

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209775

用于医疗器械快速灭菌的低温等离子体装置研究*

李兵^{1,2}, 辛朝¹, 尚中昱¹, 李昂³, 姜涛¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710054; 2. 西安交通大学微纳制造与测试技术国际合作联合实验室 西安 710049; 3. 西安交通大学口腔医院 西安 710004)

摘要:现有低温等离子体技术存在放电范围小、放电电压高等局限性,不适用于大尺寸医疗器械的消毒灭菌。本文研制了一种灭菌装置,在较低击穿电压下(大气压氦气 325 V,大气压空气 585 V)产生了大面积等离子体,且创新性地印刷电路板上实现了气体放电。通过 COMSOL 等离子体仿真以及实际放电实验,同时实现了低气压与大气压环境下的均匀辉光放电,放电实验结果表明:相对气压在-70~-50 kPa 范围内,击穿电压值最低。通过灭菌实验,验证了此灭菌装置产生等离子体的灭菌效能,并对影响灭菌效果的因素进行了探究,灭菌实验结果表明:电源频率是影响灭菌效果的最关键因素,灭菌时间其次,氦气气压对灭菌效果影响最小。对于一定浓度的大肠杆菌,6 min 即可达到完全灭菌。

关键词:大面积低温等离子体;气体放电;放电特性;消毒灭菌

中图分类号: TH777 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on low-temperature plasma device for rapid sterilization of medical instruments

Li Bing^{1,2}, Xin Zhao¹, Shang Zhongyu¹, Li Ang³, Jiang Tao¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 2. International Joint Laboratory for Micro/Nano Manufacturing and Measurement Technologies, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Hospital of Stomatological Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, China)

Abstract: The existing low-temperature plasma technology has limitations of small discharge range and high discharge voltage, which is not suitable for the disinfection and sterilization of large-sized medical devices. In this article, a sterilization device is developed that generates large-area plasma at lower breakdown voltage values (atmospheric helium 325 V, and atmospheric air 585 V) and innovatively achieves gas discharge on the printed circuit board. Through the plasma simulation in COMSOL software and actual discharge experiment, the uniform glow discharge is achieved under both low and atmospheric pressure environment. The discharge experiment results show that the breakdown voltage is the lowest when the relative air pressure is in the range of -70 to -50 kPa. Through sterilization experiments, the sterilization efficiency of the generated plasma is verified, and the factors affecting the sterilization effect are explored. Results of the sterilization experiment show that the frequency of the power supply is the most critical factor affecting the sterilization effect, following by the sterilization time, which the helium pressure has minimal effect on sterilization. The complete sterilization can be achieved in 6 min for a certain concentration of Escherichia coli.

Keywords: large area low-temperature plasma; gas discharge; discharge characteristics; disinfection and sterilization

0 引言

等离子体作为一项新兴技术,广泛应用于许多领域,

例如材料表面改性^[1-2],现代分析化学^[3-4],辅助燃烧^[5],生物诱变育种^[6],光纤气体传感器^[7],医学消毒灭菌^[8-9],等离子体电子束^[10],气体流动控制^[11],新风系统净化空气^[12]等领域。等离子体按照温度可分为高温等离子体

和低温等离子体^[13],低温等离子体温度接近室温,在医学消毒灭菌应用方面十分广泛。

常见的两种产生低温等离子体的放电结构为等离子体射流和介质阻挡放电^[14],但等离子体射流由于其结构特点,产生的等离子体往往面积很小,不适用于处理较大尺寸(一般腹腔镜器械长20 cm)的医疗器械^[15];传统介质阻挡放电(对向放电)由于电极间隙一般在毫米级别,所以应用受限;新型浮动电极介质阻挡的放电形式往往随着浮动电极的表面结构形貌而变化,可能存在放电不均匀现象^[16],导致灭菌不完全,且放电电压往往在千伏级别,甚至上万伏^[17-22],不利于大规模应用生产。

本文研制了一种灭菌装置,在较低激励电压下,分别在大气压空气以及低气压、大气压密闭氦气条件下实现了均匀放电,产生了大面积等离子体,特别适合对于大尺寸、细长形状的医疗器械的消毒灭菌,同时等离子体可在低气压或大气压环境下产生,也拓宽了其应用范围。

1 等离子体仿真及实验平台搭建

1.1 等离子体仿真

在 Comsol 软件中进行等离子体仿真,通过求解一组漂移扩散方程来计算电子密度^[23-24]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot \mathbf{E}) - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e \quad (1)$$

式中: n_e 是电子密度, t 是时间, \mathbf{E} 是电场强度, μ_e 是电子迁移率, D_e 是电子扩散系数, R_e 是电子源项。

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e \quad (2)$$

式中: M 是指假设有 M 个反应有利于电子密度增加或减少, x_j 是反应 j 的目标物质摩尔分数, k_j 指反应 j 的速率系数, N_n 指总中性数密度。

反应速率系数 k_j 通过式(3)的积分公式,由横截面数据计算得出:

$$k_k = \gamma \int_0^{\infty} \varepsilon \sigma_k(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

式中: m_e 为电子质量, ε 为能量, σ_k 为碰撞横截面, f 是电子能量分布函数,一般采用麦克斯韦能量分布函数。

对于非电子类物质,通常解式(4)来求得物质的质量分数^[25-26]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(\omega_k) + \rho(\mu \cdot \nabla)\omega_k = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k \quad (4)$$

式中: ρ 、 ω_k 、 μ 和 \mathbf{j}_k 分别为气体密度、第 k 种粒子的摩尔分数、平均流速和扩散通量。

仿真设置参数为,大气压氦气条件,阻挡介质氧化硅厚度为100 μm ,放电间隙200 μm ;激励电源信号为正弦交流电压,峰峰值1 500 V,频率100 kHz。

仿真结果如图1所示,图1(a)~(d)分别是受激氦原子质量分数、电子密度、电势和电场随时间变化的分布图。由图1(a)可以看出,经过两个RF周期后达到了周期性稳定解,由图1(d)可以看出放电间隙两端的电压相对均匀,阻挡介质材料中的电场强度比间隙中的电场强度高得多。

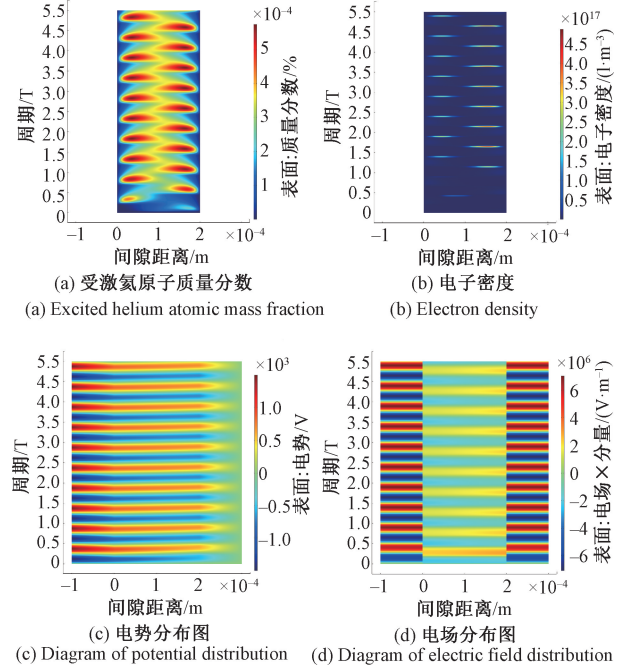


图1 Comsol 等离子体仿真

Fig. 1 Comsol plasma simulation

通过仿真实验,验证了此放电平板能产生等离子体的原理可行性,为后续放电平板的结构设计以及各参数的确定提供了理论指导。

1.2 放电装置实验台搭建

本节包括各子系统及放电平板结构设计介绍。

1) 系统组成

放电装置系统示意图如图2所示,由真空系统、电源系统、供气系统以及放电室组成,其中,真空系统由真空泵及缓冲容器组成,真空泵型号为力辰旋片式泵(2XZ-05),工作气体为氦气,纯度99.999%,电源系统由信号发生器、电源及功率放大器组成,所施加的电压信号为双极性交流脉冲方波,放电室材料为有机玻璃板。

2) 放电平板结构设计

本文设计了两种放电平板,一种是基于印刷电路板基材的放电平板,另一种是基于普通玻璃基材的放电平板,实物如图3所示。由于两种放电平板设计的相似性,所以下大部分研究工作主要围绕印刷电路基材板展开,如未特别说明,实验及相关结论均采用基于印刷电路基材放电平板,玻璃基材则不再赘述。

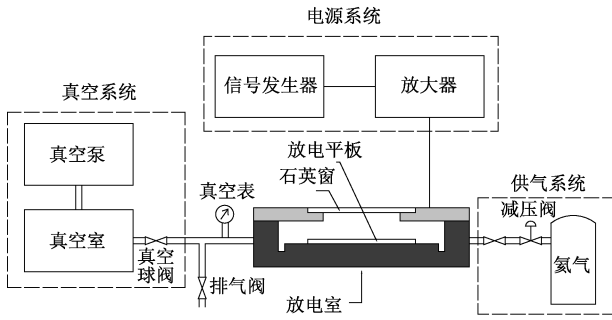


图2 系统整体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the overall system

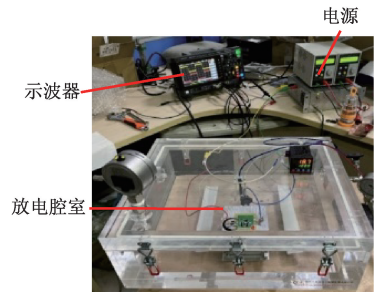


图5 灭菌装置实物

Fig. 5 Physical map of sterilization device

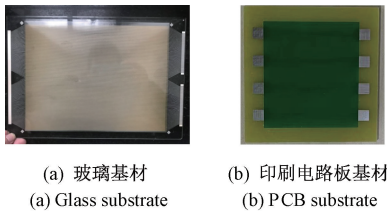


图3 两种放电平板

Fig. 3 Two discharge plates

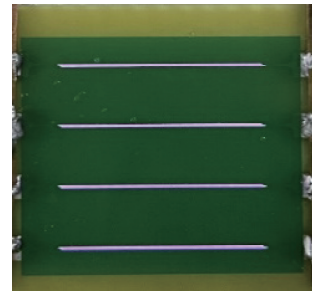


图6 放电图像

Fig. 6 Discharge image

放电平板由基材、电极、焊盘、绝缘层和镀膜层组成,如图4所示,在印刷电路板上平行排列多根条形电极,电极相互之间呈平行关系,相邻两个电极分别与电源正负极相连接,每两个电极组成一个放电单位,等离子体产生于电极对的表面空间,由于放电单元对数量多,最终会产生大面积等离子体。

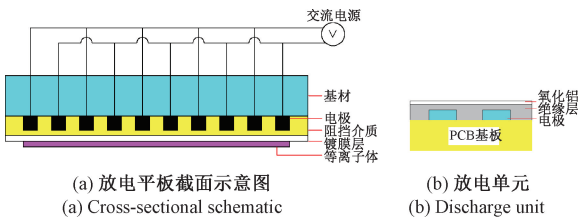


图4 放电平板结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of the discharge plate

电极材料为金属铜,绝缘层为树脂胶膜,镀膜材料为氧化铝,放电平板尺寸为10 cm×10 cm。基板材料选择印刷电路板,不同于传统共面介质阻挡放电选择的玻璃基材,首先是因为其具有良好的物理性能,易于印制高精度电极,有利于产生均匀等离子体;另外与常用材料(如玻璃、陶瓷)相比,其不容易炸裂,安全性较高,同时价格较低,性价比高。搭建的实验装置如图5所示,图6为点亮四对电极的放电图像。

2 实验结果与分析

本文实验分为两部分,1)灭菌装置产生等离子体的物理特性研究,包括放电均匀性、电学特性、温度特性以及光谱特性研究;2)为了验证其灭菌效能而进行的灭菌实验。

2.1 等离子体物理特性研究

1) 放电均匀性研究

本文采用研究施加电压与回路电流的关系作为放电均匀性的判据,选择是德高压探头(型号 Keysight-N2140A)测量电压,力科(型号 LeCroy-CP031)电流探头测量电流。测得的电压电流随时间的变化波形图如图7所示。

可以看出,其产生的电流是脉冲电流,最大幅值是0.25 A,而且在每半个电压波形内,就有一次电流脉冲波形,说明其放电在时间上的同步性,产生了均匀的等离子体。

2) 电学特性研究

(1) 击穿电压与维持电压随时间变化情况

本文分别在大气压空气以及大气压密闭氮气(相对气压0 kPa)环境中,点亮单对电极,测得的击穿电压与维持电压随电极间隙距离变化情况如图8所示。

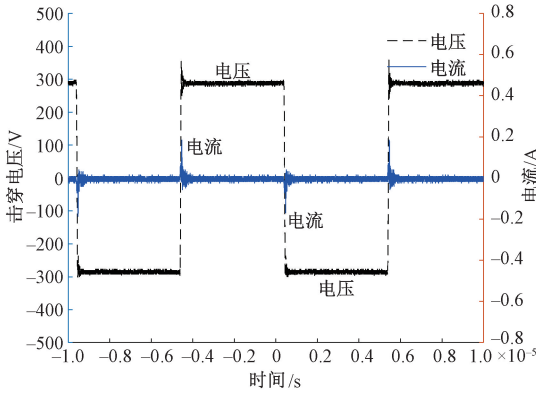


图7 电压、电流随时间的变化情况

Fig. 7 Variation of voltage and current under time

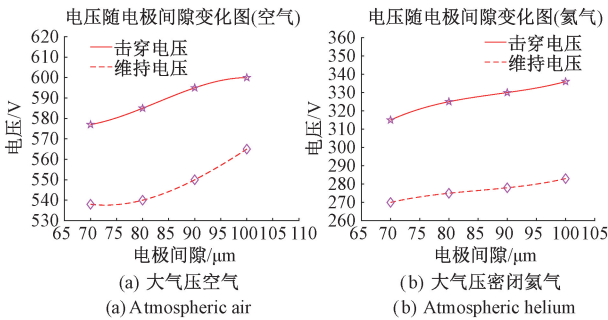


图8 击穿电压与维持电压随电极间隙距离变化情况

Fig. 8 Breakdown voltage and sustaining voltage as a function of electrode gap distance

可以看出,在大气压空气环境下,击穿电压较高,约为600 V左右,且电压随着电极间隙距离增大而缓慢增大;在大气压密闭氦气中,击穿电压值较低,约为300 V。

(2) 阻挡介质对放电影响情况

从电学的角度分析,模型等效示意图如图9所示。

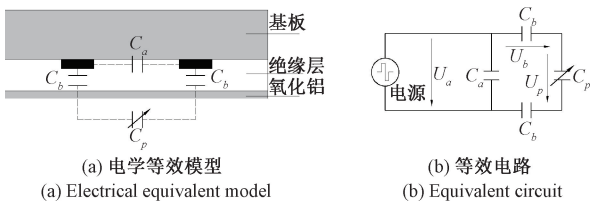


图9 电学等效模型图

Fig. 9 Diagram of the electrical equivalent model

等离子体区域相当于一个可变电容 C_p , C_a 与 C_b 为阻挡介质的电容。 U_a 为电源施加电压, U_b 为阻挡介质上电压, U_p 为等离子体区域电压, 也称气隙电压, 可由以下公式表示^[27]:

$$U_p = U_a - 2U_b = U_a - \frac{2}{C_b} \int_0^t i dt \quad (5)$$

其中, U_b 可表示为:

$$U_b = \frac{Q_b}{C_b} \quad (6)$$

又:

$$C_b = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (7)$$

则结合式(5)~(7)可得:

$$U_p = U_a - 2U_b = U_a - \frac{2dQ_b}{k\epsilon_0 A} \quad (8)$$

式中: i 为电流, Q_b 为电荷量, ϵ 为介电常数, ϵ_0 为绝对介电常数, d 为介质尺寸, A 为介质面积值。

由式(8)可知,随着阻挡材料介电常数 ϵ 的增大,气隙电压会降低。本文对3种不同阻挡介质材料进行了实验研究,分别为环氧树脂(俗名绿油漆)、低介电常数胶膜和石英玻璃,其介电常数值如表1所示。在密闭氦气环境中,不同气压值条件下3种材料的击穿电压随气压变化情况如图10所示,采样间隔为气压差值10 kPa。

表1 材料介电常数

Table 1 Material dielectric constant

阻挡介质	石英玻璃	胶膜	环氧树脂
介电常数	3.2	4.0	4.5

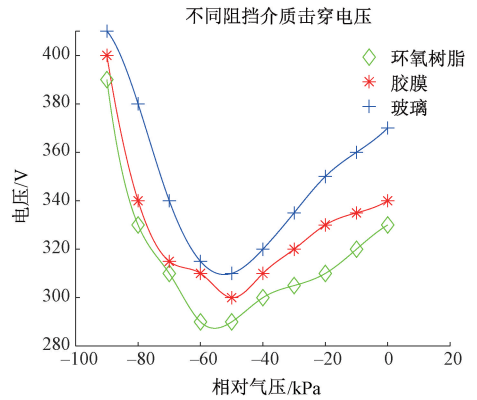


图10 击穿电压随气压值的变化趋势

Fig. 10 Variation trend of breakdown voltage with gas pressure

由图10结果表明,以环氧树脂为阻挡介质时的击穿电压最低,与理论分析相符。而在氦气相对气压从-90~0 kPa变化过程中,击穿电压呈现先降低再上升的趋势,在相对气压为-70~-50 kPa之间,击穿电压变化不大,且为区间最低值。

这可能是低气压值与氦气浓度共同影响的结果,根据气体放电理论,在低气压下击穿电压值较低,但低气压条件下,氦气浓度较低,氦原子和自由电子的数量较少,所以气体电离需要的击穿电压值更高;而气压较高时,氦

气浓度也较高,但由于相对是高气压,根据气体放电理论,气压的升高会导致击穿电压的增大,所以需要较高的激励电压才能电离气体。

实验结果表明,氦气气压在-70~-50 kPa 范围内,其击穿电压值相对较低,且电压值变化幅值不大,这是因为此气压范围同时满足了低气压以及较高气体浓度两种条件,所以其击穿电压值最低。

本文接着研究了不同厚度阻挡介质对击穿电压影响情况,以胶膜为例,厚度分别为 25 和 35 μm 。结果如图 11 所示。

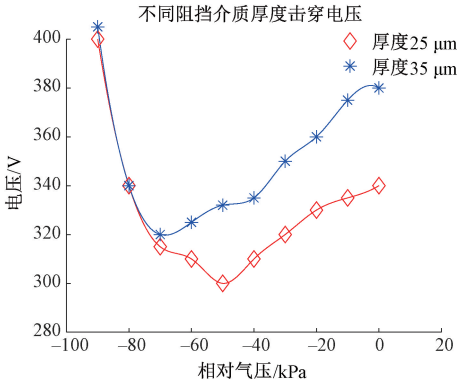


图 11 不同厚度阻挡介质对击穿电压影响情况

Fig. 11 Effect of different thicknesses of barrier dielectrics on breakdown voltage

由实验结果可知,阻挡介质厚度越大,其击穿电压值越大。

3) 温度特性研究

实验时环境初始温度为 17 $^{\circ}\text{C}$,电压 300 V,温度传感器探头距离等离子体 5 mm。测得的等离子体温度随频率和时间变化趋势如图 12 所示。

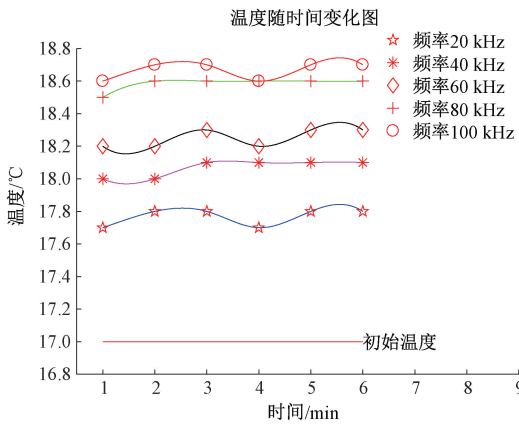


图 12 等离子体温度随频率变化图

Fig. 12 Plasma temperature changes with frequency

从实验结果可知,此放电平板产生的等离子体温度较低(约为 19 $^{\circ}\text{C}$);且温度随着频率的增加而增大,因为频率较高时,电极之间的电场变化快,其激发产生的等离子体成分也较复杂,等离子体浓度较高。

4) 光谱特性研究

采用海洋光学光谱仪(型号 HR4000),光谱仪采集参数设置为:平滑 10,平均次数 5,积分时间 100 ms。

图 13、14 分别是两种放电平板产生的等离子体光谱测量结果,其中图 13(a)和 14(a)未掺杂其他气体,图 13(b)和 14(b)掺杂气体为空气,氦气与空气比例为 10:1。

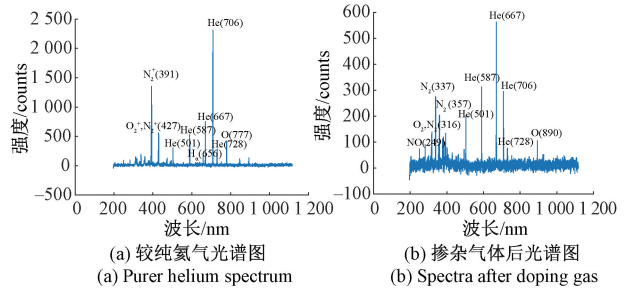


图 13 基于印刷电路平板光谱图

Fig. 13 Spectrum based on PCB substrate

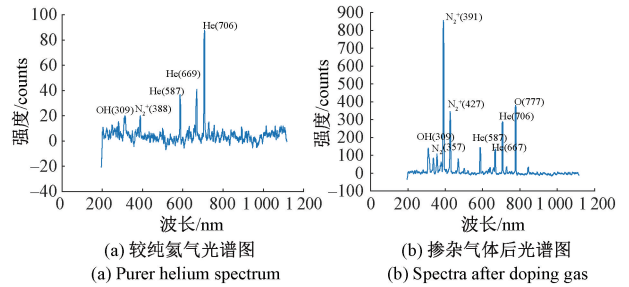


图 14 基于玻璃基材光谱图

Fig. 14 Spectrum based on glass substrate

从实验结果可知:光谱主要是由氮分子谱线带系、氦原子谱线带系、羟基自由基 OH 以及氧 O 组成,而且掺杂后活性粒子、带电粒子种类明显增加。羟基自由基 OH 粒子与氧 O 粒子具有极强的氧化作用,能和细胞膜上的不饱和脂肪酸、蛋白质等物质发生氧化反应;激发态氮分子与氦原子会与细胞膜发生作用,导致细胞膜通透性改变,最终导致细菌灭亡。

在同样的掺杂气体比例下,两种放电平板产生等离子体的粒子种类大体相同,但基于玻璃基材放电平板中含氧活性粒子较基于印刷电路放电平板的种类多,例如在玻璃基材中光谱测量时测出羟基自由基 OH(309)的谱线,且含有氧 O 的谱线,这些含氧活性粒子是灭菌的很关键因素;且又由图(b)可知,玻璃放电平板的等离子体光强也稍高

一些(印刷电路板强度最高为 580 counts,玻璃最高为 860 counts),实际应用于消毒灭菌中时,光强值越高越有利于消毒灭菌;因此本文得出基于玻璃基材放电平板产生等离子体的灭菌效果应该优于印刷电路放电平板。

2.2 灭菌实验

此灭菌实验采用基于玻璃基材的灭菌装置而进行。其产生大面积等离子体的放电图像如图 15 所示。实验条件为:多根电极点亮,大气压密闭氦气环境。

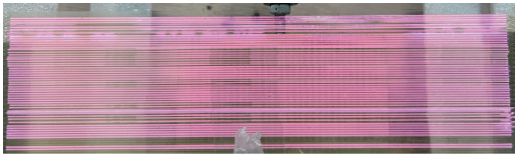


图 15 大面积等离子体
Fig. 15 Large area plasma

细菌的样本制备过程如下:将标准菌株(ATCC)在血琼脂培养基上复苏,置于 37℃ 培养箱(型号 FCD-3000Serials)培养 24 h,挑取单个菌落细菌配 0.5 麦氏浊度菌悬液,取 50 μL 均匀涂于玻片,待干后进行灭菌实验;灭菌后用无菌棉签取玻片表面细菌于无菌生理盐水中(5 mL)并取 0.5 mL 接种至普通琼脂营养培养皿,24 h 后计数灭菌前与灭菌后的菌落数。

灭菌实验对象分别是大肠杆菌和金黄色葡萄球菌,下文将分别介绍。

1) 金黄色葡萄球菌灭菌实验

本节研究了灭菌时间、电源频率与氦气相对气压对于灭菌效果的影响情况,图 16 为灭菌前后菌落在培养皿上分布实物图,图 17、18 为在不同频率、气压值下的灭菌曲线图,使用菌落计数器统计菌落数值如表 2 所示。

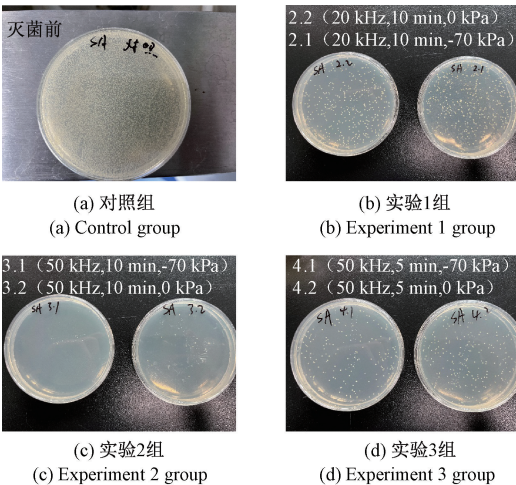


图 16 不同参数对葡萄球菌灭菌效果影响情况
Fig. 16 The influence of different parameters on the sterilization effect of staphylococcus

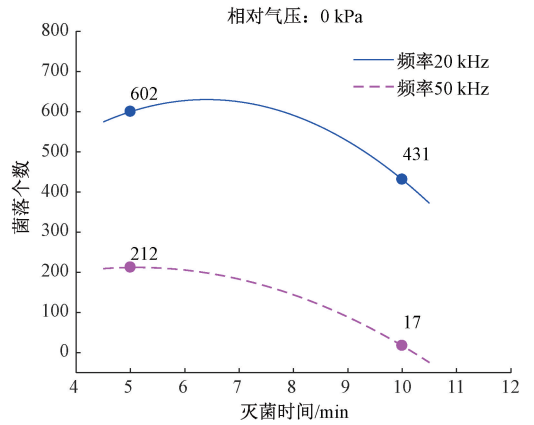


图 17 不同频率灭菌曲线图
Fig. 17 Sterilization curves of different frequencies

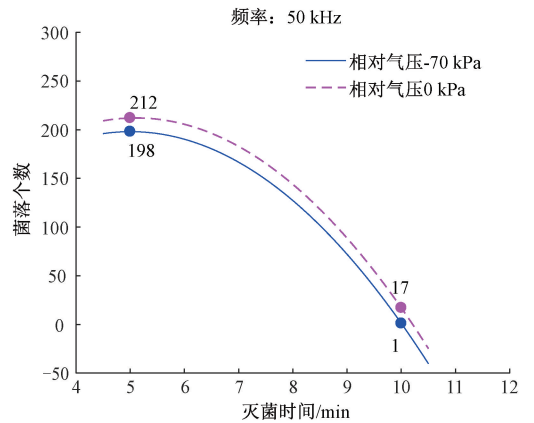


图 18 不同气压灭菌曲线图
Fig. 18 Sterilization curves of different pressures

表 2 不同实验参数下细菌菌落数

Table 2 The number of bacterial colonies under different experimental parameters

名称	时间 /min	频率 /kHz	相对气压 /kPa	菌落数 /EA
灭菌前	0	0	0	9 686
	10	20	-70	420
	10	20	0	431
灭菌后	10	50	-70	1
	10	50	0	17
	5	50	-70	198
	5	50	0	212

由实验结果可知:首先电源频率是影响灭菌效果的最关键因素,其他条件不变,随着电源频率从 20 kHz 提高到 50 kHz 时,菌落数急剧减少(如图 17 所示),同样灭菌 5 min,菌落数分别由 9 686 个减少为 602 和 212 个;灭

菌 10 min,由 9 686 个减少为 431 和 17 个。可见频率的升高大大提高了灭菌效率;

次要影响因素是灭菌时间,由图 17 可知,当其他条件不变时,灭菌时间从 5 min 延长至 10 min,菌落数由原来的 9 686 个分别降至 602 和 431 个,减少范围不是很大;

最后是氦气相对气压对灭菌效果的影响最小,如图 18 所示,相对气压由 -70 kPa 提升至 0 kPa 时,菌落数由 9 686 个分别减少为 212 和 198 个,减少幅度甚微。

2) 大肠杆菌灭菌实验

针对大肠杆菌,进行了透射电镜实验以及影响灭菌效果因素探究两部分工作。

首先是透射电镜实验(使用 HITACHI 公司生产的透射电镜)。制样过程如下:取适量细菌置于生理盐水中,离心成米粒大小沉淀后用固定液固定,经离心机离心(转速 1 000 r/min) 10 min 后,切为超薄切片以便在透射电镜下观察;

实验参数为:大气压密闭氦气条件,电源频率 50 kHz,玻片距离放电平板 5 mm,灭菌时间 5 min;电镜管电压均为 80 kV,放大倍数分别设置为 1 万、3 万、5 万和 10 万 4 种档位。实验结果如图 19~22 所示。

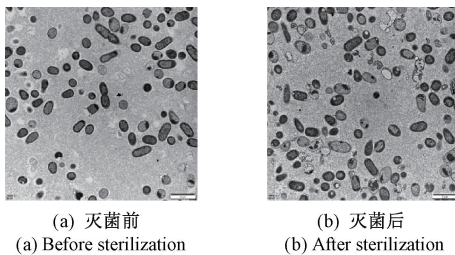


图 19 10 000 倍率透射电镜图

Fig. 19 10 000 magnification TEM image

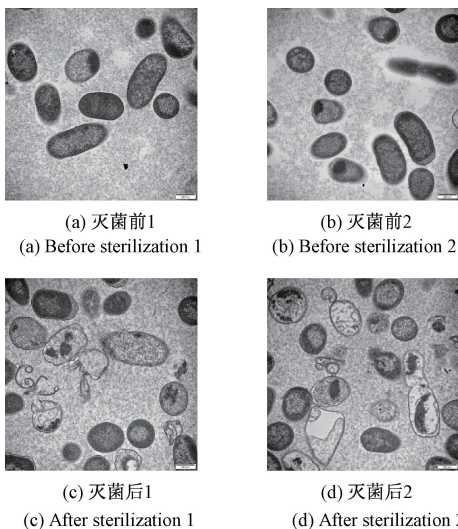


图 20 30 000 倍率透射电镜图

Fig. 20 30 000 magnification TEM image

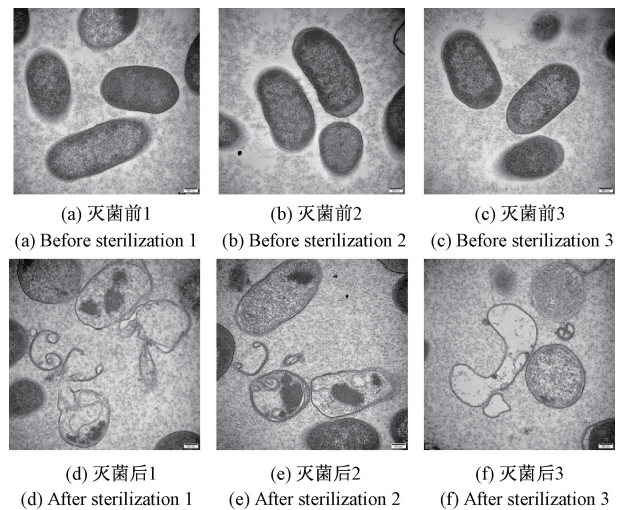


图 21 50 000 倍率透射电镜图

Fig. 21 50 000 magnification TEM image

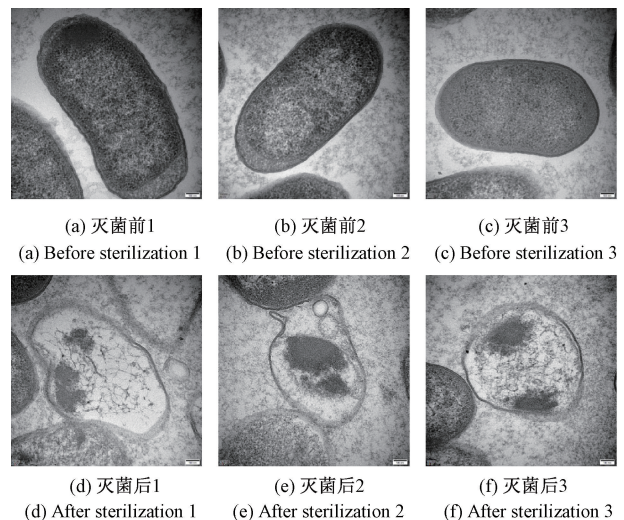


图 22 100 000 倍率透射电镜图

Fig. 22 100 000 magnification TEM image

灭菌前细胞形态完整,细胞膜边界清晰,细胞质均匀;灭菌后,细胞膜以及细胞质溶解,细胞形态有较大变化,多呈现不规则形状。如图 20(a) 中间细胞,其细胞膜完整,细胞质内容物分布均匀;但灭菌后(如图 20(c)),细胞膜已部分溶解,边缘模糊不清,细胞质内容物也已溶解,形状呈现团块状改变。又如图 20(d) 右图,细菌正在进行细胞分裂,由于受到等离子体轰击,细胞膜断裂,细胞质内容物外泄,图 22 可更清楚的看出受损的细胞。

分析其原因,主要有两方面(如图 23 所示),一是由于等离子体中各种粒子对细胞膜轰击,导致细胞膜损伤,通透性改变,引起细胞质内容物外泄,外部粒子和水分进入细胞内部,细菌逐渐消亡;另一方面,如羟基自由基、受激氮原子和电子等粒子穿过细胞膜的微小孔,进入细胞

内部,破坏细胞质(如核糖、染色体等),也与细胞质内物质发生氧化反应,影响了细胞的正常代谢繁殖,致其死亡。两种灭菌机理共同作用,使得等离子体灭菌效果显著。

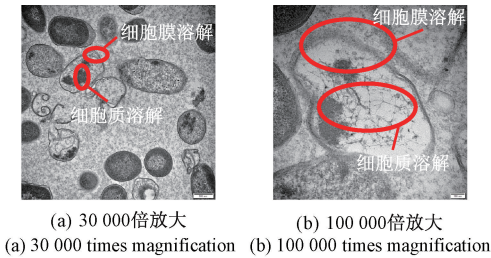


图 23 灭菌机理分析

Fig. 23 Sterilization mechanism analysis

对于大肠杆菌灭菌实验,本文重点研究了时间对灭菌效果的影响情况,分别研究了灭菌 2、4 和 6 min 后的菌落数变化情况,结果如图 24 所示。

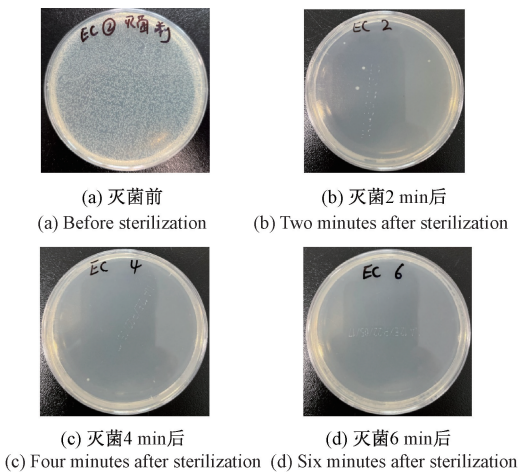


图 24 灭菌前后菌落数变化

Fig. 24 Colony changes before and after sterilization

实验结果表明:灭菌前菌落数约为 11 205 个,灭菌 2 min 后为 4 个,4 min 后为 1 个,6 min 后为 0 个,针对大肠杆菌的灭菌实验,比针对金黄色葡萄球菌的灭菌实验效果要好。

此灭菌装置产生的等离子体对大肠杆菌灭菌效果更好,对于浓度为 0.5 麦氏浓度,含量为 50 μL 的大肠杆菌而言,6 min 即可达到完全灭菌。

分析导致上述实验结果的原因:(1)此装置参数是从之前金葡实验得出的最佳灭菌参数,所以其灭菌效率很高;(2)可能由于大肠杆菌的某些特别的细菌组织和功能,导致等离子体对于大肠杆菌的灭菌效果要好于其他菌种,这需要进一步科学的研究。

3 结 论

本文研究了一种针对大尺寸医疗器械快速灭菌的低温等离子体装置,分别在低气压、大气压氦气以及大气压空气环境下实现了放电,通过研究其放电特性,掌握了两种放电平板产生等离子体的物理特性。通过灭菌实验验证了此灭菌装置的灭菌效能,在宏观与微观层面对灭菌效果及机理进行了评价与探讨,并对影响其灭菌效果的因素进行了研究,结论如下:

1) 当电极间隙设计为微米级(80 μm 左右)时,可在较低电压下(大气压氦气 300~400 V,大气压空气 600 V 左右)实现均匀放电;

2) 选择介电常数较大的阻挡介质,有利于击穿电压的降低;且在低气压一定范围内(相对气压 -70 ~ -50 kPa),击穿电压值较低;阻挡介质厚度尺寸越大,击穿电压越大。

3) 击穿电压随着电极间隙的增大而增大;等离子体温度随着电源频率增加而升高;当氦气与空气掺杂比例为 10:1 时,是较优掺杂比例。

4) 等离子体的两个微观灭菌机理,由于等离子体导致细胞膜通透性改变,细胞壁溶解和等离子体损坏了细胞质内容物,导致细胞质溶解;

5) 电源频率是影响灭菌效果的最关键因素,灭菌时间其次,氦气气压对灭菌效果影响最小。

参考文献

- [1] ABUSRAFA A E, HABIB S, KRUPA I, et al. Modification of polyethylene by RF plasma in different/mixture gases[J]. Coatings, 2019, 9(2):145.
- [2] TIMOSHINA Y A, VOZNESENKY E F, KARNOUKHOV A E, et al. Application of preliminary plasma modification the surface of synthetic materials in the processes of application of functional metal coatings[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1588(1):012053.
- [3] 宋言明,张雄雄,孙广开,等. 纳米金改善激光诱导等离子体探测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1):21-27.
- [4] SONG Y M, ZHANG X X, SUN G K, et al. Study on the improvement of laser induced plasma detection method by Au-nanoparticles[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 21-27.
- [4] 黄静,廉小亲,陈彦铭,等. 基于 OLS 法及改进 LM 法的 ICP-AES 非线性标准曲线拟合方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8):99-106.

- HUANG J, LIAN X Q, CHEN Y M, et al. Research on nonlinear standard curve fitting method of ICP-AES based on OLS algorithm and improved LM algorithm [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 99-106.
- [5] JU Y, SUN W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 48:21-83.
- [6] HOU J L, ZHANG X Y, WANG G X, et al. Novel breeding approach for Japanese flounder using atmosphere and room temperature plasma mutagenesis tool[J]. BMC Genomics, 2019, 20(1):323.
- [7] 徐荣靖,张健,陈恺,等. 纳米材料修饰的光纤气体传感器研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 1-16.
- XUN R J, ZHANG J, CHEN K, et al. Research progress of optical fiber gas sensors modified by nano-materials[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 1-16.
- [8] TONMITR N, MORI T, Z TAKAMI M, et al. Time-modulated lf-microwave hybrid plasma for surface sterilization[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(1):154-161.
- [9] ERMOLAEVA S A, VARFOLOMEEV A F, CHERNUKHA M Y, et al. Bactericidal effects of non-thermal argon plasma in vitro, in biofilms and in the animal model of infected wounds[J]. Journal of Medical Microbiology, 2011, 60(1):75-83.
- [10] ZOLOTUKHIN D B, LOMAEV M I, OKS E M, et al. Beam-plasma discharge in a dielectric cavity by electron beam injection [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28(3):035018.
- [11] 吴云,李应红. 等离子体流动控制研究进展与展望[J]. 航空学报, 2015, 36(2):381-405.
- WU Y, LI Y H. Progress and outlook of plasma flow control [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(2): 381-405.
- [12] PEMEN A J M, CHIRUMAMILLA V R, BECKERS F, et al. An SDBD plasma-catalytic system for on-demand air purification [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(12): 4078-4090.
- [13] FRIDMAN A, CHIROKOV A, GUTSOL A. Non-thermal atmospheric pressure discharge [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(2): R1-R24.
- [14] JEON J. Surface micro-discharge (SMD): Analysis of the antimicrobial effect and the plasma chemistry [J]. Ludwig Maximilians Universität München, 2015, 19: 178734.
- [15] ZHU H, JIANG L, XIE S, et al. Plasma-jet sterilization enhanced by ion wind[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum Surfaces and Films, 2021, 39(3):033001.
- [16] FRIDMAN G, PEDDINGHAUS M, BALASUBRAMANIAN M, et al. Blood coagulation and living tissue sterilization by floating-electrode dielectric barrier discharge in air [J]. Plasma Chemistry & Plasma Processing, 2007, 26(4):425-442.
- [17] 李雪林,刘峰,方志. 三维共面介质阻挡放电装置及放电特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(9):150-156.
- LI X L, LIU F, FANG ZH. Research on three dimensional coplanar dielectric barrier discharge device and its discharge characteristics [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 150-156.
- [18] 孔得霖,何锋,朱平,等. 基于 DBD 的均匀大面积等离子体射流研究[J]. 中国科学:物理学,力学,天文学, 2020, 50(9):152-161.
- KONG D L, HE F, ZHU P, et al. Research on uniform large-area plasma jet based on DBD [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(9): 152-161.
- [19] MASOUD S, PETR D, MONIKA S, et al. Mineralization of flexible mesoporous TiO₂ photoanodes using two low-temperature dielectric barrier discharges in ambient air[J]. Contributions to Plasma Physics, 2019, 59(1): 102-110.
- [20] HOMOLA T, B PONGRÁC, M ZEMÁNEK, et al. Efficiency of ozone production in coplanar dielectric barrier discharge [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2019, 39(5):1227-1242.
- [21] IMEK M, AMBRICO P F, HODER T, et al. Nanosecond imaging and emission spectroscopy of argon streamer micro-discharge developing in coplanar surface DBD [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2018, 27(5):055019.

- [22] CAILLIER B, THERESE L, BELENGUER P, et al. Parametric studies of a mercury-free DBD lamp [J]. Plasma, 2021, 4(1):82-93.
- [23] HAGELAAR G, PITCHFORD L C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models [J]. Plasma Sources Science & Technology, 2005, 14(4):722-733.
- [24] 李志刚,程立,袁忠才,等. 高功率微波作用下等离子体中的雪崩效应研究[J]. 物理学报, 2017, 66(19):195202.
- LI ZH G, CHENG L, YUAN ZH C, et al. Avalanche effect in plasma under high-power microwave irradiation[J]. Acta Phys. Sin, 2017, 66(19):195202.
- [25] HE W, LIU X H, XIAN R CH. et al. Kinetics characteristics and bremsstrahlung of argon DC discharge under atmospheric pressure [J]. Plasma Science & Technology, 2013, 15(4):335-342.
- [26] 李志刚,程立,马志伟,等. 入射频率对高功率微波与等离子体相互作用的影响分析[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(4):47-52.
- LI ZH G, CHENG L, MA ZH W, et al. Effect of the incident frequency on the interactions between high power microwave and plasma[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(4):47-52.
- [27] 王新新. 介质阻挡放电及其应用[J]. 高电压技术,

2009, 35(1):1-11.

WANG X X. Dielectric barrier discharge and its application [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1):1-11.

作者简介



李兵,分别在1988年、1991年和2004年于西安交通大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为精密测试技术、气体放电等离子体、无损检测等。

E-mail: lb@xjtu.edu.cn

Li Bing received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Xi'an Jiaotong University in 1988, 1991, and 2004, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include precision test technology, gas discharge plasma and nondestructive testing.



辛朝(通信作者),2013年于西安石油大学获得工学学士学位,现为西安交通大学硕士研究生,主要研究方向为大气压低温等离子体在医学中的应用。

E-mail: 1768996233@qq.com

Xin Zhao (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 2013. He is currently a master student at Xi'an Jiaotong University. His main research interest is application of atmospheric pressure low-temperature plasma in medicine.