

DOI: 10.11779/CJGE201709003

不同卸荷速率下大理岩破裂时效特性与机理研究

李夕兵^{1,2}, 陈正红^{*1,2}, 曹文卓^{1,2}, 陶明^{1,2}, 周健^{1,2}

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 巷道开挖过程中卸荷速率对岩体破裂特性有显著影响, 且破裂特性表现出明显的时间效应。针对岩体在卸荷条件下的受力特征, 利用颗粒流程序, 对脆性大理岩进行围压卸载数值模拟, 研究不同卸荷速率下卸荷结束瞬间和卸荷后持续点的岩石试样破裂特性和机理。结果表明: 围压卸载过程中, 卸荷变形率 $\Delta \epsilon_t$ 随卸荷速率的增大而减小, 且侧向变形比轴向变形更敏感; 在卸荷结束瞬间, 微裂纹主要集中在试样上下端部并形成剪切破裂带, 其中张拉裂纹数目是剪切裂纹的 3~6 倍, 试样的破裂程度 S_1 随卸荷速率的增大呈指数递减规律变化; 在卸荷后持续点, 卸荷速率较慢的情况下岩石试样破坏形式为宏观剪切破裂面, 卸荷速率较快的情况下岩石试样破坏形式为块体剥落及上下端部颗粒(块体)弹射, 试样的破裂程度 S_2 随卸荷速率的增大呈指数递增规律发展; 卸荷速率越快, 达到卸荷后持续点时, 试样累计释放的颗粒动能越大, 岩爆程度越大。

关键词: 大理岩; 卸荷速率; 破裂特性; 颗粒流程序

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)09-1565-10

作者简介: 李夕兵(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于中南矿冶学院采矿专业, 现任教授, 博士生导师, 主要从事采矿与岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: xbli@mail.csu.edu.cn。

Time-effect properties and mechanisms of marble failure under different unloading rates

LI Xi-bing^{1,2}, CHEN Zheng-hong^{1,2}, CAO Wen-zhuo^{1,2}, TAO Ming^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Key Laboratory of

Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha 410083, China)

Abstract: In the process of tunnel excavation, the failure properties of rock mass are obviously affected by unloading rates, and the failure properties show a clear time effect. Considering the stress characteristics of rock mass under unloading, the unloading tests on brittle marble are simulated by the particle flow code (PFC), then the failure properties and mechanisms at the unloading finished point and the continuous point are analyzed. The numerical modeling results show that the deformation rate decreases with the increasing unloading rate in the process of unloading. Moreover the lateral deformation is more sensitive than the axial deformation. At the unloading finished moment, most micro cracks formed in the samples are distributed at the top and bottom sides of the sample, and the number of tensile cracks is about 3~6 times more than that of shear cracks, then these cracks form shear fracture bands. Moreover, at this moment, the fracture degree of samples decreases exponentially with the increase of unloading rate. At the subsequent moment from the unloading finished, the failure mode of macroscopic shear fracture occurs at low unloading rates, while the failure mode turns to block spalling and particle (block) ejection at high unloading rates. Furthermore, at the subsequent moment from the unloading finished, the fracture degree increases exponentially with the increase of unloading rate. When reaching the subsequent moment from the unloading finished, the faster the unloading rates, the greater the kinetic energy release, and the rock burst is more violent.

Key words: marble; unloading rate; failure property; particle flow code

0 引言

深部高应力岩体在巷道开挖过程中围岩应力场发生变化, 应力在开挖径向上卸荷释放。开挖卸荷速率与围岩破裂程度及岩爆效应密切相关^[1-2]。同时, 很多地下工程在开挖成洞之初围岩呈现稳定状态, 但随时

间推移围岩中的破裂将不断发展, 从而导致失稳和

基金项目: 国家自然科学基金项目(11472311); 国家重点研发项目(2016YFC0600706)

收稿日期: 2016-05-30

*通讯作者(E-mail: chenzhenghong@csu.edu.cn)

破坏,说明卸荷产生的破坏并不是在开挖完成后立即发生的^[3],而是具有一定的时间性。因此研究高初始应力下,不同卸荷速率和卸荷后不同时间点的岩石破裂特性及机理,对深入认识深部高应力条件下的岩石工程开挖设计施工有着非常重要的意义。

事实上,围绕这类问题,许多学者进行过岩石卸荷试验,研究了卸荷速率对岩石力学特性的影响。如:邱士利等^[4]、王在泉等^[5]、李天赋等^[6]分别以大理岩、灰岩、玄武岩进行不同速率卸围压试验,通过对卸荷过程和破坏点的分析,得出了卸围压速率对不同岩石力学特征的影响效果,同时表明试样会在卸荷过程中就发生破坏;黄润秋等^[7]和姜德义等^[8]分别进行了大理岩和岩盐的卸荷速率试验,重点考察了卸荷结束点的变形、损伤特征,发现有的岩石会在卸荷结束点发生破坏;Zhao等^[9]和何满潮等^[10]通过花岗岩卸荷速率试验,证明了试样在卸荷后残余阶段将可能发生岩爆现象。纵观国内外在这一方面的研究不难发现,目前对围压卸荷速率的研究主要基于室内试验,而且关注的时间点主要为卸荷过程中的破坏点、卸荷结束点、残余阶段的某一特征点,缺乏不同时间点之间的对比研究。

本文在前人的工作基础上,采用颗粒流程序 (particle flow code, PFC)^[11],首次进行了卸围压试验的数值模拟。PFC 目前已被广泛应用于单轴压缩、常规三轴压缩等模拟试验^[12-14]。利用其进行卸围压模拟试验,一方面可以实时监测整个卸荷过程,得到试样在不同时间点的特征,将卸荷结束瞬间(卸荷结束点)和卸荷后持续点(残余阶段的特征点)进行对比研究。另一方面,可以不受试验成本和时间的限制。通过分析和对比不同卸荷速率下,岩石试样在卸荷结束瞬间及卸荷后持续点的应力-应变变化规律、细观裂纹扩展规律、试样破裂模式、破裂程度、以及颗粒动能释放规律,试图揭示卸荷速率对岩石破裂的时效特性和破裂机理所产生的影响。

1 岩石卸荷数值模拟

1.1 数值模拟方案

卸围压试验中轴压的变化情况对岩石的力学效应有着重要影响,目前卸围压研究主要有2种轴压变化路径:定轴压卸围压和增轴压卸围压。本文重点研究的是卸围压速率,因此,为了控制轴压对卸荷过程的影响,选择定轴压卸围压路径。卸荷数值模拟过程的轴压和围压变化过程如下:①轴压和围压按照静水压力条件施加到初始围压值 P_0 。②保持围压不变,加载轴压至初始轴压值 P_1 。③保持轴压不变,以不同速率

卸围压至零。④保持卸荷结束瞬间轴压不变,使其持续作用在试样上。

试样在卸荷过程中的承载变化状态如图1所示。

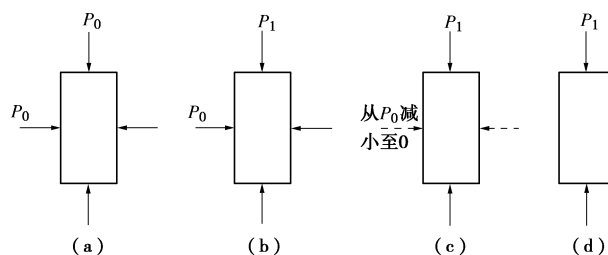


图1 卸荷数值模拟的试样承载状态示意图

Fig. 1 Schematic illustration of pressure states in numerical modeling of unloading

本文卸荷路径为线性,在相同初始围压的条件下,卸荷时间 $\Delta\tau$ 不同则卸荷速率不同,卸荷时间越短,说明卸荷速率越快。卸荷试验过程中,试样上的轴压 P 和围压 P' 变化情况可用下列数学表达式表示:

$$P = \begin{cases} P_0 + \frac{P_1 - P_0}{t_0} \times t & (0 \leq t < t_0) \\ P_1 & (t \geq t_0) \end{cases}, \quad (1)$$

$$P' = \begin{cases} P_0 & 0 \leq t < t_0 \\ P_0 \left(1 - \frac{t - t_0}{\Delta\tau}\right) & t_0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t > t_1 \end{cases}, \quad (2)$$

式中, t_0 为轴压达到初始值 P_1 的时刻, t_1 为围压卸到零的时刻, $\Delta\tau = t_1 - t_0$ 为卸荷时间。

1.2 数值模型的建立

试样为PFC^{2D}模型,黏结类型采用平行黏结,因为平行黏结不仅能承受力还能承受力矩,可以模拟大多数岩石^[15]。与大多数连续模型由本构方程控制变形性质不同,PFC模型的变形性质由力-位移控制,平行黏结模型的变形控制关系如下:

$$\Delta\bar{F}^n = \bar{k}^n A \Delta U^n, \quad (3)$$

$$\Delta\bar{F}^s = -\bar{k}^s A \Delta U^s. \quad (4)$$

式中 $\Delta\bar{F}^n$, $\Delta\bar{F}^s$ 分别为法向应力增量和切向应力增量; \bar{k}^n , \bar{k}^s 为平行黏结的法向和切向刚度; ΔU^n , ΔU^s 分别为黏结的法向位移增量和切向位移增量; A 为黏结的横截面。

平行黏结模型的主要细观参数,包括颗粒接触模量 E_c ,颗粒的法向刚度与切向刚度比 k^n/k^s ,颗粒摩擦因数 μ ,平行黏结半径乘子 $\bar{\lambda}$,平行黏结模量 \bar{E}_c ,平行黏结的法向刚度与切向刚度比 \bar{k}^n/\bar{k}^s ,平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c$ 和切向强度 $\bar{\tau}_c$ 。模型的宏观力学参数受到多个细观参数的联合影响,故需要经过一系列的试错试验,确定细观参数的取值,使得模型的基

本力学参数与室内试验^[4]获得的参数匹配。最终确定的一组细观参数见表 1, 以此组参数建立试样模型(图 2), 并进行单轴压缩模拟试验, 试验中的加载速率为 0.05 m/s, 本模型中一时步约为 8.1×10^{-8} s, 0.05 m/s 转化以时步计量的数值速率是 4.05×10^{-6} mm/step, 说明加载速率足够小, 可以保证与室内单轴压缩试验一样都是准静态加载。

表 1 PFC 颗粒模型细观参数

Table 1 Microscopic parameters of PFC model		
参数类型	细观参数	数值
颗粒基本参数	颗粒密度 $\rho /(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
	最小颗粒半径 R_{\min} / mm	0.25
	粒径比 R_{\max} / R_{\min}	1.6
	颗粒接触模量 E_c / GPa	25
	颗粒刚度比 k^n / k^s	1.6
平行黏结参数	颗粒摩擦因数 μ	0.5
	平行黏结模量 \bar{E}_c / GPa	25
	平行黏结半径乘子 $\bar{\lambda}$	1.0
	平行黏结刚度比 \bar{k}^n / \bar{k}^s	1.6
	平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c / \text{MPa}$	91 ± 5
	平行黏结切向强度 $\bar{\tau}_c / \text{MPa}$	91 ± 5

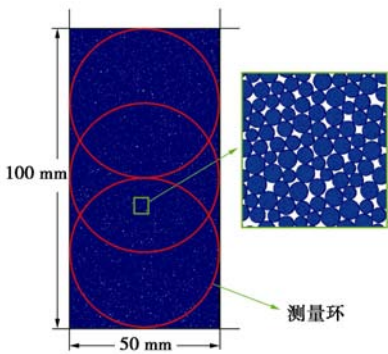


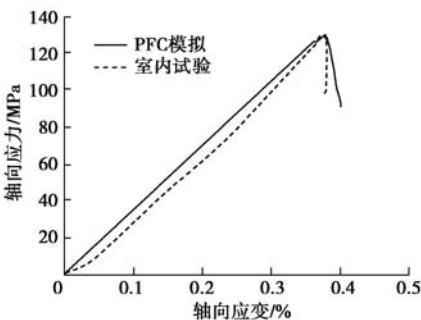
图 2 PFC 数值模型(设置 3 个测量环)

Fig. 2 PFC numerical model (three measuring circles)

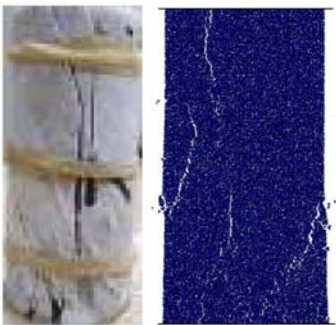
通过单轴压缩得到的模型基本力学参数、应力 - 应变曲线与室内试验基本一致(见表 2、图 3(a))。同时, 通过室内单轴压缩试验, 岩样生成 1~2 条轴向劈裂破坏面, 且在端部附近伴生有剪切破坏面, 其破坏形式与单轴压缩模拟的破坏形式一致(见图 3(b))。故可用此模型模拟该大理岩, 从而将生成的数值模型作为卸荷模拟的试样。

表 2 大理岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of marble				
力学参数	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比	弹性模量 $/\text{GPa}$	单轴抗压强度 $/\text{MPa}$
室内试验 ^[4]	2700	0.19	33.9	130.00
数值模型	2700	0.19	34.6	130.60
相对误差/%	—	0	2.06	0.46



(a) 应力 - 应变曲线对比



(b) 试样最终破坏形态对比

图 3 单轴压缩的室内试验与 PFC 模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of results of uniaxial compression by laboratory tests and PFC simulations

1.3 数值模拟步骤

考虑到深部千米以深的应力在 30 MPa 以上, 故选择初始围压值 $P_0=40$ MPa。初始轴压值 P_1 为围压 40 MPa 时双轴压缩试验峰值强度的 70%左右(该值未达到屈服强度, 可避免试样在初始压力加载过程损伤过大)。根据双轴压缩模拟, 围压 40 MPa 时峰值强度为 205.5 MPa(见图 4), 故初始轴压值 $P_1=143.5$ MPa。参照 Li 等^[16]利用 PFC 研究开挖卸荷速率时所选用的卸荷时间, 取 $\Delta\tau$ 为 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0 ms。以 $\Delta\tau$ 控制卸荷速率, 40 MPa 初始围压下, 这 5 种卸荷速率转化为以时步计量的数值速率分别为: 6.48×10^{-4} , 8.10×10^{-4} , 1.08×10^{-3} , 1.62×10^{-3} , 3.24×10^{-3} MPa/step。

卸围压数值模拟的具体步骤为: ①在 4 个约束墙体内采用颗粒排斥法生成颗粒集, 颗粒间施加平行黏结接触, 并赋予特定的细观参数, 生成数值试样; ②将约束墙体作为加压板, 施加 40 MPa 静水压力, 使围压达到初始值; ③保持围压不变, 通过伺服程序采用应力控制的方式, 使得轴压加载至初始轴压值 143.5 MPa, 此时为加载结束点 t_0 , 亦是卸荷开始点; ④在围压、轴压达到初始值后, 保持轴压不变, 以不同速率卸围压, 直到围压为零, 围压达到零的瞬间称为卸荷结束瞬间 t_1 ; ⑤围压达到零之后, 保持卸荷结束瞬

间的轴压不变,使其在试样上持续作用一段时间。考虑到最慢的卸荷速率为 $\Delta\tau=5\text{ ms}$,其卸荷结束瞬间在 t_0 后的 5 ms 处,为方便对比其他卸荷速率,同时保证不同卸荷速率下轴压作用时间相同,任何卸荷速率下,都使轴压持续作用到 t_0 后的 5 ms 处,称其为卸荷后持续点 t_2 。

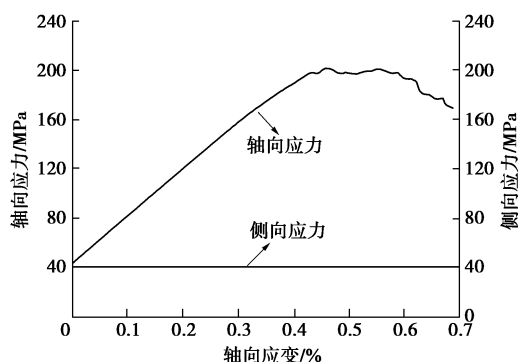


图4 双轴压缩模拟应力-应变曲线

Fig. 4 Strain-stress curve of biaxial compression simulation

整个卸荷模拟过程中轴压、围压变化都是通过编写的伺服程序进行控制的,其典型的轴压、围压变化过程如图5所示。将 $t=0$ 至 $t=t_0$ 称为初始压力加载过程, $t=t_0$ 至 $t=t_1$ 称为卸围压过程, $t=t_1$ 至 $t=t_2$ 称为卸荷后持续过程。

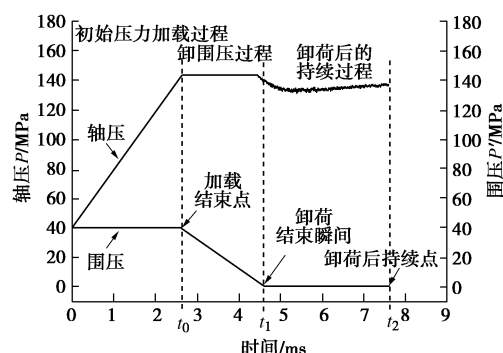


图5 卸荷模拟的典型压力变化过程($\Delta\tau=2.0\text{ ms}$)

Fig. 5 Variation process of typical pressures of unloading simulation ($\Delta\tau=2.0\text{ ms}$)

2 试样卸围压过程的破裂特征

2.1 不同卸荷速率下应力-应变曲线及变形分析

卸荷过程中,在轴压和围压的作用下,试样将产生微裂纹并发生变形,试样内部应力发生重分布。为监测试样内部应力和应变在整个卸荷过程中的变化情况,利用在建模时设置的测量环监测卸围压过程。将测量环内颗粒平均应力值视为试样内部应力^[15]:

$$\bar{\sigma}_{ij} = - \left(\frac{1-n}{\sum_{N_p} V^{(p)}} \right) \sum_{N_p} \sum_{N_c} |x_i^{(c)} - x_i^{(p)}| n_i^{(c,p)} F_j^c \quad (5)$$

式中 n , $V^{(p)}$ 分别为测量环内的孔隙率和颗粒总体积; $x_i^{(c)}$, $x_i^{(p)}$ 为黏结中心和颗粒中心; $n_i^{(c,p)}$ 为黏结中心至颗粒中心的法向量; F_j^c 为作用在黏结和颗粒上的力。

图6为不同卸荷速率下试样在初始压力加载过程和卸围压过程中,测量环测得的试样内部应力-应变曲线。据图6对试样应力-应变特征的讨论如下:

(1) 初始压力加载阶段(AB段):随着偏应力的增大,轴向应变 ε_1 的变化量比侧向应变 ε_3 的变化量大,说明加载过程中轴向变形更敏感。应力-应变曲线近似直线,为线弹性过程,应变变化量小。

(2) 卸围压前期阶段(BC段):轴向应变和侧向应变与偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)的关系仍近似直线,说明试样仍为线弹性变形。轴向应变和侧向应变在卸围压前期阶段增加缓慢,但侧向应变的增加量大于轴向应变。

(3) 卸围压后期阶段(CD段):C点为试样从弹性变为塑性的转折点,定义为卸荷屈服点,处于卸荷临近结束时。C点之前时试样为线弹性变形,且变形“迟钝”,C点之后开始塑性变形。可见试样进入卸围压的后期阶段,轴向应变、侧向应变迅速增大,发生明显的应力跌落,说明该过程中试样内部破裂不断发展,发生扩容现象。同时,侧向应变的变化量大于轴向应变,说明卸围压过程中侧向变形更敏感。

图6是利用试样内部测量环,按照式(5)获得的内部应力。图5是通过伺服控制程序施加在试样上的外加应力。对照图5和图6不难发现,在卸围压后期阶段,试样外加应力和试样内部应力在同一时刻存在较大差异,且卸荷速率越慢,差异就越大。产生这种现象的原因在于试样内部应力与作用在黏结和颗粒上的力及测量环内的孔隙率有关,一旦黏结断裂(产生微裂纹)或内部颗粒移动,内部应力就下降。卸载速率越慢,内部应力下降的程度越大,说明试样内产生的微裂纹越多,颗粒的移动程度更大。对比图5和图6发现,用测量环来测量内部应力可以一定程度上反映试样损伤程度。另外,图6所示的应力-应变曲线不包括卸荷后持续阶段,这是考虑到试样在卸荷后持续阶段会发生块体剥落或弹射(见图11),超出测量环的范围,利用测量环来计算应力-应变不再准确。而试样在初始应力加载过程和卸围压过程中仍保持整体完整(见图9),绝大部分颗粒处于测量环内,因此可利用测量环进行应力应变监测。

为分析卸荷速率对卸荷变形程度的影响,将卸围压过程中的应变增量与卸荷时间的比值来定义一个描述性变量——卸荷变形率 $\Delta\dot{\varepsilon}_i$ 。表示形式如下:

$$\Delta\dot{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_{i1} - \varepsilon_{i0}}{\Delta\tau} \quad (6)$$

式中, ε_{i1} ($i=1, 3$), ε_{i0} ($i=1, 3$) 分别表示卸荷结束瞬间和卸荷开始点的轴向应变、侧向应变。

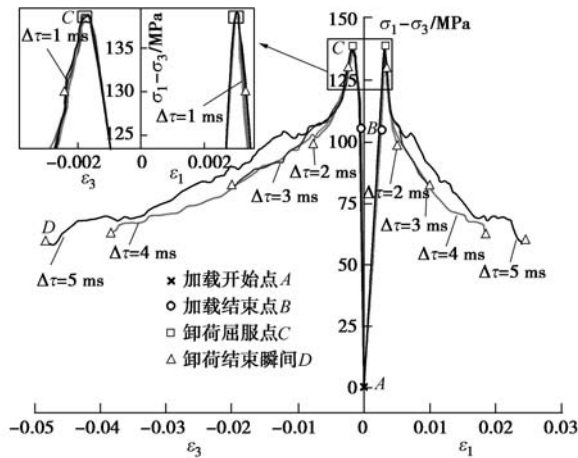


图6 卸围压过程中不同卸荷速率下的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves under different unloading rates in unloading process

卸荷变形率 $\Delta\dot{\varepsilon}_i$ 反映了围压卸荷过程单位时间内变形程度, 能表示各卸荷速率下变形的快慢。卸荷变形率 $\Delta\dot{\varepsilon}_i$ 越大, 单位时间内变形越快。卸荷结束瞬间卸荷变形率 $\Delta\dot{\varepsilon}_i$ 与卸荷时间 $\Delta\tau$ 的关系见图7, 通过分析图7可知:

(1) 不同卸荷速率下, 至卸荷结束瞬间, 卸荷变形率的大小差异明显。说明高初始围压条件下, 试样的变形程度受卸荷速率的影响明显。这与实际开挖工程中得到的结论一样, 在深部高地应力条件下开挖时, 开挖卸荷速率的调整会引起较大的围岩变形差异。

(2) 随着卸荷速率增大 (即卸荷时间 $\Delta\tau$ 减小), 轴向和侧向的变形率减小, 这主要是由于卸荷速率较快的情况下, 卸荷过程中轴压和围压作用的时间短, 至卸荷结束瞬间岩样还来不及变形, 但卸荷结束之后的一段时间内卸荷效应会继续产生影响, 卸荷结束并持续一段时间后试样的破裂特性, 将在本文第3节予以讨论。

(3) 相同卸荷速率下, 侧向卸荷变形率比轴向变形率大, 说明围压卸荷过程中, 侧向变形更敏感。

(4) 当卸荷时间 $\Delta\tau$ 为 5, 4 ms 时, 卸荷变形率明显变缓, 且二者的卸荷变形率接近。这里将 $\Delta\tau=5, 4$ ms 视为慢速卸荷, 将 $\Delta\tau=3, 2, 1$ ms 视为快速卸荷。

2.2 不同卸荷速率下卸荷结束瞬间的微裂纹特征

PFC 试样的力学性质由黏结断裂机制控制, 一旦局部拉伸或剪切应力超过平行黏结的法向和切向强度则黏结断裂^[15], 黏结断裂的积累合并导致模型发生宏观破坏, 并导致试样内部应力重分布。断裂机制如下:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}^s| \bar{R}}{I} > \bar{\sigma}_c, \quad (7)$$

$$\bar{\tau}_{\max} = \frac{-\bar{F}^s}{A} + \frac{|\bar{M}^n| \bar{R}}{J} > \bar{\tau}_c, \quad (8)$$

式中, \bar{R} , A , I , J 表示黏结的等效半径、横截面积、惯性矩和极惯性矩, \bar{F}^n , \bar{F}^s , \bar{M}^n , \bar{M}^s 分别表示法向和切向的力及力矩。

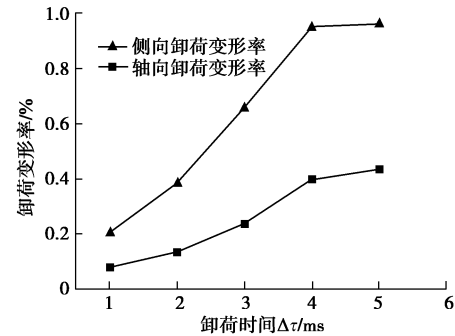


图7 至卸荷结束瞬间卸荷变形率与卸荷时间 $\Delta\tau$ 的关系

Fig. 7 Relationship between unloading deformation rates and time at unloading finished moment

断裂机制也可通过图8来表现, 若一个黏结断裂是在局部拉伸的作用下发生的, 那么将产生一个张拉裂纹; 如果一个黏结断裂是在局部剪切的作用下发生的, 那么产生一个剪切裂纹^[15]。

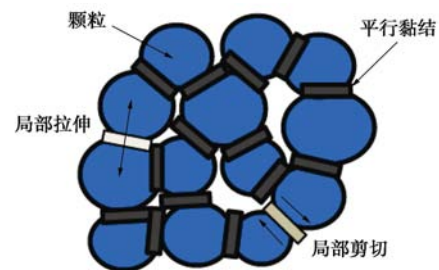


图8 试样内部裂纹类型

Fig. 8 Crack types in rock mode

不同卸荷速率下, 试样在卸荷结束瞬间的试样破裂形态和微裂纹分布状态见图9。图9中红色代表剪切裂纹, 黑色代表张拉裂纹。卸荷试验中, 每个试样的初始压力加载过程都相同, 通过微裂纹监测可知, 试样在加载过程中产生了15个微裂纹, 所以图9中的裂纹绝大部分都是在卸荷过程中产生的。

当卸荷速率较慢时 ($\Delta\tau=5, 4$ ms), 从试样破裂形态可以看出, 宏观破裂形式为X型或Y型剪切面。从微裂纹分布状态可看出, 试样破裂集中在上下端部, 众多微裂纹扩展贯通形成剪切带。这种剪切破裂带的情形, 有学者通过慢速卸荷试验中的破裂形态分析提供了验证^[3, 5, 7, 17]。当卸荷速率较快时 ($\Delta\tau=3, 2, 1$ ms), 试样内部有一定的损伤累积, 但并未发生宏观破裂,

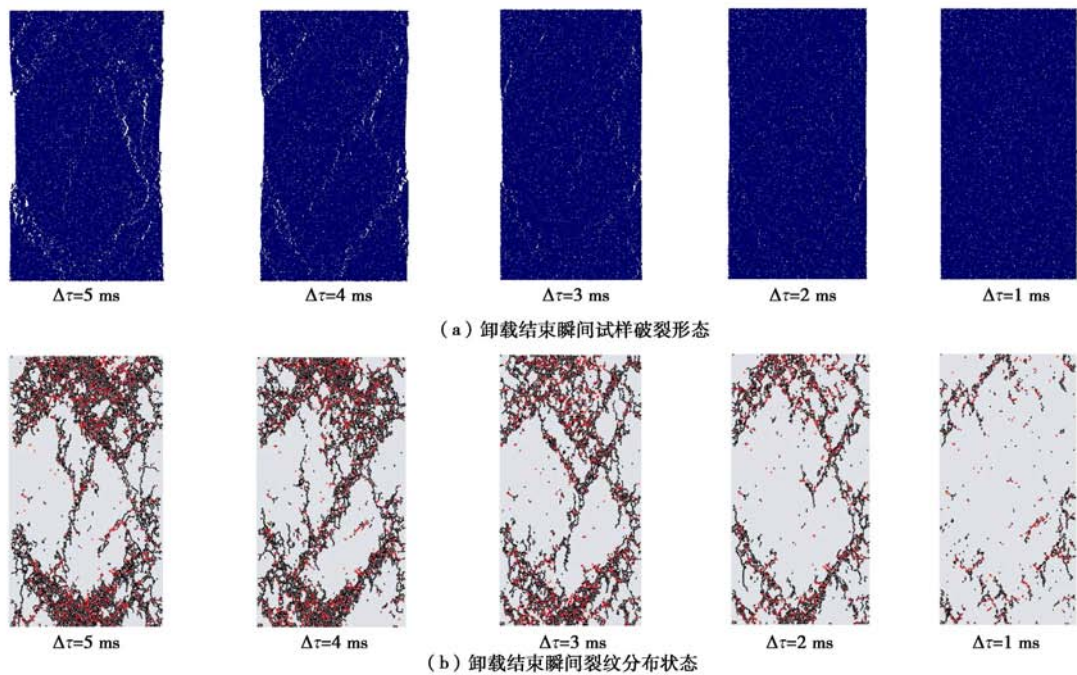


图9 卸荷结束瞬间试样破裂形态和微裂纹分布状态图

Fig. 9 Failure patterns of samples and distribution states of cracks at unloading finished point

对应的微裂纹也较少，但同样集中在试样上下端部，形成较小的剪切破裂带。

在卸荷结束瞬间，试样中所包含裂纹种类及数目可见表3。由表3可看出：

表3 卸荷结束瞬间的微裂纹统计

Table 3 Statistical results of cracks at unloading finished point				
卸荷 时间/ms	总裂纹 数目/个	张拉裂纹 数目/个	剪切裂纹 数目/个	单位时间内产生的 裂纹数目/(个·ms ⁻¹)
5.0	9202	7926	1276	1804
4.0	8402	7215	1187	2100
3.0	7042	5942	1100	2347
2.0	4872	4128	744	2436
1.0	2622	2021	601	2622

(1) 卸荷速率越慢，卸荷结束瞬间(t_1)总裂纹数目越多。产生这种现象的原因是，在卸围压过程中，围压在不断减小，但轴压仍然是保持在双轴抗压强度的70%左右，因此卸荷速率越慢，围压慢速减小，而轴压作用时间越长，因此对试样的损伤作用越大。同时，卸荷速率越慢，裂纹的产生和发展时间越长，所以裂纹越多。对比而言，卸荷速率越快，轴压和围压作用的时间越短，试样中的裂纹还来不及发展。

(2) 围压卸荷过程中，卸荷速率越快，单位时间内产生的裂纹数目越多，这是因为卸荷速率越快，导致单位时间内的偏应力变化程度大，故裂纹快速形成。

(3) 试样中的裂纹有张拉形成的也有剪切形成的，至卸荷结束瞬间时，张拉裂纹的数目约为剪切裂

纹的数目的3~6倍，因此，破裂产生的主要原因在于张拉作用。大量的张拉裂纹和少量的剪切裂纹是以剪切带的形式累积和贯通的，从而形成剪切破裂带(如图9)。剪切破裂带主要由张拉裂纹贯通形成，这一点在其他学者的研究中^[18]中也有体现和说明。

2.3 不同卸荷速率下卸荷结束瞬间的破裂程度

破裂程度有多种表达形式，PFC模型的一大特点就是可以从细观上分析试样的破裂程度。本文基于PFC的黏结断裂机制，用微裂纹总数(N_0)与颗粒间总黏结数目(N)的比值定义破裂程度 S ，即

$$S = \frac{N_0}{N} \times 100\% \quad (9)$$

卸荷试验中各种卸荷速率下的试样模型参数是一样的，总黏结数目都是27517个。如图10所示，在卸荷结束瞬间，卸荷时间与其破裂程度 S_1 满足指数关系，这说明在卸荷结束瞬间，卸荷速率越快，试样的累积破裂程度越小。同时，不同卸荷速率间破裂程度差异明显，说明高初始应力条件下试样破裂程度受卸荷速率的影响明显。通过微裂纹数目来定义卸荷结束瞬间的破裂程度，不仅快速直观，而且可以将损伤程度量化，便于与卸荷后持续点试样破裂程度做比较。

3 试样卸荷后持续过程的破裂特征

许多卸荷试验研究发现高应力条件下岩石试样在卸荷结束之后，如果轴压持续作用到某一时间点，试样将会发生岩爆现象^[9-10, 19-20]。同时，很多工程岩爆

实例也是发生在开挖后的一段时间内^[21]。这说明围压卸荷产生的影响并不只存在于卸荷结束瞬间 (t_1)。因此本节分析了卸载后持续点 (t_2) 的试样破坏形态、破裂程度和速率矢量场, 并与卸荷结束瞬间的试样破裂特性进行对比, 同时给出了卸荷试验过程的动能变化规律。

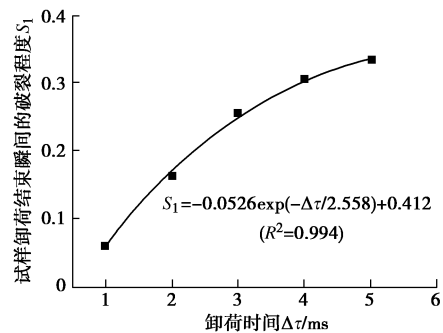


图 10 卸荷结束瞬间的破裂程度与卸荷时间关系
Fig. 10 Relationship between fracture degree and unloading time at unloading finished point

3.1 不同卸荷速率下卸荷后持续点的破坏形态

试样在不同卸荷速率下达到卸荷后持续点 t_2 时的破坏形态如图 11 所示。从图 11 中可以看出:

当卸荷速率较慢, 即 $\Delta\tau=5, 4\text{ ms}$ 时, 试样在 t_2 处的破坏形态主要为宏观剪切破裂面。当 $\Delta\tau=5\text{ ms}$ 时, t_2 时刻即是卸荷结束瞬间; 当 $\Delta\tau=4\text{ ms}$ 时, t_2 为卸荷结束后还持续了 1 ms , 其破坏是在宏观剪切破裂面的基础上, 发生了少量的块体剥落和颗粒弹射现象。

当卸荷速率较快, 即 $\Delta\tau=3, 2, 1\text{ ms}$ (分别对应卸荷结束后还持续了 $2, 3, 4\text{ ms}$) 时, 试样在 t_2 处的破坏形态为块体剥落及上下端部大量颗粒 (块体) 弹射, 这说明高应力条件下快速卸荷时, 在卸荷后持续点会发生岩爆现象。室内试验也发现快速卸荷后轴压持续作用一段时间会发生卸荷岩爆, 大量的碎块会从上下端部弹射出来^[9, 20]。在工程实际和室内试验中, 本文所模拟的这种大理岩也出现了时滞型岩爆现象, 发生大变形并伴有大量岩块飞出^[22-24]。

将卸荷后持续点与卸荷结束瞬间试样破裂形态进行对比可发现, 试样在卸荷结束瞬间破裂形式为剪切破裂带, 且卸荷速率越快破裂带越少; 但在卸荷后持续点破坏形式为宏观剪切破裂面或块体剥落和颗粒弹射, 且卸荷速率越快弹射现象越明显。这说明在卸荷试验中, 试样先出现剪切破裂带, 岩爆现象是在快速卸荷情况下, 卸荷结束并且轴压持续作用一段时间之后出现。

3.2 不同卸荷速率下卸荷后持续点的破裂程度

卸荷后持续点 t_2 的微裂纹统计见表 4, 从表 4 中可知: 裂纹总数随卸荷速率的增大而增多; 张拉裂纹是剪切裂纹的 $6\sim 9$ 倍, 说明 t_2 时刻张拉作用仍对试样破裂起主导作用; 剪切裂纹数目受卸荷速率的影响并不大, 单位时间内裂纹数目随卸荷速率的增大而迅速增加。

表 4 卸荷后持续点的微裂纹统计
Table 4 Statistical results of cracks at subsequent moment from unloading finished

卸荷时 间/ms	总裂纹数 目/个	张拉裂纹 数目/个	剪切裂纹 数目/个	单位时间内产生的 裂纹数目/(个·ms ⁻¹)
5.0	9202	7926	1276	1804
4.0	14422	12806	1616	2855
3.0	17381	15538	1843	5793
2.0	18377	16480	1899	9188
1.0	20455	18473	1982	20455

根据式 (9) 定义的破裂程度 S , 可以得出卸荷后持续点的破裂程度 S_2 随 $\Delta\tau$ 的变化规律 (图 12), 当卸荷时间在 $1.0\sim 5.0\text{ ms}$ 范围内变化时, 卸荷后持续点的破裂程度明显随卸荷速率的增大 (卸荷时间 $\Delta\tau$ 减少) 呈指数递增。

通过比较图 10 和图 12 可知, 相同卸荷速率下, 卸荷后持续点的破裂程度远远大于卸荷结束瞬间的破裂程度, 这说明卸荷破裂主要是出现在卸荷后的一段时间内, 这与轴压的累积作用效应有关。这也解释了

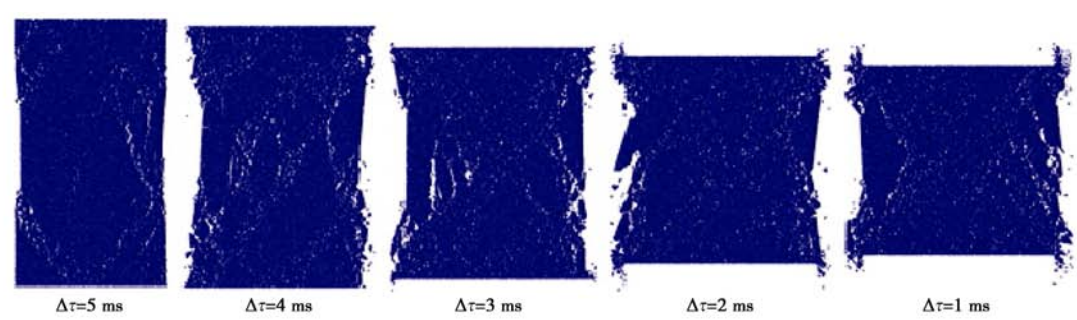


图 11 不同卸荷速率下岩样在卸荷后持续点的破裂形态
Fig. 11 Final failure patterns of rock samples at different unloading rates at subsequent moment from unloading finished

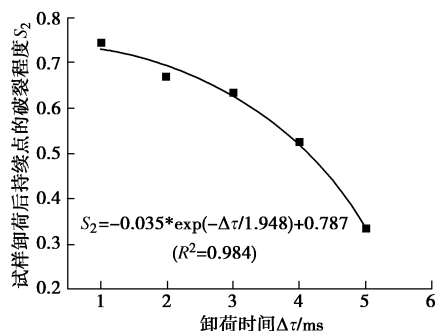


图 12 卸荷后持续点的破裂程度与卸荷时间关系

Fig. 12 Relationship between fracture degree and unloading time at subsequent moment from unloading finished

为何在巷道开挖后要及时支护, 防止围岩发生更大程度的破坏。不同卸荷速率下, 卸荷速率越快, 卸荷结束瞬间的破裂程度越小, 但卸荷后持续点的破裂程度越大。这说明不同卸荷速率对卸荷试验的不同特征点试样的破裂程度影响效果规律不同。

3.3 卸荷后持续点的岩爆现象分析

从 3.1 节中可知试样在卸荷后持续点出现了颗粒和块体弹射的岩爆现象, 有学者揭示岩爆现象的本质是岩石块体获得了动能^[25]。故通过对试样中颗粒动能和试样速度场的进一步分析, 可以更清楚地解释说明试样在卸荷后持续点出现的岩爆现象。

试样整体的动能可表示为

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{N_b} (m_i v_i^2 + I_i \omega_i^2) \quad (10)$$

式中, N_b 为颗粒数量, m_i , v_i , I_i , ω_i 分别为颗粒 i 的质量、平移速度、惯性矩、转动速度。

根据式 (10) 记录下试样在卸荷模拟中的动能, 得到不同卸荷速率下试样整体随时间而累积释放的颗粒动能变化情况 (图 13)。由图 13 可以看出, 卸荷速率较快时, 至卸荷后持续点时累积动能明显大于卸荷速率较慢时, 这说明快速卸荷情况下, 在卸荷后持续点岩爆现象明显, 且卸荷速率越快, 卸荷后持续点累积动能越大, 说明此时岩爆程度越大。

图 14 展示了 t_2 时刻的速度矢量场, v 表示颗粒速度, 从速度矢量场中可以看出: 整体上来说, 试样中部的颗粒速度小, 周边颗粒速度大, 说明岩爆是卸荷面附近的颗粒弹射; 快速卸荷时, 大部分颗粒的速度矢量都较大; 卸荷速率越快, 试样中相同速度矢量的分布越离散, 是否可以将速度矢量分布越离散视为试样的破裂块度越小还有待讨论。

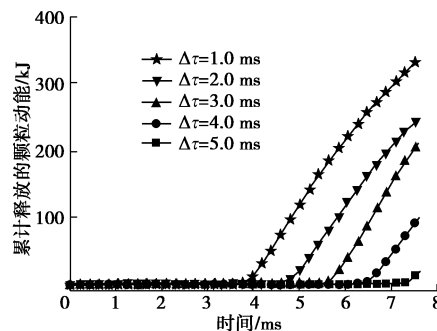


图 13 不同卸荷速率下累积释放颗粒动能随时间的变化

Fig. 13 Evolution of accumulative total released kinetic energy of samples under different unloading rates

通过上面的分析, 可以得出:

相同卸荷速率下卸荷后持续点的破裂程度远远大于卸荷结束瞬间的破裂程度, 因此巷道开挖后如果要保证巷道围岩不发生大程度破坏就要进行及时支护。快速卸荷时, 卸荷后持续点试样会发生颗粒 (块体) 弹射现象, 一方面很好地解释了为什么大多数应变型岩爆大都发生在开挖爆破以后一定时间, 表现出滞后现象, 同时也表明在深部采矿过程中, 适当的慢速卸荷可以避免在卸荷后一段时间内发生剧烈岩爆现象, 如将爆破等快速卸荷方式改为机械开采的慢速卸荷方式, 不但可以控制岩爆, 还能很好地进行能量调控。工程实践中若是能适当的提高机械开采速率, 并在相邻两次开采工序之间间隔一段时间, 提供一个卸荷后持续过程, 可使围岩具有一定的破裂程度且不发生岩爆, 那么便能实现机械方式连续开采。何种卸荷速率及卸荷后持续多长时间, 可以使试样既有一定破裂程

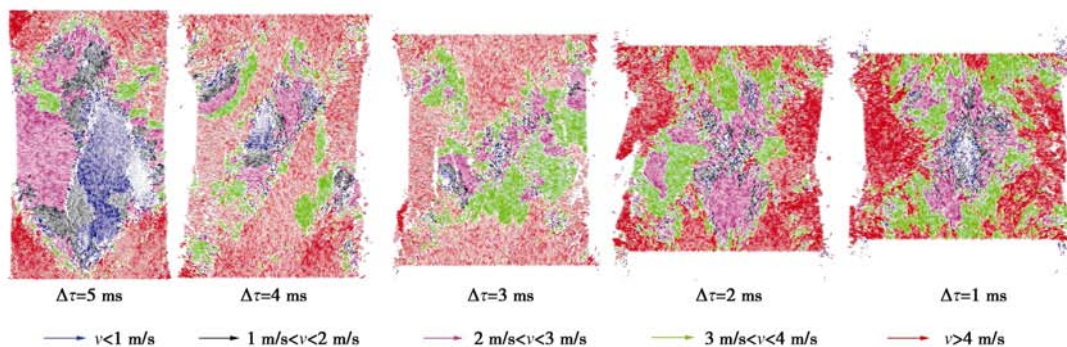


图 14 卸荷后持续点的速率矢量场

Fig. 14 Velocity vector fields at subsequent moment from unloading finished

度又不发生岩爆, 还有待进一步研究。

4 结 论

本文通过对大理岩进行不同卸荷速率下的卸围压模拟试验, 主要得到如下结论:

(1) 围压卸荷速率对高初始应力条件下大理岩变形效应的影响明显, 围压卸荷过程中侧向变形比轴向变形更敏感, 卸荷速率越慢, 至卸荷结束瞬间的卸荷变形率 $\Delta\epsilon_i$ 越大。

(2) 不同卸荷速率下, 卸荷过程进行到卸荷结束瞬间 t_1 时, 卸荷形成的微裂纹主要集中在试件上下端部, 且以张拉裂纹为主, 剪切裂纹为辅; 试样破裂形式为剪切破裂带; 试样破裂程度在卸荷结束瞬间, 随卸荷速率的增大而呈指数递减规律。

(3) 卸荷速率较慢时, 卸荷后持续点 t_2 的破坏形态为宏观剪切破裂面; 卸荷速率较快时, 卸荷后持续点的破坏形态为块体剥落及上下端部大量颗粒(块体)弹射, 出现岩爆现象, 且卸荷速率越快, 卸荷结束并持续一段时间之后岩爆程度越大; 试样破裂程度在卸荷后持续点, 随卸荷速率的增大呈指数递增规律。

参考文献:

- [1] 殷志强, 李夕兵, 金解放, 等. 围压卸载速度对岩石动力强度与破碎特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1296 - 1301. (YIN Zhi-qiang, LI Xi-bing, JIN Jie-fang, et al. Effects of unloading rates of confining pressure on dynamic strength and fragmentation characteristics of rock under impact loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1296 - 1301. (in Chinese))
- [2] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 963 - 969. (CHEN Wei-zhong, LÜ Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 963 - 969. (in Chinese))
- [3] 朱杰兵, 汪 斌, 杨火平, 等. 页岩卸荷流变力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(增刊 2): 4552 - 4556. (ZHU Jie-bing, WANG Bin, YANG Huo-ping, et al. Experimental study on rheological mechanical properties of shale under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S2): 4552 - 4556. (in Chinese))
- [4] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率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, 2010, **29**(9): 1807 - 1817. (QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1807 - 1817. (in Chinese))
- [5] 王在泉, 张黎明, 孙 辉, 等. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 1045 - 1050. (WANG Zai-quan, ZHANG Li-ming, SUN Hui, et al. Experimental study of mechanical properties of limestone under different unloading velocities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1045 - 1050. (in Chinese))
- [6] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, **12**(4): 321 - 327. (LI Tian-bin, WANG Lan-sheng. Experimental research on deformation and failure characteristics of basalt under unloading stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, **12**(4): 321 - 327. (in Chinese))
- [7] 黄润秋, 黄 达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1): 21 - 33. (HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(1): 21 - 33. (in Chinese))
- [8] 姜德义, 范金洋, 陈 结, 等. 围压卸载速率对盐岩扩容损伤影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(增刊 2): 3154 - 3159. (JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie, et al. Research on effect of unloading rate of confining pressure on capacity expansion damage of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(S2): 3154 - 3159. (in Chinese))
- [9] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. Influence of unloading rate on the strainburst characteristics of Beishan granite under true-triaxial unloading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**(2): 467 - 483.
- [10] 何满潮, 赵 菲, 杜 帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(10): 2737 - 2747. (HE Man-chao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(10): 2737 - 2747. (in Chinese))
- [11] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D (particle flow code in 2

- dimensions) (Version 3.1) [M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2004.
- [12] YOON J S, HOU M Z, JEON S. Simulations of rock strength, dilatancy and damage under uniaxial compressive load using bonded particle models[J]. *Journal of Interventional Cardiology*, 2010, **25**(3): 253 – 261.
- [13] 黄彦华, 杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏细观力学行为颗粒流模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(8): 1644 – 1653. (HUANG Yan-hua, YANG Shen-qi. Particle flow simulation of macro-and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(8): 1644 – 1653. (in Chinese))
- [14] FAKHIMI A, CARVALHO F, ISHIDA T, et al. Simulation of failure around a circular opening in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, **39**(2): 507 – 515.
- [15] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, **41**(8): 1329 – 1364.
- [16] LI X, CAO W, ZHOU Z, et al. Influence of stress path on excavation unloading response[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2014, **42**(42): 237 – 246.
- [17] 李宏哲, 夏才初, 闫子舰, 等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(10): 2104 – 2109. (LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, YAN Zi-jian, et al. Study on marble unloading mechanical properties of jinping hydropower station under high geostress conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(10): 2104 – 2109. (in Chinese))
- [18] DIEDERICHS M S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**(9): 1082 – 1116.
- [19] 杨艳霜, 周辉, 张传庆, 等. 大理岩单轴压缩时滞性破坏的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(9): 2714 – 2720. (YANG Yan-shuang, ZHOU Hui, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental investigation on time-lag failure properties of marble under uniaxial compressive test[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2011, **32**(9): 2714 – 2720. (in Chinese))
- [20] LINKOV A M. Rockbursts and the instability of rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1996, **33**(7): 727 – 732.
- [21] MANOUCHEHRIAN A, CAI M. Simulation of unstable rock failure under unloading conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, **53**(1): 22 – 34.
- [22] ZHAO X G, CAI M. Influence of specimen height-to-width ratio on the strainburst characteristics of Tianhu granite under true-triaxial unloading conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **52**(7): 890 – 902.
- [23] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(10): 20 – 34. (ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(10): 20 – 34. (in Chinese))
- [24] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(3): 561 – 569. (CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rock burst in deep tunnel: time delayed rock burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2012, **31**(3): 561 – 569. (in Chinese))
- [25] 于群, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(12): 2315 – 2322. (YU Qun, TANG Chun-an, LI Lian-chong, et al. Nucleation process of rockbursts based on microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(12): 2315 – 2322. (in Chinese))