

文章编号:1000-582X(2011)11-117-05

高压水射流割缝揭穿煤层关键参数研究

张建国^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221008;

2. 中国平煤神马能源化工集团有限责任公司, 河南 平顶山 467000)

摘要:针对高瓦斯低透气性煤层石门揭煤过程中瓦斯抽采难的现状,提出了高压水射流割缝提高煤层透气性方法。在理论分析射流轴向速度的分布规律基础上,得出射流冲击力与煤体力学性质耦合作用关系;通过分析煤体颗粒运动、受力状态,得出钻孔倾角、水量与煤体颗粒流速之间的关系;基于连续损伤力学分析出煤体产生损伤破坏的临界值,确定了高压水射流割缝煤体有效半径;并将该技术在平顶山某矿-380 mS₁石门进行现场试验,试验结果表明钻进工程量减少了38.2%,瓦斯预抽率提高了2.86倍,预抽时间缩短了57.1%,预抽面积增加了2.05倍。

关键词:高压水射流;石门揭煤;钻孔;抽采率

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Research on primary parameters of high pressure water jet during rock cross-cut coal uncovering

ZHANG Jian-guo^{1,2}

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221088, P. R. China; 2. China Pingmei Shenma Energy & Chemical Group Co. Ltd., Pingdingshan, Henan 467000, P. R. China)

Abstract: According to the problems of gas drainage in rock cross-cut coal uncovering on high gassy coal seam with low gas permeability coal seam, a novel technology which uses high pressure water jet to slot coal seam is presented to raise the methane drainage radius and permeability. Based on the distribution of water jet velocity, the relationship of impact force of water jet and characters of coal is analyzed. Besides, the velocity of coal partial basing on the relationship of force of partial and dip of drilling is studied. Then, the effective diameters of slotting are calculated. Finally, the novel technology is applied to the Pingdingshan mine. The results show that quantities is decreased 38.2%, gas drainage rate is increased 2.86 times and the period of gas drainage is reduced 57.1% and the area of the gas drainage is widened 2.05 times compared to original technology.

Key words: high pressure water jet; rock cross-cut coal uncovering; drilling; drainage rate

煤与瓦斯突出是影响煤矿安全生产的主要因素,其中石门揭煤时突出强度最大、危险性最高^[1,2]。

目前,在防治石门揭煤煤与瓦斯突出主要采用排放钻孔的方法。但由于煤层透气性低,导致排放钻孔

收稿日期:2011-07-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201200)

作者简介:张建国(1963-),男,中国矿业大学博士生,教授级高工,中国平煤神马集团总工程师,主要从事煤矿安全生产、瓦斯治理研究工作,(E-mail)2787361@163.com。

密度大,抽放半径较小,施工工期长。针对此问题,国内外的专家学者曾提出了多种提高抽放效率的措施,主要目的是扩大钻孔抽放半径,降低钻孔密度,缩短施工周期。使用的措施有深孔预裂爆破、水力冲孔、煤层注水等。深孔预裂爆能够使钻孔底部形成面积较大的孔穴,但若装药不能满足要求,易诱导突出的发生^[3]。水力冲孔、煤层注水一般在瓦斯压力大的松软煤层能够取得较好的效果,但由于钻孔直径较大,钻孔时存在塌孔、夹钻以及施工操作复杂等缺点^[4,5]。

针对石门揭煤过程中瓦斯预抽现状,笔者提出高压水射流割缝技术,基本原理是利用多功能钻头中喷嘴产生高压水射流,辅助穿层钻孔钻进,并对煤体进行割缝,诱发裂隙贯通,激发次生裂隙产生,在增大煤体暴露面积的基础上,提高煤层透气性^[6]。结合平煤矿区煤层赋存特点及煤体力学特性,将对高压水射流切割煤体所需的泵压及流量进行分析;在理论分析圆形紊动射流结构的基础上,研究射流冲击破碎煤体时射流速度分布,基于动量守恒定律得出射流作用于煤体的应力分布,分析射流割缝半径,并将该技术在平煤矿区进行石门揭煤现场试验。

1 射流参数的确定

影响高压脉冲水射流割煤的因素有很多,在已知煤体参数的基础上,笔者主要研究射流压力和流量这两个最基本的参数,其决定了煤体是否能被破碎,以及煤渣是否能被顺利排出。

1.1 射流压力分析

假设水射流的运动方向垂直于煤体,当高压水射流打击煤体时,其全部动量以作用力的形式作用于煤体表面。因此,煤体的破坏主要取决于单位面积上水射流对煤体的作用力。

射流在喷嘴出口处的动压^[7-9]

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2, \quad (1)$$

式中: P_0 为喷嘴出口的动压, ρ_0 为水的密度, v_0 为喷嘴出口的轴心速度。

射流轴心处的动压在核心段内保持不变,即为喷嘴出口处的动压,越过核心段后开始衰减。在射流基本段轴向动压的衰减,引入射流初始段长度 x_c ,可以用下式表示射流轴心动压在基本段的变化规律

$$p_m = \frac{x_c}{x} p_0, \quad (2)$$

式中: p_m 为基本段某处射流轴心动压; p_0 为在核心段射流轴心动压; x_c 为射流初始段长度, x 为基本段某处距离喷嘴出口的距离。

通过射流动量守恒,可以得出

$$x_c = 3.89 \left(\frac{R_c}{1.97K} \right)^2, \quad (3)$$

式中: R_c 为喷嘴出口半径, K 是与喷嘴有关的系数。

将式(1)、(3)带入式(2)可得:

$$p_m = 0.5012 \left(\frac{R_c v_0}{K} \right)^2 \frac{\rho_0}{x}, \quad (4)$$

式(4)即为在基本段某处射流轴心动压表达式。

射流垂直作用于煤体时,射流基本段各截面近似于圆形区域,设其圆形区域半径为 R ,在圆形截面内各点的动压随着距离射流轴线的径向距离 r 的增大而逐渐减小,其分布规律可以表示为

$$p = p_m (1 - \eta^{1.5})^4, \quad (5)$$

式中: p 为射流截面任意一点的动压; p_m 为射流截面轴心上的动压; η 为无量纲径向距离, $\eta = r/R$ 。

根据 $F_x = \int_0^R 2\pi r p dr$ 可以求出距离喷嘴出口 x 处射流冲击力 F_x ,

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \int_0^R 2\pi r p dr, \\ p &= p_m (1 - \eta^{1.5})^4, \\ p_m &= 0.5012 \left(\frac{R_c v_0}{K} \right)^2 \frac{\rho_0}{x}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

则在距离喷嘴出口 x 处,圆形截面半径 $R = a$ 的单位面积射流冲击力 $\overline{F_x}$ 可以表示为

$$\overline{F_x} = \frac{F_x}{\pi a^2}. \quad (7)$$

1.2 射流流量分析

在分析煤体颗粒在流体中的运动时,只考虑颗粒在钻杆方向和重力方向的运动,即考虑煤体受到重力、浮力、阻力的影响,由于在等截面均匀管道中滑移速度是恒定或缓慢变化的,为了简化计算,略去附加质量力。并用斯托克斯阻力系数公式代替阻力,则煤体颗粒在钻杆方向和重力方向的运动可以表示为^[10-13]

$$\begin{aligned} \frac{1}{6} \pi d_c^3 \rho_c \frac{du_c}{dt} &= \frac{1}{6} \pi d_c^3 (\rho_c - \rho_w) \sin \alpha + \\ &3\pi d_c \eta (u_w - u_c), \end{aligned} \quad (8)$$

式中: 等号左边为质量力, 右边依次为阻力、浮力; d_c 为颗粒直径; ρ_c 和 ρ_w 分别为颗粒和射流的密度; u_c 和 u_w 分别为煤体颗粒和射流的速度; α 为钻孔倾角, 仰角为正, 俯角为负; η 为水的黏性系数。

将式(8)解微分方程, 并带入初始条件 $t=0, u_c=0$, 整理可得

$$u_c = \frac{1}{n} (e^{\frac{t}{n}} - 1) \left[\frac{u_w}{n} + \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_c} g \sin \alpha \right], \quad (9)$$

式中, $n = \frac{18\eta}{d_c^2 \rho_c}$ 。

则在时间 t 内, 煤体颗粒延钻孔方向的运动距离为

$$S = \int_0^t u_c dt = \int_0^t \frac{1}{n} (e^{\frac{t}{n}} - 1) \left[\frac{u_w}{n} + \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_c} g \sin \alpha \right] dt = \frac{1}{n^2} (e^{\frac{t}{n}} - 1 - t) \left[\frac{u_w}{n} + \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_c} g \sin \alpha \right]. \quad (10)$$

煤体被高压水射流破碎后, 在钻头和水的作用下, 以煤体颗粒的形式从钻孔中排出。假设在临界情况下, 颗粒从钻杆外表面开始到达孔壁时, 颗粒正好被排出钻孔, 由牛顿运动定律可知

$$\frac{D-d}{2} = \frac{1}{2} \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_w} g t^2 \cos \alpha, \quad (11)$$

解得 $t = \sqrt{(D-d)\rho_w / [(\rho_c - \rho_w)g \cos \alpha]}$ 。式中: D 为钻孔直径, d 为钻杆直径。

若使煤体颗粒顺利排出, 须有在时间 t 内, 即:

$$S = \frac{1}{n^2} (e^{\frac{t}{n}} - 1 - t) \left[\frac{u_w}{n} + \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_c} g \sin \alpha \right] \geq L. \quad (12)$$

由此可得射流速度 u_w 需满足

$$u_w \geq \frac{Ln}{e^{t/n} - 1 - t} + \frac{(\rho_w - \rho_c)mg \sin \alpha}{\rho_c}, \quad (13)$$

则由流量 $Q = uA$ 可知, 为保证煤渣顺利排出, 流量应满足

$$Q \geq \frac{1}{4} u_w \pi (D^2 - d^2). \quad (14)$$

2 高压水射流割缝半径的计算

分析在高压水射流作用下煤体的破坏, 一般采用连续损伤力学描述, 并只考虑与煤体的物理性质有关。根据库伦准则有

$$|\tau| = c + \sigma \tan \varphi, \quad (15)$$

式中: τ 为剪切强度; c 为黏结力; σ 作用于煤体的正

应力; φ 为内摩擦角。

在连续损伤力学中的损伤破坏, Loland^[14,15] 认为在拉伸应力应变曲线中, 应力峰值以后, $\epsilon_p < \epsilon \leq \epsilon_u$ (ϵ_p 为应力峰值点的应变值, ϵ 为煤体拉伸应变, ϵ_u 为应变极限值) 裂纹在破坏区内不稳定扩展。在压应力作用下, 煤体内裂仍然具有一定得承载能力, 当 $\epsilon_p < \epsilon \leq \epsilon_u$ 时, 此阶段的 Loland 数学模型为

$$\sigma = \bar{\sigma} \left\{ 1 - h [D_0 + C_1 \epsilon_p^\beta + C_2 (\epsilon - \epsilon_p)] \right\}, \quad (16)$$

式中: $\beta = \frac{\sigma_p}{E \epsilon_p - \sigma_p}$; $C_1 = \frac{1 - D_0}{1 + \beta} \epsilon_p$; $C_2 = \frac{1 - D_{\epsilon_p}}{\epsilon_u \epsilon_p}$; σ_p 为峰值应力; σ 为煤体所受压应力; $\bar{\sigma}$ 为考虑损伤的有效应力; h 为裂纹闭合系数; D_0 为初始损伤; D_{ϵ_p} 为应力达到峰值时所对应的损伤。

将式(16)代入式(15), 可得煤体发生损伤破坏的有效应力值为

$$\bar{\sigma} = \frac{\tau - c}{\tan \varphi \left\{ 1 - h [D_0 + C_1 \epsilon_p^\beta + C_2 (\epsilon - \epsilon_p)] \right\}}. \quad (17)$$

根据 Loland 数学模型中煤体发生损伤破坏的临界值 $\sigma = \bar{\sigma}(1 - hD_0)$, 则 σ 表示为

$$\sigma = \frac{(\tau - c)(1 - hD_0)}{\tan \varphi \left\{ 1 - h [D_0 + C_1 \epsilon_p^\beta + C_2 (\epsilon - \epsilon_p)] \right\}}. \quad (18)$$

则高压水射流打击煤体, 射流到达煤体表面处截面的轴心动压需大于煤体发生损伤破坏的临界值才可对煤体产生损伤破坏, 由式(4)和式(18)可得:

$$p_m = 0.5012 \left(\frac{R_c v_0}{K} \right)^2 \frac{\rho_0}{x} \geq \frac{(\tau - c)(1 - hD_0)}{\tan \varphi \left\{ 1 - h [D_0 + C_1 \epsilon_p^\beta + C_2 (\epsilon - \epsilon_p)] \right\}}. \quad (19)$$

根据式(19)即可求得高压水射流对煤体产生损伤破坏的半径 x 表达式

$$x = 0.5012 (R_c v_0)^2 \rho_0 \tan \varphi \cdot \left\{ 1 - h [D_0 + C_1 \epsilon_p^\beta + C_2 (\epsilon - \epsilon_p)] \right\} / [K^2 (\tau - c)(1 - hD_0)]. \quad (20)$$

3 现场试验研究

3.1 试验地点概况

试验地点选在平顶山某矿-380 mS₁ 石门, 石门基本情况及待揭 K₁ 煤层赋存情况如表 1 所示。

为进行对比试验, 选取-380 mS₂ 石门作为对比

石门,石门掘进断面 10.554 m^2 ,所揭煤层及煤层赋存情况与 -380 mS_1 石门相同。

表1 K_1 煤层赋存特点

掘进断面/ m^2	煤层瓦斯压力/ MPa	煤层倾角/ $^\circ$	距待揭 K_1 煤层底板垂距/ m	形状	石门埋深/ m	煤层瓦斯含量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	煤层厚度/ m	煤层原始透气性系数/ $[\text{m}^3 \cdot (\text{MPa} \cdot \text{d})^{-1}]$
11.154	2.3	35	11.2	三心拱	532.2	17.35	2.3	0.035 347

3.2 割缝参数的确定

根据该矿水文地质资料查出所需的煤层力学参数,并依据以上计算公式得出,采用高压水射流对 K_1 煤层进行切割所需的泵压为 27 MPa ,且最大割缝半径为 1.36 m 。采用下述布孔方式,如使煤渣顺利排出所需的最低流量为 127 L/min 。根据经验公式,瓦斯抽放有效半径为钻孔半径的 2.5 倍。则钻孔的终孔间距为 6.8 m 《按防治煤与瓦斯突出规定》中关于石门揭煤钻孔的要求,使用传统工艺布置钻孔, -380 mS_2 对比石门共布置钻孔 81 个,预抽钻孔布置如图1所示。根据射流割缝对瓦斯抽放的影响半径,优化 -380 mS_1 石门钻孔布置,共布置钻孔 49 个,其中割缝孔 25 个,采用交叉割缝的方式,钻孔布置如图2所示,方形标记的钻孔采取高压水射流割缝措施。

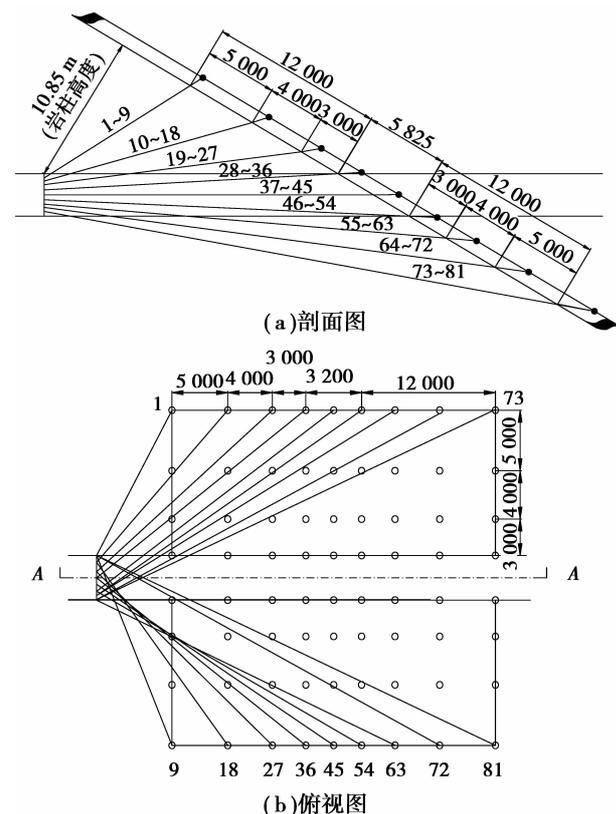


图1 -380 mS_2 石门预抽钻孔布置图

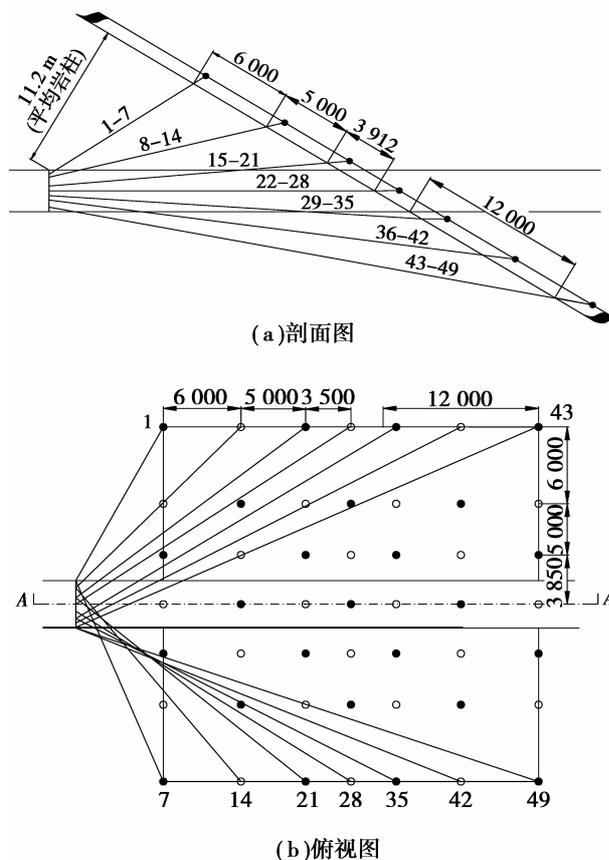


图2 -380 mS_1 石门预抽钻孔布置图

采用高压水射流割缝技术进行石门揭煤后,钻孔数量减少 32 个。相比未割缝的 -380 mS_2 石门钻进工程量减少 38.2% 。 -380 mS_1 石门在封孔后预抽瓦斯,在瓦斯预抽孔控制范围内的瓦斯预抽率为 46.53% ,预抽面积扩大到 $1\ 621.5 \text{ m}^2$ 。在未采用高压水射流割缝技术的 -380 mS_2 石门,瓦斯预抽达标时共抽出瓦斯 6916.7 m^3 ,瓦斯抽采率为 16.25% ,瓦斯预抽面积 789.1 m^3 。可以看出,经过高压脉冲水射流切缝后瓦斯预抽率提高了 2.86 倍,预抽时间缩短了 57.1% ,预抽面积增加了 2.05 倍。

4 结语

1)提出了石门揭煤瓦斯预抽新工艺,结合煤体力学特性及钻孔角度建立了高压水射流割缝泵压及

流量;

2) 基于紊动射流流学得得出高压脉冲水射流冲击破碎煤体时射流断面速度分布, 基于动量守恒定律得出射流作用于煤体的应力分布, 得出射流冲击力随着喷射距离的增大而成指数衰减;

3) 将高压水射流割缝技术应用于平顶山某矿—380 m_S₄ 石门揭煤, 应用表明钻进工程量减少 38.2%, 瓦斯预抽率提高了 2.86 倍, 预抽时间缩短了 57.1%, 预抽面积增加了 2.05 倍。

参考文献:

- [1] 林柏泉, 常建华, 翟成. 我国煤矿安全现状及应当采取的对策分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(5): 42-46.
LIN BAI-QUAN, CHANG JIAN-HUA, ZHAI CHENG. Analysis on coal mine safety situation in china and its countermeasures[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(5): 42-46.
- [2] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [3] 邢昭芳, 阎永利, 李会良. 深孔控制卸压爆破防突机理和效果考察[J]. 煤炭学报, 1991, 16(2): 1-8.
XING ZHAO-FANG, YAN YONG-LI, LI HUI-LIANG. Mechanism and results of prevention of rock burst by controlled pressure relief deep holes [J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(2): 1-8.
- [4] 刘明举, 孔留安, 郝富昌, 等. 水力冲孔技术在严重突出煤层中的应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 451-454.
LIU MING-JU, KONG LIU-AN, HAO FU-CHANG, et al. Application of hydraulic flushing technology in severe outburst coal[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 451-455.
- [5] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [6] 李晓红, 卢义玉, 向文英. 水射流理论及在矿业工程的应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007.
- [7] 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.
- [9] 赵升阳. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [10] 刘勇, 卢义玉, 李晓红, 等. 高压脉冲水射流顶底板钻孔提高煤层瓦斯抽采率的应用研究[J]. 煤炭学报, 2011, 35(7): 1115-1119.
LIU YONG, LU YI-YU, LI XIAO-HONG, et al. Application of drilling in roof or floor with high pulse pressure water jet to improve gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 35(7): 1115-1119.
- [11] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55-58.
LU YI-YU, GE ZHAO-LONG, LI XIAO-HONG, et al. Investigation of a self-excited pulsed water jet for rock cross-cutting to uncover coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 55-58.
- [12] 刘勇. 高压脉冲水射流增透技术在煤矿石门揭煤中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [13] LAN Gray. Reservoir engineering in coal seams: part 1—the physical process of gas storage and movement in coal seams [J]. SPE Reservoir Engineering, 2(1): 28-34.
- [14] ALBERTSON M L, DAI Y B, BOUWER H. Diffusion of submerged jet[J]. Transactions ASCE, 1950, 115: 639-664.
- [15] SHI JI-QUAN, SEVKET DURUCAN. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(4): 291-299.

(编辑 郑洁)