



变上限循环加卸载裂隙砂岩宏细观损伤特征研究

刘广建 周浩 牟宗龙 王康宇 裘伟奇 陈曦 王志成

引用本文:

刘广建, 周浩, 牟宗龙, 等. 变上限循环加卸载裂隙砂岩宏细观损伤特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 77–89.

LIU Guangjian, ZHOU Hao, MU Zonglong. Study on macro-and mesoscopic damage characteristics of fractured sandstone under cyclic loading and unloading with variable upper limit[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 77–89.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0160>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分级循环加卸载煤体变形破坏特征试验研究

Experimental research on deformation and failure characteristics of coal by staged cyclic loading and unloading

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 199–205 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.024>

预制裂隙砂岩相似材料损伤破坏特性试验研究

Experimental study on damage and failure characteristics of similar materials with prefabricated fracture sandstone

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 171–178 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ce05b7ed-a447-4680-96ba-09aee4e5b895>

煤张开型裂隙三维宏细观演化特征及扰动因素探究

Study on three-dimensional mesoscopic evolution characteristics and disturbance factors of coal open fractures

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 71–83 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1635>

冻融循环作用下饱水砂岩强度衰减及细观结构特征

Experimental study on strength degradation and meso-structural characteristics of saturated sandstone under freeze-thaw cycles

煤炭科学技术. 2024, 52(12): 84–93 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1487>

含孔软煤试样破坏过程的细观裂纹损伤演化机制

The mechanism of meso-crack damage evolution in the failure process of porous soft coal specimens

煤炭科学技术. 2021, 49(12): 96–103 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e9813005-db04-48d9-bce2-cf2dbc9f38ff>

不同围压下峰后循环载荷对砂岩力学及渗流特性的影响研究

Effect of post-peak cyclic load on mechanics and seepage characteristics of sandstone under different confining pressures

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 94–105 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0384>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



刘广建,周浩,牟宗龙,等.变上限循环加卸载裂隙砂岩宏观损伤特征研究[J].煤炭科学技术,2025,53(5):77-89.
LIU Guangjian, ZHOU Hao, MU Zonglong, et al. Study on macro-and mesoscopic damage characteristics of fractured sandstone under cyclic loading and unloading with variable upper limit[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 77-89.

移动扫码阅读

变上限循环加卸载裂隙砂岩宏观损伤特征研究

刘广建^{1,2},周浩²,牟宗龙³,王康宇²,裘伟奇²,陈曦²,王志成²

(1. 宁波大学岩石力学研究所,浙江宁波,315000; 2. 绍兴文理学院浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室,浙江绍兴,312000;
3. 中国矿业大学江苏省矿山地震监测工程实验室,江苏徐州 221100)

摘要:为研究裂隙岩体在循环荷载作用下的宏观损伤特征,以不同长度预制裂隙砂岩为研究对象,开展变上限循环加卸载试验,分析岩样的力学特性和宏观破坏特征;基于XRD分析结果构建裂隙砂岩 UDEC 数值模型,分析模型的细观损伤规律并揭示其机制。结果表明:加卸载作用能够强化裂隙较小岩样的抗变形能力,相反会增加裂隙较大岩样的破坏速度;随预制裂隙长度增大,岩样宏观破坏特征由拉剪复合破坏转化为以剪切破坏为主,且损伤的不可逆性逐渐提高;加卸载作用下岩样的损伤演化过程可划分为“弹性-强化-疲劳-破坏”4个阶段,弹性阶段模型未产生损伤,强化阶段模型形成有效抗力结构,疲劳阶段累积损伤大幅提高,卸载时张拉裂纹扩展;疲劳阶段加载过程裂纹相互扩展连结,相邻剪切微裂纹之间块体的接触点被破坏,块体间的连结失效,卸载过程应力下降模型松弛,块体间失效的连结在此时张开进而导致张拉裂纹在剪切微裂纹间萌生,加快模型的失稳破坏。研究结果揭示了变上限循环加卸载下裂隙砂岩的宏观损伤特征,为科学评价工程稳定性提供参考。

关键词:裂隙砂岩;变上限循环加卸载;宏观破坏特征;细观损伤规律;疲劳阶段

中图分类号: TD313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)05-0077-13

Study on macro-and mesoscopic damage characteristics of fractured sandstone under cyclic loading and unloading with variable upper limit

LIU Guangjian^{1,2}, ZHOU Hao², MU Zonglong³, WANG Kangyu², QIU Weiqi², CHEN Xi², WANG Zhicheng²

(1. Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315000, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 3. Jiangsu Mining Seismic Monitoring Engineering Laboratory, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221100, China)

Abstract: In order to study the macro and micro damage characteristics of fractured rock mass under cyclic load, cyclic loading and unloading tests with variable upper limit were carried out to analyze the mechanical properties and macro failure characteristics of the samples. Based on the results of XRD analysis, a UDEC numerical model of fractured sandstone is constructed to analyze the microscopic damage law of the model and reveal its mechanism. The results show that: loading and unloading can strengthen the deformation resistance of the samples with small cracks, and on the contrary increase the failure velocity of the samples with large cracks; With the increase of the prefabricated fracture length, the macroscopic failure characteristics of the sample changed from tensile shear failure to shear failure, and the irreversibility of the damage gradually increased. The damage evolution process of the sample under loading and unloading can be divided into four stages: “elasticity-strengthening-fatigue-failure”. No damage occurs in the elastic stage model, while an effective resistance structure is formed in the strengthening stage model. Cumulative damage increases significantly in the fatigue stage, and tensile cracks expand during unloading. During the loading stage, cracks expand and connect with each other, the contact point pole of the block between adjacent shear microcracks is destroyed, and the connection between the blocks fails. During the unloading process, the stress

收稿日期: 2024-01-28 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2024-0160

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42107177, 42277147); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ20E040002)

作者简介: 刘广建(1990—),男,河南信阳人,副研究员,博士生导师,博士。E-mail: liuguangjian@163.com

通讯作者: 周浩(1999—),男,福建南平人,助理工程师,硕士。E-mail: 331502871@qq.com

drop model is relaxed, and the failed connection between the blocks opens up at this time, leading to the initiation of tension cracks between the shear microcracks, and accelerating the instability and failure of the model. The research results reveal the macro and micro damage characteristics of fractured sandstone under variable upper limit cyclic loading and unloading, and provide a reference for scientific evaluation of engineering stability.

Key words: fractured sandstone; variable upper limit cyclic loading and unloading; macro failure characteristics; micro-damage pattern; fatigue stages

0 引言

含裂隙岩体损伤破坏机制一直是岩石力学领域重要的研究内容。工程中岩体往往会受到大量微地震或震群的影响,以某水电工程为例,自蓄水以来库区发生了大量微弱地震^[1],从荷载性质来看,地震产生的荷载既是动荷载也是循环荷载,且在循环过程荷载上限发生变动,这种荷载作用下岩体的力学特性及损伤破坏特征与静态荷载作用下有显著不同。经历长期的地壳运动和沉积作用的岩体内部会产生大量节理和裂隙等缺陷,这些缺陷周围时常会出现应力释放和集中的现象,严重影响着工程岩体的稳定性。因此,有必要对循环加卸载下含裂隙岩体的力学特性及宏观响应过程作细致地分析和深入地研究。

目前针对含裂隙岩体的力学特性,国内外有较多学者开展了大量研究。张伟等^[2]对不同裂隙倾角的水泥砂浆试样进行单轴压缩试验,发现裂隙倾角为 45° 时试样抗压强度最低,倾角 0° 和 90° 时最大;LEE等^[3]研究了单轴压缩作用下预制裂隙试样裂纹的扩展、聚合等行为;张波等^[4]对交叉裂隙试样进行单轴压缩试验,研究了交叉裂隙对岩体破坏模式及力学特性的影响;田文玲等^[5]对含预制共面双裂隙脆性砂岩进行单轴压缩试验,结果表明双裂隙试样破坏模式主要为劈裂破坏和剪切破坏两种;邓正定^[6]等研究了交叉裂隙对岩石峰值强度和破坏机制的影响,并分析了裂隙贯通率对岩石损伤的影响规律;PRUDENCIO等^[7]对断续节理岩体开展了双轴压缩试验,研究了节理各项参数的变化对岩体宏观力学特性的影响。以上研究主要得到了静态荷载下裂隙岩体宏观失稳特征和细观损伤规律,但忽略了循环荷载对裂隙岩体宏观细观损伤的影响。

针对岩体在循环加卸载作用下的损伤破坏特征,刘汉香等^[8]对千枚岩开展三轴多级循环加卸载试验,研究了其力学特性及能量耗散特征;张志镇和高峰^[9-10]开展了红砂岩循环加卸载试验,分析了在单轴和三轴情况下卸载岩样弹性能、耗散能的演化过程,探讨了工程中岩体的能量演化路径;LIU^[11]等对不同节理倾角的节理岩样开展三轴循环加卸载试验并

分析了其力学行为;徐颖等^[12]研究了循环加卸载下泥岩的能量演化与损伤特性;LUO等^[13]对脆性灰岩开展不同上限的等载循环加卸载试验,研究循环作用下脆性灰岩变形特性;LIU等^[14]通过对节理岩样开展循环加卸载疲劳试验,发现节理岩石试样在循环压缩下的破坏更加突然,没有明显的先兆。李子运等^[15]揭示了页岩在三轴循环荷载作用下的能量转化特征,建立了基于能量突变的岩石强度失效判据。以上学者主要研究了反复荷载下试样的力学行为及能量损耗特征,缺乏循环荷载上限增加导致裂隙岩体内部细观损伤的研究。

在岩土工程领域中,隧道开挖、地震波作用等,含裂隙工程岩体均经历着变化上限加卸载的过程。因此为研究含裂隙岩体在变上限循环荷载扰动下的损伤破坏特征,基于应变仪、声发射等监测技术,开展裂隙砂岩变上限循环加卸载压缩试验,分析变上限加卸载作用对裂隙砂岩力学参数、能量释放特征以及宏观破坏模式的影响。基于砂岩XRD的分析结果,构建含裂隙砂岩的UDECVoronoi模型,利用Fish语言编制程序构建模型损伤判别指标,施加变上限循环荷载,探究裂隙砂岩的细观损伤演化规律并揭示其机理。

1 室内变上限循环加卸载试验

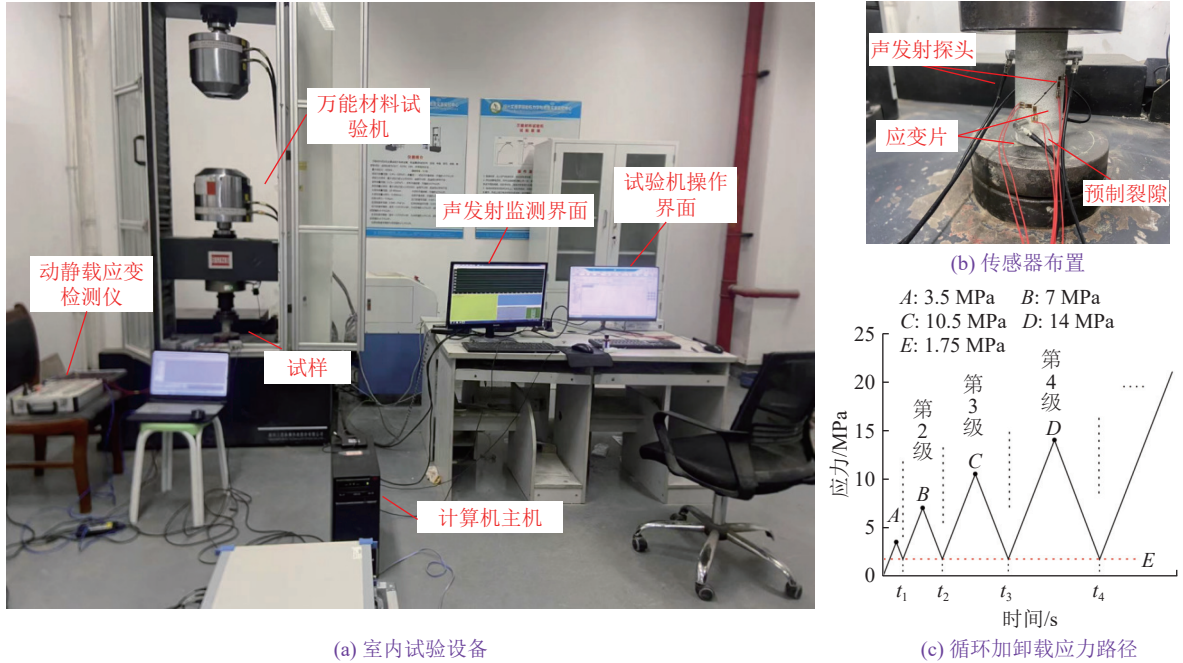
1.1 试验方案

试验采用的砂岩取自四川自贡小井沟水库附近,周围有丰富水源,砂岩岩层平均厚度为40 m左右,岩样取自同一岩层,且垂直于节理方向。将砂岩取心并加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体标准岩样,岩样中部的预制贯通裂隙均采用玉石拉花锯夹持0.8 mm金刚石砂线一次性切割完成,预制裂隙倾角为 45° 。岩样的预制裂隙长度 L 分为30、35、40及45 mm四组。通过单轴压缩试验得到标准砂岩岩样的单轴抗压强度 σ_c 约为35 MPa。

试验采用浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室的UMT万能材料试验机作为加载设备,同步应用KBG动静态应变检测仪和美国声学物理公司(PAC)的Express-96岩石多通道声发射测试装置,设

定门槛值为 40 dB, 采样频率为 3 MHz, 声发射传感器类型为 Nano30。由于含裂隙岩石损伤一般首先在裂隙上下尖端萌生并逐渐贯通^[16-18], 因此选择将应变片分别贴在裂隙上下两尖端。试验加载采用变上

限加卸载方式, 加卸载速度均设为 0.25 MPa/s, 首先加载至 3.5 MPa(10% σ_c), 然后卸载至 1.75 MPa(5% σ_c), 此后每级上限应力提高 10% σ_c , 直至岩样破坏, 室内试验各设备和应力路径如图 1 所示。



(a) 室内试验设备

(c) 循环加卸载应力路径

图 1 室内试验设备

Fig.1 Laboratory test equipments

1.2 试验结果及分析

1.2.1 力学特性分析

不同裂隙 L 的岩样应力-应变曲线如图 2 所示, 由图可知, L 由 30 mm 增加到 45 mm 时, 峰值强度分别为 18.69、15.51、9.62、7.81 MPa, 峰值强度随 L 增大逐渐下降, 这与文献 [19] 的研究结果相似。加载曲线与卸载曲线间形成滞回环, 随着循环等级的增大, 滞回环面积逐渐增大且整体向应变大的方向迁移, 说明循环等级增大以及岩样预制裂隙的增大都会增加试验过程中岩样的能量损耗。

为了分析岩样变形随加卸载等级递进的变化规律, 对应力应变曲线进行处理。对于轴向应力-轴向应变曲线, 以加载段和卸载段的割线斜率分别作为岩样的加载变形模量和卸载变形模量; 对于横向应变-纵向应变曲线, 以加载段和卸载段的割线斜率分别作为岩样的加载侧膨胀系数和卸载侧膨胀系数。考虑到岩样在加载和卸载过程均有可能发生塑性变形, 且随上限等级的增加损伤会不断累积, 通过式(1)和式(2)分别计算加载和卸载过程的变形模量和侧膨胀系数。

$$E_{i+} = \left| \frac{\Delta\sigma_{i+}}{\Delta\varepsilon_{ai+}} \right|, \quad E_{i-} = \left| \frac{\Delta\sigma_{i-}}{\Delta\varepsilon_{ai-}} \right| \quad (1)$$

$$\mu_{i+} = \left| \frac{\Delta\varepsilon_{si+}}{\Delta\varepsilon_{ai+}} \right|, \quad \mu_{i-} = \left| \frac{\Delta\varepsilon_{si-}}{\Delta\varepsilon_{ai-}} \right| \quad (2)$$

式中: E_{i+} 和 E_{i-} 分别为第 i 级加载过程和卸载过程的变形模量; μ_{i+} 和 μ_{i-} 分别为第 i 级加载过程和卸载过程的侧膨胀系数; $\Delta\sigma_{i+}$ 和 $\Delta\sigma_{i-}$ 分别为第 i 级加载过程应力差和第 i 级卸载过程应力差; $\Delta\varepsilon_{si+}$ 和 $\Delta\varepsilon_{si-}$ 分别为第 i 级加载过程和卸载过程径向应变差; $\Delta\varepsilon_{ai+}$ 和 $\Delta\varepsilon_{ai-}$ 分别为第 i 级加载过程和卸载过程轴向应变差。

通过计算得到循环加卸载下岩样变形模量和侧膨胀系数的变化规律(图 3), 图中横坐标上的“ $i+$ ”对应着第 i 级循环加载完成时刻, “ $i-$ ”对应着第 i 级循环卸载完成时刻。由图 3a 可知, 对于 $L=30$ mm 和 $L=35$ mm 岩样, 随着循环等级的增加, 变形模量呈直线上升—缓慢上升—下降的趋势。上述变化趋势说明: 岩样在前期加卸载过程中内部微裂纹逐渐压密闭合, 抗变形能力逐渐提高, 岩样出现强化现象; 在循环中期岩样变形模量缓慢上升, 这表明此时岩样内部裂纹正在萌生与扩展; 随着循环等级的递进, 岩样内部裂纹逐渐扩展贯通, 变形模量出现下降, 岩样

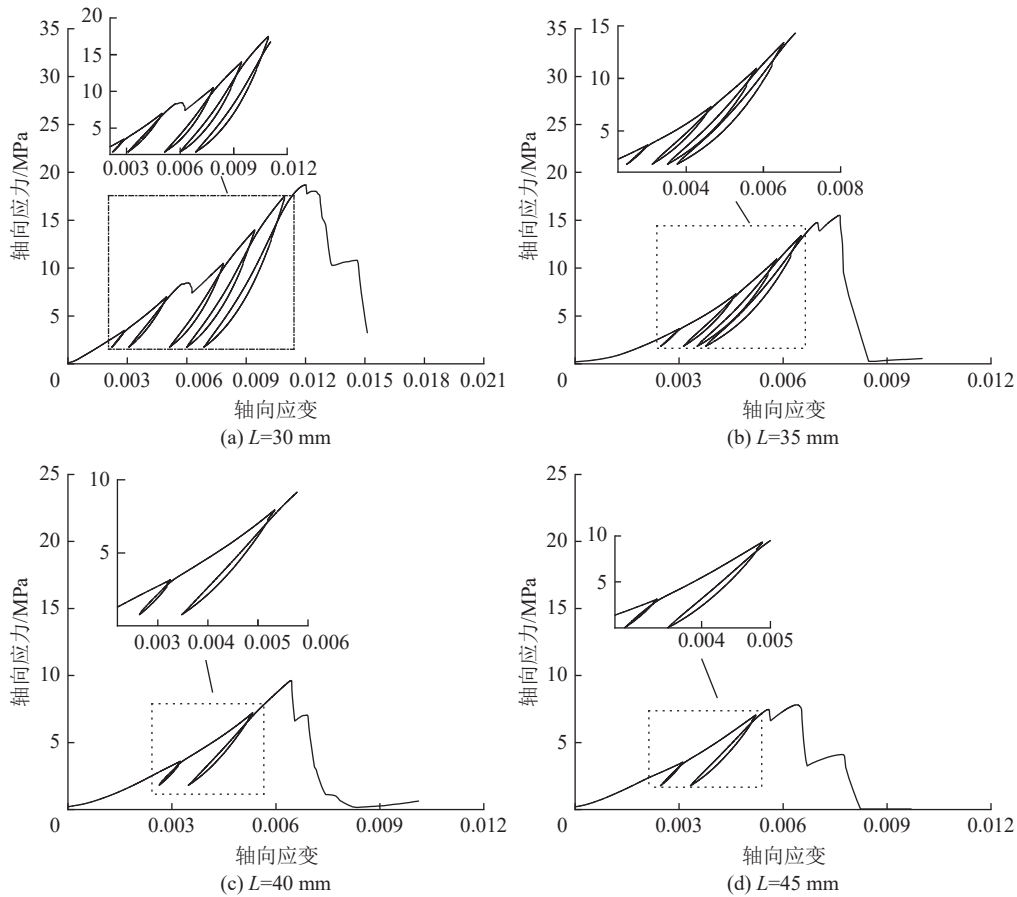
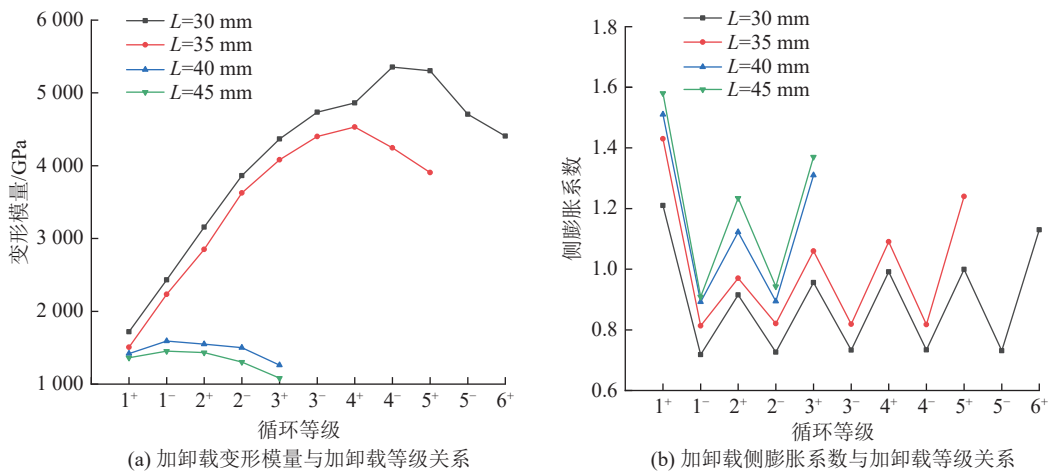


图 2 轴向应力-轴向应变曲线
Fig.2 Axial stress-strain curve

稳定性有所降低。对于 $L=40\text{ mm}$ 和 $L=45\text{ mm}$ 岩样，岩样变形模型呈短暂上升一下降的趋势，说明大尺寸预裂裂隙的加工已经导致岩样内部承载结构明显弱化，在循环前期岩样内部就已产生较为明显的宏观破裂区域，卸载过程会促使宏观破裂区域产生滑移，因此岩样较早发生破坏。此外，加载变形模型与

卸载变形模量呈现不同规律，以 $L=30\text{ mm}$ 为例，第 3 级和第 4 级循环的加载变形模量均处于直线上升阶段且上升幅度较大，而卸载变形模量的上升速率均出现明显下降，说明此时卸载过程岩样内部开始有新的损伤产生。

由图 3b 可知，岩样侧膨胀系数随 L 增大而提高，



注：图中“+”表示加载、“-”表示卸载

图 3 力学参数与加卸载等级关系

Fig.3 Relation between mechanical parameters and loading and unloading grades

第 1 级循环岩样的加载侧膨胀系数均偏大, 不符合单调递增的规律, 这是因为在荷载作用下, 岩样内平行于主轴的原生裂隙由于泊松效应而张开, 导致环向产生了大量的塑性变形^[20]; 第一级循环完成后, 由于原生裂隙孔洞基本完全张开, 加载侧膨胀系数基本不受原生裂隙孔洞影响, 呈现出随循环等级单调递增的规律, 而卸载侧膨胀系数则始终趋于平稳。在临近破坏时, 岩样内部裂隙相互贯通且张开, 导致加载侧膨胀系数均出现大幅度提升。对于 $L=30$ 、 35 mm 岩样, 分别在第 4 级和第 5 级循环时, 加载侧膨胀系数增量有所降低, 从现场岩样变形特征来说, 侧膨胀系数增量降低预示着岩样内部抗力结构的弱化; 对于 $L=40$ 、 45 mm 岩样这种却不存在这种现象。

分析总结以上规律得出, 预制裂隙较小的岩样变形模量随循环等级的提高而增加, 说明岩样抗变形能力在循环加卸载过程中得到提升, 最终破坏时变形模量降低, 侧膨胀系数大幅上升; 预制裂隙较大的岩样循环前期变形模量略微下降, 加载侧膨胀系数大幅上升, 说明在循环前期岩样内部就已经产生明显的局部破裂破坏, 加卸载过程会促使宏观破裂区域产生滑移, 从而导致岩样很快就发生失稳破坏。

1.2.2 破坏模式分析

每一块岩样破坏后, 观察并记录了其宏观破坏特征。基于 YANG 等^[21-22]等提出的裂纹类型定义, 如图 4a 所示, 对试验中出现的裂纹类型及名称进行命名, 破坏形式可大致分为剪切破坏和拉剪复合破

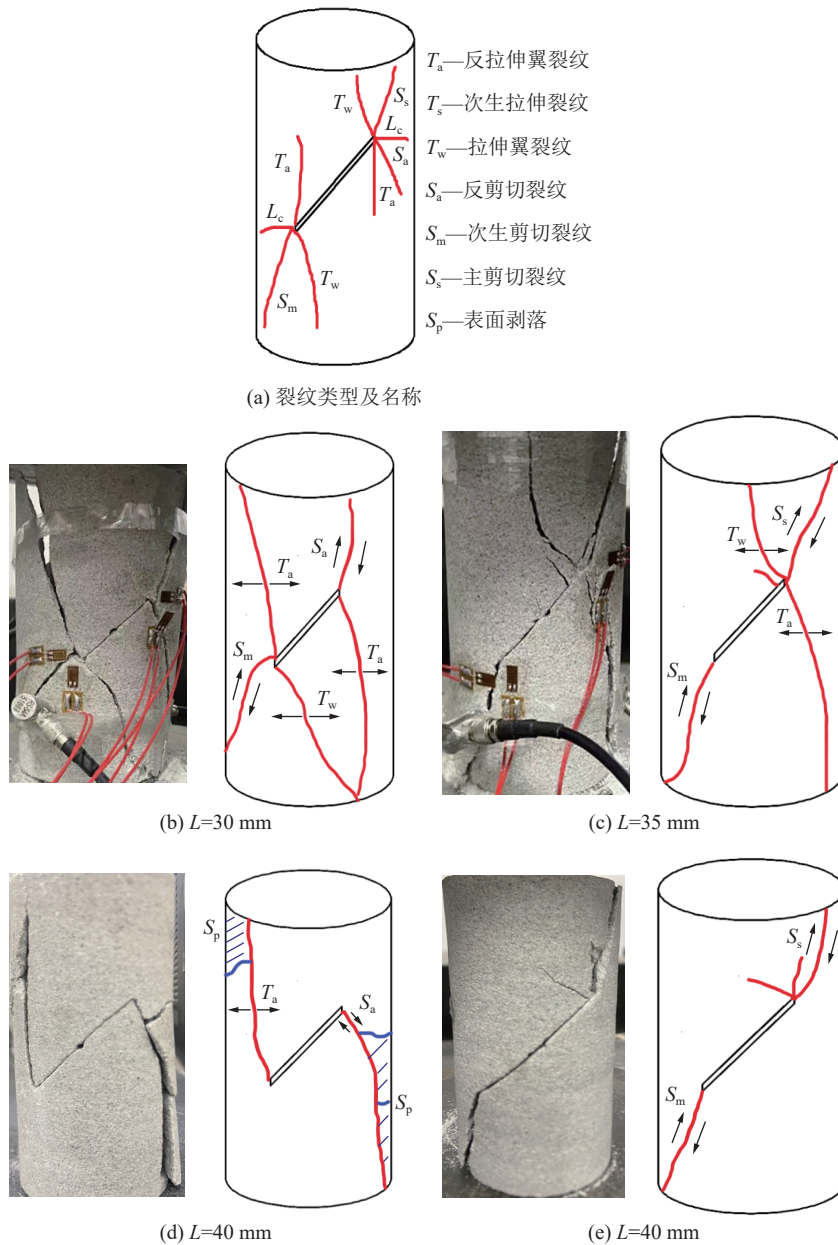


图 4 岩样最终破坏模式
Fig.4 Final failure mode of the sample

坏两大类,如图 4b—图 4f 所示。

由图可知,当 $L=30、35\text{ mm}$ 时,岩样主要以拉剪复合破坏为主,裂隙上尖端形成主剪切裂纹并扩展至岩样顶部,裂隙下尖端形成次生剪切裂纹并扩展至岩样底部,此外 $L=30\text{ mm}$ 岩样破坏时裂隙上尖端形成反拉伸翼裂纹,下尖端形成拉伸翼裂纹与反拉伸翼裂纹,拉伸翼裂纹与裂隙呈大约 70° 夹角,并按此方向扩展最终与上尖端的反拉伸翼裂纹交汇。 $L=40、45\text{ mm}$ 时,破坏形式转换为以剪切破坏为主, $L=40\text{ mm}$ 岩样表面出现大面积剥落。 L 从 30 mm 到 45 mm ,破坏类型由拉剪复合破坏转换为以剪切破坏为主,预制裂隙的扩大弱化了岩样的承载结构,岩样的峰值应变降低,岩样变得“脆性”化。

1.2.3 损伤特征分析

在循环荷载作用下,岩石内部裂纹不断萌生、发

育、扩展和贯通,这些损伤产生的能量将以弹性波的形式释放出来。为了描述循环加卸载作用下岩样内部损伤情况,以 $L=30\text{ mm}$ 岩样为例,绘制声发射特征中的能量释放率、应力与时间关系曲线,从能量释放特征角度描述岩样内部损伤情况,如图 5 所示。

由图 5a 可知,在循环加卸载初期,岩样仅有微弱的弹性波释放,此时岩样处于压密阶段,裂纹闭合,释放的能量相对较少;随着循环等级的增加,新裂纹逐渐萌生、发育和扩展,累积能量释放梯度变大,该现象随循环等级的增加逐渐变得明显;当循环荷载接近岩样峰值应力,岩样开始出现明显劣化,能量释放率开始急剧增加并在应力跌落处出现陡增,表明此时岩样已经发生失稳破坏。此外,在第 4 级以上的卸载阶段,累积能量释放率也较高,说明卸载阶段也伴随着裂纹的萌生、扩展和贯通。

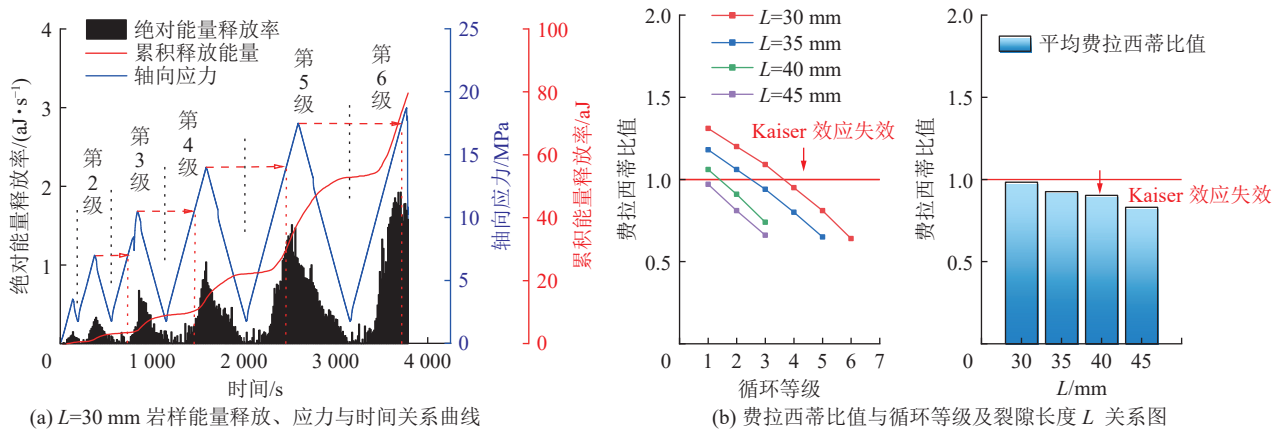


图 5 循环加卸载作用下能量释放特征

Fig.5 Capability release characteristics under cyclic loading and unloading

通过引入费拉西蒂比描述循环加卸载作用下岩样损伤不可逆的程度,费拉西蒂比是声发射效应失效程度的补充,也是岩样损伤的量度,其比值越小,岩样的累积损伤越多^[23]。

根据试验结果,岩样费拉西蒂比随循环等级的变化情况如图 5b 所示。图中可以看出,随着循环等级的递增,岩样内部的损伤不断增加,费拉西蒂比值整体呈下降趋势,损伤不可逆程度逐渐提高。对于 $L=30\text{ mm}$ 岩样的前 3 级循环,费拉西蒂比从 1.31 下降至 1.09,对应在前 3 级循环 $L=30\text{ mm}$ 岩样存在 Kaiser 效应,此时岩样内部还未产生较大损伤;在第 4 级循环费拉西蒂比下降幅度变大且小于 1,同时结合图 5a 可知,此时应力水平还没达到第 3 级循环的上限应力就已经开始有大量能量释放,这些变化表示着岩样内部裂纹正在快速扩展连结,从图 5b 左侧可以看出平均费拉西蒂比与 L 呈明显的负相关关系,这说

明预制裂隙长度的增大提高了岩样损伤的不可逆程度,导致含预制裂隙的砂岩在循环加卸载作用下不具有明显 Kaiser 效应。这种现象与 LI 等^[24]所得到的结论相似,对于所有岩体,Kaiser 效应并不总是会出现。

综上,笔者认为循环加卸载中岩样内部损伤特征除了与受载应力大小有关,还受岩样原身裂隙与缺陷的影响。

2 变上限循环加卸载数值模拟

室内试验能够有效地分析裂隙砂岩在变上限循环加卸载作用下的宏观失稳特征,并从能量释放特征角度分析岩样损伤演化情况,但对循环加卸载下岩样内部细观损伤演化规律方面的分析却略显不足,在此通过离散元 UDEC 数值模拟来获取岩样内部裂纹数据,揭示变上限循环加卸载下裂隙砂岩的细观损伤规律。

2.1 模型建立及力学参数选取

为提高数值模拟真实性,采用 X 射线衍射(XRD)对室内试验砂岩内部矿物物质和具体含量进行精细化分析,采用仪器为 EMPYREAN(帕纳科,荷兰),结果如图 6 所示。室内试验砂岩主要由 68.3% 石英(SiO₂)、29.6% 钠长石(NaAlSi₃O₈)和 2.1% 方解石(CaCO₃)组成,表明室内试验选取砂岩属于非均质性。基于此,采用 UDEC-voronoi 将模型划分成若干个离散的多边形,采用这种方法岩石材料可以视为通过接触黏结在一起的大量可变形微观块体集合^[25],能够较好的观察到加载及卸载过程模型细观块体间的变化。同时将块体的本构模型设置为各向同性的弹性模型,这样能够较好的还原卸载过程中变形可逆的特征,节理面设置为库仑-滑移模型,图 7 为 L=30 mm 数值模型示意图。

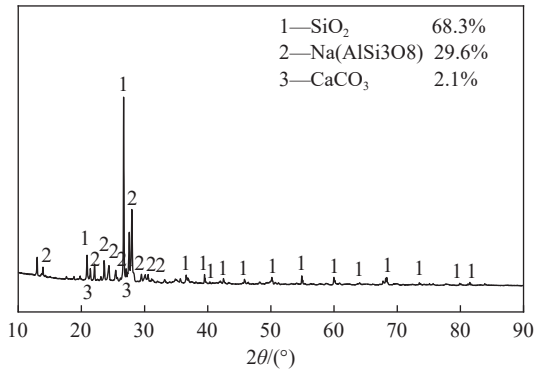


图 6 砂岩衍射强度图谱
Fig.6 Sandstone diffraction intensity profile

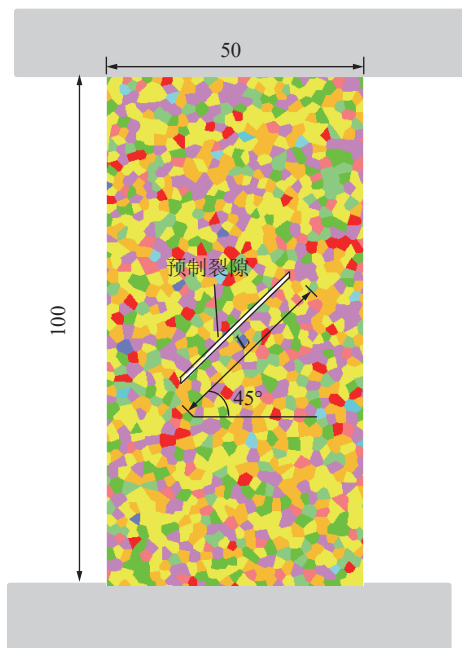


图 7 UDEC-voronoi 裂隙砂岩模型
Fig.7 UDEC-voronoi fracture white sandstone model

通过设置上下加载板对模型进行固定和加载,加载板的力学参数设置为钢板的参数。下加载板 x 方向和 y 方向的速度设为 0,使下加载板固定;将上加载板 x 方向速度设置为 0,限制上加载板水平方向的位移,模拟过程中,模型左、右边界可自由移动。

为实现数值模拟模型与室内试验岩样的参数基本一致,该数值模拟中所采用的数值模型被设定成相同的几何尺寸 ($W \times H = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$),块体之间的宏观变形特征由体积模量 K 和剪切模量 G 表征,接触模型的变形特征由法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 表征,具体计算式如(3)、式(4)所示。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$K_n \leq n \left[\max \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right], K_s = 0.4K_n \quad (4)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量; E 为弹性模量; ν 为泊松比; n 的取值范围为 1 ~ 10; K_n 为接触法向刚度; K_s 为接触切向刚度; ΔZ_{\min} 为毗邻节理单元在法线方向的最小宽度,最终相关的物理力学参数(表 1、表 2)。最终模型单轴压缩数值模拟和砂岩室内单轴压缩试验的应力-应变曲线进行对比,如图 8 所示。图中可以看出,由于没有考虑岩石的孔隙率,数值试验无法模拟室内单轴压缩试验岩石的压密阶段,但是裂纹的萌生与扩展主要发生在弹性阶段之后,即图 9 中 A-B-C 区段,该区段两者结果具有较好的一致性。

采用 YAN 等^[26]就 UDEC-voronoi 模型所推荐的方法进行加卸载,将均步荷载施加在上加载板上边界,加载与卸载曲线呈明显的阶梯状,每阶梯加、卸载 $\Delta\sigma = 0.5 \text{ MPa}$,每阶梯步数为 1 000 步,时间步长 $1.5 \times 10^{-8} \text{ s/步}$ 。

表 1 块体力学参数

Table 1 Physical parameters

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa
2 250	25.3	0.29	20.07	9.81

表 2 节理力学参数

Table 2 Joint mechanics parameters

法向刚度 $K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏结力 C/MPa	抗拉强度/ MPa
25.53	10.21	21	10.24	3.1

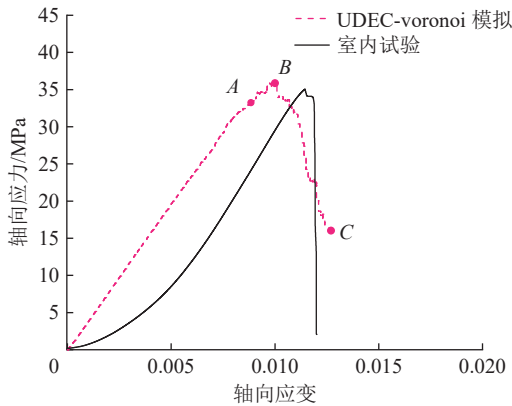


图 8 室内试验与数值模拟应力应变曲线对比

Fig.8 Comparison of stress-strain curves between laboratory test and numerical simulation

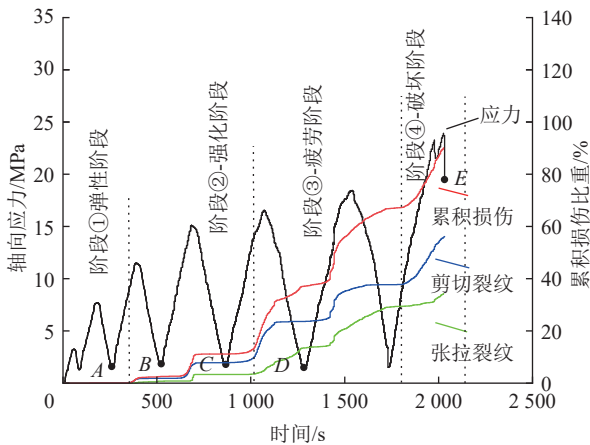


图 9 轴向应力及累积损伤与时间关系曲线

Fig.9 Relation curve of axial stress and cumulative damage with time

2.2 数值模拟结果分析

2.2.1 细观损伤特征分析

为探究裂隙砂岩在变上限循环加卸载作用下的细观损伤演化规律,利用 FISH 语言构建损伤指标对剪切裂纹与拉伸裂纹进行识别并监测裂纹长度:当

接触面的抗拉强度(法向刚度 K_n 与总法向位移增量 $\Delta\mu_n$ 的乘积)超过了块体间接触面的极限抗拉强度 T ,接触面法向应力 $\sigma_n=0$,此时判定为张拉裂纹产生;同理,当接触面的抗剪强度(切向刚度 K_s 与总切向位移弹性部分增量 $\Delta\mu_s^e$ 的乘积)超过了块体间接触面的极限抗剪强度(由黏聚力 C 和内摩擦角 φ 决定),则判定为产生剪切裂纹。定义模型损伤指标如式(5)所示。

$$D = \frac{L_s + L_t}{L_c} \times 100\% \quad (5)$$

式中: D 为模型的损伤指标; L_s 和 L_t 分别为剪切裂纹和张拉裂纹的长度; L_c 为模型中接触的总长度。基于上述指标生成损伤统计,得到裂隙砂岩模型损伤演化规律。

鉴于文章篇幅,笔者以 $L=30\text{ mm}$ 模型为例,对变上限循环加卸载作用下模型的损伤演化过程进行研究,并以时间为横坐标绘制轴向应力与裂纹演化规律的关系(图 9),通过分析应力及损伤曲线的特点,将加卸载全程分为 4 个阶段,选取加卸载全程 5 个典型时刻进行标识,图 10 给出了标识点 A~D 所对应的宏观破坏演化云图。从中可以清晰的看出模型在加卸载全程模型细观损伤演化趋势及宏观破坏表现。

由图 9 可知, $L=30\text{ mm}$ 模型在第 7 级循环发生破坏(峰值应力为 23.92 MPa),而室内试验岩样在第 6 级循环发生破坏,两者存在一定差距,这是由于除预制裂隙外,岩样内部还存在一定微观节理和缺陷。在循环前期(阶段①),应力等步增加,此时最高循环荷载水平为 $20\%\sigma_c$,模型未产生任何细观损伤及宏观裂纹,此阶段可认定模型处于弹性阶段。随着循环等级的增加,进入阶段②,模型内部开始产生损伤并呈阶梯状上升,此时大部分损伤依靠加载过程剪

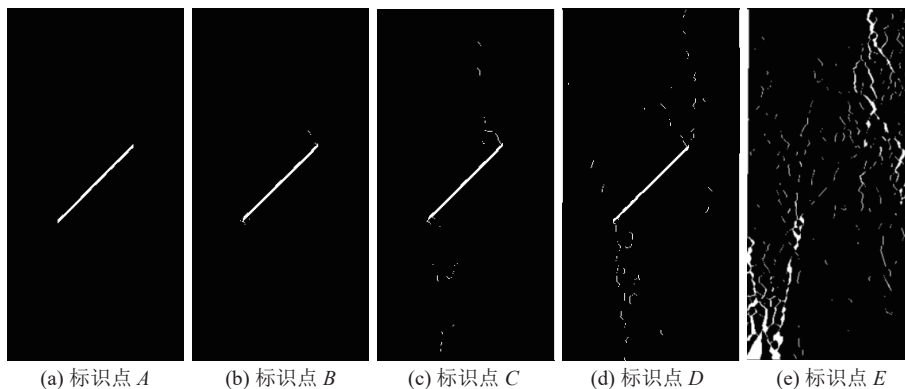


图 10 加卸载全程宏观破坏演化云图

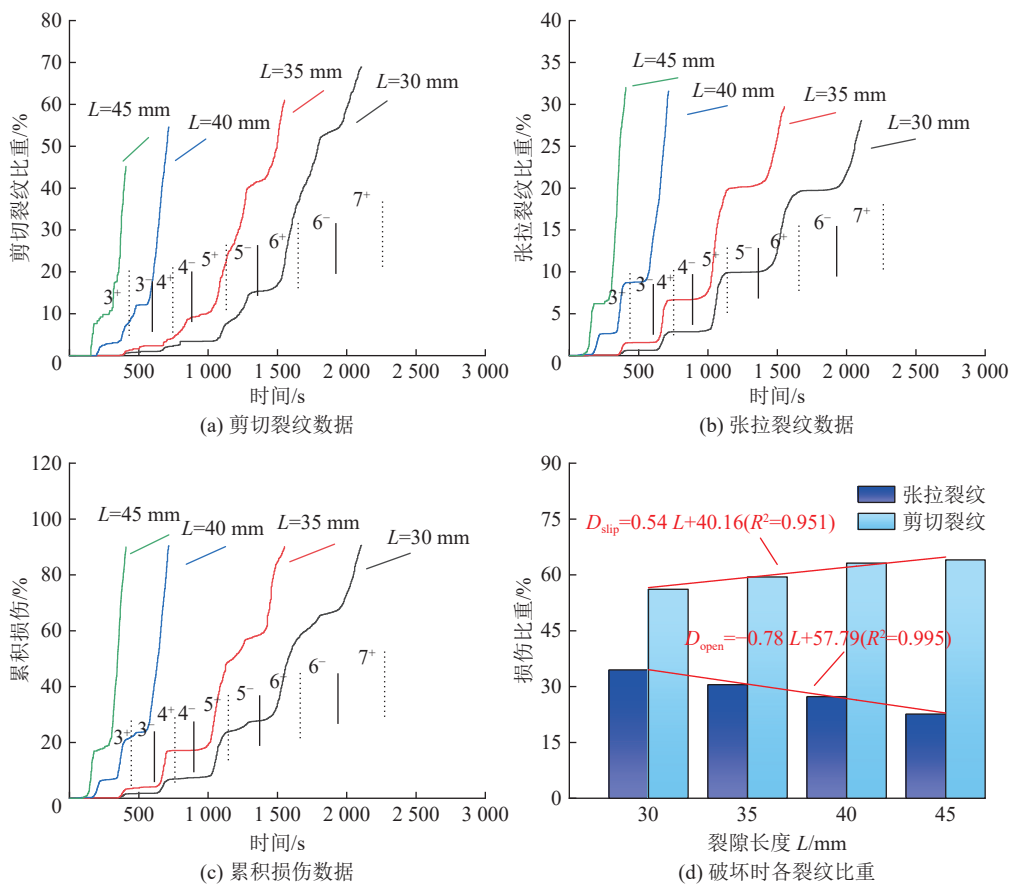
Fig.10 Macro failure evolution cloud map of loading and unloading process

切裂纹的萌生和扩展来增加,卸载过程损伤趋于稳定。从宏观破裂演化云图(标识点 B~C)可以看出,模型最初在预制裂隙上下两尖端位置形成微破裂,并逐渐向上下端延伸,但扩展速度较为缓慢,在此阶段加载过程剪切裂纹的扩展速率随循环等级的递进不断提高,同时也有少量张拉裂纹在此萌生,另外此阶段模型块体间能够形成有效的抗力结构,使得加载过程应力曲线依旧稳步行进,卸载过程模型块体间的结构得以恢复和调整,块体间的摩擦强度得到提高,损伤停止上升,因此该阶段可认定模型处于强化阶段。而当损伤上升到一定程度后,进入阶段③,此时加载过程裂纹扩展速度显著提高,微破裂汇集形成翼裂纹,并在裂隙上下尖端处各发育了一条次生裂纹(标识点 D),卸载过程损伤非但没有停止上升,反而促进了张拉裂纹的扩展,由于大量裂纹的起裂和扩展导致模型块体间的抗力结构发生改变,此阶段应力曲线出现不稳定增长,认定模型此时处于疲劳阶段,卸载过程产生的损伤为疲劳损伤。进入阶段④,模型内部损伤得到一定积累,大量的裂纹萌生、发育、扩展并逐渐贯通模型,应力曲线亦呈现出

陡降现象,这表明模型已发生整体破坏,根据标识点 E 处模型的宏观破裂云图可以判断最终破坏由翼裂纹、反翼裂纹及共面剪切裂纹共同作用引起,室内试验岩样的破裂形态与其较为吻合,说明 UDEC-voronoï 能够有效地模拟循环加卸载条件下裂隙砂岩的破坏特征。

另外,从图 8 中可以看出,模型卸载后再次加载时,应力尚未达到上级循环上限应力水平时模型就已经产生损伤,且随循环等级的递进逐渐明显,这种现象与室内试验中声发射能量释放特征表现出一致性。

图 11a—图 11c 为不同 L 模型损伤演化曲线数据。图中可见,对于预制裂隙较小的模型损伤基本与上述损伤演化的四个阶段(弹性阶段、强化阶段、疲劳阶段和破坏阶段)具有相同趋势。对于预制裂隙较大的模型表现为基本没有强化阶段,这是由于预制裂隙大,损伤形成速率大,循环前期模型内部就形成了不可恢复的宏观损伤,卸载过程模型块体间的结构难以恢复,导致模型弹性阶段后直接进入疲劳阶段,加速模型的失稳破坏。



注：图中“+”表示加载、“-”表示卸载。

图 11 不同 L 模型剪切裂纹和张拉裂纹数据

Fig.11 Shear crack and tension crack data of different L models

以 L 为横坐标, 模型破坏时剪切裂纹和张拉裂纹比重为纵坐标绘制关系图, 并对其进行拟合分析 (图 11d), 可知模型破坏时剪切裂纹比重随 L 增大呈线性递增趋势, 张拉裂纹比重随 L 增大呈线性下降趋势, 表明预制裂隙长度 L 的增大对剪切裂纹的扩展延伸有促进作用, 这是因为预制裂隙长度的增大降低了模型整体的摩擦系数, 使得块体间对剪切力的遏制作用减弱, 从而导致剪切裂纹发展数量大大增加, 张拉裂纹在损伤中的比重减小。这也从细观角度验证了室内试验岩样由拉剪复合破坏转向剪切破坏的结论。

2.2.2 损伤形成机制分析

提取模型在弹性阶段、强化阶段及疲劳阶段加载和卸载完成时的数值位移云图, 能够较好的反映加卸载作用下模型的损伤形成过程, 以 $L=30\text{ mm}$ 为例, 图 12 记录了 $L=30\text{ mm}$ 模型模拟过程中加载和卸载典型时刻的位移特征。由图 12 可知, 弹性阶段下, 加载过程模型位移由上向下逐渐减小, 最大变形基

本集中在模型顶端, 其方向向下平行于荷载方向, 在卸载过程中, 模型整体变形量值减小至 $2.1 \times 10^{-5}\text{ m}$, 说明弹性阶段下加载过程产生的变形在卸载过程能够得到恢复, 损伤因此停止增长; 随着循环等级的递进, 模型进入强化阶段, 加载过程模型上端最大变形区域逐渐扩大, 在卸载过程, 模型变形较大区域转移至上端偏右侧及下端偏左侧, 方向由垂直向下改变为向模型外侧偏转, 其余区域变形能够减小至 $2.1 \times 10^{-5}\text{ m}$; 进入疲劳阶段, 加载过程位移较大区域向下扩张, 预制裂隙上端出现变形局部增大现象, 在翼裂纹处呈现出明显的变形分界, 意味着此时分界线附近裂纹开始快速产生并扩展, 卸载过程由于应力下降模型松弛, 块体间摩擦降低, 形成以预制裂隙为界线上端滑动的趋势, 促使宏观裂纹层面间的滑移, 疲劳损伤因此产生。破坏时模型位移云图和室内试验岩样破坏形貌如图 13 所示, 可见破坏时岩样的宏观裂缝区域与模型云图中位移错动区域能够较好的匹配, 可见位移云图能够较好的反映损伤演化过程。

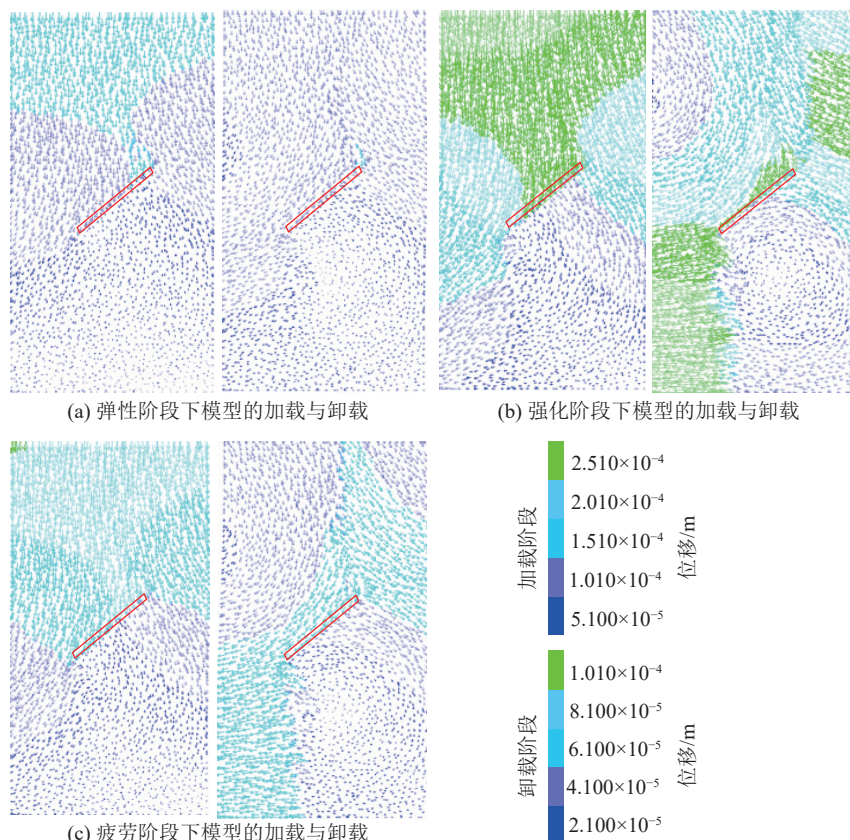


图 12 模型加卸载位移矢量图

Fig.12 Displacement vector diagram of model loading and unloading

在利用位移变形和裂纹数量研究细观损伤规律的同时, 还应密切关注循环加卸载下细观裂纹萌生位置及扩展规律, 并根据裂纹扩展位置对应的模型

块体颗粒变化特征对其损伤形成机制进行分析。图 14 展示了 $L=30\text{ mm}$ 时模型内部细观裂纹随循环等级递进的扩展规律。

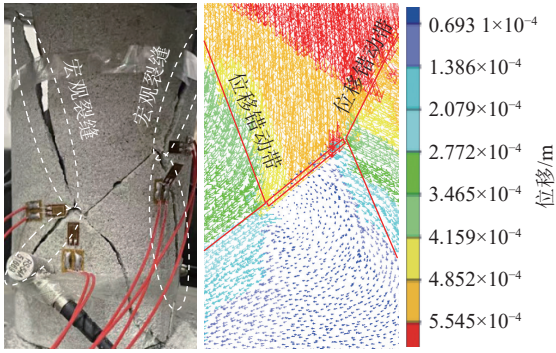
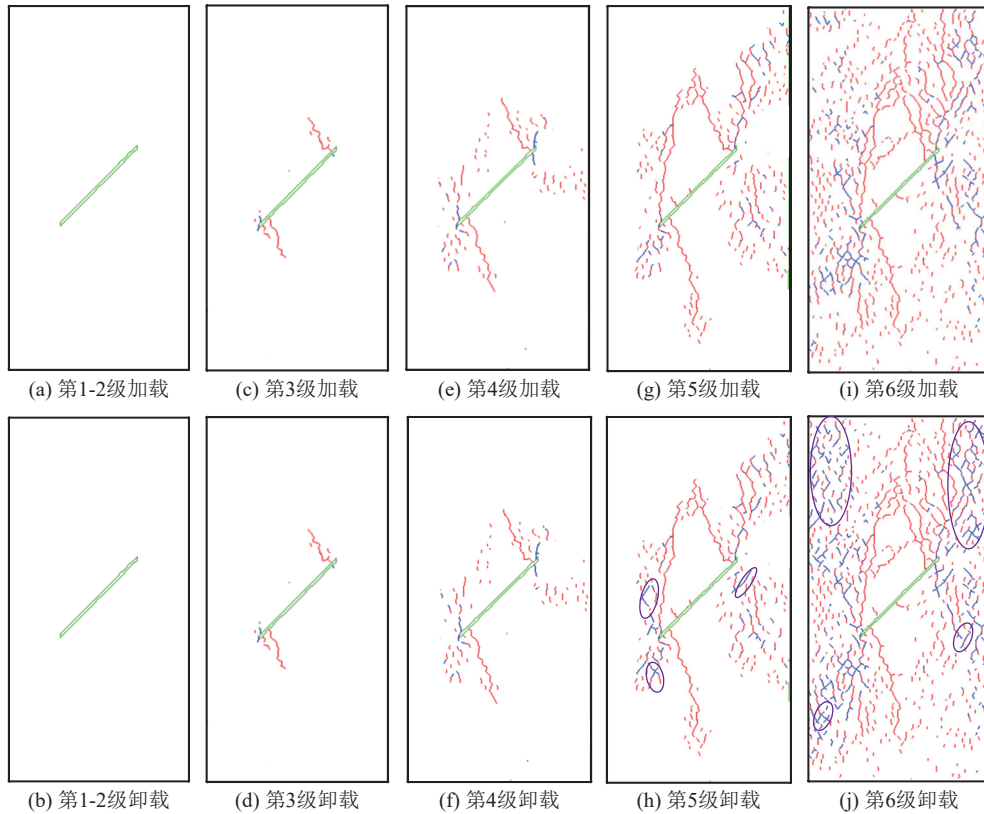


图 13 室内试验岩样破坏形貌与数值模拟模型位移云图
 Fig.13 Failure morphology of laboratory test samples and displacement cloud image of numerical simulation model

由图可知,在前两级循环过程中 $L=30\text{ mm}$ 模型处于弹性阶段,因此并未产生任何裂纹;模型由弹性阶段进入强化阶段(第 3 级和第 4 级循环),在加载

过程裂隙上下尖端均萌生出一条与预制裂隙垂直的主剪切裂纹,周围分散着若干剪切微裂纹,同时裂隙上下尖端还有极少量张拉裂纹萌生,随着循环等级递进,主剪切裂纹逐渐扩展,剪切微裂纹数量增多,张拉裂纹也出现小幅度扩展,在强化阶段卸载过程,各类型裂纹均停止萌生与扩展;模型由强化阶段进入疲劳阶段(第 5 级和第 6 级循环),此时加载过程主剪切裂纹大幅扩展并逐渐与周围的剪切微裂纹相互连结,张拉裂纹扩展速度大幅提高,另外在卸载过程有不少张拉裂纹在零散的剪切微裂纹间萌生(黑色虚线所圈区域),这个现象随循环等级的递进愈加明显;主剪切裂纹、剪切微裂纹以及张拉裂纹互相扩展连结形成宏观破裂区,导致模型失去承载能力,模型最终在第 7 级循环加载过程发生失稳破坏。



注：红色为剪切，蓝色为张拉。

图 14 裂隙砂岩试样中剪切和张拉裂纹扩展规律
 Fig.14 Crack growth regularities of shear and tension in fractured sandstone samples

为探究模型在疲劳阶段卸载过程张拉损伤形成的机制,在图 15 中展示了图 14 中黑色虚线所标记出的疲劳阶段卸载过程张拉裂纹萌生位置所对应的模型颗粒块体间的变化特征,并根据其变化特征做出疲劳阶段卸载过程张拉裂纹形成机制推理。由图可知,在疲劳阶段加载过程,模型间不断萌生出新的

剪切微裂纹,相邻剪切微裂纹之间块体的接触点容易被不断提高的荷载破坏,进而导致块体间的连结失效且不断被向下挤压;进入疲劳阶段卸载过程时,施加在模型顶部的应力逐渐下降,模型出现松弛,此前在加载过程受挤压失效的连结在此时逐渐张开,形成张拉裂纹,加快模型的失稳破坏。

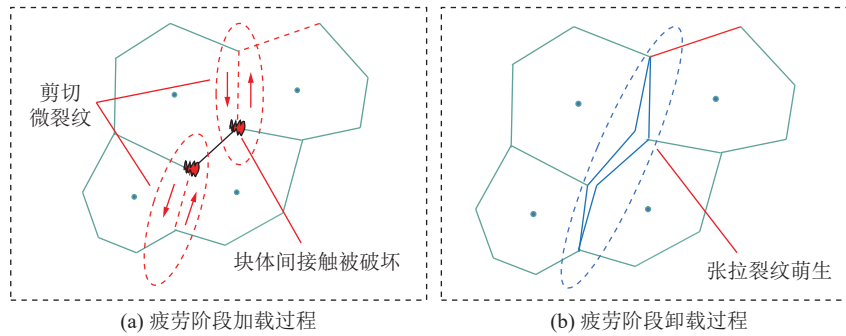


图15 疲劳阶段卸载过程损伤产生机制

Fig.15 Mechanism of damage generation during unloading in fatigue stage

3 结 论

1)在室内循环加卸载过程中,预制裂隙较小的岩样抗变形能力逐渐增强,而预制裂隙较大的岩样破坏程度逐渐增大;预制裂隙的增大及循环等级的递进都会减弱岩样能量释放的Kaiser效应;随预制裂隙的增大破坏类型由拉剪复合破坏转换为以剪切破坏为主。

2)通过裂隙砂岩的UDEc-voronoi数值模拟分析,模型的宏观破坏特征为翼裂纹、反翼裂纹及共面剪切裂纹共同作用;利用FISH语言编译代码构建了损伤判别指标,预制裂隙长度对模型细观损伤机制的影响规律主要与剪切裂纹有关,从细观角度验证了室内试验岩样由拉剪复合破坏转向剪切破坏的结论。

3)根据损伤演化规律把模型变上限循环加卸载整个过程分为:弹性阶段、强化阶段、疲劳阶段和破坏阶段;在弹性阶段和强化阶段卸载过程没有损伤产生,而在疲劳阶段卸载过程块体间的结构无法得到恢复和调整,而是以张拉裂纹扩展的形式形成疲劳损伤,加快模型的失稳破坏。

4)疲劳阶段加卸载过程模型的裂纹扩展连结特征表现为:加载过程裂纹相互扩展连结,相邻剪切微裂纹之间块体的接触点被破坏,块体间的连结失效;卸载过程应力下降模型松弛,块体间失效的连结在此时张开进而导致不少张拉裂纹在剪切微裂纹间萌生,加快模型的破坏失稳。

参考文献(References):

[1] 张吟钗. 水库地震和水-岩作用对库岸边坡动力响应特征的影响研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
ZHANG Yinchai. Study on dynamic response characteristics of reservoir bank slope under the influence of reservoir earthquake and water-rock interaction[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.

[2] 张伟,周国庆,张海波,等. 倾角对裂隙岩体力学特性影响试验模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 30-33.
ZHANG Wei, ZHOU Guoqing, ZHANG Haibo, et al. Experimental research on the influence of obliquity on the mechanical characteristics of a fractured rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 30-33.

[3] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6): 979-999.

[4] 张波,李术才,杨学英,等. 含交叉裂隙节理岩体单轴压缩破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1863-1870.
ZHANG Bo, LI Shucai, YANG Xueying, et al. Uniaxial compression failure mechanism of jointed rock mass with cross-cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1863-1870.

[5] 田文岭,杨圣奇,黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1207-1215.
TIAN Wenling, YANG Shengqi, HUANG Yanhua. PFC^{2D} simulation on crack evolution behavior of brittle sandstone containing two coplanar fissures under different confining pressures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1207-1215.

[6] 邓正定,吴建奇,尚佳辉,等. 含贯通-非贯通交叉节理岩体等效弹性模型及强度特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3098-3106.
DENG Zhengding, WU Jianqi, SHANG Jiahui, et al. Equivalent elastic model and strength properties for cross-jointed rock mass containing persistent and non-persistent joints[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3098-3106.

[7] PRUDENCIO M, VAN SINT JAN M. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 890-902.

[8] 刘汉香,别鹏飞,李欣,等. 三轴多级循环加卸载下千枚岩的力学特性及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 265-274, 281.
LIU Hanxiang, BIE Pengfei, LI Xin, et al. Mechanical properties and energy dissipation characteristics of phyllite under triaxial multi-stage cyclic loading and unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 265-274, 281.

[9] 张志镇,高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力

- 学与工程学报, 2012, 31(5): 953-962.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 953-962.
- [10] 张志镇, 高峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 1-11.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Confining pressure effect on rock energy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1): 1-11.
- [11] LIU M X, LIU E L. Dynamic mechanical properties of artificial jointed rock samples subjected to cyclic triaxial loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 98: 54-66.
- [12] 徐颖, 李成杰, 郑强强, 等. 循环加卸载下泥岩能量演化与损伤特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2084-2091.
- XU Ying, LI Chengjie, ZHENG Qiangqiang, et al. Analysis of energy evolution and damage characteristics of mudstone under cyclic loading and unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(10): 2084-2091.
- [13] Lou P J, Li C J, Liang S L, et al. Hysteresis characteristics of Brittle deformation under constant load cycling and Unloading [J]. *Tehni CKIVJESNIK*, 2020, 27(3) .
- [14] LIU Y, DAI F, DONG L, et al. Experimental investigation on the fatigue mechanical properties of intermittently jointed rock models under cyclic uniaxial compression with different loading parameters[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(1): 47-68.
- [15] 李子运, 吴光, 黄天柱, 等. 三轴循环荷载作用下页岩能量演化规律及强度失效判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 662-670.
- LI Ziyun, WU Guang, HUANG Tianzhu, et al. Variation of energy and criteria for strength failure of shale under triaxial cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 662-670.
- [16] 周喻, 刘冰, 王莉, 等. 单轴压缩条件下含双圆孔类岩石试样力学特性的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2662-2671.
- ZHOU Yu, LIU Bing, WANG Li, et al. Mesoscopic mechanical properties of rock-like material containing two circular holes under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2662-2671.
- [17] 武东阳, 蔚立元, 苏海健, 等. 单轴压缩下加锚裂隙类岩石试块裂纹扩展试验及 PFC^{3D} 模拟 [J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1681-1692.
- WU Dongyang, YU Liyuan, SU Haijian, et al. Experimental study and PFC^{3D} simulation on crack propagation of fractured rock-like specimens with bolts under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1681-1692.
- [18] 汤双臣, 冯鹏, 赵家琛. 含交叉裂隙岩石试样单轴力学特性与破坏机理[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1376-1383, 1407.
- TANG Shuangchen, FENG Peng, ZHAO Jiachen. Uniaxial mechanical properties and failure mechanism of rock specimens containing cross fissures[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(5): 1376-1383, 1407.
- [19] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 不同位置和尺寸的裂隙对岩体破坏影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3018-3028.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental study on effect of joints with different locations and sizes on rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3018-3028.
- [20] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1693-1704.
- LI Xinwei, YAO Zhishu, HUANG Xianwen, et al. Investigation of deformation and failure characteristics and energy evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1693-1704.
- [21] YANG S Q, JING H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. *International Journal of Fracture*, 2011, 168(2): 227-250.
- [22] YANG S Q. Crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(17): 3059-3081.
- [23] JIN Y, QI Z L, CHEN M, et al. Time-sensitivity of the Kaiser effect of acoustic emission in limestone and its application to measurements of in situ stress[J]. *Petroleum Science*, 2009, 6(2): 176-180.
- [24] LI C, NORDLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1993, 26(4): 333-351.
- [25] Itasca Consulting Group Inc. UDEC(universal distinct element code)[M]. Version 4.1. Minneapolis: Itasca;2011.
- [26] YAN D X, XU W Y. Mechanical characteristics of columnar jointed rock at dam base of Baihetan hydropower station[J]. *J. Cent. South Univ. Technol*, 2011, 18: 2157-2162.