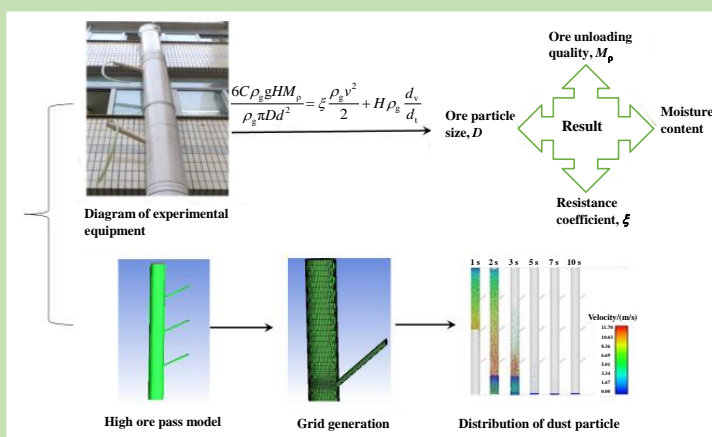


The diffusion law and distribution characteristics of high drop dust

Yihua CHEN*, Mingyan GU, Song CHEN, Lianmeng GE

College of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243000, China

Abstract: In the process of ore drawing in high pass, a strong impact airflow will be formed, which will cause dust diffusion and serious underground environmental pollution. The effective treatment of the pollution has always been the focus of underground ventilation and dust removal. In this work, the diffusion law and distribution characteristics of dust in the process of ore pass drawing are explored by means of the combination of similar experiment and numerical simulation. By changing the experimental conditions of ore drawing



quality, ore particle size, chute sealing degree, water content and other factors, the air flow size and dust concentration distribution under different conditions were researched. The CFD-DPM coupling method was used to simulate the gas–solid two-phase flow in the process of ore unloading, and the temporal and spatial distribution characteristics of gas flow and dust concentration were studied. The results showed that the maximum dust concentration and wind speed increased with the increase of ore drawing quality, and decreased with the increase of particle size and airtight degree of ore pass. The higher the water content was, the smaller the dust concentration was, but the wind speed had no obvious changed. Moreover, the key factor affecting dust concentration was water content, followed by the airtight degree of ore pass, ore drawing quality and ore particle size. In the process of ore drawing, the collision between ore particles played a dominant role, and the particle flow presented a transverse distribution.

Key words: high ore pass; particle dispersion; FLUENT numerical simulation; dust concentration; wind speed

收稿: 2020-01-06, 修回: 2020-03-03, 网络发表: 2020-03-20, Received: 2020-01-06, Revised: 2020-03-03, Published online: 2020-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0801605)

作者简介: 陈宜华(1963–), 男, 安徽省马鞍山市人, 博士, 教授, 研究方向: 矿山通风除尘, E-mail: chenyh_1234@163.com.

引用格式: 陈宜华, 顾明言, 陈颂, 等. 高落差粉尘扩散规律和分布特征. 过程工程学报, 2020, 20(11): 1353–1362.

Chen Y H, Gu M Y, Chen S, et al. The diffusion law and distribution characteristics of high drop dust (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(11): 1353–1362, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220008.

高落差粉尘扩散规律和分布特征

陈宜华*, 顾明言, 陈 颂, 葛连梦

安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243000

摘 要: 高溜井放矿过程中会形成强大的冲击气流引起粉尘扩散, 造成严重的井下环境污染, 对其进行有效治理一直是井下通风除尘的工作重心, 本工作利用相似实验和数值模拟相结合的方式探究溜井放矿过程中粉尘的扩散规律和分布特征。通过改变放矿质量、矿石粒径、溜井密闭程度、含水率等因素测试不同条件下气流大小和粉尘浓度分布, 并利用 CFD-DPM 耦合方法模拟卸矿过程中的气-固两相流, 研究气流和粉尘浓度时空分布特征。结果表明, 最大粉尘浓度和风速随放矿质量增加而上升, 随颗粒粒径和溜井密闭程度增大而降低, 且含水率越大, 粉尘浓度越小, 风速无明显变化, 在放矿过程中矿石颗粒之间碰撞占主导作用, 颗粒流呈横向分布。

关键词: 高溜井; 粉尘扩散; FLUENT 数值模拟; 粉尘浓度; 风速

中图分类号: TD714

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)11-1153-10

1 前言

金属矿山经过几十年的大规模开采, 采场已由地表向地下延伸, 经历了露天开采向深部开发的转变。矿山井下的矿石运输一般采用多中段分别卸矿, 经主溜井汇集后集中提升至地表^[1]。虽然高溜井具有生产能力强、节省能耗的优点, 但在其进行卸矿作业时, 松散的矿石在井筒内快速下落, 急剧压缩井筒下部空气, 形成强大的携带有大量粉尘的冲击风流^[2]。粉尘随着风流在巷道内扩散, 微细粉尘易悬浮在空气中难以沉降。这些粉尘如不及时采取控制和处理措施, 将严重影响矿工的健康。另外放矿硐室及联巷中有大量的机械设备, 粉尘颗粒进入耐磨件中, 在运行过程中不断与耐磨件进行摩擦, 加速磨损, 当粉尘进入精密电子元器件中(如井下自动化和监测监控系统), 还会引起电子元器件电路板的短路或损毁, 影响设备的正常运转, 加大了维护工作量。因此, 研究高溜井卸矿时粉尘扩散效应, 掌握粉尘浓度分布特点, 降低高溜井卸矿时粉尘浓度, 对改善井下作业环境具有重大意义。

国外 Hodkinson^[3]最早对呼吸性粉尘扩散规律进行研究, 确定了粉尘颗粒运动与风流风速之间的必要条件, 之后 Wang 等^[4]、Descamps 等^[5]、邹常富等^[6]、李伟等^[7]通过相似实验对放矿过程中冲击气流进行探究, 得出粉尘运动轨迹及相应的应力分布情况。还有学者在离散单元法理论的基础上利用 FLUENT 模拟软件进行模拟, 研究粉尘运动及扩散的动态过程^[8-11]。目前国内外对高溜井卸矿冲击气流的产生和粉尘污染效应的研究

集中在实际的工程措施方面, 而对冲击气流及粉尘产生的主要因素和相关理论的研究较少。综合国内外现状, 本研究按照相似准则, 建立缩小模型模拟实际高溜井放矿过程, 通过改变放矿条件, 测定各监测点的粉尘浓度、气流速度, 根据数据分析得出高溜井粉尘污染扩散特征; 由于实验条件的局限性, 因此, 采用 FLUENT 软件中的 DDPM 模型探究高溜井放矿时矿石颗粒与气流之间的分布规律, 通过实验和模拟相结合的方法, 探究高溜井不同放矿条件下气流和粉尘的扩散规律及分布特征, 为净化工作环境, 保障矿工身体健康, 确保井下放矿作业安全进行提供指导依据。

2 实验

2.1 实验装置

以某金属矿山多中段溜井(高 100 m、直径 3 m, 有三个倾角为 30°、直径 2 m 的斜溜槽、斜溜槽之间间隔为 25 m)为原型, 根据相似原理进行推导后, 建立缩小比例 1:10 的相似实验模型。模型分为 3 个中段, 由主管、卸料斗、储矿弯头组成, 如图 1 所示。为了避免溜井模型阻力增加, 本次实验将卸料斗安放在模型的顶端, 采用人工从顶端放矿, 使矿石作初速度为 0 的自由落体运动。放矿时, 将矿石聚集起来, 保证人工模拟放矿时不会崩散, 另外, 为了模拟实际溜井环境, 实验过程中将一台小型抽出式风机的入口端连接到溜井顶端, 通过抽风实验设置合理的风量, 在溜井口顶部设置可移动挡板调节溜井模型的密闭性, 利用压力传感器测定风机入口的静压强, 用热敏风速仪测定各出口风速, 计算

不同条件下溜井模型的阻力系数,进而控制溜井模型阻力大小^[12]。在测试不同实验条件下每个中段监测点的风速和粉尘浓度时,热敏风速仪探头和粉尘监测仪的采样管伸入斜溜槽靠近主管的位置,具体布置示意图见图 1。

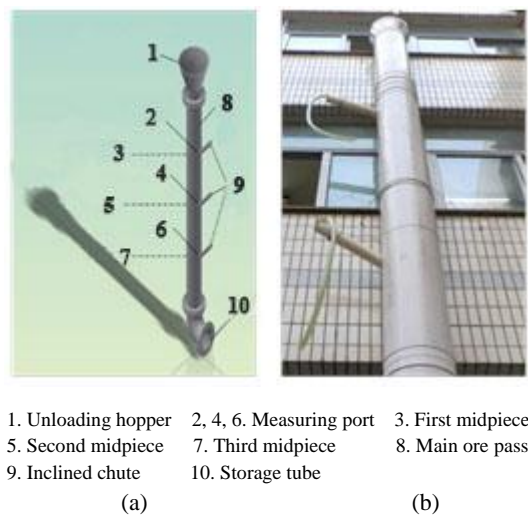


图 1 测点位置图(a)与实验装置图(b)
Fig.1 Location diagram of measuring point (a) and diagram of experimental equipment (b)

2.2 测试方法

2.2.1 粉尘测定方法

(1) 粉尘浓度的测定

称重法:利用动力抽取一定的空气通过已恒重的滤膜,根据采样前后的滤膜质量之差及采样体积即可计算粉尘浓度 TSP(mg/m³)^[13]:

$$TSP = \frac{m}{q_{v,s}t} \tag{1}$$

式中, m 为隔留在滤膜上颗粒物的质量(mg), $q_{v,s}$ 为标况下的采样流量(m³/min), t 为采样时间(min)。

本实验在图 1 所示的三个监测点分别布置 LD-5C 微电脑粉尘采样仪,对各检测断面的粉尘浓度进行连续检测。

(2) 风流速度的测定

在图 1 所示的三个监测点分别布置热敏风速仪,热敏风速仪设定每隔 2 秒监测一个数据,对各监测点的气流速度进行连续性监测,得出实验中气流速度的变化情况。

2.2.2 溜井阻力计算和冲击气流影响因素分析

溜井放矿时,矿石在溜井内自由落体运动过程中与溜井内的空气相互作用。假设溜井内的空气为连续的不可

压缩相,且矿石颗粒为均匀的球体,单位时间内的溜井阻力 P_c (Pa)可由下式求出:

$$P_c = \frac{6C\rho_g gHM_p}{\rho_g \pi Dd^2} \tag{2}$$

式中, D 为矿石粒径(m), d 为溜井的直径(m), H 为单位时间内卸矿的数量, M_p 为矿石的质量流量(kg/s), ρ_g 为矿石密度(kg/m³), C 为矿石的正面阻力系数。

在冲击压力作用下,风流克服溜井阻力与流动过程的压力损失相等,遵循能量守恒,即满足下式:

$$\frac{6C\rho_g gHM_p}{\rho_g \pi Dd^2} = \xi \frac{\rho_g v^2}{2} + H\rho_g \frac{d_v}{d_t} \tag{3}$$

式中, ξ 为溜井阻力系数,可随卸料口断面面积改变而改变, v 为冲击气流流速(m/s), $H\rho_g(d_v/d_t)$ 为惯性阻力(Pa)。从式(3)可看出,冲击气流(v)受放矿质量流量 M_p 、矿石粒径 D 、阻力系数 ξ 等因素影响。

2.3 实验样品分析

本工作选用的梅山矿石,自然类型为贫矿、富矿、安山岩、辉石和闪长玢岩等^[14],其主要化学成分为铁、钙、镁、铝、硫和磷,有微量的钒和镓,其主要物理力学性质见表 1。制备样品时,首先将部分较大矿石经颚式破碎机(鑫诚信仪器仪表有限公司)破碎至矿石粒径小于 60 mm,然后用 1 目(孔径约 25 mm),2 目(约 10 mm),4 目(约 5 mm),18 目(约 1 mm)筛分网筛将矿石筛分 $D \leq 1$ mm, $1\text{ mm} < D \leq 5$ mm, $5\text{ mm} < D \leq 10$ mm, $10\text{ mm} < D \leq 25$ mm, $25\text{ mm} < D \leq 60$ mm 五个等级,并按 1#~5#顺序依次对样品进行标记,另外,根据井下矿石的实际分布,将 1#~5#样品分别以 5%,30%,30%,30%,5%百分比进行配制混合,得到用于实验室模拟的 6#放矿样品。

Table 1 Main physical and mechanical properties of ore				
Ore rock type	Proportion /(t/m ³)	Compressive strength /MPa	Proctor's coefficient, f	Loose coefficient, k
Rich ore	>-198 m	147~196	12~14	1.6
	<-198 m			
Lean ore	4.88	49~88	12~16	1.55
Andesite	2.6	29~49	4~6	1.5
Pyroxene	2.6	49~69	8~10	1.5

3 结果与分析

本实验人工从溜井顶部放矿,通过改变放矿质量 M_p 、矿石粒径 D 、含水率及溜井阻力系数 ξ 等实验条

件,监测各测点风速和呼吸性粉尘浓度,讨论各因素对溜井冲击风速和粉尘扩散的影响。

3.1 放矿质量对溜井内粉尘和风速扩散的影响

将配制好的 6# 实验样品分别称量 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 kg, 矿石含水率为 0.304%, 人工从溜井阻力系数 $\xi=195(1/3 \text{ 密闭})$ 的溜井顶部依次进行放矿实验,测得不同放矿质量条件对风速和粉尘浓度的影响结果如图 2 和 3 所示。

由图 2(a)可以看出,溜井内粉尘浓度随投放矿石质量上升而增加且在短时间内上升到最大值。当放矿质量为 2 kg 时,溜井内最大粉尘浓度为 27.4 mg/m^3 , 浓度维持时间(浓度由 0 开始增加至最大值再降为 0 左右所用时间)约为 16 s; 放矿质量为 8 kg 时,溜井内粉尘浓度

持续时间约 40 s, 最大粉尘浓度 132 mg/m^3 , 约为放矿质量为 2 kg 时的 5 倍。由此可见,放矿质量对溜井内粉尘浓度及浓度维持时间的影响较大。由图 2(b)可以看出,最大风速随放矿质量增加而增大,放矿质量为 2 kg 时约在 6 s 时达最大风速 1.2 m/s, 放矿质量为 8 kg 时也在约 6 s 时达最大风速 2.48 m/s。可见改变放矿质量,风速达峰值的时间点基本一致,而风速从峰值下降到最小值的时间随放矿质量增大而增加,另外矿石在溜井内做类似活塞运动,落料质量与风速衰减成反比,放矿质量越大,气流向下压,风速衰减得越快;质量越小,向上的阻力大于重力,风速衰减得越慢,所以随时间增加,放矿质量为 2 kg 时风速大于放矿质量为 8 kg 时的风速。

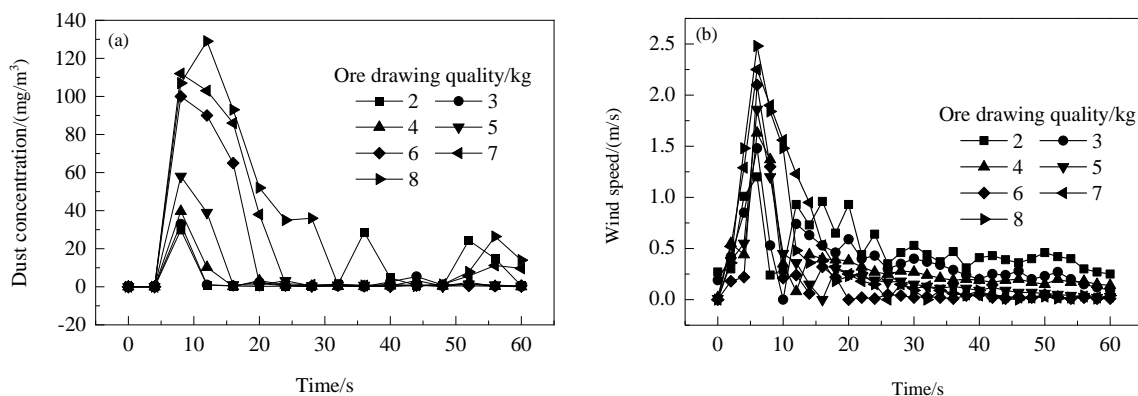


图2 放矿质量对粉尘浓度和风速的影响

Fig.2 Effects of ore drawing quality on dust concentration and wind speed

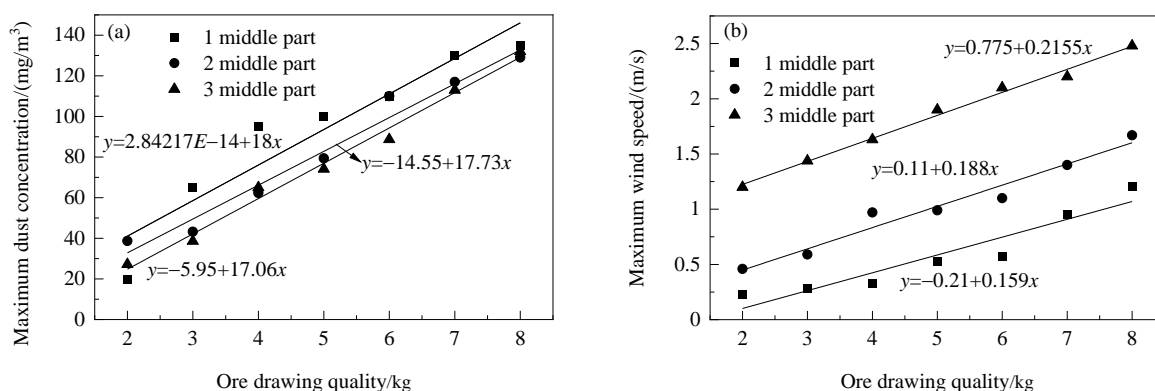


图3 最大粉尘浓度和最大风速随放矿质量变化的拟合曲线

Fig.3 Fitting curves of maximum dust concentration and maximum wind speed changing with ore drawing quality

由图 3 可以看出,由于放矿质量增加,携带的粉尘增多,溜井内每个中段的粉尘浓度均会随之增大,各中段增加的斜率基本一致且通过实验测试可知增幅随放矿质量增加呈增大趋势。风速与放矿质量变化拟合曲线的斜率为 0.159~0.2155, 每个中段风速随投放矿石质量

增加而不断增大,但由于放矿质量增大,矿石之间发生碰撞,减少了其与空气接触的几率,从而降低了矿石对溜井内气流的作用力,风速增加的幅度随放矿质量的增加在不断减小。

3.2 矿石粒径对溜井内粉尘和风速扩散的影响

将 5 个不同粒径范围的矿石颗粒, 1#~5#矿石样品分别称量 4 kg, 1/3 密闭($\xi=195$), 依次进行人工放矿实验, 并对各中段的粉尘浓度和风速进行监测, 考察矿石粒径 D 对各中段的粉尘浓度和风速的影响, 如图 4 所示。可以看出, 粉尘浓度和风速的大小与矿石粒径息息相关, 粉尘粒径越小, 溜井内的最大粉尘浓度越大, 粒径 $D \leq 1$ mm 时, 粉尘浓度约在放矿 8 s 后达最大值 215.1 mg/m^3 , 浓度维持时间约为 30 s, 最大风速达 1.9 m/s ; 粒径为 25

$\text{mm} < D \leq 60 \text{ mm}$ 时, 在 8 s 后粉尘浓度达最大值 25.9 mg/m^3 , 维持时间为 12 s, 最大风速只有 0.7 m/s 。在相同放矿质量条件下, 矿石粒径越小, 溜井内最大粉尘浓度和最大风速越大, 但粒径对风速达最大值的时间没有太大影响。这是因为粒径越小, 其表面积越大, 矿石投影面积占溜井横截面积比例就越大, 诱导溜井内更多的空气运动, 风速也变大, 进而导致粉尘颗粒运动的更剧烈, 不断扩散导致最大粉尘浓度值较高, 持续时间长。

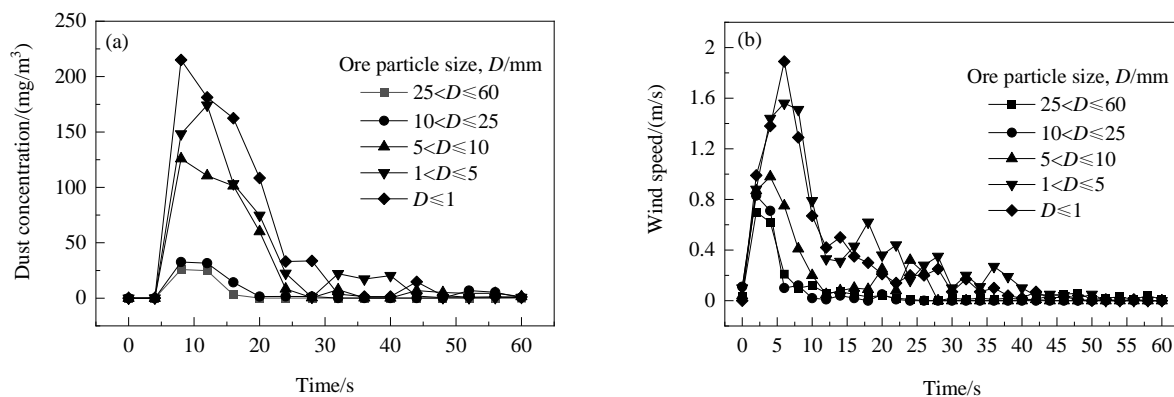


图 4 矿石粒径对粉尘浓度和风速的影响

Fig.4 Effects of ore particle size on dust concentration and wind speed

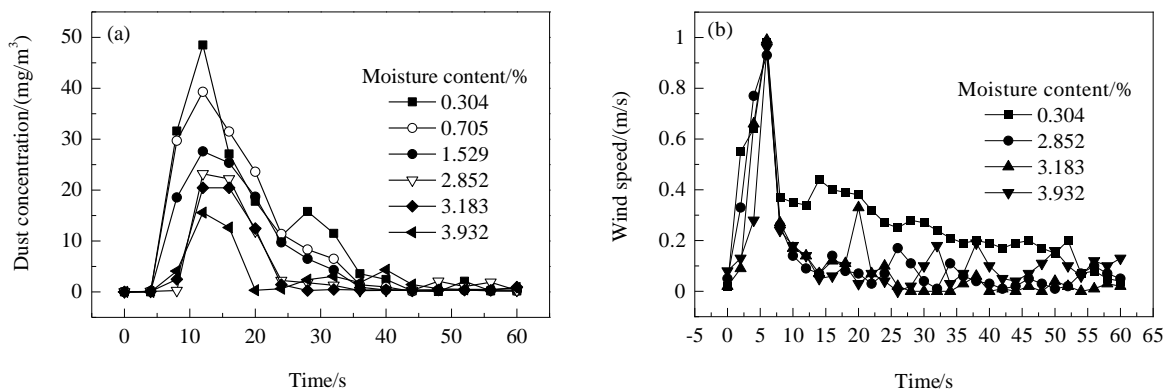


图 5 矿石含水率对粉尘浓度和风速的影响

Fig.5 Effects of moisture content on dust concentration and wind speed

3.3 矿石含水率对溜井内粉尘和风速扩散的影响

将配制好的 6#矿石样品称 6 份, 每份 4 kg, 已知原有矿石样品含水率为 0.304%, 实验采用人为喷洒清水的方式对其他 5 份矿石样品喷洒清水, 测定含水率为 0.705%, 1.529%, 2.852%, 3.183%, 3.932%, 将这不同含水率的 6 份样品在溜井 1/3 密闭($\xi=195$)条件下进行人工放矿实验, 结果如图 5 和 6 所示。可以看出, 含水率越大, 粉尘浓度最大值越小, 降到最小值所用时间越短, 而最大风速受含水率的影响较小, 达最大值所用时间也基本一致, 但含水率高的矿石风速波动较大。原因是高

湿度下矿石中的细小颗粒团聚到一起, 下落过程中凝聚成更大的团块颗粒, 由于水分子与粉尘颗粒之间的结合, 在矿石表面分子力的作用下粉尘不容易逸出。由图 6 中的拟合曲线可以看出, 溜井内粉尘浓度和风速与含水率呈负相关, 且粉尘浓度受含水率的影响较大, 风速受含水率影响较小。

3.4 溜井阻力对溜井内粉尘和风速扩散的影响

在溜井顶部放矿过程中, 空气在溜井内运动能量耗损在于克服溜井进出口阻力, 通过改变溜井密闭程度改变下料口断面面积, 进而改变溜井阻力大小。实验时,

称量4份含水率为0.304%的6#矿石样品,每份4 kg进行人工放矿实验,测定各测点在溜井进出口全密闭(溜井阻力系数 $\xi=630$)、1/3密闭($\xi=195$)、2/3密闭($\xi=383$)和不密闭($\xi=10$)四种工况下的风速和粉尘浓度,结果如图7所示。可以看出,溜井内最大粉尘浓度整体随溜井口密闭程度的增大而降低,当溜井口不密闭($\xi=10$)时,最大粉尘浓度为 79.3 mg/m^3 ,1/3密闭时,最大粉尘浓度为 39.7 mg/m^3 ,继续加大溜井密闭程度,粉尘浓度变

化幅度不大;当溜井口不密闭时,溜井内风速最大值达到 2.22 m/s ,密闭1/3时,最大风速可达到 0.97 m/s ,溜井密闭后,溜井内风速骤降,继续加大溜井密闭程度时,风速虽然在下降,但降幅较小。这是由于溜井口全开时,矿石下落过程中引起的风速较大,粉尘浓度随气流的运动程度增大而增大,溜井口逐渐密闭时,由于气流在克服溜井口阻力的过程中消耗能量,导致扩散动力不足而引起粉尘浓度和风速明显下降。

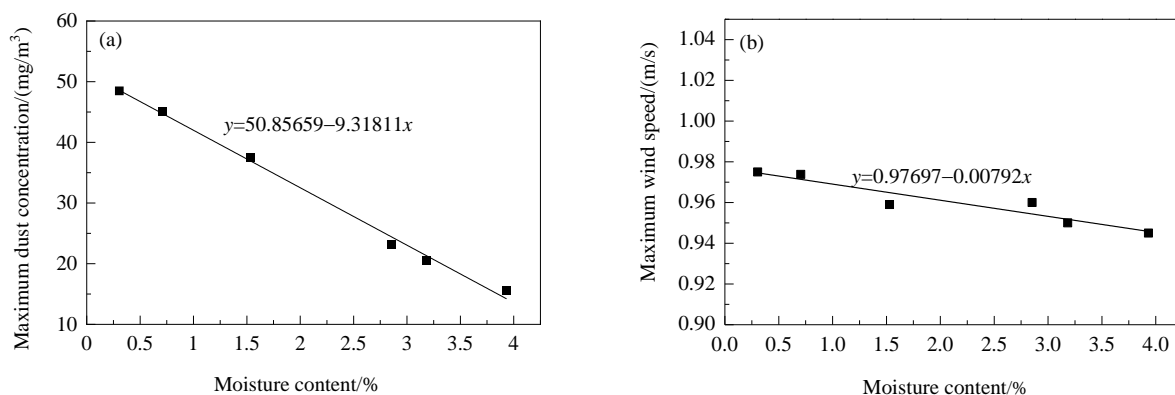


图6 最大粉尘浓度和最大风速随含水率变化的拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of maximum dust concentration and maximum wind speed changing with moisture content

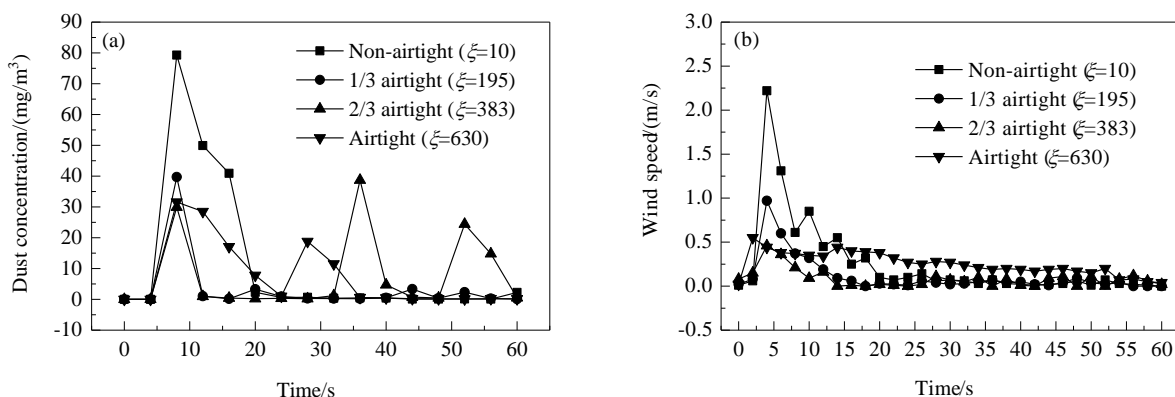


图7 溜井阻力对粉尘浓度和风速的影响

Fig.7 Effects of pass resistance on dust concentration and wind speed

3.5 各因素影响程度分析

为了分析放矿质量 M_p 、矿石粒径 D 、含水率及溜井阻力系数 ξ 等因素对风速和粉尘浓度影响程度大小,根据上述实验测试的风速和粉尘浓度实验数据(56组数据),将测试的风速和粉尘浓度作为参考序列 X_{01} 和 X_{02} ,将放矿质量 $M_p(X_1)$ 、矿石粒径 $D(X_2)$ 、含水率(X_3)及溜井阻力系数 $\xi(X_4)$ 作为比较序列,计算风速和粉尘浓度与各因素的关联度,具体计算过程如下:

(1) 建立矩阵:

$$X = (X_0, X_1, X_2, X_3, X_4) = \begin{bmatrix} x_0(1) & x_1(1) & \cdots & x_4(1) \\ x_0(2) & x_1(2) & \cdots & x_4(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0(56) & x_1(56) & \cdots & x_4(56) \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2) 序列差计算:通过逐个计算矩阵(4)比较序列和参考序列对应元素的差值绝对值,即 $|x_0(k) - x_i(k)|$,得到序列差矩阵 R_i :

$$R_i = [\beta_1(k), \beta_2(k), \beta_3(k), \beta_4(k)]^T \quad (5)$$

其中 $i=1, 2, \dots, 5, k=1, 2, \dots, 56$; $\beta_i(k)$ 为关联度系数, $\beta_i(k)=(m+\rho M)/[\Delta_i(k)+\rho M]$, m, M 为最小、最大极差, ρ 为分辨系数, 取 0.5。

(3) 关联度计算: $\beta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \beta_i(k)$, $i=1, 2, 3, 4, 5$, $n=k=1, 2, \dots, 56$, 代入数据求得风速与各因素之间的关联度 $\bar{R}_i = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = (0.935, 0.849, 0.732, 0.964)$, 粉尘浓度与各因素之间的关联度 $\bar{R}_i = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = (0.915, 0.857, 0.942, 0.938)$ 。根据计算结果可知, 冲击风速影响程度大小排序为 $X_4 > X_1 > X_2 > X_3$, 可见溜井阻力系数和放矿质量对冲击风速的影响最大, 其次是矿石粒径, 含水率影响最小; 粉尘浓度影响程度大小排序为 $X_3 > X_4 > X_1 > X_2$, 可见粉尘浓度主要受含水率和溜井阻力系数影响, 受放矿质量和矿石粒径影响较小。

4 高溜井放矿时气流和粉尘分布特征模拟结果分析

为了模拟冲击气流和粉尘浓度的分布特征, 在气固两相流的理论基础上, 用 FLUENT 流体仿真软件的 DPM 模型对高溜井放矿过程的三维流场进行模拟计算。为了保证原型与仿真模型之间溜井底部堆积物料的高度一致, 设放矿质量为 40 kg, 矿石粒径在 1~600 mm 范围内随机分布。

4.1 数值模拟及参数设定方法

(1) 模型建立及网格划分

数值模拟的几何模型尺寸与实验模型的尺寸相同, 模型中溜井总高 10 m, 直径 0.3 m, 有三个斜溜槽, 倾

角为 30 °、直径 0.2 m、斜溜槽之间间隔为 2.5 m, 由于结构化网格易于控制, 模拟计算量较小, 适用于简单规则的几何体边界^[15], 对于高溜井模型, 其几何模型较规则, 因此本研究采用结构化网格对其进行网格划分, 高溜井模型及网格划分如图 8 所示。

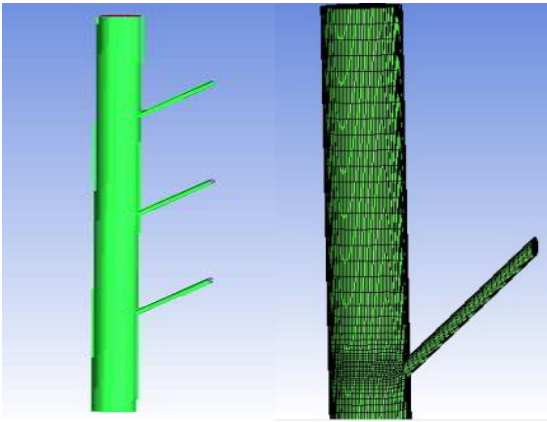


图 8 高溜井模型及网格划分
Fig.8 High ore pass model and grid generation

(2) 数值模拟参数及边界条件的设置

在前期的模型缩小、简化和假设的基础上, 综合当前国内矿山溜井实际情况, 确定了模拟所需的参数和边界条件, 如表 2 所示。通过 FLUENT 的流体仿真软件对高溜井放矿过程的三维流场进行模拟计算, 为了保证原型与仿真模型之间溜井底部堆积物料高度一致, 模拟设放矿质量为 40 kg, 并对不同时刻颗粒运动状态进行追踪, 分析放矿过程中粉尘分布特征。

表 2 数值模拟边界条件及参数的设置
Table 2 Setting of boundary conditions and parameters of numerical simulation

Boundary condition	Parameter	Boundary condition	Parameter
Solver	Pressure based	Coupling	SIMPLEC
Model	$k-\epsilon$	Discrete boundary	Reflect
Entry boundary type	Pressure-inlet	Discrete form	Second order upwind
Exit boundary type	Pressure-outlet	Mass flow rate/(kg/s)	1000~4000
Inlet and outlet pressure	$1.5e^{-0.5}$	Turbulent diffusion model	Stochastic model
Discrete phase model	On	Particle size distribution function	Rosin-Rammler (R-R)
Jet source	Surface	Distribution index	1.22
Material	Iron ore	Particle size range/mm	1~600
Resistance type	Spherical particle	Convergence standard	10^{-4}
Density/(kg/m ³)	4900		

4.2 溜井内粉尘浓度的分布特征模拟结果分析

为了尽可能与实验工况一致, 模拟的矿石颗粒为球形颗粒, 直径在 1~600 mm 之间随机分布, 利用 FLUENT 中的 DPM 模型进行模拟, 截取 1, 2, 3, 5, 7, 10 s 这些代

表性时间点的仿真计算模型的颗粒运动云图, 粒径分布结果如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出, 高溜井从顶部放矿, 大部分粉尘在气流作用下向溜井下部扩散, 且在扩散过程中与壁

面的接触较少,主要表现为颗粒之间的碰撞,矿石在下落1 s时比较集中,随后由于受力不均匀而逐渐散开,颗粒流呈横向分布,增大了与空气的接触,粉尘浓度增大。2 s时,部分矿石到达溜井底部,与底部的石块碰撞反弹后继续与向下运动的颗粒碰撞,部分颗粒在溜井内部下降,3 s后,由于惯性和风流的更新,粉尘发生沉降,粉尘浓度持续下降,这与实验中溜井粉尘浓度呈现

先上升后下降的趋势一致。图9(b)为对FLUENT中DPM模型模拟结果经过后处理得出的各个时刻溜井内粉尘粒径的平均值。可以看出,溜井内的粉尘颗粒粒径主要为1~80 μm ,前3 s内平均粒径不断增大,3 s后平均粉尘粒径逐渐减小,且随时间增加,12 s后平均粒径在3 μm 左右保持稳定不变,表明呼吸性粉尘较难沉降。

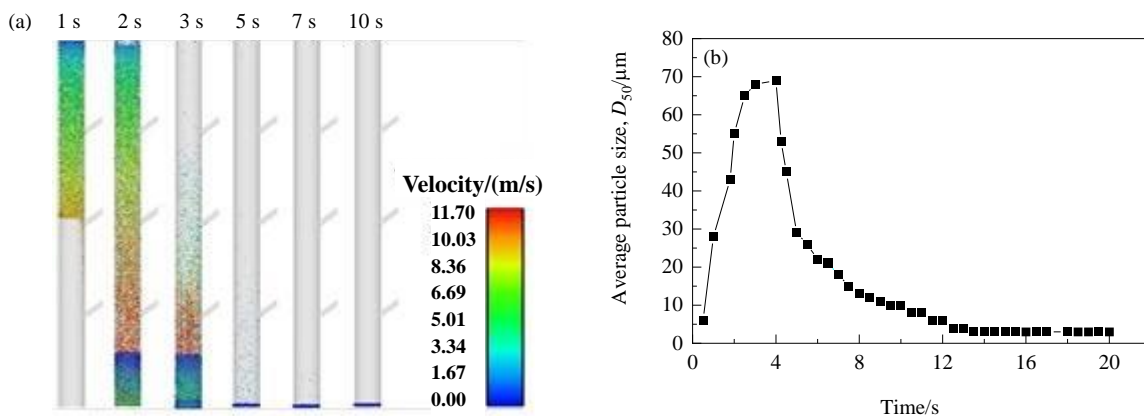


图9 粉尘颗粒及颗粒的平均粒径 D_{50} 在不同时刻的分布

Fig.9 The distributions of dust particles and average particle size D_{50} at different times

4.3 溜井内风速分布特征的模拟结果分析

利用FLUENT软件模拟直径在1~600 mm之间随机分布的球形颗粒放矿后的风速云图及风速矢量图,模拟时截取1, 2, 3, 5, 7, 10 s这些代表性时间点的仿真图,如图10和11所示。

由图10可以看出,从溜井口放矿时,矿石下落带动附近的空气流动,矿石下落的时间越长,引起的气流速度越大,尤其是靠近下部中段的出口,风速逐渐增大。

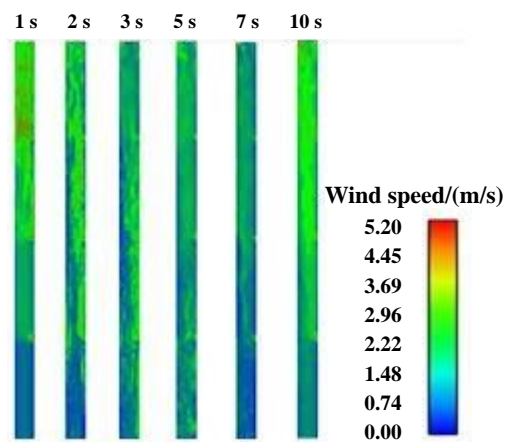


图10 不同时刻风速分布情况

Fig.10 Wind speed distributions at different times

1 s时,高溜井主管内只有上部有风速产生,各段溜槽内风速均比主管中高。10 s时,溜井内气流逐渐消失,但各段溜槽中仍有较大的风速出现。

由图11可以看出,1 s时,矿石从溜井顶部开始下落,带动周围空气向下流动,气流向各中段溜槽流动进行泄压,造成各中段和溜井内风速较大,该时刻3中段的风速值最大,其次是2中段。2和3 s时矿石一部分下落到溜井底部,另一部分继续在溜井内带动空气向下流动,各中段和溜井内的风速均在增加,但上面两中段气流密集于有斜溜槽的一侧,而3中段气流分布比较均匀,2 s后2中段的下部区域有涡旋形成;3 s时,溜井口顶部风速开始增大;5 s时,各个中段的风流速度均在增加,溜井顶部的风速增加的区域面积在增大,底部出现方向向上的反冲气流,与部分向下的气流抵消形成涡旋,溜井部分区域风速值有减小的趋势;7和10 s时矿石全部下落到溜井底部,风流由于惯性继续向下流动,各中段和溜井内的风速与之前相比都在下降;7 s时,2中段开始出现反冲气流现象,3中段出现较大的涡旋;10 s时,从底部上升到2中段的反冲气流在向下风流的作用下被消耗殆尽,仅剩下3中段下部的反冲气流形成的涡旋。

4.4 模型验证

为了验证模型的准确性,提高模拟结果的可信度,

将相同条件下的模拟结果和实验结果进行对比。以 3.1 节放矿质量 8 kg 条件下测得的风速为比较对象, 模拟时, 放矿质量、放矿时间与 3.1 节实验条件一致, 分别为 8 kg 和 1 s, 矿石粒径为 1~600 mm 随机分布, 3 中段产生的冲击气流监测结果如图 12 所示。可以看出, 由

于模拟在理想条件下进行, 选择的矿石颗粒为规则的球形, 导致模拟风速波动幅度比实验测试小, 但变化的趋势与实验结果吻合程度高, 误差在 6% 之内, 证明了该模型的正确性和适用性。

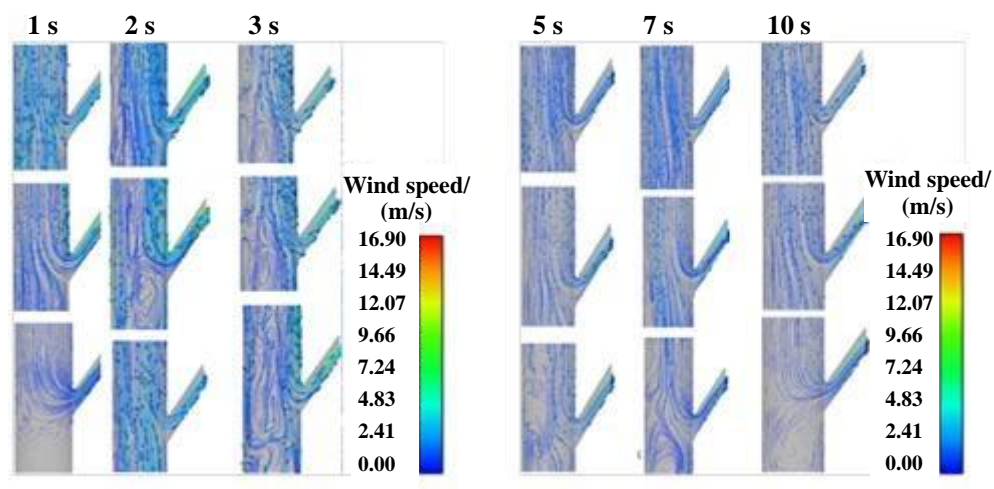


图 11 各中段在不同时刻的速度矢量图

Fig.11 The velocity diagrams of each middle segment at different times

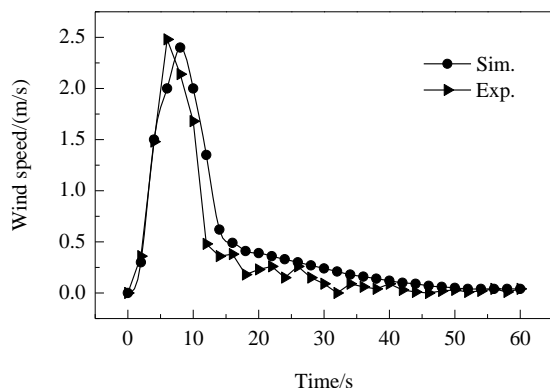


图 12 模拟结果与实验结果对比

Fig.12 Comparison between simulation and experimental results

5 结 论

利用相似实验探究了放矿质量、矿石粒径等多种因素对气流大小和粉尘浓度分布的影响, 并利用 CFD-DPM 耦合方法模拟卸矿过程中的气-固两相流, 探究了气流和粉尘浓度时空分布特征, 得到以下结论:

(1) 通过实验数据分析可知, 最大粉尘浓度和风速均随放矿质量增加而上升, 随颗粒粒径和溜井密闭程度的增大而降低。另外含水率增大, 粉尘浓度降低而风速

变化不明显。

(2) 由相关性曲线分析可知, 影响风速的主要因素是溜井密闭程度, 其次是放矿质量和矿石粒径, 而含水率对风速基本无影响。影响粉尘浓度的关键因素是含水率, 其次是溜井密闭程度、放矿质量和矿石粒径。

(3) 放矿过程模拟中, 颗粒下落过程中挤压空气向下运动, 引起溜井底部负压, 中段溜槽以气流的形式向外部泄压, 导致中段溜槽内部风速增大, 3 中段的风速最大, 其次是 2 中段, 1 中段最小。

(4) 高溜井从顶部放矿时, 与溜井壁面接触较少, 矿石颗粒之间的碰撞效应较大, 2 和 3 s 时, 部分矿石到达溜井底部, 在底部与累积的石块碰撞, 反弹后与向下的矿石继续碰撞, 颗粒流在横向上分布。矿石对气流的作用增大, 使小颗粒与气流接触扩散开来, 此时 3 中段粉尘浓度达到峰值。3 s 后, 由于沉降作用粉尘浓度降低。

参考文献

- [1] 刘伟强, 姚银佩, 王志, 等. 深溜井卸矿高压气流粉尘治理技术研究 [J]. 科技创新与应用, 2016, (7): 144.
Liu W Q, Yao Y P, Wang Z, et al. Study on dust control technology of high pressure air flow during ore unloading in deep pass [J]. Technological Innovation and Application, 2016, (7): 144.
- [2] 于广鹏. 金属矿山井下典型产生作业降尘实用技术应用 [J]. 有

- 色金属(矿山部分), 2016, 68(5): 63–66.
- Yu G P. Practical application of dust removal technology in typical underground dust production in metal mines [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2016, 68(5): 63–66.
- [3] Hodkinson J R. The relation between ventilation airspeed and respirable airborne-dust concentration in coalmines [J]. *Colliery Engineering*, 1960, 38(6): 236–239.
- [4] Wang J, Levy E K. Particle motions and distributions in turbulent boundary layer of air–particle flow past a vertical flat plate [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(8): 845–853.
- [5] Descamps I, Harion J, Baudoin B. Taking-off model of particles with a wide size distribution [J]. *Chemical Engineer and Processing: Process Intensification*, 2005, 44(2): 159–166.
- [6] 邹常富, 周东良, 许圣东, 等. 高深直溜井卸矿口产生规律及防治技术研究 [J]. *金属矿山*, 2018, 47(12): 167–170.
- Zou C F, Zhou D L, Xu S D, et al. Study on the law of dust production and prevention and control technology in ore discharging mouth of high-depth straight shaft [J]. *Metal Mine*, 2018, 47(12): 167–170.
- [7] 李伟, 刘艳章, 邹晓甜, 等. 溜井放矿过程中贮矿段井壁动态应力分布特征研究 [J]. *金属矿山*, 2018, 507(9): 53–58.
- Li W, Liu Y Z, Zou X T, et al. Research on dynamic stress distribution characteristics of shaft wall in storage section during mine discharge [J]. *Metal Mine*, 2018, 507(9): 53–58.
- [8] 汤民波, 姚贵佳, 李义杰, 等. 溜井放矿冲击气流流场数值模拟研究 [J]. *中国矿山工程*, 2017, 46(3): 57–62.
- Tang M B, Yao G J, Li Y J, et al. Numerical simulation study on flow field of leaking mine leakage [J]. *China Mine Engineering*, 2017, 46(3): 57–62.
- [9] 李义杰, 邬长福, 高宗杰, 等. 溜井冲击气流的控制模拟分析 [J]. *矿业研究与开发*, 2016, (12): 96–100.
- Li Y J, Wu C F, Gao Z J, et al. Simulation analysis of control of inclined airflow [J]. *Mining Research and Development*, 2016, (12): 96–100.
- [10] 陈雅, 王明, 蒋仲安, 等. 高溜井卸矿冲击气流产生规律及其影响因素的数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 178–185.
- Chen Y, Wang M, Jiang Z A, et al. Numerical simulation of impact air flow generation and its influencing factors when unloading ore in high ore pass [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 178–185.
- [11] Einarsrud K E, Eick I, Bai W, et al. Towards a coupled multi-scale, multi-physics simulation framework for aluminium electrolysis [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 44: 3–24.
- [12] 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 research on influencing factors of impact gas flow for ore unloading in high pass [J]. *Vibration and Shock*, 2017, 36(23): 276–282.
- [13] 金辉, 付强, 吴晓凤, 等. 重量法测定环境空气中 PM_{2.5} 的不确定度 [J]. *中国环境监测*, 2014, 30(6): 32–35.
- Jin H, Fu Q, Wu X F, et al. Determination of PM_{2.5} uncertainty in ambient air by gravimetric method [J]. *China Environmental Monitoring*, 2014, 30(6): 32–35.
- [14] 杨龙, 袁致涛, 韩跃新. 梅山弱磁性铁矿石工艺矿物学特性研究 [J]. *金属矿山*, 2009, 39(5): 67–72.
- Yang L, Yuan Z T, Han Y X. Study on mineralogical characteristics of weak magnetic iron process in Meishan [J]. *Metal Mine*, 2009, 39(5): 67–72.
- [15] 陈翠柳, 安连想, 张合生. 含灰煤气火管式废热锅炉内流场数值分析 [J]. *化工机械*, 2015, 42(2): 254–258.
- Chen C L, An L X, Zhang H S. Numerical analysis of internal flow field in fire-tube waste heat boiler containing grey gas [J]. *Chemical Machinery*, 2015, 42(2): 254–258.