

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.031

# 超声波处理对糙米吸水特性的影响\*

崔璐<sup>1</sup> 岳田利<sup>1</sup> 潘忠礼<sup>2</sup> 彭帮柱<sup>1</sup> 唐亚楠<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 美国农业部西部研究中心, 加州伯克利 94710)

**【摘要】** 糙米超声波处理后,在不同温度浸泡过程中对糙米含水率的变化进行了比较分析,利用 Peleg 方程对糙米在 60℃ 以下浸泡过程中吸水特性进行模拟,同时对糙米在 60℃ 以上的水分吸收过程进行了考察分析。试验结果表明:超声波处理提高了糙米对水分的吸收速率;利用 Peleg 方程能够很好地模拟糙米在 60℃ 以下的水分吸收过程,回归系数  $r^2 \geq 0.996$ ,水分扩散的测量值与预测值没有显著差异 ( $R < 5\%$ )。

**关键词:** 糙米 超声波 水分扩散 Peleg 方程

中图分类号: TS210.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)12-0148-05

## Water Absorption Properties of Ultrasonic Treated Brown Rice

Cui Lu<sup>1</sup> Yue Tianli<sup>1</sup> Pan Zhongli<sup>2</sup> Peng Bangzhu<sup>1</sup> Tang Ya'nan<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Processed Foods Research Unit, USDA-ARS West Regional Research Center, Berkeley CA94710, USA)

### Abstract

Water absorption characteristics of brown rice and ultrasonic treated brown rice were measured at six temperatures. Peleg's equation was used to model the water absorption below 60℃, and the water absorption character of brown rice above 60℃ was also investigated. It revealed that ultrasonic treatment significantly accelerated the water absorption properties of brown rice. Peleg's equation fit the measured moisture data below 60℃ well, the coefficients of regressions  $r^2 \geq 0.996$  and there had no significant difference between the measured and predict moisture content ( $R < 5\%$ ).

**Key words** Brown rice, Ultrasonic, Water absorption, Peleg's equation

### 引言

糙米是稻谷脱壳后的米粒,由皮层、胚乳和胚组成,大量的营养物质如纤维素、维生素以及蛋白质都集中分布在糙米的皮层和胚中<sup>[1]</sup>。由于皮层的存在,阻碍了蒸煮过程中水分向米粒中心的渗入,延长了糙米的最适烹调时间,降低了消费者的接受度。

目前,研磨是传统的糙米加工方法,糙米研磨后可以除去几乎所有的皮层和胚,只留下胚乳,成为常规意义上的白米,这个过程伴随着大量的营养物质的损失。在最大限度保留糙米的营养价值的原则

下,各种手段被用于加工食用糙米以缩短糙米的最适烹调时间。部分预糊化法<sup>[2-5]</sup>、发芽法<sup>[6-9]</sup>、酶降解部分皮层法<sup>[10-11]</sup>以及冷热风交替裂纹法<sup>[12]</sup>等方法,在不同程度上缩短了糙米的最适烹调时间。前期工作中,用低频超声波处理糙米并在室温下干燥至初始含水率,蒸煮试验证明超声波处理也能显著缩短糙米的最适烹调时间。

多年来,许多研究者模拟了稻谷的水分吸收特性<sup>[13-15]</sup>,定量研究了米粒在不同温度下的水分含量和米粒的水分吸收过程对米粒最适烹调时间的影响<sup>[16]</sup>,经验模型 Peleg 方程<sup>[17]</sup>由于形式简单、参数

收稿日期: 2010-05-31 修回日期: 2010-07-09

\* 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(2005)

作者简介: 崔璐, 博士生, 主要从事食品工程高新技术研究, E-mail: cuiluclt@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 岳田利, 教授, 博士生导师, 主要从事食品工程高新技术研究, E-mail: yuetl@nwsuaf.edu.cn

较少,被广泛用于描述谷物在不同温度下的水分吸收<sup>[18~20]</sup>。本文旨在探明超声波处理对糙米在不同温度下吸水特性的影响,利用 Peleg 方程对超声波处理前、后的糙米在 60℃ 以下温度中的水分吸收过程进行模拟,并分析在超声波改变糙米表面形态的情况下米粒在 60℃ 以上吸水特性的变化。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原料准备

试验用糙米选用美国太平洋米业有限公司当年收获的品种为 M202 的商业糙米,初始干基含水率为 14.29% ± 0.52%,千粒质量为 22.95 g。在试验前手工去除糙米中的碎米粒、杂质、不成熟和病虫害米粒,随机抽取 2 000 g 作为后续研究的原料。

将装有 500 g 糙米的铁丝网袋浸入超声波处理器的水槽中,用超声波在 55℃ 下连续处理 30 min,处理过程中用冰块保持水温的恒定,然后将糙米在室温下用鼓风机干燥至初始含水率,密封保存留待后续试验使用。

### 1.2 浸泡试验

由于稻米的胚乳含有大量的淀粉,在一定温度以上会与水发生不可逆的糊化反应,一些研究者将原料的糊化温度作为研究的转折点<sup>[14,19]</sup>。本试验中 M202 淀粉的糊化温度在 65 ~ 75℃<sup>[21]</sup>,因此将试验结果分为 60℃ 以下和 60℃ 以上两个部分进行分析。

选取整粒糙米约 2 g 放入盛有 40 mL 已经达到所需温度的蒸馏水中,糙米在蒸馏水中依据处理温度的不同分别浸泡 5 min 至 24 h 不等,用水浴锅精确控制浸泡温度波动在 ± 1℃,当浸泡达到所需时间时,将糙米倒入滤网中并用吸水纸擦拭 3 次吸去米粒表面多余水分,用烘箱法测定米粒的含水率,每个时间点重复 3 次。

### 1.3 水分吸收理论模型

在本试验中,Peleg<sup>[17]</sup>方程用来描述糙米浸泡过程中的含水率,Peleg 方程表达式为

$$M_t = M_0 + \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad (1)$$

式中  $M_t$ ——糙米在  $t$  时干基含水率, %

$M_0$ ——糙米初始干基含水率, %

$t$ ——糙米浸泡时间, h

$K_1, K_2$ ——Peleg 常数

将式(1)变换为

$$\frac{t}{M_t - M_0} = K_1 + K_2 t \quad (2)$$

式(2)说明  $\frac{t}{M_t - M_0}$  与时间  $t$  呈线性关系,其中  $K_1$  为

此线性方程的纵截距,  $K_2$  为斜率。

当时间  $t$  无穷大时,糙米的水分吸收达到平衡值,式(1)可以变换为

$$M_e = M_0 + \frac{1}{K_2} \quad (3)$$

式中  $M_e$ ——糙米在吸水平衡时干基含水率, %

Arrhenius 方程可以用来描述 Peleg 常数  $K_1$  的倒数与温度之间的关系,表达式为

$$1/K_1 = K_0 \exp(-E_a/(RT)) \quad (4)$$

式中  $E_a$ ——活化能, kJ/(kmol·K)

$R$ ——通用气体常数, 8.314 kJ/(kmol·K)

$T$ ——绝对温度, K

$K_0$ ——在参考温度下的 Arrhenius 常数

用相对误差<sup>[22]</sup>来估算由 Peleg 方程计算所得结果与试验所得结果之间的误差。

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{M - M_i^*}{M} \right)^2}{N}} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $N$ ——试验数据点的数量

$M$ ——试验测得的糙米干基含水率, %

$M_i^*$ ——计算所得的糙米干基含水率, %

## 2 结果与分析

### 2.1 糙米在 60℃ 以下浸泡过程中含水率的变化

浸泡过程中,由于米粒内、外部含水率存在较大的差异,水分向低含水率的部位转移。浸泡前期,米粒内、外水分梯度较大,使得米粒的吸水速度保持较高水平,随着水分梯度逐渐减小,米粒吸收水分的速度逐渐减小,至米粒内、外部水分梯度消失时米粒停止吸水达到吸水饱和状态。糙米在不同时间和时间条件下的含水率如图 1 所示。由图 1a 中可以看出,在浸泡 3 ~ 4 h 内糙米样品水分吸收速率非常高,随时间延长水分吸收速度逐渐减慢,当浸泡时间达到足够长(8 ~ 14 h)时,样品不再吸水,含水率曲线逐渐趋于平直。两种糙米样品在不同温度下的饱和干

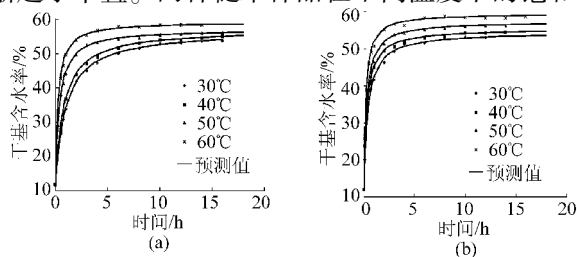


图 1 在不同时间和温度下糙米干基含水率的测量值和预测值

Fig. 1 Measured and calculated moisture content of brown rice at different temperatures and times

(a) 未处理 (b) 超声波处理

基含水率并没有显著差异。

由于超声波处理使糙米皮层表面形态发生了轻微的变化,导致糙米在吸水过程的开始阶段显现出较高的吸水速率,表现为较高的含水率,在30℃和40℃时尤为明显,未处理糙米的含水率显著低于超声波处理的糙米样品的含水率,直到浸泡6 h后这种差异逐渐变弱;在50℃和60℃浸泡时,2 h内超声波处理的糙米样品依然保持着较高的含水率,2 h后两种样品的含水率差异随着浸泡时间的增加逐渐缩小。这证明了超声波处理扩充了糙米表面的水分渗透通道,加速水分进入糙米内部,这种作用可能会在蒸煮过程中缩短烹调时间。

米粒最终的饱和含水率随浸泡温度的升高而增大,样品达到饱和所需时间也呈现出缩短的趋势。由试验测定得到:未处理的糙米在30℃下需要14 h吸水达到平衡,平衡干基含水率为53.21%;在60℃下需要10 h达到水分平衡,平衡干基含水率为57.58%;然而超声波处理的糙米在30℃下12 h时吸水达到平衡,平衡干基含水率为53.28%;在60℃下10 h吸水达到平衡,平衡干基含水率58.53%,这说明浸泡温度越高越有利于样品对水分的吸收。同时,也意味着在糙米的贮藏过程中,将糙米暴露在较高湿度和较高温度的空气中,即使是很短的时间,比如1~2 d,也会导致糙米自身的含水率发生很大变化。

利用 Peleg 方程对试验得到的含水率进行拟合,将试验数据代入式(2),得到常数  $K_1$ 、 $K_2$  以及  $r^2$  如表1所示。从表1可以看出,利用式(2)拟合试验数据的回归系数在0.996到0.999之间,说明 Peleg 方程可以很好地描述在浸泡过程中糙米的水分吸收情况,运用 Peleg 方程能精确地计算出在规定条件下在有数据的时间范围内任意一个时间点样品的含水率。

表1 不同处理的糙米在不同温度下的 Peleg 常数  $K_1$  和  $K_2$  值

Tab.1 Peleg equation constants  $K_1$  and  $K_2$  at different temperatures

样品 温度/℃	未处理糙米			超声波处理糙米		
	$K_1$	$K_2$	$r^2$	$K_1$	$K_2$	$r^2$
30	0.021	0.022	0.996	0.009	0.023	0.998
40	0.017	0.022	0.999	0.007	0.023	0.999
50	0.008	0.022	0.999	0.006	0.022	0.999
60	0.006	0.021	0.999	0.005	0.021	0.999

如图1a所示,在60℃以下的浸泡过程中  $K_2$  的变化并没有显著差异。将30℃、40℃、50℃、60℃时的  $K_2$  依次代入式(3)中计算得到未处理糙米的吸水

平衡干基含水率的理论值分别为56.1617%、56.1617%、56.1617%和59.3265%;同样,将  $K_2$  依次代入方程(3)中计算得到超声波处理糙米的吸水平衡干基含水率的理论值分别为55.4362%、55.4362%、57.4125%和59.5770%。由此可以看出,糙米在60℃以下的水中进行浸泡,吸水平衡时的干基含水率没有显著差异,证明了超声波处理仅仅增加了糙米在浸泡开始阶段的吸水速率,并未影响生糙米的持水力。

利用式(5)计算得,未处理糙米在30℃、40℃、50℃和60℃的  $R$  分别为4.92%、3.45%、4.64%和4.81%;超声波处理的糙米的  $R$  分别为4.93%、4.49%、4.30%和2.52%。由图1可以看出试验测得数据与预测值吻合很好。

对样品  $K_1$  用式(4)进行线性拟合后得到活化能和 Arrhenius 常数如表2所示。超声波处理前后糙米的活化能分别为37778.82 kJ/(kmol·K)和16112.53 kJ/(kmol·K)。回归系数  $r^2$  分别为0.948和0.993。

表2 不同样品的 Arrhenius 常数和活化能

Tab.2 Constants and activation energy related to  $K_1$

处理	活化能/ kJ·(kmol·K) <sup>-1</sup>	$K_0$	$r^2$
未处理糙米	37778.82	$1.418 \times 10^8$	0.948
超声波处理糙米	16112.53	$6.751 \times 10^4$	0.993

从表2可以看出,在相同的处理温度下,由于超声波对糙米皮层的作用,导致超声波处理的糙米吸水所需活化能降低至未经超声波处理的糙米样品活化能的一半以下。超声波处理显著降低了糙米吸水反应的活化能。

## 2.2 糙米在60℃以上浸泡过程中含水率的变化

由于浸泡温度80℃和100℃超过了糙米淀粉的糊化温度,糙米在浸泡过程中发生糊化反应,因此在本试验中高于60℃的浸泡过程是水分吸收作用和糊化反应同时发生的复杂过程。由于 Peleg 方程是一个简单的经验公式,多数研究者并不将这个公式运用于物理变化和化学变化同时发生的条件下<sup>[22~25]</sup>,本试验旨在研究超声波对糙米的吸水作用的影响,因此在60℃以上的水分扩散的研究中,仅定性的对试验现象进行讨论。

由图2可以看出,在80℃条件下,浸泡0.5 h内两种样品的含水率并没有显著差异,在浸泡0.5 h后超声波处理的糙米含水率从45.97%增至2 h的275.72%;未处理糙米含水率从0.75 h的69.79%增至2 h含水率155.89%,超声波处理的糙米含水

率远远超过未处理糙米的含水率。在 3 h 之后两种样品的含水率再次达到一致并在 3 ~ 6 h 的试验中保持在相同的水平上。在试验进行到 6 h 时,米粒失去了固有的形态,试验在此时停止。

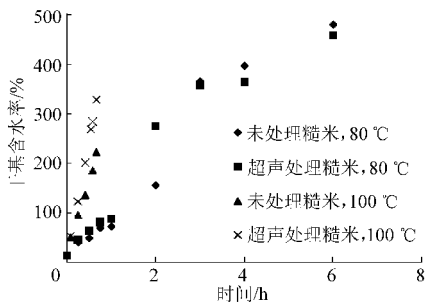


图 2 在不同温度和时间下糙米干基含水率的测量值

Fig. 2 Measured moisture content of brown rice at different temperature and time

在 100℃ 的试验中同样出现了开始阶段样品含水率无显著差异,由于处理温度的升高这种无显著差异期由 80℃ 的 0.5 h 缩短至 100℃ 的 0.25 h 内;在 0.25 h 时超声波处理的糙米含水率显著大于未经超声波处理的样品含水率,直达到最佳烹调时间时,两种样品的含水率差异达到最大。

从图 2 还可以看出,糙米在 100℃ 下浸泡直到糙米淀粉完全糊化,此时超声波处理前、后糙米的含水率分别为 223.18% 和 328.42%,而在 80℃ 试验结束时糙米样品的含水率为 480.76% 和 459.19%。这说明在 80℃ 浸泡过程中糙米粒在达到完全糊化以后会继续吸水并发生形变至水分饱和。在 100℃ 浸泡中,试验停止在最适烹调时间 40 min,此时糙米还没有发生类似 80℃ 的现象。

### 3 讨论

对比前人的研究文献, Sopade<sup>[24]</sup> 等测量了玉米、粟和高粱在 10℃、30℃ 和 50℃ 下的吸水特性,认为 Peleg 方程系数  $K_2$  不随浸泡温度的变化而变化; Pan<sup>[26]</sup> 研究了班豆在 30℃、50℃、80℃ 和 100℃ 下的吸水特性,则认为  $K_2$  与浸泡温度呈线性关系。在本试验中,糙米在 60℃ 以下的吸水特性显示出  $K_2$  没有

随着温度的变化发生显著变化,这和 Sopade 的结论一致。

Lund 等<sup>[27]</sup> 认为大米淀粉在水和淀粉比超过 1.5 倍时才能发生糊化反应,较低的含水量不能使淀粉发生糊化,基于对糙米在 60℃ 以上的吸水过程的监测,结合 Lund 等的研究,可推断本试验中在浸泡开始阶段,糙米出现单纯的吸水现象,同时也不排除米粒局部吸水达到糊化阈值并发生糊化。Akemi 等<sup>[28]</sup> 利用核磁共振成像技术观察了糙米在 37℃ 下吸水的过程,并指出糙米的吸水因品种和米粒结构而异; Hoshikawa<sup>[29]</sup> 出于研究发芽糙米的目的,运用碘化钾碘溶液水分扩散法表明糙米的吸水首先发生在胚芽以及胚芽周围部位。本试验中,由于浸泡温度较高,在前期的单纯吸水阶段,超声波处理对糙米的吸水性的影响并不明显,在局部达到糊化所需的含水率阈值后糙米淀粉开始糊化,提高了糙米粒局部的水分通过能力,因此水分开始向周围扩散并引起米粒其他部分的糊化。如前所述,超声波处理提高了糙米皮层的水分通过能力,在糊化开始以后,这种影响导致了水分迅速扩散至糙米的内部,表现出在 80℃ 和 100℃ 下糙米粒水分的显著增加。

### 4 结束语

在 60℃ 以下的浸泡过程中,超声波处理的糙米样品具有较大的水分吸收速率,相对缩短了米粒达到水分吸收平衡所需要的时间,这一现象在低温时尤为明显。Peleg 方程可以用来准确地描述 ( $r^2 \geq 0.996$ ) 和预测 ( $R < 5\%$ ) 在糊化温度以下糙米的水分吸收过程。回归分析证明, Arrhenius 方程能很好描述温度与活化能之间的关系 ( $r^2 \geq 0.948$ ), 超声波处理前后糙米的活化能为 37 778.82 kJ/(kmol·K) 和 16 112.53 kJ/(kmol·K); 超声波处理增加了糙米的水分吸收通道,加速了糙米的水分吸收速度。同样,在 60℃ 以上的浸泡过程中,超声波作用的水分通道使糙米在淀粉糊化过程中表现出较强的水分吸收能力,这可能是超声波处理缩短糙米最适烹调时间的主要原因。

### 参 考 文 献

- Muramatsu Y, Tagawa A, Sakaguchi E, et al. Water absorption characteristics and volume changes of milled and brown rice during soaking[J]. Cereal Chemistry, 2006, 83(6): 624 ~ 631.
- Afif A B, Jau Y H, Eugene S. Preparation of quick cooking rice; U. S. 5089281[P]. 1992-02-18.
- Ataullah K, Ozai-Durrani. Process for preparing quick cooking rice; U. S. 2937946[P]. 1979-01-09.
- Douglas M. Process for preparing quick-cooking brown rice and the resulting products; U. S. 3959515[P]. 1976-05-25.
- Freserick J M, Bogota N J. Process of preparing a quick-cooking brown rice; U. S. 3086867[P]. 1963-04-15.
- Hidechika T, Ken'ichi O, Hiroshi O, et al. Germinated brown rice with good safety and cooking property, process for producing the same and processed food therefrom; U. S. 6685979[P]. 2004-02-03.

- 7 Hiromichi A, Tomomi S, Hiroto S, et al. Germinated brown rice; U. S. 6630193[P]. 2003-10-07.
- 8 Sang-You K, Hyun-Jun P, Sang-Jin B. Method for preparing germinated brown rice having improved texture and cookability without microbial contamination and a germinated brown rice obtained therefrom; U. S. 7217436[P]. 2007-05-15.
- 9 Se-Soon Jang. Method for germinating dehulled brown rice; U. S. 5862627[P]. 1999-01-26.
- 10 Mithu D, Suneel G, Vishal K, et al. Enzymatic polishing of rice—a new processing technology[J]. Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2079~2084.
- 11 Zhang R, Zeng J. Study on conditions of enzymatic hydrolyzing anti-nutrition factor in brown rice[J]. Food Science, 2006, 27(11): 262~266.
- 12 Tadahiko H, Katsumoto O, Yoh K, et al. Method of heat treating brown rice; U. S. 4582713[P]. 1986-04-15.
- 13 Banaszek M M, Siebenmorgen T J. Moisture absorption rates of rough rice[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(4): 1257~1262.
- 14 Bakashi A S, Singh R P. Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during rice parboiling[J]. Journal of Food Science, 1980, 45(5): 1387~1392.
- 15 Metcalf S L, Lund D B. Factors affecting water uptake in milled rice[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(6): 1676~1679, 1684.
- 16 Kasai M, Leis A, Marica F, et al. NMR imaging investigation of rice cooking[J]. Food Research International, 2005, 38(4): 403~410.
- 17 Peleg M. A research notes—an empirical model for the description of moisture sorption curves[J]. Journal of Food Science, 1988, 53(4): 1216~1217, 1219.
- 18 Sopade P A, Obekpa J A. Modeling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg's equation[J]. Journal of Food Science, 2006, 55(4): 1880~1887.
- 19 Marcelo O B, Marcela P T, Constantino S. Water absorption and starch gelatinization in whole rice grain during soaking[J]. Lebensmittel-wissenschaft und-Technologie, 2007, 40(2): 313~318.
- 20 Elbert G, Tolaba M P, Suarez C. Model application; hydration and gelatinization during rice parboiling[J]. Drying Technology, 2000, 19(3~4): 571~581.
- 21 In-Myoung Park, Ana Maria Ibáñez, Fang Zhong, et al. Gelatinization and pasting properties of waxy and non-waxy rice starches[J]. Starch, 2007, 59(8): 388~396.
- 22 Sopade P A, Kaimur K. Application of peleg's equation in desorption studies of food systems; a case study with sago metroxylon sagu rottb starch[J]. Drying Technology, 1999, 17(4&5): 975~989.
- 23 Lopez A, Pique M T, Clopjasias M, et al. The hygroscopic behaviour of the hazelnut[J]. Journal of Food Engineering, 1995, 25(2): 197~208.
- 24 Sopade P A, Ajisehiri E S, Badau M H. The use of Peleg's equation to model water absorption in some cereal grains during soaking[J]. Journal of Food Engineering, 1992, 15(4): 269~283.
- 25 Medeni Maskan. Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(4): 337~341.
- 26 Pan Z. Modeling of water absorption of pinto beans during blanching and soaking[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 160~166.
- 27 Lund D, Lorenz K J. Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1984, 20(4): 249~273.
- 28 Akemi K H, Hitoshi T, Sachio M, et al. Water penetration into rice grains during soaking observed by gradient echo magnetic resonance imaging[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 44(3): 307~316.
- 29 Hoshikawa K, Matsuo T. Rice seed, germination and seedlings[M]. Tokyo, Japan: Food and Agriculture Policy Research Center, 1993: 91~132.