

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170236

大气压低温等离子体的研究现状与发展趋势

戴 栋¹ 宁文军¹ 邵 涛^{2,3}

(1. 华南理工大学电力学院 广州 510641

2. 中国科学院电工研究所 北京 100190 3. 中国科学院大学 北京 100039)

摘要 本文概述了2016年首届全国高电压与放电等离子体学术会议。根据会议的学术报告,结合近年来大气压低温等离子体领域中经典的综述论文,从理论研究和实际应用两方面总结和分析了大气压低温等离子体的研究现状及发展趋势。其中,理论研究主要从激励电源类型、等离子体装置、实验诊断技术和仿真方法等四个方面展开综述,实际应用则主要集中在生物医学、环境治理、流动控制和材料处理等领域。从会议相关情况来看,国内的大气压低温等离子体行业正处于高速发展阶段,理论和应用研究展现出齐头并进、相辅相成的态势。理论研究需要解决等离子体的非线性现象、参数调控机制以及大面积均匀性等问题,而实际应用则聚焦于交叉领域的拓展、等离子体与样品作用机制、以及工业应用推广的相关问题。

关键词: 大气压低温等离子体 放电 高电压 脉冲功率 学术交流

中图分类号: TM8; O53

A Review on the State of Art and Future Trends of Atmospheric Pressure Low Temperature Plasmas

Dai Dong¹ Ning Wenjun¹ Shao Tao^{2,3}

(1. School of Electric Power South China University of Technology Guangzhou 510641 China

2. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences Beijing 100190 China

3. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100039 China)

Abstract A brief introduction to the 1st National Conference on High Voltage and Discharge Plasmas (HVDP2016) is presented in this paper. According to the academic reports in the conference, combined with some classic topic-review papers in recent years, state of art and future trends of atmospheric pressure low temperature plasmas (APLTP) are summarized and analyzed from the perspective of theory and applications, respectively. In the conference, theoretical-study related topics can be classified into four main catalogs, namely the plasma power sources, plasma-generation devices, experimental diagnostics and simulation methods, while the application related topics concentrated on the areas of biology medicine, environment management, flow control and material processing. As a glimpse of the conference, it can be seen that the APLTP in China are undergoing fast developments with equilibrium and integration in both theory and applications. In the near future, theoretical issues such as the non-linear phenomena in plasmas, the regulation mechanisms of discharge parameters, and the acquiring of large-area stable discharge need to be solved. And in the application areas, investigations are focused on the expanding of cross-fields, the mechanisms of plasma interacting with samples, and the promotions of industrial applications.

Keywords: Atmospheric pressure low temperature plasmas, discharge, high voltage, pulsed power, academic communication

0 会议简介

首届全国“高电压与放电等离子体”学术会议于2016年11月26~28日在北京新大都饭店隆重举行。会议由中国电工技术学会和中国电工技术学会等离子体及应用专业委员会主办,中国科学院电工研究所、华中科技大学电气与电子工程学院承办,IFSA协同创新中心和《高电压技术》杂志社提供支持。此次会议是中国电工技术学会等离子体及应用专业委员会的旗舰会议,专委会于2016年4月批准成立,本次大会是第一届,今后将每两年举办一届。

来自全国110多家高校、科研院所以及企业界的431名代表参加了本次会议,大会累计共收到投稿摘要281篇、中英文全文论文132篇。全文论文经严格的同行评审后在《Plasma Science and Technology》、《电工技术学报》、《中国电机工程学报》、《高电压技术》、《高压电器》和《强激光与粒子束》等期刊以专题形式予以发表。

大会于11月26日上午8点30分在北京新大都饭店多功能会议厅隆重开幕,开幕式由大会主席邵涛研究员主持。韩毅副秘书长代表中国电工技术学会致辞,肖立业所长代表大会承办单位中国科学院电工研究所致辞,他简要回顾了电工技术的发展历史,鼓励大家勇于创新,推动等离子体技术的进一步应用。等离子体及应用专委会主任委员严萍研究员代表专委会致辞,她向与会代表介绍了此次大会的背景和目的。

开幕式后,中国科学院院士陈维江教授、中国科学院院士李应红教授、清华大学王新新教授、国家“千人计划”专家孔刚玉教授和西安交通大学李兴文教授相继作了精彩的大会特邀报告,他们分别介绍了我国发展特高压输电的创新实践、航空等离子体技术研究进展与挑战、帕邢定律和气体放电相似性、等离子体在癌症治疗上的进展和机会、高功率脉冲放电等离子体技术及应用,分别体现了会议主题是高电压技术、脉冲功率技术及放电等离子体技术及其应用。

在后面一天半的时间里,大会采取邀请报告、口头报告和墙报的形式,按高电压、脉冲功率和等离子体三个主题分别同步进行。西安交通大学张冠军教授、华南理工大学戴栋教授、华中科技大学杨勇教授、国防科技大学刘列教授、中国工程物理研究院王勖研究员、西北核技术研究所常超研究员、浙江大学刘振副教授、大连理工大学丁洪斌教授以

及中国科学院电工研究所王瑞雪博士分别做了各主题下的邀请报告,汇报了各领域内的国内外研究趋势、前沿问题和最新研究成果。分组交流中,有137位学者作了口头报告,汇报了各自的研究进展;26日晚间的海报交流环节中有88个海报进行了展示和交流。11月27日晚,邵涛研究员主持了大会闭幕式暨颁奖典礼活动。大会共评出6篇优秀论文,9个优秀口头汇报,以及12篇优秀海报。

1 会议议题和热点

在本次会议录用的281篇摘要中,有146篇是邀请报告和口头报告。作为会议的主要环节,口头报告在很大程度上体现了会议的主题与质量,也反应了各相关研究领域的热点问题及发展动态。因此,笔者根据口头报告摘要的内容,按照高电压、脉冲功率和低温等离子体三大主题,统计了各主题下摘要的数量及比重,如图1所示。显然,低温等离子体主题的摘要在数量上占绝对的优势,而脉冲功率主题与高电压主题的摘要数量相当。需要指出的是,脉冲功率、高电压主题与低温等离子体主题并非是完全分离的。例如,低温等离子体作为一种新的手段,可尝试用于绝缘子表面绝缘强度以及亲/憎水性性能的增强和改性,因此传统的高电压与绝缘技术也密切关注着低温等离子体应用技术的突破;而在脉冲功率主题中,有8篇摘要讨论了高重频高压脉冲电源的研制技术,这不仅表明了脉冲功率技术在低温等离子体源中占据了重要地位,也反映出低温等离子体的蓬勃发展对驱动源提出了更高的要求。考虑到低温等离子体,尤其是大气压低温等离子体(Atmospheric Pressure Low Temperature Plasmas, APLTP)受到极大的研究关注,下文将重点介绍和分析 APLTP 的研究现状及发展趋势。

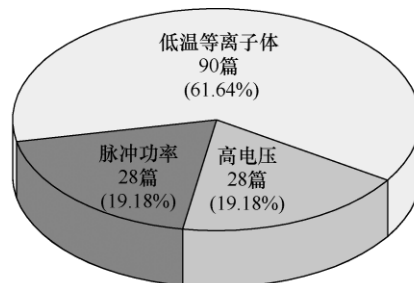


图1 各主题的数量和分布

Fig.1 Quantity and distribution of each subject

2 大气压低温等离子体的研究动态

从会议的论文和口头报告内容可以看出,当前

国内 APLTP 的研究呈现出机理探索和实际应用两方面齐头并进的态势。从口头报告来看,物理机理和应用基础相关的报告达到 50 项,主要内容集中在等离子体的参数诊断和调控、稳定性分析及调控、放电特征分析和放电理论的拓展等方面;而与实际应用相关的报告有 37 项,涉及生物医学、材料处理、环境保护、薄膜沉积、流动控制和物质合成转换等多个领域。由此也可以看出,APLTP 的物理机理和应用基础方面的研究是本次会议重点。

2.1 机理和应用基础研究

APLTP 具有多控制参数、多时间尺度、多粒子频繁碰撞过程以及复杂的物理化学耦合等特点^[1-14]。尤其当等离子体与样品作用时,可能面临更加复杂的粒子和能量转换传输过程。因此,放电的产生和维持机制、以及等离子体的关键参数灵活多变,为其特性分析及调控增加了难度。概而言之,会议中 APLTP 物理机理和应用基础相关的报告可分类为激励电源、等离子体装置、实验诊断技术和仿真方法等四个方面。

2.1.1 等离子体产生电源

首先,高频的窄脉冲电源超越直流源、kHz 交流源和射频源,成为最热门的激励电源。高频脉冲源有利于将等离子体维持在较低的温度,同时提高活性物质的含量,因而在生物医学、辅助燃烧、流动控制等实际应用领域具有显著的应用优势^[15-24]。西安交通大学的张小宁等利用自主研发的高压脉冲稳压源驱动氦等离子体射流,该电源可以实现对脉冲上升沿、脉宽、电压幅值和重复频率等多参数大范围的调节;重庆大学的刘坤等比较了脉冲与直流激励的含水射流特性,发现脉冲激励的射流可有效控温和提高 ROS(活性氧)成分。另外,多种电源的配合使用也可使等离子体获得某些特性。例如:东华大学的郭颖等将微秒脉冲源引入到了射频源驱动的大气压辉光放电,降低了起辉电压,从而提高了放电稳定性;山东大学的张远涛使用脉冲调制射频电源产生了非连续状的等离子体,可减少整体能耗并降低气体温度。

2.1.2 等离子体发生装置

介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD)和基于 DBD 的大气压等离子体射流(Atmospheric Plasma Jet, APPJ)是低温等离子体的主要产生方式^[4,11,20,25,26]。其中,DBD 的物理机理研究主要体现在斑图和时域非线性行为方面。河北大学的董丽芳等以及华南理工大学的郝艳捧等分别从斑图动

力学和放电均匀性的角度研究了 DBD 中的斑图特性;而华南理工大学的戴栋等则从时域非线性行为方面探讨了放电参数(如外施电压频率和幅值等)变化时,DBD 所表现出来的非线性放电特征及转换机制。而 DBD 的应用基础研究则主要体现在表面介质阻挡放电(Surface DBD, SDBD)的特性研究上。由于 SDBD 在流动控制和材料表面处理等领域的应用潜力,SDBD 中的电荷分布和输运特性已经吸引了广泛的关注^[27]。

相比典型的 DBD,APPJ 由于产生装置灵活且便于处理复杂表面,因而在低温等离子体未来的应用中具有更广阔的前景^[3,11,28,29]。这在本次会议报告和相关论文的数量上也有所体现。目前,APPJ 的机理研究一方面集中在工作气体与周围大气的作用效果,如射流的传播机理和环状结构的形成机制、种子电子的产生机制及作用,另一方面则聚焦在阵列式 APPJ 的均匀性、稳定性和等离子体参数的诊断及调控等,如中科院电工所邵涛等、南京工业大学方志等都在开展相关的研究工作。此外,中科院光机所的汤洁等研发了 DBD 增强型电刷阵列型等离子体射流产生装置,可有效提高能量利用率,降低气体温度。APPJ 的应用基础研究则主要包括掺杂 O₂ 和 H₂O 等杂质的射流中活性粒子的数量和分布、APPJ 与溶液的相互作用过程及活性粒子的输运转化特性等。

还需要补充的是,由裸露金属电极产生均匀稳定的弥散放电也得到了较广泛的关注^[30,31]。大连理工大学的王文春等利用针阵列-板电极结构获得了大面积的稳定弥散放电,并发现这种放电形式能够产生均匀分布的高浓度活性成分;北京理工大学的欧阳吉庭等设计了一种线-板结构的电晕放电离子源,发现比传统方式可产生更高的离子电流;嘉应学院的冯发达等还利用直流电晕放电与材料表面作用发生二次放电来产生反电晕等离子体,可在等离子体协同催化中得到应用。

2.1.3 实验诊断技术

APLTP 具有丰富的时空动力学特征,其精确的描述需依赖高分辨率的测量设备和严密的实验方法^[6,32,33]。电气测量和光学诊断是两种主要的实验研究手段。在光学诊断方面,从会议的相关报告来看,被动诊断方法仍然占主流地位,如发光图像拍摄和发射光谱测量。特别是综合利用纳秒分辨率的 ICCD 图像和发射光谱,可以更好地捕捉放电形态的时空演变、以及分析等离子体的基本参数和分布等。大

连理工大学的王文春等借助发射光谱诊断,系统地研究了多种低温等离子体的活性成分、振动/转动温度分布等参数;南京航空航天大学的吴淑群利用 He 谱线的 Stark 分裂效应测量了 APPJ 中的电场强度。

值得注意的是,近年来基于激光技术的主动测量技术也发展迅速^[34,35]。大连理工大学的丁洪斌介绍了激光诱导荧光(Laser Induced Fluorescence, LIF)、汤姆森散射(Thomson Scattering, TS)、激光诱导击穿光谱(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)、光腔衰荡光谱(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)以及激光电离分子束飞行时间质谱(MB-TOFMS)等多种方法在等离子体温度、密度、能量分布以及活性粒子含量等参数诊断中的应用。相对于发射光谱的被动测量手段而言,主动测量方法具有更高的灵活性,在测量范围和测量精度等方面具有巨大优势。如华中科技大学的岳远富等、重庆大学的熊青等和南昌大学的钱沐杨等都利用 LIF 测量了等离子体射流中 OH 自由基的含量及分布。

2.1.4 仿真方法

目前关于等离子体的仿真模型大致可分为电路模型、流体模型、粒子模型以及混合模型^[36,37]。

电路模型从等效电路的角度,将等离子体产生系统的各部分等效为电气元件,是一种全局的仿真方式。山东大学的李清泉等报告了一种基于 SDBD 的集中参数电路模型,能够较好地吻合实验数据,并且可得到表面电压、电子温度和密度等难以实验测量的参数;重庆大学的姜慧等利用类似模型,研究了 SDBD 中两种典型的电荷传输特性;清华大学的罗海云等还根据射频等离子体的“电阻-电容混联”等效电路模型推导了电子密度的解析公式。

流体模型仍然是目前低温等离子体领域的主流仿真模型。在保持基本的“漂移-扩散近似”框架下,考虑更加细致的等离子体物理和化学过程、以及多物理场耦合情形是流体模型正在关注的重点。

由于计算机计算能力的不断提升以及相关科学问题研究的深入,粒子模拟也在吸引更多的关注^[38]。华北电力大学的李庆民等和西安交通大学的李永东等分别综述了粒子模拟在等离子体仿真中的进展;河北大学的范伟丽等借助 PIC-MCC 模型揭示了 DBD 在辉光模式下丝状放电过程及产生机制;西安交通大学的孙安邦等应用蒙特卡洛模型计算了低温等离子体中的电子输运系数。

混合模型则是一种结合了流体模型与粒子模型的仿真方法^[39]。例如,在流注仿真中,用粒子模型

处理高能粒子(如电离波前端的电子),而用流体方式模拟尾部通道内的低速粒子。这种模型既能够更准确地反应气体放电的物理过程,又兼具较高的运行效率。但是,相关的研究目前尚处于起步阶段,主要问题集中在流体模型和粒子模型的结合方式上。

2.2 实际应用研究

本次会议中,APLTP 的应用涉及生物医学、环境治理、流动控制、材料处理、辅助燃烧^[40-42]、薄膜沉积、物质合成转换^[43]及人工降雨等多个领域。其中,生物医学、环境治理、流动控制和材料处理是本次会议的讨论热点,这也在一定程度上反映了当前国内 APLTP 应用行业的分布状况。下面,我们主要从生物医学、环境治理、流动控制和材料处理等四个应用领域详细介绍各自的研究进展。

2.2.1 生物医学

大气压低温等离子体,尤其是重粒子温度接近室温的冷等离子体符合生物体对温度敏感的特性,因此生物医学成为冷等离子体颇具前景的应用领域^[7,18,44-53]。冷等离子体生物医学主要包括两类应用:第一是农业诱变育种,以及杀灭病毒、细菌、微生物和藻体等非临床应用^[54,55];第二是直接用于临床治疗,如止血、创口愈合、洁牙美容、抗感染以及癌细胞杀灭等。

利用气液两相或者液相的高压脉冲放电,能够有效地杀灭溶液中的生物体^[9,10]。其中,大连海事大学白敏冬等研发的船舶压舱水处理设备能够在 30~40t/h 处理水量下,100%杀灭直径 10 μ m 以上的浮游藻类,为预防远洋船舶可能带入的物种入侵提供了强大的技术手段;孙冰等分别研究了高压脉冲液相放电中紫外线、冲击波、电场和强氧化自由基等物质对杀菌的贡献,结果显示四种物质的贡献率分别为 30.8 \pm 4.8%、36.1 \pm 5.5%、12.7 \pm 1.8%、20.4 \pm 2.5%,表明冲击波具有最大的杀灭效果。

冷等离子体的直接临床治疗已经显露出很多传统方法不具备的优势^[45-51,56]。例如:等离子体灵活的化学性使其有望成为一种强大的抗生素,且降低了病菌的抗药性;等离子体处理的创口能够快速凝血,且结痂厚度降低。而当前等离子体医学最热门的研究方向是定向的癌细胞杀灭^[45]。西安交通大学孔刚玉在题为“等离子体在癌症治疗上的进展和机会”的大会特邀报告上指出:等离子体对癌细胞和正常细胞具有选择性,对于癌细胞具有明显更高的杀灭能力,从而使之可能成为一种基本无创的癌症治疗方式。此外,包括中科院生命科学院、中国科

学院合肥物质科学研究院和中科大等多家单位的合作,揭示了 APLTP 杀菌和选择性杀灭癌细胞的分子机理。

2.2.2 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方面。

等离子体废气处理一般是在气相环境中通过高压放电形成等离子体,然后通过等离子体中的高能电子以及活性物质与废气分子发生化学反应,从而实现污染物的降解、转移等无害化的过程^[17,57,58]。目前,雾霾是我国面临的一大难题。其中,悬浮颗粒物、硫/氮氧化物和挥发性有机化合物(VOCs)等是引发雾霾的主要元凶。利用静电以及放电技术处理颗粒物和硫/氮氧化物已经具有较完备的理论和应用体系,因此目前等离子体废气处理的研究主要关注 VOCs 的降解。

VOCs 指代一类有机化学废气,而 APLTP 技术利用高能电子、羟基自由基、活性氧等物质与有机废气分子反应,以达到降解的目的,因而能够适用于多种废气。目前,常见的气相放电方式包括(填充床)介质阻挡放电、电晕放电和滑动电弧放电等,适用的 VOCs 包括卤代烃、醛和芳烃等。为了提高废气降解的效率,一般在等离子体区域引入催化剂,如铂或金等贵金属、铜或锰的氧化物以及光催化剂 TiO₂ 等^[59]。等离子体催化降解苯、甲苯的降解率可达到 100%,但是二氧化碳的选择性难以提高。复旦大学的刘克富等报告了用 DBD 降解二甲苯,转化率达到 90% 以上。

等离子体废水处理一般采用气液两相放电或者液相放电,在降解废水中的有机物(如苯酚、亚甲基蓝等)时效果显著,特别是对一些难以降解的有机废水的脱除方面表现良好^[9,10,60]。但是,由于等离子体处理废水的能效问题一直难以解决,因而大大限制了等离子体废水处理的大规模工业化应用。

2.2.3 流动控制

等离子体流动控制的主要优势体现在无运动部件、快速响应和宽频带激励,因而在提升飞行器的气动性能方面具有重要的应用前景^[27,42,61]。早期的等离子体流动控制研究主要针对高超音速飞行器减阻,而目前国内的研究则主要集中在亚音速飞行器及高速列车的减阻上。

高压正弦波激励下的 DBD 气动激励是当前研究最广泛的一种流动控制方式,其基本原理是利用 SDBD 诱导避免射流,继而抑制流动分离,减少运

行阻力。纳秒脉冲介质阻挡放电(Nanosecond-Pulse Dielectric Barrier Discharge, NS-DBD)等离子体气动激励是另一种快速发展的流动控制技术,其主要优势是提升了等离子体的流动控制能力。等离子体合成射流(PSJ)是用于激波减阻的典型等离子体激励方式,能够有效地控制高速气流形成的激波以及激波/附面层干扰。

空军工程大学李应红等针对飞行器增升减阻开展了大量的研究工作,在题为“航空等离子体技术研究进展与挑战”的大会报告上,他详细介绍了相关的研究进展。此外,国防科技大学的罗振兵和空军工程大学的吴云等都研究了两电极和三电极等离子体合成射流的相关特性,揭示了不同激励器的能量效率特性。南京航空航天大学史志伟等则系统地研究了纳秒脉冲 DBD 和等离子体合成射流的气动激励特性,其结果显示 PSJ 能形成瞬时速度 290m/s 的射流扰动,而 NS-DBD 的扰动则表现为压力波、射流和漩涡结构。受飞行器减阻研究的启发,西南交通大学的吴广宁等则尝试将正弦激励的 SDBD 流动控制用于高速列车的减阻。

2.2.4 材料处理

APLTP 因其低温高活性物质的特点,在材料处理领域具有广泛的应用前景^[62,63]。目前,国内的研究团队已经尝试将之用于纺织纤维、塑料、陶瓷和金属等材料的表面改性,在有效改变亲水性、附着性和表面绝缘性能的同时,而不对材料本体造成烧蚀等损害。

中科院电工所的王瑞雪在“脉冲等离子体在表面改性和甲烷转化领域的应用”的邀请报告中,详细介绍了所在研究团队在材料改性方面开展的一系列工作和进展。例如:利用大气压 DBD 处理有机玻璃表面,能够有效增强其表面闪络强度;利用 He 和 Ar APPJ 处理有机玻璃后,发现其亲水性能得到了提升;利用 DBD 等离子体对绝缘材料表面进行氟化处理和类 SiO₂ 薄膜沉积,可提高沿面闪络电压;采用弥散放电处理铜金属表面后再沉积 TiO₂ 薄膜,能够抑制微放电。此外,大连理工大学的王文春等还报告了一种均匀大面积的纳秒脉冲等离子体用于丙纶无纺布表面改性的研究进展。

3 发展趋势

我国的低温等离子体及其应用经过将近 20 年的发展,如今已经成为一个由等离子体物理化学、生物医学、材料工程、环境科学与工程等多学科交

又融合的特色研究领域。从本次会议的各方面情况可以看出,国内越来越多其他专业领域的研究人员正在加入低温等离子体的研究队伍,这在丰富低温等离子体学科交叉特性的同时也势必大大促进其更加快速的发展。虽然此次全国“高电压与放电等离子体”会议只包含了国内低温等离子体领域的部分研究工作,但可以管中窥豹,推断未来的发展趋势。

在基础理论研究方面,虽然等离子体物理本身已有比较完备的理论体系,但从这次会议的报告中可以看出低温等离子体仍然存在广阔的未知领域有待进一步的研究。例如:低温等离子体的时空演化规律、非线性动力学过程及其分析、各种参数对等离子体特性的调控机制等。另一方面,由应用驱动的一些关键基础问题在未来也值得引起更多的关注,如大面积均匀稳定放电的产生机制、精确高效的数值模拟方法等。

在低温等离子体的实际应用方面,可以看出目前的很多工作以实验探索为主,理论研究相对滞后。一方面,低温等离子体与其他领域的结合产生了新的交叉研究领域,相关的应用基础研究无疑是这些交叉领域进一步发展的必要支撑,也必然会吸引更多的注意力,如等离子体对活体细胞的作用机理、等离子体协同催化中气溶胶的产生机制及催化剂失活机制等。另一方面,为了将实验室里的研究成果应用到实际工业中,还必然面临着诸如安全性测试、工艺设计、装置开发等技术问题。

最后要强调的是,作为一种新的工具或手段,大气压下低温等离子体这几年来已经吸引了不少其他专业领域研究人员的关注,相关的人员也越来越来。我们相信未来还会有更多的研究人员加入进来,伴随着各种思想火花的碰撞,一定还会产生更多的新想法和新思路。

致谢:本文发表感谢中国电工技术学会等离子体及应用专委会的资助。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Bárdos L, Baránková H. Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications[J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(23): 6705-6713.
- [3] 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.
- [4] 欧阳吉庭, 张宇, 秦宇. 微放电及其应用[J]. *高电压技术*, 2016, 42(3): 673-684.
- Ou-Yang Jiting, Zhang Yu, Qin Yu. Micro-discharge and its applications[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 673-684.
- [5] Schoenbach K H, Becker K. 20 years of microplasma research: a status report[J]. *The European Physical Journal D*, 2016, 70(2): 1-22.
- [6] Lu X, 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.
- [7] Vladimir S, Jarmila P, Hana S, et al. Nonthermal plasma—a tool for decontamination and disinfection[J]. *Biotechnology Advances*, 2015, 33(6): 1108-1119.
- [8] 王新新, 付洋洋. 气体放电的相似性[J]. *高电压技术*, 2014, 40(10): 2966-2972.
- Wang Xinxin, Fu Yangyang. Similarity in gas discharges[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(10): 2966-2972.
- [9] Brisset J L, Pawlat J. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2016, 36(2): 1-27.
- [10] Bruggeman P, Kushner M J, Locke B R, et al. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, 25(5): 053002.
- [11] 吴淑群, 聂兰兰, 卢新培. 大气压非平衡等离子体射流[J]. *高电压技术*, 2015, 41(8): 2602-2624.
- Wu Shuqun, Nie Lanlan, Lu Xinpei. Atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(8): 2602-2624.
- [12] Bruggeman P, Brandenburg R. Atmospheric pressure discharge filaments and microplasmas: physics, chemistry and diagnostics[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(46): 464001.
- [13] Yatom S, Shlapakovski A, Beilin L, et al. Recent studies on nanosecond-timescale pressurized gas

- discharges[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, 25(6): 064001.
- [14] Lu X, Laroussi M, Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2012, 21(3): 034005.
- [15] 张凯, 王瑞雪, 韩伟, 等. 等离子体重油加工技术研究进展[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(24): 1-15.
Zhang Kai, Wang Ruixue, Han Wei, et al. Progress of Heavy Oil Processing by Plasma Technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(24): 1-15.
- [16] 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.
- [17] 陈思乐, 许桂敏, 穆海宝, 等. 低温等离子体处理柴油机尾气的研究进展[J]. *高压电器*, 2016, 52(4): 22-29.
Chen Sile, Xu Guimin, Mu Haibao, et al. Research progress in treatment of diesel engine exhaust by non-thermal plasmas[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(4): 22-29.
- [18] Laroussi M. Low-Temperature Plasma Jet for Biomedical Applications: A Review[J]. *Plasma Science IEEE Transactions on*, 2015, 43(3): 703-712.
- [19] Zhang Cheng, Shao Tao, Yan Ping, et al. Generation of X-ray emission in repetitive nanosecond-pulse discharge at atmospheric pressure[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(9): 2095-2104.
- [20] 聂秋月, 张晓菲, 李和平, 等. 大气压介质阻挡放电等离子体射流源研究进展[J]. *中国科学: 物理学 天文学*, 2014, 44(11): 1157-1169.
Nie Qiuyue, Zhang Xiaofei, Li Heping, et al. Advances of atmospheric-pressure dielectric-barrier-discharge plasma jet[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(11): 1157-1169.
- [21] 卢新培, 严萍, 任春生, 等. 大气压脉冲放电等离子体的研究现状与展望[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(7): 801-815.
Lu Xinpei, Yan Ping, Ren Chunsheng, et al. Review on atmospheric pressure pulsed DC discharge[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2011, 41(7): 801-815.
- [22] 赵政, 钟旭, 李征, 等. 基于雪崩三极管的高重频高压纳秒脉冲产生方法综述[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(8): 33-47.
Zhao Zheng, Zhong Xu, Li Zheng, et al. Review on the Methods of Generating High-Repetitive-Frequency High-Voltage Nanosecond Pulses Based on Avalanche Transistors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(8): 33-47.
- [23] Snoeckx R, Bogaerts A. Plasma technology-a novel solution for CO₂ conversion?[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, DOI: 10.1039/C6CS00066E
- [24] Ouyang L, Cao Z, Wang H, et al. Application of dielectric barrier discharge plasma-assisted milling in energy storage materials-A review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 691: 422-435.
- [25] 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.
- [26] Adamovich I, Baalrud S D, Bogaerts A, et al. The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(32): 323001.
- [27] 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.
- [28] Winter J, Brandenburg R, Weltmann K D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2015, 24(6): 064001.
- [29] Korolev Y D. Low-current discharge plasma jets in a gas flow. application of plasma jets[J]. *Russian Journal of General Chemistry*, 2015, 85(5): 1311-1325.
- [30] 章程, 邵涛, 严萍. 大气压下纳秒脉冲弥散放电[J]. *科学通报*, 2014, 59(20): 1919-1926.
Zhang Cheng, Shao Tao, Yan Ping, Nanosecond-pulse diffuse discharges at atmospheric pressure[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(20): 1919-1926.

- [31] 李和平, 李果, 王森, 等. 裸露金属电极大气压射频辉光放电研究进展[J]. 科技导报, 2009, 27(5): 81-86.
Li Heping, Li Guo, Wang Sen, et al. Recent progress of atmospheric-pressure glow discharges with bare-metallic electrodes[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(5): 81-86.
- [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] 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.
- [34] 李兴文, 魏文赋, 吴坚, 等. 激光诱导等离子体光学诊断方法研究综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1788-1797.
Li Xingwen, Wei Wenfu, Wu Jian, et al. Review of optical diagnosis methods for the laser produced plasmas[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1788-1797.
- [35] Reuter S, Sousa J S, Stancu G D, et al. Review on VUV to MIR absorption spectroscopy of atmospheric pressure plasma jets[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2015, 24(5): 054001.
- [36] Fan W L, Sheng Z M, Wang W M, et al. Particle simulation of mode transition in dielectric barrier discharges at different gas pressures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(47): 475208.
- [37] Lu X, Naidis G V, Laroussi M, et al. Guided ionization waves: theory and experiments[J]. Physics Reports, 2014, 540(3): 123-166.
- [38] Li C, Teunissen J, Nool M, et al. A comparison of 3D particle, fluid and hybrid simulations for negative streamers[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2012, 21(5): 055019.
- [39] Kushner M J. Hybrid modelling of low temperature plasmas for fundamental investigations and equipment design[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(19): 194013.
- [40] Popov N A. Kinetics of plasma-assisted combustion: effect of non-equilibrium excitation on the ignition and oxidation of combustible mixtures[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2016, 25(4): 043002.
- [41] 李平, 穆海宝, 喻琳, 等. 低温等离子体辅助燃烧的研究进展、关键问题及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 2073-2083.
Li ping, Mu Haibao, Yu Lin, et al. Progress, key problems and prospect on low temperature plasma assisted combustion[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 2073-2083.
- [42] 吴云, 李应红. 等离子体流动控制与点火助燃研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2024-2038.
Wu Yun, Li Yinghong. Progress in research of plasma-assisted flow control, ignition and combustion[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2024-2038.
- [43] Chen Q, Li J, Li Y. A review of plasma-liquid interactions for nanomaterial synthesis[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(42): 424005.
- [44] Smoluch M, Mielczarek P, Silberring J. Plasma-based ambient ionization mass spectrometry in bioanalytical sciences[J]. Mass Spectrometry Reviews, 2015, 35(1): 22-34.
- [45] Keidar M. Plasma for cancer treatment[J]. Post Communist Economies, 2015, 24(3): 033001.
- [46] Woedtke T V, Reuter S, Masur K, et al. Plasmas for medicine[J]. Physics Reports, 2013, 530(4): 291-320.
- [47] Weltmann K D, Polak M, Masur K, et al. Plasma processes and plasma sources in medicine[J]. Contributions to Plasma Physics, 2012, 52(7): 644-654.
- [48] Park G, Park S, Choi M Y, et al. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2012, 21(4): 043001.
- [49] Kreider W, Crum L A, Bailey M R, et al. Modelling of atmospheric pressure plasmas for biomedical applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(5): 053001.
- [50] Ehlbeck J, Schnabel U, Polak M, et al. Low temperature atmospheric pressure plasma sources for microbial decontamination[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(1): 013002.
- [51] Kong M G, Kroesen G, Morfill G, et al. Plasma medicine: an introductory review[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(11): 115012.
- [52] Thirumdas R, Sarangapani C, Annature U S. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food

- processing[J]. Food Biophysics, 2015, 10(1): 1-11.
- [53] Surowsky B, Schlüter O, Knorr D. Interactions of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma with Solid and Liquid Food Systems: A Review[J]. Food Engineering Reviews, 2015, 7(2): 1-27.
- [54] Chizoba Ekezie F G, Sun D W, Cheng J H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: current applications and future trends[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, DOI: 10.1016/j.tifs.2017.08.007
- [55] Liao X, Liu D, Xiang Q, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review[J]. Food Control, 2017, 75: 83-91.
- [56] 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.
- [57] 张晓星, 肖焱艳, 黄杨珏. 低温等离子体处理 SF₆ 废气综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 17-24.
Zhang Xiaoxing, Xiao Hanyan, Huang Yangyu. A review of degradation of SF₆ waste by low temperature plasma[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 17-24.
- [58] Veerapandian S, Leys C, De Geyter N, et al. Abatement of VOCs using packed bed non-thermal plasma reactors: a review[J]. Catalysts, 2017, 7(4): 113.
- [59] 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.
- [60] Magureanu M, Mandache N B, Parvulescu V I. Degradation of pharmaceutical compounds in water by non-thermal plasma treatment[J]. Water Research, 2015, 81(11): 124-136.
- [61] Samukawa S, Hori M, Rauf S, et al. The 2012 plasma roadmap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(25): 253001.
- [62] Penkov O V, Khadem M, Lim W S, et al. A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2015, 12(2): 225-235.
- [63] Pappas D. Status and potential of atmospheric plasma processing of materials[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films, 2011, 29(2): 020801-020801-17.
-
- ### 作者简介
- 戴 栋 男, 1976 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压技术、大气压放电等离子体。
E-mail: ddai@scut.edu.cn
- 宁文军 男, 1987 年生, 博士, 研究方向为大气压放电等离子体及其应用。
E-mail: epningwj@scut.edu.cn
- 邵 涛 男, 1977 年生, 博士, 研究员/岗位教授, 博士生导师, 教育部“长江学者奖励计划”2016 年青年项目入选者, IET Fellow, IEEE Senior Member, 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等。
E-mail: st@mail.iee.ac.cn (通信作者)
- (编辑 郭丽军)