Modeling and Simulation 建模与仿真, 2026, 15(11), 13-23
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2026.1511152

Hans汉斯

料斗速度与振动对布料均匀性的影响仿真研究

刘　豪，张宏智，张洋洋，赵　勇，蒋文龙

中国核动力研究设计院四所，四川 成都

收稿日期：2026年10月11日；录用日期：2026年11月4日；发布日期：2026年11月10日

摘　要

利用离散元仿真软件EDEM对混合粉末布料过程进行仿真，探究料斗布料工艺参数(料斗行进速率、料斗振动频率和振幅)对混合粉末布料均匀性的影响规律。结果表明：随着行进速度的提高，料斗内粉料质量流率增大，但单位距离的布料质量降低。添加料斗振动有利于粉料的下落流动，并且随着振动频率和振幅的提高，料斗内粉料下料速度增加，但布料均匀性降低。在实际生产中应合理设置料斗运行速度及振动相关参数，以确保粉料充粉下落和粉料均匀性。

关键词

离散元，粉末布料，均匀性，振动

Simulation Study on the Effects of Hopper Speed and Vibration on Powder Spreading Uniformity

Hao Liu, Hongzhi Zhang, Yangyang Zhang, Yong Zhao, Wenlong Jiang

The Fourth Research Institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

Received: October 11, 2026; accepted: November 4, 2026; published: November 10, 2026

Abstract

The discrete element method software EDEM was employed to simulate the spreading process of mixed powders, and the effects of hopper spreading process parameters, including traverse speed, vibration frequency and vibration amplitude, on the uniformity of the mixed powders were investigated. The results show that the mass flow rate of powder in the hopper increases with increasing traverse speed, whereas the mass of powder spread per unit distance decreases. The application of hopper vibration facilitates the downward discharge of powder; moreover, with increasing vibration frequency and amplitude, the powder discharge rate in the hopper increases, but the spreading

文章引用: 刘豪, 张宏智, 张洋洋, 赵勇, 蒋文龙. 料斗速度与振动对布料均匀性的影响仿真研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(11): 13-23. DOI: 10.12677/mos.2026.1511152

uniformity deteriorates. Therefore, the hopper traverse speed and vibration-related parameters should be set reasonably in practical production to ensure smooth powder discharge and satisfactory powder uniformity.

Keywords

Discrete Element Method, Powder Spreading, Uniformity, Vibration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

粉末布料过程是粉末冶金、制药、化工及食品等众多工业领域的关键共性工序，其核心目标是将粉料均匀、可控地填充至目标容器内，为后续压制、烧结等工艺提供质量保障。布料均匀性直接影响最终产品的密度分布一致性及良品率。在工程实践中，料斗移动速度、施加于料斗的振动频率和振幅是决定粉料流动行为与堆积状态的核心工艺参数。已有研究表明，合理的振动工艺能够有效提高粉料堆积密度，且存在堆积效果最优的最佳振动参数区间[1]。然而，粉料作为离散颗粒体系，其流动特性复杂，且存在拱架效应、偏析及堵塞现象，传统连续介质力学理论分析难以准确描述其动态行为。

离散元法(DEM)能够从颗粒尺度获取位置、速度、接触力等信息，为研究粉料布料过程提供有效手段[2]。近年来，研究者利用 DEM 对不同工艺场景下的布料行为开展了广泛探索。李庚等[3]采用 EDEM 软件对翻板冷却器布料器进行了仿真优化，考察了搅拌倾角和转轴转速对颗粒分布均匀性的影响。黄迪等[4]采用 EDEM 软件对复合移动电石反应器中颗粒运动状态进行模拟，研究布料器和转速对布料均匀性的影响规律。郑文庆等[5]采用离散元法研究了硬质合金刀片用粉末在模具型腔中的填充过程，分析了粉料物性、型腔几何结构、布料工艺对粉料堆积密度及颗粒偏析的影响规律。刘学等[6]则利用 EDEM 软件研究了混凝土搅拌参数对均匀性的影响规律。

本文基于 DEM 方法，建立粉料移动布料过程的数值模型，探究料斗移动速度、料斗振动频率和振幅对粉料布料均匀性和布料速度的影响规律，旨在为布料工艺优化设计提供数据支撑。

2. 仿真模型及参数

2.1. 几何模型及运动状态



Figure 1. Simplified geometric model of the spreading device
图 1. 布料工装简化几何模型

创建布料工装三维装配模型如图 1 所示，料斗总高度为 65 mm，圆形顶部直径为 50 mm，方形出料口尺度为 12 mm × 32 mm；模腔尺寸为长 300 mm × 宽 33 mm × 深 18 mm。料斗初始位置位于模腔内部

左侧，出料口底部距离模腔底部高度为 9 mm。布料工艺中，模具处于静止状态，料斗按照设定速度匀速运动。布料斗运动分为三个阶段：进程布料阶段、上移阶段和返程布料阶段，根据计算工况所需设置匀速行进速度。其中进程和返程阶段均为相同速度匀速行进，上移距离为 3 mm。料斗行走过程中发生整体振动，振动方向为料斗运动方向。

2.2. 仿真参数设置

离散元法处理的基本离散单元为单球面体。当实际粉料为非球形时，采用球面拟合法，即采用多个球面体组合为非球形，通过球面拟合非球形颗粒的外形，各个球面的相对位置固定，以球面接触代替非球形颗粒的复杂曲面接触[7] [8]。本研究中粉料 A 颗粒为直径 0.4 mm 球体，采用单球面建模并放大 5 倍至直径 2 mm。粉料 B 颗粒为异形颗粒，放大 5 倍采用双球面方式创建长轴 2.3 mm，短轴 1.54 mm 的颗粒，如图 2 所示。颗粒放大是 DEM 中降低计算量的常用粗粒化手段，已有研究表明，粗粒化可保持宏观材料行为的一致性，但局部相互作用细节可能需要参数补偿[9] [10]。为验证放大后模型的宏观流变响应，采用英国富瑞曼公司的 FT4 Powder Rheometer 型粉体流动性测试仪测量真实混合粉末流动能为 2.87 mJ/g，并创建 FT4 粉体流动性测试仪仿真模型计算放大后颗粒的流动能为 2.86 mJ/g，表明颗粒放大模型在宏观流变响应上与真实粉末具有一致性，可反映布料参数对布料均匀性的趋势性影响规律。粉料、料斗与模具其他参数设定见表 1。为降低计算成本，参照 EDEM 官方技术建议及 Lommen 等[11]的研究，将颗粒与壁面材料的剪切模量降低至 10^7 Pa 数量级，可在保证宏观流动行为准确性的前提下有效增大临界时间步长、缩短仿真时间。基于粉料 A 和粉料 B 空间分布均匀假设，通过颗粒工厂设置使粉料 A 和粉料 B 按照配比进行生成，从而达到较理想的混合均匀状态。

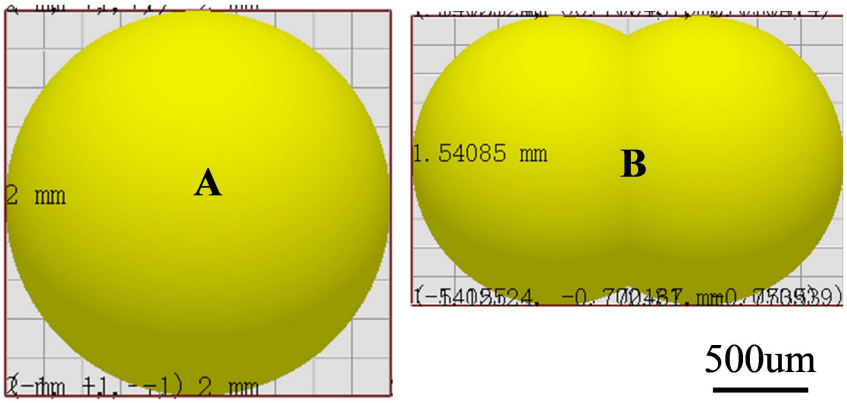


Figure 2. Particle morphology of powder
图 2. 粉料颗粒形态

Table 1. Material parameter
表 1. 材料参数

材料参数	球形颗粒 A	异形颗粒 B	料斗与模具(钢)
密度 g/cm^3	11.53	3.66	7.85
堆积密度 g/cm^3	6.81	2.11	-
泊松比	0.31	0.30	0.25
重量 g	45	228	-
剪切模量 Pa	6×10^7	3×10^7	3×10^7

2.3. 接触参数设置

采用 Hertz-Mindlin 模型描述物料之间的接触作用力。接触参数标定以文献[10]中提出的物理实验与虚拟仿真联合标定方法为框架，在此基础上针对本文所用粉料设计了侧壁坍塌实验、中心漏斗实验和斜面跌落实验。侧壁坍塌实验用于标定颗粒间静摩擦系数和滚动摩擦系数：将粉料自然填充于矩形箱体中，静置后迅速撤去一侧挡板，粉料坍塌形成休止角。在 DEM 中建立相同尺寸的侧壁坍塌模型，以休止角为响应值反演颗粒间的静摩擦系数与滚动摩擦系数。中心漏斗实验用于测定粉料的堆积角：粉料从固定高度的漏斗自由下落至水平平板，测量堆积角，以堆积角为响应值进一步标定颗粒间摩擦参数。斜面跌落实验用于标定颗粒－壁面静摩擦系数：将颗粒置于可调倾角的钢板上，记录颗粒开始滑动的临界倾角。参照 EDEM 内置的 GEMM 数据库提供的参数，对静摩擦系数、滚动摩擦系数进行修正，采用侧壁坍塌实验的休止角作为验证指标，模拟休止角与实验值的相对误差在±5%范围，最终得到如表 2 所示标定结果。需要说明的是，在密集颗粒流条件下，颗粒间持续接触、碰撞速度极低，能量耗散主要由摩擦主导，恢复系数对卸料行为的影响可忽略不计[12]。本文未对恢复系数进行独立标定，颗粒间恢复系数统一取 0.3，颗粒－钢恢复系数统一取 0.25。该取值在粉末 DEM 模拟的常用范围内。

Table 2. Contact parameter
表 2. 接触参数

接触对	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
球形颗粒 A-球形颗粒 A	0.3	0.37	0.05
异形颗粒 B-异形颗粒 B	0.3	0.32	0.08
球形颗粒 A-异形颗粒 B	0.3	0.37	0.05
球形颗粒 A-钢	0.25	0.30	0.03
异形颗粒 B-钢	0.25	0.35	0.07

2.4. 混料均匀性评价方法

通过在后处理中创建 30 个监测器，并输出每个检测器中球形颗粒质量比例，据此可得到球形颗粒质量百分比的标准差。标准差值越大表示球形颗粒分布越不均匀，反之则表示分布越均匀。

$$X_{ij}=\frac{m_{ij}}{M_{ij}}\times 100\% \tag{1}$$

$$S=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(X_{ij}-X\right)^{2}} \tag{2}$$

式中：X_{ij} 为每个监测器内球形颗粒质量百分比；m_{ij} 为每个监测器内球形颗粒质量；M_{ij} 为每个监测器内粉料总质量；S 为粉料混合均匀系数；N 为监视器数量，取值 30；X 为粉料配比中球形颗粒标准含量。

3. 布料计算结果

3.1. 料斗速度对均匀性的影响

分别对料斗行进速度为 5 mm/s、10 mm/s 和 20 mm/s 三种工况进行计算，设定振动频率均为 5 Hz，振幅均为 1 mm。三种工况布料结束状态如图 3 所示。从图 3 可以看出，当料斗移动速度为 5 mm/s 时，粉料有充足的时间下落至模具内部，在返程中进行一半时，粉料已经下落完毕，仅料斗内剩余部分黏附在料斗壁面。当料斗移动速度为 10 mm/s 时，粉料下落时间变少，在返程中，粉料下落完毕位置更接近

于起点位置时。当料斗速度进一步提升至 20 mm/s 时，很明显可以看出，粉料在返程达到起点位置时，料斗内仍剩余少部分粉料。图 4 为不同工况料斗内粉料质量随时间变化曲线，其中标准工况为没有添加料斗振动工况，料斗行进速度为 10 mm/s。由图可以看出，随着料斗运行速率增大，曲线斜率逐渐增大，即粉料质量流率增大。在相同时刻，料斗内剩余粉料的量依次为有振动 5 mm/s > 无振动 10 mm/s > 有振动 10 mm/s > 有振动 20 mm/s。结果表明，随着料斗运行速度的越快，粉料下落速度越快，但单位距离的布料质量降低。

利用后处理功能在料斗行进方向上将料斗均匀划分为 30 个小方格，并为每个小方格创建监测球形颗粒质量统计功能，结果如图 5 所示。采用标准差方法统计球形颗粒分布的均匀性，可以得到，5 mm/s、10 mm/s、20 mm/s 的料斗行进速度对应的球形颗粒分布标准差为 0.39、0.36、0.23，结果表明当料斗行进速度增大，检测器统计得到的分布数据离散型降低，分布均匀性得到提高。

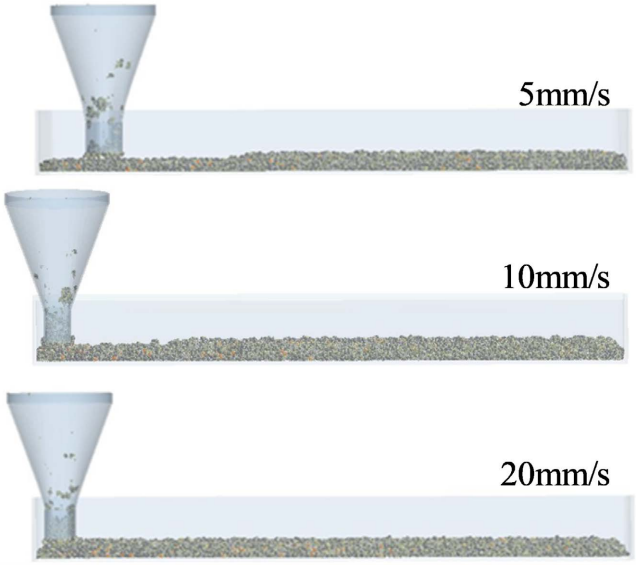


Figure 3. Final distribution state under different hopper moving speeds
图 3. 不同料斗移动速度工况布料结束状态

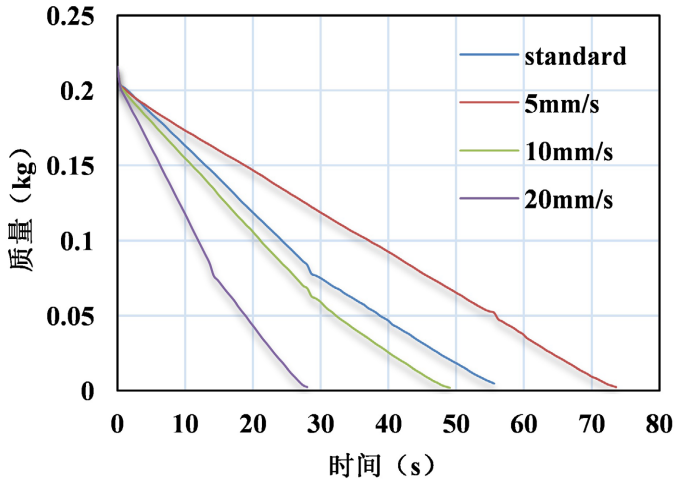


Figure 4. Curves of powder mass in the hopper over time under different hopper moving speeds
图 4. 不同料斗移动速度工况料斗内粉末质量随时间变化曲线

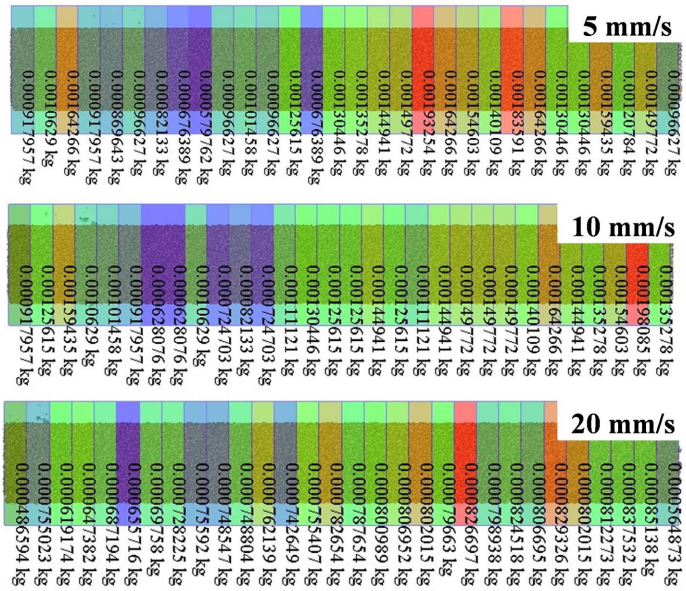


Figure 5. Mass distribution of spherical particles under different hopper moving speeds
图 5. 不同料斗移动速度工况球形颗粒质量分布

3.2. 料斗振动频率对均匀性的影响

在料斗行进速度为 10 mm/s、振幅为 1 mm 情况下，分别计算料斗振动频率为 2 Hz、5 Hz、10 Hz 工况布料情况。三种工况布料结束状态如图 6 所示。由图 6 可以看出，当振动频率为 2 Hz 时，料斗返程达到起始点时料斗内依旧剩余少部分粉料，而当振动频率为 10 Hz 时，料斗返程中接近半程即完成布料。分别提取三种工况下料斗内粉料质量随时间变化曲线，如图 7 所示，随着料斗振动频率增大，曲线斜率逐渐增大，即粉料质量流率增大。振动频率为 2 Hz 工况中料斗内质量随时间变化曲线与无振动工况基本相同，而当进一步提高振动频率后，料斗内质量流率明显增大。相同时间内，料斗内剩余粉料量为标准工况 > 2 Hz > 5 Hz > 10 Hz。结果表明，对料斗添加振动能够加快粉料的下落，减少粉料在料斗内的堆积和黏附，提高布料效率，随着振动频率增加，粉料下落越快，完成布料所需时间越短。

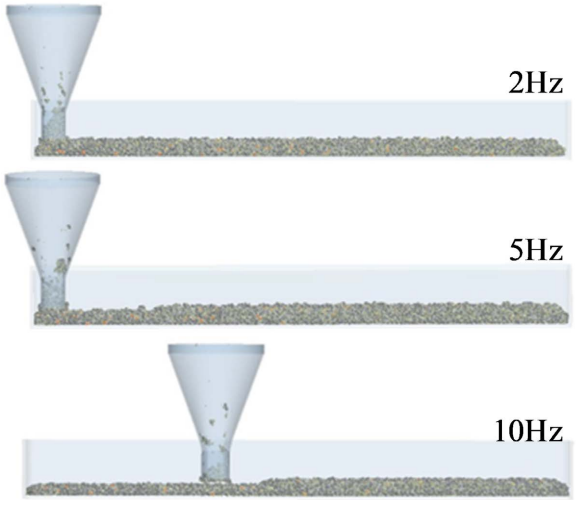


Figure 6. Final distribution state under different vibration frequencies
图 6. 不同振动频率工况布料结束状态

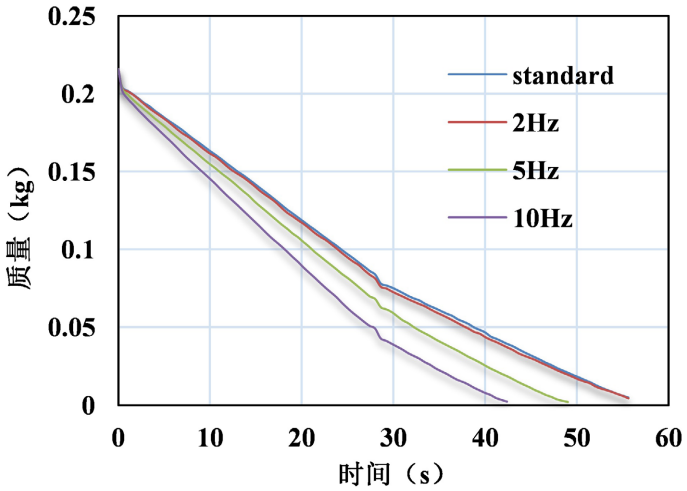


Figure 7. Curves of powder mass in the hopper over time under different vibration frequencies
图 7. 不同振动频率工况料斗内粉末质量随时间变化曲线

同样在压坯长度方向上创建 30 个检测器，统计每个检测器内球形颗粒的质量分布，进而分析球形颗粒分布均匀性，结果如图 8 所示。标准差方法对球形颗粒分布均匀性进行计算可以得到，在料斗振动频率分别为 2 Hz、5 Hz、10 Hz 情况下，球形颗粒粉末分布的标准差分别为 0.25、0.36、0.37，因此，随着料斗振动频率的提高，粉末颗粒分布数据离散性变差，分布均匀性降低。

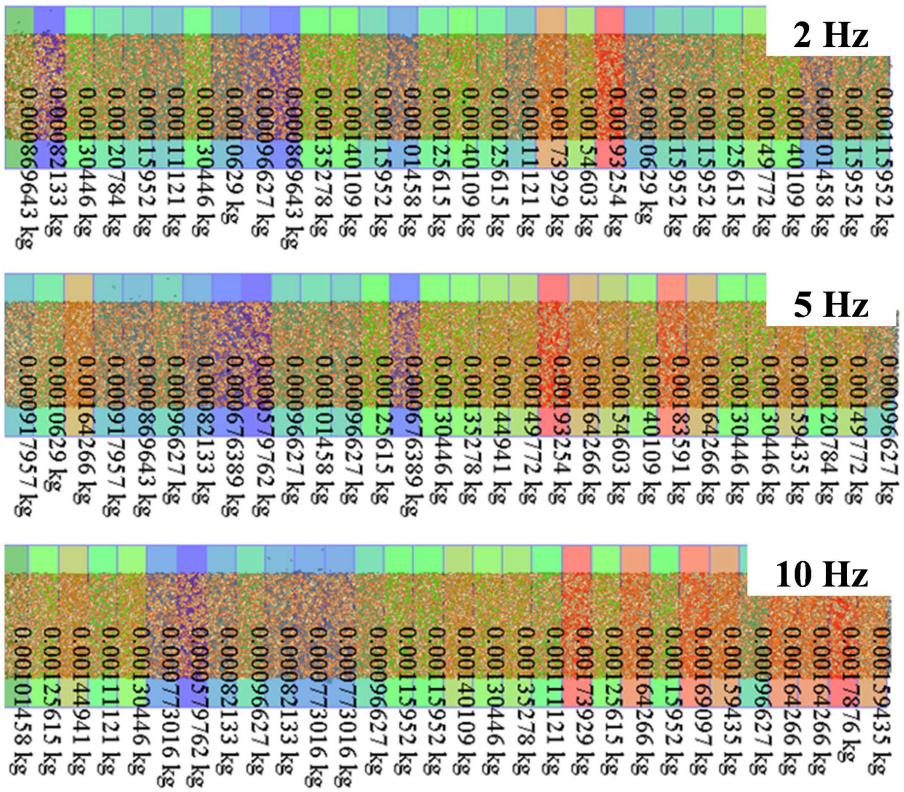


Figure 8. Mass distribution of spherical particles under different vibration frequencies
图 8. 不同振动频率工况球形颗粒质量分布

3.3. 料斗振幅对均匀性的影响

在料斗行进速度为 10 mm/s、料斗振动频率为 5 Hz 情况下，分别计算料斗振幅为 0.2 mm、0.5 mm、1 mm 和 2 mm 工况布料情况。四种工况布料结束状态如图 9 所示。由图 9 可以看出，当振幅为 0.2 mm 和 0.5 mm 时，料斗返程达到起始点时料斗内依旧剩余少部分粉料，而当振幅达到 2 mm 时，料斗返程中接近半程即完成布料。分别提取不同工况下料斗内粉料质量随时间变化曲线，如图 10 所示，随着料斗振幅增大，曲线斜率逐渐增大，即粉料质量流率增大。当振幅为 0.2 mm 和 0.5 mm 时，料斗内粉料质量变化与无振动工况基本相同，而当进一步提高振幅后，料斗内质量流率明显增大。结果表明，随着料斗振幅增加，粉料下落越快，完成布料所需时间越短。

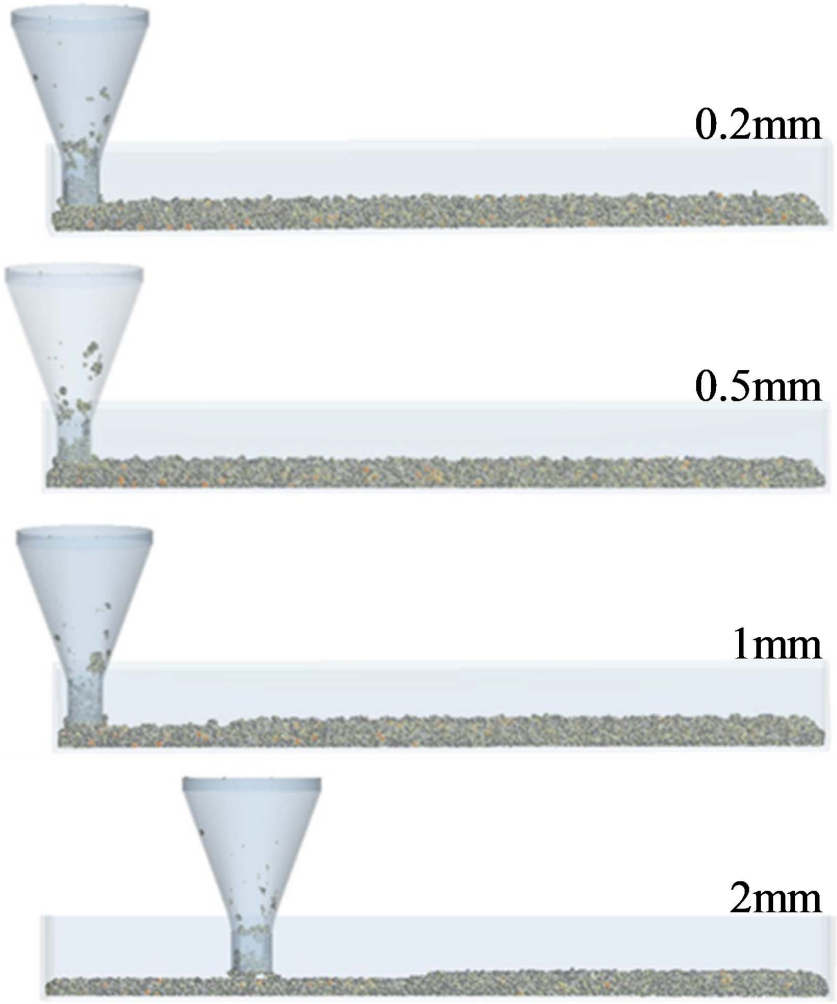


Figure 9. Final distribution state under different amplitudes
图 9. 不同振幅工况布料结束状态

同样在压坯长度方向上创建 30 个检测器，统计每个检测器内球形颗粒的质量分布，进而分析球形颗粒分布均匀性，结果如图 11 所示。通过对各个监测统计数据的计算，可以得到当料斗振幅分别为 0.2 mm、0.5 mm、1 mm 和 2 mm 时，采用标准差计算得到的球形颗粒的分布均匀性数值分别为 0.23、0.29、0.36、0.37。因此，随着料斗振幅的提高，检测器统计颗粒分布均匀性变差。

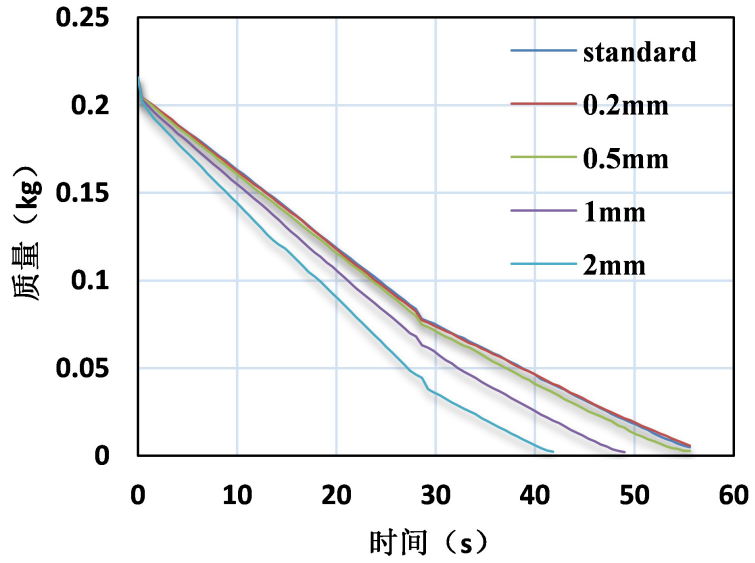


Figure 10. Curves of powder mass in the hopper over time under different amplitudes
图 10. 不同振幅工况料斗内粉末质量随时间变化曲线

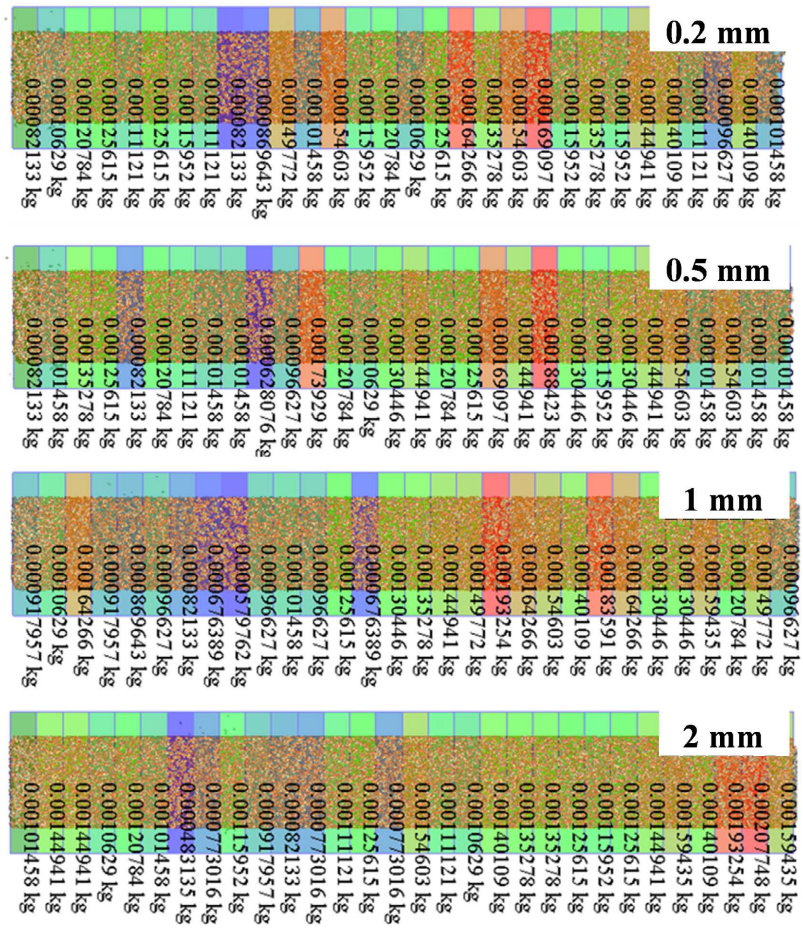


Figure 11. Mass distribution of spherical particles under different amplitudes
图 11. 不同振幅工况球形颗粒质量分布

综上，各工况布料计算结果如表 3 所示。结果显示料斗行进速度增大，粉料分布均匀性得到提高；料斗振动频率和振幅增大，粉料分布均匀性降低。实际工程操作中需要粉料在一个来回过程中完成布料，并确保粉料完全下落到模具中，可以接受粉料提前完成下落。对比完成全部粉料布料的工况(2, 3, 6, 7)，振动频率和振幅增加仅略微增大球形颗粒的质量标准差。因此，在实际生产工艺中有必要增加料斗振动，以确保粉料完全下落到模具中，并降低振动频率和振幅，降低振动对粉料均匀性的不利影响。在表 3 工况中优选振动频率 5 Hz、振幅 1 mm、布料速度 10 mm/s 参数组合。

Table 3. Summary of calculation results for distribution uniformity
表 3. 布料均匀性计算结果汇总表

工况编号	振动频率 Hz	振动振幅 mm	布料速度 mm/s	球形颗粒标准差	是否完成布料
1	2	1	10	0.25	否
2	5	1	10	0.36	是
3	10	1	10	0.37	是
4	5	0.2	10	0.23	否
5	5	0.5	10	0.29	否
6	5	2	10	0.37	是
7	5	1	5	0.39	是
8	5	1	20	0.23	否

4. 结论

论文利用离散元仿真软件 EDEM 模拟粉末的布料过程，研究了料斗行进速率、料斗振动频率和振幅对混合粉末布料过程及粉料均匀性的影响，所得规律可为实际生产工艺中料斗速度和振动参数选取提供趋势性参考。主要结论如下：

(1) 随着料斗运行速度的越快，粉料下落速度越快，但单位距离的布料质量降低。因此，料斗行进速度应低于 20 mm/s，保证粉料充分下落。

(2) 当给料斗添加振动后，料斗内粉料之间的力学结构更容易被破坏，有利于粉料的下落流动。随着振动频率和振幅提高，料斗内粉料质量流率增大。

(3) 随着料斗行进速度的增加，布料均匀性得到提高。随着振动频率和振幅的提高，布料均匀性降低。因此，在实际生产工艺中，应合理设置料斗振动相关参数。

参考文献

[1] 王文涛, 王俊元 段能全, 等. 基于离散元的粉料振动密堆积影响因素研究[J]. 中国陶瓷, 2013, 49(8): 42-45.

[2] Lei, C.G., Xu, W.B., Luo, Q.Y., Cai, D., Li, B. and Liu, C. (2025) Calibration and Testing of Discrete Element Model Parameters for Crushed Stone Soil with Varying Moisture Contents. *Engineering Research Express*, **7**, Article ID: 0455b2. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ae2424

[3] 李庚, 薛亚南, 黄永娜, 等. 基于 EDEM 的翻板冷却器布料器布料效果的离散元仿真优化[J]. 中国油脂, 2023, 48(7): 143-148.

[4] 黄迪, 曾剑桥, 刘辉. 复合移动床电石反应器中颗粒运动的离散元法模拟[J]. 化工进展, 2014, 33(10): 2576-2583.

[5] 郑文庆, 谭援强, 刘超, 等. 硬质合金刀片用粉末在型腔中填充的离散元模拟研究[J]. 硬质合金, 2024, 41(6): 526-534.

[6] 刘学, 董兴亮, 孙中华, 等. 基于 EDEM 的行星式搅拌机合理搅拌速度仿真研究[J]. 土木工程, 2024, 13(10): 1892-1899.

[7] 张宏智, 刘哲铭, 蒋文龙, 等. 不规则金属粉末流动性的离散元参数标定研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44(7): 22-24.

[8] 张立祥, 郑娃, 王亚明. 基于离散元法的煤颗粒摩擦系数标定研究[J]. 建模与仿真, 2022, 11(3): 508-515.

[9] Sakai, M., Abe, M., Shigeto, Y., Mizutani, S., Takahashi, H., Viré, A., *et al*. (2014) Verification and Validation of a Coarse Grain Model of the DEM in a Bubbling Fluidized Bed. *Chemical Engineering Journal*, **244**, 33-43. https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.01.029

[10] 廖志超, 唐雪芳, 李焕正, 等. 基于休止角和流动能的桂枝茯苓胶囊浸膏粉离散元仿真参数标定研究[J]. 中草药, 2024, 55(21): 7279-7287.

[11] Lommen, S., Schott, D. and Lodewijks, G. (2014) DEM Speedup: Stiffness Effects on Behavior of Bulk Material. *Particuology*, **12**, 107-112. https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.03.006

[12] Zhang, S., Yang, G. and Zhang, X. (2025) Effect of Boundaries on Flow Behavior of Granular Material in a Hopper. *Powder Technology*, **466**, Article ID: 121505. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121505