

doi:10.12301/spxb202300403

文章编号:2095-6002(2023)04-0001-15

引用格式:马海乐,陈文庆.基于电磁波和等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术研究现状与展望[J].食品科学技术学报,2023,41(4):1-15.



MA Haile, CHEN Wenqing. Research status and prospect of emerging physical sterilization technology of solid food based on electromagnetic wave and plasma[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023,41(4):1-15.

基于电磁波和等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术研究现状与展望

马海乐, 陈文庆

(江苏大学食品物理加工研究院/江苏省食品物理加工重点实验室, 江苏 镇江 212013)

摘要: 固态食品的杀菌是食品行业一直以来面临的关键技术难题。为保证杀菌过程的节能、高效、安全,近年来,围绕电磁波和等离子体等太空极端环境中的两大物理学现象涌现出一系列新兴物理杀菌技术,其中包括以催化式红外、微波、射频等为代表的热物理杀菌技术和以光动力、脉冲强光、低温等离子体活化水/冰、包装内低温等离子体等为代表的非热物理杀菌技术。这些新兴技术可适应不同形态、不同组分特征的固态食品的表面或整体杀菌。重点梳理了相关技术的核心问题和最新应用研究,并从4个方面提出了未来固态食品物理杀菌技术的主要研究任务:1)深化物理杀菌技术的机制研究。以不同的固态食品基质环境为基础,探明不同的食源性微生物在不同物理场胁迫下的响应机制。2)推动多物理场耦合的杀菌关键技术攻关。根据不同的固态食品物料特征,协同多种各具特色的新兴物理杀菌技术,在杀菌有效性和食品品质减损之间建立平衡。3)突破物理杀菌关键装备的制造瓶颈。在学科交叉的基础上,攻克物理杀菌关键装备研发的卡脖子技术,最大限度降低制造成本。4)促进包装内物理杀菌技术的开发与应用。根据固态食品生产的真实场景,促进包装内物理杀菌技术装备的研发,避免杀菌后的二次污染。

关键词: 固态食品; 食品安全; 食品保鲜; 物理杀菌; 电磁波; 等离子体

中图分类号: TS201; TS203

文献标志码: A

食源性致病菌与腐败菌等微生物污染的防治一直是食品质量与安全领域的主要问题之一,而固态食品的杀菌是该领域的一个全球性的关键共性技术难题。固态食品主要分为高水分的生鲜食品(蔬菜、水果、禽肉、水产品等)和中等水分及低水分的干制食品。干制食品又分为块状干制食品(肉干、豆腐干等)、粒状干制食品(根茎类丁状脱水果品和脱水蔬菜、保健食品、坚果等)、粉状干制食品(奶粉、果粉、调味粉、粉剂保健食品等)和片状干制食

品(干鱼片、脱水果蔬片等)。对于很多非常容易腐败变质的固态食品而言,杀菌并不等于保鲜,但保鲜一定要采用杀菌或抑菌手段,并保证达到很高的杀菌率甚至是商业无菌。目前针对固态食品的工业化生产,仍然离不开⁶⁰Co和电子束等辐照杀菌技术,但辐照杀菌技术对人体具有潜在的健康危害,⁶⁰Co杀菌还存在着钴源管理的风险。因此,亟须安全无害、节能高效的物理杀菌新方案,以促进固态食品杀菌产业的创新升级和可持续发展。

收稿日期:2023-04-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0700100;2017YFE0105300)。

Foundation: National Key Research and Development Program of China (2018YFD0700100;2017YFE0105300).

第一作者:马海乐,男,教授,博士生导师,主要从事食品物理加工方面的研究。

1 太空极端环境的启示

地球是一个覆盖着浓厚大气层的岩石行星,在大气层外便是外太空。目前普遍认为在海拔 100 km 处的位置就是地球大气层与外太空的分界线,国际上称之为“卡门线”。卡门线之上的外太空环境极端恶劣,除了空气稀薄、温差巨大、微重力之外,还充斥着大量来源于宇宙深处的辐射和高能粒子,其中就包括电磁波和等离子体。宇宙中的大部分天体会发出各种电磁波信号,而等离子体则是宇宙中物质存在的主要形式,占据宇宙中物质总量的 99% 以上。随着载人航天技术的不断突破,人类逐渐利用这样的极端物理环境条件进行制药育种、金属冶炼、材料提纯等科学研究。

近年来,围绕电磁波和等离子体等两大物理学现象,低碳高效、节能环保的固态食品新兴物理杀菌技术也应运而生,主要包括以催化式红外、微波、射频等为代表的热物理杀菌技术和以光动力、脉冲强光、低温等离子体活化水/冰、包装内低温等离子体等为代表的非热物理杀菌技术。

2 基于电磁波的固态食品新兴物理杀菌技术

基于电磁波的固态食品物理杀菌技术主要包括传统的辐照杀菌和紫外杀菌,以及新兴的光动力杀菌、脉冲强光杀菌、催化式红外杀菌、微波杀菌与射频杀菌等(图 1)。

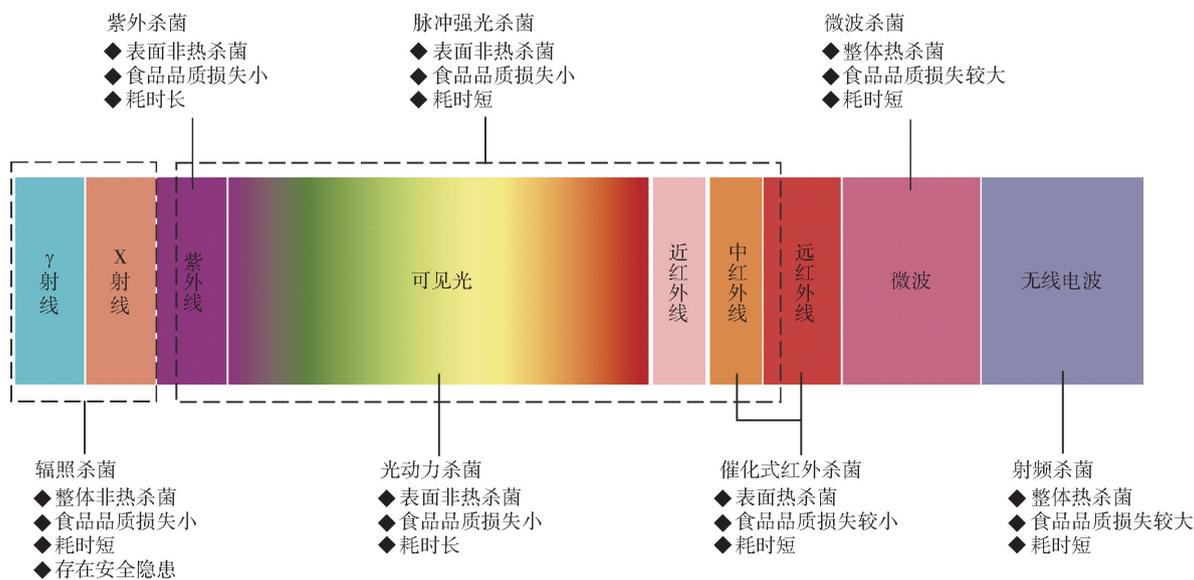


图 1 基于电磁波的固态食品物理杀菌技术

Fig. 1 Physical sterilization techniques for solid food based on electromagnetic wave

2.1 光动力杀菌

光动力杀菌是一种主要基于可见光、光敏剂和分子氧的新兴非热物理杀菌技术,起初应用于医学领域,近年来逐渐应用在固态食品杀菌中。光动力杀菌的原理:当内源性或外源性光敏剂受特定波长的光照时被激发,并从基态跃迁到更高能量的激发单重态;由于激发单重态并不稳定,容易在荧光发射条件下重新回到基态,或通过系间窜越成为相对稳定的激发三重态;而在激发三重态下,光敏剂会与周围的基态分子氧反应,发生电子转移,生成活性氧,或者将能量转移给三线态氧分子反应生成单线态氧,进而透过细胞膜,氧化蛋

白、核酸、脂质等胞内生物大分子,同时诱导一系列关键酶失活,最终使微生物细胞损伤或凋亡^[1]。该技术由于在可见光下即可达到一定的表面杀菌效果,比传统的紫外杀菌更加安全,且操作简单、温升小,对食品品质影响小^[2]。但要使食源性微生物的灭活量达到相应的标准要求往往需要数小时的照射时间,因此难以满足生产线上的快速杀菌需求,需探索短时高效的光动力杀菌方案,以促进该技术的实际落地。

光敏剂类别及浓度、光敏剂施加方式及光源是影响光动力杀菌有效性的关键因素。很多微生物自身即含有内源性光敏剂,如卟啉和细胞色素,但效果

十分微弱。而以姜黄素、核黄素、叶绿素等为代表的天然产物是目前应用于固态食品光动力杀菌的主流外源光敏剂,并且呈现出一定的剂量效应^[2-3]。但由于外源光敏剂稳定性差,生物利用度低,如若直接将其喷洒到固态食品表面则杀菌效率不高。近年来,多采用包埋技术形成光敏剂-蛋白^[4]、光敏剂- β -环糊精^[5]、光敏剂-壳聚糖^[6]等包合物或制备负载光敏剂的乳液^[7]、涂层^[8]、薄膜^[9]等,间接施加到固态食品表面,提高光敏剂的按需利用率和杀菌性能。另外,不同光源类型的发射波长和强度等特性存在一定的差异,其激活光敏剂的效率也不同。目前用于固态食品光动力杀菌研究的光源主要包括白炽灯和发光二极管(LED)在内的非相干光源,其中又以稳定性高、能耗低、价格低廉、具有特定波长的蓝色发光二极管作为激发光源居多^[10]。相比白炽灯或其他广谱光源,LED属于窄谱光源,其发射波长可做到与光敏剂的吸收波长一致,以最大程度上激发光敏剂,提高杀菌有效性^[11]。

2.2 脉冲强光杀菌

脉冲强光光源(惰性气体闪光灯)发射的光波长分布范围(200~1100 nm)很宽,近似太阳光,包括红外、可见光和紫外部分,可在极短时间(数十至数百微秒)将高功率的电脉冲转换为峰值功率极高的光辐射脉冲,光强度相当于到达地球表面太阳光强度的数千乃至数万倍,因此表现出很强的瞬时杀菌能力。同时,该技术可最大限度降低对固态食品的营养和感官品质的不良破坏。另外,由于灯管不含汞、无化学残留、对环境无不利影响,且操作简单、便于安装、节能高效,适合固态食品物料表面的连续化快速杀菌作业,因此,该技术近年来受到广泛关注。

由于脉冲强光横跨红外、可见光和紫外三大光谱区,因此其对微生物的作用机制是这三大光谱区协同作用的结果,可产生光热、光化学和光物理效应^[12]。1)光热效应。脉冲强光中的红外波段可产生一定的热辐射,引起固态食品物料表面温度的小幅上升,造成微生物细胞液的蒸发及细胞结构和胞内物质的破坏^[12]。2)光化学效应。微生物DNA吸收脉冲强光中的短波紫外(ultraviolet radiation C, UV-C)后,其结构发生变化,开始逐渐断裂,形成胸腺嘧啶二聚体,致使DNA的复制过程受阻;同时,微生物胞内酶的空间结构遭到破坏,活性减弱或丧失,严重影响微生物的遗传与代谢,从而达到抑制微生物细

胞生长繁殖的目的^[13]。该效应也被普遍认为是脉冲强光杀菌有效性的关键。3)光物理效应。该效应主要由光致发光所引起,其产生的瞬时高能冲击会损伤细胞壁和其他细胞成分,造成细胞凋亡^[14]。

大枣、枸杞、干辣椒等固态食品物料表面一般会因皱褶遮挡光照,藏匿于褶皱中的微生物由于接受不到脉冲强光的照射,从而大大降低了脉冲强光在该类固态食品表面的杀菌效果,这种现象被称为“遮蔽效应”,该效应也是制约脉冲强光杀菌效能的关键因素。因此,如何使固态食品物料的每个接触面均能受到脉冲强光照射是目前亟须解决的难点。在技术改进方面,魏文莉^[2]为解决干红辣椒背光部分杀菌不彻底的问题,引入光动力杀菌技术,以姜黄素为光敏剂,其可以覆盖到干红辣椒的凹陷褶皱部分,同时又由于脉冲强光可以覆盖姜黄素的最大吸收波长,因此可以激发姜黄素产生活性氧,引起微生物产生氧化应激甚至失活;不仅如此,该项研究还发现,相比单一的脉冲强光处理或传统的采用420 nm LED蓝光作为光源的光动力处理,“脉冲强光+光敏剂”的办法可以起到更好的协同杀菌效果。夏国华^[15]则采用催化式红外联合脉冲强光的方式,在发挥脉冲强光表面短时冷杀菌优势的同时,利用红外浅层表面热效应和长波衍射效应,克服了干青椒表面因褶皱荫蔽结构阻碍脉冲强光照射的问题,同样取得了理想的联合增效作用。在设备改良方面,我国的中物光电杀菌技术有限公司近年来相继研发出固体颗粒和粉体颗粒杀菌系列装备,通过阶梯式的组合杀菌模块结合多段振动式托盘,使物料在振动过程中接受脉冲强光辐射,同时借助不同模块之间的高度差掉落前进,从而达到自动翻料的目的,有效减弱遮蔽效应的影响^[16]。

为进一步延长固态食品货架期,近年来,国内外研究学者开始探索将脉冲强光和涂层技术相结合,以此达到抑菌保鲜的双重目的。例如,Taştan等^[17]采用含有香芹酚纳米乳液的壳聚糖涂层处理鲜切黄瓜之后进行脉冲强光照射,产生了较强的协同抑菌效应;与此处理顺序相反,Wang等^[18]在利用脉冲强光对鸡蛋表面的大肠杆菌进行快速杀菌净化处理后,采用凡士林对脉冲强光处理后的鸡蛋进行涂层处理,有效维持了鸡蛋在贮藏期间的理化品质。

2.3 催化式红外杀菌

红外线的波长在0.7~1000 μm ,具有热效应的

是中红外和远红外波段,其杀菌以浅层表面热效应为主,相应的边际效应和穿透力较弱,因此对微生物的抑制作用随固态食品厚度的增加而减小^[15]。传统的红外装备都以电力作为能源,能耗较高、碳排放较大。近年来,国际上发展了一种新型红外技术——燃气催化式红外技术,其原理是燃气和空气借助贵金属(钯、铂)的催化作用在不燃烧的情况下被转化成二氧化碳和水,同时释放出红外线,其能耗约是电红外的50%^[19]。燃气催化式红外技术所采用的燃气主要为低碳、清洁的天然气,对环境危害较小。该技术起初广泛应用于皮革、油漆、带芯等工业品的烘干,近年来在固态食品杀菌领域也有了初步的应用。王蓓等^[20]采用单板和双板两种催化式红外辐射模式对含菌量超标的香葱进行杀菌,发现在80、90℃下的单板模式处理3 min,或在60~90℃下的双板模式处理1 min,香葱表面残存菌落总数低于5 lg CFU/g,大肠菌群低于100 MPN/g,同时可以保持色泽和较多的维生素C含量。为进一步提升杀菌效果,李婷^[21]采用催化式红外联合保温技术对返潮干香菇进行杀菌防霉,并构建出初始水分含量-红外加热时间-保温时间三维杀菌曲线,可以预测60、70、80℃杀菌温度下,初始含水量在16.0%~21.4%的返潮干香菇达到杀菌要求(霉菌总数低于2 lg CFU/g)所需的红外加热时间和保温

时间。近期,笔者以大葱为典型代表蔬菜,基于催化式红外辐射构建出大葱的钝酶-干燥-杀菌-增香一体化新技术,该技术作为冷冻干燥的一种预处理技术有着广泛的应用前景^[22]。

美国加州大学戴维斯分校的潘忠礼教授是国际上较早研究催化式红外技术在农产品的干燥、杀菌、去皮、杀虫等领域中应用的代表性学者^[23]。然而,由于我国对催化式红外线发射器的设计制造技术研究缺乏,限制了我国学者将催化式红外技术应用于固态食品杀菌领域的研究进展。笔者带领的江苏大学食品物理加工团队与镇江美博红外科技有限公司经过多年的合作攻关,于2016年攻克了燃气催化式红外装备的核心部件——催化式红外发射器的设计与制造技术,相关的表面温度、发热均匀性、功率密度等核心指标达到欧美先进产品标准,该研究成果于2021年通过了由中国轻工业联合会组织的技术成果鉴定会,被认定在我国实现了从零到一的突破^[24];同时以此为基础,面向不同特征的固态食品物料以及实际生产需求,相继研发出箱式、网带式、滚筒式、悬挂式等多样化的固态食品催化式红外杀菌装备(图2)。目前,本团队正在加强催化式红外设备的燃气流量智能监控、红外发射板温度精准调控等方面的研究工作,希望推动相关系列装备向着智能化、数字化方向发展。



图2 固态食品催化式红外杀菌装备

Fig. 2 Catalytic infrared radiation equipment for solid food sterilization

目前,普遍认为微生物在吸收红外线后,其细胞组分的损伤程度由高到低可排序为:蛋白质、RNA、

细胞壁、DNA,其中又以胞内蛋白和核酸的热变性为微生物的主要致死原因^[15]。然而,在固态食品的催

化式红外杀菌机制方面,相关的研究工作仍然较少。Xia等^[25]发现,催化式红外杀菌可破坏铜绿假单胞菌细胞膜完整性、通透性和流动性;同时,破坏膜上钙离子通道,导致细胞膜损伤或破裂,细胞泳动力降低,胞内大分子物质泄漏,造成细胞凋亡。该项研究的不足之处在于仅对菌悬液进行催化式红外杀菌的机制探索,脱离了固态食品基质本身对细菌生长繁殖的影响。李婷^[21]则以返潮干香菇为基质,从细胞水平探究了催化式红外杀菌对黑曲霉的灭活机制,发现黑曲霉孢子形态严重变形、细胞壁破损、细胞膜收缩且胞内内容物泄漏,孢子的正常生命活动受到强烈干扰,引发孢子失活。目前,关于催化式红外杀菌机制的探索仍然停留在表观的辐射条件(辐射时间、辐射温度、辐射间距等)对微生物细胞水平的影响。然而,该技术的特殊之处在于,红外线的发射过程实际上是氧气被不断消耗,同时二氧化碳不断增多的过程,这样的气体环境是否会对微生物应激或凋亡产生影响是一个值得深入探究的问题。另外,微生物在基因层面上是如何启动一系列链式反应响应催化式红外辐射的胁迫,产生何种生物学效应,以及在特殊条件下是否会诱导微生物进入活的不可培养状态,这些同样是未来需深入开展的基础研究。

2.4 微波杀菌

微波加热主要依靠诱导食品中极性分子(水等)产生偶极振动和旋转,热量则随之由其中的分子摩擦产生。相较于传统的热处理将热能从食品表面传递到内部,微波的穿透力更强,因此加热速度更快^[26]。微波杀菌以热效应为主,由于微波的选择性加热,微生物体可以达到比周围流体更高的温度,导致微生物受到的损伤更快,胞内生物大分子急速变性,微生物来不及启动应激系统就被杀灭,由此导致仅仅用60~90℃,就可以在几分钟之内完成杀菌;而常规的热杀菌温度一般在100℃以上,耗时十几分钟至几十分钟不等。也有研究认为,微波加热存在一定的非热效应,即微生物体内并不会有明显的升温现象,而是微生物细胞吸收微波能后其基因的排列组合状态和机体的运动规律发生改变,从而使微生物的生理活性物质发生变化,导致微生物失活^[27]。

微波应用于固态食品杀菌亟须攻关的是加热均匀性问题和持续性问题。微波加热的均匀性受设备中微波的分布、被处理食品的形状及组分等诸多因

素影响。由于边角效应,微波的加热均匀性较差,冷点位置加热较慢,热点位置加热又太快,因此对冷点位置的微生物杀菌效能不足,而同时又容易因热点位置过热导致食品品质下降。为此,国际上著名的食品微波加工领域专家,美国华盛顿州立大学的唐炬明教授曾采用微波辅助热灭菌或微波辅助巴氏杀菌的方法,将包装食品浸入加压循环热水中,同时进行微波加热,借助水作为加热介质以此解决温度不均匀的问题^[28]。进一步地,Tsai等^[26,29]最近开发了一种微波辅助感应加热的新技术,并将其应用于白虾、蛤蜊等预包装水产品的热加工和杀菌,发现在合适的参数下,与单一的微波加热、感应加热或煮沸加热的方式相比,该技术可实现热量的均匀分布,有效灭活水产品中的微生物,并延长经该技术熟制后的水产品保质期。微波加热的持续性主要取决于微波杀菌温度达到后是否能保持恒温,这要求微波设备具有很高的可控性。南京永青食品保鲜科技发展有限公司总工程师吴永年教授是国内较早研究微波杀菌综合保鲜技术的专家,其独创箱式、隧道式等一系列微波杀菌关键成套装备,可实时控制杀菌温度和恒温杀菌时间。当食品温度过高和过低,设备均可自动调整和纠偏,以保证杀菌效果,目前在酱肉、盐水鸭、豆制品、蛋制品、粉剂制品等固态食品保鲜中已开展了大规模的产业化应用^[30]。

为避免微波的过度热效应对固态食品品质产生的负面影响,一种高功率脉冲微波技术近期被尝试应用在固态食品杀菌中。该技术将微秒级宽度的高压通过高压脉冲调制加到磁控管上,以达到数百千瓦以上的峰值功率,产生周期性瞬时高能量的脉冲微波^[31]。因此,高功率脉冲微波兼具传统微波与电磁脉冲的特点,通过工作时的间歇作用避免食品感官品质和营养品质受到热损失,同时通过瞬时高能量的微波灭活微生物,以达到杀菌目的。张亚新^[32]采用该技术可在最优参数下将单增李斯特菌和铜绿假单胞菌分别杀灭5.09 lg CFU/mL和4.81 lg CFU/mL,且观察到菌体变形严重,细胞膜损伤甚至破裂,同时可有效抑制该两种菌形成的生物膜,在一定程度上延缓河蟹肉在贮藏期间的腐败。目前该技术相关的研究仍较少,未来需进一步验证其对不同类型的固态食品物料的杀菌性能,探究其对不同食源性微生物的杀菌机制,研制更加完善的试验设备,并探索该技术产业化的可能性。

2.5 射频杀菌

射频是一种高频交流电磁波,其频率为3 kHz~300 MHz,可用在固态食品的介电加热过程中。与传统加热方法相比,射频加热可使电磁波直接穿透食品物料,通过偶极旋转和离子传导使固态食品物料内外同时受热,因此加热效率更高;且与微波杀菌相比,射频的穿透能力更强、处理量大、温升速度快、技术工业化放大难度较小^[33],是国际上广泛研究的一种新兴热杀菌技术。目前,相关研究主要集中在调味料^[34]、坚果^[35]、小麦粉^[36]等低水分固态食品及菜肴^[37]的杀菌方面。

射频杀菌以热效应为主,张莉慧^[38]采用表观试验与转录组测序技术结合的方式,发现射频加热时间越长,对核桃表面的金黄色葡萄球菌破坏程度越大,且射频加热抑制了细胞壁的合成,改变了细胞膜的通透性,影响了细胞的正常生理代谢过程。然而,对于射频杀菌过程是否存在非热效应,目前相关的研究仍然较少。为保证结论的准确性,必须确保射频加热和常规加热模式试验条件的高度一致,包括加热速率、加热均匀性等,以严格地将热效应和非热效应剥离开进行对比。Kou等^[39]采用一套精确控温的加热板系统模拟射频加热过程,以排除热效应的影响。他们发现在相同的加热曲线下,该加热板系统和射频加热的微生物致死率无显著差异,表明射频杀菌不存在非热效应。类似地,Cui等^[40]则在干扰射频加热的情况下采用一套水浴温控系统保持样品温度,发现在亚致死温度下,射频与水浴加热处理后的微生物在细胞致死率、微观形态和胞内生物大分子的变化上没有检测到差异,仅存在少量的差异基因,这也表明射频的非热效应或许很微弱甚至可以忽略不计。未来可考虑从射频对食源性微生物的离子跨膜运转、膜上受体蛋白、信号转导系统的影响等多方面进一步探究射频可能存在的非热效应。

由于边角效应的存在,射频杀菌同样出现与微波类似的加热均匀性问题,这也是制约其杀菌有效性的关键因素。对此,国内外研究者目前主要采用3种方案解决该难题。1)调整食品物料的摆放方式。张双^[33]以花生仁为例,建立电磁和传热的耦合数学模型,为花生仁射频加热后的温度分布提供了即时准确的预测,以此调整花生仁样品的摆放方式,降低因冷点位置导致的杀菌效果不理想的概率。2)在食品物料周围添加介质。张

双^[33]发现,在花生样品上表面添加与冷点区域尺寸相近的云母板可有效提高射频加热均匀性;Jiao等^[41]采用聚醚酰亚胺改善圆柱形塑料罐中花生酱的射频加热均匀性;Ozturk等^[42]则在玉米粉周围添加聚氨酯泡沫片以减小热点和冷点间的温差。3)将射频与热水或热空气加热相结合。热水辅助射频处理适用于果蔬、肉制品等高水分固态食品,热空气辅助射频处理则适用于处理谷物、坚果、面包等表面多孔类食品。

3 基于低温等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术

3.1 低温等离子体放电类型与杀菌机制

等离子体是物质除固、液、气三态之外的第四种状态,包含正负离子、电子、自由基、基态和激发态分子等。按照带电粒子温度的不同,等离子体可分为高温等离子体和低温等离子体。低温等离子体能够在较低温度(60℃以下)产生大量的主要基于活性氧和活性氮的抑菌活性物质,因此常用于固态食品表面的非热杀菌。按照放电方式的不同,低温等离子体主要分为介质阻挡放电型、射流放电型、辉光放电型、电晕放电型、微波放电型、射频放电型等^[43-44],其中,以介质阻挡放电型和射流放电型在固态食品杀菌领域的研究最为广泛。

目前,低温等离子体杀菌的作用机制主要可归纳为氧化作用、电穿孔作用、离子轰击作用3个方面。1)氧化作用。在低温等离子体产生过程中,以活性氧和活性氮为主的氧化性基团不断作用于微生物细胞表面,造成细胞膜破损、胞内物质泄漏,或透过细胞膜直接作用于胞内生物大分子,破坏细胞正常代谢和遗传过程,使细胞失活。由于革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌细胞壁中肽聚糖厚度的差异,导致革兰氏阴性菌对低温等离子体的氧化作用更为敏感^[45-46]。2)电穿孔作用。由于电场的作用,微生物细胞膜上的跨膜电位会发生改变,可能诱导电穿孔现象,使细胞膜表面出现微小的孔道,致使细胞内容物流出^[46]。3)离子轰击作用。如果低温等离子体的电子能量足够大(高于1 keV),电场中的离子在高动能的加持下,通过离子束的形式持续向微生物表面轰击,以损伤细胞膜,破坏细胞完整性;同时,部分离子会在细胞表面积累,导致胞内压力升高直至大于细胞表面临界张力,致使细胞膜破裂,内容物

泄漏,造成细胞失活^[46]。

现阶段低温等离子体技术还存在一些不足。从基础研究角度来看,目前缺乏相关的精密设备对等离子体所产生的活性粒子进行监控和分析,难以挖掘单一活性粒子对微生物应激或凋亡的影响;从实际应用角度来看,一些大型低温等离子体设备在工作过程中会释放出一定浓度的臭氧,在实际试验及生产中需注意高浓度臭氧的密闭和排放问题,避免操作人员长时间大量吸入造成的不良反应。另外,等离子体的安全性仍需被审慎评估和纳入相关法律法规,以规范其在固态食品杀菌保鲜领域中的应用。

3.2 低温等离子体活化水/冰杀菌技术

液态水被低温等离子体处理后,其反应性活性物质可与水分子反应,形成等离子体活化水。相比直接进行等离子体处理,等离子体活化水由于以水为介质,避免了活性粒子对固态食品表面的直接冲击和刻蚀,因此其作用过程更为温和,可产生一些相对长寿命的活性物质,如 H_2O_2 、 H^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 等^[47],同时使活化水呈弱酸性。等离子体活化水作为一种新型的杀菌保鲜剂,由于其较好的流动性和渗透性,以及相较于传统的含氯消毒剂具有更可靠的安全性,目前被广泛应用于果蔬、肉制品、水产品等生鲜固态食品的清洗、抑菌和保鲜^[48]。图3中的3种装置类型为目前低温等离子体活化水生产采用最多的类型^[47]。这3类装置既能通过水上放电也能通过水下放电产生活化水,其中,介质阻挡放电(大间隙)型装置和表面介质阻挡放电型装置均可稳定均匀地产生大面积的等离子体,而射流放电型装置产生的等离子体则相对较集中,但射流的冲击容易引起水花的飞溅。另外,有研究表明,水下放电的杀菌效率要强于水上放电。这可能是由于在相同体积情况下,水中的含氧量大于空气中的含氧量,水下放电可诱导积累更多、更密集的含氧基团活性物质,而水上放电则由于电离空气中的主要成分 N_2 所需的电离能较高,所产生的活性氧和活性氮物质较少,因此杀菌效率也大打折扣^[49]。

Perinban 等^[50]基于介质阻挡放电的等离子体产生等离子体活化水,发现处理 45 min 产生的等离子体活化水对羽衣甘蓝和菠菜样品具有最佳的大肠杆菌杀灭效果,但也显著降低了营养品质。除了活化蒸馏水之外,等离子体也可以用来活化本身就具有一定抑菌活性的液体,如微酸性电解水^[51]、过氧

化氢^[52]、乙酸^[53]、微气泡水^[54]等,以加强固态食品的清洗效果。另外,等离子体活化水在经历从液态到固态的相变后,即可产生等离子体活化冰,同时可保留以活性氧和活性氮为基础的抗菌活性物质,可用于生鲜固态食品的贮藏保鲜。Chanioti 等^[55]在近期发现,与普通冰相比,利用等离子体活化冰作为冷却介质保存鱼片,可显著降低鱼片中的微生物生长速率,同时使鱼片的保质期几乎延长了一倍。关于等离子体活化冰在生鲜食品保鲜中的应用报道目前较少,未来可进一步加强该项技术的基础研究和应用探索。

3.3 包装内低温等离子体杀菌技术

除了处理液态水之外,低温等离子体在固态食品杀菌领域的另一项独特的新兴应用是包装内低温等离子体(in-package cold plasma, ICP)处理技术。该技术的原理是在含有食品的密闭包装内充入环境空气或改性气体,然后将包装食品暴露在高压电场中,包装内的气体在短时间高压电场的作用下电离分解生成等离子体,进而起到杀菌消毒的作用。另外,由于杀菌过程发生在食品包装之后,相比传统的杀菌单元在包装环节之前,该技术可避免对食品造成的交叉污染^[56]。图4是目前产生包装内低温等离子体的主要装置类型^[56]。图4(a)的介质阻挡放电(大间隙)型装置上下两个极板的间距最大可达 100 mm,使整个包装能够置入放电间隙成为可能,但需要很高的电压(10~100 kV)才有可能在这样的大间隙中实现放电^[57]。图4(b)的表面介质阻挡放电型装置则仅在包装材料的内侧表面电离包装内气体产生等离子体,所需的电压较小(1~10 kV),且不受包装大小的限制,但产生的等离子体活性物质数量较少,密度较低,从而导致杀菌效率不足^[56-57]。图4(c)的尖端电晕放电型装置则不需要任何绝缘材料作为高压电极和接地电极间的介质,空气便能充当介质。该装置的特殊之处在于高压电极上设置有针状凸起,这些针状凸起实质上是一种小曲率半径电极,在其附近的空间中,电场分布集中且极不均匀,极易在周围空间使局部气体发生电离。尖端电晕放电型装置的优势在于能够使整个包装置于放电间隙中进行杀菌处理,但所需电压仍然较大,能耗较高^[56]。

ICP 技术对包装内固态食品的杀菌保鲜效果取决于包装内气体的成分及含量、施加电压的大小、包装材料的类型等多个参数。Lee 等^[58]发现,包装内

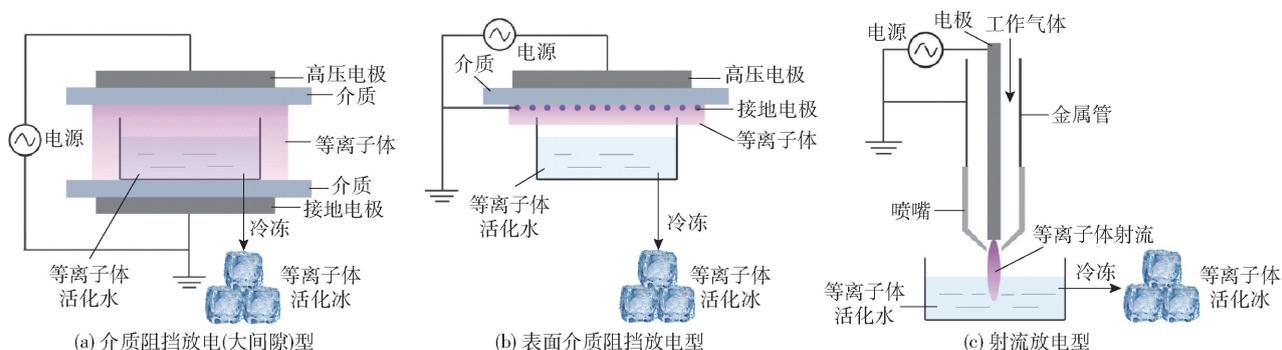


图3 低温等离子体活化水/冰杀菌主要装置

Fig. 3 Main sterilization devices of cold plasma activated water/ice

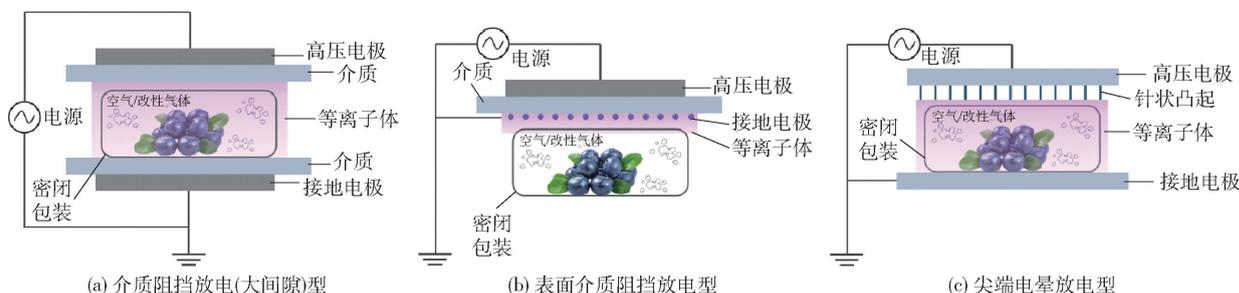


图4 包装内低温等离子体杀菌主要装置

Fig. 4 Main sterilization devices of in-package cold plasma

的气体成分为 O_2 与 CO_2 (二者体积比为 7:3) 时, ICP 技术可有效抑制蒸制年糕中的大肠杆菌的生长;同时发现,在低密度聚乙烯、聚丙烯、尼龙/低密度聚乙烯复合材料、尼龙/聚丙烯复合材料 4 种包装材料中,使用含有尼龙成分的包装材料有利于提高 ICP 处理灭活蒸制年糕中大肠杆菌的效果。Moutiq 等^[59]对包装内的鸡胸肉施加高达 100 kV 的电压,处理 5 min 后可降低 2 lg CFU/g 的菌落总数,同时对鸡胸肉的颜色、pH 值和持水能力等品质特性影响较小,并在冷藏条件下将鸡胸肉保质期延长了约 6 d;类似的电压效应也被 Zhang 等^[60]在采用 ICP 技术处理红烧鸡时所验证。但要达到理想的杀菌效果,除了加大电压这种需额外投入更高能量的方案之外,或许也可通过延长包装内等离子体的寿命来实现。有研究表明,仅需添加低浓度的乙醇便可以将部分短寿命的等离子体活性物质转化为相对长寿命的过氧乙酸,杀菌效果可提高 5 个数量级以上^[61]。该方案采用的等离子体模式为射流型,鉴于包装内等离子体主要由介质阻挡放电产生,其可行性仍需进一步测试和验证。

3.4 固态食品低温等离子体杀菌产业化新型装备

为了适应低温等离子体杀菌的产业化需求,

近年来涌现出一批基于介质阻挡放电的新型低温等离子体设备。南京农业大学章建浩教授是我国在该领域的代表性学者,章教授近期发明了一种气流式低温等离子体板,该设备克服了传统介质阻挡放电型等离子体设备处理腔室小、处理量小、无法大规模批量化杀菌的缺点,通过风扇组将相连的两个陶瓷电极管之间产生的低温等离子体气流从顶部吹出,增加了处理腔室内等离子体的气氛浓度,在配备传送带以及做好密闭等改造工作后,便可用于生产线上固态食品的批量化杀菌^[62-63]。日本学者 Toyokawa 等^[64-65]则设计发明了一种基于介质阻挡放电的滚筒输送式等离子体设备,该设备每相邻的两个滚筒分别为高压电极和接地电极。在高压电场的作用下,相邻的两个滚筒间的空气被电离进而产生等离子体。固态食品在滚筒的带动下向前翻滚输送的同时,也在产生的等离子体的作用下完成了杀菌过程,且杀菌均匀性较强。该设备可直接接入固态食品生产线进行连续化、规模化杀菌处理,是一种应用前景广阔的冷杀菌装备。目前国内尚无此类型的等离子体设备报道,亟须进行相关的研发和测试。

目前大部分研究制备的等离子体活化水体积仅

数十毫升或数百毫升,只能用于小规模试验,无法适应批量化的固态食品杀菌需求。为了进一步提升等离子体活化水的利用率和杀菌性能,吴迪等^[66]发明了一种喷淋式等离子体活化水装置,该装置通过喷洒等离子体活化水的方式清洗果蔬表面,可高效利用水量,同时避免某些果蔬不耐浸泡的问题。此外,为了提高包装内等离子体技术的产业化可行性,Ziuzina等^[67]发明了一种中试规模的大间隙介质阻挡放电式包装内等离子体装置。该装置的上下两个电极各长达1 m,放电间隙可达45 mm,可以实现在静态模式和连续模式下同时处理多个包装,并在不显著影响固态食品品质的情况下,降低微生物污染率,延长包装成品货架期。

4 固态食品物理杀菌新兴技术的总结与展望

4.1 固态食品物理杀菌新兴技术的总结

在电磁波和等离子体两大太空极端环境中的物理现象的基础上,以催化式红外、微波、射频等为代表的热物理杀菌技术和以光动力、脉冲强光、低温等离子体活化水/冰、包装内低温等离子体等为代表的非热物理杀菌技术正逐渐成为推动固态食品杀菌产业迭代升级的关键技术。表1总结了基于电磁波和低温等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术的最新应用情况。

表1 基于电磁波和低温等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术的最新应用

Tab.1 Latest application of emerging physical sterilization technology in solid food based on electromagnetic wave and cold plasma

固态食品	目标微生物	物理杀菌技术	处理参数	减菌数	参考文献
鲜切菠萝	大肠杆菌 O157:H7	光动力	蓝光波长:410 nm,光照时间:10 min,光敏剂浓度:30 μmol/L	1.11 lg CFU/g	[68]
鲑鱼片	单核细胞增生李斯特菌	光动力	蓝光波长:455~460 nm;光照时间:90 min;光敏剂浓度:150 μmol/L	>4.0 lg CFU/g	[69]
三文鱼	生孢梭菌	微波	频率:896 MHz,功率:6 kW,时间:4 min	1.78 lg CFU/g	[70]
调理菜肴 (宫保鸡丁)	总菌落	射频	极板间距:20 mm,时间30 min	>1.4 lg CFU/g	[37]
生食 大黄鱼	总菌落	脉冲强光	辐射强度:300 J/pulse;脉冲数:30	86.27%	[71]
生食 腌制香肠切片	单核细胞增生李斯特菌	脉冲强光	辐射通量:5.31 J/cm ²	1.58 lg CFU/g	[72]
鲜切生菜	1)总菌落 2)大肠菌群	低温等离子体活化水	活化水制备参数:75 kV、5 min; 活化水清洗时间:5 min	1) 1.15 lg CFU/g 2) 1.381 MPN/100 g	[73]
三文鱼	单核细胞增生李斯特菌	低温等离子体活化冰	活化水制备参数:100 kV、60 min	>2.5 lg CFU/mL (纯菌液)	[74]
年糕	大肠杆菌 O157:H7	包装内低温等离子体	包装内气体成分及体积比: O ₂ -CO ₂ (7:3); 包装材料:尼龙/低密度聚乙烯; 等离子体功率:30 W; 时间:4 min	2.2 lg CFU/g	[58]
卷心菜	1)沙门氏菌 2)大肠杆菌 O157:H7 3)单核细胞增生李斯特菌	低温等离子体 + 脉冲强光	低温等离子体参数:24.5 kV、 2 min; 脉冲强光参数:1.5 kV、2 min	1) 3.1 lg CFU/g 2) 2.9 lg CFU/g 3) 3.2 lg CFU/g	[75]

续表 1

固态食品	目标微生物	物理杀菌技术	处理参数	减菌数	参考文献	
荞麦	蜡芽孢杆菌	射频 + 紫外	射频: 85 °C、10 min, 90 °C、0 min, 95 °C、5 min; 紫外: 3.5 mW/cm ² 、10 min, 2.25 mW/cm ² 、10 min, 1 mW/cm ² 、10 min	>2.0 lg CFU/g	[76]	
黑胡椒	1) 大肠杆菌 O157:H7 2) 鼠伤寒沙门氏菌	射频	极板间距: 12.5 cm, 频率: 27.12 MHz, 功率: 12 kW, 时间: 7~8 min	>6.0 lg CFU/g	[77]	
黑胡椒	1) 大肠杆菌 2) 沙门氏菌	微波 + 蒸汽	微波: 4.19 W/g, 134 s; 蒸汽: 101~105 °C, 3 s	1) 7.59 lg CFU/g 2) 9.25 lg CFU/g	[78]	
干制食品	干青花椒	铜绿假单胞菌	催化式红外	(70 ± 3) °C, 4 min	2.6 lg CFU/g	[25]
返潮干香菇	黑曲霉	催化式红外 + 保温	红外: 70 °C, 52~78 s; 保温: 70 °C, 75~30 min	>5 lg CFU/g	[21]	
辣椒粉	大肠杆菌 O157:H7	低温等离子体	60 Hz, 11.86 kV, 15 min	>3.5 lg CFU/g	[79]	
干红辣椒	1) 大肠杆菌 2) 黑曲霉	脉冲强光	0.66 J/cm ² , 60 s	1) 5.64 lg CFU/g 2) 3.82 lg CFU/g	[2]	
干西红柿	真菌群落	低温等离子体	23 kHz, 6 kV, 2.6 W/cm ² , 30 min	76.5%	[80]	
干红辣椒片	1) 黄曲霉孢子 2) 短小芽孢杆菌孢子 3) 大肠杆菌 O157:H7	脉冲强光 + 低温等离子体	脉冲强光: 10 kV, 6.3 min; 低温等离子体: 2.0 kV, 0.8 Hz, 6.3 min	1) 1.3 lg CFU/g 2) 2.3 lg CFU/g 3) >3.8 lg CFU/g	[81]	
冻干宠物食品颗粒	鼠伤寒沙门氏菌	包装内低温等离子体	包装内气体: 78% N ₂ + 21% O ₂ + 1% CO ₂ ; 包装材料: 尼龙/聚丙烯、 2 kV 等离子体处理 10 min	>4.5 lg CFU/cm ²	[82]	

4.2 未来主要的研究任务

4.2.1 深化物理杀菌技术的机制探索研究

杀菌机制的探索是物理杀菌技术在产业化中得以安全高效应用与广泛推广的基础。不同的食源性微生物在不同的食品基质环境中对不同物理场的响应机制大不相同,一些新兴热物理杀菌技术的非热效应也尚不明晰。因此,在细胞层面研究的基础上,未来应进一步在基因水平上深入挖掘物理杀菌机制,同时探析微生物在应对不同物理场的胁迫时所出现的活的不可培养状态的机制,为消除危害固态食品安全的“隐性污染源”提供理论基础。

4.2.2 推动多物理场耦合的杀菌关键技术攻关

由于单一物理场的杀菌方法往往难以在理想的杀菌效果和食品品质减损之间达到平衡,尤其在面对低水分或表面褶皱较多的固态食品时。因此,应进一步加强非热 + 非热、热 + 非热、热 + 热等多物理场耦合的协同杀菌关键技术研究,弥补单一物理场的不足,克服微生物在杀菌过程中的应激适应性反

应,同时保障食品的感官和营养品质。

4.2.3 突破物理杀菌关键装备制造的瓶颈

目前,大部分物理杀菌技术装备仍然停留在实验室规模,部分装备的核心制造技术仍掌握在欧美等发达国家手中。未来应在多学科交叉的基础上,面向不同特征的固态食品物料,大力研制适应连续化、规模化、自动化及智能化生产需要的物理杀菌关键装备;同时,最大限度降低装备的制造成本,推进未来固态食品杀菌产业的自主跨越式高质量发展。

4.2.4 促进包装内固态食材物理杀菌技术的开发与应用

固态食品在物理杀菌后进行包装操作,往往会因二次污染导致染菌,进而导致前期物理杀菌所作的贡献大打折扣。因此,脱离包装只谈物理杀菌本身并不利于固态食品的长期保鲜。可借鉴包装内低温等离子体杀菌技术,协同气调包装手段,积极促进脉冲强光、微波、射频等电磁波技术在包装成品杀菌中的应用。

参考文献:

- [1] COSSU M, LEDDA L, COSSU A. Emerging trends in the photodynamic inactivation (PDI) applied to the food decontamination[J]. *Food Research International*, 2021, 144: 110358.
- [2] 魏文莉. 脉冲强光结合姜黄素技术对干红辣椒杀菌效果及品质研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- WEI W L. Disinfection effect and quality study of combined pulsed light and curcumin technology for dried chilies [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [3] 范宇航, 周雅菲, 刘昊天, 等. 光动力灭活在食品杀菌保鲜中的研究进展[J]. *食品科学*, 2022: 1-13.
- FAN Y H, ZHOU Y F, LIU H T, et al. Research progress of photodynamic inactivation in food sterilization and preservation[J]. *Food Science*, 2022: 1-13.
- [4] LI Y F, TAN L J, LIU F Y, et al. Effects of soluble Antarctic krill protein-curcumin complex combined with photodynamic inactivation on the storage quality of shrimp [J]. *Food Chemistry*, 2023, 403: 134388.
- [5] LAI D N, ZHOU F, ZHOU A, et al. Comprehensive properties of photodynamic antibacterial film based on κ -carrageenan and curcumin- β -cyclodextrin complex[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 282: 119112.
- [6] ZHAO L Y, DING X W, KHAN I M, et al. Preparation and characterization of curcumin/chitosan conjugate as an efficient photodynamic antibacterial agent [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313: 120852.
- [7] ZENG Q H, HU D, WANG R H, et al. Curcumin-loaded emulsions stabilized by the succinylated antarctic krill proteins: establishment of photodynamic inactivation to preserve salmon[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 178: 114613.
- [8] DU T, LI X, WANG S C, et al. Phytochemicals-based edible coating for photodynamic preservation of fresh-cut apples [J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112293.
- [9] CHEN S J, ZENG Q Y, TAN X Y, et al. Photodynamic antibacterial chitosan/nitrogen-doped carbon dots composite packaging film for food preservation applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 314: 120938.
- [10] KIM D K, KANG D H. Efficacy of light-emitting diodes emitting 395, 405, 415, and 425 nm blue light for bacterial inactivation and the microbicidal mechanism[J]. *Food Research International*, 2021, 141: 110105.
- [11] ZHU S Y, SONG Y K, PEI J L, et al. The application of photodynamic inactivation to microorganisms in food [J]. *Food Chemistry*: X, 2021, 12: 100150.
- [12] CASSAR J R, MILLS E W, DEMIRCI A. Characterization of pulsed light for microbial inactivation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 334: 111152.
- [13] AGUIRRE J S, GARCÍA DE FERNANDO G, HIERRO E, et al. Characterization of damage on *Listeria innocua* surviving to pulsed light; effect on growth, DNA and proteome[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2018, 284: 63-72.
- [14] ROWAN N J, VALDRAMIDIS V P, GÓMEZ-LÓPEZ V M. A review of quantitative methods to describe efficacy of pulsed light generated inactivation data that embraces the occurrence of viable but non culturable state microorganisms[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 44(1): 79-92.
- [15] 夏国华. 催化红外和脉冲强光对干青椒杀菌作用及联合增效机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- XIA G H. Antimicrobial effect of catalytic infrared and intense pulsed light on dry green sichuan pepper and its synergistic mechanism[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [16] 杨天晗. 用于固体物料颗粒的脉冲杀菌设备: CN106721878A [P]. 2017-05-31.
- YANG T H. Pulse sterilization equipment for solid material particles: CN106721878A [P]. 2017-05-31.
- [17] TAŞTAN Ö, PATARO G, DONSI F, et al. Decontamination of fresh-cut cucumber slices by a combination of a modified chitosan coating containing carvacrol nanoemulsions and pulsed light[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 260: 75-80.
- [18] WANG B, WEI W L, APUTEXIAKERE J, et al. Surface decontamination of whole eggs using pulsed light technology and shelf life study of combined pulsed light and vaseline coating during room temperature storage [J]. *Food Control*, 2021, 137: 108411.
- [19] 凡威. 核桃滚筒催化红外-热风联合干燥、品质及贮藏特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- FAN W. Study on drying, quality and storage properties of walnut drying with drum catalytic infrared-hot air [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [20] 王蓓, 赵兴, 马海乐, 等. 不同模式催化式红外辐射对香葱杀菌效果及品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(21): 210-215.
- WANG B, ZHAO X, MA H L, et al. Effect of different modes of catalytic infrared radiation on sterilization and quality of chives [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(21): 210-215.
- [21] 李婷. 返潮干香菇催化式红外杀菌技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- LI T. Study on the catalytic infrared radiation disinfection technology of rewetting-dried shiitake mushroom

- [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [22] 马海乐, 邓依格, 周存山, 等. 一种大葱冷冻干燥前催化式红外增香技术: CN115053951A [P]. 2022 - 09 - 16.
MA H L, DENG Y G, ZHOU C S, et al. A catalytic infrared odorization technique for green onion before freeze-drying: CN115053951A [P]. 2022 - 09 - 16.
- [23] PAN Z L, ATUNGULU G G. Infrared heating for food and agricultural processing [M]. Florida, USA: CRC Press, 2010: 1 - 284.
- [24] 江苏大学食品物理加工研究院. 我院主持完成的一项燃气催化式红外加热装备通过技术鉴定 [EB/OL]. (2021 - 11 - 12) [2023 - 04 - 02]. <https://fpp.ujs.edu.cn/info/1003/1683.htm>.
- [25] XIA G H, LI Y, TAO H H, et al. Inactivation mechanism of catalytic infrared against *Pseudomonas aeruginosa* and its decontamination application on dry green Sichuan pepper (*Zanthoxylum schinifolium*) [J]. Food Control, 2022, 132: 108483.
- [26] TSAI Y H, HWANG C C, LIN C S, et al. Comparison of microwave-assisted induction heating system (MAIH) and individual heating methods on the quality of pre-packaged white shrimp [J]. Innovative Food Science & Emerging Technology, 2021, 73: 102787.
- [27] GUO Q S, SUN D W, CHENG J H, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 67: 236 - 247.
- [28] TANG J M. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(8): 1776 - 1793.
- [29] TSAI Y H, HWANG C C, ZENG W H, et al. Retardation of quality loss and extension of shelf life of prepackaged hard clam heating by a novel microwave-assisted induction heating (MAIH) during refrigerated storage [J]. Food Control, 2022, 141: 109187.
- [30] 南京永青食品保鲜科技发展有限公司. 箱式和隧道式微波杀菌装备 [EB/OL]. (2012 - 03 - 13) [2023 - 04 - 02]. <http://www.nyqbx.com/Products.aspx>.
- [31] 刘思远. 高功率脉冲微波催陈对蓝莓酒色泽及风味的影响研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
LIU S Y. The study of the color and flavor in blueberry wine promoted by high power pulsed microwave [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [32] 张亚新. 高功率脉冲微波对产生物膜腐败菌的杀灭机理及在河蟹肉保鲜中的应用 [D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
ZHANG Y X. Sterilization mechanism of high power pulsed microwave on biofilms-forming spoilage bacteria and its application in the preservation of crab meat [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [33] 张双. 花生仁射频加热均匀性优化及杀菌工艺研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHANG S. Heating uniformity optimization and pasteurization protocol development of peanut kernels using radio frequency technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [34] 佟亭玉. 黑胡椒射频杀菌工艺及品质研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
TONG T Y. Study on radiofrequency pasteurization process and quality of black pepper [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [35] 李瑞. 采后巴旦木的射频杀菌技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
LI R. Pasteurization technologies of postharvest almonds using radio frequency heating [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [36] 林碧莹. 不同物理结构小麦产品的射频杀菌技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
LIN B Y. Pasteurization technology of wheat products with different physical structures using radio frequency energy [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [37] 马良. 典型調理菜肴射频及其抑菌剂协同杀菌机理及品质调控研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2021.
MA L. Study on the synergistic effects of radio frequency combined with antibacterial agents on the quality of typical prepared foods and related mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [38] 张莉慧. 核桃射频杀菌机制及方法研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
ZHANG L H. Mechanistic and methodological studies on pasteurization of in-shell walnuts using radio frequency energy [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [39] KOU X X, LI R, HOU L X, et al. Identifying possible non-thermal effects of radio frequency energy on inactivating food microorganisms [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 269: 89 - 97.
- [40] CUI B Z, SUN Y N, WANG K, et al. Pasteurization mechanism on the cellular level of radio frequency heating and its possible non-thermal effect [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103026.
- [41] 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.
- [42] OZTURK S, KONG F B, SINGH R K, et al. Radio frequency heating of corn flour: heating rate and uniformity

- [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 44: 191–201.
- [43] LAROQUE D A, SEÓ S T, VALENCIA G A, et al. Cold plasma in food processing: design, mechanisms, and application [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 312: 110748.
- [44] FARIAS T R B, ALVES FILHO E G, SILVA L M A, et al. NMR evaluation of apple cubes and apple juice composition subjected to two cold plasma technologies [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 112062.
- [45] MANDAL R, SINGH A, PRATAP SINGH A. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 80: 93–103.
- [46] 廖新浴. 低温等离子体诱导活的不可培养(VBNC)状态金黄色葡萄球菌的机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- LIAO X Y. The molecular mechanisms of viable but non-culturable *Staphylococcus aureus* by nonthermal plasma (NTP) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [47] 唐林, 王松, 郭柯宇, 等. 低温等离子体活化水在食品杀菌保鲜中的应用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(12): 347–357.
- TANG L, WANG S, GUO K Y, et al. The application of low-temperature plasma activated water in food sterilization and preservation [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(12): 347–357.
- [48] ZHAO Y M, PATANGE A, SUN D W, et al. Plasma-activated water: physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(6): 3951–3979.
- [49] TIAN Y, MA R N, ZHANG Q, et al. Assessment of the physicochemical properties and biological effects of water activated by non-thermal plasma above and beneath the water surface: physicochemical and biological properties of PAW [J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2015, 12(5): 439–449.
- [50] PERINBAN S, ORSAT V, LYEW D, et al. Effect of plasma activated water on *Escherichia coli* disinfection and quality of kale and spinach [J]. *Food Chemistry*, 2022, 397: 133793.
- [51] ZHU W H, TAN G Z, HAN M L, et al. Evaluating the effects of plasma-activated slightly acidic electrolyzed water on bacterial inactivation and quality attributes of Atlantic salmon fillets [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 84: 103286.
- [52] SONG Y Y, ANNOUS B A, FAN X T. Cold plasma-activated hydrogen peroxide aerosol on populations of *Salmonella typhimurium* and *Listeria innocua* and quality changes of apple, tomato and cantaloupe during storage—a pilot scale study [J]. *Food Control*, 2020, 117: 107358.
- [53] KANG T, YIM D, KIM S S, et al. Effect of plasma-activated acetic acid on inactivation of *Salmonella typhimurium* and quality traits on chicken meats [J]. *Poultry Science*, 2022, 101(5): 101793.
- [54] XU P, TAN J Z. Inactivation and removal of *Klebsiella michiganensis* biofilm attached to the inner surfaces of piping by plasma-activated microbubble water (PMBW) [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 86: 103360.
- [55] CHANIOTI S, GIANNOGLOU M, STERGIU P, et al. Cold-atmospheric-plasma activated-ice as a cooling medium with antimicrobial properties: case study on fish fillet preservation [J]. *Food Research International*, 2023: 112639.
- [56] ZHOU R W, REZAEIMOTLAGH A, ZHOU R S, et al. In-package plasma: from reactive chemistry to innovative food preservation technologies [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 120: 59–74.
- [57] MISRA N N, YEPEZ X, XU L, et al. In-package cold plasma technologies [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 244: 21–31.
- [58] LEE H S, LEE H, RYU S, et al. In-package cold plasma treatment for microbial inactivation in plastic-pouch packaged steamed rice cakes [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2023, 389: 110108.
- [59] MOUTIQ R, MISRA N N, MENDONÇA A, et al. In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology: microbial, quality and storage studies [J]. *Meat Science*, 2020, 159: 107942.
- [60] ZHANG Y L, LEI Y, HUANG S H, et al. In-package cold plasma treatment of braised chicken: voltage effect [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(4): 845–853.
- [61] XIA W J, LIU D X, GUO L, et al. Discharge characteristics and bactericidal mechanism of Ar plasma jet with ethanol and oxygen gas admixtures [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28(12): 125005.
- [62] 章建浩, 万京林, 盛孝维, 等. 箱装果蔬低温等离子体气流式冷杀菌装置: CN215123920U [P]. 2021–12–14.
- ZHANG J H, WAN J L, SHENG X W, et al. Air flow type low temperature plasma device for cold sterilization

- of fruit and vegetable packed in boxes; CN215123920U [P]. 2021-12-14.
- [63] 章建浩, 万京林, 侯喜林, 等. 一种低温等离子体气流式发生器; CN113225888A [P]. 2021-08-06.
ZHANG J H, WAN J L, HOU X L, et al. An air flow low temperature plasma generator; CN113225888A [P]. 2021-08-06.
- [64] TOYOKAWA Y, YAGYU Y, YAMASHIRO R, et al. Roller conveyer system for the reduction of pesticides using non-thermal gas plasma-a potential food safety control measure? [J]. *Food Control*, 2018, 87: 211-217.
- [65] TOYOKAWA Y, YAGYU Y, MISAWA T, et al. A new roller conveyer system of non-thermal gas plasma as a potential control measure of plant pathogenic bacteria in primary food production [J]. *Food Control*, 2017, 72: 62-72.
- [66] 吴迪, 吴清燕, 沈超怡, 等. 一种果蔬等离子体活化水传送式喷淋杀菌装置; CN213486760U [P]. 2021-06-22.
WU D, WU Q Y, SHEN C Y, et al. A plasma activated water spray sterilization device with conveyor for fruits and vegetables; CN213486760U [P]. 2021-06-22.
- [67] ZIUZINA D, MISRA N N, HAN L, et al. Investigation of a large gap cold plasma reactor for continuous in-package decontamination of fresh strawberries and spinach [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 59: 102229.
- [68] ZOU Y, YU Y S, CHENG L N, et al. Effects of curcumin-based photodynamic treatment on quality attributes of fresh-cut pineapple [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 141: 110902.
- [69] HUANG J M, CHEN B W, ZENG Q H, et al. Application of the curcumin-mediated photodynamic inactivation for preserving the storage quality of salmon contaminated with *L. monocytogenes* [J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129974.
- [70] 郭长凯. 微波场综合效应对生孢梭菌的致死效用及其对三文鱼脂肪胺品质的影响研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
GUO C K. Study the synergism of microwave thermal and non-thermal effects on *Clostridium sporogenes* inactivation and fatty acid quality of salmon fillet during pasteurization process [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [71] ZHANG J Y, ZHOU G C, JI S Q, et al. Effect of pulse light on the quality of refrigerated (4 °C) large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 167: 113855.
- [72] BORGES A, BAPTISTA E, AYMERICH T, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* by pulsed light in packaged and sliced *salpicão*, a ready-to-eat traditional cured smoked meat sausage [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 179: 114641.
- [73] 袁园. 低温等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
YUAN Y. The effect of cold plasma activated water on fresh cut lettuce during storage [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [74] 焦焯, 朱育攀, 许航博, 等. 等离子体活化水冰对纯培养及三文鱼片表面单增李斯特菌杀菌效果研究 [J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2019, 51(3): 97-103.
JIAO Z, ZHU Y P, XU H B, et al. Plasma-activated water ice inactivation of *Listeria monocytogenes* in pure culture and salmon strips [J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2019, 51(3): 97-103.
- [75] KIM Y E, MIN S C. Consecutive treatments of cold plasma and intense pulsed light for microbial decontamination of fresh cabbage slices in plastic containers [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2022, 369: 109626.
- [76] XU J J, XU Y M, GUAN X Y, et al. Effects of sequential treatments using radio frequency energy and ultraviolet light on inactivation of *Bacillus cereus* spores and quality attributes of buckwheat [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2022, 385: 109997.
- [77] TONG T Y, WANG P Z, SHI H, et al. Radio frequency inactivation of *E. coli* O157: H7 and *Salmonella typhimurium* ATCC 14028 in black pepper (*Piper nigrum*) kernels: thermal inactivation kinetic study and quality evaluation [J]. *Food Control*, 2022, 132: 108553.
- [78] SHARMA P, XIAO H W, ZHANG Q, et al. Intermitent high-power short-time microwave-vacuum treatment combined with steam impingement for effective microbial decontamination of black pepper (*Piper nigrum*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 343: 111373.
- [79] KIM Y H, LEE C, LEE S J, et al. Reduction of *E. coli* O157: H7 and *Bacillus cereus* levels in red pepper powder using dielectric barrier discharge (DBD) plasma for enhanced quality [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 76: 102916.
- [80] MOLINA-HERNANDEZ J B, TAPPI S, GHERARDI M, et al. Cold atmospheric plasma treatments trigger changes in sun-dried tomatoes mycobiota by modifying the spore surface structure and hydrophobicity [J]. *Food Control*, 2023, 145: 109453.
- [81] LEE S Y, PARK H H, MIN S C. Pulsed light plasma treatment for the inactivation of *Aspergillus flavus* spores,

Bacillus pumilus spores, and *Escherichia coli* O157:H7 in red pepper flakes [J]. *Food Control*, 2020, 118: 107401.

[82] YADAV B, ROOPESH M S. In-package atmospheric

cold plasma inactivation of *Salmonella* in freeze-dried pet foods; effect of inoculum population, water activity, and storage [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102543.

Research Status and Prospect of Emerging Physical Sterilization Technology of Solid Food Based on Electromagnetic Wave and Plasma

MA Haile, CHEN Wenqing

(*Institute of Food Physical Processing/Key Laboratory of Food Physical Processing of Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

Abstract: Sterilization of solid food has always been a key technical problem in food industry. In order to ensure an energy-saving, efficient, and safe sterilization process, in recent years, a series of emerging physical sterilization technologies have emerged in reference to two physical phenomena from the space extreme environment, electromagnetic wave and plasma. These include thermal physical sterilization technologies represented by catalytic infrared radiation, microwave, radio frequency, and non-thermal physical sterilization technologies represented by photodynamic, pulsed light, cold plasma activated water/ice, and in-package cold plasma. These emerging technologies could adapt to the surface or overall sterilization of solid foods with different forms and component characteristics. This article focused on the core issues and latest application research of relevant technologies, and proposed the main tasks for future development of physical sterilization of solid foods from four aspects. 1) Deepen the mechanism research of physical sterilization technology. Based on different solid food matrix environments, explore the response mechanisms of different food-borne microorganisms under different physical field stress. 2) Promote the key technology research of multi-physical field coupling sterilization. According to the characteristics of different solid food materials, coordinate various emerging physical sterilization technologies with their respective characteristics to establish a balance between sterilization effectiveness and food quality reduction. 3) Break through the manufacturing bottleneck of physical sterilization key equipment. Based on interdisciplinary research, overcome the technical difficulties in development of key equipment for physical sterilization, and minimize manufacturing cost. 4) Promote the development and application of in-package physical sterilization technology. According to the real production scenarios of solid food, promote the development of in-package physical sterilization technology to avoid secondary pollution after sterilization.

Keywords: solid food; food safety; food preservation; physical sterilization; electromagnetic wave; plasma

(责任编辑:叶红波)