

专题: 低温等离子体非平衡输运与主动调控

米量级宽幅间接介质阻挡放电 等离子体产生及放电特性*

李龙 崔行磊 祝曦 方志†

(南京工业大学电气工程与控制科学学院, 南京 211800)

(2025 年 8 月 28 日收到; 2025 年 9 月 16 日收到修改稿)

本文报道了一种新型米量级宽幅间接介质阻挡放电 (DBD), 用于满足大尺度、形状复杂材料的处理需求. 通过模块化分级气路设计与仿真优化, 提高放电区域及被处理材料表面流场分布均匀性. 在此基础上, 以 Ar 作为工作气体, 以六甲基二硅烷 (HMDSO) 为反应媒质, 在纳秒脉冲电源激励下产生米量级宽幅等离子体. 通过电学、光谱、温度诊断方法来评估不同运行条件参数下的粒子活性、放电均匀性和稳定性, 并对环氧材料改性, 通过水接触角测量验证改性效果及其均匀性. 结果表明, 在合适的运行条件参数下, 可产生尺寸为 1120 mm 的宽幅均匀稳定等离子体. 增大电压幅值使放电强度和粒子活性提升, 但放电均匀性和稳定性会显著降低; 增大工作气体流速虽可同时提升粒子活性、放电均匀性和稳定性, 但提升幅度较小. 在电压幅值为 12 kV、工作气体流速为 10 L/min 条件下处理 10 min 后, 环氧 (EP) 材料表面的水接触角从 67° 均匀提升至 144°, 波动幅度低于 6%. 本文所报道的米量级宽幅间接 DBD 电极可为大尺度等离子体材料改性技术工业应用提供参考和依据.

关键词: 米量级宽幅电极, 间接介质阻挡放电, 材料改性, 放电特性, 水接触角**PACS:** 52.80.-s, 52.40.Hf, 81.40.-z**DOI:** 10.7498/aps.74.20251163**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251163

1 引言

介质阻挡放电 (DBD) 作为一种典型的气体放电形式, 能在大气压条件下产生稳定性好、能量密度高的等离子体^[1-3], 其在材料改性、能源转化及环境治理等领域展现出广阔的应用前景^[4,5]. 然而随着 DBD 应用发展, 尤其是在大尺度材料表面改性领域的深入, 实验研究常用的厘米量级 DBD 已不能满足工业应用需求^[6,7]. 因此, 如何增大 DBD 电极尺度是实现等离子体处理工业化应用的关键.

宽幅 DBD 是实现工业级大尺度材料高效、均匀改性的有效手段^[8], 然而, 相比于厘米量级小型电极, 扩大放电尺度至米量级为等离子体的产生和

特性调控增加了难度. Motrescu 等^[9]利用一种 50 mm×200 mm 尺度的平行板电极实现空气 DBD 放电, 但其放电空间中出现了密集分布的丝状放电现象. Zhu 等^[10]开发了一种基于滚筒式米量级宽幅 DBD 等离子体装置, 以空气作为工作气体实现聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜的连续处理. Zeniou 等^[11]报道了一种 100 mm×100 mm 尺度的大气压等离子体装置, 该装置以氦气作为工作气体以保证放电均匀性. 现有研究表明, 电极尺寸的增大会干扰工作气体的分布均匀性, 进而影响改性效果及其均匀性. 另外, 改变工作气体流速也会对 DBD 等离子体放电产生影响, Hasan 等^[12]通过构建一维仿真模型, 揭示了流速对大气压空气等离子体化学传输的调控机制, 并发现通过增加

* 国家自然科学基金 (批准号: 52037004, 52377148) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: myfz@263.net

气体流速,可以延长高活性粒子的寿命,从而影响放电特性.此外,在实际应用中,材料形状结构多样,常出现块状、柱状曲面等特征,而常规 DBD 因其电极结构限制难以满足不同几何结构材料处理需求.因此,优化设计 DBD 电极结构,对于实现均匀稳定的等离子体放电及推动大尺度材料处理应用具有关键意义.

间接 DBD 能够通过气流将放电等离子体产生区与材料处理区分离,具有更强的灵活性和可控性,适合于大尺度复杂形状材料表面处理^[13-15].Peters 等^[16]以空气为工作气体,采用电极长度为 250 mm 的间接 DBD 对多种材料进行处理,改性后表面亲水性能均有提升.韩国新等^[17]设计了一种刷状间接 DBD 等离子体发生装置,产生宽 30 mm 的等离子体羽,处理后 PET 表面水接触角 (WCA) 降低.Stancu 等^[18]以氩气为工作气体,采用毫米级刷状间接 DBD 对医用聚氯乙烯 (PVC) 板材和薄膜进行表面处理,改性后的 WCA 分别降低 54.2% 和 39.8%.Kang 等^[19]在利用间接 DBD 等离子体处理铜基板材料时,发现间接 DBD 处理需优化气流与电压以维持等离子体活性,从而实现大尺度表面改性.研究表明,相较于直接 DBD,间接 DBD 的活性粒子则需进行跨区域运输进入处理区域,因此粒子活性不如直接 DBD.此外,间接 DBD 处理区域的等离子体空间均匀性对气体流场分布表现出更强的依赖性,流场分布均匀性直接影响表面处理效果均匀性.这导致间接 DBD 电极设计与运行参数匹配更具挑战,如何产生米量级尺度间接 DBD 并实现均匀材料改性仍有待研究.

对大尺度 DBD 电极进行放电诊断是评估等离子体状态、调控改性效果的关键.目前,对于常规厘米量级 DBD 电极,主要采用单点、单次采集的电学、光谱诊断方法^[20,21].然而对于米量级 DBD 电极,其放电区域更大,放电空间分布特性更加复杂,更容易受到电极结构和气流扰动的影响^[22-24],现有诊断方法难以全面反映大尺度电极的放电特性.因此,探索适用于大尺度等离子体放电特性诊断方法,深入分析等离子体活性、均匀性与运行条件参数之间的关联规律至关重要.

综上所述,一方面现有的大尺度电极多为直接 DBD 结构,放电间隙通常在毫米量级,当处理复杂形状或块状材料时会对放电产生显著影响,难以保证处理效果均匀性.另一方面,已报道的间接

DBD 装置虽提升了处理灵活性,但其电极尺度普遍停留在厘米量级,难以满足工业应用中大尺度材料处理效率要求.因此本文报道了一种米量级宽幅间接 DBD,结合有限元仿真优化气路结构参数,实现放电区域及材料表面流场分布均化.结合分布式电学、光谱特性诊断及发光、电极温度测量,评估粒子活性、放电均匀性及稳定性.研究电压幅值、工作气体流速等运行条件参数对放电特性的影响规律,并通过对环氧材料处理验证改性效果.本文为米量级 DBD 装置的结构设计优化、放电特性诊断及改性应用提供了参考依据.

2 电极的设计与优化

米量级宽幅间接 DBD 电极的设计不仅需要增大电极尺寸,更需要确保工作气体在放电空间内均匀分布,以提高放电及改性效果的均匀性.因此,为了产生工业应用所需的大尺度均匀等离子体,本节设计了米量级间接 DBD 电极,并重点围绕气路结构开展仿真分析与优化.

2.1 电极设计

图 1(a), (b) 分别为本文所设计的米量级宽幅间接 DBD 电极结构的示意图和实物图. DBD 电极长度为 1120 mm, 放电间隙为 2 mm. 考虑大尺度

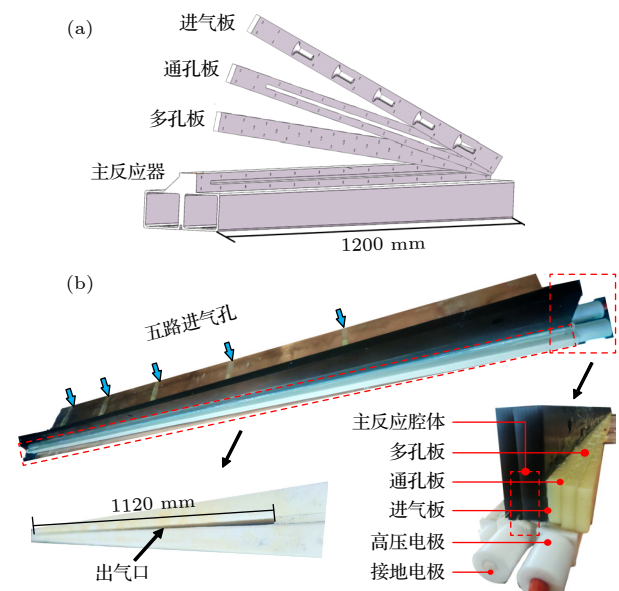


图 1 米量级宽幅间接 DBD 电极结构设计 (a) 电极示意图; (b) 电极实物图

Fig. 1. Structural design of the meter-scale wide indirect DBD: (a) Schematic diagram; (b) photo of the electrode.

放电对电极温升的影响, 电极选用导热率较好的铝金属, 阻挡介质选用热稳定性较强的陶瓷. 为实现工作气体在米量级宽幅间接 DBD 电极放电空间内均匀分布, 本研究采用模块化分级气路设计的电极结构. 如图 1(a) 所示, 电极气路部分采用四级导流构型: 进气板、通孔板、多孔板及主反应腔体. 其中多孔板中孔隙直径为 4 mm, 电极整体尺寸为 1200 mm × 80 mm. 工作气体经均气阀分流为五通道等速流后, 由进气孔通入 DBD 电极, 依次流经通孔板与多孔板, 最终抵达放电区及被处理材料表面.

2.2 气路仿真及优化

经前期研究发现, 多孔板的孔隙密度是影响流场分布均匀性的关键控制参数, 为此本文围绕不同

孔隙密度下的流场分布特征开展仿真. 非平衡态等离子体具有一定黏度且雷诺数小于 2000, 因此整个流场可采用层流稳态模型进行仿真^[25]. 基于有限元软件建立米量级宽幅间接 DBD 流场仿真模型, 求解质量连续性方程和纳维-斯托克斯方程^[26]. 仿真设定入口边界条件为 10 L/min 的流量, 出口边界条件为大气压, 电极与处理材料表面距离为 2 mm. 如图 2(a) 所示, 分别对比了不同孔隙密度条件下处理区域的流场分布, 包括 0 细分 (多孔板与通孔板一致)、2 细分 (10 孔均布)、4 细分 (20 孔均布) 及 8 细分 (40 孔均布), u_1 为电极内距出气口 5 mm 放电区域内的气体流速. 流线密度反映了气体分布的均匀程度, 流线越密集, 气体分布越均匀. 由图 2(a) 可见, 随着孔隙密度的增大, 流线逐

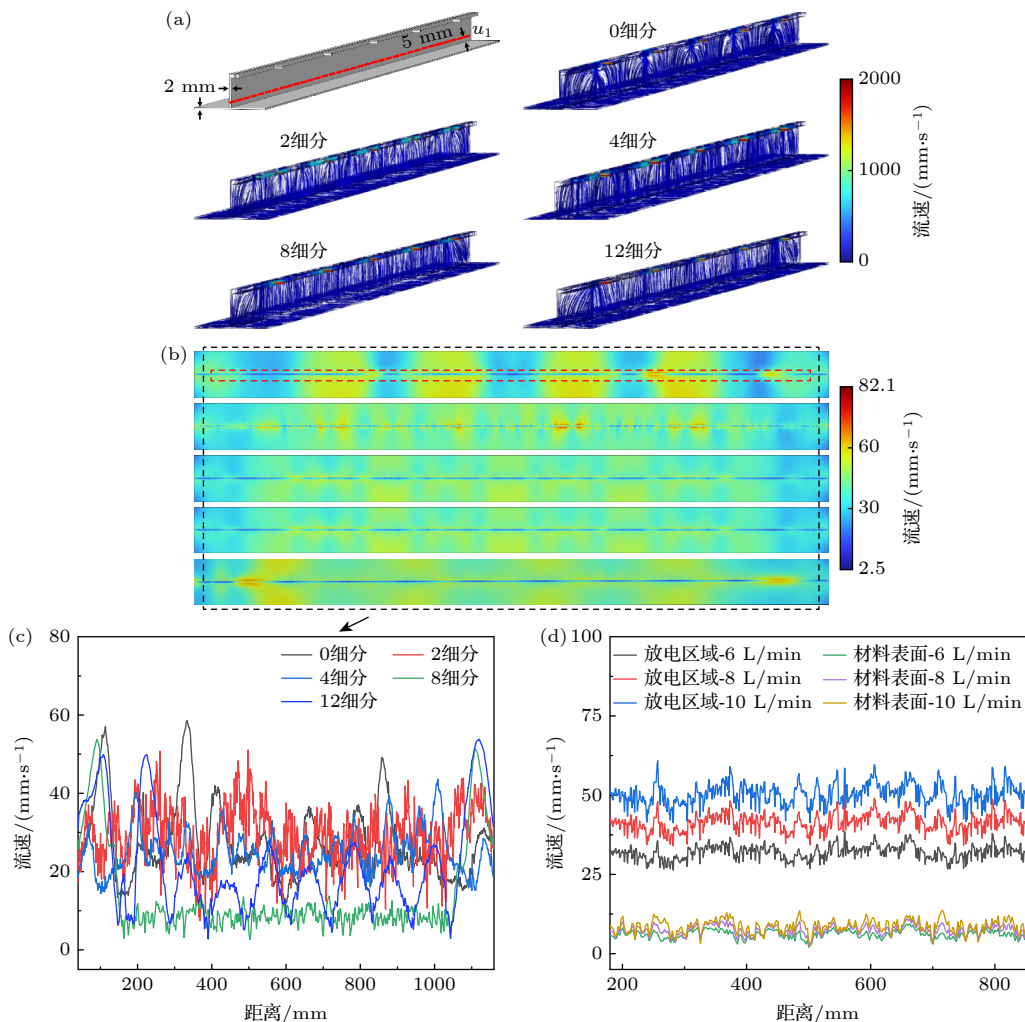


图 2 米量级宽幅间接 DBD 电极流场仿真 (a) 不同结构下工作气体流速的流线; (b), (c) 不同结构下处理材料表面流速分布; (d) 不同工作气体流速下的放电区域和材料表面流速分布

Fig. 2. Flow field simulation of the meter-scale wide indirect DBD: (a) Ar flow streamlines of gas flow rate under different structures; (b), (c) flow rate distributions on the treated material surface for different structures; (d) flow rate distributions in the discharge region and on the material surface for different total gas flow rates.

渐密集, 电极腔内的气体分布愈发均匀. 这是由于相邻孔隙间距减小, 导致气体流速流线之间的相互作用增强, 从而在电极反应腔内形成更均匀的流线分布. 此外, 由于孔隙密度的增多在进气口处产生了显著的分流效应, 出气口处的最大流速也呈现下降趋势. 图 2(b), (c) 为不同孔隙密度下材料表面流场分布, u_2 为材料表面气体流速. 当 0 细分时, 材料表面不同区域的气体流速相差较大, 并且出气口两侧流速相较于中间区域变化更加剧烈. 在距离为 160—960 mm 区域内, 气体流速在 14.8—58.1 mm/s 之间波动. 而在 8 细分结构下, 材料表面气体流速仅在 2.5—13.6 mm/s 之间变化. 波动幅度降低了 2.9 倍, 流场分布均匀性得到显著提升. 但在 12 细分结构下, 材料表面气体流速在 2.7—52.2 mm/s 之间波动. 相较于 8 细分, 波动幅度增大了 3.5 倍, 流场分布均匀性降低. 这是由于孔隙过度密集导致相邻气隙通道间产生显著干涉, 破坏了流场的层流特性^[27]. 值得注意的是, 表面工作气体流速的适当降低会增大活性粒子的驻留时间, 在有反应媒质添加时会有利于改性效果的提升^[28,29]. 此外, 根据图 2(d) 所示结果, 工作气体流速的增大不会对放电区域流速分布的均匀性产生影响, 材料表面流速大小和均匀性也没有显著变化. 因此本文采用 8 细分多孔板的设计方案开展放电特性以及改性效果研究.

3 测试平台及诊断方法

图 3 为米量级宽幅间接 DBD 处理的实验平台示意图. 相较于高频交流电源, 纳秒脉冲电源激

励下 DBD 的电流脉冲持续时间更短, 但电压上升速率更高, 导致峰值折合场强显著提升, 高瞬态场强能赋予电子更高能量, 激发产生活性粒子的能力更强^[30]. 因此本研究采用纳秒脉冲电源作为激励, 输出梯形脉冲波形幅值可调, 重复频率为 5 kHz, 上升下降沿均为 100 ns, 脉冲宽度 800 ns. 研究表明, 电压幅值和工作气体流速是影响放电特性的直接因素, 因此本文研究不同电压幅值和工作气体流速对 DBD 放电的影响规律. 电源输出电压幅值范围为 8—12 kV, 电压幅值过低无法击穿放电间隙, 而电压幅值过高会导致放电不稳定, 甚至损害电极寿命. 主气路工作气体 Ar(99.999%) 流速范围为 6—10 L/min, 流速较低时难以充满整个放电区域, 过高流速则会破坏电极内部流场的层流特性, 二者均会影响 DBD 均匀性, 通过实验发现在 6—10 L/min 范围内可实现较均匀的放电. 实验在 20 °C 恒温条件下开展, 这有利于维持液体媒质的饱和蒸气压, 从而精确控制其添加比例; 同时, 也为电极温度测试提供了稳定的环境条件. 采用鼓泡法将媒质 HMDSO(99%) 通过辅气路进入混气瓶与主气路工作气体混合均匀后, 经由气路进入放电空间内. 在前期工作中发现, 适量的 HMDSO 添加能够通过潘宁电离促进放电, 而过量的 HMDSO 添加会吸附过多的高能电子, 使得放电过程受到抑制^[30], 在本文预实验确定媒质最优流速为 15 mL/min. 选用厚度为 2 mm 的 EP 作为改性材料, 处理时将其置于往复运动平台, 运动速度 1 mm/s, 处理时间 10 min, 处理距离 2 mm.

采用分布式测量方法进行电学和光谱特性诊断, 测试位置 I—V 如图 3 所示. 采用 5 块铜箔作

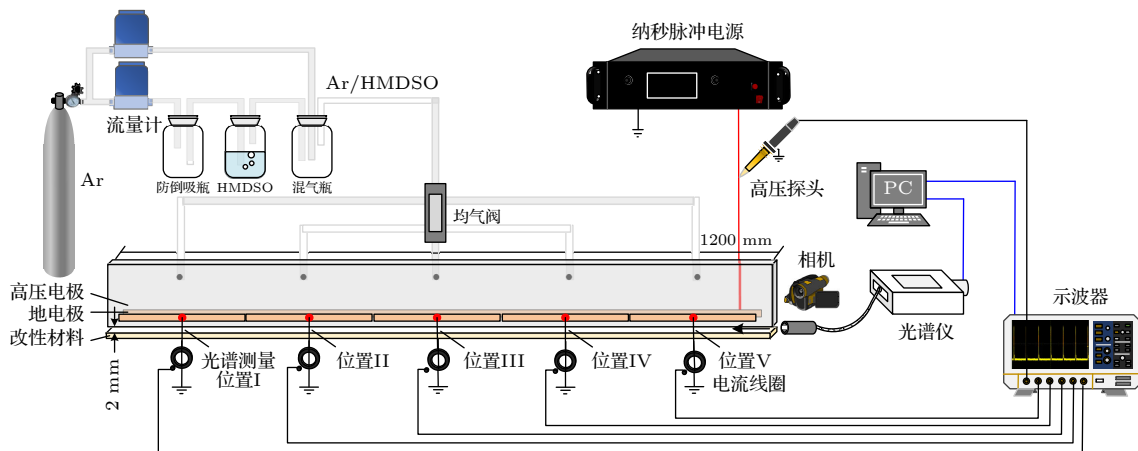


图 3 实验平台示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the experiment platform.

为接地电极^[28], 通过 5 个接地电极同步采集不同位置电流信号 I_1, I_2, I_3, I_4 和 I_5 . 使用高压探头 (Tektronix P6015A) 测量电压, 电流线圈 (Monitor-2877) 测量电流, 示波器 (Tektronix MSO46) 采集电压电流波形. 发射光谱采用光谱仪 (Ocean Optics HR4000 CG) 进行采集, 光学分辨率为 0.75 nm, 曝光时间设定为 500 ms. 将光纤探头分别固定在位置 I—V 测量发射光谱, 且与电极距离保持在 50 mm. 为了分析放电均匀性, 使用单反相机 (Canon EOS 6D) 拍摄 DBD 电极与样品之间的放电图像, 相机设定的光圈为 5.6, 曝光时间为 1/10 s, ISO 设定为 25600. 放电过程中电极发热会使阻挡介质发生非均匀膨胀, 导致表面产生微翘曲以及褶皱, 进而影响放电稳定性^[31]. 为此, 采用热成像仪 (Fotric 325 Pro) 实时监测电极放电期间温度的变化.

本文通过测量 WCA 评价改性后材料表面憎水性. 采用接触角测量仪 (ZJ-CAZ2) 在 EP 表面自动滴定 2 μ L 的去离子水液滴, 通过图像分析法测定 WCA. 为表征改性效果的均匀性, 将材料表面划分为 5 个区域, 并在每个区域内随机选取 10 个点进行 WCA 测试. 分别计算 WCA 均值与标准差以评估改性效果及均匀性.

4 放电特性

4.1 电学特性

图 4 为电压幅值 12 kV、工作气体流速 10 L/min 条件下典型放电电压电流波形, 图中 u 表示施加在 DBD 电极上的纳秒脉冲电压波形. 由图 4 可见, 在电压脉冲的上升沿和下降沿分别发生一次气体击穿, 并且各位置电流波形具有良好的 consistency. 为了评价不同位置的放电强度, 从每条电流波形中分别读取最大电流幅值 I_n . 比较发现电极中间侧电流幅值 I_3 最大, 并且电流幅值沿两侧逐渐递减, 说明米量级电极的中间位置放电强度相较于两侧略高. 采用五路最大电流幅值的均值 I_{avg} 表示整体放电强度, 并采用最大电流幅值的标准差 I_{sd} 反映不同位置放电强度的差异性, 如 (1) 式所示:

$$\begin{cases} I_{\text{avg}} = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5)/5, \\ I_{\text{sd}} = \frac{1}{5} [(I_1 - I_{\text{avg}})^2 + (I_2 - I_{\text{avg}})^2 + (I_3 - I_{\text{avg}})^2 \\ + (I_4 - I_{\text{avg}})^2 + (I_5 - I_{\text{avg}})^2]^{1/2}. \end{cases} \quad (1)$$

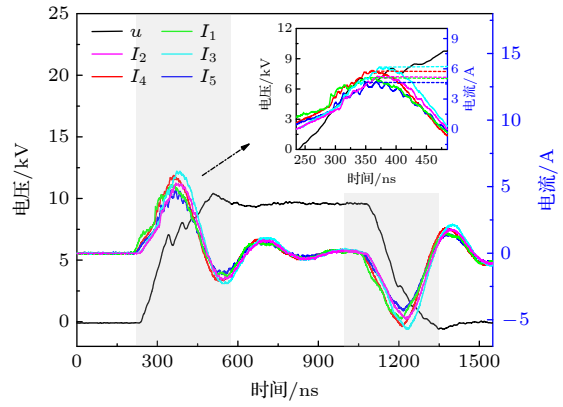


图 4 典型电压电流波形

Fig. 4. Typical voltage-current waveforms.

图 5(a), (b) 分别为在不同电压幅值和工作气体流速下的 I_{avg} 和 I_{sd} 变化规律. 如图 5(a) 所示, 当电压从 8 kV 增至 12 kV 时, 电流幅值均值从 3.8 A 升至 5.4 A, 增幅 42.1%, 说明增大电压幅值能够显著提高放电强度. 这是由于电压幅值增大提高了放电区域电场强度, 使得更多带电粒子加速

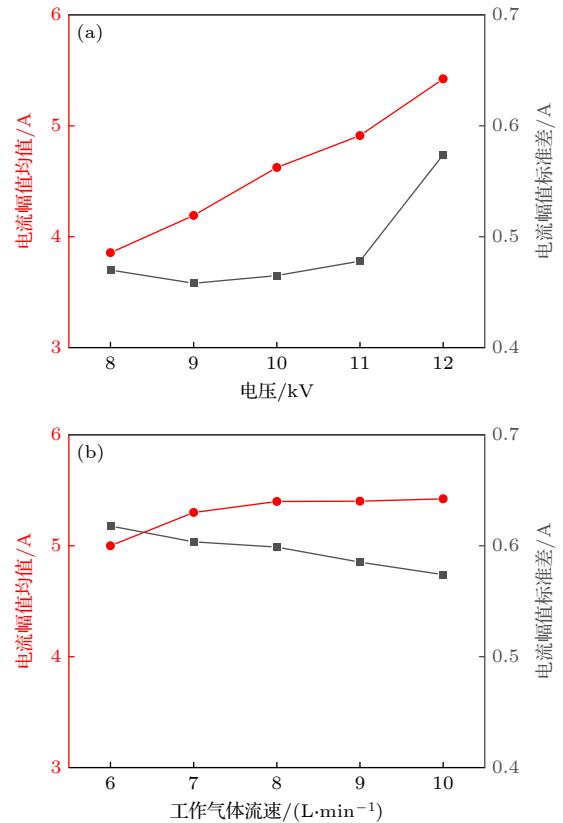


图 5 不同条件下的电流幅值均值和标准差 (a) 不同电压幅值; (b) 工作气体流速

Fig. 5. Mean value and standard deviation of current amplitude under various conditions: (a) Voltage amplitude; (b) gas flow rates.

迁移, 如 (2) 式所示 [32]:

$$u_d = \mu_e E, \quad (2)$$

其中, u_d 为漂移速度, μ_e 为带电粒子迁移率, E 为电场强度. 电流幅值更大, 放电强度更高. 然而, 电流幅值标准差随电压幅值升高呈上升趋势, 说明不同位置放电强度差异性增大, 这与放电均匀性的变化直接相关, 下文将结合放电图像结果进行解释分析. 如图 5(b) 所示, 当工作气体流速从 6 L/min 增至 10 L/min 时, 电流幅值均值增大 8.4%, 说明工作气体流速能够在一定程度上提高放电强度, 但效果并不显著.

4.2 放电图像

图 6 为电压幅值 12 kV、工作气体流速 10 L/min 条件下典型放电图像, 利用灰度值标准差 (GVSD) 对放电均匀性进行量化评价 [33]. 将捕获的图像转换为灰度矩阵, 通过边缘提取算法识别放电区域, 并提取该区域像素灰度值, 继而以该基准序列 x_n 的算术平均值 x_m 进行归一化处理, 计算过程如

(3) 式所示 [34]:

$$\bar{x}_n = \frac{x_n - x_m}{v}, \quad (3)$$

其中 \bar{x}_n 表示均值归一化灰度值, v 是方差, GVSD 为 \bar{x}_n 的微分标准差.

图 7(a), (b) 分别为在不同电压幅值和工作气体流速下的发光图像. 由图 7(a) 发现, 当电压幅值为 8 kV 时, 放电区域呈现蓝紫色, 两侧存在明显的弱放电区域, 放电区域的平均灰度值仅为 47.8. 随着电压幅值的增大, 弱放电区域逐渐消失, 放电发光亮度明显提升. 当电压幅值增至 12 kV 时, 平均灰度值相较于 8 kV 条件下提升了 1.7 倍, 这与电压幅值对放电强度的影响规律具有一致性. 与此同时, GVSD 值从 3.8 升至 6.2, 提升了 63.2%, 说明电压幅值增大会导致放电均匀性变差. 这是由于电压升高会促使电子雪崩过度发展, 引起电场畸变, 形成更强的流注放电, 导致局部区域放电通道逐渐变细且明亮, 而其他区域的放电强度相对减弱, 因此电极整体放电均匀性变差. 尽管如此, GVSD 仍仅为平均灰度值的 5.1%, 说明此时米量

位置	I	II	III	IV	V	100 mm
灰度均值	109.8	123.8	125.0	122.9	120.9	
平均灰度值: 120.5						GVSD: 6.2

图 6 典型放电的发光图像

Fig. 6. Luminescence image of typical discharge.

(a)	放电图像	平均灰度值	GVSD
8 kV	弱放电 100 mm ---- 放电边缘	47.8	3.8
9 kV	亮度增加	68.5	4.8
10 kV		93.5	4.9
11 kV		106.2	5.5
12 kV		122.9	6.2
(b)			
6 L/min		89.6	7.2
7 L/min		110.6	7.1
8 L/min		113.9	6.8
9 L/min		116.6	6.6
10 L/min		122.9	6.2

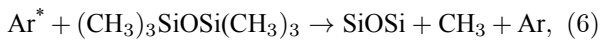
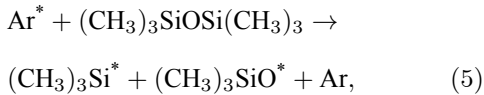
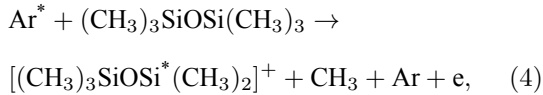
图 7 不同电压幅值和工作气体流速下的 DBD 放电图像

Fig. 7. Discharge images of DBD at different voltage amplitudes and gas flow rates.

级放电仍具有良好的均匀性^[34]. 由图 7(b) 发现, 当工作气体流速为 6 L/min 时, 放电区域的平均灰度值为 80.6. 随着工作气体流速的增大, GVSD 逐渐降低, 当工作气体流速从 6 L/min 增至 10 L/min, GVSD 下降了 13.9%, 这与图 5(b) 规律具有一致性, 说明提高工作气体流速有利于提高放电均匀性. 这是因为工作气体流速的增大能有效分散放电区域空间电荷团簇, 削弱放电区域内的电场畸变, 放电均匀性得到提升.

4.3 发射光谱

图 8 展示了电压幅值 12 kV、工作气体流速 10 L/min 条件下的米量级间接 DBD 发射光谱. 在外加电场产生的高能电子 (e) 与氩原子 (Ar) 发生碰撞, 形成不稳定的激发态氩原子 (Ar*). 随后, Ar* 通过光子返回基态或亚稳态 (Ar_m), 在光谱中产生 Ar 特征谱线 (4p → 4s). 同时, 少量渗入的环境空气中的 N₂ 也会进入放电区, 导致光谱中产生 N₂(C³Π_u → B³Π_g). 此外, HMDSO 添加后, 放电产生的高能自由电子、激发态 Ar 原子等活性粒子与 HMDSO 发生非弹性碰撞可以使 HMDSO 解离及电离反应, 在放电空间产生 Si(CH₃)₃, CH₃ 和 SiO 等分子碎片, 并形成更多的带电粒子, 从而促进放电的发展, 部分反应式如 (4) 式—(7) 式所示^[35–37]:



值得注意的是, 在光谱中未检测到 Si 的相关特征峰, 这是因为本研究电极为大尺度间接 DBD, 单位放电面积上的能量较低, 难以产生充足的含 Si 激发态粒子以满足光谱仪检测的最低阈值^[38]. 根据图 8 可知, 各测量位置光谱峰位没有变化, 但在电极两侧位置光谱略低于中间位置. 以 Ar(763.51 nm) 为例, 其在位置 III 的强度比位置 I 和 V 分别高 11.3% 和 4.0%, 这与流场以及电场分布有关. 图 9 为放电区域内不同位置的电场分布, 结合图 2 所示流场仿真结果可知, 中间侧的流场比两侧更均匀,

这保证了工作气体在中间区域的稳定分布, 为放电提供了更一致的环境; 同时, 中间侧的电场受到边缘效应的影响比两侧更小, 其场强分布更均匀且强度相对较高, 从而有效地促进电子加速并维持稳定的电子雪崩过程, 更有利于放电, 因此电极中间侧的电流幅值与光谱强度相应比两侧略高^[28].

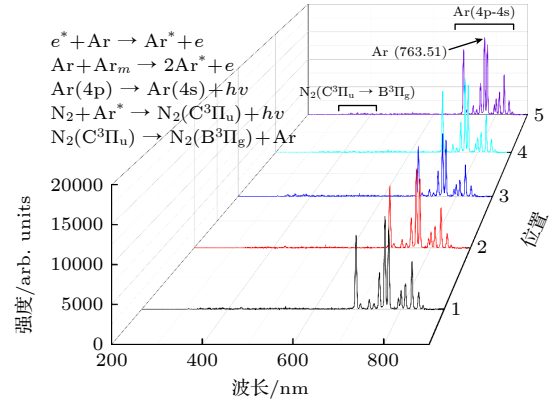


图 8 典型发射光谱

Fig. 8. Typical emission spectra.

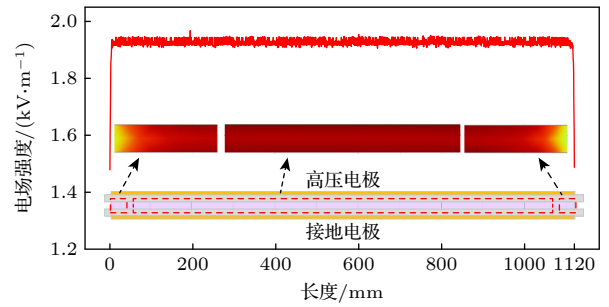


图 9 放电区域内电场分布

Fig. 9. Electric field in the discharge area.

图 10(a), (b) 分别为在不同电压幅值和工作气体流速下 Ar(763.51 nm) 强度的变化规律. 由图 10 可见, 不同位置的光谱强度变化幅度不大, 这表明不同位置的活性粒子差异较小. 随着电压幅值的增大, 光谱强度在不断提升, 当电压幅值增至 12 kV 时, 平均光谱强度从 3738 升至 11274, 上升幅度近 2 倍. 这主要是因为当电压幅值升高时, 放电空间内电场增强, 电子在自由程内获得的能量更多, 如 (8) 式所示^[32]:

$$\varepsilon_e \propto \frac{eE\lambda}{m_e}, \quad (8)$$

其中, E 为电场强度, ε_e 为电子平均能量, e 为电子电荷, λ 为自由程长度, m_e 为电子质量. 电子能量的提高进一步促进激发过程, 产生更多的激发态

粒子, 因此光谱强度增大. 由图 10(b) 发现, 随着工作气体流速的增大, 光谱强度不断提升. 当工作气体流速升至 10 L/min, Ar(763.51 nm) 平均强度提升了 26.3%, 说明增大气体流速能够提高等离子体中的粒子活性. 这是因为提升工作气体流速会增加单位时间内通过放电区的氩原子数量, 为碰撞电离提供更多反应物, 使活性粒子数目增加^[39,40]. 此外增大工作气体流速还会增强掺混效果, 有利于 HMDSO 媒质与工作气体均匀混合, 并促进激发态粒子的高效输运, 实现放电强度的提升^[41].

4.4 电极温度

图 11 为电压幅值为 12 kV、工作气体流速为 10 L/min 条件下持续放电 30 min 内电极上 4 个均匀分布点位的温度. 由图 11(c) 可见, 放电初期各测量点的温度保持在 30 °C 左右, 并且温度标准差仅为 0.3 °C. 当运行时间延长至 10 min 后, 虽然温度标准差增至 1.2 °C, 温度分布均匀性有所降

低, 但所有测量点温升稳定在 18 °C 左右, 并且电极温度趋于稳定. 当增至 30 min, 最高温度仍低于 50 °C. 本电极选用的氧化铝陶瓷介质具有高热稳定性, 其热变形温度大于 1500 °C. 根据电极温度测量结果可知, 长时间运行下电极温度仍远低于所选陶瓷介质材料的热变形温度^[42]. 因此, 在此温升范围内, 陶瓷介质不会发生热膨胀不均以及结构形变, 放电间隙得以保持恒定, 电场分布不受热扰动影响, 证明了该米量级 DBD 电极结构能够实现长期稳定运行.

为了比较不同条件下电极温度差异, 分别测量运行时间为 2 min 和 10 min 条件下电极不同位置的温度, 计算 4 个点位温度的均值以比较不同运行条件下的电极整体温度变化, 并以两个时刻温度标准差的变化评价电极运行稳定性. 图 12 为不同条件下电极温度及其标准差的差值变化规律. 由图 12(a) 可知, 当电压幅值从 8 kV 增至 12 kV, 运行 10 min 的电极温度从 32.4 °C 升至 47.5 °C,

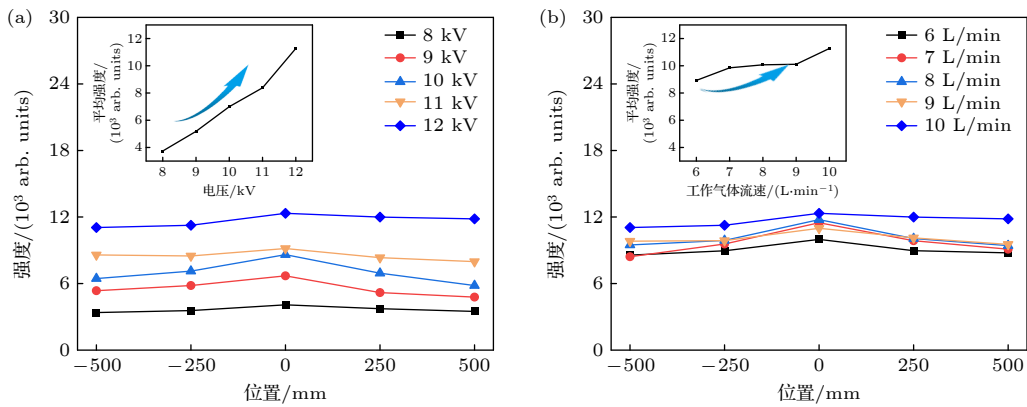


图 10 不同条件下的 Ar(763.51) 光谱强度 (a) 电压幅值; (b) 工作气体流速

Fig. 10. Ar(763.51) intensity under different conditions: (a) Voltage amplitude; (b) gas flow rate.

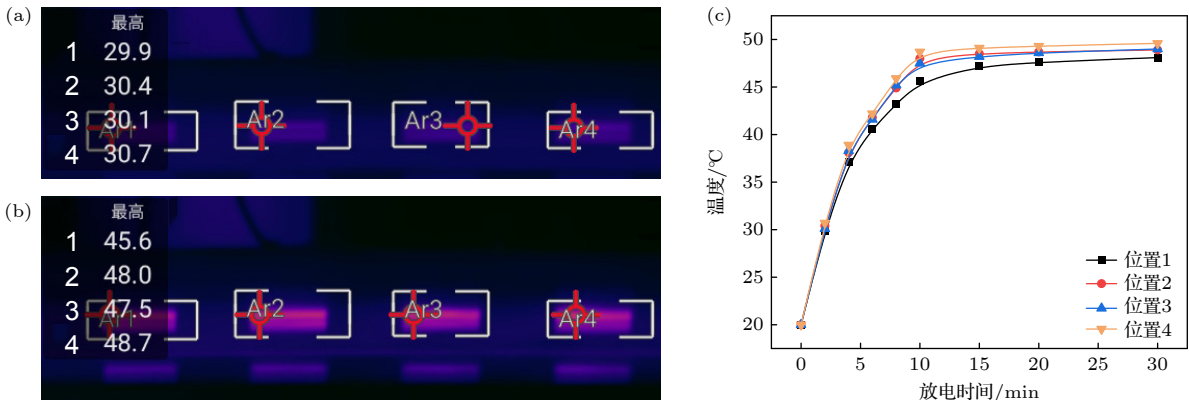


图 11 不同放电时间下不同位置的温度 (a) 2 min; (b) 10 min; (c) 温升曲线

Fig. 11. Temperatures at different positions for different discharge durations: (a) 2 min; (b) 10 min; (c) electrode temperature rise.

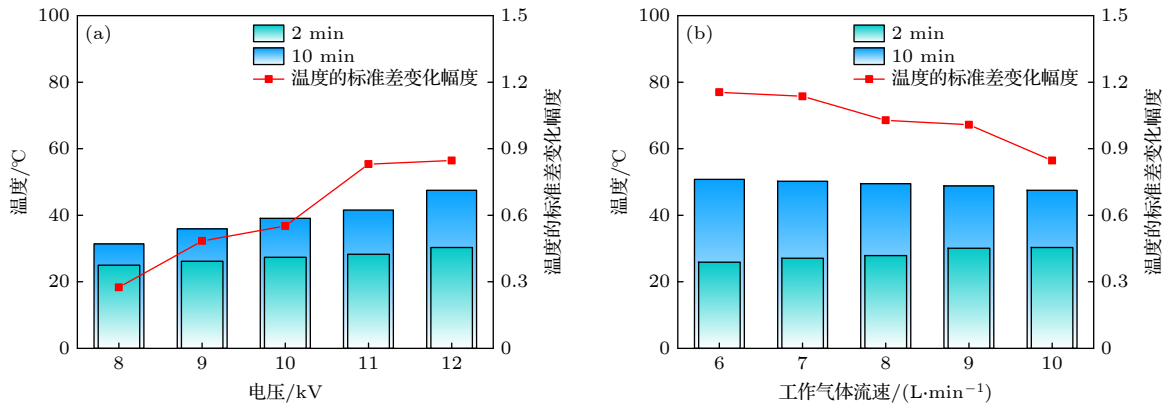


图 12 不同条件下电极温度 (a) 电压幅值; (b) 工作气体流速

Fig. 12. Electrode temperatures under different conditions: (a) Voltage amplitude; (b) gas flow rates.

提高了 46.6%, 电极温度的标准差变化幅度从 0.27 升至 0.85, 提高了 2.1 倍, 说明电压幅值的升高会降低电极运行稳定性. 结合图 5 可知, 电压幅值升高导致放电强度增大, 注入电极的功率使得电极温度升高, 降低电极的运行稳定性. 由图 12(b) 可知, 当工作气体流速从 6 L/min 增至 10 L/min 时, 运行 10 min 后的电极温度从 50.8 °C 降至 47.5 °C, 降低了 6.5%, 电极温度标准差降低 26.1%. 这是因为增大工作气体流速会加速电极散热, 电极温度随工作气体流速增大而降低. 此外结合图 7(b) 可知, 增大工作气体流速能提高放电均匀性, 不同位置处电极产生的热量差异减小, 电极温度分布更均匀.

5 改性效果

为验证本电极改性效果, 对大尺寸 EP 材料进行改性, 测量不同位置水接触角 (WCA) 结果如图 13 所示. 未处理 EP 表面 WCA 为 67°, 呈亲水性, 而在电压幅值 12 kV、工作气体流速 10 L/min 条件下, 改性后表面不同位置 WCA 均提高至 130° 以上, 达到显著的疏水改性效果. 图 13(b), (c) 分别给出了不同电压幅值和工作气体流速条件下等离子体改性对 EP 表面疏水性的影响规律. 当电压从 8 kV 增至 12 kV 时, WCA 均值由 101° 升至 144°, 但标准差由 1.7° 增大到 4.3°, 表明增大电压虽可提升改性效果却会导致均匀性下降, 这与放电特性诊断结果中增加电压能提高放电强度却会降低放电均匀性具有一致性. 结合图 5(a) 和图 7(a) 所示, 电压幅值增大显著提升放电强度, 更多的高能电子可作用于 HMDSO 碎片化, 进一步提高 Si—CH₃, Si—O 和 Si—O—Si 等

小分子碎片的比例, 促进了等离子体在材料表面引发的沉积聚合反应, 因此表面改性效果提高^[43,44]. 然而, 增大电压幅值会降低放电均匀性, 导致作用于材料表面的活性粒子 (如 Si—CH₃) 在空间上分布不均, 因此表面 WCA 差异性增大. 由图 13(c) 发现, 工作气体流速可协同优化改性效果与均匀性, 当气体流速从 6 L/min 增至 10 L/min 时, WCA 均值提升 26.5%, 同时标准差降低 18.9%. 流速增加带来的改性效果与放电规律相符合. 一方面, 流速的增大缩短了活性粒子在放电区域的驻留时间, 减小了非弹性碰撞损失, 增强了粒子活性, 改性效果随之增强. 另一方面, 更高的流速能更有效地抑制局部电场畸变, 改善放电均匀性, 从而提升改性效果在材料表面分布的均匀性. 为进一步量化放电特性与改性效果之间的关联, 建立 WCA 与电流幅值, WCA 标准差与 GVSD 的关系. 从图 13(d), (e) 可见, 随着电流幅值和 GVSD 的增加, WCA 和 WCA 标准差整体上均呈现上升趋势, 表明放电强度的提升能够增强疏水改性效果, 改善放电均匀性有利于实现均匀疏水改性. 值得注意的是, WCA 标准差与 GVSD 呈高度线性正相关 ($R^2 = 0.96$), 说明放电均匀性下降会直接导致改性均匀性变差.

6 结论

本文报道了一种新型米量级宽幅间接 DBD, 可产生均匀稳定的等离子体并实现大尺度材料改性. 设计了四级导流模块化气路, 并通过优化孔隙密度, 可提高放电区域及材料表面流场分布均匀性, 尤其在 8 细分 (40 孔均布) 条件下, 材料表面流速波动幅度降低了 2.9 倍. 通过分布式电学、

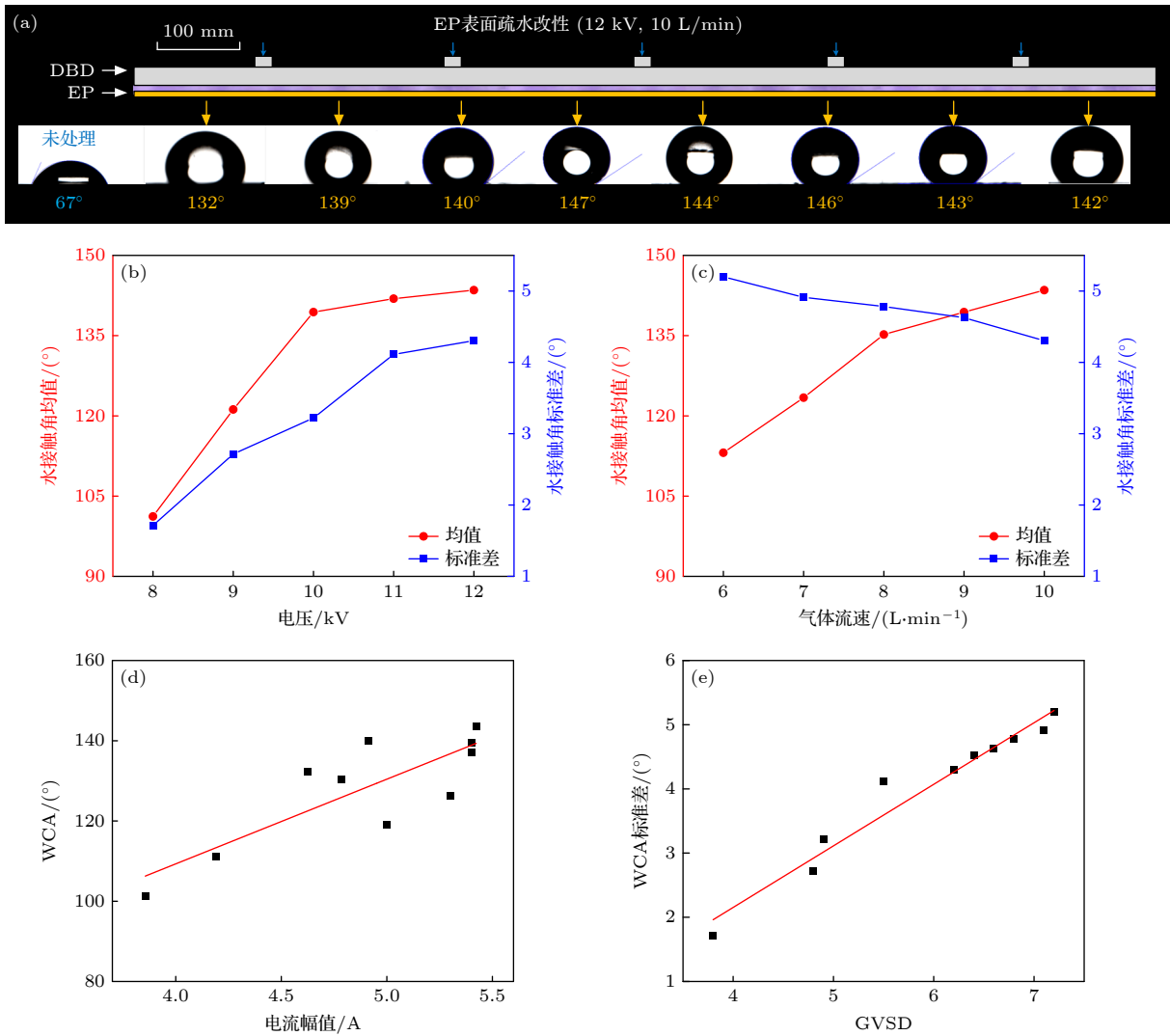


图 13 不同条件下改性后 WCA 变化 (a) 不同位置; (b) 不同电压幅值; (c) 不同工作气体流速; (d) WCA 与电流幅值; (e) WCA 标准差与 GVSD

Fig. 13. WCA under different conditions: (a) Different positions; (a) voltage amplitude; (b) gas flow rates; (d) WCA and current amplitude; (e) WCA standard deviation and GVSD.

光谱、温度测试及放电图像分析, 得到电压幅值和工作气体流速对粒子活性、放电均匀性和稳定性影响规律. 结果表明, 增大电压幅值和工作气体流速均能提高粒子活性, 且电压幅值效果更显著. 放电均匀性和稳定性随电压幅值升高而降低, 随工作气体流速增大而提高. 在电压幅值为 12 kV、工作气体流速为 10 L/min 条件下, GVSD 仍仅为平均灰度值的 5.1%, 电极运行 10 min 的温度标准差仅为 0.85 °C, 并且最高温度低于 50 °C, 证明了电极具有良好的放电均匀性和稳定性. 改性效果表明, 改性效果及其均匀性变化与放电特性具有一致性, 增大电压幅值能够提高改性效果, 但会降低其均匀性, 而提高工作气体流速能够同时提高改性效果及其均匀性.

参考文献

- [1] Jaiswal M, Srivastava B 2025 *Postharvest Biol. Technol.* **229** 113681
- [2] Wirth P, Oberste-Beulmann C, Nitsche T, Muhler M, Awakowicz P 2024 *Chem. Ing. Tech.* **96** 1237
- [3] Arora G, Hoffer P, Prukner V, Bílek P, Šimek M 2024 *Plasma Sources Sci. Technol.* **33** 025025
- [4] Xu Y, Wang Z L, Qin S C, Zhang Y, He T, Guo Y, Ding L, Zhang Y R, Yang W, Shi J J, Du C R, Zhang J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 099401 (in Chinese) [徐雨, 王超梁, 覃思成, 张宇, 何涛, 郭颖, 丁可, 张钰如, 杨唯, 石建军, 杜诚然, 张菁 2021 *物理学报* **70** 099401]
- [5] Yi T C, Sun C L, Dong J C, Han D D, Bao L, Wang Z W, Cai Y M, Zhang X 2025 *IEEE Electron. Device Lett.* **46** 757
- [6] Pernica R, Klima M, Fiala P 2024 *Meas. Sci. Rev.* **24** 215
- [7] Li X C, Chang Y Y, Liu R P, Zhao H H, Di C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 165205 (in Chinese) [李雪辰, 常媛媛, 刘润甫, 赵欢欢, 狄聪 2013 *物理学报* **62** 165205]
- [8] Sony F L, Li F, Zhu M D, Wang L, Gong H, Gan Y Q, Jin X

- 2017 *Plasma Sci. Technol.* **20** 014013
- [9] Motrescu I, Ciolan M A, Sugiyama K, Kawamura N, Nagatsu M 2018 *Plasma Sources Sci. T.* **27** 115005
- [10] Zhu X, Li F S, Guan X H, Xu J G, Cui X L, Huang J L, Liu F, Fang Z 2022 *Eur. Polym. J.* **181** 111656
- [11] Zeniou A, Puač N, Škoro N, Selaković N, Dimitrakellis P, Gogolides E, Petrović Z L 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 135204
- [12] Hasan M I, Walsh J L 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 134102
- [13] Rhouna S, Megriche A, Souidi E, Said S, Autret-Lambert C 2025 *J. Mater. Sci. Mater.* **36** 1
- [14] Wang H Q, Li W K, Zhang W Y, Wang B Q, Cha J W 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 078801 (in Chinese) [王江琼, 李维康, 张文业, 万宝全, 查俊伟 2024 物理学报 **73** 078801]
- [15] Resner L, Lesiak P, Taraghi I, Kochmanska A, Figiel P, Piesowicz E, Zenker M, Paszkiewicz S 2022 *Polymers.* **14** 3444
- [16] Peters F, Hünnekens B, Wieneke S, Militz H, Ohms G, Viöl W 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 475206
- [17] Han G X, Wu J C, Jia Y X, Wang X F, Jia P Y 2023 *J. Hebei Univ.* **43** 369 (in Chinese) [韩国新, 武珈存, 贾焯潇, 王雪芳, 贾鹏英 2023 河北大学学报 **43** 369]
- [18] Stancu E C, Ionita M D, Ionita E R, Teodorescu M, Radu M T, Dinescu G 2018 *Rom. J. Phys.* **63** 705
- [19] Kang W S, Kim H S, Hong S H 2010 *Thin Solid Films* **518** 6578
- [20] Portugal S, Choudhury B, Cardenas D 2022 *Front. Phys.* **10** 797
- [21] Liu K, Zuo J, Zhou X F, Ran C F, Yang M H, Geng W Q 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 055201 (in Chinese) [刘坤, 左杰, 周雄峰, 冉从福, 杨明昊, 耿文强 2023 物理学报 **72** 055201]
- [22] Tian S, Zhang H, Zhang X, Zhang X X, Li X C, Li Q, Ran J X 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 115202 (in Chinese) [田爽, 张寒, 张喜, 张雪雪, 李雪辰, 李庆, 冉俊霞 2025 物理学报 **74** 115202]
- [23] Zhang C, Huang B D, Luo Z B, Che X K, Yan P, Shao T 2019 *Plasma Sources Sci. Technol.* **28** 064001
- [24] Neretti G, Popoli A, Scaltriti S G, Cristofolini A 2022 *Electronics* **11** 1536
- [25] Alves L L, Bogaerts A, Guerra V, Turner M M 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 023002
- [26] Pourali N, Sarafraz M M, Hessel V, Rebrov E V 2021 *Phys. Plasmas* **28** 013502
- [27] Xu Z, Pillai K M 2016 *Numer. Heat Tr. A-Appl.* **70** 1213
- [28] Zhu X, Guan X H, Luo Z R, Wang L Y, Dai L Y, Wu Z X, Fang Z J, Cui X L, Akram X, Fang Z 2024 *J. Phys. D Appl. Phys.* **57** 275203
- [29] Zhang J L, Sun J, Wang D Z, Wang X G 2006 *Thin Solid Films* **506** 404
- [30] Zhang L L, Cui X, Liu F, Fang Z 2021 *Trans. China Electrotechn. Soc.* **36** 3135 (in Chinese) [张龙龙, 崔行磊, 刘峰, 方志 2021 电工技术学报 **36** 3135]
- [31] Chen Z C, Cheng Y, Lin C C, Li C S, Hsu C C, Chen J Z, Cheng I C 2019 *Appl. Surf. Sci.* **473** 468
- [32] Deng X T, Kong M G 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1709
- [33] Liu F, Chu H J, Zhuang Y, Fang Z, Zhou R W, Cullen P J, Ostrikov K K 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 033302
- [34] Zhou W H, Zhang D, Duan X, Zhu X, Liu F, Fang Z 2024 *Plasma Sci Technol.* **26** 094008
- [35] Chen S L, Wang S, Wang Y B, Guo B H, Li G Q, Chang Z S, Zhang G J 2017 *Appl. Surf. Sci.* **414** 107
- [36] Yambe K, Taka S, Ogura K 2014 *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.* **9** S13
- [37] Li J Z, Xu J G, Liu F, Fang Z 2022 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **50** 1823
- [38] Jin S B, Lee J S, Choi Y S, Choi I S, Han J G 2011 *Thin Solid Films* **519** 6334
- [39] Zhang X Y, Chen L, Guan T Y, Wang B H, Wang S A, Yang H Y, Song P 2024 *Phys. Scr.* **99** 025606
- [40] Uchida G, Nakajima A, Takenaka K, Koga K, Shiratani M, Setsuhara Y 2015 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** 4081
- [41] Shao X J, Zhang G J, Zhan J Y 2011 *High Volt. Eng.* **37** 1499 (in Chinese) [邵先军, 张冠军, 詹江杨, 李娅西, 张增辉, 彭兆裕 2011 高电压技术 **37** 1499]
- [42] Demirskyi D, Sepehri-Amin H, Vasylykiv O O 2025 *Int. J. Appl. Ceram. Tec.* **22** e14967.
- [43] Cui X L, Li L, Xu Z B, Zhu X, Akram S, Fang Z 2024 *J. Vac. Sci. Technol. A* **42** 043005
- [44] Liang F W, Luo H H, Zhuang W J, Liang Z D, Fan X H, Chen S, Sun Q Q 2025 *J. Phys. D Appl. Phys.* **58** 185501

SPECIAL TOPIC—Non-equilibrium transport and active control strategy in low-temperature plasmas

Generation and discharge characteristics of indirect dielectric barrier discharge with meter-scale width*

LI Long CUI Xinglei ZHU Xi FANG Zhi[†]

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

(Received 28 August 2025; revised manuscript received 16 September 2025)

Abstract

A meter-scale wide indirect dielectric barrier discharge (DBD) for treating large-scale and irregular-shaped materials is reported in this study. The structure of the modular-graded gas path is designed, and the influence of gas hole density on the flow field is simulated. It is confirmed that 8 subdividing (40 holes uniformly distributed) structure can effectively improve the uniformity of the gas flow rate distribution in the discharge area and on the treated material surface compared with 0 subdividing structure. Based on this structure, Ar is employed as the discharge gas and hexamethyldisilane as the precursor to generate meter-scale wide plasma under the excitation of a nanosecond pulsed power supply. Particle activity, discharge uniformity and stability under different operating parameters are evaluated by measuring voltage-current waveforms, emission spectra, luminescence images and temperatures at different electrode positions. The treatment effect and uniformity are verified by measuring the water contact angle (WCA) of epoxy (EP) material. The results show that a uniform and stable plasma with a width of 1120 mm is generated under suitable operating parameters. By increasing the voltage amplitude, both the discharge intensity and particle activity are improved, while the discharge uniformity and stability are significantly reduced. By increasing the discharge gas flow rate, the particle activity, discharge uniformity, and stability can be improved simultaneously but slightly. The WCA on the EP surface is uniformly increased from 67° to 144° with a variation of less than 6% after 10-min treatment at a voltage amplitude of 12 kV and a discharge gas flow rate of 10 L/min. The meter-scale wide indirect DBD electrode in this work can provide reference and basis for the industrial application of large-scale plasma material modification technology.

Keywords: meter-scale wide electrode, indirect dielectric barrier discharge, material modification, discharge characteristics, water contact angle

PACS: 52.80.-s, 52.40.Hf, 81.40.-z

DOI: [10.7498/aps.74.20251163](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251163)

CSTR: [32037.14.aps.74.20251163](https://www.cstr.org.cn/32037.14.aps.74.20251163)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52037004, 52377148).

[†] Corresponding author. E-mail: myfz@263.net

米量级宽幅间接介质阻挡放电等离子体产生及放电特性

李龙 崔行磊 祝曦 方志

Generation and discharge characteristics of indirect dielectric barrier discharge with meter-scale width

LI Long CUI Xinglei ZHU Xi FANG Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 235213 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251163

CSTR: 32037.14.aps.74.20251163

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251163>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

正弦交流电压驱动低气压CO₂放电特性的对比: DBD结构与裸电极结构

Comparative study on discharge characteristics of low pressure CO₂ driven by sinusoidal AC voltage: DBD and bare electrode structure

物理学报. 2022, 71(11): 115204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220086>

常压等离子体对柔性多孔材料表面处理均匀性的研究进展

Treatment uniformity of atmospheric pressure plasma on flexible and porous material surface: A critical review

物理学报. 2021, 70(9): 099401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210077>

双气隙下介质阻挡放电斑图的放电特性与参数诊断

Discharge characteristics and parameter diagnosis of dielectric barrier discharge patterns in double-gap configuration

物理学报. 2025, 74(11): 115202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250111>

霍尔推力器放电通道低频振荡特性及抑制方法

Characteristics and suppression methods of low-frequency oscillation in Hall thruster

物理学报. 2023, 72(17): 175201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230680>

条纹水电极介质阻挡放电中D_{2h}超点阵斑图

D_{2h} superlattice patterns in dielectric barrier discharge with striped water electrode

物理学报. 2025, 74(22): 225202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250985>

结合机器学习的大气压介质阻挡放电数值模拟研究

Numerical study of discharge characteristics of atmospheric dielectric barrier discharges by integrating machine learning

物理学报. 2022, 71(24): 245201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221555>