

多面聚能射孔压裂排放瓦斯的研究

罗 勇

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽合肥 230027)

【摘 要】 复合射孔技术能有效地控制射孔方向和压裂缝的扩展。对其作用机理进行了初步的分析研究,并对相关参数进行了理论计算。针对煤层的特性,将该技术用于煤层致裂,经过现场应用,效果良好。该技术在煤层致裂爆破中的发展方向较多,有良好的应用前景。

【关键词】 多面聚能;压裂;复合射孔技术;致裂;瓦斯抽放

【中图分类号】 TD 353.6; TU 943.3

Study on Methane Drainage with Technique of Multi-perforating and Fracturing

Luo Yong

(University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027 China)

【Abstract】 Compound technique of perforating can effectively control the perforating direction and the fracturing expansion. The functional mechanism of this technique is analyzed theoretically and related parameters are calculated. This technique is applied to fracturing coal seams and the on-site monitoring effects are satisfactory. The development direction and application prospects of compound technique of perforating are both pointed out.

【Key Words】 equilateral cumulative aciton; fracturing; compound technique of perforating; fracturing; methane drainage

0 引言

复合射孔技术的特点是将普通射孔弹和能产生大量高能气体的含能材料(压裂火药)装在一起以形成一个射孔单元。利用聚能炸药和压裂火药两者具有的数量级之差的反应速度差;引爆以后,在炮孔径向形成多股聚能射流对煤体进行射孔,压裂火药随后以毫秒级的时间产生燃气脉冲,以冲击加载的形式沿射孔通道挤压地层,通过高压气体的膨胀、挤压、尖劈作用使射流打出的孔道扩大并以裂缝的形式延伸扩展^[1~5]。

复合射孔技术在油田的岩石压裂中已经得到广泛应用^[1~5],但由于煤体力学性能差以及井下环境对安全的特殊要求,因而至今还未有用于煤层致裂。为此,本文拟对复合射孔技术用于煤层致裂方面进行研究。因为煤与一般的岩石大不相同,其强度低,极易被射孔弹形成射孔通道,故笔者设计一种不同于油、气射孔弹的多面聚能射孔弹。该射孔弹为一多面聚能药包,压裂火药采用特制导爆管(传爆炸药),在炮孔中多面聚能药包由特制导爆管串联起来,该导爆管在产生高能气体的同时又起传爆作用,

这样就解决炮孔中管道效应的负面影响。为保证多面聚能射流在形成过程中的对称性,导爆管在穿过药包中的一小部分用一个称之为阻波器的结构进行空位,该阻波器能保证药包对称中心点起爆,使多个药型罩在对称点上同时被压垮,从而形成的多条射流对称。其示意图见图1。

多面聚能射孔弹针对高瓦斯、低透气性煤层的瓦斯抽、排放,旨在通过复合射孔提高煤层的透气性,合理有效地解决高瓦斯、低透气性煤层的瓦斯预抽、放排问题。该炸药爆炸时,在径向形成多股聚能射流对煤体进行射孔,紧接着压裂火药(特制传爆炸药)被点燃产生高能气体进入刚形成的射孔内,进行很强的冲刷,清除孔眼内的残渣,疏通孔眼道,加大加深射孔,并形成大量裂隙。由于爆炸产生的震动和高压气体的压胀,使岩(煤)体内裂隙大幅度增加,形成大范围的裂隙网,煤体御压范围进一步扩大,煤层透气性也大幅度提高,为煤体内瓦斯流动创造了通路^[1~3]。

1 相关理论论述

如果把射孔单元中火药产生的气体作为体系,把射孔器外壳以外(包括煤体)作为外界,那么在压

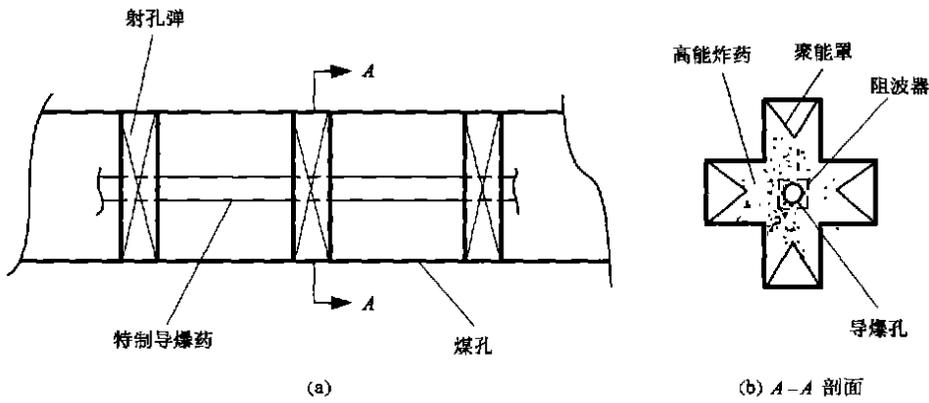


图 1 多面聚能射孔弹式示意图

裂过程中高能气体内能的减少,应等于高能气体对外所完成的各种功以及传递给外界的热量总和^[5]。根据文献[3],其高能气体作功效率 P 可表示为

$$P = npQ \quad (1)$$

式中: P 为高能气体作功功率, W ; n 为单位长度的孔眼数; p 为火药气体产生的压力, MPa ; Q 为每个孔眼单位时间内的气体排放量, cm^3/s 。

单位时间内单孔气体排放量

$$Q = Av = \frac{1}{4} \pi d^2 v \quad (2)$$

式中: A 为孔眼截面积, cm^2 ; d 为射孔入口处直径, 此处指射孔枪外壳上聚能射流形成的射孔, cm ; v 为高能气体的喷射速度, cm/s 。故有

$$p = \frac{1}{4} \pi n d^2 P v \quad (3)$$

若将高能气体视为不可压缩,则其外喷初速度可用 Bernoulli 方程求解:

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \quad (4)$$

式中: p_0 、 ρ_0 为药室内(射孔枪内)高能气体压力、密度; p_1 、 ρ_1 为从药室喷出来的高能气体压力、密度。

高级气体喷出射孔枪前的运动速度 v_0 与外喷初速度 v_1 相比,可以忽略不计,而枪身外压力 p_1 也因为远小于室内压力 p_0 ,故也可以舍去。于是

$$v_1 = \sqrt{\frac{2p_0}{\rho_1}} \quad (5)$$

则高能气体向孔眼喷射时的瞬时功率为

$$P = \frac{1}{4} \pi n d^2 P_0 \sqrt{\frac{2p_0}{\rho_1}} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,高能气体向孔眼喷射时作功的瞬时功率 P 是射孔枪内气体压力 p 的函数,它与射孔孔径 d 的平方成正比,与单位长度的孔眼数成

正比。显然,要提高高能气体的作功功率,可以采取增大射孔直径、提高爆压、增大孔眼密度等做法来提高作功能力。因此需要重点考虑炸药和聚能罩的选取。

2 主要参数的确定

2.1 聚能射流速度

聚能射流极易在岩体上产生具有方向性的射孔,根据文献[6~9],射流冲击岩体产生的驻点压力 p_s 以及射孔深度 l_0 分别由下面两式确定

$$p_s = \frac{1}{2} \rho_i v_i^2 \quad (7)$$

$$l_0 = l_i \varphi \sqrt{\frac{p_s}{S_c}} \quad (8)$$

式中: ρ_i 为射流的密度; v_i 为射流的速度, l_i 为聚能罩特征尺寸; φ 是与聚能罩形状及炸高有关的参数; S_c 为煤(岩)的动态抗压强度。其中, v_i 是由炸药性能、聚能罩材料和参数以及装药参数等因素所决定的。故可以根据预期射孔深度 l_0 计算所需要的聚能射流速度 v_i ,从而可根据实际情况对药包进行合理的设计。

2.2 单孔装药量

聚能射流在煤体形成多个射孔后,随后产生的高能气体直接进入形成的射孔内,因而煤体内裂隙大幅度增加,形成大范围的裂隙网。为达到理想的工程效果,药量的控制显得更为重要。根据文献[3, 7, 8],得到多面聚能射孔致裂单孔装药量 q 的计算公式为

$$\left(\frac{8K_b R_c}{\rho_0 D^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_b}{d_c} \right) \geq l_e \geq \left(\frac{8K_c}{\rho_0 D^2 \sqrt{\pi a \cdot f\left(\frac{a}{r}\right)}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_b}{d_c} \right) \quad (9)$$

$$q = \frac{\pi}{4} d_c^2 \rho_0 l_e l \quad (10)$$

式中: K_b 为在体积应力状态下煤的抗压强度增大系数, 计算时取 $K_b=10$; R_c 为煤的单轴抗压强度, MPa; $f(\frac{a}{r})$ 为形状因子, 可由相应的表中查出; r 为钻孔半径, m; a 为初始裂纹的长度, 可由 $f(\frac{a}{r})$ 和 r 确定, m; ρ_0 为钻孔装药密度, kg/m^3 ; D 为炸药的爆速, m/s ; d_b 为钻孔直径, m; d_c 为装药直径, m; l 为钻孔深度, m; l_c 为钻孔装药系数, 一般情况 l_c 取大值, 这样可使裂隙的扩展长度最大而又不产生扩壶效应。

2.3 裂缝长度

一般来讲, 岩层的破坏有断裂和剪断两种形式。当岩层受到压应力 σ 的作用时, 岩层中的微元同时还受到如下两个应力的作用; 与 σ 垂直的拉应力 σ_l 和与 σ 方向相反的压应力 σ_y 。对于复合射孔弹来说, 聚能炸药爆炸后, 在孔眼周围会产生压实带(即应力罩)^[9]。但高温高压的脉冲气体能形成短暂而高能的冲击波, 会在压实带上撑出多条裂缝, 极大地增加了岩层的渗透率。随着裂缝的增加及扩展, 高能的冲击波很快衰减成应力波^[3]。文献^[3]给出的孔道内压力 p 的计算公式为

$$p = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \left(\frac{d_b}{d_c}\right)^{-6} l_c^3 \quad (11)$$

根据应力波理论, 应力波应力随距离衰减的关系:

$$\sigma_r = \frac{p \cdot r_0}{r} \quad (12)$$

式中: p 为孔道内压力, MPa; r_0 为孔道半径, cm; r 为岩层中任意点到孔道轴线垂直距离, cm; σ_r 为岩层中距孔道轴线垂直距离为 r 的任意点的应力, MPa。其它符号含义同前。

根据弹性力学知识, 切向方向拉应力可以近似计算:

$$\sigma_1 = b \cdot \sigma_r = \frac{bp \cdot r_0}{r} \quad (13)$$

$$b = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (14)$$

式中: μ 为煤(岩)体的泊松比。

从式(13)可以看出, 煤(岩)层中任意一点拉应力 σ_p 的大小是与孔眼半径 r_0 成正比的。由于射孔作用形成的 σ 很大, 因其产生的 σ_1 也大。裂隙区半径的大小在很大程度上取决于岩体的抗拉强度, 岩体的抗拉强度越大, 裂隙区的半径越小, 岩石的抗拉强度越小, 裂隙区的半径反而越大^[5]。煤的抗拉强度极低, 所以很容易达到 $\sigma_1 > \sigma_{1j}$ (σ_{1j} 为煤抗拉极限

强度), 使该处煤被拉断, 从而出现裂缝。若此处是在孔眼壁, 则裂缝由孔眼发出, 沿孔眼半径方向呈放射状向外发展。如果用煤的抗拉强度 σ_{1j} 代替式 $\sigma_1 = \frac{bp \cdot r_0}{r}$ 中的 σ_1 , 则相应的 r_{\max} 就是煤层中裂缝的最大长度。于是将其整理有 $r_{\max} = \frac{pb \cdot r_0}{\sigma_{1j}}$, 即裂缝的最大长度与钻孔半径 r_0 和高能气体压力 p 有关。

2.4 钻孔间距

高能脉冲气体开始作用与射孔周边的裂隙后, 钻孔内准静态压力逐渐下降, 使裂隙尖端的应力强度因子 K_I 降低。显而易见, 应力强度因子降低的速度与切缝的数目有关, 切缝数越多, 压力和应力强度因子降低越快^[7]。当满足式 $K_I = K_{Ic}$ (K_{Ic} 为煤的断裂韧度, $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$) 时, 裂隙止裂。根据止裂判据就可计算出裂隙扩展的最大长度, 从而确定炮孔间距。文献^[3]提供的在定向裂隙的扩展过程中, 裂隙尖端的应力强度因子计算式为

$$K_I = rp \left[1 - \left(\frac{r}{a_m}\right)^2 \right] (\pi a_m)^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中符号含义同前。将各个参数代入上式, 压裂半径 a_m 就可计算出来, 工程上一般取钻孔间距 S 略小于 $2 a_m$ 。

从上文分析可以看出, 煤层强度是个重要指标: 聚能药包及压裂药的最高压力都是根据煤层的强度来确定的, 致裂区域、药量以及封孔长度等主要参数也都与之相关。

3 其它技术要求

高能气体压裂技术用于煤层致裂还是一种新的尝试, 必须针对煤层的特性, 以及井下环境对安全的特殊要求, 选择相适应的火药品种, 设计合理装药结构和点火机构。还要采取安全的保险的封孔技术以确保安全。

根据理论计算与实验结果, 火药采用单孔双基药; 弹体材料选择有机管材, 管表面涂刷防静电漆; 由于煤矿钻孔较长, 采用特制导爆管来减少管道效应的影响; 为了便于运输和井下操作, 弹长(聚能药包和特制传爆药长度)设计为 1 m, 多节弹串联起来送入钻孔内。采用内装矿用安全雷管的封闭式点火器进行点火。使用水炮泥炮孔填塞, 根据抗滑稳定性计算填塞长度。

4 工程应用

某煤矿开采的某煤层平均厚度约为 5.2 m, 倾角 13° 。煤的普氏系数 $f = 1.5$ 。其直接顶厚为

3.2 m的中细粒砂岩,老顶为砂岩(局部夹带细砂岩),平均厚度约7.8 m;直接底(包括老底)为石英砂岩,厚度大于20 m。该煤层属低透气性高瓦斯煤层,其透气性系数仅为 $0.0392\text{ m}^2\text{d}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$,回采水平煤层原始瓦斯压力达375 MPa,煤的瓦斯放散指数平均值大于14,煤层具有突出危险性。其日产每吨煤的瓦斯涌出量大于 10 m^3 ,传统的钻孔瓦斯抽放法不能有效地保证抽放率。为此,拟采用复合射孔致裂技术措施,提高瓦斯抽放率。

结合前文理论分析和计算,根据生产要求在工作面布置钻孔。爆破方案及主要爆破参数设计如下:沿煤层倾斜方向,在工作面沿其推进方向打一排钻孔,孔深40 m;孔径75 mm;孔内每米布设压裂火药500 g,隔1 m布置一个250 g聚能药包。聚能罩为圆锥形,锥角 45° ,底部外径25 mm;内径23 mm;射孔直径12~16 mm,射孔深1.0 m;每个聚能药包射孔数目为4个。高能气体致裂半径7 m;孔间距15 m,炮孔填塞使用水炮泥,根据抗滑稳定性计算得填塞长度不小于10 m。

根据现场测试结果表明:在采用复合射孔技术后,该煤层瓦斯压力急剧下降到 $0.5\sim 0.2\text{ MPa}$,低于《防治煤与瓦斯突出细则》规定的 0.74 MPa ,煤层透气性能大大增加了 $23.543\text{ m}^2\text{d}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-2}$,是原始透气性系数的570倍;钻孔瓦斯流量最大达到了 $0.442\text{ m}^3/\text{min}$,是卸压前钻孔瓦斯流量的40多倍,消除了突出危险。

5 结 论

本文对复合射孔技术用于煤层致裂方面进行了研究,现场实践表明应用效果较为理想,经成本核算比现行措施岩巷钻孔抽放提高经济效益40%。

我国的瓦斯藏量为 $32\sim 25$ 万亿 m^3 ,是石油天然气的十倍。我国目前共有150多家煤矿对矿井实行瓦斯抽放工作,平均抽放率比较低,一般都在20%左右。若进行瓦斯抽放时采取复合射孔技术,则可大大降低矿井的瓦斯含量,缩短预抽放时间,增大经济效益。该技术不仅可用提高煤层瓦斯的抽放率,还可扩大应用面,用于石门揭煤防突,矿井水的防治,并可为地面煤层气采集增产提供保障。因此,应用范围和前景是十分广阔的。

参 考 文 献

- 1 袁吉诚. 中国射孔技术的现状与发展. 测井技术, 2002, 26(5): 421~425
- 2 石崇兵, 李传乐. 高能气体压裂技术的发展趋势. 西安石油学院学报, 2002, 15(5): 17~20
- 3 王安仕, 秦发动. 高能气体压裂技术. 西安: 西北大学出版社, 1998
- 4 吴晋军, 马荣华. 复合射孔压裂技术的应用研究. 石油矿场机械, 2000, 29(2): 31~33
- 5 赵开良, 罗仁杰, 于敬文. 复合射孔技术及其应用. 断块油气田, 1999, 7(2): 62~64
- 6 沈兆武. 双面聚能射流对介质的破坏作用, 爆破器材, 1985, 14(2): 1~4
- 7 陆宇香, 林玉印. 间隔聚能装药爆破技术与应用. 煤炭学报, 1997, 22(1): 42~46
- 8 Hong R Yet al. On the Jet Penetration Height in Fluidized Beds with Two vertical Jets. Powder Technology. 2003 133: 216~227
- 9 Yu Chuan, et al. Applied Research of Shaped Charge Technology. International Journal of Impact Engineering. 1999 23: 981~988

收稿日期: 2004-10-10