

文章编号: 1000-7598 (2013) 09-2496-05

高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制

穆朝民^{1,2}, 王海露^{1,2}, 黄文尧³, 况常见¹

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 针对传统煤层预裂爆破增透存在的问题, 对定向聚能爆破控制裂纹演化方向的理论和方法进行研究, 即通过聚能射流的初始导向裂纹与后续高压气体形成的气楔联合作用, 达到控制裂纹演化方向和长度的目的。基于模型试验和数值模拟, 探讨了定向聚能爆破聚能方向和非聚能方向裂纹演化的机制。在潘三矿掘进工作面现场运用定向聚能爆破技术, 达到增加煤体裂纹与保护围岩稳定性有机的统一。试验结果表明: 爆破后3 h内抽采瓦斯量变化最为明显, 其中最大抽采量是原始抽采量的470倍。有效抽采半径为7 m以内, 爆破后顶板振幅约为0.23 cm。

关 键 词: 瓦斯灾害; 爆炸力学; 增透; 聚能

中图分类号: TD 313

文献标识码: A

Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability

MU Chao-min^{1,2}, WANG Hai-lu^{1,2}, HUANG Wen-yao³, KUANG Chang-jian¹

(1. School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 23001, China; 2. Key Lab. of Mining Coal Safety and Efficiently Constructed by Anhui Province and Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: In order to solve the problems of blasting to increase permeability in the coal seam, the methods of directional explosion with shaped charge are investigated. Jet of shaped charge penetrates the coal forming initial cracks and subsequently cracks are expanded by the wedge of explosive gas. The mechanisms of cracks of different directions are researched using numerical simulation and model tests. Through experiments on the work face of coal, it is proved that directional explosion with shaped achieve the aims of protecting roof and increasing cracks in demanding direction. The experiment results show that the change of gas drainage volume is most obvious in 3 hours after blasting; and maximum gas drainage volume is 470 times the original volume. The effective radius of gas drainage is within 7 meters; meanwhile the roof vibration amplitude is about 0.23 centimeters.

Key words: gas disasters; explosion mechanics; increasing permeability; cumulative blasting

1 引 言

瓦斯灾害是我国煤矿相关灾害的主要形式之一, 我国瓦斯灾害频发的主要原因是煤层透气性低, 瓦斯不能大量从煤体中抽采。针对煤层透气性低的特点, 采用预裂爆破强制增透瓦斯抽采日益成为热点课题。相继对煤层预裂爆破原理^[1]、预裂爆破机制的数值方法^[2]、煤层中应力波传递与裂纹扩展的数值方法^[3]、爆炸载荷下岩石的变形与破坏^[4]、岩石爆破破坏界面上的应力^[5]、岩石中条形装药能量

分布^[6]和裂隙圈半径^[7-13]进行研究, 取得了一定的研究成果。

煤层中预裂爆破裂纹呈放射状分布, 当药量过大时会破坏顶板, 药量不足时裂纹扩展效果不佳而影响抽采效果。针对上述问题, 采用定向聚能爆破的方法控制裂纹发展方向, 达到既可增加煤层透气性, 又可保护顶板的目的。

2 模型试验研究

将表面涂刷抗静电漆 PVC 管材制成药管的外

收稿日期: 2013-04-26

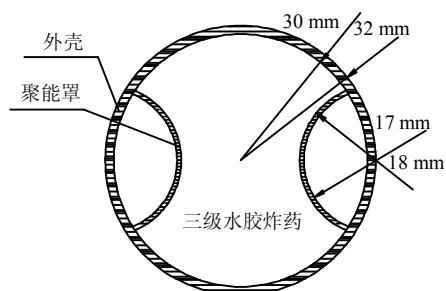
基金项目: 国家自然科学基金(No. 51204007); 安徽省高等学校省级自然科学重点项目(No. J2011A082); 安徽省自然科学基金项目(No. 1208085QE85)。

第一作者简介: 穆朝民, 男, 1977年生, 博士, 博士后, 主要从事工程安全与防护技术方面的研究工作。E-mail: chmmu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 王海露, 男, 1987年生, 硕士, 主要从事安全科学与技术方面的研究。E-mail: hailuwang.123@163.com

壳（外径为 32 mm，壁厚为 2 mm），使用外径为 18 mm，壁厚为 1 mm 的黄铜制成半圆形聚能罩。用胶水将聚能罩与药管外壳胶黏合在一起后装入 3 号煤矿许用水胶炸药，具体尺寸如图 1(a)所示。

如图 1(b)所示，将研制好的定向聚能药管装入无缝钢管（直径为 80 mm，壁厚为 6 mm，长度为 30 cm）后垂直埋入沙坑中爆破。



(a) 爆破管尺寸



(b) 爆破管实物

图 1 定向聚能爆破药管模型

Fig.1 Model of directional cumulative blasting in pipe

定向聚能药管和不加聚能罩的同尺寸普通药管对无缝钢管的爆破效果分别如图 2(a)、(b) 所示。普通柱状药管爆炸后，爆炸能量与产物向四周均匀扩散，钢管爆破后呈“十字”型破坏。加入聚能罩的定向药管爆破后，聚能罩在爆轰压力作用下形成高能金属射流，在金属射流方向优先产生裂隙并定向扩展。



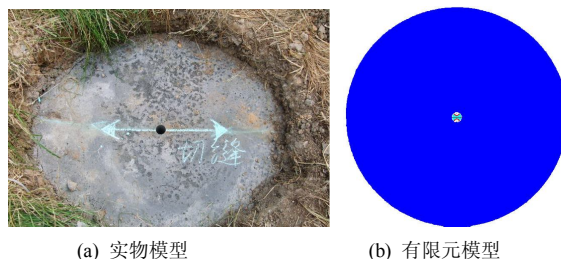
(a) 聚能爆破效果

(b) 普通爆破效果

图 2 定向聚能爆破药管钢管内爆破效果图

Fig.2 Macro-effect diagram of directional cumulative blasting in steel pipe

挖一个直径为 1.0 m、深为 0.5 m 的圆柱形大坑，然后将混合好的水泥倒入（水泥和砂的比例为 1:2，这样做出的水泥块硬度较大，比较符合条件），用直径为 40 mm 的 PVC 管插入中央，等水泥成型后，将管子拔出，待 27 d 后即可放炮做试验，如图 3(a) 所示。混凝土和炸药相关参数如表 1、2 所列。



(a) 实物模型

(b) 有限元模型

图 3 模型试验

Fig.3 Model tests

表 1 混凝土的力学性能参数

Table 1 Mechanical parameters in concrete

性能	密度 /(kg/m ³)	动态泊松比	单轴动态抗压强度 /MPa	单轴动态抗拉强度 /MPa
参数	2 420	0.3	40.0	9.3

表 2 水胶药柱性能参数

Table 2 Parameters of water-gel explosive

性能	药卷长度 /m	单位药量 /(kg/m)	药卷直径 /mm	密度 /(kg/m ³)	爆速 /(m/s)
参数	1.0	1.4~1.6	32	1 070~1 160	7 100~7 400

如图 4 所示，定向聚能药管爆破时，在聚能方向产生两条长度为 0.45 m 的主裂纹，而非聚能方向裂纹约为 0.13 m。聚能方向裂纹长度为非聚能方向的 3.7 倍。由此可知，定向聚能药可以达到控制裂纹发展方向的目的。



(a) 爆破后宏观效果

(b) 爆破后局部效果

图 4 定向聚能爆破药管混凝土内爆破效果图

Fig.4 Macro-effect diagram of directional cumulative blasting in concrete

3 数值模拟

以如图 3(a)所示的定向聚能药管在模型混凝土圆柱中爆破为背景，利用三维有限元软件 Ls-dyna 进行定向聚能爆破过程中裂纹扩展的数值模拟。混

凝土模型和定向聚能药管的尺寸与模型试验保持一致,具体模型如图 3(b)所示。模型四周采用透射边界,采用 Holmquist-Johnson-Concrete 含损伤本构模型^[11],炸药采用 Jones-Wilkins-Lee 状态方程^[11],混凝土和炸药的材料参数如表 1、2 所列。

混凝土在定向聚能装药爆炸作用下聚能方向和非聚能方向产生裂纹机制不同。①药卷爆破后聚能罩(如图 5(a)所示)和非聚能方向混凝土(如图 6(a)所示)在强冲击波作用下发生压缩变形,聚能罩被压垮,边界区域开始向中心聚能方向变形,聚能罩开始获得动能;非聚能方向混凝土在远大于自身抗压强度的冲击波作用下开始产生压缩裂纹,而聚能方向的混凝土由于聚能罩的遮挡并没有裂纹的产生。②爆破初始冲击波速度远大于聚能罩的速度(如图 6(a)、(b)所示),此时爆炸冲击波绕过聚能罩开始作用于混凝土聚能方向,爆轰产物与爆炸气体在混凝土形成椭圆形空腔(非聚能方向为长轴,如图 6(b)所示),爆炸冲击波作用于混凝土后形成压缩应力波,混凝土在强压缩应力波作用下形成粉碎形压缩裂纹。此时聚能罩在冲击波压力作用下进一步

变形,中间速度开始大于两侧速度(如图 5(b)所示)。③爆炸形成的压缩应力波作用完成,煤体由于惯性作用开始在压缩的反方向形成拉伸应力波。裂纹在拉伸应力波作用下由粉碎区域为起点向四周呈放射状发展。此时聚能罩在冲击波进一步压缩下,中心获得很大动能速度超过两侧区域形成金属射流(如图 5(c)所示),开始侵彻混凝土形成初始导向裂纹(如图 6(c)所示)。④由于射流侵彻混凝土裂纹远大于压缩粉碎区细小的压缩裂纹,爆炸形成的大量高压气体进入金属射流形成导向裂纹后形成气楔作用,此时沿聚能方向裂纹开始迅速发展,而由拉伸应力波形成放射状拉伸裂纹发展缓慢,这主要是大量高压气体以气楔形式进入聚能方向的导向裂纹,而使非聚能方向能量补充不足造成的(如图 6(d)~(f)所示)。

对比图 6 和图 4 可知,定向聚能药柱在混凝土爆破后在聚能方向和非聚能方向产生裂纹长度具有明显的区别,由射流和气楔形成裂纹远长于由压缩应力波和拉伸应力波形成的裂纹,爆炸能量主要集中在聚能方向,数值模拟和模型试验结果基本一致。

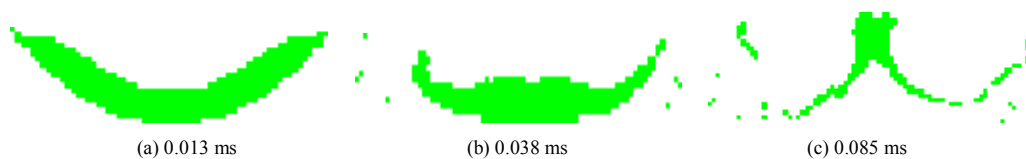


图 5 药型罩变形

Fig.5 Shaped charge deformation

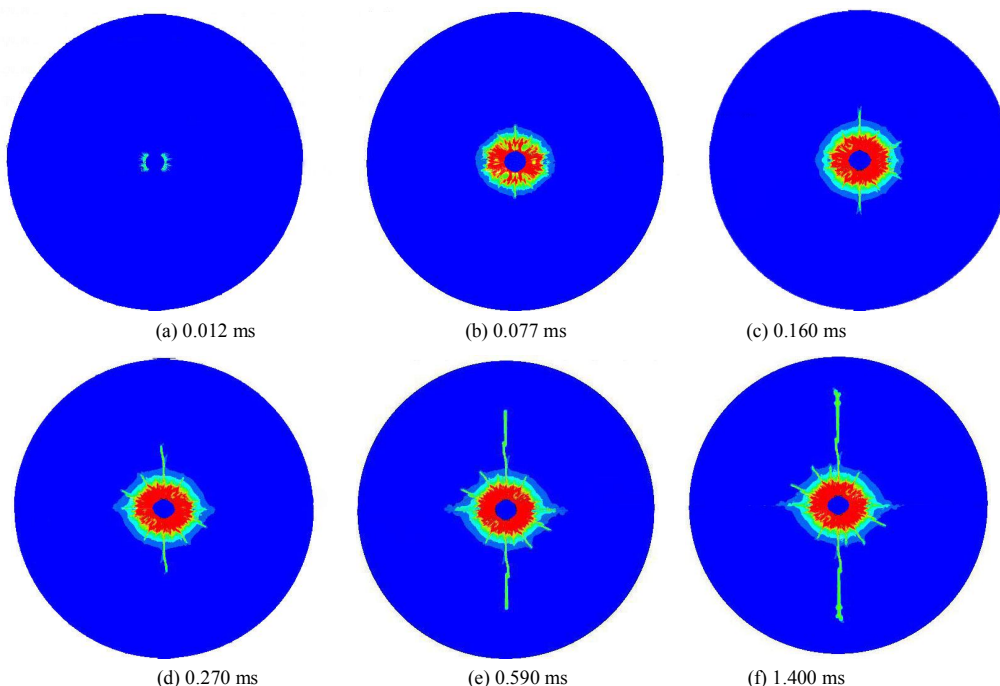
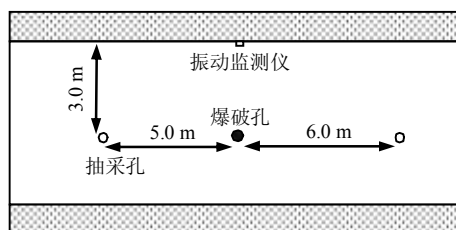


图 6 裂纹演化

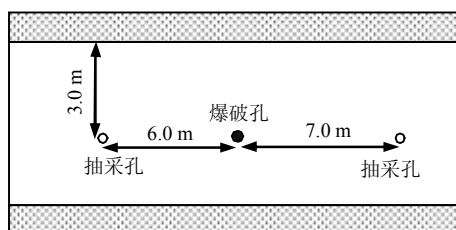
Fig.6 Cracks evolution

4 现场试验研究

试验地点选择在 1781(3)工作面运输顺和轨道槽掘进工作面,分别进行两次爆破现场试验。根据以往相关煤层预裂爆破增透的数据为基础^[14-15],进行现场定向聚能爆破相关试验设计,定向聚能药管和聚能罩直径分别为 50、20 mm,药管长度为 1 m,采用多级串联安装,封孔长度为 9 m,爆破孔孔径为 73 mm,孔深为 40 m。在距离爆破孔分别为 5、6、7 m 处施工抽采孔,抽采孔孔径和孔深分别为 113 mm、40 m,在每个抽采孔均安装专用仪器对瓦斯浓度、流量、孔内温度进行检测。进行第 1 次爆破时,在爆破孔正上方煤层与近顶板交界处孔深为 10 m 的位置处安装爆破振动监测仪。现场试验具体布置方式如图 7 所示。



(a) 振动检测仪布置

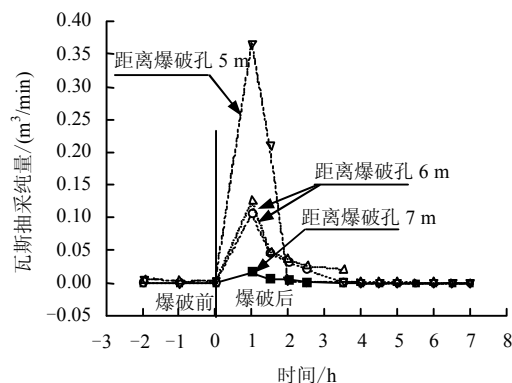


(b) 抽采孔布置

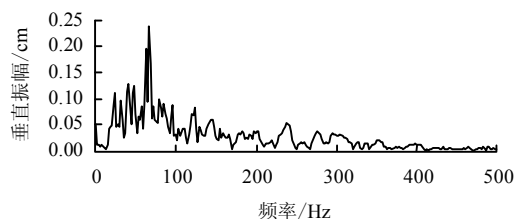
图 7 煤层爆破孔和瓦斯抽采孔布孔示意图

Fig.7 Diagram of hole used for directional explosion and gas drainage in coal mine

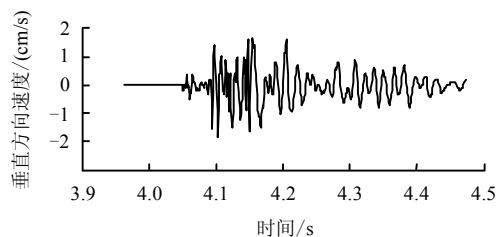
如图 8(a)所示,定向聚能药管爆破后 3 h 内,距离爆破孔 5 m 处抽采孔平均瓦斯抽采量为爆破前的 75 倍;距离爆破孔 6 m 处抽采孔平均瓦斯抽采量为爆破前的 30 倍;而距离爆破孔 7 m 处抽采孔平均瓦斯抽采量为爆破前的 8 倍。定向聚能爆破对于顶板的保护效果比较明显,如图 8(b)所示,在爆破孔非聚能方向垂直向上 3 m 处顶板位置垂直振幅为 0.23 cm,频率主要集中在 50~150 Hz 范围内,远小于普通药管进行预裂爆破增透抽采瓦斯振幅达 15 cm 的数值,从而达到保护顶板岩石完整性的目的。



(a) 瓦斯抽采纯量-时间曲线



(b) 垂直振幅-频率曲线



(c) 垂直方向速度-时间曲线

图 8 实测数据

Fig.8 Measured data

5 结论

(1) 定向聚能药管爆破后,通过聚能射流的导向裂纹与后续高压气体形成的气楔联合作用达到了控制裂纹演化方向和长度的目的,实现了提高煤层透气性与保护围岩顶板有机的统一。

(2) 通过潘三矿定向聚能爆破后实测数据可知,爆破后 3 h 内抽采瓦斯量变化最为明显,其中最大抽采量是原始抽采量的 470 倍。有效抽采半径为 7 m 以内,爆破后顶板振幅约为 0.23 cm,处于安全允许标准值范围内。

参考文献

- [1] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets[J]. *International Journal of Impacting Engineering*, 1997, 19(4): 412-414.
- [2] FORRESTAL M J, LUK V K. Penetration into soil targets[J]. *International Journal of Impacting*

- Engineering**, 1992, 12: 427—444.
- [3] FORRESTAL M J, FREW D J, HANCHAK S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. **International Journal of Impacting Engineering**, 1996, 18(5): 465—476.
- [4] 龚敏, 刘万波, 王德胜, 等. 提高煤矿瓦斯抽放效果的控制爆破技术[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(3): 223—226.
- GONG Min, LIU Wan-bo, WANG De-sheng, et al. Control blasting technique to improve gas predrainage effect in a coal mine[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2006, 28(3): 223—226.
- [5] 龚敏, 黄毅华, 王德胜, 等. 松软煤层深孔预裂爆破力学特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 17(8): 68—70.
- GONG Min, HUANG Yi-hua, WANG De-sheng, et al. Numerical simulation on mechanical characteristics deep-hole presplitting blasting in soft coal bed[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 17(8): 68—70.
- [6] 蔡峰, 刘泽功, 张朝举, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 499—503.
- CAI Feng, LIU Ze-gong, ZHANG Chao-ju, et al. Numerical simulation of improving permeability by deep-hole presplitting explosion in loose-soft and low permeability coal seam[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(5): 499—503.
- [7] 王明洋, 王立云, 戚承志, 等. 爆炸荷载作用下岩石的变形与破坏研究(II)[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 9—20.
- WANG Ming-yang, WANG Li-yun, QI Cheng-zhi, et al. Study of deformation and failure of rock under explosion load (Part II)[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2003, 23(3): 9—20.
- [8] 陈士海, 王明洋, 赵跃堂, 等. 岩石爆破破坏界面上的应力时程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1784—1788.
- CHEN Shi-hai, WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, et al. Time-stress history on interface between cracked and uncracked zones under rock blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1784—1788.
- [9] 吴亮, 卢文波, 宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 735—739.
- WU Liang, LU Wen-bo, ZONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 735—739.
- [10] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 144—147.
- DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)**, 2001, 20(2): 144—147.
- [11] 穆朝民, 齐娟. 含瓦斯煤在爆炸荷载作用下的力学特性[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 268—273.
- MU Chao-min, QI Juan. Mechanical characteristics of gas-filled coal under blasting load[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(2): 268—273.
- [12] 肖正学, 张志成, 李瑞明. 初始应力场对爆破效果的影响[J]. 煤炭学报, 1996, 21(5): 497—501.
- XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, LI Rui-ming. The effect of initial stress field on blasting results[J]. **Journal of China Coal Society**, 1996, 21(5): 497—501.
- [13] 卢文波, 陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 264—268.
- LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. A study of fracture propagation velocity driven by gases of explosion products[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1994, 14(3): 264—268.
- [14] 郭德勇, 裴海波, 宋建成, 等. 煤层深孔聚能爆破致裂增透机理研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1381—1385.
- GUO De-yong, PEI Hai-bo, SONG Jian-cheng, et al. Study on splitting mechanism of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(12): 1381—1385.
- [15] 郭德勇, 吕鹏飞, 裴海波, 等. 煤层深孔聚能爆破裂隙扩展数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 274—278.
- GUO De-yong, LÜ Pei-fei, PEI Hai-bo. Numerical simulation on crack propagation of coal bed deep-hole cumulative blasting[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(2): 274—278.