

# 过热蒸汽干燥稻米力学特性试验\*

黄小丽 肖波 王振华 杨德勇 刘相东

(中国农业大学工学院,北京 100083)

**摘要:** 利用正交试验,研究了过热蒸汽温度和风速对稻米力学特性的影响以及爆腰增率随干燥条件和含水率的变化规律。结果表明,过热蒸汽干燥稻米时稻米弹性模量不仅受自身含水率的影响,还受干燥条件的影响;过热蒸汽干燥稻米的爆腰增率与热风干燥情况基本相同。与传统的热风干燥相比,尽管过热蒸汽干燥温度较高,但稻米爆腰增率并未见恶化,且干燥速率快,能耗低。

**关键词:** 稻米 干燥 过热蒸汽 弹性模量 爆腰增率

**中图分类号:** TS210 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0199-05

## 引言

粮食收获季节往往多雨,尤其是我国南方水稻主产区收获早稻的季节,自然晾晒干燥粮食受到极大制约。刚收获的高水分粮食如不能及时干燥很容易导致霉变,不仅造成巨大的经济损失,而且影响粮食品质,甚至对人畜食用构成危害。因此,发展粮食干燥机械化显得尤为重要。然而,国内粮食干燥机械化程度并不高,玉米机械化干燥程度不足25%,而水稻机械化干燥则更低,不足5%<sup>[1]</sup>。

目前,稻谷机械化干燥方法主要是热风干燥,热源主要采用白煤油燃烧产生的烟气与空气混合,也有一些采用生物质燃料作为干燥机的热风源<sup>[2]</sup>。采用这些干燥方法,废热难以回收利用。国内外稻谷干燥机都存在能源浪费巨大的问题<sup>[3]</sup>。

过热蒸汽干燥技术具有能耗低、干燥效率高、产品质量优、安全环保等优点<sup>[4-5]</sup>。过热蒸汽干燥以纯蒸汽为干燥介质,高温蒸汽直接与湿物料接触而除去湿分。排出的废气温度超过对应压力下的沸点温度,便于回收利用,能源利用率高。目前,关于过热蒸汽干燥的研究主要集中于干燥动力学、产品质量分析、模拟研究以及与热风干燥的比较分析<sup>[6-17]</sup>。常压过热蒸汽干燥温度超过沸点温度,为了使过热蒸汽干燥能够用于热敏性物料的干燥,出现了低压过热蒸汽干燥。Panyawong等模拟了低压过热蒸汽干燥并分析了产品的干燥质量<sup>[18-19]</sup>。国内外众多学者将过热蒸汽干燥技术用于对水稻干

燥。Taechapiroj等研究了过热蒸汽流化床干燥水稻生产速煮米,分析了过热蒸汽流化床干燥稻米的干燥特性,给出改进的薄层干燥方程,分析了稻米干燥后的特性<sup>[20]</sup>。结果表明,稻谷干基含水率在18%以上时,与自然风干燥相比,过热蒸汽流化床干燥稻谷其整精米产出率较高,而白度低。Rordprapat等比较了过热蒸汽流化床干燥和热风流化床干燥稻谷,结果表明过热蒸汽流化床干燥稻谷的整精米产出率较高,白度较低,而两种干燥方法稻米的白腹百分比无区别<sup>[21]</sup>。王维斌等进行稻米过热蒸汽干燥规律的试验研究,指出稻米过热蒸汽干燥是一很有生产价值的研究课题<sup>[22]</sup>。

利用过热蒸汽干燥,稻米的整米率有所提高,这是稻米力学特性变化的宏观表象。过热蒸汽干燥条件对稻米力学特性影响规律尚未有文献报道。本研究在过热蒸汽循环干燥试验台上进行,通过多因素试验设计揭示过热蒸汽干燥稻米力学特性随干燥条件及自身含水率变化的规律。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设备

试验用过热蒸汽干燥试验装置,主要包括蒸汽发生器、电加热式过热器、干燥室、温控仪、数据采集系统和离心风机,如图1所示。其他试验设备有INSTRON-4411型万能材料试验机, FBB4型自动内校电子分析天平(上海舜宇恒平科学仪器设备有限公司), DHG-9140A型电热恒温鼓风干燥箱(上

收稿日期: 2013-03-26 修回日期: 2013-04-26

\* 国家自然科学基金资助项目(51076163, 31171772)

作者简介: 黄小丽, 博士生, 主要从事农产品干燥理论与技术研究, E-mail: cauxlhuang@aliyun.com

通讯作者: 刘相东, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品干燥理论与技术研究, E-mail: xdliu@cau.edu.cn

海精宏试验设备有限公司),50分度游标卡尺,爆腰灯。

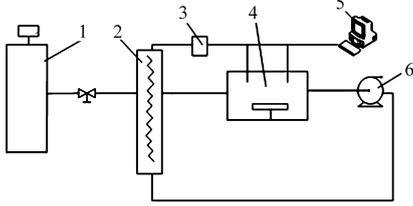


图1 过热蒸汽干燥试验装置

Fig.1 Superheated steam drying facility

1. 蒸汽发生器 2. 过热器 3. 温控器 4. 干燥室 5. 数据采集系统 6. 离心风机

## 1.2 材料与试验方法

试验用稻谷为津稻305(粳稻),来自北京西马坊村,收获时湿基含水率为19.75%(无特别说明文中含水率均指湿基含水率)。稻谷和糙米的外形尺寸(厚 $a \times$ 宽 $b \times$ 长 $c$ )分别为 $(2.26 \pm 0.02) \text{ mm} \times (3.27 \pm 0.02) \text{ mm} \times (6.00 \pm 0.02) \text{ mm}$ 和 $(2.06 \pm 0.02) \text{ mm} \times (3.02 \pm 0.02) \text{ mm} \times (4.99 \pm 0.02) \text{ mm}$ 。新鲜稻谷手工脱粒后马上装入塑料密封袋,并在 $0 \sim 2^\circ\text{C}$ 下保存。

干燥前10h将稻谷取出放在密封袋内置于室温的密闭玻璃容器内,使稻谷温度恢复至室温。试验前进行初始水分测定,测定方法依据GB 1350—2009。过热蒸汽干燥试验中,温度选取3个水平:135、150和165 $^\circ\text{C}$ ,风速选取3个水平:1.5、2.5和3.5 m/s,设计二因素三水平的正交试验。

称取一定量(约5g)稻谷(已人工去除干瘪稻谷)在料盘中平铺一层,把稻谷放入设置好条件的干燥室内;当稻米含水率达到预定值时立即将稻谷及料盘取出称量,然后迅速放入密闭的玻璃容器中。每取一粒稻谷,快速手工剥壳,在爆腰灯下观察裂纹,将完整的稻米立即放到万能材料机上进行静态压缩试验,共取10粒完整稻米在5min内完成力学试验。静态压缩试验采用的压缩速度为5 mm/min。

在进行力学试验的同时,用游标卡尺测量20粒完整稻米的尺寸;随机选取200粒稻谷,手工剥壳,用爆腰灯观察,计算稻米的爆腰率。

## 1.3 稻米弹性模量测量方法

本研究通过接触应力试验测定稻米的弹性模量。接触应力试验过程中,加载装置的压缩使凸状物体内部形成复杂的应力分布。由于试验过程中接触面积难以确定,试验结果无法按照应力和应变的关系式表示,只能用力 and 变形关系描述试验结果。赫兹提出各向同性的两个弹性体彼此接触时接触应力的求法。根据接触应力理论,用钢板对凸状农产品加载(图2),物料的弹性模量计算式为<sup>[23]</sup>

$$E = \frac{0.338K^{1.5}F(1-\mu^2)}{D^{1.5}} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{0.5} \quad (1)$$

其中

$$R = \frac{b^2}{2a} \quad (2)$$

$$R' = \frac{c^2}{2a} \quad (3)$$

式中  $E$ ——稻米籽粒弹性模量,MPa

$D$ ——在接触点稻米籽粒的变形,mm

$F$ ——施加的外载荷,N

$K$ ——系数,其取值取决于物料在接触点的主曲率半径以及主曲率的法向平面之间的夹角

$R$ ——籽粒在接触点的最小曲率半径,mm

$R'$ ——籽粒在接触点的最大曲率半径,mm

$\mu$ ——稻米泊松比,取0.3

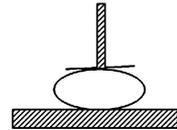


图2 稻米接触应力试验示意图

Fig.2 Diagram of brown rice contact stress experiments

## 2 结果与分析

### 2.1 过热蒸汽干燥中稻米的力-变形特性

过热蒸汽干燥稻米的力-变形特性与热风干燥(温度50 $^\circ\text{C}$ 、相对湿度21%、风速0.5 m/s)中的情况相一致,如图3所示。在破裂点之前,稻米所受载荷与变形呈线性关系,载荷随变形增加而增大。而破裂点之后,稻米籽粒强度下降,所受载荷也随之下降。随着稻米籽粒变形继续增加,接触面积变大,籽粒承受载荷又增大。

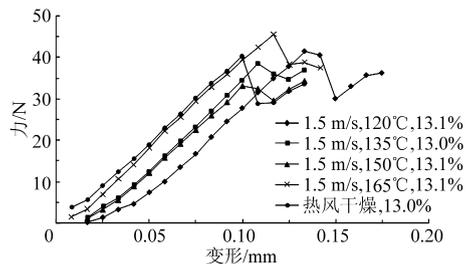


图3 过热蒸汽干燥稻米力-变形曲线

Fig.3 Force-deformation curves of brown rice dried with superheated steam

### 2.2 温度对稻米弹性模量的影响

过热蒸汽和热风干燥稻米的弹性模量均随含水率下降而增大,如图4所示。风速为1.5 m/s时过热蒸汽温度对稻米弹性模量的影响不显著;与热风干燥(温度50 $^\circ\text{C}$ 、相对湿度21%、风速0.5 m/s)相比,过热蒸汽干燥稻米的弹性模量略偏大。原因是过热蒸汽干燥中高温、高湿条件使稻米表层淀粉部

分凝胶化, 稻米抗弹性变形能力增强。当风速为 2.5 和 3.5 m/s 时, 相同含水率的稻米其弹性模量随干燥温度升高呈增大趋势。其原因主要是温度较高, 冷凝段稻米表层淀粉凝胶化程度较高, 同时冷凝水较少, 后续干燥速率快, 稻米在高温中停留时间缩短, 其内部微观结构变化小。稻米弹性模量提高, 意味着承受相同载荷时, 其弹性变形小, 抗破坏应力增大。如文献[21]所述, 过热蒸汽干燥的稻米经碾压后其整米率可提高。过热蒸汽干

燥稻米弹性模量随温度升高呈增大趋势的现象与热风干燥的情况相反。主要有两个原因, 一是过热蒸汽干燥过程中存在冷凝阶段, 稻米表层淀粉发生凝胶化; 二是几乎纯蒸汽的干燥条件与热风干燥条件截然不同, 高湿分环境下, 稻米表层毛细管收缩小, 保持毛细管通道具有良好的输运特性<sup>[24]</sup>, 籽粒内部水分扩散速率与表层水分蒸发速率差异不大, 籽粒内部温度和湿分的梯度小, 从而湿、热应力也较小。

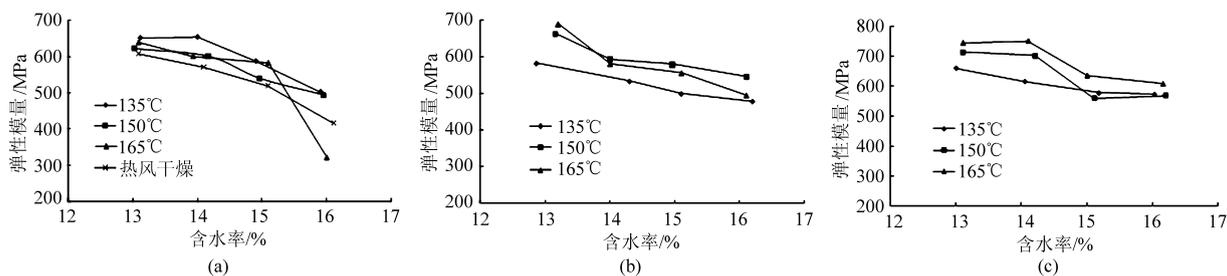


图4 不同温度下含水率对稻米弹性模量的影响

Fig. 4 Effects of moisture content on elasticity modulus of brown rice at different temperatures

(a) 1.5 m/s (b) 2.5 m/s (c) 3.5 m/s

### 2.3 风速对稻米弹性模量的影响

过热蒸汽干燥风速对稻米弹性模量的影响规律不一致。135°C 的过热蒸汽干燥, 不同含水率的稻米其弹性模量随风速提高先下降后升高, 如图 5a 所示。其原因是 135°C 下风速的提高, 可使冷凝段时

间缩短, 而热量又不足以使稻米表层淀粉充分凝胶化, 致使其抵抗变形的能力下降。而继续提高风速, 虽然稻米表层淀粉不能充分凝胶化, 但干燥速率的较大提高可减少稻谷在高温中的暴露时间, 有利于保护稻米结构完整, 从而看到稻米的弹性模量有上升趋势。

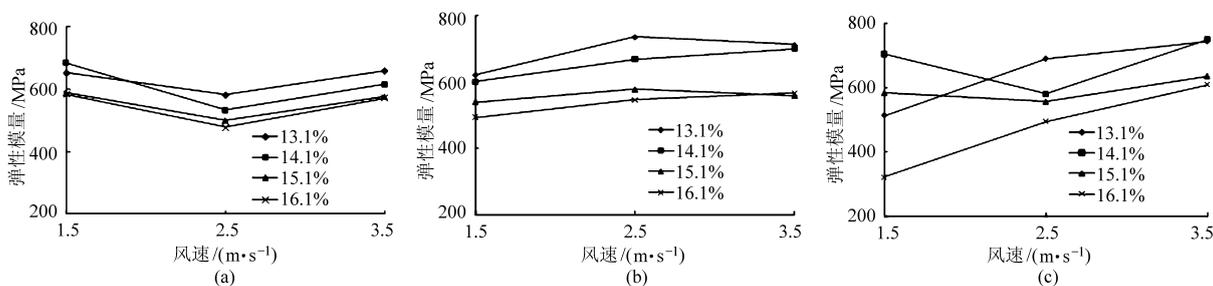


图5 不同含水率下过热蒸汽干燥风速对稻米弹性模量的影响

Fig. 5 Effects of velocity on elasticity modulus of brown rice dried with superheated steam

(a) 135°C (b) 150°C (c) 165°C

在 150°C 和 165°C 的过热蒸汽干燥中, 相同含水率的稻米其弹性模量大体上随风速提高呈增大趋势, 如图 5b 和 5c 所示。较高温度(150 和 165°C) 的过热蒸汽在短暂的冷凝阶段为稻米表层淀粉充分凝胶化提供充足的热量, 此时弹性模量主要受后续干燥速率和自身含水率的影响, 而提高风速可在一定程度上提高干燥速率, 缩短稻米在高温下停留时间, 从而提高稻米弹性模量。

从分析中发现, 采用过热蒸汽干燥, 稻米籽粒弹性模量除了受其自身含水率的影响外, 干燥条件对它也产生影响, 因为不同干燥条件处理稻米籽粒内部结构存在差异<sup>[25]</sup>。稻米微观结构存在差异其宏

观表现是力学特性如弹性模量、压缩或拉伸极限不同以及裂纹的粗细和数量。

### 2.4 过热蒸汽干燥稻米的爆腰增率

爆腰是稻米干燥普遍存在的问题, 也是影响稻米品质的重要因素。因此, 研究过热蒸汽干燥稻谷的爆腰增率成为考察的重要指标。爆腰增率是指经过一定处理后稻米的爆腰率与原始稻米爆腰率之差。试验前测得稻米的初始含水率为 17.1%, 初始爆腰率为 8.5%。过热蒸汽干燥条件与外界低温、低湿环境条件差异非常大, 缓苏后再测量稻米爆腰率必然受到缓苏条件的显著影响, 为了避免外界环境的影响, 干燥结束时马上手工剥壳测量爆腰率, 所

得数值近似干燥过程中稻米的实时爆腰率。各种干燥条件下稻米爆腰增率如表1所示。在相同含水率下,除个别条件(165℃、2.5 m/s)外过热蒸汽干燥稻米的爆腰增率与热风干燥(温度50℃、相对湿度21%、0.5 m/s)基本相同甚至还偏小。当含水率低于安全贮藏含水率13.0%时稻米爆腰增率明显偏大。在安全含水率以上,随着含水率下降,稻米的爆腰率呈上升趋势;过热蒸汽干燥稻米爆腰增率随含水率降低而增大的速率比较缓慢,而热风干燥稻米

表1 稻米爆腰增率

Tab.1 Crack additional percentage of brown rice

温度 /℃	风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	含水率/%				
		12.1	13.1	14.1	15.1	16.1
135	1.5	2.5	3.0	3.0	2.5	1.0
135	2.5	6.5	4.0	2.0	3.0	1.5
135	3.5	10.5	2.5	2.0	3.0	1.0
150	1.5	10.0	1.5	2.5	2.0	1.0
150	2.5	2.5	0.5	4.5	4.5	1.5
150	3.5	12.5	4.0	6.0	3.0	0.5
165	1.5	8.5	7.0	4.0	1.0	0.5
165	2.5	2.5	10.5	7.0	6.0	1.0
165	3.5	10.5	2.5	3.0	3.0	0.5
50(热风)	0.5	6.5	5.0	3.0	2.0	1.0

爆腰增率随含水率下降而线性增大。过热蒸汽干燥虽然温度很高,但其纯湿(H<sub>2</sub>O)的环境可以有效减少稻米在高温下产生裂纹。

对过热蒸汽干燥稻米弹性模量与爆腰率进行分析,发现两者均随含水率的下降而增大;而不同干燥条件下,相同含水率的稻米其弹性模量与爆腰增率无必然联系。弹性模量是稻米抵抗或者恢复弹性形变能力的反映,而裂纹产生意味着稻米变形已经超出了弹性变形,同时稻米不是单纯的弹性体,而是一种高分子聚合物,不能单一地用弹性模量来判断稻米爆腰率。

### 3 结论

(1) 过热蒸汽干燥稻米的力-变形特性与热风干燥的情况一致。

(2) 过热蒸汽干燥稻米弹性模量不仅受含水率的影响,还受干燥条件的影响。高温纯湿环境下,稻米弹性模量随温度和风速的提高呈增大趋势,即稻米弹性模量随着干燥速率提高呈增大趋势。

(3) 与热风干燥(温度50℃、相对湿度21%、0.5 m/s)相比,135~165℃过热蒸汽干燥稻米爆腰增率基本相同,而且爆腰增率随含水率下降而增大的速率缓慢。

### 参 考 文 献

- 李增凯,夏朝勇. 发展粮食干燥机械化促进我国新农村建设[J]. 粮食流通技术, 2009, 16(5): 19-21.  
Li Zengkai, Xia Chaoyong. Developing grain drying mechanization promoting building of new-type rural area [J]. Grain Distribution Technology, 2009, 16(5): 19-21. (in Chinese)
- 刘厚清,毛利建太郎,河野元信. 谈稻谷干燥的意义与干燥工艺[J]. 现代化农业, 2011, 23(9): 47-49.
- 李长友. 发展南亚热带水稻干燥装备技术问题的研讨[J]. 热带农业工程, 2002, 27(4): 25-27, 29.  
Li Changyou. Discussion on the development of rice drying technique in South Asian [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2002, 27(4): 25-27, 29. (in Chinese)
- Mujadar A S. Handbook of industrial drying [M]. 3th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.
- Mujumdar A S, Law C L. Drying technology: trends and applications in postharvest processing [J]. Food Bioprocess Technology, 2010, 3(6): 843-852.
- Sa-adchom P, Swasdisevi T, Nathakarakakule A. et al. Drying kinetics using superheated steam and quality attributes of dried pork slices for different thickness, seasoning and fibers distribution [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(1): 105-113.
- Hager J, Hermansson M, Wimmerstedt R. Modelling steam drying of a single porous ceramic sphere: experiments and simulations [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(8): 1253-1264.
- Erriguible A, Bernada P, Coutre F, et al. Simulation of superheated steam drying from coupling models [J]. Drying Technology, 2006, 24(8): 941-951.
- Iyota H, Nishimura N, Yoshida M, et al. Simulation of superheated steam drying considering initial condensation [J]. Drying Technology, 2001, 19(7): 1425-1440.
- Yang D Y, Wang Z H, Huang X L, et al. Numerical simulation on superheated steam fluidized bed drying: I. Model construction [J]. Drying Technology, 2011, 29(11): 1325-1331.
- Shi Y C, Xiao Z F, Wang Z H, et al. Numerical simulation on superheated steam fluidized bed drying: II. Experiments and numerical simulation [J]. Drying Technology, 2011, 29(11): 1332-1342.
- Iyota H, Nishimura N, Onuma T, et al. Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air [J]. Drying Technology, 2001, 19(7): 1411-1424.
- Moreira R G. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 291-295.

- 14 Prachayawarakorn S, Prachayawasin P, Soponronnarit S. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers[J]. *LWT*, 2006, 39(7): 770 – 778.
- 15 Prachayawarakorn S, Soponronnarit S, Wetchacama S, et al. Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air[J]. *Drying Technology*, 2002, 20(3): 669 – 684.
- 16 Uengkimhuan N, Soponronnarit S, Prachayawarakorn S, et al. A comparative study of pork drying using superheated steam and hot air[J]. *Drying Technology*, 2006, 24(12): 1 665 – 1 672.
- 17 Nathakaranakule A, Kraivanichkul W, Soponronnarit S. Comparative study of different combined superheated-steam drying techniques for chicken meat[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(4): 1 023 – 1 030.
- 18 Panyawong S, Devahastin S. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(1): 151 – 161.
- 19 Kittiworrawatt S, Devahastin S. Improvement of a mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(11): 2 644 – 2 650.
- 20 Taechapairoj C, Dhuchakallsya I, Soponronnarit S, et al. Superheated steam fluidized bed paddy drying [J]. *Journal of Engineering*, 2003, 58(1): 67 – 73.
- 21 Rordprapat W, Nathakaranakule A, Tia W, et al. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 71(1): 28 – 36.
- 22 王维斌, 孟辉, 傅宪辉, 等. 稻米过热蒸汽干燥规律的试验研究[C]//第十二届全国干燥会议论文集, 2009: 341 – 347.  
Wang Weibin, Meng Hui, Fu Xianhui, et al. Experimental research on the characteristics of rice drying under superheated steam [C]//The 12th Drying Meeting in China, 2009: 341 – 347. (in Chinese)
- 23 周祖镠. 农业物料学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.
- 24 郑先哲, 夏吉庆, 杨悦乾. 增湿加热稻谷干燥工艺的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(3): 81 – 83.  
Zheng Xianzhe, Xia Jiqing, Yang Yueqian. Experimental study on paddy drying technology by using humidified and heated air [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(3): 81 – 83. (in Chinese)
- 25 刘友朋, 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.  
Liu Youpeng, Tan Jun, Zhao Siming, et al. Effect of drying on microscopic structure of rice kernels[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2004, 19(4): 5 – 8. (in Chinese)

## Mechanical Characteristics of Rice Dried with Superheated Steam

Huang Xiaoli Xiao Bo Wang Zhenhua Yang Deyong Liu Xiangdong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Orthogonal experiments were designed to study the effects of temperature and velocity on the mechanical characteristics of brown rice, and the crack additional percentage of brown rice changing with drying condition and moisture content. The results showed that the modulus of elasticity was effected by both moisture content and drying conditions. The crack additional percentage of brown rice dried by superheated steam was closed to that of brown rice dried by hot air. Compared with conventional hot air drying, the crack additional percentage of brown rice dried with superheated steam was not worsen although the high temperature used, which had the advantages of higher drying rate and lower energy consumption. It was concluded that the superheated steam drying was a potential technology for drying rice.

**Key words:** Brown rice Drying Superheated steam Modulus of elasticity Crack additional percentage