

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.105



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 三轴应力条件下温度循环变化对大足石刻砂岩力学特性的影响

蒋思维<sup>1</sup>, 王成龙<sup>1,2,3</sup>, 刘东升<sup>3</sup>, 郭亚琛<sup>2</sup>, 仇文岗<sup>2</sup>, 陈卉丽<sup>1</sup>

(1. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400075;

3. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401121)

**摘要:**由于长期受冷热交替作用的影响,石窟寺岩体力学特性随之发生变化,给石窟寺的保护利用工作造成影响。以重庆大足石刻石窟砂岩为研究对象,通过三轴压缩试验对大足石刻砂岩的力学特性进行研究,温度变化过程设计为高温(60 °C)、常温(25 °C)、低温(0 °C),并设置不同冷热循环次数(5、10 次)、不同高温和低温持续时间(2、4 h)、不同冷却方式(自然冷却和水冷却)等多种试验工况,以分析不同温度变化对大足石刻砂岩的峰值应力和应变、弹性模量、内摩擦角、黏聚力和破坏形态的影响。结果表明:经过冷热循环作用后,砂岩的力学性能发生劣化,强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角不同程度减小;砂岩的峰值应变增加;三轴压缩的破坏形式以单剪切面的剪切破坏为主,经过冷热循环后,破坏变复杂,出现“Y”型共轭剪切破坏;围压可以改善力学性能,增加岩样强度和弹性模量。

**关键词:**石窟砂岩; 温度影响; 三轴压缩; 力学特性; 破坏形态

中图分类号:TU452 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)02-0039-10

## Influence of cyclic temperature variation on mechanical properties of Dazu Rock Carving sandstone under triaxial stress condition

JIANG Siwei<sup>1</sup>, WANG Chenglong<sup>1,2,3</sup>, LIU Dongsheng<sup>3</sup>, GUO Yachen<sup>2</sup>,  
ZHANG Wengang<sup>2</sup>, CHEN Huili<sup>1</sup>

(1. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, P. R. China)

**Abstract:** The rock mass of the grotto temple has been affected by cooling and heating for a long time, which would lead to the change of the mechanical properties of the rock mass and therefore endangers the grotto

收稿日期:2023-06-13

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-KPX0095);大足石刻研究院科研资助项目(H20220387);重庆英才计划(CQYC20210204131);重庆市科研院所绩效激励引导专项(cstc2021jxjl00004)

作者简介:蒋思维(1968- ),文博研究馆员,主要从事石窟寺文物保护研究,E-mail:1240071816@qq.com。

Received: 2023-06-13

**Foundation items:** Special Key Project of Chongqing Technology Innovation and Application Development (No. CSTB2022 TIAD-KPX0095); Foundation of Academy of Dazu Rock Carvings (No. H20220387); Chongqing Talent Program (CQYC20210204131); Special Project of Performance Incentive and Guidance for Scientific Research Institutions in Chongqing (No. cstc2021jxjl00004)

**Author brief:** JIANG Siwei (1968- ), research fellow of museum, main research interest: protection of grotto temples, E-mail: 1240071816@qq.com.

temple. In this paper, the Dazu Rock Carving sandstone in Chongqing was taken as the research object, and the mechanical properties of the sandstone were studied through triaxial compression tests. Temperature change process includes high temperature (60 °C), normal temperature (25 °C), and low temperature (0 °C). And the experimental process involves multiple conditions such as different heating-cooling cycle times (5 and 10 times), different durations of high and low temperatures (2 h and 4 h), and different cooling methods (natural cooling and water cooling). These test conditions were designed to analyze the influence of temperature changes on the peak stress and strain, elastic modulus, internal friction angle, cohesion, and failure mode. Results indicate that: The mechanical properties of sandstone weakened after multiple heating-cooling cycles. The values of strength, elastic modulus, cohesion, and internal friction angle decreased at different degrees. The peak strain of sandstone increased after multiple heating-cooling cycles. The failure mode of sandstone under triaxial compression was mainly shear failure with a single shear plane, while the failure mode became complex after multiple heating-cooling cycles, which resulted in the conjugated shear failure of "Y" type. Confining pressure could improve the mechanical properties, which increased the strength and elastic modulus of the sandstone samples.

**Keywords:** grotto sandstone; temperature effect; triaxial compression; mechanical properties; failure mode

石窟寺是中国辉煌灿烂古代文明的集中体现,是中华文明与其他古代文明交流互鉴的历史见证。近年来,中国对石窟寺的保护利用工作越来越重视,弘扬传统文化,加强新时代石窟寺保护利用工作,已经成为各地文旅部门的重要工作内容之一。石窟岩体作为室外文化遗存,受到昼夜交替和四季变化等自然现象带来的温度交替变化的影响,长此以往,会导致岩体内部裂隙发展,物理力学特性发生劣化,给石窟寺保护利用工作带来一定困难。

目前,关于温度变化对岩体的三轴力学特性造成的影响,学者们已经开展了大量的相关研究工作<sup>[1-6]</sup>。屈永龙等<sup>[7]</sup>研究了砂岩在不同温度和围压下的三轴力学特性,结果表明,随着温度升高,试样弹性模量、剪切模量及体积模量均呈先快速、后缓慢的非线性衰减规律。徐光苗等<sup>[8]</sup>对处于不同温度(-20~20 °C)和不同含水状态的红砂岩进行三轴压缩试验研究得出,温度在-10~20 °C变化时,红砂岩的弹性模量、黏聚力和内摩擦角随温度降低而增大。Yamabe 等<sup>[9]</sup>选取日本 Sirahama 砂岩,进行了-20 °C时不同围压下(0、1、3 MPa)的三轴压缩试验,发现三轴抗压强度随围压增大而增大。王乐华等<sup>[10]</sup>开展了不同热湿循环后砂岩的三轴加载与卸荷试验发现,砂岩的力学参数随热湿循环作用呈下降趋势,且变化趋势一致。陈钊等<sup>[11]</sup>通过室内干湿循环试验以及应变场分析方法分析了不同干湿循环次数下石窟砂岩内摩擦角和黏聚力等物理性的变化规律,结果表明,随着干湿循环次数的增加,矿物颗粒间的胶结作用减弱,砂岩黏聚力减小。廖茹雪等<sup>[12]</sup>开展炳灵寺石窟砂岩冻融敏感性的遗迹劣化研究发现,在低围压三轴压缩试验中,冻融循环越

剧烈,岩样应力-应变曲线与参照组的相差越大,且围压的增加可以提高岩石的压缩和残余强度。陈国庆等<sup>[13]</sup>开展了不同温差冻融后石英砂岩、变质砂岩及红砂岩核磁共振检测及三轴蠕变试验,结果表明,冻融循环作用促进了砂岩内中小尺寸孔隙的发育扩展,并且随着冻融循环次数的增大,冻融后砂岩的蠕变量增大,长期强度逐渐降低。

开展石窟寺岩体受温度影响的试验研究还需考虑石窟寺所在地的气候变化情况,并且应结合石窟岩体的性质和特点。兰恒星等<sup>[14]</sup>对石窟岩体劣化失稳方面的研究成果进行了系统梳理,发现石窟岩体的劣化失稳表现出多样性和地域差异性,但研究思路可相互借鉴。笔者研究的大足石刻岩体位于中国西南地区重庆市大足区境内,历经唐、五代、宋、明、清才开凿完成,是世界文化遗产,世界八大石窟之一。20世纪90年代至今,汪东云等<sup>[15]</sup>、张赞勋等<sup>[16]</sup>、方芳等<sup>[17]</sup>、张兵峰等<sup>[18]</sup>、黄军朋<sup>[19]</sup>对大足石刻进行了大量研究工作,分析了大足石刻渗水病害、岩石微观和表层风化等问题。对于大足石刻力学特性的研究,张鑫鑫等<sup>[20]</sup>开展大足大佛湾石刻岩石微观与力学特性研究,采用X射线衍射、光学显微镜、扫描电镜和岩石力学试验系统等对该区域内岩样进行分析,结果表明,水对该区域岩石结构有溶蚀、淋滤等破坏作用,且与天然状态相比,在饱水状态下岩样的强度明显降低。

基于以上分析可以发现,学者们针对温度变化对岩石三轴力学特性的影响已经进行了大量研究,但由于石窟寺岩体劣化存在地域差异性,一些研究成果不能直接应用于大足石刻的保护利用工作,针对大足石刻岩体的三轴力学特性受温度变化影响

的研究较少。为了更好地开展大足石刻岩体的加固利用工作,需要了解石窟内部岩体的物理力学理性,因此有必要进一步开展试验研究,分析温度循环变化对砂岩三轴力学特性的影响。以大足石刻砂岩岩体作为研究对象,基于岩体所处环境,对石窟砂岩开展三轴压缩试验,分析经过不同冷却方式、不同冷热持续时间和不同循环次数等作用后其峰值强度、峰值应变、弹性模量和破坏特征等的变化规律,为进一步研究重庆大足石刻石窟砂岩的稳定性分析提供技术支撑。

## 1 试验概况

### 1.1 岩样制备

大足石刻赋存地层主要是侏罗系石英砂,试验所用岩样取自重庆市大足区,岩样制作过程:首先对大块砂岩进行钻芯,然后进行切割打磨等工序,按照规范要求,岩样加工成高度为100 mm,直径为50 mm的圆柱体试样,如图1所示。加工完成后,岩样表面完整,无明显裂痕。



图1 加工完成的部分岩样

Fig.1 Partial rock samples after cutting

### 1.2 试验方案

根据历年气象资料,大足区多年日平均气温为17.2 °C,最冷月份为一月,平均气温为6.6 °C,最热月份为七月,平均气温为27.4 °C,年月平均相对湿度在60%~97%之间,7月份的月均相对湿度最低,为60%,10月份的月均相对湿度最高,为97%。但近年来全球气候变化,极端天气现象逐渐频繁,在过去的2022年,大足区最低温度为1 °C,最高气温达到41 °C,而对于岩体,在连日暴晒等因素的影响下,温度会更高。综合考虑上述统计结果,对砂岩试样进行不同温度的冷热循环处理,模拟石窟岩体经历的环境变化,然后对处理后的岩样进行三轴压缩试验。

#### 1.2.1 纵波波速测试

采用ZBL-U5100非金属超声检测仪对岩样进行纵波波速测试,并对岩样进行编号,测得岩样波速分布在1.81~2.06 km/s之间,说明取样规则,均一性较好。将波速相近的岩样分为一组,进行同一

工况试验,以避免因试样个体差异引起的试验结果的离散性。

#### 1.2.2 三轴压缩试验

三轴压缩试验采用HYAS-1000B型微机控制岩石三轴仪,如图2所示,首先,以0.1 kN/s的加载速率将岩样轴向力预加载到10 kN,然后对试样施加围压,为研究石窟内部不同位置岩体的物理力学特性,试验设计2、4、6 MPa三种围压工况,以加载速率0.05 MPa/s加载至围压预定值,待围压稳定后,对试样施加轴向力,加载过程采用应力控制且保持围压在试验过程中始终不变,以0.1 kN/s的加载速率施加轴向压力,直至试样压坏,应力-应变曲线出现明显下降趋势,停止试验,保存数据,卸掉压力,拆除试件,试验完毕。

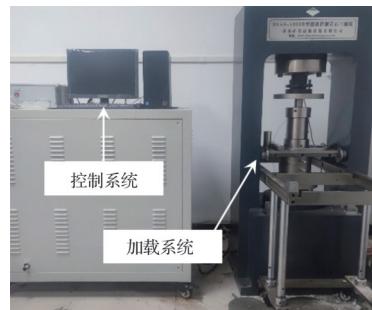


图2 岩石三轴仪

Fig.2 Rock triaxial apparatus

#### 1.2.3 冷热循环试验

温度变化过程采用GH-100C可程式恒温恒湿试验箱和DC-0520立式低温恒温槽完成,如图3所示。



图3 试验系统

Fig.3 Test system

根据大足石刻岩体所处环境,试验共设计4种工况,工况1为常温环境作参照组,工况2模拟昼夜温度变化,工况3模拟全年温度变化,工况4模拟多次温度变化,每种工况设计不同的温度条件或循环次数。其中,为模拟砂岩温度变化,主要考虑0 °C、常温(25 °C)和60 °C三种温度,并基于所模拟的温度环境,设计高温和低温持续时间;为模拟降雨环境,设计水冷却方式;为研究长期影响,设计不同次数

的冷热循环。根据不同的工况条件,设置 9 组试验,

每组 3 块岩样。具体试验操作步骤如表 1 所示。

表 1 试验工况

Table 1 Test cases

工况	试验过程	编号
工况 1	将石窟砂岩试样放置在常温环境中	1-R
工况 2 1	将岩样放入试验箱中,设置目标温度为 60 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,然后取出岩样自然冷却 2 h,完成一次循环,重复进行以上步骤,连续进行 10 次	2-N
2	将岩样放入试验箱中,设置目标温度为 60 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,之后取出岩样,采用常温水(25 ℃)冷却 2 h,完成 1 次循环,重复进行以上步骤,连续进行 10 次	2-W
3	将岩样放入试验箱中,设置目标温度为 60 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,之后取出岩样,采用低于常温 10 ℃的水冷却 2 h,完成 1 次循环,重复进行以上步骤,连续进行 10 次	2-L
工况 3	将岩样放入试验箱,设置目标温度为 60 ℃,模拟夏季高温,加热 0.5 h,保温 1.5 h,之后取出岩样,放入常温水冷却 2 h,模拟雨季环境,然后再次放入试验箱中,设置目标温度为 0 ℃,模拟冬季环境,制冷 0.5 h,保温 1.5 h,最后通过试验箱将岩样恢复至常温 25 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,至此完成 1 次冷热循环,重复以上试验步骤,共进行 10 次	3-Y
工况 4 1	操作同 2-W 类似,将岩样放入试验箱,设置目标温度为 60 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,取出岩样,采用常温水(25 ℃)冷却 2 h,完成 1 次循环,重复进行以上步骤,连续进行 5 次	4-2F
2	将岩样放入试验箱中,设置目标温度为 60 ℃,加热 0.5 h,保温 3.5 h,之后取出岩样,采用常温水(25 ℃)冷却 2 h,完成 1 次循环,重复进行以上步骤,连续进行 5 次	4-2T
3	操作同 3-Y 相似,将岩样放入试验箱,设置目标温度 60 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,取出岩样,放入常温水冷却 2 h,再次放入试验箱,设置温度为 0 ℃,制冷 0.5 h,保温 1.5 h,然后设置温度为常温 25 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,完成 1 次循环,重复进行以上步骤 5 次	4-3F
4	将岩样放入试验箱,设置目标温度为 60 ℃,加热 0.5 h,保温 3.5 h,取出岩样,放入常温水冷却 2 h,再次放入试验箱中,设置目标温度为 0 ℃,制冷 0.5 h,保温 3.5 h,然后设置目标温度为常温 25 ℃,加热 0.5 h,保温 1.5 h,完成 1 次循环,重复以上步骤,连续进行 5 次	4-3T

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同工况下石窟砂岩应力-应变曲线

对不同工况岩样进行三轴压缩试验,应力-应变曲线如图 4 所示。经过分析,可以将工况 1-R 下岩样的应力-应变曲线大致分为 4 个阶段,即:1)裂隙压密阶段;2)弹性变形阶段;3)塑性变形阶段;4)峰后破坏阶段。对比其他工况岩样的应力-应变曲线,与 1-R 曲线形态相似,同样可以分为 4 个阶段,差异则主要体现在峰值应力和应变的大小以及曲线线弹性部分的斜率。总体来看,相同围压下,冷热循环后岩样的应力-应变曲线往右下偏移,说明经过冷热循环后,岩样的强度减小,而对应的峰值应变增大,并且可以发现,弹性变形阶段后,曲线的塑性变形越来越明显,说明经过冷热循环后,岩样塑性得到发展。

对比相同工况不同围压下的应力-应变曲线,可以发现,当围压增加,岩样的峰值应变和强度增大,且曲线峰值前的屈服阶段更明显,岩样塑性增加;曲线峰值后破坏阶段增加,破坏后应力跌落速度减缓,岩样由脆性破坏逐渐向延性破坏转化。分析原因,围压对岩样的裂纹发育起到了一定的约束作用,限制了岩样的变形,提高了承受外部荷载的能力,因此,当围压增加,岩样的三轴压缩强度增大,

变形增加。

### 2.2 石窟砂岩力学参数变化特征

通过三轴压缩试验和计算得到不同工况下岩样的力学参数如表 2 所示。其中,通过三轴试验得到岩样的三轴抗压强度,运用 Mohr-Coulomb 准则得到内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ ,利用应力-应变曲线的直线段部分得到弹性模量  $E$ 。

引入劣化度<sup>[22]</sup>  $S_n$  表示砂岩试样在经历不同工况后力学参数的降低程度,用相对劣化度  $\Delta S_n$  比较不同工况造成的劣化效果。

$$S_n = \frac{T_0 - T_n}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta S_n = |S_a - S_b| \quad (2)$$

式中: $T_0$  为未经过循环作用(1-R)的砂岩试样力学参数值; $T_n$  为经历不同循环作用后泥质砂岩试样的力学参数值; $S_a$  为工况 a 对岩样力学参数造成的劣化度; $S_b$  为工况 b 对岩样造成的劣化度。

#### 2.2.1 石窟砂岩强度变化特征

图 5 对比分析了不同工况下岩样的三轴抗压强度,可以发现,经过冷热循环后,岩样强度降低,发生劣化。

图 5(a)为工况 1 与工况 2 岩样的三轴抗压强度对比图,在围压为 2、4、6 MPa 时,2-N 工况下岩样的劣化度分别为 11.57%、5.22%、4.72%,2-W 工况

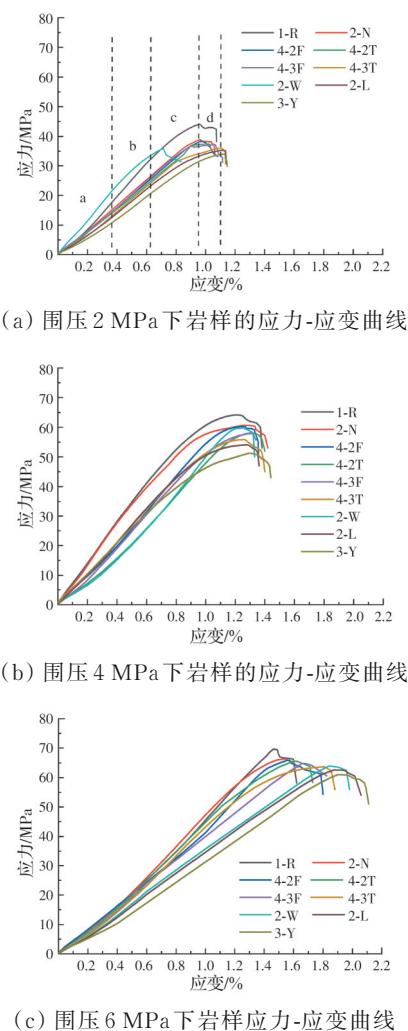


图4 岩样三轴试验应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of rock samples under triaxial compression test

下岩样劣化度分别为18.82%、6.53%、8.2%，2-L工况下岩样劣化度分别为19.84%、15.49%、10.09%。由此可见，在高温后经过水冷却造成的岩样劣化大于自然冷却后岩样的劣化，并且水温越低，强度劣化越明显。这可能是由于经过加热和冷却后，受温度循环变化的影响，岩样内部损伤增加，

在多次循环过程中，损伤不断扩展和累积，导致内部完整性降低，承受外部荷载的能力下降。试验加热过程中，岩样温度升高，发生膨胀，冷却过程中，岩样因温度降低而收缩，由于内部、外部散热速度不同，导致岩样各部分温度存在差异，因受到温度应力的影响，发生不均匀变形，促使裂隙发育；当采用水冷却时，一方面，水冷却使岩样表面温度快速降低，导致其不均匀变形增大；另一方面，由于水的渗透、溶解作用导致矿物颗粒的流失，促使裂隙发展；并且当水的温度降低时，岩样温差增大而导致损伤加剧，强度因此更低。对于相对劣化度，2-N与2-W的相对劣化度分别为7.25%、1.31%、3.47%，工况下岩样2-N与2-L的相对劣化度分别为8.27%、10.27%、5.37%，2-W与2-L工况下岩样的相对劣化度分别为1.02%、8.96%、1.89%。若忽略离散性较大的4 MPa数据，可以发现，2-W与2-L劣化度差异较小，说明低于常温10℃的冷却水对岩样强度造成的影响与常温水接近。

图5(b)为2-W和4-2F、4-2T工况下岩样的三轴抗压强度对比图。可以发现，当冷热循环次数由5次增加到10次或高温时间从2 h增加到4 h时，岩样强度劣化增加。分析原因，随着冷热循环次数的增加，因冷热循环造成的损伤不断累积，使岩样内部裂隙发展，降低了试样内部的完整性，导致岩样强度减小；而增加在高温下的时间，会使岩样高温膨胀，变形增加，裂隙发育更加充分，强度随之降低。图5(c)为3-Y、4-3F和4-3T工况下岩样的三轴抗压强度对比图，通过对比分析同样可以发现，当冷热循环次数由5次增加到10次或高温、低温时间从2 h延长到4 h，岩样的强度劣化加重。

图5(d)所示为各工况下岩样的三轴抗压强度对比图，总体来看，经过冷热循环后，岩样的三轴抗压强度发生不同程度的劣化。其中，3-Y工况下强度劣化最大，劣化度分别为22.64%、19.96%、

表2 三轴压缩试验岩样力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock samples under triaxial compression test

工况	三轴抗压强度/MPa			弹性模量/GPa			内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
	2 MPa	4 MPa	6 MPa	2 MPa	4 MPa	6 MPa		
2-N	38.90	60.64	66.36	4.33	6.03	6.30	48.1	6.82
2-W	35.71	59.80	63.94	5.90	5.23	4.63	47.3	6.54
2-L	35.26	54.07	62.62	3.99	5.25	4.82	46.9	6.41
3-Y	34.03	51.21	60.97	3.78	5.02	4.79	45.5	5.97
1-R	43.99	63.98	69.65	5.38	6.52	5.81	47.9	6.75
4-2F	38.39	60.35	65.90	4.27	5.84	5.14	47.6	6.65
4-2T	37.39	58.15	65.50	4.12	5.03	5.95	47.7	6.68
4-3F	37.13	57.92	64.79	4.46	5.74	4.99	47.4	6.58
4-3T	35.95	55.84	63.63	4.22	5.66	5.01	47.3	6.54

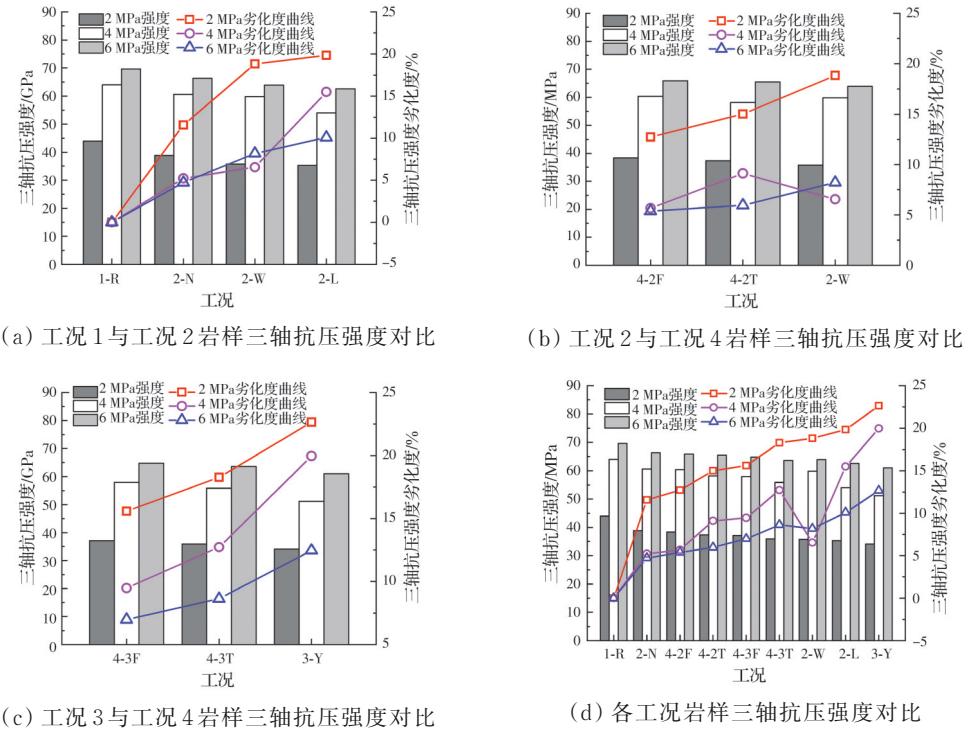


图5 不同工况岩样三轴抗压强度对比

Fig.5 Comparison of triaxial compressive strength of rock samples under different working conditions

12.5%，原因可能是，在该工况下，岩样受到的冷热变化比其他工况下更多，随着循环次数的增加，受温度变化的影响，导致内部损伤累积加剧，强度减小。而对比工况2-N与4-2F可以发现，工况2-N的设计循环次数多于工况4-2F的循环次数，但工况2-N工况下岩样的强度稍大于4-2F工况，原因可能是工况4-2F采取了水冷却方式，使岩样内部产生了更大的损伤，导致强度减小，说明冷却水的作用对岩样强度的影响较大。

分析围压对岩样强度的影响，通过图5可以发现，在较高围压下，岩样的三轴抗压强度大于较低围压下岩样的强度，并且比较劣化度曲线可以发现，围压为6 MPa时岩样的强度劣化<4 MPa时<2 MPa时这是因为，围压使岩样原生裂隙孔洞和冷热循环造成的损伤裂隙压密闭合，力学性能改善，宏观表现为承载能力大幅提高，当围压增大时，这种制约就越强。因此，围压增大，岩样三轴压缩试验的抗压强度增大，且冷热循环对岩样强度的劣化效果减弱。

## 2.2.2 石窟砂岩弹性模量的变化特征

弹性模量反映了岩石抵抗变形的能力，利用表1数据作各工况下岩样弹性模量对比图，如图6所示，且因2-W工况下2 MPa时所得岩样试验数据离散性较大，故不进行劣化度的分析。

将工况2-N、2-W、2-L与1-R进行比较，可以得到，水冷却导致的劣化度大于自然冷却，这是因为，

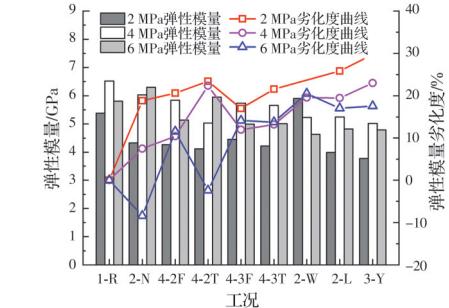


图6 不同工况下岩样弹性模量对比

Fig.6 Comparison of elastic modulus of rock samples under different working conditions

在水冷却下，因温度应力产生不均匀变形，岩样发生热破裂而力学性能变差，导致弹性模量减小；将工况4-2F与4-2T进行对比，将工况4-3F与4-3T进行对比，总体变化趋势为，冷热循环过程中，当高温和低温时间延长时，岩样弹性模量劣化增加，这是因为，时间延长使岩样受温度的影响增大，导致内部损伤增加，弹性模量减小；将工况2-W和4-2F进行对比，将工况3-Y和4-3F进行对比可知，当冷热循环次数由5次增加到10次时，岩样弹性模量劣化增加，这是因为，随着冷热循环次数的增加，岩样内部损伤不断积累，最终导致力学性能变差，弹性模量减小。对比同一工况不同围压下弹性模量的变化，总体趋势为，围压为4、6 MPa时岩样的弹性模量大于2 MPa时，且围压为4、6 MPa时岩样的弹性模量劣化度小于2 MPa时。

总的来说,冷热循环后,岩样弹性模量发生劣化,工况3-Y劣化度最大,围压为2、4、6 MPa时,劣化度分别为29.76%、22.98%、22.63%,这是因为,该工况设计冷热变化次数较多,受温度变化的影响,岩样内部损伤较严重,导致力学性能大幅下降,抵抗变形能力减弱,弹性模量减小。对比其他工况下的数据,总体规律为,水冷却造成的弹性模量劣化大于自然冷却,且冷热循环次数增多,高温和低温持续时间延长,岩样弹性模量劣化会加剧,原因可能是,这些变化使岩样受温度变化的影响增加,导致其内部损伤增大,力学性能变差。围压对岩样弹性模量的影响表现为,在围压为4、6 MPa时,岩样的弹性模量大于2 MPa时,且4、6 MPa时弹性模量劣化度更小,2 MPa时最大,这是因为围压使岩样内部的部分裂隙闭合,从而改善了其力学性能,弹性模量提高。

### 2.2.3 石窟砂岩黏聚力和内摩擦角的变化特征

内摩擦角和黏聚力是表征抗剪强度的重要参数,图7、图8分别为不同工况下岩样的内摩擦角和黏聚力变化规律对比图。可以发现,试验设计的工况对砂岩试样的 $c$ 、 $\varphi$ 值影响较小,但从图中 $c$ 、 $\varphi$ 值的变化趋势可以分析出,经过冷热循环,岩样的 $c$ 、 $\varphi$ 值减小,发生劣化,以工况1-R作为参照组,其 $c$ 、 $\varphi$ 值大于大部分经过冷热循环处理岩样的 $c$ 、 $\varphi$ 值,这表明冷热循环会导致砂岩试样的抗剪强度降低。

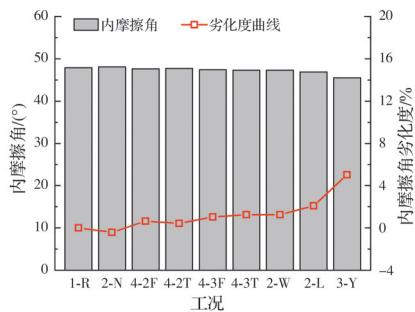


图7 不同工况下岩样内摩擦角对比

Fig.7 Comparison of internal friction angles of rock samples under different working conditions

将工况2-W与4-2F、3-Y与4-3F进行对比,2-W工况下岩样 $c$ 、 $\varphi$ 值劣化度分别为3.11%、1.25%,4-2F工况下分别为1.55%、0.63%,4-3F工况下分别为2.56%、1.04%,3-Y工况下分别为11.50%、5.01%。当循环次数由5次增加到10次,岩样 $c$ 、 $\varphi$ 值劣化更严重。将工况4-2F与4-2T、4-3F与4-3T进行对比,发现高温和低温时间增加2 h对岩样的 $c$ 、 $\varphi$ 值影响不大。对比工况2-N和2-W发现,经过水冷却后,高温岩样 $c$ 、 $\varphi$ 值劣化大于自然冷却对岩

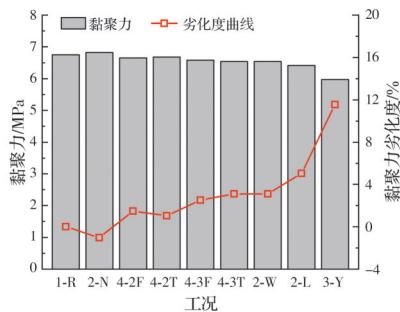


图8 不同工况岩样黏聚力对比

Fig.8 Comparison of cohesive forces of rock samples under different working conditions

样造成的劣化。各工况中劣化最大的为3-Y,而3-Y经历的冷热变化次数最多,说明冷热循环对岩样的 $c$ 、 $\varphi$ 值有影响,即对岩样的抗剪强度参数产生弱化作用,这是因为,随着循环次数的增加,岩样内部因温度变化而造成的损伤不断累积,再加上水的作用,最终导致岩样的力学性能变差, $c$ 、 $\varphi$ 值减小,并且同一工况下 $c$ 值劣化度大于 $\varphi$ 值劣化度,说明试验中 $c$ 值对冷热循环的敏感性高于 $\varphi$ 值。

### 2.3 石窟砂岩变形特征

不同工况下岩样三轴压缩试验峰值应变如图9所示,因工况2-W在围压为2 MPa时所得数据离散性较大,故不进行变形特征分析。从图9中可以发现岩样变形特征的总体变化趋势,冷热循环后,峰值应变增加,分析原因,一方面是因为岩样在高温下会产生热破裂现象,内部孔隙和裂纹扩展,导致初始应变增加,三轴压缩试验前期的压密阶段应变增加;另一方面,经过冷热循环岩样内部损伤增加,弹性模量减小,抵抗变形的能力降低,峰值应变增加。

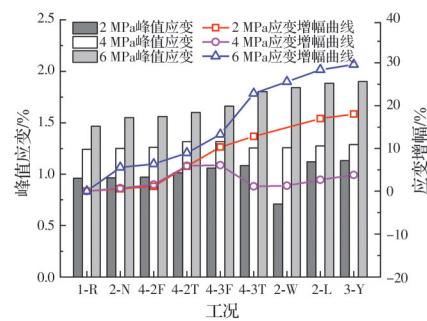


图9 不同工况下岩样峰值应变对比

Fig.9 Comparison of peak strain of rock samples under different working conditions

对比2-N、2-W、2-L工况下3组岩样,与工况1-R相比,在2、4、6 MPa围压下,2-N工况下岩样应变增幅分别为0.52%、0.72%、5.6%,2-W工况下应变增幅分别为-25.96%、1.29%、25.56%,2-L工况下应变增幅分别为17%、2.66%、28.36%,忽略2-W工况下围压为2 MPa时的应变数据可以发现,2-W

和 2-L 工况下峰值应变大于 2-N 工况下, 说明采用水冷却岩样的峰值应变大于自然冷却, 这是因为水的作用会促进裂隙的发展, 三轴压缩试验中压密阶段应变增加, 并且岩样内部损伤增加, 抵抗变形的能力降低, 导致应变增加。对比工况 2-W 和 2-L 可以发现, 降低水温后岩样峰值应变增大, 这是因为降低水温增大了温差, 岩样受温度的影响增大, 导致损伤加剧, 应变增加, 说明温差会影响岩样的峰值应变。

对比工况 4-2F、4-2T、4-3F、4-3T 可以发现, 当受到高温和低温的时间从 2 h 延长到 4 h, 岩样的峰值应变增加, 这是因为高温和低温时间延长, 受温度影响, 岩样内部裂隙和裂纹发展, 三轴压缩试验压密阶段应变增加, 且抵抗变形的能力减弱, 导致峰值应变增加。再将工况 2-W 与 4-2F、3-Y 与 4-3F 进行对比, 总体规律为, 岩样经历循环次数由 5 次增加到 10 次后, 峰值应变增大, 这是因为随着循环次

数的增加, 试验过程中岩样的损伤不断累积发展, 导致其力学性能变差, 弹性模量减小, 应变增加。

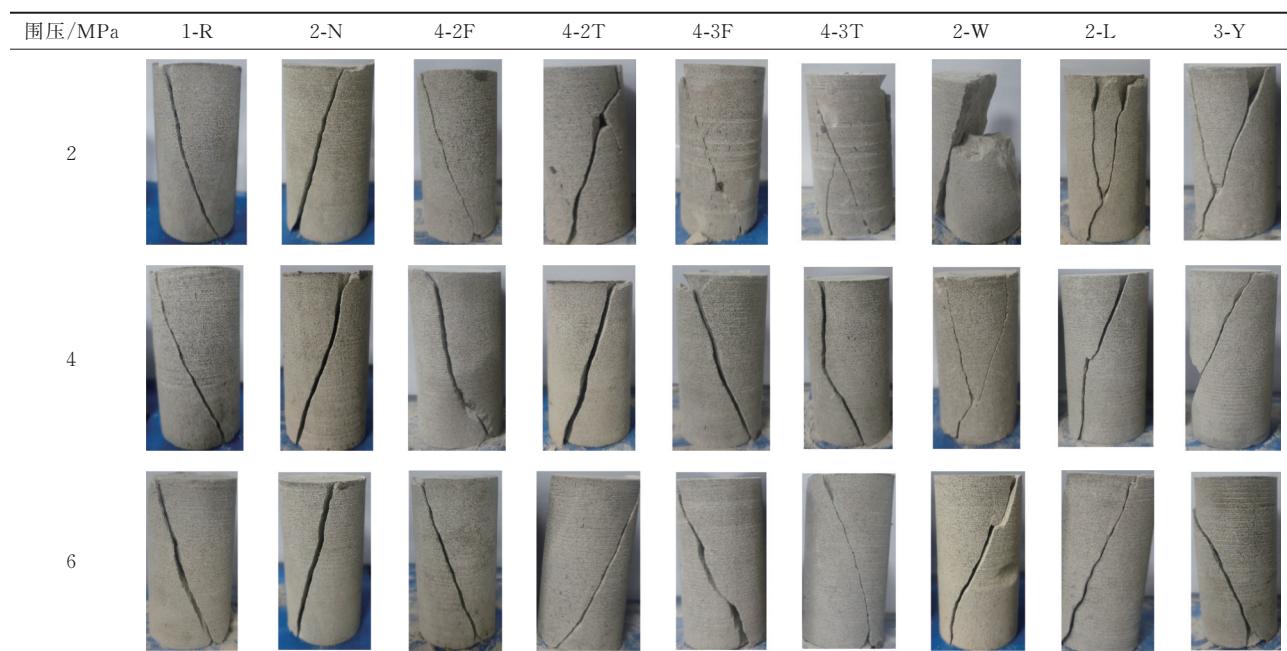
对比同一工况下不同围压对峰值应变的影响可以发现, 每一组岩样在围压为 2 MPa 时的峰值应变  $< 4$  MPa 时  $< 6$  MPa 时, 且 6 MPa 时岩样的应变增幅最大, 这是因为围压使岩样的塑性增强, 导致变形增加, 并且较高围压下岩样的承载力增加, 破坏时间加长, 有更充分的时间发展变形。

## 2.4 石窟砂岩剪切破坏特征规律分析

岩样的三轴压缩破坏是岩石内部的微裂隙萌生、扩展、贯通的结果, 表 3 为各工况下岩样经过三轴压缩试验后的破坏形态。可以看出, 岩样的三轴压缩破坏形式有单剪切面的剪切破坏和“Y”型剪切面的共轭剪切破坏两种, 剪切带大致沿着岩样端面对角开展并伴随有局部岩块掉落, 在破坏面上有剪切摩擦痕迹, 侧表面出现网状扩张裂纹, 部分岩样端部形成含有圆锥的对角破坏。

表 3 不同工况下岩样破坏形态对比

Table 3 Comparison of failure modes of rock samples under different working conditions



对比各组岩样破坏形态, 1-R 工况下岩样破坏沿对角展开, 形成一条主裂缝, 并伴有细微块末在破坏面上掉落; 观察其他工况下岩样的破坏特征发现, 在围压为 2 MPa 时, 不同工况下岩样的破坏特征差别较大, 总体规律为, 2-N、4-2F、4-2T 和 4-3F 工况下岩样以单剪切面的剪切破坏为主, 破坏形成一条主裂缝。不同的是, 在主裂缝处掉落的块末增多, 且掉落岩块的体积增大, 并且 4-2T 和 4-3F 工况下岩样破坏时在主裂缝周边出现次裂缝; 而在 4-3T、2-W、2-L 和 3-Y 工况下, 岩样发生“Y”状共轭剪切破坏, 破坏面周边次裂缝增多且岩石更加破碎。

分析原因, 经过冷热循环后, 岩样内部损伤加剧, 产生了较多的裂隙和裂纹, 而在受力过程中, 这些裂隙有充分的扩展时间, 导致破坏试样表面裂缝增多, 剪切面间错动摩擦逐渐加重, 致使最终崩落断面处出现较多岩石块末。根据岩样的破坏特征, 可以发现, 采取水冷却方式且经过冷热循环次数越多、高温和低温的持续时间越长, 岩样内部裂隙发育越多、越充分, 越容易出现次破裂面, 且破坏时岩石越破碎。

当围压增大时, 岩样破坏受到限制, 破坏形态随之发生变化, 围压为 4 MPa 时, 岩样单剪切面的

破坏形式增多,只有冷热循环影响加剧,岩样才表现出“Y”状共轭剪切破坏;围压增大到6 MPa时,岩样的破坏形态变得简单,破坏时仅出现一条主裂缝,且大部分沿对角展开,这可能是因为围压使岩样内部的部分裂隙闭合,因此在破坏时裂缝的发育减少,破坏形式单一。

### 3 结论

针对三轴应力条件下温度循环变化对大足石刻砂岩力学特性的影响开展研究,根据大足区日常环境变化情况设计不同的冷热循环工况,得到以下主要结论:

1)冷热循环作用后,石窟砂岩三轴抗压强度和弹性模量减小,相较于自然冷却,水冷却循环对砂岩的三轴抗压强度和弹性模量影响更大。当冷却方式相同时,温差增大(冷却水温度降低)、冷热循环次数由5次增加到10次、高温和低温持续时间增加,会导致岩样强度和弹性模量劣化加剧。

2)经过冷热循环,岩样内摩擦角和黏聚力减小,并且相较于自然冷却,水冷却造成的劣化更严重。当采用相同的冷却方式时,冷热循环次数越多,劣化越明显,但高温和低温时间延长对内摩擦角和黏聚力造成的影响较小。

3)经过冷热循环后,石窟砂岩三轴压缩的峰值应变增加,并且水冷却对砂岩峰值应变的影响大于自然冷却,而当冷却方式相同时,循环次数由5次增加到10次、温差增大(冷却水温度更低)、高温和低温持续时间延长,会使砂岩峰值应变增大。

4)围压为2 MPa时,石窟砂岩三轴压缩的破坏模式以单剪切面的剪切破坏为主,但经过冷热循环作用后砂岩破坏模式变复杂,出现“Y”型共轭剪切破坏,并且破坏时伴随有局部岩块掉落,部分岩样侧表面出现扩张裂纹;当围压增大到4、6 MPa时,岩样破坏形态变简单,受冷热循环导致的“Y”型剪切破坏减少。

5)围压会使砂岩的塑性增强,峰值应变随围压增加而增大,并且围压能够改善砂岩的力学性能。总体来看,围压由2 MPa增加到4、6 MPa时,岩样的三轴抗压强度随之增加且劣化度随之减小,内摩擦角和黏聚力基本无变化,弹性模量在围压为4、6 MPa时也得到提高且劣化度减小。

6)本次测试样品数量有限,今后有必要进一步开展三轴应力条件下的大足石刻砂岩力学特性研究。

### 参考文献

- [1] 李春. 冷热交替作用下花岗岩物理力学特性演化规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [2] YU J, FU G F, CHEN X, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone after freezing-thawing cycles under triaxial confining pressure unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2001-2009.
- [3] RATHNAWEERA T D, RANJITH P G, GU X, et al. Experimental investigation of thermomechanical behaviour of clay-rich sandstone at extreme temperatures followed by cooling treatments [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 208-223.
- [4] KONG B, WANG E Y, LI Z H, et al. Fracture mechanical behavior of sandstone subjected to high-temperature treatment and its acoustic emission characteristics under uniaxial compression conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(12): 4911-4918.
- [5] TIAN H, KEMPKA T, XU N X, et al. Physical properties of sandstones after high temperature treatment [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(6): 1113-1117.
- [6] KODAMA J, GOTO T, FUJII Y, et al. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 62: 1-13.
- [7] 屈永龙, 杨更社, 翟家米, 等. 低温-加载作用下白垩系砂岩的变形破坏特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2431-2442.
- [8] QU Y L, YANG G S, XI J M, et al. Experimental study on deformation and failure characteristics of Cretaceous sandstone under low temperature-loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2431-2442. (in Chinese)
- [9] 徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2502-2508.
- [10] XU G M, LIU Q S, PENG W W, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2502-2508. (in Chinese)
- [11] YAMABE T, NEAUPANE K M. Determination of

- some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1029-1034.
- [10] 王乐华, 金晶, 张冰祎, 等. 热湿循环作用下砂岩加卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 699-708.
- WANG L H, JIN J, ZHANG B Y, et al. Experimental study on loading and unloading mechanical properties of sandstone under heat and wet cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 699-708. (in Chinese)
- [11] 陈钊, 兰恒星, 刘世杰, 等. 干湿循环作用下石窟寺砂岩的抗拉强度劣化机理及破坏模式[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 612-624.
- CHEN Z, LAN H X, LIU S J, et al. Classification system of typical engineering geological deformation and failure modes in grottoes [J]. Earth Science, 2024, 49(2): 612-624. (in Chinese)
- [12] 廖茹雪, 谌文武, 王南, 等. 基于砂岩冻融敏感性的遗迹劣化预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3084-3096.
- LIAO R X, CHEN W W, WANG N, et al. Forecast of heritage deterioration based on freeze-thaw sensitivity of sandstone [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(12): 3084-3096. (in Chinese)
- [13] 陈国庆, 万亿, 孙祥, 等. 不同温差冻融后砂岩蠕变特性及分数阶损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1962-1975.
- CHEN G Q, WAN Y, SUN X, et al. Research on creep behaviors and fractional order damage model of sandstone subjected to freeze-thaw cycles in different temperature ranges [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1962-1975. (in Chinese)
- [14] 兰恒星, 吕洪涛, 包含, 等. 石窟寺岩体劣化机制与失稳机理研究进展[J]. 地球科学, 2023, 48(4): 1603-1633.
- LAN H X, LV H T, BAO H, et al. Research progress on deterioration mechanism and instability mechanism of cave temple rock mass [J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1603-1633. (in Chinese)
- [15] 汪东云, 张贊勋, 付林森, 等. 宝顶山石窟卧佛渗水病害形成原因分析[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(3): 25-28.
- WANG D Y, ZHANG Z X, FU L S, et al. Seepage water's erosion of the rock cut sleeping Buddha in Baodingshan, Dazu, Sichuan [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992, 19(3): 25-28. (in Chinese)
- [16] 张贊勋, 付林森, 姚金石, 等. 大足石刻砂岩的岩石学特征[J]. 重庆建筑大学学报, 1995, 17(2): 58-62.
- ZHANG Z X, FU L S, YAO J S, et al. Lithological characters of carved sandstone in Dazu [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1995, 17(2): 58-62. (in Chinese)
- [17] 方芳, 方云, 燕学锋, 等. 重庆大足石刻千手观音造像区地下水渗流机制分析[J]. 文物保护与考古科学, 2009, 21(4): 1-4.
- FANG F, FANG Y, YAN X F, et al. Groundwater seepage mechanism in the area of the Thousand Armed Guan Yin at Dazu stone carvings, Chongqing [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2009, 21(4): 1-4. (in Chinese)
- [18] 张兵峰, 蒋思维. 重庆大足石刻大佛湾渗水病害初探[J]. 中国文物科学研究, 2016(1): 68-71.
- ZHANG B F, JIANG S W. Preliminary exploration of water seepage disease on Big Buddha Bay of Dazu rock carving [J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2016(1): 68-71. (in Chinese)
- [19] 黄军朋. 大足石刻卧佛摩崖造像岩体表层风化特征及机理初探[D]. 兰州: 兰州大学, .
- HUANG J P. Preliminary study on the weathering characteristics and mechanism of the surface layer of the rock mass of the reclining Buddha cliff statue in Dazu stone carving [D]. Lanzhou: Lanzhou University, . (in Chinese)
- [20] 张鑫鑫, 任伟中, 吴习文, 等. 大足大佛湾石刻岩石微观与力学特性研究[J]. 武汉科技大学学报, 2017, 40(4): 314-320.
- ZHANG X X, REN W Z, WU X W, et al. Microscopic and mechanical characteristics of rocks near Big Buddha Bay Rock Carvings in Dazu [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2017, 40(4): 314-320. (in Chinese)
- [21] 刘小雨, 童邦华. 浅析地形地质特征对大足石刻大佛湾造像开凿的利弊[J]. 华北自然资源, 2021(5): 34-35.
- LIU X Y, TONG B H. Analysis on the advantages and disadvantages of topographic and geological features on the excavation of Dazu stone carving Buddha Bay statue [J]. Huabei Natural Resources, 2021(5): 34-35. (in Chinese)
- [22] 邓华锋, 肖志勇, 李建林, 等. 水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(Sup1): 2690-2698.
- DENG H F, XIAO Z Y, LI J L, et al. Deteriorating change rule test research of damage sandstone strength under water-rock interaction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup1): 2690-2698. (in Chinese)

(编辑 胡玲)