

文章编号:0253-9993(2008)12-1381-05

煤层深孔聚能爆破致裂增透机理研究

郭德勇¹, 裴海波¹, 宋建成², 秦法秋², 刘祥兵¹

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 郑州煤炭工业(集团)有限责任公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对高瓦斯低透气性煤层钻孔瓦斯抽放效率低的问题, 以郑州煤炭工业(集团)有限责任公司大平煤矿为例, 提出了煤层深孔聚能爆破致裂增透方法. 利用爆破特殊装药结构积聚爆炸能量, 驱使聚能罩侵入煤体形成初始裂隙, 并在爆生气体的二次驱动下扩大煤体断裂带范围. 现场爆破试验及瓦斯抽放效果证明, 煤层深孔聚能爆破裂隙有效影响半径为5~6 m, 钻孔瓦斯抽放浓度平均提高200%~300%.

关键词: 聚能爆破; 爆破致裂; 裂隙; 煤层透气性

中图分类号: TD235.33 **文献标识码:** A

Study on splitting mechanism of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability

GUO De-yong¹, PEI Hai-bo¹, SONG Jian-cheng², QIN Fa-qiu², LIU Xiang-bing¹

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Zhengzhou Coal (Group) Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on the low borehole gas drainage rate in high gas seam with low permeability, deep-hole cumulative blast cracking technology in coal bed was presented to improve the permeability. Denotation products and shaped covers with high kinetic energy penetrated coal seam under special charge structure, and subsequent fracturing progress by denotation gas enlarged the fracture range. The cumulative blasting is applied in Daping Coal Mine in the result of improving the gas concentration by 200%~300% equally with 5~6 m effective influencing fracture radius.

Key words: cumulative blasting; blast cracking; fracture; coal seam permeability

煤层瓦斯抽放既是瓦斯灾害防治的一项重要措施, 也是开发利用煤层气的关键技术. 影响煤层瓦斯抽放效果的主要因素是煤层透气性系数^[1], 针对高瓦斯低透气性难抽煤层, 国内外许多研究者进行了多种强化抽放瓦斯的试验研究, 如利用煤层高压注水、水力冲孔、水力割缝、松动爆破等措施来提高煤层透气性^[2-3], 取得了一定的效果, 但低透气性煤层抽放效果还是不理想. 将聚能定向断裂爆破理论引入煤层深孔爆破, 通过扩大煤层断裂带范围、提高煤体渗透性是一种重要的技术途径.

1 煤层深孔聚能爆破增透方法

对于高瓦斯低透气性煤层, 采用普通深孔松动爆破可以取得一定的抽放效果, 但还存在一些问题: 炸药能量较大一部分消耗在粉碎圈上, 断裂带扩展范围小, 压碎的煤粉容易堵塞裂缝, 或者形成爆炸空腔,

收稿日期: 2008-05-11 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772098); 教育部新世纪优秀人才资助项目(NECT-05-0214)

作者简介: 郭德勇(1966—), 男, 河南焦作人, 教授, 博士生导师. Tel: 010-62331517, E-mail: kjkfg@cumtb.edu.cn

影响顶、底板稳定等。利用聚能定向爆破技术,改进煤层深孔爆破装药结构,力求减小粉碎圈半径,扩大煤体断裂带范围,提高煤体渗透性,改善煤层钻孔瓦斯抽放效果。

为控制岩石爆破裂隙扩展方向,瑞典学者提出了线性聚能装药岩石爆破方法^[4],我国学者对岩石聚能爆破进行了大量的理论和试验研究,对聚能装药结构作了改进^[5]。根据工程实际需要,设计了2种线性聚能药包装药结构:双面和四面对称线性聚能装药结构,如图1所示。考虑工程技术和经济合理性,采用乳化炸药,聚能罩采用铝材,利用雷管起爆。

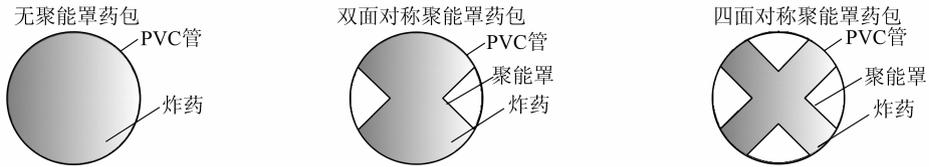


图1 聚能装药结构图

Fig. 1 Cumulative charging constitution

2 煤层深孔聚能爆破效应分析

2.1 聚能爆破聚能效应

聚能效应称为空心效应或诺尔曼效应,利用装药一端特殊的孔穴提高特定方向的破坏作用。普通的球状或柱状装药爆炸后,爆炸产物沿着装药表面向四周扩散,如在装药一端切一聚能穴,爆炸产物将向穴的轴线方向积聚。高压的爆炸产物在沿轴线汇聚时,形成更高的压力区,并迫使爆炸产物向周围的低压区膨胀,能量又随之释放。在聚能过程中动能是能够积聚的,而位能则不能集聚,反而起到分散作用。为更好利用爆轰产物的聚能作用,在聚能穴内装上金属罩,将能量尽可能转换成动能,提高能量的集中程度。基于煤矿的特殊性,采用乳化炸药,聚能罩采用铝材。

聚能药包在炮孔内起爆后,聚能罩受到强烈的冲击,向其对称面运动,在对称面上形成挤压作用,积聚爆轰产物能量,沿着炮孔径向侵彻煤体,形成煤层的初始导向宏观裂缝,如图2(a)的A、B和C部分。爆轰产物碰撞所积聚的能量一部分转化成了高速侵彻煤体聚能罩的动能,另一部分作用煤壁形成初始裂缝。

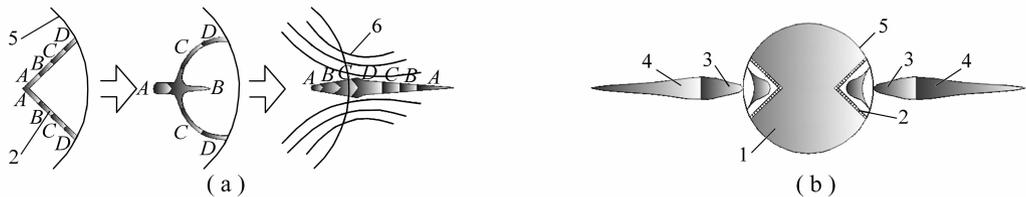


图2 聚能装药爆轰过程

Fig. 2 Cumulative charging detonation experiment

1——聚能装药; 2——聚能罩; 3——杵体; 4——聚能罩侵彻煤体; 5——PVC管; 6——聚能爆轰产物

理论分析可知,初始裂缝由爆轰产物的聚能作用和高温、高速的铝材侵彻煤体共同作用形成,在爆轰气体“气楔”的作用下^[6],裂缝进一步扩展。同时爆轰所引起的径向压缩应力波在传播过程中,在切向形成伴生拉应力,产生多条径向裂缝。

2.2 煤层深孔聚能爆破主要爆破参数

煤层聚能爆破致裂主要目的是减小爆破粉碎圈半径,尽可能将爆破能量用于扩大断裂带范围,大范围提高煤体渗透性。在确定合理爆破参数的过程中,既要有良好的爆破效果,又要技术上科学合理。聚能装药结构根据所选炸药、聚能罩类型设计,钻孔孔径和长度、装药量和封孔长度等将根据煤层地质及采掘条件进行调整。以大平煤矿13091“三软突出”回采工作面为例,地质背景及主要爆破参数:煤层均厚

5.0 m，煤层倾角 18°，距地面垂深 253 ~ 263 m，煤层瓦斯含量 9.1 ~ 13.0 m³/t，煤层瓦斯压力 0.45 ~ 0.84 MPa，煤体坚固性系数为 0.15 ~ 0.50，孔径 75 mm，孔长 40 m，封孔长度 10 m，乳化炸药 30 kg，角铝侧向装药，雷管起爆。

3 聚能爆破煤层致裂机理

3.1 煤层初始裂隙应力状态

取煤层裂纹单元体进行力学分析，由于煤层沿走向方向的尺寸远大于裂纹尺寸，可视为平面裂纹问题，为简化问题，设煤层主应力为铅垂和水平方向，裂纹单元体受力 (σ_x , τ_{xy} 为正应力和剪应力) 如图 3 所示。

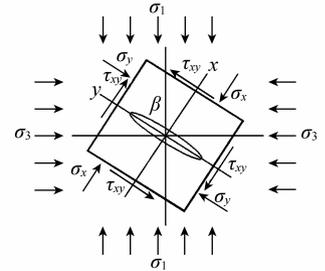


图 3 煤层原始裂隙单元体受力分析

Fig. 3 Fracture unit body of coal seam stress analyzing

根据断裂力学分析^[7-9]，裂纹面上的最大、最小拉应力为

$$\sigma_{\eta m}(\xi_{\theta}) = [(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta] / 2 \pm [2(\sigma_1^2 + \sigma_3^2) - 2(\sigma_1^2 - \sigma_3^2) \cos 2\beta]^{1/2} / 2, \quad (1)$$

式中， ξ_{θ} 为裂纹边界值； σ_1 , σ_3 为主应力。

按裂纹方向角 β 取极值并将主应力 $\sigma_1 = \gamma h$ 及 $\sigma_3 = \lambda \gamma h$ 代入式 (1) 可得到裂纹面上的最大拉应力为

$$\sigma(\xi) = \gamma h(1 - \lambda)^2 / [4(1 + \lambda)],$$

式中， γ 为煤体容重； h 为煤层埋深； λ 为侧压系数。

由于煤体本身的非均质性和各向异性，复杂的地质构造、组成，以及生产施工的爆破震动等原因，断裂作用将从煤体内薄弱结构面、孔隙和缺陷这些应力集中处发生，当靠近裂纹尖端处应力值达到该点材料的抗拉强度时，裂纹端部扩展形成裂隙。

3.2 聚能爆破煤层裂隙扩展机理分析

根据煤层深孔爆破聚能效应分析，煤体裂隙起裂和扩展的外界因素为聚能罩、爆轰产物、爆炸冲击波、爆生气体和煤层瓦斯，由于爆破孔周围煤体对上述因素响应不同，可将煤体划分为不同的爆破影响区 (图 4)。在粉碎区，煤体受瞬间高压发生粉碎性破坏，在聚能方向 (图 4 炮孔 x 轴方向) 爆轰产物积聚的能量一部分转化为聚能罩侵彻煤体的动能，使得 x 轴方向上粉碎半径变小；粉碎区外围是裂隙区，在该区域非聚能方向上 (图 4 炮孔 y 轴方向)，产生径向裂隙与环向裂隙并相互交叉，由于在粉碎区 y 轴方向上爆破能量过多消耗在粉碎煤体上，使得裂隙区在 y 轴方向扩展范围小。在 x 轴方向上聚能罩和爆轰产物侵彻煤体形成宏观裂缝，受应力波和爆轰气体作用，裂隙扩展范围要大于其它方向裂隙扩展范围。在裂隙扩展区炮孔内爆生气体就是裂缝起裂和扩展的驱动力，炮孔中的爆炸应力波和爆生气体压力改变了煤体初始应力状态，煤体内原始裂隙体形状和尺寸也随着改变，孤立的裂隙体相互沟通形成裂隙网。煤层瓦斯压力对煤体裂隙扩展的作用主要表现为降低煤体的围压，产生次生裂隙，相比爆生气体其作用较小。

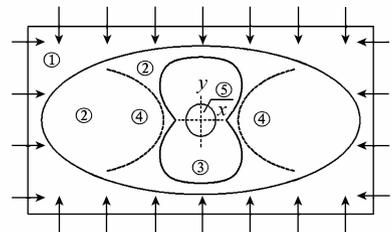


图 4 煤体在聚能爆破荷载作用下形成的区域

Fig. 4 Different zones in coal seam under cumulative blasting

- ①——弹性区；②——裂隙区；③——粉碎区；
- ④——聚能方向裂隙扩展区；⑤——炮孔

从煤体裂隙扩展微观角度分析，一方面聚能药包起爆后聚能罩直接撞击相对的孔壁，被撞击的孔壁附近煤体在较大的动能作用下形成定向裂缝；另一方面离孔壁较远处，爆轰能流密度降低，作用于煤体的能量也降低，在沿聚能方向的煤体中形成叠加应力场，在聚能方向的煤体受到更大的动能作用，在后续高温、高压的爆生气体准静态作用下，又获得非聚能方向煤体同样多的能量增量，在聚能方向煤体接受的能量增量大于非聚能方向，因此，沿聚能方向易于形成定向裂缝 (图 4)。与普通煤层深孔爆破相比，聚能

爆破能量更有效地用于煤体的裂隙扩展,使得煤层深孔聚能爆破粉碎区范围变小、断裂带范围变大,而且使爆破孔临近的大量微裂隙贯通,形成裂隙网络,提高煤体渗透性。

3.3 聚能爆破煤层裂隙扩展效果分析

根据煤层聚能爆破致裂机理分析,结合郑州大平煤矿地质条件、采掘条件设计了相应的聚能爆破瓦斯抽放施工工艺,在 13091 回风巷进行了深孔聚能爆破试验。对煤层顺层瓦斯抽放孔进行编号,对比试验炮前和炮后抽放孔瓦斯浓度,选择其中 2 组测量数据,如图 5 所示。

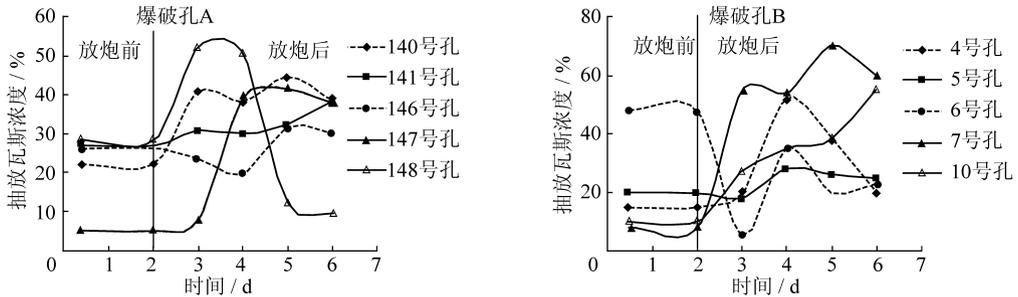


图 5 聚能爆破瓦斯抽放孔参数测试曲线

Fig. 5 Curves of gas concentration parameters under cumulative blasting

根据图 5 钻孔瓦斯浓度爆破前和爆破后的参数对比分析及现场工作经验可得:

(1) 煤层顺层聚能爆破减小了粉碎圈半径,用于径向裂隙扩展的爆破能量较普通深孔爆破比例增大,径向裂隙影响半径扩大并能与相邻爆破孔裂隙相贯通,增加了煤层渗透性,钻孔瓦斯抽放浓度平均提高 200% ~ 300%。

(2) 距离爆破孔最近的抽放孔瓦斯浓度在爆破后衰减比爆破中区的抽放孔衰减快,且出现部分抽放孔瓦斯浓度爆破后的 24 h 测试反而下降的现象,分析发现是蹋孔现象,距爆破孔远区(平均为 7 m 以外)的钻孔瓦斯抽放浓度上升幅度降低。

4 结 论

(1) 将聚能定向断裂爆破理论用于煤层深孔聚能爆破瓦斯抽放工程,通过改进爆破装药结构,利用爆轰产物与聚能罩积聚动能,侵彻煤体形成初始裂缝,为爆生气体二次驱动提供有利条件,为解决普通煤层深孔爆破粉碎圈半径大而断裂带范围小的问题提供理论和方法。

(2) 利用断裂力学、爆炸力学等理论分析了煤层深孔聚能爆破裂隙起裂、扩展和止裂的力学条件,同时分析了低透气高瓦斯煤层聚能爆破定向致裂的微观机理,为煤层聚能爆破致裂工艺设计提供理论依据。

(3) 在大平煤矿“三软突出”煤层应用煤层深孔聚能爆破瓦斯抽放技术,改变了低透气煤层的属性,煤层钻孔爆破裂隙有效影响半径为 5 ~ 6 m,在煤体硬度系数相对高的试验点,爆破裂隙有效影响半径及煤体渗透性升高效果更显著。

参考文献:

- [1] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 186 - 196.
Yu Bufang. Prevention and utilization technology of coal gas calamity manual [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005: 186 - 196.
- [2] 段康廉, 冯增朝, 赵阳升, 等. 低渗透煤层钻孔与水力割缝瓦斯排放的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2002, 27 (1): 50 - 53.
Duan Kanglian, Feng Zengchao, Zhao Yangsheng, et al. Testing study of methane drainage by bore and hydraulic-cutting seam from low permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27 (1): 50 - 53.
- [3] 邓广哲, 王世斌, 黄炳香. 煤岩水压裂缝扩展行为特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (20): 3 489 -

3 493.

Deng Guangzhe, Wang Shibin, Huang Bingxiang. Research on behavior character of crack development induced by hydraulic fracturing in coal-rockmass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (20): 3 489 - 3 493.

- [4] Bjarnholt G, Holmberg R, Ouchterlong F. A linear shaped charge system for contour blasting [A]. Konya C C. Proceedings of 9th Conference on Explosives and Blasting Technique [C]. Dallas: Society of Explosives Engineers, 1983: 350 - 358.
- [5] 何满潮, 曹伍福, 单仁亮, 等. 双向聚能拉伸爆破新技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (12): 2 047 - 2 051.
- He Manchao, Cao Wufu, Shan Renliang, et al. New blasting technology-bilateral cumulative tensile explosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (12): 2 047 - 2 051.
- [6] 罗 勇. 聚能药包在岩石控制爆破技术中的应用研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27 (1): 57 - 62.
- Luo Yong. Study on application of shaped charge in controlled rock mass blasting technology [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27 (1): 57 - 62.
- [7] Myasnikov V P, Guzev M A. Thermo mechanical model of elastic-plastic materials with defect structures [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2000, 33 (3): 165 - 167.
- [8] 龚声武, 陈才贤. 急倾斜煤层放顶煤开采顶煤破碎的 Griffith 理论分析 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 2007, 22 (2): 9 - 12.
- Gong Shengwu, Chen Caixian. Gririth theory analyses of top coal in steep seam [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2007, 22 (2): 9 - 12.
- [9] 李庆芬. 断裂力学及其工程应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005: 108 - 118.
- Li Qingfen. Fracture mechanics and its engineering application [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005: 108 - 118.

《应急救援技术与装备》(月刊) 征订启事

本刊围绕国家安全生产应急救援工作部署与要求, 宣传贯彻安全生产应急救援法规政策, 权威解析重大安全事故应急救援行动, 大力传播应急救援新知识、新技术、新方法、新装备, 深入总结应急救援工作的成功经验与失败教训, 把握指导性, 突出实用性, 全力促进安全生产应急救援工作在科学、规范、高效的轨道上又好又快地发展。

2009 年征订工作现已开始, 《应急救援技术与装备》全年订价 180 元, 付款方式如下。

银行汇款

开户行: 北京农行亚运村支行营业室

开户名称: 中国化工信息中心

账号: 230101040008441

邮汇现金

邮政编码: 100029

收款地址: 北京市安定门外小关街 53 号《应急救援技术与装备》编辑部

编辑部电话: 010 - 64418946, 64448101; 传真: 010 - 64268001

联系人: 刘 阔; E-mail: liuk@cncic.gov.cn