

脉冲强光杀菌技术在食品及包装材料中应用研究进展

佟臻, 刘雪婷, 陈金定, 高彦祥

Application of Pulsed Light Sterilization Technology in Food and Packaging Materials

TONG Zhen, LIU Xueting, CHEN Jinding, and GAO Yanxiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲强光杀菌技术在食品保鲜领域的研究进展

Research Progress of Pulsed Light Sterilization Technology in Preservation of Food

食品工业科技. 2019, 40(5): 295-299

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

Research Progress on the Sterilization Mechanism of Pulse Light and Its Efficacy on the Meat Foods

食品工业科技. 2021, 42(9): 405-411

超临界溶液浸渍法及其在食品活性包装材料中的应用研究进展

Advances in Research on Supercritical Solution Impregnation and Its Application in Active Food Packaging

食品工业科技. 2018, 39(22): 309-313,327

数学模拟技术在食品微波加工过程中的应用研究进展

Application Research Progress of Numerical Simulation Technology in Food Microwave Processing

食品工业科技. 2018, 39(24): 350-356

糖醇在食品医药及农业领域的应用研究进展

Research Progress in the Application of Sugar Alcohol in Food Medicine and Agriculture

食品工业科技. 2019, 40(7): 337-340,345

低温等离子体杀灭食源性致病菌的研究进展

Research Progress of Cold Plasma in Killing Foodborne Pathogens

食品工业科技. 2021, 42(6): 363-370,382



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 454-462. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010128

TONG Zhen, LIU Xueting, CHEN Jinding, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010128

脉冲强光杀菌技术在食品及包装材料中 应用研究进展

佟臻, 刘雪婷, 陈金定, 高彦祥*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 中国轻工业健康饮品重点实验室, 北京 100083)

摘要: 脉冲强光是一种高效、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。本文综述了脉冲强光技术的杀菌机理及其在果蔬、肉制品、乳制品、食品包装材料等领域中的应用, 脉冲强光与其他保鲜技术的耦合效果, 脉冲强光技术在食品工业中的应用实例以及脉冲强光使用的安全性。脉冲强光不仅能广泛杀灭多种致病菌而且基本不改变各类食品及食品包材的各项性质, 在提高食品安全性和延长食品保质期方面有巨大的应用潜力, 脉冲强光与其他保鲜技术的耦合与单一保鲜技术相比在杀菌效果、感官品质、营养素含量的保留等方面也都具有更好的效果。本文为研究者进一步了解脉冲强光杀菌技术、拓展其应用领域提供理论参考。

关键词: 脉冲强光, 杀菌, 食品, 包装材料, 应用

中图分类号: TS205

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)02-0454-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010128



本文网刊:

Application of Pulsed Light Sterilization Technology in Food and Packaging Materials

TONG Zhen, LIU Xueting, CHEN Jinding, GAO Yanxiang*

(China Light Industry Key Laboratory of Healthy Beverages, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Pulsed light is a new efficient environment-friendly non-thermal sterilization technology and it has a great development potential in food industry. This article reviews the sterilization mechanism of pulsed light and its applications in fruits and vegetables, meat products, dairy products, food packaging materials and other fields, the coupling effects of pulsed light and other preservation technologies, practical applications of pulsed light in food industry as well as the safety of using pulsed light. Pulsed light can not only widely destroy a variety of pathogenic bacteria, but also basically do not change the properties of foods and food packaging materials. It has huge application potential in improving food safety and extending food shelf life. The coupling of pulsed light and other fresh-keeping technology also has better effects in terms of sterilization effect, sensory quality, and nutrient content retention than single fresh-keeping technology. This review hopes to provide a theoretical reference for researchers to further understand the pulsed light sterilization technology and expand its application fields.

Key words: pulsed light; sterilization; food; packaging material; application

随着人民人均收入和生活质量的提高, 人们对于食品的高品质需求也愈发强烈。在食品加工过程中, 需要经过杀菌工艺灭活食品中的微生物及酶, 以保持食品的新鲜度、延长食品货架期。杀菌技术在

食品加工领域就显得尤为重要。热杀菌是食品工业中最常用的灭菌方式, 包括高温高压灭菌、巴氏灭菌、超高温瞬时灭菌(UHT)等。近年来, 尽管传统的热杀菌技术和设备已得到快速发展, 但热处理过程对

收稿日期: 2021-01-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0400900)。

作者简介: 佟臻(1997-), 女, 博士研究生, 研究方向: 天然产物与功能食品, E-mail: 527023029@qq.com。

* 通信作者: 高彦祥(1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 饮料加工新技术, E-mail: gyxcau@126.com。

食品理化性质和色香味等均产生不可避免的负面影响。因此,开发能够保证食品色香味的同时也能够保留其中营养成分的新型杀菌技术尤为重要。与传统热杀菌技术相比,非热杀菌技术基本不改变食品品质,并且环保节能、成本更低,因而引起越来越多的关注,并得到了迅速发展。非热杀菌技术主要分为高压、紫外线、脉冲强光、超声波、脉冲电场、冷等离子体等灭菌方式^[1]。

脉冲强光(pulsed light, PL)是一种新型非热杀菌技术^[2],能够灭活物体表面的微生物,包括食品及与食品接触的包装材料。随着脉冲强光杀菌技术的不断创新以及设备的不断优化,该技术逐渐广泛应用于各类食品及其包装材料的杀菌。本文总结了脉冲强光技术的杀菌机理以及近年来在食品及其包装材料中应用,以期丰富研究人员对此技术的深刻理解,为其广泛应用提供理论基础。

1 脉冲强光(PL)杀菌机理

PL 系统主要由动力单元和氙灯单元组成。动力单元通过产生高压和高能量电流为灯泡提供能量,将交流电转换为直流电,同时将直流电存储在电能存储设备中。当电容器达到预设水平时,控制器通过同轴电缆向灯泡释放高能电流,释放到灯泡中的能量产生强烈的脉冲光,可以直接指向目标物,达到杀菌的目的。脉冲光中发出的光谱包括紫外光区(200~400 nm)、可见光区(400~700 nm)和近红外光区(800~1100 nm),与太阳光谱(200~1100 nm)有着相似的高功率辐射脉冲^[3]。

PL 杀菌机理主要分为三个方面。一是光热反应:PL 一部分光的波长在可见光和近红外波段,这一部分光传递热量到物体表面后立即将表面温度提高到 50~150 °C,使细菌的细胞壁破裂并蒸发其细胞液,致使细菌死亡^[4]。这种瞬时升温只影响物体表面(大约 10 mm 厚),不会显著提高受辐照物体的内部温度^[5],而影响食品品质。二是光化学反应:细胞中蛋白质、DNA 和 RNA 吸收紫外线后,发生变性,结构也会发生物理化学变化,导致遗传信息受损,复制和基因转录功能丧失,最终导致细胞死亡,达到杀菌目的^[6]。三是光物理作用:PL 强穿透性和瞬时冲击能力可以破坏细胞结构,导致细菌细胞死亡^[7]。

PL 对微生物灭活的有效性受多种因素影响,如脉冲光的闪烁次数、脉冲能级、样品与灯之间距离、所施加的电压、闪光的光谱范围、处理时间、样品种类、样品的表面特性以及微生物污染的数量和种类等^[8],因此,对于不同食品种类及其包装材料,脉冲强光的杀菌效果具有明显差异性。Koch 等^[9]探究了 PL 通量(0.52~19.11 J/cm²),样品与灯泡之间的距离(8.3~13.4 cm)以及 PL 处理时间(1~30 s)对猪皮上的鼠伤寒沙门氏菌和小肠结肠炎耶尔森氏菌的效果;结果显示,随 PL 通量增加,样品与灯泡之间的距离减小以及 PL 处理时间延长,猪皮上的鼠伤寒沙门氏

菌和小肠结肠炎耶尔森菌明显减少,且在结合最小距离,最大的 PL 通量和最长处理时间条件下(8.3 cm、19.11 J/cm² 和 30 s),猪皮上的鼠伤寒沙门氏菌和小肠结肠炎耶尔森菌减少量达到最大值,分别为 2.97 和 4.19 lg CFU/g;与其他处理组相比,该处理条件最大可分别减少 1.13 和 4.19 lg CFU/g。Victoria 等^[10]发现革兰氏阴性菌在 PL 处理中显示出比真菌和革兰氏阳性菌更高敏感性,菌群减少程度可相差 1 lg CFU/g 以上。Koch 等^[9]对比了 PL 处理对猪皮和猪里脊上的沙门氏菌和耶尔森氏菌的杀菌效果,结果显示,在同等处理条件下,猪里脊的杀菌效果明显低于猪皮,猪皮与猪里脊上的沙门氏菌和耶尔森氏菌减少量最大可相差 2.21 和 2.86 lg CFU/g,这可能是因为两种材料的表面粗糙度和孔隙率不同,使得 PL 与每个表面上存在的微生物发生不同的相互作用,由于猪皮具有更光滑的表面和更小的孔隙率因而杀菌效率更高。

2 PL 杀菌技术在食品中的应用

PL 杀菌技术在食品中应用较为广泛,在果蔬、肉制品及乳制品中的研究较多,且主要为 PL 杀菌技术对食品中不同微生物的杀菌效果评价,以及杀菌的同时对食品品质的影响。

2.1 PL 杀菌技术在果蔬中应用

新鲜果蔬因其水分含量高、糖分含量高、酸度较低等有助于微生物的生长繁殖,在储运过程中极易出现腐烂变质现象。果蔬在采收后利用 PL 进行杀菌处理,可以降低微生物污染风险,减少低温贮藏过程中的果蔬变质情况,保持果蔬的新鲜度,维持其初始的风味和色泽,并延长货架期。

Tao 等^[11]研究了 PL 对生菜上 4 种常见食源性病原菌的杀菌效果以及 PL 处理对生菜理化感官品质的影响,结果显示,PL 处理对金黄色葡萄球菌的效果最好,其次为大肠杆菌和肠炎沙门氏菌。冷藏结束时,所有经 PL 处理的细菌和酵母菌总数均显著低于未经 PL 杀菌处理的生菜,最高可减少 7 lg CFU/g。PL 处理可使生菜在冷藏 8 d 内保持其品质,并能最大限度地减少失重,保持色泽良好和维持叶绿素和抗坏血酸水平。周婷婷等^[12]探究了 PL 处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响,结果显示,PL 处理能够有效延缓双孢蘑菇在贮藏期间的质量损失,保持双孢蘑菇的硬度,抑制双孢蘑菇过氧化物酶活性,延缓双孢蘑菇的褐变、脂质氧化以及总酚含量下降,以 0.048 J/cm² 脉冲光强度处理的双孢蘑菇具有最好的贮藏效果,贮藏第 8 d,总酚和维生素 C 含量分别较对照提高 39.06% 和 53.63%。Avalos 等^[13]对鲜切草莓进行了不同强度的 PL 处理,并评估了冷藏 14 d 后鲜切草莓品质变化,结果显示,经过 PL 处理的鲜切草莓均未出现明显的真菌腐烂症状,说明 PL 处理可以有效抑制鲜切草莓表面的真菌生长;以 4、8 J/cm² PL 处理可以保持鲜切草莓的硬度,防止贮藏期间软化发

生; PL 处理并未影响鲜切草莓总酚含量和抗氧化能力,且 4、8 J/cm² 处理的鲜切草莓中维生素 C 和总花色苷含量保持不变。彭光华等^[14] 探究了不同 PL 处理条件对鲜切荸荠的保鲜效果,结果显示,10 min 处理组和 15 min 处理组能够更好地抑制过氧化物酶活性、苯丙氨酸解氨酶活性,保持鲜切荸荠在贮藏期间的硬度和色泽,减少失重。

2.2 PL 杀菌技术在肉类制品中应用

肉类制品在生产、加工、包装、运输等过程中均有可能被微生物污染,成为威胁消费者食品安全健康的隐患,因此,肉类制品的杀菌效果是影响肉制品品质的重要因素。PL 处理可有效灭活肉制品中的细菌,防止交叉污染,同时对肉制品品质不会产生较大影响。

刘娜等^[15] 将 PL 和紫外照射耦合对腊肉进行处理并探究了脉冲强光(2、6、10、14、18 cm)、紫外照射距离(3、7、11、15、19 cm)、闪照时间(1、3、5、7、9 cm)以及腊肉切片厚度(1、2、3、4、5 mm)对杀菌效果的影响,结果显示,腊肉切片厚度为 3 mm、腊肉距脉冲光源 6 cm、距紫外光源 15 cm、闪照时间为 5 min 时,腊肉样品的杀菌率可达 99.67%。Fernández 等^[16] 研究了 PL 对 Serrano 和 Iberian 两种西班牙即食干腌火腿表面杀菌的效果;将李斯特菌接种在有真空包装的火腿切片表面,并用 2.1、4.2 和 8.4 J/cm² PL 进行照射;在 4 °C 和 20 °C 储存期间,测定了过氧化物值和挥发性物质并进行感官分析;结果显示,PL 处理能够灭活火腿表面的微生物,且对火腿的过氧化值及感官品质未产生影响。Ananthanarayanan 等^[17] 研究了 PL 处理对黄鳍金枪鱼排的货架期影响。结果显示,PL 处理可以有效降低金枪鱼排中挥发性盐基氮含量、菌落总数及其增长速度,降低金枪鱼的硫代巴比妥酸值、游离脂肪酸和过氧化值,表明 PL 处理可以有效控制鱼肉中微生物的增殖和脂肪氧化水解,保持金枪鱼的新鲜度;PL 处理后的样品也具有更好的感官品质;与对照样品相比,PL 处理使得金枪鱼排的货架期延长至 13 d。黄现青等^[18] 探究了 PL 处理对冷却分割鸡胸肉的品质影响,并通过响应面设计对冷却鸡胸肉的杀菌参数进行优化;结果显示,冷却分割鸡胸肉的杀菌率在优化后的 PL 处理条件下达到 90.03%,与未处理组相比,PL 处理后的冷却鸡胸肉的货架期在 0~4 °C 的贮藏温度下延长了 1~2 d,达到了预期目的。

2.3 PL 杀菌技术在乳制品中应用

乳制品灭菌是其加工生产中的关键环节。PL 杀菌技术不仅能够维持乳制品良好的风味,还可以保留其营养成分,除此之外,还可以避免传统杀菌导致的热效应的发生。

Chen 等^[19] 以不同的 PL 条件下对脱脂奶粉进行杀菌,结果显示,高能量密度、高电压和低进料速度有利于更大程度地灭活微生物,与 TiO₂ 光催化结

合可以显著提高脱脂奶粉的杀菌效果,使脱脂奶粉中的微生物减少量达到 4.71 lg CFU/g(阪崎肠杆菌)、3.49 lg CFU/g(粪肠球菌)和 2.52 lg CFU/g(蜡状芽孢杆菌)。Lacivita 等^[5] 探究了 PL 处理对马苏里拉奶酪的影响,结果显示,PL 处理能够控制马苏里拉奶酪中微生物的生长,且仅需 4 s 就可以达到与 PL 处理透明液体培养基中相当的杀菌效果,被认为是一种杀灭马苏里拉奶酪表面微生物的有效方法。Proulx 等^[20] 将 PL 和纳他霉素或乳酸链球菌素联合使用以探究其杀菌效果,结果显示,联合处理的杀菌效果受防腐剂添加顺序的影响,由于防腐剂对紫外线的吸收,在 PL 处理前添加防腐剂会降低 PL 杀菌效果;而在 PL 处理后添加,杀菌效果得到增强。陈苗^[21] 探究了 PL 处理对牛奶中阪崎肠杆菌的杀菌效果并通过响应面法对该杀菌工艺进行优化,结果显示,在闪照次数为 20 次、闪照距离为 9 cm、闪照能量为 400 J 以及闪照次数为 30 次、闪照距离为 9 cm、闪照能量为 300 J 的杀菌条件下杀菌效果最好,牛奶中阪崎肠杆菌的灭活率达到 99%,说明 PL 处理可以作为一种液体食品的杀菌手段。

PL 对其他食品杀菌效果和品质影响列于表 1 中,不难发现 PL 具有良好的杀菌效果,且对各类食品品质基本上无明显影响。

3 PL 杀菌技术对食品包装材料杀菌效果

食品包装增加了食品存储、运输、零售、消费的便利性,同时也具有一定的阻隔作用,能够延长食品的保质期。目前,食品包装中使用较为广泛的材料主要有玻璃、金属、纸张、纸板和塑料等^[40]。从生产制造到食品加工中使用,包装材料可能会暴露于存在微生物的各种环境中,对食品的安全生产构成潜在风险,尤其是在无菌包装过程中,更易引起食品安全问题。目前,食品工业中的包装材料灭菌主要是通过化学消毒剂,如过氧乙酸和过氧化氢等^[41],这些化学消毒剂极易残留在包装材料中,甚至对最终产品造成污染。因此,食品包装材料的新型杀菌技术开发对于食品行业的发展具有重要的意义,同时也引起了越来越多的关注。

PL 技术能够有效地灭活食品表面、加工设备以及食品包装材料上的微生物^[42],同时,与过氧化氢或过氧乙酸等化学消毒剂相比,PL 杀菌效果更好,且无任何化学残留物^[43]。但由于 PL 不能穿透不透明的物体表面,因此只能作于透明包装材料的杀菌^[44]。此外,PL 处理可能会导致食品表面发热,因此要求包装材料应具有一定的耐热性^[43]。

国外关于 PL 杀菌技术在食品包装材料方面的研究及应用较多,主要研究不同脉冲强度、不同处理时间、不同接种方式、不同菌种以及不同包装材料等因素对于杀菌效果的影响,其中对不同材质的包装材料杀菌效果的研究最多。研究结果发现 PL 的杀菌效果较好,为食品包装材料的杀菌提供了新的思路与方向。

表 1 各种食品经 PL 杀菌处理及其效果
Table 1 PL treatment and its results for different food products

食品种类	PL强度(J/cm ²)	微生物	最高微生物减少量 (lg CFU/g)	其他性质	参考文献	
水果类	鲜切哈密瓜	酵母菌 霉菌	4.64	PL处理使得整个贮藏期间哈密瓜硬度、抗坏血酸含量、总酚含量、可溶性固形物含量并未出现无明显变化,且很好地保留了哈密瓜色泽	[22]	
			4.56			
	鲜切苹果	好氧嗜温菌 好氧嗜冷菌 酵母菌和霉菌	1.55	PL处理并未明显改变鲜切苹果的硬度和色泽,高能量PL处理更好地保留了在贮藏期间的抗氧化活性	[23]	
			1.55 2.3			
	草莓	大肠杆菌O157:H7 纽波特沙门氏菌 H1275 鼠诺如病毒	1.9	无理化和感官评价结果	[24]	
			2.1			
	蓝莓	5.9、11.4、22.5 大肠杆菌O157:H7 纽波特沙门氏菌 H1275 鼠诺如病毒	0.9	与巴氏杀菌相比能更好地保留菠萝汁的维生素C和菠萝蛋白酶含量、抗氧化活性和色泽	[25]	
			5.7			
	菠萝汁	3.4、5.4、8.0	好氧嗜温菌 酵母菌 霉菌	5 5 5	无理化和感官评价结果	[26]
	苹果汁	71.6	酿酒酵母菌	3.9		
樱桃番茄	4、6、8	嗜冷菌 酵母菌和霉菌	6.5	PL处理对于樱桃番茄的颜色和硬度无显著影响	[27]	
			7.7			
蔬菜类	菠菜	大肠杆菌 无害李斯特菌	2.3	PL处理后并未显著改变菠菜的颜色,低能量PL处理的菠菜和对照出现相似的总酚含量变化趋势,但低能量PL处理组的总酚波动较小;高能量PL处理提高了处理后菠菜的抗氧化活性,但加速了贮藏过程中菠菜的氧化降解	[10]	
			2.6			
肉禽蛋类	生鲑鱼	嗜温菌 李斯特菌 假单胞菌 明亮发光杆菌	1.33	PL处理后的鲑鱼与对照组相比无明显变色	[28]	
			1.6			
	生鲑鱼肉 生鲑鱼皮 冷熏鲑鱼肉	1.3~10.8	单核细胞增生李斯特菌	0.5	PL处理后的冷熏鲑鱼肉与对照组相比仅有很少的感官品质变化	[29]
				0.9 1.6		
	火腿 鸡肉 法兰克福香肠	1.05~3.60	无害李斯特菌DSM 20649	1.14	PL处理后的样品与对照样品相比均无明显变色	[30]
				1.16 4.75		
	山羊肉 牛肉	1.27	大肠杆菌K12	1.66	无理化和感官评价结果	[31]
				1.74		
	液态蛋清	2.68、4.45、6.85	沙门氏菌 大肠杆菌K12	1.98	PL处理并未影响液态蛋清的发泡性和泡沫稳定性,但pH、脂质氧化水平、浊度、颜色的变化与处理强度相关	[32]
				1.28		
乳制品类	切达干酪	1.02~12.29	无害李斯特菌FSL C2-008	2.3	PL处理不会引起切达干酪理化性质发生变化	[33]
	曼彻格奶酪 豪达奶酪	0.9~8.4	无害李斯特菌	1 3	PL处理并未影响奶酪的感官特性	[34]
	卡萨尔干酪	4.88~123.25	金黄色葡萄球菌 大肠杆菌O157:H7	1.62	PL处理并未影响干酪的脂质氧化水平、pH及水分含量	[35]
				3.02		
带壳核桃	4.6~50	沙门氏菌	3.18	PL处理并未影响带壳核桃的脂质氧化水平和颜色	[36]	
粮油类	小麦粉	阪崎肠杆菌 粪肠球菌 蜡样芽胞杆菌	5.42	PL处理并未影响小麦粉的感官品质	[19]	
			4.95 2.80			
调味品类	红辣椒粉	4.45、7.84、9.56、12.8	好氧嗜温菌	2.9	PL处理并未影响红辣椒粉中辣椒素和抗坏血酸含量及抗氧化活性,也未引起红辣椒粉变色及其类胡萝卜素氧化	[37]
	黑胡椒	2.8、5.6、11.2、16.8、22.4	沙门氏菌	1.9	PL处理后的黑胡椒与对照相比无明显变色	[38]
	青花椒	3.5、4.9、6.2	霉菌	2.59	无理化和感官评价结果	[39]

Tarek 等^[45]探究了 PL 处理对聚乙烯(PE)、定向聚丙烯(OPP)和 ClearTite®等塑料膜包装的博洛尼亚牛肉的杀菌效果,结果显示,PL 处理可以减少塑料膜包装的博洛尼亚牛肉上大肠杆菌的数量,提高食

品安全性,然而杀菌效果取决于塑料膜的透光性。PE 膜具有比 OPP、ClearTite®等塑料膜更高的透光率(76%),在 PL 处理后 PE 膜上的大肠杆菌数量减少最多,杀菌效果最好,PL 处理也并未对塑料膜的表

面性能产生负面影响。Kramer等^[30]评估了PA/PE复合膜包装的即食火腿、鸡肉、和法兰克福香肠的PL杀菌效果,结果显示,PL处理能够使包装后的即食肉制品上的李斯特菌失活,提高食品安全性。与火腿和鸡肉相比,表面微观结构较光滑的法兰克福香肠上的李斯特菌减少量最大,PL处理并未影响PA/PE复合膜的各项物理性质。De等^[33]对比了PL处理对是否含有苯甲酸钠(SB)或柠檬酸(CA)抗菌淀粉膜的切达干酪上无毒李斯特菌的杀菌效果,结果显示,PL处理提高了SB淀粉膜和CA淀粉膜的拉伸强度,改善了SB淀粉膜在贮藏过程中的抑菌效果,且可与CA淀粉膜协同作用进一步减少奶酪中的李斯特菌含量,PL处理不会引起干酪理化性质发生变化。Moreira等^[46]评估了PL处理和果胶可食用膜对鲜切苹果的保鲜效果。结果显示,果胶膜可以有效减少鲜切苹果的褐变和软化,PL和果胶膜协同处理的鲜切苹果上霉菌和酵母菌数在贮藏期增加最少。Gutierrez等^[47]探究了PL处理对木薯淀粉/芋头淀粉制备的可食膜各项性质的影响,结果显示PL处理可以改善低直链淀粉含量可食膜的物理化学性质。

国内对于PL杀菌技术在食品包装材料方面的研究更加集中于PL技术与包材联用是否具有更好的食物保鲜效果。薛博等^[48]采用PL处理与可食用蜂胶涂膜联用探究其对鸡蛋的保鲜效果,并以响应面试验优化鸡蛋保鲜条件,结果显示,蜂胶质量分数为3%、闪照能量为300 J、闪照距离为13 cm、闪照次数为50次时鸡蛋的哈夫单位为72.52,比对照组高出20.02。刘娜^[49]以溶菌酶/海藻酸钠/壳聚糖天然涂膜、脉冲强光、紫外杀菌依次对腊肉进行处理,结果显示,这种耦合处理后的腊肉在贮藏期间具有最低的菌落总数、过氧化值、硫代巴比妥酸值、挥发性盐基氮值,耦合处理对于腊肉在贮藏期间的色泽保护效果大于单独处理组和空白对照组,在感官评价实验中,耦合处理后的腊肉在贮藏期间感官评分最高,因此耦合处理具有最佳的腊肉保鲜效果。李松林等^[50]利用甲壳低聚糖/菠萝蛋白酶天然涂膜和PL耦合处理腌腊禽肉,结果显示,耦合处理后的腌腊禽肉具有良好的保鲜效果,且耦合处理可以提高腌腊禽肉的色泽、风味和口感。国内采用PL处理对于食品包装材料的杀菌效果方面的研究内容较少。严杰能等^[51]研究了PL处理对饮用水瓶盖的杀菌效果,并确定了饮用水瓶盖的最佳杀菌条件:脉冲电压7 kV,照射距离9 cm,闪烁间隔0.8 s,闪烁次数2次,并进行重复试验,结果显示该杀菌条件可用于实际生产,为PL杀菌技术在饮料包材灭菌提供了理论依据。

4 PL杀菌技术与其他技术耦合

近年来,越来越多的研究人员开始将PL技术与其他保鲜技术耦合对食品进行联合保鲜,这种联合保鲜技术相比于单一保鲜技术在杀菌效果、感官品质、营养素含量的保留等方面具有更好的效果。赵越^[52]

探究了PL处理与气调包装耦合处理对鲜切油麦菜和鲜切白菜的保鲜效果,结果显示,相比于PL和气调包装的单独作用,二者耦合处理的鲜切油麦菜和鲜切白菜在贮藏10 d内的感官品质、叶绿素含量、维生素C含量、失重率、可溶性固形物以及菌落总数等试验结果均明显更好。林琳等^[53]将PL与超声耦合对生菜、甘蓝、青菜进行处理,结果显示,相比于对照组,PL耦合超声后生菜、甘蓝、青菜上的细菌总数均减少3 lg CFU/g以上,其中生菜处理组减少3.87 lg CFU/g,杀菌效果最好。该团队继续将PL与脉冲磁场相结合,并对西瓜汁、哈密瓜汁、葡萄汁进行杀菌,结果显示,所有果汁的菌落数相比于对照组均下降1.5 lg CFU/g以上,其中哈密瓜汁的杀菌效果最好,菌落数相比对照组下降1.86 lg CFU/g^[54]。Huang等^[55]探究了PL与1% H₂O₂耦合对树莓和蓝莓上沙门氏菌的杀菌效果,结果显示,PL与H₂O₂耦合处理的树莓和蓝莓上的沙门氏菌相比于单一处理分别减少1.1和0.9 lg CFU/g,是最有效的杀菌方法。Salinas等^[56]探究了PL与海藻酸涂膜以及苹果酸耦合对鲜切芒果的保鲜效果,结果显示,相比于单一处理,耦合处理可以更好地在贮藏14 d内维持芒果的色泽,且PL与苹果酸的耦合可以最大程度灭活无毒李斯特菌,菌落数相比于其他处理可减少1 lg CFU/g以上。

5 PL杀菌设备在食品工业中应用

随着科技进步以及人们对于食品质量关注度的增加,对于食品加工过程中的新型杀菌技术及设备的需求也日益增加。作为一种新型非热杀菌技术,国内外对PL杀菌在食品工业中的应用进行了深入的研究,有部分公司已将PL杀菌技术成功应用于食品加工过程。

Bushnell等^[57]发明了一种在生产过程中使用PL处理对包装材料进行表面杀菌的方法,通过辊式输送机将包装材料输送至装有吸收增强剂的罐中,并采用PL照射包装材料表面,经填充、定型和切割后完成杀菌过程,同时该技术也适用于成型容器的杀菌。

PL处理也可应用于包装材料的预处理^[58],法国Claranor公司已将PL杀菌技术应用于瓶盖、杯子、托盘及瓶胚颈部的杀菌,在食品加工过程中替代了化学灭菌剂(如过氧化氢)的使用。与化学消毒剂杀菌相比,PL杀菌技术具有无残留、低能耗、低成本、无废水产生等优点,同时杀菌速度极快,极易整合到生产线中。该公司的PL杀菌设备可以每小时连续处理7000~90000个瓶盖和90000瓶坯^[42]。

美国XENON公司的X-1100高强度脉冲光系统为台式设计,占地面积小,其发射PL的能量可达到9 J/cm²,操作人员可在短时间内完成设置,适用于实验室内体积较小物品的杀菌。另外XENON公司的Z-2000系统多应用于传送带上物体的杀菌,此系统中的PL灯单元固定在传送带上,对传送带上移动

的食品杀菌^[59]。

国内企业和研发人员紧跟世界发展方向,设计发明了与实际生产匹配度高、功能完善的设备,进一步推动了 PL 杀菌技术的应用与发展。宁波中物光电杀菌技术有限公司关于 PL 的应用公布了几项专利,其中包含“颗粒料平送杀菌设备”^[60]、“粉料平送杀菌设备”^[61]、“果酱杀菌设备”^[62],物料与设备匹配良好,可为实际生产过程中提供极大的便利。常州市兰诺光电科技有限公司公布的专利“多个脉冲灯的单模块驱动电路”^[63],可应用于各种脉冲强光杀菌设备的设计中,使得脉冲强光在实际生产中更具有实用性和高效性。专利“一种脉冲强光液体净化装置”^[64]中描述将 PL 杀菌技术应用于饮用水杀菌,克服了现有技术中饮用水的消毒技术不利于健康的问题,提供一种安全高效的饮用水杀菌方法。

陆健峰等^[65]发明了一种 PET 空瓶的脉冲强光灭菌装置,可在灌装前对 PET 空瓶进行杀菌,该装置在传送星轮上方设置 PL 发生系统和强光反射系统,实现对 PET 空瓶进行杀菌。此装置以物理杀菌方式代替传统化学杀菌方式,取消了化学品消毒区,减少了设备占地面积,节约能耗,经济环保。

6 PL 杀菌技术安全性

2000 年美国 FDA 颁布的“Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies”规定了 PL 处理食品材料表面的通量范围(0.01~50 J/cm²)^[66]。2017 年美国 FDA 颁布的“Food Code U.S. Public Health Service”并未对 PL 使用剂量做出明确规定。FAO/WHO 颁布的“General Standard for Irradiated Foods”、CAC/RCP 颁布的“食品辐照加工推荐性国际操作规范”、EFSA 颁布的“Scientific Opinion on the Efficacy and Microbiological Safety of Irradiation of Food”和“Scientific Opinion on the Chemical Safety of Irradiation of Food”以及我国颁布的“食品安全国家标准食品辐照加工卫生规范”中仅对辐照技术及其限量进行规定,均未对脉冲强光技术的使用作出明确规定。一些研究人员尝试以高通量 PL 对食品进行处理。Ferrario 等^[26]以 71.6 J/cm² 的 PL 对苹果汁进行杀菌,结果显示,PL 能有效破坏酿酒酵母 KE 162 的细胞结构,从而达到良好的杀菌效果。Keklik 等^[35]以高通量 PL 对干酪表面进行处理,结果显示,虽然 43.95 J/cm² 的 PL 具有良好的杀菌效果,然而随着通量的增加,干酪表面颜色出现明显变化。显然,高通量 PL 确实具有良好的杀菌效果。然而,PL 处理导致的某些天然色素的降解、不良风味的形成等会对食品的感官特性造成负面影响^[42],高通量下食品的 pH 和色泽变化、食品的过热现象以及臭氧的形成也是 PL 处理过程中需要考虑的一些问题^[66]。目前,关于脉冲强光的安全性评价更多的局限于临床医学方面,对于食品及其包装材料中 PL 的通量使用范围还没有定论。如

何避免高通量 PL 带来的食品品质的降低,如何将 PL 技术更加广泛地应用于各类食品包材,需要对 PL 技术进行更加深入的探索。

7 结语

脉冲强光是一种高效无残留的新型非热杀菌技术。其能在广泛杀灭多种致病菌的同时基本不改变食品及食品包材的性质,在提高食品安全性和延长食品保质期方面有巨大的应用潜力。而且 PL 处理成本低廉,更符合食品工业生产的需求。但 PL 处理也存在一些缺陷,例如:PL 处理食品表面的通量范围限制没有明确规定,PL 处理的食品包材应具有高透光率,PL 不能处理含防光辐射添加剂的包材,食品的基质组成以及食品包材的不透明性限制 PL 处理的杀菌效率,将 PL 技术与其他保鲜技术集成是一个有趣的研究方向。这些保鲜技术可以分为物理方法和化学方法。物理方法包括:气调贮藏、可食用涂膜覆盖、超声辐照、脉冲磁场辐照等;化学方法包括:添加过氧化氢、有机酸等。除此之外,降低食品包材透光性对 PL 性能的限制,开发用于热敏食品和包装材料的高效 PL 杀菌系统,以及适用于食品和包装材料的高效智能化 PL 杀菌设备也是潜在的研发方向,需要研究人员对相关领域进行深入探究。

参考文献

- [1] LI X, FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 182: 33-45.
- [2] SCHOTTROFF F, FRÖHLING A, ZUNABOVIC PICHILER 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: 1-19.
- [3] 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.]
- [4] KRAMER B, WUNDERLICH J, MURANYI P. Recent findings in pulsed light disinfection[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, 122(4): 830-856.
- [5] LACIVITA V, CONTE A, LYG J G, et al. High intensity light pulses to reduce microbial load in fresh cheese[J]. *Journal of Dairy Research*, 2018, 85(2): 232-237.
- [6] CASSAR J R, OUYANG B, KRISHNAMURTHY K, et al. Microbial decontamination of food by light-based technologies: Ultraviolet(UV) light, pulsed UV light(PUV), and UV light-emitting diodes(UV-LED)[M]. *Food Safety Engineering*, Springer, Cham, 2020: 125-130.
- [7] MANDAL R, MOHAMMADI X, WIKTOR A, et al. Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(10): 62-71.

- [8] RIFNA E J, SINGH S K, CHAKRABORTY S, et al. Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances[J]. *Food Research International*, 2019, 126: 108654.
- [9] 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 Microbiology*, 2019, 292: 64–71.
- [10] VICTORIA AGUERO M, JAGUS R J, MARTIN-BELLOSO O, et al. Surface decontamination of spinach by intense pulsed light treatments: Impact on quality attributes[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2016, 121: 118–125.
- [11] 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.
- [12] 周婷婷, 曹少谦, 张境, 等. 脉冲强光处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(5): 994–1001. [ZHOU T T, CAO S Q, ZHANG J, et al. Effects of intense pulsed light treatment on storage quality of *Agaricus bisporus*[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(5): 994–1001.]
- [13] AVALOS LLANO K R, MARTIN BELLOSO O, SOLIVA FORTUNY R. Effect of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut strawberries[J]. *Food Chemistry*, 2018, 264: 393–400.
- [14] 彭光华, 王璐瑶, 涂贻轩, 等. 复合增强脉冲强光保鲜鲜切荸荠技术研究[J]. *长江蔬菜*, 2019(4): 72–76. [PENG G H, WANG L Y, TU Y X, et al. Study on preservation technology of fresh-cut water chestnut by compound reinforced pulse strong light[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2019(4): 72–76.]
- [15] 刘娜, 梁美莲, 谭媛元, 等. 响应面法优化切片腊肉的脉冲强光-紫外照射杀菌工艺[J]. *肉类研究*, 2017, 31(6): 29–34. [LIU N, LIANG M L, TAN Y Y, et al. Optimization of pulsed ultraviolet light sterilization of sliced chinese bacon using response surface methodology[J]. *Meat Research*, 2017, 31(6): 29–34.]
- [16] 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.
- [17] ANANTHANARAYANAN T R, NITHIN C T, JOSEPH T C, et al. Effect of pulsed light on shelf life of chill stored yellowfin tuna(*Thunnus albacares*) steaks[J]. *Indian Journal of Fisheries*, 2019, 66(4): 125–134.
- [18] 黄现青, 董飒爽, 李传令, 等. 冷却鸡胸肉脉冲强光杀菌参数试验优化[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(2): 333–339. [HUANG X Q, DONG S S, LI C L, et al. Effects of pulsed light parameters on bacterium sterilization and quality of chilled chicken breast meat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2): 333–339.]
- [19] CHEN D J, WIERTZEMA J R, PENG P, et al. Catalytic intense pulse light inactivation of *Cronobacter sakazakii* and other pathogens in non-fat dry milk and wheat flour[J]. *Food Chemistry*, 2020: 332.
- [20] PROULX J, SULLIVAN G, MAROSTEGAN L F, et al. Pulsed light and antimicrobial combination treatments for surface decontamination of cheese: Favorable and antagonistic effects[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(3): 1664–1673.
- [21] 陈苗. 脉冲强光对牛奶中阪崎肠杆菌杀菌效果的影响[J]. *现代食品*, 2017(22): 83–86. [CHEN M. Optimization of sterilization on *Enterobacter sakazakii* in milk by response surface method with pulsed light[J]. *Modern Food*, 2017(22): 83–86.]
- [22] KOH P C, NORANIZAN M A, KARIM R, et al. Repetitive pulsed light treatment at certain interval on fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo* L. *reticulatus* cv. Glamour)[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 36: 92–103.
- [23] AVALOS LLANO K R, MARSELLES FONTANET A R, MARTIN 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.
- [24] HUANG Y, YE M, CAO X, et al. Pulsed light inactivation of murine norovirus, Tulane virus, *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella* in suspension and on berry surfaces[J]. *Food Microbiology*, 2017, 61: 1–4.
- [25] VOLLMER K, CHAKRABORTY S, BHALERAO P P, et al. Effect of pulsed light treatment on natural microbiota, enzyme activity, and phytochemical composition of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(7): 1095–1109.
- [26] FERRARIO M, GUERRERO S. Impact of a combined processing technology involving ultrasound and pulsed light on structural and physiological changes of *Saccharomyces cerevisiae* KE 162 in apple juice[J]. *Food Microbiology*, 2017, 65: 83–94.
- [27] LENG J, MUKHOPADHYAY S, SOKORAI K, et al. Inactivation of *Salmonella* in cherry tomato stem scars and quality preservation by pulsed light treatment and antimicrobial wash[J]. *Food Control*, 2020: 110.
- [28] PEDROS GARRIDO S, CONDON ABANTO S, CLEMENTE I, et al. Efficacy of ultraviolet light (UV-C) and pulsed light (PL) for the microbiological decontamination of raw salmon (*Salmo solar*) and food contact surface materials[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 124–131.
- [29] HOLCK A, LILAND K H, CARLEHOG M, et al. Reductions of *Listeria monocytogenes* on cold-smoked and raw salmon fillets by UV-C and pulsed UV light[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 1–10.
- [30] KRAMER B, WUNDERLICH J, MURANYI P. Inactivation of *Listeria innocua* on packaged meat products by pulsed light[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019: 21.
- [31] BRYANT M T, DEGALA H L, MAHAPATRA A K, et al. Inactivation of *Escherichia coli* K12 by pulsed UV light on goat meat and beef: microbial responses and modelling[J]. *International*

- Journal of Food Science and Technology, 2020: 102–109.
- [32] OUYANG B, DEMIRCI A, PATTERSON P H. Inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella* in liquid egg white by pulsed UV light and its effects on quality[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(5): 231–242.
- [33] DE MORAES J O, HILTON S T, MORARU C I. The effect of pulsed light and starch films with antimicrobials on *Listeria innocua* and the quality of sliced cheddar cheese during refrigerated storage[J]. Food Control, 2020: 112.
- [34] FERNANDEZ M, HOSPITAL X F, ARIAS K, et al. Application of pulsed light to sliced cheese: Effect on *Listeria* inactivation, sensory quality and volatile profile[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(8): 1335–1344.
- [35] KEKLIK N M, ELIK A, SALGIN U, et al. Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* O157: H7 on fresh kashar cheese with pulsed ultraviolet light[J]. Food Science and Technology International, 2019, 25(8): 680–691.
- [36] IZMIRLIOGLU G, OUYANG B, DEMIRCI A. Utilization of pulsed UV light for inactivation of *Salmonella enteritidis* on shelled walnuts[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020: 134.
- [37] LEE H S, PARK H H, MIN S C. Microbial decontamination of red pepper powder using pulsed light plasma[J]. Journal of Food Engineering, 2020: 284.
- [38] XIE J, HUNG Y C. Efficacy of pulsed-ultraviolet light for inactivation of *Salmonella* spp on black peppercorns[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(3): 755–761.
- [39] 周存山, 夏国华, 马海乐, 等. 一种催化式红外联合脉冲强光的青花椒杀菌方法: 中国, 110742229A[P]. 2020-02-04. [ZHOU C S, XIA G H, MA H L, et al. A method of sterilization of green pepper by catalytic infrared combined with pulsed strong light: China, 110742229A[P]. 2020-02-04.]
- [40] LAGARON J M, CABEDO L, FABRA M J. Barrier nanomaterials and nanocomposites for food packaging[M]. Nanotechnology in Agriculture and Food Science, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017.
- [41] ANDERSON N M, BENYATHIAR P, MISHRA D K. Aseptic processing and packaging. Handbook of Food Safety Engineering[M]. Berlin: Springer, 2020: 661–692.
- [42] 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.
- [43] MARANGONI JUNIOR L, CRISTIANINI M, ANJOS C A R. Packaging aspects for processing and quality of foods treated by pulsed light[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020: 85–94.
- [44] KROCHTA J M. Food packaging. Handbook of Food Safety Engineering[M]. Berlin: Springer, 2019: 1031–1124.
- [45] TAREK A R, RASCO B A, SABLANI S S. Ultraviolet-C light inactivation kinetics of *E. coli* on bologna beef packaged in plastic films[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(6): 1267–1280.
- [46] MOREIRA M R, ALVAREZ M V, MARTIN BELLOSO O, et al. Effects of pulsed light treatments and pectin edible coatings on the quality of fresh-cut apples: A hurdle technology approach[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(1): 261–268.
- [47] GUTIERREZ T J. Effects of exposure to pulsed light on molecular aspects of edible films made from cassava and taro starch[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 387–396.
- [48] 薛博, 李新华, 王改玲, 等. 脉冲强光结合蜂胶涂膜对鸡蛋保鲜效果的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2017(6): 23–26, 31. [XUE B, LI X H, WANG G L, et al. Preservation of eggs by pulsed light and propolis coating[J]. Cereal & Feed Industry, 2017(6): 23–26, 31.]
- [49] 刘娜. 天然提取物涂膜及脉冲强光-紫外对切片腊肉货架期的影响[D]. 贵州: 贵州大学, 2018. [LIU N. Effect of natural extract coating and pulsed light-UV on shelf life of sliced cured meat[D]. Guizhou: Guizhou University, 2018.]
- [50] 李松林, 蒋长兴, 陈晓明, 等. 脉冲强光法制备腌腊禽肉制品的方法: 中国, 104814448A[P]. 2015-08-05. [LI S L, JIANG C X, CHEN X M, et al. Preparation of pickled poultry products by pulsed intense light: China, 104814448A[P]. 2015-08-05.]
- [51] 严杰能, 林晓吟, 孙乔润, 等. 包装饮用水瓶盖脉冲光杀菌工艺的条件优化[J]. 饮料工业, 2019, 22(3): 37–40. [YAN G N, LIN X Y, SUN R Q, et al. Optimization of sterilization by pulse light on packing drinking water bottle cap[J]. The Beverage Industry, 2019, 22(3): 37–40.]
- [52] 赵越. 鲜切油麦菜、白菜脉冲强光与气调包装联合保鲜研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016. [ZHAO Y. The synergism of pulsed light combined with modified atmosphere packaging on preservation study of fresh-cut lettuce and Chinese cabbage[D]. Shenyang: Shenyang Agriculture University, 2016.]
- [53] 林琳, 王心磊, 崔海英, 等. 一种超声结合脉冲强光的蔬菜杀菌方法: 中国, 111406790A[P]. 2020-07-14. [LIN L, WANG X L, CUI H Y, et al. A method of vegetable sterilization by ultrasound combined with pulsed light: China, 111406790A[P]. 2020-07-14.]
- [54] 林琳, 王心磊, 崔海英, 等. 一种脉冲强光结合脉冲磁场的果汁杀菌方法: 中国, 111066992A[P]. 2020-04-28. [LIN L, WANG X L, CUI H Y, et al. A sterilization method of fruit juice by pulsed strong light combined with pulsed magnetic field: China, 111066992A[P]. 2020-04-28.]
- [55] HUANG Y, SIDO R, HUANG R, et al. Application of water-assisted pulsed light treatment to decontaminate raspberries and blueberries from *Salmonella*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 208: 43–50.
- [56] SALINAS ROCA B, SOLIVA FORTUNY R, WELTI CHANES J, et al. Combined effect of pulsed light, edible coating and malic acid dipping to improve fresh-cut mango safety and quality[J]. Food Control, 2016, 66: 190–197.
- [57] BUSHNELL ANDREW H, MEADER DON, NAESLUND

- LARS AAKE, et al. Deactivation of microorganisms[P]. US60 13918, 2000-1-11.
- [58] DUNN JOSEPH E, CLARK R WAYNE, ASMUS JOHN F, et al. Methods for presevation of foodstuffs: US, 5034235[P]. 1991-7-23.
- [59] XENON. Pulsed light system z-2000 conveyor treatment system[EB/OL]. <https://xenoncorp.com/wp-content/uploads/2020/08/Z-2000-Conveyor-Treatment-System-Data-Sheet.pdf>, 2020-08.
- [60] 杨天晗, 王盛. 颗粒料平送杀菌设备: 中国, 104940963A[P]. 2015-09-30. [YANG T H, WANG S. Sterilization equipment for horizontal conveying of granular materials: China, 104940963A[P]. 2015-09-30.]
- [61] 杨天晗, 王盛. 粉料平送杀菌设备: 中国, 104840978A[P]. 2015-08-19. [YANG T H, WANG S. Sterilization equipment for horizontal conveying of powder materials: China, 104840978A[P]. 2015-08-19.]
- [62] 王盛, 杨天晗, 缪佳. 果酱杀菌设备: 中国, 103750498A[P]. 2014-04-30. [WANG S, YANG T H, MIU J. Sterilization equipment for jam: China, 103750498A[P]. 2014-04-30.]
- [63] 蒋栋, 刘璠. 多个脉冲灯的单模块驱动电路: 中国, 106028608A[P]. 2016-10-12. [JIANG D, LIU P. Single module driving circuit for multiple pulse lamps: China, 106028608A[P]. 2016-10-12.]
- [64] 蒋栋, 刘璠. 一种脉冲强光液体净化装置: 中国, 208948894U [P]. 2019-06-07. [JIANG D, LIU P. A liquid purification device with pulsed light: China, 208948894U[P]. 2019-06-07.]
- [65] 陆健锋, 张国宏, 田夫鹏. 一种PET空瓶的脉冲强光灭菌装置: 中国, 205740330U[P]. 2016-11-30. [LU J F, ZHANG G H, TIAN F P. Pulsed light sterilization device for pet empty bottles: 205740330U[P]. 2016-11-30.]
- [66] Food and Drug Administration. Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies[S]. IFT/FDA Contract No. 223-98-2333, 2000-03-29.