

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.025

糙米三点弯曲破碎力学性能试验分析*

李毅念 徐小琴 丁为民

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

【摘要】 分别以糙米的腹部、背部作为承压面,对糙米的三点弯曲破碎力学性能进行了测试。测试结果表明,籽粒腹部、背部的三点弯曲破碎力和破碎力的分布特性存在一定的差异性,即腹部作为承压面的破碎力分布区域较分散,呈现多峰分布,而背部作为承压面的破碎力呈现集中分布的特性;腹部作为承压面的抗弯强度和弹性模量均大于背部,而其断裂能却小于背部。糙米的加工品质与其三点弯曲破碎力学性能之间亦存在一定的相关关系。

关键词: 糙米 腹部 背部 力学性能 加工品质

中图分类号: TS210.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0121-04

Experiment Analysis on Three-point Bending Breaking Force of Brown Rice

Li Yinian Xu Xiaoqin Ding Weimin

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract

Three-point bending breaking force for ventral and dorsal side of brown rice was measured individually. Average kernel breaking force (the force required to break a brown rice kernel in three-point bending) between ventral side and dorsal side were different, and kernel-to-kernel breaking force distributions were also quite different. The breaking force distribution for ventral side tended to be multi-peak, but that for dorsal side tended to be single-peak. The bending breaking strength and elastic modulus for ventral side were more than those for dorsal side, but the fracture energy for ventral side was less than that for dorsal side. On the other hand, the rice processing quality indexes were correlated to the mechanical properties of rice.

Key words Brown rice, Ventral side, Dorsal side, Mechanical properties, Processing quality

引言

对稻谷籽粒力学性能进行测试与分析的目的是建立稻谷籽粒的力学性能与其加工品质、籽粒的裂纹特性之间的相关关系。已有研究证明,糙米的整精米率与籽粒抵抗三点弯曲力的相关性较大,与籽粒在两平面间的压缩性能相关性较小^[1]。Siebenmorgen等^[2]研究表明,糙米的整精米率与籽粒中破碎力强度大于20 N的百分率密切相关,即此百分率越大稻谷的加工整精米率越大。研究结果发

现,裂纹籽粒干燥时间越长,其弯曲强度和破碎能量越小^[3];干燥影响糙米的破碎力分布,并且干燥后的保持时间对籽粒的破碎力分布也有影响^[4]。Kamst等^[5]以糙米径向压缩强度代替籽粒拉伸强度的基础上,研究证明糙米组织的拉伸强度远远低于压缩强度^[6]。国内对稻谷籽粒力学性能方面的研究现阶段仍然不多,主要有江苏大学李耀明等^[7]对稻谷籽粒的力学性能与其收获时的损伤之间相关关系的研究。

本文对糙米的三点弯曲破碎力进行试验,并分析其与加工品质之间的相关关系。

收稿日期:2009-08-17 修回日期:2009-10-19

* 南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ08029)、南京农业大学SRT计划资助项目(0915A24)、南京农业大学工学院科研启动基金和江苏省农机局基金资助项目(gxz09012)

作者简介:李毅念,讲师,主要从事农产品加工及其品质研究,E-mail:liyinian@163.com

通讯作者:丁为民,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与设施农业研究,E-mail:wmding@njau.edu.cn

1 材料与方法

试验材料为宁粳3号、武育粳和镇稻8号3个品种,均为晚季粳稻,前两品种稻谷于2008年产自江苏省盐城市的上海市海丰农场,镇稻8号产自南京农业大学江浦农场,收获时间为2008年11月,收获后在低温环境下进行贮藏5个月,然后再进行试验。

稻谷籽粒含水率的测试方法采用 ASAE Standards 方法^[8]。

抗弯折断力学性能试验采用三点弯曲测试方法,为了能够使糙米在宽度方向(即腹部—背部方向)固定进行三点弯曲破碎力测试,在试验装置宽3.4 mm的槽两端加工出三角形的型槽,便于糙米腹部或背部作为承压面进行测试,试验装置结构示意图如图1所示。使用质构仪对籽粒的力学性能进行测试,质构仪型号是 TMS-PRO(美国 FTC 公司),设定压头宽为1.2 mm,长度为10 mm,压头加载速度为30 mm/min。试验前先剥去籽粒外部的稻壳,再分别以每个品种糙米的腹部、背部作为承压面进行三点弯曲破碎力学性能测试。测试籽粒数量各200粒以上,分析腹部、背部破碎力的平均值和每个受力段籽粒个数的分布。

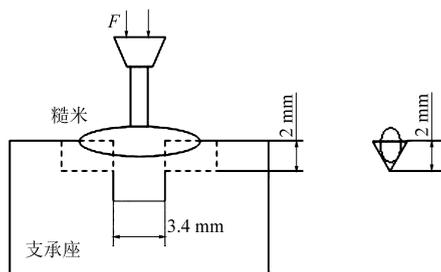


图1 糙米三点弯曲破碎力测试试验装置
Fig.1 Experimental test device for a brown rice under three-point bending

根据国标 GB/T5503—2009^[9]对稻谷的加工品质进行了试验。对3个品种稻谷籽粒的加工品质指标进行了测试,稻谷加工设备采用 JLMJ 砻米机(上

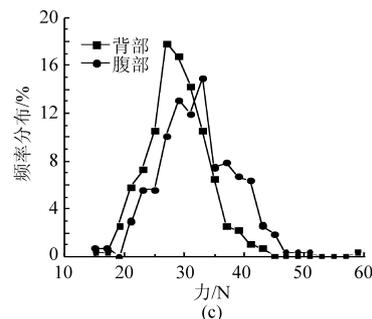
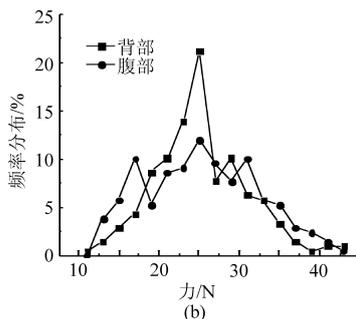
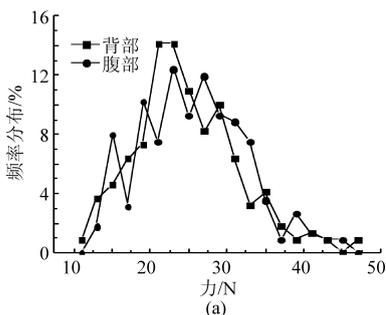


图3 糙米籽粒腹部、背部三点弯曲破碎力分布特性

Fig.3 Three-point bending break force distribution for ventral side and dorsal side of the Ning-jing 3, Wu-yu-jing and Zhen-dao 8 brown rice
(a) 宁粳3号 (b) 武育粳 (c) 镇稻8号

海嘉定粮油检测仪器厂),加工试验时每次加工50 g以上稻谷籽粒,共重复4次,稻谷去壳以后得到糙米率,糙米碾米加工后得到整精米率和碎米率2个品质指标,碾米加工时间为3 min。

2 结果与讨论

2.1 三点弯曲破碎力分析

稻谷籽粒力学试验前,宁粳3号、武育粳和镇稻8号的含水率分别为19.47%、17.07%和14.53%。

糙米腹部、背部作为承压面的三点弯曲力-变形关系典型曲线如图2所示。

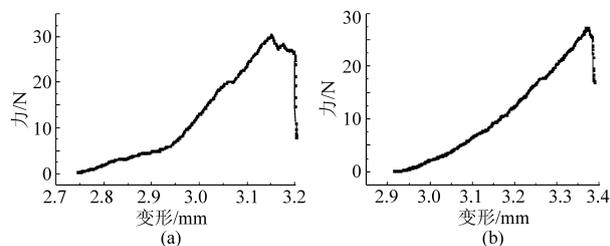


图2 典型糙米三点弯曲力-变形曲线
Fig.2 Typical strain-stress curve for three-point bending breakage of brown rice
(a) 腹部承压 (b) 背部承压

腹部和背部弯曲的力-变形曲线存在一定的差异。腹部作为承压面时,由于腹部组织强度较低,腹部首先产生压缩变形,腹部变形到一定程度后,变形量减小,背部在拉应力的作用下开始使籽粒产生弯曲变形,直至破碎。而背部作为承压面情况下,背部组织强度较大,在压头作用下压缩变形小,使籽粒直接产生弯曲变形,腹部在拉应力的作用下直至断裂。

3个品种糙米腹部、背部三点弯曲破碎力在不同区间段的分布情况如图3所示。

宁粳3号糙米腹、背部作为承压面的三点弯曲破碎力平均值分别为25.61 N和24.65 N,背部作为承压面的三点弯曲破碎力总体小于腹部作为承压面的三点弯曲破碎力,但从标准差角度分析差异性不

显著。然而,籽粒腹部、背部受力的三点弯曲破碎力分布却存在较大差异,腹部受力较大籽粒主要分布在 14~34 N 之间,且分布较均匀,呈现多峰分布特性;而背部受力的三点弯曲破碎力却相当集中,主要分布在 20~30 N 之间,其中主分布集中区域在 21~25 N 之间。

武育粳糙米腹部、背部受力的三点弯曲破碎力平均值分别为 25.39 N 和 25.14 N,背部作为承压面的三点弯曲破碎力总体小于腹部作为承压面的三点弯曲破碎力,但从标准差角度分析差异性不显著。然而与宁粳 3 号腹部、背部受力三点弯曲破碎力分布相似,腹部受力较大区域主要集中在 16~32 N 之间,且分布较均匀,而背部受力也相对集中在 18~30 N 之间,其中有一部分频率超过 20% 的糙米集中在 24~26 N 之间,分布特性接近正态分布。

镇稻 8 号糙米腹部、背部受力的三点弯曲破碎力平均值分别为 31.97 N 和 28.63 N,背部作为承压面的三点弯曲破碎力平均值小于腹部的三点弯曲破碎力平均值,并且差异性较大。腹部三点弯曲破碎力分布主要集中在 26~34 N,背部三点弯曲破碎力分布主要集中在 24~34 N,然而分布形态却存在较大差异,腹部三点弯曲破碎力分布相对较分散,呈现多峰分布特性,背部三点弯曲破碎力分布相对较集中。

以腹部作为承压面时,腹部受压应力,背部受拉应力;而以背部作为承压面时,背部受压应力,腹部受拉应力。总体来说,腹部受压,背部受拉应力情况下的强度大于背部受压,腹部受拉应力的情况。由此可以推测糙米腹部、背部的结构强度存在一定的差异,即糙米腹部的结构强度小于背部的结构强度。

糙米腹部结构强度较小、质地较软,而背部结构强度较大,质地坚硬,因此腹部作为承压面时,压头首先对腹部压缩变形,当压缩到一定程度时,背部开始承受的拉应力迅速增大,背部组织开始屈服,断裂。而背部作为承压面时,压头直接作用于背部,背部在压头的作用下,压缩变形小,因此籽粒迅速在腹部产生拉应力,腹部在本身结构强度较小情况下屈服断裂,然后向背部扩展,背部开始承受拉应力,直至背部断裂,这一点可由腹部作为承压面时的压缩变形小于背部作为承压面时的压缩变形来印证。由于背部组织相对于腹部组织质地坚硬、刚度小,因此腹部、背部作为承压面时作为相对面受到拉应力时,刚度存在差异,从而造成籽粒断裂时的变形存在差异,即背部作为承压面时的断裂变形大于腹部作为承压面时的断裂变形。

背部与腹部作为承压面的三点弯曲破碎力分布特性存在的差异性主要表现在:腹部三点弯曲破碎

力分布峰值低于背部,且分布相对较平坦,呈现多峰分布特性;背部破碎力分布峰值较高,且陡峭,这与测试的三点弯曲破碎力的标准差是一致的,即腹部作为承压面的三点弯曲破碎力的试验标准差大于背部。

2.2 其他相关力学性能的分析

为了研究计算稻谷的力学指标,分别选取了 40 粒稻谷测量其外形尺寸。糙米的相关力学性能指标主要有三点弯曲破碎强度、籽粒横截面的弹性模量和断裂能。

糙米三点弯曲破碎强度为

$$\sigma = \frac{FLC}{4I}$$

其中

$$C = B/2$$

$$I = 0.049BD^3 = \frac{\pi DB^3}{64}$$

式中 σ ——抗弯破碎强度,Pa

F ——弯曲破碎力,N

L ——两个支承点之间的距离,取 0.003 4 m

C ——糙米纵向中心轴到稻谷外层的距离,m

B ——横截面长轴长度或籽粒宽度,m

I ——惯性矩,m⁴

D ——糙米的厚度或横截面短轴长度,m

经测定和计算,宁粳 3 号 $C = 1.455 8$ mm, $I = 2.588 4 \times 10^{-12}$ m⁴;武育粳 $C = 1.542 9$ mm, $I = 3.202 0 \times 10^{-12}$ m⁴;镇稻 8 号 $C = 1.490 8$ mm, $I = 2.691 5 \times 10^{-12}$ m⁴。

糙米弹性模量

$$E = \frac{FL^3}{48\delta}$$

式中 E ——弹性模量,Pa

δ ——稻谷的变形,m

糙米的断裂能

$$G = \frac{\int Fd\delta}{A}$$

其中

$$A = \frac{\pi BD}{4}$$

式中 G ——断裂能,J/m²

$\int Fd\delta$ ——力-变形曲线下的面积

A ——断裂面的面积,m²

经计算,宁粳 3 号 $A = 4.885 5 \times 10^{-6}$ m²;武育粳 $A = 5.380 4 \times 10^{-6}$ m²;镇稻 8 号 $A = 4.844 1 \times 10^{-6}$ m²。

根据试验的数据计算所得三点弯曲破碎强度、籽粒横截面的弹性模量和断裂能如表 1 所示。

由于腹部、背部结构强度之间的差异,因此糙米腹部、背部作为承压面承受压力时,其结构类似于两

表1 糙米三点弯曲破碎力学性能

Tab.1 Mechanical properties for brown rice under three-point bending

品种	承压面	三点弯曲破碎力	籽粒厚度	籽粒宽度	变形均值	弯曲破碎强度	弹性模量	断裂能
		F/N	D/mm	B/mm	δ/mm	σ/MPa	E/MPa	$G/J \cdot m^{-2}$
宁粳3号	腹部	25.61 ± 6.93	2.14 ± 0.07	2.91 ± 0.12	0.23	12.24	35.22	602.82
	背部	24.65 ± 6.79			0.38	11.79	20.52	958.77
武育粳	腹部	25.39 ± 7.02	2.22 ± 0.10	3.09 ± 0.11	0.23	10.40	28.22	542.59
	背部	25.14 ± 5.76			0.27	10.30	23.08	630.68
镇稻8号	腹部	31.97 ± 6.27	2.07 ± 0.08	2.98 ± 0.07	0.34	15.05	28.58	987.51
	背部	28.63 ± 4.84			0.43	13.48	20.46	1048.93

种不同结构强度材料的复合板,其抗弯破碎强度也存在差异,总体来说腹部作为承压面的抗弯破碎强度大于背部作为承压面的抗弯破碎强度。这与腹部、背部作为承压面时的三点弯曲破碎力大小关系相一致。糙米腹部、背部作为承压面时的弹性模量存在的差异性较大,即腹部作为承压面时的弹性模量大于背部作为承压面时的弹性模量,而造成背部作为承压面的弹性模量较小的主要原因与背部作为承压面时的三点弯曲破碎力较小和变形量较大有关系,使其弹性模量降低。而断裂能的差异性与上述情况相反,其背部作为承压面的断裂能大于腹部作为承压面的断裂能。糙米的断裂能不仅与籽粒的破碎力有关,而且与其在承受三点弯曲破碎力时的变形有关,因此籽粒背部作为承压面时,要使籽粒破碎,单位横截面积需要更大的断裂能量。

2.3 加工品质指标分析

稻谷加工品质指标糙米率、整精米率和碎米率试验结果如表2所示。

表2 稻谷籽粒加工品质指标

Tab.2 Processing quality indexes of rice %

品种	糙米率均值	整精米率均值	碎米率均值
宁粳3号	83.75 ± 0.45	61.94 ± 1.77	14.27 ± 1.46
武育粳	84.55 ± 0.29	47.40 ± 2.52	29.30 ± 2.64
镇稻8号	81.33 ± 0.40	72.29 ± 0.98	1.04 ± 0.21

3种稻谷品种的籽粒经砻谷加工后糙米率较接近,均大于81%,武育粳的糙米率略大于宁粳3号,而镇稻8号最小。糙米经碾米加工后得到精米,然而宁粳3号的整精米率大于武育粳的整精米率接近14%,同时宁粳3号的碎米率比武育粳的碎米率约低15%;镇稻8号的整精米率最大,达到72%以上,比宁粳3号约大11%,且破碎率仅为1.04%。

由稻谷加工品质特性和糙米的力学特性可知,糙米的三点弯曲破碎力、弯曲破碎强度和断裂能越大其加工整精米率越大。加工整精米率较高的镇稻

8号糙米籽粒腹部、背部三点弯曲破碎力和弯曲破碎强度差异性较大,而宁粳3号和武育粳糙米籽粒的腹部、背部三点弯曲破碎力和弯曲破碎强度依次降低,其加工整精米率也依次降低。武育粳糙米其弯曲变形量均值最小,且腹部、背部弯曲变形量的差值也最小,其加工整精米率最小,而弯曲变形量均值较大和腹部、背部变形量差异性较大的糙米品种其加工整精米率相对较大。碾米加工过程中糙米主要受到两种作用力,籽粒间的摩擦擦离和碾削作用,即籽粒间的摩擦力和砂辊的快速碾削力^[10],碾米加工过程中的机械物理作用非常复杂,其完整的理论体系至今还没有建立,因此可以推测糙米碾白过程中籽粒断裂可能与其在垂直于纵轴方向受到一定的弯曲作用力使其折断有关。碾米加工过程中籽粒三点弯曲破碎力大,即籽粒能抵抗加工过程中较大的应力作用,弯曲变形量大即籽粒的刚度较大,而且糙米籽粒腹部、背部三点弯曲破碎力和弯曲变形量差异越大也有利于提高籽粒的加工整精米率。

3 结论

(1) 糙米腹部、背部分别作为承压面的三点弯曲破碎力存在一定的差异,特别是对于籽粒腹部、背部三点弯曲破碎力的分布存在较大差异,腹部的三点弯曲破碎力分布呈现多峰分布,而背部三点弯曲破碎力分布呈现单峰分布,且相对较集中。

(2) 糙米腹部、背部分别作为承压面的三点弯曲破碎力学性能也存在一定的差异,腹部的三点弯曲破碎力、弹性模量和弯曲破碎强度均大于背部,而背部的变形挠度和断裂能均大于腹部,因此籽粒腹部的结构强度要小于背部的结构强度。

(3) 糙米的力学特性与其加工品质存在一定的相关关系,糙米的三点弯曲破碎力、弯曲破碎强度和断裂能越大其加工整精米率越大,糙米籽粒腹部、背部三点弯曲破碎力和弯曲变形量综合地对糙米的碾米加工特性产生影响。

- 生命科学版, 2005, 31(5):518~523.
- Liu Yi, Xu Haiming, Cheng Fangmin, et al. Comparison of DSC thermal curves and RVA properties between lipid free and non-lipid free in milled rice flours[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2005, 31(5): 518~523. (in Chinese)
- 7 雷玲, 孙辉, 姜维莉, 等. 稻谷在储藏中糊化特性变化的研究[J]. 粮油食品科技, 2007, 15(5): 6~8.
Lei Ling, Sun Hui, Jiang Weili, et al. Changes of the gelatinizing behavior on storing rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2007, 15(5): 6~8. (in Chinese)
- 8 Zhou Z K, Robards K, Helliwe U S, et al. Effect of rice storage on pasting properties of rice flour[J]. Food Research International, 2003, 36(6): 625~634.
- 9 舒庆尧, 吴殿星, 夏英武, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征与食用品质的关系[J]. 中国农业科学, 1998, 31(3): 1~4.
Shu Qingyao, Wu Dianxing, Xia Yingwu, et al. Relationship between RVA profile character and eating quality in *Oryza sativa* L[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1998, 31(3): 1~4. (in Chinese)
- 10 王帅, 李新华, 谢宏. 粳稻米淀粉糊化性质及其级分的研究[J]. 粮油加工, 2006(12): 62~64.
- 11 Sirisoontsrslak P, Noomhorm A. Changes in physicochemical and sensory properties of irradiated rice during storage[J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 282~289.
- 12 Mariotti M, Zardi M, Lucisano M, et al. Influence of the heating rate on the pasting properties of various flours[J]. Starch, 2005, 57(11): 564~572.

(上接第 124 页)

参 考 文 献

- 1 Lu R, Siebenmorgen T J. Correlation of HRY to selected physical and mechanical properties of rice kernels[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(3): 889~894.
- 2 Siebenmorgen T J, Qin G. Relating rice kernel breaking force distributions to milling quality[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 223~228.
- 3 Zhang Q, Yang W, Sun Z. Mechanical properties of sound and fissured rice kernels and their implications for rice breakage [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(1): 65~72.
- 4 Siebenmorgen T J, Qin G, Jia C. Influence of drying on rice fissure formation rates and mechanical strength distributions[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(5): 1 835~1 841.
- 5 Kamst G F, Vasseur J, Bonazzi C, et al. A new method for the measurement of the tensile strength of rice grains by using the diametral compression test[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(4): 227~232.
- 6 Kamst G F, Bonazzi C, Vasseur J, et al. Effect of deformation rate and moisture content on the mechanical properties of rice grains[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 145~151.
- 7 李耀明, 王显仁, 徐立章, 等. 水稻谷粒的挤压力学性能研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 56~59.
Li Yaoming, Wang Xianren, Xu Lizhang, et al. Study on compression properties of rice grains [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 56~59. (in Chinese)
- 8 ASAE Standards S352. 2—2003. Moisture measurement—unground grain and seeds[S].
- 9 GB/T5503—2009. 粮食、油料检验 碎米检验法[S].
GB/T5503—2009. Inspection of grain and oils-determination of broken kernels[S].
- 10 刘英. 谷物加工工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 191~195.
- 11 张洪霞, 马小愚. 稻米食用品质的力学指标主成分分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 90~94.
Zhang Hongxia, Ma Xiaoyu. Principal component analysis on taste quality of brown rice based on mechanical indexes of cooked rice grain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 90~94. (in Chinese)