

中药配方颗粒汇集装置数值模拟与试验研究

赵明¹, 芦金石^{1,2}, 冯怡然^{1,2}, 崔任栋¹, 吴昊天¹, 王硕¹

¹大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连

²国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁 大连

收稿日期: 2024年5月30日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

为了解决中药配方颗粒配药方式存在配药耗时长, 易出错等问题。针对颗粒汇集装置提出了技术方案, 基于计算流体动力学和离散元(CFD-DEM)耦合方法, 对颗粒汇集装置不同出口速度下颗粒流态进行仿真模拟并采取试验研究。仿真结果表明: 当出口气体流速为8 m/s时, 部分颗粒在气路管道发生堆积, 无法进入旋风分离器进行气固分离; 当出口速度为10 m/s时, 颗粒经过气路管道全部进入旋风分离器中; 当出口达一定速度对旋风分离器内的颗粒进行汇集时, 旋风分离器锥体区域产生一些“停滞”颗粒做水平圆周旋转, 当出口速度逐渐减小到3 m/s及以下时, 颗粒在料仓中达到稳定状态。同时, 对颗粒汇集装置进行了样机搭建和试验验证, 试验与仿真模拟结果基本吻合。为多种颗粒类物料的传输和收集提供了设计参考, 提升中药配方颗粒在汇集过程中的智能化。

关键词

CFD-DEM, 颗粒汇集, 数值模拟, 试验研究

Numerical Simulation and Experimental Research on the Collection Device for Traditional Chinese Medicine Formula Particles

Ming Zhao¹, Jinshi Lu^{1,2}, Yiran Feng^{1,2}, Rendong Cui¹, Haotian Wu¹, Shuo Wang¹

¹School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning

²National Marine food Engineering Technology Research Center, Dalian Liaoning

Received: May 30th, 2024; accepted: Jun. 23rd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

文章引用: 赵明, 芦金石, 冯怡然, 崔任栋, 吴昊天, 王硕. 中药配方颗粒汇集装置数值模拟与试验研究[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(3): 266-274. DOI: 10.12677/met.2024.133031

Abstract

In order to solve the problems of long dispensing time and easy errors in the dispensing method of traditional Chinese medicine formula granules, a technical solution has been proposed for the particle collection device. Based on the coupling method of computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM), simulation and experimental research have been conducted on the particle flow state at different outlet velocities of the particle collection device. The simulation results show that when the outlet gas flow rate is 8 m/s, some particles accumulate in the gas pipeline and cannot enter the cyclone separator for gas-solid separation; When the outlet speed is 10 m/s, all particles enter the cyclone separator through the gas pipeline; When the outlet reaches a certain speed to collect particles inside the cyclone separator, some "stagnant" particles are generated in the cone area of the cyclone separator for horizontal circular rotation. When the outlet speed gradually decreases to 3 m/s or below, the particles reach a stable state in the silo. At the same time, prototype construction and experimental verification were carried out on the particle collection device, and the experimental and simulation results were basically consistent. This provides design references for the transmission and collection of various particulate materials, and enhances the intelligence of traditional Chinese medicine formula particles in the collection process.

Keywords

CFD-DEM, Collection of Particles, Numerical Simulation, Experimental Research

Copyright © 2024 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

中药配方颗粒粒径较小, 极易发生扬尘, 这对中药颗粒配药机的颗粒传输和汇集提出了较高要求。气力输送设计易于操作, 可以简单地改变管道配置来调整输送路径, 在保障物料纯净度方面具有显著优势[1]。基于气力输送设备优点, 研发了多品种颗粒类物料的汇集装置。由于在试验条件下不能对颗粒和气流进行有效监控, 本文选用 CFD-DEM 耦合来仿真模拟颗粒在汇集装置中的汇集过程, 该方法在农业和工业等[2] [3]工程领域已被证明是有效的。王晓晨[4]采用 CFD-DEM 耦合的方式, 对油茶果负压吸附系统开展了数值模拟与试验研究, 得到了各因素的影响大小和最优的工况, 试验与数值模拟结果基本一致。Zhou [5]采用 CFD-DEM 研究了旋风除尘器中微米级颗粒的速度和压力分布, 并将仿真模拟与试验进行对比, 二者数据基本吻合。张凯[6]采用 CFD-DEM 对气吸式排种器进行了仿真研究, 得到了排种器的最佳工况。计算流体动力学和离散元耦合模型可以跟踪单个颗粒的运动和受力, 考虑颗粒形状、材料属性等因素, 可以更加直观观察到颗粒的复杂流动过程, 更适合于气固两项流的研究。

本文以颗粒汇集装置为研究对象, 考察汇集装置在不同出口速度下的颗粒流态的变化, 寻找与汇集装置想匹配的速度区间, 结合试验验证, 证明了颗粒汇集装置对颗粒传输和汇集的可行性, 并对比了仿真模拟与汇集试验结果的一致性, 为中药配方颗粒汇集工艺优化提供参考。

2. 数学模型

2.1. 几何模型

汇集装置采用多支路管道与旋风分离器结合的结构形式, 实现多品种中药颗粒的传输与汇集。颗粒

汇集装置几何模型如图1所示,汇集装置左右两侧共设置了24个管道入口,可以多路并行对颗粒的汇集,工作时,颗粒依靠自身重力和旋风分离器上方风机提供的负压吸入管道及旋风分离器中,并在旋风分离器中完成气固分离,气体从旋风分离器的排气口排出,中药颗粒下落到料仓,几何结构参数如表1和表2。

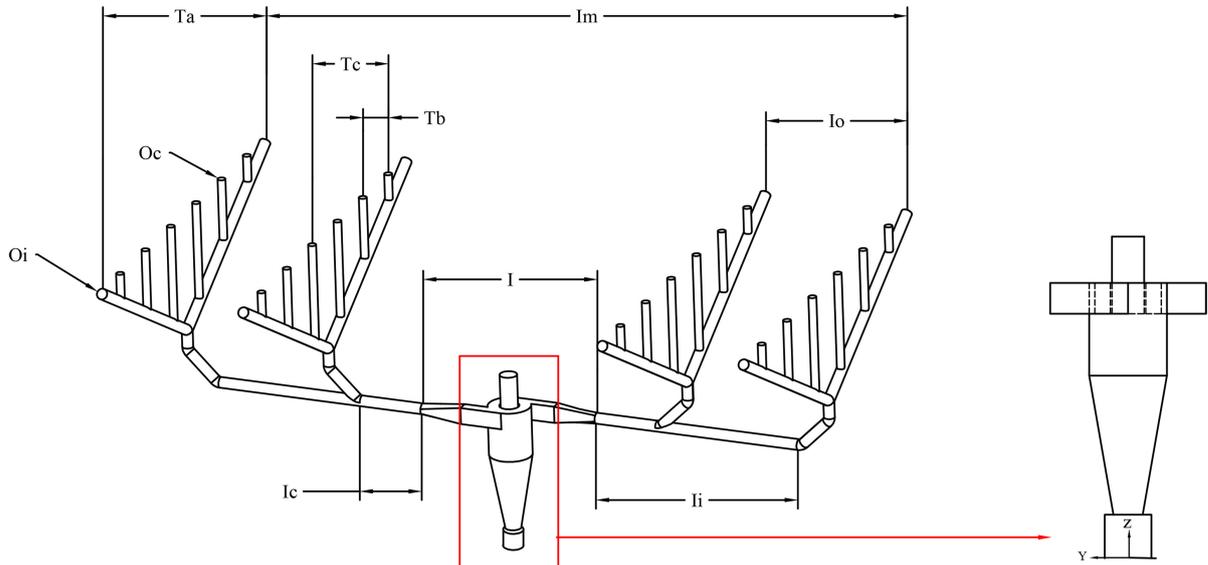


Figure 1. Geometric model of particle collecting device

图1. 颗粒汇集装置几何模型

Table 1. Particle collecting device geometry parameters (mm)

表1. 颗粒汇集装置几何结构参数(mm)

Ta	Tb	Tc	Im	Io	Ii	Ic	I	Oc	Oi
965	150	300	1558	350	500	400	400	18	25

Table 2. Cyclone geometry parameters (D = 100 mm)

表2. 旋风分离器几何结构参数(D = 100 mm)

a/D	b/D	De/D	h/D	Ht/D	S/D	Be/D	Li/D	Hc/D	Dc/D
0.4	0.24	0.415	1.2	3	0.5	0.375	1	1	0.5

2.2. 数学模型

2.2.1. 固相控制方程

在 CFD-DEM 中,固相被视为离散项,粒子在任何时间 t 的平移和旋转运动都可以用牛顿定律来描述:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{p-f,i} + \sum_{j=1}^{k_i} (f_{c,ij} + f_{d,ij}) + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (T_{ij} + M_{ij}) \quad (2)$$

式中: m_i , I_i , v_i 和 ω_i 分别是粒子 i 的质量, 惯性矩, 平移和旋转速度。作用在固相上的力是气固相互

作用力 $f_{p-f,i}$ ，粒子 i 和 j 之间的粒子之间的力包括，接触力 $f_{c,ij}$ ，粘性阻尼力 $f_{d,ij}$ 和重力 $m_i g$ 。粒子间力在与粒子 i 接触的 k_i 粒子上求和。切向力产生力矩 T_{ij} ，并导致粒子 i 旋转，因为粒子间力作用在粒子 i 和 j 之间的接触点，而不是粒子中心。 M_{ij} 是与第 i 个粒子旋转相反的滚动摩擦转矩。

2.2.2. 固相控制方程

流体被视为连续相，其微观尺度运动由局部平均 Navier-stokes 方程求解，质量和动量守恒由如下式：

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon u) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon u u) = -\nabla P - F_{p-f} + \nabla \cdot (\varepsilon \tau) + \rho_f \varepsilon g + \nabla \cdot (-\rho_f \overline{u'u'}) \quad (4)$$

式中： ε 为孔隙率； u, u' 为平均流体速度和波动流体速度； F_{p-f} 为体积流体 - 颗粒相互作用力； t, ρ_f, P, τ 和 g 分别为时间，流体密度，压力，粘性应力张量和重力加速度。 K_c 是 CFD 单元中的网格数量， V_{cell} 是网格体积； $-\rho_f \overline{u'u'}$ 是湍流引起的雷诺应力项。

2.3. 网格划分

使用 fluent meshing 中对颗粒汇集装置几何模型进行三维非结构六面体网格划分，图 2 显示了颗粒汇集装置 CFD 网格，入口打开数量为 10 的条件下，边界层数为 3 层，网格最大歪斜率为 0.3，达到计算要求。对网格无关性进行验证，在出口流速 10 m/s，分别设置了三组不同计算节点的网格，分别为 282,926，363,630，487,625 个网格数量，稳态模式迭代稳定。计算压降差异小于 5%，这表明计算结果与网格大小无关，见表 3。因此最终计算采用节点数量为 363,630 的网格。

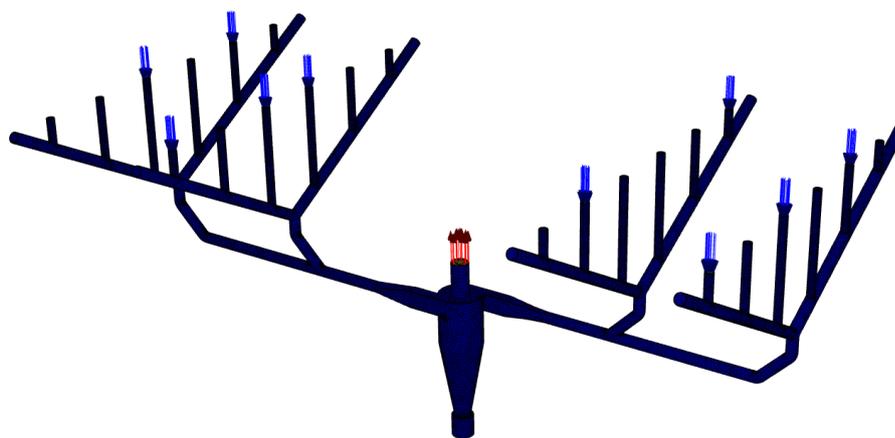


Figure 2. Particle collecting device CFD grid
图 2. 颗粒汇集装置 CFD 网格

Table 3. Grid independence verification
表 3. 网格无关性验证

网格数目	压降(pa)	最大计算误差/%
282,926	660.8	
363,630	689.7	4.19%
487,625	662.7	

2.4. 边界条件及计算设置

在 CFD-DEM 耦合计算中, 采用 SIMPLEC 压力 - 速度耦合算法, 标准壁面, RSM 湍流模型, 插值算法 PRESTO, 求解动量方程为 QUICK, 湍流动能和耗散曲率为二阶迎风格式, RSM 为一阶迎风。对照中国药典常用处方的中成药配伍, 主要药味在 10 味以下的应占 70% 以上, 在颗粒汇集装置中选取汇集装置左右边各五个入口, 共 10 个多支路管道入口。入口设为压力入口, 出口设为速度出口, 壁面处为标准无滑移边界条件, 入口和出口处采用 5% 的湍流强度, fluent 时间步长为 1×10^{-4} s。在模拟时, DEM 中管道入口的颗粒由颗粒工厂随机产生, DEM 时间步长为 1×10^{-6} s, 模拟仿真均采用双向耦合。共进行了 5 种工况的模拟, 当汇集装置对颗粒进行传输汇集时, 排气口出口速度分别 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s, 当颗粒完全进入旋风分离器进行颗粒汇集时, 出口速度为 6 m/s, 3 m/s, 根据常见内科疾病中药配方颗粒处方精选[7], 据统计颗粒剂处方一次最多服用均在 20 g 以内, 设置每个入口颗粒质量流率和给料量分别为 40 g/s 和 2 g, 本文采用 Furukawa R [8]文献中对制药颗粒的参数标定数据。

3. 模拟结果和分析

3.1. 不同出口速度下的颗粒流

图 3 显示了 3 s 时不同出口速度下汇集装置的颗粒流态(a = 8 m/s, b = 12 m/s), 在锥体区域和料仓区域建立 grid bin group 统计颗粒质量。如图 3(a)所示, 当出口速度为 8 m/s 时, 有颗粒在管道内发生堆积, 管道中的气体流速较小, 不足以使颗粒完全进入旋风分离器中进行气固分离; 同时可以观察, 管道内残留的颗粒位置有所不同, 这是由于开口位置不同, 造成的气路管道内气体流量的不匹配; 如图 3(b)所示, 当出口速度为 12 m/s 时, 颗粒完全进入旋风分离器中, 汇集过程中有部分颗粒从汇集装置排气口逃逸, 分离效率下降。随着出口速度逐渐增加, 锥体部分的颗粒向上运动, 且圆周旋转的颗粒逐渐增加。

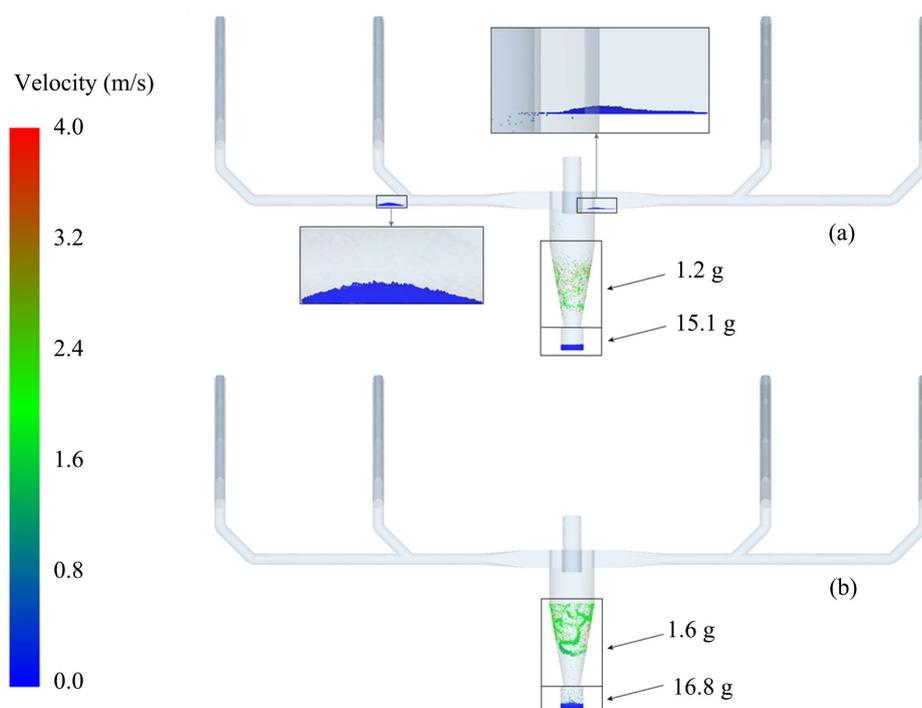


Figure 3. Particle flow patterns of particle collecting devices at different exit speeds

图 3. 不同出口速度下颗粒汇集装置颗粒流态

3.2. 颗粒流

颗粒经多支路管道进入旋风分离器后,在离心力的作用下沿着分离器的内壁面向下流动[9],图4显示了出口速度为10 m/s时颗粒汇集装置内部颗粒流态,经过3 s的模拟时间,在当前的CFD-DEM模型中,颗粒在管道无残留,并且颗粒没有从出口逃逸的现象发生,在颗粒进入分离空间后,旋风分离器锥体区域产生一些“停滞”颗粒做水平圆周旋转,没有到达底部,出现这种现象是因为圆锥部分的速度分布剖面值较高,对旋风分离器底部料仓的颗粒收集产生负面影响[10],颗粒将悬浮在锥形部分,不会从旋风分离器中出来,根据这些观测结果,在颗粒经多支路管道进入旋风分离器后,需要设计的一个合适的速度来收集旋流器底部的颗粒。

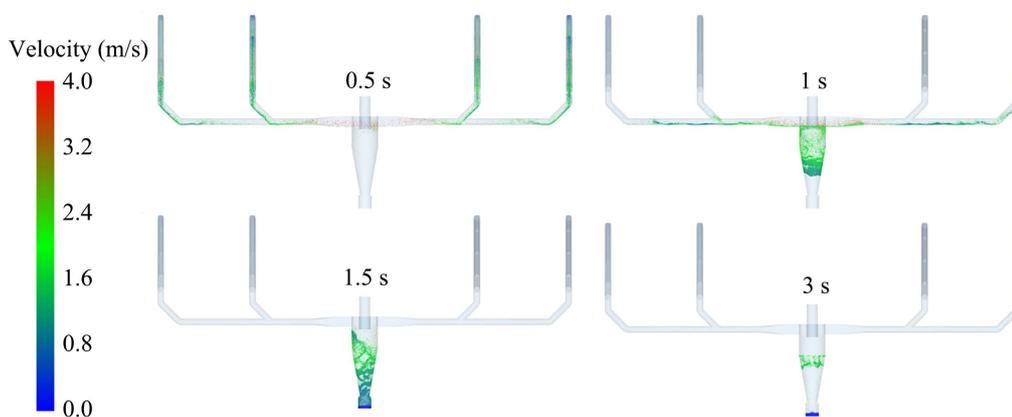


Figure 4. Particle flow pattern in particle collecting device
图4. 颗粒汇集装置内部颗粒流态

3.3. 不同出口速度下旋风分离器内部颗粒收集

图5显示了颗粒进入旋风分离器后,不同出口速度下的颗粒收集状态(a = 6 m/s, b = 3 m/s)。如图5(a)所示,当出口速度为6 m/s时,仍有部分颗粒悬浮在旋风分离器的锥体区域,如图5(b)所示,当出口速度下降到3 m/s时,颗粒完全收集在料仓中,达到宏观稳定状态。因此,当颗粒通过管道完全进入旋风分离器进行汇集时,出口速度至少要下降到3 m/s及以下。

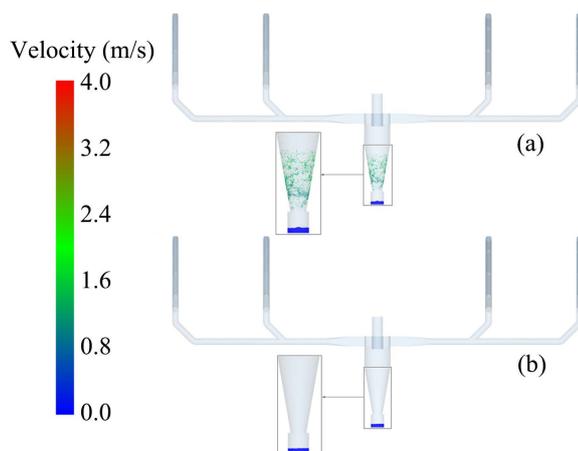


Figure 5. Particle collection state inside cyclone separator at different exit speeds
图5. 不同出口速度下旋风分离器内部颗粒收集状态

4. 汇集装置试验与结果对比

在试验时, 气流是通过安装在旋风分离器及过滤器上的负压风机产生并引入旋风分离器及管道的, 而在模拟过程中, 风机和过滤器被移除, 并且仅设置其出口风速的影响以节省计算资源。根据机械结构和仿真模拟结果, 利用多支路管道和旋风分离器结合的方式组成的汇集装置可以实现多种颗粒的传输与汇集, 因此基于汇集装置的结构, 加工并组装了一套汇集装置试验样机, 图 6 显示了颗粒汇集装置试验样机。



Figure 6. Experimental prototype of particle collecting device
图 6. 颗粒汇集装置试验样机

试验所用的中药颗粒选用华润三九医药股份有限公司生产的漏芦配方颗粒, 试验时, 打开与仿真模拟位置相同的十个管道支路入口并连接颗粒给料器, 图 7 显示了不同出口速度下颗粒汇集装置试验, 当汇集装置出口速度为 8 m/s 时, 有部分颗粒残存在旋风分离器入口处无法进入旋风分离器中, 而同一条件下仿真值也为 8 m/s 时, 同样有部分颗粒残留在旋风分离器入口处; 当出口速度为 9.2 m/s 时, 可以观察到颗粒在旋风分离器入口处没有残留, 并有部分颗粒在锥体区域做水平圆周运动。当旋风分离器出口速度由 9.2 m/s 下降到 4 m/s 后, 颗粒完全落入汇集装置下方的料仓中, 而同条件下的仿真模拟值为 3 m/s。分别进行了八组分离效率试验, 见表 4, 由表 4 可知汇集装置平均分离效率达 98%, 而仿真模拟出口速度为 10 m/s 时, 分离效率为 100%, 在分离效率方面, 二者误差为 2%, 根据中国药典第四部通则 0104 [11] 颗粒剂 6.0 g 以上, 装量差异限度 $\pm 5\%$ 的规定, 该颗粒汇集装置符合设计要求。对比试验与仿真的方案, 对误差产生的原因进行归纳分析, 结果如下。

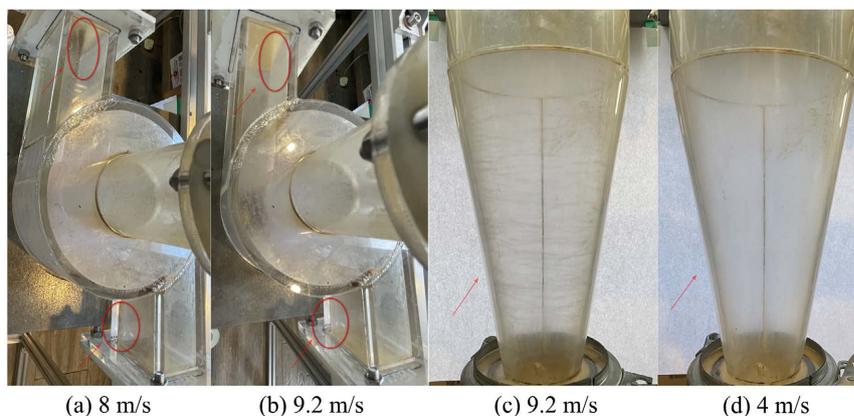


Figure 7. Experiments of particle collecting devices at different exit speeds
图 7. 不同出口速度下颗粒汇集装置试验

Table 4. The separation efficiency of the granules of the gulu formula (Outlet velocity 9.2 m/s)
表 4. 漏芦配方颗粒分离效率(出口速度 9.2 m/s)

实验组数	给料器给料量(g)	料仓收集量(g)	分离效率%	平均值(%)
1	20.00	19.70	98.5	
2	20.00	19.42	97.1	
3	20.00	19.44	97.2	
4	20.00	19.50	97.5	
5	20.00	19.56	97.8	98
6	20.00	19.75	98.7	
7	20.00	19.83	99.1	
8	20.00	19.62	98.1	

1) 试验过程中的颗粒粒径不统一,漏芦配方颗粒的粒径范围为 200~1500 μm ,仿真过程中粒径统一设置为 800 μm ,并且仿真使用的球形模型与实际的中药配方颗粒形状存在差异。

2) 在试验中,多叉路管道采用 PTEE 四氟圆管,而仿真模拟采用的是不锈钢圆管参数,两圆管在力学性能和表面粗糙度方面的差异也会扩大试验误差。

5. 结论

利用 CFD-DEM 的耦合方法,对颗粒在汇集装置中的颗粒运动过程进行仿真,当出口气体流速为 8 m/s 时,部分颗粒在管路发生堆积,无法进入旋风分离器进行气固分离;当出口速度为 10 m/s 时,颗粒经过气路管道完全进入旋风分离器中;当出口达一定速度对旋风分离器内的颗粒进行汇集时,旋风分离器锥体区域产生一些“停滞”颗粒做水平圆周旋转,随着出口速度逐渐增加,锥体部分的颗粒向上运动,且圆周旋转的颗粒逐渐增加,颗粒进入旋风分离器进行气固分离时,出口速度逐渐减小到 3 m/s 及以下时,锥体区域的颗粒下落到料仓,达到稳定状态。多支路管道和旋风分离器的结构形式能高效地完成多种颗粒的传输和汇集,试验数据与模拟结果之间有很好的 consistency。

基金项目

2023 辽宁省教育厅面上项目(揭榜挂帅服务地方):“大健康”背景下智能中药免煎颗粒收集及给药装置的研发(JYTMS20230395)。

参考文献

- [1] 盛庆娇. 气力输送系统在聚烯烃装置中的应用[J]. 炼油与化工, 2023, 34(3): 52-54.
- [2] 袁子翔, 戴飞, 赵武云, 等. 基于 CFD-DEM 的胡麻风筛式清选装置仿真分析与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 281-290.
- [3] 刘晓明, 李维, 黄川, 等. 基于 CFD-DEM 的盾构泥浆管道排渣特性参数影响规律研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(1): 161-167.
- [4] 王晓晨, 高自成, 李立君, 等. 基于 CFD-DEM 油茶果负压吸附系统数值模拟及试验研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 192-197.
- [5] Zhou, H.L., et al. (2019) Numerical Study on Gas-Solid Flow Characteristics of Ultra-Light Particles in a Cyclone Separator. *Powder Technology*, **344**, 784-796. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.054>
- [6] 张凯, 洪杨, 徐祝欣. 基于 DEM-CFD 耦合的气吸式排种器仿真研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),

- 2020, 12(6): 767-772.
- [7] 方显明, 黄红英. 常见内科疾病中药配方颗粒处方精选[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2013: 2.
 - [8] Furukawa, R., Shiosaka, Y., Kadota, K., *et al.* (2016) Size-Induced Segregation during Pharmaceutical Particle Die Filling Assessed by Response Surface Methodology Using Discrete Element Method. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **35**, 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2016.08.004>
 - [9] 李博涛, 张宏图, 位乐, 等. 基于 CFD-DEM 的旋风除尘器内气固流动特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11): 151-157.
 - [10] El-Emam, M.A., Zhou, L., Shi, W., *et al.* (2021) Performance Evaluation of Standard Cyclone Separators by Using CFD-DEM Simulation with Realistic Bio-Particulate Matter. *Powder Technology*, **385**, 357-374. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.006>
 - [11] 国家药典委员会. 中国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.