

DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.08.019

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

Dynamic simulation analysis of double-shaft paddle
type food mixer based on DEM

徐玉菁

XU Yu-jing

(东南大学成贤学院, 江苏 南京 210088)

(Chengxian College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210088, China)

摘要:目的:分析双轴桨叶式混合机内食品粉体颗粒的运动混合特性,优化验证混合机结构。方法:采用 EDEM 软件对 3 种不同尺寸的食品粉体颗粒按比例混合进行仿真,以后处理 Bin Groups 建立混合箱观察混合情况,并通过研究不同类型食品粉体之间的颗粒数量来进行评估。结果:在 $t=5$ s 时,3 种粉体食品颗粒所对应的方格中颗粒数量还存在一定的差距,但是基本相差不大,3 种粉体食品颗粒的混合程度已经很高;3 种粉体食品颗粒之间的接触随时间的变化趋势大体上是相同的,随着时间的增加,各种粉体食品之间的接触数量也随之增加,待 $t=8$ s 之后,各种粉体食品颗粒之间的接触数量基本达到稳定值。结论:采用离散元法可以有效分析桨叶式混合机中粉体食品的混合情况。

关键词:离散元;双轴桨叶式;混合机;粉体食品;混合效率

Abstract: Objective: In order to analyze the movement and mixing characteristics of food powder particles in the double-shaft paddle mixer to optimize the verification of the mixer structure. **Methods:** The EDEM software was used to simulate the proportional mixing of three different sizes of food powder particles, and then Bin Groups would build a mixing box to observe the mixing situation, and evaluate it by studying the number of particles between different types of food powder. **Results:** At $t=5$ s, there was still a certain gap in the number of particles in the squares corresponding to the three types of powdered food particles, but the difference was basically the same. The mixing degree of the

three types of powdered food particles was already very high; The change trend of the contact between food particles over time was basically the same. As time increasing, the number of contacts between various powdered foods also increased. After $t=8$ s, the number of contacts between particles between various powdered foods basically reached a stable value. **Conclusion:** The discrete element method can effectively analyze the mixing of powdered food in the paddle mixer.

Keywords: discrete element; double-shaft paddle type; mixer; feed; mixing efficiency

双轴桨叶式混合机对颗粒的形状尺寸、颗粒密度等物理性质没有特别的要求,混合性能好,生产率高。粉体颗粒在双轴桨叶式混合机内运动的混合情况非常复杂,实际试验中很难观察,也很难用相关仪器对物料颗粒的混合情况进行检测,而采用离散元法可以有效地解决此问题^[1]。刘扬等^[2]基于离散元法对双轴桨叶式混合机中物料颗粒的运动轨迹进行分析,发现混合机内物料颗粒的位移主要发生在径向,旋转运动主要发生在轴向,颗粒流动性良好,混合程度较高。兰海鹏等^[3]基于离散元法,以物料颗粒的运动轨迹对混合机中物料颗粒的混合程度进行评估,得到了物料颗粒在混合机中的运动轨迹,混合较好的位置及混合情况。彭飞等^[4]为探究粉体食品调质器中物料的运动情况,基于 DEM-CFD 耦合的方法,并采用 Design-Expert 软件设计试验,对调质器模型作业参数进行优化分析,得出各因素对调质器出料量的影响显著性,为调制器的结构设计提供参考。基于离散元法的双轴桨叶式混合机的研究较多,但针对粒径较小的粉体颗粒的混合研究甚少,针对物料茶粉、大豆粉、小麦粉 3 种颗粒的混合分析也相对较少。

DEM 离散单元法 (Discrete Element Method), 是一

基金项目:高校哲学社会科学研究基金指导项目(编号:2020SJA2214)

作者简介:徐玉菁(1983—),女,东南大学成贤学院实验师,工学硕士。E-mail:49508317@qq.com

收稿日期:2021-04-23

种显示求解的数值分析方法,该方法是继有限元法、计算流体力学(CFD)之后,用于分析物质系统动力学问题的又一种强有力的数值计算方法。DEM 离散单元法通过建立固体颗粒体系的参数化模型,进行颗粒行为模拟和分析,是解决涉及颗粒、结构、流体与电磁及其耦合等综合问题的一种强有力的过程分析工具。为探讨混合机内粉体食品颗粒的运动混合情况,试验拟基于离散元法对粉体颗粒混合过程进行仿真。采用 EDEM 软件对 3 种不同尺寸的粉体食品颗粒按比例混合进行仿真,以后处理 Bin Groups 建立混合箱观察混合情况,并通过研究不同类型粉体食品之间的颗粒数量来进行评估。从不同混合箱之间和不同类型粉体食品之间的颗粒数量、颗粒的轨迹、颗粒群轨迹来对颗粒运动混合情况进行评估,以期为双轴桨叶式混合机的结构设计及参数优化提供参考。

1 双轴桨叶式混合机原理

双轴桨叶混合机(图 1)内装有双轴旋转反向的桨叶,桨叶呈一定角度将物料沿轴向、径向循环翻搅,使物料迅速混合均匀,桨叶叶片通常做成两片式。双轴桨叶混合机充分利用物料在混合器内的上抛运动形成流动层,产生瞬间失重,使之达到最佳混合效状态。在流动层领域中,物料以一定圆周速度克服离心力,在具有特定角度的桨叶作用下移动,实现在全方位范围内进行混合,形成随机的最佳运动状态。

2 离散元仿真分析

2.1 仿真参数

仿真采用 3 种不同粉体食品颗粒进行分析,考虑到仿真时间的局限性,结合国内外文献^[5-8]对粉体食品颗粒与不锈钢离散元仿真参数的设置及软件内置 GEMM 数据库,通过休止角以批处理的方式对粉体食品颗粒进行离散元校准后,得到研究所用粉体食品各仿真参数的取值如表 1 所示。

2.2 仿真模型

利用 Solidworks 软件建立双轴桨叶混合机的三维模型,另存为 step 格式,导入 EDEM 软件进行仿真。分别建立粒径分别为 2,3,4 mm 大小的粉体食品颗粒模型,为

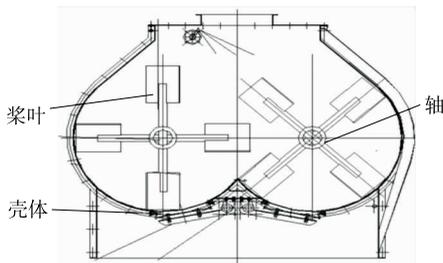


图 1 双轴桨叶式混合机

Figure 1 Double-shaft paddle mixer

表 1 离散元仿真参数表

Table 1 Discrete element simulation parameter table

仿真参数	单位	数值
粉体食品密度	kg/m ³	443
粉体食品泊松比		0.4
粉体食品剪切模量	Pa	1×10 ⁷
不锈钢密度	kg/m ³	7 850
不锈钢泊松比		0.25
不锈钢剪切模量	Pa	7×10 ¹⁰
粉体食品—粉体食品恢复系数		0.01
粉体食品—粉体食品静摩擦系数		0.45
粉体食品—粉体食品滚动摩擦系数		0.01
粉体食品—不锈钢恢复系数		0.3
粉体食品—不锈钢静摩擦系数		0.6
粉体食品—不锈钢滚动摩擦系数		0.05
JKR		0.13

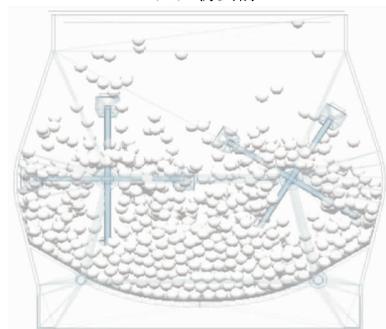
节省仿真时间,结合相关文献^[9-11],颗粒仿真采用软球模型,颗粒生成方式为 Dynamic,分别建立 3 种颗粒的虚拟工厂,3 种粉体食品物料颗粒的比例为 2 : 1 : 1 进行混合,待粉体食品颗粒处于静止状态后,对双轴桨叶设置转速双向转速 40 r/min,仿真步长设为 0.01 s,仿真时间设为 10 s,待仿真结束后,通过后处理中 Bin Groups 等工具进行分析,仿真模型如图 2 所示。

2.3 仿真运动状态分析

待仿真结束后,采用上色工具对 3 种粉体食品颗粒



(a) 仿真前



(b) 落料中

图 2 仿真模型图

Figure 2 Simulation model diagram

上色处理,观察各个时间点的混合状态,分析 3 种粉体食品颗粒的混合情况,对物流进行着色处理,三色分别为灰色、黑色、白色,如图 3 所示。

如图 3 所示, $t=1$ s 时,双轴叶片还未开始转动,处于准备混合状态; $t=2$ s 时,在双轴叶片的搅动下,3 种物料开始发生混合,最底层的黑色物料中部颗粒有向上运动的趋势,中层的白色物料中间两侧开始出现两边向上运动的趋势,最顶层的灰色物料两侧开始向下运动; t 为 2~5 s 时,双轴叶片随着时间的增加,3 种粉体食品颗粒的混合程度逐渐增加; $t=6$ s 时,3 种粉体食品的混合程度已较大。通过各个时间点的混合状态可知,3 种物料的混合从双轴叶片的周围开始,随着时间的增加,混合程度增加的同时逐渐趋于稳定。

2.4 Bin Groups 评估

待仿真结束后,采用后处理工具 Bin Groups,以每种粉体食品颗粒的数量来对 3 种粉体食品的混合程度进行评估^[12]。

在混合稳定阶段后,建立 Bin Groups 对 3 种粉体食品颗粒的混合程度进行分析。由图 4 可知:当 $t=5$ s 时,3 种粉体食品颗粒所对应的方格中颗粒数量还存在一定的差距,但是基本相差不大,3 种粉体食品颗粒的混合程度已经很高。采用离散元中的 Bin Groups 功能,可以数

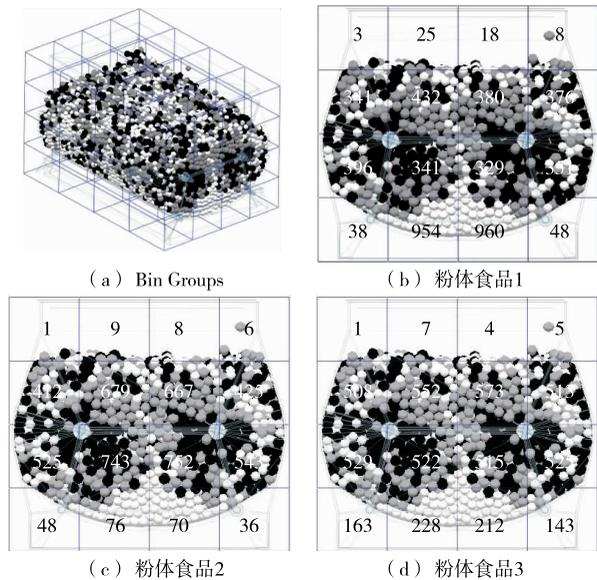


图 4 $t=5$ s 时刻粉体食品颗粒混合分析

Figure 4 Analysis of feed pellet mixing at $t=5$ s

据化地对物料的混合情况进行分析,实时观察物料的混合情况,分析双轴桨叶式混合机的混合效率。

2.5 颗粒接触评估

待仿真结束后,采用后处理工具,利用 3 种粉体食品之间的接触数来对粉体食品的混合程度进行评估,如果 3 种粉体食品之间的接触数达到稳定值,则表示混合均匀^[13]。

由图 5 可知,3 种粉体食品颗粒之间的接触随着时间的变化趋势大体上是相同的,随着时间的增加,各种粉体食品之间的接触数量也随之增加,待 $t=8$ s 之后,各种粉体食品颗粒之间的接触数量基本达到稳定值,即 3 种粉体食品之间的混合程度已经达到相对稳定的状态,仿真结果表明采用颗粒间的接触来对混合情况进行分析是可行的。

2.6 颗粒轨迹评估

待仿真结束后,采用后处理工具,分别选取每种粉体食品颗粒的径向 10 个颗粒,以流线的形式观察 3 种粉体食品颗粒在 10 s 内的运动轨迹。如图 6 所示,粉体食品 1 位于最底部,以最低部为起始端开始随双轴叶浆转动,最终朝向双轴叶片中心移动;粉体食品 2 位于中层颗粒,起始与中层开始运动,与粉体食品 1 的运动轨迹基本相同,有着相同的运动趋势;粉体食品 3 位于最上层颗粒,起始与上层开始运动,与粉体食品 1、2 的运动轨迹基本相同,有着相同的运动趋势。

3 结论

基于离散元方法建立了粉体物料与双轴桨叶式混合机的仿真模型,以颗粒状态图、颗粒间接触、颗粒轨迹对双轴桨叶式混合机的混合性能进行分析,仿真分析结果

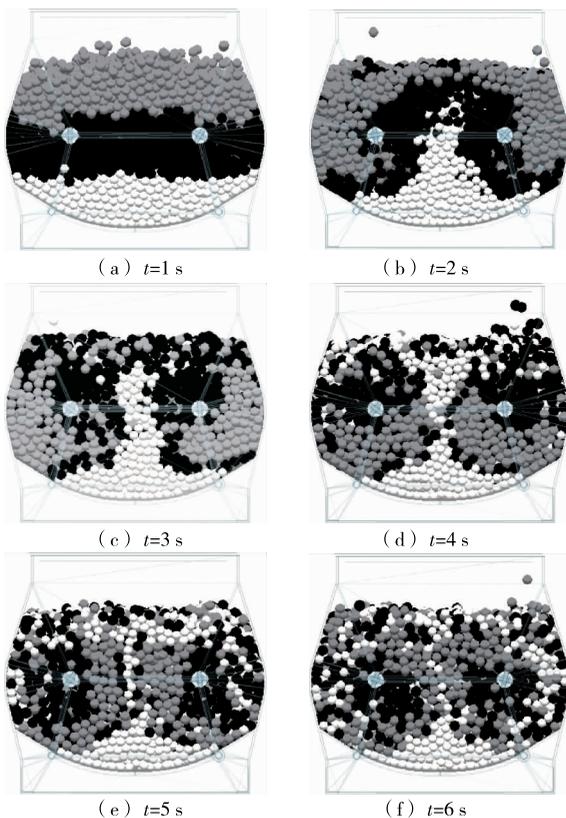


图 3 粉体食品颗粒混合状态图

Figure 3 The state diagram of feed pellet mixing

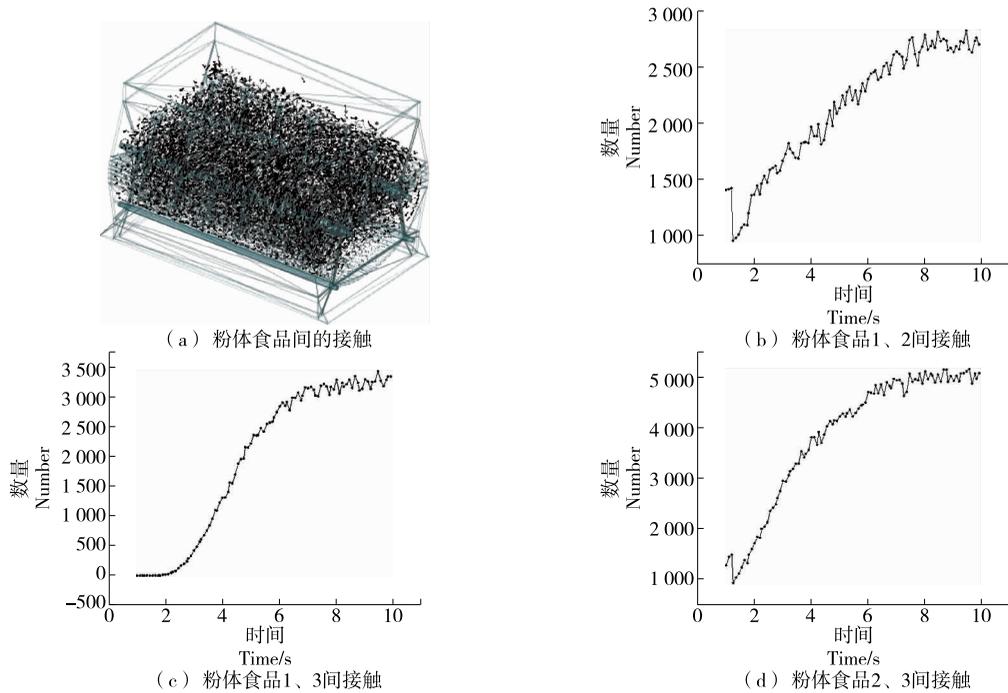


图 5 接触数随时间的变化曲线

Figure 5 The curve of the number of contacts over time

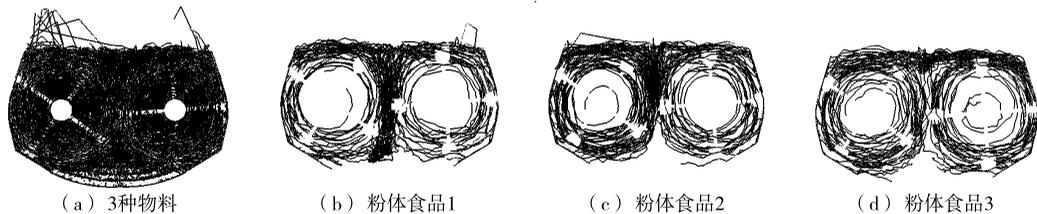


图 6 各个粉体食品的运动轨迹图

Figure 6 The trajectory diagram of each feed

可有效观察双轴桨叶式混合机混合粉体物料中的粉体运动趋势、运动轨迹、速度分布等,为双轴桨叶式混合机的结构设计及优化提供参考。研究分析中 3 种粉体食品模拟颗粒大小和质量密度基本一致,下一步可以针对不同大小和不同密度颗粒的混合仿真进行研究。

参考文献

[1] 盛玉龙, 武凯, 孙宇, 等. 双轴混合机桨叶结构改进及数值模拟研究[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 9-12, 16.
SHENG Yu-long, WU Kai, SUN Yu, et al. Research on the improvement and numerical simulation of the blade structure of the dual-shaft mixer[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019 (9): 9-12, 16.

[2] 刘扬, 唐玉荣, 胡芸莎, 等. 双轴桨叶式混合机内颗粒运动规律模拟研究[J]. 粉体食品工业, 2017, 38(9): 11-15.
LIU Yang, TANG Yu-rong, HU Yun-sha, et al. Simulation study on particle movement in a double-shaft paddle mixer[J]. Feed Industry, 2017, 38(9): 11-15.

[3] 兰海鹏, 刘扬, 贾富国, 等. 双轴桨叶式混合机内椭球颗粒混合特性模拟[J]. 农机化研究, 2017, 39(6): 74-78.
LAN Hai-peng, LIU Yang, JIA Fu-guo, et al. Simulation of mixing characteristics of ellipsoid particles in a dual-shaft paddle mixer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39 (6): 74-78.

[4] 彭飞, 方芳, 王红英, 等. 基于 CFD-DEM 的粉体食品调质器物料运动模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 355-363.
PENG Fei, FANG Fang, WANG Hong-ying, et al. Simulation and experiment of feed conditioner material movement based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 355-363.

[5] 夏蕊. 卧式螺旋粉体食品混合机数值模拟及优化[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014: 18-19.
XIA Rui. Numerical simulation and optimization of horizontal spiral feed mixer[D]. Xianyang: Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, 2014: 18-19.

(下转第 125 页)

- absolute nodal coordinate formulation[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(2): 50-55.
- [9] 耿明超, 边辉, 倪笑宇, 等. 耦合型 4UPS /UPR 并联机构刚度特性分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 76-82.
- GENG Ming-chao, BIAN Hui, NI Xiao-yu, et al. Stiffness characteristics analyses of a coupling 4UPS /UPR parallel mechanism[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(10): 76-82.
- [10] 付红栓, 赵恒华, 杨辉. 3-TPT 并联机床动力学仿真[J]. 机械设计, 2013, 30(3): 32-35.
- FU Hong-shuan, ZHAO Heng-hua, YANG Hui. Dynamics simulation of 3-TPT parallel machine tool[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(3): 32-35.
- [11] 钱太利, 于大泳. 并联机构柔性杆件的分析研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(2): 92-95.
- QIAN Tai-li, YU Da-yong. Analysis and research on flexible bar of parallel mechanism[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(2): 92-95.
- [12] 张洪, 李盼盼, 王通德. 3T 各向同性并联机构的弹性动力学建模与特性分析[J]. 机械传动, 2019, 43(5): 134-140.
- ZHANG Hong, LI Pan-pan, WANG Tong-de. Elastic dynamics modeling and characteristic analysis of a 3T isotropy parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(5): 134-140.
- [13] 吴超宇, 钱小吾, 余伟, 等. 直线驱动型并联机器人反向动力学分析与验证[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 412-420.
- WU Chao-yu, QIAN Xiao-wu, YU Wei, et al. Analysis and verification of linear driven parallel robot reverse dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 412-420.
- [14] GEETHAPRIYAN T, SAMSON R M, MUTHURAMALINGAM T, et al. Stiffness analysis of inverted tripod parallel manipulator[J]. Applied Mechanics and Materials, 2017(867): 205-211.
- [15] CRETESCU Nadia Ramona, NEAGOE Mircea. Rigid versus flexible link dynamic analysis of a 3DOF delta type parallel manipulator [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015 (762): 101-106.
- [16] LU Song, LI Yang-min, DING Bing-xiao. Kinematics and dynamics analysis of the 3PUS-PRU parallel mechanism module designed for a novel 6-DOF gantry hybrid machine tool[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(1): 345-357.
- [17] 董旭, 高铁红. 三自由度并联包装机构动力学建模与分析[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 81-87.
- DONG Xu, GAO Tie-hong. Dynamic modeling and analysis of 3-DOF parallel packaging mechanism[J]. Packing Engineering, 2020, 41(15): 81-87.
- [18] 付玉锦. 3-PTT 水平滑块式并联机器人的力学仿真研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002: 35-56.
- FU Yu-jin. The mechanics simulation study of in-parallel robot with tri-glider[D]. Shenyang: Northeastern University, 2002: 35-56.
- [19] 黄晓宾. 基于虚拟样机技术的 6 自由度 3-PRPS 并联机器人运动学和动力学的研究及参数优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 22-28.
- HUANG Xiao-bin. Kinematics and dynamics research and parameter optimization of 6-DOF 3-PRPS parallel robot based on Virtual Prototype Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013: 22-28.
- (上接第 118 页)
- [6] 其格吉日嘎拉, 王春光, 王文明. 小型卧式混合机混合均匀度的试验研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(8): 132-135.
- QI Ge-jirigala, WANG Chun-guang, WANG Wen-ming. Experimental research on mixing uniformity of small horizontal mixer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(8): 132-135.
- [7] 夏蕊, 郭贵生. 基于 CFD 的卧式螺带混合机的混合过程分析[J]. 农机化研究, 2014, 36(7): 31-34.
- XIA Rui, GUO Gui-sheng. Analysis of mixing process of horizontal ribbon mixer based on CFD[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 31-34.
- [8] 杨星, 于克强, 王德福. 基于 EDEM 的转轮式 TMR 混合机混合性能数值模拟[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 218-223.
- YANG Xing, YU Ke-qiang, WANG De-fu. Numerical simulation of mixing performance of rotary TMR mixer based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 218-223.
- [9] 高瑞红. 基于 EDEM 的碎玻璃清洗机螺旋叶片高度优化分析[J]. 山西电子技术, 2020(5): 9-10, 51.
- GAO Rui-hong. EDEM-based optimization analysis of spiral blade height of broken glass washing machine[J]. Shanxi Electronic Technology, 2020(5): 9-10, 51.
- [10] 潘青, 张清照, 李艺灵. 基于 EDEM 的碎屑流运动规律及冲击性能研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1 057-1 065.
- PAN Qing, ZHANG Qing-zhao, LI Yi-ling. Research on movement law and impact performance of debris flow based on EDEM[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1 057-1 065.
- [11] HE Ya-kai, LI Cui-ling, ZHAO Xue-guan, et al. Simulation analysis of the fertilizer ejecting device of corn fertilizer applicator based on EDEM[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1 633(1): 27-29.
- [12] 问小江, 方飞飞, 刘应科, 等. 基于煤粉堆积角的 EDEM 颗粒接触参数标定[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 114-119.
- WEN Xiao-jiang, FANG Fei-fei, LIU Ying-ke, et al. Calibration of EDEM particle contact parameters based on coal pulverized coal accumulation angle[J]. Chinese Safety Science Journal, 2020, 30(7): 114-119.
- [13] 刘兰强, 蔡英. 基于 EDEM 的高精度施肥装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(3): 68-75.
- LIU Lan-qiang, CAI Ying. Design and experiment of high-precision fertilization device based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 68-75.