

文章编号: 0253-9993(2008)12-1386-05

# 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究

李晓红<sup>1</sup>, 卢义玉<sup>1</sup>, 赵瑜<sup>1,2</sup>, 康勇<sup>1</sup>, 周东平<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘 要:** 提出了利用高压脉冲水射流钻孔、切缝以提高松软煤层透气性和瓦斯抽采率的新思想。基于岩石动态损伤模型, 理论分析和数值模拟了高压脉冲水射流瞬时动载荷、柔性撞击作用下煤体的动态损伤特性及裂隙场的变化规律。结果表明, 高压脉冲水射流的冲击效应、剥蚀效应以及震动效应等冲击荷载作用可有效破碎煤体, 增大煤体裂隙率和裂隙连通率, 提高煤层透气性。研发出了低透气性煤层中的高压脉冲水射流瓦斯抽采系统, 在重庆某典型高瓦斯低透气性煤矿进行了成功应用, 应用结果表明, 高压脉冲水射流有效提高了煤层透气性, 平均百米钻孔煤层瓦斯抽放量较原工艺提高了 7.8 倍。

**关键词:** 高压脉冲水射流; 低透气性煤层; 高瓦斯矿井; 瓦斯抽放

**中图分类号:** TD712.6 **文献标识码:** A

## Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet

LI Xiao-hong<sup>1</sup>, LU Yi-yu<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>1,2</sup>, KANG Yong<sup>1</sup>, ZHOU Dong-ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering Ministry of Education, Chongqing University 400044, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The new idea of improving the soft seam permeability and gas releasing rate by drilling and slitting the coal seam was presented. Based on the rock dynamic damage model, the dynamic damage properties and the fracture field's dynamic evolution mechanism were studied by theory analyses and numerical simulation on the condition of instantaneous dynamic load and flexible impact of high pressure pulsed water jet. The results show that the impact effect, denudation effect and vibration effect are effective in the coal cracking and permeability improving. The gas drainage system of PWJ has been developed and applied successfully in a typical mine of rich gas and low permeability in Chongqing. The application demonstrates the high pressure pulsed water jet has effectively improved seam permeability with the drainage flux mounting to 7.8 times per 100 m of drainage hole.

**Key words:** high pressure pulsed water jet; low permeability coal seam; rich gas coal mine; gas drainage

我国煤层透气性差, 特别在西南地区, 93.4% 的煤矿可采煤层都是具有煤与瓦斯突出危险的松软煤层, 煤层透气性仅为  $4.738 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 开采过程中容易诱发各种瓦斯灾害事故。如何在高瓦斯、低透气性煤层中扩大煤层瓦斯排放范围以提高煤层瓦斯抽采率, 是矿井瓦斯灾害防治急需解决的关键问题。

提高煤层的透气性是提高松软煤层瓦斯抽采率研究的核心内容, 实际应用中常用卸压区抽放、煤层注

收稿日期: 2007-12-03 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金委专项创新研究群体基金资助项目 (50621403); 国家自然科学基金资助项目 (50604019); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-06-0767)

作者简介: 李晓红 (1959—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师. Tel: 023-65106640, E-mail: xhli@cqu.edu.cn

水、水力压裂、密集钻孔抽放、深孔爆破和酸液处理等方法来提高煤层的透气性。卸压区抽放是利用工作面推进时在靠近工作面煤壁的煤体形成的裂隙场进行瓦斯释放,但由于抽放钻孔和管路距工作面较近,受采动影响大;煤层注气是在煤层有一定透气性的前提下,通过注气置换煤层瓦斯,而高瓦斯煤层其透气性往往较差,很难通过煤层注水提高瓦斯抽放率;水力压裂、密集钻孔抽放、深孔爆破和酸液处理等方法的抽放效果也不太理想,有周期长或工艺要求高的问题存在,影响矿井采掘间的正常连续作业,所以寻找一些有效提高瓦斯预排放效率的方法,显得非常重要<sup>[1-5]</sup>。

高压脉冲水射流是一种高度聚能的水射流,具有强烈的振荡特性,其振荡频率可达 200 ~ 1 000 Hz,脉冲峰值压力是平均压力的 2.5 倍,能以高度聚能的射流束在煤岩上产生冲蚀、空化来实现对煤岩的切割破碎,其穿透煤岩的能力提高了 72%,是一种新型高效的水射流形式,基于低渗透性煤层瓦斯的抽采现状和高压脉冲水射流的特性,笔者提出了利用高压脉冲水射流辅助钻孔和切缝以提高松软煤层透气性和瓦斯抽采率的新思想,结合西南地区典型国有煤矿的瓦斯灾害防治实践,拟开展高压脉冲水射流在低透气性煤层中的动力效应及瓦斯灾害控制技术研究,借助理论分析和数值模拟研究高压脉冲水射流作用下煤体的动态损伤特性及裂隙场的动态演化规律;研发集切缝、冲屑、水动力致裂于一体的低透气性煤层中的高压脉冲水射流瓦斯抽采方法,并在重庆某典型高瓦斯低透气性煤矿进行了现场试验研究。

## 1 高压脉冲水射流提高煤层透气性的机理及数值仿真

煤体既是一种地质材料,也是一种典型的孔隙裂隙介质,大量的、尺度不一、随机分布的孔隙裂隙可以看作煤体的初始损伤。在高压脉冲水射流冲击载荷作用于含有初始损伤的煤体,将产生 2 种效应:①材料刚度的劣化;②应力波能量的耗散。煤体中的不连续界面同时又作为一种“能量屏障”使得裂纹扩展常中止于此,只有当更多的能量提供给介质时才有可能产生新的裂纹。煤体的动态损伤及其演化是一个能量耗散过程,不同冲击载荷下煤体的损伤程度反映了断裂时损伤能量耗散的大小。冲击压缩与拉伸(或卸载)损伤相互影响,二者均与应变率效应有关<sup>[6-7]</sup>。

### 1.1 高压脉冲水射流作用下的煤体动态损伤模型

在体积拉伸状态下,根据岩石冲击损伤耗散能与声波衰减系数的关系、等效体积模量和裂纹密度的关系以及超声波衰减系数与材料中的裂纹密度的关系<sup>[8]</sup>,基于能量平衡原理、逾渗理论和损伤力学理论,可将损伤参量  $D$  表示成声波衰减系数  $\alpha$  与应变率  $\dot{\epsilon}$  的函数,通过  $\alpha$ ,  $\dot{\epsilon}$  的演化来揭示损伤发展规律,岩石的动态损伤采用体积应力准则和最大主应力准则来联合判断,即

$$\begin{cases} D = \frac{8\alpha}{9h} \left( \frac{1 - \bar{\nu}^2}{1 - 2\nu} \right) \left( \frac{\sqrt{20}K_{IC}}{\rho C \dot{\epsilon}} \right)^{2/3} & (\sigma_H > 0), \\ D = 1 & (\sigma_H > 0, \sigma_{\max} \geq \sigma_t), \end{cases}$$

式中,  $h$  为常数;  $\bar{\nu} = \nu \exp\left(-\frac{16}{9}\beta C_d\right)$ , 其中  $\nu$  为泊松比,  $\beta$  为常数,控制材料的卸载和重加载行为,  $C_d$  为裂纹密度;  $K_{IC}$  和  $C$  分别为材料的断裂韧性和纵波波速;  $\rho$  为密度;  $\sigma_H$  为体积应力;  $\sigma_t$  为抗拉强度。

在体积压缩状态下,基于 RDA 模型的应变率效应耦合原则可得损伤演化方程为

$$\begin{cases} \dot{D} = \lambda \dot{W} / (1 - D) & (\sigma_H > 0), \\ D = 1 & (\sigma_H < 0, \sigma_{\max} \geq \sigma_t), \end{cases}$$

式中,  $\lambda$  为损伤敏感参数;  $\dot{W}$  为压缩塑性功率;  $D$  为拉伸损伤,  $\dot{D} = \frac{\partial D}{\partial t}$ 。

在体积压缩状态下,材料的屈服强度服从与应变率有关的 Mohr-Coulomb 准则,即

$$\sigma_s = [\sigma_0(1 + C_1 \ln \dot{\epsilon}_p) + C_2 P](1 - D),$$

式中,  $\sigma_0$  为静态屈服强度;  $C_1$  为应变率影响参数;  $\dot{\epsilon}_p$  为塑性应变率;  $C_2$  为围压常数;  $P$  为压力。

## 1.2 脉冲动态损伤对煤体刚度的劣化

拉伸时的损伤演化将影响材料压缩时的屈服强度, 而压缩时的损伤将影响材料拉伸时的刚度, 冲击损伤引起材料刚度的劣化表现为

$$\sigma_{ij} = 3K(1 - D)\varepsilon\delta_{ij} + 2G(1 - D)e_{ij},$$

式中,  $\sigma_{ij}$  为应力张量;  $K$  和  $G$  分别为未损伤岩石的体积模量和剪切模量;  $\delta_{ij}$  为单位张量;  $e_{ij}$  为应变偏量张量.

## 1.3 冲击波间断与人工黏性控制

高速冲击接触在结构内部产生应力波, 造成压力、密度、加速度和能量跳跃, 给动力学微分方程组的求解带来困难. 此外, 在计算中, 突加载荷引起的强间断及其波传播, 会导致数值振荡、计算失稳. 处理此类问题较为常用的方法是在压力项中加入人工体积黏性项, 使应力波的强间断模糊在相当狭窄区域内急剧变化, 但数学上却是光滑连续变化的, 这样使得问题的求解难度降低.

采用人工黏性消除冲击波间断, 即

$$q = \begin{cases} \rho l \left| \dot{\varepsilon}_{kk} \right| (Q_1 l \left| \dot{\varepsilon}_{kk} \right| + Q_2 c) & (\dot{\varepsilon}_{kk} < 0), \\ 0 & (\dot{\varepsilon}_{kk} > 0), \end{cases}$$

式中,  $l$  为单元体积的立方根;  $\left| \dot{\varepsilon}_{kk} \right|$  为应变张量; 量纲为 1 的常数  $Q_1 = 1.50$ ,  $Q_2 = 0.06$ ;  $c$  为材料声速. 根据稳定性条件确定时间步长.

## 1.4 高压脉冲水射流作用下的煤体裂隙场的动态演化特性

基于上述动态损伤模型, 对高压脉冲水射流切割煤体进行数值仿真, 仿真结果如图 1 所示, 高压脉冲水射流作用下切缝通常经历 3 种状态的演变: ① 钻孔切缝前, 煤体中含有以断续的非贯通节理裂隙为主的分布缺陷, 即“初始损伤”; ② 开始切缝时, 切缝周围应力逐渐释放, 应力状态重新分布, 导致切缝周围围岩主应力差增大, 引起某些方向的裂纹开裂、扩展, 煤体损伤逐渐累积并派生出新的拉剪裂隙, 应力峰值很高的短脉冲可形成短裂隙, 而能量相同应力峰值较低的长脉冲, 却能形成比较长的裂隙; ③ 在持续的脉冲作用下, 切缝周围扩展裂纹逐渐发展, 部分初始裂隙相互连接, 形成贯通裂隙.



图 1 高压脉冲水射流切缝过程中煤体裂隙场演化

Fig. 1 Evolution of coal fracture field under pulsed water jets

## 2 低透气性煤层中的高压脉冲水射流瓦斯抽放试验

### 2.1 高压脉冲水射流低透气性煤层瓦斯抽采系统

自行研制的基于高压脉冲水射流的低透气性煤层瓦斯抽采系统由钻机、高压密封钻杆、高压旋转密封输水器、多功能钻头和矿用高压水泵等集成, 多功能钻头安装了一系列自激振荡喷嘴, 抽采系统具体的连接如图 2 所示.

首先开启高压泵, 在煤层内钻进深长孔, 在钻孔过程中, 由钻头上轴向振荡喷嘴产生的高压脉冲水射流切

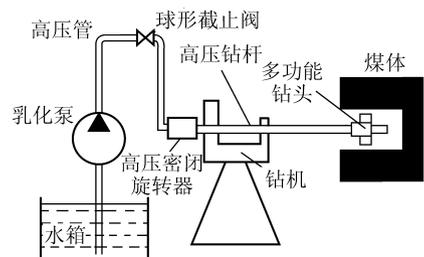


图 2 装置系统

Fig. 2 Device system

割和破碎煤体, 钻进导向孔. 钻头上的切齿进一步将煤渣研磨成细小的煤粒并将导向孔扩大; 由于切齿没有直接切割破碎煤体以及水流的快速冷却, 切齿的磨损大大降低. 细小的煤粒随孔内回水快速排出至钻孔外. 当钻孔至规定深度后开始回退, 轴向振荡喷嘴关闭, 径向振荡喷嘴开启, 升高泵压进行径向切槽. 在沿钻孔轴向切缝时, 钻杆不旋转, 只是沿轴向往复缓慢推拉钻杆, 切出与轴向平行的人工缝隙. 而沿径向切缝时, 钻杆不进行轴向运动, 但进行缓慢旋转, 这样可以切出圆盘状的人工缝隙.

## 2.2 室内切割破碎煤体试验

实验室切割煤样是从重庆某煤矿现场采集的. 将采集的煤块放入木箱内, 然后用水泥进行包裹以防止其碎裂. 煤块的坚固系数为 0.8, 高压喷嘴以 10 mm/s 的速度移动. 在试验中采取调节靶距和泵压来研究切割效果, 典型的切割数据如图 3, 4 所示 ( $S$  为靶距;  $d_1$  为喷嘴直径;  $V_v = V/t$ , 表示冲蚀体积率, 即单位时间的冲蚀体积).

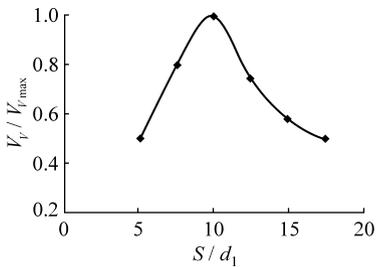


图 3 冲蚀体积率与靶距的关系

Fig. 3 Volume removal rate vs stand off distance

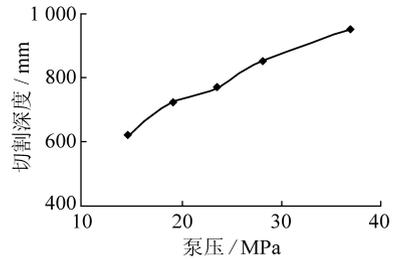


图 4 切割深度和泵压之间的关系

Fig. 4 Cutting length vs pump pressure

从图 3 可以看出, 随着靶距的增加, 冲蚀体积率逐渐增加, 靶距增加到  $10d_1$  时, 冲蚀体积率达到最大值, 后随着靶距的增加, 冲蚀体积率开始下滑, 因此本次试验确定  $10d_1$  为最优靶距. 另一方面, 从模拟试验结果 (图 4) 来看, 当水压提高到 20 MPa 以上时, 切割深度便达到 750 mm 以上, 能够保证提高煤层透气性.

## 2.3 现场试验应用

重庆某煤矿瓦斯等级鉴定为煤与瓦斯突出矿井, 本次多高压脉冲水射流钻进地点选择在该煤矿 N2709 工作面. N2709 轨道巷位于北二区 8 号层轨道巷西端, N2709 措施巷位于羊叉滩背斜西翼, 8 号煤层为单斜煤层, 倾向为北偏西  $10^\circ$ , 倾角为  $4 \sim 8^\circ$ , 煤层厚度稳定, 平均煤厚 2.70 m. 煤层的瓦斯含量为  $17.04 \text{ m}^3/\text{t}$ , 煤层的透气性系数为  $0.028 \text{ m}^2 / (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ , 属于难抽煤层; 该煤矿的 N2709 轨道巷利用高压脉冲水射流辅助钻孔 5 个, 分别记为  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$ , 为了与原工艺钻孔技术相比较, 在轨道巷的同一侧用原工艺钻了 5 个孔, 分别记为  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$ . 应用结果如图 5, 6 所示, 采用高压脉冲水射流钻进时, 钻进平均速度为  $1.70 \text{ m}/\text{min}$ , 是采用原工艺钻进的 3 倍; 平均百米钻孔瓦斯的抽放量为  $2.8564 \text{ m}^3/\text{min}$ , 是采用原工艺抽放的 8.8 倍.

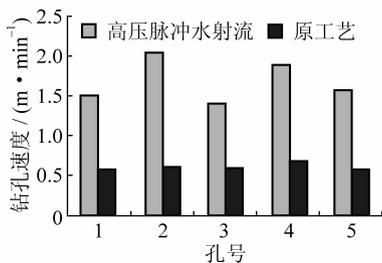


图 5 钻进速度对比

Fig. 5 Contrast of drilling speed

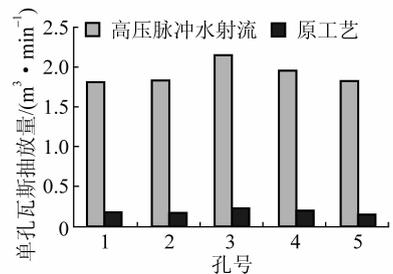


图 6 平均百米钻孔瓦斯抽放量对比

Fig. 6 Contrast of average gas extraction

### 3 结 论

(1) 高压脉冲水射流的脉冲作用较大范围地改变了煤体裂隙场状态, 在脉冲应力同煤的结构相互作用时, 煤中不同尺寸级裂隙得以扩展, 提高了钻孔附近煤层的透气能力, 释放出瓦斯。

(2) 高压脉冲水射流瓦斯抽放及灾害控制技术已成功地应用于重庆某高瓦斯低渗透性矿井, 工效提高了 3 倍多, 百米煤层钻孔瓦斯抽放量提高了 7.8 倍, 为高瓦斯煤矿的瓦斯抽采及灾害控制开辟了新途径。

#### 参考文献:

- [1] 王 婕, 林柏泉, 茹阿鹏. 割缝排放低透气性煤层瓦斯过程的数值试验 [J]. 煤矿安全, 2005, 36 (8): 4-7.  
Wang Jie, Lin Boquan, Ru Apeng. Numerical test of gas drainage in low air permeability coal seam by rifting slots [J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36 (8): 4-7.
- [2] 张英华, 倪 文, 尹根成, 等. 穿层孔水压爆破法提高煤层透气性的研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (3): 298-302.  
Zhang Yinghua, Ni Wen, Yin Gencheng, et al. Study on improving the penetrability of coal seam with the water pressure blasting in the through beds hole [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29 (3): 298-302.
- [3] 涂兴子, 徐守仁, 吕庆刚. 几种煤矿井下瓦斯抽放方法 [J]. 煤矿安全, 2003, 12 (3): 12-15.  
Tu Xingzi, Xu Shouren, Lü Qinggang. Several ways of gas drainage in coal mines [J]. Safety in Coal Mines, 2003, 12 (3): 12-15.
- [4] 包剑影, 苏 隧, 李贵贤, 等. 阳泉煤矿瓦斯治理技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 20-27.  
Bao Jianying, Su Sui, Li Guixian, et al. The technology of gas control in Yangquan Coal Mine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996: 20-27.
- [5] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 265-266.  
Zhang Tiegang. Comprehensive treatment technology of coal mine gas [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001: 265-266.
- [6] 高文学, 刘运通. 岩石动态损伤的数值模拟 [J]. 北京工业大学学报, 2000, 26 (6): 5-10.  
Gao Wenxue, Liu Yuntong. Numerical simulations on dynamic damage in brittle rocks [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000, 26 (6): 5-10.
- [7] 倪红坚, 王瑞和, 白玉湖. 高压水射流破碎岩石的有限元分析 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2002, 26 (3): 37-40.  
Ni Hongjian, Wang Ruihe, Bai Yuhu. Finite element method for analyzing high-pressure water jet breaking rock [J]. Journal of the University of Petroleum (Natural Science Edition), 2002, 26 (3): 37-40.
- [8] 王肖钧. 高速碰撞中的有限元方法及其应用 [J]. 爆炸与冲击, 1993, 13 (4): 296-304.  
Wang Xiaojun. Finite element methods and its use in hypervelocity impact [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13 (4): 296-304.