

蔡永乐,付宏伟. 水压爆破应力波传播及破煤岩机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 902-907. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1239

Cai Yongle, Fu Hongwei. Experimental study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 902-907. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1239

水压爆破应力波传播及破煤岩机理实验研究

蔡永乐, 付宏伟

(山西工程技术学院, 山西 阳泉 045000)

摘要:开展了水压爆破爆炸应力波传播及破煤机理实验研究,采用超动态应变测试系统对模拟煤体中产生的爆炸应变进行了采集分析,研究了水压爆破爆炸应力波在煤体中的传播,根据损伤破坏区域、裂纹形态等爆破效果,研究了水压爆破破煤机理,通过分析水、空气2种炮孔不耦合介质对煤体爆破作用的影响,对比证明了水压爆破煤体致裂效果明显。研究结果表明:煤体首先呈现塑性压缩破坏,在炮孔周围形成粉碎区,粉碎区半径约为炮孔半径的1.5倍;然后呈现脆性拉伸破裂,形成大范围裂隙区,裂隙区半径约为炮孔半径的13倍;最后应力波衰减为地震波,引起煤体质点产生弹性震动,形成爆破松动区。

关键词:水压爆破;爆炸应力波;破煤机理;模拟实验

中图分类号:TD235 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)04-0902-06

Experimental study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism

CAI Yong-le, FU Hong-wei

(Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China)

Abstract: The similarity simulation experiment on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism was conducted in this study. The super dynamic strain measurement system was used to collect strain produced in coal seam. The propagation and attenuation of hydraulic blasting stress wave in coal was studied. The damage area and crack shape were comprehensively evaluated. The coal broken mechanism of hydraulic blasting was studied. The blasting effects of water and air that was non-coupling medium were analyzed comparatively, which proved the advantages of hydraulic fracturing. The results showed that coal body was broken in the means of plastic compression destruction first, forming a pulverizing zone around the blast hole with a radius of about 1.5 times of the radius of the blast hole; then was broken in the means of brittle stretch destruction, forming a wide range of fracture zone with a radius of about 13 times of the radius of the blast hole; and finally stress wave was attenuated as seismic waves, causing the coal physical point of elastic vibration and forming the blasting loose area.

Key words: hydraulic blasting; blasting stress wave; coal broken mechanism; simulation experiment

近年来,水压爆破技术在工程爆破领域有了一定的应用,如拆除控制爆破^[1]、井巷掘进爆破^[2]、隧道

光面爆破^[3-4]、露天矿开采爆破^[5-6]等。水压爆破因其传能效率高^[7]、水楔作用^[8]效果明显,具有破岩能

力强^[9]、炸药能量利用率高^[10]等优点。基于水压爆破以上特性,本文提出了一种煤层水压爆破的新方法,该方法能够在煤体中形成大范围裂隙,从而提高煤体透气性。本文主要研究煤体水压爆破爆炸应力波传播及破煤机理,为该方法的现场应用提供依据。

陈士海、林从谋^[11]根据水的性质和爆炸作用特点,分析了水压爆破岩石破碎特征,讨论了水介质的水楔作用,指出水压爆破可增大孔距,丰富了水压爆破岩石破碎理论;宗琦、罗强等^[12]以水泥砂浆试块为试验模型进行了水不耦合装药爆破试验,测定了试块中爆炸应力的分布特性,提出了水不耦合装药结构适用于预裂爆破、拆除控制爆破;罗勇等^[13]通过现场试验表明水介质不耦合爆破装药量少,爆破震动低,围岩稳定性好,对于全断面一次成形巷道开挖,采用水不耦合爆破可以获得较为理想的光面爆破效果,并可节约施工成本、降低爆破烟尘、提高施工进度;张亚宾^[14]等采用 LS/DYNA 有限元程序数值模拟了水压爆破对构筑物壁体的作用过程,分析了壁体各部位在不同时刻的受力情况,指出壁体受首次冲击波、底板反射压缩波、对面壁体反射压缩波和气泡脉冲4种荷载作用,为水压爆破应用于构筑物拆除工程提供了依据。以上等研究初步探讨了水压爆破对岩石和薄壁构建物的破坏作用,而关于水压爆破爆炸应力波传播以及对煤体破坏机理的研究尚不清楚。

因此,本文通过煤体水压爆破模拟实验,利用相似材料制作试块模拟煤体,利用预埋在试块内的应变砖作为传感器,运用超动态应变测试系统采集量测爆炸应变,然后把应变换算为应力进行分析,以研究水压爆破爆炸应力波传播,综合评价损伤破坏区域、裂纹形态、裂面质量等爆破效果,研究水压爆破对煤体的破坏机理,并对比分析水、空气两种炮孔不耦合介质对煤体爆破作用的影响。

1 爆破模拟实验

1.1 测试系统

超动态应变仪应用于测量随时间变化的高频应变,它由测量电桥、放大器和滤波器等组成,为了同时测量多个动态应变信号,应变仪有多个通道,每个通道测量一个动态应变信号。本实验采用 BX120-3BA 型应变片制成应变砖作为传感器,电阻为 120 Ω ,灵敏系数为 2.08%,等级精度为 A 级。使用四川拓普测控科技有限公司的 NUXI 超动态应变仪, PVIB 总线接口,8 通道同步并行采集,同步时差低于 1 ns,各通道最高采样率可同时达到 10 MSPS,分辨率为 16 bit,如图 1 所示。

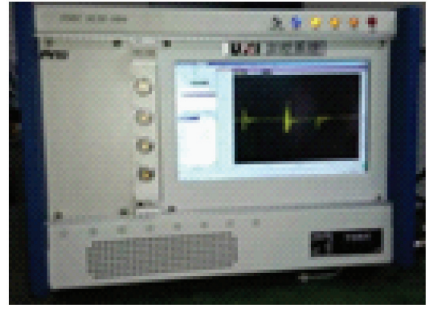


图 1 超动态应变仪

Fig. 1 Ultrahigh dynamic strainometer

1.2 实验过程

试块尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm,炮孔尺寸为 $\phi 20$ mm×15 cm,药卷尺寸为 $\phi 8$ mm×30 mm,装药不耦合系数为 2.5,不耦合介质分别为水和空气,如图 2 所示。为了充分利用试块并提高应变测试的准确性,在试块的炮孔底部中心沿对角线布置 4 个应变砖,应变砖与炮孔壁的距离分别为 40, 80, 120 和 160 mm,编号为 1, 2, 3, 4, 如图 3 所示。实验分为 2 组,第 1 组为水介质不耦合装药爆破,第 2 组为空气介质不耦合装药爆破。为保证测量数据的准确性,每组制作试块 5 个。

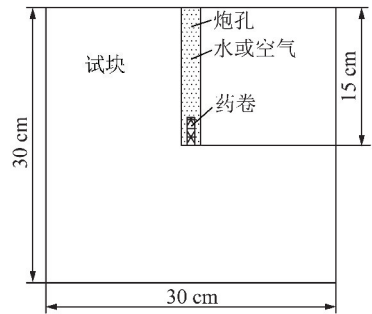


图 2 装药结构示意图

Fig. 2 Diagram of charge structure

根据相似理论,并充分考虑实验测量准确性需要,初步确定煤体模拟材料,选定 32.5 号普通硅酸盐水泥、细河沙和水为基本材料,用来控制其模拟煤体的结构强度,选定石膏、珍珠岩、云母碎、发泡剂为添加材料,用来控制煤体的微裂隙、微空洞、结构面等,以煤体 6 个物理力学性质参数(密度、抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、纵波速度)相似比为 1 制作不同强度配比的试块,然后对试块的 6 个物理力学性质参数进行测试,综合分析对比模拟煤体和实际煤体物理力学性质参数的异同,进而确定不同强度模拟煤体材料及配比。本文以中硬煤为研究对象,试块材料配比为 32.5 号普通硅酸盐水泥:细河沙:石膏:珍珠岩:云母碎:发泡剂:水=1.5:5.8:0.25:0.02:0.03:0.05:0.6,为准确安放应变砖并方便

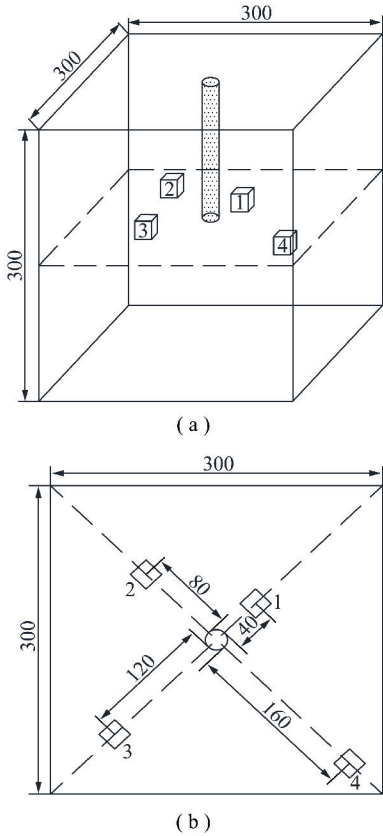


图 3 应变砖布置示意

Fig. 3 Arrangement schematic diagram of strain brick

预留炮孔,采用手工夯实方式制作试块。在制作模型试块的同时,用标准模具制作了多组 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 标准立方体试块,测其力学参数,试块的物理力学性质参数见表 1。

表 1 试块的物理力学性质参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of test block

密度/ (g · cm ⁻³)	抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松比	纵波速度/ (m · s ⁻¹)
1.3	4.27	0.26	2.1	0.2	2 000

应变砖的高度要远小于应变波的波长,为减小测量误差,应变砖尺寸确定为 20 mm×20 mm×10 mm,其材料和配比与被测试块的材料和配比相同,这样就能保证应变砖与被测试块的波阻抗一致,减少了爆炸应力波在两者界面处的反射与折射,如图 4 所示。

试块夯实制作至 150 mm 高度时,在试件内部布置应变砖,每个应变砖安设一个 BX120-3BA 型应变片,对应于炮孔的径向与切向。对粘贴在应变砖表面的应变片进行编号。试块放于阴凉处自然风干 48 h 后即可脱模,并人工养护试块 28 d。

试块经充分养护固化后即可用于实验研究,出于安全考虑,用棉布把试块抬进钢制方形箱子里进行爆

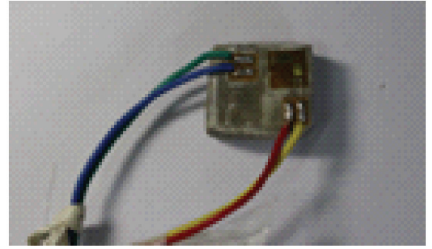


图 4 应变砖

Fig. 4 Strain brick

破,为减少边界效应对爆炸应力波传播的影响,在试块与箱壁缝隙处填充细沙。箱子外壁留有引线孔,信号传输电缆可通过引线孔引出。由于难以取到乳化炸药和雷管,并且爆破试块所需药量很小,炸药猛度不宜过大,爆速与装药密度、装药直径、外界的约束条件、起爆条件等一系列因素有关,装药时通过压密压实和紧密包裹增大约束的方式,可以使炸药的爆速和威力得到提高,因此综合考虑之下,本实验选用黑火药作为爆源。把黑火药卷制成柱形炸药,每个试块装药量为 3 g。试块装药完成后,用黄泥和环氧树脂堵塞炮孔。炮孔密封好后,连接电缆和超动态应变仪,确认电路连接完好后,引爆炸药,进行爆炸应变测试,如图 5 所示。



图 5 连线起爆

Fig. 5 Attachment initiation

2 实验结果

2.1 爆炸应力的分析

实验一共对 10 个试块的 40 个测点进行了爆炸应变测试。每个测点对应径向和切向应变。由于测试仪器性能、环境条件、应变砖制作与埋设工艺等因素的影响,共采集到 69 个有效波形,其余 11 个波形为无效波形,对波形数据进行输出和处理。

对同一组试块同一位置测得的径向和切向应变峰值分别取平均值,然后根据式(1)可以换算出每个测点的径向应力峰值和切向应力峰值^[15]。

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta) \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r) \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ_r, σ_θ 分别为径向、切向应力峰值; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ 分别为径向、切向应变峰值; E 为弹性模量; μ 为动态泊松比, 在爆炸荷载高速加载情况下, $\mu = 0.8\mu_0, \mu_0$ 为静态泊松比。

经过计算得到的各测点应力峰值见表2, 第I组

为水介质不耦合装药爆破试块, 第II组为空气介质不耦合装药爆破试块。测点编号为1, 2, 3, 4, 与炮孔壁的距离分别为40, 80, 120, 160 mm, 比例距离分别为4, 8, 12, 16。 $r = r_i/r_b$ 为比例距离, r_i 为计算点到炮孔壁的距离, r_b 为炮孔半径, $r_b = 10$ mm。

表2 不同测点处的爆炸应力峰值

Table 2 Peak blasting stress wave at different positions

MPa

试块组号	测点径向应力峰值				测点切向应力峰值			
	1	2	3	4	1	2	3	4
I	6.36	2.43	1.57	1.23	1.21	0.46	0.29	0.24
II	3.05	1.11	0.73	0.57	0.58	0.16	0.13	0.10

由表2 绘制出水、空气介质不耦合装药爆破径向和切向应力峰值随比例距离的变化曲线, 如图6, 7 所示。

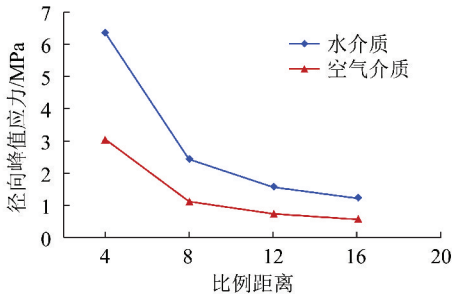


图6 径向峰值应力变化曲线

Fig. 6 Radial direction peak stress curves

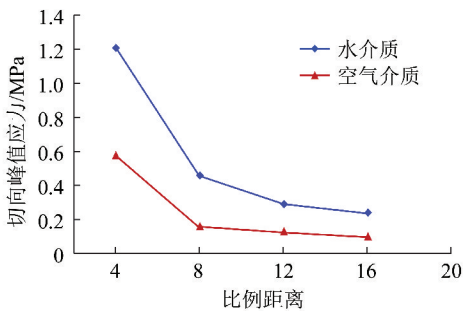


图7 切向峰值应力变化曲线

Fig. 7 Tangential direction peak stress curves

由图6 和7 可知, 水、空气介质不耦合装药爆破径向和切向峰值应力都随着距离的增大而显著降低, 在炮孔近处, 衰减速度很快, 在炮孔远处, 衰减速度减缓。相同实验条件下, 水介质不耦合装药爆破产生的径向峰值应力为空气介质不耦合装药爆破径向峰值应力的2.09~2.19倍, 水介质不耦合装药爆破产生的切向峰值应力为空气介质不耦合装药爆破切向峰值应力的2.16~2.83倍, 这是因为水是一种可压缩性小、密度大和声速大的介质, 水的密度比空气大很多, 大约为空气的800倍, 水的黏滞系数约为空气的

100倍, 水的压缩系数仅为空气的1/30 000~1/20 000, 水的冲击阻抗比空气大得多, 水本身消耗的变形能很小, 能量传递效率很高, 因此在试块中产生的应力波强度更大。

2.2 爆破效果

爆破试块后, 分析试块表面裂缝分布形态, 并剖开试块分析其内部损伤破坏特征、孔壁质量、裂隙扩展形态, 综合评价爆破效果, 从而研究爆破对煤岩体的破坏机理。

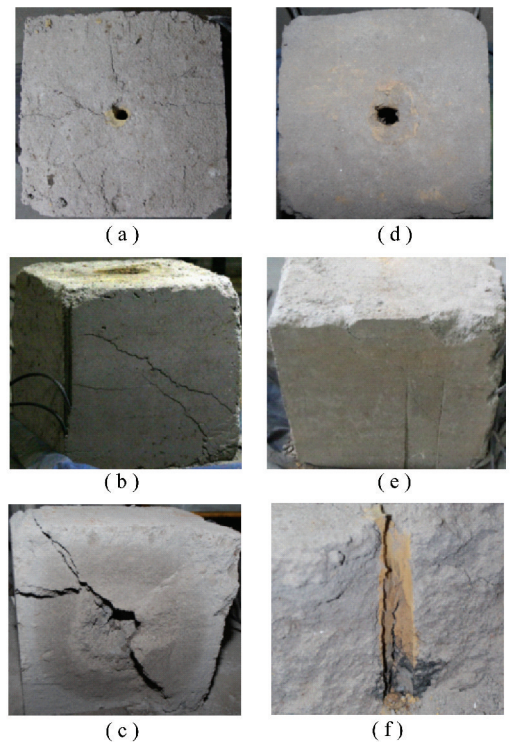


图8 试块爆破后效果

Fig. 8 Blasting effect of test blocks

图8(a), (b), (c) 为水介质不耦合装药爆破后试块; 图8(d), (e), (f) 为空气介质不耦合装药爆破后试块。

图8(a),(d)分别为水、空气介质不耦合装药爆破后试块上表面炮孔周围的裂纹分布形态,可以明显看出来,水介质不耦合装药爆破后,试块的炮孔周围产生4条主裂纹,呈径向辐射状分布,裂纹扩展方向与试块边界近似垂直,大约呈 90° ,这是因为垂直试块边界方向是爆破时裂纹扩展阻力最小的方向,在这个方向上爆破作用最集中,裂纹扩展速度也最快。主裂纹在扩展的过程中产生大量细小分支裂纹,分支裂纹无规律分布,这说明水介质不耦合装药爆破裂纹的扩展具有一定的方向性,呈径向分布,而裂纹的分岔没有无方向性,呈随机性分布。空气介质不耦合装药爆破后,试块上表面炮孔周围并没有产生明显裂纹,但是可以看到炮孔直径增大,产生扩腔现象。这是因为空气介质不耦合装药爆破时在孔壁易形成压实区,消耗大量爆炸能量,爆破能量利用率低,难以产生大范围裂隙。

图8(b),(e)分别为水、空气介质不耦合装药爆破后试块四周外壁的裂纹分布形态。从图8(b)可以显著看出来,水介质不耦合装药爆破后,试块外壁产生3条长宽裂纹,从试块中心贯穿到左右边界,并连通上下表面,试块侧壁产生明显的破坏现象。而空气介质不耦合装药爆破后,试块外壁只是产生3条细小短裂纹,产生轻微损伤。

图8(c),(f)分别为水、空气介质不耦合装药爆破后试块内部的破坏形态。从图8(c)可以看出,炮孔四周产生3条大裂缝,其中两条裂缝沿炮孔径向分布,呈对角线形状贯穿整个试块,并连通试块外壁,试块产生严重破坏断裂现象。并可在炮孔附近看到小范围粉碎圈,粉碎圈半径约为炮孔半径的1.5倍,这是因为密封在炮孔中的药卷爆炸时,经过水介质的高效传播作用,水中冲击波在试块中产生的初始应力值远大于试块的动态抗压强度,所以试块受到强烈压缩作用呈粉碎性破坏,在炮孔周围形成爆炸近区的压缩粉碎区。在粉碎圈以外,可以看到大范围水介质浸润圈,这是因为炸药爆炸以后,在试块中首先产生爆炸应力波并使其产生初始径向裂隙,当应力波衰减以后,水介质会形成水楔作用对初始裂纹产生一个膨胀撕裂作用,促使裂纹继续持续扩展。因此水介质浸润圈即为裂隙圈,裂隙圈半径约为炮孔半径的13倍。裂隙圈外围可见微小裂纹,形成爆破松动区,这是因为随着距离的增大,试块中的应力波衰减为爆炸地震波,已不能对试块造成直接的破坏作用,只会形成细微损伤。综上所述,试块在水介质不耦合装药爆破的作用下会在炮孔的周围形成压缩粉碎区、裂隙区、松动区3个区域。

图8(f)为空气介质不耦合装药爆破后试块内部的裂纹扩展形态,可以看出,空气介质不耦合装药爆破后,炮孔底部形成压实区,只在孔壁产生一条轴向垂直主裂纹,并未在炮孔周围产生径向裂纹,这是因为空气是一种压缩性很大的介质,空气的压缩系数是水的20 000~30 000倍,爆炸冲击波在空气中传播时,空气被急剧压缩,消耗了大量的爆炸能量,爆破能量利用率很低,因此难以在试块中产生大范围裂隙。

3 结 论

(1)煤体在水压爆破作用下首先呈现塑性压缩破坏,在炮孔周围形成粉碎区,粉碎区半径约为炮孔半径的1.5倍;然后呈现脆性拉伸破裂,形成大范围裂隙区,裂隙区半径约为炮孔半径的13倍;最后应力波衰减为地震波,引起煤体质点产生弹性震动,形成爆破松动区。

(2)相同装药条件下,水压爆破产生的径向峰值应力为空气介质不耦合装药爆破径向峰值应力的2.09~2.19倍;水压爆破产生的切向峰值应力为空气介质不耦合装药爆破切向峰值应力的2.16~2.83倍。水压爆破后煤体内产生多条长宽贯通型裂纹,破坏断裂现象严重,空气介质不耦合装药爆破时,产生扩腔现象,在炮孔周壁和底部形成压实区,没有产生明显裂纹,对比证明了水压爆破煤体致裂效果更明显。

(3)研究结果对水压爆破增透技术现场应用具有指导作用,根据煤层条件,合理选择炸药参数和装药结构,确定裂隙区范围,从而达到最优致裂和增透效果。水压爆破增透技术不仅传能效果明显,可以促进煤体裂纹持续扩展产生大范围裂隙提高煤层透气性,而且可以提高炸药利用率从而节省药量。

参考文献(References):

- [1] 高文学,杨军,肖鹏飞,等.基于精确延期的深孔控制爆破技术[J].煤炭学报,2011,36(2):386-390.
Gao Wenxue, Yang Jun, Xiao Pengfei, et al. Deep-hole controlled blasting technology based on precise time delay[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 386-390.
- [2] 付玉华,李夕兵,董陇军.损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数研究[J].岩土力学,2010,31(5):1420-1426.
Fu Yuhua, Li Xibing, Dong Longjun. Analysis of smooth blasting parameters for tunnels in deep damaged rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1420-1426.
- [3] 龚敏,邱焱可,李永强,等.定制雷管微差时间实测与识别法在城市隧道爆破设计中的应用[J].岩石力学与工程学报,2015,34(6):1180-1188.
Gong Min, Qiu Yikeke, Li Yongqiang, et al. Application of measuring

- and identifying detonation time of customized detonator in blasting design of urban tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6):1180-1188.
- [4] 顾义磊,李晓红,杜云贵,等.隧道光面爆破合理爆破参数的确定[J].*重庆大学学报(自然科学版)*,2005,28(3):95-97.
Gu Yilei, Li Xiaohong, Du Yungui, et al. Reasonable smooth blasting factor used in tunnel[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(3):95-97.
- [5] Ebrahim Ghasemi, Mehmet Sari, Mohammad Atefi. Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on fly rock distance in surface mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, 52:163-170.
- [6] 邵良杉,白媛,邱云飞,等.露天采矿爆破振动对民房破坏的LS-SVM预测模型[J].*煤炭学报*,2012,37(10):1637-1642.
Shao Liangshan, Bai Yuan, Qiu Yunfei, et al. LS-SVM analysis model and its application for prediction residential house's damage against blasting vibration from open pit mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(10):1637-1642.
- [7] Jeong D, Moon S, An D, et al. A study on tunnel excavation method using notch hole for vibration and over-break control in rockmass [A]. *Proceedings of the European Federation of Explosives Engineers [C]*. Vienna, 2007:195-204.
- [8] Huang Bingxiang, Liu Changyou, Fu Junhui, et al. Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011, 48:976-983.
- [9] 李春睿,康立军,齐庆新,等.深孔爆破数值模拟及其在煤矿顶板弱化中的应用[J].*煤炭学报*,2009,34(12):1632-1636.
Li Chunrui, Kang Lijun, Qi Qingxin, et al. Numerical simulation of deep-hole blasting and its application in mine roof weaken[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(12):1632-1636.
- [10] 林德余,马万昌,李忠,等.岩石爆破中水垫层作用的研究[J].*岩石力学与工程学报*,1992(2):130-139.
Lin Deyu, Ma Wanchang, Li Zhong, et al. Research on the effects of bottom water cushion on long hole blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1992(2):130-139.
- [11] 陈士海,林从谋.水压爆破岩石的破坏特征[J].*煤炭学报*, 1996, 21(1):24-29.
Chen Shihai, Lin Congmou. Features of rock fragmented by water blasting[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(1):24-29.
- [12] 宗琦,罗强.炮孔水耦合装药爆破应力分布特性试验研究[J].*实验力学*,2006,21(3):392-398.
Zong Qi, Luo Qiang. Experimental study on distribution character of blasting stress when boreholes with water-couple charge[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, 21(3):392-398.
- [13] 罗勇,崔晓荣,陆华.炮孔水介质不耦合装药爆破的研究[J].*有色金属*,2009,61(1):46-49.
Luo Yong, Cui Xiaorong, Lu Hua. Study on blasting with water decoupling charging in borehole [J]. *Nonferrous Metals*, 2009, 61(1):46-49.
- [14] 张亚宾,张云鹏,李占金,等.水压爆破的数值模拟[J].*河北理工大学学报(自然科学版)*,2007,29(4):6-10.
Zhang Yabin, Zhang Yunpeng, Li Zhanjin, et al. Study on hydraulic blasting with numerical simulation[J]. *Journal of Hebei Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 2007, 29(4):6-10.
- [15] 刘建亮.工程爆破测试技术[M].北京:煤炭工业出版社,1998:73-86.