

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S1.043

利用钻孔注水试验测试爆区周边岩体 损伤场的可行性研究

潘鹏飞¹, 孙厚广¹, 韩忠和¹, 冯 春², 乔继延², 郭汝坤², 李世海²

(1. 鞍钢集团鞍千矿业有限责任公司, 辽宁 鞍山 114043; 2. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 穿孔爆破是露天矿开采的主要模式, 爆破产生的冲击效应将导致周边岩体出现不同程度的损伤破裂, 影响台阶边坡的稳定性。提出一种利用钻孔注水试验评价爆破周边岩体等效损伤场的方法, 通过向若干钻孔内注满水, 记录不同时间的水位, 绘制水位随时间的变化曲线, 并最终获得不同位置的损伤程度及损伤深度。采用相对损伤因子定量表征爆破对岩体的损伤程度, 通过水位-时间曲线中速降段与平缓段的交界点反映岩体的损伤深度及损伤距离。通过试验发现, 爆破引起的周边岩体损伤范围一般在 20 m 之内, 引起的最大损伤深度在 12 m 以内; 铁矿的抗爆能力高于灰岩, 相同位置铁矿的相对损伤因子比灰岩的小 7.5% 左右, 铁矿的最大损伤距离及最大损伤深度均比灰岩的小 4~6 m; 某些情况下注水后水位会快速降至某一特定高程, 然后保持不变, 表明该高程出现了贯通性导水带, 可通过窥视仪等设备进行观察校核。

关 键 词: 露天矿; 爆破; 相对损伤因子; 钻孔注水; 现场试验

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0323 - 06

Feasibility study about testing rock damage distribution surrounding blasting area by water seepage in borehole

PAN Peng-fei¹, SUN Hou-guang¹, HAN Zhong-he¹, FENG Chun²,
QIAO Ji-yan², GUO Ru-kun², LI Shi-hai²

(1. Anshan Iron and Steel Group Anqian Mining Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114043, China;

2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Drilling blasting is the main mining mode in open-pit mine. Impact effect induced by blasting will lead to damage and fracture of rock surrounding the blasting area; and then affect the stability of slope. An approach to evaluate equivalent damage field of rock induced by blasting is introduced; and it is named as borehole water seepage field test. Some steps should be taken in this method. Through water seeping in each testing borehole, recording water level and seepage time, drawing water level and seepage time curve, and at last, analyzing it, the damage degree and damage depth are obtained. A relative damage factor is used to represent the damage degree induced by blasting, and the intersection point between sharp decreased stage and gentle changing stage is used to denote damage depth and damage distance. According to field testing; the maximal damage distance of rock induced by blasting is 20 m approximately; and maximal damage depth is about 12 m. The blasting resistance of iron ore is stronger than limestone. At same position, the relative damage factor of iron ore is 7.5% smaller than limestone; the maximal damage depth and maximal damage distance of iron ore is 4-6 m smaller than limestone. Sometimes, water level will decrease to certain elevation rapidly, and then keeps constant. It means a penetrated fractured zone forms; and the electronic peering instrument would be used to observe and check this phenomenon.

Keywords: open-pit mine; blasting; relative damage factor; water seepage in borehole; field test

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (No. XDB10030303) ; 国家自然科学基金青年基金 (No. 11302230) ; 鞍钢矿业集团项目 (No. 2014-科C12)。

This work was supported by the CAS Strategic Priority Research Program (B) (XDB10030303), the Youth Science Fund of the National Natural Science Foundation of China (11302230) and the Project of Ansteel Mining Group (2014-科-C12).

第一作者简介: 潘鹏飞, 男, 1969 年生, 硕士, 高级工程师, 鞍钢集团鞍千矿业有限责任公司副经理, 主要从事矿山生产安全管理方面的研究工作。
通讯作者: 冯春, 男, 1982 年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事岩土力学领域实验及数值计算方法的研究工作。E-mail: fengchun@imech.ac.cn

1 引 言

爆破开采以开采速度快、开采成本低等优点在露天矿开采中广泛使用,关于爆破开采的研究则主要关注爆区内岩体的损伤破裂机制、爆破参数与岩石的匹配关系等方面。潘井澜^[1]、徐国元等^[2]在总结前人研究工作的基础上,通过试验研究提出了爆炸产生的动压(冲击波、应力波)及静压(爆生气体)是导致爆区内岩体破碎的主要原因,且破岩方式主要为拉伸式破坏。王家来等^[3]提出动压导致岩体出现损伤,静压使岩体产生碎化,并利用损伤因子 D 来表征岩体损伤破裂的过程。余永强等^[4]通过理论分析指出层状岩体中爆生裂纹可以在比以往理论预测值更低的气体压力作用下起裂和稳定传播。谭卓英等^[5]、何天贵等^[6]、白龙等^[7]则从孔网参数、炸药单耗及堵塞长度等方面研究了爆破大块率产生的原因及消除方法。

然而,爆破过程中产生的强烈地冲击效应将导致周边岩体出现一定程度的损伤破坏,诱发滑坡、落石等灾害的发生。在爆破引起边坡失稳破坏方面,大部分的研究是以地面测得的振动时程曲线为基础展开,或是通过数学统计及人工智能的方法直接建立振动曲线与边坡爆破稳定性的联系^[8-10],或是将时程曲线输入数值计算软件,利用数值分析回答边坡的爆破稳定性问题^[11-14]。事实上,由于受场地条件及地层特性的影响,地表测得的振动时程曲线与通过岩体内部传递至坡体的应力波并不完全等价,上述将爆破过程与边坡失稳过程割裂开来的分析方法,无法准确地反映爆破对边坡的损伤破坏作用。

为了准确分析爆破对边坡稳定性的影响机制及影响规律,首先需要通过试验掌握爆破载荷作用下周边岩体损伤程度的变化规律。目前爆区周边岩体损伤场的测试方法主要有光学观测法^[15-16]和等效波速测试法^[17-18]两类。光学观测法实施时,将钻孔电视或内窥镜等光学观测设备放入钻孔中,通过上下移动观测设备,记录不同深度孔壁损伤、破裂现象,此类方法获得的观测数据较为直观(视频及照片),但观测范围有限(孔壁附近),往往存在“一孔之见”的现象。等效波速测试法实施时,在测区内按一定间距布设振动传感器,并在某一位置进行激振,通过分析振动传感器的起振时间计算出测区内的典型纵波波速及横波波速,对场地的等效损伤场进行评估,此类方法可测试较大范围的岩体等效特性,但无法给出损伤场的连通程度及损伤裂缝的

总体张开程度。

为了更为准确地获得爆区周边岩体的损伤特性,本次提出了一种利用钻孔注水试验测试爆区周边岩体等效损伤场的方法,并在鞍钢集团鞍千矿业有限责任公司下辖的哑巴岭矿区南采区进行了试验性测试。

2 钻孔注水试验

2.1 主要思路

在爆炸载荷作用下周边的岩体主要发生张拉损伤或张拉破坏,大量的张性裂隙存在势必增加岩体的等效渗透系数,通过向钻孔内注满水并分析水位随时间的变化规律,即可以反映出不同位置、不同深度岩体的损伤破裂情况。

2.2 试验步骤

钻孔注水试验共包括布孔、打孔、传感器安装、线路连接、注水、数据采集及数据分析等7个步骤,图1为试验示意图。步骤为

布孔。沿着垂直于临空面的方向以一定的间距布设钻孔,钻孔个数至少应大于2个。

打孔。用牙轮钻在指定位置打直径为250 mm的孔,孔深与炮孔深度一致。

传感器安装。将水位传感器沿孔中心缓慢放入指定位置,一般以距孔底1.0~1.5 m为宜。

线路连接。将水位传感器数据线与采集仪相连,将电源线与采集仪及传感器相连。

注水。利用水车向各钻孔内注满水,注水时应避免水流直接冲击数据线及传感器。

数据采集。打开电源,进行数据自动采集,并利用皮尺浮标法进行人工校核。

数据分析。对试验数据进行分析,建立钻孔周边岩体的损伤程度与到爆区(临空面)距离的关系。

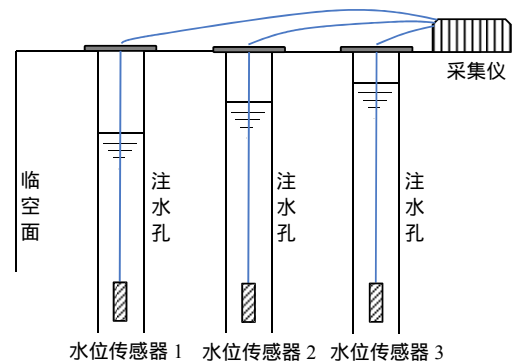


图1 钻孔注水试验原理图

Fig.1 Test principle of water seepage in borehole

3 钻孔注水试验分析

3.1 试验概况

本次试验共进行了 3 组, 2 组位于 60 平台, 测试对象为灰岩, 一组位于 48 平台, 测试对象为铁矿石。各组的钻孔参数见表 1。

表 1 注水孔参数

Table 1 Parameters of water seepage boreholes

试验组号	平台标高 /m	测试对象	测孔编号	孔深 /m	到临空面距离 /m
1	60	灰岩	1-1	15.35	2.5
			1-2	15.20	9.0
			1-3	15.60	15.5
2	60	灰岩	2-1	15.28	2.0
			2-2	15.30	8.5
			2-3	14.90	15.0
3	48	铁矿	3-1	14.00	2.3
			3-2	14.35	8.9

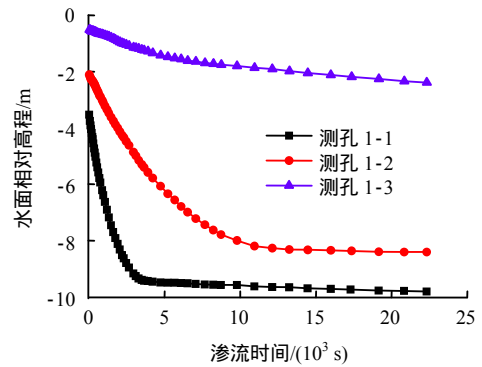
试验过程中所用的钻机为衡阳衡冶重型机械有限公司出产的 YZ35D 型牙轮钻机, 水位传感器为北京中瑞能仪表技术有限公司生产的 ZRN702 型投入式液位计, 采集仪为北京东方振动和噪声技术研究所生产的 INV3062T0 型 24 位网络式同步采集仪。

3.2 试验曲线分析

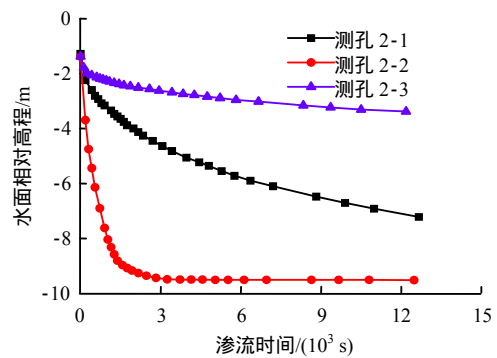
第 1 组试验获得的水位随时间的变化曲线如图 2(a)所示。从图中可以看出, 随着渗流时间的增加, 3 个钻孔的水面相对高程(设孔口高程为 0)均逐渐减小, 但减小趋势逐渐变缓。3 个测孔的水位变化速率从大到小依次为测孔 1-1 > 测孔 1-2 > 测孔 1-3, 表明距离爆区越远, 水位下降速率越慢, 爆破对该处岩体的损伤程度越低。从图 2(a)还可以看出, 每条曲线可以分为速降段及平缓段 2 个阶段, 各曲线速降段的斜率差别较大, 但平缓段的斜率差别不大; 速降段反映了爆破对岩体的损伤作用, 平缓段反映了岩体的初始特性。第 2 组试验获得的水位随时间的变化曲线如图 2(b)所示。从图中可以看出, 随着渗流时间的增加, 3 个测孔内的水位相对高程均呈逐渐下降趋势, 且下降速率逐渐变缓, 与图 2(a)的变化规律是一致的, 不同的是测孔 2-2 的下降速率明显快于测孔 2-1 及测孔 2-3。

由于第 2 组试验 3 个测孔到临空面的距离是测孔 2-3 > 测孔 2-2 > 测孔 2-1, 因此水位下降速率的排序应该为测孔 2-3 < 测孔 2-2 < 测孔 2-1, 已通过第 1 组试验获得了证实。此处测孔 2-2 中水位相对

高程的异常变化规律, 是由该测孔内存在异常的结构所引起的。本文采用窥视仪对该测孔进行了视频观测, 发现相对标高在 -8.5 ~ -9.2 m 之间存在宽约 5 cm、倾角约为 60° 的张拉裂隙(见图 3), 而此区域正是图 2(b)中测孔 2-2 曲线速降段与平缓段的转折点, 可以证明由于测孔 2-2 的深部存在贯通的张性导水裂隙带, 使得该测孔内的水位迅速下降至该裂隙带附近。



(a) 第 1 组



(b) 第 2 组

图 2 水位随时间变化曲线
Fig.2 Water level time history

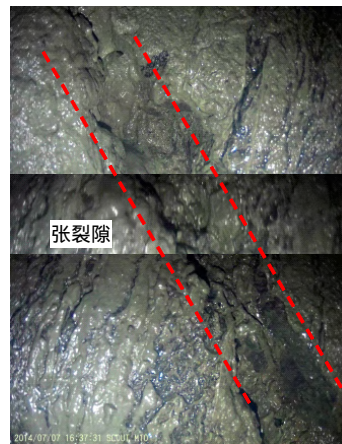


图 3 测孔 2-2 内的导水裂隙带

Fig.3 Water flowing fractured zone in borehole 2-2

通过对测孔 2-2 的周围炮孔观察发现, 炮孔 1

及炮孔 3 均为干孔，而炮孔 2 内有水且水面相对标高为 -9.2 m，此标高正是导水裂隙带的底面（见图 4）。由于注水前炮孔 1~3 均为干孔，由此认定测孔 2-2 内的水通过导水裂隙带灌入了炮孔 2 内。

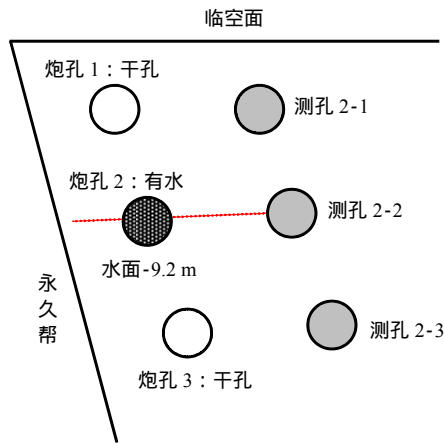


图 4 测孔 2-2 周围炮孔的干湿情况

Fig.4 Water condition in bores surrounding borehole 2-2

由于测孔 2-2 在爆区（图 4 中临空面方向）爆破前进行过一次试验性注水，并采用皮尺浮标法进行过人工观测发现其渗透速率并不大，如图 5 所示，表明图 3 中的导水裂隙带是由爆破引起的。

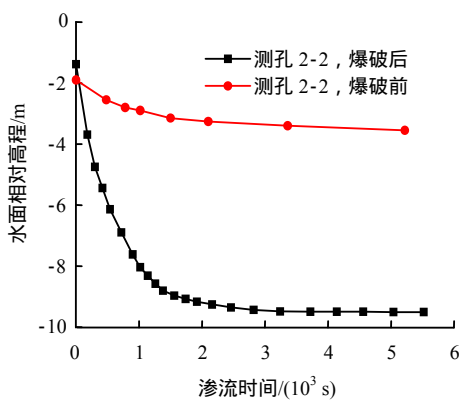


图 5 测孔 2-2 爆破前后的渗流曲线对比

Fig.5 Seepage comparison of borehole 2-2 before and after blasting

第 3 组试验获得的水位随时间的变化曲线如图 6 所示。由图可知，获得的渗流曲线变化规律与第 1 组试验的变化规律基本一致，各测孔的水面相对高程均随渗流时间的增大而逐渐减小，但减小趋势逐渐变缓，距离临空面越近，其水位下降速率越快；前 5 000 s 内，测孔 3-1 的水位下降速率明显快于测孔 3-2，但 5 000 s 之后 2 个测孔的水位下降速率基本一致。

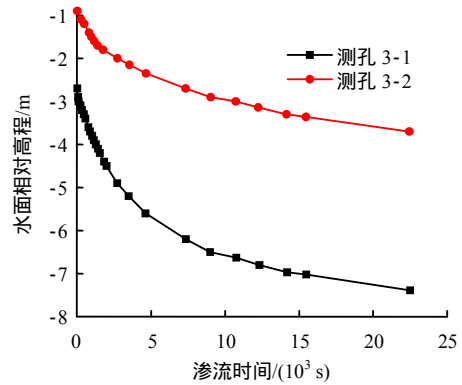


图 6 第 3 组试验曲线
Fig.6 Third testing curves

3.3 爆破损伤程度分析

由章节 3.2 给出的水面相对高程与渗流时间的变化曲线可以看出，距离临空面越近，岩体在爆炸载荷的作用下损伤得越严重，此处的水位下降得也越快。因此，利用渗流曲线进行爆破损伤程度的分析是可行的。

爆破引起周围岩体的损伤破坏，主要是通过新增损伤破裂微元实现的，可以利用介质孔隙率的改变进行表征。

定义爆破引起的介质绝对损伤因子为爆后岩体孔隙率与爆前岩体孔隙率的差，即

$$D = n - n_0 \quad (1)$$

式中： D 为绝对损伤因子； n 为当前孔隙率； n_0 为初始孔隙率。

实际操作过程中无法对每个爆区的岩/矿体进行初始孔隙率及当前孔隙率的测定，采用相对损伤因子更具有实际意义。相对损伤因子的定义为

$$D_i = 1 - n_b / n_i \quad (2)$$

式中： D_i 为第 i 点的相对损伤因子； n_b 为基准点的当前孔隙率； n_i 为第 i 点的当前孔隙率。

根据达西定理（见式（3））可知，水位下降速率与介质的渗透系数存在线性关系：

$$v_i = -k \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3)$$

式中： v_i 为第 i 个方向的渗流速度； k 为当前渗透系数； p 为渗透压力。

渗透系数又与孔隙率存在 3 次方的关系：

$$k = k_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \quad (4)$$

式中： k_0 为初始渗透系数。

由此可以得出水位下降速率与孔隙率之间存在 3 次方关系为

$$v \propto k \propto n^3 \tag{5}$$

式 (4)、(5) 可改写为

$$D_i = 1 - \sqrt[3]{|v_b / v_i|} \tag{6}$$

式中： v_b 为基准点的水位下降速率； v_i 为第 i 点的水位下降速率。

选取第 1 组试验（灰岩）及第 3 组试验（铁矿）的数据进行分析，并对水位相对高程时程曲线的速降段进行线性拟合，求取各曲线速降段的斜率（平均水位下降速率），见表 2。由表可知，随着测孔到临空面距离的增加，水位下降速率逐渐变缓。

表 2 速降段水位平均下降速率
Table 2 Average drawdown velocities of water level at sharp decreased stage

试验组号	测孔	水位下降速率/(10 ⁻⁴ m/s)
1	1-1	-18.60
	1-2	-6.40
	1-3	-1.65
3	3-1	-6.33
	3-2	-2.95

第 1 组试验以测孔 1-3 为基准点，基于式 (6) 可求得测孔 1-1 的相对损伤因子为 55.4%，测孔 1-2 的相对损伤因子为 36.1%。第 3 组试验以测孔 3-2 为基准点，基于式 (6) 可得测孔 3-1 的相对损伤因子为 22.5%。

3.4 爆破损伤范围分析

基于第 1 组试验（灰岩）及第 3 组试验（铁矿）获得的水位相对高程随时间的变化曲线（见图 2(a)、图 6），选取速降段与平缓段交界点所在高程为爆破损伤的下限，可得爆破损伤范围如图 7 所示。从图中可以看出，爆破引起的周边岩体损伤范围一般在 20 m 之内，且损伤深度随着到临空面距离的增加线

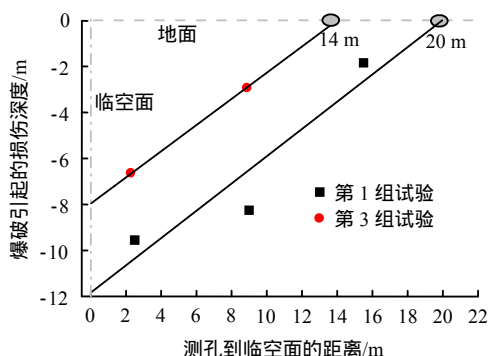


图 7 爆破引起的损伤范围
Fig.7 Damage region induced by blasting

性减小。爆破作用下铁矿的损伤范围及损伤深度均比灰岩的小；铁矿的最大损伤深度为 8 m，最大损伤距离为 14 m；灰岩的最大损伤深度为 12 m，最大损伤距离为 20 m。

4 结 论

(1) 相对损伤因子可以有效地表征爆破对周边岩体的损伤程度，相对损伤因子越大，该区域受爆破的影响越大。通过试验发现，距离临空面越远，该区域的相对损伤因子越小。在其他因素相同时，铁矿中的相对损伤因子要比灰岩中的损伤因子低 7.5%（以第 1 组试验的测孔 1-1、测孔 1-2 及第 3 组试验的测孔 3-1、测孔 3-2 为例）。

(2) 爆破引起的周边岩体损伤范围一般在 20 m 之内，损伤深度随着到临空面距离的增加线性减小。爆破作用下铁矿的损伤范围及损伤深度均比灰岩的小。

(3) 在爆破作用下，当周边岩体出现非均匀损伤（出现大的导水裂隙带等）时，该处的水位相对高程随时间的变化曲线将出现反常现象，水位将会迅速下降至某一特定高程并保持不变，此高程即为非均匀损伤出现的位置，此时可通过窥视仪等视频监控设备进行必要的观察和验证。

参 考 文 献

[1] 潘井澜. 爆破破岩机制的探讨[J]. 爆破, 1994, 11(4): 1 - 6.
PAN Jing-lan. Discussion of rock fragmentation mechanism by blasting[J]. **Blasting**, 1994, 11(4): 1 - 6.

[2] 徐国元, 古德生, 陈寿如. 爆破破岩机制的实验研究[J]. 中南工业大学学报, 1997, 28(6): 522 - 525.
XU Guo-yuan, GU De-sheng, CHEN Shou-ru. Experimental investigation on mechanism of rock fragmentation by blasting[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 1997, 28(6): 522 - 525.

[3] 王家来, 刘积铭. 岩石爆破破岩机制的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊 1): 515 - 518.
WANG Jia-lai, LIU Ji-ming. Damage analysis of rock blasting mechanism[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1996, 15(Supp.1): 515 - 518.

[4] 余永强, 邱贤德, 杨小林. 层状岩体爆破损伤断裂机制分析[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 409 - 412.
YU Yong-qiang, QIU Xian-de, YANG Xiao-lin. The mechanism analyses of bedded rock blasting damage and

- fracture[J]. **Journal of China Coal Society**, 2004, 29(4): 409 - 412.
- [5] 谭卓英, 张建国. 露天深孔爆破大块率与爆破参数之间的关系研究[J]. **爆破**, 1999, 16(4): 15 - 20.
TAN Zhuo-ying, ZHANG Jian-guo. Study on the relationships between boulder yield(BY) and Borehole blasting parameters in open pits[J]. **Blasting**, 1999, 16(4): 15 - 20.
- [6] 何天贵, 马建军, 赵东坡. 爆破大块率与爆破主参数之间的函数关系[J]. **武汉科技大学学报(自然科学版)**, 2005, 28(3): 254 - 256.
HE Tian-gui, MA Jian-jun, ZHAO Dong-po. Functional relationship between rate of blasting chunk and major parameters[J]. **Journal of Wuhan University of Science & Technology(Natural Science Edition)**, 2005, 28(3): 254 - 256.
- [7] 白龙, 左瑞. 降低矿山爆破大块率的方法浅析[J]. **现代矿业**, 2011, 27(7): 87 - 88.
BAI Long, ZUO Rui. Analysis of the method to reduce the large block ratio in blasting mining[J]. **Modern Mining**, 2011, 27(7): 87 - 88.
- [8] 裴来政. 金堆城露天矿高边坡爆破震动监测与分析[J]. **爆破**, 2006, 23(4): 82 - 85.
PEI Lai-zheng. Observation and analysis of blasting vibration to the high slope of Jinduicheng open-pit mine[J]. **Blasting**, 2006, 23(4): 82 - 85.
- [9] 杨官涛. 露天矿边坡设计及工程动载作用下的稳定性分析与评价[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
YANG Guan-tao. Study on the open pit slope design and evaluation of slope stability under construction disturbance[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [10] LI Wen-xiu, QI Dong-liang, ZHENG Shao-feng, et al. Fuzzy mathematics model and its numerical method of stability analysis of rock slope of opencast metal mine[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2015, 39(7): 1784 - 1793.
- [11] 彭德红. 露天矿边坡开挖爆破震动动力响应分析[J]. **煤炭学报**, 2005, 30(6): 705 - 709.
PENG De-hong. Analysis of dynamic response on blasting vibration about excavated slope in a surface mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2005, 30(6): 705 - 709.
- [12] 杨宇江, 李艳, 刘建坡, 等. 爆破作用下露天矿边坡动态稳定性[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2011, 32(10): 1472 - 1475.
YANG Yu-jiang, LI Yan, LIU Jian-po, et al. Dynamic stability of open pit slope under blast loading[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 2011, 32(10): 1472 - 1475.
- [13] 张宝才, 法立滕, 马宁, 等. 大孤山铁矿边坡爆破损伤分区研究[J]. **中国安全生产科学技术**, 2012, 8(6): 53 - 57.
ZHANG Bao-cai, FA Li-teng, MA Ning, et al. Study on blasting damage partition for the slope in Dagushan iron mine[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2012, 8(6): 53 - 57.
- [14] HAMID R, MOHAMMADI A, HAMID M, et al. Coupling of two methods, waveform superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in jointed rock masses[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 61: 42 - 49.
- [15] 秦英译, 王川婴. 前视井下电视和数字钻孔摄像在工程中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(增刊 1): 2834 - 2840.
QIN Ying-yi, WANG Chuan-ying. Axial downhole TV and digital optical borehole imaging and their engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2834 - 2840.
- [16] 柳小胜, 刘优平, 欧任泽. 钻孔电视在深孔爆破成井中的应用[J]. **金属矿山**, 2007, 36(8): 65 - 67.
LIU Xiao-sheng, LIU You-ping, OU Ren-ze. Application of borehole TV in shaft formation by long-hole blasting[J]. **Metal Mine**, 2007, 36(8): 65 - 67.
- [17] 尤明庆, 苏承东, 李小双. 损伤岩石试样的力学特性与纵波速度关系研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(3): 458 - 467.
YOU Ming-qing, SU Cheng-dong, LI Xiao-shuang. Study on relation between mechanical properties and longitudinal wave velocities for damaged rock samples[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 458 - 467.
- [18] 彭国诚, 侯克鹏, 程涌, 等. 尖山磷矿边坡岩体爆破开挖损伤测试研究[J]. **科学技术与工程**, 2011, 34(11): 8530 - 8533.
PENG Guo-cheng, HOU Ke-peng, CHENG Yong, et al. Testing research of rock-mass blasting excavation damage in Jianshan phosphate[J]. **Science Technology and Engineering**, 2011, 34(11): 8530 - 8533.