

变径液固流化床单个颗粒运动模拟

伍玲玲¹, 胡 林¹, 张志军¹, 喻 清^{1,2*}

(1.南华大学 核资源工程学院,湖南 衡阳 421001;2.中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:变径液固流化床内单个颗粒运动过程的研究对整个流场分析具有重要的作用.通过 Fluent-EDEM 耦合计算,对变径液固流化床内单个颗粒运动行为进行了数值模拟.结果表明:不同密度颗粒进入分选区后,分别具有不同的运动轨迹,能够实现按密度分离,模拟分选效果较好;不同密度颗粒轴向速度表现为先是在短时间内迅速增加,达到一定速度后,开始逐渐减小趋势;将模拟所得单个颗粒轨迹与轴向速度值分别与高速动态拍摄所得值比较,吻合较好.

关键词:变径液固流化床;单个颗粒;Fluent-EDEM

中图分类号:TD455 **文献标志码:**A

Simulation of Single Particle Motion in Tapered Diameter Liquid-solid Fluidized Bed

WU Ling-ling¹, HU Lin¹, ZHANG Zhi-jun¹, YU Qing^{1,2*}

(1.School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The study of the motion of individual particles in tapered diameter fluidized bed has an important effect on the whole flow field analysis. The single particle motion in tapered diameter liquid-solid fluidized bed were researched by fluent-EDEM coupling simulation. The results showed that different density particles into the sorting area, respectively, with different trajectories, can be separated by density. The axial velocity of the particles with different densities increased first in a short period of time, and then decreased gradually after reaching a certain speed. The simulated results of the single particle trajectory and the axial velocity agree well with those obtained by high-speed dynamic photography.

key words: tapered diameter fluidized bed; single particle; Fluent-EDEM

收稿日期:2017-02-17

基金项目:国家安全生产监督管理总局资助项目(hunan-0011-2016AQ);湖南省自然科学基金项目(2017JJ3274);湖南省教育厅重点项目(17A84);湖南省教育厅资助项目(15C1189)

作者简介:伍玲玲(1987-),女,实验师,主要从事矿业资源开发利用的研究.E-mail:wllshmyl@foxmail.com.* 通讯作者:喻 清,E-mail:ckyuqingk@126.com

0 引 言

FLUENT 软件是国、内外广泛应用于航空航天、生物医学、汽力工业、电子产品、运动器械、桥梁、建筑等多种工业应用及科学研究领域的计算流体力学分析软件. EDEM 是世界上第一个使用最先进的离散元技术进行颗粒系统仿真和分析的通用 CAE 软件, 可以快速、简便地建立颗粒系统的参数化模型, 准确模拟颗粒的运动行为. EDEM 也是世界上第一个可以通过与 CFD 软件耦合来对固—液/气相系统进行颗粒尺度模拟的 CAE 软件, 可以与计算流体力学分析软件 Fluent 实现无缝耦合^[1-2]. 计算时, EDEM 与 Fluent 将流场中颗粒及流体的计算信息在每一个时间步长内相互传递和更新, 实现双向耦合. 二者组成模拟气/液—固两相流的强有力工具, 可得到流场和颗粒系统相互作用的精确结果^[3]. 因此, 论文借助 Fluent 有限元软件和 EDEM 离散元软件, 采用计算流体力学(computational fluid dynamics) 与离散单元法(discrete element method, DEM) 相结合的方法, 通过 Fluent-EDEM 耦合计算, 对文献[4] 变径液固流化床内部颗粒的运动行为进行仿真模拟, 通过数值模拟与实验测定结果的比较分析, 为设计开发此类分选床、优化过程操作和提高分选效率提供详细的数据支持和可靠的理论指导.

1 构建几何模型及网格划分

由于充气式液固床中, 充气量较小, 仅在进气口处对液固流态化有所干扰, 对整体液固流态化影响不大^[4-5], 因此这里将充气部分省略, 即将充气式液固流态化分选床简化为理想状态的液固流化床. 几何模型如图 1(a) 所示. 使用 gambit 软件对模型进行网格划分, 如图 1(b) 所示.

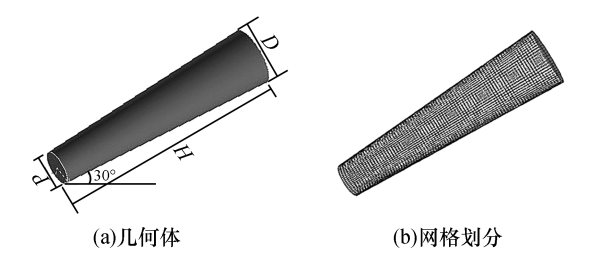


图 1 变径流化床几何体 (a) 和网格划分 (b)
Fig.1 Geometry (a) and mesh (b) of the bed

主要结构和操作参数如表 1.

表 1 结构参数
Table 1 Construction parameters

参数	符号	数值
床体底部直径/mm	d	60
床体上部直径/mm	D	100
床体高度/mm	H	400
倾斜角/(°)	—	30
网格数目	—	37 168

2 计算模型选择和边界条件设置

首先基于 CFD 方法建立液相流动模型. 液相控制方程组包括连续性方程、动量守恒方程、液相湍流模型. FLUENT 软件提供了多湍流模型, 这里选取标准 $k-\varepsilon$ 模型^[6-7]. 然后基于离散单元法 (DEM) 对于颗粒建立运动模型. 颗粒与流体相互作用力, 包括曳力、气压梯度力、虚拟质量力和升力等, 虚拟质量力和升力等其他相互作用力对模拟结果影响不大, 因此这里忽略不计^[8]. 颗粒间相互作用力选取弹性力、阻尼力, 用弹性、阻尼及摩擦滑移等机理模型来计算. 体积力仅考虑重力^[9-10].

计算时, 设定水流入口为速度进口边界, 出口为压力出口边界, 其它界面均为壁面. 具体边界条件设置如表 2 所示.

表 2 模拟参数设置
Table 2 Value of simulation parameters

相	参数	符号	单位	数值
固相	密度	ρ	kg/m ³	1 900~8 900
	颗粒直径	d_i	mm	0.5
	滚动摩擦系数	μ_r	mm	0.005
	滑动摩擦系数	μ_s	—	0.3
	泊松比	ν	—	0.3
	杨氏模量	E	N/m ²	1×10 ⁷
	阻尼系数	c	—	0.3
	入口粒子速度	—	m/s	0.5
液相	密度	ρ	kg/m ³	998.2
	粘度	μ	Pa·s	0.001
	入口速度		m/s	0.5~1.5
出口压力			Pa	101 325

3 模拟结果

3.1 单个不同密度颗粒分离过程仿真

设置铜颗粒密度为 8.9 g/cm^3 、铁颗粒密度为 5.6 g/cm^3 、铝颗粒密度为 2.7 g/cm^3 、玻璃树脂颗粒密度为 2.1 g/cm^3 、塑料颗粒密度为 1.7 g/cm^3 , 粒径均为 1 mm , 分别考察单个在水流速度 1 m/s 时颗粒在床体中运动轨迹, 仿真模拟过程见图 2.

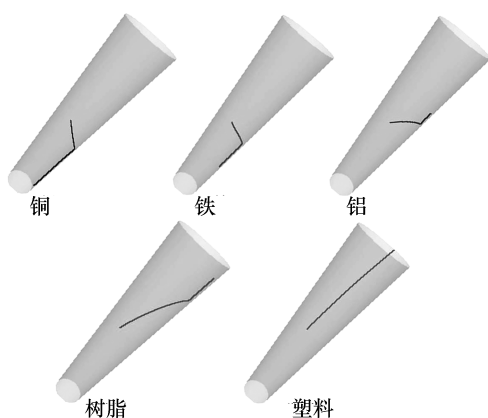


图 2 不同密度的单个颗粒运动轨迹

Fig.2 The trajectory of the individual particles

从图 2 中可以看出, 不同密度的颗粒, 分别具有不同的运动轨迹, 颗粒密度差别越大, 运动轨迹相似性越小; 密度大的颗粒最终下沉, 密度小的颗粒最终上浮; 图 2 中, 密度最大的铜颗粒从床体底部出口流出, 密度最小的塑料颗粒从床体上部出口流出, 密度大小居中的铝颗粒在分选床内停留时间最长.

将文献[4]中试验得到的单个塑料颗粒轴向运动轨迹与仿真模拟所得结果进行比较, 比较结果如图 3 所示.

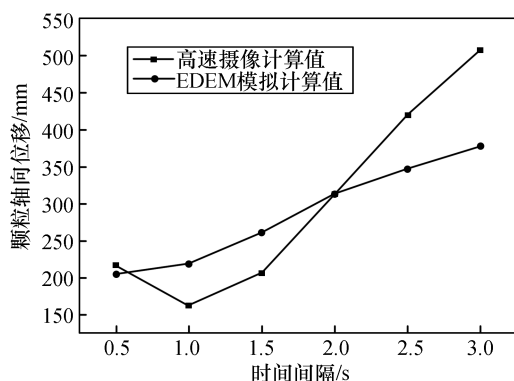


图 3 塑料颗粒轴向位移实验值与模拟值对比

Fig.3 Axial displacement comparison between experiment and simulation of plastic particles

从图 3 可以看出, 高速摄像所得塑料颗粒轴向位移值略大于模拟值, 这是因为文献[4]中实验采取的实际水流速度为 1.5 m/s , 而模拟设置的水流速度为 1 m/s ; 两条速度曲线变化趋势类似, 均呈上升趋势, 说明模拟所得结果与实验所得结果吻合较好.

3.2 单个不同密度颗粒轴向速度随时间变化关系

图 4 为从 1.0 s 颗粒产生到 4.0 s 仿真结束这段时间内, 铜、铁、铝、树脂以及塑料这五种颗粒的速度随时间变化曲线.

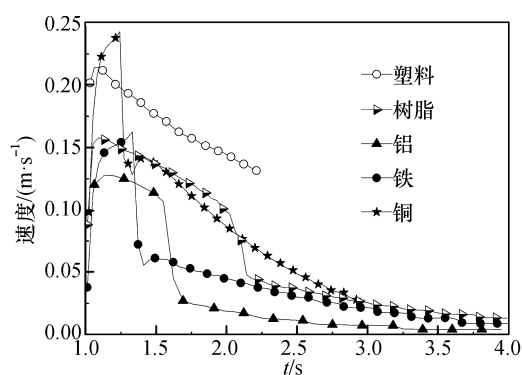


图 4 不同密度颗粒速度随时间变化曲线

Fig.4 Velocity curve with time

从图 4 中可以看出, 每种颗粒在刚产生的时候, 初始速度为零, 由于受到上升水流对其产生的向上的瞬时冲击力, 速度变化很大, 速度在短时间内迅速增加; 随着时间的推进, 由于颗粒自身重力影响, 颗粒速度开始减小. 其中, 铜颗粒、铁颗粒、铝颗粒、玻璃树脂颗粒在未从床体排出时, 先后达到受力平衡状态, 速度趋于零, 因此停留在床体下壁面不同位置上, 这与图 2 中铜颗粒、铁颗粒、铝颗粒、玻璃树脂颗粒运动轨迹图相符; 塑料颗粒由于自身密度小, 水流对其作用力远远大于颗粒自身重力, 因此塑料颗粒在未达到受力平衡之前就已从出口排出, 离开床体时速度为 0.14 m/s , 这与图 2 中塑料颗粒轨迹图相符.

将文献[4]中试验得到的单个塑料颗粒轴向速度与仿真模拟所得结果进行比较, 比较结果如图 5 所示. 由于实验采取的水流速度大于模拟设置的水流速度, 且实际实验设备尺寸大于模拟床体尺寸, 加上模拟采用的是简化的理想状态的流化床, 因此图 5 中模拟值和实验值不可能完全一致. 但是二者变化规律基本相似, 颗粒进入床体受水流作用有短时间的扰动, 然后达到稳定, 轴向速度呈逐渐减小趋势, (下转第 24 页)

- [5] 戴元宁.彩钼铅矿的化学分选方法:CN1074486[P]. 1993-07-21.
- [6] 孟宪红,李悦,刘玉珍.钼酸铵生产方法的进展[J].无机盐工业,1997,29(2):16-18.
- [7] 宋玉满.浅谈湿法生产工业钼酸铵的工艺控制[J].中国钼业,1998,22(6):48-49.
- [8] 荆春生.我国钼酸铵生产现状综述[J].中国钼业,2000,24(6):21-24.
- [9] 卢国俭,于江鸿,绍传斌.用钼精矿生产钼酸铵的试验研究[J].无机盐工业,2004,36(1):29-31.
- [10] 浸矿技术编委会.浸矿技术[M].北京:原子能出版社,1992.

(上接第15页)

说明模拟所得结果能较好的反应颗粒在变径液固流化床中床中的运动情况。

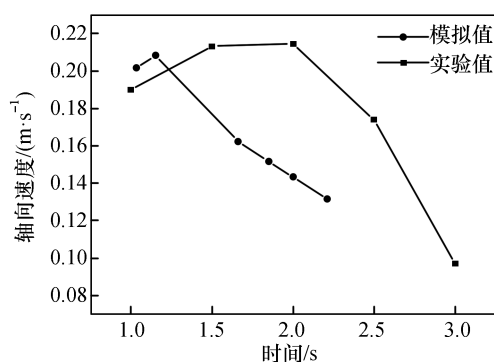


图5 塑料颗粒轴向速度实验值与模拟值对比

Fig.5 Axial velocity comparison between experiment and simulation of plastic particle

4 结 论

通过 Fluent-EDEM 耦合计算,对变径液固流化床内单个颗粒运动行为进行了数值模拟.结果表明:

1) 不同密度颗粒进入分选区后,分别具有不同的运动轨迹,能够实现按密度分离,模拟分选效果较好.

2) 不同密度颗粒轴向速度表现为先是在短时间内迅速增加,达到一定速度后,开始有逐渐减小趋势.

3) 将模拟所得单个颗粒轨迹与轴向速度值分别与高速动态拍摄所得值比较,吻合较好.

参考文献:

- [1] 周艳丽,王小飞,余永昌.基于 EDEM 软件的螺旋提土装置最佳间隙的研究和分析[J].农机化研究,2017,39(1):38-42.
- [2] GEYER B, LORENZ G, KANDELBAUER A. Recycling of poly (ethylene terephthalate)-a review focusing on chemical methods[J].Express Polymer Letters,2016,10(7):559-586.
- [3] 张尉林.FLUENT 软件与 IDEM 软件的耦合及其应用研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [4] 胡林,伍玲玲,喻清,等.充气式液固流化床内颗粒运动研究[J].矿山机械,2016,44(9):62-65.
- [5] ZHONG W Q, YU A B, LIU X J. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications[J].Powder Technology, 2016,302:108-152.
- [6] 孔琦.振动流化床中颗粒运动特性的实验研究与数值模拟[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [7] DURIS M, RADOICIC T K, GARIC R, et al. Particle velocities in quasi two-dimensional water fluidized beds of spherical particles[J].Powder Technology, 2013,246(9):98-107.
- [8] 陈云华,曲庆文,孙记树,等.基于 FLUENT 的静态充填混合器流场分析[J].矿业研究与开发,2015,35(2):87-90.
- [9] WU H, GUI N, YANG X T. Numerical simulation of heat transfer in packed pebble beds: CFD-DEM coupled with particle thermal radiation[J].International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017,110:393-405.
- [10] 段晨龙,赵跃民,伍玲玲,等.充气式液固流化床分选废弃电路板的实验研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(5):915-919.