

等离子体在环境病原微生物消杀中的应用

邵 涛¹, 窦立广¹, 张 帅¹, 卢新培², 刘大伟², 张冠军³, 刘定新³, 方 志⁴,
赵亚军⁴, 金珊珊⁴, 杨德正⁵, 张远涛⁶, 陈支通^{7,8}, 徐庆南⁷, 许桂敏⁹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074; 3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 4. 南京工业大学电气工程与控制科学学院, 南京 211816; 5. 大连理工大学物理学院, 大连 116024; 6. 山东大学电气工程学院, 济南 250061; 7. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055; 8. 国家高性能医疗器械创新中心, 深圳 518100; 9. 长安大学能源与电气工程学院, 西安 710018)

摘 要: 近年来, 等离子体技术在环境病原微生物消杀领域迅速发展, 具有良好的应用前景。该文首先介绍了低温等离子体产生原理、物理特性, 其次介绍了等离子体对细菌、真菌、病毒等不同病原微生物的灭活效果以及影响灭活效果的相关因素, 并分析了等离子体在微生物灭活过程中的物理化学机制、细胞生物学机制以及两者的协同机制。此外, 讨论了等离子体在微生物灭活及环境消毒中的实际应用, 包括对大气环境、医疗器械、伤口及皮肤表面、口腔等。最后针对当前等离子体消毒杀菌技术研究现状和存在问题做出了分析, 展望了等离子体技术在微生物灭活与环境消毒杀菌应用中的发展趋势和潜力。

关键词: 等离子体; 活性物质; 微生物灭活; 消毒; 杀菌

Applications of Plasma Technology for Microbial Inactivation and Environmental Disinfection

SHAO Tao¹, DOU Liguang¹, ZHANG Shuai¹, LU Xinpei², LIU Dawei², ZHANG Guanjun³, LIU Dingxin³,
FANG Zhi⁴, ZHAO Yajun⁴, JIN Shanshan⁴, YANG Dezheng⁵, ZHANG Yuantao⁶, CHEN Zhitong^{7,8},
XU Qingnan⁷, XU Guimin⁹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. School of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China; 5. School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 6. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 7. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 8. National Innovation Center for Advanced Medical Devices, Shenzhen 518100, China; 9. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: Recently, plasma technology has rapidly developed in the field of pathogenic microorganism inactivation and environmental disinfection, showing promising application prospects. This paper first introduces the generation principles and physical properties of low-temperature plasma, and then discusses the inactivation effect of plasma on different pathogenic microorganisms such as bacteria, fungi, and viruses, as well as the factors influencing these effects. This paper also analyzes the physical-chemical mechanisms, cell-biological mechanisms, and their synergistic effects of both. Furthermore, the practical applications of plasma in microbial inactivation and environmental disinfection are discussed, including atmospheric environment, medical devices, wounds and skin surface, and oral cavity. Finally, this paper analyzes the current research status, existing problems, and future development trends and potential of plasma disinfection and sterilization technology.

Key words: plasma; reactive species; microbial inactivation; disinfection; sterilization

0 引言

环境消毒杀菌是指通过各种物理化学手段去除或杀灭环境中大部分的病原微生物(不包括芽孢)的过程,使病原微生物无法再引起感染或繁殖,即微生物灭活,以达到净化环境、保护人类健康的目的。根据《消毒技术规范》要求,采用物理或化学消毒方法对微生物的杀灭率须达到 99.9%或杀灭对数值 ≥ 3 。杀菌是指杀死病菌的过程,从广义上讲杀菌属于消毒的一部分,旨在减少或杀灭细菌,但其不一定能真正实现消毒或灭菌。而灭菌是指使用物理和化学方法消除或杀灭物体上所有的微生物,且其对微生物的灭杀率须达到 99.999 9%或杀灭对数值 ≥ 6 。环境消毒的发展历史可以追溯到古代文明时期,尽管当时对微生物的认知尚不充分,人们已经开始采用一些基本的热和化学方法来控制疾病的传播^[1-2]。

在汉代,人们常用硫磺燃烧,利用其烟雾来消毒空气和物品,这种方法类似于古罗马使用硫磺的方式^[3]。中世纪和文艺复兴时期,人们对疾病传播的认识有所提高,促使采用更加系统的消毒措施。17 世纪末,安东尼·范·李芬霍克发明了显微镜^[4],使人们能够首次直接观察到微生物,从而加深了对微生物存在和传播的理解。到 18 世纪末和 19 世纪初,路易斯·巴斯德和约瑟夫·利斯特的贡献被视为现代消毒灭菌理论的奠基石。巴斯德在 1861 年提出了热处理(巴斯德消毒法)来控制微生物,并通过实验证明了微生物与疾病的关联^[5]。利斯特在医疗实践中推广了使用酚类消毒剂和煤焦油减少手术感染的发生率,这一方法标志着现代外科消毒的重大进展^[6]。

进入 20 世纪初至中期,随着微生物学和化学技术的迅速发展,消杀技术实现了现代化。20 世纪初,紫外线消毒开始应用于水和空气处理,广泛用于公共卫生和医疗保健领域^[7]。随后,氯化物、醇类和醛类等化学消毒剂的发展显著提高了消毒的效率和广谱性,已经成为医疗设施和食品加工中的重要工具^[8]。

病原微生物消杀在现代医疗、公共卫生、日常生活、食品安全及水处理领域中具有重要作用^[9-10]。而不同的应用场所需要的消杀手段不同,通过适当的环境消杀措施,可以有效地杀灭或去除病原微生物,防止它们在人群中传播引发疾病^[11-13]。

1 传统环境消毒法及局限性

传统消毒方法包括热消毒、化学消毒和辐射消毒等,这些方法在实践中被广泛应用,虽然有效,但也存在一定的局限性。

热消毒法是最古老且广泛应用的消毒方法之一,利用高温杀灭微生物。主要包括煮沸、蒸汽消毒和烘烤等。主要通过将液体或者蒸汽加热至 100 ℃ 以上,杀灭大部分细菌和病毒,但对一些耐热的孢子和病毒效果较差^[14]。然而,热消毒法需要特定设备和较长处理时间,对某些材料可能造成损坏或变形,限制了其应用范围。

化学消毒法利用化学物质杀灭或抑制微生物生长,具有广谱杀菌能力,但其腐蚀性和对环境的潜在危害需谨慎使用^[15-16]。辐射消毒法主要利用紫外线(UV-C 波段)和电离辐射(如伽马射线)等进行消毒,能破坏微生物的脱氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid, DNA)和核糖核酸(ribonucleic acid, RNA)结构达到灭杀效果^[17-18]。但其需要昂贵的设备和严格的操作规范,限制了其广泛应用。

随着科技的进步和需求的变化,研究人员正在探索新的环境消毒方法使微生物灭活,如低温等离子体(low-temperature plasma, LTP)技术,以弥补传统方法的局限性并提高效率 and 安全性^[19-20]。等离子体中拥有丰富的活性物质,具有绿色、环保、便携、高效等优势,有望在未来成为环境消毒领域的重要发展方向,为各行各业提供更安全、更高效的消毒解决方案。图 1 介绍了关于本综述等离子体环境病

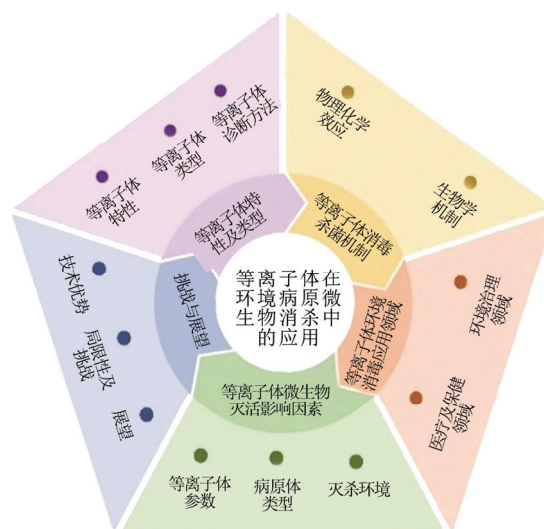


图 1 等离子体在环境病原微生物消杀中应用的框架

Fig.1 Framework of plasma technology for microbial inactivation and environmental sanitization

原微生物消杀中应用的整体结构图,分别从等离子体特性、消杀应用中常见的等离子体类型、等离子体消杀机制、等离子体环境消杀应用领域以及影响等离子体消杀效果的影响因素等方面进行详细综述,并对等离子体技术在环境消杀领域面临的挑战进行描述。

2 等离子体特性及常见类型

2.1 等离子体特性及诊断方法

2.1.1 气体温度特性及诊断方法

等离子体中的气体温度能够直接影响非电子作用过程反应的速率常数,决定了活性物质的作用过程。在大气压等离子体中,气体温度的诊断主要通过发射光谱的2种途径实现^[21]:1)基于分子转动温度拟合法;2)谱线展宽法。由于分子的转动能级间隙较小(10^{-2} eV),在大气压条件下,分子间频繁的碰撞可以使转动能量和平动能量达到平衡,即分子的转动温度近似等于气体温度^[22-24]。值得注意的是,不同气体和不同温度的等离子体能够通过振动-平动和振动-振动过程来影响振动温度^[25-27],电子之间的能量可以转换为振动能,而振动激发分子之间的碰撞弛豫可以产生转动能。较高的振动温度可表明振动激发态的活性物质浓度高,可以有效地促进等离子体中的化学反应,对降低反应阈值具有重要的价值。

2.1.2 活性物质特性及诊断方法

在放电过程中,等离子体中具有高能电子、激发态分子、离子、原子以及自由基等多种活性粒子,由于其高能量状态或未配对电子的存在而表现出极高的化学活性,并且不同类型的活性物质对不同的化学物质具有选择性的反应能力^[28-29]。

活性粒子的诊断技术包括光学发射光谱法、激光诱导荧光法、吸收光谱法、质谱法和气相色谱法等。其中,光学发射光谱技术(见图2(a))基于原子或离子在等离子体中的能级跃迁^[30]。当等离子体中的电子从高能级跃迁到低能级时,会释放出特定波长的光子,形成发射光谱。这些光子通过不同的波长对应于特定的能级差,通过检测这些波长来确定等离子体中各种粒子的能级结构和物理状态。

激光诱导荧光(laser induced fluorescence, LIF)是一种主动式诊断技术(图2(b))^[31],具有极高的灵敏度(可探测粒子数密度低至 10^6 cm⁻³)、精细的空间分辨率(微米量级)以及纳秒量级的时间分辨能力,

能够在对等离子体环境产生微小扰动的前提下,实现对基态粒子绝对浓度的高精准测量,并能够探测低能级或基态的自由基^[32]。然而,在大气压条件下,尤其是在气体混合物或反应速率系数未知的情况下,可能会影响信号的强度和全局速率常数的准确性。为了克服这些局限性,在实际应用中,LIF测量须通过校准来确保结果的可靠性^[33]。

吸收光谱法是诊断LTP活性物质的另一种重要的检测方法,具有简单可靠、可原位检测及非侵入性检测的优势。其原理是由于不同物质具有不同的内部结构,在吸收电磁波时能表现出其特征性的吸收光谱^[34-35],据此可对物质进行定量和定性分析。LTP的电子数密度和电子温度的诊断一般采用激光散射法,包括瑞利散射(图2(c))^[36]、汤姆逊散射和拉曼散射,通过检测散射光强度、频移及其角度等信息获得粒子重量、尺寸、分布及聚集态结构等信息,并且该方法能获得高时空分辨率^[37]。

质谱法是一种侵入式方法(图2(d))^[38],可以同时给出LTP体系中中性粒子和正负离子等信息^[36]。其原理是利用电场和磁场将运动的正负离子按照其质荷比进行分离,来定性定量分析离子成分及浓度。气相色谱法是一种分析速度快、分离效率高的分离分析方法。主要测量原理是根据本身特性存在差异,分离后的气体样品通过检测器采集处理获得检测信号,记录成色谱图^[39]。通过与标准样品图谱进行比较,根据每个色谱峰的保留时间对样品的种类进行定性分析,根据峰面积的大小对活性物质浓度进行定量检测。

2.2 环境消毒应用中常见等离子体类型

当前,在等离子体消毒和微生物灭活领域,一系列放电技术已被证实能有效生成具有灭杀病原微生物作用的活性物质,常见的等离子体放电形式包括电晕放电、介质阻挡放电、滑动弧放电以及微波放电等。

电晕放电是一种在特定条件下发生的气体放电现象,其特征在在于在尖锐电极,例如针尖、平板边缘或者细线等部位,在高压驱动下产生非均匀的电场,这种不均匀的电场导致电荷在电极尖端积聚,进而引发局部电离,形成电晕放电^[40],其电极结构如图3(a)所示。在空气中,电晕放电产生的主要消毒因子为臭氧(O₃),O₃具有强氧化性,能够促进氧化代谢并激活免疫系统,从而在一定程度上发挥消杀作用。然而,电晕放电的强度相对较弱,导致O₃

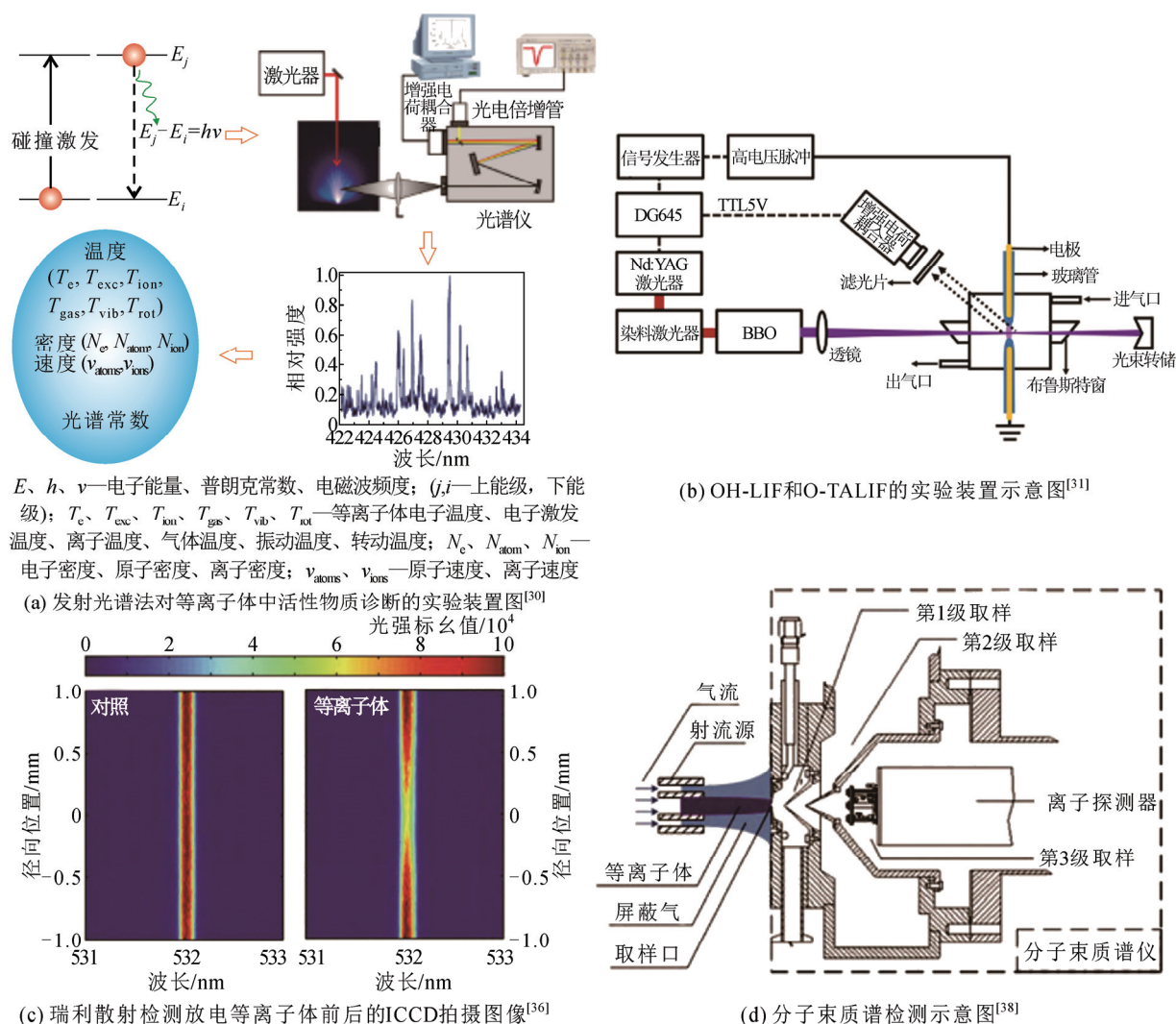


图2 活性粒子的诊断技术

Fig.2 Diagnostic techniques for active particles

及活性粒子的效率并不高^[41], 这种局限性使得电晕放电在消杀效率和应用范围上受到限制^[42], 尤其是在需要高均匀性的大型消毒应用中, 电晕放电可能并不能满足要求。

介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)是在高压和接地电极之间插入1个或多个绝缘介质的放电形式, 又称为“无声放电”^[43]。这种放电的电极结构设计多样, 主要包括板-板式、同轴圆柱式、针-板式和沿面式等^[44-47], 这些结构根据应用需求和放电特性的不同而有所选择, 常见的电极结构如图3(b)所示^[48]。介质阻挡放电的特征在于绝缘介质的介入, 限制微放电通道的产生, 使得电子与其他低能量活性粒子之间的碰撞概率降低, 从而抑制了非热力学平衡等离子体向热力学平衡状态过渡^[48-49]。

在介质阻挡放电结构的基础上, 通过在受限气

流管内部或外部的电极施加高压, 利用电场与气流的协同作用, 将等离子体释放到大气环境中形成等离子体射流, 电极结构如图3(c)所示^[50]。该技术主要采用惰性气体(例如 He 或 Ar), 并辅以少量的活性气体作为工作介质^[51]。放电产生的等离子体通常具有一定的长度, 这一特性使得活性物质与高压电场得以分离, 且放电产生的气体温度接近室温, 从而允许进行温和的接触式杀菌处理, 同时避免了对人体和热敏感材料造成热损伤的风险。放电时产生的活性氮、活性氧等, 能够迅速作用于样品表面, 针对特定区域高效消毒^[51-52]。

滑动弧放电是一种在流动气体中产生的放电现象, 其特征是在电极间最窄的间隙处发生气体击穿, 并在流动气体的作用下被拉长, 形成一道明亮的弧光放电现象, 如图3(d)所示^[53]。这种放电具

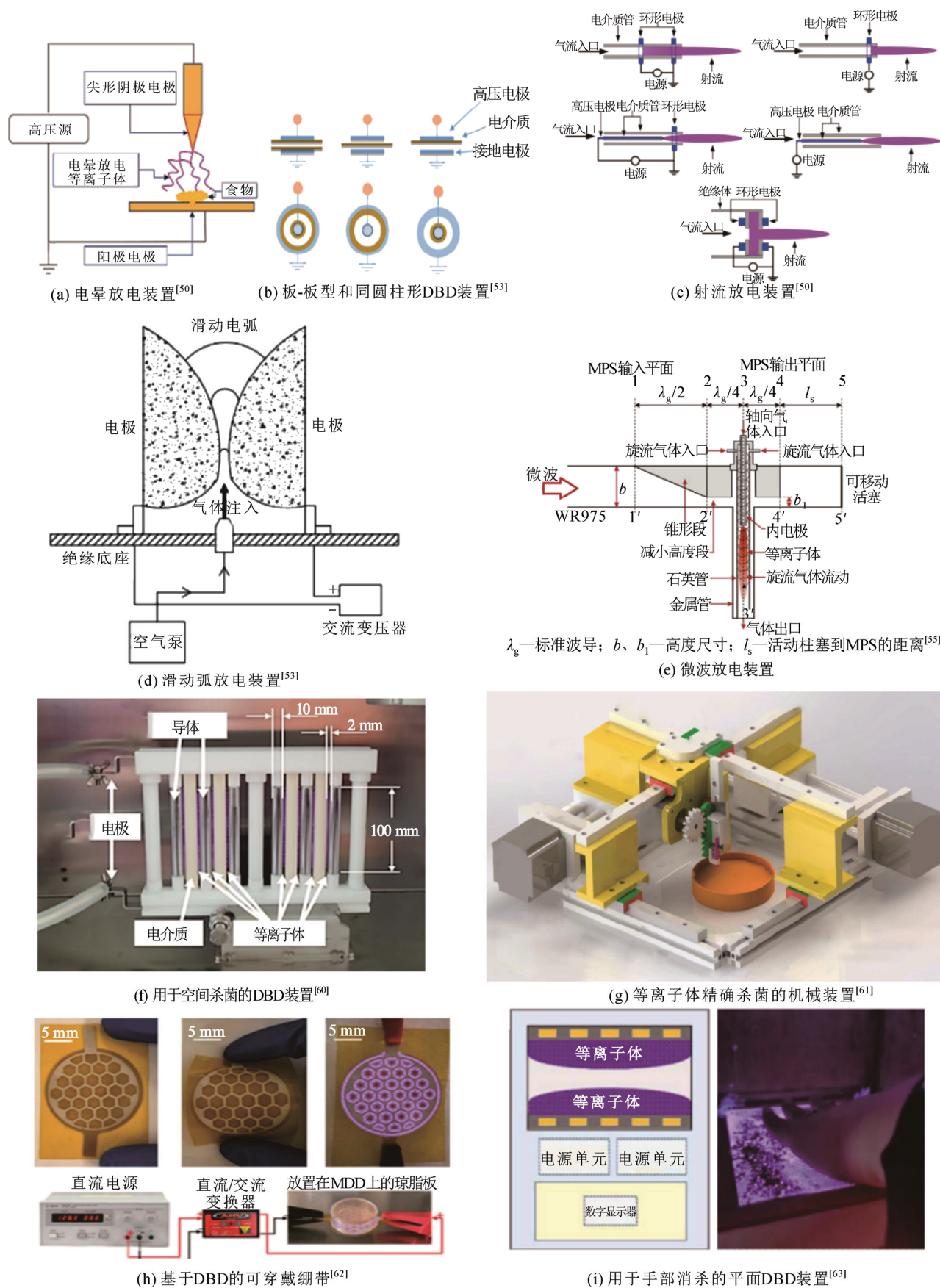


图3 消毒杀菌中常用的等离子体类型

Fig.3 Types of plasma commonly used in disinfection and sterilization

有热等离子体的特性, 具有很高的能量利用效率, 能够有效地促进化学反应进行。在电弧的形成和熄灭的循环过程中, 能够产生较高浓度的活性物质^[54], 然而, 在处理某些敏感材料时可能因滑动弧产生的高温而受损。

微波放电技术主要利用高频电磁波(通常在微波频段)来激发和维持气体中的等离子体状态, 微波放电装置产生的微波通过波导管传输, 并经过微波窗进入放电室。微波放电具有电离率高、电子数密度高等优势, 可以在短时间内对微生物灭活。如图 3(e)所示^[55], 与传统放电方式相比, 微波放电不需要金属电极, 从而避免了放电过程中对被处理材料造成潜在的污染风险^[56]。然而, 微波等离子体技术在应用过程中涉及微波辐射等潜在安全问题, 因此在消毒杀菌的操作中, 必须设计并实施严格的安全防护措施^[57]。

然而, 在实际应用中常要求等离子体的气体温度保持或接近常温, 且需要较高的活性粒子浓度以实现消毒杀菌的效果^[58-59]。因此, 开发满足应用场景的等离子体源是将等离子体用于环境中病原微生物消杀的前提。Park 等人利用半桥逆变电源驱动的 DBD 装置降低了热量输出(见图 3(f))^[60]。2022 年, 桂林电子科技大学李华老师课题组开发了可自动调节处理范围的等离子体喷射装置(见图 3(g)), 实现基于机器视觉的等离子体精密杀菌^[61]。Eskandari 等人基于 DBD 结构在蜂窝状的 PET 薄膜上丝网印刷 Ag 油墨作为高压和地电极(见图 3(h)), 开发出柔性 and 印刷的微等离子体放电结合的可穿戴装置, 并将其用于消毒烧伤加速伤口愈合的过程^[62]。2024 年, 南京工业大学方志老师课题组研制了一种微秒脉冲电源激励的平面 DBD 集成等离子体手部卫生装置(如图 3(i)所示), 该装置通过人体的最大电流约为 3.5 mA, 在连续工作 80 s 后最高表面温度约为 40 °C, 在 10 s 时间内, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的灭活率达 99%以上^[63]。

3 等离子体消毒杀菌的机制

3.1 等离子体消毒杀菌的物理化学效应

等离子体产生过程伴随着紫外线、带电粒子、强电场、亚稳态粒子、自由基及其他强活性粒子, 在本节中, 将系统讨论等离子体物理化学因素引起的消毒杀菌机制。

3.1.1 紫外线

紫外线(ultraviolet, UV)是一类频率高于可见光的电磁辐射, 其波长范围是 100~400 nm, 根据波长可以分为短波紫外(UV-C, 100~280 nm)、中波紫外(UV-B, 280~320 nm)和长波紫外(UV-A, 320~400 nm)。波长越短, 光子具有的能量越高($E=1242/\lambda$, E 的单位为 eV, λ 的单位为 nm), 细胞毒性越大。通常, 在分子水平上, 紫外线引起细胞损伤有 2 个途径: 1) 紫外线能量直接被生物大分子吸收并损伤 DNA; 2) 紫外线诱发蛋白质和脂肪的氧化进程^[64]。Wang 等人研究发现, 在干燥空气为介质产生的等离子体羽中, 可以检测到紫外线, 但 UV-C 强度明显低于 UV-A 和 UV-B 强度^[65]。虽然紫外线不是等离子体中的主要活性物质, 但在等离子体灭活病原微生物过程中具有间接作用。

3.1.2 带电粒子

对于带电粒子而言, 由于大气压下碰撞频繁, 正离子接触到样品表面时平均能量只有不到 1 eV^[66-67]; 且电子能量相对较高, 但电子数密度往往低于中性活性粒子几个数量级^[68-69], 因此, 有研究人员认为带电粒子在生物医学应用中难以起到重要作用。然而有一种假设认为, 带电粒子先附着在细胞表面, 使与之电性相反的带电粒子可以被加速, 具有足够能量破坏细胞壁/细胞膜及相邻细胞间的分子键, 从而灭活微生物^[70]。通过对比含带电粒子与不含带电粒子的等离子体杀菌效率, 发现含带电粒子的等离子体杀菌效率高一个数量级^[71]。

3.1.3 强电场

当微生物与等离子体放电区域直接接触, 电场也是诱导微生物灭活的关键因素之一。部分大气压 LTP 是通过脉冲强电场产生, 而强脉冲电场可通过电穿孔效应破坏细胞膜^[72], 此外, 等离子体产生的带电粒子会在生物物质表层形成本征场, 这一本征场形成的电场力有可能导致细胞膜分子键断裂^[70]。在非脉冲电场情况下, 等离子体中平均电场强度相对较低, 一般不足以显著破坏细胞结构^[73]。但是当电流流过细胞外时, 会在细胞外表面形成电压梯度, 进而产生跨膜电势。跨膜电势超过一定数值会破坏细胞结构, 由于跨膜电势的幅值取决于细胞的大小、形状和方向, 所以等离子体对不同细胞的破坏能力有一定差异。

3.1.4 氧氮反应物质

在等离子体环境中, 活性氧(reactive oxygen

species, ROS)与活性氮(reactive nitrogen species, RNS)的重要作用为研究人员所公认。对于不同等离子体源及不同的应用环境,产生的 ROS 与 RNS 组分有很大差异,而这些活性粒子的作用往往是相互协同的,所以其生物效应的分子机制非常复杂。表 1 列出了等离子体医学中一些常见的 ROS 及 RNS,按自由基与非自由基进行了分类^[74]。

在化学和电化学中,氧化势是衡量物质氧化还原能力的一个重要参数,氧化势越高,表示该物质的氧化能力越强,相应的生物活性也越强。表 2 列出了部分 ROS 和 RNS 的氧化势值。在等离子体对微生物灭活的研究中,OH 是一种具有较高氧化势的 ROS 分子,被认为在等离子体消毒杀菌过程中扮演着重要角色^[75]。Shen 等人的研究表明,等离子体产生的 OH 是杀灭金黄色葡萄球菌的主要活性粒子^[76]。Huang 等人表明,ONOO⁻、¹O₂ 和 NO 是等离子体活化水灭活铜绿假单胞菌的关键活性粒子^[77]。Kondeti 等研究发现,O₂⁻和 OH 是等离子体灭活铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌时的关键活性粒

子^[78]。Machala 等人研究了空气中瞬态火花放电电喷雾水中 ROS 和 RNS 的形成及其杀菌作用,结果显示,亚硝酸盐和过氧化物在酸性条件下的协同作用对杀菌效果起着关键作用^[79]。

3.2 等离子体消毒杀菌的生物学机制

等离子体产生的紫外线辐射、带电粒子累积、强电场引起的电穿孔以及 ROS 与 RNS 的氧化应激对细菌的细胞壁/细胞膜、核酸和蛋白质都有一定的破坏作用(见图 4),在本节中,将系统讨论等离子体对细菌不同成分的损伤机制以及灭活途径。

3.2.1 等离子体对细胞壁/细胞膜的作用机制

等离子体影响细胞壁/细胞膜的机制之一是电场的电穿孔以及带电粒子或静电作用的影响。电场导致的跨膜电势产生,破坏了细胞膜的磷脂双分子层结构,形成结构性缺陷或者微孔,从而使细胞膜的通透性增强,导致电穿孔。同时,直接向电场作用在细胞膜的蛋白质上,使组成跨膜蛋白质的极性氨基酸会沿电场方向发生移动,从而改变跨膜蛋白质的构造,导致膜蛋白变性。此外,当细胞外膜

表 1 常见的 ROS 与 RNS^[74]
Table 1 Common ROS and RNS^[74]

粒子名称	含氧活性粒子(ROS)		含氮活性粒子(RNS)	
	自由基	非自由基	自由基	非自由基
分类	超氧阴离子(O ₂ ⁻), 羟基(OH), 超氧化氢(HO ₂), 碳酸根(CO ₃ ⁻), 烷过氧基(RO ₂), 烷氧基(RO)	过氧化氢(H ₂ O ₂), 臭氧(O ₃), 单线态氧(O ₂ (¹ Δ _g)), 有机过氧化物(ROOH), 一氧化碳(CO),	一氧化氮(NO), 二氧化氮(NO ₂), 硝酸根(NO ₃ ⁻),	亚硝酸(HNO ₂), 亚硝酸阳离子(NO ⁺), 硝酰阴离子(NO ⁻), 三氧化二氮(N ₂ O ₃), 四氧化二氮(N ₂ O ₄), 五氧化二氮(N ₂ O ₅), 过氧亚硝基(ONOO ⁻), 过氧硝基(O ₂ NOO ⁻), 过氧亚硝酸(ONOOH), 烷基过氧亚硝酸盐(ROONO), 烷基过氧硝酸盐(RO ₂ ONO)

注: 分子式 R 代表有机物质。

表 2 常见 ROS 和 RNS 的氧化势
Table 2 Oxidation potential of common ROS and RNS particles

液相活性粒子名称	氧化势/V
OH	2.85
ONOO ⁻	2.44
O ₃	2.07
ONOOH	2.05
H ₂ O ₂	1.76
NO	1.678
O ₂ ⁻	1.44
¹ O ₂	1.3
NO ₃ ⁻	0.955
NO ₂ ⁻	0.406

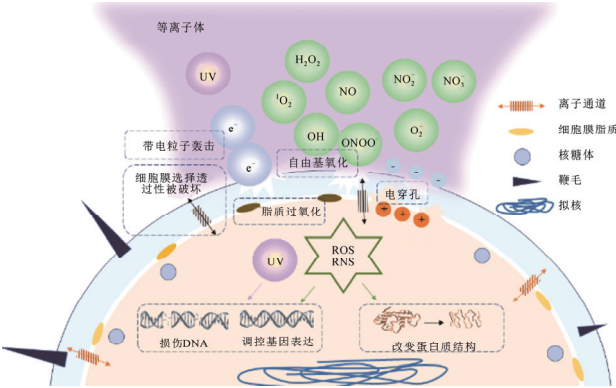


图 4 等离子体消毒杀菌机制示意图

Fig.4 Schematic diagram of plasma disinfection and sterilization mechanism

积累了足够的静电, 外向的静电超过细胞膜的拉伸强度时, 可引发细胞膜破裂, 导致细胞内容物泄漏, 最终引发细胞死亡, 静电损伤细胞壁现象常出现在细胞壁相对较薄($<10\text{ nm}$), 并有一层外膜的革兰氏阴性细菌中^[80]。

等离子体除了强电场与带电粒子对细胞壁/细胞膜造成损伤, ROS 与 RNS 粒子也可以氧化细胞壁/细胞膜, 如活性粒子 OH、O、O₃ 和 H₂O₂ 可以破坏肽聚糖结构上重要的键(C—O、C—N 或 C—C 键), 从而导致细菌细胞壁的破坏。2008 年, 西安交通大学张冠军团队研究发现: OH 自由基和亚稳态的 O 原子在等离子体灭活大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的过程中, 将细菌细胞壁和细胞膜的大分子蛋白分解成小分子的蛋白甚至是氨基酸, 将肽聚糖分解成小分子的单糖和双糖, 从而破坏了细胞的外围结构, 使得细胞内的细胞质泄漏出来; 随着等离子体处理时间的增加, 细胞质中的蛋白质和核酸等大分子物质进一步被破坏, 从而最终导致细菌死亡^[81]。由于脂质分子的不稳定性, 不饱和脂肪酸位于细胞表面附近, 很容易受到自由基的攻击, 导致细胞膜结构破坏^[82]。

3.2.2 等离子体对核酸的作用机制

等离子体诱导核酸分子(包括 DNA 和 RNA)损伤主要归因于 ROS 和 RNS。氧化势是衡量物质氧化还原能力的一个重要参数, DNA 碱基对胸腺嘧啶、胞嘧啶、腺嘌呤和鸟嘌呤的氧化势分别为 1.7、1.6、1.42 和 1.29 V^[83], 而大部分 ROS 具有氧化碱基的能力(见表 2), 进而诱导的细菌碱基损伤^[84]。

等离子体对于病毒的灭活, 其方式可以分为直接和间接 2 种(图 5(a)^[85])。直接法是通过 LTP 产生的 ONOO⁻ 和 ¹O₂ 等多种 ROS、RNS 直接破坏 N-糖苷键, 从而将碱基与脱氧核糖分离, 还可以通过与其他生物分子相互作用产生的反应产物(如氧化脂质产生丙二醛, malondialdehyde, MDA)间接损伤 DNA 和 RNA 使其失活^[86]。等离子体作用于 SARS-CoV-2 的潜在机制则包括刺突蛋白的侵蚀、通过脂质膜过氧化对病毒包膜的破坏、关键包膜/膜蛋白的变性和遗传物质的破坏, 从而破坏病毒的结构、功能、复制和生命周期(见图 5(b)^[87])。Chen 等于 2020 年首次将 LTP 直接用于物表上病毒灭活^[88], 观察到在不到 180 s 的时间内, Ar-LTP 处理使 6 个表面(塑料、金属、纸板、足球、篮球、棒球)上的所有 SARS-CoV-2 均失活。间接法则是通过等离子体处理不同性质水(如去离子水、磷酸盐缓冲溶液、0.9%氯化钠溶液等)得到等离子体活化水(plasma-activated water, PAW)进行灭活病毒^[89]。Su 等将等离子体作用于 0.9%NaCl、水和 0.3%H₂O₂ 处理新城疫病毒(Newcastle disease virus) 30 min 后, 观察到病毒完全灭活, 通过氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)、电导率、H₂O₂ 浓度等理化性质和电子自旋共振谱分析表明, 活性氧和活性氮是导致病毒 RNA 小片段降解的主要原因^[90]。等离子体不仅可以损伤核酸分子, 还可以通过调节抗氧化基因的表达对微生物产生多方面的影响, 如诱导亚致死损伤^[91]、有活力但不可培养状态以及程序性细胞死亡等^[92]。

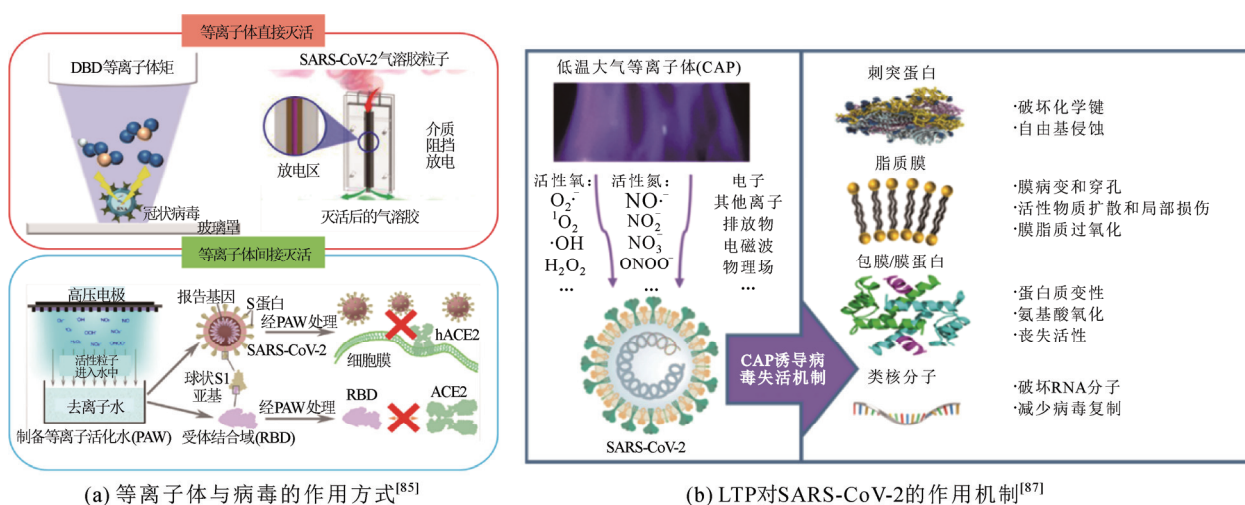


图 5 等离子体与病毒的作用方式及机制

Fig.5 Mode and mechanism of interaction between plasma and viruses

3.2.3 等离子体对蛋白质的作用机制

蛋白质的功能多样性是微生物适应多变环境并执行复杂生命活动的关键。蛋白质的基本组成单位是氨基酸,其结构的完整性对微生物的生存和繁殖至关重要。Guo 等人研究了等离子体对新型冠状病毒刺突(Spike, S)蛋白特别是 S 蛋白受体结合域(receptor-binding domain, RBD)的影响^[93],发现等离子体处理后 RBD 发生氧化修饰,不能与(human angiotensin-converting enzyme, 2hACE2)结合,使其失去与细胞膜上 2hACE2 结合的能力,进而导致假病毒不能侵染细胞。氨基酸的化学修饰可以在一定程度上引起蛋白质二级结构 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角、 Ω -环等的变化。Qian 等人研究发现,当等离子体处理细菌后,苹果酸脱氢酶中的 α -螺旋和 β -转角的比重降低,但 β -折叠和无规卷曲的比重增加,酶结构破坏,酶活性下降,导致细菌失活^[94]。

4 等离子体在环境消毒中的应用

随着全球城市化进程加速与公共卫生事件频发,环境消毒技术正面临前所未有的挑战。等离子体消毒技术因其绿色环保、高效、便携的优点在各行各业应用的发展中已逐渐崭露头角,图 6 给出等离子体消毒技术在不同时间段在各行各业中的重要发展节点。

4.1 环境治理领域

4.1.1 空气净化

流感、结核病、新冠等传染性疾病的主要传播途径是空气传播,病原微生物通过飞沫、气溶胶等形式在空气中扩散并引发感染^[95]。等离子体作为一种绿色、环保的空气净化方法,引起了相关研究领域人员的广泛关注。等离子体空气净化利用高压气体放电产生的电场、紫外辐射、活性氮氧化物对细菌及病毒的杀伤作用^[96-98]。等离子体产生模块可以很方便地集成于现有的空气循环系统,以实现整体空间的空气净化^[99]。

由于传统病毒消杀方法存在一定局限性,因此

开发了更高效、环保的等离子体病毒消杀技术^[100],其已被证明可灭活多种细菌、真菌、病毒、孢子等微生物,在抗击 COVID-19 疫情的期间受到诸多关注^[101]。Liang 等人利用 DBD 等离子体对空气中微生物进行灭杀,发现经等离子体处理 0.12 s 后可使环境中细菌和真菌均失活^[102]。Jin 等研究了不同等离子体处理时间对 SARS-CoV-2 病毒的灭活效果,发现等离子体处理时间越长对病毒的灭活效果越明显^[103]。陈松等使用 3 间独立的隔离病房(每间约 20 m²)模拟舰艇密闭舱室环境,验证了等离子体可有效杀灭从患者痰液中获取的 SARS-CoV-2,其消杀的彻底性和均匀性优于含氯消毒剂,适用于舰艇舱室内空气和表面的消毒^[104]。基于阵列式电晕放电 LTP 协同催化技术,张冠军团队设计了两代等离子体空气消毒机(XJTU-Plasma G-1 和 G-2)^[105],且该消毒机对空气中自然菌和人工菌的灭活效果均能达到《消毒技术规范》规定的消毒合格标准。

等离子体空气净化效果及效率与放电运行参数以及待处理环境条件参数密切相关。Zhang 等研究发现管内格栅状介质阻挡放电电极对空气中病原微生物的消杀效率与放电功率呈线性相关性,空气流动方向与格栅垂直时,杀菌效果更佳,且气体流量越低、空气湿度越大则杀菌效率越高^[106-107]。Zhao 等发现用于空气净化的孔洞电极随着电压的增加孔洞电极放电呈现出由边沿放电-孔内放电-孔面混合放电的转变过程,直接影响空气处理区域大小,并且外加电压频率以及孔径均会对放电模式产生影响^[108],如图 7(a)所示。Ki 等研究了空气湿度对等离子体室内空气杀菌消毒的影响^[109],研究发现高湿条件下羟基自由基的含量相对低湿条件下增加了 2 倍,而 O₃ 量却减少了一半,因此高湿环境更有利于等离子体空气杀菌消毒。可见,驱动电源参数、电极结构参数和环境温湿度等条件参数都是影响等离子体空气杀菌消毒的重要因素。在采用等离子体进行空气净化过程中,O₃是需要重点关注的产物。Park 等在制作等离子体空气净化过滤器时,采用介质阻



图 6 等离子体消毒技术在各行各业中的重要发展节点

Fig.6 Important development node of plasma disinfection technology

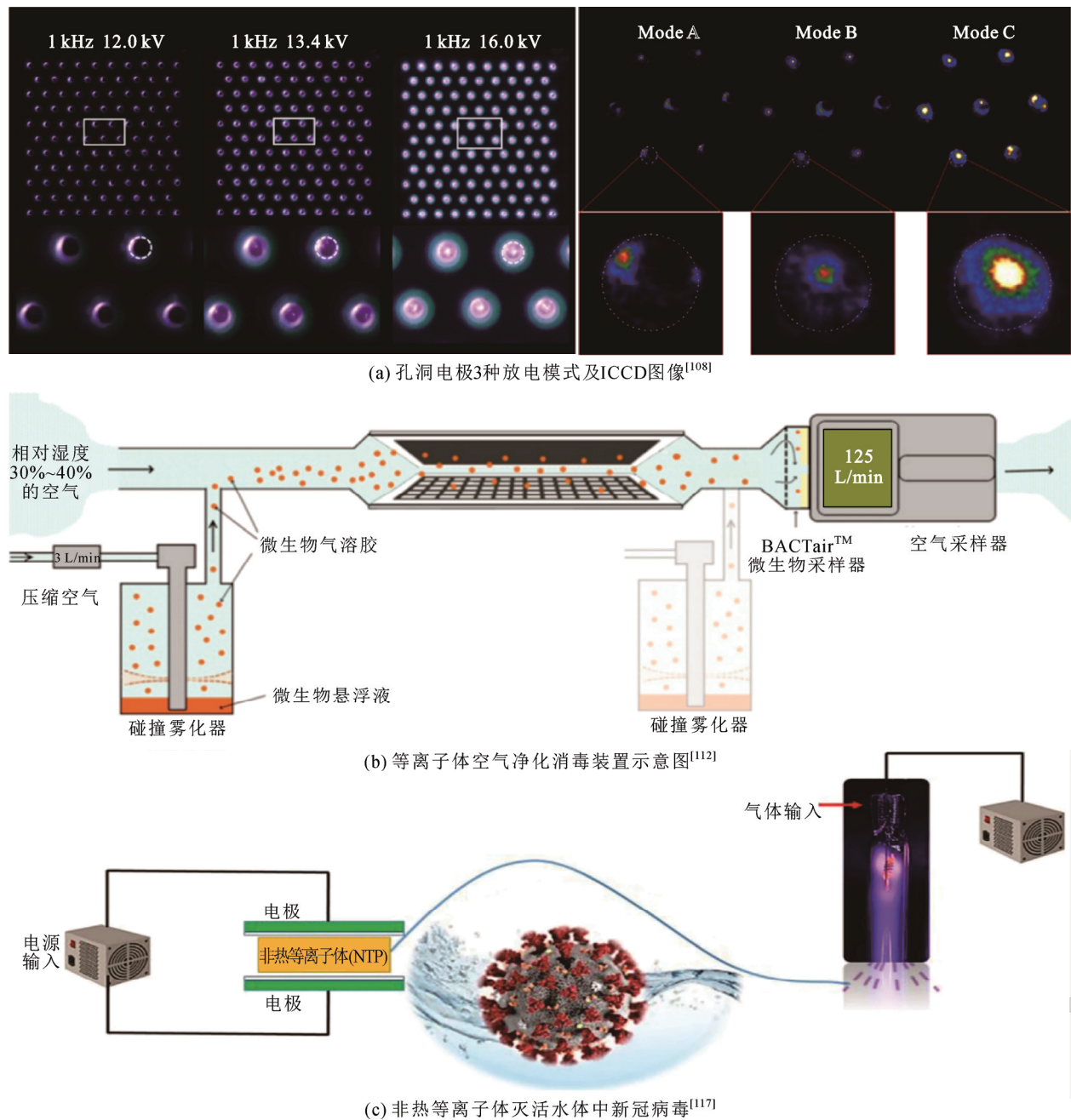


图 7 不同环境治理应用中常用的等离子体装置示意图

Fig.7 Schematic diagrams of plasma devices commonly used in different environmental treatment applications

挡放电产生 O_3 达到杀菌的目的,随后在气体出口处安装 O_3 催化剂以减少残余 O_3 排放^[110]。因此,在采用等离子体净化空气的过程中,需要考虑作用产物或残留物是否存在有害物质及相应防控措施。

4.1.2 公共场所消毒杀菌

公共场所具有人流量大、人员停留时间长、反复使用用品用具等特点。

据统计,人们大约有 90%的时间处于室内环境中。作为室内空气污染物的主要组成部分,气溶胶会携带大量的病原微生物随人员活动和空调通风系

统四处扩散,危害人体健康^[111]。图 7(b)是一种典型的等离子体处理空气中细菌的装置示意图。测试结果表明,大肠埃希菌的杀灭效果受等离子体强度和等离子体处理面积的影响。提升处理长度比双面处理更有效,而离子风的杀灭效果可忽略不计^[112]。李晔等使用等离子体空气消毒机对幼儿园教室进行消毒,结果显示在无人室内,消毒 60 min 时室内空气自然菌消亡率>90%;在有人室内,尽管人员活动持续污染空气,空气消毒仍达到 50%以上的自然菌消亡率^[113]。付慧群等基于双介质阻挡 LTP 技术,研

制出应用于殡仪场所的空气净化器样机, 并对其去除空气中的细菌、总挥发性有机化合物(total volatile organic compounds, Tvoc)、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的性能进行测试^[114], 结果显示该消毒装置作用 60 min 后, 殡仪馆内空气细菌总数、Tvoc、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的体积分数分别下降 64.60%、45.24%、14.79% 和 24.06%。魏兰芬等利用一种射流型(non-equilibrium atmospheric pressure plasma jet, N-APPJ)等离子体空气消毒机对室内空气中的白色葡萄球菌和大肠埃希菌噬菌体进行杀灭, 结果显示该空气消毒机运行 60 min 后, 对气雾室内空气人工污染的白色葡萄球菌和大肠埃希菌噬菌体的杀灭率均>99.99%^[115]。邵涛团队研究了一种复合式空气消毒机的消毒效果和安全性。该消毒机组合电晕等离子体、紫外线和光触媒等消毒因子, 启动消毒 120 min, 对试验舱内空气中白色葡萄球菌杀灭率为 99.99%; 对玻片上污染的大肠埃希菌、表皮葡萄球菌的灭活对数值均>4.00, 对玻片上 EV71 肠道病毒、H1N1 甲型流感病毒的杀灭率达 100%^[116]。同时, 该空气消毒机作用 120 min, 对室内空气中自然菌的消亡率>90%, 紫外线及 O₃ 泄漏量远小于国家标准限值。因此, 通过多技术复合, 可以兼顾高消毒效率和人机共存安全性。

面对空气污染及病原微生物传播的挑战, 等离子体消毒杀菌技术因其高效、环保的特点成为研究热点。通过在多个公共场景的研究和应用, 等离子体消毒技术展现出显著的杀菌效果和空气净化能力。然而, 室内空气污染的复杂性要求技术不断创新, 复合消杀技术如等离子体与光触媒、微波等的结合, 正成为提升净化效率的新方向。

4.1.3 工业废水消毒应用

工业废水是指从医院或制药工厂排放的废水, 其成分多样且复杂, 包括各类有机药物、医用试剂以及大量病原性微生物、寄生虫卵、抗生素及各种病毒。如若处理环节中存在漏洞便排放, 必然会污染水源传播疾病, 严重危害生态环境和社会生产。图 7(c)是用于灭活水中新冠病毒的非热等离子体(LTP)装置^[117-118]。其中对 LTP 有效性产生重大影响的参数(见图 8)包括病毒浓度、输入电源、水厚度、pH 和电导率、盐度和温度、原料气类型和成分以及反应器设计^[117]。

Satoh 等人利用脉冲等离子体对污水中大肠杆菌进行处理并得到了良好的效果^[119]。田一平等基于微流注与微辉光的强电离放电快速水处理技术, 利



图 8 影响低温等离子体杀灭水体中病毒效率的工艺因素^[117]

Fig.8 Process factors affecting the efficiency of LTP killing of viruses in water bodies^[117]

用大气压强电离放电协同水力空化技术, 进行水中大肠杆菌的杀灭剂效、时效关系研究^[120], 结果表明, 当强电离放电功率为 120~130 W、空化进气体积流量为 0.1 L/min 时, 在 3~10 s 内可 100% 杀灭废水水中 $10^4 \sim 10^6 \text{ mL}^{-1}$ 的大肠杆菌。钟荣巍等将放电等离子体用于处理含有抗生素耐药细菌和抗生素抗性基因的污水^[121], 结果表明: 在电压为 12 kV、空气作为载气、载气体积流量为 120 L/h 的条件下, 经过放电等离子体处理 25 min 后, aac(3)-II、bla_{TEM}-1、TetW 和 TetC 每微升 DNA 溶液中含有的拷贝数分别从 2.39×10^5 、 7.37×10^4 、 7.72×10^6 和 2.13×10^5 显著降低到 2.2×10^4 、 6.29×10^3 、 9.20×10^3 和 9.42×10^2 , Int11 的值从最初的 9.89×10^6 显著下降到 3.45×10^4 , 且与 ATP 结合、DNA 修复、基因转移和细胞膜形成相关基因的表达水平均降低。

等离子体技术通过高效破坏微生物及降解有机物, 显著提升了医疗废水处理效果。此外, 放电等离子体技术在去除抗生素抗性基因及其转移机制方面也展现出潜力, 为应对复杂医疗废水处理挑战提供了新思路。

4.2 医疗及保健行业的应用

4.2.1 医疗器械表面杀菌应用

目前, 医疗器械一般通过热力杀菌、环氧乙烷、过氧化氢、甲醛、过氧乙酸等进行消毒与杀菌, 这些传统杀菌方法尽管已被广泛使用, 但在面对现代医疗器械的复杂性和多样性时, 仍存在不可避免的局限性和不适用情形。因此, 将传统的杀菌方法与

新技术(如等离子体杀菌等)结合使用, 进一步满足不断变化的消杀需求。近年来, 新型等离子体杀菌技术在医疗器械中的应用逐渐增加^[122]。

1967 年, 苏联首次采用低压等离子体对手术器械进行灭菌并取得一定效果, 但是其装置需要真空环境且灭菌效率较低。张冠军团队研究了等离子体射流特性及灭菌效果, 并使用 DBD 氩等离子体射流对手术器械表面灭菌, 发现在短时间内显著降低细菌数量, 达到国家规定的消毒合格标准^[123-124]。Bálan 等采用等离子体活化水, 浸泡十二指肠镜涂层聚合物样品, 发现浸泡 30 min 后, 样品表面细菌数明显减少^[125]。Jin 等提出一种交错排布环套管式射流结构, 如图 9(a)所示, 在目标处理导管内部产生均匀放电等离子体的方法, 实现导管内表面杀菌消毒的效果^[126]。对于植入性医疗器械敏感材料, 如心脏瓣膜和人造关节等, 这些器械需要非常严格的杀菌控制, 并且器械本身的性质要求温和处理, Karipidou 等研究比较了乙烯氧化物和伽马射线两种常用的杀菌方法^[127], 对敏感医疗纳米设备(如冷冻干燥的胶原海绵)的影响, 指出 2 种杀菌方式均会对海绵内部结构带来一定的影响, 等离子体杀菌技术在胶原海绵和其他敏感医疗设备杀菌应用具有重要潜力。

4.2.2 伤口及皮肤表面杀菌

伤口及皮肤表面菌落感染是影响伤口愈合与疾病传播的主要原因之一, 传统抗生素治疗易产生耐药性且过度使用会影响生态环境^[128-129]。LTP 技

术作为一种相对绿色环保技术, 通过其富含的电场、紫外光等物理因子和高活性粒子、自由基等化学因子共同作用能有效灭活相关细菌, 抑制细菌增殖且同时能够避免菌落产生耐药性^[130-131]。张冠军团队研究发现利用适当剂量的等离子体能够促进伤口组织产生及分泌较多的 Collagen I 和表皮生长因子(epidermal growth factor, EGF), 进而激活巨噬细胞的吞噬功能, 提高机体的免疫活性, 降低创面被感染的概率, 最终促进细胞增殖与肉芽组织生长。因此除杀菌消毒外, 还能有效促进组织生长、伤口愈合^[128, 132-133]。

等离子体射流是一种常见的皮肤表面杀菌消毒装置, 德国莱布尼茨等离子体科学与技术研究所研发的射频电源(1.0~1.1 MHz)驱动 Ar 放电等离子体射流装置(kINPen)通过了欧洲电气安全标准(certification number 609.003.1), 在伤口和皮肤表面杀菌有较多应用^[134-135]。然而, 等离子体射流处理尺寸相对较小, Fridman 等提出放电区域直径达到 25.4 mm 的悬浮电极^[136]。Liu 等提出一种电池供电的便携式悬浮电极装置, 如图 9(b)所示, 该装置能与人体安全接触, 且处理 120 s 左右可形成直径 50 mm 的杀菌区域^[100]。

现有的悬浮电极多为刚性接触面, 对待处理物的平整度有一定的要求。Sun 等研制了一种柔性共面介质阻挡放电等离子体源, 能够更好地贴合待处理面, 如图 9(c)所示, 且该装置能够有效杀灭金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌^[137]。针对不同异形表

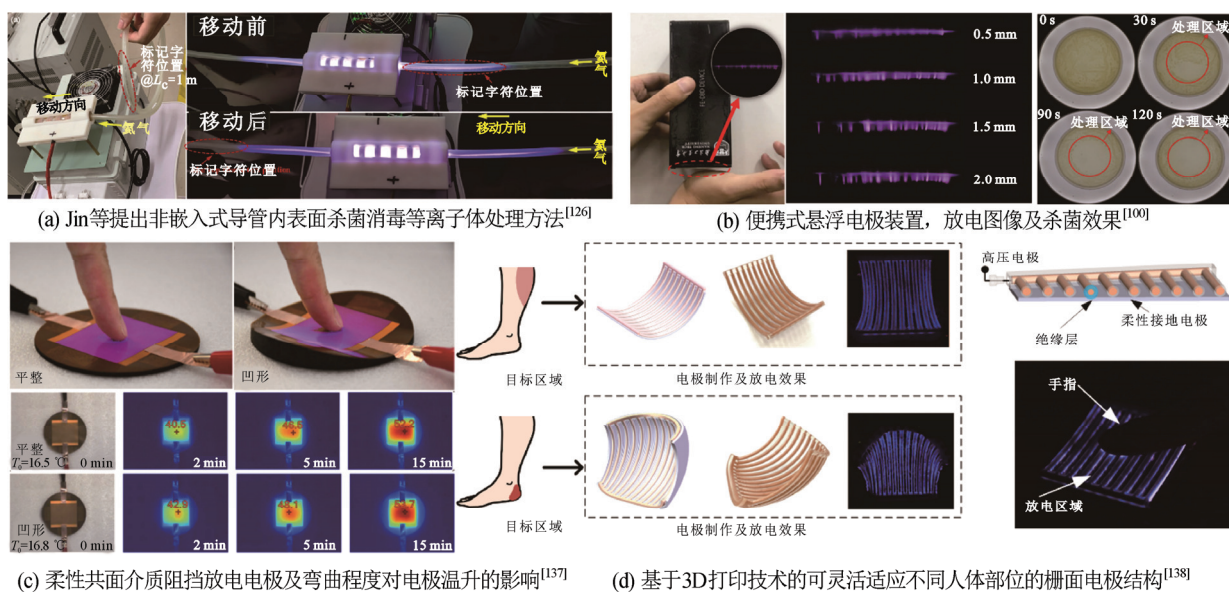


图9 医疗保健领域常用的等离子体电极结构及应用

Fig.9 Plasma electrode structures and applications commonly used in healthcare

面, Zhao 等提出了一种结合断层扫描-三维重建-3D 打印技术的个性化等离子体栅面电极制作方法, 拥有较好的贴合效果, 实现等离子体均匀、高效处理, 如图 9(d)所示, 该栅面电极具有较低的放电温度和较高的电气安全性, 且对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌有显著杀灭效果^[138]。该电极结构的设计为等离子体医学个性化治疗和精准治疗提供新思路。

4.2.3 口腔消毒应用

近年来, 国内外学者们围绕等离子体在口腔治疗器械消毒、牙齿根管消毒、口腔致病微生物的灭活等领域开展了大量的研究工作^[139-143]。

口腔治疗器械表面的消毒主要包含朊病毒/病原微生物的灭活、有机物的移除等^[144]。Mohammed 等人利用介质阻挡放电等离子体处理牙科用镊子钳^[145], 发现 1 min 内即可有效灭活镊子钳上的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌。Lu 等研制出一种可以在根管内直接放电产生等离子体的等离子体针装置^[146], 利用此装置几分钟内即可有效杀灭引起根管治疗失败的主要致病菌-粪肠球菌, 从而大大增强了根管内杀菌效率。Pan 等利用 Ar/O₂ 等离子体射流有效地杀灭了根管深部的粪肠球菌^[147]。Kaya 等对比研究了 LTP、O₃ 和 NaOCl 这 3 种方法对粪肠球菌感染根管的治疗效果^[148], 发现与 O₃ 和 NaOCl 相比, LTP 对根管中的杀菌效果有着更显著的优势。

众多实验结果证实, 等离子体可以有效灭活口腔中常见的致病微生物。Nam 等将 LTP 作为化学药物治疗的辅助疗法, 并与化学药物单独使用进行比较, 发现等离子体与 15%过氧化尿素联合处理后, 牙釉质表面黏附的变形链球菌数量明显减少^[149]。Lu 等利用等离子体对比格犬口内建立的种植体周围炎模型、体外牙龈卟啉单胞菌浮游菌及生物膜进行处理, 发现牙龈卟啉单胞菌均显著减少^[146]。此外, 周鑫才等还证实利用与氯己定相结合的等离子体可以有效地杀灭牙龈卟啉单胞菌, 从而为牙周炎以及种植体周围炎的临床治疗提供新的思路^[150]。

除了上述已证实的可直接应用大气压等离子体高效灭活口腔常见致病微生物外, Ercan 等还首次将等离子体处理的葡萄糖、半胱氨酸和肝素等来抑制耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、粪肠球菌等细菌生物膜的形成^[151]。Li 等利用等离子体活化水处理变形链球菌、黏性放线菌和牙龈卟啉单胞菌 40~60 s, 即获得显著的杀菌效果^[152]。Tasaki 等应用等离子体

活化水处理感染牙本质模型 10 s, 几乎全部杀灭变形链球菌, 其杀菌效果比用等离子体射流直接处理感染牙本质 180 s 更加显著^[153]。Ran 等人还研究了超长效等离子体活化水的生成与控制机制^[154]。

5 等离子体用于微生物灭活的影响因素

5.1 等离子体参数

等离子体对不同病原微生物的杀灭效果与放电类型、作用时间、工作气体、工作电压等因素有关。用于消杀领域的等离子体源有多种, 其中被广泛用于病原微生物灭活的大气压放电等离子体类型是介质阻挡放电和等离子体射流^[155-156]。Pannongom 等人设计了一种大气压 DBD 装置并研究了不同气体对真菌类病原体消杀的效果^[157]。结果发现在 0.75 kV 的放电电压和 80 mA 电流下, 氩气等离子体处理生理盐水中的真菌孢子 10 min 后, 真菌孢子的消杀率达 60%以上, 且随着时间的延长, 氩气等离子体抑制孢子的发芽率远高于空气等离子体处理后的效果。这也说明等离子体工作气体对病原体的消杀效果不同。

CHEN 等人研究了阿维菌素的降解速率与等离子体处理时间、等离子体施加电压和气体流速之间的关联关系^[158], 发现阿维菌素的降解率随 DBD 处理时间延长和放电电压的升高而增加, 且随阿维菌素初始浓度的增加而降低。此外, 气体流速对降解率的影响呈现先增后减的趋势, 并且在施加电压为 18 kV、气体体积流量为 1 L/min 的处理条件下, 暴露 240 s 后使阿维菌素降解率达到最大 97.47%。

等离子体参数不同, 消杀过程中病原体微生物接受到的等离子体剂量也不同。Cheng 等人考察了不同气体组分下等离子体的杀菌效果^[159], 研究结果发现 He 和 He+0.2%H₂O 气体环境下的等离子体具有最好的金黄色葡萄球菌杀灭效果, 而 He+0.5%O₂ 等离子体和 He+1%O₂ 气体环境下产生的等离子体处理 15 min 的金黄色葡萄球菌的细菌还原因子每微升 DNA 溶液中含有的拷贝数分别仅降低 2.26 和 1.10。Kim 等人深入探讨了不同气体 DBD 对微生物的消杀效果^[160], 发现 O₂、H₂O₂、CO₂ 等氧基等离子体比 Ar 等离子体更具有高效杀灭微生物的能力, 这是因为 O 基等离子体会产生更多的氧原子和含氧自由基, 这些自由基能够通过氧化反应破坏微生物的细胞结构, 从而显著提高微生物的灭活效率。此外, 当在惰性气体中添加一定量的 O₂ 也会使得等离

子体产生更多基于 O_2 和 O_3 的自由基, 这些自由基作为有效的灭活剂, 能够进一步提高介质阻挡放电等离子体的杀菌效果。因此, 在对病原微生物消杀中可以通过优化等离子体相关参数进而显著提升微生物灭活的效率和效果。

5.2 病原体类型

介质阻挡放电等离子体对不同病原体的杀灭效果与其种类息息相关。不同种类的微生物具有不同的生长期以及不同的细胞壁厚度, 这都是影响等离子体消杀效果的重要因素。Lunov 等人研究了革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌在稳定生长期和指数生长期对等离子体的敏感度^[135]。研究结果表明, 在等离子体释放出的活性物质对处于稳定生长期的细菌具有更显著的杀灭效果。

Bhatt 等对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和大肠埃希菌污染的内镜通道进行等离子体处理^[161], 结果发现, 经过等离子体处理 9 min 后耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和大肠埃希菌 3 种不同菌种对溶解 1% 结晶紫的光吸收情况分别为 2.0%、48% 和 5.5%, 铜绿假单胞菌对等离子体表现出最敏感状态(见图 10(a))。Li 等人利用相同剂量的等离子体分别对感染创面中最常见的金黄

色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和大肠杆菌进行的灭杀实验^[162]。结果发现, 铜绿假单胞菌对等离子体最为敏感仅在等离子体处理 2 min 后达到灭活 5 个量级, 其他 2 种菌种也在经过 3 min 的等离子体处理后被灭活 5 个数量级(见图 10(c))。进一步地, Yong 等人对不同壁厚的菌种进行了等离子体处理研究(见图 10(b))^[163]。研究指出由于革兰氏阳性菌表面存在较厚的脂多糖层, 这层结构对活性物质的渗透形成了阻碍, 因此与革兰氏阴性菌相比, 革兰氏阳性菌对 LTP 产生的活性物质具有更强的抵抗力, 其敏感性相对较低。

5.3 灭杀环境

病原微生物所处的环境会影响等离子体放电过程, 如环境的湿度、温度以及 pH 等, 同时也影响着等离子体对微生物的灭杀效果。Muranyi 等分别在 pH 为 5 和 7 的 2 种不同的环境下, 利用等离子体对食物中的蜡样芽孢杆菌进行灭杀处理, 发现在 pH 为 5 环境中等离子体处理后其菌落数减少 4.7 lg(CFU/g), 而在 pH 为 7 的环境中菌落数减少 2.1 lg(CFU/g)^[164]。

此外, 相对温度和相对湿度的提高会增加等离子体中羟基自由基的形成, 从而对 LTP 的杀菌效果

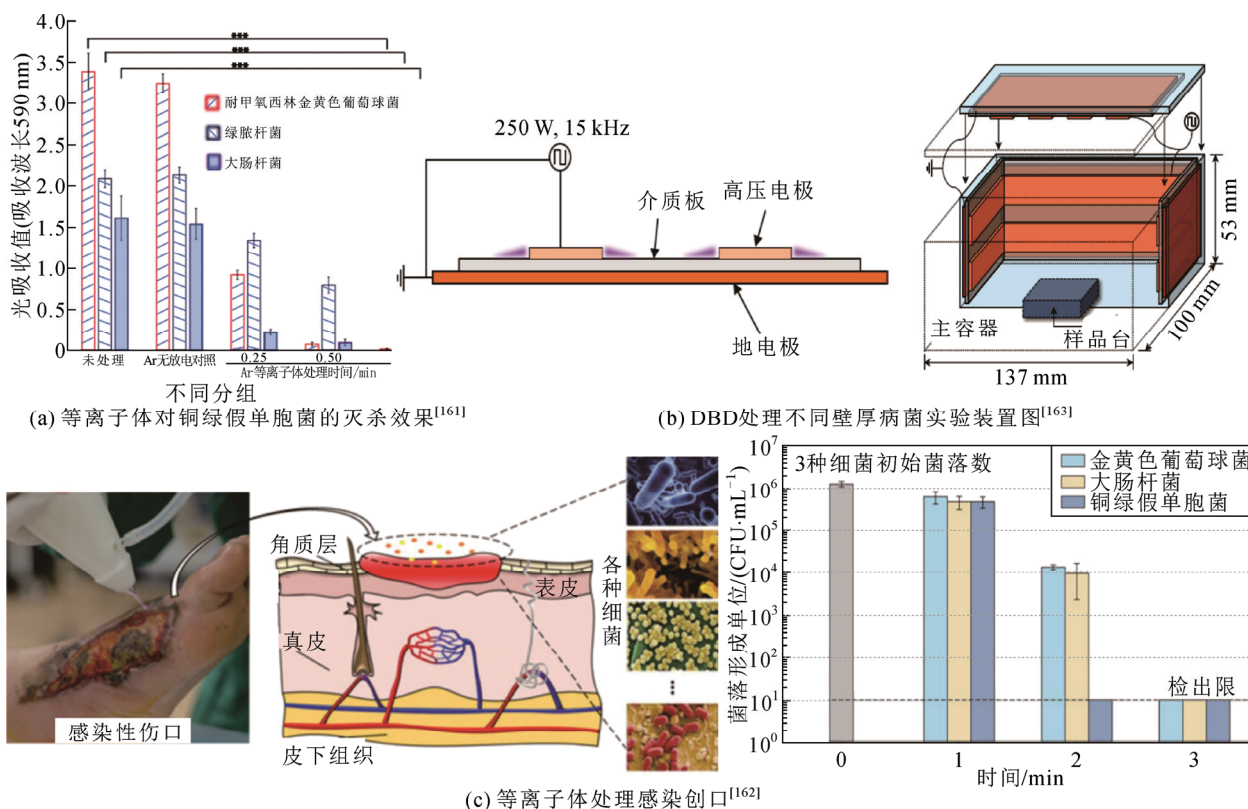


图 10 等离子体对不同类型病原体消杀

Fig.10 Plasma elimination of different types of pathogens

产生影响。Muranyi 等利用 LTP 技术在不同湿度下对 PET 表面的黑曲霉菌和枯草芽孢杆菌进行处理,发现在 70% 的高相对气体湿度下孢子死亡增加^[165]。Blumhagen 等研究表明,高浓度细菌经过等离子体处理后,上层细菌残留的细胞碎片会降低等离子体对底层细菌的灭活效率^[166]。Kvam 等认为等离子体的作用深度在纳米层级,当对微生物进行处理时,其表面覆盖的材料或者水都会削弱其杀菌性能,进而增加杀菌所需的时间^[167]。

因此,大气压等离子体在今后微生物消杀的应用中,须尽可能地清除其表面杂质、控制 pH 环境并对生物膜的厚度加以控制。

6 等离子体消杀技术面临的挑战和展望

6.1 技术优势、局限及挑战

由于具有高效、广谱、消毒时间短、低温、不损害物品、安全等优点,等离子体技术在消毒杀菌领域得到广泛应用^[168]。截至目前,虽然等离子体消毒杀菌技术的研究取得了很好的成绩,但仍然有一些关键问题亟待解决。

首先,等离子体消毒杀菌过程中发挥主要作用的成分尚未明确。等离子体中含有大量的高能带电粒子、活性粒子、紫外线、 O_3 和强电场等多种消毒因子,是一种“鸡尾酒”式的综合消毒技术。当等离子体达到消毒杀菌合格标准时主要的活性成分与最佳配比尚不清楚,且活性成分之间的相互作用机制尚不明确。特别是对于不同种类微生物(细菌、病毒等),等离子体的杀灭效果存在显著差异。在进一步的研究中,需要建立更加精确的理论模型,可以更好地理解等离子体-微生物相互作用的本质,深入分析等离子体中的活性物质如何导致微生物的死亡。此外,消毒杀菌的人机共存也是目前的难点,特别是有 O_3 产生。高 O_3 浓度($>0.1 \times 10^{-6}$)虽可增强广谱杀菌效果(如对芽孢灭活率提升 30%),但易引发黏膜刺激及设备腐蚀;低 O_3 产生($<0.05 \times 10^{-6}$)虽保障人机共存安全,却须延长作用时间(2~3 倍)或联合紫外辅助以维持等效消杀率。因此,需要采用更加先进的仿真与检测手段确定发挥主要作用的成分并进行精准调控。

其次,等离子体消毒杀菌效率容易受到多种因素的影响。不同工作参数下所产生的放电等离子体的成分不一,对微生物的杀灭效果、杀灭机制也有所差别,并且不同微生物对等离子体的抵抗力也不

同,这使得等离子体消毒杀菌效率评价尚未得到一个圆满的结论,这也是等离子体消毒应用中的一大挑战难题。因此,需要进一步深入研究,开展系统性的实验研究,构建数据库并分析归纳各参数变化趋势及其对杀菌效能的影响规律,获得不同应用场景下最优参数组合,为等离子体消毒杀菌技术的广泛应用与推广提供强有力的理论支撑。

最后,等离子体消毒杀菌装置需要进一步优化。目前等离子体产生装置没有相关统一的标准,大部分等离子体消毒杀菌装置体积庞大,且都需要连接高压电源和气瓶,成本较高,不方便携带、使用和维护。如何设计出小型、操作便捷、安全系数高、稳定运行、保障最优杀菌效果、维护方便的等离子体消毒杀菌装置也是一个需要解决的关键问题。此外,目前大多数等离子体消毒装置缺乏有效的自动化控制系统,操作复杂度较高,且实时监控杀菌过程及效果的技术尚不成熟。如何结合物联网、大数据分析等现代信息技术,开发智能化管理系统,实现远程监控、故障预警等功能是等离子体消毒装置获得进一步发展的关键。

6.2 展望

目前,等离子体在微生物消杀与环境消毒方面取得了显著的成果,相比于传统的消毒杀菌技术,等离子体具有快速、高效、无药物残留等优点。此外,LTP 具有接近室温的气体温度,这对于消毒过程中不耐高温或湿度的设备和器械表现出极大的应用潜力。等离子体属于一种离子态气体,能够适用于多种材质和环境中的微生物消杀,具有较强的广谱性。尽管等离子体在环境消毒杀菌领域具有明显的优势,但是等离子体技术的大规模推广还要解决一些问题,如何降低成本、提高设备的耐用性和可操作性,如何使等离子体消毒装置更加智能化。

等离子体技术作为一种新兴技术,相关行业标准和规范尚待完善,社会公众对等离子体消毒技术的信任感还不够强。尽管长期来看,等离子体消毒技术具备成本优势,但由于初期投入较大,短期内可能会抑制市场需求。在进一步的发展中可以通过技术创新降低成本,比如改进制造工艺、提高能源利用率等,进一步提高技术的经济可行性。随着材料科学技术和工程技术的进步,等离子体在应用中的问题也得到了进一步的解决,其应用前景是十分光明的。相信随着等离子体对微生物作用机制的不断探索和等离子体产生输出装置的不断完善统

一, 等离子体技术会不断地放大其在消毒杀菌领域的应用价值。

7 结论

1) 本文介绍了等离子体源以及其相关的诊断技术, 讨论等离子体各种源放电特性以及对各类微生物的杀灭效果、机制等, 系统分析等离子体消杀技术最新进展。

2) 等离子体技术作为一种新型的非热消杀技术, 凭借其自身独特的优势, 如无残留、广谱性、反应迅速、成本低及操作便捷等, 在空气、物表、水体等领域被广泛的应用并取得了显著效果。

3) 等离子体消杀装置的智能化程度低, 实时监控杀菌过程及效果的人工智能技术需要开发。未来等离子体消毒装置将与物联网和大数据技术相结合, 开发智能化管理系统, 实现活性物质浓度的精准监控、自动调节和远程控制, 进一步提升设备的安全性、便捷性与适用性。

4) 将等离子体技术与其他消毒手段相结合, 可形成多维度的综合消毒方案, 满足复杂环境下的多样化需求, 为医疗、公共卫生及日常生活提供更全面、高效和安全的解决方案。

参考文献 References

- [1] WINDER M, Paul U. *Unschuld, Medicine in China. A history of pharmaceutics*. Berkeley, Los Angeles and London, University of California Press, 1986, 4to, pp. xiii, 366, illus., £ 40.50[J]. *Medical History*, 1988, 32(3): 345.
- [2] HSU E. The history of Chinese medicine in the People's Republic of China and its globalization[J]. *East Asian Science, Technology and Society: an International Journal*, 2009, 2(4): 465-484.
- [3] FAIRBANK J C. Clerks and craftsmen in China and the west: lectures and addresses on the history of science and technology[J]. Cambridge University Press, 1971, 12: 328-331.
- [4] ROBERTSON L A. Antoni van Leeuwenhoek 1723-2023: a review to commemorate van Leeuwenhoek's death, 300 years ago: for submission to *Antonie van Leeuwenhoek journal of microbiology*[J]. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2023, 116(10): 919-935.
- [5] SCHWARTZ M. The life and works of Louis Pasteur[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, 91(4): 597-601.
- [6] MICHAELAS S N, LAIOS K, CHARALABOPOULOS A, et al. Joseph Lister(1827—1912): a pioneer of antiseptic surgery[J]. *Cureus*, 2022, 14(12): e32777.
- [7] COOHILL T P, SAGRIPANTI J L. Overview of the inactivation by 254 nm ultraviolet radiation of bacteria with particular relevance to biodefense[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2008, 84(5): 1084-1090.
- [8] MORRISSEY I, OGGIONI M R, KNIGHT D, et al. Evaluation of Epidemiological Cut-Off Values Indicates that Biocide Resistant Subpopulations Are Uncommon in Natural Isolates of Clinically-Relevant Microorganisms[J]. *Plos One*, 2014, 9(1): e86669.
- [9] WIDMER A F, FREI R. Decontamination, disinfection, and sterilization[M]//VERSALOVIC J, CARROLL K C, FUNKE G, et al. *Manual of Clinical Microbiology*. 10th ed. Washington, USA: ASM Press, 2011: 143-173.
- [10] RUTALA W A, WEBER D J. Infection control: the role of disinfection and sterilization[J]. *Journal of Hospital Infection*, 1999, 43: S43-S55.
- [11] BHARTI B, LI H L, REN Z Y, et al. Recent advances in sterilization and disinfection technology: A review[J]. *Chemosphere*, 2022, 308: 136404.
- [12] RUTALA W A, WEBER D J. Disinfection and sterilization: An overview[J]. *American Journal of Infection Control*, 2013, 41(5): S2-S5.
- [13] RUTALA W A, WEBER D J. Disinfection and sterilization in health care facilities: What clinicians need to know[J]. *Clinical Infectious Diseases*, 2004, 39(5): 702-709.
- [14] CORRADINI M G, NORMAND M D, PELEG M. Calculating the efficacy of heat sterilization processes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 67(1/2): 59-69.
- [15] WOLF D C, DAO T H, SCOTT H D, et al. Influence of Sterilization Methods on Selected Soil Microbiological, Physical, and Chemical Properties[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1989, 18(1): 39-44.
- [16] CHAMBERLAIN W F. Chemical sterilization of the screw-worm[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1962, 55(2): 240-248.
- [17] MORI M, HAMAMOTO A, TAKAHASHI A, et al. Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED[J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2007, 45(12): 1237-1241.
- [18] IWAGUCHI S, MATSUMURA K, TOKUOKA Y, et al. Sterilization system using microwave and UV light[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2002, 25(4): 299-304.
- [19] MOISAN M, BARBEAU J, CREVIER M C, et al. Plasma sterilization. methods and mechanisms[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2002, 74(3): 349-358.
- [20] LAROUCSI M. Low temperature plasma-based sterilization: Overview and state-of-the-art[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2005, 2(5): 391-400.
- [21] BRUGGEMAN P J, SADEGHI N, SCHRAM D C, et al. Gas temperature determination from rotational lines in non-equilibrium plasmas: a review[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2014, 23(2): 023001.
- [22] LI Y, LI S S, FENG Y, et al. Fast breakdown process and characteristics diagnosis of nanosecond pin-pin discharge[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, 57(22): 225201.
- [23] WANG S, LIU Y W, ZHOU R W, et al. Microsecond pulse gas-liquid discharges in atmospheric nitrogen and oxygen: discharge mode, stability, and plasma characteristics[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2021, 18(2): 2000135.
- [24] HUANG S, LI T, ZHANG Z F, et al. Rotational and vibrational temperatures in the spark plasma by various discharge energies and strategies[J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113358.
- [25] SUN J, ZHOU R W, HONG J, et al. Sustainable ammonia production via nanosecond-pulsed plasma oxidation and electrocatalytic reduction[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2024, 342: 123426.
- [26] ZHANG S, WANG W C, JIA L, et al. Rotational, Vibrational, and Excitation Temperatures in Bipolar Nanosecond-Pulsed Diffuse Dielectric-Barrier-Discharge Plasma at Atmospheric Pressure[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(2): 350-354.
- [27] SHAO T, YU Y, ZHANG C, et al. Excitation of Atmospheric Pressure Uniform Dielectric Barrier Discharge Using Repetitive Unipolar Nanosecond-pulse Generator[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(6): 1830-1837.
- [28] DILECCE G. Optical spectroscopy diagnostics of discharges at atmospheric pressure[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2014, 23(1): 015011.
- [29] TENDERO C, TIXIER C, TRISTANT P, et al. Atmospheric pressure plasmas: a review[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2006, 61(1): 2-30.
- [30] HARILAL S S, PHILLIPS M C, FROULA D H, et al. Optical diagnostics of laser-produced plasmas[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2022, 94(3): 035002.
- [31] WANG L P, NIE L L, LU X P. Effect of gas components on the post-discharge temporal behavior of OH and O of a non-equilibrium atmospheric pressure plasma driven by nanosecond voltage pulses[J]. *Plasma Science and Technology*, 2024, 26(5): 055402.

- [32] ONO R. Optical diagnostics of reactive species in atmospheric-pressure nonthermal plasma[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(8): 083001.
- [33] 卢新培, 罗婧怡, 聂兰兰, 等. 等离子体医学研究进展[J]. *高电压技术*, 2024, 50(8): 3555-3579.
LU Xinpei, LUO Jingyi, NIE Lanlan, et al. Progresses in plasma medicine research[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(8): 3555-3579.
- [34] WELZEL S, HEMPEL F, HÜBNER M, et al. Quantum cascade laser absorption spectroscopy as a plasma diagnostic tool: an overview[J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 6861-6900.
- [35] SÁNCHEZ H R. Seven derivations of the Beer-Lambert law[J]. *Spectroscopy Letters*, 2021, 54(2): 133-139.
- [36] VAN GESSEL A F H, CARBONE E A D, BRUGGEMAN P J, et al. Laser scattering on an atmospheric pressure plasma jet: disentangling Rayleigh, Raman and Thomson scattering[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2012, 21(1): 015003.
- [37] GUPTA N, CHOUDHRY S, KUMAR S, et al. Scattering of laser light in dielectrics and plasmas: a review[J]. *Nonlinear Optics Quantum Optics-Concepts in Modern Optics*, 2022, 55(1/2): 1-44.
- [38] GONZALVO Y A, WHITMORE T D, REES J A, et al. Atmospheric pressure plasma analysis by modulated molecular beam mass spectrometry[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2006, 24(3): 550-553.
- [39] HERRERO M. Nicholas Snow(Ed.): basic multidimensional gas chromatography[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2020, 412(25): 6637-6638.
- [40] LAN C T, ZHU H W, WANG S H, et al. Disinfection of viruses with cold atmospheric-pressure plasmas: Sources, mechanisms, and efficacy[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2024, 21(3): 2300183.
- [41] JULÁK J, SOUSKOVÁ H, SCHOLTZ V, et al. Comparison of fungicidal properties of non-thermal plasma produced by corona discharge and dielectric barrier discharge[J]. *Folia Microbiologica*, 2018, 63(1): 63-68.
- [42] KAUR S, KUMAR Y, SINGH V, et al. Cold plasma technology: Reshaping food preservation and safety[J]. *Food Control*, 2024, 163: 110537.
- [43] BRANDENBURG R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, 26(5): 053001.
- [44] XU Q N, WANG H L, ZHOU X F, et al. Micro-mesoporous polystyrene resins prepared by nanosecond pulsed discharge plasma for the efficient adsorption of PAHs[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 301: 121829.
- [45] WANG H L, XU Q N, ZHOU X F, et al. Highly efficient adsorptive removal of persistent organic pollutants using NPD-acid combined modified NaY zeolites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133858.
- [46] YANG D Z, WANG W C, JIA L, et al. Production of atmospheric pressure diffuse nanosecond pulsed dielectric barrier discharge using the array needles-plate electrode in air[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(7): 073308.
- [47] ADESINA K, T C, HUANG Y W, et al. A review of dielectric barrier discharge cold atmospheric plasma for surface sterilization and decontamination[J]. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 2024, 8(3): 295-306.
- [48] FEIZOLLAHI E, MISRA N N, ROOPESH M S. Factors influencing the antimicrobial efficacy of dielectric barrier discharge(DBD)atmospheric cold plasma (ACP) in food processing applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(4): 666-689.
- [49] ZHANG S, WANG W C, YANG D Z, et al. Nanosecond pulsed uniform dielectric barrier discharge in atmospheric air: a brief spectroscopic analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, 207: 294-300.
- [50] LU X, LAROUCSI M, PUECH V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2012, 21(3): 034005.
- [51] LU X, NAIDIS G V, LAROUCSI M, et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: generation, transport, and biological effects[J]. *Physics Reports*, 2016, 630: 1-84.
- [52] AKISHEV Y, TRUSHKIN N, GRUSHIN M, et al. Atmospheric pressure pulsed-periodical spark generator forming fast moving non-equilibrium plasma clouds[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(11): 2806-2810.
- [53] GONG X J, LIN Y C, LI X D, et al. Decomposition of volatile organic compounds using gliding arc discharge plasma[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2020, 70(2): 138-157.
- [54] BO Z, YAN J H, LI X D, et al. Scale-up analysis and development of gliding arc discharge facility for volatile organic compounds decomposition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 155(3): 494-501.
- [55] MIOTK R, HRYCAK B, CZYLKOWSKI D, et al. Atmospheric pressure microwave(915 MHz) plasma for hydrogen production from steam reforming of ethanol[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 14959.
- [56] CROSLYN A E, SMITH B W, WINEFORDNER J D. A review of microwave plasma sources in atomic emission spectrometry: Literature from 1985 to the present[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 1997, 27(3): 199-255.
- [57] KELLY S, BOGAERTS A. Nitrogen fixation in an electrode-free microwave plasma[J]. *Joule*, 2021, 5(11): 3006-3030.
- [58] SAKUDO A, YAGYU Y, ONODERA T. Disinfection and sterilization using plasma technology: fundamentals and future perspectives for biological applications[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(20): 5216.
- [59] BARJASTEH A, DEGHANI Z, LAMICHHANE P, et al. Recent progress in applications of non-thermal plasma for water purification, bio-sterilization, and decontamination[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3372.
- [60] PARK J H, PARK J S, LEE J H, et al. Space sterilization effect through high-density plasma ozone using DBD device[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2022, 17(5): 2771-2778.
- [61] YANG X T, ZHANG Y H, CHEN X Y, et al. Design and experimental study of plasma device for accurate contour scanning[J]. *Vacuum*, 2022, 205: 111442.
- [62] ESKANDARI P, BEAVER C L, ROSSBACH S, et al. Flexible micro-plasma discharge device for treating burn wound injuries against fungal infections[C]//2022 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems(FLEPS). Vienna, Austria: IEEE, Vienna, AUSTRIA, 2022: 1-4.
- [63] LIU S Y, JIN H S, LU Y Y, et al. Characteristics and performance of an integrated coplanar dielectric barrier discharge device for hand hygiene[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2024, 21(6): 2400011.
- [64] HEINLIN J, ISBARY G, STOLZ W, et al. Plasma applications in medicine with a special focus on dermatology[J]. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 2011, 25(1): 1-11.
- [65] WANG J Q, YU Z Y, XU Z M, et al. Antimicrobial mechanism and the effect of atmospheric pressure N₂ plasma jet on the regeneration capacity of *Staphylococcus aureus* biofilm[J]. *Biofouling*, 2018, 34(8): 935-949.
- [66] CHOI J, IZA F, LEE J K, et al. Electron and ion kinetics in a DC microplasma at atmospheric pressure[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(5): 1274-1278.
- [67] KIM G J, IZA F, LEE J K. Electron and ion kinetics in a micro hollow cathode discharge[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(20): 4386-4392.
- [68] SORIA C, PONTIGA F, CASTELLANOS A. Plasma chemical and electrical modelling of a negative DC corona in pure oxygen[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2004, 13(1): 95-107.
- [69] STAFFORD D S, KUSHNER M J. O₂(¹Δ) production in He/O₂ mixtures in flowing low pressure plasmas[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(5): 2451-2465.
- [70] BABAEVA N Y, KUSHNER M J. Intracellular electric fields produced by dielectric barrier discharge treatment of skin[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(18): 185206.
- [71] 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 and Polymers*, 2007, 4(4): 370-375.

- [72] SCHOENBACH K H, PETERKIN F E, ALDEN R W, et al. The effect of pulsed electric fields on biological cells: Experiments and applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(2): 284-292.
- [73] CHEN C, LIU D X, LIU Z C, et al. A model of plasma-biofilm and plasma-tissue interactions at ambient pressure[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2014, 34(3): 403-441.
- [74] GRAVES D B. The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(26): 263001.
- [75] ZHANG H, ZHANG C X, HAN Q. Mechanisms of bacterial inhibition and tolerance around cold atmospheric plasma[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023, 107(17): 5301-5316.
- [76] SHEN J, ZHANG H, XU Z M, et al. Preferential production of reactive species and bactericidal efficacy of gas-liquid plasma discharge[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 362: 402-412.
- [77] HUANG L L, GUO L, QI Y, et al. Bactericidal effect of surface plasma under different discharge modes[J]. Physics of Plasmas, 2021, 28(12): 123501.
- [78] KONDETI V S S K, PHAN C Q, WENDE K, et al. Long-lived and short-lived reactive species produced by a cold atmospheric pressure plasma jet for the inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus*[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2018, 124: 275-287.
- [79] MACHALA Z, TARABOVA B, HENSEL K, et al. Formation of ROS and RNS in water electro-sprayed through transient spark discharge in air and their bactericidal effects[J]. Plasma Processes and Polymers, 2013, 10(7): 649-659.
- [80] LAROUSSE M, MENDIS D A, ROSENBERG M. Plasma interaction with microbes[J]. New Journal of Physics, 2003, 5: 41.
- [81] MA Y, ZHANG G J, SHI X M, et al. Chemical mechanisms of bacterial inactivation using dielectric barrier discharge plasma in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4): 1615-1620.
- [82] YUSUPOV M, BOGAERTS A, HUYGH S, et al. Plasma-induced destruction of bacterial cell wall components: a reactive molecular dynamics simulation[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117(11): 5993-5998.
- [83] ARJUNAN K P, SHARMA V K, PTASINSKA S. Effects of atmospheric pressure plasmas on isolated and cellular DNA-a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(2): 2971-3016.
- [84] KARTASCHEW K, BALDUS S, MISCHO M, et al. Cold atmospheric-pressure plasma and bacteria: understanding the mode of action using vibrational microspectroscopy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(37): 374003.
- [85] KAUSHIK N, MITRA S, BAEK E J, et al. The inactivation and destruction of viruses by reactive oxygen species generated through physical and cold atmospheric plasma techniques: Current status and perspectives[J]. Journal of Advanced Research, 2023, 43: 59-71.
- [86] YAMASHIRO R, MISAWA T, SAKUDO A. Key role of singlet oxygen and peroxynitrite in viral RNA damage during virucidal effect of plasma torch on feline calicivirus[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 17947.
- [87] CHEN Z T, BAI F, JONAS S J, et al. Cold atmospheric plasma for addressing the COVID-19 pandemic[J]. Plasma Processes and Polymers, 2022, 19(9): 2200012.
- [88] CHEN Z T, GARCIA G, ARUMUGASWAMI V, et al. Cold atmospheric plasma for SARS-CoV-2 inactivation[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(11): 111702.
- [89] 郭 莉, 赵鹏瑜, 黄玲玲, 等. 等离子体活化水用于微生物消杀的意义和现状[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2955-2971.
- GUO Li, ZHAO Pengyu, HUANG Lingling, et al. Significance and current status of plasma-activated water for microbial inactivation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2955-2971.
- [90] SU X, TIAN Y, ZHOU H Z, et al. Inactivation efficacy of nonthermal plasma-activated solutions against newcastle disease virus[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84(9): e02836-17.
- [91] LIAO X Y, LIU D H, DING T. Nonthermal plasma induces the viable-but-nonculturable state in *Staphylococcus aureus* via metabolic suppression and the oxidative stress response[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2020, 86(5): e02216-19.
- [92] LUNOV O, ZABLOTSKII V, CHURPITA O, et al. The interplay between biological and physical scenarios of bacterial death induced by non-thermal plasma[J]. Biomaterials, 2016, 82: 71-83.
- [93] GUO L, YAO Z Q, YANG L, et al. Plasma-activated water: An alternative disinfectant for S protein inactivation to prevent SARS-CoV-2 infection[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421: 127742.
- [94] QIAN J, MA L J, YAN W J, et al. Inactivation kinetics and cell envelope damages of foodborne pathogens *Listeria monocytogenes* and *Salmonella Enteritidis* treated with cold plasma[J]. Food Microbiology, 2022, 101: 103891.
- [95] MARTÍNEZ-MONTELONGO J H, MEDINA-RAMÍREZ I E, ROMO-LOZANO Y, et al. Development of a sustainable photocatalytic process for air purification[J]. Chemosphere, 2020, 257: 127236.
- [96] ASSADI I, GUESMI A, BAALOUJ O, et al. Review on inactivation of airborne viruses using non-thermal plasma technologies: from MS2 to coronavirus[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(4): 4880-4892.
- [97] SCHMIDT M, JÖGI I, HOLUB M, et al. Non-thermal plasma based decomposition of volatile organic compounds in industrial exhaust gases[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(12): 3745-3754.
- [98] SCHIAPPACASSE C, PENG P, ZHOU N, et al. Inactivation of aerosolized newcastle diseases virus with non-thermal plasma[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2020, 36(1): 55-60.
- [99] 朱海巍, 兰存涛, 刘大伟. 基于人工智能优化的等离子体空气净化系统[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2998-3009.
- ZHU Haiwei, LAN Cuntao, LIU Dawei. AI optimization based plasma air purification system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2998-3009.
- [100] LIU Y W, WANG S, ZHOU R S, et al. Development of a battery-operated floating-electrode dielectric barrier discharge plasma device and its characteristics[J]. Plasma Science and Technology, 2021, 23(6): 064008.
- [101] 郭云涛, 张东荷雨, 张丽阳, 等. 新型冠状病毒等病原体空气消毒技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1438-1451.
- GUO Yuntao, ZHANG Dongheyu, ZHANG Liyang, et al. Air disinfection for SARS-CoV-2 and other pathogens: a review[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(12): 1438-1451.
- [102] LIANG Y D, WU Y, SUN K, et al. Rapid Inactivation of Biological Species in the Air using Atmospheric Pressure Nonthermal Plasma[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(6): 3360-3368.
- [103] JIN T, XU Y, DAI C W, et al. Cold atmospheric plasma: A non-negligible strategy for viral RNA inactivation to prevent SARS-CoV-2 environmental transmission[J]. Aip Advances, 2021, 11(8): 085019.
- [104] 陈 松, 翟宇佳, 陈 怡, 等. 低温等离子对模拟舰艇密闭舱室中呼吸道病毒的消杀效果[J]. 海军军医大学学报, 2023, 44(12): 1481-1484.
- CHEN Song, ZHAI Yujia, CHEN Yi, et al. Disinfection effect of low-temperature plasma on respiratory viruses in simulated warship airtight cabins[J]. Academic Journal of Naval Medical University, 2023, 44(12): 1481-1484.
- [105] 马彩琴, 许桂敏, 王香妮, 等. 新型低温等离子体消毒机空气消毒效果的试验研究[J]. 西安交通大学学报(医学版), 2021, 42(5): 774-779.
- MA Caiqin, XU Guimin, WANG Xiangni, et al. Experimental study of disinfection effect of a new low-temperature plasma disinfectant[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University(Medical Sciences), 2021, 42(5): 774-779.
- [106] ZHANG L Y, GUO Y T, CHANG X Y, et al. In-duct grating-like dielectric barrier discharge system for air disinfection[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 435: 129075.
- [107] 张丽阳, 郭云涛, 帖金凤, 等. 大气压栅状介质阻挡放电等离子体空气消毒研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2972-2987.
- ZHANG Liyang, GUO Yuntao, TIE Jinfeng, et al. Air disinfection by atmospheric pressure grating-like dielectric barrier discharge plasma[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2972-2987.

- [108] ZHAO Y J, SHI Y Q, LIU S Y, et al. Study on the mode transition of multi-hollow dielectric barrier discharge[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134(10): 103301.
- [109] KI S H, MASUR K, BAIK K Y, et al. Effects of humidity on room disinfection by dielectric barrier discharge plasma[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(42): 425204.
- [110] PARK J Y, BAEK K H, KIM S J, et al. Development of high durability plasma filter for air circulating disinfection system[J]. *Current Applied Physics*, 2022, 41: 100-110.
- [111] 焦阳, 吉硕, 于欣, 等. 低温等离子体灭活细菌气溶胶的效能及机制[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(7): 3615-3624.
JIAO Yang, JI Shuo, YU Xin, et al. Efficacy and mechanism of inactivation of bacterial aerosols by non-thermal plasma[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(7): 3615-3624.
- [112] PREHN F, TIMMERMAN E, KETTLITZ M, et al. Inactivation of airborne bacteria by plasma treatment and ionic wind for indoor air cleaning[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2020, 17(9): 2000027.
- [113] 李晔, 谢中艺, 蔡冉, 等. 等离子体空气消毒机对幼儿园室内空气气溶胶消毒效果研究[J]. *中国消毒学杂志*, 2024, 41(4): 259-260, 263.
LI Ye, XIE Zhongyi, CAI Ran, et al. Disinfection effect of plasma air disinfection machine on dynamic and static indoor air in a kindergarten[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2024, 41(4): 259-260, 263.
- [114] 付慧群, 李玉光, 陈扬, 等. 低温等离子体技术在殡仪场所空气消毒净化中的应用[J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(11): 1010-1012.
FU Huiqun, LI Yuguang, CHEN Yang, et al. Application of low temperature plasma technology in air disinfection and purification of funeral places[J]. *Journal of Environment and Health*, 2017, 34(11): 1010-1012.
- [115] 魏兰芬, 孔德华, 潘协商, 等. 射流型等离子体空气消毒机对室内空气中微生物杀灭效果的研究[J]. *中国消毒学杂志*, 2023, 40(1): 5-7, 10.
WEI Lanfen, KONG Dehua, PAN Xieshang, et al. Study on the effect of jet plasma air disinfectant on killing microorganisms in indoor air[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2023, 40(1): 5-7, 10.
- [116] 窦立广, 江福能, 李星, 等. 一种复合式空气消毒机的消毒效果研究[J]. *中国消毒学杂志*, 2025, 42(3): 175-177, 181.
DOU Liguang, JIANG Funeng, LI Xing, et al. Study on the disinfection effect of a composite air disinfection machine[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2025, 42(3): 175-177, 181.
- [117] GUESMI A, CHERIF M M, BAALOUJ O, et al. Disinfection of corona and myriad viruses in water by non-thermal plasma: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(37): 55321-55335.
- [118] Johnson D C, Bzdek J P, Fahrenbruck C R, et al. An innovative non-thermal plasma reactor to eliminate microorganisms in water[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2016, 57(18): 8097-8108.
- [119] SATOH K, MACGREGOR S J, ANDERSON J G, et al. Pulsed-plasma disinfection of water containing *Escherichia coli*[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(3R): 1137-1141.
- [120] 田一平, 周新颖, 袁晓莉, 等. 强电放电等离子体在应急净化饮用水中的应用[J]. *高电压技术*, 2017, 43(6): 1792-1799.
TIAN Yiping, ZHOU Xinying, YUAN Xiaoli, et al. Application on strong ionized discharge plasma to emergency drinking water disinfection[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(6): 1792-1799.
- [121] 钟荣巍. 放电等离子体去除水中抗生素抗性基因并抑制其转移的效应与机制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 20233.
ZHONG Rongwei. Effects and mechanisms of discharge plasma on removing the antibiotic resistance genes in water and inhibiting its transfer[D]. Xianyang, China: Northwest A&F University, 2023.
- [122] 郝悦, 许桂敏, 石兴民, 等. 低温等离子体消毒灭菌技术的应用研究进展[J]. *中国消毒学杂志*, 2024, 41(1): 51-56.
HAO Yue, XU Jiamin, SHI Xingmin, et al. Progress in the application of low-temperature plasma disinfection and sterilization technology[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2024, 41(1): 51-56.
- [123] 石兴民, 张冠军, 许桂敏, 等. 等离子体射流对医疗器械的消毒效果研究[J]. *高电压技术*, 2009, 35(3): 632-635.
SHI Xingmin, ZHANG Guanjin, XU Guimin, et al. Inactivating microorganism on medical instrument using plasma jet[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(3): 632-635.
- [124] 赵航, 孙宇豪, 张波, 等. 空气等离子体射流特性及其活化水灭菌效果[J]. *高电压技术*, 2023, 49(12): 5270-5281.
ZHAO Hang, SUN Yuhao, ZHANG Bo, et al. Characteristics of air plasma jet and inactivation efficacy of plasma activated water[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(12): 5270-5281.
- [125] BĂLAN G G, ROȘCA I, URSU E L, et al. Plasma-activated water: a new and effective alternative for duodenoscope reprocessing[J]. *Infection and Drug Resistance*, 2018, 11: 727-733.
- [126] JIN S S, JIANG Y F, ZHAO K X, et al. An atmospheric pressure plasma device with multiple ring electrodes for decontamination of flexible tubing with variable scales[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2023, 20(11).
- [127] KARIPIDOU N, TZAVELLAS A N, PETROU N, et al. Comparative studies of sterilization processes for sensitive medical nano-devices[C]//International Conferences and Exhibition on Nanotechnologies, Organic Electronics and Nanomedicine- Nanotextology (NANOTEX). Thessaloniki, GREECE, 2022: 1-8.
- [128] HUANG W C, TSAI P J, CHEN Y C, Functional gold nanoparticles as photothermal agents for selective-killing of pathogenic bacteria[J]. *Nanomedicine*, 2007, 2(6): 777-787.
- [129] LARSSON D G J, FLACH C F. Antibiotic resistance in the environment[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2022, 20(5): 257-269.
- [130] WEN Q X, YANG L, ZHAO Y Q, et al. Insight into effects of antibiotics on reactor performance and evolutions of antibiotic resistance genes and microbial community in a membrane reactor[J]. *Chemosphere*, 2018, 197: 420-429.
- [131] SAKUDO A, MISAWA T. Antibiotic-resistant and non-resistant bacteria display similar susceptibility to dielectric barrier discharge plasma[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(17): 6326.
- [132] XU G M, SHI X M, CAI J F, et al. Dual effects of atmospheric pressure plasma jet on skin wound healing of mice[J]. *Wound Repair and Regeneration*, 2015, 23(6): 878-884.
- [133] SHI X M, XU G M, ZHANG G J, et al. Low-temperature plasma promotes fibroblast proliferation in wound healing by ROS-activated NF- κ B signaling pathway[J]. *Current Medical Science*, 2018, 38(1): 107-114.
- [134] BEKESCHUS S, SCHMIDT A, WELTMANN K D, et al. The plasma jet kINPen-A powerful tool for wound healing[J]. *Clinical Plasma Medicine*, 2016, 4(1): 19-28.
- [135] CLEMEN R, HEIRMAN P, LIN A, et al. Physical plasma-treated skin cancer cells amplify tumor cytotoxicity of human natural killer(NK)cells[J]. *Cancers*, 2020, 12(12): 3575.
- [136] 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 and Plasma Processing*, 2006, 26(4): 425-442.
- [137] SUN Y H, LIU Y Y, ZHANG B, et al. Flexible thin-layer plasma sterilizer based on polyimide and efficacy evaluation under bending deformation[J]. *Physics of Plasmas*, 2024, 31(7): 073501.
- [138] ZHAO Y J, LIU Y Z, LIU Z Y, et al. A 3D-printed fence-surface plasma source for skin treatment and its potential for personalized medical application[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2024, 57(12): 125207.
- [139] CHEN R S, LIU C H, LEE K F, et al. Low-temperature nonthermal plasma for teeth bleaching[C]//2013 International Conference on Biological, Medical and Chemical Engineering (BMCE). Hong Kong, China:[s. n.], 2013: 95-99.
- [140] LI H P, ZHANG X F, ZHU X M, et al. Translational plasma stomatology: applications of cold atmospheric plasmas in dentistry and their extension, *High Voltage*, 2017, 2(3): 188-199.
- [141] JUNGBAUER G, MOSER D, MÜLLER S, et al. The antimicrobial effect of cold atmospheric plasma against dental pathogens-a systematic review of in-vitro studies[J]. *Antibiotics-Basel*, 2021, 10(2): 211.
- [142] 谢娜, 刘飞, 李子夏, 等. 大气压低温等离子体在口腔医学中应用进展[J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(2): 245-249.
XIE Na, LIU Fei, LI Zixia, et al. Application of atmospheric-pressure low-temperature plasma in stomatology: a review[J]. *Chinese Journal*

- of Medical Physics, 2021, 38(2): 245-249.
- [143] 孙小钦, 王 旭, 韩 琪, 等. 低温等离子体在口腔微生物感染性疾病中的应用研究进展[J]. 实用医院临床杂志, 2022, 19(4): 199-202.
- SUN Xiaoqin, WANG Xu, HAN Qi, et al. Application of cold atmospheric plasma in biofilm-related oral infectious diseases[J]. Practical Journal of Clinical Medicine, 2022, 19(4): 199-202.
- [144] 卢新培. 等离子体射流及其医学应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1416-1425.
- LU Xinpei. Plasma jets and their biomedical application[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1416-1425.
- [145] MOHAMMED R S, AL-MARJANI M F. DBD plasma as a practical approach to sterilization of dental instruments[J]. Physica Scripta, 2024, 99(4): 045601.
- [146] LU X P, CAO Y G, YANG P, et al. An RC plasma device for sterilization of root canal of teeth[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(5): 668-673.
- [147] PAN J, SUN K, LIANG Y D, et al. Cold Plasma Therapy of a tooth root canal infected with *Enterococcus faecalis* biofilms *in vitro*[J]. Journal of Endodontics, 2013, 39(1): 105-110.
- [148] ÜREYEN KAYA B, KECECI A D, GÜLDAŞ H E, et al. Efficacy of endodontic applications of ozone and low-temperature atmospheric pressure plasma on root canals infected with *Enterococcus faecalis*[J]. Letters in Applied Microbiology, 2014, 58(1): 8-15.
- [149] NAM S H, OK S M, KIM G C. Tooth bleaching with low temperature plasma lowers surface roughness and *Streptococcus mutans* adhesion[J]. International Endodontic Journal, 2018, 51(4): 479-488.
- [150] 周鑫才, 梁德凤, 陈伟建, 等. CHX 等离子体杀灭牙根卟啉单胞菌的实验研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2018, 34(6): 341-344.
- ZHOU Xincan, LIANG Defeng, CHEN Weijian, et al. The antimicrobial activity of plasma jet with helium flowing through 2%chlorhexidine against *Porphyromonas gingivalis*[J]. Journal of Clinical Stomatology, 2018, 34(6): 341-344.
- [151] ERCAN U K, WANG H, JI H F, et al. Nonequilibrium plasma-activated antimicrobial solutions are broad-spectrum and retain their efficacies for extended period of time[J]. Plasma Processes and Polymers, 2013, 10(6): 544-555.
- [152] LI Y L, PAN J, YE G P, et al. In vitro studies of the antimicrobial effect of non-thermal plasma-activated water as a novel mouthwash[J]. European Journal of Oral Sciences, 2017, 125(6): 463-470.
- [153] TASAKI T, OHSHIMA T, USUI E, et al. Plasma-treated water eliminates *Streptococcus mutans* in infected dentin model[J]. Dental Materials Journal, 2017, 36(4): 422-428.
- [154] RAN C F, ZHOU X F, WANG Z Y, et al. Ultralong-lasting plasma-activated water: production and control mechanisms[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2024, 33(1): 015009.
- [155] HAHNEL M, VON WOEDTKE T, WELTMANN K D. Influence of the air humidity on the reduction of *Bacillus* spores in a defined environment at atmospheric pressure using a dielectric barrier surface discharge[J]. Plasma Processes and Polymers, 2010, 7(3/4): 244-249.
- [156] SCHWABEDISSEN A, LACINSKI P, CHEN X, et al. PlasmaLabel-a new method to disinfect goods inside a closed package using dielectric barrier discharges[J]. Contributions To Plasma Physics, 2007, 47(7): 551-558.
- [157] PANNGOM K, LEE S H, PARK D H, et al. Non-Thermal plasma treatment diminishes fungal viability and up-regulates resistance genes in a plant host[J]. Plos One, 2014, 9(6): e99300.
- [158] LÜ Y, ZOU L, LI H D, et al. Investigation of non-thermal atmospheric plasma for the degradation of avermectin solution[J]. Plasma Science and Technology, 2021, 23(5): 055506.
- [159] CHENG H, XU J X, LI X, et al. On the dose of plasma medicine: Equivalent total oxidation potential (ETOP)[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(6): 063514.
- [160] 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.
- [161] BHATT S, MEHTA P, CHEN C, et al. Efficacy of low-temperature plasma-activated gas disinfection against biofilm on contaminated GI endoscope channels[J]. Gastrointestinal Endoscopy, 2019, 89(1): 105-114.
- [162] LI Y Q, NIE L L, JIN S H, et al. The effect of plasma on bacteria and normal cells in infected wound[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2022, 2022: 1838202.
- [163] YONG H I, KIM H J, PARK S, et al. Evaluation of pathogen inactivation on sliced cheese induced by encapsulated atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma, Food Microbiology, 2015, 46: 46-50.
- [164] 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, 2008, 104(6): 1659-1666.
- [165] 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, 2008, 104(6): 1659-1666.
- [166] BLUMHAGEN A, SINGH P, MUSTAPHA A, et al. Plasma deactivation of oral bacteria seeded on hydroxyapatite disks as tooth enamel analogue[J]. American Journal of Dentistry, 2014, 27(2): 84-90.
- [167] KVAM E, DAVIS B, MONDELLO F, et al. Nonthermal atmospheric plasma rapidly disinfects multidrug-resistant microbes by inducing cell surface damage[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2012, 56(4): 2028-2036.
- [168] 李德全, 陈昭斌. 等离子体技术在消毒中的应用进展[J]. 中国消毒学杂志, 2023, 40(4): 295-299.
- LI Dequan, CHEN Zhaobin. Study on the sterilization effect of ethylene oxide sterilization and low temperature plasma sterilization on surgical precision instruments[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2023, 40(4): 295-299.



SHAO Tao
Ph.D., Professor
Corresponding author



LU Xinpei
Ph.D., Professor



ZHANG Guanjun
Ph.D., Professor

邵 涛(通信作者)
1977—, 男, 博士, 研究员, 博导
主要从事高电压技术、脉冲功率技术和放电等离子体应用等研究工作
E-mail: st@mail.iee.ac.cn

卢新培
1971—, 博士, 教授, 长江学者特聘教授
主要从事低温等离子体源、诊断、及其生物医学、能源等方面应用研究
E-mail: luxinpei@hotmail.com

张冠军
1970—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事高电压绝缘与放电特性、放电等离子体与跨学科应用的教学、科研和科普工作
E-mail: gjzhang@mail.xjtu.edu.cn