

文章编号: 1673-3363-(2013)05-0785-06

高压水射流掏槽防突技术参数 数值模拟与试验研究

张嘉勇^{1,2}, 郭立稳², 罗新荣¹

(1. 中国矿业大学安全学院, 江苏 徐州 221116; 2. 河北联合大学矿业工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要 运用 ANSYS 有限元分析软件, 综合分析不同巷道模型掏槽后的围岩应力和煤体位移变化情况, 确定了高压水射流掏槽位置应距巷道底板 2/7 处左右, 掏槽孔径的大小为巷道底板长度的 4/15 左右, 这样巷道围岩裂隙发育充分, 且保持了围岩的完整性, 有利于加快工作面的掘进速度。通过现场测试, 验证了高压水射流掏槽前后煤层残存瓦斯含量显著降低, 围岩电磁辐射强度波动较大, 钻孔孔壁发生变形, 表明掏槽后槽孔周边煤体裂隙发育, 扩大了槽孔周边煤层瓦斯的释放范围, 降低了突出煤层瓦斯压力梯度, 消除了突出的危险性。

关键词 高压水射流; 掏槽; 煤与瓦斯突出; 数值模拟

中图分类号 TD 713

文献标志码 A

Parameters of high-pressure water jet punching technology in outburst prevention

ZHANG Jia-yong^{1,2}, GUO Li-wen², LUO Xin-rong¹

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063009, China)

Abstract In this paper, by using ANSYS software, the stress of surrounding rock and displacement of coal mass in different roadway models after punching were analyzed comprehensively. Additionally, it was determined that the high-pressure water jet punching position should be 2/7 or so from the roadway floor, and the aperture size should be 4/15 or so of the roadway floor length. Thus, the fissures in roadway surrounding rock may develop fully, and the rock integrity can be maintained, which is beneficial to speed up the face driving. Field test has verified that remnant gas quantity in coal seam after high-pressure water jet punching has reduced significantly, the fluctuation of electromagnetic radiation intensity in surrounding rock is large, and the hole wall is deformed after punching. This shows that the fissure development in coal mass after punching, expands the gas release range around slots, reduces the gas pressure gradient of outburst coal seam, and eliminates the outburst risk.

Key words high-pressure water jet; punching; coal and gas outburst; numerical simulation

煤与瓦斯突出是威胁煤矿安全生产的严重自然灾害之一。而目前常用防突措施存在措施工程量

大、占用掘进时间长、措施效检超标率高的缺点, 这就造成煤巷掘进速度低、矿井采掘平衡严重失

收稿日期: 2012-10-19

基金项目: 河北省科技支撑计划项目(11276904D)

作者简介: 张嘉勇(1977-), 男, 河南省方城县人, 博士, 从事矿山安全方面的研究。

E-mail: zjy815@163.com

Tel: 13933328265

调,易诱发煤与瓦斯突出。高压水射流作为局部防突措施不但能够很好地适应于严重突出煤层的掘进消突,而且措施重复率低、执行时间短、掘进速度大幅度提高,同时经济和社会效益显著。

1 高压水射流装置特点

在综合分析水力采煤、水力冲孔和水射流割缝防突的基础上^[1-10],研制了高压水射流掏槽防突装置。装置主要由液压马达、高压油管、传动装置、高压水枪及枪管(2 节,每节长 4 m)、高压水管、高

压水泵等组成。高压水射流掏槽防突装置如图 1。

高压水管输送的高压水到达高压水枪,依靠高压枪嘴的射流进行钻割煤层,在煤层中形成 1 个孔洞。在高压水和矿山压力的共同作用下,孔洞周围的煤体产生塑性、蠕变变形,改变煤体应力状态,煤体的应力集中带不断向煤层深处移动,卸压带逐渐扩大,煤层透气性增大,瓦斯压力降低,煤体潜能释放,吸附状态的瓦斯大量转化为游离状态的瓦斯并得到充分释放,从而降低了煤与瓦斯突出的危险性。

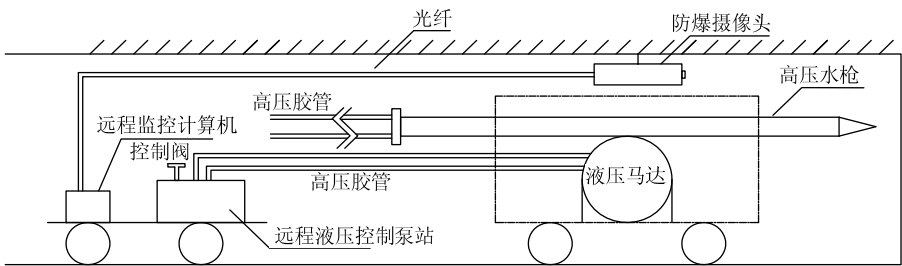


图 1 高压水射流掏槽设备
Fig.1 High-pressure water jet undercutting equipment

压马达控制高压水枪的前进或后退,而液压马达依靠液压远程控制泵站进行远距离操作,在对煤体切割的过程中,人员远距离操作,保证人员的安全。完成 1 个循环后,煤体中的瓦斯含量和围岩应力大大降低,消除了瓦斯突出危险性,加快了掘进进度,保证了人员安全。该装置特点是:

1) 高压水射流出口压力在 15~20 MPa,流量在 50~80 m³/h。其不同于水力采煤的高压水射流(流量较大)以及用于切割的高压细射流(流量较小),整套设备功率相对较低,体积相对较小,结构简单,操作简便。

2) 水枪能够深入煤体内部,掏槽距离长,瓦斯释放区域增加,加快了工作面的掘进速度。

3) 人员通过操作阀远程(200 m 以外)控制液压马达进行掏槽,加强了施工过程的安全性。

高压水射流的施工工艺和技术参数直接影响掘进工作面的防突效果,因此,本文通过数值模拟的方法,确定不同条件下具体的掏槽技术参数,为矿井现场应用提供技术指导^[11-13]。

2 防突技术参数数值模拟

2.1 建模过程

根据高压水射流破煤的物理模型,对模型尺寸、边界单元尺寸进行了确定。为了真实反映掏槽过程中槽孔周围煤体在围岩应力作用下的变性破

坏效果,模型尺寸尽可能是整个掏槽过程的呈现。模型选用拱形巷道,尺寸设为:宽度 3.0 m,高度 3.5 m,掏槽深度 20 m。表 1 为物理模型的主要力学参数。

表 1 煤体的主要力学性质
Table 1 Main mechanical properties of coal

名称	密度 /(g·cm ⁻³)	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	黏结力 /MPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量 /GPa
煤体	1.4	0.05~0.07	0.75~11	0.26	31	0.28~2.49

为真实了解掏槽后巷道围岩变形情况,掌握裂分布区域以及影响范围,在巷道周围选取 3 个关键节点:节点 1、节点 2 和节点 3。节点 1 位于巷道拱形区域中部,节点 2 位于巷道左帮中部,节点 3 位于巷道底板中部。其位置如图 2 所示。

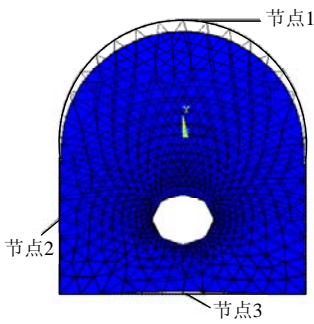


图 2 节点位置
Fig.2 Node position

高压水射流掏槽后, 槽孔周边围岩将发生收缩变形, 由于煤岩体具有一定的碎胀系数, 破碎后的煤岩体将充填槽孔, 为了不使围岩变形过大而不利铺设轨道, 同时为了防止掘进施工中发生冒顶事故, 巷道围岩 3 个节点的位移参考值设定为: 节点 1 在 Y 方向位移在 0.1~0.2 m 之间; 节点 2 在 X 方向位移在 0.03~0.1 m 之间; 节点 3 在 Y 方向位移在 0.03~0.08 m 之间。

2.2 掏槽位置的确定

选择 4 种掏槽位置: 位置 1、位置 2、位置 3 和位置 4, 其掏槽中心距离巷道底板位置分别是巷道高度 1/7, 2/7, 3/7, 4/7 处。通过对不同掏槽位置时的位移等值线图分析对比, 得出 4 种位置情况下, 节点 1、节点 2 和节点 3 在 X , Y 方向的位移, 分别见图 3~5。

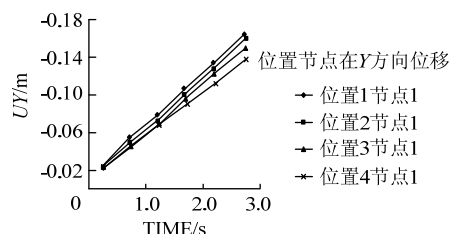


图3 不同掏槽位置节点 1 在 Y 方向上的位移
Fig.3 Node 1 displacement in the Y direction in different punching position

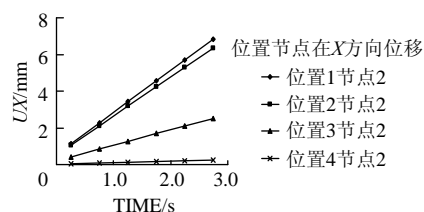


图4 不同掏槽位置节点 2 在 X 方向上的位移
Fig.4 Node 2 displacement in the X direction in different punching position

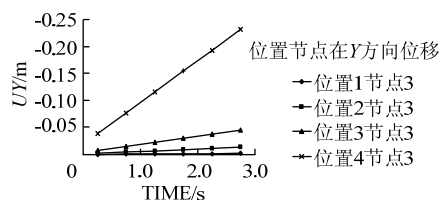


图5 不同掏槽位置节点 3 在 Y 方向上的位移
Fig.5 Node 3 displacement in the Y direction in different punching position

通过对 3 个节点在 X , Y 方向的位移化分析知, 位置 1 掏槽后底板底鼓量达到 0.25 m, 拉应力达到 7.5×10^7 Pa, 底板完整性遭到破坏, 不利于铺设轨道;

而位置 3, 4 对底板位移影响较小, 没有有效地释放底板应力, 同时顶板下沉量较大; 位置 2 底鼓量为 0.05 m, 拉应力达到 2×10^7 Pa, 促使底板裂隙发育, 而顶板也具有一定下沉变形, 有利于巷道围岩内瓦斯的释放。

2.3 掏槽孔径的确定

为了确定掏槽孔径对巷道围岩的影响情况, 模拟选用 3 种孔径: 孔径 1、孔径 2 和孔径 3, 其掏槽直径分别为 0.4, 0.8, 1.4 m。

图 6~8 为不同掏槽孔径情况下节点 1、节点 2、节点 3 在 X , Y 方向上的位移和应力变化值。

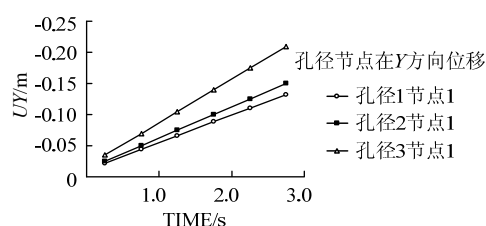


图6 不同孔径节点 1 在 Y 方向位移
Fig.6 Node 1 displacement of different hole diameter in the Y direction

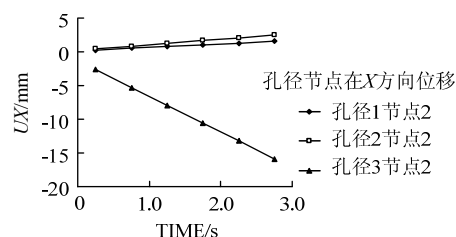


图7 不同孔径节点 2 在 X 方向位移
Fig.7 Node 2 displacement of different hole diameter in the X direction

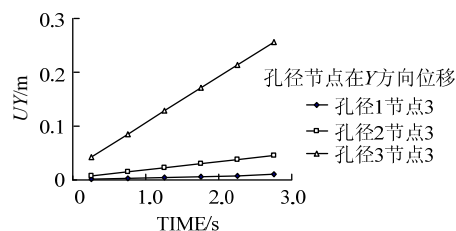


图8 不同孔径节点 3 在 Y 方向位移
Fig.8 Node 3 displacement of different hole diameter in the Y direction

通过对围岩应力变化云图和各节点的位移值比较分析知, 当掏槽孔径为 0.4 m 时, 节点 1 在 Y 方向的最大位移为 0.14 m, 节点 2 在 X 方向的最大位移为 0.001 m, 节点 3 在 Y 方向的最大位移为 0.01 m, 围岩变形量很小, 特别是在巷道两帮, 没有形成大范围的贯通裂隙, 不能有效释放瓦斯; 当掏槽

孔径为 0.8 m 时,节点 1 在 Y 方向的最大位移为 0.15 m,节点 2 在 X 方向的最大位移为 0.005 m,节点 3 在 Y 方向的最大位移为 0.05 m,巷道围岩产生一定的拉应力,产生一定范围的贯通裂隙,为瓦斯释放创造了有利条件;当掏槽孔径为 1.4 m 时,节点 1 在 Y 方向的最大位移为 0.23 m,节点 2 在 X 方向的最大位移为 0.018 m,节点 3 在 Y 方向的最大位移为 0.28 m,巷道围岩变形严重,产局部冒落的现象,不利于掘进施工。

3 实验室掏槽效果分析

3.1 试样制备

为了模拟分析煤体掏槽后受压变形情况,设计试样材料的强度与煤体近似,制备的试样的水泥标号为 32.5,所用材料的质量配比:

- 1) 1 号样,水泥:砂=1:6;
- 2) 2 号样,水泥:砂=1:5。

试样尺寸:长×宽×高=15 cm×15 cm×20 cm。每个型号试样制作 20 个。

3.2 掏槽试验

水射流掏槽试验在煤炭科学研究院唐山分院机械加工实验室进行。试验用高压水泵最大加压为 60 MPa,水枪枪嘴为 $\Phi 5$ mm 和 $\Phi 10$ mm。

1 号样进行水射流掏槽 15 个,每个孔径掏槽 5 个;掏槽孔径 $\Phi 20$ mm,编号为 1-1;掏槽孔径 $\Phi 40$ mm,编号为 1-2;掏槽孔径 $\Phi 60$ mm,编号为 1-3。2 号样进行水射流掏槽 15 个,每个孔径掏槽 5 个;掏槽孔径 $\Phi 20$ mm,编号为 2-1;掏槽孔径 $\Phi 40$ mm,编号为 2-2;掏槽孔径 $\Phi 60$ mm,编号为 2-3。

首先连接好高压枪管和高压泵,待压力升到试验要求时,打开阀门,利用高压枪嘴喷射出的射流进行掏槽试验,同时记录掏槽压力和掏槽时间。试样距枪嘴的距离为 2 m 左右。

3.3 掏槽效果分析

掏槽后试样抗压强度测试的压力机型号为 WAW-2000。加压试验如图 9 所示。



图 9 试样加压
Fig.9 Pressed sample

每个型号的试样进行 3 次加压试验,求出该型号式样的平均抵抗力和平均破坏时间,数据如表 2。

表 2 抗压实验数据
Table 2 Compression experimental data

试样编号	掏槽孔径/mm	抵抗压力/kN	加载速率/(mm·min ⁻¹)	破坏时间/s	强度损失比/%
1-0	0	31.89	0.7	222.8	/
1-1	20	15.95	0.7	130.1	41.6
1-2	40	12.28	0.7	156	29.9
1-3	60	8.37	0.7	119.2	46.5
2-0	0	69.6	0.7	236.8	/
2-1	20	52.32	0.7	163.1	31.1
2-2	40	39.8	0.7	149.5	36.9
2-3	60	30.5	0.7	131.3	44.6

注:强度损失比是原样(未掏槽)的破坏时间减去掏槽试样破坏时间后与原样(未掏槽)的破坏时间的比值。

通过以上数据分析表明,随着试样掏槽孔径的增加,试样的抗压强度越来越小,试样强度损失比呈增大趋势,这表明大孔径对试样的卸压效果明显。而强度较大的试样在相同的掏槽孔径下,试样的破坏时间较长,强度损失比较小,因为试样强度高,破坏需要的力较大,这表明强度较大试样中需增大孔径才能达到较好的卸压效果。

4 现场试验结果

为了检验高压水射流掏槽防突装置的掏槽能力和防突效果,现场测试在山西襄垣县金星煤矿进行。金星矿掘进工作面巷道为梯形:巷道宽 2.2 m,高 1.8 m。依据数值模拟结果,确定掏槽参数:槽孔中心位于底板中心线上,距底板 0.63 m;掏槽孔径为 $\Phi 0.6$ m。

4.1 现场掏槽试验

井下掏槽试验选取枪嘴口径 12 mm,枪嘴距煤壁 400 mm,高压水压力 15 MPa,流量为 70 m³/h。打开高压供水管路阀门,约 15 s 枪嘴出口达到最大压力,打开高压水枪阀门进行连续冲孔,达到要求时间后观察煤壁,并测量掏槽孔径和孔深。井下掏槽试验如图 10 所示。

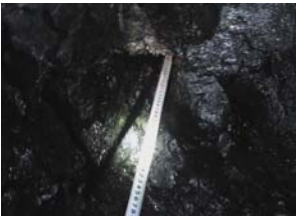


图 10 井下现场掏槽
Fig.10 Punching on underground field

4.2 防突效果测试

为了检验高压水射流掏槽防突效果，需要对掏槽前后煤体主要瓦斯参数进行对比分析，测试主要参数是煤层残存瓦斯含量和煤体裂隙变化情况。

4.2.1 煤层残存瓦斯含量测定

使用瓦斯残存量测定仪对掏槽前后相同区域煤体内部瓦斯含量值进行对比分析。具体方法如下：

- 1) 掏槽前用煤电钻在距掏槽中心左侧 1.2 m 处施工钻孔，取钻孔末端煤样装入煤样罐，然后进行实验室煤层瓦斯含量分析。
- 2) 掏槽结束 3 h 后，用煤电钻在距掏槽中心右侧 1.2 m 处施工钻孔，取钻孔末端煤样装入煤样罐，然后进行实验室煤层瓦斯含量分析。表 3 为掏槽前后煤层残存瓦斯量测定数据。

表 3 残存瓦斯量
Table 3 Remained gas

测定地点	测定阶段	CH ₄
掏槽前 (左侧)	瓦斯总量/mL	757.69
	残存瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)	2.1
掏槽后 (右侧)	瓦斯总量/mL	437.44
	残存瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)	1.21

数据表明掏槽后在钻孔周边相同区域内，煤层残存瓦斯含量显著降低，3 h 后由原来的 2.1 m³/t 下降为 1.21 m³/t，下降比例为 42.4%。这表明掏槽后槽孔周边煤体裂隙进一步发育，为瓦斯排放提供了通道。

4.2.2 掏槽前后电磁辐射强度测定

使用 KBD5 煤与瓦斯突出电磁辐射监测仪对掏槽前后煤体内部电磁辐射强度变化情况进行对比分析。具体方法如下：

- 1) 掏槽施工前在距掏槽中心上部 1.0 m 处用电磁辐射仪监测、记录，分析煤体内部裂隙情况。
- 2) 掏槽后 4 h 在同一位置用电磁辐射仪监测、记录，分析煤体内部裂隙情况。

图 11 为掏槽前后同一位置的电磁辐射强度变化曲线。图中横坐标为测试组数，纵坐标为电磁辐射强度值。

图 11 中在测试开始时(10 组内)出现 1 个强度峰值，主要由于仪器开始测定时的晃动和人员活动造成的，可忽略不计。从后期强度变化曲线可以看出，掏槽后同一位置煤体受载程度较高，强度波动比较明显，表明掏槽后 4 h 槽孔上部煤体变形较明显，

裂隙在进一步发育，通过掏槽改变了煤岩体特征，为瓦斯释放提供了有利条件。

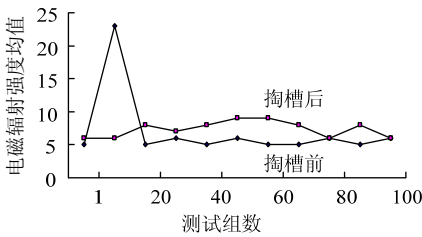


图 11 电磁辐射强度变化曲线
Fig.11 Curve of electromagnetic radiation intensity

4.2.3 煤体裂隙变化情况测定

使用 YS(B) 钻孔窥视仪对掏槽前后煤体周围钻孔内壁变化情况进行对比分析。具体方法如下：

- 1) 掏槽施工前在距掏槽中心左 2.0 m 处施工 1 个深 15 m、孔径为 42 mm 的钻孔，用钻孔窥视仪记录不同位置孔壁的情况。
- 2) 掏槽后 2 h 内，用钻孔窥视仪记录相应位置的孔壁情况，然后进行对比分析。

图 12 为钻孔 10 m 处孔壁在掏槽前后的变化情况。

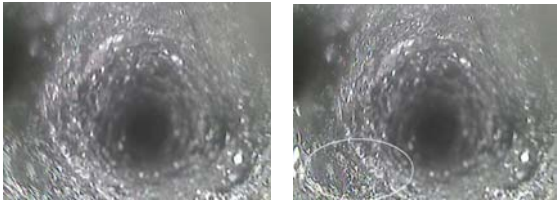


图 12 掏槽前后孔壁情况
Fig.12 Hole wall status before and after punching

掏槽后孔壁左下侧孔壁较为粗糙，且煤粉增多。因此，通过掏槽促使煤体移动变形，有利于裂隙发育，促进瓦斯的释放。

5 结 论

1) 确定掏槽位置在巷道底板中心线上，距离底板为巷道高度的 2/7 处左右，这样巷道围岩裂隙发育充分，而且保持了围岩的完整性，有利于加快工作面的掘进速度。

2) 确定高压水射流掏槽的孔径的大小为巷道底板长度的 4/15 左右。巷道围岩产生一定的拉应力，产生一定范围的贯通裂隙，为瓦斯释放创造了有利条件。通过对不同煤体强度模型掏槽后，其围岩应力和节点位移量比较分析，随着突出煤层强度的增加，掏槽后煤体裂隙分布区域和应力降低范围也在减小，掏槽防突效果大大降低，为了增加卸压

范围, 掏槽孔径也要随之增加; 同样在一些较软煤层, 应适当控制掏槽孔径, 防止掏槽后发生局部冒落现象。

3) 通过现场测试, 掏槽后在钻孔周边相同区域内, 煤层残存瓦斯含量显著降低, 围岩电磁辐射强度波动较大并且钻孔孔壁发生变形, 表明掏槽后槽孔周边煤体裂隙发育, 为瓦斯释放提供有利条件。

参考文献:

- [1] 魏国营, 郭中海, 谢伦荣, 等. 煤巷掘进水力掏槽防治煤与瓦斯突出技术[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 173-178.
WEI Guo-ying, GUO Zhong-hai, XIE Lun-rong, et al. Hydraulic slotting technology to prevent coal and gas outburst during heading excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 173-178.
- [2] 张嘉勇, 罗新荣, 郭立稳. 高压小射流掏槽防突装置设计与试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 740-744.
ZHANG Jia-yong, LUO Xin-rong, GUO Li-wen. Study on device design and test of high-pressure small jet punching technology to prevent outburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 740-744.
- [3] 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): 2058-2064.
SHEN Chun-ming, LIN Bai-quan, WU Hai-jin. High pressure water jet slotting and influence on permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2058-2064.
- [4] 刘佳亮, 司鹤. 高压水射流破碎高围压岩石损伤场的数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 40-46.
LIU Jia-liang, SI Hu. Numerical simulation on damage field of high pressure water jet breaking rock under high ambient pressure[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 40-46.
- [5] 郭臣业, 鲜学福, 姚伟静, 等. 煤岩层断裂破坏区与煤和瓦斯突出孔洞关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 802-808.
GUO Chen-ye, XIAN Xue-fu, YAO Wei-jing, et al. Relationship between the fracture zone and cave of coal or gas outburst caving in coal and rock seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6): 802-808.
- [6] 王新新, 石必明, 穆朝民. 水力冲孔煤层瓦斯分区排放的形成机理研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 467-472.
WANG Xin-xin, SHI bi-ming, MU chao-min. Study on formation mechanism of gas emission partition in hydraulic flushing coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 467-472.
- [7] HUANG Wei, CHEN Zhan-qing, YUE Jian-hua, et al. Failure modes of coal containing gas and mechanism of gas outbursts[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(4): 0504-0509.
- [8] 王晓川, 卢义玉, 康勇, 等. 磨料水射流切割煤岩体实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 246-251.
WANG Xiao-chuan, LU Yi-yu, KANG Yong, et al. Experimental study of abrasive waterjet cutting coal-rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 246-251.
- [9] 林柏泉, 杨威, 吴海进, 等. 影响割缝钻孔卸压效果因素的数值分析[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 153-158.
LIN Bai-quan, YANG Wei, WU Hai-jin, et al. A numeric analysis of the effects different factors have on slotted drilling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(2): 153-158.
- [10] ZHANG Tian-jun, REN Shu-xin, LI Shu-gang, et al. Application of the catastrophe progression method in predicting coal and gas outburst[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(4): 430-434.
- [11] 赖永标, 胡仁喜, 黄书珍. ANSYS11.0 土木工程有限元分析典型范例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 98-115.
- [12] 王丹丹. 水射流冲击破碎的数值分析[D]. 重庆: 重庆大学资源与环境科学学院, 2008.
- [13] 刘吉文, 张永利. 高地应力作用下巷道围岩蠕变的 ANSYS 仿真计算[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(增刊 2): 105-109.
LIU Ji-wen, ZHANG Yong-li. ANSYS simulation and calculation of laneway wall rock creep at high geostatic stress[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(Supp 2): 105-109.

《采矿与安全工程学报》2013 年第 4 期 Ei 收录情况

根据 Ei 中国信息部发布的最新收录结果, 本刊 2013 年第 4 期共发表论文 27 篇, 其中 Ei Compendex 收录论文 27 篇, 收录率为 100%。