

探头式超声波处理对糙米理化特性和食用品质的影响*

崔璐¹ 冯艳芸² 胡亚云¹ 潘忠礼³ 岳田利¹

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 宝鸡出入境检验检疫局, 宝鸡 721006;
3. 加利福尼亚大学戴维斯分校生物与工程系, 戴维斯 95616)

摘要: 利用探头式超声波流体装置处理糙米,以影响糙米蒸煮品质的含水率和固形物损失率2个关键参数为指标,筛查获得了探头式超声波方法对糙米的最佳处理条件,评价了不同条件下探头式超声波装置对糙米最适蒸煮时间的影响。结果表明:超声波处理辅助加热法不能有效缩短糙米的最适蒸煮时间;不控温条件下超声波处理糙米的振幅为8、终点温度50℃,此时糙米的最适蒸煮时间为30 min;控温条件下超声波处理糙米的振幅为8、终点温度50℃,则糙米的最适蒸煮时间为250 min。同时,对不同条件处理下糙米的化学组成和食用品质进行比较,控温超声波处理法对糙米的化学成分和营养品质损失小,且在外观、颜色、气味、硬度、粘度和接受度等方面更易于接受,以控温超声波处理可以实现糙米的高品质快速蒸煮。探头式超声波方法为糙米加工处理提供了一种新的思路,具有广阔的应用前景。

关键词: 糙米 探头式超声波 食用品质 理化特性

中图分类号: TS210.4; S122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0266-08

Effect of Ultrasonic Probe Treatment on Physicochemical Properties and Taste Quality of Brown Rice

Cui Lu¹ Feng Yanyun² Hu Yayun¹ Pan Zhongli³ Yue Tianli¹

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

2. Baoji Entry - Exit Inspection and Quarantine Bureau, Baoji 721006, China

3. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California at Davis, Davis 95616, USA)

Abstract: Ultrasonic probe was used for the treatment of brown rice, with two key parameters of moisture content and solid losses as indicators. The optimum cooking time of brown rice was evaluated and the optimum processing conditions of brown rice were obtained. The results indicated that ultrasonic treatment combined with heating method had no significant effect on shorten of brown rice cooking time. For the treatment of ultrasonic probe without heating, the optimum cooking time of brown rice was 30 min with the amplitude of ultrasonic probe of 8 and temperature of 50℃. For the ultrasonic probe processing with controlled temperature, the cooking time of 25 min was needed for brown rice treated with ultrasonic probe at temperature of 50℃ and the amplitude of 8. In addition, the chemical composition and nutritional quality of brown rice were little losing, the appearance, color, smell, hardness, viscosity and acceptance of brown rice were more acceptable under the condition of ultrasonic probe processing with controlled temperature than those of others. That is, ultrasonic probe combined with controlled temperature can be applied to cook high quality brown rice. Therefore, ultrasonic probe treatment provides a new train of thought for the processing of brown rice and it has broad application prospects.

Key words: Brown rice Ultrasonic probe Taste quality Physicochemical properties

收稿日期: 2015-07-10 修回日期: 2015-07-22

* 国家自然科学基金资助项目(31301498)和西北农林科技大学基本科研业务费专项资金资助项目(Z109021424)

作者简介: 崔璐,实验师,博士,主要从事食品工程与农产品加工研究,E-mail: cuiluctl@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 岳田利,教授,博士生导师,主要从事农产品加工与食品安全控制研究,E-mail: yuetl@nwsuaf.edu.cn

引言

糙米是稻谷脱壳后的米粒,不仅含有丰富的蛋白质、脂肪、纤维素、维生素 B₁、维生素 B₂及矿物质,而且还富集生理活性较高的维生素 E、亚油酸及食物中罕见的谷胱甘肽过氧化酶等营养因子,可以说稻谷中 65% 的营养元素都集中在皮层中^[1-3]。以糙米作为主食直接食用时存在蒸煮时间过长和口感风味不佳的缺点,因此对糙米的食用主要是通过碾制去掉果皮、种皮、糊粉层和胚等,获得白米等精加工产品^[4]。糙米加工精度越高,营养物质的流失越严重。随着消费者饮食观念的转变、健康意识的增强和粗粮工业化的追求,通过简便易行的技术有效缩短糙米蒸煮时间并改善其食用品质,对促进糙米消费及人体营养健康均衡化具有重要的作用^[5]。

基于糙米丰富的营养价值及对人体饮食健康的益处,许多国家都在研究如何缩短糙米的吸水时间和最适蒸煮时间并改善糙米的食味品质。在最大限度保留糙米营养价值的前提下,现在可用于食用糙米加工的方法有浸泡法、干燥法、碾削法和辐射法等物理方法,以及采用特殊方法使糙米发芽并经过酶法改变糙米皮层结构的生物方法等^[6-9]。近年来,超声波作为一种新型的处理手段,广泛运用于诊断学、工程学、治疗学、生物学等领域,并在食品加工和检测中发挥着非常重要的作用^[10-12]。探头式超声波处理器作为另一种形式的超声波处理装置,具有作用范围集中、便于携带和可叠加的特性,经常被用来处理小体积的流体^[13-14]。同时,探头式超声波对物料的处理作用方式更为直接,在一定范围内产生的声强更大^[15]。

本文利用探头式超声波装置处理糙米,以影响糙米蒸煮品质的含水率和固形物损失率 2 个关键参数为评价指标,考察不同超声波处理和加热方式下糙米的食用品质,探讨不同作用方式和条件下探头式超声波处理对糙米蒸煮时间的影响规律,并对超声波处理前后糙米的营养化学组成及感官品质进行分析,以期探头式超声波方法在糙米处理和加工中的应用提供基础参数和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

糙米,购自美国 Pacific International Rice Mill 公司 (Fairfiled, CA),初始含水率为 (13.6±0.8)%,试验前去除异物、不成熟粒以及病虫害粒。

超声波糙米样品:将随机选取的糙米装入 30 cm×20 cm 的纱网袋,浸入水中并固定在超声波

装置的中心位置。设定处理温度分别为 25、40、55℃ 3 个梯度,在超声波频率 16 kHz、功率 2 000 W 条件下对样品处理 30 min。处理完毕后捞出网袋沥水 1 min,然后将糙米平铺于玻璃盘上以蒸发表面多余水分(10 min)。糙米称量后在室温条件下放入干燥箱中加热干燥至初始含水率。

1.2 主要仪器设备

设备包括:DGX-9143BC 型干燥箱(上海福马实验设备有限公司);AUY 220 型万分之一天平(日本 SHIMADZU 公司);HH-60 型水浴锅(常州国华仪器有限公司);3000 型探头式超声波流体处理器(美国 Misonix 公司);FF-E-24-SLE 型热电偶(美国 Omega 公司);HHM-290 型温度计(美国 Omega 公司);EH20A MM-13321-00 型电热板(美国莱伯泰科有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 超声波处理器探头对环境温度的敏感性

超声波流体处理器探头对温度较为敏感,其输出功率与环境温度相关联。在一定振幅下,探头所处环境温度不同,设备的输出功率也不同。因此,在烧杯中加入一定温度的蒸馏水(30、40、50、60、70℃),设定超声波发生器振幅为 10、9、8、7、6、5,读取不同温度和振幅条件下超声波流体处理器显示的实时功率,评价超声波处理器探头对环境温度的敏感性。

1.3.2 超声波处理器辅助加热对糙米蒸煮时间的影响

在 100 mL 烧杯中加入 60 mL 蒸馏水,将烧杯置于电热板上加热(功率 1 000 W),待水沸腾后投入 4 g 糙米并开启超声波换能器,设置超声波的振幅为 10,处理时间分别为 5、10、15、20、25、30、35、40 min,计算煮熟糙米的百分比、测定糙米的含水率,评估超声波辅助加热法对糙米最适蒸煮时间的影响。同时,对糙米样品直接蒸煮测定其最适蒸煮时间或直接进行电热板加热处理测定其干基含水率,评价超声波处理对糙米样品最适蒸煮时间的影响。

1.3.3 不控温条件下超声波处理对糙米理化特性和最适蒸煮时间的影响

由于本研究中超声波处理器探头的直径为 0.6 cm,长度为 4.0 cm,为了保证实验中超声波探头对糙米处理的有效性,在 1.3.2 节中 60 mL 水与 4 g 糙米水米比例的基础上,在后续实验中选择 25 mL 水中加入 1.67 g 糙米评价不控温条件下超声波处理对糙米处理效果影响。具体操作为:在 50 mL 烧杯中加入 25℃ 的蒸馏水 25 mL,投入 1.67 g 糙米进行超声波处理。当水温分别达到设定的 50℃ 和

60℃时,停止超声波处理并记录时间,测定样品的含水率和固形物损失率,同时将烧杯立即移至电热板上进行最适蒸煮时间的测定。

1.3.4 控温条件下超声波处理对糙米理化特性和最适蒸煮时间的影响

为了控制糙米表面皮层处理程度及最终米粒形态,通过温度控制法固定超声波的输出功率,评价其对糙米处理效果的影响。具体操作为:在 50 mL 烧杯中分别加入 50℃ 和 60℃ 的蒸馏水 25 mL,糙米加入量为 1.67 g,并设定超声波处理振幅为 7、8、9 和 10,处理时间为 2 min,处理结束后测定样品的含水率和固形物损失率,同时将烧杯立即移至电热板上进行最适蒸煮时间的测定。

1.3.5 指标测定方法

(1) 最适蒸煮时间

采用玻璃板-白芯法测定最适蒸煮时间^[16]:将 30 mL 蒸馏水煮沸,倒入 2 g 糙米样品,保持烧杯中蒸馏水沸腾并开始计时。10 min 后,以 1 min 为一个时间点对糙米进行测定。具体操作为:在某一时间点停止加热,立即将烧杯中的米粒倾入筛网中并用自来水迅速冷却,控去多余水分后将米粒平铺于试验台上,用玻璃板压扁米粒并看米粒中间是否有白芯出现,有白芯出现的米粒为未煮熟米粒。每次测定 50 粒米,记录煮熟米粒的百分比直至样品百分之百煮熟,此时即为该样品的最适蒸煮时间。

(2) 含水率变化率

含水率变化率是反映超声波处理对糙米含水率影响的关键参数,主要用来估算升温过程中糙米含水率的平均变化速率。含水率变化速率计算公式为

$$Y = \frac{X_i - X_0}{t} \tag{1}$$

式中 Y——含水率的变化率,%/min

X_i ——最终含水率,%

X_0 ——初始含水率,%

t——处理时间,min

(3) 固形物损失率

固形物损失率反映的是处理过程中脱离米粒的干物质成分占原米粒干物质的比例,这些成分主要由淀粉和皮层碎片组成。将已知质量的糙米进行超声波处理,然后将米水混合物通过直径为 1.2 mm 的筛网,留取筛上物,干燥箱干燥后测定干物质的质量。固形物损失率的计算公式为

$$S = \frac{W_0 - W_i}{W_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中 S——固定物损失率,%

W_0 ——处理前干物质的质量,g

W_i ——处理后干物质的质量,g

固形物损失变化率用来估算升温过程中糙米固形物流失的平均速率,可以用来反映超声波处理对糙米固形物含量变化的影响。固形物损失率变化率计算公式为

$$s = \frac{S}{t} \tag{3}$$

式中 s——固形物损失率变化率,%/min

1.3.6 超声波处理对糙米化学组成和感官品质的影响

根据优化建立的方法,分别在 50℃ 控温和不控温条件下进行糙米的超声波处理,即将 1.67 g 糙米放入 50 mL 玻璃烧杯,采用 2 种方式进行处理,分别测定样品的化学组成变化和感官品质。

(1) 糙米化学成分的测定

依照美国分析化学家协会(AOAC)标准中的 992.15、979.10、922.06、920.86 和 992.03,对不同超声波处理方式下样品的蛋白质含量、总淀粉、总脂肪、粗纤维和维生素 E 等化学成分进行测定,同时采用 AOAC 标准的 991.43 测定淀粉中支链淀粉含量。

(2) 超声波处理对糙米感官品质的影响

依据 GB/T 15682—2008 附录 A 要求挑选评价员并在培训基础上,参照 GB/T 15682—2008 中标度检验法评价超声波处理对糙米感官品质的影响。主要包括外观、颜色、气味、硬度、弹性、粘度以及总体接受度,并以未处理的糙米作为评分基准 5 分,上下浮动各 4 个档次,即每项满分为 9 分,总分为 54 分;参照样品为未处理的糙米,参照分数为每项 5 分,总分 30 分。

2 结果与分析

2.1 超声波流体处理器探头对环境温度的敏感性分析

测试发现,在固定的温度和振幅下超声波探头具有固定的功率消耗,如图 1 所示。

从图 1 可以看出,在同一振幅下,环境温度越高,设备的输出功率越低;在相同的温度条件下,随着振幅降低,设备输出功率也呈现降低趋势。因此,超声波探头的输出功率是体系温度和振幅共同决定的。试验过程中应该在固定振幅和温度下评价超声波处理对糙米品质的影响。

2.2 超声波处理辅助加热法对糙米蒸煮时间的影响

通过测试,在糙米蒸煮过程中,烧杯内蒸馏水保持沸腾状态,超声波探头的输出功率在 21 ~ 24 W 之间,这是因为在振幅固定的条件下,在高温

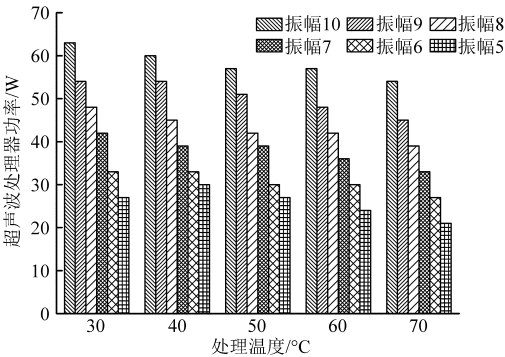


图 1 不同温度和振幅下探头式超声波处理器的输出功率

Fig. 1 Output power of ultrasonic probe at different amplitude setting and environment temperatures

的环境中,物质的分子动能较大,较低的能量便可以使探头达到设定的输出振幅。图 2 为超声波辅助加热法和对糙米直接进行蒸煮测定的糙米样品蒸煮曲线,可以得出在每个时间点上煮熟糙米的百分比没有显著变化,且糙米的最适蒸煮时间也没有缩短,说明超声波处理辅助加热法对糙米样品处理效果不明显。

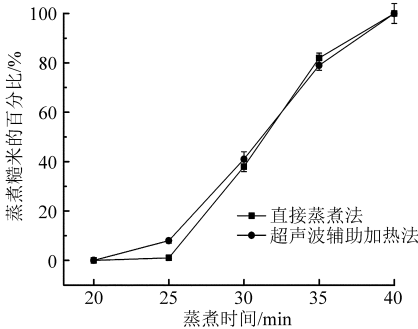
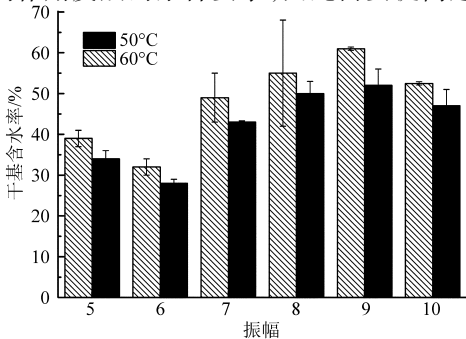


图 2 两种处理方式下糙米的蒸煮曲线

Fig. 2 Cooking curves of brown rice with two different cooking methods

蒸煮过程中糙米的含水率变化曲线如图 3 所示。从图中可以看出,与电热板直接加热法相比,超声波处理结合加热法没有显著提高糙米的含水率,其主要原因是较高的温度下超声波的输出功率较小,达不到作用皮层的条件要求,因此需要提高超声



波输出功率以达到超声波处理对糙米皮层的作用效果。因此,只有降低超声波处理探头的环境温度,才能获得较高的输出功率。

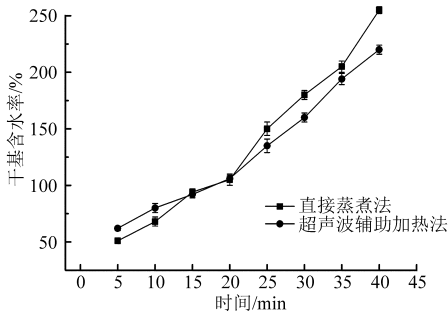


图 3 两种处理方法对糙米干基含水率的影响

Fig. 3 Effects of two different cooking methods on moisture content of brown rice

2.3 不控温条件下超声波处理对糙米理化特性及蒸煮时间的影响

为了充分利用超声波的热效应并获得较高的超声波输出功率,选择在低温下进行试验。当水米混合物达到设定的温度(50°C 和 60°C)后停止超声波处理,分别考察超声波对糙米含水率和固形物损失率的影响。从图 4 可以看出,温度 50°C,振幅为 7、8、9 和 10 时处理获得的糙米样品含水率均高于 40%,而振幅为 5 和 6 时糙米含水率小于 35%,增加幅度不大;同时,处理温度 60°C,振幅为 7、8、9 和 10 时处理获得的糙米样品含水率高于 50%,而振幅为 5 和 6 时糙米含水率小于 40%。同理,通过糙米含水率变化率也可以发现:相同的时间内,高振幅处理下超声波处理比低振幅下超声波处理的糙米含水率变化率更高。

图 5 为不同温度下超声波处理时糙米的固形物损失率及其变化率。在 50°C 和 60°C 不同温度终点处,超声波处理后糙米的固形物损失率呈现先增加后减少的趋势,且温度越高糙米的固形物损失率越大。处理温度 50°C、不同振幅条件下超声波处理时糙米的固形物损失率小于 5%;振幅

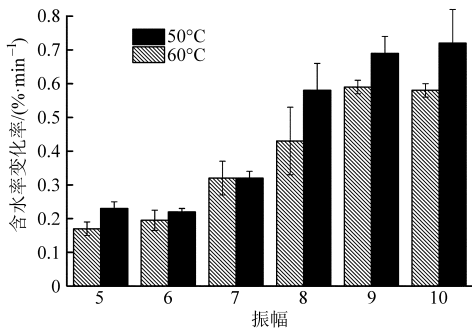


图 4 不控温条件下超声波处理对糙米含水率及其变化率的影响

Fig. 4 Effects of ultrasonic treatment on moisture content and rate of moisture change of brown rice at different treating temperatures

8、9 和 10 时固形物损失率变化率也没有发生显著差异;当振幅低于 7 时,固形物损失率变化率差异较大,这主要与超声波探头功率变化及处理时间有关。同理,处理温度 60℃、振幅大于 7 时超声波处理下糙米的固形物损失率大于 5%;振

幅 5 和 6 时固形物损失率小于 2%;同样条件下固形物损失率变化率趋势一致。因此,不控温条件下,超声波振幅为 7~10 时糙米固形物损失率大于 5%;在振幅低于 6 时,糙米的固形物损失率变化不明显。

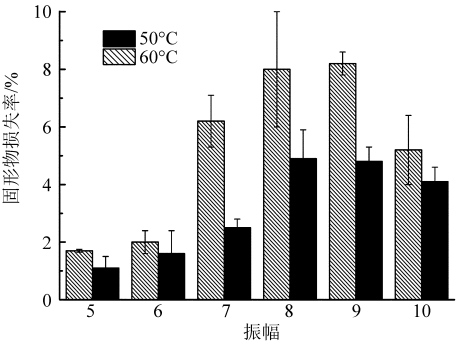


图 5 不控温条件下超声波处理对糙米固形物损失率及其变化率的影响

Fig. 5 Effects of ultrasonic treatment on solid loss and rate of solid loss of brown rice at different treating temperatures

以较低的能量消耗达到较高的含水率和较低的固形物损失率为原则,结合上述试验结果,选择振幅为 8,终点温度为 50℃ 进行最适蒸煮时间的测定。即将 1.67 g 糙米放入 50 mL 玻璃烧杯,加入 25 mL 温度为 25℃ 的蒸馏水,体系温度达到 50℃ 时停止超声处理,并立即用烧杯底部的加热器进行加热,待水沸腾后,测定最适蒸煮时间^[16]。各段所需时间为:超声波装置将水从 25℃ 加热至 50℃ 需要 1.50 min,电热板将水加热至沸腾需要 3.83 min,糙米在沸水中加热处理 24.67 min,共需要 30 min。

因此,不控温条件下超声波处理后糙米的含水率为 50%,固形物损失率为 5%,最适蒸煮时间为 30 min。

2.4 控温条件下超声波处理对糙米理化特性和蒸煮时间的影响

设定温度为 50℃ 和 60℃,对糙米进行超声波处理,2 min 后测定糙米的含水率和含水率变化率,结果如图 6 所示。结果表明,在同一温度下,当振幅为 8 和 10 时,超声波处理中糙米获得的含水率为

33%,没有显著差异;在振幅为 9 的条件下含水率为 25%,出现含水率降低的现象,可能是由于超声波探头的输出功率波动所造成的。当超声波振幅为 7 时,糙米含水率变化率减小,此时超声波发生器的输出功率仅为 36~39 W。由于处理时间一定,超声波处理中糙米含水率变化率也与含水率变化表现出同样的趋势。

图 7 为 50℃ 和 60℃ 时,超声波处理 2 min 后糙米样品的固形物损失率及其变化率。结果表明,处理温度为 50℃,振幅为 7、8、10 时,超声波处理后糙米的固形物损失率大于 8%,且没有显著差异,而振幅为 9 时固形物损失率为 4%;处理温度为 60℃,振幅为 7、8、9 时,超声波处理后糙米的固形物损失率在 8%~10% 之间,没有显著差异,而振幅为 10 时固形物损失率最大,大于 13%。同理,固形物损失率呈现出相同的趋势。

同样地,以较低的能量消耗达到较高的含水率和较低的固形物损失率为原则,结合上述试验结果,选择振幅为 8,超声波处理体系温度为 50℃,处理时

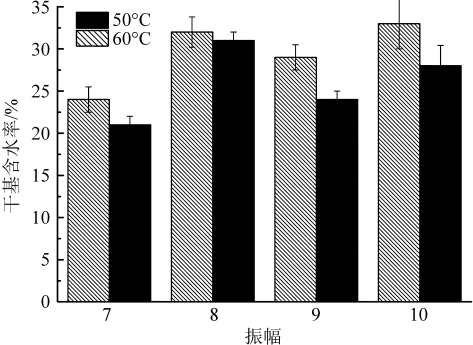
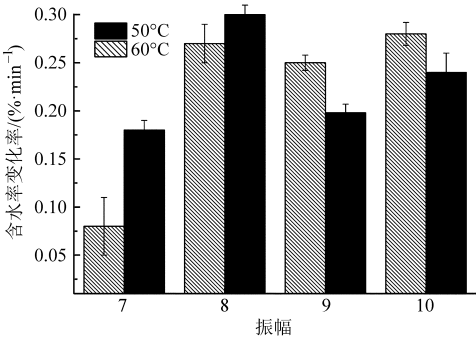


图 6 控温条件下超声波处理对糙米的含水率及其变化率的影响

Fig. 6 Effects of ultrasonic treatment on moisture content and rate of moisture content change of brown rice at different treating temperatures



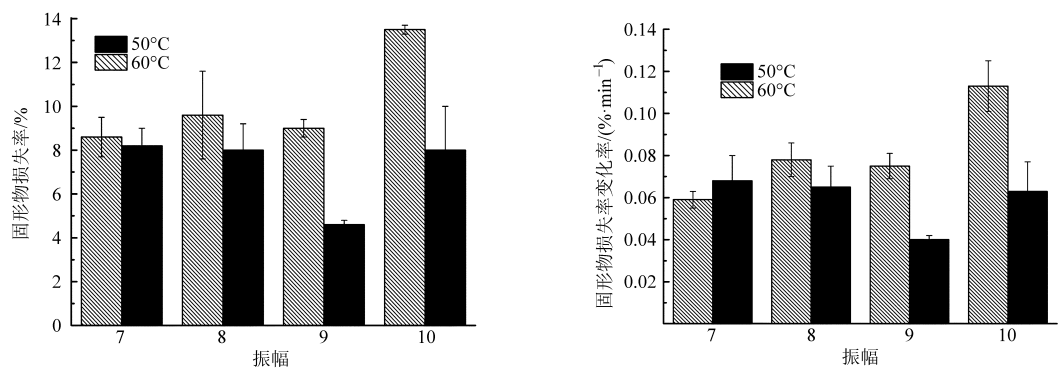


图 7 控温条件下超声波处理对糙米固形物损失率及其变化速率的影响

Fig.7 Effects of ultrasonic treatment on solid loss and rate of solid loss of brown rice at different treating temperatures

间为 2 min 进行最适蒸煮时间的测定。即将1.67 g 糙米放入 50 mL 铝筒中,加入 25 mL 温度为 50℃ 的蒸馏水,超声波处理 2 min,然后将米水混合物倒入筛中沥去水分,确定最适蒸煮时间。各段所需时间为:电热板将水温从 25℃ 升至 50℃ 需要3 min,50℃ 超声波条件下处理 2 min,糙米在沸水中加热 20 min,共需要 25 min。

因此,控温条件下超声波处理后糙米的含水率为 32%,固形物损失率为 8%,最适蒸煮时间为 25 min。

2.5 不同处理方式对糙米含水率影响

为了进一步明确超声波处理对糙米蒸煮时间和含水率的影响,直接对糙米进行蒸煮,测定含水率并将其与上述 2 种方法进行比较。由于不同处理方式下糙米的起始含水率和加热过程不同,3 种方法处理下糙米的含水率变化如表 1 所示。

表 1 不同处理的糙米的平均含水率增长速率

Tab.1 Moisture content increment of different treatments

处理方式	100℃ 起始 含水率/%	最适蒸煮 时间/min	平均含水率增长 速率/(%·min ⁻¹)
直接蒸煮法	13.60	39.60	5.46
不控温超声波处理	>50.40	30.00	<7.28
控温超声波处理	30.30	25.00	7.99

由表 1 可知,对糙米直接蒸煮过程中,从起始含水率 13.6% 至最终含水率 230% 共需要时间 39.6 min,平均含水率增长速率为 5.46%/min;不控温超声波处理方法将水米体系从 25℃ 升温至 50℃ 时糙米的含水率为 50.4%,将水米体系继续升温至沸腾时糙米的含水率继续增加,当烧杯中的水沸腾时,糙米的含水率大于 50.4%,此时蒸煮过程中糙米的平均含水率增长速率小于 7.28%/min;同理可得在控温条件下用探头式超声波处理糙米后,糙米蒸煮过程中平均含水率增长速率为 7.99%/min。因此,可以判定在控温条件下超声波处理时糙米样品中含水率增长速率最大。

2.6 超声波处理对糙米微观结构的影响

为了进一步评价超声波处理对糙米微观结构的影响,对处理前后糙米的皮层变化进行观察并拍照。结果如图 8 所示。

图 8a 是在 40℃ 蒸馏水中浸泡 4 min 的糙米样品,从图片可以看出米粒结构完整,颜色均匀,表面光滑;图 8b 是将糙米浸泡样品在室温下干燥后的结构观察,其表面基本没有发生明显的变化。图 8c 和图 8d 为温度 40℃、振幅 8 条件下超声波处理 4 min 后的糙米样品:图 8c 是对处理后的样品用筛子过滤,除去糙米表面流动水分后的结构,其皮层粗糙,导致表面水分残留较多、反光明显,且有 1/2 以上的米粒出现了局部发白的状况;图 8d 是对超声波处理样品在室温下自然干燥后的观察结果,发现米粒状态均匀,发白的部位消失,米粒皮层破坏较为明显。这种作用增加了糙米的表面积,提高了糙米的水分通透能力,加速了水分的进入,该现象是超声波处理缩短糙米最适蒸煮时间的主要原因。

2.7 超声波处理对糙米化学组成和食用品质的影响

根据优化建立的方法,分别在 50℃ 控温和不控温条件下进行糙米的超声波处理,其对糙米化学组成的影响如表 2 所示:相对于对照样品,超声波处理后,糙米的粗纤维、脂肪、维生素 E、蛋白质和淀粉含量均呈现降低趋势。不控温超声波处理样品在统计学上与未处理的糙米相比具有显著差异,说明经过不控温超声波处理后糙米的营养成分流失较为严重;而控温超声波处理样品与对照在统计学上的差异不显著,这说明控温超声波处理对糙米的化学组成和营养成分没有显著影响。

同时,超声波处理对糙米感官特性的影响如表 3 所示。从表 3 中糙米的感官评价结果可以看出,不控温超声波处理后糙米样品的感官评价指标评分都呈现降低趋势,且外观、颜色、硬度均与未处理样品在统计学上有显著差异,气味、粘度和接受度没有

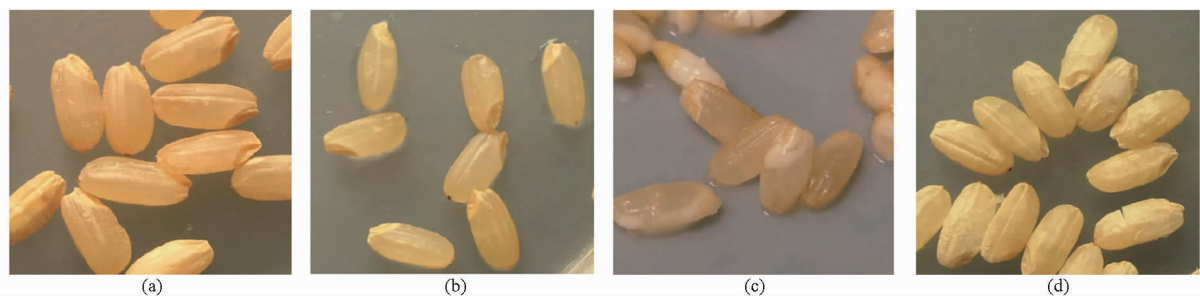


图 8 超声波处理前后糙米的表面形态

Fig. 8 Surface photos of brown rice before and after ultrasonic probe treatments

(a) 糙米浸泡样品 (b) 糙米浸泡样品干燥后形态 (c) 超声波处理糙米样品 (d) 超声波处理糙米样品干燥后形态

表 2 不同处理糙米的化学组成

Tab.2 Chemical composition of different treated rice samples

化学成分	糙米	处理方式	
		不控温超声 波处理	控温超声 波处理
粗纤维质量分数/%	1.36 ± 0.04 ^a	0.93 ± 0.06 ^b	1.35 ± 0.04 ^a
脂肪质量分数/%	3.27 ± 0.11 ^a	3.19 ± 0.09 ^a	2.99 ± 0.12 ^a
维生素 E 质量比 (μg·g ⁻¹)	15.8 ± 0.62 ^a	6.6 ± 0.83 ^b	14.7 ± 0.76 ^a
蛋白质质量分数/%	7.78 ± 0.17 ^a	5.62 ± 0.26 ^b	7.61 ± 0.32 ^a
淀粉质量分数/%	73.9 ± 1.32 ^a	53.3 ± 0.97 ^b	73.5 ± 1.29 ^a

注:同一列中不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

表 3 糙米样品的感官评价

Tab.3 Sensory qualities evaluation of brown rice

评价 指标	糙米	处理方式	
		不控温超声波处理	控温超声波处理
外观	5.25 ± 0.46 ^b	4.12 ± 0.62 ^c	6.32 ± 0.54 ^a
颜色	5.42 ± 0.47 ^b	4.33 ± 0.53 ^c	6.45 ± 0.49 ^a
气味	5.59 ± 0.66 ^b	4.31 ± 0.63 ^{bc}	6.78 ± 0.42 ^a
硬度	6.92 ± 0.63 ^a	2.36 ± 0.13 ^c	4.29 ± 0.81 ^b
粘度	5.77 ± 0.69 ^a	5.61 ± 0.74 ^a	6.28 ± 0.64 ^a
接受度	4.43 ± 0.54 ^b	5.32 ± 0.61 ^{ab}	6.36 ± 0.72 ^a

显著差异,这主要是不控温超声波处理过程对糙米的破坏较为严重,很多米粒呈现大幅度破损状态,因而会影响其感官评价和接受度。此外,控温超声波处理后糙米在外观、颜色、气味、粘度和接受度方面

感官评分较高,与对照相比均有显著差异,且硬度显著下降。由此,控温超声波处理的糙米在感官角度上比未处理的糙米更容易被接受,说明控温超声波处理的糙米有一定的市场潜力。

3 结束语

利用探头式超声波流体装置进行处理糙米,以含水率和固形物损失率为指标,筛查获得了超声波方法处理糙米的最佳方式,评价了不同条件下探头式超声波装置对糙米最适蒸煮时间的影响。研究结果表明:超声波处理辅助加热法对糙米样品处理效果不明显,糙米的最适蒸煮时间没有缩短;以较低的能量消耗达到较高的含水率和较低的固形物损失率为原则,不控温条件下超声波方法处理糙米的条件为振幅 8、终点温度 50℃,此时糙米的含水率为 50%,固形物损失率为 5%,最适蒸煮时间为 30 min;控温条件下超声波方法处理糙米的条件为振幅 8、终点温度 50℃,此时糙米的含水率为 32%,固形物损失率为 8%,最适蒸煮时间为 25 min。同时,对不同条件处理下糙米的化学组成和食用品质进行比较,控温超声波处理下糙米的化学成分和营养品质损失小,且在外观、颜色、气味、硬度、粘度和接受度等方面更易于接受,以控温超声波处理法可以实现糙米的高品质快速蒸煮。因此,探头式超声波方法为糙米加工处理提供了一种新的方法和思路,具有一定的应用价值。

参 考 文 献

1 张守文. 糙米的营养保健功能[J]. 粮食与饲料工业,2003(12):38-41.
Zhang Shouwen. The nutritional and health functions of brown rice [J]. Cereal & Feed Industry, 2003(12): 38-41. (in Chinese)

2 扈战强,代飞云,陈琴,等. 超声波辅助酶处理对糙米理化特性的影响[J]. 中国粮油学报,2013,28(5):1-6.
Hu Zhanqiang, Dai Feiyun, Chen Qin, et al. The influence of ultrasound-assisted enzymatic treatment on physicochemical properties of brown rice [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(5): 1-6. (in Chinese)

3 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.

4 Chris J Seal, Iain A Brownlee. Whole grains and health, evidence from observational and intervention studies [J]. Cereal Chemistry, 2010, 87(2): 167-175.

5 齐琳琳,于亮,于勇. 糙米的营养价值及其加工技术研究进展[J]. 中国食物与营养,2015,21(3):68-71.
Qi Linlin, Yu Liang, Yu Yong. Research advancement in the nutritional value and processing technologies of brown rice [J]. Food and Nutrition in China, 2015, 21(3):68-71. (in Chinese)

6 于巍,周坚,徐群英,等. 糙米与精米的营养价值与质构特性比较研究[J]. 食品科学,2010,31(9):95-97.
Yu Wei, Zhou Jian, Xu Qunying, et al. Comparison on nutritional values and textural properties of brown rice and milled rice [J]. Food Science, 2010, 31(9): 95-97. (in Chinese)

7 王赫男,王静. 糙米的综合利用[J]. 北京工商大学学报:自然科学版,2012,30(3):49-52.
Wang He'nan, Wang Jing. General utility of brown rice [J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2012, 30(3): 49-52. (in Chinese)

8 Jin Liang, Xiao Peng, Lu Yan, et al. Quantitative trait loci for brown rice color, phenolics, flavonoid contents, and antioxidant capacity in rice grain [J]. Cereal Chemistry, 2009, 86(6):609-615.

9 Ohtsubo Ken'ichi, Keitaro Suzuki, Yuji Yasui, et al. Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2005, 18(4): 303-316.

10 Huang Q, Li L, Fu X. Ultrasound effects on the structure and chemical reactivity of cornstarch granules [J]. Starch, 2007, 59(8): 371-378.

11 García Pérez J V, Cárcel J A, S de la Fuente-Blanco S. Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: parametric study [J]. Ultrasonics, 2006, 44(1): 539-543.

12 席细平,马重芳,王伟. 超声波技术应用现状[J]. 山西化工,2007,27(1):25-29.
Xi Xiping, Ma Chongfang, Wang Wei. Application situation of ultrasonic technology [J]. Shanxi Chemical Industry, 2007, 27(1): 25-29. (in Chinese)

13 陈晓明,李开绵,台建祥,等. 木薯皮总香豆素活性物质超声波提取工艺优化[J]. 农业机械学报,2012,43(1):158-165.
Chen Xiaoming, Li Kaimian, Tai Jianxiang, et al. Response surface methodology on ultrasonic extraction technology of total coumarin from Cassava Peel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 158-165. (in Chinese)

14 高振鹏,岳田利,袁亚宏,等. 超声波对糖化酶酶解作用的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(10):138-142.
Gao Zhenpeng, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Effect of ultrasonic on enzymolysis for glucoamylase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 138-142. (in Chinese)

15 刘海飞,肖志刚,王娜,等. 稳态化米糠蛋白超声波辅助提取及其性质研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11):235-241.
Liu Haifei, Xiao Zhigang, Wang Na, et al. Study on ultrasound-assisted extraction and properties of rice bran protein [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 235-241. (in Chinese)

16 Juliano B O, Bechtel D B. The rice grain and its gross composition[M]. United States of America: American Association of Cereal Chemists, 1985: 17-50.

(上接第 183 页)

21 同延安,赵营,赵护兵,等. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1): 64-69.
Tong Yan'an, Zhao Ying, Zhao Hubing, et al. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(1): 64-69. (in Chinese)

22 赵营. 冬小麦/夏玉米轮作体系下作物养分吸收利用与累积规律及优化施肥 [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.
Zhao Ying. Nutrients uptake, utilization, accumulation and optimize fertilization under the winter wheat/summer maize rotation system [D]. Yangling:Northwest A&F Universtiy, 2006. (in Chinese)

23 赵满兴,周建斌,杨绒,等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2): 143-149.
Zhao Manxing, Zhou Jianbin, Yang Rong, et al. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 143-149. (in Chinese)

24 陈毓君. 陕西关中冬小麦/夏玉米轮作体系下施肥对作物产量、养分吸收及累积的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
Chen Yujun. Effects of fertilizer application on yield, nutrient uptake and accumulation under the winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi [D]. Yangling: Northwest A&F Universtiy, 2012. (in Chinese)

25 Horowitz W. Official methods of analysis[M]. Washington, DC:AOAC, 1970: 17-18.

26 Lemaire G, Jeuffroy M H, Gastal F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: theory and practices for crop N management[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(4): 614-624.

27 朱新开,郭文善,封超年,等. 不同类型专用小麦氮素吸收积累差异研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(2): 148-154.
Zhu Xinkai, Guo Wenshan, Feng Chaonian, et al. Nitrogen absorption and utilization differences among wheat varieties for different end uses[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 148-154. (in Chinese)