

基于声速变化的岩体爆破累积损伤效应

闫长斌

(黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003)

摘要: 声速变化是表征损伤变量的有效参数。为揭示岩体爆破累积损伤效应及损伤演化规律, 在某地下工程中开展了反复爆破作用下围岩损伤的声波测试, 并对测试数据进行了回归分析。在此基础上, 分析了多次爆破作用下岩体损伤与声速变化的对应关系, 建立了以岩体声速降低率为基准量的岩体爆破累积损伤扩展模型。研究表明: (1) 回归分析的相关系数大于0.981 6, 说明岩体爆破损伤非线性累积回归预测模型是正确的; (2) 岩体爆破累积损伤模型将岩体损伤总量定义为初始损伤和爆破损伤之和, 综合考虑了爆破损伤累积效应和岩体初始损伤的影响, 能够真实反映岩体损伤程度, 是合理可行的。

关键词: 爆破; 声速变化; 回归分析; 累积损伤模型

中图分类号: TU 235; TU 459⁺.3

文献标识码: A

Blasting damage cumulative effect of rock mass based on sound velocity variation

YAN Chang-bin

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Sound velocity variation is the valid parameter as the token of damage variance. In order to discover the blasting damage cumulative effect and the damage evolutive law of rock mass, sound wave measurement for surrounding rock damage under blasting time after time was carried out at some underground engineering; and the data regression was analyzed at the same time. The corresponding relation between rock mass damage and sound velocity variation under several times blasting was analyzed; and the cumulative expanded models of rock mass blasting damage with the baseline of rock mass sound velocity reducing ratio were founded. Research results show that the correlation coefficient of regression analysis is more than 0.981 6, which illuminate the nonlinear cumulative regression forecast models of rock mass blasting damage founded by test results are correct. The final quantity of rock mass damage is the total of initial damage and blasting damage in the cumulative expanded models of rock mass blasting damage, and where the influences of blasting cumulative damage effect and initial damage are synthetically considered. So the models can reflect the damage degree of rock mass veritably, which are reasonable and feasible.

Key words: blasting; sound velocity variation; regression analysis; cumulative damage models

1 引言

岩体爆破损伤破坏作用机制是^[1-3]爆炸载荷作用下岩石内部大量微裂纹的形成、扩大和贯穿, 从而导致岩石宏观力学性能劣化乃至最终失效或破坏的一个连续损伤演化累积过程。对于地下工程岩体爆破稳定性问题, 不但应考虑单次爆破引起的瞬态首超破坏, 还应考虑频繁爆破导致围岩产生疲劳损伤累积破坏效应。例如边坡、隧道开挖掘进循环爆破作业等^[4-6]。因此, 探寻多次爆破作用下岩体损

伤累积演化规律, 对于合理安排岩体工程爆破设计、地下工程安全防护以及预测爆破动荷载作用下围岩长期稳定性具有十分重要的意义。

如何判别爆破引起的岩体损伤、合理表征损伤参量是岩体爆破损伤研究的重要内容。理论和实践表明^[7-9], 声速变化和岩体损伤特性密切相关, 以声速变化定义损伤参量, 进而建立岩体爆破损伤演化模型是行之有效的方法。另外, 朱劲松等^[10]对混凝土在疲劳荷载作用下超声波速变化规律进行了试验研究, 基于超声波速定义了损伤变量, 建立了混

凝土疲劳累积损伤的演化方程。因此，在现场声波测试的基础上，以声速变化表征岩体损伤，研究爆破损伤累积演化规律是可行的。

2 岩体爆破损伤累积声波测试

2.1 测点布置与测试仪器

试验地点选在某地下工程中，围岩为灰色似层状大理岩，岩层倾向 197°，倾角 75°~85°；岩石坚硬，弱~微风化，节理裂隙不发育。

声波测试孔和爆破孔均布置在巷道一侧的边墙上。本次测试共有 9 个测试孔和 1 个爆破孔。为测试方便，所有钻孔均水平向下倾斜 5°，所有钻孔保持平行，现场具体布置情况见图 1。为满足钻孔深度要求，所有钻孔均采用 YGZ-90 型中深孔凿岩机施工，钻孔深度均为 4.90~5.00 m，钻孔孔径均为 Ø60 mm。施工过程中，7 号测试孔和 2 号测试孔在孔底部贯通，二者之间存在局部破碎带。在声波测试时，7 号孔和 2 号孔作废。

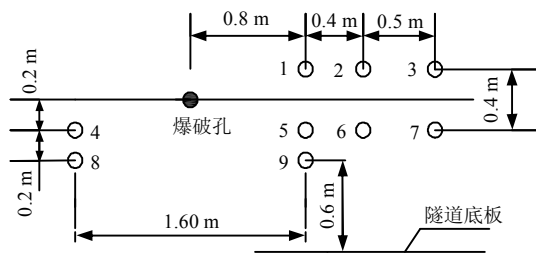


图 1 钻孔位置示意图
Fig.1 Sketch map of drilling position

2.2 模拟爆破与声波测试过程

试验研究采用小药量模拟爆破的声波测试，共进行了 10 次爆破。10 次模拟爆破均在爆破孔中进行。声波测试方法采用跨孔测试方式，测试过程中发射探头始终与接收探头保持平行。爆破前，首先对所有声波孔位进行测试，以查明爆破前围岩中声波速度的分布情况，确定既有爆破开挖对围岩损伤和扰动程度与深度。测试剖面线共 5 条，编号分别为 4-5、8-9、1-5、1-6 和 3-6，见图 1。测试时，先用塑料软管把即将进行测试的两个钻孔注满水，然后把换能器插到孔底。完成测试参数设置，测试开始后，将两个声波换能器从测试孔底部开始逐渐同步向孔口移动，每次移动距离为 0.20 m，具体参数见表 1。每次测试前，必须对声波测试参数进行仔细设置，包括测试剖面编号、增益、采样率、延迟时间、校零、孔口位置和孔距等。

表 1 岩体爆破参数
Table 1 The blasting parameters of rock mass

序号	装药量 / g	爆破位置 / m	炸药类型	充填效果
1	70	4.90	乳化炸药	较好
2	75	4.85		
3	70	4.80		
4	72	4.75		
5	70	4.70		
6	75	4.65		
7	70	4.60		
8	72	4.55		
9	80	4.50		
10	120	4.50		

3 基于声速变化的爆破损伤回归分析

3.1 基于声速变化表征的岩体爆破损伤

文献[11-12]基于声速降低率 η 建立了岩体损伤度 D 、岩体完整性系数 K 和声速降低率 η 之间的关系，并规定了损伤阈值。

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = 1 - K = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (1)$$

式中： E_0 为爆破前岩体的弹性模量； E 为爆破后岩体的等效弹性模量； v_0 为爆破前岩体的声波速度； v 为爆破后岩体的声波速度。

3.2 基于声速变化的岩体爆破损伤回归分析

根据有关混凝土与岩体疲劳裂纹扩展的双 K 准则可知^[13-14]，当损伤累积达到一定程度时，动态应力强度因子 $K_I(t)$ 超过岩体动态断裂韧度 K_{ID}^m ，完整的疲劳累积损伤演化曲线表现出 3 个明显的阶段，呈“倒 S”形状。下面对基于声速变化表征的岩体爆破累积损伤进行回归和拟合，建立非线性疲劳累积损伤演化模型。

表 2 回归拟合系数
Table 2 Regression and fitting coefficients

孔深 / m	剖面编号	A_0	A_1	A_2	A_3	R^2
4.6	4-5	0.012 6	0.069 0	-0.009 9	0.000 6	0.994 1
	8-9	-0.026 8	0.086 8	-0.013 7	0.000 8	0.999 5
	1-5	-0.008 3	0.035 7	-0.005 1	0.000 3	0.996 7
4.8	4-5	-0.015 1	0.070 5	-0.009 9	0.000 5	0.994 7
	8-9	-0.019 0	0.079 6	-0.012 6	0.000 7	0.998 5
	1-5	-0.011 7	0.042 4	-0.006 8	0.000 4	0.994 3

具体测试数据，见文献[15]，此略。分别取剖面 4-5、8-9 和 1-5 在 4.6 m 和 4.8 m 孔深处以声速变化表征的岩体爆破损伤累积结果进行回归分析，

回归结果与试验结果的比较如图 2~4 所示。根据岩体爆破损伤累积演化的非线性特点,采用 3 次多项式形式对测试得到的岩体爆破累积损伤演化数据进行回归分析,3 次多项式表达如下:

$$D = A_0 + A_1 n + A_2 n^2 + A_3 n^3 \quad (2)$$

式中: D 为岩体爆破损伤值; n 为爆破次数; A_0 、

A_1 、 A_2 和 A_3 为待定常数。

表 2 给出了回归拟合待定系数 A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 的具体值。从表 2 和图 2~4 中可以看出,岩体爆破累积损伤回归结果曲线和基于声波测试得到的试验结果曲线非常接近,说明根据试验结果建立的岩体爆破累积损伤 D 随爆破次数 n 增加的演化关系(即式(1))是正确的(相关系数 $R^2 > 0.9941$)。

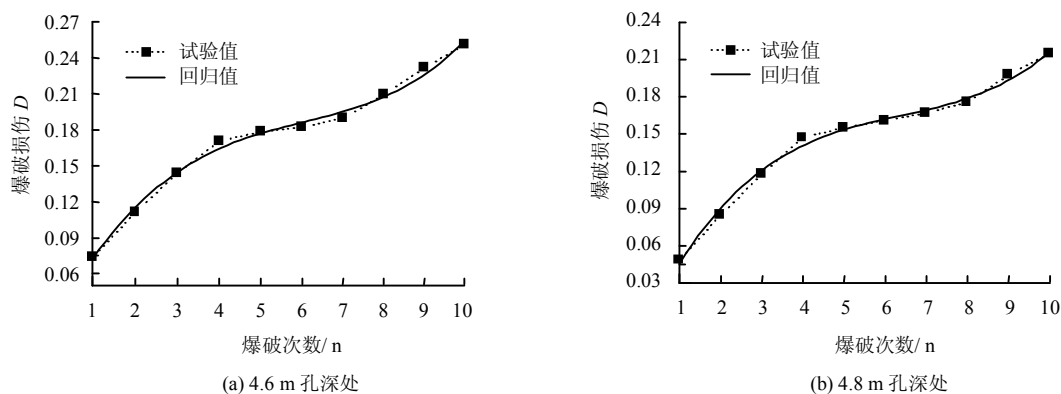


图 2 4-5 剖面非线性疲劳累积损伤演化曲线

Fig.2 Evolutive curves of nonlinear fatigue cumulative damage of section 4-5

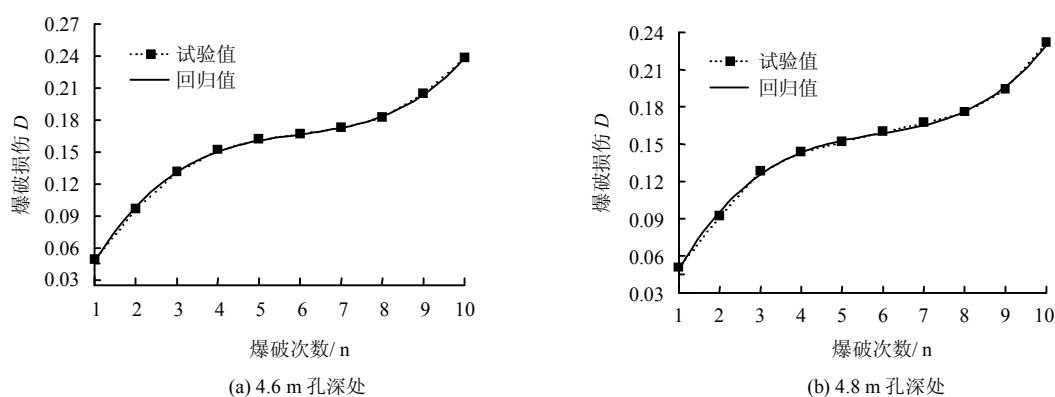


图 3 8-9 剖面非线性疲劳累积损伤演化曲线

Fig.3 Evolutive curves of nonlinear fatigue cumulative damage of section 8-9

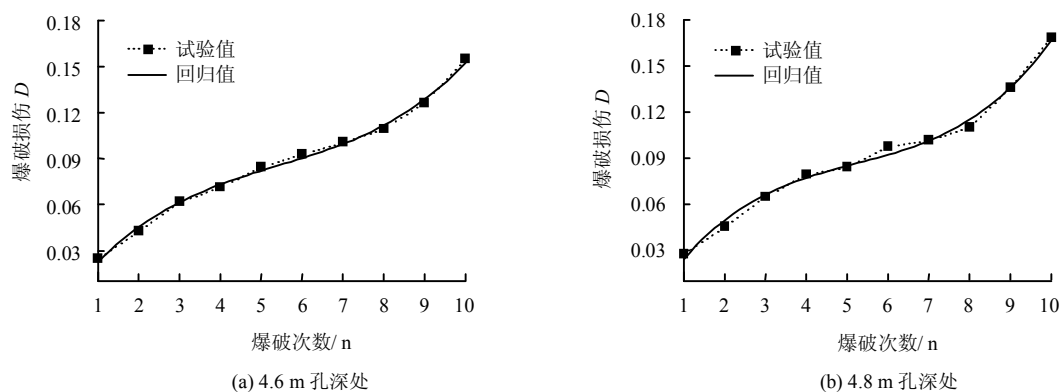


图 4 1-5 剖面非线性疲劳累积损伤演化曲线

Fig.4 Evolutive curves of nonlinear fatigue cumulative damage of section 1-5

同样,取剖面 1-6 和 3-6 在 4.6 和 4.8 m 孔深处以声速变化表征的岩体爆破损伤累积结果进行回归分析,回归结果与试验结果比较见图 5、6。剖面 1-6 和 3-6 的岩体爆破疲劳累积损伤演化曲线呈现出的非线性特性与剖面 4-5、8-9 和 1-5 不同,因此,不再采用 3 次多项式形式对测试得到的岩体

爆破累积损伤演化数据进行回归分析。根据其呈现出的非线性特性,采用如下幂指数形式:

$$D = A_0 e^{\frac{n}{B}} + A_1 \quad (3)$$

式中: D 为岩体爆破损伤值; n 为爆破作用次数; A_0 、 A_1 和 B 为待定常数。

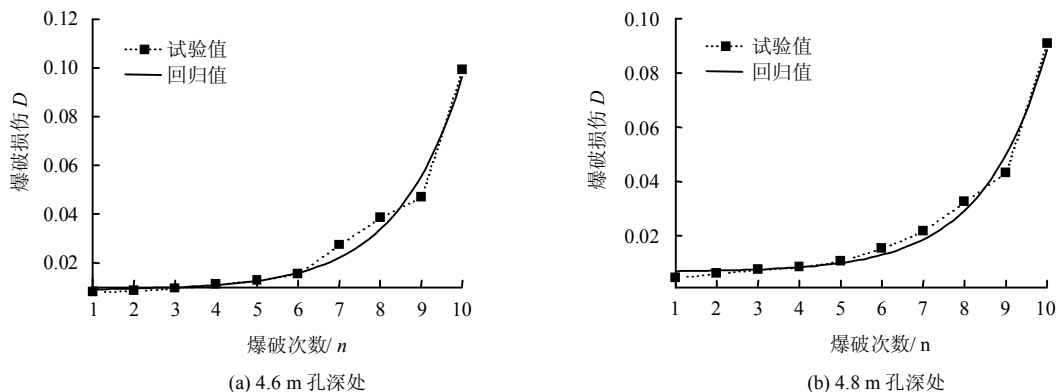


图 5 1-6 剖面非线性疲劳累积损伤演化曲线

Fig.5 Evolutive curves of nonlinear fatigue cumulative damage of section 1-6

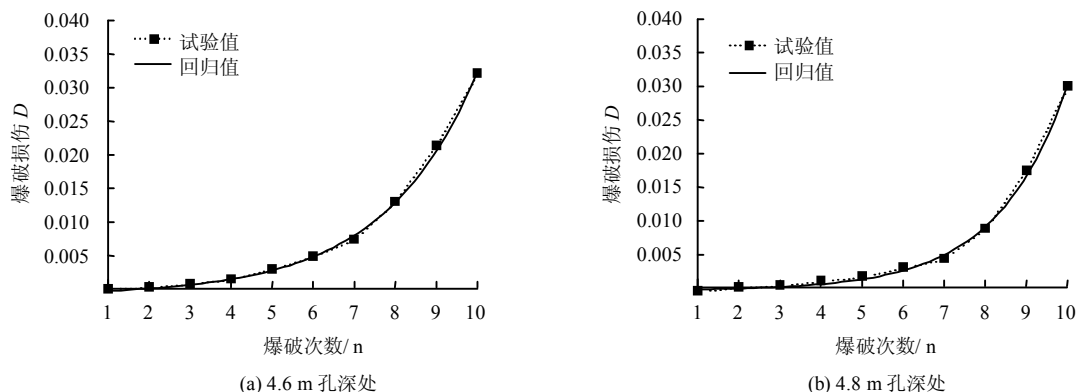


图 6 3-6 剖面非线性疲劳累积损伤演化曲线

Fig.6 Evolutive curves of nonlinear fatigue cumulative damage of section 3-6

表 3 给出了回归拟合待定系数 A_0 、 A_1 和 B 的具体值。从表 3 和图 5、6 可见,岩体爆破累积损伤回归结果曲线和基于声波测试得到的试验结果曲线也非常接近,这说明根据试验结果建立的岩体爆破累积损伤 D 随爆破次数 n 增加的演化关系(即式(2))也是正确的(相关系数 $R^2 > 0.9816$)。

由于剖面 1-6 和 3-6 距离爆源较远,受爆破影响程度较小,岩体爆破损伤程度较轻。爆破损伤累积的非线性特性不如剖面 4-5、8-9 和 1-5 明显。剖面 1-6 和 3-6 的岩体疲劳累积损伤随爆破次数增加的演化曲线不再是“倒 S”型的 3 段式,而是单一的陡增形式(见图 5、6)。经历 10 次模拟爆破后,由于爆破规模较小,而且距离爆源较远,岩体损伤

累积程度没有达到断裂破坏临界值。因而岩体受损伤破坏程度较轻,仍处于细观疲劳裂纹扩展阶段,反映在岩体疲劳累积损伤演化曲线上,就是不再呈现完整的“倒 S”型的 3 段式形状。然而,剖面 1-6 和 3-6 的岩体爆破疲劳累积损伤增长曲线形式也不同于剖面 4-5、8-9 和 1-5 岩体爆破疲劳累积损伤增长曲线前期阶段的缓慢增长形式。这是因为最后两次模拟爆破的药量较大,爆破后导致岩体损伤程度突然加剧,所以岩体爆破疲劳累积损伤曲线出现陡增形式,而不是遵循典型的“3 段式”疲劳损伤累积曲线的前两个阶段呈现缓慢增长趋势,这与实际情况是相符合的。

表 3 回归拟合系数
Table 3 Regression and fitting coefficients

孔深 /m	剖面编号	A_0	B	A_1	R^2
4.6	1-6	0.000 2	1.587 6	0.008 9	0.981 6
	3-6	0.000 4	2.271 7	-0.000 9	0.998 8
4.8	1-6	0.000 1	1.554 7	0.006 7	0.987 2
	3-6	0.000 1	1.714 3	-0.000 3	0.998 0

4 基于声速变化的爆破损伤累积模型

鉴于声速变化和岩体损伤之间存在良好的相关性, 而且具备其他方法不具备的诸多优点, 声波测试技术已成为研究岩体爆破损伤的主要方法之一^[15]。在多次模拟爆破岩体损伤声波现场测试的基础上, 以声速变化表征损伤变量, 尝试建立以声速变化为特征的岩体爆破累积损伤扩展模型。

由前述讨论可知, 实施模拟爆破后测试并分析得到的岩体损伤应该包括两个部分: 一部分是由于岩体中天然节理、裂隙、微孔洞等地质缺陷导致的初始损伤 D_0 ; 另一部分是爆破应力波作用促使裂纹扩展导致的爆破损伤 ΔD 。因此, 爆破后岩体损伤 D 可表述如下:

$$D = D_0 + \Delta D \quad (4)$$

在式(1)中已经基于声速变化定义了岩体初始损伤 D_0 的表达式, 这里将岩体初始损伤 D_0 的表达式改写为:

$$D_0 = 1 - \left(\frac{v_m}{v_0} \right)^2 = 1 - \left(\frac{v_0 - \Delta v_0}{v_0} \right)^2 = 1 - (1 - \eta_0)^2 \quad (5)$$

式中: v_m 为岩体的声波速度; v_0 为岩块的声波速度; Δv_0 为岩块声速与岩体声速的差值; η_0 为爆破前岩体初始声速降低率。

爆破应力波作用后, 岩体爆破损伤出现, 损伤总量增加。基于声速变化, 岩体爆破损伤 ΔD 可以定义为

$$\Delta D = 1 - \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{\Delta v}{v_m} \right)^2 = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (6)$$

式中: v 为爆破后岩体的声波速度; Δv 为爆破前后岩体声速的变化值; η 为爆破后岩体的声速降低率。

多次爆破作用下, 岩体爆破损伤不断增大, 但每一次爆破后岩体的爆破损伤 ΔD 都可以用声速降低率来描述。假定爆破次数为 n , 则有:

$$\Delta D_1 = 1 - \left(\frac{v_1}{v_m} \right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{\Delta v_1}{v_m} \right)^2 = 1 - (1 - \eta_1)^2 \quad (7)$$

$$\Delta D_2 = 1 - \left(\frac{v_2}{v_m} \right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{\Delta v_2}{v_m} \right)^2 = 1 - (1 - \eta_2)^2 \quad (8)$$

.....

$$\Delta D_n = 1 - \left(\frac{v_n}{v_m} \right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{\Delta v_n}{v_m} \right)^2 = 1 - (1 - \eta_n)^2 \quad (9)$$

由此可得, n 次爆破后岩体的损伤总量为

$$D = D_0 + \Delta D_n = 1 - (1 - \eta_n)^2 + 1 - (1 - \eta_n)^2 \quad (10)$$

将式(9)进一步整理后, 可得:

$$D = 2(\eta_0 + \eta_n)^2 - \eta_0^2 - \eta_n^2 \quad (11)$$

式(11)就是以岩体声速降低率为基准量表征的岩体爆破累积损伤扩展模型。矿山开采和隧道掘进时, 存在频繁爆破作业。多次爆破作用下, 岩体损伤不断累积, 当损伤累积达到一定程度时, 就会导致岩体失稳破坏。若在生产过程, 应用声波测试技术对岩体爆破损伤进行监测, 根据测试数据得到爆破后岩体声速降低率, 则可利用式(11)得到岩体的损伤累积程度。经回归分析, 在确定回归系数 A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 的基础上, 结合式(2)给出的岩体爆破疲劳损伤累积预测模型, 就可以对后续爆破造成的岩体损伤进行估算。经估算得到的岩体损伤接近岩体损伤阈值 ($D_{\text{阈}}$ 可取 0.85) 时, 应及时调整爆破设计, 并对关键部位岩体 (或软弱破碎岩体) 采取加固措施, 预防岩体失稳破坏事故。

5 结 论

(1) 基于声波测试, 以声速变化表征岩体爆破损伤变量, 研究多次爆破作用下岩体累积损伤效应与损伤演化规律的方法是可行的。

(2) 声波测试数据回归分析的相关系数 $R^2 > 0.981 6$, 说明基于声速变化建立的岩体爆破损伤非线性累积回归预测模型是正确的。

(3) 建立的以声速降低率作为基准量的岩体爆破累积损伤扩展模型, 综合考虑了岩体初始损伤和爆破累积损伤效应的影响, 能够真实地反映岩体损伤程度, 是合理的。

参 考 文 献

- [1] HAO H, WU C h, ZHOU Y X. Numerical analysis of blast-induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models. Part I: Equivalent material

- property approach[J]. **Rock Mech. and Rock Eng.**, 2002, 35(2): 79—94.
- [2] INNAURATO N, MANCINI R, CARDU M. On the influence of rock mass quality of blasting work in tunnel driving[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1998, 13(1): 81—89.
- [3] 李海波, 蒋会军, 赵坚, 等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1887—1891.
- LI Hai-bo, JIANG Hui-jun, ZHAO Jian, et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 22(11): 1887—1891.
- [4] 闫长斌, 徐国元, 杨飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究[J]. 岩土工程报, 2007, 29(1): 88—93.
- YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, YANG Fei. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(1): 88—93.
- [5] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC^{3D} 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2894—2899.
- YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, LI Xi-bing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC^{3D}[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(16): 2894—2889.
- [6] 马建军. 岩石爆破的相对损伤与损伤累积计算[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 961—964.
- MA Jian-jun. Relative damage and computation of damage cumulation for blasting in rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 961—964.
- [7] 彭德红. 边坡开挖爆破的声波测试技术[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(12): 38—41.
- PENG De-hong. Sound wave test technology for blasting excavation in side slope[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2004, 26(12): 38—41.
- [8] MEGLIS I L, CHOW T M, MARTIN C D. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2005, 42(1): 25—34.
- [9] ANDERS ANSELL. In situ testing of young shotcrete subjected to vibrations from blasting[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2004, 19(4): 587—596.
- [10] 朱劲松, 宋玉普. 混凝土双轴抗压疲劳损伤特性的超声波速法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2230—2234.
- ZHU Jin-song, SONG Yu-pu. Research on fatigue damage of concrete under biaxial compressive loading using ultrasonic velocity method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(13): 2230—2234.
- [11] 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 12—16.
- ZHU Chuan-yun, YU Sheng-chun. Study on the discriminance of rock mass damage induced by blasting[J]. **Engineering Blasting**, 2001, 7(1): 12—16.
- [12] 中华人民共和国水利部. SL47—94 水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [13] 黄达海, 宋玉普, 赵国藩. 具有宏观裂纹混凝土结构的起裂特性研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 63—66.
- HUANG Da-hai, SONG Yu-pu, ZHAO Guo-fan. Study on initial fracture properties of cracked concrete[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 63—66.
- [14] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩土损伤力学宏观细观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [15] 闫长斌. 爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究[博士学位论文 D]. 长沙: 中南大学, 2006.