

大气压低温等离子体特性与应用研究现状

梅丹华¹, 方志^{1*}, 邵涛^{2,3}

(1. 南京工业大学电气工程与控制科学学院, 江苏省 南京市 211816; 2. 中国科学院电工研究所, 北京市 海淀区 100190; 3. 中国科学院大学, 北京市 海淀区 100049)

Recent Progress on Characteristics and Applications of Atmospheric Pressure Low Temperature Plasmas

MEI Danhua¹, FANG Zhi^{1*}, SHAO Tao^{2,3}

(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu Province, China;
2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: Recent progress on the atmospheric pressure low temperature plasmas is summarized and analyzed from the viewpoints of basic characteristics and practical applications based on the related research progress and the academic reports presented in the 2018 National Conference on High Voltage and Discharge Plasmas (HVDP2018). The theoretical-study related to basic characteristics are focused on the plasma power sources, plasma generation devices, experimental diagnostics and simulation methods, while the practical applications are mainly concentrated on the areas of material processing, energy conversion, environmental protection, biomedicine, aerospace, agriculture and food. It can be seen that gratifying achievements have been made in the basic characteristics and applications of atmospheric pressure low temperature plasmas in China in recent years. In the future, we should focus on the basic theoretical and key technical problems that restrict the rapid development of some specific applications and develop practical application-oriented plasma theory and process systems, with the aim of promoting the extensive applications of atmospheric pressure low temperature plasma technology.

KEY WORDS: atmospheric pressure low temperature plasmas; discharge; basic characteristics; applications; academic communication

摘要: 根据近年来国内外大气压低温等离子体基本特性和实际应用的研究进展, 结合 2018 年全国高电压与放电等离子体学术会议邀请报告和口头报告的内容, 从基本特性理论研究和面向实际应用研究 2 个层面总结和分析了近年来大气压低温等离子体的研究进展。理论研究围绕等离子体激励电源、产生装置、实验诊断技术和数值仿真技术等方面展开; 实际应用则主要集中在材料处理、能源转化、环境治理、生物医学、航空航天以及农业食品等领域。可以看出, 国内关

于大气压低温等离子体的基本特性和实际应用的研究均取得良好进展。未来应立足于相关应用领域的具体需求, 解决制约该领域迅速发展的基本理论问题和关键技术问题, 建立和发展面向实际应用的等离子体理论体系和工艺体系, 从而促进大气压低温等离子体技术广泛应用。

关键词: 大气压低温等离子体; 放电; 基本特性; 应用; 学术交流

0 引言

高电压与放电等离子体技术在国民经济建设和社会发展中正发挥着日益重要的作用, 受到了学术界和工业界的广泛关注。高电压、脉冲功率和等离子体代表了高电压与放电等离子体技术领域的三大基础方向。对此, 国内外学者从经典的高电压绝缘技术到与新测量和材料技术的融合贯通, 从特种电源技术到高功率、高能量的未来能源获取方式, 从等离子体物理到与材料改性、生物医学、能源化工和航空航天等学科的交叉应用, 进行了大量的研究, 并取得丰硕的研究成果。另外, 近年来国内举办了该技术领域有代表性的系列学术会议, 为加强学术交流和促进学科领域技术发展提供了平台。

近年来, 学者们对低温等离子体技术研究的关注程度越来越高, 使其逐渐成为该领域的研究焦点, 从图 1 所示的 2018 年全国高电压与放电等离子体学术会议中高电压、脉冲功率和等离子体这 3 个主题摘要的数量和比重也可以看出这一点^[1]。实际上, 这 3 个方向是相互促进、共同发展的。例如, 低温等离子体的研究成果正越来越多地应用于高

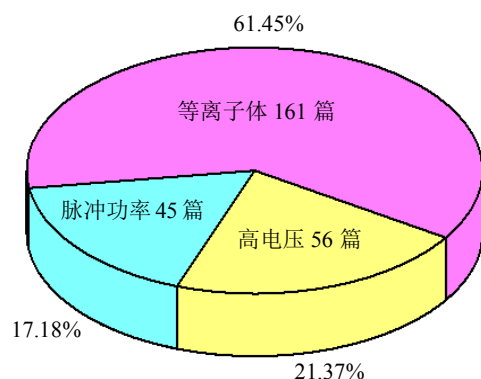


图1 2018年全国高电压与放电等离子体学术会议
三大主题摘要数量和比例分布

Fig. 1 Quantity and distribution of each subject abstract
in 2018 National Conference on High Voltage and
Discharge Plasmas

电压绝缘领域，如通过材料表面改性来提高材料绝缘特性，抑制电荷积聚，加快表面电荷消散；而脉冲功率技术的进步，特别是纳秒脉冲电源技术的快速发展为满足低温等离子体激励源的需求提供了有力保障。同时，等离子体诊断技术的发展也为传统高电压和脉冲功率领域的诊断需求提供了支持。

大气压低温等离子体作为一种新型分子活化手段，其独特的非平衡特性可以使热力学平衡条件下难以发生的反应在比较温和的条件下得以实现，在废气处理、材料表面改性等领域的应用中取得了良好的效果；近两年来在能源转化领域二氧化碳和甲烷活化利用、航空航天领域流动控制、生物医学领域癌症治疗和病菌灭活、农业食品领域种子和果蔬处理等方面也表现出了突出的优势，受到了多学科交叉领域受到了广泛关注；但是，应用领域的不断拓展对大气压低温等离子体的理论研究和科技发展提出了新的挑战，需要在等离子体基本特性、诊断技术、等离子体源的设计开发及其与实际应用的相互结合等方面开展深入研究。

大气压低温等离子体是涉及多时空尺度、多物理场，并存在声、光、电、热等多种效应的复杂物理化学过程^[2-11]。特别是当其应用于不同场合时，将与固态、液态和气态的不同物质相互作用，将发生复杂的物质和能量传递与转化，而影响气体放电等离子体本身产生和维持的关键参数复杂多变，进一步增加了其特性分析和参数调控的复杂度。对于大气压低温等离子体的实际应用，不同领域需求不同，但存在着待解决的共性问题。放电稳定性、非线性动力学、时空多尺度效应、粒子间碰撞过程以及等离子体参量调控机制等是不同领域所共同面

临的关键科学问题；而等离子体源及装置的设计开发、界面物理化学过程及调控、等离子体效应评价指标以及等离子体剂量控制则是在技术层面所面临的核心问题^[12]。解决上述共性关键科学问题和技术核心问题是提升大气压低温等离子体在不同领域应用效果和效率的关键所在。

鉴于大气压低温等离子体技术近来年的迅速发展势头及未来发展所面临的挑战，本文将重点介绍大气压低温等离子体的研究现状和未来发展趋势，总结大气压低温等离子体技术在面向国家重大需求和科学前沿领域基本特性理论与实际应用方面的主要进展和重要成果，旨在促进相关学科研究人员对放电等离子体的认识 and 关注，加强学科间的交流与合作，探索学科未来新的发展方向，进一步推动大气压低温等离子体技术在实际应用和产业化方面的发展。

1 大气压低温等离子体的研究动态

目前，国内关于大气压低温等离子体的研究主要集中在特性机理探索 and 实际应用两个方面，如图2所示。关于等离子体特性机理探索的研究包括放电特征分析、等离子体参数诊断和调控、放电稳定性和均匀性分析以及放电理论扩展等；关于等离子体实际应用的研究则涉及材料处理、资源环境与能源化工、航空航天和生物医学及农业食品等多个领域。下文将从特性机理和实际应用研究两个方面展开讨论。

1.1 基本特性机理

关于大气压低温等离子体基本特性机理的研究主要从等离子体激励电源、等离子体产生装置、实验诊断技术和数值仿真技术等4个方面展开。

1.1.1 等离子体激励电源

目前，关于高频交流、脉冲及射频等作为等离子体激励电源的研究均有报道，但相比之下，脉冲激励源是大气压低温等离子体最热门的激励电源，这也符合目前国内外的研究趋势^[6, 12-14]。多种电源组合使用也是研究人员关注的热点。例如，大连理工大学任春生等人在研究纳秒脉冲和交流双驱动下的介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)特性时，发现与单独纳秒脉冲激励相比，双驱动DBD在气流作用下更容易出现丝状放电。哈尔滨工业大学聂秋月等人在研究双频驱动大气压DBD动力学过程时，发现通过改变双频间高/低频电压配比和频率配比，可以有效调节放电过程中平均电子能

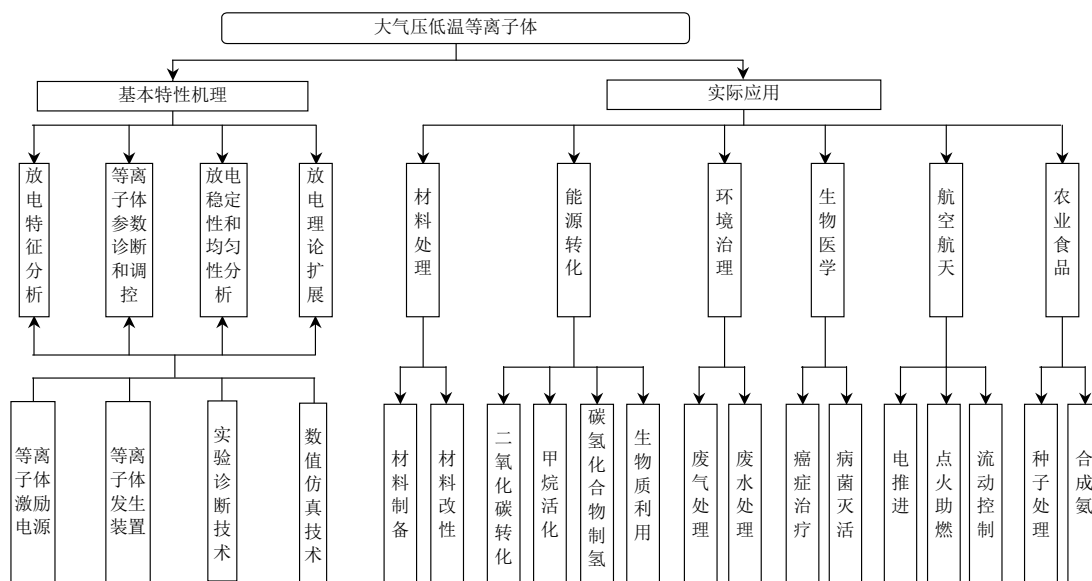


图2 大气压低温等离子体在特性机理和实际应用方面的研究热点

Fig. 2 Hot topics of atmospheric pressure low temperature plasma in characteristics and applications

量分布和活性粒子成分含量,图3所示为他们通过仿真获得的不同电压配比下的放电参数变化^[15]。脉冲调制射频放电具有能耗低、可有效加热电子等优势,引起了专家学者们的关注。山东大学张远涛团队研究了大气压脉冲调制射频放电中击穿电压与转换电压对占空比与调制频率的依赖关系;他们还采用脉冲调制的微波放电来获得脉冲大电流和具有更高能量的高能电子。

1.1.2 等离子体产生装置

DBD、大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ)以及滑动弧放电等离子体(gliding arc discharge, GAD)是目前大气压低温等离子体产生方式的研究热点,它们体现了不同等离子体应用领域中低温等离子体的主要产生方式^[16-17]。其中,关于GAD的基本特性研究主要集中在周期特性和放电模式上。中科院电工所邵涛等人在研究大气压微秒脉冲GAD放电周期特性时,发现稳定的气流场及较高的脉冲重复频率有利于滑动弧的周期性发展^[18]。大连理工大学鲁娜等人在研究交流旋转GAD用于甲烷重整过程放电特性时,发现整个放电过程存在击穿伴随滑动和稳定滑动2种模式^[19]。

介质阻挡放电分为体介质阻挡放电(volume DBD, VDBD)和表面介质阻挡放电(surface DBD, SDBD)。VDBD就是通常所说的同轴介质阻挡放电和平行板介质阻挡放电,在废气处理和能源转化方面有着较多的应用研究^[20-21]。其基本特性方面的研究主要体现在放电稳定性、均匀性和放电模式方

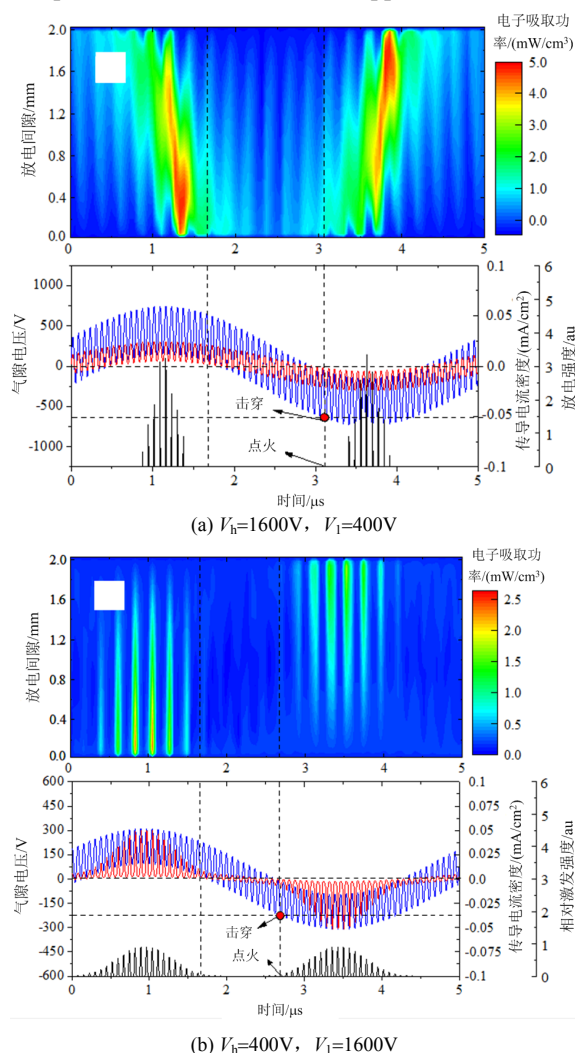


图3 不同电压配比下双频激励DBD放电参数变化
Fig. 3 Variation of discharge parameters of the atmospheric pressure DBD via dual-frequency excitation at different voltage ratios

面。大连理工大学王文春团队通过采用石英、陶瓷等介质材料和调节脉冲宽度及阻抗匹配等手段,在空气、氮气及含有电负性气体中实现了多针-板电极、板-板电极和线-管电极大面积均匀稳定放电;他们还比较了高压纳秒脉冲电源和正弦交流电源激励下的线-板和线-管电极结构放电的均匀性,图4所示为2种电源激励下线-板式电极结构放电图像和局部放电强度的空间分辨率^[22]。任春生团队通过在纳秒脉冲电源驱动的平行板 DBD 中引入一个与电场方向平行放置的悬浮金属棒电极,在 8mm 空气隙下引入气流实现了完全均匀的 DBD,并分析均匀放电产生的物理机制。大连海事大学俞哲等人以大气压氧等离子体为例,研究不同介质板结构对等离子体化学反应效能的影响,发现相比于双介质 DBD 只产生微流柱放电而言,单介质 DBD 会产生微流柱和微辉光放电交替的放电模式,因而臭氧产生浓度要高于双介质 DBD;另外,电极表面的二次电子发射能提高微放电强度,同样会促进氧等离子体化学反应。他们还利用水力空化气液混溶器在流体骤缩段产生的真空吸附效应,设计了可在 60~100kPa 条件下工作的氧等离子体反应器^[23]。SDBD 在生物医学和流动控制方面有着较多的应用研究^[24-25],对其基本特性的研究则集中在电荷分布和输运特性方面^[26]。

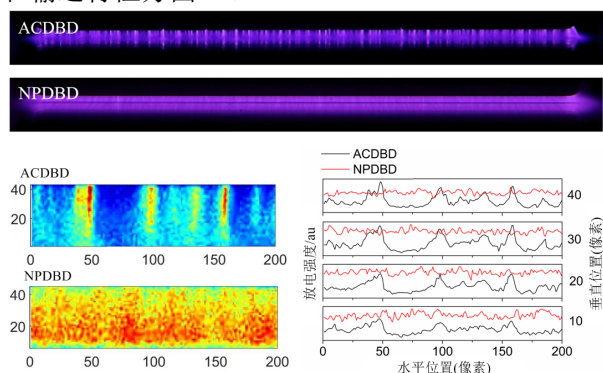


图4 纳秒脉冲和高频交流激励线-板电极结构放电图像和局部放电强度空间分辨率

Fig. 4 Discharge images of atmospheric air DBD excited by bipolar ns pulsed and AC power supplies and their spatial resolution of discharge intensity

APPJ 的基本特性研究首先集中在以下方面:

1) 射流的产生和传播机制; 2) APPJ 阵列的稳定性、均匀性等^[27-31]。北京交通大学刘文正等提出了一种在无气流作用下采用直流放电方式形成大气压空气辉光放电等离子体射流的方法,并通过尖端延展电离理论解释了大气压辉光放电等离子体射流的形成过程。东华大学郭颖等研究了不同调制脉

冲频率、占空比等放电参数下等离子体子弹的运行速度、射流最大长度及等离子体子弹数量间的关系,发现在单电极射流放电中,射流长度随占空比先增加后趋于稳定,而子弹数量随着占空比呈3个区域分布。北京理工大学欧阳吉庭等研究发现 He 等离子体射流中加入 N_2 或 O_2 后,等离子体放电通道中的电子能量降低,不利于等离子体射流的形成和传播。河北工业大学李雪辰等采用正偏置正弦电压激励 Ar 等离子体射流产生了特殊形状的膨胀等离子体羽,例如当驱动频率从低到高增加时,依次产生空心念珠形、空心锥形、丝和晕嵌套形等形状不同于常规锥形尾羽的等离子体羽^[32]。在等离子体射流阵列方面,南京工业大学方志团队通过研究一维等离子体射流阵列下游体羽长短和偏转,获得了射流阵列均匀性的变化规律,揭示了射流阵列各体羽间的耦合作用机制,为获得稳定可控的射流阵列提供指导。图5为 He 和 Ar 一维射流阵列在不同气体流量和电压条件下的放电发光图像和纹影图像^[33];他们还针对二维蜂巢状射流阵列结构研究不同参数对射流阵列模式转化的影响,获得射流阵列强耦合和大面积均匀两种模式之间的转化规律,并结合放电发展过程等分析了模式转换的机制。

APPJ 在材料处理、废水处理、生物医学领域有着广泛的应用^[8, 34-38],因而 APPJ 与作用对象的相互作用过程是其基本特性研究的另一个重要方面。西安交通大学刘定新指出,通过解耦等离子体对水溶液的复杂作用过程,包括溶解、电解、电子吸附于溶解氧等,可以定量解析这些作用过程对生成液相活性粒子的贡献,揭示等离子体射流产生液相活

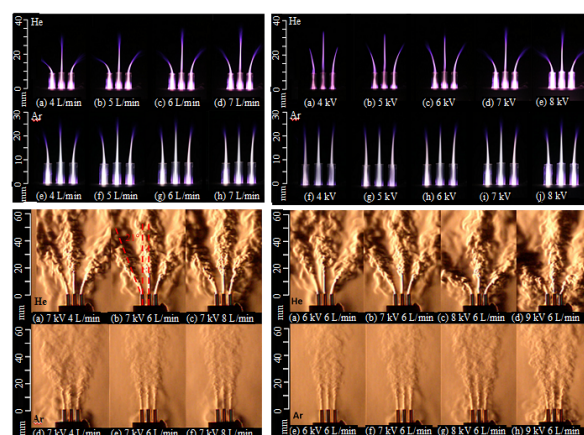


图5 He 和 Ar 一维射流阵列在不同气体流量和输入电压条件下的放电发光图像和纹影图像

Fig. 5 Discharge images and Schlieren photographs of He and Ar plasma jet arrays under different gas flow rates and applied voltages

性粒子的主要过程^[39]。华南理工大学戴栋等人在研究大气压氩等离子体作用于波浪形介质表面时,发现正极性的直流电压激励将导致介质表面放电及活性粒子分布不均匀,而采用负极性的直流电压能够改善介质表面等离子体分布的均匀性,但是产生的离子浓度要低于正极性放电,如图6所示^[40];另外,负极性电压驱动的放电具备流柱、表面放电和反击3种模式,这3种模式受到介质表面电荷及局部场强的影响。

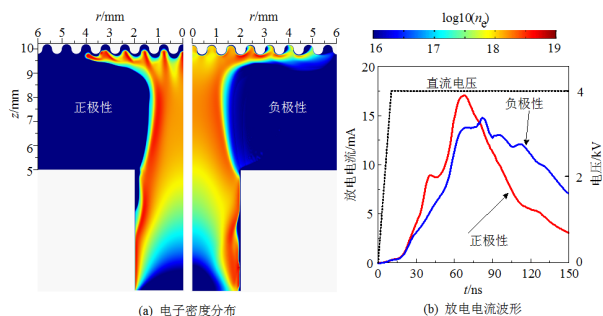


图6 正/负极性直流 APPJ 不同放电模式下电子密度空间分布和放电电流波形

Fig. 6 Spatial distributions of electron density and discharge current waveforms for positive and negative DC discharge in atmospheric pressure plasma jet

1.1.3 实验诊断技术

等离子体中含有大量的活性原子、分子、离子和自由基等,在等离子体生物、化工、材料等领域应用中发挥了关键性作用,但是这些活性粒子具有强烈的时空分布特性,对其进行精准的诊断测量可以有效调控活性粒子的产生与分布^[5, 41]。目前,电气测量和光学诊断依然是关于大气低温等离子体的主要实验诊断手段。电气测量主要是利用示波器记录电压和电流曲线,用于分析击穿电压、传输电荷、放电功率及能量效率等特性。光学诊断分为被动诊断方法和主动诊断方法^[2]。被动诊断包括发光图像拍摄和发射光谱诊断,是常见的诊断方法;主动诊断方法包括激光诱导荧光(laser induced fluorescence, LIF)、激光诱导击穿光谱(laser induced breakdown spectroscopy, LIBS)、汤姆逊散射(thomson scattering, TS)和瑞利散射(rayleigh scattering, RS)等。西安交通大学杨飞等使用 TS 和 RS 分别研究了激光诱导空气等离子体的动态变化过程,图7所示为激光诱导空气击穿后等离子体发展过程及不同时间延迟下的 TS 光谱图^[42]。除此之外,研究人员还报道了高速纹影成像技术和粒子图像测速法(particle image velocimetry, PIV)进行放电动态过程和流场分布的诊断。例如,南京航空航天

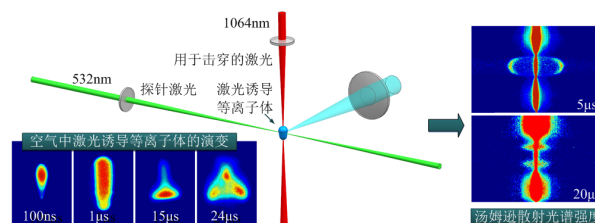


图7 激光诱导空气击穿后等离子体发展过程及不同时间延迟下的汤姆逊散射光谱图

Fig. 7 Temporal evolution of laser-induced plasma and Thomson scattering spectra at different time delays

大学吴淑群等和中科院电工所的邵涛团队分别采用高速纹影成像技术和PIV技术研究了纳秒脉冲等离子体合成射流激励器的流场分布特性。

基于等离子体的诊断技术也在逐渐发展。西安交通大学吴坚等人建立了基于光纤传输激光和等离子体光谱的激光诱导光谱系统,研究了面向核电站应用的两种钢材样品的激光诱导等离子体特性,并对 Cr 元素和 Mn 元素进行了定量测量。大连理工大学杨德正等人报道了采用等离子体原子光谱法进行重金属元素检测的研究工作,他们在大气压空气下分别得到脉冲电解液阴极放电和交流针-针放电,与原子发射光谱联用检测重金属元素,并验证了这两种放电在金属元素检测中的可行性,图8所示为脉冲电解液阴极放电装置图及用其测得的 Cd、Cu、Fe 和 Pb 典型光谱图^[43]。中国空气动力研究与发展中心邱华诚等人报道了基于脉冲放电的高超稀薄流场时空演化过程的诊断技术,通过纳秒放电激发流场局部线状发光放电,获得可达纳秒级分辨率的流场瞬时图像,根据发光强度与气体密度的关系,可以获得流场中的密度变化,利用该技术可以获得流场的精细结构及连续时间演化过程。

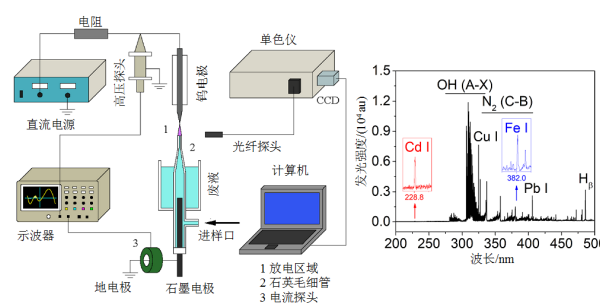


图8 脉冲电解液阴极放电装置图及

含 30 mg/L Cd、Cu、Fe 和 Pb 时的典型光谱图

Fig. 8 Experimental setup of electrolyte cathode discharge (ELCAD) and the typical spectrum of ELCAD with 30mg/L Cd, Cu, Fe, and Pb

1.1.4 数值仿真技术

等离子体本身及等离子体与物质相互作用是

非常复杂的体系和过程,存在多种叠加的效应,实验方法难以获得每个效应单独的作用。采用数值仿真技术可以分解等离子体体系的各个过程,捕捉每个效应作用的有用信息^[44]。实验诊断和数值仿真技术相互结合和补充,能够获得比较全面的等离子体物理过程。北京应用物理与计算数学研究所周前红等介绍了低温等离子体理论和模拟的研究进展,他们开发了流体模型、整体模型、粒子网格-蒙特卡罗碰撞模型(PIC-MCC)、粒子网格-直接模拟蒙特卡罗模型(PIC-DSMC)以及粒子模型与流体模型的混合模型。混合模型中流体模型和粒子模型的结合难度较大,尚处于起步阶段,具体应用实例报道较少。仿真模型的热点主要集中在流体模型和粒子模型。例如,北京理工大学欧阳吉庭等采用流体模型计算了大气压等离子体射流不同气体组分下放电通道中电子密度、电子温度和空间电荷等的分布。清华大学李和平等利用一维粒子模型模拟了不同初始电子温度下等离子体中带电子的引出过程^[45]。

等离子体在能源转化、环境治理等领域的应用过程中存在复杂的等离子体化学过程。研究人员将化学反应动力学模型与流体模型相结合,以期获得完整和全面的等离子体化学过程描述^[46-47]。北京航空航天大学的王伟宗等介绍了数值建模仿真在 CO_2 转化利用中的应用,他们将流体模型和化学反应动力学模型耦合模拟了GAD和填充床DBD等反应器中 CO_2 转化和等离子体协同催化过程,图9是他们获得的填充床DBD协同催化过程采用不同介电常数催化剂时放电流柱发展的模拟结果和实验结果对比^[48]。

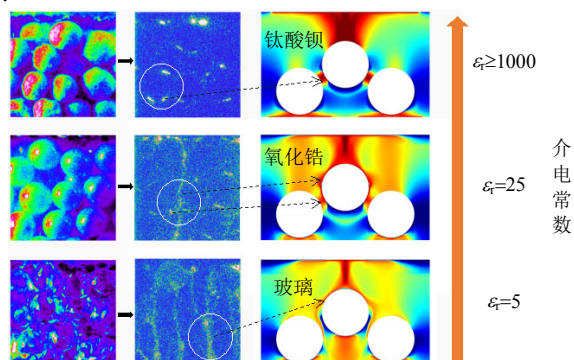


图9 填充床DBD协同催化过程不同介电常数催化剂下放电流柱发展模拟和实验结果对比

Fig. 9 Comparison between experimental and simulation results of streamer propagation in a packed bed plasma reactor for plasma catalysis applications

1.2 实际应用

关于大气压低温等离子体实际应用的讨论热

点主要集中在材料处理、能源转化、环境治理、生物医学、航空航天、农业食品等领域。

1.2.1 材料处理

等离子体因其具有大量高能电子、离子和激发态自由基等高化学活性物种及特殊的声、光、电等物理化学过程,能在传统方法达不到的工艺参数条件下进行材料制备和改性,具有广泛的应用前景。

大气压低温等离子体材料制备主要围绕功能材料和催化剂等展开^[49-51]。清华大学何金良等人提出了基于等离子体增强化学气相沉积技术的高温聚合物电容器薄膜制备方法,如图10所示。该方法可以提高聚合物电容器薄膜在高温下的介电储能性能,解决了电容器在特定应用场合面临的过热损坏问题^[52]。北京印刷学院刘忠伟等采用等离子体增强原子层沉积工艺制备获得的纳米结构 $\text{Fe}_3\text{C}_x/\text{CC}$ 复合材料,具有优异的电催化析氢性能;该团队还利用电感耦合氢等离子体增强原子层沉积技术,在低至 80°C 的沉积温度下制备得到具有优异保形性的碳化钴(Co_3C)薄膜。在催化材料和催化剂方面,北京大学的郑捷等人报道了多种等离子体技术在储能和催化材料制备的研究工作,包括制备锂离子电池负极材料和电解水制氢材料。大连大学底兰波等采用DBD等离子体制备的用于甲酸脱氢的 Pd/C 催化剂,与商业催化剂相比表现出较高的反应活性和稳定性^[53]。

对于等离子体材料改性,国内研究人员已经开始将该技术应用于纺织纤维、陶瓷以及金属等的表面改性^[17,35,50,54]。中科院电工所邵涛团队对比了

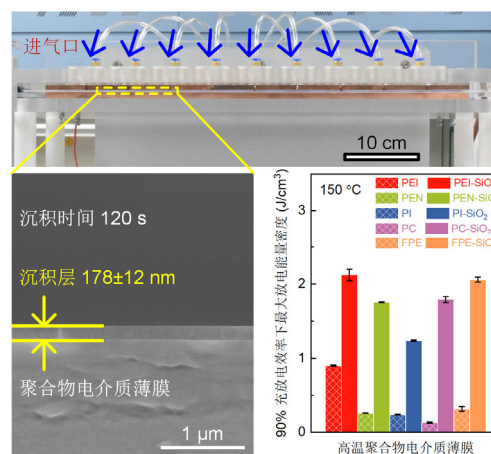


图10 等离子体增强化学气相沉积制备高温聚合物电容器薄膜

Fig. 10 Preparation of high-temperature dielectric polymer films using plasma-enhanced chemical vapor deposition

DBD 等离子体沉积和直接氟化改性聚苯乙烯表面电气绝缘性能,发现等离子体沉积和直接氟化均会引入大量极性基团(OH、COOH),显著提升表面电导率,加快表面电荷消散速率,从而使沿面闪络电压提高 30%以上,如图 11 所示^[55]。重庆大学杨庆等人发现对铜、铝和不锈钢 3 种电极材料溅射 TiO₂ 等离子体进行表面镀膜改性,可以提高金属功函数,减少空间电荷注入量,改善液体电介质的绝缘性能。河南理工大学张燕等人研究发现采用接触式气液(N₂+去离子水)DBD 对疏水性材料 PP 无纺布处理 60s 后其表面水接触角降为 0°,出现了超亲水现象。南京工业大学方志团队利用一维纳秒脉冲 Ar/HMDSO(六甲基二硅氧烷)等离子体射流阵列在环氧树脂表面沉积了超憎水性薄膜;他们还利用 Ar/TMS 射流阵列对玻璃表面处理以改善表面憎水性,图 12 所示为 TMS 含量和处理时间对玻璃表面水接触角的影响及射流阵列处理前后玻璃表面形貌的变化^[56]。

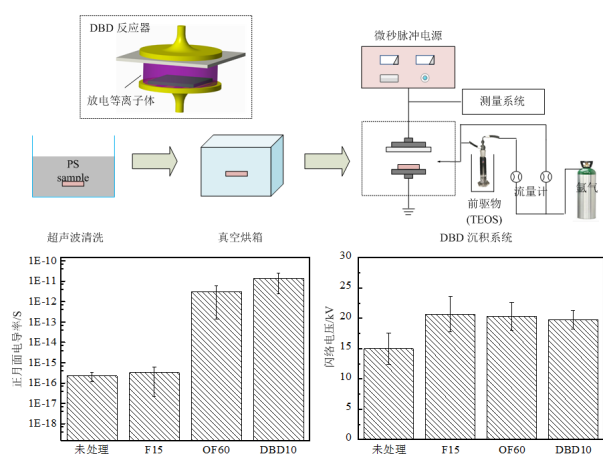


图 11 DBD 等离子体沉积改性聚苯乙烯装置及 DBD 沉积和直接氟化下聚苯乙烯表面电导率和沿面闪络变化

Fig. 11 DBD deposition system and experimental process for polystyrene (PS) surface modifications as well as the surface conductivity and the flashover withstanding voltage of PS samples before and after DBD deposition and direct fluorination

1.2.2 能源转化

大气压低温等离子体在能源转化领域的实际应用主要包括二氧化碳转化、甲烷活化、碳氢化合物制氢、生物质能转化利用等。

大气压低温等离子体用于二氧化碳转化的过程主要有二氧化碳直接分解、二氧化碳加氢、二氧化碳被水还原、二氧化碳重整碳氢化合物等^[11,46,57]。这些反应过程的主要产物有 CO、合成气(CO 和 H₂

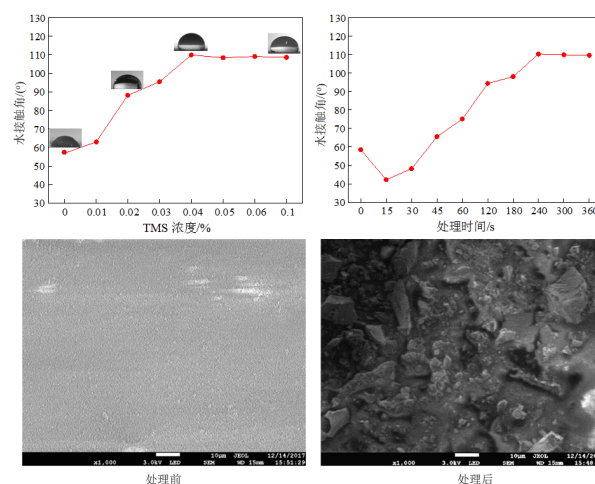


图 12 TMS 含量和处理时间对玻璃表面水接触角的影响以及处理前后表征玻璃表面形貌变化的 SEM 图像

Fig. 12 Effect of TMS content and treatment time on the water contact angle as well as SEM images of glass surface topography before and after plasma treatment

的混合物)、甲烷、甲醇、乙醇等。笔者介绍了在二氧化碳转化利用方面开展的研究工作及进展,主要分为纯等离子体反应和等离子体协同催化反应两个方面^[58-59],图 13 所示为获得的 CO₂ 直接分解过程的等离子体光催化协同效应的实验验证。浙江大学张浩团队报道了优化 GAD 反应器用于二氧化碳直接分解的研究工作^[60],他们比较了四边形和圆柱形两种反应器腔体对反应器内流场以及 CO₂ 分解过程中 CO₂ 转化率和能量效率的影响,如图 14 所示。大连海事大学王丽等在等离子体协同催化技术用于二氧化碳转化制备液态产物和二氧化碳直接分解等方面也开展了研究工作。

甲烷是世界第二大能源天然气的主要成分,是

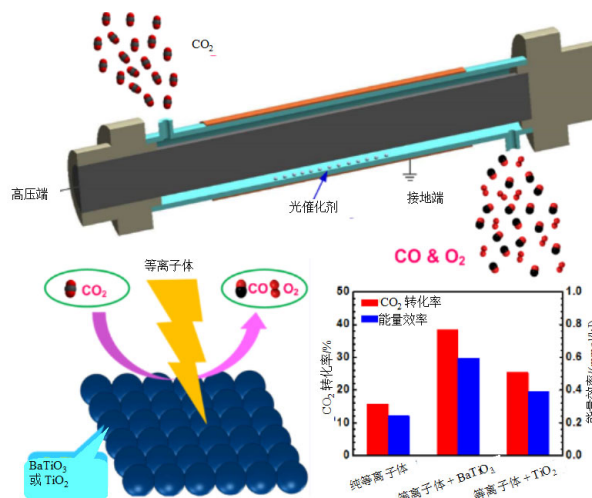


图 13 等离子体协同光催化 CO₂ 直接分解

Fig. 13 Demonstration of the synergistic effect of plasma-catalysis for the conversion of CO₂

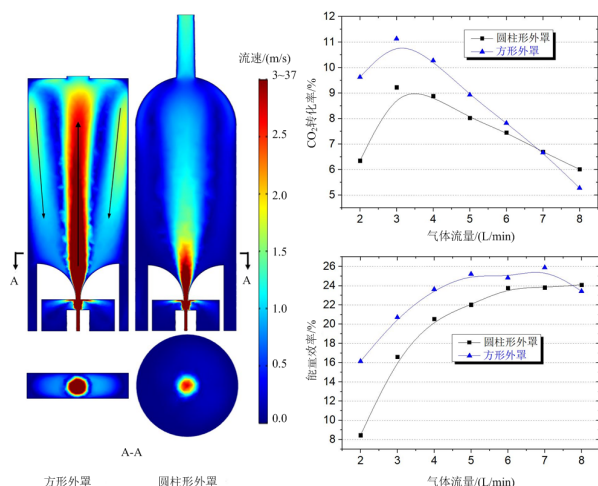


图 14 不同反应器腔体对 CO_2 分解过程反应器内流场以及 CO_2 转化率和能量效率的影响

Fig. 14 Simulated contours of gas velocity magnitude as well as CO_2 conversion and energy efficiency in the reactor with different covers

一种清洁可再生能源, 具有较大的开发前景。等离子体用于甲烷转化利用的过程包括甲烷无氧转化、甲烷部分氧化、甲烷氧化偶联、甲烷水蒸气重整和甲烷干重整等^[16, 21, 61]。上述等离子体甲烷活化过程的主要产物有 H_2 、乙烯、乙炔、合成气、甲醇、乙醇、乙酸等。中科院电工所邵涛团队在甲烷活化方面开展了大量的研究工作^[62-64]。图 15 所示为他们采用负极性纳秒脉冲放电在弥散、丝状和火花放电模式下进行甲烷无氧转化时甲烷转化率和能量效率等的结果^[65]。另外, 该团队还报道了微秒脉冲电源激励同轴 DBD 过程外电极长度和外电极结构激励方式对甲烷干重整性能的影响; 以及纳秒脉冲介质阻挡放电协同光催化甲烷干重整过程的电学特性, 其结果显示填充 ZrO_2 颗粒之后能有效改变 DBD 气隙等离子体通道形态和二次电子产生时间, 通过调整脉冲上升沿、下降沿和脉冲宽度等参数可以提高整个过程的能量利用效率。笔者和大连海事大学王丽等也分别报道了所在团队在甲烷干重整方面的研究进展^[66-67]。

氢能被视为一种无污染的可再生清洁能源, 是燃料电池车辆和小型燃料电池等的重要燃料。目前, 等离子体技术制氢过程的氢源主要包括甲醇、乙醇、甲烷及液态碳氢化合物等^[68-70]。大连海事大学孙冰等人采用脉冲针-板放电协同 TiO_2 催化剂从液态乙醇制备高纯氢气^[71], 图 16 是他们提出的液相脉冲放电协同 TiO_2 催化剂的反应机理。他们还报道了液体乙醇中微波放电制氢的研究进展, 通过对

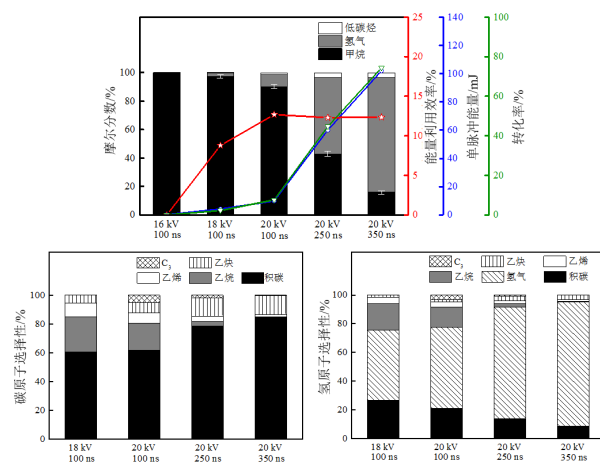


图 15 负极性纳秒脉冲放电不同模式下甲烷无氧转化过程反应性能对比

Fig. 15 Performance of non-oxidative methane conversion in different discharge regimes in nanosecond repetitively pulsed discharge with negative polarity

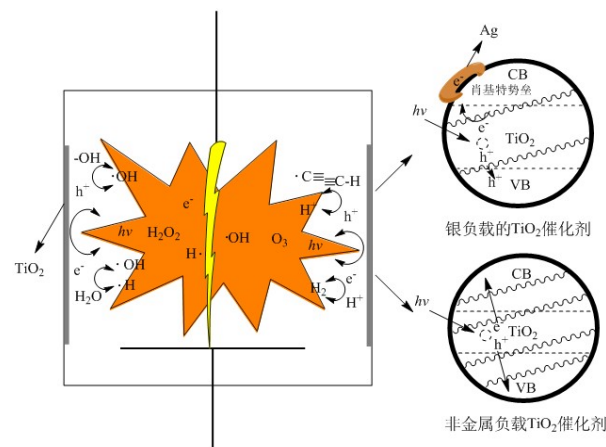


图 16 液相脉冲放电协同不同 TiO_2 催化剂机理图^[71]

Fig. 16 Mechanism of pulsed discharge in liquid combined with different TiO_2 based catalysts^[71]

比同轴耦合和直接驻波耦合两种微波反应器, 发现直接驻波耦合微波放电反应器在氢能发生量上更具有优势, 在优化条件下所产生的氢气流量为 812 NL/h, 氢气浓度为 58.1%, 氢能产率为 535 NL (H_2)/kW。浙江工商大学章旭明等报道了在温、压双控 DBD 反应器中重整正戊烷(C_5H_{12})来模拟车载液油重整制氢的研究工作, 他们发现反应器温度对 DBD 特性产生明显影响, 当温度高于 523 K 时放电将发生衰减; 通过改变自由基的种类和浓度, 可以调控氢气、含氧燃料和短链烷烃等的选择性, 在制氢的同时实现对碳元素的有效利用。

生物质因其具有来源广泛、可再生等特性, 被认为是理想的化石燃料替代品。等离子体技术用于生物质转化利用的主要过程有等离子体直接气化、等离子体直接液化、等离子体预处理生物质、等离

子体生物质油提纯、等离子体净化生物质气化产物等^[72-75]。其中, 等离子体直接气化生物质通常属于热等离子体范畴, 而其他几种生物质利用形式均可在大气压低温等离子体条件下进行。目前, 国内关于等离子体生物质利用的研究主要集中在生物质液化和气化产物净化。等离子体生物质直接液化是将等离子体电解技术和传统催化液化法相结合, 利用等离子体电解过程的加热效应和放电产生的活性粒子, 实现生物质的快速液化。厦门大学张先徽等利用等离子体液化技术对纤维素类生物质进行液化, 证明了等离子体液化技术对纤维素类生物质液化的普遍适用性, 图 17 所示为等离子体生物质快速液化的实验装置及生物质原料和液化产物^[76]。对于生物质气化技术, 该过程会不可避免地产生有害副产物焦油, 降低生物质能的利用效率, 如何有效地避免焦油的形成或者实现焦油再利用是生物质气化领域广泛关注的问题。南京工业大学刘诗筠等报道了采用 DBD 和 GAD 转化生物质焦油模拟成分的研究工作, 并探讨了低温等离子体实现焦油转化的反应路径和机理^[77-78]。

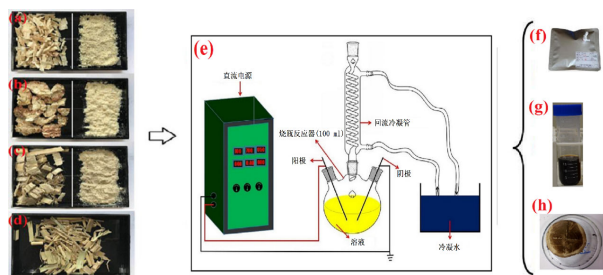


图 17 等离子体生物质快速液化实验装置及生物质原料和液化产物

Fig. 17 Experimental setup of plasma fast liquefaction of biomass as well as the feedstocks and liquefied products of biomass

1.2.3 环境治理

等离子体环境治理主要包括废气处理和废水处理两个方面。

我国“十二五”大气污染防治规划将防治对象扩展至涵盖氮氧化物(NO_x)、臭氧(O_3)、 $\text{PM}_{2.5}$ 、挥发性有机污染物(VOCs)、有毒有害物质等污染因子。大气压低温等离子体技术在上述大气污染治理中均有涉及^[79-82]。目前, 等离子体废气处理的研究热点集中在 VOC 降解上。等离子体体系含有的多种活性成分使得等离子体氧化过程非常复杂, 反应过程效率不高, 副产物复杂。在等离子体反应体系中引入催化剂, 利用催化剂的选择性催化作用促进 VOC 高效降解。催化剂可以通过一段式或者两

段式的方式引入到等离子体降解 VOC 体系; 另外, 在一段式体系中引入具有吸附作用的双功能催化剂, 通过先吸附后降解再生的过程实现 VOC 降解。重庆工商大学的王星敏等人设计了电晕-介质阻挡协同放电的低温等离子体, 并与活性炭吸附相结合进行 VOC 降解, VOC 净化率接近 100%, 实现 VOC 和 O_3 同时达标排放。上海大学程平团队将低温等离子体与自制的 $\text{g-C}_3\text{N}_4@\text{TiO}_2$ 核-壳结构光催化剂相结合进行 VOC 模型化合物甲苯的降解, 通过检测不同情况下甲苯降解的有机副产物、颗粒物、 NO_x 、 O_3 和 CO_x 的含量, 评价了等离子体协同光催化过程甲苯的降解效率和副产物的生成情况。

等离子体降解水中有机污染物主要利用放电过程产生的含氧活性成分和含氮活性成分, 作用于有机污染物分子后实现降解^[10, 34, 83-87]。用于降解水中有机污染物的放电形式有气液放电和液相放电两种。目前, 采用等离子体降解的水中有机污染物主要包括酚类、有机染料、药物抗生素以及农药等。最近, 合肥工业大学胡淑恒等对比了采用氧气、氩气、空气和氮气 4 种工作气体时, 大气压等离子体放电在水中产生的活性组分及对抗生素卡马西平的去除效果, 发现卡马西平主要通过 OH 发生取代及酰胺键的水解等作用发生降解, 并且不同工作气体放电对卡马西平去除效率的顺序为氧气>氩气>空气>氮气。厦门大学陈强团队报道了等离子体降解水中有机污染物亚甲基蓝的研究工作, 发现放电等离子体和液体相互作用产生的氧化性和还原性高活性成分对亚甲基蓝均有降解作用, 其中对亚甲基蓝的氧化是部分可恢复的, 而对其还原是不可恢复的。研究发现, 单纯的等离子体技术可以降解水中有机污染物, 并取得了一定效果, 但是过程能量效率不高, 制约了该技术的进一步应用。等离子体技术与其他技术相结合可以提高等离子体降解水中有机污染物过程的能量效率。大连理工大学李杰等采用脉冲放电等离子体协同 WO_3 光催化剂降解水中抗生素环丙沙星, 结果表明脉冲放电等离子体能够成功诱导 WO_3 , 提高其光催化活性, 并且放电等离子体和 WO_3 光催化剂产生了协同作用, 图 18 为该反应过程的主要机理^[88]。此外, 该团队还将液相放电等离子体与过硫酸盐相耦合, 利用液相放电产生的物化效应激活过硫酸盐, 生成硫酸根自由基、羟基等强氧化性物质, 从而提高污染物的降解效率和能量效率。

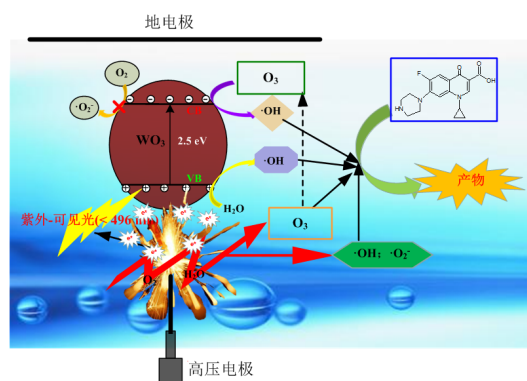


图 18 脉冲放电等离子体协同 WO_3 光催化剂降解水中抗生素环丙沙星机理

Fig. 18 Mechanism of pulsed discharge plasma induced WO_3 catalysis for synergetic degradation of ciprofloxacin in water

1.2.4 生物医学

大气压低温等离子体宏观温度接近或略高于室温，用其对生物组织和不耐热基体进行处理，能够在保证杀菌消毒效率的同时不造成热损伤，在生物医学领域受到了广泛关注^[89-90]。目前，等离子体生物医学已经在病菌灭活、止血凝血、口腔医学、癌症与肿瘤治疗、皮肤病治疗等领域取得了一些成果^[91-96]。目前国内的研究热点集中在癌症治疗、病菌灭活等方面。

等离子体中的含氧和含氮活性粒子具有很强的反应活性，可与肿瘤细胞相互作用并高效杀灭肿瘤细胞，有望成为肿瘤和癌症治疗的一种新模式。西安交通大学许德晖等报道了所在团队在大气压低温等离子体肿瘤治疗方面的研究进展，包括等离子体诱导肿瘤细胞死亡的机制和等离子体治疗安全性等，图 19 为 APPJ 处理骨癌细胞的装置、放电装置在不同极性条件下的放电图像以及利用该装置处理后癌细胞存活率随处理时间的变化^[97]。中科院深圳先进技术研究院的黄逸凡等在等离子体灭活肿瘤细胞的细胞实验中，发现细胞培养基成份对低温等离子体灭活乳腺癌细胞具有重要影响。浙江大学刘振等采用重复频率纳秒脉冲电场处理肿瘤细胞和消融实体肿瘤组织，证实了纳秒脉冲电场的有效消融范围能够达到临床需求。中科院苏州生物医学工程技术研究所庄杰介绍了所在团队关于介电谱技术应用于高压脉冲电场生物医学效应的研究工作，采用介电谱技术可以实时诊断获取正常细胞与癌变细胞的生物介电参数变化，将其与脉冲电场引起的电穿孔效应及后续生物效应建立对应联系，有望成为高压脉冲电场临床治疗技术的一种疗效诊断手段。

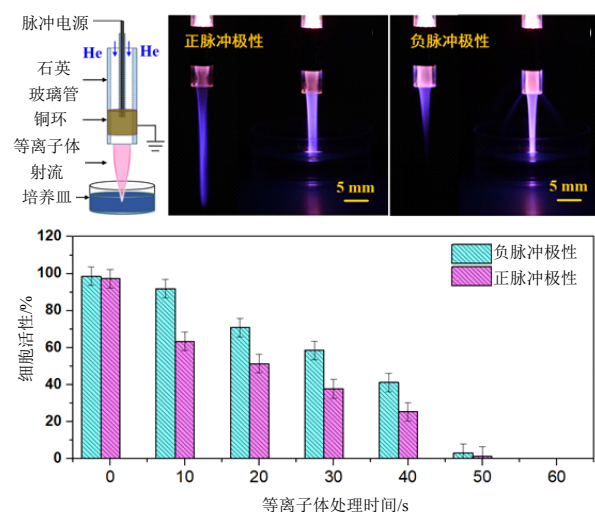


图 19 等离子体射流处理骨癌细胞装置和不同极性条件下的放电图形以及癌细胞存活率随时间的变化

Fig. 19 Plasma jet for the inactivation of myeloma cell and the cell viability of cancer cells after treated by the plasma jet under positive and negative polarity

在等离子体灭菌方面，研究工作主要围绕如何获得化学活性强、稳定性好的大气压低温等离子体，如何提高灭菌效率及相关灭菌机制等方面展开^[98-99]。中科院等离子体物理研究所程诚等人报道了空气和氧气射流气液放电灭活水中金黄色葡萄球菌的研究工作，他们发现采用单管射流直接处理时，空气、氧气等离子体均能在一定时间内有效灭活细菌；间接处理时，空气等离子体灭菌效果要远远好于氧气等离子体；而采用等离子体射流阵列有利于气液传质，表现出更好的灭菌效果。将等离子体和抗生素等药物相结合可以促进灭菌效果，例如刘定新团队将大气压低温等离子体与抗生素相结合用于灭活耐甲氧西林金黄色葡萄球菌 MRSA，发现大气压低温等离子体产生的活性成分(ROS 和 RNS)能够回复 MRSA 对多种不同种类抗生素的敏感性，促进抗生素灭活持留菌；同时，等离子体同样能够促进抗生素灭活耐药菌 MRSA 形成的生物膜，图 20 是他们进行不同工作气体表面放电灭活 MRSA 生物膜的实验装置及不同气体条件下的放电图象^[99]。在灭菌机制方面，清华大学罗海云等在采用 DBD 放电等离子体灭活枯草杆菌芽孢和大肠杆菌时，发现等离子体处理后细胞膜表面发生破裂，蛋白质和细胞膜不断分解成氨基酸和糖类、脂质，这说明等离子体灭菌能够对细菌造成不可逆的破坏。合肥工业大学许子牧等报道了 APPJ 灭活金黄色葡萄球菌生物膜的研究工作，发现等离子体产生的活性含氧/氮基团(RONS)能够破坏细菌生物膜

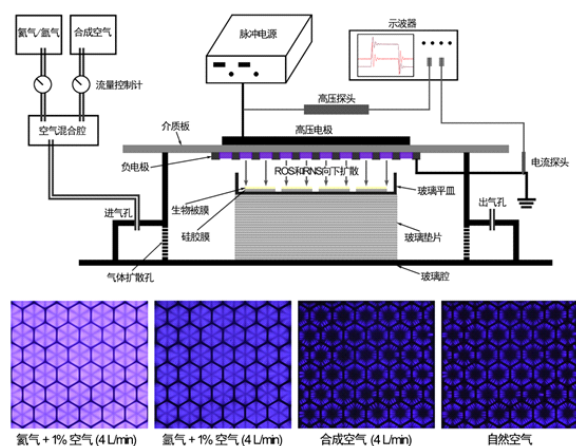


图 20 表面放电灭活耐甲氧西林金黄色葡萄球菌生物膜装置及不同气体条件的放电图像

Fig. 20 Schematic diagram of the experimental setup for eradication of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* biofilms by surface discharge plasmas and the discharge images in different working gases

的细胞外多聚物基质 (extracellular polymeric substances, EPS), 引起细菌外部结构破坏, 导致生物膜中细菌最终失活; 与此同时, APPJ 处理还可以高效抑制仍存活细菌的生物膜再生能力, 起到长效抑菌效果。

此外, 采用等离子体活化物, 例如活化水、活化油等, 也能起到有效杀灭病菌的效果^[100-101]。许子牧等采用了等离子体活化水进行金黄色葡萄球菌生物膜灭活, 发现活化水中含有大量 H_2O_2 、 O_3 、 NO_2^- 、 NO_3^- 等长寿命活性基团, 这些长寿命活性基团与微生物膜相互作用, 具有良好的灭菌效果。重庆大学刘坤等报道了采用等离子体活化水灭活致病菌青霉素的研究工作。华中科技大学刘大伟等采用常温等离子体处理橄榄油生成高活性、长寿命的等离子体活化油, 活化油可以促进生长因子的产生, 在杀灭伤口表面细菌的同时, 伤口恢复速率比自然愈合要快 28.5%。图 21 为他们采用氩氧等离子体射流处理紫草油制备活化油的实验装置、放电图像, 以及紫草油原油和等离子体处理 8h 后的活化紫草油^[101]。

1.2.5 航空航天

等离子体在航空航天领域的应用主要包括等离子体电推进、点火助燃和流动控制^[25, 102-107]。

电推进系统根据电能利用和推力产生形式的不同分为电热推进、静电推进和电磁推进三大类^[108]。其中, 电磁推进形式有霍尔推力器 (Hall thruster)、螺旋波推力器 (helicon plasma thruster, HPT)、磁等离子体推力器 (magneto-plasma-dynamic

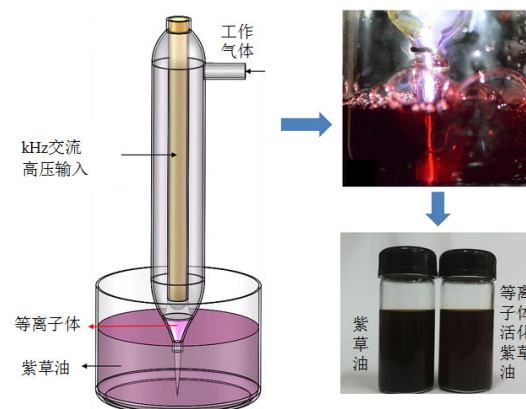


图 21 氩氧等离子体射流处理紫草油制备活化油

Fig. 21 PARAO produced by Ar + O_2 plasma jet inside the radix arnebiae oil (RAO)

thruster, MPD thruster) 及脉冲等离子体推力器 (pulsed plasma thruster, PPT) 等。西安航天动力研究所谭畅介绍了大功率磁等离子体推进研究进展及未来应用任务分析。此外, HPT 具有密度高、无电极结构、可用推进剂多样及附加磁场低等优点, 因而非常适用于航空航天推进领域。北京理工大学欧阳吉庭等采用过 Langmuir 探针、发射光谱法等手段研究了螺旋波双层推力器的羽流等离子体参数空间分布特性, 图 22 是他们进行螺旋波等离子体轴向放电特性测试的平台示意图^[109]; 他们还研究了放电管径对螺旋波等离子体模式跳变的影响。另外, PPT 具有结构简单、控制灵活、小功率下高比冲等特点, 也是该领域的研究热点。北京精密机电控制设备研究所杨磊等设计了舌形张角电极和 V 型放电腔的 160J PPT 原理样机, 并开展了放电过程和推力性能的研究。北京理工大学武志文团队针对目前 PPT 性能改进存在较大不确定性的问题, 在分析不同放电能量下能量流分配规律的基础上, 提出了“空间分离”的改进思路来提高 PPT 的能量利用率, 并获得实验验证。该校刘向阳等则针对特征值法不能准确反映 PPT 放电回路电参数变化的问题, 采用公式拟合法充分利用实验数据计算电参数, 可以得到放电过程中电参数的变化范围, 为 PPT 性能优化提供参考依据。

等离子体点火助燃是利用等离子体的高温效应、化学效应和气动效应, 来提高点火能力和燃烧效率的点火助燃技术, 分为等离子体点火和助燃两个部分。其中, 等离子体点火利用高温、高速、富含活性粒子的等离子体进行点火, 实现缩短点火延迟时间, 扩大点火边界, 并提高点火可靠性; 而等离子体助燃是利用气体放电产生的高化学活性组

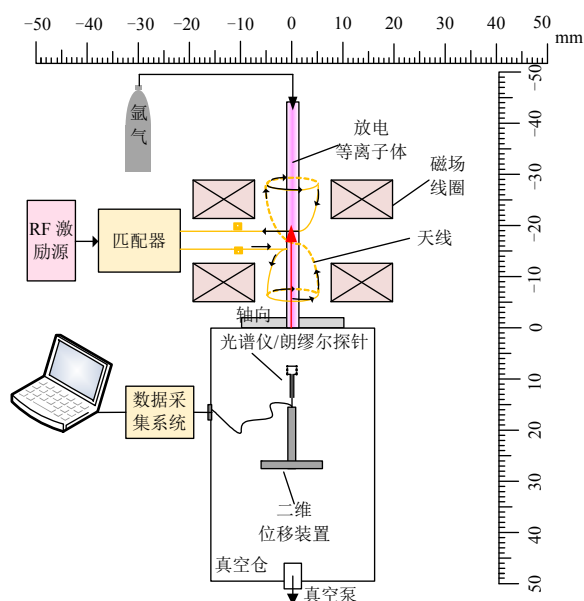


图 22 螺旋波等离子体轴向放电特性测试平台
Fig. 22 Schematic of the experimental setup for investigation of axial profiles of helicon plasma in different modes

分，加热可燃烧气体，扰动流场，改变其燃烧状态来实现助燃，能够扩大稳定燃烧的范围，并降低有害气体的排放。目前，国内外已经报道的点火助燃方式有火花放电点火器、微波放电等离子体助燃、等离子体射流点火助燃、准直流放电等离子体点火助燃以及纳秒脉冲等离子体点火器等^[110]。西安交通大学吴云等采用如图 23 所示的滑动弧等离子体喷油器来改善航空发动机的点火和熄火性能^[110]。哈尔滨工业大学唐井峰等从高速梯度流场下等离子体的产生与维持、放电火核的优化和等离子体促进燃烧反应原理 3 个不同的视角对国内外关于等离子体强化点火燃烧的研究进展进行了梳理。空军工程大学张志波等提出了一种多路放电自激型等离子体射流点火的新思路，发现采用相同的点火电源时，与常规表面火花点火器相比，自激型等离子体射流点火器能有效提高点火能量和火核穿透深度。

流动控制分为主动流动控制和被动流动控制 2 种。等离子体流动控制是基于等离子体气动激励的主动流动控制技术，具有无运动部件、响应迅速、激励频带宽以及有望实现飞行器/发动机气动特性重大提升等优势。用于等离子体流动控制的激励器主要有 SDBD、合成射流、火花放电射流、三维等离子体及等离子体涡流发生器等^[111-114]。合成射流流动控制和 SDBD 流动控制是目前国内的研究热点。国防科技大学罗振兵介绍了合成射流流动控制的研究工作及取得的进展。例如，提出了基于高超

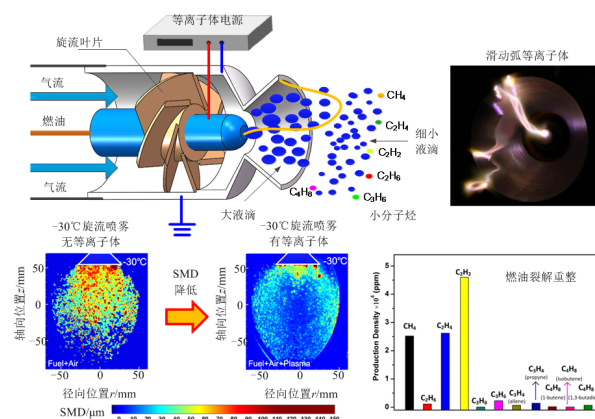


图 23 滑动弧等离子体喷油器改善点火和熄火性能

Fig. 23 Gliding arc plasma fuel injector for ignition and extinction performance improvement

声速流场特征和能量综合利用合成射流理论，发明了激波增压式、流场自维持式等新型等离子体合成射流激励器，解决了传统等离子体合成射流激励器应用于临近空间高超声速流动环境时存在环境适应性问题以及控制力和效率不高的难题。中科院电工所邵涛团队研究了基于 SDBD 的脉冲等离子体激励器的冲击波和涡流特性，图 24 所示为脉冲参数对纳秒脉冲 SDBD 激励器中冲击波和起始涡的影响^[112]。厦门大学林麒等考察了不同类型单向阀对等离子体合成射流器射流峰值速度的作用，发现隔膜式单向阀能够有效提高等离子体合成射流峰值速度，在优化工况下峰值速度提升可达 18.9%。大连理工大学任春生等在传统大气压 SDBD 等离子体激励器中引入微孔电极，发现电极上微孔的存在会造成电子和离子的部分损失，适当调节微孔位置可以引起气流速度和推力的变化，从而改变等离子体的空间分布，并影响激励器性能。北京理工大学的欧阳吉庭等人对比研究了交流高压驱动不同结构 SDBD 的流动控制特性，发现电晕型 SDBD 比宽电极 SDBD 具有更高的流动控制效率，并且高压电晕电极尺寸越小，电晕效应越强，比功率越大，

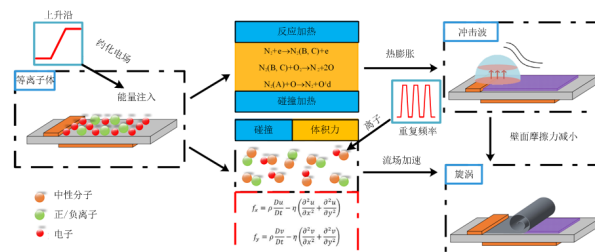


图 24 脉冲参数对纳秒脉冲 SDBD 激励器冲击波和启动涡的影响

Fig. 24 Effect of pulse parameters on shock wave and starting vortex in the nanosecond-pulse SDBD actuator

流动控制效率也就越高。

1.2.6 农业食品

等离子体在农业上的应用包括等离子体处理农产品和种子进行杀菌消毒,延长农产品的保存期,促进种子发芽和农作物生长,提高农作物产量等^[115-116]。就等离子体处理方式而言,农产品和农作物种子均可采用气相、液相放电等离子体的直接处理方式和等离子体活化液体的间接处理方式^[117-119]。值得注意的是,等离子体固氮在常温、常压下将空气中的氮转化为氨、氮氧化物等有用物质,可以为农作物生产提供绿色化肥^[120-121],是等离子体农业应用的另一种形式。目前,国内研究人员对等离子体处理促进农作物生长、等离子体固氮以及等离子体杀菌消毒等方面开展了大量工作。大连民族大学刘东平报道了等离子体水中放电及等离子体活化水在农业领域的研究工作。例如,以空气为工作气体,等离子体水中放电实现邻苯二甲酸二甲酯废液的有效降解(参见图 25)^[122];另外,空气放电产生等离子体活化水实现对腐败希瓦氏菌的有效灭活。西安理工大学徐鸣等采用极低频高压脉冲电场处理干旱条件下玉米幼苗叶片,可以增强玉米幼苗叶片细胞的呼吸代谢和光合能力,提高叶片细胞保护酶活性,降低因干旱造成的叶片细胞线粒体膜和叶绿体膜的膜脂过氧化伤害,从而促进玉米幼苗叶片生长。内蒙古农业大学吕晓桂等采用大气压 Ar 交流放电等离子体射流对芥菜种子进行预处理,发现特定条件下等离子体处理对芥菜种子的发芽和根长以及干旱胁迫下的植株生长均具有明显促进作用。中国农业大学仲崇山等和河海大学陈秉岩等均采用了 GAD 等离子体进行等离子体固氮的研究,并且陈秉岩等经过对照实验证明了等离子体固氮产物可以作为农作物生长所需的氮肥来源,促进植物生长。

2 未来发展趋势

等离子体科学与技术涉及等离子体物理化学、生物医学、材料科学与工程、环境科学与工程、能源与动力工程等诸多学科方向。近年来,越来越多其他专业领域的研究人员加入到大气压低温等离子体的研究队伍中,有力地促进了大气压低温等离子体技术与材料科学、生物医学、能源环境及国防安全等诸多领域的交叉融合。

目前,研究人员在大气压低温等离子体基本特性理论和实际应用研究方面均取得了可喜的发展。

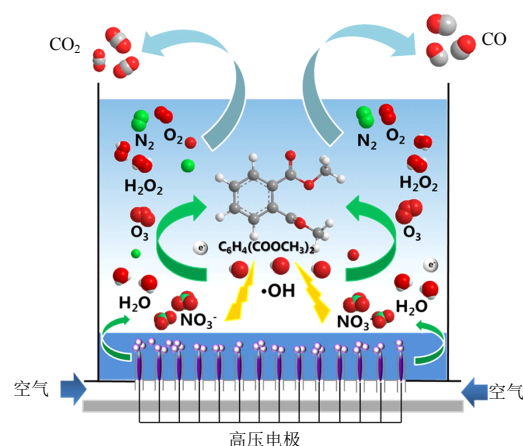


图 25 水中空气放电等离子体降解二甲酸二甲酯废液机理
Fig. 25 Mechanism of removal of dimethyl phthalate in water by non-thermal air plasma treatment

但是,大气压低温等离子体应用领域不断拓展,对该领域研究人员提出了更高的要求。大气压低温等离子体科学与技术的创新与进步,需要基础理论和实际应用两方面协同发展。

在大气压低温等离子体的基本特性理论研究方面,虽然等离子体物理本身已经具有了比较完备的理论体系,但是后续研究过程需要针对相关应用领域的具体需求,对制约该领域快速发展所涉及到的放电产生机制、时空演化机制、放电稳定性、非线性动力学过程以及等离子体参量调控等方面进行系统性的研究,包括采用精准的实验诊断技术和开发精确高效的数值模拟方法,建立该领域全面的等离子体理论体系。

在大气压低温等离子体的实际应用方面,虽然大气压低温等离子体在材料制备与改性、能源转化、环境治理、生物医学、航空航天以及农业食品等领域均获得了较好的效果或者具有较好的应用前景,但其与实际应用尚有距离。因此,在拓展应用领域的同时,需要不断提高技术水平,解决特定应用领域的相关技术壁垒问题,建立和发展面向实际应用的等离子体工艺体系。例如,开发新型高性能等离子体激励源,精确调控等离子体参量并提高过程效率。与此同时,在材料处理领域,需要解决大面积均匀稳定高活性等离子体产生问题、材料表面改性作用的时效性问题以及大面积等离子体材料处理装置的研发问题。针对能源转化和环境治理领域涉及的等离子体协同催化技术,需要开发适用于等离子体条件下的高活性催化剂,并解决催化剂失活和等离子体协同催化系统工程化放大问题。在涉及等离子体和液体相互作用的领域,需要解决放电

稳定性、等离子体与液体之间传热传质以及关键活性成分的精准调控问题。在生物医学和农业食品领域,需要建立等离子体剂量与治疗和处理效果之间的精确关系,并实现等离子体剂量的有效控制;对于等离子体生物医学,人体安全性也是需要重点关注的问题。总之,随着越来越多不同领域科研人员的加入以及等离子体特性理论和实际应用相关研究和技术的不断深入与发展,我们有理由相信,不久的将来大气压低温等离子体将在更多的领域实现大规模推广应用。

致谢

感谢中国电工技术学会等离子体及应用专委会对本文发表的支持。

参考文献

- [1] 方志, 陈秉岩. 2018 年全国高电压与放电等离子体学术会议摘要集[C]//南京, 2018.
Fang Zhi, Chen Bingyan. Abstract book of 2018 national conference on high voltage and discharge plasmas[C]//Nanjing, 2018(in Chinese).
- [2] 戴栋, 宁文军, 邵涛. 大气压低温等离子体的研究现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 1-9.
Dai Dong, Ning Wenjun, Shao Tao. A review on the state of art and future trends of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 1-9(in Chinese).
- [3] 邵涛, 严萍. 大气压气体放电及其等离子体应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Shao Tao, Yan Ping. Atmospheric pressure gas discharge and plasma applications[M]. Beijing: Science Press, 2015(in Chinese).
- [4] Li Heping, Ostrikov K, Sun Wenting. The energy tree: Non-equilibrium energy transfer in collision-dominated plasmas[J]. Physics Reports, 2018, 770-772: 1-45.
- [5] Lu Xinpei, Naidis G V, Laroussi M, et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects[J]. Physics Reports, 2016, 630: 1-84.
- [6] Shao Tao, Wang Ruixue, Zhang Cheng, et al. Atmospheric-pressure pulsed discharges and plasmas: Mechanism, characteristics and applications[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 14-20.
- [7] Lu Xinpei, Reuter S, Laroussi M, et al. Nonequilibrium atmospheric pressure plasma jets: Fundamentals, diagnostics, and medical applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [8] Reuter S, von Woedtke T, Weltmann K D. The kINPen-a review on physics and chemistry of the atmospheric pressure plasma jet and its applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(23): 233001.
- [9] Whitehead J C. Plasma-catalysis: The known knowns, the known unknowns and the unknown unknowns[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(24): 243001.
- [10] Magureanu M, Bradu C, Parvulescu V I. Plasma processes for the treatment of water contaminated with harmful organic compounds[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(31): 313002.
- [11] Snoeckx R, Bogaerts A. Plasma technology - a novel solution for CO₂ conversion?[J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46: 5805-5863.
- [12] 李和平, 于达仁, 孙文廷, 等. 大气压放电等离子体研究进展综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3697-3727.
Li Heping, Yu Daren, Sun Wenting, et al. State-of-the-art of atmospheric discharge plasmas[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3697-3727(in Chinese).
- [13] 汤铭, 宁光富, 乔光尧, 等. 一种低成本高压脉冲静电除尘电源的分析与验证[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 890-898.
Tang Ming, Ning Guangfu, QIAO Guangyao, et al. Analysis and verification of a low-cost high voltage pulse power supply for electrostatic precipitators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 890-898(in Chinese).
- [14] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705.
Shao Tao, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Atmospheric pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 685-705(in Chinese).
- [15] Nie Qiuyue, Zhang Zhonglin, Lim J W M. Numerical studies on plasma parameter modulation of atmospheric pressure dielectric barrier discharge via 200 kHz/13.56 MHz dual-frequency excitation[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(6): 063504.
- [16] Scapinello M, Delikonstantis E, Stefanidis G D. The panorama of plasma-assisted non-oxidative methane reforming[J]. Chemical Engineering and Processing, 2017, 117: 120-140.
- [17] Dimitrakellis P, Gogolides E. Hydrophobic and superhydrophobic surfaces fabricated using atmospheric pressure cold plasma technology: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2018, 254: 1-21.

- [18] 李卓凡, 章程, 张帅, 等. 大气压下微秒脉冲滑动弧放电周期特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1468-1475.
- Li Zhuofan, Zhang Cheng, Zhang Shuai, et al. Experimental study on the periodic characteristics of microsecond pulsed gliding arc discharge at atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1468-1475(in Chinese).
- [19] 王赛, 鲁娜, 商克峰, 等. 大气压交流旋转滑动弧放电及其应用于促进甲烷重整[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1451-1460.
- Wang Sai, Lu Na, Shang Kefeng, et al. AC rotating gliding arc discharge at atmospheric pressure and its application for dry reforming of methane[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1451-1460(in Chinese).
- [20] Feng Xinxin, Liu Hongxia, He Chi, et al. Synergistic effects and mechanism of a non-thermal plasma catalysis system in volatile organic compound removal: A review [J]. Catalysis Science & Technology, 2018, 8(4): 936-954.
- [21] Khoja A H, Tahir M, Amin N A S. Recent developments in non-thermal catalytic DBD plasma reactor for dry reforming of methane[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183: 529-560.
- [22] Yuan Hao, Wang Wenchun, Yang Dezheng, et al. Atmospheric air dielectric barrier discharge excited by nanosecond pulse and ac used for improving the hydrophilicity of aramid fibers[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(12): 125401.
- [23] Liu Rui, Yu Zhe, Cao Huijuan, et al. Characteristics of DBD micro-discharge at different pressure and its effect on the performance of oxygen plasma reactor[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(5): 054001.
- [24] 李清泉, 郝玲艳. 沿面介质阻挡放电等离子体及其应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1079-1090.
- Li Qingquan, Hao Lingyan, Surface dielectric barrier discharge plasma and its applications[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1079-1090(in Chinese).
- [25] Gao Guoqiang, Peng Kaisheng, Dong Lei, et al. Parametric study on the characteristics of a SDBD actuator with a serrated electrode[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(6): 064010.
- [26] 郝玲艳, 李清泉, 司雯, 等. 氩气流增强沿面介质阻挡放电等离子体特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2296-2304.
- Hao Lingyan, Li Qingquan, Si Wen, et al. Experimental study on improvement of plasma characteristics of surface dielectric barrier discharge caused by argon flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2296-2304(in Chinese).
- [27] 田思理, 王瑞雪, 章程, 等. 氦等离子体射流子弹及活性粒子时空分布特征研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 330-336.
- Tian Sili, Wang Ruixue, Zhang Cheng, et al. Temporal and spatial study of plasma bullet and reactive species in a helium plasma jet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 330-336(in Chinese).
- [28] 王立军, 郑雅霜, 王丹, 等. N_2 含量对大气压 He 等离子射流特性影响的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 61-68.
- Wang Lijun, Zheng Yashuang, Wang Dan, et al. Numerical modeling of a helium atmospheric pressure jet with various amounts of N_2 admixture[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 61-68(in Chinese).
- [29] Zhang Bo, Zhu Ying, Liu Feng, et al. The influence of grounded electrode positions on the evolution and characteristics of an atmospheric pressure argon plasma jet[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(6): 064001.
- [30] 方志, 张波, 周若瑜, 等. HMDSO 添加对大气压 Ar 等离子体射流阵列放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1775-1783.
- Fang Zhi, Zhang Bo, Zhou Ruoyu, et al. Effect of HMDSO addition on discharge characteristics of atmospheric pressure plasma jet array in argon[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1775-1783(in Chinese).
- [31] 许桂敏, 张冠军, 姚聪伟, 等. 大气压氩气等离子体射流在不同作用状态下的光电特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1375-1386.
- Xu Guimin, Zhang Guanjuan, Yao Congwei, et al. Optical and electrical characteristics of atmospheric pressure argon plasma jet under different interaction states[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1375-1386(in Chinese).
- [32] Li Xuechen, Lin Xiaotong, Wu Kaiyue, et al. Regularly-swelling plumes generated in atmospheric pressure argon plasma jet excited by a biased sinusoidal voltage[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28(5): 055006.
- [33] Liu Feng, Zhang Bo, Fang Zhi, et al. Jet-to-jet interactions in atmospheric-pressure plasma jet arrays for surface processing[J]. Plasma Processes and Polymers, 2018, 15(1): e1700114.
- [34] Foster J E. Plasma-based water purification: Challenges

- and prospects for the future[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(5): 055501.
- [35] Fanelli F, Fracassi F. Atmospheric pressure non-equilibrium plasma jet technology: General features, specificities and applications in surface processing of materials[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 322: 174-201.
- [36] 刘定新, 何桐桐, 张浩. 等离子体对人体组织的渗透作用: 研究现状与前沿问题[J]. *高电压技术*, 2019, 45(7): 2329-2342.
- Liu Dingxin, He Tongtong, Zhang Hao. Penetration effect of gas plasmas on human tissues: State-of-the-art and current issues[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(7): 2329-2342(in Chinese).
- [37] 王昕珏, 张波, 朱颖, 等. 含憎水性成分的二维射流阵列放电特性及表面改性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(10): 2824-2831.
- Wang Xinjue, Zhang Bo, Zhu Ying, et al. Study on discharge characteristics and surface modification of hydrophobic atmospheric pressure plasma two-dimensional jet array[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(10): 2824-2831(in Chinese).
- [38] 胡多, 任成燕, 章程, 等. 等离子体射流处理对聚全氟乙丙烯薄膜沿面绝缘特性的影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(15): 4633-4640.
- Hu Duo, Ren Chengyan, Zhang Cheng, et al. Effect of deposited film on the surface insulation characteristics of FEP material by atmospheric pressure plasma jet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(15): 4633-4640(in Chinese).
- [39] Chen Zeyu, Liu Dingxin, Xu Han, et al. Decoupling analysis of the production mechanism of aqueous reactive species induced by a helium plasma jet[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28(2): 025001.
- [40] Ning Wenjun, Dai Dong, Li Licheng. Atmospheric pressure plasma jet impinging on a wavy dielectric surface: Effects of DC polarities[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, 27(8): 08LT01.
- [41] Peverall R, Ritchie G A D. Spectroscopy techniques and the measurement of molecular radical densities in atmospheric pressure plasmas[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28(7): 073002.
- [42] Zhang Hantian, Wu Yi, Sun Hao, et al. Investigations of laser-induced plasma in air by thomson and rayleigh scattering[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2019, 157: 6-11.
- [43] Yuan Hao, Yang Dezheng, Li Xiao, et al. A pulsed electrolyte cathode discharge used for metal element analysis by atomic emission spectrometry[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(5): 053505.
- [44] Neyts E C, Bogaerts A. Understanding plasma catalysis through modelling and simulation-a review[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(22): 224010.
- [45] Chen Jian, Fu Tianzuo, Guo Heng, et al. Effects of electron temperature on the ion extraction characteristics in a decaying plasma confined between two parallel plates [J]. *Plasma Science and Technology*, 2019, 21(4): 045402.
- [46] Bogaerts A, Berthelot A, Heijkens S, et al. CO₂ conversion by plasma technology: Insights from modeling the plasma chemistry and plasma reactor design[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, 26(6): 063001.
- [47] Wang Weizong, Mei Danhua, Tu Xin, et al. Gliding arc plasma for CO₂ conversion: Better insights by a combined experimental and modelling approach[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 330: 11-25.
- [48] Wang Weizong, Kim H H, Van Laer K, et al. Streamer propagation in a packed bed plasma reactor for plasma catalysis applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 2467-2479.
- [49] Kaushik N K, Kaushik N, Nguyen N L, et al. Plasma and nanomaterials: Fabrication and biomedical applications [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(1): 98.
- [50] Zhang Haibao, Sang Lijun, Wang Zhengduo, et al. Recent progress on non-thermal plasma technology for high barrier layer fabrication[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(6): 063001.
- [51] Di Lanbo, Zhang Jingsen, Zhang Xiuling. A review on the recent progress, challenges, and perspectives of atmospheric-pressure cold plasma for preparation of supported metal catalysts[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2018, 15(5): e1700234.
- [52] Zhou Yao, Li Qi, Dang Bin, et al. A scalable, high-throughput, and environmentally benign approach to polymer dielectrics exhibiting significantly improved capacitive performance at high temperatures[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(49): e1805672.
- [53] Di Lanbo, Zhang Jingsen, Ma Cunhua, et al. Atmospheric-pressure dielectric barrier discharge cold plasma for synthesizing high performance Pd/C formic acid dehydrogenation catalyst[J]. *Catalysis Today*, 2019, 337: 201-207.
- [54] 张迅, 田承越, 曾华荣, 等. 大气压等离子体气相沉积制备超疏水表面及其防污防酸碱腐蚀性性能研究[J]. *高电压技术*, 2019, 45(5): 1367-1374.

- Zhang Xun, Tian Chengyue, Zeng Huarong, et al. Investigation of super-hydrophobic surface prepared by atmospheric-pressure plasma vapor deposition and its anti-dust, acid-and-alkaline resistant properties[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1367-1374(in Chinese).
- [55] Kong Fei, Chang Chao, Ma Yiyang, et al. Surface modifications of polystyrene and their stability: A comparison of DBD plasma deposition and direct fluorination[J]. Applied Surface Science, 2018, 459: 300-308.
- [56] Cui Xinglei, Yan Bing, Zhang Bo, et al. Improving surface hydrophobicity of glass using an atmospheric pressure plasma jet array in Ar/TMS[J]. Vacuum, 2018, 151: 15-24.
- [57] 鲁娜, 张楚珂, 夏芸, 等. 等离子体转化 CO₂ 的研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 351-361.
- Lu Na, Zhang Chuke, Xia Yun, et al. Advances in plasma technology for CO₂ conversion research[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 351-361 (in Chinese).
- [58] Mei Danhua, Zhu Xinbo, Wu Chunfei, et al. Plasma-photocatalytic conversion of CO₂ at low temperatures: Understanding the synergistic effect of plasma-catalysis [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 182: 525-532.
- [59] Mei Danhua, Tu Xin. Conversion of CO₂ in a cylindrical dielectric barrier discharge reactor: Effects of plasma processing parameters and reactor design[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2017, 19: 68-78.
- [60] Li Li, Zhang Hao, Li Xiaodong, et al. Plasma-assisted CO₂ conversion in a gliding arc discharge: Improving performance by optimizing the reactor design[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 29: 296-303.
- [61] Snoeckx R, Rabinovich A, Dobrynin D, et al. Plasma-based liquefaction of methane: The road from hydrogen production to direct methane liquefaction[J]. Plasma Processes and Polymers, 2017, 14(6): 1600115.
- [62] Gao Yuan, Zhang Shuai, Sun Hao, et al. Highly efficient conversion of methane using microsecond and nanosecond pulsed spark discharges[J]. Applied Energy, 2018, 226: 534-545.
- [63] Zhang Shuai, Gao Yuan, Sun Hao, et al. Time-resolved characteristics and chemical kinetics of non-oxidative methane conversion in repetitively pulsed dielectric barrier discharge plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(27): 274005.
- [64] Wang Xiaoling, Gao Yuan, Zhang Shuai, et al. Nanosecond pulsed plasma assisted dry reforming of CH₄: The effect of plasma operating parameters[J]. Applied Energy, 2019, 243: 132-144.
- [65] Sun Hao, Zhang Shuai, Gao Yuan, et al. Non-oxidative methane conversion in diffuse, filamentary, and spark regimes of nanosecond repetitively pulsed discharge with negative polarity[J]. Plasma Processes and Polymers, 2019, 16(8): e1900050.
- [66] Wang Li, Yi Yanhui, Wu Chunfei, et al. One-step reforming of CO₂ and CH₄ into high-value liquid chemicals and fuels at room temperature by plasma-driven catalysis[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 56(44): 13679-13683.
- [67] Mei Danhua, Ashford B, He Ya-Ling, et al. Plasma-catalytic reforming of biogas over supported Ni catalysts in a dielectric barrier discharge reactor: Effect of catalyst supports[J]. Plasma Processes and Polymers, 2017, 14(6): e1600076.
- [68] Khadir N, Khodja K, Belasri A. Methane conversion using a dielectric barrier discharge reactor at atmospheric pressure for hydrogen production[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(9): 095502.
- [69] 孙冰, 信延彬, 朱小梅, 等. 液体燃料醇类重整制氢技术的研究现状分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4096-4107.
- Sun Bing, Xin Yanbin, Zhu Xiaomei, et al. Analysis of the research status of liquid fuel alcohol reforming technology for hydrogen production[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4096-4107 (in Chinese).
- [70] Du Changming, Mo Jianmin Li Hongxia. Renewable hydrogen production by alcohols reforming using plasma and plasma-catalytic technologies: Challenges and opportunities[J]. Chemical Reviews, 2015, 115(3): 1503-1542.
- [71] Xin Yanbin, Sun Bing, Zhu Xiaomei, et al. Hydrogen production from ethanol solution by pulsed discharge with TiO₂ catalysts[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(20): 9503-9513.
- [72] Striugas N, Valincius V, Pedisius N, et al. Investigation of sewage sludge treatment using air plasma assisted gasification[J]. Waste Management, 2017, 64: 149-160.
- [73] Mosallanejad A, Taghvaei H, Mirsoleimani-Azizi S M, et al. Plasma upgrading of 4methylanisole: A novel approach for hydrodeoxygenation of bio oil without using a hydrogen source[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 121: 113-124.
- [74] Taghvaei H, Rahimpour M R, Bruggeman P. Catalytic

- hydrodeoxygenation of anisole over nickel supported on plasma treated alumina-silica mixed oxides[J]. RSC Advances, 2017, 7(49): 30990-30998.
- [75] Vanneste J, Ennaert T, Vanhulsel A, et al. Unconventional pretreatment of lignocellulose with low-temperature plasma[J]. Chemsuschem, 2017, 10(1): 14-31.
- [76] Xi Dengke, Jiang Congcong, Zhou Renwu, et al. The universality of lignocellulosic biomass liquefaction by plasma electrolysis under acidic conditions[J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 531-538.
- [77] Liu Shiyun, Mei Danhua, Nahil M A, et al. Hybrid plasma-catalytic steam reforming of toluene as a biomass tar model compound over Ni/Al₂O₃ catalysts[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 166: 269-275.
- [78] Mei Danhua, Wang Yaolin, Liu Shiyun, et al. Plasma reforming of biomass gasification tars using mixed naphthalene and toluene as model compounds[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 409-419.
- [79] Jaworek A, Marchewicz A, Sobczyk A T, et al. Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM_{2.5} particle emission[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 67: 206-233.
- [80] Chung W, Mei Danhua, Tu Xin, et al. Removal of VOCs from gas streams via plasma and catalysis[J]. Catalysis Reviews-Science and Engineering, 2019, 61(2): 270-331.
- [81] Wang Qi, Wang Yanhui, Wang Haochen, et al. Investigation of NO removal using a pulse-assisted RF discharge[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(6): 064013.
- [82] Xiao Zehua, Xu Di, Hao Chunjing, et al. High concentration xylene decomposition and diagnostic analysis by non-thermal plasma in a DBD reactor[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(6): 064009.
- [83] Shang Kefeng, Li Jie, Morent R. Hybrid electric discharge plasma technologies for water decontamination: A short review[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(4): 043001.
- [84] Chen Bingyan, Zhu Changping, Fei Juntao, et al. Reaction kinetics of phenols and p-nitrophenols in flowing aerated aqueous solutions generated by a discharge plasma jet [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 363: 55-63.
- [85] Shang Kefeng, Wang Hao, Li Jie, et al. Activation of peroxydisulfate by gas-liquid pulsed discharge plasma to enhance the degradation of p-nitrophenol[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(6): 064017.
- [86] 田一平, 周新颖, 袁晓莉, 等. 强电离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(in Chinese).
- [87] 武海霞, 陈卫刚, 方志, 等. 介质阻挡放电优化激活过硫酸盐处理四环素废水[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1387-1395.
- Wu Haixia, Chen Weigang, Fang Zhi, et al. Optimized activation of persulfate by dielectric barrier discharge for the treatment of tetracycline wastewater[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1387-1395(in Chinese).
- [88] Guo He, Jiang Nan, Wang Huijuan, et al. Pulsed discharge plasma induced WO₃ catalysis for synergetic degradation of ciprofloxacin in water: Synergetic mechanism and degradation pathway[J]. Chemosphere, 2019, 230: 190-200.
- [89] von Woedtke T, Schmidt A, Bekeschus S, et al. Plasma medicine: A field of applied redox biology[J]. In Vivo, 2019, 33(4): 1011-1026.
- [90] Weltmann K D, Von Woedtke T. Plasma medicine-current state of research and medical application[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2017, 59(1): 014031.
- [91] Miyamoto K, Ikehara S, Sakakita H, et al. Low temperature plasma equipment applied on surgical hemostasis and wound healings[J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2017, 60(1): 25-28.
- [92] Van Impe J, Smet C, Tiwari B, et al. State of the art of nonthermal and thermal processing for inactivation of micro-organisms[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 125(1): 16-35.
- [93] Dai Xiaofeng, Bazaka K, Richard D J, et al. The emerging role of gas plasma in oncotherapy[J]. Trends in Biotechnology, 2018, 36(11): 1183-1198.
- [94] Khalili M, Daniels L, Lin A, et al. Non-thermal plasma-induced immunogenic cell death in cancer[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(42): 423001.
- [95] Li Heping, Zhang Xiaofei, Zhu Xiaoming, et al. Translational plasma stomatology: Applications of cold atmospheric plasmas in dentistry and their extension[J]. High Voltage, 2017, 2(3): 188-199.
- [96] 许德晖, 崔庆杰, 许宇静, 等. 等离子体医学及其在肿瘤治疗中的应用[J]. 生物化学与生物物理进展, 2017, 44(4): 279-292.
- Xu Dehui, Cui Qingjie, Xu Yujing, et al. Plasma medicine and the application in tumor therapy[J]. Progress in

- Biochemistry and Biophysics, 2017, 44(4): 279-292(in Chinese).
- [97] Liu Zhijie, Xu Dehui, Zhou Chunxi, et al. Effects of the pulse polarity on helium plasma jets: Discharge characteristics, key reactive species, and inactivation of myeloma cell[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2018, 38(5): 953-968.
- [98] Shen Jie, Zhang Hao, Xu Zimu, et al. Preferential production of reactive species and bactericidal efficacy of gas-liquid plasma discharge[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 362: 402-412.
- [99] Guo Li, Xu Ruobing, Liu Dingxin, et al. Eradication of methicillin-resistant staphylococcus aureus biofilms by surface discharge plasmas with various working gases[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(42): 425202.
- [100] Kaushik N K, Ghimire B, Li Ying, et al. Biological and medical applications of plasma-activated media, water and solutions[J]. Biological Chemistry, 2019, 400(1): 39-62.
- [101] Pan Shuhui, Xu Maoyuan, Gan Lu, et al. Plasma activated radix arnebiae oil as innovative antimicrobial and burn wound healing agent[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(33): 335201.
- [102] 杭观荣, 梁伟, 张岩, 等. 大功率等离子体电推进研究进展[J]. 载人航天, 2016, 22(2): 175-185.
Hang Guanrong, Liang Wei, Zhang Yan, et al. Research progress of high power plasma propulsion[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(2): 175-185(in Chinese).
- [103] Komuro A, Takashima K, Suzuki K, et al. Gas-heating phenomenon in a nanosecond pulse discharge in atmospheric-pressure air and its application for high-speed flow control[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2018, 27(10): 104005.
- [104] 何立明, 刘兴建, 赵兵兵, 等. 等离子体强化燃烧的目前研究进展[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1537-1551.
He Liming, Liu Xingjian, Zhao Bingbing, et al. Current investigation progress of plasma-assisted ignition and combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7): 1537-1551(in Chinese).
- [105] Zeng Linghan, Wu Zhiwen, Sun Guorui, et al. A new ablation model for ablative pulsed plasma thrusters[J]. Acta Astronautica, 2019, 160: 317-322.
- [106] 聂万胜, 周思引, 车学科. 纳秒脉冲放电等离子体助燃技术研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1749-1758.
Nie Wansheng, Zhou Siyin, Che Xueke. Review of plasma assisted combustion technology by nanosecond pulsed discharge[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1749-1758(in Chinese).
- [107] 于达仁, 乔磊, 蒋文嘉, 等. 中国电推进技术发展及展望[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 1-11.
Yu Daren, Qiao Lei, Jiang Wenjia. Development and prospect of electric propulsion technology in China [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(1): 1-11(in Chinese).
- [108] Mazouffre S. Electric propulsion for satellites and spacecraft: Established technologies and novel approaches [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2016, 25(3): 033002.
- [109] Wang Huihui, Zhang Zun, Yang Kaiyi, et al. Axial profiles of argon helicon plasma by optical emission spectroscopy and Langmuir probe[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(7): 074009.
- [110] Lin Bingxuan, Wu Yun, Zhu Yifei, et al. Experimental investigation of gliding arc plasma fuel injector for ignition and extinction performance improvement[J]. Applied Energy, 2019, 235: 1017-1026.
- [111] Luo Zhenbing, Deng Xiong, Xia Zhixun, et al. Flow field and heat transfer characteristics of impingement based on a vectoring dual synthetic jet actuator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102: 18-25.
- [112] Zhang C, Huang B D, Luo Z B, et al. Atmospheric pressure pulsed plasma actuators for flow control: Shock wave and vortex characteristics[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28(6): 064001.
- [113] Wu Shuqun, Liu Xueyuan, Huang Guowang, et al. Influence of high-voltage pulse parameters on the propagation of a plasma synthetic jet[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(7): 074007.
- [114] 高国强, 彭开晟, 董磊, 等. 电压幅值和频率对表面介质阻挡放电与气动特性的影响[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 55-62.
Gao Guoqiang, Peng Kaisheng, Dong Lei, et al. Experiment of surface dielectric barrier discharge and aerodynamic characteristics at different voltage amplitude and frequency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 55-62(in Chinese).
- [115] Scholtz V, Sera B, Khun J, et al. Effects of nonthermal plasma on wheat grains and products[J]. Journal of Food Quality, 2019, article ID: 7917825.
- [116] Sera B, Sery M. Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains [J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(4): 044012.

- [117] Ito M, Oh J S, Ohta T, et al. Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies[J]. Plasma Processes and Polymers, 2018, 15(2): 1700073.
- [118] 杨波, 仲崇山, 王维洲, 等. 等离子体活性水用于农业领域的研究进展[J]. 农业工程, 2019, 9(2): 101-107. Yang Bo, Zhong Chongshan, Wang Weizhou, et al. Research progress of plasma activated water used in agriculture[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(2): 101-107(in Chinese).
- [119] Thirumdas R, Kothakota A, Annapure U, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 77: 21-31.
- [120] Wang Weizong, Patil B, Heijkers S, et al. Nitrogen fixation by gliding arc plasma: Better insight by chemical kinetics modelling[J]. Chemsuschem, 2017, 10(10): 2145-2157.
- [121] Li Sirui, Medrano J A, Hessel V, et al. Recent progress of plasma-assisted nitrogen fixation research: A review[J]. Processes, 2018, 6(12): 120248.
- [122] Qi Zhihua, Yang Liu, Xia Yang, et al. Removal of

dimethyl phthalate in water by non-thermal air plasma treatment[J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, 5(5): 920-930.



梅丹华

收稿日期: 2019-10-16

作者简介:

梅丹华(1985), 男, 博士, 副教授, 主要从事大气压低温等离子体、等离子体协同催化技术及其在能源环境化工材料等领域应用方面的研究工作, danhuam@126.com;

*通信作者: 方志(1975), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为气体放电技术产生、等离子体的特性及其应用, myfz@263.net;

邵涛(1977), 男, 博士, 研究员/岗位教授, 国家自然科学基金杰出青年科学基金获得者, 博士生导师。研究方向为高电压技术、脉冲功率技术和放电等离子体应用, st@mail.iee.ac.cn。

(责任编辑 李婧妍)