

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80623

超声功率对芋头生浆面团及馒头品质的影响

李月明¹ 李宏军¹ 任志秋² 宋佳琳¹ 韩 风¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000; 2. 黑龙江交通职业技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: [目的] 获得高品质的芋头生浆馒头。[方法] 使用超声辅助芋头生浆面团发酵, 探究超声功率(300~500 W)对面筋蛋白二级结构、面团的拉伸特性、流变学特性、馒头的比容、质构和色差的影响。[结果] 超声处理改善了芋头生浆面团的拉伸和流变学特性, 降低了游离巯基含量, 并提高了面筋网络结构有序性和稳定性, 馒头的比容、表观和质构特性也优于对照组。当超声功率为 450 W 时, 面团呈现出最佳黏弹性, 游离巯基含量下降了 30.51%, 馒头比容提高了 8.79%, 硬度降低了 21.61%, 馒头表皮光滑, 馒头瓤空隙小而均匀。[结论] 超声处理可以改善芋头生浆面团的加工特性, 超声功率为 450 W 时改善效果最佳。

关键词: 超声; 芋头生浆; 面团; 馒头; 品质

Effect of ultrasonic power on the quality of taro pulp dough and steamed bread

LI Yueming¹ LI Hongjun¹ REN Zhiqiu² SONG Jialin¹ HAN Feng¹

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China; 2. Heilongjiang Jiaotong Polytechnic, Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: [Objective] To obtain high-quality taro pulp steamed bread. [Methods] Ultrasound was used to assist the fermentation of taro pulp dough, and the effects of ultrasonic power (300~500 W) on the secondary structure of gluten protein, extensional properties of dough, rheological properties, specific volume, texture, and color difference of steamed bread were investigated. [Results] Ultrasonication improved the extensional and rheological properties of taro pulp dough, reduced the free sulfhydryl content, and enhanced the order and stability of the gluten network structure. The specific volume, appearance, and textural properties of the steamed bread were also superior to those of the control group. When the ultrasonic power was 450 W, the dough showed optimal viscoelasticity, the free sulfhydryl content decreased by 30.51%, the specific volume of the steamed bread increased by 8.79%, and the hardness decreased by 21.61%. The surface of the steamed bread was smooth, and the inner texture was small and uniform in voids. [Conclusion] Ultrasonic treatment can improve the processing characteristics of taro pulp dough, with the best improvement observed at an ultrasonic power of 450 W.

Keywords: ultrasound; taro pulp; dough; steamed bread; quality

馒头是中国的传统主食之一, 由精制小麦粉和酵母混合发酵制作而成。但小麦粉会因精制加工损失维生素和膳食纤维等营养素的含量^[1], 通过外加马铃薯、甘薯、紫薯、芋头等杂粮替代部分小麦粉制作馒头, 可提高馒头的营养品质^[2-3]。

芋头具有口感细腻、高纤维低脂肪的特性, 含有多种人体必需氨基酸和维生素^[4]。芋头代替部分小麦粉所制得的馒头, 在产生新风味、丰富馒头产品种类的同时提高了营养价值。但芋头的添加会使得馒头硬度升高、比容

和感官品质下降^[5]。通常使用外源添加剂^[6]、酶制剂^[7]及物理场处理^[8]等方式改善馒头品质。

超声处理作为一种物理改性方式, 通过产生的空化效应、剪切力和压力等, 来影响食品的结构, 以达到改善食品颜色、风味和质地的效果^[9]。Zhang 等^[10]研究发现, 在 50% 甘薯生浆面团发酵过程中使用超声辅助处理, 可显著提高面团的加工特性和馒头的感官品质。张艳艳等^[11]在面团醒面过程中使用低频超声处理, 面团的结合水含量提高了 44.0%, 吸附水含量下降了 11.0%。超声处

基金项目: 山东省重点研发计划(乡村振兴科技创新提振行动计划)项目(编号:2023TZXD004)

通信作者: 李宏军(1968—), 男, 山东理工大学教授, 博士。E-mail: Hongjunli1351@hotmail.com

收稿日期: 2024-07-03 **改回日期:** 2024-12-07

理可改善面制品的加工特性和产品品质,但目前研究多集中于纯麦面制品,超声处理辅助发酵制作芋头生浆馒头的研究鲜有报道^[12]。研究拟探讨在超声辅助发酵制备芋头生浆馒头过程中,不同的超声功率对面团加工特性和馒头品质的影响,以期获得高品质的芋头生浆馒头,并扩大超声在芋头加工领域的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

小麦粉:淀粉 73.1%,水分 11.75%,蛋白质 12.80%,淄博市云海面粉厂;

高活性干酵母:安琪酵母股份有限公司;

芋头:荔浦芋头,市售;

三羟甲基甲烷基甲烷(Tris-base):99.9%,合肥博美生物科技有限公司;

盐酸胍:99.0%,山东科源生化有限公司;

尿素:99.0%,佛山西陇化工有限公司;

甘氨酸:99.0%,北京索莱宝科技有限公司;

乙二胺四乙酸(EDTA):99.5%,佛山西陇化工有限公司;

5,5'-二硫双-2-硝基苯甲酸(DTNB):98%,上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

醒发箱:BRF-18C 型,广州展卓商用设备制造有限公司;

料理机:XZ-3 型,中山市欣泽电器有限公司;

数控超声波清洗器:KQ-500DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

质构仪:TA.XT.plus 型,英国 Stable Micro Systems 公司;

动态流变仪:KNX2110 型,英国马尔文仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:Nicolet 5700 型,美国 Thermo Nicolet 公司。

1.2 方法

1.2.1 芋头生浆面团及馒头的制备 芋头洗净、去皮、切块后,将芋头碎块和水以 $m_{芋头}:m_{水}=10:3$ 的比例混合,放入料理机中打浆 3 min,制得芋头生浆。

试验中小麦粉面团和馒头是由 300 g 小麦粉、156 mL 的水和 3 g 酵母制作而成,而芋头生浆面团和馒头的对照组是将 120 g 的芋头生浆、180 g 的小麦粉、30 mL 的水和 3 g 的酵母混合揉制 3 min 后置于 32 ℃ 的醒发箱中发酵 50 min,制得的面团通过压面、分割、整型等步骤制备重 100 g 的馒头胚,在相同条件下继续醒发 20 min,蒸制 20 min,并在熟制后室温下冷却 1 h。使用超声辅助发酵

的芋头生浆馒头配方与对照组相同,将混合揉制好的未发酵面团放入保鲜袋中,插入一根长 20 cm 的吸管并紧紧绑住,在防水的同时保持空气畅通^[9]。将装有面团的袋子放入超声波清洗槽中,水温通过加热和冷水循环控制在 32 ℃,超声时间 50 min,超声功率分别为 300,350,400,450,500 W。超声处理后芋头生浆面团制作馒头的方法与对照组相同。

1.2.2 面团湿面筋及游离巯基(—SH)含量测定

(1) 湿面筋含量:根据文献[13]。

(2) 游离巯基含量:根据文献[10],按式(1)计算样品的游离巯基(—SH)含量。

$$C_{SH} = 73.53A_{412nm} \times 5.02 \div C, \quad (1)$$

式中:

C_{SH} ——游离巯基含量, $\mu\text{mol/g}$;

A_{412nm} ——样品在 412 nm 处的吸光度;

C ——样品质量浓度, mg/mL 。

1.2.3 傅里叶红外光谱(FT-IR)测定 根据文献[14]的方法测定芋头生浆面团的傅里叶红外光谱,并使用 PeakFit 4.12 软件对图谱的酰胺 I 区($1\ 600\sim1\ 700\ \text{cm}^{-1}$)进行分析,计算二级结构峰面积比。二级结构峰归属如下: β -折叠($1\ 600\sim1\ 640, 1\ 670\sim1\ 690\ \text{cm}^{-1}$),无规卷曲($1\ 640\sim1\ 650\ \text{cm}^{-1}$), α -螺旋($1\ 650\sim1\ 660\ \text{cm}^{-1}$), β -转角($1\ 660\sim1\ 670, 1\ 690\sim1\ 700\ \text{cm}^{-1}$)。

1.2.4 面团拉伸特性测定 根据 GB/T 14615—2019。

1.2.5 面团动态流变学特性分析 根据文献[15]修改如下:使用配备 40 mm 直径且间隙为 2 mm 的平行板几何结构动态流变仪,试验间隙和应变幅度分别设置为 2 mm 和 0.1%,扫描频率范围是 0.1~10.0 Hz。

1.2.6 面团微观结构观察 根据文献[10]。

1.2.7 馒头比容测定 根据 GB/T 21118—2007。

1.2.8 馒头质构测定 根据文献[10]修改如下:从冷却后的馒头中心取 2 cm 厚的馒头片,质构仪配备 P/36R 探头,使用 TPA 模式,测前、测中、测后速度均为 1.0 mm/s,压缩比 50%;两次压缩间隔时间 5 s;感应力 $4.9 \times 10^{-2}\ \text{N}$ 。

1.2.9 馒头色差测定 根据文献[16]²³测量馒头皮和馒头瓤的颜色参数,并按式(2)计算总色差。

$$\Delta E^* = [(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

式中:

ΔE^* ——试验组与小麦馒头的总色差;

L^*, a^*, b^* ——试验组的颜色参数;

L_0, a_0, b_0 ——小麦馒头的颜色参数。

1.3 数据分析

试验数据统计处理采用 SPSS 26.0,使用 Duncan 进行显著性分析($P < 0.05$),结果表示为“平均值 $\pm$ 标准偏差”,每组样品重复 3 次以上。

2 结果与分析

2.1 面团湿面筋及游离巯基含量

面筋蛋白是由麦醇溶蛋白和麦谷蛋白在面团揉制过程中通过二硫键结合形成的均匀蛋白网络结构,其含量决定了面团的品质^[17]。如表1所示,对照组的湿面筋含量与小麦面团相比降低了32.48%,而芋头生浆面团中的湿面筋含量随超声功率的升高先增加后降低,在450 W时达到最大值。这是因为芋头生浆中不含面筋蛋白,生浆的添加对原有的面筋蛋白起到了稀释作用,而适当超声处理可促进面团面筋蛋白聚集,提高了面筋网络的稳定性^[15]。但过高的超声功率又会破坏面筋蛋白的网络结构,降低湿面筋含量,刘鹏飞等^[12]在使用超声协助鲜湿面的加工研究中得到类似结论。

表1 超声功率对芋头生浆面团湿面筋含量及游离巯基含量的影响[†]

Table 1 Effect of ultrasonic power on wet gluten content and free —SH content of taro pulp dough

超声功率/W	游离巯基含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	湿面筋含量/%
小麦面团	0.93 ± 0.03^f	28.45 ± 0.29^a
对照	2.36 ± 0.07^a	19.21 ± 0.21^d
300	2.16 ± 0.04^b	19.64 ± 0.35^{ed}
350	1.92 ± 0.02^c	19.83 ± 0.18^c
400	1.86 ± 0.03^{cd}	20.39 ± 0.05^b
450	1.64 ± 0.04^e	20.44 ± 0.16^b
500	1.80 ± 0.13^d	19.59 ± 0.07^{cd}

[†] 同列字母不同表示有显著性差异($P<0.05$)。

游离巯基氧化形成的二硫键,在维持面筋结构的稳定性和面团流变学性质方面起着重要作用^[18]。添加了芋头生浆的对照组与小麦面团相比,游离巯基含量增加了153.76%。这是因为芋头生浆中的多酚参与了面筋蛋白的氧化还原反应,进而影响游离巯基合成二硫键^[19]。超

声处理后,面团中的游离巯基随超声功率的增加呈先下降后上升的趋势。当超声功率为450 W时,面团的游离巯基与对照组相比显著降低了30.51%($P<0.05$)。这与Zhang等^[20]对超声辅助与面筋组分结构的研究结果一致,表明低功率超声处理增强的蛋白质相互作用以及空化效应产生的羟自由基,均能促进游离巯基的氧化形成二硫键,进而参与蛋白质的聚合。但当超声功率过大时,可能会造成蛋白质折叠,将蛋白内部的游离巯基暴露于表面,引发二硫键产生断裂,最终影响面筋结构的稳定性^[11]。

2.2 面团傅里叶红外光谱(FT-IR)

从图1(a)可以看出,芋头面团与小麦面团相比,在400~4 000 cm^{-1} 范围内没有出现新的吸收峰,表明芋头生浆的添加未产生新的官能团。在图1(b)中样品的 β -折叠含量均在40%左右,表明面团的蛋白质二级结构以 β -折叠为主。蛋白质的二级结构则反映面筋网络结构的强度和稳定性,其中 α -螺旋和 β -折叠代表着有序结构,通常支持蛋白质的骨架结构^[14]。与小麦面团相比,芋头生浆的添加会破坏面筋蛋白的网络结构,导致蛋白质二级结构中 α -螺旋和 β -折叠的总比例从70.32%下降到57.26%。而超声处理后 α -螺旋和 β -折叠的总比例均明显高于对照组,其中450 W的比例最高(71.20%),这一变化趋势与何秋实^[21]超声处理红豆蛋白后,蛋白二级结构变化趋势相似。当环境发生改变时,蛋白质分子会发生构象重排,结果表明适当超声处理可能促进了面筋蛋白分子的重排,改变了二级结构,提高了蛋白质结构的有序性和稳定性^[22-23]。

2.3 面团拉伸特性

超声功率对面团的抗延伸阻力和延伸性的影响如图2所示。与小麦面团相比,对照组面团的抗延伸阻力和延伸性显著降低($P<0.05$),这是因为芋头生浆的添加稀释了面团中面筋蛋白的含量,破坏了面团的网络结构。超声功率低于450 W,芋头生浆面团的拉伸特性随超声功

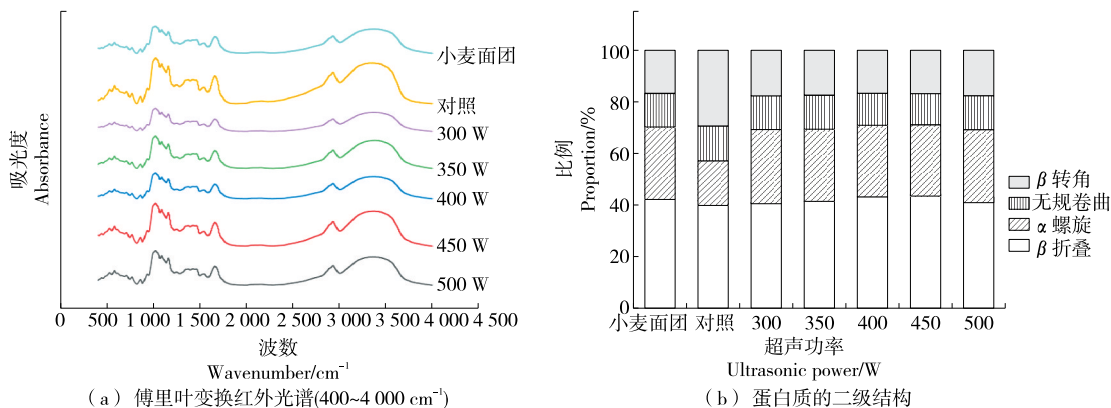
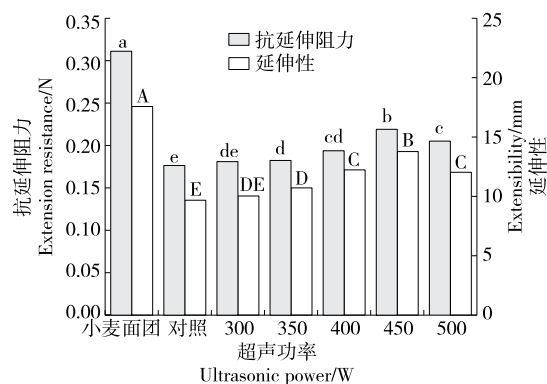


图1 超声功率对芋头生浆面团蛋白结构的影响

Figure 1 Effect of ultrasonic power on the protein structure of taro pulp dough



同指标字母不同表示有显著性差异 ($P < 0.05$)

图 2 超声功率对芋头生浆面团拉伸特性的影响

Figure 2 Effect of ultrasonic power on the extensional properties of taro pulp dough

率增加而增加。超声功率为 450 W, 抗延伸阻力和延伸性与对照组相比分别提高了 24.03% 和 42.57%, 表明低功率的超声处理可以增强面筋蛋白网络的强度和连续性, 进而提高芋头生浆面团的拉伸特性。但当超声功率高于 450 W 时, 面团的拉伸特性开始下降, 这可能是因为过高的超声功率的机械剪切力影响了面团的面筋网络结构稳定性^[24-25]。

2.4 面团流变学特性

超声辅助发酵对芋头生浆面团的流变学特性影响如图 3 所示。在整个频率范围内, 所有样品的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 均随着频率的增加而增加, 且 G' 值始终大于 G'' 值。说明面团的储能模量弹性行为占据主导, 同时具有弱凝胶体系的动态流变学特征^{[16]44}。对照组面团的 G' 值和 G'' 值显著低于小麦面团的, 这是由于芋头生浆的添加稀释了面筋网络结构, 影响了面团的流变学特性。在相同扫描频率下, 与对照组相比, 经过 450 W 超声处理的面团, G' 值和 G'' 值均明显提高, 说明适当的超声处理可以促进游离巯基氧化形成二硫键, 诱导蛋白质分子聚合, 改变面筋蛋白二级结构, 进而提高面筋蛋白强

度和稳定性, 改善芋头生浆面团流变学特性^[23-26]。

2.5 面团微观结构

超声功率对芋头生浆面团的微观结构的影响如图 4 所示。小麦面团的淀粉颗粒紧密地嵌入了面筋网络中。对照组面团中面筋网络与淀粉颗粒结合性差且结构松散, 这是由于生浆的添加稀释了面筋蛋白, 面筋网络中出现不连续结构, 这与 Han 等^[27]的研究结果一致。而超声处理后淀粉颗粒与面筋网络的结合比较均匀紧密, 超声功率 450 W 处理的面团中淀粉颗粒分布与小麦面团最为接近, 表明超声处理后淀粉颗粒与面筋网络结合性增强, 面筋网络更加连续和稳定。这是由于超声的机械作用促进了面筋网络的形成和水化, 提高了结构骨架的完整性, 进而减少了淀粉颗粒的析出^[11,17]。

2.6 馒头质构与比容

表 2 反映了使用不同超声功率辅助发酵对芋头生浆馒头比容和质构特性的影响。与小麦馒头相比, 对照组的比容、弹性和黏聚性显著降低, 而硬度和咀嚼度则明显升高 ($P < 0.05$), 一方面是因为生浆的添加破坏了面筋网络结构, 另一方面可能是由于生浆中的膳食纤维通过氢键与面筋蛋白交联, 导致馒头比容下降, 质构特性变差^[28]。

随着超声功率的增加芋头生浆馒头的比容呈先升高后降低的趋势, 并在超声功率为 450 W 时达到最大值, 比对照组提高了 8.79%。超声处理提高了面团的持气能力, 可以防止发酵和熟制过程中气室塌陷, 进而提高了馒头的比容^[28-29]。当超声功率为 450 W 时芋头生浆馒头的硬度和咀嚼度与对照相比分别降低了 21.59% 和 8.41%, 而弹性和黏聚性则分别升高了 4.30% 和 4.86%。表明适当的超声处理对芋头生浆馒头的质构特性有较为显著的改善作用 ($P < 0.05$), 这与超声辅助发酵对面团拉伸和流变学特性影响的结果一致。适当的超声处理可以提高面筋网络的稳定性, 同时促进面筋蛋白与淀粉的相互作用和大分子间的交联, 增加面团的强度和韧性, 以改善面团的加工特性, 最终提高馒头的品质^[24-25]。但当超声功率过

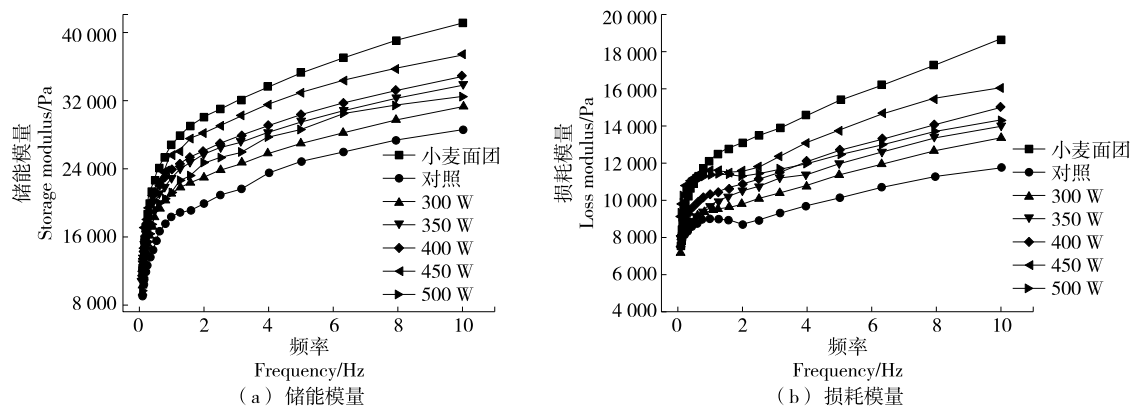
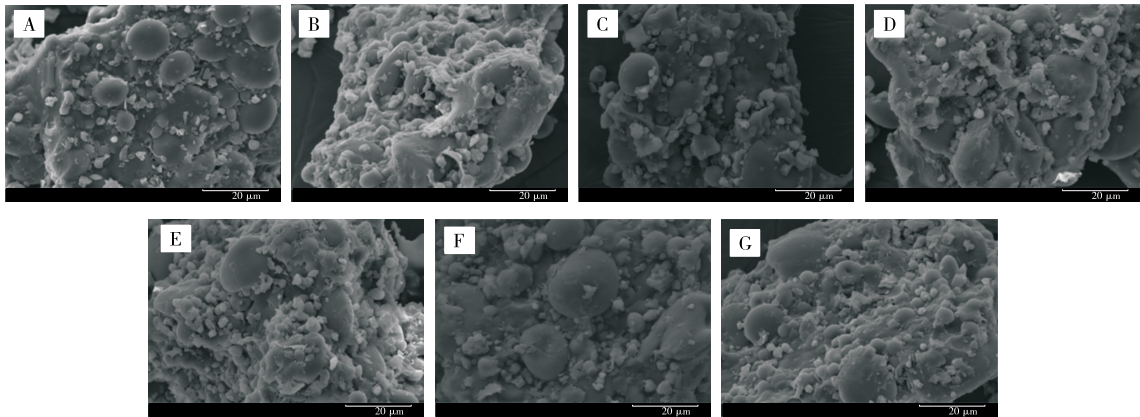


图 3 超声功率对芋头生浆面团流变学特性的影响

Figure 3 Effect of ultrasonic power on the rheological properties of taro pulp dough



A. 小麦面团 B. 对照 C. 经 300 W 超声处理的面团 D. 经 350 W 超声处理的面团 E. 经 400 W 超声处理的面团 F. 经 450 W 超声处理的面团 G. 经 500 W 超声处理的面团

图 4 超声功率对芋头生浆面团扫描电子显微镜照片的影响

Figure 4 Effect of ultrasonic power on scanning electron micrographs of taro pulp dough

表 2 超声功率对芋头生浆馒头比容和质构特性的影响[†]

Table 2 Effect of ultrasonic power on specific volume and textural properties of taro pulp steamed bread

超声功率/W	比容/(mL·g ⁻¹)	硬度/N	弹性/mm	黏聚性	咀嚼度/(N·mm)
小麦馒头	2.81±0.04 ^a	11.11±0.17 ^c	0.99±0.00 ^a	0.89±0.00 ^a	10.64±0.18 ^e
对照	2.39±0.04 ^e	13.52±0.06 ^a	0.93±0.00 ^e	0.84±0.01 ^e	14.67±0.28 ^a
300	2.44±0.07 ^{de}	13.40±0.06 ^a	0.94±0.01 ^d	0.85±0.00 ^d	14.47±0.09 ^{ab}
350	2.48±0.02 ^{cd}	12.08±0.11 ^b	0.95±0.01 ^d	0.86±0.01 ^d	14.22±0.26 ^b
400	2.53±0.03 ^{bc}	11.27±0.07 ^{cd}	0.96±0.00 ^c	0.87±0.00 ^c	13.88±0.13 ^c
450	2.60±0.01 ^b	10.60±0.11 ^e	0.97±0.01 ^b	0.88±0.01 ^b	13.44±0.11 ^d
500	2.51±0.07 ^{cd}	11.32±0.17 ^c	0.95±0.00 ^c	0.87±0.00 ^c	13.75±0.11 ^c

[†] 同列字母不同表示有显著性差异($P<0.05$)。

高时,会破坏二硫键进而影响面筋网络结构的稳定性,对馒头品质产生不利影响^[30]。

2.7 馒头色差和表观结构

不同超声功率辅助发酵芋头生浆馒头的亮度值(L^*)、黄蓝色度值(b^*)、红绿色度值(a^*)和 ΔE 如表 3 所示。与小麦馒头相比,对照组的馒头皮的 L^* 和 b^* 分别降低了 5.67 和

2.65,而 a^* 升高了 1.73;馒头瓤的 L^* 和 b^* 分别降低了 6.90 和 2.43,而 a^* 升高了 1.60。这是由于芋头生浆本身的颜色以及生浆中的酚类化合物在加工过程中发生的褐变反应导致的^[30-31]。随着超声功率的升高,馒头皮和瓤的 L^* 值和 b^* 值呈先增大后减小的趋势,而 ΔE 则呈先减小后增大的趋势。当超声功率为 450 W 时,馒头的 ΔE 最低,表明该

表 3 超声功率对芋头生浆馒头色差的影响[†]

Table 3 Effect of ultrasonic power on the color difference of taro pulp steamed bread

超声功率/ W	馒头皮				馒头瓤			
	L^*	a^*	b^*	ΔE	L^*	a^*	b^*	ΔE
小麦馒头	82.28±0.43 ^a	-0.51±0.06 ^e	17.59±0.13 ^a		86.93±0.28 ^a	-0.44±0.04 ^d	17.00±0.23 ^a	
对照	76.61±0.60 ^e	1.22±0.04 ^a	14.94±0.14 ^e	6.49±0.21 ^a	80.03±1.32 ^d	1.16±0.04 ^a	14.57±0.20 ^f	7.50±0.38 ^a
300	77.04±0.30 ^{de}	1.07±0.07 ^b	15.11±0.15 ^{de}	6.01±0.23 ^b	81.38±0.53 ^c	1.06±0.07 ^b	14.86±0.13 ^{ef}	6.14±0.54 ^b
350	77.88±0.44 ^{cd}	0.92±0.10 ^c	15.25±0.17 ^{cd}	5.19±0.19 ^c	82.02±0.11 ^c	0.81±0.08 ^b	15.15±0.16 ^{de}	5.41±0.14 ^c
400	78.41±0.78 ^{bc}	0.79±0.04 ^{cd}	15.64±0.47 ^{bc}	4.53±0.36 ^d	82.25±0.17 ^c	0.77±0.12 ^{bc}	15.70±0.04 ^{bc}	5.01±0.25 ^d
450	79.48±0.79 ^b	0.66±0.05 ^d	15.79±0.39 ^b	3.53±0.40 ^e	83.53±0.15 ^b	0.63±0.08 ^c	15.78±0.09 ^b	3.77±0.28 ^e
500	78.17±0.20 ^c	0.84±0.12 ^c	15.53±0.09 ^{bc}	4.80±0.20 ^d	82.52±0.49 ^{bc}	0.78±0.03 ^b	15.42±0.19 ^{cd}	4.83±0.19 ^d

[†] 同列字母不同表示有显著性差异($P<0.05$)。

组的颜色与小麦馒头最为接近。这是由于超声对多酚氧化酶活性的影响以及超声波处理对芋头生浆和面团的均化作用,提高了馒头的亮度,同时超声对面团加工特性的改善,也进一步提高了馒头的感官品质^[25]。

如图 5 所示,与小麦馒头相比对照组馒头表皮粗糙、横切面多孔洞、亮度下降、颜色偏暗黄。经 450 W 超声处理的芋头生浆馒头外观圆润光滑、截面空隙小而均匀。结果表明,超声处理显著改善了芋头生浆馒头的品质。

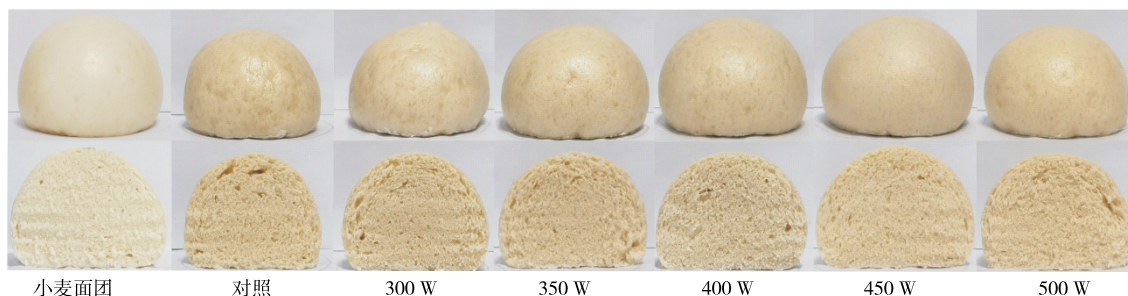


图 5 超声功率对芋头生浆馒头外观的影响

Figure 5 Effect of ultrasonic power on the apparent appearance of taro pulp steamed bread

3 结论

超声辅助芋头生浆面团发酵可以显著改善面团加工特性和馒头品质。在 300~500 W 的超声功率范围内,超声辅助的改善作用先升高后下降,在 450 W 时效果最佳。与对照组相比,面团中的游离巯基含量降低了 30.51%,而抗延伸阻力和延伸性分别提高了 24.03% 和 42.57%,面团的储能模量和损耗模量最大,且与小麦面团最为接近,扫描电镜和傅里叶红外光谱的结果同样表明超声对面筋网络结构的有序性和稳定性有改善作用。经 450 W 超声处理后,芋头生浆馒头比容提高了 8.79%,质构特性得到明显改善,外观圆润光滑、空隙细密均匀,与小麦馒头的色泽差距最小。综上所述,超声辅助发酵可以改善高添加量芋头生浆馒头的品质。

参考文献

[1] 王鑫宇,韩艳芳,李沿,等.小麦粉中的主要成分对馒头品质影响的研究进展[J].粮油食品科技,2021,29(2):152-157.
WANG X Y, HAN Y F, LI Y, et al. Research progress on the effects of main components in flour on the quality of steamed bread[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 152-157.

[2] 路飞,吴玥瞳,郑家荣,等.杂粮馒头的营养价值及加工技术研究进展[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2021,39(3):230-237.
LU F, WU Y T, ZHENG J R, et al. Research progress on nutrition values and processing technology of steamed bread with coarse cereals[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2021, 39(3): 230-237.

[3] 王莹.不同冷冻温度对莱阳芋头粉生鲜面条品质影响研究[D].新乡:河南科技学院,2022:7-10.
WANG Y. Effect of different freezing temperatures on the quality of taro noodles[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science

and Technology, 2022: 7-10.

[4] 韩笑,张东旭,王磊,等.芋头的营养成分及加工利用研究进展[J].中国果菜,2018,38(3):9-13.
HAN X, ZHANG D X, WANG L, et al. Research progress on the nutrition components and processing and utilization of taro [J]. China Fruit & Vegetable, 2018, 38(3): 9-13.

[5] 李刚凤,吴素华,廖雪媛,等.芋头馒头的研制[J].食品科技,2017,42(9):145-148.
LI G F, WU S H, LIAO X Y, et al. Preparation on the steamed bread with taro[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(9): 145-148.

[6] 汪雅馨,刘晓媛,申茹晓,等.金丝绞瓜馒头的配方优化及品质分析[J].食品科技,2023,48(9):127-135.
WANG Y X, LIU X Y, SHEN R X, et al. Process formula optimization and quality analysis of steamed bread with *Cucurbita pepo* L. subsp. *pepo* [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(9): 127-135.

[7] 刘晓芳,王岸娜,吴立根.响应面法优化粗杂粮馒头的最优配比研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(1):42-48.
LIU X F, WANG A N, WU L G, et al. Response surface methodology for optimizing the proportion of multi-grain grain steamed bread[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 42-48.

[8] 张艳艳,张斯琦,孙萌辉,等.磁场处理对面团发酵特性的影响及作用机制[J].食品科学,2024,45(3):110-116.
ZHANG Y Y, ZHANG S Q, SUN M H, et al. Effect and action mechanism of magnetic field treatment on the fermentation characteristics of dough[J]. Food Science, 2024, 45(3): 110-116.

[9] LUO D L, WU R Y, ZHANG J, et al. Effects of ultrasound assisted dough fermentation on the quality of steamed bread[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 83: 147-152.

[10] ZHANG M, SUO W J, DENG Y X, et al. Effect of ultrasound-

- assisted dough fermentation on the quality of dough and steamed bread with 50% sweet potato pulp[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105912.
- [11] 张艳艳, 李银丽, 吴萌萌, 等. 超声波对醒面过程中面团流变学特性、水分分布及蛋白二级结构的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(21): 72-77.
- ZHANG Y Y, LI Y L, WU M M, et al. Effects of ultrasonic-assisted resting on dough rheological properties, water distribution and protein secondary structure[J]. *Food Science*, 2018, 39(21): 72-77.
- [12] 刘鹏飞, 罗登林, 岳崇慧, 等. 超声协助面团加工对鲜湿面品质的改善作用[J]. *食品科学*, 2023, 44(9): 66-71.
- LIU P F, LUO D L, YUE C H, et al. Effect of ultrasound-assisted dough processing on fresh noodle quality[J]. *Food Science*, 2023, 44(9): 66-71.
- [13] CAO G, CHEN X T, WANG N, et al. Effect of konjac glucomannan with different viscosities on the quality of surimi-wheat dough and noodles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 221: 1 228-1 237.
- [14] XIONG L C, ZHANG B J, NIU M, et al. Protein polymerization and water mobility in whole-wheat dough influenced by bran particle size distribution[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82: 396-403.
- [15] 陆红梅, 王秋玉, 袁梦, 等. 不同酵母对藜麦馒头面团特性及品质的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(11): 126-131.
- LU H M, WANG Q Y, YUAN M, et al. Effects of different yeasts on characteristics and quality of quinoa steamed bread dough[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(11): 126-131.
- [16] 张敏. 超声辅助发酵对添加甘薯生浆面团及馒头品质影响研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- ZHANG M. Effect of ultrasonic-assisted fermentation on the quality of sweet potato pulp dough and steamed bread[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.
- [17] SONG J L, JIANG L J, QI M M, et al. Study of ultrasonic treatment on the structural characteristics of gluten protein and the quality of steamed bread with potato pulp[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92: 106281.
- [18] PENG H H, ZHANG J, WANG S H, et al. High moisture extrusion of pea protein: effect of *L*-cysteine on product properties and the process forming a fibrous structure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107633.
- [19] LI M, ZHU K X, PENG J, et al. Delineating the protein changes in Asian noodles induced by vacuum mixing[J]. *Food Chemistry*, 2014, 143: 9-16.
- [20] ZHANG Y Y, LI Y L, WANG H W, et al. Effects of ultrasound-assisted freezing on the water migration of dough and the structural characteristics of gluten components[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 94: 102893.
- [21] 何秋实. 超声处理对红豆蛋白结构及功能性影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(7): 49-53.
- HE Q S. The effect of ultrasonic treatment on the structure and functional properties of red bean protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(7): 49-53.
- [22] 叶子谦, 王沛, 董华, 等. 微波和超声处理对麦麸研磨特性及全麦面团品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 106-111.
- YE Z Q, WANG P, DONG H, et al. Effects of microwave and ultrasound treatment on the grinding characteristics of wheat bran and the quality of whole wheat dough[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(20): 106-111.
- [23] WEN C T, ZHANG J X, YAO H, et al. Advances in renewable plant-derived protein source: the structure, physicochemical properties affected by ultrasonication[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 53: 83-98.
- [24] ZHANG H X, CHEN G J, LIU M, et al. Effects of multi-frequency ultrasound on physicochemical properties, structural characteristics of gluten protein and the quality of noodle[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 67: 105-135.
- [25] YU Z, SU Y, ZHANG Y L, et al. Potential use of ultrasound to promote fermentation, maturation, and properties of fermented foods: a review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129805.
- [26] 白喜婷, 朱文学, 马怡童, 等. 超声波处理对全蛋液流变特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(7): 51-57.
- BAI X T, ZHU W X, MA Y T, et al. Effect of ultrasonic treatment on the rheological properties of liquid whole egg[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(7): 51-57.
- [27] HAN R, LIN J, HOU J, et al. Ultrasonic treatment of corn starch to improve the freeze-thaw resistance of frozen model dough and its application in steamed buns[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2023, 12(10): 1 962.
- [28] 孙莹, 李欣, 花玥, 等. 米糠粉、麦麸粉添加量对馒头及面团品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(2): 138-143.
- SUN Y, LI X, HUA Y, et al. Effects of rice bran powder and wheat bran powder on the quality of steamed bun and dough[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(2): 138-143.
- [29] 姚建莉. 苦杏仁皮与超声辅助处理对面团特性及面包品质的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021: 17-33.
- YAO J L. Effect of apricot kernel skins and ultrasound treatment on dough properties and bread quality[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021: 17-33.
- [30] YAO J L, ZHANG Q A, LIU M J. Utilization of apricot kernel skins by ultrasonic treatment of the dough to produce a bread with better flavor and good shelf life[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145: 111545.
- [31] 陈佳楠. 多模式超声联合温热处理对草莓汁的褐变抑制机理及品质调控研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 63-64.
- CHEN J N. Effect of multi-mode thermosonication on browning inhibition and quality regulation of strawberry juice [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 63-64.