

超声预处理对空气油炸薯条理化性质及结构特性变化

陈博儒, 黄月威, 欧梓浩, 罗诗茵, 马昌昊, 李坚, 曾新安, 黄燕燕*

(佛山大学食品科学与工程学院, 广东省食品智能制造重点实验室, 广东佛山 528225)

摘要: 该研究旨在探讨超声预处理对空气炸锅制备的薯条理化性质及结构特性的影响。结果表明, 超声预处理可以提升薯条的口感, 其硬度从2 217.3 g降低至1 743.2 g, 弹性从0.29提高到0.33。调节超声功率可降低薯条含油率, 当超声功率为600 W时, 可使薯条含油量从7.42%降低到3.87%, 并赋予薯条金黄明亮的色泽。扫描电镜结果表明超声预处理使薯条内部结构由致密变得疏松, 有助于提高空气油炸过程中薯条中水分的蒸发速率, 更快达到内外平衡温度, 可以减少油脂吸附并使得口感更酥脆。结合感官评价结果综合考虑选择超声功率为600 W作为最佳预处理条件来制备口感佳且油脂含量低的马铃薯休闲食品。研究结果为超声技术在食品加工领域的应用提供了新的视角和思路, 对于推动低脂健康油炸食品的开发和市场推广具有重要意义。

关键词: 超声; 空气炸锅; 薯条; 理化性质

文章编号: 1673-9078(2025)05-204-212

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0030

Effects of Ultrasound Pretreatment on the Physicochemical Properties and Structural Characteristics of Air-fried French Fries

CHEN Boru, HUANG Yuewei, OU Zihao, LUO Shiyin, MA Changhao,

LI Jian, ZENG Xin'an, HUANG Yanyan*

(School of Food Science and Engineering, Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Food Manufacturing, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: The effects of ultrasound pretreatment on the physicochemical properties and structural characteristics of air-fried French fries were clarified in this study. Appropriate ultrasound pretreatment resulted in a decrease in hardness from 2 217.3 g to 1 743.2 g, and an increase in elasticity from 0.29 to 0.33, indicating that French fry palatability can be improved through ultrasound pretreatment. Ultrasound pretreatment at 600 W reduced French fry oil content from 7.42% to 3.87%, giving the fries a bright golden color, and revealing that French fry oil content can be reduced by adjusting the ultrasound power. Scanning electron microscopy images showed that ultrasound pretreatment made the French fry internal

引文格式:

陈博儒, 黄月威, 欧梓浩, 等. 超声预处理对空气油炸薯条理化性质及结构特性变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(5): 204-212.

CHEN Boru, HUANG Yuewei, OU Zihao, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the physicochemical properties and structural characteristics of air-fried french fries [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 204-212.

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 国家自然科学基金区域创新重点项目(U23A20267); 国家自然科学基金项目(32172348); 广东省科学技术厅广东省科技创新战略专项资金资助项目“广东省食品智能制造重点实验室”(2022B1212010015); 佛山科学技术学院高层次人才项目(CGZ07001)

作者简介: 陈博儒(1994-), 女, 博士, 特聘青年研究员, 研究方向, 绿色碳水化合物加工, E-mail: brchen@fosu.edu.cn

通讯作者: 黄燕燕(1992-), 女, 博士, 特聘青年研究员, 研究方向, 食品中微生物的利用和控制, E-mail: huang_yanyan@fosu.edu.cn

structure loose and porous, thereby accelerating water evaporation from the French fries during air frying, achieving internal and external temperature balance faster, reducing oil absorption, and making the French fries crisper. Sensory evaluation results suggest that an ultrasound power of 600 W can be used as an optimal pretreatment condition to prepare potato snacks with improved palatability characteristics and low oil content. The results of this study provide insight and guidance for the application of ultrasound technology in food processing, which is of great significance for promoting the development and market promotion of low-fat and healthy fried foods.

Key words: ultrasound; air fryer; french fries; physicochemical properties

油炸作为一种最传统的食品加工方法,赋予食品独特的口感和香气^[1]。其中炸薯条以其金黄的色泽、酥脆的口感和典型的油炸风味,备受人们喜爱^[2]。但是油炸过程中会产生反式脂肪酸等有害物质,长期摄入可能会增加肥胖、高血压、心血管疾病等慢性疾病的风险^[3]。此外,深度油炸需要大量的油,成本相对较高,炸后的剩余油处理不当会造成资源浪费和环境污染。因此,开发健康绿色的加工方式已成为研究热点。

近年来,有研究表明使用空气煎炸等烹饪方式可替代传统煎炸^[4]。空气煎炸是以热空气替代油作为传热介质的一种新的烹饪方式,其原理是:加热管把顶部的空气加热,用超大功率的风扇把热空气吹到锅里,形成急速循环的热流,全方面接触食品表面,迅速带走水分^[5]。Shaker等^[6]发现相对于传统的深度油炸,空气煎炸薯条的吸油量比传统深度油炸薯条的吸油量低约14.8%。相比传统深度油炸,空气煎炸具有更低的油脂使用量,更少的油烟和有害物质产生,更符合健康环保的需求^[7,8]。

通过热空气的流动和加热作用可以使食物表面的温度迅速升高,形成脆皮^[9]。但由于生薯条结构致密,且空气的传热系数比油小,热空气的循环可能无法均匀地渗透到薯条内部,导致内部温度上升较慢,水分难以排出,淀粉糊化程度有限^[10]。因此,空炸薯条在口感上可能较为生硬,不如传统油炸薯条那么酥脆。随着人们消费水平的提升,对食品的风味有了更高的要求,改进加工工艺对提升薯条口感和风味至关重要。

超声波处理是一种安全、环保的非热处理技术,常用于食品加工^[11]。当超声波在液体中传播时,它会产生声学空化效应,形成微小气泡,可有效破坏食品组织和细胞结构^[12]。此外,超声波的机械振动效应对组织和细胞施加一定的挤压和摩擦力。这两种效应有助于形成微观通道,加速水的扩散,减少

油的吸收,强化基于热和能量传质过程,从而有利于缩短油炸时间,提高产品质量^[13]。已有研究表明,超声预处理能够降低深度油炸薯条的含油量,同时提升其口感品质,这显示超声预处理在改善油炸薯条的品质方面具有积极作用^[14]。

尽管在深度油炸领域,超声预处理已展现出其优势,但在空炸领域,研究仍是空白,尤其是关于超声预处理对空炸薯条的具体变化和影响尚缺乏深入的研究。为了更好地了解超声预处理在空炸过程中的作用,优化薯条的加工工艺,本研究通过对新鲜马铃薯条进行超声预处理,探究不同超声预处理后经空气油炸的薯条的质构、颜色、含油量、感官评价等指标差异,这一研究,期望能够为薯条加工行业提供一种新型的、更加健康环保的加工方式,同时也为消费者带来更加美味、健康的薯条产品。

1 材料与方法

1.1 材料

马铃薯,购于当地农贸市场;花生油,益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;其他试剂或药品均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

THC-1000SF 超声仪,济宁天华超声电子仪器有限公司;MF-KZC6502XM 空气炸锅,佛山美的集团有限公司;JSPCC-01 型切片机,瑞卡日用品有限公司;Ci7600 台式色度计,美国 X-Rite 公司;TA. newplus 质构仪,美国 Isenso 公司;PQ001-020-015V 型低场核磁共振仪(LF-NMR),苏州纽迈分析仪器股份有限公司;LGJ-10C 真空冷冻干燥器,中国 Safer 公司;MYDS-6S 液氮生物容器,中科菱菱低温科技股份有限公司;SBC-12 型离子溅射仪,北京中科科仪股份有限公司;MNE093157-11115-1

高通量表面 3D 轮廓及纳米孔隙率分析仪, 美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 实验方法

1.3.1 薯条的制备

将马铃薯清洗、去皮, 然后用切菜机切成条状。薯条的长、宽、高分别为 80、10 和 10 mm。

1.3.2 超声预处理

对样品进行超声处理, 超声功率分别为 0、400、600、800、1 000 W, 超声处理时间为 30 min。

1.3.3 空炸薯条的制备

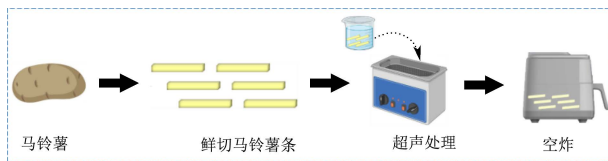


图 1 超声预处理制备空炸薯条流程图

Fig.1 Flow chart of ultrasonic pretreatment for preparing air fried French chips

首先用吸水纸去除预处理过的薯条表面多余的水分, 取 100 g 薯条, 在薯条表面喷油一次, 然后翻转至背面再喷油一次, 总喷油质量为 1.8 g。随后, 将薯条放入容量为 6.5 L 的空气炸锅, 在锅内温度 175 °C 下空气炸 15 min。然后, 将薯条翻转过来再炸 5 min 得到空炸样品, 未经预处理的新鲜薯条作为对照组。图 1 为处理流程图。

1.3.4 空炸薯条的品质分析

1.3.4.1 质构特性

将薯条切成约 10×10×10 mm 的小块, 使用质构仪测定样品的质构特征, 设置为 TPA (Texture Profile Analysis, 质构剖面分析) 模式, 所用参数如下: 探头型号为 P/50 柱状, 测试前速度为 1.0 mm/s, 测试速度为 1.0 mm/s, 测试后速度 5.0 mm/s, 加压距离为 8.0 mm, 触发力为 5.0×g, 压缩比为 70%, 间隔时间为 5.0 s^[15]。每个实验组至少测试 6 个样品。

1.3.4.2 色差测定

通过台式色度计测量薯条颜色。在测量之前, 使用黑白陶瓷板进行校准, 在样品中心部位进行测量并记录。记录各种薯条样品的明暗度 (L)、红绿度 (a) 和黄蓝度 (b)。ΔE 表示 2 种色彩之间的色差, ΔE 计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad (1)$$

式中:

a^* 、 b^* 、 L^* ——未经超声预处理的薯条色度值。

1.3.4.3 油脂含量分析

采用索氏法 (GB 5009.6-2016, 中国国家标准) 测定样品的含油量。将薯条在真空冷冻干燥器中冷冻干燥 24 h 以去除水分。随后, 将薯条样品粉碎成粉末, 以增加可用于提取的表面积。使用石油醚 (沸点范围 60~90 °C) 提取总计 2.0 g 薯条粉末 6 h。除去油后, 将剩余的薯条残渣干燥, 将上述所有测量重复三次。按照公式 (2) 计算样品中油脂含量:

$$X_1 = \frac{m_1 - m_0}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

X_1 ——样品中脂肪的含量, %;

m_1 ——接受瓶和脂肪的质量, g;

m_0 ——接受瓶的质量, g;

m_2 ——样品的质量, g。

1.3.4.4 水分含量

根据国标 GB 5009.3-2016 中规定的直接干燥法测定超声预处理鲜马铃薯条样品中的水分含量^[16]。

1.3.4.5 水分分布

用 LF-NMR 成像系统测定薯条样品的水分分布。使用自旋回波 (SE) 序列获得薯条的磁共振成像, 设置参数如下: FOV Read: 100 mm; FOV Phase: 100 mm; recovery time (TR): 15 000 ms; echo time (TE): 20 ms; average: 3。通过对序列指数衰减曲线图经分析软件进行批量反演, 得到不同超声预处理条件下薯条的横向弛豫时间 T2 谱图。

1.3.4.6 微观结构

鲜马铃薯和炸制薯条在真空冷冻干燥器中冷冻干燥 24 h 以去除水分, 随后, 将薯条样品置于液氮中低温冷却 30 s 取薯条中部切成厚约 0.3 cm 规则立方体。将切割后的样品使用导电胶固定在载物台上, 然后使用离子溅射仪在其表面均匀喷涂一层金层, 最后将样品转移到高通量表面 3D 轮廓及纳米孔隙率分析仪, 在加速电压 5 kV, 放大倍数为 400× 的条件下对空炸薯条的横截面进行观察。

1.3.4.7 感官评价

选取 10 名食品专业的本科生和研究生, 经过感官评价培训后, 对经过不同预处理的薯条进行感官评测。评价小组人员根据表 1 再制薯条的感官评定标准评分, 评测前后都需用温水漱口。

表 1 薯条感官评价表

Table 1 Sensory evaluation of French chips

项目	评分标准	参考分值
色泽 (20分)	色泽均匀, 颜色呈亮黄色	16~20
	色泽较均匀, 颜色呈淡黄或黄褐色	10~15
	色泽不均匀, 颜色发灰发暗或褐色	0~9
油腻性 (20分)	表面无明显油光, 感受不到油腻感	16~20
	表面油光轻微, 油腻感适中	10~15
	表面泛明显油光, 油腻感重	0~9
气味 (20分)	有浓郁的油炸马铃薯食品香味	16~20
	有油炸马铃薯食品香味, 无异味	10~15
	无香味或有明显异味	0~9
口感 (20分)	酥脆细腻, 酥性好, 口感较好高	16~20
	软硬适中、稍酥脆, 口感一般	10~15
	偏硬、疲软、无酥性	0~9
组织 形态 (20分)	薯条均匀平整、形状规则, 表面无突起	16~20
	和塌陷形状较规则、较平整, 有少量薯条皱缩或起泡	10~15
	形状不规则、薯条皱缩或起泡现象明显	0~9

1.4 数据分析

所有样品设置三次重复实验, 采用 IBM SPSS Statistics 26 进行单因素方差分析, 以 $P < 0.05$ 表示数据之间的显著性差异, 使用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 超声预处理对薯条质构的影响

质构特性是衡量食品组织特征的重要指标。表 2 显示了超声预处理对薯条质构参数(硬度、弹性、内聚性、粘着性和咀嚼性)的影响。与对照组相比, 超声预处理 < 600 W 时降低了薯条的硬度, 这可能是由于超声波的空化效应和机械效应形成了孔隙、裂缝和微通道, 这有助于将热空气扩散至薯条内部, 促进淀粉糊化, 从而产生更柔软的质构^[16,17]。此外, 超声预处理可能会改变半纤维素和果胶的结构, 细胞壁的果胶和半纤维素随着半乳糖

醛酸链结构的分裂而降解, 从而降低了细胞之间的机械强度和粘附力^[18]。然而当超声功率从 600 W 增加到 1 000 W 时, 薯条的硬度从 1 743.2 g 增加到 3 464.3 g, 这可能是由于高功率超声处理对薯条的纤维素, 果胶, 淀粉等结构组织造成过度破坏, 在空炸过程中薯条水分蒸发速度过快, 从而导致薯条变得更易干燥, 质构变硬^[19]。薯条粘着性也随之增加, 从 597.4 g 增加到 941.8 g, 这可能是由于超声功率增加会进一步促进淀粉颗粒结构严重破坏, 颗粒之间相互粘连, 因此增加了薯条的粘着性^[20]。

2.2 超声预处理对薯条颜色参数的影响

薯条在经超声预处理后的颜色参数和外观如表 3 所示。对照组亮度 L^* 值为 65.46, 黄度 b^* 值为 12.83, 使用功率 400 W 或 600 W 超声处理 30 min 后, 薯条的 L^* 值和 b^* 值分别为 64.91、64.89 和 12.84、11.12, 说明 600 W 以下功率超声预处理不会对薯条颜色产生明显变化。与对照组和较低超声功率(400 W)的预处理相比, 较高超声功率(1 000 W)的预处理增加了薯条的总色差 (ΔE)。具体而言, 当超声功率增强到 1 000 W 时, 薯条的亮度 (L 值) 和黄度 (b 值) 显著增加, 分别从 65.46 和 12.82 提高到了 71.71 和 16.91。这一现象可能与美拉德反应有关, 美拉德反应是一种在加热过程中, 食物中的还原糖与氨基酸或蛋白质发生反应, 产生褐色物质的化学过程。颜色的深度取决于薯条表面还原糖和氨基酸或蛋白质的含量, 以及温度和油炸时间^[21]。大功率超声处理土豆条时, 组织结构受损严重, 表层淀粉易糊化结壳, 这阻碍了还原糖和天冬酰胺的流失。因此, 在空炸过程中, 薯条更易烧焦和褐变, 颜色发生改变, 口感和风味也可能受到影响^[22]。Zhang 等^[23]研究发现, 当薯条经过长时间(120 s)微波预处理后, 其在深度油炸过程中更易发生烧焦和褐变现象。由此可以推断, 长时间、高强度的物理场预处理可能会对薯条在空气或深度油炸过程中的品质产生不利影响。






表 2 不同超声功率预处理对薯条质构特性的影响

Table 2 Effects of different ultrasonic power pretreatment on the texture characteristics of French chips

超声功率/W	硬度/g	弹性	内聚性	粘着性/g	咀嚼性
0	2 217.3±121.98 ^c	0.29±0.03 ^c	0.25±0.08 ^a	566.6±45.98 ^d	163.9±22.77 ^d
400	2 189.6±230.94 ^d	0.35±0.02 ^{ab}	0.27±0.03 ^a	597.4±55.32 ^c	208.2±32.35 ^b
600	1 743.2±131.08 ^e	0.33±0.01 ^{bc}	0.26±0.02 ^a	458.2±49.20 ^e	152.2±28.56 ^c
800	2 526.7±200.45 ^b	0.29±0.03 ^c	0.23±0.03 ^a	603.5±71.23 ^b	177.6±10.87 ^c
1 000	3 464.3±321.56 ^a	0.38±0.02 ^a	0.27±0.01 ^a	941.8±89.88 ^a	358.8±31.98 ^a

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。下表同。

表3 不同超声预处理对薯条色差变化的影响

超声功率/W	L^*	a^*	b^*	ΔE	外观
0	65.46 ± 3.43^c	-2.09 ± 0.12^b	12.83 ± 1.34^b	/	
400	64.91 ± 4.12^c	-1.68 ± 0.43^e	12.84 ± 2.76^b	0.68 ± 0.67^d	
600	64.89 ± 5.08^c	-2.01 ± 0.57^c	11.12 ± 3.28^b	1.80 ± 0.73^c	
800	68.61 ± 6.21^b	-1.82 ± 0.32^d	15.54 ± 4.87^a	4.16 ± 0.73^b	
1 000	71.71 ± 5.11^a	-2.16 ± 0.44^a	16.91 ± 3.56^a	7.46 ± 0.68^a	

2.3 超声预处理对薯条含油量的影响

图2显示了超声预处理对薯条含油量的影响。在空炸过程中,食用油随着热对流作用在薯条的表面和内部之间传递。研究发现,超声预处理样品的含油量分别比未预处理样品降低了2.28%、3.55%、1.34%和0.86%。当超声功率为600 W时,薯条含油量最低,为3.87%。Zhang等^[24]之前采用超声预处理和超声联合对流空气干燥预处理深度油炸的薯条,两种处理方式下的样品均表现出吸油量下降的趋势,这进一步证实了无论是深度油炸还是空气油炸方式,超声技术可有效降低油炸食品含油量。这可能是由于超声处理后的马铃薯条会形成一些气孔、空隙和裂纹,影响空炸过程中的水分蒸发和油脂渗透,水的蒸发在马铃薯样品中产生蒸气压,从而防止油炸过程中油渗透到薯条中^[25]。此外,超声预处理可破坏薯条表面淀粉颗粒致密结构,有利于薯条表面淀粉糊化在样品表面形成“保护壳”,从而阻碍油渗透到薯条中^[26]。然而进一步增大超声功率到1 000 W时,薯条含油量增加到6.56%,虽然水分蒸发在一定程度上可以阻碍油脂的渗透^[27],但

过高的超声功率导致的致密组织结构的破坏使得薯条组织变得更为疏松和多孔,这种结构更容易吸附和保留油脂,从而增大了薯条含油量。这说明超声在适当的预处理条件下可以降低空炸薯条的含油量,综合考虑油炸薯条的色泽、质构、含油量等因素,以超声预处理600 W为最佳条件。

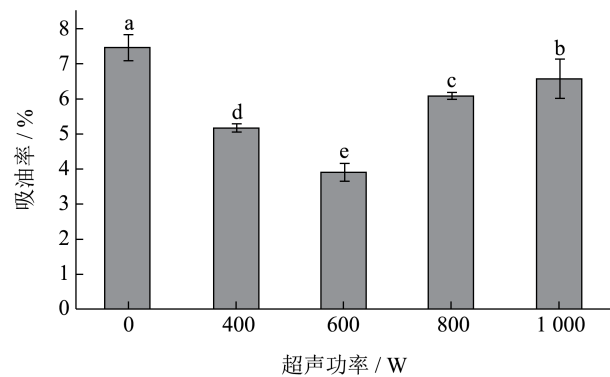


图2 超声预处理对薯条吸油量的影响

Fig.2 The effect of ultrasound pretreatment on the oil absorption of French chips

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。图4、7同。

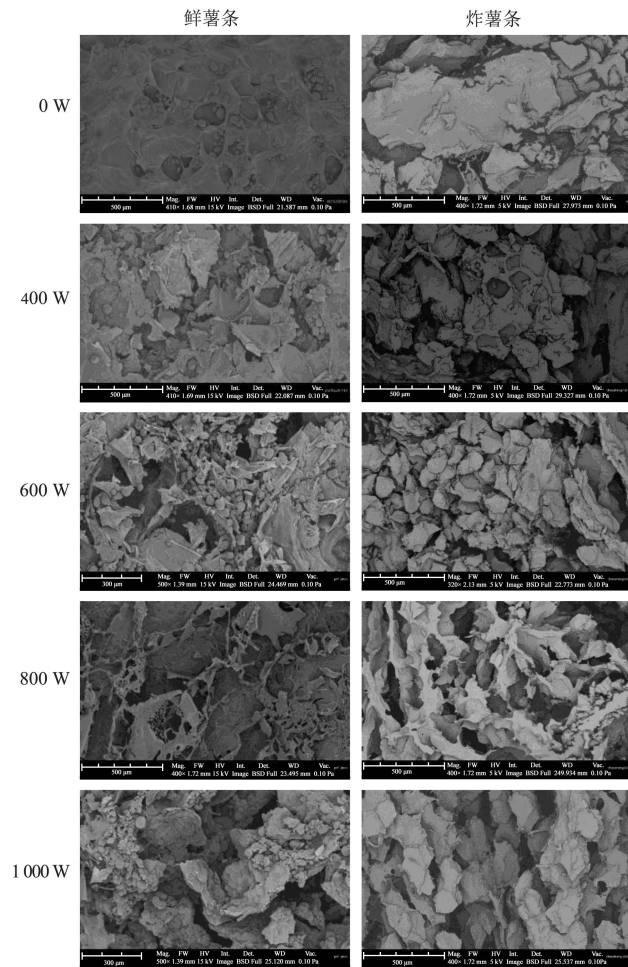


图3 不同超声预处理对鲜薯条和炸薯条微结构的影响

Fig.3 Effect of ultrasound pretreatment on the microstructure of fresh potato strips and French chips

2.4 不同超声功率预处理对鲜薯条和炸薯条微观结构的影响

不同超声预处理的薯条横截面的扫描电镜图像如图3所示,在鲜薯条中可以看到完整的细胞形状,并伴有一些球形淀粉颗粒。与对照组相比,超声预处理后的土豆细胞壁上出现了一些孔隙和裂缝,而且当超声功率进一步增加时,一些土豆细胞的细胞壁显示出轻微塌陷的迹象,这些结构有利于在空气炸制过程中淀粉糊化速率加快。经过空气炸制后的薯条中球形淀粉颗粒已经糊化,未经超声预处理的薯条其横截面呈现出大面积的块状,组织结构紧密,这种结构可能会导致薯条硬度较大,口感相对生硬,这与质构所测得的数据结果一致,说明紧密的结构与硬口感有直接关系^[28]。当薯条经过超声预处理后,其微观结构从紧密逐渐变得疏松,该变化可归因于超声波的机械效应,将能量直接传输到样品,导致组织结构快速挤压和膨胀,诱导细胞塌陷和孔隙增

加^[29]。当超声功率增大到600 W时,薯条形成均匀的细胞间隙,这种结构有利于薯条在空炸过程中快速达到内外温度平衡,有助于降低薯条的生硬口感,提升薯条的酥脆度^[29]。当超声功率进一步增大到800 W以上时,组织结构孔径增大,小微孔被破坏并合并成大微孔,导致水分流失增加,薯条口感变得发干发硬。

2.5 探究了不同超声功率处理对马铃薯水分含量的影响

研究发现,如图4所示,未经预处理的薯条的初始水分含量为85.64%,随着超声功率的增加,马铃薯水分含量分别降低了1.61%、1.90%、3.20%、3.39%,说明在空气油炸之前进行预处理可以有效降低鲜马铃薯条的水分含量,这主要是由于超声的空化效应和机械效应导致细胞膜破裂,进而减少马铃薯的水分含量。食物初始水分含量高,在炸制过程中就会有更多的水分逸出,从而留给油脂更多的渗入空间^[30]。超声预处理后马铃薯水分含量降低,这可能是导致空气油炸过程中油含量较低的原因之一。此外,水分含量的减少意味着在空气油炸过程中,薯条更易于脱水并形成干燥的外层,从而产生金黄酥脆的外观,同时减少因水分过多而导致的软化和生硬口感。

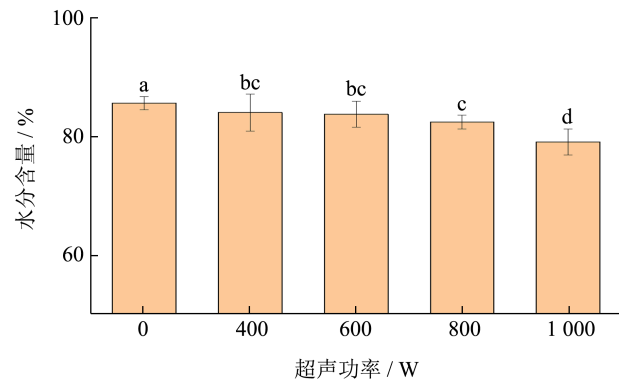


图4 不同超声预处理对鲜马铃薯水分含量的影响

Fig.4 Effect of ultrasound pretreatment on the water content of fresh potato strips

2.6 超声预处理对薯条水分分布的影响

低场核磁共振被广泛用于研究食品中水分子的分布和流动性^[31]。如图5所示,在油炸食品中,根据信号强度的不同,弛豫图谱可以大体分为两个部分,信号强度较低的水分T21(1~10 ms)和T22(10~200 ms),信号强度较高的水份T23(>200 ms),其中T21表示结合水,以吸附在淀粉颗粒外面的薄

层水为主, T22 表示油炸食品内部的自由水, 其主要依靠表面附着力、水分粘着力和毛细管力存在于潮湿物料中, T23 表示油炸食品内的脂肪^[32]。从图中可以看出, 不同超声功率处理下的薯条的 T2 弛豫时间曲线向左移动 (图 5a)。峰面积 A_2 反应了相应的含水率/含油率 (图 5b), 超声预处理的薯条 A_{21} 峰面积变化幅度不明显, 这可能是由于结合水键能较强, 流动性低, 超声对其影响较小。 A_{22} 峰面积明显小于对照的峰面积, 这是在空气油炸过程中, 薯条的内部的自由水分快速蒸发易被脱除, 薯条体系中的水分含量降低。 A_{23} 峰面积呈现先减小后增大趋势, 与吸油率数据一致。

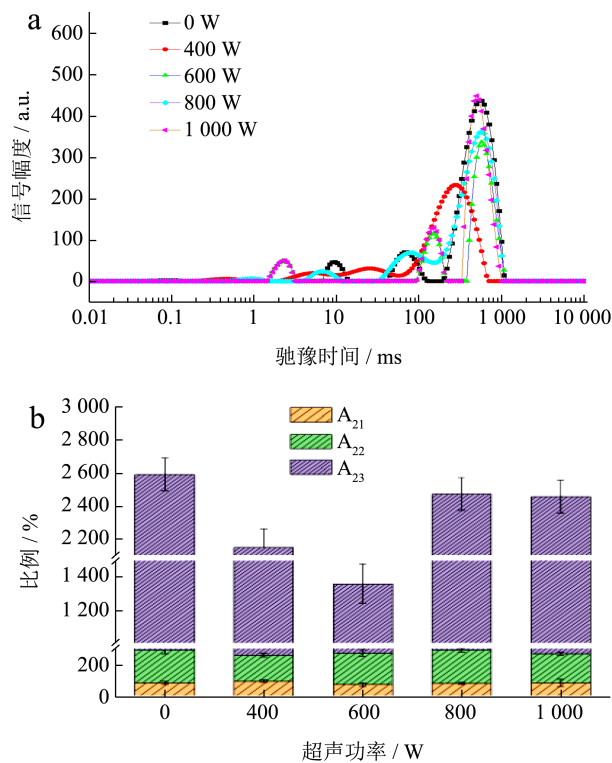


图 5 不同超声预处理对薯条弛豫时间 (a) 和峰面积比例 (b) 的影响

Fig.5 Relaxation spectrum (a) and proportion of peak area (b) of French chips after different ultrasound pretreatment

磁共振成像 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) 水分成像直接显示薯条水分分布。红色部分和蓝色部分分别表示含水量高和含水量低的区域^[33]。如图 6 所示, 未经超声预处理的薯条, 其水分含量最高, 水分在薯条中均匀分布, 这可能是由于紧密的组织结构限制了水分子的移动和扩散。与对照组相比, 超声预处理后的薯条, 红点密度逐渐降低, 这说明薯条中的水分含量降低, 这可能是由于超声波的机械作用和热效应导致的组织结构破坏和水分扩

散。超声功率越大, 红点密度越低, 意味着薯条水分含量越低, 从微观结构可知, 超声预处理导致了薯条组织结构的孔径增大, 小微孔可能被破坏并合并成大微孔, 随着超声功率的增大, 这种组织结构的改变更加显著, 导致水分含量降低。红点主要集中于薯条横截面的中心区域, 而四周的红点密度逐渐降低。这一现象印证了在薯条的外层, 水分含量相对较低, 这主要是由于外层与热空气的接触时间较长, 薯条外层的水分逐渐蒸发, 形成一层较硬的壳状结构, 使得外层的水分含量相对较低。

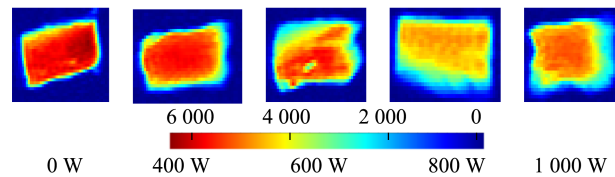


图 6 不同超声预处理后薯条的 NMR 图像

Fig.6 NMR images of French chips after different ultrasound pretreatment

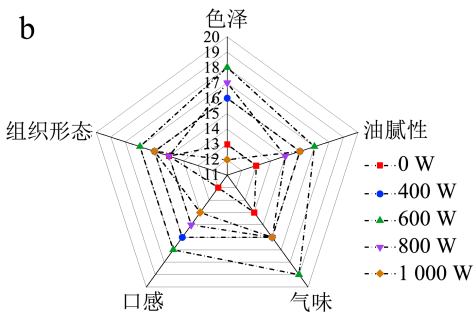
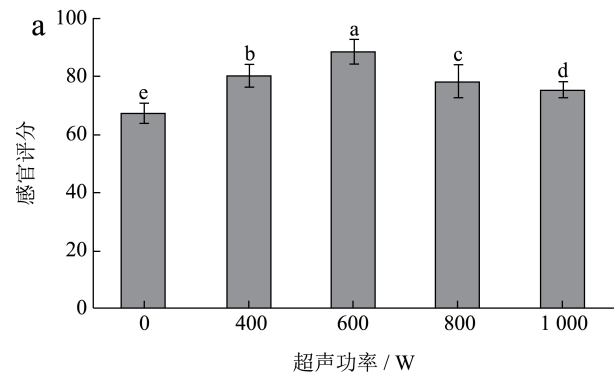


图 7 不同超声预处理薯条整体感官评分和感官评价雷达图

Fig.7 Overall sensory score and sensory evaluation radar of different ultrasound pretreated French chips

2.7 超声预处理对薯条感官的影响

图 7a、7b 分别为不同超声预处理薯条整体感官评分和感官评价雷达图。由图 7a、7b 可知, 未预处理样品感官评分最低, 这是因为未处理的薯条组织结构紧密, 导致油脂附着在表面, 空炸后油腻感

重且整体口感较生硬。而在空炸前经过超声预处理可以改善样品的感官品质,评分也相应提高。超声预处理的样品在色泽、风味、组织状态和整体接受度各方面均优于对照组,这可能是因为超声预处理让鲜切薯条组织结构更疏松,这种疏松结构能促进薯条表面硬壳形成,有效防止油脂过度渗透进薯条。此外,适当的硬壳能够保持薯条的酥脆口感,这与质构数据一致。但随着超声功率的增加,色泽指标和气味滋味的得分先增加后下降,当超声功率达到1 000 W时,薯条出现烤焦的现象,薯条色泽接受度降低,另外口感也出现了苦味,导致评分略有下降。综合考虑选择超声预处理600 W为最佳预处理方式。

3 结论

本研究针对不同超声功率预处理对空炸薯条品质特性及微观结构的影响进行了深入研究。实验结果表明,在超声功率为600 W的条件下,有效降低了空炸薯条的硬度和含油率,硬度从2 217.3 g降低至1 743.2 g,含油率从7.42%降低至3.87%。微观结构发现,超声预处理使薯条的内部结构变得更加疏松多孔,这有利于提高传质性能,促进薯条表面淀粉糊化在样品表面形成“保护壳”,提高薯条酥脆口感同时阻碍油分渗入薯条中。本研究为探究超声波对空炸薯条品质的影响提供了重要依据,并为超声波技术在开发低脂肪、更健康的油炸食品方面的应用提供一个新的视角。

参考文献

- [1] 郑向阳.油炸食品烹饪工艺的优化分析[J].食品安全导刊,2023,31:159-161.
- [2] LI Y, BAI X, ZHAO M, et al. Sodium alginate edible coating to reduce oil absorption of French fries with maintaining overall acceptability: based on a water replacement mechanism [J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2023, 236: 124042.
- [3] 陈龙,王谊,程昊,等.油炸食品中潜在的几类危害物及其消减技术[J].中国食品学报,2022,22(2):376-389.
- [4] 刘皓男.空气炸锅:方便、低脂、无害的健康网红厨电[J].家用电器,2022,8:74.
- [5] 李兴福.空气炸锅是“神器”还是“鸡肋”[J].大众用电,2023,38(4):73.
- [6] SHAKER M A. Air frying a new technique for produce of healthy fried potato strips [J]. Journal of Food and Nutrition Sciences, 2014, 2(4): 200-206.
- [7] 侯婷婷.掌握空气炸锅的秘笈——低油低脂轻油更健康[J].家用电器,2021,3:88-89.
- [8] 王君,王颖,陈喆,等.空气煎炸技术应用于食品加工的研究进展[J].美食研究,2021,38(2):49-53.
- [9] 陈权明,随晶侠,郑志伟.空气炸锅改进结构仿真及实验研究[J].家电科技,2023,4:30-34.
- [10] ROCIO D M T, MICHAEL G, BELEN M L, et al. A comparative study of the characteristics of French fries produced by deep fat frying and air frying [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(2): 349-358.
- [11] 谢冰宗,李密,董彩文,等.黄精皂苷与多糖超声辅助提取工艺优化及降血糖活性研究[J].食品与机械,2024, 40(1):158-166.
- [12] CHEN F, ZHANG M, YANG C, et al. Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: a review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63, 104953.
- [13] CHENG D, MA Q, ZHANG J, et al. Cactus polysaccharides enhance preservative effects of ultrasound treatment on fresh-cut potatoes [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106205.
- [14] JAGGAN V M.马铃薯低油脂油炸薯条加工工艺研究[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [15] 李倩,邹婷婷,朱麟菲,等.葵花籽油煎炸制品感官评价与质构的相关性分析[J].美食研究,2022,39(4):56-61.
- [16] GB 5009.3-2016,食品中水分的测定[S].
- [17] A N, LI W, LI D, et al. Effects of hot-air microwave rolling blanching pretreatment on the drying of turmeric (*Curcuma longa* L.): Physiochemical properties and microstructure evaluation [J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133925.
- [18] ZHANG J, XIE T, FAN L. Improving the quality and reducing oil absorption of fried potato chips by ultrasound pretreatment [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 148(10): 111763.
- [19] ZHANG Z, YAO Y, SHI Q, et al. Effects of radio-frequency-assisted blanching on the polyphenol oxidase, microstructure, physical characteristics, and starch content of potato [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109357.
- [20] 林江涛,孙玲玲,岳清华,等.不同粒度小麦淀粉的理化特性分析[J].现代食品科技,2022,38(8):193-198.
- [21] GRAHAM S, AYERNOR G, BEDIKAKO B, et al. Effect of blanching and frying on textural profile and appearance of yam (*Dioscorea rotundata*) French fries [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(1): 19-29.
- [22] ZHANG Y, KZHL D H W, BIZIMUNGU B, et al. Effects of blanching treatments on acrylamide, asparagine, reducing sugars and colour in potato chips [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55: 4028-4041.
- [23] ZHANG C, LYU X, MUHAMMAD R, et al. Microwave heating instead of blanching to produce low-fat French fries [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2023,

- 84: 103298.
- [24] ZHANG J, FAN L. Effects of preliminary treatment by ultrasonic and convective air drying on the properties and oil absorption of potato chips [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 74: 105548.
- [25] GHADERI J G B. Momentum, heat and mass transfer enhancement during deep-fat frying process of potato strips: Influence of convective oil temperature [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 134: 485-499.
- [26] ZHANG C, LYU X, ZHAO W, et al. Radio frequency as an innovative method to produce low-fat French fries [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(12): 5181-5189.
- [27] 任广跃, 靳力为, 段续, 等. 超声处理对果蔬干燥速率及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(4): 9-17.
- [28] TIAN J, CHEN S, JOIN S, et al. Microstructure and digestibility of potato strips produced by conventional frying and air-frying: An *in vitro* study [J]. Food Structure, 2017, 14: 30-35.
- [29] GUO Y, WU B, GUO X, et al. Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: moisture migration and quality characterizations [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 126: 109312.
- [30] 高飞, 武运, 蔡华珍, 等. 超声波协同真空卤煮牛肉过程中的传质动力学分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 205-216.
- [31] 章铖. 物理场技术在油炸用预制马铃薯条加工中的应用研究-加工工艺、减油效果和机制[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [32] 丁援园, 周裔彬, 吴亦鸣. 不同油炸温度下糯米糕水分及油脂含量分布[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 56-61.
- [33] 王双双, 李斌, 李晶, 等. 谷朊粉及其主要组分对果糖吸湿的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 185-195.