

超声处理技术在肉类工业中的应用研究进展

Progress on application of ultrasound treatment technology in meat industry

雷 辰 夏延斌 车再全 任 美

LEI Chen XIA Yan-bin CHE Zai-quan REN Mei

(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

摘要:文章综述了超声波技术对鲜肉品质特性的影响,以及辅助超声处理对肉类加工单元操作效果的影响,探讨可能出现的负面效果,并展望超声在肉类工业应用中的发展前景。

关键词:超声波;鲜肉;肉类加工;负面影响

Abstract: In this paper summarizes the application of ultrasound technology in meat industry, for example the effect of ultrasound to meat quality and the influence of ultrasound to the processing. In addition, also discussed the disadvantages of ultrasound and the application prospect of ultrasound technology in meat industry.

Keywords: ultrasound; fresh meat; meat processing; negative effects

超声处理是指利用超声波的热作用、机械作用、空化作用等^[1]实施或辅助实施乳化、脱气、提取^[2]、切割^[3]、清洗、灭菌^[4]等工艺。作为一种高效技术,超声处理在多个领域得到了广泛应用,在食品科学领域超声处理最早应用于食品的分析 and 改性^[5]。超声波通常是指频率高于 20 kHz,不引起听觉的机械弹性波,实验室最常见的超声波仪器通常使用的频率为 20 kHz~10 MHz。超声波在传播过程中,会对传播介质分子产生挤压或离散而导致介质分子形成气泡或空洞。这些空洞在后续的超声波处理中变大,最终变得不稳定而崩溃,释放出高温和高压。如这种崩溃发生在生物材料中,超声波很可能对此生物材料产生多重影响,达到促进分离或变性的目的^[6]。

常用的超声波可分为两类:高频率低强度超声波(>1 MHz, <1 W/cm²)、低频率高强度超声波(20~100 kHz, 10~1 000 W/cm²),这两类超声波也被称为功率超声波。前者不具有破坏性,常用于化合物的分离和萃取^[7],而后者常用于改变细胞结构和其他处理,如固体粉碎、抑泡、乳化^[8-9]。

超声处理有助于肉制品品质的提升,对于肉制品的腌制、脱脂、延长肉制品货架期等也有促进作用。虽然超声在肉类工业应用时间不长,却显示出了极大的应用前景。

1 超声处理对鲜肉理化特性的影响

近年来,大量研究报道了功率超声对新鲜肉和预处理肉类的影 响。表 1 总结了超声波对肉类理化性质、烹调、加工、腌制、微生物生长状况等方面的影响。

1.1 对肉嫩度的影响

传统方法通过对鲜肉进行机械处理、酶处理、化学处理

表 1 超声对肉类品质特性的影响

Table 1 The influence of ultrasound to meat quality

样品	超声参数	理化特性改变	参考文献
猪背最长肌和腰部	4.2, 11, 19 W/cm ² ; 20 kHz; 10, 25, 40 min	保水性和肉的结构未改变,物质转运和蛋白质溶出更快,肌凝蛋白变性程度更高	[10]
母鸡胸肌肉	12 W/cm ² ; 24 kHz; 15 s	剪切力减小,烹调损失不变	[11]
牛肉(半膜肌)	40 kHz; 1 500 W; 10, 20, 30, 40, 50, 60 min	亮度和红度不变,黄度减小	[12]
鸡胸肉和 大豆凝胶	20 kHz; 450 W; 0, 3, 6, 9, 12 min	凝胶更黏弹,保水性和质地特性提升,均一完整的显微结构网络	[13]
猪肉	40 kHz; 37.5 W/dm ³	嫩度提升,腌制效率提高	[14]
鸡翅表面	2.5 W/cm ² ; 40 kHz; 3, 6 min	微生物减少,时间越长减少越显著,大肠杆菌对超声更敏感	[15]
牛肉肌腱	11 W/cm ² ; 40 kHz; 60, 90 min	大肠菌群、嗜冷菌显著减少	[16]
冷却猪肉	40 kHz; 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 min	肉中小分子蛋白质含量增加	[17]

作者简介:雷辰,男,湖南农业大学在读硕士研究生。

通讯作者:夏延斌(1952-),男,湖南农业大学教授,博士生导师。

E-mail: 254574840@qq.com

收稿日期:2015-12-05

等使肉质嫩化,鲜肉的适口性增加。但该类方法耗能、耗时,产品达不到最佳的风味,因此建立一种高效的使肉嫩化的方法,是肉制品加工业的研究热点之一。从理论上说,超声在肉类中可以起到两方面的作用:超声波本身的机械作用虽然对肌纤维造成了断裂,对肌肉细胞结构造成了破坏,但促进了内源性蛋白酶的释放,导致了蛋白质的降解,使其组织结构发生了相应变化,嫩度增加。多年来,超声波对肉质嫩化的作用研究甚多,结果也不一致,一些研究者认为肉类长时间暴露在高强度的超声波环境下会对其肉质产生显著的嫩化作用,Chang Hai-jun 等^[12]发现将功率超声(40 kHz, 1 500 W)应用到牛肉的半腱肌,分别作用 10, 20, 30, 40, 50, 60 min,会使肌肉纤维的直径减少,对胶原蛋白的热稳定性和性质也会产生影响,表明超声处理可以促进肉类的嫩化。但也有研究者^[18]不认同这种作用,认为可能是超声的热效应使蛋白质变性,从而对肉品的嫩度造成了一定影响。

超声波可能引起机械损坏和肌肉嫩化的假设在家禽肉试验中也得到了证实。李莹等^[19]在对蛋鸡胸肉的研究中,发现单一的微波对鸡肉的嫩化效果不如超声—微波结合的效果好,超声对淘汰蛋鸡胸肉的嫩化效果显著,肌肉剪切力降低。在对母鸡胸肌的研究中^[11],鸡胸肉经超声处理后(24 kHz, 12 W/cm², 15 s),分别在 4 °C 贮藏 0, 1, 3, 7 d, 超声处理组的鸡胸肉的剪切力降低且烹调损失无显著变化。另外,苏丹^[20]在对老龄鹿肉的研究中,发现超声处理后的鹿肉的肌肉纤维小片化指数随着超声功率增大不断上升,由电泳结果可观察到鹿肉可溶性蛋白发生降解。这些结果都表明,超声处理在肉的嫩化中有很大应用前景。

1.2 对肉保水性的影响

肉的保水性是保持其原有水分与添加水分的能力,对肉制品加工的质量和数量有很大影响。如肉保水性差,在烹饪过程中就会因为失水而失重,造成经济损失。有研究^[13]表明,超声促进肌纤维释放蛋白质凝胶,而蛋白质凝胶对保水性(WHC)、嫩度、肉制品的粘合性都有很大影响。保水性会随着动物宰后的肌纤维结构变化而变化,因此,动物肌肉到食用肉的过程中水的分布差异与肉质的嫩度相关^[21],肉的保水性会影响肉的质地。段昌圣^[22]研究发现采用超声波处理(300 W, 60 min)酱卤鸭脖保水性最好,而且此条件下嫩度也高于对照组。Dolatowski 等^[23]用超声(45 Hz, 2 W/cm²或 25 Hz, 2 W/cm²)处理肉品,发现肉的保水性显著提高,并且对处理组的 pH 值无显著影响。Li Ke 等^[24]研究了高功率超声(20 kHz; 0, 3, 6 min)对鸡肉 PSE 肉糜悬浮液(蛋白质含量 7.5%)的影响,发现超声显著提升了 PSE 肉糜悬浮液凝胶的 pH 值和保水性。可能是超声机械作用破坏肌纤维降低了水分子渗入肌肉纤维之间的阻力,超声的空化作用与声微流共同作用,使肌肉组织细胞破坏的同时促进水分子进入组织细胞,从而提高肉的保水性。

1.3 对肉成熟的影响

尸僵持续一定时间后,在无氧降解酶作用下发生一系列生物化学变化,肉的硬度降低,保水性有所恢复,使肉变得柔嫩多汁,具有良好的风味,最适于加工食用,这个变化过程即

为肉的成熟。肌原纤维蛋白和细胞骨架蛋白在内源酶的作用下降解削弱是肉成熟的重要原因^[25],Chen Lin 等^[26]研究发现超声波(40 kHz, 1 500 W)能显著提高蛋白水解酶的活性。Stadnik 等^[27-28]对宰后 24 h 的小牛半膜肌肌肉进行超声处理(45 kHz, 120 s),并将其在 4 °C 下贮藏 24, 48, 72, 96 h,发现细胞蛋白的结构发生了破坏,pH 值和色泽均未发生显著变化,但是超声处理组的嫩度与保水性显著增加。

相比之下,Pohlman 等^[18]采用超声(20 kHz, 22 W/cm²),分别对牛肉进行 0, 5, 10 min 超声处理,宰后成熟时间 1, 6, 10 d,并未证实超声有加速成熟的作用。研究者并未发现肉质硬度方面、咀嚼性、感官特征、胶原蛋白的溶解性或肌纤维蛋白水解作用的变化。但是设备的差异导致超声强度和频率各不相同,结果不显著可能是超声的强度或者时间不够。

尽管由于不同设备产生的超声频率和强度不同,处理时间也有差异,不同试验不具有可比性,但是大部分的研究者都认为功率超声对不同来源肉的后熟和质地有显著影响,且不影响其他质量参数。

2 超声处理辅助肉类加工单元操作效果的影响

2.1 腌制

腌制是肉类加工中关键的环节,对增加产品的嫩度以及多汁性、延长货架期、调味都有重要作用。干腌法能赋予肉特殊的风味,但食盐渗透速度慢且不均匀,腌制时间过长。湿腌法的速度主要取决于卤水的浓度,超声在不破坏肉类原有品质的前提下提高腌制速度和均匀度。Ozuna 等^[14]将猪肉同时放入腌制液中静置和超声处理,发现超声腌制有助于加速物质转运,缩短了腌制时间。McDonnell 等^[29]测定了超声腌制对猪肉水结合力、色泽、质构的影响,发现超声并没有对猪肉品质产生不利影响。NaCl 扩散到肉中通常是很慢的,虽然可以通过注射实现,但是对于形状不整齐或者带骨的肉类不宜使用注射。在超声条件下肌肉的渗透性会增强^[30],高强度超声腌制还会引起蛋白质的溶出,使肉表面的肌球蛋白变性^[10]。这与高压技术的效果相似,但超声加工的成本更低,并且便于推广。

2.2 冷冻及解冻

超声通过影响冷冻食品的成核和晶体增长来控制结晶,超声的空穴作用不但可以产生微小的空洞,促进冰成核,还能通过声微流促进热量和物质转运,从而影响冷冻后食品的质地^[31],食品质地是关乎消费者对肉类产品接受度的重要因素,并且关系到营养和生物活性物质的保存。谷小慧^[32]研究发现,在冷冻过程中,超声波辅助冷冻猪肉从 5 °C 下降到 -7 °C 的冷冻时间为 81.5 min,而传统冷冻需要 106.67 min,超声波冷冻时间缩短了 30.88%,通过对猪肉的微观结构进行观察,发现超声波冷冻的细胞显示更好的网络结构,细胞空洞更少。

声能转化成热能可以加速融化过程。这个转化过程在凝固相中进行得最为剧烈,随着温度从零下温度上升,变得越来越剧烈。最近,有研究者^[33]比较了低强度超声解冻和

浸水解冻包装猪肉,解冻过程温度恒定,超声频率为 25 kHz,超声强度为 0.2 W/cm² 和 0.4 W/cm²,超声解冻和浸水解冻,肉的化学性质、微生物和质地特征均没有显著差异;且超声波解冻所需时间随着功率的增大而缩短,超声波解冻冷冻肉的汁液流失率随着超声波功率的增大而减小^[34]。

由此可见,超声冷冻可以加速肉类冷冻过程,减少冷冻过程中细胞结构的损坏,超声解冻可以降低冷冻肉汁液流失率,且不会导致微生物和质地的变化。

2.3 脱脂

工厂化养殖生产的肉类产品往往因为生长周期短而快速催肥导致脂肪含量过高。高脂肪含量的食物不符合营养摄入标准,且容易引起加工产品质量降低。脱脂常用的方法有溶液萃取法、酶法、碱皂化法等。将超声波结合这些方法使用可以有效提高脱脂效果。马艳^[35]研究发现,超声辅助能提高脱脂率并降低脱脂处理的温度和时间。卢春燕^[36]将不同的脱脂方法进行比较,发现超声辅助提高了脱脂的效率。这是因为超声的空化作用促进了脂肪细胞的破裂,同时流出的脂肪被超声乳化而加速脱离。为了探索降低肉类产品中饱和脂肪酸含量的新方法,Zhao Ying-ying 等^[13]通过超声将动物油脂替换成植物乳化油脂。发现超声可用于生产性能突出的乳化性肉制品,并且能在保证高产量的同时改善脂肪酸构成。

2.4 烹饪

通常肉制品在烹饪过程中,肉制品表面因为外部温度过高变得焦黑而内部没有充分加热,从而导致产品质量下降。超声可以有效提高传热性能,减少烹饪时间并提高产品质量。国外已有超声炒锅的专利^[37],与传统炒锅相比,超声炒锅利用超声传热不仅加热均匀还提高了升温速度,降低了能耗。利用超声进行烹调使烹调速度更快,水保存得更多,烹调损失更低。同时,烹调的肌肉纤维更嫩,肌纤维直径更大,相比于仅通过热传递烹调的肉有更多的肌纤维破裂。另外,因为超声的热传导机制效率更高相比于按传统的煮制或者加热烹调的肉,通过超声烹调的肌肉烹调损失降低至 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{5}$ 倍。这表明超声可应用于制备餐馆中的预调制肉或者用于预制菜行业^[38]。

2.5 杀菌

超声在杀灭细菌繁殖体方面的影响虽然发现于 20 世纪 20 年代^[39],但直至 90 年代才被运用于食品工业和保鲜方面^[40-41]。近年来,由于消费者对轻加工食品的需求不断增长,探索对食品本身品质“零影响”的食品加工替代方式变得越来越重要。超声有助于生物安全性的提升和食品货架期的延长,特别是对于含有热敏感性营养、功能性元素的食物,超声波的应用更有意义^[42]。

抑制微生物总的机制主要就是形成细胞内空泡,从而使细胞膜变薄,产热并产生自由基^[29]。高功率超声(20~100 kHz)能实现高压、剪切、温度梯度等,可破坏细胞膜和 DNA,从而灭活细胞^[43]。

新的超声抗菌处理由超声结合一种或几种杀菌技术而成,包括压力与超声的结合作用(压力超声波),超声和加热的结合(超声热处理),或者是超声、加热、压力的结合(热压超声波)^[44],超声结合其他杀菌技术比单一杀菌技术效果更好。研究者^[45]发现超声处理和蒸汽相结合应用于生产线的宰后鸡可以显著减少弯曲杆菌,在宰后立即进行蒸汽超声处理,其菌落总数减少了 3 个对数级。Morild 等^[46]测定了在持续高压蒸汽和高功率超声结合处理后,猪皮和肉表面的病原菌失活情况,对超声处理后(30~40 kHz, 15 s)的接种样品上的沙门氏菌、小肠结肠炎耶尔森氏菌、非致病性大肠杆菌进行了研究,发现菌落总数在处理 1 s 后降低了 1.1 lg CFU/cm²,在处理 4 s 后降低了 3.3 lg CFU/cm²,猪皮的降低程度比猪肉的高。Kordowska 等^[45]还发现超声处理与乳酸菌菌液相结合适用于对家禽皮的清洁。Smith 等^[47]发现,高强度超声和抗菌剂的结合使用可以使病原菌杀灭效果更好。

3 功率超声在肉类工业中的负面影响

功率超声在肉类工业中的应用对肉的负面影响很少被报道。但是功率超声可能会对肉的水结合力^[48]、色泽的稳定性^[49]、多汁性、感官特征、肉的产量^[50]造成不利的影响。研究者^[10]普遍认为这些变化都是因为肉蛋白质发生理化变化而引起的,但目前并未得到证实。声能可以被吸收,由于空化作用导致温度升高,食品受到热损伤^[51],且有研究^[52]证明声热效应会导致外层细胞膜广泛的物理损伤。

即使没有出现气泡破灭,由于液体介质中的剪切力,使高分子物质解聚^[53],随着超声波能量的增加,链碎片也增加^[51]。高强度超声会引起食品蛋白质功能性的改变,如胶凝性、粘度、溶解度,而这些改变通常被认为与分子结构改变有关,如疏水性增加和颗粒大小变化。由高强度超声引起的变化主要取决于蛋白质本身的性质和其变性及聚合的程度^[54]。

超声诱导水分子的同源分裂,导致食品加工中引入自由基,使食品更易被氧化^[51]。食品中的蛋白质氧化也可能导致蛋白质分解或者蛋白质-蛋白质交联作用。蛋白质被氧化后,其理化性质也会改变,如构型、构象、溶解性、对蛋白质水解作用的敏感性、酶活性^[55]。这些改变都可能决定新鲜肉的品质并影响肉制品的加工特性。工业中应用超声应当考虑引入自由基淬灭剂来阻止有害的氧化反应^[56]。

目前的研究还不足以清楚地说明超声对肉类工业可能造成的危害。虽然已知超声会导致食品分子结构的变化,经超处理的肉的品质也确实发生了改变,但是还缺乏证据证明超声和肉内在成分有关系,而这些内在成分还要与肉的功能性和食用品质有关。

4 结语与展望

许多传统的加工技术已优化到了极致,但仍没有办法满足人们日益增长的需求,高功率超声作为一种“高效、节能、环保”的加工技术,无论是对肉的影响,还是在肉制品加工工艺的应用都显示出广阔的前景。超声对于肉及肉制品的稳

定性有一定影响,虽然目前没有证据证明对人体有危害,但是若想将超声波成熟应用于肉类工业生产,还需要对其机理机制进行进一步研究。目前对于超声的研究大多是研究固定频率、强度、时间与不超声的空白对比,而将三者联系起来的动态研究较少。超声对肉类的影响趋势相同但差异往往很大,其原因不仅是设备的不同,肉类的产品的形状、厚薄、结构对超声波传播的削弱作用也是一个重要原因,构建肉类不同形状、厚薄、结构对超声波削弱模型,对超声波在肉类中应用的准确性有重要作用。另外,受制于超声设备生产工艺局限,大型的超声设备暂时很难在工业生产中推广,超声设备的研究也将是超声应用的一个重要研究方向。

参考文献

- [1] 胡爱军, 郑捷. 食品工业中的超声提取技术[J]. 食品与机械, 2004, 20(4): 57-60.
- [2] 薛菁, 吴晓彤, 王颖超, 等. 超声波辅助提取口蘑菌丝体多糖工艺优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 172-174.
- [3] 林雪, 陈长卿, 侯长安, 等. 切分松软食品的超声波切割机及其工作台的研制[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 98-100, 131.
- [4] 黄瑞, 余小林, 胡卓炎, 等. 超声对荔枝汁中TAB的杀菌效果研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 214-217, 243.
- [5] 魏彦杰. 食品蛋白质改性研究[J]. 肉类研究, 2010(5): 24-27.
- [6] Povey J W, Mason T. Ultrasound in food processing[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1998: 39-41.
- [7] 陈洪彬, 郑金水, 菜英卿. 紫苏叶中总黄酮的超声波辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 232-236.
- [8] Floros J D, Liang H. Acoustically assisted diffusion through membranes and biomaterials; Ultrasonic applications in the food industry[J]. Food Technology, 1994, 48(12): 79-84.
- [9] 宋国胜, 胡松青, 李琳. 超声波技术在食品科学中的应用与研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(6): 609-612.
- [10] McDonnell C K, Lyng J G, Morin C, et al. The effect of ultrasonic salting on protein and water-protein interactions in meat[J]. Food Chemistry, 2014, 147(6): 245-251.
- [11] Xiong Guo-yuan, Zhang Li-li, Zhang Wei, et al. Influence of ultrasound and proteolytic enzyme inhibitors on muscle degradation, tenderness, and cooking loss of hens during aging[J]. Czech Journal of Food Science, 2012, 30(3): 195-205.
- [12] Chang Hai-jun, Xu Xing-lian, Zhou Guang-hong, 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.
- [13] Zhao Ying-ying, Wang Peng, Zou Yu-feng, et al. Effect of pre-mulsification of plant lipid treated by pulsed ultrasound on the functional properties of chicken breast myofibrillar protein composite gel[J]. Food Research International, 2014, 58(4): 98-104.
- [14] Ozuna C, Puig A, García-Pérez J V, et al. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (Longissimus dorsi) brined at different NaCl concentrations[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(1): 84-93.
- [15] Kordowska-Wiater M, Stasiak D M. Effect of ultrasound on survival of gramnegative bacteria on chicken skin surface[J]. Bulletin of the Veterinary Institute of Pulawy, 2011, 55(2): 207-210.
- [16] Omaro C, Alma D A, Ana R, et al. Physicochemical and microbiological characteristics of beef treated with high-intensity ultrasound and stored at 4 °C[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 96: 2 489-2 493.
- [17] 靳慧杰. 超声波对冷却肉杀菌保鲜作用的研究[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2008: 8-23.
- [18] Pohlman F W, Dikeman M E, Kropf D H. Effects of high intensity ultrasound treatment, storage time and cooking method on shear, sensory, instrumental color and cooking properties of packaged and unpackaged beef pectoralis muscle.[J]. Meat Science, 1997, 46(1): 89-100.
- [19] 李莹, 周剑忠, 黄开红, 等. 超声波—微波设备联合嫩化淘汰蛋鸡鸡胸肉[J]. 食品科学, 2013, 34(2): 83-87.
- [20] 苏丹. 老龄梅花鹿肉嫩化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 9-24.
- [21] Lawrie R A, Ledward D A. Lawrie's meat science [M]. Cambridge, England: CRC Woodhead Publishing Limited, 2006: 128-156.
- [22] 段昌圣. 酱卤鸭脖的贮藏特性及其保水性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 42-44.
- [23] Dolatowski Z J, Twarda J. The influence of ultrasound on the ability of beef tissue to water binding[J]. Fleischwirtschaft, 2004, 84(12): 95-99.
- [24] Li Ke, Kang Zhang-li, Zhao Ying-ying, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve functional properties of batter suspensions prepared from PSE-like chicken breast meat[J]. Food Bioprocess Technology, 2014, 7(12): 3 466-3 477.
- [25] Herrera-Mendez C H, Becila S, Boudjellal A, et al. Meat ageing; Reconsideration of the current concept[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(8): 394-405.
- [26] Chen Lin, Feng Xian-chao, Zhang Ying-yang, et al. Effects of ultrasonic processing on caspase-3, calpain expression and myofibrillar structure of chicken during post-mortem ageing[J]. Food Chemistry, 2015, 177(12): 280-287.
- [27] 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.
- [28] Stadnik J, Dolatowski Z J. Influence of sonification on the oxidative stability of Beef[J]. Roczniki Instytutu Przemysłu Mięsnego i Tłuszczowego, 2009, 47(1): 63-68.
- [29] McDonnell C K, Lyng J G, Allen P. The use of power ultrasound for accelerating the curing of pork[J]. Meat Science, 2014, 98(2): 142-149.
- [30] Leal-Ramos M Y, Alarcón-Rojo A D, Mason, et al. Ultrasound-enhanced mass transfer in Halal compared with

- non-Halal chicken[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(1): 130-133.
- [31] Zheng Li-yun, Sun Da-wen. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2006, 17(1): 16-23.
- [32] 谷小慧. 超声波对冷冻肉品质影响的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2013: 20-32.
- [33] Gambuteanu C, Petru A. Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological, chemical and technological properties of un-packaged pork longissimus dorsi[J]. *Food Technology*, 2013, 37(1): 98-107.
- [34] Gambuteanu C, Petru A. Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork Longissimus dorsi muscle[J]. *Food Science Technology*, 2015, 52(4): 2 130-2 180.
- [35] 马艳. 鸡肉脱脂技术及脱脂处理对肉品质影响的研究[D]. 安徽: 安徽农业大学, 2008: 14-19.
- [36] 卢春艳. 养殖大黄鱼脱脂脱腥工艺优化及其风味成分研究[D]. 浙江: 浙江工商大学, 2011: 35-44.
- [37] Park S H, Roh Y R. Cooker: The South Korea, 0113773[P]. 2001-03-01.
- [38] Chemat F, Zill-e-Huma, Khan M K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(4): 813-835.
- [39] Arroyo C, Cebrian G, Pagan R, et al. Inactivation of *Coronobacter sakazakii* by ultrasonic waves under pressure in buffer and foods[J]. *Food Microbiol.*, 2011, 144: 446-454.
- [40] Mclements D J. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1995, 6(9): 293-299.
- [41] Knorr D, Zenker M, Heinz V, et al. Applications and potential of ultrasonics in food processing[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2004, 15(5): 261-266.
- [42] Wang Yan, Hu Yan-chun, Wang Jian-hua, et al. Ultrasound-assisted solvent extraction of swainsonine from *Oxytropis ochrocephala* Bunge [J]. *Med. Plant Res.*, 2011, 5(6): 890-894.
- [43] Hyoungill L, Feng Hao. Effect of power ultrasound on food quality[M]. New York: Springer, 1970: 559-582.
- [44] Pagan R, Mañas P, Alvarez I, et al. Resistance of *Listeria monocytogenes* to ultrasonic waves under pressure at sublethal (manosonication) and lethal (manothermosonication) tempera-
tures[J]. *Food Microbiology*, 1999, 16: 139-148.
- [45] Hanieh S, Niels H, Nonboe K U, et al. Combined steam and ultrasound treatment of broilers at slaughter: A promising intervention to significantly reduce numbers of naturally occurring campylobacters on carcasses[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2014, 176(4): 23-28.
- [46] Morild R K, Christiansen P S, Anders H, et al. Inactivation of pathogens on pork by steam-ultrasound treatment[J]. *Journal of Food Protection*, 2011, 74(5): 769-775.
- [47] Smith D P. Effect of ultrasonic marination on broiler breast meat quality and *Salmonella* contamination[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2011, 10(10): 757-759.
- [48] Siró I, Vén C, Balla C, et al. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(2): 353-362.
- [49] Stadnik J. Influence of sonification on the oxidative stability of beef [J]. *Roczniki Instytutu Przemysłu Miesnegoi Tłuszczowego*, 2009, 47(1): 63-68.
- [50] Barbieri G, Rivaldi P. The behaviour of the protein complex throughout the technological process in the production of cooked cold meats[J]. *Meat Science*, 2008, 80(4): 1 132-1 137.
- [51] Reza Kasaii M. Input power-mechanism relationship for ultrasonic irradiation: Food and polymer applications[J]. *Natural Science*, 2013, 5(8B): 14-22.
- [52] Mañas P, Pagán R. Microbial inactivation by new technologies of food preservation [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(6): 1 387-1 399.
- [53] Hao Feng, Yang Wei-qing, Hielscher T. Power ultrasound[J]. *Food Science and Technology International*, 2008, 14(5): 433-436.
- [54] Arzeni C, Martinez K, Zema P, et al. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(3): 463-472.
- [55] Zhang Wang-gang, Xiao Shan, Ahn Dong-u. Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(11): 1 191-1 201.
- [56] Ashokkumar M, Sunartio D, Kentish S, et al. Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2008, 9: 155-160.

(上接第 231 页)

- [27] 郑新. 雷达发射机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [28] Ok S B, Ryoo H J, Jang S R, et al. Design of a high-efficiency 40-kV, 150-A, 3-kHz solid-state pulsed power modulator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2 569-2 577.
- [29] 甘孔银, 汤宝寅, 王浪平, 等. 10 kV 绝缘栅双极型晶体管固体开关的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(10): 1 033-1 036.
- [30] 闫克平, 邓官全, 刘振, 等. 基于传输线变压器耦合多开关驱动变阻线的脉冲功率系统: 中国, 201110072045.6[P]. 2011-03-24.
- [31] 杨景红, 郑新, 钱锰. 加法器结构的大功率固态脉冲调制器的研究[J]. *现代雷达*, 2009, 31(4): 80-83.
- [32] 袁同山. 医用加速器高精度功率源的关键技术[J]. *工业技术创新*, 2014(4): 436-439.
- [33] 魏智. 发射机高压脉冲调制器的设计与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [34] 江婷婷. 高压脉冲电场杀菌装备中脉冲升压型高压脉冲发生器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 74.