

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90068

红外辐射食品热处理机制及其应用研究进展

Advance in research on heat treatment mechanism of infrared radiation and its application in foods

于贤龙¹ 褚 斌¹ 肖红伟²YU Xian-long¹ CHU Bin¹ XIAO Hong-wei²张卫鹏³ 赵 峰¹ 张宗超¹ZHANG Wei-peng³ ZHAO Feng¹ ZHANG Zong-chao¹

(1. 山东省农业机械科学研究院, 山东 济南 250100; 2. 中国农业大学工学院,

北京 100083; 3. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048)

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan, Shandong 250100, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

摘要:研究论述了食品红外辐射加热理论的发展,综述了红外辐射加热在食品加工应用方面的最新研究进展,解析了红外辐射加热对食品品质的影响规律,并总结阐述了基于红外辐射加热的食品加工原理与工艺优化方法,包括杀菌、解冻、漂烫、烘焙、脱皮以及干燥过程。

关键词:红外辐射;食品;热处理;加工工艺;优化策略

Abstract: The development of food infrared heating theories were discussed in this review, and the advancement of infrared heating in food processing were summarized. Moreover, the principle of food processing and process optimum method in various food infrared thermal treatment technologies, including sterilizing, thawing, blanching, baking, peeling and drying processes were also discussed.

Keywords: infrared radiation; food; heat treatment; processing technology; optimizing strategy

红外线是介于可见光和微波之间的电磁波,光谱波长范围广,能够广泛适应多品类食品的不同加工领域^[1]。

红外辐射加热过程中无需传热介质,避免了加工过程污染物的生成,且在真空、常压、高压操作环境中均能够完成高效率的传热过程,避免了温度边界层对传热过程的阻碍,具有传热速度快、加热效率高的特点^[2]。此外,对于具有一定厚度的食品物料,红外辐射具有内部加热特性,有利于提高物料的升温速度^[3]。研究^[4-5]表明,红外辐射加热有助于减少抗性淀粉含量,提高面粉易磨性,同时改善淀粉类食品的消化特性。红外辐射加热存在热效应与非热效应的共同作用,能够有效杀灭食品中细菌、真菌、虫卵以及成虫,保障食品安全与品质^[6-7]。如图 1 所示,红外辐射加热在灭酶、杀菌、烘焙、脱皮、干燥、解冻的食品加工环节展现出了巨大的应用潜力。

红外加热产生的热量高,长期暴露在高强度的红外

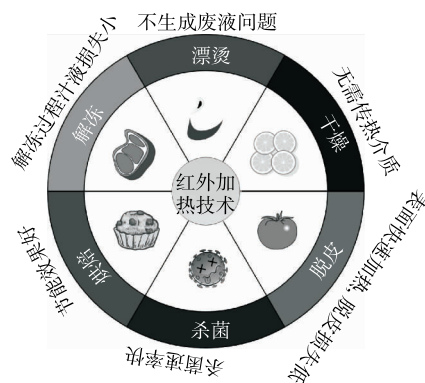


图 1 红外加热技术在食品加工中的应用

Figure 1 The application of infrared heating technology in food processing

基金项目:国家自然科学基金项目(青年基金)(编号:32102141);山东省农业科学院农业科技创新工程(编号:CXGC2021B29);现代农业机械兵团重点实验室开放课题(编号:BTNJ2021004)

作者简介:于贤龙,男,山东省农业机械科学研究院工程师,博士。通信作者:赵峰(1972—),男,山东省农业机械科学研究院研究员,硕士。E-mail:zf@sjlaser.com

张宗超(1985—),男,山东省农业机械科学研究院工程师,硕士。E-mail:617196821@qq.com

收稿日期:2021-11-29

线辐射下会引起产品品质劣变,造成营养成分特别是热敏性成分损失严重的问题。因而,红外辐射的热加工过程中需要谨慎地对其进行精准化控制^[8]。研究拟论述食品红外辐射加热理论的发展,综述红外辐射加热在食品加工应用方向上的最新研究进展,解析红外辐射加热对食品品质的影响规律,总结阐述基于红外辐射加热的食品加工原理与工艺优化方法,以期为高效、高质、节能的食品加工装备开发提供参考。

1 食品红外辐射热处理机制

1.1 匹配吸收理论

1938 年,红外辐射加热被应用于油漆的固化干燥,此后红外加热技术逐步被应用于食品加工各领域^[9]。1971 年,基于红外辐射加热的反射、吸收、透过原理提出了远红外加热的匹配吸收理论^[10]。匹配吸收理论指出红外线波长与被加热物料的吸收波长相匹配时,其能量会被吸收而达到加热的目的^[11]。红外源辐射峰、吸收峰与相应的黑体峰的匹配能够提高辐射通量密度,同时保证能量的充分吸收^[12]。朱文学等^[13]发现物料的红外光谱对含水率变化较为敏感,其影响程度甚至远大于物料品种差异所造成的影响。根据普朗克黑体辐射定律,调节红外源表面温度能够改变红外源辐射红外线波长,达到匹配的目的^[14]。但是,农产品物料普遍为热敏性物料,限制了红外源温度的可调节范围。

1.2 非匹配吸收理论

在食品加工与贮藏过程中,物料本身具有一定的厚度或呈多层堆积的状态放置,热量穿透到物料深层往往更有利于传热过程的进行。侯兰田等^[15]在一定厚度的物料的红外辐射加热吸收谱研究中发现了红外线的非匹配吸收现象。如图 2 所示,在非匹配吸收理论下,红外辐射加热包括 3 个部分:表面反射、表面吸收和穿透吸收。采用非匹配吸收理论来选择红外源的波长避开物料的主吸收峰,可以同时表面及内部层进行加热。

食品作为生化大分子、生化聚合物、无机盐和水组成的复杂的混合物,各组分具有独特的红外线吸收图谱。

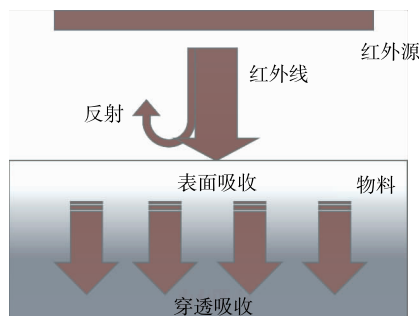


图 2 食品红外辐射加热原理图

Figure 2 Schematic diagram of infrared radiation of food

水、氨基酸、蛋白质、核酸、脂类、糖类的红外特征吸收峰集中在 $3\sim 11\ \mu\text{m}$ ^[16]。选择适宜红外波段,有助于强化加工效率,提高产品品质。对于厚度较薄的食品物料,或者表面需要快速加热,诸如脱皮、烘焙等操作,适宜选择中、长波红外源^[17]。而对于厚度较厚的农产品物料,或者需要穿透深度较大的加工过程,诸如干燥、杀菌等操作,可根据“非匹配吸收”原理,选择中、短波红外辐射器作为红外源,能够有效提高热量传递速率,同时保证加热过程的均匀性。

2 红外辐射在食品热加工中研究与应用

2.1 红外干燥技术

干燥是一种通过降低物料中含水量从而保存食品的最常用方法,也是人类已知的最古老的食物保存方法之一^[18]。早在 1941 年,红外辐射加热已被应用于种子的干燥研究中,随后红外加热提供的能量被证明适用于水果与蔬菜的脱水^[19]。目前,红外加热技术已被广泛应用于农产品的干燥研究与应用。

红外辐射具有一定的穿透能力,有利于热量向物料内部的传递。另外,红外线具有分解大水分子团簇的能力,有利于加速物料水分的内扩散,从而强化干燥效率^[20]。干燥效率的提高可以改善干燥过程的物料品质劣变。利用红外加热技术对荞麦进行干燥相较于热风干燥所需时间较短,且具有较好的外观特性和较高的蛋白质含量^[21]。红外加热温度、切片厚度、辐射距离是影响加热过程的关键因素。其中,红外加热温度在苹果片、香菇等物料干燥研究中其影响均高于切片厚度和辐射距离。巨浩羽等^[22]研究得出适宜红外温度能够抑制酶促褐变和降低美拉德反应而保证产品具有良好的色泽品质。王雪媛等^[23]发现提高红外加热温度能促进自由水与不易流动水的迁移。红外干燥作为一个非稳态过程,单一的温度参数难以适应不同阶段物料的脱水需求。干燥前期采用较高的辐射温度加快水分蒸发,而在干燥后期,采用较低的辐射温度可以避免温度过高引起的品质劣变^[24]。

如图 3 所示,红外热风干燥结合了辐射传热与对流传热传质的优势,能够有效提高干燥效率^[25]。红外—热泵联合干燥方法兼具红外辐射加热快速、传热能力与热泵干燥节能特点,实现了高效节能的干燥目的,在龙眼、鱿鱼片、金银花等物料的干燥上表现出了良好的节能保质效果^[26-28]。将红外加热方法应用于真空脉动干燥、真空冷冻干燥技术,开发出的红外真空脉动干燥设备与红外真空冷冻干燥设备具有干燥效率高、产品品质高的优点,所生产的茯苓、蜂花粉、玫瑰花干制品均具有较高的产品品质^[29-31]。组合干燥方式结合了多种干燥技术的特点,干燥的传热传质关系也相对复杂,创新参数控制方

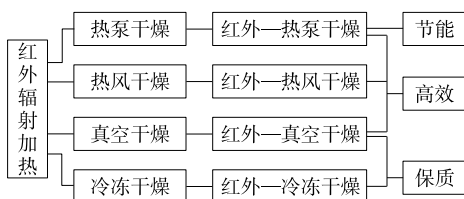


图3 基于红外辐射加热的组合干燥方法

Figure 3 Combined drying method based on infrared radiation heating

法实现干燥过程的智能控制对于高效、高质、节能干燥具有重要意义。

2.2 红外漂烫热处理技术

漂烫热处理是果蔬加工中重要的工艺环节,起到提高干燥速率以及抑制组织氧化的作用。红外漂烫作为一种新型漂烫方式,在果蔬加工的预处理过程中进行了大量应用研究^[32]。

红外漂烫传热速度快,能够穿透至物料内部进行加热,强化了漂烫的酶灭活效率^[33]。Yan等^[34]研究发现,红外辐射处理能够破坏米糠中脂肪酶的空间结构而有效抑制其活性,降低了贮藏过程中游离脂肪酸含量的上升速度。另外,红外漂烫热处理增加了果蔬组织透性,可以加快脱水过程。Chen等^[35]发现,在60,70,80℃下经红外漂烫后热风干燥时间分别减少了32.3%,41.1%,45.0%,显著提高了整体的干燥速率。

与传统热水漂烫相比,红外漂烫热处理不存在废液处理问题,同时避免了可溶性营养物质的流失^[36]。与热水漂烫干燥相比,红外漂烫干燥所获得胡萝卜干片的维生素C保留率高出39%^[37]。Kettler等^[38]对比了花生在红外漂烫和热水漂烫下的贮藏动力学,与热水漂烫相比具有更长的贮藏期,获得的花生产品在室温下保存18周未出现明显氧化。

作为一种干式漂烫方式,红外辐射传递给物料的能量会因水分蒸发被吸收而损失,这阻碍了物料漂烫的升温,延长了漂烫时间。如图4所示,增加空气介质的相对湿度引起的冷凝潜热释放可以强化传热过程。Yu等^[39]分析显示,适当地提高空气介质相对湿度可获得较高的传热速率,又能提高物料内部温度分布均匀度。而在红外漂烫领域,Li等^[40]提出利用红外与蒸汽组合加热对野菊花进行漂烫,与单一红外漂烫相比具有更高的总酚、类胡萝卜素和类黄酮含量,同时能有效抑制贮藏阶段POD酶活性再生。但是,基于空气介质强化红外漂烫传热效率的研究鲜有报道,空气介质对红外漂烫的传热强化作用仍需进一步探索。

2.3 红外加热焙烤技术

焙烤是一种在高温下(>150℃)进行的食品加工方法,能够创造出独特的风味。红外焙烤具有较高的传热

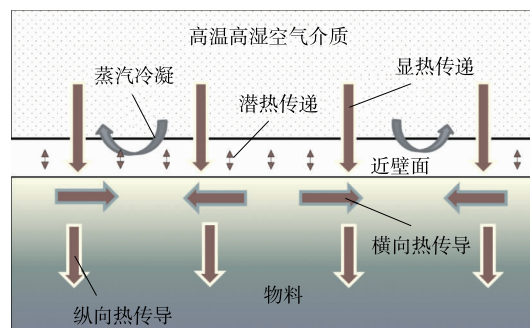


图4 物料与高温空气介质对流传热原理图

Figure 4 Schematic diagram of convection heat transfer between material and high humidity air medium

系数,面团烘焙过程中红外辐射提供的热流量超过了总热量的60%^[41]。同时,红外焙烤避免了对流烘焙物料重量损失严重的问题,有利于产品品质形成^[42]。Lee等^[43]研究表明茶叶经过红外焙烤后总酚和黄烷醇含量大大提高,其抗氧化活性成分也能够得到较高保持。此外,红外焙烤用于面包烤制能抑制面包在贮藏过程中的硬化,相比对流焙烤能够更好地维持产品在贮藏期的品质^[44]。作为一种能量密集型操作单元,红外辐射加热可显著降低焙烤能耗。Ploteau等^[45]研究表明,在较低的空气温度下红外烘焙所需的能量相对于传统对流烘焙的减少了20%。目前,基于红外加热的食品焙烤技术已被广泛应用于面包、坚果、肉类等物料的加工研究与应用中。

红外加热常与热风加热、微波加热等其他焙烤技术结合应用。Bagheri等^[46]利用红外联合热风方法显著降低了花生仁的焙烤时间与焙烤能耗。红外联合微波焙烤能够同时对物料内部与外部进行快速加热,使得物料表面在较短时间内出现美拉德反应,并促进面包外皮与面包芯的同步形成^[47]。Uysal等^[48]探究了红外联合微波焙烤对榛子色泽、质地、水分、脂肪酸组成的影响,优化后的焙烤工艺在显著缩短加工时间的基础上能够获得高质量的黑果。

2.4 红外加热脱皮技术

在罐头、干果、婴儿食品和果汁等食品的加工过程中,脱皮是一项重要的单元操作,能够改善产品口感并去除农残。应用广泛的碱液和蒸汽去皮法会消耗大量的水资源,同时伴随着高密度能量投入,去皮过程产生的废水会带来高盐度和有机污染问题。

红外辐射加热能够使物料表面快速升温,是果蔬脱皮的一种有效方法。Li等^[49]分析了红外脱皮的瞬态传热传质过程,发现红外辐射加热会使番茄表面温度快速升高,而中心位置的温度保持在低位值,有利于保持番茄硬度与降低营养物质的降解。与碱液和蒸汽的脱皮机制不同,红外加热可以致使细胞外角质层充足、细胞壁热膨

胀以及细胞层坍塌,引发表皮下压力的累积与表皮强度下降,最终导致表皮开裂^[50]。Wang 等^[51]获得的枣的剥皮损失与碱液脱皮相比较低,且色泽维持较好。刘莹等^[52]利用催化式红外技术促进了果皮与果肉的分离,相较于碱液去皮对果肉影响较小。

红外辐射加热脱皮过程中,辐射强度、辐射间距、加热时间是影响脱皮效果的 3 个重要因素。辐射强度和辐射间距是影响物料表面热通量的主要因素,而辐射时间则决定着物料的处理程度,通过缩小辐射间距与提供双面加热结构等措施能够显著提高脱皮速率^[53]。但是处理时间过长会降低脱皮后产品品质,导致硬度降低,剥皮损失增大^[54]。因此,精确的加热时间控制是保证脱皮完成度与降低脱皮损失的重要前提。

2.5 红外加热杀菌技术

红外线能够使生物细胞中的蛋白质和核酸热变性而抑制其活性,相较于对流加热灭菌,红外加热能够在短时间内使细菌、真菌、虫卵等失活^[55]。如表 1 所示,目前在多种食品物料中红外辐射加热均表现出了较强的灭菌能力。

不同峰值波长的红外辐射线的灭菌效果有所区别,较短波长的红外线对枯草杆菌具有较好的灭菌效果,而红外吸收光谱特性随细菌水分活度变化而变化^[62]。因此,合适的红外辐射波段有助于提高红外辐射对食品的灭菌效果。研究^[63]显示,3.2 μm 的红外线可以更加显著地使稻谷上霉菌与细菌失活。

红外灭菌过程中会使食品表面温度快速上升,导致物料内外存在较大温度梯度,从而出现表面糊化、裂纹、爆腰等问题。Wilson 等^[64]探究了玉米红外灭菌的红外加热温度与温度保持时间对玉米色泽、能耗、菌群失活程

度的影响,优化后的红外灭菌工艺能够在提高灭菌程度的同时维持玉米的颜色。此外,研究^[65]表明微生物在较高的温度下维持较短时间会增加耐热性,不利于微生物的失活。间歇红外加热能够将物料内外温度梯度最小化,而后期温度保持能够促进残余菌群的失活,已成为当前红外灭菌工艺研究的重点。

2.6 红外加热解冻技术

解冻是冷冻食品在加工前的重要工序,受冰晶作用易发生液汁损失、微生物繁殖、组织坍塌等问题。红外辐射加热通过引起速冻食品内部分子剧烈运动并将能量转化为热能而实现解冻。与传统鼓风解冻方法相比,红外辐射有助于降低解冻过程中细胞的液汁损失。Cai 等^[66]研究表明,红外辐射解冻后的样品松弛时间较小,说明细胞内的水转化为游离水的量较少。

受穿透能力限制红外辐射加热解冻易造成表面温度过高,加快表面水分蒸发而导致表面失水,同时出现蛋白质结构破坏等问题。为了抑制解冻过程中物料温度的快速上升,Sakai 等^[67]采用间歇式红外解冻方法可以将物料表面温度控制在 15 ℃ 以下,解冻前后金枪鱼色差较小。从水分扩散原理出发,提高红外解冻过程介质的湿含量有助于防止物料表面的水分散失。

为了实现食品解冻物料内外温度均匀上升,Cao 等^[68]发现,磁性纳米粒子辅助红外解冻处理的样品具有较高的新鲜度和品质,同时降低了甲醛和生物胺含量,有利于保证食品安全。Cai 等^[66]研究发现利用超声波辅助红外解冻可显著提高单一红外解冻下红鼓鱼的蛋白质结构,并且肌肉纤维更加光滑,能够较好地保持红鼓鱼片的品质。因此,基于红外辐射加热的多物理场组合热处理强化解冻过程的均匀性有助于降低解冻损伤。

表 1 红外处理对食品灭菌动力学与产品品质的作用

Table 1 Effects of infrared treatment on food sterilization kinetics and product quality

菌种	物料	处理工艺	主要结论	参考文献
真菌菌落	玉米	物料厚度 2.7 mm; 交替加热/保温 30 s, 总时间 15 min	在相同加热时间间歇式红外加热下真菌灭活程度提高了 33 %	[56]
黑曲菌	香菇	60~80 ℃ 下红外处理 8.7~21.2 min, 保温 20~80 min	霉菌总数小于 2 lg(CFU/g) 的食品卫生标准	[57]
李斯特氏菌	肉制品	红外加热至物料表面温度 70~85 ℃, 并保温 2~3 min	李斯特氏菌灭活 6 log(CFU/g) 以上	[58]
沙门氏菌	生杏仁	红外加热至 100~120 ℃, 90 ℃ 下保温	沙门氏菌灭活 5.5 log(CFU/g)	[59]
酵母菌	无花果	红外辐射 30 s; 紫外线照射 5 s, 红外与紫外顺序处理	酵母菌数量减少 3 log(CFU/g)	[60]
大肠菌群	菠菜	红外辐射距离 21 cm, 处理时间 50~180 s, 并保温	避免物料长时间处于高温, 更好地保存物料品质	[61]

3 结论

红外加热处理在食品加工领域具有深入的研究与应用。根据传热原理与加工特点合理选择红外线波段是实现高效、均匀热处理的关键。间歇红外加热是降低热损伤、降低能耗的重要手段,在解冻、灭菌处理方面具有显著优势。另外,基于红外辐射加热的多物理场组合热处理能够强化传热传质过程,缩短加工时间,同时也有助于提高产品的品质。后续可从以下方面进行深入探究:① 创新红外辐射器与加热形式,改善加热的均匀性与辐射强度的控制精度;② 结合传热传质、理化试验、能量分析等手段对食品红外热处理工艺进行优化;③ 开发多目标智能控制系统,着重考虑空气介质相对湿度对食品红外辐射热加工过程的作用。

参考文献

- [1] 王楠, 侯旭杰. 新型加热技术在食品加工中的应用及其研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(4): 209-215.
WANG Nan, HOU Xu-jie. Application of new heating technology and its research progress[J]. Food Research and Development, 2019, 40(4): 209-215.
- [2] GABEL M M, PAN Zhong-li, AMARATUNGA K S P, et al. Catalytic infrared dehydration of onions[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(9): 351-357.
- [3] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 碳纤维红外板辐射特性及其农产品物料干燥试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 285-293.
ZHANG Wei-peng, XIAO Hong-wei, GAO Zhen-jiang, et al. Infrared drying properties and drying experiment of carbon fiber for agricultural production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 285-293.
- [4] EMAMI S, MEDA V, PICKARD M D, et al. Impact of micronization on rapidly digestible, slowly digestible, and resistant starch concentrations in normal, high-amylose, and waxy barley[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(17): 9 793-9 799.
- [5] SEMWAL J, MEERA M S. Infrared radiation: Impact on physico-chemical and functional characteristics of grain starch[J]. Starch-Starke, 2021, 73(3/4): 202000112.
- [6] PAN Zhong-li, KHIR R, GODFREY L D, et al. Feasibility of simultaneous rough rice drying and disinfestations by infrared radiation heating and rice milling quality[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(3): 469-479.
- [7] SMITH D L, ATUNGULU G G, WILSON S, et al. Deterrence of aspergillus flavus regrowth and aflatoxin accumulation on shelled corn using infrared heat treatments[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2020, 36(2): 151-158.
- [8] ABOUD S A, ALTEMIMI A B, AL-HIIPHY A R S, et al. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing[J]. Molecules, 2019, 24(22): 2-21.
- [9] GAVIN M R. Industrial applications of infrared[J]. Nature, 1948, 162: 637.
- [10] 汪之洋. 新技术介绍—远红外加热与干燥[J]. 化学世界, 1980(4): 123-124.
WANG Zhi-yang. Introduction of new technology: Far infrared heating and drying[J]. Chemical World, 1980(4): 123-124.
- [11] 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 177-182.
WANG Xiang-you, CAO Rui-bing, SUN Chuan-zhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 177-182.
- [12] 王宝明. 红外辐射材料的光谱特性及光谱匹配问题[J]. 河北大学学报(自然科学版), 1992, 12(4): 75-79.
WANG Bao-ming. Spectral properties of infrared radiation of materials and spectrum match[J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 1992, 12(4): 75-79.
- [13] 朱文学, 张仲欣, 刘建学, 等. 玉米红外吸收光谱试验研究[J]. 干燥技术与设备, 2004, 2(4): 16-19.
ZHU Wen-xue, ZHANG Zhong-xin, LIU Jian-xue, et al. Experimental study on infrared absorption spectrum of maize[J]. Drying Technology & Equipment, 2004, 2(4): 16-19.
- [14] 石定河. 在实际应用中如何实现匹配吸收[J]. 红外研究, 1984, 2(1): 155.
SHI Ding-he. How to achieve matching absorption in practical application[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1984, 2(1): 155.
- [15] 侯兰田, 汤大新, 李玉润. 木材的红外光谱和非匹配吸收干燥机理研究[J]. 红外研究, 1983, 2(1): 1-7.
HOU Lan-tian, TANG Da-xin, LI Yu-run. The mechanism of infrared spectroscopy and unmatched absorption of wood drying[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1983, 2(1): 1-7.
- [16] SANDU C. Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis[J]. Biotechnology Progress, 1986, 2(3): 109-119.
- [17] 高云. 中短波红外辐射技术在工业加热中的应用[C]// 第十三届全国红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集. 武汉: 锦州市光学学会, 2011: 52-56.
GAO Yun. The application of medium-short wave infrared radiation technology in industrial heating[C]// The 13th National Symposium on Infrared Heating and Infrared Medical Development. Wuhan: Jinzhou Optical Society, 2011: 52-56.
- [18] EHIEM J C, IRTWANGE S V, OBETTA S E. Design and development of an industrial fruit and vegetable dryer[J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, 2009(2): 44-53.
- [19] NICHOLAS J E. Some preliminary investigations on dehydration of fruits and vegetables with infrared energy[J]. Journal of the Franklin Institute, 1943, 236(3): 285-291.
- [20] 刘玉辉, 王相友, 魏忠彩. 红外辐射对胡萝卜切片脱水作用机制研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 350-359.
LIU Yu-hui, WANG Xiang-you, WEI Zhong-cai. Mechanism of infrared radiation on dehydration of carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 350-359.

- 350-359.
- [21] 张译文, 张燕梁, 万霖, 等. 3 种干燥方法对荞麦干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 197-200.
- ZHANG Yi-wen, ZHANG Yan-liang, WAN Lin, et al. Effects of three drying methods on the drying characteristics and quality of buckwheat[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 197-200.
- [22] 巨浩羽, 肖红伟, 白峻文, 等. 苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S2): 186-191.
- JU Hao-yu, XIAO Hong-wei, BAI Jun-wen, et al. Medium and short wave infrared drying characteristics and color changing of apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(S2): 186-191.
- [23] 王雪媛, 高琨, 陈芹芹, 等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 275-281.
- WANG Xue-yuan, GAO Kun, CHEN Qin-qin, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 275-281.
- [24] 王蓓, 赵兴, 马海乐, 等. 香葱分段式变温催化红外干燥的特性及品质研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(11): 132-137.
- WANG Bei, ZHAO Xing, MA Hai-le, et al. Characteristics and quality of Chinese chives dried by a temperature segmented catalytic infrared system[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(11): 132-137.
- [25] ZHANG Yue, ZHU Guang-fei, LI Xing-yi, et al. Combined medium and short-wave infrared and hot air impingement drying of sponge gourd (Luffa cylindrical) slices[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 284: 110043.
- [26] 彭健, 王蔚婕, 唐道邦, 等. 分段式远红外—热泵干燥对龙眼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 118-123.
- PENG Jian, WANG Wei-jie, TANG Dao-bang, et al. Effect of multi-stage far-infrared radiation: Assisted heat pump drying on the quality characteristics of Longan[J]. Food Science, 2020, 41(19): 118-123.
- [27] 汪岳刚, 邓云, 王丹凤, 等. 鲑鱼片远红外热泵干燥中水分迁移及品质变化[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 34-37, 53.
- WANG Yue-gang, DENG Yun, WANG Dan-feng, et al. Changes in moisture state and quality of squid fillets dried by far infrared radiation assisted heat pump drying[J]. Food & Machinery, 2013, 29(6): 34-37, 53.
- [28] 罗磊, 康新艳, 朱文学, 等. 热泵远红外联合干燥金银花的工艺优化及品质控制[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 6-12.
- LUO Lei, KANG Xin-yan, ZHU Wen-xue, et al. Optimization of far-infrared assisted heat pump drying parameters for quality control of dried honeysuckle[J]. Food Science, 2016, 37(18): 6-12.
- [29] QIU Li-qing, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Effects of infrared freeze drying on volatile profile, FTIR molecular structure profile and nutritional properties of edible rose flower (Rosa rugosa flower)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(13): 4 791-4 800.
- [30] 张卫鹏, 陈浩然, 范晓志, 等. 茯苓丁真空脉动干燥特性及多目标优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 91-98, 144.
- ZHANG Wei-peng, CHEN Hao-ran, FAN Xiao-zhi, et al. Pulsed vacuum drying characteristics and multi-objective optimization of poria cubes[J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 91-98, 144.
- [31] 周子丹, 彭文君, 倪家宝, 等. 不同干燥方式对油菜蜂花粉色泽、酚酸含量和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 76-83.
- ZHOU Zi-dan, PENG Wen-jun, NI Jia-bao, et al. Effects of different drying methods on color, phenolic acids contents and antioxidant activity of rape bee pollen[J]. Food Science, 2021, 42(17): 76-83.
- [32] BASSEY E J, CHENG Jun-hu, SUN Da-wen. Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 137-148.
- [33] FENG Ya-bin, WU Ben-gang, YU Xiao-jie, et al. Effect of catalytic infrared dry-blanching on the processing and quality characteristics of garlic slices[J]. Food Chemistry, 2018, 266(15): 309-316.
- [34] YAN Wei, LIU Qiang, WANG Yan, et al. Inhibition of lipid and aroma deterioration in rice bran by infrared heating[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(10): 1 677-1 687.
- [35] CHEN Jing, VENKITASAMY C, SHEN Qun, et al. Development of healthy crispy carrot snacks using sequential infrared blanching and hot air drying method[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 469-475.
- [36] MUKHERJEE S, CHATTOPADHYAY P K. Whirling bed blanching of potato cubes and its effects on product quality[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(1): 52-60.
- [37] VISHWANATHAN K H, GIWARI G K, HEBBAR H U. Infrared assisted dry-blanching and hybrid drying of carrot[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 91(2): 89-94.
- [38] KETTLER K, ADHIKARI K, SINGH R K. Blanchability and sensory quality of large runner peanuts blanched in a radiant wall oven using infrared radiation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(13): 4 621-4 628.
- [39] YU Xian-long, JU Hao-yu, MUJUMDAR A S, et al. Experimental and simulation studies of heat transfer in high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) of carrot[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 114: 196-204.
- [40] LI Yuan-hui, WU Zhen-feng, TANG Xue, et al. Application of infrared-assisted steam blanching to improve enzymatic inactivation and quality retention of Chrysanthemum indicum L. flower[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2019, 56(9): 4 274-4 281.
- [41] NICOLAS V, GLOUANNEC P, PLOTEAU J P, et al. Experiment and multiphysic simulation of dough baking by convection, infrared radiation and direct conduction[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 115: 65-78.
- [42] PURLIS E. Optimal design of bread baking: Numerical investiga-

- tion on combined convective and infrared heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 137: 39-50.
- [43] LEE S C, YUK H G. Tea in health and disease prevention[M]. New York: Academic Press, 2013: 213-221.
- [44] SHYU Y, SUNG W, CHANG M, et al. Effect of far-infrared oven on the qualities of bakery products[J]. *Journal of Culinary Science and Technology*, 2008, 6(2/3): 105-118.
- [45] PLOTEAU J P, GLOUANNEC P, NICOLAS V, et al. Experimental investigation of French bread baking under conventional conditions or short infrared emitters[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 461-467.
- [46] BAGHERI H, KASHANINEJAD M, ZIAIIFAR A M, et al. Novel hybridized infrared-hot air method for roasting of peanut kernels[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37: 106-114.
- [47] SUMNU G, SAHIN S, SEVIMLI M. Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 71(2): 150-155.
- [48] UYSAL N, SUMNU G, SAHIN S. Optimization of microwave- infrared roasting of hazelnut[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(2): 255-261.
- [49] LI Xuan, PAN Zhong-li. Dry Peeling of Tomato by Infrared Radiative Heating: Part II. Model validation and sensitivity analysis[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(7): 2 005-2 013.
- [50] LI Xuan, PAN Zhong-li, ATUNGULU G G, et al. Peeling mechanism of tomato under infrared heating: Peel loosening and cracking[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 128: 79-87.
- [51] WANG Bi-ni, VENKITASAMY C, ZHANG Fu-xin, et al. Feasibility of jujube peeling using novel infrared radiation heating technology[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 69: 458-467.
- [52] 刘莹, 曲文娟, 罗圣通, 等. 基于催化式红外的西红柿干法去皮技术[J]. *食品与机械*, 2021, 37(8): 193-200.
- LIU Ying, QU Wen-juan, LUO Sheng-tong, et al. Tomato dry peeling technology based on catalytic infrared[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(8): 193-200.
- [53] LI Xuan, ZHANG Ang, ATUNGULU G G, et al. Effects of infrared radiation heating on peeling performance and quality attributes of clingstone peaches[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 55(1): 34-42.
- [54] SHEN Yi, KHIR R, WOOD D, et al. Pear peeling using infrared radiation heating technology[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65(5): 102474.
- [55] PAN Zhong-li, ATUNGULU G G. Infrared heating for food and agricultural processing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010: 225-236.
- [56] MOHAMMADI S Z, ODUOLA A A, WILSON S, et al. New infrared heat treatment approaches to dry and combat fungal contamination of shelled corn [J]. *Journal of Food Safety*, 2021, 41(2): 12886.
- [57] 李婷, 曲文娟, 吴本刚, 等. 滚筒式催化红外联合保温处理对返潮干香菇杀菌效果及品质的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(7): 120-128.
- LI Ting, QU Wen-juan, WU Ben-gang, et al. Effect of combined drum catalytic infrared with holding treatment for disinfection and quality of rewetting-dried shiitake mushrooms[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 120-128.
- [58] HUANG Li-han, SITES J. Elimination of listeria monocytogenes on hotdogs by infrared surface treatment[J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(1): 27-31.
- [59] BINGOL G, YANG Ji-hong, BRANDL M T, et al. Infrared pasteurization of raw almonds[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(3): 387-393.
- [60] HAMANAKA D, NORIMURA N, BABA N, et al. Surface decontamination of fig fruit by combination of infrared radiation heating with ultraviolet irradiation [J]. *Food Control*, 2011, 22(3/4): 375-380.
- [61] 张鑫, 曲文娟, 马海乐, 等. 脱水菠菜的催化式红外辐射灭菌研究[J]. *食品科学*, 2013, 34(23): 133-137.
- ZHANG Xin, QU Wen-juan, MA Hai-le, et al. Effectiveness of catalytic infrared radiation in the sterilization of dehydrated Spinach[J]. *Food Science*, 2013, 34(23): 133-137.
- [62] HAMANAKA D, UCHINO T, FURUSE N, et al. Effect of the wavelength of infrared heaters on the inactivation of bacterial spores at various water activities[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2006, 108(2): 281-285.
- [63] ODUOLA A A, BOWIE R, WILSON S A, et al. Impacts of broadband and selected infrared wavelength treatments on inactivation of microbes on rough rice[J]. *Journal of Food Safety*, 2020, 40(2): 12764.
- [64] WILSON S A, ATUNGULU G G, OLATUNDE G. Quality, Decontamination, and energy use considerations during radiant-heat and tempering treatments of shelled corn[J]. *Cereal Chemistry*, 2017, 94(4): 705-711.
- [65] BYRNE B, DUNNE G, BOLTON D J. Thermal inactivation of *Bacillus cereus* and *Clostridium perfringens* vegetative cells and spores in pork luncheon roll[J]. *Food Microbiology*, 2006, 23(8): 803-808.
- [66] CAI Lu-yun, ZHANG Wen-di, CAO Ai-ling, et al. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum) [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 55: 96-104.
- [67] SAKAI N, MORITA N, QIU Pan-zi, et al. 2-Dimensional heat-transfer analysis of the thawing process of tuna by far-infrared radiation[J]. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology-Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 1995, 42(7): 524-530.
- [68] CAO Min-jie, CAO Ai-ling, WANG Jing, et al. Effect of magnetic nanoparticles plus microwave or far-infrared thawing on protein conformation changes and moisture migration of red seabream (*Pagrus Major*) fillets[J]. *Food Chemistry*, 2018, 266: 498-507.