

# Sterilization Technology by Pulsed Discharge Plasma and Its Research Progress

Shenyan Du, Hongyan Wang, Zhipeng Zhu, Haiyang Xu, Ming Sun\*

School of Arts and Sciences, Shanghai Maritime University, Shanghai  
Email: [383661662@qq.com](mailto:383661662@qq.com), \*[mingsun@shmtu.edu.cn](mailto:mingsun@shmtu.edu.cn)

Received: Jul. 10<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2015; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Sterilization technology by pulsed discharge plasma is a non-thermal sterilization technology that utilizes the instantaneous change of voltage to cause irreversible loss of bacteria, leading to bacteria's death. This paper summarizes the sterilization mechanism and features of pulse discharge plasma, and its research progress of application in from home to aboard, it summarizes research focus on the current sterilization technology by pulse discharge plasma, and it proposes subsequent research work and prospect of the sterilization technology by pulsed discharge plasma.

## Keywords

Sterilization, Pulsed Discharge, Plasma, *E. coli*

---

# 脉冲放电等离子体灭菌技术及其研究进展

杜审言, 王红岩, 朱志鹏, 徐海洋, 孙 明\*

上海海事大学文理学院, 上海  
Email: [383661662@qq.com](mailto:383661662@qq.com), \*[mingsun@shmtu.edu.cn](mailto:mingsun@shmtu.edu.cn)

收稿日期: 2015年7月10日; 录用日期: 2015年7月22日; 发布日期: 2015年7月29日

---

\*通讯作者。

## 摘要

脉冲放电等离子体灭菌技术是一种利用电压瞬间发生变化而对细菌产生不可逆损失，进而导致其死亡的一种非热灭菌技术。论文综述了脉冲放电等离子体的灭菌机理、特点以及其在国内外应用的研究进展，总结了现有脉冲放电等离子体灭菌技术研究热点，提出了脉冲放电等离子体灭菌技术的后续研究工作和展望。

## 关键词

灭菌，脉冲放电，等离子体，大肠杆菌

## 1. 引言

社会的不断进步，特别是医疗、制药、食品等行业的快速发展，新的器材及生产设备的不断涌现，人们对食品质量要求的提高，环境中各种病毒的传播，都对灭菌技术提出了新的要求。生活中迫切需要安全、简便、低温、快速且无残留毒性的灭菌方法[1]。脉冲放电等离子体灭菌技术，能克服传统灭菌方法的一些局限性和不足，提高灭菌效率。采用该技术，能在低温下很好地达到灭菌的效果，不会破坏食品的营养成分和色泽，不产生副产物，不产生有毒残留物，对环境 and 操作人员安全。脉冲放电等离子体灭菌技术是采用循环设备让被处理物体通过高压脉冲电场处理腔，细菌在极短的时间内受到脉冲电场作用力产生跨膜电位，导致细菌结构破坏，细菌死亡。这种灭菌技术具有以下六个显著特点[2]：

- 1) 有较好地灭菌效果。一般能够达到6个数量级以上灭菌数，灭菌效果安全可靠；
- 2) 灭菌时间较短。整个灭菌操作流程控制在数秒以内，脉冲电场作用时间在毫秒以内，可以达到短时间超高温的灭菌效果；
- 3) 灭菌温度条件较低。一般的菌液灭菌处理后升温在30℃以内，物料温度变化很小，副产物少，产热少；
- 4) 灭菌效果均匀。在电场中各部分的菌液均受到了脉冲放电的作用，若为匀强电场，则均受到相同大小的场强作用；
- 5) 功耗较低。实验研究表明，脉冲放电等离子体灭菌技术的耗能仅为热灭菌方法的40%左右；
- 6) 节能环保。脉冲灭菌不需要加热，无需添加处理剂，对环境不会造成污染，和传统的加热处理具有明显的经济优势。

该技术是一种新的常温下非热灭菌技术，要综合考虑场强参数、外在条件和细菌的种类等因素，以找到最优良的方案。它被认为是最热门最先进的灭菌技术之一，相对于传统的灭菌技术，该技术具有创新性、科学性和先进性，目前该技术正处于发展阶段，进一步成熟后会给液态食品处理工艺带来一场新的变革，将会极大的弥补传统灭菌方法的缺点[3] [4]。该技术的有效性、安全性和实用性能能够为食品灭菌、饮用水、工业循环水处理等领域提供良好的条件[5]。若该项节能环保的新技术能尽快地投入到工业实践中，在火电厂、有色冶炼、污水处理中将发挥重要的作用。

本文主要介绍了国内外在脉冲放电等离子灭菌技术领域的研究进展和现状，总结了脉冲放电等离子体的灭菌机理及现有脉冲放电等离子体灭菌技术研究热点，提出了脉冲放电等离子体灭菌技术的后续研究工作和展望，为课题组相关研究的开展做准备。

## 2. 脉冲放电等离子体灭菌机理

目前传统的灭菌方法主要包括物理灭菌、化学灭菌和生物灭菌三大类。考虑到上述各种灭菌方法的缺陷和不足(物理灭菌易焚毁物品, 灭菌时间长, 使用范围有限; 化学药剂灭菌能较大批量的灭菌, 且较彻底, 但工艺参数多、有化学物质残留, 对人类健康造成威胁; 生物灭菌法因受环境的诸多限制, 使用范围有限[6]), 而近年来高压脉冲等离子体灭菌技术逐渐被人们重视。高压脉冲灭菌技术是一项新型的非热处理技术, 其机理是对微生物施加高压脉冲电场, 诱导微生物细胞膜出现不可逆的电穿孔, 从而导致微生物死亡。

等离子体是由部分的电子被剥夺后的原子及原子团被电离后而产生的正负电子的离子化气体状态的物质[7], 它是物质存在的基本形式之一, 与固态、液态、气态并列, 被称为物质的第四态[8]。低温等离子体的生成机理如图 1 所示。电子起决定性的作用, 高能电子与气体分子发生非弹性碰撞, 碰撞后将能量转换成基态分子的内能, 从而发生电离、离解、激发等一系列过程, 使气体处于活化的状态。这个过程中产生了具有氧化性的自由基如·OH、O、HO<sub>2</sub>、H 等, 以及产生了氧化性极强的臭氧、过氧化氢等物质, 在放电过程中, 高能电子及这些氧化性物质轰击污染物的不饱和键及 C-C 键, 这些键会发生断键等一系列反应, 引发污染物变为安全的小分子, 从而使得污染物降解去除[9]。

脉冲电场灭菌的机理主要有以下几个方面:

1) 强电场灭菌效应。利用强电场所引起的微生物细胞的穿孔效应来灭菌。由于微生物细胞膜的外表面和膜内具有一定电势差, 当一个外部的电场加到细胞两端时, 会使细胞膜内、外电势差增大, 细胞膜的通透性剧增, 细胞膜上会出现许多小孔, 产生不可的损失, 导致细胞不可逆破裂和最终死亡[10]。

2) 强烈冲击波灭菌效应。当污水中产生脉冲放电时, 大量能量在瞬间释放出来, 液体介质被击穿而形成放电通道, 产生极大的脉冲冲击电压, 使细菌的细胞膜破裂、死亡。

3) 脉冲放电化学灭菌效应。液体物料中在脉冲放电时产生的化学效应也强化和加速了细菌的死亡。由于脉冲放电的大电流及由此而产生的强磁场作用、电解电离作用, 在液体物料中会产生许多等离子体和基本粒子, 如高能电子、激励状态下的 H<sup>+</sup>、OH<sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O 离子团、O、H 原子、H<sub>2</sub>、臭氧分子、光子等。它们在强电场的作用下极为活跃, 有些基本粒子还能穿过已提高通透性的细胞膜而与细胞膜内的生命物质如蛋白质、核糖核酸等相结合, 使之变性, 死亡[11]。

4) 电离作用。在外加电磁场的作用下, 电解质电解出阴、阳离子。这些阴、阳离子在强电磁场的作用下极为活跃, 穿过本来就已经提高通透性的细胞膜, 与微生物内的生命物质如蛋白质、RNA 作用, 因而阻断了细胞内正常化反应和新陈代谢的进行[12]。

## 3. 脉冲放电等离子体灭菌的应用研究

关于脉冲电场杀菌的研究最早由 Cohn 和 Mendelsohn 提出, 他们的研究指出, 使用高电场能让细菌原生质体和红细胞溶解, 并观察到溶解度依赖于电场强度。他们计算了跨越球型细胞膜的电位差, 指出

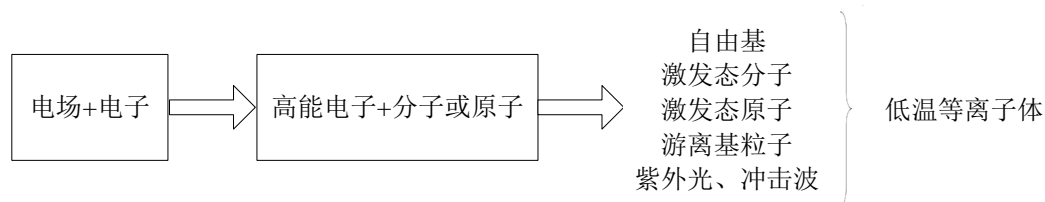


Figure 1. The generation mechanism of low temperature plasma

图 1. 低温等离子体的生成机理

电位差能够引起膜结构的性质变化。近年来,研究者对高压脉冲放电灭菌效果进行了广泛的研究,得到了一些重要的基础数据和结论。自从1967年Sale A J H等[13]发现高压脉冲电场有灭菌作用以来,许多研究者对此表现出浓厚的兴趣。2006年南开大学的刘涛等[14]利用电磁灭菌器对某些细菌进行电磁场灭菌试验,对灭菌效果和脉冲电磁场灭菌参数的选择进行了初步的探讨。结果表明,脉冲电场确有灭菌效果。2007年东北农业大学的房俊龙等[15]设计了100 kV/cm的高场强脉冲电场(PEF)灭菌系统,以荧光假单胞菌为试验靶细胞,经PEF作用180 s,在透射电子显微镜(TEM)下观察处理前后的对比情况,发现经PEF处理过的菌体细胞壁发生了破坏,细胞膜上形成不可修复的穿孔,细胞内含物和细胞碎片泄漏,导致细胞质和细胞核物质的流失,致使细胞死亡。表明所设计的PEF灭菌系统可用于液态食品的灭菌处理试验。2013年Rodriguez-Mendez B.G.等[16]应用介质阻挡放电对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌灭活,结果表明,对该两种细菌均有很高的灭活效率。

### 3.1. 电场强度和脉冲频率的影响

放电的脉冲参数对细菌的灭菌效果影响很大,随着电场强度的增加,脉冲放电重复频率的增加,细菌的灭菌率不断升高。因为单位时间内注入的能量增加,加剧了物质之间的碰撞,也增加了活性物质的数量,从而导致细菌灭活率的增加。如1983年Hulsheger H等[17]测定了不同电场强度和不同处理时间对液态食品中微生物的影响。1992年Jayarameta S等[18]应用高强度脉冲电场抑制短乳杆菌,得出细胞破坏是由于强电场导致的细胞壁破裂的结论。2004年Elez-Martínez P等[19]对果汁中的啤酒酵母用高压脉冲电场进行处理,对产生高压脉冲电场的参数(电场强度,处理时间,脉冲极性,频率,脉宽)进行了评价,并且与巴氏消毒法进行了比较。结果表明,高压脉冲电场对啤酒酵母的杀灭很有效。2007年Perni S等[20]将大肠杆菌K12血清型和鼠伤寒沙门菌在一个电场强度为100 kV/cm、30脉冲/s、每次32 ms、总共持续300 s的条件下进行处理。然后在培养基上进行培养,大肠杆菌减少了2个数量级,而鼠伤寒沙门菌减少了1个数量级。在对处理后的活菌进行计算,仅仅只有1%的细菌没有受到破坏。2008年Gachovska T K等[21]对苹果汁中的大肠杆菌通过高压脉冲电场和紫外线交替进行灭菌,结果表明,二者交替使用对大肠杆菌具有很好的抑制作用。1998年无锡轻工大学的陈健[22]对脱脂乳中的大肠杆菌用高压脉冲电场进行处理,发现用22.5 kV/cm的电场、脉冲数为50次,能使脱脂乳中的99%的大肠杆菌失活。2002年清华大学的史梓男[23]等利用脉冲高压电源对反应器中的西瓜汁施加脉冲电场处理,测定了电场强度为20、30、40 kV/cm和不同处理时间情况下西瓜汁的细菌含量和酶的活性,试验发现,脉冲电压对于西瓜汁的杀菌效果比较明显,试验30 s后平均细菌数下降到2.5%~10%。2005年吉林大学的殷涌光等[24]应用高压脉冲电场非热灭菌技术对原料乳进行预处理,发现原料乳的细菌总数随电场强度、脉冲数、初始温度的增加而降低,随流速的增加而升高。当出口温度为20℃,电场强度E等于50 kV/cm,脉冲频率为1000 Hz,流速为20 mL/min时,能使其菌落总数降低2.6个数量级,从4级原料乳提升至1级原料乳,而不改变其营养结构和风味。2007年上海电机学院的胥飞等[25]对脉冲电场杀伤细胞的机理进行了研究,结果表明:脉冲强度的增加、数目的增加导致细胞死亡数也增加。2007年江南大学的赵伟等[26]研究了高压脉冲电场对液蛋的杀菌效果及其对液蛋功能性质的影响。结果表明,当电场强度为40 kV/cm,处理时间为1660 μs时,液蛋中接种的大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌细菌数量可分别降低4.9、5.4和3.8个lg值。2007年河北大学的张悦等[27]采用板-板式电极结构,短脉冲高压电源供电,形成高压脉冲电场(PEF),对水体中大肠杆菌进行灭活处理,探讨了PEF作用下大肠杆菌失活动力学方程。研究表明:8 kV/cm PEF作用下大肠杆菌灭活效果随脉冲时间增加而提高。2009年福建农林大学的严志明等[28]建立了用高压脉冲电场进行灭菌的动力学模型,通过对酵母菌、青霉菌和大肠杆菌的研究。结果表明,酵母菌对高压脉冲电场最敏感,而青霉菌耐受性最强。2011年江南大学的唐亚丽[29]研究了10、15、20、

25、30 和 35 kV/cm 的高强度脉冲电场对大肠杆菌的杀菌效果及其对细胞膜结构的影响。结果表明, 当电场强度超过 20 kV/cm, 处理时间为 200  $\mu$ s 时, 大肠杆菌细菌数量显著降低。

### 3.2. 导电率和 pH 的影响

调节恰当的菌液 pH 和降低菌液电导率均可提高灭菌率。一般来说, 菌液导电率的增加, 菌体灭活率降低。因为导电率的增加, 菌液中导电离子也增加, 不利于电子的加速以及离子化的形成。因此产生的  $O_3$ ,  $H_2O_2$ , 高能电子及活性物质( $\cdot OH$ ,  $\cdot O$  等)减少, 使得细菌的灭活率降低。如 2005 年 García D 等[30]对两株革兰阳性菌(枯草芽孢杆菌和李斯特菌)和 6 株革兰阴性菌(2 株大肠杆菌, 1 株假单胞菌, 2 株沙门菌, 1 株小肠结肠炎耶尔森菌)用脉冲电场处理后的亚致死情况的检测, 发现革兰阳性菌在 pH 7.0 的情况下对脉冲电场具有抵抗能力, 而革兰阴性菌在 pH 4.0 的情况下对脉冲电场的抵抗力更大一些。2005 年 Gómez N 等[31]对苹果汁中的李斯特菌在不同 pH 的条件下进行了脉冲电场杀灭研究。结果表明, 在低 pH、高压脉冲电场的条件下对李斯特菌杀灭效果很好。2005 年大连理工大学的王翠华等[32]采用双向窄脉冲介质阻挡气液两相放电技术, 对大肠杆菌灭活效果进行了试验, 结果表明, 菌体灭活率随初始含菌量、电场强度、处理时间的增加而增大, 但随着电导率的增加而减小。2006 年江南大学周媛等[33]将高压脉冲电场应用于全蛋液的灭菌, 结果表明, 在蛋液流动性较差, 极易变性且高导电率的情况下, 将接种大肠杆菌或沙门菌的全蛋液置于脉冲电场中进行灭菌, 最佳处理工艺为脉冲电场强度 17.8 kV/cm, 脉冲宽度为 2  $\mu$ s, 每秒 400 个脉冲、处理时间、处理温度、电导率、pH 值及生物综合作用的结果。2011 年浙江万里学院的原勇军等[34]利用管道脉冲强光杀菌系统对流动水中大肠杆菌进行连续杀灭研究, 研究了能量、菌液浓度、pH 值、浊度、色度对蒸馏水中大肠杆菌的灭菌影响, 并在此基础上进行正交实验得出最佳组合水平。

### 3.3. 电极相关参数的影响

减小电极间距和电极直径、提高放电频率和电压峰值可以增加灭菌效率。因为电极直径减小可以降低放电过程的起晕电压, 从而增加了  $\cdot OH$  等氧化粒子的产生[35] [36]; 电极间距越小, 电极间的等离子体通道越易形成; 提高放电频率和电压峰值可以增强电极间的电场强度, 使得单位时间内产生的高能电子数量增加, 导致由于电子轰击产生的各种自由基和  $O_3$  等氧化性粒子含量增加且产生的紫外光强度增强[37]。如 2006 年 Sobrino-López A 等[38]对金黄色葡萄球菌通过一种表面应答反应方法进行高压脉冲电场处理。研究中将金黄色葡萄球菌悬于牛奶之中, 采取不同的脉冲数, 不同的脉冲宽度, 不同的脉冲极性。研究发现, 脂肪的含量与葡萄球菌的杀灭没有太大的关系, 双极脉冲杀灭葡萄球菌的效果要优于单极脉冲。在持续脉冲放电的情况下, 短而高的脉冲灭菌效果要优于长而低的脉冲。2010 年大连理工大学的王天威等[39]利用液体电极沿面放电等离子体反应器, 对大肠杆菌的灭活效果进行了研究。考察了曝气量、初始含菌量和初始 pH 值等因素对大肠杆菌的存活细菌群落总数(CFU)的影响。实验结果表明: 大肠杆菌的存活细菌群落数随初始含菌量、处理时间的增加而减少, 弱碱性条件有利于大肠杆菌的灭活。2014 年浙江大学的郑超等[40]利用双极性高频脉冲电源和自制等离子体反应器, 形成了直径为 6 mm、长 3~5 cm 的氩气等离子体射流。当脉冲电压为 2~5 kV, 脉冲频率为 1~3 kHz, 氩气体积流量为 3.3 L/min 时, 等离子体射流的功率为 1~6 w。

### 3.4. 曝气过程的影响

菌体灭活率随着曝气量的增加变化比较明显, 当曝气量达到某一最大值时, 高压放电产生的  $O_3$ ,  $H_2O_2$ , 高能电子及活性物质( $\cdot OH$ ,  $\cdot O$  等)的量达到饱和, 这时的灭菌效果最好。放电过程中, 伴随气体通入时的灭菌效果好于无气体通入时的效果, 其中尤以通氧气时效果最佳。这是由于通入水中的气体分子被强

电场的高能高速电子轰击成为各种自由基,再直接或被转变成其他粒子与有机物分子发生作用;通入氧气时,可以形成  $O_3$ ,  $H_2O_2$ , 高能电子及活性物质( $\cdot OH$ ,  $\cdot O$  等),由此使得灭活效果得到明显增[41]。如2005年大连理工大学的王翠华等[42]采用双向窄脉冲介质阻挡气液两相放电技术,对大肠杆菌灭活效果进行了试验。研究了曝气量、初始含菌量、处理时间、电场强度及电导率与大肠杆菌灭活率的关系。结果表明,菌体灭活率随初始含菌量、电场强度、处理时间的增加而增大,但随电导率的增加而减小。较佳的曝气量为  $0.75\text{ m}^3/\text{h}$ 。2010年大连理工大学的王天威等[39]利用液体电极沿面放电等离子体反应器,对大肠杆菌的灭活效果进行了研究。考察了曝气量、初始含菌量和初始 pH 值等因素对大肠杆菌的存活细菌群落总数(CFU)的影响。反应系统中,曝气量对大肠杆菌灭活效果影响很大。在曝气量为  $4.5\text{ L}/\text{min}$ ,电源频率  $7\text{ kHz}$ ,电压  $6\text{ kV}$  条件下, $500\text{ mL}$  初始含菌量为  $107\text{ CFU}/\text{mL}$  的大肠杆菌菌液,放电处理  $5\text{ min}$ ,可将全部大肠杆菌杀灭。2015年广州埔玛电气有限公司的钟璐等[43]采用流光放电等离子体技术,研究放电电压、大肠杆菌初始浓度、反应器类型对大肠杆菌灭杀的影响。结果表明:当在水槽装置中,处理温度为室温,大肠杆菌初始浓度为  $480,000\text{ 个}/\text{L}$ ,放电时间为  $45\text{ min}$ ,水样体积  $V = 50\text{ L}$ ,曝气量  $Q = 8\text{ m}^3/\text{h}$ ,放电电压为  $30\text{ kV}$ ,电流  $I = 11\text{ mA}$  时大肠杆菌的去除率达到  $99\%$ 。

#### 4. 现有脉冲放电等离子体灭菌技术研究热点

综合脉冲放电等离子体灭菌技术的研究工作,可作如下归纳[44]:

1) 脉冲放电等离子体研究中所涉及到反应器的电极形式(针-针、针-线、针-板、线-线、线-板和线-筒等)和放电电极位置(液体中,液面上方,液体中与液面上方混合)。其中,针-板电极形式的脉冲放电系统中有高的电场梯度,可以产生更强的电场强度,有利于更多氧化性物种的产生,能提高对细菌的灭活效率,因而受到更多的关注。

2) 脉冲放电等离子体系统中细菌的灭活效率受诸多因素的影响,包括不同的放电形式(火花放电、流光放电和流光-火花混合放电)、电极极性(正极性和负极性)、脉冲能量(脉冲电压和脉冲频率)、溶液条件(初始含菌量、电导率和 pH 值等)、气体条件(载气种类、气体的进入方式和曝气量等)以及溶液中的添加剂(缓冲溶液和各种自由基捕收剂)等。

3) 关于脉冲放电等离子体技术降解有机物机理研究的分析结果,普遍认为是在外加电场的作用下,电极间形成了强电场和非平衡等离子体通道,等离子体通道内的分子和电子相互碰撞,致使通道空间富集了离子、电子、激发态的原子、分子和一些活性的氧化性物种,如  $\cdot OH$ 、 $\cdot H$ 、 $\cdot O$ 、 $H_2O_2$  和  $O_3$  等,这些强氧化性物种在一般的化学反应中不易得到,但在脉冲放电等离子体通道中却可以持续产生,引发一系列复杂的化学和物理反应,使复杂大分子污染物转变成为简单安全的小分子物质,从而使细菌得以灭活。

总之,脉冲放电等离子体灭菌技术兼具有氧化性物种氧化、高能电子辐射、 $O_3$  氧化、高温氧化、紫外光解等多种作用于一体,是一种全新概念的污水处理技术,能有效地对细菌进行灭活。

#### 5. 脉冲放电等离子体灭菌技术的后续研究工作和展望

脉冲放电等离子体由于具有电子密度高、可在常压下运行的特点,已在污水处理灭菌方面体现出较突出的优势。但是,多数研究均针对不同的模拟体系进行,因此目前各机理的提出更具有各自体系的特点,统一的理论框架尚未形成,仍需进一步更深入的研究和佐证。脉冲放电等离子体的研究无论是广度还是深度上都远远不够形成规模化的工业应用,这些都是脉冲放电等离子体发展所面临的技术瓶颈。因此,需要对不同水质的处理机理进行探讨总结,获得大量的基础实验数据及化学反应动力学常数,给放电反应器的设计提供更加合理的依据和指导,使之尽早应用于工业实践[45]。进一步的研究可从以下几个方面展开:

1) 进一步完善脉冲放电等离子体灭菌机理。目前国内外关于脉冲电场各种参数对灭菌效果的影响的

实验研究已有很多, 比如电场强度、脉冲频率、处理时间、电导率和 pH 值等。但这些研究实验需要进一步从理论上进行分析和证明, 没有形成系统化的理论框架, 需要更进一步去完善。

2) 改进目前研制的高压放电发生装置。为了达到更好的处理效果, 必须提高脉冲电场的输出电压等级、改善其波形及稳定性。目前研制出的是脉冲波形为指数衰减脉冲发生器, 而应用更多的是方波脉冲发生器。必须在电路及元器件上做些改动, 如更换更好开断能力的开关、具有更大容量的电容和改变整体的电路结构等。

3) 加快实验理论与现实工业相结合的步伐。目前脉冲放电等离子体反应器的设计都针对于实验研究, 反应空间有限, 处理水量小, 很难放大到实际工程中。可通过实验室的静态分析逐步转向流动态模拟, 改变参数使污水流量能渐渐达到工业净化需求, 开发设计更加合理的脉冲等离子体反应器, 创造更合理的反应器, 使放电产生的活性粒子和污水体系充分接触, 以利于放电综合效应的发挥及细菌的灭活。

4) 充分考虑其他实验影响因素。影响灭菌效果的因素众多, 除了处理时间、脉冲电场强度和脉冲频率外还有很多处理对象本身的因素, 如处理对象的温度、pH 值、电导率、色度和浊度等, 这些我们在以后的实验中必须进行考虑。

5) 将脉冲放电等离子体灭菌的方法与其他方法结合, 设计合理的工艺流程, 发挥脉冲放电等离子体在污水处理以及提高污水中灭菌率方面的优势。

## 基金项目

国家自然科学基金项目资助(51207089)。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘芳 (2007) 电晕放电等离子体灭菌的实验研究. 广东工业大学, 广州.
- [2] 郑家波 (2012) 高压脉冲灭菌效应的理论与实验研究. 重庆大学, 重庆.
- [3] 但果, 邹积岩, 吴为民 (2002) 脉冲电场的非热效应及在液态食品处理中的应用. *农业机械学报*, **3**, 129-133.
- [4] 德力格桑 (2003) 食品加工中超高压灭菌的机理. *实用技术*, **11**, 21-22.
- [5] 方兴东, 关志成 (2000) 高压脉冲放电在水处理中的应用及发展. *高电压技术*, **1**, 29-31.
- [6] 刘芳 (2007) 电晕放电等离子体灭菌的实验研究. 广东工业大学, 广州.
- [7] 赵华侨 (1993) 等离子化学与工艺. 中国科技大学出版社, 合肥, 220-252.
- [8] 格罗斯, 等 (1980) 等离子体技术. 科学出版社, 北京.
- [9] 孙明, 郝夏桐, 鲁晓辉, 等 (2015) 气液两相脉冲放电反应器的设计及其对酸性橙 II 的降解效果. *高电压技术*, **2**, 498-503.
- [10] 周继章, 宫晓炜 (2010) 脉冲放电杀菌技术及其应用研究进展. *动物医学进展*, **7**, 95-98.
- [11] 涂顺明, 邓丹雯, 余小林, 等 (2004) 食品杀菌新技术. 中国轻工业出版社, 北京.
- [12] 刘伟, 梁瑞红, 刘成梅, 等 (2005) 脉冲电磁场杀菌的作用机理及其应用. *粮食与食品工业*, **1**, 52-54.
- [13] Sale, A.J.H. and Hamilton, W.A. (1967) Effect of high electric fields on microorganisms: I. Killing of Bacteria and yeasts. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)—General Subjects*, **148**, 781-788. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4165\(67\)90052-9](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4165(67)90052-9)
- [14] 刘涛, 马海乐 (2006) 脉冲电磁场的杀菌实验研究. *南开大学学报: 自然科学版*, **4**, 54-56.
- [15] 房俊龙, 张长利, 李文哲 (2007) 100 kV/cm 高压脉冲电场杀菌系统设计与试验. *中国乳品工业*, **11**, 38-40.
- [16] Rodriguez-Mendez, B.G. (2013) Gas flow effect on *E. coli* and *B. subtilis* bacteria inactivation in water using a pulsed dielectric barrier discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **41**, 147-154.
- [17] Hulshegerh, H., Pote, J. and Nieman, E.G. (1983) Electric field effects on bacteria and yeast cells. *Radiation and Environmental Biophysics*, **22**, 149-162. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01338893>
- [18] Jayaram, S., Castle, G.S. and Margaritis, A. (1992) Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* cells by the application of high voltage pulses. *Biotechnology and Bioengineering*, **4**, 1412-1420.

<http://dx.doi.org/10.1002/bit.260401116>

- [19] Elez-Martínez, P., Escolà-Hernández, J., Soliva-Fortuny, R.C. and Martín-Belloso, O. (2004) Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* suspended in orange juice using high-intensity pulsed electric fields. *The Journal of Food Protection*, **67**, 2596-2602.
- [20] Perni, S., Chalise, P.R., Shama, G. and Kong, M.G. (2007) Bacterial cells exposed to nanosecond pulsed electric fields show lethal and sublethal effects. *International Journal of Food Microbiology*, **120**, 311-314.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.10.002>
- [21] Gachovska, T.K., Kumar, S., Thippareddi, H., Subbiah, J. and Williams, F. (2008) Ultraviolet and pulsed electric field treatments have additive effect on inactivation of *E. coli* in apple juice. *Journal of Food Science*, **73**, M412-M417.
- [22] 陈健 (1998) 液态食品的高强度脉冲电场杀菌技术. *冷饮与速冻食品工业*, **1**, 20-21.
- [23] 史梓男, 廖小军, 钟葵, 王黎明, 关志成, 陈永明 (2002) 脉冲电场中西瓜汁杀菌钝酶效果分析. *高电压技术*, **S1**, 52-53.
- [24] 段涌光, 金声琅 (2005) 高压脉冲电场非热杀菌技术对原料乳的预处理. *包装与食品机械*, **1**, 1-4.
- [25] 胥飞, 韩强 (2007) 脉冲电场对细胞杀伤效果极其原理的研究. *电工电能新技术*, **2**, 69-72.
- [26] 赵伟, 杨瑞金, 崔晓美 (2007) 高压脉冲电场应用于液蛋杀菌的研究. *食品科学*, **4**, 60-64.
- [27] 张悦, 李国锋, 李杰 (2007) 高压脉冲电场水中杀菌. *河北大学学报(自然科学版)*, **Z1**, 78-81.
- [28] 严志明, 方婷 (2009) 高压脉冲电场对微生物的致死动力学模型. *安徽农学通报*, **19**, 51-53.
- [29] 唐亚丽, 卢立新, 赵伟, 李春阳 (2011) 高强度电场对大肠杆菌细胞膜的影响及致死效应. *食品与发酵工业*, **11**, 30-32.
- [30] García, D., Gómez, N., Mañas, P., Condón, S., Raso, J. and Pagán, R. (2005) Occurrence of sublethal injury after pulsed electric fields depending on the micro-organism, the treatment medium pH and the intensity of the treatment investigated. *Journal of Applied Microbiology*, **99**, 94-104. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02611.x>
- [31] Gómez, N., García, D., Álvarez, I., Condón, S. and Raso, J. (2005) Modelling inactivation of *Listeria monocytogenes* by pulsed electric fields in media of different pH. *International Journal of Food Microbiology*, **103**, 199-206.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.033>
- [32] 王翠华, 吴彦, 张若兵, 李国峰 (2005) 介质阻挡气液两相放电灭活大肠杆菌. *中国环境科学*, **2**, 196-199.
- [33] 周媛, 陈中, 杨严俊 (2006) 高压脉冲电场对全蛋液杀菌的研究. *食品与发酵工业*, **5**, 36-38.
- [34] 袁勇军, 庄吟潮 (2011) 脉冲强光对流动水中大肠杆菌的杀灭效果研究. In: 2011 年第四届国际食品安全高峰论坛, 北京, 2011 年 4 月 21-22 日, 124-128.
- [35] Mok, Y.S. and Oh, J.J. (2006) Degradation of organic contaminant by using dielectric barrier discharge reactor immersed in wastewater. *Plasma Science*, **34**, 2624-2629.
- [36] Kim, Y.K., Kim, S.A., Lee, S.B., Kim, J.K. and Kang, D.-W. (2005) Decomposition of ethylenediaminetetraacetic acid using He-Ar-O<sub>2</sub> dielectric barrier discharge. *Plasma Processes and Polymers*, **2**, 252-255.  
<http://dx.doi.org/10.1002/ppap.200400053>
- [37] Mok, Y.S., Oh, J.J. and Christopher, W. (2008) Degradation of an azo dye Orange II using a gas phase dielectric barrier discharge reactor submerged in water. *Chemical Engineering Journal*, **142**, 56-64.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2007.11.012>
- [38] Sobrino-López, A., Raybaudi-Massilia, R. and Martín-Belloso, O. (2006) High-intensity pulsed electric field variables affecting *Staphylococcus aureus* inoculated in milk. *Journal of Dairy Science*, **89**, 3739-3748.  
[http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72415-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72415-8)
- [39] 王天威, 李杰, 鲁娜, 吴彦 (2010) 液体电极沿面放电高效灭活大肠杆菌. In: 中国物理学会第十六届静电学术会论文集, 中国物理学会, 北京, 556-559.
- [40] 郑超, 徐羽贞, 黄逸凡, 刘振, 闫克平 (2014) 脉冲等离子体射流杀灭表面和水中的细菌. *浙江大学学报*, **7**, 1330-1335.
- [41] 陈伯通, 罗建中, 刘芳 (2006) DBD 等离子体氧化法及其在有机废水中的应用. *工业水处理*, **12**, 5-8.
- [42] 王天威, 鲁娜, 吴彦 (2010) 液体电极沿面放电高效灭活大肠杆菌. *河北大学学报(自然科学版)*, **5**, 556-559.
- [43] 钟璐, 胡小吐 (2015) 流光放电等离子体污水消毒灭菌. *环境工程*, **3**, 56-59.
- [44] 王慧娟 (2009) 脉冲放电等离子体水处理技术及其研究进展. *安徽农业科学*, **22**, 10707-10710.
- [45] 周志刚, 李杰, 吴彦 (2004) DBD 等离子体水处理技术的应用及其反应器的研究. *环境科学与技术*, **8**, 92-94.