

# 瓦斯抽采钻孔受限空间内钻屑运移特征

王永龙, 孙玉宁, 王振锋, 宋维宾

河南理工大学能源科学与工程学院, 焦作 454000

**摘要** 应用气力输送理论, 建立钻屑颗粒群孔内悬浮模型, 推导钻屑颗粒群启动最小气流速度求解方程, 结合案例分析钻屑颗粒直径、摩擦系数及钻孔倾角对钻屑颗粒群启动速度的影响规律。结果表明, 施工俯孔时, 最小启动风速存在极值 $\theta_0$ ,  $\theta_0 < \theta < 0$ 时, 伴随钻孔倾角 $\theta$ 绝对值增大, 所需最小启动风速 $v_a$ 逐渐增大, 在 $\theta_0 \sim -\pi/2$ 范围, 伴随钻孔倾角绝对值的增大, 所需最小启动风速 $v_a$ 呈现小幅度减小趋势; 施工仰孔时, 存在角度 $\theta_0$ , 当 $0 < \theta < \theta_0$ 时, 伴随仰孔倾角逐渐增大, 所需最小启动风速逐渐降低, 当 $\theta > \theta_0$ 时, 钻屑在自重作用下自行滑落; 摩擦系数对最小启动风速的影响规律与钻孔倾角类似, 当俯孔倾角 $\theta = -\pi/2$ 时, 不同摩擦系数曲线交于同一点, 表明当 $\theta = -\pi/2$ 时, 最小启动风速与摩擦系数无关。

**关键词** 瓦斯抽采; 钻屑; 最小启动风速; 钻孔倾角

**中图分类号** TD713

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.008

## Transportation characteristics of drilling cuttings in gas drainage borehole

WANG Yonglong, SUN Yuning, WANG Zhenfeng, SONG Weibin

School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

**Abstract** Based on pneumatic conveying theory, the suspension model of drilling cuttings has been established, the minimal start-up speed of the drilling cuttings was derived, and the influence of diameter of drilling cuttings, friction coefficient, and drilling angle on the start-up speed was analyzed. The results show that in downward drilling engineering, there existed a drilling angle  $\theta_0$  when the start-up speed reached its maximum value. When the drilling angle was in the range of  $\theta_0 \sim 0$ , the start-up speed  $v_a$  increased with increase of the absolute value of the drilling angle; when the drilling angle was in the range of  $\theta_0 \sim -\pi/2$ ,  $v_a$  decreased slightly with increase of the absolute value of the drilling angle. In upward drilling engineering, there existed a drilling angle  $\theta_0$ . When the drilling angle was in the range of  $0 \sim \theta_0$ , the start-up speed  $v_a$  decreased gradually with increase of the drilling angle; when the drilling angle  $\theta > \theta_0$ , the drilling cuttings will slide under gravity. Similar influence of the friction coefficient on the minimal start-up speed was obtained. When the drilling angle  $\theta = -\pi/2$ , different curves met in one point, indicating that the start-up speed had nothing to do with the friction coefficient.

**Keywords** gas drainage; drilling cuttings; minimal start-up speed; drilling angle

瓦斯在煤体中以游离和吸附两种状态存在, 是矿井瓦斯灾害的根源, 瓦斯抽采是保障煤矿安全开采、实现瓦斯综合利用的前提<sup>[1-3]</sup>。受煤层地质条件及现有抽采理论技术限制, 目前, 井下瓦斯抽采仍然是预防矿井瓦斯事故的主要技术手

段<sup>[4]</sup>。钻孔施工是井下瓦斯抽采工作最为重要的环节。施工钻孔是通过流体动力或钻杆本身的排渣动力, 将钻头破煤形成的钻屑排出孔外, 根据排渣动力源不同, 钻进排渣方式分为流体排渣和机械排渣两种方式<sup>[5]</sup>。流体排渣分为水力排渣

收稿日期: 2014-07-07; 修回日期: 2014-08-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAA03B02); 河南理工大学博士基金项目(B2014-053)

作者简介: 王永龙, 讲师, 研究方向为矿井瓦斯防治、矿山压力与岩层控制等, 电子信箱: wyyylong@126.com

引用格式: 王永龙, 孙玉宁, 王振锋, 等. 瓦斯抽采钻孔受限空间内钻屑运移特征[J]. 科技导报, 2015, 33(1): 47-51.

和风力排渣, 风力排渣效率高, 对孔壁的冲击小, 不易破坏孔壁, 钻进过程中, 不影响煤体瓦斯解吸和释放, 使瓦斯得以快速释放, 孔内气、固两相流以空气为主, 瓦斯浓度低。因此, 对于松软突出煤层钻进, 通常采取风力排渣方式<sup>[6]</sup>。

以气力输送的钻进工艺方式, 需确定钻屑颗粒群的启动速度, 进而根据钻孔直径、钻杆外径确定排渣所需的用风量。工程人员通常应用颗粒的自由沉降速度并结合经验公式计算钻进时的排渣风速<sup>[7]</sup>。在实际钻探工程中, 钻头破煤形成的钻屑颗粒群沿钻杆与钻孔之间的环状受限空间向外运移, 钻屑颗粒直径、钻屑颗粒形状及钻孔倾角等因素对钻屑运移所需要的最低风速有重要的影响, 而传统的计算方法忽略这些因素的影响, 其计算结果存在误差。因此, 有必要对钻屑颗粒群在钻孔内的运移特征进行更为详尽的研究。

## 1 单颗粒钻屑悬浮速度

### 1.1 理想球形颗粒悬浮速度

在钻孔施工过程中, 要实现煤颗粒的气力输送, 则要求气流速度首先满足煤渣颗粒在排渣空间能够处于自由悬浮的平衡状态<sup>[8]</sup>

$$W_s - W_a = F_R \quad (1)$$

式中,  $W_s$  为粒子自重,  $W_a$  为粒子在流体中所受的浮力,  $F_R$  为流体的阻力。

设气流速度  $v_0$  存在一个临界值使煤颗粒处于上述动态平衡状态, 这一定值称之为煤颗粒输送的临界悬浮速度, 假设煤颗粒为均匀的球形体

$$W_s = mg = \frac{\pi g \rho_s d_s^3}{6} \quad (2)$$

$$W_a = \frac{\pi g \rho_a d_s^3}{6} \quad (3)$$

$$F_R = CA = C \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho_a \frac{v_0^2}{2} \quad (4)$$

整理可得

$$\frac{\pi}{6} d_s^3 (\rho_s - \rho_a) g = C \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho_a \frac{v_0^2}{2} \quad (5)$$

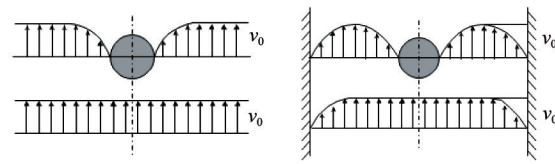
由式(5)可解出空气中球状颗粒的自由悬浮速度

$$v_0 = \sqrt{\frac{4g}{3C} \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} d_s} \quad (6)$$

式中,  $v_0$  为理想球状颗粒自由悬浮速度, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $d_s$  为球体的直径, m;  $\rho_s$  为煤颗粒密度,  $\rho_a$  为空气的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C$  为阻力系数;  $A_s$  为煤颗粒在流体方向的投影面积。

### 1.2 钻孔空间限制对颗粒悬浮速度的影响

颗粒在空间自由悬浮状态时, 颗粒所处截面上的速度不发生变化, 仍为  $v_0$ , 如图 1(a) 所示; 由于煤层施工钻孔, 排渣受钻孔直径大小限制, 为有限空间内的颗粒悬浮问题, 由于煤颗粒占据一定的空间, 使颗粒流通截面变小, 则颗粒周围气体速度增大, 从而颗粒获得附加流动力, 如图 1(b) 所示。可见, 对于同直径、同类型的颗粒, 在受限空间内运动颗粒的自由悬浮速度比自由空间内颗粒的自由悬浮速度小<sup>[9]</sup>。



(a) 颗粒自由悬浮 (b) 受限空间颗粒悬浮

图 1 空间限制对颗粒悬浮速度的影响

Fig. 1 Influence of space limitation on particle suspension speed

乌斯品斯基关于受管壁空间限制的问题, 对自由悬浮速度进行了大量的实验研究, 对式(6)进行修正

$$v_0' = \sqrt{\frac{4g}{3C} \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} d_s \left[ 1 - \left( \frac{d_s}{D-d} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

式中,  $D$  为钻孔直径, m;  $d$  为钻杆直径, m。

### 1.3 煤颗粒不规则形状对悬浮速度的影响

在煤层钻孔施工中, 钻头破煤形成的煤颗粒为不规则形状颗粒群, 对于等重物料, 以球形颗粒悬浮速度最大, 其它不规则形状颗粒悬浮速度相应较小, 这是由于不规则颗粒阻力系数较大的缘故, 因此, 需对不规则几何形状颗粒的悬浮速度进行修正<sup>[10,11]</sup>, 设不规则颗粒当量直径为  $d_c$ 。

根据流动力一般表达式, 设在同一钻孔, 同一流体介质中, 均处于悬浮状态, 浮重与流体阻力  $F_{R1}$  相等, 设不规则颗粒体积为  $V_c$ , 阻力系数为  $C_1$  可得

$$W' = V_c (\rho_s - \rho_a) g = F_{R1} = C_1 \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho_a \frac{v_0'^2}{2}$$

设当量球体阻力系数为  $C_c$ , 可得

$$W' = \frac{\pi}{6} d_c^3 (\rho_s - \rho_a) g = F_{R1} = C_c \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho_a \frac{v_0'^2}{2}$$

式中, 二者浮力相等, 同处于悬浮状态时,  $F_{R1} = F_R$ , 可得

$$C_1 \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho_a \frac{v_0'^2}{2} = C_c \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho_a \frac{v_0'^2}{2} \quad (8)$$

基于式(8)可得

$$v_0'' = \sqrt{\frac{C_c}{C_1}} v_0' = \frac{v_0'}{\sqrt{C_1/C_c}}$$

设形状修正系数  $K_s = C_1/C_c$ , 可得

$$v_0'' = \frac{v_0'}{\sqrt{K_s}} \quad (9)$$

基于上述分析, 在钻孔施工中, 钻屑在钻孔中的自由悬浮速度为

$$v_0'' = \sqrt{\frac{4g}{3CK_s} \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} d_s \left[ 1 - \left( \frac{d_s}{D-d} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

式中阻力系数  $C$  是一个重要的待定参数。根据气力输送理论, 它与雷诺数  $Re$  相关, 对于煤层钻孔施工, 采用风力排渣时, 正常输送煤渣风速 10~25 m/s, 其  $Re \geq 500$ , 颗粒处于压差阻力区, 此时,  $C = 0.44$ , 钻屑颗粒视为不规则球体, 形状修正系数  $K_s = 1.2$ <sup>[8]</sup>。钻屑在钻孔中的自由悬浮速度公式可简化为

$$v_0^* = 4.98 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} d_s} \left[ 1 - \left( \frac{d_s}{D-d} \right)^2 \right] \quad (11)$$

综上所述,风力排渣钻进施工过程中,单个煤颗粒的输送速度首先要大于颗粒自由悬浮速度,具体的气体输送速度计算还要考虑输送长度,钻孔倾角,颗粒群的摩擦碰撞等众多因素。

## 2 钻屑颗粒群启动速度

### 2.1 钻屑颗粒群力学模型求解

在实际工程中,钻头破煤形成的钻屑,以颗粒群形式沿孔底向外运移,参考单颗粒钻屑孔内自由悬浮数学模型,建立相应颗粒群钻屑孔内自由悬浮数学模型,施工俯孔钻屑颗粒群受力分析<sup>[12]</sup>如图2所示。

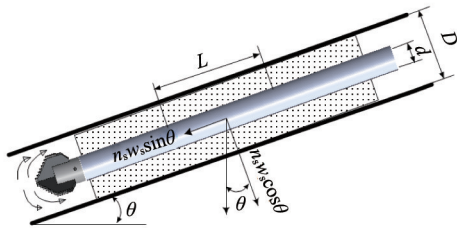


图2 施工俯孔钻屑颗粒群受力分析

Fig. 2 Force analysis of drilling cuttings in downward drift hole

1) 气流推力。设钻孔中某一段长度有  $n_s$  个粒子,从整体上分析,所受浮力是单个粒子的  $n_s$  倍,根据式(1)~(4)可得

$$C_s = \frac{8W_s}{\pi d_s^2 \rho_a v_0^2} \quad (12)$$

煤颗粒以相对速度  $v_a - v_s$  推动煤颗粒运动,此时,单个煤颗粒所受的气动推力为

$$F_R = C \frac{\pi}{4} \rho_a d_s^2 \frac{(v_a - v_s)^2}{2} \quad (13)$$

基于式(12)、(13)可得  $n_s$  个粒子所受的气动推力为

$$n_s F_R = \frac{n_s W_s (v_a - v_s)^2}{v_0^2} \quad (14)$$

2) 考虑钻孔壁摩擦力。钻孔中的煤渣颗粒在风流作用下,运动极其复杂,确切表达粒子群对管壁的作用是不可能的。假设摩擦力与作用于  $n_s$  个粒子重力在垂直管上的分力成正比,设摩擦系数为  $f_s$ ,则在流动方向上的摩擦力为  $f_s n_s W_s \cos \theta$ 。

3) 重力作用。基于图2俯孔钻屑颗粒群受力分析(以水平线为参照,俯孔为负角,仰孔为正角),俯角  $-\pi/2 < \theta < 0$  范围内,钻屑颗粒群重力在流动方向的分力为  $n_s W_s \sin \theta$ 。

综上所述,钻屑颗粒群力学模型方程为

$$\frac{n_s W_s (v_a - v_s)^2}{v_0^2} - f_s n_s W_s \cos \theta + n_s W_s \sin \theta = \frac{n_s W_s}{g} \frac{dv_s}{dt} \quad (15)$$

设颗粒速度与气流速度比为

$$\phi = \frac{v_s}{v_a} \quad (16)$$

基于式(15)、(16)可得

$$\frac{d\phi}{dt} = g \frac{v_a}{v_0^2} \left\{ \phi^2 - 2\phi + \left[ 1 - \left( \frac{v_0}{v_a} \right)^2 (f_s \cos \theta - \sin \theta) \right] \right\} \quad (17)$$

### 2.2 固气速度比分析

当被输送的粒子被加速到一定速度后,则呈现稳定的输送状态,此时,固气速度比近恒定值,即  $d\phi/dt=0$ ,代入式(17)可得

$$\phi^2 - 2\phi + \left[ 1 - \left( \frac{v_0}{v_a} \right)^2 (f_s \cos \theta - \sin \theta) \right] = 0 \quad (18)$$

由于  $\phi < 1$ ,可解方程

$$\phi = 1 - \frac{v_0}{v_a} \sqrt{f_s \cos \theta - \sin \theta} \quad (19)$$

考虑各种因素对颗粒自由悬浮速度的影响,将  $v_0^*$  代替  $v_0$  代入式(19)可得

$$\phi = 1 - \frac{4.98 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} d_s} \left[ 1 - \left( \frac{d_s}{D-d} \right)^2 \right]}{v_a} \sqrt{f_s \cos \theta - \sin \theta} \quad (20)$$

基于式(20),在倾角  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$  范围内,需满足  $f_s \cos \theta - \sin \theta \geq 0$ ,即在  $-\pi/2 < \theta < \arctan f_s$  区间内,  $\phi$  具有数学意义,即当施工仰孔且  $\theta = \arctan f_s$  时,  $\phi = 1$ ,表明在该倾角条件下,钻屑颗粒速度瞬间与气流速度相同,施工仰孔时,大于该角度,钻屑颗粒群在重力沿倾向分力作用下,自行滑落。

### 2.3 钻屑颗粒群启动最小气流速度

为分析输送所需要的最小钻屑颗粒群启动气流速度,可以假设,无论经过多少时间,当粒子发生滑动瞬间,即粒子由静止到开始运动的瞬间,此时气流的速度为理论上输送所需最小钻屑启动气流速度,因此,可令  $\phi = 0$ ,可得理论上输送所需最小启动风速

$$v_a = v_0 \sqrt{f_s \cos \theta - \sin \theta} \quad (21)$$

$$v_a = 4.98 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} d_s} \left[ 1 - \left( \frac{d_s}{D-d} \right)^2 \right] \sqrt{f_s \cos \theta - \sin \theta} \quad (22)$$

输送所需最小钻屑启动风速与粒子沉降速度  $v_0$ 、孔壁摩擦系数  $f_s$  及钻孔倾角  $\theta$  有关。按式(22)计算的输送所需最小气流速度  $v_a$ ,一般表示煤颗粒在钻孔中滑动所需最小气流速度,并非煤颗粒在悬浮稳定运动时的输送气流速度。

## 3 钻屑颗粒群启动速度

### 3.1 钻屑颗粒直径对最小启动风速的影响

某施工现场,钻孔设计直径  $D=0.12$  m,钻杆直径  $d=0.073$  m,煤密度  $\rho_s=1400$  kg/m<sup>3</sup>,气体在空间处于不可压缩状态,取空气密度  $\rho_a=1.225$  kg/m<sup>3</sup>,设摩擦系数  $f_s=0.5$ ,钻孔倾角  $\theta=0^\circ$ ,将上述参数代入式(22)得

$$v_a = 119 \sqrt{d_s} (1 - 452.7 d_s^2) \quad (23)$$

基于式(23), 绘制最小启动速度  $v_a$  与钻屑颗粒平均直径  $d_s$  相关曲线(图3)。

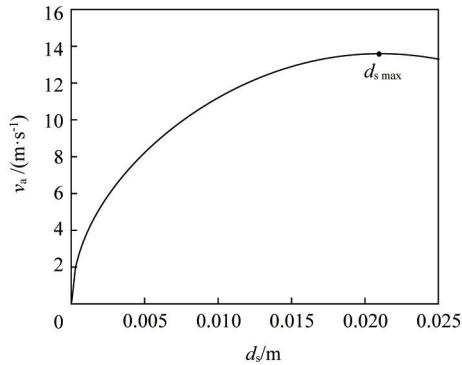


图3 钻屑颗粒直径与最小启动速度之间的关系

Fig. 3 Relationship between drilling cuttings diameter and the minimal start-up speed

根据已知参数, 钻孔与钻杆之间的环状空间距离为  $h=0.0235$  mm, 钻屑颗粒在此环状空间运移。为分析钻屑颗粒直径对最小启动速度  $v_a$  影响规律, 适当扩大  $d_s$  取值范围, 基于式(23), 在  $0 < d_s < 0.025$  m 范围内, 存在极值  $d_{s, \max}=0.0210$  m, 在  $0 < d_s < d_{s, \max}$  范围内, 钻屑颗粒直径越大, 钻屑颗粒开始运动所需要的气流速度越大; 当  $d_s > d_{s, \max}$  时, 钻屑颗粒开始运动所需要的气流速度呈下降趋势, 与实际情况不符, 为进一步分析, 将该区间分为两段, 当  $d_s > h$  时, 显然不符合实际工程, 图3中该区间无实际意义, 钻屑颗粒在该钻孔条件下将无法发生移动,  $d_{s, \max}=0.0210$  m 与理想状态下能通过的最大钻屑颗粒直径  $d_s=0.0235$  m 存在  $0.0025$  m 的差值, 表明, 受空间限制和钻孔表面摩擦等因素影响, 钻孔与钻杆之间的环状空间实际能够通过的最大钻屑颗粒直径略小于理想值。

### 3.2 钻孔倾角对最小启动风速的影响

采用3.1同样的方法和相关参数取值, 设钻屑的平均直径为  $d_s=2$  mm, 将上述数据代入式(22), 可得

$$v_a = 7.51 \sqrt{0.5 \cos \theta - \sin \theta} \quad (24)$$

因此, 基于式(24), 可将最小启动速度  $v_a$  与钻孔施工倾角  $\theta$  绘成相关曲线(图4)。

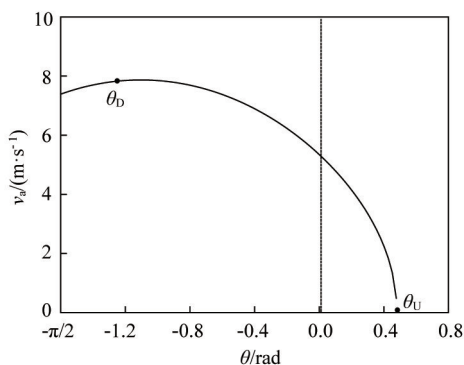


图4 钻屑最小启动风速度与钻孔施工倾角之间的关系

Fig. 4 Relationship between the minimal start-up speed and drilling angle

基于图4, 对于施工钻孔倾角的变化对钻屑最小启动风速的影响进行分析:

1) 施工水平钻孔时, 即  $\theta=0$  时, 可知曲线与纵轴的交点值为该条件下, 所需最小启动风速, 通过计算可得  $v_a=5.31$  m/s。

2) 施工俯孔, 即  $-\pi/2 < \theta < 0$  时, 根据图4, 所需最小启动风速存在一个最大值  $\theta_b$ , 即当  $\theta_b=-1.28$  rad 时, 转化为角度  $-73.3^\circ$  时, 最小启动风速存在极值,  $v_a=7.94$  m/s, 基于最大值位置进行如下分析。

$\theta_b < \theta < 0$  时, 在钻孔轴线方向上, 钻屑摩擦阻力与钻屑重力之和呈逐渐增大趋势, 伴随钻孔倾角绝对值的增大, 所需最小启动风速  $v_a$  逐渐增大。

$-\pi/2 < \theta < \theta_b$  时, 在钻孔轴线方向上, 由于在该区间, 钻屑摩擦阻力减小速度较快, 摩擦阻力与钻屑重力之和相对于  $\theta_b < \theta < 0$  区间, 出现缓慢变小趋势, 因此, 随着钻孔倾角绝对值的增大, 所需最小启动风速  $v_a$  呈现减小趋势, 当  $\theta=-\pi/2$  时, 钻屑摩擦阻力为0, 此时只须克服钻屑重力, 即在该区间, 所需排渣风速最小, 为  $v_a=7.51$  m/s。

3) 施工仰孔时, 基于式(24), 仰孔倾角在  $0 < \theta < \arctan f_s$  范围内, 存在角度  $\theta_u$ ,  $\theta_u=\arctan f_s$ , 当  $\theta > \theta_u$  时 ( $\theta=\arctan f_s=0.46$  rad, 转化为角度  $\theta=26.6^\circ$ ), 钻屑无需风流作用, 将自行滑落。根据图4, 当  $0 < \theta < \theta_u$  时, 可知钻屑所需最小启动风速相对俯孔施工方式要小的多, 与现场施工相符, 即当钻屑排渣所需最小启动风速, 随仰孔倾角逐渐增大, 呈现逐渐减小趋势; 当仰孔倾角  $\theta > \theta_u$  时, 钻屑启动所需最小启动风速为0, 此时, 钻头破煤后, 钻屑在重力作用下, 自行从钻孔内滑落。

### 3.3 摩擦系数对最小启动风速的影响

在实际工程中, 煤层中形成的钻孔, 普遍存在表面粗糙度较大, 相对摩擦系数也较大, 基于煤的类型不同, 形成的钻孔表面粗糙度也会有所差别, 通过摩擦系数的变化, 分析最小启动速度与摩擦系数之间的变化关系。

图5为不同摩擦系数条件下, 最小启动速度  $v_a$  与钻孔倾角  $\theta$  之间的变化关系。

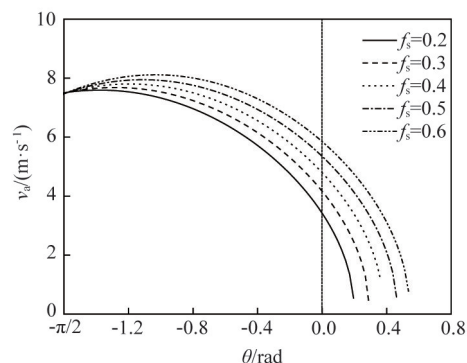


图5 不同摩擦系数最小启动速度与钻孔倾角之间的关系

Fig. 5 Relationship between the minimal start-up speed and drilling angle with different friction coefficients

1) 施工水平钻孔时, 如图5, 伴随摩擦系数增大, 相应曲线与横坐标  $x=0$  轴交点逐渐升高, 钻屑运移所需最小启动风

速逐渐增大。

2) 施工俯孔时,伴随摩擦系数增大,对于同一施工角度,钻屑运移所需最小启动风速逐渐增大;最小启动风速存在的最大值位置,伴随摩擦系数减小,位置向右移动,即相应施工角度逐渐增大;当俯孔倾角 $\theta=-\pi/2$ 时,如图5,曲线交于同一点,最小启动风速与摩擦系数无关。

3) 施工仰孔时,伴随摩擦系数增大,对于同一施工角度,钻屑运移所需最小启动风速逐渐增大;最小启动风速为0位置,伴随摩擦系数增大,与x轴交点位置向右移动,即相应倾角 $\theta$ 逐渐增大,倾角 $\theta$ 分别为 $11.3^\circ$ 、 $16.7^\circ$ 、 $21.8^\circ$ 、 $26.6^\circ$ 、 $31.0^\circ$ 。

#### 4 结论

1) 考虑钻孔空间限制、钻屑颗粒形状对颗粒悬浮速度的影响,应用气力输送理论,推导了单颗粒钻屑悬浮速度求解方程。

2) 建立钻屑颗粒群孔内自由悬浮模型,推导了钻屑颗粒群启动最小气流速度求解方程。

3) 分析了钻孔倾角对最小启动风速的影响规律,施工俯孔时,最小启动风速存在极值 $\theta_0$ , $\theta_0 < \theta < 0$ 时,伴随钻孔倾角绝对值 $\theta$ 增大,所需最小启动风速 $v_a$ 逐渐增大,在 $-\pi/2 < \theta < \theta_0$ 范围,伴随钻孔倾角绝对值的增大,所需最小启动风速 $v_a$ 呈现小幅度减小趋势;施工仰孔时,存在角度 $\theta_0$ ,当 $0 < \theta < \theta_0$ 时,伴随仰孔倾角逐渐增大,所需最小启动风速呈现逐渐降低趋势,当 $\theta > \theta_0$ 时,钻屑无需风流作用,将自行滑落。

4) 摩擦系数对最小启动风速的影响规律与钻孔倾角类似,当俯孔倾角 $\theta=-\pi/2$ 时,不同摩擦系数曲线交于同一点,表明当 $\theta=-\pi/2$ 时最小启动风速与摩擦系数无关。

#### 参考文献(References)

- [1] 李子文,林柏泉,郝志勇,等.煤体多孔介质孔隙度的分形特征研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):437-442.  
Li Ziwen, Lin Baiquan, Hao Zhiyong, et al. Fractal characteristics of porosity for porous media in coal mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 437-442.
- [2] 林柏泉,邹全乐,沈春明,等.双动力协同钻进高效卸压特性研究及应用[J].煤炭学报,2013,38(6):911-917.  
Lin Baiquan, Zou Quanle, Shen Chunming, et al. Investigation on highly effective depressurization property of dual-power drilling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 911-917.

- [3] 张悦,张民波,朱天玲,等.低透气性煤层CO<sub>2</sub>增透预裂技术应用[J].科技导报,2013,31(23):36-39.  
Zhang Yue, Zhang Minbo, Zhu Tianling, et al. Application of CO<sub>2</sub> anti-reflection pre-split technology in low permeability coal seam[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(23): 36-39.
- [4] 王永龙,宋维宾,孙玉宁,等.瓦斯抽采钻孔堵塞段卡钻扭矩力学模型分析[J].中国安全科学学报,2014,24(6):1-6.  
Wang Yonglong, Song Weibin, Sun Yuning, et al. Analysis on pipe-sticking torque mechanical model in gas extraction borehole clogging segment[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 1-6.
- [5] 孙玉宁,王永龙,翟新献,等.松软突出煤层钻进困难的原因分析[J].煤炭学报,2012,37(1):117-121.  
Sun Yuning, Wang Yonglong, Zhai Xinxian, et al. Analysis on reasons of drilling difficulty in soft and outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 117-121.
- [6] 王永龙,孙玉宁,翟新献,等.松软突出煤层新型钻进技术研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(2):289-294.  
Wang Yonglong, Sun Yuning, Zhai Xinxian, et al. Study on new drilling technology in soft and outburst SEAM[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(2): 289-294.
- [7] 冀前辉.松软煤层中风压空气钻进供风参数研究及除尘装置研制[D].北京:煤炭科学研究总院,2009.  
Ji Qianhui. Research on air supply parameter and design on dust collector for moderate pressure air drilling in soft coal bed[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2009.
- [8] 杨伦,谢一华.气力输送工程[M].北京:机械工业出版社,2006:84-115.  
Yang Lun, Xie Yihua. Pneumatic conveying engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 84-115.
- [9] 李持久,周晓君.气力输送理论与应用[M].北京:机械工业出版社,1992:29-34.  
Li Chijiu, Zhou Xiaojun. Pneumatic conveying theory and application [M]. Beijing: China Machine Press, 1992: 29-34.
- [10] 王贡献.气固二相流螺旋输送与分离机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2002.  
Wang Gongxian. Study of the mechanism of screw transportation and separating of two phase of gas and solid[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.
- [11] 杨辉.气力输送计算机设计计算系统的研制与开发[D].杭州:浙江大学,2004.  
Yang Hui. Research and exploitation fo design and computation system of computer for pneumatic conveying[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [12] 黄标.气力输送[M].上海:上海科学技术出版社,1984.  
Huang Biao. Pneumatic conveying[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984.

(责任编辑 赵业玲)

#### 《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。