

**《文物保护工程专业人员学习资料》  
石窟寺和石刻**

2020 年



文物保护工程专业人员学习资料编委会 组织编写

# 目录

1 中国石窟寺及石刻概况	1
1.1 中国石窟寺营建与开凿	1
1.1.1 佛教传播与中国石窟寺的形成、发展过程	1
1.1.2 中国石窟寺分布及其内容	4
1.1.3 石窟寺价值	5
1.2 中国石窟寺分类与石窟造像	6
1.2.1 石窟寺建筑分类与其形制	6
1.2.2 石窟造像主要类型及其特征	6
1.3 古代石刻类型、作用及研究保护历史	8
1.3.1 古代石刻主要类型	8
1.3.2 全国重点文物保护单位石刻及其他重要石刻	4
1.3.3 石刻文物价值与保护史	6
2 石窟寺及石刻的地质学基础	8
2.1 矿物学	8
2.1.1 晶体和矿物的概念	8
2.1.2 矿物的化学性质	9
2.1.3 矿物的形成与变化	9
2.1.4 造岩矿物及其特性	11
2.2 岩石学	13
2.2.1 岩石概念及分类	13
2.2.2 沉积岩	16
2.2.3 变质岩	28
2.2.4 中国石窟寺及石刻的主要岩性及分布特征	33
2.3 工程地质及水文地质	43
2.3.1 工程地质学	43
2.3.2 水文地质学	50
3 中国石窟寺及石刻保护发展过程	65
3.1 石窟寺及石刻保护历程	65
3.1.1 中国石窟寺及石刻保护发展历程及不同时期特点	65
3.1.2 中国石窟寺及石刻保护技术进展	68
3.1.3 中国石窟寺及石刻保护发展趋势	70
3.2 石窟寺及石刻保护目标与任务	70
3.2.1 石窟寺及石刻保护工程主要目的、任务	70
3.2.2 石窟寺及石刻保护程序	71
3.2.3 石窟寺及石刻保护工程规范	72
3.3 《中国文物古迹保护准则》与中国石窟寺及石刻保护	73
3.3.1 《中国文物古迹保护准则》中的保护原则	73
3.3.2 石窟寺及石刻保护工程中多学科运用	77
3.3.3 石窟寺及石刻保护经验教训	78

3.4	中国石窟寺及石刻保护加固工程典型案例	79
3.4.1	崖体加固工程	79
3.4.2	防渗治水工程	82
3.4.3	表面防风化加固工程	84
3.4.4	莫高窟监测与预警体系	85
4	中国石窟寺及石刻病害类型及成因	87
4.1	石窟寺及石刻病害定义及划分	87
4.1.1	石窟寺及石刻病害的定义	87
4.1.2	石窟寺及石刻病害分类	87
4.2	石窟寺及石刻病害主要类型	89
4.2.1	石窟寺及石刻环境与载体地质病害类型	89
4.2.2	石窟寺及石刻本体病害类型	94
4.3	石窟寺病害的影响因素及成因分析	107
4.3.1	地质营力因素及破坏作用分析	107
4.3.2	水环境	111
4.3.3	大气营力因素及破坏作用	117
4.3.4	可溶盐结晶—潮解循环破坏作用	119
4.3.5	微生物及其微生物破坏作用	121
4.3.6	人为活动因素及破坏作用	124
4.4	石窟寺及石刻病害典型案例分析	126
4.4.1	彬县大佛寺历史洪水危害案例	126
4.4.2	龙门石窟潜溪寺裂隙渗水病害案例	128
4.4.3	云冈石窟水岩作用病害案例	129
4.4.4	乐山大佛水及其危害性分析案例	130
4.4.5	花山岩画本体病害调查及标识案例	132
5	中国石窟寺及石刻保护工程勘察	140
5.1	保护工程勘察基本内容与要求	140
5.2	石窟寺及石刻保护中岩土工程勘察	140
5.2.1	基本内容及要求	140
5.2.2	保护中岩土工程勘察分析与评价	143
5.2.3	保护工程岩土勘察资料收集与利用	147
5.2.4	工程地质及水文地质测绘调查	148
5.2.5	保护中岩土工程勘探与取样	151
5.2.6	保护中岩土测试技术与要求	156
5.3	保护中环境工程地质问题勘察	162
5.3.1	环境工程地质学的概念	162
5.3.2	保护中环境工程地质问题勘察基本要求	163
5.4	石窟寺及石刻病害勘察	167
5.4.1	结构失稳病害勘察	168
5.4.2	边坡失稳病害勘察	171
5.4.3	石窟寺洞窟(洞室)失稳病害勘察	175
5.4.4	渗漏病害勘察	176

5.4.5	石质文物表层劣化病害勘察	180
5.5	石窟寺及石刻保护工程勘察总报告	190
5.5.1	文字内容要求	191
5.5.2	图件要求	195
5.5.3	表格要求	196
5.5.4	照片要求	197
5.5.5	附件要求	197
6	中国石窟寺及石刻保护工程方案设计	198
6.1	石窟寺及石刻保护工程设计文件编制程序及内容	198
6.1.1	保护工程设计文件编制程序	198
6.1.2	保护工程设计文件编制内容	200
6.2	石窟寺及石刻保护工程设计文件编制	201
6.2.1	保护工程设计文件编制要求	201
6.2.2	保护工程专项设计文件编制要求	207
6.3	石窟寺及石刻保护工程概预算编制	226
6.3.1	保护工程方案设计概算编制	226
6.3.2	保护工程施工图设计预算编制	237
7	中国石窟寺及石刻保护工程技术	243
7.1	石窟寺及石刻岩体病害治理技术	243
7.1.1	石窟寺及石刻岩体病害治理技术概述	243
7.1.2	石窟寺及石刻危岩体加固技术	243
7.1.3	石窟寺及石刻水害治理技术	271
7.2	石窟寺及石刻本体修复技术	278
7.2.1	石窟寺及石刻表面修复材料通用要求	278
7.2.2	石窟寺及石刻表面裂隙修复技术	279
7.2.3	石窟寺及石刻表面空鼓病害治理修复技术	283
7.2.4	石刻表面残损修复技术	285
7.2.5	石窟寺及石刻文物修复效果评价方法	289
7.3	石窟寺及石刻预防性保护	302
7.3.1	石窟寺及石刻预防性保护的原则	303
7.3.2	石窟寺及石刻主要监测内容和指标	303
7.3.3	石窟寺及石刻预防性保护监测预警体系构建	305
7.3.4	石窟寺及石刻日常保养与维护	306
8	中国石窟寺及石刻的保护性建筑	307
8.1	石窟寺及石刻保护性建筑概述	307
8.1.1	窟檐与石窟寺及石刻保护性建筑	307
8.1.2	石窟寺及石刻保护性建筑历史发展	309
8.1.3	石窟寺及石刻保护性建筑分析评估	311
8.2	石窟寺及石刻保护性建筑的工程及环境监测	317
8.2.1	石窟寺及石刻保护性建筑的功能需求及监测基础	317
8.2.2	保护性建筑建设中的监测要求	319
8.2.3	保护性建筑建成后的监测效果评估	321

8.3 石窟寺及石刻保护性建筑实施要点 .....	323
8.3.1 石窟寺及石刻保护性建筑的设计原则 .....	323
8.3.2 石窟寺及石刻保护性建筑的功能需求 .....	324
8.3.3 石窟寺及石刻保护性建筑施工要求 .....	325
8.3.4 石窟寺及石刻保护性建筑后评估 .....	328
9 中国石窟寺及石刻开放利用 .....	330
9.1 石窟寺及石刻的开放要求 .....	330
9.1.1 石窟寺及石刻的开放原则 .....	330
9.1.2 石窟寺及石刻对外开放对若干指标控制要求 .....	330
9.1.3 石窟寺及石刻对外开放相关工程要求 .....	336
9.2 石窟寺及石刻开放游客承载量要求 .....	337
9.2.1 游客承载量的概念 .....	337
9.2.2 游客承载量评估目标 .....	338
9.2.3 评估游客承载量的基本原则 .....	338
9.2.4 游客承载量评估的基本步骤 .....	338
参考文献 .....	350
石窟寺和石刻（工程师）样题 .....	351
石窟寺和石刻（工程师）参考答案 .....	356
石窟寺和石刻（设计师）样题 .....	357
石窟寺和石刻（设计师）参考答案 .....	364

# 1 中国石窟寺及石刻概况

## 1.1 中国石窟寺营建与开凿

### 1.1.1 佛教传播与中国石窟寺的形成、发展过程

石窟寺是佛教在中国流传后，受古印度佛教石窟影响所引进的一种宗教建筑。因其主要为开凿在山岩间的石窟构成而得名。石窟寺往往由集中于一地的多座石窟以及摩崖龕像等组成，相当于殿堂寺院，用于僧人的聚集修道与世俗礼佛祈福等佛教活动。就国内现存石窟情况可知，中国开凿佛教石窟的历史大约始于北朝早期（3 世纪），最晚至明代（16 世纪）仍有零星开凿。

佛教是世界三大宗教之一，创立于公元前 6 世纪至公元前 5 世纪的古印度，公元前 3 世纪开始向周边各国传播，而后北经大夏、安息、大月氏等国传入中国西域。通过文献记载与有关考古发现证明，佛教在西汉末年已经传入中国内地，东汉时期在社会上逐渐流行。东汉末年，安世高、支谶、竺佛朔等外来僧人把多种佛经翻译成汉文，促进了佛教在民间的宣传与普及。当时除西北以外，徐州、四川等地也都有明显的佛教影响存在。据《三国志·吴志·刘繇传》记载，汉末佛徒下邳相笮融已经大肆修建宏伟的佛寺，“以铜为人，黄金涂身，衣以锦彩，垂铜盘九重，下为重楼阁道，可容三千余人，悉课读佛经”<sup>[1]</sup>。佛教传入的这一状况，已经有东汉画像石、壁画中的佛像、六牙白象，摇钱树座上的佛像、孔望山摩崖中的涅槃像等多种考古文物发现予以证明。三国及两晋时期，中原与西域的交通往来一直持续。据《魏书·释老志》等文献记载，当时，西域和印度来中原的僧人不断增加。中原信徒增多，兴建佛塔、佛寺的风气也已经兴起，“凡宫塔制度，犹依天竺旧状而重构之”。<sup>[2]</sup>十六国时期，在西域僧人佛图澄等努力下，得到后赵皇帝石勒、石虎的崇信。中原佛教得到较大发展，建立佛寺 893 所。经僧道安等名僧的推广，佛教逐渐普及士庶，僧团也开始形成。印度与西域地区开凿石窟寺的做法随之传入，成为中原佛教徒宗教崇拜的重要功德之一。从此，石窟寺的兴建在中原逐渐增多，并且形成了众多大中小

[1]晋陈寿：《三国志·吴志·刘繇传》，中华书局二十四史排印本

[2]北齐魏收：《魏书·释老志》，中华书局二十四史排印本

型石窟群，分布于全国各地。

现存最早的中国石窟，是新疆拜城的克孜尔石窟，大约始建于公元3世纪，4、5世纪时开凿最为兴盛。其他新疆地区的石窟开凿略晚，如库木吐喇石窟、森木塞姆石窟、克孜尔朵哈石窟、吐峪沟石窟、柏孜克里克石窟等，形成了一个分布在当时文化政治中心区附近的佛教石窟群。表明佛教石窟自西沿丝绸之路传入的趋势。由新疆向东，沿河西走廊至晋陕地区，而后陆续开凿有敦煌莫高窟、安西榆林窟、玉门昌马石窟、酒泉文殊山石窟、肃南金塔寺石窟、武威天梯山石窟、永靖炳灵寺石窟、天水麦积山石窟、固原须弥山石窟、庆阳南北石窟寺等一系列石窟寺。它们都是在南北朝期间（5、6世纪）陆续开凿的大中型石窟。十六国时期的北凉，作为河西地区经济发达的地方割据中心，地接西域，佛教首先从新疆地区传入，“凉州自张轨后，世信佛教。敦煌地接西域，道俗交得其旧式，村坞相属，多有塔寺”<sup>[3]</sup>。这里建有历史上著名的凉州石窟。武威天梯山石窟可能就是凉州石窟的遗存之一。

北魏时期，由于皇室率先崇信，佛教在社会上的地位极其崇高。佛教影响力剧增。北魏太武帝灭北凉后，将凉州僧徒及吏民全部迁移到平城，使“沙门佛事皆俱东，象教弥增”<sup>[4]</sup>。其后虽然曾经有过太武帝的灭佛事件，但在文成帝即位后，立即恢复佛法，并且由僧门统昙曜主持，在平城武州塞开凿大型石窟——昙曜五窟。将中原地区开凿石窟寺的活动推向极致。孝文帝迁都洛阳后，又在洛阳龙门和巩县开凿了一批大型石窟。这些皇室资助开凿的大型石窟作为石窟寺建筑的主流，影响了中原地区的石窟寺开凿风气。以后开凿的邯郸响堂山石窟、太原天龙山石窟、义县万佛堂石窟等也延续了这一主流风格。随之而起的是在山西、河北、河南、山东、辽宁各地陆续开凿的大批中小石窟。在佛教信仰广泛普及的形势下，笃信佛陀的民众们纷纷捐资造像，为石刻绘画雕刻艺术提供了前所未有的发展天地，造就了在世界文化史上也享有盛名的北朝佛教石刻艺术。在这些石窟中，雕塑了数以万计的各种佛教造像，绘制了大量彩色壁画，收藏了罕见的古代经典书卷等珍贵文物，以及陆续发掘的原来有关建筑遗迹。它们与散布各地的佛教造像、造像碑等宗教石刻一同构建了辉煌精美

---

[3]北齐魏收：《魏书·释老志》，中华书局二十四史排印本

[4]北齐魏收：《魏书·释老志》，中华书局二十四史排印本

的北朝佛教艺术体系，是中国考古学、历史学、美术史研究中十分重要的一个组成部分。

南朝建造的石窟很少，现在能够确认的有南京栖霞寺千佛岩石窟一处。但因风化严重，又经后人重妆，造像的本来面貌不很清晰。

隋唐时期，尤其是唐代前期，兴建石窟寺的风气依然兴盛。除龙门石窟继续开凿外。彬县大佛寺、耀县药王洞、益都云门山等中原众多石窟相继开凿。敦煌莫高窟中的大量石窟也是在唐代及五代时期兴建的。广元千佛崖石窟摩崖造像群，在南北朝时期已经开凿，于唐代达到极盛。安岳卧佛院石窟也是规模较大的盛唐石窟造像群，这里还有在 15 个洞中镌刻的大量佛经文献。唐代中晚期，石窟建造活动逐渐向南方转移，四川绵阳、仁寿、夹江、巴中、通江各地的中小型石窟、摩崖造像都在这时大量开凿。最宏伟的佛像雕刻是乐山凌云寺弥勒像。大足北山石窟则是晚唐昌州刺史韦君靖开始建造的，后经五代延续开凿至南宋时期。

安史之乱以来，中原地区陆续战乱。特别是在唐武宗会昌灭佛后，寺院经济受到打击，致使中原地区石窟寺的建造一蹶不振。而随着南方经济的进一步发展，民间佛教信仰普及，五代、宋代以来，南方成为石窟寺及佛教摩崖的主要建造地域。如杭州飞来峰保存的五代吴越至明代摩崖造像，是江南佛教造像的代表作，特别是其中的元代密宗造像，在石窟艺术史上具有十分重要的地位。两宋时期四川一带的民间信徒组织活动日益兴盛，开凿了众多石窟，重庆大足的宝顶、北山、南山等 40 余处石窟造像是这一时期最宏伟的石窟造像群，成为晚期石窟造像艺术的重要代表。北宋时期的重要石窟建筑还有江西的赣州通天岩石窟。陕西北部一带在宋代陆续开凿了一系列中小型石窟，分布于榆林、延安地区的山谷中。子长的钟山石窟为其代表。由于这些石窟多为边防军人及其家属建造，也有人称之为军州石窟。远在云南一带的南诏、大理等地方政权也开凿了剑川石钟山石窟等具有地方特色的佛教石窟。在这些石窟建造比较兴盛的地区，直至明代，还有一些新的石窟开凿活动。原有的石窟在延续使用中，也有后人的重新修补妆绘等情况。

### 1.1.2 中国石窟寺分布及其内容

根据历代石窟的传布发展顺序与分布情况，宿白先生曾经把中国的石窟寺划分为三个大区域，即新疆地区、中原北方地区和南方地区。

新疆地区的石窟寺建造最早，主要分布在塔里木盆地北边缘的交通路线上，可以划分为库车、拜城一带，焉耆一带，吐鲁番一带等几个小区，基本上邻近这一地区的几个古代经济政治中心城市。新疆石窟大多是以塔庙窟和大像窟为主，辅以僧房窟、禅窟等小窟的石窟寺组合，也有少量禅房窟群。除在山岩上开凿的洞窟外，焉耆和吐鲁番等地还有用土坯砌筑的洞窟。主要洞窟中大都绘制壁画，绝大部分洞窟中原来还塑有造像。石窟中造像与壁画的内容主要是佛与菩萨等礼拜的对象，如释迦像、交脚弥勒像和宣传佛教教义的佛本生、佛传、因缘等图像。6世纪后出现千佛像。8世纪后出现阿弥陀佛像、阿弥陀净土图像以及其他净土图像。密教的佛像也在这时逐渐传入。壁画布局与绘画技法早期受西方影响，以后开始明显地表现出内地北方石窟绘画的影响。

中原北方地区的石窟寺主要开凿于北朝至唐宋时期。可以进一步划分为河西区、甘宁黄河以东区、陕西区、晋豫及其以东区四个区域。

河西与甘宁黄河以东地区的石窟寺中，内容以塑像和壁画为主。而陕西、山西、河南及其以东地区以石质雕刻造像为主。在石窟之外，还往往开凿有摩崖造像与龕像。5~6世纪是石窟开凿的盛期，主要建造有大像窟、佛殿窟、塔庙窟，以及少量禅窟。石窟中的主要造像包括有三世佛、释迦、交脚弥勒、释迦多宝对坐像、思惟菩萨像和千佛等。另外出现有维摩文殊对坐像、佛本生与佛传故事画以及飞天、迦陵频伽、狮子等装饰图像。较晚时期出现七佛像、无量寿佛像、倚坐弥勒像与观音、普贤等。7~8世纪中，盛行佛殿窟、大像窟，稍晚时期出现佛坛窟。这一时期除传统的释迦造像外，各种净土信仰造像与净土变日益增多，如弥勒、阿弥陀、药师等净土内容。地藏信仰的图像与一些密教造像也逐渐盛行。9~10世纪是石窟寺逐渐衰落的时代，石窟形制日益模仿佛殿建筑，窟前接建木结构堂阁的作法开始流行起来。窟内的壁画采用多种经变画排列的新形式。佛龕两侧流行文殊、普贤相对的布局。敦煌莫高窟与富县石泓寺等地还出现了单独的文殊窟。观世音崇拜更加普遍，出现了众多的观世音

经变与造像。天王形象也逐渐盛行，特别是在敦煌、四川等地的石窟中多建造毗沙门天王像。11 世纪以后，石窟寺的开凿越来越少。造像题材中罗汉群像盛行是这一阶段的特点。罗汉与经传结合的造像、布袋和尚像等也在这时流行开来。随着三教归一的理论兴起，儒道影响也在石窟建造中表现出来，如 13 世纪的太原龙山道教石窟、16 世纪山西平顺宝岩寺石窟中的水陆道场浮雕等。

南方地区的石窟数量不多，更多的是摩崖龕像，开凿时间也比较晚。6 世纪中，广元一带的石窟中，仍以佛殿窟为主，还有少量塔庙窟。造像以释迦、无量佛、弥勒等形象为主，还有释迦多宝对坐像等。8 世纪以后，开窟造像的风气向南发展，岷江、嘉陵江流域的窟龕增多，盛行倚坐弥勒、净土变相和各种观世音造像。开凿大佛的作法也有所出现。10~11 世纪则多见地藏像与罗汉群像等。以后儒道释三教石窟和密教题材也有所出现。如大足石篆山、大佛湾等处，杭州飞来峰等处。另外独具特色的是开凿于 9~13 世纪的大理剑川石钟山石窟。它以佛殿窟为主，主要造像也是由弥勒、阿弥陀转为观世音、毗沙门天王和密教八大明王等，还有以南诏王及其眷属为主像的窟龕。

### 1.1.3 石窟寺价值

佛教传入中国后，不断与中国传统文化融合，形成了独特的汉传佛教系统，在很大程度上影响着中国人的思想意识，成为中国历史文化的重要组成部分。石窟寺作为佛教发展的重要历史见证，对于研究佛教传承演变，了解佛教与社会政治经济的关系，探讨佛教与中国传统文化交流融合的过程等都具有重要的价值。更重要的是在世界与中国艺术史研究中，石窟寺保留下来自十六国至明代一千多年的珍贵艺术资料，提供了大量雕塑、壁画等艺术珍品，是人类文明的智慧结晶，多处石窟寺已经被确定为世界文化遗产。通过这些艺术珍品，不仅为艺术家创作提供了无尽的文化源泉，而且可以充分认识历代造型艺术、装饰艺术的技法与水平，深入开展艺术史研究。造像、壁画反映的古代人物服装发式、食品器具、生产生活、车马游宴等形象，还是从视觉直观了解古代社会文化生活的良好实证，在古代文化史的研究中具有不可替代的作用。有关石窟寺的建筑遗址发现在古代建筑史与考古学研究中占有重要地位。而敦煌石窟藏经洞保存的大量历代文书经卷被称作 20 世纪初的四大考古文物发现之一，

使历史学、宗教学、考古学等有关学科研究产生了开创性的大变更，甚至形成了综合性的新学科——敦煌学。

## 1.2 中国石窟寺分类与石窟造像

### 1.2.1 石窟寺建筑分类与其形制

石窟寺建筑基本上都是在岩壁上开凿的洞窟，仅在新疆地区有过少量用土坯砌筑的洞室形建筑。根据寺院中不同建筑部分的功能，可以划分为用于礼拜的塔庙窟、佛殿窟、佛坛窟、大像窟与用于僧人生活起居的僧房窟、用于禅修的罗汉窟（小型禅窟）以及成组的小型禅窟群。僧房窟、禅窟形制较小，且多无造像。由于石质不同及地区性的建筑差异，几个主要石窟寺分布区域石窟建筑也有一些具体形制上的变化。总起来看，塔庙窟受印度石窟建筑的影响较多，这类石窟形制较大，平面方形或长方形，中部都留有一个中心塔柱，在上面四面开龕雕刻佛像、菩萨神王像与装饰纹样等，作为绕塔礼拜的主体。石窟后壁及左右两侧壁也会雕刻佛像组合与佛传、佛本生故事画，以及供养人图等。佛殿窟同样为平面方形，窟中开阔，类似佛殿布局，在后壁上雕刻佛像主尊，两侧雕有各种供养佛像及供养人像等。佛坛窟建筑布局与佛殿窟近似，但是在后壁前留有一个平台作为供养用的佛坛。上面或建有佛教塑像，多见于以泥塑为主的石窟寺中。敦煌还有中心佛坛窟，佛坛建于窟中央，四边不接壁，上塑佛像，四周留有绕佛礼拜的通道。大像窟以雕刻宏大造型的佛像为主，有单独一尊佛像一窟的，也有佛、菩萨、弟子、天王等一组造像一窟的。

从石窟平面来看，有方形、长方形、马蹄形等类型。从石窟顶部造型看，有覆斗形、人字坡形、穹庐形、平形、券顶形等类型。一些石窟，特别是大像窟，会在石窟外沿接建木结构门廊屋顶等保护建筑，但现在基本上都已毁坏不存。

### 1.2.2 石窟造像主要类型及其特征

作为佛教崇拜的重要场所，供礼拜用的石窟与寺院建筑中的佛殿一样，以供奉各种佛教造像为主。所供奉的佛像及菩萨、天王、弟子罗汉等造像随着不

同时代佛教宗派和崇尚经典的变化而有所不同。但是各大类型内的基本造型相对固定，只是在衣饰、持物、手印等装饰上有所变化。就整体形象来看，不同时代造像的面容、体态、衣褶、饰物等也有明显差异，表现了各时代不同的审美观念，其时代特征是判断造像年代的重要依据。常见的造像主要有以下几类：

**佛像：**螺发肉髻，袒肩臂，赤足，眉间有白毫相，披袈裟或僧祇支。常见者如释迦、弥勒、阿弥陀、药师、四方佛、七佛像及千佛像，以及毗卢舍那佛像等，分立、坐、卧三种姿势。立佛脚下踏莲花座。坐姿多取跏趺坐，以及半跏坐、善跏趺坐等。卧佛为表现释迦牟尼涅槃的侧卧像。

**菩萨像：**高髻宝冠，裸上身，赤足，着裙，披戴璎珞环珮等饰物，有些手持佛具。如文殊、普贤、观音、大势至、弥勒、思惟菩萨等。密宗流行开以后，石窟造像中出现有千手千眼观世音菩萨、千臂千钵文殊菩萨、如意轮观自在菩萨、不空羼索观世音菩萨等形态特殊的造像。

**弟子像：**均为光头僧人形象，着袈裟或僧衣，常见侍立佛侧的有老人形象、少年形象，即释迦弟子迦叶、阿难。还有云冈十八窟雕刻的十大弟子。晚唐以后兴起的罗汉造像，也是表现释迦的众多弟子，有十六、十八、五百罗汉等组合，均为僧人形象，面容多变。

**天王像，**多为甲冑戎装武士，手持兵器及法器，足踏夜叉鬼怪。

**力士像，**北朝石窟中多表现为夜叉形象，裸体披发，手足作鸟爪状。唐代后转变为勇武壮士形象，上身赤裸，肌肉雄健，下着战裙，握拳赤足。如龙门奉先寺大佛群雕中的天王力士像。

**八部及诸天，**八部指佛教中作为释迦眷属侍卫诸佛的各种神鬼，包括诸天、龙、夜叉、乾闥婆、阿修罗、紧那罗、迦楼罗、摩睺罗伽等。其形象多种多样，如云冈 8 号窟门侧有骑牛的摩醯首罗天、骑金翅鸟（即迦楼罗）的鸠摩罗天，三首六臂或八臂、持日月作勇猛跏趺坐的阿修罗等。它们多为窟门、窟顶等处的装饰造像。

北朝佛教艺术雕刻的技艺中比较多地体现出了源于西方的佛教艺术风格。佛像以圆雕为主，写实因素比较强，对于肌肉与人体比例等解剖知识掌握得比较好，反映出这些技艺来源于西方的犍陀罗等佛教艺术。而后，在雕像形象上

与细部的处理上已经逐渐有了适应中原审美观念的改变。在造像的龕楣、背光中的纹饰、佛座装饰等辅助雕刻与壁画装饰中表现出一定的汉代传统艺术，大多采用线刻或减地浅浮雕的手法刻绘人物、神怪等纹饰。唐代以来，艺术本土化的成分逐渐增加。罗汉像、布袋和尚像、水月观音像等具有汉化佛教特色的造像日益多见。密宗在唐代中晚期流行开后，新加入了具有密教特色的各种佛像，如千手千眼观音像、大日如来像、十大明王像、大白伞盖佛母像等等。

## 1.3 古代石刻类型、作用及研究保护历史

### 1.3.1 古代石刻主要类型

石刻是人类发展历史中最重要的文化遗存之一。中华文明古国的文物宝库中，古代石刻遗存占有很大比重，具有无比重要的历史文化价值。对石刻的保护与研究，在中国文博工作也占有重要的地位。现在已经公布的八批总计 5058 处全国重点文物保护单位中，属于石窟寺与石刻部分的就有 307 处。此外，在属于全国重点文物保护单位的 2160 处古建筑单位内，还大多包括有附属于古建筑的碑、碣、题记等石刻文物。由于石刻大多体积庞大沉重，露天存放，面临着风化侵蚀等自然破坏情况。所以，利用现代科技手段保护石刻与研究石刻也是文物工作的一项重要任务。

石材不仅用于制造人类最早的生产工具，它还是良好的建筑材料、艺术雕刻材料和文字记录材料。从原始时代的岩画开始，人类就利用岩石传达思想意识与文化信息，从而遗留下来大量石质文物。我们可以把现存的石质文物大致归纳为四大类，即艺术雕刻、建筑石刻、石雕器物 and 专用文字石刻。它们都从属于我们今天所称的石刻范畴。上面所说的石窟寺，实际应该是兼具艺术雕刻与建筑石刻的一个大门类。可见石刻包含的范围之广大。古代学者往往根据传统称谓和石刻的外形来给它们定名分类，特别是给文字石刻定名，从而形成了很多具体的门类惯称，达数十种之多。但是这些称呼有些不很科学严谨，容易混淆，给石刻分类与编目研究造成一些困难。我们这里做了必要的梳理和重新分类，简要介绍如下。

#### （一）艺术雕刻

指在石质材料上加工成的艺术形象，包括岩画、石雕、画像石等。

人类早期的思想意识往往通过艺术写真来表现和记录。岩画就是最早的艺术作品之一。当今世界上很多地方仍然保存着大量利用岩石绘制的原始岩画遗迹。如在法国的科斯凯岩洞中发现不迟于公元前 25000 年的人类刻画和公元前 17000 年左右的动物画，诺克斯洞穴中保存有距今 1 万多年的野牛壁画，在西班牙的平达尔和阿尔塔米拉等洞穴中发现了石器时代的壁画等。在中国也有大量古代岩画的发现，分布在黑龙江、内蒙古、新疆、西藏、甘肃、宁夏、广西、云南、四川、贵州、河南等地。多处岩画已经被评定为全国重点文物保护单位。这些岩画的制作时代十分长久，大约从新石器时期延续到近代。很多岩画的绘画内容中主要表现了古代原始人的狩猎、宗教、战争、生殖等活动场面。反映了古代人对世界的认识。从广义的理解来看，这些岩画应该算是最早的石刻。

石雕则是通过各种雕刻技法制作的立体艺术形象，如石人、石兽、佛造像等，大多附属于陵墓、寺庙、祭祀遗址等古建筑。例如新疆等地曾经发现大量石人，根据考古调查研究与对比国外资料，研究者曾将其存在时间确定为自青铜时代（公元前 1200—公元前 700 年）下至相当于公元 11 世纪的漫长历史时期<sup>[5]</sup>。中原现存的石人，最早可至汉代。四川省都江堰曾经出土过汉代刻立的李冰石像，上面还有刻铭<sup>[6]</sup>。现在河南省登封中岳庙、山东省曲阜孔庙、山东石刻艺术馆等处都保存有东汉的大型石人。又如陕西唐昭陵、乾陵等地的外国首领使者像，唐宋明清帝王陵墓中的石像生等。这些石雕大多是各级古建筑古遗址文物保护单位中的组成部分。佛教雕像更是遍及各地、数量庞大的文物遗存。

画像石是汉代墓葬、祠堂等建筑中使用的装饰石材，利用平面线刻、浅浮雕等技法雕刻出人物、神鬼、动物、纹样等各种艺术图像，有些还加刻文字题榜。一些重要的画像石墓发掘后被原地保护，列为全国重点文物保护单位，如山东沂南画像石墓。更多的画像石被各地博物馆收藏。著名的专藏如南阳汉画像石博物馆、徐州汉画像石博物馆、滕州画像石馆等。汉代以后继续沿用平面

---

[5]王博、齐小山：《丝绸之路草原石人研究》，新疆人民出版社，1995 年。

[6]四川省灌县文教局：《都江堰出土东汉李冰石像》，《文物》1974 年第 7 期。四川省博物馆灌县工农兵文化站：《都江堰又出土一躯东汉石像》，《文物》1975 年第 8 期。

线刻技法制作的艺术石刻以往多称作石刻线画。大多制作成碑形。刻画有历史人物像、佛像、传世名画、山水地图等。

## （二）建筑石刻

中国古代建筑自成体系，具有独特的民族地域特色。尤其是中原地区的传统建筑，从史前时期开始，就一直沿用着以土木结构为主的建筑形式。石材大多是用来制作柱础、基石、台阶、门楣等承重、耐磨的建筑部件。在一些特殊场合，也出现过一些完全用石材构建的建筑，如墓室、桥梁、石塔、石祠堂、石阙、石牌坊等。在这些石质建筑上，往往会施加雕刻，装饰图案、花纹，有时还会附刻一些简单的铭文。例如东汉至南北朝时期的神道柱、石阙，唐代以来的经幢、墓幢、石牌坊等。一些重要的古代建筑石刻已被确定为全国重点文物保护单位及省级文物保护单位。主要的建筑石刻如：

石阙。阙是古代建筑中的一个重要组成部分，也就是庄园、宫殿建筑的外大门。现在可知东汉时期已经出现了石质的门阙。全国尚保存有 30 余处汉代石阙的遗迹，主要分布于山东、河南、四川等地。这些石阙受到建筑界与古代建筑史学者的高度重视，是重要的古代建筑资料，其中大多被确定为全国重点文物保护单位。现存石阙根据其原来所属遗址的实际用途，可以划分为庙阙与墓阙两种。庙阙是原祭神庙宇建筑的大门，如河南登封的太室、少室、启母等诸阙。墓阙则是墓葬园域的大门，如四川雅安的高颐阙等。现存的汉阙一般高度为 4~6 米，分为左右两件，呈中央对称形，中间空缺。完整的一侧阙身包括正阙、副阙或子阙。正阙最下面为基座，基座上面的直立部分为阙身，阙身上面是雕刻成仿木结构的单檐式或重檐式阙顶。阙多为磨制规整、雕刻精美的石块垒砌而成。阙身上经常分层雕刻各种图像。也有些石阙没有副阙，比较低矮，例如山东平邑发现的皇圣卿阙，高仅 2.5 米，用一块整石雕刻而成。此外，根据古代文献记载，还曾经有过平面为圆形的圆阙与左右两侧阙顶上用曲阁相连的阙，这些可能是大型的土木建筑。目前在石刻中还没有见到过这样的实物。魏晋时期，可能还有一些地方仍旧在墓地使用墓阙，如四川省渠县保存的多件石阙中，就有王家坪无铭阙、赵家村东阙、赵家村西阙等几处被认为可能是西

晋时期的建筑<sup>[7]</sup>。西晋以下，可能由于社会经济状况相对衰落，丧葬规模减小，耗资巨大的石阙逐渐被废弃。但在宫殿、城池的建筑中应该还存在着土木建筑的大型门阙。

神道柱与墓阙是汉代陵园建筑群中同时存在的两种石刻形式。前辈金石学者由于多未曾目睹实物，仅凭铭文拓本进行著录研究，所以往往将它们混淆为一体，造成混乱。实际上，通过考古调查与发掘中所得到的资料，我们可以很清楚地看到汉代的墓阙与神道柱是两种不同的石刻建筑。与阙的形制不同，神道的主体是一根圆柱，后代使用的华表应该就是源于这类圆柱形的古代建筑。神道柱的上部有长方形的额，刻写铭文。例如在北京西郊出土的东汉幽州书佐秦君之神道。神道为陵前通往陵园外的大道。神道柱则是立于神道两侧的标志（表）。从它的形状和位置可以得知它也应该是从木制的表柱演变而来。

现存的石质神道柱首先建造于汉代晚期，并逐渐成为历代大型陵墓中的一种固定石刻，不但在东汉至南朝的陵墓遗址中都有所发现，在隋唐以后各个时期的帝王陵园建筑中也有遗留。例如在陕西乾县唐乾陵南阙树立的神道柱（或称之华表）、河南巩义市北宋王陵中遗存的神道柱（或称之华表）等。保存数量最多的是南京、丹阳地区的南朝陵墓神道柱。它们一般具有底座、柱身、额、柱顶等几个组成部分。其底座大多为方形，上面有盘龙或兽形的圆雕。竖立的柱身上面雕刻出圆弧状直棱纹。柱身上部有方额。柱身顶部为雕刻莲花或其他花饰构成的华盖。有些神道柱的华盖上面还装饰有一座蹲坐的怪兽，如狮子等。

黄肠石与塞石是指汉代构筑大型陵墓中使用的石料。清代学者把它们看作是代替黄肠题凑的墓室建筑用石，所以称之为黄肠石。现代有时仍在沿用这一称呼。近来也有些考古报告中将这一类墓建筑用石称之为塞石。但塞石可能是用于堵塞墓道的大型石块，专用于在山岩中开凿的洞室墓葬。而黄肠石则应用于建筑土坑墓中的墓室。由于建筑工程的需要，这些石料上往往有刻写或墨书的文字。内容主要是记录工匠的名字、籍贯，石料的编号、建造时间等。它们的文字内容虽然简略，却对于认识汉代陵墓建造制度与确定陵墓的时代、主人等重大问题具有宝贵的参考价值。

---

[7]王建伟：《渠县汉阙》，《四川文物》1987年第3期。

石柱与柱础也是古代建筑中常见的构件。南北朝时期，出现有立柱形的纪念铭刻建筑，特别是作为全国重点文物保护单位的河北省易县标异乡义慈惠石柱，建于北齐大宁二年（562年）。它的形制分为柱础、柱身与顶饰等三部分，基础为大石基座上面加立覆莲形柱础。柱础上安放一座平面为不等边八角形的长柱身。柱顶为一座石雕四阿顶殿堂形象，殿内圆雕一座坐佛。柱身上分三层刻有3000多字的铭文。而后在唐代出现过多种专门用于题名的石柱，如大中十二年尚书省郎官石柱题名，刊刻了历届在尚书省任过郎官的人物姓名，被称作唐代三大缙绅录之一。石柱础在大型宫殿庙堂建筑中十分重要，可以据之复原建筑结构。随着雕刻技艺的发展，具有民族特色的多种装饰图案都被柱础采用，如龙凤、狮虎、神怪、乐舞、莲花、缠枝、山水等等，十分精美。在一些柱础上也附刻有铭文，内容以人物题名、佛号、纪年、吉祥词语等为主。河南省安阳市曾出土十六国后赵泰武殿猿戏石柱础，刻有“赵建武四年造泰武殿前猿戏绞柱石孔”题记，是一件重要的国宝文物。

经幢是在唐代初期产生并兴起的一种宗教石刻，以其外形源自佛教供养用品丝绸佛幢而得名。由于经幢大多是单独树立的大型石结构建筑，有关古代建筑史的研究中也把它看作是一种独立的古代建筑形式。经幢的形制比较规范，一般可以分为座、身、顶三个部分。各个部分往往是单独雕刻的石构件，然后组合成一体。经幢的主体是一根八面（平面八边形）或四面、六面（平面四边形、六边形）等的石柱，所以在陕西等地又把经幢俗称作石柱、八棱碑等。石经幢的底座大多雕刻为覆莲纹，下面有须弥座。幢顶一般雕刻成仿木结构建筑顶部常用的攒尖顶，顶端托有宝珠。幢身上雕刻经文及佛像。简单的经幢只有一级幢身，复杂的大型经幢幢身则分为若干段，即若干级。逐级收分，形成上小下大的尖塔形状。各级之间往往用宝盖形石雕以及莲座等分隔。在宝盖上雕刻出模仿丝织品的垂幔、飘带、花绳等等。

现在根据文物普查的结果，最早的纪年经幢是陕西省富平县的唐永昌元年（689年）八月立佛顶尊胜陀罗尼经幢。而在此之前，很可能还有一些更早的没有刻写纪年题记的经幢。所以，现在一般认为经幢是在初唐时期出现的，一直延续到清代仍有所制作。

墓幢的形制与经幢相似，一般比较小，通高大约在 2 米以下，甚至有小于 1 米的。如河南省洛阳市出土北宋范伯鱼兄弟建墓幢高 1.49 米<sup>[8]</sup>。1992 年在辽宁省朝阳市出土的金墓墓幢全高 2.4 米，已经是比较罕见的了<sup>[9]</sup>。墓幢上经常附刻有题记，说明墓主身份、生平，记录墓地位置等。从这一点来看，它又附加上了墓志、墓碑甚至买地券的功能了。

塔及石浮屠是在汉代随着佛教的传入而产生的一种带有外来文化色彩的宗教建筑。《说文解字》卷十三下土部中云：“塔，西域浮屠也。”浮屠，又写作浮屠，是梵文 *stupa* 的音译。

塔与中国的陵墓一样，是古代印度用来埋存死者的骨灰、舍利、头发、牙齿等遗体的纪念性建筑物。根据《涅槃经》中的记载，佛祖曾经嘱咐他的弟子阿难，在他涅槃后将他火化，收取舍利，安置在七宝瓶内，在拘尸那迦城中起塔安放。后来各地为争夺佛祖舍利产生争执，拘尸王等 8 个国家的国王将佛祖的舍利分开，各自取一份回国建塔供养。从此以后，佛塔便成为佛教徒崇拜的对象。这种埋设有佛祖舍利或佛骨、佛牙、佛发等圣物的塔，一般称作舍利塔，是中国佛寺建筑中的重要组成部分。

而后，中国古代僧人，特别是地位较高、领有宗派或主持寺院的禅师们，也仿效西域风俗，建塔安葬自己的遗体或骨灰。这些塔的形制比较小，多用砖建成，上面嵌有石板刻写的塔铭。塔铭的意义与世间通用的墓志近似。这些小型的塔与佛祖的圣物无关，也不是信徒们平时瞻礼的对象，可以称作葬塔。一地僧人的葬塔大多聚集在一起，形成一片僧人的墓地。习惯称作塔林。在各地一些著名的佛教寺院附近会保留着类似的塔林。这些葬塔的建筑式样繁多，是中国古代建筑史研究中十分重要的实物资料。

佛塔的建筑中大多离不开石质材料，有些佛塔甚至全部用石材建造。例如在山东历城县的隋大业七年（611 年）所建四门塔。这是现存最早的石质佛塔建筑，塔身用大块青石砌成，平面正方形，单层，四面攒尖顶，四面各建一个半圆形拱门，整个外形简洁浑厚，类似当时的房屋建筑。塔檐部位迭涩挑出五层。塔顶也是用石板一层层叠压而成。上面有露盘、山华、蕉叶、相轮等构成

[8]黄吉君：《洛阳发现佛顶尊胜陀罗尼北宋墓幢》，《中原文物》2002 年第 2 期。

[9]辽宁省朝阳县文物管理所：《辽宁朝阳县联合乡金墓》，《华夏考古》1996 年第 3 期。

的塔刹。全高达 15.04 米。

古代还有一种小型的石塔，上面刻写铭文，雕刻佛像。也称作石浮屠（浮屠）。

### （三）石雕器物

使用石材制作一些实用工具与器物，是古代人类很早就掌握了的生产技能。在考古发现中，可以看到历代使用石材制作的各种器物。有些上面还存在零星文字杂刻。例如先秦时期石磬等石制乐器。代表器物为近年在陕西雍城发掘的秦公大墓中出土的刻铭石磬。秦汉时期使用石材制作的日晷也有实物存在。秦代统一度量衡，官方使用的各种度量衡器多附加有官方的诏令铭文，刻有诏令的石权也有多件存世。青海省海晏县文化馆中保存有一件王莽石匱，是专门用于礼仪祭祀的用品<sup>[10]</sup>。随着建筑装饰技术的发展和礼制的要求，古代建筑中还使用了一些石质雕刻与石质礼仪器物，如历代陵墓、宗祠中使用的石香炉、石礼器、石灯等等，有些器物的上面会刻有铭文，主要是记录人名、年月、制作缘由等简单的文字。

其他如石制钱范、石砚、石磨、石盆等石制容器与工具等

现存石刻中，还有一些用于墓葬及宗教崇拜的石质器物。比较多见的有舍利函、石棺、石屏风与石床等，很多器物上面还刻写有铭文及图像。

舍利石函是古代中国佛教界专门用来盛放佛骨舍利的石质容器，具体使用时要在舍利函中安放多重小型的棺槨、玻璃瓶等舍利容器。舍利石函的外形仿照当时人们日常生活中使用的盒子。后期也有过使用小型石棺代替舍利石函的情况。在舍利石函的外表面上大多雕刻有与佛教有关的图像，如涅槃图、天王像、天龙、飞天等，还有关于瘞埋舍利的铭文与供养人题名。在对古代塔基遗址的考古发掘中曾多次出土舍利石函。

在现存文物中，可以看到自从汉代开始，上层人士已经有大量使用石棺的埋葬现象。四川曾出土相当数量的汉代石棺，山东、河南等地也有很多石棺槨出土<sup>[11]</sup>。汉代的石棺主要为长方体外形，一般由两侧石、上盖下底与前后两挡

[10]青海省文物处、青海省考古研究所：《青海文物》，文物出版社，1994年。李零：《王莽虎符石匱调查记》，《文物天地》2000年第4期。

[11]高文、高成刚：《中国画像石棺艺术》，山西人民出版社，1996年；罗二虎：《汉代画像石棺》，巴蜀书社，2002年。

六块石板组成，纹饰多雕刻在两侧与前挡上，主要是一些图案纹饰，也有少量附有文字，如泸州市石洞镇发现的画像石棺上就刻有“延熹八年”等纪年文字<sup>[12]</sup>。南北朝时期的一些贵族墓葬中有使用石棺槨的现象。在现在见到的一些北朝石棺上雕刻有大量精细的图像，包括神异动物、墓主人、孝子故事画等，这些图像的中间，按照古代中原艺术绘画的传统作法留有榜题的位置，刻写一些简单的说明及人物名称等，例如现存美国明尼阿波利斯美术馆的北魏元谧石棺。这时的石棺已经变为前高后低，近似后来所见的木棺外形。

隋唐时期的一些高等级墓葬中，发现有大型的石槨室与石棺存在，它们外形仿照殿堂建筑，上面雕刻精细的绘画，如侍女、仆从、花鸟、武士等，像隋李静训墓、唐章怀太子墓、唐薛徽墓等，但没有刻写文字题记的现象<sup>[13]</sup>。宋代以来，中原仍然有使用石棺的现象存在，但这时的石棺已模仿木棺的外形，体积较小，在石棺上刻写题铭的情形则不断有所发现。如现存河南省博物院的宋开宝九年（976年）石棺<sup>[14]</sup>、郑州文物考古研究院的西夏永安五年石棺。这些铭文刻写的位置、内容并没有固定的格式，随意性较强。

石床是一种重要的考古遗存。这类器物最早见于北魏时期的北方墓葬中，以山西大同出土的北魏太和八年（484年）司马金龙墓中石床为代表<sup>[15]</sup>；下限在北周时期，以在西安附近出土的北周天和六年（571年）康业墓<sup>[16]</sup>与北周安伽墓中石床<sup>[17]</sup>为代表。其形制相对较固定，均用石材制作成模仿实用木床的组合型葬具。其长度在2.2~2.5米以上，宽度为1米以上，高度在0.5米左右。常与这些石床形成组合的还有由石板材构成的石屏风等。石屏风一般由4件横向长的石板材构成，正面2件，两侧各1件，竖立围在石床的三边。屏风上常刻画有孝子图、墓主画像、车马出行等图像。

#### （四）专用文字石刻

[12]邹西丹：《泸州市石洞镇发现东汉“延熹八年”纪年画像石棺》，《四川文物》2007年第6期。

[13]中国社会科学院考古研究所：《唐长安城郊隋唐墓》，文物出版社，1980年；陕西省博物馆、乾县文教局唐墓发掘组：《唐章怀太子墓发掘简报》，《文物》1972年第7期；山西省考古研究所：《唐代薛徽墓发掘报告》，科学出版社，2000年。

[14]该石棺形制较小，两侧刻有僧徒弟子哭泣等图像，怀疑是起着舍利函作用的埋葬舍利用品。

[15]山西省大同市博物馆、山西省文物工作委员会：《山西大同石家寨北魏司马金龙墓》，《文物》1972年第3期。

[16]西安市文物考古保护研究所：《西安北周康业墓发掘简报》，《文物》2008年第6期。

[17]陕西省考古研究所：《西安发现的北周安伽墓》，《文物》2001年第1期。

专用文字石刻数量最多，是历来石刻文物收藏保护与研究的主体。它们都是具有独立形制，专门用于书刻文字以及图饰的石质文物。主要的类型包括：刻石（碣）、摩崖、碑、墓志、经版与其他刻经、镇墓券及买地券等。这些石刻大多保存在各级古建筑文保单位及博物馆中。独立列入文物保护单位的大多是无法移动的大型刻石、摩崖，以及集中收藏石刻的碑林、石刻群等。

刻石（碣）指镌刻有文字，未经外形加工的单独大型石材，是石刻发展过程中的早期形态，如著名的秦始皇刻石、高句丽好大王碑等。摩崖即利用自然形成的岩石断面，不做外形加工或略作加工后直接刻写文字及图像。东汉时出现了对天然石壁加以修整后雕刻铭文的作法，甚至有在石壁上雕刻出一个仿照碑形的平面刻写铭文的情况。

中国的碑在东汉时期正式定型。碑的形制基本上都可以分为碑首、碑身与碑座三个部分。碑身是一件凿磨加工成长方形的竖立长石，下部另接碑座。早期碑没有另加的单独碑首，而是将碑身顶部制作成半圆形、三角形或者平直形状。以后在碑首增加了雕刻装饰，如刻旋纹，或刻有盘龙纹饰，并逐渐形成一种以螭龙身躯为外轮廓的固定外形，习惯叫作螭首，它多雕刻成一件单独的碑首石，放置在碑身上面，与碑身明显地区分开来。为保证碑石树立稳固，碑座也由长方形的石座演变成龟趺形、须弥座形等体积较大、雕刻精美的形状。唐代以来，还有采用庑殿顶等其他造型碑首的碑石，如现存河南省登封的唐天宝三载（744年）嵩阳观纪圣德感应颂，就具有雕刻得极其精美繁复的庑殿顶式碑首，碑首顶部为宝珠，宝珠下面是四角攒尖形式的屋顶瓦垄，屋顶下面的收分表面雕刻着大量云朵装饰。

在中国古代石刻中，碑是应用最广泛石刻形制，具有最突出的彰显作用与纪念意义。碑除了被普遍用来标识冢墓陵域，颂扬功德政绩外，还被应用于宣传诏书法令，记录重大事件，刻写经典、药方、书目、记录氏族谱系、地图画像等等。

墓志是中国古代墓葬中的一种重要衬葬品，在历代墓葬的考古发掘中比较多见，尤其是在社会地位比较高的人士墓葬中多有出土。由于历代盗掘猖狂，大量墓志曾流散到社会上，有过多处公私收藏，传世保存较多。因此，墓志是

存世数量巨大的一类重要文物，在古代石刻中占有较大的比重。

现存的历代墓志大多为平面正方形或长方形的石制品，此外还有部分砖质、陶瓷质乃至铜铁制作的墓志，但现存数量较少，不属墓志主流。历代石质墓志的边长自 0.2 米至 1 米以上不等，个别极大者可达边长 2 米以上。最多见的石墓志形制为盝顶形盒式，由盝顶形的志盖与扁方形的志身两部分组成一盒，平面为正方形。也有一些盒式墓志志盖采取立方体而不做成盝顶形。还有一些墓志做成竖立的小碑形状，取圆首或方首，有跌座。此外，可能是出于丧葬方术的概念，出现过一些特殊形制的墓志，如北魏延昌二年（513 年）元显儒墓志、隋大业三年（607 年）浩喆墓志、唐贞观四年（630 年）李寿墓志等就制作成模仿龟形的立体雕刻。

墓志是重要的考古资料，在墓葬年代与墓主人身份的判断上具有宝贵的实证价值。它的形制、纹饰等信息有助于历史时期考古中的类型学研究。同时，墓志还是历史研究中不可替代的宝贵史料，记录了丰富的古代历史人文信息。因此，有学者对墓志材料在历史研究中的价值给予高度评价，反映了历史学者对出土墓志材料的重视<sup>[18]</sup>。墓志的字体多样，异体写法多见，是古代文字学研究的重要资料。除汉字外，墓志中还出现过多种古代少数民族文字，如契丹文、女真文、蒙文、藏文等，甚至有用婆罗钵文书写的古波斯语等外国文字，对于有关民族文字的研究极为重要。墓志还是古代的一种重要文体，很多墓志出于一代著名文人之手，文辞优美，感情真挚，声韵和谐，对后代写作起到了重要的范本作用，在古代文学史上占有重要的地位。因此，墓志在今天的考古学、历史学、文字学与古典文学等学科领域中都具有十分重要的研究价值。

买地券主要埋设在墓室内或者莹域之内，用于标志（或者象征性地标志）土地财产所有权。以前也有称之为“买地券”“地券”“墓券”的。它主要是记录墓主购买土地的合同券约，并在墓葬中具有一定的宗教方术作用。就现在考古出土情况来看，从汉代直至明清时期的丧葬礼仪中一直使用买地券。汉代买地券多为铅质，而后逐渐转变为石质或砖质铭刻。

---

[18]韩理洲《新出土墓碑墓志的唐代文史研究方面的学术价值》，《西北大学学报（哲社版）》26 卷 3 期；

19 牛致功：《墓志研究和史学的发展》，《陕西历史博物馆馆刊》第 11 辑等。

在汉代，我们还可以见到另一种墓中铭刻材料，即镇墓券。这是具有明显古代方术解适作用的宗教铭刻。其内容主要为驱逐鬼怪邪祟，保佑墓主安宁与生者平安的诅咒镇压术语。这种方术手段源于当时人们信仰的多鬼神论原始宗教思想。汉代以后的镇墓券多采用石质，形制一般为正方形或长方形石板材。

就现在所见，古代用石材刻制的各种经典文字中，以佛教经典的数量为最多。佛教经典刻制的工程可以说是年代悠久，规模宏大，堪称人类文化的一项重大成就。石质佛教经典的刻写方式比较多样，有利用摩崖形式的，利用碑式的，利用刻石形式的，还有刻写在佛塔、地宫中或舍利石棺上等多种形式，而在佛教刻经中数量最多的是采用长方形的石版形制，我们称之为“经版”。早期刻经还都属于摩崖刻经的形式。现存山西省太原市晋祠内的风峪石经则大多是利用长方形未加雕琢的石材刻写经文，每件石柱高1米以上，属于刻石类型。现在一般常说的佛教石经，则指的是主要利用石版形式刻写的房山云居寺石经。

保存在北京房山云居寺的云居寺石经是积聚了近千年持续努力的历史文化成果。它基本完整地刻写了佛教藏经，并且是世界上仅有的两处具有完整内容的石刻佛教经典之一。除此之外，另一处石刻佛经是现存缅甸的小乘佛教经典，用巴利文刻写。房山云居寺石经则用汉字刻写，包括了大乘佛教大藏经的主要经典。20世纪50年代对房山石经进行发掘清理后，整理出14620块经版，另外还有刻经残石420件，各种碑铭82件。所刻经典共计1100多种，3500多卷。近年又重新装入新修建的地下库房中密闭保存。

近年有几处藏传佛教的经墙也被确定为国家文物重点保护单位。它们多为书写经咒的石块堆积而成。

### 1.3.2 全国重点文物保护单位石刻及其他重要石刻

现在已经被批准的全国重点文物保护单位中以石刻立项的有如下这些：

第一批：西安碑林、爨宝子碑、爨龙颜碑、药王山石刻、段氏与大理三十七部会盟碑、重修护国寺感应塔碑、苏州文庙内宋代石刻、

第二批：地藏寺经幢。

第三批：将军崖岩画、花山岩画、亚沟石刻、南京南朝陵墓石刻、丹阳南朝陵墓石刻、云峰山天柱山摩崖石刻、铁山岗山摩崖石刻、白鹤梁题刻、浯溪

摩崖石刻、袁滋题记摩崖石刻、怡亭铭摩崖石刻、九日山摩崖石刻、焦山碑林、大金得胜陀颂碑、松江唐经幢、

第四批：贺兰山岩画、龙兴寺道德经幢、天护陀罗尼经幢、千唐志斋石刻、草庵石刻。

第五批：大观圣作之碑、大唐清河郡王纪功载政之颂碑、国山碑、千佛山石窟及明征君碑、仙都摩崖题记、东钱湖石刻、梵天寺经幢、天柱山山谷流泉摩崖石刻、鼓山摩崖石刻、泰山石刻、受禅碑与受禅台、大唐嵩阳观纪圣德感应之颂碑、七星岩摩崖石刻、桂林石刻、毗卢洞石刻造像、元世祖平云南碑、沧源崖画、重阳宫祖庵碑林、西峡颂摩崖石刻、平定准噶尔勒铭碑。

第六批：五礼记碑、宋璟碑、大佛顶尊胜陀罗尼经幢、阴山岩画、真寂之寺石窟、阿什达哈摩崖、天下第二泉庭院及石刻、顾渚贡茶院遗址及摩崖、安国寺经幢、法隆寺经幢、齐云山石刻、灵济宫碑、秀峰摩崖、泂冈阡表碑、大智彭氏家族石刻、洪顶山摩崖、圣经山摩崖、青天河摩崖、西明寺造像碑、升仙太子碑、元次山碑、云梦山摩崖、彼岸寺碑、刘碑寺碑、唐兀公碑、三游洞摩崖、东坡赤壁、慈孝沟“采皇木”摩崖、阳华岩摩崖、却金亭碑、柳侯祠碑刻、博什瓦黑岩画、孟孝琚碑、王仁求碑、马哈只墓碑、灵岩寺摩崖、杨珣碑、新修白水路记摩崖、见大日如来佛石窟寺和勒巴沟摩崖。

第七批：八会寺刻经、邢台道德经幢、卧佛寺摩崖造像、木兰围场御制碑摩崖石刻、南涅水石刻、桌子山岩画群、克什克腾岩画群、曼德拉山岩画群、庆云摩崖石刻、清追封和硕忠亲王碑、东连岛东海琅琊郡界域刻石、惠山寺经幢、郁林观石刻群、第一山题刻、阳山碑材、仙居古越族岩画群、南明山摩崖题刻、石门洞摩崖题刻、龙兴寺经幢、惠力寺经幢、柯岩造像和摩崖题刻、南山造像、琅琊山摩崖石刻及碑刻、浮山摩崖石刻、齐山摩崖石刻、黄山摩崖石刻群、仙字潭摩崖石刻、乌石山于山摩崖石刻及造像、南天寺石佛造像和摩崖石刻、罗田岩石刻、南岩石窟、皇圣卿阙功曹阙、棘梁山石刻、景灵宫碑、大泽山石刻及智藏寺墓塔林、萧大亨墓地石刻、田迈造像、禅静寺造像碑、尊胜陀罗尼经幢、陀罗尼经幢、大宋新修会圣宫铭碑、新乡文庙大观圣作之碑、佛沟摩崖造像、水南关清真寺阿文碑、慈云寺石刻、赤壁摩崖石刻、李曾伯纪功

铭、侍郎坦摩崖石刻群、南岳摩崖石刻、朝阳岩石刻、苏仙岭摩崖石刻群、禹王碑、淡岩石刻、龙龕岩摩崖石刻、丹霞山摩崖石刻、百寿岩石刻、会仙山摩崖石刻、石门大佛寺摩崖造像、瞿塘峡摩崖石刻、弹子石摩崖造像、北周文王碑及摩崖造像、鹤鸣山道教石窟寺及石刻、穆日玛尼石经墙、敖氏和罗氏墓群石刻、金沙江岩画、大王岩岩画、观音阁石刻造像、其多山洞洞穴岩画、大黑沟岩画、黑山岩画、和日寺石经墙及和日寺、康家石门子岩雕刻画。

第八批：狄仁杰祠堂碑、汉建初元年买地刻石、雁荡山龙鼻洞摩崖题记、杭州孔庙碑林、仙居洞摩崖题记、道场山祈年题记、阮鹗墓石刻、汪由敦墓石刻、南安桃源宫陀罗尼经幢、尹宙碑、回銮碑、佛顶尊胜陀罗尼经幢、丹口苗文石刻群、宜宾流杯池石刻、温泉摩崖石刻群、囊巴朗则石雕、林恩摩崖石刻、金川湾石刻、城台石刻、河峪摩崖石刻、大麦地岩画、焕彩沟石刻、刘平国刻石。

被确定为全国重点文物保护单位的石刻，都具有独特的重要历史文化价值，所在地主要属于以下几种状态：

（一）无法移动的摩崖石刻与岩画原址。例如袁滋题记摩崖石刻、怡亭铭摩崖石刻、贺兰山岩画等。

（二）传世石刻保存的原址。如南京南朝陵墓石刻、松江唐经幢、大唐嵩阳观纪圣德感应之颂碑。

（三）大量石刻集中收藏的地点。如西安碑林、药王山石刻。

### 1.3.3 石刻文物价值与保护史

由于石材的坚固本质，石刻可以保存较长的时间。这些形制不同、带有丰富文化信息的古代石刻遗留至今，而且是以文字铭刻为主，具有独特而重要的文献价值。为考古学、历史学、古文字学、美术史学、文学、法学、古代政治经济学、哲学等社会科学以及自然科学某些门类的研究保存了极其丰富可靠的原始资料。很多古代石刻由于制作技艺优良、书刻精美，也是具有高度艺术价值的珍贵文物，代表了中国古代优秀文化。在文物博物馆学的研究中占有重要的地位。

如此丰富的石刻资料包含了从先秦到清代乃至民国时期近 3000 年间的各

种文字资料与图像资料。石刻书体中有古代篆文、隶书、楷书、行书与草书等，以及大量不同时代流行过的异体文字。它对于中国古文字学与文字学研究，对于文字发展史与书法史的研究都具有重要的价值。古代各个历史时期出现过的各种文体也均在石刻材料中有所体现。这使得石刻不仅保存了极其丰富的古代历史资料，也给古典文学研究增添了取之不竭的研究素材。

从历史考古学的研究角度来看，历代石刻中保存下来的史料内容更是可观。近代学者在历史研究中已经相当普遍地应用了石刻资料，对于经济、法律、科学技术等专门史的研究更是特别注重利用石刻资料。近年来，各地汇集出版了大量古代石刻资料的图录与录文集，说明中国学术界以及整个社会都越来越重视古代石刻在中国传统文化研究中的地位与作用。古代石刻的研究还是整个考古学研究中的一个重要分支，必须要运用考古学方法，对它们的形制、类型、出土状况、发展演化等方面予以研究，以协助考古学的时代分期研究。考古工作中有石刻资料出土，也会对有关考古遗址的年代与性质判定、器物形制研究等方面起到无法替代的重要作用。

由于中国古代悠久绵延的文化传统，早在汉代就有学者注意到石刻的收集著录。宋代金石学兴起，造成社会上重视古代石刻的风气，并且将一些地方的古代石刻集中收藏，如北宋元祐五年为保存唐石经而开始汇集形成的西安碑林。一些著名的石刻也得到地方重视保护。宋代以来，收集石刻拓片和记录石刻情况的金石著录大量出现。使得石刻收藏与研究成为文人学界的一种重要活动。但是这种收藏缺乏科学性，更缺乏有效的保护机制，甚至由于大量拓片致使很多石刻造成漫漶与残损。清末以来，外国势力大肆买卖走私中国古代艺术品，造成大量文物盗卖活动，给石窟寺、艺术石雕等造成了严重破坏。近代以来的盗墓活动，造成大量墓志、买地券等石刻破坏与流失。这时开始的一些私人石刻收藏，如千唐志斋、鸳鸯七志斋等，保存下了一定数量的出土石刻。但在 1949 年前，并没有形成系统全面的石刻文物保护。

20 世纪后半期以来，陆续对一些重要的石窟寺进行了科学的保护修复工作。对确定的重点文物保护单位都进行了妥善的保护管理，维护了文物的原貌。流散在社会上的石刻文物逐渐集中到国有博物馆与文保单位中，并建立了多处专

门的石刻博物馆予以收藏保护。文物保护科研机构进行了多种石刻保护的技术研究与实际保护工程。但是由于石刻数量巨大，散布广泛，还有相当数量的古代石刻缺乏应有的保护措施，在石刻的编目管理、资料收集等方面也还有大量空白需要补充完善。

## 2 石窟寺及石刻的地质学基础

石窟寺及石刻是以天然岩石或自然岩体作为建筑材料和赋存载体而开凿的具有历史、科学、艺术价值的文物古迹。

本章将从岩石、工程地质、水文地质三个方面阐述与石窟寺及石刻保护有关的地质学相关概念和知识。

### 2.1 矿物学

#### 2.1.1 晶体和矿物的概念

形成于一定的温度、压力条件下且具特定化学成分和内部结构的天然固态物质称为矿物。矿物是构成行星和地球岩石的基本组成物质，它们在物理和化学上具有一定的界面而彼此可以分离。它们绝大多数为晶质体（晶体）。少数则是非晶质体。所以晶体的基本性质决定了矿物的基本特征。

##### （一）晶体

晶体是指其内部质点（原子、离子或分子）在三维空间周期性地重复排列构成的同体物质。这种质点在三维空间周期性地重复排列也称格子构造，所以晶体是具有格子构造的固体。所谓格子构造，指晶体内部可以根据原子、离子的排列规律构建的晶胞。晶胞（*crystal cell*）是晶体结构中的最小重复单位，可以理解为晶体结构是无数晶胞在三维空间平行堆积而成的。

##### （二）矿物

矿物是自然界中的化学元素，在一定的物理、化学条件下形成的天然物体。

这种天然物体大多是结晶的单质和化合物。人们通常所说的矿物主要指的是地壳中作为构成岩石、矿石和黏土组成单位的天然物体。

### 2.1.2 矿物的化学性质

矿物是岩石的构成单位，它的化学性质在一定程度上常是控制岩石强度及其抗风化能力等的重要因素。按化学组成，矿物可分为两类，即单质矿物和化合物矿物。

化合物类矿物又可分为以下三类：①由一种阳离子和一种阴离子组成的简单化合物如刚玉（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）。②由一种阳离子同一种络阴离子（酸根）组成的称为单盐的化合物，如方解石（ $\text{CaCO}_3$ ）等。③由两种以上的阳离子与同种阴离子或络阴离子组成的复化合物，如白云石（ $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ）及大部分硅酸盐类矿物，如钾长石（ $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ）、钠长石（ $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ）等。

矿物具有可溶性、可氧化性以及酸碱反应等性质。可溶性为矿物与某种溶液相互作用时，矿物表面的元素，由于本身的振动和受溶剂分子的吸引，而离开矿物表面进入或扩散到溶液中去，这个过程称为矿物的溶解。如方解石、白云石。矿物可氧化性为含有变价元素（Fe、Mn、S等）的矿物，当暴露地表或处于地表条件下的时候，由于受空气中的氧和溶有氧、二氧化碳和水的作用，使处于还原态的离子变为氧化态，如 $\text{Fe}^{2+}$ 变为 $\text{Fe}^{3+}$ ，并形成一些在氧化环境中稳定的矿物。矿物的酸、碱反应为某些矿物如白云石等遇酸发生酸碱反应，从而导致矿物物相发生改变的现象。

### 2.1.3 矿物的形成与变化

#### （一）矿物的形成

矿物晶体是在物相转变的情况下形成的。

1.气相转变为固相：如在火山口附近常由火山喷气直接生成自然硫、碘或氯化钠的晶体。

2.液相转变为固相，常见的有以下几种情况：

（1）岩浆熔体冷凝固晶。如玄武质岩浆温度下降结晶形成橄榄石、辉石和斜长石等；

（2）从溶液中结晶，溶液达到过饱和时析出晶体，如方解石、石膏的形成；

（3）水分蒸发，如天然盐湖卤水蒸发，盐类矿物结晶出来。

3.固相转变为固相，常见的有以下几种情况：

(1) 原矿物晶粒逐渐变大，如由细粒方解石组成的石灰岩与岩浆接触时，受热再结晶成为由粗粒方解石组成的大理岩。

(2) 一个相（矿物）转变成另一个相（矿物）。如高温石英（ $\beta$ -石英）转变为低温石英（ $\alpha$ -石英），钾-钠长石（高温）转变为条纹长石（低温）。

4.胶体凝聚：如蛋白石的形成，这是一种非晶质矿物。

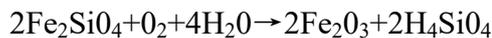
## (二) 矿物的变化

矿物形成后在环境变化中还会进一步发生变化。其中以水岩化学作用最为典型，也是影响岩石工程性能的最重要因素。对于我们认识和研究岩石风化作用及其重要。需掌握的常见作用类型有以下几类。

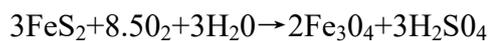
### 1.氧化还原反应

氧化作用和还原作用是一个完整体系中相互对立又相互统一的反应的两个方面。氧化还原反应实际上是电子转移的反应。如铁的硅酸盐和硫化物发生氧化时，在水的参与下，二价铁离子失去一个电子被氧化成三价，氧分子接受电子由原子态转变为负二价离子。

例如铁橄榄石的氧化：

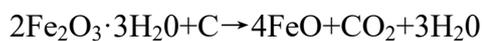


又如硫化物的氧化：



氧化结果形成硫酸，提高了水的氧化作用能力，进一步加速岩石的氧化。

还原作用是氧化作用的逆过程。如三价铁还原为亚铁，硫酸盐中的高价硫被还原为负二价硫等：



细菌常参与氧化和还原反应。如：喜氧细菌中存在一种嗜铁杆菌能将  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ；另一类嗜硫杆菌能将硫化物的硫氧化成硫酸盐；起还原作用的厌氧细菌，能将  $\text{SO}_4^{2-}$  还原成  $\text{H}_2\text{S}$  等。

### 2.脱水和水解反应

水解作用的实质是水电离的  $\text{H}^+$  或  $\text{OH}^-$  进入矿物晶格，分别取代其中的附离

子或阴离子，从而使矿物解体形成新矿物。如在氧化带盐类的水解：



最终生成赤铁矿，即发生了铁矿化。

又如钾长石 ( $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ) 水解形成高岭石 ( $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ):



此水解反应受 pH 控制，当水解反应使溶液偏碱性时，天然水将吸收大气中的  $\text{CO}_2$  和土壤中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等，使水的 pH 酸碱度保持在 5—7 之间，以增强水解的活力。

在不同的 PH 条件下，矿物水解后形成不同的次生矿物是不同的。

### 3. 水合作用

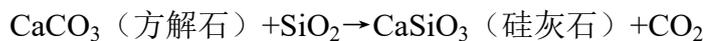
水合作用的实质是水分子整体进入矿物晶格，从而使矿物的体积增大，如赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 经水合作用生成水针铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )，硬石膏 ( $\text{CaSO}_4$ ) 水合作用生成石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 等。

### 4. 碳酸盐化和脱碳酸盐化

天然水中最常见的碳酸根 ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 和重碳酸根 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 离子与矿物或岩石间发生的作用称为碳酸盐化反应，碳酸盐化的结果使矿物部分或全部溶解。如灰岩的溶解过程为：



矿物或岩石间发生作用释放出  $\text{CO}_3^{2-}$  或  $\text{HCO}_3^-$  称为脱碳酸盐化反应。如：



### 5. 离子交换反应

阳离子交换反应主要发生在黏土矿物或胶体的交换吸附过程中。例如，当吸附了  $\text{Na}^{2+}$  离子的黏土（或胶体）和自由（包括能自由电离）的  $\text{Ca}^{2+}$  离子相遇时，黏土将释放  $\text{Na}^+$  离子和吸附  $\text{Ca}^{2+}$  离子，称为阳离子交换反应。

## 2.1.4 造岩矿物及其特性

### （一）硅酸盐矿物

七种常见硅酸盐造岩矿物及其成分和鉴定特征见表 2-1 中。

表 2-1 常见硅酸盐造岩矿物及其鉴定特征

名称	橄榄石 (Ol)	辉石 (Py)	普通角闪石 (Hb)	黑云母 (Bi)	斜长石 (Pl)	钾长石 (Or)	石英 (Q)
化学成分	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3\text{-CaMgSi}_2\text{O}_6$	$(\text{Ca,Na})_{2-3}(\text{Mg}^{2+},\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Al}^{3+})_5[\text{Al,Si}]_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$	$(\text{Mg,Fe}^{2+})_3[\text{Al,Fe}]_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	$\text{SiO}_2$
晶形	粒状	短柱状	长柱状	片状	板状	条状	粒状
颜色	黄绿、淡绿、绿	黑	黑	黑 (金黄)	灰白、淡绿	肉红	烟灰
条痕	白	白	白	白	白	白	白
光泽	玻璃	玻璃	玻璃 (丝绢)	玻璃 (珍珠)	玻璃	玻璃	玻璃 (油脂)
透明度	透明	透明	透明	透明	透明	透明	透明
硬度	>小刀	>小刀	>小刀	<小刀	≈小刀	≈小刀	>小刀
解理	不完全	完全 (二组)	完全 (二组)	完全 (一组)	完全 (二组)	完全 (二组)	断口
晶系	斜方	单斜	单斜	单斜	三斜	单斜	三方

## （二）碳酸盐矿物

碳酸盐矿物是由 $[\text{CaCO}_3]^{2-}$ 络阴离子与 Ca、Mg、Fe 等阳离子组成的含氧盐。结构中 $[\text{CaCO}_3]^{2-}$ 为平面三角形，呈孤立状，且 $[\text{CaCO}_3]^{2-}$ 三角形都平行地成层排列。由于在 $[\text{CaCO}_3]^{2-}$ 平面内光的折射率远大于垂直此平面的光的折射率，所以碳酸盐矿物的光学异向性非常强，表现为高双折率。

### 1. 方解石（Calcite）

化学组成： $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ 。常含 Mn、Fe、Zn、Mg、Pb、Sr、Ba、Co、TR 等类质同象替代物。无色或白色，有时被 Fe、Mn、Cu 等元素染成浅黄、浅红、紫、褐黑色。方解石的集合体形态也是多种多样的，有致密块状（石灰岩）、粒状（大理岩）、土状（白垩）、多孔状（石灰华）、钟乳状（石钟乳）和鲕状、豆状、结核状、葡萄状、被膜状及晶簇状等。

### 2. 白云石（Dolomite）

化学组成： $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ 。成分中的 Mg 可被 Fe、Mn、Co、Zn 替代。

纯者多为白色，含铁者灰色—暗褐色，含铁白云石风化后，表面变为褐色；玻璃光泽。三组解理完全，解理面常弯曲；硬度 3.5—4。相对密度 2.85，随成分中 Fe、Mn、Pb、Zn 含量的增多而增大。有些白云石在阴极射线作用下发鲜明的橘红光。

### 3. 文石（Aragonite，又称霏石）

与方解石呈同质二象。高温低压形成方解石，低温高压形成文石。化学组成： $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ 。Ca 常被 Sr、Pb、Zn、TR 所替代。此外还有 Mg、Fe、Al 但含量一般均较低。通常为白色、黄白色，有时呈浅绿色、灰色等；透明；玻璃光泽，断口为油脂光泽。无解理；N 壳状断口；硬度 3.5-4.5。相对密度 2.9-3.3，成分中含 sr、Ba 者相对密度增大。

## 2.2 岩石学

### 2.2.1 岩石概念及分类

岩石是天然产出的矿物或矿物与其他物质（火山玻璃、生物骨骼、胶体和岩屑等）组成的固态集合体。岩石的基本组成单位是矿物，尤其是硅酸盐造岩

矿物。岩石根据成因分为三大类，即火成岩、沉积岩和变质岩。由于形成上述三大类岩石的造岩作用具有密切的联系，所以地球上的三大类岩石是可以互相转化的（图 2-1）。

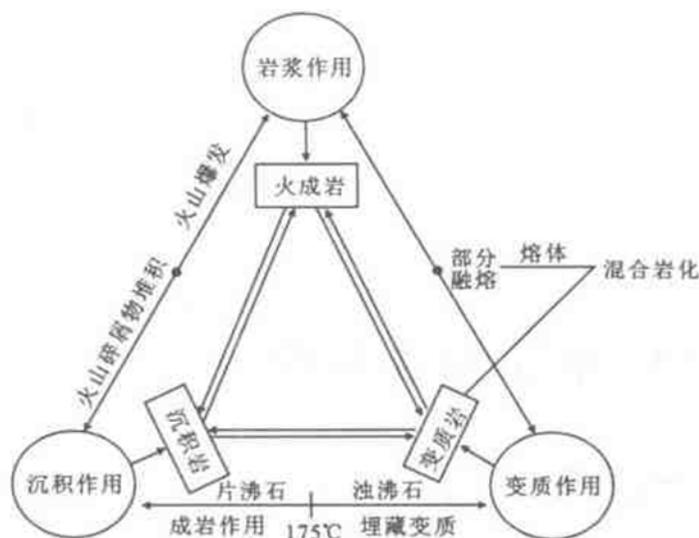


图 2-1 三大岩相互转化及三种造岩作用的关系示意图

### （一）火成岩

火成岩通指岩浆经凝固结形成的岩石，它经历了从熔融的液态岩浆因温度降低而发生向固态转化的全过程。在地球上，有些作为岩浆母体的固态岩石可能自始至终未经历过岩浆阶段，但它又常与岩浆伴生或与之有密切的联系。火成岩不仅包括全部岩浆成因的岩石，还包括一部分非岩浆成因，且一直处于固体状态的岩石，如变质岩区内的某些花岗岩。

火成岩含量较多的元素有 O、Si、Al、Fe、Mg、Ca、K、Na 等，其中 O 的含量最高，占成岩总量的 46% 以上，其次为 P、Ti、Mn、H、C 等。在研究岩石化学成分特征时，通常用氧化物的质量百分数（ $w_B\%$ ）表示，而较少使用单元素的百分比的形式。火成岩主要由  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  八种氧化物组成，其总量占岩石质量分数的 98% 以上。

由于  $\text{SiO}_2$  是火成岩 13 项氧化物中最重要的一种，因此常以此来划分火成岩类型（表 2-2）。

表 2-2 火成岩的  $\text{SiO}_2$  含量分类

岩石类型	超基性岩	基性岩	中性岩	酸性岩
$\text{SiO}_2$ 含量	<45%	45%—53%	53%—66%	>66%

火成岩传统上多使用火成岩的化学成分进行划分。传统的分类是两级分类：一为根据 SiO<sub>2</sub> 含量划分，二为依据产状划分。SiO<sub>2</sub> 含量可以通过岩石中的矿物组成反映出来，而产状可以利用岩石的结构构造来获取，两者结合即构成火成岩的总体分类方案（表 2-3）。

表 2-3

系列	钙碱性					碱性	
	超基性岩	基性岩	中性岩		酸性岩	碱性岩	
SiO <sub>2</sub> 含量	<45%	45%~53%	53%~66%		>66%	53%~66%	
石英含量	无	无或很少	<5%		>20%	无	
长石种类及含量	一般无长石	斜长石为主	斜长石为主	钾长石为主	钾长石>斜长石	钾长石为主含似长石	
岩类 产状 主要结构特征 暗色矿物种类及含量	微橄石、辉石 >90%	主要为辉石，可有角闪石、黑云母、橄橄石等 <90%	以角闪石为主，黑云母、辉石次之 15%~40%	以角闪石为主，黑云母、辉石次之 15%~40%	以黑云母为主，角闪石次之 10%~15%	主要为碱性辉石和碱性角闪石 <40%	
大、中型侵入体	中粗粒结构或似斑状结构	橄橄岩 辉石岩	辉长岩	闪长岩	正长岩	花岗岩	霞石正长岩
小型侵入体	细粒结构或斑状结构	苦橄玢岩 金伯利岩	辉绿岩	闪长玢岩	正长斑岩	花岗斑岩	霞石正长斑岩
喷出的熔岩	无斑隐晶质结构 斑状结构 玻璃质结构	苦橄岩 科马提岩	玄武岩	安山岩	粗面岩	流纹岩	响岩

\* 火成岩的碱性是用其化学成分的  $(K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$  计算值大于 3.3 确定的，反之，小于 3.3 则为钙碱性。

石窟寺及石刻常见火成岩主要有以下几类：

(1) 中性—长英质侵入岩类

中性—长英质岩类主要是指中—酸性的全晶质岩石。此类岩石又称为花岗岩类 (granitoid rocks)，它通常广义地指 SiO<sub>2</sub> 含量大于 53% 的火成岩。花岗岩类岩石在大陆地壳分布量最多，地表出露也较广泛，且常呈大规模的岩基、岩株产出。我国东部地区许多石刻大都开凿在此类岩性中，如东北地区和南方福建省。

(2) 喷出岩（熔岩）类

喷出岩（熔岩）类主要分布十分广泛而且化学成分从基性到酸性跨度的一类溢流相的火山岩。该类岩石的代表岩性有玄武岩、安山岩、粗面岩和流纹岩等。由于喷出岩类岩石多气孔、杏仁构造，不利于雕凿成型，据目前调查我

国还未发现开凿于此类岩石中的石窟寺及石刻，而以该类型岩石为材料建造的其他石质文物也极少。

### (3) 浆混岩类

浆混岩是一类以火成岩成因机理—岩浆混合作用命名的岩石。岩浆混合(和作用)包括岩浆混合(mixing)和岩浆混合(mingling)两种作用，前者属岩浆化学混合；后者应是指岩浆机械混合。对这类岩石统称为“浆混岩”。

### (4) 火山碎屑岩

火山碎屑岩是指经火山爆发作用形成的各种火山碎屑物经搬运、堆积后因发生压结、胶结和熔结等成岩作用形成的岩石。火山碎屑物形成于三种状态：液态岩浆达到近地表时因气体浓集内压力剧增而外压力突降导致的碎屑化，已固化的火山碎屑岩因后一次火山爆发而再次碎屑化，围岩和深源物质因火山爆发炸碎的碎屑化。在我国开凿于火山碎屑岩中的石窟寺及石刻较少。

## 2.2.2 沉积岩

### 一、沉积岩的形成过程

#### (一) 风化作用

地表和接近地表的已固结的岩石(火成、沉积和变质的)在温度变化、水、空气及生物的作用和影响下所发生的破坏作用称为风化作用。该作用可分为物理风化和化学风化两大类。

#### 1.物理风化作用

物理风化是指岩石只发生机械破裂而化学成分未改变的风化作用。影响物理风化作用的因素有温度变化、介质的破坏能力、生物作用的发育程度、岩石性质、地形等。

#### 2.化学风化作用

是指岩石发生化学分解的风化作用。化学分解的化学反应形式为氧化和脱氧、水化和水解、酸的作用、阳离子交换、化学溶解、去硅和硅化以及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的化合作用，这些作用有时同时，有时交替和重复进行，其标志是有新生矿物的出现。

母岩经风化后发生的机械破碎和化学分解是一个母岩物质再分配和重新组

合的过程，风化后形成的产物按其性质可分为碎屑物、溶解物和不溶残余物三类。

## (二) 搬运和沉积作用

### 1. 碎屑物的搬运和沉积

#### (1) 河流流水

河流是碎屑物质搬运的主要动力。碎屑物在流水中的搬运和沉积一方面取决于碎屑物质的密度、粒度、形状、相互引力和摩擦力；另一方面还与流水的流速、流量和性质有关。当流水动力大于碎屑重力，并克服了摩擦力和引力时碎屑被搬运，反之则沉积。

#### (2) 水盆地的水流

水盆地包括海洋、湖泊和泻湖等，其中以海洋水盆地影响的范围最广。海水盆地内的水流形式主要有波浪、潮汐和海流。

#### (3) 其他流体

除河流和水盆地的水流外，还有风、冰川和浊流等不同性质的流体，它们搬运和沉积的特点存在明显的差别（表 2-4）。

表 2-4 其他流体对碎屑物的搬运和沉积特征

	风	冰川	浊流
流体性质	密度和黏度极低 能量和方向变化大	固体 沿沟谷运动	高密度的重力流 从上向下滑动
作用范围	干旱沙漠区	高寒地区	斜坡和海底地形倾斜区
搬运特点	跳跃式为主，迁移距离中等 悬浮式迁移，距离大 滚动式迁移，距离小	浮于冰上被搬运 冰川谷底搬运 陆地迁移到海洋	沿斜坡和海底峡谷搬运 整体搬运至海底平坦区
沉积特点	大型沙丘 交错层理	冰川堆积物 海洋堆积物	浊积岩 鲍马序列

### 2. 溶解物质的搬运和沉积

溶解物质的搬运和沉积与其溶解度密切相关。化学搬运物质组分的溶解度从小到大依次为： $\text{Al}_2\text{O}_3$ — $\text{Fe}_2\text{O}_3$ — $\text{MnO}$ — $\text{SiO}_2$ — $\text{P}_2\text{O}_5$ — $\text{CaCO}_3$ — $\text{CaSO}_4$ — $\text{NaCl}$ — $\text{MgCl}_2$ ，其中 Al、 $\text{Fe}^{3+}$ 、Mn 和 Si 等氧化物难溶于水，故多呈胶体被搬运；Ca、Na 和 Mg 溶解度大，呈其溶液被搬运。

### 3.沉积分异作用

沉积分异是指不同性质的风化产物在外界动力条件的作用下搬运后按一定的序次分别沉积下来（终止搬运迁移）的现象。它可以分为碎屑物的机械沉积分异和溶解物质的化学沉积分异。

#### （三）成岩作用

成岩作用是指已定位的沉积物转变为沉积岩过程中发生的物质成分和结构构造的变化作用。

#### 1.成岩方式

##### （1）压结作用

因上覆物质静压力而使松散沉积物体积缩小、含水量减少和密度增加的作用称为压结作用。压结作用导致沉积物硬化。当静压力达到一定程度时，在沉积颗粒间的接触部分还发生溶解，这种作用称之为压溶作用，石灰岩中的缝合线构造就是压溶作用造成的。

##### （2）胶结作用

松散的沉积物由化学物质或其他细小物质黏结而变成坚硬岩石的作用称为胶结作用。常见的胶结物有钙质和白云质（碳酸盐矿物）、硅质（玉髓和蛋白石）、铁质（赤铁矿和褐铁矿）和海绿石质等。

##### （3）重结晶作用

矿物组分因扩散或溶解—沉淀而重新排列组合而使晶粒增大的现象称为重结晶作用。重结晶作用常破坏原始沉积物的结构构造，如细薄的层理构造会因重结晶作用而消失。

#### 2.成岩（自生）矿物的形成

成岩阶段以化学和生物化学方式新形成的矿物称为成岩矿物。常见的典型自生矿物有黏土矿物、方解石、白云石、石英、玉髓、海绿石、石膏、铁锰氧化物及氢氧化物；其次是黄铁矿、菱铁矿、铝的氧化物及氢氧化物和长石等。

## 二、沉积岩的基本特征和分类

### （一）颜色

对于粗颗粒陆源碎屑岩来说，石英砂岩为白色；长石砂岩多为肉红色或黄

褐色；岩屑砂岩则为暗灰或灰色。上述沉积岩的颜色主要取决于碎屑物的颜色。

## (二) 化学成分

表 2-5 给出了沉积岩与火成岩化学成分的对比，以此可说明沉积岩化学成分的总体特征。

表 2-5 沉积岩与火成岩化学特征比较

陆源沉积岩	内源沉积岩	火成岩	解释
$\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{FeO}$	——	$\text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$	表生条件下铁多呈 $\text{Fe}^{3+}$
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 总量较小	——	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 总量较高	表生条件下 K、Na 易迁移
$\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$	——	$\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$	d 多年图矿物，以吸附 K
$\text{H}_2\text{O}$ 含量高	$\text{CO}_2$ 含量可达 40%	$\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 含量均低	年图矿物 $\text{H}_2\text{O}$ 含量高 碳酸盐矿物 $\text{CO}_2$ 含量高
$\text{SiO}_2$ 含量可达 90% 以上	$\text{SiO}_2$ 含量变化范围大，0—100%	$\text{SiO}_2$ 含量集中在一定范围	石英砂岩、硅质岩和碳酸盐岩所致
CaO 与火成岩相近含大量有机质	CaO 含量变化范围大，0—40%	CaO 集中在一定范围不含有有机质	

## (三) 矿物组成

沉积岩中发现的矿物约 150 余种，但常见的仅 20 多种，如石英、长石、云母、黏土矿物、方解石、白云石、菱铁矿，Fe、Mn、Al 的氧化物和氢氧化物以及易溶盐类，总体上可分为以下三类。

陆源碎屑矿物和岩屑，指从母岩中继承下来的一部分矿物和岩石碎屑；原生矿物，指在沉积岩形成过程中母岩分解的易活物质沉积形成的矿物，如石英碎屑周围加大的石英边和海绿石等；次生矿物，指的是沉积岩成岩以后经风化形成的矿物，如海绿石、黄铁矿经风化形成的褐铁矿。

## (四) 构造

沉积岩的构造是指岩石各个组成部分的空间分布和排列方式。沉积岩的构造根据其成因可划归物理成因、化学成因和生物成因三大类（表 2-6）。

表 2-6 沉积岩构造类型及划分

物理成因			化学成因		生物成因
层理构造	层面构造	变形构造	溶解构造	凝聚构造	
水平层理	波痕	负荷印模	缝合线 假晶	结核	叠层构造 虫迹和虫孔 生物扰动
波状层理	泥裂	球—枕构造			
斜层理	雨痕	包卷层理			
粒序层理	假晶	滑塌构造			

块状层理	冲刷面 槽模	砂岩岩脉 盘状构造			
------	-----------	--------------	--	--	--

### (五) 分类

本书沉积岩分类列于表 2-7。

表 2-7 沉积岩的分类

陆源碎屑岩及碎屑粒径 ( $d$ )		内源沉积岩及矿物组成	
砾岩	$d > 2\text{mm}$	碳酸盐岩	方解石、白云石
砂岩	$d = 0.05 - 2\text{mm}$	硅质岩	石英、玉髓、蛋白石
粉砂岩	$d = 0.005 - 0.05\text{mm}$	铝质岩	铝的氢氧化物, 含黏土矿物
泥岩	$d < 0.005\text{mm}$	锰质岩	软锰矿、硬锰矿、水锰矿
		磷质岩	磷灰石、胶磷矿
		铁质岩	针铁矿、赤铁矿、菱铁矿

## 三、与石窟寺及石刻保护有关的沉积岩

### (一) 砾岩

由直径大于 2 毫米的陆源碎屑组成且其含量在 50% 以上的沉积岩称为砾岩。砾石的粒度变化范围很大, 从 2 毫米到几米的都有, 常见的是几厘米至几十厘米。由于砾石颗粒粗, 故其成分以岩屑为主。砾岩中各种成分和结构的岩屑均可出现, 主要决定于母岩区的岩石组成和堆积速度。除岩屑外, 在较细的粒级的砾岩中可有长石、石英等矿物碎屑。砾石之间的孔隙多为砂粒和基质或胶结物充填。砾石的圆度差异也可以很大, 从棱角状至圆状均可出现, 通常依砾石的圆度可把砾岩分为砾岩 (主要由次圆至圆状的砾石组成) 和角砾岩 (主要由棱角状砾石组成)。砾岩和角砾岩一般不发育层理, 但厚度很大的砾岩层也见有斜层理和粒序层理。

#### 1. 砾岩的分类

##### (1) 按砾石的粒径大小划分

砾岩按砾石粒径大小可分为巨砾 (角砾) 岩、粗砾 (角砾) 岩、中砾 (角砾) 岩和细砾 (角砾) 岩。

##### (2) 按砾石岩性的复杂程度划分

按砾石岩性的复杂程度划分可分为①单成分砾岩: 基本上由同一种岩性的砾石 (同种岩性砾石占总砾石的 75% 以上) 组成的砾岩; ②复成分砾岩: 由多

种砾石成分砾石构成的砾岩。

### (3) 按成因划分

①滨海砾岩：在滨海地区由河流搬运来的砾石或海岸破坏形成的砾石在浅水条件下，遭受波浪和潮汐的反复冲刷和磨蚀以及沿岸海流的搬运后可形成滨海砾岩。滨海砾岩一般沿岸线呈连续带状分布，多为颗粒不很粗大，分选良好、圆度高、成分单一的石英质砾岩。该砾岩层有时含海生生物化石，厚度不大，呈透镜状或较稳定的层状，可有交错层理，常与石英砂岩共生。

②冲积扇砾岩：分布于山间盆地或山前拗陷的边缘，它是由山区洪水在刚出山口处因流速突然减低而使碎屑物质快速堆积形成，其特征是分选不好，巨砾和泥质混杂，圆度差，砾石成分复杂。砾岩层厚度很大，可达几十米至几千米。其岩性和厚度变化大，常与成分比较复杂的长石砂岩、岩屑砂岩等共生。砾岩体多呈大的透镜状，但有时也可呈分布很长的带状。我国著名的敦煌莫高窟就建造在中更新统洪积—冲积酒泉组半胶结砾岩地层中，呈黄褐色、磨圆度较差、钙泥质胶结、水平层理明显。

③河流砾岩：河流砾岩多位于河床沉积的底部，其特点介于滨海砾岩和冲积扇砾岩之间，一般分选较差，常有砂泥物质混杂，圆度中等。

## 2. 砾岩的定名

砾岩进一步定名应按单成分砾岩和复成分砾岩两类分别遵循以下规则。

### (1) 复成分砾岩

颜色+胶结物成分+粒径大小+砾岩，如灰色钙质粗砾岩。

### (2) 单成分砾岩

颜色+胶结物+砾石岩性+粒度大小+砾岩，如灰白色硅质中砾岩、灰黄色泥质细砾岩。

## (二) 砂岩

粒度为 0.05~2 毫米的陆源碎屑含量在 50%以上的沉积岩称为砂岩。砂岩的碎屑成分主要是石英、长石和岩屑三种。在大多数砂岩中石英都是最主要的碎屑，也是最稳定的组分；长石和岩屑在表生条件下较易破坏，属于较不稳定的组分。由于砂岩的粒度较细，故其中所含的岩屑均为细晶结构或隐晶质结构。

这些岩屑的颜色都较深，为黑色、深灰色、褐红色、灰绿色等，岩屑的断口致密，光泽较暗淡，在野外鉴定时可根据上述特征将它与石英、长石区分开。砂岩中碎屑的成分和含量主要决定于母岩的成分和沉积物改造的历史。长石和岩屑能直接反映母岩的性质，长石可以来自花岗质岩石的母岩区，也可以是结晶基底岩石分解形成，沉积岩、喷出岩和浅变质岩的岩屑均产于地壳浅部，是母岩区切割剥蚀不深的标志，石英是最稳定的组分，岩石中石英的含量愈多则表示碎屑物质经受的改造愈充分，矿物的成熟度愈高。

砂岩中的胶结物常见的有钙质、硅质、铁质等，有时还有海绿石、石膏等。在分选性很差的砂岩中会含较多的泥质基质。

砂岩的粒度、分选性及圆度等结构特征差别很大，它取决于搬运介质的性质、动能大小、搬运距离和堆积速度。砂岩是机械沉积作用的产物，砂粒在流水搬运的过程中是最活跃的组分，故砂岩中各种层理构造和层面构造都很发育，各种类型的斜层理、交错层理以及平行层理、序粒层理等都极常见；波痕、冲刷痕迹、槽模、沟模和生物扰动等构造也很发育。这些特征均成为砂岩成因和沉积环境分析的重要标志。

### 1.砂岩的分类

(1) 按碎屑粒度大小可将砂岩分为：巨粒砂岩、粗粒砂岩（粗砂岩）、中粒砂岩（中砂岩）、细粒砂岩（细砂岩）。它们的碎屑粒径划分标准见表 2-19。

(2) 根据砂岩中基质含量可分为：净砂岩（基质含量 $<15\%$ ）和杂砂岩（基质含量 $>15\%$ ），从某种意义上说，杂砂岩也就是泥质胶结的砂岩，而净砂岩即为通常所称的砂岩。

(3) 按各碎屑物含量划分；此方案是石英—长石—岩屑三个端元的定量组成划分（图 2-2），获得的岩石名称为砂岩的基本岩石名。

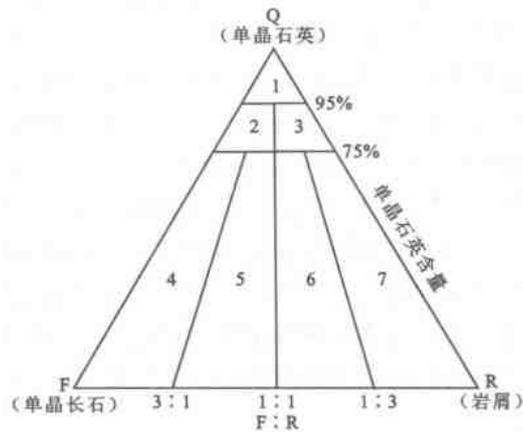


图 2-2 砂岩的石英—长石—岩屑定名划分

1.石英砂岩；2.长石石英砂岩；3.岩屑石英砂岩；4.长石砂岩；5.岩屑长石砂岩；6.长石岩屑砂岩；7.岩屑砂岩

## 2.我国砂岩的主要类型

我国石窟寺及石刻常见的砂岩类型主要有石英砂岩、长石砂岩、长石石英砂岩、岩屑长石石英砂岩等。

## 3.砂岩的定名

砂岩定名主要应考虑利用石英—长石—岩屑定量碎屑三角命名图获得的基本岩石名称，然后再加上颜色、胶结物成分和碎屑物粒度结构的修饰。这里需说明，在投影三角命名图之前应将含量估计中的胶结物分数减去，然后以石英、长石和岩屑三项的总和为 100%来计算各种碎屑的百分数含量。其命名规则如下：颜色+胶结物+基本岩石名+结构+砂岩，如灰白色硅质长石石英中砂岩、灰色泥质岩屑石英粗砂岩。

### （三）粉砂岩

粉砂岩是 0.005~0.05 毫米的陆源碎屑占 50%以上的沉积岩。粉砂岩的碎屑成分以石英为主，常含数量不定的白云母，长石和岩屑均较少见，填隙物以泥质基质为最多，其次为钙质和铁质胶结物，硅质胶结物极少，常见钙质和铁质胶结物与泥质基质混杂在一起的情况。粉砂岩多呈薄层状，常具微细的水平层理和微波状层理。由于粉砂岩饱水后易于流动，故包卷层理等变形构造也较常见。

### （四）泥质岩类

泥质岩亦称黏土岩，它是粒度小于 0.005 毫米的陆源碎屑和黏土矿物组成

的岩石。绝大多数的泥质岩是由母岩化学分解后产生的黏土矿物经机械沉积而成的，只有极少数泥质岩是凝灰岩在成岩过程中蚀变而成的。泥质岩是分布最广的一类沉积岩，占沉积岩总量的 60%左右。

泥质岩的矿物成分复杂，黏土矿物常见有高岭石、水云母、蒙脱石等。陆源碎屑矿物主要是石英、云母和极少量长石。自生矿物常见有铁的氧化物、氧化硅矿物（玉髓、石英）、碳酸盐矿物（方解石、白云石等）、硫酸盐矿物（石膏、硬石膏等）、硫化铁矿物（黄铁矿、白铁矿），此外还有海绿石、绿泥石和有机质等。这些自生矿物虽然含量一般不高，但能影响岩石的颜色及其物理性质。

泥质岩的结构主要为泥状结构、粉砂泥状结构、鲕粒或豆粒结构、生物泥状结构等。具泥状结构的岩石几乎全由泥质质点组成，岩石致密细腻，具贝壳状断口，用手捻时有滑感，用牙咬时感觉不到有坚硬的碎屑颗粒存在，用小刀切割时，切面很光滑。泥质岩的鲕粒和豆粒结构外貌上与碳酸盐岩的鲕粒、豆粒结构相似，但其内部多为隐晶质致密状，无同心层或同心层极少，其鲕粒或豆粒的质地比周围的基质坚硬。

泥质岩的层理均为水平层理，但厚薄不一，厚度在 1 厘米以下的层理称页状层理或页理。

页理发育的泥质岩通称为页岩；无页理或页理不发育的叫泥岩。泥质岩还常有泥裂、雨痕、晶体印摸以及水下滑动等构造。泥质岩的颜色变化很大。含铁的氧化物时为红色、紫色、褐色，含绿泥石、海绿石等含低价铁的硅酸盐矿物时呈绿色；含细分散的黄铁矿及有机质较多时则呈黑色或灰黑色。它们都是指示形成环境的标志，并反映沉积介质的氧化或还原条件。

由于泥质岩分类主要是根据泥质岩的固结程度、页理的发育情况等宏观构造特征划分的，通常依此而把泥质岩分为黏土、泥岩和页岩三类（表 2-8）。各类的进一步划分则按其主要矿物成分或次要组分划定。

表 2-8 泥质岩按固结程度的分类

构造特征	岩石名称
土状	黏土
块状构造或页理不发育	泥岩
页理发育	页岩

### (1) 黏土

黏土是一种未固结或弱固结的泥质岩，基本上仍为土状，在水中易泡软，具不同程度的可塑性和黏结性，多为现代风化壳的产物。出露地表的泥质岩因风化和易被水浸泡而成土状并具有明显的可塑性。常见的质地较纯的黏土有高岭石黏土、蒙脱石黏土和水云母（伊利石）黏土。

(2) 泥岩和页岩。泥岩和页岩是泥质沉积物经成岩作用后固结而成的，泥岩层理不明显，呈块状；页岩则具明显的页理构造。泥岩和页岩的成分一般都比较复杂，主要由水云母（伊利石）或高岭石组成，并含碎屑物质和各种自生矿物，但也有部分泥岩较纯，主要由高岭石组成，可称为高岭石泥岩。高岭石泥岩常为深灰色至灰色，致密较硬，具贝壳状断口。大多数泥岩和页岩常含一定数量的粉砂及其他自生矿物和有机质。含粉砂数量较明显时可称为粉砂质泥岩或粉砂质页岩。当泥岩和页岩含较多的自生矿物及有机质时，根据自生矿物及有机质等混入物的成分及颜色可将泥岩分为红色页岩（泥岩）、黑色页岩（泥岩）、碳质页岩（泥岩）、钙质页岩（泥岩）、硅质页岩（泥岩）等。

### (五) 碳酸盐岩类

#### 1. 矿物成分

碳酸盐岩是以钙、镁碳酸盐矿物为主要组成的沉积岩，其主要的岩石类型为石灰岩和白云岩。

#### (1) 碳酸盐矿物

主要是方解石和白云石，少许有文石、铁白云石和菱铁矿。

#### (2) 陆源矿物

通常在碳酸盐岩中都含有或多或少的陆源碎屑物质，它们主要是石英、长石、云母和黏土矿物。当这些碎屑物质在岩石中含量较高时，则形成陆源沉积岩和碳酸盐岩之间的过渡岩石类型。

#### (3) 非碳酸盐的自生矿物

常见的有氧化铁矿物、海绿石、黄铁矿、白铁矿、石英、玉髓、石膏、硬石膏、天青石、重晶石、磷灰石、萤石和石盐等。

#### 2. 结构

## (1) 粒屑结构

粒屑结构是内源沉积物经波浪、潮汐和流水等机械作用的破坏、搬运和再沉积形成的。其特征可与陆源碎屑岩的碎屑结构相当。粒屑结构同样也包含粒屑、胶结物和基质、胶结物类型三要素。

### 1) 粒屑颗粒类型

①内碎屑：是在水盆地内沉积不久的、固结或弱固结的碳酸盐沉积物经冲刷破碎而成，一般经短距离的搬运磨蚀，故常有一定的圆度和分选性。内碎屑的岩性常与相邻或下伏岩层的岩性有明显的关系，它们大多是薄层的微晶灰岩。内碎屑按其粒度大小可分为砾屑（>2 毫米）、砂屑（0.05~2 毫米）、粉屑（0.005~0.05 毫米）和泥屑（<0.005 毫米）。泥屑结构通常亦称泥晶结构，在肉眼观察下与微晶结构无法区分，故也可将其称为微晶结构。

②生物碎屑：包括生物颗粒、化石碎片和骨屑等，它们是盆地内分散的生物遗体堆积而成的，不包括由造礁生物形成的生物骨架结构。一般都经过水流和波浪的打碎磨损和搬运，故也常有磨圆和分选现象，少数生物遗骨也可在原地埋藏而未经破碎。

③鲕粒（豆粒）：鲕粒和豆粒都是内部具规则的同心层状结构的圆球状或椭球状颗粒，颗粒的核心多为陆源碎屑、骨屑或内碎屑。颗粒粒径小于 2 毫米的称为鲕粒，大于 2 毫米的称为豆粒。

④团粒：是由微晶碳酸盐矿物组成的球状或椭球状小颗粒，无明显的内部构造，结构均匀。团粒大小一般为 0.1~0.5 毫米。团粒与鲕粒的区别主要是团粒内部无同心层状构造。

⑤团块：团块是具不规则外形的复合颗粒，常由微晶方解石胶结几个细小生物碎屑、鲕粒或团粒等组成。颗粒大小不一，外形不规则，有的像葡萄串状。

### 2) 基质

碳酸盐岩中的基质亦称灰泥基质或泥晶基质，主要由微晶方解石组成，简称泥（微）晶基，其粒径小于 0.03 毫米。

### 3) 胶结物（亮晶）

简称亮晶胶结物，是碳酸盐颗粒之间的化学沉淀物，一般是在颗粒沉积后

从颗粒之间的粒间溶液中沉淀出来的，较径大于 0.03 毫米。

粒屑碳酸盐岩胶结物的胶结类型与陆源碎屑结构一样，也可以分为基底式胶结、孔隙式胶结和接触式胶结。

### (2) 生物骨架结构

是造礁生物形成的礁灰岩所特有的结构。常见的造礁生物有群体珊瑚、海绵、苔藓虫、层孔虫及藻类。在自然界有单一生物门类形成的礁岩，也有多种造礁生物造成的礁岩。

生物骨架结构的主要特点是由原地生长的造礁生物的遗体组成岩石的骨架，骨架内有许多大小不同、形状各异的孔隙和空洞。这些孔隙和空洞常被礁体内附生的生物遗体（如棘皮动物、有孔虫等）、造礁生物的碎屑物质以及化学沉淀的物质所充填。化学沉淀的充填物质主要为柱状或纤维状方解石，它们往往垂直骨架的表面或早期碎屑的表面呈放射状生长。其间常有许多孔隙未被充填满，这些余下的孔隙即成为地下水的良好空间。

### (3) 晶粒结构

主要为化学沉淀和重结晶作用形成的结构，它包括显晶和隐晶两大类。隐晶质结构由微晶碳酸盐矿物组成，其晶粒小于 0.03 毫米，肉眼及放大镜下都不能分辨，岩石致密，常具贝壳状或瓷状断口；显晶质结构是指肉眼或放大镜下均能分辨和确定碳酸盐矿物晶粒，其岩石断口较粗糙。

## 3. 构造

碳酸盐岩的构造种类有很多，在由机械搬运和沉积作用形成的碳酸盐岩中常见与流水作用有关的各种沉积构造，如斜层理、交错层理、波浪、冲刷痕迹等，在由浊流沉积形成的碳酸盐岩中则常有粒序层理以及槽模，沟模等构造；在原地沉积的碳酸盐岩中常见生物构造，如叠层石等，此外，结核、缝合线等构造也很常见。

## 4. 碳酸盐岩的分类和定名

自 20 世纪 50 年代以来，碳酸盐岩的研究取得了很大的进展，有关碳酸盐岩的分类方案十分繁多，本节介绍的是李昌年等根据野外观察的实际情况和习惯性做法提出一套简单的岩石命名方案（表 2-9）。

由表 2-13 可知，按内碎屑粒径、特征的粒屑类型和构造特征确定的碳酸盐岩名称只是碳酸盐岩的基本岩石名称，进一步定名还得加上“亮晶”胶结物或“泥晶”基质的前缀，如亮晶砾屑岩、泥晶鲕状灰岩等。此外，在有多种粒屑组分共同存在时，则按少前多后的原则对粒屑类型排序，如亮晶鲕粒生物碎屑灰（白云）岩，显然，该岩石生物碎屑含量多于鲕粒。

表 2-9 碳酸盐岩的主要类型和定名

胶结物、基质	据内碎屑大小定名	据特征的粒屑类型定名	构造
亮晶或（和）泥晶	砾屑灰（白云）岩 （竹叶状灰岩） 砂屑灰（白云）岩 粉屑灰（白云）岩 泥晶灰（白云）岩	鲕状灰（白云）岩 生物碎屑灰（白云）岩 团粒灰（白云）岩	核形灰（白云）岩 叠层石灰（白云）岩 礁灰（白云）岩

### 2.2.3 变质岩

#### 一、变质作用

地球上已形成的岩石因地质环境变化而处于新的物理—化学条件所发生的成分（化学的和矿物的）、结构和构造的一系列变化，这种变化的过程就是变质作用，其变化过程形成的岩石称为变质岩。

变质岩可根据原来岩石（原岩）的成因类型进行划分；原岩为火成岩的变质岩为正变质岩，原岩为沉积岩的变质岩是副变质岩；原岩为变质岩的变质岩称为复变质岩。

#### 二、变质岩的基本特征和分类

##### （一）物质成分

变质岩化学成分兼有火成岩和沉积岩的特点。对于由火成岩变质形成的正变质岩，其化学成分的变化范围较小；若为副变质岩，其化学成分范围较宽。在变质作用中，常有物质带进和带出而发生交代作用，这种作用会进一步加大变质岩的化学成分变化。根据化学成分的特点可将变质岩划分为五大化学类型（表 2-10）。

表 2-10 变质岩化学类型的化学成分及其矿物组成

化学类型	原岩	化学成分特征	出现的矿物	
			常见的	特征性的

泥岩	黏土岩、页岩	高铝贫钙 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / (K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O) 高 K <sub>2</sub> O>Na <sub>2</sub> O	长石、石英、云 母、绿泥石	蓝晶石、红柱 石、矽线石、石 榴石、堇青石
长英质	砂岩、中性长英 质火成岩	基本同上 K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O 高, FeO 和 MgO 低	基本同上 长石和石英含 量高	基本无
钙质	各种碳酸盐岩	CaO、MgO 高 FeO 和 SiO <sub>2</sub> 低	方解石、白云 石、斜长石	硅灰石、透闪 石、透辉石、石 榴石
基质	基性火成岩和火 山碎屑岩、硅质 白云质泥灰岩	FeO 和 MgO 高 CaO 和 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 较高	斜长石	绿帘石、阳起 石、透辉石、紫 苏辉石
镁质	镁铁质火成岩 高镁的沉积岩	FeO、MgO 高 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub> 低	橄榄石、碳酸盐 矿物	滑石、蛇纹石、 透闪石、菱铁矿

## (二) 结构

变质岩的结构比较复杂，它除了变质结晶作用形成的结构外，还包括原岩中因变质不彻底而部分保留下来的原岩结构，除此以外，变质作用导致岩石变形而产生的结构也是变质岩结构的重要部分。变质岩结构据此可分为变余结构、变晶结构、变形结构和交代结构等大类。由于变质作用进行得不彻底，原来岩石的矿物成分和结构特征被部分地保留下来而形成的结构称之为变余结构。岩石在固态条件下由重结晶和变质结晶作用形成的变质岩结构称之为变晶结构。岩石受到机械破坏而产生的结构称为变形结构。在变质作用中，由于化学性质活泼的流体相的作用导致物质成分的带入和带出，使原有矿物被溶解的同时被新生矿物所代替，这样形成的结构称为交代结构。

## (三) 构造

变质岩的构造主要指变质岩中各组分在空间上的排列、分布和聚集的方式。变质岩的构造可以是原岩继承性的，也可以是新形成的，即变质作用形成的构造。

### (1) 变余构造

岩石经变质后仍保留有原岩部分的构造特征。这种构造称为变余构造。变余构造是恢复原岩的重要依据。正变质岩常见的变余构造有变余气孔、变余杏仁和变余流纹等；副变质岩常见的变余构造有变余层理、变余波痕和变余泥裂

等。

## （2）变成构造

由变质作用所形成的构造称为变成构造。主要分为斑点状构造、板状构造、千枚状构造、片状构造、片麻状构造、条带状构造和块状构造等。

## （四）分类

变质岩分类完全按变质作用类型划分，由此划分出动力变质岩、区域变质岩、接触热变质岩、混合岩和交代变质岩五大类。

### 三、与石窟寺及石刻相关的变质岩简介

#### （一）动力变质岩

由动力变质作用形成的岩石称为动力变质岩。总体可分为构造角砾岩、碎裂岩、糜棱岩、千糜岩和假熔岩五类。由于动力变质岩受动力变质作用后完整性极差，不适合开凿和雕刻成形，古人一般不选择在该类岩性的地层中或岩石雕凿洞窟和石刻，故我们在实际工作中接触到此类岩石不多。所以具体的岩石具体类型及特征在此不再赘述，如感兴趣或遇到此类岩石请查阅参考文献及有关教材。

#### （二）区域变质岩

区域变质岩是原岩经区域变质作用形成的岩石，它是变质岩中分布最广、变质作用过程持续时间最长的一类变质岩。根据目前调查，由于在区域变质岩中我国石窟寺及石刻发现的岩性有片麻岩和大理岩，而板岩、石英岩被发现在我国传统村落和建筑中曾有使用。故以下主要对该四种岩石进行介绍。其他类型岩石需要了解请查阅有关参考文献和教材。

##### 1.板岩

板岩是具板状构造的浅变质岩，它多由泥质岩、粉砂岩或中酸性凝灰岩经轻微变质作用形成。原岩的矿物成分基本上没有重结晶或只有部分重结晶，岩石脱水且硬度增高，其外表呈致密隐晶质，矿物颗粒很细，肉眼难以鉴别。在板理面上偶见有少量的云母、绿泥石等新生矿物。

板岩一般可根据颜色和杂质的不同详细命名，如黑色碳质板岩、灰绿色钙质板岩等。板岩因具有板状构造，可沿板理面成片剥下，可作为房瓦、铺路等

建筑材料。在我国传统村落和南方少数民族民居中可见到此类做法。

## 2.片麻岩

岩石具明显的片麻状构造，含长石、石英较多，粒度较粗（一般大于 1 毫米），岩石中长石（钾长石、斜长石）和石英的含量大于 50%，长石含量一般大于 20%，当长石含量减少，石英增加时，则过渡为片岩。片状或柱状矿物可以是云母、角闪石、辉石等。有时可含矽线石、蓝晶石、石榴石、堇青石等特征变质矿物。片麻岩可根据所含长石的种类，分为钾长片麻岩、斜长片麻岩两大类，然后再根据暗色矿物和特征变质矿物前线进一步命名，如黑云母斜长片麻岩、矽线石钾长片麻岩等。

## 3.石英岩

这是一种石英含量大于 85%的变质岩，它由石英砂岩或硅质岩经区域变质作用或热接触变质作用形成，由于原岩所含杂质和变质条件的不同，岩石中除石英外可含少量长石、绢云母、绿泥石、白云母、黑云母、角闪石、辉石等。一般具粒状变晶结构及块状构造，有时可具条带状构造。石英岩分布广泛，是优良的建筑材料和制造玻璃的原料。北京正觉寺金刚宝座塔选用此类岩石建造。

## 4.大理岩

这是一种碳酸盐矿物（方解石、白云石为主）含量大于 50%的变质岩。它是由石灰岩、白云岩等碳酸盐岩经区域变质作用或热接触变质作用而成的。由于原岩含杂质和变质条件的不同，大理岩中可含少量蛇纹石、透闪石、透辉石、方柱石、金云母、镁橄榄石和硅灰石等特征变质矿物。一般具粒状变晶结构和块状构造，有时可具条带状构造。大理岩因在我国云南省大理县盛产而得名。通常白色和灰色大理岩居多。其中质地均匀、细粒、白色者，又称汉白玉。据调查远在公元前 21 世纪我们祖先就开始使用大理岩雕刻精美的祭品。现在在莫斯科东方博物馆内还藏有我国周朝时期用大理岩制造的盛酒祭器；大约在汉以前，大理岩就已广泛用在我国宫殿建筑的栏杆、台阶等处。而古代诗人又有称其为文石的说法。如前所述，白色细粒大理岩汉白玉因其品质温润，深得皇族喜好，加之北京房山大石窝有着得天独厚的汉白玉采石场，因此，汉白玉也成为明清两代皇家宫殿、陵寝和园林中石构件的首选石材。如故宫、天坛、天安

门金水桥、十三陵陵寝石刻等。

### （三）接触热变质岩类

接触热变质作用形成的岩石为接触热变质岩。它是岩浆体上侵定位后携带热能而烘烤周围岩石导致围岩结构、构造和矿物组成发生变化所形成的新岩石。接触热变质岩与原岩在化学成分上基本保持一致。

接触热变质岩的分类命名基本上与区域变质岩相同。但是，在接触热变质作用下，一些钙质和泥质原岩会形成一种质地均一、结构紧密的块状构造岩石，为此给此类岩石定名为角岩。角岩可为基质为隐晶的斑状结构，也可为等粒结构。

### （四）混合岩类

混合岩形成于混合岩化作用。混合岩化作用可分为区域性混合岩化和局部性混合岩化两种类型。区域性混合岩化是区域变质作用的继续，形成的混合岩分布于区域变质岩内。局部性混合岩化仅与区域变质岩形成后的晚期侵入体有关仅分布于侵入体的边缘。

混合岩由两部分组成：一为脉体；一为基体。脉体是局部熔融过程中形成的熔体，它的主要组成为长石和石英，因为变质岩发生局部熔融时，长石和石英这类低熔点的矿物可转变为熔体。基体为部分熔融变质岩后留下的固态残留物，如片麻岩、片岩等。

混合岩根据其基体和脉体的量比和构造特征可划分为混合岩、混合片麻岩和混合花岗岩三大类。

#### 1.混合岩类

这类岩石的特点是脉体含量较少，小于 50%，基体中矿物受交代作用不强烈，脉体和基体之间有较明显的界线而使之黑白分明，浅色部分代表后来加入的长石石英质的脉体，暗色部分为区域变质原岩经部分熔融后保存的残余，如斜长角闪岩、黑云母片麻岩等。该类混合岩根据脉体含量可分为混合岩化的岩石（脉体含量 < 15%）和注入混合岩（脉体含量 15%~50%）。

#### 2.混合片麻岩类

这类混合岩的特点是基体含量很少，脉体含量大于 50%，因强烈交代作用，

脉体和整体也无明显的界线而形成一种较均匀的片麻状构造，其成分与花岗岩相似，但片麻构造还较明显，暗色矿物分布不均匀，其较集中部分有时能大致反映原岩的基本轮廓。

### 3.混合花岗岩类

这类混合岩的特点是混合岩化程度最彻底，此时脉体和基体已经分离不出来了，其岩石特征与岩浆成因的花岗岩极为相似。在我国有两处石窟寺及石刻开凿于此岩性中。

#### （五）交代变质岩类

交代变质岩是接触交代变质作用和气—液变质作用形成的岩石总称，在变质过程中原岩体系存在物质成分的带进和带出，形成的变质岩不仅在矿物成分和结构构造上发生改变，更重要的是，新形成的岩石在化学成分上也发生很大的变化。

## 2.2.4 中国石窟寺及石刻的主要岩性及分布特征

我国位于亚洲东部，太平洋西岸，大地构造位于欧亚板块的东南缘，与太平洋板块和冈底斯—印度板块相接。各地地质环境差异较大，地史发展不同，区域地质各具特色。总体而言，地层发育齐全，沉积类型多样；地质构造复杂，活动带与稳定区并存；岩浆活动频繁，地史演化漫长；变质作用类型多样，变质程度各异。中国是全球具有重要地质特色的地区之一，因此我国石窟寺及石刻岩石类型的种类丰富，涵盖了岩石的三大类型。本节将对我国这三大类岩石中的代表文物类型及分布作简单介绍。

### 一、沉积岩

#### （一）砂岩

如前所述，据中国文物研究所黄克忠先生指出，我国开凿在砂岩夹薄层泥岩、页岩的石窟约占我国石窟总数的80%以上。这一研究结论表明砂岩类文物岩石材料是我国使用最多的岩石类型之一。通过对我国砂岩类石窟、摩崖造像及摩崖石刻分布空间的研究，我们发现其分布主要集中在以下三个区域：

#### 1.西南川渝地区

该区域的石质文物主要是利用侏罗系和白垩系砂岩雕凿而成。如四川乐山

大佛由白垩系夹关组 ( $K_{3p}$ ) 紫红色长石石英砂岩雕刻而成；如重庆市大足石刻北山造像群雕凿于侏罗系上统蓬莱镇组 ( $J_{3p}$ ) 和遂宁组 ( $J_{3s}$ ) 紫灰至紫红色厚层块状泥质、钙质胶结长石石英砂岩中。在该区域中除了保存了许多在天然岩体上雕刻的石刻外，还保存了大量古代先民利用当地砂岩类岩石材料建造的建筑物和构筑物。如四川雅安的高颐阙、重庆忠县的无铭阙和丁房阙，这些都是我国仅存的珍贵的汉代地面遗存。

## 2.西北陕甘宁地区

该区域的石质文物主要是利用白垩系砂岩雕凿而成。如甘肃泾川南石窟寺开凿在白垩系紫红色泥质胶结的长石石英砂岩中；甘肃庆阳北石窟寺开凿在白垩系土黄色细粒泥质胶结的长石石英砂岩中。除甘肃省外，如陕西彬县大佛也开凿在白垩系洛河组 ( $K_{1z}$ ) 紫红色中粗粒砂岩中。

## 3.华北地区山西省

该区域最具代表性的砂岩类石质文物是大同云冈石窟，它开凿在侏罗系云冈组土黄色中粗粒长石石英杂砂岩中。该区域属于这一岩性中雕凿的石刻还有太原的龙山和天龙山石窟等。

### (二) 碳酸盐岩

以碳酸盐岩为材料的多为可移动的历代碑刻，如河南洛阳关林的北魏常岳造像碑；而野外大型的不可移动石质文物可分为北方和南方两个区域来叙述。

#### 1.北方地区

北方地区最具代表性的碳酸盐岩类大型不可移动石质文物是位于河南洛阳市的龙门石窟。龙门石窟主要开凿在中、上寒武系灰岩、白云岩形成的地层中。除此之外，该区域代表性的还有位于河北邯郸市开凿在中奥陶系灰岩和白云质灰岩地层中的南响堂石窟、和开凿在寒武系厚层鲕状灰岩地层中的北响堂石窟。

#### 2.南方地区

(1) 长江上游如重庆奉节瞿塘峡壁题刻、重庆巫山楚蜀鸿沟题刻。属三叠系下统嘉陵江组灰至深灰色中厚—厚层状白云质灰岩地层，隐晶质，岩质致密坚硬。

(2) 长江下游如江苏镇江焦山石刻、南京栖霞山南朝造像及南朝陵墓石刻、

浙江杭州飞来峰造像。

(3) 广西桂林桂海碑林及宁明花山岩画。广西桂林桂海碑林石刻雕刻于泥盆系东村组灰岩中；宁明花山岩画所属地层及岩性为石炭系上统黄龙组生物碎屑灰岩。

## 二、火成岩

在地质历史上，我国是个多旋回岩浆活动的国家，所以不同时代的岩浆岩广泛发育。我国海相和海陆交互相火山岩多出现于三叠纪以前，主要分布于我国的西部；而陆相火山岩则多出现于三叠纪以后，主要分布于我国东部。岩浆岩的种类众多，从镁铁质到酸性、碱性火山岩均有出露，尤以中、酸性岩类分布最广。

### (一) 侵入岩

侵入岩类的岩石最具代表性的是花岗岩。北方地区如吉林通化集安市高句丽时期的墓葬和城墙便大量使用了花岗岩作为当时的建筑材料。如将军坟和太王陵所用石材岩性就是二长花岗岩和石英二长花岗岩。再如黑龙江阿城亚沟石刻雕刻在细粒黑云母二长花岗岩上。岩性为中细粒黑云石英闪长岩的山东泰安泰山经石峪石刻也是该类型的代表。而南方地区具代表的地区在福建。如泉州九日山石刻（图 2-3）、老君造像、洛阳桥、开元寺西塔均是以花岗岩建造或雕刻的。



图 2-3 泉州九日山



图 2-4 牡丹江渤海上京龙泉府遗址

图 2-5 海南澄迈美榔双塔燃灯幢石刻

### (二) 喷出岩

在我国该类型岩石的作为文物建筑材料最具代表的岩性是玄武岩。主要在公元 8~10 世纪东北地区渤海国时期从当地地层中开采被当作建筑材料使用，现在在黑龙江牡丹江宁安上京龙泉府遗址、吉林延吉和龙西古城遗址和琿春八连城遗址中还能见到遗留至今的当时的玄武岩建筑构件。尤其是在宁安上京龙泉府遗址上还保留了一座十分珍贵的以玄武岩雕刻的渤海时期的燃灯幢（图 2-4）。南方，海南省澄迈县美榔双塔为气孔状玄武岩建造（图 2-5）。

### (三) 火山碎屑岩

该类岩性的文物北方以辽宁义县万佛堂石窟（图 2-6）为代表。岩性为凝灰岩；与之岩性相同，南方则以浙江余杭南山造像（图 2-7）、浙江绍兴柯岩造像为代表。除此之外，代表性的还有吉林通化集安好太王碑，岩性为凝灰角砾岩（图 2-8）。

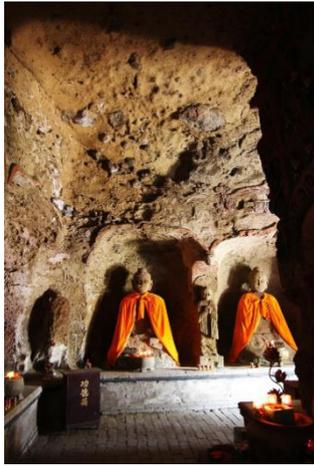


图 2-6 辽宁义县万佛堂石窟

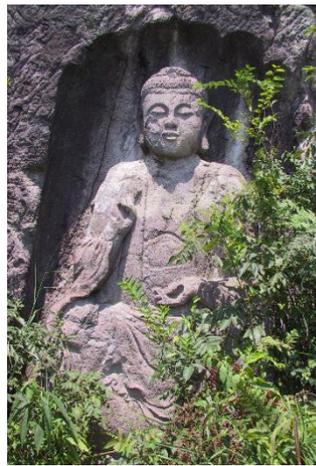


图 2-7 浙江余杭南山造像



图 2-8 吉林集安好太王碑

### 三、变质岩类

我国前寒武纪的变质岩系（带）主要分布在三个前寒武纪地块内。加里东期和华力西期变质带主要分布在几个前寒武纪地块的边缘外侧。印支期变质带受特提斯构造域的控制，主要出现在松潘—甘孜变质带、滇西变质带和秦岭—大别山变质带。燕山期和喜马拉雅期变质带明显受到印度板块向北俯冲碰撞和太平洋板块向欧亚板块俯冲的控制，构成双变质带。因此我国变质岩种类很丰富，但是由于变质岩，特别是动力变质岩由于在变质作用下，对岩石的原结构造成了破坏，许多类型的变质岩易破碎，不易雕凿成型，所以古人很少选择它们作为雕刻所用石材。据不完全统计，目前我们发现石窟寺及石刻中的变质岩有大理岩、混合花岗岩和片麻岩三类。

#### （一）大理岩

我国最具代表性的大理岩类的石窟寺及石刻是河南安阳灵泉寺石窟。该石窟所在地层为奥陶系下统中马家沟组的碳酸盐岩类，以深灰色巨厚层、厚层结晶灰岩和白云质灰岩为主，夹灰黄色薄层、中薄层白云岩和泥质白云岩。结晶

灰岩岩性致密、坚硬，性脆，有的呈花斑状结构。由于燕山期闪长岩体呈岩株状侵入其间。与闪长岩体接触处的灰岩，受热接触变质作用而成乳白色大理岩，因此造成石窟西区岩性为碳酸盐岩，如大住圣窟；而东区岩性为厚层白色中、细晶大理岩，如大留圣窟（图 2-9）。该石窟的地层分布特点也说明了大理岩的形成机理。



图 2-9 河南安阳灵泉寺大留圣窟

## （二）混合花岗岩

混合花岗岩是由强烈混合岩化作用形成的外表类似花岗岩的一种变质岩，是混合岩化作用和花岗岩化作用的最终产物，这时基体与脉体已无法分辨，岩性较均匀，其与岩浆成因的花岗岩类极为相似，但混合花岗岩与正常岩浆成因的花岗岩相比有以下不同：混合花岗岩往往向四周渐变为其他类型的混合岩，与围岩没有明显的侵入接触关系；混合花岗岩的岩性不均匀，结构变化较大，有时可见非岩浆成因的矿物如堇青石、石榴石等；混合花岗岩中交代结构普遍发育，没有明显的相带等。混合花岗岩局部仍可见残留阴影构造和不明显的片麻状构造（或线状构造），有时可见有变质岩的残留体，其片理产状与混合花岗岩的片麻理及围岩的产状基本一致。在显微镜下可见有各种交代结构。它是混合岩化作用最强烈时的产物，可以由渗透交代作用所形成，也可以是由重熔作用所形成。该类型岩性最具代表性的大型野外不可移动石质文物是位于江苏连云港市的孔望山摩崖造像（图 2-10）和将军崖岩画（图 2-11），其所处地层为元古界胶南群旬山组。



图 2-10 连云港孔望山摩崖造像



图 2-11 连云港将军崖岩画

### (三) 片麻岩

片麻岩是一种主要由长石、石英矿物组成，具有中粗粒变晶结构和片麻状或条带状构造的变质岩。该类型岩性最具代表性的大型野外不可移动石质文物是位于安徽安庆市的潜山石刻（图 2-12），其所处地层为太古界大别山群，岩性以黑云二长片麻岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩及钾长片麻岩为主。



图 2-12 安徽安庆潜山石刻

### 四、小结

综上所述，我国石窟寺及石刻主要分布于东、中部的华北地台和扬子地台两大构造单元内，该两个构造单元在地质时期内地壳运动相对平稳，岩体完整性较好，而且广泛分布有易于雕凿的砂岩和碳酸盐岩等沉积岩类；在大兴安岭—吉黑褶皱带和东南褶皱带内的岩浆岩地区也有少量石质文物分布；变质岩类石质文物主要分布或原材料采自于大理岩地区。我国代表性石窟寺及石刻岩性类型详见表 2-11。

表 2-11 中国代表性石窟寺及石刻岩性一览表

序号	名称	地点	年代	地层	岩性
沉积岩					
S	陆源碎屑岩				
S-1	莫高窟	甘肃敦煌	北魏—元	中更新统酒泉组	半胶结砾岩

	云冈石窟	山西大同	北魏	侏罗系云冈组	土黄色中粗粒长石石英杂砂岩
S-2	乐山大佛	四川乐山	唐	白垩系夹关组	紫红色长石石英砂岩
S-3	大足石刻	重庆	唐、宋—明清	侏罗系上统蓬莱镇组和遂宁组	紫灰至紫红色厚层块状泥质、钙质胶结长石石英砂岩
S-4	南石窟寺	甘肃泾川	北魏	白垩系	紫红色泥质胶结的长石石英砂岩
S-5	北石窟寺	甘肃庆阳	北魏—清	白垩系	土黄色细粒泥质胶结的长石石英砂岩
S-6	炳灵寺石窟	甘肃永靖	西秦—明	白垩系	岩屑长石石英砂岩。
S-7	马蹄寺石窟	甘肃张掖	十六国—明清	第三系上岩组	黄—红色砂岩
	榆林窟	甘肃安西	北魏—元	中更新统酒泉组	砾石层
S-8	须弥山石窟	宁夏固原	十六国、前秦、北朝—唐宋、西夏、元、明	第三系寺口子组	砖红色细粒长石砂岩
S-9	龙山石窟	山西太原	元	侏罗系云冈组	土黄色中粗粒长石石英杂砂岩
S-10	天龙山石窟	山西太原	东魏—明	侏罗系云冈组	土黄色中粗粒长石石英杂砂岩
S-11	彬县大佛	陕西彬县	北朝、唐	白垩系洛河组	紫红色中粗粒砂岩
S-12	巩县石窟	河南巩义	北魏、唐	三叠系延长群	黄色细粒长石砂岩
S-13	仙佛寺石窟	湖北来凤	唐	白垩系东湖组	褐红—砖红色纹层状中厚—巨厚层钙质粉砂岩
S-14	通天岩摩崖造像	江西赣州	唐、宋—民国	白垩系上统南雄组	泥质和钙质砂岩
S-15	皇泽寺摩崖造像	四川广元	北朝、隋唐、五代	侏罗系遂宁组	紫红色中厚层石英砂岩
S-16	千佛崖造像	四川广元	北朝、隋唐、五代	侏罗系沙溪庙组	浅灰色中厚层石英砂岩
S-17	南龕摩崖造像	四川巴中	隋—宋	白垩系苍溪组	紫红色—灰色中厚层长石砂岩
S-18	圆觉洞摩	四川安岳	唐宋	侏罗系	褐黄色—褐红色

	崖造像				薄层状粉砂岩
S-19	卧佛院摩崖造像	四川安岳	唐	侏罗系蓬莱镇组	浅紫红色—浅黄色厚层状长石石英砂岩
S-20	白鹤梁石刻	重庆涪陵	唐—当代	侏罗系新田沟组	黄绿色泥质粉砂岩
S-21	剑川石窟	云南剑川	南诏	白垩系虎头寺组	厚层浅灰、黄灰及淡红色长石石英砂岩、石英砂岩
S-22	麦积山石窟	甘肃天水	北魏—明	白垩系	厚层紫红色砂砾岩
S-23	阿尔寨石窟	内蒙古鄂托克旗	北魏—元	白垩系下统志丹群	紫红色含砾砂岩、粉砂岩、泥岩互层
S-24	克孜尔石窟	新疆拜城	公元3—9世纪	第三系上统	灰褐色、灰黄色砂岩夹泥岩
S-25	库木吐喇石窟	新疆库车	南北朝后期至盛唐	第三系上统	砂岩、砾岩、泥岩互层
C	碳酸盐岩				
C-1	龙门石窟	河南洛阳	北魏、唐宋—明清、民国	中、上寒武系	灰岩、白云岩
C-2	北响堂石窟	河北邯郸	北齐	寒武系	厚层鲕状灰岩
C-3	南响堂石窟	河北邯郸	北齐	中奥陶系	灰岩和白云质灰岩
C-4	灵泉寺石窟西区	河南安阳	东魏、北齐、隋唐、宋	奥陶系马家沟组	灰—深灰色巨厚层、厚层结晶灰岩和白云质灰岩
C-5	飞来峰造像	浙江杭州	五代、宋、元、明	石炭系船山组	灰色—深灰色生物碎屑灰岩、藻灰结核灰岩
C-6	栖霞山造像	江苏南京	南朝	二叠系栖霞组	灰—黑色厚层灰岩
C-7	南朝陵墓石刻	江苏南京、丹阳	南朝	三叠系上青龙组	灰—灰黄色泥灰岩
C-8	焦山石刻	江苏镇江	南朝、唐、宋、元、明、清	三叠系上青龙组	三叠系上青龙组灰色薄层—中厚层灰岩
C-9	桂海碑林	广西桂林	宋、元、明、清	泥盆系东村组	浅灰—灰白色亮晶(微晶)粒屑(砂屑)灰岩
C-10	瞿塘峡壁	重庆奉节	宋—民国	三叠系嘉陵江组	灰至深灰色中厚

	题刻				一厚层状白云质灰岩
C-11	千佛崖造像	山东济南	唐—明	石炭系	灰岩
C-12	花山岩画	广西宁明	春秋	石炭系黄龙组	生物碎屑灰岩
火成岩					
I	侵入岩				
I-1	亚沟石刻	黑龙江阿城	金		细粒黑云母二长花岗岩
I-2	经石峪石刻	山东泰安	北齐		中细粒黑云石英闪长岩
I-3	九日山石刻	福建泉州	宋—当代	燕山期	中细粒含黑云母花岗岩
I-4	老君岩造像	福建泉州	宋	燕山早期	二长花岗岩
I-5	千像寺造像	天津	金	燕山期	粗粒花岗岩、中粒黑云母花岗岩、含斑二长花岗岩以及细粒二长花岗岩
T	火山碎屑岩				
T-1	万佛堂石窟	辽宁义县	北魏、明清	白垩系义县组	凝灰岩
T-2	南山造像	浙江余杭	元	白垩系朝川组	玻屑凝灰岩
T-3	柯岩造像	浙江绍兴	隋、唐	白垩系朝川组	角砾凝灰岩
T-4	好太王碑	吉林集安	高句丽		凝灰角砾岩
变质岩					
M-1	灵泉寺石窟东区	河南安阳	东魏、北齐、隋唐、宋	燕山期闪长岩体呈岩株状侵入，接触热变质作用	细粒方解石大理岩
M-2	潜山石刻	安徽安庆	唐—民国	太古界大别山群	黑云二长片麻岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩及钾长片麻岩
M-4	将军崖岩画	江苏连云港	距今约4000年	元古界胶南群旬山组	混合花岗岩
M-5	孔望山摩崖造像	江苏连云港	汉	元古界胶南群旬山组	混合花岗岩

## 2.3 工程地质及水文地质

### 2.3.1 工程地质学

工程地质条件指的是与工程建设有关的地质因素的综合。地质因素包括岩土类型及其工程性能、地质结构、地貌、水文地质、工程动力地质作用等方面，它是一个综合概念。

#### 一、地层岩性

地层岩性是工程地质条件最基本的要素和研究各种地质现象的基础，所以是工程地质条件研究最主要的内容。

#### （一）地质年代与地层的概念

地质学表示地质年代的方法有两种。相对地质年代和同位素地质年龄。相对地质年代的确定主要是依据岩层的沉积顺序、生物演化和地质体之间的相互关系，即地层层序律、生物演化律和地质体之间的切割律。相对地质年代主要是根据生物界的发展和演化（以化石为根据），把整个地质历史划分为一些不同的历史阶段，借以展示时间的新老关系。它只表示顺序，不表示各个时代单位的长短。同位素地质年龄则主要是利用岩石中某些放射性元素的蜕变规律，以年为单位来测算岩石形成的年龄。现在已经根据大量已知相对地质年代的绝对年龄，明确了各相对地质年代的具体时间长短，使地质时间的概念更为完善。实际上，现在使用的相对地质年代，已经具有相应的绝对年龄了。

地层划分、对比的结果可以产生一个地区甚至全球的地层系统。地层系统包括两个要素：①组成地层序列的各种地层单位；②这些单位之间的相互级别关系。

利用地质学方法，对全世界地层进行对比研究，综合考虑到生物演化阶段、地层形成顺序、构造运动及古地理特征等因素，把地质历史划分为四大阶段，每个大阶段叫宙，即冥古宙、太古宙、元古宙和显生宙。宙以下分为代。太古宙分为古太古代和新太古代；元古宙分为古元古代、中元古代和新元古代；显生宙分为古生代、中生代和新生代。代以下分为纪，如中生代分为三叠纪、侏罗纪、白垩纪。纪以下分为世，每个纪一般分为早、中、晚三个世，但是震旦

纪、石炭纪、二叠纪、白垩纪按早、晚二分。最小的地质时代单位是期。宙、代、纪、世、期是国际上统一规定的相对地质年代单位。每个年代单位有相应的时间地层单位，表示在一定年代中形成的地层。地质年代单位与时间地层单位具有一一对应关系（表 2-12）。

**表 2-12 地质年代单位与时间地层单位对照表**

地质年代单位	时间地层单位
宙 (eon)	宇 (eonothem)
代 (era)	界 (erathem)
纪 (period)	系 (system)
世 (epoch)	统 (series)

因此，显生宙时期形成的地层称为显生宇；古生代时期形成的地层称为古生界；奥陶纪时期形成的地层称为奥陶系等，如此类推。

岩石地层单位是物质性地层单位系统中最常用的代表，主要根据地层的岩性特征进行划分、对比，建立起不同级别的完整地层系统。岩石地层单位分为四级，即群、组、段、层。组是地质调查和区域填图中最重要的基础岩石地层单位。组的含义在于具有岩性、岩相和变质程度的一致性。

经过对全世界，特别是一些重要地区的地层划分、对比研究，以及对各时代岩石进行同位素年龄测定所积累的资料综合分析，已建立了统一的地质年代表（表 2-13）。表中综合表示了各种相对地质年代单位的先后顺序及相应的同位素地质年龄和生物演化总特征。

表 2-13 地质年代表

相 对 年 代				同位素年龄 (Ma)	生 物			
宙(宇)	代(界)	纪(系)	世(统)		植物	动物		
显生宙 (宇) PH	新生代 (界) K <sub>z</sub>	第四纪(系) Q		全新世 (统) Q <sub>h</sub> 更新世 (统) Q <sub>p</sub>	1.64(2.48)	被子植物	哺乳动物	
		第三纪 (系) R	晚第三纪(系) N	上新世 (统) N <sub>2</sub> 中新世 (统) N <sub>1</sub>				23.3
			早第三纪(系) E	渐新世 E <sub>3</sub> 始新世 (统) E <sub>2</sub> 古新世 E <sub>1</sub>				
	中生代 (界) M <sub>z</sub>	白垩纪(系) K		晚(上) 白垩世(统) K <sub>2</sub> 早(下) K <sub>1</sub>	65.0	裸子植物	爬行动物 (恐龙)	
		侏罗纪(系) J		晚(上) J <sub>3</sub> 中(中) 侏罗世(统) J <sub>2</sub> 早(下) J <sub>1</sub>				135(140)
		三叠纪(系) T		晚(上) T <sub>3</sub> 中(中) 二叠世(统) T <sub>2</sub> 早(下) T <sub>1</sub>				208.0
	古生代 (界) P <sub>z</sub>	晚 (上) 古生代 (界) P <sub>z2</sub>	二叠纪(系) P		晚(上) P <sub>2</sub> 早(下) 二叠世(统) P <sub>1</sub>	250.0	孢子植物	爬行动物
			石炭纪(系) C		晚(上) 石炭世(统) C <sub>2</sub> 早(下) C <sub>1</sub>	290.0		两栖动物
			泥盆纪(系) D		晚(上) D <sub>3</sub> 中(中) 泥盆世(统) D <sub>2</sub> 早(下) D <sub>1</sub>	362(355)		鱼
		早 (下) 古生代 (界) P <sub>z1</sub>	志留纪(系) S		晚(上) S <sub>3</sub> 中(中) 志留世(统) S <sub>2</sub> 早(下) S <sub>1</sub>	409.0	藻类	无脊椎动物
			奥陶纪(系) O		晚(上) O <sub>3</sub> 中(中) 奥陶世(统) O <sub>2</sub> 早(下) O <sub>1</sub>	439.0		
			寒武纪(系) Є		晚(上) Є <sub>3</sub> 中(中) 寒武世(统) Є <sub>2</sub> 早(下) Є <sub>1</sub>	510.0		
			震旦纪(系) Z		晚(上) Z <sub>2</sub> 早(下) 震旦世(统) Z <sub>1</sub>	570.0		
	元古宙 (宇) PT	新元古代 (界)Pt <sub>3</sub>			800.0	菌藻类		
中元古代 (界)Pt <sub>2</sub>			1 000.0					
古元古代 (界)Pt <sub>1</sub>			1 800.0					
太古宙 (宇)AR	新太古代 (界)Ar <sub>2</sub>			2 500.0				
	古太古代 (界)Ar <sub>1</sub>			3 100.0				
冥古宙 (宇)HD			地球发展初始阶段(?)	3 850.0				

(据王鸿祯、李光岑编译的1990年9月由地质出版社出版的《国际地层时代对比表》资料编)

## 二、地质构造

地质构造对于所在区域的地壳稳定性、场地稳定性和工程岩土体稳定性而

言，都是极为重要的因素；而且它控制着地形地貌、水文地质条件和不良地质现象的发育和分布。所以地质构造是工程地质条件研究的最重要的内容之一。地壳中的岩层，在地壳运动的影响下，发生变形或变位，使岩层倾斜、褶皱、断开形成各种构造形态，称为地质构造。因此，地质构造是地壳运动的产物。

### （一）岩层及其产状

具有层状构造的岩石统称为岩层（stratum）。层状构造有原生与次生两类。原生层状构造又称层理（bedding），常见于沉积岩及火山岩中。它包括层面及由岩层内部的成分、粒度、结构、胶结物和颜色等特征在剖面上的突变或渐变所显现出来的一种成层性。这种层状构造是在岩石形成过程中产生的。次生层状构造常见于变质岩中，它是由变形变质作用所形成的，如片理、片麻理等。层状构造是反映构造变形的最基本的标志，是确定褶皱和断层等构造的前提。因此，岩层产状的几何定量确定是描述地质构造几何形态的基础。

地壳中任何面状构造（包括层理、节理、断层及一些具有几何意义的结构面，如褶皱轴面等）的空间位态即为产状。它是以其空间的延伸方位及其倾斜程度来确定的，即以走向、倾向和倾角的数据来表示。

### （二）构造运动及其表现

构造运动是指由于地球内部动力引起的组成岩石圈物质的机械运动。构造运动按其运动方向分为两类，即升降运动和水平运动。升降运动是指垂直于地表（即沿地球半径方向）的运动，表现为岩石圈的上升和下降。水平运动指沿平行于地表（即沿地球切线方向）的运动，表现为岩石圈物质水平位移和旋转。

### （三）基本地质构造简介

以下重点介绍地质构造的两种基本类型：褶皱构造和断裂构造。

#### 1. 褶皱构造

褶皱（fold）是地壳上最基本的构造型式。它是由岩石中的各种面（如层面、面理等）的弯曲而显示的变形。

褶皱要素是褶皱的基本组成部分，褶皱要素主要有核、翼、转折端、枢纽、轴面等。褶皱的基本类型有两种，即背斜和向斜。背斜是核部由老地层、翼部由新地层组成的，岩层凸向地层变新方向弯曲的褶皱。向斜是核部由新地层、

翼部由老地层组成的，岩层凸向地层变老方向弯曲的褶皱。一般情况下，在剖面上，背斜表现为地层向上拱起的弯曲，两翼地层自核部向两侧倾斜，而向斜为地层向下拗的弯曲，两翼地层自两侧向核部倾斜。在平面上，经地表风化、剥蚀后露出地的地层，背斜表现为老地层在中间，新地层在两侧，对称出现。

## 2.断裂构造及其分类

地壳中的岩层在力的作用下发生变形，当力达到和超过岩层强度极限时，岩层的连续完整性遭到破坏，在一定方向和一定部位的岩石发生破裂或有显著位移产生了断裂，形成断裂构造。断裂构造主要分为断层和节理两大类。

### (1) 断层

岩层在力作用下产生断裂且断裂面两侧岩块发生了显著位移，这种断裂构造称为断层。断层主要是由地壳运动造成的。它在地壳上分布十分广泛，但规模大小不一。岩层被断层断开后，其连续完整性受到了破坏，断裂面两侧岩石破碎，出现破碎带，所以这对工程地质和水文地质都会产生重大影响。因此对断层的研究至关重要。断层要素主要包括断层面、断层线、断盘、断距等。断层根据断层两盘相对位移的方向进行分类，主要分为正断层、逆断层和平移断层三类。正断层：上盘相对下降，下盘相对上升的断层，称为正断层。逆断层：上盘相对上升，下盘相对下降的断层，称为逆断层。平移断层：断层两盘顺断层走向相对位移的断层，称为平移断层。

### (2) 节理

这是由于岩石受力而出现的裂隙，但裂开面的两侧没有发生明显的位移，地质学上将这类裂缝称为节理，在岩石露头上，到处都能见到节理。节理按成因可分为原生节理和次生节理两大类。原生节理是指成岩过程中形成的节理。例如沉积岩中的泥裂，火山熔岩冷凝收缩形成的柱状节理，岩浆入侵过程中由于流动作用及冷凝收缩产生的各种原生节理等。次生节理是指岩石成岩后形成的节理，又可分为构造节理和非构造节理两类。

节理的调查测量和研究是石窟寺及石刻保护工程勘察工作中一项重要内容。节理面产状测量与岩层面产状测量方法相似，可以利用地质罗盘在节理面上测量其走向、倾向、倾角，这是调查中必须掌握的技能。

### 三、不良地质现象

#### （一）地质作用与地质现象的概念

在自然界，有的地壳演变是骤然发生的。例如山崩、地震、火山喷发、洪水等，可以在瞬间发生，造成一定的灾害，但它们不是经常发生的，因此对整个地壳演变，作用不是很大。有些地质作用，则进行很缓慢、一般不易被人们所察觉，如地质构造一节提到的岩石圈的水平运动和升降运动。就是这些极其缓慢的地质作用、在地质历史的长期发展过程中，形成了地壳面貌多次巨大的改变，产生了巨大的影响。由地质营力引起的地球表面形态、内部构造和物质成分发生变化的作用称为地质作用。地质作用所产生的现象称为地质现象。

#### （二）地质作用的分类

地质作用可分成两大类：一类是由地球内部能量引起的，称为内力地质作用；另一类是由地球外部能量引起的，称为外力地质作用。

由地球的内能引起地壳的物质成分、内部构造和地表形态发生变化的地质作用，称为内力地质作用。内力地质作用总的趋势是造成高低不平的地形，使地壳隆起成山脉或凹陷成盆地、洼地。同时伴随地壳运动的进行，产生岩浆活动和变质作用、从而形成各种岩浆岩、变质岩及有关矿产。内力地质作用包括地壳运动、岩浆活动、地震作用和变质作用。

外动力地质作用主要发生在地球表层，由地球以外的能源引起的地质作用，称为外力地质作用。外力地质作用同样改变地壳面貌、但作用的总的趋势和内力地质作用相反，是削平高山，并把破坏下来的产物搬运到低洼的地方沉积下来、使地球表面趋于平坦。同时，在外力地质作用的进行过程中，也是沉积岩及沉积矿产形成的过程。

外力地质作用包括风化作用、剥蚀作用、搬运作用、沉积作用、负荷地质作用和固结成岩作用。

#### （三）不良地质现象的概念

由地球内、外营力共同作用所产生的、对工程建设造成危害的地质作用和现象，称为不良地质现象，也称为物理地质现象。自然界中，对工程建设造成危害的地质作用和现象很多，如断层、滑坡、崩塌、岩溶、潜蚀、地震、泥石流

流、风化、冻胀、融陷、地表侵蚀等。下面就其中几个我们常见的现象做一个简单介绍。

### （1）滑坡

滑坡是指斜坡岩土体，沿着贯通的剪切破坏面（带）整体产生以水平运动为主的滑移现象。整体运动的岩土体称为变位体或滑坡体，下伏未移动的岩（土）体称为滑床。

### （2）崩塌

崩塌是斜坡岩土体被陡倾的拉裂面破坏切割，突然脱离母体，发生以垂直运动为主的坠落现象。

### （3）岩溶

地下和地表水对可溶性岩石的破坏和改造作用为岩溶作用，这种作用及其所产生的现象可统称为岩溶，国际上统称为喀斯特。多发生在碳酸盐岩地区。

### （4）泥石流

泥石流是指在山区因暴雨、暴雪或其他自然灾害诱发的一种携带大量泥砂以及石块的暂时性特殊洪流。

### （5）地震

地震又称地动、地振动，是地壳快速释放能量过程中造成的振动，期间会产生地震波的一种自然现象。地球上板块与板块之间相互挤压碰撞，造成板块边沿及板块内部产生错动和破裂，是引起地震的主要原因。地震开始发生的地点称为震源，震源正上方的地面称为震中。破坏性地震的地面振动最烈处称为极震区，极震区往往也就是震中所在的地区。地震常常造成严重的文物损毁，还可能造成海啸、滑坡、崩塌、地裂缝等次生灾害。

地震的震级和烈度，是衡量地震强度，即地震大小和对建筑物破坏程度的标准尺度。两者含义不同，但有密切关系。震级是衡量地震本身大小的尺度，用地震所释放的等量大小来衡量。烈度是衡量地震所引起的地面震动程度的尺度。它不仅取决于地震能量，同时还取决于震源深度、震中距、地质传播介质的性质等因素。所以一次地震只有一个震级，但地震造成的各地的烈度是不同，一般情况，离震中近的地方烈度高，破坏严重；远的地方烈度低，破坏轻微。

## （二）研究目的及内容

不良地质现象的研究目的是为了评价场地稳定性，并预测其对文物本体、环境及保护工程的不良影响。由于不良地质现象直接影响文物的安全及保护工程技术措施的可行性、可靠性，所以对工作区（保护区或建设控制地带）内影响文物本体及保护工程的各种不良地质现象必须详细研究。

### 2.3.2 水文地质学

水文地质条件（Hydrogeological condition）是指有关地下水形成、分布和变化规律等条件的总称。包括地下水的补给、埋藏、径流、排泄、水质和水量等。

#### 一、地下水的分类与赋存

岩土空隙既是地下水的储容场所，又是地下水的运动通路。空隙的多少、大小、形状、连通情况及其分布特点等，通常把这些统称为岩土的孔隙性。它对地下水分布、埋藏与运动具有重要的控制意义。

##### 1. 岩土中的空隙及分类

将岩石空隙作为地下水储容场所与运动通路研究时，可以分为松散岩土中的孔隙、坚硬岩石中的裂隙以及易溶岩层中的溶穴（隙）。

##### （1）孔隙

松散岩土是由大大小小的颗粒组成的，在颗粒或颗粒的集合体之间普遍存在空隙；空隙相互连通，呈小孔状，故称作孔隙。

孔隙大小对地下水的运动影响极大。孔隙通道最细小的部分称作孔喉，最宽大的部分称作空腹。孔喉对水流动的影响更大，讨论孔隙大小时可以用孔喉直径进行比较。影响孔隙大小的主要因素是颗粒大小，颗粒大则孔隙大，颗粒小则孔隙小。需要注意的是，对分选不好、颗粒大小悬殊的松散岩土来说，孔隙大小并不取决于颗粒的平均直径，而主要取决于细小颗粒的直径。除此以外，孔隙大小还与颗粒排列方式、颗粒形状以及胶结程度有关。

##### （2）裂隙

固结的坚硬岩石，包括沉积岩、岩浆岩与变质岩，其中不存在或很少存在颗粒之间的孔隙；岩石中的空隙主要是各种成因的裂隙，即成岩裂隙、构造裂

隙与风化型隙。成岩裂隙是岩石形成过程中由于冷却收缩（岩浆岩）或固结干燥（沉积岩）而产生的。成岩裂隙在岩浆岩中较为发育，如玄武岩的柱状节理便是。构造裂隙是岩石在构造运动过程中受力产生的，各种构造节理、断层即是。风化裂隙是在各种物理的与化学的因素的作用下，岩石遭破坏而产生的裂隙。裂隙发育一般并不均匀，即使在同一岩层中，由于岩性、受力条件等的变化，裂隙率与裂隙张开程度都会有很大差别。因此，进行裂隙率测量应当注意选择有代表性的部位，并且应当明了某一裂隙率测量结果所能代表的范围。

### （3）溶穴（隙）

易溶沉积岩，如碳酸盐岩、岩盐、石膏等，由于地下水的溶蚀会产生空洞，这种空隙就是溶穴。岩溶发育极不均匀。大者可宽达数百米、高达数十米乃至上百米、长达数十公里或更多，小的只有几毫米直径，并且，往往在相距极远处岩溶率相差极大。例如，在具有同一岩性成分的可溶岩层中，岩溶通道带的岩溶率可以达到百分之几十，而附近地区的岩溶率可能几乎是零。

## 2. 岩石中的水分

地壳岩石中存在着各种形式的水。存在于岩石空隙中的有结合水及重力水，另外还有气态水和固态水以及组成岩石矿物中的矿物结合水。水文地质条件重点研究对象是岩土空隙中的水。

### （1）结合水

松散岩土的颗粒表面及坚硬岩石空隙壁面均带有电荷。水分子是偶极体，在电场作用下，一端带正电，另一端带负电，如图 2-13（a）。由于静电吸引作用，固相表面（包括颗粒及岩石裂隙与洞穴壁面）便吸附水分子。根据库仑定律，电场强度与距离平方成反比。离表面很近的水分子，受到强大的吸力，排列十分紧密。随着距离增大，吸力逐渐减弱，水分子排列较为稀疏。受到固相表面的吸引力大于其自身重力的那部分水便是结合水。结合水束缚于颗粒表面及隙壁上，不能在自身重力影响下运动，如图 2-13（b）。

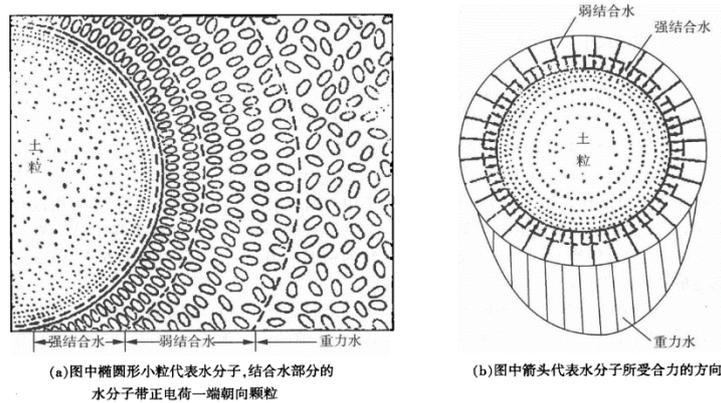


图 2-13 结合水与重力水

最接近固相表面的水叫强结合水，其厚度相当于几个、几十个或上百个水分子直径。其所受吸引力可相当于 10000 个大气压。密度平均为  $2\text{g} / \text{cm}^3$  左右，溶解盐类能力弱， $-78^\circ\text{C}$  时仍不冻结，并像固体那样，具有较大的抗剪强度，不能流动，但可转化为气态水而移动。结合水的外层，称作弱结合水，厚度相当于几百或上千个水分子直径，固体表面对它的吸引力有所减弱。密度较大，具有抗剪强度；粘滞性及弹性均高于普通液态水，溶解盐类的能力较低。弱结合水的抗剪强度及粘滞性是由内层向外逐渐减弱的。当施加的外力超过其抗剪强度时，其外层的水分子即发生流动。施加的力愈大，发生流动的水层厚度也愈大。

结合水区别于普通液态水的最大特征是具有抗剪强度，即必须施加一定的力方能使其发生变形。结合水的抗剪强度由内层向外层减弱。当施加的外力超过其抗剪强度时，外层结合水发生流动。施加的外力变大，发生流动的水层厚度也加大。

## (2) 重力水

距离固体表面更远的那部分水分子，重力对它的影响大于固体表面对它的吸引力，因而能在自身重力影响下运动，这部分水就是重力水。

重力水中靠近固体表面的那一部分，仍然受到固体吸引力的影响，水分子的排列较为整齐。这部分水在流动时呈层流状态，而不作紊流运动。远离固体表面的重力水，不受固体吸引力的影响，只受重力控制。这部分水在流速较大时容易转为紊流运动。岩土孔隙中的重力水能够自由流动。井泉取用的地下水，都属于重力水，是水文地质条件研究的主要对象。

### (3) 气态水

气态水即水蒸气，它和空气一起分布于包气带岩土空隙中。它来源于大气中的水汽与液态地下水的蒸发。气态水可以随空气的流动而运动，即便是空气不流动时，气态水本身亦可发生迁移，由绝对湿度大的地方向绝对湿度小的地方迁移。当岩土空隙内空气中水汽增多而达到饱和时，或当温度变化而达到露点时，水汽开始凝结，成为液态水。气态水与大气中的水汽常保持动平衡状态而互相转移。气态水在一处蒸发，在另一处凝结，对岩石中水的重新分布有一定的影响。

### (4) 毛细水

松散沉积物中的细小孔隙通道有如自然界的毛细管，储存于松散沉积物毛细孔隙和岩石细小裂隙中的水称为毛细水。这种水一方面受重力作用，另一方面受毛细力作用。根据毛细水在包气带岩土空隙中与地下水面的关系和充水程度，毛细水可分为以下三种：

1) 支持毛细水：由于毛细力的作用，水从地下水面沿着小孔隙上升到一定高度，在地下水面以上形成毛细水带。此带的毛细水下部有地下水面支持，故称支持毛细水（图 2-14）。毛细水带随地下水面的变化和蒸发作用而变化，但其厚度基本不变。观察表明，毛细带水除了作上述垂直运动外，由于其性质近似重力水，故也随重力水向低处流动，只是运动速度较为缓慢而已。

2) 悬挂毛细水：地下水由细颗粒层次快速降到粗颗粒层次中时，由于上下弯液面毛细力的作用，在细土层中会保留与地下水面不连接的毛细水，这种毛细水称为悬挂毛细水（图 2-14）。

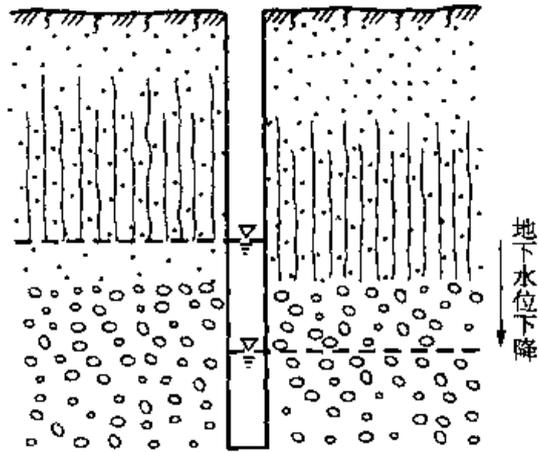


图 2-14 支持毛细水与悬挂毛细水

左侧表示高水位时砂层中的支持毛细水；右侧表示水位降低后砂层中的悬挂毛细水，砾石层中孔隙直径已超过毛细管，故不存在支持毛细水

3) 孔角毛细水：在包气带中颗粒接触点上有许多孔角的狭窄处，水呈个别的点滴状态，在重力作用下也不移动，因为它与孔比壁形成弯液面，结合紧密，将水滞留在孔角处（图 2-15）。

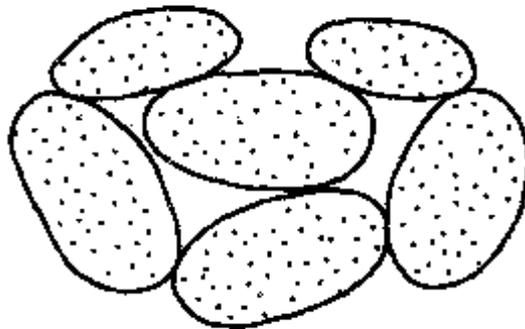


图 2-15 孔角毛细水

#### (5) 固态水

当岩石的温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  时，空隙中的液态水就转化为固态水。我国东北、内蒙古及青藏高原的某些地区，地下水终年以固态水的形态存在，即形成了所谓的多年冰土。

#### (6) 矿物结合水

存在于考古结晶内部或其间的水称为矿物结合水，可分为结构水、结晶水和沸石水。以  $\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$  离子存在于矿物结晶格架的某一个位置的水称为结构水；以水分子  $\text{H}_2\text{O}$  的形式存在于矿物结晶格架的一定位置上的水称为结晶水；以水

分子  $H_2O$  的形式存在于矿物晶胞与晶胞之间的水称为沸石水。一般矿物其所含的结构水或结晶水在数量上是一定的，而沸石水则没有固定的数量。结构水或结晶水在高温下可以从矿物中分离出来，沸石水在常温条件下也可以逸出，逸出的数量取决于温度。

## 二、包气带和饱水带

在松散砂层中挖井，可以发现各种形式的水有一定的分布区间（图 2-16）。刚挖井时，土层看上去是干燥的，其实在空隙中已有气态水，颗粒周围已吸附有结合水；向下挖，土层变得潮湿、颜色发暗，说明已出现毛细水；再向下，土的颜色变得更深更潮湿，毛细水逐渐增多，但井中仍无水，这是因为毛细水的弯液面阻止毛细水流入井中；继续向下挖，不需多久，水便开始渗入井中，出现地下水面，这就是重力水。从出现重力水面开始，以下称为饱水带，土层的所有空隙都充满了水分；以上称为包气带，空隙中以汽态水和结合水为主。

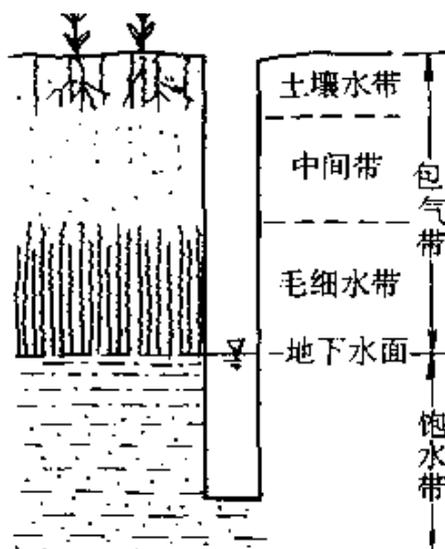


图 2-16 包气带和饱水带

### 1. 包气带

包气带位于饱水带之上，直接与大气圈接触，为岩土、空气和水的三相系统。其中的水有液态和气态两种形式。较大的空隙壁吸附有水膜，较小的和毛细孔隙含有毛细水，在空隙其他部位主要被空气和水汽占据，水汽在充气的空隙内流动，当空隙中的水分超过吸附力和毛细力所能支持的量时，这些水便以重力水的形式下渗到饱水带。颗粒吸附力和固、液界面上的表面张力造成包气

带水的压力小于大气压力而呈现负值。包气带自上而下可分为土壤水带、中间带和毛细水带三带（图 2-17）。

### （1）土壤水带

土壤水带位于包气带顶部。是植物根系活动带，含土壤水，其含量可用土壤含水量  $W$  表示。土壤含水量是土壤中含水体积  $V_n$  和土壤总体积  $V$  之比， $W=V_n/V$  可以用小数或百分数表示。

若土壤具膨胀性，其含水量随含水体积的变化而变化。包气带内的土壤含水量除在雨季降水量较大或农作物灌溉期可暂时性饱水外，大多数时间内处于不饱和状态。只有在补给期水分达到饱和后方能在重力作用下向下部不饱和层运移，直到地下水面，使水位升高。

土壤由于含有较多有机质，具团粒结构，滞留结合水和毛细水。土壤水带的深度，对应于植物根系所及深度，一般不超过数米，但高大乔木根部的排气孔深度可达十余米。

### （2）中间带

中间带又称过渡带，介于土壤水带和毛细水带之间，其厚度变化很大，从零米直到几百米。如地下水面埋探较浅，距地表只有几米，土壤水带可延伸到地面时，不存在中间带；如果地下水面埋藏深，则在土壤水带和毛细带之间存在中间带，地下水面的埋深越大，中间带的厚度也越大。

### （3）毛细水带

由于空气和水界面上的表面张力作用，水可沿地下水面上升形成支持毛细水，在包气带底部构成毛细水带。毛细水带下部饱水，但由于毛细力形成而呈现负压，其压强小于大气压强。由于毛细带内颗粒大小不同，毛细上升最大高度各处不同，因此毛细水带的上缘常具不规则的形状。

## 2. 饱水带

地下水面以下为饱水带，饱水带岩土空隙全部为液态水所充满，既有重力水也有结合水。饱水带内渗透系数  $K$  是一个常数，不随压力水头变化，地下水连续分布，能传递静水压力、能连续运动。饱水带中的重力水是开发利用和疏干排水的主要对象，是水文地质学研究的重点。

### 三、含水层和隔水层

含水层指能够透过并给出相当数量水的岩土层，因此含水层应是空隙发育的具有良好给水性及强透水性的岩土层。如各种砂土、砾石、裂隙和溶穴发育的坚硬岩石。隔水层则是不能透过并给出水或只能透过与给出极少量水的岩层，因此隔水层具有良好的持水性，而其给水性及透水性均不良，如黏土、页岩和片岩等。

#### 1. 含水层的形成的条件

##### (1) 岩土层具有储存重力水的空间

这里所指的主要是各类空隙，即松散岩石的孔隙，坚硬岩石的裂隙和溶穴等。岩石的空隙越大，数量越多，连通性越好，储存和通过的重力水就越多，越有利于形成含水层。如透水性强的砂砾石便是良好的含水层；坚硬砂岩的孔隙虽不发育，但发育构造裂隙和风化裂隙，裂隙成为其主要的储水空间，所以砂岩是含水层。

##### (2) 具备储存地下水的地质结构

具有空隙的岩层还必须有一定的地质构造条件才能储存水。透水层和不透水层组合在一起，才能形成含水地质结构。含水地质结构有两种基本形式：

1) 透水—含水—隔水形式：如大部分松散沉积物和基岩裸露地区，透水层大面积出露地表，接受补给后，沿空隙往下渗透，到隔水层或裂隙不发育的基岩面，便在透水的空隙中积聚、储存起来形成含水层，其上未饱水的部分成为透水不含水层。

2) 隔水—含水—隔水形式。如透水岩层大部为隔水层覆盖，仅在其出露地表的局部范围内方可接受补给，由于下伏有隔水层，水充满整个透水岩层，常具承压性。如山前平原或冲积平原探部的砂砾石透水层、煤系地层中裂隙、溶穴发育的坚硬基岩等均为这种类型的含水层。

##### (3) 具有充足的补给水源

一个含水层的形成除了有储容水的空间和储存水的地质条件外，还应该有一定的补给条件。首先形成含水层的透水岩土层应部分或全部出露地表以便接受大气降水和地表水的补给；或在顶底的隔水层中存在透水天窗或导水断裂等

通道，通过这些通道，可以得到其他含水层补给。充足的补给来源、丰富的补给量是决定含水层水量大小和保证程度的重要因素。否则该岩土层充其量只是一个透水的岩土层而不能形成含水层。

#### 四、地下水分类

地下水这一名词有广义与狭义之分。广义的地下水是指赋存于地面以下岩土空隙中的水；包气带及饱水带中所有含于岩石空隙中的水均属之。狭义的地下水仅指赋存于饱水带岩土空隙中的水。

长期以来，水文地质学着重于研究饱水带岩土空隙中的重力水。随着学科的发展，人们认识到饱水带的水与包气带水有着不可分割的联系，不研究包气带水，许多重大的水文地质问题是无法解决的。因此，本节介绍的是广义地下水角度地分类。

地下水的赋存特征对其水量、水质时空分布有决定意义，其中最重要的是埋藏条件与含水介质类型。

所谓地下水的埋藏条件，是指含水岩层在地质剖面中所处的部位及受隔水层（弱透水层）限制的情况。据此可将地下水分为包气带水、潜水及承压水。按含水介质（空隙）类型，可将地下水区分为孔隙水、裂隙水及岩溶水（表 2-14，图 2-18）。

表 2-14 地下水分类表

含水介质类型 埋藏条件	孔隙水	裂隙水	岩溶水
包气带水	土壤水 局部黏性土隔水层 上季节性存在重力 水（上层滞水）过路 及悬挂毛细水	裂隙岩层浅部季节 性存在的重力水及 毛细水	裸露岩溶化岩层上 部岩溶通道中季节 性存在的重力水
潜水	松散沉积物浅部的 水	裸露于地表的各类 裂隙岩层中的水	裸露于地表的岩溶 化岩层中的水
承压水	山间盆地及平原松 散沉积物深部的 水	构造盆地、向斜构造 或单斜断块的被覆 盖的裂隙岩层中的 水	构造盆地、向斜构造 或单斜断块的被覆 盖的岩溶化岩层中 的水

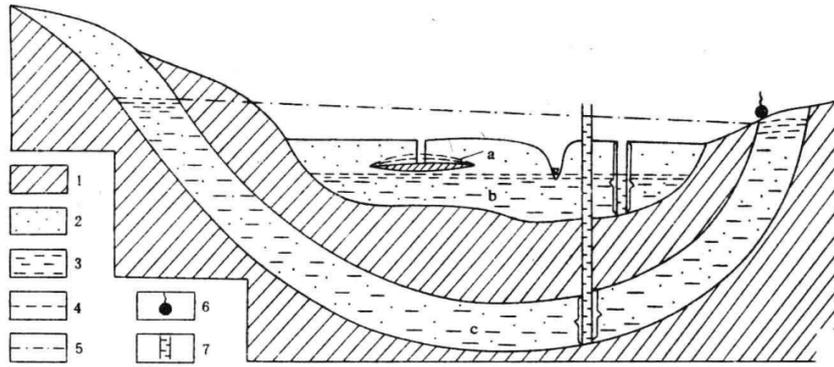


图 2-18 潜水、承压水及上层滞水

1.隔水层；2.透水层；3.饱水部分；4.前水位；5.承压水测压水位；6.泉（上升泉）；7.井（实线表示井壁不进水）；a 上层滞水；b 潜水；c 承压水

### 1.潜水

饱水带中第一个具有自由表面的含水层中的水称作潜水。潜水没有隔水顶板，或只有局部的隔水顶板。潜水的表面为自由水面，称作潜水面，从潜水面到隔水底板的距离为潜水含水层的厚度。潜水面到地面的距离为潜水埋藏深度。潜水含水层厚度与潜水面潜藏深度随潜水面的升降而发生相应的变化(图 2-19)。

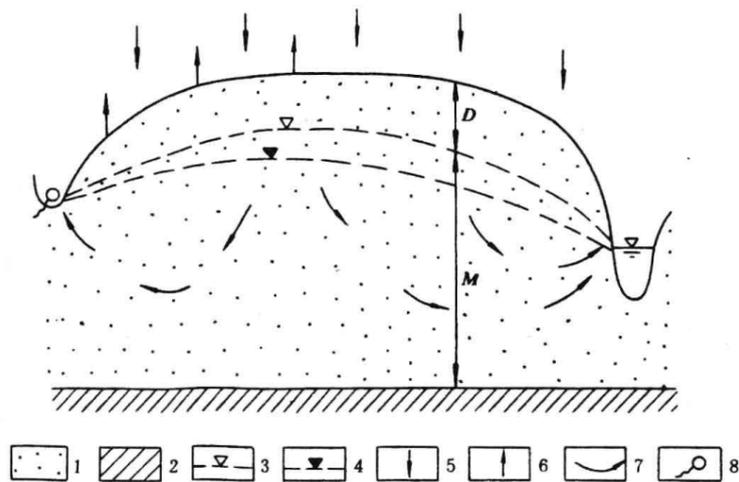


图 2-19 潜水

1.含水层；2.隔水层；3.高水位期潜水面；4.低水位期潜水面；5.大气降水入渗；6.蒸发；7.潜水流向；8.泉

### 2.承压水

充满于两个隔水层（弱透水层）之间的含水层中的水，叫作承压水。承压含水层上部的隔水层（弱进土层）称作隔水顶板，下部的隔水层（弱透水层）称作隔水底板。隔水顶底板之间的距离为承压含水层厚度（图 2-20）。

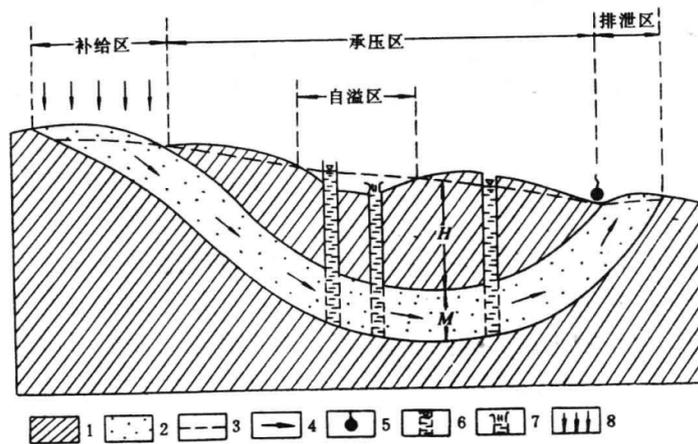


图 2-20 自流盆地中的承压水

1.隔水层；2.含水层；3.潜水位及承压水测压水位；4.地下水流向；5.泉；6.钻孔（虚线为进水部分）；7.自喷孔；8.大气降水补给； $H$ —承压高度； $M$ —含水层厚度

### 3.上层滞水

当包气带存在局部隔水层（弱透水层）时，局部隔水层（弱透水层）上会积聚具有自由水面的重力水，这便是上层滞水。上层滞水分布最接近地表，接受大气降水的补给，通过蒸发或向隔水底板（弱透水层底板）的边缘下渗排泄。雨季获得补充，积存一定水量。旱季水量逐渐耗失。当分布范围小且补给不很经常时，不能终年保持有水。由于其水量小，埋深浅，所以在保护工程中排疏难度较小。

## 五、地下水的补给、排泄与径流

补给与排泄是含水层与外界发生联系的两个作用过程。补给与排泄的方式及其强度，决定着含水层内部的径流，以及水量与水质的变化。这些变化在空间上的表现就是地下水的分布。只有对地下水的补给、排泄、径流建立起清晰的概念，才有可能正确地分析与评价地下水，采取合理有效的兴利防害措施。

### 1.地下水的补给

含水层或含水系统从外界获得水量的过程称作补给。补给除了获得水量，还获得一定盐量或热量，从而使含水层或含水系统的水化学与水温发生变化。补给获得水量，抬高地下水位，增加了势能，使地下水保持不停地流动。由于构造封闭，或由于气候干旱，地下水长期得不到补给，便将停滞而不流动。地下水的补给来源有大气降水、地表水、凝结水，来自其他含水层或含水系统的水等。与人类活动有关的地下水补给有灌溉回归水、水库渗漏水，以及专门性

的人工补给。

## 2.地下水的排泄

含水层失去水量的作用过程称作排泄。在排泄过程中，含水层的水质也发生相应变化。研究含水层的排泄应包括排泄去路及方式、影响排泄的因素及排泄量。地下水通过泉（点状排泄）、向河流泄流（线状排泄）及蒸发（面状排泄）等形式向外界排泄。此外，一个含水层中的水可向另一个含水层排泄。此时，对后者来说，即是从前者获得补给。用井开发地下水或用钻孔、渠道排出地下水，都属于地下水的人工排泄。蒸发排泄仅耗失水量，盐分仍留在地下水中。其他种类的排泄，都用于径流排泄，盐分同水分同时排走。按照补给泉的含水层的性质，可将泉分为上升泉及下降泉两大类。上升泉由承压含水层补给，水流在压力作用下呈上升运动。下降泉由潜水或上层滞水补给，水流作下降运动。

## 3.地下水的径流

地下水由补给区流向排泄区的作用过程称作径流。除某些构造封闭的自流水盆地及地势十分平坦地区的潜水外，地下水都处于不断的径流过程中。径流是联结补给与排泄的中间环节，通过径流，地下水的水量与盐量由补给区传送到排泄区；径流的强弱影响着含水层水量与水质的形成过程。研究地下水的径流应包括径流方向、径流强度、径流量等。

# 六、水文地质学调查方法与内容

## 1.水文地质调查的任务、阶段划分及工作内容

水文地质调查是分阶段进行的，一般划分为普查、初步勘探与详细勘探三个阶段。在水文地质调查的各个阶段中，配合进行水文地质测绘、水文地质勘探、水文地质试验、地下水动态观测以及地球物理勘探，以取得精度与各调查阶段相适应的水文地质资料。

为某种专门目的进行的水文地质调查，一般从第二阶段开始，这种调查称专门性水文地质调查。文物保护单位有关的水文地质调查工作属于专门性水文地质调查。

在水文地质普查工作的基础下，确定需要消除地下水危害的范围，在此范围内，结合具体任务进行初步勘查。在初勘阶段中，除了较大比例尺的水文地

质测绘以外，还需要布置一定数量的水文地质钻探、进行精度较高的水文地质试验及期限较短（一般为一个水文年）的地下水动态观测工作，并为查明导水构造、基岩埋深进行物探工作。其工作成果可以作为防渗疏水工程初步设计的依据。工作结束后，还应提出需要详细研究的地段及至进一步解决的问题，以便设计详勘工作。

工程规模较小，地区条件简单时，初步勘探所获得的资料也可以作为技术设计的依据；工程规模较大，地区条件又比较复杂时，则在初步勘探结束后，需要圈定详细调查的重点地段，提出尚未解决的问题，进行详细勘探，提出技术设计所需的全部水文地质资料与参数。在详细勘探阶段中，勘探试验的工作量应加大，精度要求应提高。图件比例尺依设计要求而定。

## 2. 调查与研究地下水的技术方法简介

近 20 年来，研究地下水所采用的技术方法有了很大发展，其总的发展趋势是定量化、自动化。除了应用历史较长的地球物理勘探方法以外，近年来，在水文地质调查与研究中引入了遥感技术、同位素技术及数学地质。这些新的技术方法不仅能使地下水调查实现高效率、低成本，而且对于水文地质学向定量化的严密科学发展，起着难以估量的推动作用。

### （1）地球物理勘探方法

通过研究地球的各种物理性质而了解地壳地质构造和找矿、找水的方法叫地球物理勘探，简称“物探”。物探在水文地质勘查中起着重要作用，具有效率高、成本低、速度快等优点。在综合水文地质勘查中，一般应遵循在水文地质测绘基础上，先物探后钻探的勘探程序。物探方法也因其探测精度受到各种自然七人为因素的干扰，以及成果的多解性与地区性的局限，其探测成果常需经过钻探的校核。物探的种类很多，如：磁法、重力、电法、地震及放射性等勘探方法，在水文地质勘查中广泛应用的是电法勘探。

电法勘探可分为直流电法（电阻率法、激发极化法、充电法等）和交流电法等。水文地质勘探中得到广泛应用的是电阻率法，包括电侧深法和电测剖面法，在钻探时还常采用电测并法来了解孔下情况。

### （2）水文地质试验

为测定水文地质参数和了解地下水的运动规律而进行的试验工作，叫水文地质试验。水文地质试验分为两类：野外试验和室内试验。其中，野外试验包括：抽水试验、放水试验、水（压水）或渗水试验、连通试验、弥散试验（示踪试验）、流速、流向测定试验等。水文地质试验是水文地质调查中不可缺少的重要手段，许多水文地质资料，都需通过水文地质试验才能获得。

### （3）地下水动态观测

含水层（含水系统）经常与环境发生物质、能量与信息的交换，时刻处于变化之中。在与环境相互作用下，含水层各要素（如水位水量、水化学成分、水温等）随时间的变化，称作地下水动态。

地下水要素之所以随时间发生变动。是含水层（含水系统）水量、盐量、热量、能量收支不平衡的结果。当含水层的补给水量大于其排泄水量时，储存水量增加，地下水位上升；反之，当补给量小于排泄量时，储存水量减少，水位下降。同样，盐量、热量与能量的收支不平衡，会使地下水水质、水温或水位发生相应变化。

地下水动态反映了地下水要素随时间变化的状况，为了合理有效的防范其危害，必须掌握地下水动态。地下水动态提供给我们关于含水层或含水系统的不同时刻的系列化信息，因此，在检验所作出的水文地质结论，在论证防范地下水的水文地质措施是否得当时，地下水动态资料是最权威的判据。

## 七、水文地质条件勘察研究内容

水文地质条件研究，应从地层岩性、地质构造、地貌特征和地下水露头的分布、类型、水质等入手，结合必要的勘探测试工作，查明研究区内地下水的类型、分布情况和埋藏条件；含水层和隔水层（相对隔水层）的分布，各含水层的富水性和它们之间的水力联系；地下水的补给、径流、排泄条件及动态变化；地下水与地表水之间的补、排关系；地下水的物理性质和化学成分等，在此基础上分析水文地质条件对文物长期保存及保护工程实践的影响。

泉、井等地下水的自然和人工露头以及地表水体的调查，有利于阐明测区的水文地质条件。所以应对测区内各种水点进行普查，并将它们标测于地形底图上。其中具代表性的以及与保护工程有密切关系的水点，应进行详细研究，

布置适当的监测工作，以掌握地下水动态和孔隙水压力变化等。

#### 参考文献:

- [1] 赵珊茸编著.简明矿物学[M].武汉:中国地质大学出版社,2015:1—66。
- [2] 韩吟文,马振东主编.地球化学[M].北京:地质出版社,2003:97—100。
- [3] 马光,宫丽编著.应用矿物学[M].沈阳:沈阳出版社,2007:18—20。
- [4] 李昌年编著.简明岩石学[M].武汉:中国地质大学出版社,2010:1—140。
- [5] 李文达.漫谈艺术石材—大理岩[J].火山地质与矿产,1997,18(3):119-220。
- [6] 田洪均.四川乐山大佛砂岩的成因[J].沉积学报,1990,8(4):41—45。
- [7] 潘别桐,谢本立,大足北山石刻渗水病害成因分析及防治对策[A].见:潘别桐,黄克忠,文物保护与环境地质(第一版).武汉:中国地质大学出版社,1992:88。
- [8] 李智毅,李宏松,张咸恭,忠县地面石质文物的风化病害研究[J].地球科学 VO120(4),1995:378。
- [9] 方云,潘别桐,陕西省彬县大佛寺石窟环境地质病害及防治对策[A].见:潘别桐,黄克忠,文物保护与环境地质(第一版).武汉:中国地质大学出版社,1992:156。
- [10] 黄继忠,云冈石窟地质特征研究[J].东南文化,2003年第5期总第169期:91—93。
- [11] 牟会宠,杨志法,南响堂石窟稳定性分析及工程处理方案[A].见:潘别桐,黄克忠,文物保护与环境地质(第一版).武汉:中国地质大学出版社,1992:126。
- [12] 赵仓群.北响堂石窟加固保护工程报告[M].北京:科学出版社,2010:20。
- [13] 李智毅,李宏松.三峡库区地面石质文物赋存的环境地质特征及其病害分析[D].见:韩文峰主编.第三届全国环境工程地质学术研讨会论文集(第一版),兰州:甘肃民族出版社,1995:60-69。
- [14] 刘佑荣,潘别桐,宁明花山岩画地质病害与防治对策[A].见:潘别桐,黄克忠,文物保护与环境地质(第一版).武汉:中国地质大学出版社,1992:165。
- [15] 中国地质图集编委会.中国地质图集(第一版)[M].北京:地质出版社,2002.25-29。
- [16] 吕继祥,曾庆利,牛健等.泰山经石峪缓坡石坪片状剥落风化的几何特征.工程地质学报2010,18(2):197—202。
- [17] 王秀兰,冯丽娟,泉州西塔花岗岩粉状物的化学成分及意义[A].见:潘别桐,黄克忠,文物保护与环境地质(第一版),武汉:中国地质大学出版社,1992:161。
- [18] 中国地质图集编委会.中国地质图集(第一版)[M].北京:地质出版社,2002.25-29。
- [19] 滕伟福,徐光黎,爆破震动对将军崖古岩画保护的效应[A].见:潘别桐,黄克忠,文物保护与环境地质(第一版).武汉:中国地质大学出版社,1992.186。
- [20] 徐成彦,赵不亿主编,普通地质学[M].北京:地质出版社,1988:49—52。
- [21] 杨伦等编著.普通地质学简明教程[M].武汉:中国地质大学出版社,1998:106—117。
- [22] 李德栋,徐嘉骏编.普通地质学[M].北京:石油工业出版社,1991:36—39。
- [23] 李智毅,杨裕云主编.工程地质学概论[M].武汉:中国地质大学出版社,1994:90—178。
- [24] 崔可锐主编.水文地质学基础[M].合肥:合肥工业大学出版社,2010:20—280。

## 3 中国石窟寺及石刻保护发展过程

### 3.1 石窟寺及石刻保护历程

#### 3.1.1 中国石窟寺及石刻保护发展历程及不同时期特点

第一阶段：探索阶段（20 世纪 40 年代到改革开放前）

中国石窟的保护从石窟调查开始，1941 年至 1943 年张大千对敦煌莫高窟对洞窟进行了调查、断代、编号，梁思成等 1940 年、杨家骆等 1947 年考察大足石刻，冯国瑞 1941 年考察麦积山石窟，王子云等 1943 年调查了丝绸之路的遗址包括石窟，1944 年成立了我国第一个依托石窟寺建立的文物保护机构“国立敦煌艺术研究所”。

中华人民共和国成立后，党和政府历来关注石窟保护工作。1950 年，中央人民政府文化部文物局展开对全国名胜古迹、革命建筑、文物史料的保存现状的摸底调查。陆续针对石窟更名或成立了一批文物保护单位，敦煌文物研究所、龙门文物保管所、四川省大足县石刻保管所、山西云冈文物管理所、麦积山石窟文物管理所等，石窟寺保护工作开始纳入正轨。1956 年，国务院发布《关于在农业生产建设中保护文物的通知》，对全国范围内的重要古文化遗址、古墓葬、重要革命遗迹、纪念建筑物、古建筑、碑碣等开展了普查工作，基本摸清了当时全国文物的基本情况和分布情况。1961 年 3 月 4 日一次性发布了关于文物保护的三项文件，公布了第一批全国重点文物保护单位，其中石窟寺遗址 14 处，石刻碑遗址 11 处；颁布的《文物保护管理暂行条例》，规定“对文物保护单位进行修缮、保养的时候，必须严格遵守恢复原状或者保存现状的原则，并划出必要的保护范围、做出标志说明、建立科学的记录档案”；发布了“国务院关于进一步加强文物保护和管理工作的指示”，提出了“重点保护、重点发掘，既对基本建设有利，又对文物保护有利的方针”。

这一时期，国家在石窟调查、研究的基础上，逐步开展了石窟保护实践和研究工作，开启了我国利用现代科学技术的科学保护工作的先河，并在石窟寺关键保护技术方面取得了突破。如：1956~1958 年开展了敦煌莫高窟第 248~

260 窟约 60 米长的岩体建造木栈道和石柱支顶加固保护试验，这是我国石窟寺首次大规模的保护试验项目和加固保护工程。1974~1976 年，应用环氧树脂进行裂隙灌浆并结合锚杆加固洞窟的方法，按照“抢险加固、排除险情、保持现状、保护文物”的原则，对云冈石窟中央区主要洞窟进行了全面的加固维修。1963~1966 年采用了重力挡墙“挡”、梁柱“支顶”和清除危岩“刷”的工程措施，按照“有若无，实若虚，大智若愚”的思想，加固长 576 米莫高窟崖壁，洞窟 354 个，是我国第一次将岩土工程、土木工程等学科相结合实施的重大文物保护工程，对以后我国石窟寺保护工程具有示范作用；1971~1974 年，开展了龙门石窟奉先寺专项加固保护工程；1978 年，采用非预应力锚杆配合钢筋挂网喷射混凝土的“喷锚支护”方案，对麦积山石窟崖体实施整体性抢救性加固，是一项借助现代科学技术，多学科协作的代表性工程，至此，我国石窟寺形成了完善的锚固技术加固体系。

1962 年，文化部文物局组织编制了《石窟崩塌、风化的防止与处理》专项研究计划，设置了“石窟围岩内部裂隙分布、地下水渗流状况与基础岩层情况等物理探测方法的探索”等 10 项研究项目，在石窟寺岩体裂隙灌浆材料、锚固技术、风化石雕像的风化加固材料等关键技术取得了重要进展。

第二阶段：发展成熟阶段（改革开放后~20 世纪末）

改革开放后，我国石窟保护进入快速发展阶段，逐步形成了成熟的保护技术和理念。1982 年全国人民代表大会常务委员会公布了《中华人民共和国文物保护法》，使文物保护有法可依。1984 年，中国正式加入《世界文化和自然遗产保护公约》，并在 1987 年成功敦煌莫高窟、故宫等为世界文化遗产。

在此阶段，一批重要工程相继实施。1984 年敦煌莫高窟南区南段的第四期加固工程，加固了第 130~155 窟之间 26 个洞窟长达 172 米的崖面；1984~1987 年西千佛洞石窟加固工程，加固了长 174 米的崖面；1990~1994 年李最雄负责的榆林窟加固工程顺利实施；1986~1992 年黄克忠总体负责的龙门石窟五年综合保护工程顺利实施；1991 年 3 月启动云冈石窟“八五”整体加固保护工程；1989~1999 年姜怀英负责实施了新疆克孜尔石窟加固保护工程；1989~1994 年黄克忠、马家郁等负责的乐山大佛三期危岩加固工程顺利实施，1991~1995

年，贾瑞广等主持完成了大足石刻北山石窟隧洞治水工程以及窟顶防渗排水工程，北山石窟渗水病害得到了有效治理。1989~1999年，敦煌石窟针对窟顶戈壁沙害，探索开展了工程治沙、生物治沙、化学治沙等综合性科学治理工作，取得显著效果。

在此期间，石窟保护技术取得明显进展，1981~1984年，黄克忠、马家郁主持潮湿环境下石窟裂隙灌浆材料的试验研究取得成功，并用于大足石刻北山石窟136窟渗水裂隙灌浆，取得显著效果；1991年，黄克忠、马家郁负责完成了国家科委课题《治理乐山大佛的前期研究》，并获得国家文物局“科技进步二等奖”。一些关键共性问题如锚固、灌浆技术基本成熟。

### 第三阶段，石窟保护技术全面提升（21世纪初至今）

进入21世纪尤其“十一五”之后，我国石窟保护技术得到迅速提高，工程应用越发广泛，实施了一批有影响力的保护项目，并逐步走出国门，开展了一批国际援助项目。

2002年修订后的第二部《中华人民共和国文物保护法》明确提出了“保护为主，抢救第一，合理利用，加强管理”的工作方针。中国文物保护的国际合作是从石窟寺保护开始的，2000年，由国际古迹遗址理事会（ICOMOS）中国国家委员会颁布，中国国家文物局、美国盖蒂保护所、澳大利亚遗产委员会三方专家联合制订的《中国文物古迹保护准则》，标志着文物保护技术已走向科学化和规范化的轨道，也标志着中国的古遗址和古建筑保护理念开始走向成熟。2005年《西安宣言》的发表表明中国文物保护和国际接轨。

一批比较有影响的文物保护重大工程有：2004~2014年，历时十年的广西花山岩画修复保护工程，在石质文物修复加固关键技术—天然水硬性石灰复合材料研究及推广方面取得突破性成果；2002~2014年实施了大足石刻千手观音修复加固工程；2008~2015年龙门石窟潜溪寺石窟水害治理工程；2014~2017年大足石刻卧佛水害治理工程；联合国教科文组织日本政府信托基金新疆库木吐喇千佛洞综合加固保护工程和河南龙门石窟加固保护工程；2000年，按照“抢险加固、遗址保护、重点修复”的12字方针，对柬埔寨吴哥窟周萨神庙实施援外修复，中国保护理念和技术开始走向世界。

同时，石窟保护技术研发逐步走向深入，取得突破性进展。“十一五”国家科技支撑计划项目《石质文物保护关键技术研究》（以云冈石窟为例），在检测技术和装备、分析评估方法体系、加固与保护相关新技术、新材料、新装备等方面取得了系列创新性成果，填补了我国在石质文物保护技术方面的空白，有力提升了我国石质文物保护水平，该成果获国家文物局文物保护科技创新一等奖。“世界文化遗产地风险预控关键技术研究”项目的实施，推动了我国石窟寺保护工作向预防性保护方向转变。敦煌形成的“基于价值完整性的平衡发展质量管理模式”，以价值完整性为质量目标，统筹保护、研究、弘扬三位一体平衡发展，获得亚洲质量创新奖和中国质量奖。

### 3.1.2 中国石窟寺及石刻保护技术进展

#### （1）石窟寺危岩体加固技术进展

石窟寺危岩体的加固主要有重力挡墙或抗滑墙、支撑构筑物和锚固灌浆等主要措施。锚固灌浆措施近年来研究比较多，在锚杆杆体和灌浆浆液方面都取得重要进展。

在锚杆杆体选择方面：成功引入预应力锚索技术运用于榆林窟、莫高窟北区濒危崖体及洞窟的加固，麦积山、龙门石窟 683 窟岩体加固中采用了金属螺纹钢锚杆，龙门石窟奉先寺加固采用金属元钢锚杆，云冈石窟采用的楔缝式金属锚杆，龙游石窟加固采用了对穿式砂浆锚杆、预应力锚索，另外，碳纤维锚杆、木锚杆、玻璃纤维锚杆也逐步展开应用研究。

在锚固浆液选择方面：早期主要采用砂浆，也开展了丙烯酸酯类、环氧树脂及改性材料的研究。近几年的实践，高标号水泥砂浆（大足石刻）、环氧树脂（云冈石窟）、PS-C、PS-C+F（榆林窟、克孜尔石窟）等都得到应用，另外，水硬石灰的研究也表明具有较好的应用前景。

#### （2）石窟寺防渗治理技术进展

石窟防渗技术主要包括三类：地面或地下排水系统、裂隙封闭灌浆技术和顶部铺盖防渗技术。裂隙灌浆技术采用的浆液和锚固灌浆的浆液基本一致，也开展以偏高岭土、硅粉及矿粉配制的无机矿物聚合物加固天龙石窟的应用研究，水硬石灰在花山岩画裂隙加固中也得到了应用。

### （3）石质文物表面防风化技术进展

石质文物防风化技术主要围绕防风化材料的研究与应用开展，也有部分学者研究了石质文物表面脱盐技术。脱盐常用吸附脱盐的方法，一般都是采用纤维纸、纸浆、脱脂棉、纱布、膨润土等吸附物质，用水作为溶剂，通过水的渗入、溶解、蒸发，将盐逐渐转移到吸附物，达到脱盐目的。防风化材料研究一直受行业关注，对砂岩的表面的防风化材料仍处于探索研究之中，有机硅类、正硅酸乙酯、PS 等研究较多，对砂砾岩石窟的表面防风化采用 PS 材料在榆林窟、莫高窟等开展了应用研究，取得了明显的加固效果，对灰岩石窟防风化材料研究较少。近年来，纳米材料和仿生材料的在石质文物表面加固研究逐渐增多，如纳米  $\text{SO}_2$ 、纳米氢氧化钙、纳米改性材料以及仿生形成的草酸钙、碳酸钙等。

### （4）石质文物清洗技术进展

文物的清洗方法有机械清洗和化学清洗法，化学清洗可分为湿洗、干洗和膏状物清洗，机械清洗有蒸汽喷射清洗技术、粒子喷射清洗技术、激光清洗技术等，也可交替使用不同方法。

机械清洗是用软毛刷或毛笔对可溶性泥垢污物进行刷除的清洗技术。先用普通水结合毛刷清洗，然后再用去离子水进行洗净。近年来，粒子喷射清洗技术也应用于清洗石灰岩和砂岩材质文物表面有害物；此外，激光清洗技术作为一种新型的清洗技术也有很多报道，并获得了较好的清洗效果。我国也已研发了专用激光清洗设备。

贴敷法是一种常用的化学清洗工艺，将清洗剂用纤维、粉末或胶体等物润湿贴敷，用塑料薄膜覆盖保湿，然后依次进行渗透、作用、溶剂挥发、抽提污染物；清洗材料有采用乙二胺四乙酸二钠络合剂去除海洋出水石质文物表面以碳酸钙为主的凝结物；用 2% EDTA 溶液为溶剂与 Carbopol 934 树脂配制成凝胶，对砖块和石块上的难溶沉积物进行清洗；用氨水及 3.5%~4% 氮川三乙酸（NTA）的氨溶液清除油性油烟，过氧化氢也可有效去除炭黑；使用氨水或者 AB-57（配置方法：碳酸氢氨 25 克、碳酸氢钠 25 克、EDTA 25 克、水 1000 克、少量表面活性剂、加羧甲基纤维素调至糊状）去除的凝灰质砂岩表面地衣类微

生物。

### (5) 石质文物的监测与预警体系进展

石质文物监测包含两部分：文物本体的健康状况和赋存环境，目前还没有成熟的监测体系，但是，已开展了大量监测工作，监测指标多为环境的温湿度、风、震动、空气中颗粒物及有害气体等，本体监测主要开展了变形、裂隙、本体水盐和温度等监测。大多石窟仍停留在监测数据积累阶段，还没有将监测数据应用于指导保护实践，但是，已经以敦煌莫高窟为代表的世界遗产已经开始了预警体系建设的尝试，也取得明显的效果，初步构建了石窟的预警体系框架。

### 3.1.3 中国石窟寺及石刻保护发展趋势

(1) 石窟保护从单纯技术保护角度逐步转变为研究、保护、弘扬于一体的综合保护转变，保护理念、保护方式、保护技术的选用开始和深度价值挖掘与阐释结合，逐步从抢救性保护到预防性保护与抢救性保护相结合的阶段过渡。

(2) 应该加大保护技术的基础研究，石窟的岩性、构造、环境等各有特点，其病害及病害程度和特征皆有个体性差异，保护技术的适应性因石不同窟存在较大差异，需要通过加大基础研究，解决技术适应性问题。

(3) 砂岩石窟表面防风化技术研究值得重点关注，砂岩风化机理和风化过程将是重点和难点，是解决砂岩风化问题的关键所在。

(4) 进一步加大地质学科理论对于石窟保护的指导，加强无损探测技术在石窟现状调查中的应用。石窟岩体稳定性无法精确判定、石窟渗水问题勘察不清、地质勘查深度不足是当前影响石窟保护的有效性和经济性的关键问题。

## 3.2 石窟寺及石刻保护目标与任务

### 3.2.1 石窟寺及石刻保护工程主要目的、任务

石窟寺及石刻保护工程的主要目的是通过技术和管理措施真实、完整地保存其历史信息及价值，保存人类历史发展的实物见证，保存人类创造性活动和文化成就的遗迹，继承和弘扬优秀文化。

石窟寺及石刻保护工程的任务是保存文物古迹及其环境（包括自然环境和

相关人文环境)和其他相关要素(包括附属文物、非物质文化遗产,工业科技遗产的设备、仪器等)。

### 3.2.2 石窟寺及石刻保护程序

石窟寺及石刻保护程序与文物古迹保护程序一致,按照《中国文物古迹保护准则》要求,文物古迹的保护程序分为六个步骤:依次是调查、评估、确定文物保护单位等级、制订文物保护规划、实施文物保护规划、定期检查文物保护规划及其实施情况。

①调查:包括普查、复查和重点调查。一切历史遗迹和有关的文献,以及周边环境都应当列为调查对象。遗址应进行考古勘察,确定遗址范围和保存状况。

②评估:包括对文物古迹的价值、保存状态、管理条件和威胁文物古迹安全因素的评估,也包括对文物古迹研究和展示、利用状况的评估。评估对象为文物古迹本体以及所在环境,评估应以勘察、发掘及相关研究为依据。

③确定文物古迹的保护等级:文物古迹根据其价值实行分级管理。价值评估是确定文物古迹保护等级的依据。各级政府应根据文物古迹的价值及时公布文物保护单位名单。公布为保护单位的文物古迹应落实保护范围,建立说明标志,完善记录档案,设置专门机构或专人负责管理。保护范围以外应划定建设控制地带,以缓解周边建设或生产活动对文物古迹造成的威胁。

④编制文物保护规划:文物古迹所在地政府应委托有相应资质的专业机构编制文物古迹保护规划。规划应符合相关行业规范和标准。规划编制单位应会同相关专业人员共同编制。涉及考古遗址时,应有负责考古工作的单位和人员参与编制。

文物古迹的管理者也应参与规划的编制,熟悉规划的相关内容。规划涉及的单位和个人应参与规划编制的过程并了解规划内容。在规划编制过程中应征求公众意见。文物保护规划应与当地相关规划衔接。文物保护规划一经公布,则具有法律效力。

⑤实施文物保护规划:通过审批的保护规划应向社会公布。文物古迹所在地政府是文物保护规划的实施主体。文物古迹保护管理机构负责执行规划确定

的工作内容。

应通过实施专项设计落实文物保护规划。列入规划的保护项目、游客管理、展陈和教育计划、考古研究及环境整治应根据文物古迹的具体情况编制专项设计。规划中的保护工程专项设计必须符合各类工程规范，由具有相应资质的专业机构承担，由相关专业的专家组成的委员会评审。

⑥定期评估：管理者应定期对文物保护规划及其实施进行评估。文物行政管理部门应对文物保护规划实施情况予以监督，并鼓励公众通过质询、向文物行政管理部门反映情况等方式对文物保护规划的实施进行监督。当文物古迹及其环境与文物保护规划的价值评估或现状评估相比出现重大变化时，经评估、论证，文物古迹所在地政府应委托有相应资质的专业机构对文物保护规划进行调整，并按原程序报批。

### 3.2.3 石窟寺及石刻保护工程规范

以下的行业技术标准与规范是石窟寺及石刻保护从业人员应该充分了解，并能够熟练应用的技术文件：

(1) 《石质文物病害分类与图示》(WW/T 0002- 2007)

规定了石质文物病害的分类类别和与之相对应的标识符号及相关术语；适用于石质文物病害调查、病害评估、保护修复文本编制、保护修复档案制作以及石质文物保护工作中涉及石质文物病害的分类及表述工作。

(2) 《石质文物保护工程勘察规范》WW/T 0063 2015

规定了不可移动石质文物保护工程勘察工作中测绘、调查、勘探、取样、测试分析及报告编制等工作的技术要求；适用于石窟寺及摩崖造像、摩崖题刻、岩画、崖墓、石质建筑物及构筑物、大型碑刻、大型单体石刻、文物建筑石构件等不可移动石质文物保护工程勘察工作。石塔、石桥、石牌坊等勘察工作可参照执行。

(3) 石质文物保护修复方案编写规范 (WW/T 0007- 2007)

规定了石质文物保护修复中的基本术语，确定了保护修复方案编写的文本内容和格式；适用于石质文物保护修复方案、石质文物保护工程设计、施工方案的编写。

(4) 石质文物保护修复档案记录规范 (WW/T 0012- 2008)

规定了石质文物保护修复档案记录的文本内容、记录格式、记录用文字、记录信息源及记录方法和规则；适用于各级各类文物收藏单位所保存的石质文物保护修复档案的记录。

(5) 可移动文物病害评估技术规程石质文物 (WW/T 0062- 2014)

规定了可移动石质文物病害评估程序、评估内容、评估方法以及评估报告的格式；适用于可移动石质文物的病害评估。

(6) 《砂岩质文物防风化材料保护效果评估方法》(WW/T 0028- 2010)

规定了砂岩质文物防风化材料保护效果评估中的相关术语、检测内容、检测程序及其具体检测方法；适用于风化砂岩质文物保护中渗透加固和表面防护材料的效果评估工作。

(7) 《砖石质文物吸水性能测定表面毛细吸收曲线法》(WW/T 0065- 2015)

规定了砖石质文物表面吸水性能测定——表面毛细吸收曲线法的相关术语和定义、测试方法、测试程序及数据计算与记录方法。适用于砖石质文物病害调查、保护材料筛选、保护效果评估等过程中涉及文物本体材质表面吸水性能测定的工作，提出采样检测和原位检测两种方法，其中原位检测方法不适用于表面带有彩绘层的砖石质文物的检测工作。

### 3.3 《中国文物古迹保护准则》与中国石窟寺及石刻保护

#### 3.3.1 《中国文物古迹保护准则》中的保护原则

(1) 不改变原状原则的解读及应用

不改变原状：真实、完整地保护文物古迹在历史过程中形成的价值及其体现这种价值的状态，有效地保护文物古迹的历史、文化环境，并通过保护延续相关的文化传统。文物古迹的原状是其价值的载体，不改变文物古迹的原状就是对文物古迹价值的保护，是文物古迹保护的基础，也是其他相关原则的基础。

不改变原状原则涉及的对象包含三个方面：文物的本体及自然环境、文化环境、文化传统。文物古迹的原状主要有以下几种状态：①实施保护之前的状态；②历史上经过修缮、改建、重建后留存的有价值的状态，以及能够体现重

要历史因素的残毁状态；③局部坍塌、掩埋、变形、错置、支撑，但仍保留原构件和原有结构形制，经过修整后恢复的状态；④文物古迹价值中所包含的原有环境状态。

情况复杂的状态，应经过科学鉴别，确定原状的内容。由于长期无人管理而出现的污渍秽迹，荒芜堆积，不属于文物古迹原状。历史上多次进行干预后保留至今的各种状态，应详细鉴别论证，确定各个部位和各个构件价值，以确定原状应包含的全部内容。一处文物古迹中保存有若干时期不同的构件和手法时，经过价值论证，可以根据不同的价值采取不同的措施，使有保存价值的部分都得到保护。

不改变文物原状的原则可以包括保存现状和恢复原状两方面内容。

必须保存现状的对象有：①古遗址，特别是尚留有较多人类活动遗迹的地面遗存；②文物古迹群体的布局；③文物古迹群中不同时期有价值的各个单体；④文物古迹中不同时期有价值的各种构件和工艺手法；⑤独立的和附属于建筑的艺术品的现存状态；⑥经过重大自然灾害后遗留下有研究价值的残损状态；⑦在重大历史事件中被损坏后有纪念价值的残损状态；⑧没有重大变化的历史环境。

可以恢复原状的对象有：①坍塌、掩埋、污损、荒芜以前的状态；②变形、错置、支撑以前的状态；③有实物遗存足以证明原状的少量的缺失部分；④虽无实物遗存，但经过科学考证和同期同类实物比较，可以确认原状的少量缺失的和改变过的构件；⑤经鉴别论证，去除后代修缮中无保留价值的部分，恢复到一定历史时期的状态；⑥能够体现文物古迹价值的历史环境。

## （2）真实性原则的解读及应用

**真实性：**是指文物古迹本身的材料、工艺、设计及其环境和它所反映的历史、文化、社会等相关信息的真实性。对文物古迹的保护就是保护这些信息及其来源的真实性。与文物古迹相关的文化传统的延续同样也是对真实性的保护。

保护文物古迹真实性的原则是指在对文物古迹价值整体认识的基础上，以文物古迹物质遗存保护为基础，同时保护它所反映的文化特征及文化传统。这一原则包含了物质遗产和非物质遗产两个方面。它不仅适用于作为历史见证的

古代遗址、古建筑等类型的文物古迹，而且对仍然保持原有功能的历史文化名城、名镇、名村以及文化景观等类型的文物古迹的保护具有指导意义。对于这类具有活态特征的文物古迹，那些具有文化多样性价值的文化传统，是真实性的重要组成部分，需要得到完整的保护。

真实性包括了外形和设计、材料和材质、用途和功能、传统、技术和管理体系、环境和位置、语言和其他形式的非物质文化遗产、精神和感觉、其他内外因素。

真实性还体现在对已不存在的文物古迹不应重建；文物古迹经过修补、修复的部分应当可识别；所有修复工程和过程都应有详细的档案记录和永久的年代标志；文物古迹应原址保护等几个方面。

### （3）完整性原则的解读及应用

完整性：文物古迹的保护是对其价值、价值载体及其环境等体现文物古迹价值的各个要素的完整保护。文物古迹在历史演化过程中形成的包括各个时代特征、具有价值的物质遗存都应得到尊重。

保护文物古迹的完整性的原则是指对所有体现文物古迹价值的要素进行保护。

文物古迹具有多重价值。这些价值不仅体现在空间的维度上，如遗址或建筑遗存、空间格局、街巷、自然或景观环境、附属文物及非物质文化遗产等的价值，也体现在时间的维度上，如文物古迹在存在的整个历史过程中产生和被赋予的价值。

在文物古迹认定、制定保护规划、保护管理、实施保护规划的过程中，要保护所有体现文物古迹价值的要素。要对各个时代留在文物古迹上改动、变化痕迹的价值和对文物古迹本体的影响进行评估和保护。

文物古迹保护区划应涵盖所有体现文物古迹价值的要素，其保护管理规定应足以消除周边活动对文物古迹及其环境产生的消极影响。

在考古遗址中需要注意对多层叠压、各时代遗存的记录和保护。规划中对考古遗址可能分布区的划定，体现了对文物古迹完整性的保护。

需要尊重和保护与文物古迹直接相关的非物质文化遗产或文化传统。

#### (4) 最低限度干预等保护原则的解读及应用

最低限度干预：应当把干预限制在保证文物古迹安全的程度上。为减少对文物古迹的干预，应对文物古迹采取预防性保护。

对文物古迹的保护是对其生命过程的干预和存在状况的改变。采用的保护措施，应以延续现状，缓解损伤为主要目标。这种干预应当限制在保证文物古迹安全的限度上，必须避免过度干预造成对文物古迹价值和历史、文化信息的改变。

作为历史、文化遗存，文物古迹需要不断的保养、保护。任何保护措施都应为以后的保养、保护留有余地。

凡是近期没有重大危险的部分，除日常保养以外不应进行更多的干预。必须干预时，附加的手段应只用在最必要部分。

预防性保护是指通过防护和加固的技术措施和相应的管理措施减少灾害发生的可能、灾害对文物古迹造成损害、以及灾后需要采取的修复措施的强度。

#### (5) 使用恰当的保护技术解读及应用

使用恰当的保护技术：应当使用经检验有利于文物古迹长期保存的成熟技术，文物古迹原有的技术和材料应当保护。对原有科学的、利于文物古迹长期保护的传统工艺应当传承。所有新材料和工艺都必须经过前期试验，证明切实有效，对文物古迹长期保存无害、无碍，方可使用。

所有保护措施不得妨碍再次对文物古迹进行保护，在可能的情况下应当是可逆的。

恰当的保护技术指对文物古迹无害，同时能有效解决文物古迹面临的问题，消除潜在威胁，改善文物古迹保存条件的技术。

对文物古迹的保护包括技术性维修和管理两个方面。文物古迹作为历史遗存，是采用相应时代的、符合当时需要的技术建造和修缮的。当这些技术仍然存在，甚至成为文物古迹价值的重要载体时，这些技术应当得到保护和传承。

科技的发展不断为文物古迹的保护提供新的可能性。由于文物古迹的不可再生性，新技术必须经过前期试验，包括一定周期的现场试验，证明其对文物古迹无害，确实能够解决所需解决的问题，才能使用。增补和加固的部分应当

可以识别，并记入档案。

运用于文物古迹的保护技术措施应不妨碍以后进一步的保护，应尽可能采用具有可逆性的保护措施，以便有更好的技术措施时，可以撤销以前的技术措施而不对文物古迹本体及其价值造成损失。

#### (6) 防灾减灾解读及应用

**防灾减灾：**及时认识并消除可能引发灾害的危险因素，预防灾害的发生。要充分评估各类灾害对文物古迹和人员可能造成的危害，制定应对突发灾害的应急预案，把灾害发生后可能出现的损失减到最低程度。对相关人员进行应急预案培训。

灾害是造成文物古迹破坏的重要原因。灾害的损失可以通过预防，以及灾后及时、妥当的应对措施降低到最低程度。预防是指在灾害发生之前，根据专业机构对可能发生的灾害进行的评估及相关的专项设计，采取必要措施，消除潜在威胁，如清除或加固危岩、滑坡体等；对文物古迹进行加固、防护，避免或减轻自然灾害或次生灾害对文物古迹可能造成的破坏；完善必要的预防性设施，如防雷、防火设施。对于可能由于人类活动引发的灾害，则应通过建立和落实相关规章制度，完善监控措施，加强教育，避免或及时制止人为破坏。文物古迹管理者应制定应对灾害的预案。相关人员，无论是文物古迹保护管理人员，周围社区的居民，或是进入文物古迹参观的游客，都应了解预案的相关内容，并定期进行应急预案的演练。

### 3.3.2 石窟寺及石刻保护工程中多学科运用

#### (1) 地质学与石窟寺及石刻保护

石窟寺是一类特殊的地质体，石质文物也是由地质材料组成，地质学的理论、方法、技术被广泛地应用于石质文物的调查、勘察、保护加固及加固效果评估中。地球物理探测技术已广泛应用于石质文物内部裂隙、结构、损伤、材料性能测试及效果评估，较常用的有地质雷达、面波、超声波、CT技术、电阻率测深等。危岩体的勘察、评价、加固基本采用地质工程和岩土工程的理论、方法和技术，锚固灌浆技术、围岩防渗止水、挡土结构物常用在石窟保护中。

## (2) 化学与石窟寺及石刻保护

化学与石质文物保护密不可分，石质文物的劣化过程主要发生的是化学变化和物理变化。石质文物的材料研发也主要依靠具有化学背景的学者来实行。保护技术研发离不开对文物劣化机理的研究，尤其是石质文物表面防风化技术研究，需要依据文物风化的过程和机理来开发针对性材料，纳米技术已被广泛应用于防风化材料的研发，砂岩风化的研究已经深入到物理化学层面，已经关注岩石成分的物理化学变化过程。基于物理化学的文物测试方法如 X 射线衍射分析 (XRD)、X 射线荧光光谱分析 (XRF)、红外吸收光谱分析 (FTIR)、扫描电子显微镜分析 (SEM)、热分析技术、色差分析等已成为石质文物保护中材料测试与表征的主要手段。

## (3) 生物学与石窟寺及石刻保护

生物学也是和石质文物保护比较相关的一门学科，石窟表面的植被是影响石窟保存的一个重要方面，植被的调查、植被的整治离不开生物学知识，在湿润地区，石质文物表面常生长有苔藓、地衣等低等植物，它们对石质文物表面的风化影响较大，如何防治目前已开展了较多的研究。同时，利用仿生学的理论和方法，借鉴生物作用形成的碳酸钙、草酸钙等矿物加固石质文物表面，达到防止风化的效果也已经开展研究。

## (4) 信息技术与石窟寺及石刻保护

信息技术已经广泛应用于石窟研究、保护和弘扬，信息技术已被大量应用于石窟监测和预防性保护中，基于信息技术的石质文物监测设备、监测数据传输、处理、分析已成为预防性保护的基础。大数据分析已被应用于石窟调查、研究、病害分析等多个方面，已经成为石窟寺研究的一个极其重要的手段。利用信息技术开展石窟的展示和弘扬已经成为必不可少的方式，也取得显著效果，多媒体、数字化、VR 技术等已在石窟寺及石刻展示中已成为常态。物联网、互联网已和石窟保护管理密不可分。

### 3.3.3 石窟寺及石刻保护经验教训

#### (1) 要切实做好前期的勘察与价值评估工作

石窟保护的一个突出问题是方案的基础资料普遍不足。勘察工作由于时间

短、投入不够、勘察手段有限，对病害认识不清，病害影响因素掌握不全，主要影响因素认识错误，造成方案缺乏针对性。价值评估与保护措施脱节，价值评估形式化严重，缺乏深度和具体性，对保护对象性质的认识不够充分，保护重点和难点没有充分的价值评估依据，保护措施难以考虑保护对象的特点。

在榆林窟的设计方案中，所使用锚固与化学灌浆加固的技术，其中在砾岩层中能否成孔便成为方案能否成立的关键，设计方与施工方通过开展钻孔机械、施工工艺、锚固拉抗试验等一系列的试验研究工作，得到满意的结果后，才能全满实施，确保加固效果。

## （2）保护理念理解不到位

不同地区、不同岩性石窟的病害成因各不相同，病害的特征也各不一样，所用保护技术存在适应性问题，保护理念如何反映到具体的保护措施中是成败的关键。实践中许多工程存在保护范围、保护规模扩大化，保护措施与理念脱节严重，最低限度干预原则和不改变文物原状原则执行不够充分，文物真实性和完整性没有得到很好的保证等问题。如有些物理加固措施规模过大，一些设计形式没有兼顾石窟风貌，造成干预过大、改变石窟原貌过多的加固时有发生。

## （3）工程前期研究不够，工程措施针对性不强

和一般建设工程相比，文物保护工程是一项特殊的工程。保护措施的关键问题是关键问题，一些成熟的技术，换一个石窟不能完全照搬，对症下药很重要，很多工程由于前期试验研究不够，难以达到预期效果。新材料、新技术的使用须经过室内、现场试验，慎重考虑施工工艺及操作步骤，取得成功经验，经过必要的论证后才能实施，尤其对石质文物表面加固和清洗措施而言，前期研究和试验更为重要。

## 3.4 中国石窟寺及石刻保护加固工程典型案例

### 3.4.1 崖体加固工程

#### 3.4.1.1 麦积山石窟崖体维修加固工程

麦积山石窟位于甘肃省天水市麦积区，始建于 384~417 年，现存洞窟 221 座、泥塑石雕 10632 身、壁画 1300 余平方米。麦积山坐落于秦岭西端，山体呈

85° 倾斜角，地质构造属侵蚀性低山丘陵区，崖体岩石裸露，为第三纪紫红、砖红色砂砾岩。砂砾岩主要为泥质胶结，且含有铁和钙质，质地粗糙，易分化，胶结程度差，主要成分由黑云母、花岗岩、闪长岩、墨云母石英片岩，以及少量石英岩和变质砂岩等古老变质岩组成。山体崖壁遭受着强烈的风、雨、日照等自然因素作用，表面风化极为严重，发育着大面积的片状剥落层，部分节理裂隙切割岩体，形成了大量的危石。

在 20 世纪 70~80 年代，国内首次将“喷锚粘托”技术应用于石窟加固维修。这种非预应力锚杆配合钢筋挂网喷射混凝土的“喷锚支护”加固方案，最早运用在麦积山石窟的山体加固工程，后来在其东崖实际施工时又增加了“粘”“托”，即灌浆黏结与牛腿承托等措施，因此总称为“喷锚粘托”加固方案。

该方案的具体做法如下：

**表 3-1 麦积山石窟加固工程做法**

技术手段	具体实施	作用
喷	利用压缩空气将混凝土高速喷射到石窟区的崖面上，还将近千个木栈道梁孔、水蚀掏空洞和较大的岸边裂隙填充密实，喷射混凝土厚度一般为 10-15 厘米	防止风化；填充裂隙；加固危岩
锚	用螺纹钢锚杆穿过层面裂隙，将被各种裂隙切割破碎的危岩锚固在内部稳定的岩体上	加固危岩
粘	将洞窟内外可见裂隙封闭后灌注 107 胶水泥浆、环氧树脂和高模数的硅酸钾黏合剂，增强其整体性	填充并加固危岩
托	在危岩外面加筑与崖体连为一体的构筑物来支托可能局部脱离的悬空岩体	加固支护

（资料来源：中国文化遗产研究院. 中国文物保护与修复技术。北京：科学出版社，2009. P178）

麦积山石窟崖体维修加固工程采用喷锚技术，辅以粘托等措施，较好地保持了山体及洞窟的外形，同时还具有经济节约、快速高效等优点。该工程自完成起至今已逾三十余年，有效保障了山体的安全与稳定，但由于受到当时技术的局限性影响，同样存在技术和理念上的缺憾，山体的大面积喷护一方面覆盖了部分崖面遗迹，同时影响了麦积山石窟原有的水环境，对洞窟内的文物造成影响。

### 3.4.1.2 榆林窟岩体保护加固工程

榆林窟位于甘肃省瓜州县城南 70 千米处榆林河峡谷两岸直立的東西峭壁

上，出露的地层均为第四纪地层，按其成因、时代的不同，可划分为下更新统玉门组砾岩（ $Q_1$ ）、中更新统酒泉组砾岩（ $Q_2$ ）、上更新统戈壁组砾岩（ $Q_3$ ）、全新统冲洪积砂土、砂及砂砾层和全新统坡积层。洞窟开凿在中更新统酒泉组砾岩（ $Q_2$ ），是一套洪积形成的钙泥质微胶结或无胶结的砂砾岩层含透镜体的地层，厚 25-40 米，颗粒呈次圆状到棱角状，分选和磨圆较差，胶结程度和强度均低于玉门组。由于受到河水下切，重力卸荷以及自然风化营力等因素的作用，岩体上产生了许多裂隙，大部分的裂隙都是与崖面平行。

针对榆林窟特殊的工程地质条件和岩土工程问题，保护工程采用了锚索技术加固裂隙危岩体，采用 PS-F 浆液进行裂隙灌浆、用 PS 材料进行崖体防风化加固和窟顶建造防渗层等工程措施对榆林窟进行综合整治。榆林窟崖体的锚索加固主要是防止开裂崖体在地震力和其他应力作用下沿裂隙发生倾倒和崩塌破坏，其锚索技术可充分发掘岩土材料本身固有的能量，最大限度地调动岩土介质内在的强度和潜力，加强岩土体的自稳能力，使岩土体保持长期持续稳定。裂隙灌浆与锚索工程相配合，一方面可以加强岩体的结构稳定性，另一方面防止大气降水深入洞窟。在灌浆材料的选择上，考虑到榆林窟崖体为泥质胶结或半胶结的砂砾岩，强度很低且极易风化，不宜采用以往环氧树脂等有机高分子化学浆液进行灌浆，因为松散的岩体裂隙风化层和环氧树脂等高分子材料的浆液形成的结石体不能牢固粘接，极易在浆液结石体与裂隙面上再次形成新的裂隙。最终，针对榆林窟砂砾岩岩体裂隙特性，经试验研究选定 PS-F（PS:最佳模数硅酸钾，F:粉煤灰）这一新型灌浆材料作为榆林窟裂隙灌浆材料，这种防风化化学加固是首次在石窟文物保护中的大规模应用，并取得了显著的效果。

#### 3.4.1.3 龙门石窟岩体加固工程

龙门石窟位于河南省洛阳市洛龙区伊河两岸的龙门山与香山上。洞窟赋存的岩体为灰色、深灰色中厚层夹薄层鲕状白云石化灰岩。岩体中发育一组缓倾层面裂隙和两组陡倾构造裂隙。构造裂隙一组与崖壁近于平行，一组与崖壁近于垂直。

20 世纪 70 年代，我国尚无石灰岩石窟加固的成熟方法和先例，为了解决这一难题，围绕奉先寺造像抢险加固工程，最终确定锚固灌浆加固措施。1986

年至 1992 年实施的龙门石窟综合治理工程,研制出适合龙门石窟石灰岩文物保护的“改性环氧树脂灌浆材料”加固配方和施工工艺;龙门石窟围岩体和主要洞窟得到加固,改善了洞窟渗漏。2001 年至 2008 年开展的“UNESCO 龙门石窟保护修复工程”,对灌浆材料防渗材料性能和施工工艺进行研究,最终确定采用超细水泥作为灌浆材料。

龙门石窟早期使用的超细水泥和环氧树脂材料在后期存在耐久性较差、泛盐碱等问题,为了解决这一问题,2013 年龙门石窟研究院与中国地质大学合作,开展“超细水泥灌浆材料改性研究”,在国内首次研发出新型无机灌浆堵漏材料,采用压力(低压)灌浆的方式,已初步取得良好效果,为解决石灰岩石窟水害问题提供行之有效的方法。

### 3.4.2 防渗治水工程

#### 3.4.2.1 大足石刻北山石窟隧洞治水工程

大足石刻位于重庆市大足区境内,为唐、五代、宋时所凿造,明、清两代亦续有开凿。大足地区温润多雨,水是引起大足石刻风化等损坏的最主要因素,多种病害都是由于水的参与而产生或加剧。地表水沿立壁裂隙下渗,冲刷裂隙的同时,在造像表面沉积钙质盐类,严重污损石刻。地下水沿各种裂隙下渗过程中,不断溶蚀扩大裂隙,其毛细渗透作用又引起龕窟下部造像的风化剥蚀。

从 20 世纪 50 年代起,大足石刻已开展水害的治理工作,多年来的工程措施如下:①改进原有排水设施。如 1953 年对宝顶山大佛湾九龙浴太子龕排水沟进行凿深加宽,以保证水流畅通,避免历史上洪水冲垮九龙浴太子岩壁及大悲阁左壁殿宇的现象。②根据不同龕窟的渗水特点,在不利于疏导的地方采用灌浆堵漏的方法。如 1983 年,研制的“潮湿环境下石窟岩裂化学灌浆材料”治理北山第 136 号窟顶渗水获得成功。③在造像后壁岩体中适当部位开凿隧洞,以截断流向造像立壁的渗水。如 1994 年竣工的北山摩崖造像北段排水隧洞工程,长 157 米、高 2.5 米、宽 1.5 米,有效地治理了北山摩崖造像北段的水害。另外,为减少地表水的入渗,在造像立壁顶部铺设防渗层,并沿造像立壁走向和倾向设立作过防渗处理的排水系统汇集雨水集中排泄,如石门山石窟顶坝的防渗排水处理,良好效果。

### 3.4.2.2 云冈石窟治水工程

影响云冈石窟保存的水的形式主要有窟顶与窟壁裂隙直接渗水、雨水对外壁面的直接冲刷、洞窟内凝结水的形成。针对不同水害类型采取不同的防治措施。

#### (1) 窟顶渗水治理措施

20 世纪 60 年代至 70 年代初，对石窟顶部渗水问题，以稀沥青灌注顶部裂隙，然后用土沥青混凝土和黄土做成隔水层，并培植草皮防渗。此外，在窟后陡坡上构筑混凝土排水沟，或于窟顶开凿修浚防渗排水渠，达到引水排水的作用。

1992 年，云冈石窟文物研究所会同中国文物研究所及美国盖蒂保护研究所针对山体渗水问题，联手进行了云冈石窟顶部防渗排水试验，1993 年在窟顶铺设防渗层；1995 年在山顶明城堡内垫高低凹蓄水地带，打通阻水脊梁，将水送至堡南专设的排水明渠，按预定方向排走。选用膨润土防水毯作为防渗材料铺设在石窟顶部。

#### (2) 外壁雨水冲刷治理措施

修建窟檐可以减少水与岩石的直接接触，大大地减缓石质文物风化速度，因此重修窟檐是减轻外壁雨水冲刷的主要途径。

#### (3) 窟内凝结水治理措施

应用新研制的岩石表面凝结水量测量装置，对云冈石窟砂岩表面凝结水量进行的实地测量。采用除湿机可以降低窟内相对湿度，可以防止凝结水在岩壁上形成，消除凝结水对石雕的危害。

### 3.4.2.3 龙门石窟治水工程

由于石灰岩最易被水侵蚀而形成含水孔洞，裂隙和岩穴提供了地下水运动的条件，而地下水的运动和作用又进一步加剧了裂隙的发展，因此石灰岩石窟容易形成溶洞和水蚀剥落等风化破坏。以龙门石窟为例，洞窟渗漏水的治理一直是石窟保护工作中的重点、难点。

龙门石窟的洞窟漏水，曾于 20 世纪 70 年代采用环氧树脂材料裂隙灌浆加固进行了不同程度的治理。20 世纪 80 年代原被堵住的漏水点重新出现了渗漏

现象。之后，结合以往化学灌浆治理效果的研究结果和龙门石窟地质情况，采取“盖、排、堵、导”的方法治理洞窟漏水：“盖、排”（表层铺土植草）是阻止雨水由裂隙口渗入裂隙。其做法是清除洞顶蓄水效果好的松碎地表层，做钢筋混凝土防渗层防止雨水渗入裂隙口。排水方法只能防止水由洞顶较近的裂隙口直接渗入洞内，对于几十米以外，乃至上千米的裂隙通道口这一渗水源，由于地理环境因素不易找到源头，无法采用盖的方法解决。此类渗入裂隙的水采用化学灌浆的方法封堵，不使渗流的水在雕刻品处渗出，简称为“堵”。因裂隙在岩体内相互连通，为防止被堵在岩体裂隙内的水改变通道另辟新路，从其他裂隙在洞窟壁面渗出，对文物造成新的破坏，采取在不影响文物保存的前提下，在无雕刻部位壁面钻孔将水导出岩体之外，简称为“导”。导的方法还包括在洞顶表面为防止雨水冲刷而修建排水沟将水导向无洞窟的区域。

2001年，依托于“UNESCO 龙门石窟保护修复工程”，针对三个试点洞窟潜溪寺、路洞、皇甫公窟进行了防渗治理研究。本次防渗工作的主要原则是：以防渗排水，疏导水流，解决大气水源为主要措施，石窟内部裂隙灌浆、封堵为辅助措施，综合防治水的危害。具体做法是：根据第一阶段灌浆试验的结果，对窟外的宽裂缝采用超细水泥进行灌浆封堵；其次，铺设膨润土硅酸盐无机防水层，减少地表水的下渗；然后对窟内的卸荷裂缝，根据上述方案的实施效果来决定是否采用环氧树脂进行灌浆，以防对主要渗水路径进行封堵后造成其他部位的渗水。具体的工程采用截、导、排、防、堵等措施结合。

### 3.4.3 表面防风化加固工程

#### 3.4.3.1 莫高窟表面防风化工程

石窟的表面防风化加固，目前通常采用的工程手段就是利用化学加固材料对表层岩土体进行改良，以增加其抗风化性能。砂砾岩胶结泥质中黏土矿物-蒙脱石，由于其在环境温湿度变化时，会反复吸水膨胀-失水收缩，这一作用使砂砾岩胶结状态受到破坏，是引起砂砾岩风化的主要原因之一。20世纪80年代初，敦煌研究院研制出PS（高模数硅酸钾）加固材料。实验证明，PS渗透到泥质胶结的砂砾岩体后，与胶结泥质作用，可明显改变砂砾岩的胶结状态，使其具有较强的耐风蚀、雨蚀及抗风化性能，可大幅提高了砂砾岩的水稳定性，

为我国西北地区泥质胶结的砂砾岩石窟加固找到了一个新的途径。以莫高窟崖体 PS 渗透加固工程为例，采用模数为 3.8、浓度 5%~10%的 PS 溶液，分 3 次进行，以喷洒渗透方式进行加固。PS 浓度逐次增大，依次为 5%，7%和 10%。待以上所有 PS 渗透固化加固措施完成后，进行作旧处理。崖面作旧材料选用敦煌当地澄板土，砂岩风化区作旧材料选用砂岩风化物中分离出的胶结泥质<sup>[18]</sup>。

#### 3.4.3.2 云冈石窟表面防风化

云冈石窟从 60 年代初就有研究单位在进行防风化材料的研究，使用甲基丙烯酸甲酯，甲基硅酸钠，聚丙烯酸酯类等进行试验。后来的 30 年又先后有若干个单位使用聚甲基三甲氧基硅烷，聚甲基三乙氧基硅烷，高模数硅酸钾，复合材料等近十种材料进行过室内和现场试验。近年来，依托于科技支撑计划项目“石质文物保护关键技术研究”，以云冈石窟为主要研究对象，针对我国砂砾岩普遍存在的共性关键技术问题，开展了包括有石质文物防风化保护和施工工艺的研究。目前已研发了三种适合云冈石窟石质文物保护的专用防风化材料，同时对其施工工艺进行了相关研究。

#### 3.4.3.2 龙门石窟表面防风化

20 世纪 90 年代起，石窟防风化逐渐受到人们的重视，龙门石窟也开始实验研究有机硅树脂、丙烯酸树脂材料的防风化加固作用。经过反复试验，这类材料在露天环境下老化周期短，一个月左右就失去防水性能，而长期使用对文物有无损害也没有定论，因此，龙门石窟逐步放弃了使用这类材料进行防风化保护，转而进行石窟的风化机理研究，力图从根本上研究解决石窟风化的方法。近年来陆续开展了与石窟防风化相关的课题研究，一是国家自然科学基金课题《凝结水在石灰岩表面形成机制的研究》，二是国家文物局课题《碳酸盐石质文物劣化定量分析与评价系统研究》，三是《龙门石窟灰岩损伤机理及防治技术研究》。通过上述工作的开展，防风化研究取得了初步的成果。

#### 3.4.4 莫高窟监测与预警体系

监测、控制石窟的赋存环境及洞窟内的微环境，主动阻止和消除影响石窟文物保存的各种不利因素，才能尽可能地延长其寿命，因此构建环境监测预警体系，实现预防性保护是今后文物保护发展的重要方向。

作为我国最重要的世界遗产地代表之一，莫高窟的监测经历了一个从无到有、从简单到复杂、从分散到系统的过程。在 20 世纪 60 年代初，莫高窟崖顶首次建立了气象观测站，监测窟区的气温、相对湿度、降雨量、日照、风速、风向和积沙等。经过气象监测，对莫高窟地区的气象环境做出了初步的评价，首次为这一时期的治沙和壁画保护提供了依据。

20 世纪 80 年代末，在与外方的国际合作项目中，对莫高窟区域大环境及洞窟小环境进行长期监测。先后开展了莫高窟窟区环境监测及评价、莫高窟周边风沙运动规律监测及流沙治理研究、洞窟环境监测及其评价、岩体裂隙位移监测、洞窟岩体内水汽运移监测、莫高窟区域地质调查等。

对于文物本体的监测，洞窟壁画病害监测、颜色监测、盐分分析与监测，是莫高窟本体保护监测的主要任务。例如莫高窟第 85 窟项目，就是通过对壁画的空鼓、酥碱等病害进行长期有效监测的基础上，制定出有针对性的保护修复措施。

莫高窟的安全防范监测系统建立于 20 世纪 80 年代末，之前仅是人工监测看守。莫高窟的洞窟数量众多，保护范围大，保护范围内的单体文物多且位置分散。已建立一套人机结合的防范系统，对莫高窟文物的安全发挥了积极作用。

21 世纪初，莫高窟又进行了游客及其对环境影响的监测，并以此为基础开展莫高窟游客承载量的研究。在多次专项问卷调查的基础上，建立了人工和网络相结合的预约制。预约制的实施不仅有利于洞窟的保护和开放管理，也有利于改善游客参观环境、提升参观质量。

2011 年开始，敦煌研究院通过国家科技支持计划项目“世界文化遗产地风险预控关键技术与示范”课题的研发成果，结合国家文物局重点文物保护工程项目“敦煌莫高窟监测预警体系建设”，建成了基于风险理论的敦煌石窟监测预警体系，用于指导敦煌石窟的保护与管理，实现了由抢救性保护逐步向预防性保护过度的目标。

## 4 中国石窟寺及石刻病害类型及成因

### 4.1 石窟寺及石刻病害定义及划分

#### 4.1.1 石窟寺及石刻病害的定义

石窟寺及石刻病害定义内容的范畴，应包括石窟寺、石刻环境及载体病害和本体病害两个方面，全面、科学、准确的定义，为石窟寺及石刻病害类型的分类奠定基础。“石窟寺及石刻病害”的内涵是“破坏现象”，主要包括两个方面的含义：一是正在发生的破坏现象，处于破坏进程过程中，发展演化的后果将对文物安全或价值造成损伤或损毁；二是尚未发生破坏，但具备形成和诱发安全隐患条件，演化发展的趋势将引发文物安全或价值损伤破坏或损毁破坏。

石窟寺及石刻病害的主要要素包含：①两种破坏现象：石窟寺、石刻环境及载体地质病害现象和本体破坏；②两个方面影响因素：自然营力作用和人为活动影响因素；③本体病害破坏包括物质成分、微观结构、形态、颜色等外貌的变化；④病害引发的后果包括影响文物安全和价值的问题。

综上所述，我们综合给出石窟寺及石刻病害的定义。

**石窟寺及石刻病害的定义：**在地质营力作用、生物活动、人为活动等影响下形成的，对石窟寺及石刻环境与载体岩体造成破坏的地质病害现象；以及对石窟寺石雕像、石刻、壁画、塑像等造成材料劣化、微观结构损伤、形态及形制破坏、结构失稳、颜色变化等，影响石窟寺及石刻文物本体安全和文物价值的破坏现象。

#### 4.1.2 石窟寺及石刻病害分类

针对石窟寺及石刻病害类型有多种表述和分类方法，无论学术上还是标准规范上还没有形成系统、规范分类。

《中国文物保护与修复技术》提出了三种不同的分类方法：第一种：按照病害源的性质，石质文物病害分为两大类：第一类病害是指由于地质作用引起的地质灾害或工程问题，如滑坡、泥石流、地裂缝等；第二类病害是由于人类

生产或工程活动，引起自然环境的变化，在改变后的自然环境营力作用下，引起原有（第一类）环境工程地质问题、石质文物病害加重或产生新的问题，如爆破震动、车辆运营震动、采矿、地下工程或过度汲取地下水引起的地面及边坡变形破坏、兴建水库引起小环境变化而加剧渗漏病害及石质文物表层劣化病害、酸雨加剧石质文物表层劣化病害、河流改道、修建水库引起的淹没问题等。

依此为基础，1992年潘别桐、黄克忠《文物保护与环境地质》提出“环境地质病害”的概念，主要划分为9类病害：①降水、河水、地下水造成的石窟漏水、渗水和积水；②边坡岩体失稳；③地震危害；④岩石风化病害；⑤风沙吹蚀病害；⑥小气候环境改变引发的石窟病害；⑦环境污染引起的石雕岩石的腐蚀病害；⑧采矿引起的地面塌陷导致的文物破坏；⑨人工爆破震动对石窟寺保存的危害。

第二种：石质文物病害类型按照其具体表象分为3类：①结构失稳；②渗水侵蚀；③表面劣化。

第三种：石窟寺、摩崖、岩画等存在的病害，按照损坏原因，概括为4类：①水的危害（渗水、凝结水、地下水）；②岩体失稳的危害（崩塌、倾覆、垮塌等）；③地震及其他外力的危害（地震、爆破震动、车辆运营震动、采矿塌方、风蚀等）；④环境污染的危害（大气污染、酸雨、粉尘等）。

《石质文物病害分类与图示》（WW/T0022007），石质文物病害分为7类：①文物表面生物病害；②机械损伤；③表面（层）风化；④裂隙与空鼓；⑤表面污染与变色；⑥彩绘石质表面颜料病害；⑦水泥修补。

我国已发布的规范、标准，以及相关专著，没有明确界定石质文物环境与文物本体的区别，有的将石窟寺及石刻环境与载体存在的病害，以地质学的不良地质现象孤立予以描述。石质文物环境与文物本体存在病害的类型、性质、诱因、作用方式、影响程度等，既存在显著的差异，具有独立性，也具有关联性。为更加清晰的界定在石窟寺及石刻不同环境条件，不同保存状态下病害的性质，对石窟寺及石刻环境和文物本体存在病害的评估分析，既要考虑石质文物环境与文物本体整体性特点，统筹考虑，体现相互关联，又要相互独立，体现区别，分类表述病害的性质，避免了二者混淆的问题，同时，与我国石窟寺

及石刻保护实践工作相适应。

鉴于以上状况，石窟寺及石刻病害分类的原则应考虑方面：①石窟寺及石刻环境与文物本体是具有关联性的一个整体；②人为营造、艺术创作的文物属性是主体，依托自然山体的地质体既是石窟寺及石刻的重要组成部分，也具有独特性；③与国家及文物行业领域相关规范、标准基本协调；④在传统习惯表述方法基础上系统化、规范化；⑤与保护工作性质和保护实践相适应；⑥与石窟寺及石刻安全及文物价值密切相关；⑦对石窟寺及石刻安全保存影响较大，具有特殊性的状况等。

依据石窟寺及石刻赋存环境与文物本体特点，石窟寺及石刻病害，首先从石窟寺及石刻环境和文物本体两个维度划分为 2 个类别病害，依据影响因素、作用方式、破坏特征，每个类别病害分为不同的病害类型，总计 10 种病害类型。即：

第一类别病害：石窟寺及石刻环境与载体岩体地质病害；第二类别病害：石窟寺及石刻本体病害。

第一类别病害按地质营力和破坏特征分为 5 种类型：危岩体（崩塌、倾覆、垮塌等）病害；滑坡病害；地下水渗水病害；洪水及泥石流病害；地震病害；第二类别病害按影响因素的作用方式和破坏特征分为 5 种类型：开裂失稳病害；水岩作用病害；风化作用病害；生物作用病害；人为活动诱发的病害。

## 4.2 石窟寺及石刻病害主要类型

依据石窟寺及石刻病害分类，一下从环境与载体地质病害和本体病害两个方面对石窟寺石刻的主要病害类型进行介绍。

### 4.2.1 石窟寺及石刻环境与载体地质病害类型

在地质营力作用、人为活动等影响下形成，对文物及人类生命财产造成损失、对石窟寺及石刻环境与载体岩体造成破坏的地质作用或地质现象称之为石窟寺及石刻环境及载体岩体地质病害。

根据我国石窟寺及石刻勘察工作与保护工作资料，古人在选择石窟寺及石

刻雕刻、营造地点时，考虑到了地质环境的安全性，依托的地质体工程地质条件一般较好，我国石窟寺及石刻地质环境及载体岩体是基本稳定的，一般不存在大规模的地质灾害现象。我国石窟寺及石刻载体岩体存在的主要地质病害，主要是局部岩体失稳，以及石窟寺及石刻环境有限规模的洪水、泥石流危害和地震危害，我国石窟寺及石刻主要的地质病害类型有 5 种：危岩体（崩塌）；滑坡；地下水渗水病害；洪水及泥石流；地震。

崩塌与滑坡属于斜坡破坏。石窟一般开凿在由于河流、冲沟切割形成的陡直崖壁之上，崖壁本身就具有进一步坍塌的趋势。后期洞窟开凿进一步破坏天然应力状态，形成一系列具有坍塌破坏可能的危岩体。在山体上方堆积体在自然情况下，风险性较高，崖壁坍塌、环境条件改变、土体强度丧失，导致这些崖壁上方松散堆积体滑动形成滑坡。这种滑坡直接对下方洞窟、附属建（构）筑、人员等造成极大威胁。而在石窟崖壁前，坍塌形成的堆积体有可能在后期自然（如河流冲刷）、人类活动（如土石方工程、地表水系统改变等），导致这些土体滑动，形成滑坡。

石窟寺及石刻环境与载体岩体存在的危岩体等地质病害，虽然对石窟寺及石刻安全的威胁是局部的，但其破坏的后果十分严重，往往是损毁性的破坏，同时对自然环境安全、人员安全构成威胁。因此，石窟寺与石刻长期存在斜坡破坏的威胁，是我国该类文物抢险保护工作的首要内容，其中以危岩体的坍塌破坏最为普遍。

#### **4.2.1.1 危岩体（崩塌）病害**

危岩体是指石窟寺及石刻岩体被多组结构面切割，在重力、风化营力、地应力、地震、水体等作用下与母岩逐渐分离，岩体结构不完整，具备崩塌的条件，出现了裂隙面扩展、变形、位移等崩塌现象，稳定性较差的岩体。危岩体虽然还没有发生崩塌破坏，但具备发生崩塌的主要条件，危岩体是潜在的崩塌体。

斜坡被陡倾的破裂面分割而成的岩土体，突然脱离母体并以垂直位移运动为主，以翻滚、跳跃、坠落方式而堆积于坡脚，这种现象和过程即称为崩塌。在石窟与石刻中，崩塌指陡直造像崖壁、洞窟、碑刻与造像在裂隙切割下，开

裂破坏，有失去稳定性风险叫危岩体。危岩体以突然脱落现象为坍塌。从规模大小可以分为山崩和坠石，文物上将表面风化开裂的一般称为松动块石。

坍塌的特征是：一般发生在崖壁的坡肩、坡面及洞窟悬空处；质点位移矢量垂直方向较水平方向要大得多；坍塌发生时无依附面；多是突然发生的、运动较快。

根据危岩破坏时的初始运动方式，将危岩分为倾倒式、滑移式、错断式、悬挑式、坐落式和坠落式等 6 类。

危岩体是石窟寺及石刻环境与载体岩体最为主要的地质病害。危岩体以及可能发生的坍塌破坏现象，是石窟寺及石刻常见的地质病害，几乎普遍存在于我国大型石窟寺、摩崖造像、摩崖题刻，是石窟寺及石刻环境地质病害中的主体病害类型。麦积山石窟、克孜尔千佛洞、须弥山石窟、龙门石窟、乐山大佛、炳灵寺石窟等大部分石窟崖壁岩体都存在危岩体病害的安全威胁，是石窟寺及石刻重点治理病害之一。

石窟寺及石刻危岩体病害与地质工程危岩体地质灾害不同的是：石窟寺及石刻危岩体病害规模小，出现的裂隙扩展、变形、位移等坍塌现象不显著。

#### **4.2.1.2 滑坡病害**

滑坡是石窟寺及石刻岩体，受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人工切坡等因素影响，在重力作用下，沿着一定的软弱面或者软弱带，整体地或者分散地顺坡向下滑动的破坏现象。

斜坡岩土体沿着贯通的剪切破坏面（带），产生以水平运动为主的现象，称为滑坡。滑坡的机制是某一滑移面上剪应力超过了该面的抗剪强度所致。滑坡的规模可以相差很大。

滑坡的特征是：通常是较深层的破坏，滑移面深入到坡体内部以至坡脚以下；质点位移矢量水平方向大于铅直方向；有依附面（即滑移面）存在；滑移速度较慢，多具有“整体性”。

我国石窟寺及石刻地质环境条件总体较好，不存在大规模山体滑坡地质灾害，但部分石窟寺及石刻仍存在小规模的滑坡病害，对石窟寺及石刻环境及载体岩体造成威胁。四川省广元皇泽寺石窟窟前坡体为坡积物堆积体滑坡体，坡

体的滑动变形对石窟寺环境，以及文物、人员造成安全隐患。重庆市合川钓鱼城遗址存在大量摩崖题刻，摩崖题刻崖壁前坡体为坡积物与侏罗纪泥岩基岩混合滑坡体，雨季水的作用诱发坡体蠕变变形，对遗址及摩崖石刻安全造成威胁。

#### **4.2.1.3 渗水病害**

我国石窟寺及石刻依托自然地质体，在开凿营造选址时，一般避开了有长期渗水，或严重渗水的区域，但自然地质体一般存在裂隙，降雨形成的上层滞水、裂隙水诱发的季节性渗水病害，普遍存在于我国石窟寺及石刻。龙门石窟、大足石刻、乐山大佛、彬县大佛寺、云冈石窟等石窟寺存在严重的渗水病害，对石雕像、石刻造成严重损害。

#### **4.2.1.4 洪水及泥石流病害**

洪水可以单独形成自然灾害，往往也衍生形成泥石流灾害。我国西北地区石窟寺，比如新疆克孜尔千佛洞、库木吐拉千佛洞、森姆塞姆千佛洞、甘肃敦煌石窟等均存在河流、山间沟谷洪水及泥石流冲刷、淹没的地质病害。

新疆克孜尔千佛洞的渭干河水系，洪水多发于6~8月，为融雪与暴雨混合型，具有忽涨忽落特征。由于第三纪砂岩、泥岩内有大量易溶盐和蒙脱石，雨水岩体极易崩解。因暴雨、洪水冲刷崖壁形成大量冲沟，是引发洞窟大面积崩塌的重要原因。森姆塞姆千佛洞窟区有一条间歇性河流，每年洪水下来，将结构松散的第三纪砂砾岩岩体冲掉一部分，造成洞窟下部悬空，危及洞窟安全。敦煌莫高窟窟前的大泉河，过若干年都要暴发一次洪水。1987年的洪水使底层的几个洞窟被淹，造成壁画破坏等危害。

根据《中国气候变化蓝皮书（2019）》，近几十年来，我国西北地区气候由暖干向暖湿转变，气候系统变暖趋势将进一步持续，极端天气气候事件趋多趋强，尤其极端气候事件增多增强，降雨量明显加大，极端降水量事件的频次呈增加趋势，西北地区河流、沟谷的洪水、泥石流灾害频次增加的危害，应引起高度重视。

#### **4.2.1.5 地震病害**

石窟寺及石刻地震病害是指地震破坏作用导致山体崩塌、滑坡等，造成石窟寺及石刻环境、载体岩体、文物等损毁破坏，并严重危及人员安全的破坏现

象。

地震对石窟与石刻的破坏主要来自地质波，震源发出的地震波是一种弹性波，地震波包括体波和面波两种。体波是通过地球本体传播的波；而面波是由体波在物质界面上形成的次生波，即体波以经过反射、折射而沿地面传播的波。各种地震波的传播速度以纵波最快，横波次之，面波最慢。由于横波和面波的振幅较大，所以一般情况下，当横波和面波到达时，地面振动最强裂，造成建筑物、石窟与石刻破坏。

位于陡峭崖壁或孤立岩体上的石窟石刻，在地震时，震动效应会因为孤立地形而叠加放大，从抗震上看，属于抗震不利地段。地震对石刻与石窟的破坏主要是导致岩石崖壁坍塌、洞窟与石刻破坏，另外岩体开裂将为后期的渗水、风化提供条件（图 4-1）。

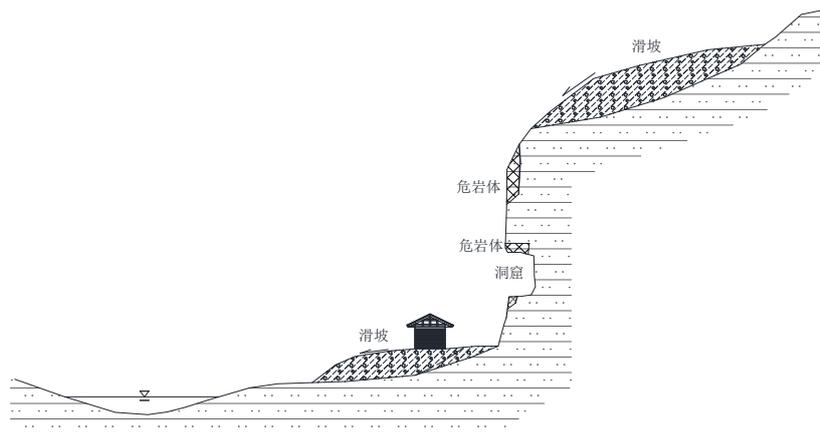


图 4-1 洞窟剖面示意图

因地震诱发的山体崩塌造成的文物破坏，往往使致命的。麦积山石窟历史上几次大规模崩塌都是自然地震引起的。从有记载的 1900 多年以来，地震在麦积山石窟附近的天水相当频繁，有严重破坏的达 15 次。公元 602 年（隋仁寿二年）的大地震，使开凿公元 566~568 年北周的七佛阁前廊柱和石雕龕檐及以下约 1000 立方米的崖壁震塌，此处的洞窟几乎全部崩塌殆尽，后人便有东崖、西崖之称。敦煌莫高窟地区属于地震活动频发地带。自公元 417 年以来，可查考的地震现象有 11 次，其中 1927 年、1932 年和 1952 年的地震较强烈。1927 年的地震将莫高窟 196 窟洞顶的一块壁画震落，并将佛龕上的塑像砸毁，部分石窟外檐崩塌。1952 年的一次地震又将 211 窟窟顶一块初唐壁画震落。

#### 4.2.2 石窟寺及石刻本体病害类型

石窟寺及石刻本体的范畴是指石雕像、题刻等雕造艺术品，以及与雕造艺术品紧密相连的、对雕刻艺术品起到支撑作用、并与雕刻艺术品有机结合的本体岩体。文物本体岩体是石窟寺及石刻重要的组成部分，是文物信息价值的支撑体。因而石窟寺及石刻本体包括雕刻艺术品和本体岩体两部分。在自然营力、生物活动、人类活动等影响因素作用下形成，石窟寺及石刻雕刻品及支撑岩体发生材料劣化、结构损伤、外貌形态变化等，对文物安全及文物价值造成损伤或损毁的破坏现象称之为石窟寺及石刻本体病害。文物本体病害直接发生在雕刻艺术品或雕刻艺术品本体岩体上，病害对文物价值的信息损害是最直接的。由于石窟寺及石刻艺术品的文物信息本体规模很小，一般为几厘米至几十厘米，本体病害更易发生，其损伤或损毁对文物价值的危害性更大。文物本体病害治理是石窟寺及石刻保护的核心工作。

石窟寺及石刻本体病害的自然营力是指引发石窟寺及石刻材料劣化、结构损伤的自然外力，主要包括地震力、大气营力（太阳辐射、降雨、降雪、温度、湿度、冰等）。

石窟寺及石刻本体病害现象主要表现在 3 个方面的变化：①本体岩体在物质成分的材料劣化和微观结构损伤变化；②力学状态的变化。力学状态的变化和调整，失去原有平衡状态，造成岩体结构变形、错位等现象，主要诱发结构安全问题；③外貌发生改变，包括形态的变化、颜色的变化等，主要影响或损害雕刻艺术品的文物价值。

诱发石窟寺及石刻本体病害的主要破坏作用主要有：①力学状态变化的结构失稳作用；②水与岩石化学反应的水岩作用；③风化营力产生的风化作用；④生物活动的生物作用；⑤人类活动引发环境变化的影响。

依据主要破坏作用，石窟寺及石刻本体病害类型分为 5 种类型：开裂失稳病害；水岩作用病害；风化作用病害；生物作用病害；人类活动诱发的病害等。

##### 4.2.2.1 开裂失稳病害

由于裂隙切割及裂隙发展演化，以及岩石结构损伤、材料劣化等影响，石窟寺及石刻本体岩体失去其既有的力学平衡状态，造成石窟寺石雕像、石刻、

壁画、塑像等发生开裂、变形、位移，直至垮塌，对石质文物形态、形制、结构造成损害，影响文物本体安全和文物价值的破坏现象称之为开裂失稳病害(图4-2)。

开裂失稳病害的对象是石窟寺及石刻雕刻艺术品和本体岩体，即石窟寺及石刻雕刻品本身，或支撑雕刻品的岩体，由于岩体力学状态的调整，失去原有结构平衡状态，产生开裂、变形、位移等，造成雕刻品，或支撑雕刻品岩体局部结构失稳或整体结构失稳的破坏现象。引发石窟寺及石刻岩体力学状态变化，失去原有平衡状态的原因既有岩石材料劣化，微观结构损伤，强度降低，承载力下降诱发变形；也有岩体材料劣化、结构形态发生变化产生营力集中，诱发开裂。

石窟寺及石刻本体开裂失稳病害，与地质环境及载体岩体的崩塌、滑坡等地质病害相比，规模小，开裂变形小，但由于直接发生在雕刻艺术品上，其损伤或损毁破坏是对雕刻品直接破坏，危害性极大，也是石窟寺及石刻比较普遍的病害现象。

比如，大足石刻宝顶山大佛湾地狱变相造像岩体出现的开裂变形破坏，开裂裂隙不断扩张，将原来在一起的沽酒女与汪崛摩罗饮酒两幅故事图分开，裂隙长5.5米，深5米，宽达8~20厘米，错落块体高4米，宽6米，深2.5米，岩体重量约54吨。随着裂隙的进一步扩展，变形岩体有崩塌破坏的危险。

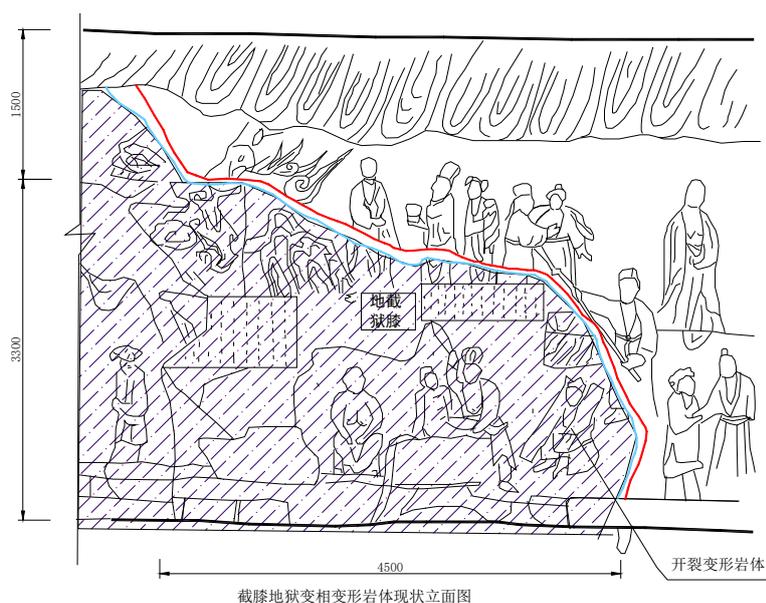


图 4-2 病害立面图

#### 4.2.2.2 水岩作用病害

水岩作用（Water-Rock Interaction—WRI）病害指在地质作用过程中，水溶液与矿物岩石之间作用，导致物质成分、微观结构、力学特性等发生变化。

水岩作用在我国岩土文物保护领域研究与工程实践中得到高度重视。多年的研究和保护实践已经证明，水是石质文物病害的第一大自然营力。1960年，王大纯教授在《云冈石窟工程地质问题》一书中明确提出“云冈石窟水岩长期而缓慢的相互作用是云冈石窟石雕遭受风化破坏的主要原因”。

水岩作用主要有力学作用、物理化学作用两种类型。水对岩土体的力学作用是相互的，一方面，岩土体中的应力场可改变岩土体的体积和空隙结构，从而改变水的运移通道，影响岩土体的渗透系数和渗流场；另一方面，岩土体中的渗流场通过施加岩土体面力（渗透压力和切向拖拽力）和体积力，来影响岩土体应力的分布。物理化学作用主要有水的软化作用、岩溶（溶解与沉淀）、冻融、基质吸力等，水对岩土体强度的影响，主要与两方面的因素有关，一是岩土体本身的结构，二是其物理性质、初始状态、含水率等。

水岩作用病害类型有：水侵蚀作用病害、水冻胀作用病害、水合及水解作用病害、水溶解作用病害。

水侵蚀作用病害是雨水和地表水通过直接冲刷，对石窟表面产生较大的机械冲击力，水的直接冲刷可将岩石中的可溶性胶结物和岩盐带走，直接增大了岩石表面孔隙率和酥松度。

水冻胀作用病害是岩体因软弱结构面含有地下水，当其随着气温下降而结冰时，体积增加 9.1%，对周围岩石可产生  $1000\sim 6000\text{kg/cm}^2$  的压力，超过一般砂岩的抗压强度，从而使岩石原有微小裂纹和层理构造扩大，使之产生破坏。经过多次冻胀作用，裂隙和层理不断地扩大、加深，最终使岩石崩解、脱落和酥粉。

水合及水解作用病害是岩石矿物中的硬石膏和其他黏土矿物吸水发生水合作用形成多种水化物，矿物吸收的水分子与晶架连接起来引起矿物体积的膨胀和收缩不仅产生较大的侧压力而且会加速岩石矿物成分的改变，例如，硬石膏（ $\text{Ca}_2\text{SO}_4$ ）吸水变成石膏（ $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）的过程，一方面产生了硬度低的新

矿物，削弱了岩石抵抗其他破坏作用的能力；另一方面在常温常压条件硬石膏水化成石膏，体积增大 31%，同时产生 0.15MPa 膨胀压力。硫酸钠发生水合作用转化成芒硝，体积增大 1.04 倍，产生 0.44MPa 膨胀压力。

水溶解作用病害是指水对岩石中部分矿物的溶解，导致岩石发生结构和性质方面的变化。水对岩石的溶解是普遍发生的，各种矿物的溶解度相差很大，岩盐、硬石膏之类矿物具有很高的溶解度，而其他的矿物溶解度很低，因此，溶解作用对由方解石、硬石膏、岩盐含量较高的岩石的破坏更为突出。

#### 4.2.2.3 风化作用病害

石质文物风化病害研究的目的是保存状态及发展趋势评估，阻止或延缓风化病害演化进程，达到珍贵文物延年益寿的目的；研究时限具体明确（石窟寺及石刻开凿一般有较为明确的时间记载，开凿是可以定为新鲜岩石状态，风化病害演化的起点），以及未来几十年、几百年时间的演化；研究的尺度只有几厘米至几十厘米（一般 20~30 厘米，最大 50 厘米）；研究的风化病害类型主要是微风化、中等（弱）风化、强风化三种类型。

石窟寺及石窟寺风化指在大气营力（包括温度、降水、风等）、生物活动以及人类活动等因素的影响下，石窟寺及石刻表层岩石发生机械破坏或化学分解变化等风化作用，引发石窟寺及石刻本体岩体材料劣化、结构损伤、外貌形态变化，以及颜色变化，影响了文物安全和文物价值的破坏现象。

石窟寺及石刻风化作用中的主要影响因素包括大气营力、生物活动、人类活动三个方面；病害的对象是表层岩石；病害的变化现象包括矿物成分、微观结构、外貌形态、颜色等多个方面变化。按风化破坏作用机理，风化作用病害分为物理风化和化学风化两种类型。

##### （1）物理风化作用

物理风化由于温度变化、水的冻融、盐类结晶、植物根劈等形成循环机械力的作用，导致岩石的机械破裂、结构破坏粉化现象。岩石本身的矿物成分和化学成分没有明显变化的现象。

在物理风化过程中，热是一个非常重要的因素。热的作用主要是因为岩石的热胀冷缩及岩石矿物成分热膨胀差异能力。

岩石为热不良导体，昼夜、季节温差形成岩石热胀冷缩。岩体内部温度为该地区的常年平均气温，表层温度受大气温度、太阳辐射、空气流通等因素影响，在气候温度影响深度范围内，出现浅表层热胀冷缩而内部相对稳定现象，相应浅表层岩石产生法向平行岩石表面的挤压张拉内力而出现片状剥落和张拉裂缝。如广西花山岩画，崖壁西晒，在晴天下午时，岩石浅表层 1m 范围了温度迅速升高，而黄昏时，温度又迅速降低，在岩石表面形成复杂的温度应力场，是花山岩画表层开裂破坏的主要因素。

岩石的成分非常复杂，除了灰岩、白云岩等外，一般为多种矿物的集合体。各矿物具有不同的热膨胀效应，即颗粒间存在热膨胀能力差异。即使同一矿物在不同方向热膨胀系数也存在差异，层状矿物这种差异最为明显，如云母、高岭石等。当温度升高或降低时，不同矿物及矿物不同方向变形不一致，将会在矿物颗粒间形成挤压或者张拉作用，除了导致颗粒本身破坏外，常以破坏颗粒的衔接，导致结构破坏为主。这种现象在花岗岩、砂岩、砾岩等最为明显。矿物的晶体越粗大，矿物类型差异越明显(如架状硅酸盐矿物与层状硅酸盐矿物)，在温度作用下，内应力越明显，岩石越容易风化。

另外一个物理风化机制为冻融与冰劈，这种现象一般发生存在冻融地区，如云冈石刻、新疆龟兹地区等。水在结冰时体积会膨胀  $1/9$ ，当这种膨胀发生在限定空间内，将会形成挤压作用。对于一些渗透性良好的砂岩、砖，吸水后受冻，将会导致内部结构受冰膨胀而破坏。而渗透性不好的岩石，这种效应就相对要弱，如龙门石窟的灰岩，冻融对岩石质地的破坏极其轻微。另外一种效应为冰劈，主要是针对有裂隙的岩体。当所处环境存结冰现象时，冰膨胀挤压裂隙面，导致裂隙尖端应力集中而撕裂开。当冰溶解时，水将向裂隙细小部位和深部迁移。这样溶~冻反复作用情况下，冰形成一种类似“斧子”效应，导致岩石不断破坏。因此冰劈作用主要发生在冻融反复的季节或地区。如云冈石窟崖壁表面钙质胶结砂岩受“冰劈效应”非常明显。

在石窟崖壁表面，另外一个非常明显的物理风化就是卸荷层裂现象。岩石在自然环境下受到垂直和水平方向的力，当河流切割、洞窟开挖等均会导致岩石表面应力释放，水平面上岩石垂直卸荷膨胀变形形成平行地面的裂隙，一般

叫层裂。在垂直崖壁，这种卸荷效应更为明显，崖壁一定深度形成走向和崖壁平行的高角度卸荷裂隙。而在洞窟顶板，这种层裂方向为垂直向下，特别是一些水平地层区洞窟，顺层理在洞窟顶开裂破坏非常明显，如大足石刻圆觉洞顶板。

盐的结晶作用在文物中是非常普遍的一个现象。一些易溶盐（如芒硝）、中溶盐（如石膏）在岩石内部反复结晶——溶解，不断向岩石为空隙迁移、富集并形成撑裂——松弛交替反复作用而使岩石破坏的现象。盐分的迁移直接受控于水分，特别是毛细水的运移，盐分总是在岩石一定毛细水运移高度范围内富集。另外这种盐分基岩作用存在一个累积效应，较低的盐分并不会对岩石造成明显的破坏。

## （2）化学风化作用

化学风化是岩石在水、氧及有机体等作用下所发生的一系列化学变化过程，引起岩石结构、矿物成分和化学成分的变化。存在成分流失或增加、新的成分形成的现象。化学风化是文物保护中最难应对的问题。

化学风化的实质是岩石由地下向地表转化过程中，适应地表环境而发生变化的过程。在岩石矿物内部，构成岩石的活泼元素，如 K、Na、Mg、Ca 等，被置换、迁移，较稳定的元素，如 Fe、Al 等，残留原地，导致原有矿物不断变化，形成与地表环境相适应的次生的更为稳定的矿物。化学风化非常复杂，有氧化、溶解、水化、水解、碳酸化、硫酸化、结晶等类型。在自然条件下，化学风化是多种方式的综合作用的结果，其中以溶解、水化、水解和氧化作用最为常见。大部分化学风化均以水为介质，因此，化学风化的影响深度与地下水的循环交替活动密切相关。

溶解作用在岩石化学风化中是一个普遍现象。水作为一种天然良好的溶剂，会导致矿物在水中溶解。易溶盐、中溶盐往往也是岩石的组成矿物，特别是西北干旱地区岩、土，遇水溶解是岩石破坏的一个极大威胁。以方解石、白云石为主体的碳酸盐岩石窟，如龙门石窟，这种溶蚀作用是石窟风化的主要模式。南方钙质胶结砂岩石窟、石刻，如川渝地区的侏罗纪、白垩纪红层砂岩，胶结物的溶蚀是岩石破坏的主要原因。与溶解作用相对应的是沉淀，当溶液过饱和，

溶解物沉淀下来，成分以原有矿物一致，但结构将完全破坏。

水化作用指水与矿物化合形成新的含水矿物，在一定情况下这种水分子又可以失去。比较典型的是无水石膏（ $\text{CaSO}_4$ ）和二水石膏之间（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）的转化，石膏在既是一些岩石的成分，同时在历史上，石刻与石窟修补过程中，曾使用石膏作为材料。石膏、无水石膏在潮湿环境下，吸水可以形成二水石膏，并导致晶体体积膨胀，而在干燥环境下，脱水导致体积收缩。这种水化作用将在岩石内部形成反复的挤压破坏作用，导致岩石破坏。除了石膏，水泥中钙矾石、易溶盐芒硝等发生这种现象也非常普遍。

水解作用指矿物遇水后发生水解并与  $\text{OH}^-$ 、 $\text{H}^+$  反应生成新的矿物。在文物保护中，最典型的是砂岩矿物中的长石的蚀变现象，长石中的  $\text{K}^+$  被水电离的  $\text{H}^+$  置换，并导致长石矿物结构有架状矿物向层状的高岭土、蒙脱石等更稳定的矿物转换，这种变化是不可逆。水解出的  $\text{K}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Mg}$  等离子又为盐害的发育提供了物质基础。

碳酸化作用指大气和土壤中的  $\text{CO}_2$  与水化合形成碳酸，并在水溶液中部分电离出  $\text{H}^+$  离子，增加了水溶解能力，加速岩石的蚀变作用。正常情况下，雨水为酸性。主要是因为空气中的  $\text{CO}_2$  的含量为 0.0314%（体积比），在  $25^\circ\text{C}$  时，由于碳酸化作用，雨水的 pH 值为 5.67。另外在土壤中（或山体内部）， $\text{CO}_2$  的分压远高于大气环境，对岩石的溶蚀能力更强。在长期遭受雨水冲刷部位，岩石主要以受水解作用、碳酸化作用。

氧化作用是矿物中元素与空气中的氧结合，形成新矿物的过程。一些岩石在缺氧、还原环境下形成，元素以低价态为主，而在地表，空气中的氧化环境下，低价态元素转变高价态，矿物结构破坏、种类转换。如沉积岩中在还原环境下形成的黄铜矿（ $\text{FeS}$ ）在地表受氧与水的作用，向褐铁矿（ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ）转换。磁铁矿（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）也会转化为褐铁矿。从宏观上看，岩石整体由还原色（灰色、黑色等）向氧化色转换（褐黄色、紫红色等），这也是很多露天石质文物表面颜色自然泛红（黄），与岩石氧化有密切关系。

按破坏形态，主要风化作用病害类型，或典型性风化作用病害类型有：板状风化、片状风化（含鳞片状）、粉末状风化、空鼓状风化、风沙剥蚀风化、堆

积覆盖风化和溶蚀风化。

板状风化病害：表层岩石单层剥落、开裂层的厚度大于 5 毫米，轴长大于 50 毫米板块状风化破坏。

片状风化病害：表层岩石单层剥落、开裂层的厚度小于 5 毫米，轴长大于 30-50 毫米片状风化破坏。当片状剥落呈现相互交错，类似鱼鳞状现象，也称为鱼鳞状风化病害。

粉末状风化病害：颗粒粒径小于 0.2 毫米，出现泥化破坏现象称为粉状风化病害；颗粒粒径大于 0.2 毫米，沙感破坏现象称为颗粒状风化病害。

空鼓状风化病害：表层岩体板状、片状与后部岩体脱离，但未开裂，形成空腔的破坏现象。

风沙剥蚀风化病害：风或风沙的磨蚀作用，表层岩体剥蚀脱落，造成局部缺失的破坏现象。风沙剥蚀常常发生在西北地区。

堆积覆盖风化病害：石窟寺及石刻表面堆积覆盖病害有多种状况，包括尘土覆盖病害、水作用沉积结垢或结壳堆积病害等。

溶蚀病害：指长期遭受雨水冲刷的石质文物，特别是碳酸盐类质地文物的表面形成的坑窝状或沟槽状溶蚀现象。酸性降雨会导致这一现象的加剧

板状、片状风化病害以力学状态损伤诱发为主，微观结构损伤诱发为辅的破坏形式，由于风化作用，表层岩石力学状态发生损伤破坏，尤其是抗拉强度降低，产生平行于临空面的张拉性破坏形式。其中以温差循环作用、干湿循环作用为主。鳞片状剥落除了力学作用影响外，风化过程中次生盐类的结晶作用影响较大。

粉末状剥落破坏现象，以微观结构损伤，力学状态损伤为辅的破坏形式，由于风化作用，表层岩石胶结物流失或长石等易风化矿物分解、蚀变，颗粒失去胶结联结作用，产生颗粒失去支撑的破坏方式。粉末状剥落泥质胶结物为主的岩石，粒状剥落以钙质胶结物为主的岩石。以岩石表层水渗流、溶蚀作用为主。

空鼓破坏现象主要砂岩类石质文物的风化破坏现象。通常空鼓空腔内填充的松散物质中，含有较多的膨胀性矿物（如石膏、芒硝、泻利盐等），其形成机

制：温差作用形成界面应力集中，表层岩石水渗流界面的平行水压力和可溶盐积聚的共同作用。

其他破坏形式的风化病害类型有：

机械损伤病害：主要指在外力作用如撞击、倾倒、跌落、地震及其地基沉降、受力不均等因素的影响下，发生的石质文物断裂与残损现象。①断裂：这里指的断裂而非一般意义上的裂隙，特指贯穿性且有明显位移的断裂与错位的现象；②局部缺失：指由上述原因造成的石质文物局部缺失与残损。

孔洞状风化病害：指石质文物表面溶解风化、软质夹杂物溶解脱落，而在石质文物上形成孔洞的风化现象。

表面泛盐风化病害：指由于毛细水与可溶盐活动，使得可溶盐在石刻表面富集析出现象。这类病害在石材质地较为疏松的砂岩、泥灰岩与凝灰岩文物表面较为常见，该类病害与毛细水活动密切相关。

风化裂隙病害：指由于自然风化、溶蚀现象导致的沿石材纹理发育，除薄弱夹杂带附近呈条带状分布且较深外，一般比较细小，延伸进入石刻内部较浅，多呈里小外大的V字形裂隙。

表面污染与变色病害：指石质文物表面由于灰尘、污染物和风化产物的沉积而导致的石质文物表面污染和变色现象。这类病害常见的表现形式有以下几种：①大气及粉尘污染：露天存放的石刻表面通常蒙蔽有大批灰尘及风化产物；②水锈结壳：石质文物露天存放或曾经露天存放，石刻表面形成的一层结壳（多为钙质）。在露天存放的灰岩类文物上极为常见。石灰岩凝浆及石灰钙华也包括在这类病害之中；③人为污染：指人为涂鸦、书写及烟熏等造成的石质文物污染现象。同时，由保护引起的变色与污染（例如采用铁箱、铁质扒钉等加固断裂部位而引起的石质文物表面变色和不正当涂刷引起的表面变色）也归入该类病害。

水泥修补：指对石质文物采用水泥类材料对文物进行黏结、加固、修补等改变文物原貌的现象

#### 4.2.2.4 生物作用病害

受生物生长及活动影响，石窟寺及石刻表层岩石的矿物、微观结构，以及

外貌等发生物理性质或化学性质的变化，引发岩石材料劣化、微观结构损伤、文物形态变化、色泽变化等，影响了文物安全和文物价值的破坏现象称之为石窟寺及石刻生物作用病害。生物作用病害是指岩石矿物、微观结构、外貌等受生物生长及活动影响而发生的风化破坏现象。生物通过生命活动的黏着、穿插和剥离等机械活动使矿物颗粒分解，是生物物理风化；生物通过自身分泌及死后遗体析出的酸等物质，对岩石的腐蚀称为生物化学风化。另外，露天保存的石窟寺及石刻，动物爪蚀破坏、动物粪便、动物的巢穴等，也对文物造成损害。

生物作用病害其内涵属于风化作用病害的范畴，但针对石窟寺及石刻的特点，生物作用病害的影响因素、作用方式及破坏现象具有特殊性、独特性，在文物保护学领域也是独具特色的研究领域，可以作为独立的病害类型。

石窟寺及石刻生物破坏作用可分为三种方式：①机械作用（物理作用）破坏，例如，岩石裂隙中的植物根系在生长过程中，对岩石施加压力，促使裂隙扩大以致崩解；②化学作用破坏，生物新陈代谢分泌出有机酸腐蚀岩石的化学反应或生物遗体腐烂后的生物化学反应，对岩石进行分解和破坏；③动物爪蚀破坏、动物排泄物以及飞虫等动物巢穴破坏形式，是露天文物特有的破坏形式。

依据生物的种类，生物作用病害主要划分为3种类型：植物作用病害；藻类及微生物病害；动物活动病害。

植物作用病害：植物包括树木、低等灌木、草本植物等，其破坏作用主要是根系生长过程中的根劈作用，导致石窟寺及石刻机械性开裂破坏。树木、灌木等植物根系进入石质文物裂隙之中，通过生长产生根劈作用的压力，对岩体结构造成破坏。

地衣及微生物病害：地衣与真菌等微生物常常共生，是共生复合体。生长在岩石表面的地衣及微生物根系穿插在岩石孔隙中，使岩石表面逐渐龟裂、破碎的机械破坏方式，以及根系所分泌的多种腐殖酸加剧岩石矿物成分劣化和微观结构松散、损伤等破坏过程。

动物活动病害：①鸟、蝙蝠等飞禽在露天石窟寺及石刻表面排泄粪便、尿等排泄物，积淀于石雕像、塑材、壁画上，不但污染文物的外貌，排泄物的污

物发生的化学反应对文物岩体成分、结构造成损伤、破坏。飞禽的危害在麦积山石窟、须弥山石窟、炳灵寺石窟、水帘洞石窟等石窟表现比较明显；②飞禽爪子抓刨石雕像、壁画、彩塑，形成爪蚀破损破坏，以及鼠蛇在窟壁中打洞，造成破坏；③昆虫、蜂蚁等飞虫在石窟寺及石刻表面、空鼓及其裂隙部位筑巢、繁衍，附着在文物表面引发的机械破坏、覆盖破坏以及化学破坏。

#### 4.2.2.5 人类活动诱发的病害

人为活动引发的病害主要有 3 个方面：大型水利工程建设产生的病害；大气污染及酸雨危害；人为生活活动的病害

##### (1) 大型水利工程建设引发的病害

大型水利工程建设，改变了石窟寺及石刻的自然环境条件、水文地质条件，诱发地下水、毛细水运移、小环境空气湿度等恶化，引发多种破坏问题。比如：刘家峡水电站的修建，造成炳灵寺石窟淤积了 30~40m 冲积物，掩埋了部分位置低的石窟，而且淤积还在不断升高，对石窟安全保存构成巨大威胁；另外由于淤积物不断升高，毛细水的作用加剧也对石窟造成危害。1977 年在库木图拉千佛洞前渭干河下游修建水电站，渭干河水位、河床升高，河水倒灌部分低位置的石窟，对石窟保存的壁画造成严重破坏；同时由于地下水位抬升，石窟内毛细水作用加剧，盐类循环结晶作用加强，也对壁画、地仗产生破坏。为减少损失，对低位置石窟的壁画采取切割异地保存的方法。1958 年修建黄洋河水库，原设计水库水位将淹没天梯山大部分石窟，因而于 1959 年采取紧急壁画、塑像切割搬迁的保护，但实际水位远远未达到设计高程，但对天梯山的损害已不可挽回。同时水库蓄水引发的地下水位抬升，造成毛细水升高、局部空气湿度增大的后患病害比较明显（图 4-3、图 4-4）。



图 4-3 刘家峡水库诱发炳灵寺石窟淤积



图 4-4 黄洋河水库对天梯山石窟的影响

## (2) 大气污染及酸雨的危害

大气环境污染对文物古迹的损害作用日趋严重，已成为世界共同关注的问题。环境污染的污染源有：酸雨、有害粉尘，以及工业、汽车燃油等造成的二次污染，其中酸雨危害是最大、最普遍的。

大气污染源主要有：风沙尘土、燃煤低空排放、汽车燃油和人为二次污染等。大气颗粒物中含有工业和人为污染的成分，其中就有燃煤排放出的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和汽车废气排放的苯溶有机物。故宫太和门石柱的汉白玉凤望柱，经 1923 年与 1985 年保存状况对比，六十多年间原清晰的雕刻花纹已风化的面目全非，花纹几乎难以辨认，通过 X-衍射和液相色谱等测试分析，大理石雕刻表面已被蚀变为石膏层，腐蚀部位岩石空隙中有煤尘颗粒。

大同云冈石窟周围被十多个煤矿包围，昼夜不停的运煤车带来大量煤灰粉尘。1987 年大同矿务局环保站在云冈窟区的监测资料表明，带煤灰的飘尘日均值达  $0.525\text{mg}/\text{m}^3$ ，已超过国家二级标准  $0.3\text{mg}/\text{m}^3$  近一倍。煤炭中的含硫量达 1%(重量比)。在显微镜下观察到煤尘粉粒已深入风化石雕的空隙中。采用 FT-IR 和 EDAX 等仪器分析，结果表明粉尘砂岩样品中有石膏化合物( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 的聚集，粉尘经测定  $\text{CaSO}_4$  的含量达 10%~15%。云冈石窟砂岩中  $\text{CaSO}_4$  的来源，主要包括两方面：一是周边环境由于燃煤释放的  $\text{SO}_2$  气体与砂岩基质中的碳酸盐胶结物发生反应，并由毛细水迁移到砂岩的表面层；二是由空气漂浮、沉降或吸附到砂岩表面的大量粉尘所携带来的（图 4-5）。



图 4-5 石刻表面粉尘堆积病害

酸雨是一种灾害性较强的雨水，酸雨病害是露天石窟寺及石刻最具代表性的环境污染病害类型。酸雨是指 pH 酸碱度小于 5.6 的雨雪或其他形式的降水。酸雨主要是由于工厂大量燃烧煤、石油、天然气，排放出大量的二氧化碳和含有硫、氮和氧化物进入到大气中，雨、雪等在形成和降落过程中，吸收并溶解了空气中的二氧化硫、氮氧化物等物质，在空中发生化学反应所形成的碳酸和硝酸，随着雨水一起降落到地面而形成的。酸雨加速露天岩石表面矿物成分溶解，出现空洞和裂缝，导致强度降低，文物表层岩石结构损伤，同时出现变脏、变黑的“黑壳”效应，影响文物价值。

酸雨酸雾是大足、安岳摩崖造像风化破坏的主要因素之一。雨雾对造像岩体侵蚀方式：雨水直接飘落到石刻岩体表面；雨水通过崖壁、地面溅落到岩石表面；降雨沿挑檐形成的跌落雨帘雨雾飘落到岩石表面；淫雨使空气中弥漫的水汽沉降在岩石表面。酸雾主要是酸性水分子以沉降的方式沉积在岩石表面形成凝结水或浸润到岩石表面孔隙中，酸雾无处不在，无孔不入，其侵蚀方式更广泛。

### (3) 人为生活活动引发的病害

1) 烟熏病害：早期朝拜或生活活动，比如在洞窟内烤火避寒，烟熏对石窟寺石雕像、彩塑等造成了严重的烟熏积垢污染，比如 20 世纪 20~40 年代，新疆库木吐喇千佛洞、山西云冈石窟等多个洞窟存在生活烟熏的病害。

比如云冈石窟第 38、16、13、15、14、27、24、23、19、18、21 窟等洞窟的前室东西壁下半部分和天花板顶壁角落处，存在深黑色、暗黑色或灰褐色烟熏区域，采用 EDAX 检测发现烟熏砂岩样品的 C、Fe 元素含量显著增加，C 的增加是烟尘附着的结果；电镜下的微观结构也表明，烟熏砂岩表面棱角圆润，

形状也不规则，表面布满了比较均匀的纳米级烟尘颗粒物。其成因主要是云冈石窟在政府保护之前的漫长岁月中，许多洞窟都曾经有人居住或常年举行祭祀活动，做饭取暖生火的油烟、来往香客的香烛灯火等，在佛龛、洞壁表面留下了大大小小浓淡不均的黑色烟熏垢层，明显影响了石雕造像的外观，对造像的艺术效果和美学价值有一定破坏。

2) 过度开发利用造成的危害：不科学和过度旅游利用对石窟寺及石刻环境及文物造成损害的破坏，尤其旅游业的迅猛发展，石窟寺洞窟内人流稠密造成瞬时湿度、二氧化碳浓度加大，加剧石雕像、石刻、壁画、彩塑的风化破坏。

3) 盗割破坏：盗割破坏是我国石窟寺及石刻，在特定历史时期特殊的破坏现象。主要是 20 世纪 30~40 年代，新疆地区部分石窟寺、甘肃省部分石窟寺、河南龙门石窟、巩县石窟等石窟寺，外国探险队对壁画、彩塑盗割，对石窟寺造成严重破坏（图 4-6）。



图 4-6 甘肃东千佛洞盗割破坏

## 4.3 石窟寺病害的影响因素及成因分析

### 4.3.1 地质营力因素及破坏作用分析

#### 4.3.1.1 矿物与地层岩性

岩石风化主要受岩石本身的结构与矿物成分控制，岩石形成环境与地表环境差异越大，岩石的抗风化能力越弱。

不同矿物本身的抗风化能力是不同的，一般说来，抗风化稳定性由大到小的顺序为：氧化物>硅酸盐>碳酸盐和硫化物。矿物的溶解性的高低是其抗风化

能力的一个重要指标，常见矿物溶解性顺序为：食盐、石膏、方解石、橄榄石、辉石、角闪石、滑石、蛇纹石、绿帘石、正长石、黑云母、白云母、石英。

石英是重要的造岩矿物，在自然环境中稳定性极高，几乎不发生化学溶解作用，一般只发生机械破碎作用。长石族矿物很多，其稳定性由高到低为钾长石、多钠的酸性斜长石、中性斜长石、多钙的基性斜长石。方解石（ $\text{CaCO}_3$ ）和白云石（ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）虽然同属于碳酸盐岩矿物，力学性质类似，但抗溶蚀能力方解石远低于白云石。

黏土矿物，如伊利石、蒙脱石、高岭石，为风化最后阶段产物，这些矿物在自然环境条件下，非常稳定。但是需要的是，黏土矿物均属于层状矿物，容易出现吸湿膨胀而脱水收缩的现象。黏土矿物是导致石质文物抗干湿循环能力关键因素。

岩浆岩在自然环境中的稳定性与岩石形成顺序相反，越早、温度越高形成的岩石抗风化能力越低。一般认为岩浆岩抗风化能力由大到小为：酸性岩（花岗岩、流纹岩）、中性岩（闪长岩、安山岩）、基性岩（辉长岩、玄武岩）及超基性岩（橄榄岩）。我国岩浆岩石窟与石刻比较少，但也不是没有。如蓟县千像寺镌刻与闪长岩之上，伊川吕寨石窟为基性的玄武岩，泉州九日山石刻为酸性的花岗岩。从抗风化能力上看，虽然九日山地处南方露天环境，由于其为抗风化能力较好的岩浆岩，保存状态明显好于北方蓟县的千像寺石刻。

沉积岩从成因上看，其主要成分为风化产物重新经历一个复杂的成岩过程形成，虽然可能伴随着轻微的变质作用，单从矿物成分上看，更能适应地表环境。沉积岩是我国石窟、碑刻主要分布的地层（或石材）。沉积岩在地表环境下，化学风化相对要弱。同时要注意，沉积岩类型众多，文物保护中主要面对沉积岩有：砂岩、砂砾岩、碳酸盐岩（灰岩与白云岩）、凝灰岩等。上述岩石在风化过程中，风化机理有显著差别。砂岩砾岩的风化主要受控于胶结物，泥质胶结最弱，其次为钙质胶结，最好为硅质胶结。碳酸盐岩的风化主要发生在表面以溶蚀为主。凝灰岩的风化与更是复杂，但一般类似于岩浆岩中的喷出岩。

变质岩更为复杂，总的说来，高温高压下形成的变质岩在地表稳定性相对要差一些。其抗风化能力上看，其顺序从大到小为：浅变质岩、中等变质岩、

深变质岩。我国石窟与石刻中，最主要的变质岩为大理岩，为沉积岩中的灰岩和白云岩重结晶而成，矿物颗粒增大，结构发生明显改变。另外龙门石窟的灰岩和白云岩也有轻微变质。从抗风化能力上看，大理岩在自然条件下的抗风化能力明显要弱，一般出现典型的砂糖状风化。另外，武当山为最为典型的区域性浅变质岩，大量的碑刻、石质构筑物存在严重的风化作用，风化差异性明显。一方面这种岩石的抗风化能力弱，另外也缺乏深入研究和保护，武当山大量露天文物存在严重的破坏。

岩石的结构与构造也是影响岩石抗风化能力的一个重要因素。

单一矿物的岩石热膨胀性、导热性一致，在温度变化时，胀缩性基本一致，不容易产生内应力而引起岩石的破坏，一般抗风化能力要好于多种矿物岩石。反之，复矿物岩石抗风化能力要弱一些。当矿物成分相同时，等粒结构比不等粒结构抗风化能力要强。颗粒越细，岩石的抗风化能力越好。主要是因为晶体越大，晶体间隙越明显，颗粒间容易脱离，而颗粒越小，比表面积越大，连接力越强，越不容易风化。这就是为什么汉白玉（大理石）与灰岩及白云岩矿物成分一致，但是抗风化能力反而要弱的原因。

#### 4.3.1.2 原生构造与地质构造作用

岩石在成岩过程中及后期地质构造运动中，会形成各种软弱带、结构面，这是控制岩石风化一个重要因素。

对于沉积岩，层理、沉积间断面（层面）、泥岩夹层（条带）等是岩石的薄弱环节，岩性与上下差异明显，且泥质含量一般较高，在自然条件下，风化速度明显要快。如川渝地区砂岩石窟风化凹槽基本上由黏土矿物定向排列富集带，在干湿循环作用下脱落而成，一些泥岩夹层形成了地下水的集中排泄通道。而乐山大佛、云冈石窟等，顺层理风化现象也是非常明显。灰岩（青石）碑刻，随着自然风化，也会将原始层理不连续性效应放大，出现片状剥落的现象。

变质岩中，原始的层面、片麻理、片理等构成了一般由云母类片状矿物定向排列而成，也是抗风化的薄弱环节，而且这类断续面在宏观上均匀分布，导致这类岩石的抗风化能力极差，保护难度极高，残留露天文物数量很少。比较典型的如湖北武当山石刻。

岩浆岩分为侵入岩和喷出岩，其中侵入岩的连续性最好，而喷出岩连续性相对要差。主要存在不连续面为流面、岩脉穿插面、岩体接触面等。我国岩浆岩石窟、石刻保存较好的主要在南方，如衡山碑刻、泉州九日山碑刻等。这些地方岩体酸性较强、抗风化能力较强，岩质均匀性比较好。

无论何种岩性，在赋存历史时期会遭受各种地质作用，形成由于构造而成的不连续面。如劈理、节理裂隙、各种断层，而褶皱、揉皱等将会除了会伴生各种次生结构面外，同时将原始结构面予以改造。在石窟与石刻中，裂隙按成因可分为构造裂隙、卸荷裂隙、风化裂隙。构造结构面按力学性质分为张拉而成的不规则断续面、剪切作用形成平直光滑面、波状起伏的剪切面。按重填物可分为泥质、钙质、硅质或者无充填。一般说来，钙质、硅质充填的结构面抗风化能力良好（在石质文物上一般形成白色的条纹）。泥质或无重填物的裂隙强度低，是后期风化的薄弱环节。

一个石窟区的宏观地形，往往受控于该地区的地层面、优势裂隙面、断层及褶皱展布。

软弱结构面的组合特点控制着岩石风化的形状。当三组及以上优势结构面切割岩石，岩石呈块状、棱角状破坏，当化学风化比较明显时，形成椭球状或球状。这种球状风化一般发育在岩性比较均匀的岩浆岩和厚层砂岩中。两组结构面切割时，岩石一般形成柱状或针状破坏，这种情况一般比较少见。而一组结构面呈优势结构面时，一般为片状、板状风化。这种现象在一些碑刻中非常普遍，这是因为当初刻碑时往往选择质地较好的砂岩、灰岩等，其优势结构面就是原生的一组沉积面。

#### **4.3.1.3 地形、地貌及微环境**

石窟寺地貌一般为河谷、沟谷地貌，具有相对比较特殊的地形地貌条件。

首先，能自然形成河谷地形，岩石的类型一般为砂岩、碳酸盐岩、胶结良好的砾岩等，岩石的强度较好，抗风化能力高。但是这种地貌下的岩石，卸荷作用一般比较发育，容易为渗水、坍塌提供良好的贯穿裂隙。

其次，河谷地貌具有比较特殊微气象环境，如山谷风，而石窟内部温度恒定的条件下，洞窟具有水汽蓄积效应。贯穿河谷容易导致局部风速加大，如龙

门石窟南北向 U 形河谷。而大足石刻大佛湾这种不贯穿的沟谷地貌，空气流通不畅，湿度较周边可能更高。

河谷朝向对石窟、石刻保护影响也很明显。朝南、朝西的崖壁文物本体风化程度一般较对应一侧明显要高。另外我国古代建筑中轴线、墓道以南北为主，这样造像南侧朝阳，其风化程度明显高于北侧。因此，阳侧温度较高将非常有利于快速风化。

### 4.3.2 水环境

水是地壳风化作用中最活跃的影响因素。水在自然界存在的方式多种多样。根据水的物理力学性质，岩土体中水的类型包括：气态水（雾水等）、固态水、液态水和结晶水，其中液态水为主体，也是对石窟寺及石刻保存状态影响最大的水。

石窟崖壁垂直切割地层，加上临河一般为地下水的排泄区。如果补给区域小，渗流途径短，地下水形成暂时性水流。而补给区域范围大，渗流途径远，地下水往往比较稳定，形成长期渗水。暂时性水流将导致文物本体的干湿循环，相对来说盐害较弱。而长期远距离渗水，地下水饱和度高，容易形成次生盐害。例如大足石刻卧佛区水害渗流途径长，石窟区渗水稳定，对石窟造成比较严重的盐害问题。

对于石窟石刻，常年浸泡于水中与常年处于干燥状态，岩石的保存状态一般较好。而最容易出现问题的是地下水波动带，即地下水高水位与低水位之间的区域。另外地下水毛细上升高度末端，盐害集中部位也是风化相对比较严重的区域。与石窟寺及石刻病害关联性最为密切的水有：裂隙水、凝结水、毛细水、雾水等。

#### 4.3.2.1 裂隙水

裂隙水，存在于岩石裂隙中的地下水。按含水介质裂隙的成因，可分为：风化裂隙水、成岩裂隙水和构造裂隙水；按埋藏条件，可以分为潜水或承压水。

风化裂隙水：赋存于岩体的风化带中，通常厚数米至数十米，未风化或风化程度较轻的母岩构成相对隔水层，因此，风化裂隙水一般为潜水。风化裂隙

水通常分布比较均匀，水力联系较好，但含水体的规模和水量都比较局限。

**成岩裂隙水：**赋存于各类成岩裂隙中。成岩裂隙是沉积岩固结脱水及岩浆岩冷凝收缩形成的裂隙，一般情况下，成岩裂隙多为闭合，不构成含水层。

**构造裂隙水：**构造裂隙水是石窟寺及石刻渗水病害中主要的影响因素。由于构造裂隙的分布密度、方向性、张开性、延伸性极不均一所造成的，裂隙水一般分布不均匀、水力联系不好。但对于层状岩层中，构造裂隙发育较为均匀，在层面裂隙的沟通下，构造裂隙水的水力联系较好，容易形成比较严重的渗水病害。大足石刻、龙门石窟、乐山大佛等石窟寺、摩崖造像的渗水病害的主要影响因素是构造裂隙渗水。

#### 4.3.2.2 凝结水

在自然环境中，由于石窟寺及石刻岩石表面辐射冷却，岩石表面空气温度下降到露点以下，在岩石表面上凝结而成的水，称为凝结水。凝结水产生的气候条件一般在天气晴朗、无风或微风的夜晚或清晨。我国石窟寺及石刻凝结水形成有两种类型：一是以气候条件变化为主的洞窟凝结水；二是以岩土内部水汽运移为主的洞窟凝结水。

我国石窟寺及石刻一般为露天条件保存，洞窟内微环境与露天自然环境，常常反差较大，夏季空气湿度、温度急剧变化，为石窟洞室凝结水的形成提供了条件。在夏季，云冈石窟、龙门石窟、大足石刻等石窟凝结水现象十分显著。

水汽在地下浅部土层或岩层空隙中运移凝结形成的地下水或在岩壁面形成凝结水。水汽由压力大处向压力小处移动，当大气温度高于土层和岩层的温度时，水汽就由大气中不断进入地下，使地下空气中的水汽过饱和而凝结成液态的地下水。凝结水在地下水形成的总量中异常微小。但在降水量少而昼夜温差较大的炎热沙漠地区，由于凝结作用强烈，常常形成凝结水。瓜州榆林窟顶层洞窟会出现凝结水现象，与岩体内水汽的运移有关。

#### 4.3.2.3 毛细水

毛细水的运动会和各种岩土相互作用，岩土中的可溶性物质随水迁移，使毛细水溶液通常具有温度、颜色、导电性等物理性质以及  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子。毛细水的运移及形成对石窟寺及石刻岩体的危害主要

表现为：诱发可溶盐积聚、沉积，造成可溶盐循环结晶破坏作用；是岩体长期处于潮湿状态，加剧材料劣化、微观结构损伤；（3）北方地区冰冻季节，毛细水带岩石会产生冰冻破坏。

#### 4.3.2.4 雾水

空气中所含的水汽多于一定温度条件下的饱和水汽量，多余的水汽就会凝结出来，当足够多的水分子与空气中微小的灰尘颗粒结合在一起，同时水分子本身也会相互黏结，就变成小水滴或冰晶。空气中的水汽超过饱和量，凝结成水滴，形成特定条件下雾水。雾有较强的吸附性，雾滴在低空飘移时，在不断与污染物碰撞，能使污染物积聚，让雾的有害成分大增雾天，污染物与空气中的水汽相结合，将变得不易扩散与沉降，一些有害物质与水汽结合，如二氧化硫变成硫酸或亚硫酸，氯气水解为氯化氢或次氯酸，氟化物水解为氟化氢。因此，雾天空气的污染比平时要严重得多。

四川盆地以多雾著称，重庆是闻名中外的雾都，大足石刻雾水酸化形成酸雾，其腐蚀性非常严重，对石刻造像的危害超过酸雨。根据监测分析研究，重庆雾水的化学成分是典型的硫酸型酸雾，大足石刻雾凝水组分浓度平均为  $21680 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，最高可达  $193059 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，雾汽受地物界面负压效应而降落在石刻表面凝结成水。雾凝水呈黑灰色，含多种降尘微粒，具有很强的腐蚀性。

#### 4.3.2.5 水岩作用

水是最大的风化营力，水岩作用是岩石化学风化最主要的作用方式。水分子中的  $\text{H}^+$  不是一成不变的，水分子本身经历着水的离子分解与合成。当铝硅酸盐受风化时，水分子的  $\text{H}^+$  与黏土结合，而  $\text{OH}^-$  和  $\text{CO}_2$  形成  $\text{HCO}_3^-$  离子，存在于水中，如果浓度饱和时，则  $\text{HCO}_3^-$  离解成  $\text{H}^+$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ ，形成碳酸盐，这又使第  $\text{OH}^-$  中的氢与氧分离。这个被分离出来的  $\text{H}^+$  又参与新的作用。

水参与岩石的许多化学风化作用，诸如：水解、溶解、氧化、水化、综合作用、离子交换、碳酸岩化、胶结与渗析等作用最为行之有效。风化作用是体系内自然发生的自由能减小的过程。矿物经风化作用被改造成为地表条件下最稳定状态的化合物，水中则富含溶质成为溶液。硅酸盐化学风化的最终产物是各

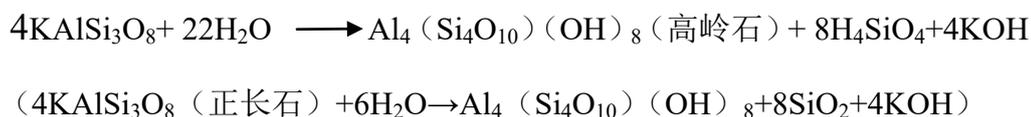
不相同的，因为，最终产物的形成受许多因素影响，即受介质的 pH 酸碱度、温度、组分、浓度、溶解气体（特别是二氧化碳和氧）以及其他因素（区域、气候、沉积量、植被等）的影响。水岩作用的主要作用方式有：水解作用、溶解作用、碳酸盐化作用、碳酸风化作用、水化作用和氧化—还原作用。

### （1）水解作用

风化作用中的水解是指水中的  $H^+$  和  $OH^-$  离子与岩石的元素之间的一种反应。作为造岩矿物基质的硅酸盐的水解，是地壳中具有代表性的水解作用，最为典型的是长石的高岭石化过程。

岩石中正长石 ( $KAlSi_3O_8$ ) 和钠长石 [ $Na(AlSi_3O_8)$ ] 都能发生水解反应成为黏土矿物高岭石  $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ ，经水解作用形成的  $KOH$ 、 $NaOH$  随水流失，析出的一部分  $SiO_2$  呈胶体随水流失，一部分形成蛋白石 ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) 留存于原地，松散的高岭石作为残积物。在长石高岭石化过程中，不仅由于钾离子、钠离子和二氧化硅被移去，体积缩小，能产生一定量的孔隙空间，而且自生黏土矿物对砂岩渗透率的破坏远大于对孔隙度破坏。在水的作用下，长石高岭石化过程逐步导致砂石产生酥粉、剥离脱落等病害。

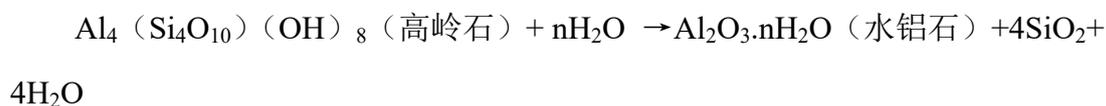
正长石水解反应式：



钠长石水解反应式：



高岭石水解反应式：



霞石风化较为复杂，其水解可以简写为：

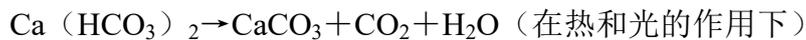


### （2）溶解作用

溶解是物理化学风化一种。水对岩石的溶解是普遍发生的，自然界中不存在绝对不溶的物质。就连铝硅酸盐这一难溶的天然化合物，在风化过程中也会

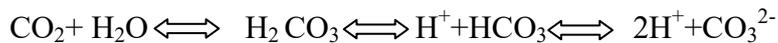
有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  分离到溶液中来。各种矿物的溶解度相差很大，岩盐、硬石膏之类矿物具有很高的溶解度，而其他的矿物溶解度很低。岩石在水中的溶解、以及土壤与岩石里的难溶化合物在水中的溶解或淋滤，都是形成天然水化学组分的主要过程。由于天然水和溶解岩石的成分不同，不是离子从固态到液态的直接过渡（比如：岩盐  $\text{NaCl}$  溶于水），便是在溶解过程中伴随着形成微溶或难溶新化合物的化学反应（比如：碳酸钙的溶解）。这两种现象在自然界中是等量齐观普遍存在的。

溶解作用对由方解石、硬石膏、岩盐含量较高的岩石的破坏更为突出。方解石在碱性溶液和酸性溶液中的溶解是完全不同的。当介质  $\text{pH} < 8$  时，方解石在水中的溶解度仍可超过  $100\text{mg/l}$ ，大气降水补给的侵蚀性  $\text{CO}_2$  使方解石发生如下水解： $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ，生成易溶性碳酸氢钙后， $\text{Ca}^{2+}$  随水逐步流失。呈溶解状态的碳酸氢钙在崖壁表面浓缩过饱和或因为光和热的作用重新分解析出难溶的碳酸钙（方解石）富集在石壁表面。

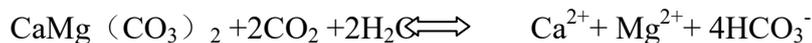


### (3) 碳酸盐化作用

$\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  与岩石的相互作用叫作碳酸盐化作用。含  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Fe}$  的岩石常常以碳酸盐化的作用而风，这一过程在碳酸的积极参与下进行，碳酸是  $\text{CO}_2$  与水的作用而生成的。天然水中的  $\text{CO}_2$  主要来源于生物化学作用其反应式为：

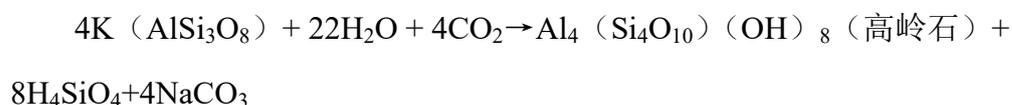


含二氧化碳的水与白云岩的相互作用，结果是白云岩被溶解，形成重碳酸镁型水：



### 碳酸风化作用：

溶解的二氧化碳与造岩的硅酸盐相互作用时，发生碳酸风化作用。长石的碳酸风化作用，可用下列反应式表示（以钠长石为例）：

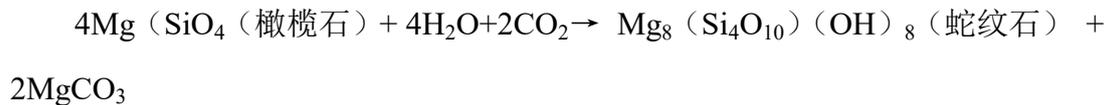




结果，钠长石变为高岭土，并形成  $\text{SiO}_2$  胶体及碳酸氢钠型水。

黑云母在碳酸风化作用下，分解为黏土矿物、钾和镁的重碳酸盐、褐铁矿及二氧化硅。

溶解的二氧化碳对铁、镁硅酸盐的水解作用属蛇纹石化：



#### (4) 水化作用

水文地球化学作用中的这一现象系指水“蒂合”到岩石或矿物的结构中而言。切不可把这一术语与相应的物理-化学术语等同起来，因为它只说明其局部有变异，即所谓形成固体水化物的水化作用。水或以配位结合的分子（结晶水）形式，或以不直接参与矿物结晶格价的分子（沸石水）形式进到矿物的结构之中。矿物在水化作用中，常增大自身体积。

硬石膏形成石膏时， $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。其体积约增大 30%。

赤铁矿形成褐铁矿： $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

褐锰矿形成水锰矿： $\text{Mg}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

水化作用和脱水作用常是可逆的。

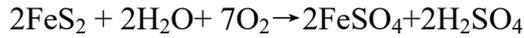
次生盐类矿物有石膏、泻利盐等， $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$  组分与溶解于水中的  $\text{O}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、等经以下一系列化学反应形成的：



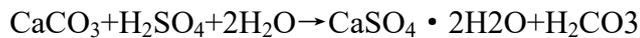
#### (5) 氧化—还原反应

物质的一个原子或离子失去电子（氧化），而另一个原子或离子获得电子的反应叫作氧化—还原。风化过程中的氧化常在游离氧作用于被风化物质时产生（其他物质或许起着氧化剂的作用）

硫化铁（白铁矿）同时发生氧化和水化反应：

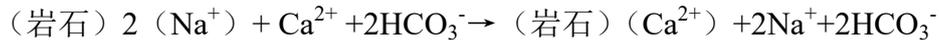


硫酸与灰岩作用，生成石膏：



离子交换反应：

天然水中广泛分布着水与围岩的离子交换作用，以碳酸氢钠水的形成：



### 4.3.3 大气营力因素及破坏作用

大气营力因素主要是指大气环境影响因素，主要包括空气的温度、湿度、风速、气压和降水，大气营力因素均由太阳辐射动力引起。大气营力因素对石窟寺及石刻病的主要破坏作用方式有：温度因素诱发的温差循环作用；湿度因素诱发的干湿循环作用；水及温度因素诱发的冻融循环作用；风及风蚀破坏作用，

#### 4.3.3.1 温差循环破坏作用

温度因素及温差循环作用：温度是物体分子运动平均动能的标志，温度是分子热运动的集体表现。温度作为大气主要因素之一，对石窟寺及石刻的主要影响是温度变化，即温差引发表层岩石应力状态的变化，当温差引发的应力状态多频次循环发生，将诱发表层岩石微观结构的损伤、破坏。温差循环作用引发的岩体风化破坏作用，称为温差循环破坏作用。

温差循环破坏作用主要发生在太阳辐射的石窟寺及石刻阳面，太阳辐射引发表层岩石温差循环变化，以及热的循环变化。由热引起岩体风化的原因不在于岩体温度的高低，而是岩体内部温度梯度变化。梯度变化越大，岩石内部产生的温度应力就越大。根据广西花山岩画、云冈石窟表层岩体温度梯度监测数据可知，大气温度和岩体温度呈周期性变化，变化趋势相同，当表面温度升高时，热量将向山体内部传导，而当外界环境温度降低时，山体内部热量又向岩体表面传递。表层岩体 0~5 厘米范围内的表层岩石温度梯度最大，向内部逐渐降低。当温度升高时，内部岩体与外部岩体发生不同程度的膨胀，外部的膨胀更为明显，此时表层岩体与内部岩体之间产生与崖壁表面垂直的拉应力。当温度下降时，岩体表面处于低温收缩状态而岩体内部仍然因较高的温度保持膨

胀状态时,形成平行崖壁的张拉应力。随着温度应力拉压循环次数的无限增多,损伤的累积导致“热应力疲劳”效应,表层岩体产生空鼓状、片状破坏。

#### 4.3.3.2 干湿循环破坏作用

空气湿度的动态变化,以及地下水季节性动态变化影响石窟寺及石刻岩体含水量动态变化,表层岩石含水量变化引发岩石微观结构、力学状态变化;当干湿引发的应力状态多频次循环发生,将诱发表层岩石材料劣化、微观结构损伤和力学状态的恶化,造成岩体风化破坏作用,称为干湿循环破坏作用。

引发石窟寺及石刻岩石干湿循环变化的影响因素包括:季节性空气湿度变化、降雨(降雪)气候空气湿度变化、地下水位变化、裂隙渗水的气候性变化等。

干湿循环作用引发石窟寺及石刻岩石风化破坏作用方式主要有:

1) 岩石胶结物流失:干湿循环侵蚀后,岩石中可溶矿物,尤其是泥质、钙质胶结物溶解流失,岩石自身胶结物量减少,孔隙度增大。特别是含有蒙脱石等膨胀泥土矿物的岩石,黏土矿物的吸水膨胀会引发十分显著的崩解现象。

2) 岩石微观结构损伤:岩石在经历湿润状态与干燥状态的循环过程中,其内部粒子间结合力降低,导致岩石粉状化、颗粒化的崩解现象。表层岩石体积变化导致石材内部应力出现,进而产生表面裂缝、空鼓甚至剥落。

3) 产生破坏应力:表层岩石在湿润时(含水率大于深层)会产生于表面平行的压应力,相反表层在干燥时(含水率小于深层)会产生于表面平行的拉应力;产生的应力超过石材本身强度时即会导致表面裂缝产生。

均质砂岩在吸水过程中产生了球面状分布的湿度应力,砂岩在球面状拉应力作用下呈洋葱式剥落。

4) 力学状态降低:模拟试验及数值模拟分析表明,干湿循环作用下岩石的弹性模量、抗压强度、黏聚力与内摩擦角都有不同程度的降低,抗风化能力减弱。

#### 4.3.3.3 冻融循环破坏作用

在寒冷气候条件下,石窟寺及石刻岩石中冻结的冰随着昼夜和季节变化发生的融化-冻结过程称为冻融作用;随着昼夜或季节的交替,冻融作用会反复发

生，引发岩石裂隙或孔隙中应力状态发生改变，造成岩石微观结构损伤、结构破坏，以及文物价值遭到破坏的风化破坏作用，称为冻融循环破坏作用。

冻融循环破坏的机理可以归结为冰晶的产生与生长导致岩石破坏。冻融循环破坏作用的诱因是岩石内孔隙水或裂隙水在低温时形成冰晶，冰晶生长产生的冻结膨胀压力引发岩体结构变化，冻结膨胀压力高于岩石拉应力时，微裂隙扩张，裂隙块体产生机械剥离、脱落，或岩石孔隙扩大，结构疏松，矿物颗粒剥落。冻融循环破坏作用产生岩石结构疏松、开裂、崩解破碎、剥落等破坏形式主要是机械破坏，属于物理风化破坏作用。模拟实验证明，砂岩冻融循环作用使得岩石弹性模量及强度减小，应力-应变曲线压缩性增大，弹性增长段减小，破坏的模式主要为剥落模式和断裂模式，最终由于冻融损伤而崩解。

我国北方寒冷地区的石窟寺及石刻，暴露在露天环境下的岩体，冻融循环作用是不可忽视的破坏作用。比如云冈石窟外立面岩石的片状开裂、片状剥离等风化破坏现象，其中主要影响因素是冻融循环作用。

#### **4.3.3.4 风蚀破坏作用**

风蚀作用是指风作为破坏营力，直接依靠气流的冲击力和紊流作用，把石窟寺及石刻表面的松散细小碎屑吹离，或风吹起沙粒并挟带沙粒形成的风沙流对石窟寺及石刻的冲击、摩擦作用，对石窟寺及石刻表面形态、外貌及结构造成破坏。风的吹蚀作用和磨蚀作用是互相联系的过程，针对露天保存的石窟寺及石刻，磨蚀的作用较为明显。

我国西北地区的石窟寺及石刻，比如甘肃敦煌莫高窟、榆林石窟、东千佛洞石窟，以及新疆克孜尔千佛洞、库木吐拉千佛洞等，石窟岩体主要为松散的第三纪泥岩、砂岩、砂砾岩，春秋冬季强劲西风的风蚀破坏作用十分显著。

风对敦煌莫高窟除了风蚀作用外，风携带鸣沙山的沙尘至莫高窟窟区，形成风沙淤积掩埋病害，对石窟壁画、彩塑等本体以及石窟环境造成严重威胁。

#### **4.3.4 可溶盐结晶—潮解循环破坏作用**

石质文物中的盐分会随着水分蒸发向表面移动，并在表层的石材空隙中析出形成白色粉状或絮状的盐结晶，盐结晶过程中体积膨胀引发岩石微观结构变化；并随着环境湿度的变化，岩石孔隙中的盐结晶发生结晶-潮解循环作用，引

发岩石裂隙或孔隙中应力状态发生改变，造成岩石微观结构损伤、结构破坏，称为可溶盐结晶-潮解循环破坏作用。

可溶盐对石窟与石刻岩石的破坏是非常普遍的现象。盐的阳离子主要来源与岩石自身的风化，而阴离子既有可能来自岩石本身，也有可能来自大气污染。盐的种类对岩石的破坏效应也有显著差异。可溶盐类型分为三种类型：易溶盐、中溶盐和难溶盐。易溶盐是指钠、钾、镁和钙的氯化盐类，碳酸盐和硫酸盐( $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )；中溶盐是指石膏( $\text{CaSO}_4$ )；难溶盐是指碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )。其中，对石窟寺及石刻影响较大的可溶盐主要有：氯盐类、硫酸盐类和碳酸盐类。

氯盐类主要为  $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$  等，这类盐的溶解度大。具有较大的吸湿性，如  $\text{CaCl}_2$  晶体能从潮湿的空气中吸收超过本身重量 4~5 倍的水分，导致体积膨胀，且所吸水分蒸发缓慢，具有较强的保水能力。

碳酸盐类主要有  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaHCO}_3$ ，这类盐存在吸附性的钠离子，并有极强碱性反应。在砂岩中，遇水时可能对岩石产生膨胀作用，导致岩石破坏，主要是因为吸附性钠离子与部分黏土颗粒作用，在颗粒周围形成结合水膜，降低联结力，导致砂岩结构破坏。

而需要注意的是  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$  作为灰岩、白云岩的组成矿物，属于难溶盐。当在溶解水中形成重碳酸盐 ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) 时变成易溶盐，且稳定性差，在岩石表面极易脱  $\text{CO}_2$  而沉淀下来，在文物本体表面形成白色污染物。这种现象在碳酸盐岩、钙质胶结砂岩中非常普遍。

硫酸盐是文物保护中需重点关注，这是因为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$  等硫酸盐导致的盐害是一个非常普遍的现象。这类盐在自然环境条件下容易出现相态转换，形成含水盐、无水盐等各种晶体，并出现体积的膨胀与收缩，导致岩石的破坏。下图为  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  系统相位图。该图中，既包括稳定状态的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (V)、 $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ，又包括了亚稳定状态的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (III) 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。而且这些相态形成温度、湿度条件，均在自然条件下极易实现。因此一般将这类硫酸盐视作具有松胀性的盐 (图 4-7)。

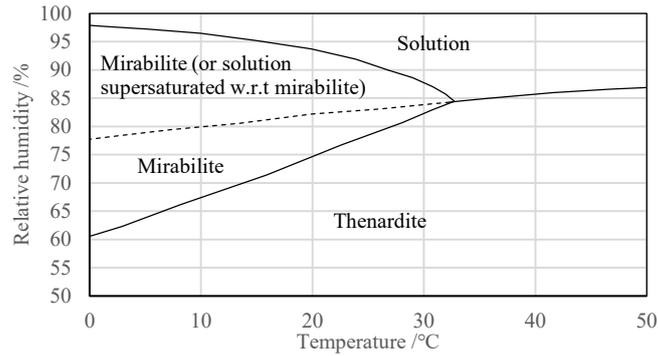


图 4-7 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O 相态图

很早以前，人们就发现晶体结晶时产生晶体压力。随着盐类结晶的认识加深，越来越意识到盐类结晶是风化作用最强的因子之一。可溶盐结晶循环破坏作用的破坏机理主要包括三个方面：可溶性盐的溶液在结晶以及生长时产生的应力、可溶盐水合作用生成的应力、盐结晶的受热膨胀，其中可溶性盐在结晶生长所产生的应力破坏作用最大。

比如：NaSO<sub>4</sub> 晶体在转化成 NaSO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 时，由于盐类结晶作用产生的膨胀压力为 0-40MPa；温度越低，压力越大，而砂岩风化层岩石抗拉强度一般小于 5MPa，盐类结晶循环作用破坏了岩石微观结构。此外，如 NaCl 等盐晶体的热膨胀率远远大于砂岩中其他矿物，在砂岩受热后，盐晶体膨胀产成应力，会对砂岩产生破坏。

在石窟与石刻保护中，经常还会遇到的一种叫石膏（CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O）的硫酸盐，古人也有将其作为修补材料或颜料的情况。石膏属于中溶盐，相对于芒硝和泄利盐，晶体中的水分子不容易失去。但是在一些特殊情况下，也可能发生相态转换，结构破坏。石膏的存在也容易在风化层表面形成一个胶结的硬壳。

可溶盐结晶循环作用引发的破坏，是石窟寺及石刻常见的风化破坏作用现象。

#### 4.3.5 微生物及其微生物破坏作用

生物风化、特别是微生物风化具有“无孔不入”的特点。微生物的种类多、体积小、分布广、适应能力与生命力强等特点决定了它们对岩石的破坏力很大。微生物是生物界最活跃的成员，在表生条件下无处不在而又充满活力。微生物是矿物风化的最重要的因素之一。微生物的活动可以导致硅酸盐、磷酸盐、碳

酸盐、氧化物和硫化物矿物被破坏并使一些重要元素（Si、Al、Fe、Mg、Mn、Ca、K、Na、Ti 等）从矿物中溶出。对石窟寺及石刻有影响的微生物类型主要有细菌和真菌两种。

#### 4.3.5.1 细菌

硅酸盐细菌（又称钾细菌）：“硅酸盐细菌”是指其溶解铝硅酸盐矿物、释放矿物态钾离子的功能特性。

氧化亚铁硫杆菌（简称 Tf 菌）和氧化硫硫杆菌（简称 Tt 菌）：这两种细菌对硫化矿产生生物浸出作用。

其他细菌：八叠球菌能在含有尿素的蛋白胨中生长并利用尿素产生氨，使介质碱性增强、破坏硅氧键、释放斜长石和石英等矿物中的硅；，假单胞菌在缺 Fe 环境中，能促进高岭石黏土矿物的分解以获取铁元素。两种杆菌（*Bacillus cereus* 和 *Bacillus Pumilus*）对去除石英砂中的铁和云母等杂质有显著的效果。

#### 4.3.5.2 真菌

真菌在矿物风化中的作用分为机械破坏与化学溶解两方面。真菌对矿物的溶解不仅可以单独进行，而且还能通过与植物及其根系形成共生体或菌根来实现。

曲霉菌与青霉菌都能促进岩石和矿物的风化。

地衣是藻类与真菌的共生体，能明显地促进岩石的化学风化作用。地衣一方面通过根系和菌丝的穿插和钻孔作用而促进矿物崩溃分解，另一方面通过新陈代谢或死亡腐烂作用而释放大量 CO<sub>2</sub> 和酸类物质，对矿物进行溶解。

菌根真菌的菌丝能穿透岩石而到达植物根系无法到达的与土壤溶液隔离的微域。外生菌根真菌产生的有机酸（如柠檬酸、草酸、延胡索酸等）与矿物晶格中二价和三价阳离子形成络合物或者通过 H<sup>+</sup> 替换黏土矿物层间钾来使矿物分解，并将其中溶解的化学元素通过菌丝传递给宿主。

#### 4.3.5.3 微生物破坏作用

生物风化是指矿物、岩石受生物生长及活动影响而发生的风化作用，它又分为物理方式与化学方式两种形式。生物通过生命活动的黏着、穿插和剥离等机械活动使矿物颗粒分解，是生物物理风化作用；生物通过自身分泌及死后遗

体析出的酸等物质，对岩石的腐蚀称为生物化学风化。微生物风化作用方式主要有酸的溶解作用、胞外聚合物的作用、生物膜的作用、酶解作用、碱解作用和氧化还原作用。

#### (1) 酸的溶解作用

酸的溶解作用是生物促进岩石和矿物风化的重要途径。生物的代谢产物中包含大量的有机酸和无机酸。无机酸主要有  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HCl}$  等，有机酸主要有柠檬酸、草酸、葡萄糖酸、甲酸、乙酸、醋酸、乳酸、琥珀酸、丙酮酸等。有机酸比无机酸更易于溶解矿物。

#### (2) 胞外聚合物的作用

细胞周围微环境中的胞外多聚物浓度大大增加，这些多聚物的主要成分是蛋白质和多糖（同时也包括单糖和二糖成分），它们含有大量的羟基、羧基官能团和有机螯合体。金属离子既能被  $\text{H}^+$  直接从矿物中置换出，也能与官能团、螯合体形成可溶性的金属有机复合体。这些物质能增大矿物-微生物表面反应的速率，使矿物的溶解速率比无微生物时大几个数量级。

#### (3) 生物膜的作用

生物膜是微生物分泌的体外聚合物堆积混合而形成的厚凝胶层，可黏附在矿物颗粒或固体物质表面。这些体外聚合物利用其吸附性为微生物获取从矿物中溶解出的营养元素。

#### (4) 酶解作用

Tf 和 Tt 菌具有亚铁氧化酶或还原硫氧化酶，能催化矿物中的亚铁和还原硫迅速氧化，导致矿物中的变价金属转化为溶液中的离子。

#### (5) 碱解作用

长石的溶解速率与溶液的 pH 酸碱度成“U”型关系，即在酸性区域，随 pH 增大而减小；在中性区域，溶解速率低，且受影响小；在碱性区域，随 pH 增大而增大。

#### (6) 氧化还原作用

Tf 菌与 Tt 菌可通过  $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  离子的氧化促进矿物的溶解。它们的表面富含脂类、多糖、蛋白质等生物大分子，这些大分子通过物理或化学方式吸附到

矿物表面，在有氧的情况下，利用空气中的  $\text{CO}_2$  作为碳源，将  $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  迅速氧化为  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ ，并从中获得生长所需能量，促进矿物的溶解。

#### 4.3.6 人为活动因素及破坏作用

人为活动对石窟寺及石刻病害的影响因素主要包括两个方面：一是大气污染的影响；二是大型建设工程引起小环境条件改变的影响。

##### 4.3.6.1 大气污染及其破坏作用

工业废气、生活燃煤、汽车尾气等人类生产活动及生活活动产生的污染源进入大气，参与大气循环过程，造成某些物质浓度升高，达到危害人员健康和石窟寺及石刻造成损害的破坏现象。

大气污染污染物主要包括两种：一是粉尘、烟液滴、雾、降尘、飘尘、悬浮物等气溶胶状态污染物；二是以二氧化硫为主的硫氧化物，以二氧化氮为主的氮氧化物，以一氧化碳为主的碳氧化物以及碳、氢结合的碳氢化合物等气体状态污染物（表 4-1）。

表 4-1 大气污染物类别表

类别	一次污染物	二次污染物
含硫化合物	$\text{SO}_2$ , $\text{H}_2\text{S}$	$\text{SO}_3$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$ , $\text{MSO}_4$
含氮化合物	$\text{NO}$ , $\text{NH}_3$	$\text{NO}_2$ , $\text{HNO}_3$ , $\text{MNO}_3$
碳的氧化物	$\text{CO}$ , $\text{CO}_2$	
碳氢化合物（碳氢氧化物）	$\text{C}_1\text{-C}_5\text{H}_n$ 化合物	醛，酮，过氧乙酰硝酸酯
含卤素化合物	$\text{HF}$ , $\text{HCl}$	
颗粒物	重金属元素，多环芳烃	$\text{H}_2\text{SO}_4$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}$

大气污染对石窟寺及石刻的主要作用方式是酸沉降，其中二氧化硫对石窟寺及石刻表面岩石的侵蚀作用是主要的破坏作用。

酸雨中硫酸、硝酸等直接作用于文物表面岩石中钙质胶结物，并参与化学反应，从而促使岩石风化破坏进程加快。酸雨除自身石灰质文物发生腐蚀外，它的作用还能使光滑岩石表面受损，从而加速在非降雨时间内气体污染物对岩石石灰质文物的酸性腐蚀。如被酸雨腐蚀磨损后变得粗糙了的岩石表面，容易吸收  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  等酸性气体生成硫酸和硝酸，增加腐蚀反应力度，扩大创面。

二氧化硫的干沉降或者湿沉降。二氧化硫或由它形成的硫酸作用于岩石中

的钙质胶结物反应生成了硫酸钙，硫酸钙随环境温湿度的变化反复再结晶，使得钙物质体积成倍增大，破坏岩石微观结构，形成疮包并造成岩石结构破坏，或者在岩石表面形成硬壳而产生剥蚀脱落。NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>在岩石表面的干沉降使石灰质文物表面盐分容易富集，加快了石灰质文物形成壳垢的过程。

另外，空气中二氧化碳污染气体，与水汽形成碳酸，使石灰石（或主含碳酸钙的岩石）转变为能溶于水的碳酸氢钙，随着水分的蒸发，这些碳酸氢钙在石刻表面形成硬壳状的碳酸钙沉淀，进而剥蚀脱落，损害文物原貌。

#### 4.3.6.2 建设工程的影响及其破坏作用

##### （1）建设工程引发小气候变化的破坏作用

位于甘肃省黄河边的炳灵寺石窟，1976年兴建刘家峡水电站后，水库的回水位将底部的几个石窟淹没，为了保护大多数文物，修筑了截水防水坝，但蓄水后石窟的病害逐渐加重。原因是刘家峡水库蓄水后，炳灵寺石窟沟谷至黄河区域水位抬高，水面扩大，使原来常年干燥的小气候发生变化，空气湿度骤然加大，库水位频繁变化，石窟区干湿循环随之变化，石窟寺所含蒙脱石等黏土矿物的膨胀—收缩循环变化，加剧了岩石微观结构的变化，石雕像表面粉状剥落等风化破坏作用现象明显。

##### （2）建设工程引发地下水位抬升的破坏作用

1965年新疆的渭干河上建设修建东方红引水枢纽，当时负责施工的单位擅自将蓄水位提升2.5米，1970年10月蓄水时，致使库木吐拉千佛洞一片汪洋，20多个洞窟坍塌，31个洞窟的珍贵壁画遭到严重破坏。后经主管部门干预，施工单位在河内修筑沙堤，反而将主河道引至窟区，直接冲刷洞窟，直到1979年才在窟区前修建截水挡水围堰，但由于围堰基础建在覆盖层上，未能起到截水作用，窟区地下水抬升，造成常水位时毛细水及可溶盐积聚和结晶破坏，河水暴涨时，窟内积水，位于底部的洞窟壁画损毁严重，最后不得对残存壁画进行切割搬迁保护。

##### （3）人工爆破震动引发的破坏

人工爆破震动对石窟寺及石刻安全造成影响。20世纪70~80年代，龙门石窟周边有洛阳水泥厂及乡镇采石场，连年采石放炮，一次爆破使用的炸药达4

吨，最近处距离龙门石窟核心区仅 1 千米。焦枝铁路的火车及穿越石窟区的洛临公路的汽车行驶产生的振动荷载作用，造成石窟开裂块体失稳。20 世纪 70~90 年代，由于采石、火车、汽车等振动的影响，发生了 12 次较大的石窟岩体崩塌事件，对石窟安全保存造成了威胁。

## 4.4 石窟寺及石刻病害典型案例分析

### 4.4.1 彬县大佛寺历史洪水危害案例

彬县大佛寺石窟位于彬县城西 10 千米处的城关镇（原属水帘乡）大佛寺村的清凉山脚下。彬县大佛寺原名“应福寺”，大规模开凿始于唐初，贞观二年（628 年）基本建成。彬县大佛寺前为泾河一级阶地，高程在 850~860 米之间，而泾河河漫滩高程在 840 米左右。大佛寺崖壁为泾河一级与二级阶地阶面，南依清凉山，面向泾河。大佛寺石窟所在的清凉山相对高差 70 米，是由红砂岩及泥质岩构成的，地势陡峭（图 4-8、图 4-9）。

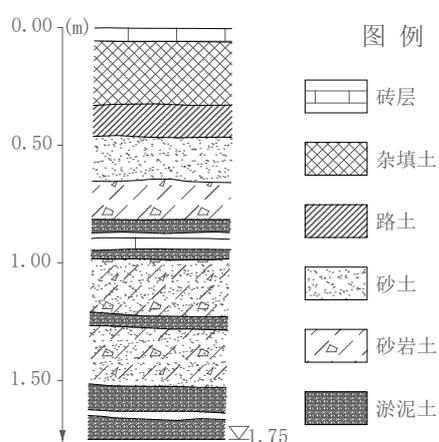


图 4-8 T1 探沟剖面图

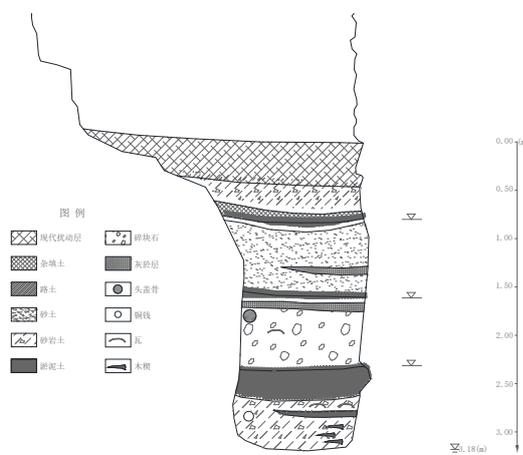


图 4-9 T2 探沟剖面图

从历史气象资料可知，唐代早期公元 618~700 年间（洞窟凿成于 628 年），泾河流域洪水没有后期规模大和频繁。也就是说，大佛开凿时，降雨量相对较低，而在开凿之后，该区域降雨量增加，水害更为严重。后期记录中，也多次出现洪水淹没泾河两岸村庄现象。如明世宗嘉靖十三年出现了明代泾河流域最大的一次洪水，淹没两岸居民牲畜无数，即洪水侵入泾河两岸一级阶地（石窟前平台大致高程）。

前期考古研究资料表明，在主窟内下部普遍覆盖有一层淤积物，淤积深度

自现地表向下 1.75~3.5 米不等，平均深 2.2 米。为查明淤积情况开挖两处探沟。

一号探沟（T1），位于石窟中轴线西侧佛像前，中心距中轴线 5 米。探沟南北长 3.1 米、宽 1 米、深 1.75 米。方位 280 度 T1 内分布有五层洪水淤积层和间歇层，间歇层内包含有倒塌堆积和人工活动痕迹。依地层自下而上可分为四期：

第一期，厚 50 厘米，下层为两期水成淤积，中夹有一层红色风化砂层，共厚 24 厘米；中层为红色砂土层，中夹有大块崩落砂岩块，出土有唐代青辊瓦；上层为一层厚 5 厘米的青白色淤泥。

第二期，厚 40 厘米，下层为风化堆积层，厚 26 厘米，中夹有尖舌筒瓦，粗布纹板瓦。以及红砂石块；其上为一白色薄淤层，同期存有灰烬层，薄淤层上为一层铺地砖，厚 7 厘米。佛像前石砌台基与此同期修筑。此层包含有琉璃瓦残块；砖层上有薄层路土；最上层为白色淤土层，厚 6 厘米。

第三期，厚 50 厘米，下层为红砂土，中夹有砂岩块及黑瓷片、白灰块；中层为红砂杂土，夹较多圆舌瓦砾，琉璃瓦块，明镜台下层雨道基础即建于此期，此层还出土模制小佛像；上层为路土，厚 18 厘米。

第四期，厚 35 厘米，下部为黄色杂土，其中有砖瓦残块及石灰点，上层为砖铺地面。

T2 位于佛像后隧道西侧，距中轴线约 3 米，探沟宽 1.1 米，长 3.2 米，深 3.18 米，方位 15 度，地层中夹有四层淤泥，依其结构，也可自下而上分为四期。

第一期，厚 95 厘米。此期下层为沙泥混合层，含水量大，中夹有一批湿透的木楔，均有使用痕迹。同层出土唐“开元通宝”币一枚，并夹有粗布纹青面筒瓦。此层中上部夹有一层 37 厘米厚的淤泥；此期上层为 35 厘米厚之青泥，含水量大。

第二期，厚 85 米。此期下部为 70 厘米厚之倒塌堆积层，中夹有大量砂岩块，并出土布纹瓦及人头盖骨一块。其上有一条灰烬层带，厚约 7 厘米。其中夹烧红之砂岩块。层顶为一条青泥带，厚 7 厘米左右。

第三期，厚 90 厘米。此期下层为 85 厘米厚之砂土层，当系风化砂岩组成，

层中夹有一道灰烬，中有黄色似木屑者，疑为烧香痕迹，此层中夹有多层路土；上层为 2 厘米厚的青白淤泥。

第四期，厚 98 厘米。此期可分三层。下层为深褐色杂土，厚 8~10 厘米；中层为 35 厘米厚之沙砾层，中夹有白灰点；最上层为扰乱层，中夹有瓦砾，白灰点及沙石块，为现代扰乱层。

最下层堆积出有唐开元通宝、青辊瓦、木楔等，时代大致可定为唐、宋。中层出有琉璃瓦及尖唇瓦，时代推测为明代左右。上层出白灰点及模制佛像，当为清代前后遗物，最上为近代扰层。

从上述资料分析，历史上唐、明代应该均出现过洪水入窟，内涝次生灾害应该更多，对石窟的造成了不小的破坏。

#### 4.4.2 龙门石窟潜溪寺裂隙渗水病害案例

龙门石窟位于河南省洛阳市城南 13 千米处，石窟开凿在伊河两岸香山和龙门山的碳酸盐岩崖壁上，始凿于北魏（494 年），历经东魏、齐、北周、隋、唐和北宋，前后达 400 多年，开凿大小窟龕 2300 余个，佛塔 40 余座，碑刻题记 3600 余块，造像 10 万余尊。龙门石窟区主要开凿的地层为寒武系中-上统的白云岩和灰岩。在自然营力作用下，龙门石窟主要存在三种病害的威胁：一是水害，主要是裂隙渗水病害；二是石窟载体岩体失稳病害；三是大气污染及其风化作用病害。其中裂隙渗水病害是龙门石窟存在最普遍、危害最严重的病害。潜溪寺洞窟的渗水病害在龙门石窟具有典型性，在我国石窟寺中也具代表性。

潜溪寺洞窟位于西山最北端，为唐中期开凿的大型石窟。潜溪寺洞窟裂隙渗水病害与潜溪寺洞窟地质条件密切相关。潜溪寺洞窟裂隙渗水病害的特点：渗流特点为季节性、暂时性渗流或滴水，与大气降水关联密切；渗水病害的水源为大气降水（降雨及降雪）；渗流通道为层面裂隙、层间破碎带、卸荷裂隙、构造裂隙构成的渗流网络（图 4-10）。

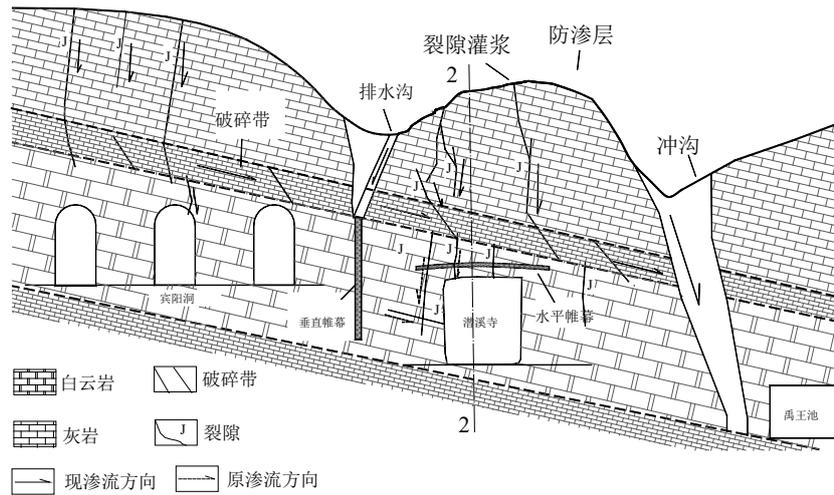


图 4-10 潜溪寺石窟渗流模式分析图

#### 4.4.3 云冈石窟水岩作用病害案例

云冈石窟石雕风化过程中，各种来源的水与岩体（石雕）发生了极其复杂而长期的反应。其中，较为重要的反应方式有：碳酸盐胶结物溶解、碎屑长石水解、盐类矿物结晶、氧化铁及氢氧化铁矿物形成和转变。

##### (1) 碳酸盐胶结物溶解

碳酸盐是云冈石窟岩石最重要的胶结物质，对岩石（和石雕）力学强度的贡献很大。由于环境变化，碳酸盐矿物与地表水、空气接触，发生以溶解为显著特征的水岩反应。当碳酸盐胶结物发生部分溶解时，剩余碳酸盐呈残留边状、悬浮状存在。碎屑颗粒内部的碳酸盐胶结物较粒间的更易保存。当岩石中的碳酸盐胶结物发生不同程度的溶解后，便在碎屑颗粒间或粒内形成新的孔隙空间。

##### (2) 碎屑长石水解

云冈窟区碎屑岩中微斜长石向高岭石转化反应的发生与该地区长期处于风化状态、气候偏旱，导致岩体内水溶液渗流活动不强及水溶液矿化度较高有关。长石风化成伊利石、高岭石等黏土矿物后，导致岩石中刚性颗粒含量减少，力学强度降低，黏土矿物晶粒间微孔隙增加，可溶盐结晶膨胀破坏性增强，石雕发生酥化破坏。

##### (3) 可溶性盐类矿物结晶

云冈窟区碎屑岩（含石雕）在风化过程中形成了多种可溶性盐类矿物。采用 X 射线衍射、扫描电镜与能谱、偏光显微镜等技术手段可以确定有石膏、

泻利盐、杜平石、水菱镁石、芒硝、石盐、方解石等。

#### (4) 氧化铁及氢氧化铁矿物形成和转变

云冈地区碎屑岩及石雕风化后，在碳酸盐胶结物溶解形成的孔洞内壁、风化黑云母边缘均有较多的铁锈色物质积聚。它们分别是碳酸盐胶结物和碎屑黑云母中的  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ，并进一步水解形成的。借助于扫描电镜，岩石样品中发现一些微小针状矿物，其化学成分以 Fe 为主，推测其为针铁矿；呈网状形态的风化产物，则不仅含 Fe，而且富 Ti、Mn 等，其矿物成分较复杂。

#### 4.4.4 乐山大佛水及其危害性分析案例

乐山大佛存在的水害（患）是最为显著的病害之一，也是最为严重的病害之一。乐山大佛存在水患的特点：

##### (1) 水患的类型十分复杂

与其他石窟寺相比，乐山大佛保存状况最大的特点是大佛整体几乎全天候处于各种水的包围中，水的类型包括：雨水、裂隙水、凝结水、毛细水、空气中的雾水、江水等（图 4-11、图 4-12）。

雨水：乐山大佛区域年平均降雨量为 1368 毫米，年平均降雨日数 175 天，即全年有一半天气在下雨，除了暴雨、大雨外，主要降雨方式常常为连续多日的绵绵小雨。雨水是对大佛影响最为显著、最为直接的水患类型。

裂隙水：乐山大佛裂隙水主要有两种方式，一是大佛表层岩体各种裂隙渗水，各种水储存或运移在大佛表层岩体裂隙中，并随着气候变换而变化。二是来自大佛岩体的地下水，崖壁岩体发育三至四层透水层，周边山体的雨水和地下水沿透水层运移，在大佛崖壁露头形成渗流。地下水渗流形成的渗水带长期处于潮湿状态，引发盐类积聚、风化剥蚀、滋生植物和微生物等。大佛胸部、腹部、头部的保存状态受裂隙水的影响比较显著。



图 4-11 大佛渗水位置及病害

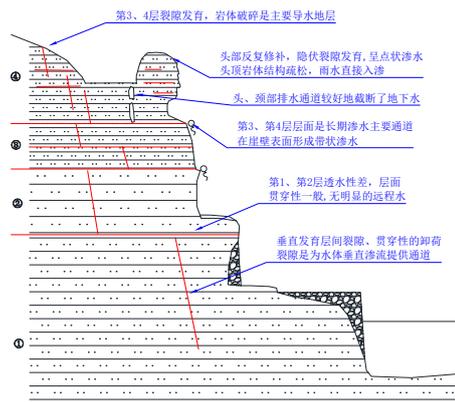


图 4-12 大佛渗水来源

**凝结水（雾水）：**乐山大佛空气湿度大，常年空气相对湿度超过 90%，常常处于过饱和状态，空气中的水分、雾水，在清晨和夜晚，常常在大佛表层形成凝结水，附着在大佛表面。凝结水具有时效性，形成频率高，对大佛的影响是潜移默化的。

**毛细水：**积聚在大佛岩体上的雨水、裂隙水和凝结水等，常常发生毛细作用，向雕像岩石全方位运移，形成毛细作用现象。毛细水就像人体的毛细血管，对大佛的影响是整体的，尤其对于长时间处于饱和状态的大佛岩体，毛细水的侵蚀作用是全方位的。

**江水：**大佛地处三江汇合处，直抵大佛基座岩体，主要影响大佛基座岩体。宽阔的江水，也加剧了大佛小区域空气的湿度。

## （2）水的侵蚀方式十分复杂

石质文物面临水的各种侵蚀方式在乐山大佛上均有存在，而且某些侵蚀方式更为突出、更具特点。

**水的冲蚀破坏：**雨水在大佛岩体表面形成漫流水，水流的冲刷及裹挟作用，将大佛表面酥松岩石颗粒、色泽矿物冲蚀掉，对大佛表层岩石直接造成冲蚀破坏。

**水的沉积覆盖损害：**水流在大佛岩体表面运移过程中，水流携带的泥沙、腐殖物沉积、附着在流经的岩石表面，造成大佛不同色泽、形态的条带状损害及污染。

**水的溶解破坏：**大佛表层岩体孔隙内的水或慢慢运移的水流，将岩石矿物

颗粒间的泥质、钙质胶结物软化，或溶于水，并随着水流发生运移，产生溶蚀破坏，造成大佛表层岩石结构酥松，风化状况加剧。

水的溶蚀破坏：乐山大佛城区大气污染属于煤烟型污染，主要污染物为二氧化硫和氮氧化物，大气中二氧化硫含量达到污染级，大气降水 pH 平均值为 4.51~4.69，属酸雨范围。与大气污染物结合形成酸性结合水，不但加剧了岩石泥质、钙质胶结物溶蚀、流失，而且也加剧了大佛岩石长石等矿物溶蚀破坏，岩石结构损害加剧，风化破坏作用加剧。

水岩作用破坏：盐类集聚及结晶作用破坏。水的不定期浸湿作用，造成岩石干湿变化，使得岩石孔隙中的可溶盐产生循环结晶作用，产生循环涨缩应力变化，破坏了表层岩石微观结构，加剧岩石风化破坏。大佛表层岩石存在的结构酥松、含絮状鼓包，其主要破坏作用是因水诱发可溶盐结晶作用造成的。

水滋养诱发杂草与灌木生长及其破坏作用：因水的滋养，在大佛岩体裂隙部位、凹陷部位生长杂草、灌木，是大佛存在的最为显著病害。长期渗水，形成了高等植物长期生长发育带，杂草、灌木生长对大佛形象、价值的破坏，杂草、灌木根系产生的根劈等破坏作用，对大佛表层岩石结构的破坏是显著和严重的。而不定期的清理、清除杂草、灌木，往往会连带清除掉大佛表面疏松的岩石，对大佛也是一种连带性的损害。

水滋养诱发微生物的生长及其破坏作用：暂时性渗水病害区，一般出现苔藓、地衣及霉菌病害。有水滋养时，微生物生长、附着在大佛岩石表面，呈“绿毛”污染，其分泌的腐殖酸侵蚀破坏岩石微观结构，加剧风化破坏；无水滋养时，干燥、死亡、变黑，形成苍痕满身的污染。大佛本体的黑色斑块、条带，黑鼻子等，是水不间断作用下，微生物生长、死亡过程变化造成的。

#### **4.4.5 花山岩画本体病害调查及标识案例**

##### **4.4.5.1 本体病害**

###### **(1) 空鼓**

花山岩画受到外部自然环境影响，如温度波动，夏季高温，暴雨冲淋，冷热交替等因素存在大量空鼓起翘现象。这些空鼓起翘对岩画及其游人构成极大危险。而且这些起翘，多平行岩面发育（图 4-13、图 4-14）。



图 4-13 岩体空鼓测量

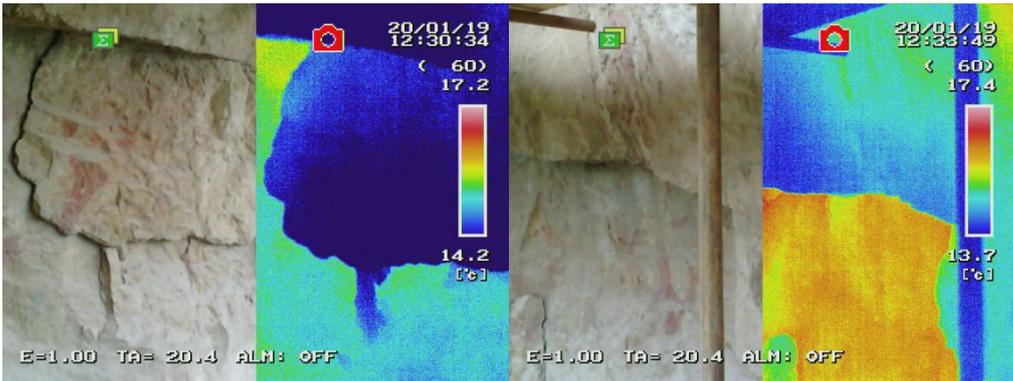


图 4-14 岩体空鼓红外热成像及可见光对比

## (2) 土锈结壳

花山岩画表面除存在较为酥松的表面积尘外，在积尘可以长期滞留的岩画凸起或者缓坡部位的表层已经形成结构较为密实的土黄色钙质结壳，这些结壳薄厚不一有的厚达 1 个毫米、有的只有几个为微米；这些锈蚀在岩画表面堆积逐步加厚，污染或者遮蔽下层绘画层，对岩画艺术体现及其长期安全保留构成极大影响。经化学分析其主要组成成分为碳酸钙 6.7%、石英 15.9%、石膏（硫酸钙）13.8%、草酸钙 6.6%等（图 4-15、图 4-16、表 4-2）。



图 4-15 花山岩画表面尘土及其钙质结壳污染影响照片

表 4-2 花山岩画表面黄色结垢组成

成分组成	石英	石膏	草酸钙石	方解石
百分比含量 (%)	15.9	13.8	6.6	63.7

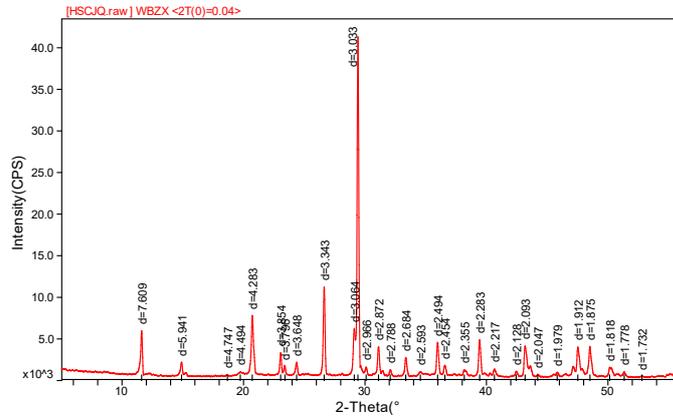


图 4-16 花山岩画表面黄色锈蚀 X-衍射分析谱图

在灰尘长期滞留部位，尘土与石灰岩基底溶解出的钙离子相互包裹，在周边空气中二氧化硫及其微生物分泌的草酸的作用下其逐步硫酸化或草酸化，在岩画表面形成难以溶解及其去除的硫酸钙与草酸钙类黄色的钙质结壳，这类污染锈蚀密实程度高，且呈逐步增厚加重趋势。该类污染堆积硫酸及其草酸化后难以溶解于水，一般水洗难以去除，使得去除难度增加（图 4-17、图 4-18）。



图 4-17 红色颜料表面黄色钙质结壳

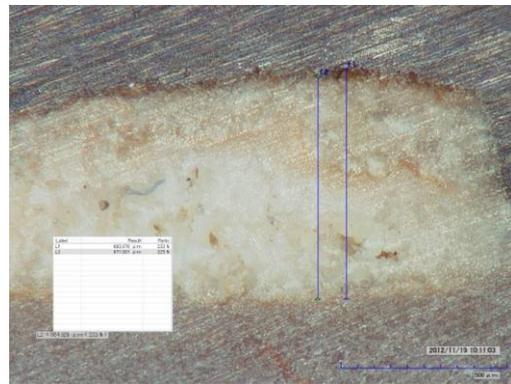


图 4-18 黄色结壳显微照片

### (3) 白色凝华

花山岩画属于石灰岩基材，岩面存在大量出水点，这些出水点的补给水源距离岩面普遍较远，裂隙水在裂隙迁移过程中逐步溶解石灰岩表面，形成富含钙离子矿化度极高（261.11~269.25mg/l）的  $\text{HCO}_3\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Ca}$  型水体，这些崖壁渗水在岩画表面蒸发脱水出水富集区域形成钟乳石；而出水较少的局部渗水点形成白色点状或条带状钙质凝华污染遮蔽岩画表面（图 4-19~21）。



图 4-19 岩画表面斑点状白色岩溶物堆积



图 4-20 表面厚层钟乳石

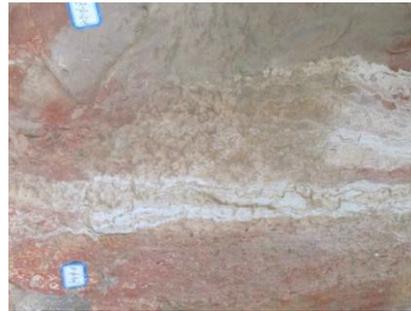


图 4-21 条带状岩溶覆盖

由于钟乳石形成的地质年代远远早于岩画的绘制年代，而且所有岩画画面的颜料层均绘制与钟乳石之上，故不将溶岩堆积形成的钟乳石列入岩画污染之中。现场采集白色溶岩斑点及其条带状薄层岩溶堆积物进行 X-衍射及其结构剖面分析白色结构较为紧密且与底层基岩或颜料层结合密实，厚度一般在几个微米到几个毫米不等，其主要组成成分为：石英 0.7%、石膏 4.8%、方解石 91.7%、文石 2.8%（图 4-22~24、表 4-3）。



图 4-22 白色凝华显微照片



图 4-23 白色凝华结构剖面照片

表 4-3 花山岩画表面白色结垢组成

成分组成	石英	石膏	文石	方解石
百分比含量 (%)	0.7	4.8	6.6	91.7

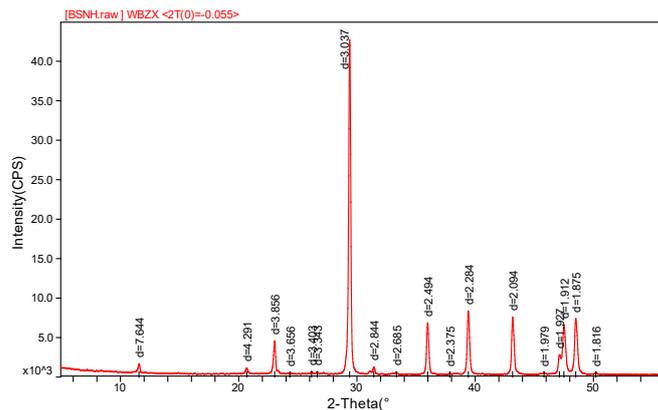


图 4-24 花山岩画表面白色凝华 X-衍射分析谱图

#### 4.4.5.2 生物病害

花山岩画绘制与左江断崖之上，露天保存，在其表面存在局部生物侵蚀现象，总体来说花山岩画生物病害可以分为树木杂草生长（根劈破坏）、土蜂虫蚁筑巢及其表面微生物（地衣、苔藓）侵蚀三大类型，其中树木杂草已在一二期保护工程中予以处理或准备处理，故不列入本次表面污染中；目前花山岩画主要生物污染为微生物侵蚀和土蜂筑巢带来的表面污损现象，其中以微生物，地衣苔藓及其藻类侵蚀表现最为突出且所占面积也最大（图 4-25~27）。



图 4-25 花山岩画表面微生物侵蚀照片（左宏观，右细部）



图 4-26 花山岩画表面虫蚁巢穴污染



图 4-27 花山岩画树木杂草生长

经采样分析花山岩画表面生长的微生物为南方山体石头表面常见的地衣（*Lepraria* sp. 癩屑衣、*Verrucaria* sp. 瓶口衣）、苔藓（长叶青藓 *rachytheciumrotaeaanum* De Not、褶叶小墙藓 *Weisiopsis anomala* Broth）等藻类群落，显微剖面显示该类污染物本身较为酥松且与本体结合不牢固（图4-28~30）。



图 4-28 岩画表面微生物剖面结构显微照片

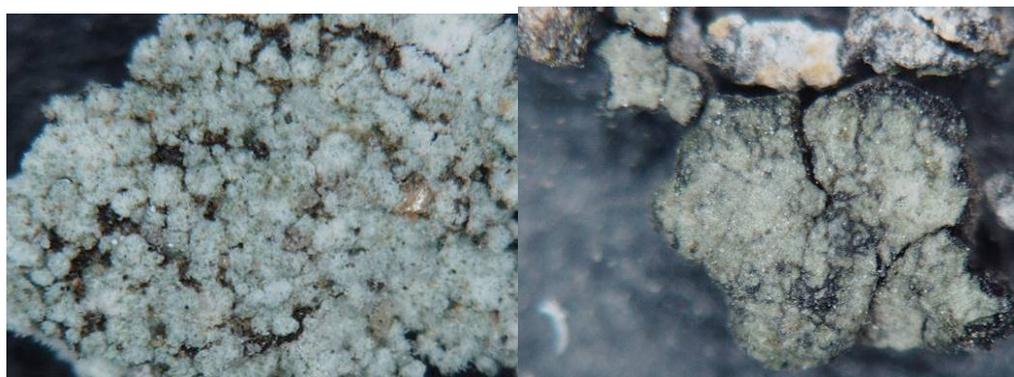


图 4-29 花山岩画表面地衣检查显微照片  
（左 *Lepraria* sp. 癩屑衣，右 *Verrucaria* sp. 瓶口衣）



图 4-30 花山岩画表面苔藓检查显微照片

(左长叶青藓 *rachytheciumrotaeatum* De Not, 右褶叶小墙藓 *Weisiopsisanomala* Broth)

#### 4.4.5.3 人为病害

##### (1) 水泥喷斑

花山岩画依附左江断崖岩面绘制而成，岩体存在部分危岩体，在前期保护过程中为了解决岩壁整体稳定性，对局部危岩进行过裂隙水泥加压灌浆及其锚固处理，处理过程中，极少数壁画表面被灌浆浆液（水泥）斑点喷溅，构成极少量表面污染。其主要成分为硅铝酸盐（图 4-31）。



图 4-31 花山岩画表面水泥斑点污染

##### (2) 涂写

花山岩画在其参观通道入口及其岩画较低部位，存在较多的人为涂写，以毛笔涂写的黑色墨迹为主，且多为游客涂写的“××到此一游”，无任何历史及其保留价值。且已构成对岩画整体美观及其历史价值体现的损害。结构照片显示其主要浮于岩体或岩画表面，其化学组成以糯米汁和无定性的炭黑为主。对花山岩画的整洁及其艺术体现构成不必要破坏（图 4-32、图 4-33）。

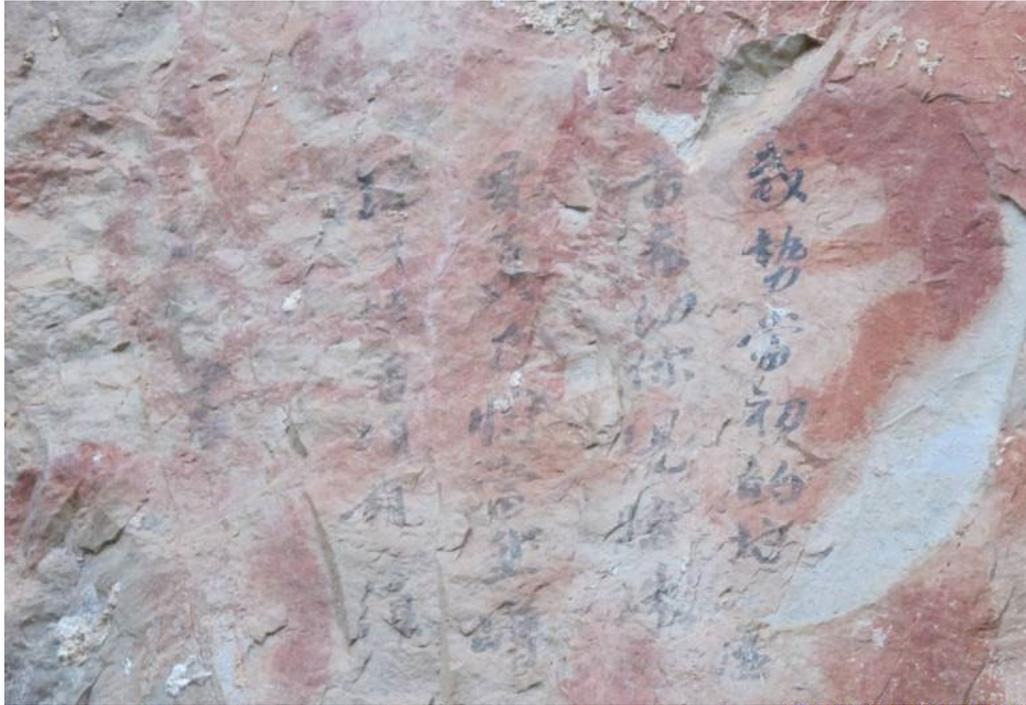


图 4-32 花山岩画表面墨迹涂写污染

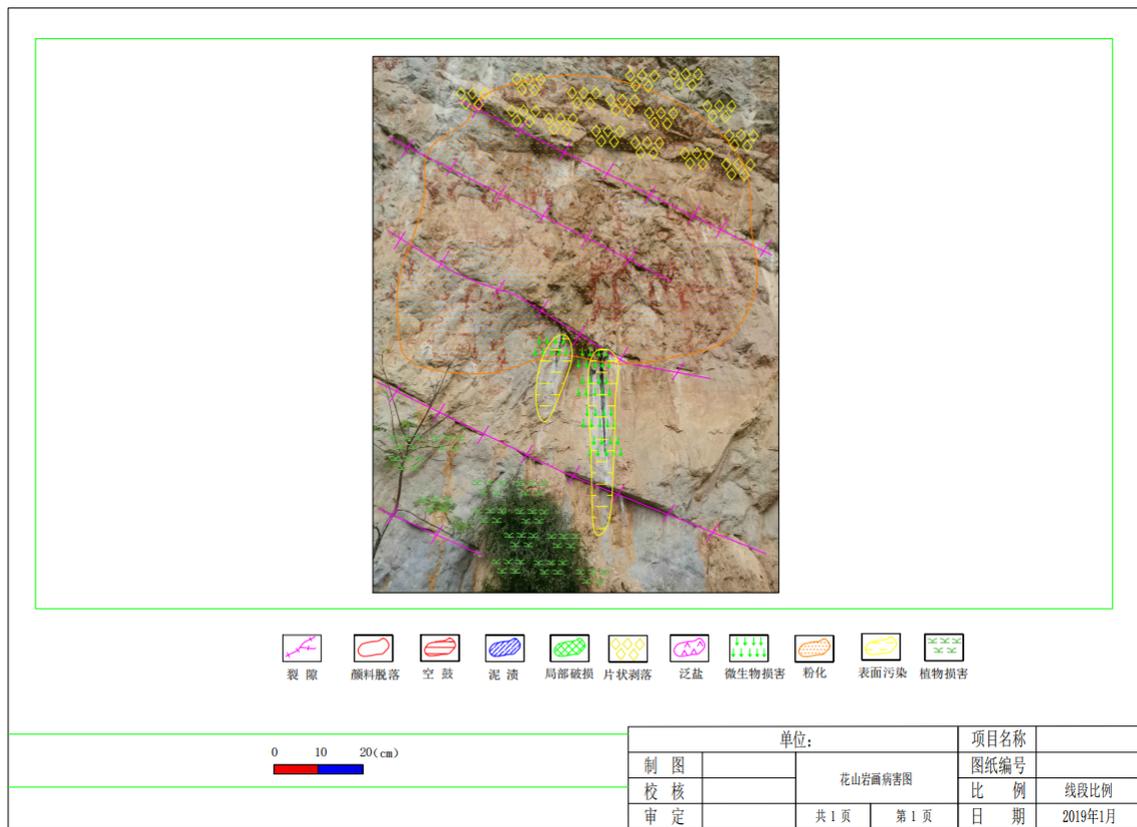


图 4-33 花山岩画病害分布示意图

## 5 中国石窟寺及石刻保护工程勘察

### 5.1 保护工程勘察基本内容与要求

石窟寺及时刻保护工程勘察，总体应按岩土工程勘察和石质文物病害勘察两部分开展工作。甲级勘察项目（乙级、丙级勘察项目有必要时）还应开展环境工程地质问题勘察。各类文物勘察工作基本内容及深度要求可参照表 5-1 执行。

表 5-1 石窟寺及石刻保护工程勘察工作基本内容及深度要求规定

类型	工程勘察内容及基本深度要求	
	岩土工程勘察（以保护单位为对象）	文物病害勘察
石窟寺、摩崖造像、摩崖石刻、岩画等与地质体相连的文物类型	查明文物所在区域工程地质及水文地质条件，对文物所在场地条件及围岩的稳定性进行评价。	查明文物现存的病害类型、分别情况、严重程度及形成机理。
采用多块石材作为构建材料建造的各类地面建筑物及构筑物	查明文物所在区域工程地质及水文地质条件，对文物所在场地条件的稳定性进行评价。	
采用单块石材雕刻的巨型碑刻、单体石刻（体量 $\geq 4\text{m}^3$ ）（单独为保护单位）		
采用单块石材雕刻的一般碑刻、单体石刻（体量 $< 4\text{m}^3$ ）（附属于其他保护单位或为保护单位组成部分）	无须单独开展岩土工程勘察工作，只需查清保护对象岩性和岩石相关的物理力学性质，如需其他资料可参考文物保护单位已有岩土工程勘察成果。	

### 5.2 石窟寺及石刻保护中岩土工程勘察

#### 5.2.1 基本内容及要求

岩土工程勘察技术方法主要包括工程地质测绘与调查、勘探与取样、原位测试与室内试验及监测四类。工程地质测绘和调查是岩土工程勘察的基础工作，

一般在勘察的初期阶段完成。该方法的本质是运用地质、工程地质理论，对地面的地质现象进行描述，分析其性质和规律，并借以推断地下地质情况，为勘探、测试工作等其他方法提供依据。在地形地貌和地质条件比较复杂的区域，必须进行工程地质测绘，但对于地形平坦、地质条件简单且较狭小的区域，则可采用调查代替工程地质测绘。工程地质测绘是认识区域工程地质条件最经济、最有效的方法，高质量的测绘工作能相当准确地推断地下地质情况，起到指导其他勘察方法的作用。鉴于该方法具有无损性，在地层出露较好区域，高质量的测绘工作可节省大量的勘探工作，所以在这些区域应加强该方法的使用和成果的综合应用，如石窟寺类石质文物保护工程中的岩土工程勘察工作。

勘探工作包括物探、钻探和坑探等方法。它是用于调查地下地质情况的方法，还可利用勘探工程，进行取样，开展原位测试和监测工作。应根据勘察目的及岩土特性选取上述各种勘探方法。物探是一种间接的勘探手段，它的优点是较之钻探和坑探轻便、经济而迅速，能够及时解决工程地质测绘中难以推断又急待了解的地下地质情况，所以常与测绘工作配合使用。它又可作为钻探的先行和辅助手段，鉴于该方法对环境的影响极小，比较符合文物保护工程勘察中“最小干预”原则的要求，故建议应将其列为首选的勘探方法。但是物探判释成果往往具多解性，方法的使用又受地形条件等的限制，成果需通过勘探工程验证。钻探、坑探、槽探等统称为勘探工程，均是直接勘探手段，由于这些方法在工作期间或多或少都会对环境造成一定影响，故在文物保护工程勘察工作不主张大范围的使用。但是作为直接勘探手段，能可靠了解地下地质情况，在岩土工程勘察中是必不可少的。其中钻探技术使用最为广泛，可根据地层类别和勘察要求选择不同的钻探方法。坑探工程的类型较多，应根据勘察要求选用。勘探工程一般需要动用机械和动力设备，耗费人力、物力较多，有些勘探工程施工周期又较长，而且受到许多条件限制，加之对文物本体和环境可能产生的负面影响，所以在选择时应慎重考虑各方面因素，以选取最合理、可靠的技术方法，布置勘探工程应以地质测绘和物探成果为依据，避免盲目性和随意性。

原位测试和室内试验主要目的是为岩土工程问题分析评价提供所需的技术参数，包括岩土的物性指标、强度参数、固结变形特性参数、渗透参数和应力

与应变时间关系的参数等。原位测试一般借助勘探工程进行，是详细勘察阶段的一种主要勘察方法。各项试验工作在岩土工程勘察中占有重要地位。原位测试和室内试验各有优缺点。前者的优点在于测试工作不脱离原有环境，基本上在现有应力条件下进行试验，所测定的岩土体的尺度大，能反映宏观结构对岩土性质的影响，代表性好，周期性较短，效率高，尤其是对于难以采样或控制采样的岩土层仍能通过试验评定其工程性质，但是缺点是试验时的应力路径难以控制，边界条件比较复杂；有些试验耗费人力、物力较多，不可能大量进行；后者使用历史悠久，其优点是试验条件比较容易控制（边界条件明确，应力应变条件可以控制等），有条件可以大量取样。但缺点是试样尺寸小，不能反映宏观结构和非均质性对岩土性质的影响，代表性差，有些试样无法保持原状，且有些地层也很难获取原状试样。综上所述，可见两者的优缺点是互补的，所以应相辅相成，配合使用，以科学、经济有效地获取所需的技术参数。

监测是构成岩土工程系统的一个重要环节，大量的工作在施工期间和施工完成后开展，但是鉴于文物保护工作的长期性特点，该项工作一般需在专项勘察（环境工程问题勘察、石质文物病害勘察）阶段就开始实施，所以可被列为一种勘察方法。它的主要目的在于保证施工质量和安全，提高工程效益。施工过程中监测包含施工作用和各类荷载对岩土环境影响的监测及对文物本体结构影响的监测，并以此为依据及时修正设计，使之在技术和经济方面更优化；施工后监测包含对施工质量的跟踪监测及对工程效果的跟踪监测，目的是验证保护工程是否达到设计要求和目的，如工程效果达到设计目标应及时进行总结经验，如工程效果未达到设计目标，也应及时对失败原因进行分析，建立保护工程档案，为保护工作的长期、可持续性保护和研究工作提供依据。同时为验证保护工程的长期有效性，文物本体及相关岩土和地质环境的长期监测也是施工后监测的重要内容。

评价与成果报告作为岩土工程勘察成果的总结性文件。应在工程地质测绘、勘探、测试和搜集已有资料的基础上，应根据任务要求、勘察阶段、地质条件和工程特点等进行编制。主要内容包括：岩土参数的分析与选定、岩土工程分析评价、反演分析、勘察成果应附的图表。对不同的勘察等级，其分析评价和

成果报告应有所不同，具体应根据设计需求而定。

各种勘察方法的选择和应用、工作的布置、工作量的大小，需根据文物的类型、勘察等级、勘察阶段、现存问题及设计拟解决的工程问题等来确定。具体要求将在后面的相关章节给予详细论述。

## 5.2.2 保护中岩土工程勘察分析与评价

### 5.2.2.1 岩土参数的分析与选取

#### (1) 岩土参数的可靠性和适用性

岩土参数的分析与选定是工程勘察成果及工程设计的基础，岩土参数的合理性很大程度上决定了岩土工程勘察分析的客观性和设计的可靠性。

岩土参数可分为两类：一类是评价指标，用以评价岩土性状，作为划分地层类别的主要依据；另一类是计算指标，用以预测岩土体在附加荷载和自然因素作用下的应力应变状态和发展趋势，进而指导工程设计、施工和监测等工作。岩土参数根据工程特点和地质条件选用，其合理性主要通过可靠性和适用性两个指标来评价。可靠性是指参数能否正确反映岩土体在规定条件下的性状，并比较有把握估算参数值所在区间。适用性是指参数能否满足评价、设计计算的假定条件和计算精度要求。

#### (2) 岩土参数的统计分析

由于岩土体的非均质和各向异性以及试验时岩土体的边界条件与原型之间的差异性等原因，岩土参数具有一定的随机性，变异性较大。岩土参数统计必须是在正确划分不同的工程地质单元和层位的基础上进行的。对不同的工程地质单元和层位的岩土物理力学指标必须分别统计，否则因不同工程地质单元和层位的岩土物理力学指标差异较大，统计的数据毫无价值。

由于岩土体的不均匀性，对在同一工程地质单元（层位）取的岩土样，用同样方法测定的数据通常是离散的，并以一定规律分布，可以用频率分布直方图和分布密度函数来表示。为了方便，通常采用统计特征值来表示。常用的统计特征值可分为两大类：一类反映数据的中心趋势，通常作为该批数据的代表值；另一类反映数据分布的离散程度，通常用以评价单个数据的可靠性。按《岩土工程勘察规范》规定，表征岩土参数的特征值，前一类为算术平均值，后一

类为标准差和变异系数。

### 5.2.2.2 工程数值法

工程数值方法是应用数值分析手段来解决与工程问题的一种方法，这些工程问题包括了相关地质体稳定性问题、文物主体结构稳定性问题、影响文物安全的渗漏问题及影响文物长期保存的流场问题等。

随着计算机技术的飞速发展，以数学、力学理论为基础，以工程地质分析为指导，以计算机技术为手段的工程地质数值分析方法，拓展了传统的工程领域，成功解决了许多重大工程地质问题，使工程地质向定量评价和预测前进了一步。目前常见的工程数值法主要有以下五种。下面我们将主要就该五种数值法的原理及各自适用对象和优缺点作扼要介绍，以便大家今后在看工作中选择评价方法时作为参考。

#### (1) 有限元法

该方法主要适用于土体、砌筑紧密或各部结合紧密的石质建筑物及构筑物、材质均一、裂隙不发育的单体碑刻、石刻、建筑构件、构造面不发育的洞窟、洞室及崖壁岩体稳定性问题分析。

有限元法不仅可以求解结构体的位移和应力，还可以对结构体进行稳定性分析和动力分析。它几乎可适用于所有的计算领域，但对于大变形问题、岩体中不连续面，无限域和应力集中问题的求解还不理想。21 世纪初出现的随机有限元法，为数值方法进行风险评估提供了便利的手段。该方法在文物保护工程勘察中已得到了广泛应用，尤其是石窟寺及石刻保护工程勘察中成功的案例比比皆是，如巩县石窟洞窟、响山石窟、花山岩画等岩体稳定性评价。

#### (2) 有限差分法

该方法主要适用于多块石块垒筑，但石块间无结合材料，不紧密的石质建筑物及构筑物的变形过程的稳定性问题分析。

有限差分法的基本思想是将基本方程和边界条件下的微分方程改成代数方程求解，差分法又分为隐式差分 and 显式差分。

FLAC (fast Lagrangian analysis of continua, 连续介质快速拉格朗日分析) 是基于有限差分原理研制推出的显式有限差分程序，能有效模拟随时间演化的

非线性系统的大变形力学过程。

FLAC 的基本算法即是拉格朗日差分法，是一种利用拖带坐标系分析大变形问题的数值方法，利用差分格式按时步积分求解。该方法求解时采用了动态松弛法，不必求解联立方程式。它不但能处理一般的大变形问题，还能模拟岩体沿结构面滑动问题。由于采用了显式差分算法，对弹塑性和大变形问题，运算速度得到了大大提高。

FLAC 最早由美国 Itasca Consulting Group Inc. 开发，现已从二维计算拓展到三维计算。目前该软件已被广泛应用于工程地质、岩土力学以及构造地质学和采矿学等研究领域。国内于 20 世纪 90 年代初才引进该软件，在文物保护工程勘察中的应用刚刚起步。曾应用于吉林集安将军坟保护工程勘察、好太王陵保护工程勘察、国内城垣保护工程勘察、丸都山城保护工程勘察等项目。

### (3) 离散元法

该方法主要适用于节理发育的边坡岩体稳定性问题分析。

离散元法将非连续力学介质离散为多边形块体单元，块与块之间没有变形协调的约束，只需满足平衡方程。基于牛顿第二定律结合不同本构方程，允许刚体或可变形体间的位移，变形可以是不连续的过程。

离散元法是一种显式求解得数值方法。该方法与在时域中进行的其他显式计算相似。“显式”是针对一个物理系统进行数值计算所用的代数方程式的性质而言的。在用显式法时，如果假定在每一迭代时步内，每个块体单元仅对其相邻的块体单元产生力的影响，那么时步取值就要足够小，以使显式法稳定。由于显式法时不需要形成矩阵，因此可以考虑大的位移和非线性，而不必花费额外的计算时间。

离散元法于 1971 年由 P.A.cundall 提出，1974 年二维程序趋于成熟。目前，已有比较成熟的三维程序，并用于岩体的破坏分析。离散元适用于求解非连续介质大变形问题，在节理化岩体、碎裂结构岩质边坡的变形和破坏过程得到广泛应用。该方法曾应用于河南洛阳龙门石窟西山岩质边坡变形破坏分析工作。

### (4) 数值流形法

石根华通过研究 DDA 与有限元的数学基础，于 1995 年提出 DDA 与有限

元的统一形式-数值流形方法。它是利用现代数学-“流形”的有限覆盖技术建立起来的一种数值分析方法，统一解决了连续和非连续变形的力学问题。

所谓“流形”是许多个别的重叠区域连接在一起，去覆盖前部材料体。流形方法具有独立的数学覆盖和物理网格，数学覆盖决定近似解的精度，作为实际材料的边界、裂缝等物理网格决定其积分区域。数学覆盖、物理覆盖、组成数学覆盖网格单元的数学覆盖编号以及组成流形单元的物理覆盖编号之间存在密切关系，并由此组成流形元覆盖系统。

在数值流形方法中，只要用不同的覆盖组合，就可以解决比有限元和 DDA 更具有普遍意义的复杂问题。数值流形方法的特点是：①所用有限覆盖系统，可将连续体、节理及块体材料用这种通用的方法进行计算；②由于数学覆盖能进行移动、分开（分离）和容易消去和增加，使得通过移动覆盖，逐步计算大变形和移动边值问题（如滑坡问题，节理和块体运动等）。由于数值流形方法是新近发展起来的一种数值方法，所以该方法的进展值得关注。又由于数值流形方法可模拟岩块的移动、分开（分离）、闭合等运动过程，因而可对岩体的局部与整体稳定性做出评判，但在岩体参数选取方面有一定局限性。

该方法目前在文物保护领域还未有应用案例，所以其适用范围和对象还有待研究。

#### （5）地质问题反分析法

工程地质和岩土工程问题的反分析方法是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种量测信息确定地层初始地应力和各类计算参数的分析方法。

位移反分析法按照其采用的计算方法又可分为解析法和数值法（有限元法等）。由于解析法只适合于简单几何形状和边界的问题反演，因此，对于复杂的岩土工程和工程地质问题，数值法具有普遍的适用性。

早期的反分析方法均是确定性方法，由于工程地质问题涉及的地层范围内，岩层的物理力学参数及力学行为常受到多种不确定因素的影响，因此，非确定性反分析法应运而生。应用概率论、数理统计、随机过程或模糊数学等不确定性数学工具，来分析量测应力值的不确定性、本构关系模型的非确定性，并基于随机、模糊数据构建非确定性优化反演模型，由此进行非确定性反分析。这种

反演分析的目的和内容与前述的确定性反分析基本相同，按其求解的主要过程可归属于优化反演方法类。对于量测信息离散性、模糊性和随机性较大，且计算本构模型事先未知而不确定的情况，这种非确定性优化反分析方法，具有良好的计算效果。

应该说明的是，虽然目前工程数值分析法已在工程领域广泛应用，且在文物保护行业，尤其是在石窟寺及石刻保护领域中有关大量成功实践的经验，但是由于石窟寺及石刻保护工程一般面临的多为岩体小型独立结构体的稳定性问题，大型的岩土体稳定性问题较少。因此，传统的建立在极限平衡原理和经典材料力学理论基础上的计算方法依然是主要的评价工具。

### 5.2.3 保护工程岩土勘察资料收集与利用

收集资料是岩土工程勘察最基本的一项工作，按照资料类型和利用方向大体可分为四类。

#### (1) 基础性资料

包括 1: 50000 以上各种比例尺的地形图，它是我们开展工程地质测绘和岩土工程勘察工作的基础性资料，有些资料必要时我们还必须单独需通过第一阶段的工程测量工作获得。

#### (2) 区域地质背景资料

包括最大比例尺的地质图及相关资料，它是帮助我们宏观了解该地区地质背景（地层、岩性、地质构造、地震等）的专业性资料，这些资料有助于我们宏观层面去分析不良地质现象、环境工程问题及石质文物病害等涉及的专项工程问题。

#### (3) 相关环境资料

包括与保护问题相关的水文资料、气象及大气条件资料、环保部门环境污染资料，特别是近 30-50 年的酸雨资料。这些资料有助于我们分析某些专项问题。如大气环境恶化及酸雨对岩石表层劣化的影响和控制。

#### (4) 以往岩土工程勘察成果

由于文物保护是一项长期性工作，所以任何一处文物保护单位实施的保护工程都是持续性的，这点也是有别于一般基本建设工程的一大特点。因此，在

勘察工作中我们应充分收集和消化前人的工作成果。在前人工作成果基础上，根据现阶段设计需求，优化勘察内容和技术路线，避免产生工作内容上的不必要重复。

#### 5.2.4 工程地质及水文地质测绘调查

##### (1) 工程地质及水文地质测绘的意义和特点

工程地质测绘是岩土工程勘察的基础工作，在诸项勘察方法中最先实施。按勘察阶段，应在方案设计阶段安排此项工作。但在施工图设计阶段为了某些专门工程地质问题或石质文物病害作补充调查，也可进行更高精度的工程地质及水文地质测绘。

##### (2) 工程地质及水文地质测绘范围

工程地质测绘范围应以文物本体及其环境产生影响的地质结构条件边界为依据确定，必要时可扩大至邻近区域。

##### (3) 比例尺

比例尺宜采用 1:500、1:1000、1:2000、1:5000 或 1:10000，具体比例尺的选择取决于勘察阶段、勘察深度和设计需求。

##### (4) 测绘精度要求

工程地质测绘精度有两层意思，即对各种地质现象描述的详细程度，以及各种地质现象在工程地质图上表示的详细程度和准确程度。为了确保工程地质测绘质量，精度要求必须与测绘比例尺相适应。

鉴于文物的特殊性及其文物保护工程勘察原则的要求，工程地质测绘和调查与其他勘察手段相比较，因其更具有扰动小的特点，对于任何一项文物保护工程勘察工作，尤其是与地质体相连的石窟寺、摩崖石刻保护工程而言，更是极其重要的一项工作。其工作质量还直接关系到后续勘察和设计工作。

##### (5) 工程地质及水文地质测绘与调查前期准备工作

在开始工程地质测绘之前，应做好资料收集、踏勘和编制测绘纲要等准备工作，以保证测绘工作的正常有序进行。

##### (6) 工程地质及水文地质测绘的方法

工程地质测绘和调查的方法与一般地质测绘相近，主要是沿一定观察路线

作沿途观察和关键点（或露头）上进行详细观察描述。选择观察路线应以最短的线路观测到最多的工程地质条件和现象为标准。在大比例尺详细测绘时，应追索走向和追索单元边界来布置路线。

工程地质测绘和调查过程最重要的是要把点与点、线与线之间观察到的现象科学有机地联系起来。克服孤立地在各点上观察现象、沿途不连续观察和不及时对现象进行综合分析产生的偏向。也要将工程地质条件与拟实施的工程特点联系起来，以便测绘工作能更好地为工程实践服务。此外，还应将实际资料、各种界线反映在外业图上，并逐日清绘在室内底图上，及时整理、发现问题及时进行必要的补充勘测。

#### （7）工程地质及水文地质测绘和调查的程序

工程地质测绘和调查一般可遵循如下的程序开展工作：

1) 阅读已有的地质资料，明确工程地质测绘和调查中需要解决的问题，编制工作计划。

2) 利用已有的遥感影像资料，如卫星照片、航测照片进行解译，对区域工程地质条件做出初步的总体评价，以判明不同地貌单元及各种工程地质条件的标志。

3) 现场踏勘。选定观测路线，选定编绘标准剖面的位置。

4) 正式测绘。测绘中应随时总结整理资料，及时发现问题，及时解决，使整个工程地质测绘和调查工作目的更明确，测绘质量更高，工作效率更高。

#### （8）工程地质及水文地质测绘的研究内容

文物保护单位工程地质测绘过程中，应始终以查明场地及其附近地段的工程地质条件及文物本体与地质环境间的相互作用为目的。因此，工程地质测绘研究的主要内容是工程地质条件的诸要素；此外，还应搜集调查自然地理及与保护相关的已建建筑物、构筑物等工程的有关资料。下面将分别论述各项研究内容的研究意义、要求和方法。

##### 1) 地层岩性

地层岩性是工程地质条件最基本的要素和研究各种地质现象的基础，所以是工程地质测绘最主要的内容。

## 2) 地质构造

地质构造对于所在区域的地壳稳定性、场地稳定性和工程岩土体稳定性而言，都是极为重要的因素；而且它控制着地形地貌、水文地质条件和不良地质现象的发育和分布。所以地质构造是工程地质测绘最重要的内容之一。

## 3) 地貌

地貌与岩性、地质构造、第四纪地质、新构造运动、水文地质以及各种不良地质现象的关系密切。所以研究地貌可借以判断岩性、地质构造及构造运动的性质和规模，搞清第四纪沉积物的成因类型和结构，以及了解各种不良地质现象的分布和发展演化历史、河流发育史等。需要指出的是，由于第四纪地质与地貌的关系密切，因此在平原区、山麓地带、山间盆地以及有松散沉积物覆盖的丘陵区进行工程地质测绘时，应着重于地貌研究，并以地貌作为工程地质分区的基础。

## 4) 水文地质条件

工程地质测绘中研究水文地质条件的主要目的是研究与地下水活动有关的并与文物保护相关的岩土工程问题，如石窟寺等渗漏问题应研究岩土的渗透性，地下水的补给、径流、排泄条件及变化规律等。

## 5) 不良地质现象

不良地质现象的研究目的是为了评价场地稳定性，并预测其对文物本体及保护工程的不良影响。由于不良地质现象直接影响文物及环境的安全和保护工程技术措施的可行性、可靠性，所以工程地质测绘时对测区内影响文物本体及环境和保护工程的各种不良地质现象必须详细研究。

## 6) 已有建筑物、构筑物的调查

测区内或测区附近已有建筑物、构筑物与地质环境关系的调查研究，是工程地质测绘中特殊的研究内容，因为某一地质环境内已兴建的建筑物及构筑物，对于拟建建筑或相关工程而言，可视为一项重要的原型试验，可以获取很多理论和实践方面都极有价值的资料，而文物本身就是既有结构，所以该项研究应与文物本体保存现状调查分析相结合开展。

## 7) 人类活动对场地稳定性的影响

测区或测区附近人类的某些工程-经济活动，往往影响场地的稳定性。例如人工洞穴、地下采空、抽（排）水和水库蓄水引起的地面沉降、地表塌陷、诱发渗漏等，都会对场地稳定性带来不利影响。对它们的调查应予以高度重视，该项研究应与环境工程地质问题勘察工作相结合。

#### （9）工程地质及水文地质测绘成果资料的整理

工程地质测绘资料的整理，可分为检查外业资料和编制图表两方面。

##### 1) 检查外业资料

①检查各种外业记录所描述的内容是否齐全；

②详细核对各种原始图件所划分的地层、岩性、构造、地形地貌、地质成因界线是否符合野外实际情况，在不同图件中相互间的界线是否吻合；

③野外所填的各种地质现象是否正确；

④核对收集的资料和本次测绘资料是否一致。如出现矛盾，应分析其原因；

⑤整理核对野外采集的各种标本；

##### 2) 成果资料

根据工程地质测绘的目的和要求，编制有关图表。工程地质测绘图件包括实际材料图、综合工程地质分区图、综合地质柱状图、综合工程地质剖面图、工程地质剖面图及各种素描图、照片和文字说明。对某些专门工程问题，尚可编制专门图件。

工程地质测绘后，一般不单独提供测绘成果，往往把测绘资料依附于某一勘察阶段的勘察报告，使某一勘察阶段在测绘基础上，围绕工程问题作进一步的深入研究。

## 5.2.5 保护中岩土工程勘探与取样

### 5.2.5.1 岩土工程勘探的任务、特点和手段

我们的工程实践都是在地壳表层一定深度范围内进行的，所以必须查明这一深度范围岩土体的空间分布情况及其工程性质以及地下水等条件。工程地质测绘主要是调查场地工程地质条件在地表的特征，并借以推断地下情况。但是要确切查明地下地质情况的基本方法还是勘探工作。下面就岩土工程勘探的任务、特点和手段三方面进行讨论。

### (1) 岩土工程勘探的任务

岩土工程勘探的任务，主要有以下六项。

1) 详细研究文物所在区域的岩土体和地质构造。研究各地层的岩性特征、厚度及其横向变化，按岩性详细划分地层，尤其应注意软弱岩层的岩性及空间分布情况；确定天然状态下各岩土层的结构和性质；确定基岩的风化深度和不同风化程度的岩石性质，划分风化带；研究岩层的产状、断层破碎带的位置、宽度和性质；研究节理、裂隙发育程度及变化情况，作裂隙定量指标的统计。

2) 研究文物所在区域的水文地质条件。了解岩土的水性，查明含水层、透水层和隔水层的分布、厚度、性质及其变化，各含水层地下水的水位(水头)、水量和水质；借助水文地质试验和监测，以了解岩土的水性和地下水动态变化。

3) 研究地貌和不良地质现象。查明各种地貌形态，如河谷阶地、洪积扇、斜坡等得位置、规模和结构；查明各种不良地质现象，如滑坡范围、滑坡面位置和形态、滑体的物质结构，如岩溶分布、发育深度、形态及充填情况等。

4) 取样及提供野外试验条件。从勘探工程中采取岩土样和水样，供室内试验和水质分析鉴定用；在勘探工程中可作各种原位测试，如标准贯入、波速测试等岩土力学性质试验，水文地质试验，如压(注)水试验等。

5) 提供检验与监测的条件。利用勘探工程布置岩土性状、地下水和不良地质现象的监测及工程实施效果的跟踪监测。

6) 其他。可进行孔中摄影及孔中电视，直观了解深部或内部岩土体的各种工程性状，如完整性、渗透性等。

### (2) 岩土工程勘探的特点

由于岩土工程勘探承担的上述各项任务，决定了其必然具有以下特点。

1) 勘探范围决定于文物形制、场地评价、文物现存病害类型、成因和保护治理工程涉及的区域和空间。勘探深度往往取决于文物所在的空间层位及其影响病害诱发因素所在的层位。如石窟寺水害治理工程的勘探区域就不能仅局限于洞窟所在位置及规模，应综合考虑导致渗水病害的补、径、排条件，结合水文地质单元，最终决定勘探区域。

2) 绝大多数文物工程都坐落于第四纪土层或基岩风化壳上, 为确保保护工程的有效性和可靠性。对这一部分地质体的研究应特别详细。应按土体成分、结构、工程性质, 结合工程设计需求, 详细划分岩土层, 尤其是软弱岩土层应给予特别注意。

3) 为了准确查明岩土的物理力学性质, 在勘探中必须注意保持岩土的天然结构和含水量, 尽量减少人为的扰动破坏。为此需要采用一些特殊的勘探手段。

4) 为了实现区域地质、水文地质、工程地质、岩土工程性质的综合研究, 以及与环境工程地质勘查、文物病害勘察等工作的紧密结合, 使勘探工作对文物本体及环境的不良影响降至最低程度, 要求岩土工程勘探应发挥综合效益, 对勘探工作的结构、布置和施工顺序也应有特殊的要求。

### (3) 岩土工程勘探的手段

岩土工程勘探有钻探、坑探及地球物理勘探三类。

钻探和坑探工程是直接勘探手段, 能较可靠地了解地下地质情况。钻探工程是使用最广泛的一类勘探手段, 普遍应用于各类工程的勘探。但是由于该技术手段对于勘察对象具有一定破坏性, 所以在文物保护工程勘察中需谨慎使用; 同时由于它对一些重要地质体或地质现象有可能会误判或遗漏, 所以也称它为“半直接”的勘探手段。坑探工程中勘探人员可以在其中观察编录, 以掌握地质结构的细节; 但是重型坑探工程耗资高、勘探周期长, 且对环境负面影响较大, 故文物保护工程勘察工作中不宜使用。地球物理勘探简称物探, 是一种间接的勘探手段。它可以简单、迅速地探测地下地质情况, 且具有立体透视的优点。但其勘探成果具多解性, 使用时往往受到一些条件的限制。考虑到以上三类勘探手段的特点, 布置勘探工作时应综合使用, 互为补充。

石窟寺及石刻保护工程勘探方法的选择应符合下列要求: ①勘探方法应根据文物类型、病害类型、勘察目的及岩土特性, 结合设计需求确定; ②勘探方法应以物探结合槽探为主; ③必要时在合理和关键位置可布置少量钻探, 但不应使用可能对文物本体造成损害的钻探方法。

#### 5.2.5.2 文物保护工程勘探工作基本要求

文物保护工程勘探工作应符合下列基本要求:

- ①勘探点应根据保护工程设计需求和勘察目的布置；
- ②在满足设计要求前提下，应严格控制勘探工作量；
- ③勘探布线、布点不得对文物本体及相关环境造成不良影响，并应避免开文物本体；
- ④勘探线布设应不少于 2 条；
- ⑤对钻孔、探槽等，在勘探结束后，应妥善回填，回填材料应选用原材料，不得使用对文物本体及环境有不良影响的材料，并尽可能恢复到原状。

### 5.2.5.3 勘探工作的布置和施工顺序

#### (1) 勘探工作的布置

布置勘探工作总的要求，应是以尽可能少的工作量获得尽可能多的地质资料。为此，作勘探设计时，必须熟悉勘探区已取得的地质资料，并明确勘探的目的和任务。将每一个勘探工程都布置在关键地点上，且发挥其综合效益。

勘探工作一定要在工程地质测绘基础上布置。勘探布置主要取决于勘察阶段、拟解决工程问题和设计需求三个重要因素。还应充分发挥勘探工作的综合效益。为搞好勘探工作，岩土工程师应深入现场，并与设计人员密切配合。在勘探过程中，应根据所了解的条件和问题的变化，及时修改原布置方案，以期圆满地完成勘探任务。

#### (2) 勘探工作的实施顺序

勘探工作的合理施工顺序，既能提高勘探效率，取得预期成果，又可节约勘探工作量。因此，在勘探工程总体布置的基础上，必须重视和研究勘探工作的实施顺序问题。

一项保护工程，尤其是地质条件复杂、工程问题复杂的重大保护工程，需要勘探解决的问题较多，包括文物本体结构探查问题、场地工程地质及水文地质条件问题、文物病害成因问题等，所以勘探工作不可能同时全面实施，而必须分批进行。这就应根据所需查明问题的轻重缓急，同时考虑到设备搬迁方便和季节变化，将勘探工作分批次实施，按先后顺序实施。先实施的部分，应该为后实施的部分提供进一步地质分析所需的资料。所以在勘探过程中应及时整理资料，并利用这些资料指导或修正后继勘探工作的设计和实施。因此，不言

而喻，选择第一批实施的勘探工作具有重要意义。

根据文物保护工程对勘探工作的基本要求，并结合各类勘察手段的特点，物探工作应配合工程地质及水文地质测绘工作首先实施，在此基础上，可对控制场地地质条件具关键作用和对解决工程问题具有指导意义的坑孔，作为第一批实施的钻探和坑探工程项目。

勘探工作的实施顺序总体安排还应遵循研究由浅至深得原则，即遵循从查明场地工程地质及水文地质条件向研究专门工程问题递进的规律。后期的勘探工作还应结合一些必需的原位测试项目。

#### 5.2.5.4 取样技术及要求

取样是岩土工程勘察中必不可少的、经常性的工作。为定量评价岩土工程问题而提供室内试验的样品，包括岩土样和水样。除了在地面工程地质测绘和坑探工程中采取试样外，主要是在钻孔中采取的。

##### (1) 土层取样要求

由于不同试验项目对土样扰动程度有不同的控制要求，因此许多国家的规范或手册中都会根据试验要求来划分土样质量等级。《岩土工程勘察规范》参照国外经验，对土样级别做出了四级划分，并明确规定了各级土样能进行的试验项目（表 5-2）。其中 I、II 级土样相当于原状土样，但 I 级土样比 II 级土样有更高要求。表中对四级土样扰动程度的区分只是共性的和相对的，没有严格的定量标准。目前虽然已有多种评价土样扰动程度的方法，但在实际工程中不大可能对索取的土样的扰动程度作太多和过于详细的研究和定量评价，所以只能对采取某一级别土样所必须使用的器具和操作方法作出规定。此外，还需要考虑土层特点、操作水平和地区经验，来判断是否达到了预期的质量等级。

表 5-2 土样质量等级划分

级别	扰动程度	试验内容
I	不扰动	土类定名、含水率、密度、压缩变形、抗剪强度
II	轻微扰动	土类定名、含水率、密度
III	显著扰动	土类定名、含水率
IV	完全扰动	土类定名

##### (2) 岩石取样

岩石试样的采取应符合下列要求：

①取样过程不应対文物本体造成不良影响，取样结束后，应尽可能恢复到原状；

②试样数量和规格应根据试验项目确定，如有特殊要求时，试样形状、尺寸和方向由设计确定；

③试样应及时妥善密封，软岩岩芯需立即密封；

④试样应及时送交试验室，风化样品在运输中应避免振动。

### (3) 水体采样

水样的采取应符合下列要求：

①采集水样时应先用水样洗涤采样容器、盛样瓶及塞子 2~3 次；

②在河流、湖泊可以直接采集表层水样时，可用适当的容器如水桶、脸盆采样，采样时应注意不得混入漂浮于水面上的物质；

③在湖泊、水库采集一定深度的水样时，可用直立式或有机玻璃采水器，按相关操作规程进行采样；

④对于自喷泉水和涓流渗水，可在涌口处或出水点处直接采样；

⑤采集不自喷泉水时，应将停滞在抽水管的水汲出，新水更替之后，再进行采样，钻孔中地下水的采样应《岩土工程勘察规范》的相关规定执行；

⑥大气降水和渗漏滴水可由适当的容器如水桶、脸盆直接采样，采样时应注意不得混入携带的其他漂浮物质；

⑦水样采集量应根据检测项目确定；

⑧水样采集后应立即送往试验室，运输方式应根据检测项目确定；

⑨水样保存方式及时限应根据检测项目确定。

## 5.2.6 保护中岩土测试技术与要求

岩土工程勘察中的测试技术包括现场原位测试和室内试验两部分。前者是在现场不改变岩土原有环境和结构条件下完成的测试工作，后者是取样后在室内条件下完成的测试工作。前者由于测试过程无须取样，所以对文物本体及环境影响较小。本节将主要介绍在文物保护工程，特别是石质文物保护工程目前常用到的一些测试技术方法。

### 5.2.6.1 原位测试试验

#### (一) 土体原位测试

土体原位测试一般是指在岩土工程勘察现场,在不扰动或基本不扰动土层的情况下对土层进行的测试,以获得所测土层的物理力学性质指标及划分土层的一种土工勘测技术。它是一项自成体系的实验科学,在岩土工程勘察中占有重要位置。这是因为它与钻探、取样、室内试验的传统方法比较起来,具有下列明显优点:①可直接在工程场地进行测试,无须取样,避免了因钻探取样所带来的一系列困难和问题,如原状样扰动问题等;②原位测试所涉及的土尺寸较室内试验样品要大得多,因而更能反映土的宏观结构(如裂隙等)对土性质的影响。

土体原位测试技术的发展历史较短,对测试机理及应用的研究都有待于进一步深入。由于现场土体边界条件不易控制及其复杂性,使所测成果和数据与土的工程性质指标等对比时,目前仍主要是建立在大量统计的经验关系之上,但这并没有妨碍它在工程勘察实践中的应用。它的优点远大于其缺点。

#### (二) 水文地质原位测试

##### (1) 原位渗透试验

###### 1) 渗压计法

渗压计法测定土的渗透性的基本原理是在钻孔中将双管式渗压计探头埋设于被测试土体,用常水头渗透压力 $\Delta u$ 压水(膨胀)或抽水(压缩),探头周围的土体将产生渗流。当 $\Delta u > 0$ 时,管路中的水通过探头流入土体;当 $\Delta u < 0$ 时,土体中孔隙水通过探头流入管路。渗流流量随时间而变,但最终将趋于稳定状态。理论分析证明,探头形状、尺寸及渗透压力一定时,稳定流量仅与土的渗透系数有关,因此,可以通过对流量的测定推算土的渗透系数。

###### 2) 试坑法、单环法和双环法

①试坑法。试坑法是在表层土中挖一试坑进行试验。坑深30~50厘米,坑底为直径37.75厘米的圆形,坑底离潜水位3~5米,坑底铺设2厘米厚的砂砾石层。试验开始时,控制流量连续均衡,并保持坑中水层厚( $Z$ )为常数(厚10厘米),当注入水量达到稳定并延续2-4h,试验即可停止。当试验层为粗砂、

沙砾或卵石层,控制坑内水层厚度 2~5 厘米时,且 $(H_k+Z+1)/l \approx 1$ ,则 $k=Q/F=v$ ,可近似测定土层的渗透系数。 $H_k$ 为毛细压力水头, m;  $l$ 为试验结束时水的渗入深度, m; 可在试验后开挖确定或取样分析土中含水率确定。

表 5-3 不同土层毛细压力水头单位: m

土层名称	$H_k$	土层名称	$H_k$
黏土	约 1.0	细粒粘土质砂	0.3
粉质黏土	0.8	粉砂	0.2
黏质粉土	0.6	细砂	0.1
砂质粉土	0.4	中砂	0.05

此法通常用于测定毛细压力影响不大的砂类土渗透系数,测定黏性土的渗透系数一般偏高。

②单环法。单环法是在试坑底嵌入一高 20 厘米、直径 37.75 厘米的铁环,该铁环的面积为 1000 平方厘米。在试验开始时,用 Mariotte 瓶控制环内水柱,保持在 10 厘米高度上,试验一直进行到渗入水量  $Q$  固定不变时为止,其渗透速度  $v$  即为该土层的渗透系数  $k$ 。

此外,可通过系统地记录一定时间段(如 30 分钟)内的渗水量,求得各时间段内的平均渗透速度,然后绘制渗透速度历时曲线图。渗透速度随时间延长而逐渐减小,并趋向常数(呈水平线),此时的渗透速度即为所求的渗透系数。

③双环法。双环法是在试坑底嵌入两个铁环,外环直径 50 厘米,内环直径 25 厘米,试验时往铁环内注水,用 Mariotte 瓶控制外环和内环的水柱都保持在同一高度(如 10 厘米)。根据内环所测得的数据按上述方法确定土层的渗透系数。

由于内环内水只产生垂向渗入,排除了侧向渗流带来的误差,因此双环法获得的成果精度比试坑法和单环法高。

## (2) 注水试验

注水试验是用人工抬向水头,向试坑或钻孔内注水,来测定松散岩土体渗透性的一种原位试验方法。通过注水试验测得渗透系数。

注水试验主要适用于不能进行压水试验,取原状土试样进行室内试验又比较困难的松散岩土体。注水试验可分为试坑注水试验和钻孔注水试验两种。试坑注水实验主要适用于地下水位以上且地下水位埋藏深度大于 5 米的各类土层。

钻孔注水试验则适用于各类土层和结构较松散、软弱的岩层，且不受水位和埋藏深度的影响。

### (3) 压水试验

压水试验是一种在钻孔内进行的渗透试验，它是用栓塞把钻孔隔离出一定长度的孔段，然后以一定的压力向该孔段压水，测定相应压力下的压入流量，以单位试段长度在某一压力下的压入流量值来表征该孔段岩石的透水性，是评价岩体渗透性的常用方法。

压水试验的目的是了解与工程有关地段岩体的相对透水性、岩体裂隙的张开度、延展性、贯通性充填物的性质、岩体的可灌性、灌浆效果检查等。在地下水条件简单、透水性较小的孔段，可以用压水试验资料估算岩体的渗透系数，为设计和工程处理提供基本资料。在文物保护工程中加入示踪剂，它还是研究渗漏问题中裂隙地下水渗流途径的重要技术方法。

### (三) 岩体原位测试

岩体原位测试是在现场制备试件模拟工程作用对岩体施加外荷载，进而求取岩体力学参数的试验方法，是岩土工程勘察的重要手段之一。岩体原位测试的最大优点是对岩体扰动小，尽可能地保持了岩体的天然结构和环境状态，使测出的岩体力学参数直观、准确；其缺点是试验设备笨重、操作复杂、工期长、费用高。另外，原位测试的试件与工程岩体相比，其尺寸还是小得多，所测参数也只能代表一定范围内的岩体力学性质。因此，要取得整个工程岩体的力学参数，必须有一定数量试件的试验数据用统计方法求得。

岩体既不同于普通的材料，也不同于岩块，它是在漫长的地质历史中形成的，由岩块和结构面网络组成的，具有一定的结构并赋存于一定的天然应力和地下水等地质环境中的地质体。因此，岩体的力学性质与岩块相比具有易变形、强度低的特点，并且受岩体中结构面、天然应力及地下水等因素影响变化很大。岩体的力学属性也常具非均质、非连续及各向异性。所以，岩体原位测试应在查明岩体工程地质条件的基础上有计划地进行，并与岩土工程勘察阶段相适应。

岩体原位测试的方法种类繁多，主要有变形试验、强度试验及天然应力量测等类型，由于大部分岩体原位测试一般文物保护工程很少使用，所以本节我

们只介绍勘察工作中常会用到的现场快速测试试验。

#### (1) 岩体声波测试

岩体声波测试技术是一项比较新的测试技术，它与传统的静载测试相比，具有独特的优点：轻便简易、快速经济、测试内容多且精度易于控制，因此具有广阔的发展前景。

工程上声波测试通常是通过声波仪发生的电脉冲（或电火花）激发声波，并测定其在岩体中的传播速度，据上述波动理论求取岩体动力学参数。这项测试技术在国际上是 20 世纪 60 年代应用于岩体测试的；我国在 70 年代初研制成岩石声波参数测定仪，并在工程勘察等单位推广应用，已取得许多有价值成果。声波测试又分为单孔法、跨孔法和表面测试法几种。

#### (2) 岩石点荷载强度试验

点荷载试验是将岩块试件置于点荷载仪的两个球面圆锥压头间，对试件施加集中荷载直至破坏，然后根据破坏荷载求岩石的点荷载强度。此项测试技术的优点是，可以测试不规则岩石试件以及低强度和严重风化岩石的强度。点荷载强度还可作为岩块与岩体工程分类及岩体风化分带的指标。

#### (3) 岩体回弹锤击试验

根据刚性材料的抗压强度与冲击回弹高度在一定条件下存在着某种函数关系的原理，利用岩体受冲击后的反作用，使弹击锤回跳的数值即为回弹值（ $R$ ），此值愈大，表明岩体愈富弹性、愈坚硬；反之，说明岩体软弱，强度低。

据研究，岩体回弹值（ $R$ ）和岩体重度（ $\gamma$ ）的乘积与岩体抗压强度呈线性关系，因此只要测得回弹值和重度，即可求取岩体的抗压强度  $\sigma_{cm}$ 。

用回弹仪测定岩体的抗压强度具有操作简便及测试迅速的优点，是岩土工程勘察对岩体强度进行无损检测的手段之一。特别是在工程地质测绘中，使用这一方法能较方便地获得岩体抗压强度指标，由于该方法对检测对象基本无损伤，所以也是石质文物保护工程中常用的现场无损检测方法。

### 5.2.6.2 室内试验

#### (一) 土工试验

土的物理性质试验项目可根据设计需求，参考表 5-4 确定。

表 5-4 土的物理性质试验项目

土的类别	试验项目
砾石土和碎石土	颗粒分析、比重、天然含水量、天然密度、最大密度、最小密度、(有机质含量、渗透系数)。
砂土	颗粒分析、比重、天然含水量、天然密度、最大密度、最小密度、(有机质含量、渗透系数)。
粉土, 黏性土	颗粒分析、比重、天然含水量、天然密度、液限、塑限、(有机质含量、渗透系数)。
a 注: 带 ( ) 项目为可选择项目。	

土的力学性质试验可包括剪切试验和压缩试验, 如设计要求, 还可进行专项试验。

特殊性土(如湿陷性土、红黏土、软土、混合土、填土、多年冻土、膨胀岩土)及特殊要求, 应根据相关规范测定土的特殊性指标。

土工试验方法及资料整理要求应按照《土工试验方法标准》的相关规定。

### (二) 岩石试验

岩石的物理性质试验项目可根据设计需求, 参考表 5-5 确定。

表 5-5 岩石物理性质试验项目

常规试验	颗粒密度和块体密度试验, 吸水率和饱和吸水率试验
可选择试验	压汞试验、渗透性试验、耐崩解性试验、冻融试验吸水性能测定试验

岩石力学性质试验包括抗压强度、抗拉强度(劈裂试验)等项目的测试。单轴抗压强度试验应分别测定干燥和饱和状态下的强度并提供极限抗压强度和软化系数。

如设计要求, 可进行岩石剪切试验, 抗水性弱或经常处于湿润状态的岩石还可进行饱和剪切试验。

岩石成分分析试验包括岩矿鉴定、矿物成分分析、化学成分分析等项目。

软弱结构面(层)力学性质试验根据设计要求可选择天然软弱结构面和滑移面的剪切试验、断层碎裂岩及结构面充填物的剪切试验及干抗剪强度和饱和抗剪强度试验。

岩石试验方法及资料整理要求应按照《工程岩体试验方法标准》的相关规定。

### (三) 水质分析试验

水质分析试验项目根据设计需求, 参考表 5-6 确定, 表中可选择项目应由

设计要求确定。

表 5-6 水质分析试验项目

常规项目	pH 酸碱度、矿化度、硬度、总碱度、主要的阳离子和阴离子含量。
可选择项目	游 CO <sub>2</sub> 、侵 CO、可溶 SiO <sub>2</sub> 、F、AS、酚、其他离子含量、细菌总数和类型。

## 5.3 保护中环境工程地质问题勘察

### 5.3.1 环境工程地质学的概念

环境工程地质学是介于地质学、工程科学、环境科学之间的边缘科学。广义的环境工程地质学既研究环境系统本身，也研究环境污染问题。因此，其研究范畴包括地质环境及其在人类工程活动影响下可能发生的变化这两个方面，即同时研究地质环境本身存在的对工程建设不利的地质作用、因素和工程建设引起的或加剧的不良地质作用与现象。地质环境本身存在的对工程建设不利的地质作用或地质因素，实际工作中常称为原生（或第一类）环境工程地质问题，主要有地震、火山、滑坡、泥石流、风沙、膨胀土等。因人类工程活动引起的或加剧的不良地质环境效应，诸如地表面沉降、塌陷、边坡与库岸塌滑以及诱发地震活动等，相应称之为次生（或第二类）环境工程地质问题。广义的环境工程地质学将地质环境与工程设施统一起来作为系统，研究所有这两类环境工程地质问题（或称工程地质环境问题）。

狭义环境工程地质学则强调环境科学，主要研究环境污染—人类活动对各种自然环境的破坏作用，因此以地质环境在人类工程活动影响下发生的变化，特别是工程活动的不良环境效应，也即上述次生环境工程地质问题为主要研究对象。

第二环境是由第一环境演变而来的，次生环境工程地质问题与原生环境工程地质问题之间常有着密切的成生联系。因此，环境工程地质学实际上不可能仅限于研究地质环境因人类工程活动引起的变化，同时也必须研究地质环境与工程设施的相互依存、相互制约关系，即如上所述，将地质环境与工程设施作为一个系统进行研究。

### 5.3.2 保护中环境工程地质问题勘察基本要求

石窟寺及石刻是人类历史上工程行为的遗迹和遗物，保护它必然离不开对其赋存地质环境的研究。

1986~1987年，在河南洛阳龙门石窟保护工程前期勘察工作过程中，针对龙门石窟存在的问题，中国地质大学（武汉）水文地质及工程地质系潘别桐教授领导的科研团队首次进行了专项研究，在这次工作研究报告和相应科研成果中，他们首次将文物保护中的有关工程问题进行了分类，并将这些问题和有关现象界定为“环境地质病害”的概念。1992年，由潘别桐教授和国家文物局文物保护科学技术研究所黄克忠先生主编的《文物保护与环境地质》一书中，正式提出了“环境地质病害”这一概念。他们按照病害的主要成因，并将“环境地质病害”划分为两类。一类是指由于自然地质作用引起的地质病害；另一类是由于人类生产或工程活动，引起自然环境改变，在改变后的自然环境营力作用下，引起原有（第一类）地质病害的加剧或诱发新的环境地质病害。很显然，这种分类方式与前述的环境工程地质问题的分类具有高度的相似性。自然也可视为两类环境工程地质问题。

#### 1. 第一类环境工程地质问题勘察

##### (1) 第一类环境地质问题的认识

因为文物是历史上既有工程行为的产物，所以它的建造过程必然受到原有地质环境的制约和限制，如我国的石窟寺多数开凿在依山傍水的崖壁上，组成崖壁的地层大都未经历过强烈构造变动，岩体完整性较好，地层产状多为近水平或缓倾，层厚多为中厚层至巨厚层。这些特点不仅反映了我国先民在使用功能方面的考虑，更反映了我国先民在工程行为中对地质环境的认识。

但是限于当时科学技术水平和人们对自然的认识水平，在这些工程行为中不可能解决所有的环境地质问题，而这些问题便成为我们需要面对和解决的问题。在石窟寺保护工程中常见的第一类环境工程问题有滑坡、崩塌、地下水渗漏等几类。

##### (2) 第一类环境地质问题的勘察要求

在不可移动石质文物保护中岩土工程勘察工作往往与第一类环境地质问题

的勘察工作是紧密相关的，应协调开展工作的，前者主要以解决地质环境大背景及场地条件问题为勘察重点，而后者在前者工作基础上，工作重点应集中在以下两个方面。一是查明该类问题分布区域、规模、严重程度及产生原因；二是研究与评价该类问题对文物本体及相关环境的影响程度。

## 2. 第二类环境工程地质问题勘察

### (1) 不可移动石质文物保护中第二类环境地质问题的认识

与不可移动石质文物保护中第一类环境地质问题相比，第二类环境工程地质问题要更为复杂。目前总结起来有大体以下几类。

#### 1) 小气候环境改变引起石质文物表层劣化加剧问题

炳灵寺石窟开凿在白垩纪长石石英砂岩中，该岩石胶结物成分中黏土矿物占 15%，而黏土矿物中蒙脱石含量高达 38%。在修建刘家峡水库后，原来的干旱小气候环境变得干湿交替频繁。这种干湿交替的小气候环境，使蒙脱石矿物发生胀缩，加速了石雕表面风化，使原来光滑圆润的石雕开始掉粉，变得粗糙模糊（图 5-1）。这种问题也出现在新疆的森木塞姆石窟。



图 5-1 小环境改变导致表层劣化加剧的炳灵寺石窟造像

#### 2) 水文地质环境变化引起的渗漏问题

炳灵寺石窟位于刘家峡水库后尾。由于水库库尾淤积和泥石流共同作用导致窟前地面抬升，地下水位升高，底部窟龕因毛细作用产生渗漏问题（图 5-2），该类问题也出现在新疆的库木吐喇石窟。



图 5-2 小环境改变导致表层劣化加剧的炳灵寺石窟窟前淤积情况

### 3) 环境污染引起的石质文物表层劣化加剧问题

由于工业的发展，大气中的二氧化硫、硝酸根离子含量增加，导致酸雨。此外某些地区大气中悬浮颗粒含量也增大，这些酸雨和微颗粒降落在石雕表面，造成石雕岩石的腐蚀。如江苏连云港孔望山摩崖石刻岩性为混合花岗岩，由于受酸雨作用，混合花岗岩中的长石矿物加剧风化，使石刻造像表面出现麻点甚至小的孔洞。又如河北邯郸响堂山石窟寺，被附近的水泥厂、化工厂及煤矿等厂矿企业包围，大气中超标的二氧化硫以及由其形成的酸雨腐蚀着石灰岩质的石雕造像。此外，大量的水泥粉尘更在石雕表面形成了一层水泥硬壳(图 5-3)。

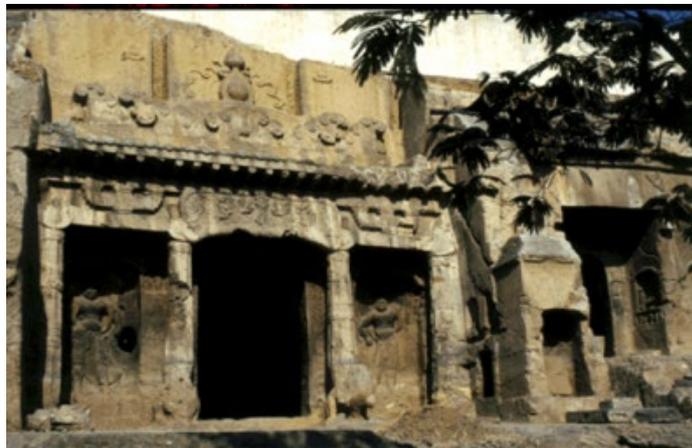


图 5-3 南响堂石窟被污染的外部石刻

### 4) 采矿引起地面坍塌导致文物破坏问题

江苏连云港将军崖岩画所在岩体位于锦屏磷矿矿床的顶板，磷矿的开采已经造成大面积的采空区，由于采空区的坍塌、崩落，导致地表岩体产生裂隙，而这些裂隙已经切割岩画所在岩体，危及岩画安全(图 5-4)。

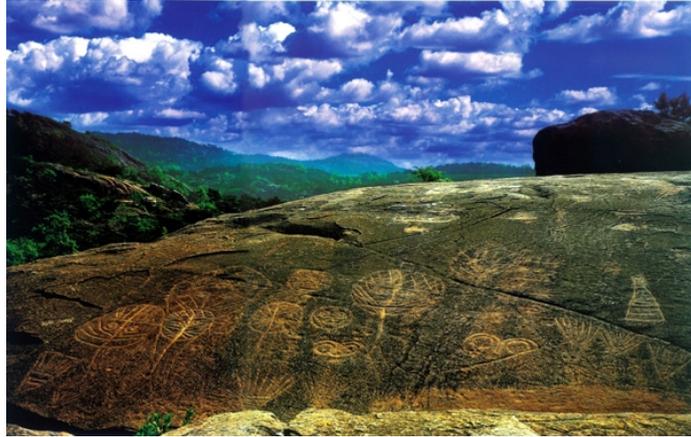


图 5-4 将军崖岩画

#### 5) 人工震动对文物保存的危害问题

人工震动对石质文物保存的危害是比较普遍存在的问题。最典型的事例发生在龙门石窟保护区。在龙门保护区内，洛阳水泥厂及乡镇企业曾连年放炮采石，焦枝铁路及穿越石窟中心区的洛临公路的火车、汽车行驶时的振动，均是导致石窟岩体因振动失稳的动力源。在这类动荷载作用下，使石窟区内的岩体危岩体渐趋失稳。同样这种震动也会导致石质文物表层劣化的加剧。如河南义马鸿庆寺石窟毗邻陇海铁路，因火车运营震动。现存石刻已损毁殆尽（图 5-5）。



图 5-5 损失殆尽的鸿庆寺石窟石刻

#### 6) 河流改道、修建水库引起的淹没或淤积问题

如云冈石窟前因十里河近代人工改道导致淤积、巩县石窟伊洛河因自然改道导致窟前淤积，这些情况使下部石刻处于地下水毛细作用带内，由于长期作用，该区域石刻多已破坏（图 5-6）。



图 5-6 云冈石窟底部石刻保存现状

而修建水库引起的淹没和淤积问题也很普遍，如前所述的三门峡水库、三峡水利工程、小浪底水库、刘家峡水库都存在此类问题。

#### (2) 第二类环境地质问题的勘察要求

通过前面分析，我们不难发现，对于石窟寺及石刻类文物而言，第二类环境工程地质问题要比第一类环境工程地质问题复杂得多，往往岩土工程勘察深度不能完全满足工程设计的要求，因此，必须开展必要的专项勘察、研究和监测工作。

该方面勘察工作主要包括下三方面内容：①查明诱发该类问题原因及对文物本体和相关环境的影响程度；②研究该类问题的控制因素，并提出防治对策；③监测和研究该类问题的规律性，并预测其发展趋势。

### 5.4 石窟寺及石刻病害勘察

石窟寺及石刻类文物因制造工艺、保存形态、所处环境条件不同，所以病害类型极为复杂，通过研究和总结，我们大体可将其分为结构失稳、渗漏和表层劣化三类。各类文物常见病害类型及勘察深度基本要求可参考表 5-7。

表 5-7 各类不可移动石质文物常见病害类型及勘察深度基本要求

类型	病害类型	勘察深度基本要求
石窟寺等与地质体相连开凿在岩体内的洞窟（洞室）类文物	结构失稳	I
	边坡失稳	查明洞窟（洞室）内岩体不稳定区域的规模、分布情况，并对危岩体进行稳定性评价及影响因素分析。
	洞窟（洞室）失稳	
	渗漏	II
表层劣化	III	
摩崖造像、摩崖石刻、岩画等与地质体相连的雕刻或描绘在岩体表面的文物	结构失稳—边坡失稳	I
	渗漏	II
	表层劣化	III
地面石质建筑物及构筑物	结构失稳	IV
	渗漏	查明渗漏点的分布区域、渗漏规律，查明与渗漏有关的原构造做法，并进行渗漏成因及影响因素分析。
	表层劣化	III
采用单块石材雕刻的巨型碑刻、单体石刻（体量 $\geq 4\text{m}^3$ ）	表层劣化	III
	结构失稳	IV
采用单块石材雕刻的一般碑刻、单体石刻（体量 $< 4\text{m}^3$ ）	表层劣化	III
<p>注 1：表中 I 内容为“查明边坡岩体不稳定区域的规模、分布情况，并对危岩体进行稳定性评价及影响因素分析。”</p> <p>注 2：表中 II 内容为：“查明渗漏点的分布区域、渗漏规律，并进行补给条件、径流途经及影响因素分析。”</p> <p>注 3：表中 III 内容为“查明岩石表层的主要劣化形态、物理力学特性的变化特点及矿物和化学成分的变化特性，并进行病害成因分析和劣化原因研究。”</p> <p>注 4：表中 IV 内容为“查明基础及主体结构保存现状、结构不稳定现象的分布规律，并进行整体稳定性及受损构件安全性评价及影响因素分析。”</p>		

#### 5.4.1 结构失稳病害勘察

结构失稳（structure failure）特指文物主体结构或其所依存的岩土环境所产生的局部或整体不稳定现象。

## 1. 一般要求

该类病害勘察的一般要求如下。

1) 在调查基础上,应重点评价和分析影响结构稳定性的各类因素,如地下工程、地震、暴雨、振动(如爆破、铁路、地铁、公路等)、地下水位变化等,为加固工程设计提供依据。

2) 应调查和评价以往加固工程的实施时间、部位、技术及目前工程的有效性,在此基础上,进一步评价以往加固工程对本次工程实施的影响程度。

## 2. 石质建筑物及构筑物结构失稳病害勘察

### (1) 结构特征调查

通过搜集资料,并结合形制测绘和勘探方法,应查明建筑物及构筑物的结构特征及构造做法,尤其是对内部隐蔽结构和加强结构做法的调查。

### (2) 基础类型及埋深调查

在不影响文物结构稳定的前提下,应布设适量探槽,以查明建筑物及构筑物基础类型、埋深及保存情况。

### (3) 场地类别与地基调查

应查明建筑物及构筑物所在位置的下部地层分布、性质、地基承载力,地下水埋深及对地基土的影响,该部分工作应与岩土工程勘探工作相结合,在不影响文物结构稳定的前提下,勘探点宜以建筑物及构筑物所在位置为重点布设区域。

### (4) 结构保存现状调查

应查明建筑物及构筑物结构变形及破坏的位置、区域(包括整体变形破坏和构件局部变形破坏),地基发生不均匀沉降时应在平面图上反映其范围、程度和裂缝走向,沉降量的测量要求应按照《建筑变形测量规程》的相关规定执行,上部结构发生变形、破坏时,所有断裂、裂缝、臃闪、倾斜、错位、塌落等与结构失稳和安全有关的迹象,其部位、规模、形态均应反映在立面实测图上,倾斜、臃闪和错位变形量的具体测量方法可参照《建筑变形测量规程》。

### (5) 测试

应查明建筑物及构筑物建筑材料类型、性质,可利用更换或塌落下来的构

件取样进行岩石物理、力学性质试验和岩石类型鉴定，具体岩石类型鉴定、命名具体要求应参照《岩石和岩体鉴定和描述标准》《岩石分类与命名方案》相关规定。如无更换或塌落下来的构件，可采用岩石声学测试、回弹锤击测试等综合方法获得岩石力学性质指标，为设计提供依据，同时应进行建造材料的采石场调查和采样以获取岩石的物理性质指标。

#### (6) 分析与评价

分析与评价应包括以下内容。

1) 分析评价地基沉降与地下水、地层岩性间的关系。

2) 整体稳定性分析与评价。在查明结构和构造做法，获得建造材料物理、力学指标的前提下，可通过数值分析方法对建筑物及构筑物整体稳定性进行分析与评价，评价过程根据环境条件、场地条件和结构特点，在设定评价工况条件时，应充分考虑风、雪及人类生产、生活活动所产生的附加荷载和暴雨、地震、洪水、潮汐等不利因素的影响。

3) 构件安全性分析与评价。

在结构保存现状调查的基础上，应对所有裂缝进行进一步测量和统计，具体要求参见表 5-8。对于承重构件，根据裂缝形态、产生部位、受力状态应明确构件变形破坏的力学机制，并根据构件受力状态和岩石的力学性质，计算构件的安全系数。石质建筑物及构筑物裂缝测量统计工作要求如下。

表 5-8 石质建筑物及构筑物裂缝测量统计样表

编号	位置	长度 (cm)	形态	裂缝宽度及 变化 (mm)	裂隙贯通性及深 度 (mm)	开裂机制 预判	其他说 明	照片

①编号：调查时所有裂缝均应逐一编号，编号可根据建筑物及构筑物结构特点按方位或构件顺序排列，并应以此为序标注在现状实测图上；

②位置：应填写裂缝所处构件名称方向及具体部位，如“明间东柱北侧顶

部”；

③长度：应按裂缝表面实际长度填写，单位为厘米；

④形态：可按裂缝表面实际形状填写，如“S”形、“Y”形；

⑤裂缝宽度及变化：应填写裂缝表面开裂的最大宽度，单位为毫米，同时填写宽度变化，如“上宽下窄”“上窄下宽”“中间窄两头宽”；

⑥裂隙贯通性及深度变化：应填写肉眼观察和可测量到的裂隙深度及是否贯通构件，单位为毫米；

⑦开裂机制预判：根据构件受力破坏状态，可按“压裂”“拉裂”“剪裂”等内容选择填写，如无法判断暂可不填，稳定性分析评价后再填写；

⑧其他说明：可填写与裂缝伴生的其他破坏迹象，如变形、压碎带等；

⑨照片：应填写裂缝部位的全景照片图版号。

在整体稳定性分析评价及构件安全性分析评价基础上，应根据文物价值、环境影响程度、局部变形构件在结构体系中的作用及变形破坏程度，对石质建筑物及构筑物的安全性进行分级评价。

#### (7) 监测

对于建筑物及构筑物上影响结构整体稳定性的活动裂缝和变形区域应进行长期监测，为加固工程设计提供依据，检验加固工程实施效果及预警。监测项目可包括裂缝监测、变形监测和地基沉降监测等，具体技术要求可参考《建筑变形测量规程》。

### 5.4.2 边坡失稳病害勘察

#### (1) 边坡区域调查

结合岩土工程勘察应查明文物保护范围内边坡地带的的不稳定区域，岩质边坡应进行详细的节理裂隙测量统计，并应反映在壁面立面图上，在此基础上，应查明所有危岩体的位置、几何尺寸、边界条件，并应反映在壁面立面、剖面图上。重点应加强对卸荷裂隙和楔形体的调查。同时应查明支护、锚固、裂隙灌浆等既往主要保护工程措施的实施位置，并应反映在相应图件上。岩体节理裂隙测量统计工作要求如下。

### 1) 测量统计内容

详见表 5-9。

表 5-9 岩体节理裂隙测量统计样表

编号	位置	产状		迹长 (cm)	隙宽 (mm)	节理裂 隙性质	填充 情况	有无 渗水	其他 说明	照片
		倾向 (°)	倾角 (°)							

### 2) 测量统计表填写要求

①编号：调查时所有节理裂隙均应逐一编号，洞窟外岩壁面节理裂隙编号可按测量导线方向排列，洞窟内节理裂隙编号可按所处壁面方位并结合测量导线方向排列，并应以此为序标注在现状实测图上；

②位置：应填写节理裂隙处的具体部位，如“1号窟窟外壁东50m处”；

③产状：应用地质罗盘测量节理裂隙的倾向及倾角，单位为°；

④迹长：应按节理裂隙表面实际长度填写，单位为厘米；

⑤隙宽：应填写节理裂隙表面开裂的平均宽度，单位为毫米，同时填写宽度变化，如“上宽下窄”“上窄下宽”“中间窄两头宽”；

⑥节理裂隙性质：通过观察、测量结果，应根据节理裂隙的产生原因填写，如“卸荷裂隙”“构造裂隙”或“层面裂隙”等；

⑦填充情况：应根据节理裂隙面中填充物质及程度的实际情况填写，如“中间被部分黏土填充”；

⑧有无渗水：按实际情况填写，裂隙有水渗出，填“有”，否则填“无”；

⑨其他说明：可填写与节理裂隙伴生的其他破坏迹象，如危岩体、破碎带等；

⑩照片：应填写节理裂隙发育部位的全景照片图版号。

### (2) 勘探与测试

应查明所有不稳定区域和危岩体结构面的产状、性质、分布及其组合关系和抗剪强度，同时应查明影响稳定性的地下水类型、水位、水量、补给、排泄

及变化规律。

### (3) 分析与评价

在调查、勘探与测试的基础上，应对所有不稳定区域和危岩体进行进一步分析，根据破坏迹象、产生部位、受力状态应明确危岩体失稳的力学机制。

#### 1) 危岩体的分类

危岩体 **dangerous rockmass** 是指文物所在边坡或洞窟（洞室）岩体由于各种结构面相互切割，形成可能滑移、倾倒、坠落的分离体。根据危岩体的形态及破坏机制。总体可分为滑移式、倾倒式和坠落式三种破坏类型。

①滑移式 (**slide**): 危岩体在自然或人为因素的影响下，沿某一结构面或软弱带发生滑动，并向下移动的破坏形式。

②倾倒式 (**overturn**): 陡坡或悬崖上的岩体在自然和人为因素作用下，发生转动坠落的破坏形式。

③坠落式 (**drop**): 陡坡或悬崖上的危岩体在重力作用下，发生向下坠落的破坏形式。

#### 2) 稳定性定性评价

岩体结构分析法，是在岩体结构及其特性研究的基础上，结合工程作用力，对工程岩体的稳定性做出的定性和半定量评价。其主要任务是解决岩体中结构体相互依存关系、制约关系，确定结构体的边界、几何形态及其在外力作用下的稳定状态。这种从岩体结构角度讨论工程岩体稳定性，尽管是定性的，但它是研究岩体稳定性的基础。

结构分析法是建立在对岩体中结构面产状及其特性调查研究的资料上，通过图解分析判定岩体稳定性的技术。这种图解分析将借助赤平投影和实体比例投影方法，依据结构面的组合关系，结合临空面确定可能失稳结构体的空间分布，同时判定不稳定块体可能移动的方向。实际上就是对危岩体边界的确定和对破坏方式的判断。

#### 3) 评价内容

详见表 5-10。

表 5-10 危岩体分析评价样表

编号	位置	边界条件	形态	体量 (m <sup>3</sup> )	破坏模式	工况条件	稳定系数计算 结果 (F <sub>S</sub> )	评价结论	照片

分析评价表填写说明：

①编号：调查时所有危岩体均应逐一编号，洞窟外岩壁面危岩体编号可按测量导线方向排列，洞窟内危岩体编号可按所处壁面方位排列，并应以此为序标注在现状实测图上；

②位置：应填写危岩体的具体发育部位，如“1号窟窟外壁东50m处崖顶”；

③边界条件：应填写形成危岩周边不连续软弱结构面产状及临空面走向、倾角，单位为°；

④形态：可按照YS 5230有关规定填写，如“楔形体”“板状体”；

⑤体量：应计算危岩体的石方量，并填写，单位m<sup>3</sup>；

⑥破坏模式：应根据危岩体边界条件，在分析破坏机制基础上填写，如“滑移破坏”“倾倒破坏”“坠落破坏”等；

⑦工况条件：填写稳定性计算时设定的工况条件，如“自重”“自重+强降雨”“自重+地震”“自重+地震+强降雨”等；

⑧稳定系数计算结果：根据破坏模式、工况条件可参考《建筑边坡工程基础规范》《边坡工程勘察规范》等相关规范对危岩体稳定状态进行计算，并填写稳定系数F<sub>S</sub>计算结果；

⑨评价结论：可按“不稳定”(F<sub>S</sub><1)、“欠稳定”(1≤F<sub>S</sub><1.25)和“稳定”(F<sub>S</sub>≥1.25)三个等级进行填写；

⑩照片：应填写危岩体发育部位的全景照片图版号。

#### (4) 监测

监测可为加固工程设计提供参数，检验加固工程措施的实施效果及为边坡稳定预警。监测项目包括位移监测和水压监测。具体技术要求可参考《建筑边坡工程基础规范》《边坡工程勘察规范》等相关规范。

### 5.4.3 石窟寺洞窟（洞室）失稳病害勘察

#### （1）不稳定区域的调查

结合岩土工程勘察应查明洞窟（洞室）内的不稳定区域，应进行详细的节理裂隙调查，在此基础上，应查明所有危岩体的位置、几何尺寸、边界条件，并应反映在相应实测图上，片帮区域应反映在洞窟（洞室）立面图上，冒顶区域应反映在洞窟（洞室）仰视图上。如工程设计需要，应与边坡区域调查相结合开展工作。

#### （2）勘探与测试

应查明所有不稳定区域和危岩体结构面的产状、性质、分布及其组合关系和抗剪强度，具体要求参见表 5-9，同时应查明影响稳定性的地下水类型、水位、水量、补给、排泄及变化规律。

#### （3）分析与评价

分析与评价具体要求如下。

①对洞窟（洞室）及其围岩整体应力分布及稳定性进行分析与评价，查明应力集中薄弱区域。

②在调查、勘探与测试的基础上，应对所有洞窟（洞室）内危岩体进行进一步分析，根据破坏迹象、产生部位、受力状态应明确不稳定区域失稳的力学机制，分析评价具体要求可参考表 5-10。

③稳定性计算参数应包括岩石主要物理、力学指标、潜在滑移面等软弱面的抗剪强度指标和变形特征指标及危岩体在计算断面上的几何要素。

④确定计算参数时，应根据岩土工程勘察的原位测试、实验室试验指标数理统计成果，结合当地经验综合分析确定。滑移面贯通的危岩体，计算时可采用残余抗剪强度。

⑤稳定性分析评价时应考虑地层岩性对岩体抗剪强度、抗风化和软化及渗透性能的影响、地质构造对破坏模式的影响、风化作用对岩体强度减弱的影响、冻融作用的影响、地震作用引起的下滑力和孔隙水压力增加的影响及地下水流动、动态变化等因素的影响。

#### (4) 监测

对于洞窟（洞室）内的变形区域应进行长期监测，为加固工程设计提供依据，检验加固工程实施效果及预警。监测项目可包括裂缝监测和变形监测。具体技术要求应参照《建筑变形测量规程》及行业有关规定。

#### (5) 巨型碑刻及巨型单体石刻失稳病害勘察

可参照石质建筑物及构筑物结构失稳病害勘察相关内容开展工作。

### 5.4.4 渗漏病害勘察

渗漏（leakage）特指大气降水、地表水或地下水在石质文物本体表面渗出的现象。

#### 1. 一般要求

该类病害勘察的一般要求如下。

1) 在搜集历史资料的基础上，应全面调查保护对象所在区域的汇水面积、地表径流特征、气候及大气降水特征。

2) 在岩土工程勘察工作基础上，应详细查明文物本体表面的渗漏区域。

3) 根据工程设计要求，围绕保护对象应进行详细的水文地质勘查，重点评价和分析渗漏特征，水的来源，渗流途径及与文物自身结构、岩土结构间的关系及渗漏对石质文物表层劣化病害的影响程度，为防渗工程设计提供依据，必要时可进行渗流规律分析。

4) 查明渗漏对石质文物表层劣化病害的影响和控制作用。

5) 重要出水点、地表水体、大气降水应采样进行水质分析。

6) 渗水点区域的沉淀物应进行取样分析。

7) 应查明渗漏水 and 凝结水的特征和区别。

8) 应探明渗析区域与毛细作用带间的关系。

9) 应调查和评价以往防渗工程的实施时间、部位、技术及目前工程有效性，在此基础上，进一步评价以往防渗工程对本次工程实施的影响程度。

10) 对于重要渗漏区域应进行长期监测，为防渗工程设计提供依据，检验防渗工程实施效果。监测项目可包括流量监测、渗出时间监测和水质监测。同时可同步实施大气降水、地下水、凝结水等项目的监测。具体技术要求应参照

国家及行业相关规定。

## 2.石窟寺（洞室）渗漏病害勘察

### （1）现状调查

现状调查主要包括以下内容：

1) 在搜集历史资料的基础上，应进行详细的节理裂隙调查统计，具体要求可参照表 5-9。

2) 应全面查明所有渗漏区域的位置、特性，具体要求如下。

#### ①渗漏区域调查内容

详见表 5-11。

表 5-11 渗漏区域调查统计表

编号	位置	面积 (m <sup>2</sup> )	特性	渗出形式	渗漏滞后 时间	其他说明	照片

#### ②调查统计表填写说明

A) 编号：调查时所有渗漏区域均应逐一编号，并应以此为序标注在现状实测图上；

B) 位置：应填写出水点的具体部位，可以具体文物为参照物结合方位填写，如“千手观音造像龕东 2 米裂隙下部”；

C) 面积：应按出水点实际渗出面积填写，单位为平方米；

D) 特性：根据出水点渗出时间特点，填写“常年渗漏”或“间歇性渗漏”：常年渗漏（perennial leakage），一年平均有 300 天以上的渗漏现象；间歇性渗漏（intermittent leakage），受季节和大气降水影响，一年只在雨季或大气降水后出现的渗漏现象；

E) 渗出形式：根据出水点渗出状态，可选择“渗析”“滴水”或“涓流”三种形式填写。具体界定如下：a 渗析（dialysis）：特指渗出量很小，仅在渗漏处形成潮湿的现象；b 滴水（drip）：特指渗漏处以水滴形式渗出的现象；c 涓流（trickling）特指渗漏处以小股流水形式渗出的现象。

F) 渗漏滞后时间：间歇性渗漏应填写出水点渗漏晚于大气降水的时间间

隔；

G) 其他说明：可填写出水点处沉淀物分布情况或滴水、涓流和积水处的渗出流量，对于“间歇性渗漏”还可填写填表前的降雨时间及降雨量；

H) 照片：应填写渗漏区域的全景照片图版号。

### (2) 勘探与测试

勘探与测试主要包括以下内容：

①应全面探明第四纪覆盖层厚度及土层渗透性能，根据工程设计需要，必要时可绘制覆盖层厚度等值线图；

②应探明所有岩层及软弱夹层的厚度及渗透性能；

③应探明大型控制性导水裂隙的位置、产状及特性，对于隐伏裂隙的调查，应采用物探、槽探结合钻探等多种技术手段；

④如设计需要，在保证文物安全的前提下，可利用一定数量的钻孔可进行压（注）水试验，以探明地下水的渗流途径，部分压（注）水试验可结合示踪法。

### (3) 分析与评价

分析与评价主要包括以下内容：

①水文地质特征分析。根据防渗工程需要，可绘制水文地质分区图；

②渗流途径分析。应包括补给条件分析、渗透通道分析及排泄特征分析；

③渗流规律分析。可包括渗流机制分析、渗漏区域形成原因分析。

## 3. 地下石质建筑物及构筑物内部渗漏病害勘察

### (1) 现状调查

在搜集历史资料的基础上，应进行详细的裂缝调查统计，具体调查要求可参照表 5-8、表 5-9，同时应全面查明所有渗漏区域的位置、特性，具体调查要求可参照表 5-11，并应在相应实测图上标注。

应结合岩土工程勘察结果，查明地下结构与地下水位间的关系，并反映在实测剖面（视）图上。

### (2) 勘探与测试

勘探与测试主要包括以下内容：

①应探明地下结构上部岩土结构及渗透性能，人工夯土应探明工程做法及渗透性能，根据工程设计需要，应按层位标注在实测剖面（视）图上；

②应全面探明地下石质构筑物结构周边及下部岩土结构、厚度、物理力学性能及渗透性能；

③应全面探明地下石质构筑物所在区域地下水类型、埋深及变化规律；

④如设计需要，在保证文物安全的前提下，可利用一定数量的钻孔进行压（注）水试验，以探明地下水的渗流途径，部分压（注）水试验可结合示踪法。

### （3）分析与评价

分析与评价主要包括以下内容：

①水文地质特征分析。根据防渗工程需要，可绘制水文地质分区图；

②渗流途径分析。应包括补给条件分析、渗透通道分析及地下水排泄特征分析；

③渗流规律分析。可包括渗透机制分析、渗漏区域形成原因分析。

## 4.地面石质建筑物及构筑物内部空间渗漏病害勘察

### （1）现状调查

在搜集历史资料的基础上，应进行详细的裂缝调查统计，具体调查要求可参照表 5-18，同时应全面查明所有出水点的位置、特性，具体调查要求可参照表 8-22，并应在相应实测图上标注。

### （2）勘探与测试

勘探与测试主要包括以下内容：

①应探明建筑物及构筑物原有排水防渗体系，并查明工程做法、工程性能及保存现状，根据工程设计需要，应绘制相关图件。

②应探明导水裂缝的贯通程度和张开度。

③应探明建筑物及构筑物所在位置的地下水类型及埋深。

### （3）分析与评价

分析与评价主要包括以下内容：

①建筑物及构筑物原有防渗体系保存现状分析。应包括原工程做法、工程性能及保存情况。

②建筑物及构筑物内部渗漏的特征。应包括出水点空间分布特征、渗出时间特征、渗出量特征。

③建筑物及构筑物内部渗漏的原因分析。应包括渗出机制分析、渗漏区域形成原因分析。

#### 5.4.5 石质文物表层劣化病害勘察

表层劣化（surface deterioration）特指石质文物表层所产生的破坏文物表面结构完整性或影响文物价值的破坏现象。

在岩土工程勘察工作基础上，应查明文物表层的病害类型、分布区域，根据工程设计要求，围绕保护对象应进行详细的取样分析，重点评价和分析病害特征，病害形成原因及影响因素，为保护修复和防风化加固工程设计提供依据。对于表面有彩绘和金箔的石质文物还应开展彩绘层和金箔层材质、保存现状及相应的病害原因分析。

##### （一）病害调查及图件编绘

病害调查是现场调查工作的重要内容，该项工作首先应建立在病害的科学分类、描述基础上。病害的科学分类和描述是文物病害勘察最基础的一项研究工作。调查工作开展前应对拟保护对象表层劣化形态进行全面甄别，对表层各类病害类型进行详细描述，并由现场调查技术人员共同编制病害类型说明表，表格样式及要求如下。

##### （1）调查表格式。

详见表 5-12。

表 5-12 岩石表层病害类型说明表

序号	病害名称	现象描述	主要分布特点及区域	图例	照片

##### （2）病害类型说明表填写要求

- ①序号：所有病害类型调查前均应统一编号；
- ②病害名称：填写病害类型的中英文名称；

③现象描述：根据有关规定，结合保护对象特点，在工作组达成共识的基础上，简明扼要描述各病害的基本特征；

④主要分布特点及区域：主要填写病害分布与文物结构或环境的关系；

⑤图例：插入调查时各病害标注所用图例；

⑥照片：插入各病害类型典型照片。

(2) 根据劣化类型说明表，应对拟保护对象文物表层病害类型分布情况进行全面调查，形成调查草图。

(3) 根据现场调查草图，按照有关图式规定绘制石质文物表层病害分布图。

(4) 根据工程设计需要和文物类型特点，石质文物表层劣化病害调查和图件编绘工作宜与工程测绘和表层劣化病害监测工作相结合。

## (二) 文物所在环境状况调查

文物所在环境状况调查内容主要包括：

(1) 气温变化特征。包括多年平均气温、多年平均最高气温、多年平均最低气温、多年极端最高气温、多年极端最低气温等。

(2) 大气降水特征。包括多年平均降水量、年平均降水日、降水集中时间段及最大降雨强度等。

(3) 蒸发量。包括年平均蒸发量、蒸发量年度特征等。

(4) 湿度变化特征。包括大气和岩石表面湿度年度变化特征，对于石窟寺等洞窟(洞室)类文物及地面石质建筑物和地下石质构筑物类文物还应查明内、外空间相对湿度的差异程度。

(5) 日照变化特征。

(6) 风向风力特征。

(7) 搜集 50 年特别是近 30 年雨水酸化资料。包括 pH 酸碱度变化及年出现频率变化。

(8) 大气污染特征及污染源分布情况。应与环保部门联合收集或检测文物区的大气环境数据，如 SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、悬浮颗粒等主要指标。并调查周边可能存在的污染源。

(9) 植被分布情况。

(10) 地表水体分布及地表径流情况。

(11) 地下水类型及埋深。

### (三) 取样

根据保护工程设计需求和测试分析目的，应进行新鲜岩石、劣化岩石样品和岩石表面生物样品的采样，具体要求如下。

#### (1) 物理力学分析为目的的取样

取样地点应选在替换下来的相同岩性的构件或不影响石质文物保存现状、相同岩性无雕刻的位置，取样应经业主单位许可，并共同确认取样地点后才能实施，同时应做好记录，深度取样应记录直径、深度，宜选用游标卡尺测量。表面取样应记录表面位置及性状。

深度取样可选用配有岩芯器的小型手持式钻机。在文物区内取样时，应选用旋转式低转速（约 100 转/分）的钻机，以避免样品过热。为保证钻孔的垂直度，可装配合适的滑板，并加配速度调节器。钻头宜选用金刚石螺旋钻头（环状）或硬质合金钻头。如果样品还需开展微生物研究，应事先作好无菌处理。表面取样可选用地质锤或凿子。深度取样原则上使用干钻。取样结束后应堵死取样时在文物保护区内或附近留下的孔洞，填堵材料应选择化学、物理性能上不对原岩石产生副作用且与岩石性质相近的材料。

表面取样规格应根据试验设计要求，一般规格有两种，5 厘米×5 厘米×5 厘米，7 厘米×7 厘米×7 厘米。可现场制备，也可取毛坯样后带回室内制备。数量依据试验要求，一般规定一组样品 3 块。

#### (2) 化学及矿物成分分析为目的的取样

应选择具代表性的地段进行取样，取样应涵盖各个层位，包括表层未风化的母岩。

根据表层材料的坚硬程度可使用以下几种工具：

- ①软鬃毛刷：用于收集尘土层、表面盐类结晶物质及粉末状剥落物质；
- ②手术刀：用于收集表面片板状剥落物质；
- ③小号的雕刻凿子：用于收集表面坚硬物质。

取样时应尽量提取还保留原结构的样品以控制测试结果的离散性。所有样

品需用密封性能良好的塑料袋或铝盒封存，封箱胶带封口，以防水汽进入，并防止结构破坏，置阴凉干燥处存放。封口处应标明取样地点、时间、劣化类型、母岩名称、层位、深度及取样人姓名。试验应控制在 6 个月内完成。

### （3）生物学分析为目的的取样

应在肉眼鉴定基础上进行，样品应能体现文物表面不同的典型和非典型生物病害源的特征。取样工具取决于病害源生长的特点，根据不同情况，可使用手术刀、镊子、小钳子和无菌软刷。

对微生物和地衣类样品应收集在无菌金属片、玻璃片上和试管内，然后用无菌塞子或胶条密封。对苔藓类样品可暂时收集在塑料袋内（时间不超过 24 小时），袋口除标明取样地点和日期外，还需标明样品所导致的病害类型。如不能在 24 小时送至实验室，样品需进行干燥处理。

### （4）岩矿鉴定为目的的取样

取样应选择具代表性的地段进行，应完整地、不破坏原结构地涵盖各个层位，且包括表层下未风化的母岩，以便室内制备垂向的剖面切片。如可能的话，应选在物理力学和化学、矿物成分分析取样点相邻地段完成。手术刀可用于风化岩石的表层取样；小号的雕刻凿子，用于新鲜岩石的取样。样品应严格包装以保证运输过程中结构不受破坏为标准。在包装封口处应标明取样地点、时间、编号、母岩名称及取样人姓名。

## （四）常用现场无损检测方法

### （1）表面回弹锤击测试

石质文物表层劣化现场检测宜采用 HT225 型回弹仪（国产）。测试地点选择应避开雕刻分布区，以确保文物本体安全；应选择相对平整的岩石表面；在选择测试点时，应避开空鼓地带，不应由于锤击造成岩石表层脱落。空鼓地带的确定，明显的可通过肉眼观察，隐伏的可通过肉眼观察或细橡胶棒、木条及手指轻敲方式的来确定；测试地点不宜选在文物表面粉末状、片状剥落严重的区域；一处测试点的区域宜选择在 0.4~0.5 平方米内，以能容纳均匀分布的测点 20 个左右为宜；测区内岩性和岩石表面结构和风化程度应相同或相近。

该测试方法适用于较致密的岩石表面，如砂岩、灰岩、花岗岩等。不适用

于酥松、胶结性差、表面均一性差且表面多孔洞的岩石，如玄武岩、砾岩等。

## (2) 表面吸水性能测试（卡斯特量瓶法）

检测设备采用两种结构型号用于检测垂直面（A型）和水平面（B型）（图5-7）。检测仪由一个直径25~30毫米的钟形罩和一个插接的定径玻璃管构成，玻璃管上有体积刻度（10毫升=10厘米水柱）。测试时应根据测试点的条件和测试目的选择合适的型号。

测试地点选择应充分考虑岩石表层不同的病害类型和劣化程度；测试点不宜选择在表层材质酥松和微裂隙发育严重的部位。应选择在岩石表面较平整完整处；测试点应选择在背阴处。测试时间应避开雨天、相对湿度大于90%或烈日曝晒天气，宜选在多云或阴天进行。

固定卡斯特量瓶前应对测试点的浮尘等进行清理；测试前应将卡斯特量瓶的触水面固定在要测试的岩石表面，固定材料可选用Bostik胶、耐水橡皮泥或硅橡胶等材料，固定材料应具弹塑性、良好的强度和防水性以达到固定、防漏的作用，并且对岩石表面的不良影响最小。如用硅橡胶固定，在硅橡胶固化之前应采取相应的辅助支撑设施，以确保卡斯特量瓶不掉落和直管部分的垂直。测试前应先预注水，如发现周边有渗漏现象应重新选点固定直至周边无渗漏为止；正式测试前的注水过程应尽量保持缓慢以防产生气泡，宜选用滴管注水；为减少蒸发量对测试的影响，可用脱脂棉或过滤试纸将瓶口遮护；每隔一定时间段读取水头凹面所在位置，时间间隔可以先短后长为原则。时间记录工具宜选用秒表。观测时间宜控制在2小时左右。每读一次数据同时应记录测试点的温湿度和表面性状变化，应注意是否有水的溢出和溢出区域及形式。

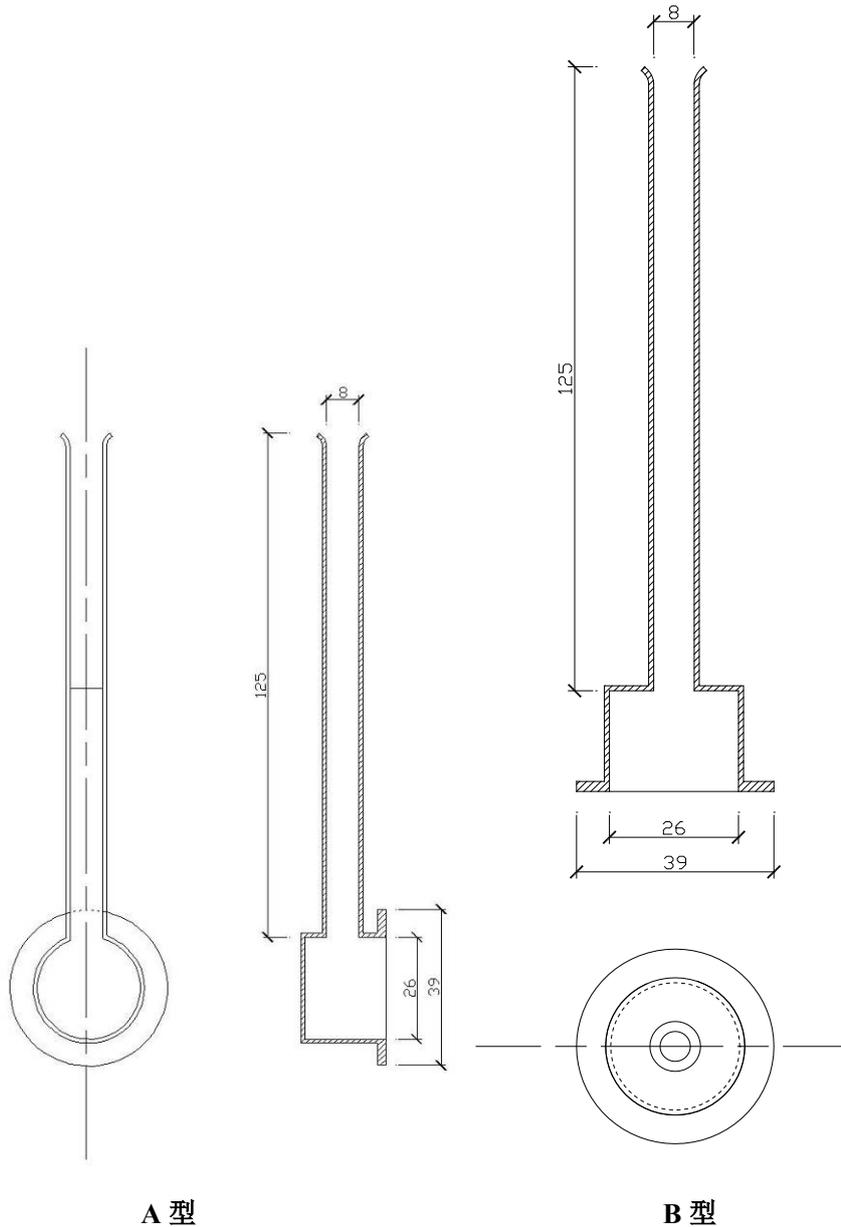


图 5-7 卡斯特量瓶构造示意图

试验适用于较致密的岩石材料，如砂岩、灰岩、大理岩、花岗岩等。不适用于裂隙和孔洞发育的岩石材料，如玄武岩、角砾岩、剪切带附近岩石等。

### (3) 岩石声学测试

现场声波测试可按两种方法分别求得岩石和岩体的平均波速。一是用时距法求岩石的平均波速。主要是在较大块的完整岩石表面上，于直线的一端作发射点，然后依次以不等距布置 4~6 个接收点在该直线上，分别测得各点的纵、横波速。以时间 (t) 为纵坐标，测距 (l) 为横坐标，分别做出通过原点的两条时距曲线，从而求得岩石的平均纵、横波速。二是用多向法求岩体的平均波

速，主要是在典型岩体的表面上，以发射点为中心，按“米”字形放射状不等距地测得 4~8 条测线的纵、横波速，分别求其算术平均值为岩体的平均纵、横波速。每一种岩石，按其地质特征，分别选取代表性试样 2~3 块，测定其岩块密度 ( $\rho$ )。

试验适用于较致密的岩石材料，如砂岩、灰岩、大理岩、花岗岩等。不适用于裂隙和孔洞发育的岩石材料，如玄武岩、角砾岩、剪切带附近岩石等。

#### (4) 红外热成像检测技术

测试点应尽量选取外观平整的表面，同时要排除日照不均匀、周边植被和建筑物阴影等的影响；对于表面有水的情况，距表面 10 厘米之内的，可直接检测；对于没有水的裂隙或内部缺陷，其垂直于表面的投影面积要远大于其深度方可用此方法测定，投影面积越大越容易观测，但应注意多个内部缺陷重叠现象；检测没有水的内部缺陷需要长时间观察动态图像，测试时间应根据检测对象材质及拟检测深度确定。

红外热成像检测技术的检测成果以红外热成像图表示，对于图像的释读应综合其他检测和勘察结果。

红外热成像检测技术适用于检测岩石表层含水分布情况以及岩石表面浅层且平行于壁面缺陷的分布情况，如空鼓、平行壁面的风化裂隙和卸荷裂隙等。

### (五) 室内试验项目

#### (1) 岩矿鉴定

传统的岩矿鉴定主要依据薄片偏光显微岩相鉴定法。

传统的光学显微镜由于分辨率、放大倍数的限制，对于细微颗粒的定性分析不准确，矿物的定量分析存在一定的误差，对纳米-微米级矿物形貌及结构特征的观察往往束手无策，随着油气勘探及地质找矿的不断深入，需要提供岩石中所有矿物、孔隙及微量元素的信息，因此整合傅里叶红外光谱仪、X 射线衍射仪、拉曼光谱仪、扫描电镜的优点，建立以大型仪器为基础的岩石矿物鉴定方法成为岩矿鉴定的发展方向。红外光谱范围为  $7500-370\text{cm}^{-1}$ ，能对固、液、气样品中含量高于 30% 的矿物进行快速、准确的定性分析；主要用于有机质分析，其次还可对部分具有极性键的无机化合物及金属氧化物进行分析。X 射线

衍射仪能快速地对样品中含量大于 15% 的矿物进行较为准确的定量分析；现今主要用于各类晶质矿物的定性分析，同时也可对碳酸盐岩矿物等不含水矿物进行定量分析。拉曼光谱仪光谱范围为 200-1000 纳米，空间分辨率为横向 0.5 微米、纵向 2 微米，通过对包裹体进行测试能直接获得成岩过程中的温度、压力、流体成分等信息；目前主要用于流体包裹体成分的测试，其次还可对分子极化度会发生变化的液态、粉末及固体样品进行定性分析。扫描电镜分辨率达到 1 纳米，能清晰地观察到纳米—微米级矿物的形貌特征及矿物的结构特征；主要用于纳米—微米级的任何非磁性固体矿物的形貌及相关关系的观察，通过大型仪器建立的岩石矿物鉴定方法具有更高的分辨率，显著地提高了岩矿鉴定的精准度，大大拓宽了岩矿鉴定的范围（如鉴定纳米/微米级的矿物、矿物的不同变种等），能够全面、精准地提供岩石矿物的矿物含量和矿物组成，客观准确的成岩作用信息、清晰的矿物微观形貌及结构特征，而且仪器功能相互弥补，测试结果相互验证，保证了测试结果的可靠性，与传统光学显微镜鉴定方法相比，现代大型仪器岩石矿物鉴定技术为揭示矿物间的共生、反应、演化、岩石的成因、沉积/成岩环境等提供了依据，为地质工作提供准确、全面的矿物定性定量、组构特征及成岩作用等信息，为地质工作的顺利完成奠定了坚实的基础。下面介绍四种常用的大型仪器分析技术，供大家在实际勘察工作中根据设计和研究需要选用。

## （2）物理性质试验

其中劣化与新鲜岩石样品物理、水理性质测试结果对比，是评价石质文物表层劣化程度的重要的宏观指标（如岩块密度变化、吸水率变化、崩解性状变化等）。但受劣化样品因试验制样要求限制有些指标难以测定，如岩石孔隙度；而吸水率测试和耐崩解试验不受样品尺寸限制，所以该两项试验可作为评价劣化程度最重要的指标。

## （3）矿物成分分析

矿物成分分析具体要求如下。

- 1) 对于原岩及劣化样品应分别通过 XRD 分析法获取矿物成分定量数据；
- 2) 对于砂岩、凝灰岩等的泥质胶结物应粉碎后，通过悬浮法获取小于 0.002

毫米的黏粒通过 XRD 分析法获取矿物成分定量数据；

3) 对于盐类矿物及化学沉淀物应通过 XRD 和差热分析法 (DTA) 进行矿物成分分析与鉴定。

#### (4) 化学成分分析

化学成分分析根据研究或工程设计需要可选定以下项目。

化学全分析，分析项目一般包括  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}^-$  (吸附水)、 $\text{H}_2\text{O}^+$  (化合水) 及烧失量 (LOI) 等；

可溶性盐分析，分析项目一般包括碳酸盐、卤化物、硫酸盐、硝酸盐等。

#### (5) 矿物微观结构观测分析

一般采用扫描电镜分析技术 (SEM) 可观察新鲜和劣化岩石样品胶结物矿物成分、新矿物 (如石膏) 的形成、孔隙变化。该项测试原则上应在成分分析试验完成并提交有关数据后开展。

#### (6) 生物分析检测

检测目的主要是完成生物类型的种属鉴定。除肉眼标本鉴定外，主要技术方法有扫描电镜检测、分子检测等。

### (六) 分析与评价

分析与评价主要包括以下内容。

(1) 根据调查结果可对表层病害分布面积进行分类统计。

(2) 根据病害对文物表面造型的影响程度及修复保护工程的要求，可对表层劣化病害类型进行分级评价。分类分级评价体系可由组群、典型类型和独立类型三级组成。

#### 1) 组群

组群是根据劣化对石质文物保存现状的影响程度，同时兼顾文物本身的功能特点和保护性质而确定的，我们将其由重至轻总体分为五个等级，即五类：

①表层完整性破坏类：文物岩石材料表层各种形式的缺失且在无依据情况下无法修复的现象；②表层完整性损伤类：文物岩石材料表层各种形式的局部破损，但可在现条件下修复的现象；③表面形态改造类：在文物岩石材料表层结构完

完整性保存较完好的前提下，表面形态由于其他物质覆盖而造成的各种形态造型变化现象；④表面颜色变化类：在岩石材料表层结构完整性保存较完好，表面形态变化不大的前提下，表面或表层颜色的各种变化现象；⑤生物寄生类：在岩石材料表层结构完整性保存较完好，表面形态变化不大的前提下，表面生物生长，并可处理的各种现象。

## 2) 典型类型

典型类型是指具有统一而明显特征以区别其他类型的现象群。①表层完整性破坏类：在该组群下可界定缺损、剥落和溶蚀三个典型类型；②表层完整性损伤类：在该组群下可界定分离、空鼓、皴裂和划痕四个典型类型；③表层微形态改造类：在该组群下可界定结垢、结壳两个典型类型；④表面颜色变化类：该组群下可界定锈变、晶析、斑迹和附积四个典型类型；⑤生物寄生类：该组群下可界定低等植物、高等植物、低等动物痕迹和霉菌四个典型类型。

## 3) 独立类型

是指一定具有独立特征以区别于其他类型的单一现象。如典型类型溶蚀下又分为均匀溶蚀和差异溶蚀 2 个独立类型；典型类型剥落下根据剥落体的特征又可分为层状、片状、鳞片状、板状、粉末状和粒状 6 个独立类型,具体要求可参照表 5-13。

表 5-13 文物岩石材料表层劣化类型分级界定说明表

序号	典型劣化类型	现象解释
1	第一类组群：表层完整性破坏类	
1-1	缺损 (Loss)	石材表面部分或全部因损伤而缺失的现象。
1-2	剥落 (Exfoliation)	指石材表层全部或部分在较小的外力条件下发生基本平行于壁面逐渐脱离母体的现象。 根据剥落物的形态分为粉末状剥落、粒状剥落、层状剥落、鳞片状剥落、片状剥落、板状剥落六个独立类型。
1-3	溶蚀 (Erosion)	石刻表面造型被逐渐侵蚀破坏模糊的现象。分为均匀溶蚀和差异溶蚀两个独立类型。
2	第二类组群：表层完整性损伤类	
2-1	分离 (DeTachment)	石材表层部分已于母体完全分开，但未脱离的现象。
2-2	空鼓 (Hollowing)	石材表层一定厚度的片板状体发生隆起变形，在片板状体后形成空腔的现象。
2-3	皴裂 (Chapping)	石材表面形成的网状微裂隙组，将石材表面分割的现象。
2-4	划痕 (Nick)	石材表面与雕刻造型无关的表面有一定深度的肉眼可观

		察到的各类痕迹。
3	第三类组群：表层形态改造类	
3-1	结垢 (Encrustation)	在石材表面渗水处或以前渗水处下方形成具有一定厚度沉淀物质的现象。
3-2	结壳 (Crust)	外界物质在石材表面形成壳层的现象。(多为黑色) 小于 1 毫米厚的也可称为结膜 (Film)。一般在轻微机械作用下, 很难清除。
4	第四类组群：表层颜色变化类	
4-1	锈变 (Patina)	石材表面固有色变化的现象。
4-2	附积 (Soiling)	外界物质在石材表面附着的现象。在轻微的机械作用下, 易于清除。
4-3	斑迹 (Spot mark)	外界物质在石材表面渗透, 从而形成的各种污染现象。在轻微的机械作用下, 不易清除。
4-4	晶析 (Efflorescence)	石材表面析出灰白色结晶状物质的现象, 一般附着力不强, 呈细小针状。
5	第五类组群：生物寄生类	
5-1	低等植物	包括真菌类、苔藓类、地衣类和藻类、蕨类五个独立类型
5-2	高等植物	包括草本和木本两个独立类型
5-3	低等动物痕迹	昆虫在石材表层生活所留下的痕迹。如虫窝、虫卵及分泌物等。
5-4	霉菌 (Mould)	从肉眼观测该类物质像霜附着于岩石表面。会呈现不同颜色, 一般情况下, 以白色、灰色和黑色居多。

(3)根据表层病害分类、分级统计结果,可对保护对象保存现状进行评估。

(4)根据调查检测分析结果,应对表层劣化程度及表层劣化深度进行评价。

(5) 根据环境调查和检测分析结果应对各类病害形成原因进行分析。

(6) 应调查和评价以往保护修复工程的实施时间、部位、技术及目前工程有效性, 在此基础上, 进一步评价以往保护工程对本次工程实施的影响程度。

### (七) 监测

对于重要保护对象应进行长期监测, 为工程设计提供依据。监测项目可包括表面形貌监测和表面强度监测。

## 5.5 石窟寺及石刻保护工程勘察总报告

勘察总报告是勘察工作的最终成果, 是保护工程设计的重要依据, 因此它的重要性是不言而喻, 为确保报告中所提供数据、结论的准确性, 我们应在对搜集的资料、现状调查与测绘、勘探、测试、岩土工程勘察报告等一系列勘察

成果进行逐项检查、全面分析鉴定的基础上编写。成果内容应与保护工程设计要求和勘察目标相对应，对石质文物主要病害的发生、原因及发展趋势应有一定的研究深度。勘察总报告内容应符合下列要求：

(1) 文字部分要求简练，条理清晰，论证有据，结论明确。

(2) 图表部分要求比例尺选择合理，图面整洁、美观、清晰，数据准确无误，表格简明实用，与文字部分相符。

### 5.5.1 文字内容要求

作为报告主体部分的文字内容，各部分间应建立严谨的逻辑关系，论述过程应做到循序渐进、深入浅出。主要应包括勘察项目概述、勘察对象概况及价值评估、区域概况、工程地质条件、水文地质条件、环境工程地质问题、石质文物主要病害及分析、以往保护工程效果分析、主要结论与建议九部分。

#### 1. 勘察项目概述

勘察项目概述是整个报告的引言部分，主要是阐述勘察工作目标、依据、工作过程和完成情况，具体可包括以下内容。

##### (1) 勘察目标、等级及要求

###### 1) 勘察目标

勘察工作目标是勘察工作的魂。是勘察工作与设计工作间的桥梁，它决定了勘察工作的总体技术路线。因此，它应是勘察报告正文部分的首要内容。它是根据项目委托书、保护设计拟解决的工程问题及工程勘察大纲确定的。

###### 2) 勘察等级

鉴于岩土工程勘察等级主要以场地及地质条件复杂程度确定的，而文物保护单位工程勘察工作的对象是既有的工程对象，因此，在文物保护单位工程勘察等级确定时，还必须考虑勘察对象的重要性，这些都决定了技术方法的选择和工作量的确定。

##### (2) 勘察工作依据

勘察工作依据总体可分为两部分：

1) 勘察技术标准、规范和规程，如《岩土工程勘察规范》。

2) 鉴于文物保护单位工程勘察工作有别于一般的建设工程，所以勘察工作的开

展还必须遵守国际及国内行业相关法律、法规和技术导则，如《中国文物古迹保护准则》《文物保护工程设计文件编制深度要求》等。

### （3）勘察技术方法、过程及工作量

1) 根据勘察目标、勘察等级、勘察依据及文物保护工作勘察特点和要求，应阐述勘察工作采用的主要技术方法。

2) 应简明扼要阐述勘察工作的实施过程及工程勘察大纲执行及调整情况。

3) 应附工作量清单及勘探点平面布置图。

### 2. 勘察对象概况及价值评估

文物保护工程勘察工作与一般建设工程勘察工作最大的不通之处在于勘察对象的特殊性，因此，勘察对象的概述在勘察报告中应成为一个独立章节。具体可包括以下内容。

#### （1）文物概况

文物概况主要阐述内容包括文物的所处地理位置、创建年代、规模等。

#### （2）历史沿革

历史沿革主要阐述文物创建之初的历史背景及历史上在位置、规模、形制特征及周边环境等方面发生重大变化情况。

#### （3）文物特点及保存现状总体情况

文物特点及保存现状总体情况主要阐述目前文物分布、主要形制特征及保存环境等情况。

#### （4）历史维修情况

历史维修情况主要阐述文物自创建以来历史各时期所经历重要维修工程的具体时间、内容和记载情况。

#### （5）价值评估。

价值评估可根据保护单位或考古单位提供的资料，从历史、科学、艺术、文化、社会五个方面对文物价值进行简要评述。

### 3. 区域概况

区域环境条件是我们认识文物破坏历史的基础，该方面主要由我们搜集的各方面资料构成。具体包括以下内容。

### （1）区域地形地貌

文物所处位置的大地构架不仅与文物创建之初选址有关，也反映了文物创建后自然环境的变迁及与现今病害发育间的关系，如前面曾提到的云冈石窟、巩县石窟，因此，对于大区域地形地貌的认识也是极为重要的。该部分主要是对区域地形地貌情况的阐述。

### （2）区域地层构造

文物创建后所经历的自然灾害大都与所处位置的地层构造有关，这点尤以与地质体相连的石质文物最具代表性，其岩体内发育的大部分节理裂隙都与构造活动有关。该部分主要是对这方面资料的梳理和阐述。

### （3）气象水文

通过对石质文物病害的梳理，我们发现无论是结构失稳、渗漏还是表层劣化，都与其所处的区域水环境紧密相关，而区域水环境包括大气环境中的水和大地环境中的水两个方面，也就是我们通常说的气象和水文条件。该部分主要是对这两个方面资料的梳理和阐述。

### （4）地震

在石质文物病害调查和结构稳定性分析中我们常常发现地震往往是导致结构彻底破坏的致命因素，所以对于地震资料的搜集和研究就显得尤为重要。该部分主要包括文物位置与所处地震活动带间的关系，所在地区历史上最强地震震中位置、震级及破坏程度。近期（近 50 年）所在地区地震发生频率及破坏程度。

## 4.工程地质条件

工程地质条件是岩土工程勘察的核心内容，也是文物保护工程勘察的基础性内容，所以该部分内容在勘察报告中的重要性不容置疑，它所提供资料和数据真实、可靠性，不仅关系到勘察结论的正确性，更关系到保护工程设计的合理性和可靠性。具体包括以下内容。

### （1）地形、地貌

该部分的内容与区域地形地貌不同之处在于，该部分主要阐述调查区域内的地形地貌特征。如文物所处位置的地形地貌单元特征，高程变化情况。

## （2）地层及空间分布

该部分主要是对工程地质调查与测绘、勘探成果的反映，结合图表，应集中反映文物所在区域地层在垂直和水平两个方向上的分布情况。

## （3）不良地质现象

这里不良地质现象特指对文物主体结构及其环境长期保存产生影响的自然地质作用和现象。如滑坡、泥石流、岩溶等，该部分主要是对以上现象分布情况及影响程度的阐述。

## （4）岩土工程性质及分析

该部分主要是对测试成果的反映，结合图表，应集中反映和分析文物所处岩土体的物理力学性质。

## （5）场地类别及稳定性评价

该部分应包括①场地均匀性分析；②场地类别分析；③场地抗震性能分析和设防级别。

## 5.水文地质条件

该部分内容也是岩土勘察极其重要的内容，对于渗漏病害治理工程更是设计的重要依据。具体包括以下内容。

### （1）地表水体分布情况及变化规律

该部分重点阐述区内影响文物保存的地表水体（如河流、湖泊、人工水体等）的空间分布情况，水位（洪水位、枯水位）变化情况及变化规律。

### （2）地下水类型及埋藏条件

该部分应详细论述场区内各层地下水的类型，初见水位埋深，静止水位埋深；含水层性质，隔水层性质；场区内地下水水位变化情况。

### （3）地下水渗流、补给及排泄条件

通过地表水体、地下水水位及周边近、井、泉分布及变化情况，详细论述地下水各个季节补给、排泄规律及渗流条件。

### （4）地下水水质分析及腐蚀性评价

根据地下水水质分析成果，按照《岩土工程勘察规范》有关规定，综合判定地下水对混凝土结构及混凝土中的钢筋及钢结构的腐蚀性。

## 6.环境工程地质问题

对于存在环境工程地质问题的保护工程,勘察报告应用单独章节进行阐述。

主要包括:环境工程地质问题类型及对文物本体和环境的影响程度;环境工程地质问题的形成原因及发展趋势两部分。

## 7.文物主要病害及分析

石质文物主要病害类型及分析是文物保护工程勘察报告的核心部分,更是保护工程设计的重要依据,该部分内容具体应包括:石质文物保存现状及主要病害类型;石质文物病害的调查、统计与危害性分析;文物病害形成原因及影响因素分析三部分。

## 8.以往保护工程效果分析

文物保护是一项长期工作,任何一次保护工程无论从治理对象,还是工程时效而言,都无法实现一劳永逸,因此,在勘察中对前人工作的总结、分析也极为重要。该部分内容具体应包括:以往保护工程实施效果及目前工程有效性分析;以往保护工程对目前石质文物病害治理的影响两部分。

## 9.主要结论与建议

勘察报告的结论部分是对勘察工作成果的总结,也是工程设计工作的直接依据,因此,其重要性不言而喻,所以总体要求该部分内容应简介、客观、严谨,所有结论均应有具体勘探或实验数据支持。

该部分内容具体可包括:文物所在场地条件的总体评价;石质文物病害形成原因及影响因素的总结;保护工程设计思路和方向性建议;石质文物病害监测指标及监测方法建议四部分。

### 5.5.2 图件要求

勘察报告内的图件总体可分为插图和附图两部分。

#### 1.插图

插图编排顺序应与文字说明顺序相符,可包括文物保护单位区位图(1:50000或1:10000)、构造纲要图、岩体节理裂隙玫瑰花图、等密度图等内容。

## 2.附图

附图应单独编目附在文字报告后，具体可包括以下内容。

- (1)文物保护范围总图或现状总平面图(1:200、1:500、1:1000 或 1:2000)；
- (2)文物形制测绘图：根据文物类型按照第四章有关内容及有关规范编绘；
- (3)勘探点平面配置图 ((1:200、1:500、1:1000 或 1:2000)；
- (4)工程地质综合(或分区)图(1:500、1:1000、1:2000、1:5000 或 1:10000)；
- (5)水文地质综合(或分区)图(1:500、1:1000、1:2000、1:5000 或 1:10000)；
- (6)工程地质岩性剖面图；
- (7)钻孔(综合)柱状图；
- (8)探井、探槽展开图；
- (9)病害分布图：根据文物类型和保护工程特点和设计要求可包括边坡或洞窟(洞室)岩体节理、裂隙立面、平面分布图及立面展开图，边坡或洞窟(洞室)危岩体分布图及立面展开图，石质建筑物及构筑物结构保存现状测绘图，文物区或文物结构内部出水点平面及立面分布图，石质文物表层病害分布图及重点部位病害详图等；
- (10)病害分析图：根据文物类型和保护工程特点和设计要求可包括各危岩体节理、裂隙剖面分析图，洞窟节理、裂隙剖面分析图，渗流模型剖面分析图等。

### 5.5.3 表格要求

勘察报告中的表格应可包括以下内容。

- (1)勘探点数据一览表；
- (2)地质描述表；
- (3)物探成果图表；
- (4)原位测试成果图表；
- (5)试验室岩土试验成果表；
- (6)大气降水、地表水、地下水水质分析成果表；
- (7)病害调查统计表。根据不同病害类型的勘察要求，可包括石质建筑物及构筑物裂缝调查统计表、岩体节理裂隙调查统计表、危岩体分析评价表、出

水点调查统计表、岩石表层病害类型说明表、岩石表层病害类型分类、分级调查统计表等。

#### 5.5.4 照片要求

照片应真实、准确、清晰，照片主要内容要求如下：

- (1) 应反映文物所在区域环境特点及文物整体风貌特点。
- (2) 应反映保护对象的时代特点及总体保存情况。
- (3) 应重点反映主要病害特征及分布区域。
- (4) 应重点反映重要勘探点情况。
- (5) 应重点反映重要取样点情况。
- (6) 照片编排顺序应与文字说明顺序及实测图顺序相符。
- (7) 照片文件大小不小于 1MB。
- (8) 照片说明文字应居中置于照片下，照片序号宜按章节编排。

#### 5.5.5 附件要求

作为勘察报告的辅助说明材料，附件可包括以下内容：

- (1) 项目委托书。
- (2) 项目协议或合同书。
- (3) 勘察单位资质。
- (4) 项目组人员构成(包括项目负责人、主要参加人员职称及专业背景等)。
- (5) 工程勘察大纲。
- (6) 上级主管部门批复、批准文件。
- (7) 专项技术论证会评审意见。
- (8) 取样登记清单。
- (9) 勘察过程中重要会议纪要。
- (10) 岩土工程勘察报告。
- (11) 其他专项报告。

## 6 中国石窟寺及石刻保护工程方案设计

石窟寺及石刻保护工程设计文件是安排石窟寺及石刻保护项目、控制保护工程投资、编制招标文件、组织保护工程施工、工程质量监督和工程竣工验收的重要依据。石窟寺及石刻保护工程设计文件的编制，必须贯彻执行国家有关政策法规、基本建设程序、标准和规范，执行国家和各级地方政府对石窟寺及石刻保护工作的有关规定，保证质量。

设计文件编制贯彻“不改变文物原状”“最低限度干预”“保护文化传统”“使用恰当的保护技术”“防灾减灾”等保护原则，全面地保存、延续文物的真实历史信息和价值；按照国际、国内公认准则，保护文物本体及与之相关的历史、人文和自然环境。文件的编制要结合文物价值、经济技术条件，吸取国内外先进经验，积极采用传统材料与工艺，并鼓励引入适宜的新技术、新材料、新工艺。在编制过程中还应注意与石窟寺及石刻保护区划范围内的其他建设工程的协调，使保护工程项目取得更大的社会、环境和经济的综合效益。

石窟寺及石刻保护工程设计一般分为方案设计和施工技术设计两个阶段。大型和重要工程应增加用于立项申请的概念性方案设计，说明项目的必要性和可行性；小型简单工程在完成现状勘察文件的基础上可以直接进入施工技术设计。

本章内容适用于指导石窟寺及石刻本体及其载体的维修加固工程和抢救工程，石窟寺及石刻附属栈道、窟檐、排水设施，石雕、碑刻的防风化保护工程，防治危及文物安全的水害、地震、滑坡、崩塌、风沙等灾害治理工程的方案的编制。

### 6.1 石窟寺及石刻保护工程设计文件编制程序及内容

#### 6.1.1 保护工程设计文件编制程序

##### (1) 资料收集

收集石窟寺及石刻历史资料、考古资料和历次维修资料，了解文物的原材料、原形制、原工艺、原做法，判别文物年代等。通过历次维修资料，判断所

采用保护措施的效果。

## （2）现场调查

设计人员在接到设计任务后，在初步阅读有关资料的基础上，首先应进行现场踏勘。石窟寺及石刻保护工程由于文物价值高、病害复杂，而勘察报告往往难以反映设计所需要的全部信息。此外，对勘察报告的判读也需要掌握现场情况，因此，对于设计人员而言，现场踏勘是必不可少的重要环节。在踏勘期间，还应对周围环境、交通和道路状况、地表及地下障碍物、当地同类文物保护工程的施工实例进行调查。

## （3）判读勘察报告

翔实的勘察资料和准确的勘察结论是正确设计的前提。因此，在不同的设计阶段，应对现状勘察报告进行研判，看其是否满足该阶段设计工作的要求，是否与设计人员在野外的踏勘相吻合，如果两者具有较大的差距，或者所提供的参数不能满足保护工程设计的需要，设计人员应及时与勘察人员进行沟通，协商解决。

## （4）编制方案设计文件

石窟寺及石刻保护工程既是一项工程活动，又是一项文物价值的保护与传承活动。在方案制定中，常常涉及到多种方案的比较，不同方案的组合，从而满足文物保护的理念与原则。设计人员最终提出的方案应该是文物真实性和完整性、技术可行性以及工程造价的有机统一。方案设计应根据立项批复的内容和要求、勘察结论开展工作，总体保护思路、保护措施、主要保护技术、工程概算等，应做到保证文物安全，满足编制施工招投标文件、主要材料购置和编制施工图设计文件的需要。

## （5）编制施工技术设计文件

施工技术设计文件是方案设计文件基础上的进一步扩充和深化。方案设计文件获得文物行政主管部门批准后，即可根据批准文件中的修改意见开展保护工程的施工技术设计文件编制工作。施工技术设计文件根据批准的方案设计，绘制出正确、完整和尽可能详细的保护设计平立剖图纸，包括部分详图、零部件结构明细表、合格标准与方法，施工图预算等，应当满足设备材料采购、非

标准构件制作和施工需要。

#### (6) 设计变更或补充

施工过程中如需变更或补充已批准的施工技术设计，由工程业主单位、设计单位、监理单位和施工单位共同现场洽商，并报原申报机关备案；如需变更已批准的保护工程项目或方案设计中的重要内容，必须经原申报机关报审批机关批准。

### 6.1.2 保护工程设计文件编制内容

文物保护方案设计文件应包括保护工程方案、设计图及相关技术文件、工程设计概算等；文物保护施工技术设计文件包括施工图、设计说明书、施工图预算、相关材料试验报告及检测鉴定结果。

#### 1. 方案设计文件编制内容

包括方案设计说明、方案设计图及方案设计概算三部分内容。

##### (1) 方案设计说明

具体包括：1) 设计依据；2) 设计原则和指导思想；3) 工程性质；4) 工程范围和规模；5) 保护措施；6) 说明与保护措施有关系的地理环境、气象特征、场地条件等；7) 被确定使用的特殊材料（如化学灌浆材料、封护材料、表面防风化材料）应提供实验室试验数据、应用实例和现场试验报告。

##### (2) 设计图纸

具体包括：1) 总平面图；2) 工程措施图；3) 其他相关专业，如建筑、水文、地质等设计图纸，按各专业相关设计标准和技术规范执行；4) 对文物影响较大的保护构筑物应有景观分析或景观效果图。

##### (3) 设计概算

具体包括：1) 概算说明（涵盖工程概述、编制依据、编制方法及其他必要的情况说明）；2) 概算汇总表；3) 概算明细表。

#### 2. 石窟寺及石刻保护工程施工技术设计文件编制内容

包括施工技术设计说明、施工技术设计图及施工技术设计预算三部分内容。

##### (1) 施工技术设计说明

具体包括：1) 设计依据；2) 设计原则和指导思想；3) 工程性质；4) 工

程范围和规模；5) 技术要求和工程做法说明；6) 工程计算书。

### (2) 施工图图纸

具体包括：1) 总平面图；2) 各相关专业平、立、剖面图；3) 重要构造做法的节点大样图等。

### (3) 设计预算

具体包括：1) 预算说明（涵盖工程概述、编制依据、编制方法及其他必要的情况说明）；2) 预算汇总表；3) 预算明细表。

## 6.2 石窟寺及石刻保护工程设计文件编制

### 6.2.1 保护工程设计文件编制要求

石窟寺及石刻保护工程设计文件包括设计说明和设计图纸。

#### 1. 设计说明

(1) 总则：根据国家文物局 2013 年下发的《文物保护工程设计文件编制深度要求》中第五章石窟及石刻类保护工程设计文件要求，设计说明应包括设计依据、设计原则和指导思想、工程范围和规模等内容，并对保护措施的选择、材料的使用试验及图纸等做出明确要求。

#### (2) 设计依据

设计依据应包括项目立项批准文件、有关政策法规、已批准的总体保护规划、勘察结论、保护及功能方面的需求（设计委托书有关内容或设计合同有关内容）等。常用的技术标准及政策法规如下：

《中华人民共和国文物保护法》；

《中华人民共和国文物保护法实施细则》；

《中华人民共和国文物保护法实施条例》；

《文物保护工程管理办法》；

《纪念建筑、古建筑、石窟等修缮工程管理办法》；

《中国文物古迹保护准则》；

《石质文物病害分类与图示》；

《石质文物保护工程勘察规范》；

《岩土工程勘察规范》；  
《工程勘察设计收费标准》；  
《中国地震动参数区划图》；  
《建筑边坡工程技术规范》；  
《锚杆喷射混凝土支护技术规范》；  
《岩土锚杆（索）技术规程》；  
《室外排水设计规范》；  
《排水沟设计规范》；  
《地下防水工程质量验收规范》；  
《X X X 项目勘察报告》；  
《X X X 项目总体保护规划》；  
《X X X 项目设计合同书》中有关技术要求内容；  
《X X X 项目委托书》；

……

### （3）设计原则和指导思想

1) 原址保护。只有在发生不可抗拒的自然灾害或因国家重大建设工程的需要，使迁移保护成为唯一有效的手段时，才可以原状迁移，易地保护。易地保护要依法报批，在获得批准后方可实施。

2) 尽可能减少干预。凡是近期没有重大危险的部分，除日常保养以外不应进行更多的干预。必须干预时，附加的手段只用在最必要部分，并减少到最低限度。采用的保护措施，应以延续现状，缓解损伤为主要目标。

3) 定期实施日常保养。日常保养是最基本和最重要的保护手段。要制定日常保养制度，定期监测，并及时排除不安全因素和轻微的损伤。

4) 保护现存实物原状与历史信息。修复应当以现存的有价值的实物为主要依据，并必须保存重要事件和重要人物遗留的痕迹。一切技术措施应当不妨碍再次对原物进行保护处理；经过处理的部分要和原物或前一次处理的部分既相协调，又可识别。所有修复的部分都应有详细的记录档案和永久的年代标志。

5) 按照保护要求使用保护技术。独特的传统工艺技术必须保留。所有的新

材料和新工艺都必须经过前期试验和研究，证明是最有效的，对文物古迹是无害的，才可以使用。

6) 必须保护文物环境。与文物古迹价值关联的自然和人文景观构成文物古迹的环境，应当与文物古迹统一进行保护。必须要清除影响安全和破坏景观的环境因素，加强监督管理，提出保护措施。

7) 工程设计内容从“保护为主、抢救第一”的原则出发。

#### (4) 工程性质

根据病害和问题确定工程性质，说明要达到的修复效果和景观效果。同一工程包含不同性质的子项工程时，要逐一说明。根据国家文物局工程立项保护工程项目类型，工程性质可分为抢险加固工程、修缮工程、其他保护性设施建设工程、环境整治工程、展示利用工程等。子项工程可细分为石刻造像修复工程、石刻造像防风化保护工程、岩体加固工程、防渗治理工程、展示工程、窟檐保护修复工程、保护性建筑工程等。

#### (5) 其他说明

1) 工程范围和规模。工程规模应量化，具体保护对象应明确。

2) 保护措施。针对病害采取的修缮防治措施，材料、做法的技术要求，必要时可作多种措施的方案比较，并提出推荐方案。采用新材料或涉及石窟、石刻安全的结构材料时，应有严格的技术要求和材料的检测报告及质量标准说明。如需要应用锚固工程、灌浆工程、防渗排水工程、防风化保护等措施，应进行专项设计。

3) 设计说明中还应说明与保护措施、保护材料等有关系的地理环境、气象特征、场地条件等。

4) 被确定使用的特殊材料（如化学灌浆材料、表面防风化材料等）应提供实验室试验数据、应用实例和现场试验报告。

## 2. 设计图纸

### (1) 总体要求

设计图纸参照国家文物局 2013 年下发的《文物保护工程设计文件编制深度要求》中第五章石窟及石刻类保护工程设计图纸要求。

### 1) 总平面图

①标示工程对象、工程范围；标注或编号列表注明文物名称。

②标示工程措施的内容、布局以及道路、防洪、场地排水、环境整治、防护设施等相关内容，标注相关主要尺寸、标高。

③指北针或风玫瑰图。

④比例一般为 1:500~1:2000。

### 2) 工程措施图

①表达保护措施所必要的平、立、剖面图（包括必要的分区平面图、立面图和若干纵横剖面图），标注工程措施、内容、材料和工艺，标注相关尺寸、标高、剖面位置、详图索引关系等。

②比例一般为 1:50~1:200。

③如有必要增加工程措施结构及节点详图。

3) 其他相关专业，如建筑、水文、地质等设计图纸，按各专业相关设计标准和技术规范执行。

4) 对文物影响较大的保护构筑物应有景观分析或景观效果图。

### (2) 设计图绘制要求

根据《CAD 建筑制图规范》和《岩土工程勘察制图标准》，并结合文物保护工程的特点，提出以下石窟及石刻保护工程设计绘图要求和标准。

#### 1) 基本要求

①所有设计单位出的图纸都要配备图纸封皮、图纸说明、图纸目录。

②图纸封皮须注明工程名称、图纸类别（方案图、施工图）、制图日期。

③图纸说明须对工程进一步说明工程概况、工程名称、建设单位、施工单位、设计单位等。

④每张图纸须编制图名、图号、比例、时间。

⑤打印图纸按需要比例出图。

⑥图层组织根据不同的用途、阶段、实体属性和使用对象，可采取不同的方法，但应具有一定的逻辑性，便于操作。各类实体应放置在不同的图层上，如平面图中，轴线标注和第三道尺寸应分层标注，标注石窟门、窗洞口的细部

尺寸应分层表示；石窟造像及其标注等单独设置图层表示；标高等尺寸也应独立分层表示。

### 2) 常用比例

常用图纸比例如下表，同一张图纸中，不宜出现三种以上的比例。常用比例为：1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:10, 1:20, 1:25, 1:30, 1:40, 1:50, 1:60, 1:80, 1:100, 1:150, 1:200, 1:250, 1:300, 1:400, 1:500。

表 6-1 常用比例表

图名	比例
平面图、立面图、剖面图	1:50、1:100、1:150、1:200、1:300
局部放大图	1:10、1:20、1:25、1:30、1:50
构造详图	1:1、1:2、1:5、1:10、1:15、1:20、1:25、1:30、1:50

### 3) 线型

①绘制图件时可根据不同用途采用下表中不同的线型。绘图时，应将主要图线用粗线表示，次要图线用细线表示。所表达的内容应重点突出、主次分明。在同一张图中，表示同一种地质特征的线型、线宽应一致。

表 6-2 线型用途表

线型	宽度 (mm)	用途
粗实线	1.0	图纸内边框线，剖面图中的地表线及钻孔深度线
中粗实线	0.4-0.6	图例边框线，地层分界线，地质剖面线，平、剖面图中被剖切的主要建筑、石窟、造像的轮廓线
细实线	0.1-0.3	等高线，等深线，图纸外边框线，标注引出线，石窟造像内部结构线、填充线、尺寸线、尺寸界限、索引符号、标高符号、分格线等
虚线	0.2-0.3	窟内平面、顶面图中未剖切到的主要轮廓线，石窟构造中不可见的轮廓线
点划线	0.1-0.3	中心线、对称线、定位轴线，地下水位，水文地质分区线。
折断线	0.1-0.3	不需画全的断开界线

②绘制虚线和点划线时，线段长度与间隔距离应相等，两线相交应交于线段处。

③绘图时，要避免图线与文字重叠。不可避免时，应确保文字、符号的清

晰,将与之重叠的图线打断。

#### 4) 字体

①设计图中的字体应采用国家正式公布实施的简体字,宜采用正体仿宋字,宽高比应采用 0.8。

②汉字的字高不应小于 3 毫米,阿拉伯数字的字高不应小于 2 毫米。力求图面清晰、美观、统一。在同一张图中反映同一种类别的文字的字形、字高应统一。

③设计图纸均应采取以下字体文件,尽量不使用 TureType 字体,以加快图形的显示,缩小图形文件。同一图形文件内字形数目不要超过四种。

Romans.shx (西文花体)、romand. shx (西文花体)、bold.shx (西文黑体)、txt. shx (西文单线体)、simpelx (西文单线体)、st64f. shx (汉字宋体)、ht64f. shx (汉字黑体)、kt64f. shx (汉字楷体)、fs64f. shx (汉字仿宋)、hztxt. shx (汉字单线)。汉字字形优先考虑采用 hztxt.shx 和 hzst.shx; 西文优先考虑 romans.sh 和 simplee 或 txt.shx。所有中英文之标注宜按下表执行。

表 6-3 图纸字体要求表

	图纸名称	说明文字标题	标注文字	说明文字	总说明	标注尺寸
用途	中文	中文	中文	中文	中文	西文
字型	St64f. shx	St64f. shx	HZ6t. shx	HZ6t. shx	St64f. shx	Romans.
字高	10mm	5 mm	3 mm	3mm	5\$0mm	3\$0mm
宽高比	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

#### 5) 尺寸标注

①标注线应采用细实线。

②标注界线应与被标注物垂直,并离开 2 毫米以上,延伸至尺寸线以外 3 毫米 以上。

③尺寸起止符号采用 45 的短细斜线表示,长度 6 毫米。

④尺寸线应平行于被标注物,且不能超过被标注物。

⑤标注数字位于尺寸线上方,字高易为 2~3 毫米,若标注界线之间的距离过于狭窄,标注数字可标注在标注界线外部或下部,标注单位为毫米。

⑥角度数字书写在圆弧的外侧,与弧的弦长平行,方向向上。

## 6) 索引符号及详图

①索引图号字高 4 毫米。

②索引在本图字高 2.5 毫米。

③索引符号的圆及直径均应以细实线绘制，圆的直径 10 毫米。

④详图符号以粗实线绘制，直径为 14 毫米。

⑤引出线均采用水平向 0.25 宽细线，文字说明均写于水平线之上。

## 6.2.2 保护工程专项设计文件编制要求

### 6.2.2.1 危岩体加固设计

#### (1) 锚固设计相关规范

锚固工程设计应根据工程要求、锚固地层及锚固岩体性质、锚杆承载力大小、现场条件、施工方法及设备供应条件等综合因素确定。锚杆设计可参考国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》及《岩土锚杆设计施工规范》等岩土锚固规范的要求。在文物本体上使用锚杆，必须在遵循文物保护原则的前提下充分的调查研究与必要的试验基础上进行设计。表 6-4 为我国的锚杆规范表。

表 6-4 我国的锚杆规范表

年代	规范名称及编号	编制单位
1984	国防工程喷锚支护技术暂行规定 CJB317 - 87	中国解放军总参谋部
1985	水利水电地下工程锚喷支护施工技术规范 SDJ57-85	中国水利部
1990	土层锚杆设计与施工规范 CECS22 : 90	中国工程建设标准化协会
1994	水工预应力锚固施工规范 SL46-94	中国水利部
1997	基坑土钉支护技术规程 CECS96 : 97	中国工程建设标准化协会
1998	水工预应力锚固设计规范 SL211 -98	中国水利部
2001	锚杆喷射混凝土支护技术规范 GB 50086 -2001	中国冶金部建筑研究总院
2003	水电工程预应力锚固设计规范 DL/T 5176 -2003	中国工程建设标准化协会
2004	水电水利工程预应力锚索施工规范 DL/T 5083 -2004	国家发展和改革委员会
2005	岩土锚杆技术规程 CECS22 : 2005	中国工程建设标准化协会

#### (2) 危岩体锚固设计原则

1) 针对石窟文物保存的特点，危岩体锚固工程设计以满足石质文物保护需

求为导向，以“最小干预、强度匹配、外观协调”为设计原则。

2) 危岩体锚固工程以变形小于正常使用限值取安全系数及稳定系数，进而反算锚固结构的承载力。以避免锚固结构设计强度过高，而造成加固体与被加固文物本体变形不匹配。

3) 危岩治理设计应根据不同类型的危岩及其破坏特征，按不同的计算模型进行计算。

### (3) 锚固工程试验

对于锚固工程的设计，前期必须进行下列专项试验与调查。

#### 1) 确定锚杆的作用荷载

掌握地层构造及构成工程地层各分层的重力密度、抗剪强度、孔隙水压等指标，据此计算出岩土压力、坡体推力及其对构筑物的作用力，并求得作用于锚杆上的荷载。

当抗剪强度现场难以测定时，可通过室内试验测得。但在现场难以取样时，通过相近的非文物本体区域内的标准贯入试验测得的 N 值，以及钻孔内水平荷载试验测得的变形系数和屈服荷载等间接方式，求得地层的抗剪强度指标。

地下水会影响锚杆的施工及抗拔力，调查时必须留意地层的地下水的水压分布、透水性及动态水力比降等。

#### 2) 确定锚杆的锚固地层

锚固地层应是不会产生滑坡且处于破坏面以外的位置，具有所需的锚杆抗拔力，且必须保证锚杆群所包裹地层的整体稳定。

#### 3) 确定锚杆锚固体周边摩擦力计算参数

尽量通过室内岩土试验或现场试验的方法，预先求得锚固体周边摩擦力计算参数。

#### 4) 确定适宜的锚杆施工方法

在石窟及石刻区施工，除考虑锚固地层的地质、地形、地下水、操作空间钻孔深度、工期等影响因素等外，还要考虑噪声、振动、粉尘等环境制约条件，尽可能选择不影响遗址环境的施工方法。

#### 5) 确定锚杆的耐腐蚀程度

要查明遗址区是否有损坏锚杆及锚固体方式的特殊环境，并应进行有关腐蚀状态的调查，综合确定施工区域的环境腐蚀程度。

6) 对于注浆工程的设计，应进行下列专项试验与调查:对于地下水位高、有自流水的场合或透水性强的渗漏水地层，灌浆常常不易密实，这种情况下，应进行微钻孔探测及相关的透水试验，为采取特殊的灌浆方法提供依据。

#### (4) 锚固设计参数确定

##### 1) 危岩体破坏模式的确定

危岩失稳破坏主要有三种模式：第一种为滑动型危岩；第二种为坠落式危岩；第三种为倾倒式危岩。在危岩体治理设计前，首先要判明危岩体属于那种破坏模式，然后采用相应的计算公式进行受力计算（图 6-1）。

##### 2) 主控结构面长度 L 计算：

$$L = \frac{H}{\sin \beta}$$

式中：H 为主控结构面的平均高度；

$\beta$  为主控结构面的倾角。

##### 3) 危岩体抗力

###### ①危岩体所需抗力计算公式：

$$P = KG \times \sin \alpha - G \times \cos \alpha \times \mu - CF \quad (\text{备注：此公式适用于在不考虑地震}$$

力和裂隙水压力的情况下使用)

式中：P——危岩体达到安全系数为 K 时所需抗滑力，单位为 KN；

G——危岩体重量，单位 K，计算公式： $G = \gamma \times V$ ；

$\gamma$ ——岩石天然容重，单位： $\text{KN/m}^3$ ；

V——危岩体体积，单位  $\text{m}^3$

$\alpha$ ——危岩体裂隙面倾角，单位度；

$\mu$ ——危岩体裂隙面内摩擦角，单位度；

F——危岩体与稳定岩体接触面面积，单位  $\text{m}^2$ ；

C——内聚力，单位 kPa（如危岩体后面裂隙面张开，则  $C=0$ ）；

K——安全系数（安全系数的选取参见第六章相关章节内容）

②危岩体坠落破坏所需锚固力计算公式:

$P = KG - CF$  (此公式适用于在不考虑地震力和孔隙水压力的情况下使用)

式中:  $P$ ——危岩体达到安全系数为  $K$  时所需锚固力, 单位为  $\text{KN}$ ;

$G$ ——危岩体重量, 单位  $\text{KN}$ , 计算公式:  $G = \gamma \times v$ ;

$\gamma$ ——岩石天然容重, 单位:  $\text{KN}/\text{m}^3$ ;

$V$ ——危岩体体积, 单位  $\text{m}^3$ ;

$F$ ——危岩体与稳定岩体接触面面积, 单位  $\text{m}^2$ ;

$C$ ——内聚力, 单位  $\text{kPa}$  (如危岩体后面裂隙面张开, 则  $C=0$ );

$K$ ——安全系数 (安全系数的选取参见第六章相关章节内容)。

③危岩体倾倒所需要抗倾覆力矩计算公式:

$$M_{\text{锚抗}} = kG(a + \mu h_0) + kQC - 0.5[\sigma_t]C^2$$

式中:  $M_{\text{锚抗}}$ ——危岩体锚杆抗倾覆力矩;

$K$ ——设计安全系数;

$G$ ——危岩体重量, 单位  $\text{KN}$ , 计算公式:  $G = \gamma \times v$ ;

$\gamma$ ——岩石天然容重, 单位:  $\text{KN}/\text{m}^3$ ;

$V$ ——危岩体体积, 单位  $\text{m}^3$ ;

$a$ ——危岩重心到倾覆点的水平距;

$\mu$ ——水平地震系数;

$h_0$ ——从下往上数第一排锚杆至倾覆点的垂直距离;

$[\sigma_t]$ ——危岩体岩石抗拉强度标准值;

$C$ ——主控结构面延伸点距倾覆点水平距;

$Q$ ——主控结构面破裂部分承受的静水压力。

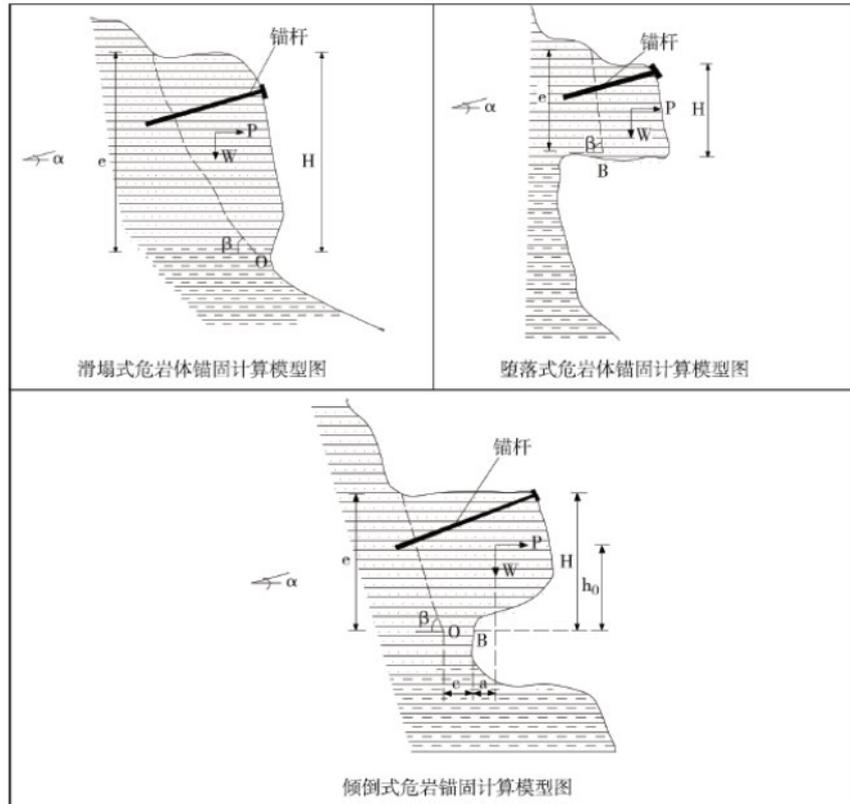


图 6-1 危岩体锚固计算模型图

#### 4) 参数 $C$ 、 $\varphi$ 值的确定

危岩体后部主控结构面的断裂扩展过程是稳定性衰减的根本原因，关系到危岩体自稳时间的长短。因此，主控结构面抗剪强度参数  $C$ ， $\varphi$  值，是进行危岩稳定性分析的关键因素之一。根据《地质灾害防治工程设计规范》，主控结构面贯通部分和未贯通部分的强度参数按照长度加权，提出了危岩主控结构面强度参数等效算法，即

$$C = \frac{(H_0 - e_0)c_1 + e_0c_0}{H_0}$$

$$\varphi = \frac{(H_0 - e_0)\varphi_1 + e_0\varphi_0}{H_0}$$

式中： $c$  和  $\varphi$  分别为主控结构面的等效黏结力 (kPa) 和等效内摩擦角 ( $^\circ$ )； $c_0$  和  $\varphi_0$  分别为危岩主控结构面贯通段的平均黏结力 (kPa) 和平均内摩擦角 ( $^\circ$ )； $c_1$  和  $\varphi_1$  分别为危岩主控结构面未贯通段的平均黏结力 (kPa) 和平均内摩擦角 ( $^\circ$ )；通常取组成危岩体的完整岩石相关参数的 0.7 倍； $H_0$  和  $e_0$  分别为危岩体高度和主控结构面贯通长度，单位均为米。

#### (5) 锚固设计与步骤

锚杆设计包括计算外荷载；决定锚杆布置和安设角度；锚杆锚固体尺寸、自由段长度和预应力筋截面的确定；稳定性预算和锚头设计等主要步骤。同时包括施工后锚杆内力监测等长期性能检测。

### 1) 危岩体锚固力计算

$$P_t = \frac{P}{\sin(\alpha + \theta) \operatorname{tg} \varphi + \cos(\alpha + \theta)}$$

式中： $P_t$ ——锚杆锚固力，单位为 KN；

$P$ ——危岩体达到安全系数为  $K$  时所需抗滑力，单位为 KN；

$\alpha$ ——危岩体裂隙面倾角，单位度；

$\theta$ ——锚杆与水平方向的夹角，单位度；

$\varphi$ ——危岩体裂隙面内摩擦角，单位度。

### 2) 锚杆间距

锚杆间距与长度应根据锚杆所锚定的构筑物及其周边地层的稳定性确定。

锚固体的设置间距取决于锚固力设计值、锚固体直径、锚固长度等因素。同时要注意锚杆的极限抗拔力会因群锚效应而减小。在文物本体上施加锚杆时，需对锚杆的安设位置进行充分研究，避免对文物造成伤害。锚杆间距，按《建筑边坡工程技术规范》的规定：锚杆挡墙中锚杆垂直间距不宜小于 2.5m，水平间距不宜小于 2m。锚喷支护中锚杆间距宜为 1.25~3m，且不应大于锚杆长度的一半。间距不宜过大，以免应力集中，同时也不宜过小，以免产生群锚效应降低锚杆的承载力；预应力锚杆间距为 2.0-4.0m。

### 3) 锚杆倾角

确定锚杆倾角时，对于不同类型的工程锚杆倾角（指锚杆与水平面的夹角）是不同的。总的来说，确定锚杆的倾角应有利于满足工程抗滑、抗塌、抗倾或抗浮的要求。但就控制注浆质量而言，如锚杆倾角过小时，注浆料的泌水和硬化时产生的残余浆渣会影响锚杆的承载力。因此，岩土锚杆（索）技术规程（CECS 22：2005）建议锚杆的倾角应该避开与水平方向成 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 的范围。

水电工程预应力锚固设计规范（DL/T 5176-2003）和水工预应力锚固设计规范（SL 212-98）给定预应力锚杆与水平面的夹角公式：

$$\beta = \theta \pm \left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$$

式中： $\beta$ ——锚固角，即预应力锚杆轴线与水平面的夹角；

$\theta$ ——滑动面（软弱结构面）倾角；

$\phi$ ——内摩擦角。

当确定的锚固角为 $-5^\circ < \beta < +5^\circ$ 时，锚杆与水平面的夹角应调整至 $\beta < -5^\circ$ 或 $5^\circ < \beta$ 。一般而言，锚杆的倾角不小于 $13^\circ$ ，也不应大于 $45^\circ$ 。倾角愈大，锚杆提供的锚固力沿滑面的分力愈小，抵抗滑体滑动的能力就相应减弱，所以锚杆安设角度以 $15^\circ \sim 35^\circ$ 为宜。

#### 4) 锚杆安全系数

设计时所规定的锚杆极限状态时的承载力，是锚杆工作荷载与安全系数的乘积。锚杆设计时考虑两种安全系数：一是锚杆锚固体抗拔安全系数。由锚杆工作年限及锚杆破坏后的危害程度确定。二是杆体的抗拉安全系数。对于预应力筋，多数国家规定应不小于1.67，即锚杆的轴向拉力设计值应不大于预应力筋抗拉强度标准值的60%（锚杆安全系数的选取可以参照第六章第一节中的石窟岩体安全评价标准中的安全系数）。

#### 5) 锚杆数量计算

危岩体破坏模式为滑动型或坠落型危岩体时，利用下式计算出所需要的锚杆（索）数量。

$$n \geq \frac{P}{\pi d L_m \tau_0}$$

式中： $d$ 为锚杆（索）的直径； $L_m$ 为主控结构面后部稳定岩体内的有效锚固长度； $\tau_0$ 为锚杆（索）锚固段砂浆与围岩之间抗剪强度。

危岩体破坏模式为倾倒型危岩时，利用下式计算所需要的锚杆（索）数量：

$$n \geq \sqrt{\frac{M_{\text{锚抗}} m l}{\pi D d l_m \tau_0}}$$

式中： $m$ 为锚杆排数； $D$ 为系数，由下式计算得出；其他符号均如前所述。

$$D = m h_0 + 0.5(m - 1) m e_0$$

式中： $P$ 为每排锚杆之间的平均间距；其他参数均如前所述。

## 6) 锚杆杆体确定

石窟及石刻岩体加固中，锚杆一般采用 HRB335 级钢筋，钢筋的强度标准值应按下表采用。

表 6-5 钢筋强度表

种类		符号	d (mm)	$f_{yk}$
热轧钢筋	HPB 235 (Q235)	$\phi$	8~20	235
	HRB 335 (20MnSi)	$\Phi$	6~50	335
	HRB 400 (20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi)	$\Phi$	6~50	400
	RRB 400 (K20MnSi)	$\Phi^R$	8~40	400

钢筋的抗拉强度设计值  $f_y$  及抗压强度设计值  $f_y'$  应按下表采用。

表 6-6 钢筋强度设计值 ( $N/mm^2$ )

种类		符号	$f_y$	$f_y'$
热轧钢	HPB235 (Q235)	$\phi$	210	210
	HRB335 (20MnSi)	$\Phi$	300	300
	HRB 400 (20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi)	$\Phi$	360	360
	RRB400 (K20MnSi)	$\Phi^R$	360	360

钢绞线具有高强度、低松弛的特点，杆体张拉时弹性位移大，受地层徐变和锚固结构变形产生的预应力损失和拉力变化小，是理想的预应力锚杆杆体筋材。杆体材料也可采用高强钢丝，高强钢丝宜采用冷拔碳素钢丝，并经处理消除残余应力。纤维增强材料是一种新型的杆体材料，具有良好的防腐性能，它由多股连续纤维与树脂复合而成。

若采用拉力分散型锚杆，要求锚杆杆体与注浆体直接黏结，依据岩土锚杆（索）技术规程（CECS 22：2005）和预应力混凝土用钢绞线（GB/T 5224），应采用环氧涂层钢绞线。对穿锚杆和压力分散型锚杆应采用无黏结钢绞线，其技术要求与环氧涂层钢绞线有明显差异。

## 7) 锚杆锚固段设计

拉力集中型锚杆和压力集中型锚杆的锚固力与锚杆锚固段的长度正相关，因此，锚固力的设计值可以通过锚固段长度的设计值来反映。

对于单根锚杆来说，由于锚固力的作用，在锚杆的锚固点会形成挤压圆锥体，圆锥体的顶角通常为直角，并由锚杆的两端向岩体中扩散发展。由于锚杆

的锚固力一定，挤压圆锥体中的锚固挤压力在端部最大，它与锚杆的深部与圆锥体的截面圆半径的平方成反比地迅速减小。

按岩土锚杆（索）技术规程（CECS 22：2005），锚杆锚固段的长度按下式估算，并取其中的较大值：

$$L_a > \frac{K \cdot N_t}{\pi D f_{mg} \Psi}$$

$$L_a > \frac{K \cdot N_t}{n \pi d \xi f_m \Psi}$$

式中：K——锚杆锚固体的抗拔安全系数；

L——锚杆或单元锚杆的轴向拉力设计值（kN）；

$L_a$ ——锚杆锚固段长度（m）；

$f_{mg}$ ——锚固段注浆体与地层间的黏结强度标准值（kPa）；

$f_{ms}$ ——锚固段注浆体与筋体间的黏结强度标准值（kPa）；

D——锚杆锚固段的钻孔直径（毫米）；

D——钢筋或钢绞线的直径；

$\xi$ ——采用 2 根或 2 根以上钢筋或钢绞线时，界面黏结强度降低系数；

$\Psi$ ——锚固长度对黏结强度的影响系数；

$n$ ——钢筋或钢绞线根数。

岩石锚杆的锚固长度宜采用 3~8m。当采用荷载分散型锚杆时，锚固长度可根据需要确定。

水电工程预应力锚固设计规范（DL/T 5176-2003）和水工预应力锚固设计规范（SL 212 - 98）也给出了类似的计算公式。其中最关键的参数是轴向拉力设计值，对于文物保护单位应该通过现场拉拔试验，并结合岩土锚杆锚固体抗拔安全系数来确定。

另一方面，公式中有与黏结强度相关的参数，而附表中的经验参数是参照水泥砂浆与岩石或钢绞线的黏结强度而给定的。如果运用无机矿物聚合物灌浆材料作为注浆体的材料，应该进行与水泥砂浆相对应的黏结强度试验。

岩土锚杆（索）技术规程（CECS 22：2005）给定：锚杆的自由段长度应穿过潜在滑裂面不少于 1.5m。而且锚杆的自由段长度不应小于 5m，并应保证

锚杆与锚固结构体系的整体稳定性。

为保证锚杆的握裹力，锚杆的上覆地层厚度不应小于 4m，以避免上部地表动、静荷载对锚杆的影响。

#### 8) 注浆体强度

全长粘接型锚杆注浆体的抗压强度应不小于 M20 和 M25。预应力锚杆锚固段注浆体的抗压强度应根据锚杆荷载传递方式和锚固地层抗剪强度确定。

#### 9) 锚杆初始预应力

对地层和被锚固结构位移控制要求较高的工程，预应力锚杆的初始预应力值宜不小于锚杆拉力设计值。

对地层和被锚固结构位移控制要求较低的工程，预应力锚杆的初始预应力宜为锚杆拉力设计值的 0.75 ~0.90 倍。

治理危岩的锚杆一般不加预应力，阻滑力主要靠锚杆与砂浆的摩擦来提供，锚固深度和孔径大小由所提供的阻滑力决定。在治理石窟危岩时，施加预应力在岩体中引起的应力扰动大小及变化程度是应论证解决的问题。

### (6) 石窟危岩体锚固设计要点及关键参数选取

1) 采用锚杆的类型应根据锚杆结构、材料特性、锚杆承载力、被锚固文物本体岩层性质、现场条件、施工方法等因素综合确定。必须保证锚固体在加固过程中质量可控、应力可调、与文物本体耐久性相适宜。

2) 锚固设计参数应减小锚固体对文物本体的扰动。避免出现单个锚固体设计承载力过大而对岩土体内部应力场出现较大扰动，且扰动不可恢复。

3) 对于石窟及石刻危岩体的稳定性分析和锚固设计，必须考虑的初始条件有：危岩体的几何尺寸、危岩体周围影响范围内文物本体的地质构造，危岩体与母岩的连接程度，岩体的物理力学性质，岩层的初始应力状况，石窟洞室的开挖方式。

在设计前，应取得如下相关基础资料：石窟及石刻区危岩体平面分布图、卸荷带范围；危岩体内部及其周围岩体的水文地质条件；危岩体几何形状、大小、物质组成，并绘出平面图、地质剖面图；危岩结构面示意图，包括结构面产状及结构面组合；主控结构面抗剪强度参数、母岩岩石抗剪强度参数与抗拉

强度等物理力学参数。

4) 若文物本体赋存的岩体有明显离层、滑动、深部裂隙张开，围岩拉伸剪切破坏及变形较明显，可采用预应力锚索加固。对于文物本体危岩体，宜选用拉力分散型锚索加固，因其预应力影响范围较小，锚固间距不宜小于 2 米，可施加 200~300kN 的低预应力；当危岩体加固范围较大，对锚固体承载力及防腐能力要求较高且周边范围内无文物本体的危岩体加固，可采用压力分散型锚索，锚固体间距不宜小于 2.5 米。

5) 在软弱危岩、断层破碎带较多及塑性流变岩层中可采用自钻式中空注浆锚杆。钻杆锚杆两者合一，钻进后不需退出，避免锚杆钻孔后出现坍孔、卡钻及插不进杆体等情况。且通过中空杆体注浆，能保证锚杆伸入范围内的岩体都得到有效加固。锚固角宜设置在 10°~35°。对于坠落型危岩上部岩体的加固，可采用竖直向下打入自钻式锚杆的方法。该锚固技术能加固危岩体上部岩土层，且能发挥出较大的锚固力。

6) 锚固段设计计算时，锚杆伸入危岩主控结构面后部稳定母岩的锚固长度宜为 3~4 米。锚固体的直径根据设计锚固力、地基性状、单元锚杆根数、钻孔能力等元素综合确定。锚固体直径范围在  $\phi 22\sim\phi 130$  毫米。保护层厚度在 10~30 毫米。

7) 注浆体与岩石和钢绞线及其他材料杆体之间的粘接强度需经过试验确定。其抗压强度与岩土体之间的强度相比不宜过高或过低，应保证强度匹配。

8) 应对特定的遗址区危岩体进行锚固体系工作性能的长期观察和监测。石窟岩体锚固工程与其他结构工程相比，对加固体系稳定性及安全性要求更高。应对岩体位移及岩土体中裂缝开展状况进行监测。

#### **6.2.2.2 石窟及石刻防渗治理设计**

##### **(1) 截、排水沟设计**

###### **1) 总体布局**

在进行石窟防渗治理规划的基础上，石窟保护区域范围内的蓄排水工程应进行专项总体布局，合理布设截水沟、排水沟等建筑物，构成完整的防御体系。

###### **2) 截水沟布设原则**

①当大气降雨沿坡面倒流入石窟及石刻窟内或冲刷崖壁面时，应在石窟窟门或沿石窟崖壁面顶部布设截水沟，截水沟断面、长度应与文物本体协调、隐蔽。

②当石窟及石刻山体顶部无措施坡面的坡长太大时，应在此坡面增设几道截水沟。增设截水沟的间距一般 20~30 米，应根据地面坡度、土质和暴雨径流情况，通过计算确定。

③排水型截水沟的排水一端应与坡面排水沟相接，并在连接处作好防冲措施。

### 3) 排水沟的布设原则

①排水沟一般布设在坡面截水沟的两端或较低一端，用以排除截水沟不能容纳的地表径流。排水沟的终端连接蓄水池或天然排水道。

②排水沟在坡面上的比降，根据其排水去处（蓄水池或天然排水道）的位置而定，当排水出口的位置在坡脚时，排水沟大致与坡面等高线正交布设；当排水去处的位置在坡面时，排水沟可基本沿等高线或与等高线斜交布设。各种布设都必须作好防冲措施（铺草皮或石方衬砌）。

③石窟及石刻保护区为减少修建排水沟对文物景观及地形地貌改变过大，排水沟的布设位置尽可能选择窟区冲沟处或与周围山势相结合整体布设。

### 4) 暴雨径流设计

①防御暴雨标准，按十年一遇 24 小时最大降雨量。

②坡面径流量的确定。根据水土保持试验站的小区径流观测资料，或查阅当地水文手册。在上述设计频率暴雨下，不同坡度、不同土质、不同植被的坡面，应采用不同的暴雨径流量。

### 5) 雨水量设计

#### ①雨水量设计

根据《室外排水设计规范》（GB50014 - 2006）雨水设计流量，应按下列公式计算：

$$Q_s = q\Psi F$$

式中： $Q_s$ —雨水设计流量（L/S）；

q——设计暴雨强度[L/ (s·hm<sup>2</sup>) ];

ψ——径流系数; 取值 0.8;

F——汇水面积 (hm<sup>2</sup>)。

## ②设计暴雨强度

根据《室外排水设计规范》(GB50014 -2006), 设计暴雨强度计算公式:

$$q = \frac{167A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^n}$$

式中: q——设计暴雨强度;

P——设计重现期 (年);

t——降雨历时 (min);

A<sub>1</sub>, C, b, n——参数, 根据统计方法进行计算确定。

## 6) 截水沟设计

### ①截水沟断面设计

蓄水型截水沟断面设计, 每道截水沟的容量 (V) 按下式计算:

$$V = V_w + V_s$$

式中: V——截水沟容量, m<sup>3</sup>;

V<sub>w</sub>——次暴雨径流量, m<sup>3</sup>;

V<sub>s</sub>——1~3 年土壤侵蚀量, m<sup>3</sup>。

V<sub>w</sub> 和 V<sub>s</sub> 值按下式计算:

$$V_w = M_w \times F$$

$$V_s = 3M_s \times F$$

式中: F——截水沟的集水面积, hm<sup>2</sup>;

M<sub>w</sub>——次暴雨径流模数, m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;

M<sub>s</sub>——年土壤侵蚀模数, m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

根据 V 值计算截水沟断面面积 (A<sub>1</sub>):

$$A_1 = V / L$$

式中: A<sub>1</sub>——截水沟断面面积, m<sup>2</sup>;

L——截水沟长度, m。

截水沟断面要素的确定:

截水沟由半挖半填做成梯形断面, 其断面要素、符号、常用数值, 如下表所示。

表 6-7 截水沟断面要素常用数值

沟底宽 $B_d$ (m)	沟深 $H$ (m)	内坡比 $m_1$	外坡比 $m_0$
0.3~0.5	0.4~0.6	1: 1	1: 1.5

②排水型截水沟断面设计有两种情况, 分别采取不同断面。

多蓄少排型。暴雨产生的坡面径流大部蓄于沟中, 只排出不能容蓄的小部分。断面尺寸基本上参照蓄水型截水沟, 沟底应取 1%左右的比降。

少蓄多排型。暴雨产生的坡面径流小部蓄于沟中, 大部排入蓄水池。断面尺寸基本上参照排水沟的断面设计, 同时应取 2%左右的比降。

#### 7) 排水沟断面设计

①排水沟断面  $A_2$  根据设计频率暴雨坡面最大径流量, 按明渠均匀流公式计算:

$$A_2 = \frac{Q}{C\sqrt{Ri}}$$

式中:  $A_2$ ——排水沟断面面积,  $m^2$ ;

$Q$ ——设计坡面最大径流量,  $m^3/s$ ;

$C$ ——谢才系数;

$R$ ——水力半径,  $m$ ;

$i$ ——排水沟比降。

② $Q$ 值的计算:

$$Q = F/6(L_r - L_p)$$

式中:  $Q$ ——设计最大流量,  $m^3/s$ ;

$L_r$ ——设计频率 10min 最大降雨强度,  $mm/min$ ;

$L_p$ ——相应时段土壤平均入渗强度,  $mm/min$ ;

$F$ ——坡面汇水面积,  $hm^2$ 。

③值的计算:

$$R = A_2 / x$$

式中： $R$ ——水力半径， $m$ ；

$A_2$ ——排水沟断面面积， $m^2$ ；

$x$ ——排水沟断面湿周， $m$ 。

④C值的计算：

$$C = \frac{1}{n} R^1 / 6$$

式中： $n$ ——糙度，土质排水沟一般取 0.025 左右。

## (2) 裂隙清理及灌浆工程设计

### 1) 裂隙清理

为使后续注浆取得较好的注浆质量和黏结强度，裂隙的清理、冲洗是一项必不可少的工作。裂隙清理主要是将裂隙内充填土及活动小石块清除，以免堵塞裂隙通道，影响浆液的灌注；裂隙冲洗是通过水流将裂隙中所充填的松散、风化的填充物或小裂隙中无法进行手工清理的泥质填充物带出，以便有利于浆液流进裂隙并与裂隙接触面胶结坚固，起到有效防渗和加固的作用。

大裂隙清理后应保证基本无泥质填充物，小裂隙采用小型工具尽量将填充物带出或推移至一定的深度。裂隙冲洗应注意控制压力，防止危岩体受力失稳或使表面小破碎体冲击掉落，且冲洗时间不宜过长，以免过多带走危岩体间的胶结物，降低危岩体的胶结强度。

### 2) 裂隙灌浆施工工艺

①现场注浆试验：在现场地表裂隙清理的过程中，可同时进行注浆试验。分别挑选几条有代表性的贯通大裂隙和微裂隙灌浆，通过试验确定灌浆压力等灌浆工艺参数，以确保隐蔽工程的可靠性。

②窟顶大裂隙注浆：将注浆管预埋至注浆深度后，采用裂隙封口材料将裂隙周边封闭一段，向裂隙中填充骨料（碎石等）后，封闭裂隙，使裂隙内部形成一封闭的注浆空间，注浆材料一般选用 42.5 普通硅酸盐水泥（可根据工程要求选择灌浆材料），注浆设备选用手动注浆泵，浆液内加入适量速凝剂，注浆饱满后采用封口材料或注浆液进行封口，并在外露水泥面初凝前嵌入与周围岩石成分相近的碎石块，和相应的表面做旧处理措施。

③微裂隙注浆 (<10 毫米): 采用裂隙封口材料以间隔 0.2 米左右预埋注浆管, 注浆时自下而上。可根据情况选用小型注浆设备 (选用注射针筒), 原则上注浆压力控制在 0.1Mpa 左右, 浆液注至饱满为止, 初凝后进行封口处理, 并采取相应的做旧处理措施。

### 3) 注浆施工工序

前期注浆试验→钻孔 (大裂隙不采用, 较小裂隙视情况) →预埋注浆管→裂隙口封堵→骨料填充 (较小裂隙不采用) →注浆→封口 (或下一段) →表面做旧处理。

### 4) 技术措施

大裂隙灌浆采用低压注浆的方法, 从内至外, 从下至上依次灌注。灌浆前, 首先用封口材料封堵裂隙的外缘口, 隙宽较大处采用砌筑封堵。灌注时, 为提高灌浆质量, 拟采用两次灌注的方法, 首次灌注掺加速凝剂的浆材, 选用浆材水灰比为 0.7:1, 使细小裂隙首先得到充填、黏结, 防止二次灌注时跑浆。二次灌注选用浆材水灰比 0.5:1, 砂灰比 1:1, 使宽大的裂隙得以充填。对隙宽大于 20 厘米的裂隙, 灌注同时可投放适量的碎石充填, 以增加砂浆灌注强度, 减少灌注量。灌注结束后, 上口和外缘口采取封护处理, 表面并进行作旧。

微裂隙灌浆步骤为首先配制成勾缝砂浆封堵裂缝, 预留灌浆孔, 间距 0.2 米, 插入注浆管。然后注射浆液, 饱和为止, 顺序从下到上, 留 1~2 排气孔。12~24 小时后, 最后封堵灌浆孔, 表面作旧。

### 5) 特殊情况处理

#### ①注浆管堵塞

预防措施: 各条裂隙均应预埋一条以上注浆管。

处理措施: 尽快进行疏通, 及早恢复注浆。如不能在短时间内疏通, 应立即换至第二注浆管继续进行注浆。

#### ②冒浆

处理措施: 采用速凝水泥对冒浆处进行封堵, 冒浆情况严重时可在浆液中掺入适量速凝剂 (水玻璃等) 解决, 速凝剂最大不宜超过 3%。

#### ③大量漏失

处理措施：可注入稠度较大的砂浆或其他充填物堵住漏浆处，必要时掺入一定量的速凝剂（水玻璃等）处理。

### （3）防渗工程结构设计

渗水石窟顶部具有较平坦的施工空间时，可考虑采用铺设防水材料进行窟顶防渗处理。平台工程区防水毯的铺设施工程序为：基层处理及验收→防水毯铺设→素土覆盖压实（可在压实边坡处用 1:3 水泥砂浆垫层上砌片石压实）。

#### 1) 基层施工

首先在工程区石窟顶部，清理掉山顶平台的堆积物以及植物根系，对裂隙进行灌浆或砌筑封护，使局部基面相对平整。表面作 20 毫米厚 C15 混凝土层。以此作为防水毯铺设的基层。

#### 2) 防水毯铺设

①找平层混凝土终凝后即可铺设防水毯，铺设时，防水毯面层的无纺布一侧应对着遇水面，纵横接缝搭接长度不小于 150 毫米，相邻端头接缝错开间距不小于 300 毫米。

②防水毯与找平层的固定用射钉（钢钉，钉长 25 毫米）沿防水毯的纵横向接缝均匀布置，钉子固定间距的要求搭接缝处钉子固定间距为 300 毫米，一般处为 500 毫米。对于穿透的地方，要用膨润土防水浆封填。

③防水毯采用人工铺设。铺设时，可根据现场实际情况，将防水毯裁成小块铺设，顺山势铺设防水毯，尽量减少接缝。另外，铺设防水毯时需选择晴天进行，以确保防水毯不受水浸影响。

#### 3) 防水毯表面回填

①防水毯铺设完成后，表面应及时回填压实，以防下雨时被水浸泡，影响其使用功能。

②防水毯表面为回填素土压实，回填土厚度不小于 300 毫米。用于回填土的土方应严格检查，不得含有尖石、大石块等杂物，以免对防水毯造成破坏。

③在工程区周边处，防水毯表面采用 30 毫米厚 1:3 水泥砂浆上砌片石压实。

### 6.2.2.3 灌浆工程设计

化学灌浆黏结方法主要用于石窟摩崖的岩体裂隙、洞窟危岩、崩塌的加固

保护。它能提高其整体性强度和抗变形的能力，并可收到不改变文物原貌的效果。经常可与锚固工程结合使用。材料的选择，操作工艺，都应经过实验、研究和检测、通过鉴定后才能使用。

灌浆材料的选择原则是：材料具有耐久性和稳定性，对岩体裂缝的黏结力接近或略大于文物及其载体的力学强度，可灌性好，室温下能固化，施工方便，对材料的色泽和毒性也应重视。

详细写出施工工艺说明、技术指标、操作规程等。

#### 6.2.2.4 防风化工程设计

要尽量少在文物上附加新材料，应以改善文物保存的环境为重点。尤其要慎用化学材料，一般只用在风化严重，需要抢修的文物上，以延缓文物损坏的速度，且不能妨碍后人对它进行再保护。

在勘察报告基础上，对石质风化原因进一步作微观分析，确定被保护的對象及范围。

选择化学保护材料时应考虑环境、文物、材质、保护材料性能及对文物、人员的安全程度、经费可行性等因素。应对多种材料进行比较、筛选，在充分试验的基础上，确定被选用的保护材料。

详细写出施工工艺说明，如对孔隙率要求减少到什么程度，透气透水性如何控制，渗透深度的控制，如何形成梯度渐变，如何防止表面固结成膜。处理后表面不能变色，不玄光。使用的工具、喷射距离、压力大小、浓度配比、喷涂次数等，都应明确阐述。

室内试验项目主要包括：防护层的结构与形态（包括材料渗透深度，材料固结后的有效组成及重量，材料在空隙内的结构形态）；物理力学性质（孔隙率、透气性、孔隙直径与体积的分布规律、固结强度）；防止水侵入的能力（表面吸水率、饱和吸水率、孔隙指数、毛细管运动速度、透水性、憎水性）；抗风化能力（耐老化性能、抗冻融试验、安定性试验、干湿循环试验、化学稳定性、重涂性）以及其他特殊项目，如崩解、膨胀性等。根据当地实际情况，可选择其中重要、必需的项目进行试验。

现场试验项目主要包括材料的渗透深度、憎水性、透水性、固结强度等。

试验步骤：根据石质文物的风化成因确定风化的类型；选择试验的地点；用实验室选定的材料进行施工；进行保护效果的检测；检测方法应尽量采用无损或微损技术。

在总结上述试验成果的基础上，编制石质文物保护的施工计划、施工工艺、资金预算和日程安排等。

#### **6.2.2.5 防洪工程设计**

涉及文物保护单位的洪水防护工程，是专业性较强的工程项目。设计单位应具有水利工程专业的资质。根据工程大小和难易程度，可聘用不同资质等级的设计单位。

委托单位应向设计单位提交设计任务书，内容包括：要求防洪工程所保护的文物范围；设计防洪标准（多少年一遇的洪水）；工程中对文物保护的要求；工程竣工后对文物环境的影响程度与后果评价等。

设计单位须提交的成果有：工程勘察报告、设计说明书、设计图纸及计算书等。内容包括流域概况，气象、水文测验和资料情况，径流、洪水资料分析，文物保护区的工程地质条件（地层、岩性、构造、岩土物理力学性质等），工程中对文物的保护措施等。图纸应包括工程布置总平面图，坝、堤剖面结构图，文物保护措施设计图等，以及有关表格、曲线、计算书等。

防洪工程设计的外观效果，应尽量与原有环境协调一致。

#### **6.2.2.6 防护棚罩设计**

防护棚罩是指在石窟及石刻保护方案中，为了保护文物所采用现代结构材料建造的有遮蔽作用的附属保护设施。设计标准要参照相关专业的设计规范。

防护棚罩的设计首先应考虑保护文物功能的需要，外观形式要与文物及周边环境相协调，不能喧宾夺主。

棚罩的地面支撑点，应尽量设置在文物遗址之外，不能影响遗址的结构及力学稳定。

设计中要考虑排水防渗设施。如需对外展示，应满足观众参观的基本要求；同时要采取有效措施保证游客及文物本体的安全。

## 6.3 石窟寺及石刻保护工程概预算编制

### 6.3.1 保护工程方案设计概算编制

设计概算是方案设计文件的重要组成部分。是在投资估算的控制下由设计单位根据方案设计图纸及说明、概算定额（或概算指标）、各项费用定额或取费标准、设备、材料预算价格等资料或参照类似工程预决算文件，编制和确定的石窟寺及石刻保护工程项目从筹建至竣工交付使用所需全部费用的文件。设计概算经国家批准后，就将是国家对该工程批准投资贷款的最高限额，是工程招标承包或投资包干的依据。搞好设计概算编制工作，对加强基本建设计划投资管理，实行招标承包制，降低工程造价，加快工程建设，发挥投资效益具有重要意义。

#### 6.3.1.1 概算的分类

##### （1）单位工程设计概算

单位工程设计概算是确定各单位工程建设费用的文件，它是根据初方案设计图纸、概算定额或概算指标以及市场价格信息等资料编制的。石窟寺及石刻保护工程概算可分为锚固工程概算、防渗工程概算、防风化工程概算、保护性建筑工程概算等。

单位工程概算由直接费、间接费、利润和税金组成，其中直接费是由分部、分项工程直接费的汇总加上措施费构成的。

##### （2）单项工程综合概算

单项工程综合概算是确定单项工程所需的概算价格的综合文件。包括单项工程的全部保护工程费用，是根据单项工程的各个单位工程概算及工程建设其他费用概算（当不编总概算只编综合概算时，才列此项费用）汇总编制的。

##### （3）工程建设其他费用概算

工程建设其他费用概算是确定属于整个建设工程所必需的，而又独立于单项工程以外的建设费用的文件。即除保护工程以外的一些费用，这些费用，当编制总概算时，列入总概算内；如果不编总概算时，则列入综合概算内。

##### （4）建设项目总概算

总概算是确定一个建设项目从筹建到竣工验收阶段全部价格的总文件，是根据各个单项工程综合概算以及工程建设其他费用概算、预备费、固定资产投资方向调节税和建设期利息概算等汇编而成的。

### 6.3.1.2 单位工程概算编制方法

#### (1) 根据概算定额编制概算

1) 按照概算定额分部分项顺序，列出各分项工程的名称。工程量计算应按概算定额中规定的工程量计算规则进行，将计算所得各分项工程量按概算定额编号顺序，填入工程概算表内。

#### 2) 确定各分部分项工程项目的概算定额单价。

工程量计算完毕后，逐项套用相应概算定额单价和人工、材料消耗指标，然后分别将其填入工程概算表和工料分析表中。如遇设计图纸中的分项工程项目名称、内容与采用的概算定额手册中相应的项目有某些不符合时，则按规定将定额进行换算后方可套用。有些地区根据地区人工工资、物价水平和概算定额编制了与概算定额配合使用的扩大单位估价表，该表确定了概算定额中各扩大分项工程或扩大结构构件所需的全部人工费、材料费和机械台班使用费，即概算定额单价。在采用概算定额法编制概算时，可以将计算出的扩大分部分项工程的工程量，乘以扩大单位估价表中的概算定额单价进行直接工程费的计算。

计算概算定额单价的计算公式为：

概算定额单价 = 概算定额人工费 + 概算定额材料费 + 概算定额机械台班使用费 =  $\sum$  (概算定额中人工消耗量 × 人工单价) +  $\sum$  (概算定额中材料消耗量 × 材料预算单价) +  $\sum$  (概算定额人机械台班消耗量 × 机械台班单价)

#### 3) 根据工程量和概算定额的基价，计算工程直接费用。

将已计算出的各分部分项工程项目的工程量分别乘以概算定额单价、单位人工、材料消耗指标，即可得出各分项工程的直接工程费和人工、材料消耗量。再汇总各分项工程的直接工程费及人工、材料消耗量，即可得到该单位工程的直接工程费和工料总消耗量。最后，再汇总措施费即可得到该单位工程的直接费。

#### 4) 将直接费用乘以间接费率(施工管理费率)和利润率得出间接费及利润。

5) 根据工程发生费用的具体情况,不能分摊到单位工程中去的费用,如施工机构迁移费、技术设备装备费和保险费等,应在综合概算或总概算中计算。

6) 将直接费、间接费和利润、税金相加,即得一般建筑工程概算造价。

## (2) 根据概算指标编制概算

### 1) 编制步骤。

现以单位建筑面积工料消耗概算指标为例具体说明概算编制步骤:

①根据概算指标中的人工工日数及拟建地区工资标准计算人工费。

每平方米建筑面积人工费=指标规定的人工工日数×拟建地区日工资标准

②根据概算指标中的主要材料数量及拟建地区材料预算价格计算主要材料费。

每平方米建筑面积材料费= $\sum$ (主要材料消耗量×拟建地区材料预算价格)

③按其他材料费占主要材料费的百分比,求出其他材料费。

每平方米建筑面积其他材料费=每平方米建筑面积主要材料费× $\frac{\text{其他材料费}}{\text{主要材料费}}$

④按概算指标中的机械费计算每平方米建筑面积机械费。

⑤按求得的人工费、材料费、机械费,求出直接费。

每平方米建筑面积直接费=人工费+主要材料费+其他材料费+机械费

⑥按求得的直接费及地区规定取费标准,求出其他直接费、现场经费、间接费、税金、计划利润及材料价差等其他费用。

⑦将直接费和其他费用相加,得出概算单价。

每平方米建筑面积概算单价=直接费+其他直接费+现场经费+间接费+材料价差+计划利润+税金

⑧用概算单价和建筑面积相乘,得出概算价值。

拟建工程概算价值=拟建工程建筑面积×每平方米建筑面积概算单价

⑨最后计算人工和主要材料消耗量。

拟建工程所需人工、主要材料消耗量=拟建工程建筑面积×每平方米建筑面积人工、主要材料消耗量

### 2) 编制方法。

①直接套用概算指标编制概算的方法。

如果设计工程项目，在结构上与概算指标中某类型结构的建筑相符，则可直接套用指标进行编制。此时即以指标中所规定的保护工程每百平方米或每平方米的造价或人工、主要材料消耗量乘以设计工程项目的概算相对应的工程量，即可得出该设计工程的全部概算价值和主要材料的消耗量，其计算公式如下：

设计工程概算价值 = 设计工程建筑面积 × 每平方米建筑面积概算单价

设计工程所需主要材料、人工数量 = 设计工程建筑面积 × 每平方米建筑面积主要材料、人工耗用量

### ②调整概算指标编制概算的方法。

当设计对象的结构特征和概算指标的结构特征有局部不同时，则需要对原概算指标进行调整，然后才能使用。调整的方法，从原指标的单位造价中，减去应换出的原指标，加入应换进的新指标，就成为调整后的单位造价指标。一般可按下列公式进行计算。

单位面积造价调整指标 = 原造价指标单价 - 换出结构构件单价 + 换入结构构件单价

单位工程概算造价 = 拟建工程建筑面积 × 单位面积造价调整指标

### (3) 根据类似概算编制概算

类似工程概算法是利用技术条件与设计对象相类似的已完工程或在建工程的工程造价资料来编制拟建工程设计概算的方法。该方法适用于拟建工程初步设计与已完工程或在建工程的设计相类似且没有可用的概算指标的情况，但必须按工程项目的建筑结构差异和价差进行调整。

#### 1) 建筑结构差异的调整。

类似工程造价的调整方法与概算指标法的调整方法相同。即先确定有差别的项目，然后分别按每一项目算出结构构件的工程量和单位价格（按编制概算工程所在地区的单价），然后以类似概算中相应（有差别）的结构构件的工程数量和单价为基础，算出总价差。将类似概算的直接工程费总额减去（或加上）这部分差价，就得到结构差异换算后的直接工程费，再行取费得到结构差异换算后的造价。

#### 2) 价差调整。

类似工程造价的价差调整方法通常有两种：一是类似工程造价资料有具体的人工、材料、机械台班的用量时，可按类似工程造价资料中的主要材料用量、工日数量、机械台班用量乘以拟建工程所在地的主要材料预算价格、人工工日单价、机械台班单价，计算出直接工程费，再行取费即可得出所需的造价指标；二是类似工程造价资料只有人工、材料、机械台班费用和其他费用时，可做人工费用（或工资标准）、材料费、台班费、措施费、间接费等系数调整。

### 6.3.1.3 单项工程概算编制方法

#### （1）编制说明

列于综合概算书的前面，一般包括：

- 1) 编制依据。说明设计文件依据、定额依据、价格依据及费用指标依据等。
- 2) 编制方法。说明是利用概算定额，还是利用概算指标编制的概算等。
- 3) 主要设备和材料的数量。说明这些主要材料（钢材、木材、水泥等）的数量。
- 4) 其他有关问题。

#### （2）综合概算表

综合概算表是汇总单项工程内各个单位工程概算价值，以及工程建设其他费用的一种综合汇总表。每一项单项工程综合概算并不一定都包括上述各个单位工程概算和工程建设其他费用，主要取决于工程的建设规模、设计要求及建设条件等各方面的因素。为了便于汇编总概算和进行投资构成比例分析、技术经济指标分析，以及使计划、统计、财务上口径一致。综合概算表还应按照费用构成，分栏设置锚固工程费用、防风化工程费用、防渗工程费用、灌浆工程费用等和工程建设其他费用。

#### （3）单项工程综合概算书的编制方法

综合概算是根据某一单项工程内各个单位工程概算及工程建设其他费用概算等基础文件，采用综合概算表编制的。其编制工作实质是综合汇总，即按统一规定的表示内容和要求，逐一归类填列。

### 6.3.1.4 工程建设项目其他费用概算编制方法

#### （1）工程建设项目其他费用概算的内容

### 1) 国家建设征用土地各项补偿费的内容

国家建设征用土地各项补偿费的内容包括：征用土地补偿费、劳动力安置费、青苗补偿费、房屋拆迁费、迁坟费、古墓挖掘费、征用土地管理费、征用菜地开发建设基金、耕地占用税、城镇土地使用税。

国家建设征用土地各项补偿费的计算方法：编制依据是经批准的建设用地、临时用地面积；各省、市、自治区人民政府制定颁发的征用土地各项补偿费标准等。

### 2) 建设单位管理费的内容

建设单位管理费是指建设单位为进行建设项目筹建、建设、联合试运转、验收总结等工作所发生的管理费用。费用内容有：工作人员工资、工资附加费、劳保支出、差旅费、办公费、工具器具使用费、固定资产使用费、劳动保护费、零星固定资产购置费、招募生产工人费、技术图书资料费、合同公证费、工程质量监督费、完工清理费、建设单位的临时设施费和其他管理费用性质开支。但不包括应计入材料预算价格的建设单位采购及保管费。

建设单位管理费的计算方法。以“单项工程费用”总和为基础，按照工程项目的不同规模，分别制定的建设单位管理费率计算。

建设单位管理费=单项工程费用总和×费率

式中：单项工程费用总和=建筑安装工程费+设备、工器具购置费（包括备品备件）

一般建设管理费率约为1%~32%，按设计负数、建设期限和费用指标计算，按设计规模以建设单位管理费用金额总数表示。

### 3) 研究试验费的内容

研究试验费指为本建设项目提供或验证设计数据资料进行必要的研究试验，按照设计规定在施工过程中必须进行试验所需的费用，以及支付科技成果、先进技术的一次性技术转让费。不包括：应由科技三项费用（即新产品试制费、中间试验费和重要科学研究补助费）开支的项目；应由间接费开支的施工企业对建筑材料、构件和建筑物进行一般鉴定、检查所发生的费用及技术革新的研究试验费；应由勘察设计费、勘察设计单位事业费或基本建设投资中开支的项

目。

#### 4) 生产职工培训费的内容

生产职工培训费是指新建企业或新增生产能力的扩建企业在交工验收前自行培训或委托其他厂（矿）培训技术人员、工人和管理人员的费用；以及生产单位为参加施工、设备安装、调试以及熟悉工艺流程、机器性能等需要提前进厂人员的工资所支出的费用。费用内容包括：培训人员和提前进厂人员的工资、工资附加费、差旅费、实习费、劳动保护费和住宿费等。

#### 5) 办公和生活家具购置费的内容

办公和生活家具购置费是指为保证新建、改建、扩建项目的初期正常生产、使用和管理所必须购置办公和生活家具、用具的费用。改建、扩建项目所需的办公和生活家具购置费，应低于新建项目的费用。

范围包括：办公室、会议室、资料档案室、阅览室、文娱室、食堂、浴室、理发室、单身宿舍和规定必须建设的托儿所、卫生所、招待所、中小学校等的家具用具。购置应本着勤俭节约的精神，严格控制购置范围。

#### 6) 勘察设计费

勘察设计费是指委托勘察设计单位进行勘察设计时，按规定应支付的工程勘察设计费；为本建设项目进行可行性研究而支付的费用；在改动范围内由建设单位自行勘察设计的费用。

#### 7) 供电贴费

供电贴费是指按照国家规定，建设单位应支付的供电工程贴费、施工临时用电贴费。

#### 8) 施工机构迁移费

施工机构迁移费是指施工机构根据建设任务的需要，经有关部门决定建制地（指公司或公司所属工程处、工区）由原驻地迁移到 25 公里以外的另一地区所发生的一次性搬迁费用。不包括：应由施工企业自行承担的规定距离范围内调动施工力量以及内部平衡施工力量所发生的迁移费用；由于违反基建程序，盲目调迁队伍所发生的迁移费；因中标而引起施工机构迁移所发生的迁移费。费用内容包括：职工及随同家属的差旅费、调迁期间的工资、施工机械、设备

工具、用具和周转性材料的搬运费。

#### 9) 引进技术和进口设备项目的其他费用

引进技术和进口设备项目的其他费用包括：应聘来华的外国工程技术人员的生活和接待费。为引进技术和进口设备项目派出人员到国外培养和进行设计联络、设备材料检验所需的旅费、生活费和服装费等。国外设计及技术资料费、专利和技术保密费、延期或分期付款利息，进口设备材料检验费。从国外引进成套设备建设项目在工程建成投产前，建设单位向保险公司投保建筑工程险或安装工程险应缴纳的保险费。

#### 10) 预备费的内容

预备费是指在初步设计和概算中难以预料的工程费用，其中包括实行按施工图预算加系数包干的预算包干费用，其用途如下：在进行技术设计、施工图设计和施工过程中，在批准的初步设计和概算范围所增加的工程和费用。设备、材料的价差。由于一般自然灾害所造成的损失和预防自然灾害所采取的措施费用。在上级主管部门组织竣工验收时，验收委员会（或小组）为鉴定工程质量，必须开挖和修复隐蔽工程的费用。

### (2) 工程建设项目其他费用概算的编制方法

#### 1) 国家建设征用土地各项补偿费的编制方法

根据授权单位批准的建设用地、临时用地面积和各省、自治区、直辖市人民政府制定颁发的各项补偿费、安置补助费标准计算；大中型水利水电工程建设移民安置办法，按有关部门规定执行。

此项费用除预备费外，不作其他费用计取的基础。

#### 2) 建设单位管理费的编制方法

以“单项工程费用”总和为基础，按照工程项目的不同规模分别制定的建设单位管理费率计算；或以管理费用金额总数表示。对于改、扩建项目应适当降低费率。

#### 3) 研究试验费的编制方法

按照设计提出的研究试验内容和要求，按合同计划进行编制；或按单项工程费用之和的 0.15% 计列。

#### 4) 生产职工培训费的编制方法

根据初步设计规定的培训人员数或提前进厂人数，培训方法、时间和国务院主管部门规定的费用指标计算。

#### 5) 办公和生活家具购置费的编制方法

按照设计定员和办公生活用具综合费用定额，中学、小学、招待所、托儿所、卫生所六项费用定额计算，包干使用。

#### 6) 勘察设计费的编制方法

按国家计委颁发的工程勘察设计收费标准和有关规定进行编制。

#### 7) 供电贴费的编制方法

按国家计委批转水利电力部关于供电工程收取贴费的暂行规定执行。

#### 8) 施工机构迁移费的编制方法

初步设计概算的编制，应经建设项目的主管部门同意，按建筑安装工程费用的百分比或类似工程预算计算；施工图预算根据主管部门批准的施工队伍调迁计划进行计算。

#### 9) 引进技术和进口设备项目的其他费用编制方法

应聘来华的外国工程技术人员费用、项目派出人员出国费和技术引进费应按照合同和国家有关规定计算。国外设计及技术资料费、专利和技术保密费、延期或分期付款利息，进口设备材料检验费，应按照中国人民银行、国家发改委、财政部、商务部等部门规定和中国人民保险公司规定的保险费率计算。

#### 10) 预备费的编制方法

以“单项工程费用”总计和工程建设其他费用（不包括本项费用）之和，按照规定的预备费率计算。引进技术和进口设备项目应按国内配套部分费用计算。施工图预算包干系数，以直接费和间接费之和为基础计算。

### 6.3.1.5 总概算编制方法

总概算是确定一个建设项目从筹建到竣工验收的全过程价格的总文件，是设计文件的重要组成部分，由各单项工程综合概算、工程建设其他费用、建设期利息、预备费、固定资产投资方向调节税和经营性项目的铺底流动资金组成，并按主管部门规定的统一表格编制而成。总概算是编制基本建设计划的依据，

是考核设计经济合理性的依据，是实行投资包干和签订施工合同的依据，是办理工程拨款和贷款的依据和最高限额，是考核建设成本的依据。

### （1）总概算的内容

总概算文件通常由编制说明、总概算表及其他所包括的单项工程综合概算表、单位工程概算表、工程建设其他费用概算表所组成。

### （2）编制说明

1) 工程概况：说明工程建设地址、名称、规模等主要情况。

2) 编制依据：说明上级机关的指标和规定、设计文件、概算定额、类似预算、材料预算价格、设备预算价格及费用指标等各项编制依据。

3) 投资分析：一般分析各项投资的比例和费用构成分析。如有同类型材料可对两个或几个资料进行分析对比。说明设计是否经济合理和投资的经济效果。

4) 主要设备和材料数量：说明建筑安装工程主要材料如钢材、木材、水泥等数量及主要机械设备、动力设备、电气设备数量。

5) 其他有关问题说明：说明有关投资方面的遗留问题，影响今后投资变化的因素，以及有关需要说明的问题。

### （3）总概算表

总概算表中的项目，按工程和费用项目性质划分为工程费用项目和工程建设其他费用项目两大部分。在两部分费用合计以后，列出“预备费用”项目。可回收金额列在总概算的最后。

总概算由设计单位负责编制，如果一个建设项目由几个设计单位共同设计时，其他设计单位负责编好所承担设计的工程概算，主体设计单位负责编制总概算。

### （4）编制总概算的准备工作

1) 根据设计说明、总平面图和全部工程项目一览表等资料，对建设项目的内容、性质、建设单位的要求作一般了解，在此基础上拟出编制总概算提纲，明确编制工作的主要内容、重点、编制步骤和审查方法。

2) 根据已经拟好的编制总概算提纲，广泛搜集基础资料，合理选用编制依据。

3) 编制或审查综合总概算及其他费用概算书。

#### (5) 总概算的编制方法

总概算的编制方法，是根据建设项目内各个单项工程综合概算及工程建设其他费用概算等基础文件进行编制的。

1) 填列总概算表。表头填写建设项目名称、总概算价值。表内各栏按照统一制定的表格的内容和要求，依工程费用项目和工程建设其他费用性质归类列入建筑工程费、安装工程费、设备购置费、其他费用等，并计算出各栏合计。

2) 在汇列好各种概算文件后，按取费标准计算预备费用。

3) 汇总出建设项目总概算价值、计算回收金额。

4) 计算各项技术经济指标。整个建设工程的技术经济指标，应选择建设工程中最有代表性和最能说明投资效果的指标计划，以便与其他建设项目进行比较，说明设计的技术经济合理性。

5) 投资分析。在编制总概算时，为了对基本建设投资进行分析，应在总概算表中计算出各项工程和费用的投资占总投资的比例，在表的末尾计算出每项费用的投资占总投资的比例。

6) 编制总概算说明。将总概算书封面、总概算编制说明、总概算表等按顺序汇编成册，构成建设项目总概算书。

### 6.3.1.6 石窟寺及石刻保护工程概算编制方法

#### (1) 基本要求

1) 工程概算，应以相应的设计文件为基准进行编制。概算所列项目、数量应与方案设计文件相符，二者不能脱节。

2) 工程概算依据应选择科学、适用的定额；当无定额依据时，允许以市场价格为依据进行编制。

#### (2) 编制依据

1) 现状勘察与方案设计。

2) 国家有关的工程造价管理的法规、政策。

3) 工程所在地（或全国通用的）现行适用的专项工程和安装工程的概算定额、预算定额、综合预算定额，以及有效的单位估价表、材料和构配件预算价

格、工程费用定额和有关规定。

- 4) 类似或可比工程的造价构成或技术经济指标。
- 5) 现行的有关材料运杂费率。
- 6) 因工程场地条件发生的其他规定之内的工程费用标准。
- 7) 管理单位或业主提供的有关工程造价的其他资料。

### (3) 概算书编排内容

1) 封面(或扉页)。写明工程名称、编制单位、编制日期,应有编制人、审核人签字并加盖编制人员资质证章和法人公章。

2) 概算编制说明书。内容应包括:工程概述,说明工程的规模和性质;编制依据,主要说明所选用的定额、指标和其他标准;编制方法和其他必要的情况说明。

3) 概算汇总表。由明细表子目汇总、合成。依次列出直接费、间接费和取费费率、其他费用、合计和总计费用。

4) 概算明细表。依序套用定额子目、编号;无定额及其他标准作为依据的子目,要特别标注清楚。

## 6.3.2 保护工程施工图设计预算编制

施工图预算是建设项目建筑安装工程施工图设计预算的简称。它是在施工图设计阶段,各个单位工程设计工作都完成以后,而又在各个单位工程施工以前,设计单位,业主或招标单位、施工单位或投标单位等有关部门按照施工图、施工组织设计、现行预算定额和工程量计算规则、费用定额以及人工、材料、机械台班等为依据,以单位工程为单位,采用一定的方法进行编制的。

### 6.3.2.1 编制依据

- (1) 施工图及说明书和标准图集
- (2) 施工组织设计或施工方案
- (3) 现行预算定额
- (4) 地区材料预算价格表
- (5) 地区建设费用定额
- (6) 工程承包合同

(7) 工作手册及有关工具书和计算机工程预算软件

### 6.3.2.2 编制程序和计算方法

#### (1) 单价法

单价法是指在编制建筑工程预算时，按照建筑工程预算定额所规定的工程量计算规则和编制依据，计算各分项工程的工程量，乘以建筑工程预算定额中所编制好的相应各分项工程的单位基价金额，求出单位工程的人工费、材料费、施工机械费并汇总求和，按调价规定对人工费、机械费、材料费进行调价，得到定额直接费。再按规定计取其他直接费、间接费、计划利润和税金，最后汇总得出单位工程施工图预算的一种方法。编写步骤如下图。

单价法编制施工图预算，由于各地区的建筑工程造价计算程序各不相同，计算公式也就不同，但直接工程费的基本计算公式是相同的。

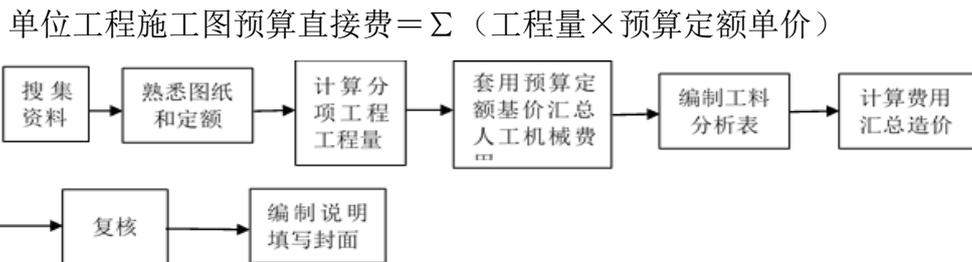


图 6-1 单价法编制施工图预算步骤

#### (2) 实物法

实物法是指建筑工程预算按照建筑工程预算定额所规定工程预算工程量计算规则和编制依据，计算各分项工程的工程量，乘以建筑工程预算定额中所编制好相应各分项工程的人工、材料、机械台班的定额用量，再乘以工程所在地当时的人工、材料、机械台班的实际单价。求出单位工程的人工费、材料费和施工机械费，并汇总求和，进而求工程直接费，再按规定计取其他各项费用。最后汇总就可得出单位工程施工图预算。编制步骤如下图。

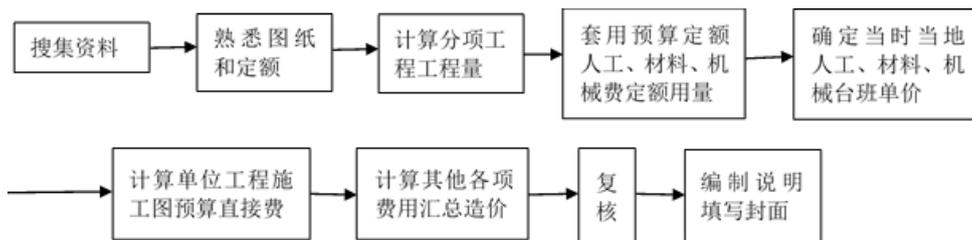


图 6-2 实物法编制施工图预算步骤

### (3) 综合单价法

所谓综合单价即分项工程完全单价，是将各种工料和价格从市场上采集后编制成直接工程费，然后以直接工程费为基准参照费用定额把各项间接费和利润、税金分解到各分部分项工程合成为综合单价，某分项工程综合单价乘以工程量即为该分项工程的合价，所有分项工程合价汇总后即为该工程的总价。这种方法与前述方法相比较，主要区别在于：间接费和利税是用一个费率分摊到分项工程单价中，从而组成分项工程完全单价的。

综合单价法是分部分项工程单价为全费用单价，全费用单价经综合计算后生成，其内容包括直接工程费、间接费、利润和税金（措施费也可按此方法生成全费用价格）。各分项工程量乘以综合单价的合价汇总后，生成工程发包价。由于各分部分项工程中的人工、材料、机械含量的比例不同，各分项工程可根据其材料费占人工费、材料费、机械费合计的比例（以字母“C”代表该项比值）在以下三种计算程序中选择一种计算其综合单价。

- 1) 采用以人工费、材料费、机械费合计为基数计算该分项的间接费和利润。
- 2) 采用以人工费和机械费合计为基数计算该分项的间接费和利润。
- 3) 采用以人工费为基数计算该分项的间接费和利润。

### (4) 施工图预算计价程序

- 1) 计算直接费：由直接工程费和措施费组成。

#### ①直接工程费

人工费：人工费 =  $\sum$  (工日消耗量 × 日工资单价)

材料费：材料费 =  $\sum$  (材料消耗量 × 材料基价) + 检验试验费

施工机械使用费：施工机械使用费 =  $\sum$  (施工机械台班消耗量 × 机械台班单价)

#### ②措施费

只列通用措施费项目的计算方法，各专业工程的专用措施费项目的计算方法由各地区或国务院有关专业主管部门的工程造价管理机构自行制定。

环境保护：环境保护费 = 直接工程费 × 环境保护费费率 (%)

文明施工：文明施工费 = 直接工程费 × 文明施工费费率 (%)

安全施工：安全施工费=直接工程费×安全施工费率（%）

临时设施费：临时设施费用=（周转使用临建费+一次性使用临建费）×（1+其他临时设施所占比例（%））

夜间施工增加费：夜间施工增加费=（合同工资/定额工期）×（直接工程费中的人工费合计/平均日工资单价）×每工日夜间施工费开支

二次搬运费：二次搬运费=直接工程费×二次搬运费率（%）

大型机械进出场及安拆费：大型机械进出场及安拆费=（一次进出场及安拆费×年平均安拆次数）/年工作台班

混凝土、钢筋混凝土模板及支架：模板及支架费=模板摊销量×模板价格+支、拆、运输费；租赁费=模板使用量×使用日期×租赁价格+支、拆、运输费

脚手架搭拆费：脚手架搭拆费=脚手架摊销量×脚手架价格+搭、拆、运输费；租赁费=脚手架每日租金×搭设周期+搭、拆、运输费

已完工程及设备保护费：已完工程及设备保护费=成品保护所需机械费+材料费+人工费

施工排水、降水费：排水降水费=∑排水降水机械台班费×排水降水周期+排水降水使用材料费、人工费

## 2) 计算间接费

### ①规费费率。

根据本地区典型工程发承包价的分析资料综合取定规费计算中所需数据。规费费率的计算公式。

A 以直接费为计算基础。

规费费率（%）=（∑（规费缴纳标准×每万元发承包价计算基数）/每万元发承包价中的工人费含量）×人工费占直接费的比例（%）×100%

B 以人工费和机械费合计为计算基础。

规费费率=∑（规费缴纳标准×每万元发承包价计算基数）/每万元发承包价中的人工费和机械费含量×100%

C 以人工费为计算基础。

规费费率= $\sum$ (规费缴纳标准×每万元发承包价计算基数)/每万元发承包价中的人工费含量×100%

②企业管理费费率。企业管理费费率计算公式。

A 以直接费为计算基础。

企业管理费费率(%)=(生产工人平均管理费/(年有效施工天数×人工单价))×人工费占直接费比例(%)×100%

B 以人工费和机械费合计为计算基础。

企业管理费费率(%)=(生产工人平均管理费/(年有效施工天数×(人工单价+第一工日机械使用费)))×100%

C 以人工费为计算基础。

企业管理费费率(%)=(生产工人平均管理费/(年有效施工天数×(人工单价+第一工日机械使用费)))×100%

企业管理费费率(%)=(生产工人平均管理费/(年有效施工天数×(人工单价)))×100%

3) 计算利润及税金

①建筑工程利润根据工程类别计算

工程类别划分标准、利润率按照不同工程类别计算。

②税金

税金计算公式：税金=(税前造价+利润)×税率(%)

纳税地点在市区的企业：

$$\text{税率}(\%) = \frac{1}{1-3\%-(3\% \times 7\%)-(3\% \times 3\%)}$$

纳税地点在县城、镇的企业：

$$\text{税率}(\%) = \frac{1}{1-3\%-(3\% \times 5\%)-(3\% \times 3\%)}$$

纳税地点不在市区、县城、镇的企业：

$$\text{税率}(\%) = \frac{1}{1-3\%-(3\% \times 1\%)-(3\% \times 3\%)}$$

4) 汇总工程费用，确定土建工程施工图预算

石窟寺及石刻保护工程施工图预算=直接工程费+间接费+利润+税金

### 6.3.2.3 石窟寺及石刻保护工程预算编制

#### (1) 施工图预算书基本要求

1) 以相应的施工图设计文件为前提编制，预算所列项目、工程量，必须与设计文件的相关内容对应，严禁二者脱节和不符合。

2) 预算可以采用定额法编制，也可以采用实物法编制。取费标准执行国家和地方的相关规定。

3) 采用预算定额法编制预算时，必须选择适用定额。某部分项目确实缺乏适用定额时，允许以市场价格为依据进行编制。

#### (2) 预算编制依据

1) 施工图设计技术文件。

2) 国家和工程所在地政府有关工程造价管理的法规、政策。

3) 工程所在地（或全国通用的）主管部门的现行的、适用的工程预算定额和有关的专业安装工程预算定额、材料与构配件预算价格、工程费用定额及有关取费规定和相应的价格调整文件。

4) 现行的其他费用定额、指标和价格。

5) 因工程场地条件而发生的其他规定之内的工程费用标准。

6) 采用实物法编制预算书时，工程直接费以市场价为依据，取费标准仍应执行国家和工程所在地主管部门的相关规定。

#### (3) 预算书编排内容

1) 封面（或扉页）。写明项目或工程名称、编制单位、编制日期，应有编制人、审核人签字，并加盖编制人员资质证书和编制单位法人公章。

2) 预算编制说明书。其内容应包括：工程概述，说明工程的性质和规模；编制依据，对所选用的定额、指标、相关标准和文件规定进行清楚的说明；编制方法和其他必要的情况说明。

3) 预算汇总表。由明细表子目汇总、合成。依次列直接费、间接费和取费率、其他费用、合计费用。

4) 预算明细表。套用定额子目要准确并编号清楚；无定额和其他标准作为依据的子目，要标注清楚。

## 7 中国石窟寺及石刻保护工程技术

### 7.1 石窟寺及石刻岩体病害治理技术

#### 7.1.1 石窟寺及石刻岩体病害治理技术概述

石窟寺及石刻类文物赋存的岩体历经千百年的漫长岁月，受到各种自然营力（地震、河流冲刷、地下水侵蚀、大气降水、风蚀等）的长期作用和人类活动的影响，石窟岩体产生不同程度的病害。石窟岩体病害的类型和产生原因在前面章节已有论述，本章主要对石窟岩体病害的多种治理技术及措施进行详细介绍。

需要特别强调的一点是，各类治理技术措施的设计和应用首先必须是建立在对石窟岩体病害的类型和形成机理的准确判断和分析的基础上，具体应用应根据窟区的气候条件、环境条件、地震烈度、石窟和文物的重要性、石窟岩体的岩性、裂隙性质和发育程度、危岩体的稳定状态、渗水的类型及坡体稳定性等多种影响因素进行综合考虑，灵活地应用单个治理措施或多种治理措施的组合，针对主要的石窟岩体病害进行治理，必要时应做出对比方案进行技术、经济和环境等诸方面的综合比较，筛选出适宜的方案。

石窟寺及石刻岩体病害治理技术主要包括危岩体锚固技术、局部支顶加固技术、崖面风蚀病害治理技术、水害治理技术、环境地质灾害防治技术、治理工程质量检测与效果评估技术等。

#### 7.1.2 石窟寺及石刻危岩体加固技术

窟区内的岩体是石窟的载体，只有保持岩体的稳定，才能保证石窟的稳定和安全。危岩体在各类石窟窟区普遍存在，是石窟岩体病害最常见的一种病害形式，其不仅对石窟和文物的安全构成了极大的威胁，而且对工作人员及游客的生命财产安全也构成了极大危害，危岩体加固是石窟岩体加固的最主要内容之一。

### 7.1.2.1 锚固技术

在保证岩土工程成功和安全的所有措施中，岩土锚固技术是可供选择的最成熟和经济可靠的技术之一。采用锚固技术可以充分发挥岩土体的自稳能力，提高岩土体的强度，有效控制岩土体的变形。本节将分别对应用于石窟寺及石刻危岩体锚固技术中的锚杆技术和预应力锚索技术其关键技术要点包括类型选用、设计计算方法与施工技术要点等分别进行讲述。

#### (一) 锚杆技术

锚杆支护与传统的支护有着根本的不同，后者常常是被动地承受破坏岩土体所产生的荷载，而前者（锚杆）可以主动地加固岩土体，有效地控制其变形，防止岩土体坍塌破坏的发生。

##### 1. 锚杆分类和技术特征

将目前工程中使用的锚杆归纳成锚杆分类图，如图 7-1 所示：

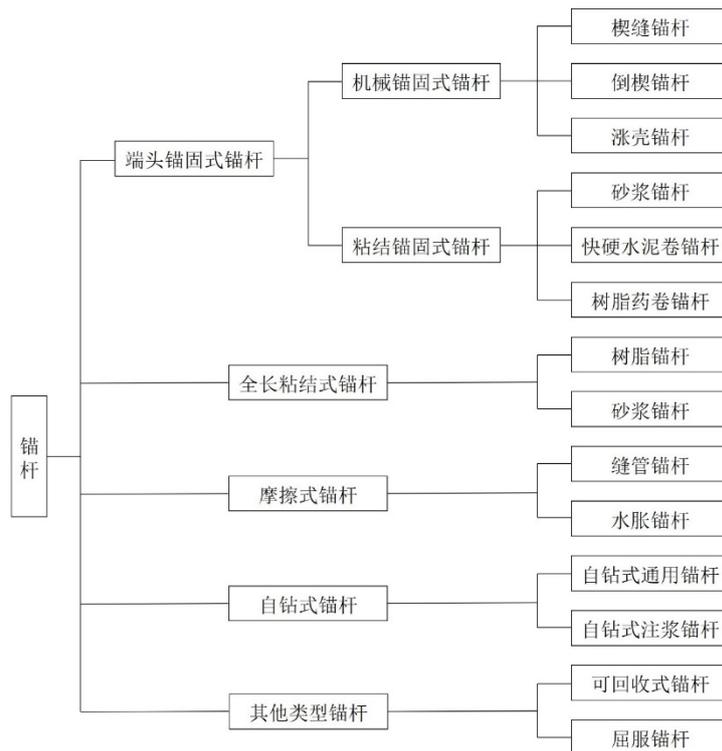


图 7-1 锚杆分类图

在石窟寺及石刻危岩体锚固工程中，常用的锚杆类型包括水泥砂浆锚杆、玻璃纤维锚杆等，主要技术特征和使用范围如下：

##### (1) 水泥砂浆锚杆

水泥砂浆锚杆是全长锚固的锚杆，利用水泥砂浆与锚杆的黏结力和砂浆与

岩层的黏结力而达到锚固危岩体的目的（图 7-2）。锚固性能方面，钢筋、钢丝绳砂浆锚杆的设计锚固力为 50kN，当钢筋直径小于 10 毫米时，可一眼用双筋，如果粘接锚杆的水泥砂浆采用早强水泥拌制，则砂浆锚杆同树脂锚杆的性能接近，其成本低于树脂锚杆。

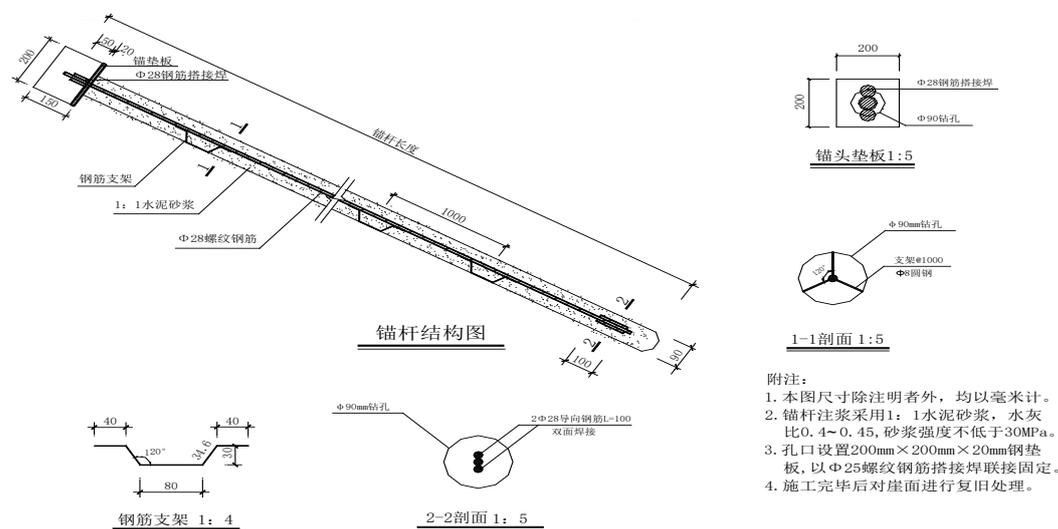


图 7-2 锚杆结构示意图

## (2) 玻璃纤维锚杆

玻璃纤维是一种以合成树脂为黏结剂，玻璃纤维为增强材料制成的复合材料。杆体生产主要用拉挤成型法，Φ16 毫米玻璃纤维杆体平均破断力 75.4kN，完全可满足 40~50kN 工作载荷的要求。上述锚杆较传统钢锚杆有如下优点：

- 1) 防腐蚀，可长久支护；
- 2) 绝缘，防静电；
- 3) 全螺纹，易切割，抗剪、抗拉，黏结力强、锚固反应快；
- 4) 杆体轻，是同样长度传统钢锚杆之 25% ；

5) 可广泛与相关施工设备配合使用。可与各种锚杆配件、树脂卷或其他锚固剂及工地安装测试设备共同配合使用。

## (3) 木锚杆

木锚杆的杆体和楔子应使用硬木材，垫板可用普通木材。锚杆的构件使用前应作防腐处理。灌注普通水泥砂浆的木锚杆，设计锚固力约在 10kN 左右，当灌注其他浆材时，锚固力应做相应调整。

## (4) 竹锚杆

竹锚杆可用四根厚 8~10 毫米、宽 30~38 毫米的竹片，22 号铁丝箍成圆形杆体，箍间距 300~400 毫米，两端至铁箍距离稍大于楔子长度。楔子和垫板可用木材加工，要求同普通木锚杆。竹锚杆的锚固力不够稳定，锚固力稍低于木锚杆。竹锚杆使用前需作防腐处理。

### (5) 自钻式锚杆

自钻式锚杆是一种将钻孔、锚杆安装、注浆、锚固合而为一的锚杆。特制的钻杆打入地层后不再收回，钻杆即为锚杆体，并使用等截面的中空管取代钢筋，从而可确保锚杆体的强度。该锚杆特别适用于风化岩、碎石层、回填层、砂砾层和圆卵石层等难以成孔的地层。

文物保护工程中可用自钻式中空注浆锚杆，该锚杆是将注浆与锚固合而为一，这种方法比附加注浆管的方法更加方便可靠。对于围岩十分破碎，钻孔难以形成、易于垮孔；或者要求尽量减少震动，以免围岩更易塌落等特殊情况下，可采用不取出钻杆就注浆的自钻式锚杆。穿过断层破碎带、淋水带岩层可采用自钻式中空注浆锚杆。

## 2. 锚杆选型

在石窟寺及石刻危岩体锚固工程中，锚杆选型的基本原则为：

(1) 锚杆的锚固力特性曲线，必须与岩体的位移、压力相适应，确保在获得安全的加固效果前提下，尽量降低锚固工程量，降低对岩体的扰动作用。

(2) 根据岩体的稳定性情况和加固现场的施工条件，综合判断选择预应力锚杆或无预应力锚杆。

(3) 锚杆类型必须与工程的服务年限相适应，即考虑锚杆的耐用性与防腐性是否与服役年限相一致。

(4) 在易于塌落失稳、松动位移较大等的破碎或软弱岩体中，除选择合适的锚杆类型外，还可配合其他有较大承载力的支护结构，以构成各类加固效果好的混合支护结构。

(5) 考虑施工现场安装的方便性与机械化安装，提高加固效率。

总之，锚杆选型要满足技术经济上的合理性，以获得最好的经济效益。

## 3. 锚杆材料

锚杆材料组成有：杆体材料、注浆加固材料、托板（垫板）、锚杆螺母、钢带和网等。

(1) 杆体材料：圆钢及螺纹钢是制作各种普通锚杆杆体的主要材料，锚杆常用钢筋及其力学性能如表 7-1 所示。锚杆常用圆钢截面及其承载能力如表 7-2 所示。

表 7-1 锚杆常用钢筋及其力学性能

钢筋品种		牌号	公称直径 (mm)	屈服点 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (MPa)	冷弯 $d$ =弯心半径 $a$ =钢筋直径
外形	强度等 久			不小于			
光圆 钢筋	I	Q235	8~20	235	370	25	$180^\circ d=a$
变形 钢筋	II	20MnSi 20MnNb <sub>6</sub>	8~25 28~40	335	550	27	$180^\circ d=3a$ $180^\circ d=4a$
	III	20MnSiV 20MnTi 25MnSi	8~25 28~40	400			$90^\circ d=3a$ $90^\circ d=4a$
	IV	40SiMnV 45SiMnV 45Si <sub>2</sub> MnTi	10~25 28~32	540	835	10	$90^\circ d=5a$ $90^\circ d=6a$

表 7-2 锚杆常用钢筋截面及承载能力

杆体 直径 (mm)	毛截 面积 (mm <sup>2</sup> )	Q235		A5		16Mn		25MnSi	
		屈服 载荷 (kN)	破断 载荷 (kN)	屈服 载荷 (kN)	破断 载荷 (kN)	屈服 载荷 (kN)	破断 载荷 (kN)	屈服 载荷 (kN)	破断 载荷 (kN)
16	201.1	48.2	76.4	56.3	100.1	68.3	104.5	76.4	116.6
18	254.5	61.1	96.7	71.3	127.3	86.5	132.3	96.7	147.6
20	314.2	75.4	119.4	88.0	157.1	106.8	163.4	119.4	182.2
22	380.1	91.2	144.4	106.4	190.1	129.2	197.7	144.4	220.5
24	452.4	108.5	171.8	126.6	226.1	153.7	236.1	180.9	262.2
28	615.8	147.8	234.0	172.4	307.9	197.2	307.9	234.0	307.9

(2) 注浆加固材料

注浆加固材料常用的为水泥基浆材。文物保护工程对注浆加固材料的性能

要求是：强度与被加固岩体匹配；与杆体及岩体无不良化学反应，物理化学性能尽量与岩体匹配；良好的耐久性，尽量降低对文物的保护处理次数；与岩石粘接面有较高粘接强度；凝结时间、强度等能根据不同的需求进行调节；选材除能满足文物保护要求外，还要原材料容易获得，价格便宜，尽量节约开支。

快硬水泥药卷类材料在部分文物锚固工程中也有应用。主要为快硬水泥制成。使用快硬水泥药卷可以实现锚杆的快速安装，通过杆体将药卷送入孔底，搅拌后可以实现快速凝固和锚杆的快速安装。立即上紧托板几分钟后即可产生锚固力。

(3) 托板（垫板）：托板是锚杆的重要组成部件，钢板、铸铁板和竹胶板等，均可做托板。常用托板形状如图 7-3 所示，其中，第 4 类型托板效果最好。

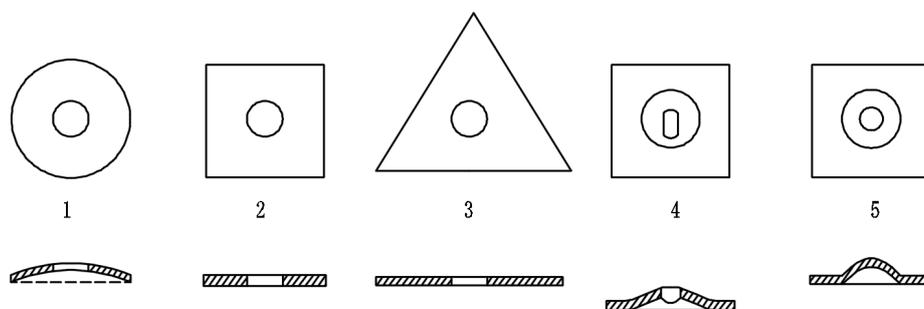


图 7-3 各类型托板图

(4) 锚杆螺母：螺母是固定托板、网、钢带等支护材料的一个重要构件，它是锚杆支护结构中形成支护力，控制岩体变形破坏的一个重要组成部分。在危岩体支护中一般使用标准件粗制六角螺母，与锚杆杆端螺纹相配套，要求螺母满足锚杆抗拉拔力的作用。

(5) 钢带：钢带可将单根锚杆连接起来组成一个整体承载结构，提高锚杆支护整体效果。钢带一般由 2~3 毫米的薄钢板制成。在石窟寺及石刻危岩体锚固工程中一般使用较少。

(6) 网：在部分崖体区域，上部常有破碎岩石掉落。有时为防止岩块掉落，同时为提高锚杆支护的整体效果，可以采用加固网共同配合使用。根据网的形式与品质目前常用的有铁丝网、钢筋网与塑料网等。

#### 4. 锚杆支护原理概述

从 20 世纪 60 年代开始至今，已逐步形成了各种锚杆支护作用理论，还处

于百家争鸣之中。本部分对几种得到工程和理论界普遍认同的锚杆作用机理作概要介绍。

1) 悬吊作用：悬吊作用原理认为：锚杆支护通过锚杆将软弱、松动、不稳定的岩土体悬吊于稳定的岩土体中，以防止其离层滑落。起悬吊作用的锚杆，主要是提供足够拉力，用以克服滑落岩土体的重力或下滑力，来维持岩土体稳定。

2) 组合梁作用：这种原理是把薄层状岩体看成一种梁（简支梁），锚杆支护后，相当于用螺栓将它们紧固成组合梁，各层板便相互挤压层间摩擦阻力大为增加，内应力和挠度大为减少，于是增加了组合梁的抗弯强度。

3) 挤压加固作用：这种原理认为，施加锚杆后，围岩内部形成连续压缩带，即使比较松散的岩土体也能形成承受较大荷载的整体结构。

4) 围岩强度强化理论：该理论认为锚杆支护作用实质就是改善锚固区岩体力学参数，强化锚固区围岩强度，特别是强化围岩破裂后的强度，从而保持围岩稳定。

## 5. 石窟寺及石刻危岩体锚固工程设计与计算

锚固设计的首要任务是进行危岩体稳定性分析，确定不稳定危岩体的位置、规模和潜在失稳模式。同时了解影响危岩体失稳的主要因素。针对潜在失稳或将来可能失稳的危岩体，根据工程地质勘查阶段所获取的结果，在确定潜在不稳定块体的位置、规模、形态、大小及稳定状态的基础上，选择合理的破坏准则和安全系数。在以上基础上决定锚杆布局、安设角度及预应力值，设计锚杆和锚杆体的类型和尺寸，验算锚杆稳定性和设计锚头等主要内容。以黏结式锚杆为例：

### （1）锚杆设计拉力值的确定

锚杆设计拉力值以危岩体稳定性分析结果为依据，综合考虑锚杆的布置形式等因素，在满足危岩体安全的前提下，合理地确定其大小。锚杆的布置形式和排距、间距的确定，应以提供均匀压力，避免出现大范围的拉力区及不发生群锚效应为原则。工程中常用的砂浆锚杆主要用于体积较小、厚度较薄的局部危岩体加固，多布置在洞窟密集部位，此外，锚杆还起到平衡岩体内部因锚索

预应力作用而产生的拉应力，优化岩体受力状态。

### (2) 锚杆安全系数的确定

锚杆的安全系数为其极限拉力值与设计拉力值的比值，其大小由对锚杆特性的认识程度和锚杆可能失效后的危害程度来确定。一般来讲，石窟危岩体加固工程中锚杆的安全系数为 $\geq 2.0$ 。国家文物局制定的新规范讨论稿参考了国内外经验数据，荷载设计安全系数 K 值取 2.5，材料安全系数应与荷载安全系数相匹配，不小于 2.5。

### (3) 锚杆参数设计

#### 1) 锚杆锚固段长度的确定

锚杆失效通常是由杆体与锚固体的握裹力或锚固体与孔壁间黏结强度不足引起的，锚杆锚固段长度的选择应分别对上述两种情况进行验算，取两者的较大值。同时，锚固段长度不应小于 3.0 米，必要时，可通过锚杆的基本试验来确定。锚杆锚固段长度可按下式进行计算：

#### 2) 锚杆自由段长度的确定

锚杆自由段长度主要应根据被加固危岩体的可能滑动面的产状、深度和锚杆设计位置来确定，同时，应超过岩体滑动面 1.0 米，并应大于 5.0 米，以防止锚杆由于岩体变形而产生过大的预应力损失。

#### 3) 锚杆倾角的确定

锚杆倾角对锚固效果有显著的影响，因此，选择最佳的倾角能取得最好的效果。在实际应用中，锚杆倾角的选择还要考虑钻孔、灌浆的方便、合理来加以确定。石窟危岩体锚固工程中锚杆倾角可根据现场具体情况采取垂直于裂隙面、向下倾斜或向上仰斜三种形式。垂直于裂隙面及向下倾斜的锚杆压浆时采用反向压浆方式；向上仰斜的锚杆压浆时封孔设排气管，采用正向压浆方式；如孔口设弹性封孔环，灌浆过程中也可缓慢向孔底方向移动灌浆管，待灌满后再缓慢抽出灌浆管，让浆液充满灌浆管所占的空间。

## 6. 锚杆支护施工机具及工艺

在锚杆加固工程中，保证锚杆的施工质量对加固效果的发挥至关重要。

### (1) 锚杆施工要求：

在锚杆施工中应满足以下要求：

1) 锚杆的布置在断面图上呈放射状，大体上均匀布置，展成平面图为矩形或菱形；

2) 锚杆方向在整体岩层中应基本垂直岩层面，以便充分发挥锚杆的作用。布置孔位时应先按图纸要求确定布置形式和间、排距，确定好孔位。尽量垂直于岩面打眼；

3) 锚杆孔深度必须与作业规程的要求和所使用的锚杆相一致。水泥砂浆锚杆孔深允许偏差 50 毫米；

4) 成孔后必须用高压风吹净锚杆孔底的岩粉、碎块、积水，以保证锚杆锚固质量。

5) 灌浆完毕后，应将托板紧贴岩面，并拧紧螺母或打紧楔子，使得锚杆具有实际的、可靠的锚固力。

## (2) 锚杆施工机具

锚杆施工机具包括锚杆钻机、钻杆与钻头等。

锚杆支护施工中，钻孔质量的好坏直接影响锚杆支护质量。锚杆钻机是锚杆支护的主要设备。锚杆钻机按工作原理可分为旋转式、冲击式、冲击旋转式；按锚杆钻机所用动力可分为液压、电动和气动式。高质量的钻杆、钻头能使钻机充分发挥其性能，达到最佳钻孔效果。国内常使用的钻杆一般为六角中空钢钻杆。选择钻头时，综合考虑以下因素：总体质量和可靠性、钻进速度、使用寿命、价格合理、在特定岩层中的钻进能力。在石窟寺及石刻岩体锚固工程中尤其要注意选用钻头要尽量降低对岩体的振动和冲击影响。根据“十一五”科技支撑计划“石质文物保护关键技术(2009BAK53B04)”项目的研究结果，牙轮钻头磨削钻进比硬质合金钻头冲击回转钻进能够降低对岩体的扰动。

## (3) 锚杆施工工艺

锚杆施工的一般顺序为：钻孔、清孔——锚杆体制作安装——安置锚杆——注浆——施加预紧力——切割多余杆体、封闭锚头——表面复旧。

注意事项：在水泥砂浆锚杆施工时，应保证注浆材料的性能，水泥与沙配合比一般采用 1:1 或 1:2 (重量比)，水灰比 0.38 ~ 0.45。采用快硬水泥卷施工，

水泥卷浸水前应先在其端部扎 3~5 个小孔 ( $\Phi 1$  毫米), 然后将水泥卷放在盛有清水的水桶中浸入水中, 待水泥卷不再冒气泡时(约 2 分钟左右), 迅速取出, 放入锚杆孔内, 并用杆体送到孔底。然后用气动或电动搅拌机, 边旋转边推进杆体, 搅破水泥卷使其充分拌和。待水泥凝固 10~20 分钟后再安装托板, 紧固螺帽。

## 7. 锚杆的实验

锚杆试验包括破坏性试验、非破坏试验、蠕变试验。

### (1) 破坏性试验

破坏性试验的目的主要是通过试验, 检验锚杆的锚固性能和所用材料的安全度。要求在短的时间间隔内对锚杆进行分级加载, 直到破坏为止。在每一级荷载下要记录下锚杆头部位移的变化情况, 然后将试验结果以荷载一位移的形式绘出曲线。最后写出试验报告, 报告应包括各种图表、锚杆所处岩层情况、所用锚杆及张拉设备情况、锚孔的技术指标、锚杆安装方法和时间、试验方法和时间、破坏性质、试验结果及其观测结果。由于该试验属破坏性试验, 所以不能在构成加固系统的工作锚杆上进行。详细试验步骤参照具体试验规程进行。

### (2) 非破坏试验

非破坏试验是使用仪器对锚杆进行的一种无损伤检验, 可直接在工作锚杆上进行。这种小型仪器的头部装有压电晶体传感器。把该仪器的探头紧贴锚杆的外露端, 传感器能把仪器生成的弹性波传给锚杆。由于波的传播速度取决于锚杆长度、灰浆状况以及结合状态等因素, 所以这些波又是以不同的速度沿锚杆传播, 然后信号又返回到传感器, 通过对返回信号进行处理, 就能分析出锚杆长度、锚杆与水泥浆或孔壁与水泥浆的结合情况以及机械锚固装置与孔壁之间的接触是否满足要求和应力大小等, 进而可发现锚杆的施工质量和存在的问题。

### (3) 蠕变试验

在软弱地层中设计锚杆, 尤其是预应力锚杆, 由于通过锚杆对锚固段地层有一较大的长期荷载, 该地段会产生较大的蠕变。为了了解锚杆在可能发生蠕变地层的工作特性, 按我国《土层锚杆设计与施工规范》CECS 22:90) 规定:

对于塑性指数大于 17 的淤泥及淤泥质土层中的锚杆应进行蠕变试验,并要求试验的锚杆数不应小于 3 根。

## (二) 预应力锚索技术

预应力锚索技术主要用于锚固体积较大的危岩体,尤其在应用于文物保护领域时,具有结构简单、施工安全、锚固力大、对坡体扰动小等诸多优点,为较大型石窟危岩体加固的主要技术措施。以下就预应力锚索的发展、分类、形成机理、结构以及预应力锚索的设计、施工等方面进行重点论述。

我国的预应力锚固技术应用始于 20 世纪 60 年代。1964 年安徽省梅山水库在岩石坝基的加固中,首次成功的使用了预应力锚索。此后,大吨位预应力锚固技术在国防、水电、矿山、公路等领域内逐步推广应用。最近十余年来,随着国内经济建设大规模展开,锚固技术在岩土工程诸多领域获得迅猛发展,在理论研究、技术创新、工程应用等方面,都获得许多新的成果,促使锚固技术日渐成熟,使其已成为岩土工程关键技术,效果显著。

预应力锚索技术首次应用于我国的文物保护工作中是在 1992 年,中铁西北科学研究院首次将锚索锚固技术成功应用于敦煌石窟榆林窟岩体加固工程,取得了显著成效。随后在炳灵寺石窟岩体加固渗水治理工程、敦煌莫高窟北区病害治理工程、北石窟寺危岩体抢险加固及渗水治理工程、马蹄寺石窟病害治理工程、天梯山石窟加固治理工程、肃北五个庙石窟病害治理工程等多处石窟岩体病害治理中得到广泛推广和成功应用,取得了大量的宝贵经验。

### 1. 预应力锚索的基本特征及基本组成构件

#### (1) 预应力锚索的基本特征:

1) 预应力锚索以群组形式出现。这些锚索在空间上是独立存在、非连续分布的。通过一群预应力锚索建立的锚固力场,达到加固补强的共同目的。

2) 预应力锚索具有很强的主动调控性。预应力锚索安放数量,安放位置、深度、方向,施加预应力的的大小,均可依据现场需求加以调整。可充分调动工程地质体的潜在自稳能力,改变其内部应力分布性状和大小,限制有害变形的发生,提高工程结构的稳定与安全。

3) 预应力锚索属高效预应力范畴。锚索使用的预应力筋,如预应力钢丝、

预应力钢绞线、精轧螺纹钢筋等均为高强度材料，只要利用较小材料截面，即可获得较高的预应力。

4) 预应力锚索将结构与地层紧密地联结在一起，形成共同工作的体系。

5) 预应力锚索能够在尽可能少地扰动被锚固体的状况下，达到加固、增稳的目的，所以预应力锚索是一种高效、经济的加固技术。

(2) 预应力锚索基本组成构件：

预应力锚索由三个基本构件组成（见图 7-4）。它们分别为：锚索束体（简称束体）、外锚头 and 锚固孔（简称锚孔）。

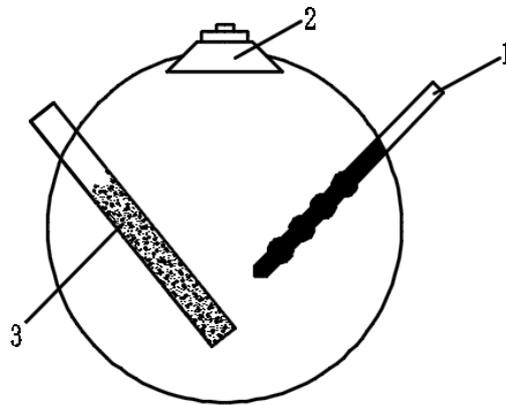


图 7-4 预应力锚索基本组成构件

1-预应力主体；2 外锚头；3-锚孔

束体——它可用各种预应力材料，按一定方式编制而成，其下端与锚孔底部固结，上端与外锚头相连，中间部分起到产生并传递预应力的作用。为了防止腐蚀，在束体上还要设置一些附件和防腐材料。

外锚头——保持预应力并向被加固体传递预压力，一般由锚具、墩座（常用钢筋混凝土或钢制作），以及部分束体等组成。

锚孔——起安放、固定束体，控制施力方向的作用，可用机械钻凿等方法在被加固体中制作成型。

预应力锚索束体，在预应力锚索中起着关键性的作用，依照它的不同部位实际所发挥的功能，可将其划分成三大段：内锚段（锚固段）、自由段和外锚段（外锚固段）。

内锚段——是指束体下端最先与孔壁固结在一起的部分。它与锚固浆体以及锚孔下部共同组成预应力锚索的内持力端（也称为锚固体），担负着对锚索所

承受的集中荷载，扩散传入稳定介质中的关键作用。

自由段——是产生预应力的源头。指束体中能自由伸长并产生预应力的部分；预锚锁定后一般是指内锚段上端至工作锚具间的这一段束体。

外锚段——是指伸出工作锚板外，可供千斤顶张拉、建立预应力的那部分束体。建立预应力后，此段束体大部分将被切除，只有很小的一段将与工作锚板、锚墩等共同组成预应力锚索的外持力端。

## 2. 预应力锚索分类

预应力锚索可按加固对象、工作年限、锚孔形态，以及按自由段与孔壁是否永久黏结进行大致分类。在文物保护工程中，常根据束体段是集中固定在一处还是分散固定在多处将锚索分为：荷载集中型和荷载分散型。由于荷载集中型锚索在锚索内锚段均可引起较大的应力集中（拉应力或压应力），均可造成内锚段的损坏，因此催生了一类可以防止锚固段应力过分集中的锚索—荷载分散型锚索。荷载分散型也相应可分为拉力分散型、压力分散型与拉压分散型三类。目前工程中应用较多的是拉力集中型，而具广阔应用前景的是荷载分散型锚索。

## 3. 预应力锚索设计

锚索设计是指要在特定地层中，选择出适宜的锚索形式及布局，确定锚索承载能力和锚固长度等结构参数。被加固地层是锚固系统的一个重要组成部分，由于地层条件千变万化，而锚索的锚固性能又对地层性质的变化极其敏感，所以目前还不可能用一个简单的公式来准确地计算其参数。锚固设计仅用于设计人员在初步设计时估算锚索锚固力等参数。在文保工程中，锚索的锚固力通常要通过现场试验加以确认。

### （1）设计准备工作

#### 1) 锚索设计的一般要求

①锚索设计应在调查、试验、研究的基础上，充分考虑锚固区地层的工程地质、水文地质条件和工程的重要性等。

②在满足工程使用功能的条件下，应确保锚索设计具有安全性与经济性。

③确保锚索施加的预应力对结构物（被加固结构及相邻结构）和地层不产生有害影响，锚索束体产生的位移能控制在允许的范围內。

④设计锚索均应在进行锚固性能试验后才能用于工程加固。

⑤锚索设计结果与试验结果有较大差别时，应在调整锚索设计参数后重新进行试验。

## 2) 主要设计内容

①根据地层情况合理选择锚索锚固类型及布局；

②确定锚索埋设深度、自由段长度；

③确定锚索的锚固力；

④确定锚索束体材料及截面面积；

⑤计算锚索注浆体与地层之间的黏结长度；

⑥计算锚索注浆体与锚索束体之间的黏结长度；

⑦根据所选用的张拉设备及锚具，确定锚索的张拉段长度；

⑧确定外锚头的形式及结构；

⑨确定锚索的防腐措施。

## 3) 收集相关资料

收集现有工程相关资料的目的，是利用最经济的手段获取锚索工程规划、设计和施工时所需要的有价值的资料和数据，为锚索设计和施工提供完整可靠的理论依据。需调查收集的资料内容如下：

①地形地史资料：收集场地及附近区域的地形地貌形成及变迁历史，人工回填地层的历史、回填材料、深度及分布情况，古代或近代危岩体的形成原因及现状等资料，对潜在危岩（或不稳定）体的稳定性进行评估。

②锚固布局与周围环境：进行锚固场地位置及边界线的确认，了解场地形状、场地内外高差及基准高程、相邻洞窟及相关文物的情况。

③埋设物与障碍物：收集有关原有基础、挡土墙、堤防、地下管道、地下暗沟、地下电缆、探洞及文物等埋设物的构筑情况、位置与分布的资料。

④气象资料：了解场区及附近区域内的气温、降雨（雪）量、主要风向及风力、冰冻深度及其随季节变化规律。

⑤地震资料：了解场区位置地震发生的时间、次数、烈度、造成灾害及破坏情况，分析地震发生的频度及与地质构造的关系。

⑥水文地质与工程地质资料：收集地下水的类型、补充来源、埋藏深度、随季节变化规律、地层的透水性及水质分析等资料；收集场区及附近地区已有的地质勘查资料及区域性工程地质资料。

⑦地层构造条件：了解地层的类型、节理及密度、倾角、走向、风化程度；了解不良地质现象的位置及发育程度。

⑧类似工程：了解附近甚至外地与本工程条件类似的加固工程情况，收集有关设计、施工、试验、加固效果、竣工验收报告等资料。

⑨交通状况：了解交通、运输、供水、供气等条件，地方可利用材料来源，以及当地机械加工的水平及能力。

⑩环境保护：了解噪声、振动及施工可能对周围环境造成的影响，污水、污物处理方法等。

#### 4) 掌握相关技术参数

①有关土层的参数：土的粒度成分、容重、压缩性、含水量、塑性指标、剪切强度和渗透系数等。

②有关岩体的参数：岩石的单轴抗压强度、容重、弹性模量、渗透性、弹性波速和膨胀性等。

③有关腐蚀方面的参数：地层的成分、地下水位、有效电阻、导电率、化学成分与含量、水的化学成分及 pH 值、与金属的氧化还原势、杂散电流等。

#### 5) 必要的补充勘探与试验

如若不能满足以上要求，可向有关方面提出补充勘探与试验的要求。鉴于锚固工程的特性，建议勘探孔的布设范围，应覆盖锚索能达到的区域，以充分了解锚索所穿过的岩体的性质（构造、结构、充填物、地下水等）。

#### 6) 掌握相关规程规范

有关预应力锚索设计方面的规程、规范（国标、行标）很多，应结合工程特点，配套选用。文物保护工程中一些常用规范如下：

①岩土工程勘察规范（GB 50021-2001）；

②锚杆喷射混凝土支护技术规范（GB 50086-2001）；

③岩土工程预应力锚索设计与施工技术规范（GBJ 3635-1999）；

- ④土层锚杆设计与施工规范（CECS 22： 90）；
- ⑤水工建筑物水泥灌浆施工技术规范（SL 62-94）；
- ⑥预应力混凝土用钢绞线（GB/T 5224-2003）；
- ⑦预应力混凝土用钢丝（GB/T 5223-2002）；
- ⑧预应力筋锚具、夹具和连接器（GB/T 14370-2000）；
- ⑨预应力筋锚具、夹具和连接器应用技术规程（JGJ 85-2002）；
- ⑩混凝土外加剂应用技术规范（GB 50119-2003）；
- ⑪无黏结预应力筋（JG 3006-93）；
- ⑫无黏结预应力筋专用防腐润滑脂（JG 3007-93）；
- ⑬硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥（GB 175-1999）；

（2） 采用公式法计算主要方法及步骤（以文保工程常见锚索为例）

### 1) 确定锚索材料强度

锚索(图 7-5)采用高强度低松弛  $\Phi 15$  钢绞线,标准抗拉强度值为 1860MPa,截面积为 1.4299cm<sup>2</sup>, 计算时取 1.42cm<sup>2</sup>; 水泥砂浆配比为水泥: 砂子: 水 =1:1:0.40~0.43, 标号 M28。

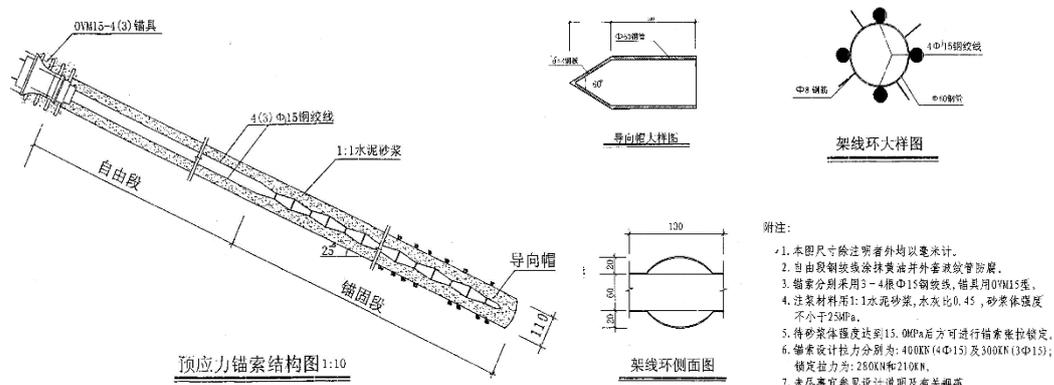


图 7-5 预应力锚索结构示意图

### 2) 确定锚索锚固段长度、锚索孔径、锚索倾角及其他

锚索能否达到预计的锚固力,很大程度上取决于地层抵抗锚索从中拉出的抗力。这种抗力是由承受锚索锚固段压力直接作用的地层和不受这种压力作用的其他地层间的抗剪强度决定的。地层抗力只有大于或等于锚索的锚固力时才能保证结构稳定, 否则地层将出现倒锥形剪切破坏。

根据国内外拉拔试验资料统计，在一般岩层中，当锚索孔孔径为 130 毫米时，锚固段长度超过 10 米后，锚固力基本上不再随着锚固段增加而增加；当锚索孔孔径为 110 毫米时，在一般岩层中的适宜锚固深度为 7~8 米。原则上讲，锚索在工程上作为受拉构件，应尽量使其不受剪，充分发挥其作用。为此可采取下列技术措施：

a. 锚索向下俯斜一定角度 3°~20°不等；向上仰斜一定角度 0°~90°不等，90°为垂直上吊锚索。锚索倾角在 -10°~ +10°范围时，灌浆材料硬化时产生的残余浆渣及灌浆料的泛浆会影响锚索承载力，应予以避开。对于锚索锚固角的调整，必须以提供较好的锚固效果为准。

b. 在张开大裂隙处，锚索外套抗剪钢管以增强其抗剪能力（图 7-6）；

c. 在危岩体根部悬空处设置支顶结构；

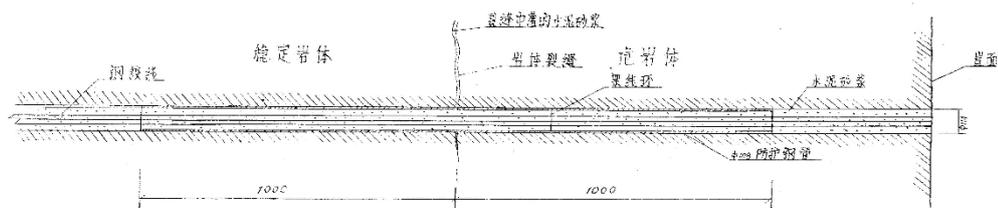


图 7-6 锚索穿越宽大裂隙处设置抗剪防护钢管示意图

d. 对裂隙灌浆，增加岩黏聚力。

### 3) 锚索锚固力计算

锚索在地层中的锚固力受诸多因素的制约，包括：岩石的强度、结构、粘接材料强度、锚索类型、锚固段形式以及施工工艺等均会对锚固力产生影响，另外还存在许多未了解的因素也会产生影响。这些因素涉及注浆体与地层界面、注浆体与预应力筋等多介质、多层面相互结合的复杂力学问题。计算锚固力（锚固长度）的方法有公式法、经验类比法和现场实验法三种。

以下给出用公式法计算锚固力（锚固长度）的主要计算步骤：

锚索的极限锚固力计算公式为：

$$T_j = \pi D L \tau \quad (\text{kN}) \quad \text{—————公式 7.1}$$

式中：D—锚索孔直径，单位为 m；

L—锚固段长度，一般取最佳锚固段长度；

$\tau$ —锚索砂浆体与锚固段围岩之间的平均摩阻应力，单位为 kPa；

如石窟属国家重点保护文物，规范规定永久性预应力锚索（锚杆）结构设计安全系数  $K \geq 2.0$ ，设计中一般取  $K=2.0$ ，计算设计锚固力：

$$T_s = 0.5T_i \text{——公式 7.2}$$

$$\text{每束锚索的极限抗拉力为： } T_i' = S \cdot f_{ptk} \cdot n_0 \text{ (kN) ——公式 7.3}$$

式中： $T_i'$ —每束锚索的极限抗拉力，单位 kN；

$S$ —每根钢绞线的折算截面积，为  $1.4299\text{cm}^2$ ，取  $S=0.000142\text{m}^2$

$f_{ptk}$ —钢绞线的标准强度值， $f_{ptk}=1860\text{MPa}=1860000\text{kPa}$

$n_0$ —每束锚索的钢绞线根数；

材料安全系数  $K_c = T_i' / T_s > K = 2.0$ 。

至此，根据危岩体倾覆力和锚固力计算结果可算出各块危岩体加固锚索束数  $N$ ，并根据倾覆力矩进行立面布置。应注意，锚索的自由段长度应不小于 5m。

$$N = P^0 / (T_s \cos \beta) \text{——公式 7.4}$$

式中： $\beta$ —锚索倾斜角度，单位为度。

注：待国家文物局制定的新规范颁布实施后，安全系数取值应执行新规范。

### （3）文物保护工程预应力锚索设计注意事项

1) 对于文物保护工程和其他较大的锚固工程，都需要在现场做锚固力拉拔试验，求出对应于最大锚固力的锚固深度，作为设计的依据，设计手册或有关资料给定的  $\tau$  值或最大锚固力值只能供初步设计参考，不能作为施工图设计的依据。

2) 石窟危岩体病害治理工程中的永久性锚索，安全系数  $K$  应不小于 2.0，国家文物局编制的规范讨论稿中  $K$  值为 2.5。在部分塑性指数大于 17 或地下水发育并有侵蚀性的地层中安设永久性锚索，其安全系数不得小于 2.2，并需采取加固地层的相应措施。

## 4. 预应力锚索施工工艺

### （1）施工程序

预应力锚索施工顺序为：锚索孔钻孔、清孔——钢绞线编束成型、安装导向尖壳、架线环——安置锚索——压浆——施加预应力——切割多余钢绞线、

封闭锚头——表面复旧。

## (2) 施工工艺

### 1) 锚索成孔工艺

锚索孔的直径根据设计锚固力大小和锚头型式而定，锚固力与锚索孔直径成正比例关系。石窟危岩体加固锚索，考虑到岩体岩性较脆，厚度不大，被加固岩体不能受弯，为防止应力集中，压碎或折断岩体，多采用小吨位锚索，锚索孔直径一般设计为  $\phi 110$  毫米；而在治理滑坡时，锚索孔直径一般设计为  $\phi 130$  毫米。每束锚索可设置 4~12 根  $\phi 15$  毫米的钢绞线，设计抗拔力可达 470~1300KN。

锚索孔深度按下式计算：

$$L_{\text{总}} = L_{\text{由}} + L_{\text{效}} + L_{\text{沉}} = L_{\text{由}} + \frac{KP_0}{\pi D \tau} + L_{\text{沉}} \text{-----公式 7.5}$$

式中： $P_0$ ——一束锚索的设计拉力；

$L_{\text{沉}}$ ——孔底预留沉渣段，一般取 0.5~1.0 米；

$L_{\text{总}}$ ——锚索孔总深度；

$L_{\text{效}}$ ——有效锚固段长度；

$L_{\text{由}}$ ——自由段长度，不小于 5 米。

由上式计算出的钻孔深度只供初步设计用，实际深度要根据实钻结果及现场抗拔力试验的结果综合确定。钢绞线应预留张拉段长 1.5 米。打俯斜的锚索孔与打仰斜的排水孔在施工工艺上并不完全相同，除了严格确定方向、俯斜角、牢固固定钻机、跟套管钻进、安装导向棒外，要特别注意排渣及钻孔沿顺时针方向偏斜。因为正转钻进孔底岩渣拨向左侧挤压钻具向右偏斜，所以最好采取冲击钻进，把孔内岩渣及时吹出来。若地下水丰富，应连续钻进；在接近孔底部位，要提取岩芯，以进一步了解岩层裂隙情况。在断层破碎带中钻进，要跟套管或注浆加固孔壁。

现将钻锚索孔通常遇到的问题及解决办法作一简单介绍。

钻锚索孔是锚索施工的最重要最基本的环节，其施钻工艺比较复杂，特别是在岩质坚硬而又破碎的地层、裂隙发育跑风的地层和呈软塑状态的地层中钻进，都有相应的施钻工艺和对机具性能的特殊要求。

a. 锚孔钻进，成孔是施工关键。为保证钻孔平直和钻进速度，特别是较深的锚索孔，应选用长导轨钻机和高频、轻型冲击器。为保护文物应使用无水干钻、高压风清孔出渣的施工工艺；采用高精度测量技术，当钻孔距壁画雕像较近时，开孔可采用合金钻头，回旋钻进，钻进 0.5m 以上或穿过主要裂隙面后，才使用低压冲击钻进，虽费工费时，但减小了施工震动，减轻了对文物的影响。

b. 孔口至裂隙面段地层若成孔性较好，则不需下套管保护孔壁，可按设计孔径裸孔钻进；若这一段地层成孔性较差，为防止孔壁坍塌卡钻，就应跟套管钻进，其孔径比设计孔径大一个档次（例如设计孔径为 110 毫米，此段就下  $\phi 127$  毫米的套管），也可以用水泥浆加固孔壁而不下套管，视具体情况而定。裂隙面至孔底一段，可采用冲击钻进。锚固段可采用 ODEX 钻具（图 7-7）冲击扩孔，扩大锚固段孔径增加锚固力，确保满足设计要求。

c. 若地层裂隙发育跑风，岩渣吹不出来，则应采用双管同时推进的钻机或边钻进边灌浆充填裂隙保护孔壁，这样虽然进度慢，但安全稳妥，不易出钻探事故。也可采用大功率空压机，一般要求风量不小于  $12\text{m}^3/\text{min}$ ，风压不低于 1MPa 的空压机。但在石窟加固工程施工中应控制风压。

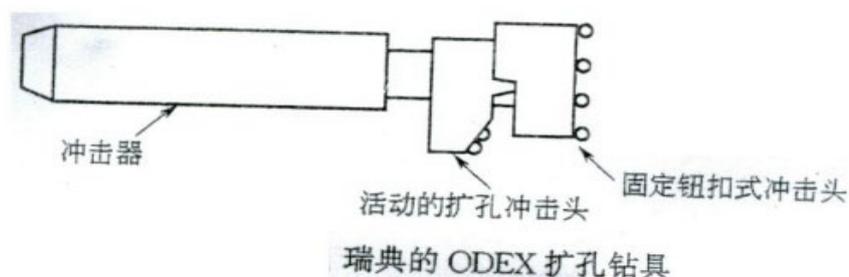


图 7-7 ODEX 扩孔钻具

## 2) 压浆工艺

a. 钻孔钻进到设计深度后，首先要清孔，清除孔内的岩渣和粉尘，增加锚固效果。最好用高压气流清孔，文物保护工程不宜采用清水进行清孔，水流易沿裂隙渗入洞窟损伤文物。

b. 锚索锚固力的形成，主要靠水泥砂浆与钢绞线（或高强钢丝）之间的握裹力和与锚索孔孔壁之间的摩阻力形成。因此，向锚索孔内压浆是保证预应力锚索施工质量的关键环节，确保灌浆的质量至关重要。

水泥砂浆配比为：水：水泥：砂子=0.4~0.43:1:1；其中水泥标号不低于 325R，

砂子过筛孔径 4~6 毫米，并用水洗净。砂子粒径太大，容易发生离析，堵塞灌浆管。拌好的砂浆要过筛，以免有水泥结块堵塞灌浆管。

除上吊锚索和仰斜锚索外，不管对何种地层，均应采用反向压浆，即把灌浆管下到孔底，由孔底向孔口方向反向压浆。反向压浆的优点是：即能保证砂浆完全充满锚索孔，又不会出现正向压浆过程中因排气管堵塞孔底形成压缩空气、砂浆无法压进的现象。尤其是在地下水发育无法排干时，正向压浆是无法保证灌浆质量的，而反向压浆却可以把孔内地下水挤出孔外，保证灌浆质量，灌浆的压力可控制在 0.3~0.6Mpa。

反向压浆工艺过程如下：孔内压浆管采用金属管，或 PVC 管，采用金属管时，用外接箍连接，禁止采用异径接头连接；灌浆前用清水润湿灌浆管内壁。反向压浆的最大压力一般控制在 0.6MPa，随着孔内浆液由里向外不断推进，压力也逐渐升高，压力接近 0.4~0.6MPa，即暂停灌浆，将压浆管向外抽出 2~3m，这样边压边抽管，直至达到设计要求。

使用机械式内锚头时应先施加预应力，然后灌浆。

对于上吊锚索可采用正向压浆方式压浆，排气管多为  $\phi 10\sim 15$  毫米的塑料管或尼龙管，灌浆后留在孔内。

### 3) 张拉锚索

张拉前，首先把孔口处混凝土和岩面凿平，然后再依次放上钢垫板，安装外锚头、千斤顶及工具锚头，组装完毕后即可张拉。

张拉吨位和相应的压力表读数要预先制成表格。每加一级荷载，要稳定 5~8 分钟，然后卸荷，再加到下一级荷载，稳定 5~8 分钟，卸荷至前级荷载，再次升级加荷，直至加到设计荷载，持荷 10 分钟，再卸荷至设计的预应力值锁定，至此整个张拉过程完毕。在加荷的同时，要测量锚索的伸长量，绘制出 P~S 曲线，确认锚索在弹性阶段工作。

石窟危岩体加固，当危岩体较薄时，不能施加大的预应力，以防止应力集中，压碎或折断岩体。

### 4) 锚索预应力损失

锚索预应力损失，一般由三部分组成：

①施加预应力时，在顶压工作锚夹片的过程中造成预应力损失，这是不可避免的。这部分预应力损失值，估计在 5%左右。测出这部分预应力损失并不难，可根据在顶压锚具夹片的过程中高压油泵压力表的增加值算出预应力损失值。

②施加预应力锁定后，在千斤顶卸荷的过程中产生预应力损失。这也是不可避免的。锁定后由于千斤顶卸荷，在一个短暂的时间内，钢绞线失去了力的平衡，它势必带着夹片向孔内方向回缩，作加速运动，可能还有轻微的滑移，这一部分预应力损失可以通过量测锚具处锚索钢绞线的回缩长度及反力墩位移计算出来。

以上两部分预应力损失值的大小与锚具类型有关。有关资料认为，这两部分预应力损失为 2%~3%，实际上由于现场一些因素的综合影响，预应力损失可能在 8%左右。

③除了上述在锁定和千斤顶卸荷过程中造成的预应力损失外，地层的蠕变、钢绞线的松弛和锚头的松动等因素都会造成预应力损失（图 7-8）。

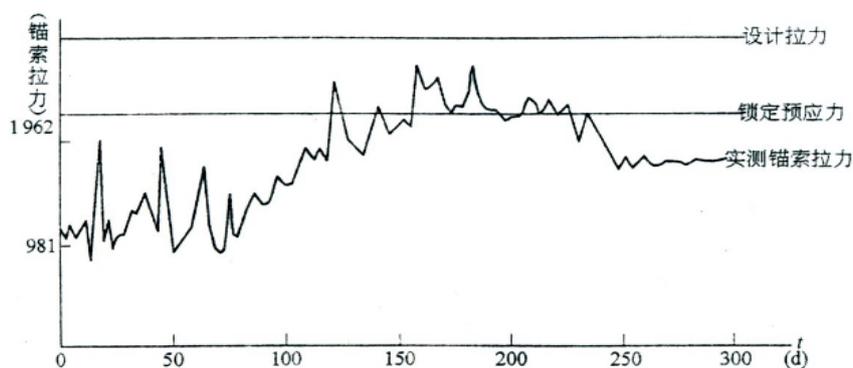


图 7-8 锚索拉力—时间变化曲线

根据预应力损失分析并结合岩层厚度、抗压强度、岩体完整性等诸多具体因素，一般情况可采取超张拉的措施对锚索预应力的损失进行弥补，超张拉一般为原设计荷载的 10%左右；但石窟岩体较薄或较破碎时不宜采取超张拉的措施。

## 5. 预应力锚索试验

预应力锚索试验主要包括验证试验、适应性试验和验收试验三种。

### (1) 验证试验

不论是临时锚索或永久锚索，在使用前均应进行验证试验以证明锚索的结

构、使用材料、部件、施工方法和施工人员的技术水平能否满足工程需求。该试验尤其要研究如锚索的承载力、荷载—变形、松弛和蠕变等问题。也要考虑搬运、储存、安装和施工过程中的锚索抗物理破坏的能力。在设计锚索的验证试验时，建议至少试验三根锚索，最好在与工作锚索相同的地层中进行试验。验证试验步骤及参数取值参照相关规范进行。试验完成后，对预应力锚索自由段实际长度和破坏情况、预应力损失速率、位移速率、防腐情况等评价。

### (2) 适应性试验

通过验证试验后的锚索在使用前应进行现场适应性试验，以检查锚索在特定现场条件下的适应性。该试验可以在施工前或施工时选择的工作锚索上进行，也可以在附加的试验锚索上进行，但应在与工作锚索相同的地层和施工工艺的条件下进行。当工作锚索的类型和地层条件发生变化时，应对工程中使用的每一种类型的锚索进行补充试验，试验锚索一般不少于三根。试验过程中监测荷载的波动情况，对锚头位移、锁定荷载的观测时间等进行记录。试验步骤及参数取值参照相关规范进行。试验完成后按验证试验评定方法，评价锚索。

### (3) 验收试验

验收试验亦称质量控制试验，它是针对所有工作锚索进行的，其目的是证实当锚索承受大于设计荷载时的短期锚固性能和在满足设计条件时锚索的安全系数，将试验结果与现场适应性试验结果进行恰当的对比，可预测锚索长期性能提供有价值资料。预应力锚索验收可参照相关规范进行。检查数量一般为锚索总数的5%~10%。

#### 7.1.2.2 局部支顶技术

部分石窟及石刻的下方岩体中存在有岩洞、溶洞或由于部分窟区岩性较软，尤其是泥岩等软弱夹层遇水易崩解，长期经受雨水冲刷和洪水掏蚀，在坡脚部位或其他部位形成多处悬空或空洞，加剧了坡脚的应力集中状态，造成上部岩体失去支撑，加之边坡陡立甚至局部反倾，在上部岩体自重、地震力和其他综合因素的影响下，上方危岩体产生倾倒、崩塌、下错或坠落，给文物以及人员的安全均带来隐患。如不对影响上方岩体稳定的部位进行有效支顶而仅采用锚固措施进行加固，将会造成锚固工程量增大，同时对岩体的完整性造成不利影

响,而且难以保证整个崖体的安全。因此可在洞窟密集部位设置局部支撑结构,以提高该处岩体的稳定性,并防止因岩体下错剪断锚索。

局部支顶措施包括浆砌片石支撑墙、钢筋混凝土支撑墙、钢筋混凝土立柱等多种形式,采用何种形式应根据现场具体情况而定。其基础一般应下到稳定的持力岩层;如稳定的持力岩层下伏较深,施工确有困难,也可通过承载力计算后设置扩大基础,但基础埋深不宜小于1~1.5米。例如莫高窟北区洪水冲刷将坡脚掏空处、安西榆林窟西崖坡脚和庆阳北石窟寺北1号窟就均采取了此种支顶措施防护。

考虑到支顶工程对窟区景观的影响,支顶结构应采取小体积、分散设置,并采用原岩粉末做成粘接材料对结构物表面进行复旧处理,使其外观近似于风化岩柱或岩层,以达到与石窟及石刻岩体及崖面浑然一体的效果。

### 7.1.2.3 危石病害治理措施

由于危石体积一般较小,因此危石病害的治理措施原则上采取就地清除的方法。对少数情况下坡面比较破碎和危石成群出现时,也可采取喷锚挂网或挂柔性网的治理措施,但在石窟岩体加固工程中,却不宜采取喷锚挂网或挂柔性网的治理措施,因为它不符合“修旧如旧、不改变原貌”的文物修缮原则,因此对上述少部分不易清除或清除后影响景观原貌的较大危石应采取微型抗剪锚杆就地锚固和砂浆灌注黏结的治理措施。

危石就地清除的措施虽然比较简单,但应特别注意以下几个方面的问题:

(1) 危石清除前应首先对下部石窟及文物进行遮蔽防护。由于危石已与母岩完全脱离,且一般位置较高,清除过程中一旦不慎掉落砸到石窟及文物上,则会对石窟及文物造成不可挽回的破坏,后果不堪设想。因此危石清除的文物遮蔽防护方法与危岩体加固的文物遮蔽方法有较大不同,不仅要进行粉尘防护遮蔽,更主要的是要进行防砸,一般应首先用塑料薄膜或彩条布加薄竹板或薄木板对石窟及文物进行粉尘防护遮蔽,然后在危石清除的下方采取加密脚手架和铺设加厚木板(厚度不小于6厘米)的防砸遮蔽措施。

(2) 在清除较大的危石时,可先用搭设脚手架对其进行固定,然后就地将危石破碎成较小的块体再进行清除。

(3)对少部分不易清除或清除后影响景观原貌的较大危石采取微型抗剪锚杆就地锚固时，由于危石的破坏模式为滚落、剥落或脱落，抗剪力较大，因此对危石进行就地锚固时应一律采用抗剪锚杆。

(4)只有在危石锚固张拉结束后方可进行砂浆灌注黏结。应首先采用低压风和钢丝刷清理危石的黏结面，并进行边缘封堵，最后进行砂浆灌注黏结。禁止用水清洗，以防危石根部土状风化物遇水泥化，强度迅速降低而造成危石突然坠落事故。

#### 7.1.2.4 窟顶危岩体塌落病害的专项治理措施

部分大型石窟（如榆林窟 6 窟、炳灵寺 169 窟、天梯山石窟 13 窟、张掖马蹄寺 3 窟、北石窟寺 165 窟等）岩体被多组裂隙切割成块状，风化严重，已经形成了多块危岩体，直接威胁下方文物的安全；同时地下水发育，多见渗水点出露，长年有水流出，冲蚀洞窟所在岩面，形成沟槽，加速岩体风化、破坏岩体的稳定性，同时渗水增加了窟内湿度，危害壁画，加速了岩体风化，在地震力作用下极易塌落。

根据部分大型石窟的具体情况在治理工程中应特别注意以下两个方面：

(1)大型石窟的工程治理应做出专项施工组织设计，实施工程治理前首先要进行临时支顶，对文物进行多层次安全防护，并在施工前再次进行详细测绘，对病害的发展状况进行复查，确保原设计的工程效果以及人员和文物安全。

(2)由于大型石窟窟顶危岩体塌落病害严重，而且随着时间和外部条件的变化其变形将逐渐加剧，因此应在加强观测的基础上根据病害的发展状况实施动态设计，并随时根据实际情况对原设计进行调整补充。

大型石窟窟顶危岩体塌落病害的治理措施应采用包括窟外坡面吊梁吊顶（薄顶石窟）、轻型型钢混凝土支撑梁（厚顶石窟）、上吊锚杆和上吊锚索等综合技术措施来加固窟顶，以增强洞窟自身强度。

##### （一）薄顶大型石窟窟顶危岩体塌落病害的治理措施

根据现场勘察情况，首先应对严重风化、开裂破碎的岩层进行支顶，在确保洞窟安全的情况下，对风化岩面及危岩进行清理。然后用锚杆、灌浆加固窟顶岩体，并在周边设置仰斜锚杆和锚索，提高其自身强度，在此基础上可再设

置锚索钢框架结构体托住窟顶岩体以提高窟顶岩体的稳定性。框架用吊杆与吊梁连接。

薄顶特大型石窟窟顶危岩体塌落病害的治理一般均是石窟抢险加固工程的重点，也是设计难度和施工难度较大、技术含量较高的分项工程，其设计涉及国内外最先进的锚固技术——单孔复合锚固技术、浅埋洞室围岩压力计算理论、结构计算理论、对锚结构、钻孔电视技术和灌浆机具、灌浆材料、灌浆压力的选择等。薄顶特大型石窟窟顶岩体加固工程施工，必须单独作详细的施工组织设计，组织精心施工。其加固工程含三个方面的内容：

(1) 对窟顶破碎危岩体用上吊锚杆（索）锚固、对锚、灌浆加固，提高其自身强度和整体性；

(2) 用吊索、吊杆、型钢框架结构体托住窟顶危岩体；

(3) 用斜拉或上吊预应力锚索承担一部分荷重，减小对稳定性较差的窟壁及拱门的压力，并增加其抗倾覆能力。

对应这三个方面的内容，整个加固工程施工有三个要点：首先，精确测量窟顶各部位厚度，然后再用凿岩机打穿窟顶薄弱部位和破碎带岩体，采用钻孔电视技术详细检查岩体内部软弱夹层部位厚度和风化蚀空情况，确定拟灌浆液配方，灌浆压力和对拉锚杆可施加的预应力值，并做试样，测定试样强度，最后付诸施工。其次，按先做上吊锚杆（索）和对穿锚杆再灌浆的顺序加固窟顶岩体，通过这一措施可有效地提高窟顶岩体自身的强度，增加其完整性，这是一个十分关键的措施。灌浆压力不能超过 10kPa，不能全面展开，应分散进行，同一批灌浆孔不能超过 2~3 个，距离不应小于 5 米。每个孔灌浆时要缓慢，间歇式进行，灌浆泵可采用可控制、可反转回浆的挤压式砂浆泵。灌浆时，要牢固支顶窟顶危岩体，并加强观测，待全部上吊锚杆（索）和对锚砂浆体所灌浆液材料达到设计强度后，才可据下一步施工需要撤去少部分临时支撑。所有对锚锚杆两端（窟内和窟外）均需进行防腐、防水处理并封闭。最后，设置型钢框架托住窟顶危岩，然后用锚杆、锚索将钢框架锚固与坡面上的吊梁连接。设钢框架前，先清理小块危石；对带有文物的小块危岩用微型锚杆锚固或取上涂上环氧树脂黏结剂后再黏合复原。钢框架要尽量嵌在岩体内，并避开文物，

钢框架施工先施工单件，然后连接组合，避免或减小因上吊锚索（杆）施加预应力而使钢框架结构本身产生过大的结构应力或错位。施工时，对钢框架进行支顶，待上吊锚索（杆）砂浆体龄期达到 28 天后方可缓慢有序地撤去支撑。锚索孔、锚杆孔开孔 1 米深度范围内用齿轮钻头或合金钻头钻进，目的是为保证钻孔位置准确，减小对危岩体的震动，施工完成后进行复旧处理。型钢框架和上吊锚索（杆）组合结构的作用有两点：一是托住危岩体；二是通过适当施加预应力（每根锚索及锚杆张拉荷载不宜超过 20~30kN），变成主动式受力结构，防止危岩体继续卸荷。

## （二）厚顶大型石窟窟顶危岩体塌落病害的治理措施

根据现场勘察情况，首先应对严重风化、开裂破碎的岩层进行支顶，在确保洞窟安全的情况下，对风化岩面及危岩进行清理。然后用上吊锚杆和锚索、灌浆加固窟顶岩体，提高其自身强度，在此基础上可再设置支撑窟顶的轻型型钢混凝土支撑梁或框架和锚索（杆）相结合的结构体托住窟顶岩体以提高窟顶岩体的稳定性。

厚顶大型石窟窟门拱形岩体是应力集中部位，岩体裂隙是加固的要点，对保证整个窟顶的稳定至关重要。所以首先应对洞门窟顶和及上部的危岩体用上吊锚索（杆）进行加固。锚索可采用由  $\Phi 15$  的高强度低松弛钢绞线组成，具体钢绞线根数根据危岩体重量大小计算而定，锚索孔孔径为  $\Phi 110$  毫米；锚杆采用  $\Phi 28$  毫米的螺纹钢，锚杆孔孔径为  $\Phi 60\sim\Phi 90$  毫米。锚索（杆）方向以竖直方向为主，其目的是使危岩体与上部稳定岩体连成一个整体；施工前首先要对部分较危险的危岩体进行临时防护支顶，以防止施工震动造成危岩体险情继续发展甚至塌落的施工事故。

对上吊锚索（杆）孔可采用先封口、预留排气管、然后进行压力注浆的施工工艺，以确保孔内浆液饱满。在上吊锚索（杆）水泥砂浆体基本上达到设计强度之后，再对危岩体水平裂隙灌注高强度水泥树脂浆液，使危岩体与上部稳定岩体黏结为一个整体；对竖直裂隙则灌高强度膨胀水泥砂浆，使危岩体相互挤紧，增强洞窟自然拱的整体性和支撑能力。锚索在稳定岩体中的有效锚固深度一般为 6~8 米；锚杆在稳定岩体中的有效锚固深度为 2~4 米。

部分厚顶大型石窟窟顶局部岩体经过长期风化、剥蚀、卸荷、地震作用和存在层间软弱层，强度低，整体稳定性差，仅靠锚索（杆）加固已不能完全保证其稳定和安全，因此可在此处窟顶下方设置支撑窟顶的轻型型钢混凝土支撑梁，型钢混凝土支撑梁拱脚及中部左右各设置数根向上或斜向上的上吊锚索（杆）与支撑梁相连接，通过把锚索（杆）锚固在稳定岩体中，从而使梁体在深部稳定岩体中牢牢生根，使之和窟顶岩石成为一个整体，使原先此处窟顶岩石的自重荷载由型钢混凝土支撑梁来承担一部分，增强了原岩的支撑力。按 C30 混凝土配合比灌注混凝土制成型钢混凝土支撑梁。支撑拱施工完毕后进行复旧处理，使之与窟顶浑然一体，以符合文物加固修缮“修旧如旧，保持石窟原貌”的原则。

### （三）部分大型石窟窟顶岩层因受水的影响而发生层状剥落的治理措施

部分大型石窟净空巨大，窟顶岩体裂隙发育，大气降水沿裂隙下渗，使窟顶严重受潮，窟内湿度较大，窟顶岩层发生层状剥落和坍塌，并危及窟内文物安全，如不及时抢救治理，病害将进一步发展，可能造成窟顶穿通、文物严重受损。对于此类石窟可采取下列治理措施：

#### （1）改善窟内通风条件

这类特大型石窟一般情况下在营造之初就在门楣上方开凿有通风窗口，首先对原有的通风窗口进行重新清理疏通，如果原有的通风窗口已被封闭，则重新打开以改善窟内的通风条件，通风窗口的重新打开，对降低窟内空气湿度的效果将十分明显；没有通风窗口的或虽有侧向通风口但通风效果不良的，可考虑在顶部打通风孔。窟门应做成通风的栅栏。

#### （2）崖顶表面防水处理

根据特大型石窟崖面裂缝的具体情况，用不同浆液进行裂缝灌浆，防止雨水继续沿裂缝下渗。对裂隙宽度超过 2 厘米的宽大裂隙，可采用防水材料进行充填封闭；对裂隙宽度小于 2 厘米的裂隙，可采用微膨胀灌浆材料进行充填封闭。充填封闭结束后应对其表面进行复旧处理。

对部分砂砾岩特大型石窟崖顶可有针对性地进行换填，采用三合土覆盖崖顶表面，做好有组织排水，这样既可以保持岩体的自然透气性，同时仍具有一

定的防水性。

但是需特别强调的一点是：大型石窟崖顶的表面换填不宜采取混凝土铺盖和直接在崖顶地表覆盖层敷设隔水层（防渗土工布或防水片材等）的封闭防水措施。因为该措施虽然可阻止雨水的继续下渗，并使整个崖顶表面趋于平整，但其致命的缺点是严重妨碍了岩体内水分的自然蒸发，一旦地表水进入覆盖层下，极易产生顶板效应，最终导致洞窟潮湿加剧。

### （3）在石窟内顶部做钢筋网架、崖顶做横梁的措施加固窟顶

当窟顶上方岩面比较平坦，可设横梁时，可采用该种措施。具体治理措施是在窟内顶选取两个最佳受力点（即锚拉点），以这两点为基点自崖顶向窟内垂直钻孔，孔径为10~30厘米，崖顶以这两个孔道为中心分别向两端延伸，在崖顶开槽浇铸横梁，使梁的两端支撑在较厚的岩体上，横梁分别以数根螺纹钢垂直下穿至窟内与钢筋网架相连接，托住窟顶。

## 7.1.3 石窟寺及石刻水害治理技术

由于地下水的出露和大气降水等原因，会导致窟内和崖面出现水害。水与岩石在相互作用的过程中，存在物理、化学、力学的复杂作用，使岩石出现不同形式和不同程度的劣化。物理作用

物理作用主要指在干湿或冻融等潮湿环境下，岩石出现泥化、软化或者软弱面润滑的现象。水岩的化学作用主要破坏岩体内的物质成分，并伴随新的矿物产生，研究表明岩体的化学风化主要伴随硅酸盐矿物的水解进行，生成伊蒙混层和高岭石矿物，高岭石矿物进一步发生水化反应生成伊利石和绿泥石。水对岩体力学性质的影响主要为孔隙水压力和超孔隙水压力作用，其中应力场和渗流场的复合作用被广泛关注。

水害治理应遵循不改变文物原状、最小干预的原则。目前主要采用疏排为主、截堵为辅、多措并举的技术指导思想。尤其是针对基岩裂隙水的治理，由于水的运移途径及分布状态是千变万化的，必须在详细而准确地查清地下水的类型、补给来源、运移途径及分布状况的基础上，才能有针对性地确定治理方案，达到投资小、见效快、事半功倍的成效，否则治理工程极易失败。水患治理工程应采取动态设计、信息化施工，根据施工中的具体情况及时对设计进行

补充和调整，以确保工程效果。

### 7.1.3.1 基岩裂隙水的治理措施

基岩裂隙水沿裂隙及构造破碎带赋存并向临空面运移，对危岩体产生静水压力；同时湿润岩体，产生水汽遇冷形成凝结水；当水位较浅时，还产生毛细水危害。渗水点浸泡软化崖面岩体，加剧了岩体的冲蚀、风化和冻融破坏作用，是岩体失稳的重要原因之一，部分渗水直接流入洞窟，威胁文物安全。针对其特点，可采取以排、截、疏导为主，封堵为辅的综合治理措施（图 7-9），其治理原则是截断基岩裂隙水的补给来源、打通地下水的排泄通道，以排除地下水。具体的治理技术措施有以下几种：

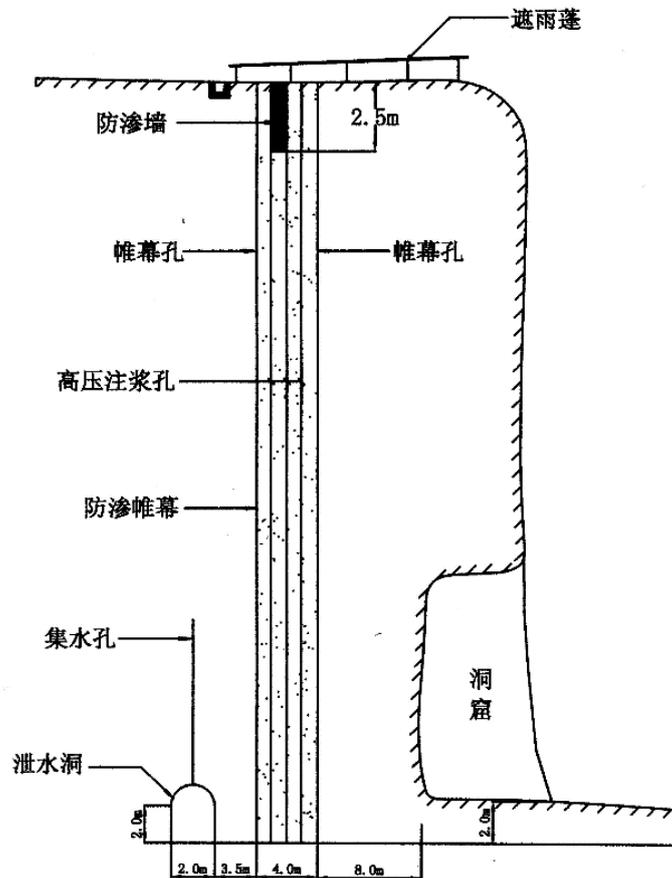


图 7-9 防渗帷幕、泄水洞、集水孔等综合排水

#### (一) 平孔排水

石窟所在的砂岩、砂砾岩、砾岩岩体中，往往夹有隔水效果相对较好的泥岩和页岩等软弱夹层（如炳灵寺石窟区砂岩在高程 1777 米左右夹有一层厚约 6~30 厘米的粉砂质泥岩；云冈石窟区砂岩中夹有薄层砂质页岩），由于夹层岩性软弱，在地质构造运动中不易折断，往往形成窟区的隔水地层，大气降水和

基岩裂隙水沿其上覆岩体的裂隙及断裂下渗至该层后，不能继续向下移动，只有沿水平方向向临空面渗流，沿此层多处形成渗水点。因此，在此位置设置水平排水孔改变地下水的运移途径，可将地下水引离崖面和石窟。该措施在已有的石窟治水工程中，效果比较明显。

排水孔应先于其他分项工程实施，排水孔的位置和长度应视现场具体情况而定，要求测量定位准确，其长度 5~40 米不等；其仰斜角度视软弱夹层（隔水地层）具体情况而定，一般应平行设置于软弱夹层（隔水地层）上部 5~20 厘米处，排水孔不允许打穿隔水地层，以免使地下水渗入隔水地层下部岩层裂隙；孔内可设置高强度、耐腐蚀的 PVC 集水花管，集水花管孔径一般为 80~100 毫米；也可在一个集水点处采取一孔多向的排水孔措施，即沿 2~3 个方向分别设置 2~3 个排水孔，呈放射状，孔内设置 PVC 集水花管，然后将这 2~3 个排水花管在孔口以联结接头汇集成一处将水排出，以便最大范围地拦截地下水，增强排水效果。孔口封闭必须密实，一般以防水材料封闭孔口及原渗水点，以保证水全部从管中排出。

例如炳灵寺石窟崖面渗水主要是由大气降水通过入渗作用的补给而产生的，具有补给面大、径流时间长的特点，因此，企图通过阻止地表水的入渗而完全消除崖面渗水是不现实的，在充分考虑了造成崖面渗水的各个控制因素后选择“原地疏导，引离崖面”的治理方案，即采用一孔多向的仰斜排水孔拦截基岩裂隙水，并通过排水管将裂隙水引离崖面，这样既保证了岩体和文物不受侵蚀又不会使文物景观受到影响，工程治理效果十分明显。再如贵州青龙洞岩体加固工程中也采取了平孔排水措施，排水效果明显。

## （二）防渗帷幕

对于石窟区岩体中基岩裂隙水总量不大的情况可采用高压注浆形成防渗帷幕的治理措施。虽然这类石窟区的基岩裂隙水总量不大，但往往对石窟文物造成了严重的甚至是致命的危害。因此在保证防渗帷幕质量的同时还包括特殊的技术措施要求：

- （1）防渗帷幕靠窟侧注浆孔距石窟内壁距离一般不大于 8.0 米；
- （2）防渗帷幕的周边孔可先期灌注水泥浆形成帷幕，然后在帷幕中间高压

注浆，使浆液既不流进洞窟也不流失到远处，确保形成一道密实可靠的防渗帷幕；

(3) 主浆液必须具有良好的可灌性和抗腐蚀性，对裂隙充填物和风化裂隙面有一定的加固作用。浆液渗出物对岩体无害。目前主要采用低碱水泥浆液。

(4) 由于岩性的不同，岩石渗透系数和渗透半径各不相同，因此注浆孔间距也各不相同，主要应根据岩性及裂隙的产状和分布进行布设，一般在砂岩、砂砾岩、砾岩岩体中注浆孔间距为 80~100 厘米，在具体实施过程中根据具体情况可适当进行调整；但在穿过裂隙密集带或破碎带的部位应适当减小注浆孔间距，加密注浆孔的布置。

### (三) 泄水洞、钻孔综合排水措施

对于石窟区岩体中的基岩裂隙水也可采取泄水洞、钻孔综合排水措施（图 7-10、图 7-11），用以及时排泄地下水。

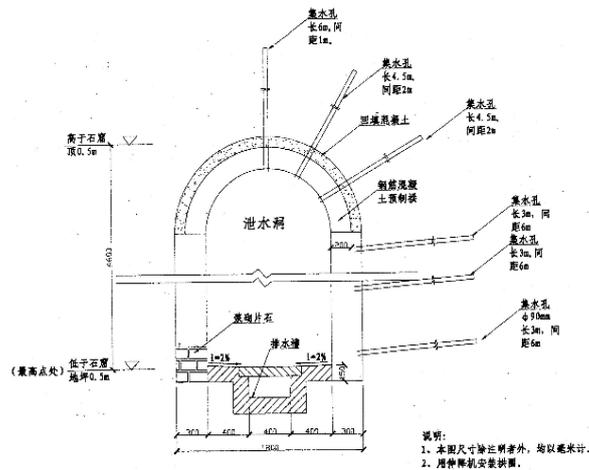


图 7-10 泄水洞、集水孔结构示意图

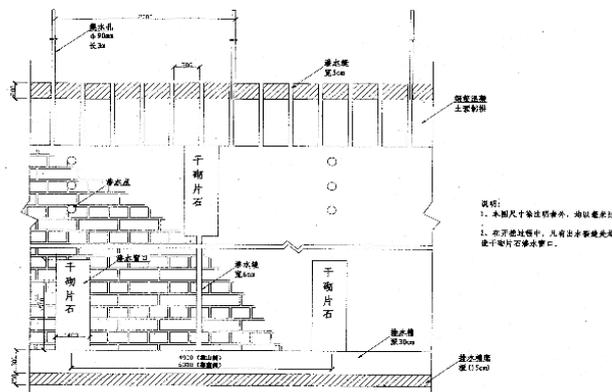


图 7-11 泄水洞纵断面图

不管是垂直崖面的构造裂隙，还是平行于崖面的卸荷裂隙，都是越靠近崖

面下延深度越大。所以在确定泄水洞洞身位置时，应视裂隙延伸情况、窟壁潮湿部位及渗水点标高而定，洞身必须置于含水裂隙部位。

为防止由于开挖泄水洞引起石窟载体的应力调整，对石窟的稳定性造成不利影响，应首先进行稳定性分析计算。泄水洞的截面积不宜过大，但同时也应考虑施工条件的问题，一般断面为2米×2.5米（开挖断面）。为防止泄水洞岩体风化，引起泄水洞的坍塌，对泄水洞内衬砌0.3米厚的浆砌片石，并预留渗水缝、泄水孔，设置反滤层。施工过程中对所有渗水点、裂隙处均干砌片石作为渗水窗口；上部拱形部分安装混凝土预制拱，相临拱圈之间预留渗水缝，宽度4~5厘米。

沿泄水洞轴线方向在拱顶部位向上垂直、斜向打排水钻孔，以增加截排水效果。垂直、斜向排水钻孔长度视石窟所在崖体高度和裂隙分布情况而定，其目的是截断地下水向石窟方向的运移途径并将地下水汇集到泄水洞内排出。

泄水洞和排水钻孔既是排水设施，同时也是一道截断地下水的设施，可通过检查井、钻孔排出石窟的基岩裂隙水，条件适宜亦可直接排出。

### 7.1.3.2 毛细水治理措施

部分石窟窟区由于地下水水位较浅，其地下水水位埋深高度小于窟区毛细水强烈上升高度。毛细水的上升，使岩体湿度增大，特别是地下水在运移上升过程中，将岩体中的可溶盐如硫酸钠等带到岩体和文物表层，盐分运移及晶体膨胀和收缩对石窟文物造成较大破坏。

毛细水的治理原则是降低地下水位、使地下水水位埋深深度大于窟区毛细水强烈上升高度。盲沟是降低地下水水位、防止毛细水上升的有效措施，排水效果好，施工方便，使用寿命长。盲沟可先于其他治理工程实施，其作用不限于降低窟区地下水水位，将地下水水位降到低于毛细水强烈上升高度，减小岩体湿度，减缓风化作用，而且由于有了盲沟排水系统，地下水排泄通畅，地下水通过上部裂隙的时间大大缩短，渗漏少、岩体吸收少，降低了岩体和窟内的湿度，减少了岩体和窟内的凝结水。

具体的治理技术措施一般为窟前设置排水盲沟（图7-12）。排水盲沟的位置距崖壁一般为4~6米，距离不宜过大，否则会影响降水效果；排水盲沟的深

度视窟区地下水水位标高和毛细水强烈上升高度而定，应大于窟区毛细水强烈上升高度 0.5~1 米，宽度 1.6 米；盲沟侧壁上部用干砌片石砌筑，下部以浆砌片石砌筑或混凝土预制块，预留渗水孔和渗水缝，主壁外设反滤层；底部设排水槽，表层铺设土工布并以砂浆抹底，沟底排水纵坡为 1%；盖板也应预留渗水孔，排水盲沟中间可设置数个检查井和集水井，具体数量视排水盲沟长度而定，一般 25~40 米设置一处检查井，在盲沟转折处应设检查井，集水井设置在窟区最易排水处，集水井直径一般为 1.5~2 米，内壁以干砌片石砌筑，外设反滤层。

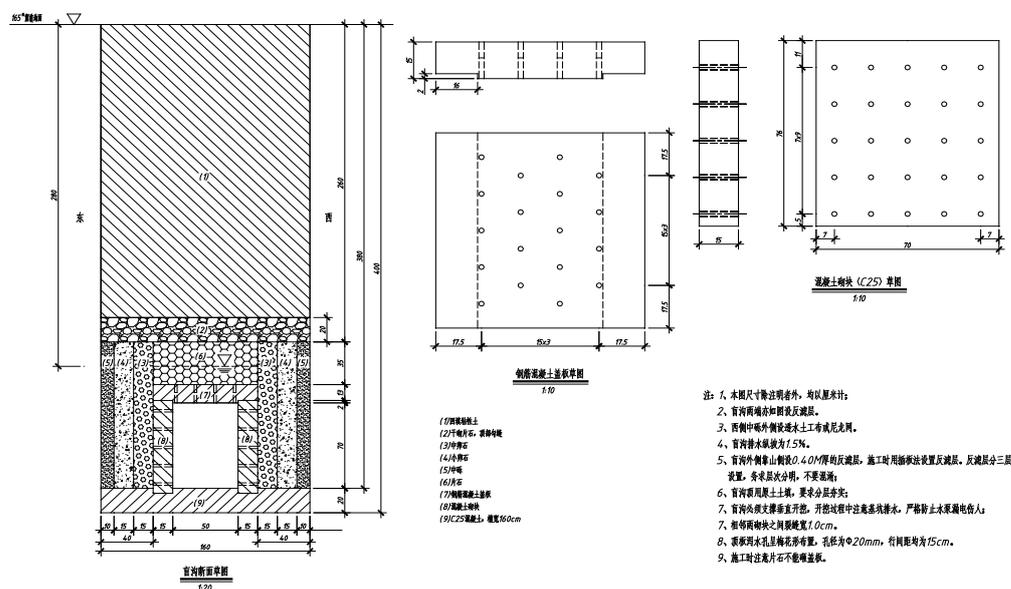


图 7-12 盲沟结构图

### 7.1.3.3 地表水（大气降水）治理措施

地下水的补给来源之一是大气降水的下渗，所以截断地下水的补给来源、加强窟顶地表水排水系统，采取隔水措施防止地表水下渗是防水保护工程的重要措施之一，可收到事半功倍、立竿见影的效果。其对于防渗帷幕、泄水洞、水平排水孔等工程措施也具有重要的辅助作用。但防止地表水下渗的隔断措施却不宜在窟区全范围内实施，一是在大范围内全部隔断防渗，耗资巨大；二是窟区内一般会有多处自然沟切割及洼地，工程实施有相当的技术困难，成功的把握性不大；三是全部隔断可能引起窟区生态环境的变化。因此，隔断工程措施只能在小范围内实施，突出重点，精心设计，精心施工，达到有效保护石窟和文物的目的。

防止地表水下渗的具体措施有以下几种。

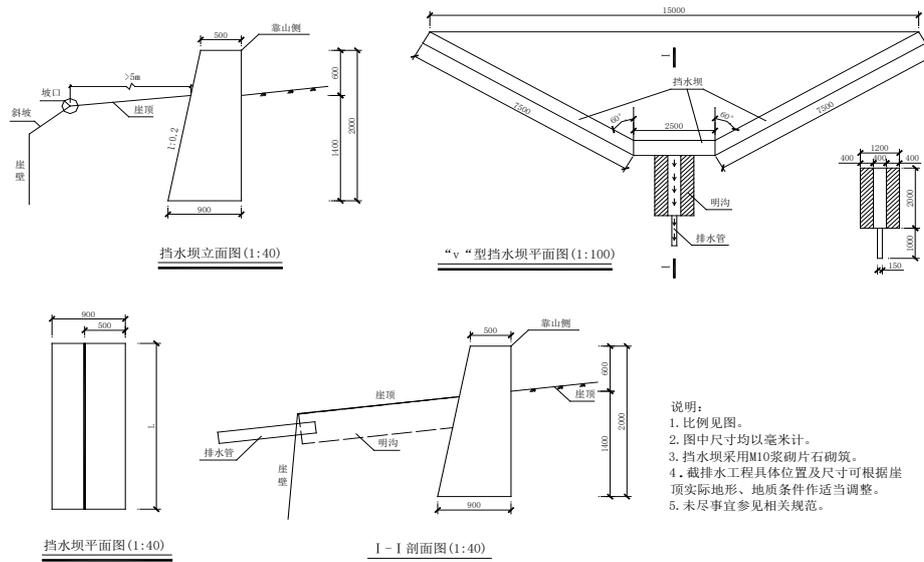


图 7-13 截排水沟和挡水坝工程结构示意图

(1) 崖顶设置截排水沟（管）和挡水坝（图 7-13）。

根据窟区崖顶的具体地形和地层情况，工程措施共分为两类：

第一类：在汇水面积较大的斜坡坡口附近设置挡水坝，坝体高度一般不超过 2 米，露出地面 0.5~1 米，地下埋深 1.5~1 米，坝长根据现场具体情况而定。

第二类：对汇水面积较小，坡面无明显沟槽但崖壁受冲刷严重的部位，采用“V”字形挡水坝和排水沟（管）相结合的方法对地表水进行截排疏导、引离崖面。

截排水沟和挡水坝结构可采用钢筋混凝土和浆砌片石等组成，实施视具体情况而定。

(2) 崖顶敷设隔水层

开挖崖顶地表覆盖层，在 1.5~2 米冻结深度以下敷设隔水层，如防渗土工布或防水片材等。该措施的优点是可恢复坡面自然形态，可在渗水严重的小范围实施；缺点是施工过程中严重扰动原覆盖层，而且一旦局部损坏不易及时发现和维修，地表水如进入覆盖层下则难以蒸发，产生顶板效应，最终导致洞窟潮湿。

(3) 崖顶设置架空遮雨篷

可采取在崖顶设置架空遮雨篷，高出地面 1.0 米左右，以创造良好的通风

条件。该措施的优点在于不扰动地表覆盖层，工程设施便于维护。根据地形变化遮雨篷设置为若干单元，雨水经遮雨篷遮挡后流入侧面地表排水沟排出区外。为了不影响窟顶景观，可沿临空面陡坡边缘用原岩砌筑一道矮墙，并进行复旧处理使之与崖面外观保持一致。

但采取此措施时应注意防风，大风区不宜采取此措施。

#### (4) 崖顶表面平整

以填高地表洼地为主，将地面略加整平，然后将防水片材直接敷设在地表，并与地表排水沟连接。该措施的缺点是施工过程中严重扰动原覆盖层，但优点是施工简便，造价较低且便于维修。

#### (5) 冲沟整治及充填封闭崖顶裂隙

对于规模较大的冲沟选择持力层较好的区域进行岩块砌补，然后进行汇水区和排水通道整治，形成一定坡度利于排水，施工过程中禁止砌补过量、确保环境协调一致。

部分石窟窟区岩体裂隙十分发育，裂隙是大气降水向岩体深部渗入的通道，渗水使岩体的潮湿程度增大，加速风化。因此对崖顶裂隙应进行充填封闭。

## 7.2 石窟寺及石刻本体修复技术

### 7.2.1 石窟寺及石刻表面修复材料通用要求

#### 1. 修复材料的通用要求

《中国文物古迹保护准则》第 22 条指出：“按照保护要求使用保护技术。独特的传统工艺技术必须保留。所有的新材料和新工艺都必须经过前期试验和研究，证明是最有效的，对文物古迹是无害的，才可使用。”关于《中国文物古迹保护准则》若干重要问题的阐述第 11.2.2 中也指出：“所有的保护补强材料和施工方法，都必须先在实验室进行试验，取得可行的成果后，才允许在被保护的实物上作局部的中间试验……得到完全可靠的效果以后，才允许大范围使用。”这也是文物保护中保护修复材料与工艺筛选研究应该遵循的基本原则。

石刻表面修复材料的需要满足以下基本原则和通用要求：

(1) 适用性原则。在满足保护文物性能及工艺条件要求的前提下，所选的

材料对文物体系包含信息的干扰尽可能小;对人身健康和文物安全无不良影响;在保护处理需要同时使用几种材料时,要充分地考虑材料之间的匹配性。

(2)良好的耐久性。文物的保存是一个长期的过程,对同一裂隙的保护处理不可能是经常性的,这就要求在文物保护工作中选用的材料具有良好的耐久性,在外界因素的影响下,能延缓文物的破坏,延长其保存寿命。

(3)良好的化学性能。引入到文物材料体系中的修复材料,既要满足保护处理所需的化学活性,还要具有不与文物原材料发生不必要的化学反应的化学稳定性。

(4)可再处理性原则。随着文物保存时间的延长和科学技术的发展,不断会有新技术和新材料的出现,裂隙也会出现再次修复保护的可能。从长远的观点来考虑,裂隙修复材料应具有良好的可再处理性,给将来的保护处理留下足够的空间。

(5)环境友好原则。环境友好是指在材料的整个寿命周期中,同时具有满意的使用性能和优良的环境协调性,或者能够改善环境。

(6)其他原则。对材料的色泽和毒性也应予以重视,还要考虑施工方便、价格便宜等。

## 2.修复材料的基本分类

修复材料是石窟寺及石刻保护的核心问题之一。按照材料组分,常用的石刻表面裂隙的修复材料可分为有机材料、无机材料和复合材料三类。无机材料性能良好,与石材有很好的相容性,主要包括钙、钡体系和水玻璃体系等,常用的无机材料有:石灰水、氢氧化钡、碱土硅酸盐及氟硅酸盐等;有机材料中一类是小分子化合物,如硅酸酯、硅氧烷等,另一类是聚合物,它在石质文物和古建筑的加固、封护中应用极其普遍,主要有:环氧树脂、丙烯酸树脂和有机硅树脂。复合材料包括天然材料、有机高分子树脂、活性单体等。

### 7.2.2 石窟寺及石刻表面裂隙修复技术

裂隙修复技术是延缓文物劣化的重要手段之一。石雕及石刻表面裂隙修复技术主要包括裂隙勾缝、裂隙注浆、粘接修复等,旨在石窟寺和石刻文物裂隙中形成一种新的、抗风化的胶结物,同时不形成任何破坏岩石的含盐副产物,

不会引起表面颜色的变化，达到裂隙修复和文物长期保存的目的。

### 7.2.2.1 裂隙灌浆材料及其专用要求

#### 1. 灌浆材料的基本要求

主要用在石刻裂隙的充填、粘接，防止水分进入时刻内部，对灌浆材料的基本要求是：

(1) 具有高流动性（黏度低）和良好的扩散性，室温下浆液能有效、快速流入和填充到被灌体的裂隙去；

(2) 具有一定的塑性膨胀性能，能够有效克服浇筑初期产生的塑性沉降，保持均匀分散悬浮状态，保证灌注密实，杜绝空鼓现象；

(3) 硬化快、早期强度高，具备一定的填充、承载、支撑能力；

(4) 浆液黏度、凝结时间、粘接强度可调，作为补强固结材料具有一定的伸缩性；

(5) 由浆液形成的结石应具有一定的粘接强度、力学强度和与被灌体相适应的弹性模量，能够确保灌浆的质量和效果；

(6) 易溶盐含量小于 3‰，材料的盐致劣化程度低；

(7) 符合耐水性、耐酸碱性等要求。

#### 2. 常用灌浆材料的选择

对于石刻表面裂隙切割病害修复材料的筛选，应当遵循保护修复程序和修复原则，尽可能使用传统材料，首选在文物保护领域已通过鉴定或推广使用的材料。考虑到石刻表层温湿度的剧烈变化，灌浆修复材料面临耐候性的严重考验，因此，对于表层裂隙（深度低于 2 厘米）应优先选择耐候性强的无机材料。工程实施前，应进行材料的可灌性、耐候性等试验。

(1) 改性环氧树脂。它是含有环氧基团的高分子材料。其黏度低（ $20 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，以下），微裂隙也能灌入，同时增加了韧性，可灌时间掌握在 3.5 h，并能在常温下操作。其配比要根据岩石性质和裂隙宽度来确定。施工中应注意控制注浆量，控制不当会发生爆聚。

对潮湿的细微裂缝，改性环氧树脂仍具有很好的可灌性和黏结力（黏结抗拉强度可达 3MPa）。材料在常温下的黏度为  $60 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ，但仍能灌入细微裂缝。

环氧树脂的耐老化性较差，不太适合表层加固，特别是直接裸露于自然环境。

(2) 中国传统水硬性石灰。作为传统的硅酸盐建筑材料，水硬性石灰最早应用于 5000 年前仰韶文化时期的甘肃秦安大地湾遗址，在我国应用十分广泛，如料礓石、阿嘎土、蛎灰、糯米灰浆、捶灰等。水硬性石灰兼有石灰与水泥的特性，收缩性低、耐盐碱，抗折、抗压强度适中并可调，与文物兼容性好，且其生产过程中无任何外来添加物，水溶盐含量很低，近年来在岩土文物保护中得到应用和推广。

(3) 国外水硬性石灰。作为传统的硅酸盐建筑材料，欧美国家自 20 世纪 70 年代就开始将水硬性石灰广泛应用于历史建筑物的修复中。目前，欧洲、美洲、澳洲，几乎所有砖石历史建筑的修缮，均采用水硬性钙质凝结材料为基料的修复材料，或采用添加有活性水硬性组分的石灰配方优化材料。以国外应用较为广泛的 NHL2、NHL3.5 和 NHL5 号水硬性石灰为例于我国传统材料进行比较，两者具有相似的活性水硬性组分和实际表现。

(4) PS 系列灌浆材料。其特点是：固结体都是硅酸盐类无机物，接近岩石的主要成分，耐老化、有较高的固结强度、黏度小、渗透好、可灌性强，浆液中不含有重金属等有害物质，价格比有机类浆材便宜。它是以高模数 (3.8~4.2) 的硅酸钾 ( $2K_2O \cdot SiO_2$ ) 为主剂，氟硅酸镁 ( $MgSiF_6$ ) 为固化剂，再加交联剂以提高浆液的稳定性，减水剂 (表面活性剂) 以提高浆液的渗透能力。通过一定的配比，并用水稀释而形成的一种无色透明液体，制作工艺简便。PS 浆液渗透到岩石裂隙中，能与泥质的胶结物和风化产物起作用，形成难溶的硅酸盐，它先形成凝胶，然后逐渐形成强度较高的，耐水的管状、纤维状的无机复合体。这种浆材的耐水性、稳定性和固结强度有明显的优势。但它对施工工艺要求较高，浆液的浓度配比、灌浆量、时间都要严格控制。要求在干燥环境下施工，固化时间也较长。因此在潮湿多雨，岩体湿度大、岩石致密的情况下不宜使用。

#### 7.2.2.2 裂隙灌浆修复工艺及实施要点

石窟寺及石刻发育的裂隙特征和规模差异很大，同一文物往往发育多种成因、不同发育程度的裂隙，裂隙的长度、张开度、粗糙度、起伏度、充填情况

复杂，修复工艺也随之调整，不同成因的裂隙对修复材料的要求不同。一般来讲，裂隙修复的主要工艺和实施要点包括：

#### ①支护

根据裂隙发育情况，制作大小不等的壁板，用固定在工作架上的可调丝杆支顶到石刻表面上，支顶前从裂缝处清理破碎的碎石、覆土、枯草等杂物。壁板要有柔软的线毯和棉纸做垫层。在加固治理措施实施前，首先对灌浆裂隙以外的文物本体采用遮蔽方式进行防护，确保灌浆不会对文物本体产生影响的情况下再进行施工。

#### ②裂缝封闭

首先向裂隙内喷洒少量清水，简单清洗裂隙内壁，使浆液能与岩石表层充分黏结；然后采用修复材料实施封闭裂缝防止漏浆。

#### ③埋设注浆管

在封闭裂隙过程中埋设注浆管，注浆管和间距视裂隙张开度和深度而定。

#### ④钻灌浆孔或预留观察孔

在裂隙上部预留观察孔；对于裂隙张开度较小无法插入注浆管的小裂隙，可在裂隙旁边次要部位或无雕刻纹饰的地方，钻小孔作为灌浆孔。

#### ⑤灌浆

按照由下而上依次将裂隙修复材料浆液灌入裂隙，在灌浆过程中要注意观察，以免漏浆污染。一般情况下，采用人工静压注射的方式灌浆，对于灌浆量较大的裂隙，要分多次操作，待下面的浆液凝结干燥后，拔出注浆管，进行上面的灌浆。

#### ⑥灌浆效果检查

在有条件的情况下，可采用内窥镜检查浆液的流向和黏结效果。

#### ⑦修复锚固孔

待浆液完全干燥后，拆除壁板并对遗留在表面的灌浆材料进行清洗，填补观察孔，干燥后补色作旧。对于现有勾缝材料仍然保存良好且具有完好功能的部分应保留，只在表面涂刷薄层灰浆来使整体色彩更加协调。

以上裂隙修复工艺和实施要点仅为主要工艺，针对不同的裂隙修复要求，

相应的工艺可根据需要进行调整。

### 7.2.3 石窟寺及石刻表面空鼓病害治理修复技术

空鼓是指石材表层一定厚度的片板状体发生隆起变形，在片板状体后形成空腔且未完全脱离的现象，状态较脆弱，易剥落。对石刻空鼓的修复加固，一般采用灌浆-修复加固一回贴的方法，必要时增加临时性锚固。通过增强片板状体与原岩的连接的方式，达到加固效果。

#### 7.2.3.1 空鼓修复材料及其专用要求

##### 1.空鼓修复材料要求

空鼓修复的核心是材料的充填、固化粘接，以及加固后材料的长期耐老化性，空鼓修复材料专用要求应包括：

(1) 修复材料的黏度较低，有良好的渗透性和可灌性，浆液能有效填充到整个空腔；

(2) 与岩石具有相近的物理特性。需填充的空腔基本与石刻表面平行，修复材料不应阻断岩石内部的水气运移，应具有相近的孔隙率，以保证岩石的透水、透气性。

(3) 修复材料抗老化性能良好，与石刻材质相比，机械强度相近，热湿膨胀系数相近；

(4) 修复料老化后不能对文物产生新的破坏；

(5) 修复材料与石材之间应有较好的黏结力和附着力。

##### 2.空鼓修复常用修复材料

(1) 石刻空鼓粘接材料，传统方法曾使用过动物胶（如鱼鳔胶、猪血、兽皮胶、虫胶），植物胶（如树胶、树脂）和矿物胶（如沥青、石蜡）等。但这些材料对小型石质文物或构件仅能起临时加固作用，对比较大的构件或文物不适用。

(2) 结构性加固粘接，目前多数是用有机材料，比如改性环氧树脂、丙烯酸乳剂和硅树脂的合剂等，其粘接强度高，但耐紫外线的能力较差，不适合加固裸露在外界的石刻。

(3) 超细水泥作为黏结剂，具有一定的黏结力、价廉和易于操作的特点。

但水泥释放出水溶性盐（磺酸钠、碳酸钾及硫酸盐），对文物有害，因而一般不在石质文物上使用。

（4）水硬性石灰作为传统的硅酸盐建筑材料，以其收缩性低、耐盐碱，抗折、抗压强度适中并可调，与文物兼容性好，水溶盐含量低等优势，在露天和高湿度环境下也表现出较强的适应性和良好的修复效果，正推广应用。但在微裂隙的可灌性方面还需进一步研究。

### 7.2.3.2 空鼓修复工艺及实施要点

#### 1.具体施工工艺

（1）除尘。先用软毛刷轻轻刷除表面浮沉，然后采用洗耳球对空鼓内部风化层、风化产物进行反复清理，或可用纯净水进行流水清洗；必要时可采用内窥镜对空腔的状况进行探视，若空腔内有较大的碎石、地仗碎块或较多的砂土，设法取出。这一过程比较危险，要十分谨慎。需要进行支顶防护。风化特别严重部位建议进行预加固。

（2）开设注浆孔。对于小型空鼓，从片板状体边缘插入注浆管，无须开孔。对于面积较大的空鼓部位，需开设部分注浆孔。用特制工具在空鼓区域已破损或无重要文物信息处开设直径 0.5~1 厘米的小孔；在同一壁面上，注浆孔的分布应呈不规则三角形，一方面可实现顺利灌浆，另一方面，保证片板状体与石刻本体黏结牢固，提高整体稳定性。

（3）埋设注浆管。将注浆管从注浆孔插入空隙中，注浆管可根据空鼓部位的情况调整。

（4）勾缝。根据石质文物赋存环境特点以及石质文物本体岩性特点，选用合适的勾缝材料，调配合适的水灰比进行边缘封堵，防止漏浆造成的二次污染。

（5）灌浆。用不同规格的注射器由下而上，将浆液顺注浆管压入表面空鼓部位，同时适时调整壁板支顶的力度。

（6）支顶。用带有保护层的棉纸和吸水脱盐材料及黏土垫的透气性顶板，对片板状体进行支顶保护和脱盐。视空鼓部位干燥程度应多次更换吸水脱盐垫。对于极为脆弱或已达稳定状态、难以归安的空鼓，以文物安全为主，不硬性复位。

(7) 修补注浆孔。待灌浆区域干燥后, 去除壁板, 用和石质文物性能相近、兼容的材料, 填补灌浆孔。

## 2. 实施要点

(1) 支顶防护。支顶防护是空鼓灌浆技术的重要环节, 是指通过固定在脚手架上的可调丝杠, 将垫上毛毯或其他软性物料的壁板支撑在预灌浆空鼓的表面。支顶有两个目的。一是支撑保护。防止在灌浆过程中因片板状体潮湿或在灌浆时受到外力作用导致脱落受损, 起到临时支撑防护作用。此阶段支顶力不宜过大, 若压力过大, 片板状体很容易被压碎、脱落, 特别是大、薄、硬而脆的片板状体更要小心谨慎。二是整形复位。灌浆后, 由于浆液中的部分水分渗入空腔, 片板状体有一定塑性, 通过上紧丝杆适度加力, 使空鼓变形在外力作用下恢复原位, 起到整形作用。随着片板状体恢复原位, 实现浆液与石刻的充分接触, 发挥浆液的粘接作用。支顶时间即移去壁板的时间视浆液结石体的强度而定。

(2) 结合灌浆的锚固补强。对于小型空鼓 (边长 $\leq 15$  厘米), 灌浆一般能够解决片板状体与母岩间黏结力丧失的问题, 不需要进行锚固补强; 对于面积较大的空鼓 (边长 $\geq 15$  厘米), 会出现常压灌浆效果差的状况, 可根据实际情况增加必要的锚固补强措施。锚孔原则上要尽量选择在注浆孔上, 可减少对石刻的损坏。

(3) 灌浆效果的评价。一般而言, 对灌浆效果的评价要从材料、工艺、灌浆的密实度等几个方面进行考虑。由于空腔内石材风化产物复杂, 有的石材多层片状风化并充填颗粒, 有的富集微生物代谢产物, 在不揭取片板状体的前提下, 难以清理通畅, 灌浆到位, 不应苛求灌浆达到完全密实。灌浆效果一般需要借助仪器, 比如高频探地雷达、红外热像仪、超声波仪等进行无损检测评价。

### 7.2.4 石刻表面残损修复技术

#### 7.2.4.1 石刻表面残损修复的基本要求

(1) 保持文物的历史真实性和艺术性

在修复文物前, 应充分了解历史信息, 查找设计和维修的资料, 去伪存真、去粗取精, 以获得准确的信息。最好有同时期、同类型的实物遗存做参考, 要

综合考虑文物的历史、美学和科技特征。修复应体现文物的原貌或应有价值，但不能凭主观意识去臆造或创造。

#### (2) 最小干预

以维持现状为主，避免过多干预，注重修复加固，减少补全补色。文物近期没有危险应尽量减少干预，必须干预时，只对危险部分进行。因此一般较完整、老化变质不明显的文物，应重点控制或改善其保存环境，以利于保存其现状和价值信息。当缺损造成结构失稳，单纯的支护无法协调外观，这种情况可以进行较大干预，在力学上满足稳定性要求，在细节上淡化视觉反差，强调完整感。

#### (3) 可识别性

遵循可识别原则，修复部分的色彩、质感应与文物表面略有区别，要根据文物表面的平整程度、粗糙程度、光洁程度修复，要与石材接近，不能形成大的反差。依据邻近原始部分的表面起伏塑形，使整体的表面纹饰连续平滑。修复表面应略低于原始的表面，不能凸出。

#### (4) 可再处理性

修复过程中附加在石刻上的各种材料，都应具有可逆性。应确保修复材料的可再处理性，对后期再处理预留充足空间。

### 7.2.4.2 常用修复材料及要求

#### 1. 缺损修复材料的基本要求

(1) 补全材料能够满足石质文物的稳定条件，并且具有相对的稳定性和耐久性，对原始材料无损害。

(2) 补全的材料应具有可逆性，或用可逆的方式来再处理。可以作为牺牲层，二次破坏应该发生在补全材料上，以此来保护原始材料。

(3) 较强的可塑性，完全固化前有足够的时间进行修形、补形；完全固化成型后，可进行二次处理，新旧材料仍有较好的粘接性能。

#### (4) 安全耐久性

补全修复使用的材料要求具有相当的惰性，在使用环境中能保持较久的时间；而且修复的材料必须是可逆的、兼容的产品，即补全材料同原材料的病变过

程要相适应，原来的材料与补全所用的材料在物理、化学等性能上必须是相接近的，不能由于补全材料与原材料在某种性能上的差异而改变和破坏石质文物的原材料，不能对石质文物造成新的破坏。一件石质文物补全后，是否能真正做到延缓其劣化病变的过程，是否真正达到残缺补全的目的，材料的兼容性起着非常重要的作用。

## 2.常用缺损修复材料

通常根据文物自身的条件选择适用的缺损修复材料。应在积极沿用、改进传统材料基础上，尝试引入现代科技和现代新材料，但新材料的实际应用要经过系统、严格、长期的现场试验和室内测试，综合评估良好方可使用。

(1) 原石材：性能与原始部分一致，可作为大块的补砌材料，粉碎后可作为填料或灌浆骨料。补砌时，与原始部分的接触面无法直接啮合，必须借助其他软材料来填充缝隙和分散压力。对于缺失部位较大的地方，用石材补全，重量较大，需要较强的固定方式。

(2) 砖：配合灰浆用于古建筑、古遗址的修复和补全。适用于缺失体量大的石质文物补全。

(3) 石膏：使用前为粉末状，可用水调和成糊状，直接进行修复。凝固后与石材表面接触良好，有一定的啮合强度，固化后的强度较好；但凝固过程放热，与石材的兼容性不佳，孔隙率和密度与石材相差大，透气性和透水性差是这种材料的弊端。

(4) 灰浆：灰浆是常用的传统补全材料。粉状石灰用水调和后成为有可塑性的灰浆，操作性强，凝固过程中放热低，凝固后与石材附着良好，强度适宜，透气性透水性好，与石材兼容性好，耐久性良好。灰浆中可调入不同的大理石粉调节颜色，也可以添加其他的纤维、有机或无机的材料来改善使用性能。

(5) 传统水硬性石灰材料：料礓石、阿嘎土、蛎灰、糯米灰浆、捶灰是我国长期、广泛使用的建筑材料及修复材料，水硬性石灰兼有石灰与水泥的特性，收缩性低、耐盐碱，抗折、抗压强度适中并可调，与文物兼容性好，且其生产过程中无任何外来添加物，水溶盐含量很低。相对于其他材料，水硬性石灰尤其适用于露天保存的文物修复。随着固化机理研究和改性材料的研发，水硬性

石灰材料的种类更丰富、工艺更完善，逐渐形成完整的修复体系。

(6) 现代材料：环氧树脂胶泥、玻璃钢等新型材料可以填平石材表面的裂纹、空隙，凝固时几乎不收缩，粘接性能良好。使用时可以直接修补缺，或预先灌注成型，缺点是露天条件下的耐老化性能不足，强度过高，易变色或脱落。

对于补色材料，一般采用无机材料，即矿物颜料，性能比较稳定，不易褪色。修复时，优先选择颜色相近材料，或在修复材料中直接掺加矿物颜料，尽量达到与原文物的颜色相近、整体协调的效果。

#### 7.2.4.3 残损修复工艺及实施要点

##### 表面残损修复主要施工工艺

(1) 表面清洗。文物本体污染物种类较多，清洗可选用物理、化学和机械方法，先对其表面灰尘、泥土用刷子、竹签、棉花等工具进行预清扫；对于表面沉积、水泥修补、人为污染、黑色结壳等顽固性污染物，应通过现场试验对比，筛选出适合的清洗技术后再施工，比如高压蒸汽清洗、激光清洗等。

(2) 脱盐。可溶盐主要采用吸附法脱除。吸附物质可采用纤维纸、纸浆、脱脂棉等，用水作为溶剂，使水渗入岩石微孔而溶解可溶盐类。例如将宣纸浸泡在纯净水中，完全浸湿后用搅拌机反复搅拌直到宣纸结构完全改变为糊状，放置数小时后使用。手工在需要脱盐的区域均匀覆盖一层，边覆盖边用保水海绵、毛刷等压按，确保与石材表面完全贴合，待完全干燥后取下；二是用喷壶将文物本体喷湿后，将单层宣纸或多层宣纸贴附在文物本体上，用饱水海绵或毛刷按压贴实，用棕毛刷子在宣纸上反复拍打，确保与石材表面完全贴合，完全干燥后取下。脱盐次数和效果可通过测试揭取纸浆的电导率仪确定。

(3) 表面预加固。对于粉化剥落严重区域，应用喷洒法、刷涂法或者注射器滴落法做预加固处理，预加固后做好支顶保护。

(4) 回贴。对于表面残损部位，尽可能收集残块进行标识、清洗、加固后，用修复材料粘接回贴。根据修复加固的类型，采用不同黏度，不同粒径的修复材料，以满足黏结和灌浆的不同要求。必要时，可采用不锈钢锚杆进行结构增强。

(5) 补色。补色是石刻本体表层修复的最后环节。同等条件下，应尽可能

选用与石刻表层颜色相近的修复材料，最大限度免除补色的必要性。必要时，应选择耐候性好的矿物颜料，做到“远看一致，近看有别”。

### 7.2.5 石窟寺及石刻文物修复效果评价方法

修复效果评价是通过检测、量测、试验等方法，对工程效果进行的符合性评价。主要分为即时效果评价和长期效果评价，即时效果为修复后的短期状态评价，检测周期应大于6个月，低于24个月；长期效果评价时间不低于36个月，需关注修复材料的耐候性。

#### 7.2.5.1 修复效果的感官评价方法

##### 1. 原则性评价

基于《中国文物古迹保护准则》及文物保护的相关原则，对修复材料、外观、价值体现等方面进行原则性评价。

(1) 文物古迹价值评估，保护不应降低或改变其历史价值、艺术价值、科学价值以及社会价值和文化价值。

(2) 不改变原状。是文物古迹保护的要义。它意味着真实、完整地保护文物古迹在历史过程中形成的价值及其体现这种价值的状态，有效地保护文物古迹的历史、文化环境，并通过保护延续相关的文化传统。

(3) 真实性。是指文物古迹本身的材料、工艺、设计及其环境和它所反映的历史、文化、社会等相关信息的真实性。对文物古迹的保护就是保护这些信息及其来源的真实性。与文物古迹相关的文化传统的延续同样也是对真实性的保护。

(4) 完整性。文物古迹的保护是对其价值、价值载体及其环境等体现文物古迹价值的各个要素的完整保护。文物古迹在历史演化过程中形成的包括各个时代特征、具有价值的物质遗存都应得到尊重。

(5) 最低限度干预。应当把干预限制在保证文物古迹安全的程度上。为减少对文物古迹的干预，应对文物古迹采取预防性保护。

(6) 使用恰当的保护技术。应当使用经检验有利于文物古迹长期保存的成熟技术，文物古迹原有的技术和材料应当保护。对原有科学的、利于文物古迹长期保护的传统工艺应当传承。所有新材料和工艺都必须经过前期试验，证明

切实有效，对文物古迹长期保存无害、无碍，方可使用。所有保护措施不得妨碍再次对文物古迹进行保护，在可能的情况下应当是可逆的

## 2.数字化建模技术支持

采用虚拟现实、图形图像处理等信息科学新技术，可有效实现文物数字化、文物虚拟修复，达到文物信息数字化、全方位展示和有效保护，虚拟效果和可视化模型可作为文物修复效果的评估手段。

### (1) 三维扫描检测原理

三维扫描是指集光、机、电和计算机技术于一体的高新技术，能够将实物的立体信息转换为计算机能直接处理的数字信号，且能直接与 CAD、CAM、CIMS、VR 等技术对接、开发，实现信息留存、虚拟现实或增强现实等功能。具有突出优势：非接触式、无损；数据全面、生动；精度高；速度快；直观性及现势性强；但价格较高、数据处理工作量大。**三维激光扫描技术主要用于勘察设计阶段已进行数据采集的文物。**

### (2) 工作流程

工作流程一般分为三部分：项目准备及外业、内业数据处理和实际应用。应用阶段，通过数据与模型精细对比，基于早期修复虚拟修复成果，实现实际修复效果的量化评估。

### (3) 数据采集要求

精度要求：三维数据采集的分辨率越精细越好，采样点距尽量均匀。但精细的数据量的加大，对后续的数据处理和保存等都增加了难度。因此需要根据实际情况进行选择合适分辨率大小。下面是对不同对象的采集分辨率推荐要求：

- a) 外立面、大佛像，建议采集分辨率 2~10 毫米；
- b) 中小佛像、罗汉、小佛龕、洞壁，建议采集分辨率为 0.5~2 毫米；
- c) 字刻、雕刻图案、岩画等，建议采集分辨率小于 0.5 毫米。

条件要求：与修复前三维扫描的信息采集条件（温度、湿度、光照等）、信息处理流程、设备精度等要一致，或者提升。

### (4) 主要测试指标

三维扫描的虚拟修复能够构建逼真的三维虚拟修复模型，可成为文物修复效果量化评价的有效手段，主要作用有四个方面：

- a) 基于三维激光扫描技术，可获取文物虚拟修复、实际修复的数据与模型，支持感官评估，并实现修复效果的精细、量化评估；
- b) 通过文物虚拟修复全面挖掘数据，对石窟寺及石刻本体表层的主要文物信息如造型图谱、岩画、文字等进行匹配、对比分析及精细几何数据的量取；
- c) 基于三维模型的色彩映射实现文物色彩修复评估；
- d) 基于点云数据进行石窟寺洞室、岩体、石刻的倾斜度分析，评估加固、修复效果。

### 7.2.5.2 修复效果的质量评价方法

#### 1. 色差检测技术

色差仪不能准确地测出样品的三刺激值和色品坐标，却能准确地测出两个颜色相近的样品间的色差，适用于定量测量文物修复后颜色差异，操作简便，价格便宜，具备一定的科学性。

##### (1) 色差检测原理

对于两个颜色之间差别的视觉判断，主要有两种直观的评价，即可感知性和可接受性；可感知性是指观察者能够看到颜色的差别或能够判断两个颜色样品之间色差的大小的视觉属性（表 7-3）；而可接受性则表示观察者是否可以接受被观察颜色差别的视觉判断。

表 7-3 色差的感性认识

色差 $\Delta E_{ab}$	人眼的感觉
小于 0.1	不可分辨
0.1 到 0.2	专家可分辨
0.2 到 0.4	一般人可分辨
0.4 到 0.8	一些部位严格控制的色差范围
0.8 到 1.5	常用控制色差范围
1.5 到 3.0	分开看似乎是相同颜色
大于 3.0	明显色差
大于 12	不同颜色名称

CIE Lab ( $L^*a^*b^*$ ) 色差公式是国际上公认的色差公式。色差包括明度差 ( $\Delta L^*$ )、彩度差 ( $\Delta a^*$ ) 和色相差 ( $\Delta b^*$ ) 三个方面。在与颜色感觉一致的均匀

颜色空间内，两个颜色样品之间的色差表示为其坐标点之间的距离，即

$$\Delta E_{ab}^* = [ (L1^* - L2^*)^2 + (a1^* - a2^*)^2 + (b1^* - b2^*)^2 ]^{1/2}$$

或

$$\Delta E^* = [ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 ]^{1/2}$$

式中， $L1^*$ 、 $a1^*$ 、 $b1^*$ 和 $L2^*$ 、 $a2^*$ 、 $b2^*$ 分别是两个样品的坐标值。色差公式的几何意义，是在均匀颜色空间以标准色样的坐标点为中心的一个椭球，其在 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 三个方向的半轴长分别为 $(L1^*-L2^*)$ 、 $(a1^*-a2^*)$ 和 $(b1^*-b2^*)$ 。若规定椭球内的颜色满足色差不容限的要求，则椭球外的颜色与标准色样的色差超出了色差不容限范围，便不满足色差的要求。

对于修复效果的评估，在 $\Delta E_{ab}^*$ 大于3时，应考虑文物保存环境、修复工艺、保养时间等因素综合判定。

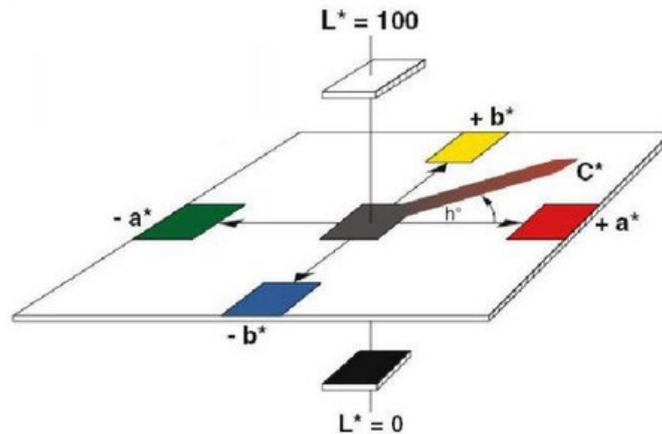


图 7-14 色空间示意图

## (2) 测试点的选择

色差测试主要有两个方面，一是文物修复前后颜色变化，二是修复后颜色的整体协调性，测试地点选择应符合下列要求：

- a) 测试点具有代表性，包括文物表层不同颜色的分布、过度；
- b) 测试点应相对平整，应避开脆弱文物分布区，以确保文物本体安全；
- c) 测量点的温度须稳定，避免温度的变化造成测量误差；
- d) 测量点应保持清洁干燥，提高测量的准确度；
- e) 一处测试点的区域宜选择在 0.4~0.5 平方米范围内，以能容纳均匀分布的测点 20 个左右为宜。

## 2.显微成像检测技术

便携式显微镜体积小，价格低，便于携带，特别适合移动检测、现场检测；图像直接显示在屏幕上，便于观察，而且可以实时拍照、录像，记录检测数据，支持数据处理、二次开发。

### （1）建议参数：

- a 放大倍率：不低于 100 倍，连续可调；
- b 传输接口：USB2.0 以上；
- c 照片和视频像素：130 万像素以上；
- d 分辨率：1280×1024 以上；
- e 测量功能：可以测量长、宽、点线距离，多边形、直径圆、半径圆、三点圆、连续线、弧度、角度、两圆心距离等。

### （2）测试指标：

- a 表观形貌：节理、裂隙、颗粒物、粗糙度等
- b 裂隙修复：修复材料的完整度、龟裂、风化等；
- c 污染物：微生物、结壳、结垢、颜料等；
- d 颜料层：完整度、起甲、龟裂、空鼓、脱落等；

## 3.表面回弹锤击技术

### （1）目的及适用范围

该测试方法适用于较致密的岩石表面，如砂岩、灰岩、花岗岩等。不适用于酥松、胶结性差、表面均一性差且表面多孔洞的岩石，如玄武岩、砾岩等。

对于强度较低的修复材料，可以采用**表面硬度计测试**。岩石的表面硬度抗压强度之间具有近似的相应关系，材料的强度越高，硬度值也就越高。在试件允许的情况下，一般选不同部位至少测试三个硬度值，取平均值，取平均值作为试件的硬度值。

### （2）检测方法和技术要求

回弹仪是一种用于测定岩石表面强度的简易测试仪器，国外称斯密特锤。在一定条件下，它根据冲击回弹高度和刚性材料抗压强度间的函数关系，可定量地，原位无损测试地检测岩石的表面强度。其中回弹高度用回弹值（R）

来表示。根据研究，岩体回弹值（R）和岩体重度（ $\gamma$ ）的乘积与岩体抗压强度呈线性关系，因此，只要测得回弹值和重度，即可按图求得岩石得抗压强度。用表面回弹锤击测试岩石的抗压强度具有操作简单及测试迅速的优点，是石质文物保护工程勘察中不可或缺的无损检测技术之一。

1) 仪器的选择：石质文物表层现场检测可采用不同型号的便携式里氏硬度计或回弹仪进行检测评估。

2) 测试地点的选择。测试地点选择应符合下列要求：

a 应避免脆弱文物分布区，以确保文物本体安全；

b 测试点应选择相对平整的岩石表面；

c 在选择测试点时，应避免悬空地带，不应由于锤击造成岩石表层脱落。空鼓地带的确定，明显的可通过肉眼观察，隐伏的可通过细橡胶棒、木条或手指的轻敲来确定；

d 一处测试点的区域宜选择在 0.4~0.5 平方米范围内，以能容纳均匀分布的测点 20 个左右为宜；

标定修正：

在测试之前，回弹仪应完成标定工作，标定须在配备的标准砧子上率定，率定达到标准值方能使用。若达不到标定值，应用以下公式修正：

$$\text{修正值} = \text{回弹值} \times \text{修正系数} \text{——公式 7.6}$$

式中：

$$\text{修正系数} = \text{砧子规定标准值} / \text{在标定砧子测 10 个数据的平均值。}$$

注：国内规定：率定时垂直向下锤击 16 次，舍去最大最小值各 3 点，用剩余的 10 个数据求其平均值。

非水平冲击的修正：

一般现场测试多以水平锤击为主，应首先建立非水平锤击与水平锤击间的修正关系，才能保证测试标准的统一。具体修正方法和要求应按照下表或图规定执行。

表 7-4 回弹仪读数修正表

回弹值	倾斜角修正值			
	+90°	+45°	-45°	-90°

10			+2.4	+3.2
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1
40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7
50	-3.1	-2.1	+1.6	+2.2
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7

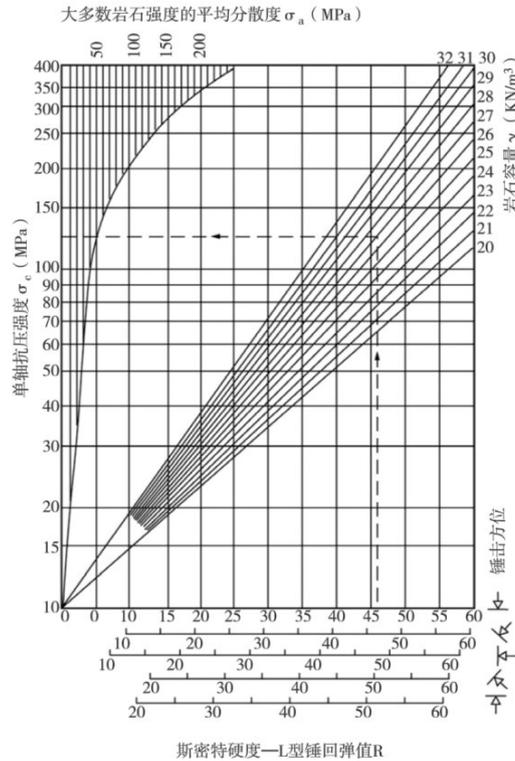


图 7-15 单轴抗压强度与回弹值 R 及容重  $\gamma$  的关系图

3) 测试要点。测试要点具体如下：

a 每种岩性的测区不少于 10 个，各测区内测点间间距应大于 3 厘米，每个测点只测试一次；

b 每个测区内不少于 20 个测点；

c 在锤击过程中，应以冲杆中心垂直对准测点中心，用力将冲杆均匀压入仪器外壳内，直至冲击锤脱落产生冲击回弹值；

d 测试后应在施测岩体内提取岩样，测定其岩块密度，并计算容重。

4) 测试成果分析与评定

a 测试成果分析：

一般情况下，在数据统计中应将所测数据最大、最小各 2 个数值舍去，如数据中还存在明显不合理的测定值，也应舍去。要求每个测区参加统计的数据

不少于 16 个；

计算统计数据组的均值、方差和变异系数。以确定测试数据的离散程度和置信度；

参照图 7-15，根据均值和容重查求岩石的抗压强度值。

**b 保护修复效果评定标准：**

修复部位表面回弹强度值应较周边岩石强度明显增加。且接近或略高于周边岩石强度值。

**4.表面吸水性能测试（卡斯特量瓶法）**

**（1）试验原理**

卡斯腾量瓶法（Karsten tube）是最早在欧洲使用的一种测试岩石表面吸水量的方法，它是由德国工程博士卡斯腾先生发明的。该检测仪由一个内径约 3 厘米的钟形玻璃罩和一根插接的带有毫升刻度的管子构成。测量时用防水黏结材料将其黏附于岩石或被测量对象表面。注水至约 10 厘米水柱然后观测记录水柱下降过程。所以称该检测方法为卡斯腾量瓶法（Karsten tube）。它可用于定量、半定量地检测材料在一定压力下的毛细吸水能力和憎水能力，能够直观地反映材料表面的保存现状及在保护处理前后的吸水能力的变化。

**（2）仪器的选择**

目前检测设备有两种结构型号，可分别用于检测垂直面（A 型）和水平面（B 型）（见下图）。

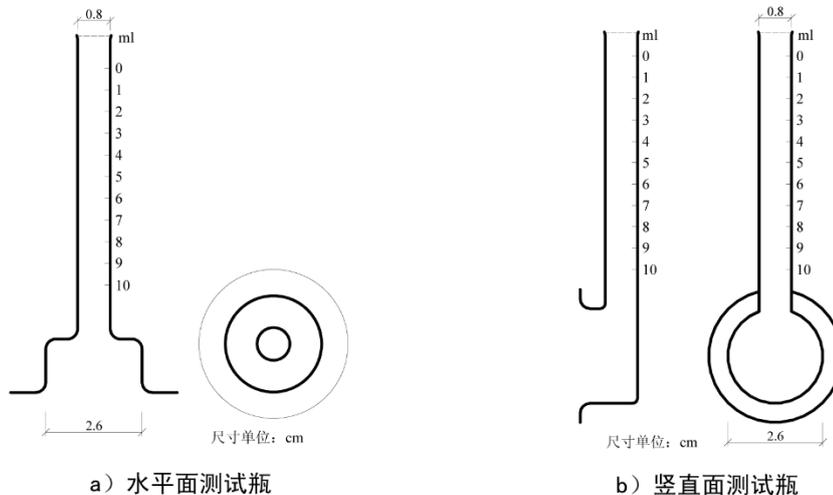


图 7-16 卡斯特瓶结构示意图

检测仪由一个直径 25~30 毫米的钟形罩和一个插接的定径玻璃管构成，玻

璃管上有体积刻度（10ml=10 厘米水柱）。测试时应根据测试点的条件和测试目的选择合适的型号。

1) 测试地点的选择。测试地点选择应符合以下要求：

- a 测试地点选择应充分考虑文物表层修复前不同的病害类型和劣化程度；
- b 测试点应选择在岩石表面较平整完整处；
- c 测试点应选择在背阴处。

(3) 测试时间的选择

测试时间应避开雨大、相对湿度大于 90%或烈日曝晒大气，最好选在多云或阴天进行，或者具备较好的遮护条件。

(4) 测试要点

测试应符合以下要求：

a 固定卡斯特量瓶前应对测试点的浮尘等进行清理；

b 测试前应将卡斯特量瓶的触水面固定在要测试的岩石表面，固定材料可选用 Bostik 胶、耐水橡皮泥或硅橡胶等材料，固定材料应具弹塑性、良好的强度和防水性以达到固定、防漏的作用，并且对岩石表面的不良影响较小。如用硅橡胶固定，在硅橡胶固化之前应采取相应的辅助支撑设施，以确保卡斯特量瓶不掉落和直管部分的垂直。测试前应先预注水，如发现周边有渗漏现象应重新选点固定直至周边无渗漏为止；

c 正式测试前的注水过程应尽量保持缓慢以防产生气泡，宜选用滴管注水；

d 为减少蒸发量对测试的影响，可用脱脂棉或过滤试纸将瓶口遮护；

e 每隔一定时间段读取水头凹面所在位置，时间间隔可以先短后长为原则。时间记录工具宜选用秒表。观测时间宜控制在 2 小时左右。每读一次数据同时应记录测试点的温湿度和表面性状变化，主要是注意是否有水的溢出和溢出区域及形式。

(5) 测试成果分析

用该方法测得的岩石毛细吸水系数 ( $W_k$ ) 被定义为单位面积单位时间岩石表面吸水量，等于岩石表面单位面积吸水量除以时间平方根（如下式）。具体计算方法和要求可按照行业有关标准相关规定执行。）

$$W_{wk}=Q/\sqrt{t} \text{-----公式 7.7}$$

式中:

$W_{wk}$ ——岩石毛细吸水系数, 单位为  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$ ;

$Q$ ——单位面积的吸水量, 单位为千克每平方米 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) ;

$t$ -时间, 单位为小时 (h)。

#### (6) 适用范围

该测试方法适用于较致密的岩石材料, 如砂岩、灰岩、大理岩、花岗岩等。不适用于裂隙、孔洞发育、均一性较差的岩石材料, 如玄武岩、角砾岩、剪切带附近岩石等。

### 5. 超声波检测技术

超声检测 (UT) 是指利用超声波对构件内部缺陷进行检查的一种无损检测方法。用发射探头向构件表面通过耦合剂发射超声波, 超声波在构件内部传播时遇到不同界面将有不同的反射信号 (回波)。利用不同反射信号传递到探头的时间差, 可以检查到构件内部的缺陷。

测试技术要点与要求:

#### (1) 校核

应把发射与接收两个换能器的辐射面直接相对并用黄油、凡士林、石膏、黏土等材料耦合, 读出声波传播所需的时间, 此值为仪器系统的对零误差 ( $t_0$ ), 计算波速时应减去该值。

#### (2) 耦合剂的选择

岩石表面测试所用耦合材料的选择以易于清除且对岩石表面影响最小为原则, 不得对文物本体或环境造成污染, 不宜选用黄油或凡士林为耦合剂。

#### (3) 测试要点

a 把两个换能器按一定距离分别用耦合剂固定于需测试的岩面上, 并量测两换能中点的距离, 此值即为声波在岩石中传播的距离。当声波仪启动后, 可把荧光屏显示波形曲线的最先起跳点所对应的时标值作为纵波到达的时间 ( $t_p$ ) 再根据波形叠加原理, 在波形曲线上寻找与第一个波形变异点对应的时标值, 即可获得横波到达的时间 ( $t_s$ )。

b 现场声波测试可按以下两种方法分别求得岩石和岩体的平均波速:

用时距法求岩石的平均波速。主要是在较大块的完整岩石表面上,于直线的一端作发射点,然后依次以不等距布置 4~6 个接收点在该直线上,分别测得各点的纵、横波速。以时间 ( $t$ ) 为纵坐标,测距 ( $l$ ) 为横坐标,分别做出通过原点的两条时距曲线,从而求得岩石的平均纵、横波速。

用多向法求岩体的平均波速,主要是在典型岩体的表面上,以发射点为中心,按“米”字形放射状不等距地测得 4~8 条测线的纵、横波速,分别求其算术平均值为岩体的平均纵、横波速。每一种岩石,按其地质特征,分别选取代表性试样 2~3 块,测定其岩块密度 ( $\rho$ )。

#### (4) 资料整理与成果应用

a) 按以下公式分别计算纵波速度 ( $V_p$ ) 和横波速度 ( $V_s$ )。

$$V_p = \frac{l}{t_p - t_0} \text{-----公式 7.8}$$

$$V_s = \frac{l}{t_s - t_0} \text{-----公式 7.9}$$

式中:  $V_p$ -纵波速度,单位为米每秒 (m/s);

$l$ -声波传播距离,单位为米 (m);

$t_p$ -纵波到达时间,单位为微秒 ( $\mu\text{s}$ );

$t_0$ -仪器系统的对零误差,单位为微秒 ( $\mu\text{s}$ );

$V_s$ -横波速度,单位为米每秒 (m/s);

$t_s$ -横波到达时间,单位为微秒 ( $\mu\text{s}$ )。

b) 按以下公式可计算岩石如下的各种动弹性参数:

动弹性模量 ( $E_d$ )

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \text{-----公式 7.10}$$

泊松比 ( $\mu$ )

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \text{-----公式 7.11}$$

剪切模量 (刚度模量) ( $G$ )

$$G = \rho V_s^2 \text{-----公式 7.12}$$

拉梅常数 ( $\lambda$ )

$$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \text{-----公式 7.13}$$

体积模量（压缩模量）（ $K$ ）

$$K = \rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \text{-----公式 7.14}$$

单位抗力系数（ $K_0$ ）

$$K_0 = \rho V_p^2 \left( 1 - \frac{u}{1-u} \right) \frac{1}{100} \text{-----公式 7.15}$$

以上各式中： $E_d$ -动弹性模量，单位为帕（Pa）；

$V_p$ -纵波速度，单位为米每秒（m/s）；

$V_s$ -横波速度，单位为米每秒（m/s）；

$P$ -岩块密度，单位为千克每立方米（ $\text{kg/m}^3$ ）；

$\mu$ -波松比；

$G$ -剪切模量，单位为帕（Pa）；

$\lambda$ -拉梅常数，单位为千克每米每秒平方（ $\text{kg/m}\cdot\text{S}^2$ ）

$K$ -压缩模量，单位为帕（Pa）；

$K_0$ -单位抗力系数，单位为帕每米（Pa/m）。

#### （5）定量描述与评价

根据工程地质领域经验，可用岩石风化系数  $F_s$  定量描述岩石的风化程度，通过对比风化系数评估修复效果，风化系数可按式确定。

$$F_s = \frac{V_{p0} - V_p}{V_p} \text{-----公式 7.16}$$

式中： $F_s$ -岩石风化系数；

$V_{p0}$ -新鲜岩石纵波速度（m/s）；

$V_p$ -风化岩石纵波速度（m/s）。

具体评价与分级要求可按照下表规定执行。

表 7-5 岩石风化系数凡风化程度分级表

风化程度	风化系数 $F_s$
未风化	$F_s < 0.1$
微风化	$0.1 \leq F_s < 0.25$
弱风化	$0.25 \leq F_s < 0.5$
强风化	$F_s \geq 0.5$

#### （6）适用范围

该测试方法适用于较致密的岩石材料，如砂岩、灰岩、大理岩、花岗岩等。此外，超声波还可用来检测裂隙灌浆、空鼓灌浆等保护修复措施的修复效果。

## 6. 红外热成像检测技术

### (1) 检测要点及注意事项

#### 修正系数

修正系数或发射率应按下式确定。

$$\text{发射率} = \frac{\text{实测值}}{\text{标准值}} \text{——公式 7.17}$$

式中：

实测值—红外热像仪测得的温度；

标准值—接触式测温仪测得的温度。

注：由于任何物体都不可能完全没有反射，所以修正系数都会小于 1。

备注：高于绝对零度（-273.15℃）的任何物体，其物体表面都会发射红外线，温度越高，发射的红外能量越强。红外线测温仪和红外热像仪据此可以测量物体表面的温度的，但是红外线测温仪和红外热像仪测量结果受被测物体表面的光洁度所影响，实验证明：物体表面越接近于镜面（反射越强），其表面所发出的红外能量衰减越厉害，所以测量前我们需要对不同物体的表面对红外能量的衰减情况做出补偿，也就是设置一个补偿系数，这个补偿系数就是修正系数或发射率。

### (2) 检测过程注意事项

#### a 测试点的选择：

测试点应尽量选取外观平整的表面，同时要排除日照不均匀、周边植被和建筑物阴影等的影响。

#### b 测量过程要点：

对于表面有水的情况，距表面 10 厘米之内的缺陷，可直接检测；

对于没有水的裂隙或内部缺陷，其垂直于表面的投影面积要远大于其深度方可用此方法测定，投影面积越大越容易观测，但应注意多个内部缺陷重叠现象；

检测没有水的内部缺陷需要长时间观察动态图像，测试时间应根据检测对

象材质及拟检测深度确定。

### (3) 检测成果

红外热成像检测技术的检测成果以红外热成像图表示，对于图像的释读应综合其他检测和勘察结果。

### (4) 适用条件

红外热成像检测技术适用于以下情况：

a 适于检测岩石表层含水分布情况；

b 适于检测岩石表面浅层且平行于壁面缺陷的分布情况，如空鼓、平行壁面的风化裂隙和卸荷裂隙等。

## 7.3 石窟寺及石刻预防性保护

石窟寺及石刻的预防性保护，是通过对石窟寺及石刻采用防护、改善保存环境、加强管理等措施，阻止和减缓文物病害发生的可能，以及灾害对文物古迹造成损害而开展的保护工作。

及时认识并消除可能引发灾害的危险因素，预防灾害的发生，灾后采取及时、妥当的应对措施，使灾害对文物的影响降低到最低程度，是石窟寺预防性保护的主要目标。

在灾害发生之前，对可能发生的灾害进行的评估及相关的专项设计，采取必要措施，消除潜在威胁，如清除或加固危岩、滑坡体等；对文物古迹进行加固、防护，避免或减轻自然灾害或次生灾害对文物古迹可能造成的破坏；完善必要的预防性设施，如防雷、防火设施。对于可能由于人类活动引发的灾害，应通过建立和落实相关规章制度，完善监控措施，加强教育，避免或及时制止人为破坏。文物古迹管理者应制定应对灾害的预案。在灾害发生之后，采取及时、妥当的应对措施，使灾害对文物的影响降低到最低程度，对灾害进行溯源分析，对灾害的影响及处理灾害影响所采取措施进行评估分析，改进和完善预防性保护措施。

预防性保护有三个要点内容：预防性保护要满足最低限度干预原则；预防性保护要通过技术措施和管理措施共同实施；预防性保护要减少或避免文物古

迹遭受的威胁与灾害。

### 7.3.1 石窟寺及石刻预防性保护的原则

石窟寺及石刻预防性保护应遵从以下原则：

(1) 满足文物保护相关的原则，如合理利用、不改变原状、真实性、完整性、最低限度干预、保护文化传统、使用恰当的保护技术等。

(2) 预防性保护要有长期性、持续性，在监测的基础上，发现问题后要及时进行处理。任何保护措施都应为以后的保养、保护留有余地。

(3) 有确定的科学证据证明某项活动对文物可能带来潜在的、不可挽回的或可证实的损害，都应该采取预防性保护措施。

(4) 预防性保护措施必须经过专家委员会论证。

### 7.3.2 石窟寺及石刻主要监测内容和指标

监测是石窟寺及石窟预防性保护的一种重要保护方式，它可以及时发现和处理石窟寺及石刻保护中出现的问题，实现对最早和最低限度的干预，最大限度地保护其真实性和完整性。

(1) 监测的定义：监测是认识文物古迹蜕变过程及时发现文物古迹安全隐患的基本方法。通过记录、整理、分析监测数据，有助于及时掌握石窟寺及石刻各方面情况，可为保护工程实施，制定、修改保护规划提供重要依据。

(2) 监测的原则：

a 时效性原则：监测信息源发送信息后经过接收、加工、传递、利用的时间间隔及其效率。

b 持续性原则：监测工作是一项长期持续的过程，是长期监测的成果。

c 代表性原则：监测数据能反应监测对象的时空特征。

d 适宜性：监测的技术装备并不需要是最先进的，而应当是最适宜的，即与文物保护实际需要和保护管理机构能力相匹配。

e 针对性：应根据石窟寺及石刻实际情况和可能存在的隐患制定切实可行的监测内容和制度。

(3) 监测的形式：监测按照形式也可以分为：定期监测、连续监测、日常

监测、专项监测等。

#### (4) 监测的内容

a 大环境的监测：即影响石窟寺及石刻的外部环境监测，包括降水、温度、湿度、光照、洪水、振（震）动、酸雨及环境质量的监测，也包括土壤、水文、植被等多方面环境因素变化的观测等，还包括石窟寺及石刻保护区景观变化的监测等。

b 微环境的监测：即影响石窟寺及石刻某一微小空间的环境指标监测，包括温度、湿度、二氧化碳、光照、降尘等要素及环境质量的监测。

c 石窟寺和石刻载体和本体监测：包括外观变化，如形变、错位、裂隙、沉降、风化等，还包括其物理性质指标和化学性质指标的变化，如孔隙性、水分、热量、PH、易溶盐等。

d 生物监测：对影响文物本体保护的动物、植物及微生物监测。

e 干预活动监测：对采取的干预措施进行监测，评估干预效果的专项监测。

f 预防性设施监测：应根据石窟寺及石刻实际情况和可能存在的隐患制定切实可行的监测内容和制度，如消防、避雷、防洪、固坡等安全设施的监测。

g 对旅游活动和其他社会因素对文物古迹及环境影响的监测。

#### (5) 监测指标

石窟寺及石刻的监测指标是衡量监测要素对石窟寺及石刻保护影响程度的目标参数，包括数量指标和质量指标。

数量指标：反应文物劣化规模大小和数量多少等数量特征的各种指标。

质量指标：监测要素是否达到文物保存质量要求的总量指标。

监测指标是评估监测要素对文物影响的重要依据，针对各石窟寺及石刻的特征，建立适用其保护要求的指标，不同的石窟寺及石刻，其指标可能不同。指标要可衡量对文物的影响程度，要有可执行性，有科学的依据。

某项指标往往只能反映某一方对文物的影响程度，文物的劣化是多方面因素共同影响，因此需要多个指标，构建其指标体系。

选择指标时最好选择容易收集快速衡量、准确度高、可被多维度分解、单一数据源。

### 7.3.3 石窟寺及石刻预防性保护监测预警体系构建

石窟寺及石刻监测预警体系是实现各种监测信息与风险分析结果的汇集、相关信息的抽取,并据此进行风险分析,把分析结果直观地展现在决策者面前作为预测预警或事件处置的依据。包括风险监测、风险预警、预警信息发布与传播、预警响应、体系运行保障等 5 个内容。

#### (1) 风险监测

针对石窟寺及石刻风险监测需求,部署监测设备、购买监测服务或开展监测活动,并建设统一的信息共享平台。

#### (2) 风险预警

评价各种风险状态对文物的影响的强弱程度。

#### (3) 预警信息发布与传播

利用各种方式,实现预警信息的发布与传播,保证其实时、准确的被需求人员知道。

#### (4) 预警响应

建立预警响应制度及措施,保证在预警信息发布时快速有效的实施。

#### (5) 体系运行保障

设计体系运行保障方案、建立体系运维制度,保障系统平稳、有序运行。

石窟寺及石刻监测预警体系遵照“保护为主、抢救第一、合理利用、加强管理”的文物工作方针和世界遗产公约的相关要求,引入风险管理理论,科学系统分析石窟寺及石刻所面临的自然和人为影响因素,运用各种成熟、可靠的监测、数据传输、分析等相关技术,创建“风险监测——综合预报——提前预警——及时处理”的遗产保护管理工作模式,最大限度地减小各种风险因素对遗产所造成的危害,实现变化可监测、风险可预报、险情可预控、保护可提前的预防性保护管理目标,使得遗产地真实性、完整性得到有效保护。

石窟寺及石刻预防性保护监测预警体系的建设要根据文化遗产管理单位的实际情况进行设计。

### 7.3.4 石窟寺及石刻日常保养与维护

#### (1) 保养维护的定义

文物古迹在保存过程中会受到自然力和人为的各种侵袭。保养维护是根据监测及时或定期消除可能引发文物古迹破坏隐患的措施。如及时修补破损的瓦面，消除影响文物古迹安全的杂草植物，保证排水、消防系统的有效性，维护文物古迹及环境的整洁等。

(2) 保养维护的原则：日常保养是及时化解外力侵害可能造成损伤的预防性措施，适用于任何保护对象。第一、必须明确抢险加固工程与保养维护的界限；第二，制订相应的保养制度，要对有隐患的部分实行连续监测，记录存档，并按照有关的规范实施保养工程。保养制度应明确工作内容，落实到专人负责。第三、日常保养工作需要持续性、规律性。

(3) 保养维护的内容：可大致分为四类。第一类为维护石窟寺及石刻的清洁卫生，如清理石窟寺及石刻周边环境的杂草，影响石窟寺安全的植被，清洁石刻上的动物粪便等等；第二类为防渗防潮工程，如针对石窟寺的积水、漏水现象，保持排水畅通；第三类为临时修补工程，如填塞结构孔洞、自然裂隙，以减少风力、鸟兽和灰尘的侵蚀污染，清理零星风化落石等，并在必要时实施简易的支顶加固等；第四类是维护防灾设施，包括防火、防震、防雷击等，如维持避雷网的完好状况和消防设施的有效性等。

## 8 中国石窟寺及石刻的保护性建筑

### 8.1 石窟寺及石刻保护性建筑概述

#### 8.1.1 窟檐与石窟寺及石刻保护性建筑

在石窟外部窟壁相接建造的木结构建筑，或利用赋存岩体开凿的类似“屋檐”的设施，称之为窟檐。根据史料记载和考古研究成果，国内大部分石窟都曾经建有窟檐。大部分木结构窟檐的建造使石窟正立面呈现出类似中国传统木构大殿的形象，体现了石窟寺中国化的特征；这种窟檐也依据了文化传统、美观和参拜礼佛需求，为信众提供了较为舒适的宗教空间。比如建成多层楼阁式建筑的大像窟窟檐，通过精妙的设计，提供了不同的视角来瞻仰佛像。

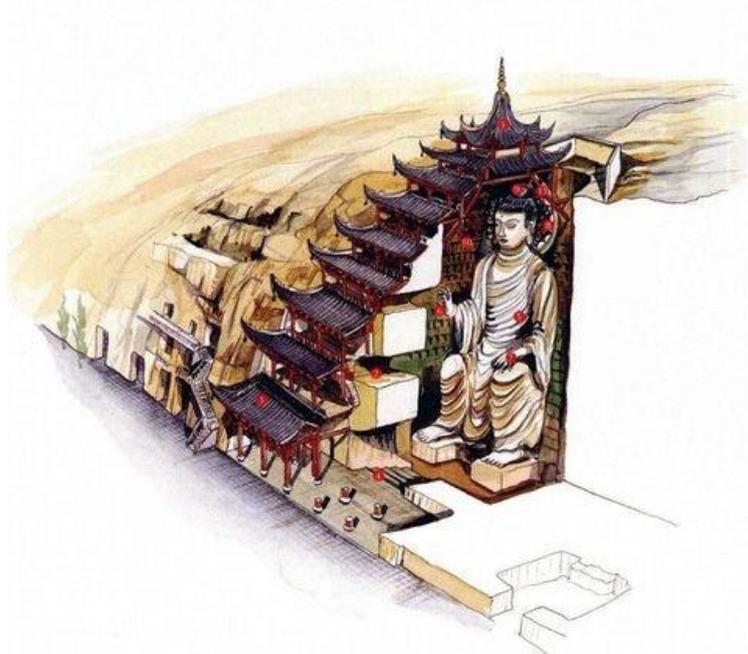


图 8-1 敦煌莫高窟九层阁窟檐内部平台与空间（图片来源：李乾朗.穿墙透壁——剖视中国经典古建筑. [M].桂林:广西师范大学出版社,2009.）

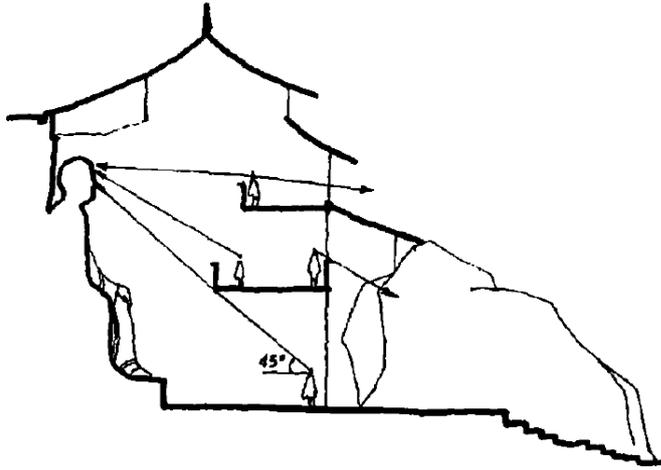


图 8-2 重庆涪滩二佛寺殿阁式窟檐：主佛高 12.5 米，建于唐代晚期，窟檐设计精妙，充分考虑了参观需求。从窟檐地面层入口，举头仰望大佛脸部，视角正好 45 度，基本上是人平视是最高视野范围。人站在二层平台上，刚好可以以 30 度角仰望大佛面部，这是人眼仰视最舒服的角度，到了三层人眼视线高度正好平视大佛面部，可以看清所有雕刻的细节。

（图片来源：郭璇.巴蜀摩崖佛殿空间类型及营建手法初探. [J].重庆建筑大学学报，2004（4））

另一方面，古代工匠也意识到了窟檐的保护作用，窟檐的存在使造像免于暴露在阳光直射和雨水侵蚀之下，因此，即使没有庞大木构窟檐建筑的需求，在石窟开凿之初，工匠也会利用岩体凿出“屋檐”，保护窟龕佛像。



图 8-3 重庆大足宝顶山华严三圣龕：利用天然岩体开凿出的窟檐（图片来源：吕宁摄）

出于文化和功能两方面需求，历史上窟檐虽可能屡次损毁，但往往被不断重建。如敦煌莫高窟九层楼始建于初唐武则天时期，历经多次重建，现存石窟窟檐建于二十世纪初；云冈石窟自北魏开窟起就建了大量木构窟檐，损毁后辽代又进行了大规模重修，石窟崖面上也保存了清晰可辨的建筑痕迹。石窟寺窟檐体现了中国传统的建筑观和文化特质，也反映出前人朴素的保护理念和工匠

们无与伦比的创造力，成为独特的中国建筑类型。

随着漫长的自然侵蚀和人为因素破坏，大量窟檐已经损毁不存。石窟本体受到阳光、降水等环境直接影响，造像、壁画均残损严重。目前，我国已公布的全国重点文物保护单位中有石窟寺及石刻 268 处，大部分受自然侵蚀存在不同程度的病害威胁。虽然不少石窟经过保护维修，已经有效减缓了病害发展趋势。

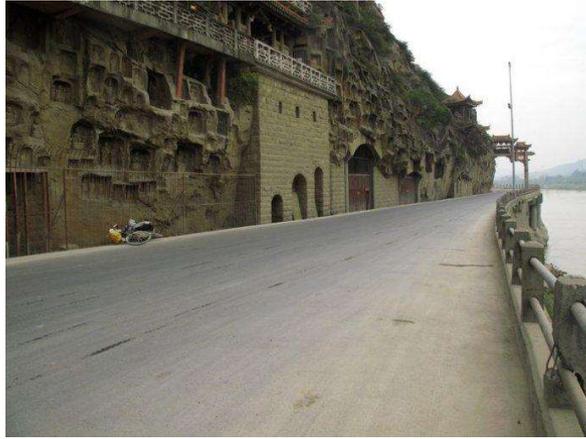


图 8-4 四川广元千佛崖摩崖造像：108 国道改道前直接从窟下通过，汽车尾气、扬尘污染、风雨侵蚀、日光暴晒等对文物造成持续破坏，不少摩崖造像残损加剧难以辨识（图片来源：[http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_4ff568bd010183am.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_4ff568bd010183am.html)）

相较于直接干预本体的化学保护措施，窟檐对石窟的影响更小、风险更低，符合最小干预原则和不改变文物原状原则。20 世纪 50 年代以后，以建造窟檐为主要手段的保护措施也成为石窟保护研究的重要方向之一。按照《文物保护工程管理办法（2003）》和《中国文物古迹保护准则（2015）》等法律法规的分类，为保护目的而附加的窟檐设施也称为保护性设施或保护性建筑。

### 8.1.2 石窟寺及石刻保护性建筑历史发展

我国石窟寺石刻保护性建筑的建设工作大致可以分为三个阶段。

第一阶段是 20 世纪 50 年代后至改革开放初期，以“保存现状”“恢复原状”为原则，修复或重建了少量的窟檐。当时百废待兴，石窟保护力求节省。国家重点组织开展了敦煌、云冈、大足、龙门四大石窟的保护工程，着力解决石窟本体安全问题。20 世纪 50 年代莫高窟窟檐抢修和砌墙加固工程、大足北山石刻的保护长廊建设工程，20 世纪 60 年代龙门石窟奉先寺保护工程和窟檐设计，

20世纪50年代和20世纪70年代云冈石窟加固工程，挽救了一批濒危石窟和石刻文物。这一阶段修复的多为木构传统形式窟檐，施工时部分使用了现代工程手段和化学保护技术，在有依据、可操作的前提下并不排斥“恢复原状”。梁思成先生所说“有若无”的方式、陈明达先生指出兼顾保护有效性和空间完整性的评判标准，都可以作为这个阶段窟檐建设工作的基本思路和原则。但是，由于工程更关注建筑质量，恢复的标准集中在石窟的“艺术性”和“坚固”上，采取的部分措施不可逆，在一定程度上改变了石窟原状，也加大了进一步保护的难度。

第二阶段是20世纪80~90年代，以“不改变文物原状”为原则，窟檐建设增加，并多针对历史窟檐已完全损毁的石窟寺，在建设中使用大量现代工程措施和科技手段。一方面，随着国家文物保护经费的增加，石窟保护工程和新建窟檐增多，麦积山石窟、须弥山石窟、龙门石窟、天龙山石窟、大足石刻等都将窟檐作为一项重要的文物本体保护措施，纳入工程范畴。窟檐的材质从木构转变为钢筋混凝土为主，建筑规模、体量、对石窟的干预和影响程度都有所增加。另一方面，窟檐建设过程中暴露出不少值得深思的问题。如须弥山石窟第5窟大佛上修建的钢混水泥窟檐，未充分考虑风化情况和岩体承载能力，造成窟檐与岩体之间出现裂缝，直接影响到文物本体安全。这与当时盲目相信“科学”手段与现代材料，缺乏审慎的审查程序，工程设计能力的局限性有关，也反映出当时虽然确立了“不改变文物原状”的原则，但是缺乏有效的评价体系和方法，导致了一些石窟保护工程成为上述“科学”手段与材料的试验场。

第三阶段是2000年至今，以“不改变文物原状”和“整体保护”为原则，窟檐建设更为谨慎，在注重保护效果的前提下，外观样式反而不拘一格、更为多样。这一时期，随着对文物保护工作的重视、经费的充足和对保护紧迫性的深刻认识，全国开展了多项石窟保护工程，涉及的文物保护单位越来越多，工程量不断增长。学术界对直接作用于文物本体的措施更加慎重和严格，开始重视环境监测和影响评估，逐渐从强调工程措施向关注日常维修和预防性保护转变。这一阶段对窟檐的认识呈现出了两个倾向：一是将窟檐作为“最小干预”和预防性保护措施，在石窟保护工作中加大新建窟檐、雨篷的比重；二是严格

控制大型窟檐建设工程，充分论证项目的必要性、可行性、对文物及周边景观的影响，像云冈石窟五华洞窟檐建设工程、广元千佛崖保护性设施建设工程、金塔寺西窟窟檐加固工程等，都经过了长时间的研究论证，有的工程还引发了业内的激烈讨论。同时，更多人开始反思 20 世纪 50 年代后的石窟保护工作，以理性、客观的态度评价工程效果，梳理、分析问题，促进了窟檐保护理念和文物保护理论的发展。

20 世纪 50 年后开展的一系列石窟保护和窟檐建设工作，是我国文化遗产保护工作的重要实践，集中抢救保护了一批濒危的珍贵石刻和雕塑艺术精品，培养、锻炼了一批高素质的专业人员，也为石窟展示、旅游发展、遗产申报等工作奠定了基础。虽然有的窟檐在设计上存在缺陷，但这是受制于当时的认识水平和能力，并不能否认窟檐这一保护手段的有效性。在窟檐建设和石窟保护中，学术界一直注重引入新技术、新材料，形成包容开放和鼓励创新的学术氛围，这对现在的窟檐建设工作仍具有重要的借鉴和指导意义。

### 8.1.3 石窟寺及石刻保护性建筑分析评估

石窟寺及石刻窟檐建筑按照建筑材料划分，可分为木结构窟檐、砖石结构窟檐、钢筋混凝土结构、钢结构和轻质结构等几种。

按照建筑形式划分，可分为传统形式和新形式两大类。前者指历史上就有的窟檐或按照历史形制设计的窟檐，可以分为自然岩体窟檐、悬挑式窟檐、柱廊式窟檐、殿阁式窟檐，后者为非传统形式的现代结构构筑物。

#### （一）自然岩体窟檐

以石窟本体材料营造庇护空间，优点是形态自然，因地制宜，在效果上与摩崖石窟浑然一体，且结构强度和耐久性远胜木材，许多摩崖石窟的木窟檐已不存，而最初凿出的石质窟檐历经百年仍保存完整。缺点是功能单一，且限于石材本身物理强度，宽度小、深度浅，保护效果欠佳。典型案例：大足宝顶山天然岩体窟檐、安岳毗卢洞柳本尊造像龕等。

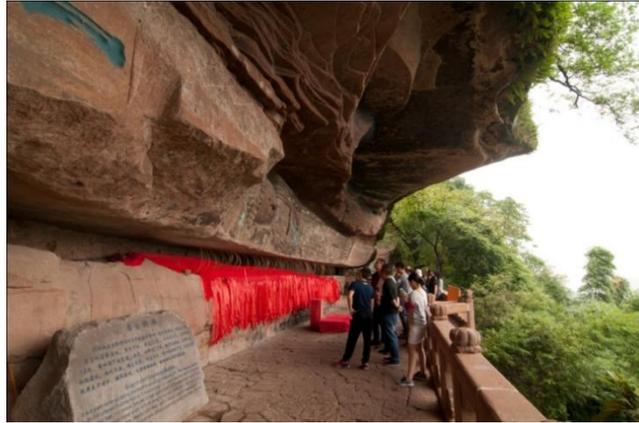


图 8-5 钓鱼城卧佛自然岩体窟檐（图片来源：吕宁摄）

### （二）悬挑式木结构窟檐

一般在小型浅龕、分散的窟龕和地形崎岖，不便于窟檐落柱的窟龕使用，该类型窟檐使用简单的单坡木结构屋顶，往往尺度较小，出檐距离也较短。该类型窟檐对视线遮挡小，利于采光通风，对于岩体上方的流水和雨水也有一定的阻挡作用，且体量较小，可以灵活分布，既可以单独存在，也可以连续形成窟檐组合。缺点是该类型窟檐结构基础接触岩体，有的甚至需要在岩体上打深孔，对赋存岩体有一定破坏性；且木结构与岩体的交接方式则多是搭接或插接，辅之以灰泥抹缝，如处理不当常出现从接缝处渗水的状况，影响保护效果。典型案例：敦煌莫高窟第 427 窟窟檐、四川安岳卧佛院南岩窟群窟檐等。



图 8-6 安岳卧佛院南岩石窟群悬挑式木构窟檐（图片来源：吕宁摄）

### （三）柱廊式窟檐

主要设置于带状分布的大型石窟群前，沿摩崖边缘落柱，柱上置屋架，廊下铺设硬质地面或栈道。檐柱间留空或设置保护性格栅，一般不设门窗。部分柱廊式窟檐两端有山墙。窟檐屋面荷载一部分通过屋架传至摩崖山体，一部分

通过檐柱传至地面。由于檐柱的支撑，窟檐出挑深度可以更大。屋顶形式的选择也更灵活，可设单坡、双坡顶，局部可改变檐柱的数量和位置来改变窟檐高度、出檐深度等。典型案例：大足北山佛湾石窟窟檐、邛崃石窟中的磐陀寺窟檐。



图 8-7 大足北山佛湾石窟窟檐立面图(资料来源:重庆大学建筑城规学院历史研究室提供)



图 8-8 大足北山佛湾石窟窟檐内 (图片来源:吕宁摄)

大足北山佛湾石窟位于北山西侧崖壁上，开凿于 892~1162 年（唐景福元年至南宋绍兴三十二年）。造像崖面长约 300 米，高 7~10 米，分为南、北两段。北山佛湾石窟窟檐建于 1952 年，为砖木结构的单层柱廊式窟檐。窟檐大部分为双坡屋面，南段入口部分有重檐歇山顶，北段有多处重檐攒尖顶和歇山顶。出檐深度 4~6 米，外檐口高度约 4 米，重檐部分檐口高度 6~7 米。北山窟檐的出檐深度和檐口高度之比为 1:1~1.5:1，完全遮蔽了造像部分，防止了阳光直射和风雨侵蚀，并形成了一定宽度的礼拜空间。

#### （四）殿阁式窟檐

殿阁式窟檐将摩崖石刻与佛殿或楼阁建筑结合，创造出空间围合感强，内部空间大的全覆盖保护性建筑。殿阁式窟檐主要用于大像窟和重点区域的石窟群保护，建筑外观具有标志性，作为主体景观与邻近寺庙形成建筑群，同时也能兼具保护和展示两种功能。尽管历史上曾有大量殿阁式窟檐，但多毁于战火，

且由于重建成本过高，保存至今的较少。典型案例：敦煌莫高窟九层楼、天龙山石窟漫山阁、云冈五华洞新建仿北魏风格窟檐、涇滩二佛寺窟檐等。



图 8-9 莫高窟 196 窟窟檐，建成于唐景福二年(893 年)，是我国现存的五座唐代木构之一，也是现存最早的窟檐；于 20 世纪 50 年代进行了修复。(图片来源：张荣摄)



图 8-10 1908 年五层楼窟檐

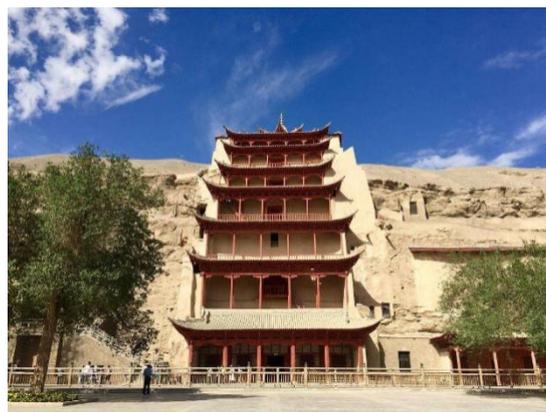


图 8-11 九层楼窟檐现状：九层楼为石窟编号 96 的北大像窟窟檐，窟内供奉着 35.5 米高的弥勒像一尊。最早能看到的这座洞窟的形象是 1908 年伯希和拍摄的照片，当时北大像外的窟檐较现今更为简陋，被称为五层楼。1924 年，美国学者华尔纳来到莫高窟时候，五层楼毁坏，北大像的头部完全暴露在外。1934 年，斯文赫定来到敦煌，拍摄到了正在施

工的九层楼，据碑刻记载，1927~1935年，由敦煌富商与乡绅共同集资兴建而成。根据学者的研究，北大像窟从开窟至今，窟檐共重修过8次。

（图片来源：左：兰州大学敦煌学研究所.敦煌莫高窟百年图录（上）《伯希和敦煌图录》.兰州：甘肃人民出版社.2008，右：张荣摄）

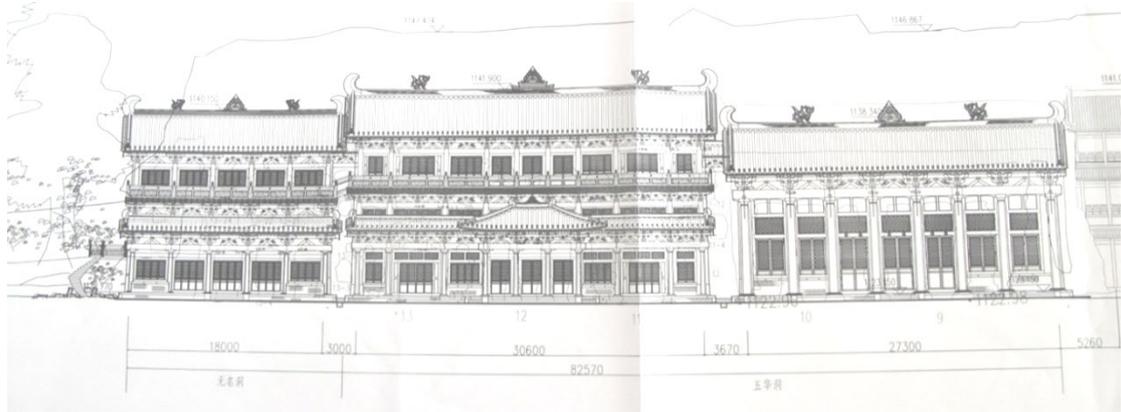


图 8-12 五华洞保护性窟檐实施方案总平面图（图片来源：云冈研究院.山西省大同市云冈石窟五华洞保护性窟檐修建工程施工图设计文件.2011.）

五华洞保护性窟檐 2010 年完成方案设计，依据窟前考古发现的柱列和孔洞遗迹，确定了原北魏窟檐的面阔和高度，并参考云冈石窟内北魏风格的石雕进行了具体形制设计。窟檐工程包括第 9-10 窟窟檐：面阔七间，进深七椽，高廊柱式单檐悬山建筑，屋面筒板布瓦顶、高 14.69 米的殿阁式建筑。第 11-13 窟窟檐：面阔九间，进深六椽，重檐悬山建筑；明次间出单檐半庑殿顶抱厦，二层出平座以勾栏围护，屋面筒板布瓦顶、高 18.07 米的殿阁式建筑。无名洞窟檐：面阔五间，进深七椽，重檐悬山顶建筑；底层高廊柱式，二层出平座以勾栏围护，屋面筒板布瓦顶、高 17.50 米的殿阁式建筑。整个工程于 2013 年完成。

新形式窟檐：指非中国传统建筑形式窟檐，一般采用钢筋混凝土、轻钢结构等现代材料建造。灵活的形式和材料的优越性可以更好地与监测结合、满足保护需求，并兼顾展示利用等功能，但往往因为与历史环境存差异而引起争议。典型案例：四川广元千佛崖保护性设施。

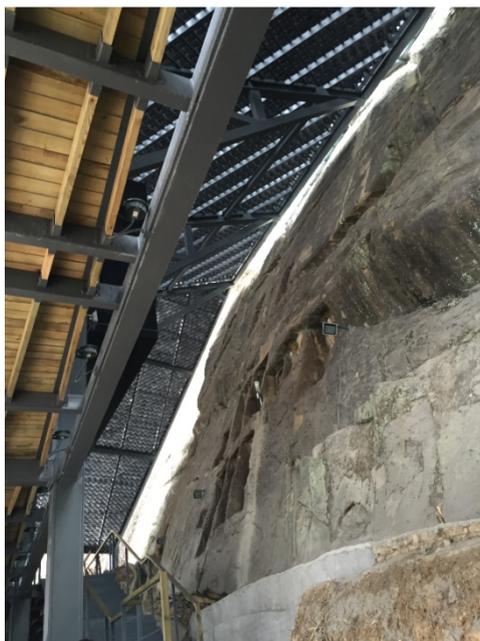


图 8-13 广元千佛崖新形式窟檐（图片来源：吕宁摄）

广元千佛崖新形式窟檐是我国以现代建筑方式对大型摩崖造像进行保护，本着谨慎的态度，国家文物局于 2013 年同意建造试验段，结合监测数据分析，检验主体方案的可行性。试验段的选址位于距离千佛崖摩崖造像核心范围 99 米的一组石窟，共 16 龛，拥有与主体造像范围一致的水文地质条件。

鉴于摩崖造像保护实践证明，完全与外界隔绝的保护方式会干扰摩崖造像依存的原始环境。整个设计采用了半封闭式的表皮模式，通过合理的结构与构造设计，确保保护设施在为摩崖造像遮风挡雨的同时，仍具有良好的通风性能，以不剧烈改变摩崖造像所在环境的方式阻止相关危害因素的影响。同时，新建的保护设施采用轻质的钢结构悬臂体系获得结构稳定性，与崖体完全脱开，不碰触摩崖造像本体，以实现文物保护措施“可逆”和“最小干预”的原则。另一方面，方案利用保护设施整体覆盖遗产本体后形成的空间，对造像及其附属文物进行了多角度和多层次的价值阐释。

按照建筑功能划分，窟檐可以分为单纯具有遮风避雨功能的保护型窟檐和兼具保护、宗教和展示多种功能的复合型。前者多见于自然岩体窟檐、悬挑式窟檐等不具备展示空间的较小体量设施和，后者多见于其他形式。

对窟檐效果的评价需参考以下三方面：

保护效果：保护功能为最重要、最核心功能，结合监测数据，可以从窟檐内外对直射光的遮蔽效果、对降水的遮蔽效果（包括排水的通畅性）、通风性（包

括风速、风向和含沙率等)、温度变化差异和湿度变化差异等几个方面分析,判断窟檐内微环境的改变对窟龕造像风化、水蚀等残损的影响,是否减弱了石窟的劣化速度。

展示利用:窟檐设施是否提供了可供观览的道路及空间,是否能够提供价值阐释与展示的内部设施(包括传统说明牌、现代数字化多媒体手段等)

宗教空间:窟檐设施是否提供了礼拜空间和相关设施。

## 8.2 石窟寺及石刻保护性建筑的工程及环境监测

### 8.2.1 石窟寺及石刻保护性建筑的功能需求及监测基础

#### 1.石窟寺及石刻保护性建筑功能需求的类型

对石窟寺及石刻保护性建筑的功能需求可分为针对性功能和通用性要求。针对性功能指基于病害调查、劣化机理分析等前期研究工作,以缓解具体石窟寺及石刻的特异性风险因素为目标,力图改善如风蚀、水害等严峻问题的功能需求,体现了保护性建筑“解决现有问题”的功能特点。通用性要求指石窟寺及石窟保护性建筑的设计、论证、施工以及长期存在对文物本体安全,暨保护性建筑应在实现上述针对性功能的同时,不引入或尽量少引入新风险因素、固有风险因素不扩大或尽量避免扩大。

#### 2.石窟寺及石刻保护性建筑实现功能需求的基本模式

保护性建筑功能需求的实现,往往不直接通过加热、制冷等主动控制手段或较少采用主动控制手段,更多依靠保护性建筑的形态、位置、材料,通过新增/改变微环境与区域环境的边界,调节文物本体与赋存环境间的固有关系,构建更有利于文物长久保存的动态平衡。

保护性建筑实现功能需求的基本手段是创造新的边界条件,并将文物本体周边的热、湿、风等微环境场与区域环境场分隔。具体而言,文物本体与赋存环境动态平衡发生于文物物质遗存和微环境整体中,保护性建筑建设前,上述整体与赋存岩体、区域环境或完全联通(浅窟、石刻造像)或部分联通(深窟),保护性建筑建设后,上述整体与赋存岩体、区域环境或部分联通(类窟檐、保护棚形式)或基本不联通(类窟门、封闭式保护建筑形式)。

### 3.保护性建筑功能实现中的常见问题

保护性建筑的功能需求往往是指标性、趋势性的，例如降低辐射量、降水量、最大风速降低至某水平，但功能需求的实现则是通过环境的分隔间接实现，因此很可能面临着调节过当、调节不足、总体失衡等风险，因此应关注包括但不限于下列的常见问题：

- 1) 岩体水、蒸发、扩散平衡的变化；
- 2) 空气流场的系统性改变；
- 3) 减小风蚀与保障通风的取舍；
- 4) 不同气候条件下，太阳辐射、天空背景辐射减弱的利弊判断。

#### （四）保护性建筑的监测基础

保护性建筑的监测流程应贯穿其全生命周期，即前期辅助、优化设计，建设过程中实时监测，建设完成后跟踪评估。

保护性建筑的监测要素应覆盖文物物质遗存表面状态，文物本体与环境的热湿交换、化学反应等交互机制，空气微环境、赋存岩体、相关水体的主要表征指标，区域环境的常态特征。

保护性建筑的监测分析应涵盖针对性功能效果的评价、通用性要求的保障以及常见问题的通盘考虑。

#### （五）监测参数选择

根据针对石窟寺及石刻勘察中确定的病害种类，从病害现象出发，分析病害产生的物理情境、梳理发生的基本过程，确定病害的主要影响因素，最终形成与影响因素对应的监测要素集，并进行对应性监测，形成监测报告。

保护性建筑的监测参数除与病害的发生发展有相关性之外，还应对保护性建筑的改进具备指导性，在原有监测报告的基础上，针对石窟寺及石刻原有病害问题，在保护性建筑内外进行对比监测，用以评估保护性建筑是否起到了减缓石质病害的作用。

一些常见病害影响要素以及对应的监测要素如下表

病害种类	影响因素	监测要素
表面粉化	周期性温湿度变化 冻融作用	温湿度 露点

	水盐活动	壁温
片状剥落	温度变化 水盐活动	温湿度 岩石含水率
空鼓	温度变化	温湿度
风蚀	风力风向 大气颗粒物	风速风向 总悬浮颗粒物
表面污染	污染性气体 人为活动 大气颗粒物	大气污染气体监测 总悬浮颗粒物
微生物	水分 光照 生物活动性	岩石含水率 温湿度 阳光辐射量 图像监测

由于气象环境、石窟构造和人类活动的复杂性，实际工作中仍需因地制宜，对效果评估参数集进行删减和补充。

## 8.2.2 保护性建筑建设中的监测要求

### 1. 建设中的监测需求

石窟寺及石刻类文物的保护性建筑的建设目的之一就是为了改善文物本体所处的环境条件。因此保护性建筑对环境的改变是必然的结果。尤其是针对大型石窟寺及石刻的保护性建筑由于自身的体量以及对石窟环境的控制要求，其带来的赋存岩体影响和环境影响也会较大。因此在其建设过程中应特别进行施工过程监测，以保证文物本体及环境的安全，同时发现并反馈问题。

### 2. 建设中监测参数选择与关注问题

保护性建筑的监测是贯穿其全生命周期的，因此，保护性建筑建设中的监测参数选择，应覆盖保护性设施方案设计阶段明确的监测参数，应覆盖前期勘察中已经明确的劣化因素的变化情况，及时反馈分析以指导保护性设施的施工与必要改进。同时建设中监测还应关注下列问题。

#### (1) 地下水位

保护性建筑的建设一般应在石窟本体及附存岩体的地下水及渗漏水治理完成后再进行。建设过程中应尽量减少对地下水位的影响，尤其是具有大型或较深基础的建筑需要被特别关注。寒冷地区还应关注地下水位变化可能引起的冻融病害的影响。

## （2）震动

保护性建筑的施工中不可避免将产生震动。震动传导到石窟本体时的振幅和频率都应在安全阈值范围内。针对附存岩体的直接施工（比如钻孔等）应进行震动监测，防止过大震动引发岩体崩塌、开裂或者原有裂隙发育等病害。

## （3）沉降

大型保护性建筑或基础受力集中的保护性建筑。在建设时及建成后，应特别关注建筑基础或者被保护本体是否发生沉降。

## （4）污染物

保护建筑的施工必然会造成一定量的污染物。应在施工中对本体进行必要遮护，严格防止颗粒污染物、油漆等外界物质对本体造成喷溅、污染。同时应监测施工中产生的污染气体，尤其是硫氧化物和氮氧化物。

## （5）微生物

保护性建筑的建设中可能造成本体区域的微环境短时间内的改变（例如温湿度、光照辐射强度等），应监测此类改变是否导致微生物病害的爆发，并及时调整施工措施。包含有壁画、彩塑的石窟文物尤其应引起重视。

### 3.建设中监测的其他要求

#### （1）监测系统要求

石窟寺及石刻类文物的监测系统应尽量采用模块式可扩展系统。方便支持建设实施中的临时监测项目的扩增，以及结束临时监测后不续用模块的剥离和存档记录。系统应具有实时数据分析计算和预警功能。保障建设施工中的实时监测数据的处理要求和预警机制。条件允许的系统，应具有巡查、记录、监控等管理或辅助管理模块，便于建设施工中的项目管理和文物安全保障。

#### （2）监测点位要求

保护性建筑建设中的监测点位布置，应覆盖保护性建筑建设中和建成后所涵盖的范围；对于赋存岩体、地下水位等大体量环境要素，宜采取多点位连续监测布置。

#### （3）施工安全的监察

保护性建筑大都临近文物本体并与其直接接触，应在建设中针对施工安全

和本体安全保障设立专项监察措施。

### 8.2.3 保护性建筑建成后的监测效果评估

#### 1. 数据处理

原始数据的处理是进行监测数据分析的第一步，为保证监测数据的有效性和代表性，应对数据进行处理。同一参数宜整理为相同的时间间隔，以避免统计抽样误差，同时便于计算。

由于仪器与工作环境的影响，采集数据可能存在数值采集错误、数据异常和缺失的情况，这部分数据应在数据分析初期进行处理，以免影响分析。

错误值指据采集条件和常识判断不可能出现的情况，如数值长时间不发生变化、相对湿度等数值归零等。错误值需予以删除，缺值的处理方法视数据情况而定：

(1) 如连续缺值较少（如缺值少于6个或时长少于6小时）可直接进行线性插值填充；

(2) 连续缺值时间较长的，如有多年监测数据，可使用过往同期数据进行插值填充，气象监测数据可借助临近气象站进行插值填充。

(3) 连续缺值时间较长且无多年监测数据应保持缺值，不予填充。

数据应进行包括平均值、标准差、极差在内的基本统计学参数计算，有多年数据基础的，应同时统计累年数据。由于保护性建筑评估关注异常值，因此数据不清洗异常值，只对异常值标记并计数。

#### 2. 保护性建筑效果评估

##### (1) 对比保护建筑建成前后的监测参考值

监测参考值其意义为监测点不加人工干预的条件下各参数变化趋势。该数据是统计对于无保护性建筑条件下保存环境的模拟，与保护性建筑建设后的环境数据对比从而评估保护性建筑的效果。该参考值有多种设计方法：

未建设保护建筑前保护对象多年监测数据逐时累积平均，结合极差、标准差数据；未建设保护建筑前保护对象至少一年数据滑动平均值，结合极差、标准差数据；保护性建筑周边相似区域相似对象的至少一年监测数据。

##### (2) 建筑效果评估

有效的保护性建筑应消除或减少不利保存条件，同时使石窟寺保存环境稳定向好。采用监测数据对比与现场观察两种方式进行建筑保护效果评估。

### 1) 监测数据对比

对比保护性建筑内与保护性建筑外实时监测数据（或环境参考值），同时结合分级预警体系可以定量评估建筑的保护效果，提高保护性建筑的评价的客观性，保证建筑设计改进的针对性。

首先保护性建筑建成后整体保存环境应有明显改善，首先监测数据中 90% 以上的数值满足保护性建筑设计目标；石窟寺微环境温湿度等基本环境要素监测数据应整体向更有利于保存的方向偏移，但偏移不宜过大以免打破保存平衡；根据前期监测确定的主要破坏性环境因素指标应全面降低；监测期内所有监测要素预警次数应明显减少，同时预警级别都应显著降低。

### 2) 现场勘查对比

现场勘查对比可以定性评估建筑的保护效果，同时可以观察未进行实时监测的区域变化，避免由于监测选点导致的评估片面性，是环境监测数据评估的有效补充。

保护性建筑不可避免的对石窟寺原有环境产生影响，因此应通过现场勘查评估保护性建筑的次生作用，如由于微环境变化导致的微生物种类、分布位置、种群规模的变化，水盐病害位置、盐害种类与强度的变化等。

保护性建筑效果评估应以监测数据为基础，结合现场勘查对比情况综合评价。如保存环境没有明显改善，各环境指标未能达到设计目标或现场观察时出现新的次生风险，则需要对保护建筑进行针对性改进。

### (3) 预警体系与监测系统改进

保护性建筑不应打破文物与保存环境原有平衡，以平滑保存环境的波动、避免极端条件、消除高危条件、减少往复变化为目的。根据保护性建筑效果评估结果针对性改善建筑设计同时调整、增补监测点，完善监测体系，同时分析以往监测设定的预警阈值适用性。

环境参考值应随监测数据积累每年更新；预警体系应与监测系统整合，建立实时预警机制；预警系统可进一步与环境调节装置联动，实现环境调节控制

的自动化和智能化。

## 8.3 石窟寺及石刻保护性建筑实施要点

### 8.3.1 石窟寺及石刻保护性建筑的设计原则

石窟寺及石刻保护性建筑的设计应以保护文化遗产价值及其真实性和完整性为前提，除了贯彻“美观、坚固、经济”的基本建筑设计原则之外，还应符合以下设计原则：

- (1) 保护性建筑及设施的设计应以满足石窟寺及石刻保存条件为核心目标；
- (2) 保护性建筑及设施的建设应尽可能减小对石窟寺及石刻本体的干预；
- (3) 任何新增保护性建筑及设施都应具有可逆性；
- (4) 保护性建筑及设施的外观应具有可识别性；
- (5) 保护性建筑及设施应与自然环境和人文环境相协调；

保护性建筑及设施的设计应以满足石窟寺及石刻保存条件为核心目标。建筑设计需在前期勘察和监测数据收集的基础上，分析病害残损及主要致病因素，确定石窟寺及石窟保存的必要条件监测指标，包括日照、温度、湿度、壁面温度、风速、风向、岩体含水率、风化、彩绘褪色、渗漏水、粉尘颗粒物等，确定文物本体安全保存所需达到的各项指标理想阈值作为建设后评估保护绩效的参照标准，并以此为依据确定能够减少或阻隔病害因素负面影响的技术措施和设计方案，以达到保护文物本体的目标。

保护性建筑及设施的建设应尽可能减小对石窟寺及石刻本体的干预。建筑设计应以地质勘察报告和前期勘察成果为依据，合理选用结构形式和布置基础落点，尽量采用轻质结构材料，减少建筑荷载对赋存场所的影响。建筑主体承重结构应与石窟寺或石刻所赋存的崖面或岩石保持必要的安全距离，确保文物本体的安全。建筑设计还应考虑施工期间实施本体保护的可行性，尽可能减少干扰。

任何新增保护性建筑及设施都应具有可逆性。保护性建筑的主体及其建设过程都不得妨碍再次对文物古迹进行保护，应采用能够在确保文物安全的同时进行拆除的形式，为未来实施更先进的保护技术保留可能性。

保护性建筑及设施的外观应具有可识别性。建筑形式应简洁美观，诚实体现建筑设计的时代特征并采用当代技术措施，以避免混淆历史信息和浪费建设资金，避免破坏文物历史环境的真实性，避免干扰文物价值展示和阐释的准确性。

保护性建筑及设施应与自然环境和人文环境相协调。建筑设计应从造型、材料、色彩、工艺等方面考虑，使保护性建筑建成后能融入自然环境，呼应文物所代表的人文历史背景和地域文化特征。

### 8.3.2 石窟寺及石刻保护性建筑的功能需求

石窟寺及石刻保护性建筑的功能需求包括文物本体保护的功能、价值展示与阐释的功能、服务所在社区的功能和提供专业研究条件的功能。

#### 1. 文物本体的保护

石窟寺及石刻保护性建筑首先应满足文物本体保护的要求，应采取建筑技术措施实现遮蔽直射阳光、阻隔雨水、减缓风速、加强空气流通等目的，使建筑建成后文物本体所在的物理环境条件保持相对稳定，满足保护要求。

在确定技术措施和设计方案之后，还应采用必要的计算机模拟运算、模型实验等技术手段校核设计方案是否能够达到预期的保护效果评估指标，实现设计的核心目标。

#### 2. 价值展示与阐释

保护性建筑及设施的设计应尽可能考虑文化遗产的价值阐释和展示功能。在确保文物本体安全和满足保护目标的前提下，设计方案的空间设计和流线组织应尽可能满足游客参观、本体展示和价值阐释的功能。在对石窟寺及石刻保存条件进行评估的前提下，制定恰当的展览展示策略，特别是对于保存条件脆弱的情况，应尽量采用多媒体数字展示、线上参观等技术手段减少保护型建筑的现场参观活动对文物本体保护的干扰，减轻文物保护压力。

#### 3. 社区服务的功能

保护性建筑及设施应体现“公众共有、公众保护、服务公众”的社区服务功能，在设计、建设和使用全过程中应充分考虑、协调和满足石窟寺和石刻的权属所有单位、各级保护和管理单位、当地社区、居民、游客等利益相关方的

合理需求。应充分考虑石窟寺及石刻的传统使用方式，适当延续其在地方社区中的历史功能，使其发挥应有的社会效益，让文化遗产更好地融入当代生活。

#### 4.专业研究

保护性建筑及设施的设计应充分考虑石窟寺及石刻本体相关的历史、考古、艺术史、建筑史等学科开展调查研究工作的专业需求，通过空间功能、设备管线和交通流线组织等方面的设计提供便于专业研究人员研究使用的工作条件。

### 8.3.3 石窟寺及石刻保护性建筑施工要求

#### 1.勘察阶段

前期地质勘查通过查明勘察区的工程地质条件,并根据石窟寺及石刻保护性建筑的功能特点对拟建区工程地质条件进行系统性评价，为该保护性建筑工程的地基基础设计及施工提供地质依据和参数。

依据现行国家标准、规范、规程的技术要求，勘察阶段主要完成如下内容：

(1) 查明场地范围内的地形地貌特征，地貌成因类型及地貌单元的划分；详细查明场地内有无影响保护性建筑稳定的不良地质作用现象（如溶洞、古河道、人工洞穴等）及成因、分布范围、规模、发展趋势，危害程度和不利影响，并提出整治方案的建议。

(2) 查明埋藏的河道、沟浜、墓穴、防空洞等对工程不利的埋藏物，并对场地的稳定性和适宜性做出评价。

(3) 细查明勘察区范围内岩土层的类型、结构，分布范围，尤其应查明基础下软弱夹层和坚硬地层的分布规律，以及各层岩土的工程特性，对岩土层的均匀性、强度和变形指标做出分析和评价。

(4) 详细查明当地气象条件以及场地地下水类型及埋藏条件、地表水来源、水位和积水时间，以及排水条件，提供地下水水位、变化幅度及其抗浮设防水位，判定水和土对建筑材料的腐蚀性。

(5) 查明有无可液化地层，并对液化可能性做出评价，指出它们对场地和地基的危害程度，提出治理方案建议；判定场地和地基的地震效应，确定场地土类别，提供抗震设计有关参数。

(6) 分析场地工程地质条件，推荐适宜的基础方案及基础持力层；对可能

采取的地基基础类型，基坑开挖及支护、工程降水方案进行评价，提供设计所需的岩土物理力学性质参数和所需的水文地质参数，提供合理的工程措施意见和合理的施工方法。

(6) 提出施工阶段中应注意的岩土工程问题，对基础沉降观测等要求提出建议。

## 2. 施工前保护阶段

工程施工前应对场地范围内的石窟寺及石刻进行文物本体保护，要点如下：

(1) 清理和清洗应在保护设施建造之前；包括对泥土、浮石、植被及腐殖质、其他杂物的清除，有条件的可用压力较小的流动清水进行清洗；

(2) 保护材料的选择应从防水性、透气性、坚固性、稳定性方面考虑，必要时可选用多种材料进行叠加处理；

(3) 石窟寺及石刻保护的贴面材料宜选用日本棉纸或中国宣纸等柔软无腐蚀性的材料；上层覆盖材料宜根据不同场地条件和石窟寺及石刻材质特征选用树皮或草皮、浮石或沙砾、黏土加石灰、经过注射或浸润处理后憎水性、防水性增强的有机材料（有机硅类）等；

(4) 在整个施工过程中应注意做好记录和监测工作；

整个工程结束后可根据记录和监测结果考虑其他保护措施，比如表面试剂的使用等。

## 3. 施工阶段

工程施工前须由业主单位报文物行政部门备案。全国重点文物保护单位和省级文物保护单位的保护工程须报省文物行政部门备案，市、县级文物保护单位的保护工程须报文物所在地的市、县级文物行政部门备案。承担工程的施工、监理单位必须具有国家文物局认定的文物保护工程资质。

开工备案资料包括施工组织设计、监理组织计划等主要施工文件。

施工单位需按各地地方要求进行相应的企业备案，施工人员进场前要接受文物保护相关知识的培训。

(1) 文物保护工程施工企业，必须建立现场管理机构（项目部）。现场管理机构由项目负责人、技术负责人、施工员、材料员、安全员等组成，实行项

目负责人负责制。

(2) 施工现场采用封闭式管理，各类标识清晰明确。场区内地面做到坚实平整，保证排水畅通，污水、废水的排放符合要求。各类构件场地、施工机具等要按施工平面布置图的布局放置。建筑垃圾、生活垃圾要集中存放，并有覆盖，定时清理。施工场地平整整洁、无乱堆乱放现象。

(3) 重视消防安全，成立防火安全领导小组，制定安全防火措施制度。合理配备消防器材并定期检查更换。现场从事电气焊、切割作业人员必须持证上岗。施工现场用火应经监理报建设单位审核后，方可实施。施工现场电器设备必须安全可靠，电动机或起动机外壳必须接地。定期开展安全防火检查。

(4) 制定确保安全施工和文明施工的切实措施。进入施工现场的各类作业人员必须佩戴安全帽并合理使用安全带。临边、洞口、电梯井口、楼梯口必须有防护栏杆或防护设施。施工现场需搭设安全防护棚，设立安全标示牌、警示牌和操作规程牌，施工机具做好安全防护。

(5) 文物本体应采取必要的临时保护措施进行覆盖和遮蔽，施工过程中应减轻振动，切实保证施工过程中不破坏文物本体。

(6) 重视环境保护和施工人员职业健康，妥善处理现场施工产生的噪音、粉尘、污水和垃圾。

(7) 工程资料的收集、整理、报送应当与工程进度同步进行。监理单位负责监理资料并对施工资料的收集、管理和立卷工作进行监督、检查。施工单位负责施工资料的管理工作。

(8) 施工过程中如发现新的文物、有关资料或其他影响文物保护的重大问题，要立即记录，保护现场，并经原申报机关向原审批机关报告，请示处理办法。

(9) 施工过程中如需变更或补充已批准的技术设计，由工程业主单位、设计单位和施工单位共同现场洽商，并报原申报机关备案；如需变更已批准的工程项目或方案设计中的重要内容，必须经原申报机关报审批机关批准。

(10) 按工序分阶段验收。重大工程告一段落时，项目的审批机关应当组织或者委托有关单位进行阶段验收。

(11) 工程竣工后，由业主单位会同设计单位、施工单位、监理单位对工程质量进行验评，并提交工程总结报告、竣工报告、竣工图纸、财务决算书及说明等资料，经原申报机关初验合格后报审批机关。项目的审批机关视工程项目的实际情况成立验收小组或者委托有关单位，组织竣工验收。

(12) 施工单位应严格按照《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》提前做好施工组织设计，对于超过一定规模的危大工程，施工单位应当组织召开专家论证会对专项施工方案进行论证。施工单位应遵守《建设工程安全生产管理条例》《建筑施工易发事故防治安全标准》及有关工程建设安全生产及文明施工的管理规定，采取必要的安全防护措施，确保安全文明施工。

#### 8.3.4 石窟寺及石刻保护性建筑后评估

石窟寺及石刻保护性建筑建成后需要对实施效果进行使用后评估，并以设计严格遵守相关建筑规范为首要前提。

##### 1. 评估内容

石窟寺及石刻保护性建筑的使用后评估应侧重保护绩效、建筑安全性和使用者体验三方面内容，提供游客参观活动的保护性建筑还应对室内环境质量进行评估。

对保护绩效的评估是石窟寺及石刻保护性建筑使用后评估的重点内容，主要对建成后的建筑内部环境条件是否达到设计确定的、能够满足保护要求的各项指标阈值和是否减缓文物本体病害发展速度到预期的目标进行评估，内容可包括日照、温度、湿度、壁面温度、风速、风向、岩体含水率、风化、彩绘褪色、渗漏水、粉尘颗粒物等项指标，评估结果能反映出保护性建筑建成后的本体保护效果。

对保护性建筑安全性的评估主要针对新建建筑对文物本体的安全稳定性影响和建筑自身的安全性进行评估。其中，建筑对文物本体的安全稳定性影响评估包括建筑基础对石窟寺及石刻赋存环境的稳定性影响，建筑对与文物本体接触部分的稳定性影响，建筑的排水、通风、采光等功能性构造对文物本体稳定性影响等。建筑自身的安全性评估内容包括建筑结构的安全性和建筑构造体系的安全性。

使用者体验的评估包括对本体展示效果、展览展示条件、参观者的体验效果、管理使用条件、开展专业研究条件等使用效果进行的评估，评估结果能够体现保护性建筑满足价值阐释与展示、社区服务和专业研究等功能需求的程度。

提供游客参观活动功能的保护性建筑还需要进行室内环境质量评估，评估内容包括温湿度、光环境、声环境和空气质量等，评估结果能反映保护性建筑是否适合较多人员进入、停留和活动，并可作为制定游客管理计划的依据。

## 2.评估方法

石窟寺及石刻保护型建筑的使用后评估过程分三个阶段，即计划准备阶段、数据收集阶段和数据分析阶段。

计划准备阶段需要完成前期资料收集和人员沟通的工作，包括收集前期勘察监测资料和其他背景资料，与建筑管理方、设计方、施工方、使用方等各利益相关方进行沟通，并制定评估工作计划书。

数据收集阶段的评估方法包括客观测量和主观评价两种。其中客观测量方法包括室内物理环境监测、能耗统计与监测、人的行为模式大数据调查、环境能源效率分析等；主观评价方法包括步入式观察、访谈、问卷调查等。

数据分析阶段以收集到的数据为基础，采用统计学和评价学的分析方法得出各方面的评估结论，并合理确定各评估内容的权重，得出综合评价结论。

## 9 中国石窟寺及石刻开放利用

文物的开放和利用指文物保护单位在不影响文物古迹安全和真实性、完整性的前提下，依托文物古迹及其环境，进行的游览、展陈、游客服务、经营服务等活动。开放分为全面开放和有限开放。全面开放是指全部开放；有限开放是指在有限的时段，或者将有限的空间开放。开放的文物保护单位，为真实地展示其自身的历史形象，恰当地使用多种艺术与技术手段和导游方案，准确地向公众阐释其价值。

### 9.1 石窟寺及石刻的开放要求

#### 9.1.1 石窟寺及石刻的开放原则

(1) 坚持突出社会效益。注重发挥文物的公共文化服务和社会教育功能，传承弘扬中华优秀传统文化。

(2) 坚持依法合规。严格遵守文物保护等法律法规，注重规范要求，切实加强监管。

(3) 坚持合理适度。文物开放利用必须以确保文物安全为前提，不得破坏文物、损害文物、影响文物环境风貌，避免过度开放。

#### 9.1.2 石窟寺及石刻对外开放对若干指标控制要求

##### 1. 石窟寺及石刻开放条件

(1) 石窟寺及石刻开放应满足以下条件：

1) 文物本体无安全隐患，具备基本的开放服务保障，符合消防、安全防范有关基本要求，能够保障人员安全和文物安全。

2) 石窟寺及石刻开放使用方责任清晰，能够承担开放的各项工作，履行文物日常维护保养职责。

3) 文物价值载体认定清晰。

(2) 开放管理机构应具备的基本条件

1) 开放管理机构应设有专门的服务接待部门，配备专职人员。

- 2) 应设有专门的文物保护单位专门机构，配备专职保卫人员。
- 3) 应配备与开放服务相适应的文物保护设施和设备。
- 4) 应具有适宜于对游客开放的内容和与之相适应的展示手段。
- 5) 对因人为或自然因素而构成文物损害的潜在威胁已采用了相应的防护措施。
- 6) 文物保护单位由多个机构管理的，应明确各机构之间的职责和协调方式。
- 7) 文物保护单位管理机构应在符合本单位文物保护的前提下，制定开放服务的质量方针和目标，并组织实施。

## 2. 开放评估

文物保护单位应进行开放可行性评估，评估开放使用对洞窟壁画、塑像及石刻的影响，根据文物保护要求和实际情况，科学制定开放策略和计划，并以恰当的方式向社会公布。开放策略和计划需明确开放区域、开放内容、开放时间、配套服务、管理维护、安全防范等方面内容。

## 3. 特殊情况下的关闭

石窟寺及石刻出现下列情况应立即停止开放并公告，进行整改：

(1) 开放过程中出现重大文物险情，影响文物安全和文物价值，或造成恶劣社会影响；

(2) 开放过程中出现安全事故等突发事件，威胁人员安全。

整改后，文物保护单位应重新进行开放可行性评估，确定文物建筑符合开放条件后，方可对外开放。重新开放前，应及时将整改情况向社会公告。

## 4. 开放区域

应根据文物保护单位的级别、性质、特点、游客承载力确定开放区域。开放活动对文物保护单位保护范围及其环境景观造成潜在威胁的区域不应开放。

## 5. 开放内容

应重点阐释和展示石窟寺及石刻的独特价值和历史文化信息，弘扬社会主义核心价值观，坚持积极健康的文化导向，提高公众的审美水平。

## 6. 开放方式

(1) 应尽最大限度向公众开放，可根据石窟寺及石刻的特点和开放需要，

采取日游和夜间游览等分时段开放方式，提升游客观光体验。

(2) 根据客流量和文物保护的需要，确定能保证石窟寺及石刻安全的日游客最大承载量，并向社会公布。根据确定的日游客最大承载量采取限流措施，通过预约参观、错峰参观等方式科学调节游客人数。

(3) 应根据文物保护单位的性质、特点和条件，采用人工讲解、语音导览和自由参观的方式进行。讲解内容应按照文物的价值编写，科学、准确、通俗，兼具知识性和趣味性。

(4) 应根据石窟寺及石刻的特点，精心设计合理的开放路线供游客参观。

(5) 应有整个文物保护单位的综合性介绍，文物保护单位整体与单体的解释宜设置中、英文简介。

(5) 石窟寺及石刻的阐释和展示主要采用本体展示、陈列展示、数字展示、图文信息展览、解说导览、建设网站等方式，真实、准确、生动地展现文物的历史、艺术、科学价值及相关的社会、文化、事件、人物关系及其背景，以增进公众对文物的认知。

## 7. 开放服务

### (1) 开放服务人员

1) 应配备讲解员和管理人员，讲解员和管理人员应遵守职业道德和职业规范。讲解员应具备以下工作能力：应熟练掌握本岗位的服务规范，熟悉文物保护单位的价值和文物保护基础知识；具有一定的文化素养和业务技能；具备较好的语言表达能力，普通话应达到规定的要求，少数民族地区讲解员应具备使用当地少数民族语言讲解的能力。

2) 根据游客需求，宜配备受过专业训练的外语讲解员。讲解员、管理人员应穿着工作服或指定的服装，佩戴统一制作的工作牌。

3) 文物保护单位的参观、讲解应由本单位的讲解员承担。非本单位人员引导参观、讲解的，应遵守文物保护单位开放参观及其讲解内容的规定和要求。

4) 管理人员应熟练掌握本岗位的服务规范，具备较好的语言表达能力，普通话应达到规定的要求。

### (2) 接待服务

1) 文物保护单位对外开放时为满足公众的需要提供的接待服务, 服务标准化工作应以游客需求为导向, 提升游客满意度, 保护消费者合法权益。

2) 开放区应设出入口, 其设置位置应合理, 方便公众购票和咨询。售、检票处应有遮阳避雨措施和一米线等设施。其形式、规模应与文物环境风貌协调。

3) 开放区域应公开服务项目和服务价格。设置分参观点售票的单位, 应分别设置单一门票或套票, 由游客自主选择购买。

4) 游客服务中心位置合理, 规模适度, 设施齐全, 功能完善。

5) 出口、售票处、主要参观点等场所, 宜设置宣传文物本体的导游全景图、导览图、参观须知、参观点介绍牌、游览范围等。

6) 应设置小件物品寄存处。

7) 门票的背面可印有参观须知、游览路线, 或专门提供相关印刷品。

8) 开放区内游览(参观)路线布局合理、顺畅。应为残疾人提供特殊服务。

9) 应向符合国家规定享受免费或优惠待遇的公众提供相应的优惠开放服务。

10) 宜向游客提供与文物保护单位相关的出版物和音像制品供其选购。

11) 不准拍摄或限制拍摄的文物保护单位开放参观点及馆藏文物, 应设立中英文说明和相应的警示标志。

12) 应建立开放服务投诉机制, 及时、妥善地处理投诉, 投诉档案记录完整。

### (3) 开放服务人员的培训

应建立开放服务人员的培训机制。特殊工作人员上岗前应进行必要的素质和技能检查、培训, 国家规定应持证上岗的工作人员应取得相应的证书。

### (4) 参观环境

1) 文物开放区内的各项营业性服务场所及从业人员应实施统一、规范管理, 定点经营。

2) 开放区内的环境空气质量应符合 GB 3095—1996 一类区、二类区标准。一类区适用一级浓度限值, 二类区适用二级浓度限值(见表 9-1、表 9-2)。

表 9-1 环境空气污染物基本项目浓度限值

序号	污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
			一级	二级	
1	二氧化硫(SO <sub>2</sub> )	年平均	20	60	ug/m <sup>3</sup>

		24 小时平均	50	150	
		1 小时平均	150	500	
2	二氧化氮 (NO <sub>2</sub> )	年平均	40	40	
		24 小时平均	80	80	
3	一氧化碳 (CO)	1 小时平均	200	200	
		24 小时平均	4	4	mg/m <sup>3</sup>
4	臭氧 (O <sub>3</sub> )	1 小时平均	10	10	
		日最大 8 小时平均	100	160	
5	颗粒物 (粒径小于等于 10μm)	1 小时平均	160	200	
		年平均	40	70	μg/m <sup>3</sup>
6	颗粒物 (粒径小于等于 2.5μm)	24 小时平均	50	150	
		年平均	15	35	
		24 小时平均	35	75	

表 9-2 环境空气污染物其他项目浓度限值

序号	污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
			一级	二级	
1	总悬浮颗粒物 (TSP)	年平均	80	200	μg/m <sup>3</sup>
		24 小时平均	120	300	
2	氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	年平均	50	50	
		24 小时平均	100	100	
		1 小时平均	250	250	
3	铅 (Pb)	年平均	0.5	0.5	
		季平均	1	1	
4	苯并[a]芘 B (a) P	年平均	0.001	0.001	
		24 小时平均	0.0025	0.0025	

3) 室内空气质量应符合 GB/T 18883—2002 中的“物理性”“化学性”“生物性”“放射性”的规定 (见表 10.3), 噪声值不应高于 60dB。

表 9-3 室内空气质量标准

序号	参数类别	参数	单位	标准值	备注
1	物理性	温度	℃	22~28	夏季空调
				16~24	冬季采暖
2		相对湿度	%	40~80	夏季空调
				30~60	冬季采暖
3		空气流速	m/s	0.3	夏季空调
				0.2	冬季采暖
4		新风量	m <sup>3</sup> /(h◆人)	30 <sup>a</sup>	
5		二氧化硫	mg/m <sup>3</sup>	0.50	1 小时均值
6		二氧化氮 NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	0.24	1 小时均值
7		一氧化碳 CO	mg/m <sup>3</sup>	10	1 小时均值
8	二氧化碳 CO <sub>2</sub>	%	0.10	日平均值	
9	氨 NH <sub>3</sub>	mg/m <sup>3</sup>	0.20	1 小时均值	
10	臭氧 O <sub>3</sub>	mg/m <sup>3</sup>	0.16	1 小时均值	

11		甲醛 HCHO	mg/m <sup>3</sup>	0.10	1 小时均值
12		苯 C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	mg/m <sup>3</sup>	0.11	1 小时均值
13		甲苯 C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	mg/m <sup>3</sup>	0.20	1 小时均值
14		二甲苯 C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	mg/m <sup>3</sup>	0.20	1 小时均值
15		苯并[a]芘 B(a)P	ng/m <sup>3</sup>	1.0	日平均值
16		可吸入颗粒物 PM <sub>10</sub>	mg/m <sup>3</sup>	0.15	日平均值
17		总挥发性有机物 TVOC	mg/m <sup>3</sup>	0.60	8 小时均值
18	生物性	菌落总数	cfu/m <sup>3</sup>	2500	依据仪器定
19	放射性	氡 <sup>222</sup> Rn	Bq/m <sup>3</sup>	400	年平均值（行动水

a 新风量要求≥标准值，除温度、相对湿度外的其他参数要求≤标准值；

b 达到此水平建议采取干预行动以降低室内氡浓度。

### (5) 开放服务质量的保证与评估、监督

文物保护单位管理机构应建立服务质量保证体系。应开展游客调查项目，向游客发放并回收具有一定调查目的的“游客调查表”，并使其制度化。

## 8. 游客安全

(1) 文物保护单位管理机构必须制定与游客有关的安全制度，建立责任追究制。

(2) 在文物保护单位开放区及其建设控制地带，要严格禁止可能造成重大安全事故的活动。

(3) 对可能危及游客人身、财物安全的场所，应向游客做出真实说明和明确的警示，设置安全标志和方便游客参观的设施。险峻地段应有专人负责安全提示，引导游客活动。

(4) 在游客集中和有安全隐患、偏僻、分散的参观点，应设有流动的安全保卫人员，其数量应与参观区域规模及性质相适应。

(5) 对文物开放区游客不能进入的地段、场所，应设置警示、禁止进入标志和防护设施。进行文物维修等施工的地段和场所，应设有明显的施工标志，并采取有效的防护隔离措施。

(6) 有条件的单位应当设有救护站，配备救护人员。

## 9. 突发事件的应急预案

应建立游客安全、文物安全以及自然灾害、事故灾难、公共卫生、社会安全等突发事件的应急预案，当突发事件发生时，立即启动相应的应急预案。

### 9.1.3 石窟寺及石刻对外开放相关工程要求

文物保护单位的保护范围内不得进行其他建设工程或者爆破、钻探、挖掘等作业。但因特殊情况需要在文物保护单位的保护范围内进行其他建设工程或者爆破、钻探、挖掘等作业的，必须保证文物保护单位的安全，并经核定公布该文物保护单位的人民政府批准，在批准前应当征得上一级人民政府文物行政部门同意；在全国重点文物保护单位的保护范围内进行其他建设工程或者爆破、钻探、挖掘等作业的，必须经省、自治区、直辖市人民政府批准，在批准前应当征得国务院文物行政部门同意。

根据保护文物的实际需要，经省、自治区、直辖市人民政府批准，可以在文物保护单位的周围划出一定的建设控制地带，并予以公布。在文物保护单位的建设控制地带内进行建设工程，不得破坏文物保护单位的历史风貌；工程设计方案应当根据文物保护单位的级别，经相应的文物行政部门同意后，报城乡建设规划部门批准。

在文物保护单位的保护范围和建设控制地带内，不得建设污染文物保护单位及其环境的设施，不得进行可能影响文物保护单位安全及其环境的活动。对已有的污染文物保护单位及其环境的设施，应当限期治理。

凡在保护范围内新建的保护、展示、管理等工程项目应满足下列要求：

- (1) 必须满足文物保护的安全性要求；
- (2) 尽可能满足文物环境的和谐性要求；
- (3) 必须严格控制新建工程的建设规模，体量宜小不宜大；
- (4) 新建工程设计抗震按照当地抗震烈度要求设防；
- (5) 建筑造型应避免与文物保护单位的历史时空出现“错位”现象，避免不恰当的建筑表现力，力求简洁恰当。

展示和游客服务设施的选址应根据文物保护规划和专项设计进行，须符合文物古迹保护、价值阐释、保证游客安全、对原有环境影响最小等要求。

开放区域内的标志标识系统应与文化特色、景观环境相协调，体量、尺度、色彩、材质适宜，文字及图案内容清晰、直观，突出文化性、生态性、艺术性和功能性。鼓励采用双语标识及国际通用图形标志。

随展示路线设计配置寄存、公厕、饮水、休憩场地等服务设施。

开放区服务设施全部按照无障碍标准设计，包括完善残疾人通道，为老人或行动不便者提供轮椅或专门服务。

如需增设照明设备，应进行充分技术论证，并经文物主管部门批准后才能安设照明设备，安装时，应按文物保护部门的规定进行设计施工。照明的照度或亮度、光源的红外线和紫外线的含量、照射时间，即被照彩塑、壁画的年曝光时间以及光源的颜色参数均须严格按标准进行设计。应选用无紫外线、无红外线或其含量少，符合标准的灯。

栈道防护栏杆上杆离防护面高度不低于 1.2 米。根据实际情况对栈道、护栏、防石网等服务和安全设施定期进行安全检测。

## 9.2 石窟寺及石刻开放游客承载量要求

### 9.2.1 游客承载量的概念

保护区域承载量的概念可追溯到 20 世纪 30 年代的美国国家公园服务处，到 20 世纪 60 年代开始有较系统化的应用。从那时起，这个概念经多次修改、定义，并得到进一步细化。在这种演变过程中出现了几个框架或方法论，虽然并没有形成一致性的命名系统，但现在似乎都集中并基本达成一个共识的方法。可以接受改变的极限、游客冲击管理、游客体验和资源保护是目前广泛使用的模型。这些模型纳入类似的规划和决策过程，用于管理游客和他们所参观地方之间的变化与复杂的关系。这些模式的主要原则、利用指标和监测，已被国际组织改编并应用在可持续旅游、原野和自然遗产保护区管理的政策中。

针对文化遗址、针对各类需求的公众，要回答“多少改变是可以接受的？”“怎样才是最佳的体验？”这样的问题特别困难。对文化遗址的改变“零容忍”或“无改变”的政策（即任何损坏都不能被接受）被公认是遥不可及的理想，但又必须大力加强文物资源的保护力度，因为任何损失都是无法挽救的。为调节逐渐增强的参观压力，让游客看什么，在什么状况下体验一个遗产地，对文物资源某种程度的妥协，是管理策略的一部分，但是必须是在可接受的程度内。

任何以游客参观的开放形式都会对文物本体影响和环境产生影响。游客数

量对文物本体和环境产生的影响要尽可能小且处于可接受的极限。

因此，游客承载量不是文物保护单位可以安全容纳的游客人数，而是确定在防止文物本体劣化和环境受到影响的同时，寻求维护游客安全和满意的临界值所必需的状态。这些目标牵涉到考虑一系列的变数，包括遗产地的范围及其价值；环境状况间复杂的因果关系；劣化和参观；游客服务和基础设施的需求；遗产地可接受的改变或冲击的程度和监测改变的方法；保护遗产地的价值与游客的健康和安全的手段，同时仍然允许灵活性以满足不断变化的状况。在目前的研究中，需要在一开始的时候就对固有的复杂性建立清楚的参数。

### 9.2.2 游客承载量评估目标

评估目标包括：

- (1) 确定文物保护单位可供开放的文物资源；
- (2) 确定影响文物保护单位游客承载量的限制条件；
- (3) 确定监测游客容量和游客影响的指标；
- (4) 确定文物保护单位游客承载量测算方法；
- (5) 确定修正文物保护单位游客承载量的程序；
- (6) 得出文物保护单位的游客承载量。

### 9.2.3 评估游客承载量的基本原则

(1) 游客安全第一的原则。需对文物开放方式、观众参观方式、参观路线设计、开放服务设施等涉及游客安全的因素进行全面评估。

(2) 文物安全原则。游客参观不会对文物及其赋存环境造成破坏，或者游客参观造成的影响经评估后属于可接受的限度内的原则。

(3) 游客获得良好体验的原则。需评估展示方法、展示内容、管理方式、参观环境等，使游客对文物能够得到全面的理解和认识并获得满意的参观感受。

### 9.2.4 游客承载量评估的基本步骤

确定游客承载量，需经过全面、仔细的评估，分析涉及“9.3.3 评估游客承载量的基本原则”内容的各个要素，提出问题并确定影响参观的各种限制条件。

根据评估结果，确定游客承载量、制定监测方法和管理工具。

#### 1.确定管理目标和研究影响参观的限制条件

文化遗产地的承载量不是遗产可以安全接纳的游客人数，而是通过评估发现各种限制条件，以达到防止遗产劣化和遗产赋存环境受到破坏、维护游客安全和满意度临界值的目标。这个目标的实现要考虑到“9.3.3 评估游客承载量的基本原则”涉及的一系列变化因素。

##### (1) 游客安全涉及的因素

洞窟/石刻位置和石窟崖体稳定性、游览线路设置、附加设施（栈道、平台、楼梯、桥梁，等）承载安全是否适合游客参观，以及威胁游客人身安全的其他各类要素，评估这些要素对于游客开放需求的适应性要求。出于文物安全和游客参观的目的，实施必要的、稳妥的加固和防护工程。

##### (2) 开放资源和开放范围涉及的要素

根据壁画内容、价值、时代，洞窟大小和位置等，确定开放洞窟；确定开放的文物建筑。综合考虑游客参观对石窟和石刻、崖体、环境的影响，游客管理、容纳量和服务等，确定石窟区域开放参观区域。

##### (3) 文物及其赋存环境的变化

可接受的遗产及其环境改变极限，评估这种改变是由于游客开放参观造成，或加剧了这种改变；遗产可能遭受最大威胁的时段。

##### (4) 游客满意度相关的各种因素

1) 游客健康：主要是考虑在半封闭环境下由于温湿度、气味、二氧化碳含量过高引起参观不适；

2) 参观体验不佳：主要是参观方式、路线设计、石窟/石刻讲解介绍、参观环境、服务设施、管理方式不合理，以及了解遗产地价值不完全或不准确、相关信息获取渠道不畅等要素；

#### 2.确定冲击遗产影响参观的关键问题

对于石窟寺和石刻，主要有以下内容：

(1) 石窟、石刻文物安全不能得到保障；

(2) 无法提供完善的参观方式；

(3) 游客参观服务不完备；

(4) 石窟寺壁画、彩塑及石刻的多种病害，是内部可溶盐随湿度变化而反复溶解和结晶所致，必须分析、了解盐分含量和组成；

(5) 旅游旺季窟内过度拥挤，空气污浊，参观环境恶化，给游客带来不适的感觉；

(6) 石窟崖体不稳定，辅助设施不完善、不安全等。

### 3.确定监测遗产变化的关键性指标

主要有以下内容：

(1) 监测文物与载体的稳定性；

(2) 通过监测与分析，确定与可溶盐有关病害的证据；

(3) 通过监测、调查分析，确定导致游客满意度下降的主要因素。

### 4.确定遗产保存和游客满意的理想状态

(1) 壁画和彩塑长期保存的理想状态是洞窟、石刻所处环境稳定，也就是期望湿度的变化幅度较小，不会引起可溶盐的潮解或风化；

(2) 保障游客在洞窟内的舒适度，即期望二氧化碳的浓度不高于国家认可的浓度，有满足参观需求的洞窟空气交换率，有足够的参观空间，不会发生拥挤，避免人员受伤和文物受损；

(3) 保证游客获得遗产文化价值的完整性、准确性，获取各类信息的渠道通畅；

(4) 得到满意的软件和硬件参观服务。

### 5.设计并执行评估方案

评估方案的目的是确定病害作用机理，病害与参观行为的关联，游客健康、安全和舒适程度。评估方案包括游客参观分析、实验室分析调查、环境监测分析、通过现场试验监测病害的活动性、评估每个洞窟/石刻的状况和参观的条件。这些评估结果共同提供以下信息：

(1) 洞窟/石刻内现存活动病害的类型和分布情况；

(2) 激活病害的环境因素；

(3) 通过测定每小时窟内外空气交换的量值，来确定自然状态下的洞窟空

气交换率，空气交换率可表示对窟内相对湿度（RH）和二氧化碳浓度变化的影响；

（4）参观活动对壁画的影响，二氧化碳的累积对游客的影响，拥挤和其他因素对游客体验的影响；根据每个洞窟/石刻的重要性、大小、安全性和观赏性，确定开放参观的可利用条件；

（5）影响游客承载量的管理条件

#### 1) 游客的参观分析

游客参观分析目的一是要调查并了解游客的数量、背景（如来源、性别、年龄、文化程度、职业等）、行为和参观模式、参观时间、偏好、习惯等，可提供给游客的文物保护单位的信息内容和方式，游客参观体验调查（主要包括文物信息接受程度、参观舒适度、服务满意度）；二是要确定参观团队的最大人数和每个洞窟/石刻的实际容量或占用率（如果进入洞窟参观的话）；三是确定开放洞窟内二氧化碳的安全浓度；四是评估分析现有的游客管理方法和对策。

为实现以上目的，需要通过游客调查和游客参观行为观察、评估单个游客所需参观的空间大小，了解能够适应的二氧化碳浓度范围，以及对现有游客管理能力和方法进行分析和评估等一系列工作，以确定能够确保游客健康、安全和舒适的空间大小，可接受的二氧化碳浓度上限，以及对特殊洞窟/石刻的管理办法。

可以确定的 5 个关键参数为（进入洞窟参观方式）：每个参观团队游客的最大数量、游客参观所需的最小面积、可参观洞窟的最小面积、每个洞窟参观的最短时间和洞窟内二氧化碳浓度的上限。如果不进入洞窟参观，也需要根据基本设施状况、讲解和参观方式等要素，确定参观团队人数。

#### 2) 壁画病害的实验室分析调查

相对湿度变化会导致壁画中可溶盐潮解和结晶的变化，是多种壁画病害的诱因，需要进行如下的分析：

①分析鉴别盐的种类；

②确定引起可溶盐潮解的相对湿度的临界值,从而确定洞窟/石刻相对湿度的控制标准；

③通过实验观察盐在砂砾岩和泥质壁画的迁移过程；

④确定含盐的壁画随着相对湿度的反复变化而发生的劣化现象。

### 3) 环境调查

洞窟环境的变化，是游客入窟参观和壁画劣化之间发生联系的关键点。环境调查工作主要是确定洞窟湿气的来源，包括调查游客呼吸对湿度的影响以及窟门的开启与关闭对洞窟微环境的影响。环境调查还需查明自然状态下洞窟空气交换率（即通风状况）对洞窟湿度和二氧化碳浓度造成的影响。环境调查工作主要包括：

①进行窟外环境与开放洞窟窟内微环境的监测；

②模拟洞窟的环境状况；

③测量洞窟的空气交换率，以洞窟二氧化碳的浓度不超过 1500ppm 为界限。

石刻的赋存环境调查可以参照石窟环境调查方法。

### 4) 现场试验

试验目的是确定游客参观与洞窟微环境波动之间的定量关系，以及与壁画/石刻病害发展之间的关联性，并且通过实验室形成今后长期监测病害的具体方法。进行环境监测和游客人数统计，监测记录病害变化情况，并做相应分析。

### 5) 洞窟/石刻现状、风险等级和参观条件的评估分析

对具有开放潜力的洞窟/石刻进行本体状况和开放参观条件的评估。根据它们的本体状况（即对壁画和彩塑的保存状况，主要是病害状况）和其开放参观条件（即价值、安全和通道、面积，等），确定其中哪些洞窟/石刻可以开放参观，哪些洞窟/石刻不宜开放参观。具体评估工作包括：

①收集历史信息资料和洞窟/石刻基础数据；

②现场评估洞窟/石刻情况和开放参观条件；

③风险等级的认定；

④确定洞窟/石刻价值高低、安全性、通道和可提供的游客参观空间；

⑤汇集每个洞窟/石刻或石刻的基础资料。

通过开展此项评估，对具有开放潜力的洞窟/石刻进行风险等级划分，同时规定离壁面 0.5 米以外的空间为参观有效空间。

## 6.确定最终的游客承载量限定条件

游客承载量的限定条件来自于 9.2.3.5 中的研究和评估结果，包括可参观洞窟/石刻数量的限定、洞窟/石刻环境条件的限定和游客管理方法的限定。

(1) 确定不适宜参观的洞窟/石刻或文物单体数量。根据洞窟/石刻价值、安全、游客通道、洞窟/石刻可参观面积和壁画风险程度等因素，综合确定洞窟/石刻开放所必须满足的各项条件的临界值。这些限制条件将宜开放洞窟/石刻和不宜开放的洞窟/石刻划分出来，通常情况下，将那些价值较低、有安全隐患、面积狭小和病害严重的洞窟/石刻列为不适宜开放的洞窟/石刻。

(2) 确定石窟、石刻开放区域及面积。

(3) 确定在控制洞窟/石刻环境条件情况下可开放的洞窟/石刻。洞窟/石刻内湿度和二氧化碳的临界值的确定，使得一些二氧化碳浓度容易超标和对湿度升高敏感的洞窟/石刻成为限制开放的洞窟/石刻，通过控制环境指标，这些洞窟/石刻可作为参观洞窟/石刻。

(4) 游客管理方法的限定。游客管理方法涉及一系列具体指标，如参观团队的人数、讲解员数量、接待和展示能力、参观时间、每个团队可参观洞窟/石刻的数量和参观路线，游客休憩、参观道路、卫生、服务等设施，都对遗产的游客承载量产生影响，如果改变某些限制条件，遗产的游客承载量可能会随之发生变化。

上述确定游客承载量限定条件的步骤，在各项要素评估过程中要更多的建立与游客数量的关联，得到以游客数量为基本参考量的限定条件。

## 7.游客承载量的计算

根据评估得出的限定条件，结合游客管理方式，按照面积容量法、游线容量法、卡口容量法或其他有效计算方法，根据“表 9-4 石窟/石刻文物保护单位开放空间承载量限值和公共区域和游步道承载量标准”，计算各类限定条件下的游客承载量并进行比较，取其最小值作为文物保护单位游客基本承载量，将该数值对照影响石窟石刻及其环境（含生态环境）和游客的关键问题，逐项评估、修正，并与文物保护单位游客量经验值、瞬时承载量核对，最终确定文物保护单位的最终游客承载量数值（向下取整保留百位数）。

表 9-4 石窟/石刻文物保护单位开放空间承载量限值和公共区域和游步道承载量标准

内部开放空间承载量限值		
极限值	展示面积	高度
≥0.52 m <sup>2</sup> /人	≥13 m <sup>2</sup>	≥2m
公共区域和游步道承载量标准		
公共区域	游步道	
≥4m <sup>2</sup> /人	≥0.6m <sup>2</sup> /人, ≥0.8-1mm/人	

(1) 空间承载量计算方法

某石窟/石刻文物保护单位（文物景点）开放空间（以面积计算）除以人均占有面积，乘以文物保护单位（文物景点）有效开放时间与游客在该文物保护单位（文物景点）滞留时间的比值。若一个石窟/石刻文物保护单位有多个文物景点对任一一组游客均实行开放,则取其最小数值为空间承载量，向下取整数。

计算方法见公式 9.1:

$$C_k = \text{Int} \left( \text{Min} \left( \frac{S_i}{A_i} \times \frac{T_i}{t_i} \right) \right) \dots\dots\dots (9.1)$$

若一个石窟/石刻文物保护单位多个文物景点分别对不同游客开放，则几个文物景点游客承载量数据相加，向下取整数得到空间承载量。

计算方法见公式 9.2:

$$C_k = \text{Int} \left( \sum \frac{S_i}{A_i} \times \frac{T_i}{t_i} \right) \dots\dots\dots (9.2)$$

公式 9.1、公式 9.2 中:

- CK——石窟/石刻文物保护单位承载量;
- Si——第 i 个文物景点开放面积;
- Ai——第 i 个文物景点游客人均占有面积;
- Ti——第 i 个文物景点有效开放时间;
- ti——游客在第 i 个文物景点平均滞留时间。

(2) 载重承载量计算方法

某石窟/石刻文物保护单位（文物景点）栈道、桥梁、楼梯等通道以及相关建筑面积，除以单位荷载（以平方米/人计），乘以通道以及相关建筑有效开放时间与游客在通道、建筑上滞留时间的比值。若一个石窟/石刻文物保护单位有

多个通道以及相关建筑对任一组游客均实行开放,则取其最小数值为载重承载量, 向下取整数。

计算方法见公式 9.3:

$$C_z = \text{Int} \left( \text{Min} \left( \frac{S_{Zi}}{A_{Zi}} \times \frac{T_i}{t_i} \right) \right) \dots\dots\dots (9.3)$$

若一个石窟/石刻文物保护单位的多个通道以及相关建筑文物景点分别对不同游客开放, 则几个通道以及相关建筑游客载重承载量数据相加, 向下取整数得到载重承载量。

计算方法见公式 9.4:

$$C_z = \text{Int} \left( \sum \frac{S_{Zi}}{A_{Zi}} \times \frac{T_i}{t_i} \right) \dots\dots\dots (9.4)$$

公式 9.3、公式 9.4 中:

CZ——载重承载量;

SZi——某通道、建筑面积;

AZ——某通道、建筑单位荷载;

Ti——某通道、建筑对游客的有效开放时间;

ti——游客在某通道、建筑平均滞留时间。

注: AZ 值会随时间的改变而发生变化, 须监测或定时测算。

### (3) 游步道承载量计算方法

#### 1) 面积计算法

某石窟/石刻文物保护单位(文物景点)游步道面积, 除以人均占有面积, 乘以游步道有效开放时间与游客在该游步道上滞留时间的比值。若一个文物保护单位有多个游步道对任一组游客均实行开放, 则取其最小数值为游步道承载量, 向下取整数。

计算方法见公式 9.5:

$$C_y = \text{Int} \left( \text{Min} \left( \frac{S_{Yi}}{A_{Yi}} \times \frac{T_i}{t_i} \right) \right) \dots\dots\dots (9.5)$$

若一个石窟/石刻文物保护单位的多个游步道分别对游客开放，则几个游步道游客承载量数据相加，向下取整数得到游步道承载量。

计算方法见公式 9.6:

$$C_Y = \text{Int} \left( \sum \frac{S_{Yi} \times T_i}{A_{Yi} \cdot t_i} \right) \dots\dots\dots (9.6)$$

公式 10.5、公式 10.6 中:

CY——游步道承载量;

SZi——某游步道面积;

AZi——某游步道人均占有面积;

Ti——某游步道有效开放时间;

ti——游客在某游步道平均滞留时间。

## 2) 长度计算法

某石窟/石刻文物保护单位（文物景点）游步道长度，除以人均占有长度，乘以游步道有效开放时间与游客在该游步道上滞留时间的比值。若一个石窟/石刻文物保护单位有多个游步道对任一组游客均实行开放,则取其最小数值为游步道承载量，向下取整数。

计算方法见公式 9.7:

$$C_Y = \text{Int} \left( \text{Min} \left( \frac{L_{Yi} \times T_i}{M_{Yi} \cdot t_i} \right) \right) \dots\dots\dots (9.7)$$

若一个石窟/石刻文物保护单位的多个游步道分别对不同游客开放，则几个游步道游客承载量数据相加，向下取整数得到游步道承载量。

计算方法见公式 9.8:

$$C_Y = \text{Int} \left( \sum \frac{L_{Yi} \times T_i}{M_{Yi} \cdot t_i} \right) \dots\dots\dots (9.8)$$

公式 9.7、公式 9.8 中:

CY——游步道承载量;

LZi——某游步道长度;

MZi——某游步道人均占有长度;

T<sub>i</sub>——某游步道有效开放时间；

t<sub>i</sub>——游客在某游步道平均滞留时间。

(4) 设施承载量计算方法

石窟/石刻文物保护单位某设施单次运行所容纳的游客承载量与每天运行次数的乘积。若一个石窟/石刻文物保护单位有多个设施对任一组游客均实行开放,则取其最小数值为游步道承载量, 向下取整数。

计算方法见公式 9.9:

$$C_s = \text{Int} (\text{Min} (D_i \times Q_i) ) \dots\dots\dots (9.9)$$

若一个石窟/石刻文物保护单位多个设施分别对不同游客开放, 则几个设施游客承载量数据相加, 向下取整数得到设施承载量。

计算方法见公式 9.10:

$$C_s = \text{Int} (\sum D_i \times Q_i) \dots\dots\dots (9.10)$$

公式 9.9、公式 9.10 中:

C<sub>S</sub>——石窟/石刻文物保护单位设施承载量;

D<sub>i</sub>——第 i 个设施单次运行最大承载量;

Q<sub>i</sub>——第 i 个设施日最大运行次数。

(5) 公共区域承载量计算方法

开放的石窟/石刻文物保护单位公共区域总面积除以人均占有面积, 乘以开放区域有效开放时间与游客在该区域)滞留时间的比值。若一个石窟/石刻文物保护单位有多个公共区域对任一组游客均实行开放,则取其最小数值为空间承载量, 向下取整数。

计算方法见公式 9.11:

$$C_g = \text{Int} (\text{Min} (\frac{S_{Gi}}{A_{Gi}} \times \frac{T_i}{t_i} ) ) \dots\dots\dots (9.11)$$

若一个石窟/石刻文物保护单位有多个公共区域分别对不同游客开放, 则几个公共区域承载量数据相加, 向下取整数得到公共区域承载量。

计算方法见公式 9.12:

$$C_G = \text{Int} \left( \sum \frac{S_{Gi} \times T_i}{A_{Gi} \times t_i} \right) \dots\dots\dots (9.12)$$

公式 9.11、公式 9.12 中：

CG——石窟/石刻文物保护单位公共区域承载量；

SGi——第 i 个公共区域面积；

AGi——第 i 个公共区域人均占有面积；

Ti——第 i 个公共区域的有效开放时间；

ti——游客在第 i 个公共区域平均滞留时间。

## 8. 管理对策

防止壁画、彩塑、石刻劣化，赋存环境受到破坏，保障游客参观满意度，是游客承载量研究要达到的管理目标。通过对各项影响要素的评估分析，确定了游客承载量的各种限定指标，得出游客承载量数值，根据这些评估和计算结果，制定必要的管理对策，建立新的管理工具，逐步形成长期的科学管理方法，以满足不断变化的游客人数和多样化的游客体验需要。

### (1) 建立洞窟/石刻监控和满足管理需要的网络化系统工具

为实时掌握石窟石刻相关文物、环境变化，分析其受游客参观影响程度，及时改进游客管理策略，需要建立一个较全面的覆盖文物本体、环境、游客监测体系，以满足石窟/石刻保护和开放管理的需要，同时也可作为石窟/石刻游客承载量的管理工具。这套系统具备以下功能：

1) 游客预约网络系统，可实现网络预约，可根据预约，预先调整不同时段的游客数量，缓解高峰时段的游客参观压力；

2) 对开放洞窟/石刻开展实时的环境监测，可根据环境监测的结果，及时做出调整洞窟/石刻开放或关闭的决定；

3) 对游线做实时调整，旅游旺季或节假日为了疏导游客，可及时调整每个参观团队的参观路线，减少洞窟/石刻拥挤和游客参观等待时间；

### (2) 根据监测结果而采取的管理措施

1) 出现崖体稳定性和文物病害时，应停止石窟石刻等文物参观。或者关闭出现病害的洞窟/石刻；

2) 窟内湿度达到阈值以上时, 应关闭存在盐害壁画的洞窟/石刻, 及时指定替代洞窟/石刻, 调整参观线路。

3) 根据洞窟/石刻病害和保护情况的变化, 可调整洞窟/石刻风险等级。

4) 当洞窟二氧化碳超出极限时, 应减少该洞窟的参观次数或延长参观团组之间的进窟间隔时间, 并开启窟门。

(3) 应按照国家规定, 向公众发布遗产地游客承载量数值。

(4) 游客承载量不是静态的数据, 而是动态和机动的系统。保护水平和管理水平的提高、游客体验需求的提升, 都会影响游客承载量数值, 需要不断地重新监测和评估洞窟的状况和游客的满意程度。未来游客模式和游客数量的变化, 无疑将影响参观的对策, 应充分考虑影响文物保护单位游客承载量的多种因素, 需要及时制定新的管理策略。管理策略的不断完善, 将能逐步达到洞窟安全和游客满意的理想目标。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国文物保护法（2017年11月，第十二届全国人民代表大会常务委员会第三十次会议通过）
- [2] 中华人民共和国文物保护法实施条例（2016年1月13日国务院第119次常务会议修订）
- [3] 中华人民共和国旅游法（2018年10月26日第十三届全国人民代表大会常务委员会第六次会议修订）
- [4] 中国文物古迹保护准则（2015年版）
- [5] 西安宣言—保护历史建筑、古遗址和历史地区的环境（2005年10月，国际遗址理事会第15届大会）
- [6] GB 3095—2012环境空气质量标准
- [7] GB/T 15624-2011服务标准化工作指南
- [8] GB/T 18883-2002室内空气质量标准
- [9] GB/T 18971-2003 旅游规划通则
- [10] GB/T 20416-2006 自然保护区生态旅游规划技术规程
- [11] GB/T 22527-2008文物保护单位标志
- [12] GB/T 22528-2008文物保护单位开放服务规范
- [13] GB 50298-1999 风景名胜区规划规范
- [14] GB 50357-2005 历史文化名城保护规划规范
- [15] LB/T 034-2014 景区最大承载量核定导则
- [16] WW/T 0083-2017 文物保护单位游客承载量评估规范
- [17] 文物建筑开放导则（国家文物局文物保发〔2019〕24号）
- [18] 关于促进文物合理利用的若干意见（国家文物局文物政发〔2016〕21号）
- [19] 敦煌莫高窟保护总体规划（2006-2025）

## 石窟寺和石刻（工程师）样题

### 一、单项选择题

- 下列岩石中，不属于沉积岩的是（ ）。  
A. 砂岩  
B. 石灰岩  
C. 花岗岩  
D. 白云岩
- 在岩穴、石崖壁面或独立岩石上涂绘或凿刻图案的文物类型称为（ ）。  
A. 摩崖题刻  
B. 碑刻  
C. 岩画  
D. 石窟
- 岩石抗拉强度（ ）抗压强度。  
A. 小于等于  
B. 大于  
C. 小于  
D. 等于
- 新疆克孜尔石窟大约始建于（ ）世纪。  
A. 公元 2  
B. 公元 3  
C. 公元 5  
D. 公元 7
- 不属于砂岩类石窟寺的是（ ）。  
A. 南响堂石窟  
B. 云冈石窟  
C. 乐山大佛  
D. 大足石刻
- 地面某一点相对高程有（ ）。  
A. 1 个点  
B. 3 个点  
C. 无数个点  
D. 10 个点
- 下列不属于渗漏水源的是（ ）。  
A. 大气降水  
B. 凝结水  
C. 地表水体  
D. 地下水
- 以下关于表层劣化病害类型调查，阐述错误的是（ ）。  
A. 病害的科学分类和描述是表层劣化病害调查最基础的一项研究工作。  
B. 调查工作开展前，应对拟保护对象的病害类型进行全面甄别，对各类病害类型进行详细描述，并由现场调查技术人员共同编制病害类型说明表。  
C. 病害类型说明表应包括病害名称、现象描述、分布特点及区域、图例、照片。  
D. 病害分类应严格执行《石质文物病害分类与图示》（WW/T 0002-2007）有关规定。
- 被称为中国石窟寺考古奠基人的学者是（ ）。  
A. 梁思永  
B. 苏秉琦



- C. 长石—石英—滑石—萤石      D. 石英—萤石—长石—滑石
20. 定义不准确的是 ( )。
- A. 开裂——石质文物在压应力作用下开裂的现象
- B. 结构失稳——文物本体结构或其所依存的岩土环境所产生的局部或整体不稳定的现象
- C. 错位——石质文物块体间发生明显位移现象
- D. 崩塌——陡坡或悬崖上的岩体在自然和人为因素的作用下,发生向下坠落的破坏形式
21. 受酸雨酸雾大风化破坏影响相对较大的石窟是 ( )。
- A. 云冈石窟      B. 龙门石窟
- C. 大足石刻      D. 麦积山石窟
22. 地壳中含量最多的矿物是 ( )。
- A. 高岭石      B. 方解石
- C. 长石      D. 石英
23. 地震烈度反映一次地震的 ( )。
- A. 能量大小      B. 地表破坏程度
- C. 影响范围      D. 地震裂缝情况
24. 根据《文物保护工程竣工验收资料要求》,施工资料不包括 ( )。
- A. 施工组织设计      B. 图纸会审
- C. 施工预算书      D. 施工日志
25. 不属于平顶洞窟顶板开裂变形治理措施的有 ( )。
- A. 支护      B. 局部清除
- C. 锚固      D. 灌浆
26. 常用于石窟表层劣化勘察的检测方法不包括 ( )。
- A. 表面回弹锤击测试      B. 地震面波测试
- C. 岩石声学测试      D. 表面吸水性能测试
27. 下列属于硅酸盐矿物的有 ( )。
- A. 石英      B. 白云石
- C. 辉石      D. 长石
28. 始建于我国北魏时期的石窟不包括 ( )。
- A. 甘肃敦煌莫高窟      B. 山西大同云冈石窟
- C. 河南洛阳龙门石窟      D. 河南巩县石窟
29. 对于不可移动石质文物保护工程环境状况调查,一般可不包括的内容是 ( )。
- A. 所在区域的劳动力及物价情况      B. 温度变化特征
- C. 大气降水特征      D. 湿度变化特征



40. 不属于凝灰岩岩性的石窟寺和石刻的是 ( )。
- A. 浙江余杭南山造像                      B. 浙江绍兴柯岩造像  
C. 浙江杭州飞来峰造像                      D. 辽宁义县万佛堂石窟

## 二、多项选择题

41. 下面对于石刻造像渗透加固材料重要的技术要求有 ( )。
- A. 加固后强度适度增加                      B. 加固后应具有防水性  
C. 加固后的颜色变化较好                      D. 渗透深度必须达到或大于风化深度  
E. 加固具有透气性
42. 监测工作是岩土工程中的一个重要环节, 其目的有 ( )。
- A. 保证施工质量                              B. 验证工程长期有效性  
C. 保证施工安全                              D. 保证游人安全  
E. 加快工程建设
43. 下列始建于我国南北朝时期的石窟有 ( )。
- A. 敦煌莫高窟                                B. 大同云冈石窟  
C. 洛阳龙门石窟                              D. 天水麦积山石窟  
E. 邯郸响堂山石窟
44. 下列始建于我国十六国时期的石窟有 ( )。
- A. 甘肃敦煌莫高窟                              B. 山西大同云冈石窟  
C. 河南洛阳龙门石窟                              D. 新疆拜城克孜尔石窟  
E. 甘肃天水麦积山石窟
45. 不属于外力地质作用的有 ( )。
- A. 岩浆作用                                  B. 剥蚀作用  
C. 搬运作用                                  D. 沉积作用  
E. 地震作用
46. 与酸雨形成有关的因素包括 ( )。
- A. 煤火燃烧                                  B. 天然气燃烧  
C. 汽油燃烧                                  D. 太阳黑子活动  
E. 高空臭氧层
47. 石刻表面裂隙修复技术包括 ( )。
- A. 裂隙勾缝                                  B. 裂隙灌浆  
C. 粘结修复                                  D. 铁件加固  
E. 去掉松散部分
48. 三维激光扫描测绘技术的优势有 ( )。
- A. 非接触                                      B. 精度高

- C. 速度快  
E. 再现性强
- D. 成本低
49. 陡坡易产生崩塌的地层是 ( )。
- A. 厚层状泥岩  
B. 玄武岩  
C. 厚层状泥灰岩  
D. 厚层状砂岩与泥岩石层  
E. 厚层状砂岩
50. 在加固碎裂状危岩体中, 为防止预应力锚索的预应力衰减采取的有效措施是 ( )。
- A. 增大锚固段的锚固力  
B. 增大锚墩  
C. 分次、分级张拉  
D. 增厚垫板  
E. 增大自由段的长度

## 石窟寺和石刻 (工程师) 参考答案

01 C	02 C	03 C	04 B	05 A
06 C	07 B	08 D	09 C	10 B
11 A	12 C	13 A	14 B	15 D
16 D	17 D	18 B	19 A	20 A
21 C	22 C	23 B	24 C	25 B
26 B	27 B	28 A	29 A	30 C
31 A	32 D	33 A	34 C	35 B
36 B	37 C	38 D	39 C	40 C
41 ACDE	42 ABC	43 BCE	44 AE	45 E
46 ABC	47 ABC	48 ABC	49 BD	50 BC

## 石窟寺和石刻（设计师）样题

### 一、单项选择题

1. 根据《石质文物保护工程勘察规范》，不符合地衣取样要求的是（ ）。
  - A. 叶子部分，用手术刀撬起提取
  - B. 表面硬壳部分，应用手术刀尖撬起菌体所在硬壳，以便中心部分在不受损条件下被提取
  - C. 硬壳内部深入岩石部分，可由底层取部分厚度的样品
  - D. 果实部分，只需提取菌体的一小部分组织
2. 岩石分级和特性试验中，对岩石材料的试验项目不包含的内容是（ ）。
  - A. 含水量
  - B. 抗压强度
  - C. 抗拉强度
  - D. 时间效应和塑限试验
3. 下列始建于十六国时期的石窟是（ ）。
  - A. 敦煌莫高窟
  - B. 大同云冈石窟
  - C. 洛阳龙门石窟
  - D. 新疆克孜尔石窟
4. 下列岩石中，不属于沉积岩的是（ ）。
  - A. 砂岩
  - B. 石灰岩
  - C. 花岗岩
  - D. 白云岩
5. 下列石窟中，开凿年代最早的是（ ）。
  - A. 敦煌莫高窟
  - B. 龙门石窟
  - C. 大足石刻
  - D. 云冈石窟
6. 对于一处石质文物点维修工程的前期测绘，可以不包括的（ ）。
  - A. 文物保护区的地形测绘
  - B. 临时性建筑的测绘
  - C. 文物单体的平、立、剖面测绘，重要建筑和单体还应考虑仰视、俯视图和构件大样的测绘
  - D. 病害发育和残损部位
7. 新疆克孜尔石窟大约始建于（ ）世纪。
  - A. 公元 2
  - B. 公元 3
  - C. 公元 5
  - D. 公元 7
8. 影响石窟文物保存的毛细水治理最有效的措施是（ ）。
  - A. 修建窗檐
  - B. 加热
  - C. 增大温度
  - D. 降低地下水位
9. 下列不属于砂岩类石窟寺的是（ ）。
  - A. 南响堂石窟
  - B. 云冈石窟

- C. 乐山大佛  
D. 大足石刻
10. 下列可以构成隔水层的是 ( )。
- A. 粗砂岩  
B. 砾岩  
C. 黏土  
D. 细砂岩
11. 地面某一点相对高程有 ( )。
- A. 1 个点  
B. 3 个点  
C. 无数个点  
D. 10 个点
12. 水文地质调查方法不包括 ( )。
- A. 水文地质测绘  
B. 水文钻探  
C. 水文地质试验  
D. 岩体原位测试
13. 关于矿物的说法, 错误的是 ( )。
- A. 矿物是组成矿石和岩石的基本单位  
B. 矿物是各种地质作用形成的化合物或单质  
C. 矿物具有较为稳定的物理性质  
D. 每种矿物只有一个硬度
14. 某石窟寺赋存地层岩性为侏罗纪长石石英砂岩, 该地层的地质年代是 ( )。
- A. 元古代  
B. 古生代  
C. 中生代  
D. 新生代
15. 以下不属于不良地质现象的是 ( )。
- A. 洪涝  
B. 滑坡  
C. 崩塌  
D. 泥石流
16. 云母是 ( )。
- A. 岛状硅酸盐矿物  
B. 链状硅酸盐矿物  
C. 层状硅酸盐矿物  
D. 架状硅酸盐矿物
17. 火成岩中花岗岩是 ( )。
- A. 超基性岩  
B. 基性岩  
C. 中性岩  
D. 酸性岩
18. 关于文物保护工程岩土工程勘察勘探工作原则的说法, 错误的是 ( )。
- A. 勘探工作应在工程地质测绘基础上进行  
B. 无论是勘探工作的总体布置还是单个勘探点的设计, 都应综合考虑、统筹兼顾  
C. 勘探布置应与勘察阶段相适应



24. 关于含水层形成条件, 认识错误的是 ( )。
- A. 岩土层具有储存重力水的空间 B. 具备储存地下水的地质结构  
C. 具有充足的补给水源 D. 具有良好的径流通道
25. 下列关于潜水说法, 错误的是 ( )。
- A. 饱水带中第一个具有自由表面的含水层中的水称作潜水  
B. 潜水没有隔水顶板, 或只有局部的隔水顶板  
C. 潜水的表面为自由水面, 称作潜水面, 从潜水面到隔水底板的距离为潜水含水层的厚度, 潜水面到地面的距离为潜水埋藏深度  
D. 潜水含水层厚度与潜水潜藏深度不会发生变化
26. 关于地下水排泄的说法, 错误的是 ( )。
- A. 含水层失去水量的作用过程称作排泄  
B. 在排泄过程中, 含水层的水质不发生变化  
C. 研究含水层的排泄应包括排泄去路及方式、影响排泄的因素及排泄量  
D. 一个含水层中的水可向另一个含水层排泄。此时, 对后者来说, 即是从前者获得补给
27. 被称为中国石窟寺考古奠基人的学者是 ( )。
- A. 梁思永 B. 苏秉琦  
C. 宿白 A. 常书鸿
28. 下列始建于我国十六国时期的石窟是 ( )。
- A. 甘肃敦煌莫高窟 B. 山西大同云冈石窟  
C. 洛阳龙门石窟 D. 新疆拜城克孜尔石窟
29. 不符合保护现存实物原状与历史信息的石窟寺保护工程设计原则是 ( )。
- A. 修复应当以现存的有价值的实物为主要依据, 并必须保存重要事件和重要人物遗留的痕迹  
B. 一切技术措施应当不防碍再次对原物进行保护处理  
C. 独特的传统工艺技术必须保留  
D. 所有修复的部分都应有详细的记录档案和永久的年代标志
30. 不符合工程措施图的基本要求的是 ( )。
- A. 表达保护措施所必要的平、立、剖面图  
B. 标注工程措施、内容、材料和工艺  
C. 标注相关尺寸、标高、剖面位置、详图等级关系等  
D. 标示工程范围及与周边环境的位置关系
31. 绘图线型选择错误的是 ( )。

- A. 粗实线用于图纸内边框线、剖面图中的地表线及钻孔深度线
- B. 中实线用于图例边框线、地层分界线、地质剖面线
- C. 细实线用于等高线、标注引出线、石窟造像内部结构线、填充线、尺寸线
- D. 点划线用于窟内平面、顶面图中未剖切到的主要轮廓线、中心线、对称线
- 32.** 关于石窟危岩体加固工程预应力锚索的说法，错误的是（ ）。
- A. 需要在现场做锚固力拉拔试验
- B. 预应力锚索设计也可参考设计手册或经验确定工值
- C. 永久性锚索、安全系数  $K$  不应小于 2.0
- D. 锚索轴线应基本垂直于被加固危岩体的裂隙面
- 33.** 砂岩的风化与胶结构密切相关，抗风化能力相对较强的是（ ）。
- A. 泥质胶结砂岩
- B. 硅质胶结砂岩
- C. 钙质胶结砂岩
- D. 铁胶结砂岩
- 34.** 矿物硬度由大到小的排序为（ ）。
- A. 石英—长石—萤石—滑石
- B. 长石—石英—萤石—滑石
- C. 长石—石英—滑石—萤石
- D. 石英—萤石—长石—滑石
- 35.** 定义不准确的是（ ）。
- A. 开裂——石质文物在压应力作用下开裂的现象
- B. 结构失稳——文物本体结构或其所依存的岩土环境所产生的局部或整体不稳定的现象
- C. 错位——石质文物块体间发生明显位移现象
- D. 崩塌——陡坡或悬崖上的岩体在自然和人为因素的作用下，发生向下坠落的破坏形式
- 36.** 符合石窟保护工程地形测绘范围的确定要求有（ ）。
- A. 经正式公布的文物保护范围为依据
- B. 充分考虑保护对象的特点、保护工程类型以及设计实际需求
- C. 确保地形、地貌及地物单元的完整性
- D. 将建设控制地带纳入测绘范围
- 37.** 根据《石质文物保护工程勘察规范》表层劣化病害分级分类结构说明表分离类型是指（ ）。
- A. 石材表面部分或全部因损伤而缺失的现象
- B. 石材表层一定厚度的片板状体发生隆起变形的现象

- C. 石材表层部分已于母体完全分开，但未脱离的现象
- D. 石材表层全部或部分在较小的外力作用下发生基本平行于壁面逐渐脱离母体的现象

38. 下列可经室内试验直接测试出来的是（ ）。
- A. 孔隙比
  - B. 颗粒比重
  - C. 相对密度
  - D. 饱和度
39. 地壳中含量最多的矿物是（ ）。
- A. 高岭石
  - B. 方解石
  - C. 长石
  - D. 石英
40. 地震烈度反映一次地震的（ ）。
- A. 能量大小
  - B. 地表破坏程度
  - C. 影响范围
  - D. 地震裂缝情况

## 二、多项选择题

41. 根据《石质文物保护工程勘察规范》，不可移动石质文物主要病害类型有（ ）。
- A. 结构失稳
  - B. 渗漏
  - C. 表层劣化
  - D. 风蚀
  - E. 雨蚀
42. 新疆地区的石窟在古代主要分布的区域有（ ）。
- A. 古龟兹区
  - B. 古焉耆区
  - C. 古高昌区
  - D. 古于阗区
  - E. 古疏勒区
43. 不属于平顶洞窟顶板开裂变形治理措施的有（ ）。
- A. 支护
  - B. 全部清除
  - C. 锚固
  - D. 灌浆
  - E. 局部清除
44. 监测工作是岩土工程中的一个重要环节，其目的有（ ）。
- A. 保证施工质量
  - B. 验证工程长期有效性
  - C. 保证施工安全
  - D. 保证游人安全
  - E. 加快工程建设
45. 下列常用于石窟表层劣化勘察的检测方法有（ ）。
- A. 表面回弹锤击测试
  - B. 地震面波测试
  - C. 岩石声学测试
  - D. 表面吸水性能测试
  - E. 微波测试
46. 水库建设对库区周边石窟寺和石刻文物可能造成的影响有（ ）。

- A. 地下水位抬升，加剧渗漏病害
  - B. 地表水位抬升，造成季节性淹没
  - C. 小环境变化，加剧风化作用
  - D. 水库诱发地震，引起结构稳定性问题
  - E. 风速加大
47. 三维激光扫描测绘技术的优势有（ ）。
- A. 非接触
  - B. 精度高
  - C. 速度快
  - D. 成本低
  - E. 再现性强
48. 常用的矿物鉴定方法有（ ）。
- A. 手标本外观鉴定法
  - B. 光性鉴定法
  - C. 化学分析法
  - D. 仪器分析法
  - E. 肉眼观察法
49. 下列始建于我国南北朝时期的石窟有（ ）。
- A. 敦煌莫高窟
  - B. 大同云冈石窟
  - C. 洛阳龙门石窟
  - D. 天水麦积山石窟
  - E. 邯郸响堂山石窟
50. 关于窟檐说法错误的是（ ）。
- A. 石窟寺和石刻窟檐从结构角度讲都是木结构窟檐
  - B. 窟檐的设计重点是外观形式与文物及周边环境相协调
  - C. 窟檐是一种保护性措施
  - D. 窟檐可经防治窟内凝结水
  - E. 窟檐可经减缓酸雨对石窟的侵蚀

## 石窟寺和石刻（设计师）参考答案

01 C	02 D	03 A	04 C	05 A
06 B	07 B	08 D	09 A	10 C
11 C	12 D	13 D	14 C	15 A
16 C	17 D	18 D	19 D	20 A
21 B	22 D	23 B	24 D	25 D
26 B	27 C	28 A	29 C	30 D
31 D	32 B	33 B	34 A	35 A
36 D	37 C	38 B	39 C	40 B
41 ABC	42 ABC	43 BE	44 ABC	45 ACD
46 ABCD	47 ABCE	48 ABCD	49 BCE	50 ABD