

卸围压下砂岩力学特性及细观机制颗粒流分析

田文岭¹, 杨圣奇^{1,2}, 黄彦华¹

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 鉴于试验砂岩内摩擦角较大及峰后脆性强的特点, 选用颗粒流程序 PFC^{2D} 中的 cluster 单元进行模拟, 在常规三轴压缩试验校正的基础上得到一组能够真实反映砂岩宏观力学行为的细观参数, 模拟了砂岩两种卸围压路径, 结果表明其峰值强度随初始轴向应力的增大而不断增大, 其规律与试验相同。选取了两种卸围压路径微裂纹数目随应力-应变的演化趋势进行分析, 结果表明卸围压对试样造成的损伤较加轴压大, 同时初始轴向应力增大一定程度上增加了试样承受破坏的能力。通过对不同应力路径裂纹两侧位移场的分析可知卸围压会造成颗粒在横向产生位移不连续, 导致试样破坏。

关 键 词: 卸围压; 颗粒流模拟; cluster 单元; 微裂纹; 位移场

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 2-0775-08

Particle flow analysis of mechanical behavior and meso-mechanism of sandstone under unloading confining pressure

TIAN Wen-Ling¹, YANG Sheng-Qi^{1,2}, HUANG Yan-Hua¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Cluster element in particle flow code (PFC^{2D}) is used to construct numerical specimen in light of the large internal friction angle and brittleness at post-peak stage of tested sandstone. A set of micro-parameters that can reproduce the macromechanical behavior of sandstone were calibrated through comparing with the experimental results under triaxial compression. Then two different radial unloading paths are simulated. The numerically simulated results show that the peak strength increases with the increasing of initial axial stress, and has a similar trend with the experimental results. The evolution characteristic of microcrack numbers under two radial unloading paths is analyzed. The damage extent under radial unloading is more serious than that under axial loading. Furthermore, the ability to withstand damage enhance with the increasing of initial axial stress. From the analysis of displacement field under different loading paths, it is clear that sandstone fails due to the discontinuity of displacement.

Keywords: radial unloading; simulation by particle flow; cluster cell; microcrack; displacement field

1 引 言

隧洞工程、露天开采及边坡工程的开挖过程实际上是岩体在某一方向的应力及应变释放过程, 同时地下工程开挖后围压也在不断变化, Brzovic^[1]通过长时间的观察发现围压是先少量增加后降低的过程。开挖过程中地应力重新平衡, 是一个复杂的加卸载过程, 研究岩石的特性一般采用常规三轴压缩试验。李建林等^[2]通过对三峡工程永久船闸高边坡

的模拟发现, 加荷与卸荷存在区别。同时 Lau 等^[3]指出现有的加荷试验路径与实际工程不符, 采用卸荷路径测定岩石力学参数则会更加精确。由于开挖卸荷引起的岩体失稳问题十分普遍, 而卸荷岩体力学特性的研究不够成熟, 尤其是关于岩体卸围压的细观机制研究较少, 进一步完善发展卸荷岩体的理论, 对揭示非连续岩体卸荷失稳机制及解决工程问题具有重要意义。

关于卸荷岩体的力学性质研究主要采用室内试

收稿日期: 2016-0-

基金项目: 江苏省杰出青年基金项目(BK20150005); 国家自然科学基金面上项目(41272344); 江苏省双创团队资助项目(2014)

This work is supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province for Distinguished Young Scholars (BK20150005); National Natural Science Foundation of China (41272344); Team Project Funded by 2014 Jiangsu Innovation and Entrepreneurship Program.

第一作者简介: 田文岭, 男, 1990年生, 博士生, 从事裂隙岩体破裂过程研究。E-mail: tianwenling3@163.com

通讯作者简介: 杨圣奇, 男, 1978年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事深部岩石力学与地下工程方面的研究。E-mail: yangsqi@hotmail.com

验的方法, 尤明庆等^[4]保持轴向位移不变进行三轴卸荷试验, 用不同围压下三轴压缩全过程曲线对卸荷过程进行定性地解释, 以本征强度和塑性变形统一研究了三轴压缩和卸围压两种力学过程。高春玉^[5]对锦屏一级水电站坝址区大理岩试样进行加卸载条件下的三轴试验, 设计了 4 种不同的加、卸载路径, 研究了不同应力路径下岩石的变形破坏规律及主要参数的变化规律。王斌等^[6]对锦屏二级水电站大理岩进行 4 种应力途径下的加卸载试验, 研究其强度及宏观破坏特征分析, 发现大理岩峰前卸围压强度参数对围压最敏感, 卸载岩石破坏具有较强的张性破裂特征, 并通过分析破坏断口 SEM 扫描结果, 证明卸载过程中伴有拉剪破坏。李宏哲等^[7]通过对大理岩加卸载变形特性试验, 从体积变形的角度出发, 建立锦屏大理岩加卸围压本构模型。张黎明等^[8]对硬质灰岩进行加轴压卸围压试验发现, Drucker-Prager 和 Mogi-Coulomb 的回归效果较好, 采用经验方法和数学方法证明了 Mogi-Coulomb 求出的摩擦角和黏聚力更为合适。黄润秋等^[9]、黄达等^[10]通过加卸载试验研究了卸荷过程的应力-应变特征、破裂模式及本构模型, 发现卸荷过程中的岩石破坏是回弹变形和扩容所致, 裂纹主要以张裂纹为主。苏承东等^[11]研究不同应力路径下煤样声发射特征, 发现卸围压试验声发射计数更大、能量更高, 煤样破坏更加剧烈。牛双建等^[12]通过三轴卸围压试验得到不同初始损伤岩样, 并对试样进行单个试件进行不同围压下的常规三轴试验, 定义损伤变量, 研究峰值强度与损伤变量的关系。许国安等^[13]、张黎明等^[14]分别对砂岩和大理岩进行单轴、常规三轴和卸围压试验研究, 分析了不同应力路径下的能量变化规律, 结果表明常规三轴储能极限大于峰前卸围压、峰前卸围压大于单轴压缩储能极限。

以上试验研究极大的丰富了人们对于卸围压下岩体力学行为的认识, 但关于卸围压下岩石的细观力学行为研究较少。由于 PFC 颗粒流程序可以很好地记录试样的破裂过程, 已经广泛应用于岩石破裂机制的研究中^[15-16]。本文在前人试验^[17]的基础上采用颗粒流模拟的方法研究卸围压应力路径下的岩石细观破坏机制。

2 数值模拟方法

颗粒流法是 Cundall 等^[18]在离散元的基础上采用分子动力学的原理开发出的数值模拟方法, 主要应用于岩石类材料的基本特性、颗粒物质的动力学响应及岩石类材料的破裂过程等基本的问题研究

中^[19]。颗粒流程序主要使用圆盘或者球作为基本单元模拟真实岩石材料的力学行为, 由于颗粒间无法形成自锁力, 无法达到较高的内摩擦角和压拉比, 在此基础上开发出了 clump 单元^[20]和 cluster 单元^[19]。clump 单元由不可分割的若颗粒组成, 允许颗粒之间产生部分重叠, 用于构建不同形状的单元, 模拟岩石晶粒破坏过程中的自锁现象, 但由于 clump 单元自身无法破坏, 且当围压较高时易产生脆延性转化现象。cluster 单元由相邻若干颗粒胶结而成, 胶结同样为 PB 模型, 但强度参数较大, 当颗粒间的法向或者切向应力达到其强度时, cluster 单元会发生破坏。本次模拟的试样内摩擦角较大, 且峰后表现为脆性, 为了更加真实地反映该组砂岩的力学性能, 数值模拟中采用 cluster 单元。

2.1 数值建模

为尽可能使数值模拟与试验相似, 选取数值模型尺寸与试验相同, 长和宽分别为 100 mm 和 50 mm, 颗粒半径在 0.25~0.40 mm 之间。先根据颗粒的半径及属性在墙内随机生成一定数目的颗粒, 通过半径调整法使内应力平衡, 其后删除接触少于 3 的浮颗粒。当试样初步生成后进行划分 cluster 单元, 首先选取一个颗粒作为 cluster 单元的颗粒, 在此基础上遍历与该颗粒接触的所有颗粒, 并添加到该 cluster 单元中, 当 cluster 单元中的颗粒个数未达到设定颗粒个数时, 程序会自动遍历 cluster 单元中其他颗粒的接触颗粒, 并将其添加到该 cluster 单元中, cluster 单元中的颗粒个数达到设定值, 或者所有颗粒已经划分成功后, 退出划分程序。本文设定 cluster 颗粒个数为 6, 通过划分的结果见图 1。

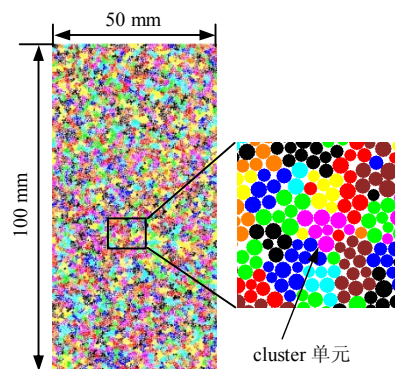


图 1 数值模拟岩样

Fig.1 Numerical simulation sample

2.2 细观参数验证

由于 cluster 单元依然采用 PB 接触模型, 其细

观参数调试过程与 PB 模型相似。首先在保持刚度比和内摩擦角不变的情况下通过调整颗粒接触模量与平行黏结模量的方法控制压缩弹性模量, 然后通过调整刚度比控制泊松比, 此过程中弹性模量会发生变化, 所以要反复迭代直至达到合理的弹性模量和泊松比, 再在此基础上通过调整平行黏结法向强

度和切向强度的方式调整试样的内摩擦角和黏聚力。由于 cluster 单元需要对单元内部和外部的平行黏结强度进行设置, 为了简化调试过程, 将 cluster 单元内部平行黏结强度设定一个较大的值, 再进行外部平行黏结参数的调试, 不断调试得到表 1 中的细观参数。

表 1 PFC^{2D} 细观参数
Table 1 Micro-parameters in PFC^{2D}

最小半径 / mm	最大半径 / mm	接触模量 / GPa	连接刚度比	颗粒间摩擦系数	平行连接半径因子	平行黏结模量 / GPa	平行黏结刚度比	cluster 内部黏结强度 / MPa		cluster 外部黏结强度 / MPa	
								法相	切向	法相	切向
0.25	0.40	17	2.5	0.85	1.00	17	2.5	150±10	350±10	30±4	220±10

表 2 为不同围压下试样峰值强度试验与模拟对比。从图中可以看出, 除单轴压缩条件下试样峰值强度差别较大以外, 其他围压条件下峰值强度试验与模拟结果的相对误差都小于 10%。这是由于 PFC 程序的峰值强度随围压变化遵循 Mohr-Coulomb 强度准则, 而试验结果单轴压缩强度明显低于回归线。图 2 为不同围压下峰值强度试验与模拟对比结果, 从图中可以看出, 试验与模拟结果吻合较好, 模拟结果点距离回归线较近。总体而言, 模拟结果峰值强度随围压的变化与试验结果相似, 遵循 Mohr-Coulomb 强度准则。

表 2 试验和模拟主应力峰值强度对比^[17]
Table 2 Compression of peak strength in experiment and numerical simulation^[17]

对比	不同围压下峰值强度 / MPa				
	0	5	10	15	25
试验 / MPa	76.96	128.06	133.69	170.52	217.61
模拟 / MPa	86.95	118.30	140.50	168.70	210.20
相对误差 / %	0.13	0.08	0.05	0.01	0.03

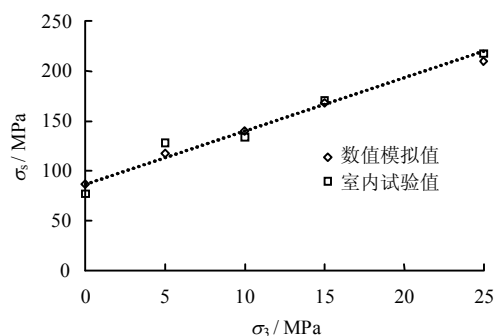


图 2 不同围压下砂岩试验与模拟主应力峰值强度对比^[17]

Fig.2 Comparisons of peak strengths of sandstone obtained from experiment and numerical simulation under different confining pressures^[17]

图 3 为砂岩常规三轴应力-应变曲线模拟结果。

从图中可以看出, 随着围压的增大, 试样的峰值强度及峰值应变都有所增加, 同时弹性模量也会随着围压的增大而不断增加, 其结果与文献[17]的结果相同。图 4 为不同围压下砂岩最终破裂模式试验结果与模拟结果对比。

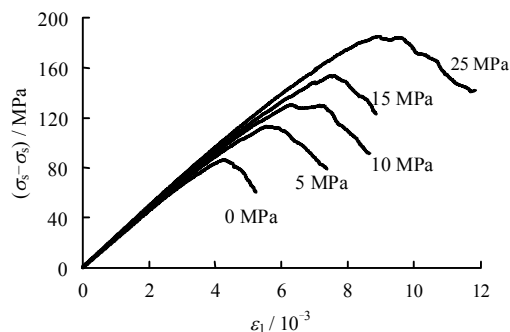


图 3 砂岩常规三轴压缩模拟应力-应变曲线
Fig.3 Conventional triaxial stress-strain curves of sandstone through numerical simulation

试验结果表明试样在单轴压缩条件下主要表现为沿轴向的劈裂破坏, 而试样在一定围压作用下主要表现为一定倾角的剪切破坏; 比较模拟结果可以看出在单轴压缩条件下试样同样以轴向劈裂为主, 当试样围压作用下主要以剪切破坏为主, 但是模拟试样往往会形成两条共轭剪切面。总体而言试验与模拟结果相似, 单轴压缩以轴向劈裂破坏为主, 而围压作用下主要以剪切破坏为主。

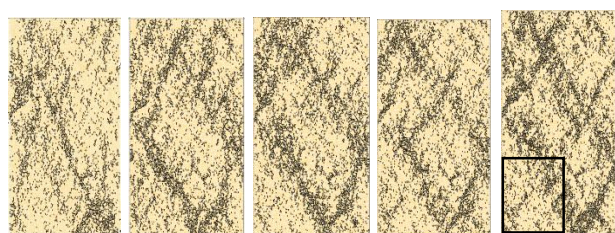
3 不同卸荷路径离散元模拟

为了研究不同卸围压路径下岩石的细观力学响应, 本文在文献[17]试验的基础上选取两个卸围压路径进行模拟, 在保证模拟结果与试验结果与试验结果在宏观上保持一致的情况下进行细观力学行为的分析。两条应力路径: ① 当轴向应力加载至峰

前某点时,保持轴向加载速度不变,以等速率进行卸围压,直至试样破坏。② 当轴向应力加载至峰前某点时,保持轴向应力不变,以等速率卸围压,直至试样破坏。



(a) $\sigma_3=0$ MPa (b) $\sigma_3=5$ MPa (c) $\sigma_3=10$ MPa (d) $\sigma_3=15$ MPa (e) $\sigma_3=25$ MPa
(1) 砂岩



(a) $\sigma_3=0$ MPa (b) $\sigma_3=5$ MPa (c) $\sigma_3=10$ MPa (d) $\sigma_3=15$ MPa (e) $\sigma_3=25$ MPa
(2) 模拟结果

图 4 不同围压下砂岩试验和数值模拟最终破坏模式的对比

Fig.4 Comparison of failure modes of sandstone in experiment and numerical simulation under different confining pressures^[17]

3.1 模拟与试验结果对比

图 5 为不同初始轴向应力加载轴压、卸围压模拟的应力-应变曲线,从图中可以看出,随着初始轴向应力的增加,在保持相同卸围压速率条件下峰值强度会随初始轴向应力的增加而不断增加,但其弹性模量随初始轴向应力的改变几乎不变,该结论与文献[17]相似。图 6 为应力路径①不同初始轴向应力卸围压偏应力峰值强度试验与模拟结果对比,初始围压为 30 MPa,初始轴压分别为 17.5、25.0、32.5 MPa。从图中可以看出,模拟结果应力峰值强度随着初始轴压的增大呈现线性增大的规律,与试验结果对比可知模拟结果可以在一定程度上反映峰值应力随初始轴压的变化规律。

图 7 为不同初始轴向应力卸围压加载轴压试样最终破裂模式试验结果与模拟结果对比。从图中可以看出试验结果试样主要表现为拉剪复合型破坏,在试样中既存在与加载轴呈一定角度的剪切裂纹,同时也存在与最大轴向应力平行的拉伸裂纹;模拟结果显示试样内同样会存在拉伸裂纹和剪切裂纹,但由于模拟离散性较小导致试样的破裂模式随初始轴

向应力的变化不大。

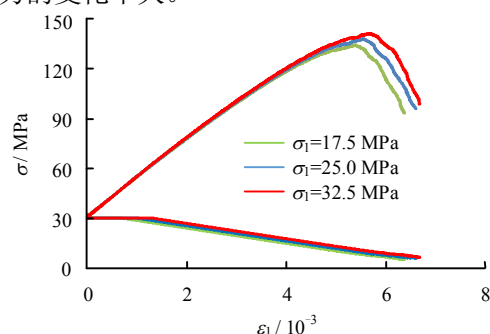


图 5 不同初始轴向应力加载轴压卸围压模拟结果应力-应变曲线

Fig.5 Numerical simulation stress-strain curves under unloading confining pressures axial loading at different initial axial stresses

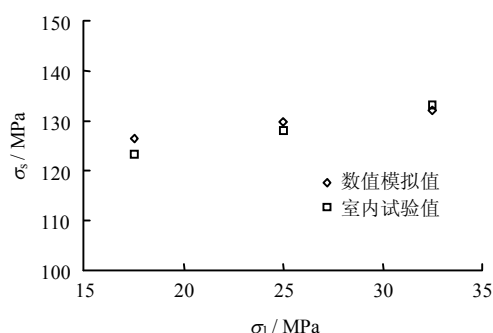
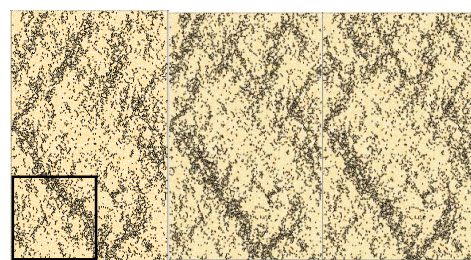


图 6 不同初始轴向应力卸围压偏应力峰值强度试验与模拟对比(应力路径①)^[17]

Fig.6 Comparison of peak strengths obtained from experiments and numerical simulation under unloading confining pressures at different initial axial stresses (stress path①)^[17]



(a) $\sigma_1=17.5$ MPa (b) $\sigma_1=25$ MPa (c) $\sigma_1=32.5$ MPa
(1) 试验结果



(a) $\sigma_1=17.5$ MPa (b) $\sigma_1=25$ MPa (c) $\sigma_1=32.5$ MPa
(2) 模拟结果

图 7 不同初始轴向应力卸围压加载轴压试样数值模拟与试验破裂模式对比^[17]

Fig.7 Comparison of failure modes in numerical simulation and experiments under unloading confining pressures and axial loading at different

initial axial stresses^[17]

图 8 为不同初始轴向应力、恒定轴向应力、卸围压模拟的应力-应变曲线, 包含轴向应力和环向应力随轴向应变的变化。从图中可以看出, 随着卸围压的不断进行, 轴向应力在恒定一段时间后开始迅速下降, 观察环向应力随轴向应变的变化可以看出后期轴向应变速率不断提高。试样峰值应变会随初始轴向应力的提高有所提高, 与文献[17]的结论相同。由图还可以看出, 随着初始轴向应力的增加, 试样发生破坏时的围压有所增大, 换言之之初始轴向应力的增大会降低围压的改变量, 承受围压降低的能力有所降低。

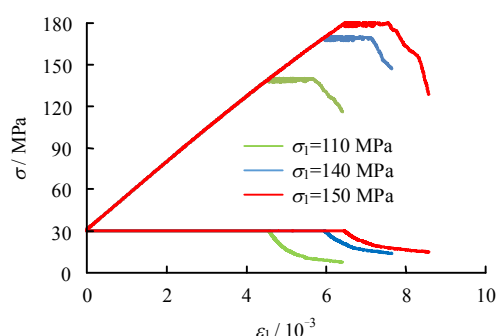


图 8 不同初始轴向应力加载卸围压模拟的应力-应变曲线

Fig.8 Numerical simulation stress-strain curves under constant axial loading and unloading confining pressures at different initial axial stresses

图 9 为应力路径②不同初始轴向应力条件下峰值强度试验与模拟结果对比, 此时初始围压为 30 MPa, 当轴向应力分别加载至 110、140、150 MPa 时, 保持轴向应力不变以相同的速率进行卸围压。从图中可以看出, 试验的试样峰值强度随着初始轴向应力的增加而呈现非线性增加, 与模拟结果可知随着初始轴向应力的增加峰值强度同样呈现非线性增加趋势, 但较试验结果峰值强度略低。图 10 为不同初始轴向应力恒轴压卸围压应力路径下试样最终破裂模式室内试验与数值模拟结果对比。从图中可以看出, 试验结果随着初始轴压的增加试样的破裂模式由拉剪复合型破坏逐渐向剪切破坏过渡; 模拟结果表现为随着初始轴压的增加在试样的右上方逐渐由拉伸破坏向剪切破坏过渡。对比试验和模拟结果可以看出破裂模式总体随初始轴向应力的增加不断由拉剪复合型破坏向剪切破坏过渡。

3.2 不同应力路径下试样颗粒流模拟细观分析

为了更加清楚地认识卸围压对试样最终破坏的影响, 选取微裂纹数目及裂纹两侧位移场在不同

应力路径下的变化进行分析, 旨在通过细观的角度认识卸围压对试样的影响。

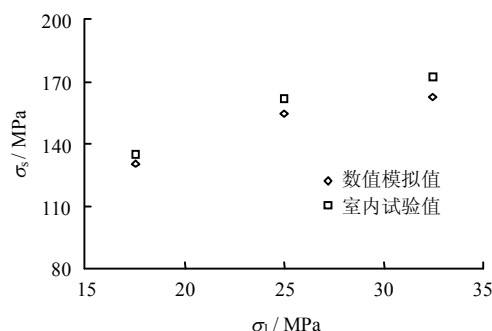
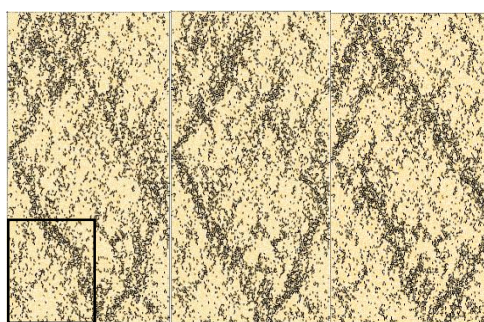


图 9 不同初始轴向应力恒轴压卸围压偏应力峰值强度试验与模拟的对比(应力路径②)^[17]

Fig.9 Comparison of peak strength obtained from experiment and numerical simulation under unloading confining pressures at different initial axial stresses (stress path ②)^[17]



(a) $\sigma_1=110$ MPa (b) $\sigma_1=140$ MPa (c) $\sigma_1=150$ MPa
(1) 砂岩



(a) $\sigma_1=110$ MPa (b) $\sigma_1=140$ MPa (c) $\sigma_1=150$ MPa
(2) 模拟结果

图 10 不同初始轴向应力恒轴压卸围压试样数值模拟与试验破裂模式对比^[17]

Fig.10 Comparison of failure modes in numerical simulation and experiment under constant axial stress and unloading confining pressures at different initial axial stresses^[17]

图 11 为不同初始轴向应力加载卸围压微裂纹数目随应力应演化曲线, 初始轴向应力为 17.5、25.0、32.5 MPa。从图中可以看出, 初始轴向应力对试样的弹性模量影响不大, 峰值强度随初始轴向

应力的增大而不断增大。其裂纹数目随初始轴向应力的增大发生明显变化,随着初始轴向应力的增大微裂纹数目在相同轴向应变条件下不断减小,说明围压减小对试样的损伤能力较轴向应力的增大对试样的损伤能力大。当应力达到峰值时对应的微裂纹数目由 3 244 个增加到 3 320 个,说明初始初始轴压的增大一定程度上增加了试样承受破坏的能力。

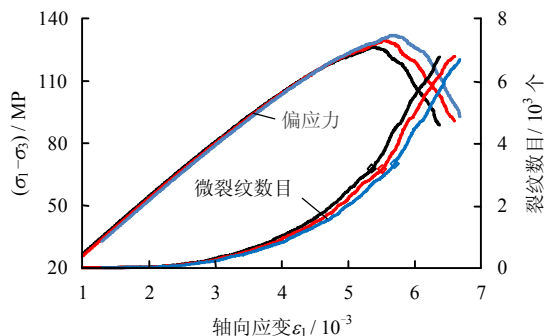


图 11 不同初始轴向应力加轴压卸围压微裂纹数目随应力-应变演化曲线

Fig.11 Evolution curves of the microcrack number with stress-strain under unloading confining pressures and axial loading at different initial axial stresses

图 12 为不同初始轴向应力恒轴压卸围压微裂纹数目随应力-应变演化曲线。初始轴向应力为 110、140、150 MPa,从图中可以看出,随着初始轴向应力的增大其峰值强度不断增大,同时峰前弹性模量明显降低,与文献[17]结论相同。与图 11 相似,随着初始轴向应力的增加达到峰值时对应的裂纹数目增加,说明初始初始轴压的增大一定程度上增加了试样承受破坏的能力。

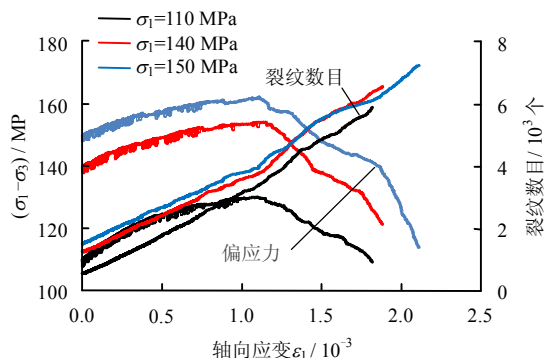
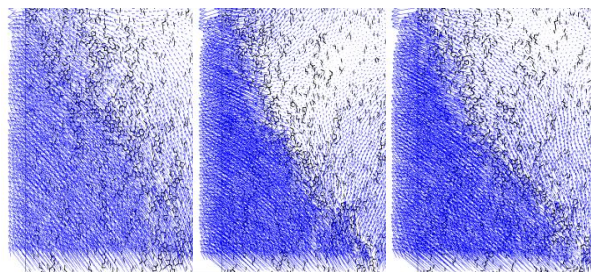


图 12 不同初始轴向应力恒轴压卸围压微裂纹数目随应力-应变演化曲线

Fig.12 Evolution curves of micro crack number with stress-strain under constant axial loading

and unloading confining pressures at different initial axial stresses

为了研究不同应力路径下试样破坏后的位移场,选取加轴压恒围压 ($\sigma_3 = 25$ MPa)、加轴压卸围压 ($\sigma_1 = 17.5$ MPa) 及恒轴压卸围压 ($\sigma_1 = 110$ MPa) 3 种应力路径试样进行分析,为了更具比较性,选取试样的右下端倾斜裂纹周围的位移矢量图进行分析 (3 个试样在此处都产生裂纹,且位置相似)。图 13(a)为加轴压恒围压应力路径下的位移矢量图,从图中可以看出,在裂纹两侧位移的方向和大小差别较小,这是因为虽然轴向应力的增大导致裂纹的产生,但围压的存在限制的试样的横向运动,造成裂纹两侧的位移差别较小。图 13(b)为加轴压卸围压应力路径下的位移矢量图。从图中可以看出,在裂纹的两侧位移的大小发生较大变化,同时位移的方向在某些区域也会产生变化,这是因为在加轴压卸围压的过程中导致颗粒在横产生向位移不连续,导致裂纹的萌生和扩展。图 13(c)为恒轴压卸围压应力路径下的位移矢量图,从图中可以看出虽然在裂纹两侧的位移方向未发生改变,但此时裂纹两边的位移大小改变量较图 13(a)大,这是由于初始轴压较大,虽然卸围压增加了颗粒横向位移不连续,但较图 13(b)卸围压对试样的影响小。



(a) 加轴压、恒围压 (b) 加轴压、卸围压 (c) 恒轴压、卸围压

图 13 不同加载路径试样最终破坏后位移场

Fig.13 Displacement field after final destruction of samples

4 结 论

(1) 鉴于试验结果内摩擦大峰后脆性强的特点选用 cluster 单元,合理确定出了能够反映该组砂岩宏观特性的细观参数。

(2) 模拟了加轴压卸围压和恒轴压卸围压两种路径的试验全过程,其峰值强度随初始轴向应力的变化规律与试验相一致,同时试样最终破裂模式也与试验结果相似,证明了使用颗粒程序模拟两种路径卸围压的可行性。

(3) 分析两种卸围压路径下微裂纹数目随应力-

应变的演化规律结果表明, 卸围压对试样的损伤较加轴压对试样的损伤大, 同时初始轴向应力的增大在一定程度上提高了试样承受破坏的能力。

(4) 三种加载路径下裂纹两侧的位移矢量变化结果表明, 围压的存在会限制颗粒的横向位移, 而卸围压会使颗粒在横向发生不连续位移, 导致裂纹的产生。

参 考 文 献

- [1] BRZOVIC. Characterization of primary copper ore for block caving at the El teniente mine[D]. Chile: Western Australia School of Mines, 2010.
- [2] 李建林, 王乐华. 卸荷岩体的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2032—2036.
LI Jian-lin, WANG Le-hua. Study on size effect of unloaded rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(12): 2032—2036.
- [3] LAU J S O, CHANDLER N A. Innovative laboratory testing[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1427—1445.
- [4] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24—29.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Triaxial confining depressure test of rock sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(1): 24—29.
- [5] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456—460.
GAO Chun-yu, XU Jing, HE Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 456—460.
- [6] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2138—2145.
WANG Bing, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2138—2145.
- [7] 李宏哲, 夏才初, 肖维民. 锦屏水电站大理岩加卸荷本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 441—447.
LI Hong-ze, XIA Cai-cu, XIAO Wei-min. Research on constitutive model of marble of Jinping hydropower station under loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 441—447.
- [8] 张黎明, 王在泉, 石磊. 硬质岩石卸荷破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2012—2018.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SHI Lei. Experimental study of hard rock failure characteristic under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2012—2018.
- [9] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下岩石变形特征及本构模型研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441—447.
HUANG Run-qiu, HUANG Da. Study on deformation characteristics and constitutive model of rock on the condition of unloading[J]. **Advances in Earth Science**, 2008, 23(5): 441—447.
- [10] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2205—2213.
HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2205—2213.
- [11] 苏承东, 高保彬, 南华, 等. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 757—766.
SU Cheng-dong, GAO Bao-bin, NAN Hua, et al. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 757—766.
- [12] 牛双建, 靖洪文, 杨旭旭, 等. 深部巷道破裂围岩强度衰减规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1587—1596.
NIU Shuang-jian, JING Hong-wen, YANG Xu-xu, et al. Experimental study of strength degradation law of surrounding rock in fractured zone of deep roadway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(8): 1587—1596.
- [13] 许国安, 牛双建, 靖洪文, 等. 砂岩加卸载条件下能耗特征试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3611—3617.
XU Guo-an, NIU Shuang-jian, JING Hong-wen, et al. Experimental study of energy features of sandstone under loading and unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(12): 3611—3617.
- [14] 张黎明, 高速, 王在泉, 等. 大理岩加卸荷破坏过程的能量演化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1572—1578.

- ZHANG Li-ming, GAO Su, WANG Zai-quan, et al. Analysis of marble failure energy evolution under loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1572—1578.
- [15] 丛宇. 卸荷条件下岩石破坏宏观机制与地下工程设计计算方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- CONG Yu. Study on rock macroscopic and mesoscopic failure mechanism under unloading conditions and designing and calculating methods of underground engineering[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2014.
- [16] YANG S Q, HUANG Y H, JING H W, et al. Discrete element modeling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. **Engineering Geology**, 2014, 178: 28—48.
- [17] 韩铁林, 陈蕴生, 宋勇军, 等. 不同应力路径下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3959—3966.
- HAN Tie-lin, CHEN Yun-sheng, SONG Yong-jun, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone under different loading paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3959—3966.
- [18] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(1): 47—65.
- [19] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, 41: 1329—1364.
- [20] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007, 44(7): 997—1010.