

超声解冻对南美白对虾品质及蛋白氧化程度的影响

彭盼盼

(周口职业技术学院医学院, 河南 周口 466000)

摘要: [目的] 提升冷冻南美白对虾的质构品质。[方法] 以南美白对虾为对象, 系统评价超声解冻 (300, 400, 500 W) 对冷冻虾质构特性、解冻损失、蒸煮损失、TVB-N 含量、TBARS 值、蛋白质氧化程度 (巯基、羰基含量)、氨基酸释放、pH 值和感官评定指标的影响。[结果] 超声解冻显著增加了冷冻虾的弹性、硬度和回复性 ($P < 0.05$), 其中 400, 500 W 超声组的硬度和弹性显著高于 300 W 超声组。超声解冻显著降低了冷冻虾产品的解冻损失、蒸煮损失和 TVB-N 含量 ($P < 0.05$), 500 W 超声组的降低效果最显著。氨基酸分析显示, 超声解冻显著提高了总氨基酸 (TAA) 含量和必需氨基酸 (EAA) 比例, 其中 300, 400 W 超声组的亮氨酸、谷氨酸等必需氨基酸释放量达到最高值。蛋白质氧化程度分析表明, 超声解冻组的巯基含量较常温解冻显著增加, 羰基含量显著降低。感官评定结果显示, 超声解冻组的综合评分显著高于常温解冻组, 其中 400 W 超声组的感官评分最高。Pearson 相关性分析表明, 冷冻虾的解冻损失与弹性、硬度呈负相关 ($P < 0.05$), 与 TVB-N 含量、TBARS 值、羰基含量呈正相关 ($P < 0.05$); TVB-N 含量与硬度、弹性、回复性呈负相关 ($P < 0.05$), 与 TBARS 值、羰基含量呈正相关 ($P < 0.05$)。[结论] 超声解冻较常温解冻提升了冷冻虾的质构品质, 有效抑制了解冻过程中的脂质和蛋白质氧化程度, 其中 400 W 超声解冻处理最为适宜。

关键词: 超声解冻; 质构特性; 品质; 南美白对虾; 蛋白质氧化

Effect of ultrasonic thawing on the quality and protein oxidation of *Litopenaeus vannamei*

PENG Panpan

(Medical School, Zhoukou Polytechnic, Zhoukou, Henan 466000, China)

Abstract: [Objective] To improve the texture quality of frozen *Litopenaeus vannamei*. [Methods] Using *Litopenaeus vannamei* as the research object, the study systematically evaluates the effects of ultrasonic thawing (300, 400, 500 W) on the texture properties, thawing loss, cooking loss, TVB-N, TBARS values, protein oxidation (content of sulphhydryl and carbonyl groups), amino acid release, pH value, and sensory evaluation of frozen shrimp. [Results] Ultrasonic thawing significantly increases the elasticity, hardness, and recovery of the frozen shrimp ($P < 0.05$), with the 400 and 500 W ultrasonic groups showing significantly higher hardness and elasticity than the 300 W group. Ultrasonic thawing significantly reduces thawing loss, cooking loss, and TVB-N content in the frozen shrimp ($P < 0.05$), with the 500 W ultrasonic group showing the most significant reduction. Amino acid analysis reveals that ultrasonic thawing significantly increases the total amino acid (TAA) content and the proportion of essential amino acids (EAA), with the release of essential amino acids such as leucine and glutamic acid being highest in the 300 and 400 W ultrasonic groups. The protein oxidation analysis shows that the sulphhydryl content in the ultrasonic-thawed group was significantly higher than that in the room-temperature thawed group, while the carbonyl content was significantly lower. Sensory evaluation results indicated that the overall score of the ultrasonic-thawed group is significantly higher than that

基金项目: 河南省教育厅高等教育教学改革研究与实践项目 (编号: 2017SJGLX670)

通信作者: 彭盼盼 (1991—), 女, 周口职业技术学院讲师, 硕士。E-mail: pengpanpan199@163.com

收稿日期: 2024-11-04 改回日期: 2025-05-29

引用格式: 彭盼盼. 超声解冻对南美白对虾品质及蛋白氧化程度的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 122-129.

Citation: PENG Panpan. Effect of ultrasonic thawing on the quality and protein oxidation of *Litopenaeus vannamei*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 122-129.

of the room-temperature thawed group, with the 400 W ultrasonic group achieving the highest sensory score. Pearson correlation analysis indicates that the thawing loss of frozen shrimp is negatively correlated with elasticity and hardness ($P<0.05$), and positively correlated with TVB-N, TBARS values, and carbonyl content ($P<0.05$). TVB-N is negatively correlated with hardness, elasticity, and recovery ($P<0.05$), and positively correlated with TBARS values and carbonyl content ($P<0.05$). [Conclusion] Ultrasonic thawing improves the texture quality of frozen shrimp compared to room-temperature thawing and effectively inhibits lipid and protein oxidation during the thawing process, with 400 W ultrasonic thawing being the most suitable.

Keywords: ultrasonic thawing; texture property; quality; *Litopenaeus vannamei*; protein oxidation

南美白对虾(*Penaeus vannamei*)肉质鲜美,营养丰富,富含氨基酸、矿物质、不饱和脂肪酸等多种对人体有益的营养元素,深受消费者青睐^[1-2]。据统计,2021年中国南美白对虾产量为127万t,占虾类总产量的80%^[3]。但虾体水分含量较高,因此在常温条件下贮藏极易在微生物和自溶酶的作用下发生腐败变质现象,从而失去食用价值^[4-5]。低温可以有效抑制微生物的生长和虾组织内源酶的活性,从而延长虾的货架期^[4,6]。但冷冻虾在进行二次加工和销售时均需要进行解冻,解冻是冰晶融化的过程,目前工业上常采用的解冻方式主要为自然解冻、冷藏解冻和流水解冻等^[7-8]。传统的解冻过程是缓慢的、不均匀的,在解冻过程中易导致食物中的蛋白质变性、汁液流失、不饱和脂肪酸被氧化,大大降低食品的新鲜度和食用品质^[9-11]。

超声技术作为一种非热加工技术,能够避免传统热加工对食品品质和营养价值的破坏,被广泛应用于食品加工中的各个操作单元,如灭酶、杀菌、解冻等。其中,超声解冻作为一种新兴解冻技术,可以强化物料的解冻过程,促使物料内部各个结晶区域的声能吸收解冻界面不断地向冻结区移动,解冻均匀性与解冻效率均得到提高,具有解冻时间短、微生物污染小、局部升温慢等优点^[12-14],已被广泛应用于猪肉、牛肉、鱿鱼等冷冻制品的解冻中^[15],但超声解冻在冷冻虾产品中的应用较少,且超声处理对冷冻虾品质的影响尚不清楚。

当前工业中常用的解冻方式除自然解冻外,还包括静水解冻与流水解冻。静水解冻通过水介质的热传导加速解冻,但存在耗时长、微生物污染风险高的问题;流水解冻虽能通过水流循环提高解冻均匀性,但水资源消耗较大。超声解冻作为一种结合水介质与物理场作用的新型技术,其核心优势在于通过空化效应和机械振动加速冰晶融化,而非单纯依赖水介质的热传递。研究拟选择常温解冻(空气介质)作为对照,旨在排除水介质本身对解冻效果的潜在影响,从而更精准地评估超声能量对冷冻虾品质的独立作用。分析超声解冻温度、功率对冷冻虾脂质氧化、蛋白质氧化、新鲜度等食用品质的影响,以期提高解冻产品品质,为食品解冻技术的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 仪器、试剂与材料

超低温冰箱:W-86L728J型,青岛海尔特种电器有限公司;

高速组织捣碎机:DS-1型,广州东巨实验仪器有限公司;

食品质构仪:TMS-Pro型,美国FTC公司;

数字食品温度计:MITIR型,温州米特尔智能科技有限公司;

超声微波联用仪:SB-5200DT型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

紫外分光光度计:UV757型,浙江赛德仪器设备有限公司;

南美白对虾:市售;

2-巯代巴比妥酸、三氯乙酸、氯化钾、硼酸、磷酸氢二钾、氢氧化钠、氯化钠等均为国产分析纯。

1.2 方法

1.2.1 样品处理 选择大小均匀,质量为 (15 ± 2) g南美白对虾,加冰猝死,分装, -20°C 贮藏10d。每只虾单独放入食品级聚乙烯密封袋中,袋内无多余空气,袋子尺寸为 $15\text{ cm}\times 10\text{ cm}$,厚度为0.05 mm。采用真空包装机进行密封,抽真空率不低于99.5%。每个样品袋装载一只虾,确保虾体完全平铺,不重叠。采用以下方法进行解冻,解冻过程用热电偶温度计检测样品中心温度,结合水产品加工实际,以确保虾体内部温度均匀且尚未开始显著降解,以 0°C 作为解冻终点。

(1) 常温解冻(对照组):将样品从 -20°C 冰箱取出,室温(25°C)解冻,用时 (57 ± 2) min。

(2) 超声解冻:将样品从 -20°C 冰箱取出,置于超声波清洗器中,加水至完全淹没样品,超声温度 25°C ,超声功率分别为300, 400, 500 W,解冻用时分别为 (21.0 ± 0.5) , (19.0 ± 0.4) , (18.0 ± 0.5) min。

1.2.2 质构分析 参照王庆铃等^[16]的方法。起始力0.05 N,测试速度1.00 mm/s,形变量50%,2次循环测试,时间5 s。

1.2.3 解冻损失测定 准确记录样品解冻前的质量,解冻后用吸水纸擦去样品表面水分,称重,按式(1)计算解冻损失。

$$Y = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \tag{1}$$

式中

Y——解冻损失,%;
m₁——解冻前质量,g;
m₂——解冻后质量,g。

1.2.4 蒸煮损失测定 解冻后的样品,用吸水纸擦干表面水分,称重,沸水中隔水蒸煮 5 min,用吸水纸擦干表面水分后再次称重。按式(2)计算蒸煮损失。

$$Y = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \tag{2}$$

式中

Y——蒸煮损失,%;
m₁——蒸煮前质量,g;
m₂——蒸煮后质量,g。

1.2.5 TVB-N 含量测定 按 GB 5009.228—2016 执行。

1.2.6 硫代巴比妥酸反应物(TBARS)测定 准确称取 5.00 g 样品,加入 50 mL 三氯乙酸,摇匀,50 ℃振摇 30 min,冷却,过滤,取 5 mL 滤液于 25 mL 比色管中,以 5 mL 三氯乙酸作样品空白,分别加入 5 mL 硫代巴比妥酸水溶液,混匀,90 ℃水浴 30 min,冷却,测定 532 nm 处吸光度。

1.2.7 蛋白质氧化程度分析

(1) 肌原纤维蛋白提取:参照许丹等^[17]的方法稍作修改。取解冻后的样品,搅碎,加入 4 倍体积的低温缓冲液(0.1 mol/L KCl,20 mmol/L Tris-HCl),4 ℃反应 15 min,过滤,4 ℃、3 000×g 离心 15 min,收集沉淀为粗蛋白,重复提取 4 次,以获得高质量的蛋白。

(2) 巯基含量测定:取 0.1 mL 肌原纤维蛋白溶液

(1 mg/mL),加入 4.9 mL 0.2 mol/L Tris-HCl 缓冲液,混匀,取 4 mL 混合液加入到 1 mL 0.1% DTNB 中,40 ℃保温 25 min,测定 412 nm 处吸光度。根据吸光度计算总巯基含量,摩尔消光度为 13 600 L/(mol·cm)。

(3) 羰基含量测定:取 0.5 mL 肌原纤维蛋白溶液(1 mg/mL),加入 2 mL 2,4-二硝基苯肼(DNPH)溶液,避光静置 30 min,加入 2.5 mL 20% 三氯乙酸沉淀蛋白,10 000×g 离心 5 min,取沉淀,用 2 mL 乙酸乙酯—乙醇(V_{乙酸乙酯}:V_{乙醇}为 1:1)洗涤 3 次,加入 6 mL 6 mol/L 盐酸胍溶解沉淀,静置 10 min,10 000×g 离心 5 min,取上清液,测定 370 nm 处吸光度,以空白组为对照,按式(3)计算蛋白质中羰基含量。

$$X = \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{空白}}}{22\,000c} \times 10^6, \tag{3}$$

式中:

X——羰基含量,nmol/mg;
c——肌球蛋白质量浓度,mg/mL;
A——370 nm 处吸光值;
22 000——分子吸光系数,L/(mol·cm)。

1.2.8 肌肉品质指标测定

(1) pH 值:精确称取 10 g 解冻后的虾样本,加入 90 mL 去离子水,使用无菌均质机混匀,4 ℃静置 30 min,用无菌滤膜过滤,使用校正后的 pH 计进行测定。

(2) 虾肉感官评定:邀请 5 名具有评定经验的感官评定人员对冷冻南美白对虾的气味、外观和肉质组织进行评分(评分标准见表 1)。6 分表示极新鲜,1 分表示完全腐败。感官评分总分为 18(极新鲜)~3(完全腐败)分,低于 9 分,则认为样品已不可食用。

表 1 南美白对虾感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation standards for *Litopenaeus vannamei*

气味	外观	肉质组织	分值
虾体固有的特征气味	虾体完整,虾头与虾体连接紧密,头部、躯干、尾部体色正常,有光泽	肌肉坚实,弹性好,肉与壳连接紧密	6
轻微的虾体特征气味	虾头与虾体仍然结合,头部、躯干、尾部的色泽轻微褐变	肌肉较有弹性,肉与壳连接稍松弛	5
轻微氨味	虾头松弛,头部轻微黑变,躯体和尾部出现黑点,色泽发暗	肌肉弹性较差,肉与壳连接较松弛	4
轻微的腥臭味	虾头从虾体轻微脱落,头部黑变,躯干和尾部明显变色	肌肉弹性差,肉与壳连接松弛	3
氨味,很强的腥臭味	虾头几乎从虾体脱落,头部几乎完全黑变,躯干与尾部黑变	肌肉组织松弛,肉质发黄	2
强烈的腥臭味、氨味	虾头完全从虾体脱落,头部完全黑变,躯干与尾部严重黑变	壳易剥离,肌肉糊状	1

(3) 虾肉水解氨基酸含量:称取 100 mg 样品(蛋白质含量为 10~20 mg),加入 10 mL 6 mol/L 盐酸水解液,充分混匀,吹入氮气 15 s,110 ℃水解 22 h,冷却,离心,上清液过 0.22 μm 滤膜,稀释 100 倍后进行 HPLC-MS/MS 检测,质谱分析为正离子模式。

1.3 数据分析

使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行显著性分析

(P<0.05),使用 Excel 2020 软件计算平均值和标准偏差,Origin 2021 软件绘图,结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 对冷冻虾质构特性的影响

质构特性是食品的主要感官指标,直接关系食品的嫩度、口感、可食性和出品率,对固体或半固体食品而言,

质构分析仪能够较好模拟口腔咀嚼所反映出的感官评级^[18]。由表2可知,超声处理显著增加了样品的硬度、弹性和回复性,400,500 W超声组的硬度和弹性显著高于300 W超声组。样品的质构特性变化与样品在冻结与解冻过程中冰晶的形成以及微生物、内源酶活性密切相关,一方面不均匀的解冻过程使得冰晶对肌肉细胞造成不可逆的机械损伤,肌肉组织结构发生变化,蛋白变性程度增加,另一方面在微生物和酶的作用下,虾组织的自溶效应增强,蛋白质不断被降解,造成质构特性发生变化,影响消费者的可接受性^[19-20]。超声处理显著缩短了解冻时间,此外,超声波能对细胞组织和蛋白质网状空间结构造成损伤,进而起到减菌和降低酶活的作用^[4],这可能是超声解冻能够改善冷冻虾产品质构特性的主要原因。

表2 超声解冻对冷冻虾质构特性的影响[†]

Table 2 Effect of ultrasonic thawing on the qualitative and structural properties of frozen shrimp

解冻方式	硬度/N	弹性	回复性
常温解冻	3.89±0.21 ^c	0.48±0.025 ^c	0.17±0.011 ^b
300 W 超声	4.49±0.12 ^b	0.69±0.031 ^b	0.20±0.012 ^a
400 W 超声	4.90±0.11 ^a	0.77±0.021 ^a	0.22±0.023 ^a
500 W 超声	4.78±0.13 ^a	0.78±0.022 ^a	0.25±0.017 ^a

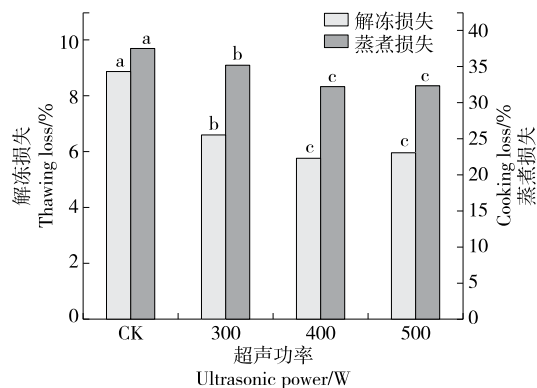
[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 对冷冻虾解冻损失和蒸煮损失的影响

由图1可知,与常温解冻相比,超声解冻显著降低了冷冻虾的解冻损失和蒸煮损失,超声功率对解冻损失和蒸煮损失的影响趋势相同,400,500 W超声组的解冻损失和蒸煮损失显著低于300 W超声组,但400,500 W超声组的蒸煮损失和解冻损失无统计学差异。解冻损失主要与冻结过程中产生的冰晶大小及分布有关,冰晶体积大,分布不均则会破坏虾的组织结构,解冻后会有较高的汁液流失率。蒸煮损失与肌肉纤维蛋白质的空间相关,超声解冻较常温解冻耗时短且解冻过程稳定、均匀,对样品的组织细胞和蛋白质网状空间结构的破坏较小,此外,超声波能够促进致密肌纤维蛋白网状结构的形成,使得肌纤维之间的水分子保持牢固^[14,21],但超声功率较大时会过度破坏肌纤维结构,降低肉的特水能力。

2.3 对冷冻虾 TVB-N 含量的影响

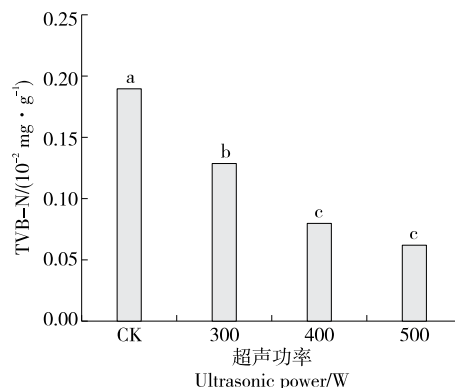
由图2可知,与常温解冻相比,超声组样品的TVB-N含量显著降低($P<0.05$),且随着超声功率的增加而减少,但400 W超声组与500 W超声组之间无统计学差异。超声技术作为一种非热加工技术,可以使压力和温度发生局部的迅速变化,进而产生剪切破坏、空穴化效应、细胞膜变薄、定位加热和自由基的生成等,使微生物产物理性损伤,从而起到减菌和降低酶活性的效果^[22-23]。



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图1 超声解冻对冷冻虾解冻损失和蒸煮损失的影响

Figure 1 Effect of ultrasonic thawing on thawing loss and cooking loss of frozen shrimp



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图2 超声解冻对冷冻虾 TVB-N 含量的影响

Figure 2 Effect of ultrasonic thawing on TVB-N of frozen shrimp

2.4 对冷冻虾 TBARS 值的影响

南美白对虾中富含不饱和脂肪酸,但解冻过程中,在脂肪酶水解酶和氧气作用下游离不饱和脂肪酸会被氧化降解,此外,脂质氧化产生的初级、次级代谢产物会进一步诱导蛋白质氧化等反应,脂质氧化会导致食品的色泽、风味、质地和营养价值劣变,这将影响产品的食用价值以及消费者的接受度^[24]。由图3可知,与常温解冻相比,超声组显著降低了冷冻虾的TBARS值,且超声功率越高, TBARS值越低,表明超声解冻能够抑制脂肪酸的氧化,可能是超声解冻显著减少了解冻时间,进而减少了游离脂肪酸被氧气等外部环境的影响,而且超声波能破坏蛋白质空间结构使脂肪酶水解酶的活性降低。李慢等^[4]研究发现,超声解冻由于解冻速率较快,缩短了脂肪氧化反应时间,较空气解冻降低了中国对虾的脂肪氧化程度,与试验结果一致。

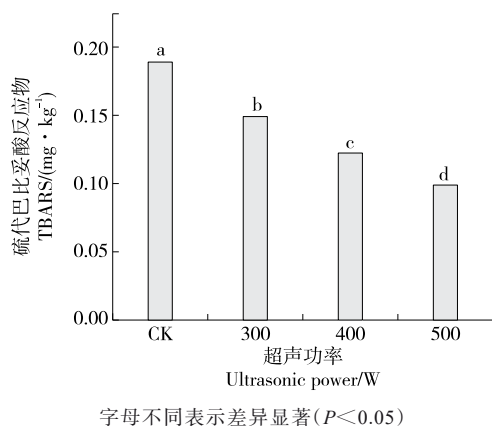


图3 超声解冻对冷冻虾TBARS值的影响

Figure 3 Effect of ultrasonic thawing on TBARS values of frozen shrimp

2.5 对冷冻虾羰基含量的影响

肌原纤维蛋白质的羰基含量可用来反映蛋白氧化程度,样品中糖基含量越高表明其蛋白质氧化程度越严重^[25-26]。由图4可知,超声处理组的羰基含量显著低于常温解冻组,但不同超声功率对冷冻虾中羰基含量的影响无统计学差异,主要原因是,一方面超声作用破坏了蛋白质降解的钙激活酶和组织蛋白酶,另一方面超声解冻显著缩短了解冻时间,减少了样品与氧自由基的接触,但不同超声功率解冻所需时间差异较小,可能是导致不同超声功率下羰基含量差异不显著的主要原因。以上结果表明超声解冻能抑制蛋白质氧化,极大地提高了冷冻虾的品质。

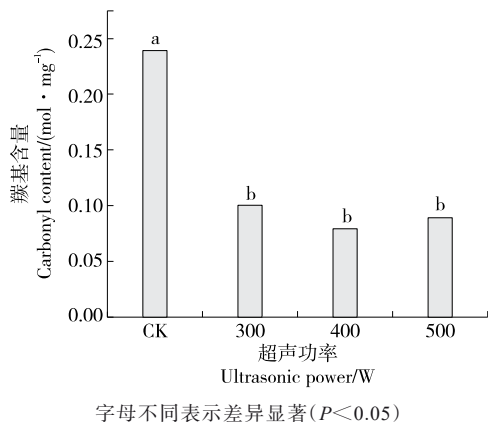


图4 超声解冻对冷冻虾羰基含量的影响

Figure 4 Effect of ultrasonic thawing on carbonyl content of frozen shrimp

2.6 对冷冻虾巯基含量的影响

肌原纤维蛋白质分子中的半胱氨酸等氨基酸中的巯基在氧化过程中易被活性氧自由基攻击形成二硫键,活

性巯基含量随之减少,进而加速蛋白功能性的丧失。巯基含量的高低是反映蛋白氧化程度的重要指标之一,巯基含量越高代表氧化程度越低^[25]。由图5可知,超声组的巯基含量显著高于常温解冻组,且随着超声功率的增加而增加,表明超声处理能有效抑制南美白对虾解冻过程中蛋白质的氧化程度。这与李慢等^[4]的研究结果一致。朱文慧等^[12]研究发现,超声波辅助解冻降低了蛋白质的变性和氧化性。

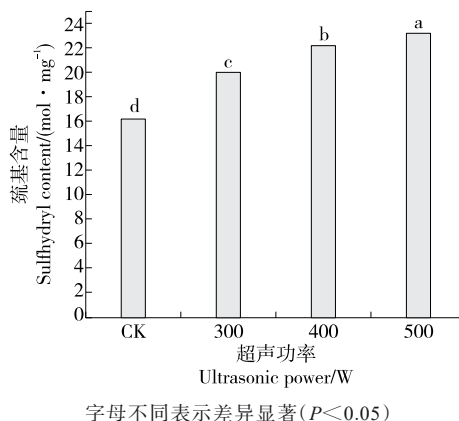


图5 超声解冻对冷冻虾巯基含量的影响

Figure 5 Effect of ultrasonic thawing on sulphhydryl content of frozen shrimp

2.7 对冷冻虾pH值的影响

由表3可知,常温解冻样品的pH值升高,表明常温解冻虽然能够保持虾的基本品质,但由于解冻时间较长,可能导致虾的细胞代谢产物(如乳酸和氨基酸)积累,从而使pH值升高。常温解冻过程中,虾体内的酶活性仍然存在,为代谢物的持续生成提供了催化基础,随着解冻时间的延长,细胞膜的完整性受到影响,导致细胞内外物质交换加速,进而影响pH值的稳定性。相较之下,超声组样品显示出更好的新鲜度,超声波通过产生微小气泡并在其破裂时释放能量,形成强烈的局部温度和压力变化,从而加速冰晶融化,减少了细胞内水分的损失和对细胞膜的破坏。这种快速解冻的方式能够有效抑制细胞内酶活

表3 超声解冻对冷冻虾pH值的影响[†]

Table 3 Effect of ultrasonic thawing on pH value of frozen shrimp

解冻方法	解冻时间/min	pH 值
常温解冻	57.0±2.0	7.40±0.15 ^d
300 W 超声	21.0±0.5	7.30±0.12 ^c
400 W 超声	19.0±0.4	7.10±0.10 ^b
500 W 超声	18.0±0.5	6.90±0.08 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

性,减少代谢产物的生成,从而保持虾的鲜度。随着超声功率的增加,超声波的能量增强,导致更高效的气泡形成和破裂,进一步加速了冰晶的融化过程,减少了对虾肉的损伤,抑制了细胞内的生化反应,保持了较低的 pH 值。较低的 pH 值通常与更高的鲜度相关,表明虾体内的腐败微生物和酶活性受到抑制。

2.8 对冷冻虾感官品质的影响

由表 4 可知,常温解冻的综合评分显著低于超声组,表明传统解冻方法对虾的感官品质影响较大,可能导致虾在解冻过程中失去水分,产生质地变差和气味不佳的现象。随着超声解冻功率的增加,虾的感官评分逐渐提高,300,400 W 超声组样品品质明显改善,尤其在气味和外观方面,表明超声波能够有效促进冰晶的快速融化,减少对虾肉质的损伤,从而保持其新鲜度。值得注意的是,500 W 超声组样品表现出最佳的感官品质,综合评分达到最高水平,可能与超声波的能量密度和频率有关。适当的超声功率能够有效促进水分的均匀分布和快速解冻,避免过度加热和水分流失,从而保持虾的最佳感官特征。统计分析结果显示,不同解冻方法之间的感官评分存在显著差异($P<0.05$),表明超声解冻技术在提高冷冻虾的感官品质方面具有显著优势,尤其是 500 W 超声组能够最大程度地保持虾的感官特征,确保其新鲜度和食用价值。

表 4 超声解冻对冷冻虾感官评定变化[†]
Table 4 Sensory evaluation changes of frozen shrimp under ultrasonic thawing

解冻方法	气味	外观	肉质组织	综合评分
常温解冻	4.20±0.75 ^c	4.30±0.68 ^c	4.10±0.62 ^c	12.60±1.05 ^c
300 W 超声	5.60±0.35 ^b	5.70±0.42 ^b	5.30±0.48 ^b	16.60±0.85 ^b
400 W 超声	5.70±0.42 ^b	5.80±0.35 ^a	5.60±0.50 ^a	16.90±0.75 ^b
500 W 超声	5.90±0.22 ^a	5.95±0.15 ^a	5.85±0.20 ^a	17.70±0.33 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.9 对冷冻虾水解氨基酸的影响

由表 5 可知,超声解冻显著提高了冷冻虾的氨基酸释放。常温解冻组的氨基酸释放量普遍较低,说明传统解冻方法对蛋白质结构和氨基酸释放的影响不足。随着超声功率的增加,氨基酸的释放量显著提升,尤其是在 400, 500 W 超声组中,亮氨酸、谷氨酸等必需氨基酸的释放量达到最高值,表明高功率超声波能够最大程度地促进蛋白质水解,释放出更多氨基酸。此外,必需氨基酸(EAA)总量在超声组中逐渐增加,尤其是在 500 W 组达到最高值,而非必需氨基酸(NEAA)的释放量变化较小,显示出超声对非必需氨基酸的影响相对较小。呈味氨基酸(DAA)的释放量在超声组中也有所增加,尤其在 500 W

表 5 超声解冻对冷冻虾水解氨基酸的影响

Table 5 Effect of ultrasonic thawing on hydrolyzed amino acids of frozen shrimp

氨基酸	常温解冻	300 W 超声	400 W 超声	500 W 超声	%
异亮氨酸	0.65±0.08	0.85±0.12	0.95±0.10	1.02±0.09	
胱氨酸	0.05±0.02	0.09±0.03	0.11±0.04	0.13±0.03	
亮氨酸	1.30±0.15	1.50±0.18	1.65±0.16	1.78±0.14	
赖氨酸	1.28±0.16	1.45±0.14	1.58±0.11	1.70±0.10	
蛋氨酸	0.28±0.05	0.38±0.06	0.44±0.07	0.50±0.05	
苯丙氨酸	0.68±0.10	0.78±0.08	0.86±0.09	0.93±0.07	
苏氨酸	0.62±0.12	0.74±0.14	0.81±0.12	0.88±0.09	
缬氨酸	0.70±0.06	0.79±0.07	0.87±0.08	0.94±0.06	
丙氨酸	1.18±0.09	1.27±0.07	1.34±0.08	1.42±0.06	
天冬氨酸	1.28±0.06	1.37±0.09	1.43±0.07	1.50±0.05	
谷氨酸	1.90±0.11	2.08±0.09	2.18±0.10	2.28±0.08	
甘氨酸	0.90±0.15	1.04±0.12	1.12±0.11	1.20±0.09	
脯氨酸	0.45±0.07	0.40±0.08	0.36±0.06	0.33±0.05	
丝氨酸	0.40±0.06	0.36±0.11	0.34±0.09	0.44±0.07	
酪氨酸	0.41±0.08	0.43±0.10	0.44±0.06	0.36±0.07	
精氨酸	1.02±0.07	1.09±0.09	1.02±0.05	1.16±0.08	
组氨酸	0.98±0.14	1.16±0.12	1.08±0.09	1.06±0.07	
必需氨基酸(EAA)	5.60±0.18	6.20±0.45	7.10±0.30	7.35±0.25	
非必需氨基酸(NEAA)	8.80±0.25	9.20±0.20	9.15±0.15	9.30±0.18	
呈味氨基酸(DAA)	5.30±0.18	5.75±0.16	5.85±0.12	5.95±0.15	
总氨基酸(TAA)	14.50±0.35	15.60±0.45	16.50±0.35	17.50±0.30	
EAA/TAA	38.62	39.74	43.03	41.99	
DAA/TAA	36.55	36.92	35.45	34.00	

超声组中增加明显,表明超声解冻不仅提高了氨基酸的释放量,还可能改善虾的风味特性。

2.10 相关性分析

为进一步分析超声解冻对冷冻虾品质的影响及机制,采用 Pearson 相关性分析冷冻虾解冻过程中各品质指标间的可能关系,结果如图 6 所示。由图 6 可知,冷冻虾的解冻损失与弹性、硬度呈负相关($P<0.05$),与 TVB-N 含量、TBARS 值、羰基含量呈正相关($P<0.05$),TVB-N 含量与硬度、弹性、恢复性呈负相关($P<0.05$),与 TBARS 值、羰基含量呈正相关($P<0.05$)。表明冷冻虾在解冻过程中各品质的变化具有潜在联系,如蛋白质的氧化会诱导脂质氧化的发生和食品质构特性的劣变。因此,开发一种优势解冻技术对食品加工行业尤为重要。

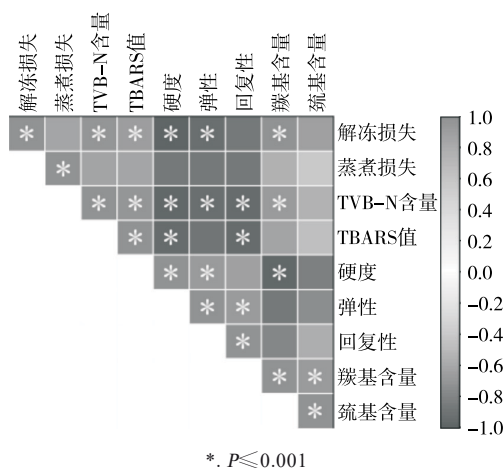


图 6 相关性分析

Figure 6 Correlation analysis

3 结论

400 W 功率的超声解冻效果显著,能够最大程度地促进冰晶均匀融化,减少对虾肉细胞的机械损伤,从根本上提升了冷冻虾的质构品质。超声解冻能显著降低巯代巴比妥酸反应物的生成,抑制脂肪酸氧化,显著提高巯基含量,降低羰基含量,表明其在抑制脂质和蛋白质氧化方面具有独特优势。常温解冻组虽表现出较低的氨基酸释放量(较超声解冻组低 15%~20%),但其汁液流失率和蒸煮损失率却显著高于超声组。常温解冻因耗时较长,导致肌原纤维蛋白部分变性,疏水性基团暴露,持水能力下降(水分结合能力降低 30%~40%),从而加剧汁液流失;而超声解冻通过快速解冻减少了蛋白质变性,维持了肌纤维结构的完整性。此外,长时间常温解冻可能引发内源性蛋白酶(如组织蛋白酶)的阶段激活与失活,蛋白质分解有限;后期升温阶段虽酶活性恢复,但变性蛋白形成聚集态,反而不易被酶解,最终导致总氨基酸释放量较低。综上,超声解冻通过空化效应促进冰晶均匀融化,减少了对肌纤维的机械损伤,同时加速了解冻过程中酶与底物的接触效率,因此汁液流失少且氨基酸释放更充分。超声解冻需依赖水介质传递能量,为区分超声效应与浸水作用,后续研究应增设仅浸水(无超声)的解冻组,以量化超声技术的独立贡献。超声解冻的深层次机理尚未完全阐明,如超声波对蛋白质分子结构的微观影响、不同功率对食品品质的差异性机制等均需后续深入研究。

参考文献

[1] ZHENG J R, ZHAO Y, FENG Y X, et al. C-Jun N-terminal kinase activation contributes to improving low temperature tolerance via regulating apoptosis in the Pacific white shrimp *Penaeus vannamei*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2023, 139:

108912.

[2] 孙康婷, 陈胜军, 潘创, 等. 南美白对虾微冻贮藏期间蛋白质品质变化及预测模型的建立[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 317-326.
SUN K T, CHEN S J, PAN C, et al. The changes and prediction model of protein quality of *Litopenaeus vannamei* during partial freezing storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(7): 317-326.

[3] SHIN H S, MONTACHANA CHIMBORAZO M E, ESCOBAR RIVAS J M, et al. Genetic parameters for growth and morphological traits of the Pacific white shrimp *Penaeus vannamei* from a selective breeding programme in the industrial sector of Ecuador[J]. Aquaculture Reports, 2023, 31: 101649.

[4] 胡彼波, 陈文飞, 顾泽茂, 等. 抗冻剂对蒸煮小龙虾虾仁冻融后品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(1): 116-124.
HU X B, CHEN W F, GU Z M, et al. Effect of antifreeze on the quality of cooked crawfish tail meat after freeze-thawed[J]. Food & Machinery, 2023, 39(1): 116-124.

[5] 王梦娟, 王灵昭, 顾涵, 等. 南极磷虾自溶物深度酶解产物鲜味研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(1): 75-79.
WANG M J, WANG L Z, GU H, et al. Study on umami of deep enzymatic hydrolysates of Antarctic krill autolysates[J]. China Condiment, 2023, 48(1): 75-79.

[6] 张亚瑾, 焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 215-221, 236.
ZHANG Y J, JIAO Y. Research status and prospect of freezing and thawing technologies of aquatic products[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 215-221, 236.

[7] GIMMEL A, BAUMGARTNER K, BÄCKERT S, et al. Effects of storage time and thawing method on selected nutrients in whole fish for zoo animal nutrition[J]. Animals, 2022, 12(20): 2847.

[8] 田金钊, 刘莹, 臧梁, 等. 不同解冻方式对水产品品质影响研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 204-210.
TIAN J C, LIU Y, ZANG L, et al. Effect of different thawing methods on the quality of aquatic products: a review[J]. Food Research and Development, 2023, 44(12): 204-210.

[9] LV Y, XIE J. Quality of cuttlefish as affected by different thawing methods[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 33-52.

[10] 林而舒. 不同解冻方式对半刺厚唇鱼风味物质的影响[J]. 水产养殖, 2023, 44(7): 1-5, 17.
LIN E S. Effect of different thawing methods on the volatile flavor compounds of *acrossocheilus hemispinus*[J]. Journal of Aquaculture, 2023, 44(7): 1-5, 17.

[11] 沈婉钰, 王雪儿, 汪高玮, 等. 不同冷冻—解冻方式对苹果汁品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(13): 40-46.
SHEN W Y, WANG X E, WANG G W, et al. Effects of different freezing-thawing methods on the quality of apple juice[J]. Food Research and Development, 2023, 44(13): 40-46.

- [12] 朱文慧, 宦海珍, 李月, 等. 超声辅助解冻对秘鲁鱿鱼胴体蛋白氧化与品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 68-76.
ZHU W H, EUN H Z, LI Y, et al. Effect of ultrasound-assisted thawing on protein oxidation and quality of frozen jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [J]. Food Science, 2021, 42(5): 68-76.
- [13] 孙晋跃, 张衡, 张娇娇, 等. 超声联合乳酸处理对沙门氏菌游离及生物膜菌体的杀菌作用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 270-278.
SUN J Y, ZHANG H, ZHANG J J, et al. Sterilization effect of ultrasound combined with lactic acid against *Salmonella* planktonic and biofilm cells[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 270-278.
- [14] 蔡路昀, 许晴, 曹爱玲. 不同超声辅助解冻方式对海鲈鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 264-271.
CAI L Y, XU Q, CAO A L. Effects of different ultrasound-assisted thawing methods on the quality of the sea bass [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 264-271.
- [15] 雷辰, 夏延斌, 车再全, 等. 超声处理技术在肉类工业中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 232-236.
LEI C, XIA Y B, CHE Z Q, et al. Progress on application of ultrasound treatment technology in meat industry[J]. Food & Machinery, 2016, 32(5): 232-236.
- [16] 王庆玲, 栾艺, 王俊山, 等. 微波-热风耦合干燥处理对牛肉干品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 39-46.
WANG Q L, LUAN Y, WANG J S, et al. Effect of combined microwave-hot air drying on quality of beef jerky[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 39-46.
- [17] 许丹, 韩悦, 郑斌, 等. 基于组织蛋白酶催化的不冻液冻结中华管鞭虾中肌原纤维蛋白氧化分析[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 71-77.
XU D, HAN Y, ZHENG B, et al. Myofibrillar protein oxidation in immersion-frozen red shrimp (*Solenocera crassicornis*) during frozen storage: analysis based on changes of endogenous enzyme activity[J]. Food Science, 2023, 44(4): 71-77.
- [18] 娄鑫玲, 武艺雪, 范志红, 等. 不同质构特性西兰花对口腔加工行为和米饭餐饱腹感的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 131-138.
LOU X L, WU Y X, FAN Z H, et al. Broccoli texture modulates oral processing behavior and satiety of cooked rice [J]. Food Science, 2023, 44(9): 131-138.
- [19] 房思维, 余进祥, 郭全友, 等. 外源添加剂对小龙虾虾糜制品凝胶特性的影响及协同效应[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 23-32.
FANG S W, YU J X, GUO Q Y, et al. Effect and synergy of different exogenous additives on gel properties of the crayfish surimi products[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 23-32.
- [20] 李翰卿, 马丽珍, 陈胜军, 等. 不同解冻方式对鳇乌贼胴体肌肉品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 20-28.
LI H Q, MA L Z, CHEN S J, et al. Effect of different thawing methods on muscle quality of *sthenoteuthis oualaniensis*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(5): 20-28.
- [21] 蔡路昀, 许晴, 曹爱玲. 不同超声辅助解冻方式对海鲈鱼肌原纤维蛋白的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 1-8.
CAI L Y, XU Q, CAO A L. Effects of different ultrasound-assisted thawing methods on the myofibrillar protein of the sea bass (*Perca fluviatilis*) [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 1-8.
- [22] FAN K, WU J X, CHEN L B. Ultrasound and its combined application in the improvement of microbial and physicochemical quality of fruits and vegetables: a review[J]. Ultrason Sonochem, 2021, 80: 105838.
- [23] 孔金花, 诸永志, 葛庆丰, 等. 超声波协同微酸性电解水对小龙虾净化及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 182-189.
KONG J H, ZHU Y Z, GE Q F, et al. Effect of ultrasonic and slightly acidic electrolyzed water on the purification and quality of crayfish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 182-189.
- [24] 卢逸夫, 王灵昭, 钱亮亮, 等. 虾皮酱加工过程中脂质氧化及抗氧化研究[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(4): 1-7.
LU Y F, WANG L Z, QIAN L L, et al. Lipid oxidation and antioxidation of shrimp skin paste during processing[J]. Food Research and Development, 2023, 44(4): 1-7.
- [25] 唐欣颖, 吉宏武, 张迪, 等. 高压静电场解冻对凡纳滨对虾肌球蛋白结构特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 177-184.
TANG XY, JI H W, ZHANG D, et al. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the structural characteristics of myosin in shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 177-184.
- [26] 张进伟, 胡晓, 陈胜军, 等. 腌制风干过程中卵形鲳鲹鱼肉性质、蛋白质氧化及游离氨基酸的变化[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 272-278.
ZHANG J W, HU X, CHEN S J, et al. Changes in physicochemical properties, protein oxidation and free amino acids of *trachinotus ovatus* during curing and air-drying[J]. Food Science, 2022, 43(18): 272-278.