

王颂萍, 王雪羽, 杨欣悦, 等. 超声波技术嫩化机理及其在肉制品中应用效果的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 423-431. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040166

WANG Songping, WANG Xueyu, YANG Xinyue, et al. Research Progress on the Mechanism of Ultrasound Tenderization and Application Effect in Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 423-431. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040166

· 专题综述 ·

# 超声波技术嫩化机理及其在肉制品中应用效果的研究进展

王颂萍<sup>1</sup>, 王雪羽<sup>2</sup>, 杨欣悦<sup>2</sup>, 李海静<sup>2</sup>, 夏秀芳<sup>2,\*</sup>  
(1. 河北工程大学科信学院, 河北邯郸 056038;  
2. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

**摘要:** 嫩度是评估肉制品品质的重要指标, 提高嫩度有利于吸引消费者二次购买。传统物理嫩化技术虽广泛应用于肉及肉制品的嫩化加工, 但在线应用差这一缺陷导致消费者接受度较低, 因此推进了新兴物理嫩化技术的研究。其中, 超声波作为一种高效节能、绿色环保、穿透力强的非热加工技术广泛用于肉制品的嫩化。本文综述了肉制品嫩化理论、嫩度主要影响因素以及超声波嫩化的基本原理, 并从不同角度(肌纤维和结缔组织特性)阐述了超声波技术对肉制品嫩度的影响, 为超声波技术在改善肉制品品质方面提供新思路 and 理论指导。

**关键词:** 超声波, 肉制品, 嫩度, 影响因素, 嫩化机理

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)09-0423-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040166



本文网刊:

## Research Progress on the Mechanism of Ultrasound Tenderization and Application Effect in Meat Products

WANG Songping<sup>1</sup>, WANG Xueyu<sup>2</sup>, YANG Xinyue<sup>2</sup>, LI Haijing<sup>2</sup>, XIA Xiufang<sup>2,\*</sup>

(1. Kexin College, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Tenderness is an important index to evaluate the quality of meat products, and improving the tenderness of meat products is conducive to attracting consumers to buy again. Although traditional physical tenderization technology is widely used in tenderizing processing of meat and meat products, the defect of poor online application leads to low consumer acceptance, which has promoted the research of emerging physical tenderization technologies. Among them, ultrasound as an energy-efficient, green environmental protection, strong penetration of non-thermal processing technology has been widely used in the tenderization of meat products. The theory of meat products tenderization, the main influencing factors of meat products tenderness and the basic principle of ultrasound tenderization are reviewed. The effects of ultrasound technology on tenderization of meat products are discussed from different perspectives (muscle fiber and connective tissue properties). It provides new ideas and theoretical guidance for ultrasound technology to improve the quality of meat products.

**Key words:** ultrasound; meat products; tenderness; influencing factors; tenderization mechanism

嫩度是指食用肉口感的老嫩, 反映了肉的质地, 它会影响到肉制品的营养、口感、风味和消化等, 有研

究表明, 消费者愿意花费更多的钱去购买具有较好嫩度的肉类产品<sup>[1]</sup>。而肉制品的不当处理会使它们出

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: 黑龙江省百千万工程科技重大专项(2019ZX07B03)。

作者简介: 王颂萍(1976-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: 297868536@qq.com。

\* 通信作者: 夏秀芳(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: xxfang524@163.com。

现肉质硬、嫩度差等问题,很难咀嚼,因此,在其加工过程中需进行嫩化处理<sup>[2]</sup>。

肉品中常用的嫩化方法包括物理(自然熟化法<sup>[3]</sup>、电刺激法<sup>[4]</sup>、超高压法<sup>[5]</sup>、冲击波法<sup>[6]</sup>和超声波法<sup>[7]</sup>等)、化学(盐法<sup>[8]</sup>、一磷酸腺苷法<sup>[9]</sup>和有机酸法<sup>[10]</sup>)和酶法嫩化(内源酶法<sup>[11]</sup>和外源酶法<sup>[12]</sup>)等,而化学和酶法嫩化需要精确控制化学试剂的用量和纯度并严格控制生物酶的用量和作用条件<sup>[13]</sup>,相比之下,物理嫩化简单安全,可操作性更强。其中,超声波作为90年代提出的一种新兴的嫩化技术,凭借其安全性高、绿色环保、高效节能、运行成本低等优点广泛应用于肉及肉制品中<sup>[14-15]</sup>。

超声波是一种由纵波产生的能量,其振动频率大约每秒20000次(20 kHz),超出人类的听觉极限,它还可以穿透各种物质<sup>[16]</sup>。在超声系统中,电能转化为振动能,即机械能,它通过超声介质传递,产生机械效应、热效应和空化效应等<sup>[7]</sup>。其中,空化效应是使肉制品发生化学、物理和生物变化的主要原因。本文将从肉制品嫩化理论、嫩度的主要影响因素以及超声嫩化的原理和影响因素进行概述,并从两个方面(肌纤维和结缔组织特性)阐明超声波技术对肉制品嫩度的影响。为超声波技术在肉制品嫩度领域的广泛应用奠定理论基础并提供参考。

## 1 肉制品的嫩化

### 1.1 嫩度的定义

嫩度是决定肉制品品质的主导因素及感官特征的决定性因素,它直接影响着肉的食用价值和商品价

值,反映了肌肉中不同蛋白的结构特性<sup>[17]</sup>。肉的嫩度是指肉易切割的程度,一般用剪切力来表征,剪切力越大,嫩度越差<sup>[18]</sup>。肉的嫩度指肉入口咀嚼时,其对舌或颊的柔软性、对牙齿压力的抵抗力、咬断肌纤维的难易程度和嚼碎程度<sup>[5]</sup>。

### 1.2 肉制品嫩化的理论

肉制品嫩化机制是不同的嫩化方法通过其物理和化学作用改变肉制品的组织结构,使其发生生物、物理、化学反应的过程<sup>[19]</sup>。在肉制品成熟过程中,诸如肌原纤维联接蛋白、肌膜连接蛋白以及肌细胞基板连接蛋白等维持肌原纤维结构完整的蛋白被降解,即推进肉的嫩化过程<sup>[20]</sup>。肉制品四大成熟理论(钙蛋白酶、溶酶体组织蛋白酶、细胞凋亡酶和蛋白酶体理论)所涉及的钙蛋白酶在降解宰后肌肉蛋白质的过程中起主导作用<sup>[21]</sup>。因此,钙蛋白酶体系主导成熟过程中肉类的嫩化。其中,m-和 $\mu$ -钙蛋白酶较为活跃,而m-钙蛋白酶的激活受限于极高的 $Ca^{2+}$ 浓度,所以 $\mu$ -钙蛋白酶较广泛地应用于肉制品的嫩化<sup>[13]</sup>。

肌肉可食化过程中, $Ca^{2+}$ 渗出并激活钙蛋白酶,进而降解肌原纤维中肌联蛋白以及肌间线蛋白等维持肌原纤维完整性的主要蛋白<sup>[21]</sup>,Z盘结构弱化、M线消失、Z线和I带断裂以及H区肿胀,肌原纤维及肌纤维结构被破坏,弱化细丝及细丝与Z线间相互作用,增加肌原纤维小片化程度,从而提高肉制品嫩度<sup>[13]</sup>(如图1所示)。

### 1.3 肉制品嫩度的影响因素

肉制品嫩度受宰前和宰后因素的影响,主要表

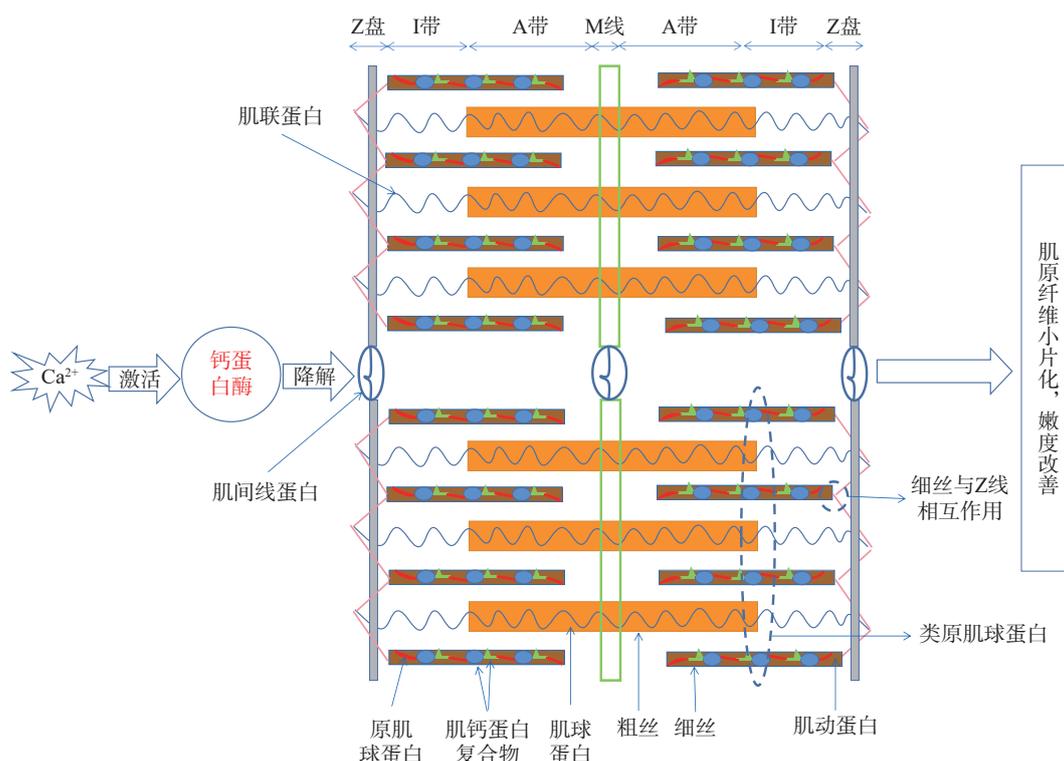


图1 钙蛋白酶嫩化机制<sup>[13]</sup>

Fig.1 Tenderization mechanism of calpain<sup>[13]</sup>

现在: a. 宰前因素: 畜禽品种、年龄、性别、饲养条件和肌肉部位等<sup>[5]</sup>。畜禽的品种不同, 肌肉嫩度不同, 例如: 西门塔尔肉牛和夏洛莱肉牛的嫩度比利木赞肉牛嫩度差; 同一种动物年龄小的其肉质嫩, 因为随动物年龄的增长, 胶原蛋白的交联增加, 胶原纤维间的联结强度变大, 肌内膜和肌束膜变得更有规则, 厚度增加, 导致肉嫩度下降; 公畜肉要比母畜肉嫩度差; 圈养或很少放养的牛肉嫩度高于经常放养的牛肉; 同一种动物的不同部位肌肉嫩度存在差异, 一般来说腰部肉比腿部肉更嫩, 这主要是由肌肉中结缔组织的分布情况决定的<sup>[22-23]</sup>。b. 宰后因素: 宰后排酸和成熟、烹调方法和温度等<sup>[8]</sup>。在 pH 较高的肉中很难形成僵直收缩, 同时肌肉中钙激活酶的活性较强, 故肉的嫩度较高; 肉在烹饪过程中, 采用煮、焖、烧等烹饪方法时, 肉的嫩度要高于采用炒、炸、烤等方法; 肉在卤煮时, 随温度升高其硬度增加, 烤制时, 肉的嫩度随肉中心温度的升高而降低<sup>[24]</sup>, 这可能是由于肉在加热过程中, 蛋白质会发生变性, 从而影响嫩度。

宰前和宰后因素对嫩度影响的不同, 究其根本是肌纤维和结缔组织的含量和性质的不同<sup>[21]</sup>。肉的成熟嫩化经历快速和慢速两个阶段: 快速嫩化阶段, 肌原纤维结构弱化; 慢速嫩化阶段, 肌束膜和肌内膜结缔组织结构变弱<sup>[12]</sup>。

1.3.1 肌纤维特性对嫩度的影响 肌肉由肌纤维组成, 肌节是肌纤维的重复构造单位, 也是肌肉伸缩与松弛的基本单元, 故肌纤维类型、密度、直径和肌节长度等因素的不同会引起肉嫩度的差异<sup>[25]</sup>。肌纤维分为: 红肌(I型)纤维和白肌(II型)纤维, 其中慢收缩氧化 I 型纤维的蛋白酶与其抑制剂的比例要比快收缩糖酵解 II 型纤维的小, 因此, 白肌成熟更快, 故在宰后成熟过程中高红肌(I型)纤维含量肉的嫩化效果劣于高白肌(II型)纤维含量肉<sup>[26]</sup>。臧大存<sup>[27]</sup>研究发现肌纤维直径越小, 其密度越大, 保水性越强, 肌肉嫩度越大, 因此, 肌纤维密度与肉嫩度呈正相关。当肌肉发生冷收缩时, 肌纤维直径增加, 加剧了肌节的缩短, 引起肉的嫩度下降。此外, 肌原纤维是肌纤维独特的细胞器。有研究表明肌原纤维降解对肌肉嫩度具有重要作用<sup>[21]</sup>, 它会使 Z 盘结构被弱化, 肌原纤维断裂, 使肉嫩化。

1.3.2 结缔组织特性对嫩度的影响 结缔组织呈网状且质地坚硬, 构成了肌肉的支撑骨架, 且具有较好的锁水能力, 故其分布越广, 持水力越强, 嫩度越好, 其中, 肌束膜厚度、胶原蛋白含量、热溶解性和共价交联等对肌肉嫩度的影响较大<sup>[23]</sup>。肌肉中占结缔组织总量 90% 的肌束膜的厚度是导致不同部位肉嫩度差异的决定性因素<sup>[25]</sup>, 二者呈正相关。此外, 结缔组织成分中胶原纤维的直径也会影响肉类嫩度, 由于蛋白水解酶能有效地攻击细小的纤维束, 降解纤维, 故可通过有效控制蛋白水解酶的活性来改善肉制品的嫩度<sup>[28]</sup>。胶原蛋白是肌内结缔组织的主要成分<sup>[12]</sup>,

其含量与肌肉嫩度呈负相关<sup>[29]</sup>, 且其热溶解性与肉嫩呈正相关<sup>[30]</sup>。胶原蛋白在成熟过程中会形成多种共价交联, 包括: 二共价键的分子间交联和三共价键的分子内交联(吡啶交联)<sup>[12]</sup>, 其中, 分子间交联只是暂时的, 随着时间的推移, 它会消失并被吡啶交联所代替<sup>[27]</sup>, 吡啶交联形成的羟赖氨酸吡啶啉和赖氨酸吡啶啉反映了肌肉中的交联情况<sup>[23]</sup>, 随着动物年龄的增长, 胶原蛋白共价交联数目增加, 溶解度下降, 最终导致肉嫩度降低。

## 2 超声波嫩化原理及影响因素

20 世纪 90 年代, SOLOMON 等<sup>[31]</sup>发现了超声波嫩化(又称水波嫩化)是一种嫩化原理完全异于其他技术的全新技术, 它是机械波在食品领域应用的新进展。超声嫩化是指超声作用于液体产生的震荡波可以穿透肉块, 改变了影响肉嫩度的蛋白质之间的相互作用力及联接键, 进一步改善肉的嫩度<sup>[32]</sup>。现在通常利用低频超声波(20~100 kHz)的“声耦”作用使肉受迫振动, 从而提高嫩度。超声波在液体介质中传播时, 受压力和位移的影响, 表现为一种由密部(高压区)和疏部(低压区)交替组成的纵波<sup>[33]</sup>。超声波会产生机械效应、热效应和空化效应, 其中, 对肉制品嫩化起主要作用的是空化效应。张苏苏<sup>[14]</sup>对牛仔盖肉排进行超声波处理, 得出最佳超声嫩化条件: 温度 44 °C, 功率 187 W, 时间 19 min, 此时牛仔盖肉排的剪切力最小, 这可能是由于超声产生的空化效应使肌肉中的肌原纤维发生断裂, 从而有效地改善了牛仔盖肉排的嫩度。

### 2.1 超声波嫩化肉制品的原理

超声波是在介质中传播的弹性波, 当波的能量达到一个阈值时, 就会产生空化现象<sup>[34]</sup>。超声空化指当适度频率的超声波作用于液体时, 声波在正负压之间传播引起微小气泡发生膨胀、压缩、崩溃和震荡等一系列非线性过程<sup>[16]</sup>。超声波作用下液体中气泡的运动包括两个阶段: 稳态空化和瞬态空化。稳态空化, 即空化气泡在超声波的作用下膨胀或震荡, 在此过程中泡内温度变化很小, 故可理解为等温过程<sup>[35]</sup>。瞬态空化是指超声波作用于液体时, 负压声强会破坏液体分子间的结合键或其它相互作用, 导致液体分子断开, 形成微小的空穴, 即气泡核, 气泡核与原来存在于液体中的微小气泡由于泡内压强高于泡外压强而膨胀, 同时从声场中吸收大量能量; 当进入正压时, 气泡会被压缩而急剧崩溃, 并且产生瞬时高温(5000 K)、高压(50 MPa)、自由基及微射流等, 引起组织结构改变, 从而起到嫩化肉的效果<sup>[35-36]</sup>(如图 2 所示)。

嫩化肉制品的机制可推断为: a. 超声波在传播过程中引起极小的介质颗粒位移, 但引起的加速度很大, 它将导致介质颗粒的机械振动剧烈而迅速变化<sup>[37]</sup>。因此, 超声波本身的振动以及超声空化的破坏作用将通过破坏力弱的分子间相互作用, 如氢键和范德华力等, 引起肌肉组织结构受到物理破坏, 破坏

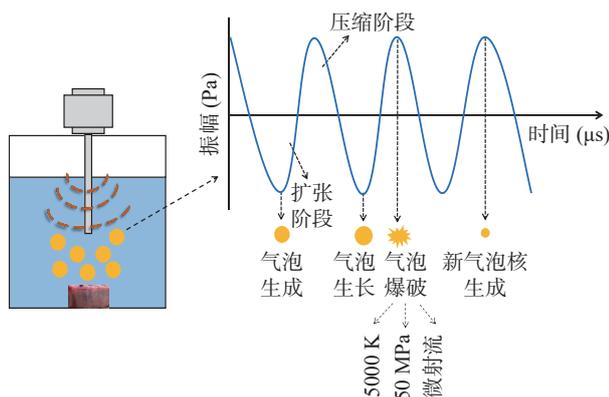


图2 超声产生空化效应示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of cavitation effect produced by ultrasound

Z 盘的完整性,导致肌动蛋白丝解聚<sup>[38]</sup>; b.超声处理破坏细胞结构,加速细胞凋亡,促使肌细胞内  $\text{Ca}^{2+}$  外流,活化钙激活酶,进而促进了肌原纤维蛋白的分解,改善肉的嫩度<sup>[19]</sup>; c.空化气泡的内爆会产生一些物理效应,包括微射流、微湍流、自由基和高剪切应力等,这些物理效应可以导致细胞膜损伤,对蛋白质产生理化破坏,从而达到嫩化效果<sup>[33]</sup>。

## 2.2 超声波参数对肉制品嫩化的影响因素

超声波依频率和功率的差异可以分为:高频低强度( $>1 \text{ MHz}$ ,  $<1 \text{ W/cm}^2$ )和低频高强度( $20\sim 100 \text{ kHz}$ ,  $10\sim 1000 \text{ W/cm}^2$ )<sup>[16]</sup>。其中,低频高强度超声波较多用于食品分析、蛋白质改性和肉制品嫩化等方面。除频率与功率外,超声时间以及温度等对嫩度的影响也较大。

**2.2.1 超声波频率对嫩度的影响** 超声波在低频条件下可以产生较高能量,易在液体中产生较强的空化效应。钟赛意<sup>[39]</sup>研究发现盐水鸭经不同频率(26.4、49.8、70.2 kHz)超声处理后,剪切力都较未超声组小,其中,26.4 kHz 处理组剪切力约为 2700 g,70.2 kHz 处理组剪切力约为 3100 g,这可能是由于低频超声产生了较强的空化作用,对肌纤维产生了机械破坏,激活了钙蛋白酶和组织蛋白酶并降解蛋白质,提高了盐水鸭的嫩度。

**2.2.2 超声波功率对嫩度的影响** 超声波功率也会通过空化效应的强弱影响肉制品的嫩度。KANG 等<sup>[40]</sup>探究了不同超声波功率(0、150、200、250、300 W)对腌制牛肉嫩度的改善情况。结果表明:经过超声处理 120 min 后,其压缩损失和剪切力随着超声功率的增加而减小,且 300 W 处理组相比于对照(0 W)组而言,分别减小了 23.89% 和 27.44%,即达到了最佳的腌制和嫩化效果。这可能是由于超声频率和时间都相同时,功率越大,能量越高,产生的空化作用越强,促使肌肉组织中的细胞破裂,水分进入到肌肉细胞内,使细胞的持水性增加,改善嫩度。

**2.2.3 超声波时间对嫩度的影响** 在合理的超声时间内,肉制品嫩度与时间呈正相关,但过长时间的超

声处理会降低蛋白酶活性,抑制蛋白的分解,从而引起肉嫩度的下降,因此,可以结合频率和功率合理控制超声嫩化时间。李正英等<sup>[41]</sup>应用  $3.0 \text{ W/cm}^2$  超声波处理蒙古绵羊后腿肉来研究超声波时间(0、10、20、30、40、50 min)对羊肉的嫩化效果,发现 30 min 处理组的羊肉剪切力和破碎指数最小。

**2.2.4 超声波温度对嫩度的影响** 超声波嫩化肉制品时,温度同样起着重要的作用。当嫩化温度较低时,肉中酶的活性不能全部被激活,致使嫩化效果不佳;当温度较高时,由于过度嫩化导致肌肉组织蛋白网络中的水分流出较多,降低持水性,故要合理控制超声波温度<sup>[42]</sup>。张苏苏<sup>[14]</sup>研究超声温度(20、30、40、50、60  $^{\circ}\text{C}$ )对牛仔盖肉排嫩度的影响,发现持水力和剪切力随温度的升高呈现先降低后升高的趋势,持水力在 40  $^{\circ}\text{C}$  达到最小值,剪切力在 50  $^{\circ}\text{C}$  达到最小值,然后通过响应面优化试验得到超声温度为 44  $^{\circ}\text{C}$  时,嫩化效果最佳。

## 3 超声波技术对肉制品肌纤维特性及结缔组织特性的影响

嫩度是决定肉制品品质最重要的感官特性,超声波可以通过改善与肌肉嫩度有关的肌纤维(主要由肌原纤维构成)和肌内结缔组织(主要由胶原纤维构成)的特性以达到嫩化肉制品的目的(机理如图 3 所示)。例如:激活组织蛋白酶或降解肌肉中的肌原纤维蛋白,破坏肌纤维和结缔组织结构,从而改善肉制品嫩度,提高其口感与品质。WANG 等<sup>[17]</sup>利用超声( $20 \text{ kHz}$ ,  $25 \text{ W/cm}^2$ )处理牛半腱肌 40 min,其剪切力比未经超声处理样品低,可能是由于超声通过加速肌纤维的分解及肌间线蛋白和肌钙蛋白-T 的降解,从而提高了嫩度。同时,超声波还可以通过削弱肌球蛋白和肌动蛋白间的相互作用提高嫩度<sup>[43]</sup>。ZOU 等<sup>[20]</sup>报道了超声处理破坏了肌球蛋白和肌动蛋白的完整性以及肌动蛋白-肌球蛋白相互作用,使肌动球蛋白解离,从而增加了肌动蛋白的数量,改善嫩度。

### 3.1 超声波嫩化技术对肉制品肌纤维特性的影响

肌纤维(肌细胞)是肌肉的基本组成单位,肌原纤维是肌细胞特有的细胞器,约占肌纤维固形成分的 60%~70%,粗丝和细丝结合形成了肌原纤维,1000~2000 条肌原纤维组成一个肌纤维<sup>[23]</sup>。此外,其主要蛋白成分为肌原纤维蛋白。超声波会通过影响肌纤维组织结构和持水性以及肌原纤维蛋白的降解和持水能力等因素影响肉制品的嫩度<sup>[12]</sup>。

#### 3.1.1 超声波嫩化技术对肌纤维微观结构的影响

肌原纤维的断裂被认为是肉变嫩的最重要间接因素之一,超声空化效应产生气泡,气泡内爆引起的微射流会造成物体表面物理性破坏,破坏了肌纤维的完整性,使纤维间距增加,在纤维间隙中可以观察到细胞内容物的释放,并将肌原纤维分解成大小不同的片段,肌原纤维小片化增加,肉的嫩度得以提高<sup>[44]</sup>。此外,超声波可以通过改变肌纤维直径和肌节长度等来

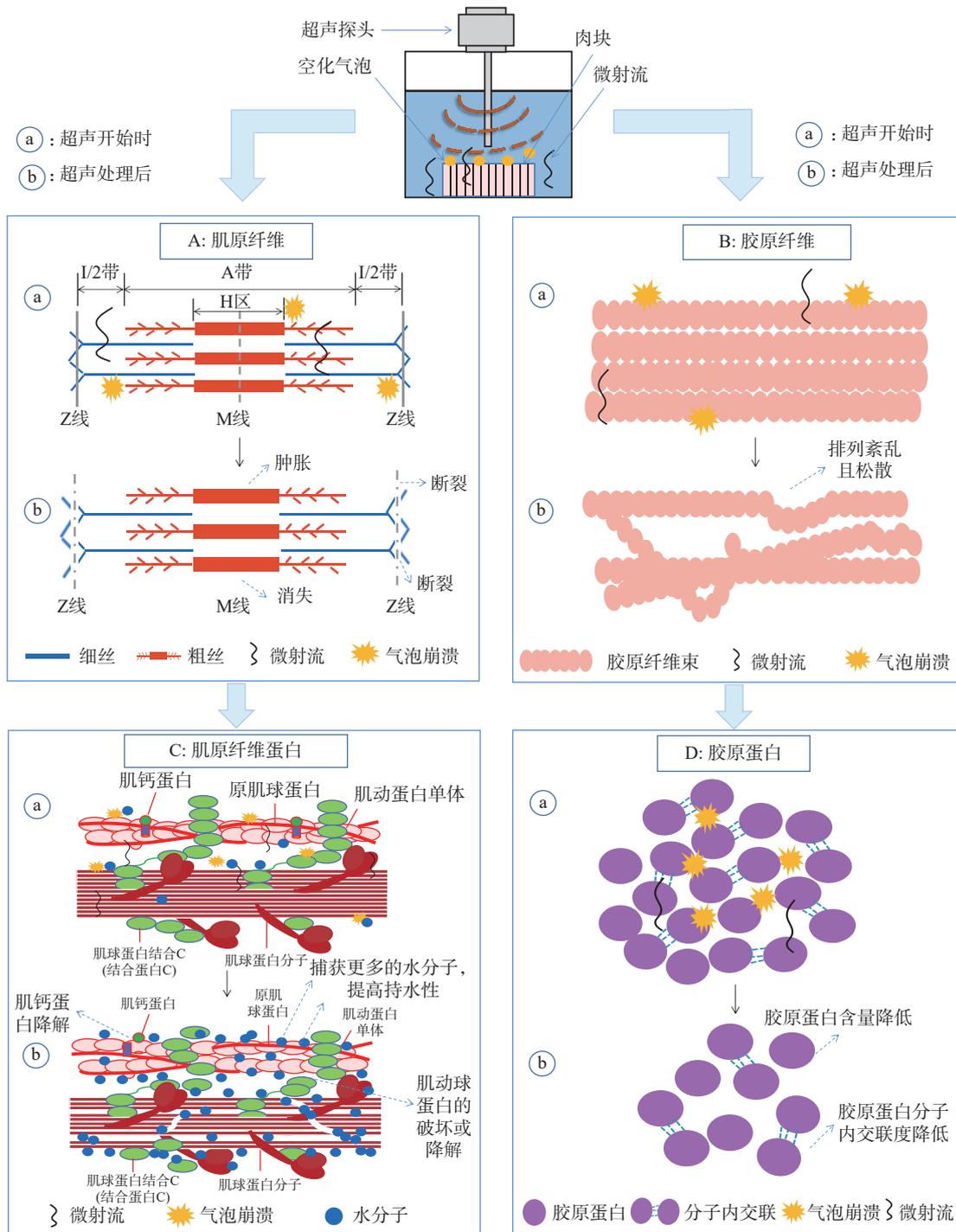


图 3 超声波技术嫩化肉制品机制

Fig.3 Mechanism of tenderizing meat products by ultrasound technology

改善肉制品的嫩度。超声空化产生的微射流和高剪切应力等会破坏肌原纤维结构,使 M 线消失、Z 线和 I 带断裂以及 H 区肿胀,肌肉纤维直径变小,肌节变宽,造成肌纤维结构松弛,提高肉制品嫩度<sup>[5]</sup>(如图 3A 所示)。同时,超声还可以使固体物质产生系列快速的收缩和膨胀循环,即“整合扩散”机制,对肌纤维产生拉伸作用,使肌节长度增加,改善肉制品嫩度<sup>[39]</sup>。

3.1.2 超声波嫩化技术对肌纤维保水性的影响 保水性主要由位于肌原纤维晶格外部以及肌肉细胞外部的弱结合水决定<sup>[45]</sup>。一般认为,肌纤维的保水性越

好,肉制品越嫩,因此,提高肌纤维保水能力有利于嫩度的改善。超声波可以提高肉制品保水能力,这可能是因为超声波使纤维间距增加,水分进入到肌纤维间隙,增强肌纤维的保水性<sup>[5]</sup>。同时,高天丽<sup>[8]</sup>发现超声处理可以使细胞破裂,使水分渗透到细胞中,保水性增加,改善了横山羊肉的嫩度。此外,超声波可以增加肌纤维结合水分的强度,通过降低肉类的蒸煮损失提高肉类的持水能力<sup>[46]</sup>。SHIKHAOJHA 等<sup>[47]</sup>发现超声处理可以增大肌丝的拉伸收缩幅度,从而导致肌原纤维扩张,增加保水能力。

3.1.3 超声波嫩化技术对肌原纤维蛋白降解和持水

性的影响 蛋白质是肉制品的主要成分,其中,肌原纤维蛋白占肌肉总蛋白质的55%~60%,其结构和功能的改变会极大程度地影响肉制品品质<sup>[48]</sup>。超声波可以降解肌原纤维蛋白以改善其结构特性或促进肌原纤维蛋白与水结合来捕获水分子以提高其持水性,起到嫩化肉制品的效果<sup>[49]</sup>(如图3C所示)。

肌原纤维蛋白主要由肌球蛋白、肌动蛋白以及一些结构蛋白等组成,共同维持肌原纤维的完整性<sup>[21]</sup>。超声波快速破坏肌肉细胞中的溶酶体、肌质网和线粒体等,促进蛋白酶的释放;同时,肌质网和线粒体结合Ca<sup>2+</sup>的能力下降,Ca<sup>2+</sup>被释放,有助于激活酶原,降解肌原纤维结构蛋白和肌纤维间连接蛋白,提高了肌原纤维蛋白的降解速率,使可溶性蛋白含量增加,从而改善了肉制品的嫩度<sup>[12]</sup>。超声波还可以促进 $\mu$ -钙蛋白酶的自溶和活化, $\mu$ -钙蛋白酶激活后可降解膜、细胞质和核底物等,导致细胞结构破坏,改变了细胞膜的通透性,促使肌细胞释放组织蛋白酶和钙蛋白酶,在酶体系的作用下,加速了肌动球蛋白的降解和肌原纤维蛋白的水解,破坏肌原纤维紧密结构,使肉制品得以嫩化<sup>[50]</sup>。此外,WANG等<sup>[17]</sup>发现超声波可以降解牛肉的肌间线蛋白和肌钙蛋白-T,进而导致细丝或肌动球蛋白被破坏,使剪切力降低。

超声空化产生的机械和化学效应,可以改变肉制品中肌原纤维蛋白的结构,从而增强其功能特性,改善肉制品品质<sup>[51]</sup>。超声空化现象会产生微射流和高压,破坏水分子而产生高活性自由基( $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}\cdot$ 和 $\text{H}\cdot$ )和超氧化物,这些自由基可以与蛋白质分子发生反应,破坏蛋白质分子之间的相互作用(如疏水作用、氢键和二硫键等),加速改变肌原纤维蛋白空间结构和溶解度,增强水-蛋白质相互作用,同时,这些蛋白通过与水结合的方式捕获水分子,通过提高持水性的方式嫩化肉制品<sup>[52-53]</sup>。KANG等<sup>[40]</sup>发现超声波处理可以促进肌原纤维蛋白的降解与肌球蛋白的提取,从而增强肉制品保水性、凝聚性和多汁性并降低其硬度值。

### 3.2 超声波嫩化技术对肉制品结缔组织特性的影响

结缔组织是肌肉的次要组成部分,由三部分构成(肌内膜、肌束膜和肌外膜)。修整肉时剔除肌外膜,保留大量的肌束膜和肌内膜<sup>[23]</sup>。二者主要由胶原纤维构成,主成分为胶原蛋白,还存在少许弹性蛋白、网状蛋白、糖蛋白和蛋白多糖<sup>[25]</sup>。其中,胶原蛋白是影响嫩度的主要成分,胶原纤维的连接主要是由蛋白多糖完成的。肉的硬度分为尸僵和基础硬度(背景嫩度),改善尸僵硬度是通过肌纤维的降解,而改善基础硬度是通过降低肌肉内结缔组织的含量和破坏结缔组织结构特性来实现<sup>[30]</sup>。

3.2.1 超声波嫩化技术对胶原蛋白含量和溶解性的影响 胶原蛋白含量反映了结缔组织含量,并且胶原蛋白含量与剪切力呈正相关,侧面反映出肉的嫩度。GONZALEZ等<sup>[54]</sup>报道超声后牛肉样品的总胶原蛋

白含量明显低于未超声牛肉样品,其嫩度得到了改善。因此,超声处理可以通过降低胶原蛋白含量提高嫩度(如图3D所示)。此外,胶原蛋白的溶解性也会决定肉制品的嫩度。大量研究表明,肉的嫩度可以通过增加可溶性胶原蛋白含量来改善<sup>[55]</sup>。超声空化效应产生的较强穿透力可以破坏肌肉原有结构的支撑骨架(肌束膜、肌内膜),使结缔组织变得疏松,胶原蛋白可溶性增加,促进肉制品的嫩化<sup>[19]</sup>。

3.2.2 超声波嫩化技术对结缔组织结构的影响 肌束膜与肌内膜的厚度是影响剪切力的主要因素,胶原纤维作为细胞外基质的主要结构成分,它也是结缔组织的重要结构,而超声空化产生的微射流、微湍流和高温高压等会使肌内膜和肌束膜出现裂痕,肌内膜紧密结构发生变形,肌束膜破裂并部分溶解,破坏胶原纤维的物理结构,引起胶原纤维变性并聚集在细胞外,使胶原纤维排列紊乱且松散,进而提高肉制品的嫩度<sup>[56]</sup>(如图3B所示)。同时,超声破坏肌束膜和肌内膜,使其分解成单个胶原纤维,并使肌束膜中的蛋白多糖发生较大程度的降解,使胶原纤维间连接断裂,弱化肌肉内结缔组织结构,故结缔组织的这种分解及结构的弱化可能会导致肉制品的嫩度增加<sup>[25]</sup>。此外,结缔组织的稳定性还与胶原蛋白分子内交联程度密切相关。LEPETIT<sup>[29]</sup>发现随着熟肉中胶原蛋白交联数量的增加,肉的韧性也会相应的增加。超声空化作用会对胶原纤维产生机械物理破坏或者增加肌肉酶的降解,影响胶原蛋白中羟基吡啶和赖氨酸吡啶的交联度和稳定性,破坏了胶原纤维的内部交联,导致胶原蛋白分子内交联度降低,使胶原蛋白的平均稳定性下降,从而有利于肉制品的嫩化<sup>[57]</sup>(如图3D所示)。另外,胶原蛋白分子间的作用力大小也会决定嫩度的高低,而超声空化产生的微射流等可能会破坏胶原蛋白分子间的作用力,使胶原蛋白分子间作用力减小,胶原蛋白结构更加疏松,进而改善肉制品的嫩度。

## 4 展望

超声波技术可以克服传统物理嫩化技术的不稳定性及在线应用差等缺点,目前已广泛应用于鹅肉、鸡肉、牛肉和羊肉等的嫩化。同时,在肉制品加工过程中,超声波可以破坏肉的肌原纤维、溶酶体和结缔组织等,达到嫩化肉制品的效果,其中,在酱牛肉和牛肉粒的生产加工过程中,超声波技术已得到广泛应用。但仍存在一些问题需要进一步解决,主要包括:a.如何在利用超声波技术嫩化肉制品时最大程度抑制/消除超声产生的局部过热现象;b.应该研发输出稳定的超声设备,使其更加适应工业化规模的肉类嫩化,实现科技到生产力的转化。

肉制品多种多样,不同肉制品中肌纤维及结缔组织特性也不尽相同,并且在嫩化过程中,一些外部条件也会不可避免地影响肌原纤维蛋白和胶原蛋白的变性,因此,利用单一的处理手段完全无损地嫩化

肉制品相对来说较为困难。可以通过超声波与其他技术结合的方式嫩化肉制品。首先,超声波与不同加工方式(熏烤、蒸煮、干燥、腌制、发酵等)结合使用,既可以提高肉制品的嫩化效率,又可以节约资源和成本;其次,超声波与其它新兴技术结合,如脉冲电场、脉冲光、超高压、冲击波等,以避免超声可能产生的不良影响,达到较好的嫩化效果,为肉制品的精深加工奠定较好的基础,推进肉类加工业的发展;最后,超声波与新型辅料相结合,超声处理可以使肌纤维结构相对松散,通过新型纳米材料将磷酸盐或对温度以及酸碱度较为敏感的嫩化剂包埋其中,由于纳米材料的稳定性更高及其缓释作用,可以将嫩化剂相对准确且长时间稳定释放于肌纤维当中,起到更好的嫩化效果。

### 参考文献

- [1] ZHU C Z, YIN F, TIAN W, et al. Application of a pressure-transform tumbling assisted curing technique for improving the tenderness of restructured pork chops[J]. *LWT*, 2019, 111: 125–132.
- [2] 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.
- [3] 高海燕, 张瑞瑶, 贾甜, 等. 不同嫩化方法对鹅肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(7): 190–194. [GAO H Y, ZHANG R Y, JIA T, et al. Effects of different tenderization treatments on the quality of goose meat[J]. *Food Science*, 2017, 38(7): 190–194.]
- [4] ZHANG Y M, JI X K, MAO Y W, et al. Effect of new generation medium voltage electrical stimulation on the meat quality of beef slaughtered in a Chinese abattoir[J]. *Meat Science*, 2019, 149: 47–54.
- [5] 苏丹. 老龄梅花鹿肉嫩化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. [SU D. Research on tenderizing methods of aging sika meat[D]. Changchun: Jilin University, 2012.]
- [6] ZUCKERMAN H, BOWKER B C, EASTRIDGE J S, et al. Microstructure alterations in beef intramuscular connective tissue caused by hydrodynamic pressure processing[J]. *Meat Science*, 2013, 95(3): 603–607.
- [7] 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.
- [8] 高天丽. 中式烹制及嫩化工艺对横山羊肉品质的影响研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017. [GAO T L. The effects of Chinese cooking and tenderization methods on the quality of Hengshan goat meat[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017.]
- [9] 张森, 王道营, 张牧焱, 等. 一磷酸腺苷与肌球蛋白相互作用的荧光光谱研究[J]. *食品科学*, 2016, 37(17): 32–37. [ZHANG M, WANG D Y, ZHANG M H, et al. Fluorescence spectroscopic study of the molecular interaction between adenosine 5'-monophosphate and actomyosin[J]. *Food Science*, 2016, 37(17): 32–37.]
- [10] KE S, HUANG Y, DECKER E A, et al. Impact of citric acid on the tenderness, microstructure and oxidative stability of beef muscle[J]. *Meat Science*, 2009, 82(1): 113–118.
- [11] 朱蓓薇, 董秀萍, 李岩, 等. 通过内源酶嫩化技术生产低温熟化海参制品的方法: 中国, CN104286975A[P]. 2015-01-21. [ZHU B W, DONG X P, LI Y, et al. A method for producing low-temperature matured sea cucumber products by endogenous enzyme tenderization technology: China, CN104286975A[P]. 2015-01-21.]
- [12] 张宝琦. 不同处理对秦川牛肉品质影响的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2008. [ZHANG B X. Study on effects on beef quality of Qinchuan cattle among different factor[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2008.]
- [13] 时海波, 诸永志, 方芮, 等. 宰后肉品嫩化技术及其作用机理研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 311–321. [SHI H B, ZHU Y Z, FANG R, et al. Progress of technologies and mechanisms of tenderization of post-mortem muscle[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 311–321.]
- [14] 张苏芬. 牛仔盖肉排品质改良及贮藏特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019. [ZHANG S S. Study on the quality improvement and storage characteristics of beef round steaks[D]. Changchun: Jilin University, 2019.]
- [15] ALARCON-ROJO A D, JANACUA H, RODRIGUEZ J C, et al. Power ultrasound in meat processing[J]. *Meat Science*, 2015, 107: 86–93.
- [16] 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.
- [17] WANG A R, KANG D C, ZHANG W G, et al. Changes in calpain activity, protein degradation and microstructure of beef *M. semitendinosus* by the application of ultrasound[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 724–730.
- [18] 孔令明, 李芳, 张文, 等. 不同电刺激处理时间对宰后马肉成熟过程中嫩度的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(9): 76–81. [KONG L M, LI F, ZHANG W, et al. Effect of electrical stimulation on horsemeat tenderness during postmortem aging[J]. *Food Science*, 2018, 39(9): 76–81.]
- [19] 张坤, 王道营, 张森, 等. 高强度超声对鹅胸肉嫩度及品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(15): 122–127. [ZHANG K, WANG D Y, ZHANG M, et al. Effect of high-intensity ultrasonic treatment on goose tenderness and meat quality[J]. *Food Science*, 2018, 39(15): 122–127.]
- [20] ZOU Y, ZHANG K, BIAN H, et al. Rapid tenderizing of goose breast muscle based on actomyosin dissociation by low-frequency ultrasonication[J]. *Process Biochemistry*, 2018, 65: 115–122.
- [21] 郎玉苗. 肌纤维类型对牛肉嫩度的影响机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. [LANG Y M. Mechanism and effects of muscle fiber types on beef tenderness[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.]
- [22] VOLPELLI L A, FAILLA S, SEPULCRI A, et al. Calpain system *in vitro* activity and myofibril fragmentation index in fallow deer (*Damadama*): Effects of age and supplementary feeding[J]. *Meat Science*, 2005, 69(3): 579–582.
- [23] 刘晶晶. 结缔组织热变化对牛肉嫩度影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. [LIU J J. The influence of heat change of connective tissue on beef tenderness[D]. Beijing: Chinese Aca-

- demy of Agricultural Sciences, 2018. ]
- [ 24 ] BERRY B W. Tenderness of beef loin steaks as influenced by marbling level, removal of subcutaneous fat, and cooking method[J]. *Journal of Animal Science*, 1993, 71(9): 2412–2419.
- [ 25 ] 李春保. 牛肉肌内结缔组织变化对其嫩度影响的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006. [ LI C B. Effects of intramuscular connective tissue on beef tenderness[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. ]
- [ 26 ] KLONT R E, BROCKS L, EIKELBOOM G. Muscle fibre type and meat quality[J]. *Meat Science*, 1998, 49: S219–S229.
- [ 27 ] 臧大存. 鸭肉嫩度影响因素及变化机制的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007. [ ZANG D C. Studies on the mechanism and factors of tenderness variation in duck meat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. ]
- [ 28 ] LIGHT N, CHAMPION A E, VOYLE C, et al. The role of epimysial, perimysial and endomysial collagen in determining texture in six bovine muscles[J]. *Meat Science*, 1985, 13(3): 137–149.
- [ 29 ] LEPETIT J. A theoretical approach of the relationships between collagen content, collagen cross-links and meat tenderness [J]. *Meat Science*, 2007, 76(1): 147–159.
- [ 30 ] KIM H W, CHOI Y S, CHOI J H, et al. Tenderization effect of soy sauce on beef *M. biceps femoris*[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1-4): 597–603.
- [ 31 ] SOLOMON M B, LONG J B, EASTRIDGE J S. The hydrolyne: A new process to improve beef tenderness[J]. *Journal of Animal Science*, 1997, 75(6): 1534–1537.
- [ 32 ] JAYASOORIYA S D, TORLEY P J, D'ARCY B R, et al. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine *Semitenidinosus* and *Longissimus* muscles[J]. *Meat Science*, 2007, 75(4): 628–639.
- [ 33 ] 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.
- [ 34 ] LÓPEZ-PEDROUSO M, PÉREZ-SANTAESCOLÁSTICA C, FRANCO D, et al. Proteomic footprint of ultrasound intensification on sliced dry-cured ham subjected to mild thermal conditions [J]. *Journal of Proteomics*, 2019, 193: 123–130.
- [ 35 ] 沈阳. 超声空化的理论研究及影响因素的模拟分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014. [ SHEN Y. Theoretical research on ultrasonic cavitation and simulation analysis of affecting factors[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. ]
- [ 36 ] 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.
- [ 37 ] ZOU Y, SHI H, CHEN X, et al. Modifying the structure, emulsifying and rheological properties of water-soluble protein from chicken liver by low-frequency ultrasound treatment[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 810–817.
- [ 38 ] TEREFE N S, SIKES A L, JULIANO P. 8-Ultrasound for structural modification of food products[J]. *Innovative Food Processing Technologies*, 2016: 209–230.
- [ 39 ] 钟赛意. 超声波在盐水鸭加工中的应用研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007. [ ZHONG S Y. Study on the application of ultrasonic in salting processing of salted duck[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. ]
- [ 40 ] 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.
- [ 41 ] 李正英, 陈锦屏, 陈忠军, 等. 羊肉超声波嫩化技术的研究 [J]. *食品科学*, 2006, 27(12): 413–416. [ LI Z Y, CHEN J P, CHEN Z J, et al. Study on ultrasonic technology to tender lamb meat[J]. *Food Science*, 2006, 27(12): 413–416. ]
- [ 42 ] 唐福元, 王伟, 刘晓庚, 等. 超声辅助无花果叶蛋白酶复合嫩化剂对猪腩肉嫩度的影响 [J]. *食品科学*, 2017, 38(12): 204–210. [ TANG F Y, WANG W, LIU X G, et al. Optimization of pork tenderization using ultrasound treatment combined with tenderizer combination[J]. *Food Science*, 2017, 38(12): 204–210. ]
- [ 43 ] SALEEM R, AHMAD R. Effect of low frequency ultrasonication on biochemical and structural properties of chicken actomyosin[J]. *Food Chemistry*, 2016, 205: 43–51.
- [ 44 ] XIONG G Y, FU X Y, PAN D M, et al. Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 60: 104808.
- [ 45 ] BERTRAM H C, PURSLOW P P, ANDERSEN H J. Relationship between meat structure, water mobility, and distribution: A low-field nuclear magnetic resonance study[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(4): 824–829.
- [ 46 ] LI X, WANG Y, SUN Y Y, et al. The effect of ultrasound treatments on the tenderizing pathway of goose meat during conditioning[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(8): 2957–2965.
- [ 47 ] SHIKHAOJHA K, KERRY J P, TIWARI B K. Investigating the influence of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and moisture migration measurement in *Lactobacillus sakei* cultured and uncultured beef jerky[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 81: 42–49.
- [ 48 ] WANG B, KONG B H, LI F F, et al. Changes in the thermal stability and structure of protein from porcine *Longissimus dorsi* induced by different thawing methods[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126375.
- [ 49 ] 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. Recent advances in understanding the effect of high power ultrasound on protein functional characteristics and its applications in meat processing[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 289–297. ]
- [ 50 ] 张坤, 邹焱, 王道营, 等. 高强度超声处理对鹅胸肉肌球蛋白特性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(21): 59–65. [ ZHANG K, ZOU Y, WANG D Y, et al. Effect of high-intensity ultrasound on the characteristics of goose breast muscle actomyosin[J]. *Food Science*, 2018, 39(21): 59–65. ]
- [ 51 ] LI K, FU L, ZHAO Y Y, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the

- emulsion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105275.
- [ 52 ] BAREKAT S, SOLTANIZADEH N. Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment[J]. *Innovative Food Science&Emerging Technologies*, 2017, 39: 223–229.
- [ 53 ] WANG B, DU X, KONG B H, et al. Effect of ultrasound thawing, vacuum thawing, and microwave thawing on gelling properties of protein from porcine *Longissimus dorsi*[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 104860.
- [ 54 ] GONZALEZ-GONZALEZ L, ALARCON-ROJO A D, CARRILLO-LOPEZ L M, et al. Does ultrasound equally improve the quality of beef? An insight into longissimus lumborum, infraspinatus and cleidooccipitalis[J]. *Meat Science*, 2020, 160: 107963.
- [ 55 ] BURKE R M, MONAHAN F J. The tenderisation of shin beef using a citrus juice marinade[J]. *Meat Science*, 2003, 63(2): 161–168.
- [ 56 ] 万云飞. 超声与氯化钙联合处理影响牛肉超微结构与嫩度的机理研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019. [ WAN Y F. The effect of ultrasound combined with calcium chloride on the ultrastructure and tenderness of beef[D]. Xiayang: Northwest A&F University, 2019. ]
- [ 57 ] CHANG H J, XU X L, ZHOU G H, et al. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef semitendinosus muscle during ultrasonic processing[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(1): 285–297.