

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0283-06

# 瓦斯抽放孔射流排水排渣方法及实验研究

李栋, 卢义玉, 王洁, 廖识, 黄小波

(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要** 针对煤矿俯孔积存水和煤渣影响瓦斯抽放效果问题, 提出射流排水排渣方法, 设计加工出射流深孔排水排渣装置, 采用正交试验法验证了该方法可行性, 并研究工作参数对其性能影响规律。结果表明: 压缩空气压力  $p$  对其性能影响最大, 随着  $p$  值增大排水渣量呈现先增多后减少趋势, 存在最优空气压力值  $p^*$  使其性能最优; 存在临界孔深  $H_{np}$ , 即孔深小于  $H_{np}$  时排出水渣量保持不变, 孔深大于  $H_{np}$  时排出水渣量逐渐减小; 其他条件不变, 随着孔内水深升高, 排水渣量逐渐增大。射流排水排渣方法可行, 操作简单, 能有效排出瓦斯抽放孔中的水和煤渣。

**关键词** 瓦斯抽放孔; 排水排渣; 实验研究

**中图分类号** TD 712

**文献标识码** A

## Method and Experimental Study on Draining Water and Cinder by Jet in Gas Drainage Hole

LI Dong, LU Yi-yu, WANG Jie, LIAO Shi, HUANG Xiao-bo

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University,  
Chongqing 400030, China)

**Abstract** Water and coal cinder in the downward drainage holes influence the effect of gas drainage. A new method is proposed to drain water and coal cinder by jets. A set of device for drain water and cinder by jets is designed. The feasibility of this method is verified by using orthogonal test and the influences of working parameters on the device performance are also researched. The results show that the device performance is most affected by compressed air pressure  $p$ . The amount of water and coal cinder increase at first and then reduce as  $p$  increases indicates that there exists an optimal air pressure  $p^*$  making the device performances the best. There is a critical depth  $H_{np}$  of drainage holes. When the depth of hole is less than  $H_{np}$ , the amount of water and coal cinder keep invariant. However, the amount decreases gradually when the depth of hole is more than  $H_{np}$ . If all other conditions do not change, the amount of water and coal cinder increase gradually as the water depth in the holes increase. The  $p^*$  of the device for water and coal cinder drainage is 0.55 MPa obtained by experiments. The method of draining water and coal cinder by jets is feasible and simple to operate and available to drain water and coal cinder effectively in the drainage holes of coal mine.

**Key words** gas drainage hole; water and coal cinder drainage; experimental study

收稿日期: 2011-05-05

基金项目: 国家自然科学基金委专项创新研究群体基金项目(50921063); 重庆市杰出青年基金项目(CSCT, 2009BA6047); 重庆大学“211工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

作者简介: 李栋(1986-), 男, 山东省淄博市人, 研究生, 从事采矿工程方面的研究。

E-mail: ld@cqu.edu.cn

Tel: 15123876008

我国大部分煤层赋存条件复杂,易诱发矿井瓦斯灾害事故,严重制约煤矿安全高效生产<sup>[1-4]</sup>。为消除煤与瓦斯突出隐患,矿井通常采用在煤层中打钻孔(孔深 30~80 m,孔径 50~80 mm)预抽瓦斯<sup>[5-9]</sup>。但由于施工工艺、煤层水文地质条件及含水率等自然因素影响,钻孔后俯孔中一般会积存大量的水和煤渣。由于钻孔深度深且孔径小,无法找到有效的办法将孔中积存的水和渣排出,阻塞煤层中瓦斯流动的孔隙裂隙通道,瓦斯抽放效果受到严重影响。另外,在煤质松软煤层中,钻孔中积水长时间浸泡孔壁煤体将会导致钻孔坍塌,进而导致出现瓦斯抽采空白带,使煤矿生产存在很大安全隐患。

针对矿井瓦斯抽放俯孔排水排渣问题,目前国内研究还是空白。实际生产中矿井对瓦斯抽放孔中积存的水和煤渣一般不做处理,只有在封孔时仅对封孔段进行排水。在此过程中通常采用风力排水<sup>[10-11]</sup>,即在钻孔完成以后,将压缩空气经过钻杆内孔、钻头进入孔底,在孔内形成风流,将积水、煤渣排出,但效果很差,一般只能排出 10 m 左右积水,远远无法达到深孔排水的目的。因此,如何有效地排出瓦斯抽放孔中积存的水和煤渣成为高效抽采瓦斯的关键问题。

论文提出瓦斯抽放孔射流排水排渣方法,研制出一种深俯孔排水排渣装置,根据矿井实际情况改进其内部结构、外部尺寸,并采用正交试验法验证该方法可行性,研究工作参数对其性能影响规律。

## 1 射流排水排渣方法

射流排水排渣是基于射流泵工作原理设计出射流深孔排水排渣装置,利用射流紊动扩散作用,通过压缩空气将俯孔中积存的水和煤渣抽取并排放。

射流排水排渣方法首先将排水管与装置出口连接牢固,然后将压风系统与装置通过压缩空气管连接牢固,再将连接好的装置置入俯孔中,开启压缩空气阀门,压缩空气通过装置喷嘴形成高速射流,在喷嘴出口处产生低压区,对水渣混合物产生抽吸作用,并由于喷嘴出口处射流边界层的紊动扩散作用,与周围的水渣混合流体发生动量交换,空气射流的动能一部分传给水渣混合体,混合形成水、煤渣、压缩空气构成的三相流体,并进行能量和质量传递<sup>[13-15]</sup>。在流动过程中,进行流体速度场的均衡,并伴随压力升高,三相流速度逐渐趋于一致。

三相流压力继续升高,从装置出口经排水管将积水、煤渣从钻孔内排出。根据现场俯孔内积水大小,当观察到排水管没有积水、煤渣排出时,表明排水完毕,关闭压缩空气阀门,深孔排水过程结束,取出装置再将连接好的装置置入下一俯孔中,重复以上步骤。方法示意图见图 1。

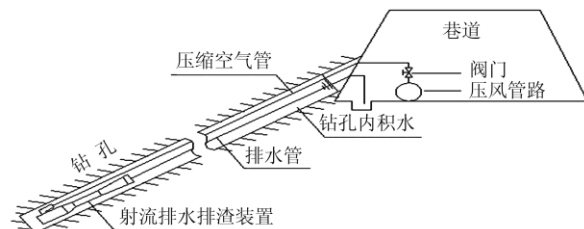


图 1 射流排水排渣方法示意

Fig.1 Schematic diagram of the method

## 2 射流深孔排水排渣装置研究

射流深孔排水排渣装置<sup>[12]</sup>主要由工作喷嘴、接受室、混合室、扩散器等部件组成,如图 2 所示。对该装置性能影响因素可分为 2 类,一类是装置结构的影响,如喷嘴结构、最佳截面比、喉嘴距等;另一类是工作参数的影响,如压缩空气压力  $p$ ,钻孔积水深度  $h$ ,钻孔深度  $H$ ,压缩空气温度  $t$  等。本文通过理论计算设计出装置各结构参数;由于压缩空气温度基本不变,因此只研究压缩空气压力、钻孔深度和积水深度对装置性能的影响。

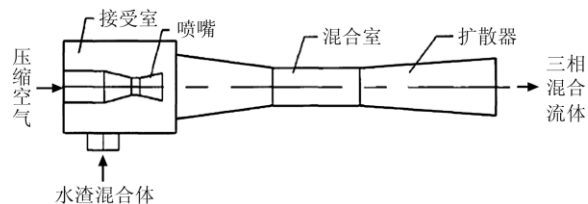


图 2 射流深孔排水排渣装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the water and cinder drainage device

### 2.1 结构参数

排水排渣装置的设计即是在考虑矿井压风系统压力、俯孔孔径、孔深及煤渣粒径等因素基础上,对压缩空气压力、钻孔深度、积水深度与排水排渣装置性能的关系进行一系列研究后,设计出装置最优结构参数<sup>[14]</sup>,主要包括喷嘴结构、最佳截面比、喉嘴距等,其他尺寸均取经验值。

#### 1) 喷嘴结构

根据工作流体为大膨胀比的气体射流泵设计经验,在压力比  $p_p/p_H \geq 1/\Pi_{ps}$  情况下,通常选取

工作喷嘴形状为扩张式，如图 3 所示。

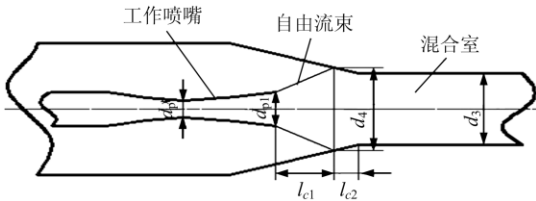


图 3 结构设计示意

Fig.3 Schematic diagram of structure design

喷嘴临界截面直径按式 (1) 计算

$$d_{p^*} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{G_p a_{p^*}}{k_p \Pi_{p^*} p}}} \quad (1)$$

式中： $G_p$  为工作流体重量流量； $a_{p^*}$  为工作流体的临界速度； $k_p$  为绝热指数，理想气体取 1.4； $\Pi_{p^*}$  为工作流体压缩比。

喷嘴出口截面直径按式 (2) 计算

$$d_{p1} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{f_{p^*}}{q_{PH}}} \quad (2)$$

式中： $q_{PH}$  为折算质量速度； $f_{p^*}$  为喷嘴临界截面面积。

## 2) 最佳截面比

射流深孔排水排渣装置的最佳截面比  $(f_3/f_{p^*})_{OPT}$ ，即混合室面积与喷嘴临界截面面积之比，由公式 (3) 计算得到

$$(f_3/f_{p^*})_{OPT} = \frac{k_p \Pi_{p^*} \varphi_1 \varphi_2 \lambda_{PH}}{2 \frac{\Delta p_c}{p}} \quad (3)$$

表 1 射流深孔排水排渣装置主要结构参数

Table 1 The main structure parameters of the water and cinder drainage device

参数	喷嘴临界截面直径/mm	喷嘴出口截面直径/mm	最佳截面比	混合室直径/mm	混合室长度/mm	扩散器长度/mm	扩散器收缩角/(°)	扩散器出口段直径/mm	喉嘴距/mm
尺寸	8.0	9.0	2.6	13.0	91.0	49.0	8.0	20.0	26.0

## 2.2 排水排渣装置的加工

按照理论计算的尺寸，加工出排水排渣装置，剖面图如图 4 所示。该装置采用不锈钢材料，加工

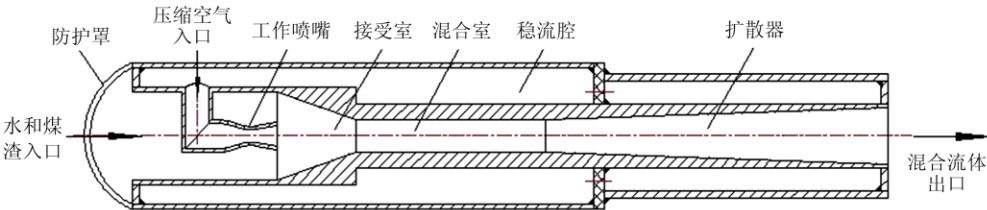


图 4 排水排渣装置剖面图

Fig.4 Profile of the water and cinder drainage device

式中： $\varphi_1$  为速度系数，分别取 0.95，0.975； $\lambda_{PH}$  为折算等熵速度，查表取 1.497； $p_c$  为出口压力，与孔深相对应。

## 3) 喉嘴距

混合室直径  $d_3$  由公式 (4) 计算得到

$$d_3 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \sqrt{4 f_{p^*}}} \quad (4)$$

压缩空气从喷嘴喷出到接受室壁段为自由流速，其长度  $l_{c1}$  由公式 (5) 计算

$$l_{c1} = \left[ \sqrt{0.083 + 0.76u} - 0.29 \right] \frac{d_1}{2a} \quad (5)$$

式中： $a$  为实验常数，取 0.08。

自由流束直径  $d_4$  由公式 (6) 计算

$$d_4 = 3.4 d_1 \sqrt{0.083 + 0.76u} \quad (6)$$

喉嘴距  $l_c$  由自由流速  $l_{c1}$  和混合室入口段长度

$l_{c2}$  2 部分组成，其中  $l_{c2} = \frac{d_4 - d_3}{2}$ 。

## 4) 其他结构参数

混合室长度  $l_k = 7d_3$

扩散器的长度  $l_{\Pi} = 7(d_c - d)$

式中： $d_c$  为扩散器出口截面直径。

经过一系列计算，得出射流深孔排水排渣装置的主要结构参数，结果如表 1 所示。

目前在矿井钻孔中钻头直径多为 75 mm，考虑钻头破煤不完全，设计其直径为 60 mm，并在前端加一凸出光滑挡板，防止突起煤块将装置卡住。

要求内表面尽量光滑，工作喷嘴为可活动部件，其余各连接部分均焊接牢固，保证有良好的密封性。

3 实验研究

实验主要是通过调整压缩空气压力、钻孔垂深、钻孔积水深度等工作参数,得出各工作参数对装置性能影响规律,确定出其最大排水排渣深度、最优压缩空气压力,并验证射流排水排渣方法可行性。

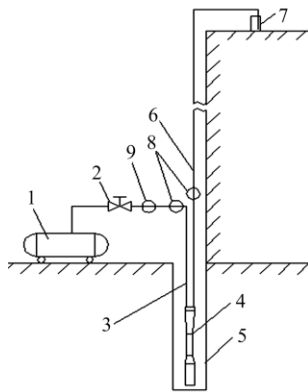
3.1 实验设备及工艺

3.1.1 实验设备

- 1) 空气压缩机: 型号W-0.9/10;
- 2) 射流深孔排水排渣装置;
- 3) 智能一体化涡轮式电子流量计: 型号 LWGY-10 (CF) C/0.5, 量程0.2~1.2 m<sup>3</sup>/min, 精度 0.5级;
- 4) 采用1.5级标准压力表 (量程0~1.0 MPa, 精度2.5级) 测定压缩空气压力。

3.1.2 实验工艺

实验装置及示意流程如图 5 所示。



1-空气压缩机; 2-压缩空气阀门; 3-压缩空气管;  
4-排水排渣装置; 5-蓄水池; 6-排水管; 7-接收桶;  
8-压力表; 9-流量计

图 5 实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental device

连接管路,将排水出口分别接至实验室楼层不同高度模拟不同的瓦斯抽放俯孔深度,通过空压机阀门控制压缩空气压力,通过将装置置于水池中不同位置来模拟钻孔水深。根据设计尺寸,筛选粒径小于最大排出粒径的煤渣,并将称重后的煤渣混入到蓄水池中。检查系统气密性良好后,将排水排渣装置置入蓄水池中,开启压缩空气阀门,当排水量较大且稳定时开始计时,计时约30秒钟,用流量计测量压缩空气量,用量筒测量其排水量,用天平称排出煤渣重量。

3.2 实验方案的确定

实验分为两部分:第 1 部分采用正交试验法确定该装置压缩空气压力  $p$ , 钻孔垂深  $H$ , 积水深度  $h$  最优取值范围;第 2 部分采用单因素实验法得出装置准确最优压缩空气压力及排水最大深度。在实验分析过程中采用喷射系数  $u$  的大小,即排出水渣的质量流量与压缩空气的质量流量之比的大小,作为评判装置性能好坏的指标,  $u$  值越大说明装置性能越优。

由于煤矿现有空气压缩系统压力在 0.4~0.7 MPa 之间,瓦斯抽采俯孔深度普遍在 30~80 m 之间,俯角在-25°~0° 之间较多,结合实验室设备所能满足的条件,选取压缩空气压力  $p$ , 钻孔积水垂深  $h$  和钻孔垂深  $H$  为影响因素,其中  $p$  取值范围为 0.3~0.7 MPa,  $h$  取值范围为 0.5~1.5 m,  $H$  取值范围为 10~20 m, 见表 2。

表 2 实验因素水平

Table 2 Factor and level of experimental

因素	水平		
	1	2	3
$p/\text{MPa}$	0.3	0.5	0.7
$h/\text{m}$	0.5	1	1.5
$H/\text{m}$	10	15	20

本文选用L<sub>(9)</sub> (3<sup>4</sup>) 正交表进行实验,实验方案及实验结果见表3。

表 3 正交试验方案

Table 3 The Orthogonal Test

序号	$p/\text{MPa}$	$H/\text{m}$	$h/\text{m}$	$u$
1	0.3	0.5	10	0.343
2	0.3	1	15	-0.007
3	0.3	1.5	20	-0.099
4	0.5	0.5	15	0.381
5	0.5	1	20	0.197
6	0.5	1.5	10	1.05
7	0.7	0.5	20	0.39
8	0.7	1	10	0.679
9	0.7	1.5	15	0.671

3.3 实验结果及分析

从表 3 中可以得出,  $p$  值对排水排渣装置性能的影响最大,装置性能最好的一组实验参数为 0.5-1.5-10。再采用单因素实验法在最优实验参数附近取值,确定出准确  $p$  和  $H$  值。

3.3.1  $p$  值确定及对装置性能影响

根据正交试验结果, 选取 $p$ 值范围为0.4~0.6 MPa, 每0.05 MPa取一 $p$ 值,  $h$ 为1.5 m,  $H$ 为10 m进行单因素实验, 实验结果见图6。

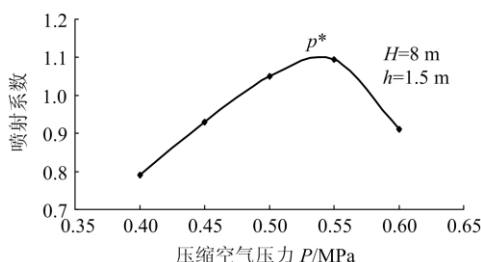


图6 喷射系数 $u$ 随 $p$ 值的变化

Fig.6 Entrainment ratio and motive pressure

从图6中可以看出, 在 $h$ 与 $H$ 值一定时, 排水排渣装置存在一个最优压缩空气压力 $p^*$ , 使喷射系数达到最大值。当 $p$ 值小于 $p^*$ 时, 喷射系数随着 $p$ 值升高急剧升高; 当 $p$ 大于 $p^*$ 时, 随着 $p$ 值升高喷射系数降低。由此可知, 单一提高 $p$ 值并不一定能改善装置的排水排渣能力。因为当 $p$ 值升高时, 压缩空气流量 $G_p$ 也随之增加, 装置所能达到的极限喷射系数 $u_{\text{HP}}$ 随之降低。

### 3.3.2 $H$ 值确定及对装置性能影响

选取 $p$ 值为0.55 MPa,  $h$ 值分别为1 m, 1.5 m,  $H$ 值范围为5~23 m, 每3 m取一 $H$ 值进行实验, 实验结果见图7。

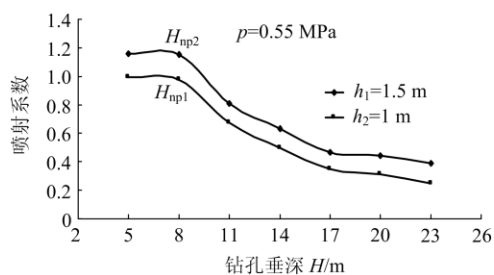


图7 喷射系数 $u$ 与 $H$ 的关系图

Fig.7 Entrainment ratio and discharging pressure

从图7可以看出, 当 $p$ 值与 $h$ 值一定时, 装置存在一个临界出口垂深 $H_{\text{np}}$ 。当 $h$ 值逐渐增加时, 喷射系数会随之减小; 当 $h$ 值增加到一定值时, 喷射系数变为零; 继续增加 $h$ 值时, 喷射系数可能出现负值, 也就是, 部分工作流体会从接受室进入到蓄水池中。当 $h$ 值减小时, 在小于临界出口垂深 $H_{\text{np}}$ 之前, 喷射系数逐渐增大; 当继续减小 $h$ 并小于 $h_{\text{np}}$ 时, 喷射系数达到最大值, 并且保持不变。这是因为: 在装置的几何参数 $f_3/f_{p^*}$ 已定情况下, 当 $h$ 值小于 $h_{\text{np}}$ 时, 混合室中混合流体的速度达到极限速度, 排水排渣

装置达到 $p$ 和 $h$ 给定情况下的最大喷射系数。

### 3.3.3 $h$ 值对装置性能影响

从图7可以看出, 当 $p$ 与 $H$ 一定时, 积水垂深 $h$ 由1.5 m降到1 m时会引起喷射系数的减小, 极限喷射系数由 $u_{(\text{np})2}$ 降低到 $u_{(\text{np})1}$ ; 从整体上看, 当 $h$ 降低时, 也会引起临界排水垂深 $H_{\text{np}}$ 的减小。这是因为:  $h$ 升高, 一方面会增加引射流体与喷嘴出口处工作流体间的压力差, 增加引射流体进入接受室的推动力, 提高喷射系数; 另一方面, 增加了混合流体的能量, 增强了克服出口压力的能力, 所以使 $H_{\text{np}}$ 有所提高<sup>[16]</sup>。即当俯孔中积水深度增加时, 装置排水排渣能力得到提升。

## 4 结 论

1)  $p$ 值对装置性能影响较大, 最优空气压力值 $p^*$ 使排水渣量达到最大值, 该装置 $p^*$ 为0.55 MPa。

2) 存在临界孔深 $H_{\text{np}}$ , 孔深小于 $H_{\text{np}}$ 时排出水渣量保持不变, 孔深大于 $H_{\text{np}}$ 时排出水渣量逐渐减小。

3) 其他条件不变, 随着俯孔积水加深, 该装置喷射系数、极限喷射系数随之增大, 排水排渣能力得到提升。

4) 当钻孔倾角为 $-25^\circ$ , 俯孔积水深度为1.5 m时, 排水排渣深度能达到60 m, 排水排渣质量流量达到1.8 kg/min。

5) 射流排水排渣方法可行, 操作简单, 能有效排出瓦斯抽放孔中的水和煤渣。

## 参考文献:

- [1] 谢和平. 煤炭科学技术发展的展望[J]. 煤炭学报, 1997, 22(增刊): 10-17.  
XIE He-ping. Prospect of development of coal science & technology [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(Supp): 10-17.
- [2] 胡省三, 成玉琪. 21世纪前期我国煤炭科技重点发展领域探讨[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 554-558.  
HU Sheng-san, CHENG Yu-qi. Discussions on key development fields of China's coal science and technology at early stage of 21st century [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(1): 554-558.
- [3] 申宝宏, 刘建中. 我国煤矿瓦斯治理的技术措施[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 673-679.  
SHEN Bao-hong, LIU Jian-zhong. The technical measures of gas control in china coal mines [J]. Journal of

- China Coal Society, 2007, 32(7): 673-679.
- [4] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991: 10-18.
- [5] 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: 237-242.
- [6] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [7] 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.
- [8] 李晓红, 卢义玉. 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 Xiao-hong, LU Yi-yu. 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.
- [9] 王佑安. 矿井瓦斯防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994: 20-33.
- [10] 杨永良, 李增华, 高文举, 等. 煤层钻孔风力排渣模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 415-418.
- YANG Yong-liang, LI Zeng-hua, GAO Wei-ju, et al. Simulative experiment of pneumatic slag off for boreholes in coal seams [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 415-418.
- [11] 王海峰, 李增华, 杨永良. 钻孔风力排渣最小风速及压力损失研究[J]. 煤矿安全, 2005, 36(3): 4-6.
- WANG Hai-feng, LI Zeng-hua, YANG Yong-liang. Study on lowest wind speed and pressure loss of drilling dust extraction with wind-force for borehole [J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36(3): 4-6.
- [12] 卢义玉, 李晓红. 煤矿深孔排水/排渣方法: 中国, CN 1014 B. 2010.
- [13] 陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 1-10.
- [14] E.Я.索科洛夫. 喷射器[M]. 北京: 科学出版社, 1977: 130-154.
- [15] 华自强. 工程热力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1965: 36-41.
- [16] 李海军. 喷射器性能、结构及特殊流动现象的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2004.

(上接第270页)

5) 确定滑块内黏聚力、内摩擦角、重度时同时考虑了均质土坡与层状结构岩层;

6) 编制出的程序检验结果既能得出符合露天矿边坡设计要求的帮坡角及其稳定系数, 还能查看不同帮坡角对应的稳定系数。

#### 参考文献:

- [1] 周昌寿, 杜竞中, 郭增涛, 等. 露天矿边坡稳定[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [2] 孙玉科, 杨志法, 丁恩保, 等. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [3] 唐学忠. Visual Basic 程序设计教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] HOEK E, BRAY J W. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [5] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [6] 张天宝. 土坡稳定分析圆弧法的数值解研究[J]. 四川大学学报, 1978(增刊): 97-122.
- ZHANG Tian-bao. Numerical research of analysis of slope stability in circular method [J]. Journal of Sichuan University, 1978(Supp): 97-122.
- [7] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [8] 苏爱军. 滑坡稳定性评价原理与方法-条分法的改进[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008.
- [9] 阎中华. 关于非均质土石坝圆弧滑动稳定安全系数极值分布问题的商榷[J]. 人民黄河, 1980(3): 10-13.
- YAN Zhong-hua. The discussion about the distribution of extrem value of safety factor of the circular slide in unsteady earth rock-fill dam [J]. Renmin Huanghe, 1980 (3): 10-13.
- [10] YANG H HUANG. 土坡稳定分析[M]. 包承纲, 王清友, 宋崑仑, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 1988.