

# 敦煌莫高窟崖体风化特征及保护对策

王旭东<sup>1, 2</sup>, 张虎元<sup>2</sup>, 郭青林<sup>1, 2</sup>, 吕擎峰<sup>2</sup>

(1. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200; 2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 详细的现场调查发现, 莫高窟岩体以物理风化为主。按照病害与地貌部位的组合关系, 从加固工程实际出发, 将风化病害划分为 9 种形式、3 种程度, 确定不同病害的空间展布特征。依据“综合性高、成熟度高、有效性强”的工程技术遴选原则, 选择出 PS 渗透固化、裂隙注浆、锚索锚固、薄顶加固、局部清除等具体加固措施, 论证各项措施的可靠性, 从而建立莫高窟加固工程设计的框架结构。

**关键词:** 工程地质; 莫高窟; 崖体; 风化; 保护; 加固

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)05 - 1055 - 09

## WEATHERING CHARACTERIZATION AND CONSERVATION TREATMENT OF CLIFF AT MOGAO GROTTOES

WANG Xudong<sup>1, 2</sup>, ZHANG Huyuan<sup>2</sup>, GUO Qinglin<sup>1, 2</sup>, LU Qingfeng<sup>2</sup>

(1. Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China; 2 Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** Detailed investigations conducted on the rock cliff of Mogao Grottoes show that physical weathering is the major factor responsible for the deterioration of cliff rock. From the viewpoint of reinforcement engineering, weathering hazards in Mogao Grottoes are classified into 9 kinds with 3 different intensities in relation to micro-geomorgraphy. Various treatments are evaluated and suggested for engineering design; such as the PS consolidation of cliff surface, crack grouting, cable stabilization to unstable rock mass, topping of thin-covered caves and removing of unfavorable structures for stabilization constructed in the early time. The reliability of the treatments is proven and the frame structure for design of reinforcement engineering in Mogao Grottoes is established.

**Key words:** engineering geology; Mogao Grottoes; rock cliff; weathering; conservation; reinforcement

## 1 引言

莫高窟位于中国著名历史文化名城敦煌市南 25 km, 处于三危山和鸣沙山夹持的大泉河洪积扇上缘地带(见图 1), 是当今世界上现存规模宏大、内容丰富、保存完好、艺术精湛的佛教艺术宝库。莫高窟始建于前秦建元二年(公元 366 年), 现保存有 16 国后期到北魏、北周、隋、唐、五代、宋、西夏、元等时代的洞窟 750 多个, 分布在南北长 1 680 m

的山崖上。其中保存有壁画的洞窟 492 个, 主要集中在南区, 保存壁画约 45 000 m<sup>2</sup>, 彩塑 2 000 余身。1988 年联合国教科文组织将莫高窟列为世界文化遗产保护单位。

莫高窟是“丝绸之路”上最为重要的历史文化遗址之一, 是公元 4~14 世纪中西文化交流、融合的重要见证。莫高窟连续不断的建造, 系统地提供了中外艺术风格交流、融合、发展的丰富资料, 展示了中国古代艺术流派的发展历史, 许多建筑、壁画、雕塑等艺术品都是价值极高的精品。莫高窟提

**收稿日期:** 2008 - 11 - 07; **修回日期:** 2009 - 03 - 03

**基金项目:** 国家科技支撑计划重点项目(2006BAK30B02)

**作者简介:** 王旭东(1967 - ), 男, 博士, 1990 年毕业于兰州大学地质系水文地质工程地质专业, 现任研究员、兰州大学兼职教授, 主要从事石窟与土遗址保护方面的教学与研究工作。E-mail: xudongwang99@yahoo.com.cn



图1 莫高窟区域影像图

Fig.1 Image of the Mogao Grottoes

供并展示了古代中国科学技术的丰富资料 and 重要成果。由沙漠、山岭、戈壁及绿地景观环抱的莫高窟，具有特殊的审美价值。

莫高窟洞窟由不同时代开凿而成，洞窟大小及洞型差别很大，紧密排列在半胶结的砾岩崖体上。由于密集洞窟群开挖松动及直立崖体长期卸荷回弹，莫高窟崖体稳定性实际上是洞室围岩稳定问题与边坡岩体稳定问题的双重组合。

到目前为止，莫高窟崖体加固工程主要由 3 个阶段构成<sup>[1~3]</sup>：(1) 1956 年及 1963~1966 年间，莫高窟进行过 2 次大规模的岩体加固工程，当时采用混凝土及块石砌体对危岩进行支、挡、顶加固处理，抢救了大批濒危的壁画和彩塑，消除了大规模岩体破坏的严重险情，大大提高了洞窟岩体的稳定性及抗震能力。(2) 1999 年，对木桥廊区段(洞窟 C248~C261)进行了重新加固，工程内容包括清理危岩，木栈道维修加固，对洞窟上方裸露风化崖面及崖顶斜坡砂砾石覆盖层进行 PS 渗透化学加固。(3) 2000~2003 年，完成莫高窟大泉河防洪工程，消除了地面洪水对莫高窟的威胁；采用锚固及 PS 渗透加固对莫高窟北区岩体进行了保护加固，真正实现了加固工程修旧如旧、不改变原有外貌。

风沙对莫高窟的危害是多方面的。解放前，流沙曾掩埋了大多数底层洞窟，清沙是当时主要的保护任务。长期的携沙风直接侵蚀崖面，造成部分上层洞窟成为薄顶洞窟，为降水入渗提供了可能。进入洞窟的携沙气流还对壁画表面形成不断的磨蚀。从 20 世纪 50 年代开始，针对风沙危害进行过专门的风沙防治研究及试验工程，主要包括防沙墙、防沙沟、输沙沟、树枝及芦苇防沙栅栏、草方格沙障、砾石压沙、化学固沙<sup>[4]</sup>、尼纶网防沙栅栏<sup>[5]</sup>及生物

固沙<sup>[6]</sup>。目前，以工程阻沙、生物治沙、化学固沙组成的综合治沙系统已初步形成。

为了取得最佳的壁画保存环境，从 20 世纪 70 年代末以来，展开了 40 多项莫高窟文物保护科研项目，主要涉及莫高窟周边环境演变、窟区环境质量评价、莫高窟水害治理、风沙运动规律及风沙危害研究、固沙试验研究、砂砾岩体风化风蚀机理研究、既有加固构筑物抗震稳定性研究、地震防灾文物保护研究、砂砾岩石窟岩体裂隙灌浆研究、硅酸盐加固灌浆材料研究以及洞窟游客承载力评估等。1980 年安装的铝合金窟门，有效减缓了窟内温湿度变化及风沙磨蚀，窟内安装的玻璃屏风预防了游客对壁画的直接损害。

20 世纪 60 年代开展的大规模岩体加固，从根本上消除了岩体变形破坏对洞窟安全的威胁。但是，窟区支挡工程构筑物覆盖保护的崖面范围有限，洞窟上方未受到保护的裸露岩面及崖顶斜坡部位，在剧烈的温度变化条件下，经受长期的风蚀和雨蚀，发生严重的风化破坏。目前，常常有砂石落下，对窟区游人安全威胁很大。特别是上层洞窟窟顶被风蚀变薄后，入渗雨水严重损坏壁画彩塑文物。快速发展的风化剥蚀，成为威胁莫高窟南区洞窟文物安全的严重隐患，急需有效的控制和治理。

## 2 风化因素

岩石风化是地表岩石矿物对环境条件响应的结果，地质学上习惯上划分为物理风化、化学风化及生物风化等。莫高窟地处西北内陆腹地，常年受蒙古高压影响，气候干旱、降水量少、温差大，风沙活动频繁，典型的沙漠气候特征决定了风化形式以物理风化为主。

### 2.1 风场

莫高窟是一个多风地区，年平均风速为 3.5 m/s，而且风向多变(见图 2)，以南风、偏南风为主，其次是偏西和偏东风。南风出现频率最高，占 31.0%，与偏南风合计占 47.9%；其次是偏西风，所有的偏西风合计总频率的 28.1%。偏南风多而风力较弱，输沙能力约占 27.5%，但造成崖面强烈风蚀；偏西风少而风力较强，是造成洞前积沙的主要原因。小频率高强度的西风，受主体环流西风带和大型天气过程控制，造成鸣沙山物质向窟区移动；大频率低强度的南风受地形控制，反向搬运，抑制崖顶沙物质的东移。

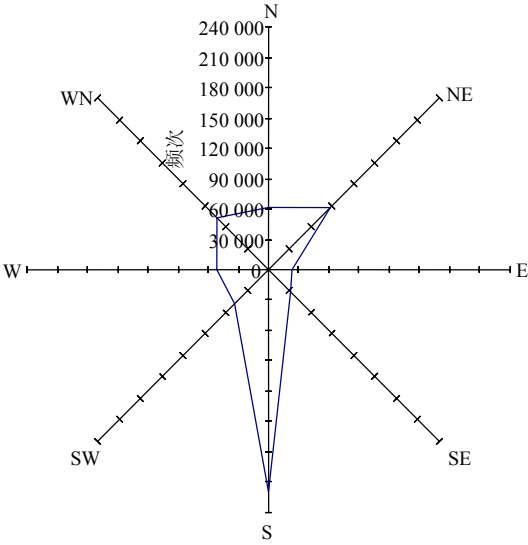


图 2 莫高窟风向玫瑰图(1990~2007 年)  
Fig.2 Wind rose diagrams at the Mogao Grottoes  
(in 1990 - 2007)

2.2 降水与温湿度

据观测，莫高窟地区每年日照总时数可达 2 962.5 h，明显高于北纬 40°附近的年日照标准时数。据莫高窟崖顶气象站观测资料，窟区年平均气温 10.3℃，最高气温 40.6℃，最低气温-31℃。据位于沙漠绿洲的敦煌市气象站资料，敦煌地区多年平均气温为 9.4℃，最高气温 35℃(7 月)，最低气温-28℃(1 月)。莫高窟与敦煌市历年月平均气温对比见表 1。

表 1 莫高窟与敦煌市历年平均气温对比

Table 1 Comparison of the multi-year average temperatures between Mogao Grottoes and Dunhuang

City													℃
地名	月平均气温												多年 平均 气温
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
莫高窟	-6.7	-4.0	6.3	12.7	19.6	24.0	24.3	25.3	18.8	11.1	1.5	-5.8	10.6
敦煌市	-9.4	-4.6	4.3	12.4	18.9	23.0	24.9	23.8	17.3	9.4	0.3	-7.4	9.4

就目前国内外研究水平，虽然还不能确切测量或预测岩石中温差应力的大小，但是在干旱寒冷地区，仅仅因为气温急剧降低及岩石表部与内部明显的温度梯度所产生的拉应力，也可能导致岩石颗粒之间拉裂解体<sup>[7, 8]</sup>。崖顶缓坡地段薄层砂岩由于发生强烈的差异风化，逐渐后退成二级陡坎，威胁顶层洞窟的安全。

莫高窟多年平均降水量为 23.2 mm，空气相对湿度年平均值为 32%，最高相对湿度 88%，最低相

对湿度为 7%。敦煌地区多年平均降水量为 44.7 mm，空气相对湿度为 42.2%。敦煌及莫高窟的降水在年内分配极不均匀，夏季(6~8 月)降水量占全年降水量的 58%，而 10 月至翌年 3 月的降水量仅占 21%(见表 2)。莫高窟地区的年平均蒸发量高达 4 347.9 mm，是年平均降水量的 187 倍。空气干燥指数达 32；敦煌市区年平均蒸发量为 2 486 mm，为降水量的 56.7 倍(见表 3)。

表 2 莫高窟与敦煌市历年降水量对比

Table 2 Comparison of the multi-year rainfalls between Mogao Grottoes and Dunhuang City

地名	月降雨量												mm
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	多年 平均 降雨 量
莫高窟	1.25	0.17	1.03	2.03	1.43	2.8	6.2	4.4	1.4	0.55	0.95	0.98	23.2
敦煌市	1.30	1.10	1.20	3.60	3.40	9.2	12.5	6.4	2.2	1.00	1.20	1.60	44.7

表 3 莫高窟与敦煌市历年空气相对湿度对比

Table 3 Comparison of the multi-year relative humidity between Mogao Grottoes and Dunhuang City

地名	月空气相对湿度												%
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	多年 平均 空气 相对 湿度
莫高窟	45.4	35.2	22.4	36.8	27.3	29.9	30.0	27.5	27.3	26.8	34.8	42.6	32.2
敦煌市	50.6	43.6	34.6	33.1	33.0	39.4	45.3	40.1	39.5	44.6	49.7	53.3	42.2

干燥的气候、稀少的降雨，是莫高窟历经千年完好保护至今的主要环境条件。尽管沙漠戈壁地区降雨极少，但单次阵雨强度较大，可以在崖面上形成集中径流，直接冲刷坡面风化松动岩体，或通过崖顶裂隙直接渗入顶层洞窟内部，引起洞窟壁画酥碱破坏。

3 崖体风化特征

3.1 崖体形貌与地层岩性

莫高窟位于大泉河出山口冲洪积扇的上缘，处于基岩山区隆起带与敦煌盆地沉降带之间的接触地带，西南为流沙覆盖的鸣沙山，东南为前震旦系敦煌群古老变质岩组成的三危山(见图 1)。

莫高窟现存洞窟开凿在大泉河西岸陡崖上，崖壁基本上呈南北走向延伸，长约 1 680 m。莫高窟 90%以上的洞窟主要集中在长 920 m 南区崖体上，崖



体高度一般为 10~45 m, 呈下陡上缓的组合边坡(见图 3<sup>[9]</sup>)。下部直立崖体高 10~20 m, 岩性为中更新统酒泉砾岩, 构成洞窟围岩; 上部缓坡坡度 40°左右, 岩性为上更新统砂砾石层, 构成顶层洞窟的覆盖层。缓坡上方存在宽阔的窟顶戈壁平台, 与鸣沙山相距 800~1 000 m, 是洞窟区来沙的主要输沙区。

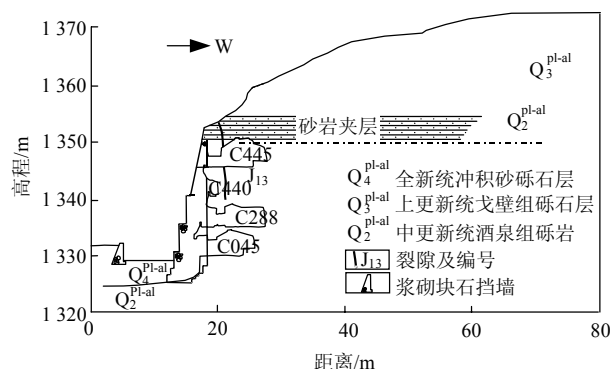


图 3 莫高窟典型洞窟剖面图<sup>[9]</sup>

Fig.3 Profile of typical geological section at the Mogao Grottoes<sup>[9]</sup>

下更新统玉门组砾岩( $Q_1^{pl-al}$ ): 上覆于第三系泥质砂岩( $N_2$ )之上, 岩性为灰褐色砾岩, 层理清楚, 质地较为坚硬, 硅质胶结或硅钙质胶结, 构成洞窟底层的基底。

中更新统酒泉组砾岩( $Q_2^{pl-al}$ ): 构成所有洞窟的围岩。青灰色, 层理发育, 钙质或钙泥质胶结, 夹中细砂岩透镜体。其中粒径大于 20 mm 的占 7%~15%, 5~20 mm 占 24%~55%, 2~5 mm 占 10%~26%, 小于 2 mm 的占 21%~33%。

上更新统戈壁组砾石层( $Q_3^{pl-al}$ ): 出露于洞窟崖体顶部戈壁层, 岩性为灰白色砂砾层夹砂层和粉土层透镜体, 层理发育, 结构松散, 砾石分选性较差, 磨圆度为棱角状或次棱角状。

全新统( $Q_4^{pl-al}$ ): 岩性主要为河床冲积的松散砂砾石层、亚砂土、亚黏土和风成沙以及近代坡积物, 分布于窟前地带。

### 3.2 风化病害

岩石风化是地表岩石矿物长期缓慢的变质过程。莫高窟岩体风化的主要类型是物理风化。随着环境温湿度随天气、季节、昼夜的反复变化, 一方面, 石窟砂砾岩中的砾石与胶结物之间发生明显的温差应力; 另一方面, 泥质胶结物中的黏土矿物, 如蒙脱石、绿泥石等反复吸水膨胀, 失水收缩, 导致砂砾的胶结结构破坏。

莫高窟的文物本体是壁画。洞窟围岩是壁画的天然支撑体, 需要具备足够的力学稳定性。同时,

洞窟所在的崖体, 不仅为洞窟提供密闭边界, 而且从客观上又构成莫高窟遗址特定的地貌景观。因此, 莫高窟崖体保护的实质, 就是要提高洞室及边坡岩体的稳定性, 同时尽可能切断洞窟与外界的水气联系, 维持崖体既有的外貌景观不变。应当看到, 关于岩石风化研究, 出于力学稳定性评价的需要, 传统的岩石力学主要关注风化岩石物理力学性质的变化, 而文物保护工程出于“修旧如旧”的特殊需要, 还必须重视风化作用对岩体表面特有“装饰”效果的影响。

风化作用与特定的地形边界相组合, 可能发生一系列的物理地质现象, 如崩塌、掉块、流沙、渗漏、盐害等(见图 4~7), 对文物本体或文物载体的



图 4 莫高窟崖顶差异风化现象

Fig.4 Weathering of the cliff top at Mogao Grottoes



图 5 莫高窟崖顶缓坡砂岩差异风化现象

Fig.5 Weathering of the sandstone of the mild slope of-cliff top at Mogao Grottoes



图 6 洞窟 C193 附近强风化砾岩雨后掉落现象

Fig.6 Dropped gravels of strong weathered sandstone near C193 after rainfall

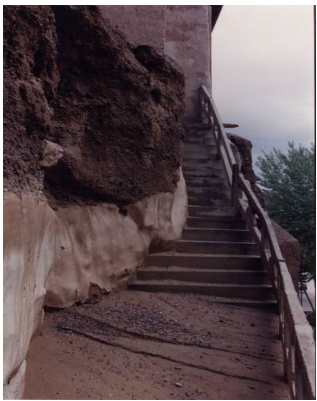


图 7 洞窟 C196 附近强风化砾岩雨后掉落现象  
Fig.7 Dropped gravels of strong weathered sandstone near C196 after a rainfall

稳定性、密封性、装饰性产生危害，也可能给游客安全产生威胁。为行文方便，将风化作用导致的对文物本体、文物载体或文物观赏者带来潜在威胁的物理地质事件统称为文物风化病害。

莫高窟崖体不同的地形地貌部位，岩体的风化程度差别很大(见图 5)，产生的风化病害类型也不相同。从岩体抗风化加固工程的实际需要出发，在现场详细勘察的基础上，将莫高窟风化病害划分为 9

种类型。根据其对窟区文物或游客的危害程度，将每一种病害划分为危害强烈、危害中等和危害微弱 3 个水平。表 4 列出了各种病害危害程度的定性描述特征，表 5 列出了各类病害的数量统计结果。将病害类型及危害程度赋予不同的编码(见表 4)，按照危害程度+病害类型的组合方法，将表示各种病害的代码标识在编制的莫高窟崖面 1：200 地质病害分布图上。例如，标记 S-I 的区域，表明该区“发育强烈的崖面砾岩风化病害”，依此类推。同一区段同时发育数种不同病害时，为了减轻图面负担，更为了突出加固工程重点，只标注危害强烈及危害中等的病害，而危害轻微的病害则省略。强烈沙害出现在莫高窟南区的全部区域，图中也不再专门示出。应当看到，历史上完成的部分加固工程，如土坯挡沙墙、窟顶水泥砂浆抹面等，由于制作时代较早，已经演化成新的风化病害。洞窟崖面与上部缓坡的连接部位，由于地层中易溶盐含量较高，出现白色斑点或条带，影响崖面色调，作为地层盐害单独列出。对规模较大的构造裂隙、卸荷裂隙和风化裂隙，进行了专门测绘，方便今后加固工程中专门进行灌浆封闭处理。

表 4 莫高窟风化病害类型及发育程度划分  
Table 4 Classification and development degree of weathering hazards for Mogao Grottoes

代 码	病 害 类 型	危害程度分级		
		强烈(S)	中等(M)	轻微(L)
I	崖面砾岩风化	表部岩体严重风化，疏松状，或呈层状剥离，自然脱落，落石、落沙	表部岩体明显风化，结构疏松，崖面砾石用手可以扳动	表部岩体风化，但结构致密坚硬，崖面砾石经地质锤轻击掉落
II	砂岩风化	风化后退形成台坎或凹槽状地形；受风化裂隙切割产生悬挂危石，或风化危石从母岩脱落，在缓坡段极限停留	砂岩露头裸露，长期差异风化形成叠层状外观，表部风化块体用手可以掰落，搓捏后呈散砂状	砂岩露头裸露，但强风化部分在早期加固工程中已被清除；或砂岩被下滑的坡积物覆盖
III	缓坡岩体风化	斜坡坡度总体大于 32°，表部残坡积物钎探厚度大于 50 cm，坡面砾石一经触动即滚下崖面	斜坡坡度基本接近 30°~32°，表部残坡积物钎探厚度 30~50 cm，坡面砾石经触动有滚下崖面的危险	斜坡坡度总体小于 30°，表部残坡积物覆盖层厚度变化较大，且以风积沙为主，无滚石现象
IV	危岩与危石	卸荷裂隙发育，崖眉附近存在高悬或外凸危岩，既有支撑构筑物加固效果不明显，强烈地震时可能崩塌，威胁洞窟安全	风化裂隙发育，在崖面、砂岩露头或斜坡局部台坎等临空部位形成危石，地震时有可能崩落	缓坡地带残坡积物中存在大漂砾，或砂岩风化形成的松动块石，在地震或降雨触发情况下有可能滚落
V	薄顶洞窟	洞窟顶拱深入或接近砂岩层，窟顶上覆地层总厚度小于洞室跨度	洞窟顶拱接近砂岩层，窟顶上覆地层总厚度大于洞室跨度	洞窟顶拱与砂岩之间的砾岩厚度大于洞室跨度
VI	降水下渗	窟顶上覆地层厚度小于洞室跨度，或裂隙切割洞窟，洞窟内有渗水、潮湿等现象	窟顶上覆地层较厚，但崖面裂隙切割洞窟，降水有入渗洞窟的可能	崖面存在较大面积的露天壁画，壁画表面观察到流水污染的痕迹
VII	既有加固工程病害	大面积水泥砂浆抹面天然质感差，风化破裂，与下伏岩石脱空，有坠落危险	挡砂墙基础掏空或歪斜，有倒塌危险	崖面裂隙勾缝水泥砂浆天然质感差，勾缝砂浆虚脱
VIII	地层盐害	崖体表面出现数米以上白色盐晕	崖体表面出现不连续白色盐斑	崖体表面偶尔有白色盐斑出现
IX	沙害	大风时窟前落沙掉石现象明显	大风时窟前偶有落沙掉石现象	大风时窟前仅有扬尘现象

表 5 莫高窟南区风化病害统计表  
Table 5 Statistics of weathering hazards in the southern area of Mogao Grottoes

危害 程度 分级	I (崖面砾岩风化)		II (砂岩风化)		III (缓坡岩体风化)		IV (危岩与危石)		V (薄顶洞窟)		VI (降水下渗)	VII (既有加固 工程病害)		VIII (地层盐害)		IX (沙害)	
	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度 /m	崖面 长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度/m	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	崖面 长度 /m
强烈(S)	444.9	65.1	380.0	168.8	10 961.4	418.5	359.7	28.0	843.0	140.5	140.5	99.6	9.5	108.1	21.9	39 858.0	999.5
中等(M)	3 821.6	742.4	1 378.9	261.6	8 194.5	316.0	2 480.8	456.4			243.5*	232.2	12.2				
轻微(L)							643.6	61.5			97.9				53.8	24.3	

注：“\*”表示裂隙长度。

4 保护措施

莫高窟风化岩体加固工程设计，必须遵循“保持原貌，修旧如旧，最小干预”的文物保护基本理念。据此，选择成熟度高、有效性强的工程措施，采取 PS 渗透固化、裂隙注浆、锚索锚固、薄顶加固、局部清除等综合整治的方案，力求给后人保护加固留有余地。

4.1 PS 渗透固化

采用 PS 喷洒渗透方式，主要对崖体表面强烈风化、中等风化砾岩及砂岩露头进行 PS 固化加固，提高其强度及抗风化、抗剥蚀能力，稳定岩面，保护深部岩体。PS 浆液在砂砾岩风化层中的可灌注性良好。根据岩体的风化程度，可以通过调整浆液浓度及配合比，对浆液扩散范围和深度实现间接控制。这样，一方面确保浆液有效加固范围，另一方面防止浆液中的水分超范围渗透，危及洞窟文物。PS 浆液对砂砾岩黏结性强，形成的结石体强度高，具有抗冻融、抗风蚀能力强，化学稳定性好，通气透水能力强的优点。

采用模数为 3.8、浓度 5%~10%的 PS 溶液，分 3 次进行渗透加固。PS 浓度逐次增大，依次为 5%，7%和 10%。每次喷洒时以溶液不再渗透、沿崖面刚刚出现面流为标准，确保渗透深度超过疏松风化层厚度。关于 PS 三次喷洒用量分配，中等风化岩体可在 1：1：1 的基础上通过现场试验优化；对于强风化岩体，为减少表部疏松层渗透时软化脱落，适当减少首次用量，在 1：2：3 基础上现场优化确定。

对砂岩夹层地带较大厚度的风化残积物，首先采用梅花形布置花管，通过花管无压注入 PS 浆液，形成 PS 固化柱，至少 30 d 之后再对残积物表部进行 PS 渗透加固，确保表部加固层与下伏岩体有效

连接，防止表部加固层剥离或滑移。

以上所有 PS 渗透固化加固措施完成后，需要进行作旧处理。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。作旧材料用水浸泡制成泥浆并过滤，加入适量的 PS 材料，喷涂覆盖前期 PS 渗透固化的崖面，使 PS 加固后岩面色调与加固前相近。

关于岩石的物理风化，一般笼统地认为，冻融循环起着主要的作用。其实，在干旱寒冷气候条件下，岩石的含水量很低，水分冻结引起的胀裂并不重要。研究结果<sup>[7, 8]</sup>表明，岩石表面由于存在微起伏度，表面颗粒不同侧面接受的太阳辐射量不同，颗粒在平面方向出现温度梯度；不同矿物颗粒热传导系数的不同，从岩石表面向深度方向出现的温度梯度也有不同。岩石表面矿物频繁的热胀冷缩会引起材料疲劳，温差应力是造成颗粒间胶结物破坏的主因。热致物理风化主要发生在岩石表面一定的深度内。PS 加固砂砾岩体的基本原理是，通过 PS 渗透扩散，二氧化硅胶凝材料提高岩石浅表部颗粒之间胶结物的强度<sup>[2]</sup>。因此，PS 渗透加固崖体风化表部，可以起到良好的抗风化效果。

4.2 裂隙注浆

采用填充式注浆，对崖顶张裂隙进行注浆黏结加固，可以消除岩体沿裂隙进一步风化、增强岩体完整性、阻止大气降水渗入岩体洞窟等目的。

首先采用高压风清理裂隙，然后对裂隙两侧的风化崖面喷洒 PS 进行渗透加固，待岩面干燥且达到较高的强度后，用水泥砂浆对裂隙进行封闭，然后开始正式灌浆。

根据裂隙宽度、裂隙充填特征及裂隙与洞窟的交切关系，注浆材料可采用不同浓度的 PS，PS-C，或 PS-F 浆液，进行一次性注浆或多次、间歇式注浆。对于与洞窟相贯通或距洞窟较近的裂隙，必须先进

行裂隙封闭, 采用高浓度浆液, 进行低压力、多次、间歇式注浆。对于可能向洞窟内串浆的裂隙, 采用高浓度的 PS-C 浆液, 进行挤入式注浆。对于卸荷裂隙, 采用低浓度 PS 浆液, 进行无压多次、间歇式注浆, 注浆工序采用由下而上的上行方式。因为砂砾岩裂隙注浆的主要目的是填充裂隙, 防止雨水渗入, 因此, 结石体的强度以接近或略大于被注浆岩体的强度最为理想。这可以通过浆液配比得到较好的实现。

干旱地区降雨稀少, 但极为少见的突发降雨会在崖面上形成集中径流, 沿裂隙渗入到洞窟内部<sup>[10]</sup>。砂砾岩石窟崖体裂隙 PS-F 灌浆技术, 已经在敦煌得到应用, 如 2006 年完成的敦煌莫高窟北区加固<sup>[10]</sup>, 2002 年完成的榆林窟加固<sup>[2]</sup>。多年的实际观测证实, 该技术成熟可靠, 防渗加固效果明显。

4.3 锚索锚固

洞窟 C201~C204 区崖体顶部发育的卸荷裂隙, 切入洞窟 C196 顶拱, 与自由临空面(崖面)组合, 发育成大体积危险岩体(见图 8), 在地震条件下可能会发生错落式剪切破坏, 直接威胁洞窟 C196 及其下方洞窟 210~204 之间所有洞窟的安全。采用机械钻孔压力型锚索(见图 9), 将危岩锚固在较深部

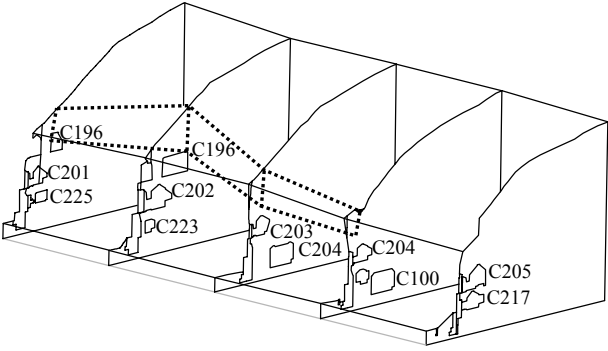


图 8 洞窟 C201~C204 区段卸荷裂隙在三维组合剖面图中的展布

Fig.8 3D distribution of the unloading cracks between caves C201 to C204

位的稳定岩体上, 达到既不改变崖面形态, 又增强岩体稳定性的目的。

岩体锚固技术在我国麦积山石窟加固中首次得到应用<sup>[11]</sup>, 在榆林窟加固工程应用过程中, 配合崖面 PS 渗透加固, 克服了以前喷射混凝土对崖面外貌的改变, 更符合文物保护“修旧如旧”的基本原则<sup>[12]</sup>。锚固技术被建议用于伊拉克巴米扬石窟的加固<sup>[13]</sup>。



图 9 洞窟 C202~C204 区段上方锚索布置图

Fig.9 Distribution of anchor cables upside caves C202 to C204



#### 4.4 薄顶加固

由于砂砾岩体被严重风化、风蚀,加之雨水的冲刷,莫高窟部分上层洞窟窟顶变薄,雨水很容易透过窟顶透水性好的砂砾岩渗入窟内。窟顶洞窟主要采用土工薄膜防渗,土工织物与PS固化碎石层加厚处理的方法进行综合整治。

薄顶洞窟窟顶存在裂隙时,首先应对裂隙进行PS注浆封闭。窟顶加固前对窟顶风化砾岩进行修整,喷洒PS溶液固化加固。然后铺一层土工薄膜,薄膜上端嵌入岩体横向沟槽,并用钢锚钉锚固在沟槽中,用水泥砂浆将沟槽填平。在土工薄膜上铺设土工织物,铺撒细砂和砾石,喷洒PS固化。碎石层分两次完成,每层厚约3 cm,PS模数和浓度依次升高。

薄顶洞窟加固,巧妙地将下部土工膜防渗与上部人工覆盖砂砾石层PS固化处理结合起来,这一创新技术经过莫高窟北区加固工程检验,证明是可靠的<sup>[2]</sup>。

#### 4.5 局部清除

洞窟上方的缓坡地带,坡度已经接近天然休止角,表层堆积物极易发生滚落,威胁游人安全。因此,需要对缓坡表部危石和既有加固工程病害进行综合处理。对于台坎部位出现的体积较小、无法用原位加固稳定的危石,对于早期加固工程残留下来的危险挡沙墙,对于遭受严重风化、虚脱或翘离岩体表面的砂浆抹面,建议采用人工的方式,局部予以清除。

局部清除是不可逆的工程措施,一般情况下严禁使用;尽可能采取短锚杆支档等方法,原地稳定危石、孤石,以维持斜坡原始地形地貌不变。只有在短锚杆支档等其他补救措施失效,确认局部清除对斜坡原始地形影响很小,清除后不影响斜坡上方岩体稳定性的前提下,经文物主管部门批准同意,局部清除作业才可以实施。

在过去长期的保护过程中,莫高窟崖体有些病害在历史上曾经得到过多期加固处理。由于既有加固工程长期服役,加之当时技术水平的限制,部分挡沙墙和砂浆抹面已经演化成新的病害,采取审慎的方法予以局部清除,是务实的表现。局部清除在莫高窟属于首次使用<sup>[14]</sup>,如存在其他比选方案,应尽量避免使用。即便功能是多余的,部分既有加固工程保留下来,也可以为后人提供莫高窟保护加固历史的实物见证。

#### 4.6 加固工程措施综合应用

关于莫高窟崖体岩石的工程性质,已经取得了大量的研究成果<sup>[15~17]</sup>,本研究重点对崖体顶部缓坡地段的工程性质进行了详尽的调查研究,并采用立体摄影的方法对崖面的所有细节进行了测绘,这为准确把握崖面病害分布奠定了基础。

PS系列产品用于崖体裂隙灌浆、崖面防风化处理与做旧,可以克服传统岩体加固方法(如水泥砂浆、石灰抹面、喷混凝土等)对外观的改变,特别是不改变遗址表面原有的细部特征,保留了文化遗址的沧桑感和历史感。PS加固砂砾岩体的抗风化效果已经得到国内其他遗址的验证。

采用锚杆或锚索加固石窟崖体,替代传统的挡墙及梁柱支顶,既能取得可靠的结构安全性,同时可以实现文物加固工程“有若无”的特殊效果,是岩体现代加固技术与遗址保护实践成功结合的产物。

薄顶洞窟加固采用的地质膜材料耐久性问题,已经得到环境工程领域的广泛论证<sup>[18, 19]</sup>,用于莫高窟非污染岩土环境中,应当是可靠的。历史上残留下来的既有挡沙墙和砂浆抹面,如果不能满足结构稳定要求,建议局部清除,满足稳定要求的作为加固保护历史见证予以保留。

历史地看,任何加固工程总是受当时科学技术水平的限制,加固效果也只能维持一定的时期。文物保护不存在一劳永逸的措施。因此,需要在技术求新和技术保守之间取得一定的平衡:新技术必须经历实践检验之后才可以在文物保护工程中的应用。本研究的主要特点是,综合应用多种实践验证过的新技术、新方法,从整体上应对莫高窟岩体风化引起的病害问题,提高世界文化遗产地的保护水平和开放能力。

## 5 结 论

(1) 莫高窟岩体以物理风化为主,造成岩体风化的因素主要有温湿度变化、降水和携沙风的侵蚀作用。全面勘察研究发现,莫高窟崖体风化病害已经发展到影响遗址安全及正常开放的程度,需要采取工程的方法进行适度干预。

(2) 从工程防御的角度出发,将莫高窟风化病害划分为9种类型、3种危害程度,查明并编制了详细的风化病害分布位置图,为加固工程方案编制奠定了基础。

(3) 莫高窟崖体防风化加固工程勘察,成功引



入三维立体摄影技术,岩体风化病害展示采取了平面图、剖面图、立面图等多种形式,提高了传统勘察技术水平,满足了文物保护的特殊需要。

(4) 遵从“保持原貌,修旧如旧,最小干预”的文物保护理念,认为文物保护工程设计需要选择“综合性高、成熟度高、有效性强”技术措施。根据我国石窟保护加固经验和莫高窟实际情况,论证了PS渗透固化、裂隙注浆、锚索锚固、薄顶加固、局部清除等措施的适用性,建立了莫高窟加固工程设计的框架结构。

## 参考文献(References):

- [1] 孙儒洞. 莫高窟石窟加固工程的回顾[J]. 敦煌研究, 1994, (2): 14 - 29.(SUN Rujian. Review reinforcement engineering of Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 1994, (2): 14 - 29.(in Chinese))
- [2] 李最雄. 丝绸之路石窟壁画彩塑保护[M]. 北京: 科学出版社, 2005.(LI Zuixiong. Conservation of the wall paintings and colored statues of the grottoes on the Silk Road[M]. Beijing: Science Press, 2005.(in Chinese))
- [3] 李最雄. 敦煌石窟保护工作六十年[J]. 敦煌研究, 2004, (3): 10 - 26.(LI Zuixiong. Sixty years on the conservation of the Dunhuang Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2004, (3): 10 - 26.(in Chinese))
- [4] 李最雄, NEVILLE A, 林博明. 莫高窟崖顶的化学固沙实验[J]. 敦煌研究, 1993, (1): 120 - 125.(LI Zuixiong, NEVILLE A, LIN Boming. Chemically sand fixed experiment on the top of Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 1993, (1): 120 - 125.(in Chinese))
- [5] 屈建军, 张伟民, 凌裕泉. 莫高窟顶尼纶网栅栏防沙效应初步研究[J]. 干旱区研究, 1993, (3): 20 - 25.(QU Jianjun, ZHANG Weimin, LING Yuquan. Experimental research of nylon fence off sand on roof of Dunhuang Mogao cave[J]. Arid Zone Research, 1993, (3): 20 - 25.(in Chinese))
- [6] 汪万福, 张伟民. 敦煌莫高窟崖顶风沙环境综合治理回顾与展望[J]. 敦煌研究, 2007, (5): 98 - 102.(WANG Wanfu, ZHANG Weimin. Review and prospect the comprehensive control of blown sand environment on the top of Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2007, (5): 98 - 102.(in Chinese))
- [7] HALL K, ANDRÉ M F. Rock thermal data at the grain scale: applicability to granular disintegration in cold environments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(8): 823 - 836.
- [8] HALL K, GUGLIELMIN M, STRINI A. Weathering of granite in Antarctica: II. thermal stress at the grain scale[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(3): 475 - 493.
- [9] WANG X D, ZHANG H Y, ZHANG M Q. Stabilization and consolidation of Mogao Grottoes in China[C]// SOLA P, ESTAIRE J, OLALLA C, ed. Preservation of Natural Stone and Rock Weathering. [S.l.]: [s.n.], 2007: 211 - 216.
- [10] GUO Q L, WANG X D, ZHANG H Y, et al. Damage and conservation of the high cliff on the northern area of Dunhuang Mogao Grottoes, China[J]. Landslides(to be published).
- [11] YI W Z, LANG X Q. Techniques for reinforcement of the Maijishan Grottoes[C]// Proceedings of Conservation of Ancient Sites on the Silk Road. [S. l.]: [s. n.], 1993: 187 - 193.
- [12] 李文军, 王逢睿. 中国石窟岩体病害治理技术[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.(LI Wenjun, WANG Fengrui. Treatment technology for diseases of rock grottoes in China[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006.(in Chinese))
- [13] MARGOTTINI C. Instability and geotechnical problems of the Buddha niches and surrounding cliff in Bamiyan Valley, Central Afghanistan[J]. Landslides, 2004, 3(1): 41 - 51.
- [14] FAN J S. Fifty years of protection of the Dunhuang Grottoes[C]// Proceedings of Conservation of Ancient Sites on the Silk Road. [S. l.]: [s. n.], 1993: 12 - 22.
- [15] 王旭东, 张明泉, 张虎元, 等. 敦煌莫高窟洞窟围岩的工程特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 756 - 761.(WANG Xudong, ZHANG Mingquan, ZHANG Huyuan, et al. Engineering properties of surrounding rocks of Mogao Grottoes at Dunhuang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 756 - 761.(in Chinese))
- [16] 张虎元, 曾正中, 张明泉, 等. 敦煌莫高窟围岩稳定性及环境保护[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 17(2): 73 - 80.(ZHANG Huyuan, ZENG Zhengzhong, ZHANG Mingquan, et al. Rock mass stability and environmental protection problems at Mogao Grottoes site[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 17(2): 73 - 80.(in Chinese))
- [17] 付长华, 石玉成. 地震荷载下莫高窟围岩动态损伤特性研究[J]. 西北地震学报, 2004, (3): 266 - 273.(FU Changhua, SHI Yucheng. Research on dynamic damage characteristics of country rock of Mogao Grottoes under earthquake loading[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, (3): 266 - 273.(in Chinese))
- [18] BOUAZZA A, ZORNBERG J G, ADAM D. Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances[C]// Geosynthetics—7th ICG-Delmas. Lisse: Swets and Zeitlinger, 2002, 445 - 507.
- [19] ROWE R K, SANGAM H P. Durability of HDPE geomembranes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20(2): 77 - 95.