

基于 CFD-DEM 耦合的碾米颗粒运动模拟 与方法研究

杨 勇¹ 周 龙¹ 范吉军² 余南辉¹ 李 园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] 针对卧式碾米机在碾米过程中造成颗粒破碎和过碾的问题, 提出通过改变吸风气流方向提高糙米颗粒的碾磨质量。[方法] 采用 CFD-DEM 耦合方法, 分别对上吸风 10 m/s、下吸风 5 m/s 和无风速 3 种状态进行数值仿真分析, 并通过物理样机碾磨试验验证仿真结果。[结果] 随着气流方向由上吸风转变到下吸风, 颗粒沿 Y 轴的上升速度 v_y 及三轴合成平均速度 v 整体降低, 同层段位置处上吸风颗粒速度 v_y 大于下吸风的, 在碾白室中下部处明显观察到上吸风颗粒平均速度 v 大于下吸风颗粒的, 碾磨区域内颗粒运动能力的差异导致容易过碾和破损区域的受力情况明显不同, 颗粒运动能力强时碾白室底部颗粒受到的挤压力减小, 颗粒运动能力弱时碾白室底部颗粒受到的挤压力增大; 颗粒翻滚角速度在上吸风的作用下, 对比无风速和下吸风效果增强; 每种状态下 3 次的物理试验结果, 上吸风 10 m/s、无风速和下吸风 5 m/s 的碾磨度平均值分别为 1.90%、2.20%、2.78%, 破损率平均值分别为 0.37%、0.46%、0.60%。[结论] 上吸风状态下颗粒碾磨过程中的流动和受力特性优于无风速和下吸风的情况; 上吸风比无风速和下吸风的碾磨度和破碎率明显下降。

关键词: 碾米颗粒; CFD-DEM; 颗粒流动; 多孔介质模型

A motion simulation method for rice particles during the milling process based on CFD-DEM coupling

YANG Yong¹ ZHOU Long¹ FAN Jijun² YU Nanhui¹ LI Yuan¹

(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 solve the problems of particle crushing and overgrinding of rice in horizontal milling machines, it is proposed to improve the milling quality of brown rice particles by changing the direction of suction air flow. [Methods] The CFD-DEM coupling method is used for the numerical simulation of the three states of upward suction at 10 m/s, downward suction at 5 m/s, and no wind speed (0 m/s). The simulation results are verified by the milling test with the physical prototype. [Results] As the air flow direction changes from upward suction to downward suction, the ascending velocity v_y and triaxial synthetic average velocity v of rice particles along the Y axis show an overall decreasing trend, and the upward suction particle velocity v_y is greater than the downward suction particle velocity v_y at the same layer. It is observed that the average velocity v of upward suction particles is larger than that of downward suction particles in the middle and lower parts of the whitening chamber. The difference in the movement capacity of the particles in the grinding area leads to a significant difference in the force in the areas prone to overgrinding and crushing. When the particle movement capacity is strong, the extrusion pressure on the particles at the bottom of the whitening chamber decreases. When the particle movement capacity is weak, the extrusion pressure on the particles at the bottom of the whitening chamber increases. In the case of upward suction, the rolling angular velocity of particles is higher than those in the cases of no wind speed and downward suction. According to the results of three physical tests in each state, the average degree of milling (D_{OM}) under upward suction at 10 m/s, no wind speed, and downward suction at 5 m/s are 1.90%,

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: 2025-02-17 改回日期: 2025-08-17

引用格式: 杨勇, 周龙, 范吉军, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的碾米颗粒运动模拟与方法研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 64-71.

Citation: YANG Yong, ZHOU Long, FAN Jijun, et al. A motion simulation method for rice particles during the milling process based on CFD-DEM coupling[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 64-71.

2.20%, and 2.78%, respectively, and the average rate of crushing (R_{OC}) are 0.37%, 0.46%, and 0.60%, respectively. [Conclusion] The flow and force characteristics of the particle milling process under upward suction are superior to those under no wind speed and downward suction. The D_{OM} and R_{OC} under upward suction are significantly lower than those under no wind speed and downward suction.

Keywords: rice particles in milling; CFD-DEM; particle flow; model of porous medium

水稻是中国最重要的农作物之一,年产量位居世界前列^[1]。收获的稻谷需要经过清理、砻谷、碾米等一系列加工工序,才能转化为食用大米。其中,碾米是将稻谷加工成白米的关键工序,直接影响最终大米的品质。碾磨过程由碾米机完成,碾米机通过碾白辊的高速旋转去除糙米的糠层,获得完整的白米^[2]。然而,在这一过程中,不仅米糠被去除,大米也会产生破碎。为了提高碾磨质量,许多研究集中于碾米机的内部结构设计,但是气流方向同样影响碾磨效果。传统卧式碾米机依靠向下吸风收集米糠,一些中国企业提出了上吸风式碾米机,以提高米糠收集效率^[3-4]。然而,关于不同吸风方式碾米机对糙米碾磨质量的研究报道较少。

近年来,随着离散元法(DEM)和计算流体力学(CFD)模拟技术的进步,CFD-DEM耦合已被广泛应用于农业工程领域。虞文俊等^[5]利用Fluent-DEM耦合模拟茶叶杀青机中滚筒内流场温度分布,研究电加热结构与红外杀青机对茶叶杀青均匀性和效率的影响。张德俊等^[6]采用CFD-DEM耦合研究辣椒风选分离过程中辣椒混合物的运动特性及分离机理,并模拟不同风速下辣椒的含杂率和损失率。陈平录等^[7]采用CFD-DEM耦合方法对联合收割机收割稻谷时的不同干燥方式进行仿真,分析稻谷的运动、传热及搅龙内的流场。马秋成等^[8]采用CFD-DEM耦合方法分析莲子混合物料在分离管道中的

运动特性。王立宗等^[9]运用CFD-DEM耦合技术研究上吸风式碾米机环形风道中米糠和碎米的运动规律,并分析不同风速下的分离效果。夏圣博等^[10]基于CFD-DEM耦合模拟联合收获机收获后气流对籽粒运动速度和轨迹的影响,得出了最优清种气流速度。刘立意等^[11]采用CFD-DEM耦合模拟不同风速下稻谷在垂直圆管中通风谷层阻力的变化,结果表明仿真与试验结果一致。目前尚未见针对大米碾磨设备中,不同风向下颗粒在碾磨室中的运动和接触效果进行研究。

研究拟采用CFD-DEM耦合方法分析碾米机在不同吸风方向下,碾磨过程中颗粒的运动特性和受力情况。通过仿真数据分析上吸风10 m/s、无风速和下吸风5 m/s下颗粒的运动和受力差异,并在试验样机中进行碾米试验,对比不同吸风方向和无风速情况下颗粒的碾磨度与破碎率,探讨气流方向对碾米效果的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 米粒颗粒及数值模型构建 如图1所示,大米颗粒可以看作是一种柱体颗粒,但是每粒颗粒的尺寸存在差异性,为了减少仿真计算量,又能让糙米颗粒模型符合所需的轴对称柱体,随机选取30个大米颗粒,用游标卡尺测量 L , l_1 , l_2 ,取其 L 和 $(l_1+l_2)/2$ 的平均值^[12],分别定义为长轴和短轴的值。测量结果为长轴6.5 mm、短轴2.1 mm,进行建模。

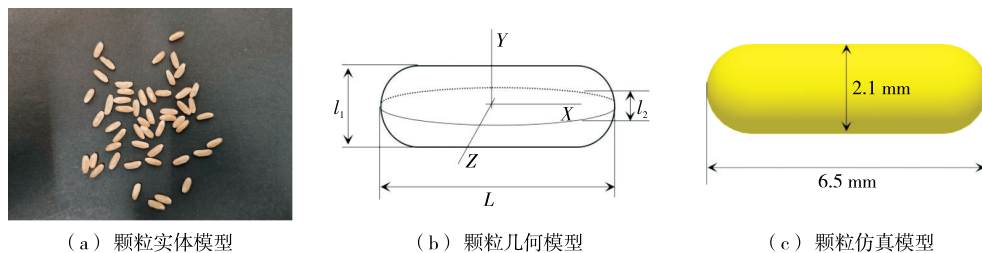


图1 糙米等效离散元模型

Figure 1 Equivalent discrete element model of brown rice

1.1.2 试验装置及数值模型构建 如图2所示,碾米试验装置主要由变速电机、变速风机、吸尘管道、碾磨区域等组成。其中碾磨区域由环形风筒、米筛网、碾米辊组成。糙米颗粒装在总长为165 mm、内径为50 mm的正六边形的碾米腔中,通过环形风筒包裹并固定在实验台架上。吸尘风机与环形风筒由管道连接,改变吸风口的方向,实现内部气流方向的变化,模拟糙米在不同气流方向上的碾米试验。

1.2 CFD-DEM 数值模拟

1.2.1 流体相模型 由于欧拉模型在仿真过程中考虑了颗粒相的体积分数,根据实际情况,糙米碾磨试验颗粒对流场的作用明显,因此采用欧拉模型对CFD-DEM进行耦合仿真^[13-14]。流体相由Navier-Stokes方程控制,基本控制方程包括流体体积分数和动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon v) = 0, \quad (1)$$

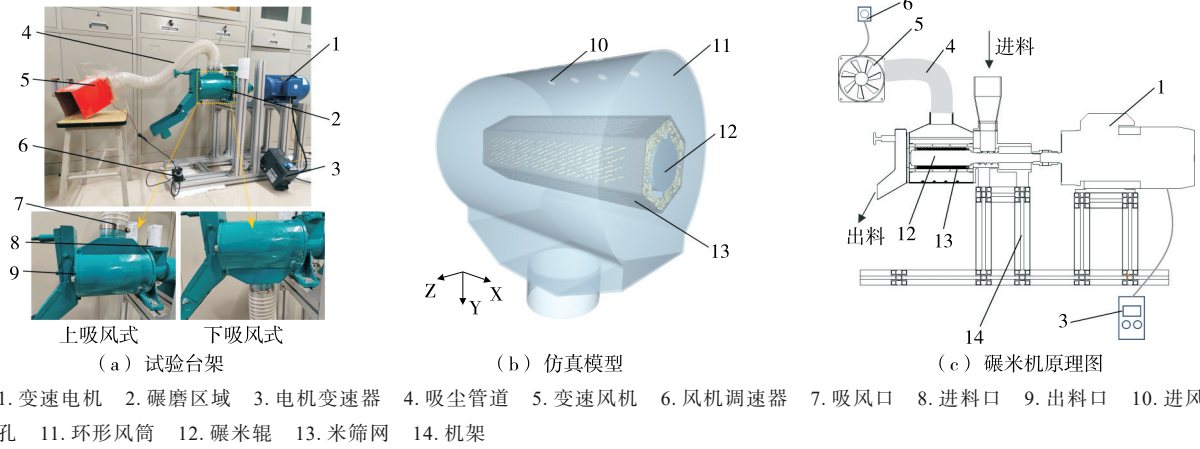


图2 气吸式碾米机结构

Figure 2 Structure of air-suction rice milling machine

$$\frac{\partial(\epsilon\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon v^2) = -\nabla P + \nabla(\mu\epsilon\nabla u) + \rho\epsilon g - S, \quad (2)$$

式中:

t ——时间, s;

ρ ——气体密度, kg/m³;

ϵ ——孔隙率, %;

v ——气体流速, m/s;

g ——重力加速度, m/s²;

P ——流体压强, Pa;

μ ——气体黏滞系数, Pa·s;

S ——动量源项;

∇ ——哈密顿微分算子。

动量源项 S 为气固两相耦合中网格单元内气流阻力的总和, 表达式:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{V}, \quad (3)$$

$$F = 0.5C_D\rho A|v|\cdot v, \quad (4)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & (Re \leq 0.5) \\ \frac{24(1.0 + 0.25Re^{0.687})}{Re} & (0.5 < Re \leq 1000) \\ 0.44 & (Re > 1000) \end{cases}, \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho L|v|}{\mu}, \quad (6)$$

式中:

F_i ——第 i 个颗粒对气流的阻力, N;

V ——网格单元体积, m³;

v ——颗粒体的流动速度, m/s;

A ——颗粒投影面积, m²;

C_D ——颗粒的阻力系数;

Re ——雷诺数;

L ——颗粒的直径, m。

1.2.2 颗粒接触模型 在 EDEM 软件中采用 Hertz-Mindlin 接触模型作为跟踪求解粒子运动信息的基本接触模型。此模型与 Hertz 的理论在法向上结合, 在切向上与 Mindlin 的无滑移模型相结合, 可以在不增加相对计算量的情况下, 准确地表征颗粒在接触过程中的运动行为^[15]。根据牛顿第二定律获得颗粒的运动方程为:

平移运动:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = m_p g + F_p, \quad (7)$$

旋转运动:

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{t,ij} + T_{r,ij}), \quad (8)$$

式中:

g ——重力加速度, m/s²;

F_p ——颗粒在气流中运动时受到的合力, N;

m_p ——颗粒的质量, kg;

v_p ——颗粒的速度, m/s;

ω_i ——颗粒角速度, rad/s;

I_i ——颗粒的转动惯量;

$T_{r,ij}$ ——滚动摩擦力矩;

$T_{t,ij}$ ——切向力矩。

1.2.3 多孔介质模型 多孔介质是固体骨架组成的物体中, 构成的空隙空洞与液体、气体或气液两相相互连通而组成的多相物体。在碾米机中米筛网分布着大小均匀的小孔是典型的多孔介质, 因此, 在仿真求解过程中将米筛网区域设置为多孔介质模型^[16], 表达式:

$$C_1 = \frac{150(1-\epsilon)^2}{D^2\epsilon^3}, \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D\varepsilon^3}, \quad (10)$$

式中:

C_1 ——阻力系数;

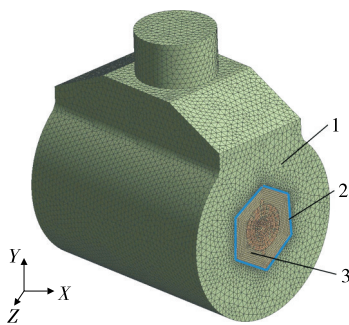
C_2 ——惯性损失系数;

D ——滤网孔直径,m;

ε ——孔隙率,%。

物理试验采用的滤网参数 D 为1.2 mm, ε 为35%。代入式(9)和式(10)可得 $C_1=1.026 \times 10^9$ 、 $C_2=4.421\ 768 \times 10^4$ 。

1.2.4 耦合模型参数 为进行数值模拟,建立如图3所示的碾磨装置简化模型,采用四面体和六面体网格进行网格划分,网格数量为1 320 899。填充流体域后,分割碾磨区域的流体域,运用布尔运算将碾磨区分为多孔介质区域(米筛网)和碾白室计算域,然后建立风道流体域、多孔介质域、碾白室计算域的捕获关系,确保流场计算信息的完整交换。将碾白室填充率为40%的颗粒,设置参数信息见表1^[17],碾辊转速为600 r/min,时间步长为1.35×



1. 风道流体域 2. 多孔介质域 3. 碾白室计算域

图3 碾磨区域网格

Figure 3 Milling area grids

表1 大米颗粒和碾磨腔的结构或操作参数

Table 1 Structure or operating parameters of rice particles and milling chamber

名称	限制因素	单位	参数值
糙米	泊松比		0.25
	密度	kg/m ³	1 460
	剪切模量	Pa	2×10^8
铁	泊松比		0.3
	密度	kg/m ³	7 800
	剪切模量	Pa	2×10^{11}
糙米—铁	静摩擦系数		0.56
	动摩擦系数		0.02
	碰撞恢复系数		0.5
糙米—糙米	静摩擦系数		0.43
	动摩擦系数		0.023
	碰撞恢复系数		0.6

10^{-5} s,保存间隔为0.01 s。Fluent中吸风口设置,上吸风时风速为10 m/s,下吸风时风速为5 m/s,为了让仿真更接近试验进料口、出料口和进风孔,定义压力入口初始压力值为零,仿真时,将时间步长设置为 10^{-4} s,保存间隔为0.5 s。

2 结果与分析

2.1 CFD-DEM 数值仿真结果分析

通过观察在上吸风、下吸风及无吸风自然状态3种工况下糙米颗粒的碾磨状态,发现糙米颗粒运动速度和受力情况随之发生了改变。这是由于在不同气流方向作用下,糙米颗粒受到的挤压应力发生了变化,且糙米颗粒的扩散流动性、翻转运动能力均有明显差异。

2.1.1 颗粒运动速度分析 Y轴方向颗粒分布速度 v_y 结果及X、Y、Z三轴方向颗粒分布合成速度 v 结果如图4所示。在模拟颗粒运动过程中,糙米在碾白室内不同轴向的运动速度可用于表征其位移能力的强弱。不同气流方向下,颗粒的运动特性存在差异。当颗粒流动稳定后,采样20个时刻内所有颗粒在X、Y、Z轴的平均速度,依据式(11)和式(12)计算得出颗粒稳定流动时的平均速度 v_y 及3个轴向合成的平均速度 v ^[18]。

$$v_y = \frac{\sum_{i=1}^{20} v_i^y}{20}, \quad (11)$$

$$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2 + (v_z)^2}, \quad (12)$$

式中:

v_i^y ——所有颗粒在第 i 步时Y方向的平均速度,m/s;

v_x, v_z, v_y ——颗粒的X、Y、Z轴方向平均速度,m/s;

v ——X、Y、Z轴方向合成平均速度,m/s。

由图4可知,上吸风10 m/s、无风速和下吸风5 m/s,同层段处上吸风速度 v_y 均大于下吸风速度 v_y ,表明颗粒在上吸风10 m/s时Y轴的向上位移能力增强,下吸风5 m/s时Y轴的向上位移能力减弱。这是由于下吸风状态下,糙米碾磨过程中受自身重力和向下气流的双重影响,更加倾向于下沉运动,从而导致Y轴向上位移能力减弱。无风速状态下颗粒只受重力影响,但在上吸风状态下,气流方向向上,颗粒的重力与向上的气流为对抗作用,有助于减缓颗粒的下沉运动,颗粒群受碾过程中增强了颗粒的向上流动性,使碾白室的颗粒运动速度 v_y 显著提升,可以更好地让碾米腔下方的颗粒由中至上运动,增强了往返运动的活跃性。由图5可知,颗粒在不同状态下三轴合成平均速度 v 分布趋势与图4大致相同,糙米颗粒均体现出先由下部区域运动速度上升至中部区域,再到上部区域颗粒速度减缓的变化规律。但在碾白室的中下部上吸风10 m/s、无风速和下吸风5 m/s平均速度 v 差异较为明显。造成这种变化趋势的主要原因是:颗粒在中下部堆积密

集相互作用力强,碾辊传递给颗粒的能量更多,且在上吸风工况时,引入系统向上的气流增加了颗粒的流动性,在下吸风工况时,向下的气流对颗粒的流动性起到了抑制作用,从而导致颗粒平均速度 v 差异也越明显。而碾白室的上下两端颗粒平均速度 v 差异较小,这是因为靠近碾辊凸肋的部分,是颗粒流往复运动的起止点区域。由上述分析可知,向上的气流方向对受碾颗粒运动活跃性增强,向下的气流则导致受碾颗粒扩散速度减缓运动活跃性减弱。

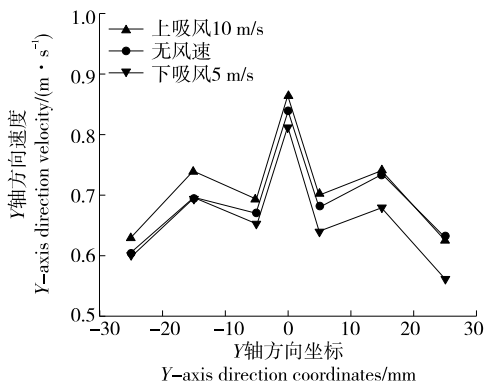


图4 糙米沿Y轴方向的速度 v_y

Figure 4 Velocity v_y of brown rice along the Y-axis

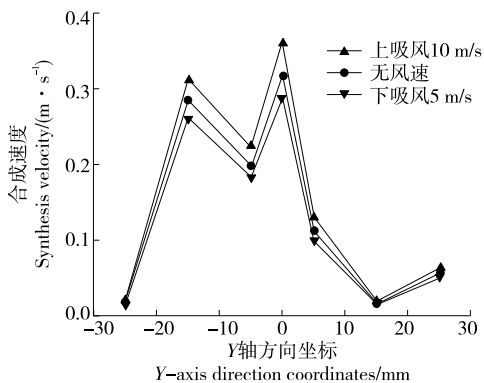


图5 糙米三轴合成的速度 v

Figure 5 Triaxial synthetic average velocity v of brown rice

2.1.2 颗粒运动受力分析 对糙米颗粒的运动仿真发现,在不同风速状态下颗粒流动速度对颗粒压力的影响也有所差异。图6为当颗粒流动达到稳定状态时,分别在上吸风10 m/s、无风速和下吸风5 m/s 3种状态下,颗粒运动平均速度的着色分布情况,图7为不同状态下颗粒流压力着色的空间分布情况,为了体现明显的着色分布,使用相同的级数和压力范围。据观察,具有峰值速度和压力的颗粒数量随吸风方向变化而改变^[19]。如图8所示,不仅因为引入系统向上的气流对中部糙米颗粒的运动有一定增速作用,且分布在碾磨室底部糙米颗粒所受到的压力有所减小。这主要是由于向上的气流在提高颗粒流的

整体流动性的同时,也使糙米颗粒之间的堆积效果得到了改善,从而使碾白室底部平均压力下降。由图7可知,碾辊凸肋处颗粒聚集的位置压力均增大,这是因为凸肋底部铣削区域在输送过程中受到较大挤压力。因此,糙米在此区域容易发生碾磨和破碎。然而改变气流的方向,颗粒所受的压力会随气流方向的改变而发生变化。在上吸风状态下,由于颗粒上升速度和整体运动能力的增强,糙米颗粒在碾磨工况中易碎区域的流动性提高,以减弱颗粒受到的挤压力。

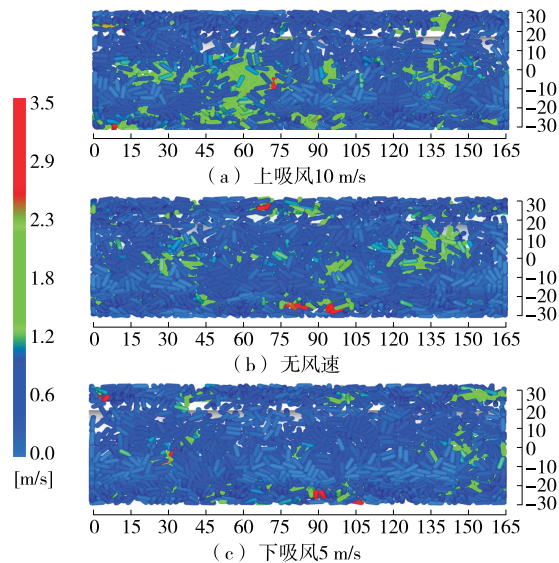


图6 不同气流状态下颗粒速度的空间分布

Figure 6 Spatial distribution of particle velocity under different airflow states

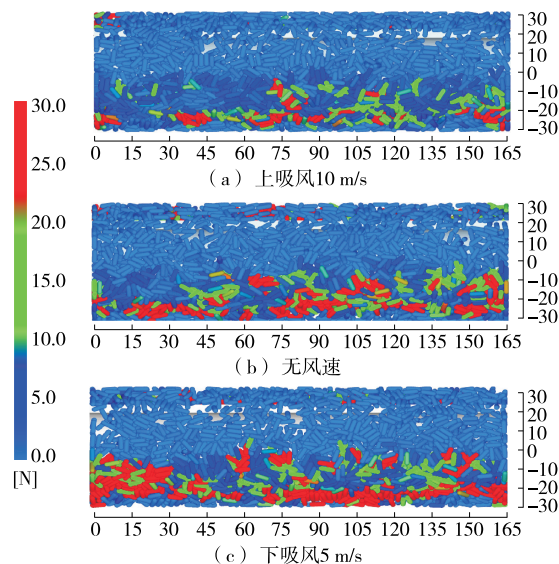


图7 不同气流状态下颗粒压力的空间分布

Figure 7 Spatial distribution of particle pressure under different airflow states

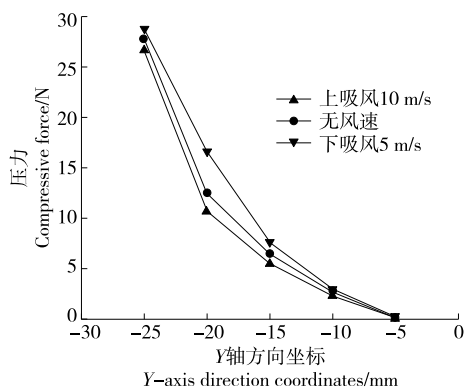


图8 不同气流状态下糙米的压力

Figure 8 Pressure of brown rice under different airflow states

2.1.3 颗粒翻滚角速度分析 从宏观上看,碾磨过程中形成的颗粒流运动方向随着碾辊转动而发生移位,糙米颗粒不规则地跌落和上升。通过旋转角速度的增加,增强了颗粒的无序运动,从而提高了糙米碾磨的整体运动能力,当糙米发生碾磨时,糙米与糙米、糙米与筛网之间会发生切削作用,确保米粒腹背部都得到充分切削^[20]。

如图9所示,颗粒翻滚包括沿颗粒长轴旋转并绕短轴翻滚。颗粒的旋转角速度被视为破坏颗粒有序运动的变量,外部气流的变化影响着颗粒的流动性与颗粒获得的旋转角速度直接相关,从而导致颗粒群的翻滚运动能力不同。图10展示了气流方向变化时颗粒角速度随时间波动的情况。此处显示的旋转角速度是短轴和长轴的角速度总和。可以看出,在不同吸风状态下,角速度的波动频率并无显著差异,但是上吸风10 m/s、无风速到下吸风5 m/s整体对比下,旋转角速度显现出逐渐沿Y轴负方向移动的变化趋势。这表明在相同的碾辊转动速度下,颗粒翻滚波动频率并没有受到太多影响,但颗粒的翻滚角速度受外部气流的影响较大。这是由于当气流向上与重力反向颗粒流动性增强时,翻转空间增大,更多的颗粒在无序翻滚运动而不是处于堆积状态。为了量化所有颗粒的翻滚能力,图11显示了不同风速状态下的平均角速度,随着下吸风到上吸风气流方向的改变,旋转角速度明显增加。基于上述的分析,可以通过增加外部上吸风风速来提高糙米颗粒的翻滚能力,从而让受碾颗粒的交替速度更快。为了达到更高的交替速率,更改风道的结构和筛子网孔的大小以增强颗粒的翻滚运动可能是一种有效的方法,但这需要通过进一步的研究来确认。

2.2 样机试验结果分析

为了验证以上仿真结果的可靠性,搭建如图2所示的试验台架进行碾米试验,在上吸风10 m/s、无风速和下吸风5 m/s 3种情况下糙米的碾磨度和破碎率对比分析。为了便于试验,选用未碾磨的大米质量为140 g,不同风速情

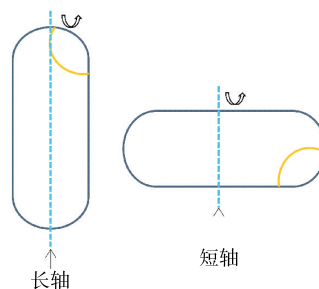


图9 颗粒翻滚运动示意图

Figure 9 Schematic diagram of particle rolling

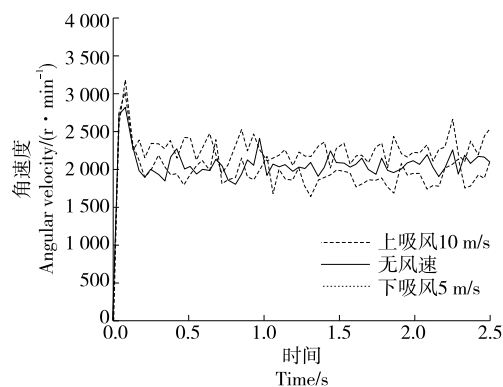


图10 颗粒角速度随时间的波动

Figure 10 Angular velocity fluctuations of particles with time

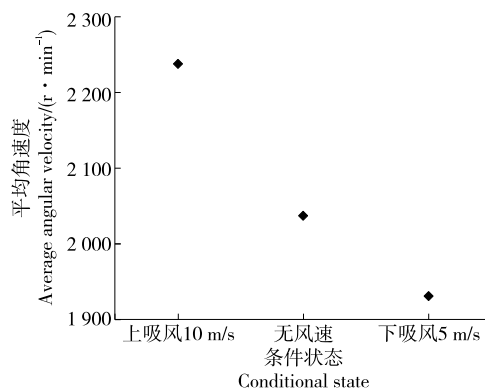


图11 不同风速状态下的平均角速度

Figure 11 Average angular velocity under different wind speed conditions

况下试验重复3次。将碾米时间设定为20 s,碾磨完成后,按式(13)和式(14)计算大米碾磨度和破损率^[15]。

$$D_{OM} = \frac{M - M_0}{M} \times 100\%, \quad (13)$$

$$R_{OC} = \frac{M_1}{M_0} \times 100\%, \quad (14)$$

式中:

D_{OM} ——大米碾磨度,%;

R_{oc} ——大米破损率,%;
 M ——颗粒碾磨前的质量,g;
 M_0 ——颗粒碾磨后的质量,g;
 M_1 ——碾磨后碎米的质量,g。

碾磨效果如图 12 所示。在 3 种状态下,每种状态试验 3 次的结果取平均值,其中上吸风颗粒的平均碾磨度和平均破损率为 1.90% 和 0.37%(最小),下吸风的平均碾磨度和平均破损率为 2.78% 和 0.60%(最大),对比上吸风状态下分别增加了 0.88% 和 0.23%,而无风速状态下的碾磨度和破损率为 2.20% 和 0.46% 居于两者之间,

对比上吸风状态下分别增加了 0.30% 和 0.09%。由表 2 可知,试验结果与仿真结果的变化趋势相同。表明颗粒受到向下的气流和重力同向时,颗粒在运动倾向于沉底运动,在有限的运动空间内形成堆积增加底部压力,但此时受到碾辊的扰动,降低了颗粒的翻滚运动能力,使糙米颗粒的碾磨效果较差。而在上吸风碾磨过程中,由于气流方向与重力方向相反,下方的颗粒向上运动能力强于下吸风,颗粒群的流动能力更快,颗粒相互作用的时间变短,增加扰动的无序性,可以避免颗粒过度碾磨,减少加工破碎率。

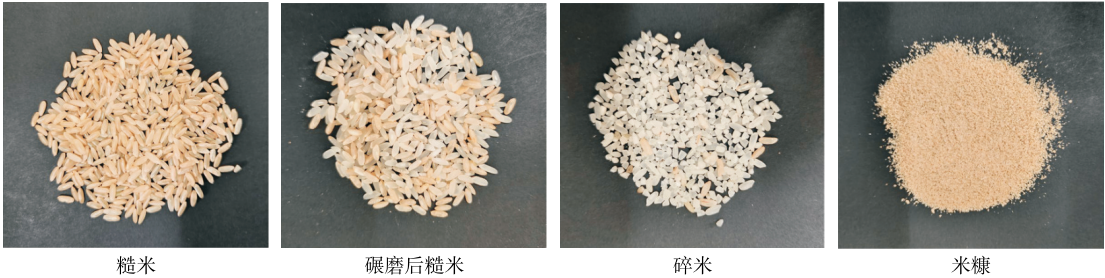


图 12 碾磨实物展示
Figure 12 Milling objects

表 2 试验结果
Table 2 Experimental data

工况	试验次数	物料原始质量/g	碾磨后质量/g	碎米质量/g	碾磨度/%	破损率/%
上吸风 10 m/s	1	140	137.41	0.49	1.85	0.36
	2	140	137.28	0.52	1.94	0.38
	3	140	137.35	0.50	1.89	0.36
无风速	1	140	136.86	0.63	2.24	0.46
	2	140	136.79	0.66	2.29	0.48
	3	140	137.10	0.61	2.07	0.44
下吸风 5 m/s	1	140	136.15	0.81	2.75	0.59
	2	140	135.98	0.83	2.87	0.61
	3	140	136.21	0.79	2.71	0.58

3 结论

气流方向的变化对受碾颗粒的流动速度和压力分布以及翻滚能力的改变对颗粒碾磨具有重要作用。在上吸风状态下,颗粒沿 Y 轴的上升速度(v_y)及三轴合成平均速度(v)显著高于下吸风 5 m/s 和无风速状态,且碾白室中下部颗粒运动活跃性增强,碾白室底部的颗粒所受压力减小;颗粒流动性增强,糙米在碾磨加工中有更多翻滚空间,从而使颗粒跟随碾辊转动时的翻滚角速度提升,以确保米粒腹背部碾磨效果更均匀避免过碾。试验结果表明,上吸风状态下对比无风速和下吸风状态下碾磨度分别下降了 0.30%, 0.88%, 破损率分别降低了 0.09%,

0.23%;上吸风碾米机相较传统下吸风碾米机改善了颗粒过碾和破损现象。由于该研究是改变气流方向和无风速条件下的对比,下一步可以针对不同上吸风风速和不同填充比例之间的颗粒运动仿真研究,以及考虑颗粒碾磨中温升问题。

参考文献

[1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3 404-3 414.
ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3 404-3 414.

- [2] 陈德炳, 李祖吉, 张永林, 等. 基于离散元法的糙米碾白过程仿真初探[J]. 粮食与饲料工业, 2015(3): 1-4.
CHEN D B, LI Z J, ZHANG Y L, et al. Brown rice milling whiteness process simulation based on discrete element method[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(3): 1-4.
- [3] 郭伟. 一种上吸风多功能碾米机: CN201420806399.8[P]. 2015-06-03.
GUO W. A multifunctional rice milling machine with upward air suction: CN201420806399.8[P]. 2015-06-03.
- [4] 王立宗, 范吉军, 余南辉, 等. 上吸风环形风道碾米机设计与试验[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(4): 63-68.
WANG L Z, FAN J J, YU N H, et al. Design and experiment of the top-suction rice mill with annular air duct [J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(4): 63-68.
- [5] 虞文俊, 吴瑞梅, 李红, 等. 基于 Fluent-EDEM 耦合的茶叶红 外杀青机滚筒内流场数值模拟[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 104-109, 120.
YU W J, WU R M, LI H, et al. The numerical simulation on temperature field inside the radiation de-enzyme machine based on Fluent-EDEM coupling[J]. Food & Machinery, 2019, 35(8): 104-109, 120.
- [6] 张德俊, 张小明, 吴获, 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.
- [7] 陈平录, 肖石华, 许静, 等. 收割机提升搅龙中干燥稻谷的 CFD- DEM 数值模拟[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(5): 93-101.
CHEN P L, XIAO S H, XU J, et al. CFD-DEM simulation of paddy drying in lifting screw conveyor of harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(5): 93-101.
- [8] 马秋成, 雷林韬, 卢安舫, 等. 基于 CFD-DEM 耦合法的莲子壳 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.
- [9] 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.
- [10] 夏圣博, 李耀明, 姬魁洲, 等. 基于 CFD-DEM 的种子联合收 获机气流清种仿真分析[J]. 农机化研究, 2025, 47(4): 1-8.
XIA S B, LI Y M, JI K Z, et al. Simulation analysis of air flow seed cleaning for seed combine harvester based on CFD-DEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47 (4): 1-8.
- [11] 刘立意, 郝世杨, 张萌, 等. 基于 CFD-DEM 的稻谷通风阻力 数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 27-32, 158.
LIU L Y, HAO S Y, ZHANG M, et al. Numerical simulation and experiment on paddy ventilation resistance based on CFD- DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 27-32, 158.
- [12] HAN Y L, JIA F G, ZENG Y, et al. Effects of rotation speed and outlet opening on particle flow in a vertical rice mill[J]. Powder Technology, 2016, 297: 153-164.
- [13] 刘向军, 石磊, 徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法 的研究现状[J]. 计算力学学报, 2007(2): 166-172.
LIU X J, SHI L, XU X C. Activities of dense particle-gas two- phase flow modeling in Eulerian-Lagrangian approach[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007(2): 166-172.
- [14] LI A Q, JIA F G, SHEN S H, et al. Numerical simulation approach for predicting rice milling performance under different convex rib helix angle based on discrete element method[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103257.
- [15] 刘冬冬, 刘贞姬, 谢炎, 等. 基于网式过滤器滤网过滤两种模 型的流场模拟分析[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 130-140.
LIU D D, LIU Z J, XIE Y, et al. Flow field simulation analysis based on two models of mesh filter[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2): 130-140.
- [16] 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.
- [17] 韩燕龙, 贾富国, 曾勇, 等. 受碾区域内颗粒轴向流动特性的 离散元模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 176-184.
HAN Y L, JIA F G, ZENG Y, et al. Granular axial flow characteristics in a grinding area studied by discrete element method[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(23): 176-184.
- [18] 贾富国, 唐玉荣, 杨欲晓, 等. 基于离散元法的碾米机结构优 化设计研究[J]. 塔里木大学学报, 2020, 32(2): 80-89.
JIA F G, TANG Y R, YANG Y X, et al. Simulation of structure optimization design of rice mill on discrete element method[J]. Journal of Tarim University, 2020, 32(2): 80-89.
- [19] LI A Q, HAN Y L, JIA F G, et al. Examination milling non- uniformity in friction rice mills using by discrete element method and experiment[J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 247-259.
- [20] 张强, 廖敏, 杨亚军, 等. 糙米的碾白过程模拟及破碎影响分 析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14 969-14 975.
ZHANG Q, LIAO M, YANG Y J, et al. Simulation of blanching process of brown rice and analysis of crushing effect [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14 969-14 975.