

中文引用格式:安学旭,胡志平,王振林,等. 加卸荷条件下闪长岩细观响应机制[J]. 中国安全科学学报,2026,36(3):221-228.

英文引用格式:AN Xuexu, HU Zhiping, WANG Zhenlin, et al. Meso response mechanism of diorite under loading and unloading conditions[J]. China Safety Science Journal,2026,36(3):221-228.

加卸荷条件下闪长岩细观响应机制^{*}

安学旭^{1,2}讲师, 胡志平^{**2,3}教授, 王振林⁴, 田安安⁴, 张永辉²

(1 陕西交通职业技术学院 铁道工程学院, 陕西 西安 710018; 2 长安大学 建筑工程学院,

陕西 西安 710061; 3 西安市绿色智慧交通岩土工程重点实验室, 陕西 西安 710068;

4 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.1000

资助项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2021JLM-49, 2025JC-YBQN-014); 2023 年陕西交通职业技术学院
科研创新团队资助项目(CX2302)。

【摘要】 为探究加卸荷应力路径下硬岩的细观响应特征,采用颗粒流程序(PFC^{3D})软件开展 20 MPa 围压下闪长岩三维数值模拟加卸荷试验,并将数值模拟结果与室内试验结果对比,验证该数值模拟方案的可靠性;在此基础上,分析闪长岩模型加卸荷宏观变形过程中内部颗粒速度、接触力以及拉剪微裂纹沿模型轴向与径向的分布特征。结果表明:峰前阶段,受端部能量输入与侧向约束协同作用,颗粒轴向速度呈端部高、中部低的分布特征,径向速度由内向外线性递增;接触法向力沿轴向(端部>中部)和径向(边缘>内部)呈现边缘强化分布特征并持续增长,拉裂纹主导损伤(径向聚集卸荷面、轴向均匀分布)。峰后阶段,侧向约束骤减引发颗粒速度剧增,接触力链断裂导致接触法向力与剪力快速衰减;细观层面拉剪裂纹加速扩展,尤其剪裂纹在双剪斜面聚集贯通,直接触发宏观承载力骤降。

【关键词】 加卸荷; 闪长岩; 细观; 数值模拟; 分布特征

Meso response mechanism of diorite under loading and unloading conditions

AN Xuexu^{1,2}, HU Zhiping^{2,3}, WANG Zhenlin⁴, TIAN An'an⁴, ZHANG Yonghui²

(1 School of Railway Engineering, Shaanxi College of Communications Technology, Xi'an Shaanxi 710018, Shaanxi, China; 2 School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710061, China; 3 Xi'an Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Green and Intelligent Transport, Xi'an Shaanxi 710068, China; 4 Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: In order to explore the microscopic response characteristics of hard rock under the loading and unloading stress paths, the diorite numerical model under 20 MPa confining pressure was carried out by using the PFC^{3D} program. Then, the numerical simulation results were compared with the laboratory test results to verify the reliability of the numerical simulation scheme. On this basis, the change

* 文章编号:1003-3033(2026)03-0221-08; 收稿日期:2025-08-10; 修稿日期:2025-12-10

** 通信作者:胡志平(1972—),男,湖南益阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事地下空间研究。E-mail: huzhiping@chd.edu.cn。

characteristics of micro particle velocity, contact force and tensile shear micro-crack along the axial and radial direction of the model during loading and unloading were studied. The results show that in the pre-peak stage, driven by synergistic effects of terminal energy input and lateral confinement, particle axial velocity exhibits higher values at the ends and lower values in the central region, while radial velocity increases linearly from interior to exterior. Contact normal forces demonstrate enhanced distribution characteristics along both axial (ends > center) and radial (periphery > core) directions, with sustained growth during loading. Tensile cracks dominate damage initiation, concentrating radially near unloading surfaces while distributing uniformly axially. In the post-peak stage, an abrupt reduction of lateral confinement triggers a dramatic particle velocity surge. Disintegration of force chains precipitates rapid decay in contact normal and shear forces. Accelerated propagation of tensile-shear micro-cracks occurs at the mesoscopic level, particularly with shear cracks concentrating and coalescing along double-shear planes, directly precipitating macroscopic bearing-capacity collapse.

Keywords: loading and unloading condition; diorite; microscopic; numerical simulation; distribution characteristics

0 引言

深部硬岩工程中,隧道开挖、矿产开采等活动易引发围岩环向应力升高、径向应力降低的应力重分布现象,常伴随岩爆、板裂、剥落等灾变,严重威胁地下工程安全施工^[1]。这些宏观灾变本质上是围岩应力重分布过程中细观损伤累积演化的最终体现^[2-4]。因此,通过再现岩石加卸荷过程中的细观破裂演化,开展加卸荷条件下岩石细观特征研究,深化对其损伤破裂机制的认知,具有重要的工程意义。

数值模拟方法目前已成为研究岩石力学特性与细观损伤破坏的核心手段。基于离散元理论的颗粒流程序(Particle Flow Code, PFC)软件,因无需预设复杂强度准则即可模拟细观损伤演化而受到学者广泛关注,且已被证实适用于研究岩石细观破坏问题^[5-8]。吴顺川等^[9]基于 PFC^{3D} 软件开展了卸荷岩爆数值模拟;马春驰等^[10]利用 PFC^{3D} 分析了不同围压下花岗岩卸荷岩爆效应;田文岭等^[11]通过 PFC^{2D} 研究了 2 种卸围压路径下砂岩细观破裂特征;丛怡^[12]、金爱兵^[13] 等分别借助 PFC^{3D} 与 PFC^{2D} 探究了不同卸荷速率下岩石力学特性;LI Xibing 等^[14] 利用 PFC^{2D} 分析了含节理大理岩峰前卸荷的细观响应;刘婕等^[15] 结合试验与 PFC^{3D} 揭示了花岗岩加卸荷破坏机制。

现有基于颗粒流软件的研究多聚焦于岩石宏观力学性能与变形破坏特征,针对加卸荷条件下岩样内部细观破坏演化特征的研究仍相对匮乏。鉴于此,笔者拟基于 PFC^{3D} 颗粒流数值模型软件,对闪长岩加卸荷过程进行三维数值模拟,并建立模型,通过

与室内试验结果对比验证模型合理性;在此基础上,系统分析模型内部细观颗粒速度、颗粒间接触力及拉剪微裂纹的空间分布与演化特征,以期揭示闪长岩加卸荷过程的细观破裂机制。

1 三维离散元模型构建与加卸荷方案

1.1 平行节理模型

PFC^{3D} 作为岩石细观力学研究的主流软件之一,其内置的平行节理模型常用于模拟脆性岩石的宏细观力学行为^[16-17]。

1.2 细观参数标定

采用秦岭引汉济渭工程的闪长岩为研究对象,通过室内三轴压缩试验获得其基本力学参数。数值模型尺寸为 50 mm × 100 mm,由 23 771 个不同尺度的刚性颗粒组成。为体现非均质性,利用高斯函数为颗粒间接触赋予差异化强度特性,经反复试算,确定细观参数(表 1)。

表 1 PFC ^{3D} 细观参数			
Table 1 Meso parameters in the PFC ^{3D}			
参数	量值	参数	量值
最小半径/m	0.000 6	摩擦因数	0.001
粒径比	2.50	内摩擦角/(°)	4.5
安装间距/m	0.000 2	颗粒密度/(kg · m ⁻³)	2 710
黏结弹性模量/GPa	8.563	黏结张拉强度/MPa	20.02 ± 0.275

不同围压下试验与数值模拟中的偏应力与轴向应变曲线如图 1 所示,不同围压下试验与数值最大偏应力及其对应轴向应变值见表 2。由图 1 和表 2

可见:室内试验与数值模拟所获得的不同围压条件下闪长岩的峰值强度及轴向应变比较接近。因此,该组细观力学参数可被用于后续模型加荷计算分析。

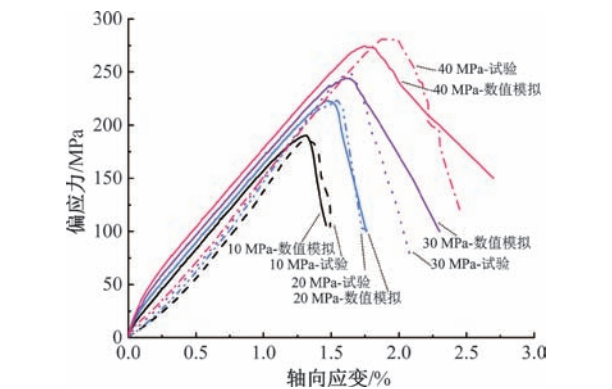


图1 不同围压下试验与数值模拟中的应力应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves in laboratory test and numerical simulation under different confining pressures

表2 不同围压下试验与数值模拟中最大偏应力与对应轴向应变
Table 2 Maximum deviatoric stress and corresponding strain in laboratory tests and numerical simulations under different confining pressures

围压/MPa	10	20	30	40
试验最大偏应力/MPa (对应轴向应变值/%)	190.274 (1.320)	221.412 (1.485)	243.919 (1.626)	275.674 (1.811)
数值最大偏应力/MPa (对应轴向应变值/%)	185.511 (1.337)	222.051 (1.527)	248.520 (1.633)	280.871 (1.872)
相对强度误差/% (相对轴向应变误差/%)	2.503 (1.288)	0.289 (2.828)	1.886 (0.431)	1.885 (3.368)

注:相对强度(轴向应变)误差为试验与数值模拟数据之差的绝对值与试验数据之比。

1.3 试验方案

试验采用的加卸荷应力路径如图2所示,主要步骤为:①先以固定速率同时施加围压与轴压至预定静水应力A点;②维持岩样围压不变,以0.1 mm/min的位移控制方式施加轴压至岩样三轴压缩峰值强度的 $n(0<n<1)$ 倍处,即B点;③按预定速率进行卸围压,同时保持轴向加载速率不变,直到岩样完全破坏为止。

图3为试样在30 MPa围压下,数值模拟中以0.002、0.004、0.008和0.016 MPa/时步4种不同

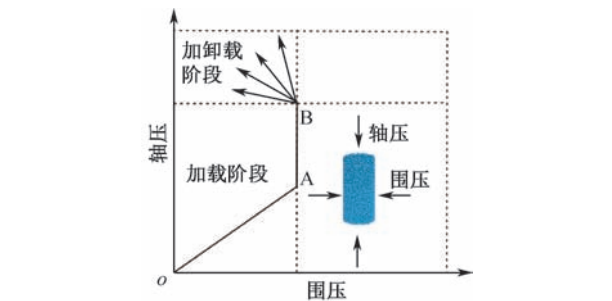


图2 加卸荷应力路径
Fig.2 Loading and unloading stress path

力/时步卸载方式获得的卸荷曲线图与室内试验中以0.008、0.016、0.032和0.064 MPa/s等4种不同卸载方式获得的卸载曲线图。由图3可知:数值模拟中4种不同的力/时步卸载方式获得的卸载应力曲线与室内试验应力控制方式获得卸载应力曲线基本吻合,说明数值模拟中力/时步的卸载方式与试验中应力控制卸载方式作用相同,可用于后续模型卸载计算分析。

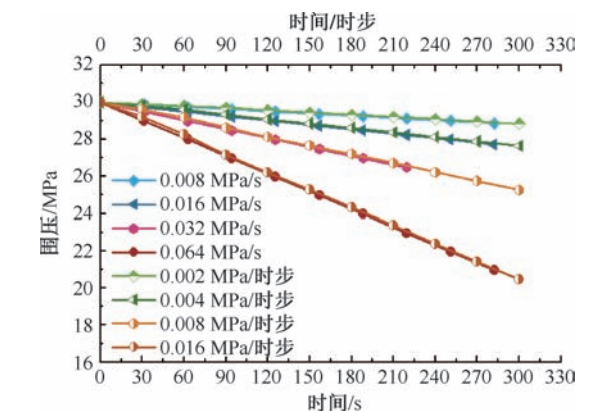


图3 试验与数值模拟中卸荷应力曲线
Fig.3 Unloading stress curves in test and numerical simulation

当初始围压为20 MPa,卸围压速率为0.002 MPa/时步,卸围压速率为0.008 MPa/s时,加卸荷条件下数值模拟与试验获得的应力应变曲线如图4所示。由图4可知:数值模拟获得的加卸荷曲线与室内试验获得的加卸荷曲线二者基本吻合,说明数值模拟获得的本构模型曲线能够较好地反映实际闪长岩的力学特性,也说明基于上述细观力学参数及卸围压方式进行闪长岩加卸荷数值模型具有一定的可靠性。

2 加卸荷模型的细观破裂特征分析

三轴加卸荷试验中,模型宏观变形主要为轴向和径向,将数值模型进行不同部位划分,如图5所

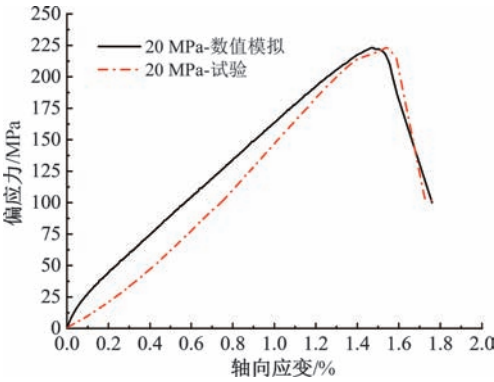


图 4 加卸荷条件下数值模拟与试验获得的应力应变曲线

Fig. 4 Numerical simulation and test curves of stress and strain under loading and unloading condition

示。轴向某一节柱体范围为 $Z_i(i=1,2,\dots,5)$, 径向某一圆环柱体范围为 J_i 。取 20 MPa 围压条件下闪长岩模型加卸荷本构曲线上的 4 个关键点(加卸荷初始点 A、加卸荷峰前点 B、加卸荷峰值点 C 及加卸荷峰后点 D), 分析加卸荷细观破裂特征, 得到模型加卸荷过程中轴向与环向变形曲线, 如图 6 所示。

2.1 颗粒速度变化特征

加卸荷条件下, 模型内颗粒速度演化是宏观加卸荷过程中细观损伤的动态响应, 加载阶段颗粒约束稳定, 速度变化幅度小、细观损伤程度低; 卸载阶段侧向约束降低, 导致颗粒速度显著变化。轴向不同区域内颗粒的轴向速度分量变化特性如图 7 所示。图 7 显示, 峰前阶段(A、B、C 点), 颗粒轴向速度沿模型轴向呈显著端部大、中部小分布, 端部区域(Z_1, Z_5)均值明显高于中部区域(Z_3)。其成因直接与模型边界条件及加载方式相关, 端部(Z_1, Z_5)为轴向荷载输入端口, 刚性加载板直接驱动附近颗粒运动, 使其动能最高; 中部区域(Z_3)颗粒受内部颗

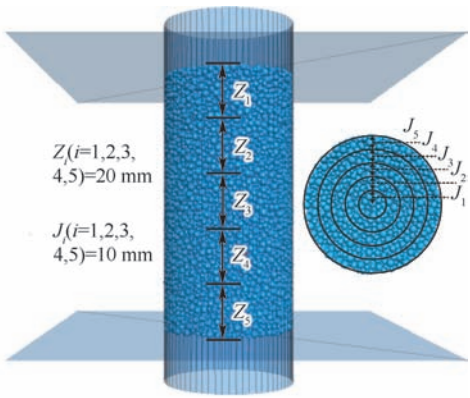


图 5 模型内不同部位划分

Fig. 5 Division of different parts in the model

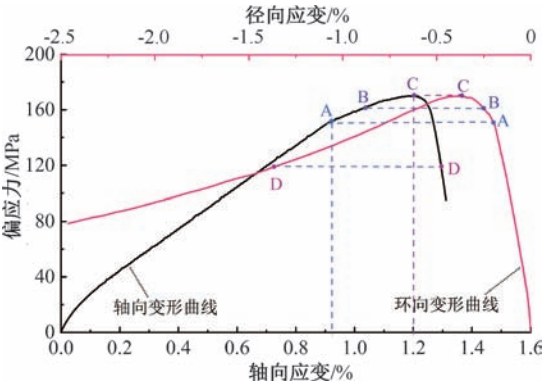
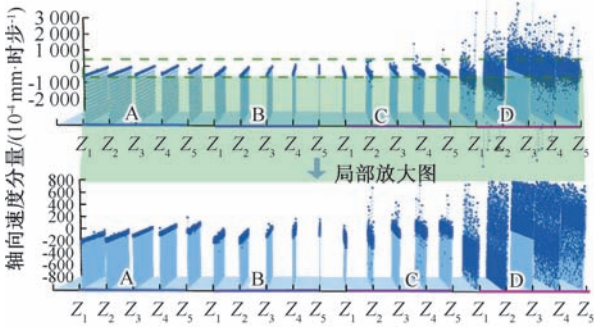


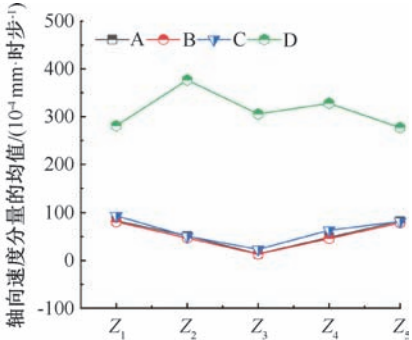
图 6 20 MPa 围压下模型加卸荷过程中轴向与环向变形曲线

Fig. 6 Axial and circumferential deformation curves of model during loading and unloading under 20 MPa confining pressure

粒约束更强, 仅传递应力, 故速度相对较低。这种非均匀速度分布是宏观应力分布与能量输入位置在微观尺度的直接体现。峰前(B、C 点)颗粒轴向速度整体提升, 但上述空间分布特征保持一致; 峰后 D 点, 各轴向区域颗粒轴向速度剧烈跃升, 均值显著提高。径向速度分量的变化特性如图 8 所示。图 8 显



(a) 颗粒轴向速度分量的变化特征



(b) 颗粒轴向速度分量的均值变化曲线

图 7 轴向不同区域内颗粒的轴向速度分量变化特征

Fig. 7 Change law of axial velocity components of particles in different axial regions

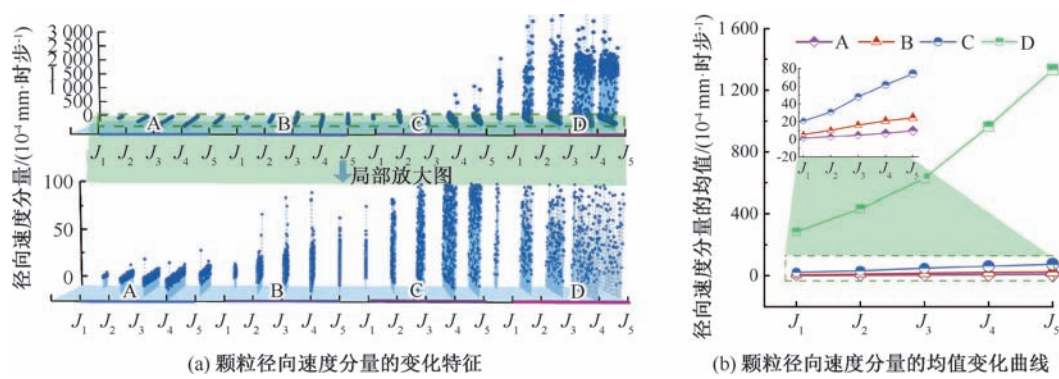


图 8 径向不同区域内颗粒的径向速度分量的变化特征

Fig. 8 Change law of radial velocity components of particles in different radial regions

示,加卸荷全程颗粒径向速度沿模型径向呈内(J_1)向外(J_5)线性递增梯度分布。峰前阶段(A、B、C点),颗粒径向速度整体偏低且随进程缓慢递增,外层区域(J_4 、 J_5)增幅更显著;峰后D点,各径向区域速度呈爆发式增长,外层 J_5 区域均值超峰前C点同区域18倍。

2.2 颗粒间接触力变化特征

为揭示 A、B、C、D 4 个关键点所对应的微观力学机制,绘制不同分析区域内的颗粒间接触力分布图。其中,轴向不同范围内颗粒接触法向力与剪力的演变特征,分别如图 9 与图 10 所示;径向不同范围内的颗粒接触法向力变化特征如图 11 所示。

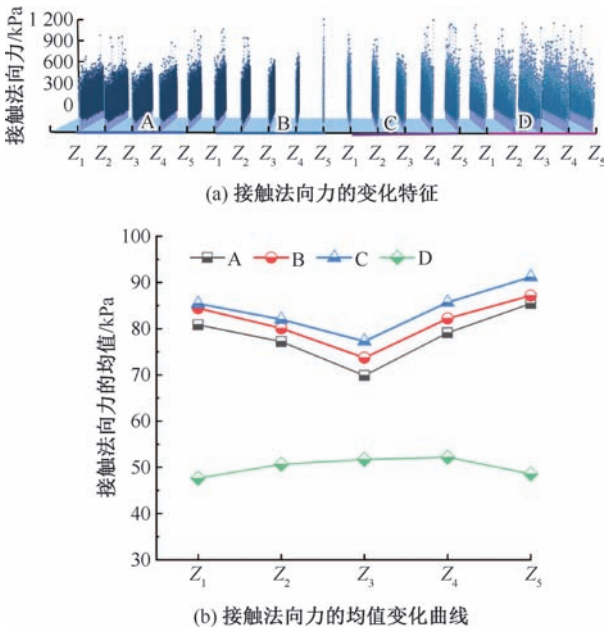


图 9 轴向不同范围颗粒间的接触法向力变化特征

Fig. 9 Change law of particle contact normal force in different axial ranges

图 9 显示,加卸荷曲线 A、B、C 点(峰前阶段),模型轴向颗粒接触法向力的活跃区间与均值呈端部

大、中部低分布,且随加卸荷进程逐渐增大,这与上下端面为能量输入端直接相关。峰后 D 点,接触法向力活跃区间较峰前有所扩大,但均值显著降低;其成因在于侧向约束减弱引发颗粒重组,峰后卸荷面附近径向速度激增导致动能耗散与有效承载接触数锐减,直接驱动宏观承载力下降。

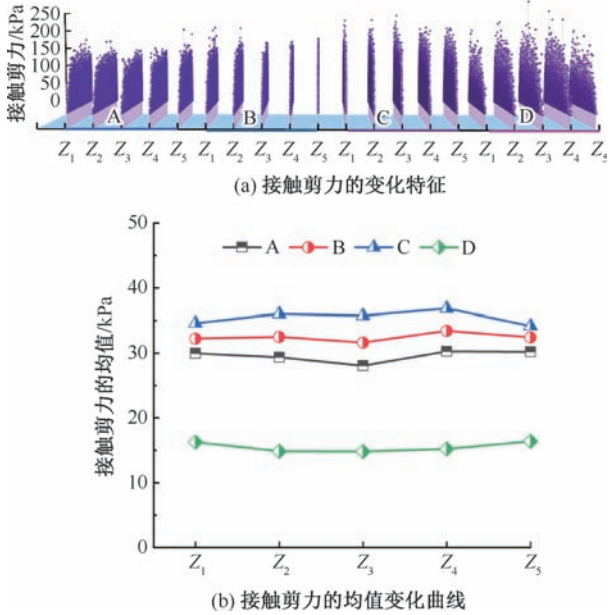


图 10 轴向不同范围颗粒接触剪力变化特征

Fig. 10 Change law of particle contact shear force in different axial ranges

图 10 显示,加卸荷峰值强度前,模型轴向不同部位颗粒接触剪力的活跃区间及均值曲线变化基本一致;随加卸荷进程推进,二者均逐渐升高,表明该过程中模型内部颗粒接触法向力受上下端部效应影响较小。峰后 D 点,颗粒接触剪力的活跃区间及均值较峰前显著降低,说明模型轴向不同部位颗粒接触剪力与其宏观承载能力呈显著正相关。

由图 11 可知:加卸荷峰值强度前,模型径向颗

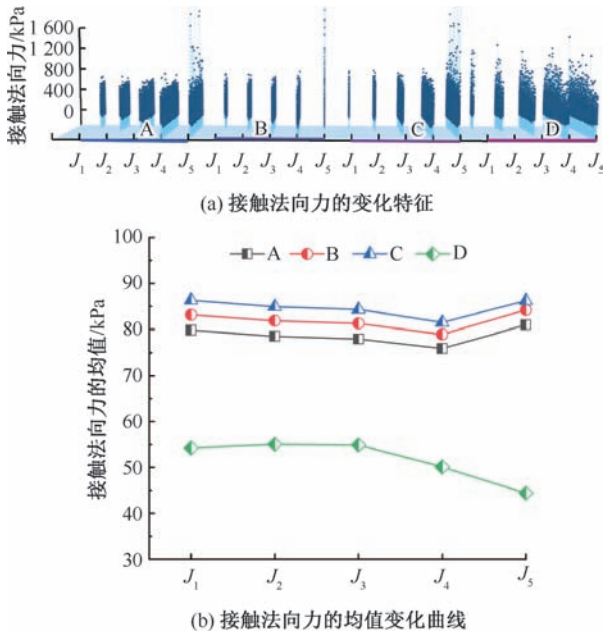


图 11 径向不同范围颗粒接触法力变化特征

Fig. 11 Change law of particle contact normal force in different radial ranges

粒接触法向力的分布区间及均值呈先降后升特征,卸载面附近逐渐回升;峰后 D 点处,颗粒接触法向力分布区间与峰前无显著差异,但均值显著降低。轴向压缩与径向卸荷的综合作用使模型内部颗粒向卸荷面运动,峰前侧向约束限制了卸荷面附近颗粒的径向位移,导致该区域颗粒接触法向力高于内部;峰后模型承载力与侧向约束快速衰减,使得卸荷面附近颗粒接触法向力反而低于内部。

2.3 微裂纹分布特征

在颗粒流模型中,外部荷载作用下模型内拉剪微裂纹的形成是其内部损伤演化最直观反映。为探究加卸荷过程中模型内部拉剪微裂纹的变化及分布特征,分析本构曲线上 4 个关键点处的模型轴向与径向拉剪裂纹空间分布特征。加卸载过程中模型内拉裂纹空间分布特征和内剪裂纹空间分布特征分别如图 12 和图 13 所示。

由图 12 可知:加卸荷过程中模型内部拉裂纹沿轴向分布较均匀,沿径向主要聚集在模型边缘,即卸

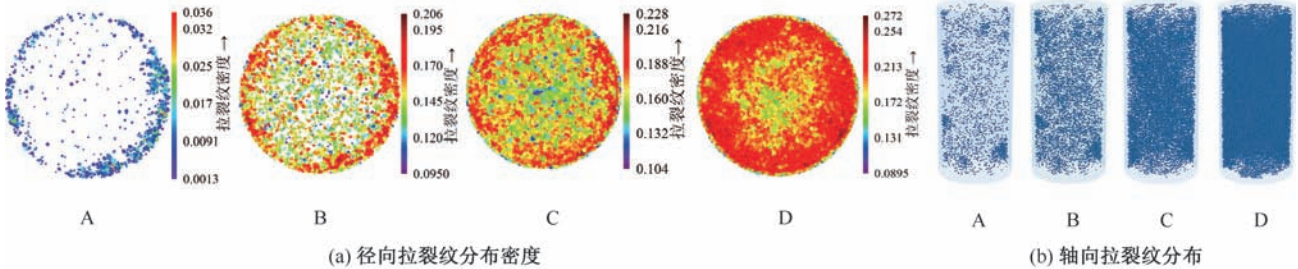


图 12 加卸载过程中模型内拉裂纹空间分布特征

Fig. 12 Spatial distribution characteristics of tensile fractures during loading and unloading

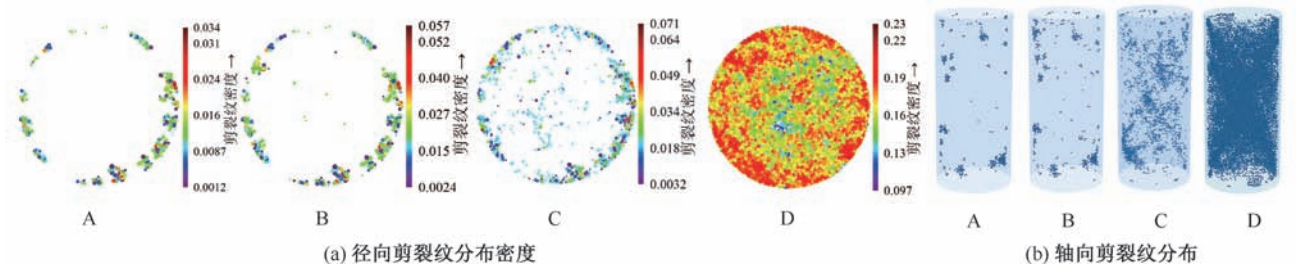


图 13 加卸载过程中模型内剪裂纹空间分布特征

Fig. 13 Spatial distribution characteristics of shear fractures during loading and unloading

荷面附近,在其截面中心部位分布较低。随着加卸荷过程的进行,模型内部拉裂纹分布密度呈现快速的增大趋势,尤其是越过 C 点后变化尤为显著,可见加卸荷过程中,卸荷面附近侧向约束作用的降低效应对其内部拉裂纹的分布具有明显的影响。图 13 显示,加卸荷峰前(C 点前),模型内部剪裂纹数量较少,径向以边缘聚集为主,轴向集中于上下部

位左右边缘,中心区域分布稀疏;峰后剪裂纹呈快速增长趋势,径向仍以边缘分布为主,轴向则集中于内部双剪斜面附近,形成宏观双剪主贯通裂纹,表明峰后破坏伴随一定延性特征。

3 岩样细观响应机制分析

图 14 为 20 MPa 围压下闪长岩数值模型加卸荷

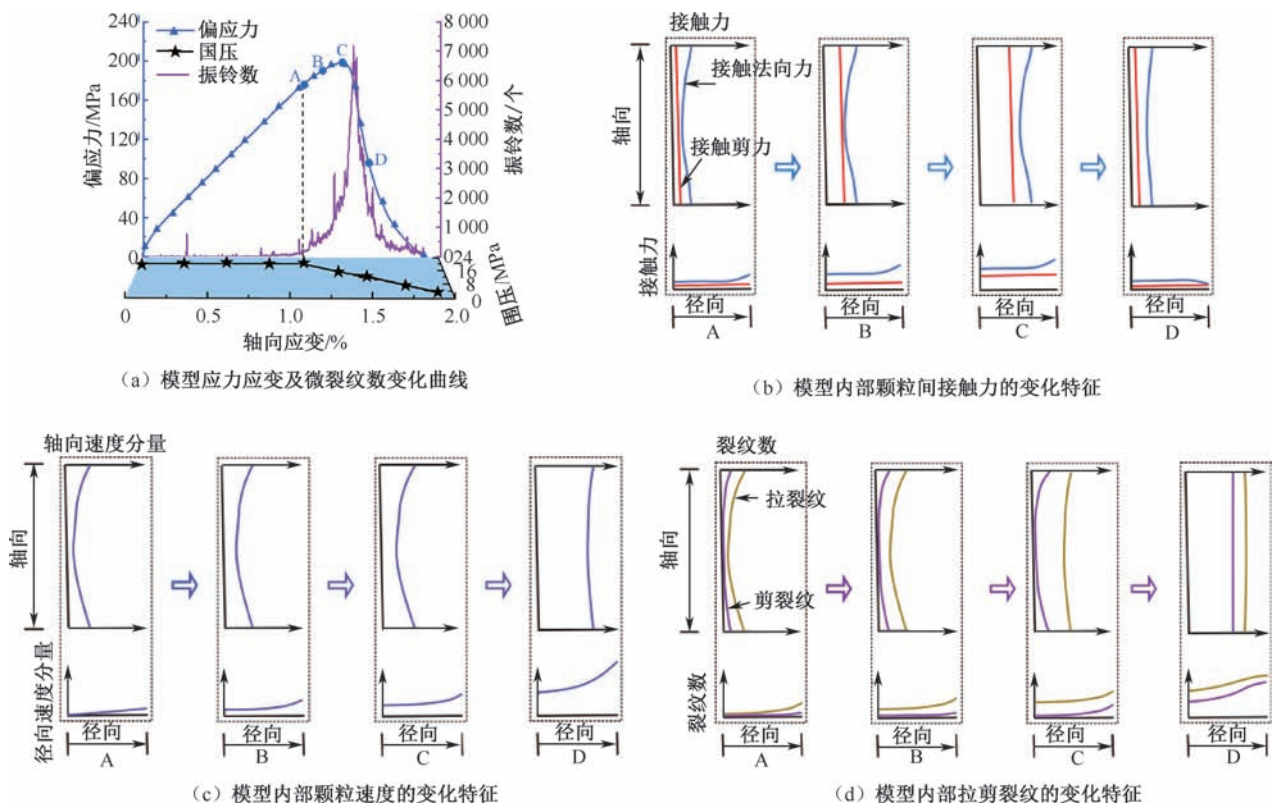


图 14 闪长岩模型加卸荷过程中内部细观变化特征

Fig. 14 Change curves of model stress-strain and number of micro-cracks during loading and unloading

过程中的宏观变形曲线与细观变化特征。

由图 14 可知:在 A 点前,模型处于弹性状态。在 A 点处,由于模型上下端部为外部能量的输入端,使得模型上下端部附近颗粒的轴向速度分量及法向接触力较中部大,由于较活跃颗粒部位容易产生拉剪微裂纹,致使模型上下端部微裂纹大于中部。模型压缩变形过程中,模型内部颗粒将向压缩方向及径向运动,模型径向边缘由于初始围压的作用使得其内部颗粒径向运动受阻,从而使模型径向边缘附近颗粒间的接触法向力较其内部大。

在加卸荷峰值强度前(A—C)阶段,模型内部颗粒的轴向速度分量沿模型轴向变化特征与 A 点处的轴向加载过程相似,但由于卸围压的作用使得模型内部颗粒的轴向速度、接触力及拉剪微裂纹整体变化较 A 点处要显著,同时因模型内部颗粒间的抗拉强度小于其抗剪强度,从而使得模型内部产生的拉裂纹数显著大于剪裂纹。模型压缩过程中,模型内部颗粒向径向运动,由于卸围压作用使得模型内部颗粒径向运动受阻减弱,致使模型径向边缘附近颗粒的径向速度分量及拉剪微裂纹较其内部变化要更为剧烈,并随着加卸荷过程中的持续逐渐由边缘及端部部位向模型内部及中部部位扩展,当接近加卸荷峰值强度时,模型内部部分剪裂纹在其内部双剪部位开始逐渐聚积,并与其附近拉裂纹一块形成拉剪主贯通面。

当模型进入峰值后跌落阶段后,由于宏观承载能力以及侧向约束作用的快速降低效应,致使模型内部颗粒速度快速增大,较大的颗粒速度使得模型内部拉剪裂纹迅速产生,同时又促使颗粒间的接触力快速降低。

4 结 论

- 1) 文中揭示了卸荷面动能释放主导岩样扩容失稳机制,加卸荷峰值前,颗粒轴向速度呈“端部>中部”梯度分布,径向速度由内向外线性增大;峰值后,轴向与径向速度骤增(径向速度峰后可达峰前 18 倍),卸荷面附近颗粒动能释放显著。
- 2) 峰值前接触法向力轴向呈端部集中、径向呈内外高中间低的非均匀分布,剪力分布较均匀且持续增长;峰值后接触法向力与剪力在快速衰减,即力链结构杯被快速瓦解致使其承载力骤降。
- 3) 阐明卸荷破裂的空间分异特征,在峰值前,拉裂纹主导,沿卸荷面聚集且轴向均匀分布;在峰值后,剪裂纹于双剪部位加速贯通,拉裂纹向内部扩展,形成拉-剪协同破坏带,卸荷面附近损伤密度显著高于内部。

参考文献

- [1] CAO Wenzhuo, LI Xibing, TAO Ming, et al. Vibrations induced by high initial stress release during underground excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53:78-95.
- [2] CHEN Miao, YANG Shengqi, RANJITH P G, et al. Cracking behavior of rock containing non-persistent joints with various joints inclinations[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 109: DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102701.
- [3] 张鹏海, 杨天鸿, 徐涛, 等. 蚀变花岗片麻岩破坏过程中声发射事件的演化规律[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2 189-2 197.
ZHANG Penghai, YANG Tianhong, XU Tao, et al. The evolution law of acoustic emission events during the fracture process of altered granite gneiss[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2 189-2 197.
- [4] 李兆霖, 王连国, 姜崇扬, 等. 基于实时 CT 扫描的岩石真三轴条件下三维破裂演化规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 937-949.
LI Zhaolin, WANG Lianguo, JIANG Chongyang, et al. Three-dimensional fracture evolution patterns of rocks under true triaxial conditions based on real-time CT scanning[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 937-949.
- [5] LI Xiaofeng, LI Haibo, ZHAO Jian. 3D polycrystalline discrete element method (3PDEM) for simulation of crack initiation and propagation in granular rock[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 90:96-112.
- [6] HUANG Yanhua, YANG Shengqi, TIAN Wenling. Crack coalescence behavior of sandstone specimen containing two pre-existing flaws under different confining pressures[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 99:118-130.
- [7] ZHANG Xiaoping, WONG L N Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: a numerical study based on parallel bonded-particle model approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5): 711-737.
- [8] SILVA V R S, RANJITH P G, WU Bisheng, et al. Micro-mechanics based numerical simulation of NaCl brine induced mechanical strength deterioration of sedimentary host-rock formations[J]. Engineering Geology, 2018, 242:55-69.
- [9] 吴顺川, 周喻, 高斌. 卸载岩爆试验及 PFC^{3D} 数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 2): 4 082-4 088.
WU Shunchuan, ZHOU Yu, GAO Bin. Study of unloading tests of rock burst and PFC^{3D} numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4 082-4 088.
- [10] 马春驰, 李天斌, 陈国庆, 等. 硬脆岩石的微观颗粒模型及其卸荷岩爆效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 217-227.
MA Chunchi, LI Tianbin, CHEN Guoqing, et al. Study of unloading tests of rock burst and PFC^{3D} numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 217-227.
- [11] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华. 卸围压下砂岩力学特性及细观机制颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增 2): 775-782.
TIAN Wenling, YANG Shengqi, HUANG Yanhua. Particle flow analysis of mechanical behavior and meso-mechanism of sandstone under unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 775-782.
- [12] 丛怡, 丛宇, 张黎明, 等. 大理岩加、卸荷破坏过程的三维颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1 179-1 186, 1 212.
CONG Yi, CONG Yu, ZHANG Liming, et al. 3D particle flow simulation of loading-unloading failure process of marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1 179-1 186, 1 212.
- [13] 金爱兵, 刘佳伟, 赵怡晴, 等. 卸荷条件下花岗岩力学特性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(增 1): 459-467.
JIN Aibing, LIU Jiawei, ZHAO Yiqing, et al. Mechanical characteristics analysis of granite under unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 459-467.
- [14] LI Xibing, CHEN Zhenghong, WENG Lei, et al. Unloading responses of pre-flawed rock specimens under different unloading rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(7): 1 516-1 526.
- [15] 刘婕, 丛宇, 张黎明, 等. 花岗岩真三轴加、卸载破坏的细观损伤机制研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(8): 2 677-2 688.
LIU Jie, CONG Yu, ZHANG Liming, et al. Mesoscopic damage mechanism of granite under true triaxial loading and unloading[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(8): 2 677-2 688.
- [16] YANG Shengqi, YIN Pengfei, ZHANG Yuanchao, et al. Failure behavior and crack evolution mechanism of a non-persistent jointed rock mass containing a circular hole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 114:101-121.
- [17] WU Shunchuan, XU Xueliang. A study of three intrinsic problems of the classic discrete element method using flat-joint model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(5): 1 813-1 830.



作者简介: 安学旭 (1989—), 男, 陕西延安人, 博士, 讲师, 主要从事深部隧洞病害防控等方面的研究。E-mail: 412169225@qq.com。