

DOI: 10.11779/CJGE20221470

高渗压与循环加卸载环境下开挖卸荷岩体力学特性 试验研究

陈兴周, 白亚妮, 陈莉丽, 马彬, 王文瑞, 龚盛

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 探究高渗压与循环加卸载环境下深部开挖卸荷岩体力学特性的演化规律, 有助于揭示复合荷载作用下工程开挖卸荷围岩的变形破坏机理。从区分开挖扰动强度与渗压量级入手, 以高渗压环境下遭受开挖扰动的卸荷岩体为对象, 开展了考虑特定孔压与循环荷载复合作用条件下的三轴加卸载试验。结果表明: ①卸荷量级直接影响循环加卸载过程岩样的变形规律及其破坏强度, 孔隙水压促进了岩样循环加卸载过程的拉剪破坏; ②孔压增幅加剧了同量级卸荷岩样循环加卸载过程的延性变形及强度衰减, 且卸荷岩样的轴向、环向与体积变形曲线均在 2 MPa 孔压时产生波动; ③伴随孔压增加, 岩样卸荷量级为 30% 时的环向变形呈先增加后减小的趋势, 而岩样卸荷量级为 60% 时的环向变形呈现先减小后增加的规律; ④伴随卸荷量级与孔压增加, 岩样破坏时端部裂隙的倾角逐渐增大, 沿岩样轴向产生的拉剪破裂面愈加凸显。

关键词: 深部岩体; 开挖卸荷; 高渗压; 循环加卸载; 力学特性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0737-09

作者简介: 陈兴周(1980—), 男, 陕西周至人, 工学博士, 教授, 主要从事水工岩体力学及工程渗流方面的教学与科研工作。Email: xzchen0416@163.com。

Experimental study on mechanical properties of excavated unloading rock mass under high osmotic pressure and cyclic loading and unloading environments

CHEN Xingzhou, BAI Yani, CHEN Lili, MA Bin, WANG Wenrui, GONG Sheng

(Department of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Exploring the evolution laws of mechanical properties of deeply excavated unloading rock mass under high osmotic pressure and cyclic loading and unloading environments is conducive to the release of deformation and failure mechanism under combined loading. By distinguishing the excavation disturbance intensity from the magnitude of osmotic pressure, the triaxial loading and unloading tests are conducted, and unloading rock mass subjected to excavation disturbance under high osmotic pressure environments are conducted considering the combined action of specific pore pressure and cyclic loading. The results show that: (1) The magnitude of unloading directly affects the deformation laws and the failure strength of rock samples and the pore water pressure promotes their tensile and shear failure during the cyclic loading and unloading. (2) The increase of pore pressure intensifies the ductile deformation and strength attenuation of the unloading rock samples with the same magnitude during the cyclic loading and unloading process, and the axial, circumferential and volumetric deformation curves of the unloading rock samples fluctuate at the pore pressure of 2 MPa. (3) With the increase of pore pressure, the circumferential deformation of the rock samples at the unloading magnitude of 30% increases first and then decreases, while that at the unloading magnitude of 60% decreases first and then increases. (4) With the increase of unloading magnitude and pore pressure, the dip angle of the end fracture gradually increases when the rock sample is damaged, and the tensile and shear fracture surface generated along the axial direction of the rock sample becomes more prominent.

Key words: deep rock mass; excavation and unloading; high osmotic pressure; cyclic loading and unloading; mechanical property

0 引言

动态高渗压环境下深部岩体在施工过程中, 除了

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979218, U1965107); 陕西省
自然科学基金项目 (2018JM5118)
收稿日期: 2022-11-28

承受前期工程开挖扰动外,还将承受地质构造运动及场区渗流场周期性变动等造成的反复加卸载作用。工程开挖扰动、卸荷松弛、卸荷岩体结构演化等物理力学作用促进了孔隙与裂隙的衍生及贯通,加剧了高渗压地下水的潜蚀作用。进而,赋存于动态高渗压与循环荷载复合环境下的卸荷围岩,其承载能力将大幅下降、结构演化将逐渐加剧,导致洞室大变形、衬砌结构破坏及突涌水等工程灾害日益增多。因此,深入探究高渗压环境下,深部卸荷岩体在循环加卸载复合作用下的力学特性及其变形破坏机理,对于促进深部工程岩体长期稳定性的科学评价具有重要意义。

为此,国内外许多学者针对岩石在循环荷载作用下的损伤演化规律及变形破坏机理进行了研究。如:Guo 等^[1]、卢高明等^[2]探究了单轴循环荷载试验过程中岩石的强度、疲劳变形及能量特征。Meng 等^[3]在对比区分加卸载速率的基础上,研究了单轴循环加卸载条件下岩石声发射特性的变化规律。Munoz 等^[4]研究了岩石单轴峰后循环加卸载作用下的强度及损伤区变形特征。Zhang 等^[5]建立了弹-黏-塑性模型来描述岩石在循环单轴压缩过程中的力学损伤行为。Meng 等^[6]、Chen 等^[7]、蔡燕燕等^[8]探究了三轴循环加卸载试验下,不同围压条件时岩石峰后强度、损伤变形及弹性模量等参数的响应规律。赵闯等^[9]、Wang 等^[10]探讨分析了循环加卸载试验过程中岩石损伤断裂演化过程、能量特征及其破坏特性。部分研究针对人工制备裂隙岩样或卸荷岩样,探究了复杂环境下裂隙损伤岩石的循环加卸载力学特性。如:周志华等^[11]针对含裂隙岩样,研究了渗透水压环境下岩石循环荷载过程中的变形特性。魏元龙等^[12]开展了含天然裂隙页岩的三轴循环加卸载试验,发现含裂隙岩样在加卸载条件下破坏提前、变形更加复杂。王瑞红等^[13]开展了不同围压与不同卸荷量条件下砂岩峰后循环加卸载试验,研究发现峰后岩体残余强度对围压变化具有敏感性。

已有成果多数为单一环境下“完整岩样”或“均质岩样”的循环力学特性研究;较少研究考虑先期受荷损伤及渗透压环境等因素对岩石循环力学特性的影响。于此,本文以考虑孔压作用的卸荷岩样为试验对象,开展不同孔压与循环荷载复合作用下卸荷岩样三轴循环加卸载试验,分析复合环境下岩石的力学特性与变形特征及宏观破裂形态,以期复合环境下卸荷岩体损伤变形累积过程分析与评价提供依据,促进岩石循环加卸载力学特性研究成果的不断丰富。

1 试件制备及试验方案

1.1 试件制备

本试验依托 THMC 岩石多场耦合三轴流变测试系统执行,试验系统装置及试验岩样,如图 1 所示。

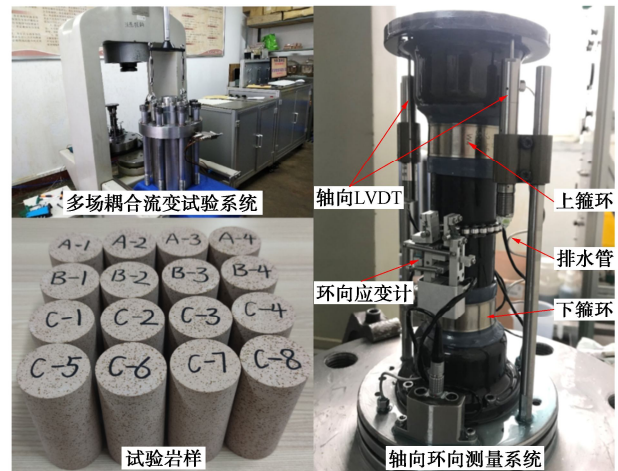


图 1 试验系统装置及试验岩样

Fig. 1 Test system equipments and rock samples

以砂岩为试验对象,按照国际岩石力学学会(ISRM)标准,制备成 $50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ (直径 \times 高度)的标准圆柱体岩样,其直径与高度直径与高度误差范围小于 0.3 mm ,表面无明显可见节理、整体性较好,并剔除波速差异较大的岩样,以减少试验结果的离散性。

1.2 试验方案

试验的主要目的在于,通过开展不同卸荷量级和渗压作用下砂岩三轴循环加卸载试验,探究复合环境下岩石的力学特性。为模拟深部岩石赋存应力环境及渗压环境,综合已开展的试验结果及岩样性质,选取定围压 15 MPa 作为试验应力条件;关联深层地下水渗透问题及室内试验的可操作性,选取 $1, 2, 3\text{ MPa}$ 孔压作为试验渗压条件,无孔压作为试验对照组。

本次试验系统中孔压加载装置主要由上下游端口、出水口等部分组成,上下游端口压力差可以实现模拟岩石试样所承受的压力水头,孔压加载装置的控制方式选用压力控制。

(1) 试验准备阶段

三轴循环加卸载试验对象为已卸荷岩样,因而先开展不同孔压条件下常规三轴压缩及三轴卸荷试验,为制备损伤岩样提供依据。具体试验方案如下:

a) 三轴压缩试验:选用 4 个岩样(A-1~A-4),分别进行定围压 15 MPa ,孔压为 $0, 1, 2, 3\text{ MPa}$ 下的三轴压缩试验,以获取不同孔压下岩样的三轴峰值抗压强度,为循环加卸载应力水平上下限提供参考。

b) 三轴卸荷试验:选用 4 个岩样(B-1~B-4),分别进行定围压 15 MPa ,孔压为 $0, 1, 2, 3\text{ MPa}$ 下的三轴卸荷试验,以获取不同孔压条件下岩样卸荷破

坏时的围压值, 进而确定卸荷量级。

(2) 试验阶段

依托试验准备阶段所得试验数据, 进行三轴循环加卸载试验。具体试验方案如下:

a)卸荷岩样制备试验: 选用 8 个岩样(C-1~C-8), 分别进行定围压 15 MPa, 孔压为 0, 1, 2, 3 MPa 的三轴卸荷试验。分别制备不同卸荷量级的损伤岩样, 制备完成后直接进行三轴循环加卸载破坏试验。卸荷量级 D 为

$$D = \frac{\sigma_0 - \sigma_D}{\sigma_0 - \sigma_p} \quad (1)$$

式中: σ_0 为初始围压值; σ_p 为卸荷破坏时围压值; σ_D 为目标卸荷量级对应的围压值。

b) 三轴循环加卸载试验: 分别以前述卸荷量级为 30%、60%的卸荷岩样 (C-1~C-8) 为对象, 依次开展定围压 15 MPa, 不同孔压 (0, 1, 2, 3 MPa) 作用下的三轴循环加卸载破坏试验, 以获取不同卸荷量级岩样在不同孔压加持下的试验数据。

试验为循环荷载下限保持不变, 上限应力等幅升高的加卸载破坏试验, 三轴循环加卸载试验过程, 如图 2 所示。试验应力路径如图 2 (a): ① OA 段: 以 2 MPa/min 的恒定加载速率等速率加载轴围压至一定压力 (大于孔压 1~2 MPa), 然后以同等速率施加孔压至目标值 (1, 2 或 3 MPa), 保持孔压恒定, 继续施加轴围压至静水压力状态 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 15$ MPa); ② $AB-AB'$ 段: 保持围压不变, 以 4 MPa/min 的恒定加载速率加载轴压至三轴峰值强度的 70%; ③ $BC-BC'$ 段: 轴压保持不变, 围压以 1 MPa/min 的速率卸载至目标卸荷量级对应围压值, 至此完成卸荷岩样的制备; ④ $CD-CD'$ 段: 循环加载全过程保持对应卸荷量级目标围压值不变, 加卸载速率均为 2 MPa/min。循环加卸载过程如图 2 (b), 循环加载应力每一级增幅为 2 MPa, 循环应力下限为对应孔压下三轴峰值强度的 70%, 依次进行变幅多级循环加卸载、直至岩样破坏。

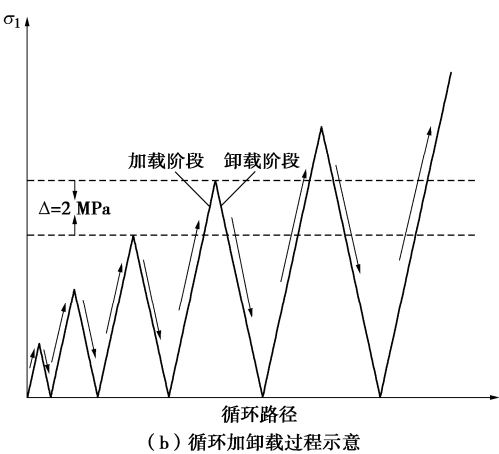
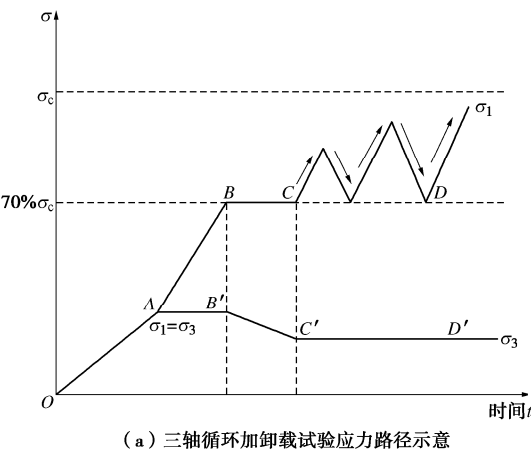


图 2 三轴循环加卸载试验过程应力路径

Fig. 2 Stress paths during triaxial cyclic loading and unloading tests

2 常规三轴加卸载试验结果分析

2.1 三轴压缩试验

开展不同孔压条件下常规三轴压缩试验, 以确定循环应力水平的上下限值。试验结果表明, 伴随孔压增加, 岩样的三轴峰值强度降低, 塑性阶段轴向与环向变形速率减小, 当轴向应力达到岩样的极限承载力时, 加载导致岩样裂隙弱面贯通发生破裂, 应力呈断崖式跌落; 试样破坏时有清脆响声, 为典型的脆性破坏。分析认为, 试验孔压环境越大, 岩样原生孔隙被水分子填充的越密实, 其内部滋生的裂隙又为水体提供了诸多流动通道, 孔隙水压力作用愈加明显, 从而降低了岩样内部矿物颗粒之间的胶结能力、削弱了颗粒间的力链强度; 达到峰值应力前, 岩样总体变形不大, 随着轴向压力继续加载, 岩石内部微小裂纹不断滋生及衍化, 到达极限承载能力时演化为贯通裂缝, 进而导致岩样的承载能力急剧下降。

基于常规三轴压缩试验结果, 得到了不同孔压条件下岩样的基本参数, 如表 1 所示。

表 1 不同孔压条件下岩样常规三轴压缩基本参数

Table 1 Basic parameters of conventional triaxial compression of rock samples under different pore pressure conditions

孔压/ MPa	基本参数		
	峰值强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
0	149.82	12.3	0.39
1	141.52	11.6	0.40
2	139.45	11.5	0.41
3	134.91	11.3	0.46

分析可知, 随孔压增加, 岩样力学性质劣化明显。较无孔压试验结果, 1, 2, 3 MPa 孔压下岩样峰值强度降低百分比分别为 5.54%, 6.92%, 9.95%。主要因孔压作用诱发了岩石裂隙的进一步张开, 在复合荷载环境的影响下, 裂隙更易形成及扩展, 承载能力也随

之下降。为探究峰前岩样三轴循环承载力学特性,最终选定对应孔压条件下岩样三轴峰值强度的70%作为循环应力水平下限值。

2.2 三轴卸荷试验

开展三轴卸荷试验以得到岩样破坏时的围压值,由此划分卸荷量级,制备卸荷岩样。试验结果表明,随着孔压量级的增加,峰值环向应变逐渐减小,而轴向变形整体变化较小。主要原因在于,围压卸载过程中,前期由于轴向加压形成的致密裂纹,因环向约束的减小而逐渐扩展、贯通,孔压幅值越大、岩石内部新生裂纹越多,且随偏应力的增加而逐渐扩展,横向膨胀变形也随之增大,但累积承载变形总体呈减小趋势;当围压卸载到一定程度时,岩样因环向剧烈扩容而破坏,表现出延性破坏特征。

根据三轴卸荷试验结果,孔压为0, 1, 2, 3 MPa时,岩样发生破坏时对应围压值分别为4.16, 4.23, 4.74, 6.15 MPa,岩样破坏前可卸围压范围,随孔压增加而减小。经过尝试性试验,综合考虑岩样损伤后再承载试验的可行性,最终选定30%与60%卸荷量级作为三轴循环荷载试验的先决条件。

3 三轴循环加卸载试验结果分析

3.1 应力-应变曲线分析

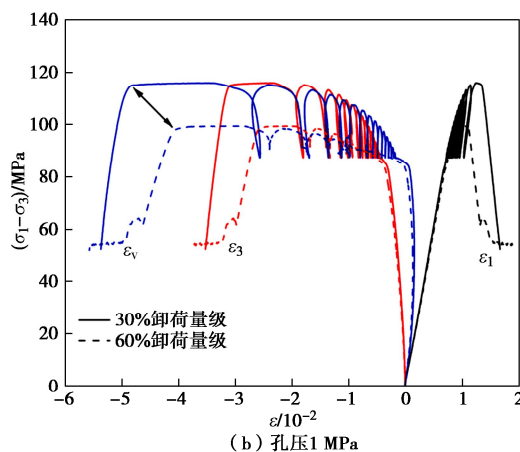
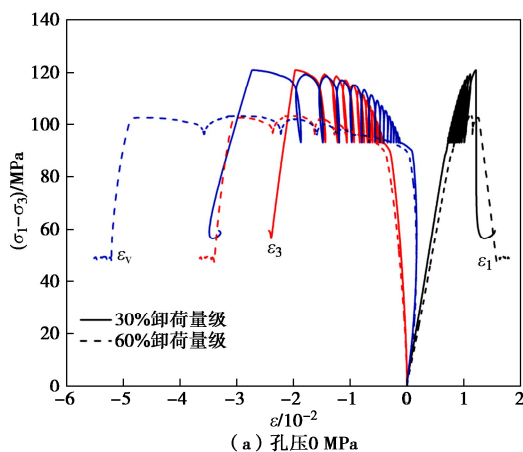
不同孔压条件下卸荷岩样三轴循环加卸载过程应力-应变曲线,如图3所示。循环加卸载之前,岩样经历:①裂隙压密阶段:微向上凹,初始轴向荷载致使岩样内部细小孔隙压实闭合,承载能力稍有强化;②弹性阶段:近直线段,以弹性变形为主;③裂隙稳定扩展阶段:微向下凹,累积加载导致岩石内部微裂纹应力集中,竖向出现细小滋生裂隙,变形损伤加剧。

对比图3(a)与图3(b), (c), (d)所示应力-应变曲线发现:无孔压赋存环境下,卸荷量级为60%的岩样比卸荷量级为30%的岩样的轴向、环向和体积

变形均更大;而有孔压环境下,卸荷量级为30%的岩样变形更大。分析认为,无孔压环境下损伤较为严重的岩样,其先期卸荷损伤产生的微裂纹在后续循环荷载作用下,又经历反复压密闭合、卸荷张开过程,岩样脆性增加、变形损伤随之加剧;故而,60%卸荷量级岩样最终由于弱面裂隙贯通、承载能力丧失而发生破坏,整体变形较大。孔压赋存环境下,卸荷损伤越严重的岩样初始裂隙发育越多,内部孔隙水、裂隙水无法及时排出,在孔隙水压力影响下岩石内部颗粒间力链强度减小,降低了岩样的抗剪强度,整体承载能力较低;进而在相同孔压作用下,60%卸荷岩样较30%岩样,完整性低、承载力弱,因而整体受循环荷载作用时间及承受反复荷载作用次数较少,更易发生破坏,表现为破坏提前、变形量相对较小。

由此可以推断,无孔压环境下,岩石的卸荷损伤程度是影响其承载能力的主要因素,决定岩样的变形破坏时间及其变形量的大小;而孔压赋存环境下,孔隙水压力对岩样力学强度的劣化作用远大于卸荷量级的影响。由此可见,涉及高渗压环境下开挖卸荷岩体的工程处置时,有必要评估场区渗流环境对开挖卸荷岩体长期强度的削减效应,有必要考虑场区动态高渗压的幅度及其变化过程,有必要结合施工期开挖扰动分区结果制定导排水措施、以降低渗压对卸荷岩体的潜蚀及浮托作用。

对比图3(b), (c), (d)所示应力-应变曲线发现:孔压为1 MPa时,加卸载之前,30%卸荷量级岩样的应力-应变曲线在60%卸荷量级岩样曲线的上方;孔压为2, 3 MPa时,分布规律相反;同时,相同孔压作用下,两种卸荷量级岩样的轴向、环向变形差值,存在随孔压增加呈先增大后减小的变化趋势,在2 MPa孔压处发生波动;此外,不同卸荷量级岩样的承载能力,存在伴随孔压增加而逐渐接近的现象。分析认为,当孔压小于2 MPa时,孔压劣化效应或可逼近



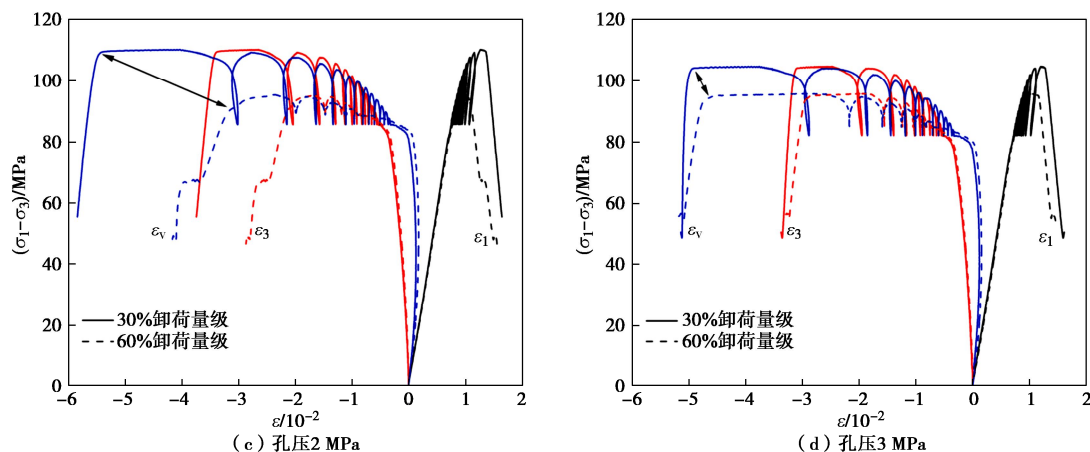


图3 不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载过程应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of unloading rock samples under different pore pressures during triaxial cyclic loading and unloading process

卸荷损伤的影响; 先期卸荷损伤程度较大的岩样, 承载能力因裂隙弱面较多而降低, 发生同样变形所需极限应力较低, 故而 60%卸荷量级岩样的变形曲线斜率较缓; 而当孔压 ≥ 2 MPa 时, 孔隙水压力的劣化作用显著提高, 故而卸荷损伤严重的岩样内部缺陷的衍生频率更高, 变形速率更快。由此可见, 开挖扰动强度与孔隙水压力形成的复合荷载环境, 对于卸荷岩体强度的削减作用存在一定差异, 孔压对于卸荷岩体强度的影响存在一定的阈值; 工程设计中需要结合场区动态渗压极大值或者洞群相对位置调整, 以降低水头压差、减小高水头作用下卸荷围岩的长期变形。

此外, 卸荷量级为 30% 的岩样, 在 1, 2, 3 MPa 孔压作用下, 破坏时循环次数分别为 15, 13, 11 次; 卸荷量级为 60% 的岩样, 破坏时循环次数分别为 5, 4, 6 次, 即岩样先期损伤越大, 承受循环荷载能力越低; 孔隙水压力幅值越大, 岩样劣化效应越显著。试验结果反馈了工程中保护岩体、减少开挖扰动及缩减卸荷松弛范围的重要性; 体现了动态高渗压对于开挖岩体卸荷效应具有显著的增速作用, 循环荷载不仅致使孔隙水极大削减了岩体颗粒间的力链强度, 也加剧了岩体宏细观结构的破坏及裂隙贯通; 工程设计中需要重视开挖岩体卸荷渗流力学特性的研究。

3.2 轴向变形分析

不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载应力-轴向应变曲线, 如图 4 所示。在循环作用初期, 卸载曲线未沿加载曲线原路径返回, 且每一级循环再加载曲线, 均通过上一循环卸载曲线的终点。同时, 由于轴向加压会使岩样中的既有孔隙闭合, 卸荷又会使已压密的裂隙逐渐张开并产生衍生裂隙; 故而, 加载曲线向下凹、卸载曲线向上凹, 交叉部分形成了滞回环。随着循环应力的提高, 岩样局部孔隙和裂纹尖端应力集中、变形不断累积, 导致滞回环开口宽度、高度及其面积

相继增加, 间距由密变疏, 应变持续增加。

对比图 4 (a) 与图 4 (b), (c), (d) 所示不同卸荷量级岩样的应力-轴向应变曲线发现: 无孔压时, 60%卸荷量级岩样峰值轴向应变相较 30%卸荷岩样应变值大; 孔压赋存下其变化规律相反。分析认为, 考虑孔压和循环荷载复合环境时, 孔压较卸荷量级成为致使岩石损伤劣化的先决条件。

对比图 4 (b), (c), (d) 所示不同孔压条件下, 卸荷岩样轴向应变曲线变化规律可知: 30%卸荷量级岩样峰值轴向应变伴随孔压增加呈先增加后减小的变化趋势, 而 60%卸荷量级岩样的应变值呈先减小后增加的趋势; 同时, 由于卸荷量级差异性导致岩样峰值轴向应变的差值、总体呈现出先增加后减小的变化特征, 变化规律均在 2 MPa 孔压处发生波动。由此可见, 以轴压变化模拟循环加卸载的受力环境, 导致了轴向变形能力的持续变化, 侧面说明循环加卸载过程诱发了岩样的结构变化; 对于承受动态高渗压与循环外载的开挖卸荷岩体来讲, 需要在工程设计中考虑扬压力与循环外载所诱发的基岩结构劣化问题。

3.3 环向变形分析

轴向变形主要源于岩样内部的结构变化、颗粒滑动及裂隙结构的剪切滑移。假三轴受力状态下, 环向变形曲线反馈了试样竖向裂隙的产生和变化状况, 以及侧向约束减弱后岩样颗粒滑动与弹塑性变形的能力。从细观角度来看, 屈服初期岩样的某一局部, 特别是外侧面发生了剪切滑移之后, 将产生相应的环向变形, 但此时轴向变形因岩样整体仍处于弹性状态而较小; 故而, 环向变形相较轴向变形可以更直观的反应侧向约束减弱后岩石内部的屈服和结构弱化过程。

不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载应力-环向应变曲线, 如图 5 所示。循环加载过程中, 岩样反复经历体胀和体缩, 因试验过程中仅有岩样端部反复受

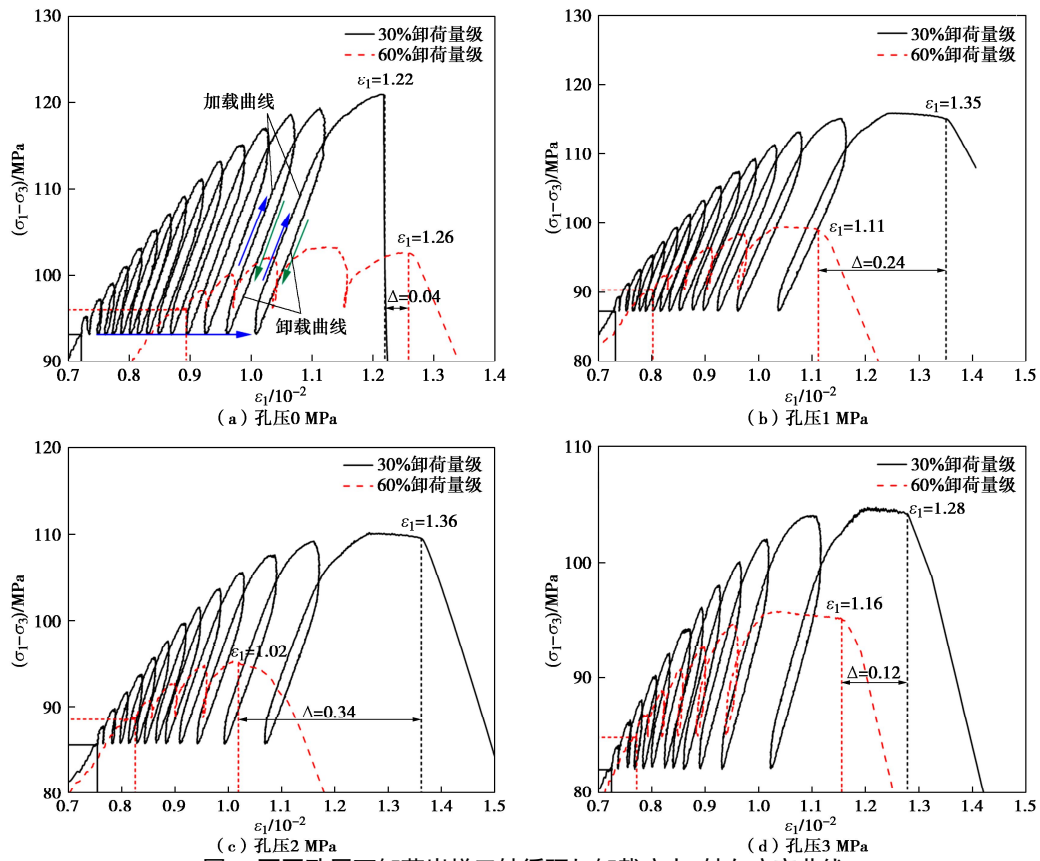


图 4 不同孔压下卸荷岩样三轴循环加载-卸载应力-轴向应变曲线

Fig. 4 Stress-axial strain curves of unloading rock samples under different pore pressures during triaxial cyclic loading and unloading process

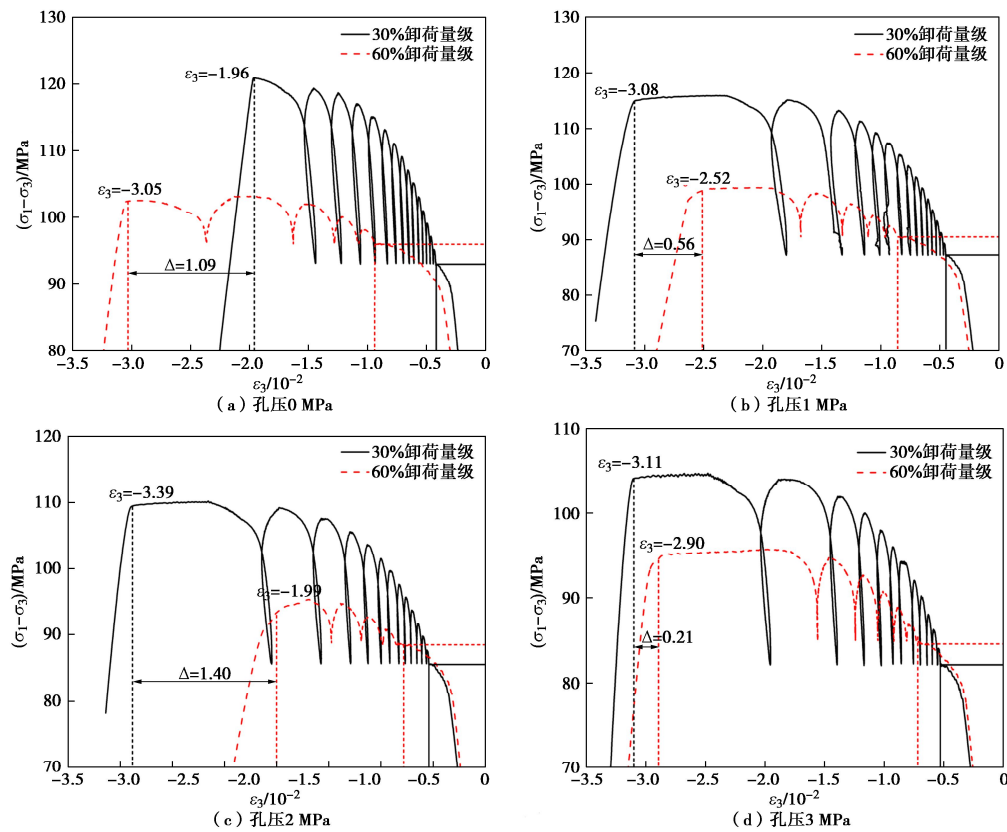


图 5 不同孔压下卸荷岩样三轴循环加载-卸载应力-环向应变曲线

Fig. 5 Stress-lateral strain curves of unloading rock samples under different pore pressures during triaxial cyclic loading and unloading process

循环荷载作用, 从而造成环向变形的不断变化和累积。

对比图 5 (a) 与图 5 (b), (c), (d) 应力-环向应变曲线发现, 两种卸荷量级岩样在无孔压下最终环向变形差值较大, 在孔压赋存下变形差值较小, 表明孔压作用弱化了卸荷量级对岩样变形损伤的影响。对比图 5 (b), (c), (d) 发现, 伴随孔压增加, 30%卸荷岩样的环向变形呈先增后减的趋势, 60%卸荷岩样变化规律相反; 同时, 两种卸荷量级岩样的环向变形差值, 存在伴随孔压增加先增后减的趋势, 均在 2 MPa 孔压处发生了波动。分析认为, 一是低孔压环境下, 较完整岩样承载能力高、可承受循环次数较多, 变形破裂所需时间较长; 故而, 变形具有足够时间累积, 卸荷损伤较小的岩样变形累积值大。二是高孔压条件下, 损伤岩样中张开孔隙裂隙几乎完全充水, 受循环荷载与孔隙水压及不可压缩水体作用的综合影响, 加剧了卸荷损伤岩样宏观裂隙的扩容甚或溃屈离散, 从而导致 60%卸荷量级岩样的环向变形速率更大; 不同卸荷量级岩样破坏时的累积环向变形差值较小, 说明了高孔压的影响优于卸荷损伤。由此可见, 针对开挖扰动后可利用卸荷岩体的工程设计, 需要重视动态高渗压扰动下开挖轮廓附近卸荷岩体松弛变形的累积

问题, 也需要根据对象岩体结构与母岩成份研究孔隙水压的作用阈值, 以期结合场区渗压和卸荷松弛区制定有效的导排水措施, 以减小渗压诱发的长期变形。

3.4 体积变形分析

不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载应力-体积应变曲线, 如图 6 所示。在加载阶段, 轴向压缩导致了裂隙闭合及孔隙压密, 岩样体积减小; 而在卸荷阶段, 由于端部约束减小, 引起岩样局部的孔隙或颗粒膨胀回弹, 岩样体积略有增大, 但总体呈持续减小趋势。相同孔压条件下, 伴随加卸载过程, 30%卸荷量级的岩样, 存在体积往复变化现象, 而 60%卸荷量级的岩样体积持续减小, 体胀现象不明显; 原因在于, 较小卸荷量级对应的岩样, 原生孔隙结构变化不大, 仍然具有较大的弹性势能; 当卸荷诱发岩样原生孔隙结构发生较大变化时, 循环加卸载作用易于在局部原生细观结构改变的位置产生应力集中, 以原生结构持续改变的状态存在, 表现为塑性变形增加、力学强度衰减。对比图 6 (b), (c), (d) 所示体积变形曲线可知, 其变化规律类似于环向变形, 即相同孔压条件下两种卸荷量级岩样的体积变形差值, 仍然随孔压增加呈现出先增大后减小的趋势, 且变化特征仍在 2 MPa 孔压处发生波动。

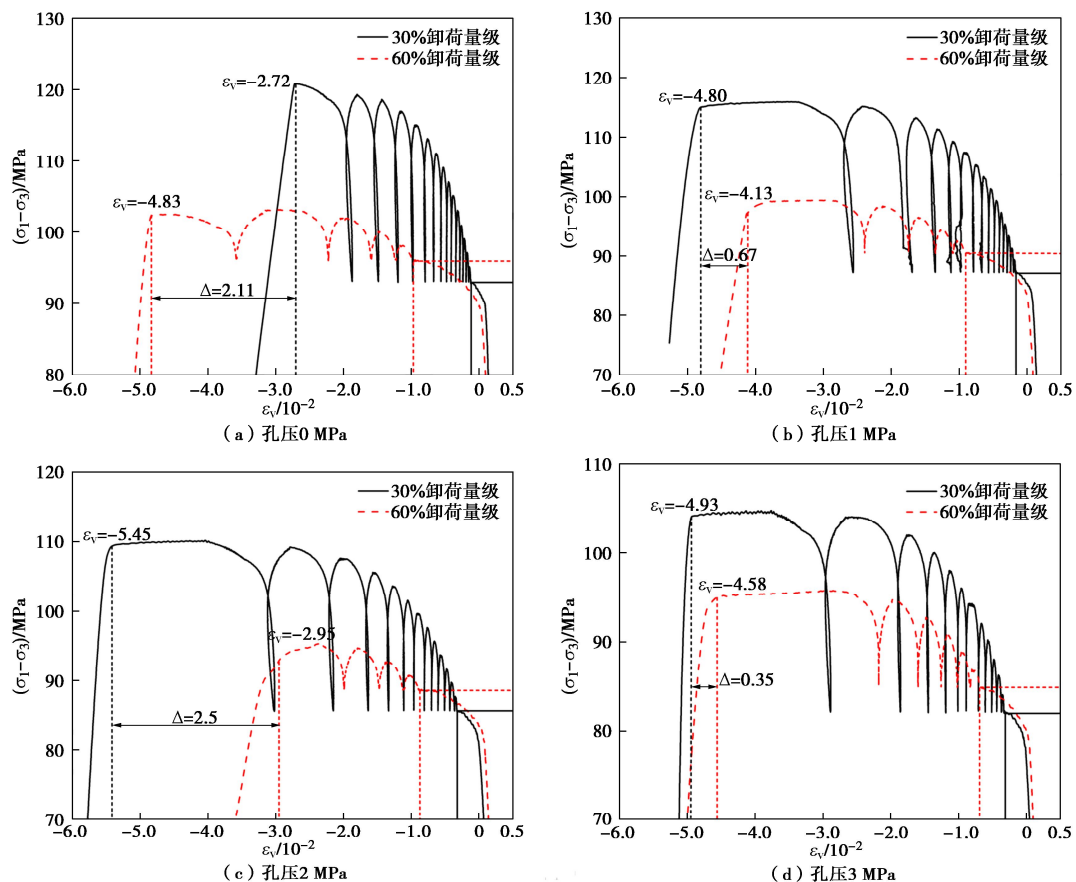


图 6 不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载过程应力-体积应变曲线

Fig. 6 Stress-volumetric strain curves of unloading rock samples under different pore pressures during triaxial cyclic loading and unloading process

表 2 不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载试验参数汇总

孔压/MPa		卸荷量级					参数		
		峰值强度/MPa		弹性模量/GPa		轴向应变		环向应变	
0	30%	132.67	13.2	1.22×10 ⁻²	-1.96×10 ⁻²	-2.72×10 ⁻²			
	60%	110.69	11.4	1.26×10 ⁻²	-3.05×10 ⁻²	-4.83×10 ⁻²			
1	30%	126.50	12.1	1.35×10 ⁻²	-3.08×10 ⁻²	-4.80×10 ⁻²			
	60%	106.93	11.7	1.11×10 ⁻²	-2.52×10 ⁻²	-4.13×10 ⁻²			
2	30%	121.19	11.6	1.36×10 ⁻²	-3.39×10 ⁻²	-5.45×10 ⁻²			
	60%	103.18	11.2	1.02×10 ⁻²	-1.99×10 ⁻²	-2.95×10 ⁻²			
3	30%	116.13	11.6	1.28×10 ⁻²	-3.11×10 ⁻²	-4.93×10 ⁻²			
	60%	101.92	11.2	1.16×10 ⁻²	-2.90×10 ⁻²	-4.58×10 ⁻²			

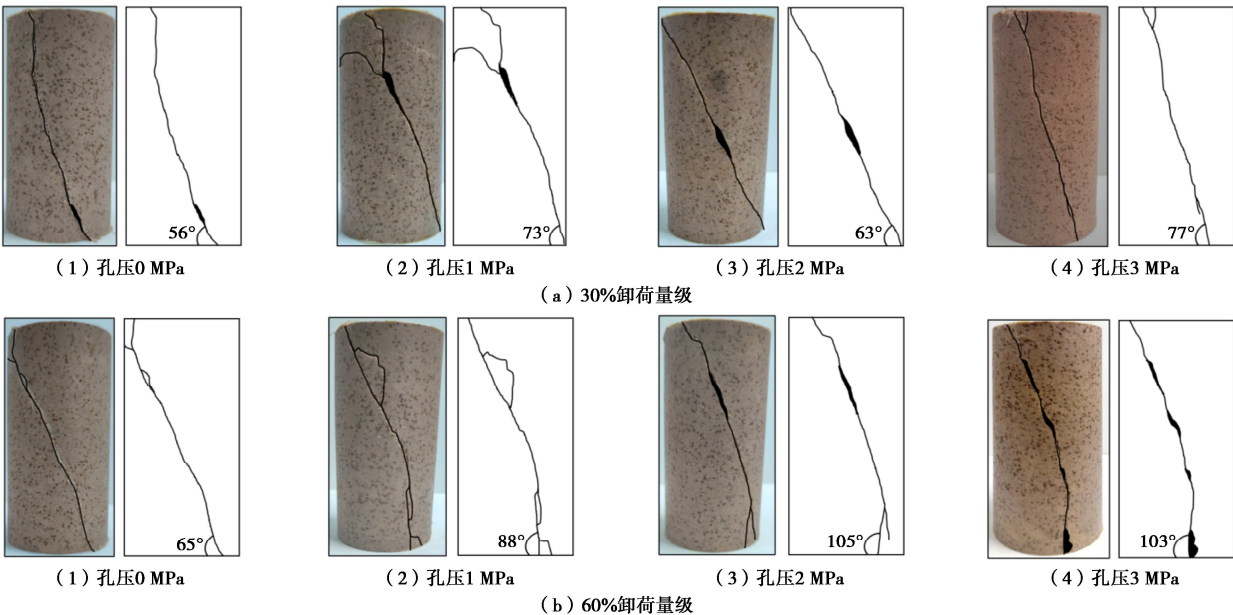


图 7 不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载试验宏观破裂形态

Fig. 7 Macro-fracture morphologies in triaxial cyclic loading and unloading tests on unloaded rock samples under different pore pressures

4 循环加卸载力学及变形特性分析

4.1 力学参数及变形特征分析

汇总了卸荷岩样三轴循环加卸载试验所得相关参数，见表 2。分析可知，相同孔压下，岩样的峰值强度和弹性模量随卸荷量级的增加均有不同程度的降低。无孔压环境下，两种卸荷岩样的力学参数差值最大；伴随孔压增加，参数差值逐渐减小，表明孔压作用弱化了卸荷损伤对岩石力学强度的影响，且卸荷岩样的承载能力受孔压幅值影响较大。当孔压较大或增加至一定幅值时，卸荷岩样的承载能力逐渐接近、受卸荷程度影响较小；需要说明的是，基于尝试性试验所选卸荷量级，是考虑了开挖扰动后卸荷岩体仍可作为结构性工程岩体来使用，而非其原有结构彻底丧失。

对比分析不同应变结果可知，卸荷岩样破坏时应变的变化规律基本相似，峰值应变与孔压幅值关系密切。随着孔压增加，30%卸荷量级的岩样，应变呈先增加后减小的变化趋势，60%卸荷量级的岩样，应变呈先减小后增加的趋势，变化规律均在 2 MPa 孔压处波动，且孔压大小对卸荷岩样变形累积的敏感性不同。

由此可见，涉及动态高渗压环境下开挖扰动区卸荷岩体工程设计时，综合考虑场区循环动载与动态高渗压峰值对分析卸荷岩体的长期变形特性具有重要意义。

4.2 宏观破裂特征分析

不同孔压下卸荷岩样三轴循环加卸载宏观破裂形态，如图 7 所示。分析发现，30%卸荷岩样端部裂纹倾角均在 90° 以内；孔压环境下，60%卸荷岩样的主裂缝端部倾角在 100° 左右；且孔压条件下岩样破裂程度明显比无孔压下更为显著，岩样破裂程度明显比无孔压条件下更为显著，说明孔压加剧了岩样竖向破裂及侧向膨胀变形。此外，相同孔压条件下，较小卸荷量级试样端部张性裂纹较小，宏观破坏主要为单一剪切面；随着卸荷量级的增大，通常并存有轴向张性裂面、次级共轭剪裂面等，表现为张剪破坏，在试样端部也集中有一定数量的轴向裂纹。综合分析发现，卸荷岩样端部裂隙倾角，存在伴随卸荷量级增加而显著增大的特征。由此可见，受开挖扰动强度较大的卸荷岩体，更容易在动态高渗压环境下产生贯通性裂隙扩展及次生裂纹发育，高渗压作用易于造成裂隙的法向扩容和切向滑移，是工程设计中卸荷岩体承载力评

价与变形控制分析所需考虑的主要因素。

5 结 论

(1) 循环加载促进了卸荷岩样力学强度衰减, 孔压作用削弱了卸荷量级对岩样变形参数的控制作用。

(2) 伴随孔压增加, 30%卸荷量级岩样应变呈先增后减趋势, 60%卸荷岩样应变变化规律与之相反; 且因卸荷量级差异造成岩样应变的差值总体呈现先增加后减小的变化特征, 在 2 MPa 孔压处产生波动。

(3) 受岩体结构与母岩成份的影响, 孔压对卸荷岩体变形破坏特性的影响存在一定阈值。低孔压条件下, 卸荷损伤对岩样力学性质起主导作用; 伴随孔压增加, 孔隙水压导致的劣化效应显著提高。

(4) 卸荷岩样三轴循环加卸载作用下的宏观破裂形态, 主要以贯穿性拉剪型裂隙为主; 伴随孔压与卸荷量级增加, 岩样破坏时端部裂隙倾角逐渐增大, 主控裂隙以近似竖向形态展现, 轴向破裂更加明显。

(5) 试验过程及结果表明, 开挖强度及其扰动范围改变了场区岩体的原生结构特征, 动态高渗压介入后加剧了开挖卸荷岩体的结构劣化及强度衰减, 卸荷裂隙同时遭受高渗压法向扩张与切向拉剪的力学作用, 累加上场区外载与动态渗压的循环往复作用, 势必引起工程卸荷岩体的变形加剧及承载力降低。

参考文献:

- [1] GUO H, JI M, ZHANG Y, et al. Study of mechanical property of rock under uniaxial cyclic loading and unloading[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018: 1-6.
- [2] 卢高明, 李元辉, 张希巍, 等. 周期荷载作用下黄砂岩疲劳破坏变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(10): 1886-1892. (LU Gaoming, LI Yuanhui, ZHANG Xiwei, et al. Fatigue deformation characteristics of yellow sandstone under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(10): 1886-1892. (in Chinese))
- [3] MENG Q, ZHANG M, HAN L, et al. Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(10): 1-14.
- [4] MUNOZ H, TAHERI A. Postpeak deformability parameters of localized and nonlocalized damage zones of rocks under cyclic loading[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2019, **42**(6): 1663-1684.
- [5] ZHANG C, WANG Y, RUAN H, et al. The strain characteristics and corresponding model of rock materials under uniaxial cyclic load/unload compression and their deformation and fatigue damage analysis[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021, **91**(6): 2481-2496.
- [6] MENG Q B, LIU J F, REN L, et al. Experimental study on rock strength and deformation characteristics under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, **54**(2): 777-797.
- [7] CHEN J, DU C, JIANG D, et al. The mechanical properties of rock salt under cyclic loading-unloading experiments[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2016, **10**(3): 325-334.
- [8] 蔡燕燕, 唐 欣, 林立华, 等. 疲劳荷载下大理岩累积损伤过程的应变速率响应[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(5): 827-836. (CAI Yanyan, TANG Xin, LIN Lihua, et al. Strain rate response of damage accumulation of marble under fatigue loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(5): 827-836. (in Chinese))
- [9] 赵 闯, 武 科, 李术才, 等. 循环荷载作用下岩石损伤变形与能量特征分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(5): 890-896. (ZHAO Chuang, WU Ke, LI Shucai, et al. Energy characteristics and damage deformation of rock subjected to cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(5): 890-896. (in Chinese))
- [10] WANG Y, FENG W K, HU R L, et al. Fracture evolution and energy characteristics during marble failure under triaxial fatigue cyclic and confining pressure unloading (FC-CPU) conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, **54**(2): 799-818.
- [11] 周志华, 曹 平, 叶洲元, 等. 单轴循环载荷与渗透水压下预应力裂隙岩石破坏试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, **31**(2): 292-298. (ZHOU Zhihua, CAO Ping, YE Zhouyuan, et al. Failure characteristics of prestress fractured rock under uniaxial cyclic loading and seepage water pressure[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2014, **31**(2): 292-298. (in Chinese))
- [12] 魏元龙, 杨春和, 郭印同, 等. 三轴循环荷载下页岩变形及破坏特征试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(12): 2262-2271. (WEI Yuanlong, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Experimental research on deformation and fracture characteristics of shale under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(12): 2262-2271. (in Chinese))
- [13] 王瑞红, 李建林, 蒋昱州, 等. 循环加卸载对岩体残余强度影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(10): 2103-2109. (WANG Ruihong, LI Jianlin, JIANG Yuzhou, et al. Experimental research on influence of cyclic loading and unloading on rock mass residual strength[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(10): 2103-2109. (in Chinese))