

文章编号:1000-582X(2010)07-086-05

## 磨料射流割缝技术防突机理及应用

周东平, 卢义玉, 康 勇, 夏彬伟

(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)

**摘 要:**为改善李子坪南二井 3102 北机巷掘进碛头瓦斯预抽时间长、掘进速度慢的现状,通过对磨料射流使煤(岩)体损伤模型及防突机理的分析,研究了磨料射流切割破碎煤(岩)体的过程;利用磨料水射流切割煤矸石的实验研究,确定了磨料射流切割煤矸石的各种参数,并研制了一套新型的适合于现场应用的磨料水射流割缝装置。现场试验表明:磨料射流能够切穿单轴抗压强度为 62 MPa、60~80 mm 厚度的煤层夹矸,在煤层中形成缝槽,增大了瓦斯涌出自由面,促使煤体大范围快速卸压,增强煤层透气性,首月内瓦斯单孔平均抽采量提高了 2.83 倍。

**关键词:**磨料水射流;割缝;透气性;掘进速度

**中图分类号:**TD 821

**文献标志码:**A

## Mechanism and application of protection against outburst for abrasive water jet slotting technology

ZHOU Dong-ping, LU Yi-yu, KANG Yong, Xia Bin-wei

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Hazard Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Aiming at the status quote of long time for methane extraction and slow speed for laneway excavating in coal seams of Liziya south 2JHJ well, abrasive water jet slotting technology is adopted to improve the methane desorption and increase excavating speed in semi-coal laneway. Through analyzing damage model and protection against outburst mechanism, the process of Coal-Rock Mass being cut and fractured is studied. Through lab test on abrasive water jet cutting coal-bed gangue, a new abrasive water jet cutting device is successfully designed and made and all parameters are determined. It is showed that abrasive water jet can cut through a coal-bed gangue with thickness 60~80 mm and uniaxial compressive strength 62 MPa. After cutting coal seams by abrasive water jet, the surface area for methane is enlarged and then coal seams pressure fell rapidly. Therefore the permeability and desorption of coal seams are greatly increased. The results are as follows: the average productivity of single-hole was enhanced by 2.83 times.

**Key words:** abrasive water jet; slotting; permeability; excavating speed

我国的煤炭赋存地质条件复杂,主要依靠地下开采,随着开采深度的增加,煤层瓦斯含量逐渐

增加<sup>[1-3]</sup>,煤层瓦斯压力增大,突出的危险性增高,防突难度越来越大。国内煤与突出多数发生在煤

收稿日期:2010-01-10

基金项目:国家自然科学基金委员会专项创新群体基金资助项目(50621403);国家自然科学基金资助项目(50604019)

作者简介:周东平(1978-),男,重庆大学博士研究生,主要从事高压水射流及瓦斯治理方向的研究。

卢义玉(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)luyiyu@cqu.edu.cn。

巷掘进工作面, 占有突出次数的 66.2%, 平均突出强度为 66.9 t/次, 煤巷掘进过程中频繁的突出成为危及职工生命安全的主要原因<sup>[4-5]</sup>。李子垭南二井位于华蓥山煤田中段, 属于典型的煤与瓦斯突出矿井。自建井以来, 仅在 3102 机轨巷的石门揭煤和煤巷掘进中发生煤与瓦斯突出 8 次, 最大突出煤量 820 t, 最大突出瓦斯量 16 859 m<sup>3</sup>。分析李子垭南二井 3102 机轨巷中煤与瓦斯突出的主要原因: 矿井主采煤层为 K<sub>1</sub> 煤层, 3102 机轨巷 K<sub>1</sub> 煤层平均厚度为 2.18 m, 中间夹矸, 且矸石强度较大; 矸石下部煤层较硬, 瓦斯含量和压力较低, 超前抽采钻孔容易形成, 但瓦斯抽采量较小; 矸石上部煤层较软, 瓦斯含量和压力较大, 打超前抽采钻孔时容易卡钻、喷孔, 甚至引起煤与瓦斯突出, 抽采孔很难形成。为了切穿李子垭南二井 3102 机轨巷软硬煤层中间矸石, 有效治理李子垭南二井 3102 北机巷掘进头部的煤与瓦斯突出问题, 作者研究了高压

磨料射流割缝技术, 并在李子垭南二井 3102 北机巷掘进头得到应用, 达到改善瓦斯抽采现状、提高煤巷掘进速度的目的。

李子垭南二井 3102 北机巷掘进头属于典型煤与瓦斯突出掘进头, 本次试验的成果技术可以在类似的煤矿掘进中推广应用。

### 1 地质概况及割缝孔布置

李子垭南二井 3102 北机巷掘进头巷道内主采煤层为 K<sub>1</sub> 煤层, 煤层倾角 44°~48°。中间夹石为黑色泥岩、褐灰色粘土岩以及炭质泥岩, 夹矸厚 60~80 mm。矸石上部煤层松软, 呈粉末状及片状, 下部煤层坚硬易碎, 多呈块状。表 1 为 K<sub>1</sub> 煤层瓦斯赋存特征。3102 北机巷为 K<sub>1</sub> 煤层的掘进工作面, 巷道断面形状为斜顶梯形, 巷道净宽 3.6 m, 矮帮高 1.8 m, 高帮以全部揭露煤层为准, 高 3.26 m。净断面积 9.5 m<sup>2</sup>, 如图 1 所示。

表 1 3102 北机巷 K<sub>1</sub> 煤层煤样化验结果

测定地点	吸附常数		水分 /%	灰分 /%	空隙体积 K/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	瓦斯压力 /MPa	瓦斯含量 x/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )
	a/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	b/MPa <sup>-1</sup>					
K <sub>1</sub> 煤层软分层	24.02	0.844	0.005	0.007 2	0.029 4	3.2	18.22

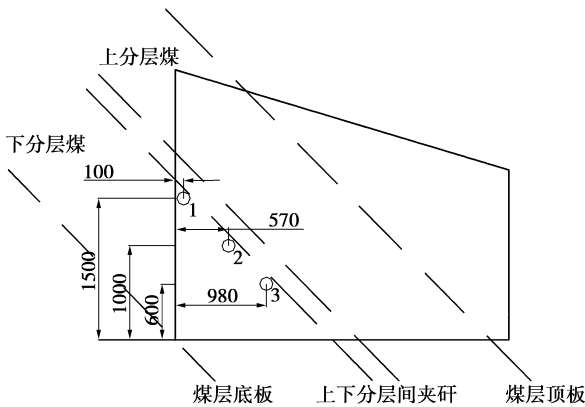


图 1 割缝孔端面布置图

### 2 岩(煤)体损伤模型及防突机理分析

磨料水射流是在高速流动的水流中加入固体微粒(磨料)而形成的。通过磨料发生装置使磨料获得能量, 磨料粒子本身有一定的质量和硬度, 因此磨料射流具有良好的磨削、穿透、冲蚀的能力。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。在磨料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>。

#### 2.1 磨料射流作用下岩(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>[8-9]</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

$$D = \left. \begin{aligned} & \frac{8\alpha}{9h} \left[ \frac{1-v^2}{1-2\nu} \right] \left[ \frac{\sqrt{20}K_{IC}}{\rho C \dot{\epsilon}'} \right]^{\frac{2}{3}} (\sigma_H > 0) \\ & D = 1 \quad (\sigma_H > 0, \sigma_{max} \geq \sigma_c) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中,  $h$  为常数;  $\bar{v} = v \exp \left[ -\frac{16}{9} \beta C_d \right]$ , 其中  $v$  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

$$\left. \begin{aligned} \dot{D} &= \frac{\lambda \dot{W}}{(1-D)}, \\ D &= 1 \quad (\sigma_H < 0, \sigma_{\max} \geq \sigma_t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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,  $\dot{D} = \partial D / \partial t$ 。

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

$$\sigma_s = [\sigma_0 (1 + C_1 \ln \dot{\epsilon}_p) + C_2 P] (1 - D), \quad (3)$$

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;  $P$  为空隙压力。

## 2.2 磨料射流割缝防突机理

磨料射流割缝技术属于高压水射流割缝技术, 具有高压水射流在煤体中割缝的一般特征<sup>[9-11]</sup>。中该技术的特殊之处是在临近软分层的硬煤或岩石层中先形成一个钻孔, 然后在钻孔内利用高压磨料射流装置对钻孔周围的煤(岩)体进行径向割缝, 在钻孔周围形成一个具有一定深度的盘状缝槽, 该盘状缝槽穿越煤层夹矸达到软分层, 并在软分层中形成较深缝槽。采用高压水射流割缝措施后, 增加了煤体暴露面积, 达到煤层内自我解放, 为煤层内部卸压、瓦斯释放和流动创造了良好的条件。其结果是: 首先缝槽的出现增加了煤体的瓦斯涌出面面积, 且缝槽周围煤体在一定范围内较充分卸压, 增大了煤层卸压区的宽度和透气性; 其次, 割缝在煤体中形成盘状缝槽空间, 这一缝槽可以使周围煤体发生激烈的位移和膨胀, 增加了煤体中的裂隙, 改善了煤层中的瓦斯流动状态, 为瓦斯抽采提供了有利条件, 改变了煤体的原始应力和裂隙状况, 煤体和围岩中的应力紧张状态得到一定程度缓和, 达到突出潜能的大量释放。煤层的超前高压水射流割缝所形成很深的卸压、排瓦斯钻孔缝槽能使煤层的地应力和瓦斯压力重新分布, 从而使煤体中的高应力变形区和高瓦斯压力区得以消失。这样, 既削弱或消除了突出的动力, 又大幅改变了突出煤层的物理力学参数。因此, 高压水射流割缝技术既可以增大透气性和提高煤层瓦斯抽采的能力, 又可以起到防止突出的作用。

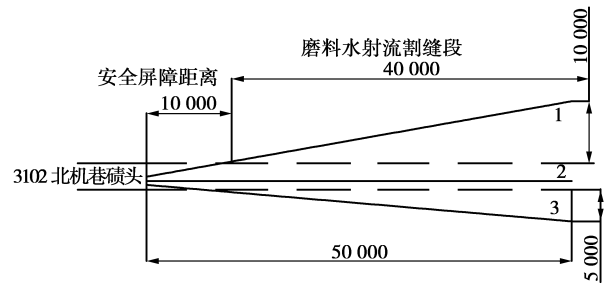


图 2 割缝孔剖面布置图

李子埡南二井 3102 北机巷掘进碛头煤层属突出危险区, 在掘进工作面硬煤层中钻超前抽放钻孔<sup>[12-13]</sup>, 待形成抽采孔后利用高压磨料射流对抽采孔进行径向割缝, 切穿中间夹石后在上部软分层中形成切槽, 达到对软分层的卸压增透的目的。割缝孔布置如图 1、图 2 所示, 抽采孔控制范围为巷道顶板 10 m, 底板 5 m。

## 3 岩石实验室与现场试验研究

### 3.1 煤岩巷道岩石的单轴压缩试验

实验岩样为李子埡南二井 3102 北机巷掘进碛头煤层夹矸(泥岩), 将所取岩芯加工成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  圆柱体试件。实验采用 MTS815 岩石力学测试系统, 采用位移控制, 加载速度为  $0.1 \text{ mm/min}$ 。实验得到了轴向应力与轴向应变、横向应变、体应变的曲线图 3 所示。轴向应力与轴向应变的全过程曲线可以分为 4 个阶段<sup>[14-15]</sup>, 即: 初始压密、弹性变形、应变硬化、应变软化阶段。第 1 阶段轴向应力-应变曲线微向上弯曲, 产生的原因是岩石试件中的微裂隙和节理面被压密实的结果; 第 2 阶段曲线近似于直线; 第 3 阶段岩石内部开始产生微裂隙, 随加载荷载的增加, 试件内部的裂隙扩展最终汇合贯通, 使试件破坏, 单轴抗压强度为  $62 \text{ MPa}$ , 在这个阶段内, 体应变有一个最大值, 这个最大值对应的应力就是屈服应力; 第 4 阶段试件破坏后, 试件仍然有一定的承载能力。

### 3.2 磨料射流切割煤岩巷道岩石的实验室试验

为了确定磨料射流的切割性能参数, 实验室对磨料射流切割夹矸(泥岩)进行了实验研究, 实验测试系统由柱塞泵、磨料罐、高压旋转输水器、多功能钻头组成, 如图 4 所示为磨料射流切割装置连接图。切割头连接在钻头后面, 其径向只有一个喷嘴直径为  $2 \text{ mm}$ , 旋转速度  $60 \text{ r/min}$ , 磨料浓度  $5\%$ , 系统压力  $25 \sim 30 \text{ MPa}$ , 额定流量  $120 \text{ L/min}$ 。实验中磨料采用  $70 \sim 110$  目的石英砂。

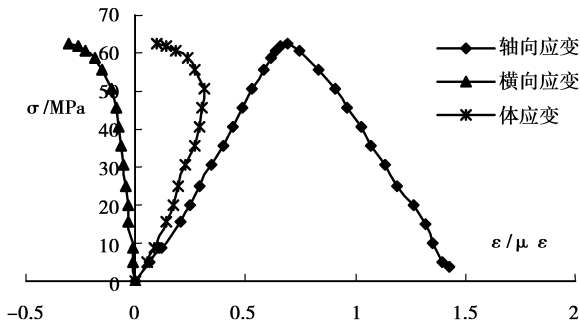
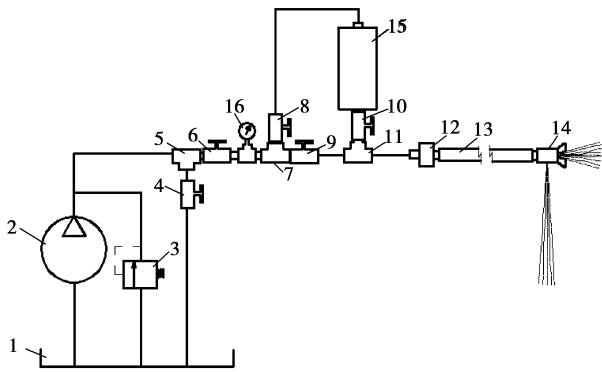


图 3 泥岩在单轴压缩下应力与轴向、横向、体应变关系曲线



1 为水箱; 2 为柱塞泵; 3 为溢流阀; 4, 6, 8, 9, 10 为高压球阀; 5, 7, 11 为三通; 12 为高压旋转输水器; 13 为钻杆; 14 为多功能钻头; 15 为磨料罐; 16 为压力表。

图 4 磨料射流切割装置系统

为了模拟现场切割矸石的应力状态,实验室用混凝土固定矸石试件,只留一个暴露面。在不同的泵压条件下,对该矸石(泥岩)旋转切割 10 分钟,对切割深度进行了测试,图 5 为磨料射流切割压力与切割深度关系图。

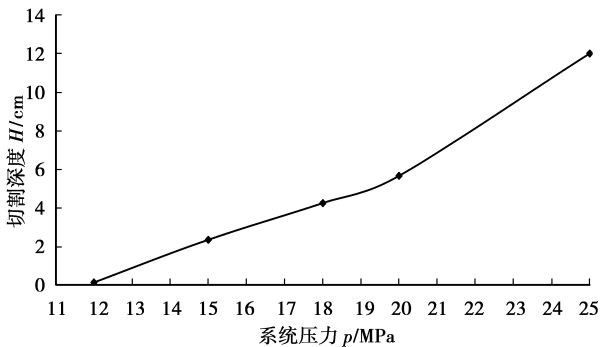


图 5 系统压力  $p$  与切割深度  $H$  的关系

根据实验室对矸石(泥岩)采用磨料射流切割实验的测试表明(现场采用与实验室相同的磨料切割系统),该套磨料切割系统当压力为 25~28 MPa、采

用 70~110 目石英砂做磨料、浓度为 5%、切割时间 10 min 的情况下能够切穿李子垭南二井 3102 北机巷掘进头  $K_1$  煤层中的 12 cm 夹矸。

### 3.3 磨料射流切割煤岩巷道现场试验

1)形成超前抽采孔。在 3102 北机巷掘进头工作面钻制直径为 75 mm、垂直深度 50 m 的预抽钻孔,选择 3 个作为磨料水射流割缝试验孔。这 3 个钻孔布置在硬分层中,见图 1。

2)高压纯水射流冲孔。该次试验径向采用单喷嘴旋转割缝,首先利用纯水射流清洗管路,保证管路畅通。煤矿现场额定泵压 31.5 MPa,去除管路压力损失后到达水尾的压力在 25~28 MPa 之间。待孔口有大量返水时打开磨料开始切割。

3)高压磨料射流割缝实验。打开磨料球阀,控制磨料浓度为 5%左右,割缝压力为 25~28 MPa,进行旋转割缝,割缝从孔底开始,每条缝槽切割 10 min 左右,待孔口返渣变小时停止切割,退出两根钻杆约 1.5 m 开始下一个缝槽的切割,在距头 10 m 范围不进行切割,作为保护煤柱。单孔割缝数目在 25~30 个之间,单孔割缝实验时间 6~8 个小时,单孔实验须在一次操作中完成以防塌空丢失钻杆。

4)割缝过程的现象。大量煤粉从孔内排出,单孔大约有 500 kg 煤渣涌出,有喷孔现象,没有出现塌孔。

5)割缝能力。现场割缝试验表明,高压磨料射流割缝能力比纯水射流割缝提高很多,在同等压力条件下纯水无法割穿的夹矸,磨料射流能够轻易割穿。

### 3.4 应用结果分析

切缝工况压力为 25~28 MPa,煤层切缝半径约计为 1.5 m,每个圆盘形缝槽的切割时间为 15~20 min。在切缝过程中,利用悬挂式瓦斯检测仪对孔口周围的瓦斯施时检测,配有专职瓦斯检测员利用 WTC 型突出预测仪进行钻屑解吸指标( $K_1$ )的测定,其  $K_1$ (单位: $\text{mL}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})$ )值由措施前的 0.8 变为 0.3 小于临界值 0.5。

切缝完成后立即封孔抽采,对切缝孔和未切缝孔分别集中起来连入抽采网络中并分别考察单孔瓦斯浓度平均值,如图 5 所示。待抽采一个月后,检测孔指标已经达标。其结果表明:利用磨料射流割缝后,首月瓦斯单孔抽放量提高了 2.83 倍。高压磨料水射流割缝技术的使用既解决了煤巷软分层难形成抽采孔的重大难题,又解决了如何快速抽采瓦斯,进而提高煤巷掘进速度的重大难题。

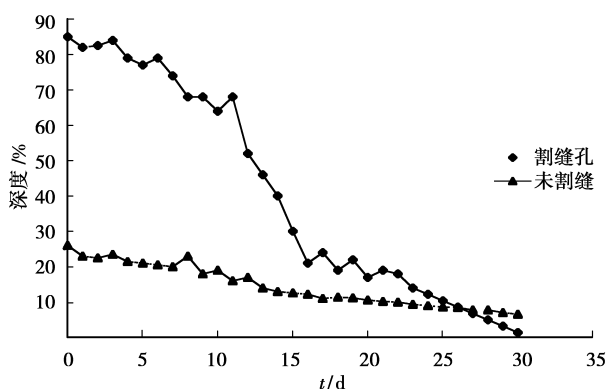


图6 割缝孔和未割缝孔的单孔瓦斯浓度对比

## 4 结 论

1) 25~28 MPa 的泵压、5% 浓度的 70~110 目石英砂作磨料、经过 10 分钟左右的切割时间, 磨料水射流能够割穿厚度为 12 cm 单轴抗压强度在 62 MPa 左右的泥岩矸石。

2) 高压磨料射流具有一般高压水射流割缝技术的一般特征, 能够增加煤体瓦斯涌出面积, 达到煤层内自我解放, 为煤层内部卸压、瓦斯释放和流动创造了良好的条件。李子垭现场试验中, 首月瓦斯单孔抽放量提高了 2.83 倍。

### 参考文献:

- [1] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [2] 于不凡. 煤和瓦斯的突出机理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
- [3] 胡殿明, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存规律及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [4] 林柏泉, 崔恒信. 矿井瓦斯防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [5] 齐黎明, 林柏泉, 支晓伟. 上山掘进时卸压区应力及防突长度分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005(3): 299-302.  
QI LI-MING, LIN BO-QUAN, ZHI XIAO-WEI. Analysis on distressed zone's stress and length of preventing outburst in raising tunnelling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005(3): 299-302.
- [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 WEN-XUE, LIU YUN-TONG. 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 HONG-JIAN, WANG RUI-HE, BAI YU-HU. 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 XIAO-JUN. Finite element methods and its use in hypervelocity impact [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(4): 296-304.

[9] 李晓红, 卢义玉, 赵瑜, 等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1387-1390.

LI XIAO-HONG, LU YI-YU, ZHAO YU, et al. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1387-1390.

[10] 杨林, 唐川林, 李晓红, 等. 自激振荡脉冲射流装置的频率特性[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(1): 43-45.

YANG LIN, TANG CHUAN-LIN, LI XIAO-HONG, et al. Frequency characteristic of pulsation-jet device of self-excited oscillation [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(1): 43-45.

[11] 李晓红, 杨林, 王建生, 等. 自激振荡脉冲射流装置的固有频率特性[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 641-644.

LI XIAO-HONG, YANG LIN, WANG JIAN-SHENG, et al. The natural frequency characteristic of the self-excited oscillation pulsed water jet device [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 641-644.

[12] 卢平, 李平, 周德永, 等. 石门揭煤防突抽放瓦斯钻孔合理布置参数的研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 242-248.

LU PING, LI PING, ZHOU DE-YONG, et al. Study on proper layout parameters of the gas drainage drills of outburst prevention in rock cross cut coal uncovering [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 242-248.

[13] 中华人民共和国煤炭工业部. 防治煤与瓦斯突出规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.

[14] 吴德伦, 黄质宏, 赵明阶, 等. 岩石力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002, 15-60.

[15] 鲜学福. 岩石蠕变断裂失稳研究中几个问题的探讨[R]. 重庆: [s. n.], 2003.

(编辑 赵 静)