

文章编号: 1001-1749(2023)05-0663-07

综合物探法在大足石刻圆觉洞窟保护中的应用

赵宏欣¹, 张晶^{1,2}, 魏子贺¹, 许鹏¹, 马骏骅¹

(1. 辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 沈阳 110000;

2. 辽宁工程技术大学, 阜新 123000)

摘要: 大足石刻是集释(佛教)、道(道教)、儒(儒家)“三教”于一身的大型石刻艺术博物馆, 圆觉洞作为其摩崖造像中最具有代表性的作品之一, 在长期自然应力作用下, 致使圆觉洞文物本体及周边围岩体出现了岩石风化剥蚀加速、顶板失稳险情加重等一系列病害。这里运用超声横波成像技术、地质雷达法和微电极高密度法, 对大足石刻圆觉洞顶板进行勘探, 推断了防水混凝土保护层厚度, 与调查资料显示厚度一致。利用综合地球物理技术推断了防水混凝土风化破损位置4处及主裂隙3条, 揭示了岩体裂隙的发育情况, 为后期病害的治理工作提供了基础, 对类似项目有一定的借鉴意义。

关键词: 大足石刻圆觉洞窟; 微电极高密度; 超声横波成像技术; 地质雷达; 裂隙

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.13

0 引言

大足石刻集释(佛教)、道(道教)、儒(儒家)“三教”造像之大成, 具有鲜明的民族化、生活化的特色, 在中国石刻中独树一帜, 宝顶山石刻作为大足石刻的重要代表, 在我国摩崖石刻艺术中占有举足轻重地位, 同时也是中国晚期石窟艺术历史的重要见证。

近年来, 水体侵蚀加剧了宝顶山文物本体及周边围岩体的岩石风化剥蚀^[1], 造成了顶板失稳险情等一系列病害。水体的流通往往发生在岩体破碎裂隙发育区, 精确探测文物所处岩体隐伏裂隙破碎发育情况是消除病害至关重要的一环。

常规地质灾害调查手段只能了解文物所处岩体表面的病害, 无法掌握岩体内部病害的发育情况; 钻孔探测会破坏岩体完整性, 增加文物毁坏风险, 故而无法应用。而地球物理勘探方法^[2-6]作为一种无损

检测技术, 能够在不破坏岩体的情况下对岩体内部结构进行探测, 查明岩体不良地质发育情况, 为后期病害的治理提供宝贵的资料。

笔者利用超声横波成像技术^[7]和地质雷达^[8]对地层浅部进行探测, 推断解释了防水混凝土保护层厚度及破碎位置, 结合利用微电极高密度电阻率法^[9-10]对地层深部的探测能力, 推断解释了裂隙延伸发育情况, 为后期病害的治理提供了参考依据。三种物探方法的综合利用^[11-17]在本次勘探中取得了良好的效果, 对类似工作具有借鉴意义。

1 圆觉洞概况

圆觉洞位于宝顶大佛湾南崖西部, 是宝顶山摩崖造像中最具有代表性的作品之一。洞口有作奔突怒吼状石狮一只, 窟内正壁刻“三身”(法身、应身、报身), 窟内两侧刻有十二圆觉, 左右各六尊, 下有基座,

收稿日期: 2022-06-08

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0095)

第一作者: 赵宏欣(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震、电法、测井等综合地球物理技术的应用, E-mail: 982498030@qq.com.



图 1 圆觉洞洞口全景图

Fig. 1 Panorama of Yuanjue Cave entrance

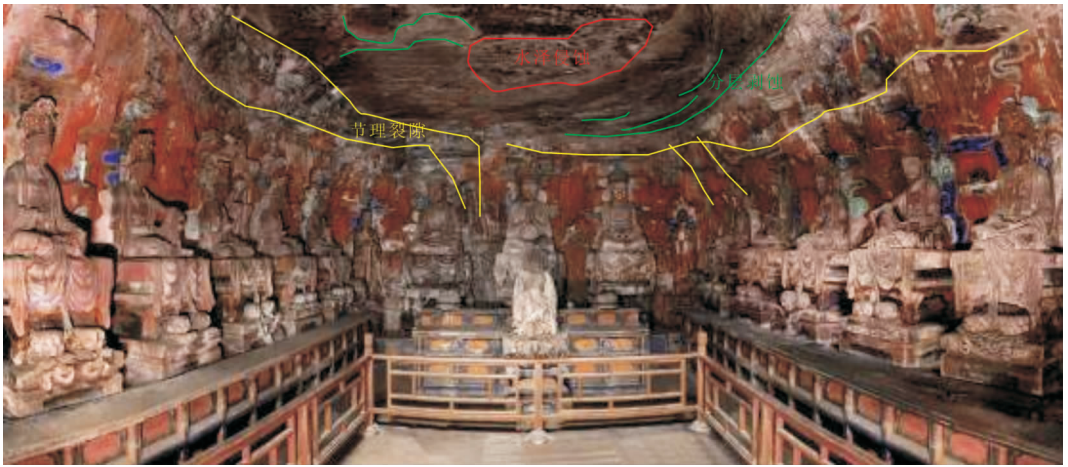


图 2 圆觉洞窟内全貌

Fig. 2 Panorama in Yuanjue Cave

六个基座相连形成整体。洞内石雕刻画细腻、造型优美,装饰性强,袍袖飘舞轻柔婉转,如娟似绸。地处四川盆地丘陵地区与川东平行岭谷交接地带,属低山和深丘地区,常年气候潮湿。

根据调查资料得知圆觉洞第四纪覆盖层为回填土,厚度未知,一般以黄褐至黑褐色砂土或粉土为主,其中普遍包含有一定量的青瓦、红砖碎片及砂岩块石,土体粘性差、结构松散。1998年修缮资料显示,圆觉洞洞顶区域曾经做过地面防渗处理,对基岩裂缝进行过1:4环氧树脂修补,并铺设150 mm厚1:5灰土找坡防水。同时,上覆雨布防水层,最后覆300 mm厚耕植土,种植草皮。但目前看已有多处大型乔木生长,对圆觉洞顶板防渗极为不利。圆觉洞顶板全部位于侏罗系下段 J_3P^{s-1} 上部砂岩层,岩层层厚约15 m~20 m为浅褐至灰绿色细粒长石石英砂岩,呈水平状,多数在层面上含有大量白色片状

云母碎片,局部含有大型薄层状斜层理,含多条泥岩薄夹层。下伏地层为 J_3P^{1-2} 下部泥岩层,紫灰色粉砂质泥岩,含绿色钙质条带,泥岩表面风化裂隙发育,层理发育不明显,与上覆砂岩界面处风化形成凹槽,影响圆觉洞整体稳定性。

圆觉洞洞窟现状如图1、图2所示,从图1可以看出,圆觉洞洞身所处岩体破碎(红色闭合圈所示)、节理裂隙较发育(黄色线条所示)、岩体完整性差;从图2可以看出,圆觉洞窟内洞顶岩体有分层剥蚀(绿色线条所示),水泽侵蚀(红色闭合圈所示)和纵横交错节理裂隙发育(黄色线条所示)表现。岩体破碎、节理裂隙等不良地质构造容易形成水体流通通道,危害文物本体,查明洞窟所处岩体不良地质构造发育情况是后期开展治理工作的前提。

为此,在圆觉洞窟洞顶进行物探勘测以期查明洞窟顶板防水混凝土保护层是否存在风化侵蚀破坏现象以及隐伏节理裂隙等不良地质构造发育情况。

表 1 主要岩体物性参数统计表

Tab. 1 Statistics of the main media's physical properties parameters

介质名称	横波波速/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	视电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	相对介电常数
砂岩	2.0 ~ 3.0	$(0.1 \sim n) \times 10^2$	15 ~ 50
泥岩	0.8 ~ 2.0	$(0.1 \sim n) \times 10^2$	13 ~ 30
混凝土	3.5 ~ 4.5	$(0.1 \sim n) \times 10^3$	6~8

表 1 为研究区内主要岩体物理性质的统计情况。本次勘测任务主要分布在洞窟顶板处,结合地质调查及前期资料可知,该处岩体为砂岩及其上部防水混凝土层。混凝土和砂岩的横波波速、电阻率值和介电常数存在一定的差异,为地球物理方法开展提供了基础。根据超声横波成像技术和地质雷达反射界面的情况,可以推断出混凝土层的厚度,再结合其横向连续性可以推断防水混凝土层是否存在破损情况。根据微极距高密度电阻率反演断面图(图 7)可以推断岩体内破碎裂隙发育情况,结合防水层的破损位置可以推断出水蚀通道。

2 方法原理

2.1 超声横波成像技术

超声横波成像技术^[17-19],主要是使用超声波探头测量超声波脉冲在介质中的传播速度、首波幅度和接收信号的主频率等声学参数,并根据这些参数及其相对变化来判断介质的内部情况。超声波遇波阻抗差异的界面时会发生强反射,根据其幅值可以推断地层的变化,本次测试采用仪器设备为 ACSYS 公司研制生产的 MIRA A1020 型超声波断层扫描成像仪,运用合成孔径聚焦和阵列式超声(SAFT-C)技术。通过断层扫描仪的天线阵的测量对采集到的信息形成数据阵列,最后生成被测物体的横截面视图(图 5)。

2.2 地质雷达

地质雷达探测技术是利用高频电磁波在地下电性界面的反射,以探测有关目标物的一种物探方法^[20-21]。地质雷达的发射和接收天线紧贴地面,由发射机发射的短脉冲电磁波经发射天线辐射传入大地,电磁波在地下传播过程中遇到介质的分界面后便被反射或折射,反射回地面后被接收天线接收到回波,回波信号因传播路径、电磁场强度及波形在传播过程中介质的电性差异及几何形态的不同而发生变化如图 3 所示,通过雷达主机精确记录回波信号

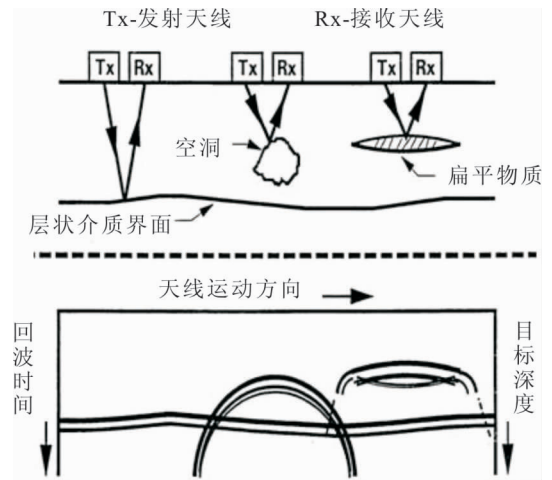


图 3 典型目标雷达回波图

Fig. 3 Geological radar operation

的运动特征,便可获得地下介质的断面扫描图像,根据扫描图的波形及反射波的强度特征,可追踪图像中同相轴等灰度线或等色线,结合其他勘探资料,即可识别地下目标物。

电磁波的反射信号强度主要取决于上下层介质的电性差异,差异越大反射信号越强。雷达波穿透深度与地下介质电导率和中心频率相关,即电导率越高,穿透深度越小;中心频率越低,穿透深度越大。电磁波在分界面上的反射系数主要与介电常数有关,在两层介质的分界面上,当介质的介电常数存在差异时,才会发生反射,分界面两侧的介电常数差异越大,反射能量越强。

2.3 微极距高密度电阻率法

常规高密度电阻率法电极距一般都在 1.0 m 以上,难以满足探测要求,本次探测采用 0.1 m 微电极距,装置类型为温纳装置,基本原理是:电极按供电正极—测量正极—测量负极—供电负极的布极方式,等比例排列在剖面上,获得某一深度的视电阻率值。根据设计要求和场地地形实际情况确定每排列一次性布设 60 根电极,供电电压为 180 V,供电时间为 100 ms,断电时间为 50 ms。测量时 $AM =$

$MN=NB$ 为一个电极间距, $A、B、M、N$ 逐点同时向右移动, 得到第一条剖面线(即第一层); 接着 $AM、MN、NB$ 增大一个电极间距, $A、B、M、N$ 逐点同时向右移动得到另一条剖面线, 这样不断扫描测量下去得到倒梯形断面。

3 探测结果与地质解释

水体侵蚀洞窟内部文物本体及岩体需要穿过顶板岩体上部防水混凝土保护层, 结合现场调查资料可以推断混凝土保护层存在破损情况。为了查明保护层破损位置及岩体破碎裂隙发育情况及可能的水蚀通道路径, 采用超声横波成像技术、地质雷达及微电极高密度电阻率法, 对洞窟顶板岩体进行探测。为了防止第四纪覆盖层干扰实验结果, 在数据观测前铲除圆觉洞窟顶部所有的第四纪覆盖层, 然后在其上布设纵横相交的测线。这里选取其中一条测线, 在该条测线上进行了三种方法的数据观测。由于客观条件及探测原理所限, 不同方法的数据覆盖长度各不相同, 如图 4 所示, 微电极高密度电阻率法测线长度为 7.5 m, 电极距为 0.1 m; 超声横波成像技术和地质雷达测线长度为 7.0 m。

3.1 超声横波成像技术探测结果与地质解释

图 5 为超声横波成像技术反演剖面, 对采集的数据通过专业反演软件处理生成幅值色彩图, 纵向 0.1 m~0.2 m 区域有一明显的强弱能量分界面如图 5 红色虚线所示。结合前期资料圆觉洞顶板上曾做防水混凝土保护层, 考虑到混凝土与砂岩的波速间存在差异, 其波阻抗不同, 二者交界面会出现强反射, 推断红色虚线以上为防水混凝土保护层。横向 0.2 m~0.7 m、1.8 m~2.8 m、4.3 m~4.8 m、5.4 m~6.2 m 区域出现同相轴错断现象, 考虑到防水混凝土保护层受风化侵蚀破坏后颗粒的胶结状态发生变化, 导致地层不均匀, 从而在振幅图上会出现同相轴错断现象推断为防水混凝土保护层破损处, 如图 5 中 $P_1、P_2、P_3、P_4$ 所示。防水混凝土保护层风化侵蚀破坏位置是地层薄弱处, 更容易遭到水体的侵蚀形成水系侵蚀通道, 是本次勘探工作的重要关注点。

3.2 地质雷达探测结果与地质解释

图 6 为地质雷达断面图, 该断面纵向 0.1 m~0.2 m 区域有一明显的反射界面, 推断为地层分界面, 红色虚线所示。考虑到防水混凝土保护层与原砂岩层电介电性存在明显的差异, 电磁波穿过时会



红色测线 G1 微电极高密度电阻率法测线
蓝色测线 C1 超声横波成像技术和地质雷达测线

图 4 实景测线图

Fig. 4 Scene line map

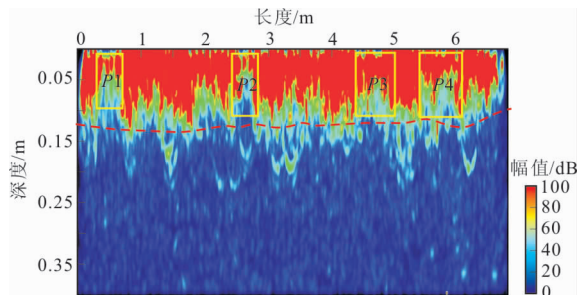


图 5 超声横波成像技术反演剖面

Fig. 5 Section diagram of ultrasonic CT method

产生强烈的反射, 在地层交接处会出现反射界面, 结合前期调查资料及图 5 超声横波成像技术反演断面可以推断图 6 中红色虚线以上为防水混凝土保护层。横向 0.2 m~1.0 m、1.8 m~2.4 m、4.2 m~4.6 m、5.6 m~6.5 m 区域呈现横向不连续, 这表明地层不均匀, 推断为防水混凝土保护层破损处, 与图 5 中 $P_1、P_2、P_3$ 和 P_4 对应。

3.3 微电极高密度电阻率法探测结果与地质解释

图 7 为微电极高密度电阻率法反演断面图, 该断面整体视电阻率值较低不超过 $500 \Omega \cdot m$, 纵向 0.1 m~0.2 m 处有一相对高阻、低阻分界面如红色虚线所示, 虚线上方视电阻率值在 $150 \Omega \cdot m$ 以上, 虚线下方视电阻率值不超过 $150 \Omega \cdot m$, 局部区域低于 $50 \Omega \cdot m$ 。结合调查资料可知该处曾做防水混凝土保护层, 推断虚线以上为混凝土保护层。该段面横向 1.2 m~2.3 m、4.0 m~4.5 m、5.8 m~6.1 m 区域深部存在倾斜低阻体, 视电阻率值呈相对低阻闭合圈横向连续性中断。根据以往经验, 电阻率值呈低阻闭合圈横向连续性中断常和含水层空洞、破

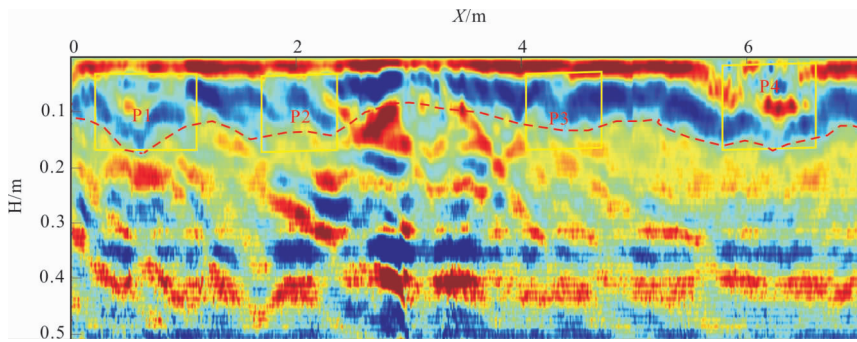


图6 地质雷达法断面图

Fig. 6 Geological radar cross-sectional map

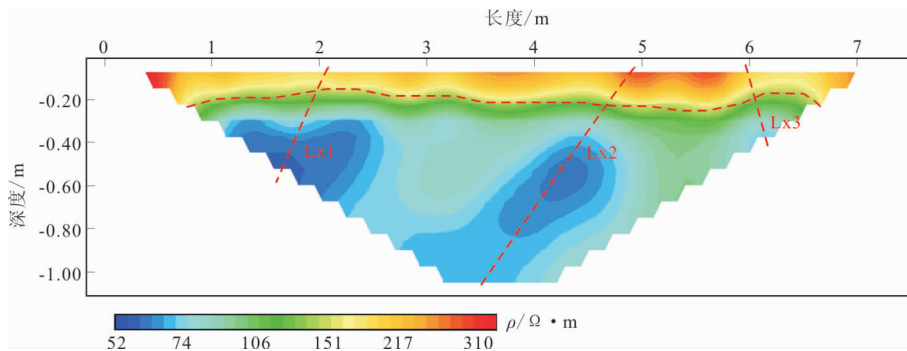


图7 微电极高密度电阻率法反演断面图

Fig. 7 Microelectrode high density resistivity profile

碎裂隙地质体发育等有关,本次勘探结合地质调查资料,推断该处为破碎裂隙发育,如LX1、LX2、LX3所示,对比图5、图6断面图与P2、P3和P4位置对应,这表明水体沿防水混凝土保护层破损处通过向地层深处侵蚀。

对比三种方法的同线探测结果,宏观上探测结果存在结构一致性,都对覆盖层厚度的反演良好,其中超声横波成像技术方法的覆盖层显示为0.10 m~0.15 m,地质雷达方法显示为0.10 m~0.18 m,微电极高密度电阻率方法显示为0.15 m~0.25 m。对于防水混凝土保护层破碎位置,超声横波成像技术和地质雷达法均有反应,微电极高密度电阻率没有反应,其中超声横波成像技术方法的破损位置显示为0.2 m~0.7 m、1.8 m~2.8 m、4.3 m~4.8 m和5.4 m~6.2 m四处区域;地质雷达方法显示为0.2 m~1.0 m、1.8 m~2.4 m、4.2 m~4.6 m、5.6 m~6.5 m四处区域。对于裂隙超声横波成像技术和地质雷达法没有反应,微极距高密度电阻率法推断解释了三条主裂隙分别为Lx1、Lx2和Lx3。根据资料可知,防水混凝土保护层厚为0.15 m,对比勘探成果可知分辨率上,超声横波成像技术对厚度反应最大偏差为0.05 m,地质雷达法对厚度反应最大偏差为0.05 m,微极距高密度法对厚度反应最

大偏差为0.10 m。

4 结论及问题

运用超声横波成像技术、地质雷达及高密度电阻率法对大足石刻圆觉洞顶板进行探测,对比分析探测结果得出以下结论:

1) 三种地球物理技术探测圆觉洞顶板防水混凝土保护层厚度是有效的。其中,超声横波技术和地质雷达因为采用反射波探测理论,故而比高密度电阻率法对顶板防水混凝土保护层的探测效果更佳,而反之高密度电阻率法对陡倾角裂隙更为有效。

2) 超声横波成像技术和地质雷达推断解释了混凝土保护层四处破碎部位,而对裂隙的发育情况没有反应;微电极高密度电阻率法推断解释了三条主裂隙,对混凝土保护层破损位置没有反应,分析可能是同一性质的地层物性差异不明显的原由。

3) 三种物探方法的综合利用在本次勘探中取得了良好的效果,对类似项目有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 田小甫,孙进忠,柳亚千. 晋阳大佛边坡岩体风化分级研究[J]. 地质与勘探, 2010, 46(4): 0722-0727.

- TIAN X F, SUN J Z, LIU Y Q. Weathering grading of rockmass on the slope at the Jin yang Buddha[J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(4): 0722—0727. (In Chinese)
- [2] 任建光, 黄继忠, 石云龙, 等. 地球物理电法勘探技术在云冈石窟保护中的应用[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2008, 24(5): 94—96.
REN J G, HUANG J Z, SHI Y L, et al. The application of electrical method in Yungang grottoes[J]. *Journal of Shanxi Datong University(Natural Science)*, 2008, 24(5): 94—96. (In Chinese)
- [3] 钟世航. 我国考古和文物保护工作中物探技术的应用[J]. *文物保护与考古科学*, 2004, 16(3): 59—64.
ZHONG S H. Application of geophysical technology for archaeology and preservation of cultural relics[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*. 2004, 16(3): 59—64. (In Chinese)
- [4] 钟世航. 地球物理技术在我国考古和文物保护工作中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(3): 498—506.
ZHONG S H. Application of geophysical technology in archaeological and cultural heritage conservation in China [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(3): 498—506. (In Chinese)
- [5] 钟世航, 用物探方法解决文物保护和考古中某些难题[J]. *地球物理学报*, 1991, 34(5): 636—643.
ZHONG S H. New progress in applying geophysical exploration methods to protecting historical relics and to archeology [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1991, 34(5): 636—643. (In Chinese)
- [6] 周富彪, 孙进忠, 石金山, 等. 桂林七星岩摩崖题刻渗水通道瑞雷波探测[J]. *文物保护与考古科学*, 2019, 31(03): 100—109.
ZHOU F B, SUN J Z, SHI J S, et al. Rayleigh wave exploration of seepage passage inscribed on Qixingyan cliff in Guilin [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(03): 100—109. (In Chinese)
- [7] 周华, 杨森, 高峰, 等. 重庆大足千手观音便携 X 探伤调查及初步研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2012, 24(04): 45—54.
ZHOU H, YANG M, GAO F, et al. Investigation and preliminary study on portable X-ray flaw detection of Guanyin in Dazu, Chongqing [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*. 2012, 24(04): 45—54. (In Chinese)
- [8] 覃覃, 赵永辉, 林国聪, 等. 探地雷达在上林湖越窑遗址水下考古中的应用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(03): 199—205.
QIN T, ZHAO Y H, LIN G C, et al. Application of ground penetrating radar in Underwater Archaeology of Yueyao site in Shanglinhu Lake [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(03): 199—205. (In Chinese)
- [9] 石春娟. 重庆大足千手观音造像的电磁勘探和水文地质勘探[J]. *物探与化探*, 2018, 42(6): 1306—1310.
SHI C J. Research on electromagnetic prospecting and hydrogeological exploration for the statue of Thousand-Hand Avalokitesvara at Dazu, Chongqing [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(6): 1306—1310. (In Chinese)
- [10] 肖宽怀, 王绪本. 微电极高密度电法探测在文物保护中的应用研究[J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(1): 10—17.
XIAO K H, WANG X B. The research about the application of relic protection with the method of microelectrode detection of high density electrical [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(1): 10—17. (In Chinese)
- [11] 温学飞, 何滔, 孟海东, 等. 基于综合物探法的矿山土质滑坡滑动面探测[J]. *物探化探计算技术*, 2018, 40(4): 479—486.
WEN X F, HE T, MENG H D, et al. Detection of sliding surface of mining landslide based on comprehensive geophysical prospecting method [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 40(4): 479—486. (In Chinese)
- [12] 张以文, 张卫, 邱占林, 等. 综合物探方法在新建水库勘察中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2022, 44(4): 477—482.
ZHANG Y W, ZHANG W, QIU Z L, et al. Application of integrated geophysical prospecting method in new reservoir investigation [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 44(4): 477—482. (In Chinese)
- [13] 王其合. 综合物探技术在城市轨道交通勘察中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2021, 43(03): 360—366.
WANG Q H. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in urban rail transit survey [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 43(03): 360—366. (In Chinese)
- [14] 何灿高, 王杰, 张美多. 综合物探方法在岩溶区勘察中的应用[J]. *水利水电工程设计*, 2019, 38(04): 48—50.
HE C G, WANG J, ZHANG M D. Application of comprehensive geophysical prospecting methods in the investigation to the Karst area [J]. *Design of Water Re-*

- sources & Hydroelectric Engineering, 2019, 38(04): 48—50. (In Chinese)
- [15] 廖友清, 陈致同, 刘彦华. 综合物探方法在北盘江大桥岩溶地质勘察中的应用[J]. 地质学刊, 2020, 44(Z1): 185—191.
LIAO Y Q, CHEN Z T, LIU Y H. Application of integrated geophysical methods in Karst geological survey of Beipanjiang bridge[J]. Journal of Geology, 2020, 44(Z1): 185—191. (In Chinese)
- [16] 王军成, 赵振国, 高士银, 等. 综合物探方法在滨海县月亮湾地热资源勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 321—330.
WANG J C, ZHAO Z G, GAO S Y, et al. Application of a comprehensive geophysical exploration methods in the exploration of geothermal resources in Yueliangwan, Binhai County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 321—330. (In Chinese)
- [17] 栗宝鹏, 张涛, 张美多, 等. 超声横波反射三维成像技术及应用在水工混凝土缺陷诊断中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(5): 595—602.
LI B J, ZHANG T, ZHANG M D, et al. Dimaging technology based on ultrasonic shear wave reflection and its application in defect diagnosis of hydraulic concrete[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(5): 595—602. (In Chinese)
- [18] 董明华, 穆鹏宇. 地质雷达及超声横波技术在密集型钢筋混凝土结构检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 686—693.
DONG M H, MU P Y. Application of ground penetrating radar and transverse wave reflection imaging technology to detection of dense reinforced concrete structures[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(5): 686—693. (In Chinese)
- [19] 杨杰, 王浩多, 程琳. 混凝土结构内部缺陷超声波 CT 检测图像特征[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11): 127—130.
YANG J, WANG H D, CHENG L. Experimental study on image characteristics of ultrasonic ct detection of internal defects in concrete structures [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(11): 127—130. (In Chinese)
- [20] 刘宗辉, 刘毛毛, 周东, 等. 基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3282—3290.
LIU Z H, LIU M M, ZHOU D, et al. Recognition method of typical anomalies in karst tunnel construction based on attribute analysis of ground penetrating radar [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3282—3290. (In Chinese)
- [21] 黄真萍, 曹洁梅, 周成峰, 等. 探地雷达资料的高分辨去噪处理及应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 521—526.
HUANG Z P, CAO J M, ZHOU C F, et al. The high-resolution de-noise processing of ground-penetrating radar data and its engineering application [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2012, 40(4): 521—526. (In Chinese)

Application of comprehensive geophysical prospecting in the protection of Yuanjue caves in Dazu rock carvings

ZHAO Hongxin¹, ZHANG Jing^{1,2}, WEI Zihe¹, XU Peng¹, MA Junhua¹

(1. Liaoning Non-ferrous Geological Exploration and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China;

2. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Dazu rock carvings is a large stone carving art museum. It includes Buddhism, Taoism, and Confucianism. Yuanjue cave is one of the most representative works in its cliff sculptures. Under long-term natural forces, a series of diseases, such as accelerated rock weathering and erosion and increased risk of roof instability, have occurred in the cultural relics and surrounding rock bodies of Yuanjue cave. This paper uses the ultrasonic transverse wave imaging technique, geological radar method and microelectrode high-density method to explore the roof of Dazu rock carvings Yuanjue cave. It inferred the thickness of the waterproof concrete protective layer. Furthermore, it consists of the thickness shown in the survey data. Through comprehensive geophysical techniques, we explain four locations of weathering damage and three prominent cracks in waterproof concrete. It reveals the development of rock mass fractures. This provides a foundation for the treatment of later diseases. And it has a specific reference significance for similar projects.

Keywords: Dazu rock carvings Yuanjue cave; microelectrode high-density method; ultrasonic transverse wave imaging technique; ground penetrating radar method; fracture