

文章编号: 0253-9993(2013)12-2153-05

煤层水力割缝系统性能瞬变特性研究

袁 波^{1,3} 康 勇^{1,3} 李晓红^{1,3} 王晓川^{1,3} 王泽峰^{2,3}

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉大学 水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 煤层水力割缝预抽采技术是防治煤与瓦斯突出这种矿井主要动力灾害的有效手段, 但水力割缝系统在工况转换过程中存在瞬变现象, 极易诱发煤与瓦斯突出。针对水力割缝系统在工况转换瞬变中瞬变压力和流量控制的问题, 采用实验测试方法对自主研制设计的水力割缝关键装置不同喷嘴和阀芯结构参数瞬变压力和流量进行了系统测试, 分析了割缝关键装置喷嘴与阀芯结构参数对瞬变压力和流量的影响规律。试验结果表明: 喷嘴数量与参数对瞬变压力不产生影响, 瞬变压力均为 1.1 MPa, 净流量呈现线性变化规律, 能够利用线性变化预测瞬变压力, 预测最大误差 9.3%; 割缝关键装置阀芯不同参数对瞬变压力影响不同, 流量控制主因数为上孔口直径, 试验瞬变压力不随阀芯面积改变而改变。

关键词: 水力割缝; 瞬变压力; 瞬变流量

中图分类号: TD434 文献标志码: A

Experimental study on transient characteristics of hydraulic cutting seams system in coal seam

YUAN Bo^{1,3}, KANG Yong^{1,3}, LI Xiao-hong^{1,3}, WANG Xiao-chuan^{1,3}, WANG Ze-feng^{2,3}

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Key Laboratory of Hubei Province For Water Jet Theory & New Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Hydraulic cutting seams pre-extracted technique used in coal seam is an effective means to prevent and control coal and methane outburst which is the dominating dynamic disaster in coal mine. However, transient process appeared in transition of drilling to cutting in hydraulic cutting seams system may sensitively cause coal and methane outburst occurrence. Depending on transient process pressure and discharge control problem of hydraulic cutting seams system, experimental methodology was employed to systematically investigate transient characteristics of independent designed and manufactured key device of hydraulic cutting seams and the key structure influence of cutting device was analyzed. Experimental results show that there is little effect on transient pressure by diameter and number of nozzle and is stabilized on about 1.1 MPa, linear trend of net discharge which could predict transient pressure is fitted 9.3% is the prediction maximum errors; various kinds of valve element parameters impact transient pressure are different and not uniform, parameter of up-orifice diameter is the primary discharge manipulative constant while transient pressure do not vary with valve element area.

Key words: hydraulic cutting seams; transient pressure; transient discharge

煤与瓦斯突出是矿井动力灾害的主要来源, 对瓦斯进行有效抽采不仅能够防止煤与瓦斯事故发生, 提高煤矿生产安全, 而且能够有效利用资源, 改善生态环境。然而, 如何对瓦斯进行有效抽采, 特别是低渗

收稿日期: 2013-06-27 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB239203); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0424); 湖北省杰出青年基金资助项目(2012FFA020)

作者简介: 袁波(1985—), 男, 贵州遵义人, 博士研究生。Tel: 027-68774906, E-mail: canvil100@126.com。通讯作者: 康勇(1978—), 男, 宁夏西吉人, 副教授。Tel: 027-68774906, E-mail: kangyong@whu.edu.cn

煤层的瓦斯抽采是一个国际公认技术难题。国内外专家学者们先后试验研究了密集钻孔抽采、水压致裂抽采、水力冲孔抽采等技术方法^[1-4],但收效甚微。水力割缝技术是通过水射流在煤层内部形成一定空间扁平缝槽,使煤层内部卸压的同时在缝槽附近形成连通裂缝,从而有效提高瓦斯运移速率,达到煤层瓦斯抽采的目的。最早对水力割缝技术进行尝试性现场试验是湖南煤炭研究所在鹤壁四矿进行的^[5],试验表明能够提高瓦斯抽放速度、增加瓦斯抽放量,在鹤壁六矿、红卫煤矿等进行了试验性研究均表明抽放效果良好^[6-7];进入新世纪,在国际能源危机和煤层气(瓦斯)作为常规能源的背景下,瓦斯预抽采技术得到快速发展,段康廉等^[8]实验研究了特大煤样水力割缝条件下瓦斯渗透率,结果发现割缝能提高瓦斯排量,当埋深为 400 m 时割缝较钻孔的瓦斯排量提高了 25%;唐建新等^[9]设计了应用于抽放钻孔中切割煤体的高压水射流装置并应用与现场试验,结果表明采用高压水射流切缝后钻孔预抽瓦斯抽放率提高了 18.8%,抽放时间缩短 90% 以上;林柏泉等^[10-12]分析了煤层巷道煤与瓦斯突出机理并提出整体卸压概念并在工作面进行割缝应用,结果表明割缝能够使钻孔之间相互沟通,煤体整体得到充分卸压,瓦斯和应力得到释放,能够应用于煤层瓦斯防突;李晓红等^[13-16]提出利用高压脉冲水射流钻孔、切缝形成网格化以提高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并模拟了动载荷、柔性撞击作用下煤体动态损伤特性及裂隙场演化规律,结果表明高压水射流冲击效应、剥蚀效应及振动效应等动态作用下可有效破碎煤体,增大煤体裂隙率和裂隙连通率,提高煤层透气性,应用于现场结果表明平均百米钻孔煤层瓦斯抽放量较原工艺提高了 7.8 倍,团队设计形成了水力割缝技术成套系统^[17-19]并在重庆、贵州、淮南等地区推广应用,该成套系统主要包括供水系统、钻进系统、旋转密封系统及割缝系统。

水力割缝技术预抽效果和安全性关键是水力割缝系统的造缝能力和性能,而造缝能力和安全性的主要影响因素为割缝关键装置,合理设计割缝关键装置技术参数能够在钻孔过程中提供足够流量保证钻进清洗和煤渣快速运移脱离现场,同时能够控制压力转变保证系统安全运行和防止突出危险,在造缝中高效割缝,因此有必要对系统瞬变过程进行研究与优化。图 1 所示为自主研制的水力割缝技术关键装置示意图,在钻孔过程中流体从 A、B 通道流出提供足够流量,在割缝过程中流体经 A 通道流入喷嘴形成径向高速水射流产生缝隙。然而,在从 A、B 通道运

行转换到 A 通道运行过程中结构发生改变,系统失稳,流动将从一个稳定工作状态转变到另一个稳定工作状态,由于柱塞泵的存在压力发生瞬变,因此这个转变过程即称为瞬变现象,根据瞬变流理论^[20]系统压力急剧上升,高压形成高速水流瞬间集聚冲击煤层,瞬间强外负荷作用于煤层将破坏煤层力学平衡,从而极易导致瓦斯大量涌出和煤体大量塌落,诱发瓦斯灾害和导致抱钻的危险。针对水力割缝系统在工况转换过程中瞬变易导致系统不稳定及突出和抱钻危险的问题,文献[21]利用流体力学基本理论和试验方法对水力割缝装备压力瞬变后特性进行了研究,研究表明射流瞬变后压力正比于瞬变压力,瞬变后压力与通道当量流量特性有关。本文以水力割缝系统关键装置为研究对象,对割缝关键装置压力、流量特性进行试验研究,分析水力割缝系统瞬变性能与阀芯和喷嘴结构参数的内部规律。

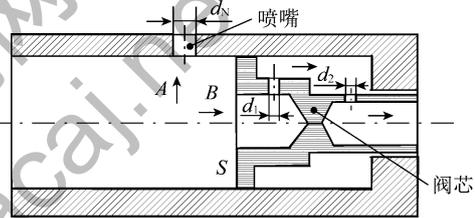


图 1 水力割缝关键装置示意

Fig. 1 Diagram of hydraulic cutting seams key device

1 试验条件及方案

1.1 试验装置与方案

试验在自主研制的煤与瓦斯测试试验系统上进行,图 2 为水力割缝设备性能特性试验系统示意。系统主要由高压泵系统、管路系统和测试系统组成。试验系统与自来水系统连接保证持续供水,高压泵系统额定压力和流量分别为 60 MPa 和 120 L/min。

表 1 所示为试验结构参数与数值,试验参数包括喷嘴直径 d_N 、阀芯上下孔直径 d_1 、 d_2 和阀芯面积 S ,喷嘴数量若干,结构根据文献[22]设计,阀芯上下孔数量为 1~4 个且保持一致。试验方案改变采用单因子原则,其他采用不变参数 $d_N = 3$ mm, $d_1 = d_2 = 4$ mm, $S = 593$ mm²,安装喷嘴数量 2 只,孔数 4 个,总计 20 组试验方案。

1.2 试验数据采集与处理

管道中流量利用涡轮流量计测量后输出脉冲信号转换得到,压力利用 Kulite ETM-300-375M 压力传感器输出电流信号后,经过运算放大器放大送至 QuantumX 数据采集系统进行数据采集测量,采样频率为 50 Hz。图 3 为水力割缝系统瞬变过程的典型压

力信号,图中压力在极短时间内骤增至最大值并稳定,在骤增前压力基本以正弦信号脉动并缓慢增加,因此瞬变压力选取骤增前最后一个正弦波峰值(图3);根据流量信号测试发现流量无剧烈变化,瞬变过程前后并未发生明显改变,因此流量数据选取瞬变后 20 s 内平均值。同种方案分别进行 5 次重复试验,从而消除压力、流量测试数据的偶然误差。

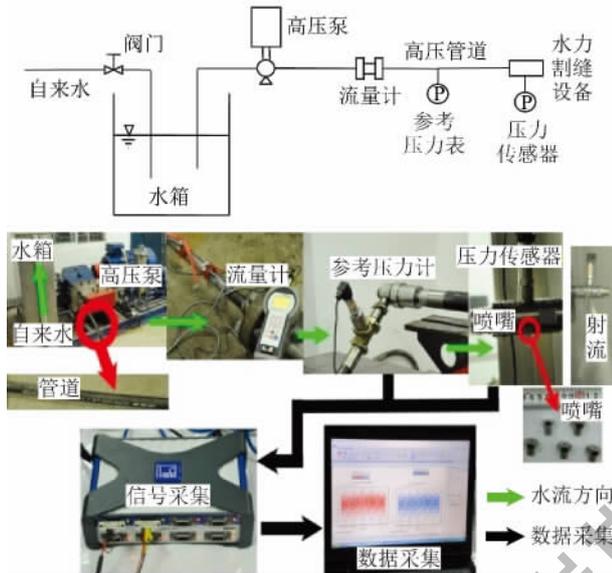


图 2 水力割缝系统性能特性试验系统

Fig. 2 Experimental schematic description of hydraulic cutting seams system

表 1 水力割缝装备参数数值

Table 1 Parameter of hydraulic cutting device

d_N / mm	d_1 / mm	d_2 / mm	S / mm^2
3.0	2	2	735
3.5	4	4	593
4.0	6	6	530

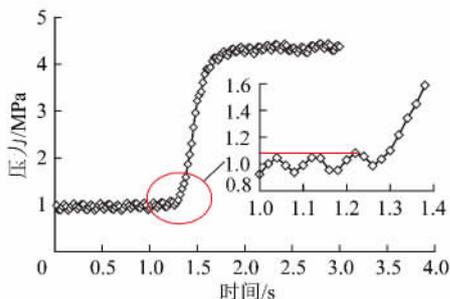


图 3 水力割缝系统瞬变过程典型压力信号

Fig. 3 Transient process typical signal of hydraulic cutting seams system

2 试验结果与分析

2.1 喷嘴变更对瞬变特性的影响规律

喷嘴是割缝的执行部件,图 4 为压力、流量测试

结果,绿色为压力,数据显示压力基本不变,约 1.1 MPa,瞬变压力不随喷嘴当量直径的变化而变化,即与喷嘴直径和数量无关;蓝色为流量,若以线性关系进行拟合(虚线),工况点在拟合曲线附近较为分散,对流量与直径数据进一步处理(图 5),图 5 中(0,0)点表示 3 mm 单喷嘴瞬变工况点, Q 表示流量,下标 3 表示 3 mm 喷嘴对应值, a 表示线性系数,图中净流量随直径平方的增加而线性增加,线性系数为 1.805,对比流量与当量直径的线性关系,虽然有些工况点存在少量偏离,但极大地降低。实际上,流量线性关系与所有实际测试工况偏离误差均在 8% 以内,引起数值偏离的原因主要有两个方面:一是流量与喷嘴流量系数有关,在数据处理中均将流量系数考虑为最优且相同,但实际喷嘴很难实现;另一方面是数据测试中仪器本身有系统误差。根据流体力学理论,喷嘴流量不仅与直径和数量有关,同时也和压力关联,根据净流量与喷嘴直径平方的线性拟合发现流量仅与喷嘴当量直径相关,即仅与直径和数量相关,进一步说明瞬变压力不随喷嘴数量和直径的变化而变化。

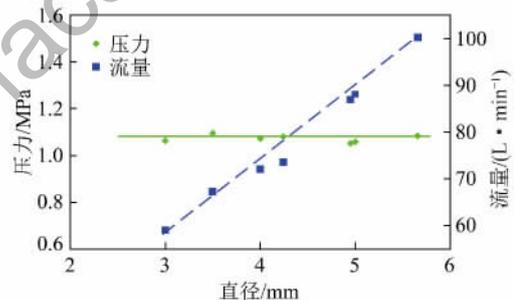


图 4 喷嘴压力-流量试验结果

Fig. 4 Pressure and discharge testing data of nozzle

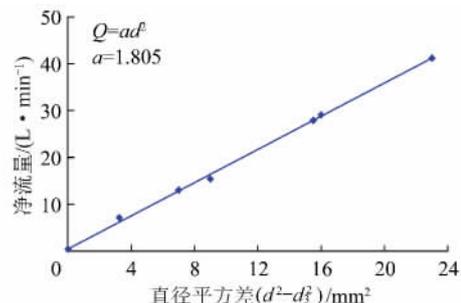


图 5 净流量与直径平方差测试结果

Fig. 5 Net discharge testing data of nozzle

根据净流量与直径平方线性关系,可以预估水力割缝装置瞬变压力。根据流体力学方程有

$$Q = \varphi \sqrt{\frac{2P}{\rho}} A$$

式中 φ 为流量系数; P 为压力; A 为过流面积; ρ 为密度。

因此有

$$P = \frac{\rho Q^2}{2A^2 \varphi^2} = \frac{C}{\varphi^2} a^2$$

式中, C 为系数常数, 与单位和密度相关, 若流量、直径和压力单位分别选取为 L/min , mm 和 MPa , 密度 $\rho = 998.1 \text{ kg/m}^3$, 则 $C = 0.225$ 。

根据线性关系, 若选用喷嘴最优流量系数, 预测瞬变压力为 0.813 MPa , 误差为 23.9% , 误差较大; 若选用 3 种试验喷嘴最优流量系数^[21], 预测瞬变压力为 0.98 MPa , 误差为 9.3% 。

2.2 阀芯结构对瞬变特性影响规律

阀芯是水力割缝技术关键装置核心部件, 它是变更割缝关键装置工作状态的动件, 图 6 为阀芯上下孔径相同时孔径变化的压力、流量特性测试结果, 图中有效直径为 4 mm 分别为单孔 4 mm 阀芯和四孔 2 mm 阀芯的两个工况点, 表 2 所示为阀芯不同上下孔径压力、流量测试结果。图 6 中随着等效直径的增加瞬变压力逐渐降低, 降低幅度慢慢减小, 降低到一定程度后趋于平坦; 随着等效直径的增加流量增大, 且增大幅度越来越大。

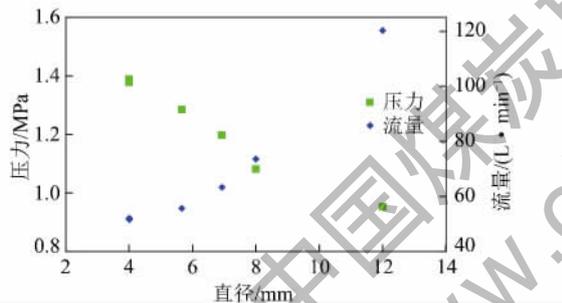


图 6 阀芯直径变化测试结果

Fig. 6 Pressure and discharge testing data of valve element

表 2 阀芯不同上下孔径试验测试结果

Table 2 Pressure and discharge testing data of various up-orifice and down-orifice diameter

$d/$ mm	P/MPa	$Q/$ ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	$d/$ mm	$P/$ MPa	$Q/$ ($L \cdot \text{min}^{-1}$)
2-2	1.378	51.6	4-6	1.102	75.2
2-4	1.191	52.0	6-2	1.173	63.3
2-6	1.039	51.5	6-4	1.118	92.6
4-2	1.066	57.7	6-6	0.952	120.2
4-4	1.081	73.6			

注: 直径如 2-2 表示为上-下孔口直径。

表 2 中测试数据显示上下孔径影响压力和流量的规律比较复杂, 压力既有升高又有降低。若固定上孔口 2 mm 和 6 mm 上孔口随下孔口直径增加压力降低, 但 4 mm 上孔压力升高; 若固定下孔口, 上孔口

增加压力单调性消失。流量随阀芯孔径的增加而增加, 但对流量大小变化上下孔口的影响程度不同, 2 mm 上孔口阀芯随下孔口增大流量大小基本不变, 但 6 mm 下孔口随上孔径的增加流量大幅度增加, $2 \sim 4 \text{ mm}$ 及 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 流量分别增加了 46.1% 和 59.8% ; 下孔口同样影响流量特性 4 mm 上孔径阀芯下孔径 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 流量增加了 27.5% , 但 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 流量增加仅 2.2% ; 6 mm 上孔径阀芯下孔径 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 和 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 流量分别增加了 46.3% 和 29.8% 。

图 7 为压力和流量随阀芯面积 S 的变化规律, 数据表明随面积的增加, 压力和流量仅有少量下降, 下降幅度低于 1% 基本可忽略。流量不变能够利用流动条件和压力均未发生改变来合理解释, 但压力不变却存在矛盾, 因为阀芯动作依靠压力作用力来完成, 根据力学关系其他条件不变瞬变压力与面积乘积应保持不变, 即动作总作用力应保持不变, 面积增加必然导致瞬变压力的降低。利用数值模拟方法对水力割缝系统关键装置进行了定常数值模拟, 阀芯附近模拟结果如图 8 所示, 这可以合理解释压力恒定机理, 面积 S 在图中为 C 所示, 面积改变是由于增大内孔直径从而面积降低, 即图中 D 区域, 从图中发现 C, D 区域压力大小基本相同, 因此压力有效作用面积基本没有改变, 从而瞬变压力不变。

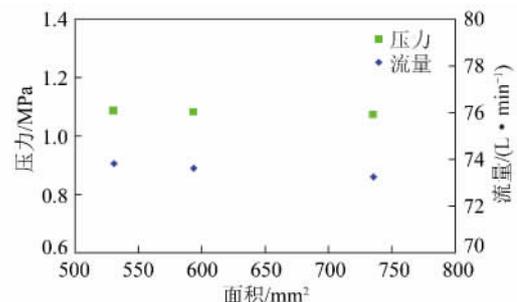


图 7 阀芯面积影响规律测试结果

Fig. 7 Pressure and discharge testing data of valve element area

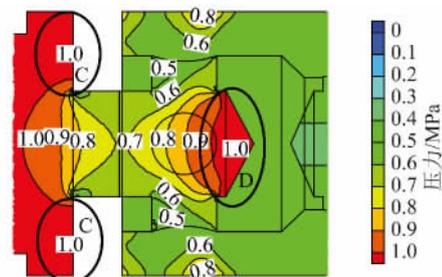


图 8 阀芯附近压力分布

Fig. 8 Numerical simulation of valve element pressure

3 结 论

(1) 水力割缝系统瞬变压力与喷嘴数量和直径

参数无关; 流量与喷嘴当量直径平方呈线性关系, 线性系数能够预测瞬变压力。

(2) 阀芯上下孔口对瞬变压力和流量会产生影响但程度不同。上下孔口有效直径相同且增加则瞬变压力降低, 流量大幅度非线性增加; 上孔口直径为控制流量主要参量。

(3) 瞬变压力和流量不随阀芯面积的改变而改变, 有效作用面积不变是形成压力和流量不变的内在机理, 增加瞬变压力需通过减小阀芯外缘直径, 从而减小有效作用面积来实现。

参考文献:

- [1] 王耀锋, 李艳增. 预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J]. 煤炭学报 2012 37(8): 1326-1331.
Wang Yaofeng, Li Yanzeng. Technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove[J]. Journal of China Coal Society 2012 37(8): 1326-1331.
- [2] 富 向. 井下点式水力压裂增透技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1317-1321.
Fu Xiang. Study of underground point hydraulic fracturing increased permeability technology[J]. Journal of China Coal Society 2011 36(8): 1317-1321.
- [3] 王春光, 张东旭. 深部煤矿开采瓦斯综合治理技术研究[J]. 煤炭科学技术 2013 41(8): 11-14.
Wang Chunguang, Zhang Dongxu. Research on comprehensive gas control technology of deep coal mining[J]. Coal Science and Technology 2013 41(8): 11-14.
- [4] Wei Guoying, Shan Zhiyong, Zhang Zimin. Research on hydraulic slotting technology controlling coal-gas outbursts[J]. Journal of Coal Science and Engineering(China) 2008 14(1): 67-72.
- [5] 佚名. 高压水力割缝防止煤与瓦斯突出[J]. 煤矿安全, 1986(11): 4-10.
- [6] 瞿涛宝. 试论水力割缝技术处理煤层瓦斯的效果[J]. 西部探矿工程, 1996 8(3): 51-53.
Qu Taobao. Discussion on effect of treating coal seam methane with hydraulic cutting seam technique[J]. West-China Exploration Engineering, 1996 8(3): 51-53.
- [7] 瞿涛宝. 关于水力割缝技术对防止煤与瓦斯突出有效性的探讨[J]. 煤矿安全, 1983(12): 21-28.
- [8] 段康廉, 冯增朝, 赵阳升, 等. 低渗透煤层钻孔与水力割缝瓦斯排放的实验研究[J]. 煤炭学报 2002 27(1): 50-53.
Duan Kanglian, Feng Zengchao, Zhao Yangsheng et al. Testing study of methane drainage by bore and hydraulic-cutting seam from low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society 2002 27(1): 50-53.
- [9] 唐建新, 贾剑青, 胡国忠, 等. 钻孔中媒体割缝的高压水射流装置设计及试验[J]. 岩土力学 2007 28(7): 1501-1504.
Tang Jianxin, Jia Jianqing, Hu Guozhong, et al. Design and experimentation of high-pressure water jet set applied to incising coal seam in boreholes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1501-1504.
- [10] 林柏泉, 吕有厂, 李宝玉, 等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用[J]. 煤炭学报 2007 32(9): 959-963.
Lin Baiquan, Lü Youchang, Li Baoyu, et al. High-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology and its application in outbursts prevention[J]. Journal of China Coal Society 2007 32(9): 959-963.
- [11] 沈春明, 林柏泉, 吴海进. 高压水射流割缝及其对煤体透气性的影响[J]. 煤炭学报 2011 36(12): 2058-2063.
Shen Chunming, Lin Baiquan, Wu Haijin. High-pressure water jet slotting and influence on permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society 2011 36(12): 2058-2063.
- [12] 林柏泉, 孟凡伟, 张海宾. 基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J]. 煤炭学报 2011 36(1): 75-79.
Lin Baiquan, Meng Fanwei, Zhang Haibin. Regional gas control based on drilling-slotting-extracting integration technology[J]. Journal of China Coal Society 2011 36(1): 75-79.
- [13] 李晓红, 卢义玉, 向文英. 水射流理论及在矿业工程中的应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007.
- [14] 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): 1386-1390.
Li Xiaohong, Lu Yiyu, 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): 1386-1390.
- [15] 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 69.
Lu Yiyu, Ge Zhaolong, Li Xiaohong, 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 69.
- [16] 赵 瑜, 李晓红, 卢义玉, 等. 瓦斯压力对非均质煤岩抗压强度尺寸效应的影响[J]. 煤炭学报 2009 34(8): 1081-1085.
Zhao Yu, Li Xiaohong, Lu Yiyu, et al. Influence of gas pressure on compressive strength size effect of inhomogenous coal[J]. Journal of China Coal Society 2009 34(8): 1081-1085.
- [17] 李晓红, 卢义玉, 刘 勇, 等. 一种顺层钻进松软煤层深长瓦斯抽采孔的方法及装置[P]. 中国专利: CN101975023A, 2010-10-20.
- [18] 李晓红, 卢义玉, 姜德义, 等. 一种煤层瓦斯抽放方法及装置[P]. 中国专利: CN200710092673.4, 2007-09-07.
- [19] 李晓红, 卢义玉, 刘 勇, 等. 一种顺层钻进松软煤层深长瓦斯抽采孔的装置[P]. 中国专利: CN201020568896.0, 2010-10-20.
- [20] Wylie E B, Streeter V L. Fluid transients in systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.
- [21] Yuan Bo, Kang Yong, Hu Yi, et al. Research on transient switching pressure behaviours and control of hydraulic cutting in coal seams[J]. Disaster Advances 2013 6(S1): 137-144.
- [22] Leach S J, Walker G L, Smith A V, et al. Some aspects of rock cutting by high speed water jets [and discussion][J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series a, Mathematical and Physical Sciences, 1966 260: 295-310.