

基于 CFD-DEM 的盘式气流磨分级数值模拟

陈剑璇^{1,2}, 李占福^{1,2}, 高紫圣³, 童昕^{1,2}

(1. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

3. 福建省金龙稀土股份有限公司, 福建 龙岩 364000)

摘要: 为了探索盘式气流磨中铁基粉末分级的内在机理, 开发了基于 CFD-DEM 气固两相流模型, 实现对盘式气流磨分级的数值模拟, 并分析不同进气压力对分级性能的影响。采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 和离散元法 (discrete element method, DEM) 双向耦合的数值模拟方法, 使用喷嘴入口速度, 验证网格数量对计算结果的影响。把腔室内部划分为破碎区、分级区和分级轮内部。颗粒间的碰撞主要发生在破碎区并随着时间的增加而加剧, 在分级轮内部几乎没有颗粒间的碰撞。随着喷嘴进气压力的增加, 分级效率呈现降低的趋势, 从 91.0 % 下降到 56.8 %, 且整体变化幅度大; 而分级精度则呈现增加趋势, 从 0.63 增加到 0.87。

关键词: 铁基粉末; 盘式气流磨; 计算流体力学; 离散元法; 气流分级

中图分类号: TB44

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)04-0382-07

Numerical simulation of classification in a spiral jet mill based on CFD-DEM

CHEN Jianxuan^{1,2}, LI Zhanfu^{1,2}, GAO Zisheng³, TONG Xin^{1,2}

(1. Fujian Key Laboratory of Intelligent Processing Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Fujian Golden Dragon Rare-Earth Co., Ltd., Longyan 364000, China)

Abstract: In order to explore the intrinsic mechanism of iron-based powder classification in a spiral jet mill, a gas-solid two-phase flow model using CFD-DEM is developed to realize the numerical simulation of spiral jet mill classification and to analyze the effect of different nozzle inlet pressures on the classification performance. A two-way coupled numerical simulation method of computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM) is adopted to verify the influence of the number of grids on the calculation results using the nozzle inlet velocity. The interior of the chamber can be divided into the crushing zone, the classifying zone and the interior of the classification wheel. The collision between particles mainly occurs in the crushing zone, and the collision is more intense with the increase of time, and there is almost no collision between particles inside the classification wheel. With the increase of nozzle inlet pressure, the classification efficiency decreases from 91.0 % to 56.8 %, and the overall change is large. The classification accuracy shows an increasing trend from 0.63 to 0.87.

Keywords: iron-based powder; spiral jet mill; computational fluid dynamics; discrete element method; airflow classification

铁基制品是粉末冶金行业生产量最大的一类材料, 在一定程度上代表一个国家粉末冶金技术水平^[1]。气流磨是粉体制造的设备之一, 鉴于实验条件限制及高昂的成本, 利用数值模拟已成为

研究气流磨的关键技术之一。

许多国内外学者对气流磨的数值模拟进行了研究。陈海焱^[2]通过 Fluent 软件分析了气流磨的粉碎流场和气流分级。发现提高喷嘴设计马赫

收稿日期: 2024-09-13

基金项目: 福建省技术创新重点攻关及产业化项目 (2023XQ002); 福建省科技计划高校产学研合作项目 (2024H6015)

第一作者简介: 陈剑璇 (1995—), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 研究方向: 数字化设计与分析。

通信作者: 李占福 (1987—), 男, 河北衡水人, 副教授, 博士, 研究方向: 多场耦合 CAE 分析与仿真。

数可以增大喷嘴出口的气流速度,但会导致气流速度衰减加快。杨康伟^[3]研究了进气压力、喷嘴间距和分级轮转速对气流磨粉碎和分级的影响。Sabic C 等^[4]利用 CFD 软件探究气流磨粉碎过程中结块现象形成的条件。Luczak 等^[5]设计并构建了一种新型实验螺旋气流磨装置,并用 PIV 测量证实了在螺旋气流磨内整个横截面上确定合理的粒子轨迹和粒子速度的可能性。Scoot L 等^[6]研究了喷嘴压力对颗粒和流体的影响,发现颗粒的粉碎主要受喷嘴压力和腔室内的持料量影响。

综上所述,现有气流磨的数值模拟,主要集中于使用 CFD 对流场进行分析,对于颗粒的模拟不够精确,尤其是在颗粒间相互作用显著的情况下。本文采用 CFD-DEM 耦合方法,探究超细粉体颗粒在复杂运行机制下的分级机理,为超细粉体的分级提供理论和技术支持,同时也为相关领域的工程应用和科学研究提供新的视角和方法论基础。

1 数值模拟

1.1 仿真模型与网格划分

以 MQPW10T 型盘式气流磨为研究对象,在保证模拟结果准确性的前提下适当简化,仿真模型包括喷嘴、物料进气口、进料管、腔室和分级轮,结构如图 1 所示。分级轮有 60 个叶片,长 16.25 mm,宽 7.5 mm,高 100 mm。图 2 为模型的网格划分,喷嘴处和分级轮的旋转区域加密处理,并进行网格无关性验证,使用喷嘴入口速度验证网格数量对计算结果的影响,结果如表 1 所示,当网格数量超过 76.1 万时,喷嘴入口速度的计算结果趋于稳定。因此,基于计算成本和精度的平衡考虑,选择 76.1 万网格进行模拟。

表 1 网格无关性验证

Tab.1 Grid independence verification

网格	尺寸/mm	速度/(m·s ⁻¹)	网格数量/万个
1	40	174	20.5
2	20	210	38.5
3	10	245	76.1
4	5	250	156.4
5	2	252	310.4

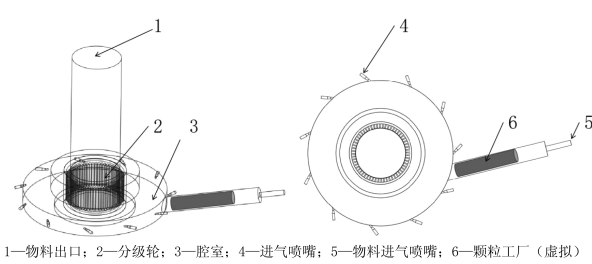


图 1 仿真几何模型
Fig.1 Simulation geometric model

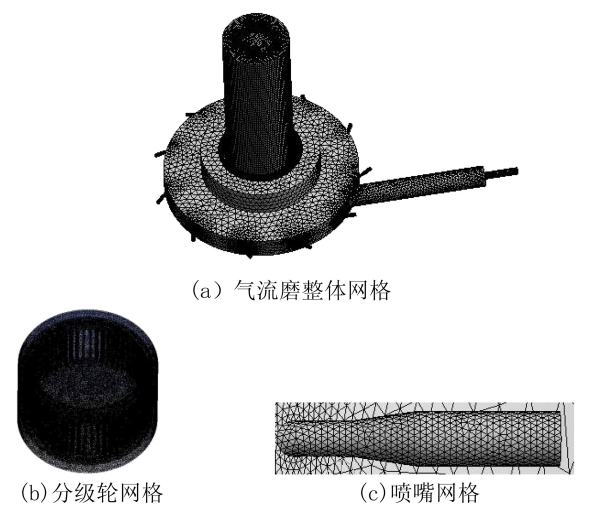


图 2 网格划分
Fig.2 Mesh division

1.2 仿真参数设置

根据性质设置流体域的边界,11 个喷嘴进气口和 1 个物料进气口设置为压力入口,数值分别为 600 kPa 和 620 kPa;物料出口设置为压力出口,数值为 30 kPa;其余壁面表面设置为壁面类型;重力加速度为 9.81 m/s²。模拟分级轮在实际工况下的旋转行为,则是在单元区域条件设置中通过勾选网格运动选项,绕 Y 轴旋转,其旋转速度为 125 rad/s。

模拟中所使用的颗粒相为铁基粉末,密度 7 500 kg/m³,杨氏模量 6.37×10⁹ Pa,恢复系数 0.2,静摩擦系数 0.3,动摩擦系数 0.076。使用 Bettersize2600 激光粒度分析仪测得实际生产中的合格颗粒粒径分布,经过计算得出投入分级的颗粒粒径比例,再按照正态分布产生不同粒度的颗粒,投入颗粒总量为 10 万个,颗粒的粒径分布如图 3 所示。气相为氮气,密度 1.2 kg/m³,黏度 1.8×10⁻⁵ Pa·s。

使用 Fluent 19.0 和 EDEM 2018 软件进行耦

合计算,求解气相控制方程时,计算方法选择速度压力耦合求解器的 Phase Coupled SIMPLE 算法。根据耦合接口的要求,为确保计算的稳定性与准确性,设定流场计算的时间步长为离散时间步长的整数倍关系,CFD 时间步长为 5×10^{-7} s,DEM 时间步长为 5×10^{-9} s,总仿真时间为 0.02 s。

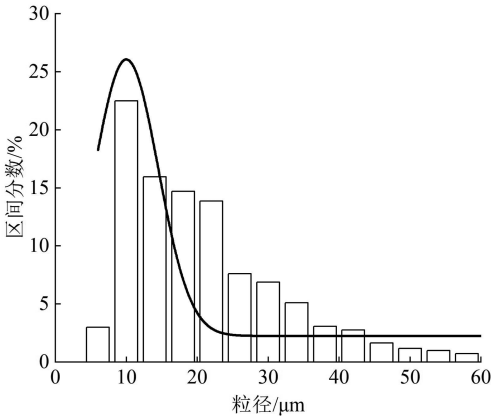


图 3 EDEM 中投入的铁基粉末粒径分布图
Fig.3 Particle size distribution chart of iron-based powder inputted in EDEM

1.3 CFD-DEM 模型验证

对 CFD-DEM 模型模拟盘式气流磨中的运动和分级问题进行数值模拟验证。仅改变分级轮的转速,分别为 105、115、125、135、145 rad/s,分析盘式气流磨分级后的铁基粉末粒径分布。图 4 为数值模拟得到的不同分级轮转速下合格颗粒粒径分布。

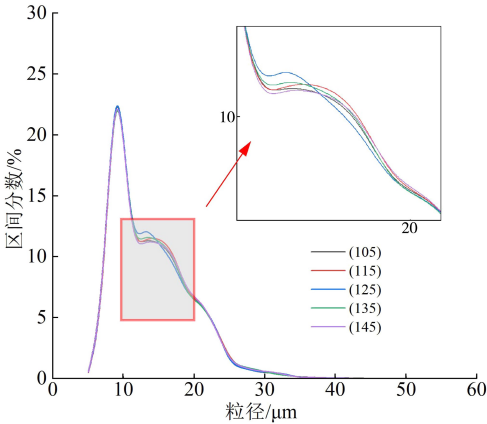


图 4 不同分级轮转速下的合格颗粒粒径分布
Fig.4 Particle size distribution of qualified particles at different classification wheel speeds

由图 4 可知,分级轮转速对合格颗粒粒径分布的影响主要集中在 10~20 μm (D50 区间),符合实

际生产中改变分级轮转速对 D50 的影响。因此,该模型对铁基粉末的模拟具备相对较高的精度,可作为研究盘式气流磨分级铁基粉末过程模拟。

2 结果与分析

2.1 流场特性

图 5 为喷嘴截平面和 XY 截平面所在位置的速度云图,气流在腔室内形成涡流,并围绕腔室中心近似轴对称旋转。

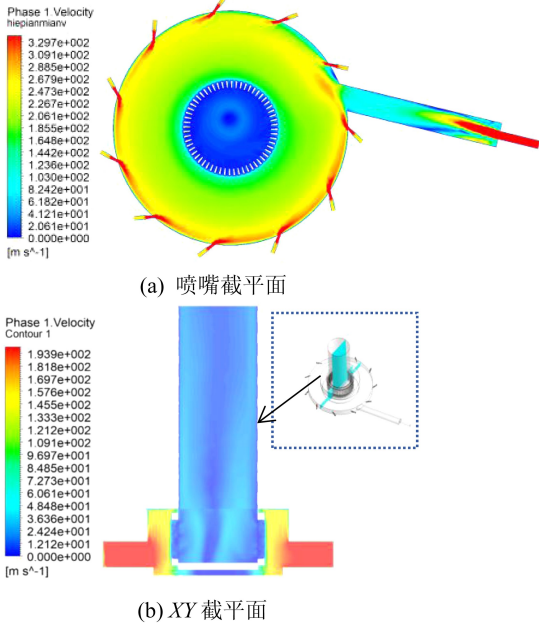


图 5 喷嘴截平面和 XY 截平面的速度云图
Fig.5 Velocity contour plot of nozzle cross-sectional plane and XY section plane

从腔室侧壁向腔室中心靠近,气流速度呈现逐层递减的趋势,且这种递减规律在同一半径层面上较为一致。在 XY 截平面的速度云图中,可看到左下方区域内的速度分布存在不对称性,这一现象归因于从进料管进入腔室的气流和铁基粉末在此集聚所引发的局部速度扰动。

图 6 为喷嘴入口到分级轮中心的速度分布,可见喷嘴出口速度的最大值不在喷嘴出口而是在距离喷嘴出口 3 mm 处。气流在喷嘴出口处出现激波,使得喷嘴出口速度急剧降低,气流速度从 653 m/s 骤降到 275 m/s,激波过后气流速度出现一定的稳定区,气流速度从 220 m/s 开始缓慢下降。气流到达分级轮周围时,受到分级轮的高速旋转,产生反方向的气流,气流速度又进一步下降,然后趋于平缓。

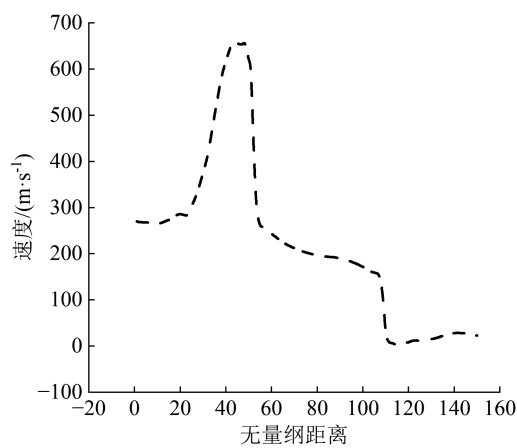


图 6 喷嘴径向位置的速度分布

Fig.6 Velocity distribution of nozzle radial position

图 7 是从喷嘴和物料进气口进入腔室内部气体的三维流线图。

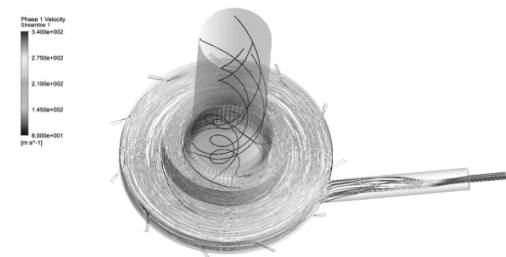


图 7 喷嘴和物料进气口的气流三维流线图

Fig.7 3D streamline diagram of airflow in nozzle and material intake port

由图 7 可见,在腔室内的气流主要是沿着圆周做旋转运动,符合分级的铁基粉末会流向物料出口。气流速度在进料管与腔室交界处出现骤减,且速度骤减的距离和颗粒工厂的长度一致,原因是铁基粉末在此生成,气流能量转移到了颗粒上,颗粒获得初始速度,得以进入腔室,导致气流速度下降。

2.2 颗粒特性

图 8 是瞬时颗粒空间分布。0.002 s 时铁基粉末在颗粒工厂中生成,且在物料进气口的气流下,被带到研磨室内。在 11 个拉瓦尔喷嘴的高速射流下,铁基粉末开始第一次主动分级,部分被带到分级区。在高速旋转的分级轮产生的强大离心力作用下,铁基粉末被被动分级,符合粒度要求的通过分级轮进入旋风分离器和除尘器收集,用于后续的制造工艺,不符合粒度要求的铁基粉末下降至破碎区继续粉碎,以保证最终产品的稳定性

和一致性。在靠近物料进气口的进料管处,会形成一小部分颗粒堆积,在实际生产后,拆开设备进行清理时,也发现此处存在铁基粉末的堆积,导致生产效率下降和成本增加。

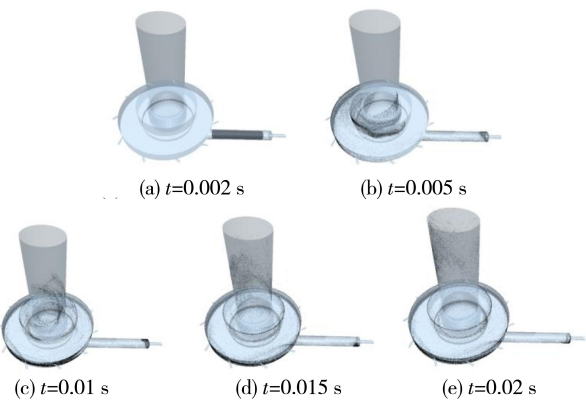
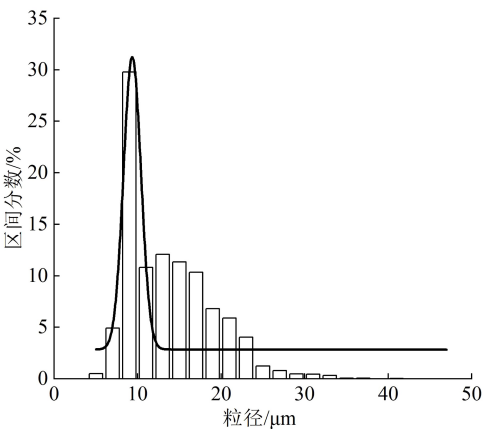


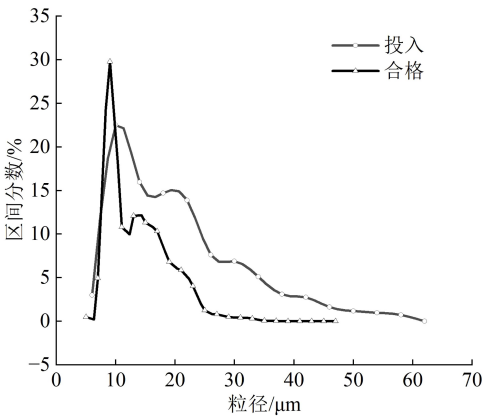
图 8 瞬时颗粒空间分布

Fig.8 Instantaneous particle spatial distribution

图 9 为铁基粉末粒径分布对比图。



(a) 合格铁基粉末粒径分布



(b) 粒径分布对比

图 9 合格的铁基粉末粒径分布图

Fig.9 Qualified iron-based powder size distribution chart

图 9(a)为合格铁基粉末粒径分布图,统计的颗粒空间在分级轮内部以及出口管道区域内,和投入的铁基粉末粒径分布图(图 3)对比,对比结果如图 9(b)。由图 9(b)可知,粒径分布趋势较为一致,且峰值粒径都出现在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间。但在区间分数上,粒径在 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间,合格高于投入的;其他区间则是投入高于被分级的。原因是现有的数学模型和算力的限制下,前文假设为球形颗粒(实际的铁基粉末是棱形片状的),球形颗粒更加容易受流场所影响,进而导致区间分数的差异。

铁基粉末粒径分布数据来自后处理导出,再使用 origin 对其统计;破碎区主要粒径分布为 $28 \sim 60 \mu\text{m}$,分级区主要粒径分布为 $22 \sim 30 \mu\text{m}$,分级轮内部主要粒径分布为 $5.6 \sim 20 \mu\text{m}$,所对应的区间位置如图 10 所示。

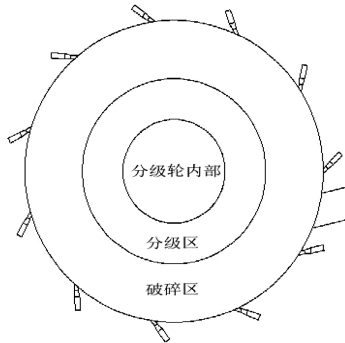


图 10 盘式气流磨内部分级区域的划分

Fig.10 Division of internal classification area in a spiral jet mill

CFD-DEM 相较其他方法的一大优势是可获取颗粒的碰撞信息,图 11 为三个区域的颗粒间碰撞次数与时间的关系。由图 11 可知,破碎区的碰撞事件密度在 0.003 s 后呈指数级增长,其碰撞频率显著高于其他两个区域,表明该区域内铁基粉末因湍流剪切应力作用产生剧烈碰撞聚结现象;同时,粒径较大的颗粒受离心力作用沿腔体壁面运动并与之发生二次碰撞。相比之下,分级区和分级轮内部的碰撞行为主要发生在 0.01 s 后,其碰撞增长率趋于平缓,与颗粒群进入分级装置时的流体动力分级过程(此时铁基粉末与旋转叶片表面因速度差产生周期性碰撞接触)对应。

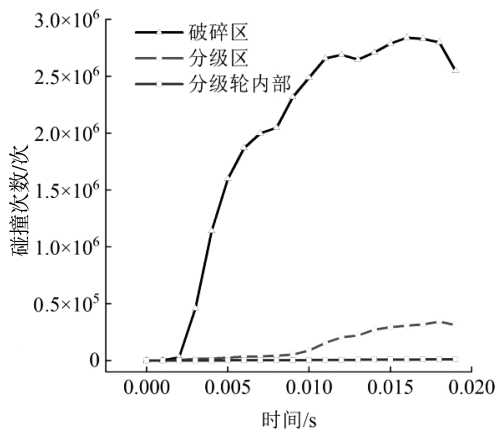


图 11 颗粒间碰撞次数与时间关系

Fig.11 Relationship between number of particle collisions and time

2.3 盘式气流磨的分级性能

气流磨分级性能的优劣主要由两个指标评价^[7]:一是分级效率,本文采用牛顿分级效率 η_N ,它表明分级工作的数量指标,表达式如下:

$$\eta_N = \frac{(w_1 - w_0)(w_0 - w_2)}{w_0(1 - w_0)(w_1 - w_2)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, w_0 为合格颗粒在原料中的质量分数; w_1 为合格颗粒在分级后细粉中的质量分数; w_2 为合格颗粒在分级后粗粉中的质量分数。

另一个是反映分级工作质量的分级精度 K ,理想状态的分级精度为 1, K 越接近 1, 分级精度越高,表达式如下:

$$K = \frac{d_{75}}{d_{25}} \quad (2)$$

式中, d_{25} 为颗粒粒径 25% 的部分分级效率,%; d_{75} 为颗粒粒径 75% 的部分分级效率,%。

2.4 喷嘴进口压力对分级性能的影响及分析

喷嘴进口压力是影响气流速度和能量的关键参数,其直接决定了铁基粉末的加速程度和碰撞能量,对铁基粉末的分级效率和分级精度影响很大。仿真结束后,在后处理中导出合格颗粒粒径的信息,经公式(1)和(2)计算得出分级效率和分级精度,图 12 为喷嘴进气压力对分级效率和分级精度的影响规律,喷嘴进气压力值由 400 kPa 到 800 kPa 。由图 12 可知,随着喷嘴进气压力的增加,分级效率呈现降低趋势,从 91.0% 下降到 56.8% ,且整体变化幅度大;而分级精度则呈现增加趋势,从 0.63 增加到 0.87 。

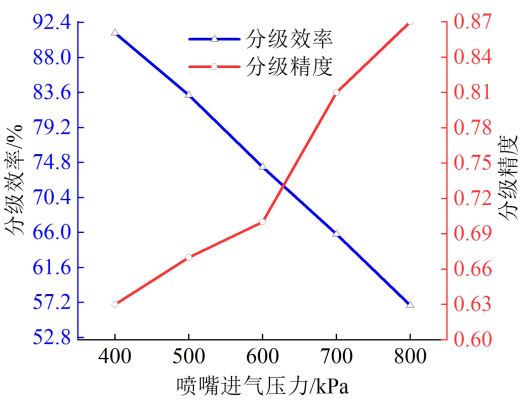


图 12 喷嘴进气压力与分级性能关系

Fig.12 Relationship between nozzle inlet pressure and classification performance

图 13 为不同喷嘴进气压力下的截平面处速度云图和矢量图。

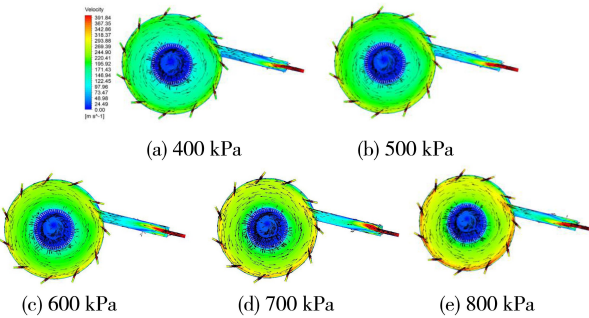


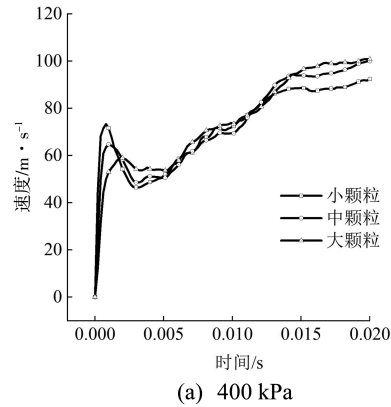
图 13 不同喷嘴进气压力下的截平面处速度云图和矢量图

Fig.13 Velocity clouds and vectors at cross-sectional plane under different nozzle inlet pressures

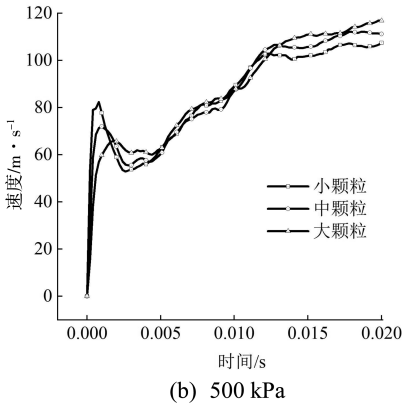
由图 13 可知,随着喷嘴进气压力的增高,径向气流的速度增大,但其偏移程度基本不变。径向气流速度的增加会提高铁基粉末在破碎区的流化速度,使得铁基粉末进入分级区域的运动状态发生改变,从而影响分级性能。

图 14 为不同喷嘴进气压力下颗粒粒径之间的速度关系,小颗粒的粒径范围为 $5.6\sim 22.0\text{ }\mu\text{m}$,中颗粒的粒径范围为 $22\sim 30\text{ }\mu\text{m}$,大颗粒的粒径范围为 $30\sim 56\text{ }\mu\text{m}$ 。由图 14 可知,在不同喷嘴进气压力下,铁基粉末的平均速度都在 0.002 s 内达到峰值,且各个时间点的铁基粉末平均速度会随着粒径的增加而变大。然后,随着铁基粉末在腔室内运动一段时间后,不同粒径间的平均速度差距开始减小。因此,粒径的变化对速度的主要影

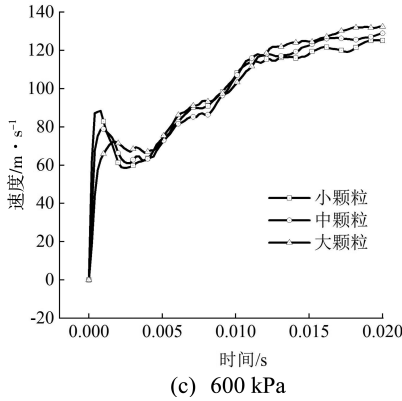
响是在铁基粉末开始加速阶段,而对于颗粒碰撞后的运动状态影响较小。



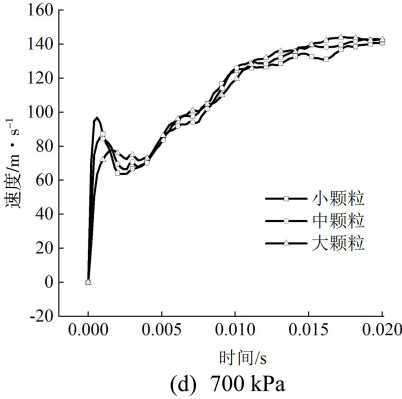
(a) 400 kPa



(b) 500 kPa



(c) 600 kPa



(d) 700 kPa

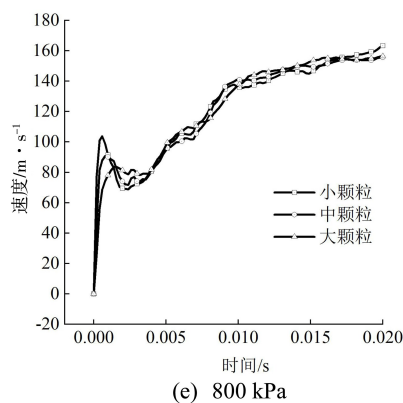


图 14 不同喷嘴进气压力下颗粒粒径之间的速度关系
Fig.14 Velocity relationship between different nozzle inlet pressures and particle sizes

3 结论

- 1) 颗粒间的碰撞主要发生在破碎区,随时间的增加而加剧;在分级轮内部几乎没有颗粒间的碰撞。
- 2) 根据该区域内的颗粒粒径分布,把研磨室内部划分为破碎区、分级区和分级轮内部。
- 3) 随着喷嘴进气压力的增加,分级效率呈现降低趋势,且整体变化幅度大;而分级精度则呈现增加趋势。
- 4) 喷嘴进气压力对铁基粉末速度的影响主要发生在开始的加速阶段,随着时间的推移,不同粒径之间的速度差距开始减少。

参考文献:

[1] 黄伯云, 韦伟峰, 李松林, 等. 现代粉末冶金材料与技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1917-1933.

[2] 陈海焱. 流化床气流粉碎分级技术的研究与应用[D]. 成都: 四川大学, 2007.

[3] 杨康伟. 流化床气流磨中碳化钨粉运动和分级的数值模拟[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.

[4] SABIA C, FRIGERIO G, CASALINI T, et al. A detailed CFD analysis of flow patterns and single-phase velocity variations in spiral jet mills affected by caking phenomena[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 174: 234-253.

[5] LUCZAK B, MÜLLER R, KESSEL C, et al. Visualization of flow conditions inside spiral jet mills with different nozzle numbers-analysis of unloaded and loaded mills and correlation with grinding performance[J]. Powder Technology, 2019, 342: 108-117.

[6] SCOTT L, ORISSOVA A, BURNS A, et al. Effect of grinding nozzles pressure on particle and fluid flow patterns in a spiral jet mill[J]. Powder Technology, 2021, 394: 439-447.

[7] 毛文浩, 颜翠平, 范俊哲, 等. 叶片结构参数对涡流分级机分级性能的影响[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(9): 90-94.

(责任编辑: 陈雯)