

射频解冻过程中食品加热均匀性影响因素的研究进展

姜纪伟, 周 纷, 张艳霞, 王锡昌*

(上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘 要: 射频加热(radio frequency, RF)技术作为一种新兴加热技术, 是一种高效、低能耗的可替代传统加热的热处理方法。该方法在提高工业效率的同时又可保证食品的质量安全性及品质, 可满足食品工业中的解冻以及其他加工需求, 在食品工业中具有越来越大的应用潜力和发展前景。但解冻过程中存在的“边缘效应”等加热不均匀问题仍是制约该技术的一个瓶颈。本研究对射频解冻及其原理进行了介绍, 并总结了影响解冻过程中加热均匀性等问题的因素, 包括电磁场、射频功率、电极电压及间隙、食品的介电特性等, 以期对射频解冻技术的研究及改善加热均匀性等未来研究发展方向提供参考。

关键词: 射频解冻; 加热均匀性; 样品形状; 电极间隙; 介电特性

Research progress on influencing factors of food heating uniformity in radio frequency thawing process

JIANG Ji-Wei, ZHOU Fen, ZHANG Yan-Xia, WANG Xi-Chang*

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: Radio frequency (RF) heating technology is an efficient and low energy consumption heating method which can replace traditional heating as an emerging heating technology. It can not only improve the industrial efficiency, but also guarantee the safety and quality of food at the same time, which can meet the thawing and other processing needs in the food industry and has an increasing application potential and development prospects in food industry. However, the uneven heating problem such as edge effect in the thawing process is still a bottleneck restricting the technology. This paper introduced the radio frequency thawing and its principles, and summarized the affect heating uniformity during the thawing process, including electromagnetic field, radio frequency power, electrode voltage and gap, and dielectric properties of food, etc, in order to provide a reference for future research and development directions such as the improvement of radio frequency thawing technology and the solution of heating unevenness.

KEY WORDS: radio frequency thawing; heating uniformity; sample shape; electrode gap; dielectric properties

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFD0901006)

Fund: Supported by National Key R&D Program of China(2018YFD0901006)

*通讯作者: 王锡昌, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与品质评价。E-mail: xcwang@shou.edu.cn

*Corresponding author: WANG Xi-Chang, Ph.D, Professor, College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, No. 999 Hucheng Ring Road, Pudong New District, Shanghai 201306, China. E-mail: xcwang@shou.edu.cn

1 引 言

冷冻是鱼类、肉类保存的常用方法, 对于延长产品保质期、维持其风味和营养价值具有重要意义^[1]。冷冻包括实际冷冻、冷冻储存和解冻 3 个阶段, 是保持食品质量的关键操作^[2,3]。传统解冻方法通常包括自然空气解冻、流水解冻^[4]、低温静置解冻等, 这类方法由于较长的解冻时间可能导致产品的蛋白质溶解度降低和汁液流失^[5], 并且解冻不均匀以及解冻方法热转化不良的缺点也会导致营养价值降低。因此, 为了克服这些问题, 研究人员不断寻求新型的解冻技术, 如射频解冻 (radio frequency, RF)、高压静电场 (high-voltage static electric field, HVEF) 解冻、欧姆解冻、微波解冻以及压力辅助解冻等^[6-8]。与传统解冻相比, 这些新兴技术虽具有较短的解冻时间以及减少了微生物生长和品质劣变速度等优势, 但同时也存在一些技术方面的问题, 例如高压静电场解冻不仅成本高, 并且还易产生臭氧, 发生蛋白质变性和脂质氧化^[9,10]; 欧姆解冻又易发生轻微电穿孔和电极腐蚀, 高度损伤细胞, 存在潜在食品毒理学风险^[11]。

射频解冻采用 300 kHz~300 MHz 的电磁波, 使离子发生振荡摩擦而产热进行解冻^[12]。微波解冻和射频解冻都属于介电解冻。射频解冻常用的频率为 13.56、27.12 和 40.68, 微波解冻常用频率为 915 和 2450 MHz^[13,14], 它们都是利用冻肉中的极性分子和电离子在电磁力驱动下相互影响, 使冻肉内能增加而实现快速解冻^[15]。微波解冻虽因其极快的解冻速度、较少的质量损失、较成熟的技术方案而快速普及, 但相对于射频解冻, 由于其所需频率更高、分子运动更剧烈、解冻速率高, 更容易造成解冻温度不均及局部过热现象^[16,17]。根据目前研究发现, 射频解冻技术不仅具有更快的解冻时间和更低的能耗, 而且具有低频率和高穿透深度的优势^[18-20], 更适合解冻尺寸较大的冷冻食品, 且均匀度更好, 在工业应用中更具优势。

射频解冻方式虽具有解冻速率快等优点, 但由于穿透能力、样品尺寸、形态、成分等的不同, 也容易产生加热不均匀现象甚至是“边缘效应”, 即在加热过程中, 由于功率水平和边缘处电磁场弯曲, 射频产生的能量更趋向于边缘从而使中心温度上升很慢^[18], 导致产品品质不均等问题^[18-22]。虽然一些研究人员研究了食品材料 RF 加热过程中的温度分布, 并采取了一些措施减弱其不均匀温度分布程度^[23-27], 但并未彻底解决该问题, 因此关于该方面问题仍需进一步研究。Tiware 等^[28]报道, 不均匀温度分布可使食品表面或内部不同部位过热或全部过热进而导致质量损失。目前冷点导致肉类产品温度不均匀分布已引起广泛关注,

温度不均匀分布会进而导致细菌存活、对消费者健康产生潜在威胁^[29]。随着计算机模拟技术、红外、光纤测温技术和介电特性测量技术迅速发展, 提出了许多改善射频解冻过程均匀性的方法, 主要有: 通过传送带输送、加热间隙对物料进行搅拌、热风辅助加热、物料周围辅助介质等^[21,24,30]。鉴于此, 本文介绍并分析了射频解冻过程的加热不均匀性问题, 并对影响射频解冻过程中的加热不均匀性的相关因素进行了详细叙述和讨论, 为射频解冻技术的发展提供一定的理论依据, 并为射频解冻技术的研究及改善加热均匀性等未来研究发展方向提供参考。

2 射频装置

典型的 RF 系统由 2 个主要部件组成: 发电机和施加器。发生器部分主要用于产生 RF 能量, 施加器是金属结构。通过 RF 传输钢带将 RF 产生的能量引导到待加热的产品。目前在商业应用中主要使用 2 种 RF 系统: 开路 (也称为自激振荡器) 和 50 Ω 技术^[31]。目前开放式射频系统广泛应用于许多工业, 由于 50 Ω 系统比开路系统更昂贵, 所以并没有被工业普遍使用。开路 RF 系统主要借助于产生电磁能量的 RF 发生器产生热量。将目标材料放置在顶部电极和底部电极之间, 在传送带上移动以模拟连续过程, 存储电能的电容器和用于将电能传递到热能的电阻器以及具有可调节高度的顶部电极板通过馈电条感应耦合到振荡器的电路以此进行射频加热。图 1 为射频装置简易示意图。

3 射频解冻过程中加热均匀性的影响因素

3.1 电磁场

非均匀电磁场分布是导致 RF 处理期间不均匀加热的主要因素。射频加热系统设计中包括许多因素, 例如电极间隙、电极形状和电场频率以及样品位置, 这些因素都可能会影响 RF 处理产品中电磁场分布。图 2 标示了放置在 2 个平行板电极之间的矩形电介质材料的典型电磁场分布, 电场偏转会导致样品中心电场强度提高^[32], 因此食物几何形状的内电磁场必须均匀以确保均匀加热。为实现此目的, 可以使用额外方法 (如电极附件, 移动样品位置或 2 种方法结合) 来确保工业应用的射频加热均匀性。根据 Alfaifi 等^[33]和 Huang 等^[23]说法, 可通过使拐角变圆并减小封装几何形状边缘以及改变电极配置, 以改善矩形样品中的电磁场均匀性, 从而保证 RF 加热过程中温度的均匀分布。但由于射频装置较大, 对其设备的电极形状及电极附件等进行更改可能会有一些操作上的不便, 不易实施, 因此可对食品的边缘进行处理进一步改善加热均匀性。

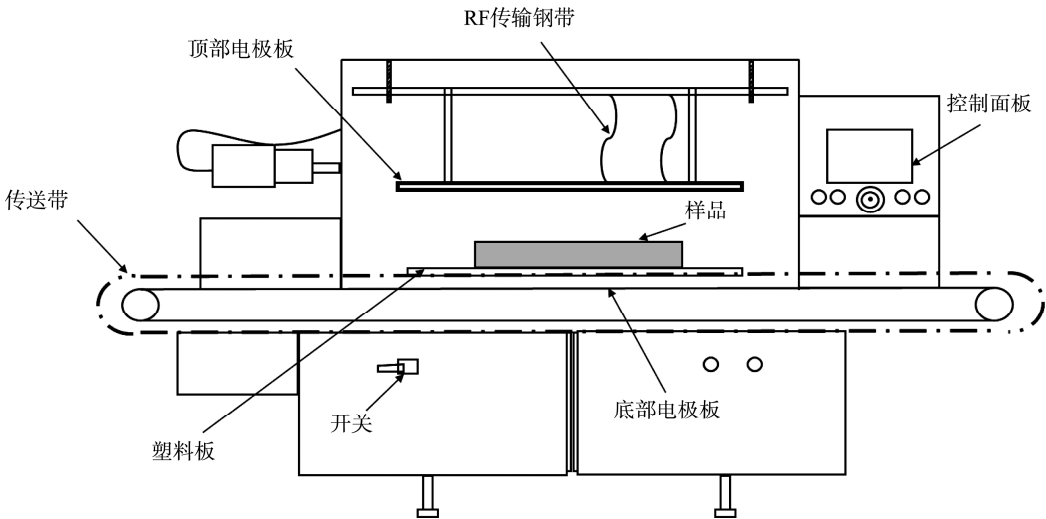


图 1 射频解冻实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of radio frequency thawing experimental device

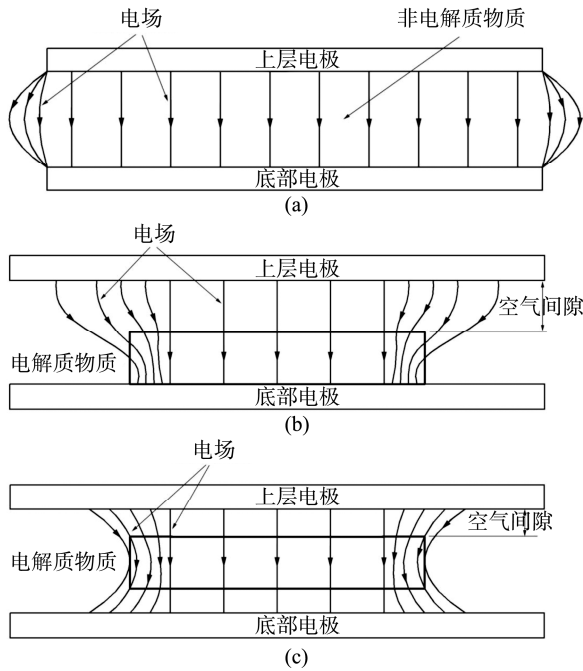


图 2 放置在 2 个平行板电极之间的矩形电介质材料的典型电磁场分布^[32]

Fig.2 Typical electromagnetic field distribution of a rectangular dielectric material placed between 2 parallel plate electrodes^[32]

3.2 射频功率

功率也是影响加热均匀性的关键因素之一，功率增加时射频产生的能量逐渐增加，导致加热过程中样品的温度从中心到边缘逐渐升高，从而导致温度分布不均匀。Marra 等^[13]使用有限元分析求解电磁和热方程，研究不同输出功率和加热速率下，RF 处理过程中圆柱形肉丸的温度分布。结果表明，使用较低输出功率可使温度分布更均

匀。Romano 等^[34]的研究也印证了这一结论，通过使用肉糜作为食品 RF 加热模型，发现施加功率越高，温度分布越不均匀，而当射频功率衰减时，却可以实现更均匀的加热。所以在今后的研究中可以针对不同食品适当调节功率大小进而实现其加热均匀性的改善

3.3 电极配置和顶部电极电压

Tiwari 等^[28]评估了顶部电极弯曲和角度对射频加热均匀性的影响，结果表明，顶部电极弯曲位置对样品功率均匀性指数(pulverized uniformity index, PUI)影响很大，电场大小及其在样品内分布随顶部电极弯曲位置和角度而变化，调整到特定顶部电极的弯曲位置和角度，可实现特定样品尺寸最佳 RF 加热功率均匀性。此外，Tiwari 等^[25]也发现不同的回射距离(样品边缘与底部基座和新设计电极顶部之间距离)和弯曲角度对射频加热后的填充在矩形容器内的葡萄干加热均匀性有一定影响；Alfaifi 等^[33]发现，处理具有不同介电特性、热物理性质和不同尺寸的材料，需要不同电极配置；Uyar 等^[35]和 Wang 等^[36]发现，电压在整个上极板表面是变化的，在电压输入点处最小，离输入点越远电压越大；Huang 等^[22]报道，较高顶部电极电压可导致绿豆 RF 加热时间更短。其他研究也发现顶部电极电压对 RF 加热速率也具有一定的影响^[37]。综上，适当地调整电极弯曲位置和角度以及顶部电极电压可以有效改善射频解冻过程中的加热均匀性。但其弯曲位置和角度还需进一步的针对性的研究和探索。

3.4 电极尺寸及其电极间隙

在 RF 加热处理期间，一些几何因素，例如电极之间距离和样品顶部电极的大小等对样品加热均匀性具

有一定影响。电极大小及其电极间隙导致的不同影响结果如表 1 所示。目前关于电极大小和电极间隙的研究表明, 使用与样品相同尺寸电极和适当减小电极间隙可适当提高加热均匀性。

表 1 电极大小及其电极间隙导致的不同影响结果
Table 1 Different effects of electrode size and electrode gap

因素	影响	参考文献
电极大小	使用与样品相同尺寸电极温度分布会更均匀。	[38]
	尺寸大于样品表面的电极可导致样品边缘处温度更高。	[38]
	使用尺寸小于样品的电极温度分布会不规则。	[12,38]
	顶部电极面积为样品尺寸的 1.32 倍时, 样品角落和边缘热点将大大减少。	[39]
	电极间隙减小时, 不均匀倾斜电场比例逐渐缩小, 产品温度最高部分获得更多加热功率。	[25]
电极间隙	样品体积逐渐减小, 电极和样品表面之间气隙增加导致电场偏转, 降低了样品内电场浓度。	[35]
	随着电极间隙增加, 射频加热速率降低。	[24]
	对于固定样品高度, 间隙增加, 导致加热速率随着电极间隙增加而降低	[22]
	电极间隙增加时, 导致样品边缘处温度较低。	[18]
	改变电极间隙来控制功率水平: 电极间隙越小, 能量越高。不同电极间隙处理导致解冻时间和温度分布差异明显。	[18]
	功率逐渐增加, 角落和边缘加热较快, 较大电极间隙代表较低功率, 此情况下边缘效应不明显。	[33]

3.5 食品的介电特性

食品的介电特性是影响射频加热的主要因素, 它会随电磁场分布和温度的变化而变化, 进而影响电磁波和物料的相互作用。当周围材料介电常数在样品的可比较范围内时, 可以改善 RF 加热均匀性。Birla 等^[40]报道, 射频加热新鲜水果的温度分布不均匀是由食物和周围介质(通常是空气)之间的不同介电特性差异引起的。添加盐可以改变水的介电特性, 可以减小水果和水之间的不同加热时间之间的差异。Wang 等^[41]发现, 射频循环水加热预包装马铃薯泥时, 周围介质水电导率增加时, 加热均匀性明显改善。Tiwari 等^[25]报道, 周围材料介电常数(介于 8 和 11 之间)接近小麦粉介电常数值(固定为 8)时, 功率均匀性指数(power uniformity index, PUI)最低。同时也发现周围材料介电常数在 8 到 11 之间, 温度均匀性指数(temperature uniformity index, TUI)最低。Jiao 等^[42]发现, 使用聚醚酰亚胺(polyetherimide, PEI)辅助法后, 介电损耗因子较低。损耗因子远小于介电常数时, 介电常数会决定其电场分布。Huang 等^[39]发现, 当周围材料介电常数(3.0)接近大豆样品(3.6)时, 可实现温度均匀性。使用具有低损耗因子和相似介电常数的周围材料而不是空气可减少一定的电场畸变。Huang 等^[23]将大豆样品放置在聚苯乙烯容器中发现可提高加热均匀性, 可能是因为聚苯乙烯与大豆介电常数最接近和具有较低介电损耗因子值。该研究还发现容器材料的厚度和角半径对射频加

热过程中大豆的均匀性均具有显著影响。Huang 等^[43]发现, 周围材料和样品之间介电常数差异较大时, 电场偏转和变形频繁增加。当容器介电常数等于样品介电常数时, 电场畸变减小。容器的介电常数随着固定样品介电常数值增加时会导致温度均匀性的增加。当样品介电常数为<7 时, 周围容器介电常数小于样品, TUI 最低; 样品介电常数≥7, 当周围容器介电常数大于样品时, TUI 开始达到最小值; 周围容器介电常数与样品介电常数相当时, TUI 具有最小值。

这些结果表明, 选择最合适的周围材料去改善各种食品中的 RF 加热均匀性是可靠的。使用特定介电常数值周围材料还可以实现其他干燥产品(例如杏仁、扁豆、小麦、胡桃)的最佳 RF 加热均匀性^[44]。但由于不同食品的介电特性不同, 所以可能需要不同介电特性的周围材料, 因此在研究过程中必须要考虑食品的特性, 所以仍需进行进一步研究及总结, 确定适合大部分食品的介电材料, 并进行分类应用。

3.6 加热容器

Jiao 等^[45]用高耐热性和电气强度的介电材料 PEI 限制其在 RF 加热期间的吸热性, 使热量更多集中在食品上。实验将 PEI 块的高度逐渐增加, 加热效果随着热点切换到样品中心和 PEI 块之间的位置而改变, 使得加热均匀性下降。尽管较高的 PEI 块没有提供最佳加热均匀性, 但经此 PEI 块盛装的样品外层具有较低温度, 此加热模式使其更适合与传统热空气或热水

加热组合去提高温度均匀性。Huang 等^[43]研究容器尺寸对射频加热均匀性的影响,用实验和计算机模拟选择了小型和中型容器(容器材料为云母板)进行实验室规模试验,选择宽度与顶部电极相同的大型容器用于工业规模应用,并对 3 个不同长度和宽度的容器进行模拟,结果发现在大容器中获得了最佳加热均匀性;随着云母板厚度增加,所有均匀度指数均先下降,之后逐渐增加。板厚对于改善小容器中样品的 RF 加热均匀性起重要作用。此研究同时发现,在电极之间放置具有不均匀厚度的均质样品时,样品较厚部分会吸收更多能量并且更快加热。刘艳^[46]采用不同包裹样品方式,改变与物料表面接触的介质材料,以达到不同解冻效果。结果表明,不同包裹方式对于温度变化趋势影响不大,但是解冻终点整体温度有差异。今后可以在射频实验中应用高耐热性和电气强度的介电材料以及适当厚度的立方体形状加热容器,以此进一步改善加热均匀性效果。

3.7 样品几何形状、放置方向及其位置

样品几何形状、放置方向及其位置同样也会对加热均匀性产生一定的影响。Marra 等^[13]研究了形状、方向和位置对 RF 加热的影响,发现立方体形状更适于 RF 加热处理,因为立方体形产品表现出快速且更均匀加热能力及吸收能力^[25,47]。若产品为圆柱形,建议采用垂直放置方向和位置,因为水平方向圆柱体加热较慢,并且温度分布不均匀^[48]。Birla 等^[40]发现球形受 RF 加热影响较低。刘艳^[46]采用不同形状聚丙烯保鲜盒将羊肉进行圆柱体、立方体、球体冻结塑形。解冻后发现圆柱体和立方体形状解冻均匀性指数更低,解冻均匀性更优;且立方体处理较圆柱体稍有优势。球体肉块解冻时间长,表面部分过度加热,且发生局部受热变性,解冻效果较差。

Tiwari 等^[25]进行的模拟结果表明,样品尺寸接近于零,或者是保持在射频电极之间的最大可能尺寸对射频加热功率均匀性更好。随着尺寸增加,大部分电场倾斜进入,此时如果尺寸小于电极尺寸,样品边缘和角落会产生偏转^[42]。倾斜电场会增加样品中射频加热功率不均匀性^[40],正如 Uyar 等^[35]证明,在电极和样品之间固定气隙中,样品体积越小,样品加热速率越快。根据 Uyar 等^[47]的结论,若将电极保持恒定距离,样品体积减小会影响温度评估。其他结果表明,投影面积越宽加热越快,但温度分布不均匀^[13]。当样品放置在射频电极中间时,温度分布会更均匀,这是由于顶部和底部边缘偏转的电场增加了样品中心部分的净电场浓度^[39,42]。Yang 等^[18]发现同一电极间隙解冻同尺寸冷冻鱼块,尺寸越大解冻效果越好,且温度分布更

均匀。因此发现增加食品尺寸可以降低电磁场边缘效应,以此改善加热过程中的不均匀问题。针对不同结果,可对食品尺寸进行进一步的研究。

3.8 样品密度和周围容器密度的大小关系

有研究发现周围容器密度越小,样品内部 RF 加热均匀性更好^[22]。Huang 等^[43]发现周围容器密度逐渐增加时,TUI 起初略有下降,但随后显著增加,这是由于加热密度值较低,低密度周围容器可提供更好的加热均匀性,导致更高的射频加热速率^[22]。从周围容器和样品的密度线性关系结果可以推断,当周围容器密度远小于样品密度时,可以实现样品均匀加热,并且可进一步用于其他干燥产品加热均匀性的改善和其他应用。Huang 等^[23]发现,将大豆样品放入聚苯乙烯容器(低密度)中,TUI 明显提高,产品质量保持良好,此结果同样也适用于其他低水分食物。综上,适当选择较低密度的周围容器能够对食品的加热均匀性起到一定的改善作用,所以今后也可从容器密度方面对周围容器进行进一步的确定,以改善射频解冻过程中食品的加热均匀性。

4 结论与展望

本研究对射频解冻过程中食品加热均匀性影响因素的研究进展进行了综述。射频解冻技术作为一种新型解冻技术,是一种有较好发展前景的替代传统的热处理方法,在提高生产效率和工艺水平的同时又可保证食品的安全性及品质,在食品工业中具有广泛的应用潜力和发展前景。目前国内外针对于食品射频解冻均匀性的问题主要从射频功率、电极电压及间隙、样品尺寸、食品的介电特性及样品密度与周围密度的大小关系等几个方面进行了分析和研究。但这些研究仅考虑了样品在射频电场中的静止状态下的加热均匀性的差异,研究范围较片面。所以在今后需要对其动态下的射频加热过程进行进一步的研究。如可以考虑改装射频设备以实现物料在解冻过程中的移动或翻转(不仅仅局限于传送带),并深入研究食品运动和翻转过程中的解冻均匀性。

参考文献

- [1] Li D, Jia S, Zhang L, et al. Effect of using a high voltage electrostatic field on microbial communities, degradation of adenosine triphosphate, and water loss when thawing lightly-salted, frozen common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. J Eng, 2017, 212(12): 226–233.
- [2] Cai L, Cao M, Cao A, et al. Ultrasound or microwave vacuum thawing of red seabream (*Pagrus major*) fillets [J]. Ultrason Sonochem, 2018, (47): 122–132.
- [3] 胡晓亮, 王易芬. 水产品解冻技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(29): 39–46.

- Hu XL, Wang YF. Research progress of aquatic product thawing technology [J]. Chin Agric Sci Bull, 2015, 31(29): 39–46.
- [4] 袁琳娜, 李洪军, 王兆明, 等. 新型冷冻和解冻技术在肉类食品中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 220–227.
- Yuan LN, Li HJ, Wang ZM, *et al.* Research progress of the application of new freezing and thawing technology in meat food [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(2): 220–227.
- [5] Mousakhani-Ganjeh A, Hamdami N, Soltanizadeh N. Thawing of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) using still air method combined with a high voltage electrostatic field [J]. J Food Eng, 2015, (169): 149–154.
- [6] Zhu SM, Su GM, He JS, *et al.* Water phase transition under pressure and its application in high pressure thawing of agar gel and fish [J]. J Food Eng, 2014, (125): 1–6.
- [7] Choi MJ, Min SG, Hong GP. Effects of pressure-shift freezing conditions on the quality characteristics and histological changes of pork [J]. LWT Food Sci Technol, 2016, (67): 194–199.
- [8] 郑大字, 刘蕾, 毛伟杰, 等. 金枪鱼解冻技术研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2017, 33(1): 56–60.
- Zheng DY, Liu L, Mao WJ, *et al.* Research on tuna thawing technology [J]. J Harbin Univ Comm (Nat Sci Ed), 2017, 33(1): 56–60.
- [9] He XL, Liu R, Tasumi E, *et al.* Factors affecting the thawing characteristics and energy consumption of frozen pork tenderloin meat using high-voltage electrostatic field [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2014, (22): 110–115.
- [10] Rahbari M, Hamdami N, Mirzaei H, *et al.* Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein [J]. J Food Eng, 2018, 216(1): 98–106.
- [11] Jaeger H, Roth A, Toepfl S, *et al.* Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods [J]. Trends Food Sci Technol, 2016, (55): 84–97.
- [12] Llave Y, Terada Y, Fukuoka M, *et al.* Dielectric properties of frozen tuna and analysis of defrosting using a radio-frequency system at low frequencies [J]. J Food Eng, 2014, (139): 1–9.
- [13] Marra F, Lyng J, Romano V, *et al.* Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model [J]. J Food Eng, 2007, 79(3): 998–1006.
- [14] Guo Q, Sun DW, Cheng JH, *et al.* Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry [J]. Trends Food Sci Technol, 2017, (67): 236–247.
- [15] Farag KW, Lyng JG, Morgan DJ, *et al.* A comparison of conventional and radio frequency thawing of beef meats: Effects on product temperature distribution [J]. Meat Sci, 2011, 4(7): 1128–1136.
- [16] 胡晓亮, 王易芬, 李玉林, 等. 无线电波频率和温度变化对狭鳕鱼糜介电特性的影响[J]. 核农学报, 2018, (8): 1543–1548.
- Hu XL, Wang YF, Li YL, *et al.* Effects of radio frequency and temperature changes on the dielectric properties of pollock surimi [J]. J Nucl Agric, 2018, (8): 1543–1548.
- [17] 张建敏. 射频解冻机理与自适应射频电源研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- Zhang JM. Research on the mechanism of radio frequency thawing and adaptive radio frequency power supply [D]. Jinan: Shandong University 2019.
- [18] Yang H, Chen Q, Cao H, *et al.* Radio frequency thawing of frozen minced fish based on the dielectric response mechanism [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2018, (52): 80–88.
- [19] Hafezparast-Moadab N, Hamdami N, Dalvi-Isfahan M, *et al.* Effects of radiofrequency-assisted freezing on microstructure and quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2018, (47): 81–87.
- [20] Nagaraj G, Singh R, Hung YC, *et al.* Effect of radio-frequency on heating characteristics of beef homogenate blends [J]. LWT Food Sci Technol, 2015, 60(1): 372–376.
- [21] Huang Z, Chen L, Wang S. Computer simulation of radio frequency selective heating of insects in soybeans [J]. Int J Heat Mass Trans, 2015, (90): 406–417.
- [22] Huang Z, Zhu H, Wang S, *et al.* Finite element modeling and analysis of radio frequency heating rate in mung beans [J]. Trans Asabe, 2015, (58): 149–160.
- [23] Huang Z, Zhang B, Marra F, *et al.* Computational modeling of the impact of polystyrene containers on radio frequency heating uniformity improvement for dried soybeans [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2016, (33): 365–380.
- [24] Jiao Y, Tang J, Wang S. A new strategy to improve heating uniformity of low moisture foods in radio frequency treatment for pathogen control [J]. J Food Eng, 2014, (141): 128–138.
- [25] Tiwari G, Wang S, Tang J, *et al.* Analysis of radio frequency (RF) power distribution in dry food materials [J]. J Food Eng, 2011, 104(4): 548–556.
- [26] Zhang P, Zhu H, Wang S. Experimental evaluations of radio frequency heating in low-moisture agricultural products [J]. Emirates J Food Agric, 2015, 27(9): 1.
- [27] Zhou H, Guo C, Wang S. Performance comparison between the free running oscillator and 50 Ω radio frequency systems [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2017, (39): 171–178.
- [28] Tiwari G, Wang S, Tang J, *et al.* Computer simulation model development and validation for radio frequency (RF) heating of dry food materials [J]. J Food Eng, 2011, 105(1): 48–55.
- [29] Rincon AM, Singh RK, Stelzleni AM. Effects of endpoint temperature and thickness on quality of whole muscle non-intact steaks cooked in a radio frequency oven [J]. LWT Food Sci Technol, 2015, 64(2): 1323–1328.
- [30] Zheng AJ, Zhang B, Zhou LY, *et al.* Application of radio frequency pasteurization to corn (*Zea mays* L.): Heating uniformity improvement and quality stability evaluation [J]. J Stored Prod Res, 2016, (68): 63–72.
- [31] Marra F, Zhang L, Lyng JG. Radio frequency treatment of foods: A review of recent advances [J]. J Food Eng, 2009, 91(4): 497–508.
- [32] Uyar R, Bedane TF, Erdogdu F, *et al.* Radio-frequency thawing of food products-A computational study [J]. J Food Eng, 2015, (146): 163–171.
- [33] Alfaifi B, Tang J, Jiao Y, *et al.* Radio frequency disinfection treatments for dried fruit: Model development and validation [J]. J Food Eng, 2014, 120(1): 268–276.
- [34] Romano V, Marra F. A numerical analysis of radio frequency heating of regular shaped foodstuff [J]. J Food Eng, 2008, 84(3): 449–457.
- [35] Uyar R, Erdogdu 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 Bioprod Process, 2014, 92(3): 243–251.
- [36] Wang Y, Zhang L, Gao M, *et al.* Evaluating radio frequency heating uniformity using polyurethane foams [J]. J Food Eng, 2014, (136): 28–33.
- [37] Zhu H, Huang Z, Wang S. Experimental and simulated top electrode

- voltage in free-running oscillator radio frequency systems [J]. J Electromagn Waves Appl, 2014, 28(5): 606–617.
- [38] Llave Y, Liu S, Fukuoka M, *et al.* Computer simulation of radiofrequency defrosting of frozen foods [J]. J Food Eng, 2015, (152): 32–42.
- [39] Huang Z, Zhu H, Yan R, *et al.* Simulation and prediction of radio frequency heating in dry soybeans [J]. Biosys Eng, 2015, (129): 34–47.
- [40] Birla SL, Wang S, Tang J. Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water [J]. J Food Eng, 2008, 84(2): 270–280.
- [41] Wang J, Olsen RG, Tang J, *et al.* Influence of mashed potato dielectric properties and circulating water electric conductivity on radio frequency heating at 27 MHz [J]. J Microwave Power, 2008, 42(2): 31–46.
- [42] Jiao S, Deng Y, Zhong Y, *et al.* Investigation of radio frequency heating uniformity of wheat kernels by using the developed computer simulation model [J]. Food Res Int, 2015, (71): 41–49.
- [43] Huang Z, Marra F, Wang S. A novel strategy for improving radio frequency heating uniformity of dry food products using computational modeling [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2016, (34): 100–111.
- [44] 周洪学. 射频系统加热性能及均匀性改善研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Zhou HX. Heating performance and uniformity improvement of radio frequency systems [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [45] Jiao Y, Shi H, Tang J, *et al.* Improvement of radio frequency (RF) heating uniformity on low moisture foods with polyetherimide (PEI) blocks [J]. Food Res Int, 2015, (74): 106–114.
- [46] 刘艳. 羊肉射频解冻技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- Liu Y. Research on mutton radio frequency thawing technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [47] Uyar R, Erdogdu F, Sarghini F, *et al.* Computer simulation of radio-frequency heating applied to block-shaped foods: Analysis on the role of geometrical parameters [J]. Food Bioprod Process, 2016, (98): 310–319.
- [48] Huang Z, Marra F, Subbiah J, *et al.* Computer simulation for improving radio frequency (RF) heating uniformity of food products: A review [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2016, 58(6): 1033–1057.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介



姜纪伟, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与品质评价。

E-mail: 13796709428@163.com



王锡昌, 教授, 主要研究方向为食品营养与品质评价。

E-mail: xcwang@shou.edu.cn