

糙米碰撞力学特性研究

王鑫宇¹, 张超^{1*}, 王巍², 李淑博²

(1.河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450000;

2.中央储备粮滨州直属库有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要: **目的** 研究糙米的力学特性影响因素, 并寻找糙米破碎的最佳参数(糙米的初始温度、撞击动量和品种)以及不同初始温度糙米的破碎能。**方法** 通过改变糙米的品种和初始温度以及撞击动量, 在自制试验台中进行试验, 记录试验数据并作压缩量-撞击力曲线, 以糙米所受的撞击力和破碎率为双试验指标进行正交试验, 考察分析试验因素与糙米撞击力、破碎率之间的相应变化关系。**结果** 动量和糙米初始温度对糙米撞击力和破碎率有显著影响, 糙米品种对撞击力和破碎率影响并不显著, 较优的参数组合方案是品种 2(兆优)在 20 °C 或 25 °C 的情况下经 $637 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 撞击后, 其撞击力最小和破碎率最低, 并对兆优不同温度下的破碎能进行计算, 在 15~35 °C 下破碎能分别为 25.676 6、30.788 8、23.023 1、26.041 1、21.699 2 N·mm。**结论** 在同一温度下, 其不同品种撞击力不同。随着温度的升高, 粳米和粳米的撞击力出现不同的趋势, 然而破碎率趋势却相同。在同一撞击动量情况下, 撞击力和破碎率都呈现上升趋势。粳米的碰撞能随温度呈升高后降低的趋势。本文为更好研究糙米的破碎提供了参考, 并对碾米机的设计和结构参数等方面具有十分重要的意义。

关键词: 糙米; 撞击动量; 糙米初始温度; 正交试验; 破碎能

中图分类号: TS210.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2023)23-0118-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.014

Collision Properties of Brown Rice

WANG Xin-yu¹, ZHANG Chao^{1*}, WANG Wei², LI Shu-bo²

(1. College of Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China;

2. Central Grain Reserve Binzhou Depot Co., Ltd., Shandong Binzhou 256600, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the factors of the collision properties of brown rice, and find the best parameters for breaking brown rice (initial temperature, impact momentum, and variety of brown rice) as well as the breakage energy of brown rice at different temperature. By changing the variety, initial temperature, and impact momentum of brown rice, experiments were conducted in a self-made platform. The data were recorded and impact force curve was drawn. Orthogonal experiments were conducted with the impact force and breakage rate of brown rice as experiment indicators to analyze the corresponding relationships between experiment factors and the impact force and breakage rate of brown rice. Momentum and initial temperature of brown rice had a significant effect on the impact force and breakage rate of brown rice, but the brown rice varieties did not have a significant effect. The preferred parameter combination was that variety 2 (Zhaoyou) had the lowest impact force and breakage rate after being impacted by $637 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ at 20 °C or 25 °C. The breakage energy of Zhaoyou at 15 to 35 °C was 25.676 6, 30.788 8, 23.023 1, 26.041 1, and 21.699 2 N·mm, respec-

收稿日期: 2023-04-07

基金项目: 河南省教育厅高等学校重点科研项目(22B460006); 河南工业大学高层次人才基金项目(2019BS016)

*通信作者

tively. At the same temperature, the impact force of different varieties is different. With the increase of temperature, the impact force of long-grain rice and polished round-grained rice shows different trends, but the trend of breakage rate is the same. Under the same impact momentum, the impact force and breakage rate all show an upward trend. The collision energy of long-grain rice decreases with the increase of temperature. This work provides a reference for better study of brown rice breaking, and is of great significance to the design and structural parameters of rice mill.

KEY WORDS: brown rice; impact momentum; initial temperature of brown rice; orthogonal experiment; breakage energy

水稻是中国第一大粮食作物, 约占世界稻谷产量的 40%, 但目前我国水稻产量却有所下降。经人民日报报道^[1], 2022 年稻谷产量 4 169.9 亿斤, 较 2021 年降低了 87 亿斤, 下降了 2%, 稻谷播种面积 2 946.667 万 hm^2 , 比 2021 年减少了 47.107 万 hm^2 , 下降了 1%。受南方地区高温干旱影响, 稻谷单产 7 124.997 kg/hm^2 , 每 hm^2 产量比 2021 年减少 34.5 kg , 下降了 0.5%。稻谷在我国粮食产量处于下降状态, 在加工环节损失严重, 极大威胁我国国民口粮安全。如何在加工过程中, 降低破碎率和提高产量逐渐成为我国粮食人员长期关注的难题。

在碾米加工过程中, 糙米的碰撞和压缩会直接影响糙米加工破碎率。李修银等^[2]研究糙米中裂纹和扩展变化, 当碾白压力大于 30 N, 糙米会产生裂纹, 并总是从糙米底部产生。张涛等^[3]对糙米进行了力学试验并观察裂纹扩展变化, 结果表明在糙米受力时, 先由内部产生裂纹而后扩展正面。Siebenmorgen 等^[4]对糙米进行三点弯曲试验, 结果表明破碎力与糙米宽度或长度没有显著关系, 与厚度呈极显著关系, 并得出糙米具有相似的平均破碎力, 但破碎力分布大不相同。冯帅博等^[5]测定了心白、腹白、无垭白糙米的压缩力学特性并利用显微镜切片观察, 结果表明无垭白糙米和腹白糙米承受压缩力大于心白糙米, 先是内部形成连续裂纹, 然后以胚乳为中心辐射状向表皮扩散。

上述学者主要研究单品种糙米的压缩力和由此引发的裂纹, 并未对多品种以及碰撞做出分析, 糙米碾白过程是受多因素耦合共同影响, 在碾白过程中糙米的破碎率是由碰撞和压缩等多因素综合作用。

刘程等^[6]利用仿真软件研究糙米在不同含水率和不同速度的碰撞过程, 结果表明糙米破碎率随着含水率和碰撞速度的增加而增加, 米粒临界速度为 22 m/s 。吴中华等^[7]研究同一稻谷品种下不同温度和含水率的压缩特性, 结果表明其压缩特性载荷存在统计分布特性, 并得出含水率较温度其对挤压载荷影响更大, 当稻谷在高温高含水率下降时, 其糙米所受挤压载荷将会增加。上述研究主要集中在糙米参数和压缩特性, 并未在碰撞角度下, 对糙米不同初始温度进行研究。从玻璃化理论角度下, 在碾白过程, 当糙米温度

发生变化, 糙米内部物性参数变化较小, 温度超过糙米的玻璃化转变温度, 糙米内部的物理参数将会急剧变化, 从而影响糙米的碰撞和压缩等力学性能, 因此研究在不同初始温度的下糙米碰撞性能变化规律, 以便于更好地应用于粮食实际加工。

本文将通过试验糙米撞击破碎过程分析, 在单因素和多因素正交试验中分析糙米初始温度、品种以及对撞击动量对破碎力和破碎率的影响, 并基于矩阵分析法优化参数, 降低破碎力和破碎率, 计算其不同温度下的破碎能。

1 试验

1.1 材料和仪器

主要材料: 糙米, 四川宜宾于 2022 年秋季收获。

主要仪器: 恒温恒湿箱, 中国福瑞杰公司; 自制撞击试验台, 自制撞击试验台主要由 NOS-F306 传感器(长沙诺赛希斯公司)和撞击头槌组成, 撞击头槌上标有高度尺。传感器记录糙米所受的撞击力, 传感器与计算机相连接, 计算机以 3 kHz 的频率采集数据。自制撞击试验台示意图如图 1 所示, 图 2 为配套软件窗口图。在进行试验之前, 需对传感器调零。

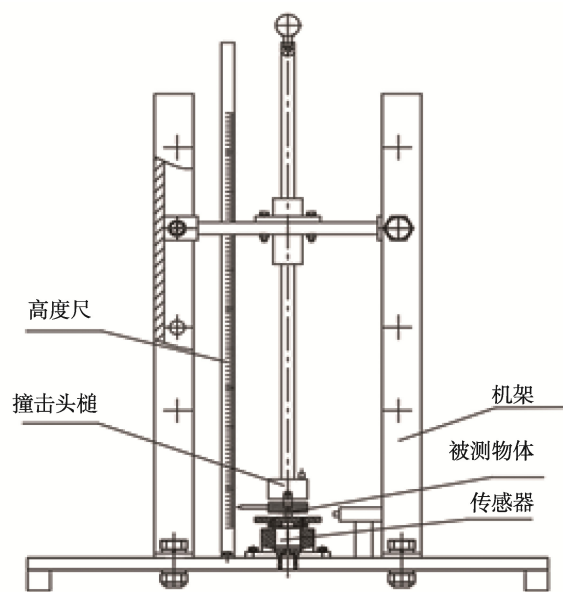
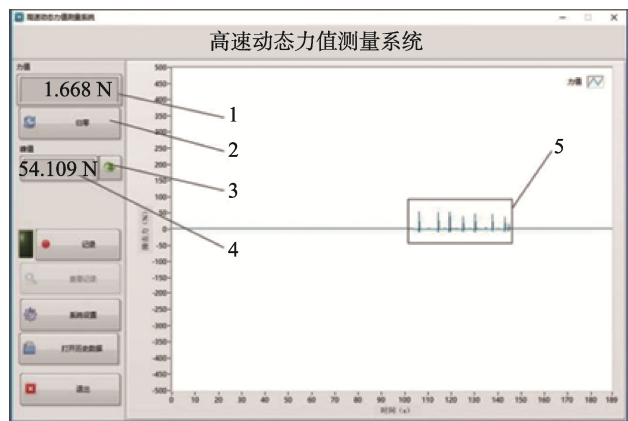


图 1 自制撞击试验台

Fig.1 Self-made impact test platform



1.力数值; 2.调零按钮; 3.峰值归零按钮;
4.当前力峰值; 5.力曲线。

图 2 高速动态力值测量系统界面
Fig.2 Interface of high speed dynamic force measurement system

1.2 方法

1.2.1 材料制备

稻谷经过砻谷后, 手工剥去未完全去除的稻壳, 去除碎米、不完整和病变颗粒, 随机挑选符合试验的净糙米, 选取颗粒需颗粒饱满, 无垩白、无裂纹。不同品种的糙米各准备 500 颗, 在恒温箱中调节糙米温度, 每隔 30 min 取 100 颗糙米用温度测试仪进行测量, 温度取多次测量值的平均值。为了防止测量时温度发生变化, 利用中央空调将室内温度调节至目标温度。

1.2.2 试验因素

试验因素选择糙米品种、糙米初始温度和撞击动量。每组试验取 20 颗糙米进行撞击试验, 记录其撞击力和破碎率, 撞击力取平均值。

本试验主要选择四川宜宾产的晶两优、兆优、荃优和郑州产的郑州早稻、郑州 81574, 水平分别设置为 1~5。每种品种糙米各准备 500 粒。

在经过多次碾米试验后, 在 2022 年秋季测得其在常温下糙米初始温度约为 21.5 °C, 经过碾米试验后, 其糙米出机温度约为 31 °C, 糙米温度设 5 个水平, 分别为 15、20、25、30、35 °C。

在自制试验台, 撞击头槌刻有高度尺, 撞击锤头设置不同的高度, 产生不同的瞬间撞击速度, 对糙米施加不同的撞击动量。其撞击动量计算过程, 见式 (1)。

$$\int Fdt = mv - mv_1 = p - p_1 \quad (1)$$

式中: m 为锤头质量, kg; V 为锤头和糙米的瞬时撞击速度, m/s; P 为锤头和糙米的瞬时动量,

kg·m/s; v_1 为撞击后的瞬时速度, m/s; p_1 为撞击后的瞬时动量, kg·m/s; t 为撞击时间, s; F 为撞击力, N。

经试验知, 经过碰撞后, 糙米基本处于静止或破碎状态, 因此 v_1 和 p_1 设置为 0, 撞击时间 t 趋近于 0^[8], 设置最大撞击力为 f , 则式 (1) 可以简化为:

$$ft = mv = p \quad (2)$$

式中: f 为最大瞬时撞击力, N。

由式 (2) 可知, 只需计算糙米的瞬时碰撞速度和测量其撞击锤头质量即可求出其撞击动量。撞击速度可由自由落体公式计算得出, 其因素水平设置见表 1。

表 1 高度和动量水平
Tab.1 Height and momentum level

水平	高度/mm	撞击瞬时速度/ (m·s ⁻¹)	撞击动量/ (10 ⁻⁶ kg·m·s ⁻¹)
1	6	0.342	589
2	7	0.37	637
3	8	0.395	681
4	9	0.42	722
5	10	0.442	760

1.2.3 糙米碰撞数据采集和处理

在自制试验台中, 以不同的高度自由释放撞击头槌, 头槌会以不同撞击速度与糙米发生碰撞, 糙米受力会经传感器, 实时与高速动态力值测量系统进行测量和读取, 输出其力-时间和力-压缩量数据。整理保存数据后, 通过 origin 和 minitab 软件进行绘图和统计。

1.2.4 单因素和正交试验设计

为更快且可靠地掌握试验对象的相互影响关系, 比较各因素的影响程度, 完成参数优化。本试验首先采用单因素试验确定其单因素最佳条件, 再进行正交分析。通过正交试验, 就可以得出每个因素对试验指标的影响程度, 确定出各因素的主次顺序。在试验前, 控制室温防止糙米温度发生变化。

第 1 组试验以温度为变量, 分别设置为 15、20、25、30、35 °C, 其余参数除品种外保持不变, 撞击动量设置为 637×10⁻⁶ kg·m/s。经过试验后, 统计其撞击力和破碎率, 共有 25 组试验, 每组试验糙米个数为 20。表 2 为糙米品种和初始温度试验。

第 2 组试验以动量为变量, 分别设置为 589×10⁻⁶、637×10⁻⁶、681×10⁻⁶、722×10⁻⁶、760×10⁻⁶ kg·m/s, 其余参数除品种外保持不变, 设置糙米初始温度为

20 ℃。经过试验后, 统计其撞击力和破碎率, 共有 25 组试验, 每组试验糙米个数为 20。表 3 为糙米品种和动量水平。

表 2 糙米品种和初始温度试验
Tab.2 Brown rice varieties and initial temperature test

水平	因素	
	品种 (A)	初始温度 (B) /℃
1	1	15
2	2	20
3	3	25
4	4	30
5	5	35

表 3 糙米品种和动量水平
Tab.3 Brown rice varieties and momentum level

水平	因素	
	A 品种	C 初始动量/(10^{-6} kg·m·s $^{-1}$)
1	1	589
2	2	637
3	3	681
4	4	722
5	5	760

本次正交试验不考虑交互作用, 按照 $r=3, m>5, n$ 尽可能小的原则, 选用正交表 $L_{25}(5^6)$, 试验方案具体设计如表 4 所示。根据自制试验台进行 25 组糙米撞击试验。双试验指标分别为糙米撞击力和破碎率。得到试验结果后, 以矩阵分析法进行数据分析。

表 4 正交试验设计
Tab.4 Orthogonal experiment design

水平	因素		
	品种 (A)	糙米温度 (B)	动量 (C)
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5

2 结果与分析

2.1 单因素试验

为研究糙米各影响因素对糙米破碎的影响规律和机理, 进行了单因素试验。因品种是一个独特的参数, 各品种物性参数不同, 无法进行单因素试验, 故需要做双因素试验。试验以撞击力和破碎率为双指标研究糙米力学特性。

第 1 组试验以糙米初始温度 B 为变量, B 分别设置为 15、20、25、30、35 ℃, 其他参数除品种外保持不变, 糙米初始温度对撞击力指标的影响如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可分析出, 在同一温度下, 不同品种糙米受到撞击力不同, 这是因为品种、环境、遗传和仓储等因素导致的性质差异^[9-10], 撞击力均在 65~75 N^[4]。在相同温度下, 其撞击力不同是因其品种差异^[11], 品种 1、2 和 3 属于籼米, 形状细而长, 而品种 4 和 5 属于粳米, 形状短而粗, 不同糙米结构导致其撞击力承受能力不同。糙米属于高分子物质, 在不同温度下, 当糙米温度超过玻璃化转变温度时, 内部链段运动发生改变, 物质进入橡胶态。在橡胶态下, 物质变形能力增加, 发生玻璃化转变, 糙米的弹性模量和热系数等物性参数发生急剧改变。力学性能参数尤为突出, 并且温度导致糙米含水率发生变化, 其抗破坏强度、皮层和胚乳之间的结合力发生改变^[12], 从而导致糙米的撞击力和破碎率的不同。由图 4 可知, 大部分品种的破碎率在 20~30 ℃时达到最低。

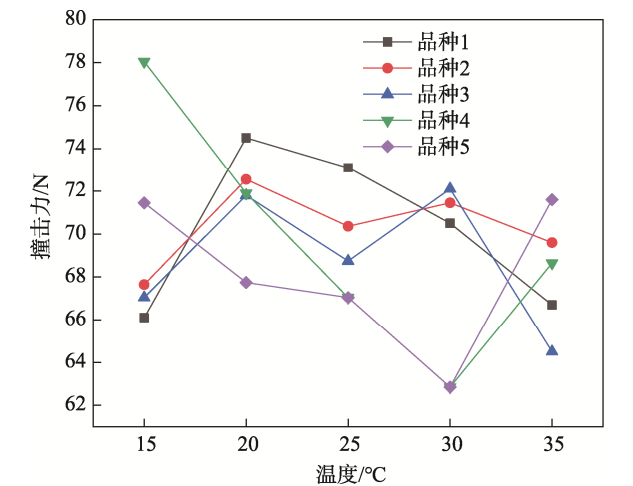


图 3 糙米初始温度变化下的撞击力试验结果
Fig.3 Experimental results of impact force of brown rice under initial temperature change

第 2 组试验以动量 C 为变量, C 分别设置为 589×10^{-6} 、 637×10^{-6} 、 681×10^{-6} 、 722×10^{-6} 、 760×10^{-6} kg·m/s, 其余参数除品种外保持不变, 糙米初始温度对撞击力

和破碎率的影响如图 5 和图 6 所示。随着施加动量的增大,糙米所受撞击力和破碎率不断增大,糙米所受动量对撞击力和破碎率成正比。随着动量的增加,其糙米受到的撞击力越来越大,超过了其皮层和糊粉层的结合力,在其糙米短轴产生裂纹^[13],进而发生破碎。

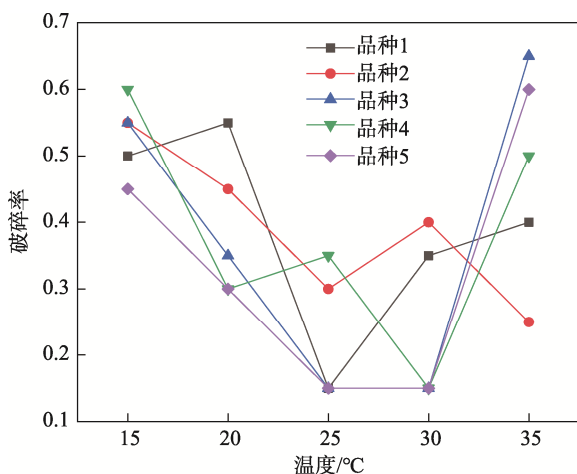


图 4 糙米初始温度变化下的破碎率试验结果
Fig.4 Experimental results of breakage rate of brown rice under initial temperature change

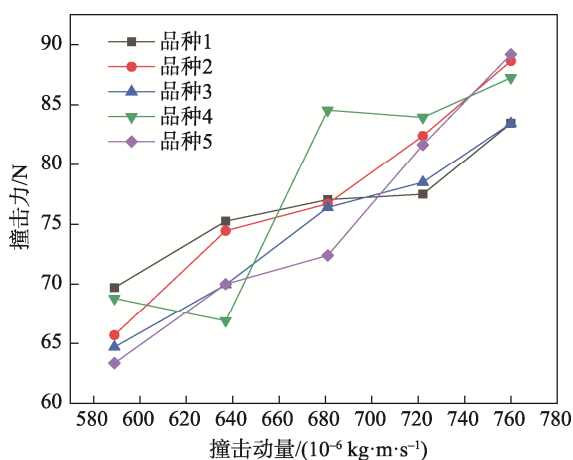


图 5 动量变化下的撞击力试验结果
Fig.5 Experimental results of impact force under momentum change

2.2 正交试验

上文通过单因素分析得到了影响撞击力和破碎率的规律,但各参数之间可能存在相互联系,相互制约。为了更快速可靠地掌握试验因素之间的相互影响,比较各因素对指标的影响程度,本文采用正交试验设计法,设计三因素五水平正交试验。选用 $L_{25}(5^3)$ 正交表,以糙米品种 A、初始温度 B、施加动量 C 为试验因素,设计双指标试验,具体各因素水平和试验结果如表 5 所示。对结果进行极差分析以及双指标进

行权重计算,得出试验最佳水平。

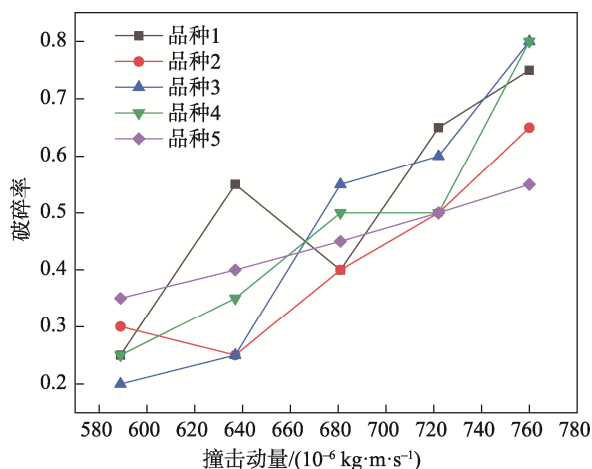


图 6 动量变化下的破碎率试验结果
Fig.6 Experimental results of breakage rate under momentum change

表 5 中的撞击力直观分析,显示了撞击力的极差对比,撞击力随着品种的不同而不同;在不同温度下,撞击力极差处于先降低后增加状态,在温度 20 °C 情况下,撞击力达到最低;在不同撞击动量下,撞击力极差处于先增加后降低再增加的状态,在 $589 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 情况下,撞击力极差达到最低。根据极差对比,3 个影响因素对撞击力的相关性从大到小排序为 C、B、A,动量对撞击力影响最大,品种最小。

由表 5 中的破碎率直观分析以及破碎率的极差对比可知,破碎率随着品种不同和温度的增加,处于先降低后增加随后再降的状态,在实验糙米为品种 2 的情况下,糙米初始温度为 15 °C 或 20 °C 时破碎率达到最小值;糙米的破碎率随着动量的增加而增加,在 $589 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 情况下,破碎率极差达到最低。根据极差对比,3 个因素对破碎率的相关性从大到小排序为 C、B、A,同撞击力相关性排序相同,动量对撞击力影响最大,品种最小。

由表 5 得到的正交试验结果分析可知,对于撞击力,最优参数组合是 $A_1B_2C_1$,即品种 2 在动量为 $589 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 、温度为 20 °C 情况下,撞击力最小;对于破碎率,糙米在温度为 20 °C 和 25 °C 时破碎率最低,最佳组合为 $A_2B_3C_1$ 或 $A_2B_2C_1$,即品种 2 在动量为 $589 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 的情况下,处于 20 °C 或 25 °C 时破碎率最低。

2.3 矩阵分析

由于影响 2 项试验指标的最优方案不一致,在单指标分析的基础上,采取矩阵分析法对 2 项指标进行综合权重分析后选取最佳方案,从而解决撞击力和破碎率的最优配置问题。矩阵分析法^[14]的计算过程如下:

表 5 正交试验数据
Tab.5 Orthogonal experiment data

水平	品种	温度/℃	动量/ (10 ⁻⁶ kg·m/s)	撞击力/N	破碎率
1	1	15	589	62.75	0.35
2	1	20	637	47.65	0.40
3	1	25	681	70.10	0.50
4	1	30	722	74.70	0.65
5	1	35	760	94.10	0.75
6	2	15	637	73.95	0.45
7	2	20	681	70.15	0.45
8	2	25	722	78.15	0.45
9	2	30	760	84.90	0.55
10	2	35	589	67.60	0.45
11	3	15	681	78.45	0.50
12	3	20	722	78.00	0.50
13	3	25	760	83.85	0.55
14	3	30	589	75.25	0.60
15	3	35	637	80.25.	0.65
16	4	15	722	81.75	0.55
17	4	20	760	82.35.	0.45
17	4	25	589	63.85	0.20
18	4	30	637	71.25	0.65
20	4	35	681	95.95	0.60
21	5	15	760	96.45	0.60
22	5	20	589	66.15	0.30
23	5	25	637	74.65	0.40
24	5	30	681	93.95	0.60
25	5	35	722	77.55	0.55
k ₁₁	69.86	78.67	67.12	撞击力直观分析	
k ₁₂	74.95	68.86	69.55		
k ₁₃	79.16	74.12	81.72		
k ₁₄	79.03	80.01	78.03		
k ₁₅	81.75	83.09	88.33		
R ₁	11.89	14.23	21.21		
排序	3	2	1		
最优水平	A ₁	B ₂	C ₁		
K ₂₁	0.53	0.49	0.38	破碎率直观分析	
K ₂₂	0.47	0.42	0.51		
K ₂₃	0.56	0.42	0.53		
K ₂₄	0.49	0.61	0.54		
K ₂₅	0.49	0.60	0.58		
R ₂	0.90	0.19	0.20		
排序	3	2	1		
最优水平	A ₂	B ₂ 或 B ₃	C ₁		

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_1 = & \begin{bmatrix} \frac{1}{69.86} & 0 & 0 \\ \frac{1}{74.95} & 0 & 0 \\ \frac{1}{79.16} & 0 & 0 \\ \frac{1}{79.03} & 0 & 0 \\ \frac{1}{81.75} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{78.67} & 0 \\ 0 & \frac{1}{78.67} & 0 \\ 0 & \frac{1}{74.12} & 0 \\ 0 & \frac{1}{80.01} & 0 \\ 0 & \frac{1}{83.09} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{0}{67.12} \\ 0 & 0 & \frac{1}{69.55} \\ 0 & 0 & \frac{1}{81.72} \\ 0 & 0 & \frac{1}{78.03} \\ 0 & 0 & \frac{1}{88.33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{384.75} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{384.75} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{384.75} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} \frac{11.89}{47.33} \\ \frac{14.23}{47.33} \\ \frac{21.21}{47.33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_1 = \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_1 \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 0.000\ 009 \\ 0.000\ 009 \\ 0.000\ 008 \\ 0.000\ 008 \\ 0.000\ 008 \\ 0.000\ 010 \\ 0.000\ 011 \\ 0.000\ 011 \\ 0.000\ 010 \\ 0.000\ 009 \\ 0.000\ 017 \\ 0.000\ 017 \\ 0.000\ 014 \\ 0.000\ 015 \\ 0.000\ 013 \end{bmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{M}_1$ 为试验指标层矩阵, $\mathbf{T}_1$ 为因素层矩阵, $\mathbf{S}_1$ 为水平层矩阵, $\mathbf{W}_1$ 为指标的权矩阵, 同理可得 $\mathbf{W}_2$, 总矩阵 $\mathbf{W}$ 为所有权矩阵的平均值, 计算如下:

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2}{2} = \frac{1}{2} \times \left\{ \begin{bmatrix} 0.000\ 009 \\ 0.000\ 009 \\ 0.000\ 008 \\ 0.000\ 008 \\ 0.000\ 008 \\ 0.000\ 010 \\ 0.000\ 011 \\ 0.000\ 011 \\ 0.000\ 010 \\ 0.000\ 009 \\ 0.000\ 017 \\ 0.000\ 017 \\ 0.000\ 014 \\ 0.000\ 015 \\ 0.000\ 013 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.139\ 181 \\ 0.157\ 061 \\ 0.131\ 819 \\ 0.150\ 651 \\ 0.150\ 651 \\ 0.318\ 041 \\ 0.371\ 647 \\ 0.371\ 647 \\ 0.255\ 475 \\ 0.259\ 733 \\ 0.431\ 690 \\ 0.321\ 650 \\ 0.309\ 513 \\ 0.303\ 782 \\ 0.282\ 831 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} 0.069\ 645\ 0 \\ 0.078\ 535\ 0 \\ 0.065\ 935\ 0 \\ 0.075\ 529\ 5 \\ 0.075\ 329\ 5 \\ 0.159\ 025\ 5 \\ 0.185\ 529\ 0 \\ 0.185\ 529\ 0 \\ 0.127\ 742\ 6 \\ 0.129\ 871\ 0 \\ 0.215\ 853\ 5 \\ 0.160\ 834\ 0 \\ 0.154\ 763\ 5 \\ 0.151\ 998\ 5 \\ 0.141\ 422\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由 $\mathbf{W}$ 矩阵的结果分析得到了 3 个参数对评价指标的综合影响程度排序从大到小为 C、B、A, 即动量、温度、品种, 同极差分析相同, 证明结果可靠性。其中 A 的 5 个不同水平因素的对试验结果的权重分别为

0.003 491、0.003 963 6、0.003 303、0.003 762、0.003 377 4, 显然 A_2 的权重最大, 同理 B 中的 B_2 和 B_3 权重最大, C 中的 C_1 权重最大。由此可以确定其最优方案为 $A_2B_2C_1$ 或 $A_2B_3C_1$, 即兆优在 20 °C 或 25 °C 的情况下经 $637 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 撞击后, 其撞击力最小和破碎率最低。

2.4 破碎能

糙米的撞击力-压缩量曲线如图 7 所示。在糙米发生破碎时, 其瞬时的接触力为破坏应力, 压缩曲线破坏应力以前的曲线同坐标轴围成的面积为破坏能。糙米的破坏能是糙米力学特性的重要参数, 它对糙米的运输、储藏和加工等方面起着重要的作用。对不同温度下的平均撞击力进行分析, 根据力-压缩量图计算得出 15、20、25、30、35 °C 的破碎能分别为 23.032 1、30.777 8、26.041 1、25.676 6、21.699 2 N·mm。图 9 为 20 °C 糙米撞击力-压缩量拟合曲线, 图 8 为不同温度下温度-破碎能曲线。由图 8 可得, 兆优在不同温度下, 破碎能呈现先升高后降低的趋势, 在 20 °C

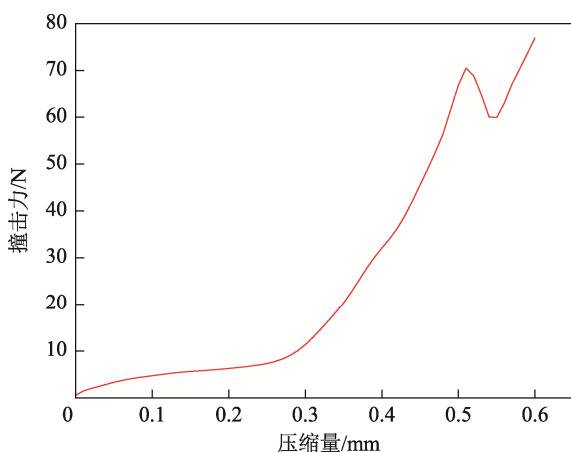


图 7 20 °C 糙米撞击力-压缩量拟合曲线
Fig.7 Impact force-compression curve of brown rice at 20 °C

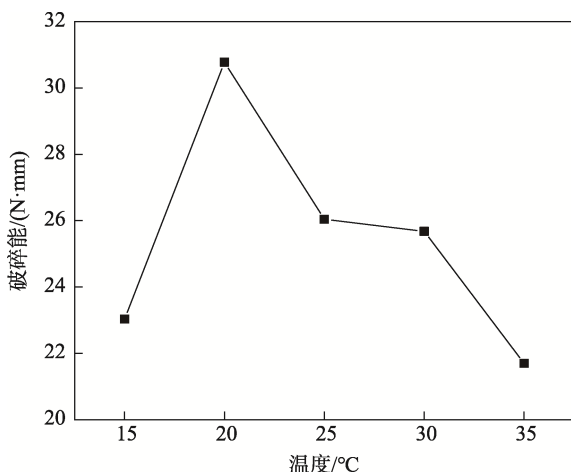


图 8 温度-破碎能曲线
Fig.8 Temperature-breakage energy curve

时破碎能最大, 同图 3 撞击力的曲线呈相同趋势, 表明糙米破碎能越大其能承受的撞击力越大。

3 结语

本文对糙米在自制试验台上进行不同参数下的碰撞试验, 以糙米品种、糙米初始温度和对糙米施加的动量为 3 个变量, 以撞击力和破碎率为力学特性评价指标, 进行单因素和多因素正交试验获得糙米撞击力的最佳条件: 在初始温度为 20 °C 时, 品种 2 (兆优) 在动量为 $589 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 的情况下, 撞击力最小; 破碎率最佳条件为品种 2 (兆优) 在动量为 $589 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 的情况下, 处于 20 °C 或 25 °C 时破碎率最低。通过矩阵分析法综合评定双指标后, 得出最佳组合为 $A_2B_2C_1$ 或 $A_2B_3C_1$, 即兆优在 20 °C 或 25 °C 的情况下经 $637 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 撞击后, 其撞击力最小并且破碎率最低。计算了兆优在不同温度下的破碎能, 经过分析得出, 破碎能随着温度的上升呈现先增加后下降状态, 在 20 °C 时破碎能达到最大值 30.777 8 N·mm。通过糙米碰撞过程参数的分析, 对糙米的加工降碎有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 邱海峰. 中国粮食产量再创新高[N]. 人民日报海外版, 2022-12-13(003).
QIU Hai-feng. China's Grain Production Reaches a New High[N]. People's Daily Oversea Oversea, 2022-12-13(003).
- [2] 李修银, 廖敏, 张涛, 等. 糙米腹背部破碎特性与裂纹扩展研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(7): 33-37.
LI Xiu-yin, LIAO Min, ZHANG Tao, et al. Study on Crushing Characteristics and Crack Propagation of Brown Rice Ventral and Dorsal Side[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(7):33-37.
- [3] 张涛, 李修银, 廖敏, 等. 糙米正面破碎特性与裂纹扩展规律[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 88-92.
ZHANG Tao, LI Xiu-yin, LIAO Min, et al. Front Fracture Characteristics and Crack Propagation of Brown Rice[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 88-92.
- [4] SIEBENMORGEN T J, QIN G. Relating Rice Kernel Breaking Force Distributions to Milling Quality[J]. Transactions of the Asabe, 2005, 48(1): 223-228.
- [5] 冯帅博, 田勇, 曹宪周, 等. 基于机械力作用的糙米显微结构分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(6):70-74.
FENG Shuai-bo, TIAN Yong, CAO Xian-zhou, et al. Microstructure Analysis of Brown Rice Based on Mechanical Force Action[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019,

- 40(6):70-74.
- [6] 刘程, 王旺平, 宋少云. 基于离散元 EDEM 的米粒破碎特性分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 88-92.
LIU Cheng, WANG Wang-ping, SONG Shao-yun. Analysis of Rice Grain Breakage Characteristics Based on Discrete Element EDEM[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 88-92.
- [7] 吴中华, 王珊珊, 董晓林, 等. 不同温度及含水率稻米籽粒加工过程破裂载荷分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 278-283.
WU Zhong-hua, WANG Shan-shan, DONG Xiao-lin, et al. Analysis of Rice Compression Fracture Load in Processes with Various Temperatures and Moisture Content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 278-283.
- [8] 曹宪周, 张超, 房凯文, 等. 糙米碰撞过程试验及仿真分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 80-83
CAO Xian-zhou, ZHANG Chao, FANG Kai-wen, et al. Experiment and Simulation Analysis of Brown Rice Collision Process[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 80-83.
- [9] 杜雪树, 李进波, 夏明元, 等. 稻米整精米率研究进展[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S2): 13-15.
DU Xue-shu, LI Jin-bo, XIA Ming-yuan, et al. Research Progress on Head Rice Rate[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(S2): 13-15.
- [10] 邹禹, 钱宝云, 占新春, 等. 我国南方籼稻整精米率发展趋势及对策[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(11): 38-45.
ZOU Yu, QIAN Bao-yun, ZHAN Xin-chun, et al. The Development Trend and Countermeasures on Head Rice Rate of Indica Rice in Southern China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(11): 38-45.
- [11] 任祖方, 许乔谔, 吴杰, 等. 稻谷的机械力学特性试验[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(21): 4880-4883.
REN Zu-fang, XU Qiao-ming, WU Jie, et al. Research on the Mechanical Properties of Rice Kernel[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(21): 880-4883.
- [12] 周显青, 孙晶, 张玉荣. 稻米籽粒静态力学特性的表征与分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 1-7.
ZHOU Xian-qing, SUN Jing, ZHANG Yu-rong. Research on the Mechanical Properties of Rice Kernel[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 1-7.
- [13] 张超, 曹宪周, 张昊晨, 等. 糙米撞击裂纹扩展的分形研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 96-101.
ZHANG Chao, CAO Xian-zhou, ZHANG Hao-chen, et al. Fractal Study on Stress Crack Propagation during Brown Rice Impact[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 96-101.
- [14] 周玉珠. 正交试验设计的矩阵分析方法[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(2): 202-207.
ZHOU Yu-zhu. A Matrix Analysis of Orthogonal Design[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(2): 202-207.

责任编辑: 曾钰婵