

## 高溜井卸矿气流诱导粉尘污染研究

蒋仲安, 王亚朋<sup>†</sup>, 王九柱

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:**为掌握金属矿山高溜井卸矿风流及粉尘的时空变化规律,采用相似原理推导出了高溜井卸矿气流及粉尘的相似准则数,以相似准则数为基础建立了溜井相似实验模型,并通过相似实验及数值模拟对不同卸矿流量、不同矿石粒径及不同卸矿高度下溜井内气流变化、粉尘运移规律进行研究.研究表明:溜井第一中段卸矿时,第一、二中段井口压差为负,第三、四中段压差为正;三、四中段有粉尘被卸矿气流带出,为溜井主要产尘点;随卸矿流量的增加,产尘点的风速及粉尘浓度呈现出先增加后减少的规律,卸矿流量为1.0 kg/s时风速及产尘量最大;卸矿流量不变时,产尘点的风速与矿石粒径呈反比,粉尘浓度与矿石粒径为幂函数关系,指数最大值为-0.63;卸矿流量及矿石粒径不变时,卸矿高度越大产尘点的风速及粉尘浓度越大.

**关键词:**高溜井;粉尘扩散;冲击气流;相似准则;高速摄影

**中图分类号:**TD714.2

**文献标志码:**A

## Studies on Dust Pollution Induced by High-ore Pass Unloading Airflow

JIANG Zhongan, WANG Yapeng<sup>†</sup>, WANG Jiuzhu

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to grasp the temporal and spatial variation of unloading airflow and dust in high ore pass in metal mines, the similarity criterion of high ore pass unloading airflow and dust was derived by similar principle. The similar experimental model of the ore pass was established based on the similarity criterion. Experiments and numerical simulations were carried out to study the airflow changes and dust migration laws under different unloading flow rates, different ore sizes and different unloading heights. The results show that when the first middle section of the ore pass is unloading, the differential pressure at the wellhead in the first and second middle sections is negative, and the pressure difference in the third and fourth middle sections is positive; in the third and fourth middle sections, the dust is discharged by the unloading airflow, which is the main dust-producing point of the ore pass; with the increase of the unloading flow, the wind speed and dust concentration of the dust-producing point show a law of increase first and then decrease, and when the unloading flow is 1.0 kg/s, the wind speed and dust production are the largest; When the unloading flow rate is constant, the wind speed of the dust-producing point is inversely proportional to the ore particle size. The dust concentration and ore particle size are in a power function relationship, and the maximum

\* 收稿日期:2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874016), National Natural Science Foundation of China(51874016)

作者简介:蒋仲安(1963—),男,浙江诸暨人,北京科技大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: 18306422116@163.com

index is  $-0.63$ ; When the unloading flow rate and ore particle size are constant, the greater unloading height results in the greater wind speed and dust concentration of the dust-producing point.

**Key words:** high-ore pass; dust-diffusion; impinging airflow; similar criteria; high-speed photography

溜井作为金属矿山主要运输系统,大量矿石在溜井内快速下落,形成活塞效应,溜井内稳定气流被推动,由井口涌出形成冲击气流。矿石下落造成的粉尘被冲击气流携带进入巷道,导致粉尘污染<sup>[1-3]</sup>。国内外对于溜井气流及粉尘运动规律的直接研究相对较少,针对散落物下落诱导气流分析较多。Uchiyama 等<sup>[4-5]</sup>建立二维及三维数值模型,对分散颗粒流下落的复杂紊流过程进行了模拟分析。通过建立不同边界条件下的模型,分析了颗粒密度和直径对自身流动的影响。Wypych 等<sup>[6]</sup>和 Liu 等<sup>[7]</sup>采用实验及理论推导方法对物料下落夹带气流及粉尘产生量进行研究,分析了物料下落高度与夹带气流量之间的关系,得出夹带气流量与下落高度的  $5/3$  次方成正比。李维梓<sup>[8]</sup>假设物料下落为自由落体,下落过程中没有温度变化,推导并证明出散落物诱导气流的最大速度小于物料末速度的  $0.807$  倍。李小川等<sup>[9-10]</sup>将物料下落过程中夹带空气作为产生尘的主要因素,对现有理论计算公式及实验方法进行总结,为物料下落夹带气流量的计算提出了研究方案。贾兰等<sup>[11]</sup>运用溜槽物料牵引流、落料诱导气流和剪切气流理论分析了溜槽工艺的粉尘析出机理。同时总结出,溜槽运输系统粉尘的析出是诱导空气的尘化作用及剪切压缩空气尘化作用的结果,影响粉尘析出的主要因素包括物料的基本属性、运行速度及溜槽出口落差。王学文等<sup>[12]</sup>使用离散元软件 EDEM 建立了某型号煤仓与煤散料的分析模型,描述了 EDEM 建立煤仓模型、煤颗粒模型和生成煤散料的具体方法,模拟仿真了煤仓内煤散料卸料流动状态。Ansart 等<sup>[13-14]</sup>和 Möbius<sup>[15]</sup>针对固体散装物料下落过程中堆积及粉尘扩散问题,建立漏斗实验装置分析了粉末自由下落形成的粉尘雨流特征,并研究了漏斗口形状对雨流特征的影响。刘启觉<sup>[16]</sup>、严兴忠<sup>[17]</sup>依靠流体力学的相关理论,推导出了物料下落过程产生诱导风量的计算公式。王英敏等<sup>[18]</sup>通过忽略矿石与井壁之间的碰撞,将矿石下落视为自由沉降,推导出溜井内最大冲击风速计算方程,从而确定了影响冲击风速的主要因素。

上述对于物料下落诱导气流的研究,忽略了矿石间的碰撞关系,没有明确分析出溜井内矿石下落过程中,各中段风流方向与矿石运动位置的对应关系。因此,为全面分析溜井产尘及气流分布规律,本文以安徽矿业集团溜井运输系统为研究背景,采用相似实验及数值模拟两种分析方式,依靠高速摄像技术,对不同卸矿条件下溜井口粉尘扩散及气流变化进行直观研究,为溜井卸矿粉尘的治理提供理论基础。

## 1 相似实验模型参数确定

溜井尺寸较大,很难建立  $1:1$  的实验模型。为保证实验的可行性,采用相似准则对原有尺寸进行缩放,建立溜井的相似实验模型进行分析,为实现相似实验模型与现场情况相同,产生的物理现象及力学相似,不但要保证模型的几何相似,流体的运动及动力相似,同时还要满足两种环境下的流体运动具有相同的初始条件及边界条件。溜井相似准则是建立相似模型的基础,为满足相似实验对相似模型的要求,根据相似定理分别对溜井内气流及固体颗粒的相似准则数进行推导。

### 1.1 冲击气流相似准则推导

根据暨朝颂<sup>[19]</sup>建立的溜井内冲击气流量计算方程式可知,影响溜井内冲击气流量  $Q$  的主要物理量包括空气密度  $\rho_g$ 、矿石直径  $d_p$ 、空气粘度  $\mu$ 、溜井直径  $D$ 、矿石的质量流量  $m_p$ 、重力加速度  $g$ 、矿石密度  $\rho_p$ 、矿石下落高度  $h$ 、溜井局部通风阻力系数  $\xi$  及溜井内冲击风速  $v_g$ 。由相似第二定理可知在假定流体为不可压缩并忽略热交换的情况下,溜井卸矿诱导冲击气流函数表达式为:

$$f = (\rho_g, d_p, \mu, D, m_p, g, \rho_p, h, \xi, v_g) \quad (1)$$

再根据  $\pi$  定理在上述物理量中选取  $d_p, \rho_g, g$  3 个互不影响的独立量纲,则无量纲  $\pi$  数为 7。无量纲  $\pi$  可以表示为  $\pi_1 = d_p^a \rho_g^b g^c m_p$ ;  $\pi_2 = d_p^d \rho_g^e g^f h$ ;  $\pi_3 = d_p^g \rho_g^h g^i D$ ;  $\pi_4 = d_p^j \rho_g^k g^l \rho_p$ ;  $\pi_5 = d_p^m \rho_g^n g^o v_g$ ;  $\pi_6 = d_p^p \rho_g^q g^r \mu$ ;

$\pi_7 = d_p \rho_g \xi$ .  $\pi_1$  表达式两侧的因次为:  $1 = [L]^a [ML^{-3}]^b [LT^{-2}]^c [MT^{-1}]^d$ ,  $L$  表示长度量纲;  $M$  表示质量量纲;  $T$  表示时间量纲. 为满足等式成立, 则方程式指数为零, 即满足方程组:  $a+c-3b=0, b+1=0, -2c-1=0$ ; 解得  $a=-\frac{5}{2}, b=-1, c=-\frac{1}{2}$ , 因此得到  $\pi_1 = \frac{m_p}{d_p^2 \rho_g g^{\frac{1}{2}}}$ ; 同理可

得  $\pi_2 = \frac{h}{d_p}, \pi_3 = \frac{D}{d_p}, \pi_4 = \frac{\rho_p}{\rho_g}, \pi_5 = \frac{g d_p}{v_g^2}, \pi_6 = \frac{\mu}{d_p \rho_g g^{\frac{1}{2}}}, \pi_7 = \xi$ .

由  $\pi_3, \pi_4$  可知溜井内矿石下落阻塞比准则数

$\frac{\pi_4}{\pi_3} = \frac{\rho_p d_p}{\rho_g D}$ ;  $\pi_2, \pi_5$  可知弗汝德准则数  $\frac{\pi_5}{\pi_2} = \frac{g h}{v_g^2}$ ; 质量流量准则数  $\pi_1 = \frac{m_p}{d_p^2 \rho_g g^{\frac{1}{2}}}$ . 气流在溜井内的流动

可理想化为不可压缩过程, 要实现相似前后运动规律相同, 在满足几何相似的同时, 还需要满足上述准则数相等. 由几何相似可知相似模型与现场原型按照 1:25 的比例缩小; 溜井内矿石下落阻塞比准则数为  $\frac{\pi_4}{\pi_3} = \frac{\rho_p d_p}{\rho_g D}$ , 由阻塞比准则数看出矿石及空气的密度是影响相似准则数相等的主要因素. 当保证相似实验中矿石及空气的密度与现场一致时, 矿石粒径在原有分布基础上缩小 25 倍, 即满足溜井相似条件. 同理, 为满足弗汝德准则数及质量流量准则数相等, 卸矿质量流量为实际卸矿流量的  $(1/25)^{\frac{5}{2}}$ .

## 1.2 粉尘颗粒相似准则推导

溜井内矿石下落推动气体运动的过程中, 假设气体为不可压缩流动. 对其使用三维稳态不可压缩 N-S 方程进行描述, 气体运动方程可写为<sup>[20]</sup>:

$$\rho_g \frac{dU_g}{dt} = F + \mu_g \Delta U_g - P \quad (2)$$

式中:  $\rho_g$  表示气体密度, 单位为  $kg/m^3$ ;  $U_g$  表示气体速度矢量, 单位为  $m/s$ ;  $t$  表示运动时间, 单位为  $s$ ;  $F$  表示气体的单位质量力, 单位为  $N/m^2$ ;  $P$  表示为气压, 单位为  $Pa$ ;  $\mu_g$  表示动力黏度, 单位为  $Pa \cdot s$ ;  $\Delta$  表示拉普拉斯算子.

粉尘颗粒在溜井内随气流运动, 对单个颗粒进行受力分析可知, 颗粒尺寸较小忽略量级较小的力后, 影响粉尘运动的主要力为重力、浮力、气动阻力. 粉尘在溜井内的运动方程可表示为<sup>[21-22]</sup>:

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \left\{ \rho_p \frac{dU_p}{dt} - (\rho_p - \rho_g) g \right\} = \frac{\pi}{8} C_d d_p^2 \rho_g (U_g - U_p) |U_g - U_p| \quad (3)$$

式中:  $d_p$  为粉尘颗粒直径, 单位为  $m$ ;  $\rho_p$  为粉尘颗粒密度, 单位为  $kg/m^3$ ;  $C_d$  为气动阻力系数;  $U_p$  为粉尘颗粒的运动速度, 单位为  $m/s$ ;  $g$  为重力加速度, 单位为  $m/s^2$ .

延用对冲击气流相似准则推导过程, 在式(2) (3) 基础上选取影响粉尘运移的主要物理量  $\rho_g, \rho_p, U_g, U_p, \mu_g, d_p, g, P, h, t$ . 其中,  $h$  为溜井高度, 单位为  $m$ ;  $t$  为粉尘运动时间. 同理根据  $\pi$  定理中量纲分析推导出以下准则数: 斯托克斯准则数  $(Stk = d_p^2 \rho_p t^{-1} \mu_g^{-1} |U_g - U_p|)$ , 雷诺准则数  $(Re = l \rho_g U_g \mu_g^{-1})$ , 弗劳德准则数  $(Fr = U_g l^{-0.5} g^{-0.5})$ , 均时性准则数  $(H_0 = U_g t l^{-1})$ , 密度准则数  $(\rho_p \rho_g^{-1})$ , 运动准则数  $(U_p U_g^{-1})$ . 分析可知想要实现完全的相似, 必须满足所有准则数相等, 即应建立与现场完全一致的实验模型, 显然受实验条件的限制不可能实现<sup>[23]</sup>. 因此, 采用近似模型法对相似准则数进行简化分析. 实验时采用粉尘颗粒由现场采样取回满足密度准则数; 粉尘颗粒较小, 其运动完全依附于空气流动, 可近似为两种速度一致, 运动准则数为 1. 通过对溜井相似实验中雷诺数的计算发现, 其数值与现场条件下雷诺数值处于相同自模区内, 忽略雷诺准则数相等; 分析颗粒重力与惯性力两者之间的量级知, 两者之比的弗劳德准则数可以忽略. 通过对气流、颗粒运动相似准则数的推导及简化分析可知, 为保证建立的溜井相似实验模型得出与现场相同的物理现象, 应在满足几何相似的基础上保证空气介质的密度、粘性系数与现场相同及粉尘颗粒在溜井内物质密度应相等.

## 2 溜井实验平台的建立

以北京科技大学防尘实验室为基础, 建立相似溜井卸矿粉尘分析实验平台. 实验平台主要包括相似溜井模型、高速摄影机(型号: UHS-12V2012)、微电脑激光粉尘检测仪(型号: LD-5C)、通风多参数检测仪(型号: JFY-4). 通过上述仪器实现对卸矿时溜井口气流、压差及粉尘浓度变化情况的实时检测与记录, 直观反映出卸矿粉尘的产生及扩散过程. 为满足可视化的分析矿石下落过程中溜井口及联络巷内粉尘的产生与运移, 实验采用高强度、高透视性亚克力材料建立溜井模型. 由溜井模型相似准则知, 为满

足几何相似,相似模型尺寸与实际尺寸比为 1:25.建立的相似模型尺寸为:溜井高度  $H'$  为 3.6 m,每个分层高度为  $h_1'$  为 0.8 m,溜井直径  $D_1'$  为 0.14 m,矿仓直径  $D_2'$  为 0.2 m,斜溜巷道直径  $D_3'$  为 0.12 m(斜溜巷道与溜井夹角为  $35^\circ$ ),联络巷长  $L'$  为 0.6 m,宽  $W'$  为 0.16 m,高  $h_2'$  为 0.18 m.通过对现场卸矿情况的调查,实验时单次卸矿量为 1.6 kg,卸矿流量为 0.8 kg/s.根据对溜井卸矿现场矿石粒径的分析,按照相似准则缩小后确定出相似实验中矿石粒径配比为小于 0.5 mm(2%)、0.5~1 mm(34%)、1~5 mm(40%)、5~10 mm(20%)、10~20 mm(4%).建立的溜井卸矿实验平台及实验使用矿石配比如图 1、图 2 所示.

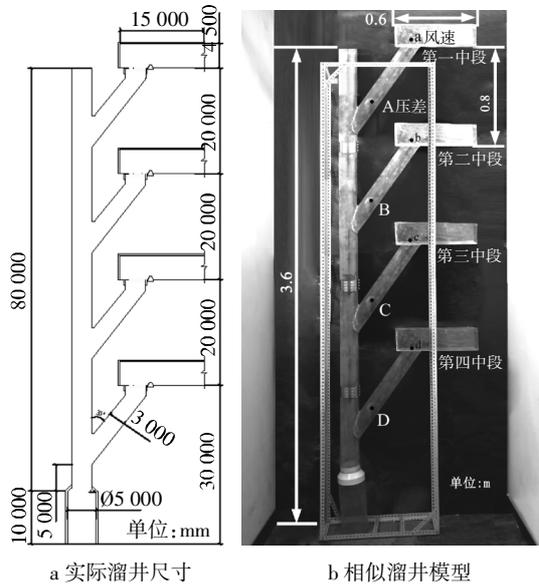


图 1 卸矿实验平台  
Fig.1 Unloading experimental platform

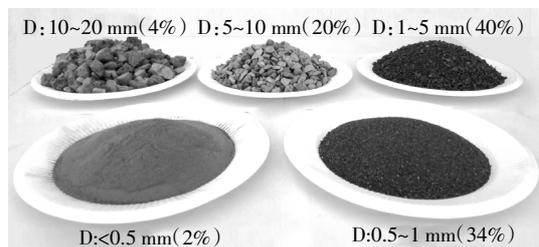


图 2 实验矿石配比  
Fig.2 Proportion of experimental ores

### 3 相似实验结果分析

#### 3.1 卸矿流量对产尘点气流及粉尘浓度影响分析

卸矿流量是卸矿主要控制参数,以卸矿流量 0.8 kg/s 为基础,选取 0.4 kg/s、0.6 kg/s、0.8 kg/s、1.0 kg/s、1.2 kg/s 5 个卸矿流量,在溜井第一中段进行卸矿

实验,并分别对不同中段溜井口压差(测点为 A~D)及风速(测点为 a~d)大小监测.卸矿流量为 0.8 kg/s 时,各中段溜井口压差监测结果如图 3 所示.

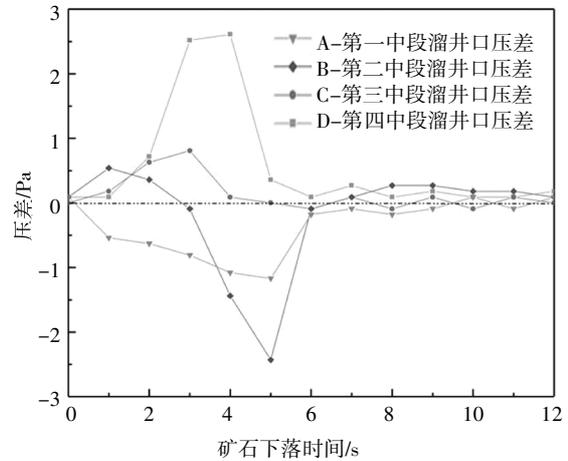
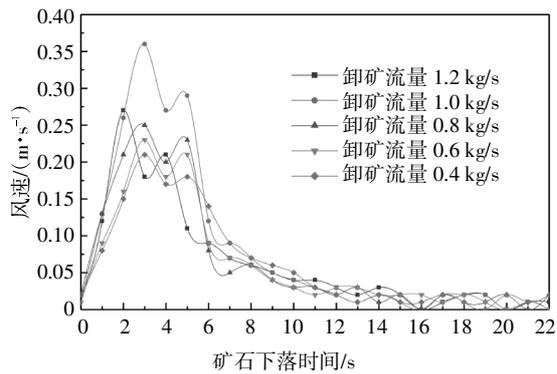


图 3 不同中段溜井口压差曲线

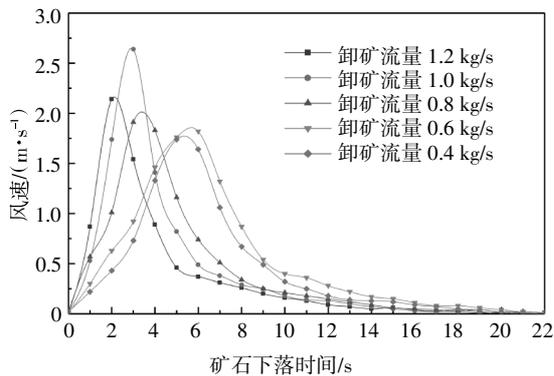
Fig.3 Pressure differential curve of different middle ore pass

由图 3 可知,第一中段测点 A 压差始终为负值,说明此中段气流被吸入溜井;第二中段测点 B 压差 3 s 前为正值,表现出矿石对气流的挤压,3 s 后矿石通过出现负压,气流被吸入溜井;第三、四中段压差均为正值,表现出矿石下落对溜井内气流压缩的释放阶段.因此,第一中段卸矿时,第三、四中段为溜井主要产尘点,风流是驱使粉尘进入联络巷的动力.不同卸矿流量变化下,产尘点风速及粉尘峰值浓度变化如图 4 所示.

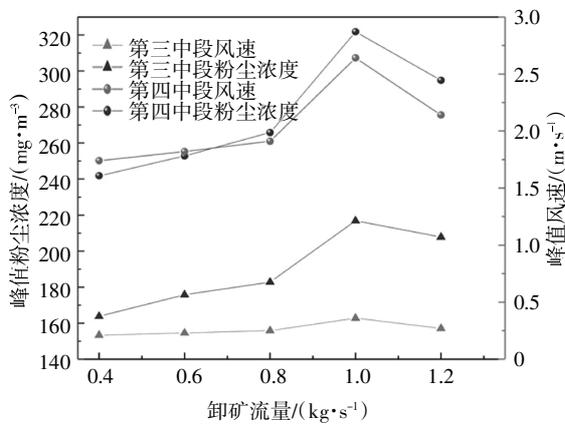
由图 4(a)(b)可以看出,产尘点气流速度随着卸矿流量的增加呈现出先增加后减少的趋势.定性分析可知卸矿流量逐渐变大时,矿石对气体的夹带量增加导致风速变大(流量小于 1.0 kg/s 时);当卸矿流量过大时分散的矿石可以视为整体下落的物体,与空气的接触面减小,夹带气流量减小,风速减少(流量大于 1.0 kg/s 时).第三中段风速衰减过程先后出现两个峰值,产生这种规律的原因是矿石下落过程中气流由溜井口迅速被压出产生第一个峰值;当矿石下落至矿仓后会产生反冲气流对第三中段进行补充,因此出现第二个峰值.而第四中段风流速度较大,反冲气流量不足以补充其衰减量,因此风速仅体现出先增大后减小趋势.由图 4(c)分析可知,粉尘峰值变化规律与风速随卸矿流量变化规律一致,粉尘浓度最大值出现在第四中段.在流量区间为 0.8~1.0 kg/s 范围内降低卸矿流量能明显改善溜井口风速大小及产尘量.



(a)第三中段风速变化



(b)第四中段风速变化



(c)产生点峰值粉尘浓度变化

图4 不同流量下产尘位置风速及粉尘浓度变化

Fig.4 Variations of wind speed and dust concentration at different dust-producing locations under different flow rates

分析实验结果可知,卸矿流量小于 1.0 kg/s 时,粉尘浓度及风速值与卸矿流量呈正相关,第四中段风速及粉尘浓度均为最大值.为更加直观反映出粉尘随时间变化关系,采用高速摄影机对卸矿流量为 1.0 kg/s 时,第四中段粉尘扩散情况进行拍摄分析.提取出 0.05 s、0.10 s、0.15 s、0.20 s 4 个时刻粉尘云运动图像,如图 5 所示.高速摄影机拍摄参数设置如表 1 所示.粉尘受卸矿气流作用涌入联络巷后,大粒径粉尘在巷道内优先沉降,小粒径粉尘随风流在巷

道内运动.通过测量,粉尘云在 0.2 s 内的扩散距离为 0.2 m,粉尘云的运动速度为 1 m/s.卸矿口处最大冲击风速为 2.64 m/s,冲击风速大概为粉尘运移速度的 2.64 倍,风速衰减较快粉尘滞后于风速在联络巷内运动.



(a) 0.05 s



(b) 0.1 s



(c) 0.15 s



(d) 0.2 s

图5 溜井联络巷内粉尘云运动

Fig.5 Dust cloud movement in crosscut of ore pass

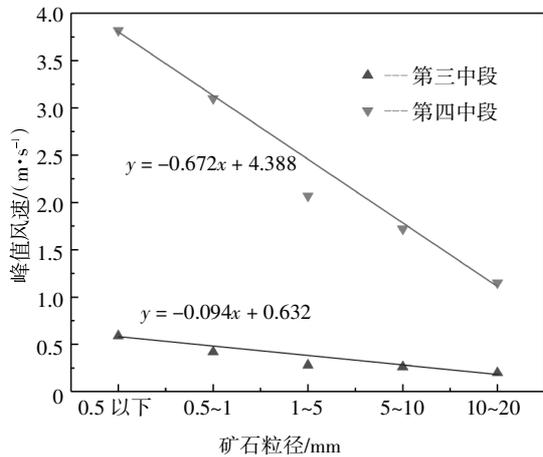
表1 高速摄影机拍摄参数

Tab.1 Photographic parameters of high-speed camera

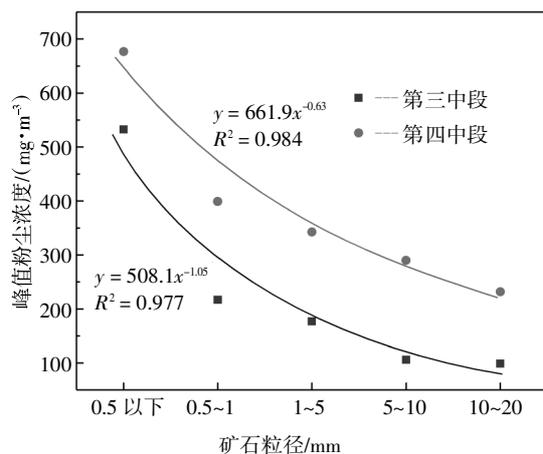
参数名称	参数设置	参数名称	参数设置
分区显示	1	分辨率	1 280 × 720
拍摄速率	100 fps	曝光时间	9 900 μs
EDR 设置	0 μs	CSR	1 μs

### 3.2 矿石粒径及卸矿高度对产尘点气流及粉尘浓度影响分析

矿石粒径变化反映了矿石比表面积,卸矿量一定时矿石粒径越小,矿石比表面积越大,与空气接触面积越大.按照矿石配比设置矿石粒径,在卸矿量及卸矿流量一定时,分别对 10~20 mm、5~10 mm、1~5 mm、0.5~1 mm、小于 0.5 mm 5 个粒径区间进行卸矿实验.不同粒径下产尘点风速及粉尘浓度峰值变化如图 6 所示.由图 6 看出粒径变化时仅对各中段风速及粉尘浓度的大小产生影响,粒径相同时粉尘浓度最大值出现在第四中段,与流量变化分析规律一致.风速及粉尘浓度值与粒径大小呈负相关,粒径越大风速与浓度值越小.其中,粉尘浓度与矿石粒径变化呈幂函数关系,最大产尘点幂函数指数为-0.63.



(a)各中段峰值风速随粒径变化

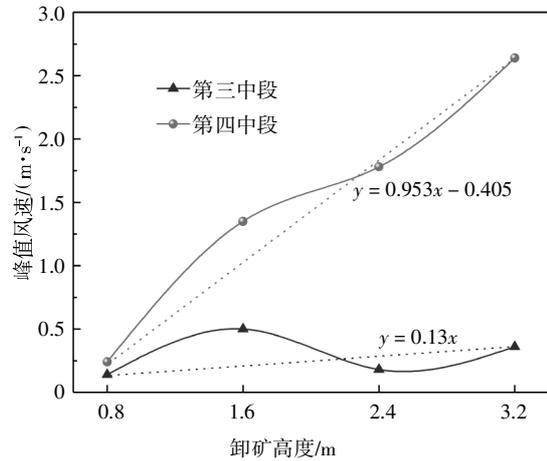


(b)各中段峰值浓度随粒径变化

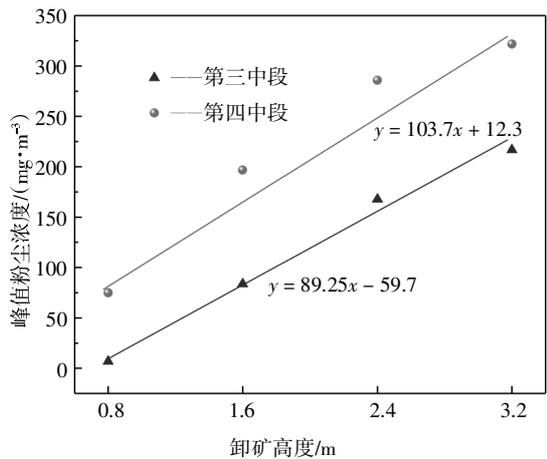
图 6 不同粒径下产尘位置风速及粉尘浓度峰值变化  
Fig.6 Variations of wind speed and peak dust concentration at different particle sizes

理想化的卸矿过程是矿石与空气间发生完全的

能量交换,不存在能量损失,矿石的重力势能完全转化为空气的动能.因此,在不同中段卸矿即卸矿高度的变化直接影响了矿石重力势能的大小.确保卸矿量及卸矿流量不变的情况下分别在不同中段进行卸矿实验,对三、四中段溜井口进行风速及粉尘浓度值监测.粉尘及风速峰值监测结果如图 7 所示.



(a)三、四中段峰值风速随卸矿高度变化



(b)三、四中段峰值浓度随卸矿高度变化

图 7 不同卸矿高度下产尘位置风速及粉尘浓度峰值变化  
Fig.7 Variation of wind speed and peak dust concentration at dusting sites at different unloading heights

由图 7 看出,第四中段风速及粉尘浓度随卸矿高度的增加而增大,矿石重力势能的大小决定了溜井内空气动能.卸矿高度由 0.8 m 增加到 3.2 m 时,第四中段溜井口峰值风速增加了 10 倍.第三中段风速相对较小,风速与卸矿高度大致呈正比关系.当第三中段卸矿时(卸矿高度为 1.6 m),溜井口风流方向与矿石下落方向一致,受矿石下落的作用风速偏大.并且随卸矿高度增加,矿石对卸矿位置的风流影响越大.第三中段卸矿时,卸矿处风流为第四中段

卸矿时卸矿处风速的2倍.由图7(b)可知,粉尘浓度随卸矿高度的增加而增加.第三中段粉尘浓度大致为第四中段粉尘浓度的0.5倍,而第四中段风速为第三中段风速的2~8倍;对粒径分析可知,第三中段粉尘粒径小于第四中段,粉尘颗粒较小风速变化对其影响较小.

#### 4 数值模型对实验结果验证分析

冲击气流是由矿石重力势能转化为空气动能的过程,本质为颗粒与气体间的相对运动.为研究冲击气流在溜井内由产生到衰减的分布规律,利用Fluent软件开源优势编辑API接口实现与EDEM之间数据的传递.对气固两相流分析时,空气被理想为恒温、连续、不可压缩的介质,矿石与空气之间相对运动,实现能量交换<sup>[24-25]</sup>.考虑到矿石颗粒间的碰撞,使用EDEM软件中Hertz-model描述矿石自身、矿石与矿石及矿石与溜井壁间碰撞的作用力.

##### 4.1 几何模型建立

根据如图1(a)所示溜井实际尺寸,使用Solidworks软件按照1:1比例建立三维数值模型,导入CFD-DEM软件进行分析.模型建立及网格划分情况,如图8所示.经过对现场卸矿情况的监测知,溜井平均一次卸矿量为5000kg,每次卸矿大约持续2s.根据现场检测情况溜井第一水平联络巷设置为压力入口,第二、三、四中段设置为压力出口,模型其余部分设置为墙体.并通过溜井卸矿现场监测到的不同中段压力值的大小设置压力边界条件.EDEM碰撞模型及Fluent流体分析具体参数的设定见表2所示.

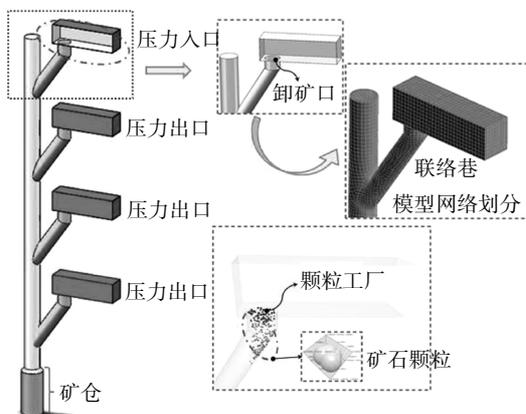


图8 模型建立及网格划分情况

Fig.8 Modeling and meshing

表2 EDEM-CFD耦合模拟参数设置

Tab.2 EDEM-CFD coupled simulation parameter settings

参数	参数名称	参数设置	参数名称	参数设置
Fluent	求解类型	压力求解器	Turbulent intensity	4.27%
	重力加速	9.81 m/s <sup>2</sup>	Hydraulic diameter	4 m
	压力入口	梯度变化	计算频率	10
	压力出口		Wall	No Slip
	Save data file every (time steps)	3	Max iterations /time step	30
	Solution Method	Scheme (SIMPLE)	High order term relaxation	—
EDEM	颗粒接触模型	Hertz-Mindlin 模型	矿石密度	4 800 kg/m <sup>3</sup>
	颗粒半径	0.01~0.5 m	粒径分布	R-R
	Poisson's ratio	0.4	一次卸矿量	5 000 kg

##### 4.2 数值模型结果分析

###### 4.2.1 卸矿后产尘点风流速度的验证分析

由能量守恒准则可知,卸矿量的大小直接决定了溜井内冲击风速的强度.图9显示了卸矿量为5000kg时,溜井内不同时刻风流变化云图.可以看出溜井内风速大小随着矿石的持续下降逐渐增加,最大值出现在矿石完全下落至矿仓,时间为8s时,溜井内最大风速为6.0m/s,溜井卸矿过程符合能量守恒定律.由风速云图看出,第一和第四中段风速变化最为明显.第一中段风速是矿石夹带气流自由下落,引起的风流迅速变化;第四中段风速是由矿石下落过程中能量的积累,风速变化较大,同时携带大量粉尘涌出溜井口.因此,第四中段为溜井主要产尘部位,与相似实验溜井口风速监测结果一致.根据不同时刻风速云图与色彩带对比可以看出各中段峰值风速大小关系为:第四中段>第一中段>第二中段>第三中段,与相似实验各中段峰值风速排序一致.风速云图中获取的最大风速可以监测出矿石瞬间释放引起矿石周围的最大风速,而相似实验中监测到的压差受卸矿过程中矿石下落影响,第一中段压差相对数值模拟获取的数据偏小.根据风速变化分析可知,

第一中段卸矿时,矿石在溜井内与井壁大致存在两个主要撞击点.矿石最终沿右侧井壁稳定散落,因此右侧井壁处风流变化明显比左侧大,矿石的下落不能简单的视为活塞运动.

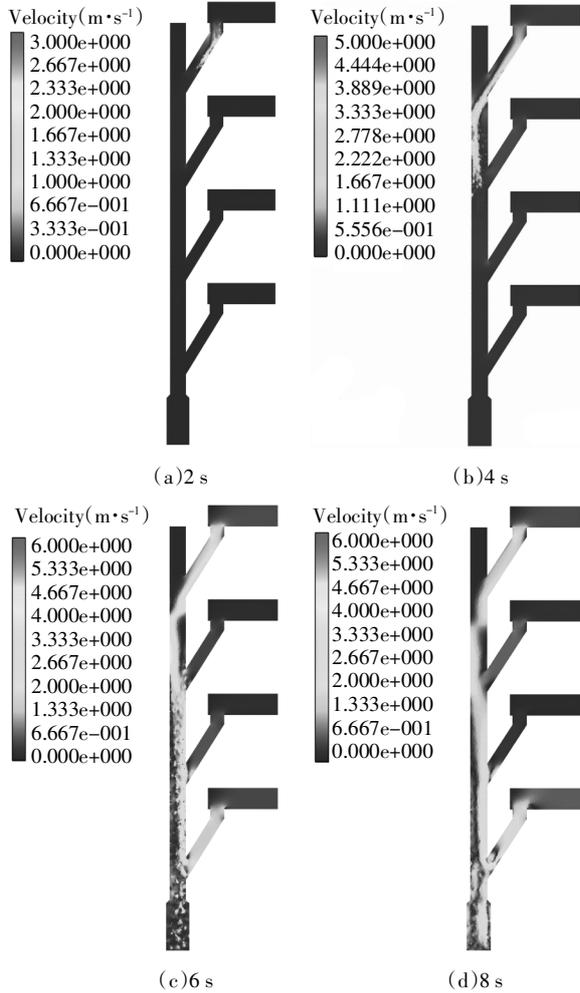


图 9 不同时刻溜井内卸矿风速云图

Fig.9 Wind velocity nephogram of ore unloading in ore pass at different time

#### 4.2.2 卸矿后产生点风流方向的验证分析

风速云图体现了溜井内整体风流大小分布情况,受矿石下落路径的影响溜井内右侧风流普遍大于左侧,不同中段溜井口存在大量气流被反吸入或被压出主流井.为明确不同中段气流方向随矿石下落的变化,在分析出相似实验压差变化的同时,相应提取出不同时刻溜井内风速矢量及矿石下落轨迹图,如图 10 所示.由图 10(a)(b)所示,矿石下落大约 4 s 时,随矿石下落溜井内气流受矿石的诱导作用,第一中段气流由联络巷流入溜井内;矿石未完全通过第二中段,其余中段气流受第一中段影响存在

被压出的趋势.由图 10(c)所示,随矿石完全通过第二中段,第二中段斜坡道与主溜井连接处形成负压,二中段联络巷处风流被吸入主溜井,此处风流方向改变.由于第三、四中段距离矿仓较近,矿石下落聚集大量气流,矿石的运动不能体现出负压,因此均有风流流入联络巷.对比溜井相似实验压差结果(图 3)可知,第二中段压差改变时刻为 3 s,数值模拟中时刻为 5 s 左右风速矢量方向发生改变,由于下落高度不同导致矿石通过第二中段耗时有差别,从而影响了风流方向变化的时间点;但数值模拟中风流矢量图箭头方向的变化与相似实验压差正负值的变化趋势一致.

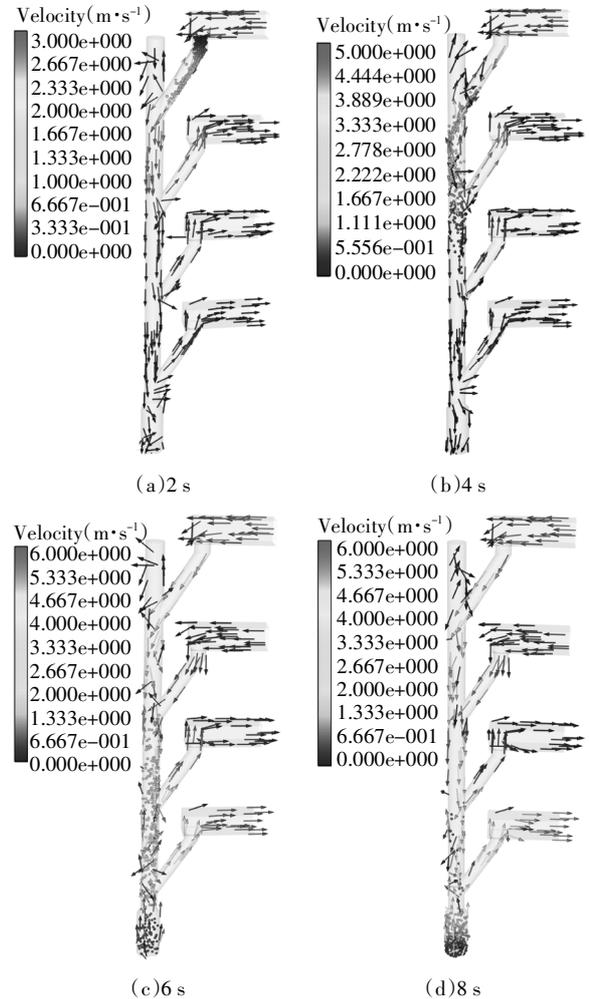


图 10 不同时刻溜井内卸矿风流矢量

Fig.10 Air flow vectors of ore unloading at different times in ore pass

## 5 结论

1)通过相似准则推导出溜井实验模型相似准则

数. 为保证实验与现场吻合, 实验几何相似比例为 1 : 25, 实验卸矿流量为实际卸矿流量的  $(1/25)^{\frac{5}{2}}$ .

2) 溜井卸矿产生的冲击气流是导致粉尘污染的主要因素, 通过数值模拟及相似实验对第一中段卸矿量为 5 000 kg 时各中段风流方向及风流大小分析可知, 第三、四中段溜井口有冲击风流冲出, 其中第四中段风速达到 2.64 m/s 左右; 通过对溜井口压差及风速矢量分析发现, 第一、第二中段风流是溜井内负压导致, 风流由溜井口进入主溜井. 由风速大小及风向分析可知, 第一中段卸矿时, 第三、第四中段为主要产尘点.

3) 卸矿流量小于 1.0 kg/s 时, 溜井产尘点风速、粉尘浓度与卸矿流量呈正比关系; 卸矿流量大于 1.0 kg/s 时, 卸矿过程可以被理想化的当作整块物体下落, 夹带气流量减少风速出现下降趋势. 产尘点风速变化趋势与粉尘浓度变化趋势基本一致, 风流是主导产尘的主要因素.

4) 产尘点风速变化与矿石粒径呈反比, 粒径变化对第三中段风速影响相比第四中段更为明显. 粉尘浓度与粒径变化呈幂函数的关系, 最大产尘点幂指数为 -0.63. 随卸矿高度变化, 粉尘浓度及风速整体为负相关, 但卸矿处风速受矿石运动影响更为明显.

## 参考文献

- [1] 吴国珉, 刘金明, 吴超. 溜井放矿冲击气流的分析与污染控制措施[J]. 采矿技术, 2007(4): 40—41.  
WU G M, LIU J M, WU C. Analyzing the impact air chute ore and pollution control measures [J]. Mining Technology, 2007, 7(4): 40—41. (In Chinese)
- [2] 李政. 坑下矿山高溜井漏风及粉尘污染控制技术研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2006, 58(5): 42—45.  
LI Z. Research on control technology of air leakage and dust pollution in high slope of mine [J]. Non-Ferrous Metal (Mine Part), 2006, 58(5): 42—45. (In Chinese)
- [3] 王明, 蒋仲安, 陈举师, 等. 高溜井卸矿冲击气流影响因素的相似理论与实验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(23): 276—282.  
WANG M, JIANG Z A, CHEN J S, *et al.* Similarity theory and experimental study on influencing factors of high-slip mine unloading impinging airflow [J]. Vibration and Shock, 2017, 36(23): 276—282. (In Chinese)
- [4] UCHIYAMA T. Numerical analysis of particulate jet generated by free falling particles [J]. Powder Technology, 2004, 145(2): 123—130.
- [5] UCHIYAMA T, NARUSE M. Three-dimensional vortex simulation for particulate jet generated by free falling particles [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(6): 1913—1921.
- [6] WYPYCH P, COOK D, COOPER P. Controlling dust emissions and explosion hazards in powder handling plants [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(2): 323—326.
- [7] LIU Z, WYPYCH P, COOPER P. Dust generation and air entrainment in bulk materials handling— a review [J]. Powder Handling and Processing, 1999, 4(4): 421—425.
- [8] 李维梓. 理想落料管诱导空气量理论计算[J]. 建筑热能通风空调, 1985(2): 8—13.  
LI W Z. Theoretical calculation of induced air volume for ideal blanking pipe [J]. Building Thermal Ventilation, 1985(2): 8—13. (In Chinese)
- [9] LI X C, WANG Q L, LIU Q, *et al.* Developments in studies of air entrained by falling bulk materials [J]. Powder Technology, 2016, 291: 159—169.
- [10] 李小川. 气流场中粉尘颗粒流动行为与湿法净化[D]. 徐州: 中国矿业大学化工学院, 2013: 38—47.  
LI X C. Flow behavior and wet purification of dust particles in air-flow field [D]. Xuzhou: School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining, 2013: 38—47. (In Chinese)
- [11] 贾兰, 宋子岭, 赵光, 等. 大高差溜槽粉尘颗粒扩散运动规律数值模拟[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1406—1411.  
JIA L, SONG Z L, ZHAO G, *et al.* Numerical simulation of diffusion movement law of dust particles in large height difference chute [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(3): 1406—1411. (In Chinese)
- [12] 王学文, QIN Yi, TIAN Yankang, 等. 基于 EDEM 的煤仓卸料时煤散料流动特性分析 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 130—134.  
WANG X W, QIN Y, TIAN Y K, *et al.* Analysis of flow characteristics of coal bulk in coal bunker unloading based on EDEM [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 130—134. (In Chinese)
- [13] ANSART R, RYCK A D, DODDS J A. Dust emission in powder handling: free falling particle plume characterization [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 152(2/3): 415—420.
- [14] ANSART R, LETOURNEAU J J, RYCK A D, *et al.* Dust emission by powder handling: influence of the hopper outlet on the dust plume [J]. Powder Technology, 2011, 212(3): 418—424.
- [15] MÖBIUS M E. Clustering instability in a freely falling granular jet [J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2006, 74(5): 051304.
- [16] 刘启觉. 理想落料诱导空气量的计算[J]. 通风除尘, 1987(3): 33—36.

- LIU Q J. Ideal falling material induced air rate calculation [J]. *Ventilation and Dust Removal*, 1987(3):33—36. (In Chinese)
- [17] 严兴忠. 落料诱导空气量的理论计算法 [J]. *工业安全与防尘*, 1993(8):12—18.
- YAN X Z. The theoretical calculation method for the falling-substance-induced air rate [J]. *Industrial Safety and Dust Control*, 1993(8):12—18. (In Chinese)
- [18] 王英敏, 栾昌才. 溜矿井冲击风量的计算及其控制[J]. *有色金属(矿山部分)*, 1981(1):43—47.
- WANG Y M, LUAN C C. Calculation and control of impact air volume in slip mine [J]. *Non-ferrous metal (Mine Part)*, 1981(1):43—47. (In Chinese)
- [19] 暨朝颂. 溜井的冲击气流[J]. *中国矿山工程*, 2007, 36(1):36—38.
- JI C S. The impact air-flow in ore pass [J]. *China Mine Engineering*, 2007, 36(1):36—38. (In Chinese)
- [20] 王洪胜. 综采放顶煤开采瓦斯运移规律及控制技术应用研究[D]. 北京:北京科技大学土木与环境工程学院, 2016:71—76.
- WANG H S. Study on gas migration law and application of control technology in fully mechanized caving mining [D]. Beijing:School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, 2016:71—76. (In Chinese)
- [21] 陈举师, 蒋仲安, 张义坤. 破碎硐室粉尘质量浓度分布规律的实验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(7):1051—1055.
- CHEN J S, JIANG Z A, ZHANG Y K. Experimental study on distribution of dust mass concentration in broken chamber [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science Edition)*, 2015, 36(7):1051—1055. (In Chinese)
- [22] 张兴华, 葛少成, 陈曦, 等. 基于量纲分析的转载点诱导气流影响因素分析与应用[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(2):604—610.
- ZHANG X H, GE S C, CHEN X, *et al.* Analysis and application of factors affecting airflow induced by transfer point based on dimensional analysis [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(2):604—610. (In Chinese)
- [23] 蔡卫, 蒋仲安, 刘毅. 综采工作面喷雾降尘中相似准则数的探讨[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(2):151—154.
- CAI W, JIANG Z A, LIU Y. Discussion on the number of similar criteria in spray dust reduction in fully mechanized mining face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(2):151—154. (In Chinese)
- [24] 孙忠强. 公路隧道钻爆法施工粉尘运移规律及控制技术研究[D]. 北京:北京科技大学土木与环境工程学院, 2015:75—77.
- SHUN Z Q. Study on dust migration law and control technology of highway tunnel drilling and explosion method [D]. Beijing:School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, 2015:75—77. (In Chinese)
- [25] 姚贵佳. 溜井冲击气流数值模拟与控制研究[D]. 赣州:江西理工大学资源与环境工程学院, 2016:16—21.
- YAO G J. Research on numerical simulation and control of sliding airflow [D]. Ganzhou:School of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, 2016:16—21. (In Chinese)