

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80595

三维运动混合机内食品颗粒混合效果数值模拟

程月峰¹ 孟兆新¹ 王孟刚² 沙宇峰²

(1. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
2. 哈尔滨纳诺机械设备有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: [目的] 探究三维运动混合机在混合过程中不同主动轴转速和料筒形状对食品颗粒混合效果的影响。[方法] 利用三维软件对三维运动混合机进行简化建模, 通过 ADAMS-EDEM 耦合的方法, 分别对不同转速和料筒形状进行仿真模拟和分析。[结果] 提高转速可以显著提高混合效果和混合效率, 但当转速相对较高时, 再提高转速对提高混合效果不再明显; 相较于其他料筒形状, 正方形料筒的混合效果相对较好, 椭圆形料筒的混合效果相对较差; 且当离散系数 ≤ 0.2 时, 转速 12 r/min 的混合效率相对于转速 8, 10 r/min 的分别提高了约 33%, 66%, 正方形料筒较椭圆形料筒的混合效率提高了约 100%。[结论] 利用仿真模拟的方法可以有效地分析三维运动混合机内食品颗粒的混合情况。

关键词: 三维运动混合机; ADAMS-EDEM 耦合; 食品颗粒; 混合效果; 离散系数

Numerical simulation of food particle mixing effect in three-dimensional motion mixer

CHENG Yuefeng¹ MENG Zhaoxin¹ WANG Menggang² SHA Yufeng²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;
2. Harbin Nanuo Machinery Equipment Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150078, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different active shaft speeds and barrel shapes on the mixing performance of food particles in a three-dimensional motion mixer. [Methods] Simplified modeling of the three-dimensional motion mixer was performed using 3D software. Simulation and analysis were conducted for different speeds and barrel shapes through the ADAMS-EDEM coupling method. [Results] Increasing the speed could significantly improve the mixing effect and efficiency. However, when the speed was relatively high, further increasing the speed did not significantly enhance the mixing effect. Among various barrel shapes, the square barrel showed relatively better mixing performance, while the elliptical barrel showed relatively poorer performance. Additionally, when the dispersion coefficient was less than or equal to 0.2, the mixing efficiency at 12 r/min was improved by 33% and 66% compared to 8 r/min and 10 r/min, respectively. The mixing efficiency of the square barrel was 100% higher than that of the elliptical barrel. [Conclusion] Simulation methods can effectively analyze the mixing conditions of food particles in a three-dimensional motion mixer.

Keywords: three-dimension motion mixer; EDEM-ADAMS co-simulation; food particles; mixing effect; coefficient of dispersion

三维运动混合机是一种新型高效的混合设备, 其主要用于制药、食品、机械等行业中某些粉状、颗粒状物料的高均匀度的混合^[1-2]。但由于物料颗粒在混合机内的混合情况比较复杂, 且也很难利用相关仪器实时检测混合机内颗粒的混合情况^[3]。而采用离散单元法能够直观地模拟混合过程中颗粒体系的运动特性和规律, 可以简单地分析混合效果, 从而更好地解决此类问题^[4-5]。

目前, 国内外利用离散单元法对混合机的混合效果

研究较多, 如高旭等^[6]研究了混合机的转子、筒底、筒壁的旋转方式及物料填充率对混合效果的影响; Jadidi 等^[7]利用校准的 DEM 模型研究了粒数比、填充率和桨叶转速对混合性能的影响。但针对三维运动混合机物料混合的研究相对较少, 且大多数是通过对比试验的方法来研究其混合效果, 如董单伟等^[8]利用对比试验方法研究了不同混合比的调制乳粉在三维运动混合机中的混合均匀度; 王进红等^[9]利用对比试验证明, 三维运动混合机填充系数范

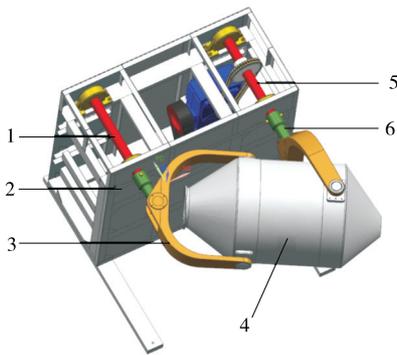
通信作者: 孟兆新(1967—), 男, 东北林业大学教授, 博士。E-mail: mzhxmail@163.com

收稿日期: 2024-06-27 改回日期: 2024-10-25

围大、混合时间短、残留量少,且延长混合时间能保持较高的混合均匀度。为便于了解三维运动混合机内颗粒的混合情况,研究基于 ADAMS 与 EDEM 耦合的方法,对其混合过程进行仿真模拟,以研究转速及料筒形状对食品颗粒混合效果的影响,以期为提高混合效果和效率提供参数优化方案。

1 三维运动混合机结构及工作原理

三维运动混合机的简化结构如图 1 所示,主要由机架、料筒、主动拨叉、从动拨叉以及主动轴和从动轴组成,各部件之间均为铰接,是一种单自由度、多刚体运动机构^[10]。三维运动混合机的主动轴与从动轴相互平行,与相邻旋转副的轴线相互垂直,当主动轴作匀速转动时,从动轴则以相反的方向旋转,且速度不恒定,使料筒做周而复始的平移、翻转和自旋相结合的复合运动,给予物料一种持续交替脉冲作用,沿着料筒作环向、径向、轴向的三向复合运动,物料颗粒之间相互流动扩散、积聚、掺杂,以达到混合均匀的目的^[11]。



1. 主动轴 2. 机架 3. 主动拨叉 4. 料筒 5. 从动拨叉 6. 从动轴

图 1 三维运动混合机结构简图

Figure 1 Structure diagram of three-dimensional motion mixer

2 数值仿真模型

随着数值计算方法的发展,能够通过计算机对实际问题进行模拟计算,使得仿真计算在工程中应用更广泛。研究利用 ADAMS 与 EDEM 双向耦合方法,对三维运动混合机运动过程进行仿真模拟。

2.1 三维模型的建立

研究对象选取 GH-100 型三维运动混合机。为了提高计算效率,利用 Solidworks 建立三维模型,使各尺寸相比实际模型等比例缩小,并将缩小后的三维简化模型分别导入 ADAMS 和 EDEM 中,其料筒的尺寸大小如图 2 所示。

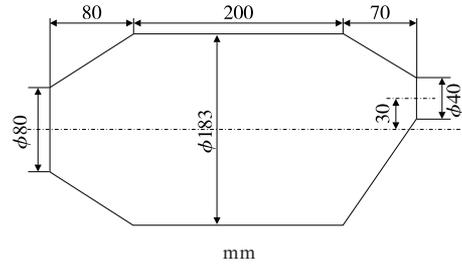


图 2 料筒几何尺寸

Figure 2 Barrel geometry size

在 ADAMS 中,各部件约束条件设置如表 1 所示。接触条件:机架、料筒、主动拨叉、从动拨叉以及主动轴和从动轴分别与大地设置 G-FORCE,如图 3 所示。后续与 EDEM 进行耦合仿真时,G-FORCE 将 EDEM 中颗粒介质对机架、料筒、主动拨叉、从动拨叉以及主动轴和从动轴之间的力和力矩传递到 ADAMS 中。利用 Co-simulation 读取文件建立耦合关系^[12-14]。其耦合原理如图 4 所示。

表 1 部件运动副设置

设置对象	运动副	设置对象	运动副
机架—大地	固定副	料筒—从动拨叉	转动副
机架—主动轴	转动副	从动拨叉—从动轴	转动副
主动轴—主动拨叉	转动副	从动轴—机架	转动副
主动拨叉—料筒	转动副		

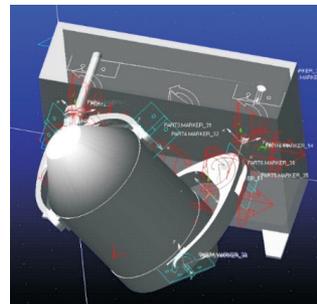


图 3 约束和 G-FORCE 添加示意图

Figure 3 Constraints and G-FORCE add schematic

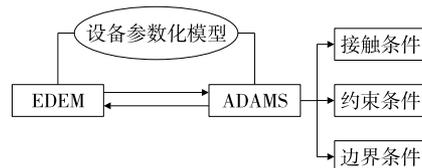


图 4 ADAMS-EDEM 耦合原理图

Figure 4 ADAMS-EDEM coupling principle diagram

2.2 物理属性设置和工作参数选取

为了使仿真结果更加贴近实际,在 EDEM 中,食品颗粒与食品颗粒、食品颗粒与壁面之间选择 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型^[15-16],其理论公式为:

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*} \alpha^{3/2} + \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3, \quad (1)$$

式中:

F_{JKR} ——法向弹性接触力, N;

γ ——表面能, J/m²;

E^* ——弹性模量, MPa;

α ——切向重叠量, m;

R^* ——等效接触半径, m。

法向重叠量 δ 与切向重叠量 α 的关系为:

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

当 $\gamma=0$ 时,力变为 Hertz-Mindlin 法向力:

$$F_{Hertz} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{3/2}. \quad (3)$$

即使颗粒之间没有物理接触,该模型也能提供有吸引力的内聚力,具有非零力的颗粒之间的最大间隙为:

$$\delta_c = -\sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha_c}{E^*}} + \frac{\alpha_c^2}{R^*}, \quad (4)$$

$$\alpha_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^*}{2E^*} \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{1/3}, \quad (5)$$

式中:

δ_c ——颗粒间最大间隙, m;

α_c ——切向最大间隙, m。

当颗粒之间没有发生实际接触且间隙小于最大间隙,颗粒间的内聚力达到了最大值。间隙大于最大间隙时,内聚力为 0,最大内聚力可由式(6)计算。

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2} \pi\gamma R^*. \quad (6)$$

其他相关物理特性参数见表 2 和表 3。在预先设定的颗粒工厂中生成颗粒,将约 22 000 个球形食品颗粒填充到料筒中,其大小为 5 mm,并按上下填充的方式分为两种,各 11 000 个,所有食品颗粒可占料筒有效体积的 40% 左右^[17-18]。初始阶段为静态装填,待食品颗粒填充完成后,需静置一段时间,使 EDEM 中的食品颗粒可以完全静止,利用 EDEM 中的后处理功能输出为新的 deck 文件,并将输出的新的 deck 文件的初始时间设置为 0 s,从而方便新的 deck 文件与 ADAMS 耦合。为了更清楚地看到料筒混合的情况,分别将两种食品颗粒采用红色和黄色来区别。

表 2 EDEM 颗粒、壁面参数设置

来源	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切模量 G/Pa
食品颗粒	0.40	443	1×10^7
混合机	0.29	7 801	8×10^8

表 3 EDEM 接触参数设置

碰撞形式	恢复系数 E	静摩擦系数 f_s	动摩擦系数 f
食品颗粒与食品颗粒	0.01	0.45	0.01
食品颗粒与混合机	0.30	0.60	0.05

3 模拟结果与分析

3.1 颗粒混合机理分析

通过对三维运动混合机料筒中食品颗粒的混合研究发现,其主要混合机制为扩散混合和对流混合。图 5 为三维运动混合机主动轴旋转 1 周,料筒中的食品颗粒速度矢量图。由图 5 可知,底部颗粒均呈深蓝色,速度较小且分布均匀,而表层颗粒的速度相对较大,这是由于受对流混合模式的影响,将颗粒混合分为主动层和被动层,即表层颗粒和底部颗粒。另外,混合机使颗粒在三维空间中运动,不仅有湍动作用,加速了物料的扩散和流动且有翻转运动,克服了离心力的影响,消除了比重偏差现象,不产生颗粒的积聚和滞流。而且湍动作用是强烈的,翻转运动是缓慢的,使物料在混合容器内的运动无任何死角,料筒中的颗粒相互渗透,逐渐达到完全混合状态。

为了对食品颗粒混合程度变化进行定量分析,利用 EDEM 的后处理中的划分网格功能(grid bin group),导出各个网格中总颗粒数或者某种颗粒的数量,如图 6 所示。由于三维运动混合机在运动过程中,料筒的位置不是固定不动的,且划分的网格无法随之运动,故为了降低混合均匀度计算的误差,需要剔除单个网格中颗粒总数少于 50 的网格。通过所取样的网格来计算混合均匀程度,为了简单明了地观察混合均匀程度,选用离散系数 C_v 来评价混合效果,离散系数 C_v 越小,表明混合效果越好^[19-21]。

离散系数 C_v 为:

$$C_v = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (7)$$

颗粒离差的平均值 η 和标准差 σ 分别为:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i}{n}, \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta)^2}{n-1}}. \quad (9)$$

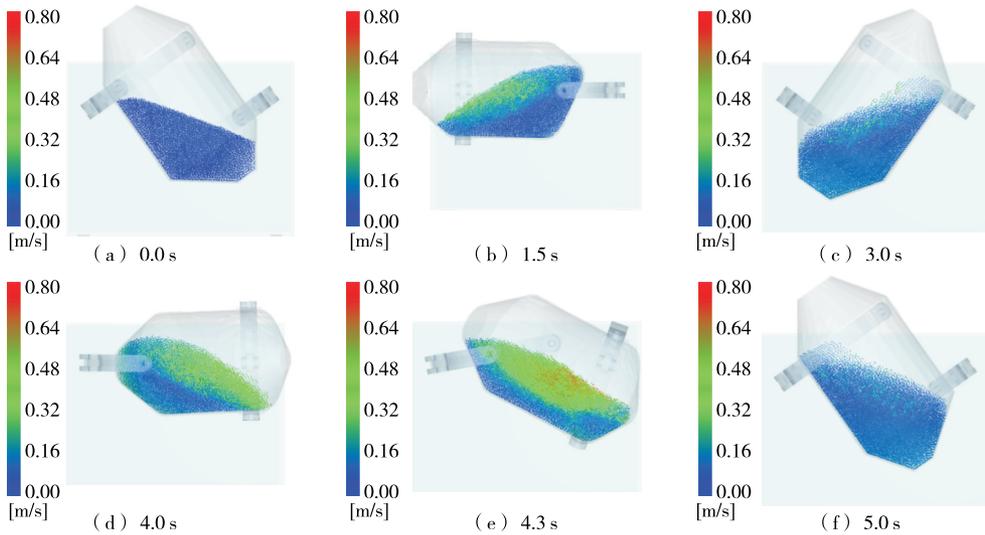


图 5 料筒中食品颗粒的速度矢量图

Figure 5 Particle velocity vector diagram of food in barrel

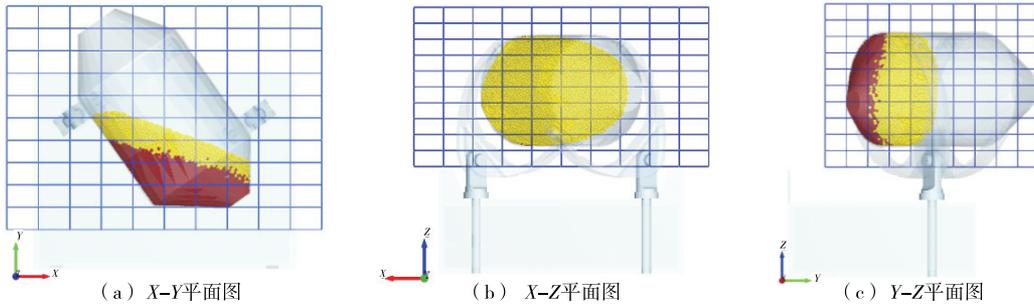


图 6 不同平面网格划分示意图

Figure 6 Schematic diagram of different plane grid division

3.2 混合效果影响分析

为了更好地研究不同影响因素对颗粒混合效果的影响,对三维运动混合机不同转速和料筒形状进行仿真模拟分析。

3.2.1 转速对混合效果的影响 三维运动混合机料筒内的颗粒混合过程根本上是颗粒间、颗粒与壁面间的相互碰撞而导致的,主动轴的转速直接影响颗粒的混合均匀程度,改变主动轴转速是提高颗粒在料筒中混合均匀程

度的一种手段。图 7 为 5 种不同转速下混合 90 s 后的颗粒状态分布图。由图 7 可知,较高转速下颗粒的分布较为均匀。

时间节点的离散系数 C_v 曲线如图 8 所示。随着时间的增加,离散系数 C_v 的总体趋势均是变小的,说明增加混合时间,可以提高颗粒混合效果。但当混合时间超过 80~90 s 后,转速为 10, 12 r/min 的离散系数曲线趋于平稳,说明当料筒中的颗粒混合到一定程度后,增加混合时间对

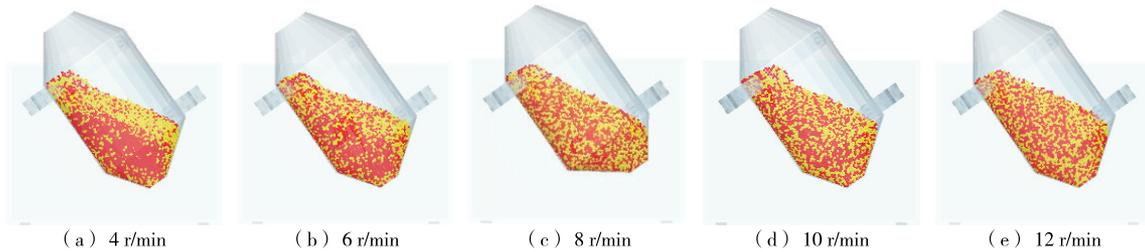


图 7 不同转速下的颗粒状态分布图

Figure 7 Distribution of particle state at different rotational speeds

颗粒之间的混合效果影响相对较小。

当转速为4~12 r/min时,在相同时间节点,随着转速的增加,其相对应的离散系数 C_v 相对较小,表明混合效果相对较好,这是由于转速的增加,加大了料筒中颗粒的运动速度,增强了颗粒之间的对流混合、剪切混合和扩散混合,同时,增加转速可以大幅度降低混合时间。通过比较不同转速的离散系数曲线发现,转速较低(4~8 r/min)时,增加转速可以快速提高混合效果;而转速相对较大(8~12 r/min)时,增加转速对提高混合效果的影响逐渐降低。

当离散系数 C_v 降至0.2时,8,10,12 r/min的转速对应的混合时间分别为70,56,42 s,12 r/min转速下的混合效率相对于8,10 r/min的分别提高了约33%,66%。转速为4,6 r/min时混合90 s后的离散系数 C_v 未能达到0.2,如若提高混合效果,还需要增加混合时间。

3.2.2 料筒形状对混合效果的影响 从目前国内外对三维运动混合机的研究以及对制造厂家的参观发现,三维运动混合机的料筒绝大多数为圆筒形。因此,为探究不

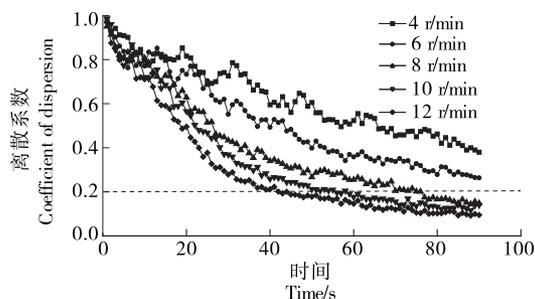


图8 不同转速下离散系数 C_v 随时间的变化

Figure 8 The variation of dispersion coefficient C_v with time at different speeds

同形状的料筒对混合效果的影响,又重新设计了正方形和椭圆形两种形状的料筒。控制正方形料筒和椭圆形料筒的体积与之前圆筒形料筒的体积几乎一致,以此减小料筒形状的改变带来的混合误差,其中椭圆形料筒的离心率 $e=0.6$ 。图9为不同形状料筒在8 r/min的转速下混合90 s的颗粒状态分布图。

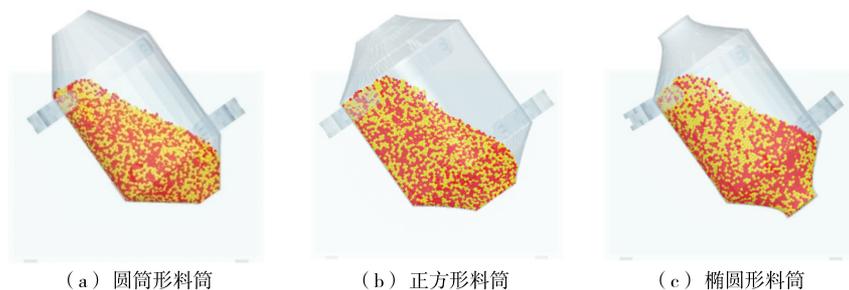


图9 不同料筒形状里颗粒状态分布图

Figure 9 Particle state distribution of different barrel shapes

图10为不同形状料筒的离散系数 C_v 随时间变化的曲线。由图10可知,3种形状料筒的离散系数 C_v 均随混合时间的增加而不断减小,混合效果越来越好。

在3种形状的料筒中,正方形料筒的混合效果最好,椭圆形料筒的混合效果最差,而圆筒形料筒的混合效果居于两者之间。因为椭圆形料筒混合过程中,短轴曲面相比于长轴曲面的表层颗粒,运动空间相对较小。当颗粒从短轴曲面到长轴曲面运动的过程中,混合空间扩大,但此时料筒的速度较慢,降低了颗粒间的相互作用,不利于混合。在长轴曲面向短轴曲面运动的过程中,混合空间减小,颗粒之间的渗透作用减弱,混合效果相对减小,导致椭圆形料筒的总体混合效果却略低于圆筒形料筒。而在正方形料筒混合过程中,由于几何结构大多为平面,且每个平面的大小相同,导致表层颗粒滑落的幅度更大,运动速度更快;由于其两相接触面相互垂直,导致颗粒在混合过程中存在较大的落差,使颗粒运动更加混乱,更利

于混合效果的增加,因而正方形料筒的混合效果高于圆筒形料筒。

当离散系数 C_v 降至0.2时,正方形、圆筒形和椭圆形料筒的混合时间约为43,70,87 s,正方形料筒相对于圆筒形和椭圆形料筒的混合效率分别提高了约62%,100%。

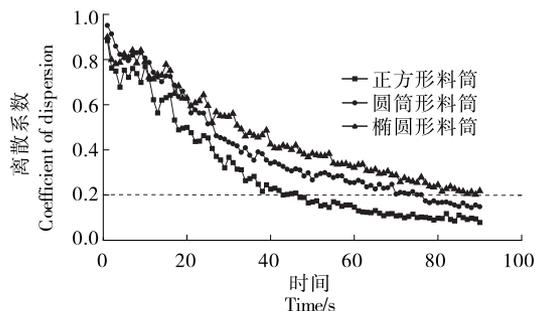


图10 不同料筒形状下离散系数 C_v 随时间的变化

Figure 10 Variation of dispersion coefficient C_v with time under different barrel shapes

3.3 试验验证

为了验证以上仿真模拟结果的准确性,根据前文的结果分析,通过三维运动混合机进行试验验证。为便于识别,选用等量的黄、绿两种颜色(直径为 5 mm)的聚甲基丙烯酸甲酯颗粒作为物料,并采用上下方式进行填充。

由于无法观察到颗粒混合的运动状态,为定量比较试验与仿真模拟的混合效果,将试验混合后的颗粒抽样计算离散系数,图 11 为在 8 r/min 的转速下混合 90 s 后的部分颗粒分布图。

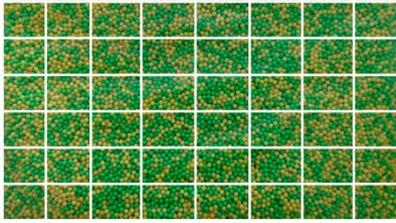


图 11 混合 90 s 后的部分颗粒分布图

Figure 11 Part of the particle size distribution after 90 s mixing

表 4 和表 5 分别为在不同转速下和不同形状料筒中混合 90 s 后的试验及仿真结果。由表 4 和表 5 可知,试验结果与仿真结果的变化趋势相同,且仿真模拟的混合效果较试验结果的更好。对试验结果与仿真结果进行误差分析,结果表明,两者偏差在 10% 以内,证明了仿真模拟结果的正确性。

表 4 不同转速下试验结果与仿真结果对比

Table 4 Comparison of experimental and simulation results at different speeds

转速/(r·min ⁻¹)	仿真值	试验值
4	0.380	0.397
6	0.260	0.293
8	0.145	0.189
10	0.120	0.142
12	0.100	0.131

表 5 不同料筒形状下试验结果与仿真结果对比

Table 5 Comparison of experimental and simulation results under different barrel shapes

料筒形状	仿真值	试验值
正方形料筒	0.095	0.120
圆筒形料筒	0.145	0.189
椭圆形料筒	0.200	0.223

4 结论

通过对三维运动混合机料筒内食品颗粒混合仿真模拟得知,随着混合时间的增加,混合效果不断变好,但当混合到一定程度后,混合效果的变化将不再明显,且在相同的时间内,主动轴转速越高,混合效率越好,另外,在正方形、圆筒形和椭圆形 3 种形状的料筒中,正方形料筒的混合效果最好,椭圆形料筒的混合效果最差。当离散系数为 0.2 时,即混合效率达到 80% 左右,转速 12 r/min 的混合效率相对于转速 8, 10 r/min 的分别提高了约 33%, 66%;正方形料筒的混合效率较椭圆形料筒的提高了约 100%。但由于试验研究时采取的填充比例和密度基本一致,下一步可以针对不同填充比例和不同颗粒密度之间的混合进行仿真模拟分析研究。

参考文献

[1] LI S, KAJIWARA S, SAKAI M. Numerical investigation on the mixing mechanism in a cross-torus paddle mixer using the DEM-CFD method[J]. Powder Technology, 2021, 377: 89-102.

[2] 周吉嘉. 混合机性能优化与自动化控制研究[J]. 冶金管理, 2023(23): 26-27.

ZHOU J J. Research on performance optimization and automatic control of mixer[J]. Metallurgical Management, 2023 (23): 26-27.

[3] 徐玉菁. 基于 DEM 离散元建模技术的双轴桨叶式食品混合机运动仿真分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 115-118, 125.

XU Y J. Dynamic simulation analysis of double-shaft paddle type food mixer based on DEM[J]. Food & Machinery, 2021, 37 (8): 115-118, 125.

[4] CHANDRATILLEKE G R, JIN X, SHEN Y S. DEM study of effects of particle size and density on mixing behaviour in a ribbon mixer[J]. Powder Technology, 2021, 392: 93-107.

[5] CAI R H, HOU Z C, ZHAO Y Z. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer[J]. Powder Technology, 2019, 352: 193-208.

[6] 高旭, 雷杰, 狄瞻霞, 等. 基于 EDEM 的强力混合机混匀效果数值模拟[J]. 过程工程学报, 2023, 23(11): 1 530-1 540.

GAO X, LEI J, DI Z X, et al. Numerical simulation of mixing effect of strong mixer based on EDEM[J]. Journal of Process Engineering, 2023, 23(11): 1 530-1 540.

[7] JADIDI B, EBRAHIMI M, EIN-MOZAFFARI F, et al. Mixing and segregation assessment of bi-disperse solid particles in a double paddle mixer[J]. Particuology, 2023, 74: 184-199.

[8] 董单伟, 肖东梅, 刘莹莹, 等. 三维运动混合机在调制乳粉中混合均匀度的验证方法研究[J]. 食品安全导刊, 2021(34): 65-68.

DONG S W, XIAO D M, LIU Y Y, et al. Research on the

- verification method of the mixing uniformity of the three-dimensional motion mixer in the modulated milk powder [J]. *Food Safety Guide*, 2021(34): 65-68.
- [9] 王进红, 王忠文, 刘定炜, 等. 三维运动混合机及在饲料加工中的应用[J]. *饲料工业*, 2014, 35(15): 7-10.
- WANG J H, WANG Z W, LIU D W, et al. Three-dimensional motion mixer and its application in feed processing[J]. *Feed Industry*, 2014, 35(15): 7-10.
- [10] 胡静波, 马华民, 戚兴明. 基于ADAMS软件的三维运动混合机动力学仿真分析[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2013, 14(2): 37-39.
- HU J B, MA H M, QI X M. Dynamic simulation analysis of three-dimensional motion mixer based on ADAMS software [J]. *Journal of Changchun University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2013, 14(2): 37-39.
- [11] 刘定炜. SHS200三维运动混合机的研制[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013: 7.
- LIU D W. Development of SHS200 three-dimensional motion mixer[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013: 7.
- [12] 高阳, 李学楠, 陈海滨, 等. 套圈整体抛磨的EDEM-ADAMS耦合数值模拟和试验[J]. *轴承*, 2023(11): 39-45.
- GAO Y, LI X N, CHEN H B, et al. EDEM-ADAMS coupling numerical simulation and experiment for overall grinding of rings[J]. *Bearings*, 2023(11): 39-45.
- [13] ZENG Y, LI J, LI H C, et al. Research on the ditching resistance reduction of self-excited vibrations ditching device based on MBD-DEM coupling simulation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1372585.
- [14] WANG Y, WANG L L, LI C C, et al. Optimization of excavator bucket structure by a coupled simulation method[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(20): 11336.
- [15] SHI Q, WANG B, MAO H P, et al. Calibration and measurement of micrometre-scale pollen particles for discrete element method parameters based on the Johnson-Kendall-Roberts model[J]. *Biosystems Engineering*, 2024, 237: 83-91.
- [16] 高国华, 李博文, 杨德秋, 等. 基于离散元法和TRIZ理论的薯土分离机构优化[J]. *现代农业装备*, 2019, 40(5): 10-18.
- GAO G H, LI B W, YANG D Q, et al. Optimization of potato-soil separation mechanism based on discrete element method and TRIZ theory[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2019, 40(5): 10-18.
- [17] MORI Y, SAKAI M. Advanced DEM simulation on powder mixing for ellipsoidal particles in an industrial mixer[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 429: 132415.
- [18] 陈荟, 刘雪东, 刘文明, 等. 基于相似原理的超细粉体搅拌功率的实验和DEM数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2023, 23(11): 1506-1517.
- CHEN H, LIU X D, LIU W M, et al. Experiment and DEM numerical simulation of mixing power of ultrafine powder based on similarity theory[J]. *Journal of Process Engineering*, 2023, 23(11): 1506-1517.
- [19] 易军, 周彪, 魏霄儒. 基于EDEM离散元仿真的振动筛网出料均匀性分析[J]. *机械设计与制造*, 2023(12): 55-58.
- YI J, ZHOU B, WEI X R. Analysis of discharge uniformity of vibrating screen based on EDEM discrete element simulation [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2023(12): 55-58.
- [20] 田祥州, 贺福强, 陈发江, 等. 基于EDEM的板材制备立轴行星式搅拌机特性[J]. *中国粉体技术*, 2023, 29(2): 29-37.
- TIAN X Z, HE F Q, CHEN F J, et al. Characteristics of vertical shaft planetary mixer for plate preparation based on EDEM[J]. *China Powder Technology*, 2023, 29(2): 29-37.
- [21] 詹璐歆, 贺福强, 陈发江, 等. 基于EDEM的木质纤维板铺装装置结构优化[J]. *中国粉体技术*, 2023, 29(3): 63-71.
- ZHAN L X, HE F Q, CHEN F J, et al. Structural optimization of wood fiber board paving device based on EDEM[J]. *China Powder Technology*, 2023, 29(3): 63-71.