

脉冲光在食品工业中的应用

Advances in pulsed light and its applications in food industry

杜艳 陈复生

DU Yan CHEN Fu-sheng

(河南工业大学, 河南 郑州 450001)

(Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:文章综述一种新兴的非热方法——脉冲光的基本装置,分析其在多种食品基质中的作用机理和效果,并对可能存在的问题进行概括,为脉冲光在食品工业中的应用提供新的思考和见解。

关键词:脉冲光;食品工业;应用;局限性

Abstract: As one of the novel nonthermal methods, pulsed light (PL) is a technology for the fast, mild and residue free surface decontamination of food and food contact materials. This paper introduces the appliance and mechanism of PL firstly, and then details its application in food sterilization and removal of toxins and allergens. At last, the drawbacks of PL and its possible developments in food industry are discussed.

Keywords: Pulsed light; food industry; application; limitations

脉冲光(Pulsed light, PL)又称强脉冲光(Intense pulsed light, IPL)、脉冲紫外光(Pulsed UV light, PUV)、脉冲白光(Pulsed white light, PWL)、高强度广谱脉冲光(High intensity broad-spectrum pulsed light)等,是一种非热物理加工技术,起源于 20 世纪 70 年代后期的日本,于 1984 年在美国注册专利,1996 年美国食品药品监督管理局(Food and drug administration, FDA)的第 21 条法案允许在食品加工中使用,剂量不得超过 12 J/cm^2 [1]。它利用瞬时放电的脉冲工程手段和惰性气体灯管,以脉冲形式激发强烈的白光,能量可达 35 MW,强度相当于到达地球表面太阳光强度的数千至数万倍;光谱范围包括了紫外线波段(180~400 nm)、可见光波段(400~700 nm)和近红外光波段(700~1 100 nm),尤以紫外线波段最为丰富。

基金项目:国家自然科学基金(编号:21676073);河南省优秀科技创新团队项目;河南省重点自然科学基金(编号:162300410046)

作者简介:杜艳,女,河南工业大学在读博士研究生。

通信作者:陈复生(1963—),男,河南工业大学教授,博士。

E-mail: fushengc@haut.edu.cn

收稿日期:2018-04-20

由于脉冲光峰值能量极高,脉冲持续时间极短,且不含汞和高压气体等污染成分,具有高穿透、作用温度低、能效高、适配性高、安全、易控制的特点,逐渐受到国内外学者关注[1]。文章从 PL 的作用装置、作用机理、具体应用和存在问题四方面着手,介绍近年来学界在此领域取得的诸多进展,为 PL 在食品工业中的具体应用提供依据。

1 脉冲光装置

脉冲光装置由动力单元和惰性气体灯单元 2 个基本结构组成,其中惰性气体灯主要以氙灯为主;动力单元是向惰性气体灯单元提供高电压高电流脉冲的部件,为惰性气体灯管提供所需的能量;然后惰性气体灯在动力单元提供能量的基础上,发出由紫外线至近红外线区域的光线(原理见图 1)。电源输入的电流经过设备变压器升压后,对高压直流发生器的电容器进行充电,通过强光发生器(氙灯两端)形成直流高压。经系统触发器产生高压脉冲,升压后电流触发产生瞬时电感使氙气电离导通形成持续时间极短的闪光。电容放电后,高压下降,为下一次闪光积蓄能量[2]。

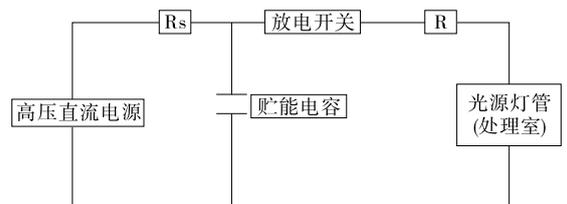
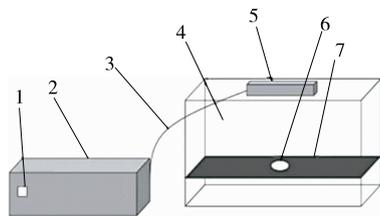


图 1 脉冲光产生原理图

Figure 1 The schematic diagram of pulse light generation

PL 装置示意图见图 2。其中,光源灯管需要亮度强、快闪,而氙灯除了满足这些条件之外,还具有启动快、波谱长等优点,又考虑到安装的方便性和均匀性,最终选用管状脉冲氙灯作为光源,工作电压(又称击穿电压)为 800~3 000 V;操作过程中要防止脉冲氙灯输入能量超过最大值而引起爆炸,灯的输入能量应小于工作时最大允许输入能量的 30%。样品处理室壁的材料以不锈钢为佳,因不锈钢反光性良好,



1. 电源 2. 控制模块 3. 控制电缆 4. 处理室 5. 光源灯管
6. 目标物 7. 样品台

图2 脉冲光的装置示意图

Figure 2 The sketch map of pulsed light device

不仅可以提高照射在样品上的光强度提高作用效果^[3],也能够保护测试人员的眼睛不受强光伤害。

目前,完善的PL设备层出不穷,有德国Steri Beam公司的Automatic Laboratory Flash Lamp System (Steri Beam Systems, GmbH, Kehl, Germany)和美国Xenon公司的SteriPulse™-XL 3000 Pulsed Light Sterilization System (Xenon Corporation, Wilmington, MA, American)等,也有一些自主研发的试验装置,均已在食品工业中取得了良好的应用。

2 脉冲光的作用机理

目前关于脉冲光的作用机理研究主要集中于微生物学领域,学界公认的3种作用方式分别为:光化学作用、光热作用和光物理作用。

光化学作用是指物质的分子吸收了外来光子的能量后激发的化学反应。微生物经PL照射后,其DNA会吸收紫外线波段的能量(200~280 nm)而裂解,发生结构改变,形成胸腺嘧啶二聚体,阻碍DNA的复制和细胞分裂,扰乱微生物自身的新陈代谢和遗传等,导致细胞的死亡及孢子钝化^[4]。光热作用是指材料受光照射后,光子能量与晶格相互作用,振动加剧,温度升高。PL是一种广谱光,其中的近红外光能辐射能量,可使细胞表面局部升温至50~150℃,破坏细菌细胞壁,使细胞液蒸发,破坏细胞结构,导致死亡^[5]。除了光化和光热作用之外,PL的穿透性和瞬时冲击能力使其具有强大的光物理作用,能够损坏细胞壁和其他细胞成分,导致细胞死亡^[4]。

3 脉冲光在食品工业中的应用

脉冲光作为一种食品非热加工技术,已成为国际食品工业的重要推动力,它处理温度低,能更好保持食品固有的结构、色泽、营养和新鲜度,解决了传统热加工技术使食品物理或化学性质劣变的问题,如今多被用于食品冷杀菌方面,在其他食品加工领域也略有涉及。

3.1 食品杀菌

常见的食品冷杀菌技术有超高压杀菌、脉冲电场杀菌、紫外线杀菌和辐照杀菌等。其中,超高压杀菌是通过100 MPa以上的压力作用破坏细菌细胞膜,抑制酶活,以达到灭菌效果。但过高的压力同时也会对食品的感官造成负面影响,且受到操作方式的限制,超高压只能处理包装气密

性良好(如塑料包装)的食品,以避免液体介质浸入造成二次污染。脉冲电场杀菌主要利用电磁场的作用和电离作用阻碍微生物细胞膜内正常生化反应和新陈代谢,杀灭菌体。目前技术成熟的高压脉冲发生器仍以指数衰减波为主,存在杀菌效率低、能耗高等缺点。紫外线可以破坏有机物的分子结构,从而影响微生物体内的蛋白质和核酸,致使微生物死亡。尽管紫外线成本低、杀菌效率高,却会加速食品脂肪氧化、蛋白变性、维生素降解、产生异臭、食品变色等,导致食品营养成分下降。辐射杀菌操作简便,效果显著,且可以一定程度上保持粮食品质,却受到同位素射线穿透能力强弱的影响,应用范围十分有限,如 γ -射线穿透力强,适用于完整食品及各种包装食品的内部杀菌,而电子射线穿透力较弱,一般用于小包装食品、冷冻食品及食品表面的杀菌处理。

脉冲光在杀菌方面的应用起步较晚,最早出现于医疗器械表面杀菌和透明药剂溶液杀菌方面,随着脉冲光杀菌技术的完善和设备的成熟,逐渐过渡到食品当中,它能有效杀灭暴露在食品和包装材料表面或水中的细菌、霉菌、孢子、休眠孢子、原生质、病毒等各类微生物,是一种无汞、低热、无副产物的新型杀菌技术。脉冲光杀菌设备成本低廉,可以安装于食品加工生产线上,进行连续性生产,在生产成本和效率方面具有明显优势,目前在气体、液体、固体等食品基质的杀菌消毒中均得到推广^[6-12]。

3.1.1 空气杀菌 传统的空气消毒主要通过干燥技术、静电吸附技术、臭氧消毒技术、负离子消毒技术、光催化氧化技术、紫外线消毒技术等。脉冲光技术作为一种新型空气净化技术于2012年才得到研究。张银苹^{[6]29-56}采用了实验室自主搭建的风管内脉冲光动态空气杀菌系统,探索了脉冲光对空气中微生物的杀灭效果,结果表明,经脉冲光照射之后,空气中的微生物浓度显著下降;且杀菌效率随着风速、空气相对湿度、风管截面的升高而降低,微生物粒径越小,其对脉冲光的杀菌越敏感;建立了能够良好预测脉冲强光对室内空气除菌率的数学模型,但该模型未将环境温度、闪照频率等会对除菌率产生影响的因素考虑在内,还有待完善。

3.1.2 液体食品杀菌 脉冲光在液体食品杀菌中的应用较多,因其样品往往具有一定的透明性,使脉冲光易于穿透,杀菌消毒效果极佳。Kasahara等^[7]研究PL对山羊乳中大肠杆菌(*E. coli*)的杀菌效果及感官属性的影响,发现在PL强度为10 J/cm²时,大肠杆菌减少6 lg CFU/mL,芳香物质有所改变,而物理性质和组成成分无显著性变化。Feng等^[8]研究了PL结合TiO₂膜在脉冲峰值电压300 V、频率15 Hz、脉冲宽度5 ms的条件下共同作用,对压载水中赤潮异湾藻(*Heterosigma akashiwo*)的杀菌作用,发现其杀菌率高达99.89%,这表明PL与TiO₂膜在杀菌方面具有协同作用。Yi等^[9]应用中试规模连续流动脉冲光系统处理地下水,发现以14.02 J/cm²脉冲光强度照射290 s,初始带菌量10⁵~10⁶ CFU/mL的大肠杆菌(*Escherichia coli* C600)可减少4.79 lg CFU/mL;以13.05 J/cm²强度照射270 s,初始带菌量4.5×10⁴ CFU/mL的好氧及兼性厌氧异样微生物可减少2.91 lg CFU/mL;以4.30 J/cm²强度照射89 s,初始含量为

$10^3 \sim 10^4$ PFU/mL 的诺瓦克病毒 (Murine norovirus, MNV) 可减少 3.35 lg PFU/mL。

除此之外, PL 在饮用水、果汁、饮料的杀菌中均有显著作用: 可将水中的隐孢子虫 (*Cryptosporidium parvum*) 减少 4.0 lg (N/N₀); 使苹果汁中的展青霉菌 (*Penicillium expansum*) 减少 3.76 lg CFU/mL; 将矿泉水和等渗饮料中的铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 减少 7.0 lg CFU/mL^[10]。上述研究证明 PL 可有效用于液体食品杀菌消毒, 应用范围广泛。

3.1.3 固体食品杀菌 固体食品种类丰富, 涵盖了粮油制品、果蔬制品、畜禽制品和水产品等。使用 PL 技术对这些食品进行杀菌处理, 对延长货架期具有十分重要的意义。

(1) 粮油制品: Jun 等^[11] 采用一种脉冲紫外光系统处理谷物以灭活黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 孢子, 发现在闪照时间 100 s、照射距离 3 cm、输入电压 3 800 V 的条件下, 黑曲霉孢子数量可减少 4.93 lg CFU/mL。Hwang 等^[3] 以芝麻种子为研究载体, 使用实验室自制的 PL 设备, 探索 PL 对细菌、霉菌和酵母菌的杀灭效果, 发现初始微生物载量为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ CFU/g 的芝麻种子, 经 39.85 J/cm² 的脉冲光照射之后, 微生物减少 0.86 lg CFU/g。刘昕等^[12] 研究了脉冲光杀灭市售桃李面包表面霉菌的效果, 发现脉冲次数为 37 次、照射距离为 10 cm、脉冲能量为 400 J 时, PL 对面包表面霉菌杀菌率可达到 99.49%。

(2) 果蔬制品: 高剂量的 PL 可能会在杀菌的同时引起果蔬的褐变。但 Gómez 等^[13] 在讨论 PL 对鲜切苹果中酿酒酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae* KE 162)、大肠杆菌 (*Escherichia coli* ATCC 1129)、李斯特菌 (*Listeria innocua* ATCC 33090) 的杀灭作用时, 发现光强度为 11.9 J/cm² 时, 可在不引起苹果色泽劣变的前提下显著延长货架期。

Aguiló-Aguayo 等^[14] 分别从鲜切鳄梨 3 面分别以光强 3.6、6.0、14.0 J/cm² 的脉冲光同时照射, 并对其贮藏期间 (4 ℃, 15 d) 微生物 (好氧嗜常温菌、酵母、霉菌) 含量、色泽、叶绿素稳定性和脂质氧化程度进行检测。结果发现经 PL 照射后, 鳄梨中好氧嗜常温菌减少 1.20 lg CFU/g, 酵母和霉菌的生长被抑制 (3 d), 此外, 鳄梨中叶绿素滞留增加、色泽受到保护, 鳄梨氧化程度没有增加。

Xu 等^[15] 考察了 PL 对新鲜树莓中沙门氏菌 (*Salmonella*) 和大肠杆菌 (*Escherichia coli* O157:H7) 的灭活效果, 发现以 28.2 J/cm² 的脉冲光处理 30 s 可使二者分别减少 4.5、3.9 lg CFU/g, 但考虑到对树莓颜色和质地的不良影响, PL 的推荐用量为 5.0 J/cm²。

杨艺龙等^[16] 对即食杏鲍菇两面各脉冲光照射 20 s (光强 8.7 J/cm², 脉冲 3 次), 采用包装后再灭菌的处理方式, 产品的颜色、口感和气味均无明显变化; 而采用染菌后再包装, 大肠杆菌、枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌数量显著下降, 杀灭率均达到 91% 以上。Oms-Oliu 等^[17] 的试验表明, 光强 4.8 J/cm² 的 PL 可延长蘑菇的保质期且对其抗氧化稳定性无明显影响, 与 Xu 等^[15] 的研究结论类似。Agüero 等^[18] 以菠菜为研究对象, 施加不同剂量的 PL 之后, 其叶片上的李斯

特菌和大肠杆菌下降 0.4~2.2 lg CFU/g。

(3) 畜禽制品: 畜禽制品中最常出现的病原体微生物为沙门氏菌 (*Salmonella spp.*)、弯曲杆菌 (*Campylobacter spp.*)、大肠杆菌 (*E. coli*) 和耶尔森氏鼠疫杆菌 (*Yersinia spp.*)。Rajkovic 等^[19] 发现 PL 对肉制品中李斯特菌 (*Listeria monocytogenes*) 和大肠杆菌 (*E. coli* O157:H7) 有杀灭作用, 但随着脉冲间隔时间的延长, 灭菌效果变差。Ganan 等^[20] 在即食干腌肉表面接种沙门氏菌 (*S. enterica*) 和李斯特菌 (*L. monocytogenes*), 以 11.9 J/cm² 的 PL 处理后, 发现二者分别减少 1.81、1.51 lg CFU/cm², 且在贮藏 30 d (室温) 内未出现色泽和感官上的变化。

(4) 水产品: Figueroa-García 等^[21] 研究了脉冲紫外光对聚乙烯预包装的生鲑鱼片的杀菌效果, 发现脉冲光强度为 2.0 J/cm² 可明显降低微生物污染度, 延长货架期, 鲑鱼片感官品质没有影响。Ozer 等^[22] 同样采用脉冲紫外光, 处理鲑鱼片表面的大肠杆菌 (*E. coli* O157:H7) 和李斯特菌 (*L. monocytogenes* Scott A), 结果显示, 照射距离为 5 cm, 处理 30 s, 二者分别减少 0.86、0.70 lg CFU/g; 照射距离为 8 cm, 处理 60 s, 分别减少 1.09、1.02 lg CFU/g; 这表明在较远的照射距离条件下, 可以通过延长处理时间来提高除菌率, 但随着处理时间的延长, 样品表面温度显著上升。Nicorescu 等^[23] 在三文鱼上接种荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*), 经 PL 处理后, 带菌量减少 3.41 lg CFU/g。

上述研究证明 PL 在水产品表面杀菌中具有显著效果, 在水产品种类不同、染菌种类不同的情况下, 均可达到良好的除菌效果, 可将 PL 进一步推广到其他水产品除菌保藏的应用中。

3.1.4 食品包装材料表面杀菌 加工后的食品原料必须经过包装才能在市场上流通, 若包装材料受到污染, 则会在与食品接触过程中转移到食品中, 导致食品品质劣变、货架期缩短。随着 PL 技术的兴起及其在食品冷杀菌方面的发展, 将 PL 杀菌应用于食品包装材料引起了学者的广泛关注^[24]。

Turtoi 等^[25] 在 20 mm×20 mm 的聚乙烯纸包装材料上接种了 4 种霉菌 (*Cladosporium herbarum*、*Aspergillus niger*、*Aspergillus repens*、*Aspergillus cinnameus*), 以强度为 0.244~0.977 J/cm² 的脉冲光处理 (脉冲持续时间 10×10³~30×10³ s), 得到的最高除菌量为 2.7 lg CFU/cm²; 此外, 还发现 *C. herbarum* 产生的孢子 (blastospores) 比 *aspergilli* 产生的孢子 (fialospores) 更容易去除, 可能是由于 2 种孢子的颜色不同 (fialospores 呈黑色, blastospores 呈绿色), 吸收的脉冲光波长也有所不同引起的, 因此可以推测, 细菌或孢子自身的颜色对脉冲光的杀菌效果也存在影响。

Haughton 等^[26] 研究了 PL 对不同鸡肉包装材料 (不锈钢、聚乙烯砧板、黑色聚丙烯托盘、白色聚丙烯托盘、蓝色聚丙烯、铝盘、聚烯烃、聚乙烯聚丙烯、聚氯乙烯) 表面空肠弯曲杆菌 (*Campylobacter jejuni*)、大肠杆菌 (*E. coli*) 和沙门氏菌 (*S. enteritidis*) 的消除效果, 发现在照射距离 (14 cm) 不变的情况下, 脉冲时间 5 s 可将所有材料表面空肠弯曲杆菌全部杀灭; 距离 11.5 cm, 脉冲时间 5 s, 聚氯乙烯和铝盘上的大

肠杆菌杀灭完全,其他材料减少 2.52 lg CFU/cm²。

除此之外, Montgomery 等^[27]发现 PL 可使聚苯乙烯表面枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)浓度降低 6 lg CFU/mL 以上,使低密度聚乙烯膜表面的大肠杆菌和李斯特菌分别减少 2.7, 3.9 lg CFU/mL 以上。Gómez-López^[28]采用 PL 处理低密度聚乙烯、高密度聚乙烯,聚乙烯铝箔纸层压板、聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚乙烯涂层纸板,发现其表面的李斯特菌(*L. innocua*),分别减少了 1.9~7.1, 1.7~7.2, 1.0~3.5, 1.0~4.4, 1.1~4.5 lg CFU/cm²,可能与不同材料表面介质的导热性和光滑性等有关。

3.2 去除毒素及过敏原

国内外关于 PL 降解毒素的研究较少。Wang 等^[29]针对稻谷易受黄曲霉(*Aspergillus flavus*)侵染,产生对人体造成不可逆损坏的黄曲霉毒素 B₁(AFB₁)和黄曲霉毒素 B₂(AFB₂),探索了脉冲光在降解毒素中的应用。结果表明,不同样品中的 AFB₁和 AFB₂对脉冲光(0.52 J/cm²)的敏感度不同;PL 处理糙米 80 s, AFB₁和 AFB₂的降解度分别达到 75.0%和 39.2%,而处理米糠仅需 15 s 即可分别达到 90.3%和 86.7%的降解度,可能是去壳后糙米表面凹凸不平,凹陷处受到 PL 照射较少,使隐藏其中的 AFB 免于降解;PL 处理后 AFB₁和 AFB₂的诱变活性均被完全消除,毒素降解度高于传统的紫外辐照处理,这主要与 PL 强度高、波谱范围有关。

关于过敏原去除方面的研究,学者多使用“脉冲紫外光(PUV)”进行表述。Chung 等^[30]用脉冲紫外光降低花生提取物和液体花生酱中的过敏原(Ara h1, Ara h2, Ara h3),将样品放在距离氙灯 RS-3000C 中轴线 14.6 cm 处,以每秒 3 次脉冲的频率分别处理花生提取物 4 min、液体花生酱 3 min,将处理后的样品离心分离,取上清液进行 SDS-PAGE 和竞争性抑制酶联免疫(cIELISA)分析,并以沸水处理作为对照。SDS-PAGE 结果表明,煮沸对花生过敏原去除作用很小,而 PUV 处理样品中过敏原(63 kDa)水平或溶解度明显下降,另一过敏原(18~20 kDa)不受影响,过敏原水平降低导致不溶性大分子的聚合,使过敏原溶解度下降。cIELISA 显示,未处理样品中的 IgE 结合体比 PUV 处理样品高出 7 倍,表明 PUV 可有效降低花生提取物和液体花生酱中的 IgE 结合体。

在此基础上, Yang 等^[31]研究了 PUV 对大豆中过敏原的去除效果,与 Chung 等^[30]采用相同的方法探索了处理时间(2, 4, 6 min)的影响,发现 PUV 可以降低大豆过敏原(如大豆球蛋白和 β -伴球蛋白)水平,随处理时间的延长 IgE 结合体呈现减少趋势,但在此过程中样品温度和质量损失有所增加。接着, Yang 等^[32]就 PUV 在花生过敏原的去除中,补充说明了脉冲光强度等对处理效果的影响,表示随着光强度由 111.6 J/cm² 增加至 223.2 J/cm²,过敏原与蛋白的结合强度逐渐下降;花生提取物和花生酱中的 IgE 结合体减少量分别为对照组的 12.9, 6.7 倍。Yang 等^[33]通过试验证实 PUV 对虾提取物中的过敏原也有显著的去除作用。

Shriver 等^[34]对比了 PUV(脉冲频率 3 次/s,脉冲距离 10 cm,处理时间 4 min)处理、沸水处理和 PUV+沸水处理对白对虾过敏原——原肌球蛋白(36 kDa)的去除效果,并将未处理样品作为对照,发现 PUV 不仅能够降低样品中的 IgE 结合体,且能够抵消沸水处理带来的样品 IgE 结合体的增加。PUV 还被用于杏仁蛋白提取物抗原性的去除, Li 等^[35]通过 Western blots 和间接性 ELISA 结果表明:处理时间为 7 min(脉冲频率 3 次/s、脉冲距离 10 cm)时,过敏原和 IgE 结合体水平下降最多。

目前 PL 在食品工业中的研究主要集中于灭菌方面,对于毒素和过敏原去除研究相对较少。而毒素和过敏原是引起食品安全问题的重要因素,探索去除毒素和过敏原的有效方法是各国学者始终关注的议题。以上文献为 PL 用于毒素和过敏原去除提供了思路,可以应用于低致敏性花生酱、大豆饮料等食品开发,并指出:① PL 对花生黄曲霉毒素的去除率高于传统的紫外辐照处理,可能与 PL 强度高、波谱范围广有关;② 毒素和过敏原的去除效率可能与脉冲光强度、处理时间、脉冲距离等因素有关,但具体影响规律、去除机理和对人体作用的临床效果还有待于进一步研究。

3.3 其他作用

除上述应用之外,关于脉冲光的其他报道也屡见不鲜。Wihodo 等^[36]将 PL 作为一种蛋白交联方法用于改善酪蛋白膜性质,探索脉冲次数(0~15 次)对作用效果的影响,发现随着脉冲次数的增加,膜的光滑性和均匀性逐渐增加,但超过 12 次会出现结构性缺陷;在膜制作过程中先加入 PEG(400)丙烯酸酯再经 PL 处理,膜的机械强度和延伸性显著增加,水蒸气渗透性无明显变化;类似地,若先加入 PEG(200)丙烯酸酯,则会产生多孔膜结构。

PL 还可以诱导大分子物质的改变,如通过二硫化物交换造成大蛋白聚集物形成^[37],引发蛋白骨架裂解诱导褐变,使蛋清蛋白骨架裂解、免疫活性增加、凝胶温度下降、泡沫稳定性增加,黏度和凝胶强度没有变化,这可能为蛋白质的改性等提供思路。然而, Panozzo 等^[38]研究表明 PL 处理后的谷蛋白虽然也受 PL 诱导褐变,但免疫活性降低,过敏反应降低。

PL 对食品成分也有一定的影响,可用于提高芒果品质,保持新鲜芒果的硬度、颜色以及类胡萝卜素、苯酚和抗坏血酸的含量,维持苯丙氨酸解氨酶(PAL)和多酚氧化酶(PPO)的活性^[39];但高剂量的 PL 会使 PPO 活性增加,促进酶促褐变^[17]。Janve 等^[40]以 PUV 处理大豆 16 s,发现其中脂肪氧合酶(LOX)活性降低 99.95%,温度达到(33.5±1.8)℃, SDS-PAGE 和 RP-HPLC 结果显示,脉冲光处理时间和脉冲距离对 LOX 的灭活影响显著。

4 脉冲光可能存在的问题

尽管脉冲光相比于其他食品冷处理方式优势显著,但在实际应用中,由于受到样品形态、初始带菌量、输入电压、脉冲宽度(脉冲持续时间)、脉冲频率、脉冲次数、脉冲距离(样品与光源中轴线的距离)等因素的影响,仍存在一定的限制

和负面作用。

(1) PL 对固体表面和透明液体杀菌效果较好,而由于遮光效应以及光的反射、折射和散射等现象的存在,使得 PL 对深颜色的液体或凹凸不平的表面杀菌效果较差^[41],且杀菌只停留在表面,对肉中的寄生虫(如旋毛虫等)没有影响,这一现象在猪肉中尤为明显^[42]。

(2) 若初始带菌量较高,PL 的杀菌效果并不明显^[43]。

(3) 在果蔬(如苹果、鳄梨、蘑菇等)杀菌过程中,若使用的 PL 强度过高,由于 PL 对蛋白结构的影响,会在一定程度上提高多酚氧化酶(PPO)活性,引起褐变^[14]。

(4) 虽然 PL 可以使花生、大豆等食品中的过敏原含量降低,但实际致敏性的下降还需要通过临床试验进一步证实。

5 展望

随着科学技术的不断进步,脉冲光在食品工业中的应用会得到更多的关注。未来可进行的研究有:选择合适的 PL 处理条件,从分子生物学层面加强对 PL 作用机理的研究,并充分发挥 PL 与其他食品加工方式(如热处理、超声波处理、高静压处理等)的互补优势,开发更为有效的食品加工方法,进一步扩大 PL 的应用范围,推动国际上对 PL 技术的深度开发和广泛利用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] FENG Dao-lun, SHI Ji-dong, SUN Dan. Inactivation of microalgae in ballast water with pulse intense light treatment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 90(1/2): 299-303.
- [3] HWANG H-J, CHEIGH C-I, CHUNG M-S. Construction of a pilot-scale continuous-flow intense pulsed light system and its efficacy in sterilizing sesame seeds[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 1-6.
- [4] FERRARIO M, GUERRERO S. Effect of a continuous flow-through pulsed light system combined with ultrasound on microbial survivability, colour and sensory shelf life of apple juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 214-224.
- [5] HUANG Yao-xin, SIDO R, HUANG Run-ze, 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.
- [6] 张银苹. 脉冲强光动态空气杀菌效果的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [7] KASAHARA I, CARRASCO V, AGUILAR L. Inactivation of *Escherichia coli* in goat milk using pulsed ultraviolet light[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 152(152): 43-49.
- [8] FENG Dao-lun, XU Shi-hong, LIU Gang. Application of immobilized TiO₂ photocatalysis to improve the inactivation of *Heterosigma akashiwo* in ballast water by intense pulsed light[J]. Chemosphere, 2015, 125: 102.
- [9] YI J Y, LEE N H, CHUNG M S. Inactivation of bacteria and murine norovirus in untreated groundwater using a pilot-scale continuous-flow intense pulsed light (IPL) system[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 108-113.
- [10] HWANG H J, CHEIGH C I, CHUNG M S. Relationship between optical properties of beverages and microbial inactivation by intense pulsed light [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 31: 91-96.
- [11] JUN S, IRUDAYARAJ J, DEMIRCI A, et al. Pulsed UV-light treatment of corn meal for inactivation of *Aspergillus niger* spores[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2003, 38(8): 883-888.
- [12] 刘昕, 马涛, 王勃, 等. 脉冲强光对面包表面霉菌杀菌效果的研究[J]. 食品科技, 2014(3): 116-120.
- [13] GÓMEZ P L, SALVATORI D M, GARCIA-LOREDO A, et al. Pulsed light treatment of cut apple: dose effect on color, structure, and microbiological stability[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(6): 2 311-2 322.
- [14] AGUIL-AGUAYO I, OMS-OLIU G, MARTIN-BELLOSO O, et al. Impact of pulsed light treatments on quality characteristics and oxidative stability of fresh-cut avocado[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 320-326.
- [15] XU Wen-qing, WU Chang-qing. The impact of pulsed light on decontamination, quality, and bacterial attachment of fresh raspberries[J]. Food Microbiology, 2016, 57: 135-143.
- [16] 杨艺龙, 陈君琛, 沈恒胜, 等. 脉冲强光对即食杏鲍菇杀菌工艺研究[J]. 福建农业学报, 2015(4): 400-405.
- [17] OMS-OLIU G, AGUIL-AGUAYO I, MARTIN-BELLOSO O, et al. Effects of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(3): 216-222.
- [18] AGUERO M V, JAGUS R J, MARTIN-BELLOSO O, et al. Surface decontamination of spinach by intense pulsed light treatments: Impact on quality attributes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121: 118-125.
- [19] RAJKOVIC A, TOMASEVIC I, SMIGIC N, et al. Pulsed UV light as an intervention strategy against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 on the surface of a meat slicing knife[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 446-451.
- [20] GANAN M, HIERRO E, HOSPITAL X F, et al. Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products[J]. Food Control, 2013, 32(2): 512-517.
- [21] FIGUEROA-GARC A J E, SILVA J L, KIM T, et al. Use of pulsed-light to treat raw channel catfish fillets[J]. Journal of the Mississippi Academy of Sciences, 2002, 47(4): 114-120.
- [22] OZER N P, DEMIRCI A. Efficacy of pulsed-UV light treatment inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on raw salmon [C]// St. Joseph, Michigan. 2004 ASAE Annual Meeting, Ottawa; American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2004: 1.
- [23] NICORESCU I, NGUYEN B, CHEVALIER S, et al. Effects

- of pulsed light on the organoleptic properties and shelf-life extension of pork and salmon [J]. *Food Control*, 2014, 44: 138-145.
- [24] HEINRICH V, ZUNABOVIC M, BERGMAIR J, et al. Post-packaging application of pulsed light for microbial decontamination of solid foods: A review [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 30: 145-156.
- [25] TURTOI M, NICOLAU A. Intense light pulse treatment as alternative method for mould spores destruction on paper-polyethylene packaging material [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(1): 47-53.
- [26] HAUGHTON P N, LYNG J G, MORGAN D J, et al. Efficacy of high-intensity pulsed light for the microbiological decontamination of chicken, associated packaging, and contact surfaces [J]. *Foodborne Pathogens & Disease*, 2011, 8(1): 109.
- [27] MONTGOMERY N L, BANERJEE P. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in biofilms by pulsed ultraviolet light [J]. *Bmc Research Notes*, 2015, 8(1): 235.
- [28] GÓMEZ-LÓPEZ V M. Pulsed Light and Packaging [M]// SMITHERS G W. Reference Module in Food Science. Murcia: [s.n.], 2016: 463-470.
- [29] WANG Bei, MAHONEY N E, PAN Zhong-li, et al. Effectiveness of pulsed light treatment for degradation and detoxification of aflatoxin B₁ and B₂ in rough rice and rice bran [J]. *Food Control*, 2016, 59: 461-467.
- [30] CHUNG S Y, YANG W, KRISHNAMURTHY K. Effects of pulsed UV-light on peanut allergens in extracts and liquid peanut butter [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(5): C400-C404.
- [31] YANG W, CHUNG S-Y, AJAYI O, et al. Use of pulsed ultraviolet light to reduce the allergenic potency of soybean extracts [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2010, 6(3): 61-64.
- [32] YANG W, MWAKATAGE N R, GOODRICH-SCHNEIDER R, et al. Mitigation of major peanut allergens by pulsed ultraviolet light [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(7): 2 728-2 738.
- [33] YANG W, SHRIVER S K, CHUNG S-y, et al. In vitro gastric and intestinal digestions of pulsed light-treated shrimp extracts [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, 166(6): 1 409-1 422.
- [34] SHRIVER S, YANG W, CHUNG S-Y, et al. Pulsed ultraviolet light reduces immunoglobulin E binding to atlantic white shrimp (*Litopenaeus setiferus*) extract [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(7): 2 569.
- [35] LI Ying-qiu, CHEN Zheng-xing, MO Hai-zhen. Effects of pulsed electric fields on physicochemical properties of soybean protein isolates [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 40(7): 1 167-1 175.
- [36] WIHODO M, MORARU C I. Effect of Pulsed Light treatment on the functional properties of casein films [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 837-844.
- [37] MANZOCCO L. Photo-induced modification of food protein structure and functionality [J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(3): 346-356.
- [38] PANOZZO A, MANZOCCO L, LIPPE G, et al. Effect of pulsed light on structure and immunoreactivity of gluten [J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 366-372.
- [39] CHARLES F, VIDAL V, OLIVE F, et al. Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 18: 190-195.
- [40] JANVE B A, YANG W, MARSHALL M R, et al. Nonthermal inactivation of soy (*Glycine max* Sp.) lipoxygenase by pulsed ultraviolet light [J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(1): C8-C18.
- [41] CHOI M-S, CHEIGH C-I, JEONG E-A, et al. Nonthermal sterilization of *Listeria monocytogenes* in infant foods by intense pulsed-light treatment [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(4): 504-509.
- [42] GREEN S, BASARAN N, SWANSON B G. High-intensity light [M]// *Food Preservation Techniques*. Washington: Woodhead Publishing, 2003: 284-302.
- [43] IZQUIER A, G MEZ-L PEZ V M. Modeling the pulsed light inactivation of microorganisms naturally occurring on vegetable substrates [J]. *Food Microbiology*, 2011, 28(6): 1 170-1 174.

(上接第 122 页)

- [7] VOLKOW N D, WANG G J, TELANG F. Increased dopaminergic function in the thalamus is associated with excessive daytime sleepiness [J]. *Sleep Medicine*, 2018, 43(3): 25-30.
- [8] FORSTER C H. Sleep in insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2018, 63(1): 69-86.
- [9] 董晖, 刘丽秋, 时红娟, 等. 尿毒症脑病大鼠脑组织多巴胺、5-羟色胺含量变化及发病机制的探讨 [J]. *中国实验诊断学*, 2010, 14(1): 42-45.
- [10] 陈娟, 王一超, 崔蓉, 等. 小鼠脑组织中多巴胺和 5-羟色胺检测方法的优化试验研究 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2014, 24(14): 1 996-1 999.
- [11] 张梓毓, 徐德平. 五味子助眠成分的分离鉴定 [J]. *食品与机械*, 2018, 34(3): 162-165
- [12] 王静. 荷青花中皂苷类化合物的研究 I [D]. 吉林: 吉林大学, 2015: 25.
- [13] 王春梅, 李贺, 孙靖辉, 等. 北五味子多糖抗焦虑和镇静催眠作用 [J]. *食品科学*, 2015, 36(13): 239-242.
- [14] MONTI J M, MONTI D. The involvement of dopamine in the modulation of sleep and waking [J]. *Sleep Med Rev*, 2007, 11(2): 113-133.
- [15] VOLKOW N D, WANG G J, TELANG F. Increased dopaminergic function in the thalamus is associated with excessive daytime sleepiness [J]. *Sleep Medicine*, 2018, 43(3): 25-30.
- [16] Charlotte Helfrich-Förster. Sleep in Insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2018, 63(1): 69-86.