



# 文丘里粉体喷射器内部颗粒运动特性的联合仿真

许 晶<sup>1</sup>, 刘雪东<sup>1</sup>, 仇 康<sup>2</sup>

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 南京新城实业有限公司, 江苏 南京 210047)

**摘要** 采用计算流体力学-离散单元法(CFD-DEM)耦合方法, 对文丘里粉体喷射器内部 5 种不同粒径球形颗粒组成的颗粒群的气力输送过程进行数值模拟; 分析颗粒的运动轨迹, 发现部分颗粒在吸收室的底部聚集, 颗粒在文丘里喷射器内部的运动集中分布在输送管道的中下部位, 小尺寸颗粒速度较快, 颗粒尺寸越大, 颗粒与颗粒碰撞次数越多, 颗粒与壁面碰撞次数越少; 采用离散单元法-有限单元分析(DEM-FEA)耦合方法对颗粒与壁面碰撞引起的壁面应力变化进行分析。结果表明, 喷射器在喷嘴出口处附近和吸收室底部出现应力峰值。

**关键词** 文丘里喷射器; 计算流体力学-离散单元法耦合; 颗粒运动; 离散单元法-有限单元分析耦合; 应力分析

中图分类号: TK121

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2016)04-0039-05

## Numerical simulation of particle motion characteristics in venturi powder In jector using joint approach

XU Jing<sup>1</sup>, LIU Xuedong<sup>1</sup>, QIU Kang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Nanjing Xincheng Industrial Company Limited, Nanjing 210047, China)

**Abstract:** The pneumatic conveying process of Venturi powder injector was simulated by using the method of computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM) coupling, internal particle group was composed of five different diameters particles. The trajectories of particles were analyzed, part of particles gather together at the bottom of the absorption section. Most of the particles distribute in the middle and lower parts of pipelines in venturi powder ejector, small size particles are faster. The greater the particle size is, the more particle-particle collisions are and the less particle-wall collisions are. Analysis of the wall stress change due to the impact of particles was carried

out by using the method of discrete element method-finite element analysis (DEM-FEA) coupling. It results that there is peak stress near the nozzle exit and the bottom of the absorbed section.

**Keywords:** Venturi ejector; computational fluid dynamics-discrete element method coupling; particle motion; discrete element method-finite element analysis coupling; stress analysis

干燥粉体物料的气力输送技术被广泛应用于石油、化工、冶金、制药、食品、矿物加工等领域<sup>[1-2]</sup>, 气力输送具有适应物料范围广、布置灵活、对环境无污染、操作费用低、维修简单等突出优势<sup>[3-6]</sup>。文丘里粉体喷射器是气力输送装置的核心构件, 研究颗粒的运动行为及颗粒与壁面之间的作用规律对于优化输送过程具有重要意义<sup>[7]</sup>。

Ji 等<sup>[8]</sup>讨论了文丘里管喉部直径对气流速度的影响, 通过提高气流速度可以提升抽吸能力, Liu 等<sup>[9]</sup>开展了一系列气体单相和气-煤混合流的文丘里实验, 收集并比较了压力分布、表观气速等数据, 结果显示, 在文氏管内部压力急剧减小, 其中扩散部分的衰减程度最小。国内外学者的实验或数值仿真研究的重点多集中在对文丘里管内部流场特性的分析, 对气-固两相流中颗粒运动规律的探讨较少, 对颗粒撞击壁面引起的文丘里喷射器壁面的应力变化规律的研究更少。

鉴于此, 采用计算流体力学-离散单元法(CFD-DEM)耦合的方法, 对文丘里粉体喷射器内部颗粒的气力输送过程进行模拟, 探讨颗粒的运动特性。与单一的 CFD 数值模拟相比, CFD-DEM 耦合法综合考虑流场对颗粒运动特性以及颗粒对流体流动特性的影响。采用离散单元法-有限单元分析(DEM-FEA)耦合的方法, 得到颗粒碰撞壁面导致壁面的应力变化情况, 研究对文丘里喷射器内部颗粒运动特性及优化喷射器结构设计具有一定指导意义。

## 1 计算模型及设置

### 1.1 模型建立

文丘里喷射器结构如图 1 所示。其中喷嘴直径  $d_{th}=14\text{ mm}$ , 文丘里管喉部直径  $D_{th}=28\text{ mm}$ , 喉部长度  $L_{th}=108\text{ mm}$ , 收缩半角  $\theta_{con}=11.3^\circ$ , 扩散半角  $\theta_{di}=5.5^\circ$ 。

收稿日期: 2015-09-25, 修回日期: 2015-11-02。

第一作者简介: 许晶(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为化工过程机械、粉体工程技术及设备。E-mail: xj.91@foxmail.com。

通信作者简介: 刘雪东(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为石油化工设备及机械结构完整性、粉体工程设备与技术。E-mail: lxd99@126.com。

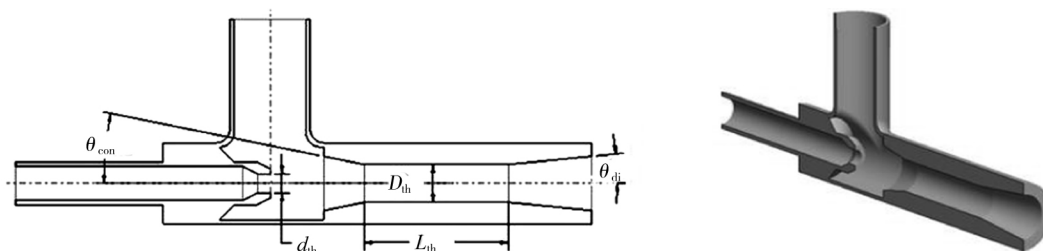


图 1 文丘里粉体喷射器结构图

Fig. 1 Schematic of venturi powder ejector

数值模拟的计算模型如图 2 所示。模型主要由喷嘴部分、吸入部分和文丘里管等 3 部分组成。其中,压缩空气入口直径  $D_{air}=25$  mm,颗粒入口直径  $D_{per}=54$  mm,出口直径  $D_{out}=40$  mm,文丘里管总长  $L=200$  mm,喷嘴伸入位置为颗粒入口管道中心处。

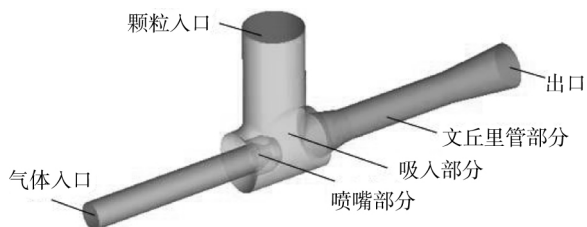


图 2 文丘里粉体喷射器仿真计算模型

Fig. 2 Simulated computational model of Venturi powder ejector

## 1.2 计算条件设置

1)CFD 设置。为得到更好的射流扩张效果,选用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型进行非稳态计算。气体入口边界条件设为速度入口  $v_1=50$  m/s;颗粒入口边界条件设为速度入口  $v_2=0$ ;出口边界条件设为自由出口;其余面均设为无滑移的固壁面。流体介质为空气,固体颗粒为粉煤,并对数学模型作出基本假设:流场为稳定、无温差存在的流场,气相和固相均视为不可压缩的介质<sup>[10]</sup>。

2)DEM 设置。采用模拟软件 EDEM 2.6.1,EDEM 相关参数的设置如表 1 所示。输送对象是直径分别为 0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 mm 的 5 种均匀球形颗粒各 1 000 个组成的颗粒群,输送颗粒群的粒径分布情况如图 3 所示。

表 1 EDEM 参数设置

Tab. 1 Parameters setting of EDEM

| 颗粒参数      |                                         |                    | 接触参数  |      |          |             |           |
|-----------|-----------------------------------------|--------------------|-------|------|----------|-------------|-----------|
| 泊松比 $\mu$ | 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 剪切模量 $G/\text{Pa}$ | 接触类型  | 接触模型 | 恢复系数 $E$ | 静摩擦系数 $f_s$ | 动摩擦系数 $f$ |
| 0.35      | 1 400                                   | $1.3\times 10^9$   | 颗粒与颗粒 | 无滑移  | 0.5      | 0.6         | 0.05      |
|           |                                         |                    | 颗粒与壁面 | 无滑移  | 0.5      | 0.4         | 0.05      |

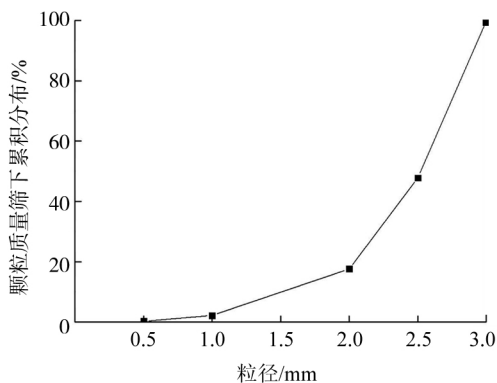


图 3 输送颗粒群的粒径分布图

Fig. 3 Particle size distribution of delivery particle group

3)CFD-DEM 耦合模块设置。固相颗粒的体积分数为 0.11%,因此采用 Lagrangian 耦合模型,该模型将气相与颗粒相之间的动量交换考虑在内,适用于固相颗粒体积占总体积小于 10%的情况<sup>[11-13]</sup>。耦合区域为流体流域,阻力模型采用改进自由流阻力模型。

4)FEA 设置。由于文丘里喷射器模型呈对称结构,因此为缩短计算时间,取其 1/2 进行分析,并在对称面上施加对称约束。

5)DEM-FEA 耦合模块设置。耦合原理是将 EDEM 中颗粒碰撞壁面引起喷射器壁面产生的应力变化数据导入 ANSYS Workbench 应力分析模块,并以载荷形式加载到相应作用面。

2 结果与讨论

2.1 颗粒运动轨迹

喷嘴处喷出高速射流与空气之间产生卷吸作用和紊动扩散作用,引起文丘里效应<sup>[14]</sup>,把吸收室内的空气带走,使该处形成低压区。图 4 所示为绝对压力分布云图,颗粒从吸收室顶部入口被吸进喷射器。图 5a 为颗粒群在 0.1、0.16、0.2、0.3 s 4 个不同时刻的运动情况;图 5b 为直径 0.5 mm 的颗粒在 4 个时刻的运动轨迹。

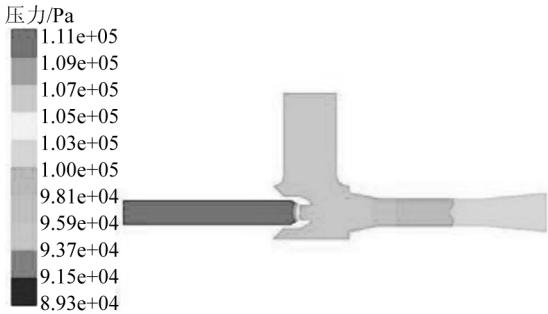


图 4 绝对压力分布云图

Fig. 4 Absolute pressure distribution contour

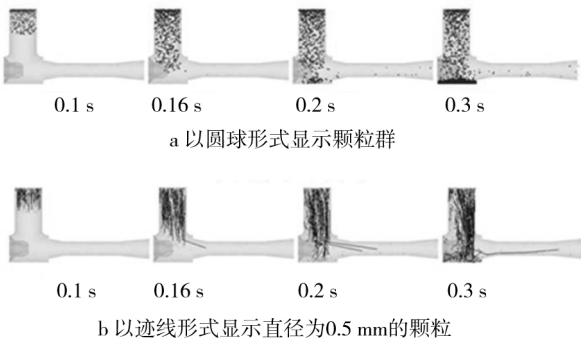


图 5 颗粒的运动情况

Fig. 5 Movement condition of particles

由图 5 可知,颗粒在自身重力作用和文丘里效应

抽吸作用下,在吸收室中缓慢地加速下降;在 0.16 s 左右,颗粒到达喷嘴附近,被高速射流加速并携带进入文丘里管;在 0.3 s 左右,喷射器内部形成稳定的颗粒输送流,颗粒从吸收室进入喷射器,一部分沿文丘里管水平输送,从出口离开喷射器;另一部分滞留在吸收室底部,整个过程伴随着颗粒的碰撞、反弹、折射等剧烈运动。

图 6 为喷射器内部流体的速度矢量图。由图可知,喷射器内部主要形成 2 处对颗粒运动影响较大的漩涡,图 6 中 I 为由于文丘里现象产生的卷吸漩涡,II 位于吸收室与文丘里管接口处,是由于截面收缩流体碰击壁面造成的阻力漩涡。受到图 6 中 I 处卷吸漩涡的影响,颗粒在远离文丘里管入口的地方分布较密集,在靠近文丘里管入口处的地方分布较稀疏。在图 6 中 II 处阻力漩涡的作用下,颗粒群将沿着中心部位进入文丘里管,而位于文丘里管进口处左侧下方的颗粒则受到阻力漩涡的阻碍,在此形成累积。为减少颗粒在喷射器底部的聚集,应将该处内部结构设计成一个流线型斜面,以确保物料能够及时被传送<sup>[15]</sup>。

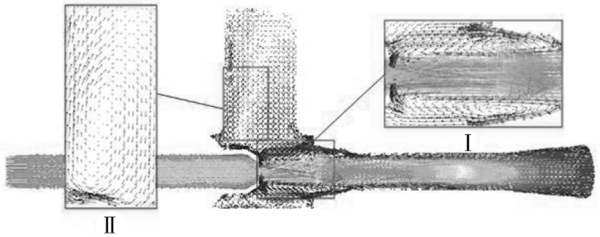


图 6 喷射器内部流体速度矢量图

Fig. 6 In jetor internal fluid velocity vector diagram

2.2 文丘里管部分颗粒位置及速度分布

文丘里管是文丘里粉体喷射器的关键部分,对其内部颗粒运动学特性的分析具有重要意义。图 7 为 0.8、0.9、1.0 s 3 个时刻截取文丘里管的喉部颗粒群的位置及速度分布。

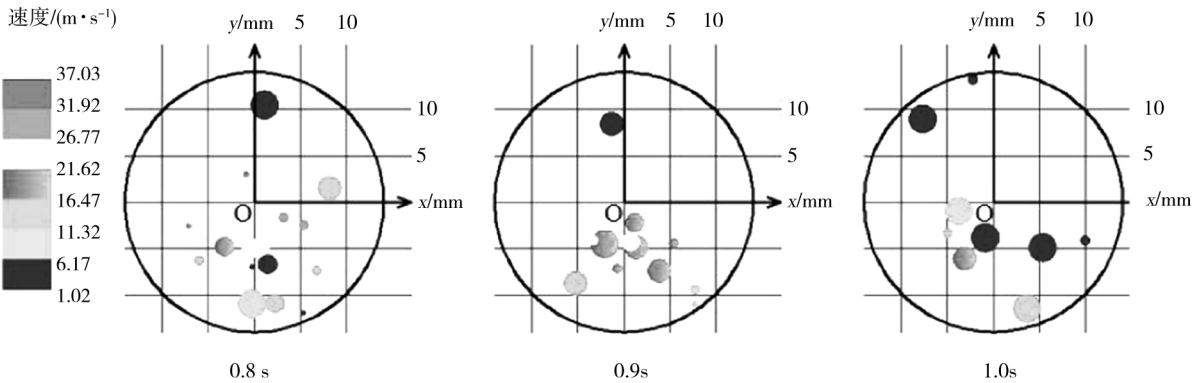


图 7 文丘里喉部颗粒位置和速度分布

Fig. 7 Position and velocity distribution of particle in throat of Venturi

图 7 中喉部截面是直径为 28 mm 的圆。以圆心为坐标原点, 水平半径所在直线为  $x$  轴, 右侧为正方向, 竖直半径所在直线为  $y$  轴, 上方为正方向, 建立直角坐标系。

位置分布。图 8 为喷射器内部速度分布云图。如图 8 中 I 所示, 喉部中心区域为高速区, 颗粒跟随高速气体传输, 同时少量颗粒由于扩散运动会脱离中心区域, 但极少有颗粒贴近壁面。受重力沉降作用, 大约 85% 的颗粒分布在三、四象限, 即喉管的中下部位, 一、二象限分布较少。

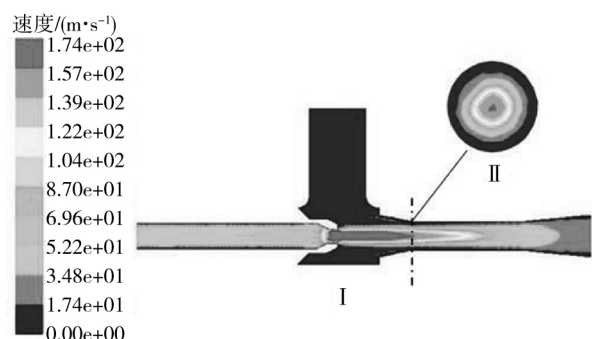


图 8 速度分布云图

Fig. 8 Velocity distribution contour

速度分布。由图 7 可知, 位于一、二象限的颗粒速度普遍低于三、四象限的颗粒速度, 原因是向上运动的颗粒要克服自身重力约束而损失了部分能量。图 8 中 II 为喉部入口处截面速度分布云图, 由图可知, 入口处流体速度从中心向边缘递减, 文丘里管其他位置流体速度皆满足此分布规律, 故越靠近中心的颗粒速度越大, 远离中心的颗粒速度较小。在相同位置, 颗粒尺寸越小, 受气体阻力越小, 越容易被加速, 速度大于大尺寸颗粒。

### 2.3 碰撞分析

文丘里喷射器内部颗粒的碰撞形式主要分为颗粒与颗粒碰撞和颗粒与壁面碰撞 2 种。图 9 为不同尺寸颗粒与颗粒碰撞次数统计。

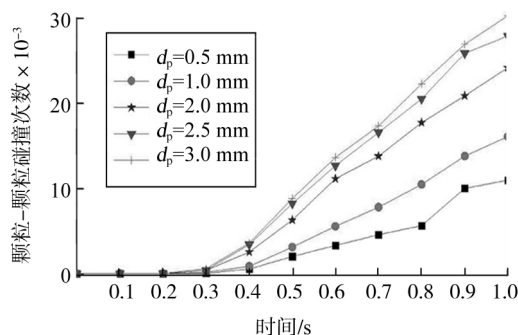


图 9 颗粒与颗粒碰撞次数统计

Fig. 9 Number of particle and particle collisions

由图 9 可知, 1 s 时刻, 粒径为 0.5 mm 颗粒与全体颗粒碰撞次数累计为 9 892 次, 随着颗粒尺寸的增大, 颗粒与颗粒的碰撞次数大幅增加, 直径为 3 mm 颗粒与全体颗粒碰撞次数累计达到 29 827 次, 原因是颗粒尺寸越大, 所占空间越大, 发生碰撞运动的概率也就越大。

图 10 为不同尺寸颗粒与壁面碰撞次数统计。由图可知, 1 s 时刻, 直径为 0.5 mm 颗粒与壁面碰撞次数累计达 5 153 次, 随着颗粒尺寸的增大, 颗粒与壁面的碰撞次数相应减少, 直径为 3 mm 颗粒与壁面碰撞次数仅为 1 103 次。这主要是由两方面的原因造成: 一方面, 小尺寸颗粒对气体的跟随性较好, 气体湍流加剧了小尺寸颗粒的运动紊乱, 且小尺寸颗粒从颗粒与颗粒之间空隙逃逸的机会更多, 这都导致小尺寸颗粒与壁面的碰撞机会远远大于大尺寸颗粒; 另一方面, 大尺寸颗粒在与小尺寸颗粒碰撞后不易被弹开, 将保持碰撞前的运动轨迹下落触底, 故在底部滞留较多, 这大大减少了大尺寸颗粒与壁面发生碰撞的次数。颗粒与壁面发生碰撞, 就会对喷射器壁面产生应力作用, 对喷射器的稳定性造成影响。

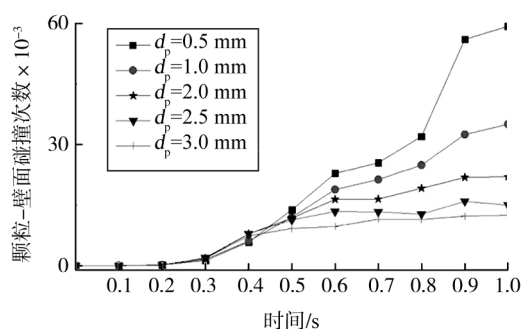


图 10 颗粒与壁面碰撞次数

Fig. 10 Number of particle and wall collisions

### 2.4 颗粒撞击壁面的应力分析

图 11 为从颗粒对壁面碰撞的角度来分析文丘里喷射器的应力情况。由图可知, 最大应力出现在喷射器喷嘴、吸收室、文丘里管交接的 I 处, 最大应力值为 1 107.2 Pa。这是由此处的流场最为紊乱, 颗粒无规律运动最为剧烈, 颗粒与壁面碰撞最为频繁造成的。此外, 吸收室底部(图中 II 处)由于颗粒的碰撞与累积出现应力相对集中现象, 但由于颗粒在底部累积, 减少了颗粒碰撞底部的次数和剧烈程度, 故底部所受应力最大值仅为 984.22 Pa。应力分析结果表明, 颗粒碰撞次数越多、碰撞越剧烈的部位, 受到颗粒碰撞引起的应力越大。

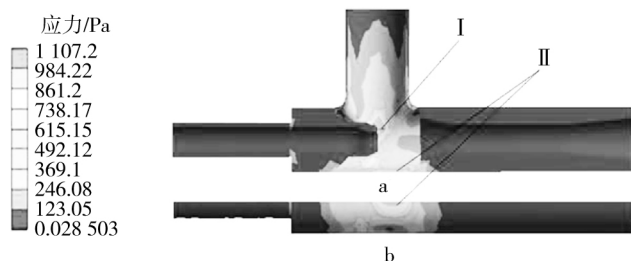


图11 喷射器应力分布

Fig. 11 Stress distribution of injector

### 3 结论

基于 CFD-DEM、DEM-FEA 的联合仿真方法,对文丘里粉体喷射器内部颗粒群的输送过程进行数值模拟,分析颗粒运动特性以及喷射器应力分布,得到如下结论:1)颗粒在文丘里效应的作用下被吸入喷射器,又被喷嘴射出的高速气体加速形成输送流,但在吸收室的底部会形成颗粒聚集和滞留现象;2)颗粒流在文丘里管输送过程中集中分布在管道的中下部位,小尺寸颗粒速度较快;3)颗粒群在输送过程中,颗粒与颗粒碰撞次数随着颗粒尺寸的增大而增加,颗粒与壁面碰撞次数随着颗粒尺寸的增大而减少;4)由于颗粒碰撞频次及撞击强度的影响,喷射器在喷嘴出口处附近和吸收室底部出现应力峰值,因此在实际生产制造过程中,应对应力集中部位进行材料表面强化处理或采用耐磨衬里等措施,以减少这些部位的磨蚀。

### 参考文献(References):

[1] ZHOU F B, HU S Y, LIU Y K. CFD-DEM simulation of the pneumatic conveying of fine particles through a horizontal slit[J]. Particuology, 2014, 16: 196-205.

[2] WANG X F, JIN B S, XIONG Y Q, et al. Flow behaviors of gas-solid injector by 3D simulation with kinetic theory of granular flow[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(6): 823-831.

[3] TRIPATHI N, SHARMA A, MALLICK S S, et al. Energy loss at bends in the pneumatic conveying of fly ash[J]. Particuology, 2015, 21: 65-73.

[4] KRUGGELI-EMDEN H, OSCHMANN T. Numerical study of rope formation and dispersion of non-spherical particles during pneumatic conveying in pipe[J]. Powder Technology, 2014, 268: 219-236.

[5] HIROTA M, SOGO Y, MARUTANIC T, et al. Effect of mechanical properties of powder on pneumatic conveying in inclined pipe[J]. Powder Technology, 2002, 122: 150-155.

[6] 朱步范,贾德刚,黄晓军. 粉体机械输送设备与气力输送设备应用比较[J]. 工程建设与设计, 2005(10): 48-50.

[7] ZHOU Y M, SUN Z N, GU H F, et al. Structure design on improving injection performance for Venturi scrubber working in self-priming mode[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 80: 7-16.

[8] JI D, ZHANG M L, XU T G, et al. Experimental and numerical studies of the jet tube based on Venturi effect[J]. Vacuum, 2015, 111: 25-31.

[9] LIU K, LU H F, GUO X L, et al. Experimental study on flow characteristics and pressure drop of gas-coal mixture through Venturi[J]. Powder Technology, 2014, 268: 401-411.

[10] 谢菲,吴占松. 文丘里管内气固两相流流动的数值模拟和实验[J]. 动力工程, 2007, 27(2): 237-241.

[11] 董宝川,刘雪东,苏世卿. 基于 CFD-DEM 耦合法的固定床管式反应器流体流动特性数值模拟[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(4): 11-14.

[12] 喻黎明,邹小艳,谭弘,等. 基于 CFD-DEM 耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 126-132.

[13] 杜俊,胡国明,方自强,等. 弯管稀相气力输送 CFD-DEM 法数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(4): 134-138.

[14] 吴健伟. 粉煤灰气力输送喷射器的设计及应用[J]. 应用能源技术, 2010(10): 40-42.

[15] XIONG Y Q, ZHANG M Y, YUAN Z L. Three-dimensional numerical simulation method for gas-solid injector[J]. Powder Technology, 2005, 160: 180-189.

### (上接第38页)

[6] 龚翠平,杨威,刘静. 涡流空气分级机的分级效率与分级精度[J]. 中国粉体技术, 2014, 20(4): 80-82.

[7] 李进春,李双跃,任朝富,等. 涡流空气分级机气流密封方式的设计[J]. 水泥技术, 2008(4): 38-40.

[8] 焦渤,沈志刚,赵小虎,等. 气流分级机流场的数值模拟与优化[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(5): 1-6.

[9] 叶红齐,赵春雷. 分级过程中的逆流和错流[J]. 矿冶工程, 2000, 20(2): 19-21.

[10] 胥海伦,陈海炎,毕海权. 基于康达效应的超微细粉分级数值模拟研究[J]. 西南科技大学学报, 2005, 20(1): 42-45.

[11] 孙占鹏,孙国刚,许杰. 挡板对卧轮式气流选粉机性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(1): 6-10.

[12] 梅芳,张庆红,陆厚根. 气流分级“鱼钩效应”的研究[J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(6): 616-621.

[13] KRAIPECH W, CHEN W, PARMA F J, et al. Modelling the fish-hook effect of the flow within hydrocyclones[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 66(1/2/3/4): 49-65.

[14] ESWARAIAH C, ANGADI S I, MISHRA B K. Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook phenomenon in a circulating air classifier[J]. Powder Technology, 2012, 218: 57-63.

[15] 郭丽杰,刘家祥,王京刚,等. 气流预分散对涡流空气分级机分级性能的影响[J]. 化学工程, 2007, 35(3): 51-54.

[16] 钱海燕,叶旭初,张耀金,等. Turboplex 超细粉分级机的实际操作性能[J]. 中国粉体技术, 2000, 6(5): 110-111, 121.