

高压电场杀菌技术研究进展

邝金艳, 林颖, 王丽, 李宗军*
(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128)

摘要: 高压电场杀菌技术具有良好的应用前景, 已在食品、卫生等领域受到越来越多的关注。本文介绍2种常见的高压电场杀菌技术的设备、杀菌机理和影响杀菌的相关因素, 综述高压电场杀菌技术在不同电场条件下的杀菌效果和高压电场技术在食品(肉类和水产品)杀菌中的应用, 并探讨高压电场技术的发展和高压电场技术联用其他杀菌技术的杀菌效果, 旨在为高压电场技术在食品杀菌领域中的应用提供参考。

关键词: 高压脉冲电场; 高压静电场; 杀菌机理; 食品杀菌

Research Progress in High-Voltage Electric Field Sterilization Technology

KUANG Jinyan, LIN Ying, WANG Li, LI Zongjun*
(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: High-voltage electric field sterilization technology has good application prospects and has received increasing attention in fields such as food and hygiene. In order to provide a reference for the application of high-voltage electric field in food sterilization, this article introduces readers to the equipment and working mechanisms of two common high-voltage electric field sterilization technologies and the factors influencing the sterilization efficiency, and it reviews the efficiency of high-voltage electric field sterilization technology under different electric field conditions and the application of high-voltage electric field technology in food (meat and aquatic products) sterilization. Furthermore, this review discusses future prospects for high-voltage electric field technology and the efficiency of high-voltage electric field technology combined with other sterilization technologies.

Keywords: pulsed electric field; high-voltage electrostatic field; sterilization mechanism; food sterilization

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230711-068

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123(2023)09-0052-08

引文格式:

邝金艳, 林颖, 王丽, 等. 高压电场杀菌技术研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(9): 52-59. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230711-068. <http://www.rlyj.net.cn>

KUANG Jinyan, LIN Ying, WANG Li, et al. Research progress in high-voltage electric field sterilization technology[J]. Meat Research, 2023, 37(9): 52-59. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230711-068. <http://www.rlyj.net.cn>

原料采购、加工、贮藏等过程中存在的微生物污染问题是威胁食品安全和消费者健康的重要因素。微生物因素潜在的食品安全隐患不容忽视, 因此杀菌处理是食品工业中必不可少的工序。杀菌技术不仅能延长食品贮藏时间, 还能降低致病菌污染的风险^[1-3]。随着经济水平的提高, 消费者对食品品质和食品安全提出了更高的要求。传统的食品热杀菌技术对食品功能成分, 如花青素和多酚等, 以及食品感官品质破坏较大, 不能满足现

代食品加工的需求^[4]。传统的热杀菌技术, 如巴氏杀菌技术、高温杀菌技术、超高温瞬时杀菌技术等是通过加热对食品进行杀菌, 杀菌效果好、适用广泛, 但食品颜色、口味、气味等发生改变, 营养成分损失, 食用价值降低^[5]。高压电场技术杀菌效果好、杀菌时间较短、能耗小、环保无污染, 且能最大限度地保持食品原有的营养成分和感官性状, 为传统的热杀菌提供了新颖的替代方案, 在实际生产过程中具有广阔的应用前景^[6-7]。目前,

收稿日期: 2023-07-11

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2022NK2035)

第一作者简介: 邝金艳(1999—)(ORCID: 0009-0007-6011-8018), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品生物技术。

E-mail: 1186647408@qq.com

*通信作者简介: 李宗军(1967—)(ORCID: 0000-0001-7495-3822), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品生物技术。

E-mail: hnlizongjun@163.com

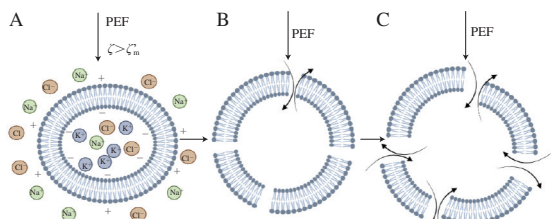
国内外研究人员将电场技术应用于不同的食品领域，如杀菌^[8-10]、冷冻解冻^[11-12]、干燥^[13]、有效成分提取^[14]和降低有害物质积累^[15]等。本文重点阐述高压静电场（high voltage electrostatic field, HVEF）和高压电脉冲场（pulsed electric field, PEF）的装置特点、杀菌机理、杀菌效果影响因素及其在食品杀菌中的应用研究进展，并联合其他杀菌技术进行展开介绍。

1 高压电场杀菌技术简介

1.1 高压电场杀菌机理

1.1.1 PEF杀菌机理

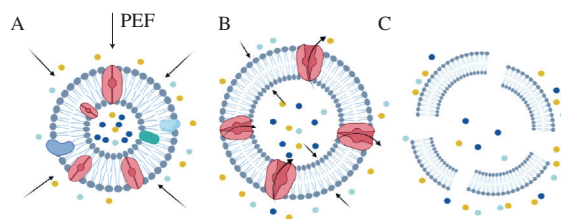
非热加工技术中，PEF是研究最广泛、最有发展前景的工艺之一。目前，人们普遍认为PEF的灭活机理主要集中在电崩解理论^[16-17]和电穿孔理论^[18-20]。然而现有研究认为，电崩解机理更能够说明脉冲电场灭菌的原理和过程^[21]。有研究者将细胞膜视为电容，细胞膜内外存在电势差。电崩解理论是指在外加电场作用下，细胞膜两侧的异性电荷和电解质在细胞膜内外聚集，将会对细胞膜形成挤压力，使膜的厚度减小。当跨膜电压超过某个临界值时，细胞膜就会开始崩解，形成崩解孔。崩解孔的面积占细胞膜的总面积较小时，细胞膜的崩解是可逆的^[22]。如果细胞膜的崩解孔面积过大且长时间处于电场作用下，就会导致其产生不可逆崩解，会导致细胞膜内物质与外部物质的大量、自由交换，最终细胞死亡^[23]，如图1所示。微生物细胞膜主要是由蛋白质和磷脂双分子层组成，细胞结构稳定。电穿孔理论是在电场的作用下，细胞膜磷脂双分子层和蛋白质通道发生改变。电场扩大细胞膜上原有的膜孔并产生新的疏水性膜孔，最后变成稳定的亲水性膜孔，细胞膜孔可以导电并产生局部焦耳热，磷脂双分子层从凝胶结构转变为液晶结构，细胞膜通透性增加；电场作用后，电压敏感的蛋白质通道打开，细菌细胞膜上形成小孔，使得细胞膜通透性增加，外部小分子物质通过小孔进入细胞内，使得细菌体积膨胀，细胞膜破裂，细菌内容物外泄，最终导致细菌损伤或死亡^[24]，如图2所示。



A. PEF作用下，膜被挤压（ ζ 为电场作用后电位， ζ_m 为细胞膜电位差）；B. 可逆的崩解孔；C. 不可逆孔，细胞死亡。

图1 电崩解理论示意图^[17]

Fig. 1 Schematic diagram of electric disintegration theory^[17]



A. 电场作用下，细胞膜结构发生变化；B. 通透性改变，水和小分子物质通过小孔流入细胞内；C. 细胞膨胀，细胞膜破裂，导致细胞溶解。

图2 电穿孔理论示意图^[24]

Fig. 2 Schematic diagram of electroporation theory^[24]

1.1.2 HVEF杀菌机理

HVEF作为一种新型的非热加工技术，在食品工业中应用越来越广泛，HVEF已被证实是一种有效的杀菌方法^[25]，并能保持食品的物理和感官特性^[26-27]。HVEF杀菌机理有以下三方面：1）HVEF也具有类似于PEF杀菌的电崩解和电穿孔理论；2）芒刺-板型和线-板型HVEF中存在极强的电晕放电现象，在强电场作用下，空气中存在的少量带电粒子与中性分子或原子不断发生碰撞，其中电子与氧分子碰撞产生的臭氧对食品表面微生物具有杀灭作用。臭氧导致细胞膜结构和成分发生变化，引起新陈代谢紊乱，细胞膜通透性变大，内环境稳态被破坏，最终导致细胞溶解、死亡^[28-29]；3）电离产生的活性氧具有很强的氧化性，对杀菌至关重要，如过氧化氢能使微生物细胞膜氧化破裂，失去物质交换能力，使得微生物死亡。羟自由基是一种极强的氧化剂，能迅速氧化与之相邻的核酸、糖以及细胞的多种组分。超氧阴离子自由基可以破坏微生物的细胞膜、细胞核、蛋白质和碳水化合物等，最终导致细菌突变、老化和死亡^[30-31]。

1.2 影响高压电场杀菌的因素

1.2.1 PEF杀菌效果的影响因素

PEF技术对于微生物的灭活效果影响因素包括PEF的处理参数、被处理介质条件及微生物自身的特性^[24,32]。PEF处理参数包括脉冲电场波形、电场强度、脉冲处理时间和脉冲频率等因素。介质条件也是PEF灭菌的重要影响因素，如被处理介质的状态、电导率、离子强度、温度、pH值和水分活度等。PEF杀菌的影响因素有很多，微生物种类、生长阶段和微生物大小等都对PEF杀菌效果有影响^[33]。PEF技术对食品杀菌效果的影响总结见表1。

表1 影响PEF杀菌效果的因素

Table 1 Factors influencing the sterilization efficiency of PEF

影响因素	杀菌效果影响	参考文献	
PEF处理参数	脉冲电场波形	方波输送的能量大部分超过了跨膜电位所需的阈值，峰值电压持续时间长，杀菌效果较好	[34-36]
	电场强度	当电场强度超过微生物跨膜电压某个临界值，灭活效果随场强的增加而增强	[37-38]
	脉冲处理时间	微生物杀菌效果随脉冲处理时间延长而增强	[37-38]
	处理室	处理室的结构影响杀菌效果	[39]
	脉冲占比	随着脉冲占比的增大（0%~48%），电场实际处理时间延长，杀菌效果越好	[37]
	脉冲频率	脉冲频率改变影响脉宽和脉冲个数变化，脉冲频率的杀菌效果影响因素复杂	[37]

续表1

影响因素	杀菌效果影响	参考文献
微生物特性	微生物种类 微生物的种类决定了细胞壁和细胞膜的组成结构不同；细菌孢子比细菌、酵母更有耐受性	[40-42]
	生长阶段 对数生长阶段微生物的细胞膜脂肪酸流动性大，对PEF更敏感	[43-44]
	细胞大小 跨膜电位大小与细胞的半径成正比，细胞大容易被穿透	[32,45]
	介质状态 固体食品含有丰富的离子、蛋白质和脂类，食品电导率增加，液体食品中微生物比固体食品中微生物易灭活	[46]
介质条件	离子强度 离子强度关系到膜穿孔率和微生物细胞膜的损害率；离子强度增加，电导率增加，微生物灭活效果降低	[46]
	电导率 电导率决定了放电端负载的阻值，低电导率杀菌效果强	[32]
	温度 温度越高，微生物细胞膜流动性越大，提高电场杀菌效果	[47-48]
	pH 样品的离子强度、电导率的之间存在差异；pH值本身也对微生物和酶有直接影响；介质pH值下降，杀菌效果提高	[32,49]
水分活度	低水分活度下，细胞收缩，细胞膜增厚，灭菌率降低	[50]

1.2.2 HVEF杀菌效果的影响因素

研究发现，影响HVEF杀菌效果的因素是电场设备、处理对象的特性和微生物的生理特性^[51]。电场设备中HVEF的电极板类型、电场强度和处理时间对杀菌效果有很大影响，芒刺-板型电极板尖端的气体因电晕放电被电离成高能离子和电子，芒刺-板型的灭菌效果明显优于其他板型^[52-53]。处理对象因素，如温度、电导率和pH值等都对微生物的灭活起着重要作用。食品种类、处理温度、微生物数量和生长阶段等也是影响杀菌效果的重要因素。HVEF技术对食品灭菌效果的因素总结见表2。

表2 影响HVEF杀菌效果的因素
Table 2 Factors influencing the sterilization efficiency of HVEF

影响因素	杀菌效果影响	参考文献
电场设备	电极板类型 芒刺-板型电晕放电现象较强，芒刺-板型杀菌效果优于板-板型和线-板型	[52-53]
	电场强度 在处理相同时间条件下，电场强度逐渐增加，微生物致死率逐渐增加	[54]
	处理时间 在相同电场强度作用下，电场处理时间越长，对微生物杀菌效果越好	[55]
	板间距 针-板间距（7~30 mm）由小到大变化过程，电场功率逐渐增大又逐渐减小	[56]
处理对象特性	电功率 电场电功率越大（0~2 W），输出的能量越多，对微生物杀菌作用越显著	[57]
	食品种类 外加电场对于干燥状态细胞没有阻碍作用，溶液状态使得场强减小，削弱HVEF的作用效果	[51,58]
	温度 随着温度升高（30~60℃），可适当降低电场强度，生物致死率增加	[59]
	电导率 电导率决定电阻，从而影响场强和温度，电导率降低，杀菌效果增强	[51]
微生物生理特性	pH 低pH值条件下不利于微生物生长，PEF对低pH值的食品杀菌效果更好	[60]
	微生物种类 革兰氏阴性菌细胞膜结构简单，由一层薄薄的肽聚糖和脂多糖组成，其比革兰氏阳性菌敏感	[61]
	微生物浓度 在相同电场强度和处理时间作用下，细菌浓度越低，杀菌效果越好	[51]
	生长阶段 对数生长期微生物细胞膜流动性大，相比于稳定期敏感，提高杀菌效果	[62]

2 高压电场杀菌技术应用

2.1 不同PEF条件的杀菌效果

与传统热杀菌技术相比，PEF技术因对病原微生物的

有效灭活以及延长产品保质期、保留新鲜度等优势而被广泛研究，用于食品杀菌和保存^[63-64]。牛德宝^[43]采用25 kV/cm的PEF处理醋酸菌6.0 ms，醋酸菌的灭活菌数达到3.66（lg（CFU/mL）），且电场强度对醋酸菌的致死效应较脉冲处理时间更为重要。此外，随着初始温度升高到42℃，PEF对醋酸菌的灭活效果最大，减少4.97（lg（CFU/mL））。Tao Xiaoyun等^[65]采用35 kV/cm的PEF处理大肠杆菌和酿酒酵母90 μs，大肠杆菌和酿酒酵母的菌落数分别减少5.15、5.30（lg（CFU/g））。经研究分析，在相同的电场处理条件下，酵母的死亡率大于大肠杆菌，酵母对PEF更敏感，这与Evrendilek^[66]和Qin Bailin^[67]等的发现一致。Zhao Wei等^[68]采用流式细胞术结合荧光技术，定量实时检测PEF对大肠杆菌细胞和亚致死损伤微生物细胞的损伤程度，揭示了PEF灭活大肠杆菌的潜在机制。PEF诱导的亚致死损伤细胞在25 kV/cm时达到最大值，该研究表明，在较高的电场强度下，PEF诱导的亚致死损伤细胞转为永久性膜损伤细胞。Zhu Ning等^[69]对脉冲电场灭菌的处理室进行研究，发现随着工作电压升高到500 V，酿酒酵母和金黄色葡萄球菌数量分别下降5.42、4.77（lg（CFU/g））；对数生长期的酿酒酵母、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌比稳定期微生物对电场的变化更敏感，因为对数生长期的细胞迅速分裂并活跃生长。当PEF条件为脉冲频率30.5 kHz、占空比2.3%、处理时间7 min和电场强度45 kV/cm时，PEF对调理牛肉中微生物致死率为87.33%，且调理牛肉的货架期延长，感官品质无显著降低，为调理肉制品的杀菌保藏提供了参考^[70]。

2.2 不同HVEF条件的杀菌效果

与PEF相比，HVEF用于杀菌的电场强度不高，时间较长，杀菌效果不如PEF。通常情况下，增大电场强度和延长处理时间会提高HVEF杀菌效果。王云龙等^[52]探讨不同HVEF对大肠杆菌的诱变效应差异，结果表明，高压芒刺电场在1 kV/cm处理大肠杆菌时突变率最高，是对照组的12倍，HVEF在场强为4 kV/cm处理时突变率最高，为对照组的5.47倍。该研究还表明，不同HVEF对大肠杆菌的突变效应由高到低分别为高压芒刺电场、高压变频电场、HVEF。Huang Han等^[71]研究HVEF对约氏不动杆菌的抗菌机制，结果表明，在30 kV/cm、15 min电场条件下，约氏不动杆菌数量减少2.06（lg（CFU/g））。白爱枝等^[72]研究HVEF对大肠杆菌的损伤效应，场强为4 kV/cm时大肠杆菌的存活率和突变率的变化和对照组相比均达到极显著水平，此条件下处理2 min时大肠杆菌的存活率最低，仅为（7.77±1.73）%。Liu Jiao等^[54]利用HVEF辅助冻结虾，在电场作用下产生小而均匀的冰晶，改善虾质地同时抑制了微生物生长。在15、20 kV/cm时细菌群落结构变化显著，低于其他组。因此，

高强度HVEF ($>15\text{ kV/cm}$) 对细菌有抑制作用。Gao Wenqing等^[73]研究可调并联HVEF对罗非鱼贮藏期间新鲜度的影响, HVEF处理可有效降低冷藏 ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$) 罗非鱼肉的微生物生长速度, 随着电场强度从 10 kV/cm 增加到 900 kV/cm , 这种抑制效果增加10倍。HVEF在食品保鲜方面具有良好的使用潜力, 因为它有效地保持了鱼类的新鲜度。当电场强度为 600 kV/cm 或更高时, 效果更佳。HVEF还运用于肉类冻藏及解冻, 如胡裴裴^[74]对比分析低压静电场与非静电场条件辅助短期冻藏过程中猪肉的菌落总数变化, 肉样在 -12 、 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏28 d时的菌落总数较对照组菌落总数下降4.50、4.48 ($\lg(\text{CFU/g})$)。何向丽^[75]运用HVEF解冻猪里脊肉, 并研究解冻后贮藏期间微生物的变化。结果表明, 猪里脊肉在电压为 10 kV 处理后的菌落总数比对照组的菌落总数减少0.45 ($\lg(\text{CFU/g})$), 在解冻后的1~3 d, 对照组散发腐烂气味, 电场处理组仍保持得较新鲜。此外, Xie Changwei等^[76]发现, HVEF解冻鸡腿肉样品中的微生物菌落数低于对照组。HVEF解冻似乎能有效抑制微生物活动并延缓肉类变质。还有研究报道了不同包装形式的食品在贮藏期间的微生物变化不同, 随着时间的延长, 静电组样品的菌落总数明显低于未静电组。贮藏8 d时, 托盘静电组样品的菌落总数大于6 ($\lg(\text{CFU/g})$), 而其他组样品在贮藏6 d时的菌落总数已接近或大于6 ($\lg(\text{CFU/g})$), 并且在贮藏8 d时的菌落总数已超过7 ($\lg(\text{CFU/g})$)^[77]。关于PEF与HVEF在几种典型食品中的杀菌效果对比见表3。

表3 PEF和HVEF在几种常见食品杀菌中的应用

Table 3 Application of PEF and HVEF in the sterilization of several common foods

电场类型	食品种类	微生物类型	电场参数	微生物减少量或致死率	参考文献
PEF	鸡肉	空肠弯曲杆菌	500 Hz, 15 kV/cm , 30 s	0.25 ($\lg(\text{CFU/g})$)	[78]
PEF	鸡肉	肠杆菌科	500 Hz, 15 kV/cm , 30 s	0.27 ($\lg(\text{CFU/g})$)	[78]
PEF	调理牛肉	菌落总数	0.5 kHz, 45 kV/cm , 7 min, 占空比2.3%	87.33%	[70]
HVEF	香肠	金黄色葡萄球菌	芒刺-板 2.4 kV/cm , 30 min	2.38 ($\lg(\text{CFU/g})$)	[55]
HVEF	猪肉	金黄色葡萄球菌	芒刺-板 2.4 kV/cm , 30 min	1.86 ($\lg(\text{CFU/g})$)	[55]
HVEF	三文鱼	菌落总数	芒刺-板 2 kV/cm , 15 min	0.85 ($\lg(\text{CFU/g})$)	[79]
HVEF	鸢乌贼	菌落总数	$4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3.8 kV , 8.3 min	2.33 ($\lg(\text{CFU/g})$)	[80]
HVEF	鸡腿	菌落总数	板-板 100 kV/cm , $4\text{ }^{\circ}\text{C}$	3~4 ($\lg(\text{CFU/g})$)	[76]

2.3 高压电场技术与其他技术的联用

微生物对电场技术的易感性不同, 电场技术处理后观察到3种形式的细胞, 即死亡、存活和亚致死损伤细胞。PEF和HVEF技术对于微生物杀菌均存在一定的局限性, 单独作用较难达到预期效果。因此, 将电场技术与其他技术协同以强化杀菌效果, 优化杀菌工艺, 如电场技术与温热、冰温、抑菌剂、紫外和脉冲光等技术协同。Niu Debao等^[81]研究不同体积分数乙醇对醋酸杆菌细胞膜脂肪酸组成、脂质构象、膜流动性和脉冲

电场抗性的影响。结果表明, 醋酸杆菌的生长受到抑制。例如, 用9%乙醇培养的醋酸杆菌 (10^9 CFU/mL) 在PEF作用 (20.0 kV/cm 、 6.0 ms) 下, 醋酸杆菌菌落数为5.17 ($\lg(\text{CFU/g})$), 而不用乙醇培养的菌落数为3.22 ($\lg(\text{CFU/g})$)。Pyatkovskyy等^[82]探究高静水压 (high hydrostatic pressure, HPP)、PEF和超声 (ultrasonic, US) 处理对单核细胞增生李斯特菌的灭活效果, 当PEF和HPP、US同时使用时观察到协同效应。陈婧^[44]以酿酒酵母为研究对象, 研究柚皮苷协同PEF对微生物的致死作用。随着电场强度的增强和电场处理时间的延长, 对微生物的杀菌效果明显增强。当场强为 35 kV/cm 、处理时间为 $2\text{ }400\text{ }\mu\text{s}$ 时, 菌落数减少1.89 ($\lg(\text{CFU/mL})$), 并且柚皮苷与PEF协同处理的菌落数减少量是PEF单独处理时的3.15倍。朱诚^[83]将等离子体结合PEF灭菌, 研究发现, 二者结合具有显著的协同抑菌效果, 等离子体处理3 min, 之后PEF (15 kV/cm 、 $10\text{ }\mu\text{s}$) 处理的组合能够分别杀灭5.98、5.82 ($\lg(\text{CFU/mL})$) 金黄色葡萄球菌、大肠杆菌。段伟文等^[84]将静电场与冰温技术结合对虾进行保鲜, 当贮藏时间延长至后期, 电压越高, 静电场结合冰温对微生物的抑制效果越好, 并能明显抑制对虾的腐败和不良气味的产生, 同时能改善虾肉色泽, 抑制pH值上升等。何天夫^[85]研究发现, PEF协同肉桂醛对大肠杆菌的灭活具有协同增效作用。当肉桂醛浓度为最小杀菌浓度的1/2且无PEF作用时, 大肠杆菌灭活效果为0.04 ($\lg(\text{CFU/mL})$)。当场强为10、15、20、 25 kV/cm 时, 杀灭效果分别为0.54、0.71、1.37、2.38 ($\lg(\text{CFU/mL})$)。相似地, 刘英^[51]研究高压芒刺电场结合肉桂醛使用对单增李斯特菌的杀菌效果及杀菌机理, 结果表明, 高压芒刺电场与肉桂醛结合处理可以提高杀菌效果。当电场强度为 14 kV/cm 、处理15 min条件下, 结合不同浓度肉桂醛处理加剧了单增李斯特菌细胞内核酸、蛋白质等大分子外流、造成DNA的降解和细胞膜破损程度加剧, 微生物致死效果增加。岑剑伟等^[86]探究HVEF联合冰温技术对鲜罗非鱼片的保鲜效果。结果发现, 冰温气调保鲜组在贮藏6 d时微生物数超过 10^7 CFU/g , 冰温空气包装组在贮藏3 d时超过 10^8 CFU/g , HVEF结合冰温气调条件下贮藏到30 d时微生物数量仅为 10^4 CFU/g 。Lin Yunian等^[87]以红鲷鱼为研究对象, 在鱼片表面接种腐败希瓦氏菌, 研究US和HVEF抗菌活性, 还研究了US和HVEF解冻对鱼片品质特性的影响。结果表明, US和HVEF联合处理对腐败希瓦氏菌抗菌性最好, 致死率为96.73%。此外, US和HVEF联合使用可以最大限度减少解冻损失, 保持鱼片质地。目前, 国内外研究表明, 电场技术与其他杀菌技术的协同作用对微生物抑制更加有效, 能延长食品的货架期, 更好保留食品的理化性质和营养成分, 具有良好的应用前景。关于电场技术与其他技术联用的杀菌效果见表4。

表4 电场技术与其他技术联用的杀菌效果

Table 4 Sterilization efficiency of electric field technology combined with other technologies

处理方式	食品种类	微生物类型	电场参数	杀菌效果	参考文献
低压交变电场协同冰温处理	带鱼	菌落总数	3.5 kV/m、-2℃、6 d	菌落总数下降接近1 (lg (CFU/g))	[88]
PEF协同冷藏处理	罗非鱼	菌落总数	10 kV、4℃、6 d	菌落总数下降接近1 (lg (CFU/g))	[89]
静电场结合冰温技术	虾	菌落总数	3.5 kV、(-1±1)℃、6 d	菌落总数下降0.59 (lg (CFU/g))	[84]
高压芒刺电场结合肉桂醛	牛肉	单增李斯特菌	14 kV、15 min、4℃、0.155 g/L; 结合处理后4℃存放12 h	死亡率为(59.30±3.46)%	[51]
HVEF结合冰温技术	罗非鱼	菌落总数	3.8 kV/cm、50 Hz、(-0.5±0.2)℃	菌落总数降低1 (lg (CFU/g))	[86]
HVEF结合US	红鲷鱼	腐败希瓦氏菌	3 kV、50 Hz、25℃; 360 W、40 kHz、25℃	致死率为96.73%	[87]

3 高压电场杀菌技术发展前景

3.1 PEF杀菌技术的发展前景

许多研究表明PEF技术具有高效的杀菌作用,已取得较好的研究进展^[90]。目前为止,PEF对液体和半固体食品杀菌效果较好^[78],这是因为带电分子存在于液体中,电流在液体食品中更有效移动且固体食品含有丰富的离子、蛋白质和脂类,食品电导率增加,影响场强,液体食品中微生物比固体食品中微生物易灭活。电源电压影响微生物杀菌效果,电源电压需要上千至上万伏,成本高且有安全隐患。为促进PEF技术工业化,需进一步改进高压电源。研究表明,金属电极对微生物的致死率较高,但是金属电极(不锈钢、钛)长时间处于高电压条件下易发生分解,影响食品安全和电极板使用寿命^[28,91],关于新型电极材料(碳材料)的应用仍需进一步研究。至今,PEF杀菌技术大多停留在实验室水平,未能运用于工业化生产。同时,不同处理室间存在电场强度不均匀、场强过小等问题^[28]。PEF处理过程中微生物细胞亚致死损伤的发生会严重影响PEF处理食品的微生物货架期和食品安全^[92]。说明PEF杀菌技术需要进一步优化,增强PEF的杀菌效果,推广PEF电场技术的应用。最近几年,低、中电场强度的电场技术引起了大多数研究者的关注^[69,93]。因此,今后的研究需朝着高质量、杀菌、经济和可靠方向发展,并进一步探索PEF杀菌技术在食品、农业、卫生等相关领域的应用前景。

3.2 HVEF杀菌技术的发展前景

HVEF杀菌效果不如PEF, HVEF设备构造相对简单、价格低、温度变化幅度小、电源电压低、电场强度不高,达到理想灭菌效果所需时间长。HVEF电源输出电压较低,杀菌的电场强度不高,在微生物灭活过程中也出现大量的亚致死损伤细胞,影响食品货架期和消费者安全。电极板类型对微生物杀菌有很大影响,常见的不同电极板类型中,芒刺-板型HVEF杀菌效果最佳,能大幅度减少处理时间^[52]。相对于PEF, HVEF对固体食品杀菌效果较好,对食品的组织结构和营养风味无破坏,在固体食品杀菌保鲜领域具有更广阔的发展前景。HVEF设备简单,经济环保无残留,是理想的非热加工技术。同时,相比于PEF, HVEF用于杀菌研究相对较少,杀菌效

果不及PEF,进一步技术优化或结合其他杀菌技术能发挥更大的研究价值和使用价值。

4 高压电场装置特点

4.1 PEF装置特点

PEF是高压脉冲电源在2个电极板之间形成脉冲电场, PEF以较高的电场强度(10~50 kV/cm)、较短的脉冲宽度(0~100 μs)和较高的脉冲频率(0~2 000 Hz)对物料进行处理。PEF装置一般由高压脉冲发生系统和高压PEF处理室组成。处理系统的脉冲波形有振荡波、指数衰减波、方波和双极性波等。振荡波形杀菌效率较差,在食品杀菌方面运用较少;指数衰减波是通过简单的电容充放电电路形成;方波峰值电压持续时间长,杀菌效果好;双极性波由一组正波和负波构成。处理室有平行盘式、柱-盘式、柱-柱式、线圈绕柱式和同心轴式等^[94]。PEF技术处理食品杀菌效果好、处理时间短、无污染,能最大限度保留食品原有的营养成分^[10]。PEF装置示意图如图3所示。

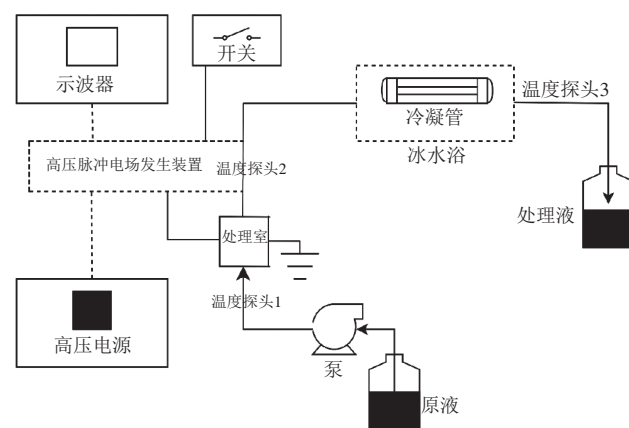


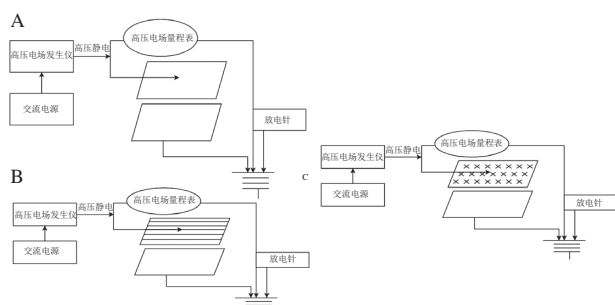
图3 PEF装置示意图^[95]

Fig. 3 Schematic diagram of PEF system^[95]

4.2 HVEF装置特点

HVEF是低压电源(0~30 V)经电子线路处理产生高频矩形波,再经过整流、滤波、多谐振变换和多级倍压整流等电路,最终变换成稳定的直流高电压(0~50 kV)。高压电源施加在2块平行的电极板之间

形成HVEF^[94]。通过调节控制器改变输出电压或极板之间的距离改变电场强度^[96]。常见的HVEF装置有板-板型、线-板型和芒刺-板型，装置示意图如图4所示。线-板型电极可产生较大电晕电流，但电流分布不均匀。板-板型电极板能产生较强的匀强电场，但几乎不产生电晕电流，因此杀菌效果相对较差。芒刺-板型产生的电晕电流分布均匀且杀菌效果明显优于以上2种类型^[51-53]。HVEF在食品工业中应用广泛，展现出杀菌效果好、能耗小、产热小、绿色无污染和对食品品质无影响等优势^[7]。



A. 板-板型HVEF; B. 线-板型HVEF; C. 芒刺-板型HVEF。

图4 HVEF装置示意图^[97]

Fig. 4 Schematic diagram of HVEF system^[97]

5 结语

高压电场技术不仅能保持食品原本的品质，还具有低能耗、低污染等优势，未来具有广阔的发展前景。PEF技术处理时间短，杀菌效果强大，一直深受国内外研究人员的青睐，但需要向应用食品范围广、降低生产成本、高压电源和电极的调整等方向发展。HVEF技术构造相对简单、成本较低、电源电压较低等特点在食品领域应用广泛。HVEF电极结构类型影响微生物杀菌效果，芒刺-板型HVEF在食品杀菌保鲜方面具有更加广阔的前景。为了高压电场技术实现大规模应用，高压电场技术设备的优化与深入研究、结合其他杀菌技术增强杀菌效果有待进一步探索。相信通过不断地研究与完善，高压电场技术将在食品等各个领域发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] CALVO T, ALVAREZ-ORDONEZ A, PRIETO M, et al. Influence of processing parameters and stress adaptation on the inactivation of *Listeria monocytogenes* by non-thermal atmospheric plasma (NTAP)[J]. Food Research International, 2016, 89: 631-637. DOI:10.1016/j.foodres.2016.09.014.
- [2] XU Feiyue, XIAO Meifeng, XIAO Sui, et al. Inactivation mechanism of *Vibrio parahaemolyticus* via supercritical carbon dioxide treatment[J]. Food Research International, 2017, 100: 282-288. DOI:10.1016/j.foodres.2017.08.038.
- [3] YOO J H, BAEK K H, HEO Y S, et al. Synergistic bactericidal effect of clove oil and encapsulated atmospheric pressure plasma against *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* and

- its mechanism of action[J]. Food Microbiology, 2021, 93: 103611. DOI:10.1016/j.fm.2020.103611.
- [4] BOURAS M, GRIMI N, BALS O, et al. Impact of pulsed electric fields on polyphenols extraction from Norway spruce bark[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 80: 50-58. DOI:10.1016/j.indcrop.2015.10.051.
- [5] 王潇栋, 孔阳芷, 张艳玲, 等. 杀菌技术的作用机制及在食品领域中的应用[J]. 中国酿造, 2022, 41(2): 1-8. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2022.02.001.
- [6] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, XANTHAKIS E, et al. Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 195: 222-234. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.10.001.
- [7] HE Xiang, GUO Liangjia, TATSUMI E, et al. Effect of corona wind, current, electric field and energy consumption on the reduction of the thawing time during the high-voltage electrostatic-field (HVEF) treatment process[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 34: 135-140. DOI:10.1016/j.ifset.2016.01.006.
- [8] ALIREZALU K, MUNEKATA P E S, PARNIAKOV O, et al. Pulsed electric field and mild heating for milk processing: a review on recent advances[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(1): 16-24. DOI:10.1002/jsfa.9942.
- [9] 杨晓伟. 高压静电场对大肠杆菌K12损伤机制的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017: 7.
- [10] 孙晋跃, 孙芝兰, 吴海虹, 等. 非热杀菌技术在低温鸡肉制品致病菌控制中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(8): 84-90. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200529-139.
- [11] 夏广臻. 磁场、静电场辅助制冷分别对食品保鲜及冷冻影响的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019: 16.
- [12] 唐梦. 高压静电场解冻对罗非鱼片品质影响及其机理的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 9.
- [13] LIU Caiyun, PIROZZI A, FERRARI G, et al. Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13: 45-52. DOI:10.1007/s11947-019-02364-1.
- [14] HE Guidan, YAN Xiaoya, WANG Xiaodan, et al. Extraction and structural characterization of collagen from fishbone by high intensity pulsed electric fields[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(6): e13214. DOI:10.1111/jfpe.13214.
- [15] SHINDE G P, KUMAR R, REDDY K R, et al. Impact of pulsed electric field processing on reduction of benzylpenicillin residue in milk[J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2021, 19(1): 1143-1151. DOI:10.1007/s40201-021-00680-3.
- [16] ZIMMERMANN U. Electrical breakdown, electroporation and electrofusion[J]. Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology, 2005, 105: 175-256.
- [17] 周丽珍, 李冰, 李琳, 等. 高压脉冲电场杀菌机理及影响因素研究新进展及相关问题探讨[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(7): 213-217.
- [18] TSONG T Y. Electroporation of cell membranes[J]. Biophysical Journal, 1991, 60(2): 297-306. DOI:10.1016/s0006-3495(91)82054-9.
- [19] HO S Y, MITTAL G S. Electroporation of cell membranes: a review[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 1996, 16(4): 349-362. DOI:10.3109/07388559609147426.
- [20] DIMITROV D S, SOWERS A E. Membrane electroporation-fast molecular exchange by electroosmosis[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, 1990, 1022(3): 381-392. DOI:10.1016/0005-2736(90)90289-z.
- [21] 魏新芳, 李家辉, 延二宝, 等. 脉冲电场灭菌机理分析及细菌失活模型的研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(1): 6-12. DOI:10.3969/j.issn.1007-449x.2011.01.002.
- [22] VEGA-MERCADO H, MARTIN-BELLOSO O, QIN B L, et al. Non-thermal food preservation: pulsed electric fields[J]. Trends in Food Science and Technology, 1997, 8(5): 151-157. DOI:10.1016/s0924-2244(97)01016-9.

- [23] ZHU Ning, YU Ning, ZHU Yue, et al. Inactivation of *Pichia rhodanensis* in relation to membrane and intracellular compounds due to microchip pulsed electric field (MPEF) treatment[J]. PLoS ONE, 2018, 13(6): e0198467. DOI:10.1371/journal.pone.0198467.
- [24] 张涛. 高压脉冲电场灭菌参数及电穿孔机制研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018: 4.
- [25] MIN S C, ROH S H, NIEMIRA B A, et al. Dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma inhibits *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, and Tulane virus in romaine lettuce[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 237: 114-120. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2016.08.025.
- [26] DALVI-ISFAHAN M, HAVET M, HAMDAMI N, et al. Recent advances of high voltage electric field technology and its application in food processing: a review with a focus on corona discharge and static electric field[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 353: 111551. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2023.111551.
- [27] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 37: 68-73. DOI:10.1016/j.ifset.2016.07.028.
- [28] 齐梦圆, 刘卿妍, 石素素, 等. 高压电场技术在食品杀菌中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 284-292. DOI:10.7506/spkx.1002-6630-20210313-175.
- [29] 高智伟, 徐静, 邓世龙, 等. 不同电场参数对豆腐解冻特性的研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 28-34. DOI:10.3969/j.issn.1001-5167.2018.01.005.
- [30] 徐洪斌, 张林生, 何仁泉, 等. 高压静电技术杀菌灭藻研究及机理分析[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(2): 40-42. DOI:10.3969/j.issn.1009-2455.2002.02.015.
- [31] 马良军. 高压电场低温等离子体对肠炎沙门氏菌和单增李斯特菌菌体损伤作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 8.
- [32] 汪浪红. 柚皮素协同脉冲电场杀灭大肠杆菌和金黄色葡萄球菌机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 7.
- [33] 卢家喧, 连宾. 高压脉冲电场杀菌机理及影响因素分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(24): 7601-7603; 7606. DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2007.24.106.
- [34] BEVERIDGE J R, MACGREGOR S J, ANDERSON J G, et al. The influence of pulse duration on the inactivation of bacteria using monopolar and bipolar profile pulsed electric fields[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(4): 1287-1293. DOI:10.1109/tps.2005.852345.
- [35] 田媛, 平雪良, 姚文龙, 等. 高压脉冲电场杀菌设备的能量利用[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 77-80. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2016.01.018.
- [36] 汤真. 不同电参数下脉冲电场处理过程原牛乳品质影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020: 5.
- [37] 王婷玉. 高压脉冲电场技术对鲜切苹果中病原菌杀菌效果及品质影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017: 6.
- [38] 李静, 肖健夫, 陈杰, 等. 高压脉冲电场对苹果汁中大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的钝化效果[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(8): 41-45. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.08.025.
- [39] 方婷. 高压脉冲电场杀菌动力学及处理室改进研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008: 15.
- [40] CORBO M R, BEVILACQUA A, CAMPANIELLO D, et al. Prolonging microbial shelf life of foods through the use of natural compounds and non-thermal approaches: a review[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(2): 223-241. DOI:10.1111/j.1365-2621.2008.01883.x.
- [41] 陶晓赞. 高压脉冲电场(PEF)对蓝莓汁品质及杀菌机理探究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015: 8.
- [42] TIMMERMANS R A H, GROOT M N N, NEDERHOFF A L, et al. Pulsed electric field processing of different fruit juices: impact of pH and temperature on inactivation of spoilage and pathogenic micro-organisms[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 173: 105-111. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2013.12.022.
- [43] 牛德宝. 脉冲电场杀灭醋酸菌及钝化其关键产酸酶机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 8.
- [44] 陈婧. 柚皮苷及其金属络合物与脉冲电场协同杀菌作用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 32.
- [45] LIU Zhiwei, ZENG Xinan, SUN Dawen, et al. Effects of pulsed electric fields on the permeabilization of calcein-filled soybean lecithin vesicles[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 131: 26-32. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.01.009.
- [46] 章铖, 杨瑞金, 赵伟. 脉冲电场在固体食品加工中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6545-6553. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq.11-5956/ts.2022.20.012.
- [47] REZAEIMOTLAGH A, TANG K S C, RESCH M, et al. Inactivation kinetics of *Escherichia coli* in cranberry juice during multistage treatment by electric fields[J]. Food Research International, 2018, 106: 780-790. DOI:10.1016/j.foodres.2018.01.049.
- [48] LIU Xiaojun, LENDORMI T, LE FELLIC M, et al. Hygienization of mixed animal by-product using pulsed electric field in a continuous treatment system: synergistic effect with ohmic heating on the inactivation of indicator bacteria[J]. Waste Management, 2020, 118: 18-26. DOI:10.1016/j.wasman.2020.08.012.
- [49] 让一峰, 陈晓婵, 田一雄, 等. 高压脉冲电场强化杀菌对哈密瓜汁品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(17): 105-109. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2019.17.019.
- [50] ARONSSON K, RONNER U. Influence of pH, water activity and temperature on the inactivation of *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* by pulsed electric fields[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2001, 2(2): 105-112. DOI:10.1016/s1466-8564(01)00030-1.
- [51] 刘英. 高压芒刺电场结合肉桂醛处理对单增李斯特菌的杀菌效果及机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 6.
- [52] 王云龙, 白爱枝, 宋智青, 等. 不同高压电场对大肠杆菌诱变效应的比较[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 14-21. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2018.01.0014.
- [53] 张佰清, 程玉米, 常雪妮. 芒刺高压静电场处理对大肠杆菌微生环境的影响[J]. 食品科技, 2007, 187(5): 40-43. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2007.05.012.
- [54] LIU Jiao, WANG Yue, ZHU Feixia, et al. The effects of freezing under a high-voltage electrostatic field on ice crystals formation, physicochemical indices, and bacterial communities of shrimp (*Solenocera melanthero*)[J]. Food Control, 2022, 142: 109238. DOI:10.1016/j.foodcont.2022.109238.
- [55] QI Mengyuan, ZHAO Ruqing, LIU Qingyan, et al. Antibacterial activity and mechanism of high voltage electrostatic field (HVEF) against *Staphylococcus aureus* in medium plates and food systems[J]. Food Control, 2021, 120: 107566. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107566.
- [56] 许潇, 那日, 杨军, 等. 高压电晕电场放电特性的研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 600-604. DOI:10.3969/j.issn.1000-1638.2009.05.014.
- [57] 罗莹, 张佰清, 魏宝东. 高压直流静电场对大肠杆菌的杀菌效果[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(1): 114-116. DOI:10.3969/j.issn.1000-1700.2006.01.030.
- [58] 白爱枝, 赵巧燕, 闫祖威, 等. 不同处理方式下高压电场对大肠杆菌杀菌效应的比较研究[J]. 食品科学, 2009, 30(9): 56-58. DOI:10.3321/j.issn.1002-6630.2009.09.012.
- [59] 朱丽霞, 张佰清. 高压匀强静电场对大肠杆菌的致死效应[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(1): 52-55. DOI:10.3969/j.issn.1000-1700.2008.01.012.
- [60] 黄明明. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌和鼠伤寒沙门氏菌杀菌机理及应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 40.
- [61] HAN L, PATIL S, BOEHM D, et al. Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82(2): 450-458. DOI:10.1128/aem.02660-15.



- [62] 陈婧, 曾新安, 王满生. 柚皮苷与脉冲电场对酿酒酵母的协同致死作用[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(9): 27-30. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2013.09.022.
- [63] BARBA F J, GALANAKIS C M, ESTEVE M J, et al. Potential use of pulsed electric technologies and ultrasounds to improve the recovery of high-added value compounds from blackberries[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 167: 38-44. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.02.001.
- [64] WANG Mansheng, WANG L H, BEKHIT A E D A, et al. A review of sublethal effects of pulsed electric field on cells in food processing[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 32-41. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.11.035.
- [65] TAO Xiaoyun, CHEN Jian, LI Luning, et al. Influence of pulsed electric field on *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(7): 1416-1427. DOI:10.1080/10942912.2014.917098.
- [66] EVRENDILEK G A, ZHANG Q H. Effects of pulse polarity and pulse delaying time on pulsed electric fields-induced pasteurization of *E. coli* O157:H7[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(2): 271-276. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2004.06.001.
- [67] QIN Bailin, ZHANG Q, BARBOSA-CANOVAS G V, et al. Inactivation of microorganisms by pulsed electric fields of different voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(6): 1047-1057. DOI:10.1109/94.368658.
- [68] ZHAO Wei, YANG Ruijin, ZHANG Wenbin, et al. Quantitative and real time detection of pulsed electric field induced damage on *Escherichia coli* cells and sublethally injured microbial cells using flow cytometry in combination with fluorescent techniques[J]. Food Control, 2011, 22(3/4): 566-573. DOI:10.1016/j.foodcont.2010.10.006.
- [69] ZHU Ning, WANG Yanli, ZHU Yue, et al. Design of a treatment chamber for low-voltage pulsed electric field sterilization[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 42: 180-189. DOI:10.1016/j.ifset.2017.07.016.
- [70] 李霜, 李诚, 陈安均, 等. 高压脉冲电场对调理牛肉杀菌效果的研究[J]. 核农学报, 2019, 33(4): 722-731. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.04.0722.
- [71] HUANG Han, GAO Tianqi, QIAN Xiaoqing, et al. *In vitro* antibacterial mechanism of high-voltage electrostatic field against *Acinetobacter johnsonii*[J]. Foods, 2022, 11(7): 955. DOI:10.3390/foods11070955.
- [72] 白爱枝, 李瑞云, 王新雨, 等. 高压静电场对大肠杆菌的生物学效应[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2534-2539. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20160812012.
- [73] GAO Wenqing, YANG Shangyan, XIE Wenchang, et al. Effects of adjustable parallel high voltage electrostatic field on the freshness of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during refrigeration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 151-157. DOI:10.1016/j.lwt.2015.10.019.
- [74] 胡斐斐. 低压静电场辅助冻藏及解冻对猪肉品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 12.
- [75] 何向丽. 猪里脊肉冻结解冻特性及高压静电场(HVEF)解冻机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016: 60.
- [76] XIE Changwei, LI Chengxiang, Gao Wenqing, et al. Effect of thawing and cold storage on frozen chicken thigh meat quality by high-voltage electrostatic field[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(4): M193-M197. DOI:10.1111/j.1750-3841.201.01594x.
- [77] 李鹏, 王红提, 孙玉凤, 等. 高压静电场对不同包装冷鲜鸡肉贮藏过程中产品特性的影响[J]. 肉类研究, 2018, 32(11): 36-40. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201811006.
- [78] HAUGHTON P N, LYNG J G, CRONIN D A, et al. Efficacy of pulsed electric fields for the inactivation of indicator microorganisms and foodborne pathogens in liquids and raw chicken[J]. Food Control, 2012, 25(1): 131-135. DOI:10.1016/j.foodcont.2011.10.030.
- [79] QI Mengyuan, YAN Haiyang, ZHANG Yan, et al. Impact of high voltage prick electrostatic field (HVPEF) processing on the quality of ready-to-eat fresh salmon (*Salmo salar*) fillets during storage[J]. Food Control, 2022, 137: 108918. DOI:10.1016/j.foodcont.2022.108918.
- [80] 李翰卿, 马儒珍, 陈胜军, 等. 不同解冻方式对鳇乌贼胴体肌肉品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 20-28. DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2023.05.003.
- [81] NIU Debao, WANG Langhong, ZENG Xinan, et al. Effect of ethanol adaption on the inactivation of *Acetobacter* sp. by pulsed electric fields[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 52: 25-33. DOI:10.1016/j.ifset.2018.11.009.
- [82] PYATKOVSKYY T I, SHYNNARYK M V, MOHAMED H M, et al. Effects of combined high pressure (HPP), pulsed electric field (PEF) and sonication treatments on inactivation of *Listeria innocua*[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 233: 49-56. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.04.002.
- [83] 朱诚. 等离子体联合脉冲电场灭菌的协同效应研究及其对亚细胞结构作用的探索[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2022: 29.
- [84] 段伟文, 全沁果, 章雪琴, 等. 静电场结合冰温技术对凡纳滨对虾贮藏期品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 101-107. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2018.12.022.
- [85] 何天夫. 肉桂醛对大肠杆菌抑菌机理及与脉冲电场协同灭菌效果研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 56.
- [86] 岑剑伟, 蒋爱民, 李来好, 等. 高压静电场结合冰温技术对罗非鱼片贮藏期品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 282-288. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622043.
- [87] LIU Yunnian, WANG Mengjun, PAN Min, et al. A potential spoilage bacteria inactivation approach on frozen fish[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100335. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100335.
- [88] 尚子寒, 沈俊, 张家玮, 等. 低压交变电场协同冰温对带鱼船上保鲜品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(12): 1-8. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2022.12.001.
- [89] 王津. 极低频脉冲电场对冷藏罗非鱼保鲜及其作用机理的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 61.
- [90] MORALES-DE LA PENA M, ELEZ-MARTINEZ P, MARTIN-BELLOSO O. Food preservation by pulsed electric fields: an engineering perspective[J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3: 94-107. DOI:10.1007/s12393-011-9035-7.
- [91] 张若兵, 杜钢, 傅贤, 等. 采用高压脉冲电场技术的食品处理装置电极设备电化学腐蚀[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1889-1894. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.2014.06.039.
- [92] ZHAO Wei, YANG Ruijin, SHEN Xiaohan, et al. Lethal and sublethal injury and kinetics of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in milk by pulsed electric fields[J]. Food Control, 2013, 32(1): 6-12. DOI:10.1016/j.foodcont.2012.11.029.
- [93] BOUDJEM N, KHERAT M, DROUCHE N, et al. Investigation of the mechanisms of *Escherichia coli* cells sterilization by the application of an electric field[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16: 6259-6266. DOI:10.1007/s13762-019-02218-5.
- [94] 杨宇帆, 陈倩, 王浩, 等. 高压电场技术在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 316-320; 325. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.19.055.
- [95] 方婷, 龚雪梅, 余林林, 等. 高压脉冲电场杀菌效果的 F 值理论研究[J]. 中国食品学报, 2010, 10(5): 106-112. DOI:10.16429/j.1009-7848.2010.05.016.
- [96] 黄显吞. 高压静电场作用机理的物理解释及其在农业中的应用[J]. 广东农业科学, 2010, 37(7): 189-191. DOI:10.16768/j.issn.1004-874x.2010.07.083.
- [97] 孙迎春, 刘晓冬, 杨秀兰, 等. 高压芒刺静电场对小鼠LFA-1和ICAM-1表达的影响[J]. 分子科学学报, 2005, 21(5): 46-50. DOI:10.3969/j.issn.1000-9035.2005.05.010.