

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.003

温度循环作用下石窟砂岩渗透特性试验

王成龙^{1,2,3}, 蒋思维¹, 仇文岗², 陈鹏举², 刘东升³, 郭亚琛²

(1. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044;

3. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401121)

摘要:石窟岩体常年裸露在外, 会受到多种自然因素的影响, 尤其是温度变化和渗水等, 可能导致岩体物理力学性质发生改变。针对温度循环作用下石窟砂岩的渗透特性开展研究, 选取重庆大足石刻砂岩为研究对象, 通过渗透试验, 对多次冷热循环后石窟砂岩的渗透率进行测定和分析, 并进一步研究了渗透试验后石窟砂岩的抗压强度特性。试验过程设计了不同冷热循环次数、不同高温持续时间、不同冷却方式等多种试验工况。研究结果表明: 经过多次冷热循环, 砂岩渗透率增加, 并且渗透率变化幅度受循环次数和冷却方式的影响; 当渗透压增大, 砂岩渗透率增加; 在高渗透压下渗透后, 砂岩的强度稍小于低渗透压下的强度。

关键词:石窟砂岩; 温度影响; 冷却方式; 渗透特性

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)10-037-09

Experiments on permeability characteristics of grotto sandstone after temperature cycling

WANG Chenglong^{1,2,3}, JIANG Siwei¹, ZHANG Wengang², CHEN Pengju²,
LIU Dongsheng³, GUO Yachen²

(1. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: The rock mass of grotto temples, exposed year round, is influenced by natural factors, especially temperature fluctuations and water seepage, which change the rock's physical properties. This paper investigates the permeability characteristics of Dazu grotto sandstone (Chongqing) after multiple heating-cooling cycles. Permeability tests are conducted under various conditions, such as cycle frequency, high temperature exposure durations, and cooling methods. Results show that sandstone permeability increases with heating-cooling cycles, influenced by the number of cycles and cooling methods. High permeability pressure also reduces sandstone's compressive strength compared to low permeability pressure.

Keywords: grotto sandstone; temperature effect; cooling methods; permeability characteristics

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 大足石刻研究院科研资助项目(H20220387); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0095); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2022NSCQ-LZX0001)。

Supported by the Academy of Dazu Rock Carvings Foundation (H20220387), Special Key Project of Chongqing Technology Innovation and Application Development (CSTB2022TIAD-KPX0095), and Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2022NSCQ-LZX0001).

作者简介: 王成龙(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方向的研究, (E-mail) wangclong@cqu.edu.cn。

通信作者: 郭亚琛, 男, 研究生, 主要从事岩土工程方向的研究, (E-mail) GuoYCh2023@163.com。

石窟寺作为重要历史文物,蕴含丰富的历史文化价值,其保护利用工作越来越受到重视,国家文物局《“十四五”石窟寺保护利用专项规划》提出深刻认识石窟寺保护利用工作的新特点和新要求,持续加强石窟寺保护研究工作。石窟岩体作为室外文化遗存,会经历各种自然因素包括冷热交替和渗水病害等的影响。温度循环变化会引起石窟岩体强度发生改变,而水在岩石中渗流也会对岩石的物理力学性质产生一定影响,进一步改变岩石裂隙,长此以往会导致岩体渗透特性随之发生变化,进而对石窟寺保护利用工作产生巨大阻碍。

目前,针对温度变化对岩体渗透特性的影响,国内外学者已经进行了大量的研究工作^[1-5]。盛金昌等^[6]开展了温度变化条件下石灰岩裂隙渗透特性试验研究,结果表明升温过程中流量和等效水力开度呈现增大的趋势,恒温过程等效水力开度逐渐变小并趋于稳定。Casse等^[7]在不同温度和压力条件下进行渗流试验,发现温度对胶结砂岩渗透率的影响与饱和流体的性质有关,饱和水通过岩芯的渗透率随温度升高而降低,而气体渗透率与温度无关。贺玉龙等^[8]在不同温度和不同有效应力下进行了砂岩的孔隙度试验和渗透率试验,得出温度升高会加剧矿物的扩散以及热膨胀作用,最终导致砂岩产生压缩效应,在有效应力不变的情况下,使砂岩岩样的渗透率大幅度减小。刘均荣等^[9]对砂岩、灰岩、变质岩和砾岩的渗透率受热变化规律进行了试验研究,结果表明岩石在常压下经过高温处理后,其渗透性随温度的升高而逐渐增大。张渊等^[10]在恒定三轴压力和不同温度(常温~600℃)条件下对长石细砂岩渗透率变化开展试验研究,结果表明细砂岩存在渗透率突变阈值温度,温度达到突变阈值后,渗透率增速会大幅提升。

考虑到岩体性质的差异和外部环境条件等的不同,以上研究成果并不完全适用于石窟寺的保护利用工作。近些年,对于石窟岩体的研究工作国内外学者也已取得大量成果,陈钊等^[11]开展了干湿循环作用下圆觉洞砂岩抗拉强度劣化机理研究及破坏模式分析,发现随着干湿循环次数的增加,砂岩黏聚力和内摩擦角减小,最终造成拉裂力学性质的劣化。周其廷等^[12]对云冈石窟砂岩、大足石刻砂岩、乐山大佛砂岩进行了盐溶液的湿度循环劣化试验,结果表明盐结晶对乐山大佛砂岩的破坏作用最强,大足石刻砂岩次之,对云冈石窟砂岩的破坏作用最小。兰恒星等^[13]从多方面总结了各因素作用下石窟寺岩体的劣化机制与失稳机理,得出石窟寺岩体的劣化失稳表现出多样性和地域差异性。

通过以上研究成果可以发现,针对石窟岩体的研究,应考虑石窟寺所在地的环境特点,并结合石窟岩体的性质。大足石刻位于中国西南地区重庆市大足区境内,历经唐末、五代、盛极于两宋,至今已有千年历史,在其石窟内也逐渐产生了较多裂隙(见图1)。因所在地区夏季雨水充足,大足石刻面临较严重的渗水病害的威胁,上世纪90年代至今,国内学者也对大足石刻岩体的渗水病害、岩石微观和表层风化等问题进行了详细的分析^[14-19],但针对大足石刻岩体渗透特性受温度变化影响的研究较少。



图1 大足石刻石窟裂隙

Fig. 1 Rock fractures of Dazhu Rock Carvings

因此,笔者针对大足石刻石窟岩体开展研究,以大足石刻砂岩作为研究对象,基于岩体所处环境,考虑围压,对石窟砂岩开展渗透试验,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,大足石刻砂岩渗透特性的变化规律,以及渗透影响下石窟砂岩的抗压强度特性,为进一步开展重庆大足石刻石窟稳定性分析提供技术支撑。

1 试验概况

1.1 岩样制备

岩样取自重庆市大足区,对大块的砂岩进行钻芯、切割、打磨,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(见图 2),加工完成后,岩样表面完整无明显裂痕。



图 2 加工完成的部分岩样

Fig. 2 Partial rock samples after cutting

1.2 试验方案

根据大足区气象资料,近些年,大足区最低温度为 1 °C,最高气温为 41 °C,而对于岩体,在连日暴晒等因素的影响下,其表面温度会更高。在综合考虑上述影响因素后,设计不同工况的冷热循环试验,模拟大足石刻岩体的环境变化过程,对冷热循环处理后的岩样进行渗透试验,测定不同工况下石窟砂岩的渗透率,分析冷热循环对石窟砂岩渗透特性的影响,渗透试验完成后,进一步开展砂岩的强度试验。具体试验分为以下 4 个步骤。

1.2.1 纵波波速测试

纵波波速是岩石密实性与完整性的一种表征指标,可以衡量岩样的损伤度、均质性与差异性。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,结果如表 1 所示,可以发现,岩样波速分布在 1.81~1.94 km/s 之间,波速差异较小,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,避免因岩样个体差异所引起的试验结果的离散性。

表 1 岩样纵波波速

Table 1 Longitudinal wave velocities of rock samples

编号	纵波波速/(km·s ⁻¹)	编号	纵波波速/(km·s ⁻¹)
1	1.94	12	1.84
2	1.94	13	1.84
3	1.92	14	1.84
4	1.92	15	1.84
5	1.91	16	1.83
6	1.88	17	1.83
7	1.88	18	1.82
8	1.86	19	1.82
9	1.84	20	1.82
10	1.84	21	1.81
11	1.84		

1.2.2 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。根据大足石刻

环境条件共设计4种试验工况,工况一模拟石窟砂岩所处环境的昼夜温度变化,工况二对石窟砂岩进行多次温度变化,工况三模拟全年温度变化,工况四岩样作为参照组。每种工况设计不同的温度变化过程,其中,为模拟砂岩温度变化,主要考虑0℃、25℃(常温)和60℃这3种温度,并基于所模拟的温度环境,设计了不同的高温 and 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,共设置7组试验,每组包括3块岩样。具体试验操作如表2所示。

表2 试验工况
Table 2 Test cases

工况	试验过程	编号
工况一	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1次循环,重复进行以上步骤,连续进行10次。	1-X
	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。	1-Y
	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。	1-Z
工况二	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,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。	2-J
	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10次。	2-K
工况三	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,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-Q
工况四	将石窟砂岩试样放置在常温环境中。	4-B

1.2.3 渗透试验

试验仪器采用岩石全应力多场耦合三轴试验机,如图3(a)所示。利用稳态法测定岩样渗透率,计算表达式^[20]为

$$K_n = \frac{\mu L \Delta Q_n}{A \Delta P \Delta t_n} \quad (1)$$

式中: K_n 为砂岩在 Δt_n 时间内的平均渗透率, m^2 ; μ 为流体黏滞系数,取 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,水温为20℃; ΔQ_n 为 Δt_n 时间内渗过砂岩试样的水体积, m^3 ; L 为水流渗流长度,即试验中砂岩试样高度, m ; A 为试样横截面面积, m^2 ; ΔP 为岩样渗流上、下游渗透压差, Pa ; Δt_n 为记录点间隔时间, s 。

为了研究石窟内部岩体在不同渗透压下的渗透特性,设置轴压与围压为0.70 MPa,渗透压设计为0.20、0.35、0.50 MPa。试验过程中,将冷热循环完成的岩样安装到三轴压力室中,然后,以应力控制的方式施加轴压和围压至0.70 MPa,轴压和围压稳定后,施加渗透压力,待渗透压稳定,开始观察并记录岩样的渗透变化。该过程由计算机自动完成,由于渗流速度较慢,需要的渗透时间也相对较长,选择每间隔2 h观察一次岩样渗透的变化,当渗透稳定不再发生变化则认为岩样渗透完成。保存数据,卸除压力拆除试件,试验完毕。

1.2.4 单轴压缩试验

渗透试验完成后,挑选部分岩样进行单轴压缩试验,研究水的渗透作用对砂岩力学特性的影响,试验仪器采用WDAJ-600岩石剪切流变试验机,如图3(b)所示,首先将岩样放置在试验台中央,保证岩样受力均匀,然后采用位移控制的方式对岩样进行加载,加载速率为0.20 mm/min,直至岩样压坏,应力-应变曲线出现明显下降趋势,停止试验,保存数据,卸除压力拆除试件,拍照记录岩石破坏后的外观形态,试验完毕。

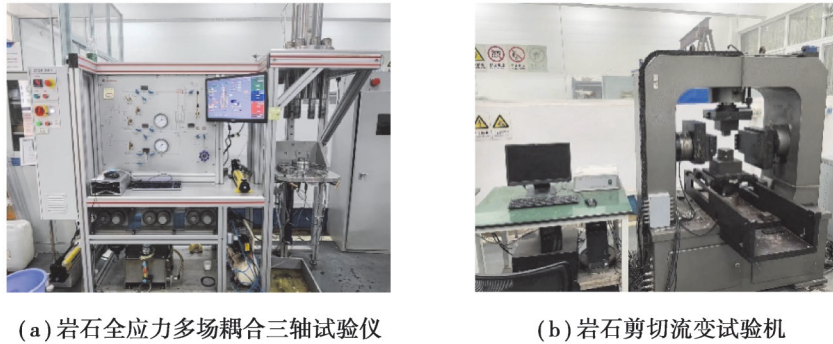


图 3 试验系统

Fig. 3 Testing system

2 试验结果与分析

2.1 石窟砂岩渗透率变化特征

通过试验和式(1)计算得到不同工况下岩样的渗透率,利用式(2)计算得到不同工况岩样渗透变化率 k_n ,分析岩样经过冷热循环后渗透率的变化情况。

$$k_n = \frac{K_n - K_0}{K_0}, \quad (2)$$

式中: K_n 为经过冷热循环后岩样的渗透率, m^2 ; K_0 为常温状态下岩样的渗透率, m^2 。

图4为工况一与工况四岩样的渗透率变化对比图,可以发现,与工况4-B相比,冷热循环后岩样的渗透率呈增大趋势,并且不同工况渗透率变化幅度存在差异。分析原因,是因为在冷热循环过程中,加热时,岩样温度升高发生膨胀,冷却时,岩样温度降低而收缩。由于岩样内部、外部散热速度不同导致岩样各部分温度存在差异,岩样因此受到温度应力的影响发生不均匀变形促使内部产生损伤,在多次冷热循环后,损伤不断累积,裂纹、裂隙逐渐发育,最终岩样内部孔裂隙增多,内部连通程度增大,导致岩样渗透率增大。通过对比不同工况岩样的渗透率,可以发现高温后采用水冷却的岩样渗透率大于自然冷却岩样的渗透率,并且冷却水温度降低,使温差增大,会导致岩样渗透率变化增大,说明增大温差和水冷却会对岩样内部造成更大的损伤。分析原因,一方面水冷却方式使岩样表面温度快速降低导致岩样不均匀变形增加,并且冷却水温度降低,会使温差增大,温度应力对岩样造成的损伤加剧;另一方面水的渗透、溶解等作用会导致矿物颗粒的流失促使裂隙发展,最终导致渗透变化率增加。在相同工况下比较渗透压对岩样渗透率的影响,可以发现,渗透压为0.50 MPa时岩样的渗透率>渗透压为0.35 MPa时岩样的渗透率>渗透压为0.20 MPa时岩样的渗透率,这是由于当渗透压增大,岩样受到的渗透力增加,导致渗流增加,渗透率增大。

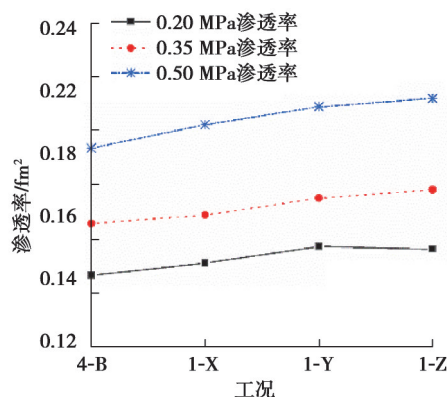


图 4 工况一与工况四岩样渗透率对比

Fig. 4 Comparison of permeability of rock samples for case 1 and case 4

图5为1-Y与2-J、2-K岩样的渗透率变化对比,分析可得,当冷热循环次数由5次增加到10次,岩样渗透率增加,并且总体来看,当高温时间从2 h延长到4 h,岩样渗透率也在增加,尤其是在高渗透压下。这是因为冷热

循环次数增加,岩样因冷热循环造成的损伤不断累积,内部孔裂隙逐渐发展,使内部渗流路径的连通程度增加,导致岩样渗透率增加;而增加岩样在高温下的时间,会使岩样高温膨胀变形增加,孔裂隙发育因此更加充分,导致岩样渗透增加,渗透率增大。对比分析不同渗透压下岩样的渗透率,同样可以发现,在较高渗透压下岩样的渗透大于较低渗透压的情况,这是因为增大渗透压会增大岩样受到的渗透力,使岩样内渗流加剧,渗透率增大。

图6为工况三与工况四岩样渗透率变化对比,与工况4-B岩样相比,3-Q岩样渗透率增大较为明显,并且通过与图4和图5对比,3-Q岩样渗透率均稍大于其他工况岩样渗透率,分析原因,工况3-Q模拟全年温度变化包括夏季高温环境和冬季低温环境,试验过程温度变化较大,岩样在试验过程中受温度变化影响,内部会产生损伤,孔裂隙逐渐发育,并且产生的损伤无法自然修复,在多次冷热循环后,岩样内部损伤不断累积加剧,孔裂隙扩展、贯通,导致岩样内部的连通程度较好,渗透率增加。对比不同渗透压下岩样的渗透率,同样可以发现,在较高渗透压下岩样的渗透率更大。

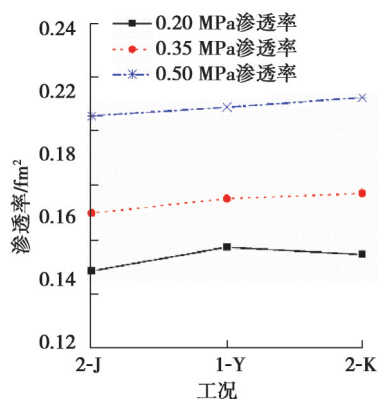


图5 工况一与工况二岩样渗透率对比

Fig. 5 Comparison of permeability of rock samples for case 1 and case 2

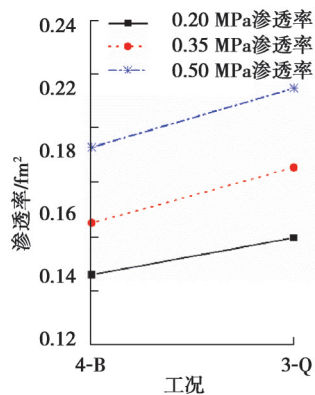


图6 工况三与工况四岩样渗透率对比

Fig. 6 Comparison of permeability of rock samples for case 3 and case 4

图7为不同工况岩样渗透变化率对比图,与工况4-B岩样相比,1-X岩样在渗透压为0.20、0.35、0.50 MPa时渗透变化率分别为3.14%、1.92%、4.46%,1-Y岩样渗透变化率分别为7.29%、5.69%、8.07%,1-Z岩样的渗透变化率分别为6.64%、7.53%、9.46%,而3-Q渗透变化率最大分别为9.41%、12.32%、11.28%,可以发现,相比于自然冷却,高温岩样经过水冷却后岩样的渗透变化率更大,并且当水的温度降低时,岩样的渗透变化率增大。这是因为冷热循环作用会导致岩样内部产生损伤,孔裂隙逐渐发育,进而使岩样渗流增加,渗透率增大,而相比于自然冷却,水冷却会增大岩样的损伤,渗透变化率增大。工况3-Q,渗透变化率最大,这是因为该工况设计温度变化较大,包括模拟夏季高温后冷却和冬季低温后恢复,导致试验过程中岩样受温度变化产生的损伤不断累积,使该工况下岩样的损伤程度大于其他工况,渗透变化率随之增大。

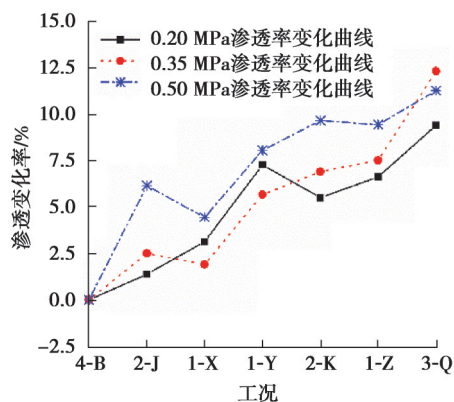


图7 不同工况岩样渗透变化率对比

Fig. 7 Comparison of the increase in permeability of rock samples for different cases

2.2 单轴压缩试验结果分析

2.2.1 不同工况石窑砂岩强度和变形特征

图 8 为渗透压为 0.20 MPa 时工况一岩样的单轴压缩试验压力-应变曲线,由于岩样采集地点的差别,应力峰值与朱鹏熹等^[15]的有一定差别,但是研究得到的结论相似。可以发现,经过不同工况的冷热循环和渗透试验后,岩样的单轴抗压强度和应变出现差异,表现为高温岩样经过水冷却后,峰值强度和应变小于岩样自然冷却的情况,分析原因可能是,冷热循环作用导致岩样内部产生损伤,使岩样力学性能变差,抗压强度和应变减小。试验过程中,高温岩样受到冷却水的作用,一方面使岩样内部和外部矿物产生温差而受到温度应力的影响,产生不均匀的膨胀、收缩变形;另一方面水的渗透、溶解作用造成岩样中矿物颗粒的流失,进而导致孔裂隙的发育,并在多次冷热循环过程中裂纹不断扩展和累积,岩样内部完整性降低,宏观表现为承载力较低,加载过程更易发生破坏,应变也随之减小。当高温岩样都采用水冷却方式,对比 1-Y 和 1-Z 岩样的单轴抗压强度,发现当冷却水温度较低,岩样单轴抗压强度减小,这可能是因为冷却水温度降低,导致岩样外部更快速冷却,增大了岩样内部和外部的温差,使岩样不均匀变形增大而造成损伤,在多次冷热循环过程中,损伤不断积累,导致岩样强度降低。

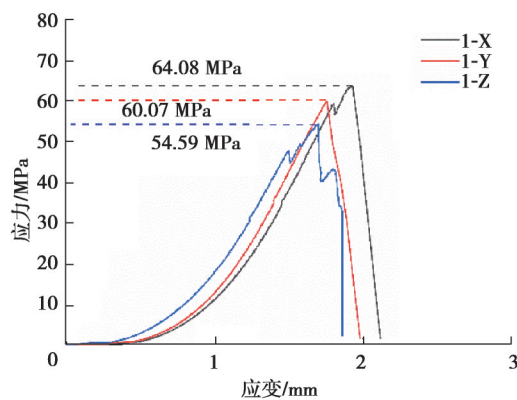


图 8 渗透压为 0.20 MPa 时不同工况岩样应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of rock samples under different operating conditions with osmotic pressure of 0.20 MPa

图 9 为工况 1-X 岩样在不同渗透压下的单轴压缩试验应力-应变曲线,可以发现,较高渗透压下完成渗透试验后的强度小于岩样在较低渗透压下的峰值强度,说明本试验中较高渗透压会对岩样造成更大的损伤,导致岩样力学性能变差,峰值强度降低,分析原因可能是渗透压增大,使岩样受到的渗透力增加,水对岩样的破坏作用增强,导致岩样内部损伤加剧,峰值强度减小。

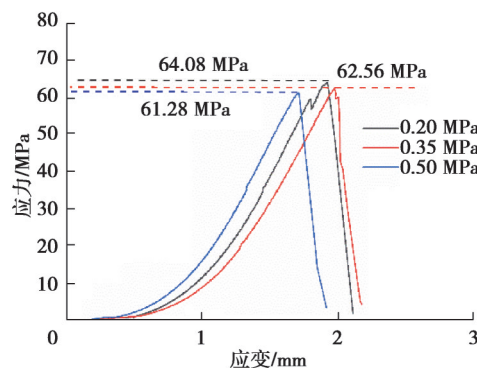


图 9 不同渗透压下工况 1-X 岩样应力-应变曲线





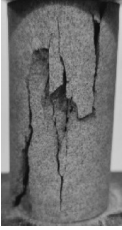
Fig. 9 Stress-strain curves of rock samples under different osmotic pressures for cases 1-X

2.2.2 不同工况石窟砂岩破坏特征

砂岩的单轴压缩破坏是岩石内部裂纹逐渐扩展、贯通的结果,属于剪切破坏和劈裂破坏^[15]。表3为不同工况岩样单轴压缩试验的破坏形态,可以发现,不同工况下岩样破坏时形成的破坏面、裂缝数量和破损程度存在差异,与自然冷却相比,采用水冷却的岩样破坏时,形成裂缝更多并且相互贯通,导致岩样外观更加破碎,岩块碎屑掉落数量也随之增加。在较大渗透压时,破坏也更为明显。经过冷热循环和渗透试验作用后,岩样内部损伤增加,裂纹裂隙发育,在压缩试验过程中,这些裂纹裂隙会不断发展,导致岩样薄弱处增多,逐渐形成多个裂缝,破坏时表现为形成多个破坏面并相互贯通。

表3 岩样单轴压缩破坏形态

Table 3 Failure forms of sandstone specimens under uniaxial compression tests

工况	1-X-0.20 MPa	1-X-0.35 MPa	1-X-0.50 MPa	1-Y-0.20 MPa	1-Z-0.20 MPa
破坏形态					

3 结 论

以重庆市大足石刻石窟砂岩作为研究对象,分析了温度影响下石窟砂岩的渗透特性,并进一步研究了温度和渗透影响下砂岩的强度特性,最终得出以下结论:

1) 经过冷热循环,石窟砂岩渗透率增大,相较于自然冷却,水冷却循环对砂岩的渗透特性影响更大。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,高温持续时间增加,会导致岩样渗透率变化增加。

2) 冷却方式会影响砂岩强度,与自然冷却相比,水冷却后砂岩强度降低,岩样的破损程度更严重,并且当冷却水的温度降低,砂岩强度进一步减少。

3) 在不同渗透压下经过渗透试验后,砂岩峰值强度出现差异,随着渗透压的增大,砂岩单轴抗压强度略有降低,并且在高渗透压下完成渗透试验的砂岩,单轴压缩时,破坏也更为明显。

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.
Li C. Study of the evolution of granite's physical and mechanical properties under heating and cooling alternating[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [2] Jiang H P, Jiang A N, Zhang F R. Experimental investigation on the evolution of damage and seepage characteristics for red sandstone under thermal-mechanical coupling conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(24): 816.
- [3] Xu P, Yang S Q. Influence of stress and high-temperature treatment on the permeability evolution behavior of sandstone[J]. Acta Mechanica Sinica, 2019, 35(2): 419-432.
- [4] Li Y Z, Wu Y, Qiao W G, et al. The permeability evolution of sandstones with different pore structures under high confining pressures, high pore water pressures and high temperatures[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1771.
- [5] Zhao Z L, Jing H W, Fu G P, et al. Experimental and numerical studies on permeability properties of thermal damaged red sandstone under different confining pressures[J]. Geofluids, 2021, 2021(1): 6693768.
- [6] 盛金昌, 张肖肖, 贾春兰, 等. 温变条件下石灰岩裂隙渗透特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1832-1840.
Sheng J C, Zhang X X, Jia C L, et al. Experiment study on permeability of limestone fracture under temperature variation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1832-1840. (in Chinese)

- [7] Casse F J, Ramey H J Jr. The Effect of temperature and confining pressure on single-phase flow in consolidated rocks (includes associated paper 9087) [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1979, 31(8): 1051-1059.
- [8] 贺玉龙, 杨立中. 温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14): 2420-2427.
He Y L, Yang L Z. Mechanism of effects of temperature and effective stress on permeability of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2420-2427. (in Chinese)
- [9] 刘均荣, 秦积舜, 吴晓东. 温度对岩石渗透率影响的实验研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2001, 25(4): 51-53.
Liu J R, Qin J S, Wu X D. Experimental study on relation between temperature and rocky permeability[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2001, 25(4): 51-53. (in Chinese)
- [10] 张渊, 万志军, 康建荣, 等. 温度、三轴应力条件下砂岩渗透率阶段特征分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 677-683.
Zhang Y, Wan Z J, Kang J R, et al. Analysis of stage characteristics of sandstone permeability under conditions of temperature and triaxial stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 677-683. (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. Mechanism and failure mode of tensile strength degradation of Shikuosi sandstone under dry wet cycling [J]. *Earth Science*, 2024, 49(2): 612-624. (in Chinese)
- [12] 周其廷, 孙文静, 孙德安, 等. 湿度循环对石窟砂岩孔隙中硫酸盐结晶过程的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(2): 128-135.
Zhou Q T, Sun W J, Sun D A, et al. Effect of humidity cycle on sulfate crystallization process in grotto sandstone pores[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2023, 49(2): 128-135.(in Chinese)
- [13] 兰恒星, 吕洪涛, 包涵, 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, Lyu H T, Bao H, et al. Advances in degradation and instability mechanism of grotto temple rock mass[J]. *Earth Science*, 2023, 48(4): 1603-1633. (in Chinese)
- [14] 李震, 张景科, 刘盾, 等. 大足石刻小佛湾造像砂岩室内模拟劣化试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1513-1521.
Li Z, Zhang J K, Liu D, et al. Experimental study on indoor simulated deterioration of sandstone of Xiaofowan statues at Dazu Rock Carvings[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(8): 1513-1521. (in Chinese)
- [15] 朱鹏熹, 王成龙, 蒋思维, 等. 温度影响下石窟砂岩力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(S1): 3310-3320.
Zhu P X, Wang C L, Jiang S W, et al. Experimental study on mechanical properties of grottoes sandstone influenced by temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(S1): 3310-3320. (in Chinese)
- [16] 汪东云, 张赞勋, 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(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]. *China Industrial Economics*, 1992(3): 25-28. (in Chinese)
- [17] 张赞勋, 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)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 王如宾, 徐波, 徐卫亚, 等. 不同卸荷路径对砂岩渗透性演化影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(3): 467-475.
Wang R B, Xu B, Xu W Y, et al. Experimental research of the influence of different unloading stress paths on permeability evolution of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(3): 467-475. (in Chinese)

(编辑 郑洁)