

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.035



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 不可移动石质文物岩石理化性质研究 ——以重庆市石佛寺遗址摩崖造像区为例

杨阳<sup>1</sup>, 刘汉龙<sup>1</sup>, 张良帅<sup>2</sup>, 刘海军<sup>3</sup>, 熊华山<sup>4</sup>, 叶琳<sup>2</sup>,  
王鲁琦<sup>1</sup>, 韩绍康<sup>1</sup>, 仇文岗<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市文物考古研究院, 重庆 400013;  
3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610052; 4. 重庆市地质矿产勘查开发集团  
检验检测有限公司, 重庆 400707)

**摘要:**以重庆市石佛寺遗址摩崖造像区为工程背景, 通过开展野外勘测及岩石试样的理化性质测试, 提出一种针对不可移动石质文物的理化性质研究方法, 即跨尺度分析方法。室内试验采用宏观试验及微观试验, 宏观试验包括三轴试验和直剪试验, 微观试验包括扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)分析。采用宏观试验测得样品的基本力学参数; 通过电镜分析可知, 试样为标准的砂岩, 孔隙率较大, 表明其对水的敏感性较高, 在长期干湿循环作用下, 其强度会随着时间的推移而降低, 即典型的水岩相互作用; XRD 衍射试验表明, 由于砂岩中黏土矿物含量较高, 故其水理性质较差, 抗风化能力较弱, 这是导致其风化的主要原因。地质雷达勘测及辅助声波探测表明, 在有效保护文物的前提下, 可以采用该方法对文物进行宏观和微观的跨尺度科学分析。

**关键词:**无损检测; 跨尺度分析; 石质文物; 摩崖造像; 理化性质分析

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)03-0001-08

## Physicochemical properties of immovable stone relics: a case study of Moya statue area of Shifosi Site in Chongqing

YANG Yang<sup>1</sup>, LIU Hanlong<sup>1</sup>, ZHANG Liangshuai<sup>2</sup>, LIU Haijun<sup>3</sup>, XIONG Huashan<sup>4</sup>,  
YE Lin<sup>2</sup>, WANG Luqi<sup>1</sup>, HAN Shaokang<sup>1</sup>, ZHANG Wengang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China; 2. Chongqing Cultural Relics and Archaeology Research Institute, Chongqing 400013, P.R.China; 3. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, P.R.China; 4. Chongqing Geology and Mineral Exploration Group Testing Co., Ltd., Chongqing 400707, P.R.China)

**Abstract:** Take Moya statue area of Shifosi cite in Chongqing as the engineering background, this paper

收稿日期: 2022-01-26

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(JG2021072); 国家自然科学基金(52108300); 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-bsh0047)

作者简介: 杨阳(1992-), 男, 博士, 主要从事岩土工程研究, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn。

王鲁琦(通信作者), 男, 博士, E-mail: wlq93@cqu.edu.cn。

Received: 2022-01-26

**Foundation items:** Special Key Project of Technological Innovation and Application Development of Chongqing (No. JG2021072); National Natural Science Foundation of China (No. 52108300); Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2021jcyj-bsh0047)

**Author brief:** YANG Yang (1992-), PhD, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn.

WANG Luqi (corresponding author), PhD, E-mail: wlq93@cqu.edu.cn.

proposes a research method for determination of the physicochemical properties of stone relics that cannot be moved through field survey as well as the application of cross-scale analysis method in immovable stone cultural relics. Laboratory tests were conducted by macro and micro tests, and the former include triaxial tests and direct shear tests, which were used to measure the basic mechanical parameters of samples. The micro tests include scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analysis. Through SEM, it can be seen that the sample is standard sandstone of large porosity, indicating that it is highly sensitive to water. In the long-term dry-wet cycle, its strength will decrease with time, namely, the typical water-rock interaction; XRD experiments show that the high content of clay minerals in sandstone leads to poor hydrologic properties and weak weathering resistance, which is also the main reason for weathering. Geological radar survey and auxiliary acoustic detection show that this method can be used to carry out macroscopic and microscopic cross-scale scientific analysis of cultural relics under the premise of effective protection of cultural relics.

**Keywords:** nondestructive testing; cross-scale analysis; stone cultural relics; cliff carving; analysis of physico-chemical properties

在众多历史文化遗产中,石质文物因分布范围广、历史悠久、价值高等特点,具有极其重要的地位<sup>[1]</sup>。石佛寺遗址位于重庆市江津区长江北岸的圣泉街道塔坪村,其历史沿革从晚唐一直延续至明清时期<sup>[2]</sup>,分为摩崖造像区、建筑基址区、墓葬区等,摩崖造像集中开凿于长15.2 m、宽8.7 m、高6.2 m的5号巨石上。遗址后缘为砂岩陡崖,但陡崖底部为泥岩,因砂岩和泥岩的风化程度不同,该遗址存在差异风化,这种风化现象不仅会破坏文物的完整,还会对后期运营造成威胁<sup>[3]</sup>。因此,对石质文物开展裂隙发育勘测,为后续文物保护工作提供数据支撑有非常重要的意义。

石佛寺遗址是中国为数不多的通过考古发掘全面揭露出来的布局完整的石窟寺,是地下遗存与地面遗址相结合、寺庙建筑与墓葬相呼应、碑刻材料与出土遗存相印证的历史时期考古的罕见案例,具有十分重要的历史、科学、艺术及文化、社会价值。

目前,在不可移动石质文物的病害勘察及科技保护中,采用了大量的无损检测方法<sup>[4]</sup>。在文物修缮工作方面,无损检测分析是指对进行检测的文物不产生任何物化及其他危害的分析检测技术<sup>[5]</sup>。现阶段文物的无损检测技术主要有超声波CT技术<sup>[6-8]</sup>、X射线光谱<sup>[9-11]</sup>、红外热成像技术<sup>[12-13]</sup>等;Feng等<sup>[14]</sup>还提出将激光超声无损检测技术应用于裂纹检测中。黄继忠等<sup>[15]</sup>以山西长春玉皇庙为研究对象,通过对比其他无损检测技术,阐述了微波技术在检测文物含水率方面的优点;齐扬等<sup>[16-18]</sup>提出了利用激光无损清除石质文物表面的污染物;Krügener等<sup>[19]</sup>利用THz技术对石质文物内部裂隙进行探测,并采用多种方法对文物修复状态进行了评估。除

此之外,于森等<sup>[20]</sup>总结了微生物技术在石质文物领域进行无损检测的发展历程。

室内、室外综合勘探方法在土木工程领域应用相当广泛,物探方法具有便于控制、分辨率较高、比较方便等特点。因此,在20世纪40年代末,已经将物探方法应用到了考古领域,Vickers等<sup>[21]</sup>首次将探地雷达应用于考古及文物的保护中。近年来,物探作为无损检测技术,在中国文物保护中得到了很好的应用<sup>[22-24]</sup>。

综上所述,根据实际工况分析,以石佛寺遗址摩崖造像区为研究对象,开展野外地质雷达勘测、辅助声波探测以及岩石试样的理化性质测试,揭示不可移动砂岩石质文物的劣化机理,提出一种新型的裂隙探测方法。

## 1 工程概况

石佛寺遗址位于重庆市江津区长江北岸的圣泉街道塔坪村,属构造剥蚀丘陵地貌,地质构造上位于北碚向斜西翼,岩层产状 $104^{\circ}\angle 8^{\circ}$ 。据地面调查,场区主要岩土层有第四系全新统人工填土( $Q_4^{ml}$ )素填土、坡残积( $Q_4^{dl+el}$ )粉质黏土、崩坡积( $Q_4^{col+dl}$ )块石土、侏罗系中统沙溪庙组( $J_2s$ )泥岩、砂岩。

场地总体上为向南倾斜的斜坡,如图1所示,石佛寺遗址位于斜坡上的冲沟(沟谷)地带。遗址后缘约150 m处为一陡崖,陡崖主要为砂岩,崖底部为泥岩。泥岩为极易风化岩石,砂岩风化较泥岩慢,在差异风化作用下,陡崖下的泥岩首先被剥蚀掉,导致陡崖砂岩失去支撑,不断形成落石,陡崖下的斜坡地带随处可见(砂岩大块石),现发掘出的佛塔地宫、爬山廊、转轮藏、摩崖造像区均为陡崖落石。

现阶段因斜坡地形整体剥蚀趋缓,落石发育渐缓,但仍存在落石的可能。

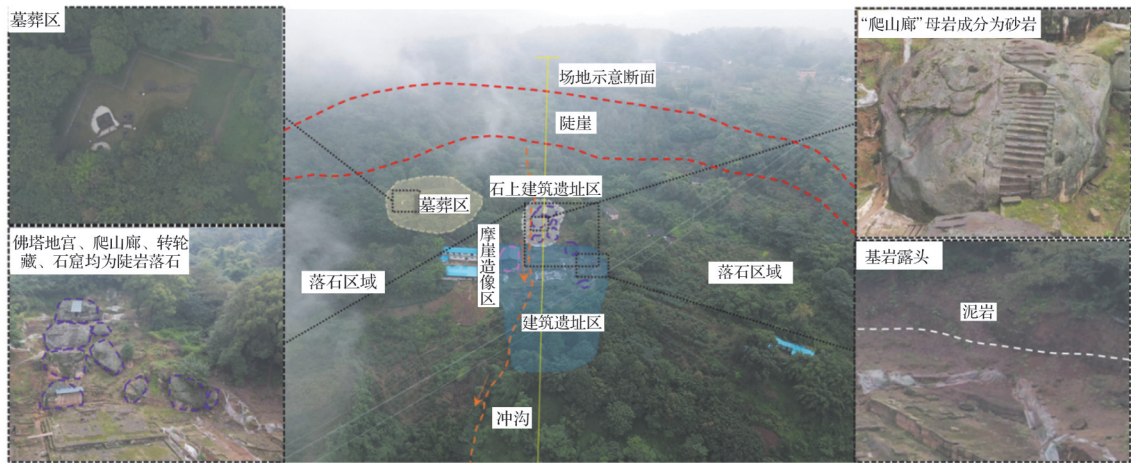


图1 重庆市江津区石佛寺遗址场地整体地貌

Fig. 1 Overview of the Shifo Temple, Jiangjin District, Chongqing

另一方面,石佛寺位于斜坡上的冲沟地带,如图2所示,周边雨水等均向遗址区汇集,2021年10月(非雨后)现场调查期间,可见冲沟中有小股水

流,汛期可能形成大量汇水、山洪。石窟后缘的泥痕表明其曾部分被掩埋,因此,汛期偶发的山洪对遗址仍存在一定威胁。

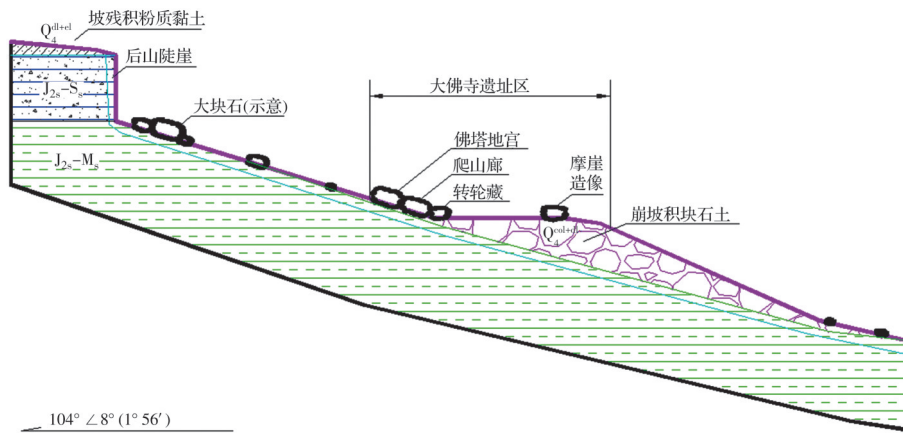


图2 江津石佛寺遗址场地剖面示意图

Fig. 2 Section diagram of Jiangjin Shifo Temple archaeological site

从现场总体地形来看,石佛寺遗址整体疑为斜坡、冲沟地带形成的堆积体,现状未见失稳,场地基岩面可能较陡,如在遗址区或其周边进行工程建设,可能诱发场地沿基岩面整体滑动、变形。

## 2 野外调查

通过前期的野外踏勘,采取地质雷达为主、声波探测为辅的勘探方式,力求达到勘探工作目的。建立三维坐标,以广场最左侧保护棚柱脚为原点,右侧为x轴正向,远离建筑基址区一侧为y轴正向,竖直向上为z轴正向,三维相对坐标如图3所示。测

区位于重庆市江津区浒溪公园右侧,长江以北,所处地形地貌为山间平坝区,地势平坦。裂隙与完整的岩石有着明显的介电常数、波速的物性差异,具备良好地质雷达及声波的物性条件。

野外踏勘工作共完成18条地质雷达测线,包括沿y轴正向环绕岩石、沿x轴正向环绕岩石、位于建筑基址区一侧、位于岩石组背后及左侧等多个位置,地质雷达测线总长388.4 m;声波探测共6条测线,包括沿x轴正向环绕岩石、位于建筑基址区一侧、位于岩石组背后及左侧等多个位置,共完成624个裂隙检测点。



图3 石佛寺摩崖造像相对坐标图

Fig. 3 Relative coordinates of Shifo Temple Cliff Carving

### 3 室内试验

在石佛寺遗址摩崖造像区进行现场取样后,在室内对试样的物理参数进行分析,并开展了三轴试验及直剪试验;对破坏后的试样进行微观电镜扫描;多尺度分析研究区域典型岩石的物理力学性质。

#### 3.1 宏观性质测试

试样定为砂岩,采用三轴试验测定岩石的剪切强度,为测定极端工况下岩石的力学性质,对岩石试样进行充分饱和,同时,结合直剪试验,进一步确定试样的物理力学性质。试验得到砂岩力学参数:天然含水率为 1.56%~1.70%,颗粒密度约为 2.61 g/cm<sup>3</sup>,天然密度为 2.43 g/cm<sup>3</sup>,干密度为 2.39 g/cm<sup>3</sup>,饱和密度为 2.47 g/cm<sup>3</sup>,孔隙比为 0.89,孔隙率为 8.13%~8.92%,吸水率为 3.1%~3.54%,饱和吸水率为 3.39%~3.75%,里氏硬度值为 469~530,干单轴抗压强度为 40.9~41.6 MPa,饱和单轴抗压强度为 22.4~23.7 MPa,弹性模量为 15.9~17.3 GPa,泊松比为 0.102~0.104。

参照典型岩石试样的应力-应变关系曲线(如图4)、莫尔应力圆包线(如图5)及三轴试验强度曲线(如图6),可以得到岩石的抗剪强度参数,并确定其抗拉强度,其中,摩擦角为 42.6°,黏聚力为 10 MPa,抗拉强度为 1.31~1.51 MPa。

#### 3.2 微观测试

收集破坏后的试样,进行电镜扫描及XRD衍射

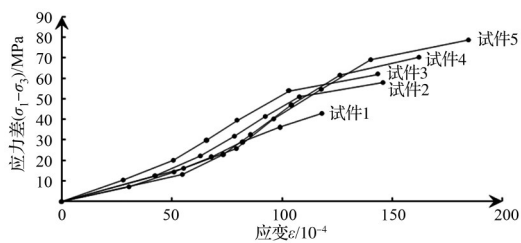


图4 应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain relationship curve

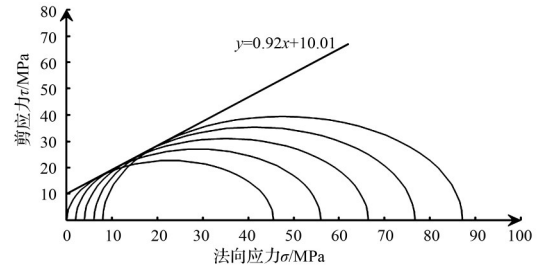


图5 莫尔应力圆包线

Fig. 5 Mohr's stress circle envelope

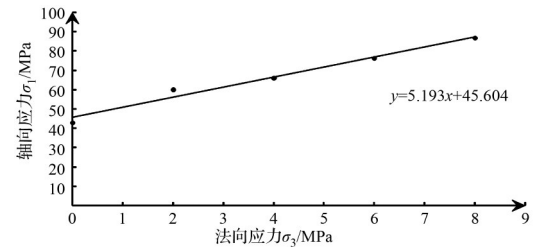


图6 三轴试验强度曲线

Fig. 6 Strength curve of triaxial test

试验,其中,电镜扫描采用重庆大学 TM-4000 Plus 扫描电子显微镜,射线衍射分析采用荷兰帕纳科 Empyrean 多功能高分辨 X 射线衍射仪。

分别对电镜扫描所得到的岩石试样断面微观结构进行 50 倍、200 倍、500 倍、2 000 倍的微观扫描,如图 7 所示。

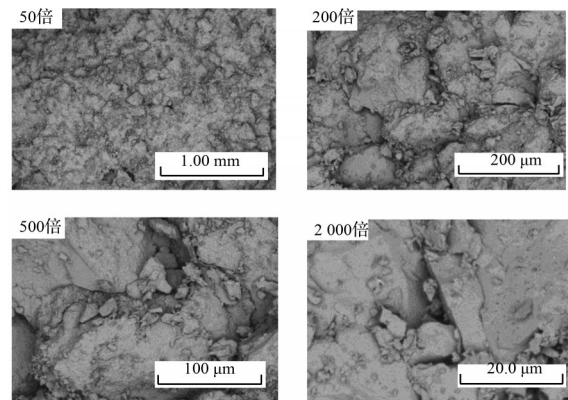


图7 试样断面微观结构

Fig. 7 Microstructure of the specimen section

由电镜分析可知,试样为标准的砂岩,孔隙率较大,表明其对水的敏感性较高;力学断裂所形成的碎屑较多,在长期干湿循环作用下,其长期强度会随着时间的推移而降低,即典型的水、岩相互作用。砂岩样品的 EDS 化学成分测试如图 8 所示,EDS 分析结果及 XRF 测试结果表明,该砂岩主要成分为 Si、Al、Ca、Mg、Fe、K 的氧化物,占比达 98% 以

上。对比XRD结果可知:Si元素的主要存在形式为SiO<sub>2</sub>,是石英的主要成分;Al元素主要存在于白云母中;Ca主要以其氧化物的形式存在,是方解石及其风化产物的主要成分。

根据X衍射分析结果,造岩矿物成分为:石英45%,长石14%,方解石12%,黏土矿物29%,为钙质胶结长石石英砂岩,方解石呈填充式胶结,遇盐酸起泡。从X-射线衍射可知,砂岩中同样含有绿泥石等黏土矿物,因为黏土矿物性质活泼,吸附水的能力较强,在砂岩中则主要体现为饱和吸水率较高,浸水饱和后的强度急剧降低。总之,砂岩中黏土矿物含量较高的特点导致其水理性质较差,抗风化能力较差,这也是导致其风化的主要原因。

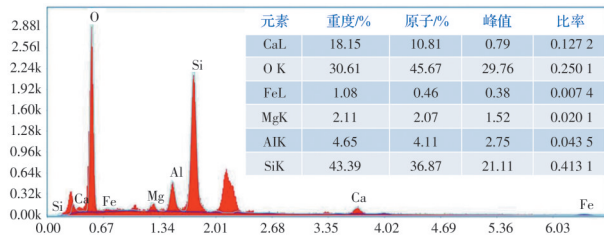


图8 EDS化学成分测试

Fig. 8 Chemical composition test of EDS

#### 4 分析原理及方法

地质雷达是以超高频电磁波作为探测场源的无载波电磁脉冲波,由一个发射天线向地下发射一定中心频率,另一天线接收由地下不同介质界面产生的反射回波,电磁波在介质中传播时,其传播时间、电磁场强度与波形随所通过介质的电性质(如介电常数 $E\gamma$ )及测试目标体的几何形态差异而产生变化,根据接收的回波旅行时间、幅度和波形等信息,可探测地下目标体的结构和位置信息。其工作原理如图9所示。

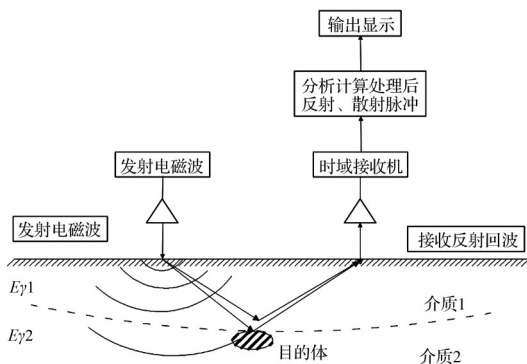


图9 地质雷达工作原理图

Fig. 9 Working principle diagram of ground-penetrating radar

采用美国SIR-3000地质雷达仪,由于该工区地形平坦、通视条件较好,不需要专门的测地定点工作,因此,测点的布设与剖面测量同时进行,利用已知地物作为参考点确定剖面起点,借助皮尺等间隔做好标记,铺好排列。

地质雷达工作方法:地质雷达采用100、40 MHz天线测量,100 MHz天线采用点测,采样窗口300 ns,每5 m打标,如图10所示。



图10 地质雷达(左图)及声波测试(右图)现场勘探

Fig. 10 Geological radar (left) and acoustic sounding (right) field exploration

40 MHz天线采用逐点测量,每0.5 m一点,采样窗口600 ns,每5 m打标。声波测深工作方法:超声波检测仪采用超声波激发,单端激发,另一端接收;发射电压为250、500、1 000 V,采样周期为0.05、0.1、0.2、0.4、0.8、1.6、3.2、6.4  $\mu$ s,发射脉宽20  $\mu$ s~200 ms,样点长度1 024,采样时间200 ms,全通无滤波。

#### 5 物探结果分析

##### 5.1 地质雷达及声波资料处理流程

地质雷达资料处理采用中国矿业大学开发的GR雷达处理分析系统,包括数据编辑、标记管理、信号处理、数学运算、测距里程数据修复、参数设置、解释系统及新增功能等模块。资料处理主要包括数据编辑、预处理、标记分割、反演等,其流程如图11所示。

声波资料处理采用加拿大骄佳公司 Geogiga Seismic资料处理系统,包括前期处理、反射波、折射波、地震映像、面波、跨孔层析、折射层析、垂直剖面、地脉动、波速测井、面波高级版、成果图等功能板块,主要进行预处理、滤波等,资料处理采用计算机,人机交互解释。

##### 5.2 异常识别及解译过程

地质雷达异常识别的基本要求:1)反射层信号识别,同一反射层信号连续、相位一致;2)空洞信号

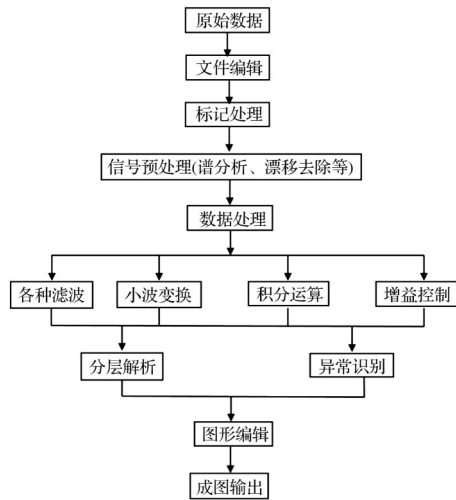


图11 资料处理流程

Fig. 11 Data processing flow

识别,出现强反射信号或双曲线信号或波形杂乱。

地质雷达识别的基本要求:1)同一连续完整层的地震波初至明显、连续性好;2)在空洞部位,地震波形呈双曲线特征或波形杂乱。

信号识别除应符合上述要求外,还应遵循以下原则:1)注重实测资料与现场的符合性;2)注重不同物探方法之间的统一性;3)注重与地质人员、野外技术人员的沟通交流。

在处理、分析原始数据的基础上,资料解译要结合现场实际情况,以已有地质现象(即表面裂隙)为准,先进行标准信号识别,确定介电常数、波速等参数,然后进行成图,进而逐剖面确定各异常性质、深度、规模等特征。对于非典型信号,则综合两种物探方法进行判定。

### 5.3 裂隙扩展分析

物探工作完成18条地质雷达测线,总长为388.4 m,测点间距均为0.1 m,采样长度采用200、300、600  $\mu\text{m}$ ,物理点数总计3 884个;624个裂隙检测点,测线长度总计124.7 m,测点间距均为0.2 m,物探工作完成质量较好,符合规范。

共发现显著裂隙24条,裂隙深度位于35~54 cm之间,裂隙长度最长为16 m。相关裂隙的深度及发育走向符合岩石裂隙发育基本原理与相关规律,具体如下:

1)正面(建筑基址区一侧)存在6条发育严重的裂隙,深度在35~50 cm之间。其中两个佛龛上侧的裂隙较深,在40~50 cm之间。该面右侧区域细小裂隙十分发育。

2)右侧面存在5条发育严重的裂隙,深度在

35~48 cm之间,裂隙宽度不断,深度相对较浅。

3)背面存在7条发育严重的裂隙,深度在38~52 cm之间,佛龛中横向发育5条裂隙,离地高度分别为1.14、1.45、1.75、2.82、3.3 m,其中,离地高度为1.75、2.82 m的裂隙较深,位于44~52 cm之间。

4)左侧面存在5条显著发育的裂隙,裂隙深度在42~54 cm之间,其中最为严重的裂隙位于佛龛正上方,呈竖向发育,在佛龛内沿左侧弧线弧形向下发育。

借助三维成像软件在室内对岩石尺寸进行还原,并对裂隙的空间位置及相应的发育走向进行勾画,但由于建模所需的所有数据仅凭借皮尺野外测量得到,数据量相对较少,且存在一定误差,得到的效果有限。岩石各面的裂隙位置如图12所示。

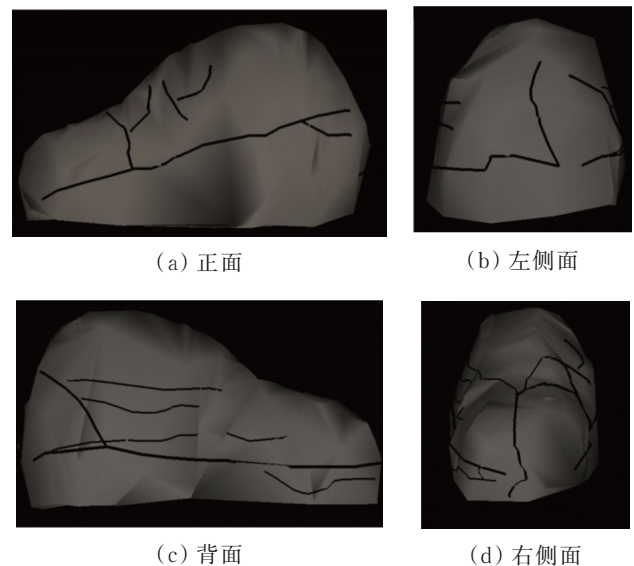


图12 裂隙发育情况

Fig. 12 Fracture development

## 6 结论

通过室内试验及现场勘测相结合的宏观及微观跨尺度表征方法,以重庆市石佛寺遗址摩崖造像区为工程背景,通过无损检测与跨尺度岩石理化性质研究,揭示了不可移动砂岩石质文物的劣化机理,提出了一种新型的裂隙探测方法。

1)详尽的工程特性试验及理化分析可以有效揭示不可移动砂岩石质文物的劣化机理。通过电镜分析可知,试样为标准的砂岩,孔隙率较大,表明其对水的敏感性较高;力学断裂所形成的碎屑较多,在长期干湿循环作用下,其强度会随着时间的推移而降低,即典型的水、岩相互作用;XRD衍射试

验表明,砂岩中黏土矿物含量较高的特点会导致其水理性质较差,抗风化能力较差,这也是导致其风化的主要原因。

2)无人机航拍成果和场地地质数据有机结合对文物后期保护工程具有指导作用,对于遗址类历史文物的保护至关重要。根据现场调查可知,场地中下方区域处于洼地,摩崖造像区后方发育高差较小的陡崖有利于地表水向场地汇集。同时,建筑遗址区冲沟发育,可见流水。因此,建议调查场地周边地下水、地表(汇)水等水文地质情况,对场地汇水进行截、排处置。

3)针对不可移动石质文物,相较于单一的物探方式,野外地质雷达勘测及辅助声波探测的联合方法能更好地探测裂隙分布。本文所述野外现场勘测可无损获取裂隙发育等情况,在此次遗址考古发掘过程中,由于场地原始平衡状态被扰动,物探结果共发现摩崖造像区浅表层连续裂隙24条,裂隙深度位于35~54 cm之间,裂隙长度最长为16 m,内部并未贯通;建议对摩崖造像进行更为详细的三维检测,以获取细化的三维数据资料。

#### 参考文献

- [1] WANG H P, ZANG Y F, LIANG F X, et al. A probabilistic method for fractured cultural relics automatic reassembly [J]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2021, 14(1): 1-25.
- [2] 牛英彬, 邵星积, 邹后曦, 等. 2017年度江津石佛寺遗址墓葬区发掘简报[J]. *江汉考古*, 2018(Sup1): 170-191. NIU Y B, SHAO X J, ZOU H X, et al. Excavation report of Jiangjin Shifo Temple Site tomb area in 2017 [J]. *Jiangnan Archaeology*, 2018(Sup1): 170-191. (in Chinese)
- [3] 吴玉清, 张涛, 李杰, 等. 故宫石质螭首健康状况无损检测及评估预研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 33-39. WU Y Q, ZHANG T, LI J, et al. Non-destructive testing and evaluation pre-study on health status of stony dragon heads in the Forbidden City [J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2): 33-39. (in Chinese)
- [4] 刘建成, 肖林芝, 谢振斌. 我国石质文物保护研究进展: 基于国家自然科学基金资助项目的分析[J]. *文物保护与考古科学*, 2019, 31(2): 112-119. LIU J C, XIAO L Z, XIE Z B. Protection of stone cultural relics in China: Analysis of NSFC-funded projects [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(2): 112-119. (in Chinese)
- [5] QU J T, ZHANG B J, WU J, et al. Nondestructive testing of two jade huangs unearthed at the Kuahuqiao Neolithic site [J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2019, 11(4): 1589-1597.
- [6] CHEN X, QI X B, XU Z Y. Determination of weathered degree and mechanical properties of stone relics with ultrasonic CT: A case study of an ancient stone bridge in China [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2020, 42: 131-138.
- [7] LUDENO G, CAVALAGLI N, UBERTINI F, et al. On the combined use of ground penetrating radar and crack meter sensors for structural monitoring: Application to the historical Consoli Palace in Gubbio, Italy [J]. *Surveys in Geophysics*, 2020, 41(3): 647-667.
- [8] 孙进忠, 陈祥, 袁加贝, 等. 石质文物风化程度超声波检测方法探讨[J]. *科技导报*, 2006, 24(8): 19-24. SUN J Z, CHEN X, YUAN J B, et al. Test methods for detecting weathering degrees of stone cultural relics [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(8): 19-24. (in Chinese)
- [9] 周越, 闫灵通, 李丽, 等. X射线光谱在文物无损分析中的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(5): 1329-1335. ZHOU Y, YAN L T, LI L, et al. The progress of the application of X-ray spectroscopy in the nondestructive analysis of relics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(5): 1329-1335. (in Chinese)
- [10] Analytical Methods Committee AMCTB No. 108. Hand-held X-ray fluorescence analysis of archaeological artefacts: Challenges, advantages and limitations [J]. *Analytical Methods*, 2021, 13(33): 3731-3734.
- [11] MANRIQUE-ORTEGA M, MITRANI A, CASANOVA-GONZÁLEZ E, et al. Material study of green stone artifacts from a Teotihuacan complex [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 35(12): 1431-1445.
- [12] 史宁昌, 王迅, 张存林. 红外热波成像技术在文物保护修复中的应用[J]. *中国国家博物馆馆刊*, 2017(5): 149-157. SHI N C, WANG X, ZHANG C L. The application of infrared thermal wave imaging technology in conservation [J]. *Journal of National Museum of China*, 2017(5): 149-157. (in Chinese)
- [13] LERMA J L, CABRELLES M, PORTALÉS C. Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2190-2197.
- [14] FENG Q, WU Y J, GUO H L, et al. Laser ultrasonic nondestructive testing based on nonlinear ultrasonic coefficient [J]. *Russian Journal of Nondestructive*

- Testing, 2020, 56(3): 209-221.
- [15] 黄继忠, 曹铖, 张悦, 等. 微波技术在砖石质文物含水率检测中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(1): 8-16.  
HUANG J Z, CAO C, ZHANG Y, et al. Application of microwave technology in detecting the moisture content of brick and stone cultural heritages [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2021, 33(1): 8-16. (in Chinese)
- [16] 齐扬, 叶亚云, 王海军, 等. 激光清除石质文物表面污染物的作用机制[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 99-107.  
QI Y, YE Y Y, WANG H J, et al. Mechanisms of laser cleaning of contamination on surface of stonework [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 99-107. (in Chinese)
- [17] 叶亚云, 齐扬, 秦朗, 等. 激光清除石质文物表面污染物[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 90-95.  
YE Y Y, QI Y, QIN L, et al. Laser cleaning of contaminations on the surface of stone relics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 90-95. (in Chinese)
- [18] 齐扬, 周伟强, 周萍, 等. 激光清洗石质文物工艺[J]. 江汉考古, 2015(1): 112-117.  
QI Y, ZHOU W Q, ZHOU P, et al. Technology of laser cleaning stone relics [J]. Jiangnan Archaeology, 2015(1): 112-117. (in Chinese)
- [19] KRÜGENER K, SCHWERDTFEGER M, BUSCH S F, et al. Terahertz meets sculptural and architectural art: Evaluation and conservation of stone objects with T-ray technology [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14842.
- [20] 于森, 朱旭东, 潘皎. 石质文物微生物检测技术的研究进展[J]. 微生物学报, 2011, 51(11): 1447-1453.  
YU M, ZHU X D, PAN J. Advance in detection methods of microbes on historic stones: A review [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51(11): 1447-1453. (in Chinese)
- [21] VICKERS R S, DOLPHIN L T. A communication on an archaeological radar experiment at Chaco Canyon, New Mexico [J]. Masca Newsletter, 1975 11(1): 6-8.
- [22] 赵勇, 曾昭发, 李静, 等. 地球物理探测技术在石窟寺裂隙渗流中的应用现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2): 928-937.  
ZHAO Y, ZENG Z F, LI J, et al. Application status and prospect of geophysical exploration technology in fracture seepage of grottoes [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(2): 928-937. (in Chinese)
- [23] LEUCCI G, DI GIACOMO G, DITARANTO I, et al. Integrated ground-penetrating radar and archaeological surveys in the ancient city of hierapolis of Phrygia (Turkey) [J]. Archaeological Prospection, 2013, 20(4): 285-301.
- [24] 朱军昌. 物探方法在石质文物保护中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.  
ZHU J C. Application of geophysical prospecting methods in the protection of stone relics [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)