

椭圆颗粒搅拌运动及混合特性的数值模拟研究

刘扬 韩燕龙 贾富国 姚丽娜 王会 史宇菲

Numerical simulation on stirring motion and mixing characteristics of ellipsoid particles

Liu Yang Han Yan-Long Jia Fu-Guo Yao Li-Na Wang Hui Shi Yu-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

轴对称构件受力分析的插值粒子法

Interpolating particle method for mechanical analysis of space axisymmetric components

物理学报.2015, 64(10): 100204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100204>

镁基合金自由枝晶生长的相场模拟研究

Phase-field modeling of free dendritic growth of magnesium based alloy

物理学报.2015, 64(6): 060201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060201>

黏弹性问题的改进的复变量无单元 Galerkin 方法

Improved complex variable element-free Galerkin method for viscoelasticity problems

物理学报.2014, 63(18): 180203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.180203>

密集剪切颗粒流中速度波动和自扩散特性的离散元模拟

Velocity fluctuation and self diffusion character in a dense granular sheared flow studied by discrete element method

物理学报.2014, 63(13): 134502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134502>

对颗粒物质运动的一致性进行控制的随机力场

Control of the fluctuation in the uniform granular flow by a random force field

物理学报.2013, 62(16): 164502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164502>

椭球颗粒搅拌运动及混合特性的数值模拟研究*

刘扬 韩燕龙 贾富国† 姚丽娜 王会 史宇菲

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

(2014年9月16日收到; 2014年12月6日收到修改稿)

为探讨在强制搅拌下同属性颗粒由分层到分布均匀状态的运动特征及规律, 本研究利用三维离散单元法模拟不同转速下U形罐体内等粒径椭球颗粒的混合过程. 从单颗粒随机运动轨迹、宏观颗粒流运动矢量图的角度分析颗粒混合过程的宏观混合规律及局部混合特征, 定量描述混合度与搅拌叶片旋转圈数的数学关系. 结果表明, 强制搅拌下同属性分层颗粒的混合是在对流混合及四个局部混合共同作用下实现的; 分层颗粒的混合度与搅拌轴的转速无关, 而与搅拌轴旋转圈数直接相关; 混合度与圈数的关系符合指数增长模型. 研究结果可为散体物料增混行业的设备改进及操作控制提供依据和参考.

关键词: 椭球颗粒, 混合特性, 三维离散元, 数值模拟**PACS:** 45.70.Mg, 02.60.Cb, 83.10.Rs**DOI:** 10.7498/aps.64.114501

1 引言

颗粒物质被视为传统固体、液体和气体之外的第四态物质, 激起高度关注和大量研究. 其中颗粒物料的堆积、堵塞、密集流动、混合分离等是备受关注的热点和难点问题^[1-4]. 颗粒物质混合是工业生产中常见的过程, 广泛地应用在制药、化工、能源等领域^[5,6]. 在颗粒混合方面, 多数学者研究集中在不同属性颗粒在混合过程中出现分离或离析的现象. 如赵啦啦研究了不同尺寸、密度的颗粒在垂直机械振动系统中的分离现象, 该现象属于巴西果效应^[7]; 也有学者对处于滚筒、搅拌式混合器、V形混合设备内, 不同属性的颗粒系统的混合过程中出现的自由表面流做了大量研究^[8-10]. 该类研究揭示出的颗粒在混合过程中分层原因及分层规律具有重要的实际意义, 对筛分、增混等设备的改进具有突出贡献. 颗粒物质除色泽等外观属性不同外, 此类颗粒物质的混合过程属于同属性颗粒混合. 针对同属性颗粒混合, 目前的研究大都集中在设备参数对混合效果的影响上, 如Kwapinska等^[11]通过离

散元法模拟了转筒直径、旋转速度、装载量等参数对颗粒的径向混合的影响. Dubey等^[12]模拟发现旋转盘的转速、填充率和喷雾模式影响药片包衣效果. Grajales等^[13]对发酵生物质颗粒在滚筒内的混合过程进行了研究, 对滚筒内含与不含内管时流态及流动层的速度进行了测量比较. 但就处于分层状态下的同属性颗粒的混合均匀特性尚需深入研究, 该类研究对生物质肥料制备、农产品发酵及热加工、种子水分调质等工程问题具有指导意义.

本文采用离散单元法的数值模拟手段^[14-16], 对U形罐体内同属性的分层颗粒混合过程进行模拟研究. 分析模拟系统内的单颗粒运动、颗粒群宏观矢量运动规律与特征, 定量描述混合程度与叶片轴旋转圈数的关系.

2 数值模拟模型及方法

2.1 数值模拟体系

本文模拟U形罐体内分为上下两层的等粒径椭球颗粒在搅拌叶片转动条件下的运动及混合

* 黑龙江省自然科学基金(批准号: E201322)、哈尔滨市优秀学科带头人基金(批准号: RC2013XK006004)、北方寒地现代农业装备技术重点实验室开放课题资助(批准号: 548008)和哈尔滨市应用技术与开发项目(批准号: 2013DB2BG005)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jfg204@163.com

过程.

U形罐体和搅拌叶片结构如图 1(a) 所示. 罐体高 H 为 115 mm, 宽 B 为 82 mm, 内径 R 为 33 mm. 搅拌轴由上下错位等间距排列的八个曲状叶片组成, 叶片具体尺寸为: 垂直长度均为 30 mm, 弧长为 30.3 mm, 宽度为 10 mm, 厚度为 1.5 mm, 叶片间距 10 mm.

模拟的椭球颗粒原型为脱壳后的长粒稻, 外观形态接近椭球体, 多次测量后得颗粒的长轴 L 为 7 mm, 短轴 D 为 2.8 mm, 如图 1(b) 所示.

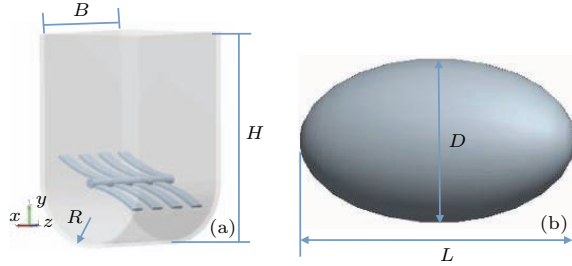


图 1 数值模型构造 (a) 数值模型几何构造; (b) 数值模型颗粒构造

Fig. 1. Numerical model configuration: (a) geometric configuration of numerical model; (b) granular configuration of numerical model.

2.2 数值模拟方法

本文采用的数值模拟方法为离散单元法 (discrete element method, DEM), 该方法可以分析与求解复杂离散体系的动力学问题. 所采用的离散元软件为 EDEM, 因模拟颗粒为干颗粒, 故忽略模拟颗粒间的黏附力及液桥力, 采用软球碰撞模型, 并且遵循颗粒 Hertz 法向接触理论和 Mindlin-Deresiewicz 切向接触理论 [17]. 基于以上分析, 选用软件中的 Hertz-Mindlin(no slip) 接触力学模型, 如图 2 所示.

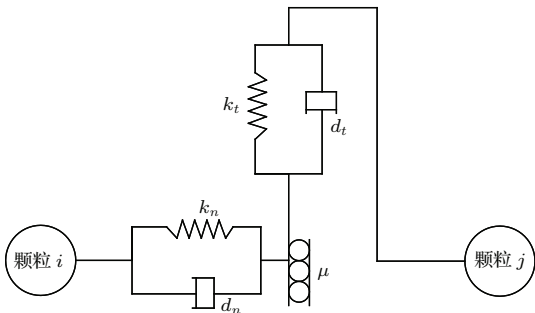


图 2 Hertz-Mindlin(no slip) 接触力学模型

Fig. 2. Contact mechanics model of Hertz-Mindlin.

基于上述接触模型, 模拟中将罐体内椭球颗粒划分为一个个相互独立单元, 根据牛顿第二定律,

循环迭代计算, 确定每个时间步长内每个单元受力及位移, 进而得到每个单元在每个时步下的平动及转动关系, 并实时更新单元位置, 通过对每个单元进行力、位移跟踪计算, 最终获取罐体内颗粒群的宏观运动规律.

由上述分析, 在某时步下罐体内单个椭球颗粒单元 i 的平动运动方程为

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{F}_n + \mathbf{F}_n^d + \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_t^d), \quad (1)$$

式中, \mathbf{V} 表示颗粒移动速度, m 表示颗粒质量, n_i 为与颗粒 i 接触的颗粒总数, \mathbf{F}_n 为椭球颗粒间法向碰撞接触力, \mathbf{F}_n^d 为法向阻尼, \mathbf{F}_t 为切向碰撞力, \mathbf{F}_t^d 为切向阻尼. 根据力的合成及颗粒接触碰撞中能量的损耗, 模型中将每个椭球颗粒的碰撞接触力及阻尼都分解为法向和切向方向. 其中法向碰撞接触力 F_n 计算公式如下:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \alpha^3}, \quad (2)$$

式中 E^* 为等效弹性模量, R^* 为等效半径, α 为法向重叠量. E^* 和 R^* 通过弹性模量, 泊松比和相互接触的颗粒间的半径求出. 法向阻尼 F_n^d 计算公式如下:

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \sqrt{S_n m^* v_n^{\text{rel}}}, \quad (3)$$

其中 ε 为恢复系数, m^* 为等效质量 (由接触颗粒质量求出), v_n^{rel} 为法向相对速度, S_n 为法向刚度 (由弹性模量、颗粒半径及碰撞重叠量求出).

而椭球颗粒间切向碰撞力 \mathbf{F}_t 及切向阻尼 \mathbf{F}_t^d 计算公式如下:

$$F_t = -S_t \delta, \quad (4)$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \sqrt{S_t m^* v_t^{\text{rel}}}, \quad (5)$$

其中 δ 为切向重叠量, S_t 为切向刚度 (由弹性模量、颗粒半径及碰撞重叠量求出), v_t^{rel} 为切向相对速度.

而在某时步下罐体内单个椭球颗粒单元 i 的转运方程为

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{T}_t + \mathbf{T}_r), \quad (6)$$

其中 \mathbf{T}_t , \mathbf{T}_r 为颗粒单元 i 受到切向力矩和滚动摩擦力矩, I 为转动惯量, $\boldsymbol{\omega}_i$ 表示角速度, t 表示时间, \mathbf{g} 表示重力加速度.

切向力矩 $\mathbf{T}_t = \mathbf{R}_i \times (\mathbf{F}_t + \mathbf{F}_t^d)$, 滚动摩擦力矩 $\mathbf{T}_r = -\mu_t \mathbf{F}_n \mathbf{R}_i \hat{\boldsymbol{\omega}}$. \mathbf{R}_i 为颗粒 i 质心到接触点的距

离(矢量), ω 为接触点处物体的单位角速度(矢量), μ_r 为滚动摩擦因数.

罐体中颗粒群在上述平动方程及转动方程控制下, 发生移动和滚动^[18]. 涉及的罐体及椭圆颗粒的初始边界参数及物理力学参数^[18,19], 如表 1 所示.

表 1 模拟所需参数
Table 1. Material parameters used in simulation.

参数	值
颗粒密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1538
颗粒泊松比	0.4
颗粒剪切模量/Pa	1.1×10^7
颗粒间恢复系数	0.6
颗粒间静摩擦系数	0.43
颗粒间动摩擦系数	0.01
颗粒总数	5000
颗粒与内壁的静摩擦系数	0.3
颗粒与内壁的动摩擦系数	0.01
颗粒与内壁的恢复系数	0.6
罐体密度(钢材)/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7800
罐体泊松比	0.3
罐体剪切模量/Pa	7×10^{10}
时间步长/s	6.3×10^{-6}

3 数值模拟过程及分析

本模拟实验进行了低转速范围内的颗粒群在搅拌叶片带动下的运动仿真, 在 XY 平面内, 以 X 轴向右为正方向, 文中叶片转动方向定义为逆时针. 搅拌叶片的三种转速分别为: 10 r/min, 20 r/min, 30 r/min. 如图 3(a) 所示, 为便于分析颗粒的混合程度, 将等粒径的同属性椭圆颗粒在初始状态下标定为蓝、灰色两层, 每层颗粒均为 2500 粒. 在颗粒层稳定后, 搅拌叶片以设定的角速度回转,

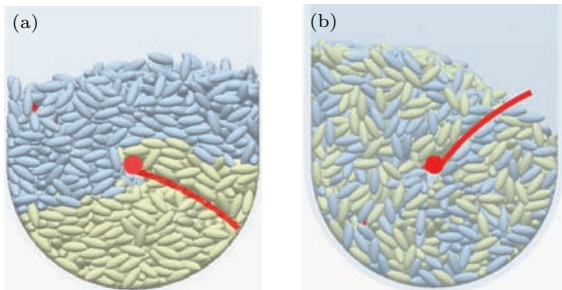


图 3 颗粒群状态图 (a) 颗粒群运动的初始形态; (b) 颗粒群运动的终了形态

Fig. 3. State diagram of particle swarm: (a) initial condition of particle swarm motion; (b) final condition of particle swarm motion.

期间各个颗粒会发生复杂的运动, 致使最终分层的颗粒群混合均匀, 如图 3(b) 所示.

3.1 单颗粒轨迹分析

为明晰颗粒的随机运动, 本文随机提取了三种转速下颗粒群内单个颗粒在运动过程中 X 轴和 Y 轴方向的坐标, 作出单颗粒在径向方向的轨迹图, 如图 4 所示. 虽然罐体内的颗粒受重力、剪切、挤压、摩擦等复合作用力, 但从图中可以看出, 三种转

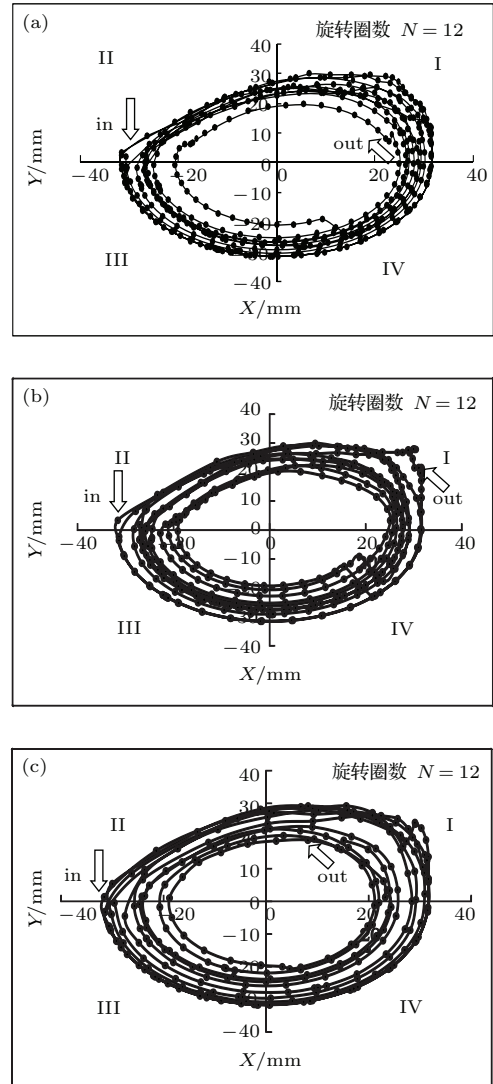


图 4 不同转速下单颗粒径向轨迹图(箭头 in 代表颗粒运动起点, 箭头 out 代表颗粒运动终点) (a) 单颗粒在 10 r/min 下的轨迹; (b) 单颗粒在 20 r/min 下的轨迹; (c) 单颗粒在 30 r/min 下的轨迹

Fig. 4. Radial trajectory diagram of single particle at different rotating speeds (arrow-in represents particle motion origin, arrow-out represents particle motion end point): (a) trajectory of single particle at 10 rpm; (b) trajectory of single particle at 20 rpm; (c) trajectory of single particle at 30 rpm.

速下的单颗粒都在做回转运动. 随着转速的提高, 颗粒轨迹在径向的运动形态略有扩张, 但变化不明显, 这与王瑞芳^[20]的研究结果符合. 综观图4(a)—(c)可以发现, 单个颗粒的运动具有规律性与随机性并存特征. 随机性主要体现在颗粒的轨迹是在一定范围内波动的, 本文所选的单颗粒虽在运动的过程中没能贯穿整个径向区域, 但可看出, 随着转速的提高, 该颗粒出现在径向区域的运动范围增大, 随机性增强, 说明转速可以提高径向上的混合速率. 规律性表现在轨迹呈现类椭圆形态, 尤其是在II, III象限内, 三种转速下的颗粒轨迹都出现快速下落现象. 观测模拟过程发现, 这是由于颗粒群被叶片带动到最高点后会出现颗粒间剪切滑落, 出现类似“小瀑布”形态. 这与Mellmann^[21]在研究滚筒内颗粒在径向方向运动中提出的“Cascading”形态的描述符合. 由单颗粒运动过程中体现出的随机性及规律性可以推断: 1) 颗粒群在运动过程中的宏观表征为以某些规律性的现象作周期性运动; 2) 颗粒群在运动终了的宏观表征为以一定混合度的径向区域分布.

3.2 颗粒群运动矢量图分析

为验证以上推断, 如图5至图7, 本文作出不同转速四个特定时刻下的颗粒群的宏观运动矢量图. 该四个特定时刻是根据颗粒群由分层状态到混合状态演变过程中出现特定现象确定的. 如图5(a)所示, 分层的颗粒在叶片以10 r/min逆时针转动时, 从局部特征(图中黑色虚线框)可以看出, 处于上层靠近轴心位置的蓝色颗粒群没能按叶片的带动方向作圆周运动, 而是出现部分颗粒贯穿到灰色颗粒体系内, 本文将此局部特征命名为颗粒的扩散混合运动, 如McCarthy等^[22]研究, 扩散混合是指颗粒在运动过程中发生的颗粒尺度的相互穿插和渗透作用, 类似于流体中的分子扩散, 是造成颗粒微观尺度混合的重要作用机理. 可能是由于靠近轴心位置蓝色的颗粒受叶片的作用力较弱, 在重力及上层颗粒群的挤压碰撞作用下, 该位置的颗粒首先向下滑落, 造成颗粒间相互穿插与渗透, 形成了混合运动的第一个局部特征; 随着叶片持续地运动, 如图5(b)所示, 叶片右下侧的颗粒群(图中黑色虚线框)出现无序运动态, 此位置下的颗粒运动方向混杂, 当叶片转动到此刻时, 左上方颗粒群被扬起, 而右下侧的颗粒群会短暂受压, 受几何体和搅拌叶片的约束, 右下侧颗粒群如固体般受压形变, 颗粒

群中各个单颗粒如晶格般抵制形变, 形成错综复杂的颗粒网, 犹如无序状态, 而此局部特征会使两色颗粒群有更多的接触碰撞, 进一步促进分层颗粒的混合; 而在图5(c)中出现的是颗粒群的滞留形态(图中黑色虚线框处), 叶片由图5(b)运动图5(c)处时, 一部分蓝色颗粒并没有在惯性作用下进入下落层, 而是滞留在坡顶位置, 这可能因切向速度过大, 部分颗粒沿壁面上抛, 下落后该部分颗粒落入与之分层的颗粒群内, 形成滞留, 该局部特征虽作用微弱, 但对混合均匀的进程起促进作用; 图5(d)描述的是对混合均匀起最大作用的局部特征: “小瀑布”混合, 这符合单颗粒轨迹体现出的“小瀑布”形态, 在颗粒流的右上侧, 达到最高点后, 颗粒运动形式发生改变, 开始向下滑动和滚动, 在下落层中出现明显的速度分层(图中矢量箭头的粗细代表颗粒速度大小), 颗粒体系在下落层中因速度大小不一, 出现相互剪切滑落, 促进了分层颗粒体系混合均匀进程.

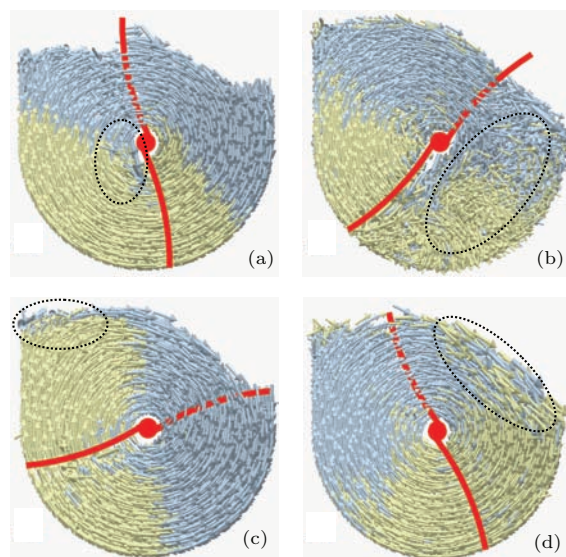


图5 转速为10 r/min下颗粒群四个时刻的运动矢量图 (a) 颗粒群在轴心的扩散运动; (b) 颗粒群在轴侧的无序特征; (c) 颗粒群在坡顶的滞留形态; (d) 颗粒群在下落层的“小瀑布”形态

Fig. 5. Motion vector diagram of particle swarm four time at rotating speed of 10 rpm: (a) diffusive motion of particle swarm in the shaft core; (b) unordered characteristics of particle swarm on the side of shaft; (c) retention form of particle swarm at the top of slope; (d) cascading form of particle swarm in the drop layer.

从图5发现, 除了局部混合特征外, 宏观颗粒运动方面, 颗粒的对流混合贯穿整个模拟体系, 对流混合是指在外界力的作用下, 颗粒团从一处移动到另一处, 发生宏观尺度的运动^[23]. 对流混合的混

合速度最快,能快速降低混合系统的不均匀度^[24],达到宏观上的混合.从蓝、灰分层颗粒系到终了的混合均匀系,每时刻都有两色颗粒团大位置的移动,只是在运动的后期,随着模拟体系混合均匀,宏观方面的对流运动被削弱.

综上所述对颗粒群运动的矢量图分析,分层颗粒体系正是在四种局部混合特征和贯穿整个模拟体系的宏观对流混合作用下完成径向的混合均匀.同时分析仿真过程发现,颗粒群的四种局部混合特征是周期性出现的,这种周期性的规律不仅印证了在分析单颗粒轨迹时提出的推断(颗粒群在运动过程中的宏观表征为以某些规律性的现象作周期性运动),而且也发现了颗粒群在U形罐体强制搅拌体系下出现的四种局部特征与转速无关,只与搅拌轴所处的位置有关.如图6和图7,虽然转轴叶片的转速提高,但四种局部特征也会出现,并且比较图5至图7,四种局部特征出现时,转轴所处的位置几乎相同.

至此通过分析单颗粒运动及颗粒体系的宏观运动矢量图可证实,单颗粒运动中体现出的随机性和规律性并存的现象会使宏观颗粒群出现周期性规律(四种局部混合特征)和终了径向颗粒均匀分布.

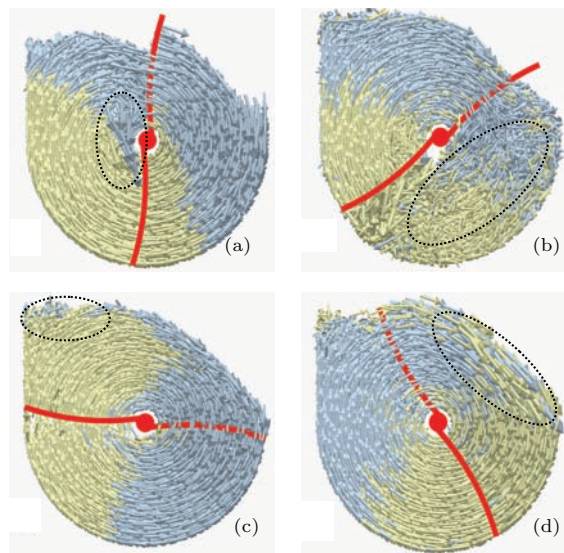


图6 转速为20 r/min下颗粒群四个时刻的运动矢量图 (a) 颗粒群在轴心的扩散运动; (b) 颗粒群在轴侧的无序特征; (c) 颗粒群在坡顶的滞留形态; (d) 颗粒群在下落层的“小瀑布”形态

Fig. 6. Motion vector diagram of particle swarm four time at rotating speed of 20 rpm: (a) diffusive motion of particle swarm in the shaft core; (b) unordered characteristics of particle swarm on the side of shaft; (c) retention form of particle swarm at the top of slope; (d) cascading form of particle swarm in the drop layer.

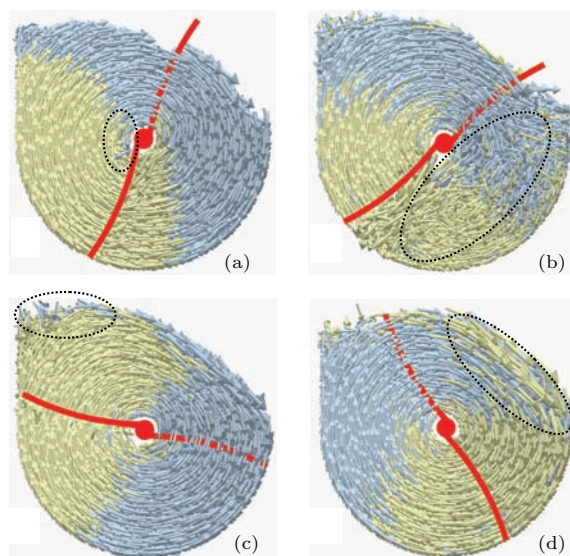


图7 转速为30 r/min下颗粒群四个时刻的运动矢量图 (a) 颗粒群在轴心的扩散运动; (b) 颗粒群在轴侧的无序特征; (c) 颗粒群在坡顶的滞留形态; (d) 颗粒群在下落层的“小瀑布”形态

Fig. 7. Motion vector diagram of particle swarm four time at rotating speed of 30 rpm: (a) diffusive motion of particle swarm in the shaft core; (b) unordered characteristics of particle swarm on the side of shaft; (c) retention form of particle swarm at the top of slope; (d) cascading form of particle swarm in the drop layer.

3.3 分层颗粒群混合过程的定量分析

在对颗粒流矢量运动图分析中发现,颗粒流的径向运动特征及形态不依赖于搅拌叶片转速的大小,而是和叶片轴运动位置密切相关.仿真结果得知,随着叶片轴的转速提高,混合速率增加,罐体内分层颗粒群达到均匀状态的时间缩短.同时获悉,在径向方向,当叶片轴转过的圈数相同时,三种转速下颗粒群的形态相近,这与Zhou在研究二组元颗粒在叶片搅拌式混合器中的运动分离现象结论相似^[25].故可假设颗粒流径向混合程度可由叶片轴转过的圈数表征.为定量分析混合程度,本文借鉴文献^[26]的方法,采用分离指数反映混合程度的变化.为得到颗粒体系在罐体径向的分离指数,在几何体XY面内划分了 5×8 个网格,如图8所示.每个网格作为一个样本,每个样本宽为14.3 mm,高为14.5 mm,厚为14 mm.但是,由于每个样本内的颗粒数相差很大,罐体上半部可能不含颗粒或样本覆盖在容器外部,故采用了加权方案来解决这一问题,含有较少颗粒的样本具有较小的权重,含有较多颗粒的样本具有较大的权重,如果样本网格内没有颗粒,那么其权重为零.计算单个样本*i*的

权重值 k_i 的公式如下:

$$S = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^{N_s} k_i (a_i - \bar{a})^2}, \quad (7)$$

$$k = \sum_{i=1}^{N_s} k_i, \quad (8)$$

$$k_i = N_i / N_t, \quad (9)$$

式中, N_s 为样本总数; a_i 为待测颗粒在样本 i 内的体积分数; \bar{a} 为相应颗粒在样本总数内的体积分数; N_i 为样本 i 内颗粒的总数; N_t 为所有样本内颗粒的总数; k_i 为单个样本 i 的权重. 据 (7)–(9) 式绘制出了叶片轴旋转圈数与分离指数的关系曲线, 如图 9 所示.

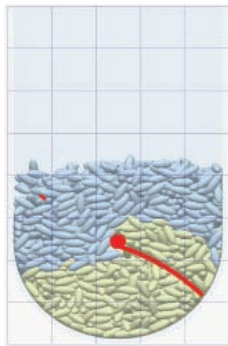


图 8 几何体 XY 面内 5×8 网格划分图

Fig. 8. 5×8 cell division diagram of geometry in XY plane.

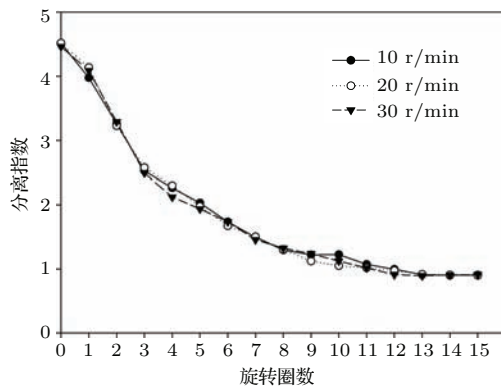


图 9 不同转速下分离指数随旋转圈数的变化

Fig. 9. Variation of separation index with revolutions at different rotating speeds.

分离指数可反应混合度的变化, 值越小代表混合越充分, 颗粒群分布越均匀. 图 9 中可明显看出, 三种转速下的曲线规律相同, 近乎重合; 圈数相等时, 分离指数值接近, 故在 U 形罐体内分层颗粒群的混合程度与叶片轴的旋转圈数有关. 从图 9 中也可看出, 分离指数随圈数的增加呈现先快速下降,

接着下降速率降低, 最后分离指数不再变化的趋势. 分析其原因, 分层颗粒群在叶片轴的带动下, 前 3 圈对流混合作用很明显, 颗粒团大范围移动, 两色颗粒团互相接触、渗透、碰撞剧烈, 故开始阶段分离指数下降很明显. 随着分层颗粒逐渐分布均匀, 对流混合作用被削弱, 这期间主要是四种局部混合周期性作用于积聚的颗粒团, 故分离指数下降速率降低. 最后分层颗粒已均匀分布, 故分离指数只有很小波动, 趋于定值.

在确定罐体内径向混合度与叶片旋转圈数的变化趋势后, 为进一步建立其数学模型, 本文采用 SigmaPlot 软件中 exponential growth 模型拟合了三种转速下分离指数与旋转圈数的数学关系. 数学模型如下:

$$S = s_0 + a \cdot e^{-bN}, \quad (10)$$

式中, S 为分离指数, N 为叶片轴旋转圈数, s_0 , a , b 分别为模型系数, 具体值如表 2 所示.

表 2 分离指数与旋转圈数关系的数学模型参数

Table 2. Mathematic model parameters of relation between separation index and revolutions.

转速/ $r \cdot \min^{-1}$	s_0	a	b	R^2
10	0.0756	0.3857	0.2311	0.9956
20	0.0714	0.3970	0.2327	0.9935
30	0.0740	0.3894	0.2368	0.9912

由表 2 可知, 各转速下采用数学模型 ((10) 式) 拟合后的方程决定系数 R^2 值都接近 1, 方程拟合优度较好, 表明该模型能很好的表征分离指数与旋转圈数的关系. 由于转速对混合程度影响甚微, 各转速下的模型系数接近. 为给 U 形混合器的操作带来理论指导, 文中采用均值 \pm 标准差的方法计算了不同转速下的模型系数的范围变化, 为模型的实际应用作出初探. 统一后分离指数与旋转圈数的表达式如下:

$$S = (0.0715 - 0.0758) + (0.3849 - 0.3965) \times e^{-(0.2306 - 0.2365)N}. \quad (11)$$

式 (11) 可以指导混合工艺在实践上的应用, 根据混合要求, 可以控制搅拌叶片旋转圈数来得到预期的混合效果.

4 结 论

本文采用离散单元法模拟分层颗粒群在 U 形罐体内搅拌均匀的过程. 研究不同转速下径向方向

的单颗粒轨迹变化特征,发现罐体内单颗粒的运动具有随机性的同时存在明显规律性;分层颗粒群的混合均匀过程正是全部单颗粒运动特征的宏观体现,通过颗粒群运动的宏观矢量图,明晰了分层颗粒群的混合均匀过程是在对流混合及四个分别命名为扩散运动、无序特征、滞留形态、“小瀑布”形态的局部混合共同作用下达到的;同时发现搅拌叶片的转速只影响混合速率,而混合程度是由叶片转过的圈数决定的,因而文中采用分离指数定量描述了分层颗粒群混合程度随旋转圈数的关系,建立的数学模型可为相关领域提供理论参考.

参考文献

- [1] Chan K W, Kwan A K H 2014 *particuology* **16** 108
- [2] Ouyang H W, Huang S C, Liu Z M, Wang Q 2009 *Rare Met. Mater. Eng.* **38** 1310 (in Chinese) [欧阳鸿武, 黄誓成, 刘卓民, 王琼 2009 稀有金属材料与工程 **38** 1310]
- [3] Khalilitehrani M, Abrahamsson P J, Rasmuson A 2014 *Powder Technol.* **263** 45
- [4] Abdul Q, Shi Q F, Liang X W, Sun G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034601
- [5] Cleary P W, 2013 *Powder Technol.* **248** 1035
- [6] Radl S, Brandl D, Heimbürg H, Glasser B J, Khinast J G 2012 *Powder Technol.* **226** 199
- [7] Zhao L L 2010 *Ph. D. Dissertation* (Xuzhou: China University of Mining And Technology) (in Chinese) [赵啦啦 2010 博士学位论文(徐州: 中国矿业大学)]
- [8] Demagh Y, Moussa H B, Lachi M, Noui S, Bordja L 2012 *Powder Technol.* **224** 260
- [9] Conway S L, Lekhal A, Khinast J G, Glasser B J 2005 *Chem. Eng. Sci.* **60** 7091
- [10] Lemieux M, Bertrand F, Chaouki J, Gosselin P 2007 *Chem. Eng. Sci.* **62** 1783
- [11] Kwapinska M, Saage G, Tsotsas E 2006 *Powder Technol.* **161** 69
- [12] Dubey A, Hsia H, Saranteas K, Brone D, Misra T, Muzzio F J 2011 *Chem. Eng. Sci.* **66** 5107
- [13] Grajales L M, Xavier N M, Henrique J P, Thomeo J C 2012 *Powder Technol.* **222** 167
- [14] Hou Q F, Dong K J, Yu A B 2014 *Powder Technol.* **256** 529
- [15] Chandratilleke C R, Yu A B, Bridgwater J 2012 *Chem. Eng. Sci.* **79** 54
- [16] Ren B, Shao Y J, Zhong WQ, Jin B S, Yuan Z L, Lu Yong 2012 *Powder Technol.* **222** 85
- [17] Wu D P, Li X X, Qin Q, Guan B, Zang Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098201 (in Chinese) [吴迪平, 李星祥, 秦勤, 管奔, 臧勇 2014 物理学报 **63** 098201]
- [18] Han Y L, Jia F G, Tang Y R, Liu Y, Zhang Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174501 (in Chinese) [韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 刘扬, 张强 2014 物理学报 **63** 174501]
- [19] Hu G M 2010 *Analysis and Simulation of Granular System by Discrete Element Method Using EDEM* (Wuhan: Wuhan University of Technology Press) p301 (in Chinese) [胡国明 2010 颗粒系统的离散元素法分析仿真(武汉: 武汉理工大学出版社) 第301页]
- [20] Wang R F, Li Z Y, Dou R B, Guo J Z 2013 *Trans. CSAM.* **44** 93 (in Chinese) [王瑞芳, 李占勇, 窦如彪, 郭建忠 2013 农业机械学报 **44** 93]
- [21] Mellmann J, 2001 *Powder Technol.* **118** 251
- [22] McCarthy J J, Khakhar D V, Ottino J M 2000 *Powder Technol.* **109** 72
- [23] Cisar S E, Ottino J M 2007 *AIChE J.* **53** 1151
- [24] Sudah O S, Coffin-Beach D, Muzzio F J 2002 *Powder Technol.* **126** 191
- [25] Zhou Y C, Yu A B, Bridgwater J 2003 *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **78** 187
- [26] Gao H L, Chen Y C, Zhao Y Z, Zheng J Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124501 (in Chinese) [高红利, 陈友川, 赵永志, 郑津洋 2011 物理学报 **60** 124501]

Numerical simulation on stirring motion and mixing characteristics of ellipsoid particles*

Liu Yang Han Yan-Long Jia Fu-Guo[†] Yao Li-Na Wang Hui Shi Yu-Fei

(Department of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

(Received 16 September 2014; revised manuscript received 6 December 2014)

Abstract

To investigate the motion characteristics and the law of identical property for particles obtained under segregation to uniform distribution conditions in forced agitation mixing, the mixing process of the same sized ellipsoidal particles at different rotating speeds in a U-tank is simulated using three-dimensional discrete element method. Macroscopic mixing law and partial mixing characteristics in particle mixing process are analysed in the view of single particle random motion trajectory and motion vector diagram of macroscopic particle flow. And the mathematical relation between mixability and revolutions of agitating blades is described quantitatively. Results show that convective mixing and four partial mixing characteristics control the mixing homogeneity process of identical property of segregation particles in forced agitation mixing. Mixability of segregation particles is independent of rotating speed of the agitating shaft, but has a direct correlation with revolutions. The relation between mixability and revolutions agrees with the exponential growth model. Research results can provide the basis and reference for equipment improvement and operating control of bulk material in the industry of the augmenting of mix.

Keywords: ellipsoid particles, mixing characteristics, three-dimensional discrete element, numerical simulation

PACS: 45.70.Mg, 02.60.Cb, 83.10.Rs

DOI: 10.7498/aps.64.114501

* Project supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. E201322), the Harbin Foundation for Outstanding Academic Leaders, China (Grant No. RC2013XK006004), the Modern Agricultural Equipment Technology Key Laboratory Open Project Funding of Northern Cold Region, China (Grant No. 548008), and the Application of Technology Research and Development Project of Harbin, China(Grant No. 2013DB2BG005).

[†] Corresponding author. E-mail: jfg204@163.com