

## 专家论坛专栏

**编者按:**随着消费者对食品新鲜度和品质的需求逐渐提高,低温等离子体冷杀菌作为一种新兴的非热杀菌技术已经成为食品科技领域的研究热点。本期栏目特邀专家从低温等离子体冷杀菌技术的杀菌机理、开发应用、装备研制、杀菌效能评估等方面进行专业阐释,期待为延长生鲜食品贮藏期、提升产品品质提供新的有效途径。

(栏目策划:李 宁)

doi:10.3969/j.issn.2095-6002.2018.04.002

文章编号:2095-6002(2018)04-0008-09

引用格式:章建浩,黄明明,王佳媚,等.低温等离子体冷杀菌关键技术装备研究进展[J].食品科学技术学报,2018,36(4):8-16.



ZHANG Jianhao, HUANG Mingming, WANG Jiamei, et al. Development of sterilization technology and equipment of cold plasma cold sterilization[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018,36(4):8-16.

## 低温等离子体冷杀菌关键技术装备研究进展

章建浩<sup>1</sup>, 黄明明<sup>1</sup>, 王佳媚<sup>1,2</sup>, 赵见营<sup>1</sup>

(1.南京农业大学 江苏省肉类生产与加工质量安全控制协同创新中心/国家肉品质量安全控制工程技术研究中心/食品科学技术学院,江苏 南京 210095; 2.海南大学 食品学院,海南 海口 570228)

**摘要:**近年来低温等离子体技术作为新型高效非热源性杀菌技术,在食品杀菌领域受到越来越多关注。从低温等离子体冷杀菌技术的背景、杀菌机理、食品冷杀菌关键技术应用及技术装备国际研发等方面进行阐述,希望为低温等离子体在生鲜类及热敏性食品的大规模开发及应用方面提供研究参考。

**关键词:**低温等离子体;食品冷杀菌;杀菌机理;核心技术装备

**中图分类号:** TS205.9

**文献标志码:** A

食品冷杀菌保鲜包装技术的是国际食品科学技术的最新研究方向之一,低温等离子体冷杀菌技术(cold plasma cold sterilization, CPCS)是一种可用于食品贮藏保鲜的冷杀菌技术,利用食品周围介质产生光电子、离子和活性自由基与微生物表面接触导致细胞破坏从而达到杀菌目的。目前,对于生鲜肉、新鲜果蔬及鲜切蔬菜等热敏食品采用的冷藏、气调包装等杀菌保鲜包装技术,存在杀菌不彻底及产生二次污染的问题。为提高生鲜食品安全及延长货架保鲜期,开发高效冷杀菌保鲜包装技术已经成为

食品保鲜行业的必然趋势。

### 1 低温等离子体概述

等离子体(plasma)是一种由自由电子和带电离子为主要成分的物质形态,广泛存在于宇宙中,被称为是物质除固态、液态、气态之外的第四状态,也被称为“等离子态”;它可以由中性气体在高电压作用下激发诱导产生,如图1<sup>[1]</sup>,按照粒子(电子、离子、中性粒子)温度差异可以分为热等离子体“热平衡等离子体”和低温等离子体“非平衡等离子体”<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2018-06-06

基金项目:苏州高新区科技创新创业人才项目;苏州市科技计划项目(SNG2017074);江苏高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介:章建浩,男,教授,博士生导师,主要从事畜产品加工与质量控制等方面的研究。

早期的低温等离子体只有在低于大气压条件下才可以调控产生,随着等离子物理和工程学的深入研究使得低温等离子体可以在大气压条件下产生,使低温等离子体具有很好的商业开发价值<sup>[3]</sup>。

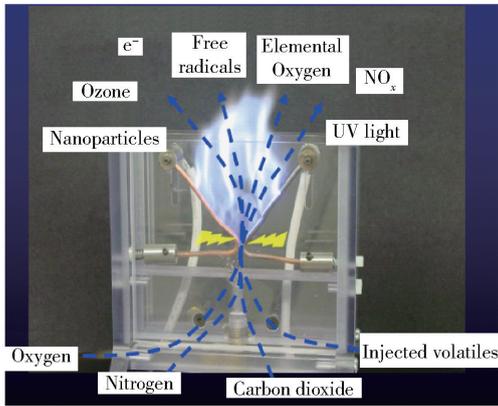


图1 低温等离子体形成机理

Fig. 1 Cold plasma generation-ionization processing

## 2 CPCS 杀菌机理

低温等离子体冷杀菌技术可以产生多种具有杀菌性能的物质,如活性氧(reactive oxygen species, ROS)、活性氮(reactive nitrogen species, RNS)、带电粒子、紫外光子等。不同的杀菌物质作用于细胞的不同部位造成细胞破坏或者生物体死亡,见图2<sup>[4]</sup>。CPCS的杀菌机理可从对细胞的蚀刻作用、细胞膜穿孔与静电干扰、大分子氧化三个方面解释。

### 2.1 蚀刻作用

蚀刻作用是指微生物在CPCS的作用下,某些物质发生化学键断裂,最终产生挥发性物质,如CO<sub>2</sub>

和C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>等。CPCS产生的紫外线和活性氧自由基被认为是发生蚀刻作用的主因。在波长200~300 nm范围的紫外线,还可以诱导遗传物质中胸腺嘧啶二聚物的形成从而影响DNA的复制<sup>[5-7]</sup>。但在大气压条件下,紫外线可以迅速与活性氧反应造成紫外线能量的下降( $< 50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ),使其在杀菌过程中杀菌效果的降低<sup>[6]</sup>。活性氧自由基如羟基自由基和氮氧自由基可以直接轰击生物体表面的细胞膜,并与环境中的氧分子共同作用,在细胞膜表面“缓慢燃烧”最终生成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O等挥发性物质<sup>[8-9]</sup>。

### 2.2 细胞膜穿孔与静电干扰

CPCS产生的高能电子作用于微生物表面,造成细胞膜局部腐蚀及磷脂等物质化学键的破坏。同时高能电子还可以与活性氧等物质协同作用,氧化细胞膜表面的蛋白质和脂质,细胞膜局部的变形造成细胞膜表面小孔形成<sup>[10-11]</sup>。CPCS产生的电子和离子在细胞膜表面富集,使微生物表面局部发生不规则性的异样曲率引发静电干扰,使微生物细胞膜的总电张力超过了膜的总抗拉强度,从而造成细胞膜表面小孔形成<sup>[12]</sup>。

### 2.3 细胞内的大分子氧化

CPCS产生的ROS、RNS可以与细胞大分子物质发生氧化反应。ROS的生物靶点包括DNA、蛋白质和脂类<sup>[13]</sup>。尤其是细胞膜表面的脂质是ROS的主要攻击靶点。ROS攻击细胞膜中多不饱和脂肪酸,引起脂质的链式反应<sup>[14]</sup>。

CPCS产生的氢过氧自由基、超氧阴离子自由基、单线态氧和臭氧都可以导致脂质的氧化,它们可以与不饱和脂肪酸发生脱氢反应,形成脂质自由基,

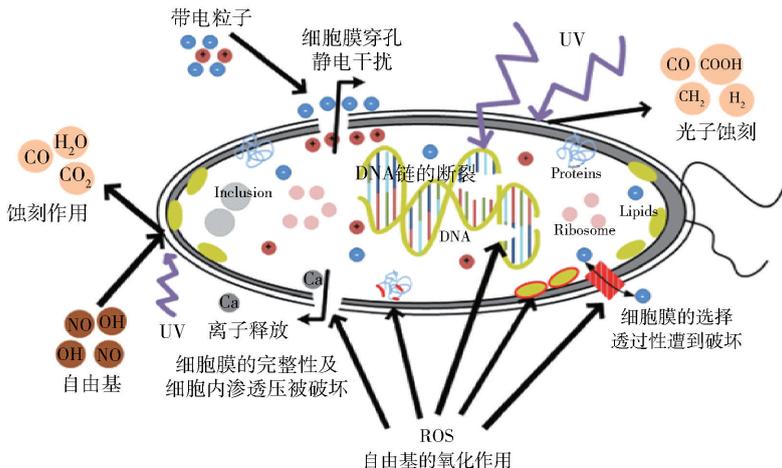


图2 低温等离子体杀菌示意图

Fig. 2 Schematic overview of cold plasma-related inactivation mechanisms

脂质自由基与氧分子反应生成脂质过氧化氢自由基,脂质过氧化氢自由基具有很强的氧化性,它们可以与周围不饱和脂肪酸发生氧化反应形成脂肪酸过氧化物,从而引发脂质的链式反应。细胞膜中脂质的链式反应造成细胞膜内旋性的改变,细胞膜的选择透过性破坏,细胞内外渗透压失衡,最终导致细胞的裂解<sup>[15]</sup>。

ROS还可以攻击蛋白质造成氨基酸侧链的修饰和蛋白质三级结构的改变。这些改变可能会导致蛋白质的功能变化,从而扰乱细胞新陈代谢及正常生理机能<sup>[16]</sup>。如某些蛋白质中的Fe-S簇对超氧化物自由基的攻击特别敏感,多数酶类的活性金属结合部位对ROS的攻击也特别敏感<sup>[17]</sup>。同时蛋白质的氧化导致氧化蛋白在体内的积累,当细胞体内存在过量的氧化蛋白时会抑制蛋白酶的活性<sup>[18]</sup>。

ROS的另一个反应目标是DNA,它与DNA的碱基和糖基反应,造成脱氧核糖核酸的多种类型的氧化损伤。羟基自由基可以与DNA中的糖基反应,造成DNA链的断裂,一般认为羟基自由基并不具备穿过细胞膜的性质,所以CPCS造成的DNA链断裂可能是由于过氧化氢与细胞内的金属离子发生Fenton反应,产生的羟基自由基直接作用临近的DNA造成的<sup>[19]</sup>。ROS的反应产物也可以与DNA反应。如脂质过氧化氢自由基可与DNA中的嘌呤反应造成嘌呤聚合物的产生<sup>[20]</sup>。同时脂质链式反应产生的某些醛类也可以与DNA反应造成碱基的烷基化和DNA链内或链间的交联<sup>[21]</sup>。

## 3 食品中CPCS技术研究进展

### 3.1 生鲜果蔬CPCS技术应用

CPCS具有作用时间短、杀菌温度低等优势。在过去几年中,等离子体在食品领域的应用已有大量研究。Critzler等<sup>[22]</sup>第一次发表了CPCS对鲜切果蔬的杀菌效果,在果蔬表面接种7 lg(CFU/g)的大肠杆菌O157、单核增生性李斯特菌和沙门氏菌,采用CPCS处理1min使各菌菌落数含量下降1.0、1.0、2.0 lg(CFU/g)。CPCS处理芒果得到类似的杀菌效果,经过1min处理,造成芒果中单核增生性李斯特菌和大肠杆菌O157菌落数含量下降2.5 lg(CFU/g)<sup>[23]</sup>。随着进一步的研究发现,CPCS处理不同微生物,会造成不同程度的影响。Pemi等<sup>[9]</sup>采用CPCS处理哈密瓜表面的酿酒酵母和葡萄糖醋酸菌

发现,经等离子体处理后酿酒酵母菌对CPCS具有更强的抗性。采用CPCS处理芒果和柠檬果皮上大肠杆菌、酿酒酵母菌和葡萄糖醋酸菌发现类似的结果,CPCS对酿酒酵母菌的杀菌效果显著低于对大肠杆菌和葡萄糖醋酸菌的杀菌效果。CPCS设备的不同也会带来对杀菌效果的影响,经滑动电弧等离子体设备处理果皮表面的沙门氏菌和大肠杆菌O157,分别造成2.93和3.4 lg(CFU/g)的下降<sup>[24]</sup>。研究发现,CPCS对抗逆性较强的菌膜中的微生物也有很好的杀灭效果,CPCS处理可显著降低生菜表面菌膜中气单胞菌菌落含量(5 lg(CFU/g))<sup>[25]</sup>。除新鲜果蔬外,CPCS还可以有效的杀灭果汁中的微生物。研究表明经过12、8和25s的CPCS处理,可以使鲜榨橙汁中的金黄色葡萄球菌、白色念珠菌和大肠杆菌下降5 lg(CFU/mL)<sup>[26]</sup>。CPCS还可以很好地杀灭果汁中的某些耐酸菌,如弗氏柠檬酸杆菌。经过480s处理可以使苹果汁中的弗氏柠檬酸杆菌含量下降5 lg(CFU/mL)。研究发现,CPCS处理对橙汁的色泽、pH值、抗氧化能力以及总酚含量并没有带来显著的影响,但过长的处理时间对果汁的色泽影响高于其他因素。研究发现短时间的CPCS处理可以增加石榴汁中的花青素含量,但过长的处理时间可能造成樱桃汁中花青素含量的下降<sup>[27]</sup>。CPCS对水分含量较低的干果和香辛料类食品也具有很好地杀菌作用。利用CPCS处理胡椒粉30min,可以使其中的沙门氏菌、枯草芽孢杆菌孢子以及萎缩芽孢杆菌孢子分别下降4.1、2.4、2.8 lg(CFU/g),并且对胡椒粉的色泽、风味无显著影响<sup>[28]</sup>。Bermúdez-Aguirre等<sup>[29]</sup>在用CPCS处理生菜、胡萝卜和西红柿时发现,微生物菌落浓度也是影响CPCS杀菌性能的因素之一,相比于高菌落浓度,在低菌落浓度时低温等离子体的杀菌效果更佳。

### 3.2 禽肉制品CPCS技术应用

在冷链运输或冷藏条件下,某些嗜冷菌还会生长繁殖造成肉制品的腐败变质。采用喷射型CPCS装置,以He+O<sub>2</sub>作为诱导气体可以有效地杀灭鸡肉表面的微生物,并且随着处理时间的增加杀菌效果逐步增强<sup>[30]</sup>。CPCS中诱导气体和样品本身的差异带来不同的杀菌效果。分别采用He和Ar为诱导气体处理猪肉,使猪肉表面菌落总数分别下降1.0 lg(CFU/g)和2.5 lg(CFU/g)。在相同的设备条件下处理牛肉,使牛肉表面菌落总数分别下降2.0和0.5 lg(CFU/g)<sup>[31]</sup>。采用介质阻挡放电(dielectric

barrier discharge, DBD)类型的CPCS分别处理猪肉和牛肉中的单核增生性李斯特菌,造成3.86和4.01 lg(CFU/g)的下降量( $p < 0.05$ ),但当此设备处理猪肉和牛肉中的大肠杆菌时,两者的杀菌效果差异不显著(分别下降3.41和3.30 lg(CFU/g)),这表明菌种的差异对CPCS的杀菌效果也具有一定的影响<sup>[32]</sup>。CPCS处理禽肉表皮上的空肠弯曲杆菌和沙门氏菌,当菌液浓度分别为2.0、3.0、4.0 lg(CFU/g)时,CPCS的杀菌效果分别为1.42、1.87、2.45 lg(CFU/g)和1.25、1.08、1.31 lg(CFU/g)。在此设备条件下处理鸡胸脯肉,其空肠弯曲杆菌和沙门氏菌分别下降了1.65、2.45、3.11 lg(CFU/g)和1.85、2.61、2.54 lg(CFU/g)<sup>[33]</sup>。这表明相对于粗糙的表面,CPCS对光滑的样品表面具有更好地杀菌效果,并且初始菌落总数越高,CPCS的杀菌效率越低。采用He为诱导气体的DBD型CPCS处理猪背最长肌,可使其中的单核增生性李斯特菌和大肠杆菌分别下降0.43、0.34 lg(CFU/g),采用He + O<sub>2</sub>为诱导气体的此设备同样处理以上两种菌,其下降量分别增加到0.59、0.55 lg(CFU/g)<sup>[34]</sup>。一般认为活性氧为CPCS的主要杀菌源,其杀菌作用显著高于其他等离子体物质,诱导气体中氧气含量对CPCS产生的活性氧量具有显著影响,在一定范围内高的氧气含量产生高的活性氧含量,因而其杀菌效果更强。研究发现CPCS应用于禽肉制品杀菌的同时,也会对肉品的品质带来某些影响。Kim等<sup>[35]</sup>发现,CPCS处理造成猪背最长肌pH值和亮度下降,但对其脂质氧化程度影响并不显著。Sara等<sup>[36]</sup>发现虽然CPCS处理会造成牛肉干中脂质氧化程度的提高,但并没有超过硫代巴比妥酸值的阈值(0.4 mg/kg)。

国内从事CPCS杀菌保鲜包装技术应用研究的单位相对较少。章建浩等<sup>[37]</sup>公开了一种生鲜肉高压电场等离子体协同纳米光催化杀菌保鲜方法,其用于气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)之后的生鲜肉的冷杀菌处理,可以延长生鲜肉的保鲜期。王佳媚<sup>[1]</sup>发现生鲜鸡肉用CPCS处理后在4℃条件下可保藏至少14 d,等离子体处理有效抑制了鸡肉中嗜温菌、嗜冷菌和假单胞菌的生长,同时有效维持了鸡肉的良好感官品质。本课题组对CPCS处理鲜牛肉的保鲜期进行了研究,发现CPCS可以有效延长牛肉货架期,并且与非CPCS处理组相比,贮藏期间牛肉的挥发性盐基氮含量和生物胺

含量显著低于对照组。

### 3.3 CPCS对食品中酶及毒素和农药降解的作用

CPCS对溶菌酶<sup>[38]</sup>、多酚氧化酶和过氧化物酶<sup>[39]</sup>等酶类都具有很强的至畸失活作用<sup>[40-42]</sup>。酶失活水平上的差异主要归因于酶自身、等离子体处理条件、使用的酶介质以及等离子体设备类型的差异。过氧化物酶(peroxidase, POD)和多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)是果蔬中普遍存在的重要酶。PPO催化酚类氧化为醌类,而这一催化反应往往会造成对食品不利的改变,如脂质和酚类的氧化带来对食品风味的改变和食品表面的褐变。Pankaj等<sup>[43]</sup>对番茄粗提取物中POD在低温等离子体作用下的快速失活进行了验证。研究发现,处理时间和电压对酶的失活水平有显著影响。Surowsky等<sup>[44]</sup>研究不同诱导气体下CPCS对POD及PPO活性的影响,通过圆二色谱法对比分析处理前后酶结构的差异,发现处理后酶结构中 $\alpha$ -螺旋的数量显著减少,从而造成酶活性的丧失。通过荧光光谱分析发现,经过CPCS处理的蛋白质中色氨酸结构发生变化,进一步证实了低温等离子体对蛋白质的结构修饰。Ehlbeck等<sup>[45]</sup>用微波型CPCS处理鲜切苹果和马铃薯10 min,发现处理后鲜切苹果和马铃薯中的PPO活性下降了62%和77%,POD活性下降了65%和89%。一般认为PPO活性的下降导致植物新陈代谢的降低,从而达到抑制果蔬表面褐变的目的。Tappi等<sup>[46]</sup>采用DBD型CPCS处理苹果后发现,鲜切苹果中果胶酶活性随着处理时间的增加而逐步下降,从而可以达到延缓果蔬成熟变软的作用。研究发现CPCS除了可以直接作用于酶外,还可以通过间接作用达到抑制酶活的目的,Ali等<sup>[47]</sup>研究发现,CPCS处理丁子香酚衍生物,其反应产物可以作用于酪氨酸酶造成酶二级结构的变化。CPCS对酶除了抑制活性外,在特殊情况下还具有增强酶活的作用,Li等<sup>[48]</sup>发现CPCS处理增加了脂肪酶的活性。Chen等<sup>[49]</sup>发现经过低温等离子体处理的糙米其发芽率增加了162%,这可能是通过增加糙米中 $\alpha$ -淀粉酶活性引起的。Puac等<sup>[50]</sup>研究发现CPCS处理会导致胡萝卜体内超氧化物歧化酶和过氧化物酶酶活性的增加,超氧化物歧化酶可以降解超氧阴离子为过氧化氢和氧气,过氧化物酶进一步降解过氧化氢为水和氧气。

天然和合成毒素在我们的生态环境中无所不在,如胰蛋白酶抑制剂、皂甙、凝集素等有毒化合物

可能存在于各种食品中。其他毒素,如杀虫剂、内分泌干扰剂、霉菌毒素等的存在引起了消费者对食品安全的关注。目前,应用于食品领域降解有毒化合物的非热技术非常有限。CPCS 具有降解食品中霉菌毒素的能力<sup>[51-52]</sup>。目前研究人员通过优化 CPCS 工艺参数,以达到提高霉菌毒素降解效率的目的,并深入研究 CPCS 对霉菌毒素的降解机理<sup>[51,53]</sup>。虽然已将 CPCS 作为一种可行的替代方法呈现,但还需要进一步研究,以了解 CPCS 产生的不同活性物质与霉菌毒素的反应机制以及毒性降解通路。杀虫剂是一种常用的农作物试剂,它大大降低了昆虫造成的农作物损失,从而有效提高了农产品的产量。但是,杀虫剂在杀虫的同时,其在果蔬中的残留对人类也是有害的,因此必须严格管制所有食品中的农药残留。CPCS 已被证实具有降解杀虫剂的功能<sup>[54-55]</sup>。CPCS 对农药的降解主要归因于其产生的多种活性物质,如离子 ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{N}_2^+$ )、分子 ( $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 和自由基 ( $\text{O}\cdot$ ,  $\text{OH}\cdot$ ,  $\text{NO}\cdot$ )。

## 4 等离子体活性水的研究进展

CPCS 产生的活性自由基可以被水吸收,在水中产生诸如 ROS、RNS 以及  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$  等物质,极大地提高了水的氧化还原电位,被定义为等离子体活性水 (plasma active water, PAW)。PAW 目前已经被证明对不同的食源性致病菌和生物膜菌等均有较好的清除作用<sup>[56-57]</sup>。Ma 等<sup>[58]</sup>研究 PAW 对草莓表面微生物的杀菌效果,研究发现经过 20min 处理,造成草莓菌落总数下降 3.5 lg(CFU/g)。经过 0~4 d 的贮藏,PAW 处理并未对草莓的 *L* 值、*a* 值和 *b* 值造成显著影响,在贮藏期第 4 天,*a* 值升高但与空白对照组相比差异不显著。有研究表明,相比 CPCS 直接处理,PAW 的杀菌效果更强,Fernández 等<sup>[59]</sup>采用 CPCS 直接处理草莓仅造成 1.72 lg(CFU/g) 的下降,而 PAW 的杀菌效果显著高于 CPCS 直接处理。这可能是由于草莓表面的凹槽和小孔限制了 CPCS 的杀菌范围,而 PAW 处理采用完全浸泡的方式,从而增大了杀菌物质与微生物的接触面积达到更好的杀菌效果。随后研究人员研究了活性水对中国小红莓的保鲜作用,发现 PAW 处理能显著延长小红莓的保鲜期<sup>[60]</sup>,同时在 7d 的贮藏期内,PAW 处理组和空白对照组的颜色差异不显著。Alshraiedeh 等<sup>[61]</sup>研究海藻酸钠 PAW 对不同致病菌的抑制作

用。结果表明,海藻酸钠 PAW 溶液对大肠杆菌有较强的致死作用。

## 5 CPCS 核心技术装备研发进展

### 5.1 CPCS 核心技术装备

CPCS 的激发系统结构有多种形式,系统的结构和材料性质对其形成等离子体具有显著的影响。介质阻挡放电系统 (dielectric barrier discharge, DBD) 被认为是最有效的等离子体冷杀菌激发系统,其组成结构示意图见图 3<sup>[62]</sup>。DBD 系统激发装置的电极材料和介质阻挡绝缘板对杀菌效能特性具有决定作用。

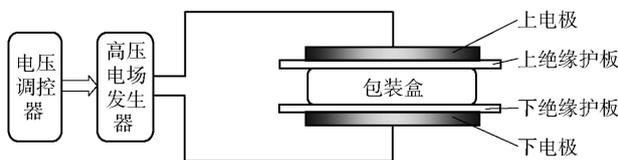


图 3 高压电场低温等离子体激发系统

Fig. 3 Cold plasma excitation system

目前,国际上研究使用的 DBD 型 CPCS 都是以简单组装为主,也有工厂化杀菌的 DBD 等离子体激发系统设备的研究报道。欧盟于 2016 年开启了一项 SAFE-BAG 项目,旨在结合多种 DBD 类型的等离子体通过间接处理的方式作用于食品流水线。Misra 等<sup>[63]</sup>研发了一种隧道式等离子体激发装置,如图 4。这是利用几个并行独立的 DBD 系统共同组建成一个隧道模式,等离子体在隧道的洞腔内产生,这种设计具有设计简单,杀菌全面的优势,并且可以根据食品材料的不同随意调节流水线速度。

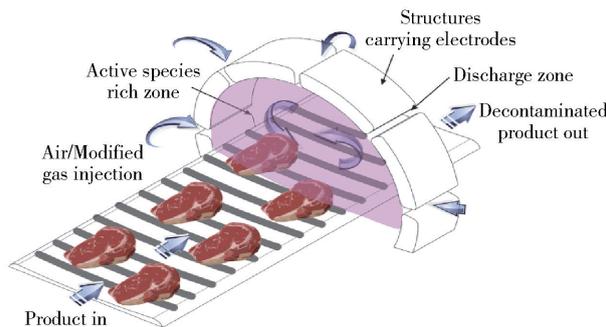


图 4 隧道式 CPCS 流水线装置

Fig. 4 CPCS of tunnel like structure

南京农业大学国家肉品质量控制工程技术研究中心食品保鲜包装研究所从 2012 年开始与美国农业部-农业研究服务局的肉类研究中心 (USDA-ARS, QSARU) 合作进行 CPCS 关键技术研究,2015

年借助江苏省国际合作和农业创新基金项目资助,在国内建立了第一套 CPCS 实验装置,见图 5,启动了我国低温等离子体冷杀菌关键技术和装备的系统研究开发,包括 CPCS 杀菌动力学分析、杀菌作用机理和调控机制及生鲜调理肉冷杀菌保鲜包装技术等方面的系统研究。在此装备研究基础上,目前 CPCS 自动化生产线也正在设计研发过程中。



图 5 CPCS 实验设备

Fig. 5 CPCS equipment

## 5.2 CPCS-MAP 冷杀菌保鲜包装关键技术和自动化生产线研发

与目前广泛采用的热源杀菌技术比较,CPCS 与气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)保鲜技术完美结合。产生杀菌作用的等离子体来源于包装内部气体,对包装产品进行杀菌处理不会产生二次污染、不会产生化学残留,安全性高;尽管使用的电压非常高,但电流微小、杀菌处理过程很短,不会产生热量、没有温升,且能耗低、操作简便。因此,CPCS-MAP 技术是食品冷杀菌保鲜包装技术的重要突破;为此,笔者课题组通过产学研紧密合作,正在致力于 CPCS-MAP 冷杀菌保鲜包装自动化生产线的研发。

## 6 CPCS 关键技术装备研究展望

在过去 5 年中,CPCS 在食品新技术研究领域引起了很大的关注,目前研究显示 CPCS 在食品冷杀菌保鲜包装应用中还存在某些局限性。由于低温等离子体的渗透深度低,造成食品内部的微生物难以杀灭;细菌迁移到食品组织和粗糙食物表面形成的难以杀灭的生物膜也为 CPCS 提出了一个提高杀菌效能的问题;某些食品成分,如抗氧化剂和其他营养素可能会影响 CPCS 杀菌效率,这些问题表明未来使用 CPCS 技术时需要某些特定产品进行优化处理。此外,CPCS 对食品品质的影

响研究相对较少,除了对食品 pH 值、脂肪氧化、感官色泽等因素的影响外,还需要研究其对食品中微生物、酶等的影响机理和调控机制。这是食品科学一个新的研究领域,需要科研人员广泛深入的研究探索。

生鲜调理食品符合现代食品“特色美味、方便营养”的消费理念,必定成为今后食品消费的主流,冷杀菌保鲜包装技术是制约其发展的瓶颈。为此,生鲜调理食品安全品质控制和冷杀菌保鲜包装关键技术是“十二五”国家科技支撑计划项目的重点研发领域,也是“十三五”国家重大研发项目的热点主题。由于 CPCS-MAP 生产线具备智能高效自动化、冷杀菌无残留、低碳绿色等优势,因此它特别适用于对生鲜类及热敏性食品(如生鲜畜禽鱼类肉制品及调理产品、新鲜果蔬及鲜切菜等)的大规模生产包装,具有关键的技术突破、巨大的开发空间和良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王佳媚. 纳米  $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  等光催化协同高压电场等离子体靶向抑菌机理及鸡肉保鲜包装研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
- [2] BOGAERTS A, NEYTS E, GIJBELS R, et al. Gas discharge plasmas and their applications[J]. *Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy*, 2002, 57(4):609 - 658.
- [3] SEGAT A, MISRA N N, CULLEN P J, et al. Effect of atmospheric pressure cold plasma (ACP) on activity and structure of alkaline phosphatase[J]. *Food & Bioprocess Processing*, 2016, 98:181 - 188.
- [4] CLARK J P. *Non-thermal processing*[M]. New York: Springer, 2009:129 - 145.
- [5] BOUDAM M K, MOISAN M, SAOUDI B, et al. Bacterial spore inactivation by atmospheric-pressure plasmas in the presence or absence of UV photons as obtained with the same gas mixture[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2006, 39(39):3494 - 3507.
- [6] MOUNIR L. Low temperature plasma-based sterilization: overview and state-of-the-art[J]. *Plasma Processes & Polymers*, 2010, 2(5):391 - 400.
- [7] MURANYI P, WUNDERLICH J, HEISE M. Influence of relative gas humidity on the inactivation efficiency of a low temperature gas plasma[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 104(6):1659 - 1666.
- [8] MOREAU M, ORANGE N, FEUILLOLEY M G. Non-

- thermal plasma technologies: new tools for bio-decontamination[J]. *Biotechnology Advances*, 2008, 26(6):610–617.
- [9] PERNI S, LIU D W, SHAMA G, et al. Cold atmospheric plasma decontamination of the pericarps of fruit [J]. *Journal of Food Protection*, 2008, 71(2):302–308.
- [10] MOISAN M, BARBEAU J, CREVIER M C, et al. Plasma sterilization: methods and mechanisms[J]. *Pure & Applied Chemistry*, 2002, 74(3):349–358.
- [11] GRZEGORZEWSKI F, ROHN S, KROH L W, et al. Surface morphology and chemical composition of lamb's lettuce (*Valerianella locusta*) after exposure to a low-pressure oxygen plasma[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(4):1145–1152.
- [12] FRIDMAN G, BROOKS A D, BALASUBRAMANIAN M, et al. Comparison of direct and indirect effects of non-thermal atmospheric-pressure plasma on bacteria [J]. *Plasma Processes & Polymers*, 2010, 4(4):370–375.
- [13] MEAD J F. Free radical mechanisms of lipid damage and consequences for cellular membranes [J]. *Free Radicals in Biology*, 1976(2):51–68.
- [14] HALLIWELL B, GUTTERIDGE J M, CROSS C E. Free radicals, antioxidants, and human disease: where are we now? [J]. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 1992, 119(6):598–620.
- [15] CHEN P T, JEIFU S, CHAO Y P, et al. Construction of chromosomally located T7 expression system for production of heterologous secreted proteins in *Bacillus subtilis* [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2010, 58(9):5392–5399.
- [16] BABIOR B M. The respiratory burst of phagocytes [J]. *Journal of Clinical Investigation*, 1984, 73(3):599–601.
- [17] SERES T, KNICKELBEIN R G, WARSHAW J B, et al. The phagocytosis-associated respiratory burst in human monocytes is associated with increased uptake of glutathione[J]. *Journal of Immunology*, 2000, 165(6):3333–3340.
- [18] GAUNT L F, BEGGS C B, GEORGHIOU G E. Bactericidal action of the reactive species produced by gas-discharge nonthermal plasma at atmospheric pressure: a review[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(4):1257–1269.
- [19] CLAPP P A, DAVIES M J, FRENCH M S, et al. The bactericidal action of peroxides: an E. P. R. spin-trapping study. [J]. *Free Radical Research*, 1994, 21(3):147–167.
- [20] HENLE E S, LINN S. Formation, prevention, and repair of DNA damage by iron/hydrogen peroxide [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1997, 272(31):19095–19098.
- [21] MARNETT L J. Oxyradicals and DNA damage [J]. *Carcinogenesis*, 2000, 21(3):361–370.
- [22] CRITZER F J, KELLY-WINTENBERG K, SOUTH S L, et al. Atmospheric plasma inactivation of foodborne pathogens on fresh produce surfaces [J]. *Journal of Food Protection*, 2007, 70(10):2290–2296.
- [23] DAN S. Alkylation of DNA and hemoglobin in the mouse following exposure to ethene and ethene oxide [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 1983, 45(2):139–151.
- [24] YU H, PERNI S, SHI J, et al. Effects of cell surface loading and phase of growth in cold atmospheric gas plasma inactivation of *Escherichia coli* K12[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, 101(6):1323–1330.
- [25] NIEMIRA B. Cold plasma inactivates *Salmonella Stanley* and *Escherichia coli* O157: H7 inoculated on golden delicious apples[J]. *Journal of Food Protection*, 2008, 71(7):1357–1365.
- [26] JAHID I K, HAN N, HA S D. Inactivation kinetics of cold oxygen plasma depend on incubation conditions of *Aeromonas hydrophila* biofilm on lettuce[J]. *Food Research International*, 2014, 55(2):181–189.
- [27] LI H, WANG L, LI G, et al. Manipulation of lipase activity by the helium radio-frequency, atmospheric-pressure glow discharge plasma jet[J]. *Plasma Processes & Polymers*, 2011, 8(3):224–229.
- [28] LEINS M, KOPECKI J, GAISER S, et al. Microwave plasmas at atmospheric pressure [J]. *Contributions to Plasma Physics*, 2014, 54(1):14–26.
- [29] BERMÚDEZ-AGUIRRE D, WEMLINGER E, PEDROW P, et al. Effect of atmospheric pressure cold plasma (APCP) on the inactivation of *Escherichia coli*, in fresh produce[J]. *Food Control*, 2013, 34(1):149–157.
- [30] KIM B, YUN H, JUNG S, et al. Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions [J]. *Food Microbiology*, 2011, 28(1):9–13.
- [31] DIRKS B P, DOBRYNIN D, FRIDMAN G, et al. Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica* [J]. *Journal of Food Protection*, 2012, 75(1):22–28.

- [32] SONG H P, KIM B, CHOE J H, et al. Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes* [J]. *Food Microbiology*, 2009, 26(4):432–436.
- [33] PATIL S, MOISEEV T, MISRA N N, et al. Influence of high voltage atmospheric cold plasma process parameters and role of relative humidity on inactivation of *Bacillus atrophaeus* spores inside a sealed package[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2014, 88(3):162–169.
- [34] KIM J E, LEE D U, MIN S C. Microbial decontamination of red pepper powder by cold plasma[J]. *Food Microbiology*, 2014, 38(38):128–136.
- [35] KIM H J, YONG H I, PARK S, et al. Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin[J]. *Current Applied Physics*, 2013, 13(7):1420–1425.
- [36] SARA K R, FLEMMING H, FRANK L. Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: Inactivation of *Listeria innocua* and changes in product quality[J]. *Food Microbiology*, 2012, 30:233–238.
- [37] 章建浩, 王佳媚, 庄宏. 生鲜肉高压电场等离子体协同纳米光催化杀菌保鲜方法; CN/2014/104126641 B [P]. 2014–11–05.
- [38] HUA H C, CHANG H C, YU K C, et al. An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: low-pressure plasma [J]. *Food Chemistry*, 2016, 191:120–127.
- [39] MAEDA K, TOYOKAWA Y, SHIMIZU N, et al. Inactivation of *Salmonella*, by nitrogen gas plasma generated by a static induction thyristor as a pulsed power supply [J]. *Food Control*, 2015, 52:54–59.
- [40] TSUTSUMI T, ISHIKAWA K, TAKEDA K, et al. Real-time temperature monitoring of Si substrate during plasma processing and its heat-flux analysis [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(1s):01AB04.
- [41] TAKENAKA K, CHO K, SETSUHARA Y, et al. Investigations on plasma-biomolecules interactions as fundamental process for plasma medicine [J]. *Journal of Physics*, 2013, 441(1):012001.
- [42] TEN B L, PFOHL K, AVRAMIDIS G, et al. Plasma-based degradation of mycotoxins produced by fusarium, aspergillus and alternaria species [J]. *Toxins*, 2017, 9(3):1–12.
- [43] PANKAJ S K, MISRA N N, CULLEN P J. Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 19(4):153–157.
- [44] SUROWSKY B, FISCHER A, SCHLUETER O, et al. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 19(4):146–152.
- [45] EHLBECK J, BUBLER S, SCHLÜTER O K. Pre-drying treatment of plant related tissues using plasma processed air: impact on enzyme activity and quality attributes of cut apple and potato [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 40:78–86.
- [46] TAPPI S, BERARDINELLI A, RAGNI L, et al. Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 21(4):114–122.
- [47] ALI A, ASHRAF Z, KUMAR N, et al. Influence of plasma-activated compounds on melanogenesis and tyrosinase activity [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:1–20.
- [48] LI Y, KOJTARI A, FRIEDMAN G, et al. Decomposition of L-valine under nonthermal dielectric barrier discharge plasma [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2014, 118(6):1612–1620.
- [49] CHEN J, BAI Y, MU H, et al. Reduction of dichlorvos and omethoate residues by O<sub>2</sub> plasma treatment [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(14):6238–6245.
- [50] PUAC N, ZIVKOVIC S, SELAKOVIC N, et al. Long and short term effects of plasma treatment on meristematic plant cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(21):257–257.
- [51] ILELEJI K, STROSHINE R L, KEENER K, et al. Reduction of aflatoxin in corn by high voltage atmospheric cold plasma [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(6):1042–1052.
- [52] WANG S Q, HUANG G Q, LI Y P, et al. Degradation of aflatoxin B1 by low-temperature radio frequency plasma and degradation product elucidation [J]. *European Food Research & Technology*, 2015, 241(1):103–113.
- [53] SICILIANO I, SPADARO D, PRELLE A, et al. Use of cold atmospheric plasma to detoxify hazelnuts from aflatoxins [J]. *Toxins*, 2016, 8(5):1–12.
- [54] MISRA N N, PANKAJ S K, TONY W, et al. In-package nonthermal plasma degradation of pesticides on fresh produce [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 271

- (2):33–40.
- [55] SARANGAPANI C, OTOOLE G, CULLEN P J, et al. Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017(1):55–60.
- [56] MISRA N N, KEENER K M, BOURKE P, et al. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2014, 118(2):177–182.
- [57] MA R, YU S, TIAN Y, et al. Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in post-harvest chinese bayberries [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2016, 9(11):1825–1834.
- [58] MA R, WANG G, TIAN Y, et al. Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 300:643–651.
- [59] FERNÁNDEZ A, NORIEGA E, THOMPSON A. Inactivation of *Salmonella enterica serovar Typhimurium* on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology [J]. *Food Microbiology*, 2013, 33(1):24–29.
- [60] BENSTAALI B, MOUSSA D, ADDOU A, et al. Plasma treatment of aqueous solutes: some chemical properties of a gliding arc in humid air [J]. *European Physical Journal*, 1998, 4(2):171–179.
- [61] ALSHRAIEDEH N H, ALKAWAREEK M Y, GORMAN S P, et al. Atmospheric pressure, nonthermal plasma inactivation of MS2 bacteriophage: effect of oxygen concentration on virucidal activity [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2013, 115(6):1420–1426.
- [62] 王佳媚, 黄明明, 乔维维, 等. 冷源等离子体冷杀菌技术及其在食品中的应用研究 [J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(5):55–62.
- WANG J M, HUANG M M, QIAO W W, et al. Disinfection technology of cold plasma and its application in food [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(5):55–62.
- [63] MISRA N N, JO C. Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 64:74–86.

## Development of Sterilization Technology and Equipment of Cold Plasma Cold Sterilization

ZHANG Jianhao<sup>1</sup>, HUANG Mingming<sup>1</sup>, WANG Jiamei<sup>1,2</sup>, ZHAO Jianying<sup>1</sup>

(1. *Jiangsu Collaborative Innovation Center of Meat Production and Processing/  
National Center of Meat Quality and Safety Control/*

*College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*

*2. College of Food Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China)*

**Abstract:** Cold plasma as an effective non-thermal technology for decontamination has been received more and more attention in recent years. This review provides a critical summary of studies of development background and the sterilization mechanisms of cold plasma, while the decontamination applications of cold plasma in food industry have been also involved. In addition, the development of machinery of cold plasma technology in food industry and future research suggestions have been provided. The main purpose of this review is to provide information of cold plasma sterilization technology for further research.

**Keywords:** cold plasma; food cold sterilization; sterilization mechanism; core technology and equipment

(责任编辑:李 宁)