

文章编号: 1673-3363-(2016)01-0128-06

含纵向裂隙砂岩的强度劣化与加载速率效应

尹乾, 靖洪文, 苏海健, 赵洪辉

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

摘要 裂隙岩石力学行为是地下工程稳定性分析的基础。在基于西部浅埋巷道顶板受力特征分析的基础上, 对单轴压缩作用下含纵向裂隙砂岩的强度劣化特征及加载速率效应进行了试验研究。研究表明: 裂隙偏移量较小(0~6 mm)时试样以劈裂破坏为主, 而偏移量较大(12~24 mm)时试样出现劈裂和斜剪混合破坏, 但斜剪是导致最终失稳的决定因素; 随着偏移量的逐渐增大, 试样承载力呈现先增大再减小后又逐渐增大的趋势, 偏移量在6~12 mm之间出现一个明显的突变区域, 这与试样破坏形态息息相关; 随着加载速率的增大, 裂隙试样承载力逐渐增大, 而劣化系数逐渐减小, 且表现为先剧减后平缓的分段式特征。

关键词 岩石力学; 顶板; 纵向裂隙; 强度劣化; 加载速率

中图分类号 TU 45

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.020

Strength degradation and loading rate effect of sandstone containing a longitudinal fissure

YIN Qian, JING Hongwen, SU Haijian, ZHAO Honghui

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Fractured rock mechanics behavior is the foundation of underground engineering stability analysis. Experimental study on strength degradation and the loading rate effect of sandstone containing a lengthways fissure under uniaxial compression has been done based on the mechanics model of roadway roof in the western shallow buried strata. The results show that, split failure will dominantly happen in the samples when the translation distance is small (0-6 mm); while mixed failure of split and shearing will probably occur when the translation distance is large (12-24 mm); and the shearing failure is the decisive factor leading to final instability. With the increasing of fissure translation distance, sample capacity presents a trend of increasing first, then decreasing and gradual increasing again, and the translation distance between 6 mm to 12 mm appears an obvious sudden change region which is closely related to the failure form of the samples. The capacity of sample containing lengthways fissure increases gradually with the increasing of loading rate, however the strength degradation coefficient decreases and presents the staged characteristic of first sharp decline and then gentle variation.

Key words rock mechanics; roof; lengthways fissure; strength degradation; loading rate effect

收稿日期: 2014-01-20

责任编辑: 王江涛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036003); 国家自然科学基金项目(51374198, 51579239); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDEK1305)

作者简介: 尹乾(1989—), 男, 安徽省宿州市人, 博士, 从事岩石力学与工程等方面的研究。

E-mail: 631441969@qq.com

Tel: 13645225046

岩石是一种复杂的天然地质材料,经历长期的沉积、地壳运移和人类工程扰动,内部存在许多节理、裂隙等缺陷,缺陷的扩展、演化、贯通是导致岩石强度劣化和失稳破坏的重要因素^[1-3]。

众多学者针对含缺陷岩石力学行为这一重要科学问题开展了研究工作,取得了诸多成果,也为大家提供了一些新的认识。肖桃李等^[4-5]通过在类岩石材料中人工预制裂隙的方法,对三轴压缩作用下单裂隙岩石的裂纹扩展特征与强度变化规律进行了研究;刘建坡等^[6]采用单纯形定位算法对预制孔洞粗粒花岗岩和细粒砂岩破裂过程中的声发射活动特征、空间相关长度和能量释放率进行了研究;杨圣奇等^[7-8]通过对断续三裂隙砂岩试样进行单轴压缩试验,获得了岩桥倾角对试样强度破坏和裂纹扩展特征的影响规律;谢林茂等^[9]利用 RFPA^{3D}-Parallel 程序研究了含孔洞岩石试样分别在单轴、双轴和三轴加载条件下的三维破裂过程;李新平等^[10]通过冻融循环试验和单轴压缩试验,研究了冻融荷载作用下裂隙长度和裂隙倾角对单裂隙岩体试样强度的影响规律,并探讨了裂隙岩体在冻融和荷载耦合作用下的损伤劣化机制。

然而纵观国内外文献对于含缺陷岩石力学特性的研究,多是考虑缺陷尺度和缺陷角度的影响,对于实际工程中缺陷相对位置对岩石承载力的影响却未见有所报道。本文在对西部浅埋岩层巷道顶板受力特征进行简化的基础上,以砂岩材料为试验对象,分析和探讨了单轴压缩作用下含不同偏移量纵向裂隙试样的强度劣化特征及其加载速率效应。

1 试验准备

1.1 问题描述

西部浅埋岩层巷道开挖后,忽略低覆重的情况下顶板受力特征可以简化为如图 1 所示,两端受对称的均布荷载,岩层内为长短不一的节理、裂隙,浅埋岩层内沿水平方向布置。选取一个含单一裂隙的岩体单元,其受力特征可以看成是一块沿纵向裂隙岩石的单轴压缩状态,研究其强度特征和变形破坏行为具有重要的理论和工程意义。

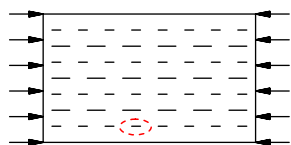


图 1 顶板简化模型

Fig.1 Simplified model of roof

1.2 试验方法

选取沉积岩中最为典型的砂岩材料作为试验对象,自然状态下呈暗红色,质地均匀,平均密度为 2.43 g/cm^3 ,矿物成分以石英、长石、高岭石为主。将砂岩加工成 $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的长方体板状试样,并切割 1 条平行于最长边的贯通裂隙,如图 2 所示,裂隙长度均为 32 mm ,宽为 1.3 mm ,距离试样中心的偏移量 a 分别为 $0, 6, 12, 18, 24 \text{ mm}$,每种偏移量试样加工 2~3 块。为反映真实岩体内充填裂隙的受力特征,在加工完的贯通裂隙进行石膏充填,石膏内加入少量的微膨胀剂以增大界面的黏结效果。

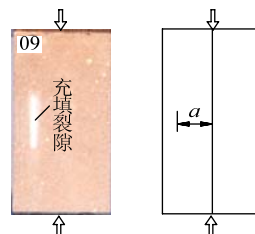


图 2 含纵向裂隙砂岩试样

Fig.2 Sandstone sample containing a lengthways fissure

采用 YNS2000 万能伺服压力机对含纵向裂隙砂岩试样进行单轴压缩试验,加载过程采用位移加载方式,加载速率为 0.1 mm/min ,预接触力为 2 kN ,加载方向沿裂隙走向(如图 2)。同时,为考察加载速率对裂隙试样的强度及劣化规律的影响,分别对完整试样和偏移量为 0 的试样进行了不同速率的压缩试验,加载速率分别为 $0.1, 0.4, 0.7, 1.0$ 和 1.3 mm/min 。加载过程中在试样上下端部各设置 1 块刚性垫板,并均匀地涂 1 层凡士林润滑剂,从而减小端部承压效应对试验结果的影响。

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态分析

不同偏移量下含纵向裂隙砂岩试样破坏形态如图 3 所示。轴向应力加载下预制裂隙尖端均发生一定的扩展,但最终失稳破坏面并不一定是预制裂隙尖端的起始裂隙,这与纵向裂隙的偏移量存在直接联系:

1) 偏移量在 $0 \sim 6 \text{ mm}$ 之间,试样由预制裂隙尖端发生纵向劈裂,并由此形成 1 个竖向的失稳破坏面,试样完全失去承载力。当然由于裂纹扩展过程的侧向挤压和材料本身非均质性的原因,同样产生了少量的倾斜裂纹。

2) 偏移量在 12~24 mm 之间, 试样出现 2 处大的破裂面, 其一为预制裂隙尖端扩展发生的纵向劈裂, 其二为预制裂隙右侧发生的斜剪破坏, 劈裂破

坏发生在剪切之前, 轴向应力达到峰值点附近发生斜剪破坏, 说明试样最终失稳是由剪切破坏决定的。

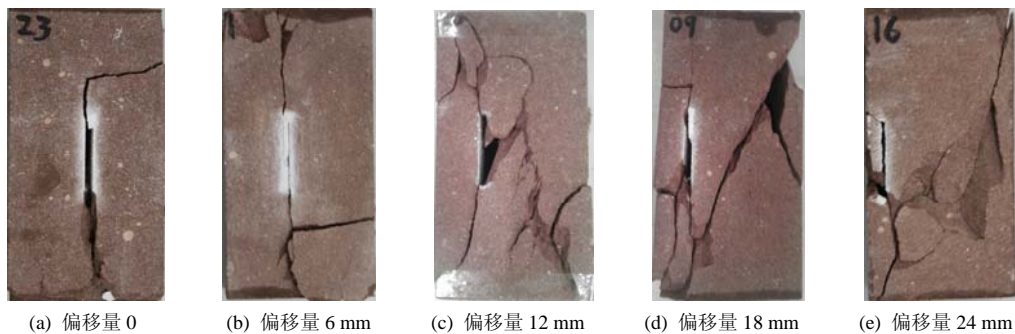


图 3 砂岩试样破坏形态
Fig.3 Failure form of sandstone sample

2.2 强度特征分析

不同裂隙偏移量砂岩试样单轴压缩作用下应力应变曲线如图 4 所示。细晶结构砂岩孔隙率相对较小, 加上压缩初期预接触作用, 试样的应力应变曲线压密阶段表现得并不明显, 略微呈下凹形, 且压密阶段相对较短; 偏移量较小(0~6 mm)时, 峰前阶段较为平滑, 而随着偏移量的增大(12~24 mm), 轴向应力达到峰值点前后产生了剧烈的波动, 这也正与其复杂的破坏特征相吻合; 达到峰值强度以后, 轴向应力应变曲线经历短暂的演化过程即发生快速跌落, 试样承载力完全丧失, 反映出了脆性岩石的基本力学特性。

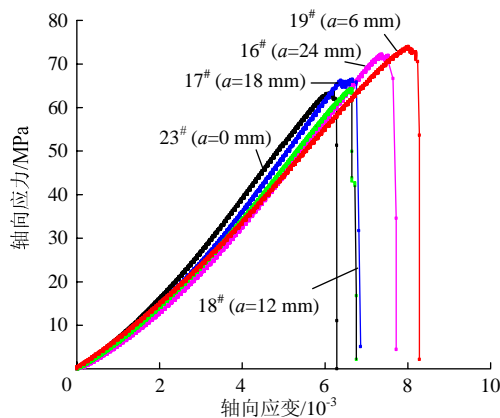


图 4 试样应力应变曲线
Fig.4 Axial stress-strain curve of sandstone sample

不同偏移量下含纵向裂隙试样单轴压缩试验结果如表 1 所列, 其中, σ 为峰值强度, ϵ_0 为峰值应变, E 为弹性模量。裂隙偏移量对弹性模量的影响较小, 主要还是由材料本身的性质来决定, 但对峰值强度和峰值应变的影响较大。不同偏移量下峰

值强度和峰值应变变化特征如图 5 所示。

表 1 砂岩试样参数

Table 1 Parameters of sandstone sample

| 编号 | a/mm | σ/MPa | $\epsilon_0/10^{-3}$ | E/GPa | ω |
|-----------------|---------------|---------------------|----------------------|----------------|----------|
| 01 [#] | — | 75.37 | 8.38 | 11.00 | 完整 试样 |
| 02 [#] | — | 77.00 | 9.12 | 10.96 | |
| 15 [#] | — | 79.67 | 9.39 | 10.64 | |
| 05 [#] | 0 | 60.58 | 7.54 | 10.17 | 0.217 |
| 13 [#] | 0 | 56.21 | 6.98 | 10.22 | 0.273 |
| 23 [#] | 0 | 63.67 | 6.20 | 12.18 | 0.177 |
| 11 [#] | 6 | 67.81 | 7.33 | 11.29 | 0.123 |
| 19 [#] | 6 | 73.93 | 8.01 | 10.84 | 0.044 |
| 20 [#] | 6 | 70.45 | 7.72 | 10.88 | 0.089 |
| 10 [#] | 12 | 65.20 | 6.95 | 11.52 | 0.157 |
| 18 [#] | 12 | 64.32 | 6.65 | 11.14 | 0.168 |
| 09 [#] | 18 | 69.59 | 7.09 | 11.70 | 0.100 |
| 17 [#] | 18 | 66.44 | 6.66 | 11.90 | 0.141 |
| 08 [#] | 24 | 67.61 | 6.90 | 11.90 | 0.126 |
| 16 [#] | 24 | 72.23 | 7.37 | 11.60 | 0.066 |

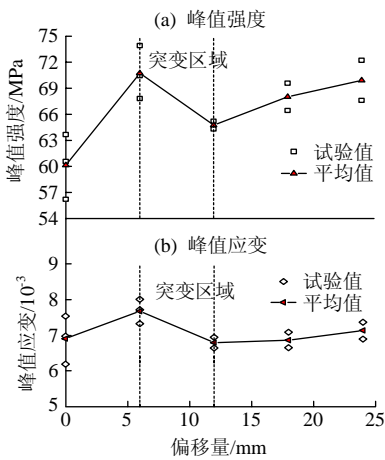


图 5 峰值强度、峰值应变与偏移量的关系
Fig.5 Relationship of peak strength and peak strain with the translation distance

随着偏移量的逐渐增大，砂岩峰值强度和峰值应变均呈现先增大再减小后又增大的趋势，而这种复杂的变化特征与试样的失稳形态存在直接的关联性，总体可以分为 3 个阶段：

1) 偏移量在 0~6 mm 之间，试样由预制裂隙尖端发生劈裂破坏为主，随着偏移量的增大承载力逐渐增大。偏移量由 0 增大为 6 mm，峰值强度平均值由 60.15 MPa 增大为 70.73 MPa，增大了 17.59%，而峰值应变平均值也由 6.91×10^{-3} 增大为 7.68×10^{-3} ，增大了 11.14%。

2) 偏移量由 6 mm 增大为 12 mm，试样主要破坏形态由劈裂破坏转化为斜剪破坏，承载力也因此发生突变，峰值强度平均值由 70.73 MPa 减小为 64.76 MPa，减小了 8.44%，而峰值应变平均值也由 7.68×10^{-3} 减小为 6.80×10^{-3} ，减小了 11.46%。

3) 偏移量在 12~24 mm 之间，试样最终失稳主要由右侧区域的剪切破坏引起，随着偏移量的增大，右侧区域范围逐渐增大，试样承载力也逐渐增大。偏移量由 12 mm 增大为 24 mm，峰值强度平均值由 64.76 MPa 增大为 69.92 MPa，增大了 7.97%，而峰值应变也由 6.80×10^{-3} 增大为 7.14×10^{-3} ，增大了 5.00%。

2.3 强度劣化特征

为掌握纵向裂隙对砂岩试样承载力的影响规律，对完整砂岩试样进行了多次单轴压缩试验，结果如表 1 所列，峰值强度平均值为 77.35 MPa，破坏形态如图 6 所示。完整试样以斜剪破坏为主，沿倾斜方向形成一个主破裂面将试样分成两部分，当然也伴随了少量近似沿应力加载方向的拉破坏次生裂纹的发展。

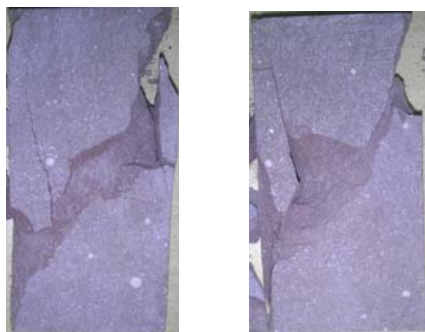


图 6 完整试样破坏形态

Fig.6 Failure form of intact sandstone sample

与完整试样相比，含纵向裂隙砂岩试样的承载能力均发生了一定程度的劣化，为定量研究这种劣化特征，引入强度劣化系数 ω ，其表达式^[11]为

$$\omega = 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{0w}} \quad (1)$$

式中： σ_0 为含纵向裂隙砂岩的单轴压缩强度； σ_{0w} 为完整砂岩试样的单轴压缩强度。劣化系数越大，试样承载力衰减幅度越大，反之则衰减幅度越小，越接近完整试样承载力。

含纵向裂隙试样强度劣化系数 ω 的变化特征如图 7 所示，具体数值如表 1。不同裂隙偏移量砂岩试样强度劣化系数在 0.044~0.273 之间，平均值为 0.140。随着偏移量的逐渐增大，劣化系数先减小再增大后又逐渐减小，偏移量在 6~12 mm 之间出现一个突变区域，这与试样失稳形态和峰值强度的变化特征相吻合。

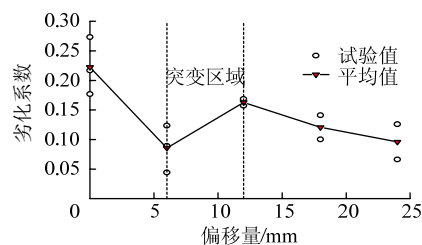


图 7 劣化系数变化特征

Fig.7 Change feature of degradation coefficient

3 加载效率效应分析

加载速率是影响岩石力学性质测试的重要因素，但至今没有一个固定的标准^[12-13]。完整试样和偏移量为 0 的典型裂隙试样在不同加载速率下峰值强度的变化特征如图 8 所示。

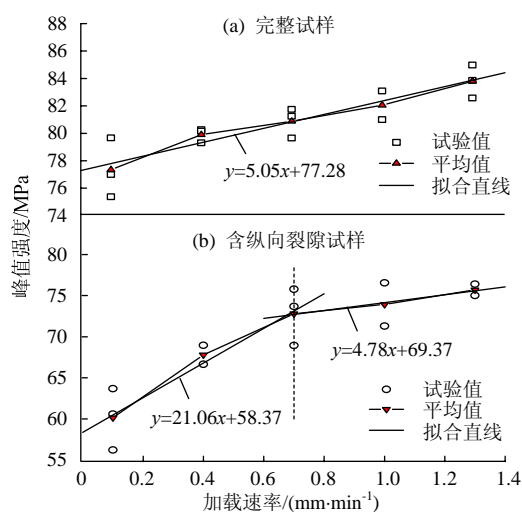


图 8 峰值强度与加载速率的关系

Fig.8 Relationship of peak strength with loading rate

由图 8 可以看出，随着加载速率的增大，完整试样和裂隙试样的峰值强度均呈现逐渐增大的特

征,但增大趋势具有很大的差别:

1) 完整试样随着加载速率的增大峰值强度增大趋势较为稳定,没有明显的突变点,基本呈线性增长特征,拟合直线斜率为 5.05。加载速率由 0.1 mm/min 增大为 1.3 mm/min 时,峰值强度平均值由 77.35 MPa 增大为 83.80 MPa,增大了 8.34%。这主要是由于速率较小时岩石破坏过程中存在一个优势剪切面,能量的耗散主要发生在优势面,随着加载速率的增大,岩石破坏逐渐剧烈,能量耗散在多个破裂面同时发生,承载力增大^[13]。

2) 裂隙试样的峰值强度随着加载速率的增大逐渐增大,但增长趋势逐渐平缓。加载速率在 0.1~0.7 mm/min 之间,裂隙试样的峰值强度增长速度较快,峰值强度平均值增大了 21.01%,拟合直线斜率为 21.06;而加载速率由 0.7 mm/min 增大为 1.3 mm/min,峰值强度平均值仅增大了 3.99%,拟合直线斜率仅为 4.78。分析原因可能是由于加载速率的增大诱使试样承载力增大,但同样也加速了纵向裂隙的发育和扩展,一定程度上又缓和了承载力的增大速度。

通过式(1)同样获得了不同加载速率下试样的强度劣化系数 ω ,变化特征如图 9 所示。随着加载速率的增大,强度劣化系数逐渐减小。加载速率在 0.1~0.7 mm/min 之间,劣化系数的减小幅度较大,速率由 0.1 mm/min 增大为 0.7 mm/min,劣化系数由 0.222 减小为 0.100,减小了 54.95%;随着加载速率的增大,在 0.7~1.3 mm/min 之间,劣化系数的减小趋势较为平缓,速率由 0.7 mm/min 增大为 1.3 mm/min,劣化系数仅减小了 3.00%。

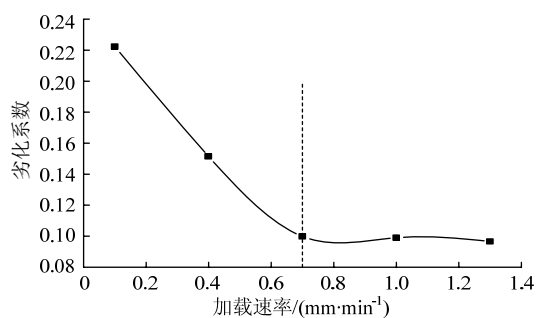


图 9 劣化系数与加载速率的关系

Fig.9 Relationship of degradation coefficient with loading rate

4 结 论

1) 单轴压缩作用下含纵向裂隙砂岩的失稳破坏形态与裂隙偏移量存在直接关系,偏移量在 0~6

mm 之间试样沿裂隙尖端发生劈裂破坏,而偏移量在 12~24 mm 之间斜剪破坏占主导地位。

2) 试样的峰值强度和峰值应变随着裂隙偏移量的增大,呈先增大再减小后又逐渐增大的趋势;而劣化系数变化特征正好相反,偏移量在 6~12 mm 之间力学性质存在明显的突变区域。

3) 偏移量为 0 的典型裂隙试样随着加载速率的增大承载力逐渐增大,而劣化系数逐渐减小,以加载速率 0.7 mm/min 为界前后分别表现为剧减和平缓的特征。

需要指出的是,本文试验中裂隙偏移量在 6~12 mm 之间试样力学性质出现了一个明显的突变区域,但如何确定具体的突变点,还需要在突变区域范围内进行大量的试验和统计,这将是笔者下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] 杨圣奇,温森,李良权.不同围压下断续预制裂纹粗晶大理岩变形和强度特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):1572-1587.
YANG Shengqi, WEN Sen, LI Liangquan. Experimental study on deformation and strength properties of coarse marble with discontinuous pre-existing cracks under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1572-1587.
- [2] YANG S Q, DAI Y H, HAN L J, et al. Experimental study on mechanical behavior of brittle marble samples containing different flaws under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(12): 1833-1845.
- [3] 靖洪文,苏海健,杨大林,等.损伤岩样强度衰减规律及其尺寸效应研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):543-549.
JING Hongwen, SU Haijian, YANG Dalin, et al. Study of strength degradation law of damaged rock sample and its size effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 543-549.
- [4] 肖桃李,李新平,贾善坡.深部单裂隙岩体结构面效应的三轴试验研究与力学分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1666-1673.
XIAO Taoli, LI Xinping, JIA Shanpo. Triaxial test research and mechanical analysis based on structure surface effect of the deep rock mass with single fissure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1666-1673.
- [5] 肖桃李,李新平,郭运华.三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J].岩土力学,2012,33(11):

- 3251-3256.
- XIAO Taoli, LI Xinping, GUO Yunhua. Experimental study of failure characteristic of single jointed rock mass under triaxial compression tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3251-3256.
- [6] 刘建坡, 徐世达, 李元辉, 等. 预制孔岩石破坏过程中的声发射时空演化特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2538-2547.
- LIU Jianpo, XU Shida, LI Yuanhui, et al. Studies of AE time-space evolution characteristics during failure process of rock specimens with prefabricated holes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2538-2547.
- [7] YANG S Q, YANG D S, JING H W, et al. An experimental study of the fracture coalescence behaviour of brittle sandstone specimens containing three fissures [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(4): 563-582.
- [8] 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 31-39.
- YANG Shengqi. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 31-39.
- [9] 谢林茂, 朱万成, 王述红, 等. 含孔洞岩石试样三维破裂过程的并行计算分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(9): 1447-1455.
- XIE Linmao, ZHU Wancheng, WANG Shuhong, et al. Three-dimensional parallel computing on failure process of rock specimen with a pre-existing circular opening[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9): 1447-1455.
- [10] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11): 2307-2315.
- LI Xinping, LU Yani, WANG Yangjun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11): 2307-2315.
- [11] YANG S Q. Crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(17): 3059-3081.
- [12] 杨仕教, 曾晟, 王和龙. 加载速率对石灰岩力学效应的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(7): 786-788.
- YANG Shijiao, ZENG Sheng, WANG Helong. Experimental analysis of mechanical effects of loading rates on limestone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(7): 786-788.
- [13] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊1): 2610-2615.
- YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Sup 1): 2610-2615.

(上接第 127 页)

- [11] 李江腾, 曹平. 非对称开采时矿柱失稳的尖点突变模型[J]. *应用数学和力学*, 2005, 26(8): 1003-1008.
- LI Jiangteng, CAO Ping. Cusp catastrophe model of instability of pillar in asymmetric mining[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2005, 26(8): 1003-1008.
- [12] 杨治林, 余学义, 郭何明, 等. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(12): 1763-1766.
- YANG Zhilin, YU Xueyi, GUO Heming, et al. Study on catastrophe mechanism for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1763-1766.
- [13] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害控制研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊1): 459-463.
- YANG Zhilin. Study of controlling catastrophe for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Sup 1): 459-463.
- [14] 唐春安. 岩石破裂过程失稳的尖点灾变模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 1990, 9(2): 100-107.
- TANG Chun'an. A cusp catastrophic model of rock unstable failure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1990, 9(2): 100-107.
- [15] SAUNDERS P T. 突变理论入门[M]. 凌复华, 译. 上海: 上海科学技术和文献出版社, 1983: 12-15.
- [16] 陈忠辉, 唐春安, 傅宇方. 岩石失稳破裂的变形突跳研究[J]. *工程地质学报*, 1997, 5(2): 143-149.
- CHEN Zhonghui, TANG Chun'an, FU Yufang. Study on sudden jump of deformation in unstable failure of rocks [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1997, 5(2): 143-149.