

DOI: 10.11779/CJGE20240053

循环加载与卸围压组合扰动下红砂岩损伤破裂与渗透特性

姚 玮¹, 俞 缙^{*2}, 周先齐¹, 常方强², 常 旭²

(1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024; 2. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘 要: 为探究深地工程开挖诱导岩体损伤破裂及渗透性演化规律, 开展了同步测定波速与渗透率的循环加载与卸围压组合扰动三轴试验, 研究了不同条件下红砂岩的损伤与渗透性演化规律。结果表明: ①岩石在不同组合扰动阶段具有不同的应力应变曲线形态, 其末端形态取决于在何种扰动阶段破坏, 初始应力比为决定组合扰动诱发岩石破坏难易的主要因素; ②总峰值轴向应变随初始应力比增大而增大, 其中组合扰动轴向应变占比始终较低, 总峰值体积应变绝对值随初始应力比增大而先增大后减小, 其中组合扰动体积应变占比比较高; ③在初始加载阶段, 波速增大, 渗透率降低, 在组合扰动阶段, 波速下降, 渗透率增加, 且损伤与体积应变近似呈线性关系, 损伤与渗透率随扰动次数增加均呈先慢后快的增长趋势, 且拐点分别近似在一条直线上; ④岩石在组合扰动卸围压阶段破坏为单剪切破坏模式, 在组合扰动循环加载阶段破坏为共轭剪切破坏模式; ⑤双高(高初始应力比与高初始围压)条件将显著加剧岩体开挖失稳破坏风险。

关键词: 深地工程; 组合扰动; 力学特性; 损伤; 渗透性

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)01-0048-09

作者简介: 姚 玮(1992—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事岩土力学与地下工程等方面的教学和科研工作。

E-mail: dongnanyantu@163.com。

Damage cracking and permeability characteristics of red sandstone under combined disturbance of cyclic loading and confining pressure unloading

YAO Wei¹, YU Jin², ZHOU Xianqi¹, CHANG Fangqiang², CHANG Xu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To explore the rules of rock mass damage and permeability evolution induced by excavation of deep earth engineering, the triaxial tests under combined disturbance of cyclic loading and confining pressure unloading for simultaneous measurement of wave velocity and permeability are conducted. The damage and permeability evolution rules of red sandstone under different conditions are studied. The results show that: (1) The rock exhibits different stress-strain curve shapes at different stages of combined disturbance, and their end shapes depend on at which stage of disturbance the rock is failed. The initial stress ratio is the main factor to determine the difficulty of rock failure induced by the combined disturbance. (2) The total peak axial strain increases with the increase of the initial stress ratio, and the proportion of axial strain of the combined disturbance is always low. The absolute value of the total peak volume strain increases first and then decreases with the increase of the initial stress ratio, and the proportion of disturbance volume strain the combined is high. (3) At the initial loading stage, the wave velocity increases, and the permeability decreases. In the combined disturbance stage, the wave velocity decreases and the permeability increases. The damage and volume strain are approximately linearly related, and both the damage and permeability show a slow and then fast growth trend with the increase of disturbance times, and the inflection point seems to be on a straight line. (4) The rock exhibits a single shear failure mode at the combined disturbance unloading confining pressure stage, and a conjugate shear failure mode at the combined disturbance cyclic loading stage. (5) The double-high condition (high initial stress ratio and high

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52374090); 厦门市自然科学基金项目 (3502Z202372047); 福建省中青年骨干教师教育科研项目 (JAT220339); 福建省科技计划引导性项目 (2022Y0029); 厦门理工学院高层次人才科研启动项目 (YKJ22045R)

收稿日期: 2024-01-16

***通信作者** (E-mail: bogyu0717@hqu.edu.cn)

initial confining pressure) will significantly increase the risk of excavation instability and failure of rock.

Key words: deep earth engineering; combined disturbance; mechanical property; damage; permeability

0 引言

不同于经典理论假定的常规加载路径,深部岩体经历了从三向等压的原岩高应力状态,到开挖诱导产生围压降低状态,直至最终破坏的复杂路径,且在此过程中同时存在由爆破与机械开挖等引起的循环加载作用。对该条件下岩体的损伤与渗透性演化过程认识不清,是导致煤矿瓦斯突出、深埋隧道突涌水、低功效油气抽采和注浆加固等工程问题频发的主因^[1-2]。

在单纯循环加载下岩石损伤与渗透性研究方面,陈兴周等^[3]发现孔隙水压促进了岩样循环加载过程的拉剪破坏。陈旭等^[4]根据声发射 RA 和 AF 值发现多级等幅循环加载产生的剪切裂纹多于常规三轴,且循环加载后基于应变的渗透率损失率减小。Wang 等^[5]通过分析盐岩的微观结构变化发现,仅当孔隙率超过阈值时,其对渗透率的影响才较为明显,并建立了盐岩的疲劳损伤演化方程。Ning 等^[6]提出岩石渗透性与损伤过程中的裂纹扩展密切相关。Wang 等^[7]发现高围压会抑制岩样循环加载损伤与峰后渗透率的发展。在单纯卸荷下岩石损伤与渗透性研究方面,张培森等^[8]根据岩石卸荷损伤演化与围压的关系提出,围压可提高岩石储能能力并抑制能量的耗散,且卸围压过程中渗透率呈波动上升趋势。李克钢等^[9]结合核磁共振技术与三轴卸荷渗流试验,发现其渗透率呈四级演变特征,且当卸荷比超过 60%后,岩石内部裂隙发育程度突增。Yang 等^[10]发现初始围压越大,初始渗透率越小,破坏后渗透率增幅也越小,且卸荷速率越小,裂纹体积扩展应变越大。Chen 等^[11]提出强卸荷作用会显著提高岩石的渗透率、脆性断裂特征、能量硬化性能和能量释放率。

上述研究主要关注单纯循环加载或卸荷下岩石的损伤破裂与渗透特性。事实上,与单纯循环加载或卸荷作用不同,深地工程中岩体往往同时承受着开挖强卸荷作用和循环加载作用,即循环加载与卸围压组合扰动。Xiao 等^[12]开展了预先循环加载后卸荷的真三轴试验,发现预先循环加载显著改变了岩石的损伤破裂特性,随着预循环加载次数的增加,岩石强度和弹性模量均为先增大后减小,且岩样均出现剪切和拉伸裂隙。侯志强等^[13]进行了先循环加载后卸围压的三轴试验,并配合 CT 扫描,发现预先循环加载对岩样起到了主因损伤作用,而卸围压是岩样破坏的主因。

综上,当前研究极大地推动了岩石在循环加载或卸围压下的损伤演化与渗透特性研究,但多数仅考虑单一扰动作用,或将其中一种扰动作为另一种的预先

作用,而未考虑二者共同作用效应。鉴此,开展了同步进行波速与渗透性测试的红砂岩循环加载与卸围压组合扰动试验,研究其在组合扰动下的变形与破坏规律、损伤演化与渗透特性。研究结论可为深地工程开挖的安全性评价提供参考。

1 试验概述

1.1 试样制备与试验设备

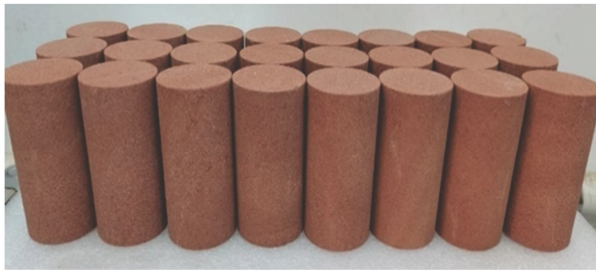
砂岩属于沉积岩,是地下工程中较为常见的岩石。本次研究中所采用的岩样是采自四川自贡同一区域的红砂岩,以保证岩样物理力学特征的均一性。岩样根据国际岩石力学学会(ISRM)试验规程的建议^[14],制成 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (直径 \times 高度)、端面平整度不超过 0.03 mm 、轴向偏差不得超过 0.25° 的标准圆柱体岩石试样,如图 1(a)所示,可见岩样质地均匀,无明显节理、裂隙等。岩样平均密度为 2.36 g/cm^3 ,平均孔隙率为 8%。试验前采用 DS5-16C 超声波检测仪测定岩样纵波波速,选择波速差异较小的岩样进行试验,从而进一步减少岩石离散性对试验结果的影响,并采用真空抽气装置使岩样饱和。

本次试验中所采用的设备为 TFD-2000/D 型岩石电液伺服三轴试验系统,该试验机可以通过手动气驱泵和控制软件相配合,对轴压、围压以及水压进行独立控制,可进行单调加载与复杂应力路径下的三轴试验,并同步测定渗透率和波速。三轴试验机、渗透率-波速联合测定压头、岩样封装以及超声波波速测试系统示意图如图 1(b)所示,波速测定由 DS5-16C 超声波/声发射测试系统与三轴试验机配合完成。

1.2 试验原理及方案

本次试验采用瞬态法测定渗透率,具体步骤如下:①先由真空饱和器对岩样进行抽真空饱和;②在施加围压之后,对岩样再抽真空约 1 h;③在岩样两端施加 1.5 MPa 水压,大约保持 1 h,使岩样饱和;④快速将下游水压降至 0.5 MPa ,待水压稳定后卸掉水压;⑤加载至下一个测点后,重复步骤③和④,由于岩样已饱和过,步骤③时长可缩短。

试验前,在压头和岩石接触面涂抹凡士林填充空隙以改善声波在岩样中的传播性能,并调整噪声信号使其低于门槛值。测定时,由 CH1 通道激发超声波,由 CH2 通道接收,根据时间差计算波速,之后由 CH2 通道激发超声波,由 CH1 通道接收,再次计算波速,最终取二者平均值。



(a) 红砂岩试样

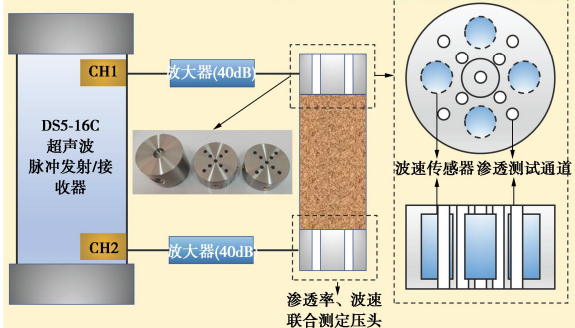
(b) TFD-2000/D 型岩石电液伺服三轴试验系统
图 1 岩样和试验设备

Fig. 1 Rock specimens and testing equipment

(1) 单调加载试验

以 0.5 MPa/s 速率加载至静水压力状态 (5, 10, 15, 20 MPa), 测定初始渗透率和波速, 之后保持围压恒定并以 0.375 MPa/s 速率加载偏应力, 每当偏应力增幅达到 10 MPa 时测定渗透率和波速, 直至岩样破坏, 并测定破坏岩样的渗透率与波速。

(2) 循环加载与卸围压组合扰动试验

组合扰动加载路径如图 2 所示, 步骤如下: ①加载至静水压力状态 (此时围压即为初始围压 σ_{31}) 并测定初始渗透率和初始波速; ②加载偏应力至初始应力水平 K_0P (K_0 为初始应力比, 取 0.4, 0.6 和 0.8, 即低、中、高初始应力比, 分别对应深地工程中低、中、高应力集中程度, P 为单调加载峰值应力), 每当偏应力增幅达到 10 MPa 时测定渗透率和波速; ③以 0.375 MPa/s 速率进行轴向循环加载, 应力上限为 K_0P , 应力下限均为 $0.15P$, 每级循环加载 10 周期; ④以 0.5 MPa/s 速率卸围压, 每一级卸荷量为 $0.2\sigma_{31}$; ⑤重复步骤③和④直至岩样破坏或循环加载达到六级。不同扰动阶段开始、结束及岩样破坏后均测定渗透率及波速。

2 变形特性试验结果分析

2.1 应力应变关系

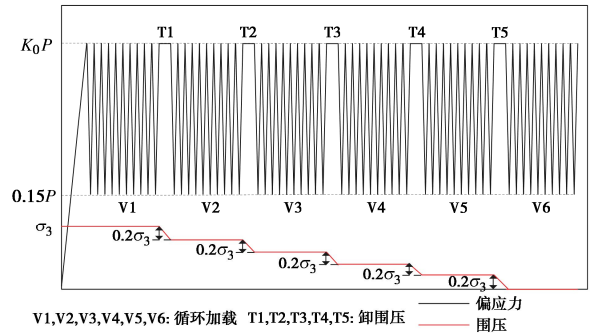


图 2 组合扰动应力控制方案

Fig. 2 Stress control scheme for combined disturbance

单调加载应力应变曲线如图 3 所示, 根据岩石在三轴应力状态下的渐近破坏特征, 通常分为如下几个阶段: ①初始压密阶段 (原点至 A): 岩石中的裂纹闭合, 应力应变曲线呈非线性; ②弹性变形阶段 (AB): 岩石几乎没有产生新裂纹, 应力应变曲线呈线性; ③裂纹稳定扩展阶段 (BC): 岩石内部所产生的裂纹为稳定裂纹, 若保持应力水平恒定, 则已有裂纹不扩展; ④裂纹非稳定扩展阶段 (CD): 岩石塑性变形发展迅速, 裂纹大量增加并扩展连通, 应力应变曲线呈非线性; ⑤峰后破坏阶段 (D 之后): 当达到峰值应力后, 裂纹贯通形成宏观破裂面, 岩样破坏。

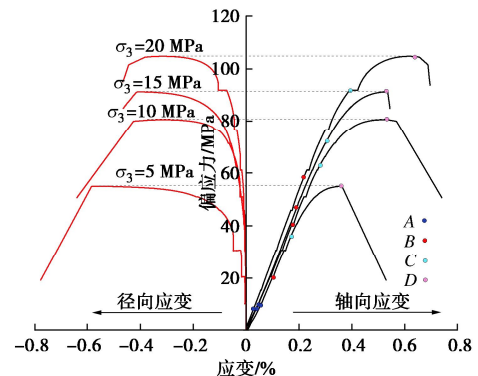
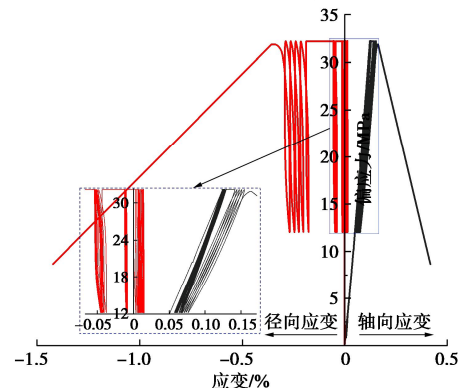


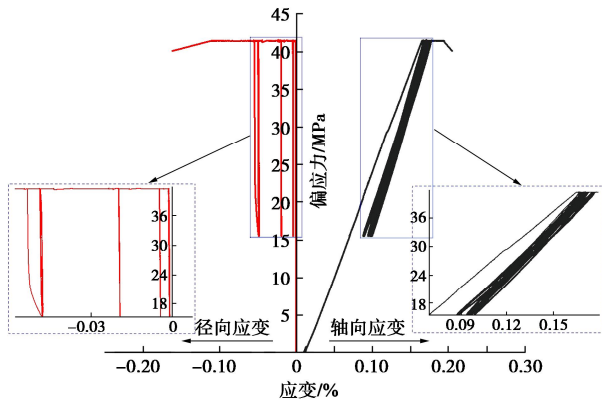
图 3 单调加载应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under monotonic loading

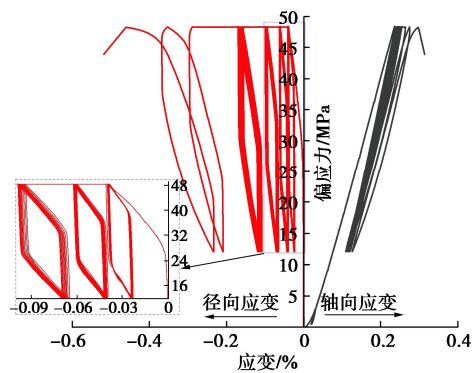
红砂岩在组合扰动下的典型应力应变曲线见图 4~6。由图 4~6 可知, 组合扰动变形具有显著阶段特征, 其末端形态取决于在何种扰动阶段破坏, 若在循环加载阶段破坏, 为显著不闭合的滞回曲线; 若在卸围压阶段破坏, 则为径向变形显著增加。



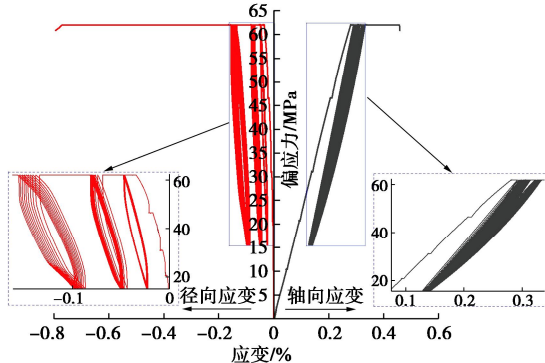
(a) 初始围压 10 MPa



(b) 初始围压20 MPa

图4 $K_0=0.4$ 时组合扰动应力应变曲线Fig. 4 Stress-strain curves under combined disturbance at $K_0=0.4$ 

(a) 初始围压10 MPa



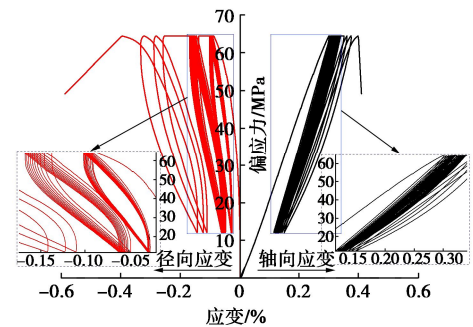
(b) 初始围压20 MPa

图5 $K_0=0.6$ 时组合扰动应力应变曲线Fig. 5 Stress-strain curves under combined disturbance at $K_0=0.6$

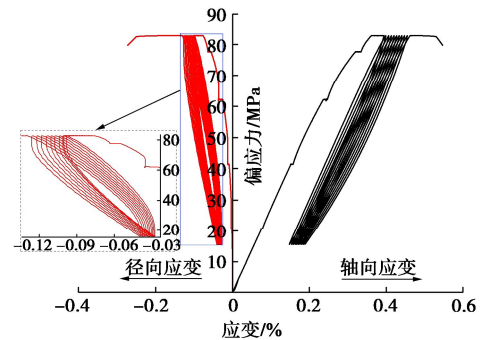
由图4可知,当 $K_0=0.4$ 时,岩样在组合扰动前尚处于弹性变形阶段,滞回曲线非常密集。初期不可逆应变很小,后期逐渐增加。整体上,径向应变增加较轴向应变更明显。

由图5可知,当 $K_0=0.6$ 时,初始加载已超过岩石起裂应力,裂纹在组合扰动前已发育至一定程度,故相比于 $K_0=0.4$ 时,组合扰动中不可逆应变有所增加,且滞回曲线密集程度有所下降。综上可知,在中低 K_0 下,均属于在裂纹非稳定扩展前对岩样施加组合扰动,二者存在一定共同点:首先,在组合扰动初期,不可逆应变增量很小,且轴向不可逆应变增量明显小于径向,同时,滞回曲线在扰动破坏阶段前无显著不闭合特征。

由图6可知,当 $K_0=0.8$ 时,在组合扰动前岩样内部裂纹发育程度已较高,在组合扰动中不可逆变形显著增长,滞回曲线稀疏,这与中低 K_0 的结果明显不同。由此可知,初始应力比,即岩石在组合扰动前的裂纹发育及变形程度,对组合扰动促使岩石变形发展的效率具有重要影响。此外,当 σ_{31} 增大后,岩石所能承受的组合扰动次数(每一级循环加载或卸围压记为1次扰动)减少,且不可逆变形发展更快,这是由于高初始围压下单次卸荷量更大,故每级卸围压引起的损伤也更大。



(a) 初始围压10 MPa



(b) 初始围压20 MPa

图6 $K_0=0.8$ 时组合扰动应力应变曲线Fig. 6 Stress-strain curves under combined disturbance at $K_0=0.8$

综上,在双低(低 K_0 与低 σ_{31})条件下,不可逆变形增长缓慢,滞回曲线密集,而在双高(高 K_0 与高 σ_{31})条件下,不可逆变形增长迅速,滞回曲线稀疏。同时,岩样在破坏时刻应力跌落迅速,发生脆性破坏,脆响声清晰。在深地工程中,往往围压较高,故在应力集中区可达到双高条件,该区域岩体在开挖过程中具有较高安全风险。

将组合扰动下偏应力跌落前时刻的应变称为总峰值应变,由初始加载应变和组合扰动应变两部分构成。初始加载与组合扰动轴向应变如图7所示,二者相加即为总峰值轴向应变。由图7及前文可知,岩样在围压5, 10, 15, 20 MPa下的单调加载峰值轴向应变分别为0.36%, 0.52%, 0.54%, 0.62%,均高于组合扰动下总峰值轴向应变,即组合扰动可缩短岩石变形破坏进程,而变形是地下工程开挖中常用的监测对象与稳定性判别指标,故简单套用常规理论进行开挖

稳定性分析可能存在安全隐患。此外, K_0 越高, 初始加载与总峰值轴向应变越大, 而组合扰动轴向应变占比始终较低。

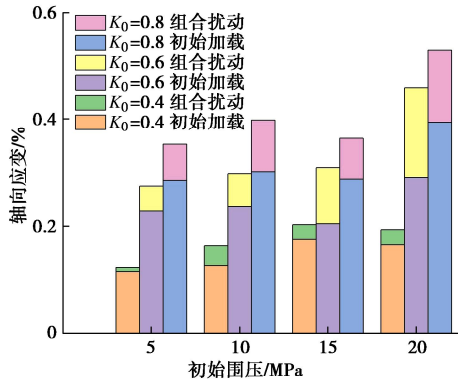


图7 初始加载与组合扰动轴向应变

Fig. 7 Relationship between initial loading and axial strain of combined disturbance

红砂岩在组合扰动下的总峰值体积应变由初始加载体积应变和组合扰动体积应变构成, 见图 8。可以看出, 相较于组合扰动轴向应变, 组合扰动体积应变在总应变中的占比显著增高, 同时, 随着 K_0 增加, 组合扰动体积应变绝对值均为先增大后减小, 且该现象在高初始围压下更明显。

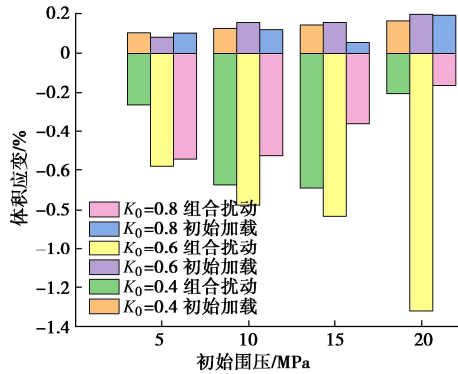


图8 初始加载与组合扰动体积应变

Fig. 8 Relationship between initial loading and volume strain of combined disturbance

将图 8 中初始加载体积应变与组合扰动体积应变相加得到总峰值体积应变, 如图 9 所示。可以发现, 总峰值体积应变变化规律与组合扰动体积应变一致, 结合图 8 可知, 组合扰动决定岩样体积应变变化趋势, 为诱导岩样扩容的主导因素。

2.2 红砂岩扩容特性与围压卸载敏感性

将组合扰动中当前围压与初始围压的比值定义为相对围压比, 每级卸围压后, 体积应变与相对围压比的关系如图 10 所示, 图中 5-0.4 表示 $\sigma_{31}=5$ MPa 且 $K_0=0.4$, 其余同理。

由图 10 可知, 即使在低 K_0 下, 当组合扰动开始后, 岩样迅速开始扩容, 相比于单调加载, 组合扰动可使红砂岩扩容提前。随着相对围压比减小, 岩样扩

容呈先慢后快的趋势, 在双低条件下, 扩容缓慢, 在双高条件下, 扩容迅速。此外, 若 K_0 很低, 即使 σ_{31} 很大, 岩样仍需经历多次组合扰动才会破坏; 若 K_0 很高, 即使 σ_{31} 较小, 岩样仍迅速破坏。且岩石扩容的本质是其内部裂纹发育、扩展, 故 K_0 是决定组合扰动破坏难易程度的主要因素, σ_{31} 为次要因素。

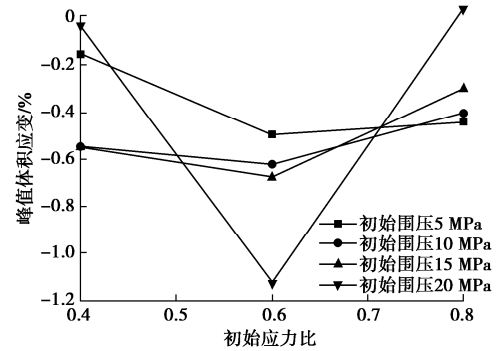


图9 组合扰动下总峰值体积应变

Fig. 9 Total peak volumetric strains under combined disturbance

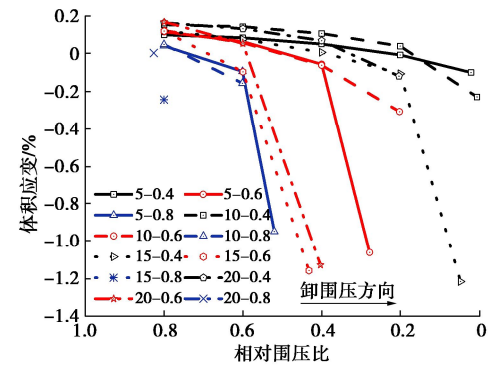


图10 组合扰动下体积应变与相对围压比关系

Fig. 10 Relationship between volumetric strain and relative confining pressure ratio under combined disturbance

采用应变围压增量比 λ_i [15] 描述红砂岩组合扰动应变对围压卸载的敏感程度:

$$\lambda_i = \frac{\Delta \epsilon_i}{\Delta \sigma_3} \quad (1)$$

式中: $\Delta \epsilon_i$ 为组合扰动应变; $\Delta \sigma_3$ 为组合扰动中围压卸载量。

轴向、体积应变围压增量比与初始应力比的关系如图 11 所示。除双高条件下的体积应变围压增量比外, 其余条件下应变对围压卸载的敏感性均与 K_0 呈正相关关系。在双高条件下, 裂纹在组合扰动前已进入非稳定扩展阶段, 在组合扰动中新生裂纹的发育受到抑制, 主要为裂纹间岩桥断裂、既有裂纹贯通等, 而新生裂纹是岩石扩容的主要因素 [16], 故其 λ_i 比 $K_0=0.6$ 时降低, 这与图 8 中高 K_0 下, 组合扰动体积应变减小类似。同时, 体积应变围压增量比普遍高于轴向应变围压增量比, 即体积应变对围压卸载的敏感程度高于轴向应变, 故在深地工程开挖过程中, 需格外关注径向变形的变化。

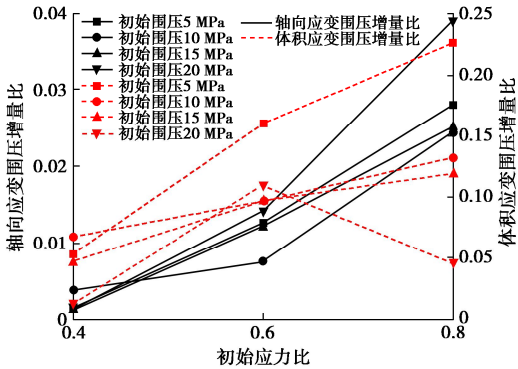
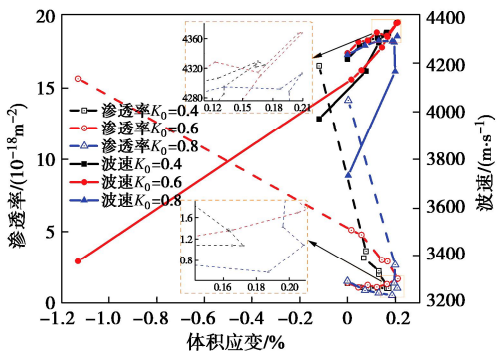


图 11 不同初始条件下应变围压增量比

Fig. 11 Increment ratios of strain confining pressure under different initial conditions



(d) 初始围压 20 MPa

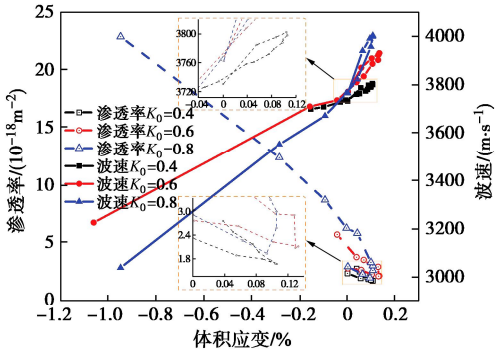
图 12 组合扰动下波速和渗透率与体积应变关系

Fig. 12 Relationship among wave velocity, permeability and volumetric strain under combined disturbance

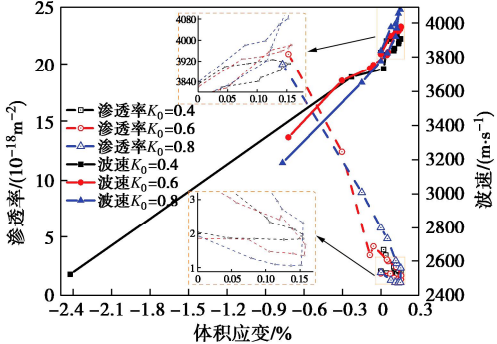
3 损伤破裂与渗透性试验结果分析

3.1 波速与渗透性变化规律及损伤演化特性

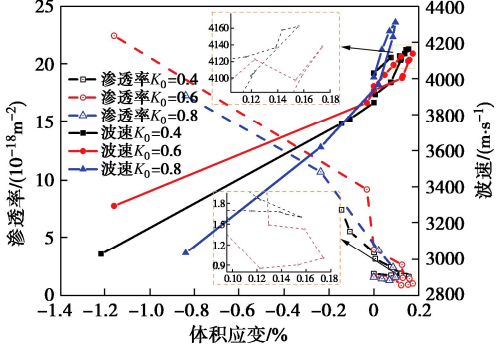
岩样波速及渗透率与体积应变的关系如图 12 所示。部分试验在组合扰动后期围压已小于 2 MPa, 不便再进行渗透率测试, 故仅展示此前所测渗透率。



(a) 初始围压 5 MPa



(b) 初始围压 10 MPa



(c) 初始围压 15 MPa

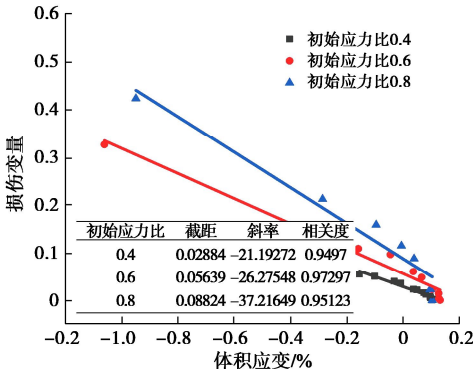
由图 12 可知, 波速与渗透率曲线波动较大, 这是由于循环加载与卸围压诱导裂纹发育的机制与效率不同。在初始加载阶段, 岩样压密, 波速增大、渗透率减小, 并分别在体积应变拐点处达到最大、最小值; 在组合扰动阶段, 裂纹迅速发育, 体积应变增大, 波速下降、渗透率增大, 且散点分布为先密集后稀疏, 表明组合扰动诱导裂纹发育先慢后快。此外, 在中低 K_0 下, 在组合扰动前裂纹尚处于稳定发展阶段, 故之后波速下降与渗透率增加的趋势较为平缓; 在高 K_0 下, 由于已进入裂纹非稳定扩展阶段, 故波速下降与渗透率增加均显著加快。

岩样损伤的表达式为^[17]

$$D = 1 - (v/v_0)^2 \quad (2)$$

式中: v 为损伤岩样的波速; v_0 为初始加载结束后岩样的波速。组合扰动开始后, 损伤与体积应变的关系如图 13 所示。

由图 13 可知, 红砂岩组合扰动损伤与体积应变近似呈线性关系, 且高 K_0 下线性拟合斜率绝对值最大, 即该条件下岩样损伤演化最迅速。并且, 在高 K_0 下, 随着 σ_{31} 增大, 拟合斜率绝对值增幅分别为 0.64, 10.20, 61.35, 可见 σ_{31} 的增加可显著促进组合扰动损伤演化, 也说明双高条件会极大影响深地工程开挖的安全性。



(a) 初始围压 5 MPa

初始应力比	截距	斜率	相关度
0.4	0.02884	-21.19272	0.9497
0.6	0.05639	-26.27548	0.97297
0.8	0.08824	-37.21649	0.95123

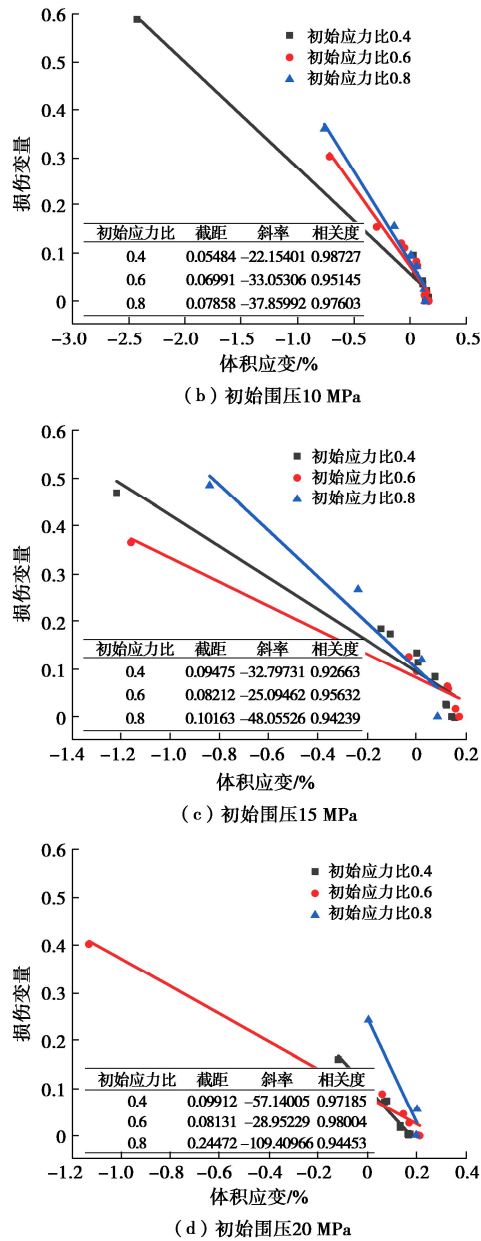


图 13 组合扰动下损伤与体积应变关系

Fig. 13 Relationship between damage and volumetric strain under combined disturbance

损伤与组合扰动次数的关系见图 14。由图 14 可以看出，随着组合扰动进行，损伤演化趋势均为先慢后快。在中低 K_0 下，岩样需经历多次组合扰动才会破坏，甚至当 σ_{31} 很低时，岩样未破坏，且不同扰动阶段损伤演化速率差异明显。随着 K_0 提高，岩样破坏所需组合扰动次数减少，当达到双高条件时，损伤增速显著增大，此时不同扰动阶段损伤演化速率的差异性不明显。并且，损伤演化由慢变快的拐点均近似在同一直线上，将其分为损伤发育和损伤加速阶段。

渗透率与组合扰动次数的关系如图 15 所示。由图 15 可以看出，在中低 K_0 下，渗透率在多次扰动后才明显增大。值得注意的是，当 $K_0=0.4$ 时，所有条件下渗透率增长拐点分布均接近；当 $K_0=0.6$ 时， $\sigma_{31} \geq 15$

MPa 时的渗透率增长拐点比 $\sigma_{31} \leq 10$ MPa 时明显提前；当 $K_0=0.8$ 时，渗透率增长拐点均显著提前，且在双高条件下，渗透率在极少次扰动后便显著增长。类似于损伤与组合扰动次数的关系，渗透率增长拐点均近似在同一直线附近，将其分为渗透率稳定增长和加速增长阶段。

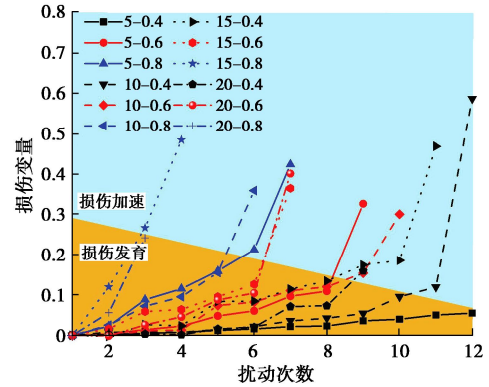


图 14 组合扰动下损伤与扰动次数关系

Fig. 14 Relationship between damage and disturbance number under combined disturbance

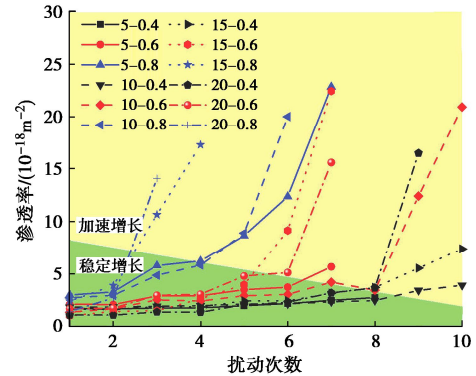


图 15 组合扰动下渗透率与扰动次数关系

Fig. 15 Relationship between permeability and disturbance number under combined disturbance

3.2 破坏模式

岩样的破坏模式如图 16, 17 所示，其中， $\sigma_{31}=5$ MPa 且 $K_0=0.4$ 时岩样最终未破坏， $\sigma_{31}=10$ MPa（全部）及 $\sigma_{31}=15$ MPa 且 $K_0=0.8$ 时岩样在循环加载阶段破坏，其余岩样均在卸围压阶段破坏。可以看出，破坏模式可分为主剪切破裂面并伴有大量裂隙的单剪切破坏模式及具有两个主剪切破裂面的共轭剪切破坏模式。

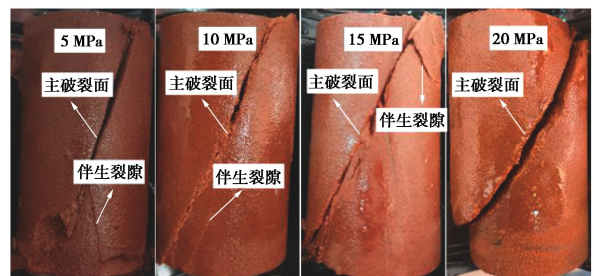


图 16 单调加载下岩样破坏模式

Fig. 16 Failure modes of rock specimens under monotonic loading

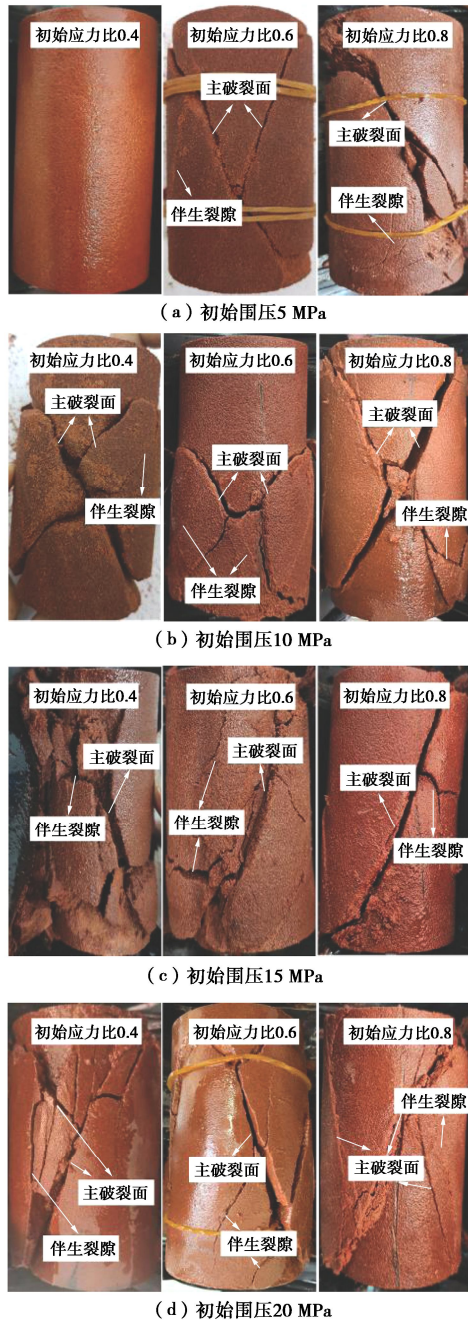


图 17 组合扰动下岩样破坏模式

Fig. 17 Failure modes of rock specimens under combined disturbance

由图 16, 17 可知, 单调加载与组合扰动卸围压阶段破坏的岩样均为单剪切破坏模式, 破坏局限在单一条带附近且非均匀, 但显然组合扰动使岩样产生的伴生裂隙更多、破碎程度更严重; 在组合扰动循环加载阶段破坏为共轭剪切破坏模式, 破坏集中在两个交叉的条带上, 破碎程度较低且较均匀。其中较为特殊的是, $\sigma_{31}=15\text{ MPa}$ 且 $K_0=0.8$ 时岩样虽在循环加载阶段破坏, 却为单剪切破坏模式, 这是由于最终阶段仅一个循环周期, 未能改变上一级卸围压对破坏模式的影响。此外, 中低 K_0 下岩样经历多次组合扰动才破坏, 新生裂纹较多, 故此时单剪切破坏模式的破碎程度更严重,

而高 K_0 下, 岩样在较少组合扰动后便破坏, 且多为原有裂纹的扩展、连通, 故破碎程度相对较低。

4 结 论

(1) 组合扰动应力应变曲线末端形态取决于最终扰动阶段, 其总峰值轴向应变小于单调加载峰值应变; 随着初始应力比增加, 总峰值轴向应变逐渐增大, 而组合扰动轴向应变占比始终较低; 组合扰动为诱导岩样扩容主导因素; 体积应变对围压卸载更敏感, 且多数情况下, 轴向和体积应变对围压卸载的敏感程度与初始应力比呈正相关关系; 初始应力比为决定组合扰动破坏难易程度的主要因素, 初始围压为次要因素。

(2) 在初始加载阶段波速小幅增加、渗透率小幅下降, 在组合扰动阶段, 波速下降、渗透率上升, 双高条件下波速衰减与渗透率增加最迅速; 组合扰动阶段损伤与体积应变近似呈线性关系, 且在高初始应力比下, 损伤与体积应变线性拟合斜率的绝对值随初始围压增大而增大; 损伤与渗透率随组合扰动次数的增加呈先慢后快的增长趋势, 且各自拐点分别近似在一条直线上, 可分别分为损伤发育与损伤加速演化阶段, 以及渗透率稳定增长与加速增长阶段。

(3) 红砂岩在组合扰动卸围压阶段破坏为单剪切破坏模式, 破坏局限在单一条带附近, 在组合扰动循环加载阶段破坏为共轭剪切破坏模式, 破坏集中在两交叉共轭条带附近; 中低初始应力比下单剪切破坏模式的破碎程度更严重。

(4) 在双高条件下, 红砂岩在组合扰动下的变形发展更迅速、损伤与渗透性变化更剧烈, 即在深地工程中, 应力集中区和高围压区的交叉区域存在更高的安全风险。

参考文献:

- [1] 谢和平, 张 茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959-3978. (XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959-3978. (in Chinese))
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813. (HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813. (in Chinese))
- [3] 陈兴周, 白亚妮, 陈莉丽, 等. 高渗透与循环加卸载环境下

- 开挖卸荷岩体力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(4): 737-745. (CHEN Xingzhou, BAI Yani, CHEN Lili, et al. Experimental study on mechanical properties of excavated unloading rock mass under high osmotic pressure and cyclic loading and unloading environments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(4): 737-745. (in Chinese))
- [4] 陈旭, 肖义, 汤明高, 等. 多级等幅循环荷载作用下砂岩变形、渗透及声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, **43**(8): 1923-1935. (CHEN Xu, XIAO Yi, TANG Minggao, et al. Experimental study on deformation, permeability and AE characteristics of sandstone under multi-stage cyclic loading with a constant amplitude[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, **43**(8): 1923-1935. (in Chinese))
- [5] WANG J B, ZHANG Q, SONG Z P, et al. Microstructural variations and damage evolvement of salt rock under cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, **152**: 105078.
- [6] NING Z X, XUE Y G, LI Z Q, et al. Damage characteristics of granite under hydraulic and cyclic loading-unloading coupling condition[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, **55**(3): 1393-1410.
- [7] WANG W, DUAN X L, JIA Y, et al. Deformation characteristics, gas permeability and energy evolution of low-permeability sandstone under cyclic loading and unloading path[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, **81**(9): 369.
- [8] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 应力-渗流耦合作用下不同卸荷路径对砂岩损伤特性及能量演化规律的影响研究[J]. 岩土力学, 2024, **45**(2): 325-339. (ZHANG Peisen, XU Daqiang, YAN Wei, et al. Influence of unloading paths on sandstone damage characteristics and energy evolution law under stress-seepage coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(2): 325-339. (in Chinese))
- [9] 李克钢, 杨宝威, 秦庆词. 基于核磁共振技术的白云岩卸荷损伤与渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3493-3502. (LI Kegang, YANG Baowei, QIN Qingci. Experimental study on unloading damage and permeability of dolomite based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3493-3502. (in Chinese))
- [10] YANG Y R, LI W P, WANG Q Q, et al. Experimental study on mechanical behavior and permeability evolution of weakly cemented sandstone under unloading conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, **83**(4): 115.
- [11] CHEN Z Q, MA C C, LI T B, et al. Experimental investigation of the failure mechanism of deep granite under high seepage water pressure and strong unloading effect[J]. Acta Geotechnica, 2022, **17**(11): 5009-5030.
- [12] XIAO F, JIANG D Y, WU F, et al. Effects of prior cyclic loading damage on failure characteristics of sandstone under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, **132**: 104379.
- [13] 侯志强, 王宇, 刘冬桥, 等. 三轴疲劳-卸围压条件下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(5): 1510-1520. (HOU Zhiqiang, WANG Yu, LIU Dongqiao, et al. Experimental study of mechanical properties of marble under triaxial unloading confining pressure after fatigue loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(5): 1510-1520. (in Chinese))
- [14] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(3): 281-289.
- [15] 刘新荣, 刘俊, 李栋梁, 等. 不同初始卸荷水平对深埋砂岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(11): 3081-3088. (LIU Xinrong, LIU Jun, LI Dongliang, et al. Experimental research on the effect of different initial unloading levels on mechanical properties of deep-buried sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(11): 3081-3088. (in Chinese))
- [16] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1686-1697. (QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and unloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(8): 1686-1697. (in Chinese))
- [17] KAWAMOTO T, ICHIKAWA Y, KYOYA T. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, **12**(1): 1-30.