

# SLK 涡流选粉机重力分级区内颗粒的运动特性

赵冬梅<sup>1</sup>, 童聪<sup>2</sup>

1. 西南科技大学制造科学与工程学院, 绵阳 621010
2. 中材成都重型机械有限公司, 成都 610100

**摘要** 选粉机内颗粒的重力分级对后续离心分级有重要影响。为研究颗粒在选粉机重力分级区内的运动特性,在对颗粒进行受力分析的基础上,分别建立  $y$  向和  $x$  向颗粒运动方程,通过理论分析探索了颗粒在  $y$  向和  $x$  向的运动特性。运用计算流体力学理论,考察重力分级区内气流速度在  $y$  向和  $x$  向的变化规律,研究不同粒径颗粒的运动轨迹。结果表明,重力分级区内气流速度在  $y$  向上递增,颗粒在  $y$  向做速度不断增大的变加速运动;气流速度在  $x$  向上由返料锥近壁端向远壁端递减,颗粒在  $x$  向做速度不断减小的变减速运动。研究结果可为选粉机的设计提供理论参考和数据基础。

**关键词** SLK 涡流选粉机;重力分级区;颗粒运动特性;变加速

**中图分类号** TB44

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.17.006

## Particle Characters in the Gravitational Classification Zone of the SLK Classifier

ZHAO Dongmei<sup>1</sup>, TONG Cong<sup>2</sup>

1. College of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China
2. Sinoma Chengdu Heavy Machinery Co. Ltd., Chengdu 610100, China

**Abstract** The particle gravitational classification process is one of the important factors affecting the centrifugal classification performance of a classifier. To understand the particle motion characters in the gravitational classification zone of the classifier, an SLK5500 classifier is chosen as the object, and particle motion equations are built in the  $y$  direction and  $x$  direction by analyzing the action forces on the particle. And theoretical analysis is made to explore particle characters in the  $y$  and  $x$  directions on the basis of the particle motion equations. According to the computational fluid dynamics theory, the changing rules of gas velocities in the  $y$  and  $x$  directions of the gravitational classification zone are investigated, and particle trajectories of different diameters are studied. The theoretical analysis and simulation result show that in the gravitational classification zone, the gas velocity increases progressively in the  $y$  direction, where particle motion is a variable acceleration motion with an increasing acceleration; the gas velocity decreases from the return cone near wall terminal to the far wall, and the particle motion in the  $x$  direction is a variable acceleration motion with a decreasing acceleration. This research has provided a reference and data for the classifier structure design.

**Keywords** SLK classifier; gravitational classification zone; particle character; variable acceleration

选粉机是粉体制备工艺系统中的重要设备之一,根据其进料方式的不同,可分为上进料式和下进料式<sup>[1]</sup>。物料颗粒在下进料式选粉机中主要完成2次分级:在返料锥与下壳体之间的重力分级区完成一次重力分级<sup>[2]</sup>,经重力分级后的物

料进入到选粉机转子的离心分级区完成离心分级。其中重力分级的实质是对颗粒进行一次预选,也称为初选,重力分级的过程在很大程度上决定了进入离心分级区颗粒粒径的大小,从而对选粉机的循环负荷及分级效率都有重大影响,

收稿日期:2014-02-14;修回日期:2014-03-25

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAA04B04);国家火炬计划项目(09C2621502330)

作者简介:赵冬梅,讲师,研究方向为机械制造及自动化,电子信箱:zdongmei@swust.edu.cn

引用格式:赵冬梅,童聪. SLK 涡流选粉机重力分级区内颗粒的运动特性[J]. 科技导报, 2014, 32(17): 41-45.

最终影响成品的产量与细度。

近年来,选粉机的研究取得了较大进展,主要集中在理论分析<sup>[3,4]</sup>、流场测量<sup>[5,6]</sup>、实验研究<sup>[7]</sup>和结构优化<sup>[8,9]</sup>4个方面。在理论分析中,主要以颗粒的离心分级为对象,对“鱼钩效应”<sup>[10,11]</sup>、“惯性反漩涡”<sup>[12,13]</sup>、颗粒在转子叶片间运动轨迹<sup>[14,15]</sup>等进行了相应研究,为选粉机的分级机理研究和结构优化提供了较有价值的结论。选粉机内颗粒的重力分级对后续离心分级有重要影响,而对颗粒在重力分级区运动特性的研究还未见报道。本研究以下进料式SLK5500型选粉机为对象,采用理论分析与数值模拟相结合的方法,对重力分级区内的流场分布特点和颗粒运动进行研究,旨在探索颗粒在重力分级区内的运动特性,考查颗粒重力分级机理,为选粉机的结构设计和参数优化提供参考。

## 1 重力分级区内颗粒运动特性的理论分析

### 1.1 重力分级区的定义

下进料式选粉机SLK5500结构模型如图1所示,其重力分级区为选粉机下壳体与返料锥之间的环状锥形区域。因返料锥角与下壳体水平倾角不等,形成变截面的环形锥管,由于该区域形状的特殊性,使得其流场和颗粒运动特性变得复杂。

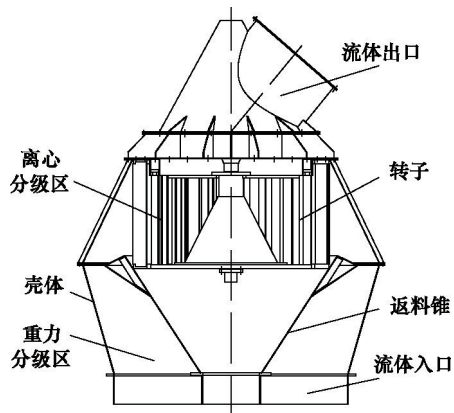


图1 SLK5500选粉机结构

Fig. 1 Structure of SLK5500 classifier

### 1.2 颗粒受力分析

以重力分级区环形截面径向为 $x$ 向、旋转轴为 $y$ 向建立坐标系(图2)。在重力分级区内,影响颗粒运动的力主要有浮力 $F_b$ 、气体曳力 $F_d$ 及自身重力 $F_g$ 。其标量计算公式分别为

$$F_g = mg = \rho_s Vg = \frac{\pi}{6} \rho_s d^3 g \quad (1)$$

$$F_b = \rho_g Vg = \frac{1}{6} \rho_g \pi d^3 g \quad (2)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_g (v_g - v_s)^2 C_D A = \frac{1}{2} \rho_g (v_g - v_s)^2 C_D \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

式中, $m$ 为颗粒质量,kg; $\rho_s$ 为颗粒密度,kg/m<sup>3</sup>; $V$ 为颗粒体积,m<sup>3</sup>; $d$ 为颗粒粒径,m; $g$ 为重力加速度,9.8 m/s<sup>2</sup>; $\rho_g$ 为空气密

度,kg/m<sup>3</sup>; $v_g$ 为气流速度,m/s; $v_s$ 为颗粒速度,m/s; $A$ 为等效体积颗粒的迎风面积,m<sup>2</sup>; $C_D$ 为曳力系数,与颗粒雷诺数有关。

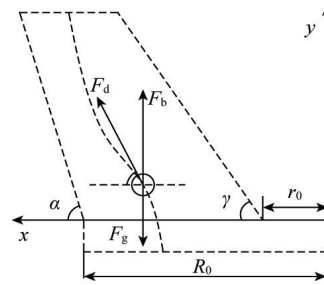


图2 重力分级区的坐标系与颗粒受力

Fig. 2 Coordinate system and particle forces analysis of gravitational classification zone

由图2可知,浮力 $F_b$ 和重力 $F_g$ 分别沿 $y$ 轴正反方向,气体曳力 $F_d$ 是沿气流迹线的切向,与 $x$ 向的夹角为 $\gamma$ 。将 $F_d$ 分解到 $y$ 向和 $x$ 向,可得出颗粒 $y$ 向所受合力为

$$F_d \sin \gamma + F_b - F_g = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_g (v_g - v_s)^2}{2} \sin \gamma + \frac{\pi d^3}{6} (\rho_g - \rho_s) g \quad (4)$$

颗粒在 $x$ 向所受合力为

$$F_d \cos \gamma = \frac{1}{2} \rho_g (v_g - v_s)^2 C_D A = \frac{1}{2} \rho_g (v_g - v_s)^2 C_D \frac{\pi d^2}{4} \cos \gamma \quad (5)$$

### 1.3 颗粒运动特性分析

根据对颗粒的受力分析,可分别建立颗粒在 $y$ 向和 $x$ 向运动方程。

1) 颗粒在 $y$ 向上的运动方程:

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_g \frac{dv_s}{dt} = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_g (v_g - v_s)^2}{2} \sin \gamma \pm \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho_g) g \quad (6)$$

式中,当颗粒沿 $y$ 向正向运动时符号取负,当颗粒沿沿 $y$ 向负向运动时符号取正。其中,

$$v_g = \frac{W}{S} = \frac{W}{\pi(R^2 - r^2)} = \frac{W}{\pi \left[ \left( R_0 + \frac{y}{\tan \alpha} \right)^2 - \left( r_0 + \frac{y}{\tan \beta} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

式中, $W$ 为入口风量,m<sup>3</sup>/h; $S$ 为 $y$ 向环形截面的面积,m<sup>2</sup>; $R$ 为 $y$ 向高度上的下壳体半径,m; $r$ 为 $y$ 向高度上的返料锥半径,m; $\alpha$ 为下壳体水平倾角, $\beta$ 为返料锥角。由式(6)、(7)可知,由于气流速度在 $y$ 向上随坐标发生变化,随 $y$ 向向上, $S$ 减小, $v_g$ 增大,颗粒所受的气体曳力也随之增大,故颗粒在 $y$ 向上的合力随 $y$ 向正向不断增大,因此颗粒在 $y$ 向做速度不断增大的变加速运动。

2) 颗粒在 $x$ 向上的运动方程:

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_g \frac{dv_s}{dt} = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_g (v_g - v_s)^2}{2} \cos \gamma \quad (8)$$

由式(8)可知,若不考虑流体区域壁对气流的影响,气流速度在 $x$ 向上不随坐标发生变化,故颗粒在 $x$ 向的合力也不随坐标改变,颗粒在 $x$ 向做匀减速运动。但实际上,由于气流的不可压缩性,且返料锥角较大, $y$ 向上的截面突变造成壁

区域气流的挤压,产生压力能并转化为 $x$ 向的动能,故气流速度在近壁端大,远壁端小,故颗粒在 $x$ 向的合力由返料锥近壁端向远壁端递减,因此颗粒在 $x$ 向做速度不断减小的变减速运动。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型构建与网格划分

根据SLK5500型选粉机实际尺寸参数构建了重力分级区计算模型,采用四面体网格结构对模型进行网格划分,为保证计算精度,对网格进行加密,网格大小为20 mm,总共划分23.5万网格,最大畸形值为0.71,表明网格质量较好。

### 2.2 边界条件

定义计算区域的入口和出口分别为速度入口(velocity inlet)和自由出口(outflow),入口流速根据风量换算。气相计算的湍流模型选用正化群理论的RNG  $k-\epsilon$ 湍流模型,离散方程选用Simple算法求解压力-速度耦合,压力插补选用Presto!格式,对流项采用二阶迎风格式计算,计算收敛精度为 $10^{-5}$ 。运用Eular-Lagrange方法进行颗粒轨迹计算,方法中视气相为连续相,颗粒为离散相。用硅酸盐水泥生料作为离散相材料,取其密度为 $3.15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,颗粒形状系数取0.8。

### 2.3 模拟结果

#### 2.3.1 速度分布

1)  $y$ 向速度分布。图3(a)、图4(a)分别为重力分级区内 $x$ 截面速度云图和 $y$ 向速度分布。可以看出,由于截面在 $y$ 向的面积变化造成气流速度在该方向呈现了一定的速度梯度变化,气流在 $y$ 向向上运动过程中速度不断增大,由式(3)可知,气流速度在 $y$ 向的递增使颗粒所受的气体曳力不断增大,造成颗粒在 $y$ 向正向的合力不断增大,因此颗粒在 $y$ 向上的运

动为变加速运动,沿 $y$ 向正向速度不断增大。

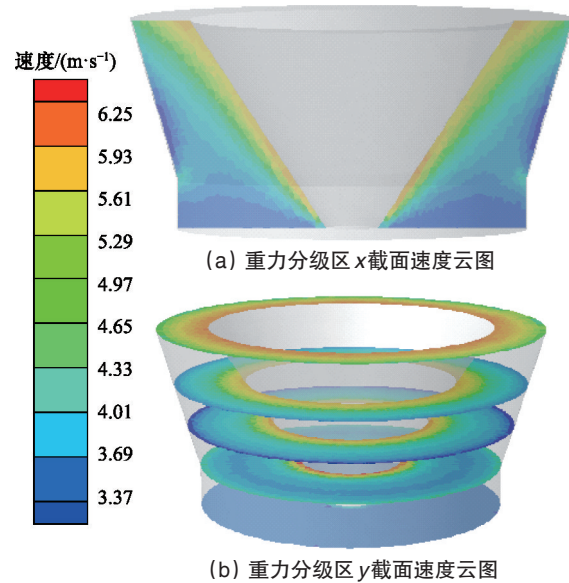
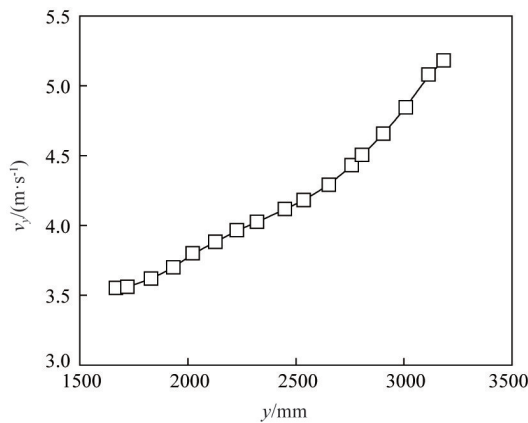


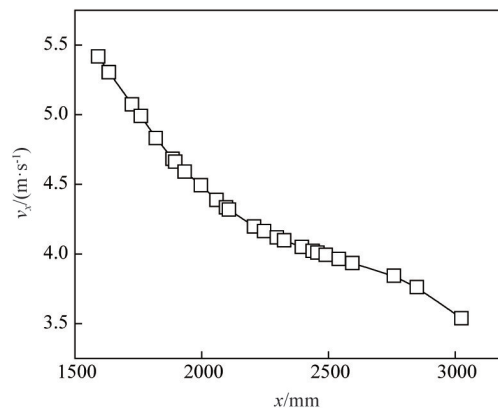
图3 重力分级区  $x$ 截面和  $y$ 截面速度云图

Fig. 3 Velocity nephogram of  $x$  section and  $y$  section in gravitational classification zone

2)  $x$ 向速度分布。在重力分级区内分别取 $y=0, 800, 1600, 2400, 3450 \text{ mm}$ 截面,图3(b)、图4(b)分别为各截面速度云图和 $x$ 向速度分布。由图3(b)可知,各截面上气流的速度分布呈同心圆状,在返料锥近壁端,气流速度较大,而返料锥远壁端气流速度较小。由图4(b)可知,各截面在 $x$ 向存在速度梯度变化,造成颗粒在 $x$ 向正向的合力由返料锥近壁端向远壁端递减,颗粒在 $x$ 向的运动为变减速运动,沿 $x$ 向正向速度不断减小。



(a) 重力分级区内  $y$ 向速度分布



(b) 重力分级区内  $x$ 向速度分布

图4 重力分级区内  $y$ 向与  $x$ 向速度分布

Fig. 4 Velocity distributions in  $y$  and  $x$  directions in gravitational classification zone

#### 2.3.2 颗粒运动特性

对不同粒径大小的颗粒在重力分级区内运动轨迹进行了模拟计算,选取了特征粒径 $d=10, 30, 80, 200 \mu\text{m}$ 的颗粒进

行分析,分别考查了几组特征粒径的颗粒在运动过程中,其 $y$ 向速度及 $x$ 向速度变化情况。

1) 颗粒在 $y$ 向上的运动特性。图5所示为4组颗粒在重

力分级过程中的运动轨迹与 $y$ 向速度变化情况。由图5可知,粒径较小颗粒( $d=10, 30 \mu\text{m}$ )对气流的跟随性较好,颗粒轨迹较为流畅,在整个重力分级阶段 $y$ 向速度不断增大;而粒径较大的颗粒( $d=80, 200 \mu\text{m}$ )颗粒轨迹对气流的跟随性差,颗粒轨迹也较为紊乱;粒径 $d=80 \mu\text{m}$ 的颗粒呈现了先减速后加速的运动特性,粒径 $d=200 \mu\text{m}$ 的颗粒在 $y$ 向上先加速后减速,最终不能随气流继续上升,停留在重力分级区底部。这是由于粒径较小的颗粒在重力分级过程中,受到 $y$ 向的气体曳力和浮力之和始终大于其重力,使其一直保持变加速相上

运动,速度与加速度都在不断增大;粒径稍大的颗粒在重力分级的初始阶段受到 $y$ 向的气体曳力与浮力之和小于其重力,使其在此过程中做减速运动,但颗粒在 $y$ 向上运动过程中,由于气流速度梯度引起的气体曳力增大,使颗粒受到 $y$ 向正向的合力逐渐增大,在颗粒的运动速度减小为零之前,气体曳力与浮力之和变为大于其重力,颗粒开始做加速运动;粒径较大的颗粒也会呈现初始阶段的减速运动,但在颗粒的运动速度减小为零之前,气体曳力与浮力之和仍小于其重力,颗粒便不能继续向上运动。

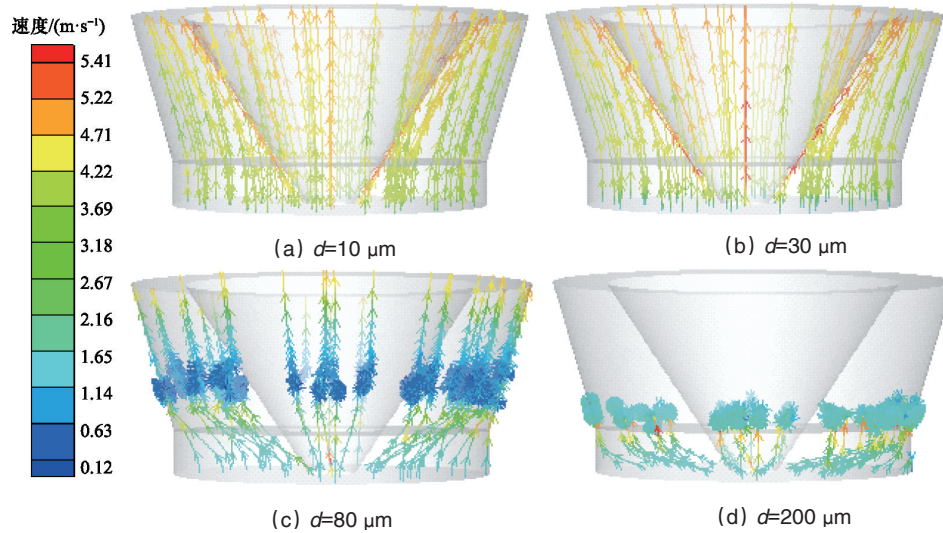


图5 颗粒运动轨迹与 $y$ 向速度

Fig. 5 Particle trajectories and velocities of  $y$  direction

2) 颗粒在 $x$ 向上的运动特性。图6所示为4组颗粒在重力分级过程中的运动轨迹与 $x$ 向速度变化情况。因为对称轴为 $y$ 轴,故颗粒在 $x$ 向速度在坐标轴原点左右两端是反向的。从图6可以看出,颗粒粒径较小( $d=10, 30 \mu\text{m}$ )时,沿返料锥近壁端运动的颗粒其 $x$ 向速度较大,而远壁端的 $x$ 向速度较小。颗粒粒径较大( $d=80, 200 \mu\text{m}$ )时,沿返料锥近壁端与沿

远壁端运动的颗粒之间, $x$ 向速度的变化不明显。这是由于颗粒在 $x$ 向上只受到气体曳力的分力作用,且分力较小,粒径较小的颗粒因质量较小,其受到 $x$ 向的速度梯度变化产生的气体曳力变化影响较大。而较大的颗粒因质量较大,其受到的 $x$ 向的速度梯度变化引起的气体曳力变化影响较小。

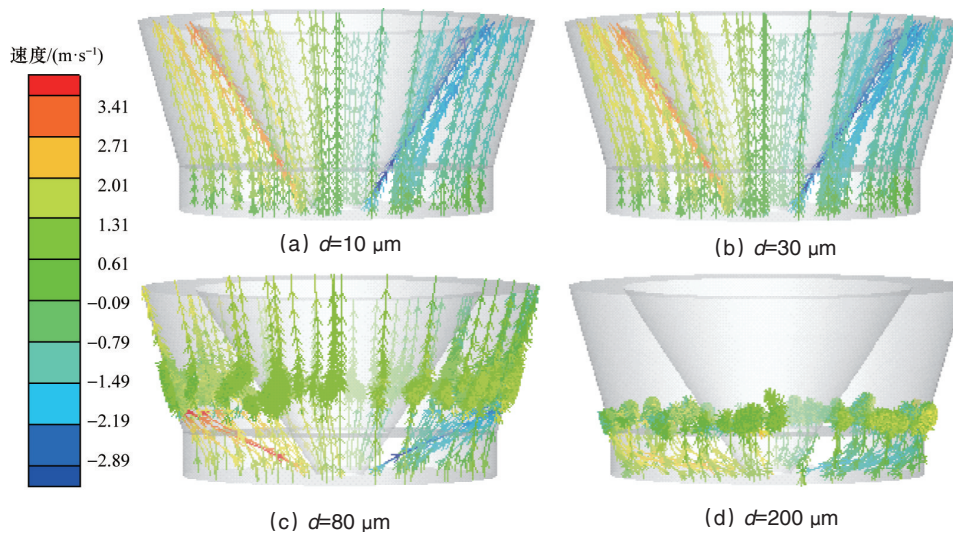


图6 颗粒运动轨迹与 $x$ 向速度

Fig. 6 Particle trajectories and velocities of  $x$  direction

### 3 结论

文献[10]~[13]等对涡流选粉机流场的研究、文献[14]和[15]等对选粉机内颗粒运动轨迹的分析,都是以选粉机的离心分级区为对象展开的,这些研究为选粉机的离心分级机理研究和分级室的结构优化提供了技术支持。

本研究在分析SLK涡流选粉机的结构基础上,针对重力分级区进行研究,从理论上阐述了重力分级区的分级机理,推导重力分级区颗粒的运动方程,采用数值模拟的手段,考察重力分级区内气流速度的分布规律,研究颗粒的运动特性,为选粉机的重力分级理论提供数据基础,也为选粉机重力分级区的结构设计和参数优化提供参考,得到如下结论。

1) 重力分级区内气流速度在 $y$ 向上随坐标增大而单调递增,颗粒所受的气体曳力也随之增大,故颗粒受到的合力随 $y$ 向坐标递增,因此颗粒在 $y$ 向做速度不断增大的变加速运动。

2) 重力分级区内气流速度在 $x$ 向上由于返料锥边壁对气流的影响,由返料锥近壁端向远壁端递减,颗粒在 $x$ 向的合力也随之递减,因此颗粒在 $x$ 向做速度不断减小的变减速运动。

3) 粒径较小的颗粒在重力分级区内 $y$ 向上保持加速向上运动,粒径稍大的颗粒在 $y$ 向上先减速后加速并向上运动,而粒径较大的颗粒做减速运动,最终停止向上运动。

4) 粒径较小的颗粒在重力分级区内 $x$ 向上受气流速度梯度变化产生的气体曳力变化影响较大,故其沿返料锥近壁端的速度较远壁端大,而粒径较大的颗粒受气体曳力变化的影响较小,在 $x$ 向上速度变化不明显。

#### 参考文献 (References)

- [1] 刁雄,李双跃,黄鹏. 进料方式对超细分级机分级性能的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(12): 3818-3825.  
Diao Xiong, Li Shuangyue, Huang Peng. Effect of feeding type on classification performance of superfine classifier[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2012, 63(12): 3818-3825.
- [2] 张廷龙,杨福新,韩春阳,等. 立磨笼式选粉机切割粒径的计算[J]. 矿山机械, 2011, 39(7): 12-14.  
Zhang Tinglong, Yang Fuxin, Han Chunyang, et al. Computation of separation grain size of rotating cage separator for vertical roller mills[J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(7): 12-14.
- [3] 伍勇,施光明,方善如. 离心涡轮式气流分级机分级区域研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2001, 33(3): 38-40.  
Wu Yong, Shi Guangming, Fang Shanru. Investigation for effective separation area of a turbo air classifier[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2001, 33(3): 38-40.
- [4] 刘家祥,何廷树,夏靖波. 涡流分级机流场特性分析及分级过程[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(5): 485-489.  
Liu Jiexiang, He Tingshu, Xia Jingbo. Air flow field characteristics analyzing and classification process of the turbo classifier[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(5): 485-489.
- [5] Toneva P, Epple P, Breuer M, et al. Grinding in an air classifier mill— Part I: Characterisation of the one-phase flow[J]. Powder Technology, 2011, 211(1): 19-27.
- [6] Toneva P, Wirth K, Peukert W. Grinding in an air classifier mill— Part II: Characterisation of the two-phase flow[J]. Powder Technology, 2011, 211(1): 28-37.
- [7] 刘圣照,刘家祥,冯永国,等. 涡流空气分级机转笼结构对其分级性能的影响[J]. 化工学报, 2007, 58(7): 1751-1756.  
Liu Shengzhao, Liu Jiexiang, Feng Yongguo, et al. Effect of rotor structure on classification characteristics of turbo air classifier[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(7): 1751-1756.
- [8] 黄强,于源,刘家祥. 涡流分级机转笼结构改进及内部流场数值模拟[J]. 化工学报, 2011, 62(5): 1264-1268.  
Huang Qiang, Yu Yuan, Liu Jiexiang. Improvement on rotor cage structure of turbo air classifier and numerical simulation of inner flow field [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(5): 1264-1268.
- [9] Finch J A. Modeling a fish-hook in hydro cyclone selectivity curves[J]. Powder Technology, 1983, 36(1): 127-129.
- [10] Nageswararao K A. critical analysis of the fish hook effect in hydro cyclone classifiers[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 80(1/2/3): 251-256.
- [11] 刘家祥,徐德龙,赵江平,等. 涡流分级机内惯性反旋涡对颗粒分选的影响[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(1): 63-66.  
Liu Jiexiang, Xu Delong, Zhao Jiangping, et al. The effects of inertia counter-rotating vortices in vortex classifier on particle classification[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1998, 30(1): 63-66.
- [12] 刘家祥,何廷树,夏靖波,等. 涡流空气分级机内湍流涡频谱对其性能的影响[J]. 北京化工大学学报, 2003, 30(5): 48-51.  
Liu Jiexiang, He Tingshu, Xia Jingbo, et al. The effect of frequency spectrum of the eddies of turbulent flow in a turbo classifier on its classification characteristics[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2003, 30(5): 48-51.
- [13] 杜妍辰,王树林. 颗粒在涡轮式分级机分级轮中的运动轨迹[J]. 化工学报, 2005, 56(5): 823-828.  
Du Yanchen, Wang Shulin. Particle trajectory in vortex classifier rotor [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(5): 823-828.
- [14] Xu N, Li G H, Huang Z C. Numerical simulation of particle motion in turbo classifier[J]. China Particuology, 2005, 3(5): 275-278.
- [15] 黄卫星,诸海碧,黎梅,等. 气固循环床上行两相流颗粒曳力系数研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 53-57.  
Huang Weixing, Zhu Haibi, Li Mei, et al. Drag coefficient in gas-solid two phase flow of CFB riser[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 53-57.

(编辑 陈华斌)