

双向加压下岩石能量规律的实验研究

黎立云^{1,2},王荣新¹,马旭¹,赵占文¹,许岩岩¹,卢箐芳¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘要:在保持侧向压力基本稳定的条件下,对岩石试件进行了竖向反复加卸载直至破坏的双向压缩实验,得到了不同侧压及不同竖向压力下卸载的等效卸载弹性模量;对岩石试件还进行了双向同步加卸载直至破坏实验,得到了不同加载速度及不同双向压力下卸载的等效卸载弹性模量;两种实验都得到了破坏时的总吸收能、总耗散能和总可释放应变能。同时完成了方板中心圆孔岩石试件在不同加载速度下的双向压缩红外热成像实验。实验结果表明,加载速度越高,则试件表面平均温度越低;反之,亦然。

关键词:双向压缩;卸载弹性模量;加载速度;总破坏吸收能;耗散能;可释放应变能

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A

The energy variety analysis of rock under biaxial compression

LI Li-yun^{1,2}, WANG Rong-xin¹, MA Xu¹, ZHAO Zhan-wen¹, XU Yan-yan¹, LU Jing-fang¹

(1. Institute of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The cyclic vertical loading-unloading biaxial compression tests of marble under several fixed transverse pressures were carried out. Another synchronous biaxial compression test of marble was also carried out. Unloading elastic modulus in these two situations were obtained. Correspondingly the total absorbed energy, releasable strain energy and dissipative energy in above two failure progress were also obtained. The thermal infrared biaxial compression experiment of holed foursquare specimen under different loading rate was done. The experimental result shows that the higher the loading rate is, the lower the average temperature of specimens surface is, vice versa.

Key words: biaxial compression; unloading elastic modulus; loading velocity; total damage absorptive energy; dissipative energy; releasable strain energy

实际工程中的岩石多处于复杂的应力环境中,特别对于深部地下工程,多为两向高压应力状态或者三向高压应力状态。深部工程巷道或隧道开挖过程中岩爆的发生与岩体内可释放应变能沿临空弱面的释放有关^[1-9];作为岩体结构突发破坏的原动力,可释放应变能与当时应力状态下岩石的卸载弹性模量和泊松比相关。在岩爆发生过程中,伴随着新的破坏,又会有新的能量耗散,因而需要研究岩体在不同应力条件下破坏所需要的能量。笔者继通过单向压缩实验测得岩石的卸载弹性模量、卸载泊松比、破坏吸收能、可释放应变能、耗散能等各种能量规律后^[10-12],

又对岩石进行了不同侧压下的加卸载破坏实验,研究了在不同侧压下,竖加卸载时各种能量的变化。对岩石试件还进行了双向同步加卸载破坏实验,得到了在不同加载速度和不同双向压力下卸载时的等效卸载弹性模量,以及上述各能量的量值规律。同时完成了方板中心圆孔试件在双向压缩下的红外热成像实验,得到了不同加载速度下岩石内能量耗散的一些特点。这些实验研究结果可为深部工程岩体结构进行突发破坏的相关分析,例如总可释放应变能计算、总耗散能计算^[13-15]、抛射岩体的动能计算等提供参考。

1 可释放应变能与耗散能定义

设一个岩体单元在应力作用下将产生变形, U 为应力在对应应变上做的总功(图1), 由功能原理可知

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

其中, U^d 为单元体内的耗散能, 用于形成材料内部损伤、各种声热及电磁辐射消耗; U^e 为单元体内可释放弹性应变能, 它的汇集和释放与突发的岩体灾害相关。在复杂应力状态下, 岩体单元内总输入能 U 和总可释放应变能 U^e 应满足式(2)和(3), 即

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e \quad (3)$$

$$\varepsilon_i^e = \frac{1}{E_i} [\sigma_i - \nu_i (\sigma_j + \sigma_k)] \quad (4)$$

式中, ε_i 为主应力方向上的总应变; ε_i^e 为相应的弹性应变; E_i 为卸载弹性模量; ν_i 为卸载泊松比。

由式(3)和(4)可知, 可释放应变能与卸载弹性模量和卸载泊松比相关。

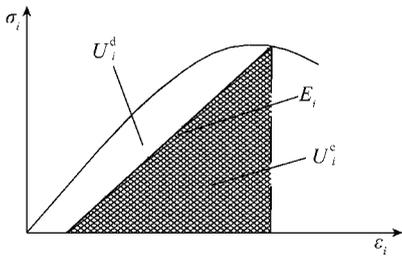


图1 E_i, U^d 和 U^e 的力学意义

Fig. 1 Mechanical meanings of E_i, U^d and U^e

2 不同侧压下的双向压缩试验

2.1 实验情况

实验材料为大理岩, 试件尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 厚度为 1.8 cm 。本文在侧压 $F_x = 0, 5, 10, 15, 20, 25 \text{ kN}$ 六种情况下对岩石进行加卸载直至破坏。竖向和横向载荷均采用位移加载, 加载速度为 0.1 mm/min , 加载情况如图2所示。实验开始时双向同时加载, 当横向载荷达到规定要求后, 保持横向位移不变(侧压有小波动), 竖向每增 10 kN 就卸载至零, 依次类推, 直至试件破坏。实验过程中双向载荷随时间的变化曲线如图3所示, 竖向载荷与位移的关系曲线如图4所示。

2.2 卸载弹模变化规律

由于是在有侧压条件下而不是在单向应力条件下测试, 故将在另一正交方向上测得的卸载弹性模量称为等效卸载弹性模量, 它与这个方向上岩石的能量耗散值与释放值直接相关。卸载弹性模量根据实验

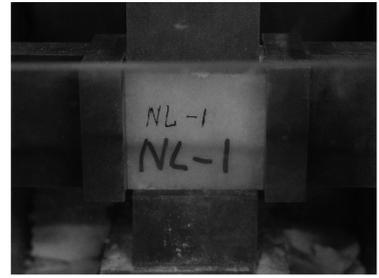


图2 双向加压实验情况

Fig. 2 Biaxial compression tests

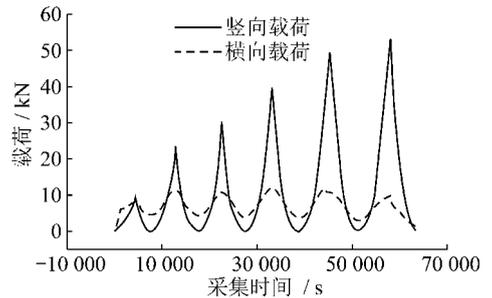


图3 双向载荷-时间曲线

Fig. 3 Load-time curves of biaxial compression tests

所得载荷位移曲线(图4)中每次卸载线的斜率求得。不同侧压下卸载弹性模量变化规律如图5所示。卸载泊松比只宜于在单向压缩的卸载实验下求得, 关于卸载泊松比的实验研究结果见文献[10-11]。

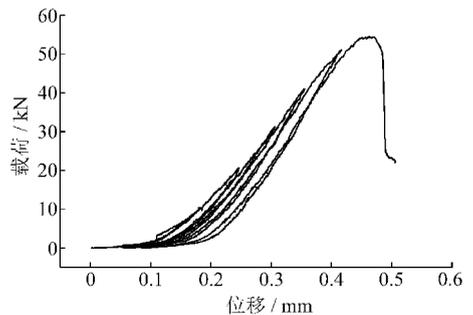


图4 侧压 $F_x = 5 \text{ kN}$ 时竖向载荷 F_y 与位移曲线

Fig. 4 Load F_y v. s. displacement under side-pressure $F_x = 5 \text{ kN}$

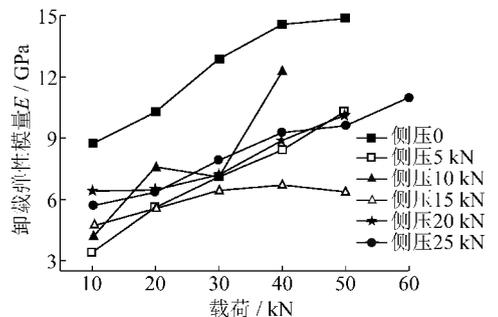


图5 不同侧压下卸载弹性模量 E 随载荷的变化

Fig. 5 The change of unloading E with loads under different side-pressure

由图5可以看出,随着图中横坐标所示竖向载荷的不断增大,卸载弹性模量都不断增大,在将要达到破坏载荷时,卸载弹性模量的增速有变缓的趋势;无侧压下的卸载弹性模量明显高于有侧压下的卸载弹性模量,当岩石的侧压略微增加以后,卸载弹性模量很快降低,但随着侧压的逐步增加,卸载弹性模量的变化规律并不明显。图5说明,由于有侧压(侧向位移固定)时的卸载弹性模量明显低于无侧压时的值,由表达式 $U^e = \sigma^2 / 2E_{eq}$ 可知,两者在相同竖向载荷下卸载,前者会释放出更多的能量,这种情况应该引起工程界注意。需说明的是此实验实质为侧向位移保持不变,侧向压力小波动,因而在加卸载过程中侧向并无新能量输入。

2.3 破坏时可释放应变能、耗散能随侧压的变化规律

根据图4试件的载荷-位移曲线下的总面积可

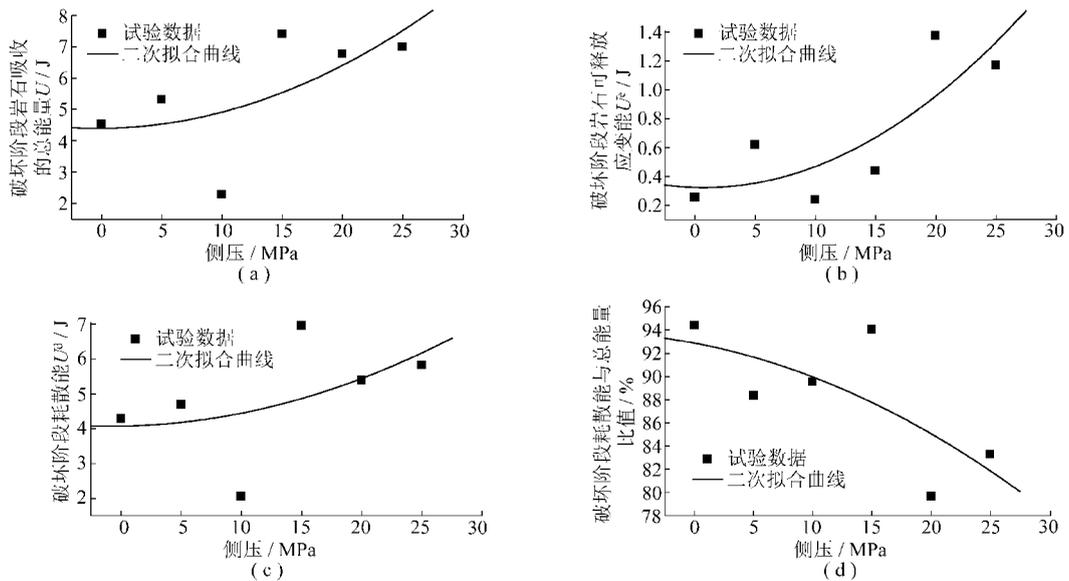


图6 破坏阶段总吸收能 U 、可释放应变能 U^e 、耗散能 U^d 和 U^d/U 随侧压的变化曲线

Fig. 6 The change curves of U , U^e , U^d and U^d/U with side-pressure in failure process

3 同步加卸载下的双向压缩实验

本文的同步加卸载双向压缩实验设备和试件与2.1节所述相同,加载速度分别取0.10、0.15、0.20、0.25 mm/min四种情况,考察双向同步加载下加载速度对可释放应变能、耗散能和总破坏吸收能的影响。图7为 x 、 y 两向载荷同步随时间变化的关系曲线,图8为双向同步加载下,不同载荷水平下卸载,加载速度对总耗散能 U^d 和总破坏吸收能 U 比值的影响,并与水平线 $U^d/U=0.5$ 相比较。图9(a)、(b)分别为 y 向和 x 向反复加卸载下的载荷位移曲线。图10(a)、(b)分别为不同载荷值下同步卸载时 y 向和 x 向的

得到载荷总功,扣除掉试验机吸收的能量即为岩石吸收的总能量 U 。卸载线下的面积则为可释放应变能 U^e ,由式(1)可知,两者之差即为耗散能 U^d 。岩石破坏前瞬间可释放能计算取用了前次卸载弹性模量。破坏前夕岩石吸收的总能量(总破坏能)、可释放应变能、耗散能和总能量之比随侧压的变化曲线如图6所示。

由图6(a)~(c)可以看出,在破坏前夕,岩石吸收的总能量、储存的可释放应变能和耗散能都随侧压的增加而逐渐增大,也即,侧压越大,使岩石破坏吸收的总能量、储存的可释放应变能和耗散能都越大;试验中也可看到试件破碎程度越严重。从图6(d)可以看出,随着侧压的增大,临近破坏时,岩石耗散能与总吸收能的比值在逐渐减小,这说明临近破坏时可释放能与总吸收能的比值在逐渐增大;也即随着侧压的增大,可释放能增速大于耗散能增速。

等效卸载弹性模量,它们直接与各自方向上的可释放应变能相关。图8,10(a)、(b)的横坐标重复是因为后续的加载循环有重复。通过图8可看出,在各种加载速度下,随着载荷水平的提高,耗散能与总吸收能的比值 U^d/U 越来越小,由水平线上方的高于0.5转为低于0.5,说明临近破坏时,可释放应变能与总吸收能相比可以占到50%以上。在破坏过程中,由于有新的破裂面产生,这些应变能又会被消耗掉很多。实验中可测到,同步加压到破坏所需的总吸收能明显高于图6所示小侧压下的总吸收能。速度升高,比值 U^d/U 略有下降,这些规律与单向压缩时相同^[10-12]。

由图10(a)、(b)可看出, y 向和 x 向的卸载弹性

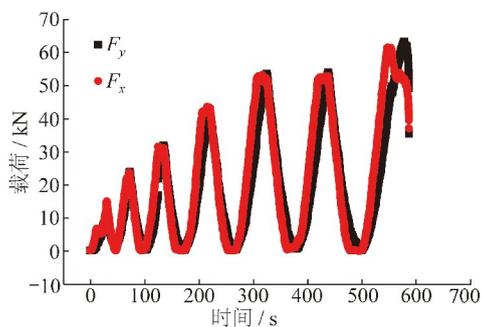


图7 双向同步加卸载时载荷与时间曲线

Fig. 7 Load-time curves of biaxial compression tests

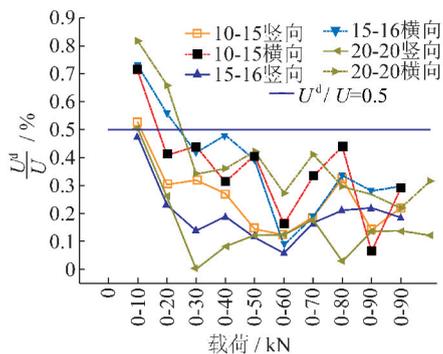


图8 破坏阶段 U^d/U 变化情况

Fig. 8 U^d/U variation in failure process

“10-15”表示加载速度为0.1 mm/min, 试件编号为第15组, 其他同理。

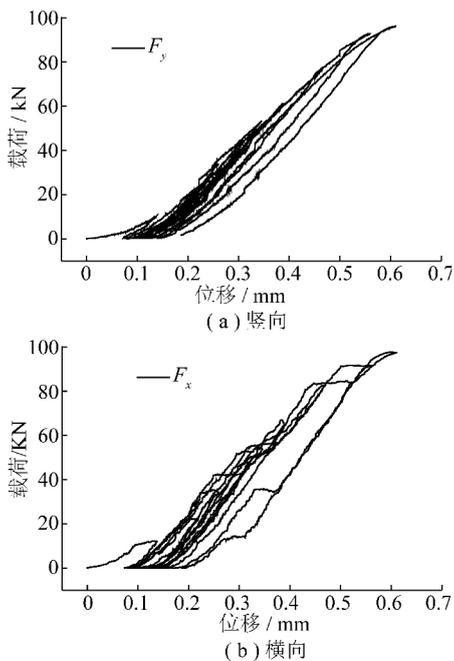


图9 竖向载荷 F_y 、横向载荷 F_x 与位移关系曲线

Fig. 9 The relation curves of load F_y, F_x and displacement

模量都随着载荷水平的提高而提高, 说明随着压缩载荷的变大, 岩石趋于越坚硬, 但压力增加到一定程度, 卸载弹性模量趋于平稳, 到了临近破坏时, 才有所下

降。这说明, 在受载的不同阶段, 岩石的卸载弹性模量是不同的, 因而释放能量的能力也是不同的。加载速度对卸载弹性模量的影响不是很明显; 这些规律与单压时也相同^[10-11]。

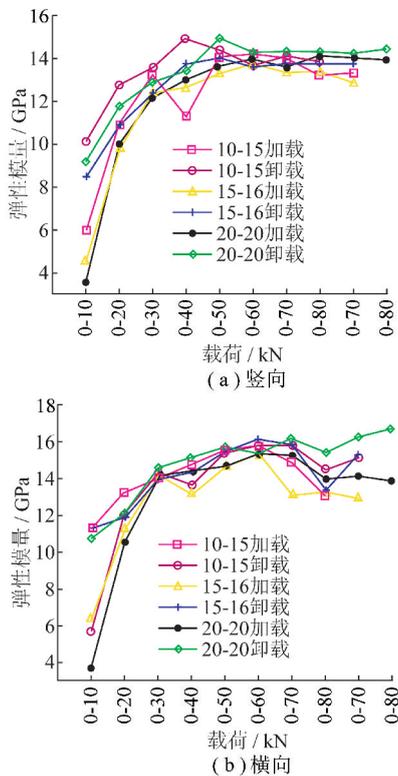


图10 不同加载速度下弹性模量随载荷的变化

Fig. 10 The change curves of the elastic modulus with the load under different loading rates

4 不同加载速度的双向压缩红外试验

本文的双向压缩红外实验, 其加载设备及试件外廓仍与图2所示相同, 只是试件中心有直径为10 mm的圆孔, 用来模拟观察工程中圆形隧道周边的能量变化情况。共做了3个试件, 对1号试件双向位移加载的速度均为0.05 mm/min; 对2号试件 x 方向加载速度为0.25 mm/min, y 方向加载速度为0.50 mm/min; 对3号试件 x 方向加载速度为0.40 mm/min, y 方向加载速度为0.50 mm/min。每个试件的最终载荷相同, 双向载荷都为23 MPa左右。不同加载速度, 达到相同载荷时的红外图像如图11所示。通过观察可知, 加载速度慢时, 如1号试件, 到达载荷终值时红外图像显示平均温度稍高一点, 也即能量耗散值要大一些; 相反, 加载速度较快时, 如3号试件, 到达载荷终值时红外图像显示平均温度稍低一点, 也即能量耗散值要小一些。这些规律与单向压缩时相同^[10-12], 也与图8所表明的趋势相同。

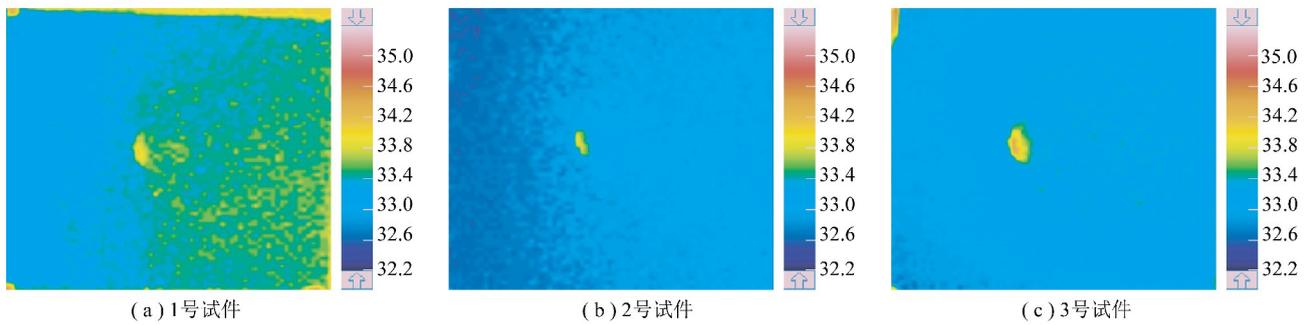


图 11 达到相同载荷时 3 个试件的红外图像(单位:°C)

Fig. 11 Three TIR images of specimens when arrived at the same load(Unit:°C)

5 结 论

(1)通过本文的双向压缩实验可知,对于有固定侧向位移(侧向压力小波动)的岩石结构,在另一正交方向上的等效卸载弹性模量会明显小于纯单向压缩下的卸载弹性模量;在某一载荷下卸载,这个方向可以释放出比纯单向压缩下更多的能量。这会对应于某种实际情况,应该引起工程界注意。

(2)在破坏前夕,岩石吸收的总能量、储存的可释放应变能和耗散能都随侧压的增加而逐渐增大。侧压越大,破坏时所需要的能量越大,而且岩石的破碎程度也越严重。

(3)双向压缩实验临近破坏时,可释放应变能比耗散能增长得更快;在破坏前夕,试件内应力所做功的 50% 以上都以可释放应变能的形式储存于岩石内。但在破坏的过程中,可释放应变能又会被消耗掉很多。

(4)随着侧压的增大,岩石耗散能与总吸收能的比值在逐渐减少,说明一向侧压可以减少另一正交方向上施力过程中的能量耗散值。

(5)通过本文的两种双向压缩实验可知,加载速度对岩石内部的能量耗散程度有一定影响;一般的规律为,加载速度慢一点,到达同一载荷值时,能量耗散值会稍高一点。

(6)双向压缩下的等效卸载弹性模量随载荷水平的提高而提高,载荷较高时会有一个稳定过程,破坏过程中逐步变小。

(7)岩石双向压缩下的各种能量规律与单向压缩时基本一致。

参考文献:

[1] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M]. 北京:科学出版社,2009.
Jiang Yaodong,Zhao Yixin,Liu Wengang, et al. Investigation on the mechanism of coal bumps and relating experiments[M]. Beijing:

Science Press,2009.

- [2] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 深层煤层巷道平动式冲击地压三维模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2 864-2 869.
Jiang Yaodong,Zhao Yixin,Liu Wengang, et al. Investigation on three-dimensional model of instability of translatory coal bumps in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(16):2 864-2 869.
- [3] 邹德蕴,姜福兴. 煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J]. 煤炭学报,2004,29(2):159-163.
Zou Deyun,Jiang Fuxing. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass [J]. Journal of China Coal Society,2004,29(2):159-163.
- [4] 陆菜平,窦林名,谢耀社,等. 煤样三轴围压钻孔损伤演化冲击实验模拟[J]. 煤炭学报,2004,29(6):659-662.
Lu Caiping,Dou Linming,Xie Yaoshe, et al. Experimental simulation of drilling impact of coal sample in three-axle enclosed pressure[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(6):659-662.
- [5] 孙振武,代进,杨春苗,等. 矿山井巷和采场冲击地压危险性的弹性判据[J]. 煤炭学报,2007,32(8):794-798.
Sun Zhenwu,Dai Jin,Yang Chunmiao, et al. Elastic energy criterion of rock burst in roadway and coalface of mine[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(8):794-798.
- [6] 林柏泉,菅从光. 爆炸波能量变化特征及壁面热效应[J]. 煤炭学报,2004,29(4):429-433.
Lin Baiquan,Jian Congguang. Energy changing characteristics of explosion wave and heating effect of wall[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(4):429-433.
- [7] 费鸿禄,徐小荷,唐春安. 地下硐室岩爆的突变理论研究[J]. 煤炭学报,1995,20(1):29-33.
Fei Honglu,Xu Xiaohu,Tang Chun'an. Research on theory of catastrophe of rock burst in underground chamber[J]. Journal of China Coal Society,1995,20(1):29-33.
- [8] 徐曾和,徐小荷,唐春安. 坚硬顶板下煤柱岩爆的尖点突变理论分析[J]. 煤炭学报,1995,20(5):485-491.
Xu Zenghe,Xu Xiaohu,Tang Chunan. Theoretical analysis of a cusp catastrophe bump of coal pillar under hard rocks[J]. Journal of China Coal Society,1995,20(5):485-491.
- [9] 华安增,孔园波,李世平,等. 岩块降压破碎的能量分析[J]. 煤炭学报,1995,20(4):389-392.
Hua Anzeng,Kong Yuanbo,Li Shiping, et al. Energy analysis of de-

- pressurized rock fracture[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(4): 389-392.
- [10] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 003-3 010.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 003-3 010.
- [11] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 729-1 740.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 729-1 740.
- [12] 黎立云, 鞠 杨, 赵占文, 等. 静动态加载下岩石结构破坏时的能量分析[J]. 煤炭学报, 2009, 35(6): 737-740.
Li Liyun, Ju Yang, Zhao Zhanwen, et al. Energy analysis of rock structure under static and dynamic loading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 35(6): 737-740.
- [13] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂. 煤岩电磁辐射特性及其应用研究进展[J]. 自然科学进展, 2006, 16(5): 532-536.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang. Electromagnetic radiation properties and application research progress of coal petrology[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(5): 532-536.
- [14] Kowalczyk K, Ostrowska-Maciejewska J, Pecherski R. An energy-based yield criterion for solids of cubic elasticity and orthotropic limit state[J]. Warszawa: Arch. Mech., 2003, 55(5): 431-448.
- [15] Sujathal V, Chandra Kishen. Energy release rate due to friction at bi-material interface in dams[J]. Engng. Mech., 2003(7): 793-800.

2011 年《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版) 征订启事

《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING(CHINA)》是由中国煤炭学会主办的、向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》英文版《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING(CHINA)》是向世界传播我国煤炭科学技术的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科学成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用。及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是《煤炭学报》英文版的主要任务。《煤炭学报》英文版和中文版具有不同的刊登内容和各自的特点。

《煤炭学报》英文版为季刊,每期 112 页,每册国内订价 28 元,全年共收费 112 元。订阅者可直接和本编辑部联系,订单函索即寄,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930, E-mail: mtxbbyh@126.com, mtxb@vip.163.com