

引用格式: 石利彤, 姚山. 复合粉体混合过程的离散元建模仿真[J]. 中国材料进展, 2025, 44(9): 854-861.

SHI L T, YAO S. Modeling and Simulation of Heterogeneous Powder Mixing Process Based on Discrete Element Method[J]. Materials China, 2025, 44(9): 854-861.

## 复合粉体混合过程的离散元建模仿真

石利彤, 姚山

(大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 复合粉体的制备被很多领域的研究人员所重视, 为了研究密度差异较大的异质粉体机械混合特性, 采用离散元法对密度不同的硅砂、石墨、酚醛树脂粉体颗粒的机械混合进行研究。建立了两种混合机理不同的混合机模型、粉体颗粒模型以及 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型, 通过实验与仿真相结合的方式测量并标定颗粒间的接触参数, 分析粉体颗粒在混合过程中的受力情况、运动轨迹、速率分布、颗粒碰撞数以及混合均匀性, 并通过实验验证仿真模型的可靠性。研究发现, 受自身重力, 搅拌桨、其他颗粒和搅拌桶的碰撞及摩擦力的作用, 粉体颗粒在混合机中的运动与实际相符, 单螺旋锥形混合机更适合密度相差较大的硅砂、石墨与酚醛树脂粉体间的混合, 在混合 18 s 后相对标准偏差可达到 0.122。通过两种混合机的混合实验和统计计算粉体的相对标准偏差验证了模型的可靠性, 相对标准偏差小于 0.13 时的混合时间的绝对偏差  $\leq 2$  s。

**关键词:** 复合粉体; 异质; 离散元; 混合方式; 混合均匀性

**中图分类号:** TB115; TQ051.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)09-0854-08

## Modeling and Simulation of Heterogeneous Powder Mixing Process Based on Discrete Element Method

SHI Litong, YAO Shan

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The preparation of composite powders has been highly valued by researchers in many fields. In order to study the mechanical mixing characteristics of heterogeneous powders with significant density differences, the discrete element method was used to study the mechanical mixing of silica sand, graphite and phenolic resin powder particles with different densities. Two kinds of mixer models with different mixing mechanisms, powder particle model and Hertz-Mindlin with JKR contact model were established. The contact parameters between particles were measured and calibrated by combining experiment and simulation. The force of powder particles in the mixing process, the motion trajectory, the rate distribution, the number of particle contacts and the mixing uniformity were analyzed, and the reliability of the simulation model was verified by experiments. Research has found that the movement of powder particles in the mixer is consistent with the reality under the force of its own gravity, collision and friction of stirring paddle, other particles and mixing barrel. The single spiral conical mixer is more suitable for mixing silica sand, graphite and phenolic resin powder with large density difference, and the relative standard deviation reaches 0.122 after 18 s. The reliability of the model is verified by the mixing experiments of two kinds of mixers and the relative standard deviation of powder calculated statistically. The absolute deviation of the mixing time is less than or equal to 2 s when the relative standard deviation is less than 0.13.

**Key words:** composite powder; heterogeneity; discrete element method; mixing method; mixing uniformity

### 1 前言

多组元复合粉体广泛应用于医学、化工、食品、农业、增材制造等领域<sup>[1-6]</sup>。复合粉体的制备有很多方式, 其中机械混合的效率最高、应用最广泛, 但粉体混合过程具有十分复杂的运动学、力学行为, 粉体在混合机内的运动方式、流动性、形状、粒度分布、堆积状态等都

收稿日期: 2024-03-04 修回日期: 2024-04-01

第一作者: 石利彤, 女, 1998年生, 硕士研究生

通讯作者: 姚山, 男, 1966年生, 教授, 博士生导师,

Email: yaoshan@dlut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202403002

影响着复合粉体的混合均匀性。在实验研究中很难对粉体颗粒的运动及力学行为进行分析，因此需要通过建模仿真等方式对其混合机理进行深入探讨。

目前，离散元仿真技术已经成为研究离散颗粒相关问题的主流方式<sup>[7-12]</sup>。离散元法把研究对象看成一系列独立运动的离散粒子的集合，采用离散元模拟软件 EDEM 进行数值模拟可以突破实验的限制，对每个时刻、每个颗粒的运动及受力情况进行观察分析。宣颖等<sup>[13]</sup>对除颜色外完全相同的聚甲基丙烯酸甲酯颗粒的混合进行了建模仿真，研究了直叶桨式粉体混合机搅拌过程、搅拌速度、桨叶直径和数目对搅拌功率、扭矩的影响及功率计算公式，但没有具体分析颗粒运动及混合均匀性。叶广朋等<sup>[14]</sup>对双螺杆混合机进行建模仿真，但研究中两种颗粒密度相近。张卫锋等<sup>[15]</sup>建立了炭黑等粉体物料的颗粒模型与 Hertz 接触力-位移模型，但没有考虑到颗粒间的粘附力。

在现阶段的模拟研究中绝大多数都是粒径、密度等相近的粉体间混合，且忽略了混合过程中颗粒间的粘附力。增材制造中制备砂型的复合粉体中不同粉体间的密度差异往往较大，并且粉体颗粒粒径较小，分子间的作用力明显，经典 Hertz 接触力-位移模型并不能很好地描述粉体间的混合。因此本文基于离散元法建立密度差异较大的硅砂、酚醛树脂、石墨的颗粒模型以及 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型、粉体混合模型，通过实验与仿真相结合的方式测量并标定颗粒间的接触参数，并考虑颗粒间粘附力，研究粉体混合时的运动过程及混合均匀性，从而提高数值模拟应用在机械混合上的准确性和可靠性，完善粉体混合过程中的颗粒运动理论，为机械混合制备复合粉体的进一步研究提供理论依据。通过对比两种不同混合机条件下的颗粒运动参数和均匀性的研究，找到更适合增材制造用复合粉体混合的混合方式。

## 2 离散元建模的理论基础

接触模型是离散单元法的核心，也是离散元仿真软件的基础，其选取对分析结果的准确性有较大影响<sup>[16]</sup>。考虑到干燥的石墨、树脂在宏观上表现出一定的粘附性，因此选择适用于模拟粘性系统的 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型。图 1 为颗粒接触模型图，主要由弹簧(k)、阻尼器(c)和滑动器(μ)组成，C 表示耦合器，其作用是引入颗粒配对关系，不计入计算。

当颗粒 *i* 和颗粒 *j* 接触时，两颗粒间的法向接触力  $F_n$ 、切向重叠量  $\delta$  表示为<sup>[17]</sup>：

$$F_n = \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 - 4 \sqrt{\pi \gamma E^* \alpha^3} \quad (1)$$

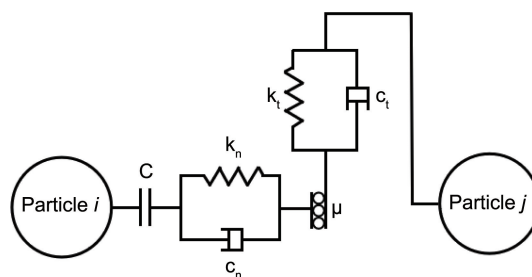


图 1 颗粒接触模型图

Fig. 1 Particle contact model diagram

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} \left( 1 - \sqrt{\frac{4\pi\gamma R^{*2}}{E^* \alpha^3}} \right) \quad (2)$$

式中， $E^*$  为等效弹性模量，Pa； $R^*$  为等效颗粒半径，m； $\alpha$  为两颗粒接触半径，m； $\gamma$  为颗粒表面能，J/m<sup>2</sup>。

粉体颗粒会在混合的过程中受到多种力的相互作用，从而影响颗粒间的混合均匀性和粘附力，由图 2 可知颗粒受到的合力  $F$  与合力矩  $T$  分别为：

$$\sum F = F_g + F_\omega + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,j} + F_{t,j}) \quad (3)$$

$$\sum T = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{t,j} + T_{r,j}) \quad (4)$$

式中， $F_g$  为颗粒重力，N； $F_\omega$  为颗粒所受到的离心力，N； $F_{n,j}$  为颗粒 *i* 受到颗粒 *j* 的法向接触力，N； $F_{t,j}$  为颗粒 *i* 受到颗粒 *j* 的切向接触力，N； $T_{t,j}$  为颗粒 *i* 受到颗粒 *j* 的切向接触力矩，N·m； $T_{r,j}$  为颗粒 *i* 受到颗粒 *j* 的摩擦力矩，N·m； $n_i$  为与颗粒 *i* 接触的颗粒总数，个。

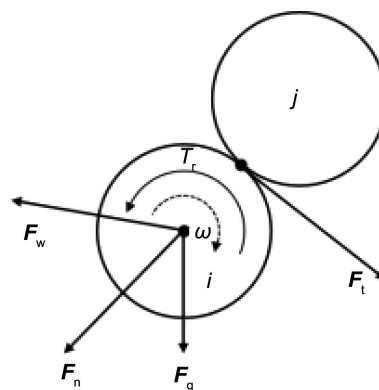


图 2 粉体颗粒受力分析图

Fig. 2 Force analysis diagram of powder particles

## 3 离散元模型建立

### 3.1 模型假定

对模型作以下假定：

- (1) 颗粒表面光滑；
- (2) 颗粒混合过程中不会破碎；
- (3) 颗粒间由于水分、静电效应和范德华力而体现

的粘附力由表面能体现,并且在混合过程中保持不变;

(4) 颗粒在混合过程中混合环境的温度、湿度等不变。

### 3.2 仿真参数

硅砂( $\text{SiO}_2$ )、石墨(C)、酚醛树脂(PF)3种颗粒的

本征参数如表 1 所示<sup>[17-21]</sup>。

同时通过休止角实验与仿真模拟相结合的方式对粉体颗粒进行离散元接触参数校准<sup>[19]</sup>,得到 3 种粉体颗粒的接触参数,如表 2 所示。

表 1 颗粒本征参数<sup>[17-21]</sup>

Table 1 Particle intrinsic parameters<sup>[17-21]</sup>

	True density/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Bulk density/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Poisson's ratio	Shear modulus/Pa
$\text{SiO}_2$	2680	1450	0.25	$5 \times 10^6$
C	2250	920	0.16	$2 \times 10^7$
PF	1400	414	0.35	$2 \times 10^6$
Equipment	7850	—	0.3	$8 \times 10^{10}$

表 2 颗粒接触参数

Table 2 Particle contact parameters

	$\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{SiO}_2\text{-C}$	$\text{SiO}_2\text{-PF}$	$\text{SiO}_2\text{-E}$	C-C	C-PF	C-E	PF-PF	PF-E
COR	0.5	0.4	0.35	0.5	0.3	0.25	0.3	0.19	0.19
C	0.55	0.325	0.4	0.5	0.1	0.175	0.075	0.25	0.19
R	0.085	0.085	0.085	0.05	0.085	0.085	0.01	0.085	0.01
ISE	0.8	0.738	0.675	0	0.675	0.613	0	0.55	0

Notes: E represents equipment; COR represents coefficient of restitution; C represents coefficient of static friction; R represents coefficient of rolling friction; ISE represents interface surface energy

### 3.3 混合机模型建立

利用 Solidworks 软件建立混合机三维模型。图 3a 为直桨式混合机,可看出搅拌桨相对于搅拌桶偏心,在搅拌过程中,搅拌桨绕中心轴 1 逆时针旋转,搅拌桶绕中心轴 2 顺时针旋转。图 3b 为单螺旋锥形混合机,螺旋桨绕中心轴按逆时针旋转。

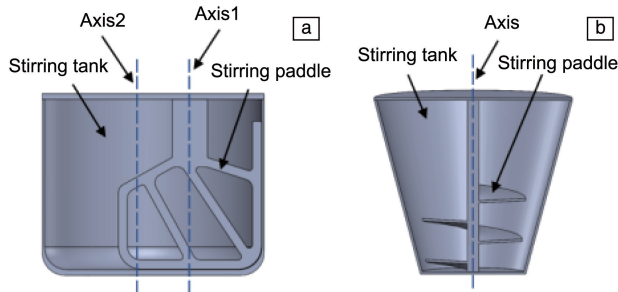


图 3 混合机三维模型: (a) 直桨式混合机, (b) 单螺旋锥形混合机  
Fig. 3 3D model of mixer: (a) straight blade mixer, (b) single spiral conical mixer

## 4 混合过程分析

### 4.1 颗粒运动轨迹分析

#### 4.1.1 直桨式混合机

直桨式混合机内 3 种颗粒的运动轨迹如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,当混合机启动后,颗粒受搅拌桨的碰撞后被击飞,又由于颗粒与器壁碰撞加上自身重力作用快速沉降下来,随后跟随着桶体的转动绕旋转中心做顺时针圆周运动,旋转中心位于桶体与搅拌桨旋转中心连线左侧。位于搅拌桨与桶体接触位置附近的颗粒,由于搅拌桨与壁面距离较近,颗粒被搅拌桨反向击飞向上运动,颗粒落下后受顺时针旋转的颗粒撞击,随其余颗粒进行顺时针圆周运动。在做圆周运动的同时,因搅拌桨与其他颗粒的共同作用,使得颗粒的运动趋势呈螺旋上升或下降,从而实现颗粒的对流混合。

从图 4 正视图中可以分别看出硅砂颗粒运动主要集中在桶体下半部分,石墨颗粒运动集中在中下方,酚醛树脂颗粒运动轨迹遍布整个桶体,这是由于硅砂颗粒密度最高,酚醛树脂颗粒密度最低,根据动量守恒定律可知,低密度颗粒在受到撞击时速率更大,向上运动距离更长。

#### 4.1.2 单螺旋锥形混合机

单螺旋锥形混合机内不同颗粒的运动轨迹如图 5 所示,从图中可以看出当颗粒落到螺旋桨上时,随着桨的转动呈螺旋下降的运动趋势。当颗粒下降到底部时,受到桶底及桶体内圈颗粒的反作用力,在桨与桶的间隙中呈螺旋上升式运动。当颗粒上升到粉体最顶端时,由于继续受向上的力却无法继续向上,使得颗粒向桶体内圈

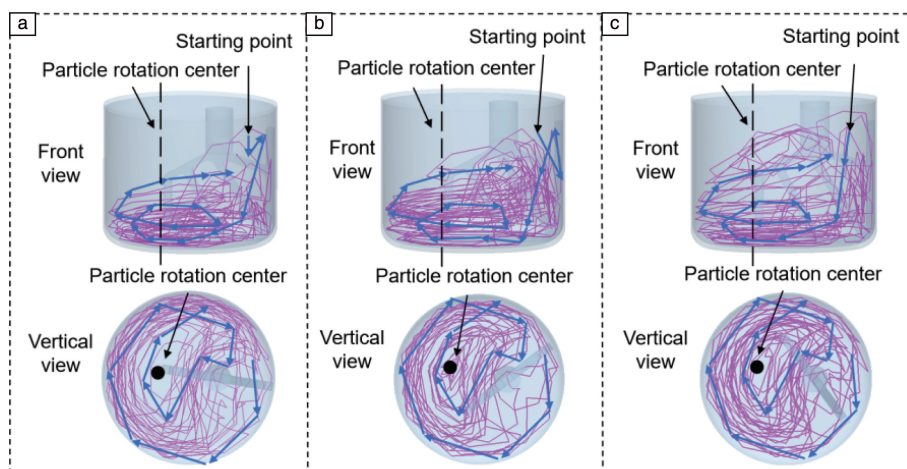


图 4 直桨式混合机内不同颗粒运动轨迹：(a) 硅砂，(b) 石墨，(c) 酚醛树脂

Fig. 4 Different particles motion trajectory in a straight blade mixer: (a) silica sand, (b) graphite, (c) phenolic resin

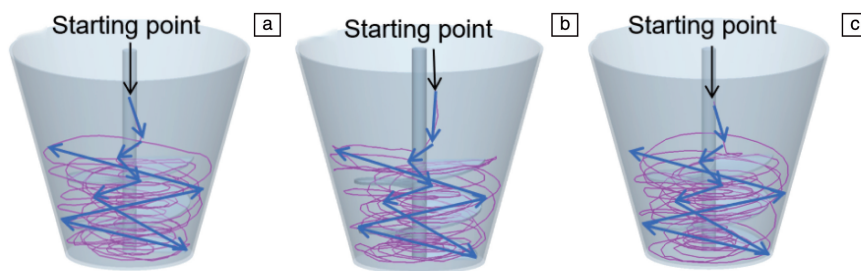


图 5 单螺旋锥形混合机内不同颗粒运动轨迹：(a) 硅砂，(b) 石墨，(c) 酚醛树脂

Fig. 5 Different particles motion trajectory in a single spiral conical mixer: (a) silica sand, (b) graphite, (c) phenolic resin

滚落并重新掉落至搅拌桨上。如此循环往复，实现颗粒间的混合。

## 4.2 粉体颗粒流场分析

### 4.2.1 直桨式混合机

粉体颗粒在直桨式混合机内不同时刻的流场如图 6 所示。位于桶体底部边缘且远离搅拌桨部分的颗粒速率较快，大于 0.4 m/s，这是由于颗粒随桶体顺时针旋转且不受搅拌桨反向力。在 39.6 s 时，被搅拌桨反向击飞的

颗粒速率大于 0.4 m/s，是由于颗粒受到的搅拌桨反向力大于颗粒顺时针运动的力，使得颗粒被击飞，被击飞的颗粒在桶体上半部分没有与其他颗粒的碰撞。由于旋转中心桶体线速率较小，且受到搅拌桨反作用力，旋转中心颗粒速率较慢，小于 0.1 m/s。颗粒圆周运动的旋转中心没有位于桶体的旋转中心是因为桶体旋转中心位置受搅拌桨反向作用，导致中心偏移，一定程度改善了因离心作用产生的颗粒偏析。

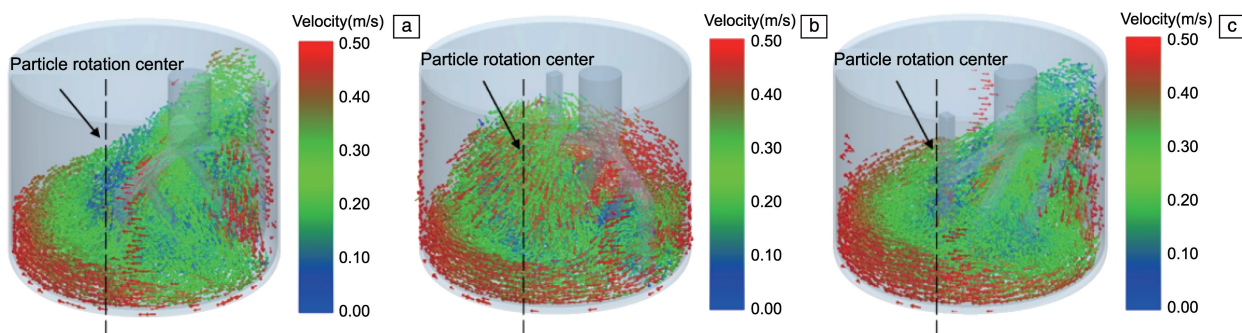


图 6 直桨式混合机内不同时刻颗粒流场：(a) 39.4 s，(b) 39.6 s，(c) 39.8 s

Fig. 6 Particles flow field at different time points in a straight blade mixer: (a) 39.4 s, (b) 39.6 s, (c) 39.8 s

#### 4.2.2 单螺旋锥形混合机

粉体颗粒在单螺旋锥形混合机内不同时刻的流场如图 7 所示, 颗粒运动速率以桨叶表面为基准向外发散, 桨叶表面颗粒运动速率最快, 大于 0.17 m/s, 越远离桨叶速率越慢, 由 0.2 逐渐减小至 0.05 m/s, 这是由于远

离桨叶的颗粒只受其他颗粒的碰撞, 而桨叶旋转所产生的力通过颗粒逐层向外传递。在上下桨叶之间的颗粒运动方向相同, 形成湍流区; 桨叶间与桨叶和桶体之间的颗粒反向运动, 形成对流区。

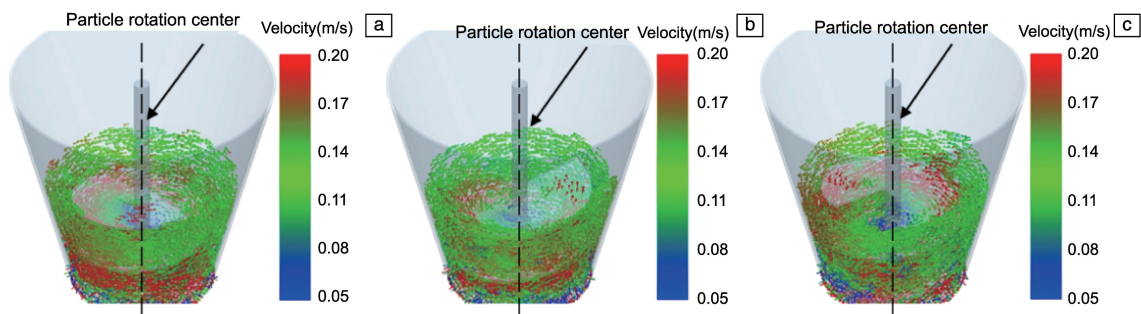


图 7 单螺旋锥形混合机内不同时刻颗粒流场: (a)39.0 s, (b)39.2 s, (c)39.6 s

Fig. 7 Particles flow field at different time points in a single spiral conical mixer: (a)39.0 s, (b)39.2 s, (c)39.6 s

### 4.3 颗粒接触数分析

#### 4.3.1 直桨式混合机

从图 8a 中可以看出, 在 0.1 s 前随着颗粒的生成, 颗粒接触数迅速增加。0.1 s 后颗粒全部生成且混合机开始工作。由 3.2 节可知在搅拌桨边缘靠近桶体时, 由于搅拌桨反向运动及桶体的约束, 颗粒被击飞, 速率增大且接触数也增多, 0.2 s 时颗粒接触数达到第一个峰值, 为 35 181 次。总颗粒接触数在 0.1 s 混合机开始工作后就在 35 000 次上下达到动态稳定。搅拌桨在 10 s 内旋转 12.5 圈, 每圈搅拌桨两个边缘分别接触一次桶壁, 对应图中 25 个峰值。

从图 8b 中可以看出, 硅砂生成后产生石墨颗粒, 石

墨堆积在硅砂上方, 硅砂与石墨接触数开始增多, 0.1 s 后石墨颗粒随着混合机旋转逐渐运动到硅砂粉体的缝隙中, 使得硅砂与石墨间的接触数继续增多, 6 s 后在 7500 次上下达到动态稳定。石墨生成后产生酚醛树脂颗粒, 酚醛树脂颗粒堆积在石墨颗粒上, 两颗粒间接触数最多, 但随着混合过程持续进行, 石墨、酚醛树脂分散在硅砂颗粒间, 由于石墨、酚醛树脂颗粒数较少, 所以两颗粒间接触数减少, 8 s 后在 1400 次上下达到动态稳定。由于石墨的阻挡, 在 0.1 s 前硅砂与酚醛树脂接触数很小, 当 0.1 s 后混合机开始旋转, 酚醛树脂逐渐运动到硅砂粉体缝隙间, 硅砂与酚醛树脂间接触数缓慢增加, 10 s 后在 6000 次上下波动呈动态稳定。

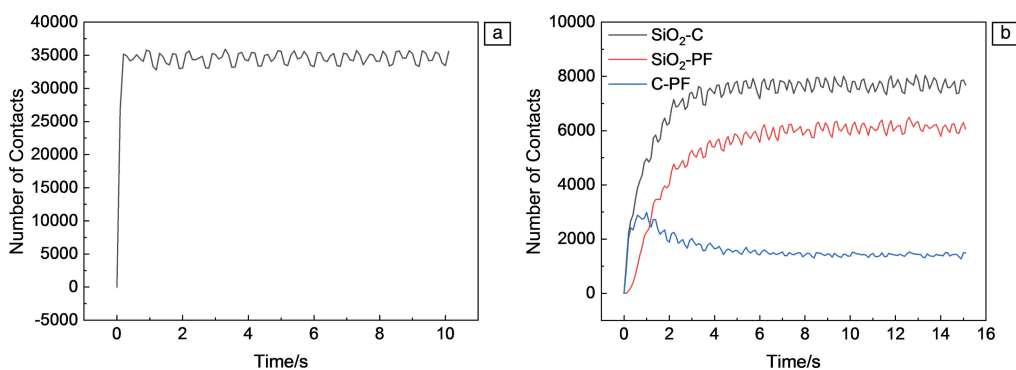


图 8 直桨式混合机内接触数随时间变化曲线: (a)总接触数, (b)不同粉体间接触数

Fig. 8 Curves of contact number in a straight blade mixer as a function of time: (a) total contact number, (b) contact number between different powders

#### 4.3.2 单螺旋锥形混合机

从图 9a 中可以看出, 在 0.1 s 前随着颗粒的生成, 接触数随颗粒数量的增加而增加。0.1 s 后颗粒全部生成且桶体与搅拌桨开始旋转, 由于桨叶的阻挡, 桨叶下方

未充满颗粒。颗粒随着桨叶的旋转逐渐填充至桨叶下方, 从而使总接触数继续增加, 1 s 时填充完全, 接触数到达第一个峰值, 为 46 080 次, 桨叶间颗粒与桨叶和壁面间颗粒在整个过程中存在持续的对流, 所以总接触数的波

动幅度相对较小，颗粒碰撞数 1 s 后在 50 000 次上下波动。

由图 9b 计算结果可以看出 3 种颗粒间接触数随时间变化的相对趋势与直桨混合机相似，但颗粒在锥形混合

机内堆积更加紧密，因此接触数要高于在直桨混合机内。硅砂与石墨碰撞数在 14 s 后达到 9300 次左右，硅砂与酚醛树脂碰撞数 18 s 后在 7500 次上下达到动态稳定，石墨与酚醛树脂碰撞数 10 s 后在 1850 次上下波动。

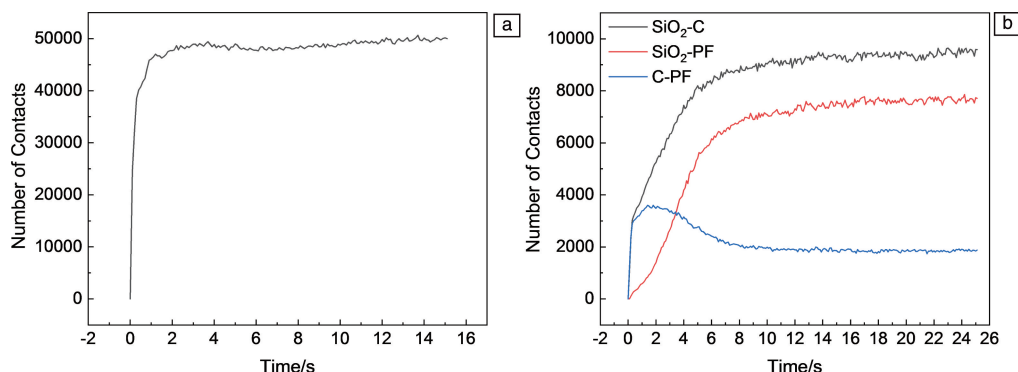


图 9 单螺旋锥形混合机内接触数随时间变化曲线：(a)总接触数，(b)不同粉体间接触数

Fig. 9 Curves of contact number in a single spiral conical mixer as a function of time: (a) total contact number, (b) contact number between different powders

#### 4.4 混合均匀性分析

将硅砂、石墨和酚醛树脂按质量比 10:2:1 进行混合，转速为 7.85 rad/s。在后处理中，对颗粒进行着色，以不同颜色区分。由于混合机形状较为复杂，直接对混合机建立 Grid Bin Group 不利于统计计算，因而混合完成后将粉体颗粒倒入 90 mm×90 mm×90 mm 的正方体盒子中，对正方体盒子建立 Grid Bin Group 取样后进行统计分析，如图 10 所示。

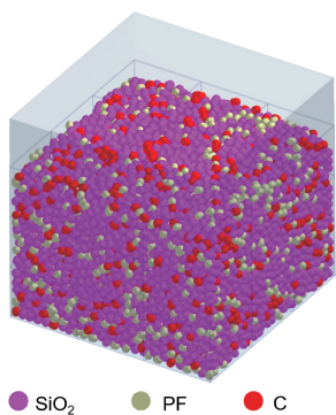


图 10 取样网格群

Fig. 10 Sampling grid group

工业混合过程较难达到理想混合状态，一般颗粒体系的相对标准偏差 (relative standard deviation, RSD) 为 0.13，则混合器空间内颗粒分布是近乎完全均匀的<sup>[18]</sup>。两种混合方式的 RSD 如图 11 所示，从图中可以看出，直桨混合机在混合硅砂与石墨时效率很高，在 6 s 时即可达到要求，但是对于硅砂与酚醛树脂的混合在 30 s 时才

可以达到要求。单螺旋锥形混合机在混合硅砂与酚醛树脂时效率高于直桨式混合机，混合 18 s 后即可达到要求。

由 4.1 与 4.2 节可知，直桨混合机在混合过程中由于搅拌桨与桶体旋转方向相反，颗粒随桶体顺时针旋转时被高速旋转的搅拌桨反向击飞，因此可以更快地使颗粒混合均匀，但根据动量守恒定律，密度越小，被搅拌桨撞击时获得更快的速率，从而使得小密度颗粒运动轨迹范围更大，且难以混合均匀。单螺旋锥形混合机在整个混合过程中均存在对流混合区，使颗粒运动相对规律，混合质量更加稳定。

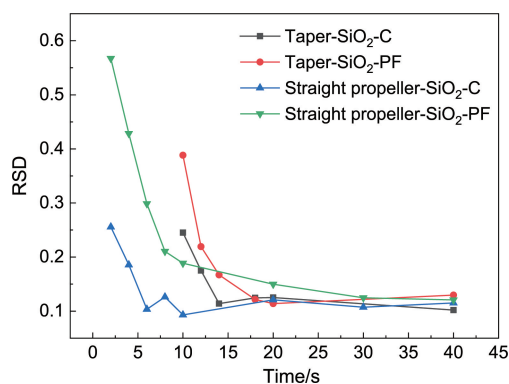


图 11 硅砂、石墨、酚醛树脂颗粒混合不同时间下相对标准偏差

Fig. 11 Relative standard deviation of silica sand, graphite and phenolic resin particles mixed at different time

#### 4.5 实验验证

为了验证仿真模拟的准确性，使用直桨式混合机和单螺旋锥形混合机对硅砂、石墨、酚醛树脂按质量比 10:2:1 进行混合，取样并通过影像测量仪对样品

拍照, 统计并计算 RSD, 取样统计过程如图 12 所示。

在混合不同时间时取样, 将样品平铺在影像测量仪样品台上, 在样品上随机选取 5 个位置进行拍照, 对照

片中的颗粒进行统计, 黑色为石墨颗粒、黄色为树脂颗粒, 统计完成后计算 RSD, 如图 13 所示。

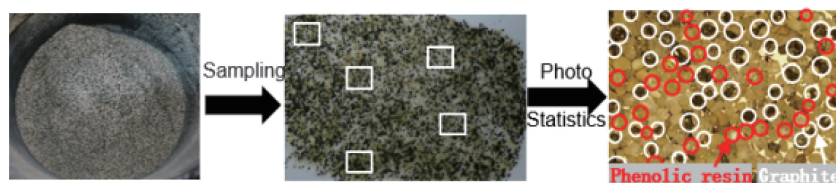


图 12 取样统计流程

Fig. 12 Sampling statistical process

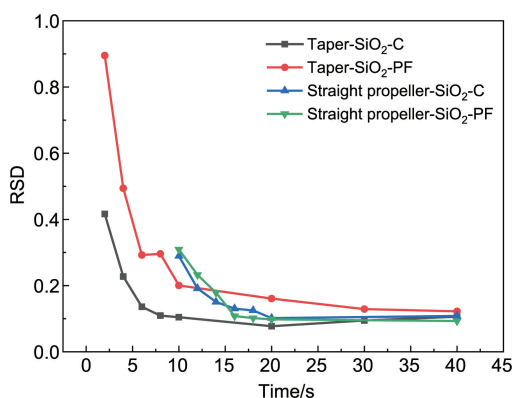


图 13 硅砂、石墨、酚醛树脂颗粒混合不同时间下相对标准偏差

Fig. 13 Relative standard deviation of silica sand, graphite and phenolic resin particles mixed at different time

从图 13 中可以看出直桨混合机在混合硅砂与石墨时混合效率很高, 在 8 s 时 RSD 为 0.109, 但是对于硅砂与酚醛树脂的混合在 30 s 时 RSD 为 0.122。单螺旋锥形混合机在混合硅砂与酚醛树脂时效率高于直桨式混合机, 混合 16 s 后 RSD 为 0.108。实验与模拟所得的粉体 RSD 随混合时间的变化趋势相同, 满足 RSD 时的混合时间的绝对偏差小于等于 2 s, 说明模拟结果具有一定的可靠性。

## 5 结论

本文成功建立了针对密度差异较大的粉体之间的混合的离散元模拟模型, 通过实验与模拟相结合的方式确定了粉体间的接触参数, 并考虑颗粒间粘附力。分析了两种混合机中颗粒运动机理及硅砂、石墨与酚醛树脂粉体颗粒间混合均匀性。单螺旋锥形混合机更适合密度相差较大的硅砂、石墨与酚醛树脂粉体间的混合, 在 18 s 后相对标准偏差可达到 0.122。通过两种混合机的混合实验并统计计算粉体的相对标准偏差验证模型的可靠性, 相对标准偏差小于 0.13 时的混合时间的绝对偏差小于等于 2 s。

## 参考文献 References

- [1] YASUNORI M, KAORU M, TOMONOBU U, *et al.* Chemical and Pharmaceutical Bulletin[J], 2014, 62(4): 322-327.
- [2] VASQUEZ E, GIROUX P F, LOMELLO F, *et al.* Powder Technology[J], 2020, 360: 998-1005.
- [3] 王长顺, 吴思琪, 闫春泽, 等. 科学通报[J], 2022, 67(11): 1137-1154.  
WANG C S, WU S Q, YAN C Z, *et al.* Chinese Science Bulletin [J], 2022, 67(11): 1137-1154.
- [4] 杨家懿, 朱伟, 史云松, 等. 高分子材料科学与工程[J], 2017, 33(6): 184-190.  
YANG J Y, ZHU W, SHI Y S, *et al.* Polymer Materials Science & Engineering[J], 2017, 33(6): 184-190.
- [5] 王江, 刘凯, 孙华君, 等. 材料科学与工艺[J], 2018, 26(2): 9-14.  
WANG J, LIU K, SUN H J, *et al.* Materials Science and Technology[J], 2018, 26(2): 9-14.
- [6] 王雪岩, 贺俊超, 钟磊, 等. 特种铸造及有色合金[J], 2022, 42(5): 636-642.  
WANG X Y, HE J C, ZHONG L, *et al.* Special Casting & Nonferrous Alloys[J], 2022, 42(5): 636-642.
- [7] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 农业机械学报[J], 2023, 54(12): 58-69.  
CHEN Y, GAO X X, JIN X, *et al.* Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery[J], 2023, 54(12): 58-69.
- [8] 史玉鹏, 薛博, 臧传江, 等. 农业机械学报[J], 2023, 54(S1): 103-114.  
SHI Y P, XUE B, ZANG C J, *et al.* Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery[J], 2023, 54(S1): 103-114.
- [9] MOLINARI M, CALANCA V, GALLI C, *et al.* Science[J], 2003, 299(5611): 1397-1400.
- [10] ODA Y, HOSOKAWA N, WADA I, *et al.* Science[J], 2003, 299(5611): 1394-1397.
- [11] ERIKSSON K K, VAGO R, CALANCA V, *et al.* Journal of Biological Chemistry[J], 2004, 279(43): 44600-44605.
- [12] XU Y, ZHANG X, WU S, *et al.* International Journal of Agriculture-

- al and Biological Engineering[J], 2020, 13(6): 227-235.
- [13] 宣颖, 刘雪东, 周成奇, 等. 化工进展[J], 2021, 40(7): 3598-3607.  
XUAN Y, LIU X D, ZHOU C Q, *et al.* Chemical Industry and Engineering Progress[J], 2021, 40(7): 3598-3607.
- [14] 叶广朋, 刘振峰, 周国发. 中国粉体技术[J], 2021, 27(4): 130-137.  
YE G P, LIU Z F, ZHOU G F, *et al.* China Powder Science and Technology[J], 2021, 27(4): 130-137.
- [15] 张卫锋, 张福霞, 汪传生, 等. 材料科学与工艺[J], 2018, 26(2): 84-89.  
ZHANG W F, ZHANG F X, WANG C S, *et al.* Materials Science and Technology[J], 2018, 26(2): 84-89.
- [16] ZHANG S, ZHAO H, WANG X, *et al.* Computers and Electronics in Agriculture[J], 2023, 204: 107519.
- [17] 张帅, 单忠德, 张杰. 铸造技术[J], 2016, 37(2): 288-291.  
ZHANG S, SHAN Z D, ZHANG J. Foundry Technology[J], 2016, 37(2): 288-291.
- [18] 何平, 王丛洋, 范益伟, 等. 塑料工业[J], 2021, 49(2): 155-160.  
HE P, WANG C Y, FAN Y W, *et al.* China Plastics Industry[J], 2021, 49(2): 155-160.
- [19] 谢楠. 基于 CFD-DEM 的膨胀石墨气固两相流动特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.  
XIE N. Research on the Gas-Solid Flow Characteristic of Expanded Graphite Based on CFD-DEM[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [20] 周帅帅, 李静, 杨浩, 等. 中国粉体技术[J], 2022, 28(2): 87-98.  
ZHOU S S, LI J, YANG H, *et al.* China Powder Science and Technology[J], 2022, 28(2): 87-98.
- [21] LI S, ZHANG B, YANG L, *et al.* Machines [J], 2023, 11(4): 463.