

不同种类大米颗粒的离散元仿真参数标定

朱林枫 刘晓鹏 张永林 宋少云 尹强 曹梅丽

(武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430048)

摘要: [目的] 对比不同种类大米的接触参数的差异, 为抛光机结构的优化设计提供理论依据。[方法] 利用台架试验与仿真试验, 结合 MATLAB 软件图像处理技术, 通过最陡爬坡试验和二次正交试验, 得到了最佳参数组合, 并对粳米、粳糯米、籼米、籼糯米 4 种米粒的接触参数进行了测量和标定。[结果] 粳米、粳糯米、籼米、籼糯米与钢板间的静摩擦系数分别为 0.47, 0.46, 0.52, 0.52, 滚动摩擦系数分别为 0.069, 0.074, 0.081, 0.075, 碰撞恢复系数分别为 0.40, 0.42, 0.43, 0.41。进行堆积角测量试验, 其中, 粳米间静摩擦系数 0.34、滚动摩擦系数 0.04、碰撞恢复系数 0.53; 粳糯米间静摩擦系数 0.32、滚动摩擦系数 0.04、碰撞恢复系数 0.45; 籼米间静摩擦系数 0.37、滚动摩擦系数 0.06、碰撞恢复系数 0.56; 籼糯米间静摩擦系数 0.35、滚动摩擦系数 0.05、碰撞恢复系数 0.54。[结论] 长粒形籼米、籼糯米的静摩擦系数及滚动摩擦系数要大于圆粒形的粳米、粳糯米, 且籼米的滚动摩擦系数也要略大于籼糯米的滚动摩擦系数。

关键词: 大米; 离散元; 接触参数; 标定; 试验分析

Calibration of discrete element simulation parameters for different kinds of rice grains

ZHU Linfeng LIU Xiaopeng ZHANG Yonglin SONG Shaoyun YIN Qiang CAO Meili

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430048, China)

Abstract: [Objective] To provide a theoretical reference for the optimal design of the polisher structure by comparing the differences in the contact parameters of different kinds of rice. [Methods] Using bench test and simulation test, and combining with MATLAB software image processing technology, the optimal parameter combinations are obtained through the steepest climbing test and quadratic orthogonal test, and the contact parameters of the four kinds of rice grains, namely Japonica Rice, Japonica Glutinous Rice, Indica Rice, and Indica Glutinous Rice, are measured and calibrated. [Results] The coefficient of static friction between Japonica Rice, Japonica Glutinous Rice, Indica Rice, and Indica Glutinous Rice and the steel plate is 0.47, 0.46, 0.52, and 0.52, respectively. The coefficient of rolling friction is 0.069, 0.074, 0.081, and 0.075, respectively. The collision recovery coefficient is 0.40, 0.42, 0.43, and 0.41, respectively. In the stacking angle measurement test, the coefficient of static friction between Japonica rice is 0.34, with a coefficient of rolling friction of 0.04, and a collision recovery coefficient of 0.53. The coefficient of static friction between Japonica Glutinous Rice is 0.32, with a coefficient of rolling friction of 0.04, and a collision recovery coefficient of 0.45. The coefficient of static friction between Indica Rice is 0.37, with a coefficient of rolling friction of 0.06, and a collision recovery coefficient of 0.56. The coefficient of static friction between Indica Glutinous Rice is 0.35, with a coefficient of rolling friction of 0.05, and a collision recovery coefficient of 0.54. [Conclusion] The coefficients of static friction and rolling friction of the long-grained Indica Rice and Indica Glutinous Rice are larger than those of the round-grained Japonica Rice and Japonica Glutinous Rice. The coefficient of rolling friction of Indica Rice is also slightly larger than that of Indica Glutinous Rice.

Keywords: rice; discrete element; contact parameter; calibration; test analysis

基金项目: 湖北省自然科学基金(编号: 2025AFC123); 湖北省教育厅科学研究计划重点项目(编号: D20231602)

通信作者: 刘晓鹏(1989—), 男, 武汉轻工大学副教授, 博士。E-mail: conquermygod@163.com

收稿日期: 2024-09-14 改回日期: 2025-03-05

引用格式: 朱林枫, 刘晓鹏, 张永林, 等. 不同种类大米颗粒的离散元仿真参数标定[J]. 食品与机械, 2025, 41(10): 67-74.

Citation: ZHU Linfeng, LIU Xiaopeng, ZHANG Yonglin, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for different kinds of rice grains[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 67-74.

大米是稻谷经过砻谷、碾米、抛光等工序加工处理而来的产品,在中国的饮食结构中占有重要地位^[1]。大米可分为粳米、籼米和糯米,其中糯米又包括粳糯米和籼糯米^[2]。在大米加工过程中,抛光作为核心工序之一,其作用是除糠、增亮、增白,有利于提升大米品质^[3]。由于不同种类大米的物理参数存在一定的差异,故在抛光加工不同种类大米时,抛光机所对应结构必然不同。明确大米在加工过程中的受力和运动状态,对于优化抛光机的结构具有重要意义^[4]。

对抛光机而言,因其是密闭的加工系统,大米在机体内部的受力及运动状态难以通过常规测试手段获知。离散元法可模拟物料颗粒在加工设备内部的运动状态和受力状态。采用该方法对抛光机进行仿真模拟,对于研究大米颗粒在抛光机中的受力分布和运动轨迹具有较高的可靠性^[5]。在仿真过程中,大米颗粒的本征参数和接触参数是影响仿真结果准确性的重要因素。其中,本征参数可以通过试验及查阅相关文献来确定^[6]。但对于大米颗粒与接触材料间,以及大米颗粒之间的静摩擦系数、滚动摩擦系数和碰撞恢复系数等主要接触参数,难以全部通过常规试验手段进行获取,需要对部分接触参数进行标定^[7]。近年来,诸多学者聚焦于离散元法的应用,结合堆积角的实测试验与仿真试验,在农业物料接触参数标定方面取得了显著的研究进展^[8-10]。但研究对象仅为单一种类大米,缺少对比且研究结果的分析与机械设备的优化设计的联系不够密切。而抛光机在作业时常常需要对多种大米进行加工,同时不同大米的外形特征及接触参数,对于抛光机的结构设计有着重要影响。

针对上述实际问题,拟以粳米、粳糯米、籼米、籼糯米为研究对象,采用台架试验与仿真试验相结合的方法,对粳米、粳糯米、籼米、籼糯米与钢之间的接触参数,以及颗粒之间的接触参数进行测定与标定,并分析不同种类米粒的接触参数对抛光机结构设计及工作参数设置的影响,以期为大米抛光机的设计提供理论参考。

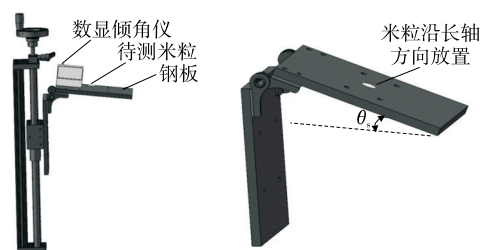
1 材料与方法

1.1 试验材料

选取的试验材料为:东北龙粳 31 号(粳米)、东北富粘 1 号(粳糯米)、安徽芜湖美香占 2 号(籼米)、湖北鄂糯 9 号(籼糯米)。由于抛光加工的对象是经碾白处理后的大米,因此,在试验前需对上述 4 种大米预先进行碾白处理,从而更准确地对抛光大米的接触参数进行测试与标定。碾白所用设备为 YL-M003 型碾米机(浙江云粮科技有限公司,功率 500 W、频率 50~60 Hz、转速 1 000~2 000 r/min)。

1.2 米粒与钢材料间接触参数测定

1.2.1 米粒与钢材料间静摩擦系数测定 静摩擦系数采用斜面法测定^[11],测定装置如图 1(a)所示,测定原理如图 1(b)所示。



(a) 摩擦系数测量装置示意图 (b) 静摩擦系数测量原理

图 1 静摩擦系数测量装置示意图及测量原理

Figure 1 Coefficient of static friction measuring device and its measuring principle

试验时,先将单个待测米粒沿长轴方向静置于倾角可调的钢板平面上,用数显倾角仪检查米粒是否水平放置。匀速缓慢调节钢板平面倾角,随着倾角逐渐增大,当米粒刚开始具有向下运动的趋势时停止调节,并用数显倾角仪记录待测米粒与水平面的夹角 θ_s 。4 种米粒均按此方法进行试验,每种米粒的试验均重复 5 次,求出各对应倾角平均值。按式(1)计算米粒与钢材料间的静摩擦因数。

$$\mu_s = \tan \theta_s, \quad (1)$$

式中:

μ_s ——静摩擦系数;

θ_s ——斜面倾角,°。

1.2.2 米粒与钢材料间滚动摩擦因数测定 滚动摩擦同样采用斜面法进行测定,仍采用图 1 所示装置。测定原理如图 2 所示。



图 2 滚动摩擦系数测量原理

Figure 2 Measuring principle of rolling friction coefficient

试验时,因为在通常情况下,米粒的滚动摩擦系数远小于静摩擦系数,再将单个米粒沿短轴方向静置于倾角可调的钢板平面上,由于米粒的横端面与钢板间的接触更为平滑,此时其所受的滚动摩擦阻力要远小于滑动摩擦阻力,则使米粒在试验过程中可以处于滚动状态。其

他试验操作方法与前文一致,待米粒沿着钢板平面刚开始滚动时停止调节,用数显倾角仪记录待测米粒与水平面的夹角 θ_d 。4种米粒均按此方法进行试验,每种米粒的试验均重复5次,求出各对应倾角平均值。按式(2)计算米粒与钢材料间的滚动摩擦因数。

$$\mu_d = \tan \theta_d, \quad (2)$$

式中:

μ_d ——滚动摩擦系数;

θ_d ——斜面倾角,°。

1.2.3 米粒与钢材料间碰撞恢复系数测定 碰撞恢复系数采用自由落体法进行测定。试验装置工作原理如图3所示。

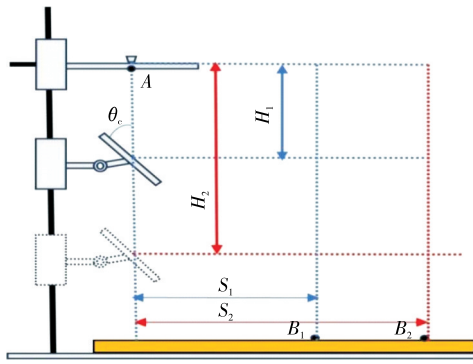


图3 碰撞恢复系数测量原理

Figure 3 Measuring principle of collision recovery coefficient

试验时,预先将倾角为45°的钢板平面调整至高度为 H_1 ,米粒从A处自由下落,与钢板平面碰撞后,以抛物线轨迹运动至沙盘上的 B_1 位置,记录此时的水平位移为 s_1 。再次调整钢板平面高度为 H_2 ,米粒仍然从A处自由下落,与钢板平面碰撞后,以抛物线轨迹运动至沙盘上的 B_2 位置,

记录此时的水平位移为 s_2 。根据式(3)和式(4)计算碰撞恢复系数 $e^{[12]}$ 。

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gs_1s_2(s_1-s_2)}{2(H_1s_2-H_2s_1)}} \\ v_y = \frac{H_1v_x}{s_1} - \frac{gs_1}{2v_x} \end{cases}, \quad (3)$$

$$e = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 \cos\left(45^\circ + \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x}\right)}}{v_0 \sin 45^\circ}, \quad (4)$$

式中:

v_x ——米粒水平方向分速度,m/s;

v_y ——米粒竖直方向分速度,m/s;

s_1, s_2 ——米粒碰撞反弹后的水平位移,m;

H_1, H_2 ——米粒投放点竖直高度,m;

v_0 ——米粒碰撞前瞬间的自由落体速度,m/s;

e ——碰撞恢复系数。

4种米粒均按此方法进行试验,每种米粒的试验均重复5次,求出各对应碰撞恢复系数的平均值。

1.3 米粒间接接触参数标定

1.3.1 米粒堆积角 散粒体物料堆积角受颗粒接触参数影响,因此,为对米粒间接接触参数进行标定,需测量各种米粒的堆积角。堆积角测量原理如图4(a)所示,将填充米粒的钢制圆筒缓慢提升,米粒在重力作用下从底部自然下落并逐渐堆积,待稳定后其坡面和水平面的夹角即为堆积角。利用MATLAB软件对颗粒堆积图像进行灰度处理、二值化、再提取其边界点,最后对轮廓曲线的边界点进行拟合,如图4(e)所示。计算出各种类米粒与钢板间堆积角 α_r ,4种米粒均按此方法进行试验,每种米粒的试验均重复5次,求出各对应堆积角平均值。

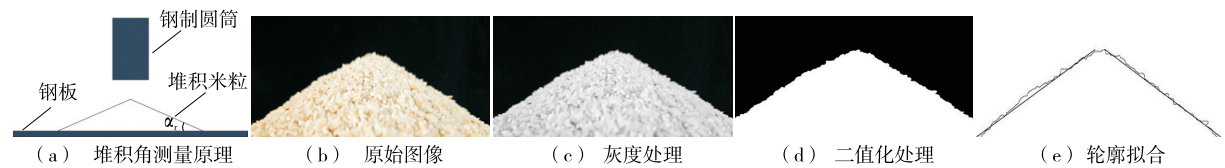


图4 堆积角测量原理及图像处理方法

Figure 4 Measuring principle and image processing method of repose angle

1.3.2 米粒的离散元模型 目前,离散元法(discrete element method, EDM)已经普遍应用于农业物料加工领域,该法不仅可以直观模拟大米加工设备在多种参数组合下的运动,还可以准确分析加工装备内大米颗粒的运动轨迹和所受压力分布等规律。由于大米表面较为平整且各米粒形状较为规则,故先利用游标卡尺对4种米粒的

尺寸进行重复测量,并取平均值,然后用SolidWorks软件对各米粒进行外部轮廓的建模,再将“.stl”格式的文件导入到EDEM 2022软件中进行颗粒填充。填充颗粒平滑值设置为2,得到4种由不同粒径小球组合填充而成的大米颗粒离散元模型。如图5所示。各材料的本征参数如表1所示。



图 5 各米粒建模

Figure 5 Modelling of individual rice grains

表 1 材料本征参数

Table 1 Material intrinsic parameters

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	长轴长度/mm	短轴长度/mm
粳米	0.40	1.1×10^7	1 600	3.8	1.10
粳糯米	0.40	1.1×10^7	1 600	4.1	1.20
籼米	0.40	1.1×10^7	1 600	4.9	0.86
籼糯米	0.40	1.1×10^7	1 600	5.4	0.90
钢板	0.25	8.0×10^{10}	7 853		

1.3.3 仿真试验 为确定接触参数标定取值范围,在 EDEM 中重复上述仿真进行最陡爬坡试验。4 种米粒与钢板间的接触参数取上文中的试验数据,经查阅文献及预试验,选取米粒之间的静摩擦系数 A 、滚动摩擦系数 B 和碰撞恢复系数 C 作为显著性试验因素,试验结果 α_s 为仿真堆积角、 σ 为仿真堆积角 α_s 与台架实际测量堆积角 α_t 的相对误差 σ ,并以相对误差 σ 为指标对仿真试验结果进行评价。

在进行最陡爬坡试验后,为获取在离散元仿真试验中碎米颗粒自身间的最优接触参数区间,分别以颗粒自身间静摩擦系数 A 、滚动摩擦系数 B 和碰撞恢复系数 C 为试验因素,以仿真堆积角 α_s 为指标,利用 Design-Expert 13.0 软件进行二次正交旋转组合试验,并通过 central-composite 模块进行寻找最优接触参数区间。二次正交试验设计可以通过选取有代表性的试验点,使得这些点在各参数因子空间中的分布是均匀合理的,且便于揭示各接触参数因子之间以及因子与响应变量堆积角之间的复杂关系。这有助于减少试验次数,同时保证试验结果的可靠性和准确性。该方法也已被广泛应用于颗粒状物料的最优接触参数区间的寻优及标定^[13-15]。

2 结果与分析

2.1 米粒与钢材料接触参数

根据测量及计算,各米粒与钢材料间的接触参数分

别如表 2~表 4 所示。

根据对比分析发现长粒形籼米、籼糯米的静摩擦系数及滚动摩擦系数要大于圆短粒形的粳米、粳糯米,且籼米的滚动摩擦系数也要略大于籼糯米。而 4 种米粒的碰撞恢复系数差异则未显示出与米粒外形特征之间有明显的相关性。

2.2 堆积角

根据 MATLAB 软件对堆积角图像进行处理,测量结果如表 5 所示。粳米、粳糯米、籼米、籼糯米的堆积角分别为 27.06° 、 27.26° 、 29.94° 、 28.93° 。由于长粒形籼米、籼糯米的静摩擦、滚动摩擦系数要大于圆短粒形粳米与粳糯米,故堆积角测量结果也稍大,与前文各米粒与接触材料之

表 2 米粒与钢材料静摩擦系数测量结果

Table 2 Measurement results of static friction coefficient between rice grains and steel materials

序号	粳米	粳糯米	籼米	籼糯米
1	0.46	0.48	0.52	0.54
2	0.47	0.45	0.50	0.54
3	0.49	0.47	0.54	0.52
4	0.46	0.47	0.51	0.49
5	0.49	0.44	0.53	0.53
均值	0.47	0.46	0.52	0.52

表 3 米粒与钢材料滚动摩擦系数测量结果

Table 3 Measurement results of rolling friction coefficient of rice grains and steel materials

序号	粳米	粳糯米	籼米	籼糯米
1	0.065	0.068	0.082	0.078
2	0.073	0.068	0.084	0.069
3	0.069	0.075	0.084	0.068
4	0.074	0.079	0.077	0.077
5	0.066	0.080	0.079	0.085
均值	0.069	0.074	0.081	0.075

表 4 米粒与钢材料碰撞恢复系数测量结果

Table 4 Measurement results of collision recovery coefficient between rice grains and steel materials

序号	粳米	粳糯米	籼米	籼糯米
1	0.40	0.43	0.44	0.45
2	0.44	0.43	0.41	0.41
3	0.42	0.38	0.48	0.46
4	0.39	0.45	0.39	0.37
5	0.38	0.45	0.39	0.37
均值	0.40	0.42	0.43	0.41

间参数试验结论一致。

2.3 最陡爬坡试验

最陡爬坡试验设计及结果如表 6 所示。仿真试验堆积角的相对误差显现出先减小后增大的情况,其中粳米、粳糯米、籼米、籼糯米相对误差分别为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 ,均为第 3 组试验相对误差最小,分别为 7.30%, 8.60%, 0.74%, 5.26%。可推断出最优值范围在第 3 组因素水平附近。故选取第 2 组、第 3 组和第 4 组试验因素为二次正交试验的水平编码值。

表 6 最陡爬坡试验设计与结果

Table 6 Steepest climbing test design and results							
序号	A 静摩擦系数	B 滚动摩擦系数	C 碰撞恢复系数	$\sigma_1/\%$	$\sigma_2/\%$	$\sigma_3/\%$	$\sigma_4/\%$
1	0.20	0.01	0.25	36.40	36.90	35.42	34.83
2	0.30	0.03	0.35	10.71	9.90	10.80	9.99
3	0.40	0.05	0.45	7.30	8.60	0.74	5.26
4	0.50	0.07	0.55	34.33	31.62	23.92	29.97
5	0.60	0.09	0.65	43.00	41.01	41.17	49.94
6	0.70	0.11	0.75	50.40	53.70	45.44	50.80

2.4 二次正交旋转组合试验

二次正交旋转组合试验因素水平见表 7,试验设计与结果见表 8。

应用 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行回归分析,得到静摩擦系数、滚动摩擦系数、碰撞恢复系数 3 个接触参数与堆积角(粳米 Y_1 、粳糯米 Y_2 、籼米 Y_3 、籼糯米 Y_4)相对误差间的二阶回归方程。在保证模型显著性好的前提下^[16],得到各类型米粒最终的二次回归模型方程:

$$Y_1=28.60+3.07A+2.22B-0.108\ 6C+0.56AB+0.36AC+0.47BC+0.938\ 1A^2+0.231B^2+0.119\ 7C^2,$$
 (5)

$$Y_2=29.41+2.96A+2.07B-0.001\ 6C+0.387\ 5AB+0.425AC+0.572\ 5BC+0.988\ 6A^2+0.293\ 9B^2+0.198\ 4C^2,$$
 (6)

$$Y_3=30.42+2.79A+2.03B-0.303\ 6C+0.146\ 3AB+0.796\ 3AC-0.016\ 2BC+1.31A^2+0.218\ 4B^2+0.034\ 6C^2,$$
 (7)

$$Y_4=29.55+2.30A+1.86B-0.227\ 8C-0.125AB+0.035AC-0.277\ 5BC+1.16A^2+0.323\ 3B^2+0.061\ 7C^2.$$
 (8)

由表 9 可知,4 种米粒模型方差分析结果均显著,表明分析结果有效。其中静摩擦系数及滚动摩擦系数对 4 种米粒的堆积角形成影响较大,碰撞恢复系数对各米粒的堆积角形成影响较小。

表 5 米粒堆积角测量结果

Table 5 Measurement results of repose angle of rice grains				
序号	粳米/(°)	粳糯米/(°)	籼米/(°)	籼糯米/(°)
1	27.20	27.11	29.50	27.97
2	25.69	27.50	31.98	28.41
3	28.98	25.66	28.68	30.85
4	27.25	28.56	28.60	27.95
5	26.20	27.47	30.93	29.47
均值	27.06	27.26	29.94	28.93

表 7 试验因素与水平

Table 7 Test factors and levels			
水平	A 静摩擦系数	B 滚动摩擦系数	C 碰撞恢复系数
—1.68	0.23	0.02	0.28
—1	0.30	0.03	0.35
0	0.40	0.05	0.45
1	0.50	0.07	0.55
1.68	0.57	0.08	0.62

2.5 米粒间接触参数寻优及标定

以米粒堆积角的相对误差最小值为目标,通过 Design-Expert 13.0 软件对回归方程进行寻优求解,分别以实际测得的堆积角($Y_1=27.06$ 、 $Y_2=27.26$ 、 $Y_3=29.94$ 、 $Y_4=28.93$)设定目标函数和约束条件计算后得到多组解,最终选取各米粒自身间静摩擦系数 A_1 、滚动摩擦系数 B_1 、碰撞恢复系数 C_1 。为验证该参数组合的准确性,将其代入 EDEM 软件中进行堆积角仿真试验,仿真试验结果用 θ' 表示,与实测堆积角间的相对误差用 σ 表示。试验 5 次得到米粒堆积角均值,如表 10 所示。

与实际堆积角相对误差分别为 0.40%, 0.58%, 0.26%, 0.72%, 表明各米粒最优参数组合可靠。

2.6 米粒接触参数对于抛光机结构设计的影响

米粒经过碾米机砂辊碾白加工后,需通过抛光机进行处理才能成为表面光泽剔透的成品大米。抛光机通过

表 8 二次正交旋转组合试验设计与结果

Table 8 Quadratic orthogonal rotating combination test design and results

项目	A	B	C	$Y_1/(^{\circ})$	$Y_2/(^{\circ})$	$Y_3/(^{\circ})$	$Y_4/(^{\circ})$
1	-1	-1	-1	26.30	27.23	28.15	27.11
2	1	-1	-1	30.21	31.21	32.30	31.57
3	-1	1	-1	28.66	29.50	32.21	31.52
4	1	1	-1	34.95	35.3	36.44	35.17
5	-1	-1	1	24.75	25.62	26.71	27.46
6	1	-1	1	30.24	31.57	33.54	31.75
7	-1	1	1	29.13	30.45	30.20	30.45
8	1	1	1	36.72	37.68	38.12	34.55
9	-1.68	0	0	25.38	26.76	29.37	28.26
10	1.68	0	0	36.46	37.16	38.24	37.15
11	0	-1.68	0	25.24	26.75	27.31	26.89
12	0	1.68	0	32.60	33.24	34.12	33.77
13	0	0	-1.68	29.26	30.35	31.27	30.17
14	0	0	1.68	27.95	29.10	29.12	29.01
15	0	0	0	28.35	29.65	30.50	29.70
16	0	0	0	28.72	29.72	30.54	29.46
17	0	0	0	28.57	29.34	30.74	29.72
18	0	0	0	28.96	29.28	30.15	29.45
19	0	0	0	28.50	29.16	30.27	29.48

抛光辊对米粒进行摩擦、碰撞作用,去除残留于米粒表面的糠粉,从而提升米粒的光洁度。抛光机的主要工作参数为:抛光辊转速、压力门开度。转速一般在 600~1 600 r/min 可调,压力门开度一般在 4~12 mm 可调。抛光机的主要工作部件为抛光辊,其主要有球体式和凸筋式

两种结构形式。球体式抛光辊的主要结构参数为:球面材料、辊间间隙、球体排列等;凸筋式抛光辊的主要结构参数为:螺旋筋长度、螺旋升角等^[17]。抛光机作业需满足抛光质量要求的同时,能够降低能耗和碎米率。可根据不同种类米粒的接触参数特性,对抛光机的主要工作参数和结构参数进行优化设计。

经前述试验分析可知,籼米、粳糯米的静摩擦系数为 0.48~0.55,滚动摩擦系数为 0.075~0.083;粳米、粳糯米的静摩擦系数为 0.45~0.50,滚动摩擦系数为 0.070~0.075;而 4 种米粒的碰撞恢复系数无较明显的差异。

对于球体式抛光辊,米粒在抛光室内运动以碰撞为主。其辊间间隙及压力门开度与米粒所受碰撞力呈负相关。由于 4 种米粒的碰撞恢复系数无明显差异,在加工时辊间间隙均可设计为 10~20 mm,压力门开度可调节至 12~18 mm,以达到合适的碰撞力区间。由于球体式抛光辊摩擦作用影响相对较小,只需要通过对抛光球面的材料进行调整。在加工摩擦系数较大的籼米、粳糯米时,可采用摩擦力较小的钢制球面。在加工摩擦系数较小的粳米、粳糯米时,此时可以对球面进行喷砂工艺,并增大球体的螺旋排列密度以达到良好的抛光光洁度。抛光辊的转速均可设置为 800~1 200 r/min。

对于凸筋式抛光辊,米粒在抛光室内运动以摩擦为主。螺旋筋长度与大米轴向输送能力呈正相关,其螺旋升角与大米所受碰撞力呈正相关。在加工摩擦系数较大的籼米、粳糯米时,可减小其所受的摩擦力。在结构设计时,可通过减小螺旋筋长度来减少摩擦时间,从而降低能耗。同时可以尝试减小抛光螺旋升角为 5°~6°,并降低抛光辊的转速至 700~1 100 r/min。在加工摩擦系数较小的粳米、粳糯米时,为达到良好的抛光光洁度,可适当增

表 9 二次项模型方差分析[†]

Table 9 Analysis of variance of quadratic model

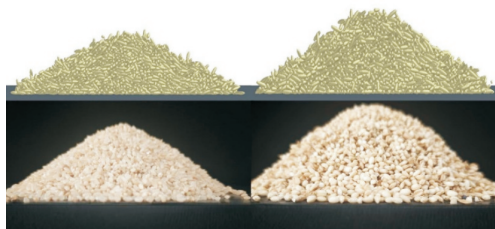
项目	粳米堆积角 Y_1		粳糯米堆积角 Y_2		籼米堆积角 Y_3		籼糯米堆积角 Y_4	
	F	P	F	P	F	P	F	P
模型	82.71	<0.000 1**	76.98	<0.000 1**	71.93	<0.000 1**	73.73	<0.000 1**
A	448.20	<0.000 1**	421.25	<0.000 1**	356.26	<0.000 1**	343.21	<0.000 1**
B	234.81	<0.000 1**	204.95	<0.000 1**	189.14	<0.000 1**	223.33	<0.000 1**
C	0.56	0.473 0	<0.01	0.991 2	4.23	0.069 9	3.36	0.100 1
AB	8.74	0.016 0**	4.22	0.070 0**	0.58	0.467 6	0.59	0.461 2
AC	3.61	0.089 8	5.08	0.050 7	17.05	0.002 6**	0.05	0.834 2
BC	8.16	0.034 9**	9.22	0.014 1**	<0.01	0.934 7	2.92	0.121 7
A ²	41.86	<0.000 1**	46.91	<0.000 1**	78.84	<0.000 1**	87.49	<0.000 1**
B ²	2.54	0.145 6	4.15	0.072 2	2.18	0.173 1	6.76	0.028 7**
C ²	0.68	0.431 6	1.89	0.202 5	0.05	0.820 0	0.25	0.631 7

[†] “*”表示显著;“**”表示极显著。

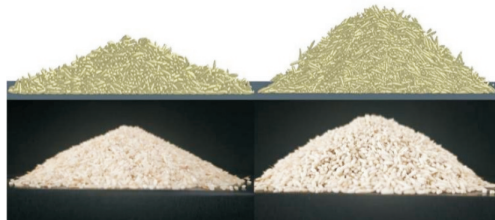
表 10 堆积角试验验证

Table 10 Repose angle test validation

序号	A_1	B_1	C_1	θ'	$\sigma/\%$
1	0.34	0.04	0.53	27.17	0.40
2	0.32	0.04	0.45	27.42	0.58
3	0.37	0.06	0.56	30.02	0.26
4	0.35	0.05	0.54	28.72	0.72



(a) 梗米与梗糯米堆积轮廓



(b) 籼米与籼糯米堆积轮廓

图 6 堆积角试验验证

Figure 6 Repose angle test validation

大其所受的摩擦力,提升摩擦加工效果,并适当增加螺旋筋长度,提高大米的输出能力,使米粒在抛光室内的时间延长,能更加充分的翻滚和摩擦。同时在结构设计时,可适当增加抛光螺旋升角至 $6^\circ \sim 7^\circ$,并可增大转速至 1 000~1 400 r/min。

3 结论

(1) 开展了基于采用斜面滑动法、斜面滚动法、自由落体碰撞法、无底圆筒法标定梗米、梗糯米、籼米、籼糯米与钢板间的静摩擦系数、滚动摩擦系数与碰撞恢复系数。并通过二次正交试验确定了影响形成堆积角大小的显著性因素关系:米粒间碰撞恢复系数与堆积角大小呈负相关;米粒间静摩擦系数、米粒间滚动摩擦系数与堆积角大小呈正相关,且静摩擦系数的因素更显著。

(2) 确定了不同大米类型对于大米加工设备离散元仿真所需的接触参数,并对其参数进行对比分析,发现长粒形籼米、籼糯米的静摩擦系数及滚动摩擦系数要大于圆粒形的梗米、梗糯米,且籼米的滚动摩擦系数也要略大于籼糯米的。

(3) 根据力学特性分析及大米加工设备的角度研究,不同种类的抛光辊对于加工不同接触参数的大米,有着不同的设计需求。在大米抛光加工过程中,抛光机需要相应的针对不同类型的米粒进行结构设计,同时要对抛光机的工作参数深入研究,以确定合适的范围,以在达到良好抛光效果同时,能够降低能耗,减少加工成本。

该研究主要对米粒类型离散元接触参数进行标定,根据米粒之间的静、动摩擦系数的差异进行对比分析,并对大米抛光机的结构设计进行了探讨。后续将进一步通过离散元仿真与试验方法,量化接触参数和外形特征等与大米抛光机结构设计优化的关系,提出更为具体的大米加工策略和相关加工机械的优化设计方案。

参考文献

- [1] 朱启思,关则恩,邓常继,等. 籼稻适度加工关键技术研究[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(3): 108-111.
- [2] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [3] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [4] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [5] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [6] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [7] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [8] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [9] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [10] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [11] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [12] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [13] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [14] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [15] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [16] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [17] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [18] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [19] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [20] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [21] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [22] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [23] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [24] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [25] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [26] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [27] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [28] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [29] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [30] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [31] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [32] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [33] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [34] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [35] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [36] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [37] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [38] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [39] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [40] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [41] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [42] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [43] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [44] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [45] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [46] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [47] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [48] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [49] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [50] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [51] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [52] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [53] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [54] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [55] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [56] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [57] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [58] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [59] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [60] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [61] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [62] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [63] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [64] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [65] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [66] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [67] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [68] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [69] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [70] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [71] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [72] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [73] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [74] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [75] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [76] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [77] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [78] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [79] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [80] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [81] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [82] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [83] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [84] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [85] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [86] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [87] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [88] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [89] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [90] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [91] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [92] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [93] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [94] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [95] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [96] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [97] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [98] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [99] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.
- [100] 王卓权,林祯芃,陈旭东,等. 不同原料糯米品种对绍兴黄酒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 773-779.

- simulation of impact component for *Camellia oleifera* fruit picking machine[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024, 52(6): 143-154.
- [7] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 58-69.
- CHEN Y, GAO X X, JIN X, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of cyperus esculentus seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 58-69.
- [8] 刘大为, 段佳鹏, 陈星宇, 等. 基于 EDEM 的稻种离散元摩擦参数标定[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(2): 189-195.
- LIU D W, DUAN J P, CHEN X Y, et al. Calibration of friction parameters of seed particle models of hybrid rice based on EDEM[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(2): 189-195.
- [9] LI H C, ZENG R, NIU Z Y, et al. A calibration method for contact parameters of maize kernels based on the discrete element method[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 664.
- [10] HU M J, XIA J F, ZHOU Y, et al. Measurement and calibration of the discrete element parameters of coated delinted cotton seeds[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 286.
- [11] 张春, 杜文亮, 陈震, 等. 荞麦米筛分物料接触参数测量与离散元仿真标定[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 46-51.
- ZHANG C, DU W L, CHEN Z, et al. The measurement of contact parameters of buckwheat rice screening material and discrete element simulation calibration[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 46-51.
- [12] 彭才望, 周婷, 宋世圣, 等. 基于 Hertz 接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 125-134.
- PENG C W, ZHOU T, SONG S S, et al. Measurement and analysis of restitution coefficient of black soldier fly larvae in collision models based on Hertz contact theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 125-134.
- [13] 郭凌云, 赵美卿, 高有山, 等. 旋耕后农田模型离散元参数标定[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 296-301.
- GUO L Y, ZHAO M Q, GAO Y S, et al. Calibration of discrete element parameters of farmland model after rotary tillage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 296-301.
- [14] 张宏建, 陈修波, 李宏立, 等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 80-90.
- ZHANG H J, CHEN X B, LI H L, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 80-90.
- [15] 代永波, 杨薇, 李建东, 等. 玉米小区五行分种机理分析与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(11): 13-20, 28.
- DAI Y B, YANG W, LI J D, et al. Mechanism analysis and experiment of five-row seeding in maize community[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(11): 13-20, 28.
- [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] 颜俊, 胡治湘, 罗红武, 等. 提高大米抛光机抛光大亮度降低碎米率的方法研究[J]. 粮食与饲料工业, 2020(3): 1-3, 6.
- YAN J, HU Z X, LUO H W, et al. Research on improving polishing brightness of rice polisher and reducing broken rice rate[J]. Cereal & Feed Industry, 2020(3): 1-3, 6.