

基于 CFD-DEM 耦合的上吸式碾米机结构优化与物料分离特性研究

李 园¹ 周 龙¹ 范吉军² 余南辉¹ 杨 勇¹

(1. 武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430023; 2. 武汉轻工大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430023)

摘要: [目的] 通过优化风道结构和运行参数提高上吸式碾米机内米糠和碎米的分离效率。[方法] 采用 CFD-DEM 耦合数值仿真与试验验证相结合的方法, 研究上吸式碾米机在不同结构与运行参数下的物料分离特性。通过单因素试验及响应面分析, 对风道宽度、风速、隔板宽度及隔板间距等关键参数进行优化。[结果] 下吸风口增设隔板可以改善上吸式碾米机风道内的压力与流速分布, 显著提升米糠上吸率并降低碎米沉降率, 且试验与仿真结果规律一致; 响应面分析得到的最优参数组合为风道宽度 39.2 mm、风速 9.3 m/s、隔板宽度 13.2 mm、隔板间距 26.7 mm; 最优条件下, 数值仿真验证的米糠上吸率为 96.2%, 碎米沉降率为 97.4%。[结论] 通过流场调控与结构优化的协同设计, 能够有效解决上吸式碾米机中物料颗粒分离效率不足的共性难题。

关键词: 上吸式碾米机; 物料分离; 风道结构; 参数优化; CFD-DEM; 数值模拟

Structural optimization and material separation characteristics of an updraft rice mill based on CFD-DEM

Li Yuan¹ Zhou Long¹ Fan Jijun² Yu Nanhui¹ Yang Yong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China)

Abstract: [Objective] To enhance the separation efficiency of rice bran and broken rice in an updraft rice mill by optimizing the air duct structure and operating parameters. [Methods] A combined approach of CFD-DEM coupled numerical simulation and experimental verification was adopted to investigate the material separation characteristics of the updraft rice mill under different structural and operating parameters. Key parameters, including air duct width, air velocity, baffle width, and baffle spacing, were optimized through single-factor experiments and response surface methodology. [Results] The addition of baffles at the lower suction inlet improved the pressure and flow velocity distributions within the air duct of the updraft rice mill, significantly increasing the upward suction rate of rice bran and reducing the settling rate of broken rice. The experimental and simulation results showed consistent trends. Response surface analysis showed that the optimal parameter combination was an air duct width of 39.2 mm, air velocity of 9.3 m/s, baffle width of 13.2 mm, and baffle spacing of 26.7 mm. Under the optimal conditions, numerical simulation verified that the upward suction rate of rice bran reached 96.2%, while the settling rate of broken rice reached 97.4%. [Conclusion] Through the coordinated design of flow field regulation and structural optimization, the common problem of insufficient particle separation efficiency in updraft rice mills can be effectively addressed.

Keywords: updraft rice mill; material separation; air duct structure; parameter optimization; CFD-DEM; numerical simulation

基金项目: 湖北省重点研发计划(编号: 2023BBB018)

通信作者: 周龙(1970—), 男, 武汉轻工大学教授, 博士。E-mail: profzh@126.com

收稿日期: 2025-10-24 改回日期: 2026-04-11

引用格式: 李园, 周龙, 范吉军, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的上吸式碾米机结构优化与物料分离特性研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 79-87.

Citation: Li Yuan, Zhou Long, Fan Jijun, et al. Structural optimization and material separation characteristics of an updraft rice mill based on CFD-DEM[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 79-87.

稻米作为全球过半人口的主食,其加工品质直接影响食用价值与经济效益。在稻谷碾磨加工过程中,米糠与碎米的高效分离是提升整米率、保障成品质量的核心技术挑战^[1-3]。分离效果不仅影响大米的营养品质和商品等级,也是决定原料利用率和加工经济性的重要因素^[4]。上吸式碾米机因具有结构紧凑、能耗低等优势,在中小规模稻米加工中得到广泛应用。该设备利用风机产生的负压气流,将轻质米糠从上部风道吸出,密度较大的碎米则在重力作用下沉降,从而实现物料的有效分级与分离^[5-6]。然而,在实际运行中,上吸式碾米机普遍存在米糠吸出效率不高以及碎米易受气流裹挟的问题,严重制约了物料分离效果与产品质量的进一步提升^[7]。

在农业与物料加工领域,气流风选是一种广泛应用的高效分选方法,设备结构与运行参数是决定分选效率的关键因素^[8-10]。陈林等^[11]设计了对称式结构双吸风新型米糠碎米分离装置,研究表明吸风风速为 4.5 m/s 时的物料分离效果最佳,分离率高达 98.99%。雷港等^[12]提出了装配拱形隔板的振动风选米糠碎米分离装置,发现拱形隔板高度为 95 mm、宽度为 110 mm 时,分离率达 82.66%,且损失率为 0。Ma 等^[13]研究了风力参数对上吸风碾米机分选效果的影响,发现增大风速能够增强米粒在碾磨腔内的翻滚位移,从而有效降低碎米率;当气流速度为 6 m/s、喷射气流速度为 20 m/s 时,分离率达 95.4%,碎米率为 5.4%。随着计算流体力学的快速发展,CFD-DEM 耦合数值模拟已成为研究气固两相流的强大工具,众多学者基于该技术对复杂流场中物料颗粒的运动特性开展了广泛研究。马秋成等^[14]采用 CFD-DEM 耦合方法,研究了不同工艺参数下莲子物料分离装置内的气流场分布规律,为相关分离设备的设计提供了理论依据。Yuan 等^[15]研究了气流速度、圆柱筛直径及转速等因素对稻谷混合物在气流筒筛内的运动规律和筛分特性的影响,其仿真结果与试验相比筛分率误差仅为 3.3%,验证了 CFD-DEM 方法在研究气固两相流方面的可靠性。王立宗^[16]对碾米机内米糠与碎米的分离运动进行仿真预测,为上

吸风式碾米机结构优化设计提供了理论参考。然而,目前针对上吸式碾米机中风道几何参数、气流速度、隔板导流构件等多因素耦合作用下米糠和碎米分离特性的系统性研究仍相对不足,深入探究不同条件下颗粒在风道中的运动特性对提升碾米机物料分离性能具有重要意义。

研究拟采用 CFD-DEM 耦合数值模拟方法,研究上吸式碾米机风道宽度、进口风速及隔板布置等关键参数对米糠上吸率和碎米沉降率的影响规律,基于响应面分析方法优化关键参数,并通过分析风道内的压力与速度场分布特性,揭示隔板对物料分离过程的调控机制,旨在为上吸式碾米机的性能提升和工程优化提供理论依据与设计参考。

1 分析方法

1.1 几何模型

如图 1(a) 所示,试验系统由小型碾米机、变速电机、变速风机、风管、米糠收集装置和碎米收集装置组成。试验过程中,分别将米糠和碎米放入进料口,在风机产生的上吸风力作用下,米糠通过米筛网和碾米机内部环形风道后被吸入上方的米糠收集装置中,而碎米则在重力作用下落入下方收集装置。在 Solid works 中按照 1:1 比例建立碾米机三维几何模型,如图 1(b) 所示。主体尺寸为长 165 mm、宽 130 mm、高 220 mm,上吸风口为直径 60 mm、高 60 mm 的圆筒结构,下吸风口为长 80 mm、宽 80 mm 的正方形结构,内部碾米辊直径为 90 mm,仿真过程中通过改变碾米辊的直径来改变风道宽度大小。采用在下吸风口添加隔板的方式对碾米机内部流场进行优化,从而提高米糠与碎米的分离效率,隔板为长 165 mm、宽 18 mm 的亚克力板。

采用 EDEM 软件构建离散元模型时,碾米机模型采用的材料为亚克力板,米糠和碎米颗粒均采用 Single Sphere 模型进行还原和等效替代,其中碎米平均等效粒径为 1.5 mm,米糠平均等效粒径为 0.24 mm,如图 1(c) 所示。模拟过程中,不同材料的物理参数及材料间的接触参数设置分别如表 1 和表 2 所示^[17-18]。

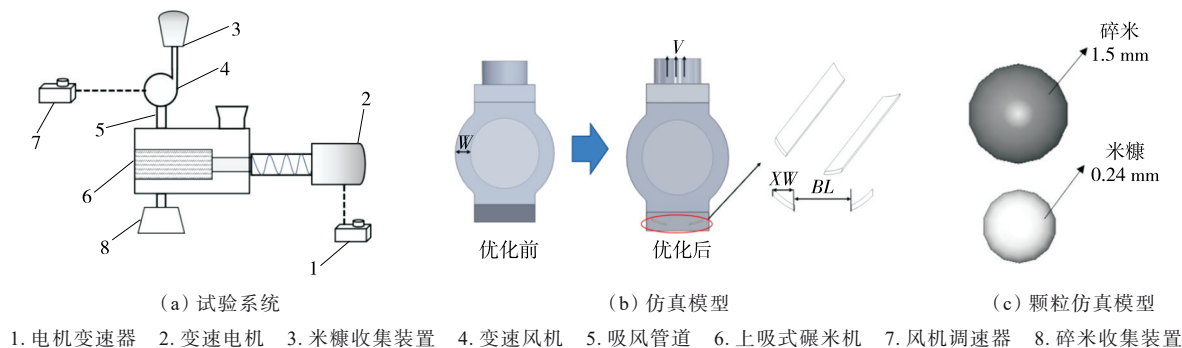


图 1 试验系统与颗粒几何模型

Figure 1 Test system and particle geometric model

表 1 材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of materials

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/Pa
米糠	1 600	0.30	$1.5\text{e}+006$
碎米	1 500	0.30	$2.6\text{e}+006$
亚克力板	1 190	0.25	$7.9\text{e}+010$

表 2 材料间的接触参数

Table 2 Contact parameters between materials

接触形式	静摩擦系数	滚动摩擦系数	弹性恢复系数
米糠—米糠	0.83	0.01	0.2
米糠—碎米	0.70	0.01	0.3
碎米—碎米	0.57	0.01	0.4
米糠—亚克力板	0.72	0.01	0.3
碎米—亚克力板	0.67	0.01	0.5

1.2 网格划分与边界条件

在数值模拟之前,采用 Fluent Meshing 对碾米机几何模型进行网格划分,使各部分网格正交质量均在 0.1 以上,以保证 Fluent 与 EDEM 的耦合精度。考虑风道内可能存在涡流,选用能够准确计算流场湍流的 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[16,19-20]。重力设置在负 y 轴方向,大小为 9.81 m/s^2 。Fluent 中计算域进口边界条件采用速度进口,出口边界条件为压力出口,初始压力为 0。碾米机的几何模型网格划分与边界条件见图 2。设置 Fluent 计算时间步长为 $6.0\text{e}-004 \text{ s}$,总步数为 5 000 步,每计算 1 000 步保存一次数据。根据碾米机的运行方式,在 EDEM 中的碾米辊位置设置颗粒工厂,在颗粒工厂平面上随机生成碎米和米糠颗粒,初始速度为 0 m/s ,颗粒间接触计算选用 Hertz-Mindlin (no slip) 模型。设置颗粒生成速率为 500 个/s,生成时间为 2 s,第 3 s 无颗粒生成以保证颗粒的分离效果。为详细获取颗粒运动信息,设置 EDEM 计算时间步长为 $1.5\text{e}-006 \text{ s}$,每 0.004 s 保存一次数据,总计算时间为 3 s。每组仿真均在相同条件下重复两次,取两次平均值进行分析。

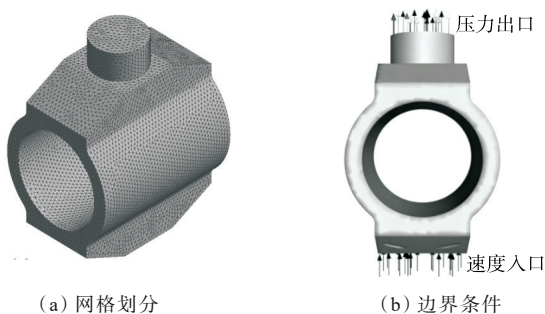


图 2 几何模型网格划分与边界条件

Figure 2 Geometric model meshing and boundary conditions

1.3 时间无关性验证

为确保数值模拟结果的可靠性,首先进行了时间无关性分析。在碾米机的入口与出口截面处分别设置监测面,统计不同时刻下通过该截面的颗粒数量。结果表明,由于颗粒在前 2 s 内持续生成,通过监测面的颗粒数量迅速增加。进入第 3 s 后,颗粒通过数量逐渐趋于稳定,延长仿真时间对分离效果的影响显著减小。至第 4 s 时,绝大部分颗粒已被分离出去,风道内仅残留极少量颗粒。综合考虑计算效率与模拟精度,最终确定颗粒运动仿真的时长为 3 s。

1.4 颗粒动态分析

在模拟过程中,气相流体和固相颗粒的耦合是通过计算动量汇来实现的。气流推动颗粒,使其扩散和移动,不同颗粒运动受力分析对于颗粒分离至关重要。风道中的颗粒受力分析如图 3 所示,颗粒在风道中运动受重力、浮力和上升气流对颗粒的曳力的影响。由于颗粒受到的浮力远小于气流对颗粒的曳力,米糠和碎米的分离主要是通过不同颗粒在风道内受气流对颗粒的曳力和重力的相对差异而引起悬浮速度不同而实现的^[16]。

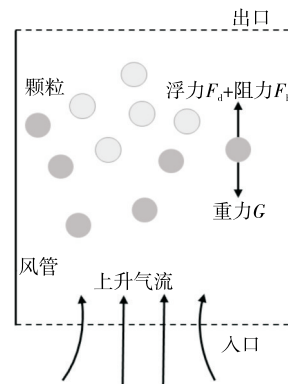


图 3 风道内颗粒受力分析

Figure 3 Force analysis of particles in the air duct

悬浮颗粒受力平衡方程:

$$F_d + F_b = G, \quad (1)$$

式中:

F_d ——气流对颗粒的曳力, N;

F_b ——颗粒受到的浮力, N;

G ——颗粒重力, N。

颗粒气流阻力描述如式(2)所示。

$$F_d = \frac{\pi d_p^2}{8} C_p \rho |v - v_p| (v - v_p), \quad (2)$$

式中:

C_p ——颗粒阻力系数;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

v ——流体速度, m/s ;

v_p ——颗粒速度, m/s ;

d_s ——颗粒等效直径, m。

颗粒等效直径计算:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6v}{\pi}} \quad (3)$$

颗粒阻力系数计算:

$$C_p = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & Re_p < 1 \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & 1 < Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (4)$$

$$Re_p = \frac{\rho|v - v_p|d_s}{\mu} \quad (5)$$

式中:

Re_p ——颗粒运动雷诺数;

μ ——流体黏度, kg/(m·s)。

当粒子悬浮时, 粒子速度为 0。将式(1)和式(2)结合可得颗粒悬浮速度的计算公式, 如式(6)所示。

$$v_0 = \left[\frac{4g}{3} \times \frac{d_s(\rho_p - \rho)|v - v_p|}{c_p} \right]^{0.5} \quad (6)$$

式中:

v_0 ——颗粒悬浮速度, m/s。

根据式(6)计算, 碎米颗粒的悬浮速度为 6.4 m/s, 而米糠颗粒悬浮速度为 1.6 m/s, 远低于碎米。所以在风道中, 密度小、粒径细的米糠会被上吸风携带走, 而密度和粒径大的碎米则在重力作用下沉降回落, 从而实现米糠与碎米在碾米机内部高效分离。

1.5 评价指标

以米糠上吸率与碎米沉降率对不同条件下碾米机的运行性能进行评价, 二者计算式:

$$r_b = \frac{A_{rb}}{T_{rb}} \times 100\% \quad (7)$$

$$b_r = \frac{S_{br}}{T_{br}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

r_b ——米糠上吸率, %;

A_{rb} 、 T_{rb} ——上方吸出的米糠和总米糠的质量, kg;

b_r ——碎米沉降率, %;

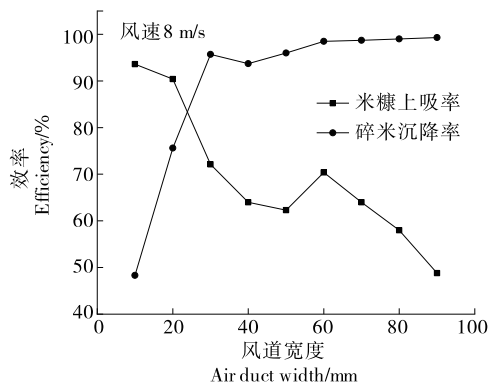
S_{br} 、 T_{br} ——下方沉降的碎米和总碎米的质量, kg。

2 结果与分析

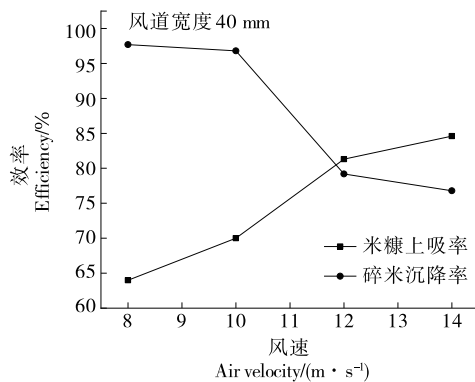
2.1 不同因素对分离性能的影响

2.1.1 无隔板下的分离性能 如图 4 所示, 随着风道宽度的增加, 米糠上吸率呈下降趋势, 从风道宽度为 10 mm 时的 93.6% 下降为 90 mm 时的 48.8%。碎米沉降率随风道宽度增加呈先快速上升后趋于稳定的规律, 在风道宽度为 30 mm 时便达到 95.7%。随着风速的增加, 米糠上吸率逐渐上升, 而碎米沉降率逐渐下降。风速从 8 m/s 增加至 14 m/s 时, 米糠上吸率从 64% 提高至 84.6%, 碎米沉降率从 97.7% 下降至 76.8%。以上结果表明, 风道宽度和风速对米糠和碎米的分离性能具有双重影响, 实际应用中需综合考虑米糠上吸率和碎米沉降率进行确定。此外, 过度增加风道宽度对碎米沉降率的提升不大, 反而会使米糠上吸率下降, 因此后续在添加隔板的仿真中, 风道宽度研究范围选取为 20~50 mm。

2.1.2 添加隔板后的分离性能 如图 5(a) 所示, 随着风道宽度从 20 mm 增加至 30 mm, 米糠上吸率从 97.5% 略微下降至 94.6%, 明显低于无隔板时的下降幅度, 而碎米沉降率从 52.4% 大幅提升至 96.6%。这是由于风道宽度增加会降低气体流速, 从而削弱米糠上吸效果并加速碎米重力沉降。如图 5(b) 所示, 当风速从 8 m/s 增加到 12 m/s 时, 米糠上吸率从 92.8% 提高至 97.7%, 碎米沉降率从 97% 下降至 76.3%, 显著优于无隔板下的效果。当风速持续增加到 14 m/s 时, 由于高速气流产生湍流动能, 观察到了部分碎米颗粒从上吸风口被吸出, 导致碎米沉降率大幅下降至 48.6%, 同时米糠上吸率略有下降。如图 5(c) 所示, 隔板宽度从 6 mm 增加至 12 mm 时, 米糠上吸率从



(a) 风道宽度的影响



(b) 风速的影响

图 4 无隔板时不同条件下的分离性能

Figure 4 Separation performance under different conditions without baffles

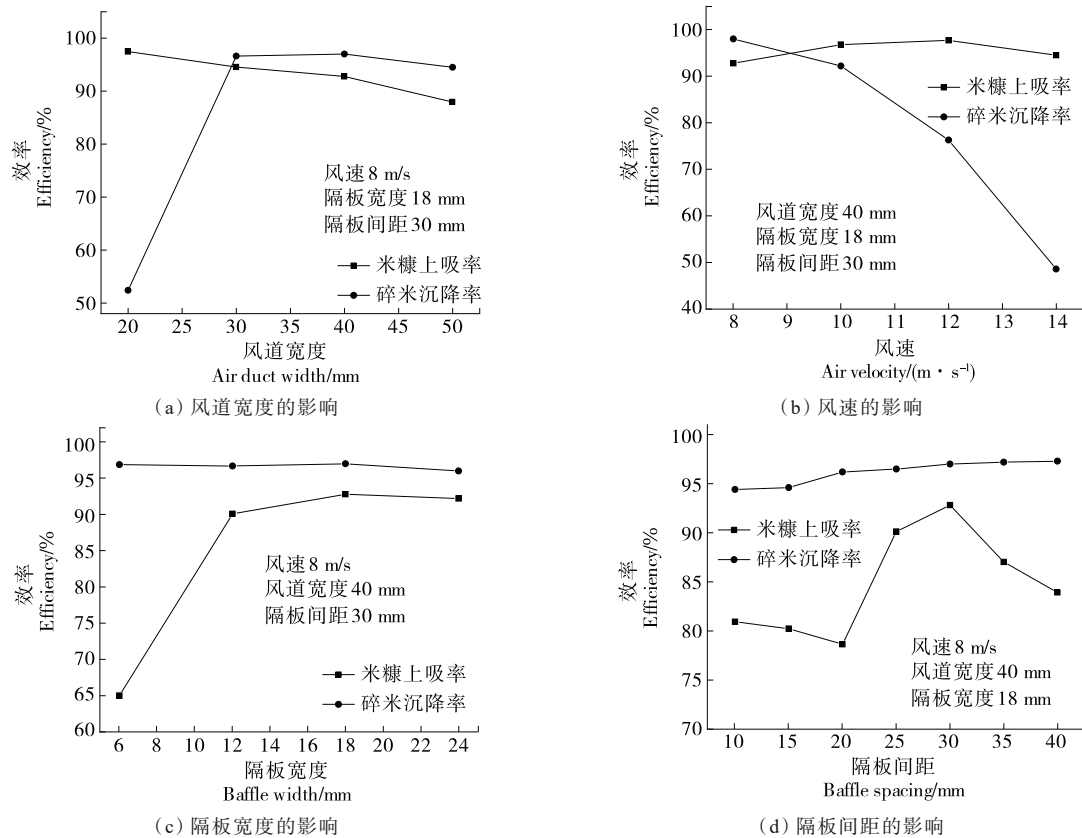


图5 有隔板时不同条件下的分离性能

Figure 5 Separation performance under different conditions with baffles

65%大幅提升至90.1%,继续增加隔板宽度至24 mm对米糠上吸率影响不大,而在整个隔板变化范围内,碎米沉降率几乎保持不变。如图5(d)所示,隔板间距从10 mm增加至40 mm过程中,米糠上吸率出现大幅波动,在隔板间距为30 mm时达到最大为92.8%,而碎米沉降率随着隔板间距的增加从94.4%小幅增加至97.3%。这是因为隔板间距的变化会导致风道内气流不稳定,由于米糠密度较小,其上吸率受气流稳定性影响较大,而碎米密度较大,其沉降率波动幅度较小。

2.1.3 试验验证 为了验证仿真结果的可靠性,在风速8 m/s、风道宽度40 mm下开展了无隔板时的米糠上吸和碎米沉降试验。此外,在该条件下引入隔板,开展了隔板宽度18 mm、隔板间距30 mm下的试验,结果如表3所示。仿真和试验结果均表明,添加隔板后米糠上吸率大幅度提升,而碎米沉降率变化不大。在无隔板时,气流缺乏加速区域,气流阻力不足以实现米糠的高效吸出,导致大量米糠滞留在风道内,分离过程的选择性较低。隔板的存在能够构建局部加速涡流场,显著提高米糠的负压吸出能力,同时保证碎米在可控范围内沉降,实现了分离纯度与碎米损失的平衡。试验过程得到的米糠上吸率和碎米沉降率明显低于仿真结果,这可能是由于试验中碾米机

的铁质壁面较为粗糙,对颗粒的黏附滞留作用较强,导致米糠上吸和碎米沉降受到阻碍。此外,试验过程中还发现少量粒径较小的碎米卡滞在米筛网中,同样会对碎米沉降率造成影响。

表3 仿真与试验结果对比

Table 3 Comparison of simulation and experimental results %

参数	无隔板		有隔板	
	仿真	试验	仿真	试验
米糠上吸率	64.0	55.1	92.8	79.8
碎米沉降率	97.7	87.0	97.0	85.1

以上单因素分析结果表明,碎米沉降率受风道宽度和风速的影响较大,而米糠上吸率则主要受隔板间距和隔板宽度的影响。整体来说,米糠上吸率在运行参数变化范围内的波动幅度小于碎米沉降率。在风道宽度20~40 mm、风速8~12 m/s、隔板宽度12~24 mm、隔板间距25~35 mm范围内,米糠上吸率均保持在85%以上。因此,后续响应面分析过程中,在以上参数范围内,以碎米沉降率为响应值开展运行参数组合优化,以进一步提升米糠和

碎米的分离性能。

2.2 运行参数优化

2.2.1 响应面试验设计与结果 采用 Expert-Design 13 软件中的 Box-Behnken (BBD) 设计方法,以风道宽度、风速、隔板宽度和隔板间距为试验变量,碎米沉降率为响应指标,设计试验。试验因素水平及编码值见表 4,BBD 试验设计及结果见表 5。

表 4 试验因素水平及编码值

Table 4 Different levels of experimental factors and their corresponding code values

编码	X ₁ 风道宽度/mm	X ₂ 风速/(m·s ⁻¹)	X ₃ 隔板宽度/mm	X ₄ 隔板间距/mm
-1	20	8	12	25
0	30	10	18	30
1	40	12	24	35

表 5 BBD 试验设计及结果

Table 5 Experimental design and results of BBD

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	碎米沉降率/%
1	-1	-1	0	0	52.4
2	1	-1	0	0	97.0
3	-1	1	0	0	12.9
4	1	1	0	0	76.3
5	0	0	-1	-1	83.3
6	0	0	-1	1	82.7
7	0	0	1	-1	84.9
8	0	0	1	1	48.1
9	-1	0	-1	0	37.4
10	1	0	-1	0	95.0
11	-1	0	1	0	23.5
12	1	0	1	0	66.9
13	0	-1	0	-1	95.3
14	0	1	0	-1	40.1
15	0	-1	0	1	96.0
16	0	1	0	1	38.7
17	-1	0	0	-1	29.2
18	1	0	0	-1	91.5
19	-1	0	0	1	31.0
20	1	0	0	1	91.9
21	0	-1	-1	0	96.6
22	0	1	-1	0	53.1
23	0	-1	1	0	90.2
24	0	1	1	0	26.4
25	0	0	0	0	84.5
26	0	0	0	0	80.8
27	0	0	0	0	86.0

2.2.2 模型建立与方差分析 对不同组合下得到的碎米沉降率进行多元线性回归拟合,得到不同因素下碎米沉降率的预测模型如式(9)所示,其回归系数 $R^2=0.954\ 1$,表明该模型可靠性较高。

$$Y=-680.67+12.46X_1+36.43X_2+21.11X_3+16.31X_4+0.24X_1X_2-0.06X_1X_3-0.007X_1X_4-0.42X_2X_3-0.52X_2X_4-0.3X_3X_4-0.18X_1^2-2.3X_2^2-0.21X_3^2-0.18X_4^2$$

(9)

对拟合得到的碎米沉降率多元线性回归预测模型进行方差数据分析,结果如表 6 所示。模型的 P 值 $<0.000\ 1$,表明此模型在回归区域内拟合高度显著。失拟项的 P 值为 0.079,表明模型的失拟性与系统误差相比并不显著,该模型能够准确描述碎米沉降率与风道宽度、风速、隔板宽度和隔板间距的关系。此外,风道宽度、风速和隔板宽度对碎米沉降率的影响显著,而隔板间距对碎米沉降率的影响不显著。根据 F 值大小可以判断,各因素对碎米沉降率的影响大小顺序为: $X_1>X_2>X_3>X_4$ 。

表 6 碎米沉降率多元线性回归方差分析

Table 6 Variance analysis of multiple linear regression for broken rice sedimentation rate

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	19 204.71	14	1 371.77	18.75	$<0.000\ 1$
X ₁	9 196.40	1	9 196.40	125.69	$<0.000\ 1$
X ₂	6 533.33	1	6 533.33	89.29	$<0.000\ 1$
X ₃	973.80	1	973.80	13.31	0.003 3
X ₄	107.40	1	107.40	1.47	0.249 0
X ₁ X ₂	88.36	1	88.36	1.21	0.293 4
X ₁ X ₃	50.41	1	50.41	0.69	0.422 7
X ₁ X ₄	0.49	1	0.49	0.01	0.936 1
X ₂ X ₃	103.02	1	103.02	1.41	0.258 4
X ₂ X ₄	1.10	1	1.10	0.02	0.904 3
X ₃ X ₄	327.61	1	327.61	4.48	0.055 9
X ₁ ²	1 716.82	1	1 716.82	23.46	0.000 4
X ₂ ²	450.60	1	450.60	6.16	0.028 9
X ₃ ²	304.35	1	304.35	4.16	0.064 0
X ₄ ²	107.00	1	107.00	1.46	0.249 8
残差	878.03	12	73.17		
失拟项	863.71	10	86.37	12.06	0.079 0
纯误差	14.33	2	7.16		
总和	20 082.75	26			

2.2.3 交互作用分析 从图 6(a)可以看出,风道宽度和风速的交互作用十分明显,碎米沉降率随风道变宽和风速降低而增加;风道宽度 20~28 mm、风速 9~12 m/s 时,碎米沉降率的提升率最为显著。从图 6(b)和图 6(c)可以看出,无论在宽风道还是窄风道条件下,隔板宽度和隔板间距对碎米沉降率的影响均不如风速明显。从图 6(d)和

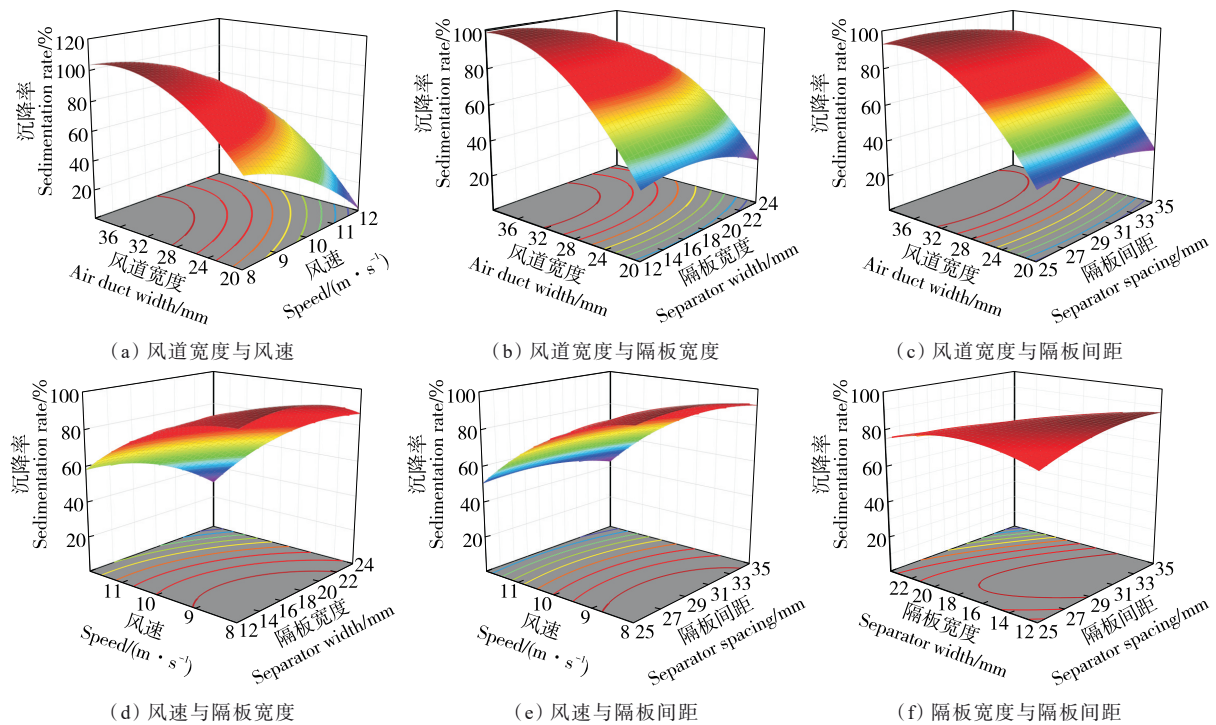


图6 不同因素交互作用下的碎米沉降率

Figure 6 Sedimentation rate of broken rice under the influence of different factors interacting with each other

图6(e)可以看出,在较高风速条件下,隔板宽度对沉降率的影响比低风速下更加明显;而隔板间距在不同风速条件下对碎米沉降率的影响均不显著。从图6(f)可以看出,隔板宽度和隔板间距的交互作用在所有因素组合中最不明显,在研究参数范围内,碎米沉降率普遍超过70%,整体维持在较高水平。

基于试验建立的碎米沉降率预测模型对运行参数进行优化,得到的最优参数为:风道宽度39.2 mm,风速9.3 m/s,隔板宽度13.2 mm,隔板间距26.7 mm。该条件下,模型预测碎米沉降率为99.5%,数值仿真结果为97.4%,预测误差为2.1%,表明预测模型具有较高的准确性。同时,仿真得到的米糠上吸率为96.2%,说明通过参数优化同时实现了较高的米糠上吸率与碎米沉降率。

2.2.4 验证实验 由于试验条件限制,风道宽度不可调整,风速与隔板参数也无法完全精准控制,将运行参数设定为:风道宽度40 mm,风速9 m/s,隔板宽度13 mm,隔板间距27 mm。经验证,米糠上吸率为80.3%,碎米沉降率为87.5%,均低于仿真值。这一差异主要源于两方面:① 试验参数与优化参数之间存在偏差;② 试验所用碾米机表面为粗糙铁质材料,对米糠和碎米具有较强的滞留与吸附作用。

在风道宽度40 mm,风速9 m/s,隔板宽度13 mm,隔板间距27 mm的条件下,在未添加隔板时,米糠上吸率仅为55%(碎米沉降率为89.1%),大量米糠未能有效吸出。引入隔板后,米糠上吸率显著提升至79.6%(碎米沉降率

为85.4%),表明隔板有效改善了风道内气流分布,增强了米糠的负压吸出能力。尽管碎米沉降率在加隔板后有所下降,但经参数优化后回升至87.5%,整体分离性能较优。以上试验结果表明,通过合理设置隔板结构与运行参数,可在保证碎米沉降的同时,显著提升米糠的吸出效率,具有较好的工程应用价值。

2.3 风道流场特性分析

从图7(a)可以看出,在无隔板条件下(风速8 m/s、风道宽度40 mm),风道内整体压力范围为 $-112.000 \sim -0.584$ Pa,压力梯度较为显著。风道下方压力较高,有利于碎米沉降;而中间环形区域压力整体偏高且分布不均,导致米糠吸出路径不稳定,这是该条件下米糠上吸率较低的主要原因。图7(b)展示了添加隔板(隔板宽度18 mm,间距30 mm)后的压力分布。压力变化范围扩大为 $-1.31e+002 \sim -4.13e-001$ Pa,中间环形区域压力均匀稳定在 -26.5 Pa左右,有助于米糠的聚集与定向吸出。同时,上方区域负压增强,进一步提升了对米糠的抽吸能力。图7(c)为响应面分析得出的参数优化组合下的压力分布。由于风速提高,上方负压范围显著扩大,极大提高了米糠吸出效率。中间环形区域压力分布在 $-3.47e+001 \sim -1.80e+001$ Pa,压力梯度分布合理且较为均匀,保证了米糠在风道内聚集与上吸路径的连续性和稳定性。以上结果表明,添加隔板对碾米机风道内的压力场和颗粒运动具有显著的调控作用。

图8展示了增设隔板前后及参数优化后的风道内速

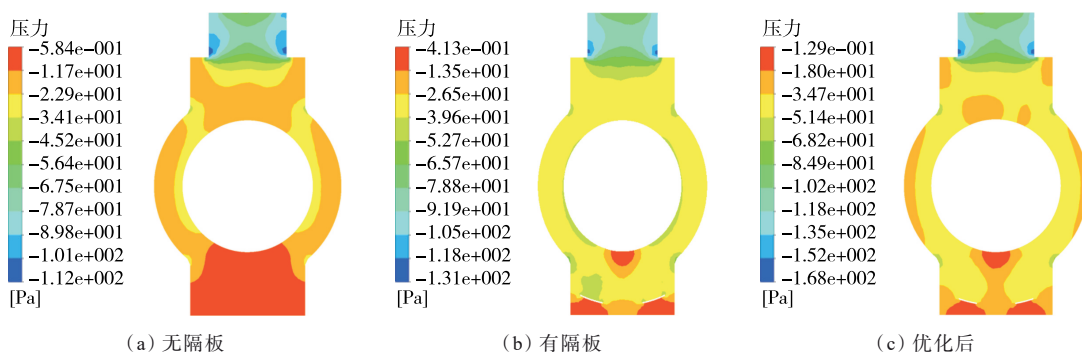


图7 添加隔板前后风道内压力分布

Figure 7 Pressure distribution in the duct before and after adding the baffles

度分布。无隔板条件下,风道内最大流速约为 10.8 m/s,高速区域主要集中在上方出口,中间环形风道和下方区域的流速相对较低。下方区域存在明显的低速区,速度梯度变化较大,这会导致部分米糠因气流支撑不足随着碎米一起沉降。整体气流分布均匀性较差,高速区与低速区界限分明,这种不均匀性易引发局部紊流或流动分离,从而降低分离效率。从图 8(b)可以看出,引入隔板后,中间环形风道的流速分布更加均匀,为米糠提供了更

稳定的吸出路径。然而,由于隔板对气流的分隔作用,下方区域出现局部低速区,对部分碎米的沉降产生了一定阻碍。参数优化组合下的速度分布如图 8(c)所示。风道内最大流速提高至约 12.8 m/s,上方出口的高速区范围进一步扩大,显著增强了对米糠的抽吸能力。中间环形风道的流速分布均匀性进一步提高,速度梯度过渡更为平滑。同时,优化后的隔板宽度有效减小了下方的低速区范围,最大限度降低了隔板对碎米沉降的负面影响。

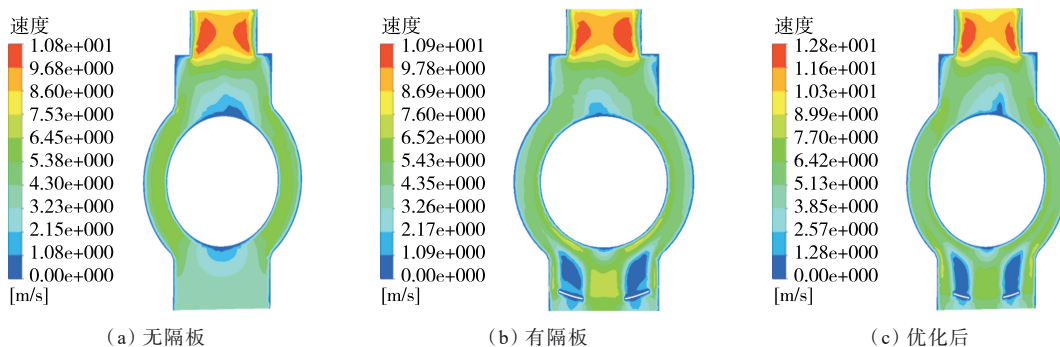


图8 添加隔板前后风道内速度分布

Figure 8 Velocity distribution in the duct before and after the addition of a baffle

综上,在上吸式碾米机的下吸风口处加装隔板,在实际工程应用中是一种具备成本效益优势的结构改进策略。通过合理调控风速、风道宽度、隔板间距与隔板宽度等关键参数,能够保证大幅提升米糠上吸率的同时,有效抑制碎米被气流裹挟,从而不仅提高了整米产品的纯度,也提升了米糠副产品的回收率,为实际生产带来显著的经济效益。

3 结论

基于 CFD-DEM 耦合数值仿真,研究了上吸式碾米机风道结构及运行参数对米糠与碎米分离性能的影响。通过单因素与响应面试验,分析了风道宽度、风速、隔板宽度与隔板间距对米糠上吸率与碎米沉降率的影响规律。结果表明,增设隔板可显著提升米糠上吸率,并改善碎米

沉降性能。响应面分析得到的最优参数组合为:风道宽度 39.2 mm、风速 9.3 m/s、隔板宽度 13.2 mm、隔板间距 26.7 mm,该条件下的米糠上吸率达 96.2%,碎米沉降率为 97.4%。流场特性分析表明,隔板结构有效改善了风道内压力场与速度场分布,进而增强了物料分离性能。未来可进一步研究加工不同品种稻谷时的最佳运行参数,进而设计基于实时监测的自适应分离系统,通过参数动态优化保证物料分离始终在最佳状态下运行。

参考文献

- [1] 刘锐, 苗艺源, 黄家章, 等. 营养功能型稻米产业研究进展与展望[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(6): 215-224.
- Liu R, Miao Y Y, Huang J Z, et al. Research progress and prospect of functional rice industry[J]. Journal of the Chinese

- Cereals and Oils Association, 2024, 39(6): 215-224.
- [2] 张珊, 洪滨, 沙迪新, 等. 稻米适度加工及其品质综合评价研究进展[J]. 食品科技, 2023, 48(6): 125-130.
Zhang S, Hong B, Sha D X, et al. Research progress on moderate processing and comprehensive quality evaluation of rice[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(6): 125-130.
- [3] 张玉荣, 刘影, 周显青, 等. 实验室碾米机加工不同粒形稻米对加工精度的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2010(10): 3-7.
Zhang Y R, Liu Y, Zhou X Q, et al. Effect of different grain shape rice pressed by laboratory rice mill on processing degree [J]. Cereal & Feed Industry, 2010(10): 3-7.
- [4] 安晓东, 陈小威, 杨磊, 等. 米糠制粒浸出工艺的研究与实践 [J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 140-143.
An X D, Chen X W, Yang L, et al. Research and practice of rice bran granulation and extraction process[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(3): 140-143.
- [5] 王立宗, 余南辉, 范吉军, 等. 上吸风碾米机环形风道内颗粒运动特性[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(2): 25-30.
Wang L Z, Yu N H, Fan J J, et al. Motion characteristics of particles in annular duct of top-suction rice mill[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(2): 25-30.
- [6] 计鑫, 吴柄明. 糠粳二次分离的生产应用[J]. 粮食与食品工业, 2015, 22(5): 49-50, 56.
Ji X, Wu B M. Production and application on secondary separation of rice bran and broken rice[J]. Cereal & Food Industry, 2015, 22(5): 49-50, 56.
- [7] Li A Q, Jia F G, Fei J M, et al. Numerical investigation of flow similarity of rice grains in friction rice mill and establishment of scale-up rule[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 108010.
- [8] 张德俊, 张小明, 吴荻, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的辣椒清选仿真研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(7): 87-96.
Zhang D J, Zhang X M, Wu D, et al. Simulation of pepper cleaning based on DEM-CFD coupling[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(7): 87-96.
- [9] 厉加兴, 申开颜, 梁英杰, 等. 基于 CFD 的红茶烘焙仿真及参数优化研究[J]. 农业与技术, 2025, 45(16): 44-50.
Li J X, Shen K P, Liang Y J, et al. Research on simulation and parameter optimization of black tea roasting based on CFD[J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(16): 44-50.
- [10] 郭柄江, 马学东, 刘正海, 等. 风筛式谷物清选模拟研究及参数讨论[J]. 农机化研究, 2021, 43(2): 10-15.
Guo B J, Ma X D, Liu Z H, et al. Simulation study and parameters discussion on wind-sieve type grain cleaning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(2): 10-15.
- [11] 陈林, 范吉军, 周龙. 对称式双吸风米糠与碎米分离装置的设计与试验[J]. 武汉轻工大学学报, 2023, 42(2): 114-121.
Chen L, Fan J J, Zhou L. Design and experiment of the symmetrical rice bran and broken rice separation device with double suction[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2023, 42(2): 114-121.
- [12] 雷港, 余南辉, 范吉军, 等. 基于 EDEM-Fluent 耦合的米糠碎米分离装置的试验研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(5): 76-83.
Lei G, Yu N H, Fan J J, et al. Experimental study on rice bran broken rice separation device based on EDEM-Fluent coupling [J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(5): 76-83.
- [13] Ma Z D, Wang L Z, Yang L, et al. Research on the influence of wind speed parameter matching on the operation quality of an upper suction-type rice mill[J]. Applied Sciences, 2025, 15(4): 1 849.
- [14] 马秋成, 雷林韬, 卢安珂, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的莲子壳仁分离装置优化与试验分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 87-91.
Ma Q C, Lei L T, Lu A G, et al. Simulation optimization and test of pneumatic separating device for lotus seed shell and kernel based on CFD-DEM coupling method[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 87-91.
- [15] Yuan J B, Wu C Y, Li H, et al. Movement rules and screening characteristics of rice-threshed mixture separation through a cylinder sieve[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 320-329.
- [16] 王立宗. 上吸风环形风道碾米机的设计与实验研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021: 28-32.
Wang L Z. Design and experimental study of up-suction rice mill with annular air duct[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021: 28-32.
- [17] 陈林, 余南辉, 王立宗, 等. 米糠和碎米的接触参数测量与离散元仿真标定[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(2): 127-136.
Chen L, Yu N H, Wang L Z, et al. Measurement of contact parameters and discrete element simulation calibration of rice bran and broken rice[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(2): 127-136.
- [18] 陈林, 余南辉, 范吉军, 等. 基于响应面法的米糠与碎米混合物间离散元参数标定[J]. 武汉轻工大学学报, 2023, 42(6): 10-17.
Chen L, Yu N H, Fan J J, et al. Calibration of discrete element parameters between rice bran and broken rice mixtures based on response surface methodology[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2023, 42(6): 10-17.
- [19] 张国荣, 张界威, 季家东, 等. 进风管锥度与供风方式对冷风发酵房流场均匀性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 94-100.
Zhang G R, Zhang J W, Ji J D, et al. Effects of inlet duct taper and air supply mode on flow field uniformity in cold air fermentation room[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 94-100.
- [20] 于洋, 蔚明强, 王尔杰, 等. 枸杞烘干箱温度场优化及仿真[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 101-107.
Yu Y, Wei M Q, Wang E J, et al. Optimization and simulation analysis of temperature field of wolfberry drying box[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 101-107.