

糙米正面破碎特性与裂纹扩展规律

Front fracture characteristics and crack propagation of brown rice

张 涛 李修银 廖 敏 郑睿恺

ZHANG Tao LI Xiu-yin LIAO Min ZHENG Rui-kai

(1. 西华大学机械工程学院, 四川 成都 610039; 2. 西华大学现代农业装备研究院, 四川 成都 610039)

(1. School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China;

2. Institute of Modern Agricultural Equipment, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China)

摘要:目的:研究碾米室中糙米破碎特性。方法:利用万能材料试验机进行糙米力学试验,通过数字显微镜观察糙米中裂纹及其扩展变化。结果:糙米受力时会经历屈服阶段与强化阶段的交替过程,直至断裂;在挤压载荷作用下,内部微孔洞处产生裂纹,裂纹的快速扩展造成了米粒破碎或断裂,在三点弯曲和剪切载荷下,糙米从支撑端底面产生裂纹,并扩展至正面;糙米的抗挤压变形能力最大、抗三点弯曲变形能力次之、抗剪切变形能力最小;与挤压载荷相比,糙米在三点弯曲和剪切载荷下的破碎强度和破碎能较小。结论:在对碾米机结构进行设计时,要尽量减少弯曲、剪切作用对糙米的影响;同等条件下,粳型糙米的力学特性优于籼型糙米。

关键词:糙米;正面;破碎特性;裂纹扩展;力学试验

Abstract: **Objective:** Study on broken characteristics of brown rice in rice milling chamber. **Methods:** The mechanical tests of brown rice were carried out by universal material testing machine, and the breaking cracks were observed by digital microscope. **Results:** Brown rice will undergo the alternating process of yield stage and strengthening stage until fracture. Under the action of extrusion load, cracks were generated at the internal microvoids, and the rapid propagation of cracks caused the breakage or fracture of rice grains. Under three-point bending and shear loads, cracks were generated from the bottom of the support end and extended to the front. The compressive deformation resistance of brown rice was the largest, followed by the three-point bending deformation resistance, and the shear deformation resistance were the smallest. Compared with extrusion load, the breaking strength and breaking energy of brown rice under three-

point bending and shear load were smaller. **Conclusion:** When designing the structure of rice mill, the influence of bending and shearing on brown rice should be minimized. Mechanical properties of japonica brown rice are better than indica brown rice under the same conditions.

Keywords: brown rice; front; crushing characteristics; crack propagation; mechanical test

2020 年中国稻谷产量约为 2.12 亿 t,其加工环节的损失率高达 20%,尤其是糙米碾白加工环节,精米出米率只有 70%,严重影响成品米精度和商品价值^[1-3]。减少碾米阶段的碎米对提高成品米出米率和粮食产量具有重要意义。米粒破碎理论涉及到稻谷脱粒和大米碾白的损伤破坏,主要从能量守恒角度对米粒损伤破碎进行研究^[4-6];关于稻米籽粒裂纹扩展的研究^[7-13]表明,造成稻米籽粒断裂破碎的原因大多与水分和温度有关。而糙米正面在碾米过程中接触面积最大,最易受到力的冲击,文章拟对糙米正面的破碎特性与裂纹扩展进行研究,为碾米加工设备的设计、结构优化,以及碾米降碎工艺等方面提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

如图 1 所示,糙米平放在桌面上,受桌面支承的籽粒面称为底面,其对立面称作糙米正面;糙米籽粒的粒型用长度、宽度、厚度 3 个尺寸表示,糙米胚芽一端到另一端的最大距离称为糙米长度,正面到底面间的最大距离称为糙米宽度,两正面之间的最大距离称为糙米厚度。

选取目前市场上主要售卖的籼型稻谷和粳型稻谷,产地分别来自于江苏和安徽,收获时间均为 2020 年 6 月。通过手工脱壳方式分别获得两品种糙米近 500 粒,测得糙米三轴尺寸、籽粒重量如表 1 所示。由表 1 可知,粳型糙米的宽度、厚度及密度均略大于籼型糙米。

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(编号:2019YFN0106, 2019GFW007)

作者简介:张涛,男,西华大学在读硕士研究生。

通信作者:廖敏(1971—),男,西华大学教授,博士。

E-mail:848264319@qq.com

收稿日期:2021-09-22

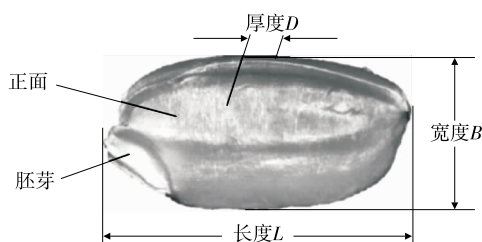


图1 糙米三轴尺寸

Figure 1 Triaxial dimensions of brown rice

表1 糙米的物理特征参数

Table 1 Physical characteristic parameters of brown rice

样品	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	百粒重/g	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)
籼型	7.05±0.34	2.29±0.09	1.87±0.06	2.00±0.23	15.32±0.20	1.263
粳型	5.54±0.14	3.13±0.11	2.31±0.05	2.70±0.22	15.47±0.20	1.298

试验机预加载力为 5 N,加载速度为 0.5 mm/s,移动速度为 50 mm/s^[8]。试验过程中当压头检测到籽粒断裂后,立即停止加载,压头自动提升至一定位置。随机取 30 粒左右完整糙米试样逐粒进行加载试验^[8],计算破碎力、破碎变形等的平均值及标准差。

1.2.2 糙米损伤裂纹观察 利用 15J(JQC 型)精密三维视频显微镜对糙米内部裂纹的产生和扩展进行观察,并寻找糙米内部裂纹扩展的相关规律。利用万能材料试验机对糙米进行受力加载:第 1 阶段,以一个较小力值对第一粒糙米进行加载,并将该粒糙米平放后磨去中心线以下的部分(见图 2),随后将该糙米染色放入显微镜下观察,若未发现裂纹,则继续对第二粒同品种糙米进行加载,第 2 次的加载力值大于第 1 次的,不断重复此过程直至糙米出现裂纹;第 2 阶段,将糙米加载至破碎,为方便与第 1 阶段对比,需将破碎糙米沿前视方向磨掉一部分,染色后放入显微镜下观察。

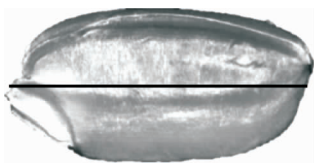


图2 糙米磨削示意图

Figure 2 Chart of brown rice grinding

1.2.3 糙米正面破碎特性指标 糙米是生物系材料,但其内部产生应力裂纹的过程与金属极为相似,因此为研究糙米的破碎特性,借助金属材料相关力学理论提出了破碎力、破碎变形、破碎强度、破碎能以及弹性模量 5 个表征糙米破碎特性的重要指标,破碎力和破碎变形表示使糙米破碎或断裂的最大外力和最大变形,其值可通过万能材料试验机读出;破碎强度是指引起糙米破碎或断

贾富国等^[14-15]研究发现,糙米在碾白加工时,当含水率为 15%~16%时,碎米率最小,因此,采用 105 °C 恒重法^[16]测得糙米初始含水率为(11.0±0.2)%,通过加湿调质技术将两种糙米的含水率控制在 15%~16%,并获得糙米样品。

1.2 试验方法

1.2.1 糙米力学试验 采用 CMT1103 万能材料试验机对糙米进行力学特性测试,挤压夹具由上方的压头和下端为支承座组成,弯曲及剪切试验夹具为定制。

裂所需的最大应力;弹性模量可表示糙米抵抗变形能力的大小,其值等于糙米弹性阶段应力与应变之比;破碎能是指糙米从受力到断裂过程中所消耗的能量,其值等于外力在力的位移方向上所做的功。根据文献^[7]计算不同试验条件下糙米的破碎强度、弹性模量及破碎能,并结合万能材料试验机读取糙米破碎力和破碎变形值。

1.3 数据分析

相同试验条件下,对籼型糙米和粳型糙米正面分别进行 30 次挤压、三点弯曲和剪切试验,通过万能材料试验机测控软件得到相应的力与位移数据,导出数据后,剔除有明显错误的的数据,保留规律相近的数据,选取代表性数据,以位移量作为横坐标,力作为纵坐标,经绘图软件绘制得到不同载荷下糙米力一位移曲线图。

2 结果与分析

2.1 糙米正面挤压力学特性表征

2.1.1 挤压载荷下的力一位移曲线 由于籼型糙米和粳型糙米在不同荷载作用下的力一位移曲线基本相似,因此仅选取籼型糙米的力一位移曲线进行分析。

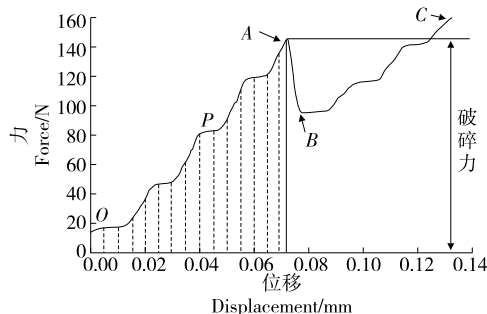


图3 挤压力一位移特征曲线

Figure 3 Extrusion pressure-displacement characteristic curve

由图 3 可知,挤压力—位移特征曲线主要由 OA、AB 和 BC 3 段组成,OA 段中,变形随挤压力的增大而增大, O 点为糙米开始发生变形的点,为起始点,其对应载荷值为 10~20 N,随着糙米变形的增大,挤压力也逐渐增大,在 A 点挤压力达到最大值,随后 AB 段载荷急剧下降,说明糙米在 A 点发生了破碎;此外,OA 曲线上还出现了诸多类似 P 的台阶,数量随变形的增大而增多,直至点 A 形成阶梯状;其中 OA 段力—位移曲线与横坐标所围成的面积为破碎能。BC 段,曲线呈现出与 OA 段相似的变化规律,是由于压头继续对已破碎糙米进行挤压,淀粉颗粒间的结合力被打破,因而 BC 段糙米变形随载荷的增加越来越容易。

对于挤压力—位移曲线出现多个台阶 P 并形成阶梯状的原因,可以参考低碳钢在压缩时的机械性能表现以及粉末压制理论。对糙米籽粒施压后,糙米内部微小颗粒间会发生相对移动,颗粒会填充内部间隙,微小颗粒迅速堆积至最紧密状态,米粒抗压能力增大,于是出现了特征曲线中斜率由小到大的转变,载荷继续增大直至达到颗粒承受极限,由于糙米形状近似为扁平椭球体,在糙米受压过程中,糙米越来越扁,其与压头的接触面积不断变大,新的微小颗粒继续向间隙填充,颗粒堆积直至达到最紧密状态,因此形成台阶 P,随着变形的增大,台阶 P 不断重现直至糙米破碎。

此外,当糙米被压缩时,内部的微粒相对移动,并将空隙填充到紧实状态,在此期间,挤压力—位移特性曲线出现一个近似水平线的线段,该曲线段中,变形量显著增大,但是载荷值却几乎不变或是微小幅度增加,如果将该线段放大,还可以看出该线段呈小锯齿状,这种现象类似于低碳钢压缩屈服阶段内晶格间的相对滑移;当颗粒填充间隙已至紧密状态,要使糙米变形必须增加压力,于是出现了曲线中斜率显著增加的曲线段,随变形增加,载荷大幅度增加,与低碳钢受压时的强化阶段类似,因此可认为挤压力—位移特征曲线中近似水平的曲线段是属于糙米屈服阶段,斜率显著增大的曲线段是属于糙米强化阶段,糙米籽粒的断裂来源于屈服阶段和强化阶段的不断往复。

2.1.2 挤压载荷下的裂纹扩展 由图 4 可知,糙米胚乳组织排列不均匀,其内部淀粉颗粒形状大小不一,淀粉颗粒之间容易形成微孔洞,即糙米内部存在间隙,证实了糙米力—位移特征曲线上 P 台阶的出现是由于颗粒间的相对运动进而填充内部间隙造成的推测。

由图 5(a)可知,当糙米受挤压作用内部出现裂纹时,产生了 3 条比较明显的裂纹,但此时糙米还未发生破碎,裂纹从糙米中心向外延伸。由图 5(b)可知,当糙米正面受挤压作用断裂时,产生了 3 条竖直裂纹,中间竖直裂纹从正面贯穿到底面,是形成糙米挤压破碎的主要裂纹,另

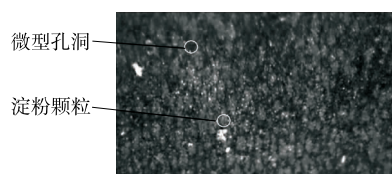
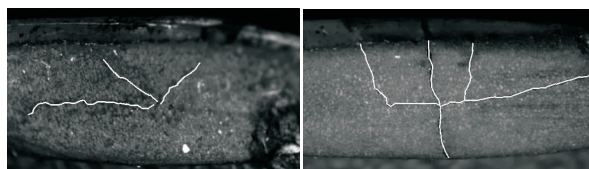


图 4 糙米未受力时内部视图

Figure 4 Internal view of brown rice without stress (14 000×)



(a) 出现裂纹 (b) 断裂

图 5 糙米正面受挤压载荷内部视图

Figure 5 Internal view of brown rice facing extrusion load

外两条竖直裂纹延伸至中部后与横向裂纹相交。综上,随着挤压力的逐渐增大,裂纹由糙米内部向外部进行扩展,从而引起糙米断裂。

2.2 糙米正面三点弯曲力学特性表征

2.2.1 三点弯曲载荷下的力—位移曲线 由图 6 可知,糙米正面受三点弯曲作用时的力—位移曲线与挤压力—位移曲线趋势相近,变形起始点 O 对应的载荷值为 5~10 N,小于糙米正面挤压载荷变形起始点所对应的值,一定程度上反映出糙米正面抵抗弯曲变形的能力小于抵抗挤压变形的能力;籽粒所受三点弯曲作用力随变形量的增大而增大,当增大到 A 点后,载荷急剧下降到 0,如 AB 段所示,表明 A 点糙米断裂,A 点为破碎力点;与受挤压时情况一致,三点弯曲力—位移特征曲线上也有诸多类似 P 的台阶,表明三点弯曲载荷下的糙米也经历了屈服阶段和强化阶段的交替过程,直至糙米断裂。

2.2.2 弯曲载荷下的裂纹扩展 由图 7 可知,当糙米正面受三点弯曲载荷作用产生裂纹但未断裂时,糙米从底

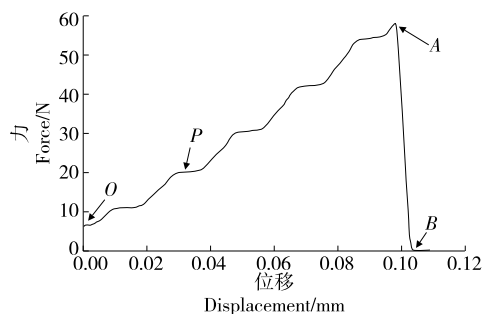
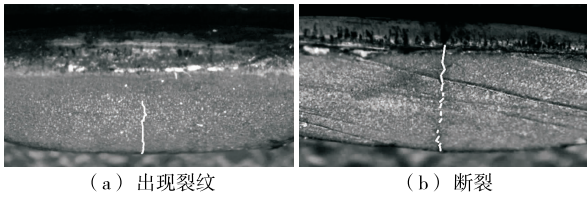


图 6 糙米正面三点弯曲力—位移曲线

Figure 6 Three-point bending force-displacement curve of brown rice front



(a) 出现裂纹 (b) 断裂

图 7 糙米正面受三点弯曲载荷内部视图

Figure 7 Internal view of brown rice under three-point bending load

面产生了竖直裂纹;当糙米正面受弯曲载荷作用断裂时,产生了从正面到底面贯穿的竖直裂纹,说明随着三点弯曲载荷的逐渐增大,裂纹是从竖直方向向底面扩展至正面,而底面为支撑面,即裂纹会沿受力端扩展,直至断裂。

2.3 糙米正面剪切力学特性表征

2.3.1 剪切载荷下的力—位移曲线 由图 8 可知,糙米正面受剪切作用时的力—位移曲线与弯曲力—位移曲线相似, O 点为变形起点,其对应荷载值略 > 5 N,小于糙米在正面挤压和弯曲作用下变形起始点所对应的荷载值,一定程度上反映出糙米抵抗剪切变形的能力小于抵抗挤压和弯曲变形的。

2.3.2 剪切载荷下的裂纹扩展观察 由图 9 可知,糙米正面在剪切载荷作用下产生的裂纹与三点弯曲载荷作用下的类似,都是从支承端开始产生竖直裂纹,随着载荷力的增加,裂纹从支承端逐渐向受力端扩展直至糙米断裂。

2.4 糙米正面压、弯、剪力学特征比较

相同试验条件下,糙米正面受挤压、弯曲、剪切载荷的破碎力—位移特征曲线如图 10 所示,为便于观察,只

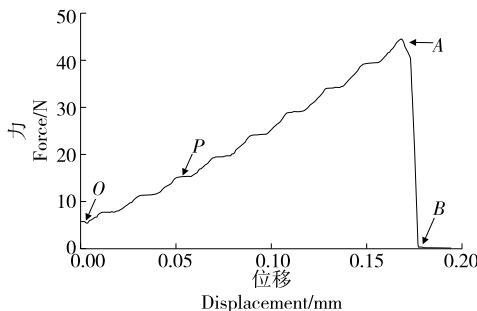


图 8 糙米正面剪切破碎力—位移特征曲线

Figure 8 Characteristic curve of frontal shearing breaking force-displacement of brown rice

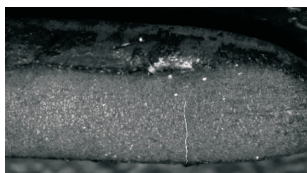


图 9 糙米正面受剪切力内部视图

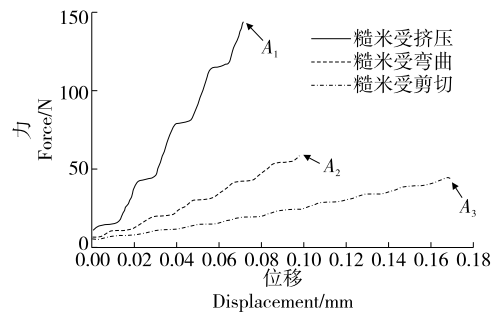
Figure 9 Internal view of frontal shearing force of brown rice

截取糙米从未受力到受力破碎、断裂的曲线段。

由图 10 可知,3 种破碎力均随破碎变形的增大而增大,除存在诸多台阶外,直至断裂,上升趋势几乎是线性的,因而可以认为含水率在 15% 左右的糙米近似地符合线弹性材料的力学特征;糙米正面在挤压载荷下的破碎力最大,破碎变形最小;剪切载荷下的破碎力最小,破碎变形最大;挤压载荷下的力—位移曲线斜率最大;挤压破碎的力—位移特征曲线上的台阶数量最少,剪切破碎的力—位移曲线上的台阶数量最多且呈锯齿状;挤压变形起始点 O 所对应载荷均大于弯曲和剪切下的。

从 3 种力学状态考虑,相同条件下,力—位移特征曲线斜率越大,破碎力越大,破碎变形越小,变形越小曲线上台阶数量越少。此外,力—位移特征曲线的斜率大小还代表材料线性刚度大小,斜率大刚度大,抵抗变形能力大,故糙米抗挤压变形能力最大,抗剪切变形能力最小,抗弯曲变形能力位于抗挤压和抗剪切之间。

从试验方面考虑,糙米正面的 3 种力学特性试验的加载压头与籽粒接触形式不同,造成米粒损伤的形式不同。挤压试验中,糙米粒平放在支承座上,支承座为刚性平板,挤压压头也是与其形状大小相同的刚性平板,当压头向糙米粒加压时,籽粒除了受到垂直向下的作用力外,还受到支承平板对其的支承反力,且压头与糙米粒的接触面积在 3 种力学试验中最大,当破碎力一定时,探头对糙米粒产生的压强最小,因此要使米粒断裂,所需力就更大,故其挤压破碎力最大,破碎变形最小。三点弯曲试验中,糙米籽粒底部是两点支承,当压头向下加压时,籽粒正面受压底部受拉,且探头与籽粒接触面积相较于挤压试验而言更小,产生的压强更大,因此弯曲破碎力小于挤压破碎力、弯曲破碎变形大于挤压破碎变形。剪切试验中,压头与糙米的接触面积在 3 种力学试验中最小,产生的压强水平最大,糙米在受到剪切载荷时,糙米横截面会沿作用力方向发生相对错动变形,故其在剪切破碎力最小,破碎变形最大。



A_1 、 A_2 、 A_3 为糙米破碎力点

图 10 糙米正面受压、弯、剪时破碎力—位移曲线

Figure 10 Breaking force-displacement curve of brown rice under positive compression, bending and shearing

综上可以推断,碾米加工过程中弯曲力、剪切力下的糙米更容易被破坏,因此,加工过程中要尽量避免糙米受到弯曲和剪切作用。

2.5 糙米正面破碎特性指标

由表 2 可知,无论是籼型糙米还是粳型糙米,破碎力大小为挤压破碎力>三点弯曲破碎力>剪切破碎力,破

碎变形力大小为挤压破碎变形<三点弯曲破碎变形<剪切破碎变形,与破碎力一位移特征曲线对应;3 种力学类型的破碎强度大小为挤压破碎强度>三点弯曲破碎强度>剪切破碎强度;糙米破碎能大小与破碎力、破碎强度的分布趋势一致;同一试验条件下,糙米压缩模量>三点弯曲模量>剪切模量。

表 2 糙米破碎特性指标

Table 2 Mechanical properties of brown rice

样品	力学类型	破碎力/N	破碎变形/mm	破碎强度/MPa	破碎能/(N·mm)	弹性模量/MPa
籼型糙米	挤压力	145.02±3.57	0.074±0.008	228.90±3.52	5.88±0.34	357.97
	三点弯曲力	57.01±2.24	0.098±0.012	63.45±3.05	3.75±0.37	104.67
	剪切力	38.71±4.47	0.151±0.020	38.79±3.02	3.15±0.42	44.13
粳型糙米	挤压力	152.30±5.79	0.083±0.005	230.17±2.48	6.86±0.25	332.44
	三点弯曲力	62.42±4.58	0.105±0.032	65.31±2.38	4.20±0.20	97.20
	剪切力	42.24±4.80	0.165±0.017	40.44±2.36	3.60±0.30	40.98

同载荷类型条件下,粳型糙米的破碎力、破碎变形、破碎强度及破碎能均大于籼型糙米,粳型糙米显示出更好的力学特性,破碎强度除了与破碎力大小有关,还与糙米厚度有关,随着破碎力的增大,糙米厚度减小,破碎强度增大。

3 结论

试验表明,由于糙米内部胚乳组织的不均匀性,淀粉颗粒间容易形成微孔洞,糙米正面在受到挤压载荷作用时,会先在内部微孔洞处产生裂纹,裂纹的快速扩展造成了米粒破碎或断裂。在三点弯曲和剪切载荷下,糙米从支撑端底面产生裂纹,并扩展至正面;糙米受力时会经历屈服阶段与强化阶段的交替过程,直至断裂;与挤压载荷相比,糙米在三点弯曲载荷和剪切载荷作用下的破碎强度和破碎能较小。糙米抗挤压破碎的能力最大、抗弯曲破碎能力次之、抗剪切破碎能力最小,因此在对碾米机结构进行设计时,要尽量减少弯曲、剪切作用对糙米的影响;同等条件下,粳型糙米的力学特性优于籼型糙米。糙米加工品质与其力学特性间具体相关关系暂不明确,后续可通过米粒的三维模型建立^[17],进行离散元仿真,以期能根据破碎特性相关指标选择合适加工工艺,降低碾米过程中碎米的产生。

参考文献

[1] 朱西慧. 大米加工企业过度加工行为及其影响因素: 以江苏为例[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(2): 105-107, 118.
ZHU Xi-hui. Overprocessing behavior of rice processing enterprises and its influencing factors: Taking Jiangsu as an example[J]. Grain Science, Technology and Economy, 2018, 43(2): 105-107, 118.
[2] 樊琦, 刘梦芸, 祁华清. 我国稻谷加工粮食损失与治理对策研

究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(5): 117-120.
FAN Qi, LIU Meng-yun, QI Hua-qing. Research on grain loss and control countermeasures of rice processing in China[J]. Grain and Oil Food Science and Technology, 2015, 23(5): 117-120.
[3] 张双. 碾米机中物料流流体动力学分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017: 65.
ZHANG Shuang. Fluid dynamics analysis of material flow in rice mill[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017: 65.
[4] 韩燕龙. 碾米机内米粒运动特征及碾白特性[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017: 88.
HAN Yan-long. The characteristics of grain movement and milling in rice mill[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017: 88.
[5] 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: 14-18.
ZENG Yong. Whitening mechanism and crushing characteristics of rice grains in horizontal mill[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 14-18.
[6] 吴杰. 基于显微图像处理的稻谷破损方式研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 26-36.
WU Jie. Study on rice damage based on microscopic image processing[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014: 26-36.
[7] 程绪铎, 高梦瑶, 杜小翠, 等. 稻谷籽粒的压缩特性与含水率关系的实验研究[J]. 粮食储藏, 2015, 44(1): 6-10.
CHENG Xu-duo, GAO Meng-yao, DU Xiao-cui, et al. Experimental Study on relationship between compression characteristics and moisture content of rice grain[J]. Grain Storage, 2015, 44(1): 6-10.
[8] 周显青, 张玉荣, 褚洪强, 等. 糙米机械破碎力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 255-262.
ZHOU Xian-qing, ZHANG Yu-rong, CHU Hong-qiang, et al. Brown rice mechanical crushing mechanical properties test and analysis[J]. Agricultural Engineering Journal, 2012, 28(18): 255-262.

(下转第 110 页)