

碾米机离散元模拟参数测定

Determination of discrete element simulation parameters of rice milling machine

张 宁 曹宪周 王鑫宇 孙艳岭

ZHANG Ning CAO Xian-zhou WANG Xin-yu SUN Yan-ling

(河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001)

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:目的:解决碾米机操作不便及碾米机滚动摩擦系数与滑动摩擦系数概念混淆的问题。方法:使用 EDEM 软件对碾白加工过程进行离散元模拟。以 MNAW18 型碾米机为参照,取丰两优系列糙米为样品,通过自主搭建实验台并结合模拟标定,建立一套测取碾米机离散元模拟参数的方法。结果:使用自制碰撞系数试验装置,并结合视频运动处理软件得到糙米与糙米、碾辊和筛网间的碰撞恢复系数分别为 0.34, 0.24, 0.43;利用斜面倾角与静摩擦系数的关系,设计静摩擦试验,测得糙米与糙米、碾辊和筛网间的静摩擦系数分别为 0.467, 0.881, 0.550;通过糙米堆积角试验、糙米斜面滚落试验与离散元模拟试验相结合对滚动摩擦系数进行标定,得到糙米与糙米、碾辊和筛网间的滚动摩擦系数分别为 0.013, 0.101, 0.159。结论:通过二次模拟,仿真模拟结果与实测结果误差在合理范围内,表明参数标定的数据是可靠。

关键词:离散元;碾米;摩擦系数;碰撞恢复系数

Abstract: **Objective:** To solve the problem that the roller is inconvenient to operate and the concept of rolling friction coefficient and sliding friction coefficient is confused. **Methods:** EDEM software was used to simulate the white milling process. Taking MNAW18 rice mill as a reference and taking Feng Liangyou series brown rice as a sample, a set of method for measuring discrete element simulation parameters of rice mill was established by independently setting up an experimental bench and combining with simulation calibration. **Results:** Using the self-made collision coefficient experimental device and video

motion processing software, the collision recovery coefficients between brown rice and brown rice, roller and screen were 0.34, 0.24 and 0.43 respectively. Based on the relationship between inclined angle and static friction coefficient, the static friction experiment is designed. The static friction coefficients between brown rice and brown rice, roller and screen were 0.467, 0.881 and 0.550 respectively. The rolling friction coefficient was calibrated through the combination of brown rice stacking angle experiment, brown rice inclined plane rolling experiment and discrete element simulation experiment. The rolling friction coefficients between brown rice and brown rice, roller and screen were 0.013, 0.101 and 0.159 respectively. **Conclusion:** Through the secondary simulation, the error between the simulation results and the measured results is within a reasonable range, which indicates that the parameter calibration data is reliable.

Keywords: discrete element; rice milling; friction coefficient; collision recovery coefficient

碾米机是大米加工过程中的关键设备。随着离散元应用技术的完善与推广,离散元模拟技术在碾米研究中的应用越来越广泛。庞晓霞^[1]使用 EDEM 软件进行了砂辊碾米机碾白室内物料运动仿真;张双^[2]利用 EDEM 软件进行了碾米机中物料流体动力学分析;曾勇^[3]利用 EDEM 进行了实验室级横式碾米机碾米过程离散元仿真;李碧等^[4]使用 EDEM 软件进行了卧式铁辊喷风碾米机碾白过程的多场耦合仿真。然而使用计算机进行离散元模拟时的一大难点是需要获取相应的模拟参数。刘瑞等^[5]标定了包衣玉米种子离散元仿真参数;张胜利等^[6]对绿豆离散元仿真参数进行了标定;牛有智等^[7]对颗粒饲料进行了参数标定;张涛等^[8]对玉米秸秆物理参数进行了标定。Ucgu 等^[9]研究了土壤间的恢复系数和摩擦力;Asaf 等^[10]对土壤所需离散元参数进行了测定;郑向

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFC1600601, 2017YFD0401101)

作者简介:张宁,男,河南工业大学在读硕士研究生。

通信作者:曹宪周(1963—),男,河南工业大学教授,硕士。

E-mail: xianzhoucao@163.com

收稿日期:2022-05-21 **改回日期:**2022-09-20

阳等^[11]测定了发射药颗粒间的摩擦系数;王云霞等^[12]测定了玉米种子间的接触参数。

目前,对于糙米离散元参数标定缺乏相关研究,而且已有的研究存在操作不便以及出现将滚动摩擦系数与滑动摩擦系数概念混淆的情况。研究拟通过自主搭建实验台结合离散元模拟中的 Hertz-Mindlin no slip 接触模型,建立一套更为简便获取碾米离散元模拟所需试验参数的方法,以期为进行碾米离散元研究提供参数依据。

1 碰撞恢复系数

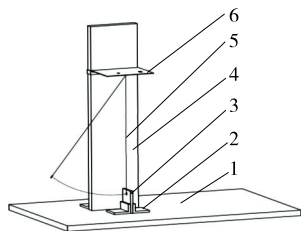
1.1 试验原理

由牛顿碰撞定律可知,对于材料确定的两个物体,碰撞后两物体的分离速度 $(v'_2 - v'_1)$ 与碰撞前两物体的接近速度 $(v_2 - v_1)$ 成正比,比值由两物体的材料决定,称为碰撞恢复系数 e ,即

$$e = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \quad (1)$$

1.2 试验装置

采用自主搭建的碰撞恢复系数实验台,如图 1 所示。



1. 实验台底座 2. 夹具 3. 糙米板、筛网、碾辊 4. 标板 5. 带有糙米的细线 6. 可移动挡板

图 1 碰撞恢复系数试验装置

Figure 1 Impact recovery coefficient test device

试验装置测试原理如图 2 所示。糙米在 B 位置无初速度自由释放,当其下落至最低点时,恰好发生碰撞,规定碰撞前速度为 v_1 ,碰撞后速度为 v'_1 。与之相碰的糙米板、筛网、碾辊位置固定,因此碰撞前后速度均为 0。所以碰撞恢复系数 e 可简化为:

$$e = \frac{-v'_1}{v_1} \quad (2)$$

式中:

v_1, v'_1 ——糙米碰撞前后的速度矢量。

该测试方法测量碰撞恢复系数具有显著优点。一方面,米粒基本在一个平面内进行运动,不会向四周随机弹射;另一方面,该方法通过对采集的碰撞过程视频进行运动处理,可直接获取米粒碰撞前后的速度,优化了计算。采用该方法,碰撞的瞬间米粒会发生轻微的摆动,会伴随随机误差的产生,造成计算出的碰撞恢复系数产生轻微波动。但其与以往经常采用颗粒自由落体方式下落,忽视了米粒碰撞后会以不同的角度向四周散射,会产生极

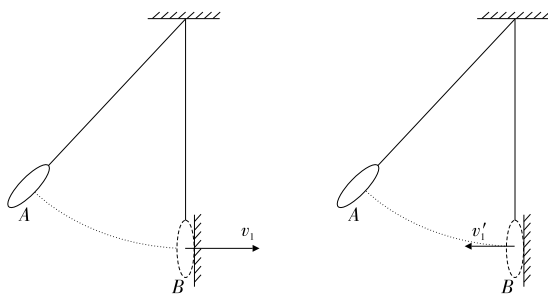


图 2 试验装置测试原理图

Figure 2 Test device test schematic diagram

大的不确定性,而通过碰撞前后高度估算碰撞恢复系数的方法相对而言更具优势。

1.3 试验结果

碰撞恢复系数测定试验通过录制糙米碰撞过程中的视频,再由 Tracker 软件对视频进行处理,获取糙米碰撞前后的速度,如图 3 所示,再代入式(2)计算碰撞恢复系数。由表 1 可知,糙米与碾辊、糙米和筛网间碰撞恢复系数分别为 0.34, 0.24, 0.43。

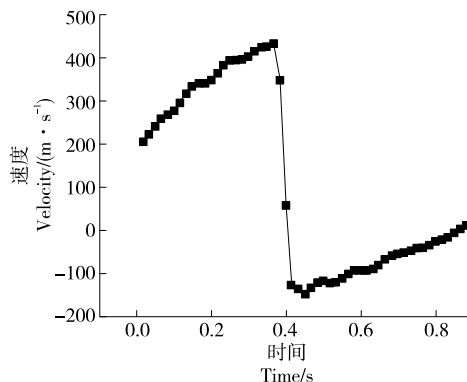


图 3 米粒水平速度分析

Figure 3 Analysis of horizontal velocity of rice grain

2 静摩擦系数

2.1 试验原理

将粘有糙米的物块置于可调节的斜面上,通过逐渐增大斜面与水平面之间的夹角(图 4),当物块刚好向下移动时记为 θ ,则:

$$\mu_s = \frac{G \sin \theta}{G \cos \theta} = \tan \theta \quad (3)$$

式中:

μ_s ——静摩擦系数;

G ——糙米物块的重力, N。

2.2 试验方法

分别将筛网样品、砂辊固定至自制斜面仪器上,将物块置于其上,缓慢调大斜面角度。当糙米物块刚好下滑时,读取斜面上仪上的角度值。试验结果见表 2。

表 1 糙米与碾辊、糙米及筛网间的碰撞试验结果

Table 1 Collision test results between brown rice and roller, brown rice and screen

试验次数	糙米与碾辊			糙米与糙米			糙米与筛网		
	碰撞前 v_1	碰撞后 v'_1	碰撞恢复	碰撞前 v_1	碰撞后 v'_1	碰撞恢复	碰撞前 v_1	碰撞后 v'_1	碰撞恢复
	(mm · s ⁻¹)	(mm · s ⁻¹)	系数 e	(mm · s ⁻¹)	(mm · s ⁻¹)	系数 e	(mm · s ⁻¹)	(mm · s ⁻¹)	系数 e
第 1 次	433	-137	0.32	517	123	0.24	460	-206	0.45
第 2 次	415	-151	0.36	431	-106	0.24	404	-158	0.39
第 3 次	398	-136	0.34	580	-140	0.24	420	-191	0.45
e 均值		0.34			0.24			0.43	

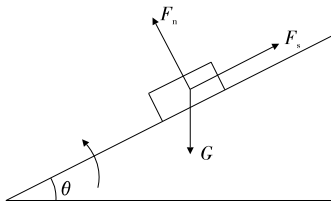


图 4 静摩擦系数测试原理

Figure 4 Static friction coefficient test principle

表 2 静摩擦系数试验结果

Table 2 Experimental results of static friction coefficient

试验号	糙米—糙米/(°)	糙米—筛网/(°)	糙米—砂辊/(°)
1	25	30	42
2	27	28	39
3	27	29	40
4	24	30	42
5	22	28	41
6	26	28	43
7	25	29	42
8	27	28	40
9	27	30	43
10	26	28	42
平均值	25.0	28.8	41.4

由表 2 可知,糙米物块刚好向下滑动时与糙米、筛网和砂辊间的角度平均值 θ 分别为 25.0°,28.8°,41.4°。因此糙米与糙米、筛网和砂辊间的静摩擦系数分别为 0.467,0.881,0.550。

3 滚动摩擦系数

滚动摩擦系数是离散元模拟中至关重要的一个物理参数,该参数对颗粒的堆积特性有显著影响,其大小主要取决于相互接触物体的材料性质和表面状况,如粗糙程度、湿度等。目前,对非圆颗粒滚动摩擦系数的测定还没有准确成熟的测量方法,当颗粒的某参数未知时,参数标定的方法是一种有效便捷的研究手段,当模拟过程中调

节或拟合出的颗粒参数值符合试验结果时,可认为该值为颗粒参数值^[13]。

3.1 糙米间滚动摩擦系数

3.1.1 糙米堆积角试验 预先在堆积角试验装置下方平铺一层糙米,称取 250 g 糙米倒入试验装置上的漏斗内,糙米自由落下在下方平铺的糙米上堆积形成糙米堆。

通过 GetData 软件对糙米堆 +x、-x、+y、-y 4 个方向的图像轮廓边缘进行处理,获得糙米颗粒堆轮廓坐标点如图 5 所示。

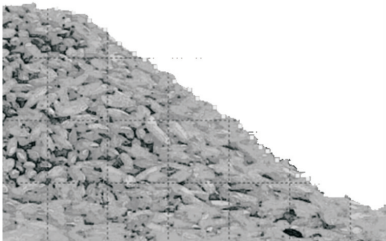


图 5 GeData 获取边缘轮廓数据

Figure 5 GeData obtains edge contour data

3.1.2 糙米堆积角试验结果 通过 GetData 对图像进行处理获得糙米堆 +x、-x、+y、-y 4 个方向的边缘轮廓数据,通过 Origin 软件进行拟合,获得拟合方程的斜率 k 如图 6 和表 3 所示。

设堆积角为 α ,则

$$\alpha = |\arctan(k)|。 \tag{4}$$

由表 3 中的数据求得堆积角 α 为 32.123°。

3.1.3 糙米颗粒离散元模型 随机挑选 50 粒糙米样品,使用游标卡尺测其三轴尺寸,最终结果取平均值。由图 7 可知,糙米平均尺寸为 6.896 mm × 2.332 mm × 1.973 mm。

3.1.4 试验装置离散元模型及参数设置 仿真试验与物理试验应保持一致,图 8 为仿真所用模型,上方是漏斗,下方是落料台。其中漏斗距离落料台高度为 75 mm,漏斗自身高度 120 mm,大口直径 115 mm,小口直径 15 mm。仿真试验中生成糙米总质量 250 g,仿真试验所用参数见表 4。

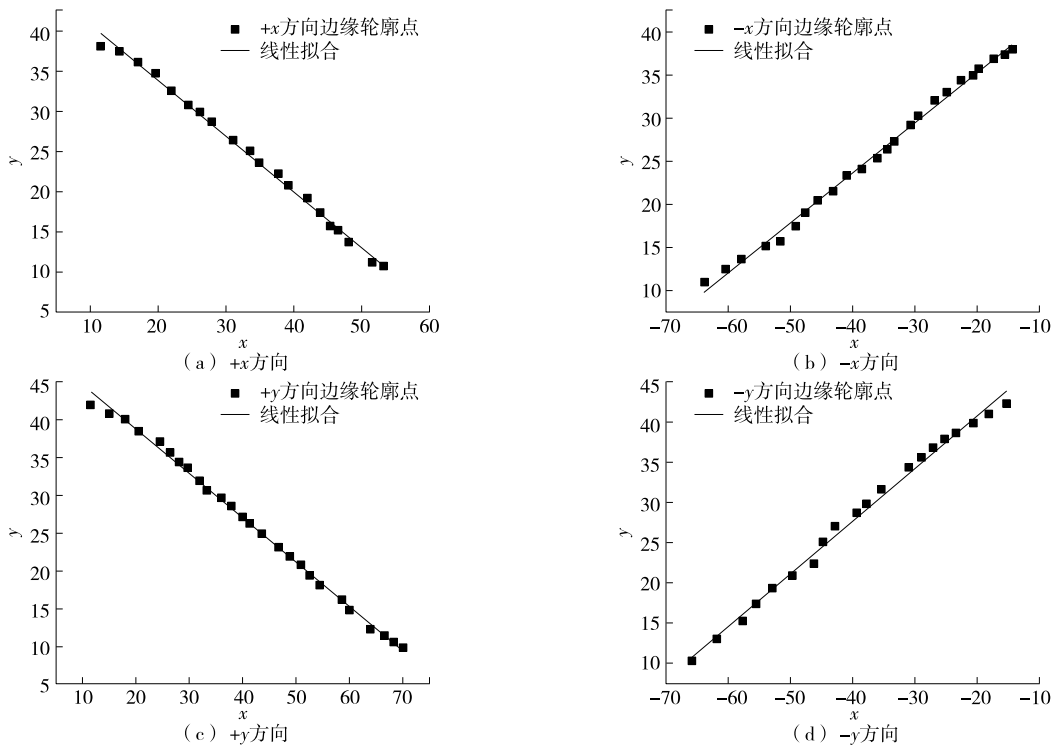


图 6 糙米堆边界轮廓图像处理

Figure 6 Image processing of boundary contour of brown rice heap

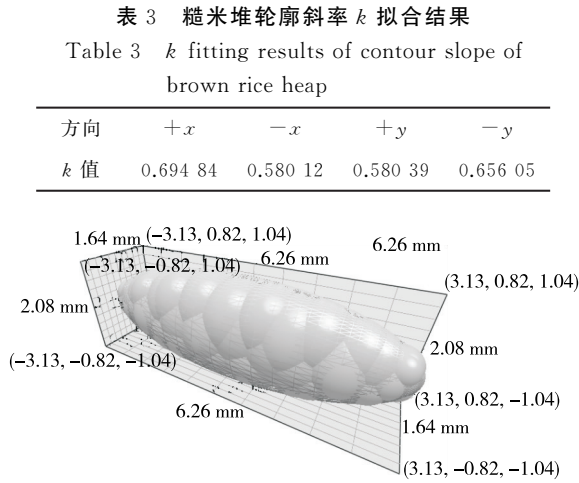


图 7 糙米离散元模型

Figure 7 Brown rice discrete element model

3.1.5 模拟结果与分析 离散元模拟按照滚动摩擦系数跨度值 0.02, 分别取值 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 采用 GetData 软件对模拟试验的图片进行处理, 以此找出滚动摩擦系数 μ_r 与堆积角 α 的关系, 试验结果见表 5。

将仿真试验中的滚动摩擦系数 μ_r 与堆积角度 α 进行线性拟合, 得到糙米滚动摩擦系数与堆积角度拟合曲线如图 9 所示。

堆积角拟合方程为:

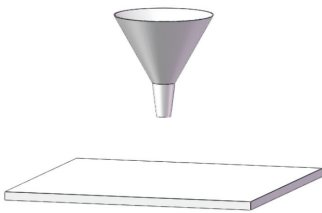


图 8 糙米堆积角离散元仿真模型

Figure 8 Discrete element simulation model of brown rice stacking angle

表 4 离散元模拟参数

Table 4 Discrete element simulation parameters

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	碰撞恢 复系数	剪切模 量/Pa	静摩擦 系数	滚动摩 擦系数
1 334	0.25	0.24	3.32×10^8	0.467	0.01~0.07

$$\alpha = 30.06 + 177.35\mu_r - 1\,065.25\mu_r^2。$$
 (4)

将实际堆积角试验中测得的角度值代入式(4), 可得糙米颗粒间的滚动摩擦系数为 0.013。

3.1.6 二次拟合验证 为了验证所得糙米间滚动摩擦系数的准确性, 将其代入 EDEM 软件中进行二次模拟, 模拟所获图像如图 10 所示。

通过对二次模拟所获糙米堆轮廓进行图像处理, 得到堆积角为 32.416° , 与实际试验所获得的误差为 0.91%, 在 1% 内, 证明了标定数值的准确性。

表 5 糙米堆积角轮廓边缘拟合曲线斜率

Table 5 Slope k of edge fitting curve of brown rice accumulation angle contour

滚动摩擦系数	$+x$	$-x$	$+y$	$-y$	$ k $ 平均值	$\alpha/(^{\circ})$
0.01	-0.570	0.622	-0.692	0.596	0.62	31.80
0.03	-0.639	0.707	-0.686	0.685	0.68	34.22
0.05	-0.732	0.783	-0.795	0.645	0.74	36.50
0.07	-0.740	0.733	-0.670	0.861	0.76	37.23

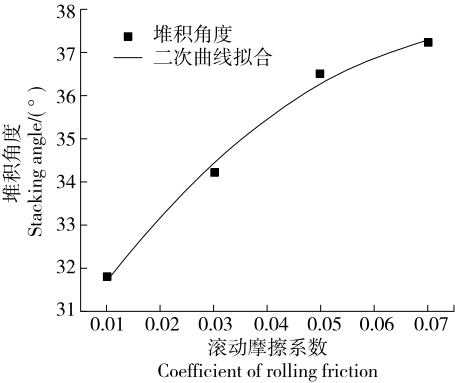


图 9 堆积角拟合曲线

Figure 9 Accumulation angle fitting curve

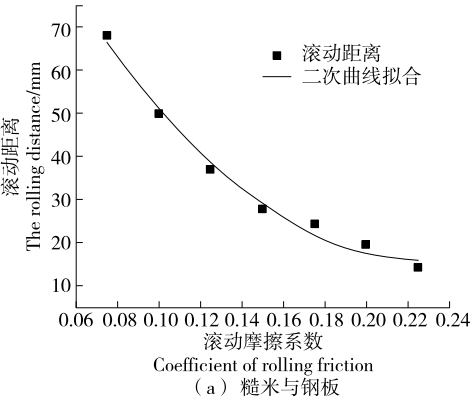


图 10 二次模拟糙米颗粒堆

Figure 10 Secondary simulation of brown rice particle reactor

3.2 糙米与筛网、碾辊间滚动摩擦系数测定

3.2.1 试验方法 糙米与筛网、碾辊间滚动摩擦系数通过米粒斜面滚落试验与 EDEM 模拟仿真进行标定。选取



(a) 糙米与钢板

30 粒糙米置于倾斜角度为 30° 的斜面上,沿斜面方向距斜面与实验台平面交界处 100 mm 的位置,使其无初速度自由滑落,测量米粒距离斜面底端的距离 x ,取平均值,糙米斜面滑落仿真试验台如图 11 所示。

3.2.2 试验结果 实际试验中,以钢板代替筛网,以砂纸代替碾辊,分别将砂纸与钢板贴于糙米斜面滚落实验台进行试验^[14]。试验结果见表 6。



图 11 糙米斜面滑落仿真实验台

Figure 11 Brown rice inclined plane slide simulation experiment table

表 6 糙米斜面滚落试验统计

Table 6 Experimental statistics of slope rolling of brown rice

试验次数	钢板	砂纸
第 1 次	53.33	32.84
第 2 次	48.57	27.21
第 3 次	50.40	32.53
均值	50.77	30.86

EDEM 模拟试验中,按照滚动摩擦系数跨度值 0.025 进行模拟试验。其中糙米滚动摩擦系数取 0.013。对模拟试验结果进行曲线拟合,结果见图 12。

所得拟合方程分别为:

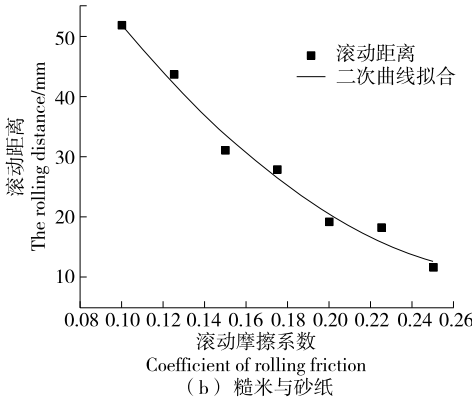
$$x_1 = 129.775\ 43 - 1\ 004.891\ 43\mu_{r1} + 2\ 196.571\ 43\mu_{r1}^2, \quad (5)$$

$$x_2 = 102.753\ 43 - 612.362\ 38\mu_{r2} + 1\ 007.904\ 76\mu_{r2}^2, \quad (6)$$

式中:

μ_{r1} 、 μ_{r2} ——糙米与钢板、砂纸的滚动摩擦系数;

x_1 、 x_2 ——糙米在钢板、砂纸上的滚动距离,mm。



(b) 糙米与砂纸

图 12 糙米滚动距离 x 与滚动摩擦系数 μ_r 拟合曲线

Figure 12 Fitting curve of rolling distance x and rolling friction coefficient μ_r of brown rice

将实际试验中的 x 代入式(5)和式(6),得糙米与钢板、砂纸间滚动摩擦系数 μ_{r1} 分别为 0.101, 0.159。

3.2.3 二次模拟验证 将 μ_{r1} 、 μ_{r2} 输入 EDEM 软件中进行二次验证,得出糙米与钢板间水平滚动距离 x 值为 51.68,与实际平均值误差为 1.79%;糙米与碾辊间水平滚动距离 x 值为 30.85,与实际平均值误差为 0.032%;可以认为糙米与钢板、砂纸间实际滚动摩擦系数分别为 0.101, 0.159。

4 结论

使用自制碰撞系数试验装置,并结合视频运动处理软件得到糙米与糙米、碾辊和筛网间的碰撞恢复系数分别为 0.34, 0.24, 0.43。利用斜面倾角与静摩擦系数的关系,设计静摩擦试验,测得糙米与糙米、碾辊和筛网间的静摩擦系数分别为 0.467, 0.881, 0.550。通过糙米堆积角试验、糙米斜面滚落试验与离散元模拟试验相结合对滚动摩擦系数进行标定,得到糙米与糙米、碾辊和筛网间的滚动摩擦系数分别为 0.013, 0.101, 0.159。研究中使用的糙米品种为河南丰两优,品种相对单一,后续可以基于试验方法,研究不同品种的糙米,建立数据库。

参考文献

- [1] 庞晓霞. 砂辊碾米机碾白室内物料运动仿真[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015: 26-36.
PANG X X. Material movement simulation in white grinding room of sand roller rice mill [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015: 26-36.
- [2] 张双. 碾米机中物流流体动力学分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017: 23-40.
ZHANG S. Fluid dynamics analysis of material flow in rice milling machine[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017: 23-40.
- [3] 曾勇. 横式碾米机内米粒碾白机理及破碎特性[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 19-47.
ZENG Y. Whitening mechanism and crushing characteristics of rice grains in horizontal rice milling machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 19-47.
- [4] 李碧, 宋少云, 张永林, 等. 卧式铁辊碾米机碾白压力影响因素的仿真研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2021, 40(2): 24-28.
LI B, SONG S Y, ZHANG Y L, et al. Simulation study on influence factors of rolling pressure of horizontal iron roller rice mill[J]. Journal of Wuhan Light Industry University, 2021, 40(2): 24-28.
- [5] 刘瑞, 李衍军, 刘忠军, 等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 1-8, 18.
LIU R, LI Y J, LIU Z J, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters for coated maize seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Sup): 1-8, 18.
- [6] 张胜伟, 张瑞雨, 陈天佑, 等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种实验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 71-79.
ZHANG S W, ZHANG R Y, CHEN T Y, et al. Calibration of discrete element simulation parameters and seed arrangement experiment of mung bean seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71-79.
- [7] 牛智有, 孔宪锐, 沈柏胜, 等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 132-140, 207.
NIU Z Y, KONG X R, SHEN B S, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for pellet feed damage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 132-140, 207.
- [8] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 120-127.
ZHANG T, LIU F, ZHAO M Q, et al. Measurement of corn straw contact physical parameters and discrete element simulation calibration[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120-127.
- [9] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105-117.
- [10] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1/2): 227-242.
- [11] 郑向阳, 张领科, 符少波. 发射药颗粒间摩擦系数测定及其对装填密度的影响[J]. 弹道学报, 2019, 31(1): 85-91.
ZHENG X Y, ZHANG L K, FU S B. Measurement of friction coefficient between propellant particles and its influence on loading density[J]. Journal of Ballistics, 2019, 31(1): 85-91.
- [12] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42.
WANG Y X, LIANG Z J, ZHANG D X, et al. Calibration of interspecific contact parameters of maize seed particle model based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 36-42.
- [13] 鹿芳媛, 马旭, 谭穗妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与实验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 93-99.
LU F Y, MA X, TAN S Y, et al. Simulation calibration and experiment of main contact parameters of discrete element of rice bud seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 93-99.
- [14] 王志鹏, 李永祥, 徐雪萌. 基于堆积实验的小米离散元参数标定[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 115-120.
WANG Z P, LI Y X, XU X M. Parameter calibration of millet discrete element based on stacking experiment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(2): 115-120.