

# 不同温度及含水率稻米籽粒加工过程破裂载荷分析

吴中华<sup>1,2</sup>, 王珊珊<sup>1</sup>, 董晓林<sup>1</sup>, 李凯<sup>1</sup>, 赵丽娟<sup>1,2</sup>, 张忠杰<sup>3</sup>

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津市绿色低碳过程装备国际联合研究中心, 天津 300222;  
3. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

**摘要:** 稻米籽粒在收获后干燥、仓储和碾米加工过程中受到不同程度压缩载荷, 过大压缩载荷将造成籽粒发生破裂(爆腰), 从而降低稻米整米率和经济价值。籽粒压缩破裂载荷是稻谷加工1个重要物性参数, 该文从统计学角度对稻米籽粒压缩破裂载荷进行试验研究。通过机械压缩测量试验及大样本分析, 得到稻米籽粒在同一温度、含水率下, 其压缩破裂载荷存在统计分布特性。定义并采用稻米籽粒中值  $F_{50}$  和大端破裂载荷  $F_{90}$  表征稻米压缩破裂载荷; 在低温低含水率(16℃, 14%)时, 稻米籽粒的中值  $F_{50}$  为63 N,  $F_{90}$  为80 N。研究了稻米加工过程两大重要工艺参数-温度和含水率对籽粒破裂载荷的影响, 发现破裂载荷随温度升高而下降, 随含水率下降而增大; 相比温度, 含水率对破裂载荷影响更大。当稻米从高温高含水率(60℃, 21%)到低温低含水率(16℃, 14%)时, 其由橡胶态转变为玻璃态, 相应地破裂载荷从35增加到80 N。统计学意义下稻米压缩破裂载荷数值接近生产实际, 更能精确指导稻米加工过程优化和产品品质提高。

**关键词:** 干燥; 应力分析; 玻璃化转变; 热风干燥; 稻米; 统计学分析

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.035

中图分类号: S5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0278-06

吴中华, 王珊珊, 董晓林, 李凯, 赵丽娟, 张忠杰. 不同温度及含水率稻米籽粒加工过程破裂载荷分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 278—283. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.035 <http://www.tcsae.org>  
Wu Zhonghua, Wang Shanshan, Dong Xiaolin, Li Kai, Zhao Lijuan, Zhang Zhongjie. Analysis of rice compression fracture load in processes with various temperatures and moisture content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 278—283. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.035 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

水稻是中国重要的粮食作物, 收获后稻谷将经历干燥、仓储和碾米等加工过程, 其籽粒在加工过程中受到不同程度的压缩应力<sup>[1-4]</sup>。例如, 在水稻热风干燥中, 稻谷籽粒内部存在热湿梯度, 并由此产生压缩应力(挤压作用)或拉应力<sup>[5-8]</sup>。在稻谷仓储中, 下层稻米籽粒将受到上部籽粒重力挤压, 而产生压缩应力; 而在碾米过程中, 稻米籽粒也将受到一定的挤压<sup>[9-10]</sup>。在这些加工过程中, 过大压缩载荷将造成籽粒发生破裂(爆腰, 即应力裂纹)<sup>[11-14]</sup>, 从而降低稻米整米率和经济价值。因此, 稻米籽粒压缩破裂载荷是稻谷收获后加工过程一个重要的物性参数, 其数值明确对加工过程控制和优化是十分必要的。

近年来, 针对稻谷干燥爆腰机理<sup>[15-17]</sup>, 前人先后提出应力理论包括热湿梯度理论、楔应力理论、收缩理论, 以及玻璃化转变理论<sup>[18]</sup>。在应力理论中, 爆腰(应力裂纹)产生的判据一般为: 稻粒在干燥和冷却过程中内部积累热湿内应力( $\sigma$ )大于稻谷抵抗破裂的最大载荷(即破裂载荷  $F$ )时, 应力裂纹将产生。在玻璃化转变理论中, 格里菲思断裂判据为弹性储能( $\sigma^2 \pi \alpha$ ,  $\alpha$ 为裂纹长度)应

当超过一个特定的值(断裂能  $E$ )<sup>[19]</sup>。无论应力理论还是玻璃化转变理论, 稻谷籽粒温度和含水率都是影响籽粒干燥内应力 $\sigma$ 性质(拉应力或压应力)和大小的重要因素。同理, 稻谷籽粒破裂载荷( $F$ )也受温度和含水率影响。

压缩破裂载荷作为稻谷籽粒物性参数, 随着籽粒个体不同而有所差异<sup>[20]</sup>。稻谷籽粒生长环境, 生长时间, 收割天气等不同, 籽粒内部成分和含水率不同, 物性有差异。国内外研究人员已测量了不同粮食品种(如稻谷、玉米)籽粒的压缩、剪切破裂载荷等数值<sup>[21-23]</sup>。然而, 稻谷干燥、仓储和碾米加工处理的是大量稻谷籽粒。前人的稻米籽粒压缩破裂载荷测量试验偏重于籽粒个体, 样本量少, 将其数值应用于大量籽粒加工过程可能存在偏差。另外, 玻璃化转变对破裂载荷影响也未见相关研究。

因此, 本文拟从统计学角度, 对稻米籽粒压缩破裂载荷进行再认识, 其目的为: 统计学意义下稻米破裂载荷数值明确和表征, 以便更好地应用稻米实际加工过程; 研究玻璃化转变基本要素-温度和含水率, 对稻米压缩破裂载荷的影响。

## 1 试验材料、仪器及方法

### 1.1 试验材料和仪器

试验原料为天优 3301, 籼型感温三系杂交水稻, 产自海南省三亚地区, 2016年7月15日收获; 收获后的稻谷密闭包装后在2~4℃的条件下进行空运和储藏。带壳初始湿基含水率为23%, 剥壳后稻米初始湿基含水率为

收稿日期: 2018-09-25 修订日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471618); 国家重点研发计划(2017YFD0400904)

作者简介: 吴中华, 博士, 教授, 主要从事浓缩干燥与粉体工程技术研究。

Email: wuzhonghua@tust.edu.cn

22%, 淀粉质量分数为  $65.4\% \pm 3.81\%$ , 蛋白质质量分数为  $8.60\% \pm 0.01\%$ 。稻谷籽粒含有大量淀粉和蛋白质高分子聚合物, 在干燥过程易发生玻璃化转变现象。

自制控温装置; BSA124S-CW 电子天平(赛多利斯科学有限公司); 温度计; CT3 食品质构仪(美国 Brookfield 公司); DL-101-3BS 电热恒温鼓风干燥箱(天津市中环实验电炉有限公司)。

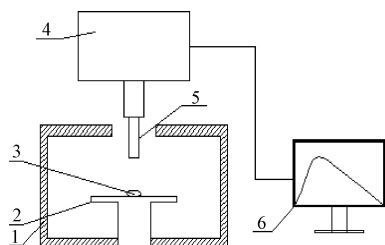
## 1.2 试验方法

### 1.2.1 不同含水率稻米样本制备

为研究含水率对稻米压缩破裂载荷的影响, 需准备不同含水率稻米样本, 其制备流程如下: 每次准备样本时, 取约 250~300 g 稻谷籽粒进行手工剥壳, 然后选取颗粒饱满、无裂纹的籽粒, 并从中称取约 200 g 稻谷籽粒。按照初始含水率 22% 计算, 将稻谷籽粒平铺于网筛(直径 300 mm), 网筛置于实验室窗台(试验条件为室温  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度为 52%) 下自然晾晒。自然晾晒过程中, 稻米籽粒水分缓慢蒸发, 质量和含水率下降。每隔 2 h 测量稻谷质量, 至预设含水率  $X$  对应的稻谷质量  $M$  时( $X=(M-200 \times 0.78)/M$ , 例如 181.4 g 对应于含水率 14%、185.7 g 于 16%、190.3 g 于 18%、197.5 g 于 21%), 停止晾晒, 即制备成预设含水率的稻米样本批次。该批次样本制备后, 放进密实袋密封以保持含水率稳定, 并及时进行籽粒破裂载荷试验。需要指明的是, 预设含水率为该批次约 100 粒的稻米整体含水率, 各籽粒含水率有差异, 单个籽粒实际含水率在后续试验中测定。

### 1.2.2 单粒破裂载荷试验

本文中, 破裂载荷测量主要采用机械压力试验法<sup>[24-26]</sup>。图 1 为破裂载荷试验装置示意图, 主要包括自制恒温腔, CT-3 食品质构仪, 和计算机。试验时, 先将密封的稻米样本放入自制恒温腔约 3 h, 当稻米温度达到预设温度后, 开始单粒破裂载荷试验。取单粒稻米放置在压缩载物台正中, 利用 CT3 对稻米籽粒进行压缩试验, 其中质构仪中探头和压缩载物平台也放置在自制恒温腔内中, 以保持籽粒温度。经过前期反复试验知, 探头的压缩距离为 0.2 mm 时稻米发生破裂且稻米籽粒还相对完整, 因此本研究中压缩距离定为 0.2 mm。记录试验时稻米籽粒的压缩曲线和稻米温度。



1.自制恒温腔 2.载物台 3.单粒稻米 4.CT-3 食品质构仪主机 5.探针  
6.计算机  
1.Homemade thermostat 2.Loading stage 3.Singer rice 4.CT-3 5.Probe  
6.Computer

图 1 稻米压缩试验装置图

Fig.1 Compression test device for rice kernel

### 1.2.3 单籽粒含水率试验

完成破裂载荷试验后的单个稻米籽粒, 进行编号(例

如, 第  $i$  个稻米籽粒) 并立即测量其质量  $M_{i0}$ , 再将该稻米籽粒放置在试纸中, 置于 DL-101-3BS 电热恒温鼓风干燥箱中。利用烘箱烘干法在  $103\text{ }^{\circ}\text{C}$  下烘干, 每 30 min 取出该稻米籽粒并称质量, 直至恒质量  $M_{id}$ , 然后计算第  $i$  个稻米籽粒实际含水率  $X_i$ ,  $X_i=(M_{i0}-M_{id})/M_{i0}$ 。然后, 根据籽粒实际含水率进行归类处理: 当籽粒实际含水率在某个整数含水率  $\pm 0.5\%$  范围, 则该整数含水率视为籽粒名义含水率(方便归类)。例如, 籽粒实际含水率在  $14\% \pm 0.5\%$  内, 则籽粒含水率视为 14%。类似地,  $16\% \pm 0.5\%$  为 16%,  $17\% \pm 0.5\%$  为 17%,  $18\% \pm 0.5\%$  为 18%。

### 1.2.4 统计分析

对所有制备样本中的每一个稻米籽粒, 重复上述机械压缩和含水率测量试验, 即得到稻米籽粒破裂载荷大样本数据。根据稻米含水率和温度进行归类, 对压缩破裂载荷进行统计学分析。本研究中, 保证每一温度和含水率下, 稻谷籽粒压缩破裂载荷样本数不少于 30 粒。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 稻米籽粒的压缩破裂过程

图 2 是湿基含水率为 14% 稻米籽粒在  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  (室温) 条件下进行机械压缩试验, 所获得的不同载荷变化曲线。从图 2a 中可以看出, 随着压缩过程进行, 籽粒所受载荷逐渐增大; 当载荷达到峰值时(54 N) 开始迅速降低, 此载荷峰值即为稻米籽粒压缩破裂载荷。图 3 为采用灯光透射法获得的多个湿基含水率为 14% 的稻米籽粒进行破裂载荷试验后的图像, 可明显看到籽粒中的大裂纹。

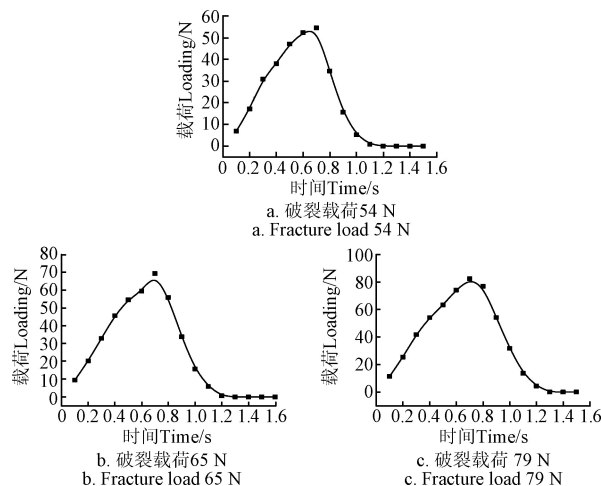


图 2 含水率 14% 稻谷籽粒在温度  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  的压缩曲线

Fig.2 Compression curve of paddy rice kernel with 14% moisture content at  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$



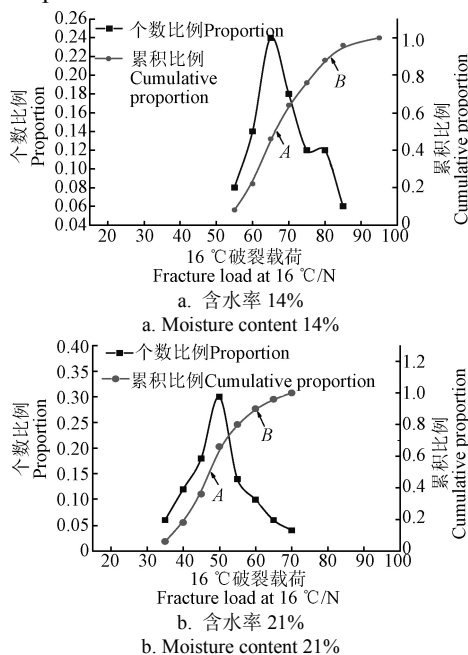
图 3 压缩试验后稻米籽粒裂纹

Fig.3 Rice kernel cracks after compression test

图 2b 和 2c 为湿基含水率同为 14% 的其他稻米籽粒在 16 °C 条件下得到的载荷变化曲线, 破裂载荷分别为 65 和 79 N, 是图 2a 中籽粒的 54 N 的 1.46 和 1.2 倍。比较图 2a、2b 和 2c, 可以发现同一含水率稻米籽粒在相同的试验条件下所得到的破裂载荷不同, 而且数值差别较大。推测其原因为, 由于每粒稻谷的生长微环境有差别, 导致稻谷组成成分、成熟度等不同, 因而单个稻米籽粒破裂载荷不同。试验结果表明, 稻米籽粒破裂载荷相差较大, 之前有文献[22]用一个固定数值来代表破裂载荷方法不可取, 用数值范围来代表破裂载荷也不够准确; 为了更好地表征稻米籽粒破裂载荷, 本文采用统计方法来研究籽粒破裂载荷。

## 2.2 稻米籽粒破裂载荷统计分布

图 4 显示了湿基含水率为 14% 和 21% 稻米籽粒在 16 °C 下的破裂载荷分布图。类似于工程常用的粒径分布图概念, 破裂载荷分布图定义为指不同破裂载荷范围内的稻米籽粒的个数所占的比例。图 4a 中, 横坐标为籽粒破裂载荷, 左侧纵坐标为个数比例, 定义为该破裂载荷对应的稻米籽粒数占含水率 14% 稻米籽粒数的比例; 右侧纵坐标为累积比例, 定义为小于某上限破裂载荷籽粒数占含水率 14% 稻米籽粒数的比例。从图 4a 中可以看出, 破裂载荷分布范围为 55~85 N, 峰值个数比例 (图 4a 中个数比例最大值) 为 23.8%, 对应破裂载荷约为 65 N。类似粒径分布图,  $F_{50}$  定义为累积比例为 0.5 对应的破裂载荷, 用于表达稻米籽粒的平均破裂载荷 (图 4a 中点 A 所示), 其值为 63 N, 其物理意义为当施加 63 N 载荷于含水率 14% 稻米籽粒时, 约 50% 稻米籽粒会发生破裂。 $F_{90}$  为累积比例为 0.9 对应破裂载荷, 也称大端破裂载荷 (图 4a 中点 B 所示), 其值为 80 N。图 4 中, 破裂载荷分布跨度  $Span$ , 定义  $Span=(F_{90}-F_{50})/F_{50}$ , 其值为 0.270。分布跨度  $Span$  越小, 载荷分布越集中。



注: A、B 分别为平均破裂载荷、大端破裂载荷。

Note: A, B are the point of median fracture load and large end fracture load, respectively.

图 4 不同含水率稻米籽粒在 16 °C 的破裂载荷分布  
Fig.4 Fracture load distribution of rice kernel at 16 °C with different moisture content

图 4b 显示了含水率为 21% 稻谷米粒在 16 °C 下的破裂载荷分布图。从图 4b 可以得到, 破裂载荷分布范围为 35~70 N, 峰值个数比例为 30%, 对应破裂载荷约为 50 N。平均破裂载荷  $F_{50}=47$  N, 大端破裂载荷  $F_{90}=60$  N,  $Span=0.277$ 。相对于图 4a, 平均破裂载荷下降 25.4%, 跨度相差 2.6%。

## 2.3 稻米籽粒破裂载荷分布影响因素

稻米籽粒含有大量淀粉和蛋白质等高分子聚合物, 随着干燥过程中温度和含水率变化, 籽粒内部将发生玻璃化转变。刘木华等[27-28]应用玻璃化转变理论分析稻米籽粒内部应力分布, 发现干燥过程中, 籽粒表面层为玻璃态, 承受拉应力; 而中心层为橡胶态, 承受压应力。爆腰易发生在玻璃层和橡胶层之间的交界面, 并且交接面位置/形状在干燥过程中, 随温度和含水率动态变化。本文研究的籽粒破裂载荷, 可应用于籽粒橡胶层抵抗压应力情景。本节内容为结合玻璃化转变理论, 研究玻璃化转变基本要素-温度和含水率对籽粒破裂载荷的影响。

### 2.3.1 含水率对稻谷籽粒破裂载荷分布影响

图 5 显示了不同含水率稻米籽粒在温度 16 和 60 °C 下破裂载荷分布图。从图 5a 中可以看出, 随着稻米籽粒含水率降低, 破裂载荷分布曲线整体右移, 峰值个数比例对应破裂载荷增加, 其值为 50、55、60、65 N。基于图 5 中载荷分布曲线, 可以计算得到: 当稻米籽粒含水率为 21%、18%、16%、14%, 平均破裂载荷  $F_{50}$  依次为 47、51、58、63 N, 大端破裂载荷  $F_{90}$  依次为 60、65、74、80 N, 跨度依次为 0.277、0.275、0.276 和 0.270。可见, 在温度 16 °C 下, 随着含水率从 21% 降低至 14%, 稻米籽粒大端破裂载荷  $F_{90}$  增加了 33.3%, 即承压能力增加, 但破裂载荷跨度变化 2.5%, 相差不大。

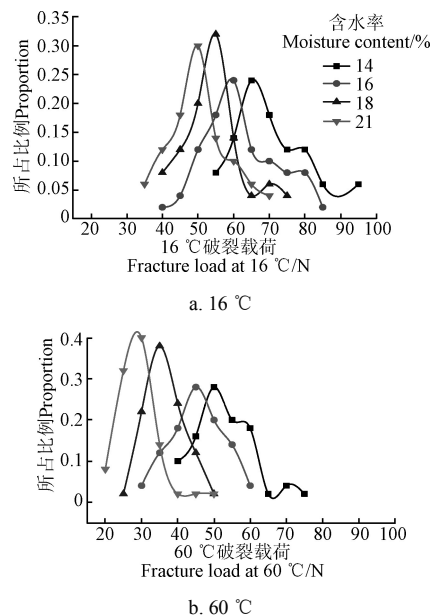


图 5 不同含水率稻米籽粒在不同温度下破裂载荷分布  
Fig.5 Fracture load distribution of rice kernel with various moisture content at different temperature

图 5b 显示了不同含水率稻米籽粒在温度 60 °C 下破裂载荷分布图。类似于图 5a, 随着稻米籽粒含水率降低,

破裂载荷分布曲线整体右移,峰值个数比例对应破裂载荷增加,其值为31、33、45、50 N。类似地,中值破裂载荷 $F_{50}$ 依次为27、33、42、49 N,大端破裂载荷依次为35、42、52、60 N,跨度依次为0.296、0.272、0.238和0.224。可见,在温度60℃下,随着含水率从21%降低至14%,稻米籽粒大端破裂载荷 $F_{90}$ 增加71.4%,破裂载荷跨度减小24.3%。

图6显示了16和60℃下稻米籽粒大端破裂载荷 $F_{90}$ 与稻米含水率之间的关系图。可以看出,大端破裂载荷 $F_{90}$ 随含水率增加而减小,两者之间存在近似线性关系。原因可能为随着稻米籽粒含水率减少,籽粒体积收缩,籽粒内部淀粉和蛋白质等高分子聚合物进一步紧密结合,籽粒内部结构密实,承压能力增大。

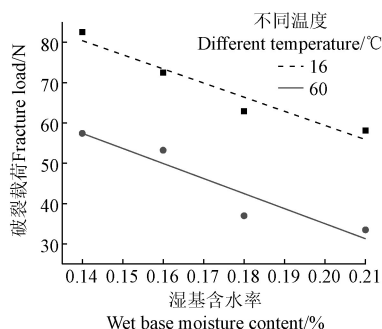


图6 大端破裂载荷与含水率线性关系图

Fig.6 Linear relationship between fracture load  $F_{90}$  and moisture content of rice kernels

### 2.3.2 温度对稻谷籽粒破裂载荷分布影响

图6也显示了温度对稻米破裂载荷的影响。同一含水量下,温度越高,稻米大端破裂载荷降低。图6中,含水率21%下,大端破裂载荷从60降至31 N,降幅达30%;而在含水率14%时,大端破裂载荷从80降至60 N,降幅为25%。

温度和含水率对稻米籽粒破裂载荷影响,可以用玻璃化转变理论解释。根据玻璃化转变理论的观点,从稻米玻璃化转变温度图(图7)中可知,稻米在温度16℃处于玻璃态,内部淀粉高聚物分子链段都不能运动,整体表现为类似玻璃的刚性固体,膨胀系数和扩散系数低,但弹性模量大。在温度60℃时,稻米籽粒处于橡胶态,分子链段发生运动,表现为高弹性固体,膨胀系数和扩散系数高,但弹性模量小<sup>[29-31]</sup>。当稻米籽粒由玻璃态转变为橡胶态时,弹性模量降低;在相同载荷下,橡胶态允许形变大,但抵抗破裂的最大载荷(破裂载荷)减小。

图8分别显示了不同含水率(14%、16%、18%、21%)和温度(16、30、45和60℃)的稻米籽粒中值和大端破裂载荷三维分布。以图8b中的大端破裂载荷为例,稻米籽粒在低温低湿情况下,破裂载荷较高;而高温高湿情况下,破裂载荷明显降低。当稻米从高温高含水率(60℃, 21%)到低温低含水率(16℃, 14%)时,其由橡胶态转变为玻璃态,相应地破裂载荷从35 N增加到80 N。稻米烘干过程中,内部应力超过破裂载荷将导致应力裂纹(爆腰)。图8中载荷分布结果为稻米烘干过程降低爆腰率

提供方向:一方面,在较低温度下烘干,以提高稻米破裂载荷值;另一方面,通过干燥-缓苏工艺减小稻米积累的内部应力,使之小于稻米破裂载荷。同理,在烘干稻米后续仓储过程中,低温储藏的稻米不易爆腰。

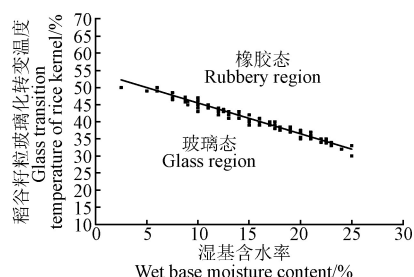
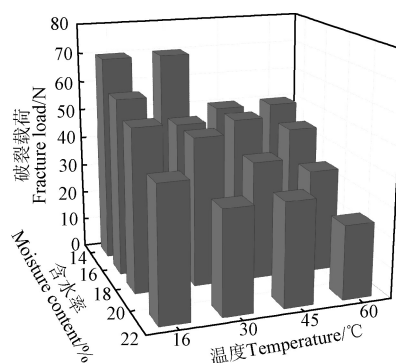
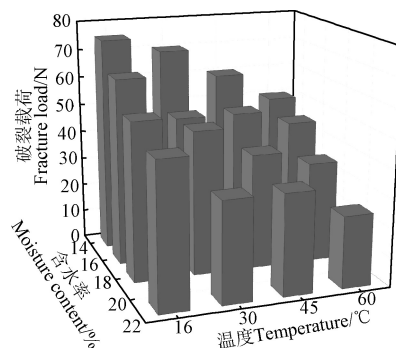


图7 稻米籽粒玻璃化转变温度图<sup>[10]</sup>

Fig.7 Glass transition temperature of rice kernels



a. 破裂载荷  $F_{50}$   
a. Fracture load  $F_{50}$



b. 破裂载荷  $F_{90}$   
b. Fracture load  $F_{90}$

图8 稻米籽粒中值和大端破裂载荷三维分布

Fig.8 Three-dimensional distribution of fracture load  $F_{50}$  and  $F_{90}$  of rice kernel

## 3 结论

稻米籽粒压缩破裂载荷存在统计分布特性。通过压缩测量试验及大样本分析,得到稻米籽粒在同一温度、含水率下,其破裂载荷仍存在统计分布特性;在低温低含水率(16℃, 14%)时,稻米籽粒的中值破裂载荷 $F_{50}$ 为63 N,大端破裂载荷 $F_{90}$ 为80 N。

含水率和温度是稻米籽粒压缩破裂载荷的两大重要影响因素。破裂载荷随温度升高而下降,随含水率下降而增大;相比温度,含水率对破裂载荷影响更大。

玻璃化转变理论在解释稻米破裂载荷变化发挥重要

作用。文中,当稻米从高温高含水率(60℃,21%)到低温低含水率(16℃,14%)时,籽粒由橡胶态转变为玻璃态,相应地破裂载荷从35增加到80 N。

### [参 考 文 献]

- [1] 杨俊贤. 浅析稻谷存储特性及储存技术[J]. 粮食问题研究, 2016(2): 40—42.
- [2] 冯永, 李萌. 改进颗粒组力学模型模拟筒仓卸粮成拱微观机理[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 286—293.  
Feng Yong, Li Meng. Simulation of meso-mechanism of silo unloading grain aching based on improved particle composition mechanical model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(20): 286—293. (in Chinese with English abstract)
- [3] 孟祥国, 郑先哲, 张强. 稻谷及时干燥工艺对品质影响[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 149—153.  
Meng Xiangguo, Zheng Xianzhe, Zhang Qiang. Rice drying in time process impact on the quality[J]. Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 149—153. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马兴灶, 方壮东, 李长友. 基于分析法的粮食逆流干燥系统能效评价与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 285—291.  
Ma Xingzao, Fang Zhuangdong, Li Changyou. Energy efficiency evaluation and experiment on grain counter-flow drying system based on exergy analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(22): 285—291. (in Chinese with English abstract)
- [5] Cnossen A G. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: Effect on milling quality[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1661—1667.
- [6] Perdon A, Siebenmorgen T J, Mauronmoustakos A. Glassy state transition and rice drying: Development of a brown rice state diagram[J]. American Association of Cereal Chemists, 2000, 77(6): 708—713.
- [7] 徐凤英, 黄木水, 陈震, 等. 稻谷烘干过程中的水分扩散特性与品质特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 261—267.  
Xu Fengying, Huang Mushui, Chen Zhen, et al. Moisture diffusion characteristics and quality characteristics of rice during drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(15): 261—267. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨国峰, 陈江, 王正. 空气温度和湿度对稻谷增湿效果的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 28—32.  
Yang Guofeng, Chen Jiang, Wang Zheng. Effect of temperature and relative humidity on rice hygroscopicity[J]. Food Science, 2010, 31(7): 28—32. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡庆兰, 阙婷婷, 任西营, 等. 玻璃化转变在食品贮藏中的应用研究进展[J]. 中国酿造, 2013, 32(8): 1—4.  
Hu Qinglan, Que Tingting, Ren Xiying, et al. Application and research progress of glass transition in food preservation[J]. China Brewing, 2013, 32(8): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘木华, 吴颜红, 曾一凡, 等. 基于玻璃化转变的稻谷爆腰产生机理分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 30—34.  
Liu Muhua, Wu Yanhong, Zeng Yifan, et al. Fissure formation in rice kernel based on glass transition theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 30—34. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吴中华, 刘兵, 王丹丹, 等. 稻谷干燥缓苏特性与裂纹产生规律研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 368—374.  
Wu Zhonghua, Liu Bing, Wang Dandan, et al. Drying-tempering characteristics and fissuring law of paddy rice kernel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 368—374. (in Chinese with English abstract)
- [12] Cnossen A G, Jimenez M J, Siebenmorgen T J. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(1): 61—69.
- [13] 马荐, 李成华, 王丹阳. 干燥工艺参数对稻谷爆腰率增值的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(1): 114—117.  
Ma Jian, Li Chenghua, Wang Danyang. Experiment study on influence of drying parameters on additional crack percentage of rice in a deep fixed-bed[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(1): 114—117. (in Chinese with English abstract)
- [14] 任广跃, 王芳, 张忠杰, 等. 干燥温度及缓苏操作对稻谷爆腰的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(19): 112—114.  
Ren Guangyue, Wang Fang, Zhang Zhongjie, et al. Effects of drying temperature and tempering on kernel cracking of paddy[J]. Food Research and Development, 2013, 34(19): 112—114. (in Chinese with English abstract)
- [15] 潘登, 张朝庭. 稻谷爆腰的机理及应对措施[J]. 农业机械, 2012(30): 53—55.
- [16] 吴中华, 康宁, 董晓林, 等. 声发射法无损检测稻谷籽粒应力裂纹[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 274—280.  
Wu Zhonghua, Kang Ning, Dong Xiaolin, et al. Non-destructive detection of stress cracking in rice kernel by acoustic emission[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 274—280. (in Chinese with English abstract)
- [17] 吴明亮, 汤楚宙. 稻谷爆腰机理及影响因素研究进展[J]. 粮油加工, 2006(2): 60—63.
- [18] Bindzus W, Livings S J, Gloria-Hernandez H, et al. Glass transition of extruded wheat, corn and rice starch[J]. Starch, 2002, 54(9): 393—400.
- [19] 何平笙. 新编高聚物的结构与性能[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [20] Obata M, Ohtsuki K. A study on vertically loaded pile caps part-III: A method to calculate initial cracking load of four pile caps[J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1983, 324: 104—110.
- [21] 戴飞, 张锋伟, 赵武云, 等. 种子玉米果穗芯力学特性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(5): 1—5.
- [22] 马秋成, 郭耿君, 马婕, 等. 莲仁力学特性参数测定及挤压破碎特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 263—271.  
Ma Qiucheng, Guo Gengjun, Ma Jie, et al. Determination of mechanical characteristic parameters and extrusion crushing characteristics test for lotus seed kernel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 263—271. (in Chinese with English abstract)
- [23] 蒋敏敏, 陈桂香. 基于应力路径试验的小麦粮堆力学特性和应力应变关系模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 280—287.  
Jiang Minmin, Chen Guixiang. Mechanical properties and stress strain model for bulk wheat based on stress path test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(7): 280—287. (in Chinese with English abstract)
- [24] 孙静鑫, 杨作梅, 郭玉明, 等. 谷子籽粒压缩力学性质及损伤裂纹形成机理[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 306—314.  
Sun Jingxin, Yang Zuomei, Guo Yuming, et al. Compression mechanical properties and crack formation law of millet grain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 306—314. (in Chinese with English abstract)
- [25] 牛海华, 赵武云, 史增录. 玉米籽粒力学特性的研究进展及应用[J]. 中国农机化学报, 2011(2): 101—104.  
Niu Haihua, Zhao Wuyun, Shi Zenglu. Progress of research and application in mechanical properties of corn kernel[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(2): 101—104. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王方艳, 高升. 典型萝卜力学特性的对比试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 166—169.  
Wang Fangyan, Gao Sheng. Comparative experimental study on mechanical properties of typical radish[J]. Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 166—169. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘木华. 水稻干燥品质的模拟和控制机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.  
Liu Muhua. Study on Simulation and Control Mechanism of Rice Drying Quality[D]. BeiJing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李栋. 稻谷干燥应力裂纹生成扩展及抑制的试验研究和机理分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.  
Li Dong. Experimental Study on the Development and Control of Stress Cracks of Rough Rice in Drying[D]. BeiJing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [29] Zhou Yingwu, Wang Xiaowei, Sui Lili, et al. Effect of mechanical fastening pressure on the bond behaviors of hybrid-bonded FRP to concrete interface[J]. Composite Structures, 2018, 204(15): 731—744.
- [30] Cnossen A G, Siebenmorgen T J, Yang W D, et al. An application of glass transition temperature to explain rice kernel fissure occurrence during the drying process[J]. Drying Technology, 2001, 19(8): 1661—1682.
- [31] Gulati T, Datta A K. Coupled multiphase transport, large deformation and phase transition during rice puffing[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 139: 75—98.

## Analysis of rice compression fracture load in processes with various temperatures and moisture content

Wu Zhonghua<sup>1,2</sup>, Wang Shanshan<sup>1</sup>, Dong Xiaolin<sup>1</sup>, Li Kai<sup>1</sup>, Zhao Lijuan<sup>1,2</sup>, Zhang Zhongjie<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. Research Center of Low-Carbon Green Process Equipment, Tianjin 300222, China;

3. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Harvested fresh rice kernels would encounter compress load with various intensities in the sequent drying, storage and milling processes. Excess compress load which exceed the fracture load of the rice kernel may cause rice cracking, which reduces the head rice yield and its economical value of the rice kernel. The compress fracture load is an important property parameter of paddy rice in sequent processing and it is necessary to know exactly the value of this parameter. In this paper, the compression fracture load of rice kernel was determined using the statistics analysis method. A series of mechanical compression experiments were conducted on the rice kernels with various moisture contents of 14%-21% and temperatures of 16-60 °C and the value of the compression fracture load in each experiment was recorded. Through the large sample statistics analysis, it was found that under the same temperature and moisture content, the compression fracture load of rice kernels had different values which may be caused by the various growing environment and the statistical distribution characteristics was demonstrated for the compression fracture load. In the view of statistics, the concept of the median and large compress fracture load were proposed and used to express the compression fracture load statistically. In the case of the moisture content of 14% and temperature of 16 °C, the rice kernels was determined to have the median fracture load  $F_{50}$  of 63 N and the large fracture load  $F_{90}$  of 80 N. The effects of two important process parameters of the rice temperature and moisture content, on the compression fracture load of rice kernel were also investigated and it was found that the compression fracture load decreased with the increase of the rice kernel temperature, and increased with the decrease of the moisture content of the rice kernel, and the moisture content had a greater impact on the fracture load than the temperature. When the moisture content of the rice kernel was decreased from 21%, to 18%, 16% and 14% at the temperature of 16 °C, the median compression fracture load  $F_{50}$  was 47, 51, 58, 63 N and the large compression fracture load  $F_{90}$  was 60, 65, 74, 80 N. When the moisture content of the rice kernel was decreased from 21%, to 18%, 16% and 14% at the temperature of 60 °C, the median compression fracture load  $F_{50}$  was 27, 33, 42, 49 N and the large compression fracture load  $F_{90}$  was 35, 42, 52, 60 N. The glass transition theory played an important role in explaining the change of the fracture load of rice kernel. In this paper, when the rice kernel from a high temperature and high moisture content (60 °C, 21%) status changes into a low temperature and low moisture content (16 °C, 14%) one, it transits correspondingly from the rubber state into the glass state, and the large fracture load  $F_{90}$  increased from 35 to 80 N. The fracture load of rice kernels obtained in the view of statistics have more accurate physical meaning and was helpful to rice process optimization and improvement of rice quality.

**Keywords:** drying; stress analysis; glass transition; hot air drying; rough rice; statistical analysis