

# 卸荷速率对粉砂岩力学特性的影响

郭红军<sup>1,2</sup>, 季 明<sup>2</sup>, 曹 力<sup>1</sup>

(1. 江苏建筑职业技术学院 建筑管理学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 矿业工程学院 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 围绕“向地球深部进军”的国家战略, 超前布局、抢占深地研究高地、积极推动深地开发基础科学问题的探索已迫在眉睫。结合地下工程施工特点, 本文设计了恒轴压卸围压实验, 以粉砂岩为研究对象, 利用围压增量比概念探讨了不同卸荷速率对其力学特性的影响规律, 实验发现: 卸荷过程以横向变形为主, 扩容现象明显, 卸荷时间、应变、弹性模量、泊松比及能量对围压降敏感程度随卸荷速率增加呈幂函数降低, 且敏感期转向破坏点, 表明高卸荷速率滞后且钝化了岩石各参数对围压降的响应, 但使岩爆几率增加, 这为地下工程尤其是深地工程提供了参考和依据。

**关键词:** 卸荷速率; 应变; 变形参数; 应变能; 岩爆

中图分类号: TD 322

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0860-09

## Effect of unloading rate on the mechanical properties of siltstone

GUO Hongjun<sup>1,2</sup>, JI Ming<sup>2</sup>, CAO Li<sup>1</sup>

(1. School of Construction Management Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, School of Mines, China University of Mining & Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Focusing the national strategy of "marching to the deep of the earth", it is urgent to advance the layout, seize the highlands for deep research, and actively promote the exploration of basic science in the deep development. Combined with the construction characteristics of underground engineering, this paper designs a constant axial pressure unloading confining pressure experiment. Taking siltstone as the research object, the influence of different unloading rates on its mechanical properties is discussed by using the concept of confining pressure increment ratio. The experiment finds that the unloading process is dominated by lateral deformation, and the expansion phenomenon is obvious; the sensitivity of unloading time, strain, elastic modulus, Poisson's ratio and energy to confining pressure drop decreases as a power function with the increase of unloading rate, and the sensitive period turns to the failure point; indicating the high unloading rate lags behind and inactivates the response of rock parameters to confining pressure drop, but increases the probability of rock burst. It provides a reference and basis for underground engineering, especially deep engineering.

**Key words:** unloading rate; strain; deformation parameter; strain energy; rock burst

岩石力学特性及其内部能量演化规律是工程实践的重要理论依据, 国内外学者从不同方面切入进行相关研究并取得丰硕的成果<sup>[1-2]</sup>。近年来, 岩石卸围压变形破坏研究备受关注, 卸荷过程中不同影响因素变成了研究重点, 本文以卸荷速率为焦点进行岩石卸荷过程中相关特性的研究。

较低卸荷速率有益于岩石的破碎程度, 随卸荷速率增大, 脆性特征愈加明显、破坏程度也愈加剧烈<sup>[3]</sup>。快速卸荷过程张性裂纹出现早于剪切裂纹,

岩石宏观破坏是由表及里<sup>[4]</sup>。同时, 快速卸荷缩短了岩石破坏时间, 使破坏点处于高应水平, 增加了岩爆事故的可能性和破坏性<sup>[5]</sup>。

李夕兵等<sup>[6]</sup>利用颗粒流程序(PFC<sup>2D</sup>)研究得出: 随着卸荷速率增大, 卸荷变形率减小且横向变形比轴向变形更敏感。丛宇等<sup>[7]</sup>结合实验室实验和PFC<sup>2D</sup>数值模拟, 以能量、损伤演化特征及 AE 演化规律为突破点, 探讨了卸荷速率对大理岩破坏机制的影响: 随着卸荷速率增加, 岩样承载力与轴向

收稿日期: 2019-12-24

修改稿日期: 2020-11-16

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金面上资助项目(20KJB560032); 江苏省建设系统科技资金资助项目(指导类)(2020ZD30/2019ZD080); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划资金资助项目(202010849028Y); 教育科学研究课题(重点项目)(ZS2020-6)

第一作者: 郭红军(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学、井巷围岩控制和地下工程动力灾害方面研究工作。E-mail: hongjun\_g@163.com

应变均减小、更易发生破坏,并提出了 AE 计数率持续增长且出现“平静期”的现象和岩石黏结能与应变能同时出现负增长的现象均可作为岩样破坏的前兆特征. 荣浩宇等<sup>[8]</sup>基于 Ansys Workbench 数值模拟还发现:随着卸荷速率增大,弹性模量减小变慢,围压-弹性模量逐渐呈非线性关系,泊松比增加越慢,而临近破坏时,泊松比快速增大. 当然,还有学者认为,随着卸荷速率增大,岩石极限承载强度不断提高<sup>[9]</sup>.

除了对岩石进行大量研究外,煤体也受学术界青睐. 在初始瓦斯压力和围压相同的情况下,卸围压速率增大加快了煤体失稳破坏进程,卸围压效应系数反映了卸荷速率对含瓦斯煤岩失稳破坏难易程度,二者存在幂函数关系<sup>[10]</sup>. 随卸载速率增加,煤体强度呈幂函数降低<sup>[11]</sup>,维持在应力平台阶段的时间减少且与其呈幂函数关系,更容易发生失稳破坏<sup>[12]</sup>.

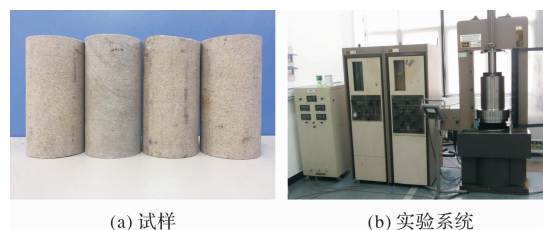
岩石卸荷能量演化方面,卸荷速率越大,弹性应变能释放得越快、越剧烈,耗散能变化率也随卸荷速率增加而变大,加剧了岩石损伤<sup>[13]</sup>;耗散能变化率比弹性应变能变化率大一个数量级,能量快速耗散是岩石卸荷破坏过程的主要特征,随卸荷速率的增加,同一围压条件下岩样原始强度衰减的更快<sup>[14]</sup>. 在相同围压下,总能量、弹性应变能和耗散能随着卸荷速率增大而不断减小,同时能量转化速率也在不断地减小<sup>[15]</sup>. 等围压条件下较大卸荷速率使岩样破坏时释放的能量较小,说明岩样破坏前极限储存能较少,更易发生岩爆事故<sup>[5,16]</sup>. 在不同卸荷速率下,破坏点处轴向能量和总能量的演化过程没有发生明显变化,卸荷速率的大小主要是对峰值点处的能量起到影响作用<sup>[17]</sup>.

卸荷速率大小与围压减小快慢相对应,本文以各参量与围压的变化关系间接反映卸荷速率对其影响并展开讨论.

## 1 粉砂岩加载破坏特性研究

### 1.1 实验方案

岩样(粉砂岩)取自陕西某矿,将岩样加工成  $\Phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$  的圆柱体标准试件,如图 1(a)所示. 将完整性和均一性较好的试件进行波速测试,并选取波速离散性较小的试件进行实验. 本实验利用中国矿业大学 MTS 815.02 电液伺服岩石力学实验系统(图 1(b))完成.



(a) 试样 (b) 实验系统

图 1 岩样试件与实验系统

Fig. 1 Specimen and rock mechanics testing system

常规三轴压缩实验测得 30 MPa 围压条件下粉砂岩试样平均破坏强度为 110 MPa 左右. 卸荷实验应力路径如图 2 所示,具体过程为(1)应力控制方式,以 0.05 MPa/s 加载速率交替施加围压( $\sigma_2 = \sigma_3$ )和轴压( $\sigma_1$ ),每 5 MPa 转换一次,即  $\sigma_{i(i=1,2,3)}(0) \rightarrow \sigma_3(5) \rightarrow \sigma_1(5) \rightarrow \sigma_3(10) \dots$  使围压至预定值 30 MPa; (2)应力控制方式,保持围压不变,以 0.25 MPa/s 加载速率施加轴压至岩样等围压条件下峰值强度的 80%; (3)应力控制方式,保持轴压不变,以不同速率(0.05 MPa/s、0.25 MPa/s、0.5 MPa/s 和 0.85 MPa/s)降低围压至岩样破坏; (4)位移控制方式,峰后继续加载以获取粉砂岩试件全应力-应变曲线.

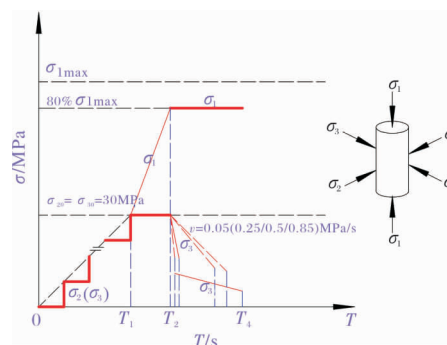
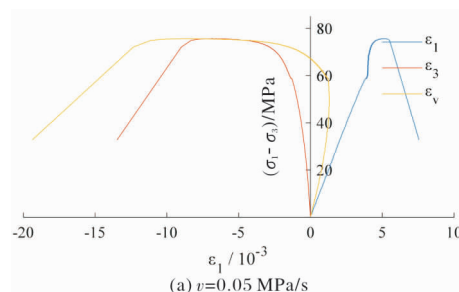


图 2 卸荷实验应力路径与加载方式

Fig. 2 Stress path and loading method in unloading test

### 1.2 全应力-应变关系

结合实验数据,图 3 给出了不同卸荷速率下粉砂岩试件三轴加卸荷破坏应力-应变曲线,其中  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_3$ 、 $\epsilon_v$  分别为试件轴向应变、横向应变和体积应变.



(a)  $v=0.05 \text{ MPa/s}$

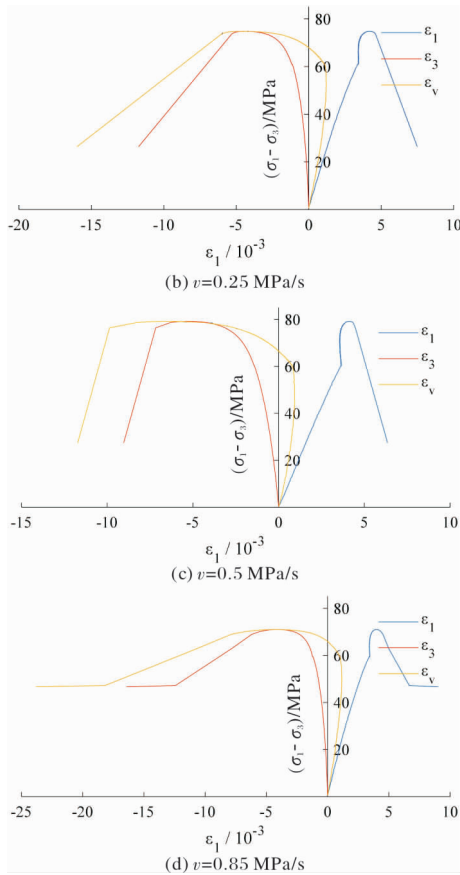


图3 不同卸荷速率应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under different unloading rates

由图3可知,随着卸荷速率增加,卸荷点至破坏应力-应变规律基本一致,破坏时刻对应的轴向应变呈减小趋势,卸荷时间呈幂函数降低(图4),破坏瞬间横向应变显著增大,表现出强烈扩容特征,对应出现了明显的应力降。

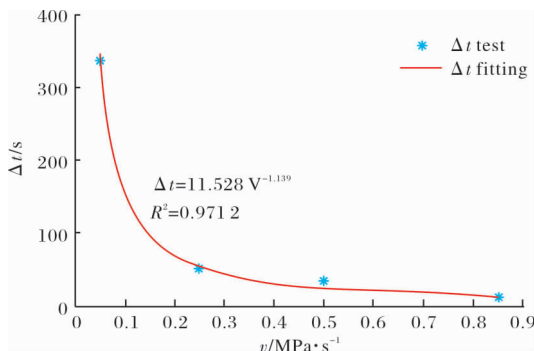


图4 卸荷破坏时间与卸荷速率关系

Fig. 4 Relationship between unloading failure time and unloading rate

当卸荷水平(轴压)一定且保持不变时,岩石变形、损伤及破坏主要与围压有关,而围压变化快慢由卸荷速率决定。为了研究卸荷速率对应变的影响,本文引入应变围压增量比概念<sup>[18]</sup>,即应变增量和围压增量之比,可表示为

$$\frac{\Delta \varepsilon_{i(t+1)}}{\Delta \sigma_{3(t+1)}} = \frac{\varepsilon_{i(t+1)} - \varepsilon_{i(t)}}{\sigma_{3(t+1)} - \sigma_{3(t)}} \quad (1)$$

式中,  $\Delta \varepsilon_{i(t+1)}$  ( $i=1, 3, v$ ) 为  $t+1$  时刻轴向(横向、体积)应变增量;  $\varepsilon_{i(t+1)}$ ,  $\varepsilon_{i(t)}$  为  $t+1$  和  $t$  时刻应变;  $\Delta \sigma_{3(t+1)}$  为  $t+1$  时刻围压增量;  $\sigma_{3(t+1)}$ ,  $\sigma_{3(t)}$  为  $t+1$  和  $t$  时刻围压。

应变围压增量比是表征各应变随围压变化快慢的物理量,能够较好地反应岩石卸荷过程中,应变对围压变化的响应程度,该值越大说明变形对围压变化越敏感。结合实验数据和式(1)得到不同卸荷速率条件下应变围压增量比与轴压关系,如图5所示。

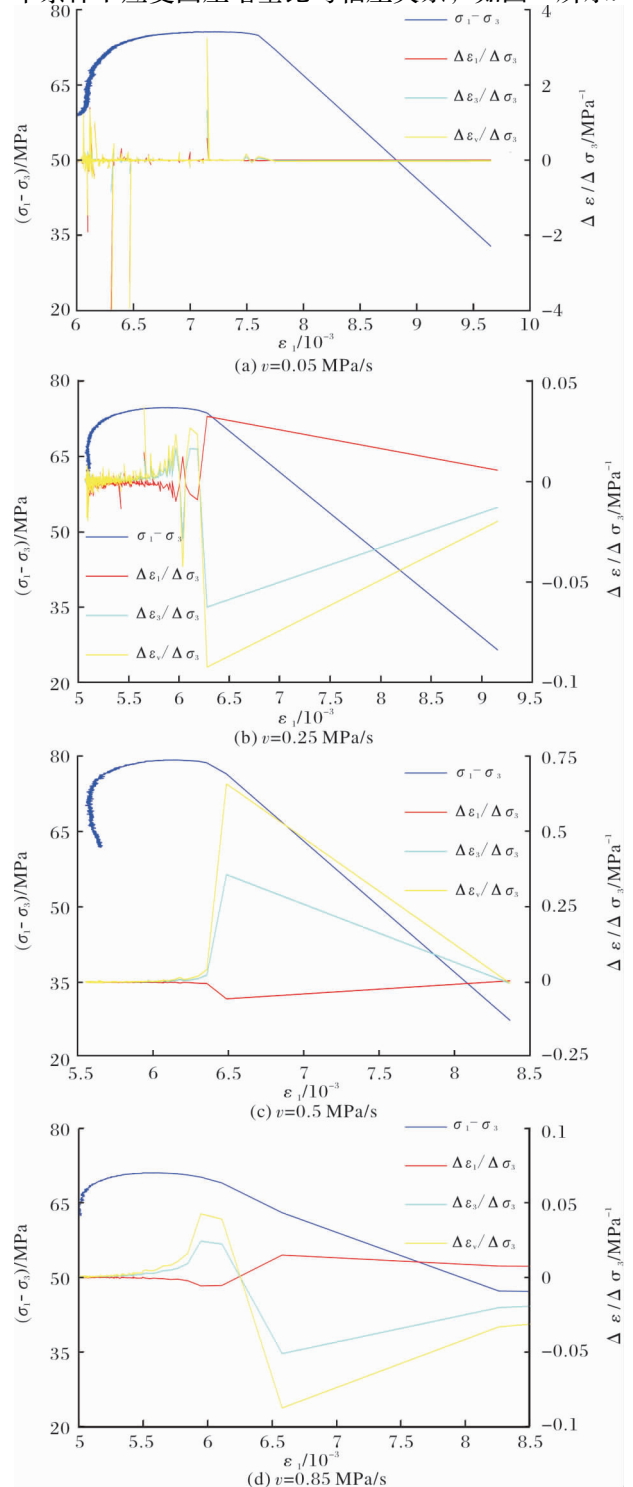


图5 应变围压增量比演化曲线

Fig. 5 Evolution curve of strain-confining pressure increment ratio

由图5可知,随着卸荷速率增加,卸荷至破坏前应变对围压降敏感程度近似幂函数降低,且敏感期向破坏点转移,其原因是低卸荷速率时,荷载作用时间充分,各向变形完全显现,对围压降响应及时且强烈,反之,高卸荷速率时,荷载快速变化使岩石来不及反应就已发生破坏,导致卸荷初期应变对围压降响应钝化,仅在破坏点附近出现了短时敏感期,敏感程度明显小于低卸荷速率时期;卸荷过程中,横向应变对围压降敏感程度始终高于轴压应变,说明卸荷扩容以横向变形为主。

### 1.3 变形参数演化规律分析

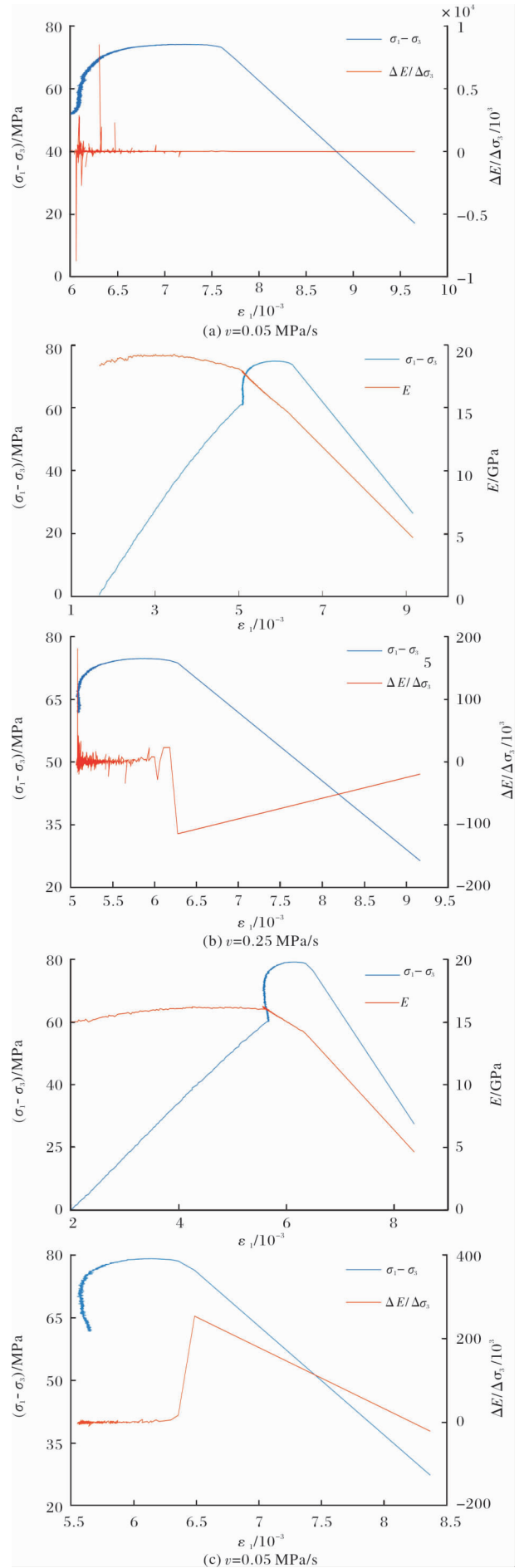
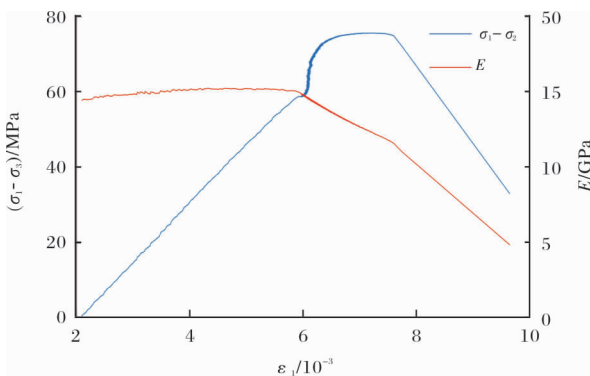
基于围压增量比概念,同样可计算弹性模量围压增量比和泊松比围压增量比,即

$$\begin{cases} \frac{\Delta E_{t+1}}{\Delta \sigma_{3(t+1)}} = \frac{E_{t+1} - E_t}{\sigma_{3(t+1)} - \sigma_{3(t)}} \\ \frac{\Delta \mu_{t+1}}{\Delta \sigma_{3(t+1)}} = \frac{\mu_{t+1} - \mu_t}{\sigma_{3(t+1)} - \sigma_{3(t)}} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\Delta E_{t+1}$  为  $t+1$  时刻弹性模量增量;  $E_{t+1}$ 、 $E_t$  为  $t+1$  和  $t$  时刻弹性模量;  $\Delta \mu_{t+1}$  为  $t+1$  时刻泊松比增量;  $\mu_{t+1}$ 、 $\mu_t$  为  $t+1$  和  $t$  时刻泊松比。

结合实验数据,粉砂岩全应力-应变过程中变形参数及其卸荷段围压增量比变化如图6和图7所示。

由图6和图7可知,卸荷段弹性模量近似线性降低,卸荷点至破坏点和破坏点至峰后降低梯度不同;卸荷初期,泊松比呈非线性增加,应力平静期线性增加趋势明显,破坏点附近至峰后随卸荷速率增加由缓慢增加转变为稳定不变;二者变化梯度统计发现,随着卸荷速率增加,其值也随之增大;与应变围岩增量比类似,随着卸荷速率增加,弹性模量和泊松比对围压降敏感程度呈幂函数降低,且敏感期向破坏点转移。在快速卸荷条件下,岩石内部结构仅发生较小变化甚至来不及发生变化就已进入破坏状态。因此,变形参数对围压降的敏感程度由低卸荷速率时卸荷点的剧烈响应向高卸荷速率时破坏点的剧烈响应转化。



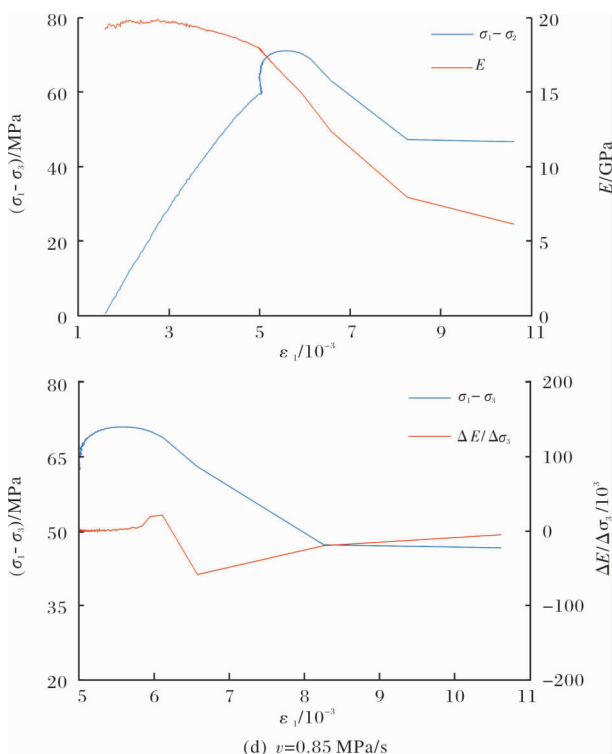


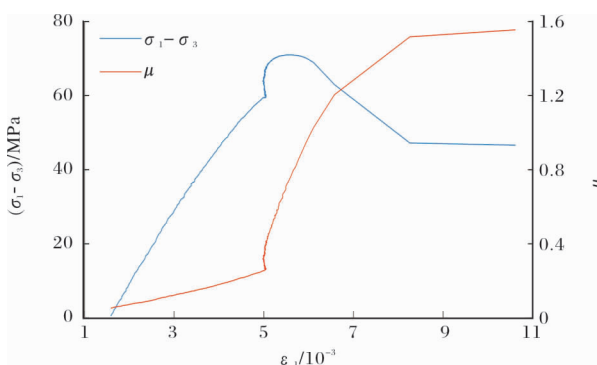
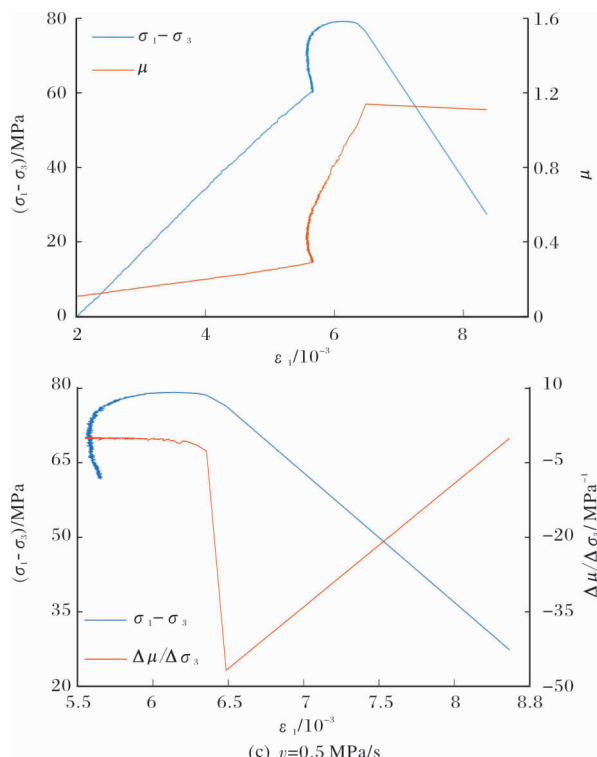
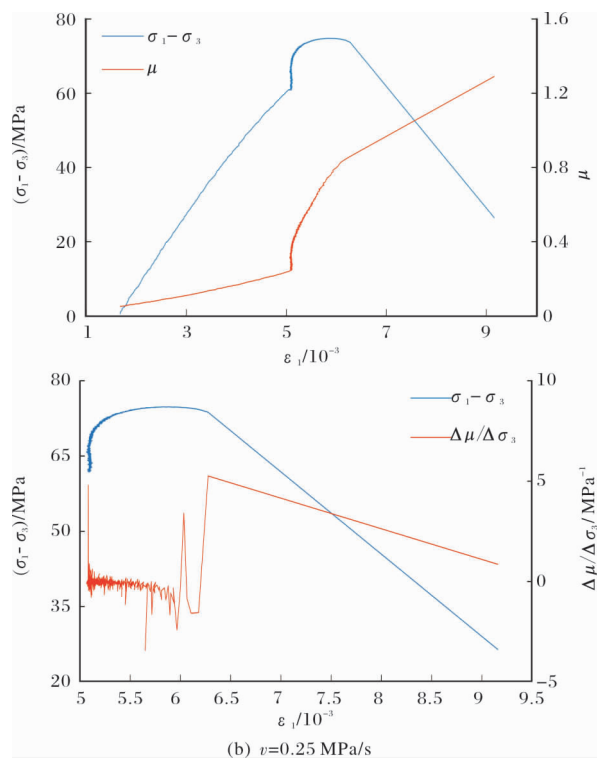
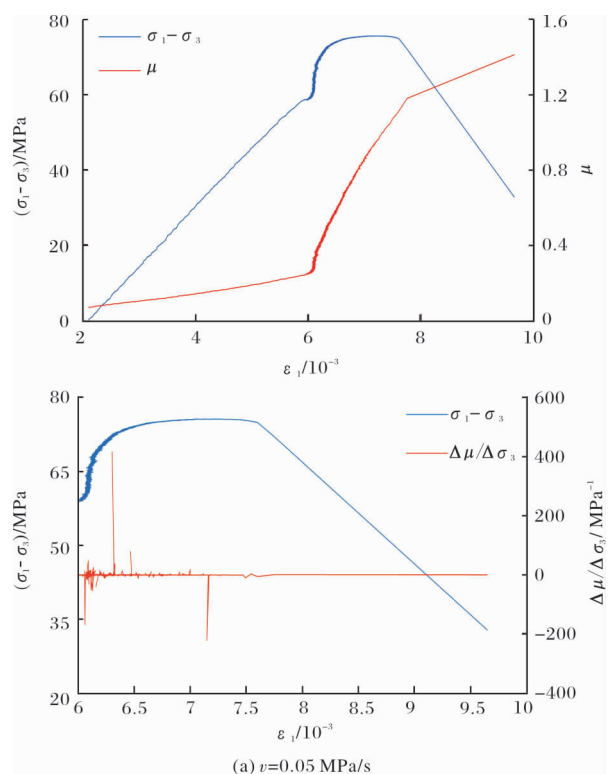
图6 弹性模量围压增量比演化曲线

Fig. 6 Evolution curve of elasticity modulus-confining pressure increment ratio

#### 1.4 能量演化规律分析

在三轴实验中,轴压做功使岩样产生轴向变形,围压则产生横向变形.因此,岩样吸收总能量  $U$  包括轴向变形吸收的轴向应变能  $U_1$  和横向变形消耗的环向应变能  $U_3$ ,则有

$$U=U_1+U_3 \quad (3)$$



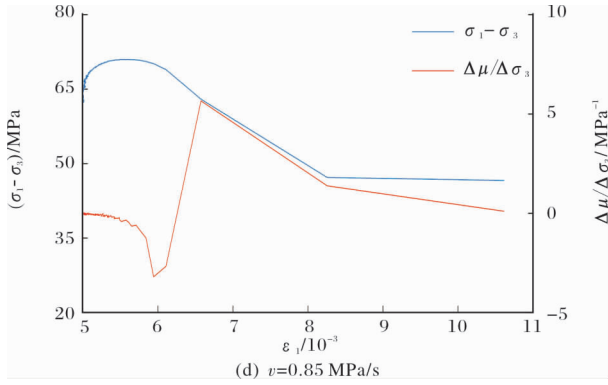


图7 泊松比围压增量比演化曲线

Fig. 7 Evolution curve of Poisson's ratio-confining pressure increment ratio

任意  $t$  时刻, 轴向应变能  $U_1$  和环向应变能  $U_3$  可根据应力-应变曲线积分求得, 即

$$U_1 = \int_0^{\varepsilon_1(t)} \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (4)$$

$$U_3 = 2 \int_0^{\varepsilon_3(t)} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon_1(t)$ ,  $\varepsilon_3(t)$  为任意  $t$  时刻轴向应变和横向应变。

根据式(4)和式(5)定积分概念, 采用微元面积

求和, 即

$$U_1 = \sum_{t=0}^{t_0} \frac{1}{2} (\sigma_{1(t+1)} + \sigma_{1(t)}) (\varepsilon_{1(t+1)} - \varepsilon_{1(t)}) \quad (6)$$

$$U_3 = \sum_{t=0}^{t_0} (\sigma_{3(t+1)} + \sigma_{3(t)}) (\varepsilon_{3(t+1)} - \varepsilon_{3(t)}) \quad (7)$$

式中,  $\sigma_{1(t+1)}$ ,  $\sigma_{1(t)}$  为  $t+1$  和  $t$  时刻轴压。

根据能量性质不同, 岩样吸收总应变能  $U$  转化为可释放的弹性应变能  $U_e$  和耗散能  $U_d$ , 则

$$U = U_e + U_d \quad (8)$$

$t$  时刻, 弹性应变能  $U_e$  为

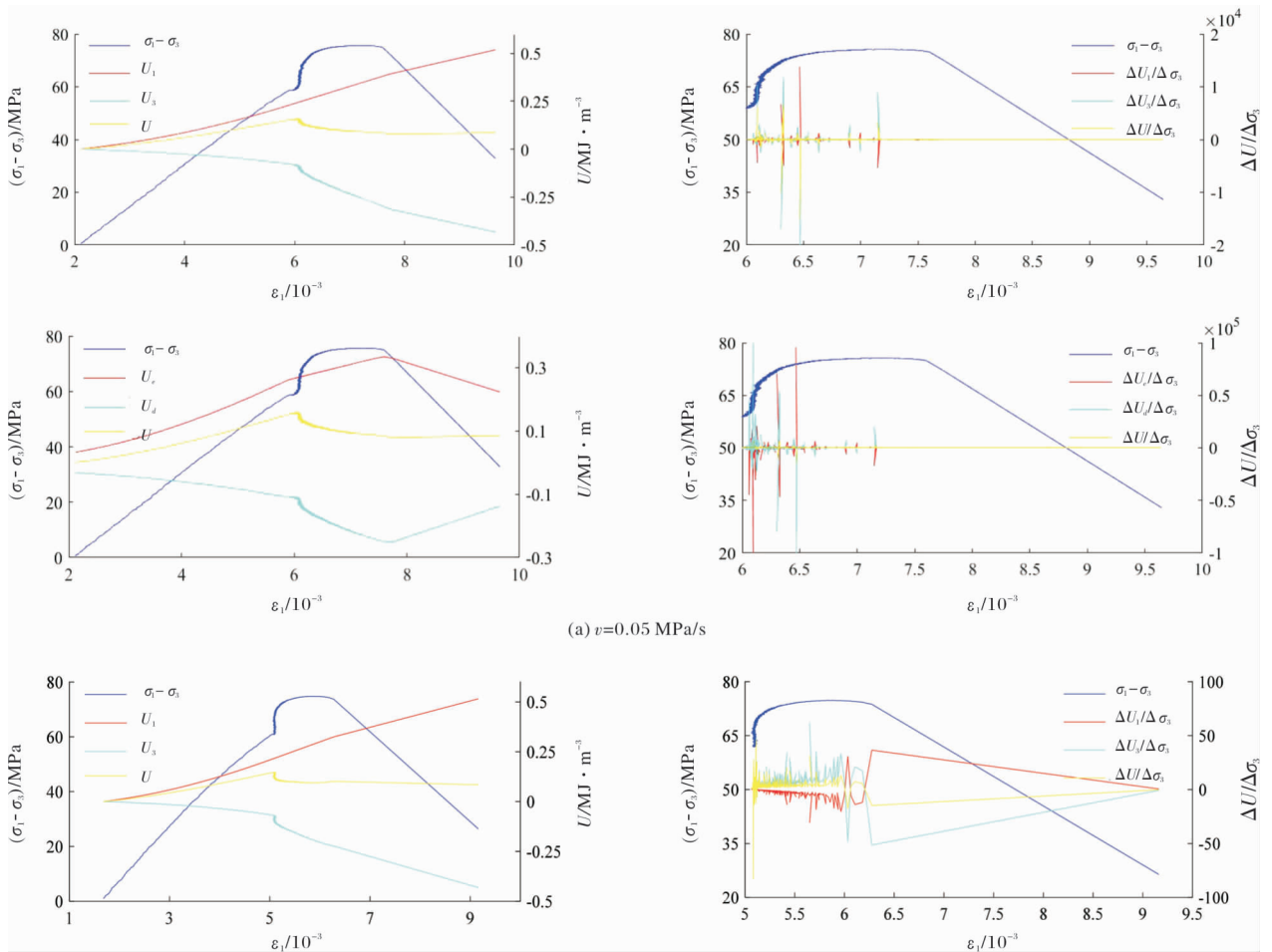
$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_{1t} \varepsilon_{1t} \quad (9)$$

结合围压增量比概念, 能量围压增量比可表示为

$$\frac{\Delta U_{t+1}}{\Delta \sigma_{3(t+1)}} = \frac{U_{t+1} - U_t}{\sigma_{3(t+1)} - \sigma_{3(t)}} \quad (10)$$

式中,  $\Delta U_{i(t+1)}$  为  $t+1$  时刻岩石内部能量增量;  $U_{t+1}$ ,  $U_t$  为  $t+1$  和  $t$  时刻岩石内部能量。

计算得到粉砂岩全应力-应变过程中能量及其围压增量比演化如图8所示。



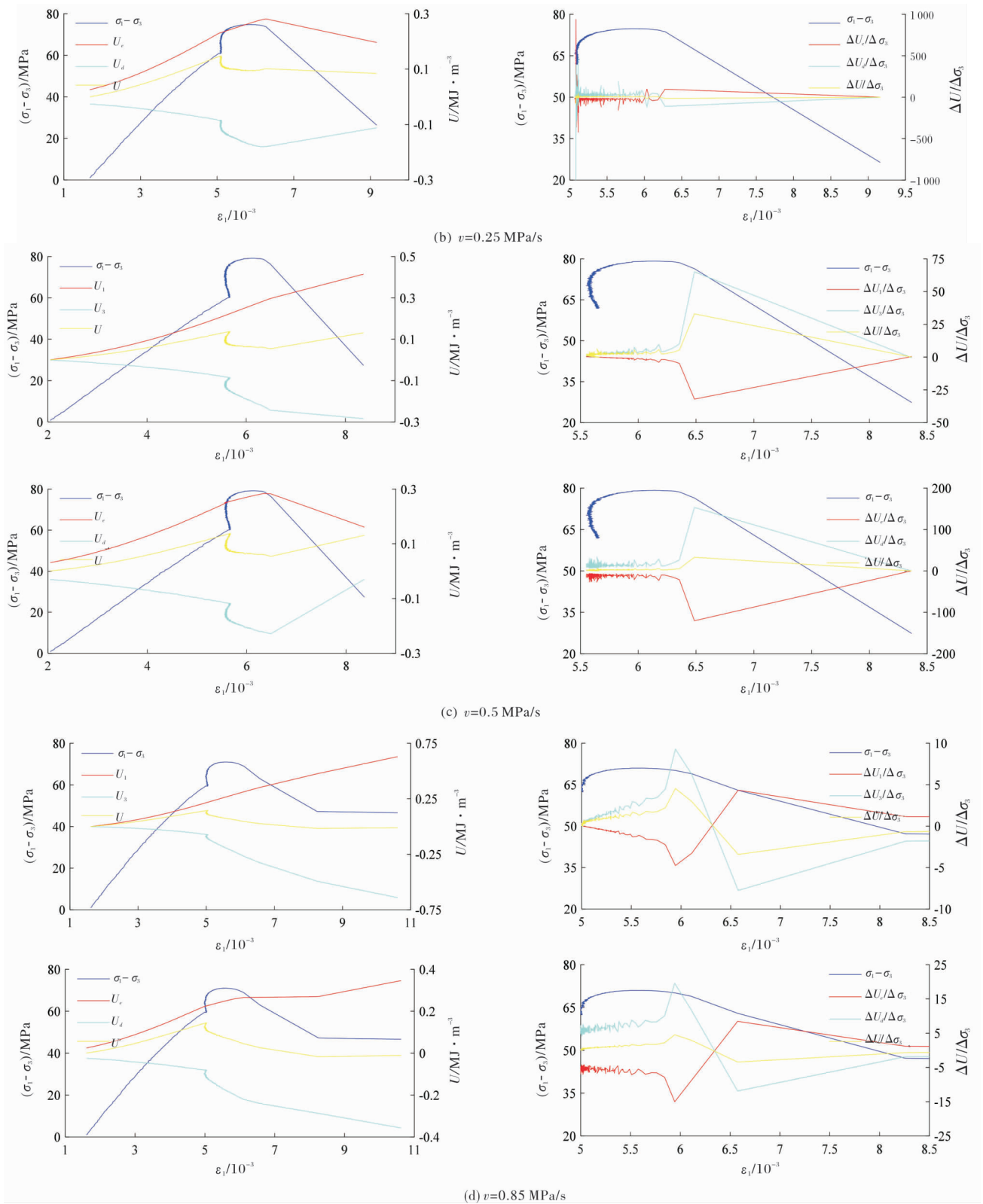


图8 能量围压增量比演化曲线

Fig. 8 Evolution curve of energy-confining pressure increment ratio

由图8可知,不同卸荷速率条件下,应变能变化规律整体相同,但其增量对围压降响应程度差异较大.岩石破坏根本原因是内部积聚能量超出了其承受能力,以劣化、损伤和破坏等形式释放能量而达成新的平衡状态.低卸荷速率时,增大的应力差

有较充分的作用时间,岩石内部微细裂纹发育,输入能量耗散较多,使破坏瞬间释放能量有限,表现出卸荷初期各应变能对围压降响应剧烈;反之,高卸荷速率下输入能量短时间内在岩石内部来不及作用,其内部储存能量很快达到了极限承受能力,迅

速形成主破坏裂纹、弹性应变能瞬间释放,表现出岩石破坏点附近能量对围压降响应活跃。同时还发现,低速卸荷时能量围压增量比远大于高速卸荷时期,甚至大几个量级,某种程度上解释了低速卸荷岩石破碎充分的现象,结合各参数对围压降响应敏感期出现的位置特征也说明卸荷速率增加使岩石由延性破坏向脆性破坏发展,使岩爆几率增加。

## 2 讨论

地下开挖施工过程中,作业空间为三向压缩的原岩应力环境,岩体处于受压蓄能状态。开挖破坏了天然平衡,最显著的变化是开挖空间(如隧道或洞室)围岩径向应力急剧降低,且围岩不同深处降低速率不同。与卸荷实验不同的是,开挖卸荷过程中,围岩之间存在相互抑制变形作用,不管卸荷速率多大都不会演变成单向压缩受载形式。快速卸荷使围岩相互抑制作用在一定区域内迅速减弱,由高围压状态即刻跌落为低围压应力环境,相当于很短时间内完成了高围压向低围压的转换,降低了岩体破坏的要求,为浅部围岩向开挖自由空间变形创造了条件,即为卸荷实验中各参数对围压降响应不明显但破坏点响应剧烈的情况,此时易造成岩爆事故;向围岩深部,浅部围岩对其仍有一定的抑制作用,使该区域岩体所处应力环境变化相对较慢,在较高围压条件下岩体破坏相对困难一些,即为卸荷实验中各参数对围压降响应强于破坏点处的情况,此时围岩内部裂隙萌生、发育及扩展,耗散了较多能量,尽管使其完整性变差,但是有效降低了岩爆危险性。

## 3 结论

结合粉砂岩恒轴压卸围压实验和不同参数增量比概念,分析了卸荷速率对其力学特性的影响规律,得出以下结论:

(1)随着卸荷速率增加,卸荷时间、应变、弹性模量、泊松比及能量对围压降敏感(响应及时和强烈)程度均呈幂函数形式降低,敏感期向破坏点转移且仅出现了短时敏感期;

(2)卸荷过程,粉砂岩以横向变形为主,表现出明显扩容特征。卸荷速率增加使岩石内部积聚能量由全卸荷过程持续耗散向破坏点附近瞬间释放转化,增大了岩爆几率,研究成果为隧道、洞室等地下工程安全施工提供了依据。

## 参考文献 References

[1] GUO Hongjun, JI Ming, LIU Dapeng. Transition

threshold of granite mechanical characteristics at high temperature[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020 (3):1-10.

[2] GUO Hongjun, JI Ming, ZHANG Yidong, et al. Study of effect on mechanical property of rock under uniaxial cyclic loading and unloading[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018(10): 1-6.

[3] 李涛. 不同应力路径下粉砂岩力学特性及卸荷本构模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.

LI Tao. Siltstone's mechanical properties in different stress paths and research of unloading constitutive model [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[4] 马艾阳, 伍法权, 沙鹏, 等. 锦屏大理岩真三轴岩爆试验的渐进破坏过程研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2868-2874.

MA Aiyang, WU Faquan, SHA Peng, et al. Progressive failure of Jinping marble in true triaxial rockburst test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35 (10): 2868-2874.

[5] 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 Weizhong, LÜ Senpeng, GUO Xiaohong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(6): 963-969.

[6] 李夕兵, 陈正红, 曹文卓, 等. 不同卸荷速率下大理岩破裂时效特性与机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(9): 1565-1574.

LI Xibing, CHEN Zhenghong, CAO Wenzhuo, et al. Time-effect properties and mechanisms of marble failure under different unloading rates[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (9): 1565-1574.

[7] 丛宇. 卸荷条件下岩石破坏宏观机理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.

[8] 荣浩宇, 胡亚桥, 张立洋. 不同卸围压速率下粉砂岩力学特性数值模拟研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(10): 53-55.

RONG Haoyu, HU Yaqiao, ZHANG Liyang. Numerical simulation of mechanical properties of siltstone under different unloading confining pressure[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(10): 53-55.

- [9] 张凯,周辉,潘鹏志,等. 不同卸荷速率下岩石强度特性研究[J]. 岩土力学,2010,31(7):2072-2078.  
ZHANG Kai,ZHOU Hui,PAN Pengzhi,et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(7):2072-2078.
- [10] 吕有厂,秦虎. 含瓦斯煤岩卸围压力学特性及能量耗散分析[J]. 煤炭学报,2012,37(9):1505-1510.  
LÜ Youchang,QIN Hu. Investigation into mechanical responses and energy dissipation properties of coal containing methane to confinement unloading[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(9):1505-1510.
- [11] 蒋长宝,俞欢,段敏克,等. 基于加卸载速度影响下的含瓦斯煤力学及渗透特性实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(6):1216-1222.  
JIANG Changbao,YU Huan,DUAN Minke,et al. Experimental study of mechanical and permeability characteristics of coal with methane containing due to different loading-unloading speeds[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(6):1216-1222.
- [12] 尹光志,蒋长宝,王维忠,等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(1):68-77.  
YIN Guangzhi,JIANG Changbao,WANG Weizhong,et al. Experimental study of influence of confining pressure unloading speed on mechanical properties and gas permeability of containing-gas coal rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(1):68-77.
- [13] 张军伟,姜德义,赵云峰,等. 分阶段卸荷过程中构造煤的力学特征及能量演化分析[J]. 煤炭学报,2015,40(12):2820-2828.  
ZHANG Junwei,JIANG Deyi,ZHAO Yunfeng,et al. Analysis of the mechanical characteristics and energy evolution of tectonic Coal during the process of step unloading[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(12):2820-2828.
- [14] 高速,张黎明,王在泉,等. 大理岩卸荷破坏变形及能量特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2808-2813.  
GAO Su,ZHANG Liming,WANG Zaiquan,et al. Study of deformation and energy properties of marble unloading failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(S1):2808-2813.
- [15] 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 Liming,GAO Su,WANG Zaiquan,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.
- [16] 卢自立,邓拓,刘文浩,等. 变质砂岩卸围压破坏特征试验研究[J]. 土木工程与管理学报,2014,31(4):29-32,54.  
LU Zili,DENG Tuo,LIU Wenhao,et al. Testing on unloading confining pressure for characteristics of the metamorphic sandstone [J]. Journal of Civil Engineering and Management,2014,31(4):29-32,54.
- [17] 丛宇,王在泉,郑颖人,等. 不同卸荷路径下大理岩破坏过程能量演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3140-3147.  
CONG Yu,WANG Zaiquan,ZHENG Yingren,et al. Energy evolution principle of fracture propagation of marble with different unloading stress paths[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(9):3140-3147.
- [18] 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):1686-1698.  
QIU Shili,FENG Xiating,ZHANG Chuanqing,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,2012,31(8):1686-1698.

(编辑 吴海西 沈 波)