

安全技术及工程

# 防喷敛集装置优化设计及其抗冲击性能研究

杨建国<sup>1,2</sup>

(1. 炼焦煤资源开发及综合利用国家重点实验室, 河南 平顶山 467000; 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:** 为了更加有效地防止高压水射流割缝施工过程中可能引起的瓦斯喷孔现象, 对传统防喷敛集装置进行了优化设计。优化后的防喷敛集装置采用胶囊封孔、注水加压的工作方式, 其质量较传统装置减少了50%, 同时敛集端部分采用合页式开口设计, 操作更加方便, 工序更加简化。其次, 试验测试了优化后防喷敛集装置的抗冲击性能, 表明优化后的装置具有较好的抗冲击性能, 其能承受的最大累积冲击量为 $1\,188\text{ N}\cdot\text{s}$ 。现场试验结果表明: 钻孔体积较传统装置减少39%~67%, 基本防止了瓦斯超限事故的发生, 证明优化后的装置具有更好的密封性及更强的稳定性。

**关键词:** 瓦斯防治; 喷孔现象; 高压水射流; 防喷敛集装置; 抗冲击性能

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)12-0064-06

## Optimized design on outburst prevention and collection device and study on impact resistance performances

Yang Jianguo<sup>1,2</sup>

(1. State Key Lab of Coking Coal Resource Development and Comprehensive Utilization, Pingdingshan 467000, China;

2. China Pingmei Shenma Energy and Chemical Group Corporation Limited, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** In order to more effectively prevent a gas blowhole phenomenon occurred during the slotting construction process with the high pressure water jet, an optimized design was conducted based on the conventional outburst prevention and collection device. After the optimization, a rubber pack hole sealing and water injection pressurized working method was applied to the blowout prevention and collection device. The weight of the device was reduced by 50% than the conventional device. Meanwhile, a hinge mode open design was applied to the end of the collection part, thus the operation would be easier and the process would be simpler. Also after the optimization, the impact resistance performances of the blowout prevention and collection device were experienced and test. The optimized device could have good impact resistance performances and the max accumulated impact impulse of the optimized was  $1\,188\text{ N}\cdot\text{s}$ . Site experiment results showed that the borehole volume was reduced about 39%~67% than the conventional device. The gas over limit accident could be prevented basically and the optimized device could have better sealing performances and more strong stability.

**Key words:** gas prevention and control; bursthole phenomenon; high pressure water jet; outburst prevention and collection device; impact resistance performances

## 0 引言

长期以来, 煤与瓦斯突出事故一直是制约我国煤矿安全高效生产的主要因素之一, 如何安全快速地消除煤与瓦斯突出事故一直是我国煤矿科技工作

者研究的焦点<sup>[1-3]</sup>。经过不断的研究与实践, 卸压增透预抽煤层瓦斯已经成为我国防治煤与瓦斯突出灾害事故的主要手段之一, 其中高压水射流割缝增透技术以其良好的卸压效果、简便的操作工序成为该类技术的代表, 在我国许多矿井生产过程中得到

收稿日期: 2016-10-12; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.12.011

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: 杨建国(1959—), 男, 河南平顶山人, 教授级高级工程师, 现任中国平煤神马能源化工集团有限责任公司总经理。

引用格式: 杨建国. 防喷敛集装置优化设计及其抗冲击性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 64-69.

Yang Jianguo. Optimized design on blowout prevention and collection device and study on impact resistance performances[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 64-69.

了广泛使用<sup>[4-10]</sup>。然而,由于高压水射流割缝是一个对煤体不断扰动的过程,因而在松软突出煤层中实施高压水射流割缝技术时,可能会由于射流的强冲击作用使得煤体瞬间卸压,从而使得瓦斯和水煤渣顺着钻孔大量涌出,形成喷孔现象,从而为现场施工造成一定的安全隐患。特别是随着我国煤矿开采深度的增加,地应力及瓦斯压力也随之增大,将使得该类问题更加突出<sup>[11-17]</sup>。为此很多学者对喷孔现象及其防止方法进行了大量的研究。梁运培等<sup>[18]</sup>对煤层钻孔喷孔的发生机理进行了探讨;龙建明等<sup>[19]</sup>研制了一套新型气水渣分离及孔内粉尘捕捉一体化装置;陈久福等<sup>[20]</sup>根据粉尘、瓦斯、水的物理性质,提出气水渣自动分离方法,并设计加工出气水渣分离一体化装置;黄春明等<sup>[21]</sup>为抑制水力割缝诱发的喷孔现象,避免施工巷道瓦斯超限,提出了一种防喷孔装置,以上研究均取得了一定成果,但仍依然存在部分不足之处。例如传统防喷敛集装置部分密封性能差,难以起到防喷孔的效果,而部分的防喷敛集装置则因其装置质量过大,固定困难等问题制约了其现场适应性,特别是在施工上向穿层钻孔时,这些问题越发突出。同时,防喷敛集装置在实际应用中常受到周围复杂的煤岩环境的影响,其抗冲击性能常成为其是否能够稳定使用的重要因素。因此,笔者在以上研究的基础上,结合现场施工的实际情况,对防喷敛集装置进行优化设计,并对其抗冲击性能进行测试研究,最后进行现场应用。

## 1 防喷敛集装置优化设计

防喷敛集装置的主要作用是为了防止高压水射流割缝过程中大量瓦斯及煤渣混合物突然涌入施工现场,进而造成瓦斯超限、巷道报警断电等影响现场作业及威胁施工安全等问题。因此,防喷敛集装置必须具备非常强的密封性能,同时为了增加其现场适应性,防喷敛集装置的质量不宜过大。根据以上要求,笔者通过研究对防喷敛集装置进行了优化,优化后的防喷敛集装置如图 1 所示,并通过研究钻孔过程中瓦斯、煤渣、水的流动特点,对原有防喷敛集装置做出如下优化:①减轻装置质量(整个防喷敛集装置质量为 15 kg),并将将来封孔部分开口处设计为合页型,便于钻头与钻杆通过。如图 1b 所示,提高装置适应性。②装置采用胶囊封孔、注水加压的方式,胶囊工作压力为 1.5~2.0 MPa。同时在胶囊入口处设置单向阀,并结合加压装置,对胶囊压力进

行动态监测,从而确保胶囊密封性能。装置优化前后各参数对比见表 1。

表 1 防喷敛集装置优化前后参数对比  
Table 1 Contrast of each parameters of outburst prevention and collection device

参数	传统防喷敛集装置	优化后的防喷敛集装置
装置质量/kg	30	15
封孔器外径/mm	130	110
密封固定	挂钩弹簧	胶囊封孔、注水加压
胶囊工作压力/MPa	—	1.5~2.0

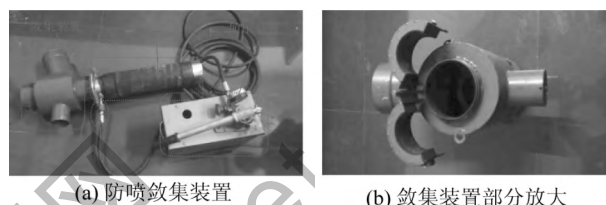


图 1 优化后的防喷敛集装置

Fig. 1 Optimized outburst prevention and collection device

## 2 防喷敛集装置抗冲击性能试验

### 2.1 试验方案

根据现场实际工况,防喷敛集装置在使用过程中主要受到静载荷、钻杆转动带来的持续振动以及煤水混合物带来的冲击载荷这 3 个因素的作用。因此,本次试验将对优化后的防喷敛集装置在这 3 种载荷作用下的抗冲击性能进行测试。其中,静载荷由不同质量的水泥试件提供,振动作用由振动架提供,而冲击载荷作用则由不同质量的钢锤,从不同高度自由落体撞击冲击敛集装置受力端的方式进行模拟。其次,试验参数中,静载荷、冲击载荷、作用时间均按现场实际工况确定,而钢锤质量、钢锤冲击次数及钢锤冲击高度则按照防喷敛集装置所受总冲量不变的原则进行一定的调整。

### 2.2 试验过程

1) 静载荷及振动模拟试验。①将优化后的防喷敛集装置安放于预先浇筑好的水泥块中(水泥块中心预制了一个直径 113 mm 的钻孔模型),采用加压装置对胶囊加压至指定压力(分别为 1.5、2.0 MPa)。②防喷敛集装置与水泥块完全固定后将其放置在振动装置上并在装置套筒上标记好刻度。③将不同质量的水泥块(35、45、55、75、85、105 kg)放置在防喷敛集装置受力端上面,静置设定时间模拟静载荷作用(60 min)。随后开启振动装置持续设

定时间(30 min)模拟振动作用。④测量并记录不同情况敛集装置相对于水泥块的滑移位移,并记录敛集装置与水泥块的接触情况及气囊压力读数。

2) 冲击载荷试验。①将优化后的防喷敛集装置安放于预先浇筑好的水泥块中,采用加压装置对气囊加压至指定压力(分别为1.5、2.0 MPa)。②待防喷敛集装置与水泥块完全固定后,将其放置在测试台上并在装置套筒上标记好刻度。③将不同质量(分别为10、20 kg)的钢锤升至一定高度(分别为40、60、80、100 cm),使其自由落体作用于敛集装置受力端,每个条件下冲击次数为20次。④钢锤每冲击5次之后测量并记录不同情况下敛集装置相对于水泥块的滑移位移,并记录敛集装置与水泥块的接触情况及气囊压力读数。

### 2.3 试验结果及分析

静载荷试验结果见表2,振动模拟试验结果见表3。

表2 静载荷试验结果

Table 2 Experiment results of static load experiment

气囊压力/MPa	载荷/kg	持续时间/min	敛集装置状态
1.5	35	60	无下滑
1.5	45	60	无下滑
1.5	55	60	无下滑
1.5	75	60	30 min内下滑2 mm,补气,无下滑
1.5	85	60	35 min内下滑3 mm,补气,无下滑
1.5	105	60	28 min内下滑5 mm,补气,无下滑
2.0	105	60	无下滑
2.0	115	60	无下滑

表3 振动模拟试验结果

Table 3 Experiment results of vibration simulation

气囊压力/MPa	载荷/kg	持续时间/min	敛集装置状态
1.5	35	30	无下滑
1.5	45	30	无下滑
1.5	55	30	无下滑
1.5	75	30	无下滑
1.5	85	30	无下滑
1.5	105	30	无下滑
2.0	105	30	无下滑

分析表2可知,静载荷试验中,当气囊压力为1.5 MPa时,随着水泥块试件质量的增加,防喷敛集的稳定性逐渐减弱,当水泥块试件质量小于55 kg时装置未出现下滑现象,当水泥块试件质量超过55 kg后装置出现轻微下滑,气囊压力也有所下降,但补气后基本不下滑。其次,当气囊压力为2.0 MPa

时,水泥块试件质量即便达到了115 kg,都未发现下滑现象。这是由于气囊压力增加,增大了与孔壁的摩擦力,因此稳定性增大。从表3可知,在振动载荷作用下气囊压力无论是1.5 MPa还是2.0 MPa均未发生下滑现象。因此,优化后的防喷敛集装置在静载荷和振动状态下,其稳定性能极好。

冲击载荷试验结果见表4,反映了防喷敛集装置抗冲击性能的情况,当气囊压力为1.5 MPa,冲击次数在20次以内冲击高度为60 cm以内条件下,装置均未发生下滑。当气囊压力为2.0 MPa,冲击高度大于60 cm,冲击次数大于5次时,装置会出现轻微下滑,但幅度不大,经采取补气措施后,未出现下滑情况。当冲击次数在5次以内,冲击高度小于100 cm时,装置未出现下滑,证明优化后的防喷敛集装置具有较好的抗冲击性能。而当冲击高度为100 cm,冲击次数大于5次时,防喷敛集装置的抗冲击能力达到极限。其次,为了更加具体地表征优化后的防喷敛集装置的抗冲击性能,定义其累积抗冲击量 $I_n$ 为

$$\sum_{i=1}^n I_n = m\sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中: $n$ 为冲击次数; $m$ 为冲击钢锤质量; $g$ 为重力加速度; $h$ 为钢锤的冲击高度。

表4 冲击载荷试验结果

Table 4 Experiment results of impact loading test

气囊压力/MPa	重锤质量/kg	冲击高度/cm	冲击次数	敛集装置状态
1.5	10	40	5	无下滑
1.5	10	40	10	无下滑
1.5	10	40	15	无下滑
1.5	10	40	20	无下滑
1.5	20	60	5	无下滑
1.5	20	60	10	无下滑
1.5	20	60	15	下降2 mm,气压下降0.15 MPa,补气
1.5	20	60	20	无下滑
2.0	20	80	5	无下滑
2.0	20	80	10	下降3 mm,气压下降0.25 MPa,补气
2.0	20	80	15	下降2 mm,气压下降0.2 MPa,补气
2.0	20	80	20	无下滑
2.0	20	100	5	无下滑
2.0	20	100	10	下降5 mm,气压下降0.35 MPa,补气
2.0	20	100	15	下降6 mm,气压下降0.4 MPa,补气
2.0	20	100	20	下降4 mm,气压下降0.35 MPa

根据计算,得到各个情况下防喷敛集装置所能承受的累计冲击量,如图2所示。其中,当敛集装置

经钢锤撞击后出现位移滑动,但经过补气措施后无下滑,则其累积冲击量按之前的冲击次数进行计算。当敛集装置经钢锤撞击后出现位移滑动,并且采用补气措施后仍出现下滑,则认为装置的抗冲击性能已达到极致,不统计在图 2 中。

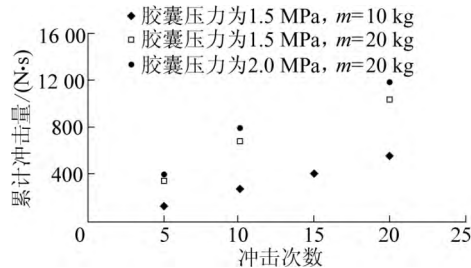


图 2 防喷敛集装置抗冲击累积冲击量变化  
Fig. 2 Cumulative impulse of borehole outburst prevention device

分析图 2 可以看出,优化后的防喷敛集装置能抵抗的累积冲击冲量随胶囊压力的增加而增加。其能抵抗的最大累积冲击冲量为 1 188 N·s。因此优化后的防喷敛集装置在冲击荷载作用下,依然能保持较好的稳定性,十分牢固。

3 现场试验

根据试验测试结果,对优化后的防喷敛集装置进行现场测试,并与传统防喷敛集装置效果进行对比。试验选择在平煤股份有限公司十矿己<sub>15</sub>-24080 中间底位巷 600 m 附近进行,该区段含两层煤,分别为己<sub>15、16</sub>煤层和己<sub>17</sub>煤层,煤层埋深约 912 m,煤层倾角为 10°~37°,煤体密度为 1.3 g/cm<sup>3</sup>,煤层原始瓦斯压力最大达 3.6 MPa,瓦斯含量为 17.6 m<sup>3</sup>/t。由于该区段瓦斯压力与瓦斯含量均超过规定的数值,因而采用高压水射流割缝技术对煤层进行卸压增透,其钻孔布置如图 3 所示。

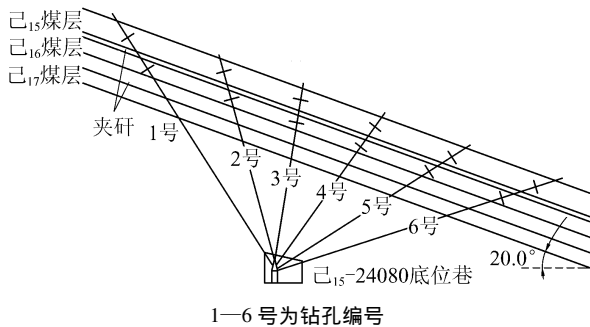


图 3 钻孔布置示意

Fig. 3 Schematic of drilling arrangement

现场试验时选择两排施工钻孔进行对比试验。

第 1 排钻孔在实施高压水射流割缝时采用传统的防喷敛集装置,而第 2 排钻孔采用优化后的防喷敛集装置。试验过程中记录下 2 种防喷装置的使用情况,见表 5 和表 6。

表 5 传统防喷装置现场试验情况

Table 5 Field test conditions of traditional borehole outburst prevention device

钻孔编号	瓦斯体积分数/%	割缝钻孔施工情况	装置试验情况
1 号	0.49	无动力现象	正常
2 号	0.61	憋孔、喷孔	滑动
3 号	0.59	憋孔、喷孔	滑动
4 号	0.48	轻微喷孔	滑动
5 号	0.62	憋孔、喷孔	滑动
6 号	0.52	轻微喷孔	滑动

表 6 优化后的防喷敛集装置现场试验情况

Table 6 Field test conditions of optimized borehole outburst prevention device

钻孔编号	瓦斯体积分数/%	割缝钻孔施工情况	装置试验情况
1 号	0.21	无动力现象	正常
2 号	0.32	轻微喷孔	正常
3 号	0.36	憋孔、喷孔	轻微滑动,压力下降约 0.1 MPa,补气后正常
4 号	0.29	憋孔、喷孔	轻微滑动,压力下降约 0.1 MPa,补气后正常
5 号	0.26	轻微喷孔	正常
6 号	0.17	无动力现象	正常

瓦斯体积分数变化曲线如图 4 所示,从现场试验过程可以看出,在突出煤层实施高压水射流割缝时,由于煤层瓦斯含量高,瓦斯压力大,极易诱发钻孔喷孔现象,并且随着钻孔倾角的增大,钻孔喷孔现象越剧烈,这主要是由于此时煤体重力也成为瓦斯喷孔的重要诱因。本次试验钻孔中,出现轻微喷孔现象的钻孔数占 33%,出现憋孔、喷孔现象的钻孔数占总钻孔数的 42%。其次,通过表 4、表 5 与图 4 可以看出,采用传统的防喷敛集装置时,钻孔 2 号、3 号、5 号的巷道瓦斯体积分数分别高达 0.61%、0.59%、0.62%,占钻孔总数的 50%。而采用优化后的防喷敛集装置后,6 个钻孔的瓦斯体积分数最高为 3 号钻孔的 0.36%,通过对比对应钻孔瓦斯体积分数可以发现,使用传统防喷敛集装置时钻孔瓦斯

体积分数是使用优化后的防喷敛集装置钻孔瓦斯体积分数的1.64~3.06倍。可见优化后装置对于瓦斯浓度的控制,效果十分显著。因此采用优化后的装置基本能完全杜绝巷道瓦斯浓度超限,保证现场施工的安全。同时,在喷孔现象发生后,采用传统的防喷敛集装置均出现了下滑甚至脱落现象,而采用优化后的防喷敛集装置却未见大幅度下滑,在3号、4号钻孔出现较为剧烈的喷孔现象后,装置产生轻微滑动,但经采取补气措施后,未见有下滑,证明优化后的防喷敛集装置具有更好的密封性能及较强的抗冲击性能,使用中更加牢固,从而能够保证现场施工的安全。

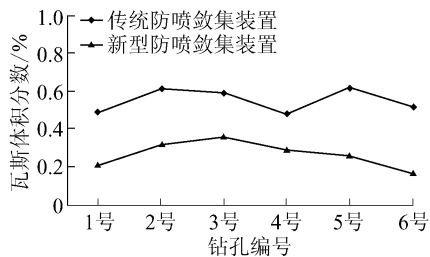


图4 瓦斯体积分数变化曲线

Fig. 4 Curve of mash gas concentration

## 4 结 论

1) 优化后的防喷敛集装置采用胶囊封孔、注水加压的方式,装置质量仅为15 kg,较传统防喷敛集装置质量减少50%。同时敛集装置端部采用合页式开口设计,操作更加方便,工序更加简单。

2) 抗冲击性能试验结果表明优化后的防喷敛集装置的抗冲击性能受到载荷的作用时间和作用高度的影响较大,当胶囊压力为2.0 MPa,钢锤质量为20 kg,冲击高度为100 cm时,优化后的防喷敛集装置抗冲击性能达到极致,其能承受的累积冲击冲量为1 188 N·s。

3) 现场试验中使用传统防喷敛集装置时钻孔瓦斯体积分数是使用优化后防喷敛集装置瓦斯体积分数的1.64~3.06倍。表明优化后的防喷敛集装置具有更好的密封性能,对于瓦斯浓度的控制效果十分显著。基本解决了高压水射流割缝时引起瓦斯喷孔而造成瓦斯超限的问题。同时,在出现钻孔喷孔现象无明显下滑现象,证明优化后的防喷敛集装置具有更强的稳定性。

## 参考文献(References):

[1] 袁亮.高瓦斯矿区复杂地质条件安全高效开采关键技术[J].

煤炭学报,2006,31(2):174-178.

Yuan Liang. Key technique to high efficiency and safe mining in highly gassy mining area with complex geologic condition [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 174-178.

[2] 陈静,王继仁,贾宝山.低透气性煤层瓦斯抽采技术与应用[J].煤炭技术,2009,28(3):70-73.

Chen Jing, Wang Jiren, Jia Baoshan. Technology and application on gas drainage in low-permeability coal seam [J]. Coal Technology, 2009, 28(3): 70-73.

[3] 申宝宏,刘见中.我国煤矿瓦斯治理的技术措施[J].煤炭学报,2007,32(7):673-679.

Shen Baohong, Liu Jianzhong. The technical measures of gas control in China coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 673-679.

[4] 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(3):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(3): 1386-1390.

[5] 窦林名,杨增强,丁小敏等.高压射流割煤技术在防治冲击地压中的应用[J].煤炭科学技术,2013,41(6):10-13.

Dou Linming, Yang Zengqiang, Ding Xiaomin et al. Application of high pressure water jet coal cutting in mine pressure bumping prevention and control [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 10-13.

[6] 康勇,王晓川,卢义玉等.磨料射流辅助三翼钻头破岩试验研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(2):212-218.

Kang Yong, Wang Xiaochuan, Lu Yiyu et al. Experimental study of rock breaking by a three wing abrasive jet assisted drill bit [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 212-218.

[7] 袁波,康勇,李晓红等.煤层水力割缝系统性能瞬变特性研究[J].煤炭学报,2013,38(12):2153-2157.

Yuan Bo, Kang Yong, Li Xiaohong et al. Experimental study on transient characteristics of hydraulic cutting seams system in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2153-2157.

[8] Lu Yiyu, Liu Yong, Li Xiaohong et al. A new method of drilling long boreholes in low permeability coal by improving its permeability [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84(2): 94-102.

[9] 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 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.

[10] 邹忠有,白铁刚,姜文忠等.水力冲刷煤层卸压抽放瓦斯技术的研究[J].煤矿安全,2000,31(1):34-36.

Zou Zhongyou, Bai Tiegang, Jiang Wenzhong et al. Research into coalbed methane drainage by pressure relief hydraulic impacting

- and cutting technology [J]. *Safety in Coal Mines*, 2000, 31(1): 34-36.
- [11] Kang Yong, Xiaochuan Wang, Xiaofeng Yang, *et al.* Numerical simulation of control blasting with borehole protecting and water jet slotting in soft rock mass [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 933-938.
- [12] 黄小波, 卢义玉, 夏彬伟, 等. 淹没射流旋转割缝技术在突出煤层掘进中的应用 [J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(3): 70-73.  
Huang Xiaobo, Lu Yiyu, Xia Binwei, *et al.* Application of flooded water jet rotary slotting technology to gateway driving in outburst seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(3): 70-73.
- [13] 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试验研究 [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.
- [14] 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.
- [15] 孙矩正, 李东洋, 栗登峰, 等. 高压水射流割缝诱导钻孔喷孔机理及防治措施 [J]. *煤矿安全*, 2016, 47(2): 136-139.  
Sun Juzheng, Li Dongyang, Su Dengfeng, *et al.* Mechanism of drilling jet orifice induced by high pressure water jet cutting and its control measures [J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(2): 136-139.
- [16] 张建国, 林柏泉, 翟成. 穿层钻孔高压旋转水射流割缝增强透防突技术研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(3): 411-415.  
Zhang Jianguo, Lin Baiquan, Zhai Cheng. Research on outburst prevention technology of high pressure hydraulic-cutting seam through layer and its application [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(3): 411-415.
- [17] 沈春明, 汪东, 张浪, 等. 水射流切槽诱导高瓦斯煤体失稳喷出机制与应用 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9): 2097-2104.  
Shen Chunming, Wang Dong, Zhang Lang, *et al.* Mechanism and application of inducing high-gas coal outburst from borehole by waterjet slotting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2097-2104.
- [18] 梁运培. 煤层钻孔喷孔的发生机理探讨 [J]. *煤矿安全*, 2007, 38(10): 61-65.  
Liang Yunpei. Discussion of the principle of output of drilling hole in coal seam [J]. *Safety in Coal Mines*, 2007, 38(10): 61-65.
- [19] 龙建明, 陈久福, 李文树, 等. 穿层预抽钻孔气水渣分离装置的研制与应用 [J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(12): 46-49.  
Long Jianming, Chen Jiufu, Li Wenshu, *et al.* Research and application on gas, water and dust separator to pre-drainage borehole through beds [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(12): 46-49.
- [20] 陈久福, 孙大发, 龙建明, 等. 气水渣分离及瓦斯粉尘捕捉一体化装置的研究与应用 [J]. *矿业安全与环保*, 2013, 40(5): 45-47.  
Chen Jiufu, Sun Dafa, Long Jianming, *et al.* Development and application of integrated gas-water-slag separation and gas-dust capture device [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2013, 40(5): 45-47.
- [21] 黄春明, 代志强, 郭明功. 高压水射流割缝增强瓦斯抽采及防喷孔技术研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(4): 63-66, 109.  
Huang Chunming, Dai Zhixu, Guo Mingong, *et al.* Study on enhanced gas drainage and borehole outburst prevention technology with high pressurized water jet slotting [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(4): 63-66, 109.