

编者按:在新一代科技革命与产业革命的驱动下,食品科技与食品工业正经历前所未有的变革与挑战。食品装备技术作为连接农业、制造业与消费终端的枢纽,它的创新与产业升级不仅是保障食品安全,提升产品品质与生产效率,降低能耗的关键,更是推动行业智能化转型的核心动力与重要保障。然而,目前我国食品装备关键技术和装备薄弱,限制了行业的发展。随着 AI、大数据、物联网等技术的开发与应用,食品装备智能化将为食品制造高质量发展注入新动能。本刊现开设“食品装备”特约专栏,连续刊载相关文章。

(本刊主编:中国工程院院士陈坚教授。客座编辑:江苏大学食品与生物工程学院徐斌教授。)

食品电磁加工技术及装备国产化进展

曹诗林¹, 成军虎², 杨 逍², 陈博儒¹, 马 骥², 李 坚¹, 曾新安^{1,2*}

(¹ 佛山大学 广东省食品智能制造重点实验室 广东佛山 528000

² 华南理工大学食品科学与工程学院 广州 510641)

摘要 目前食品的传统加工方法已难以满足消费者对食品安全、营养和感官品质日益增长的需求。食品电磁加工技术作为新型的绿色加工处理手段,在食品加工、提取、灭菌保鲜等领域展现出显著优势,具有巨大的应用潜力,有望推动食品工业的转型升级。本文综述食品电磁加工技术,包括脉冲电场、低温等离子体、脉冲强光、微波等技术以及装备的国产化现状和面临的挑战,展望其未来发展趋势,旨在为食品电磁加工技术与装备的发展提供理论支撑,助力食品产业的高质量发展,保障公众食品安全。

关键词 电磁加工; 食品智能制造; 脉冲电场; 低温等离子体; 脉冲光

文章编号 1009-7848(2025)02-0001-14 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2025.02.001

传统食品加工方法易导致食品营养成分降解和风味劣变。随着行业的发展,消费者对食品安全与营养的重视程度不断提高,对食品的口感、营养和品质的要求也越来越高。在高质量发展的要求下,食品加工工业正面临转型升级的挑战。食品电磁加工技术作为一种发展迅速的新型食品加工技术,在食品灭菌、保鲜、抗菌和成分改性方面具有独特优势,能有效保持食品原有的品质和口感,满足消费者的需求。在市场驱动下,食品电磁加工技术与装备的国产化、高端化、智能化发展正在逐步推进,是实现食品产业高质量发展的重要途径。

本文探讨近年来食品电磁加工技术的发展趋势、相关装备国产化的现状及未来挑战,为该领域的创新发展提供理论依据和技术支撑,推动我国

食品工业的高质量发展,确保人民群众“舌尖上的安全”。

1 食品电磁加工技术发展

食品电磁加工技术是根据电磁波谱的波段范围及频率开放范围,利用电磁场与物质之间的相互作用,对食品进行加工处理的一种先进技术,主要涉及脉冲电场技术、低温等离子体技术、脉冲强光技术、微波技术、红外技术等。

1.1 脉冲电场加工技术基本概念与原理

脉冲电场(Pulsed electric field, PEF)是以较高的电场强度(10~50 kV/cm)、较短的脉冲宽度(0~100 μ s)和较高的脉冲频率(0~2 000 Hz)对液体、半固体食品进行处理,具有温度低、效率高等特性,可用于果汁、酒类、乳液等液体或半液体食品灭菌领域^[1-3]。经过 PEF 处理的液态食品中的微生物,其细胞膜结构将遭受不可逆性的损伤,表现为细胞膜表面形成无法自行修复的微孔,即不可逆性电穿孔现象,进而导致微生物细胞的死亡^[4-5]。

收稿日期: 2025-02-19

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2023YFD2101000);国家自然科学基金项目(U23A20267, 32272466, 32172348)

第一作者:曹诗林,男,博士,讲师

通信作者:曾新安 E-mail: xazeng@scut.edu.cn

在食品有效成分提取领域,PEF具有提取效率高,时间短,溶剂消耗量少,产量大等特点^[6],其机制是当生物细胞或组织暴露于PEF中时,细胞膜结构发生改变,进而增加导电性、渗透性,显著提高细胞膜的通透性,使目标活性物质溶出^[7-9]。此外,PEF辅助干燥可有效缩短干燥时间,减少干燥过程中食品损伤,最大程度地保留其中的营养和生物活性成分并增强其复水性^[10-12],其干燥原理是PEF处理会导致细胞膜形成电穿孔,进而显著增强干燥过程中食品的传质和水分排出^[13-14],其处理过程如图1所示。

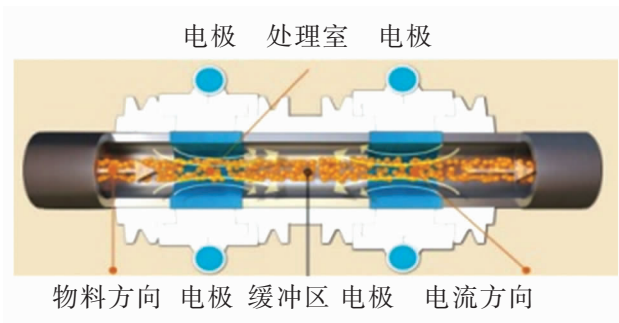


图1 脉冲电场处理过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the pulsed electric field treatment process

研究表明,PEF处理能够引起食品中蛋白质、淀粉、脂类、酶等生物大分子的结构与功能发生显著变化,进而对食品的品质及保存特性产生重要影响^[15-19]。PEF处理时,食品中的带电分子在外加电场的作用下发生迁移,导致分子内部或分子间的电荷分布及相互作用力发生改变,进而引起物质性质的变化^[20-23]。这种电场诱导的分子层面上的结构重组,不仅影响食品组分的物理、化学特性,而且可能改变其生物学功能,从而对食品的整体质量产生深远影响。

1.2 脉冲电场食品加工技术进展

Kantala等^[24]使用30 kV/cm的PEF对泰国橙汁进行10次处理,发现PEF对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有显著灭活作用。Buitimea-Cantúa等^[25]研究表明,PEF协同高静压处理可有效杀灭黑/红树莓汁中的霉菌和酵母菌。Horlacher等^[26]研究表明,经中等场强PEF结合轻度预热连续处理25 s后,燕麦和豌豆蛋白混合植物奶中的大肠杆

菌和李斯特菌以及天然微生物群至少减少5个对数单位。PEF杀菌技术在液体食品处理中的应用通常能够实现至少5个对数单位的菌落总数降低效果^[27-29]。Jiang等^[30]研究表明,在PEF电场强度为3.26 kV/cm,脉冲数为83,酒糟与蒸馏水比例为3:20的条件下,酒糟谷蛋白提取物含量较超声辅助提取增加13.81%。Salee等^[31]发现,利用PEF辅助水萃取黑米粒中的矢车菊素-3-葡萄糖苷和芍药素-3-葡萄糖苷,提取效率相较于对照组提高了60%。Kim等^[32]将PEF与亚临界水联用提取洋葱皮,结果表明,用电场强度为2.5 kV/cm的PEF预处理15 s,总槲皮素产量最高,与未PEF预处理的样品相比,PEF预处理使总槲皮素产量提高了33.22%。此外,PEF辅助提取不仅可提高物料产率,缩短提取时间,还可增强多酚类物质抗氧化能力^[33-35]。Liu等^[36]研究了PEF预处理对真空干燥胡萝卜干燥的影响,结果表明,当电场强度为0.6 kV/cm,持续时间为0.1 s时,与未被PEF预处理的样品相比,PEF预处理的样品在25℃和90℃时干燥时间分别缩短了55%和33%,且在复水过程中对色泽保留程度更高。Yamakage等^[37]研究表明,经PEF预处理的菠菜干燥速率高于热水处理组和未处理组,并且水溶性成分的流失减少。此外,PEF在冷冻干燥方面也取得较好的应用。Lammerskitten等^[38]研究发现,PEF预处理的苹果片与未处理组相比,有效水扩散系数增加了44%,结晶度提高24.5%,加工时间缩短了57%,且复水过程中吸水量增加。Bist等^[39]使用辛烯基琥珀酸酐和PEF对几内亚淀粉纳米颗粒(GSNP)进行改性,结果表明产品的直链淀粉含量降低,吸水能力、吸油能力和结晶度提高,从而使改性后的GSNP具有制备成稳定Pickering乳液和递送活性功能物质载体材料的潜力。Meza-Jiménez等^[40]采用PEF技术处理食品级木瓜蛋白酶,结果表明,在电场强度13 kV/cm与流速0.2 L/min时,木瓜蛋白酶二级和三级结构发生变化,且64%的木瓜蛋白酶失活。另外,Zhang等^[41]研究表明,PEF处理后藜麦分离蛋白(QPI)的二级结构发生显著变化,其结构有序性、表面疏水性和热稳定性增强,粒径减小,改善了QPI产品的起泡和乳化性能。以上说明PEF在食品生物大分子改性领域具有良好的应用潜力^[42-43]。

2 低温等离子体加工技术发展

2.1 低温等离子体加工基本概念与原理

低温等离子体(Cold plasma, CP)作为一种新兴的非热加工技术(图 2),通过在气体介质中激发产生活性氧(Reactive oxygen species, ROS)、活性氮(Reactive nitrogen species, RNS)、自由基以及离子等活性物质,对食品组分产生影响。该技术绿色环保、处理条件温和、经济效益高以及操作简便等优势^[44],正逐渐应用于食品加工领域,包括食品杀菌、保鲜以及成分提取等多个方面^[45]。

2.2 低温等离子体加工技术进展

与目前广泛采用的热杀菌保鲜技术相比,CP 技术在杀菌过程中具有安全、高效、无残留等优点,对孢子、酶和毒素灭活效率高^[46],适用于生鲜及热敏性食品的冷杀菌。如图 3 所示,等离子体是一种包含自由电子、离子、中性原子和分子的气体状态,具有高能电子和活性物种,能够对微生物细胞造成不可逆的损伤,从而实现杀菌目的^[47]。目前,低温等离子体已在许多食品中得到应用,涵盖了肉禽类、鲜切果蔬类、水产食品、谷物面粉等固体食品以及果汁、牛奶等液态食品等。任翠荣等^[48]利用常压 CP 技术处理新鲜草莓,结果显示草莓的维生素 C 含量显著高于对照组,且果实失重率降低,常温保鲜期延长 2 倍。Critzler 等^[47]利用 CP 技术处理新鲜哈密瓜和苹果后,其表面的大肠埃希菌、沙门氏菌以及单增李斯特菌种群显著减少。贺玲^[49]利用 CP 处理鲜切黄瓜后,其表面的大肠杆菌致死率高达 99.65%。CP 处理不仅提高了黄瓜的食用安全系数,还有效保护了黄瓜的水分、糖度、酸度和颜色。CP 通过调节蓝莓果实细胞壁代谢及 ROS 代谢等生理、生化活动延缓了蓝莓果实采后品质的劣变,还通过调节植物激素信号转导及 MAPK 信号通路来延缓蓝莓果实的采后软化进程^[50]。李夏等^[51]研究表明,CP 不仅能有效降低鲜切莴苣的菌落总数,还能维持其色泽及硬度,降低失重率和抑制褐变,从而有效延长货架期。此外,CP 也成功应用于鲜切西兰花的保鲜^[52]。

在肉品和水产品方面,甘可凡等^[53]研究表明,CP 协同复合精油处理可有效延长牛肉货架期,且能够保持较好的感官品质。刘品等^[54]研究表明,利

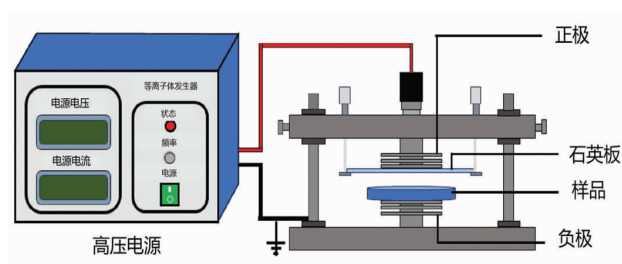


图 2 等离子体装备示意图

Fig.2 Schematic diagram of plasma equipment

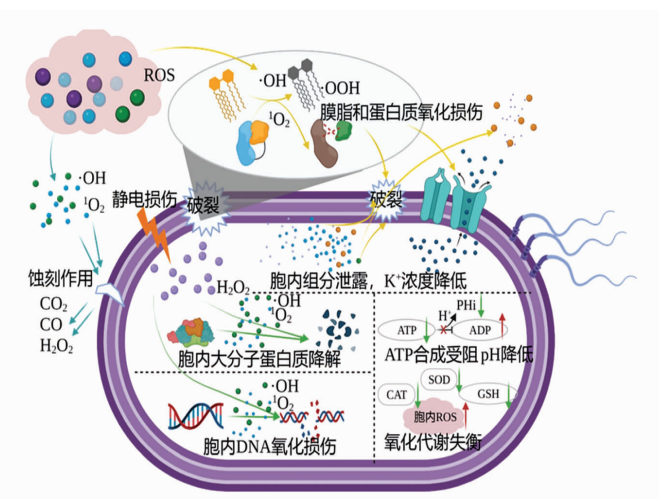


图 3 低温等离子体杀菌示意图

Fig.3 Schematic diagram of cold plasma sterilization

用 CP 技术对南美白对虾进行处理(50 kV、60 s),可以显著减缓对虾黑变及品质下降速度,延长对虾的货架期。吕广瑞^[55]研究表明 CP 杀灭啤酒中总菌落、大肠杆菌、酵母菌的效果良好。Kaur 等^[56]研究表明,作为传统热处理的替代方法,CP 可以保留营养成分并延长食物的保质期。此外,将 CP 技术整合到包装材料中,可以提高产品新鲜度,延长其保质期,最大限度地减少产品的腐败和浪费,增加经济效益。

作为一种新型的非热加工技术,CP 技术因安全、绿色、能耗低等优势而在食品工业中展现出巨大的应用潜力^[57]。通过电离气体产生的活性物质对生物细胞进行破壁,CP 技术还可促进有效物质的溶出。此外,这些活性物质可对蛋白、多糖等生物大分子进行改性。研究表明,CP 处理能从植物材料中提取黄酮类^[58]和多酚^[59]等化合物。Heydari 等^[58]综述 CP 技术在提取植物生物活性物质中的

应用,其认为 CP 不仅能提高提取效率,还能保证提取物的质量和安全性。

3 脉冲光加工技术发展

3.1 脉冲光基本概念与加工原理

脉冲光(Pulsed light, PL)是一种新型非热杀菌技术^[60],其利用惰性气体闪光灯在紫外光、可见光、红外光和近红外光的频率范围(200~1 100 nm)产生短时间、高功率的强广谱脉冲光辐射,实现对微生物的灭活,又被称为高强度脉冲紫外光、强光脉冲、宽光谱白光等。随着 PL 技术的不断创新及设备的不断优化,该技术逐渐应用于各类食品的杀菌、保鲜及加热技术。

3.2 脉冲光加工技术进展

PL 技术对食品中污染微生物具有灭菌速度快,反应条件温和及无残留等特点^[61],被广泛应用于食品的表面杀菌^[62]。吴凯为等^[63]总结近十年来 PL 杀菌技术在食品保鲜中的研究结果,包括 PL 杀菌技术影响微生物灭活的因素和在食品保鲜领域的应用。Tao 等^[64]研究 PL 对生菜上 4 种常见食源性病原菌的杀菌效果以及对生菜理化感官品质的影响,发现 PL 处理对金黄色葡萄球菌的抑制效果最好,其次为大肠杆菌和肠炎沙门氏菌。Fernández 等^[65]研究表明,PL 可有效杀灭西班牙即食干腌火腿表面的李斯特菌。类似地,Borges 等^[66]研究表明,PL 处理后的切片腌肉产品表面的单增李斯特菌减少,且颜色等产品关键质量指标得以保持。Basak 等^[67]研究了 PL 处理的葡萄汁在 4℃ 下储存 35 d,比热处理果汁保留了更多的酚类物质和更高的抗氧化能力。田芳等^[68]试验表明,PL 技术能有效杀灭湿米粉中的霉菌。此外,PL 技术在真菌毒素防控方面具有潜力^[69],其通过光化学和光物理效应破坏毒素的化学结构^[70]。

PL 灭活和减少微生物负荷的有效性归因于物理化学、光热和光物理机制^[71]。Mahendran 等^[72]研究表明,PL 是一种快速和环境友好的去污技术,在食品工业中具有许多潜在的应用。高功率 PL 不仅可以有效延长肉类、水产品的保质期^[73-75],也能在保持香菇风味的同时,延长保质期^[76]。在果汁保鲜方面,Basak 等^[77]研究表明,经 PL 处理的果汁储存 45 d 后,其抗氧化成分、酚类物质和维生

素 C 的含量显著高于热处理组。Llano 等^[78]发现 PL 处理不仅能延缓鲜切苹果的褐变和氧化程度,还提高了其酚类物质和维生素 C 的含量。Kwaw 等^[79]研究表明,PL 处理可显著提高乳酸发酵桑椹汁中总酚、总黄酮、总花青素含量及自由基清除能力。佟臻等^[71]认为 PL 是一种高效、环保的新型非热杀菌技术,在食品领域具有巨大的发展潜力。

PL 技术通过使用高功率的闪光灯产生宽光谱的光线,包括紫外线、可见光和红外线,能够有效灭活食品中的微生物,延长食品的货架期,同时最小化影响食品的营养成分和感官特性^[80]。Vargas-Ramella 等^[81]研究了 PL 处理技术对水果和蔬菜中酚类化合物的影响。John 等^[61]研究发现 PL 处理是一种较好的表面消毒技术,对食品中的病原体和腐败微生物有很好的灭活效果,同时对食品质量属性的影响最小。谢艳英等^[82]研究表明,PL 对肉类食品中常见病原微生物具有较好的灭活效果,同时对肉类色泽、风味和感官品质的影响较小。Bhavya 等^[83]研究了不同 PL 系统对微生物的作用方式以及对液体食品的影响。

4 食品微波加工技术发展

4.1 食品微波加工的基本概念和原理

在电磁加工技术中,微波技术加热机制比较独特,微波能量能够直接穿透食品内部,实现食品内、外同时加热(图 4)。食品中水溶性盐类,其正、负离子也与电场配合作用,向电场的相反电极区移动,瓦解水的氢键产生附加热量。同时,被电场加速的离子与相邻离子发生“内碰撞”,并将自身的动能传递给被碰撞的离子,使运动更剧烈,产生大量的热。该特点使微波加热的时间缩短,而均匀性有所提高^[84]。微波在食品热加工中主要通过电磁场激发原料产生热能,实现对食品的加热^[85],其加热具有选择性,由物质的介质损耗因数决定吸收微波的能力,损耗因数越大,吸收能力越强。此外,微波能穿透非金属材料,深入加热物体内部,这使得它在食品加工中不仅加热效率高,还能较好地保持食品的风味和营养^[86]。

在杀灭细菌方面,微波装备主要利用微波热效应与非热效应共同作用于微生物,在获得高杀菌效果的同时,减少对食品的色、香、味形产生影

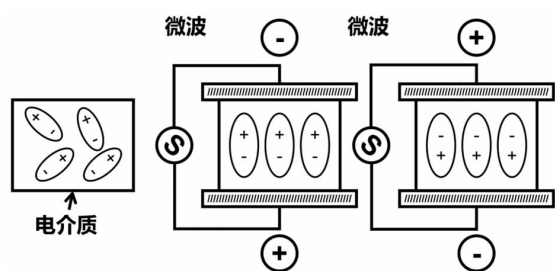


图 4 微波加热示意图

Fig.4 Schematic diagram of microwave heating

响^[86]。比如,连续微波杀菌工艺利用微波热效应迅速升温,破坏微生物的生物大分子结构,使其失活;脉冲微波杀菌则通过周期性高功率脉冲强烈辐射微生物^[86]。通过微波杀菌来实现肉类食品的保鲜,具有高效性和节能性,还能够避免对食品品质产生过多影响^[87]。此外,微波还可以用于特定成分的提取。微波加热原料可引发分子极化和离子导电效应,因食品中不同成分的介电常数不一样,导致对微波能量的差异化吸收,故具有特定特性的目标成分被选择性加热并从原料中释放到提取介质中。相较于传统萃取方法,微波辅助萃取技术具有提取效率高,生产周期短的优势^[88]。与高强度超声等技术和传统方法相比,微波加热可实现对物料高效和低能耗的提取^[89]。

4.2 微波技术进展

在杀菌、抑菌方面的应用中,杨佳等^[90]研究发现微波处理能有效抑制鱼肉脂质的氧化,降低菌落总数和腐败菌数,显著降低总挥发性盐基氮的含量及脂质氧化程度;在口感上,微波处理可以减轻苦味,增强鲜味,并减少丙醇等不良气味物质,从而延缓鱼肉品质劣变。此外,Najafabadi等^[91]研究发现微波技术可有效保存枣果的天然感官特性和生物活性成分。Alam等^[92]研究发现微波技术可以辅助渗透脱水,从而提高对椰子肉的保鲜效果。

食品热加工方面,马天琛等^[93]通过微波技术对糜子进行预处理,微波凭借极强的穿透力,直接作用于淀粉内部的水分子,高频振动产热使淀粉发生糊化,淀粉分子含水量的不同将直接导致淀粉颗粒表面出现不同程度的形变和裂缝。另外,微波处理也使淀粉形态、结晶度、流变性、膨胀度等性质发生改变。微波处理工艺使糜子淀粉中抗性

淀粉含量增加,表明该处理在制备糜子抗性淀粉中有着重要作用。此外,研究发现使用微波技术可以提高海藻中有效成分的提取率^[94]。Mortazavi等^[95]研究表明微波预处理可有效提高亚麻籽油的提取率,通过增加微波处理时间和种子水分水平,亚麻籽油的一些理化性质,包括酸度、过氧化值、类胡萝卜素和勃朗宁指数(BI)提高,同时使种子含水量和亚麻籽油中叶绿素含量均降低。

5 食品电磁加工装备国产化进展

5.1 食品电磁加工装备国产化、智能化的现状

从 2000 年至今,国际上脉冲电场技术研究取得较大的发展。美国一家公司开发的工业化规模设备——DTI PowerMod™ 系统平均功率 25 kW,最高输出电压达 30 kV,处理量达 400 L/h,可应用于液态食品的保藏、细胞降解等领域。德国食品技术研究所(DIL)目前正从事商业化规模的设备研制与应用设备。德国一家公司为食品、饮料和科学部门提供脉冲电场系统,设计开发出工业化规模 PEF 设备,主要应用于果汁和冰沙、乳制品干制食品、素食薯片、马铃薯片、炸薯条等。中国农业大学廖小军教授团队首先对 PEF 系统进行开发与设计,而后将该系统应用于微生物的控制,食品中内源酶的钝化和花色苷的提取等方面的研究。江南大学杨瑞金、赵伟教授团队主要从事 PEF 对液态蛋、牛奶、果蔬汁等液体食品的加工与应用以及大功率 PEF 设备的研制。华南理工大学曾新安教授团队(图 5)开发了多套 PEF 处理系统,通过该系统研究了 PEF 对食品中组分的影响,微生物的致死机理及加快催化化学反应等。国内现有的主要是实验型脉冲电场提取设备,而美国、法国等已研发出工业化设备,有 100 多条生产线在产业化应用。由于国外的技术垄断,国内仍处于空缺状态,需加快自主研制及产业化。

低温等离子体灭菌装备技术近年取得显著进展,已成为医疗、食品安全、半导体等领域的重要工具。在国际市场上,多家知名企业和研究机构致力于低温等离子体灭菌装备的开发和应用。日本一家公司开发的 CeraPlas® 等离子体发生器,可在环境空气或外部气体中点燃,已广泛应用于医疗器械的灭菌与表面处理。此外,其轻巧、紧凑的尺



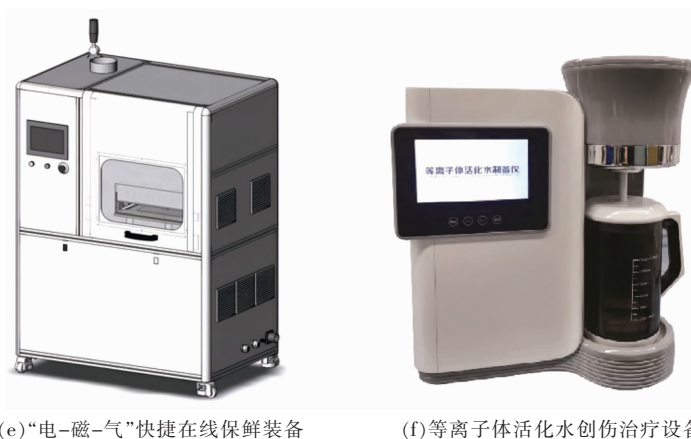
图5 高压脉冲电场改性/杀菌设备

Fig.5 High-voltage pulsed electric field modification/disinfection equipment

寸,可实现电池供电的小型手持式低温等离子系统。美国一家公司设计开发的 Plasma Tact 系列技术专注于等离子体灭菌技术在室内环境中的应用,其设备被用于手术器械、病房空气等的灭菌处理。德国一家公司开发了代表等离子应用技术的 2.45 GHz 的等离子清洗机,主要应用于等离子清洗、刻蚀、灰化、涂镀和表面处理。国内市场也在快速发展中,多家企业在低温等离子体灭菌设备的研发和生产方面取得重要进展。南京已建成一个国内外低温等离子体工程应用的研发基地,提供多种型号的等离子体灭菌设备。也有公司专注于为医疗和工业市场提供大气等离子表面处理机和

清洗机等产品,正在为国内市场的灭菌需求提供可靠支持。在科研领域,多所高校和研究机构在推动低温等离子体灭菌技术的发展。西安交通大学荣命哲教授团队、华中科技大学卢新培教授团队、华南理工大学成军虎教授团队、南京农业大学章建浩教授团队等在等离子体灭菌机理、装备设计和应用方面进行了深入研究(图6)。中国科学院的多个研究所也致力于开发新型等离子体灭菌设备,并探索其在食品、医疗等领域的应用效果。这些研究团队不仅推动了技术进步,也为国内产业化应用提供了坚实的技术支撑。





(e)“电-磁-气”快捷在线保鲜装备

(f)等离子体活化水创伤治疗设备

图 6 基于低温等离子体技术的消毒与治疗设备

Fig.6 Disinfection and treatment equipment based on cold plasma technology

近年来,电磁加工在食品加工领域的应用日益广泛,技术水平不断提升,部分关键装备已实现国产化,在自动控制、数据分析和采集方面取得一定进展。然而,与国际先进水平相比,仍存在一定差距,特别是在稳定性、精准加工和智能化领域。食品电磁加工装备在国产化领域的难点主要有以下两方面:

1) 电磁加工的关键技术装备与新一代信息技术的融合不够。目前,在加工过程中,缺乏对食材表观和微观变化、加工程度的实时感知技术,这导致电磁装备加工过程中的闭环控制技术仍不完善。在灭菌保鲜方面,电磁加工主要应用于液态和半固态食品的处理,而对固态食品的处理效果仍有待提高。此外,缺乏食品原料的细菌数量检测、新陈代谢速率的实时感知技术与装备。对于加工技术参数与不同场景下的杀菌效果,食品处理后的新陈代谢和劣变速率间的关系研究尚显不足。解决这些问题需要加强基础研究,提升传感器技术,并优化数据处理算法。

2) 全产业链信息共享机制不完善与平台缺失。食品生产涉及较长的产业链,从农场到餐桌的过程中包括种植或养殖、加工、流通等多个环节,且各领域间信息差异性较大。目前,国内尚未建立完善的全产业链信息共享机制,信息共享平台存在巨大缺口,导致电磁加工技术在食品领域的应用进展缓慢。迫切需要加快建立和完善食品生产全产业链的信息共享机制,构建以数据平台为基础的共享环境,从而推动电磁技术在食品工业化、

信息化应用的良性发展。

5.2 食品电磁加工装备国产化建议

1) 加快发展食品电磁加工技术,提升关键技术的国产化、信息化和智能化水平。智慧食品电磁加工技术是在电磁加工产业化、自动化基础上,结合人工智能、大数据、物联网、区块链、数据分析与挖掘、5G 等新一代食品加工信息技术,推动电磁加工与食品智能制造技术深度融合。通过建立食品电磁加工环节与信息深度交换应用的新场景,能够实现食品保鲜、生物活性物质提取等智慧食品加工模式,从而提升食品质量、生产效率、节能和实现少人化乃至无人化的生产目标。在发展智慧食品电磁加工过程中,应注重基础理论研究,推进电磁加工、食品加工工艺和高效智能化三者的有机结合,以便更好地实现无人化、智能化、信息决策和精准调控的工业化生产。

2) 建立以电磁加工为纽带,联通的信息化、智能化平台。在食品加工装备国产化领域,构建以电磁加工为纽带的信息化、智能化平台,是提升制造竞争力的关键。这将有助于提升装备技术水平和生产效率,聚焦研发高效、节能的电磁加工设备,以适应食品工业的发展需求。通过电磁加工技术整合生产数据、设备状态和质量控制信息,能够实现数据驱动的决策支持。集成先进的传感器和控制系统,可以实现设备的智能化操作和实时监控,确保高质量、高效率 and 自动化的目标。

采用云计算和大数据技术集中管理生产数据,增强生产过程的透明性和可追溯性。利用大数

据分析和人工智能技术优化生产流程,预测设备维护需求,降低能耗,提升设备利用率。同时,加强网络安全,保障平台数据和企业商业机密的安全。

为确保实施效果,必须加强人才培养,建立跨学科团队,推动技术创新。同时争取政策支持和资金投入,降低企业升级成本,加速技术成果的转化。通过示范项目展示平台的实际效果,吸引更多企业参与,扩大平台的应用范围。最终,该平台将推动食品加工设备国产化进程,提高国内装备的国际竞争力,为食品工业的可持续发展提供技术支持。

3) 加强政策性引导,加快形成电磁生产国产化、智能化的应用场景示范效应。推动食品电磁加工装备的国产化和智能化,政策的引导和支持至关重要。通过加强政策支持,可有效加速推进进程,形成具有示范效应的应用场景。政策导向和资助有助于整合资源,促进技术研究和市场需求的拓展,激活行业创新活力,促进上、下游产业链的协同发展,最终实现食品加工业的转型升级,推动高质量发展。

6 结语

本文综述了食品电磁加工技术在食品工业中的应用现状和发展趋势,揭示其在杀菌、保鲜和成分改性方面的独特优势,尤其是在保持食品原有营养和感官品质方面的非热效应。食品电磁加工技术的研究和应用虽有一定进展,但仍面临技术装备国产化、高端化、智能化进程的挑战,以及对技术深入理解的需求。

在量子传感与智能响应材料革新驱动下,食品电磁加工技术正迎来突破性发展拐点。新一代多物理场耦合调控技术将突破传统电磁场单一作用模式,通过太赫兹波与静磁场的时空协同、微波与等离子体的能量叠加,构建可编程的智能场域系统。基于数字孪生的智能装备研发将实现电磁参数与食品介电特性的实时映射,依托边缘计算和AI决策系统,开发具有自学习能力的自适应加工平台。微波光催化灭菌、电磁辅助酶解等颠覆性技术有望突破非热加工的能效瓶颈。随着《“十四五”智能制造发展规划》的持续推进,食品电磁加工技术将加速向模块化、微型化、网络化方向演

进,通过与柔性电子、生物制造等前沿领域的深度交叉,开启个性化营养食品智能制造的新纪元。

参 考 文 献

- [1] 张敏, 曲梦婷, 赵蕾, 等. 电场技术在果蔬汁加工中的研究进展[J]. 农产品加工, 2024(9): 90-94, 98.
ZHANG M, QU M T, ZHAO L, et al. Research progress of electric field technology in fruit and vegetable juice processing[J]. *Agricultural Products Processing*, 2024(9): 90-94, 98.
- [2] 赵松松, 王宏宇, 吴子健, 等. 非热物理杀菌技术在冷链食品中的应用研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 417-425.
ZHAO S S, WANG H Y, WU Z J, et al. Research progress on the application of non-thermal physical sterilization technology in cold chain food[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2024, 40(12): 417-425.
- [3] ŠALAŠEVIČIUS A, UŽDAVINYTĖ D, VIŠOCKIS M, et al. Effect of pulsed electric field (PEF) on bacterial viability and whey protein in the processing of raw milk[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(23): 11281.
- [4] ARSHAD R N, ABDUL-MALEK Z, MUNIR A, et al. Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 104: 1-13.
- [5] SOLTANZADEH M, PEIGHAMBARDUST S H, GULLON P, et al. Quality aspects and safety of pulsed electric field (PEF) processing on dairy products: A comprehensive review[J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(Sup 1): 96-117.
- [6] RANJHA M M A N, KANWAL R, SHAFIQUE B, et al. A critical review on pulsed electric field: A novel technology for the extraction of phytoconstituents[J]. *Molecules*, 2021, 26(16): 4893.
- [7] BOCKER R, SILVA E K. Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices [J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 15: 100398.
- [8] NALIYADHARA N, KUMAR A, GIRISA S, et al. Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction

- escalation technology in food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 122: 238–255.
- [9] 石铭芸, 蒋中英. 脉冲电场导致囊泡成孔作用机制的研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2021, 38(1): 5–10.
- SHI M Y, JIANG Z Y. Research progress in pore formation mechanism of vesicles induced by pulsed electric field[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2021, 38(1): 5–10.
- [10] PUNTHI F, YUDHISTIRA B, GAVAHIAN M, et al. Pulsed electric field-assisted drying: A review of its underlying mechanisms, applications, and role in fresh produce plant-based food preservation[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(6): 5109–5130.
- [11] 苏文龙, 王谦鑫宏, 邱智东, 等. 脉冲电场技术在食品干燥加工中的研究进展[J]. *食品科技*, 2023, 48(12): 83–90.
- SU W L, WANG Q X H, QIU Z D, et al. Research progress of pulsed electric field technology in food drying and processing [J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(12): 83–90.
- [12] 吕敏明, 杜慧慧, 蔡乐, 等. 脉冲电场预处理在果蔬干燥中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(12): 430–436.
- LÜ M M, DU H H, CAI L, et al. Research progress on the application of pretreatment of pulsed electric field in fruit and vegetable drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(12): 430–436.
- [13] SHORSTKII I, SOSNIN M, SMETANA S, et al. Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (PEF) pretreated plant materials [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 316: 110822.
- [14] GIANCATERINO M, WERL C, JAEGER H. Evaluation of the quality and stability of freeze-dried fruits and vegetables pre-treated by pulsed electric fields (PEF)[J]. *LWT*, 2024, 191: 115651.
- [15] ZHAO W, YANG R, ZHANG H Q. Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2012, 27(2): 83–96.
- [16] NIU D, ZENG X A, REN E F, et al. Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109715.
- [17] 李丹丹, 陶阳, 杨哪, 等. 电场辅助淀粉改性的研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 254–264.
- LI D D, TAO Y, YANG N, et al. Recent advances in electro-assisted modification of starch[J]. *Food Science*, 2022, 43(11): 254–264.
- [18] FERRAZ L P, SILVA E K. Pulsed electric field-assisted extraction techniques for obtaining vegetable oils and essential oils: Recent progress and opportunities for the food industry[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 354(P2): 128833.
- [19] 黄艺, 李丹丹, 杨哪, 等. 电场处理对酶活力的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(11): 377–388.
- HUANG Y, LI D D, YANG N, et al. The effects of electric field treatments on enzyme activity [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(11): 377–388.
- [20] WANG Q J, LI Y F, SUN D W, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(13): 1–14.
- [21] ZHAO W, YANG R J, LIANG Q, et al. Electrochemical reaction and oxidation of lecithin under pulsed electric fields (PEF) processing[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(49): 12204–12209.
- [22] 许飞跃. 琥珀酰化乳清蛋白的脉冲电场辅助制备及其与壳聚糖复合体系的性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- XU F Y. Study on succinylated whey protein produced by pulsed electric field pretreatment and properties of its complex system with chitosan [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [23] 陈博儒. 脉冲电场协同酯化反应调控淀粉的功能特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- CHEN B R. Study on the functional properties of starch regulated by pulsed electric field assisted esterification[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [24] KANTALA C, SUPASIN S, INTRA P, et al. Evaluation of pulsed electric field and conventional ther-

- mal processing for microbial inactivation in Thai orange juice[J]. *Foods*, 2022, 11(8): 1102.
- [25] BUITIMEA-CANTÚA G V, RICO-ALDERETE I A, ROSTRO-ALANÍS M D J, et al. Effect of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields processes on microbial safety and quality of black/red raspberry juice[J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2342.
- [26] HORLACHER N, OEY I, LEONG S Y. Effect of pulsed electric field processing on microbial and enzyme inactivation in blended plant-based milk alternatives: A case study on a microbial challenge test for a non-sterilized oat-based beverage enriched with pea protein[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2024, 94: 103699.
- [27] ARSHAD R N, ABDUL-MALEK Z, ROOBAB U, et al. Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 43-54.
- [28] TOEPFL S, HEINZ V, KNORR D. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2007, 46(6): 537-546.
- [29] CAVALCANTI R N, BALTHAZAR C F, MARGALHO L P, et al. Pulsed electric field-based technology for microbial inactivation in milk and dairy products[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2023, 54: 101087.
- [30] JIANG Y S, XING M Z, KANG Q S, et al. Pulse electric field assisted process for extraction of Jiuzao glutelin extract and its physicochemical properties and biological activities investigation[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132304.
- [31] SALEE N, CHAIYANA W, YAWOOTTI A, et al. Optimization of the pulse electric field assisted extraction of black rice grain for antioxidant and sirtuin1 enzyme stimulation activities[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 6459.
- [32] KIM H S, KO M J, PARK C H, et al. Application of pulsed electric field as a pre-treatment for sub-critical water extraction of quercetin from onion skin [J]. *Foods*, 2022, 11(8): 1069.
- [33] LUENGO E, ÁLVAREZ I, RASO J. Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 17: 79-84.
- [34] SURANO B, LEIVA G, MARSHALL G, et al. Pulsed electric fields using a multiple needle chamber to improve bioactive compounds extraction from unprocessed *Opuntia ficus-indica* fruits[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 317: 110864.
- [35] LIN S Y, LIANG R, XUE P, et al. Antioxidant activity improvement of identified pine nut peptides by pulsed electric field (PEF) and the mechanism exploration[J]. *LWT*, 2017, 75: 366-372.
- [36] LIU C, PIROZZI A, FERRARI G, et al. Impact of pulsed electric fields on vacuum drying kinetics and physicochemical properties of carrot [J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109658.
- [37] YAMAKAGE K, YAMADA T, TAKAHASHI K, et al. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102615.
- [38] LAMMERSKITTEN A, MYKHAILYK V, WIKTOR A, et al. Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 57: 102211.
- [39] BIST Y, SHARANAGAT V S, SAXENA D C. Unveiling the synergistic effect of octenyl succinic anhydride and pulsed electric field on starch nanoparticles [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 280(P3): 136024.
- [40] MEZA-JIMÉNEZ M D L, POKHREL P R, ROBLES DE LA TORRE R R, et al. Effect of pulsed electric fields on the activity of food-grade papain in a continuous system[J]. *LWT*, 2019, 109: 336-341.
- [41] ZHANG X Y, LI Z R, ZHENG X J, et al. Characteristics of quinoa protein isolate treated by pulsed electric field[J]. *Foods*, 2024, 13(1): 148.
- [42] GITERU S G, OEY I, ALI M A. Feasibility of using pulsed electric fields to modify biomacromolecules: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 72: 91-113.
- [43] TAHA A, CASANOVA F, ŠIMONIS P, et al. Pulsed electric field: Fundamentals and effects on the structural and techno-functional properties of dairy and plant proteins[J]. *Foods*, 2022, 11(11): 1556.

- [44] 郭俭. 低温等离子体杀菌机理与活性水杀菌作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
GUO J. The inactivation mechanism of non-thermal plasma agents and bactericidal effect of plasma activated water[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [45] UCAR Y, CEYLAN Z, DURMUS M, et al. Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 355-371.
- [46] NWABOR O F, ONYEAKA H, MIRI T, et al. A cold plasma technology for ensuring the microbiological safety and quality of foods[J]. Food Engineering Reviews, 2022, 14(4): 535-554.
- [47] CRITZER F J, KELLY-WINTENBERG K, SOUTH S L, et al. Atmospheric plasma inactivation of food-borne pathogens on fresh produce surfaces[J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(10): 2290-2296.
- [48] 任翠荣, 刘金光, 王世清, 等. 常压低温等离子体处理对草莓保鲜效果的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2017, 34(3): 228-234.
REN C R, LIU J G, WANG S Q, et al. Effect of strawberry preservation by atmospheric pressure low temperature plasma[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Ziran Kexueban), 2017, 34(3): 228-234.
- [49] 贺玲. 冷等离子体延缓蓝莓软化的分子机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
HE L. A dissertation submitted for the degree of master[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [50] ZHAO Y, YAN L F, YAN W J, et al. Effect of combined cold plasma-activated water and dielectric barrier discharge treatment on the sterilization and quality of strawberry[J]. Food Science, 2022, 43(17): 105-116.
- [51] 李夏, 钱婧, 章建浩, 等. 等离子体活化水联合介质阻挡放电处理对鲜切茼蒿杀菌效果及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 196-205.
LI X, QIAN J, ZHANG J H, et al. Effect of combined plasma-activated water and dielectric barrier discharge treatment on the sterilization and quality of fresh-cut lettuce[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 196-205.
- [52] 张勇, 张志伟, 程晨霞, 等. 低温等离子体处理提高鲜切西兰花贮藏品质[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 164-170.
ZHANG Y, ZHANG Z W, CHENG C X, et al. Storage quality improvement of fresh-cut broccoli by cold plasma treatment[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(2): 164-170.
- [53] 甘可凡, 钱婧, 章建浩, 等. 低温等离子体协同复合精油对牛肉贮藏保鲜的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 292-301.
GAN K F, QIAN J, ZHANG J H, et al. Effect of cold plasma synergistic composite essential oils on beef storage and freshness preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 292-301.
- [54] 刘品, 陈静. 低温等离子体对南美白对虾防黑变及品质的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(11): 184-187.
LIU P, CHEN J. Study on prevention of blackening of *Penaeus vannamei* by low temperature plasma[J]. The Food Industry, 2018, 39(11): 184-187.
- [55] 吕广瑞. 基于低温等离子体的精酿啤酒杀菌技术及装置的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
LÜ G R. Study on sterilization technology and device of craft beer based on low-temperature [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.
- [56] KAUR S, KUMAR Y, SINGH V, et al. Cold plasma technology: Reshaping food preservation and safety [J]. Food Control, 2024, 163: 110537.
- [57] 相启森, 张嵘, 范刘敏, 等. 大气压冷等离子体在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 368-372.
XIANG Q S, ZHANG R, FAN L M, et al. Research progress of atmospheric cold plasma in fresh-cut fruits and vegetables preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 368-372.
- [58] HEYDARI M, CARBONE K, GERVASI F, et al. Cold plasma-assisted extraction of phytochemicals: A review[J]. Foods, 2023, 12(17): 3181.
- [59] 颜心怡, 李锦晶, 李赤翎, 等. 冷等离子体技术对食品组分的影响及其作用机制[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 445-454.
YAN X Y, LI J J, LI C L, et al. Effect and action mechanism of cold plasma technology on food components[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 445-454.
- [60] SCHOTTROFF F, FRÖHLING A, ZUNABOVIC -

- PICHLER M, et al. Sublethal injury and viable but non-culturable (VBNC) state in microorganisms during preservation of food and biological materials by non-thermal processes[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2773.
- [61] JOHN D, RAMASWAMY H S. Pulsed light technology to enhance food safety and quality: A mini-review[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 23: 70-79.
- [62] 张瑞雪, 张文桂, 管峰, 等. 脉冲强光在食品工业中的研究和应用进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 305-312.
- ZHANG R X, ZHANG W G, GUAN F, et al. Advances in Research and Application of Pulsed Light in Food Industry[J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 305-312.
- [63] 吴凯为, 蔡文琪, 张成东, 等. 脉冲强光杀菌技术在食品保鲜领域的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(5): 295-299.
- WU K W, CAI W Q, ZHANG C D, et al. Research progress of pulsed light sterilization technology in preservation of food[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(5): 295-299.
- [64] TAO T, DING C, HAN N, et al. Evaluation of pulsed light for inactivation of foodborne pathogens on fresh-cut lettuce: Effects on quality attributes during storage[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 21: 100358.
- [65] FERNÁNDEZ M, HOSPITAL X F, CABELLOS C, et al. Effect of pulsed light treatment on *Listeria* inactivation, sensory quality and oxidation in two varieties of Spanish dry-cured ham[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126294.
- [66] 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*, 2023, 179: 114641.
- [67] BASAK S, PARAB P, CHAKRABORTY S. Variations in quality attributes of pulsed light-treated table grape juice during refrigerated storage (4 °C) and ambient conditions (25 °C)[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(9): 5363-5377.
- [68] 田芳, 张卓佳, 唐娇艳, 等. 脉冲强光对湿米粉中霉菌的杀菌效果研究[J]. *食品安全导刊*, 2023(24): 156-158, 177.
- TIAN F, ZHANG Z J, TANG J Y, et al. Study on sterilization effect of pulsed light on mold in wet rice flour[J]. *China Food Safety Magazine*, 2023 (24): 156-158, 177.
- [69] SALAZAR-ZÚÑIGA M, LUGO-CERVANTES E, RODRÍGUEZ-CAMPOS J, et al. Pulsed light processing in the preservation of juices and fresh-cut fruits: A review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(3): 510-525.
- [70] 周爱云, 王龔. 脉冲强光技术对花生中黄曲霉毒素的消减与控制机制研究[C]// 中国食品科学技术学会第二十届年会摘要集, 长沙: 中国食品科学技术学会, 2023: 25-26.
- ZHOU A Y, WANG Y. Study on the mechanism of reduction and control of aflatoxin in peanuts by pulsed light technology [C]// Abstracts of the 20th Annual Meeting of CIFST, Changsha: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023: 25-26.
- [71] 佟臻, 刘雪婷, 陈金定, 等. 脉冲强光杀菌技术在食品及包装材料中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 454-462.
- TONG Z, LIU X T, CHEN J D, et al. Application of pulsed light sterilization technology in food and packaging materials[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(2): 454-462.
- [72] MAHENDRAN R, RAMANAN K R, BARBA F J, et al. Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 67-79.
- [73] GUILLERMO V N, MARTÁN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R. Impact of pulsed light treatments and storage time on the texture quality of fresh-cut tomatoes [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 45: 29-35.
- [74] HIERRO E, GANAN M, BARROSO E, et al. Pulsed light treatment for the inactivation of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 158(1): 42-48.
- [75] KOCH F, WIACEK C, BRAUN P G. Pulsed light treatment for the reduction of *Salmonella typhimurium* and *Yersinia enterocolitica* on pork skin and pork loin[J]. *International Journal of Food Microbiol-*

- ogy, 2019, 292: 64–71.
- [76] 戚向阳, 周婷婷, 曹少谦. 不同强度脉冲强光对鲜香菇保鲜效果的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 287–293.
- QI X Y, ZHOU T T, CAO S Q. Effects of intense pulsed light treatment with different intensity on preservation of fresh shiitake mushrooms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 287–293.
- [77] BASAK S, MAHALE S, CHAKRABORTY S. Changes in quality attributes of pulsed light and thermally treated mixed fruit beverages during refrigerated storage (4 °C) condition[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103025.
- [78] LLANO K R A, MARSELLÉS-FONTANET A R, MARTÍN-BELLOSO O, et al. Impact of pulsed light treatments on antioxidant characteristics and quality attributes of fresh-cut apples [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 206–215.
- [79] KWAW E, MA Y, TCHABO W, et al. Impact of ultrasonication and pulsed light treatments on phenolics concentration and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice[J]. LWT, 2018, 92: 61–66.
- [80] REN M, YU X, MUJUMDAR A S, et al. Visualizing the knowledge domain of pulsed light technology in the food field: A scientometrics review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102823.
- [81] VARGAS-RAMELLA M, PATEIRO M, GAVAHIAN M, et al. Impact of pulsed light processing technology on phenolic compounds of fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 115: 1–11.
- [82] 谢艳英, 安格尔, 包璐莹, 等. 脉冲强光杀菌机制及其在肉类食品中作用效果的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 405–411.
- XIE Y Y, AN G E, BAO L Y, et al. Research progress on the sterilization mechanism of pulse light and its efficacy on the meat foods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 405–411.
- [83] BHAVYA M, UMESH HEBBAR H. Pulsed light processing of foods for microbial safety [J]. Food Quality and Safety, 2017, 1(3): 187–202.
- [84] 刘畅. 新型食品加工技术的研究进展及应用前景[J]. 中国食品工业, 2024(11): 143–145.
- LIU C. Research progress and application prospects of new food processing technologies [J]. China Food, 2024(11): 143–145.
- [85] ZHOU S C, CHEN W J, FAN K. Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: A review [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103683.
- [86] 张岩岩, 侯剑桥, 李书尚. 微波技术在食品加工中的实践探索[J]. 中国食品工业, 2024(19): 131–133.
- ZHANG Y Y, HOU J Q, LI S S. Exploration of microwave technology in food processing practice [J]. China Food, 2024(19): 131–133.
- [87] 曹晨, 张艳波. 肉类食品保鲜技术的研究进展[J]. 中国食品工业, 2023(10): 74–76.
- CAO C, ZHANG Y B. Research progress on preservation technology of meat products [J]. China Food, 2023(10): 74–76.
- [88] 郭婧潭, 侯杰龄, 马英捷, 等. 微波辅助提取酸枣仁油的工艺优化研究[J]. 辽宁化工, 2024, 53(6): 899–901.
- GUO J T, HOU J L, MA Y J, et al. Optimization of microwave-assisted extraction process for jujube kernel oil [J]. Liaoning Chemical Industry, 2024, 53(6): 899–901.
- [89] FARIA G M L, SILVA E K. Pulsed electric field, ultrasound and microwave heating based extraction techniques for valorization of pomegranate peel by-products: A review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4): 113078.
- [90] 杨佳, 吴俊杰, 郭全友, 等. 微波联合微酸性电解水处理对轻腌大黄鱼品质及风味的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, (2024-11-07)[2025-02-19]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Zlcs-hjNidH4xbkjJd1wbqrvn1dSsWDA9bQiZSEnRT3_raMTq1apzD3KVPzfy2p34HBBJ9WWj1_RJUrfZEmrrju1UQIMXMiizLQgYwk cTV9efe4DpGwmXizK94ou5tUqxjHC0HD - CAivB_Nqt0HAjQLE6U - FFzWoGlfsKN5MRNHdXvGJmkY2R7c2ievbxpd&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- YANG J, WU J J, GUO Q Y, et al. Effects of microwave combined with slightly acidic electrolytic water treatment on the quality and flavor of lightly

- salted large yellow croaker[J/OL]. Food and Fermentation Industries, (2024-11-07)[2025-02-19]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Zlcs-hjNidH4xbkjJd1wbqrvn1dSsWDA9bQiZSEnRT3_raMTq1apzD3KV Pzfy2p34HBBJ9WWj1_RJUrfZEmrrjzu1UQlMXMiizLQgYwkcTV9efe4DpGwmXizK94ou5tUqxjHCOHD-CAivB_Nqt0HAjQLE6U-FFzWoGlfSKN5MRNHdXvGJmkY2R7c2ievbxd&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [91] NAJAFABADI N S, SAHARI M A, BARZEGAR M, et al. Effect of processing conditions (conventional heating, microwave, chilling, and freezing) on the stability of some bioactive compounds of jujube fruit[J]. Applied Food Research, 2023, 3(1): 100293.
- [92] ALAM M, JANNAT M, DATTA N, et al. The influence of microwave-assisted osmotic dehydration in coconut meat preservation technique[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100448.
- [93] 马天琛, 张津铭, 张诺, 等. 糜子抗性淀粉的制备及其在食品中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22): 212-217.
- MA T C, ZHANG J M, ZHANG N, et al. Preparation of resistant starch for *Panicum miliaceum* L. and its application in food[J]. Food Research and Development, 2024, 45(22): 212-217.
- [94] DERAFFSHI M, HASSANI A, AMANIFAR S, et al. Optimization of *Sargassum bovianum* extraction techniques for germination of wheat, canola, and corn under different salinity stress[J]. Agronomy, 2024, 14(11): 2646.
- [95] MORTAZAVI P, AZADMARD-DAMIRCHI S, PIRAVI-VANAK Z, et al. Microwave-accelerated pretreatment technique in green extraction of oil and bioactive compounds from camelina seeds: Effectiveness and characterization[J]. Green Processing and Synthesis, 2023, 12(1): 20230101.

Advances in Localization of Food Electromagnetic Processing Technology and Equipment

CAO Shilin¹, CHENG Junhu², YANG Xiao², CHEN Boru¹, MA Ji², LI Jian¹, ZENG Xinan^{1,2*}

(¹Guangdong Key Laboratory of Food Intelligent Manufacturing, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong

²School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract Traditional thermal processing methods in food production are increasingly inadequate to meet the rising consumer demands for food safety, nutrition, and sensory quality. Food electromagnetic processing technology, as a type of novel non-thermal treatment methods, exhibits distinct advantages in various fields such as food processing, extraction, and sterilization preservation. And it is expected to significantly promote the transformation and upgrading of the food industry. This paper reviewed the development trends, the status of domestic equipment, and the challenges faced by food electromagnetic processing technology, and provided a prospective outlook. The aim was to provide theoretical support for food electromagnetic processing technology, contribute to the high-quality development of the food industry, and ensure public food safety.

Keywords electromagnetic processing; intelligent food manufacturing; pulsed electric fields; cold plasma; pulsed light