

文章编号:0253-9993(2009)08-1086-04

# 煤层深孔聚能爆破致裂增透工艺研究

郭德勇<sup>1</sup>, 宋文健<sup>1</sup>, 李中州<sup>2</sup>, 秦法秋<sup>2</sup>, 刘祥兵<sup>1</sup>

(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:** 针对低透气性煤层瓦斯抽放率低问题, 将聚能爆破技术应用于煤层增透中, 制定了聚能爆破增透工艺, 并将增透工艺分为选址、打钻、装药、封孔、引爆5个步骤。在深孔聚能爆破致裂机理研究的基础上, 进一步分析了煤层深孔爆破影响半径及其与装药不耦合系数的关系。以郑州大平煤矿13091工作面为例, 对煤层深孔聚能爆破增透瓦斯抽放工艺技术可行性进行了验证。

**关键词:** 聚能爆破; 煤层裂隙; 增透工艺; 瓦斯抽放

中图分类号: TD712.62 文献标识码: A

## Research on splitting technical of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability

GUO De-yong<sup>1</sup>, SONG Wen-jian<sup>1</sup>, LI Zhong-zhou<sup>2</sup>, QIN Fa-qiu<sup>2</sup>, LIU Xiang-bing<sup>1</sup>

(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 gas drainage in low permeability coal bed, the cumulative blasting technology was applied in improving the coal bed permeability, and the technical process of cumulative blasting to improve permeability was formulated. The technical process was divided into location, drilling, loading, sealing and detonation. On the basis of the study of splitting mechanism of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability, further, the relation between decoupling coefficient and radius of demolition influence was analyzed. Taking 13091 working face of Daping Mine as an example, the technical feasibility was tested.

**Key words:** cumulative blasting; coal bed fracture; increase permeability technical; gas drainage

瓦斯抽放不仅是防治煤矿瓦斯事故积极有效的措施, 而且是煤层瓦斯开发利用的关键技术<sup>[1]</sup>。如何提高煤层瓦斯抽放率一直是瓦斯抽放工作中亟待解决的技术难题, 影响煤层瓦斯抽放的主要问题之一是煤层的低透气性<sup>[2]</sup>。我国的煤层以低透气煤层为主, 因此, 必须研究开发能有效提高煤层透气性的技术方法, 通过煤层增透提高瓦斯抽放效果。

### 1 工程概况

郑州煤炭工业集团大平煤矿(简称大平煤矿)是一个高瓦斯突出矿井, 目前主要开采二叠纪山西组二<sub>1</sub>煤层。聚能爆破增透实验选择13采区13091工作面, 该工作面标高为+60~-70 m, 走向长750~520 m, 倾向宽平均70 m, 煤层倾角约20°, 煤层平均厚度在5 m以上且变化不大; 工作面煤层顶底板以泥岩、中粒砂岩为主, 不利于煤层瓦斯的逸散; 工作面煤质松软, 煤层透气性差, 属于不易抽放煤层; 工作面采用本煤层瓦斯抽放, 钻孔布置方式为顺层平行钻孔, 瓦斯抽放效果较差。

收稿日期: 2008-12-16 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772098); 教育部科学技术研究重点资助项目(108025)

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@cumb.edu.cn

## 2 聚能爆破主要参数

### 2.1 爆破孔的设计

#### 2.1.1 钻孔选址

聚能爆破工艺中钻孔选址是整个工程实施的第 1 步，科学合理的选址不但可以使实验成功率高，而且可以提高实验的安全性。煤层深孔聚能爆破钻孔选址必须考虑以下 2 个因素：① 安全因素。在选址时尽量使预期的爆破影响半径内不存在瓦斯地质、水文地质隐患。由于聚能爆破影响半径大，必须注意避免诱发矿井事故。② 施工因素。聚能爆破涉及打钻、装药等工序，在实施过程中需要一定的操作空间，因此，一般不选择在煤层坡度大、巷道狭窄的地方，要避免破坏巷道设施。

#### 2.1.2 爆破孔孔径、孔深

聚能爆破孔深取决于装药长度和封孔长度，实验中设计装药长度为 30 m，根据现场经验，为保证爆破安全封孔长度设计 8 m 以上，考虑到钻孔中可能出现煤渣在孔底堆积，聚能爆破孔孔深设计为 40 m 以上。根据装药不耦合系数设计和药包安装 2 方面的因素，钻孔孔径设计为 75 mm。

#### 2.1.3 孔间距的设计

聚能爆破孔间距的大小取决于聚能爆破影响区域的范围。如果 2 个爆破孔(图 1)间距过大，则孔间爆破裂隙无法贯通；孔间距过小，则裂隙扩展范围重叠，造成爆破能量的浪费。实验证明，孔间距应设计在 10 m 左右。聚能爆破实验中爆破影响范围可分为爆破产生的金属碎片在煤层中的切割深度<sup>[3]</sup>和爆生气体导致裂缝扩展长度 2 部分。前者由于聚能爆破在孔壁上形成的切槽深度远小于裂隙扩展的最大长度，可忽略不计；后者由爆生气体的压力和岩体的断裂强度因子  $K_1$  决定<sup>[4]</sup>。



图 1 相邻爆破孔裂隙扩展范围

Fig. 1 Neighboring shot hole crevasse expansion scope

$$K_1 = 2p_b r_b (1 - r_b^2/b^2) / (\pi b)^{1/2}, \tag{1}$$

式中， $p_b$  为裂缝止裂时炮眼内爆生气体压力，与炸药药量、药包结构及被爆岩体性质等因素有关； $r_b$  为炮孔半径； $b$  为裂隙扩展长度。

由式 (1) 求  $K_1$  对  $b$  的偏导可知，当  $b = \sqrt{5}r_b$  时  $K_1$  取最大值，结合止裂条件可得裂隙尖端应力强度因子随裂隙扩展的变化趋势(图 2)。孔壁主要受爆生气体的作用，随着裂缝的扩展炮眼内准静态压力很快达到峰值，之后逐渐下降，裂隙尖端的应力强度因子降低，其降低速度与切缝数目有关。切缝数越多压力和应力强度因子降低越快。当满足  $K_1 = K_D$  ( $K_D$  为岩石的动态断裂韧度) 时裂隙止裂<sup>[5-6]</sup>，用  $K_D$  代替式 (1) 中的  $K_1$ ，则

$$K_D = 2p_b r_b (1 - r_b^2/b^2) / (\pi b)^{1/2}. \tag{2}$$

令  $\lambda = b/r_b$ ， $F(\lambda) = 2(r_b/\pi)^{1/2} (1 - \lambda^2)\lambda^{-1/2}$ ，则式 (2) 可改写为  $K_D = p_b F(\lambda)$ 。将裂隙扩展到最大长度  $b_{max}$  所对应的  $\lambda$  值记为  $\lambda_c$ ，则最大裂隙长度  $b_{max} = \lambda_c r_b$ 。因此，炮眼间距  $a = 2b_{max}$ 。

### 2.2 药包结构的设计

#### 2.2.1 聚能药包

聚能药包由 PVC 套管、矿用炸药、金属楔形罩 3 部分组成。聚能罩采用楔形罩的装药称为线型聚能

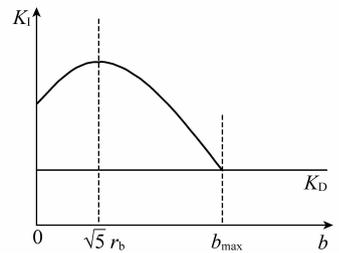


图 2 应力强度因子随裂隙扩展的变化曲线

Fig. 2 The change curve of stress intensity factor with crevasse expansion

装药 (LSC), 也称面对称型聚能装药. 其中, PVC 套管内径 40 mm, 管厚 1 mm; 矿用炸药选为乳化炸药; 金属楔形罩为顶角  $\leq 90^\circ$ 、母线长 13 mm 的角铝. 在 PVC 管一端加长 50 mm、内径为 42 mm 的一段, 与下一聚能药包连接.

### 2.2.2 装药不耦合系数

大平煤矿 13091 工作面聚能爆破瓦斯抽放采用径向空气不耦合装药, 并采用特制聚能药包, 使炸药爆炸能量沿孔深的分布更趋均匀化. 爆破过程中, 由于空气的缓冲作用, 爆生气体静压产生的切向拉应力取代应力波峰压对煤体作用<sup>[7]</sup>. 孔壁上的金属切槽产生应力集中, 促使裂缝在聚能方向上进一步扩张. 因此, 装药不耦合系数成为决定聚能爆破主裂隙扩展长度的重要条件之一.

根据压碎圈半径和裂隙圈半径的经验公式<sup>[8]</sup>, 结合大平煤矿煤岩特征及爆破相关参数 (表 1), 求得耦合系数  $k$  与煤岩压碎圈半径和裂隙圈半径的关系:  $r = 0.56k^{-6.01}$ ,  $r_g = 6.6k^{-6.21}/(1 - D')$ , 其中,  $r$  为压碎圈半径;  $r_g$  为裂隙圈半径;  $D'$  为煤体初始损伤系数.

表 1 大平煤矿煤岩性质及爆破相关参数

Table 1 Coal property and demolition related parameters of Daping Coal Mine

煤岩性质					炮孔直	乳化炸药密	乳化炸药爆
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	波速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比	径/mm	度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1.25	1.20	4.92	0.246	0.3	75	1 050	3 900

大平煤矿聚能爆破瓦斯抽放设计孔径 75 mm, 药卷直径 40 mm. 由径向不耦合系数计算公式  $k_d = d_b/d_c$ , 其中  $d_b$  为炮孔直径,  $d_c$  为药卷直径, 计算结果为  $k_d = 1.88$ .

## 3 施工工艺

### 3.1 装药工艺

(1) 制备聚能药包. 聚能爆破炸药用煤矿乳化炸药, 炸药卷以串联方式连接, 聚能槽按设计方式装入长 2 m 的 PVC 管中. 在 PVC 管中部开三角形槽, 雷管以 2 个一组并联插入药卷中, 药卷之间的雷管按串联方式连接.

(2) 装药. 装药前首先清除炮眼内煤粉. 聚能爆破药卷在钻孔中的安装方式如图 3 所示, 为防止送药过程中煤渣累积阻碍装药, 在第 1 根 PVC 管顶端安装木质锥形导向梭, 聚能药卷之间通过套接方式连接. 药卷中每根炮线的接头必须用绝缘胶布包扎, 脚线与放炮母线沿孔顶煤壁引出炮孔, 避开淋水和其它导体. 聚能药卷连接完毕后依次送入炮孔, 安装过程中须进行雷管和放炮电缆导通检查, 直至所有药卷送入炮孔.

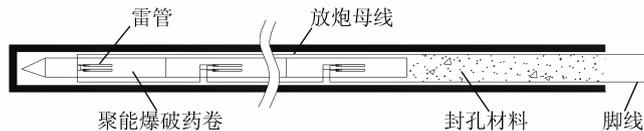


图 3 钻孔中聚能药包结构剖面

Fig. 3 Structure sectional drawing of cumulative dynamite volume in bore

### 3.2 封孔工艺

封孔工艺是聚能爆破技术的关键环节, 主要包括封孔材料的选择和封孔长度的确定. 一般来说, 深孔爆破的封孔长度与装药量、孔深、孔径和爆破区环境有关. 聚能爆破孔设计装药量大、煤壁松软易发生冲孔, 根据实践经验封孔长度取 8 m 以上可以保证封孔质量. 由于聚能爆破封孔长度大, 为防止黄泥球在封孔过程中局部堆积, 实际工作中制备直径为 50 mm, 长为 100 ~ 200 mm, 有一定黏合力的黄泥卷, 风干一段时间后使用. 黄泥卷用炮棍逐节推入孔中, 并捣实, 同时将炮线引至炮孔外并留有足够的长度.

### 3.3 起爆方式

封孔完毕后再次进行导通,用起爆器测量爆破网路电阻值,如爆破网路电阻远小于起爆器准爆能力,则可安全起爆;如爆破网路电阻接近或大于起爆器允许的最大负载电阻,则不能安全起爆.导通后所有实验人员撤离到安全区域,选用 MFD-200 型起爆器正向引爆聚能药卷.药卷中电雷管连接方式为串并联,药卷之间用串联方式连接,每个药卷中的电雷管为并联,这种连接方式不仅可以减小出现瞎炮的可能性,而且减小爆破网路中的电阻值,增加了起爆过程的安全性.

## 4 结 论

(1) 结合大平煤矿瓦斯地质及采掘工程等条件,将聚能爆破煤层致裂理论与瓦斯抽放技术结合,设计了钻孔布置、打钻、聚能装药结构和参数、钻孔装药工艺、封孔、起爆等程序,形成了一套科学的聚能爆破瓦斯抽放工艺.

(2) 根据聚能爆破煤层致裂机理和大平煤矿工程地质条件,推导出聚能爆破主裂隙扩展半径的经验公式并计算出装药不耦合系数.

(3) 通过大平煤矿实验和理论计算,爆破后煤层裂隙在半径为 5~6 m 内显著增多,受震动影响,更大范围内煤层微裂隙相互贯通,实践证明,聚能爆破是低透气煤层增透的有效技术途径.

感谢河南省煤层气开发利用有限公司姜光杰董事长和中国矿业大学(北京)高尔新教授给予的帮助!

### 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.  
Yu Bufan. A handbook of coal mine gas disaster prevention and use technology [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [2] 孙茂远,黄盛初,王 玺,等. 煤层气开发利用手册 [M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.  
Sun Maoyuan, Huang Shengchu, Wang Xi, et al. A handbook of coalbed methane development and utilization [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998.
- [3] 林玉印,陆守香. 聚能与非聚能不耦合装药模型爆炸应变测量的研究 [A]. 民用爆破器材新进展(4) [C]. 北京:兵器工业出版社,1995:319-324.  
Lin Yuyin, Lu Shouxiang. Binding energy and non-binding energy not coupling powder charge model detonation strain-gauging research [A]. The New Civilian Explosives Progress (4) [C]. Beijing: Weapons Industry Publishing House, 1995:319-324.
- [4] 杨永琦,戴 俊,单仁亮,等. 岩石定向断裂控制爆破原理与参数研究 [J]. 爆破器材,2000,29(6):24-28.  
Yang Yongqi, Dai Jun, Shan Renliang, et al. Study on the mechanism of directional split of rock by controlled blasting and its parameters [J]. Explosive Materials, 2000, 29 (6): 24-28.
- [5] Ma G W, An X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45 (6): 966-975.
- [6] 肖正学. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(4):546-549.  
Xiao Zhengxue. The research of break controlled blasting crack growth rule [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (4): 546-549.
- [7] Myasnikov V P, Guzev M A. Thermomechanical model of elastic-plastic materials with defect structures [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2000, 33 (3): 165-167.
- [8] 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.