

9-11-2024

Analysis of rice grain motion characteristics in a rice polisher based on particle image velocimetry

DUAN Feng

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

LIU Xiaopeng

School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430048, China,
conquermygod@163.com

HU Peng

Nanchang Cigarette Factory of China Tobacco Jiang Xi Industrial Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330029, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://www.ifoodmm.cn/journal>

Recommended Citation

Feng, DUAN; Xiaopeng, LIU; Peng, HU; Yonglin, ZHANG; Zeliang, XIE; and Houchang, PEI (2024) "Analysis of rice grain motion characteristics in a rice polisher based on particle image velocimetry," *Food and Machinery*. Vol. 40: Iss. 7, Article 13.

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.80750

Available at: <https://www.ifoodmm.cn/journal/vol40/iss7/13>

This Food Equipment & Intelligent Manufacturing is brought to you for free and open access by Food and Machinery. It has been accepted for inclusion in Food and Machinery by an authorized editor of Food and Machinery.

Analysis of rice grain motion characteristics in a rice polisher based on particle image velocimetry

Authors

DUAN Feng, LIU Xiaopeng, HU Peng, ZHANG Yonglin, XIE Zeliang, and PEI Houchang

基于粒子图像测速法的大米抛光机内米粒运动规律分析

Analysis of rice grain motion characteristics in a rice polisher based on particle image velocimetry

段 丰¹ 刘晓鹏¹ 胡 鹏²

DUAN Feng¹ LIU Xiaopeng¹ HU Peng²

张永林¹ 谢泽良³ 裴后昌¹

ZHANG Yonglin¹ XIE Zeliang³ PEI Houchang¹

(1. 武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430048; 2. 江西中烟工业有限责任公司南昌卷烟厂, 江西 南昌 330029; 3. 湖北天和机械有限公司, 湖北 鄂州 436042)

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430048, China; 2. Nanchang Cigarette Factory of China Tobacco Jiang Xi Industrial Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330029, China; 3. Hubei Tianhe Machinery Co., Ltd., Ezhou, Hubei 436042, China)

摘要: [目的] 通过研究抛光机运行参数、米粒运动规律、产生碎米率之间的关系, 寻求抛光机的较优参数调控依据。 [方法] 通过分析抛光室内米粒的运动过程、开展全因素试验以及应用粒子图像测速法(PIV)对米粒运动轨迹进行分析, 明确米粒的运动状态、碎米率与抛光机转速及压力门开度之间的关系。 [结果] 当压力门开度 20 mm 时, 在试验转速范围内均不能形成有规律的米粒运动形态, 此时不能达到米粒抛光要求。当压力门开度 4 mm、转速为 600~1 400 r/min 时, 米粒呈现出螺旋升角较小且高低速区域交替出现的运动形态。当压力门开度 8 mm、转速 1 400 r/min 时, 米粒呈现出高低速(速度差 > 3 m/s)区域交替出现的运动形态。上述两种工况下, 米粒因过度揉搓或压力过大导致碎米率较高(>4%)。在试验范围内的其余工况下, 米粒均呈现出螺旋角大小适中的高低速(速度差为 2~3 m/s)区域交替出现的运动形态, 此时碎米率为 2%~4%, 能够达到较好的抛光效果。 [结论] 不同工况下米粒形成的运动形态与产生的碎米率不同, 在合适的压力门开度和转速下, 米粒呈现出适当的运动形态, 能达到较好的抛光效果。

关键词: 抛光机; 米粒; 粒子图像测速法; 运动形态; 碎

米率

Abstract: [Objective] By studying the relationship between the operating parameters of the polishing machine, the motion patterns of rice grains, and the generation of broken rice rates, to seek the basis for optimal parameter control of the polishing machine. [Methods] By analyzing the motion process of rice grains in the polishing chamber, conducting full-factorial experiments, and applying Particle Image Velocimetry (PIV) to analyze the trajectory of rice grain movement, clarified the relationship between the motion status of rice grains, the rate of broken rice, and the rotational speed of the polishing machine as well as the opening degree of the pressure gate. [Results] When the pressure gate aperture was set to 20 mm, no coherent motion pattern was observed within the experimental range of machine speeds, rendering the rice polishing ineffective. In contrast, with a pressure gate aperture of 4 mm and machine speeds ranging from 600 to 1 400 revolutions per minute, the rice grains exhibited an alternating motion pattern characterized by a relatively small spiral angle and the occurrence of regions with varying velocities. Furthermore, under the condition of a pressure gate aperture of 8 mm and a machine speed of 1 400 r/min, the rice grains demonstrated an alternating motion pattern in regions of high and low velocities (with a velocity difference exceeding 3 m/s). In both of these scenarios, excessive friction and pressure led to a high rate of broken rice (exceeding 4%). In the remaining experimental conditions, characterized by appropriate pressure gate apertures and machine speeds, the rice

基金项目: 湖北省重点研发计划(编号:2022BBA0047)

作者简介: 段丰, 男, 武汉轻工大学在读硕士研究生。

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: 2023-08-03 **改回日期:** 2024-01-03

grains exhibited a moderately sized spiral angle in alternating regions of high and low velocities (with a velocity difference of 2~3 m/s). This configuration resulted in a broken rice rate ranging from 2% to 4%, indicative of favorable polishing effects. [Conclusion] The motion patterns formed by rice grains and the resulting broken rice rates vary under different operating conditions. Under suitable opening degree of the pressure gate and rotational speed, rice grains exhibit appropriate motion patterns and achieve better polishing effects.

Keywords: polishing machine; rice grains; PIV; motion patterns; broken rice rate

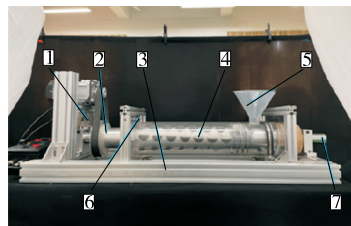
中国是稻谷生产和消费大国,2022 年稻谷总产量约 2.1 亿 t^[1]。稻谷经过清理、砻谷、谷糙分离、碾米、抛光、色选等工序加工后成为大米^[2]。中国对大米的消费需求较大、品质要求较高^[3]。在加工过程中,稻谷经砻谷脱壳形成糙米后,采用碾米机砂辊碾白即可形成表面粗糙的大米颗粒。由于大米颗粒粗糙表面上附着的少量糠粉、灰尘会降低大米的观感品质及耐储性,故需进一步使用抛光机将表面的糠粉、灰尘清除^[4]。同时,抛光过程中产生的压力和摩擦高温可使米粒内部淀粉半糊化后形成较光滑的表面,从而提高大米品质^[5]。

大米的抛光效果与抛光机运行参数(转速、压力门开度)相关^[6]。由于目前针对大米抛光理论研究较为缺乏,无法提供更优化的抛光机运行参数调控策略。为保证作业效果,抛光机实际作业时,常会因运行参数调整不当,导致米粒因过度加工而破碎^[7-9],影响加工质量。当抛光机运行参数不同时,大米颗粒在抛光室内的受力状态和运动状态必然不同。虽然难以对抛光室内大米颗粒的受力进行实时测量,但可通过研究抛光机运行参数、米粒运动规律、产生碎米率之间的关系,来寻求抛光机的较优参数调控依据。随着计算机仿真技术的发展,在大米颗粒运动规律研究方面,众多学者^[10-13]应用仿真模拟的方法对密闭空间内的大米颗粒运动过程进行分析。仿真分析法可对大米颗粒运动过程进行可视化呈现,但仿真模型与实际往往存在较大差异,分析结果难以对大米抛光机的参数优化提供理论参考。粒子图像测速法(PIV)是一种非接触、瞬时、动态、全流场的粒子运动规律测量技术,适用于大米颗粒运动规律的研究。该方法目前广泛应用于流体运动的研究^[14-16],但鲜有将该技术应用于大米加工领域。

研究针对现有抛光机存在因过度加工而致使米粒破碎的问题,考虑计算机仿真方法难以对抛光室内米粒运动过程进行准确呈现的技术难点,提出一种基于球面揉搓抛光原理的大米抛光机,采用粒子图像测速法对抛光室内米粒运动规律及其影响因素进行分析,以期后续抛光机结构及运行参数优化设计提供理论参考。

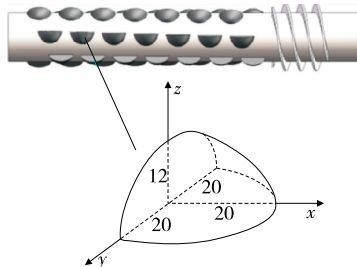
1 大米抛光机结构与工作原理

大米抛光机主要由进料斗、抛光室、压力门、机架、电机、传动系统等组成,如图 1(a)所示。其中,抛光辊上分布有按螺旋规律排列的椭圆筋,采用揉搓方式对大米进行抛光,其结构与尺寸如图 1(b)所示。抛光辊由变频电机带动,转速在 0~1 500 r/min 可调。压力门开度在 0~20 mm 可调。工作时,大米颗粒通过进料斗进入抛光室内,在抛光辊的摩擦、揉搓作用下去除表面糠层,随后从压力门流出,完成抛光作业。



1. 电机 2. 同步带 3. 抛光辊 4. 亚克力外壳 5. 进料斗
6. 压力门 7. 主轴

(a) 大米抛光机总体结构示意图



(b) 抛光辊结构示意图

图 1 大米抛光试验样机结构图

Figure 1 Structural diagram of the experimental prototype for rice polishing

2 抛光室内米粒运动状态分析

2.1 运动过程分析

以单颗粒为研究对象,将大米颗粒视为质点。假设米粒质量为 m ,抛光辊转速为 n ,抛光辊直径为 D 。将抛光辊视为动坐标系,抛光过程中米粒受力状态如图 2(a)所示。根据理论力学加速度合成定理可知:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_a = a_e + a_r' + a_r'' + a_c \\ a_e = m\omega^2 \left(\frac{D}{2} + d \right) \\ a_r'' = m \frac{v_r^2}{\rho} \\ a_c = 2\omega v_r \\ \omega = \frac{2\pi n}{60} \\ v_e = \omega \left(\frac{D}{2} + d \right) \end{array} \right. , \quad (1)$$

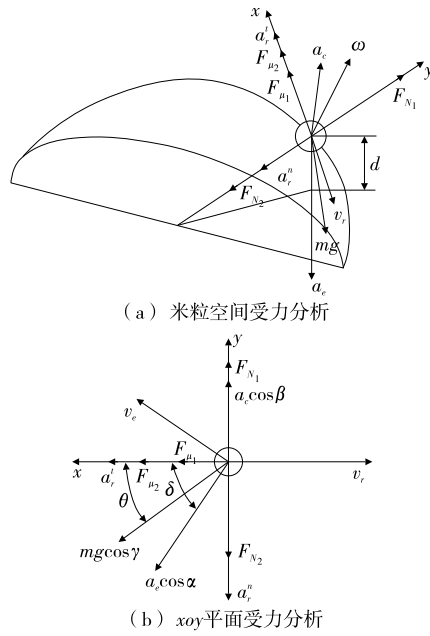


图 2 米粒运动过程分析

Figure 2 Analysis of the motion process of rice grains

式中:

- a_a ——米粒的绝对加速度, m/s^2 ;
- a_e ——米粒的牵连加速度, m/s^2 ;
- a_r^t ——米粒的切向相对加速度, m/s^2 ;
- a_r^n ——米粒的径向相对加速度, m/s^2 ;
- a_c ——米粒的科氏加速度, m/s^2 ;
- m ——米粒质量, kg ;
- ω ——抛光辊角速度, rad/s ;
- D ——抛光辊直径, m ;
- d ——米粒到抛光辊表面的距离, m ;
- v_r ——米粒的相对速度, m/s ;

$$\begin{cases} F_{N_1} = \frac{a_r^t + \mu_2 \frac{4\pi n}{60} v_r \cos \beta - \mu_2 m \frac{v_r^2}{\rho} - (\cos \delta - \mu_2 \sin \delta) m \frac{4\pi^2 n^2}{3 \cdot 600} \left(\frac{D}{2} + d\right) \cos \alpha - (\cos \theta - \mu_2 \sin \theta) mg \cos \gamma}{\mu_1 + \mu_2} \\ F_{N_2} = \frac{a_r^t - \mu_1 \frac{4\pi n}{60} v_r \cos \beta + \mu_1 m \frac{v_r^2}{\rho} + (\cos \delta + \mu_1 \sin \delta) m \frac{4\pi^2 n^2}{3 \cdot 600} \left(\frac{D}{2} + d\right) \cos \alpha - (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta) mg \cos \gamma}{\mu_2 + \mu_1} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 影响因素

由式(4)可知,当抛光辊结构尺寸一定时,椭圆球筋对米粒的压力 F_{N_1} 、米粒之间的压力 F_{N_2} 均与抛光辊转速 n 有关。二者均随着转速 n 的增大而增大。此外, F_{N_1} 、 F_{N_2} 还与米粒与椭圆球筋的相对运动状态有关,当压力门开度 L 变化时,米粒在出料口的运动状态如图 3 所示。压力门开度 L 减小时,米粒出料变得困难,与椭圆球筋的相对运动状态发生变化,米粒堆积在出料口使得抛光室内抛光压力增大。综上所述,米粒的运动状态与大米抛光机的转速 n 及压力门开度 L 有关。

- ρ ——椭圆球筋在该位置的曲率半径, m ;
- n ——抛光辊转速, r/min ;
- v_e ——米粒的牵连速度, m/s 。

当抛光辊转动时,摩擦力 F_{μ_1} 使米粒沿椭圆球筋表面加速运动,在动坐标系中视为切向速度减小的圆周运动,从而对其他米粒产生压力作用引起摩擦力 F_{μ_2} ,最终米粒在摩擦力、压力的作用下达到受力平衡,可知:

$$\begin{cases} ma_a = F_{\mu_1} + F_{\mu_2} + F_{N_1} + F_{N_2} + mg \\ F_{\mu_1} = \mu_1 F_{N_1} \\ F_{\mu_2} = \mu_2 F_{N_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

- F_{μ_1} ——椭圆球筋对米粒的摩擦力, N ;
- F_{μ_2} ——米粒对米粒的摩擦力, N ;
- F_{N_1} ——椭圆球筋对米粒的压力, N ;
- F_{N_2} ——米粒之间的压力, N ;
- g ——重力加速度, m/s^2 ;
- μ_1 ——椭圆球筋对米粒的摩擦因数;
- μ_2 ——米粒对米粒的摩擦因数。

将加速度和力沿坐标轴投影可得:

$$\begin{cases} F_{\mu_1} + F_{\mu_2} + mg \cos \gamma \cos \theta = a_r^t + a_e \cos \alpha \cos \delta \\ F_{N_1} - F_{N_2} - mg \cos \gamma \sin \theta = a_c \cos \beta - a_r^n - a_e \cos \alpha \sin \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中:

- α ——牵连加速度与 xoy 平面的夹角, $^\circ$;
- β ——科氏加速度与 xoy 平面的夹角, $^\circ$;
- γ ——重力与 xoy 平面的夹角, $^\circ$;
- δ ——牵连加速度在 xoy 平面的投影与 x 轴的夹角, $^\circ$;
- θ ——重力在 xoy 平面的投影与 x 轴的夹角, $^\circ$ 。

联立式(1)、式(2)和式(3)可得:

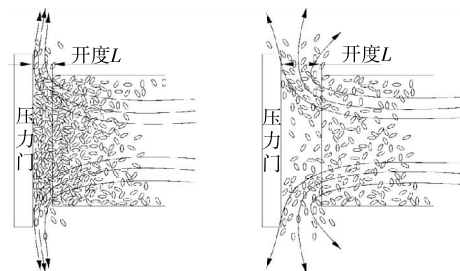


图 3 不同开度下米粒在抛光室内的相互作用

Figure 3 Interaction of rice grains at different openings within the polishing chamber

3 台架试验

根据前文分析可知,转速 n 、压力门开度 L 会影响抛光室内米粒受力及其运动形态。以转速、压力门开度为试验因素,碎米率、米粒运动形态为试验指标,开展台架试验。

3.1 试验材料

选取普通籼米,将其使用经砻谷机及碾米机处理后得到白米作为试验材料。为保证大米边界易于识别,将处理后得到的部分白米染成红黑两种颜色,再将未染色的白米和染色后的红米、黑米等比例均匀混合。试验前将试验所用大米使用 2 mm 筛网过滤,筛出碎米,使试验大米均为整米。

3.2 试验方法

以转速 n 和压力门开度 L 两个因素开展全因素试验。

3.3 试验指标

试验后取定量大米质量,使用 2 mm 筛网筛出碎米并测量碎米质量,按式(5)计算碎米率。

$$\delta = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (5)$$



图 4 染色大米

Figure 4 Stained rice grains

式中:

δ ——碎米率, %;

m_2 ——大米总质量, kg;

m_1 ——碎米质量, kg。

采用粒子图像测速法(PIV)对米粒运动形态进行分析^[17]。打开电机,从进料斗加入混合大米,待机器平稳运行后,使用千眼狼 X190M 对抛光辊位置进行拍摄,获取米粒运动图像,应用 Matlab 中的 pivlab 对图像进行处理,得到米粒运动形态^[18]。

3.4 结果与分析

全因素试验与方差分析结果如表 1、表 2 所示。

在 PIVlab 中处理得到每组试验的运动形态如图 5~图 9 所示,并使用 PIVlab 的参数提取功能得到高低速区的平均速度。

由图 5~图 9 可知,大部分工况下米粒均形成了明显的高低速区域交替出现的现象。对比速度云图中的米粒运动方向与实际拍摄视频中椭圆球筋位置可知,形成该现象的原因如图 10 所示。以球筋 A 为例,在抛光过程中,球筋将米粒撞向两侧,由于球筋呈螺旋排列,球筋 A 左侧的米粒与球筋 C 碰撞继续加速形成高速区,球筋 A 右侧米粒与球筋 D 左侧米粒碰撞速度中和形成低速区。随着抛光辊不停旋转,便在速度云图中形成了高低速区域交替出现的现象。

表 1 全因素试验结果

Table 1 Results of the full factorial experiment

序号	转速 $L/(r \cdot \text{min}^{-1})$	压力门开度 n/mm	碎米率/%	序号	转速 $L/(r \cdot \text{min}^{-1})$	压力门开度 n/mm	碎米率/%
1	4	600	4.52	14	12	1 200	2.41
2	4	800	5.63	15	12	1 400	2.63
3	4	1 000	5.29	16	16	600	1.36
4	4	1 200	4.39	17	16	800	1.69
5	4	1 400	5.32	18	16	1 000	1.75
6	8	600	2.81	19	16	1 200	1.94
7	8	800	3.08	20	16	1 400	2.44
8	8	1 000	3.83	21	20	600	0.99
9	8	1 200	2.91	22	20	800	1.45
10	8	1 400	4.42	23	20	1 000	1.52
11	12	600	1.51	24	20	1 200	1.57
12	12	800	2.03	25	20	1 400	1.92
13	12	1 000	3.04				

表 2 影响显著性分析

Table 2 Significance analysis of influencing factors

来源	III 类平方和		自由度	均方		F 值		显著性	
	压力门开度	转速		压力门开度	转速	压力门开度	转速	压力门开度	转速
假设	39.964	4.070	4	9.991	0.123	81.432	8.293	**	*
误差	1.963	1.963	16	1.018	0.123				

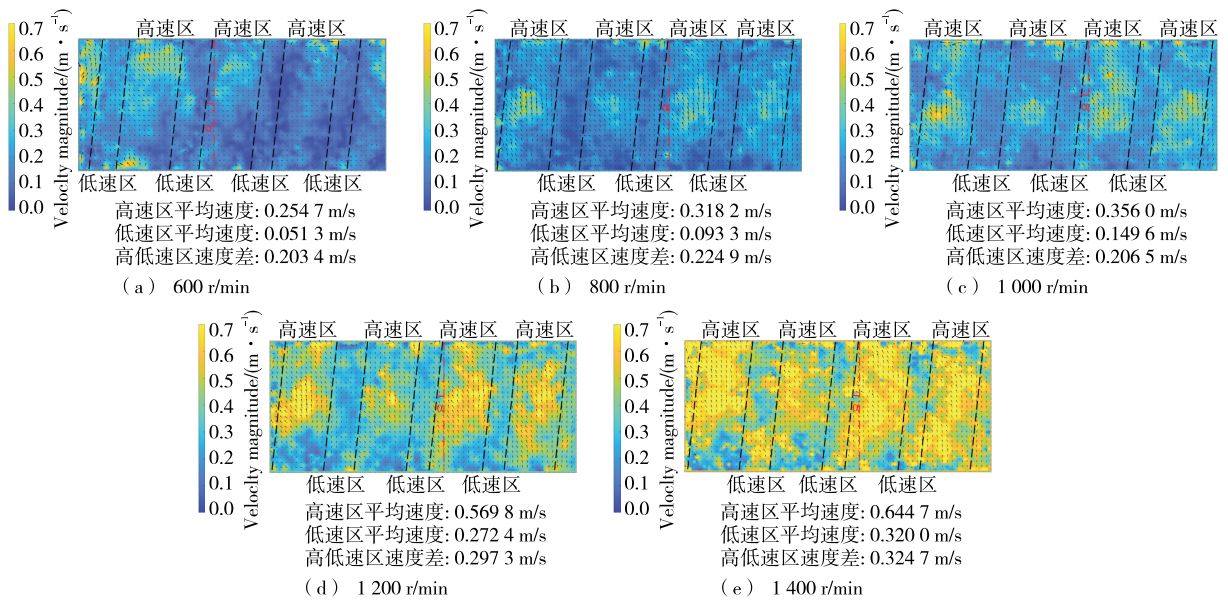


图 5 压力门开度为 4 mm 时的速度云图

Figure 5 Velocity contour map at an opening width of 4 mm

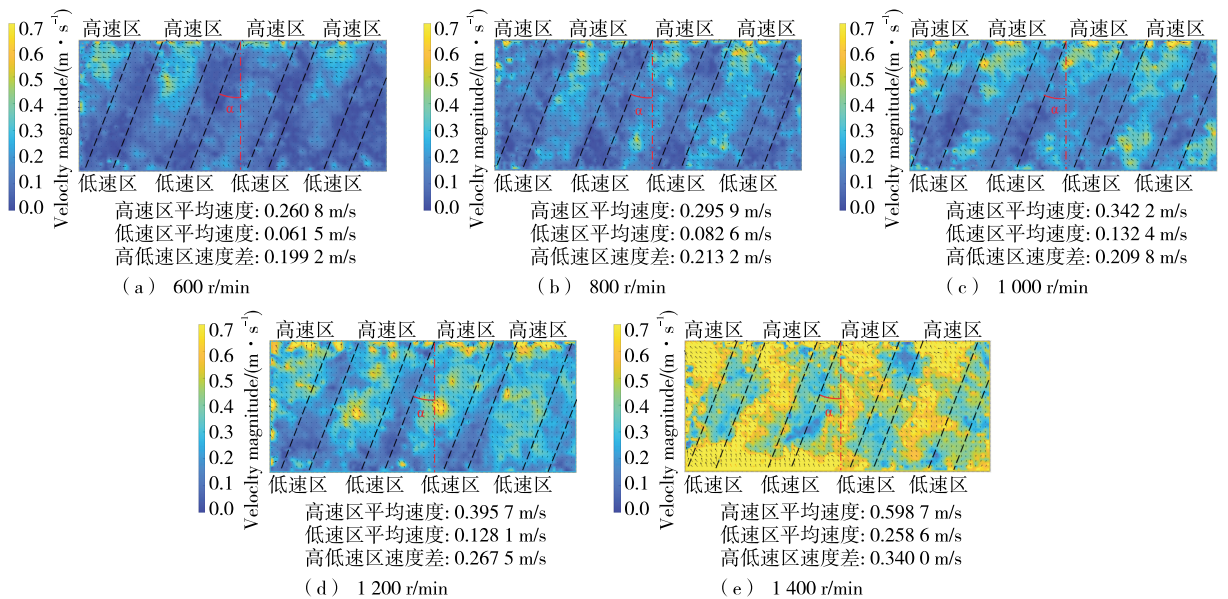


图 6 压力门开度为 8 mm 时的速度云图

Figure 6 Velocity contour map at an opening width of 8 mm

(1) 较高碎米率时的米粒运动形态:当 $L=4\text{ mm}$ 、 n 为 600~1 400 r/min 时,碎米率达到 4.3% 以上。这是由于此时压力门开度过小,出料困难,米粒堆积在抛光室内,导致米粒轴向输送困难,周向运动速度远大于轴向运动速度,形成如图 5 所示米粒运动呈现出螺旋角较小且高低速区域交替出现的运动形态。当形成该运动形态时,表明米粒在抛光室内揉搓过度,导致碎米率较高。

当 $L=8\text{ mm}$ 、 $n=1\ 400\text{ r/min}$ 时,碎米率达到 4.42%。这是由于此时压力门开度较小的同时转速较高,导致抛光压力较高。米粒在球筋的带动下高速运动,高

低速区域速度差 $>3\text{ m/s}$,形成如图 6(e) 所示高低速区域速度差较大且交替出现的运动形态。当形成该运动形态时,表明米粒在抛光室内的抛光压力过高,导致碎米率较高。

(2) 较低碎米率时的米粒运动形态:当 $L=20\text{ mm}$ 、 n 为 600~1 400 r/min 时,碎米率在 2.0% 以下。这是由于此时压力门开度过大,米粒出料迅速,导致米粒在抛光室内停留时间过短,未出现规律的高低速区交替出现的现象,形成如图 9 所示无明显规律的运动形态,当形成该运动形态时,虽然米粒的碎米率较低,但米粒在抛光室内未

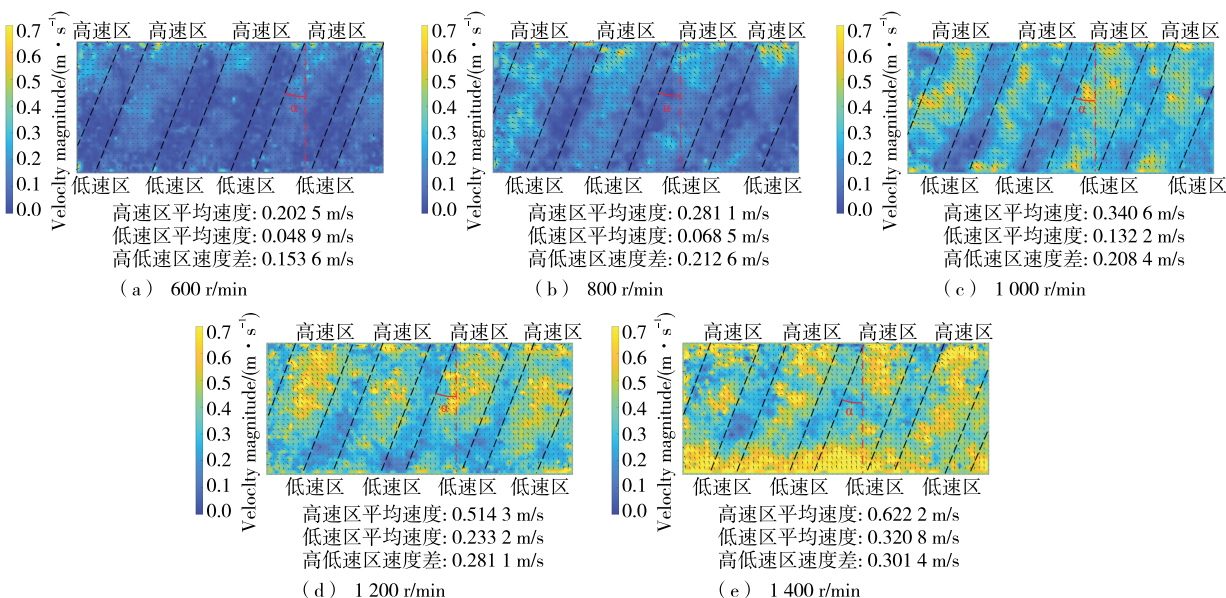


图 7 压力门开度为 12 mm 时的速度云图

Figure 7 Velocity contour map at an opening width of 12 mm

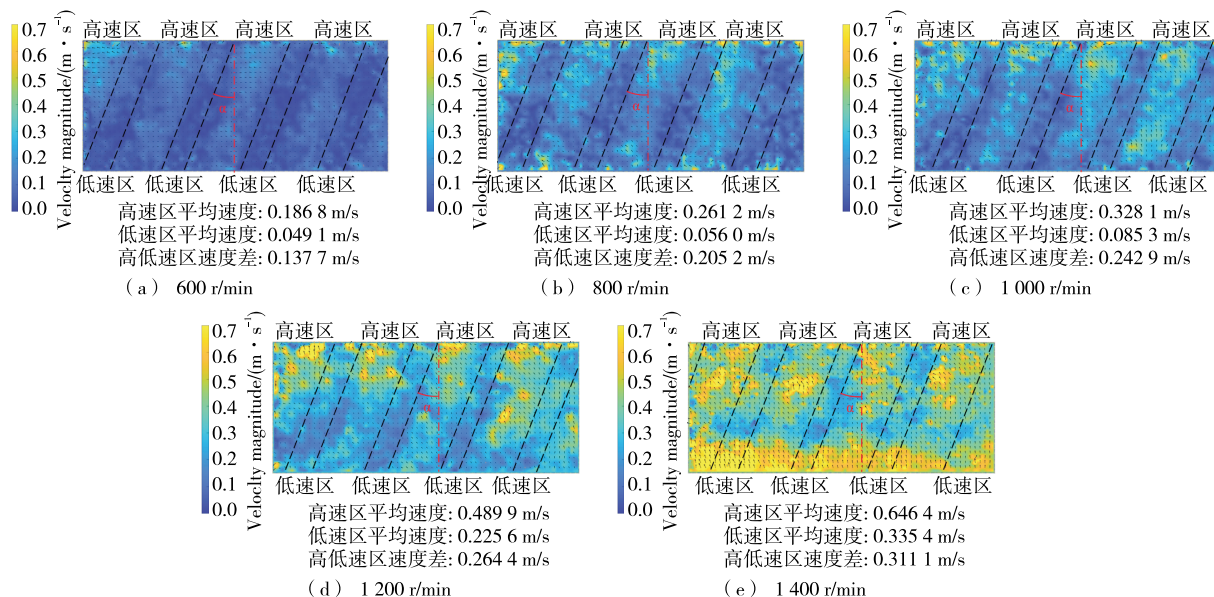


图 8 压力门开度为 16 mm 时的速度云图

Figure 8 Velocity contour map at an opening width of 16 mm

得到充分揉搓,导致米粒抛光效果差。

当 L 为 12~16 mm、 $n = 600$ r/min 时,碎米率在 1.7% 以下。这是由于此时压力门开度较大的同时转速较低,导致抛光压力较低,米粒运动速度较低,高低速区域速度差 < 2 m/s,形成如图 7(a)和图 8(a)所示高低速区域速度差较小且交替出现的运动形态。当形成该运动形态时,虽然米粒的碎米率较低,但抛光压力过低,不能达到米粒抛光要求。

在试验范围内的其余工况下,米粒均呈现出螺旋角

大小适中的高低速区域交替出现的运动形态,且高低速区域速度差为 2~3 m/s,碎米率为 2%~4%。当形成该运动形态时,米粒在抛光室内揉搓的次数及抛光压力均较为合适,在保证较低碎米率的同时具有较好的抛光效果。

4 结论

(1) 提出了一种采用揉搓方式对大米进行抛光的抛光机,通过开展抛光室内米粒的运动过程分析以及全因素台架试验,明确了米粒在抛光机内的运动状态、碎米率

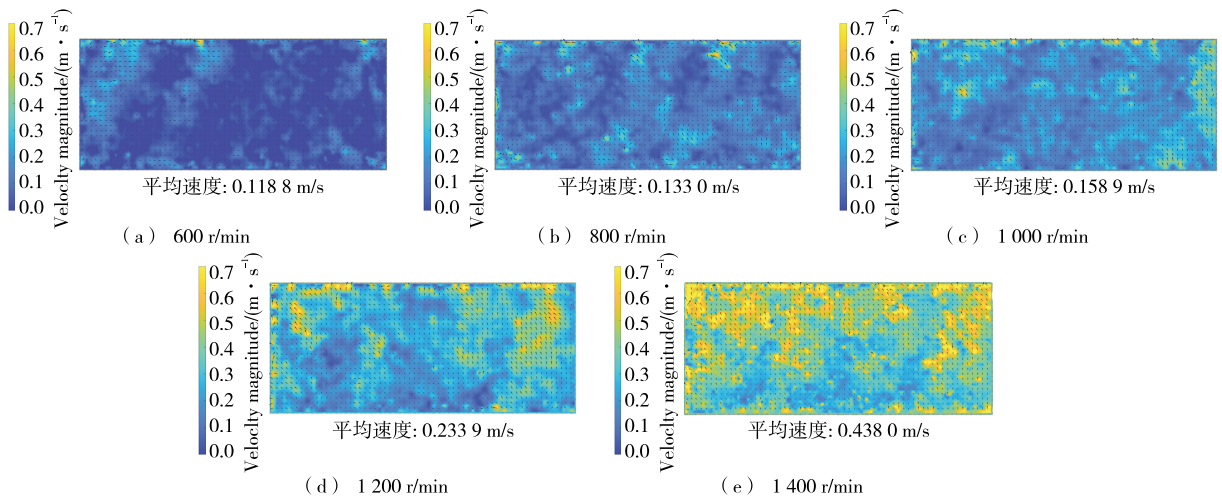


图9 压力门开度为 20 mm 时的速度云图

Figure 9 Velocity contour map at an opening width of 20 mm

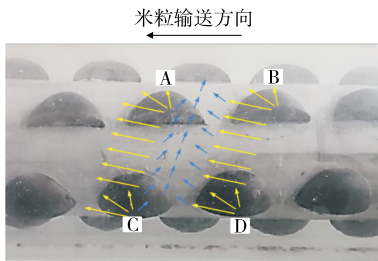


图 10 高、低速区域形成原因

Figure 10 Reasons for the formation of high and low-speed regions

与转速 n 、压力门开度 L 之间的关系。

(2) 全因素试验结果表明,当压力门开度为 20 mm、转速为 600~1 400 r/min 或压力门开度为 12~16 mm、转速为 600 r/min 时,虽然碎米较低,但抛光效果差。当压力门开度为 4 mm、转速为 600~1 400 r/min 或压力门开度为 8 mm、转速为 1 400 r/min 时,米粒因破碎率较高而达不到抛光要求。

(3) 当其余试验工况下,米粒均呈现出螺旋角大小适中的高、低速区域交替出现的运动形态,速度差为 2~3 m/s,碎米率为 2%~4%。此时米粒在抛光室内揉搓的次数及抛光压力均较为合适,能够达到较好的抛光效果。

参考文献

[1] 国家统计局关于 2022 年粮食产量数据的公告[N]. 中国信息报, 2022-12-13(1).
Announcement of the national bureau of statistics on grain production data for 2022[N]. China Information News, 2022-12-13(1).
[2] 谢天, 杨会宾, 郭亚丽, 等. 我国稻米加工工艺的沿革与展望[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 71-76.
XIE T, YANG H B, GUO Y L, et al. Evolution and prospect of rice

processing technology in China[J]. China Rice, 2021, 27(4): 71-76.
[3] 张成龙. 中国水稻产业竞争力及影响因素研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 20.
ZHANG C L. Chinese academy of agricultural sciences dissertation [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009: 20.
[4] 韩锐敏. 对稻谷加工工艺的探讨[J]. 粮食与饲料工业, 2005(3): 1-3, 16.
HAN M R. Discussion of rice processing technology[J]. Cereal & Feed Industry, 2005(3): 1-3, 16.
[5] 姜山, 胡志刚. 大米抛光磨损研究综述[J]. 现代制造技术与装备, 2020(4): 177-178.
JIANG S, HU Z G. A review of rice polishing wear[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020(4): 177-178.
[6] 颜俊, 胡治湘, 罗红武, 等. 提高大米抛光机抛光光洁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.
[7] 陈思思, 樊琦. 我国稻谷过度加工造成营养物质损失浪费的研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 10-13.
CHEN S S, FAN Q. Research on nutrient loss and waste during rice over processing in China[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(7): 10-13.
[8] 樊琦, 黑文静, 祁华清, 等. 湖北省粮油加工环节损失浪费研究[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(6): 78-83.
FAN Q, HEI W J, QI H Q, et al. Study on loss and waste during grain and oil processing in Hubei province [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(6): 78-83.
[9] 胡纪东. 湖北省稻谷加工粮食损失现状调查与评估[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2018: 7-21.
HU J D. Investigation and estimate on the status of rice processing loss in Hubei province[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2018: 7-21.

(下转第 140 页)

- Prevention, 2024, 35(1): 39-42.
- [17] 刘星, 杨钰昆, 秦楠, 等. 连翘叶固体饮料的研制及活性成分测定[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2 125-2 130.
LIU X, YANG J K, QIN L, et al. Study on processing technology of *Forsythiae fructus* leaves solid beverage and determination of its active ingredients[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(6): 2 125-2 130.
- [18] 刘奇, 章越, 盛燕, 等. 基于层次分析法—熵权法—独立性权法结合正交设计法优选胃病 1 号提取工艺[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(21): 2 998-3 004.
LIU Q, ZHANG Y, SHENG Y, et al. Optimization of extraction process of gastropathy oral thick paste 1 by orthogonal design based on analytic hierarchy process method-entropy weight method-independent weight method[J]. Chin J Mod Appl Pharm, 2023, 40(21): 2 998-3 004.
- [19] 李雨洋, 覃柳馨, 陈卫卫, 等. 星点设计—效应面法优选黄精固体饮品中黄精多糖的提取工艺[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(8): 44-50.
LI Y Y, QIN L X, CHEN W W, et al. Optimization of polygonatum sibiricum polysaccharide extraction process by central composite design-response surface method in *Polygonati rhizoma* solid beverage[J]. China Food Additives, 2021, 32(8): 44-50.
- [20] 伍国羽, 林榆子, 潘育方. 白藜多糖颗粒剂的制备工艺研究[J]. 广东药科大学学报, 2024, 40(1): 14-21.
WU G Y, LIN Y Z, PAN Y F. Study on preparation process of *Acanthopanax trifoliatus* (L.) Merr polysaccharides granules[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2024, 40(1): 14-21.
- [21] 九红, 付满玲, 刘洪盛, 等. 赶黄草醇提物和赶黄草总黄酮对小鼠亚急性酒精性肝损伤保护作用的比较研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 391-397.
JIU H, FU M L, LIU H S, et al. Comparative study on hepatoprotective effects of alcohol extract and total flavonoids of *penthorum chinense* pursh against alcohol-induced subacute liver injury in mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 391-397.
- [22] 戴胜, 汪惠丽. 天然甜味剂罗汉果甜苷的研究进展[J]. 中成药, 2023, 45(2): 503-509.
DAI S, WANG H L. Research progress of natural sweetener momoside[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(2): 503-509.
- [23] 闫志芳, 任可乐, 孟祥龙, 等. 决明子水提物对急性酒精性肝损伤小鼠的保护作用研究[J]. 食品与药品, 2023, 25(5): 440-445.
YAN Z F, REN K L, MENG X L, et al. Protective effect of water extract of *Cassiae semen* on acute alcoholic liver injury in mice[J]. Food and Drug, 2023, 25(5): 440-445.
- [24] 郭子雨, 赵军, 姚雨含, 等. 睡莲酚对小鼠酒精性肝损伤的保护作用[J]. 药学研究, 2023, 42(9): 668-672.
GUO Z Y, ZHAO J, YAO Y H, et al. Protective effect of isostrictiniin on alcoholic liver injury in mice [J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2023, 42(9): 668-672.
- [25] TESCHKE R. Alcoholic liver disease: alcohol metabolism, cascade of molecular mechanisms, cellular targets, and clinical aspects[J]. Biomedicines, 2018, 6(4): 106.
- [26] 张瞭飞, 姜欣, 李一澍, 等. 4-甲基愈创木酚对酒精性肝损伤小鼠的保护作用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 92-98.
ZHANG L F, JIANG X, LI Y S, et al. Protective effect of 4-methylguaiaicol on alcohol-induced liver injury in mice[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(18): 92-98.

(上接第 87 页)

- [10] 荀春林. 智能碾米机结构设计及碾米特性仿真[D]. 南京: 东南大学, 2020: 35-59.
XUN C L. Structure design of intelligent rice milling machine and simulation of rice milling characteristics[D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 35-59.
- [11] 雷庆明. 自助碾米机的控制系统设计及碾白特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 35-58.
LEI Q M. Study on the control system and the whitening characteristics of self-service rice mill [D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 35-58.
- [12] LI A Q, JIA F G, WANG Y L, et al. Numerical analysis of the rice transport uniformity in vertical friction rice mill based on discrete element method [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107398.
- [13] ZENG Y, JIA F G, MENG X Y, et al. The effects of friction characteristic of particle on milling process in a horizontal rice mill[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(5): 1 280-1 291.
- [14] CERQUEIRA R F L, PALADINO E E, YNUMARU B K, et al. Image processing techniques for the measurement of two-phase bubbly pipe flows using particle image and tracking velocimetry (PIV/PTV) [J]. Chemical Engineering Science, 2018, 189: 1-23.
- [15] CHEN B, LI X J, ZHU Z C. Investigations of energy distribution and loss characterization in a centrifugal impeller through PIV experiment[J]. Ocean Engineering, 2022, 247: 110773.
- [16] LIU Z X, YU Z X, CHEN X X, et al. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106583.
- [17] GRANT I. Particle image velocimetry: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1997, 211(1): 55-76.
- [18] THIELICKE W, STAMHUIS E. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. Journal of Open Research Software, 2014, 2(1): 30.