

# 超声波技术在中央厨房食品加工中的应用研究进展

张兆丽<sup>1,2</sup>, 曹静<sup>1</sup>, 孟祥忍<sup>1,2</sup>, 王洋<sup>1,2\*</sup>

(1. 扬州大学旅游烹饪学院, 食品科学与工程学院, 江苏扬州 225127)

(2. 江苏省淮扬菜工程中心, 江苏扬州 225127)

**摘要:** 中央厨房是餐饮和食品行业发展的必然趋势,但在中央厨房集中采购、加工、储运环节过程中,传统加工方式不能满足中央厨房工业化运作。因此,需要新的高效处理技术来提高中央厨房的运营效率和食品安全控制。超声波技术是一种非热物理加工技术,不仅可以对原辅料及产品进行无损检测,还可以实现加工过程的精确控制和更高层次的自动化。该综述概述了超声波技术的机理,系统地阐述了超声波技术在中央厨房的原辅料和厨房用具的清洗、冷冻和腌制等加工操作的应用、产品杀菌、产品储运以及加工过程及产品进行无损检测。通过文献综述发现,超声波技术在中央厨房加工过程中非常具有应用价值,可以有效解决中央厨房在低清洁效率、高营养损失、高能耗、产品保质期短和自动化运行带来的挑战等问题。

**关键词:** 超声波技术; 中央厨房; 食品; 加工; 应用

文章编号: 1673-9078(2023)11-333-341

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.11.1478

## Applications and Research Progress of Ultrasonic Technology for Food Processing in Central Kitchen

ZHANG Zhaoli<sup>1,2</sup>, CAO Jing<sup>1</sup>, MENG Xiangren<sup>1,2</sup>, WANG Yang<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Tourism and Cooking, College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China) (2.Huaiyang Cuisine Engineering Center, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** The Central Kitchen is an inevitable trend in the development of catering and food industries. However, in the process of centralized procurement, processing, storage and transportation in the Central Kitchen system, traditional processing methods cannot satisfy the industrialized operation of the Central Kitchen system. Therefore, new efficient processing technologies are needed to improve the operational efficiency of the Central Kitchen and food safety control. Ultrasonic technology is a non-thermal physical processing technology, which can allow not only non-destructive detection of raw and auxiliary materials and products, but also precise control and higher degree of automation for processing. The paper summarizes the mechanism of ultrasonic technology, and systematically reviews the application of ultrasonic technology in central kitchen processing operations such as cleaning, freezing and/or marinating of raw and auxiliary materials and kitchen utensils, product sterilization, product storage and transportation, and non-destructive detection for processing and products. Through literature review, it is found that ultrasonic technology is very valuable for application in central kitchen processing, and can effectively solve problems encountered in the Central Kitchen system such as low cleaning efficiency, high nutrition loss, high energy consumption, short product shelf life and challenges related to automatic operation.

**Key words:** ultrasonic technology; central kitchen; foods; progressing; application

引文格式:

张兆丽,曹静,孟祥忍,等.超声波技术在中央厨房食品加工中的应用研究进展[J].现代食品科技,2023,39(11):333-341

ZHANG Zhaoli, CAO Jing, MENG Xiangren, et al. Applications and research progress of ultrasonic technology for food processing in central kitchen [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 333-341

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32102134); 扬州大学高层次人才科研启动基金项目 (137012132); 扬州大学大学生科创基金项目 (X20210904)

作者简介: 张兆丽 (1984-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品科学与烹饪科学, E-mail: zhaoli@yzu.edu.cn

通讯作者: 王洋 (1985-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品科学与食品装备开发, E-mail: chinawangy@yzu.edu.cn.

中央厨房起源于美国、日本和其他发达国家,在餐饮连锁店的标准化方面发挥着重要作用。中央厨房,是指统一规模采购原料、标准化加工制作、统一冷链配送的集成式厨房模式。中央厨房实现了集团化采购、标准化操作、集约化生产、工业化配送、专业化运营和科学化管理的发展特征。与传统餐饮和食品加工相比,中央厨房通过集中采购、统一制备和加工等标准流程,可以严格地对产品进行食品安全控制,确保产品的质量与安全。同时,中央厨房还具有生产效率较高、资源综合利用率高及餐厨废弃物集中处置等优势。

中央厨房加工的新鲜食品主要包括水果和蔬菜、肉类、水产品、食用菌等,这些食品原辅料加工之前需要进行适当的预处理,主要包括清洗、酶灭活和消毒、包装和涂层等。目前中小型食品加工公司在对新鲜食品进行预处理时仍然面临一些问题,如清洁效率低、耗水量大、加工自动化能力低(如肉类和新鲜农产品切配、加工等工序)、加工过程中食品营养损失高、能耗高、食品安全性差等。这些问题给正在发展的中央厨房产业带来了无形压力。随着中央厨房在餐饮行业“如火如荼”的发展,超声波技术在中央厨房产业中的应用正引起研究者广泛关注。

超声波技术是一种非热物理加工技术,在介质中机械振动产生的一种频率大于 20 kHz 的声波<sup>[1]</sup>。目前,超声波技术被广泛应用于食品、医药、化工等领域。超声波产生的空化、机械、化学和生物效应对食品加工过程产生一定的影响,例如能够提高传质传热效率、减少加工时间、降低加工过程中试剂用量、增加产量、提高食品安全性、保留食品营养等优势<sup>[2]</sup>。研究人员发现利用超声波清洗技术不仅可以明显减少果蔬表面的致病微生物,还可以有效去除表面黏附的污染物<sup>[3,4]</sup>。研究发现利用超声波技术处理果蔬原材料,超声波对多种致病菌微生物具有较高的灭活效率<sup>[5,6]</sup>。研究人员利用超声波技术强化酶对餐厨垃圾进行水解,发现超声波预处理可以显著减小复杂餐厨废弃物的粒度,进行高效酶解,有效地将食物餐厨垃圾转化为增值产品<sup>[7]</sup>。因此,超声波技术可以应用于中央厨房产品加工的各个环节,并能保持食品品质,应用前景广阔。目前已有较多关于超声波技术改善食品品质方面的研究。因此,本文将重点介绍中央厨房和超声波技术的概念和作用机理,综述超声波技术在中央厨房食品产业中的应用进展,可以为中央厨房产品标准化、产业化和工业化生产提供有价值的参考。

## 1 中央厨房

### 1.1 中央厨房概念

中央厨房称为餐饮配送中心,主要为酒店、学校、航空公司、工厂和大型超市等消费群体提供产品。中央厨房主要任务是将原材料制备和加工成半成品或最终产品,并以冷链或热链的形式交付给每个销售端,然后销售端进行二次加热和销售组合,分销给客户。例如,生鲜食品原材料可以制备成各种各样的产品-即食食品,如熟肉、熟沙拉和烟熏/腌制海鲜<sup>[8]</sup>。连锁餐饮业中央厨房的建立和发展在日本、美国等发达国家已具有几十年的历史,并具有较成熟的运营模式。

### 1.2 中央厨房运作

由于新冠疫情的影响,餐饮行业遭受了巨大的冲击,但同时也加快了餐饮行业朝向零售化、自动化、数字化等趋势发展,中央厨房行业的发展要适应这种趋势,尤其是“中央厨房+无接触配送”模式。中央厨房是在疫情防控常态形势下保障餐饮供应的有效方式,重点餐饮企业积极开展自行配送或与线上平台合作的方式,探索“云餐厅”经营模式,开展“无接触式”统一配送服务,为消费者配送免洗蔬菜、肉类、面点等餐饮成品及半成品。而在国内,中央厨房发展现状还停留在半机械化、大量人工介入的流水线,因此急需引入先进的科学技术来加强和规范中央厨房的运作与管理,达到标准化、工业化、产业化生产模式。因此,中央厨房产业需要进一步构建全面覆盖的加工规模化、品质多元化、质量标准化、服务规范化、配送智能化的餐饮供应链体系<sup>[9]</sup>。

## 2 超声波技术

超声波通过换能器将声能转化为机械能,使弹性介质产生振动,产生物理化学效应。根据超声波频率和强度以及实际应用,超声波可以分为两类,一种是高强度低频超声波(功率强度 $>1\text{ W/cm}^2$ 、频率 20~100 kHz),其具有很高的能量,可以使介质内部产生快速移动的微气泡流,经过一系列变化最终气泡剧烈破裂,从而改变食品原料的物理化学性质,影响食品蛋白质等大分子的改性。另一种是低强度高频超声波(功率强度 $<1\text{ W/cm}^2$ 、频率 100~1 MHz),其蕴含的能量低,常用于食品成分表征、食品结构改善等,不会对产品造成任何损失,在测定过程中也不会改变食品物料的物理性质或化学性质。

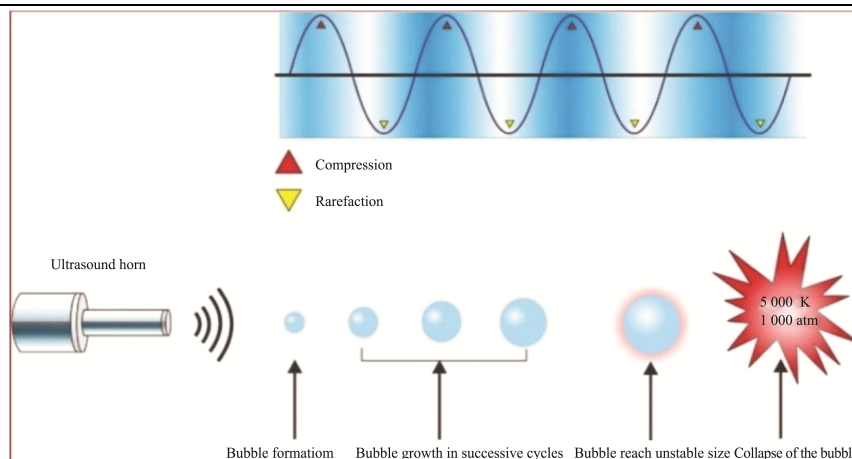


图1 超声波空化效应示意图

Fig.1 Schematic illustration of ultrasonic generation of cavitation

超声波技术作为一种非热物理加工技术，具有许多优势，如具有能耗低、营养成分破坏小、可控性强、效率高等特点，已被广泛应用于食品加工领域。超声波的物理化学效应主要归结为超声波的空化效应、物理效应和热效应、化学效应。超声波作用机理主要与其产生的空化效应有关（空化效应的产生如图1<sup>[16]</sup>），根据空化气泡是否破裂，空化效应可分为稳定空化和瞬态空化<sup>[10]</sup>。食品结构修饰的作用主要归因于超声波的瞬时空化，因为空化气泡在高声压下会迅速膨胀，并在达到共振临界点时发生坍塌，在局部区域会产生高达5 000 K的瞬时高温和高达30 MPa的高压，然后引发一系列物理、化学效应以及热效应<sup>[11-13]</sup>。声空化效应引起的物理效应主要包括强力的剪切力、冲击波、高速微射流、湍流和剧烈声流<sup>[14]</sup>，这些声流、冲击波、微射流引起流体湍动，增加混合与传质效应，同时导致食品生物大分子折叠和展开，对食品结构产生显著影响<sup>[15]</sup>。

### 3 超声波技术在中央厨房中的应用

#### 3.1 超声波清洗技术

##### 3.1.1 超声波技术在果蔬清洗上的应用

新鲜食材预处理的第一步是清洁和去污，主要污染源是土壤、粪便、其他异物等杂质。清洁不仅需要清除这些杂质，还应该适当地消除新鲜食材表面的微生物<sup>[17]</sup>。因此，有效清洁和去污是实现中央厨房产品生产的一项基本工序。随着微生物数量的减少，成品或半成品可以延长保质期并保持良好的营养品质<sup>[18,19]</sup>。传统清洗、剥皮等方法难以达到预期效果，如普通水洗只能洗去果蔬原料表面灰尘等易去除的污染物，超声场中空化气泡的产生作用可以达到清洁果蔬表面的目的。超声波清洗的作用机理是基于清洁溶

液中超声空化气泡的形成以及破裂。空化气泡的崩溃导致局部产生高温高压、较强的剪切力和高活性自由基（H·和·OH），有效地去除污染物、灭活微生物和降解食品表面农药。一般用于食品清洁的超声波通常是高强度低频超声波<sup>[20,21]</sup>，超声波清洗效率与超声波频率、超声功率和超声作用时间有关。超声波清洗技术对生物活性成分（如水果和蔬菜中的酚类化合物和花青素）的影响很小<sup>[21-26]</sup>。Alenyorege等<sup>[3]</sup>研究了不同超声频率模式（扫描频率、固定频率和频率组合）对大白菜表面大肠杆菌及其理化质量变化的影响，与普通水洗相比，固定超声频率为40 kHz时，超声波清洗可以更有效地将大肠杆菌数量减少3 log CFU/g，保留大约20%的酚类化合物，并且不会影响产品外观。Cao等<sup>[17]</sup>研究了不同频率（0、25、28、40、59 kHz）超声波清洗草莓10 min（20 °C），将处理过的样品在5 °C下储存8 d，结果表明，当超声频率为40 kHz时处理是最好的，草莓表面的微生物数量可以显著减少，同时保持维生素C和可溶性固体含量。RyeolPark等<sup>[4]</sup>对超声场中气泡产生和气泡表面清洗进行了研究，在不同污染条件下对污染物粘附强度和表面润湿性的清洁试验表明，超声场中产生的蒸汽和气泡分别能更有效地去除强粘附和弱粘附的污染物。

研究发现超声波和臭氧联合对食物具有清洁作用。超声波有利于破坏致病微生物的细胞膜，使臭氧更充分地分散和溶解在细胞中，从而氧化并加速微生物的死亡。超声空化也有利于增强臭氧分解，产生大量自由基，从而增强有机物质的分解，同时提高臭氧的溶解速率。超声波使臭氧在更短的时间内达到清洁溶液中的较高浓度，这有利于农药残留的净化和降解<sup>[27-29]</sup>。Siddique等<sup>[30]</sup>研究发现，与简单自来水洗涤相比，采用超声波臭氧氧化处理受试果蔬的累计化学残留量从9.006 μg/g和1.921 μg/g下降至3.214 μg/g

(64.3%)和1.064  $\mu\text{g/g}$  (44.6%)，超声波臭氧化处理能有效地显著降低蔬菜和水果中的农药残留。Fan等<sup>[31]</sup>使用超声波和臭氧联合清洗莴苣，研究发现超声波和臭氧处理能够有效地去除莴苣表面的有机磷农药残留（甲胺磷和敌敌畏）。由于臭氧具有许多优点（包括具有更宽的去污范围和更高的去污效率，并且无残留物且成本更低），因此臭氧与超声波协同处理可以适用于中央厨房的大规模清洁。Maryam等<sup>[32]</sup>研究超声波辅助低强度电流处理对番茄样品中农药（卡坦、噻虫嗪和甲霜灵）残留量的影响，结果表明当超声频率和电流组合为40 kHz+1 400 mA、24 kHz+800 mA和24 kHz+1 400 mA时，卡坦、噻虫嗪和甲霜灵的残留量分别减少了94.24%、69.80%和95.06%，可以有效地去除蔬菜中的农药残留。Azam等<sup>[33]</sup>研究多频率多模式超声波处理（20、40、60 kHz）对新鲜莴苣表面阿维菌素（Abamectin b1, AB）、甲氧基甲氨蝶呤（Alphamethrin, AL）和阿维菌汀苯甲酸酯（Emamectin Benzoate, EB）清除效果，结果表明超声波三频率序列模式是清除农药残留的最有效方法，当超声处理8 min后，分别去除92.31%、89.36%和95.25%的AB、AL和EB，对莴苣的生理和营养特性并没有影响。因此，超声波技术是一种很有前景的清洁技术，不仅在一定程度上可以去除新鲜果蔬农药残留，而且不会损害产品的完整性和质量。

### 3.1.2 超声波技术在厨房用具上的应用

超声波压制在液体介质振动频率非常高的冲击波让液体分子产生正负交变，当声强达到一定程度时，快速生成微小的空化气泡并瞬时闭合，产生强大的微爆炸和冲击波破坏清洗物表面物质，达到充分清洗效果。虽然每一个空化气泡的作用很小，但每秒钟就会产生数亿空化气泡共同作用会具有良好的清洗效果，任何死角都能被清洗到。

在厨房中，由于烹制食品会产生很多油烟、油尾气等污染物，不仅造成厨房用具污染问题，同时影响到厨房的整洁效果，而且对人体产生很大危害，因此考虑将超声波清洗技术应用到厨房用具的清洁方面。高强度低频超声波通常可以用于清洗中央厨房生产设备和管道，如油烟机和碗筷等，在工作过程中连续式操作，不能产生中断。李雅莉等<sup>[34]</sup>研究表明高强度超声波处理厨房油污的清洗效率可达98%以上，蒸汽清洗效率低于90%，而手工清洗和有机溶剂清洗效率低至60%~70%。马兰<sup>[35]</sup>研究表明，超声波技术清洁油污具有高效节能的特点，在研究超声振动清洗原理和超声空化清洗原理的基础上，通过模块化设计超声清洗刷来实现“一机多功能”的理念。苟仲武<sup>[36]</sup>对节能

超声波洗碗机研究表明，装置结构简单，可以充分利用废热液、回收热水、空气源热水、太阳能热水作为洗碗机的热源，并且通过超声波震荡作用促进厨具上的油污乳化、食物残渣等分解脱落，其成本低，能耗低、清洗效果好，对清洗过程中餐具摆放无特殊要求，省时省力。因此，超声波技术应用于厨房用具的清洗方面具有很大的发展潜力。

### 3.2 超声波杀菌技术

产品杀菌是中央厨房产品生产加工过程中必需的工序之一。超声波具有的杀菌能力主要是由其空化作用所引起的，当高强度超声波在液体中传播时会产生纵波，因此产生交替压缩和膨胀的区域，这些压力改变的区域容易引起空穴现象，并形成微小气泡核，微小气泡核在绝热收缩以及崩溃的瞬间，内部会呈现超高温和超高压，从而杀死液体中的某些细菌、病毒等，从而达到杀菌的效果。超声波灭菌技术是一种极具前途的非热灭菌技术。Lin等<sup>[5]</sup>研究超声波杀菌技术对蔬菜汁中大肠杆菌O157:H7的灭活率影响，结果表明超声波处理对大肠杆菌O157:H7表现出良好的抗菌能力，当超声波处理条件为功率100 W，处理时间为10 min，功率密度为50 W/cm<sup>2</sup>时，对大肠杆菌O157:H7的抑菌率为68.91%。Liao等<sup>[37]</sup>研究超声波功率（200~400 W）对枯草芽孢杆菌灭活率的影响，当超声功率为400 W时处理的样品中枯草芽孢杆菌的数量减少了5 log CFU/g。

相较于传统技术，超声波杀菌技术具有更多优势。张琪等<sup>[38]</sup>通过对加热杀菌、微波杀菌、超声波杀菌3种杀菌技术对比分析后得到，超声波杀菌15 min时沙棘果浆杀菌效果最佳，维生素C保存率最高，达到92%，且质构特性和感官评定检测的结果也优于其他方式。Dai等<sup>[39]</sup>研究表明与传统的热加工工艺相比，超声波杀菌技术可以降低能耗，保持营养成分，对整体食品质量的危害较小。Royintarat等<sup>[40]</sup>研究表明，超声波辅助等离子体活化水杀菌效果较好，结果表明此方法可以使厚度为4 mm的鸡肉中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的数量分别减少1.5 log CFU/g和0.9 log CFU/g，有效地达到杀菌的目的。因此，相较于传统的杀菌技术，如巴氏杀菌、加热杀菌等技术，超声波杀菌效果更佳，对食物营养的保存率更高，非常适用于中央厨房中预制产品的杀菌领域。

### 3.3 超声波技术在冷冻加工中的应用

在食品冷冻过程中，结晶很大程度上影响了食品冷冻品质，大小分布不均的冰晶会损害食品结构，降



低食品品质。而超声波辅助冷冻技术具有控制结晶作用, 通过利用超声波定向效应, 利用高能超声波控制食物内部结晶速度和过程, 在一定程度上可以促进相关物质形成结晶, 尤其对于一些处于临界核状态的食品, 超声波处理能够加速形成其核心。同时, 通过控制结晶的速度, 能够得到均匀细致的结晶体, 保障食品内部结晶不被外界所污染, 具有很高的商业价值。目前, 该技术在一些果蔬类、肉类储存中都有较为广泛应用。Cheng 等<sup>[41]</sup>研究发现超声处理草莓后, 能够显著地缩短草莓的冻结时间。Zhang 等<sup>[42]</sup>在温度达到 0 °C 时以 180 W 的超声波处理猪背最长肌 8 min, 超声工作、超声间歇时间分别为 30 min、30 s, 研究表明超声波辅助冷冻技术明显缩小了肌肉中冰晶尺寸, 使冰晶分布更加均匀, 降低了肌肉的解冻损失, 并改善了肉的冷冻品质。Sun 等<sup>[43]</sup>研究发现超声辅助浸泡冷冻在不同超声功率水平下提高了鲤鱼冷冻速度, 当超声功率为 175 W 时, 超声处理能够显著缩短鲤鱼的冷冻时间, 并改善了鱼肉质量。Shi 等<sup>[44]</sup>研究了不同超声功率密度对草鱼背部肌肉的冷冻速率及其物化性质的影响, 结果表明当超声功率密度  $\geq 0.38 \text{ W/cm}^2$  时, 可以显著缩短预冷阶段的时间和总冷冻时间, 保护肌原纤维蛋白结构, 减少冷冻和蒸煮损失。这些研究表明超声波技术不仅能缩短冷冻产品解冻所需要的时间, 还有助于抑制冷冻肉类产品冻藏过程中的受损和变质, 因此, 超声波解冻技术可以应用于中央厨房冷冻产品的高质量标准化生产。

### 3.4 超声波技术在腌制过程中的应用

腌制食品因其特殊的风味及口感深受大众的喜爱。传统腌制方法是使用食用盐或其他调味料涂抹在

食物表面, 放置一段时间, 使调味料和盐充分进入食物中, 已达到所需腌制状态。超声波技术作为新型非热物理加工技术, 能够在不损害肉及肉制品品质的情况下加速腌制过程, 在盐含量、食品感官品质等方面达到较好效果, 并引起了广泛关注。采用超声波 (20 kHz) 辅助烹饪可以有效促进盐的渗透, 减少烹饪损失, 提高五香牛肉的嫩度<sup>[45]</sup>。Siróa 等<sup>[46]</sup>将猪腰浸入氯化钠盐水中, 在 5 °C 下采用 3 种不同盐渍处理方法进行处理, 研究了超声波辅助腌制对猪腰的组织结构、蛋白质变性、结合水能力、持水能力、氯化钠扩散系数和肉类纹理剖面的影响, 结果表明超声波处理能够有效地提高了猪腰的保水能力和纹理性能。Contreras 等<sup>[47]</sup>探讨了超声波技术监测火腿腌制后的情况, 结果表明随着超声波功率的增加, 火腿重量呈现减少的趋势 (每千克 26.1 m/s), 这两个变量间具有良好的相关性 ( $r=0.95$ ), 超声波功率与盐含量和水分含量密切相关, 因此, 超声波不仅可以无损地监测火腿重量的总体变化, 还可以监测腌制后水分和盐含量的变化。Bao 等<sup>[48]</sup>采用不同功率的超声波技术辅助加工牦牛干, 结果表明, 超声波处理对肉的颜色、气味和味道产生负面影响, 但增加了肉的嫩度和整体可接受性, 显著增加了醇和醛的含量, 因此适当的超声功率有助于提高牦牛干的质量。Inguglia 等<sup>[49]</sup>研究了超声频率、超声时间对低钠禽肉进行超声腌制的影响, 与传统腌制技术相比, 超声波改变了膜通透性并促进了电解质离子的渗透和扩散, 显著地缩短腌料浸入肌肉组织所需要的时间。类似的研究结果还有很多<sup>[50-52]</sup>, 表明超声波不仅能有效缩短产品的腌制时间, 还能促进盐在这类产品中的均匀分布。超声波辅助腌制在肉制品中的相关研究如表 1。

表 1 超声波辅助腌制在肉制品中的相关研究

Table 1 Study on ultrasonic assisted curing in meat products

序号	肉种类	超声条件	主要实验结果	文献
1	猪肉	超声波频率: 90 kHz; 超声处理时间: 2 h	通过超声处理的样品, 食用品质和营养品质高于常规处理组	[53]
2	兔肉	超声波功率: 110 W	超声波辅助腌制提高了兔肉的腌制效果	[54]
3	猪肉	超声波频率: 40 kHz; 超声功率密度: $37.5 \text{ W/dm}^3$	高强度超声波有效地提高食盐的渗透速率	[55]
4	鸡肉	超声波频率: 20 kHz; 超声波功率: 300 W	超声辅助腌制提高鸡肉产品腌制速率并提高了嫩度和持水性	[56]
5	鸡肉	超声波功率: 100 W; 超声温度: 45 °C	超声波辅助腌制能显著缩短腌制时间, 提高食盐的渗透速率	[57]

### 3.5 超声波技术结合气调包装的应用

在中央厨房中, 食物的包装是一项非常重要的工序。超声波技术可以结合气调包装技术对食物进行有效的长期保藏。张福平等<sup>[58]</sup>采用超声波结合气调包装技术处理采后番石榴, 结果表明, 超声波结合气调包装不仅可以减缓番石榴果实营养品质的下降和水分的

散失, 还可以有效地抑制番石榴果实的呼吸强度、质膜相对透性和过氧化物酶活性的下降, 减缓果实细胞衰老, 有利于果实储藏和原有风味保存。这项技术不仅可以减少百香果维生素 C 的损失率, 还能抑制可溶性蛋白质含量的减少, 在贮藏后期能保持较高的酸含量, 有效延缓果实成熟速度。Elvira 等<sup>[59]</sup>研究了包装内的空气侵入情况及在不同温度下超声波参数的变

化, 结果表明超声波技术可以作为传统破坏性技术的新替代技术应用在食品产品包装工序。Zhang 等<sup>[60]</sup>研究了超声波结合气调包装对小白菜贮藏品质的影响, 结果表明超声波(30 kHz)处理不同时间(5、10 和 15 min)结合气调技术处理后的小白菜, 可以延缓小白菜在贮藏期间菌落总数的增加, 并有效地减缓了总可溶性固形物的减少和抗坏血酸和叶绿素的损失。Zhang 等<sup>[61]</sup>利用超声波辅助静电纺丝法制备食品包装材料, 来提高食品的抗菌效果和提供紫外线屏障。因此, 通过超声波技术结合其他包装技术可以对食物进行较长时间的保藏, 提高了食物的营养价值与商品价值。

### 3.6 超声波技术在食品加工过程中的检测应用

#### 3.6.1 超声波技术检测果蔬产品

水果和蔬菜富含丰富的维生素、矿物质等营养素, 是人们每天重要的膳食摄入。采摘后新鲜果蔬会产生失水、微生物感染、机械损伤等问题, 在储存期间易遭受损失, 因此对新鲜果蔬进行检测是十分重要的<sup>[21]</sup>。超声波技术能够检测果蔬类产品的成熟度以及保鲜度, 但是果蔬类食品在贮存或者成熟过程中会出现内部结构、水分含量、糖含量等变化, 这些变化均会影响超声波技术的检测结果。由于果蔬组织内部存在气体, 超声波检测效果会明显衰减, 进行数据分析时也比较复杂, 但只要操作得当, 可以采用超声波技术进行检测果蔬类产品。与传统检测技术相比, 超声波检测技术存在着灵敏度高, 速度快, 成本低的优势。罗贤清等<sup>[62]</sup>发现超声波技术在食品安全监测中起到了很重要的作用, 在检测果蔬时, 可以根据其水分、糖分检测其成熟度。Kathiravan 等<sup>[63]</sup>研究表明采用超声波辅助检测可以直接检测果蔬中的抗坏血酸, 简单方便快捷。因此, 超声波技术可以运用于果蔬产品的无损检测和内部品质检测。

#### 3.6.2 超声波技术检测乳制品

在乳制品中, 由于乳状液体水相密度大于油相密度, 因此乳状液体会出现分层现象, 消费者认为这种现象是乳制品变质所产生的, 但此现象并不能确定乳制品已经变质, 是否已经变质还需要对乳制品油相含量以及分布状况进行检测。相较于传统检测方法, 超声波技术对于油相检测更加精确、简便, 更加适用于大批量样品分析<sup>[62]</sup>。同时, 超声波技术可降低牛奶脂肪球直径, 可以促进油脂和水结合, 减少分层。相关人员研究了超声波对复合乳状液和生乳脂肪稳定性和奶油化的影响, 结果表明超声波可以预处理乳状液中的脂肪颗粒, 以使其成为奶油<sup>[64]</sup>。

Vodret 等<sup>[65]</sup>测定超声波通过乳酪的时间检测乳酪

中的裂缝和异物, 结果表明在不受温度影响的情况下, 超声波技术可以正确检出 90%乳酪中的裂缝和异物。孙选等<sup>[66]</sup>将超声波技术结合牛乳检测方法具有高精度、高稳定性、低成本等优点, 适合于实验室, 乳品加工行业等进行操作。Quacha 等<sup>[67]</sup>通过研究加入牛奶中的三种菌种, 利用超声波速度和振幅的变化快速检测这些微生物的生长特征。因此, 超声波检测技术因非侵入式、对样品无破坏、快速等优势, 可以在乳制品行业中被广泛应用。

#### 3.6.3 超声波技术检测肉制品

肉类食品的消费在我国市场占较大的比例, 居民密切关注肉类食品的健康安全问题。超声波技术可以实现对禽类的肉食部分进行安全的指标检测, 但由于超声波频率较高, 超出了肉类食品的承受范围, 破坏其肌原纤维蛋白等营养成分, 降低肉类食品的品质, 但通过合理控制超声波频率的大小, 完全可以实现对禽类的肉食部分进行检测。Sara 等<sup>[68]</sup>研究高压二氧化碳和高功率超声联合处理下干腌火腿单核细胞增生性李斯特菌灭活的可行性, 发现 30 kHz、10~12 W、2 min 超声波协同高压二氧化碳处理下, 干腌火腿的单核细胞增生性李斯特菌数量显著减少。Correia 等<sup>[69]</sup>利用超声波技术检测去骨家禽产品中的骨碎片, 为食品安全问题提供了一种非侵入性、经济高效的解决方案。Corona 等<sup>[70]</sup>研究表明, 利用超声波技术检测高压处理或冷藏对真空包装干腌火腿组织结构特性的影响, 研究表明在火腿包装中超声波速度与火腿硬度有关, 发现超声无损检测技术可以作为一种有效可行的方法检测火腿的组织结构变化。因此, 采用超声波检测技术可以判断肉类制品的品质。

## 4 结语和展望

超声波技术在中央厨房产业中的应用是食品产业的创新。本文综述了超声波技术在中央厨房产业中的应用, 此技术不仅应用在产品清洗、产品杀菌、产品检测等环节, 还能最大限度地保持产品原有的营养成分和品质, 并减少人力资源投入, 在一定程度上有效解决中央厨房存在的低清洁效率、高营养损失、产品保质期短、自动化运行等问题。因此, 超声波技术在中央厨房产业中具有良好的应用前景。尽管超声波技术现已被逐渐接受和广泛应用, 但它还存在一些问题需要给予更多研究和关注。例如, 超声波设备在工作时难免会发出比较大的噪音, 对操作人员的耳朵造成一定的损害; 超声波清洗装备只适用于部分食物的清洗, 较软的食材采用超声波清洗会吸收波而影响清洗效果。此外, 超声波在传播过程中会因受到外界因素

的影响, 出现结果偏差, 因此在超声波技术实际应用中, 做好精细化管理, 以更好地发挥超声波技术的应用价值。同时, 需要进一步考虑将超声波技术结合其他技术共同运用到中央厨房产业中, 实现中央厨房产业的自动化、智能化、数字化和标准化。

## 参考文献

- [1] 屠耀元. 超声检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [2] Chen F, Zhang M, Fan K, et al. Non-thermal technology and heating technology for fresh food cooking in the central kitchen processing: A review [J]. Food Reviews International, 2020, 38(4): 608-627.
- [3] Alenyorege E A, Ma H I, Ayim I. Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in fresh-cut Chinese cabbage using sweeping frequency ultrasound: Inactivation kinetics of inoculated [J]. Journal of Food Safety, 2019, 39(6): 12696.
- [4] Park R, Choi M, Park E H, et al. Comparing cleaning effects of gas and vapor bubbles in ultrasonic fields [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105618.
- [5] Lin L, Wang X, Li C, et al. Inactivation mechanism of *E. coli* O157:H7 under ultrasonic sterilization [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 59: 104751.
- [6] Zhu D, Zhang Y, Kou C, et al. Ultrasonic and other sterilization methods on nutrition and flavor of cloudy apple juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022: 105975.
- [7] Li X, Mettu S, Martin G J, et al. Ultrasonic pretreatment of food waste to accelerate enzymatic hydrolysis for glucose production [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 53: 77-82.
- [8] Stratakos A C, Koidis A. Suitability, efficiency and microbiological safety of novel physical technologies for the processing of ready-to-eat meals, meats and pumpable products [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(6): 1283-1302.
- [9] 马如娟. 中央厨房: 防疫保供“主力军” 食品安全“守护员” [N]. 甘肃经济日报, 2021, 11, 23(001).
- [10] Xu B, Azam S R, Feng M, et al. Application of multi-frequency power ultrasound in selected food processing using large-scale reactors: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 81: 105855.
- [11] Rahman M M, Lamsal B P. Ultrasound-assisted extraction and modification of plant-based proteins: Impact on physicochemical, functional, and nutritional properties [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 1457-1480.
- [12] Zhou L, Zhang J, Xing L, et al. Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 493-512.
- [13] Flores E M, Cravotto G, Bizzi C A, et al. Ultrasound-assisted biomass valorization to industrial interesting products: state-of-the-art, perspectives and challenges [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 72: 105455.
- [14] Ashokkumar M. The characterization of acoustic cavitation bubbles - An overview [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 864-872.
- [15] Ashokkumar M. Applications of ultrasound in food and bioprocessing: Applications of ultrasound in food and bioprocessing [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 25: 17-23.
- [16] Jambak A R, Mason T J, Lelas V, et al. Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86(2): 281-287.
- [17] Turantaş F, Ersus S B, Sömek A, et al. Decontamination effect of electrolyzed water washing on fruits and vegetables [J]. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2018, 7(4): 337-342.
- [18] Galanakis C M. Sustainable Food Systems from Agriculture to Industry [M]. Academic Press, 2018.
- [19] Mukhopadhyay S, Ramaswamy R. Application of emerging technologies to control Salmonella in foods: A review [J]. Food Research International, 2012, 45(2): 666-677.
- [20] Zhao Y M, Alba M D, Sun D W, et al. Principles and recent applications of novel non-thermal processing technologies for the fish industry - A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 59(5): 728-742.
- [21] Cheng X, Zhang M, Adhikari B, et al. Effect of power ultrasound and pulsed vacuum treatments on the dehydration kinetics, distribution, and status of water in osmotically dehydrated strawberry: A combined NMR and DSC study [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(10): 2782-2792.
- [22] Awad T S, Moharram H A, Shaltout O E, et al. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review [J]. Food Research International, 2012, 48(2): 410-427.
- [23] Lagnika C, Zhang M, Mothibe K J. Effects of ultrasound and high pressure argon on physico-chemical properties of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 82: 87-94.

- [24] Golmohamadi A, Möller G, Powers J, et al. Effect of ultrasound frequency on antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin content of red raspberry puree [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(5): 1316-1323.
- [25] Cao S, Hu Z, Pang B, et al. Effect of ultrasound treatment on fruit decay and quality maintenance in strawberry after harvest [J]. *Food Control*, 2010, 21(4): 529-532.
- [26] Turantaş F, Kılıç G B, Kılıç B. Ultrasound in the meat industry: General applications and decontamination efficiency [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 198: 59-69.
- [27] Jiang Q, Zhang M, Xu B. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 69: 105261.
- [28] Lesko T, Colussi A J, Hoffmann M R. Sonochemical decomposition of phenol: Evidence for a synergistic effect of ozone and ultrasound for the elimination of total organic carbon from water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(21): 6818-6823.
- [29] Xu G, Chen S, Shi J, et al. Combination treatment of ultrasound and ozone for improving solubilization and anaerobic biodegradability of waste activated sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 180(1): 340-346.
- [30] Siddique Z, Malik A U, Asi M R, et al. Impact of sonolytic ozonation (O<sub>3</sub>/US) on degradation of pesticide residues in fresh vegetables and fruits [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 79: 105799.
- [31] Fan X D, Zhang W L, Xiao H Y, et al. Effects of ultrasound combined with ozone on the degradation of organophosphorus pesticide residues on lettuce [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(57): 45622-45630.
- [32] Cengiz M F, Başlar M, Basançebe O, et al. Reduction of pesticide residues from tomatoes by low intensity electrical current and ultrasound applications [J]. *Food Chemistry*, 2018, 267: 60-66.
- [33] Azam S M R, Ma H, Xu B, et al. Multi-frequency multi-mode ultrasound treatment for removing pesticides from lettuce (*Lactuca sativa* L.) and effects on product quality [J]. *LWT*, 2021, 143: 111147.
- [34] 李雅莉. 超声波清洗的原理和实际应用[J]. *清洗世界*, 2006, 7: 31-35.
- [35] 马兰. 基于超声波技术的厨房表面油污清洁工具设计研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [36] 苟仲武. 热水源节能超声波洗碗机及用该装置清洗厨房用具的方法: CN102727149B[P]. 2014-08-13.
- [37] Liao X, Li J, Suo Y, et al. Multiple action sites of ultrasound on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2018, 7(1): 102-109.
- [38] 张琪, 朱丹, 牛广财, 等. 不同杀菌方式对沙棘果浆品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 166-172.
- [39] Dai J, Bai M, Li C, et al. Advances in the mechanism of different antibacterial strategies based on ultrasound technique for controlling bacterial contamination in food industry [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 211-222.
- [40] T Royintarat, E H Choi, P Seesuriyachan, et al. Ultrasound-assisted plasma-activated water for bacterial inactivation in poultry industry [C]// 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2019: 1028-1032.
- [41] Cheng X, Zhang M, Adhikari B, et al. Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 44: 49-55.
- [42] Zhang M, Haili N, Chen Q, et al. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles [J]. *Meat Science*, 2018, 136: 1-8.
- [43] Sun Q, Zhao 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.
- [44] Shi Z, Zhong S, Yan W, et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *LWT*, 2019, 111: 301-308.
- [45] Zou Y, Kang D, 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.
- [46] 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.
- [47] Contreras M, Benedito J, Garcia-Perez J V. Ultrasonic characterization of salt, moisture and texture modifications in dry-cured ham during post-salting [J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108356.
- [48] Bao G, Niu J, Li S, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the quality, nutrients and volatile compounds of dry-cured yak meat [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105864.

- [49] Inguglia E S, Burgess C M, Kerry J P, et al. Ultrasound-assisted marination: role of frequencies and treatment time on the quality of sodium-reduced poultry meat [J]. *Foods*, 2019, 8(10): 473.
- [50] 李心悦,曹涓泉,徐静,等.超声波辅助腌制对猪肉糜食用品质及凝胶性能的影响[J].*肉类研究*,2022,36(8):21-28.
- [51] Contreras-Lopez G, Carnero-Hernandez A, Huerta-Jimenez M, et al. High-intensity ultrasound applied on cured pork: Sensory and physicochemical characteristics [J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(2): 786-795.
- [52] Zhang F, Zhao H, Cao C, et al. Application of temperature-controlled ultrasound treatment and its potential to reduce phosphate content in frankfurter-type sausages by 50% [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71: 105379.
- [53] 孟祥忍,刘宗振,吴鹏,等.不同腌制方式对扬州盐水鹅预制品品质的影响[J].*食品工业科技*,2023,44(9):104-110.
- [54] Gómez-Salazar J A, Ochoa-Montes D A, Cerón-García A, et al. Effect of acid marination assisted by power ultrasound on the quality of rabbit meat [J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 1-6.
- [55] 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.
- [56] Xiong G, Fu X, Pan D, et al. Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 60: 104808.
- [57] 权硕伟.超声波辅助腌制鸡小腿的技术研究[J].*五邑大学学报(自然科学版)*,2016,30(4):34-37,51.
- [58] 张福平,陈蔚辉,郑楚萍,等.超声波结合气调包装对番石榴贮藏品质与生理的影响[J].*南方农业学报*,2017,48(3):493-498.
- [59] Elvira L, Sampedro L, Matesanz J, et al. Non-invasive and non-destructive ultrasonic technique for the detection of microbial contamination in packed UHT milk [J]. *Food Research International*, 2005, 38(6): 631-638.
- [60] Zhang X, Zhang M, Devahastin S, et al. Effect of combined ultrasonication and modified atmosphere packaging on storage quality of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(9): 1573-1583.
- [61] Zhang R, Lan W, Ji T, et al. Development of polylactic acid/ZnO composite membranes prepared by ultrasonication and electrospinning for food packaging [J]. *LWT*, 2021, 135: 10072.
- [62] 罗贤清,陈建军,胡斌,等.超声波技术在食品安全检测中的新进展[J].*农机化研究*,2007,9:195-196,205.
- [63] Kathiravan S, Sundaram E, Paulraj B A, et al. Simple and selective optical biosensor using ultrasonicator synthesis of 5-((anthracen-9-ylmethylene) amino)-2,3-dihydrophthalazine-1,4-dione for direct detection of ascorbic acid in vegetables and fruits [J]. *Food Chemistry*, 2020, 332: 127150.
- [64] Juliano P, Kutter A, Cheng L J, et al. Enhanced creaming of milk fat globules in milk emulsions by the application of ultrasound and detection by means of optical methods [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(5): 963-973.
- [65] Vodret B, Milia M, Orani M G, et al. Detection of genetically modified organisms in food: comparison among three different DNA extraction methods [J]. *Veterinary Research Communications*, 2007, 31(S1): 385-388.
- [66] 孙选,李国平,艾长胜.超声波技术在牛乳成分检测中的应用[J].*济南大学学报(自然科学版)*,2007,2:108-111.
- [67] Ouacha E, Faiz B, Moudden A, et al. Non-destructive detection of air traces in the UHT milk packet by using ultrasonic waves [J]. *Physics Procedia*, 2015, 70: 406-410.
- [68] Sara S, Martina C, Giovanna F. High pressure carbon dioxide combined with high power ultrasound processing of dry cured ham spiked with *Listeria monocytogenes* [J]. *Food Research International*, 2014, 66: 264-273.
- [69] Correia L R, Mittal G S, Basir O A. Ultrasonic detection of bone fragment in mechanically deboned chicken breasts [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(1): 109-115.
- [70] Corona E, García-Pérez J V, Mulet A, et al. Ultrasonic assessment of textural changes in vacuum packaged sliced Iberian ham induced by high pressure treatment or cold storage [J]. *Meat Science*, 2013, 95(2): 389-395.