

云冈石窟第3窟后室顶板加固治理与监测

范 潸¹,闫宏彬¹,孟令松²,黄 宇²,齐彦明²

(1. 云冈石窟研究院,山西大同 037007; 2. 辽宁有色地质一〇一队有限责任公司,辽宁抚顺 113006)

摘要: 云冈石窟第3窟是云冈石窟开凿规模最大的洞窟,在开凿过程中戛然而止。特殊的洞窟结构加上千年的自然风化催生了多种病害,其中后室顶板崩塌最为严重。为此,采用岩石测试、地质雷达和钻孔勘查等多种方法,查明了顶板岩石性质和破坏形式。在钢结构支护的前提下,利用环氧树脂裂隙注浆结合玻璃纤维锚杆牵拉的方法对顶板进行加固。对施工完成后121 d的裂隙、倾斜和应力监测数据进行分析,表明加固效果良好,具有广泛的借鉴意义。

关键词: 云冈石窟第3窟;顶板加固;监测

中图分类号: K878.6;K879.22 **文献标识码:** A

0 引言

云冈石窟位于山西省大同市城西16 km的武州山南麓,共有大小洞窟254座,主要洞窟45座。其中,第3窟又称“灵岩寺”^[1],是开凿规模最大的洞窟,也是一座未完工的洞窟,其窟内地面遗迹为后代传递了洞窟开凿方法和取石途径等信息,具有极高的研究价值^[2-3]。窟内仅有的3尊造像雕刻精细,面部圆润丰满,推测为初唐时期雕刻而成^[4]。

由于历经千年的自然风化和其自身特殊的地质构造,第3窟存在危岩、渗水、片状剥离、粉状风化、生物扰动等多种病害。其中,后室顶板危岩最为危险,极有可能发生局部垮塌,后果不堪设想。本次治

理主要采用灌浆粘接结合锚杆牵拉的方法对后室顶板进行加固,基本解决了后室顶板的稳定性问题。

1 第3窟后室顶板地质特征

1.1 地层

第3窟整体以砂岩为主,这也是其开凿成为大型洞窟的有利条件,但是局部偶夹页岩、粉砂岩及泥砾,易发生差异风化,影响洞窟稳定性。本次研究的后室顶板周围地层自下而上可分为3层^[5]:①层位于最下方,顶板残存厚度仅0.3~0.5 m;②层位于中间,为易风化层,厚度0.2~1.5 m不等,是影响洞窟顶板稳定性的主要因素;③层位于最上方,岩层稳定(表1)。

表1 后室顶板地层划分

Table 1 Stratigraphic division of backroom roof

编号	岩石名称	岩石性质	岩层厚度
①	钙质铁质胶结石英长石砂岩	中-粗粒结构呈褐红色,粗粒结构呈褐黄色;薄-中厚层状;水平层理,夹一层青灰色粉砂质泥岩,局部见砾石。	4.9~5.3 m
②	杂色中粒砂岩与粉砂质页岩互层	灰褐色、青灰色、褐黄色,页岩色深,属于还原环境下形成;层理非常发育,见云母顺层理定向排列;中粒砂岩色偏红,铁质胶结,见过渡相粉砂质页岩;形成了第3窟中部的一个主要的风化凹槽,上部崖壁的大量坍塌均与该风化凹槽有密切关系,局部曾修复。	0.2~1.5 m
③	粗粒状含砾石长石英砂岩	褐黄色,水平层理发育,岩性较纯,厚层状,层厚比较均匀,一般为50~100 cm;砾石呈棱角状,主要由石英和少量岩屑构成;局部发育有细(中)粒砂岩。	3.0~3.2 m

收稿日期:2020-03-28;修回日期:2020-04-29

作者简介:范 潸(1988—),男,硕士,2014年毕业于中国地质大学(北京)矿物学、岩石学、矿床学专业,研究方向为石窟寺及石刻保护,

E-mail: 410740383@qq.com

1.2 岩石性质

按照 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》,2014 年采用万能压力机、电子天平和鼓风干燥

箱等设备对第 3 窟顶部②层 3 组微风化砂岩样品进行物理、水理和力学性质测试。实验环境条件为温度 22 ℃, 湿度 38%, 测试结果见表 2。

表 2 岩石性质测试结果

Table 2 Test results of rock properties

样品编号	物理性质		水理性质		力学性质		
	天然块体密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	含水率/%	饱和吸水率/%	天然单轴抗压强度/MPa	饱和单轴抗压强度/MPa	软化系数
A	2.37	10.61	0.29	3.99	47.9	14.6	0.30
B	2.38	10.23	0.28	4.02	43.9	15.3	0.35
C	2.37	10.61	0.28	4.04	39.8	9.3	0.23
平均	2.37	10.48	0.28	4.02	43.9	13.1	0.29

1.2.1 物理性质 测试结果显示, 砂岩天然块体密度在 2.37 ~ 2.38 g/cm³ 之间, 对比砂岩经验数据 2.2 ~ 2.6 g/cm³ 适中^[6], 岩石孔隙率为 10.48%, 说明砂岩存在较多的孔隙, 能为水盐运移提供有利通道, 加速岩石风化。

1.2.2 水理性质 岩石平均含水率为 0.28%, 饱和吸水率为 4.02%, 与经验值对比适中, 但由于②层岩石中含有 30% 以上的伊利石、绿泥石等水敏矿物, 遇水极易软化膨胀, 因此在渗水通道打通后会导致岩石强度严重降低。

1.2.3 力学性质 岩石天然单轴抗压强度为 39.8 ~ 47.9 MPa, 属于较硬岩, 饱和单轴抗压强度为 9.3 ~ 15.3 MPa, 软化系数 0.29, 浸水后强度急剧下降, 抗水抗风化性和抗冻性较弱。

2 第 3 窟后室顶板勘察

2.1 顶板危岩裂隙分布状况

勘查结果显示, 后室顶板存在 73 条主要裂隙, 以 SN、EW 和 NW-SE 向为主, 将其切割成 3 个危岩区(图 1), 局部①层已经掉落。由于顶板处岩性属于中粒砂岩与粉砂质页岩互层, 层状裂隙发育, 导致洞窟顶板历史上形成大量垮塌掉块。洞窟险情记录显示, 近几年裂隙边缘岩体频繁发生小块掉落现象。

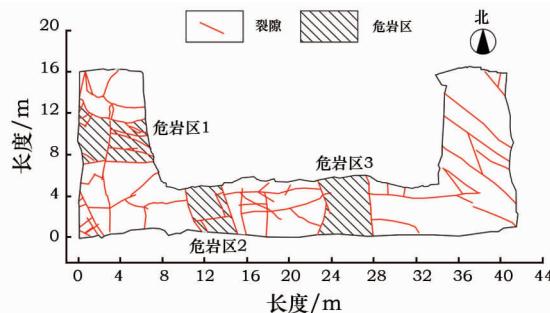


图 1 后室顶板危岩裂隙分布图

Fig. 1 Unstable rock and crack distribution of back room roof

危岩区 1 顶板①层残存厚度 230 ~ 300 mm, 最薄处 100 mm, 裂缝最宽处 120 mm, 最深 0.6 m。虽然该区域暂时不对游客开放, 但其崩落会加速南侧稳定岩体的变形, 仍需重点加固。

危岩区 2 顶板①层残存厚度 200 ~ 340 mm, 裂缝最宽 120 mm, 最深 0.8 m, 表面破碎。该区位于 3 尊造像正上方, 是游客逗留时间最长的区域, 危险性极大, 极易崩落伤害游客, 对造像也存在极大威胁。

危岩区 3 表层薄层状风化, 裂隙宽约 0.1 ~ 0.3 m, 深度约 0.4 m。该区域位于栈道正上方, 是游客沿线参观必经之路, 极易发生片状掉落砸伤游客, 威胁较大。

2.2 钻孔勘察

孔内摄影资料(图 2)显示, ①层砂岩在顶板区域残存厚度仅为 0.3 ~ 0.5 m, 其上②层岩石局部较薄, 仅有 0.2 ~ 0.3 m。从①层已坠落区域边缘观察, ②层局部已风化缺失, 向内掏空深度可达 1 m 多, 钻孔典型剖面见图 3。



图 2 孔内摄影

Fig. 2 Hole photography

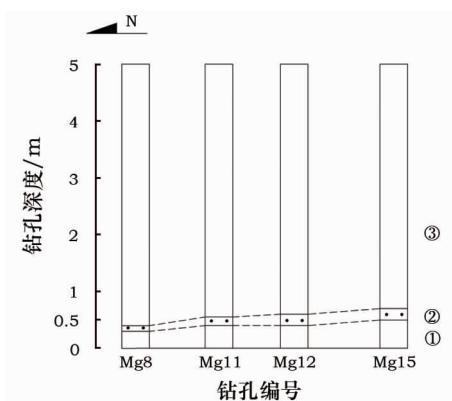


图3 钻孔剖面图

Fig. 3 Borehole profile

2.3 物探

利用 GPR Live Full Package 手持雷达对 2.2 中同一剖面测量显示, 在顶板底面向上 0.3~0.6 m 出现异常(图 4)。图像与钻孔资料一致, 印证了该软弱裂隙带的存在。

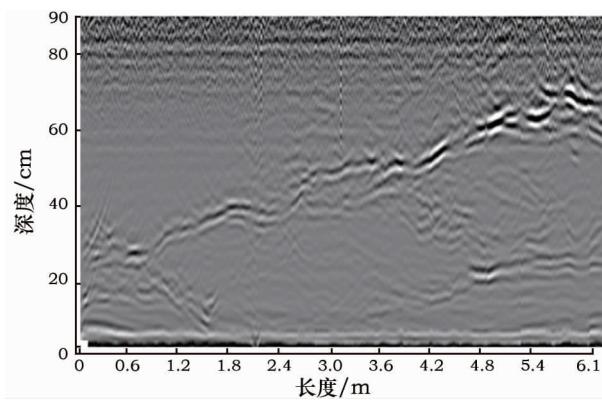


图4 物探剖面图

Fig. 4 Geophysical prospecting profile

3 顶板破坏形式

顶板发生破坏乃至崩塌的主要原因是②层岩石性质特殊, 其风化速度相对较快, 差异风化形成的空腔导致下方①层岩石与上方岩体分离, 发生坠落。

岩体破坏过程细分为 5 个阶段(图 5):

- 1) 洞窟开凿前, 山体处于原始沉积状态, 内部几乎没有贯通裂隙, 岩体稳定。
- 2) 洞窟开凿后, ①层砂岩仅剩下不足 0.5 m 的厚度, 下方临空, 依靠岩石自身的结合力维持稳定, 并在重力的影响下逐渐变形。
- 3) 由于②层自身相对滞水, 山体上方裂隙的渗水在此聚焦, 既增加了岩体自重, 又加速了岩石风化。

化。长期影响下, 岩体开裂并产生变形。

- 4) 裂隙不断发育, 形成危岩体并局部坠落。
- 5) 未坠落的岩体由于边缘处的页岩层暴露在空气中, 风化加速, 不断向内掏空, 形成新的危岩体, 成为本次加固的主要对象。

因此, 对尚未坠落的顶板危岩治理是关键所在。既要防止危岩体坠落, 同时也要阻止页岩层的快速风化。

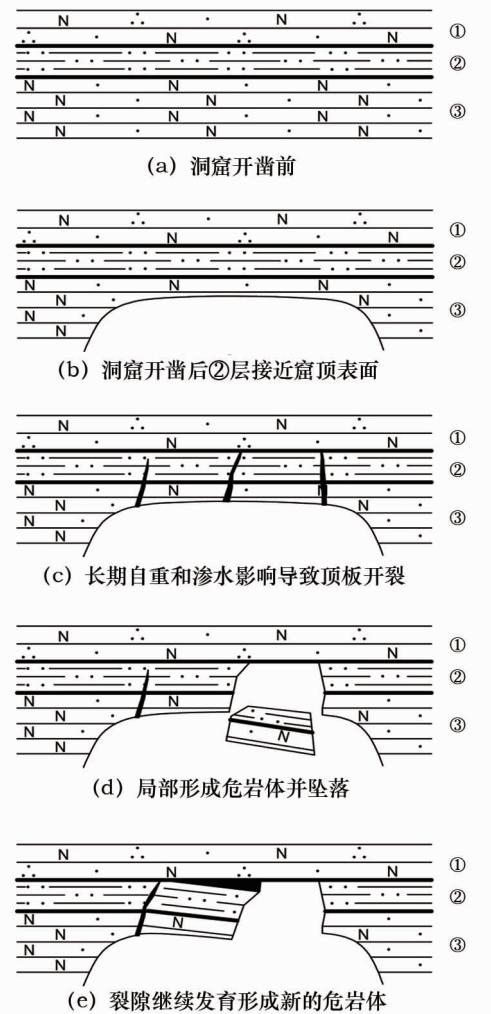


图5 顶板破坏形式

Fig. 5 Roof collapse pattern

4 第3窟顶板加固治理方法

4.1 临时支护和防护

4.1.1 顶板危岩临时支护 为了保证施工时顶板 3 个危岩区的稳定性, 本次工程采用临时钢结构支撑加固措施。每个危岩区采用 6~8 根 40a 槽钢对接形成立柱支撑, 柱与柱之间利用整体脚手架每隔 4 m 设置 $\phi 48$ 钢管和构件连接固定, 最下方横管离地 300~500 mm, 形成横向支撑体系(图 6)。



图 6 框架式钢结构临时支护

Fig. 6 Temporary support of frame steel structure

同时为了保证支撑体系对文物的最小干预,避免对地面和窟顶遗迹造成破坏,立柱底部采用钢垫板下放置柔性材料与地面接触,顶部槽钢与顶板不平处用柔性材料找平。

4.1.2 临时防护 为了防止岩块坠落和灌浆材料渗漏对地面遗迹造成破坏,采取了逐层设置防坠网及地面全铺地毯的方式进行防护。为了防止灌浆材料和施工中产生的灰尘污染,将 3 尊造像整体采用框架式木板和钢板防护,同时使用防水卷材全方位进行防水防污处理。

4.2 裂隙注浆预加固

在开展牵拉锚杆施工前,为了进一步保障施工安全,对顶板向上 0.5 m 以内区域裂隙开展注浆预加固,步骤如下:

1) 材料试验。灌浆前选取一试验场地进行灌浆试验以确定最佳的浆液配比及施工工艺。

2) 表面清洁。用手工工具或压缩空气清洁裂隙面,保证其粘接强度。

3) 布设注浆孔。采用沿裂隙线两侧梅花状布设注浆孔,待成孔完成后,使用高压风对孔内进行清理并埋设灌浆管。灌浆孔深度根据裂隙实际深度进行调整,间距 0.2 ~ 0.5 m。

4) 裂隙封堵。注浆孔施工前用环氧树脂胶泥对所有外露裂隙进行有效封堵,封堵裂隙要进行 2 ~ 3 次,直至裂隙完全封闭。

5) 灌浆。根据裂隙的分布情况,通过高压泵将浆液灌入岩石裂缝,对所有裂隙进行充填及粘接,灌浆压力 15 ~ 40 MPa,对不适合高压区域采用注射

器进行浆液的灌注。灌注时及灌注后设置专人观察,存在漏浆点立即暂停灌注并封堵。图 7 为灌浆加固后取出的岩芯,可以看到环氧树脂将原本被密集裂隙切割形成的碎裂岩体有效地粘接成为整体。

6) 修补作旧。注浆完毕后采用母岩粉、矿物染料调色后的砂浆在注浆孔口作旧处理,使得颜色、形式与周边协调一致,美观。



图 7 灌浆加固后取出的岩芯

Fig. 7 Rock core produced after grouting

4.3 锚杆加固

锚固施工质量的好坏直接影响锚杆的承载能力及危岩的稳定性,综合考虑第 3 窟特殊的施工条件和地质条件,选取了适宜的施工方法并进行了精细施工,工序如下:

1) 搭建脚手架。为了减少钻进过程中产生的振动,因此在顶部脚手架的搭建时经过详细计算。既要给钻机工作留出合适的空间,也要保证钻机在钻进时脚手架的整体稳定性,确保安全。

2) 钻孔钻进。在保证钻进位置和方向等参数符合要求的条件下,采用了最新改进风动钻机^[7],可将岩体取芯,更直观地了解岩体内部情况,为下一步灌浆提供参考。与此同时,采用的钻孔除尘技术,有效地减轻了施工所产生的灰尘对文物的污染。

3) 锚杆制作与安装。由于本次顶板治理的对象均为坠落式危岩体,需要的锚杆应具备较强的抗拉拔能力。本次工程采用的玻璃纤维增强聚合物锚杆相较于传统的钢筋锚杆具有抗拉强度高、不生锈、材质轻、寿命长等优点^[8]。对加固后锚杆进行拉拔试验(图 8),数据显示,锚杆在最大荷载 93.1 kN 下(设计值的 116%,设计值为 80 kN),最大位移值 1.87 mm,最小位移值 0.28 mm,锚杆的抗拉拔力和位移量均符合规范规定并满足设计要求。锚杆杆体上每隔 1 ~ 2 m 安放对中支架,并设置注浆管、排气管和备用管,为锚杆灌浆做好充分准备。



图 8 玻璃纤维锚杆拉拔试验
Fig. 8 Pull - out test of fiberglass bolt

4) 注浆材料试验。采用经试验具备较好流动性的环氧树脂进行灌浆。对 3 组环氧树脂立方体试块抗压强度进行检测,检验仪器为 NYL - 20000 型压力试验机,试件尺寸 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$,标准养护条件下龄期 15 d,抗压强度 67 ~ 79 MPa。平均值 72.2 MPa,略大于砂岩的抗压强度,既能保证粘接的有效性,又能防止强度过高导致岩石内部开裂。

5) 注浆施工。注浆是锚固施工过程中一个重要环节,注浆质量的好坏将直接影响锚固的承载

能力。灌浆采用螺杆式高压泵进行压力灌浆,若浆液从排气孔中排出,说明灌浆饱满。封堵排气孔并间歇性进行补浆,确保锚杆灌浆质量。

4.4 风化凹槽封护

对于②层岩石裸露区域,表面采用钢丝网及锚钎进行固定,再使用修复砂浆和低碱水泥进行封护,有效地防止碎石块掉落和进一步风化掏空,最后表面作旧处理,跟周围协调一致。

5 第 3 窟顶板稳定性监测与评估

本次治理项目于 2019 年 8 月份完工,对当年 9 月 1 日 0 时至 12 月 30 日 24 时共计 121 d 的监测数据进行了对比分析,监测内容包括裂隙宽度、危岩体下表面倾斜度和锚杆应力。

5.1 裂隙和倾斜监测

裂隙监测设备测量范围 $\pm 10 \text{ mm}$,测量精度 $\pm 0.01 \text{ mm}$,采集频率 30 min,倾斜监测设备测量范围 $\pm 20^\circ$,测量精度 $\pm 0.07^\circ$,采集频率 30 min。裂隙、倾斜监测数据变化范围见表 3。

由于裂隙宽度和危岩体下表面倾角初始值不同,因此只有一定时间内的变化幅度具有参考意义。经对比,裂隙和倾斜监测数据会随温度变化做周期性变化,裂隙宽度最大变化幅度为 0.162 mm,倾角最大变化值为 0.231° ,变化幅度较小,表明岩体稳定^[9]。

表 3 裂隙、倾斜监测数据变化范围表

Table 3 Variation range of monitoring data of crack and declivity

位置	裂隙/mm			倾角东西/(°)			倾角南北/(°)		
	最小值	最大值	变化幅度	最小值	最大值	变化幅度	最小值	最大值	变化幅度
勘察孔 1	7.317	7.340	0.023	1.826	2.024	0.198	-0.258	-0.027	0.231
危岩体 W13	10.967	11.129	0.162	2.318	2.541	0.223	-0.664	-0.450	0.214
危岩体 W32	6.212	6.361	0.149	-0.841	-0.648	0.193	3.816	3.949	0.133

5.2 锚杆应力监测

选取 3 个锚杆的不同深度开展实时应力监测,设备测量范围 $\pm 25 \text{ kN}$,测量精度 $\leq 1\% \text{ FS}$,采集频率 30 min。

监测数据显示,锚杆内部应力缓慢上升并趋于稳定,表明施工完毕后顶板有微小的变形,引起了锚杆内部应力变化,证明锚杆发挥了拉结作用,达到预期的加固效果(图 9)。

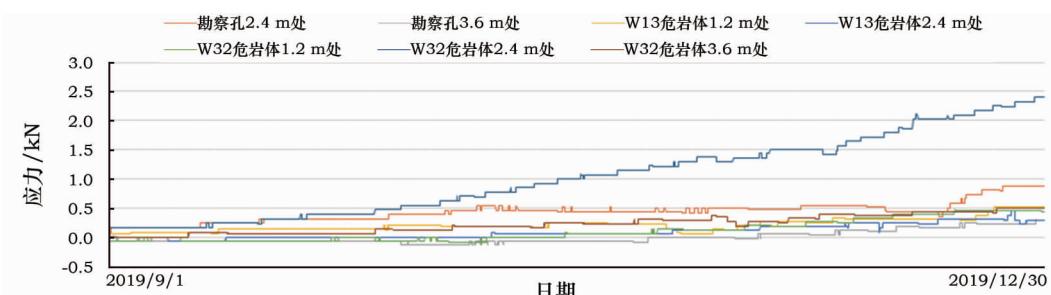


图 9 锚杆内部应力监测数据变化趋势图
Fig. 9 Variation trend of stress monitoring data in bolt

6 结 论

1) 钻孔和物探资料显示,第3窟后室顶板危岩体的形成与粉砂质页岩层较易风化密切相关,差异风化直接导致了顶板危岩体的形成。

2) 灌浆后取出的岩芯验证了流动性好的环氧树脂可以充分地粘接岩体内部密集发育的细微裂隙;力学试验显示,环氧树脂试块的抗压强度略大于砂岩的抗压强度,能有效防止凝结后自身强度过高而导致的岩石内部开裂。

3) 顶板危岩治理后121 d的监测数据显示,裂隙宽度、危岩体下表面倾角变化幅度较小,锚杆内部应力缓慢上升并趋于稳定,表明岩体得到了有效的加固,达到了预期的治理效果。

参考文献:

- [1] 宿白.“大金西京武州山重修大石窟寺碑”校注[J].北京大学学报(人文科学),1956(1):71–84.
SU Bai. The notes of “The inscription of reconstruction of the large grottoes in Wuzhou Mountain, the west capital of the Jin Dynasty” [J]. Journal of Peking University (Humanities), 1956 (1) : 71 – 84.
- [2] 刘建军,曹臣民,王克林.云冈石窟第3窟遗址发掘简报[J].文物,2004(6):65–88.
LIU Jianjun, CAO Chenmin, WANG Kelin. Excavation of Cave Temple 3 at Yungang [J]. Cultural Relics, 2004 (6) : 65 – 88.
- [3] 郭静娜,范潇.云冈石窟北魏遗迹及石质文化研究——以第三窟为例[J].山西大同大学学报(社会科学版),2019,33(6):42–47.
ZHENG Chen, BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, et al. Current status and prospects of GFRP anchor research [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019 (4) : 90 – 99.
- [4] 宿白.云冈石窟分期试论[J].考古学报,1978(1):25–38.
SU Bai. The periodization of the Yungang cave temples [J]. Acta Archaeologica Sinica, 1978 (1) : 25 – 38.
- [5] 严绍军,陈嘉琦,窦彦,等.云冈石窟砂岩特性与岩石风化试验[J].现代地质,2015,29(2):442–447.
YAN Shaojun, CHEN Jiaqi, DOU Yan, et al. Characteristics of Yungang Grottoes sandstone and weathering simulation tests [J]. Geoscience, 2015, 29 (2) : 442 – 447.
- [6] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册(第5版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018:182–188.
Editorial Committee of Geological Engineering Handbook. Geological engineering handbook [M]. 5th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2018 : 182 – 188.
- [7] 陆清有,兰立志,佟宝华.风动钻孔除尘装置的研究与应用[J].中国勘察设计,2007(4):71–72.
LU Qingyou, LAN Lizhi, TONG Baohua. Research and application of air – driven drilling dust removal device [J]. China Investigation & Design, 2007 (4) : 71 – 72.
- [8] 郑晨,白晓宇,张明义,等.玻璃纤维增强聚合物锚杆研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2019(4):90–99.
ZHENG Chen, BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, et al. Current status and prospects of GFRP anchor research [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019 (4) : 90 – 99.
- [9] 姜云辉,王金华,黎利兵,等.石窟岩体稳定性监测系统应用与研究[J].文物保护与考古科学,2014,26(4):70–75.
JIANG Yunhui, WANG jinhua, LI libing, et al. Research on cave rock stability and application of a monitoring system [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2014, 26 (4) : 70 – 75.

Strengthening and monitoring of the back room roof at Cave 3 of Yungang Grottoes

FAN Xiao¹, YAN Hongbin¹, MENG Lingsong², HUANG Yu², QI Yanming²

(1. Yungang Grottoes Academy, Datong 037007, China; 2. Liaoning Nonferrous Geology 101 Team Co., Ltd., Fushun 113006, China)

Abstract: Excavation of Cave 3, the largest – scale cave excavation of Yungang Grottoes, came to an abrupt end during the process. The special structure and natural weathering over thousands of years have resulted in a variety of diseases, among which collapse of the back room roof is the most serious. By means of rock testing, physical exploration and borehole exploration, the causes of roof failure were discovered. The roof has been strengthened by measures such as grouting of cracks and insertion of anchor rods subsequently. The analysis of cracks, tilt and stress monitoring data for 121 days after completion shows that the reinforcement is effective and it has extensive reference significance.

Key words: Cave 3 of Yungang Grottoes; Roof reinforcement; Monitoring

(责任编辑 张存祖;校对 谢 燕)



作者照片

作者介绍：范潇，1988年生，山西大同人，文博馆员。2011年毕业于合肥工业大学资源勘查工程专业，获学士学位。2014年毕业于中国地质大学（北京）矿物学、岩石学、矿床学专业，获硕士学位。硕士毕业后在内蒙古地质工程有限责任公司从事区域地质调查、矿产调查等工作。2016年调入云冈石窟研究院，从事不可移动石质文物保护研究工作，曾在《地学前缘》《矿物学报》《中国文物报》《大同大学学报》等期刊发表多篇论文。