

# 肉制品新兴热加工技术研究进展

张彦纳<sup>1</sup>, 陈星<sup>1\*</sup>, 刘冬梅<sup>1</sup>, 王璐<sup>1</sup>, 李阿敏<sup>2</sup>, 陈东坡<sup>2</sup>, 周鹏<sup>1</sup>

(1. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 食品学院, 江苏无锡 214122)

(2. 杭州老板电器股份有限公司, 浙江杭州 311100)

**摘要:** 肉制品是我们日常饮食的重要组成部分, 其营养均衡, 味美鲜香, 含有蛋白质、脂肪和矿物质等。热处理是肉和肉制品的重要加工步骤, 然而, 传统热加工方法通常会对产品品质造成一些负面影响 (如破坏营养成分、产生异味和有害物质), 因此, 寻找可替代传统热加工的新方法在肉制品加工领域一直是研究热点。微波加热、射频加热、欧姆加热及红外加热等技术相比传统热加工具有独特优势, 也可组合使用, 为提高肉制品品质和适应消费者需求提供了有效路径。该综述简述了肉的结构与品质之间的关系, 解析了新兴热加工技术的基本原理, 讨论了其最新研究应用进展, 并对比了加工特点, 旨在为今后肉制品新兴热加工技术的发展提供理论支持。

**关键词:** 肉制品; 热加工; 原理; 应用; 加工特点

文章编号: 1673-9078(2024)08-374-382

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0751

## Research Progress of Meat Products Emerging Thermal Processing Technology

ZHANG Yanna<sup>1</sup>, CHEN Xing<sup>1\*</sup>, LIU Dongmei<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, LI Amin<sup>2</sup>, CHEN Dongpo<sup>2</sup>, ZHOU Peng<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Food Science and Resources, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China) (2.Hangzhou Robam Appliances Co. Ltd., Hangzhou 311100, China)

**Abstract:** Meat products are an important part of our daily diet. They are balanced in nutrition, delicious and flavorful, containing protein, fat and minerals. Thermal treatment is an important processing step for meat and meat products. However, traditional thermal processing methods usually have some negative effects on product quality (e.g. destroying the nutrients, producing unpleasant odor and harmful substances). Therefore, seeking new methods that can replace traditional thermal processing has been a research hotspot in the field of meat processing. Microwave heating, radio frequency heating, ohmic heating and infrared heating have unique advantages over traditional thermal processing, and can also be used in combination, to provide an effective way to improve meat quality and meet consumer demand. This review outlines the structure-quality relationship of meat products, analyzes the basic principles of the emerging thermal processing technologies, discusses the latest research and application progress, and compares the processing characteristics, aiming to provide a theoretical support for the development of emerging thermal processing technologies for meat products in the future.

**Key words:** meat products; thermal processing; principle; application; processing characteristics

引文格式:

张彦纳,陈星,刘冬梅,等.肉制品新兴热加工技术研究进展[J].现代食品科技,2024,40(8):374-382.

ZHANG Yanna, CHEN Xing, LIU Dongmei, et al. Research progress of meat products emerging thermal processing technology [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 374-382.

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31901611); 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室自主课题 (SKLF-ZZA-202301); 江南大学食品学院学科交叉融合创新项目 (SFST2023-KY-05)

作者简介: 张彦纳 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品蛋白结构与功能, E-mail: 3248695324@qq.com

通讯作者: 陈星 (1990-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品蛋白结构与功能, E-mail: xingchen@jiangnan.edu.cn

肉制品是我们日常饮食的重要组成部分。肉类产品可为机体提供高价值营养素，与此同时，经烹饪后往往产生愉悦的味道和香气，给人们带来美食享受。近年来，肉类产品的消费在全球范围内不断增长<sup>[1]</sup>，我国肉制品市场需求量大，肉类产量已经连续二十多年稳居世界第一，肉类总产量约占世界总产量的1/3<sup>[2]</sup>，同时，消费者购买能力强，肉制品市场规模庞大<sup>[3]</sup>，如何满足国人对营养、健康、美味的新需求正成为我国肉制品工业的重要指导方向。

热处理或热烹饪是肉制品加工的基础过程，经处理后，肉制品发生熟化并产生特征品质，供消费者安全食用。典型的热加工（煎、煮、蒸、炒、烧烤和油炸等）通常基于传导和对流机制，往往会导致受热不均匀以及食品营养健康品质的劣变<sup>[4]</sup>。为此，需开发高效、高性价比的新型绿色加热技术，以满足人们日益增长的美味、营养、健康的肉制品需求<sup>[5]</sup>。研究表明，新兴的热加工技术诸如微波加热、欧姆加热、射频加热和红外加热等，具有减少营养损失和提高肉制品质量的潜力<sup>[6]</sup>。另一方面，区别于传统热对流传导过程，新兴加热技术诱发热量自产品内部产生，作用过程时间较短，有助于减少加热或烹饪时间，提高效率。新兴热加工技术可以单独使用，也可以与传统技术联用，以提高产品的安全性，延长其保质期，同时改善产品品质和感官特性<sup>[7]</sup>。例如 Turp 等<sup>[8]</sup>开发了一种用于烹饪肉丸的欧姆-红外组合系统，结果表明，欧姆结合红外加热处理可以改善肉丸的颜色和质地。

近年来，聚焦新兴肉制品热加工技术这一领域研究报道与日俱增，相关研究成果更新迭代较快，目前已有文章对相关内容进行了综述报道，例如：Zielinska 等<sup>[9]</sup>介绍了微波辅助干燥在食品中的应用及研究进展；Guo 等<sup>[10]</sup>综述了射频加热技术应用于新鲜食品的研究进展；Richa 等<sup>[11]</sup>对欧姆加热技术在肉类食品中的应用进行了总结。不同于以上综述，本论文对多种新兴热加工技术：微波加热、欧姆加热、射频加热、红外加热以及多种技术组合加热的原理及其在肉制品中的应用进展进行了系统整理和分析，旨在为今后肉制品新兴热加工技术的发展提供理论支持。

## 1 肉制品构-质关系

### 1.1 肌肉组织

肌肉组织通常包括平滑肌和横纹肌，后者附着于骨骼上，是可食用肉制品加工的主要原料，约占

动物肌体的30%~40%。横纹肌的构成单位是肌纤维，每50~150根肌纤维集聚成束，每个肌束的表面包围一层结缔组织薄膜，称为肌束膜。肌纤维的粗细随动物的种类、年龄、营养状况、肌肉活动情况不同而异。

已有众多研究表明，肌纤维的面积、数目和直径与肉品质（如嫩度、pH值、肉色）直接相关<sup>[12]</sup>。肌原纤维蛋白构成肌肉组织的主要组分，其功能特性（如溶解性、凝胶性、乳化性等）对肉制品的品质形成具有关键作用。肉制品熟制过程中，肌原纤维蛋白加热后变性形成凝胶，对肉制品的持水性和质构有重要影响<sup>[13]</sup>。热处理过程中，蛋白质的二级结构在一定程度上展开，肌原纤维蛋白的空间结构遭到破坏，更多埋藏在内部的氨基酸疏水性残基暴露出来，造成蛋白表面疏水性增加、溶解度下降。在传统烹饪过程中，对温度不能进行很好的控制，较高的烹饪温度会导致蛋白质体积损失和变性更多，这些体积变化可能是早期温度下胶原蛋白收缩的结果，导致纤维的横向和纵向收缩，对肉制品的品质产生不良的影响。针对以上现象，采用新的热加工技术如微波加热<sup>[14]</sup>、射频加热<sup>[15]</sup>、欧姆加热<sup>[16]</sup>等可对肉制品的品质进行改善。

### 1.2 脂肪组织

脂肪组织是肉中仅次于肌肉组织的组成部分，具有较高的食用价值。主要分布在肌束和肌纤维之间，脂肪的沉积使肉表现出大理石纹，其数量和分布的不同使肌肉呈现出不同程度的大理石纹。脂肪组织在肉中的含量变化较大，取决于动物种类、品种、年龄、性别及育肥程度。脂肪组织的构造单位是脂肪细胞，它是动物体内最大的细胞，直径为30~120 μm，最大可达250 μm。脂肪组织中脂肪约占87%~92%，水分占6%~10%，蛋白质占比1.3%~1.8%，还包含少量的酶、色素及维生素等。

脂肪含量与肉的食用品质密切相关，可影响肉的嫩度、风味、肉色、系水力及大理石纹评分，是影响肉品质的重要因素之一<sup>[17]</sup>。脂肪是肉风味的前体物质之一，肌肉组织中的脂肪含有大量的硬脂酸、软脂酸和油酸，在肉制品的热加工过程中，一些简单的前体物质如氨基酸、糖和脂肪酸等可以降解为许多小分子的醛、酮、胺类和其他化合物，这些化合物既可直接影响肉的风味，又可相互作用或通过特殊途径与其他化合物发生反应，进而生成香味物质<sup>[18]</sup>。大量研究表明，脂类氧化是使肉质变坏的主

要原因,脂类氧化产生的醛类和醇类组成复杂的化合物,其气味和味道都很难为消费者所接受<sup>[19]</sup>。使用传统热加工技术有时会造成脂质和蛋白质过分氧化,导致肉类食用品质和营养价值下降。随着加热时间和加热温度的增加,甚至会产生一些有害物质。因此,改进加热方式,采取更为合适的新方法来改善肉制品的品质至关重要。已有研究表明:欧姆加热<sup>[20]</sup>、红外加热<sup>[21]</sup>等热加工技术可对脂肪的过度氧化进行改善。

### 1.3 结缔组织

结缔组织是将动物体不同部分连结和固定在一起的组织,分布于肌肉四周,包于肌束和肌纤维之外。结缔组织中细胞很少,占很大比例的是细胞外基质和纤维。基质由粘稠的蛋白多糖构成,蛋白多糖含有许多氨基葡聚糖(粘多糖)。结缔组织的主要纤维有胶原纤维、弹性纤维以及网状纤维三种,但以前二者为主,胶原纤维的主要成分是胶原蛋白。

结缔组织起着支撑肌肉组织的作用,是决定肉品质(如嫩度、保水性)的关键成分<sup>[22]</sup>。肌肉中结缔组织的含量及分布与肉制品品质关系密切,结缔组织含量越丰富,肌肉的持水能力就越强。结缔组织的稳定性与胶原纤维的尺寸有关,胶原纤维越粗,就越难以被人体消化和水解,导致肌肉嫩度下降。不恰当的烹调处理会对肉制品的嫩度产生消极的影响,使得肉质变硬、嫩度下降,从而影响肉制品的食用价值。胶原蛋白在维持肌肉结构、柔韧性、强度以及肌肉质地等方面起着重要的作用。胶原蛋白的溶解可减缓肉制品在烹调过程中的肌原纤维收缩,与其品质改善有密切的关系<sup>[23]</sup>。结缔组织的稳定性还依赖于胶原蛋白的交联,交联程度越大,肉质越硬,适当的加热可使肉的硬度下降,有利于改善肉质。总之,胶原蛋白虽然在肌肉组织中占比不高,但它是决定肉质地的主要因素之一,不当的加热处理会引起胶原蛋白热变性聚集,对肉的品质及质构特性会产生不利影响。已有众多研究表明,微波加热<sup>[24]</sup>、欧姆加热<sup>[25]</sup>等新兴加热技术可以改善这种现象。

## 2 新兴肉制品热加工技术

### 2.1 微波加热

微波(Microwave Heating, MW)加热是一种将电磁能转化为热能的方法。微波技术也称为介电加

热技术,可以利用频率范围(0.3~300 GHz)内的电磁波能量<sup>[32]</sup>。根据国际电信联盟的许可,915 MHz和2 450 MHz的频率可用于家用微波、食品工业以及科学研究。微波加热原理如图1所示,微波炉内部产生的电磁场使食物内部的极性分子产生旋转和碰撞,导致食物温度升高。特别是水分子和离子化合物是食物中的主要分子偶极子,它们可以随着微波的频率在食物中快速旋转,与其他分子碰撞,产生摩擦和热量,可以快速烹饪食物。

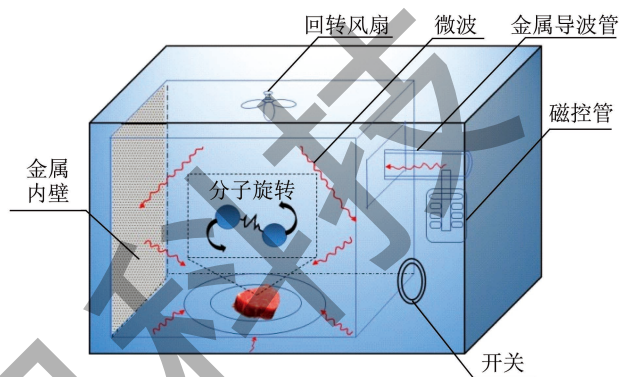


图1 微波加热原理图

Fig.1 Schematic diagram of microwave heating

如表1所示,微波加热相比传统加热具有独特优势,例如:高加热速率、易于操作、安全处理以及低维护性,在食品工业中应用广泛<sup>[9]</sup>,比如微波巴氏杀菌、烘烤、解冻、干燥等。

研究人员从感官、电子鼻和电子舌的角度评价了微波对肉类风味的积极贡献。例如,Choi等<sup>[33]</sup>从颜色、烹调损失、质地特性和感官特性等方面研究了五种烹饪方法(包括煮、蒸、烤、微波和过热蒸)的差异。同时也有研究报道了不同烹调方法(热水煮、蒸、微波加热、烤箱烘烤)对红酥鸡的影响,对重新加热的红酥鸡进行感官评价、电子鼻分析和电子舌分析来评价其风味<sup>[26]</sup>,研究结果表明,与其他烹饪方法相比,微波加热后的样品可以保持红酥鸡的大部分原有风味。Wang等<sup>[34]</sup>证实了微波蒸煮草鱼的降钠效果,与传统水浴蒸煮相比,微波蒸煮能减少蒸煮损失,保持草鱼鱼肉的致密结构,因此,微波可以有效防止草鱼鱼肉中盐分的流失,从而提高咸味感。由此可见,微波加热可以对改善肉制品的风味,提高人们的食用体验。

微波加热可改善肉制品的食用品质(如:质地、颜色、保水性和烹调损失)。例如,在Taşkiran等<sup>[14]</sup>对鸡大腿肉的研究中,微波加热显示出比传统电烤箱更高的持水性。相对较高的微波功率处理提

高了牦牛肉中挥发性物质的含量。研究表明,高功率输出微波结合短时间蒸煮可能是牦牛肉加工的优先选择。Li等<sup>[35]</sup>的研究中表明,与沸水蒸煮相比,微波蒸煮能有效快速变性牦牛肉蛋白,缩短蒸煮时间。然而,微波处理会使肉色质量变差,并增加肉的烹调损失。微波处理对食物中蛋白质消化率也有积极或消极的影响。例如,Calabrò等<sup>[27]</sup>使用傅里叶红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)分析了微波加热和常规加热对牛肉的影响,证明了牛肉中蛋白质含量的解折叠和聚集随着微波炉功率水平的增加而增加,这一结果可以显著影响胃肠消化过程,因为 $\beta$ -折叠与 $\alpha$ -螺旋的高比率可以导致蛋白质的低营养价值和胃肠消化酶的低获得性。Rombouts等<sup>[24]</sup>发现微波加热有利于蛋白质解折叠、聚集和交联,其程度低于感应加热。此外,与水煮肉相比,微波处理通过降低肉的剪切力和减轻对肌肉纤维结构的热损伤来改善质构品质。

综上所述,相比于传统烹饪方式,微波烹饪肉制品风味提升、质构改善等方面具有一定优势。然而,微波加热可能会造成温度分布不均,导致肉制品加热不均,引起食用品质的降低(表1)。

## 2.2 射频加热

射频(Radio Frequency Heating, RF)加热作为一种介电加热,与传统加热相比,具有加热速度快、能量效率高、被加热产品内部温度分布均匀等优点<sup>[28]</sup>。射频加热应用频率范围为3 kHz~3 GHz,与微波相似,射频是一种非电离形式的电磁能量。工业上使用两种射频加热系统:开路和50- $\Omega$ 技术。开路射频加热系统已广泛应用于许多工业领域。然而,由于50- $\Omega$ 射频加热系统成本较高,它们主要用于实验水平。射频原理如图2所示,在射频处理中,介电材料放置在两个平行的金属电极板之间,提供交变电磁场。电介质材料(如水)中的极性分子试图与快速改变极性的交变电磁场的方向保持一致,并不断调整自己,旋转和移动以造成摩擦损失,从而使整个材料受热<sup>[36]</sup>。

近年来,射频能量的应用已经被广泛研究,该技术诱发体积加热,可弥补传统加热方法的低加热速率短板。Guo等<sup>[10]</sup>研究了射频的优点,主要是由于加热快、热渗透深和质量控制的可能性,可应用于不同的工艺中,如蒸煮、农产品收获后处理、巴氏杀菌、干燥和解冻。

表1 热加工技术原理、应用及加工特点

Table 1 Principle, application and processing characteristics of thermal processing technologies

热加工技术	条件	作用机制	应用工艺	加工对象实例	加工特点	参考文献
微波加热技术	频率范围: 915 MHz、 2 450 MHz	电磁场使食物内部的极性分子产生旋转和碰撞,导致食物温度升高	巴氏杀菌、 烘烤、解冻、 干燥等;	红酥鸡、草鱼、 牦牛肉、马驹 肉等	优点: 高加热速率、 易于操作、安全处理 以及低维护性 缺点: 温度分布不均	[26,27]
射频加热技术	频率范围: 3 kHz~3 GHz	电介质材料中的极性分子不断调整自己试图与快速改变极性的交变电磁场的方向保持一致,旋转和移动造成摩擦损失,使整个材料受热	蒸煮、农产 品收获后处 理、巴氏杀 菌、干燥、 解冻等	鸡胸肉、猪肉 火腿、秋刀鱼、 猪里脊肉等	优点: 加热快、高效的 热渗透和及质量控制 缺点: 投资成本高、 可能出现脂质氧化 (出现酸败和异味) 和蛋白质的氧化	[28,29]
欧姆加热技术	电场强度: 3.3~12 V/cm	基本原理: 焦耳加热, 通过施加在材料上的电 流电阻来产生热量	食物的热烫、 脱水、发酵、 巴氏杀菌等	牛肉、火鸡肉、 猪肉、香肠、 扇贝、冷冻金 枪鱼块等	优点: 加热快、低成 本、环境友好、热量 分布均匀 缺点: 难以长时间保 持稳态烹饪、没有水 和盐的情况下应用较少	[30,31]
红外加热技术	波长: 0.5~100 $\mu$ m	红外辐射可以被食物中的水分子和离子吸收引起温度的升高	脱水、解冻、 油炸、巴氏 杀菌等	汉堡肉饼、 鸡块、牛肉等	优点: 节省能源、减少 烹调损失低、精确 控制温度、加热均匀 缺点: 穿透力低、 加热元件难接以触 到且易损坏	[16,25]

射频加热应用于肉制品的优势在于可显著缩短烹饪时间。Kirmaci 等<sup>[29]</sup>使用 6 kW、27.12 MHz 的射频烤箱，比较了新鲜和腌制的鸡胸肉的射频和水浴烹饪，结果表明，射频烹饪的加热速度更快，烹饪时间缩短了 42%，尽管射频熟肉的颜色度较低，但在这两个过程中测得的质量参数相似。Muñoz 等<sup>[28]</sup>分析了猪肉火腿的两步烹饪工艺，包括射频隧道和蒸汽烤箱，并将结果与完全在蒸汽烤箱中加工的火腿进行了比较，结果显示，使用射频烹饪时间减少了 50%，在最终产品的感官质量方面没有观察到明显的差异。Kanafusa 等<sup>[37]</sup>研究出射频加热可以将真空包装的生秋刀鱼均匀加热到 120 °C，比传统加热快 2.9 倍。Wang 等<sup>[15]</sup>向猪里脊肉施加 27.12 MHz 的射频能量，证明射频加热改善了猪肉肌原纤维蛋白凝胶的保水性，具有改善肉质的潜力，并且可以大大减少加工时间，此外还有效促进了稳定有序的凝胶网络结构的形成。在食品解冻方面，Bedane 等<sup>[38]</sup>发现，与传统解冻（4 °C 制冷条件下）相比，射频解冻鸡胸肉可以显著减少营养价值的损失。Bedane 等<sup>[39]</sup>发现，在射频加热过程中，与球形和水平取向的圆柱样品相比，垂直取向的圆柱样品有更好的温度均匀性。然而，最大加热速率和功率吸收是在球形和水平取向的圆柱样品的底部观察到的，说明食品模拟材料研究几何形状和方向对食品射频加热过程中的性能和温度分布具有重要影响，这一发现可为射频加热技术迭代提供新见解。

由此可以看出，射频加热在缩短肉制品烹饪时间与改善品质方面具有较好的发展空间。其缺点在于设备技术投资成本高，脂质过度氧化引起的酸败和异味，以及蛋白质的氧化劣变（表 1）。

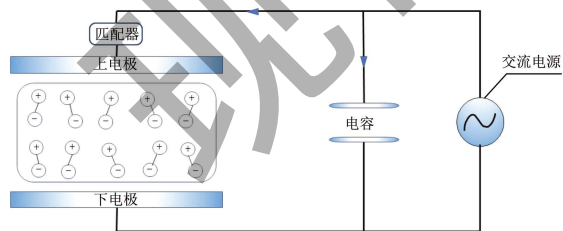


图 2 射频加热原理图

Fig.2 Schematic diagram of radio frequency heating

### 2.3 欧姆加热

与微波加热相同，欧姆加热（Ohmic Heating, OH）也是一种电加热技术。欧姆加热示意图如图 3 所示，是一种体积加热方法，基本原理是焦耳加热，通过施加在材料上的电流电阻来产生热量。大多数

食物含有大量的水和溶解盐，这些溶液可以通过电解导电。当电解质被置于电场中时，电解质中的离子向带相反电荷的电极移动，移动离子之间相互碰撞产生阻力，增加其动能，从而加热产品。欧姆加热器是一种电加热装置，它利用食物自身的电阻来产生热量，由于离子运动，食物材料内部瞬间产生大量热量（焦耳效应）。

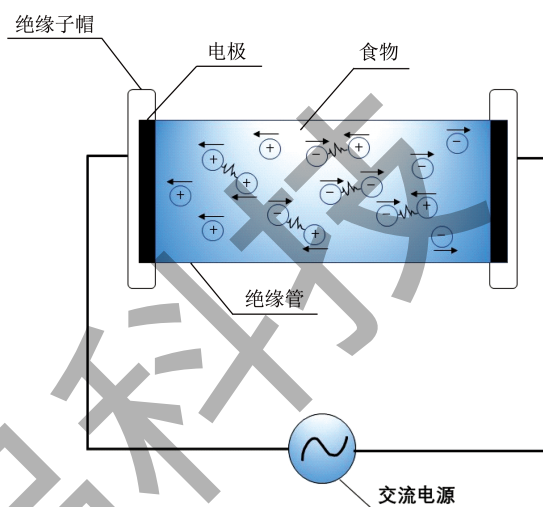


图 3 射频加热原理图

Fig.3 Schematic diagram of radio frequency heating

关于热加工的肉制品，消费者更喜欢其保持最小的质地变化和最大的烹饪价值，欧姆加热在这一方面具有优势，例如：产品质量好、烹饪时间短、成本低、能源效率高以及环境友好工艺。欧姆加热可广泛应用于食品工业中，例如：食物的热烫、脱水、发酵、杀菌、巴氏杀菌和加热。

近年来，欧姆加热在牛肉、火鸡肉、猪肉等肉类和扇贝等海鲜的一些大规模应用中显示出可缩短烹饪时间、实现均匀加热等优势，在某些情况下，还降低了烹调损失<sup>[30]</sup>。与常规加热方法相比，欧姆加热在产品开发如汉堡肉饼、肉丸、肉肠等产品的微生物灭活和烹饪方面提供了良好的效果<sup>[11]</sup>。除此以外，Ángel-rendón 等<sup>[40]</sup>发现欧姆加热还可用于烹饪肉类婴儿食品的杀菌。Pedersen 等<sup>[41]</sup>的研究表明，与传统加热工艺相比，欧姆加热能明显改善虾的质量。Tian 等<sup>[25]</sup>报道称，与传统加热方法相比，欧姆加热牛肉的烹调损失值较低的主要原因之一是加热速度较快导致肌原纤维热蛋白变性较低，这使得样品变性的时间更短。Van der sman 等<sup>[16]</sup>也得到了类似的结果：如果欧姆加热以较快的速度对肉进行加热，可显著降低水分的损失。

欧姆加热在肉制品解冻方面也有其独特的优

势, Fattahi 等<sup>[31]</sup>发现浸没式欧姆解冻显著缩短了冷冻金枪鱼块的解冻时间, 此外, 欧姆处理的解冻损失和总损失明显低于常规的解冻方法, 与空气解冻和水解冻相比, 金枪鱼块在浸泡欧姆解冻时氧化更快。Miao 等<sup>[42]</sup>在关于冷冻鱼糜欧姆解冻的研究中发现, 与常规解冻相比, 欧姆解冻具有更高的解冻速率。

从以上可以看出, 欧姆加热应用范围广阔, 相对于常规烹饪及解冻方式, 欧姆加热有助于更好改善肉制品的品质, 发展前景良好。不足之处在于欧姆加热难以长时间保持稳态烹饪、没有水和盐的情况下应用较少(表1)。

## 2.4 红外加热

在传统烤箱中对肉制品进行烹饪可能会产生过热以及过度氧化的问题, 并且需要高能量输入。为了克服这些问题, 相关研究人员开发了具有红外辐射应用的烤箱。该技术及其效果已在禽肉中广泛研究, 红外加热(Infrared Heating, IR)是一项重要的肉类加工技术。与微波和射频加热一样, 红外加热是一种短时高温过程。红外辐射在电磁波谱内工作, 波长范围为0.5~100  $\mu\text{m}$ 。这种辐射可以被食物化合物(水分子和离子)吸收进而引起温度的升高。红外加热示意图如图4所示, 红外线发射灯置于加热器内, 所发出的红外射线穿透食品材料后, 食物中的水分子以60 000~150 000 MHz的频率振动, 通过分子间的摩擦产生热量<sup>[43]</sup>。红外辐射的传播不需要任何介质, 它从发热体转移到产品表面, 不加热周围的空气<sup>[44]</sup>。

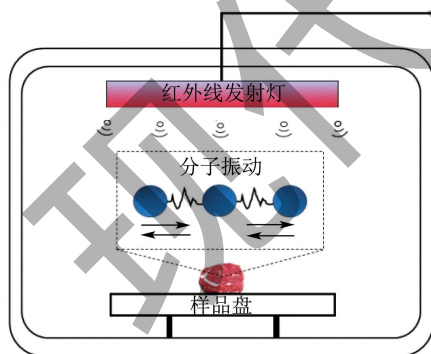


图4 红外加热原理图

Fig.4 Schematic diagram of infrared heating

红外加热有很多优点, 例如: 热量直接由物体表面渗透到内部, 加热更快均匀以及营养成分降解更低等<sup>[21]</sup>, 在巴氏杀菌、干燥、解冻、烘烤等方面均有应用。Rahimi 等<sup>[45]</sup>对鸡块进行的一项研究表明, 深度油炸、红外处理前油炸和红外处理后油炸不会导致感官品质特征的差异。然而, 在油炸前和油炸

后的鸡块中观察到的总重量下降是不同的, 并且在红外处理的鸡块中观察到的脂肪含量比油炸过的鸡块的脂肪含量低, 脂肪含量可影响肉的食用品质, 比如嫩度、风味、颜色、系水力等。Özcan 等<sup>[46]</sup>的发现, 用红外加热对牛肉进行处理可产生12种不同的多环芳烃, 低于欧洲委员会规定的限值, 这表明红外加热方法是安全可行的。Kendirci 等<sup>[47]</sup>发现, 利用红外辐射会引起肉丸结皮的形成, 可以抑制脂肪向表面迁移, 因此可能会减少热解。

此外, 红外加热还具有节省能源、减少烹调损失低、精确控制温度等显著优势。其缺点在于穿透力低、加热元件难接以触到且易损坏(表1), 限制了红外加热的应用。

## 2.5 多种技术组合加热

以上热加工方式不仅可以单独使用, 也可与其它传统或新兴热加工技术组合应用于肉制品的加工, 综合加热技术的优点, 克服其他加工技术的缺点, 更好的提高肉制品的品质。首先对多种技术组合加热做个简单归纳, 如表2所示。

微波辅助食品加工技术, 即利用微波辅助传统或新兴食品加工技术加工肉制品, 具有节能、提高肉制品质量、减少烹饪时间和降低操作成本等优点。为了改变微波炉的传热方式来解决微波加热肉类嫩度低的问题, Wang 等<sup>[48]</sup>研究了微波结合传导加热和微波加热两种传热方式对五花肉质特性的影响。研究表明, 复合加热的肉具有致密的凝胶结构和较高的持水性, 可显著提高肉的嫩度和食用品质。在肉类工业中, 微波结合对流加热对工业规模的食物制造商有一些关键的益处, 例如在熏肉的情况下, 微波结合对流加热技术的低能耗, 以及可获得更高的产品产量以及更好的感官质量<sup>[51]</sup>。Nguyen 等<sup>[52]</sup>研究了与较慢的常规加热相比, 微波辅助加热对虹鳟鱼的酶解和功能特性的影响。结果表明, 微波辅助加热的样品的水解度和蛋白质溶解度显著高于微波加热的样品。此外, Tsai 等<sup>[49]</sup>在90  $^{\circ}\text{C}$ 和70  $^{\circ}\text{C}$ 下分别进行至少110 s和130 s基于微波辅助感应加热的加工, 实验结果显示足以获得完全煮熟的无污染物的澳洲肺鱼肉, 具有最佳的外观和颜色, 以及在硬度和咀嚼性方面理想的纹理。微波辅助加热作为一种新兴的热加工方法在即食海鲜产品的生产中具有相当大的潜力。其他微波辅助应用包括调和、油炸、烘烤、冷冻等, 可以更好地保持加工产品的营养和感官特性。其缺点在于组装所需系统的成本较高。

表 2 组合热加工技术原理、应用及加工特点

组合热加工技术	条件	作用机制	应用工艺	加工对象实例	加工特点	参考文献
微波结合传导 / 对流加热	微波感受器: 底部采用微波吸收和导热材料, 可以吸收微波转化为热能	肉表面的微波加热结合底部的传导加热对其进行加工	巴氏杀菌、加热等	五花肉、熏肉等	优点: 较高的持水能力; 较低的烹调损失; 更好的嫩度	[48]
微波结合感应加热	腔体可分离的模块化复合微波加热系统: 上腔是微波加热单元, 下腔是感应加热单元	装有样品的密封容器紧贴感应半腔内壁, 感应半腔由导热性好的金属材料制成, 接受感应加热, 热量进一步传给容器的样品	巴氏杀菌、冷藏、热加工等	即食海鲜、澳洲肺鱼肉等	优点: 高效的热传递、可在大气压下加热和运行、加热均匀 缺点: 组装所需系统所需成本较高	[49]
微波结合红外加热	适当的微波加热功率和红外温度	由内向外加热的电磁波与由外向内加热的红外线相结合对样品进行均匀加热	烘焙、干燥、烘烤、解冻等	凡纳滨对虾等	优点: 提高质地和复水性能、加热快且均匀 缺点: 生产能力受到设备尺寸和运营成本的限制	[50]
欧姆结合红外加热	欧姆烹饪单元红外烹饪装置相结合	欧姆烹饪单元将样品预先煮熟, 再将样品转移到已经与欧姆烹饪单元相结合的红外烹饪装置中进行红外加热;	蒸煮、巴氏杀菌、脱水等	牛肉、肉丸等;	优点: 能源效率高、烹饪时间短、促进脂质氧化、实现更丰富的风味释放; 缺点: 组装所需系统的成本较高	[8]

欧姆结合其他加热技术对肉制品的加工也有很大优势, 例如: 欧姆结合对流系统, 欧姆结合红外线等。Zell 等<sup>[53]</sup>比较了欧姆结合对流加热系统中低温长时间烹饪和高温短时间烹饪以及常规烹饪对产品质量的影响。结果表明, 欧姆结合对流加热系统可显著缩短烹饪时间 7~15 倍, 显示其快速加热的优势。欧姆结合红外技术可以改善肉制品品质, Turp 等<sup>[8]</sup>开发了一种用于烹饪肉丸的欧姆-红外组合系统。结果表明, 欧姆结合红外加热处理可以改善肉丸的颜色和质地。此外, Özcan 等<sup>[46]</sup>还对欧姆蒸煮和欧姆结合红外加热中的脂质氧化进行了对比研究, 发现欧姆结合红外线烹饪可促进脂质氧化, 实现更丰富的风味释放。

综上所述, 采用多种技术组合加热可弥补单独加热技术的短板, 有利于提高肉制品的品质, 具有更好的应用前景。但是, 多种技术组合加热的限制之处在于组装所需系统所需成本较高, 经济性不高(表 2)。

### 3 结论与展望

新兴热加工技术(微波加热、射频加热、欧姆加热、红外加热以及多种技术组合加热)在肉制品

加工具有独特优势, 在保证产品的安全性和质量的同时, 有望满足现代消费者的高品质需求, 例如高加热效率、易于操作、高营养保留、高食用品质等, 应用潜力巨大, 借助相关技术增效联用, 可取长补短, 进一步提升肉制品美味、营养与健康属性。以上新兴的热加工技术虽各有所长, 但其工业化应用方面还存在一定局限性, 如微波加热会造成肉类嫩度降低; 射频加热不当会影响加热均匀性, 其工业放大难度较大; 欧姆加热的安全性和可行性需进一步完善; 高成本投资是限制以上新兴技术广泛应用的关键瓶颈。后续研究应围绕上述问题, 开展技术攻关, 以促进新兴热加工技术在肉制品工业的合理应用与高质量发展。

### 参考文献

- [1] SULEMAN R, WANG Z, AADIL R M, et al. Effect of cooking on the nutritive quality, sensory properties and safety of lamb meat: Current challenges and future prospects [J]. Meat Science, 2020, 167: 108172.
- [2] 曲超, 陶翠, 牛琳茹, 等. 我国肉类加工业“十三五”期间发展状况及趋势[J]. 肉类研究, 2021, 35(11): 44-49.
- [3] 金柯男, 朱广潮, 程代, 等. 肉类预制菜的安全与控制研究进展 [J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 110-118.

- [4] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Trends in processing technologies for dried aquatic products [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(4): 382-394.
- [5] 蔡明珺.新型加热技术在食品加工中的应用及其研究进展[J].*现代盐化工*,2022,2:49.
- [6] KANG D, ZHANG W, LORENZO J M, et al. Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(11): 1914-1933.
- [7] MORENO-VILET L, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ H, VILLANUEVA-RODRÍGUEZ S. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel thermal processing [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 50: 196-206.
- [8] TURP G Y, ICIER F, KOR G. Influence of infrared final cooking on color, texture and cooking characteristics of ohmically pre-cooked meatball [J]. *Meat Science*, 2016, 114: 46-53.
- [9] ZIELINSKA M, ROPELEWSKA E, XIAO HW, et al. Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave-assisted drying of food products: Quality properties [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(13): 2212-2264.
- [10] GUO C, MUJUMDAR A S, ZHANG M. New development in radio frequency heating for fresh food processing: A review [J]. *Food Engineering Reviews*, 2019, 11: 29-43.
- [11] RICHA R, SHAHI N, SINGH A, et al. Ohmic heating technology and its application in meaty food: A review [J]. *Advances in Research*, 2017, 10(4): 1-10.
- [12] HUO W, WENG K, GU T, et al. Effect of muscle fiber characteristics on meat quality in fast-and slow-growing ducks [J]. *Poultry Science*, 2021, 100(8): 101264.
- [13] 吴燕燕,熊添,李来好,等.鱼肉蛋白的热变性研究进展[J].*食品工业科技*,2018,39(5):343-347.
- [14] TAŞKIRAN M, OLUM E, CANDOĞAN K. Changes in chicken meat proteins during microwave and electric oven cooking [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(2): e14324.
- [15] WANG X, WANG L, YANG K, et al. Radio frequency heating improves water retention of pork myofibrillar protein gel: An analysis from water distribution and structure [J]. *Food Chemistry*, 2021, 350: 129265.
- [16] VAN DER SMAN R. Model for electrical conductivity of muscle meat during Ohmic heating [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 208: 37-47.
- [17] 田青,张民,杨振燕,等.莱芜猪脂内脂肪与肉品质的关系及其影响因素的研究进展[J].*猪业科学*,2023,40(4):118-121.
- [18] 刁小琴,王莹,贾瑞鑫,等.动物性脂肪对肉品风味影响机制研究进展[J].*肉类研究*,2022,36(3):45-51.
- [19] 赵予挺.抗氧化处理对传统风干羊肉品质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [20] TIAN X, SHAO L, YU Q, et al. Comparative analysis of quality uniformity of ohmic and water bath heating treated pork batter with different fat content [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(4): e14377.
- [21] RASTOGI N K. Recent trends and developments in infrared heating in food processing [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(9): 737-760.
- [22] 汪洋,王稳航.肌内结缔组织的组成、分布及生长调控研究进展[J].*中国食品学报*,2021,21(7):349-359.
- [23] 崔莹莹,李想,杨铭铎.肉的烹调嫩化机理研究进展[J].*中国调味品*,2019,44(7):184-187,194.
- [24] ROMBOUTS I, WOUTERS A G, LAMBRECHT M A, et al. Food protein network formation and gelation induced by conductive or microwave heating: A focus on hen egg white [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 66: 102484.
- [25] TIAN X, WU W, YU Q, et al. Quality and proteome changes of beef *M. longissimus dorsi* cooked using a water bath and ohmic heating process [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, 34: 259-266.
- [26] WANG J, ZHANG M, FAN K, et al. Effects of reheating methods on the product quality of Hongsu chicken dish [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(11): e13823.
- [27] CALABRÒ E, MAGAZÙ S. Modulation of Maillard reaction and protein aggregation in bovine meat following exposure to microwave heating and possible impact on digestive processes: An FT-IR spectroscopy study [J]. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2020, 39(2): 129-138.
- [28] MUÑOZ I, SERRA X, GUÀRDIA M D, et al. Radio frequency cooking of pork hams followed with conventional steam cooking [J]. *LWT*, 2020, 123: 109104.
- [29] KIRMACI B, SINGH R K. Quality of chicken breast meat cooked in a pilot-scale radio frequency oven [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2012, 14: 77-84.
- [30] LLAVE Y, MORINAGA K, FUKUOKA M, et al. Characterization of ohmic heating and sous-vide treatment of scallops: Analysis of electrical conductivity and the effect of thermal protein denaturation on quality attribute changes [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 50: 112-123.
- [31] FATTAHI S, ZAMINDAR N. Effect of immersion ohmic heating on thawing rate and properties of frozen tuna fish [J]. *Food Science and Technology International*, 2020, 26(5): 453-461.
- [32] JIANG H, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Comparison



- of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spouted microwave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(9): 1827-1834.
- [33] CHOI Y S, HWANG K E, JEONG T J, et al. Comparative study on the effects of boiling, steaming, grilling, microwaving and superheated steaming on quality characteristics of marinated chicken steak [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2016, 36(1): 1-7.
- [34] WANG X, MUHOZA B, WANG X, et al. Comparison between microwave and traditional water bath cooking on saltiness perception, water distribution and microstructure of grass carp meat [J]. *Food Research International*, 2019, 125: 108521.
- [35] LI S, TANG S, YAN L, et al. Effects of microwave heating on physicochemical properties, microstructure and volatile profiles of yak meat [J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2019, 47(1): 262-272.
- [36] AWUAH G B, RAMASWAMY H S, TANG J. *Radio-Frequency Heating in Food Processing: Principles and Applications* [M]. CRC Press, 2014.
- [37] KANAFUSA S, TAKAHASHI C, UEMURA K. The effect of radio-frequency heating on vacuum-packed saury (*Cololabis saira*) in water [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2018, 82(9): 1576-1583.
- [38] BEDANE T F, ALTIN O, EROL B, et al. Thawing of frozen food products in a staggered through-field electrode radio frequency system: A case study for frozen chicken breast meat with effects on drip loss and texture [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 50: 139-147.
- [39] BEDANE T F, ERDOGDU F, LYG J G, et al. Effects of geometry and orientation of food products on heating uniformity during radio frequency heating [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2021, 125: 149-160.
- [40] ÁNGEL-RENDÓN S V, FILOMENA-AMBROSIO A, CORDON-DÍAZ S, et al. Ohmic cooking: Application of a novel technology in pork and influences on water holding capacity, cooking loss and colour [J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2019, 17: 100164.
- [41] PEDERSEN S J, FEYISSA A H, KAVLI S T B, et al. An investigation on the application of ohmic heating of cold water shrimp and brine mixtures [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 28-35.
- [42] MIAO Y, CHEN J Y, NOGUCHI A. Studies on the ohmic thawing of frozen surimi [J]. *Food Science and Technology Research*, 2007, 13(4): 296-300.
- [43] ABOUD S A, ALTEMIMI A B, RS AL-HIIPHY A, et al. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing [J]. *Molecules*, 2019, 24(22): 4125.
- [44] SAKARE P, PRASAD N, THOMBARE N, et al. Infrared drying of food materials: Recent advances [J]. *Food Engineering Reviews*, 2020, 12(3): 381-398.
- [45] RAHIMI D, KASHANINEJAD M, ZIAHIFAR A M, et al. Effect of infrared final cooking on some physico-chemical and engineering properties of partially fried chicken nugget [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 47: 1-8.
- [46] ÖZCAN A U, MASKAN M, BEDIR M, et al. Effect of ohmic cooking followed by an infrared cooking method on lipid oxidation and formation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) of beef muscle [J]. *Grasas Y Aceites*, 2018, 69(4): e279-e279.
- [47] KENDIRCI P, ICIER F, KOR G, et al. Influence of infrared final cooking on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in ohmically pre-cooked beef meatballs [J]. *Meat Science*, 2014, 97(2): 123-129.
- [48] WANG X, WANG X, MUHOZA B, et al. Microwave combined with conduction heating effects on the tenderness, water distribution, and microstructure of pork belly [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 62: 102344.
- [49] TSAI Y H, HWANG C C, KAO J C, et al. Cooking and pasteurizing evaluation of barramundi (*Lates calcarifer*) meats subjected to an emerging microwave-assisted induction heating (MAIH) technology [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2022, 80: 103089.
- [50] 毛伟杰,朱丽钰,孙鲁浩,等.微波-红外联合加热对凡纳滨对虾品质的影响[J].*水产学报*,2020,44(2):314-320.
- [51] ORSAT V, RAGHAVAN G, KRISHNASWAMY K. Microwave technology for food processing: An overview of current and future applications [J]. *The Microwave Processing of Foods*, 2017: 100-116.
- [52] NGUYEN E, JONES O, KIM Y H B, et al. Impact of microwave-assisted enzymatic hydrolysis on functional and antioxidant properties of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* by-products [J]. *Fisheries Science*, 2017, 83: 317-331.
- [53] ZELL M, LYG J G, CRONIN D A, et al. Ohmic cooking of whole beef muscle-Evaluation of the impact of a novel rapid ohmic cooking method on product quality [J]. *Meat Science*, 2010, 86(2): 258-263.