

文章编号:1673-2383(2019)06-0070-05

网络出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1378.N.20191224.2120.024.html>

网络出版时间:2019-12-25 07:00

基于机械力作用的糙米显微结构分析

冯帅博,田 勇,曹宪周*,房凯文
(河南工业大学机电工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:为了研究糙米受机械力时应力裂纹的生成扩展机理,采用 TMS-PRO 质构仪分别测定心白、腹白、无垭白糙米的压缩力学特性,并对试验前和试验后的糙米进行切片显微观察。结果表明:无垭白糙米与腹白糙米能承受的压缩力均大于心白糙米,且无垭白糙米与腹白糙米能承受的压缩力相差不大。分析显微图像发现正常收获的糙米籽粒内部已经存在不连续微裂纹,在受到机械力作用后,糙米籽粒内部形成连续微裂纹,且以胚乳中心部位呈辐射状向表皮扩展。

关键词:机械力作用;显微观察;微裂纹

中图分类号:TS210.1

文献标志码:B

0 引言

糙米属于颖果,脱去颖壳后表面平滑有光泽,由种皮、谷皮、糊粉层、胚乳、胚、胚芽等组成。加工大米时大量的碎米都产生自碾米工序,待加工糙米存在的裂纹是造成加工浪费的主要原因之一。

由于机械作用在稻谷内部产生的内应力,导致在稻谷腹部产生裂纹并向背部扩展,形成横向裂纹而易于断裂破碎。徐立章等^[1]通过显微观察分析了稻谷应力裂纹的生成以及扩展机理,发现微裂纹(以下简称微裂纹)的产生是导致糙米加工后产生宏观裂纹的重要原因。李栋等^[2]通过扫描电子显微镜观察,发现经自然晾晒后的稻谷会产生自胚乳组织的中心部位向四周扩展应力裂纹。刘友明等^[3]通过扫描电镜观察了稻谷微裂纹的存在对稻谷在干燥后产生宏观裂纹会产生很大影响。崔帆等^[4]阐述了粮食受外载荷作用后所反映的力学特征及理化品质两方面特性与粮食破碎之间的关联性。李阳等^[5]通过

物性分析仪对稻谷外壳进行拉伸实验,测得稻谷外壳的力学特性参数,并结合稻谷外壳拉伸断裂裂纹处的显微图像分析稻谷外壳拉伸破坏过程。周显青等^[6]通过糙米的碾白试验得出随着糙米中不完善粒含量增加,糙出白率、碾白率升高,整精米率降低,碎米率升高。许启铿等^[7]采用三轴仪对小麦进行三轴压缩实验,得到小麦试样的应力-应变关系曲线并计算得到其弹性模量。张玉荣等^[8]将不同量的不完善粒小麦加入清理过的完善粒样品中测定其容重,结果表明,随着各类型不完善粒含量的增加,各级小麦样品的容重均呈降低趋势。Siebenmorgen 等^[9-10]通过分析糙米的压缩强度与整精米率的相关性以及三点弯曲力与整精米率的相关性,总结出糙米的三点弯曲力与整精米率相关性更大。Courtois 等^[11]采用图像分析的方法,对未经处理的稻谷样品进行破碎率测定和裂纹估计。Shimizu 等^[12]通过对不同品种谷粒样品进行先增加含水率再烘干的试验,然后对糙米裂纹进行了统计分析,并对裂纹的尺寸分布进行了分析。目前大多数研究都集中在不同的干燥工艺对糙米微裂纹的产生以及扩展的影响,却很少有学者报道糙米承受机械力时的微裂纹的生成扩展机理,因此,作者通过研究微观状态裂纹产生及扩展的机理,进而分析宏观状态下糙米籽粒产生机械应力时的断裂原因。

收稿日期:2019-05-21

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1600601);河南省科技攻关项目(172102210034);河南省教育厅科学技术研究重点项目(17A460009)

作者简介:冯帅博(1994—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为粮食机械。

*通信作者:曹宪周,教授,E-mail:xianzhoucao@126.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为来自安徽、江西以及广西 3 个省区的籼稻,这 3 种籼稻种植面积大,广泛用于加工和食用,品种名称分别为新隆梗 3 号、泰优 398 以及中研优 739,全部收获于 2018 年,手工剥壳,随机挑选符合试验要求的心白籽粒、腹白籽粒以及无垭白籽粒各 100 粒。

1.2 实验仪器

INSPECT F50 场发射扫描电子显微镜:美国 FEI 公司;TMS-PRO 质构仪:美国 FTC 公司;镀铬游标卡尺:成都成量工具集团有限公司;DHG-9030A 电热恒温鼓风干燥箱:南北设备集团;ZYJ-1000E 光电显微镜:上海兆仪光电科技有限公司。

1.3 水分含量测定

采用 ASAE Standards 法测试稻谷籽粒水分含量,测得试验样品水分含量为 14.2%。

1.4 糙米力学性能测定

采用质构仪对糙米进行挤压破碎试验。感

应单元为 500 N,接触起始力为 0.75 N,压缩速度为 5 mm/min。根据多次准备试验得到的结果,将心白籽粒、腹白籽粒和无垭白籽粒的变形量设置为 29%。该实验装置采用电脑安装相应的控制分析软件,然后通过软件直接读取并记录详细的试验数据。对每个产地的心白、腹白、无垭白籽粒进行 30 组压缩试验,数据取平均值。

1.5 糙米断面显微观察

采用光学电镜以及扫描电镜观察糙米籽粒断面微观结构。选择心白、腹白和无垭白 3 种籽粒进行挤压试验。使用手术刀沿籽粒开裂方向进行切片,放置在光学电镜以及扫描电镜中进行断面观察,使用扫描电镜时,还需要将样品放置在离子涂层溅射仪内,将样品表面溅射 99.999% 的纯金,观测样品的导电性。

2 结果与分析

2.1 糙米受挤压机械力分析

利用质构仪对 3 个不同产地的糙米进行挤压试验,得到了糙米的破碎力、硬度和破碎能,如表 1 所示。

表 1 糙米挤压试验结果

Table 1 Results of brown rice extrusion experiment

品种	水分含量/%	弹性模量/MPa	籽粒样式	变形度/%	破碎力/N	硬度/N	破碎能/J
泰优 398	14.2	26.52	心白	29	34.96	57.44	5.80
			腹白	29	72.98	88.54	10.06
			无垭白	29	73.08	91.53	10.69
中研优 739	14.2	25.49	心白	29	33.58	53.66	5.35
			腹白	29	70.09	85.73	9.85
			无垭白	29	71.36	87.52	9.98
新隆梗 3 号	14.2	21.48	心白	29	31.77	51.78	5.27
			腹白	29	69.76	84.38	9.05
			无垭白	29	70.85	85.98	9.18

由表 1 可知,以泰优 398 为例,心白颗粒的破碎力、硬度以及破碎能分别为 34.96 N、57.44 N、5.80 J;腹白颗粒的破碎力、硬度以及破碎能分别为 72.98 N、88.54 N、10.06 J;无垭白籽粒的破碎力、硬度以及破碎能分别为 73.08 N、91.53 N、10.69 J。腹白籽粒挤压力学指标与无垭白籽粒的挤压力学指标相差无几,而且两者的挤压力学指标都大于心白籽粒挤压力学指标。中研优 739 和新隆梗 3 号的心白、腹白、无垭白和泰优 398 的挤压力学规律一致。通过比较心白、腹白、无垭

白颗粒的挤压力学规律,可得出心白颗粒在糙米加工中极其容易破碎,是糙米加工破碎率的主要来源,减少糙米的心白率可以提高精米率。腹白颗粒和无垭白颗粒的挤压力学特性基本相同,能承受较大的挤压力。

运用 Minitab 对糙米受到挤压机械力进行差异显著性分析。原假设所有样本的均值都相等,备选假设至少有一个均值不同,显著性水平 $\alpha = 0.05$,对 3 种不同糙米损伤粒挤压破碎试验数据进行单因子方差分析,结果见表 2。

表 2 不同损伤糙米挤压破碎力方差分析
Table 2 Variance analysis of crushing force of brown rice with different damages

来源	自由度	SS	MS	F	P
因子	2	19 072.39	9 536.20	1 500.02	0.000
误差	57	362.37	6.36		
合计	59	19 434.76			

根据方差分析,得出 $P=0.000$,因此 3 种不同损伤糙米籽粒具有极其显著的统计学差异。

2.2 糙米未受机械力显微图像分析

对未受到机械力的糙米样品进行切片,然后放置在光学显微镜和扫描电子显微镜下进行断面观察,图 1 为糙米断面在光学显微镜下观测图片,图 2 为糙米断面在扫描电子显微镜下观测图片。

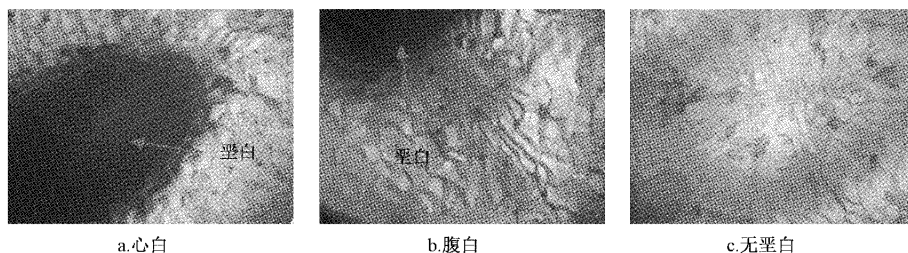


图 1 光学显微镜下的糙米断面图

Fig.1 Cross-section of brown rice observed by optical microscope

3 种籽粒的机械力学表现为心白籽粒挤压力最小,腹白籽粒与无垩白籽粒挤压力差别不大而且都大于心白颗粒。从图 1 可知,造成这种情况的原因主要是,糙米灌浆时期胚乳淀粉粒和蛋白质颗粒排列疏松而充气形成白色不透明部分,这些胚乳淀粉以及蛋白质颗粒积累不够密实,因此容易在心部造成垩白现象。糙米籽粒在受到机械力时,最先在心部产生微裂纹,然后以辐射状向表皮扩展。心白籽粒心部充满

了大量不透明的疏松物质,形成垩白粒,由于垩白不能承受较大的挤压作用力,因此在受到挤压力作用时,心部垩白处最先开始破碎形成裂纹,在局部造成应力集中,所以继续施加较小挤压力作用力,微裂纹就能扩展至表皮。腹白籽粒的垩白部分产生在籽粒腹部,心部与无垩白籽粒一样,积累紧密的胚乳淀粉以及蛋白质颗粒,因此腹白籽粒与无垩白籽粒能够承受几乎同样大小的挤压作用力。

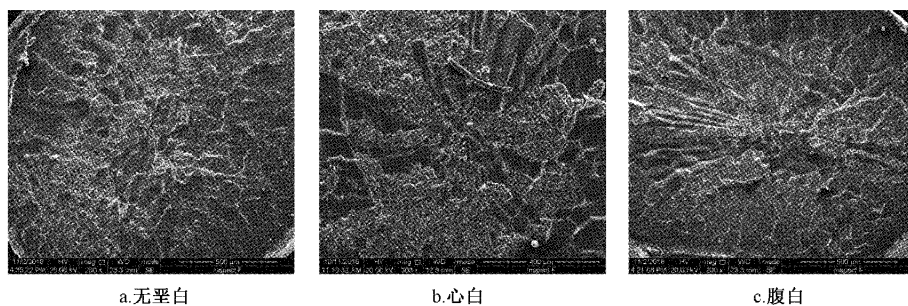


图 2 扫描电子显微镜下的糙米断面图

Fig.2 Cross-section of brown rice observed by scanning electron microscope

未进行挤压试验前,对糙米进行切片观察。糙米内部除了正常切片时形成的胚乳断面以及细胞断面,有些籽粒内部存在不连续微裂纹,如图 2 所示。在生长过程中,稻谷急剧受热或冷却,使籽粒的表面与内部膨胀或收缩,产生不均匀的应力错位,或者受外力撞击作用而产生不连续微裂纹^[13],这些不连续微裂纹,容易在以后的加工中因为疲劳损伤而快速形成连续不规则裂纹,造成糙米籽粒破碎。

2.3 糙米受挤压机械力显微图像分析

将受到质构仪挤压的糙米样品进行切片,然后放置在扫描电子显微镜中进行断面观察,图 3a 为放大 400 倍的糙米籽粒断面图,图 3b 为放大 200 倍的糙米籽粒断面图。

淀粉粒完全成熟后贮藏在稻谷的胚乳中,背部、中部、腹部的淀粉均为大小一致的多面体晶体,排列紧致,粒径较小^[14]。如图 3 所示,糙米内部断裂存在两种形式,一种是细胞间的断裂,

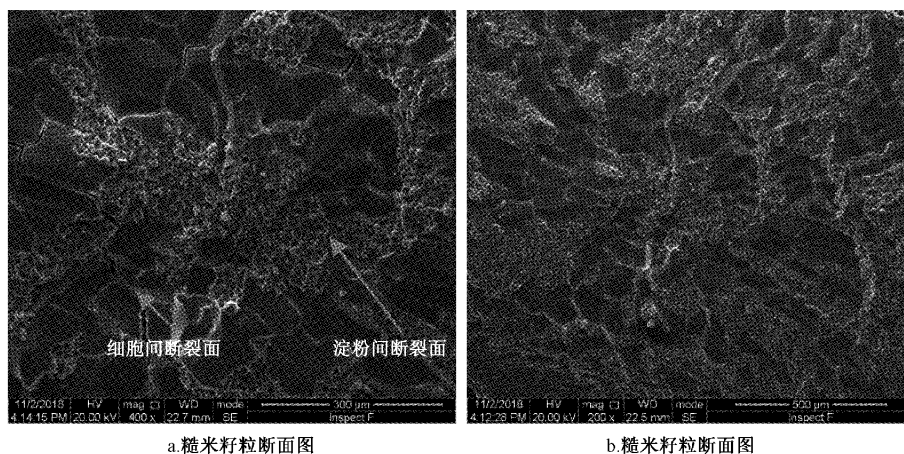


图3 受挤压机械力糙米籽粒不同放大倍数断面图

Fig.3 Cross-section of extruded brown rice with different magnification factors

一种是淀粉间的断裂。细胞之间的结合力大于淀粉间的结合力,因此,淀粉间断裂更容易发生^[15]。产生裂纹或断裂的颗粒,其应力裂纹呈辐射状向四周扩展,未发生断裂的颗粒,外力没有对胚乳造成破坏或产生有限的破坏,其内部淀粉颗粒排列紧致,断面处较为光滑,呈现较少的微裂纹。根据糙米的力学特性可以分析,挤压力越大,糙米受损越严重,表现为裂纹变长变宽,但是断裂裂纹图是相似的。

3 结论

对不同损伤程度的糙米粒可以承受的临界破裂力进行方差分析,得出不同损伤糙米粒的临界破裂力存在显著的差异性,心部存在垩白现象的糙米,相较于腹部存在垩白现象以及无垩白现象的糙米,其不能够承受较大挤压机械力,容易最先形成裂纹并断裂。在进行碾米机械机构优化时,需要充分考虑心白粒的力学特性。在进行糙米碾白过程中,需要根据糙米中心白粒的含量,调节碾白室空间结构及转子转速,以此改变糙米受力状况,从而减少糙米破碎率及提高精米出品率。

通过糙米的显微图像分析得出,糙米在未受到作用力时,籽粒内部已经存在不连续微裂纹,在承受挤压机械力过程中,微裂纹从中心点开始,将不连续微裂纹连接起来形成连续裂纹,或者产生新的连续微裂纹,并以辐射状向表皮扩展。糙米在碾米过程中断裂的主要原因是糙米在碾米之前内部结构已经发生破坏,因而降低了糙米力学性能,增加了糙米碾白破裂率。优化糙

米收割砻谷设备参数,减少糙米在收割和砻谷阶段的损伤,也可以大大提高精米率。

糙米碾白过程的破裂原因是极其复杂的,挤压破碎是糙米碾白过程中主要的破碎现象,下一步可以根据糙米受剪切力、弯曲力的力学特性开展研究,并通过对糙米破坏断面进行显微观测,然后利用分形理论对其裂纹生成规律进行更加深入的研究。

参考文献:

- [1] 徐立章,李耀明,王显仁.稻谷脱粒损伤的量化与检测方法[J].农业机械学报,2007,38(11):185-188.
- [2] 李栋,毛志怀.稻谷自然晾晒后显微结构分析研究[J].农业工程学报,2003,19(2):156-159.
- [3] 刘友明,谭军,赵思明,等.干燥对稻谷籽粒微观结构的影响研究[J].中国粮油学报,2004,19(4):5-8.
- [4] 崔帆,田勇,曹宪周.粮食颗粒力学特性与其破碎关联性研究进展[J].中国粮油学报,2018,33(12):142-146.
- [5] 李阳,李永祥,曹宪周,等.稻谷外壳拉伸力学性能实验研究[J].中国粮油学报,2018,34(1):1-4.
- [6] 周显青,郑超杰,张玉荣,等.糙米中不完善粒对其加工品质的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2012,33(6):22-26,36.
- [7] 许启铿,陈家豪,王录民.小麦力学参数的三轴压缩试验研究[J].河南工业大学学报

- (自然科学版), 2015, 36(5): 101-105.
- [8] 张玉荣, 陈赛赛, 周显青, 等. 不完善粒类型对小麦容重的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 51-55, 59.
- [9] SIEBENMORGE T J, QIN G, JIA C. Influence of drying on rice fissure formation rates and mechanical strength distributions [J]. Transaction of the ASAE, 2005, 48(5): 1835-1841.
- [10] SIEBENMORGEN T J, QIN G. Relating rice kernel breaking force distributions to milling quality[J]. Transaction of the ASAE, 2005, 48(1): 223-228.
- [11] COURTOIS F, FAESSEL M, BONAZZI C. Assessing breakage and cracks of parboiled rice kernels by image analysis techniques[J]. Food Control, 2014, 21(4): 567-572.
- [12] SHIMIZU N, HAQUE M A, KIMURA T. Measurement and fissuring of rice kernels during quasi-moisture sorption by image analysis[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 48(7): 98-103.
- [13] 李素梅, 沈金声. 稻谷爆腰产生的原因及对策[J]. 粮食与饲料工业, 2000(1): 20-21.
- [14] 张艳霞. 稻米直链淀粉含量与淀粉理化特性及品质的关系[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [15] 李毅念, 丁为民. 稻谷腹部、背部微观结构差异性分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(16): 474-475.

Microstructure Analysis of Brown Rice Based on Mechanical Force Action

FENG Shuaibo, TIAN Yong, CAO Xianzhou, FANG Kaiwen

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology,
Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the formation and propagation mechanism of stress cracks in brown rice under mechanical force action, the compressive mechanical properties of brown rice with white heart, white abdomen and non-chalky brown rice were measured by TMS-PRO texture analyzer respectively, and the brown rice were observed by section microscopy before and after the experiment treatment. The results showed that the compression force that non-chalky brown rice and abdominal brown rice could bear was greater than that of heart brown rice, but the compression force that non-chalky brown rice and abdominal brown rice could bear was not significantly different. Analysis of microscopic images showed that discontinuous microcracks already existed in the normally harvested brown rice grains. After being subjected to mechanical force, continuous microcracks formed in the brown rice grains and radiated to the epidermis at the center of endosperm.

Key words: mechanical force action; microscopic observation; microcracks