

振动流化床高粱干燥特性模拟与能效分析

鄢琰琪¹ 万霖^{1,2} 车刚^{1,2} 王皓辰¹ 袁有¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省农机智能装备重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: [目的] 深度分析振动流化床中高粱运动和传热传质特性, 确定合理的振动和通风参数, 实现高粱高效干燥。[方法] 通过振动和热风共同作用, 利用流化床干燥过程中高粱和空气介质的热质传递及运动关系, 以 CFD-DEM 流固耦合理论为基础, 建立传热传质模型, 并探究振动频率、热风温度和表观风速对干燥速率和干燥不均匀度的影响。[结果] 干燥初期受颗粒运动和相对湿度影响, 高粱干燥不均匀性会逐步加剧。低床层颗粒因受气流扰动大而换热剧烈, 且以对流换热为主; 中高床层则以颗粒间导热为主。当振动频率为 20 Hz 时, 最小流化速率可降低 8.36%, 床层膨胀率可降低 42.11%。当振动频率为 21 Hz, 热风温度为 336 K, 表观风速为 1.7 m/s 时, 振动流化床最大干燥速率为 17.86%/h, 最小干燥不均匀度为 0.304, 验证实验误差值均 < 5%。[结论] 振动流化床干燥技术可实现新鲜高粱的高效可控干燥。

关键词: 高粱; 振动流化床; 传热传质; 参数优化; 能耗

Simulation and analysis of drying characteristics of sorghum in vibrating fluidized bed

YAN Yanqi¹ WAN Lin^{1,2} CHE Gang^{1,2} WANG Haochen¹ XI You¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: [Objective] To analyze the motion, heat transfer, and mass transfer characteristics of sorghum in a vibrating fluidized bed and determine appropriate vibration and ventilation parameters to achieve efficient drying of sorghum. [Methods] Under the combined action of vibration and hot air, and based on the heat and mass transfer as well as the motion relationships between sorghum particles and the air medium during the fluidized bed drying process, a heat and mass transfer model was developed based on CFD-DEM fluid-solid coupling theory. The effects of vibration frequency, hot air temperature, and apparent wind speed on drying rate and drying unevenness were investigated. [Results] In the initial stage of drying, the unevenness of sorghum drying gradually increased due to the influence of particle motion and relative humidity. Particles in the lower bed layer experienced intense heat exchange because of strong airflow disturbance, with convection as the dominant heat transfer mode, whereas heat transfer in the middle and upper bed layers mainly occurred through conduction between particles. When the vibration frequency was 20 Hz, the minimum fluidization velocity decreased by 8.36%, and the bed expansion ratio decreased by 42.11%. When the vibration frequency was 21 Hz, the hot air temperature was 336 K, and the apparent wind speed was 1.7 m/s, the maximum drying rate of the vibrating fluidized bed reached 17.86%/h, and the minimum drying unevenness was 0.304. The validation experiment showed that the errors were all less than 5%. [Conclusion] Vibrating fluidized bed drying technology can achieve efficient and controllable drying of fresh sorghum.

Keywords: sorghum; vibrating fluidized bed; heat and mass transfer; parameter optimization; energy consumption

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(编号: LH2022E098); 国家重点研发计划项目(编号: 2021YFD2100901)

通信作者: 万霖(1971—), 女, 黑龙江八一农垦大学教授, 博士。E-mail: 381995603@qq.com

收稿日期: 2025-06-27 改回日期: 2026-03-09

引用格式: 鄢琰琪, 万霖, 车刚, 等. 振动流化床高粱干燥特性模拟与能效分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 27-36.

Citation: YAN Yanqi, WAN Lin, CHE Gang, et al. Simulation and analysis of drying characteristics of sorghum in vibrating fluidized bed [J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 27-36.

高粱是世界上第五大粮食作物^[1],也是中国重要的杂粮作物^[2],可直接食用或作为食品原料^[3]、饲料原料^[4]、酿酒原料等^[5]进行生产活动。2024 年,中国高粱总产量为 323.9 万 t,同比增长 6.07%^[6]。中国高粱的收获多集中在蜡熟后期,收获后的高粱主要依赖传统的自然晾晒来降低籽粒水分。然而,自然晾晒存在诸多弊端,例如干燥周期较长,容易受到天气变化的影响等^[7-8]。在农产品加工中,常见的干燥方法有热风干燥、微波干燥、真空干燥、真空冷冻干燥及振动流化床干燥^[9]。振动流化床干燥技术是一种在干燥过程中利用气流对物料进行搅拌、悬浮和加热的干燥技术,机械振动的引入,可有效改善颗粒流化状态,降低干燥能耗并提升产品品质^[10]。朱学军等^[11]使用振动流化床对膏状物料进行干燥试验,结果表明,在流化床中增设振动和浸没加热管装置,能大大强化传热、传质效果。然而,该过程不仅涉及气相和固相之间的热质传递过程,其内部还呈现多种流动状态。由于试验方法固有的局限性,获得关于流化床内颗粒的详细信息极具挑战性^[12-13]。

近年来,离散元法(DEM)与计算流体力学(CFD)耦合模型已能精确模拟颗粒—流体—振动多场耦合行为^[14]。Yang 等^[15]基于 CFD-DEM 方法探究了 Geldart D 颗粒在有无振动的流化床中气固结构的时空特征和粒子间碰撞,结果表明,引入振动可显著增加颗粒间碰撞的强度和均匀性、参与碰撞的颗粒数量以及床的总动能;空气温度是影响干燥速度的关键因素,风速变化可以缓解流化床干燥小麦的不均匀性。Ma 等^[16]研究了醋渣与惰性粒子组成的混合物在振动流化床内的流化行为,发现醋渣的干燥速率随着振动强度的增加或醋渣质量浓度的降低而增加。相较于其他干燥技术,振动流化床在粮食干燥中的研究仍不够系统和深入,尤其是在高粱干燥领域,其颗粒在流化状态下的传热传质行为尚未被充分揭示和定量分析。

试验拟将高粱颗粒的干燥模型引入到现有的 DEM 模型中,构建一种基于 CFD-DEM 的软球模型。在此基础上,系统分析不同干燥参数对高粱干燥行为的影响,分析干燥速率、含水率分布和床层温度均匀性的作用机制,并以试验数据为依据对干燥参数进行优化,以期为高粱及其他谷物的振动流化床干燥工艺优化提供依据。

1 模型建立

为提高数值模拟效率并突出振动流化床中高梁干燥过程的主要传热传质特征,在构建 CFD-DEM 耦合模型过程中作出如下假设:① 干燥过程仅考虑高粱颗粒内部的导热传热与水分蒸发过程中伴随的相变换热,忽略颗粒内部的自然对流效应,蒸汽在颗粒内部的扩散过程被视为稳态;② 高粱颗粒被简化为均质、各向同性的单组分材

料,初始温度与含水率在颗粒内部分布均匀,并忽略干燥过程中颗粒因水分流失而产生的体积收缩效应;③ 水分以液态在颗粒内部扩散,并在颗粒表面完成蒸发;④ 考虑到建模与计算的简化,所有高粱颗粒均近似为球形。整个模拟基于 CFD-DEM 耦合建模方法,其中气相被视为连续相,高粱颗粒作为离散相。

1.1 气相控制方程

通过求解质量和动量守恒方程来模拟气体流动,如式(1)、式(2)所示^[17]。

$$\frac{\partial \epsilon_g}{\partial t} + \nabla \cdot \epsilon_g u = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \rho_g u_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g u_g u_g) = -\epsilon_g \nabla p - \nabla \cdot (\epsilon_g \tau_g) - F_{gp} + \epsilon_g \rho_g g, \quad (2)$$

式中:

ϵ_g ——空隙率;

ρ_g ——气体密度, kg/m³;

u_g ——气体速度, m/s;

p ——气体压力, Pa;

τ_g ——气体应力张量;

g ——重力加速度, m/s²;

F_{gp} ——体积气固相互作用力, N。

对于振动流化床干燥机, F_{gp} 主要受曳力影响:

$$F_{gp} = \frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^n f_{d,i}, \quad (3)$$

式中:

V_{cell} ——单元的体积, m³;

n ——单元中粒子的数量。

气体作用在第 i 个粒子上的曳力 $f_{d,i}$ 为^[18]:

$$f_{d,i} = 0.125 \pi \mu_f \epsilon_g d_p C_d R_{ep} |u - v_i| \epsilon_g^{-\beta}, \quad (4)$$

$$R_{ep} = \frac{\rho_g \epsilon_g d_p |u_g - v_i|}{\mu_f}; C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{R_{ep}}} \right)^2;$$

$$\beta = 3.7 - 0.65 \exp \left[-\frac{(1.5 - \log_{10} R_{ep})^2}{2} \right], \quad (5)$$

式中:

μ_f ——流体动力黏度, kg/(m·s);

d_p ——颗粒直径, m;

C_d ——曳力系数;

R_{ep} ——颗粒雷诺数;

v_i ——第 i 个颗粒的速度, m/s。

气相能量守恒为^[19-20]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \epsilon_g c_{pf} T_f) + \nabla \cdot (\rho_g \epsilon_g u_g c_{pf} T_f) = \nabla \cdot (\epsilon_g k_f \nabla T_f) + \dot{Q}_{f,p}, \quad (6)$$

式中:

c_{pf} ——气体的比热容, $J/(kg \cdot K)$;
 k_f ——气体的导热系数, $W/(m \cdot K)$;
 T_f ——气体的温度, K ;
 $\dot{Q}_{f,p}$ ——单位体积气体和颗粒间的热量交换速率,
 J/s 。

气相组分守恒为^[21]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \rho_g u_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g u_g u_g) = -\nabla \cdot (d_{g,eff} \epsilon_g \rho_g \nabla u_g) - M_{gp}, \quad (7)$$

式中:

w_g ——气相中水蒸气质量占比, kg/kg ;
 $d_{g,eff}$ ——气相有效传质系数, m^2/s ;
 M_{gp} ——相间质量交换速率, kg/s 。

1.2 颗粒相控制方程

颗粒运动采用离散元方法^[22]进行建模,而每个颗粒的运动受牛顿第二定律支配,所以颗粒 i 的平动和旋转运动控制方程为:

$$m_p \frac{d^2 r}{dt^2} = -V_p \nabla p + \frac{V_p \beta}{1 - \epsilon_g} (u_g - v_p) + m_p g + F_c, \quad (8)$$

式中:

m_p ——颗粒质量, kg ;
 r ——颗粒位置, m ;
 V_p ——颗粒体积, m^3 ;
 β ——气固相间动量交换系数;
 V_p ——颗粒速度, m/s ;
 F_c ——接触力, N 。

$$I_{p,i} \frac{d\omega_{p,i}}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{t,ij} + T_{r,ij}), \quad (9)$$

式中:

$I_{p,i}$ ——转动惯量, $kg \cdot m^2$;
 $T_{r,ij}$ ——滚动摩擦力矩, $N \cdot m$;
 $T_{t,ij}$ ——作用在颗粒 i 上的切向力产生的转矩, $N \cdot m$ 。

颗粒传热主要包括颗粒间热传导、气固间对流换热以及液体蒸发带走的一部分热量^[21]。

$$(m_p c_{p,p} + m_l c_{p,l}) \frac{dT_p}{dt} = \sum \dot{Q}, \quad (10)$$

式中:

m_l ——液体质量, kg ;
 T_p ——颗粒温度, K ;
 $c_{p,l}$ ——液体比热容, $J/(kg \cdot K)$;
 $c_{p,p}$ ——颗粒比热容, $J/(kg \cdot K)$ 。

颗粒间的热传导与颗粒之间温差、接触时间、颗粒物性以及接触半径有关^[21]。

$$Q_{pp} = (T_{p,i} - T_{p,j}) \pi r_c^2 t_c^{-1/2} / [(\rho_{p,i} c_{p,i} k_{p,i})^{-1/2} + (\rho_{p,j} c_{p,j} k_{p,j})^{-1/2}], \quad (11)$$

式中:

r_c ——高粱间接触面半径, m ;
 t_c ——高粱间接触时间, s ;
 ρ_p ——高粱密度, kg/m^3 ;
 k_p ——高粱导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

在高粱干燥过程中,按式(12)计算每个颗粒的水分含量^[23]。

$$m_{p,i} \frac{dX_w}{dt} = -h_m A_i (\rho_{v,p} - \rho_{v,\infty}), \quad (12)$$

式中:

$m_{p,i}$ ——干颗粒质量, kg ;
 X_w ——颗粒含水率, %;
 h_m ——气固传质系数, m^2/s ;
 A_i ——颗粒表面积, m^2 ;
 $\rho_{v,p}$ ——颗粒表面的饱和蒸气质量浓度, kg/m^3 ;
 $\rho_{v,\infty}$ ——颗粒周围空气中的水蒸气质量浓度, kg/m^3 。
按式(13)计算传质系数 h_m ^[24]。

$$h_m = D_v \frac{sh_p}{d_p}; sh_p = 2 + 0.6 R_{ef}^{1/2} Sc^{1/3}, \quad (13)$$

式中:

D_v ——空气中水蒸气的分子扩散率, m^2/s ;
 sh_p ——颗粒的舍伍德数;
 Sc ——施密特数($Sc = \mu / D_v$)。

振动流化床的腔室在激振电机带动下做往复循环运动,引入振动场后,腔室的位移与速度可表征为:

$$\begin{cases} Y = A_0 \sin(2\pi ft) \\ V_p = 2\pi f A_0 \cos(2\pi ft) \end{cases}, \quad (14)$$

式中:

A_0 ——振动幅度, mm ;
 f ——振动频率, Hz 。

2 模拟设置和模型验证

图1为流化床干燥器的几何形状和网格,该干燥器由 $150 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 的矩形组成。根据文献[25],该流化床干燥器可以被视为伪二维流化床,用以简化建模与计算复杂度,同时保留流体与颗粒运动的主要特征。气体通过床体底部均匀进入干燥室,作为干燥介质以一定流速向上流动。床体顶部设置为压力出口边界,允许气体自由排出;壁面区段采用无滑移、绝热边界约束条件。初始时,高粱颗粒在床体底部自然堆积,高度约为 84 mm 。模拟中颗粒初始温度为 298 K ,含水率统一设定为 20% ,以保证初始状态的均匀性和可比性。颗粒的物性参数及干燥模型所需的传热传质参数见表1^[26-27]。

针对离散化网格开展独立性验证分析,图2呈现了6种不同网格尺度的床层压力降分布特征。综合计算精度与算力开销,本次数值模拟选用的网格单元总数为

表 1 数值模拟参数

Table 1 Parameters applied in numerical simulation

变量	单位	数值	变量	单位	数值
流化床 x,y,z 方向网格划分	mm	$150\times 20\times 800$	颗粒与壁面间滑动摩擦系数		0.48
颗粒直径	mm	3	液体密度	kg/m^3	1 000
颗粒密度	kg/m^3	1 192	液体比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	4 200
颗粒泊松比		0.31	液体导热	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.59
颗粒热导率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.4	气体密度	kg/m^3	1.2
颗粒比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	1 500	气体导热系数	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.020 9
颗粒间碰撞恢复系数		0.422	气体比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	1 004
颗粒间滑动摩擦系数		0.504	出口压力	Pa	101 325

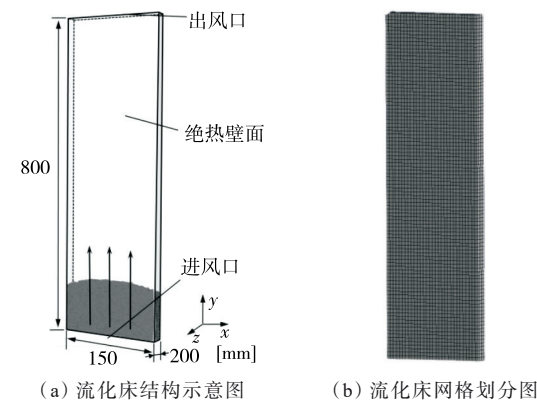


Figure 1 Geometry and mesh of a pseudo-2D vibrating fluidized bed

5 700。将模型预测的模拟结果与试验数据进行对比,试验中,入口热风速度为 1.5 m/s,温度为 333 K。由于计算限制,模拟预测的粒子数量为 10 029,仿真系统比试验系统小得多,表明仿真结果不能直接与试验结果进行比较。因此,将模拟和试验得到的所有数据经过数据归一化处理后进行比较^[23]。采用相同的方程得到归一化的颗粒含水量、温度和干燥时间,得

$$C^n = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (15)$$

式中:

$C_{\max}, C_{\min}$ ——每个变量的最大值和最小值;

C^n ——归一化的无量纲值;

C ——有量纲值。

由图 3 可知,在模拟和试验中,水分含量和温度变化的总体趋势相似:虽然干燥初期存在微小差异,试验测量得到的水分和温度变化均比模拟结果的快,但这是合理的,因为高粱初始含水率较低,干燥主要发生在降速期^[28]。此外,模拟未考虑湿颗粒的微观结构。因此,该数值模型适用于颗粒干燥,可用于后续的模拟干燥过程。

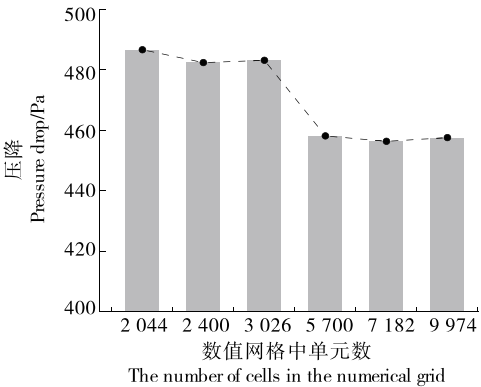


Figure 2 Grid independence analysis of vibrating fluidized bed

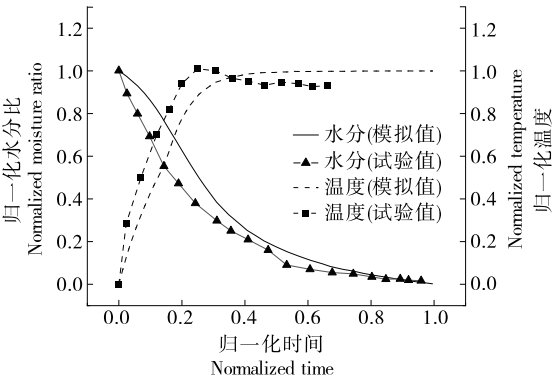


Figure 3 Comparison between the simulation results and experimental data

3 数值模拟结果与分析

3.1 干燥过程的传热、传质特性

如图 4 所示,干燥初始阶段,颗粒与高温气流发生剧烈对流传质,导致床层内水蒸气摩尔分数迅速升高,并在 0.029 8 处达到峰值。随着干燥过程的进行,颗粒内部水

分缓慢扩散至表面并被气流带走,气相含湿量逐步降低,最终趋于入口空气的平衡状态。

图5为空气速度为1.5 m/s、振动频率为10 Hz、温度为333 K时,床层中颗粒的温度和水分含量的变化趋势。初始时刻,热空气自床层底部进入,颗粒受热使表层水分蒸发,同时在气流作用下,颗粒发生运动。然而,部分颗粒出现温度短暂下降,表明早期蒸发吸热效应显著,导致热量损失,该现象随着持续加热逐渐减弱。由于底部颗粒先与热空气接触,使得该区域温度和含水率变化与其他区域差异显著。随着颗粒在流化状态下的随机运动,床层内部温度与含水率的不均匀性逐步加剧,表明干燥不均匀性随着时间的推移而增加。

图6为空气速度为1.7 m/s、振动频率为20 Hz、温度为333 K时,不同床高处颗粒温度和对流传热速率随时间的变化曲线。由图6可知,低床层颗粒温度上升速率较高,温度波动较大,且对流传热系数最高,表明底部换热较为剧烈。随着床层高度的增加,颗粒温度上升速率降低,温

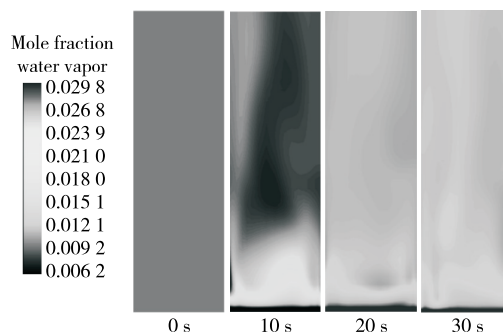


图4 空气速度为2 m/s和温度为333 K时的水蒸气摩尔分数

Figure 4 Vapor mole fraction at air velocity of 2 m/s and temperature of 333 K

度波动减小,对流传热系数亦逐渐降低,说明热风在穿透床层过程中能量衰减,换热作用减弱。综上,低床层受气流扰动影响较大,传热形式以对流换热为主;中高床层则以颗粒间导热为主。

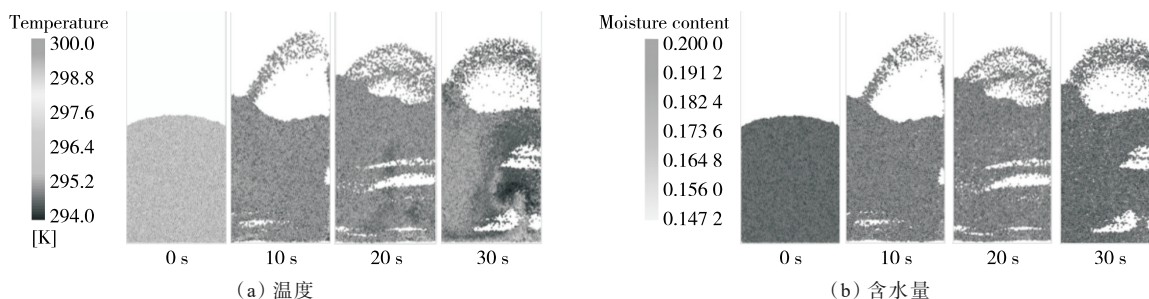


图5 颗粒的温度和含水量变化

Figure 5 Temperature and moisture content changes of particles

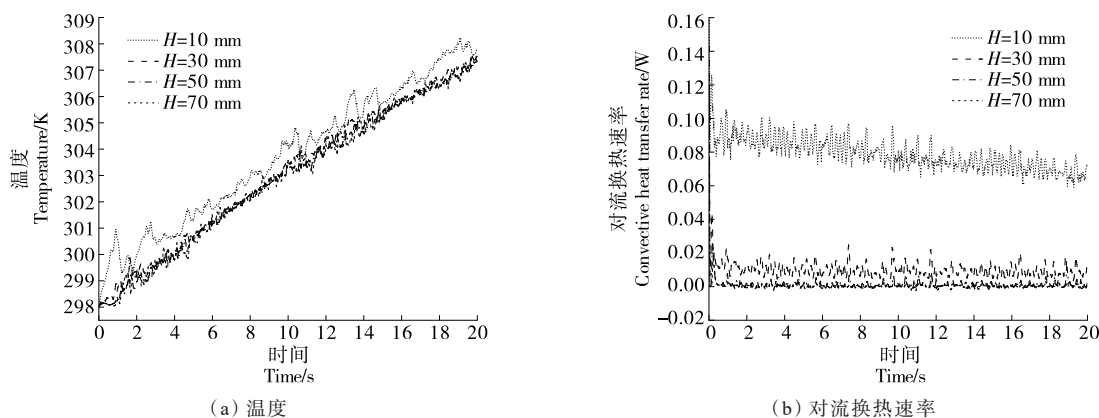


图6 颗粒的平均温度和对流传热速率变化

Figure 6 Changes of average particle temperature and convective heat transfer rate

3.2 振动频率对高粱颗粒干燥过程的影响

3.2.1 床层压降和膨胀率波动 图7为不同振动条件下高粱颗粒的最小流化风速随表观风速的变化规律。随着

风速的增加,床层压降先增大后趋于稳定。无振动条件下,当床层压降达到平稳时最小流化风速为1.4 m/s;引入振动后,当振动频率为10 Hz时,最小流化风速降至

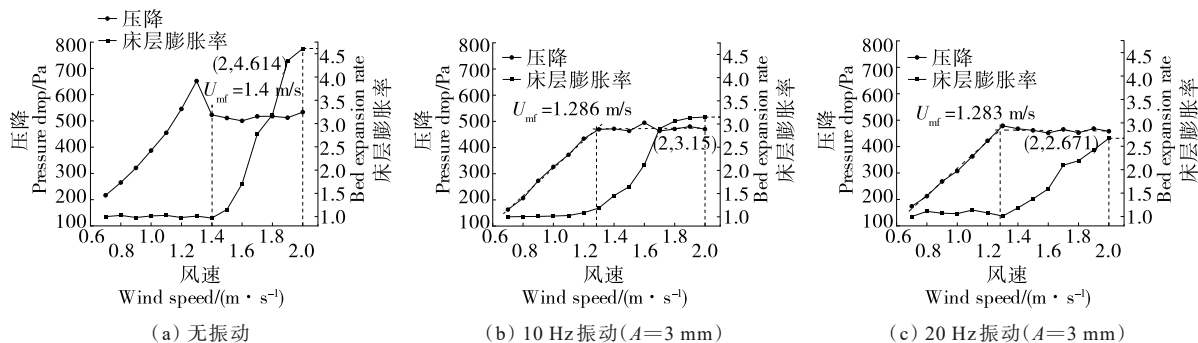


图 7 不同条件下床层压降及床层膨胀率随风速的变化

Figure 7 Changes of bed pressure drop and expansion ratio with air velocity under different conditions

1.286 m/s,降幅达 8.14%;当振动频率为 20 Hz 时,最小流化风速进一步降至 1.283 m/s,降幅为 8.36%。说明周期性的振动增强了颗粒的局部相对运动,提高了床层内颗粒分散性,从而有效降低了最小流化风速。而当颗粒流化后,继续提高振幅对最小流化速率的影响较小,反而增加了机器功耗。

除此之外,振动频率对物料层膨胀行为存在显著调控作用。随振动频率升高,物料层膨胀率呈下降趋势。当表观风速为 2 m/s 时,膨胀率由无振动时的 4.61 降至振动频率为 20 Hz 时的 2.671,降幅为 42.11%。表明引入振动可通过剪切作用破碎大气泡,削弱气泡聚并的可能性,使颗粒混合更加均匀,改善了床层流化的稳定性。综上,振动频率的上调不仅有助于降低最小流化风速,还能改

善料层流化状态,提升干燥工序的稳定性与均匀性。

3.2.2 振动频率对传热、传质效果的影响 由图 8 可知,振动频率的增加会降低热量传递速率,主要归因于振动强度提高,高粱颗粒在流化床内运动加剧,使得颗粒与热风接触时间相对减少,热传递时间不足,颗粒不能充分吸收热量,进而减缓了水分蒸发速率,降水幅度下降。

振动频率为 25 Hz 的干燥速率反而比振动频率为 10 Hz 的小,且在 20 Hz 左右达到最大值,干燥速率呈先升高后降低趋势,说明振动频率过大会降低受热速率和降水幅度,不利于高粱颗粒干燥的进行;而振动强度增加,干燥非均匀性逐渐降低,表明适当提高振动频率不仅能提高干燥速率,还可以改善干燥过程中高粱干燥不均匀性问题,以获得更好的干燥产品质量。

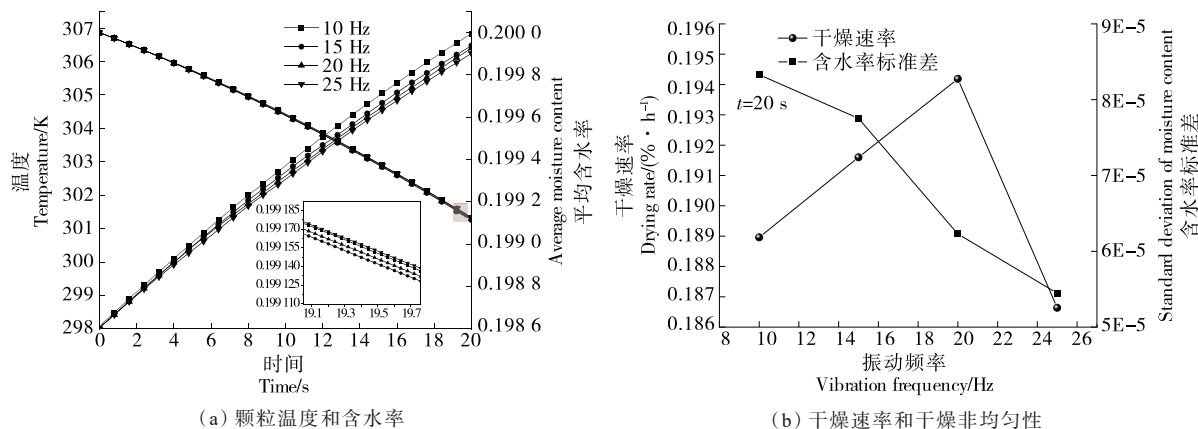


图 8 风速 1.5 m/s 和风速 333 K 下振动频率对传热、传质效果的影响

Figure 8 Effects of vibration frequency on heat and mass transfer at 1.5 m/s air velocity and 333 K air temperature

3.3 热风温度对高粱颗粒传热、传质效果的影响

由图 9 可知,随着气温的升高,颗粒温度上升速率加快,但温度均匀性降低。原因可能是较高的热风温度使床层中的温度梯度增大,同时增强了气流扰动,颗粒的非均匀运动进一步扩大了温度分布的不均匀性。当空气温度从 323 K 上升到 343 K 时,20 s 时,343 K 下的水分降幅

比 323 K 下的多 16.25%。主要是较高的空气温度提供了更多的显热,加速了水分从颗粒内部向外部的扩散,提高了颗粒整体的干燥速度。

由图 10 可知,随进风温度升高,高粱含水率峰值占比逐渐收窄,含水率波动区间相应拓宽。343 K 工况下的干燥不均度为 323 K 的 2.8 倍,表明更高的风温加快了颗粒

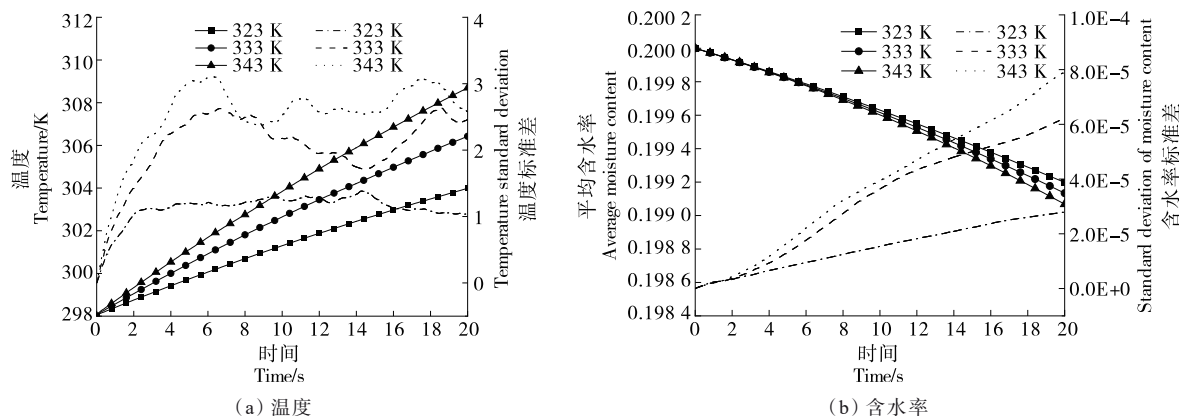


图9 高粱的温度和含水率的变化曲线

Figure 9 Temperature and moisture content variation curves of sorghum

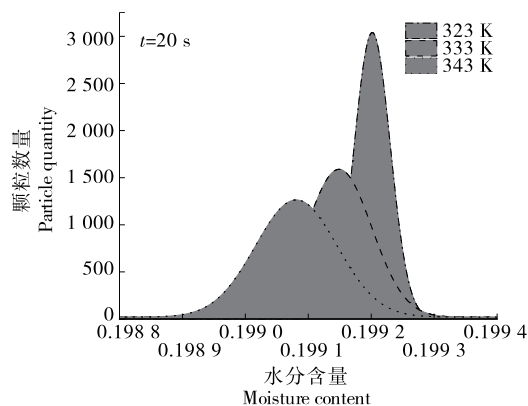


图10 高粱含水率频率分布

Figure 10 Frequency distribution of sorghum moisture content

的水分迁移速率,但扩大了床层内颗粒含水率的极差,最终导致干燥均匀性下降。

3.4 表观风速对高粱颗粒传热、传质效果的影响

由图11可知,表观风速升高会在振动流化床产生更多气泡,带动床层高粱颗粒速率提升,这有助于气固两相

间强化传质,进而推动干燥过程加速。

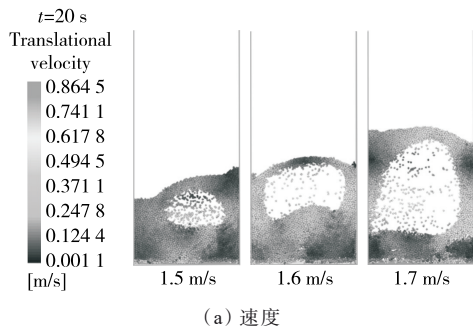
干燥前8 s内,不同工况下高粱含水率变化曲线无显著差异;后续阶段高粱传热传质速率的分化幅度显著扩大,核心因素为初始阶段高粱与气流间的热质交换尚未充分激活,随干燥时长增加,床层内高粱运动与热湿传递过程逐步趋近稳态,最终不同流化条件下流化床的干燥效能差异进一步显现。

由图12可知,随表观风速升高,颗粒群温升率呈上升趋势,使得温频分布曲线整体向高频域偏移。同期高粱湿分分布的离散度呈现收窄特征,表明提高表观风速不仅可强化流化床层的传热与传质效能,还可优化干燥过程中床内物料含水率分布不均的问题。

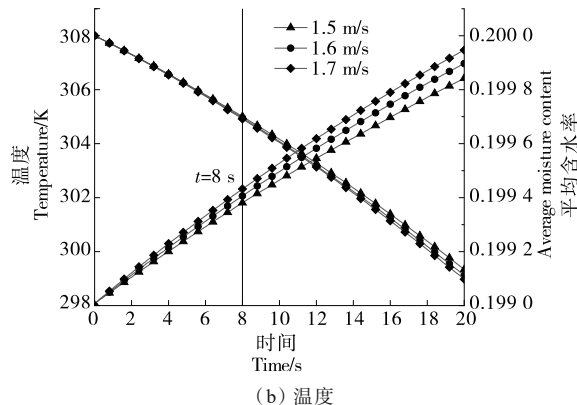
4 高粱振动流化床干燥参数优化试验

4.1 材料与设备

试验用料为白杂八号高粱,将收获后的高粱进行除杂处理后保存。试验设备主要包括振动流化床试验台、电加热系统、电控系统以及检测设备。



(a) 速度



(b) 温度

图11 颗粒速度和温度对含水率的影响

Figure 11 Effects of particle velocity and temperature on moisture content

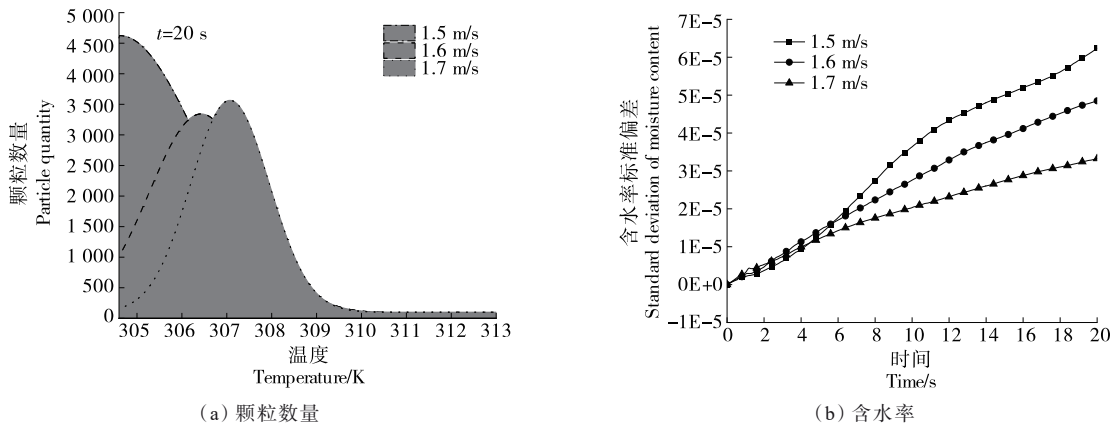


图 12 颗粒温度频率和颗粒含水率标准差的变化

Figure 12 Changes of particle temperature frequency and moisture content standard deviation

4.2 二次回归正交旋转组合试验

选取热风温度、振动频率和表观风速为因素,以干燥速率和干燥均匀度为评价指标,采用三因素五水平二次回归正交旋转组合设计优化干燥工艺参数,在保证干燥效率的同时,最大程度提升干燥质量。因素水平编码见表 2,试验设计与结果见表 3。

表 2 因素水平编码表

Table 2 Coding table of factors and levels

编码值	x_1 振动频率/Hz	x_2 热风温度/ $^{\circ}\text{C}$	x_3 表观风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1.682	30	80	1.70
1	26	72	1.62
0	20	60	1.50
-1	14	48	1.38
-1.682	10	40	1.30

使用 Design-Expert 13 软件进行多元回归拟合分析,以干燥速率(Y_1)和干燥均匀度(Y_2)为响应指标,构建二次多项式回归模型:

$$y_1 = -67.387 - 1.442x_1 + 0.348x_2 + 67.709x_3 - 0.042x_1^2 - 0.003x_2^2 - 22.2x_3^2, \quad (16)$$

$$y_2 = 6.804 - 0.328x_1 + 0.132x_2 - 7.897x_3 + 0.767x_1x_3 - 0.117x_2x_3 + 0.004x_1^2 + 0.000x_2^2 + 3.765x_3^2. \quad (17)$$

由表 4 可知,两个回归模型均具有高度显著性($P < 0.01$),其失拟项均不显著,说明模型与实际数据之间不存在系统性误差,拟合精度较高。模型决定系数 R^2 分别为 0.968 3 和 0.985 0,校正决定系数 R_{Adj}^2 分别为 0.946 3 和 0.974 6,说明模型具有较高的可靠性。模型中 x_2 和 x_3 的 P 值均 < 0.01 ,说明对高粱干燥速率以及干燥不均匀度均有极显著影响; x_1 对干燥速率的 P 值 < 0.05 ,差异显著, x_1 对干燥不均匀度的 P 值 < 0.01 ,差异极显著; x_2x_3 对干燥不均匀度影响极显著($P < 0.01$); x_1x_3 对干燥不均匀度影响显著($P < 0.05$)。

表 3 二次回归正交旋转组合试验及结果

Table 3 Quadratic regression orthogonal rotation combination test and results

试验号	x_1	x_2	x_3	干燥速率/ ($\% \cdot \text{h}^{-1}$)	干燥不 均匀度
1	-1	-1	-1	12.788	0.867
2	1	-1	-1	12.459	0.326
3	-1	1	-1	15.527	1.896
4	1	1	-1	14.519	1.484
5	-1	-1	1	15.049	0.490
6	1	-1	1	13.903	0.214
7	-1	1	1	17.338	0.885
8	1	1	1	17.574	0.650
9	-1.682	0	0	14.078	1.356
10	1.682	0	0	13.128	0.531
11	0	-1.682	0	14.430	0.153
12	0	1.682	0	18.364	1.395
13	0	0	-1.682	15.255	1.032
14	0	0	1.682	18.543	0.353
15	0	0	0	16.945	0.513
16	0	0	0	17.545	0.598
17	0	0	0	17.595	0.483
18	0	0	0	17.645	0.593
19	0	0	0	17.556	0.506
20	0	0	0	17.244	0.583
21	0	0	0	17.141	0.592
22	0	0	0	17.245	0.534
23	0	0	0	18.012	0.627

4.3 参数优化与试验验证

为获取高粱干燥速率与干燥均匀度协同最优的工艺参数组合,采用 Design-Expert13 软件对核心优化目标进行寻优计算:

表4 方差分析表[†]
Table 4 Analysis of variance for test indicators

方差来源	干燥速率				干燥不均匀度			
	平方和	均方	F值	P值	平方和	均方	F值	P值
模型	78.53	9	44.06	<0.000 1**	4.12	9	94.65	<0.000 1**
x_1	1.08	1	5.46	0.036 0*	0.59	1	122.80	<0.000 1**
x_2	22.12	1	111.68	<0.000 1**	1.91	1	394.42	<0.000 1**
x_3	14.56	1	73.54	<0.000 1**	0.89	1	182.99	<0.000 1**
x_1x_2	0.06	1	0.31	0.586 0	0.00	1	0.75	0.403 4
x_1x_3	0.02	1	0.12	0.739 9	0.02	1	5.04	0.042 7*
x_2x_3	0.17	1	0.85	0.373 1	0.23	1	47.47	<0.000 1**
x_1^2	35.04	1	176.90	<0.000 1**	0.32	1	66.67	<0.000 1**
x_2^2	3.87	1	19.52	0.000 7**	0.11	1	22.27	0.000 4**
x_3^2	1.58	1	7.97	0.014 4*	0.05	1	9.37	0.009 1**
残差	2.57	13			0.06	13		
失拟项	1.75	5	3.37	0.062 0	0.04	5	3.36	0.062 4
纯误差	0.83	8			0.02	8		
总和	81.10	22			4.19	22		

[†] *表示显著($P<0.05$),**表示极显著($P<0.01$)。

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 10 \text{ Hz} \leq X_1 \leq 30 \text{ Hz} \\ 40 \text{ }^\circ\text{C} \leq X_2 \leq 80 \text{ }^\circ\text{C} \\ 1.3 \text{ m/s} \leq X_3 \leq 1.7 \text{ m/s} \\ 12.459\%/\text{h} \leq Y_1 \leq 18.543\%/\text{h} \\ 0.153 \leq Y_2 \leq 1.896 \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

求解得到最佳参数组合为振动频率20.95 Hz,热风温度335.8 K,表观风速1.7 m/s,此时回归模型预测得到的高粱干燥速率为18.54%/h,干燥不均匀度为0.293。修正最优参数为振动频率21 Hz,热风温度336 K,表观风速1.7 m/s,此条件下的平均高粱干燥速率为17.86%/h($n=3$),与回归模型预测值误差 $\leq 5\%$;干燥不均匀度为0.304($n=3$),与回归模型预测值误差 $\leq 5\%$,处于较优水平,可以满足要求。

5 结论

运用离散元法与计算流体力学耦合模拟对高粱干燥过程中不同振动频率、热风温度和表观风速下的干燥特性进行了仿真分析。结果表明,干燥初期,高粱干燥不均匀性会因颗粒流动和相对湿度的增加而升高。床层底部颗粒受热形式以对流换热为主,中高床层以导热为主。当振动频率为20 Hz时,高粱最小流化速率能降低8.36%,床层膨胀率能降低42.11%。振动流化床的最优工艺条件为振动频率21 Hz,热风温度336 K,表观风速1.7 m/s,此时干燥速率最大为17.86%/h;干燥不均匀度最小为0.304,验证实验误差均 $<5\%$,确定结果可靠。后续可以通过增

加工作条件,建立完整的结构模型等进一步提高仿真的准确性。

参考文献

[1] PUNIA H, TOKAS J, MALIK A, et al. Characterization of phenolic compounds and antioxidant activity in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] grains[J]. Cereal Research Communications, 2021, 49(3): 343-353.

[2] 段有厚,王艳秋,郭晓雷,等.中国高粱品种登记现状分析及建议[J].辽宁农业科学,2022(4): 49-51.

DUAN Y H, WANG Y Q, GUO X L, et al. Analysis and suggestions on the status of registration of sorghum varieties in China[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2022(4): 49-51.

[3] 张顺.红曲高粱酸面团的制备及其对面包品质的影响[D].雅安:四川农业大学,2023: 11-12.

ZHANG S. Preparation of monascus sorghum sourdough and its effect on bread quality[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023: 11-12.

[4] 任海伟,卢娜娜,路力榕,等.瘤胃液对全株甜高粱青贮质量的影响[J].农业工程学报,2021, 37(5): 216-223.

REN H W, LU N N, LU L R, et al. Effects of rumen fluid addition on the ensiling quality of whole-plant sweet sorghum [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 216-223.

[5] 黄治国,刘娜,卫春会,等.高温大曲曲房空气中可培养细菌的分离鉴定及产酶特性[J].食品与机械,2021, 37(5): 15-21.

HUANG Z G, LIU N, WEI C H, et al. Isolation, identification and enzyme production characteristics of culturable bacteria in

- the air of high-temperature Daqu fermentation room[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 15-21.
- [6] 王贵荣. 中国农村统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 140-147.
- WANG G R. China rural statistical yearbook 2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023: 140-147.
- [7] 庞凌云, 袁志华, 詹丽娟, 等. 铁棍山药片热风干燥过程中传热传质规律[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 157-165.
- PANG L Y, YUAN Z H, ZHAN L J, et al. Heat and mass transfer of *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun slices during hot-air drying process[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 157-165.
- [8] 吴凡, 王展, 周坚, 等. 干燥方式对挤压麸皮理化性质和抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 67-72, 150.
- WU F, WANG Z, ZHOU J, et al. The effect of drying method on the physical and chemical properties and antioxidant activity of extruded wheat bran[J]. Food & Machinery, 2022, 38(6): 67-72, 150.
- [9] 谢永康, 王茜, 巨浩羽, 等. 5 种干燥方式对花生干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 197-203.
- XIE Y K, WANG X, JU H Y, et al. Effects of five drying methods on the drying characteristics and quality of peanuts[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 197-203.
- [10] 车刚, 万霖, 王洪超, 等. 稻谷保质干燥理论与技术装备[M]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2025: 3-4.
- CHE G, WAN L, WANG H C, et al. Theory and technical equipment for drying rice quality[M]. Harbin: Northeast Forestry University, 2025: 3-4.
- [11] 朱学军, 吕芹, 叶世超. 惰性粒子振动流化床中膏状物料干燥[J]. 化工学报, 2007(7): 1 663-1 669.
- ZHU X J, LÜ Q, YE S C. Drying of paste materials in vibrated fluidized bed with inert particles[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007(7): 1 663-1 669.
- [12] DE MUNCK M J A, PETERS E A J F, KUIPERS J A M. CFD-DEM modeling and validation of solids drying in a gas-fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 291: 119922.
- [13] MILACIC E, MANZANO M N, MADANIKASHANI S, et al. Experimental study on the temperature distribution in fluidised beds[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 248: 117062.
- [14] 臧英, 黄子顺, 秦伟, 等. 气吸式杂交稻单粒排种器研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 181-191.
- ZANG Y, HUANG Z S, QIN W, et al. Design of hybrid rice air-suction single-seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 181-191.
- [15] YANG K M, LI X, WANG Y C, et al. CFD-DEM simulation study on heat and mass transfer of wheat particles in gas-solid fluidized bed[J]. Journal of Food Process Engineering, 2025, 48(1): e70036.
- [16] MA C, XU H B, ZHONG W Q, et al. Experimental study on fluidization characteristics of vinegar residue in a vibrated fluidized bed[J]. Advanced Powder Technology, 2022, 33(8): 103698.
- [17] ZHOU Z Y, KUANG S B, CHU K W, et al. Discrete particle simulation of particle-fluid flow: model formulations and their applicability[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 661: 482-510.
- [18] DI FELICE R. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(1): 153-159.
- [19] BIRD R B, STEWART W E, LIGHTFOOT E N. Transport phenomena[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1961, 108(3): 78C.
- [20] GOLSHAN S, SOTUDEH-GHAREBAGH R, ZARGHAMI R, et al. Review and implementation of CFD-DEM applied to chemical process systems[J]. Chemical Engineering Science, 2020, 221: 115646.
- [21] SUTKAR V S, DEEN N G, PATIL A V, et al. CFD-DEM model for coupled heat and mass transfer in a spout fluidized bed with liquid injection[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 288: 185-197.
- [22] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [23] AZIZ H, AHSAN S N, DE SIMONE G, et al. Computational modeling of drying of pharmaceutical wet granules in a fluidized bed dryer using coupled CFD-DEM approach[J]. AAPS PharmSciTech, 2022, 23(1): 59.
- [24] RANZ W, MARSHALL W. Evaporation from droplets[J]. Chem Eng Prog, 1952, 48: 141-146.
- [25] LI T W, GOPALAKRISHNAN P, GARG R, et al. CFD - DEM study of effect of bed thickness for bubbling fluidized beds[J]. Particuology, 2012, 10(5): 532-541.
- [26] 纪杰, 喻丽华, 吴雪梅, 等. 酒用高粱种子离散元仿真参数标定[J]. 农机化研究, 2024, 46(9): 46-52.
- JI J, YU L H, WU X M, et al. Parameter calibration of discrete element simulation of sorghum seed for wine use[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(9): 46-52.
- [27] 唐天琪, 夏靖达, 孙珊珊, 等. 基于 DEM 模型湿颗粒鼓泡流化床传热传质特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(11): 3 011-3 019.
- TANG T Q, XIA J D, SUN S S, et al. Investigation on heat and mass transfer characteristics in bubbling fluidized by DEM numerical simulation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(11): 3 011-3 019.
- [28] AZMIR J, HOU Q F, YU A B. Discrete particle simulation of food grain drying in a fluidised bed[J]. Powder Technology, 2018, 323: 238-249.