

文章编号:2095-7386(2021)03-0035-07

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2021.03.007

稻谷挤压力学—结构特性研究

范雨超¹, 杨柳¹, 杨文庆¹, 宋少云^{1,2}, 曹梅丽¹, 张永林^{1,2}, 张家凡¹

(1. 武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430023; 2. 湖北省粮油机械工程技术研究中心, 湖北 武汉 430023)

摘 要:对三种常见稻谷的挤压峰值力及结构变化进行研究,采用质构仪结合图像采集对稻谷进行压缩试验,对稻谷在不同的压距、速率、含水率、温度下的挤压峰值力和显微图像进行分析比较。实验结果表明:三种稻谷所受挤压峰值力随着压距的增大而增大,籼米稻壳结构完整,在大压距下也不会出现断裂,其内糙米出现长轴裂纹,未断裂。粳米和糯米的谷壳在大压距下基本断裂,压距增大,粳糙米表面横向裂纹数量逐渐增加,直至断裂,糯糙米在短时间内被压扁并失去承载能力;速率对稻谷的峰值力无明显影响;三种稻谷的挤压峰值力随着含水率的上升而减小,并且产生吸湿性裂纹,含水率对粳米的力学及结构性能影响最明显;随着温度的上升,三种稻谷发生玻璃化转变,产生裂纹,所受峰值力下降。

关键词:稻谷;挤压力学性能;结构变化;裂纹

中图分类号:TS 210.1

文献标识码:A

Research on the extrusion mechanics-structural property of paddy grain

FAN Yu-chao¹, YANG Liu¹, YANG Wen-qing¹, SONG Shao-yun^{1,2}, CAO Mei-li¹, ZHANG Yong-lin^{1,2}, ZHANG Jia-fan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Hubei Grain and Oil Machinery Engineering Technology research Center, Wuhan 430023, China)

Abstract: The peak extrusion forces and structural changes of three paddy grain kinds were investigated, the peak extrusion force and microscopic image of rice grains were analyzed and compared at different compression distances, rates, moisture contents, temperatures by compression tests with a texture analyzer. The experimental results showed that peak extrusion force of the three types of rice grains increased with the increase of compression distance, and the indica rice husk was structurally intact and not fracture even at large compression distances, its inner brown rice showed long-axis cracks without fracture. The hulls of japonica and glutinous rice basically fractured at large compression distance, the number of transverse cracks on the surface of japonica brown rice gradually increased until fracture as compression distance increased, and glutinous brown rice was flattened and lost its load-bearing capacity within a short period of time; the rate had no obvious effect on the peak force of the rice grains; the peak extrusion force of the three rice grains decreased with the increase of moisture content and produced hygroscopic cracks, and moisture content had most obvious effect on the mechanical and structural properties of japonica rice. With the temperature increase, three paddy grains underwent glass transition and produced cracks, the peak force applied decreased.

Key words: rice; extrusion mechanical property; structural changes; cracks

收稿日期:2021-05-10.

作者简介:杨柳(1989-),男,讲师,博士, yangliu@wpu.edu.cn;

基金项目:武汉轻工大学博士启动科研(2019RZ08),武汉轻工大学校杰出青年科研项目(2020J06).

1 引言

稻谷是世界三大粮食作物之一,在近期爆发的全球性新冠肺炎疫情的背景下,粮食的重要性愈发明显^[1]。早在 2014 年,我国国家粮食局等三部门就大力倡导粮油加工业节粮减耗,减少粮油加工环节的浪费^[2]。

稻米在从原料加工成初级产品(精白米,大米粉等)之前,需经历从入仓、清理到脱壳、碾白等工艺流程^[3]。除碾白工序外,稻米都是以稻谷的形式存在,在收获、加工、储运和处理过程中,由于机械设备的使用造成了对谷物的损伤,外界机械力的作用是造成稻谷破碎的主要原因之一^[4-6]。稻谷加工是造成谷物损伤的主要工序之一,稻谷在辊间运动脱壳时,过大的挤压力会导致谷物的挤压破碎^[7]。因此,了解稻谷在加工时的力学特性,对提高稻米的产量和品质有重要的意义。

早在 1973 年 Prasad^[8]等人研究了压缩载荷作用下稻谷籽粒的力学特性,随着含水率的增加,稻谷的最大压力减小。Kamst 和 Bonazzil^[9]等进行了稻米的应力松弛试验,研究表明稻米是线性粘弹性体,弹性模量和挤压强度随变形速率增大而增大,随温度及含水率的增大而减少,在含水率较低时温度影响较大。丁林峰^[10]进行了稻谷的压缩试验,测得水稻谷粒的力—位移曲线以及最大破坏力,从而得出其弹性模量和泊松比等常规力学性能参数。严晓婕和程绪铎^[11-12]等人对稻谷籽粒压缩时的压缩特性参数进行测定,并研究了含水率对稻谷籽粒压缩特性的影响。

现阶段研究大多集中在稻谷力学性能参数的研究上,同时,稻谷的力学-结构特性与稻谷的品质和产量直接相关联。笔者以三种常见稻谷品种为研究对象,探究了稻谷在不同的压距,速率,湿度,温度下的压缩特性变化规律,并根据稻谷结构变化得出其力学特性,为稻谷加工提供参考依据。

2 材料和方法

2.1 试验材料及设备

根据稻米的粒形和粒质不同,将稻米分为三种,分别为粳稻谷、籼稻谷、糯稻谷^[13]。本试验所选取的三种稻谷品种分别为郑早 10 号(粳稻谷),桂育 11 号(籼稻谷),连糯 1 号(糯稻谷),均产于 2020 年。

试验设备:TA. XTC - 18 型质构仪:上海保圣实业发展有限公司;supereyes 电子数码显微镜:广东深圳超眼旗舰店;Olympus - BX51 光学显微镜:宁波协创计量仪器有限公司;电热鼓风干燥箱:北京市永光明医疗仪器有限公司;数显电子游标卡尺;试管等。

2.2 稻谷的结构尺寸

稻谷主要由稻谷外壳和颖果(糙米)组成。稻谷外壳约占稻谷重量的 20%,主要由芒、外颖、内颖组成,内外颖边缘卷起呈钩状,相互勾合包裹着颖果,并通过稻谷长轴末端的芒结合^[14],如图 1(A)所示。糙米约占稻谷重量的 80%,由麸皮层,胚和胚乳等组成,如图 1(B)所示。其中胚乳由糊粉层和内胚乳组成,内胚乳包括次糊粉层和含淀粉的胚乳^[15],外壳和颖果之间存在一定的空隙。从筛选出的三种稻谷样品中各 50 粒,分别测量它们的长,宽,高,取平均值作为本次试验的稻谷的外形尺寸(表 1)

表 1 稻谷的外形尺寸

尺寸	籼米桂育	粳米郑早	连糯
	11 号	10 号	1 号
长度/mm	8.75 ± 0.34	7.53 ± 0.21	7.36 ± 0.23
宽度/mm	2.81 ± 0.15	3.54 ± 0.18	3.6 ± 0.14
厚度/mm	2.01 ± 0.13	2.37 ± 0.13	2.15 ± 0.04

2.3 稻谷材料制备

试验用稻谷经人工筛选后放入密封塑料袋中恒温保存,筛选原则为谷粒完整,谷壳表面无开口的完整稻谷颗粒。同时为了研究温度及湿度对稻谷力学特性的影响,需要制备不同温度和湿度下的稻谷样品。制备流程为:选取部分筛选的稻谷,共均分为 9 组,其中 4 组稻谷样品分别放置在试管中,用去离子水浸泡 1 h,3 h,6 h,24 h,浸泡过程中试管密封,制备后放入密封塑料袋中,以确保稻谷的含水率保持稳定;剩下 5 组稻谷分别装入加热用密封装置后,放置于电热恒温干燥箱,在 30 ℃,60 ℃,90 ℃,120 ℃,150 ℃ 条件下加热半小时,加热完成后放入塑料密封袋中。

2.4 试验方法

稻谷经筛选后,同等条件下,采用上海保圣质构仪 TA. XTC - 18 对单颗稻谷籽粒的力学特性进行测试,感应力为 20 g,测试前速为 1.0 mm/s,测试后速度为 2.0 mm/s,实验方式为单次测试,选定其中一种参数为变量,其余参数选定为同一条件,各参数变量见表 2。

表 2 稻谷力学特性测试参数

变量	品种	压距 (mm)	速率 (mm/s)	泡水时间 /含水率 (h)/%	温度 (℃)
1	郑早 10 号	0.2	0.1	0/5.6	30
2	桂育 11 号	0.4	0.2	1/20.2	60
3	连糯 1 号	0.6	0.3	3/22.8	90
4		0.8	0.6	6/26.3	120
5		1		24/29.7	150

试验选取直径为 6 mm 的圆柱体探头,基座为长方体,校准传感器,探头高度校准,确定试验方法后将单粒稻谷样品放置在基座上,调整基座的方位保证每次试验时压缩探头压在稻谷样品同一位置,每组试验重复 5 次,在采集与控制中心得到挤压力—时间特征曲线,取平均值。压缩试验后,通过超眼电子显微镜观测糙米腹部结构变化,压缩示意图见 1(c)。

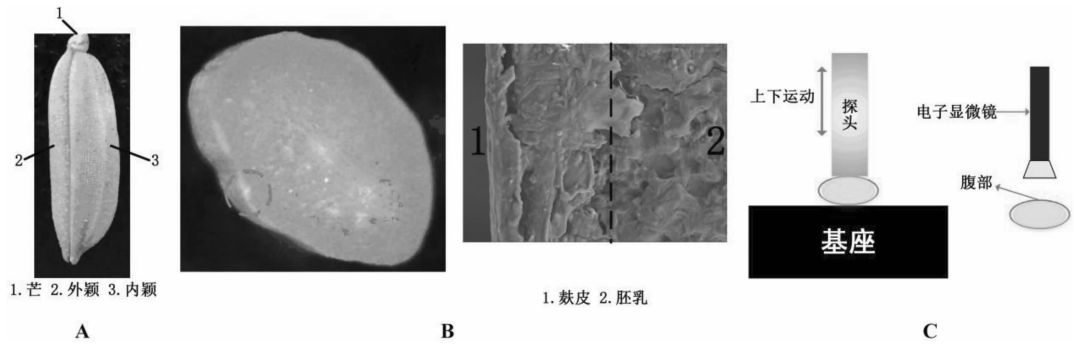


图 1 (A) 稻谷外形结构;(B) 糙米剖面及 SEM 图;(C) 压缩示意图及观测示意图

3 结果与分析

3.1 不同品种下稻谷的力学—结构特性

图 2 所示为 0.6 mm 压距,0.1 mm/s 速率,无浸泡,无加热条件下三种稻谷的挤压力—时间特征曲线,图中箭头所指为虚线圆圈的局部放大曲线图。可以看出,在到达破裂点之前,稻谷所受挤压力与时间呈线性关系。由于籼米结构为细长型,且谷壳与糙米基本完全贴合,挤压力—时间曲线的斜率基本

无变化。粳米和糯米的形状大致相同,短阔浑圆,类似于椭圆,且谷壳与糙米之间有一定的空隙,试验起始阶段,探头接触到外谷壳,谷壳主要由粗纤维和二氧化硅组成,质地坚硬^[4],此时曲线的斜率较低,随着探头的下压,谷壳被挤压直至与糙米接触,此时曲线斜率逐渐增大,通过 origin 软件拟合计算,三种稻谷的曲线斜率都在 18.66 ± 0.19 以内,说明从探头将谷壳挤压至与糙米接触到糙米出现裂纹时的三种稻谷的力学性能基本相同。

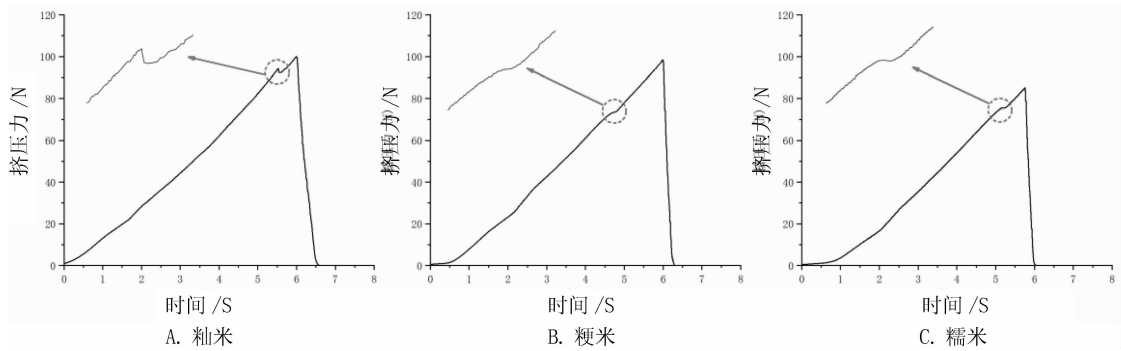


图 2 挤压力—时间特征曲线

图 3 为 0.6 mm 压距下三种稻谷及脱壳后的糙米腹部图,籼米的内颖和外颖之间结合力较强,无明显断裂,粳米和糯米此时内外颖之间在长轴方向除末端芒附近,已基本断裂,连接处缝隙不大。从三种稻米的糙米表面图可以看出,在试验过程中,糙米中心处厚度最大,为主要受力点^[16],由于糙米表面的

麸皮层以纤维为主,使糙米具有一定的韧性,因此籼米和粳米的中心处在挤压力的作用下逐渐产生塑性变形^[17],由于胚乳内的淀粉颗粒形状不均匀,容易造成缺陷,在受到外加载荷时,由于缺陷处的应力集中,糙米内部率先形成内应力裂纹^[18],随着试验的进行,内部裂纹逐渐扩展,籼米的裂纹形式为长轴方

向,故图 2 中波峰形成的时间也较长,粳米裂纹形式为短轴裂纹,糯米籽粒颜色为乳白,内部裂纹无法观

察,根据对应的挤压力-时间特征曲线可以判断在内部形成了裂纹,未扩展至表面。

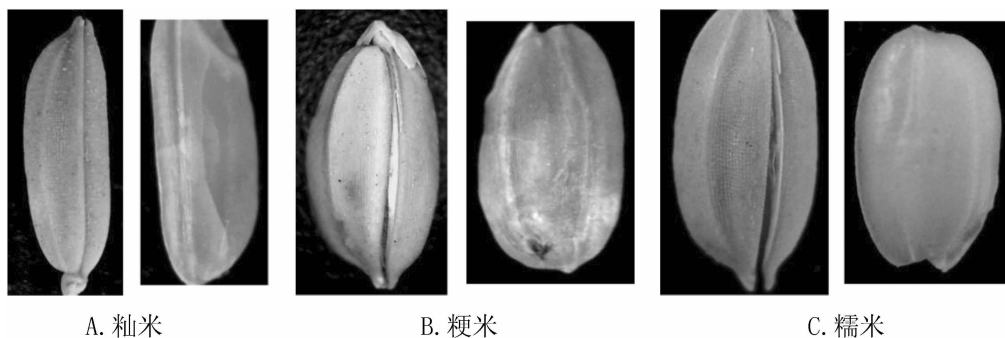


图 3 0.6 mm 压距下三种稻谷的显微图像

3.2 不同压距下稻谷的力学-结构特性

三种稻谷在 0.1 mm/s 速率,无泡水,无加热,不同压距条件下的峰值力-压距散点及拟合曲线见图 4,根据试验结果,稻谷所受的挤压峰值力与压距基本呈线性关系,线性拟合方程为:

籼米: $F_p = 176.77x$ ($R^2 = 99.8\%$, R^2 为相关指数)

粳米: $F_p = 157.03x$ ($R^2 = 99.6\%$)

糯米: $F_p = 153.75x$ ($R^2 = 99.9\%$)

从拟合方程可以看出随着压距的增大,三种稻谷所受的峰值力逐渐增大,且峰值力大小始终为:籼米 > 粳米 > 糯米,并且随着压距的增大,三种稻谷之间的峰值力之差逐渐增大。

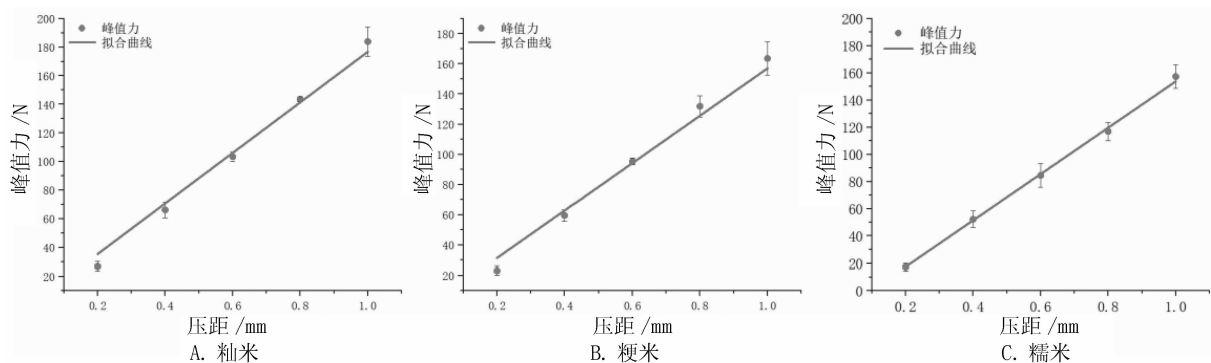


图 4 三种稻谷的挤压峰值力-压距散点图及拟合曲线

图 5 为 1 mm 压距下三种稻谷及其糙米的腹部图,结合图 3 可以发现籼米外壳随着压距的增大无明显变化,而内部的糙米表面的塑性变形区域会随着压距的增大而增大,裂纹形式为长轴和短轴,但糙米未断裂;粳米的外壳在 1 mm 压距下已基本断裂,

糙米表面塑性变形程度较高,且横向裂纹不断扩展直至籽粒断裂;糯米外壳内外颖连接处的开口随着压距的增大逐渐延伸至芒,接近完全断裂,糙米随着压距的增大被压缩,直至失去承载能力,在短时间内形成多条裂纹,且向四周逐渐扩展,籽粒完全断裂。

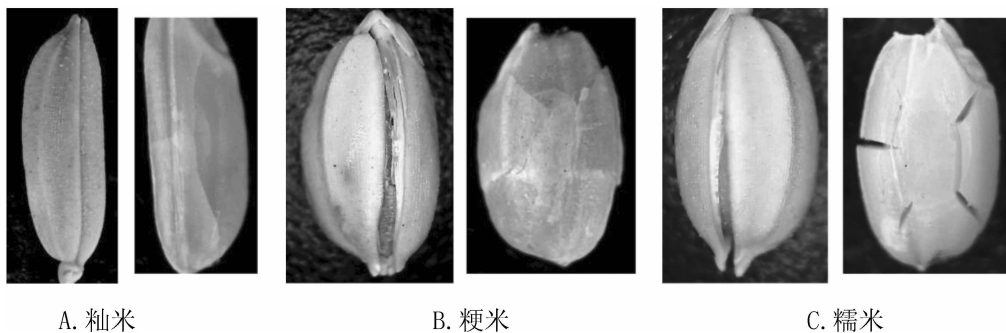


图 5 1 mm 压距下三种稻谷的显微图像

3.3 不同速率下稻谷的力学—结构特性

0.6 mm 压距,无泡水,无加热,不同速率条件下,三种稻谷的峰值力—压距点线图如图 6 所示,随

着速率的增加,三种稻谷的峰值力都在一定范围内变化,说明速率对稻谷所受的挤压峰值力无明显影响。

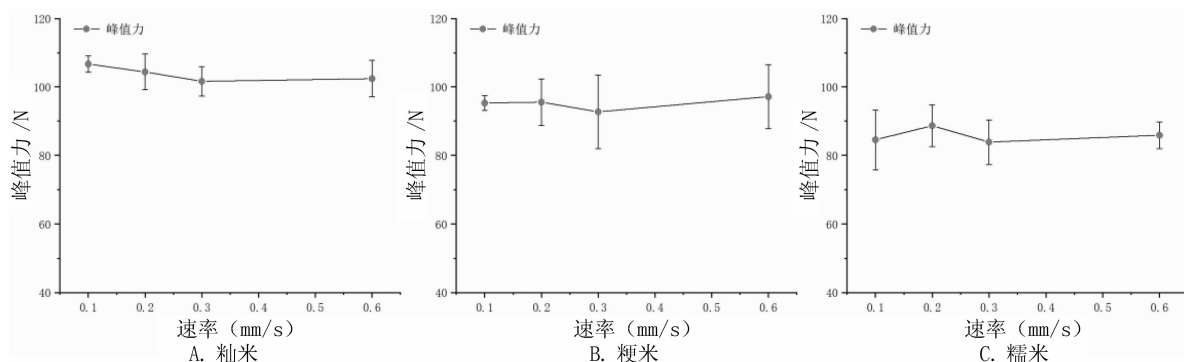


图 6 三种稻谷的峰值力-速率特征点线图

图 7 表明,速率增大的情况下,三种糙米表面塑性变形程度增加,但裂纹在短时间内未形成,籼米稻

壳仍未有明显变化,粳米和糯米稻壳在高速率下稻壳开口增大。

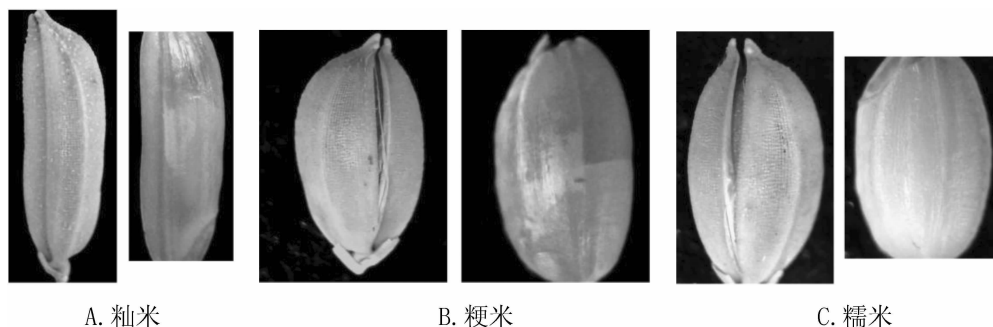


图 7 0.6 mm/s 速率下三种稻谷的显微图像

3.4 不同湿度下稻谷的力学-结构特性

图 8 为 0.6 mm 压距,0.1 mm/s 速率,无加热,不同浸泡时间下稻谷的峰值力-浸泡时间特征散点图及拟合曲线,根据试验所得 5 个浸泡时间下稻谷的峰值力,稻谷所受挤压峰值力与浸泡时间为幂函数关系,根据公式 $Y = ax^b + c$ 对原始数据图像进行拟合,所得方程如下:

$$\text{籼米: } F_p = -16.69x^{0.3} + 99.99 (R^2 = 99.3\%)$$

$$\text{粳米: } F_p = -26.57x^{0.27} + 95.3 (R^2 = 99.6\%)$$

$$\text{糯米: } F_p = -17.4x^{0.35} + 84.53 (R^2 = 99.4\%)$$

三种稻谷所受峰值力都会随着浸泡时间的增加而减小,拟合公式表明含水率对粳米的所受峰值力影响最大,不同稻谷力学性能的变化趋势不同主要是因为主要化学成分(直链淀粉和支链淀粉以及蛋白质)含量不同所导致的^[19],随着浸泡时间的增加,稻谷在单位时间内吸收的水分逐渐减少,峰值力随之逐渐减小。

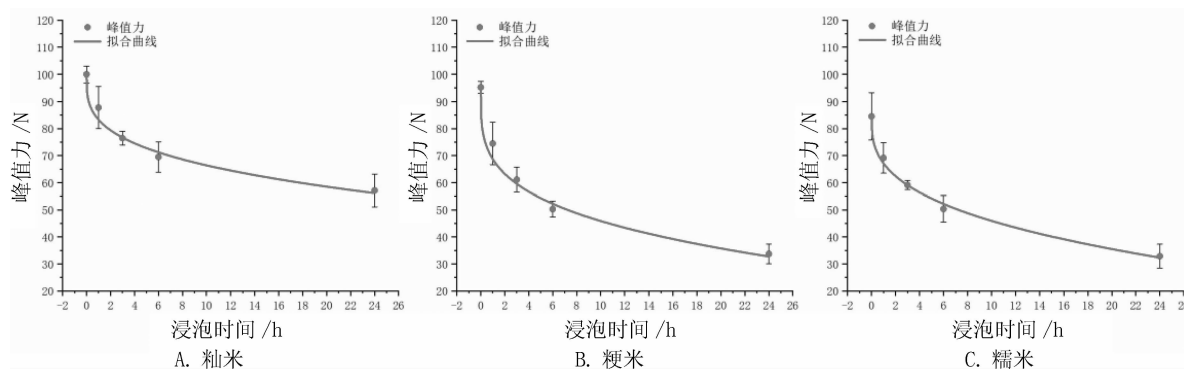


图 8 三种稻谷的峰值力-浸泡时间特征散点及特征曲线

图 9 为试验后所拍摄的三种稻谷的显微图像, 籼米稻壳在浸泡后脆性增大, 在挤压作用下稻壳开裂, 并且糙米表面塑性变形程度增大, 塑性变形区域长轴方向上出现局部断裂, 周围存在多道长轴裂纹;

结合挤压力—时间特征曲线上波峰的出现和显微图像, 粳米和糯米表面随着含水率的增加, 出现了吸湿性裂纹, 裂纹形式为横向断裂^[20], 在挤压作用下, 可判断粳米产生长轴裂纹, 糯米未产生应力裂纹。

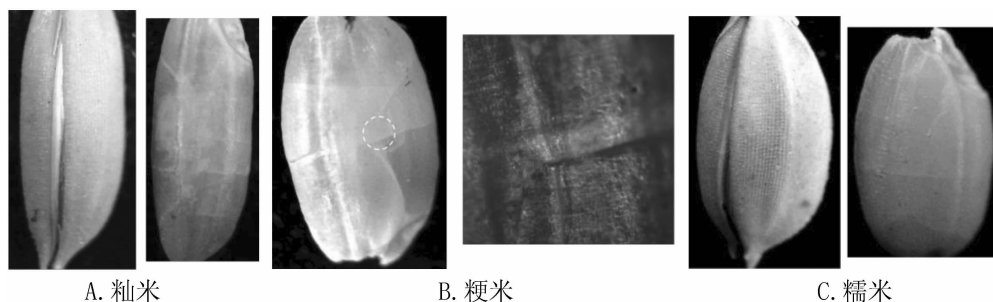


图 9 浸泡 6 h 下三种稻谷的显微图像

3.5 不同温度的稻谷的力学-结构特性

三种稻谷在 0.6 mm 压距, 0.1 mm/s 速率, 无泡水, 不同温度条件下的峰值力-温度散点及拟合曲线图见图 10, 籼米和糯米在 120 °C 之前, 随着温度的上升, 所受峰值力小幅增加, 温度上升到 150 °C, 所

受峰值力大幅减少, 可用玻璃化转变理论解释, 玻璃化转变指稻米因受热发生从玻璃态向橡胶态的转变^[21], 橡胶态下胚乳内产生裂纹, 导致稻谷承载能力降低, 粳米发生玻璃化转变的温度比籼米和糯米小。

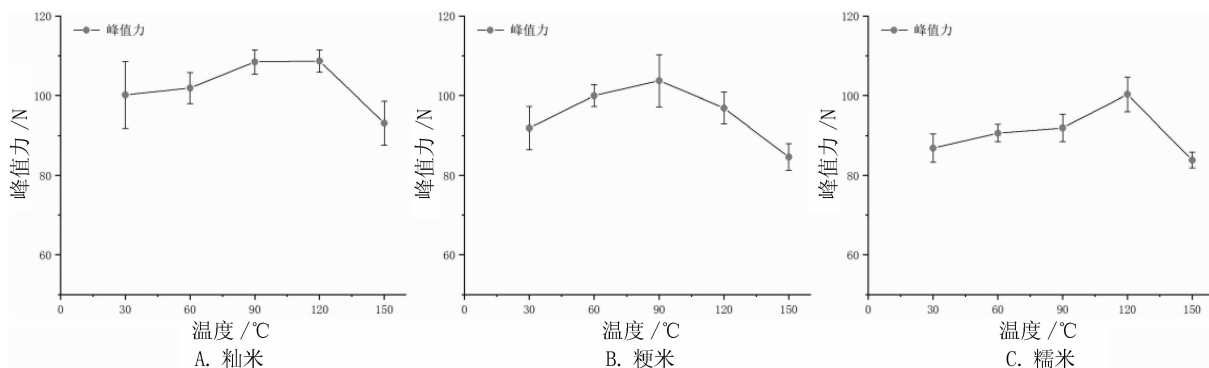


图 10 三种稻谷的峰值力-温度特征点线图

图 11 为 150 °C 下籼米和粳米的显微图像, 籼米稻壳在高温加热及试验后结构仍未发生明显变化, 其内糙米表面出现长轴及短轴裂纹, 且色泽由亮白

变为焦黄, 粳米表面色泽变化更为明显, 且表面出现纵横交错的裂纹, 糯米无明显变化。



图 11 150 °C 下两种稻谷的显微图像

4 结论

通过质构仪压缩试验, 得出了挤压力—时间曲

线, 并结合显微图像, 得出了以下结论:

籼米结构为细长型, 且谷壳与糙米基本贴合, 其挤压力—时间曲线基本无斜率变化, 粳米和糯米外形

类似于椭圆,谷壳与糙米中间存在空隙,由于谷壳质地较硬,其挤压力-时间特征曲线在起始阶段斜率较低。粳糙米和粳糙米色泽亮白,可观察到受挤压后中心区域有明显的塑性变形,粳米的裂纹形式为长轴,粳米的裂纹形式为短轴,糯糙米胚乳内产生裂纹,由于色泽乳白,无法观察到未延伸至表面的裂纹。

三种稻谷所受挤压峰值力及其差值随着压距的增大而增大,且始终为:粳米>粳米>糯米。随着压距的增大,粳米谷壳未出现明显变化,粳糙米塑性变形区域增大,首先出现长轴裂纹,随后延伸至短轴,未出现断裂;粳米和糯米谷壳的破坏程度增大,粳糙米表面塑性变形区域增大,裂纹形式为短轴,糯糙米在1 mm压距下被压扁,迅速失去承载能力,裂纹扩展直至断裂。速率对三种稻谷的力学-结构性能无明显影响。

随着含水率增大,三种稻谷所受峰值力逐渐减小,粳米峰值力降幅最大,随着浸泡时间的增加,稻谷趋近饱和,含水率及力学性能无明显变化。粳米谷壳浸泡后受压出现断裂,表面塑性变形程度增大,且出现短轴裂纹,粳米和糯米出现吸湿性裂纹,形式为短轴方向,粳米受压后出现长轴裂纹。

随着温度的上升,三种稻谷所受峰值力小幅上升,直至出现玻璃化转变,粳米和糯米在150℃转变为橡胶态,出现裂纹,峰值力大幅下降。粳米在温度大于90℃时,发生玻璃化转变,所受峰值力下降。且150℃下粳米和粳米色泽由亮白变焦黄,粳米变化更明显。

参考文献:

- [1] 郑红明. 稻米市场稳“定”了:稻谷产量或连续10年超2亿吨[N]. 粮油市场报,2020-11-24(A03).
- [2] 国粮局等三部门力促粮油加工业节粮减损[J]. 粮食与饲料工业,2014(06):68.
- [3] 林家永,谭云,陈文雅. 2018年我国稻谷加工科研回顾与展望[J]. 粮油食品科技,2019,27(03):1-8.
- [4] 常光宝. 水稻谷粒的力学性能及脱粒损伤机理研究[D]. 江苏大学,2009.
- [5] 王显仁,李耀明,徐立章. 水稻谷粒的机械损伤机理及试验[J]. 农机化研究,2007(12):141-143+147.
- [6] 李业波,曹崇文,杨俊成. 水稻缓苏的理论和实验研究[J]. 农业机械学报,1997:55-58.
- [7] 李阳. 基于稻谷力学特性胶辊磨谷机工作参数优化[D]. 河南工业大学,2019.
- [8] Prasad S, Gupta C P. Behavior of paddy grains under quasi-static compressive Loading [J]. Transactions of the ASAE, 1973, 16(2):328-330.
- [9] Kamst G F, Bonazzi C, Vasseur J, et al. Effect of deformation rate and moisture content on the mechanical properties of rice grain[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1):145.
- [10] 丁林峰,李耀明,徐立章. 稻谷压缩试验的接触力学分析[J]. 农机化研究,2007(12):112-115.
- [11] 严晓婕,程绪铎. 稻谷籽粒压缩特性的实验研究[J]. 粮食储藏,2014,43(01):21-25.
- [12] 程绪铎,高梦瑶,杜小翠,严晓婕,冯家畅. 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(01):6-10.
- [13] 赵霹雳. 稻谷加工环节中损失浪费调查及其影响要素的初步研究[D]. 武汉轻工大学,2018.
- [14] Chen P Y, Jia F G, Liu H R, et al. Effects of feeding direction on the hulling of paddy grain in a rubber roll huller [J]. Biosystems Engineering,2019, 183(C):196-208.
- [15] 杨柳,杨腾宇,范雨超,等. 稻米籽粒挤压力学-破碎特性研究[J]. 武汉轻工大学学报,2021,40(01):47-53.
- [16] 任祖方,许乔洛,吴杰,任奕林. 稻谷的机械力学特性试验[J]. 湖北农业科学,2012,51(21):4880-4883.
- [17] 崔帆. 糙米碾白破碎机理研究[D]. 河南工业大学,2019.
- [18] 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(04):1-7.
- [19] 肖威. 常温下稻米湿应力场物理参数及裂纹机理的试验研究[D]. 东北农业大学,2007.
- [20] 白士刚,赵宏伟,贾富国. 糙米吸湿裂纹的断裂力学机制[J]. 食品工业,2020,41(09):273-275.
- [21] 李阳. 稻谷吸附解吸和玻璃化转变对裂纹的影响研究[D]. 吉林大学,2016.