

无线电波加热技术在水产品加工中的应用

欧阳杰, 宋艳艳, 胡晓亮, 沈建*

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 农业部远洋渔船与装备重点实验室, 国家水产品加工装备研发中心, 上海 200092)

摘要 无线电波加热是近年来兴起的一种加热新技术, 具有物料升温速度快、整体加热、节能等特点, 可大幅降低加热时间, 提高产品品质。主要对射频和微波 2 种无线电波加热技术在水产品解冻、干燥、杀菌等方面的研究和应用现状进行总结, 对存在的问题及产生的原因进行分析, 以期对无线电波加热技术在水产品加工中更好的应用提供理论和技术支撑。

关键词 无线电波; 加热; 解冻; 干燥; 杀菌

中图分类号 TS 254 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)21-0017-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.21.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The Application of Radio Wave Heating Technology in the Processing of Aquatic Products

OUYANG Jie, SONG Yan-yan, HU Xiao-liang et al (Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Ocean Fishing Vessel and Equipment, Ministry of Agriculture, National R&D Branch Center for Aquatic Product Processing Equipment, Shanghai 200092)

Abstract Radio wave heating is a new heating technology that has emerged in recent years. It has the advantages of fast heating speed, energy conservation and overall heating, which can greatly reduce heating time and improve product quality. The research and application of radio wave heating technology were summarized, such as radio frequency and microwave used in thawing, drying and sterilization of aquatic products, and the existing problems and causes of radio wave heating were analyzed in this paper to provide theoretical and technical support for the better application of radio wave heating technology in aquatic products processing.

Key words Radio wave; Heating; Thawing; Drying; Sterilization

加热处理是水产品加工中最常用的技术手段之一, 如解冻、蒸煮、干燥、烘烤杀菌等均需要不同程度的热处理^[1]。但热处理过程会损害水产品中的热敏性物质, 从而影响物料的品质^[2]。温度和加热时间是影响食品加热过程中热损伤程度的主要因素, 传统加热方式主要通过热传导、热对流等方式将热量从外部热源传递到食品内部, 加热时间较长, 加热均匀性较差, 从而造成水产品风味、色泽、质构及营养成分的损失^[3-4]。无线电波加热是近年来兴起的一种加热新技术, 其加热原理是利用高频交变电磁场激发食品内部的离子振动以及水分子极性转动导致摩擦生热, 具有物料升温速度快、整体加热的优点, 可大幅降低加热时间, 提高产品品质^[5-9]。随着无线电波加热技术的不断成熟, 其在食品加工中的应用越来越广泛, 在水产品加工领域的应用也逐渐增多^[10-13]。笔者主要对射频和微波 2 种无线电波加热技术在水产品解冻、干燥、杀菌等方面的研究和应用现状进行总结, 对存在的问题进行分析, 以期对无线电波加热技术在水产品加工中更好的应用提供理论和技术支撑。

1 无线电波加热在水产品加工中的应用

近年来, 无线电波加热技术在水产品加工的多个环节被广泛研究和应用, 关于水产品无线电波加热解冻、干燥、杀菌等的研究报道比较多, 研究主要集中在加热过程中水产品的品质变化、工艺参数优化等, 关于加热过程中温度分布及有

效控制、加热均匀性保障等方面的研究相对较少。

1.1 无线电波加热解冻 射频是无线电波的一种, 其频率在 1~300 MHz, 具有整体加热的特性, 无须热传导过程就能使被加热物料内外部同时加热、同时升温, 并且加热速度快。此种加热方式能大大减少升温时间, 减少能耗, 提高加热的均匀性, 从而提高解冻效率并最大可能地保持食品品质^[14-15]。朱传琴等^[16]研究设计了谐振频率为 27.1 MHz 的平板电容式无线电波解冻系统, 并应用该系统对冷冻鲑鱼进行解冻试验, 研究发现相比于常规的解冻方法, 无线电波解冻能更好地保持鲑鱼的感官品质, 当解冻频率在 25.1~30.8 MHz 内, 解冻时间为 925~1 268 s, 解冻效率高, 具有较好的应用推广前景; Jason 等^[17]解冻鲱鱼和白鲑鱼, 发现使用无线电波 (36~40 MHz, 6 kW) 解冻, 鱼体温度可以在 12.5 min 内从 -29℃ 快速升高到 -1~7℃, 比起 16 h 的空气解冻和 3 h 的流水解冻, 无线电波解冻更好地保存了鱼的汁液和风味; Marra 等^[18]利用间歇式无线电波将肉从 -20℃ 升高到 -8℃, 解冻时间缩短到原来的 1/30, 并且温度分布更加均匀, 能量消耗更低; 王亚盛^[19]应用 27.1 MHz 无线电波对冷冻鲑鱼进行解冻, 发现无线电波解冻鲑鱼效果优于微波解冻和一般常用的解冻方法, 鲑鱼升温 14℃ 所需要的平均解冻时间为 17.7 min, 样品的色泽和质构较好, 解冻均匀, 在谐振时样品鱼的解冻速度最快, 无线电波解冻具有快速、高效、加热均匀等特性, 有着较好的应用价值。

微波是指频率为 300 MHz~300 GHz 的电磁波, 微波解冻是指利用电磁波作用于冷冻水产品中的分子极性基团, 特别是冻品中的水分子, 使其在电场中改变极性分子的轴向排列, 造成分子间互相旋转、振动、碰撞, 产生剧烈摩擦而发热, 解冻速度快、解冻效率高、解冻后品质较好^[20]。崔瑾等^[21]研

基金项目 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所基本科研业务费项目 (2017YJS0012); 上海市自然科学基金项目 (16ZR1445000)。

作者简介 欧阳杰 (1983—), 男, 湖南娄底人, 副研究员, 硕士, 从事水产品加工技术与设备研究。* 通信作者, 研究员, 从事水产品加工设备技术研究。

收稿日期 2019-05-22; **修回日期** 2019-06-03

究了不同频率的微波对黄花鱼的解冻效果,表明在一定厚度内的冻鱼微波解冻效果较好,微波频率越高,其穿透深度越小;马燕等^[22]比较了不同解冻方式下翡翠贻贝的理化品质,结果表明微波解冻法较适宜,解冻快速且解冻后样品的挥发性盐基氮(TVB-N)值较低,感官品质较好,翡翠贻贝的鲜度和质量要高于空气解冻;李念文等^[23]在对大目金枪鱼块的解冻研究中也得出了相似的结论,认为微波解冻后鱼肉的鲜度较好,较好地保持了金枪鱼的色泽、质构,其菌落总数仅为 3.011 CFU/g ,解冻后的鱼肉适合用于直接生食;刘玉敏等^[24]比较了不同解冻方法对冷冻贝类和鱼类解冻效果,结果表明与传统空气解冻相比,微波解冻能有效抑制腐败微生物的生长,解冻后样品的感官品质较好。

1.2 无线电波加热干燥 干燥是水产品加工与贮藏最常用的方法之一,除了日晒和热风等传统干燥方法外,近年来不断涌现出新的干燥方法,如微波干燥,其独特的介电加热特性使干燥速率大大加快,同时具有选择性和穿透性好、无余热等优点,被广泛应用于食品工业和农产品加工等方面。郑洁等^[25]研究认为微波功率 500 W 对虾的干燥效果最好;张倩等^[26]研究了不同微波功率密度和脉冲间歇比对对虾扇贝闭壳肌营养成分的影响,并对其工艺参数进行优化,结果表明较低的微波功率和较小的脉冲间歇比有利于物料中蛋白质、多糖、粗脂肪和脂肪酸等营养成分的保留。为了最大程度保留物料原有品质,联合2种或者多种干燥方式,实现优势互补,将成为未来水产品干燥技术的发展趋势。关志强等^[27]研究表明热泵-微波联合干燥罗非鱼片可缩短 $1/3$ 的干燥时间,且复水率明显增加;张国琛等^[28]研究了脱毒海星微波-真空干燥工艺的优化,得出脱毒海星的最佳微波真空干燥条件为微波功率密度 4 W/g ,脉冲时间 60 s 和真空度 0.090 Mpa ;张国琛等^[29]利用微波-真空干燥对虾,结果表明微波干燥功率密度与干燥速度成正相关,与收缩率成负相关。

1.3 无线电波加热杀菌 微波杀菌主要利用其电磁场的热效应和非热生物效应。热效应是指微波在微生物体内转化为热能,破坏微生物内部稳态从而杀灭微生物;非热生物效应是指微波电场会改变微生物膜的正常电位,影响细胞内的离子浓度,从而使细菌无法进行正常的新陈代谢进而死亡^[30]。将微波技术用于水产品的灭菌是利用微波的选择投射作用使食品内外受热均匀,迅速升温杀灭细菌,故能很好保持物料的营养价值。李桂芬等^[31]研究了微波杀菌对带鱼段保鲜的效果,发现微波杀菌试验组在 13 d 后开始腐败变质,对照组在第 3 d 即开始腐败变质,说明微波杀菌可以显著延长产品的货架期;金声琅等^[32]以鱼丸中最耐热的大肠杆菌作为指示菌,对比了鱼丸的微波灭菌和加热灭菌效果,确定了微波强度和杀菌时间均与杀菌效果成正相关,经微波杀菌的样品在 8 d 之后检测均保持无菌状态,但对感官质量与水含量的影响大于加热灭菌;吴东雷等^[33]进行了湿紫菜微波杀菌技术的研究,确定了紫菜水分含量与微波处理时间均对杀菌效果有显著影响,在微波功率 600 W 的条件下处理

20 s 的紫菜与常规紫菜杀菌($85\text{ }^\circ\text{C}$ 杀菌 30 min 、 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 杀菌 15 min)相比,杀菌时间更短,紫菜营养物质保留更多,色泽更好。

2 无线电波加热存在的问题及分析

无线电波加热比较适合均匀性较好的物料,如鱼糜和鱼糜制品,加热整鱼等均匀性不是特别好的物料时,加热过程会存在局部过热、加热不均匀等问题,对水产品品质造成较大影响,有关无线电波加热技术的改进仍处于实验室探索阶段,加上无线电波加热设备的造价比较昂贵,部分还依赖进口,水产品加工企业实际生产中应用还比较少,产业化应用的实例也较少见报道。

2.1 引起加热不均匀的原因 尽管在过去几十年的时间里,无线电波加热技术迅猛发展,但温度分布不均仍是食品介电加热过程中的主要问题,这也是阻碍无线电波加热技术大规模工业化应用的原因之一^[34-35]。图1为典型的加热不均匀的物料温度分布示意图,物料的边角部位温度要远高于中心温度。

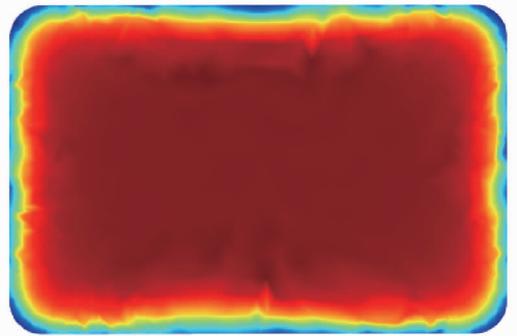


图1 加热不均匀的物料温度分布示意

Fig.1 Non-uniform temperature distribution of material

在无线电波加热过程中,许多因素都会影响其温度分布规律。首先,是食品本身的热物性和介电特性都会随着水分含量及温度的改变而发生变化,一般来说,食品材料的介电损耗会随着温度的升高而增大,这使得无线电波加热过程(特别是射频干燥过程)变得更为复杂。同时,当无线电波功率较大时,不均匀加热的现象也会更加严重,这是由于食品吸收的电磁波能与电场强度的平方成正比。因此,当无线电波功率较高时,食品冷热点间的温差将增大。其次,在无线电波加热过程中,许多因素都会影响电场的均匀性。虽然无线电波加热属于整体加热,但电场的不均匀分布势必会导致食品内部温度的不均匀分布,食品中高温区域意味着加热过程中该位置的电场强度较高,而低温区域则表示该位置的电场强度较低。影响电场分布的因素大致可分为2种:腔体本身的设计和食品负载间的相互影响。对于无线电波加热腔来说,波导管的位置、腔体的形状,甚至腔体中的某些悬挂部件(如搅波器)都会影响加热腔内电场的分布。而食品负载间的相互影响是指不同类型食品的介电特性、厚度、形状、尺寸以及穿透深度都不相同,从而会引起电场分布的不均匀。

2.2 加热不均匀导致的品质变化 有研究发现,无线电波加热后,食品冷热点之间的温差可达 $60\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 。在无线电

波加工过程中,加热后食品品质劣化、微生物安全等问题都是由加热不均匀引起的。对于无线电波解冻来说,由于水的介电损耗远远大于冰的介电损耗,因此不均匀加热会导致部分区域已融化,而部分区域仍处于冻结状态,若将食品材料全部解冻至目标温度,极易导致高温区域汁液流失率大、解冻品质较差。对于无线电波干燥来说,高温会引起食品变硬,并出现焦化,而低温区域则会导致水分在该区域内聚集。对于无线电波杀菌过程来说,若在冷点区域,食品的最终温度未达到灭菌的目标温度,则会导致杀菌不完全,引发食品安全问题。

此外,无线电波加热食品的温度分布与传统加热不同。对于固体食品材料来说,传统加热方式一般为热传导和表面对流,热量传递的方向总是由食品表面向内传递,因此冷点一般位于食品的几何中心位置,热点则位于食品表面。而无线电波加热后,食品内部的冷热点根据电场分布的不同,可位于食品中的任意位置。探究无线电波加热食品的温度分布规律,确定其冷热点位置,也是保持食品加热后的品质、提高加热均匀性的基础,从而指导无线电波加热工艺的优化。

3 结语

随着无线电波加热技术的不断突破以及无线电波发生装备研发与制造技术的不断成熟,无线电波加热技术在水产品加工中的应用将不断拓展,具有巨大的潜在市场和广阔的应用前景。无线电波加热技术的研究与应用不仅能提升水产品热加工效率,提高热能利用率,减少排放,实现节能减排的目标,而且能有效保障水产品及其加工制品的品质,起到提质增效的作用,促进水产品加工产业的健康发展。

参考文献

- [1] 刘钟栋. 微波技术在食品工业中的应用[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1998:271-276.
- [2] 王冰冰. 虾肉糜的微波加热特性研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2016.
- [3] 曹燕,程裕东. 鲢、狭鳃鱼糜微波加热凝胶形成的动力学分析[J]. 水产学报, 2005, 29(4): 547-551.
- [4] BENGTSSON N. Electronic defrosting of meat and fish at 35 and 2450 MHz—a laboratory comparison [J]. Food technology, 1963, 17(10): 1309-1312.
- [5] PIYASENA P, DUSSAULT C, KOUTCHMA T, et al. Radio frequency heating of foods: Principles, applications and related properties—A review [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2003, 43(6): 587-606.
- [6] FARAG K W, LYNG J G, MORGAN D J, et al. A comparison of conventional and radio frequency tempering of beef meats: Effects on products temperature distribution [J]. Meat science, 2008, 80(2): 488-495.
- [7] UYAR R, ERDOĞDU F, MARRA F. Effect of load volume on power absorption and temperature evolution during radio-frequency heating of meat cubes: A computational study [J]. Food and bioproducts processing, 2014, 92(3): 243-251.
- [8] JIAO Y, TANG J M, WANG S J. A new strategy to improve heating uniformity of low moisture foods in radio frequency treatment for pathogen control [J]. Journal of food engineering, 2014, 141: 128-138.
- [9] 刘嫣红, 杨宝玲, 毛志怀. 射频技术在农产品和食品加工中的应用[J].

- 农业机械学报, 2010, 41(8): 115-120.
- [10] ROMANO V, MARRA F. A numerical analysis of radio frequency heating of regular shaped foodstuff [J]. Journal of food engineering, 2008, 84(3): 449-457.
- [11] TIWARI G, WANG S, TANG J, et al. Computer simulation model development and validation of radio frequency (RF) heating of dry food materials [J]. Food Eng, 2011, 105: 48-55.
- [12] UYAR R, BEDANE T F, ERDOĞDU F, et al. Radio-frequency thawing of food products: A computational study [J]. Journal of food engineering, 2015, 146: 163-171.
- [13] WANG S, MONZON M, JOHNSON J A, et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: I. Heating uniformity and energy efficiency [J]. Postharvest Biol Technol, 2007, 45(2): 240-246.
- [14] CATHCART W H, PARKER J J. Defrosting frozen foods by high frequency heat [J]. Food research, 1946, 11(4): 341-344.
- [15] 胡晓亮, 王易芬, 郑晓伟, 等. 水产品解冻技术研究进展 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(29): 39-46.
- [16] 朱传琴, 王亚盛. 冷冻食品射频解冻系统的设计方案 [J]. 食品机械, 2008(3): 57-59.
- [17] JASON A C, SANDERS H R. Dielectric thawing of fish. I. Experiments with frozen herrings [J]. Food technology, 1962, 16(6): 101-116.
- [18] MARRA F, LYNG J, ROMANO V, et al. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model [J]. Journal of food engineering, 2007, 79(3): 998-1006.
- [19] 王亚盛. 冷冻鲢鱼的介电常数与射频解冻效果研究 [J]. 安徽农业科学, 2006, 19(34): 5130-5131, 5134.
- [20] DÍAZ-TENORIO L M, GARCÍA-CARREÑO F, PACHECO-AGUILAR R. Comparison of freezing and thawing treatments on muscle properties of Whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Journal of food biochemistry, 2007, 31(5): 563-576.
- [21] 崔瑾, 衣绍庄, 谷小慧, 等. 冻藏黄花鱼微波解冻条件的研究 [J]. 食品科技, 2012, 37(3): 69-72.
- [22] 马燕, 田少君. 微波技术在食品解冻中的研究进展 [J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(6): 35-38.
- [23] 李念文, 谢晶, 周然. 金枪鱼解冻方法及解冻品质评价的研究进展 [J]. 广东农业科学, 2012(19): 108-111.
- [24] 刘玉敏, 王静, 李兆杰, 等. 微波解冻对冷冻食品菌落总数的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14382-14383, 14386.
- [25] 郑洁, 葛妍妍, 卞雨隆, 等. 微波功率对干燥即食调理对虾品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(26): 21-22.
- [26] 张倩, 张国琛, 母刚, 等. 微波真空干燥对虾扇贝闭壳肌营养成分的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(6): 604-609.
- [27] 关志强, 郑立静, 李敏, 等. 罗非鱼片热泵-微波联合干燥工艺 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 270-275.
- [28] 张国琛, 李莎, 张倩, 等. 脱毒海星微波真空干燥工艺优化 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 289-295.
- [29] 张国琛, 张倩, 齐妍, 等. 变功率微波真空间歇干燥扇贝柱的研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(4): 350-354.
- [30] 贾敏, 薛长湖, 丛海花, 等. 频率和温度对鲍鱼介电特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(18): 182-185.
- [31] 李桂芬, 娄永江. 微波能对带鱼杀菌保鲜的研究 [J]. 中国水产, 2001, 28(3): 64-66.
- [32] 金声琅, 丁芸. 鱼丸的微波灭菌和加热灭菌的比较 [J]. 肉类研究, 2006, 20(12): 29-32.
- [33] 吴东雷, 汪仕韬, 邵卫卫, 等. 湿态紫菜微波杀菌技术研究 [J]. 食品研究与开发, 2016, 37(5): 26-29.
- [34] ALFAIFI M. Disinfestation of dried fruits using radio frequency energy [D]. Washington: Washington State University, 2013.
- [35] ALFAIFI B, TANG J M, JIAO Y, et al. Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: Model development and validation [J]. Journal of food engineering, 2014, 120: 268-276.