

# 基于特征应力点提出围岩爆破前后损伤比例公式<sup>\*</sup>

张亦海,李淼

(北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

**摘 要:**目前大多数隧道采用的是爆破掘进,炸药爆炸后的冲击应力会对隧道围岩造成不同程度的损伤。隧道围岩的损伤积累会降低围岩强度进而会影响岩体稳定性。岩石的破坏过程在微观上是内部缺陷微裂隙发展、传播、贯通,但岩石的内部微裂隙损伤难于直观观测。笔者通过室内岩石三轴压缩破坏试验和声发射特征试验所获得岩石加载过程的特征应力点判断岩石内部微裂隙发展阶段。特征应力点有裂隙初始应力—原岩损伤强度、爆破应力—凯塞点强度、裂隙贯通应力(长期强度)—原岩强度、抗压峰值强度。基于对围岩破坏过程的特征应力点的研究,提出了围岩爆破前后的损伤比例公式,量化了隧道爆破后围岩相对于原岩的损伤程度。

**关键词:** 爆破掘进;围岩损伤;特征应力点;岩石声发射;损伤比例公式

中图分类号:U45

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)03-0672-06

## A Damage Rate Formula before and after Blasting of Surrounding Rock Based on the Characteristics Stress Points

Zhang Yihai, Li Miao

(University of Science and Technology Beijing, College of Civil Engineering and Resource Engineering,  
Beijing 100083, P.R. China)

**Abstract:** Nowadays blasting is used in most tunnels excavation and explosive impact stress will cause varying degrees of damage to the surrounding rock of the tunnel. The accumulation of damage will reduce the strength of surrounding rock and will reduce the stability. The process of rock failure is that the microcrack of internal defects develops, though the rock internal micro crack damage is difficult to be observed. All typical stress points of the stress-strain curve are obtained by indoor rock compressive tests and acoustic emission tests to determine the stage of microcrack development. Typical stress points have microcrack initial stress-the original rock damage strength, blasting stress-Kaiser point strength, microcrack coalescence stress strength-the original rock strength and the peak of compressive strength. Based on the study of the typical stress points the process of surrounding rock, the ratio formula of surrounding rock blasting is put forward, and the tunnel rock damage relative to the original rock is quantified.

**Keywords:** blasting excavation; surrounding rock damage; characteristics stress point; acoustic emission of rock; damage ratio formula

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-12-15(修改稿)

作者简介:张亦海(1989-),男,河北沧州人,博士生,主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。

E-mail: b20150015@xs.ustb.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2016YFC0600703)

0 引言

岩石的破坏过程是几个不同的变形阶段,其中包括微裂隙萌生、发展和聚合。有学者研究表明<sup>[1-3]</sup>,岩石微裂隙萌生开始的应力值 $\sigma_{ci}$ 为主轴抗压强度的 0.3~0.5,这时裂隙主要平行于最大主应力而发展。随着微裂隙的发展到达一定阶段,微裂隙开始贯穿聚合,各个平行的裂隙贯通形成宏观的断裂面,这时主轴的应力值为 $\sigma_{cd}$ ,对于完整岩体来说就是岩体长期强度 $\sigma_{cd}$ 。

岩石受力破坏是其内部微破裂萌生、扩展和贯穿的过程,伴随破坏过程岩石会产生声发射现象<sup>[4-5]</sup>。这个现象早在 20 世纪 30 年代就由美国矿山局的 Obert 所发现,并将声发射技术应用到矿山矿柱岩体稳定性和岩爆的监测预报中。岩石具有记忆效应,其内部的声发射事件数在没有达到历史上受最大的应力之前不会大量地增加,这便是岩石的凯瑟效应<sup>[6]</sup>。其本质是岩石在历史上受到的最大应力作用所形成的特定微裂纹在达到历史最大应力作用下重新活动和延展的客观反映,声发射试件数则表现为突然增加<sup>[7]</sup>。由岩石凯瑟效应可知隧道围岩在爆破瞬间记录了巨大的冲击应力,通过室内声发射特征试验<sup>[8-12]</sup>便可以找到爆破时岩石受到的最大应力即 $\sigma_{kaiser}$ 。李庶林等<sup>[13]</sup>对单轴受压岩石破坏全过程声发射特征进行了详细的研究。余贤斌等<sup>[14]</sup>对直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性进行研究。尹贤刚等<sup>[15]</sup>对岩石破坏声发射强度分形特征做了充分的研究。

1 围岩特征应力点研究确定

1.1 试验方案

本次试验仪器采用 MTS-815,主要用于岩石等材料的电液伺服控制的常规力学试验,配有伺服控制的全自动三轴加压和测量系统如图 1 所示。

试验设计 0、10、20、30、40 MPa 这 5 个围压下岩石的全应力应变加载并配合加声发射采集仪。岩样组装如图 2 所示,岩样加载破坏结果如图 3 所示。

1.2 岩石裂隙初始应力-原岩损伤强度 $\sigma_{ci}$

Martin 等<sup>[2]</sup>通过对 376 岩石试样所做的室内

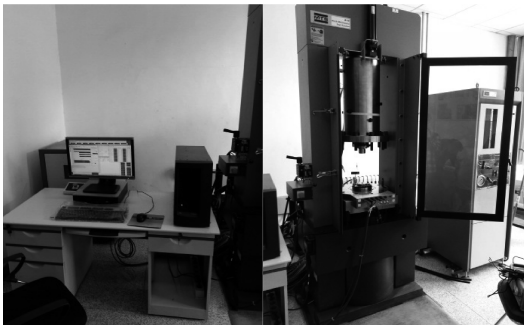


图 1 MTS 岩石力学试验机

Fig. 1 MTS rock mechanics testing machine

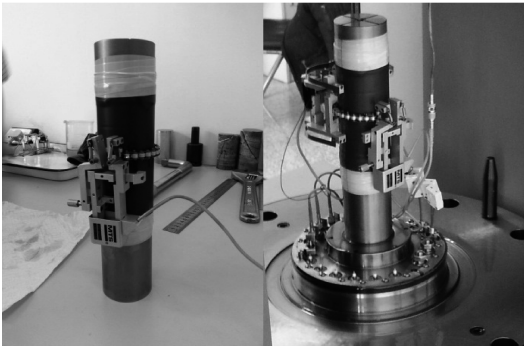


图 2 岩样组装

Fig. 2 Rock sample assembling

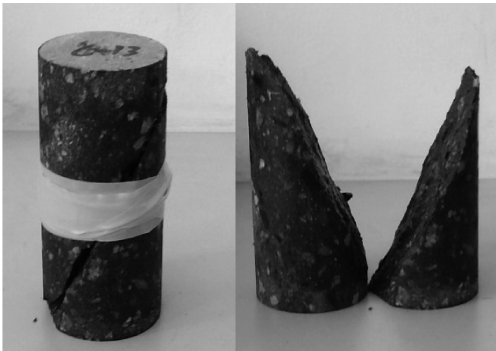


图 3 岩样破坏

Fig. 3 Rock sample failure

试验得出结论,岩石裂隙初始应力(即原岩损伤强度)发生在压缩阶段、岩石线弹性变形阶段。岩石压缩变形首先是内部微裂隙压密阶段,这一阶段岩石内部原有裂隙将被压密,不会产生新的微裂隙,其微裂隙体积是在减小的<sup>[16]</sup>。当裂隙总体积减小为零时,进而进入线弹性变形阶段,在这一阶段开始时裂隙总体积为零,岩石是完全的线弹性体,岩石的弹性模量 $E$ 及泊松比 $\mu$ 都是通过岩石这一阶段的数据所求出。当岩石裂隙体积开始由零增加时,便是裂隙初始应力即原岩损伤强度。Martin 学者研究过岩石发生变形时其环向变形分为几个阶

段,在原有裂隙压密阶段时环向应变是线性变化,岩石变形进入线弹性阶段时环向变形还是线性增加变化,当岩石开始进入稳定裂隙发展开始阶段,环向变形便开始由线性变为非线性变形,因此可以利用岩石变形过程中环向应变的响应方法求得裂隙初始强度,此方法可总结如下:

(1)确定不稳定裂隙发展开始点,即体积应变止涨,如图 4 所示。

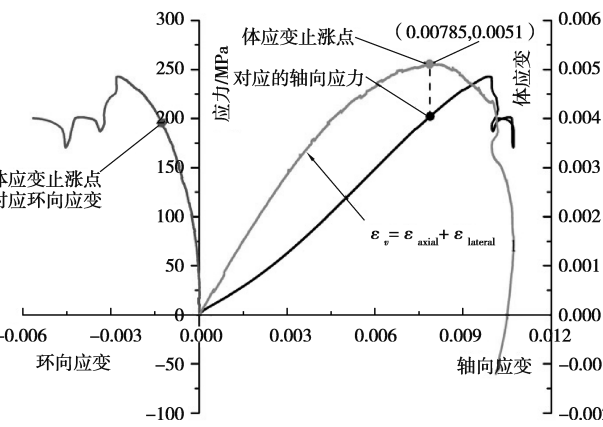


图 4 岩石体应变止涨点和环向应变参考直线确定图

Fig. 4 The maximum of value volumetric strain and lateral strain reference line

(2)确定环向应变的参考直线,具体如图 5 所示。

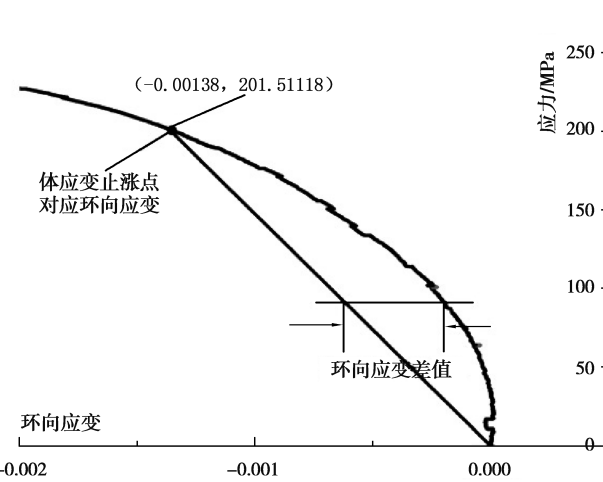


图 5 环向应变参考直线图

Fig 5 Lateral strain reference line

- (3)求出环向应变与参考直线之间的差值。
- (4)绘出差值对应力的曲线,最大差值对应的应力便是裂隙初始强度,如图 6 所示。

此方法主要的优点是消除了人为因素的影响,对比于以往所采用的声发射法确定岩石裂隙强度

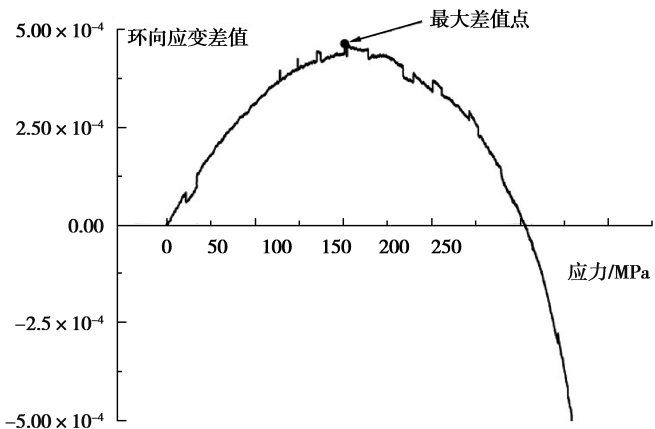


图 6 环向应变差值与应力曲线图

Fig. 6 Curve of lateral strain difference value and stress

精度提高了好几个百分点。对承德地区烧锅隧道围岩取样,对 10 组岩样进行常规三轴压缩试验,得到试验数据,通过此方法确定

表 1 岩样裂隙初始强度表

Table 1 Initial strength of rock samples

岩样编号	围压/MPa	$\sigma_{ci}$ /MPa
1#	0	34.4
2#	0	34.9
3#	10	60.9
4#	10	81.4
5#	20	135.5
6#	20	135.1
7#	30	76.7
8#	30	134.8
9#	40	135.1
10#	40	180.1

### 1.3 凯瑟点强度 $\sigma_{kaiser}$

岩石具有 Kaiser 点是因为岩石的记忆效应,以往的原始地质构造或者人工开挖爆破作用中,其所受的最大应力将被岩体记录下来。记忆效应实际就是岩石的内部裂隙开裂程度,因为当岩石在受到爆破作用时其爆破的应力远远大于岩石原始应力  $\sigma_{ci}$ 。上文提到当岩石所受的应力大于裂隙初始应力时,岩石中的内部裂隙将进一步的扩展开裂。其开裂的程度即岩体的损伤程度是由 Kaiser 点的应力值来决定的,但是 Kaiser 的应力值是爆破时炸药爆炸应力波在岩体中传播时所在某一点的应力值。

由此看来,Kaiser 点是联系炸药爆炸时能量的利用和岩石被破坏程度的一个重要的参数。

在进行岩石三轴压缩试验时,在岩样的侧面放置一个岩石声发射收集的探头,记录岩样在整个加载过程中声发射事件数。在载荷没有达到爆破时,岩石所受冲击载荷时事件数没有急剧的增加,一旦载荷到达岩样内部的声发射事件数就将急剧增加。利用岩石这种性质可以确定岩石爆破时所受爆炸冲击应力,具体如图 7 所示。

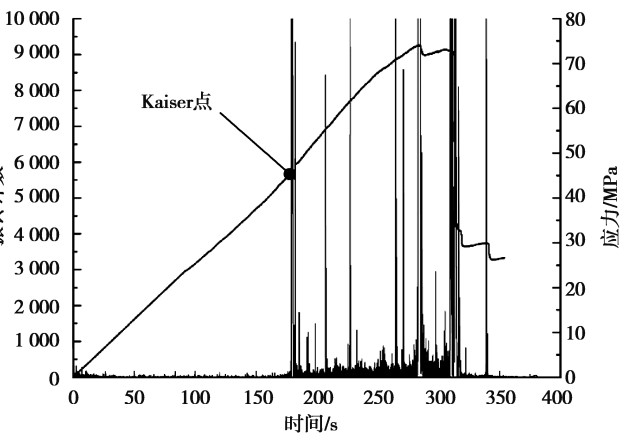


图 7 岩石声发射凯瑟点

Fig. 7 Kaiser point of rock acoustic emission

表 2 岩样凯瑟强度表

Table 2 Kaiser strength of rock sample

岩样编号	围压/MPa	$\sigma_{\text{Kaiser}}$ /MPa
1#	0	55.3
2#	0	55.0
3#	10	100.6
4#	10	107.5
5#	20	159.6
6#	20	165.2
7#	30	103.7
8#	30	214.5
9#	40	235.7
10#	40	303.3

1.4 岩石贯通应力-长期强度  $\sigma_{\text{ed}}$

岩石单轴脆性压缩变形的几个阶段(原有裂隙压密阶段、线弹性变形阶段、裂隙稳定发展阶段、不稳定裂隙发展阶段、抗压峰值峰后阶段)中,不

稳定裂隙发展阶段的起始点又称为岩石裂隙贯通应力,即岩石的长期强度。岩石在稳定裂隙发展阶段其内部的微裂隙主要是平行最大主应力方向稳定均匀的开裂,当微裂隙开裂到一定程度,各个微裂隙之间便开始贯通,形成宏观的裂隙。岩石长期的强度  $\sigma_{\text{ed}}$  的解释是:岩石在长时间处于这个应力时(大约是抗压峰值强度的 75%<sup>[1]</sup>),岩石可以失稳破坏。对试验的岩样来说,当到达贯通应力时,其体应变处于峰值,岩石的膨胀性变形大于岩石的压缩性变形,平行于最大主应力方向便开始有宏观的裂纹出现。具体确定岩石的贯通应力方法如图 8 所示。

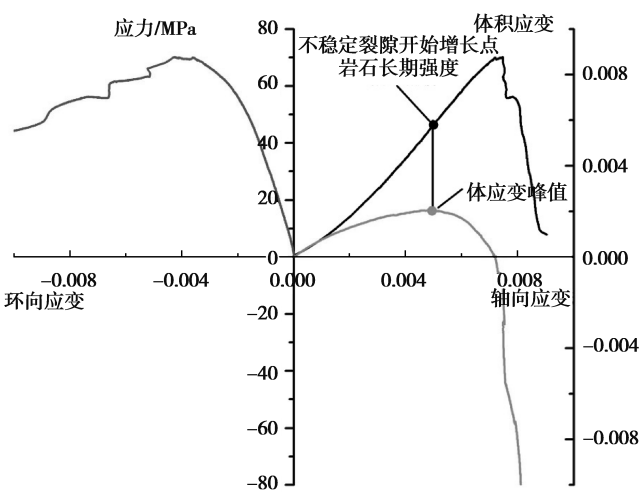


图 8 岩样的长期强度

Fig. 8 Long-term strength of rock sample

表 3 岩样长期强度

Table 3 Long-term strength of rock sample

岩样编号	围压/MPa	$\sigma_{\text{ed}}$ /MPa
1#	0	54.1
2#	0	55.3
3#	10	122.9
4#	10	126.7
5#	20	200.9
6#	20	233.1
7#	30	118.6
8#	30	234.8
9#	40	228.2
10#	40	298.4



2 围岩爆破前后损伤比例的提出

隧道围岩的特征应力包括岩石裂隙初始应力、凯瑟点应力、岩石贯通应力、抗压强度峰值等。对于隧道掘进过程中围岩的损伤程度,目前很难量化,大多数都是通过一些爆破后破碎程度来判断,进而选择应用什么样的支护方法。因此,寻找一种可以量化的隧道爆破前后围岩损伤程度的比例公式对界定隧道围岩损伤至关重要。

本文针对围岩特征应力其表示的意义和岩石变形阶段的特点,提出了基于特征应力的围岩爆破

前后损伤比例公式  $\lambda = \frac{\eta_{\sigma_{\text{Kaiser}}/\sigma_{\text{cd}}} - \eta_{\sigma_{\text{ci}}/\sigma_{\text{cd}}}}{1 - \eta_{\sigma_{\text{ci}}/\sigma_{\text{cd}}}}$ ,此公式

综合考虑了岩石破坏时的微观效应,即岩石微裂隙的产生、发展和贯通。裂隙初始应力是岩石内部微裂隙开始萌生的特征应力值,长期强度是岩石内部微裂隙贯通产生宏观破裂的特征应力值,1 减去其两者的应力比值代表岩石从开始到破坏的尺度。

$\eta_{\sigma_{\text{Kaiser}}/\sigma_{\text{cd}}} - \eta_{\sigma_{\text{ci}}/\sigma_{\text{cd}}}$  的应力比值差值代表爆破冲击应力对岩石的破坏尺度。并且对岩石微裂隙的发展的几个阶段作了详细的阐述,确立出岩石脆性破坏的几个阶段的特征应力。隧道在爆破掘进过程中,由于炸药爆破时作用在岩石上的冲击应力对围岩的内部结构造成一定的损伤,但其损伤的尺度没有量化的指标,围岩的前后损伤比例公式完全可以量化出在一次爆破过程中围岩损伤的程度。

表 4 岩样损伤比例  
Table 4 Scale of rock damage

岩样编号	$\eta(\sigma_{\text{ci}}/\sigma_{\text{cd}})$	$\eta(\sigma_{\text{Kaiser}}/\sigma_{\text{cd}})$	$\lambda$
1#	0.64	1.02	1.07
2#	0.63	0.99	0.98
3#	0.5	0.82	0.64
4#	0.64	0.85	0.58
5#	0.67	0.94	0.52
6#	0.58	0.62	0.31
7#	0.65	0.87	0.64
8#	0.57	0.91	0.8
9#	0.59	1.03	1.08
10#	0.6	1.02	1.04

由表 4 可以看出,爆破前后的损伤比例 围绕 1 上下浮动,当比例比 1 越小时,围岩受到爆破冲击应力的损伤越小,反之,等于大于 1 时,围岩受到比较大的程度的损伤。对表 4 数据拟合处理得出损失比例公式与围压关系的曲线图 9。

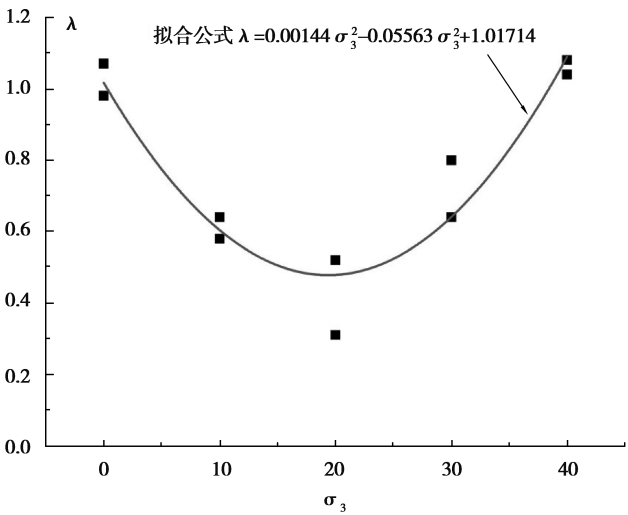


图 9 损伤比例公式与围压拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of damage ratio formula  
versus confining pressure

3 结论

(1)将岩石脆性压缩破坏过程分原裂隙压密阶段、线弹性变形阶段、裂隙稳定发展阶段、不稳定裂隙发展阶段、峰后阶段几个阶段,阐述了每个阶段的过渡特征应力点的具体意义以及确定方法。

(2)通过对破坏阶段特征应力点之间关系分析研究,建立了围岩爆破前后损伤比例,量化了隧道爆破后围岩的损伤程度。

(3)所提出的围岩爆破前后损伤比例公式与围压进行了数据拟合,得出了拟合曲线的函数表达式,可以作为隧道围岩支护时的理论指导。

参考文献 (References)

[1] Cai M, Kaiser P K, Tasaka, Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(5):833-847.

[2] Martin C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[D]. Department

- of Civil Geological Engineering, University of Manitoba Winnipeg, June, 1993.
- [3] Niclesiar M, Martin C D. Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks [J]. Engineering Geology, 2013, 154(2): 64-76.
- [4] 阳生权, 吕中玉, 刘宝琛. 隧道围岩爆破地震累积效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, (S2): 1451-1454. (Yang Shengquan, Lu Zhongyu, Liu Baochen. Study on Blasting Seismic Cumulative Effects of Road Tunnel and Its Surrounding Rocks[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, (S2): 1451-1454. (in Chinese))
- [5] 阳生权, 周健, 陈秋南, 等. 爆破震动作用下的地下结构及围岩幅频特性[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 104-107. (Yang Shengquan, Zhou Jian, Chen Qiunan, et al. Frequency and Amplitude Analysis of Underground Structure and Rock Affected by Blasting Vibration[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 104-107. (in Chinese))
- [6] Diederichs M S, Kaiser P, Eberhardt K E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(5): 785-812.
- [7] 舒西刚, 刘新荣, 姜德义, 等. 歌乐山石灰石矿爆破地震波的测试与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 586-590. (Shu Xigang, Liu Xinrong, Jiang Deyi. Test and Analysis on Blasting Seismic Wave of Geleshan Limestone Mine [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3): 586-590. (in Chinese))
- [8] Chen L Y, Wang G Z, Tan J P, et al. Effects of residual stress on creep damage and crack initiation in notched CT specimens of a Cr-Mo-V steel [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 97(1): 80-91.
- [9] Tuncay E, Ulusay R. Relation between Kaiser effect levels and pre-stresses applied in the laboratory [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(4): 524-537.
- [10] Lehtonen A, Cosgrove J W, Hudson J A, et al. An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect [J]. Engineering Geology, 2012, 124(1): 24-37.
- [11] Shiotania T, Ohtsu M, Ikeda K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(5-6): 235-246
- [12] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [13] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499-2503. (Li Shulin, Yin Xiangang, Wang Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503. (in Chinese))
- [14] 余贤斌, 谢强. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137-142. (Yu Xianbin, Xie Qiang. Direct tensile, splitting and uniaxial compression test of rock acoustic emission characteristics of Rock Mechanics and engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 137-142. (in Chinese))
- [15] 尹贤刚, 李庶林. 岩石破坏声发射强度分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3512-3516. (Yin Xiangang, Li Shulin. Study on the characteristics of acoustic emission intensity of rock failure [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3512-3516. (in Chinese))
- [16] 吴建, 陈士海. 巷道围岩爆破地震效应的模拟和解析对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1217-1222. (Wu Jian, Chen Shihai. Comparison of Numerical Simulations and Analytic Solutions about Blasting Seismic Effects in Surrounding Rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1217-1222. (in Chinese))