

液态 CO₂ 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用

赵 龙¹,王兆丰^{1,2},孙矩正³,涂冬平⁴

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454003;

2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,河南 焦作 454003;

3. 中国平煤神马集团能源化工研究院,河南 平顶山 467000;4. 平顶山天安煤业股份有限公司 十三矿,河南 平顶山 467000)

摘要:针对平煤十三矿煤层的高瓦斯低透气性现状,为了提高矿井的瓦斯抽采量,采用了液态 CO₂ 相变致裂技术进行强化抽采,试验研究了液态 CO₂ 相变致裂技术在高瓦斯低透气性煤层中的增透机理和消突增透效果。通过对已_{15,17}-11111 运输巷底抽巷采取液态 CO₂ 相变致裂技术,利用专门的液态 CO₂ 相变致裂装置,在穿层钻孔中致裂爆破,可以使周围煤体产生裂隙,煤层透气性系数增大,试验结果表明:单孔瓦斯平均抽采体积分数是试验前的 1.42 倍,单孔瓦斯日平均抽采纯量是试验前的 2.17 倍,抽采衰减周期至少延长 2 倍以上,可有效提高煤层瓦斯预抽效果。

关键词:低透气性煤层;液态 CO₂;相变致裂;穿层钻孔;抽采纯量

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2016)03-0075-05

Application of permeability improvement technology with liquid CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam

Zhao Long¹, Wang Zhaofeng^{1,2}, Sun Juzheng³, Tu Dongping⁴

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Provincial Key Lab of Gas Geology and Gas Control - Cultivation Base, Provinces and Ministry Joint Established State Key Lab, Jiaozuo 454003, China; 3. Research Institute of Energy and Chemical Industry, China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China; 4. No. 13 Mine, Pingdingshan

Tian'an Coal Company Limited, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: According to the high gassy low permeability status of the seam in No. 13 Mine of Pingdingshan Tian'an Coal Company and in order to improve the gas drainage volume of the mine, the liquid CO₂ phase transition fracturing technology was applied to the enhanced gas drainage. The experiment study was conducted on the permeability improved mechanism and the outburst elimination and permeability improved effect of the liquid CO₂ phase transition fracturing technology in the high gassy and low permeability seam. With the liquid CO₂ phase transition fracturing technology applied to the floor drainage gateway of the Ji_{15,17}-11111 transportation roadway, the special liquid CO₂ phase transition fracturing device applied could make a fracturing explosion during the bed crossing borehole, could make the cracks around the coal mass, could make the permeability coefficient increased of the seam. The experiment result showed that, the average drainage concentration from a single gas borehole was 1.42 times higher than before the experiment. A daily average drainage pure volume from a single gas borehole was 2.17 times higher than before the experiment. The attenuation period of the gas drainage was expanded over two times at least and the pre-drainage effect of the seam gas could be effectively improved.

Key words: low permeability seam; liquid CO₂; phase transition fracturing; bed crossing borehole; pure drainage volume

0 引 言

平顶山东部矿区(包括八矿、十矿、十二矿、十

三矿、首山一矿)是我国煤与瓦斯突出灾害较为严重的区域之一。平煤十三矿是平煤股份的主力生产矿井,核定生产能力达到 210 万 t。平煤十三矿属高

收稿日期:2015-09-25;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2016.03.015

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274090);河南省协同创新资助项目(15131319)

作者简介:赵 龙(1988—),男,河南南阳人,硕士研究生。Tel:15225811081, E-mail:dragon8864@163.com

引用格式:赵 龙,王兆丰,孙矩正,等.液态 CO₂ 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J].煤炭科学技术,2016,44(3):75-79.

Zhao Long, Wang Zhaofeng, Sun Juzheng, et al. Application of permeability improvement technology with liquid CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 75-79.

瓦斯矿井,主采煤层为已_{15,17}煤层,煤的普氏系数为0.1~0.5,原始煤层透气性系数为0.009 6 m²/(MPa²·d),属难抽采煤层。依据《防治煤与瓦斯突出规定》的要求,十三矿采取了低位巷穿层钻孔水力冲孔强化预抽的区域防突措施,但由于煤层松软、透气性低,导致抽采浓度低、持续时间短、抽采量小、有效钻孔率低,煤层瓦斯区域预抽效果不理想^[1]。为了提高低透气性煤层的瓦斯预抽效果,除了在工程上增加钻孔密度、延长抽采时间外,还应依靠多种形式的煤层增透技术,增大煤体裂隙密度和范围,以增加煤层透气性,最终达到提高抽采效果的目的^[2]。现阶段主要运用的增透措施有水力冲孔、水力压裂、水力割缝、高压水射流、深孔预裂爆破等^[3-9],此外,文献[10]首次将液态CO₂相变致裂技术引入低透气性煤层增透领域中,在河南焦煤能源有限公司九里山矿16051底抽巷试验取得了理想的增透效果。国内学者对液态CO₂相变致裂技术有过不少试探性的研究^[11-20],然而对于液态CO₂相变致裂的机理和增透效果的考察研究尚不足,还有待进一步研究,笔者基于平煤十三矿已_{15,17}-11111运输巷底抽巷的液态CO₂相变致裂试验对致裂机理进行了初步的探讨,并对其增透效果进行进一步研究。

1 液态CO₂相变致裂技术增透机理

液态CO₂相变致裂技术主要是通过液态CO₂在极短时间内发生相变(由液态转化为气态,体积增大600倍),产生应力波向周围传播,应力波和高能气体一方面使煤体产生新的裂隙,另一方面促使原生裂隙扩展、发育,进而达到致裂的效果。

1.1 液态CO₂相变致裂工艺流程

1) 充装设备:充装设备由充装架、增压泵、液态二氧化碳钢瓶及钢瓶支架、空压机等组成,主要功能是将液态CO₂通过增压泵加压充装入一个特制的合金储液管内(储液管可承受1 000 MPa以上的压力,安全稳定),如图1所示。



图1 充装系统示意

Fig. 1 Filling system diagram

2) 致裂工序:利用钻机将释放管和储液管在导通杆的推进下安全输送到预定位置,在电子导通器测量导通后,用矿用低压(9 V)起爆器启动致裂装置,液态CO₂在加热管瞬间产生的大量热量的作用下发生相变,由液态转化为气态,体积膨胀600倍,高压气体冲破定压泄能片从释放管冲出,并产生破坏力巨大的应力波,使煤体产生裂隙并发育,达到增加煤层透气性的效果,相变致裂如图2所示。

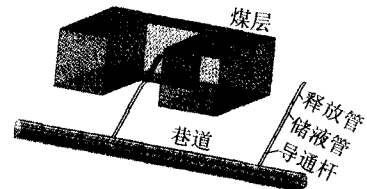


图2 相变致裂示意

Fig. 2 Phase-transforming fracture diagram

3) 封孔联抽:经过穿层钻孔液态CO₂相变致裂后,起钻退出导通杆、储液管和释放管,按照煤矿常用“两堵一注”封孔方式进行注浆封孔,再用钢丝软管将穿层钻孔与永久抽采管路联接抽采。

1.2 液态CO₂相变致裂数值模拟

根据现场的实际致裂试验情况,在COMSOL数值模拟软件的Solid Mechanics模块建立一个液态CO₂相变致裂的模型,尺寸为50 m×50 m,如图3所示,模型几何中心处显示为致裂钻孔。根据液态CO₂相变致裂的机理,利用COMSOL建立数值模型进行模拟,边界设置为低反射边界条件,将爆破冲击力按照爆炸函数形式加在致裂孔上,根据模拟的应力应变云图来对致裂过程进行分析。

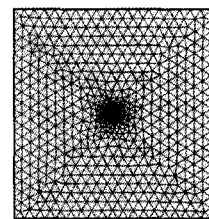


图3 数值模型

Fig. 3 Mathematical model

采用高压气体爆破冲击波作用原理^[21]进行数值计算,根据对爆破冲击波随时间的衰减规律研究^[22-25],得到任一时刻的致裂爆破压力函数为:

$$P(t) = P_{\max} e^{-\frac{\gamma t}{t_0}} \sin\left(\frac{4\pi t}{t + t_0}\right)$$

式中: P_{\max} 为致裂爆破最大压力,MPa; γ 为冲击力衰减率; t_0 为致裂完成总时间,为一定常数; s ; t 为致裂

任一时刻的时间, s。状态方程参数见表 1。

表 1 状态方程参数

Table 1 Parameter of state equation

| 煤体弹性模量/GPa | 泊松比 | P_{max}/MPa | γ | t_0/s |
|------------|-----|---------------|----------|--------------------|
| 12 | 0.3 | 270 | 0.28 | 2×10^{-2} |

1.3 数值模拟结果分析

液态 CO₂相变致裂的过程中,随着时间的推移,模型整体在不同时刻的等效应力云图如图 4 所示,平面应变云图如图 5 所示。从图中可以看出,致裂爆破使煤体原应力平衡状态受到破坏,致裂孔周围煤体发生大幅度位移和应力变化,促使煤体应力重新分布,集中应力带向远离破坏煤体深部转移,煤体有效应力降低,扩大了钻孔的卸压区域。

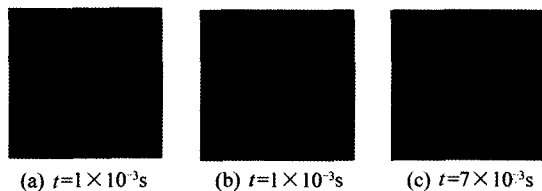


图 4 模型应力分布云图

Fig. 4 Stress contours of model

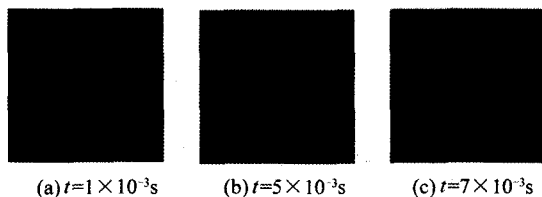


图 5 模型应变分布云图

Fig. 5 Strain contours of model

1.4 增透机理

液态 CO₂相变致裂技术利用瞬时高能气体冲击波使煤体产生大量裂隙,使煤体的透气性增加;通过震动消除煤体结构的不均匀,致裂孔周围煤体发生大幅度位移变化,促使煤体应力重新分布,集中应力带向深部转移,减小应力集中,降低煤体中的能量梯度,进而达到消突的目的。

由于煤体中新裂隙的产生和应力降低,煤层透气性大幅度提高,破坏了煤体中瓦斯吸附与解吸的动态平衡,使大部分吸附在煤体中的瓦斯解吸转化成游离瓦斯,游离瓦斯通过裂隙运移至瓦斯抽采钻孔进行抽采,进而提高了煤体瓦斯抽采率,很大程度上释放了煤体的弹性潜能和瓦斯膨胀能,使煤体的弹塑性增加、脆性减小,降低煤体中残存瓦斯的解吸速度。

2 液态 CO₂相变致裂技术实施方案

2.1 试验地点概况

平煤十三矿己_{15.17}-11111 运输巷底抽巷走向采面位于己一采区东翼第六区段,为突出危险区,煤厚 4.35~6.20 m,平均 5.8 m,煤层倾角 10°~19°,煤层走向 80°~100°,倾向 170°~190°,工作面标高-470~-630 m,设计可采走向长 980 m,倾斜长 150 m,采高 3 m。煤的破坏类型为 II~III 类,煤层节理比较发育,煤层顶底板均为砂质泥岩,透气性较差。瓦斯含量 16.98 m³/t,实测瓦斯压力 3.6 MPa。

2.2 致裂钻孔布置

矿井采用穿层钻孔预抽瓦斯作为主要瓦斯抽采手段,通过瓦斯抽采,可以有效降低己_{15.17}煤层的瓦斯含量,释放煤岩的弹性性能,达到防治煤与瓦斯突出的效果。在己_{15.17}-11111 运输巷底抽巷 220 m 处布置 1 个钻场,沿巷道走向分组布置钻孔,每组施工 13 个钻孔,便于钻孔开钻,13 个钻孔分 2 列布置,分别施工单双号钻孔,列间距 2.5 m,钻孔直径 94 mm,孔深穿透煤层顶板 0.5 m,在 2 列钻孔中间位置设置 1 组致裂孔 3 个,钻孔布置方式如图 6 所示。

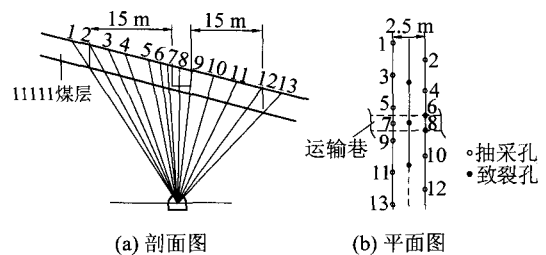


图 6 钻孔布置示意

Fig. 6 Diagram of drilling hole layout

2.3 液态 CO₂相变致裂技术实施

实施时,先按照预先设计钻孔参数施工 13 个普通穿层钻孔,采用“两堵一注”封孔方式进行封孔,联网抽采收集前期数据,一段时间后进行中间位置的致裂孔施工,成孔后按照致裂工序进行液态 CO₂相变致裂。为了定量考察致裂前后瓦斯预抽效果,在整个过程中,对各抽采钻孔瓦斯浓度、流量、负压进行监测,并记录整理。

2.4 液态 CO₂相变致裂效果考察及分析

本次方案通过考察周边钻孔参数变化来衡量液态 CO₂相变致裂的效果。致裂前后瓦斯抽采浓度、抽采纯量和抽采时间的关系如图 7 所示。从图中可以看出:致裂后瓦斯浓度大幅提高,且可以长时间保

持在40%左右;致裂后单孔瓦斯日抽采纯量由致裂前的 $2\text{ m}^3/\text{d}$ 升高为 $4\text{ m}^3/\text{d}$,普遍高于致裂前的平均水平。致裂前抽采20 d左右,瓦斯体积分数衰减到10%以下,致裂后抽采40 d仍未见衰减趋势,说明抽采衰减周期至少提高2倍以上。

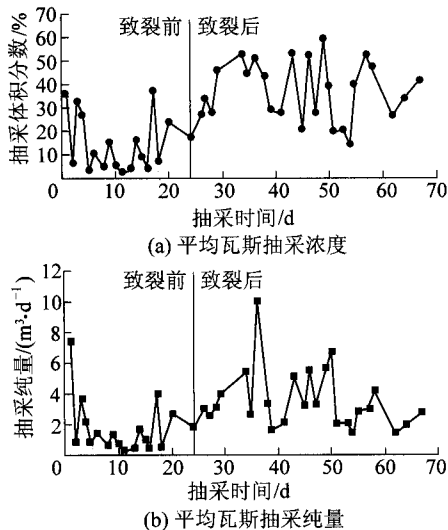


图7 平均瓦斯抽采浓度和平均瓦斯抽采纯量随时间变化

Fig. 7 Average gas concentration and gas drainage scalar varying with time

通过对致裂前后各穿层钻孔瓦斯抽采浓度和抽采纯量的整理分析发现,除个别钻孔预裂后瓦斯浓度不升反降外(表2),绝大多数钻孔在预裂后的瓦斯浓度和抽采纯量均明显增加,预裂后的瓦斯体积分数是预裂前的0.92~2.79倍,平均为1.42倍,即瓦斯体积分数平均增加42%;预裂后的单孔瓦斯抽采纯量是预裂前的1.03~6.92倍,平均为2.17倍,即瓦斯抽采纯量平均增加1倍以上。

表2 致裂前后各孔瓦斯参数对比

Table 2 Compared on gas parameters of each hole before and after fracturing

| 孔号 | 单孔平均抽采体积分数/% | | 单孔平均抽采纯量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | |
|----|--------------|-------|---|------|
| | 致裂前 | 致裂后 | 致裂前 | 致裂后 |
| 1 | 38.92 | 36.34 | 3.25 | 3.92 |
| 2 | 15.46 | 36.53 | 0.87 | 3.37 |
| 3 | 24.02 | 22.17 | 1.35 | 1.53 |
| 5 | 19.53 | 18.91 | 1.46 | 2.14 |
| 6 | 6.40 | 17.85 | 0.48 | 3.32 |
| 7 | 24.09 | 30.42 | 1.77 | 1.82 |
| 8 | 18.01 | 22.46 | 1.12 | 2.01 |
| 9 | 44.81 | 52.87 | 2.71 | 4.64 |
| 10 | 35.15 | 37.55 | 2.78 | 2.94 |
| 11 | 33.49 | 48.52 | 3.09 | 4.64 |

注:因4、12、13号孔封孔质量不佳,漏气严重,故未进行考察。

由表2可以看出,液态 CO_2 相变致裂技术在高瓦斯低透气煤层的应用中,可以明显增加煤层瓦斯抽采浓度、抽采纯量,并且使抽采的衰减期延长,该技术取得了很好的强化增透效果。

3 结 论

1) 通过穿层钻孔液态 CO_2 相变致裂数值模拟,对致裂爆破瞬间应力波和裂隙发育的分布发展规律进行了研究,对液态 CO_2 相变致裂的机理进行了初步探讨。

2) 液态 CO_2 相变致裂技术能够使煤层的透气性增加,在致裂后很长一段时间内,瓦斯浓度和抽采纯量始终能保持在较高水平,而且该技术能够有效延长抽采衰减周期。

3) 通过在平煤十三矿己_{15.17}-11111运输巷底抽巷采用穿层钻孔液态 CO_2 相变致裂技术,使单孔瓦斯预抽平均体积分数提高42%以上,单孔日平均瓦斯抽采纯量是致裂前的2.17倍,证明该技术在高瓦斯低透气性煤层中进行增透消突是可行的。

4) 液态 CO_2 相变致裂技术适用范围广、操作简便、安全可靠,有良好的卸压增透效果且不会引发瓦斯超限,与其他增透技术相比,更加适用于高瓦斯低透气性煤层和有煤与瓦斯突出危险性的矿井,具有更好的经济效益。

参考文献(References):

- [1] 王兆丰,范迎春,李世生.水力冲孔技术在松软低透突出煤层中的应用[J].煤炭科学技术,2012,40(2):52-55.
Wang Zhaofeng, Fan Yingchun, Li Shisheng. Hydraulic punching technology in soft low through the application of the coal seams [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 52-55.
- [2] 刘俊杰.地质统计学在预测煤层冲刷带中的应用研究[J].煤炭学报,2004,29(1):49-52.
Liu Junjie. The application of geostatistics in forecasting the coal seam scouring [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 49-52.
- [3] 孔留安,郝福昌,刘明举,等.水力冲孔快速掘进技术[J].煤矿安全,2005,36(12):46-47.
Kong Liuan, Hao Fuchang, Liu Mingju, et al. Hydraulic punching rapid tunneling technology [J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36(12): 46-47.
- [4] 方前程,王兆丰,杨利平.利用水力割缝提高低透气性煤层瓦斯抽采的试验研究[J].煤,2007,16(5):1-2.
Fang Qiancheng, Wang Zhaofeng, Yang Liping. With hydraulic slotted low permeability of coal seam gas drainage by experimental research [J]. Coal, 2007, 16(5): 1-2.

- [5] 翟 成,李贤忠,李全贵.煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J].煤炭学报,2011,36(12):1996-2001.
Zhai Cheng, Li Xianzhong, Li Quanguai. Pulsation of coal seam hydraulic fracturing pressure relief anti-reflection technology research and application[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1996-2001.
- [6] 王兆丰,王 林,陈向军.深孔预裂爆破在高瓦斯特厚煤层回采中的应用[J].煤炭科学技术,2008,36(8):31-33.
Wang Zhaofeng, Wang Lin, Chen Xiangjun. Deep hole pre-split blasting in gas, the application of the thick coal seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(8): 31-33.
- [7] 张连军,林柏泉,高亚明.基于高压水力割缝工艺的煤巷快速消突技术[J].煤矿安全,2013,44(3):64-66.
Zhang Lianjun, Lin Baiquan, Gao Yamin. Based on the high-pressure hydraulic cutting seam technology rapid outburst elimination technique in coal roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(3): 64-66.
- [8] 郭德勇,吕鹏飞,单智勇,等.瓦斯抽采煤层增透深孔聚能爆破钻孔参数[J].北京科技大学学报,2013,35(1):16-20.
Guo Deyong, Lyu Pengfei, Shan Zhiyong, et al. Coal seam gas drainage of anti-reflection deep hole shaped blasting drilling parameters [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(1): 16-20.
- [9] 张英华,倪 文,尹根成,等.穿层孔水压爆破法提高煤层透气性的研究[J].煤炭学报,2004,29(3):298-302.
Zhang Yinghua, Ni Wen, Yin Gencheng, et al. Wear layer pore water pressure method to improve coal seam permeability research [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 298-302.
- [10] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等.液态 CO₂相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2015,34(1):1-5.
Wang Zhaofeng, Sun Xiaoming, Lu Tingkan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with the fracturing technique by liquid CO₂ phase transition [J]. Journal of Henan Polytechnic University: National Science, 2015, 34(1): 1-5.
- [11] 韩亚北.液态二氧化碳相变致裂增透机理研究[D].焦作:河南理工大学,2014.
- [12] 孙小明.液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究[D].焦作:河南理工大学,2014.
- [13] 徐 颖,程生玉,王家来.国外高压气体爆破[J].煤炭科学技术,1997,25(5):52-53.
Xu Ying, Cheng Shengyu, Wang Jialai. High pressure gas blasting abroad[J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(5): 52-53.
- [14] 聂 政.二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J].煤炭技术,2007,26(8):140-141.
Nie Zheng. Application of carbon dioxide blasting technique in coal mines[J]. Coal Technology, 2007, 26(8): 140-141.
- [15] 魏 刚,夏洪满,姜凤岗,等.液态 CO₂爆破器落煤试验研究[J].煤矿开采,2009,14(1):22-24.
Wei Gang, Xia Hongman, Jiang Fenggang, et al. Test research on coal drop with liquid CO₂ blaster [J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(1): 22-24.
- [16] 赵立朋.煤层液态 CO₂深孔爆破增透技术[J].煤矿安全,2013,44(12):76-79.
Zhao Lipeng. Liquid CO₂ anti-reflection blasting technology of coal seam [J]. Safety in Coal Mine, 2013, 44(12): 76-79.
- [17] Singh S P. Non-Explosive applications of the PCF concept for underground excavation [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13: 305-311.
- [18] 张 悦,张民波,朱天玲,等.低透气性煤层 CO₂增透预裂技术应用[J].科技导报,2013,31(23):36-39.
Zhang Yue, Zhang Minbo, Zhu Tianling, et al. Low permeability coal seam CO₂ anti-reflection pre-splitting technology application [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(23): 36-39.
- [19] 周彦杰.二氧化碳炮爆破技术在煤矿开采中的运用[J].内蒙古煤炭经济,2014,31(4):99-100.
Zhou Yanjie. Dioxide gun blasting technology in coal mining [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2014, 31(4): 99-100.
- [20] 朱拴成,周海丰,李浩荡.二氧化碳炮处理综采工作面巷道三角区悬顶[J].煤矿安全,2013,44(8):144-146.
Zhu Shuancheng, Zhou Haifeng, Li Haodang. The application of carbon dioxide gun in processing hanging arch at triangle area of fully mechanized mining face roadway [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(8): 144-146.
- [21] 李守巨,费鸿禄,何庆志,等.试论爆炸气体的爆破作用[J].阜新矿业学院学报:自然科学版,1992,11(3):46-49.
Li Shouju, Fei Honglu, He Qingzhi, et al. Blasting of explosive gases [J]. Journal of Fuxin Mining Institute: Natural Science, 1992, 11(3): 46-49.
- [22] 郭学彬.爆破工程[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [23] 陆遐龄.岩体中爆炸应力波的试验研究[J].岩石力学与工程学报,1992,11(4):364-372.
Lu Xialing. Experimental study of the stress wave rock explosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(4): 364-372.
- [24] 朱小明,宋宏伟,刘 辉.岩石中爆炸应力波衰减规律[J].山西建筑,2007,33(31):112-113.
Zhu Xiaoming, Song Hongwei, Liu Hui. The attenuation regular of stress wave in rocks [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(31): 112-113.
- [25] 金旭浩,卢文波,田 勇,等.岩石爆破过程 S 波的产生机制分析[J].岩土力学,2011,32(S2):228-232.
Jin Xuhao, Lu Wenbo, Tian Yong, et al. Analysis of S wave generated in rock blasting process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 228-232.