

射频加热技术在食品工业中的应用 Application of radio frequency heating in food industry

李玉林^{1,2,3,4} 焦阳^{1,2,3,4} 王易芬^{1,2,3,4,5}

LI Yu-lin^{1,2,3,4} JIAO Yang^{1,2,3,4} WANG Yi-fen^{1,2,3,4,5}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品热加工工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 国家淡水水产品加工技术研发分中心〔上海〕, 上海 201306; 4. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心,
上海 201306; 5. 奥本大学生物系统工程系, 美国 奥本 36849-5417)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center of Food Thermal-processing Technology, Shanghai 201306, China; 3. National R&D Branch Center for Freshwater Aquatic Products Processing Technology〔Shanghai〕, Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 5. Department of Biosystems Engineering, Auburn University, Auburn, Alabama 36879-5417, USA)

摘要:射频加热技术作为一种新型热加工技术,其在食品干燥、杀菌、杀虫、解冻等领域的潜力被广泛开发,并且在这些领域已有部分工业应用。文章综述了射频加热技术机理、在食品领域的应用以及射频加热过程的数学建模方法,指出了射频加热技术目前存在的加热不均匀性等问题及解决方案,并对未来研究的方向进行了展望。

关键词:射频加热;食品加工;介电特性;数学建模

Abstract: The radio frequency (RF) heating is a novel technology in food industry which has the advantages of fast and volumetric heating. The potential application of the radio frequency technology has been gradually developed in many fields including food drying, sterilization/pasteurization, dis-infestation, thawing and etc. However, there are still problems like non-uniform heating problem needs further research. It was reviewed the fundamentals, applications, and mathematical modeling techniques of radio frequency heating processes in this study, and the future research needs of it were also prospected.

Keywords: radio frequency heating; food processing; dielectric properties; mathematical modeling

食品加热在单元操作中占据着重要的地位,其过程直接影响食品的最终质量和安全性,关系到公众的健康^[1]。加热时间、目标温度、加热均匀性、能耗、产品品质等都是人们在食品热加工过程中考虑的重要因素^[2]。

射频加热作为一种新型的加热方式,是利用食品分子在电磁波中的运动,使得食品在射频加热器内升温,达到加热效果。相比较传统加热方式,射频加热具有加热速度快、加热均匀、穿透深度大等优点,有潜力作为新兴技术应用于食品工业中。然而,食品物料的复杂特性均影响其在射频加热过程中的温度分布均匀性,如物料的介电特性、热特性、形状、大小、组分等^[3],使得射频加热技术在多种领域的工业应用尚需一定研究。本文拟介绍射频加热的概念、特点,及其在食品工业中的应用和现存问题,总结计算机模拟技术在射频加热中运用现状,并提出射频加热的发展前景以及未来研究的方向。

1 射频加热原理特点以及能耗分析

1.1 射频的概念

射频(Radio Frequency)是指频率为3 kHz~300 MHz的高频电磁波,一般在家用、工业、科学和医疗领域允许应用的频率为13.56, 27.12, 40.68 MHz^[4]。

射频和微波加热过程同属介电加热过程,其原理可简单描述为在物料内部将电磁能转化为热能的过程。在介电加热过程中,由于波段加热机理不同,食品在电磁场中一般由极性分子转动或离子传导主导生热。微波加热过程由极性分子转动主导,食品中的极性分子随着高频电磁场的极性快速变化而转动,导致分子间摩擦产生热量;射频加热过程主

基金项目:上海市科委浦江人才计划(编号:16PJ1404100);上海市青年东方人才计划(编号:QD2016055);上海市教委高校青年教师培养资助计划(编号:ZZHY15004);国家自然科学基金面上项目(编号:31571866);上海市科委地方院校能力建设项目(编号:16050502200)

作者简介:李玉林,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:焦阳(1985—),女,上海海洋大学副教授,博士。

E-mail: yjiao@shou.edu.cn

收稿日期:2017-09-23

要以离子转动生热,电场不断变化导致离子总是向带有相反电荷的方向运动,使得离子间不断碰撞摩擦生热^[5]。图 1 分别描述了这两种机理。

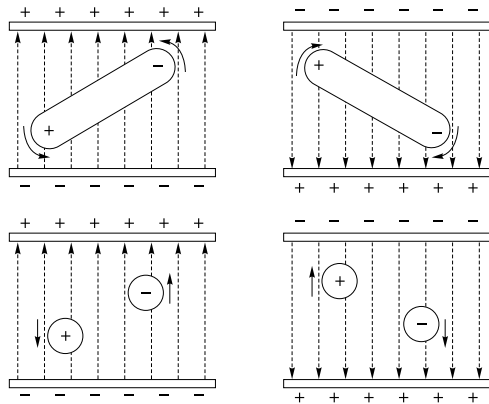


图 1 电磁加热过程中偶极子旋转和离子传导生热原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of dipole rotation and ion conduction principles in electromagnetic heating

1.2 介电特性

介电特性对射频加热食品有重要的影响,它决定了食品和电磁能之间的相互作用,也是影响射频加热效率的关键因素^[6]。

介电特性主要用介电常数与介电损耗来表示,表述为:
 $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, (1)

式中:

ϵ^* ——复介电特性, F/m;

ϵ' ——介电常数,电介质储存外电场能量的能力, F/m;

j ——虚数单位, $j = \sqrt{-1}$;

ϵ'' ——介电损耗,电介质存损耗电场能量的能力, F/m。

对于热传递可忽略的射频加热过程,由于介电材料和电场之间的相互作用而引起的温升可用式(2)表示^[7]:

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 2\pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon'' \quad (2)$$

式中:

ρ ——物料密度, kg/m³;

C_p ——物料比热, J/(kg·℃);

ΔT ——物料的温升,℃;

f ——频率, Hz;

E ——电场强度, V/m;

ϵ_0 ——真空介电常数, 8.85×10^{-12} F/m。

物料的介电特性受频率、温度、脂肪含量、水分含量、盐分含量等的影响^[8]。一般来讲, ϵ' 和 ϵ'' 在射频频段范围均随频率的升高而减小;随温度的升高而增大;随着脂肪含量的升高而减小;随着水分含量的升高而增大; ϵ' 随盐分含量的升高而减小,而 ϵ'' 随盐分含量的升高而增大^[9]。

穿透深度用于描述电磁波进入某种介质的深度,把垂直于表面的平面波的能量在介质内部衰减到它在表面值的 1/e 时的深度叫做穿透深度,一般用 dp 来表示,受温度、食品组

分等影响。可以用式(3)计算:

$$dp = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' [\sqrt{1 + (\epsilon''/\epsilon')^2} - 1]}} \quad (3)$$

式中:

c ——光速, 3×10^8 m/s。

穿透深度在加热过程中用以预测待加热物料的厚度,以保证加热过程中加热效率及温度均匀性。

1.3 射频加热的优势

传统加热方式如热空气、水浴、蒸汽加热等,均依赖于食品本身的导热特性实现由外至内的加热过程,而射频加热以其整体加热的特点,与传统加热方法相比具有较大优势,见表 1。

表 1 射频加热与传统加热的特点对比

Table 1 A comparison between radio frequency and traditional heating

项目	射频加热	传统加热
原理	交变电磁场使得样品内部微观粒子高速转动、振动,摩擦生热	热传导、热对流
加热效率	电磁能到热能的能量转换效率高,且加热速度快,能够避免因加热时间长带来的食品品质劣化	热能传递效率低,且加热速度慢,易导致食品品质劣化
均匀性	整体加热,均匀性好,但在样品尖角处有边角过热的问题	由外及内加热,均匀性差
适用性	射频加热穿透深度深,更适合大宗物料、多孔介质的加热,且场强变化小加热均匀性较好 ^[10]	适合薄层、小体积样品加热
选择性	对不同介电特性的成分具有选择性 ^[11] ,适用于食品的射频干燥和射频杀虫;能够穿透多种包装材料,选择性加热内部食品,避免加工后包装引起的二次污染	无选择性;难以穿透包装,不适于带包装加热
可操作性	工艺设计及调节略复杂	工艺设计及调整简单易行

与传统加热方式相比,射频加热尽管设备成本投入高,但具有能耗低的优点,在工业生产中具有优越性。Wang 等^[12]利用射频对核桃进行杀虫处理,探索所需能耗和成本。研究表明,当每小时对 1 561.7 kg 的核桃进行杀虫时,射频能源利用率为 79.5%,平均每公斤能量消耗花费 0.002 7 美元,与溴代甲烷熏蒸的成本相当。总体来讲,射频加热能量转换效率较高,加热速度快,在能耗核算方面与传统方法相当甚至更优。

2 射频加热技术在食品工业中的应用

2.1 射频在食品干燥中的应用

食品物料热敏感性较强,干燥温度、时间等工艺参数对

食品品质有显著影响。射频干燥以其整体加热、穿透深度大的优势,能够减轻食品表面结壳现象,提高传质效率,适用于去除传统干燥过程降速段难以去除的水分,显著缩短干燥时间,获得更高的食品品质。另外,将射频技术结合其他干燥方式,如:热风干燥,可得到更适于食品干燥的工艺。

Silva 等^[13]对澳洲坚果进行试验,用热风单独干燥时可以将籽粒水分从 33%降低至 1.5%,但耗时 1 个月以上,且游离脂肪酸值已达到 1.2%(规定合格值不高于 1.5%),因此需要研究其他新的干燥工艺来缩减干燥时间,减少其营养的损失。Suchada 等^[14]比较了射频联合干燥和热风干燥稻米的效率,结果发现,联合干燥较热风干燥时间节约了 38%以上,同时节约能耗达 90%,品质无显著差异。Wang 等^[15]用热风辅助射频加热系统来干燥澳洲坚果,分别用 40,50,60 °C 的热风联合 6 kW,27 MHz 的射频加热系统对坚果进行干燥,最终发现热风辅助射频加热系统干燥比单独的热风干燥时间缩短 50%,并且发现单独的热风干燥比热风辅助联合干燥后的过氧化值(PV)和游离脂肪酸值高(FFA),且在加热时间为 240,360 min 时数值较明显,在 240 min 时单独的热风干燥较热风射频联合干燥过 PV 和 FFA 分别高出 0.03 meq/kg 和 0.02%,而在 360 min 时 PV 和 FFA 分别高出 0.09 meq/kg 和 0.04%。张波^[16]利用射频热风联合干燥核桃,结果表明单独使用热风干燥和射频热风联合干燥将核桃水分含量干燥到 8%分别需要 240,100 min,且干燥完成后射频热风联合干燥过的核桃过氧化值明显低于热风干燥的,分别为 0.34,0.58 meq/kg,而自由脂肪酸值和颜色值 2 个指标在 2 种干燥之间并无显著性差异。

2.2 射频在食品杀菌中的应用

射频加热的整体加热特性能够大块食品整体灭菌,尤其是射频可以迅速穿透并加热多孔性物料,因此对于农产品物料的灭菌具有独特优势^[11]。

OrsatV 等^[17]利用 27.12 MHz 的射频加热火腿,结果表明当射频加热物料 5 min 时其中心温度达到 75~85 °C,后进行高阻隔材料真空包装,火腿的保质期可延长至 28 d。刘嫣红等^[18]利用射频—热风联合技术处理了保鲜白面包,与传统的热风处理方式相比,射频—热风处理可以在更低的温度时达到要求的杀菌效果,且加热速率是传统加热方式的 30 倍,可以更好地保证面包的品质。吕晓莹等^[19]以鲜榨猕猴桃汁为研究对象,沙门氏菌为受试菌,使用固定频率 27.12 MHz 的射频设备进行处理,探索了处理时间、极板间距以及猕猴桃汁厚度对射频杀菌效果的影响,证实最优化条件下射频处理可使猕猴桃汁中的沙门氏菌下降 8 个数量级以上。试验中也比较了巴氏杀菌和射频杀菌对猕猴桃汁中 V_C含量的影响,结果表明巴氏杀菌后的 V_C保留率为 93.2%,而射频杀菌的保留率高达 98.1%。Rossana Villa-Rojas 等^[20]对面粉进行了射频灭菌试验,发现加热时间为 8.5~9.0 min、温度达到 75 °C 时,表面加热均匀性最好,其中的沙门氏菌和屎肠球菌能够减少 5~7 个数量级。

可见射频技术在食品灭菌中效果显著,并且能更好地保留食品中的营养物质。

2.3 射频在食品解冻中的应用

射频解冻速度快,生产设备易实现连续性,且能够穿透大部分包装材料,适于带包装食品的解冻,防止外部细菌的入侵繁殖;射频解冻过程不使用水,没有废水排除问题,作业环境优良。因此,射频解冻技术具有较好的应用前景^[21]。

Jason 等^[22]将 3.18 kg、-29 °C 的鱼置于极板间距为 6 cm 的电极板之间进行射频(36~40 MHz)解冻,最终发现射频解冻仅需 12 min,而利用空气解冻需要 16 h,水解冻则需要 3 h,而且射频解冻滴沥损失少,气味、风味更好。Pizza 等^[23]利用功率为 4 kW、频率为 27.5 MHz 的射频解冻猪肉(35 cm×10 cm×11 cm),发现当其中心温度达到 4 °C 时,表面温度达到 13 °C。Farag 等^[24]对瘦肉、肥肉与瘦肉质量比为 1:1 的混合肉、肥肉 3 种类型的牛肉进行了解冻试验,分别利用射频与空气解冻温度范围在 -1~5 °C,重为 4 kg 的牛肉,比较解冻后的温度分布,结果表明,对于瘦肉而言解冻时间射频解冻比空气解冻少,并且终点温度分布较均匀,但肥肉和混合肉的均匀性比瘦肉差。Koray 等^[25]比较了微波和射频解冻冷冻虾块,分别运用 915 MHz 的微波和 27.12 MHz 的射频将虾块从 -22 °C 解冻,发现微波分别利用 500 W 和 1 kW 的功率将物料解冻至 -5~-3 °C 时分别需要 10,4 min,而射频电极板高度分别在 150,160 mm 解冻至相同的温度时分别需要 11,7 min,通过红外成像可得,微波加热表面温度分别达到 7.3 °C(500 W)和 18.6 °C(1 kW),而射频加热后表面温度低于 0 °C,且电极板与物料的距离越大加热后温度均匀性越好。因此,与微波相比,射频解冻均匀性更好。

因此,相比较于传统的空气解冻出现的食品表面发干、失重较大,水解冻造成的微生物侵入食品以至于污染,微波解冻带来的加热不均匀、穿透深度小等缺点,射频解冻技术能够带来更高品质更安全的食品。

2.4 射频在食品蒸煮及漂烫中的应用

Laycock 等^[26]分别用射频加热器和水浴锅加热 3 种形式的肉类(整块的,不均匀搅碎的和均匀搅碎的),发现在 27.12 MHz 下的射频加工到 72 °C 时 3 种肉类所需时间分别为 13.25,13.5,5.83 min,而水浴加工下时间分别为 151,130,109 min,并且射频加工后肉质口感好,色差和滴沥损失较水浴加热少。Zhang 等^[27]研究了肉糜的射频水浴联合蒸煮过程。通过控制不同的循环水温度、输入功率、加热时间、升温后保持时间 4 个变量,当将肉糜定型包装后进入 80 °C 的循环水中,在 500 W 射频加热器中加热 30 min,待样品超过 72 °C 之后维持 2 min,结果发现射频—循环水联合加热时间比传统蒸汽加热时间减少 79%,射频处理后肉糜样品质量损失小于传统的蒸汽加热,且射频处理后肉糜的硬度、胶着性、咀嚼性较传统加热方式高。Mcekenne 等^[28]对 27.12 MHz、500 W 的射频和蒸汽加工火腿肉进行了比较,发现将腿部的火腿肉最冷点加热到 73 °C 时,射频约需 40 min,而蒸汽加热则需 120 min,射频加热较蒸汽加热后肉类的硬度值高出 6.12~14.31 N,咀嚼度高出 3.12~4.28 N,弹性高出 1.35~1.52 mm,渗透试验最大负荷高出 1.52~3.47 N,因

此在这些方面射频加工方式较蒸汽加工效果好。Guo等^[29]研究了射频加热和传统蒸汽加热后碎牛肉中大肠杆菌的存活状况,结果表明,在2种加工方式均可以控制大肠杆菌的前提下,射频处理时间为蒸汽加热处理的1/30,并且温度均匀。Bilal等^[30]对鸡胸肉进行射频蒸煮试验,将包装好的新鲜鸡胸肉分别用射频和水浴蒸煮,射频加热至中心温度达到74℃时需要23.8 min,但水浴加热需41.3 min,并且射频加工的鸡胸肉温度分布比水浴加热均匀。

张永迪等^[31]运用射频对苹果进行了烫漂处理,用不同极板间距将苹果分别加热至70~95℃的6个不同温度后停止烫漂,结果发现极板间距为115 mm时升温速度最快,而极板间距为125 mm时升温最慢,从22℃升到95℃,分别需95,140 s,且电极板高度分别为115,125 mm,温度加热到75℃时PPO(多酚氧化酶)酶活性均不足10%,但加热到85℃时酶活性分别为24.6%,0.5%,射频烫漂的温度和时间均对PPO的灭活有影响,以此进行射频加热进一步的探索。

综上所述研究表明,射频处理的食品汁液损失少,营养价值保留完好,杀菌效果显著,而且加热时间短且更加均匀。射频加热可以方便地与其他方式结合使用,如:水浴加热,可获得更加优化的工艺。

3 射频加热过程的计算机模拟

3.1 建模分析的意义

有限元分析是利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟,用有限数量的未知量逼近无限未知量的真实系统。利用计算机模拟射频加热系统可以得到可观察、分析、操控的模型^[32],求解计算机模型获得射频加热时肉眼观察不到的温度场和电磁场,有利于精细化分析加热效果。

射频建模过程是一个涉及多物理耦合的电磁和热传导方程解的多物理问题。自20世纪90年代中期以来,射频加热过程的数值模拟过程开始被广泛探索并验证。模拟过程分为两个部分:极板之间和物料内部的电磁场分布以及电磁能转化为热能后的温度场分布求解。

3.2 运用COMSOL建模

COMSOL Multiphysics[®]是一款基于有限元的大型的高级数值仿真软件,广泛应用于各个领域的科学研究及工程耦合计算。在射频加热中,用COMSOL软件模拟物料加热过程的温度变化和电磁场分布,并运用实验验证所开发模型的准确性和精度。目前,在射频加热过程的计算机模拟研究中,COMSOL Multiphysics[®]已经成为最广泛最通用的模拟工具。已有研究证明基于COMSOL开发的模型在水果^[33]、鱼类^[34]、肉类^[35]、干果^[36]以及大量低水分食品^[37]物料的射频加热过程中都与试验结果相符。

在此基础上,COMSOL建模还用于射频加热过程的温度分布均匀性分析,以及温度、分布均匀性提升方案的开发,以节约大量试验带来的人力、物力及财力。Huang等^[38]曾用6 kW、27.12 MHz的射频加热器对大豆粉加热,并用COMSOL软件模拟温度分布,对比证明其与试验的温度分

布基本一致,仿真结果表明,射频加热样品的均匀性受使用容器的介电特性和厚度的影响,当周围容器的介电常数与样品的比值为0.01%~0.10%时,加热均匀性最好,且容器材料的厚度为100,200 mm时加热均匀性较其他厚度好。为分析样品的形状和放置方位对加热速率和温度分布的影响,Birla等^[39]模拟了球形样品在射频加热过程中不同因素对加热效果的影响,结果表明放置在空气中的球形物料在射频电极板下加热时具有不均匀性,但将球形物料置于水中时可显著提高均匀性,并提出假设将球形物料运动和旋转可提高射频加热的均匀性。所开发的计算机模型可以进一步预测由样品介电特性、尺寸、形状对加热的影响。

Jiao等^[37]对花生酱进行了射频灭菌过程模拟及其实验验证,用27.12 MHz、6 kW的射频加热聚酰亚胺(PEI)材料环绕的花生酱,发现PEI环绕后的花生酱被射频加热得更加均匀,证明了运用介电特性类似材料环绕样品对于加热均匀性提高的有效性。Jiao等^[40]为进一步验证在花生酱上、下表面放置不同直径(2,4,6,8,10 cm)的PEI材料块对其加热均匀性的影响,结果发现PEI直径为8 cm时均匀性最好,整个样品中温差最大为9℃,而不加PEI的花生酱温差为17℃。通过计算机模拟得到温度不均匀性值可知,当PEI厚度为1.3 cm时不均匀性数值最小,这证明了辅助材料对射频加热过程中冷点温度提高的有效性。Llvae等^[41]对射频解冻金枪鱼过程进行了数据模拟,用13.56 MHz的射频将样品从-60℃解冻至-3℃,并进行了不同电极板尺寸的加热效果对比,结果证实,当样品与电极尺寸相近时加热更加均匀。

运用COMSOL Multiphysics[®]软件模拟及求解射频加热过程见图2。

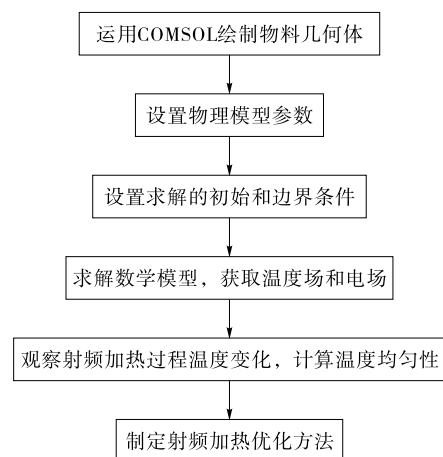


图2 运用COMSOL Muptiphysics[®]有限元多物理场软件模拟射频加热流程图

Figure 2 The flow chart of COMSOL Multiphysics[®] simulation of a radio frequency heating process

4 结论

射频加热是一种很有前景的食品加热技术,具有加热速度快、穿透深度大及选择性加热等优势,但仍具有一定程度的加热不均匀性问题。由于缺乏针对食品样品详尽具体的

研究、设备投资高且工艺探索复杂等多种原因,目前国内外尚未将射频加热技术广泛应用于工业生产。为了更好地将射频加热技术应用于食品工业,需要对射频加热技术进行进一步的研究与探索,包括:

(1) 对物料的介电特性进行系统性的研究。物料的介电特性因成分不同而不同,并且随温度、频率、成分等的变化而变化,对介电特性深入探索可以作为数值模拟时的输入参数,并且以此为基础计算穿透深度,以确定射频加热时物料的最优堆积厚度。

(2) 射频加热存在边角过热的弊端。由于射频能量在边角的聚集性和热逃逸现象,使得升温过快的边角更热,食品品质下降。现有研究中所开发的加热均匀性提高方案仍然不具有普适性、工业化应用等特点,射频加热技术的拓展应用仍受限于加热均匀性。

(3) 射频在食品工业应用探索尚不全面。射频加热在食品工业领域的研究方向拓展多集中在灭菌、杀虫、解冻等领域,在食品干燥、烘焙中应用较少。另外,因畜产品、水产品等样品成本高、工艺探索复杂,目前射频加工食品种类大多集中在谷类和干果中,尚需进一步拓展。

(4) 工业化生产受限。目前,绝大多数有关射频加热技术的研究还基于小型实验室设备,将其研究结论真正应用于放大工业化生产较困难。更主要的原因是,射频加热设备投资较高,且一般食品厂商不熟悉设备操作及原理,不具备运用射频加热设备自主开发加工工艺的能力,因此限制了射频加热技术在食品工业中的应用。更多更系统的基于射频加热技术的产品工艺研究能够为潜在用户提供更好的服务支持,射频加热设备、工艺开发和能耗等各项成本的估算可为射频加热技术在食品工业界的推广提供更有力的数据支持。

(5) 深入运用计算机模拟方法探索射频加热过程。运用计算机模拟方法模拟物料的射频加热过程,可直观地显示出物料内部电磁场及温度分布,用以进一步探索射频加热的应用领域并开发优化的加热方案。

参考文献

- [1] 沈玉栋,柳春红,孙远明,等. 食品质量与安全专业的发展与构想[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 264-267.
- [2] 张宁,王冉冉,李法德. 射频加热技术在农产品和食品工业的应用研究进展[J]. 食品工业, 2013, 34(11): 199-203.
- [3] MARRA F, ZHANG Lu, LYNG J G. Radio frequency treatment of foods: review of recent advances[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(4): 497-508.
- [4] 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 & Nutrition, 2003, 43(6): 587-606.
- [5] MEDA V, ORSAT V, RAGHAVAN V, et al. Microwave heating and the dielectric properties of foods[J]. Microwave Processing of Foods, 2005, 5(5): 61-75.
- [6] LYNG J G, ZHANG Lu, BRUNTON N P. A survey of the dielectric properties of meats and ingredients used in meat product manufacture[J]. Meat Science, 2005, 69(4): 589-602.
- [7] NELSON S O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control[J]. Transactions of the Asae, 1996, 39(4): 1 475-1 484.
- [8] 郭文川,朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 308-312.
- [9] ZHANG Lu, LYNG J G, BRUNTON N P. The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 142-151.
- [10] 李兴畅,杨天平,杨琳,等. 胡桃木板材高频真空二次干燥[J]. 家具, 2017, 38(2): 9-12.
- [11] 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.
- [12] WANG Shan, 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 Biology and Technology, 2007, 45(2): 240-246.
- [13] SILVA F A, AJR M, MAXIMO G J, et al. Microwave assisted drying of macadamia nuts[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(3): 550-558.
- [14] SCHADAV, CHAISATHIDVANICH K, THANAPORN-POONPONG S N, et al. Aging milled rice by radio frequency heat treatment[J]. Proceedings of International Research on Food Scurity, 2006, 36(2): 14-25.
- [15] WANG Yun-yang, ZHANG Li, JOHNSON J, et al. Developing hot air-assisted radio frequency drying for in-shell macadamia nuts[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(1): 278-288.
- [16] 张波. 核桃射频热风联合干燥特性及品质变化研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2017: 10-21.
- [17] ORSAT V, LI Bai, RAGHAVAN G S V. Radio frequency heating of han to enhance shelf life in vacuum packing[J]. Journal of Food Process Engineering, 2004, 27(4): 267-283.
- [18] 刘嫣红,唐炬明,毛志怀,等. 射频热风与热风处理保鲜白面包的比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 323-328.
- [19] 吕晓英,吴倩,李光辉,等. 猕猴桃汁射频杀菌工艺初探[J]. 食品工业科技, 2015, 23(8): 267-270.
- [20] VILLA-ROJAS R, ZHU Ming-jun, MARKS B P, et al. Radio-frequency inactivation of Salmonella, Enteritidis PT 30 and Enterococcus faecium, in wheat flour at different water activities [J]. Biosystems Engineering, 2017, 156(4): 7-16.
- [21] 李修渠. 高频波解冻新技术[J]. 肉类工业, 2001(10): 26-29.
- [22] AFALIJ C, HASSAN S R. Dielectric thawing of fish, Experiments with frozen white fish[J]. Food Technology, 1962, 16(6): 101-112.
- [23] PIZZA A, PEDRIELLI R, BUSETTO M. Use of radio frequencies in the meat processing industry: Effects on the quality characteristics of meat and cooked meat products[J]. Industria Conserve, 1997, 72: 122-133.
- [24] FARAG K W, LYNG J G, MORGAN D J, et al. Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of -18 to +10 °C[J]. Meat Science, 2008, 79(4): 740-747.

- [25] PALAZOGLU T K, WELAT Miran. Experimental comparison of microwave and radio frequency tempering of frozen block of shrimp [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017, 41(3): 292-300.
- [26] LAYCOCK L, PIYASENA P, MITTAL G S. Radio frequency cooking of ground, comminuted and muscle meat products[J]. *Meat Science*, 2003, 65(3): 959-965.
- [27] ZHANG Lu, LYNG J G, BRUNTON N P. Effect of radio frequency cooking on the texture, colour and sensory properties of a large diameter comminuted meat product[J]. *Meat Science*, 2004, 68(2): 257-268.
- [28] MCKENNA B M, LYNG J, BRUNTON N, et al. Advances in radio frequency and ohmic heating of meats[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(2): 215-229.
- [29] GUO W, TIWARI G, TANG Ju-ming, et al. Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(2): 217-224.
- [30] KIRMACI B, SINGH R K. Quality of chicken breast meat cooked in a pilot-scale radio frequency oven[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 14(2): 77-84.
- [31] 张永迪, 周良付, 李宇坤, 等. 射频加热烫漂对苹果片理化性质和微观结构的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(5): 134-141.
- [32] 邢敏, 黄岚. 计算机模拟仿真教学的研究与实践[J]. *现代教育科学*, 2007, 46(1): 152-153.
- [33] BIRLA S L, WANG S, TANG Ju-ming, et al. Improving heating uniformity of fresh fruit in radio frequency treatments for pest control[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2004, 33(2): 205-217.
- [34] LLAVE Y, LIU Shi-xiong, FUKUOKA M, et al. Computer simulation of radiofrequency defrosting of frozen foods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 152(C): 32-42.
- [35] 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.
- [36] ALFAIFI B, TANG Ju-ming, JIAO Yang, et al. Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: Model development and validation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 120(1): 268-276.
- [37] JIAO Yang, TANG Ju-ming, WANG Shi-jian. 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(22): 128-138.
- [38] HUANG Zhi, ZHU Han-kun, YAN Rong-jun, et al. Simulation and prediction of radio frequency heating in dry soybeans[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129(1): 34-47.
- [39] BIRLA S L, WANG Shi-jian, TANG Ju-ming. Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(2): 270-280.
- [40] JIAO Yang, SHI Huo-jie, TANG Ju-ming, et al. Improvement of radio frequency (RF) heating uniformity on low moisture foods with Polyetherimide (PEI) blocks[J]. *Food Research International*, 2015, 74(8): 106-114.
- [41] LLAVE Y, LIU Shi-qiong, FUKUOKA M, et al. Computer simulation of radiofrequency defrosting of frozen foods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 152(C): 32-42.

(上接第168页)

参考文献

- [1] 孙建霞, 张燕, 胡小松, 等. 花色苷的结构稳定性与降解机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 67-70.
- [2] 吴春, 张艳. 纤维素酶法提取葡萄籽中原花青素的研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(10): 258-261.
- [3] 郭卫芸, 杜冰, 程燕锋, 等. 冷冻处理对果蔬的影响及其应用[J]. *食品与机械*, 2007, 23(2): 118-121.
- [4] 李勇. 食品冷冻加工技术[M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2004: 161-170.
- [5] 朱文学. 冷冻干燥原理与技术[M]. 北京: 北京科学出版社, 2009: 359-366.
- [6] 朱蓓薇, 张敏. 食品工艺学[M]. 北京: 北京科学出版社, 2015: 168-170.
- [7] 罗志刚, 周子丹. 微波辐射对木薯淀粉性质影响[J]. *粮食与油脂*, 2010(6): 11-12.
- [8] 杨光, 杨波, 丁霄霖. 微波辐射对抗性淀粉形成的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(10): 118-120.
- [9] MUZIMBARANDA C, TOMASIK P. Microwave in physical and chemical modification of starch [J]. *Starch*, 1994, 46(12): 469-474.
- [10] VADIVAMBAL R, JAYAS D S. Changes in quality of microwave-treated agricultural products: a review[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(1): 1-16.
- [11] 白卫东, 王琴, 连卫敏. 微波对植物油品质的影响[J]. *食品科学*, 2002, 23(2): 37-40.
- [12] 李巧玲, 陈学武. 微波强化浸取天然色素的研究[J]. *食品科学*, 2002, 23(2): 49-52.
- [13] 王福荣. 酿酒分析与检测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 111-135.
- [14] 杨兆艳. pH示差法测定桑椹红色素中花色苷含量的研究[J]. *食品科技*, 2007, 32(4): 201-203.
- [15] ARACELI C, MADELOURDES P H, MAELENA P, et al. Chemical studies of anthocyanins: A review [J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(4): 859-871.
- [16] 刘一健, 孙剑锋, 王颖. 葡萄酒酚类物质的研究进展[J]. *中国酿造*, 2009, 28(8): 5-9.
- [17] STEPONKUS P L, WILSON J, GROUT B W W, et al. The effects of low temperatures on biological systems[M]. New York: E. Arnold, 1989: 100-102.
- [18] LYONS J M, GRAHAM D, RAISON J K. Low-temperature stress in crop plants: The role of the membrane[M]. New York: Academic Press, 2010: 413-414.
- [19] 王会, 杨湄, 刘昌盛, 等. 微波处理油料对油脂品质影响的研究进展[J]. *中国油脂*, 2011, 36(4): 23-26.
- [20] 刘晓庚, 曹崇江, 周逸婧. 微波加工对食品安全性的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(5): 484-488.