

黄荣秋, 臧明伍, 李海花, 等. 超声波技术在肉品加工中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 431-439. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100228

HUANG Rongqiu, ZANG Mingwu, LI Haihua, et al. Research Advance of Application of Ultrasonic Treatment in Meat Processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 431-439. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100228

· 专题综述 ·

超声波技术在肉品加工中的应用研究进展

黄荣秋^{1,2}, 臧明伍^{1,*}, 李海花², 柴悦^{1,2}, 赵冰¹, 张顺亮¹, 张哲奇¹, 张凯华¹, 李素¹, 吴倩蓉¹, 李丹¹

(1. 中国肉类食品综合研究中心北京食品科学研究院, 北京 100068;

2. 天津农学院动物科学与动物医学院天津市农业动物繁育与健康养殖重点实验室, 天津 300384)

摘要: 目前, 超声波处理在肉品加工前处理及热加工中得到广泛的研究和应用, 研究普遍认为超声波的空化效应、机械效应和热效应是引起肉品品质改变的主要原因。本文综述了超声波技术在肉品加工中的技术原理及其在肉品加工前处理和热加工过程中的应用进展, 阐述了超声波辅助加工过程中对肉类嫩度、色泽、保水性及脂质、蛋白质氧化的改善效果, 并对其应用前景进行展望。总体而言, 超声波技术在辅助冻结、解冻、腌制、热加工中对肉类理化性质及感官品质具有显著改善作用。本文为超声波技术在肉品加工中的应用提供了理论参考。

关键词: 超声波, 原理, 应用, 前处理, 热加工, 肉类品质

中图分类号: TS251.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)20-0431-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100228



本文网刊:

Research Advance of Application of Ultrasonic Treatment in Meat Processing

HUANG Rongqiu^{1,2}, ZANG Mingwu^{1,*}, LI Haihua², CHAI Yue^{1,2}, ZHAO Bing¹, ZHANG Shunliang¹, ZHANG Zheqi¹, ZHANG Kaihua¹, LI Su¹, WU Qianrong¹, LI Dan¹

(1. China Meat Research Center, Beijing Academy of Food Science Center for Food Evaluation, Beijing 100068, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Agricultural Animal Breeding and Healthy Husbandry, College of Animal Science and Veterinary Medicine, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Ultrasonic treatment has been widely researched and applied in the pre-processing and thermal processing of meat and meat processed products at present. The cavitation effect, mechanical effect, and thermal effect of ultrasonic wave are considered to be the main reasons for the changes of meat quality. In this paper, the basic principle of ultrasound and the application progress in pre-treatment and thermal processing in meat processing are reviewed. The effects of ultrasonic treatment on meat tenderness, color, water holding capacity, and lipid and protein oxidation are summarized. The future prospect of its application is also proposed. In general, the physicochemical property and sensory quality of meat and meat processed products are significantly improved during ultrasound-assisted freezing, thawing, curing, and thermal processing. The paper provides a theoretical reference for the application of ultrasonic treatment in meat processing.

Key words: ultrasonic wave; principle; application; pre-treatment; thermal processing; meat quality

超声波是由声波传播过程中介质分子运动产生的机械波组成, 传播频率高, 不能被人耳察觉^[1], 广泛应用于化工、医药、农业等领域^[2-5]。近年来, 超声波技术在食品工业中的应用也发展迅速, 在结晶、干

燥、提取、杀菌、酶活调控、肉品品质改善等方面得到广泛研究与应用。

在改善肉品品质方面, 超声波辅助其它技术在肉品加工过程中可以对肉品品质起到很好的调控作

收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 北京市科技计划 (Z191100004019011); 北京市科技计划 (Z221100007122010); 北京市自然科学基金项目“磷脂分子介导猪肉宰后成熟过程直链醛类风味形成机制” (6224065)。

作者简介: 黄荣秋 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 动物性食品生产与安全, E-mail: huangrongqiu9@163.com。

* 通信作者: 臧明伍 (1981-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 肉品科学与食品安全, E-mail: zangmw@126.com。

用^[6]。目前,超声波技术在肉品加工中的应用多集中在辅助冷冻储存、加工前处理及热加工过程中,对改善肉质、辅助冻结、提高解冻效率、辅助腌制等方面效果显著,在防腐、乳化、嫩化等过程中具有改变肉品物理、化学性质的能力^[7]。根据超声波强度的不同,其在调节酶活方面也有一定程度贡献^[8]。虽然超声波已被用于肉品加工过程中的工艺改善,但仅有少数工艺被用于工业化生产,需要继续研究以扩大工业化规模应用。与此同时,高强度的超声波处理被证实有促进氧化的效果,而过度氧化对肉品品质产生一定负面影响。因此,明确肉品超声波处理加工特性对于调控肉品品质显得尤为重要^[9]。

本文介绍了超声波技术应用原理及在肉类加工中前处理及热加工过程中应用进展,并评估超声波辅助加工对肉制品嫩度、色泽、持水力及脂质氧化、蛋白质氧化的影响,为提高产品加工效率,改善产品品质提供理论依据。

1 超声波技术原理

超声波是一种机械波,主要将电能转化为机械能,其传播速度受介质性质影响,一般通过空化效应、机械效应和热效应发挥作用^[6],图1为超声波作用原理。空化效应主要是指存在于液体中的微气核空化泡在超声波作用下振动,当声压达到一定值时形成负压,空化气泡生长、膨胀、破裂、收缩的动力学过程,空化效应同时伴随着空化气泡局部高温高压的

产生及强大的冲击力带来的微射流^[10]。空化气泡的震荡和生长又称为稳态空化,此过程相对稳定,没有温度和压强的剧烈变化;空化气泡收缩与破裂称为瞬时空化,瞬时空化取决于超声波的振幅与频率,空化气泡爆破瞬间释放局部温度可高达5000 K,压强可达50 MPa^[7]。由于空化泡的分布并不均匀,因此空化效果可能有所不同^[11-12]。机械效应一方面包括空化气泡破裂产生的微射流和冲击波产生的机械能;另一方面超声波在介质中传播,介质质点在声波作用下振动产生较高的加速度,对介质结构具有破坏作用^[13]。超声波在介质中传播产生的反射波也会引发机械效应产生。以上机械反应在超声波处理中并不是单独存在,而是协同发挥作用^[14-15]。超声波在传播过程中伴随能量的传播。介质机械振动过程中摩擦产热、对外部能量的吸收、空化气泡爆破产生的高温等是导致热效应产生的主要原因^[10],其中空化效应导致局部高温,其它原因导致介质温度整体升高。

除空化效应、机械效应和热效应外,超声波处理弥散作用在肉制品加工过程中有所应用。超声波处理有助于改善细胞通透性,加速生物膜物质交换,在肉制品腌制过程中广泛应用,有效缩短腌制时间^[16]。

2 超声波在肉品前处理中的应用

2.1 超声波辅助冻结在肉品中的应用

冷冻保存是肉类储存、运输过程中最常用的方法,低温有助于降低生物化学反应速率,抑制微生物生长繁殖,从而保证产品质量安全^[17]。研究发现,冷冻速率与肉品色泽、保水性、组织结构等品质参数密切相关,冷冻产生冰晶的位置和大小是决定冷冻产品质量的重要因素^[18]。传统的冻结方法速率较低,形成冰晶较大且尖锐,容易造成细胞损伤,影响产品质量。超声波辅助冻结的应用提高了肉品冷冻效率,增加冰晶的成核率,促进小冰晶的产生,从而降低对肉品微观结构的破坏^[19],提高冷冻肉质量。

目前的研究认为,超声波空化气泡破裂局部高压的产生有助于增加冰核的数量及产生速度,产生的微射流可使大冰晶碎裂成小冰晶,降低冰晶的形成对组织结构完整性的破坏^[20]。另外,微射流的产生可有效提高冻结水与未冻水之间的热量传递效率,加速冰晶的产生,提高肉类冷冻速率^[21]。但超声波热效应的产生可能阻碍冰晶的产生,因此超声波参数的确定在生产中尤为重要。研究人员在探究超声波辅助冷冻对畜禽肉质的影响中得到,相较于传统冻结方式,超声波辅助冷冻在提高冷冻效率、减少水分损失、改善肉质中效果显著(表1)^[22-24]。然而,过高强度的超声波处理能显著增加肌纤维间隙,导致肌肉组织物理特性弱化,因此恰当的超声处理功率(160~180 W)是减小冷冻冰晶尺寸、增加冰核数量的关键。已有研究证明,超声波辅助冻结技术的产生可有效提高肉类冻结速率,对保障冷冻肉食用品质方面发挥积极作用。

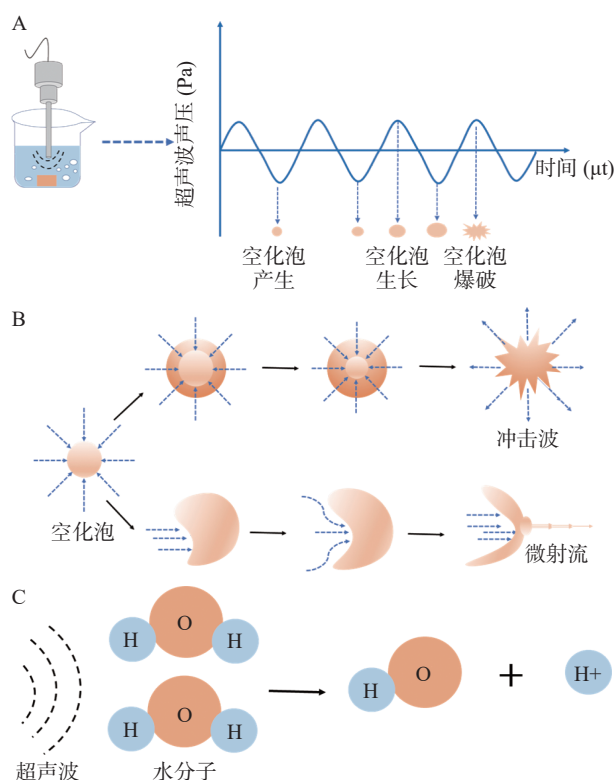


图1 超声波作用原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic action principle

注:A:超声空化效应;B:空化气泡破裂及微射流的产生;C:水分子分解产生自由基。

表 1 超声波辅助冻结在肉品中的相关研究结果

Table 1 Relevant research results of the effect of ultrasonic-assisted freezing on meat quality

名称	工艺参数	品质	参考文献
鲤鱼	功率: 0、125、150、175、200 W 频率: 30 kHz 时间: 30 s开, 30 s关; 持续9 min	最佳功率175 W时解冻损失与蒸煮损失较低, 冷冻冰晶尺寸较小, 冷冻时间缩小, 鱼肉品质改善。	Sun等 ^[22]
猪肉	功率: 180 W至中心温度达-20 ℃	冰晶尺寸小且均匀, 蒸煮损失低于空气冷冻, 脂质氧化程度较低。	Zhang等 ^[23]
鸡胸肉	功率: 125、165、205、245 W	165 W时冷冻时间显著下降, 冰晶更小更均匀, 解冻损失与蒸煮损失降低。	Zhang等 ^[24]

2.2 超声波在肉品解冻中的应用

除冻结工艺外, 超声波对肉品解冻工艺的发展发挥重要作用。不当的解冻方式会造成水分及营养物质的流失, 导致产品保水性变差。引起冷冻肉感官品质下降及营养物质流失的主要原因是解冻过程中肌肉完整结构的损伤^[7]。传统解冻方法解冻效率低, 不适应规模化生产, 超声波辅助解冻技术的发展有效减少了冷冻肉的解冻时间, 并实现低温条件下快速解冻, 提高了冷冻肉解冻品质。

超声波声能向热能的转化加速了解冻过程, 肉品的快速解冻有助于保持产品肌纤维结构的完整性。高功率的超声波有助于提高热能在介质中的扩散速度, 适当功率的超声辅助解冻有助于低温快速解冻的实现, 有效预防高温对肉质的影响^[25]。另外, 超声波的传播在固体中的衰减速度大于在液体中的衰减速度, 且易在固液界面产生反射, 因此导致固体冰晶对能量吸收更高, 加速冰晶溶解。目前, 在超声辅助解冻技术对猪肉、牛肉、羊肉、鸡肉、鱼类解冻品质的影响领域已有诸多研究。Wang 等^[26] 通过比较真空解冻、超声波解冻和微波解冻对猪背最长肌品质影响, 发现真空解冻和超声波解冻对肉品品质的影响相对较低。Zhang 等^[27] 通过研究不同功率的超声辅助浸泡解冻对鸡胸肉解冻速度及理化性质的影响, 表明 300 W 的超声波辅助浸泡解冻有效降低样品结合水和自由水的解冻损失, 很大程度保持肌原纤维蛋白结构的完整性; 适当功率的超声波处理可以加快解冻速率的同时保证肉品品质, 但对微观结构会造成一定影响。Guo 等^[28] 研究不同功率的超声波对牦牛肉解冻品质的影响, 发现低功率超声波(400 W)在加快解冻速率的同时保证细胞完整性, 但肌纤维面积显著增加, 600 W 功率的超声波处理肌纤维边界消失, 肌纤维细胞发生破裂, 证明高功率的超声波处理对肉品

品质和结构产生不利影响。因此, 针对不同的样品特性设置超声波处理参数是工业化生产中面临的重要问题。

2.3 超声波在肉类腌制中的应用

腌制是肉制品前处理的重要环节, 目的在于延长产品保质期及改善产品感官品质。传统的腌制方法包括干腌、湿腌、盐水注射腌制、滚揉等^[29]。腌制过程主要涉及两种物质传递过程, 一种为肉中水分向外迁移过程, 另外一种为腌制液成分向肉内部渗透扩散过程^[30]。外界高盐环境通过高压渗透作用促使肉中水分快速向外迁移, 盐离子向内渗透却尤为缓慢, 通过注射盐水可有所改善, 但盐水注射易造成分布不均, 导致产品品质不稳定。超声波的应用可以改变肌纤维的结构, 增强生物膜的通透性, 显著提高肌肉组织渗透性, 有效缩短腌制时间, 提高生产效率^[16]。

超声波辅助腌制对肉品持水性、嫩度、肉色、微生物总量及风味物质产生等均发挥着重要作用。超声功率、超声时间、腌制液盐离子浓度等均是影响盐离子扩散的重要因素(表 2)。Cárcel 等^[30] 研究发现在超声强度阈值以上, 猪里脊肉 NaCl 含量与超声波强度成比例增加。超声波空化效应产生的微射流影响传质过程, 空化气泡破裂对肌肉结构造成的损害影响肌肉嫩度和持水性。Pan 等^[31] 认为超声波加速盐离子向宰后肌肉内传播, 且增加肌肉蛋白质氧化敏感性, 相比静态腌制, 在色泽和保水性上有所改善。Li 等^[32] 研究超声波辅助滚揉腌制对肌肉品质属性的影响, 得到超声波辅助处理显著提高了腌制液吸收, 鸡胸肉嫩度和口感有所改善。超声波辅助腌制是超声波空化效应、机械效应与弥散作用协同作用的结果, 其在提升腌制效率的同时可能对肉质造成其它的影响, 目前研究认为超声波辅助腌制对产品脂质和蛋白质氧化具有促进作用。Kang 等^[33] 在研究超声强度

表 2 超声波辅助腌制在肉品中的相关研究结果

Table 2 Related research results of ultrasonic-assisted curing on meat quality

名称	工艺(类别)	品质	参考文献
猪里脊	静态腌制、盐水搅拌腌制、超声辅助腌制	超声辅助腌制NaCl传质速率与超声强度成比例增长, 持水力增强。	Cárcel等 ^[30]
猪股二头肌	静态腌制、超声辅助腌制(20 kHz, 350 W, 1 h)	超声辅助腌制有利于感官品质的改善, 蛋白质氧化敏感性增强。	Pan等 ^[31]
鸡胸肉	超声波辅助滚揉腌制(40 kHz, 140 W)	显著提高腌制速率, 加速肌纤维断裂	Li等 ^[32]
牛肉	静态腌制、超声波辅助腌制(功率: 2.39、6.23、11.32、20.96 W/cm ² , 时间: 30、60、90、120 min)	超声辅助研制加速蛋白质聚集及自由基的产生。	Kang等 ^[33]
牛肉	超声波辅助腌制(2%、4%、6% NaCl, 500 W, 25 kH, 1 h)	超声波辅助腌制有助于增强低盐腌制效果, 提高MUFA含量。	陈银基等 ^[34]

和超声时间对蛋白质氧化和结构的影响中发现超声波处理增加了蛋白质聚集,空化效应产生的自由基导致蛋白质氧化的发生。陈银基等^[34]采用不同浓度食盐结合超声波对牛肉进行腌制发现,超声波辅助腌制可以提高牛肉不饱和脂肪酸含量及脂质氧化程度。

基于超声波辅助腌制提高腌制液扩散速度基础上,相关研究人员在低盐腌制,开发低盐肉制品上进行系列研究,为降低膳食盐摄入作出努力。Pinton 等^[35]研究氯化钠替代物对肉糜品质影响,发现 KCl 替代钠盐结合超声波处理猪肉糜储存期间脂质氧化及感官水平没有显著影响,为低钠盐肉制品的开发提供了理论依据。

3 超声波处理在肉类热加工中的应用

肉制品热加工过程对肉品品质产生直接影响,主要涉及胶原蛋白和肌原纤维蛋白变性。传统热加工过程加工耗时长、能源消耗量大,且长时间高温处理在导致蛋白质变性的同时,可能引起营养物质流失,风味、色泽等质量下降^[36]。研究显示,超声波辅助加工较传统加工方法耗时短,且有助于改善产品质地。

超声波作为一种新型加工技术在肉制品加工过程中被用于改善产品属性,使其获得良好的感官品质^[36]。传统热加工方式包括煎炸、蒸煮等,长时间高温加热不利于肉色、水分等的保持,同时导致蛋白结构发生改变,影响食用品质。相较于传统加工方法超声波辅助加工可有效提高加工过程中热传导率,是缩短加工时间的主要原因,在改善产品蒸煮损失、保持肉色、改善整体风味轮廓中发挥重要作用。研究证实,超声波技术在肉制品煎炸、蒸煮过程中通过促进自由基产生、改变肉品微观结构等最终对感官特性产生影响^[37-38]。低功率超声波辅助油炸产品空化效应导致肌纤维适度断裂,增加产品嫩度。Wang 等^[38]研究不同功率超声处理对油炸肉丸理化特性及微观结构影响,发现超声波可有效缩短加工时间,降低水分损失,提高产品得率,显微镜观察到纤维网络交联,感官评价结果优于未经超声处理的样品。脂质和蛋白质氧化降解是产品风味产生的主要途径,超声波处理对氧化进程的改变对挥发性风味物质的产生具有一定影响。Zou 等^[39]的研究结果显示超声波辅助加工后五香牛肉挥发性风味成分中醛类、醇类、酮类物质含量显著增加,对五香牛肉特征风味的形成具有积极影响。热加工中辅以超声波处理在提高肉制品挥发性化合物丰富度的同时,可以延缓储藏期脂质氧化进程,有助于延长产品货架期。Zhang 等^[40]对超声辅助蒸煮牛肉冷藏期理化性质测定发现,超声波辅助在不破坏产品特性的同时,有助于产品冷藏期间肉色的保持,TBARS 值显著下降。因此,超声波辅助加工可能是一种有效改善肉制品品质的潜在加工技术,未来可能在预制肉制品发展中发挥积极作用。

此外,超声波辅助干燥技术在肉品风干过程中

可加速水分挥发,提高传热效率,从而加速干燥过程^[41]。一方面,超声波振动引起干燥产品表面及内部空气对流,提高热传导效率^[20];另一方面,由于超声处理在细胞内外空化气泡的破裂,导致肌肉组织细胞内微通道的产生,加速水分向外扩散,但过高强度的超声波处理较长时间,容易导致肉品组织结构损伤,影响肉品食用品质^[2]。Baslar 等^[42]通过超声辅助真空干燥显著提高牛肉和鸡肉干燥速率,同时降低能源消耗。Bantle 等^[41]在探究超声辅助干燥动力学时发现,在对鳕鱼进行干燥时,超声强度在不超过 2 W/kg 时,干燥时间可至少降低 50%,证明超声辅助干燥在提高干燥效率上具有显著效果。

4 超声波处理对肉品理化特性的影响

4.1 超声波处理对肉品嫩度的影响

嫩度是评价肉品食用品质的重要指标。动物屠宰前的品种、营养、年龄及宰后成熟等均会对胴体嫩度产生影响。目前大多研究结果认为肉类嫩化的主要原因是肌原纤维蛋白及相关蛋白的水解,其中以肌原纤维蛋白的水解发挥主要作用^[43]。嫩化方式主要包括物理嫩化、化学嫩化和生物嫩化。相关研究证明,超声波机械效应和空化效应的协同作用,在改善肉制品嫩度上具有巨大应用潜力。

超声辅助冻结、解冻、烹饪等加工过程产生的物理化学反应破坏肌原纤维蛋白完整机构,导致组织结构韧性下降,另一方面超声辅助腌制在腌制液作用下,组织蛋白持水力的改变,影响蛋白质溶解度,肌纤维断裂及蛋白质溶解均对肉品嫩度产生影响^[44-46]。除此之外,肌肉内源酶活性对自身品质改善也发挥一定作用,而超声波处理对肉质品内源酶活性具有激活或灭活效果^[46-48],因此通过控制超声功率调节相关蛋白水解酶活性,可能对改善产品嫩度具有一定贡献。有学者认为,肉品嫩化的发生是内源酶系统协同作用的结果,动物屠宰后成熟的目的是为蛋白酶水解系统降解肌肉蛋白提供反应时间^[49]。大量研究证明,钙蛋白酶在嫩化过程中发挥重要作用。超声波处理导致的生物膜结构损伤,有助于钙离子的释放,从而激活钙蛋白酶,加速肌纤维降解。Wang 等^[50]研究发现超声波可能促进 μ -钙蛋白酶的自溶和活化,加速结构蛋白水解,达到改善肌肉嫩度的目的。除钙蛋白酶外,组织蛋白酶在调节鸡肉嫩度上也有所贡献。Wang 等^[51]评估超声波对宰后成熟牛肉品质影响发现,超声波处理提高了组织蛋白酶 B 的活性,组织蛋白酶 B 作用于胶原蛋白分子改变了胶原蛋白结构,导致其热变性温度下降。由于胶原蛋白与结缔组织韧性具有相关性,胶原蛋白稳定性的下降,有助于改善产品嫩度。

4.2 超声波处理对肉品保水性的影响

肉品保水性(Water binding capacity, WHC)与肉质嫩度、色泽、风味等密切相关,保水性高的产品更易被消费者接受。肉制品 WHC 的变化取决于在

储藏及加工过程中肌原纤维蛋白结构的变化^[52]。超声波处理在调控肉品保水能力上应用广泛。

超声波处理对肌原纤维蛋白构象产生一定影响。疏水力、静电斥力及氢键结合能力等是蛋白质持水关键作用力。研究显示,超声波处理对肌原纤维蛋白中 α -螺旋、 β -折叠相对含量比例有所影响, α -螺旋与 β -折叠主要依靠氢键维持稳定。姜国川等^[53]通过探究改性对肌原纤维蛋白结构影响得到超声波-谷氨酰胺转氨酶复合改性后蛋白质 α -螺旋相对含量下降, β 折叠相对含量升高,最终导致蛋白凝胶持水力升高。Kang 等^[54]研究蛋白质改性对牛肉结构及水分分布的影响,发现超声波辅助腌制有助于 NaCl 进入,增加蛋白质侧链与水的结合,从而改变牛肉持水力。超声波处理不仅在肉品前处理持水力的改善中发挥作用,在降低产品蒸煮损失上也有所作用。Wang 等^[55]探究超声波辅助真空蒸煮对五香牛肉质地及保水性变化得到,超声波辅助热处理导致的肌肉结构热诱导变化和蛋白质变性可能是造成蒸煮损失降低的主要原因。因此,超声波处理作为一种高效肉类加工辅助技术,在改善产品质构、提升保水性上发挥积极作用。

4.3 超声波处理对肉品色泽的影响

肉色作为消费者的第一感官印象是评价肉品质量的重要因素之一,呈色深浅主要与肌红蛋白含量及状态相关,氧化水平、保水性、肌肉微观结构状态等均对肉品色泽产生重要影响。超声波处理引起肉品品质指标发生改变,因此可能导致色泽发生变化。

目前研究普遍认为,超声波处理导致肉品脂质、蛋白质氧化水平、保水性等的改变,影响肉色稳定性。Domínguez 等^[56]认为脂质氧化释放的醛类物质影响血红素结合蛋白氧化还原稳定性。Stadnik 等^[57]研究超声波辅助牛肉感官特性变化时发现,超声处理阻碍了肌红蛋白氧化,延缓高铁肌红蛋白的产生,促进牛肉色泽的整体变化。Díaz-Almanza 等^[58]发现,超声波空化效应改变牛肉表面微观结构,导致水分流失,从而使牛肉亮度增加。另外,脂质氧化初级氧化自由基的产生关联线粒体电子传递链从而影响高铁肌红蛋白还原性。线粒体电子传递消耗氧气,有助于延缓氧化,但氧化自由基的产生阻碍正常电子传递过程,导致电子泄露,电子泄露可以加速自由基产生,如此循环,最终导致肉色稳定性变差^[59]。Tang 等^[60]研究结果表明,超声处理可通过线粒体脂质氧化或电子传递链介导减少高铁肌红蛋白的产生来影响肌红蛋白稳定性。与此同时,也有一些研究表明,超声波处理对肉品色泽没有影响,认为超声产生的能量不足以对肌红蛋白造成影响^[61],尤其对熟肉制品的影响效果有限^[6],生鲜肉冻融是影响肉品色泽的重要因素,超声波处理有助于冻融过程中肉色的保持。Gan 等^[62]研究不同解冻方式对肉类品质影响时发现,超声波解冻有效保持了肉类肌肉组织结构,降低 TBARS 值,

且高铁肌红蛋白含量最低,证明相较于微波解冻、红外线解冻及室温解冻,超声波辅助解冻对肉色影响最小。肉色的调控途径多样,目前的研究结果认为活性氧介导的线粒体功能损伤及氧化的发生是导致肉色劣变的主要原因,抑制氧化发生是防止肉色劣变的重要思路。超声波处理已被证实在肉色保持中发挥积极作用,是一种具有应用潜力的肉色改善辅助手段。

4.4 超声波处理对肉品脂质氧化及风味的影响

脂质氧化过程复杂,包含多种生物化学反应,主要是不饱和脂肪酸通过自由基启动氧化,分解产生小分子物质的过程,对产品不饱和脂肪酸含量、风味、色泽、嫩度等具有重要影响^[63]。适度的氧化能够丰富肉制品风味,提升产品质量,但氧化过度易造成风味劣变、营养物质流失,甚至导致氢过氧化物等有害物质产生。因此,控制氧化过程在肉类工业发展中尤为重要。超声波作为一种有效的食品加工创新技术,对肉制品脂质氧化降解具有一定作用。

选取合适的超声波加工参数对肉品感官品质具有改善效果,但超过一定阈值强度的功率超声产生的物理化学效应也可能产生负面影响,其中最为直观的是对产品挥发性风味物质的影响。余力等^[64]研究不同解冻方式对兔肉挥发性风味物质的影响得到,仅超声波解冻后产生特征性风味物质 2-戊基呋喃。风味物质主要是由脂肪酸不饱和和双键氧化产生的次级挥发性小分子物质构成。因此,肉制品不饱和脂肪酸含量与产品风味具有较强相关性(表 3)。Ojha 等^[65]研究发现超声波处理对牛肉干中饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸比例具有显著影响,其中以多不饱和脂肪酸含量最高。Bao 等^[66]对不同功率超声波预处理干腌牦牛肉肉质、营养成分测定发现,肉品饱和脂肪酸含量随超声功率升高而增加,对肉品颜色、风味产生负面影响,但改善了肉品嫩度。另外,超声波空化效应能够造成细胞膜损伤。磷脂富含双键,是构成细胞膜骨架的主要成分,细胞膜损伤导致磷脂双分子层结构受到破坏,最终使不饱和双键更易发生氧化。与此同时,超声空化气泡爆破释放的能量会导致空化气泡周围水分子均裂产生自由基(羟自由基和氢自由基),启动脂质氧化反应^[67]。但有研究认为,低频超声处理有助于降低脂质氧化水平(表 3)。Xu 等^[68]采用低频超声处理鸭肝,结果显示低频超声可以降低脂质氧化速率,颜色、质构等品质未发生明显改变,原因可能是超声波处理改变了蛋白质构象,造成大量还原性氨基酸暴露,起到抗氧化效果,改善鸭肝的异味感,导致醇、醛的含量降低,酸类物质增多。

超声波处理在加速脂质自由基氧化同时可能对酶促氧化进程产生促进作用。功率超声空化气泡的爆破产生的高温高压可能导致蛋白质二级和三级结构的改变,从而对内源蛋白酶活性产生影响。脂肪氧化酶(LOX)是催化肉制品脂质氧化发生的主要酶类,能够特异性催化含有顺,顺-1,4-戊二烯结构的不

表 3 超声波处理对肉品脂质氧化相关研究结果

Table 3 Related research results of ultrasonic treatment on lipid oxidation of meat products

名称	工艺参数	脂质氧化	参考文献
鸭肝	功率: 600 W 频率: 40 kHz 时间: 30 min	脂质氧化和异味感降低, 醛类物质和醇类物质含量减少。	Xu等 ^[68]
牛肉	频率: 25、33、45 kHz 时间: 30 min	脂肪酸含量显著变化, MUFA 含量较高。	Ojha等 ^[65]
培根	功率: 250、500、750 W 频率: 20 kHz	脂肪酶和脂肪氧合酶活性增加, 不饱和脂肪酸含量升高, TBARS升高	Zhang等 ^[8]
鲢鱼	功率: 180、210、240、270、300 W	脂肪氧合酶活性随超声功率呈下降趋势	王帮国等 ^[69]
黄羽肉鸡	功率: 0.2 W/cm ² 频率: 40 kHz 时间: 15 min	钙蛋白酶、组织蛋白酶和总蛋白酶失活, 蛋白质和脂质氧化水平下降, 延长货架期。	Li等 ^[70]

饱和脂肪酸, 产生氢过氧化物。有研究报道, 低功率超声波具有激活蛋白酶的作用, 高功率超声波具有钝酶作用(表 3)。Zhang 等^[8]通过研究超声对非烟熏培根特征风味的影响得到超声波处理显著增加了脂肪酶活性, 促进多不饱和脂肪酸的产生, 改善产品氧化水平, 提高特征风味物质醛、酯、酸的产生。王帮国^[69]对鲢鱼的研究中发现超声波处理使 LOX 失活。Li 等^[70]通过研究超声波联合低温短时加热, 对黄羽肉鸡品质影响得到超声波辅助加热处理显著提高黄羽肉鸡重要蛋白酶失活率, 使微生物活性显著降低, 蛋白酶活性的下降延缓了脂质氧化进程, 同时对蛋白质羰基的形成产生影响, 有效延长产品货架期。

目前的研究证明, 超声波处理在肉类加工过程中脂质氧化水平具有调控作用, 为其在工业化生产中应用提供理论基础, 还需进行更加深入的研究确定超声波的应用参数。

4.5 超声波处理对肉品蛋白质氧化的影响

蛋白质是生物体所需的重要营养物质, 有关蛋白质氧化与生物体慢性疾病的发展已有广泛的研究, 近年来, 关于蛋白质氧化在食品工业中的发展的研究也越来越多。蛋白质氧化与脂质氧化机制相似, 均是由自由基引发的链式反应, 主要包括羰基化、游离巯基减少、氨基酸侧链修饰、分子间交联聚集、脂质与蛋白质氧化交互作用等几种形式^[71-72]。目前的研究认为, 活性氧在肉品蛋白质氧化发生中起主导作用。蛋白质氧化的发生对肉品物理化学性质产生重要影响, 研究证明超声波处理在肉品蛋白质改性、调控产品品质上具有显著优势。

肌原纤维蛋白是构成肌纤维的主要成分, 因此肉品品质改变与肌原纤维蛋白结构及功能改变有关。超声波空化效应引起的局部高温会促进活性氧的产生, 还原性氨基酸残基易被氧化, 引发氨基酸侧链修饰。Zhang 等^[73]研究超声波辅助滚揉对猪肌原纤维蛋白理化特性的影响, 发现超声波处理后肌原纤维蛋白结构展开, 疏水性氨基酸暴露, 导致蛋白质羰基含量增加、巯基含量减少。伴随肌原纤维蛋白氧化水平的增加, 可能导致肉品感官品质的改变。相关研究证明超声波辅助解冻有促进蛋白质氧化的效果,

同时导致肌原纤维排列松散, 有助于增加产品嫩度。除肌原纤维蛋白外, 结缔组织中含有丰富的胶原蛋白, 超声波空化效应可能破坏胶原蛋白交联, 从而改善胶原蛋白溶解度^[52]。自由基的产生在脂质和蛋白质氧化进程中均发挥重要作用, 这也成为了联系两者之间的重要桥梁。相关研究认为, 脂质氧化产物及自由基的产生影响蛋白质氧化和交联化合物的产生, 进而影响相应蛋白酶的识别或产生其它影响^[74-75]。Lima 等^[75]在探究超声处理对意大利腊肠的理化特性时发现, 超声处理加剧了脂质氧化的发生, 显著降低储藏过程中腊肠硫醇化合物含量, 证明超声处理加速了蛋白质水解, 有助于自由基进入氨基酸, 从而对产品产生不利影响。

综上, 超声波辅助蛋白质氧化修饰可以改变蛋白质构象及功能, 从而影响产品质量。但是尽管超声波对肉制品蛋白质氧化影响取得一定进展, 但关于其相互作用机制仍不清楚, 有待进一步研究。

5 总结与展望

本文综述了超声波处理在肉品前处理、热加工中的研究进展及其肉品品质的影响。相较于传统处理方法, 超声波技术具有良好辅助加工效果, 在前处理、热加工中对于改善肉品品质、提升加工效率方面具有良好应用前景。目前, 超声波辅助加工技术主要在实验室研究上取得一定成果, 仅有部分应用于生产, 因此仍需深入研究才能将更多工艺应用于规模化工业生产中, 而超声波辅助加工应用中仍存在诸多问题亟需解决。基础理论方面, 超声波高能量的传播会导致蛋白质结构发生改变, 其是否造成有害物质的产生, 影响肉类营养价值, 需要进一步研究。另外, 超声波联合其他处理方式在肉质改善中效果显著, 但其协同作用机制仍有待深入探究。应用技术方面, 一方面, 超声功率过大造成的肉品品质劣变不容忽视; 另一方面, 肉类基质复杂, 超声波在不同品种肉中作用效果不同。因此, 针对不同肉品特性优化超声波参数阈值, 在生产中尤为重要。此外, 已有研究表明不同超声波处理设备处理效果呈现出差异, 不具有统一评判标准, 因此超声波设备的标准化对于超声波技术在肉类工业中的推广应用也显得尤为必要。

参考文献

- [1] LEE S, CHOI Y S, JO K, et al. Improvement of meat protein digestibility in infants and the elderly[J]. *Food Chemistry*, 2021, 356(15): 129707.
- [2] YAO Y, PAN Y, LIU S Q. Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 62: 104722.
- [3] IZADIFAR Z, IZADIFAR Z, CHAPMAN D, et al. An introduction to high intensity focused ultrasound: Systematic review on principles, devices, and clinical applications[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9(2): 460.
- [4] WANG Q Z, CHEN G, YERSAIYITI H, et al. Modeling analysis on germination and seedling growth using ultrasound seed pretreatment in switchgrass[J]. *PLoS One*, 2012, 7(10): e47204.
- [5] JANG W S, SKIBNIEWSKI M J. Embedded system for construction asset tracking combining radio and ultrasound signals[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009, 23(4): 221–229.
- [6] ALARCON-ROJO A D, CARRILLO-LOPEZ L M, REYES-VILLAGRANA R, et al. Ultrasound and meat quality: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 55: 369–382.
- [7] BARRETTO T L, SANCHES M A R, PATEIRO M, et al. Recent advances in the application of ultrasound to meat and meat products: Physicochemical and sensory aspects[J]. *Food Reviews International*, 2022, 39(3): 1–16.
- [8] ZHANG J, ZHANG W G, ZHOU L, et al. Study on the influences of ultrasound on the flavor profile of unsmoked bacon and its underlying metabolic mechanism by using HS-GC-IMS[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 80: 105807.
- [9] 康大成, 刘云国, 张万刚. 高功率超声波对蛋白质功能特性的影响及其在肉品加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 289–297. [KANG D C, LIU Y G, ZHANG W G. Effect of high-power ultrasonic wave on functional characteristics of protein and its application in meat processing[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 289–297.]
- [10] RASTOGI N K. Opportunities and challenges in application of ultrasound in food processing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2011, 51(8): 705–722.
- [11] RASTOGI N K, RAGHAVARAO K S M S, BALASUBRAMANIAM V M, et al. Opportunities and challenges in high pressure processing of foods[J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2007, 47(1): 69–112.
- [12] 姚金锁. 超声激励下无界域内空化结构及空化泡动力学行为的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021. [YAO J S. Study on cavitation structure and dynamic behavior of cavitation bubble in unbounded domain under ultrasonic excitation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.]
- [13] RASHWAN S S, DINCER I, MOHANY A. Sonication to hydrogenization: Sono-hydro-gen[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(3): 1045–1048.
- [14] BARRETTO T L, POLLONIO M A R, TELIS-ROMERO J, et al. Improving sensory acceptance and physicochemical properties by ultrasound application to restructured cooked ham with salt (NaCl) reduction[J]. *Meat Science*, 2018, 145: 55–62.
- [15] DONG Y X, ZHANG H Z, MEI J, et al. Advances in application of ultrasound in meat tenderization: A review[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2022, 6: 360.
- [16] CRUZ-GARIBALDI B Y, ALARCON-ROJO A D, HUERTA-JIMENEZ M, et al. Efficacy of ultrasonic-assisted curing is dependent on muscle size and ultrasonication system[J]. *Processes*, 2020, 8(9): 1015.
- [17] ZHAN X M, SUN D W, ZHU Z W, et al. Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(17): 2925–2938.
- [18] LI J G, MA X Y, ZHANG J W, et al. Insight into the mechanism of the quality improvement of porcine after ultrasound-assisted immersion freezing[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(8): 5504–5513.
- [19] LU N, MA J, SUN D W. Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: Mechanisms, techniques and applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 124: 63–85.
- [20] BHARGAVA N, MOR R S, KUMAR K, et al. Advances in application of ultrasound in food processing: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105293.
- [21] TU J, ZHANG M, XU B G, et al. Effects of different freezing methods on the quality and microstructure of Lotus (*Nelumbo nucifera*) root[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 52: 59–65.
- [22] SUN Q X, ZHAO X X, ZHANG C, et al. Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels[J]. *LWT*, 2019, 108: 106–112.
- [23] ZHANG M C, XIA X F, LIU Q, et al. Changes in microstructure, quality and water distribution of porcine longissimus muscles subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during frozen storage[J]. *Meat Science*, 2019, 151: 24–32.
- [24] ZHANG C, SUN Q, CHEN Q, et al. Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of chicken breast[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 117(4): 247–255.
- [25] BIAN C H, YU H J, YANG K, et al. Effects of single-, dual-, and multi-frequency ultrasound-assisted freezing on the muscle quality and myofibrillar protein structure in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 15: 100362.
- [26] WANG B, BAI X, DU X, et al. Comparison of effects from ultrasound thawing, vacuum thawing and microwave thawing on the quality properties and oxidation of porcine *Longissimus Lumborum* [J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1368.
- [27] ZHANG C, SUN Q X, CHEN Q, et al. Effectiveness of ultrasound - assisted immersion thawing on the thawing rate and physicochemical properties of chicken breast muscle[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(5): 1692–1703.
- [28] GUO Z L, GE X Z, YANG L H, et al. Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105345.
- [29] 付丽, 郑宝亮, 高雪琴, 等. 牛肉的超声波快速腌制与嫩化工艺优化[J]. *肉类研究*, 2017, 31(12): 23–29. [FU L, ZHENG B L, GAO X Q, et al. Optimization of ultrasonic fast curing and tenderizing technology of beef[J]. *Meat research*, 2017, 31(12): 23–29.]
- [30] CÁRCEL J A, BENEDITO J, BON J, et al. High intensity ultrasound effects on meat brining[J]. *Meat Science*, 2007, 76(4): 611–619.
- [31] PAN J J, LI C L, LIU X J, et al. A multivariate insight into the organoleptic properties of porcine muscle by ultrasound-assisted brining: Protein oxidation, water state and microstructure[J]. *LWT*,

2022, 159: 113–136.

[32] LI Y, FENG T, SUN J X, et al. Physicochemical and microstructural attributes of marinated chicken breast influenced by breathing ultrasonic tumbling[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 105022.

[33] KANG D C, ZOU Y H, CHENG Y P, et al. Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 33: 47–53.

[34] 陈银基, 鞠兴荣, 周光宏. 食盐腌渍与超声波处理对牛肉脂肪酸组成的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(19): 13–18. [CHEN Y J, JÜ X R, ZHOU G H. Effects of salt pickling and ultrasonic treatment on fatty acid composition of beef[J]. *Food Science*, 2009, 30(19): 13–18.]

[35] PINTON M B, DOS SANTOS B A, CORREA L P, et al. Ultrasound and low-levels of NaCl replacers: A successful combination to produce low-phosphate and low-sodium meat emulsions[J]. *Meat Science*, 2020, 170: 108244.

[36] SOLTANI FIROUZ M, SARDARI H, ALIKHANI CHAM-GORDANI P, et al. Power ultrasound in the meat industry (freezing, cooking and fermentation): Mechanisms, advances and challenges[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 86: 106027.

[37] 刘薇, 赵赵, 朱文政, 等. 超声波辅助煮制对畜禽肉制品品质影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(7): 419–427. [LIU W, ZHAO Z, ZHU W Z, et al. Research progress on the effect of ultrasonic-assisted cooking on the quality of livestock and poultry meat products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(7): 419–427.]

[38] WANG Y, ZHANG W G, ZHOU G. Effects of ultrasound-assisted frying on the physiochemical properties and microstructure of fried meatballs[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(10): 2915–2926.

[39] ZOU Y H, KANG D C, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 46: 36–45.

[40] ZHANG J, ZHANG Y Q, ZOU Y H, et al. Effects of ultrasound-assisted cooking on quality characteristics of spiced beef during cold storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 136(2): 110359.

[41] BANTLE M, EIKEVIK T M. A study of the energy efficiency of convective drying systems assisted by ultrasound in the production of clipfish[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65(15): 217–223.

[42] BASLAR M, KILICLI M, TOKER O S, et al. Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 26: 182–190.

[43] PEÑA-GONZÁLEZ E M, ALARCÓN-ROJO A D, RENTERÍA A, et al. Quality and sensory profile of ultrasound-treated beef[J]. *Italian Journal of Food Science*, 2017, 29(3): 463–475.

[44] PEÑA-GONZALEZ E, ALARCON-ROJO A D, GARCIA-GALICIA I, et al. Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 53: 134–141.

[45] ZOU Y, SHI H B, XU P P, et al. Combined effect of ultrasound and sodium bicarbonate marination on chicken breast tenderness and its molecular mechanism[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 59: 104735.

[46] 毛相朝, 李娇, 陈昭慧. 非热加工技术对食品内源酶的控制研究进展[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(12): 1–13. [MAO X Z, LI

J, CHEN Z H. Research progress on control of endogenous enzymes in food by non-thermal processing technology[J]. *Journal of Chinese institute of food science and technology*, 2021, 21(12): 1–13.]

[47] 程新峰, 蒋凯丽, 朱玉钢, 等. 超声波灭酶机制及其在食品加工中的应用[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(8): 351–357. [CHENG X F, JIANG K L, ZHU Y G, et al. Mechanism of ultrasonic enzyme inactivation and its application in food processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(8): 351–357.]

[48] KAUR L, HUI S X, MORTON J D, et al. Endogenous proteolytic systems and meat tenderness: Influence of post-mortem storage and processing[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2021, 41(4): 589–607.

[49] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Applied and emerging methods for meat tenderization: A comparative perspective[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2018, 17(4): 841–859.

[50] WANG A, KANG D, ZHANG W, et al. Changes in calpain activity, protein degradation and microstructure of beef M. semitendinosus by the application of ultrasound[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245(12): 724–730.

[51] WANG L, LI J J, TENG S, et al. Changes in collagen properties and cathepsin activity of beef M. semitendinosus by the application of ultrasound during post-mortem aging[J]. *Meat Science*, 2022, 185: 108718.

[52] ZOU Y, YANG H, ZHANG M H, et al. The influence of ultrasound and adenosine 5'-monophosphate marination on tenderness and structure of myofibrillar proteins of beef[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2019, 32(10): 1611.

[53] 美国川, 王丽岩, 刘亚春, 等. 改性处理对猪肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(19): 89–95. [JIANG G C, WANG L Y, LIU Y C, et al. Effect of modification on structure and gel properties of porcine myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2019, 40(19): 89–95.]

[54] KANG D C, GAO X Q, GE Q F, et al. Effects of ultrasound on the beef structure and water distribution during curing through protein degradation and modification[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 317–325.

[55] WANG H P, GAO Z W, GUO X Y, et al. Changes in textural quality and water retention of spiced beef under ultrasound-assisted sous-vide cooking and its possible mechanisms[J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2251.

[56] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products[J]. *Antioxidants*, 2019, 8(10): 429.

[57] STADNIK J, DOLATOWSKI Z J. Influence of sonication on Warner-Bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (m. semimembranosus)[J]. *European Food Research and Technology*, 2011, 233(4): 553–559.

[58] DIAZ-ALMANZA S, REYES-VILLAGRANA R, ALARCON-ROJO A D, et al. Time matters when ultrasonating beef: The best time for tenderness is not the best for reducing microbial counts[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(6): e13210.1–e13210.9.

[59] 齐婷婷, 张一敏, 杨啸吟, 等. 氧化应激对牛肉肉色及其稳定性的影响研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(7): 260–266. [QI T T, ZHANG Y M, YANG X Y, et al. Research progress on the effect of oxidative stress on meat color and stability of beef[J]. *Food Science*, 2023, 44(7): 260–266.]

- [60] TANG J L, FAUSTMAN C, MANCINI R A, et al. The effects of freeze-thaw and sonication on mitochondrial oxygen consumption, electron transport chain-linked metmyoglobin reduction, lipid oxidation, and oxymyoglobin oxidation[J]. *Meat Science*, 2006, 74(3): 510–515.
- [61] SIKES A L, MAWSON R, STARK J, et al. Quality properties of pre-and post-rigor beef muscle after interventions with high frequency ultrasound[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(6): 2138–2143.
- [62] GAN S, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of different thawing methods on quality of unfrozen meats[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 134: 168–175.
- [63] PÉREZ-ANDRÉS J M, CHAROUX C M G, CULLEN P J, et al. Chemical modifications of lipids and proteins by nonthermal food processing technologies[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(20): 5041–5054.
- [64] 余力, 贺雅非, 王兆明, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉挥发性风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(22): 95–101. [YU L, HE Z F, WANG Z M, et al. Effects of different thawing methods on volatile flavor compounds of Ira rabbit meat[J]. *Food Science*, 2015, 36(22): 95–101.]
- [65] OJHA K S, HARRISON S M, BRUNTON N P, et al. Statistical approaches to access the effect of *Lactobacillus sakei* culture and ultrasound frequency on fatty acid profile of beef jerky[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 57: 1–7.
- [66] BAO G L, NIU J, LI S B, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the quality, nutrients and volatile compounds of dry-cured yak meat[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105864.
- [67] 王帮国, 余振宇, 林琳, 等. 超声波、超高压对白鲢鱼肌肉脂肪氧化酶构象及酶活力的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 169–175. [WANG B G, YU Z Y, LIN L, et al. Effects of ultrasound and ultra-high pressure on conformation and enzyme activity of lipoxigenase in silver carp muscle[J]. *Food Science*, 2018, 39(3): 169–175.]
- [68] XU L, XIA Q, CAO J X, et al. Ultrasonic effects on the headspace volatilome and protein isolate microstructure of duck liver, as well as their potential correlation mechanism[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71: 105358.
- [69] 王帮国. 白鲢鱼肌肉脂肪氧化酶构象和酶学特性及其脂肪氧化调控研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [70] LI P P, SUN L G, WANG J K, et al. Effects of combined ultrasound and low-temperature short-time heating pretreatment on proteases inactivation and textural quality of meat of yellow-feathered chickens[J]. *Food Chemistry*, 2021, 355: 129645.
- [71] MARTINAUD A, MERCIER Y, MARINOVA P, et al. Comparison of oxidative processes on myofibrillar proteins from beef during maturation and by different model oxidation systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(7): 2481–2487.
- [72] 胡吕霖, 任思捷, 沈清, 等. 肉蛋白烹调氧化及其对肉品与人体健康的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(19): 327–331, 336.
- [HU L L, REN S J, SHEN Q, et al. Cooking oxidation of meat protein and effects on meat and human health[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(19): 327–331, 336.]
- [73] ZHANG R Y, XING L J, KANG D C, et al. Effects of ultrasound-assisted vacuum tumbling on the oxidation and physicochemical properties of pork myofibrillar proteins[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 74: 105582.
- [74] 陶迎梅. 蛋白质氧化修饰介导冷藏滩羊肉品质变化的机理研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021. [TAO Y M. The mechanism of protein oxidation mediated quality changes in lamb of Tan sheep during refrigerated storage[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021]
- [75] ALVES L D L, SILVA M S D, FLORES D R M, et al. Effect of ultrasound on the physicochemical and microbiological characteristics of Italian salami[D]. Yinchuan: Food Research International, 2018, 106: 363–373.