等离子体改性 PDMS 表面的电源工况分析

刘勇智¹,黄 舜²,范冰洁¹,马卫民³,王瑶东²

(1.空军工程大学航空工程学院,西安,710038; 2.空军工程大学研究生院, 西安,710038; 3.94354 部队,山东济宁 272000)

摘要 配电网线路因低温恶劣环境存在覆冰问题,对供电系统可靠性产生重大危害,使用疏水薄膜或涂层能 有效预防覆冰。高效低成本制备适配线路的疏水涂层是一个实用课题。利用 He(Ar)/CH₄/C₄F₈混合气 体,等离子体改性聚二甲基硅氧烷(PDMS)制备疏水表面,该表面可包裹线路外层提供疏水性能。研究放电 电压等级、放电极间距、放电时间和放电频率对等离子体改性制备疏水表面的影响。利用 COMSOL 软件分 析 PDMS 微通道电场强度分布,探究等离子体分布情况。基于仿真结果,设计实物实验,通过测量 PDMS 改 性表面接触角、粗糙度和表面形貌成分,以及拍摄气体放电图像,验证与分析了各因素作用机理。最后,选择 合适工况成功制备符合预期的 PDMS 疏水表面,并测试其具有良好稳定性。

关键词 供电网覆冰问题;PDMS;疏水性表面;等离子体改性;场强分布

DOI 10. 3969/j. issn. 1009-3516. 2022. 02. 011

中图分类号 TM89 文献标志码 A 文章编号 1009-3516(2022)01-0068-09

Analysis of Power Supply Conditions on Plasma-Modified Polydimethylsiloxane Surface

LIU Yongzhi¹, HUANG Shun², FAN Bingjie¹, MA Weimin³, WANG Yaodong²

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Graduate School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

3. Unit 94354, Jining, Shandong 272000, China)

Abstract Due to low temperature and harsh environment, there is ice coating problem in distribution network lines, which has great harm to the reliability of power supply system. Hydrophobic film or coating can be used to effectively prevent the ice coating problem. Preparation of hydrophobic coatings for adaptive circuits with high efficiency and low cost is a practical subject. A hydrophobic surface was prepared by plasma modification of polydimethylsiloxane (PDMS) with mixed gas of $He(Ar)/CH_4/C_4F_8$. The surface can cover the outer layer of the circuit to provide hydrophobic properties. The effects of discharge voltage level, distance between discharge electrodes, discharge time and discharge frequency on the preparation of hydrophobic surface modified by plasma were studied. COMSOL software was used to analyze the electric field intensity distribution of PDMS microchannel and explore the distribution of plasma. Based on the simulation results, physical experiments were designed to verify and analyze the mechanism of each factor

收稿日期: 2021-12-23

作者简介:刘勇智(1972-),男,湖南娄底人,教授,研究方向为航空电气设备及其自动化。E-mail:619939137@qq.com

引用格式: 刘勇智,黄舜,范冰洁,等:等离子体改性 PDMS 表面的电源工况分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(2): 68-76. LIU Yongzhi, HUANG Shun, FAN Bingjie, et al. Analysis of Power Supply Conditions on Plasma-Modified Polydimethylsiloxane Surface[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(2): 68-76.

by measuring the contact angle, roughness and surface topography of PDMS modified surface and taking gas discharge images. Finally, suitable conditions were selected to successfully prepare the PDMS hydrophobic surface in line with expectations, and its good stability was tested.

Key words icing problem of power supply network; PDMS; hydrophobic surface; plasma modification; the field intensity distribution

电源系统和输配电系统组成供电系统,电源系统依赖于发电机硬件,输配电系统依赖于配电线路。由于跨区域输配电导致环境温度跨度大,配电线路经常遭受低温和冻雨,导线表面产生大量覆冰,严重危害线路运行,甚至使线路断裂。传统主动除冰法如热力融冰和机械除冰等,需花费大量人力物力。而疏水涂层在配电网建设之前便可包裹至线路表面,维护成本低、易于推广,并且防护机理研究趋于成熟^[1]。

聚二甲基硅氧烷(PDMS)除透气性良好、耐高 低温(-60~200℃)、化学稳定和耐腐蚀之外,自身 呈现疏水性,利于等离子体改性。Qing等利用高目 数砂纸模板制备氟化硅胶薄膜,模板法制备操作简 单、模板种类多以及可大面积应用,但模板造价昂贵 且模板分离易破坏改性表面^[2];Yang等硅烷化激光 刻蚀过的硅片得到疏水表面,激光蚀刻制备均匀度 高和稳定性好,能处理软硬材质表面,但蚀刻成本 高、处理时间长,难于大规模生产^[3];Zhang等在 80 ℃采用盐酸和全氟辛酸蚀刻制备出超疏水铝表面, 化学蚀刻成本低、可控性好,但会破坏基底本身强度 以及蚀刻试剂会破坏环境^[4]。

大气压射流等离子体改性技术 (atmospheric pressure plasma jet, APPJ)是一种高效、操作灵活、 便捷、成本低廉、绿色的表面处理技术。在保护环境 以及复杂材料表面处理等领域被大量研究和使用。 其中疏水性方向, Zhang 等在常压下利用介质阻挡 放电产生等离子体改善高温硫化硅橡胶(HTV) 憎 水性[5]。吴淑群等通过激光诱导荧光法研究常压等 离子体射流中各自由基的粒子密度对改性影响[6]。 郝艳捧等证明电流脉冲发光特性在三脉冲 APPJ 放 电起始阶段具有辉光放电结构^[7]。现阶段, APPJ 的研究主要集中于放电气体种类和配比特性以及气 体放电特性方面,针对电源参数影响 APPJ 的研究, 如放电电压、放电时间较少。研究电源工况的影响 规律不仅对研究制备 PDMS 疏水性表面和 APPJ 的 控制以及制备设备长期高效运行具有指导作用,而且 大规模制备时有利于保障电力企业生产安全[8]。

本文以氦气(He)或者氩气(Ar)混合甲烷 (CH₄)和八氟环丁烷(C₄F₈)气体作为放电气体,通 过改变放电电压等级、放电电极极间距离、放电时间

1 等离子体改性 PDMS 表面作用机理

1.1 等离子体改性类型

等离子体处理表面是通过改变表面物理结构和 化学组成来改善样品疏水性,主要包括蚀刻、聚合和 接枝聚合3种机理。

蚀刻处理主要分为物理蚀刻和化学蚀刻。前者 因为等离子体喷射时具有较大初动能,通过撞击物 体表面使表面分子发生逃逸,起到蚀刻作用。后者 通过气体被电离成活性离子态与材料表面发生反 应,从而改变表面形态和性质。本实验中由 C₄F₈气 体电离产生的含氟离子具有一定腐蚀。

聚合则是借用气体放电,使反应材料解离或者 激发形成电子、离子和自由基等活性物。活性态反 应物之间相互聚合并在改性表面沉淀,形成改性膜。 聚合反应单体选择范围广泛,但是聚合成的改性膜 性能参差不齐,对反应物配方要求高。接枝聚合与 聚合机理类似,但聚合对象由反应材料本身演变成 样品表面和反应材料两者之间。在等离子体改性期 间,化学稳定性能差的样品会产生活性基团,与气体 放电产生的活性等离子体聚合,形成改性膜。接枝 聚合具有反应简单、成功率高以及单体选择广等优 点。PDMS 具有良好的化学稳定和初级疏水性,不 适于聚合和接枝聚合。

1.2 PDMS 表面疏水性形成

水滴在荷叶上会自然圆润滑落,疏水表面正是 仿照荷叶表面研制的。形成疏水表面有2个关键因 素,一是样品表面低自由能,无法让附着物有效黏 附,二是表面具有微/纳米级粗糙结构。等离子体 改性制备 PDMS 疏水表面,一方面通过射流喷射 等离子体碰撞样品表面,吸收样品表面能,导致表 面吸附能力变弱,从而改变疏水性,另一方面通过 等离子体蚀刻作用改变表面粗糙结构,形成更强 的疏水性。

$$\begin{cases} \cos\theta = R_{\rm f} \frac{\kappa_{\rm S} - \kappa_{\rm LS}}{\kappa_{\rm LG}} \\ R_{\rm f} = \frac{\Lambda_{\rm SL}}{\Lambda_{\rm F}} \end{cases}$$
(1)

式中: $R_{\rm f}$ 为表面粗糙度; $\kappa_{\rm s}$ 、 $\kappa_{\rm Ls}$ 和 $\kappa_{\rm LG}$ 分别为固体/气体、固体/液体和液体/气体交界面的表面自由能; $\Lambda_{\rm SL}$ 为真实表面积; $\Lambda_{\rm F}$ 为表观表面积。

Wenzel 基于杨氏方程提出 Wenzel 预测模型^[9],见图 1。该模型进一步揭示了样品表面性质与液体接触角之间的关系。假设任意样品的粗糙表面是化学组分均一的,Wenzel 认为粗糙表面增大了固/液实际接触面积,从而改变了样品表面性能,其关系如式(1)所示。研究表明,随着 R_f 增大,疏水表面愈加疏水,而亲水表面愈加亲水。等离子体改性通过蚀刻作用优化表面粗糙程度,制备 PDMS 疏水性表面。



2 电场仿真

通过 COMSOL 软件的静电模块模拟实际等离子 体改性时 PDMS 微通道电场分布,获得实验电源工况 参考值。图 2 为 PDMS 基底尺寸。通过 COMSOL 仿 真,观察通入气体后的 PDMS 基底电场分布。据研 究证明,等离子体浓度(疏水等离子体)与疏水性成 正相关,浓度越高的区域疏水性越强^[10]。用电场强 度表征等离子体整体浓度,推测疏水效果。本次仿 真包括电压等级和放电极间距两部分仿真。



图 2 PDMS基底微通道尺寸

图 3 为电压等级电场分布,随着电压等级增大, 分布图颜色从柠檬黄变至橘红。由标尺知,等离子 体浓度随着电压等级增大逐步上升,即电压等级越 高,气体放电程度越高,符合放电一般理论,且电压 超过 15 kV,等离子体浓度趋于饱和。



图 3 放电电压等级仿真电场

图 4 为极间距离电场分布图,随着极间距增大, 分布图颜色从橘红变至橙黄。由标尺知,等离子体 浓度随着极间距增大而逐步下降,且当极间距过大 之后,变化趋势减缓,最后趋近平缓。随着极间距增 大,放电区域体积变大,中心点等离子体浓度下降, 呈现出中心点电压下降现象。图 5 为放电电压和极 间距与仿真电场中心点电压趋势图。基于趋势图,选 定高压脉冲电源(NPG-18/3500)为气体放电电源。



图 5 放电电压和极间距离与仿真电场中心点电压曲线图

3 实验与结果分析

3.1 实验装置及测量

APPJ 实验装置如图 6 所示,使用双环电极共

轴结构;选用石英玻璃射流管,长 250 mm,内径 4 mm,厚 1 mm;电极由 2 个铜金属带组成,带宽 10 mm,厚 1 mm,高低压电极间距 12 mm;混合气 体采用质量流量计(MKS PR400B)控制进气速度, 完成气体混合;采用高压脉冲电源(NPG-18/3500), 峰值电压 40 kV,最高频率 4 kHz;脉冲上升沿、脉 宽均不可调,可被外触发,可输出触发信号,延迟约 700 ns。



测量方法分为5部分:①用滴管在 PDMS 改性 表面滴加2μL去离子水,采用数码相机尼康J3微 距拍摄水滴后,用 VISIO 软件测量表面接触角,考 虑测量误差,随机取样品表面五处,进行接触角测 量,计算其均值;②使用数码相机尼康J3拍摄放电 图像,感光度ISO:6400,曝光时间0.0008s;③采 用 Solver-P47型原子力显微镜(AFM)表征表面形 貌;④采用手持表面粗糙度测量仪 TR200测量改性 表面粗糙度 Ra,取样长度1mm,评定长度5mm,测 15次取其均值;⑤采用 AvaSpec-ULS2048光纤光 谱仪测定放电光谱,并对光谱数据进行标准化处理。

3.2 实验材料

市售 PDMS 基底,等离子体改性前在丙酮中浸洗 15 min 后,去离子水冲洗 15 min,真空烘箱中常温条件下烘干 20 min 待用。

混合气体由 He 或 Ar 混合 CH₄和 C₄F₈组成。 在前期对气体种类、气体比例、射流管喷射方向的实 验基础上,选择 5.5%的 C₄F₈/CH₄/Ar 混合气体, 射流管竖直放置。

He和Ar分别以不同配比和C₄F₈进行组合进 行实验时,C₄F₈提供蚀刻基团F和疏水性官能团 CF_x起到疏水作用,He、Ar和CH₄是辅助气体。当 C₄F₈占比超过5.8%时,混合气体放电效果都会减 弱甚至不放电,导致改性表面接触角无明显变化且 基本接近未处理 PDMS 表面。亲水基团 He和Ar 空军工程大学学报(自然科学版)

在疏水改性中为 C₄ F₈ 这类功能性基团气体提供易 放电环境。此外,C₄ F₈ 作用效果存在阙值,过量无 法起到更好改性作用。

3.3 实验结果及分析

图 7 为 PDMS 表面在不同电压等级下等离子 体改性过后的 AFM 图像。测其表面粗糙度分别为 1.01 µm、3.78 µm、4.81 µm 和 6.44 µm,接触角分 别为 93.4°、133.1°、142.4°和 159.7°。从图 7(a)可 以看出未处理的 PDMS 表面已初步具有粗糙结构, 从而自身呈现出一定的疏水性。由图 7(b)、(c)、 (d)知,随着电压等级提升,表面颗粒从小逐渐变 大,表面粗糙度和接触角也对应增大。AFM 图像 表明改变放电电压等级,能有效优化表面形貌,使样 品表面呈现出疏水性。



同样,改变放电频率、时间和极间距离也能有效 改性。为进一步探究电源工况对表面改性的机理, 以表面粗糙度作为表面形貌的特征参数,接触角作 为疏水性的特征参数,分析不同电源参数下电离 C₄ F₈气体各主要碳氟基团的产生含量。通过实验规 律,确定等离子体改性 PDMS 表面的最佳电源 工况。

结合电场仿真,在大量实验基础上,选择基准实 验条件:电压 15 kV、极间距离 3.8 cm、放电时间 3 min 和放电频率 2.5 kHz。因实验情况单一会导致 电源工况与接触角关系不明显,所以在电源影响因 素下,增加不同气体种类和不同配比两类对照组。 因不同配比混合气体条件下,电源参数只影响接触 角终值,不改变化趋势,选取 5.5%配比的Ar/C₄F₈ 混合气体测取表面粗糙度和碳氟基团相对含量。

图 8 为 5.5% 配比的 Ar/C₄ F₈ 混合气体放电图 像,图 9 为 5.5% 配比的 He/C₄ F₈ 混合气体放电图 像,从左至右,电压等级分别为 9、15、20 kV。



图 9 电压等级放电图像(He/C₄F₈)

图 10 为电压等级与接触角关系,接触角随电压 等级增大而增大。在未达到接触角最大值时,接触 角大幅度变化,在接触角抵达155°附近时,接触角 无明显变化。实验证明电压能增强等离子体改性, 但当进入超疏水性(接触角大于150°,滚动角小于 10°)[11]阶段时,电压影响作用受限。依据仿真结 果,假如电压无限大,接触角应接近180°,但实际呈 现出接触角到达一定程度不再增加,甚至有回落趋 势。表明接触角存在极限值,该结果存在多方面原 因:第一,疏水作用主要来自混合气体中电离出来的 含氟官能团,氟基改性效果有限,电压等级只能起到 量变,而无法导致质变;第二,混合气体在射流管中 被电离,功能性 C_4F_8 气体主要电离方程式如表 1 中 的化学式①,随着电离程度增加,会发生其他多重分 $_{\rm IRD}$ 解反应^[12]。C₄F₈气体放电产生的等离子体中,主要 有 3 种碳氟基团 F_x CF 和 CF₂,其中 F 基团起到蚀 刻作用,副产物氟类化合物沉积于改性表面。气体 放电过程中疏水性气体电离程度有限,即无穷大电

压无法增加射流中的含氟官能团浓度。

电离方程式	能量变化/eV
① $C_4 F_8 + e \rightarrow C_3 F_5^+ + CF_2 + F + 2e$	$\Delta H = 18.0$
	$\Delta H = 9.0$
(3) $C_4 F_8 + e \rightarrow 2C_2 F_4 + e$	$\Delta H = 2.4$
$ (\underline{4}) C_2 F_4 + e \rightarrow 2 C F_2 + e $	$\Delta H = 3.1$
(5) $C_4 F_8 + e \rightarrow F^- + C_4 F_7$	$\Delta H = 3.0$
(6) $C_4 F_7 + e \rightarrow C_2 F_4 + C_2 F_3 + e$	$\Delta H = 2.4$



图 11 为不同电压等级下,表面粗糙度和碳氟基 团含量变化趋势。随着电压增大,F含量和表面粗 糙度逐渐增大直至稳定,CF含量缓慢增大,而 CF₂ 含量先增大再减小,疏水性持续增强。从图 11 和电 离方程式知,电压增大使 C₄ F₈ 电离度增大,并使 CF₂进一步分解成F,但电压 15 kV 之后,各产物无 法进一步分解,维持在相对稳定含量。实验表明等 离子体中F含量决定了改性表面接触角终值,但产 生F反应程度有限。从功率角度来看,当功率过大 时,一方面,基底表面会遭到破坏。另一方面,单 位时间流过气体中 C₄ F₈含量是一定的,外界输入 能量大于单体所需能量,多余能量无法被充分 利用。



图 11 电压等级与粗糙度和辐射强度曲线图

图 12 为放电频率与接触角关系,接触角随频率 增大而增大,有较强线性关系。图 13 为不同频率 下,表面粗糙度和碳氟基团含量变化趋势,随着频率 增大,F含量和表明粗糙度逐渐增大至稳定,CF含 量先缓慢减小再增大至稳定,CF₂含量先减小再增 大,疏水性能持续增强。实验表明,频率升高接触角 增大,2.5 kHz之后,接触角无明显变化,达到阙值。 在放电方面,频率未改变气体放电颜色,但是改变了 放电气体速率,实际观察到气体放电在高频时更剧 烈,增大频率先是加速了副反应,消耗 CF₂得到 F, CF₂短暂下降后,频率继续增大使主反应更活跃, CF₂逐渐增大,而 F 含量持续增加。同时,增大频 率即增大功率,使碳氟基团具有较大初始能量。 该能量一部分为撞击 PDMS 表面起到推进作用, 另一部分使等离子体具有更强的化学活性,更利 于电离。



图 13 放电频率与粗糙度和辐射强度曲线图

图 14 为 5.5% 配比的 Ar/C₄ F₈ 混合气体放电 图像,图 15 为 5.5% 配比的 He/C₄ F₈ 混合气体放电 图像,从左至右,极间距分别为 3.2、3.8、4.4 cm。



图 16 为极间距与接触角关系,接触角随极间距 先增大后减小,在3.8 cm 附近达到最大接触角。图 17 为不同极间距下,表面粗糙度和碳氟基团含量变 化趋势,随着极间距增大,F含量和表明粗糙度先增 大再减小,变化幅度大,CF和CF。含量先增大再减 小,变化幅度小,疏水性能先增强后减弱。通过仿真 知极间距越短,电场分布越好。但实际中,因混合气 体流速和射频管体积有限,当极间距过小时,难以及 时有效建立放电电场,混合气体无法充分电离,致使 碳氟基团含量低,良好的电场分布无法弥补电离不 彻底,故接触角偏小。在极间距 3.8 cm 之前,电离 度随极间距增大逐渐增大,蚀刻效果增强,疏水性增 强。当极间距过大时,放电气体失去良好放电环境, C_4F_8 电离主反应大幅减弱,F基团含量过低。同时, 较大极间距导致射流喷射效果变差,即喷射距离长 消耗能量多,所以接触角逐渐减小。







3 min 前,粗糙度和F含量与疏水性成正相关, 但当材料表面粗糙度超过临界值(Ra=6.44 μm), 疏水性与粗糙度和F含量呈负相关。依据Wenzel 预测模型,粗糙度增加会增大接触角,但实际粗糙度 在持续增加,但疏水性能反而减小。当放电2 min 时,粗糙度 Ra 为 5.01 μm,改性表面逐渐形成荷叶 般的微/纳粗糙结构,呈现出超疏水性,并在 3 min 达到最佳。超出临界值后,表面微/纳粗糙结构被破 坏,呈现出宏观的粗糙结构,改性表面沟壑能够容纳 液滴,如图 20 所示,微观粗糙度优势降低,接触角随 着时长增加而大幅减小。综上,放电时间需要综合



3.4 疏水性表面制备

考虑,3 min 左右为最佳时间。

制备疏水表面需要考虑多种变量,协调变量之间的影响。通过实验探究和仿真,最终选择放电时间3 min,放电频率 2.5 kHz,极间距 3.8 cm,使用 5.5% 配比的 Ar/ CH₄/C₄ F₈ 时能得到目前最佳接触角 PDMS 基底。图 21 为改性前后 PDMS 表面水 滴图,表面初始接触角 90.2°,经等离子体改性达到,如图 22 所示。





图 22 PDMS 基底表面水滴接触角测量

国内输配电线路多为钢芯铝绞线、铝合金钢芯 绞线,单根导线外径从 10 mm 到 70 mm 不等。选 择直径分别为 25 mm 和 60 mm,测试 PDMS 改性 表面在不同弯曲应力作用下的疏水性能。图 23 (a)、(b)、(c)、(d)为 60 mm 直径下动态滴落过程, 模拟实际中雨水与配电线路接触,从图知,液滴碰撞 改性表面后迅速弹开,未发生黏附。图 23(e)为 25 mm 直径下水滴与改性表面接触示意图。图 23 表 明弯曲状态下改性表面依旧具有良好疏水性能,弯 曲应力影响较小。



图 23 PDMS 基底曲面测试

4 PDMS 疏水表面稳定性测试

配电网线路工作环境恶劣,所制改性表面应该 具有良好的稳定性。根据线路实际工作环境,以图 23 中样品为基准改性表面,设计如下测试。

4.1 储存性能测试

将所制备样品均分为4份,常态环境静置,在不同时段进行表面接触角测量,如图24中A所示。 改性表面接触角先减小再趋于稳定。因为样品制备 成功初期稳定性较差,接触角呈现出最大值,随着静 置时间增长,样品表面性能稳定,该测试表明稳定的 样品依旧表现出良好的疏水性能。



4.2 耐磨性能测试

安装输配电线路,需要不断移动,期间会产生表 面磨损。为测试样品表面耐磨性能,利用砂纸(600 目)均匀摩擦表面。改性表面水滴接触角与砂纸摩 擦次数关系如图 24 中 B 所示。从图 24 知,样品表 面接触角随着摩擦次数增加而减小,但是变化幅度 较小,疏水性能未遭到严重破坏。测试表明所制备 样品表面具有良好耐磨性能。

4.3 耐低温性能测试

线路覆冰取决于湿度和温度两个影响因素,所以 为测试实际冰冻环境下改性表面的疏水性能。将样 品改性表面均分为4份并标号,放置于-20℃相对 干燥环境中24h,取出后测量改性表面接触角,如图 25所示。样品表面接触角发生小幅度变化,测试表明 所制备样品表面能够适应低温环境,起到疏水作用。



4.4 耐酸碱性能测试

线路实际铺设时,会遇到酸雨、碱液腐蚀,破坏 线路表面结构,使涂层疏水性能下降。因此对改性 表面进行耐酸碱性能测试,将样品改性表面均分为 7份,分别浸泡在不同 pH 值(4、5、6、7、8、9、10)的 水溶液中 48 h。取出后冲洗干净并烘干,测量改性 表面水滴接触角,结果如图 26 所示。

从图 26 知,在弱酸和弱碱时,接触角变化小,主 要因为改性表面存在的氟化物具有一定耐酸碱性以 及微观结构能减缓酸碱物质侵入。但酸碱性过大 时,会使接触角大幅减小,腐蚀性溶液会破坏改性表 面微观结构,使其失去原有功能。这表明所制备样 品表面只具备一定耐酸碱稳定性,还需进一步优化。



5 结论

1)疏水性表面能够有效解决配电网覆冰问题, 尤其是当接触角超过 150°。通过 Ar/CH₄/C₄F₈混 合气体放电得到等离子体,对 PDMS 基底表面改 性,制备了 151.3°的疏水性表面,具有良好稳定性。 等离子体改性技术相较于其他制备技术,有高效低 成本绿色等优势。

2)电源工况通过促进 C₄ F₈ 气体电离过程,改变 电离产物碳氟基团含量,增强表面疏水性。通过放电 光谱和形貌分析,发现等离子体改性制备疏水表面是 利用碳氟基团的蚀刻作用,对 PDMS 表面进行结构优 化,使其具有二元微/纳粗糙结构,形成疏水性。

3)在制备过程中,探究了电源工况对等离子体 改性的影响规律。疏水性能随电压和频率的增大而 增大,直至疏水性能阙值。疏水性能随时间和极间 距先增大后减小,并且两者对疏水性能影响程度有 限。疏水性能随表面粗糙度先增大后减小,疏水性表 面需要微观层次的粗糙结构,宏观粗糙结构会削弱疏 水性能。同时,针对不同气体种类和不同气体配比, 电源工况有类似的影响规律。该实验规律为后续研 制适配气体放电的电源提供了一定理论基础。

参考文献

- [1] 李超逸,宋世杰.配电网线路防结冰涂层构筑及其性能 评价[J].中国表面工程,2021,34(3):66-74.
- [2] QING Y, LONG C, AN K, et al. Sandpaper as Template for a Robust Superhydrophobic Surface with Self-Cleaning and Anti-Snow/Icing Performances[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 548:224-232.
- [3] YANG C, WANG F. Fabrication of Controllable Wettability of Crystalline Silicon Surfaces by Laser Surface Texturing and Silanization [J]. Applied Surface Science, 2019, 497: 1-8.
- [4] ZHANG X,ZHAO J,MO J, et al. Fabrication of Superhydrophobic Aluminum Surface by Droplet Etching and Chemical Modification[J]. Colloids & Surfaces a Physico-

chemical & Engineering Aspects, 2019, 567: 205-212.

- [5] ZHANG R, HAN Q, XIA Y, et al. Plasma Jet Array Treatment to Improve the Hydrophobicity of Contaminated HTV Silicone Rubber [J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(10): 79-86.
- [6] 吴淑群,董熙,裴学凯,等.基于激光诱导荧光法诊断大 气压低温等离子体射流中 OH 自由基和 O 原子的时 空分布[J].电工技术学报,2017,32(8):82-94.
- [7] 郝艳捧,刘耀阁.大气压氦气介质阻挡多脉冲辉光放电的光学演化过程[J].高电压技术,2012,38(1):188-193.
- [8] 李栖楠.电源频率对大气压氦气射流等离子体放电特性的影响[J].中国安全生产科学技术,2021,17(9): 145-149.
- [9] 李欣义.基于激光烧蚀法制备超疏水金属表面及其性 能研究[D].长春:吉林大学,2021:12-24.
- [10] DIMITRAKELLIS P, GOGOLIDES E . Hydrophobic and Superhydrophobic Surfaces Fabricated Using Atmospheric Pressure Cold Plasma Technology: A Review [J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2018,254:1-9.
- [11] ZHANG B, DUAN J, HUANG Y, et al. Double Layered Superhydrophobic PDMS-Candle Soot Coating with Durable Corrosion Resistance and Thermal-mechanical Robustness [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020,71(12): 1-11.
- [12] 黄宏伟. C₂F₆、C₄F₈ 双频电容耦合等离子体特性研究 [D]. 苏州:苏州大学,2010:23-37.
- [13] LIU Y B,GU H M, JIA Y, et al. Design and Preparation of Biomimetic Polydimethylsiloxane (PDMS) Films with Superhydrophobic, Self-Healing and Drag Reduction Properties via Replication of Shark Skin and SI-ATRP [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356:318-328.
- [14] 孙洁,武晖.常压射流等离子体处理 PET 膜诱导自由 基研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2015,16 (4):88-91.
- [15] XU P Y, PERSHIN L, MOSTAGHIMI J, et al. Efficient One-Step Fabrication of Ceramic Superhydrophobic Coatings by Solution Precursor Plasma Spray[J]. Materials Letters, 2017, 211, 24-27.
- [16] 高淑蓉,金佳鑫,魏博建,等.液滴撞击疏水/超疏水表 面防结冰技术研究进展及未来展望[J].化工学报, 2021,72(8):12-19.
- [17] QI Y H, ZHENG J P. An Azo-PDMS-Based Wearable UV Sensor with the Optimized Photo Response Mode for Dual Sensing and Synchronous Detection[J]. Science China Technological Sciences, 2022(1):179-190.
- [18] 刘磊.用于气体放电的多路组合开关电源研究[D].西 安:西安石油大学,2020:46-52.

(编辑:姚树峰)