第 52 卷 第 5 期：2282-2290 高电压技术 Vol.52, No.5: 2282-2290
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250378

基于油水相分离的多孔环氧树脂制备及闪络强度提升机理

任杰睿，朱明晓，徐学凯，刘　睿，罗禄洋，石　博
（中国石油大学(华东)新能源学院，青岛 266580）

摘　要：沿面闪络问题是制约电力设备可靠运行的关键瓶颈。多孔结构是提升闪络强度的有效方法，但现有多孔结构构造方法难以用于传统环氧树脂等绝缘材料。该文通过热固化结合油水相分离法制备多孔环氧树脂绝缘材料，利用悬浮水滴在环氧树脂中构造孔隙结构，通过调控水相含量(5%~40%)调控环氧基体的多孔形貌，分析了孔隙对材料疏水性及闪络强度的影响，结合电位衰减、电位扫描与放电路径观测揭示了多孔结构对闪络强度的作用机理。结果表明：当制孔剂(水)含量为 10%~20%时，闪络强度提升效果最优，较无孔材料最高提升 24.8%，多孔结构对沿面闪络强度的提升，可归因于孔隙促进表面电荷耗散与电晕稳定化的共同作用。

关键词：环氧树脂；多孔结构；沿面闪络；疏水性；电荷输运调控

Preparation of Porous Epoxy Resin Based on Oil-water Phase Separation and Mechanism of Flashover Strength Enhancement

REN Jierui, ZHU Mingxiao, XU Xuekai, LIU Rui, LUO Luyang, SHI Bo
(College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Surface flashover is a critical bottleneck restricting the reliable operation of electrical equipment. Although porous structures have proven effective in enhancing flashover strength, existing construction methods are difficult to apply to traditional insulating materials like epoxy resin. We successfully prepared porous epoxy resin insulation materials through thermal curing combined with an oil-water phase separation method. Porous structure in epoxy resin is constructed by the suspended water droplets. By adjusting the water phase content (5%~40%), we regulated the porous morphology of the epoxy matrix and analyzed the influence of pores on material hydrophobicity and flashover strength. Through potential decay analysis, potential scanning, and discharge path observation, the mechanism of porous structure in enhancing flashover strength is revealed. The results indicate that, when the pore-forming agent (water) content reaches 10%~20%, the flashover strength improvement is optimal, showing a maximum enhancement of 24.8% compared to non-porous materials. The enhancement can be attributed to the combined effects of pore-induced surface charge dissipation and corona stabilization.

Key words: epoxy resin; porous structure; surface flashover; hydrophobicity; charge transport regulation

0　引言

气-固复合绝缘是金属封闭式组合电器(gas-insulated switchgear，GIS)、架空输电线路等电力设备的主要绝缘结构，介质特性的差异使界面处电场发生畸变，进而引发沿面闪络故障[1-2]，高压输电设备绝缘界面的沿面闪络问题已成为制约电力系统可靠性的关键瓶颈。可见，界面是整个绝缘系统的短板，提升沿面闪络强度对改善电力设备运行性能具有重要意义[3]。

绝缘子本体及表面特性对沿面闪络强度均产生很大影响。从绝缘子本体调控角度，一方面可以通过优化绝缘子形状改善电场分布，另一方面可采用介电功能梯度材料达到均匀电场的目标，进而提升闪络强度[4]。绝缘子表面改性也是改善沿面耐电性能的有效方法，常用方法包括直接氟化[5-6]、臭氧化、等离子体处理[7-8]、电子束辐照等化学改性法，和表面刻蚀、模板法等物理改性法，及复合涂层等方法[9-13]。相关方法可以通过调控表面电荷注入及

基金资助项目：山东省自然科学基金(ZR2021ME027)；青岛市自然科学基金(24-4-4-zrjj-172-jch)。
Project supported by Natural Science Foundation of Shandong Province of China(ZR2021ME027), Qingdao Natural Science Foundation (24-4-4-zrjj-172-jch).

迁移过程抑制表面电荷积聚[14-17]，例如表面氟化和等离子体处理通过引入浅陷阱促进表面电荷消散，达到提升闪络强度的目标。此外，绝缘子表面微观形貌调控也是改善沿面耐电性能的有效方法。

多孔结构作为一种新型绝缘性能调控策略，近年来受到广泛关注。雷清泉院士发现纳米多孔阳极氧化铝模板可抑制碰撞电离，从而提升气体击穿强度[18]。司马文霞团队研制了纳米孔桥接硅氧烷材料，进一步验证了孔隙尺寸对绝缘性能的调控作用，发现击穿强度随孔隙减小显著增大[19-20]。西安交通大学任明等利用聚酰亚胺气凝胶分析了多孔结构对击穿强度的作用[21]。在沿面闪络领域，张冠军等利用 3D 打印技术制备了孔径为毫米级的表面通孔结构，使真空闪络电压提升[22]；朱明晓等研究表明，微纳多孔结构通过阻碍碰撞电离与电晕稳定化协同作用，可使闪络强度提升超 100%[23]。然而，现有研究多局限于宏观孔隙，且采用的多孔结构构造方法难以用于传统环氧树脂等绝缘材料，因此需要研究新的多孔材料高效制备方法，并对闪络特性的调控机制进行深入研究[24]。

针对上述问题，本研究提出基于油水相分离法的多孔环氧树脂绝缘材料制备策略。通过调控水相含量(5%~40%)，在环氧基体中构筑孔径 1~20 μm 的多孔结构，实现表面形貌的精准调控。结合电位衰减、电位扫描与放电路径观测，揭示了多孔结构通过浅陷阱促进电荷耗散与电晕稳定效应的协同作用机制。

1 实验方法

1.1 多孔环氧树脂材料制备流程

实验材料包括：双酚 A 型环氧树脂(E51)、甲基四氢苯酐、2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚(DMP-30)、去离子水、乙醇(95%)。所有化学品均为市售分析纯，未经额外纯化处理。

图 1 为多孔环氧树脂的制备过程。通过油水相分离法制备多孔环氧树脂材料，具体步骤如下：按照表 1 称取 E51 液体，在 600 r/min 下电动搅拌，并同步滴加去离子水，继续搅拌 10 min 使其充分混合均匀，得到环氧树脂-水混合液，搅拌后液体呈现乳白色；将甲基四氯苯酐液体和 DMP-30 促进剂混合，并加入到环氧树脂-水混合液中搅拌均匀。将混合液体在 40 ℃下真空脱气，然后倒入模具中，按照 80 ℃ 2 h、120 ℃ 2 h 的流程升温固化。利用 600 目砂纸对固化后样品表面进行打磨，打磨后用高压气体酒精喷雾吹去表层杂物，打磨过程可使样品内部孔隙充分暴露。再升高温度到 120 ℃并抽真空以去除水分。最终形成直径 5 cm、厚度约为 2 mm 的多孔环氧树脂绝缘材料。

油水相分离过程中，去离子水与环氧树脂的相容性差异导致两相分离。随着搅拌速率的提升(600 r/min)，水相在剪切力作用下分散为微纳米级液滴(图 1)。固化阶段，甲基四氢苯酐的疏水特性加速了油相(环氧树脂)与水相的界面分离，最终通过高温脱除水相液滴形成孔隙。

1.2 沿面电学性能测试

利用场发射扫描电子显微镜(SEM)对材料表面形貌进行观察。采用 JC2000D1CA 接触角测试仪测量样品的静态水接触角，利用水滴分析软件包对水滴的光学照片进行拍摄和分析，每个样品在 5 个不同位置测量。

利用指型电极测量样品在空气中的沿面闪络电压，以 1 kV/s 的上升率施加直流电压直至闪络。试样紧密压放在指形不锈钢电极下，其中电极半径为 10 mm，电极之间的距离为 10.7 mm。每组样品重复测试 12 次，采用双参数威布尔分布对闪络电压 U_S 进行统计分析，按式(1)计算累积闪络概率[23]：

$$P(U_S)=1-\exp\left(-(U_S/\alpha)^{\beta}\right) \tag{1}$$

式中：α 为 63.2%概率对应的特征闪络电压；β 为形状参数表征数据离散度。实验过程中，使用配备微距镜头(EW-73D)的数码相机(佳能 EOS-90D)拍摄了

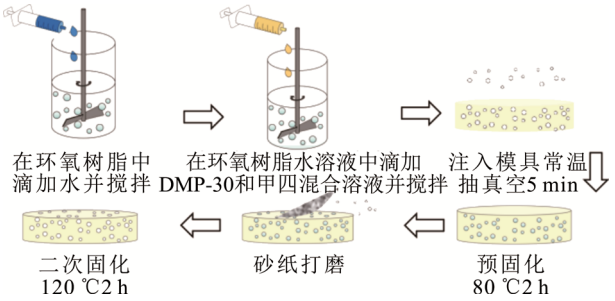


图 1 多孔环氧树脂的制备示意图

Fig.1 Schematic diagram of porous epoxy resin preparation

表 1 样品成分含量

Table 1 Sample composition and content

样品	E51 质量/mg	水质量/mg
PEP-1	105	10
PEP-2	100	20
PEP-3	89	40
PEP-4	67	80

不同样品的闪络路径。每次拍摄时，相机和电极的位置固定不变，从水平和垂直角度拍摄闪络通道。相机 ISO 设置为 200，曝光时间涵盖整个闪络过程。

采用等温表面电位衰减法测量样品的表面陷阱分布(见图 2)。样品通过“针-筛网-表面”三电极结构进行电晕放电充电，针尖与筛网电极间距 5 mm，筛网与样品间距 2 mm。充电过程中针电极施加 6 kV 直流电压，筛网电极施加 2 kV 偏置电压，充电时间 5 min。充电完成后，将试样移至开尔文探针(Trek347)下方测量表面电位。根据 Simmons 等温放电电流理论[23]，陷阱能级 E_t 和陷阱密度 N_t 由式(2)—(3)计算：

$$E_t = kT\ln(vt) \tag{2}$$

$$N_t = \frac{\varepsilon t}{q_e f_0 kT\delta L}\frac{\mathrm{d}\varphi(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中：k 是玻耳兹曼常数；T 是温度；v 为入陷空穴/电子的逃逸频率，取为 1 012 s^{-1}；t 为测量时间；ε 和 L 为样品的介电常数和厚度；q_e 为元电荷量；f_0 为陷阱初始占据态，取为 1；δ 是电荷注入深度，假定为 2 μm；$\varphi(t)$为测量的电位。

进一步地，对不同样品的表面电位分布进行扫描，实验布置如图 3 所示。采用扁平指型电极对样品施加电压，施加电压幅值为 10 kV，时间为 2 min，然后将样品快速移动至静电探头下进行扫描。沿两个电极的中轴线进行扫描，得到不同时间下的表面电位分布。

2 结果与讨论

2.1 多孔材料的表面形貌分析

首先观测了不同含量制孔剂样品的光学形貌，发现随着去离子水含量的提升，样品由透明逐渐向乳白色转变，这是由于环氧树脂内孔隙对光线的散射作用引起的，说明材料内部形成了多孔结构。

采用 SEM 观测了多孔环氧树脂的表面形貌，如图 4 所示。进一步通过 ImageJ 软件对 SEM 图像进行二值化处理，统计等效直径分布；每组样品分析 2 个 200 μm×300 μm 区域，累计统计孔隙数量超过 100 个，确保数据代表性，得到不同材料的孔径分布及孔隙率，如图 5 所示。结果表明，微米级气隙遍布在材料表面，说明水滴蒸发后形成了微观结构良好、表面粗糙、孔隙相互连通的多孔环氧树脂样品。随着去离子水含量的提高，所得多孔样品的孔径整体呈增大趋势，孔隙率先增高后降低。

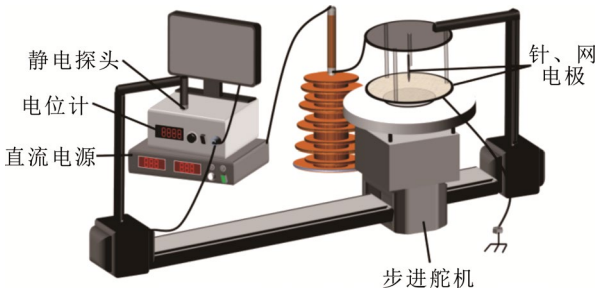


图 2 等温表面电位衰减测试平台

Fig.2 Testing platform for isothermal surface potential decay

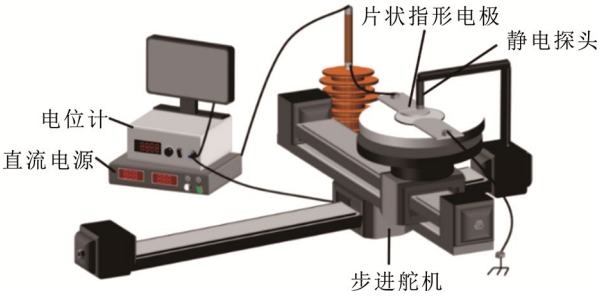


图 3 表面电位扫描测试平台

Fig.3 Testing platform for scanning potentials

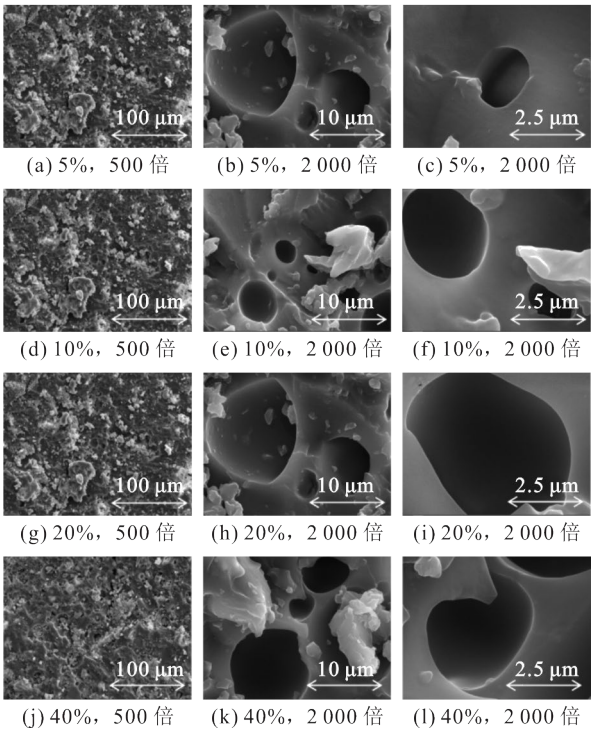
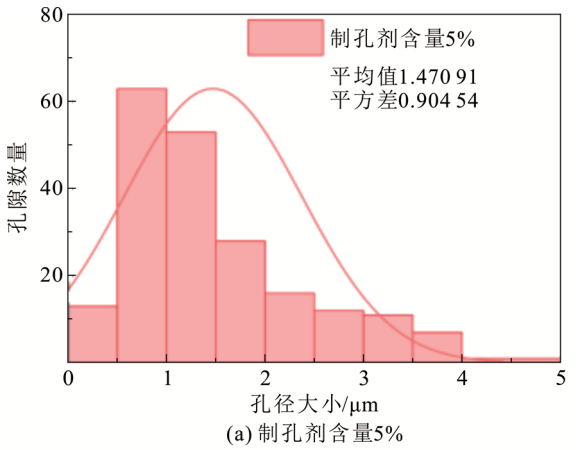


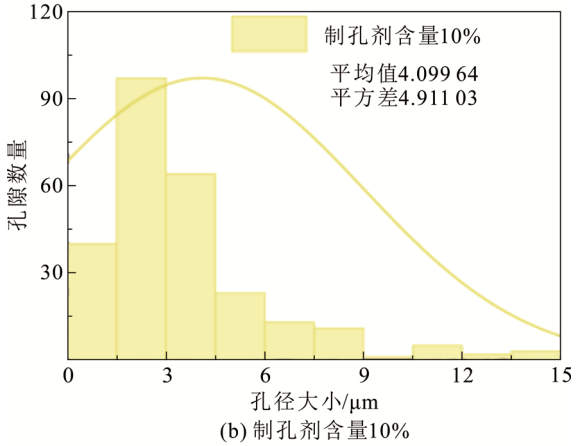
图 4 多孔样品 SEM 图像

Fig.4 SEM images of porous specimens

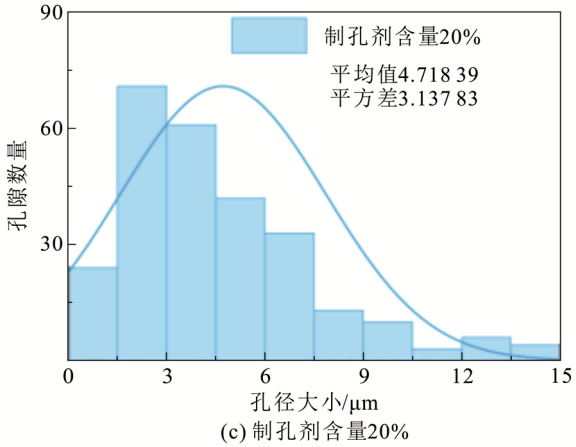
当含水量(质量分数，下同)为 5%时，多孔环氧树脂的孔径在 1~5 μm 之间，平均孔径为 1.5 μm，孔径整体较小，孔隙率较低(1.9%)且分布不均；当



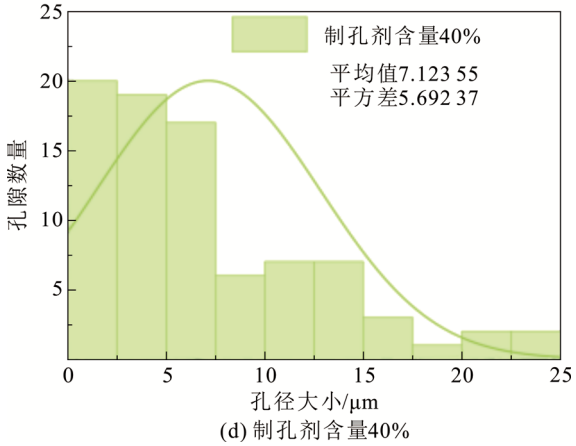
(a) 制孔剂含量5%



(b) 制孔剂含量10%



(c) 制孔剂含量20%



(d) 制孔剂含量40%

图 5　孔径统计分析

Fig.5　Statistic analysis of pore size

致孔剂含量增加至 10%和 20%时，孔隙结构开始变得丰富，平均孔径分别为 4.1 μm 和 4.7 μm，孔隙率从 6.4%增加至 7.4%。相比之下，当水含量为 40%时，孔径在 2~25 μm 之间，样品的孔隙数量陡降，具有更大孔径的结构，孔径分布团聚现象明显。

上述结果表明，水含量为 10%~20%时，所得环氧树脂材料孔隙率最高，且孔隙分布较均匀。分析原因为：当水含量较少时，难以在环氧树脂内形成足够的孔隙；而含水量过大时，水滴容易发生团聚，倾向于形成大孔隙结构。

2.2　微观形貌对疏水性的影响

不同水含量下多孔环氧树脂材料的接触角(CA)变化规律如图 6 和图 7 所示。可以看出，无孔隙环氧树脂的接触角为 43.5°，形成多孔结构后接触角增大，当水含量为 20%时接触角达到峰值 122.4°；水含量增加至 40%时，接触角为 114.5°，变化规律与前述孔隙结构分析结果一致。由于多孔结构在材料表面形成了微米级粗糙形貌，显著增加了表面粗糙度，根据 Cassie-Baxter 理论，微米级孔洞与亚微米级突起使表面粗糙度显著增大，进而改善了疏水性。

2.3　多孔材料的沿面闪络性能

测量得到不同材料的直流闪络电压，如图 8 所示。在正极性直流电压下，无孔隙样品的闪络电压为 17.2 kV，多孔样品的沿面闪络强度显著高于无孔隙材料；随着孔隙度升高，样品闪络强度不断增大，在水含量 10%时闪络强度达到最大值为 20.8 kV，较无孔隙样品提高了 20.9%。在负极性直流电压下，无孔隙样品的闪络电压为 17.7 kV；引入孔隙后闪络强度显著提升，在水含量 20%时闪络的强度达到了最大值为 22.1 kV，较无孔隙样品提高了 24.8%。

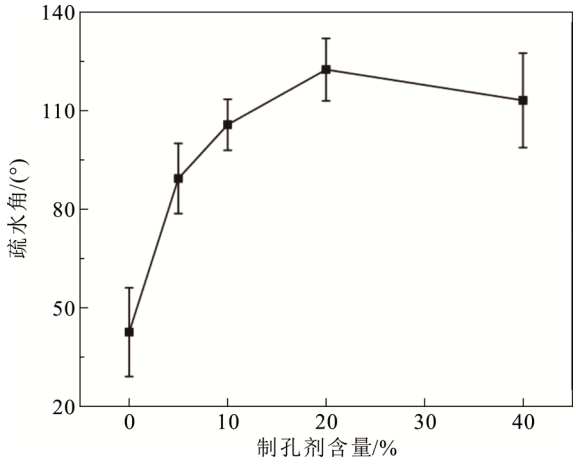


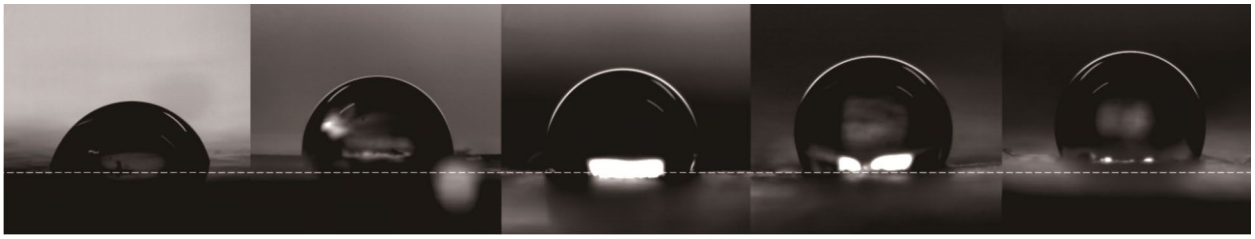
图 6　多孔材料的疏水角测试

Fig.6　Hydrophobic test of porous materials

图 9 为 0.2 MPa 及 0.3 MPa 空气中的闪络电压测试结果。可见，多孔结构使高气压氛围内的闪络强度也有效提升，0.2 MPa 及 0.3 MPa 气压下的最大提升幅度分别为 32%和 13%。

上述结果表明，水含量在 10%~20%之间时，多孔样品的孔隙分布更均匀，对应闪络电压提升效果最优。由于去离子水分子之间存在氢键，高含水量时容易发生团聚现象，因此 40%制孔剂含量时成片制孔效果变差，主要形成了大孔隙结构，对闪络强度提升作用降低。

为了说明本文多孔结构对闪络强度的提升作用，将其与常用表面改性方法进行对比。等离子体表面改性和氟化广泛用于改善闪络性能，相关研究中两种方法的闪络强度提升幅度分别为 13%~19%[8-9]和 11%~19%[5]，低于本文多孔结构的提升效果。文[23]采用纳米多孔结构提升闪络强度，最优



(a) 无孔 (b) 制孔剂含量5% (c) 制孔剂含量10% (d) 制孔剂含量20% (e) 制孔剂含量40%

图 7 水接触角正视图

Fig.7 Front view of the water contact angle

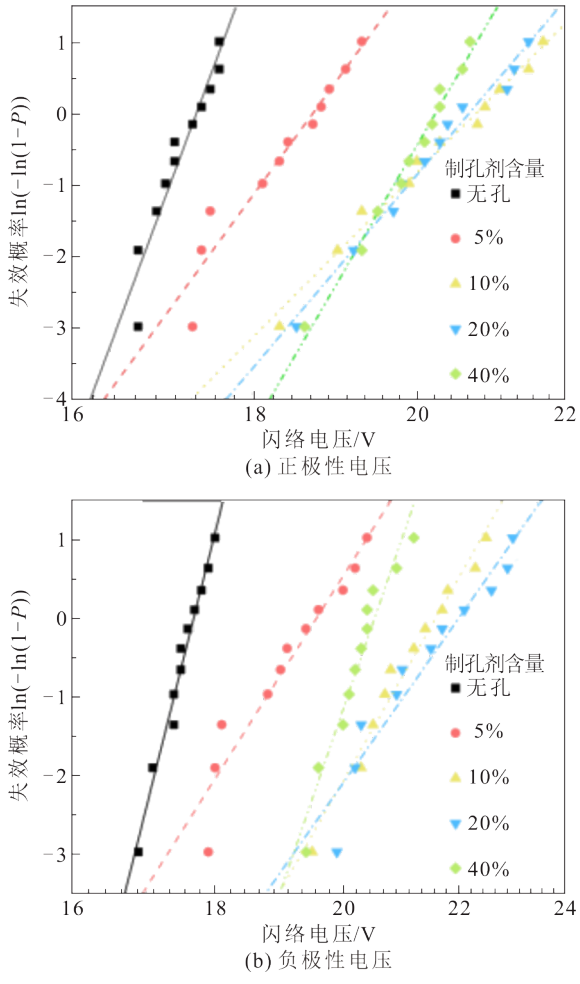


图 8 直流闪络电压测试

Fig.8 DC flashover voltage test

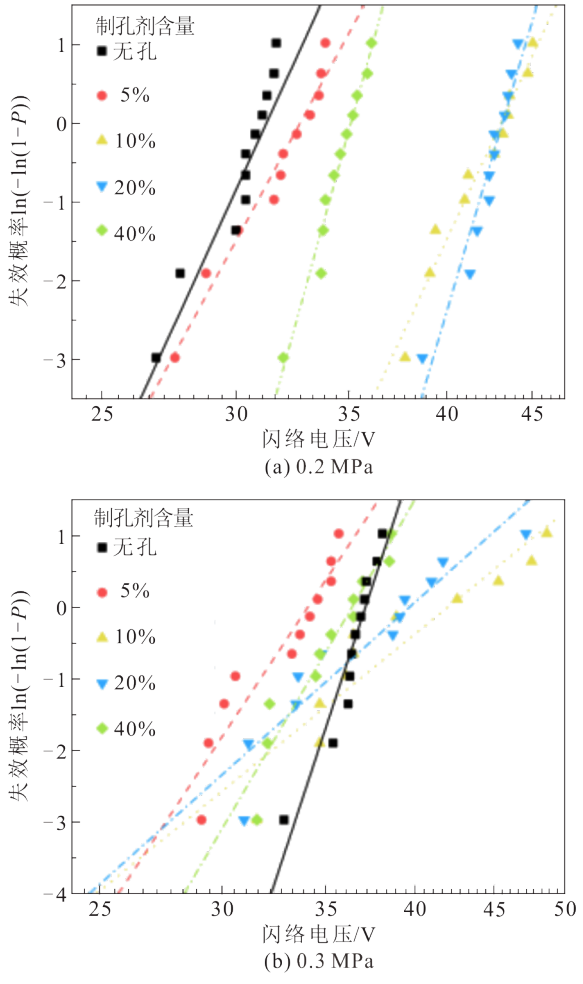


图 9 高气压空气中的沿面闪络强度

Fig.9 DC flashover strength in high atmospheric pressure

提升效果达到 100%，但是纳米多孔材料制备需要采用相分离等方法，制备流程非常复杂且易发生破损[23]。以上结果说明，基于油水相分离法制备多孔材料是改善闪络性能的有效手段。

2.4 表面电位衰减测试

为了分析多孔结构对闪络强度的提升机理，测量了不同样品的等温表面电位衰减曲线，如图 10 所示。实验结果表明，表面电位呈现出先快速衰减后缓慢衰减的趋势，且随造孔剂含量增加衰减速度明显加快。表面电位衰减过程与陷阱分布关系密切，随着造孔剂含量的增加，浅陷阱密度逐渐提高，如图 11 所示。

等温表面电位衰减曲线及陷阱分布特征反映了表面电荷的自由迁移过程，多孔结构对电荷迁移起到多方面作用。电荷在孔隙内(气体)的迁移率高于在固体表面的迁移率，电荷倾向于向孔隙内部输运，因此多孔结构促使表面电荷向孔隙迁移，加速了表面电位衰减过程。基于以上原因，表面电位随孔隙度增加衰减更快，表现为浅陷阱数量增加。现有大量研究表明，浅陷阱有利于促进表明电荷消散，抑制电荷积聚，进而达到闪络电压提升的目标，因此多孔结构促进电荷消散作用是闪络性能改善的重要原因。

2.5 闪络路径形貌分析

分别在高压电极施加了正极性和负极性直流

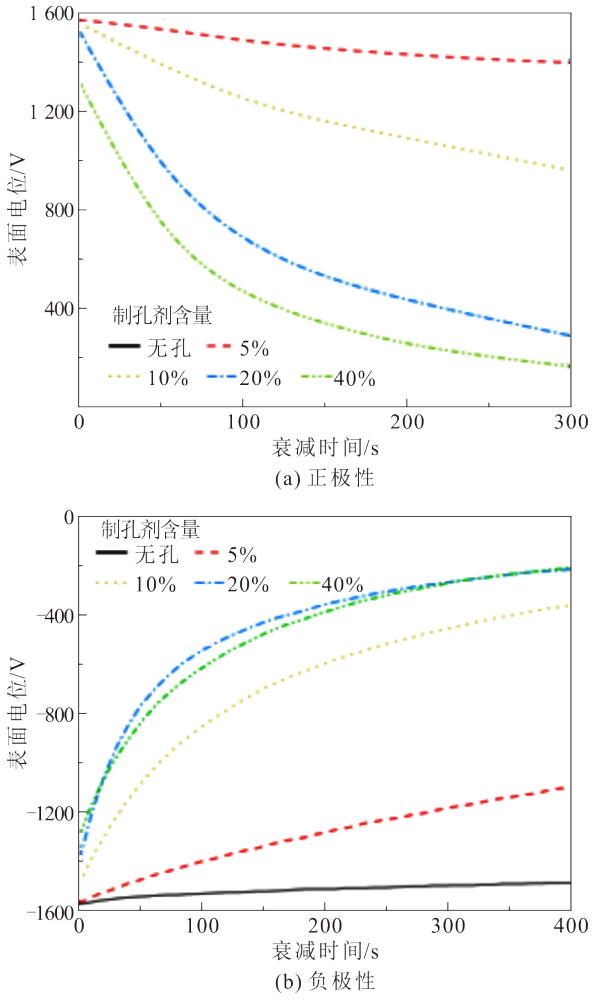


图 10 等温表面电位衰减曲线

Fig.10 Curves of isothermal surface potential decay

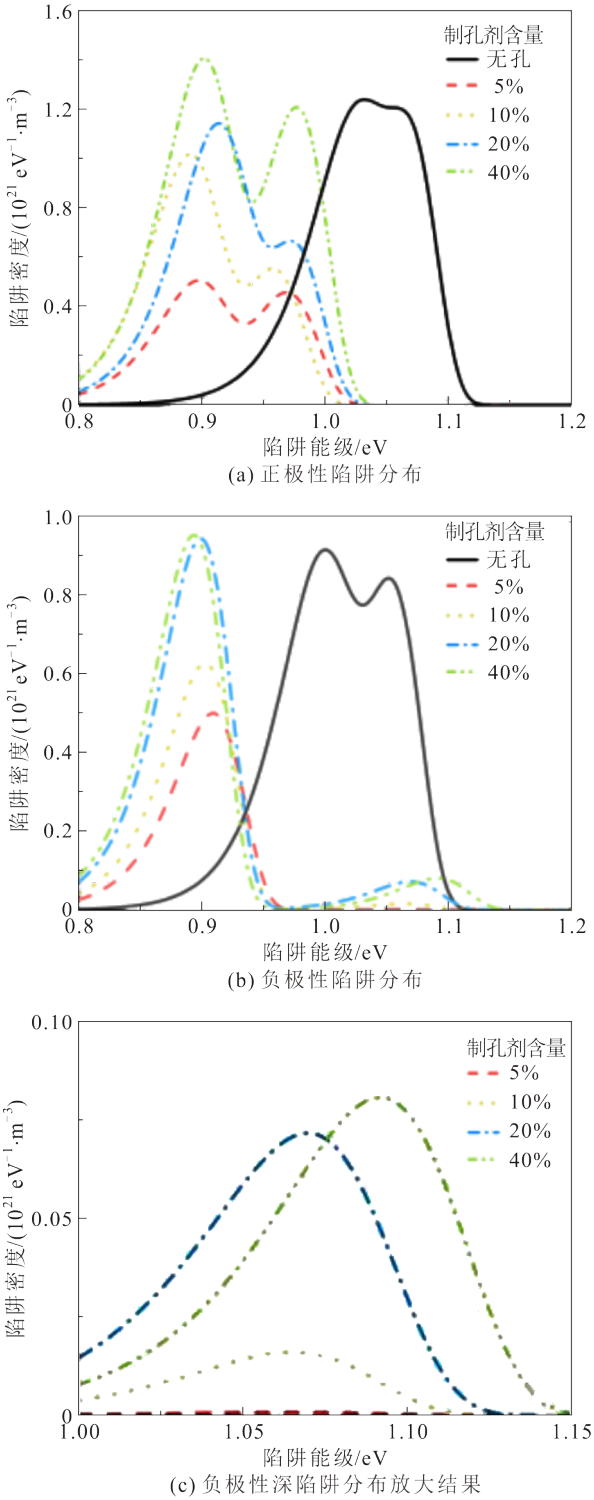


图 11 陷阱分布表征

Fig.11 Trap distribution characterization

电压，并在水平和垂直方向拍摄了闪络路径，进一步地，通过对多次闪络的路径进行分析，统计得到了闪络通道相对电极中轴线的偏转角度，如图 12 所示。闪络通道俯视图和侧视图分别如图 13 和图 14 所示。可以看出，无孔隙环氧树脂的闪络通道主要位于两个电极的中心线上，闪络通道的偏转角度很小；随着制孔剂含量的增大，闪络通道逐渐远离中心线，且偏转角随水含量增大先增加后减小，在水含量为 20%时偏转角度达到最大值。闪络通道照片的侧视图，表明无论施加何种电压，闪络通道都靠近样品表面，垂直方向上闪络路径偏转较小。

多孔结构对闪络路径的偏转效应可以归因于电晕稳定化作用。电晕稳定作用常被用于解释电负性气体击穿电压随气压的驼峰曲线，电晕放电在电极附近形成稳定电荷区域，降低了电极区域电场强度，并迫使随后的流注绕过该区域，进而起到提升击穿强度的作用[25-26]。多孔结构具有超高的比表面积，可以有效附着电子和离子，表现出与电负性气体相似的行为[27]。对沿面闪络采用的指形电极，首先在电极-固体-气体的三结合点附近形成电晕放电，以高压电极为例，放电产生的正极性电荷可以迁移至孔隙内部，并被高表面积的孔壁附着，形成稳定电荷区，削弱了高压电极附近的电场强度，从而抑制了随后的放电过程，因此闪络通道倾向于绕过电场强度减弱区域，形成偏转的闪络路径，并提高闪络强度。

对闪络路径偏转角度及孔隙结构进行对比分析，可以发现，水含量为 20%时孔隙率较高且孔隙

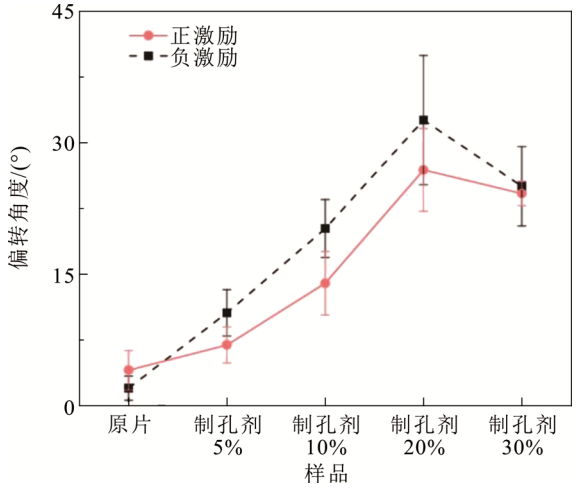


图 12 沿面闪络通道的偏转角度

Fig.12 Deflection angle of surface flashover channel

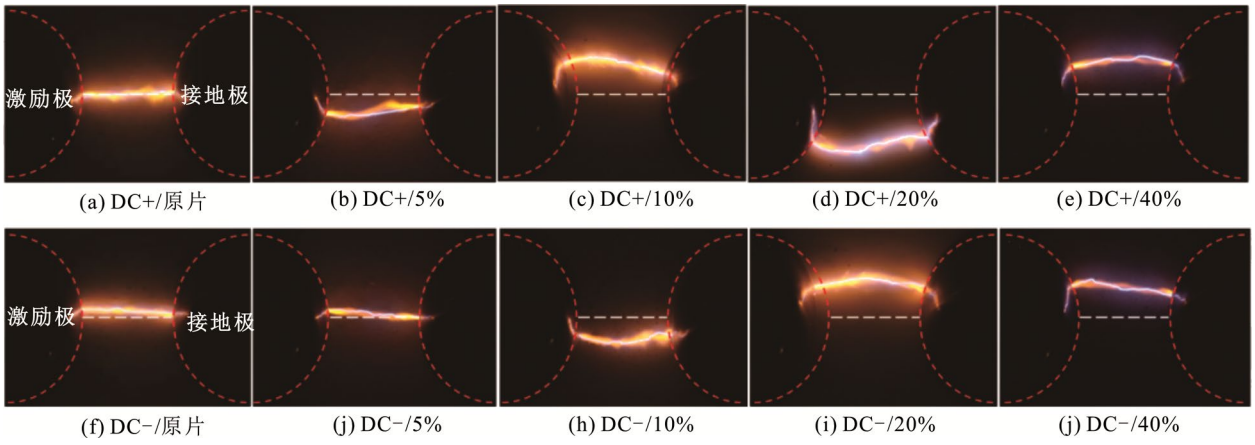


图 13 闪络通道的俯视图

Fig.13 Top-view images of flashover channel under positive and negative voltages

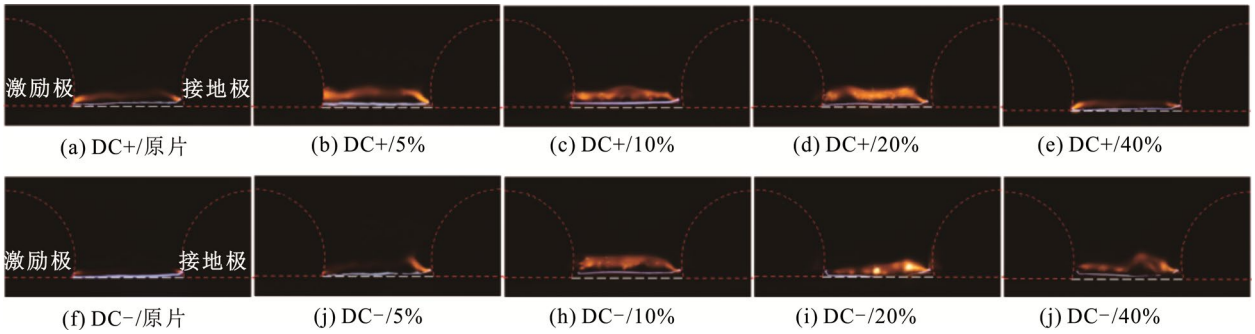


图 14 闪络通道的侧视图

Fig.14 Side-view images of flashover channel under positive and negative voltages

分布较均匀，对电荷的附着效果更好，因此呈现出最大的偏转角度，这与前述电晕稳定化的分析结果是一致的。

2.6 多孔材料的机械性能分析

测试了多孔材料的机械强度，如图 15 所示。可以看出，随着致孔剂含量的增加，多孔材料的拉伸强度呈现降低趋势，说明多孔结构降低了材料的机械强度。为了改善多孔材料的机械性能，后续可采用以下方案，一方面可通过掺杂玻璃纤维等填料提升机械强度，另一方面仅在绝缘子表面构建多孔结构，在提高闪络强度的基础上确保优异的机械性能。

2.7 多孔结构的闪络机理分析

对沿面闪络采用的指形电极，电极-固体介质-气体三结合点处电场强度最高，容易引发沿面放电甚至引起最终闪络，其中电荷的迁移、积聚等过程对强度影响很大。通过对比分析孔隙结构、沿面闪络强度、表面电位衰减及闪络路径，多孔结构对闪络性能的提升主要归因于以下协同作用机制。

(1)加速表面电荷消散：多孔结构形成了连通孔隙结构，而气隙内电荷迁移率较高，使得表面电荷更容易迁移到孔隙内部并迅速消散。如图 16(a)所示，三结合点处放电形成的电荷易向孔隙内部迁移，这有助于减少表面电荷的积累，降低电场畸变，从而提高闪络电压。

(2)电晕稳定化效应：电荷向孔隙内部迁移过程中会被孔壁附着，以正极性电极为例，放电产生的正离子可以迁移至孔隙内部，并被高表面积的孔壁附着[27]，如图 16(a)所示。由于多孔结构具有较高的比表面积，使附着电荷密度显著升高，在三结合点附近形成稳定电荷区，削弱了高压电极附近的电场强度，从而抑制了随后的放电过程，并提高闪络强度。特别是，随着孔径减小，孔壁比表面积显著增加，电晕稳定化效应更加显著，如图 16(b)所示。综合上述分析，多孔结构的加速电荷消散作用随水含量升高而增强，但电晕稳定化效应水含量先增强后减弱，因此在水含量 10%~20%时对闪络强度的提升效果最优。

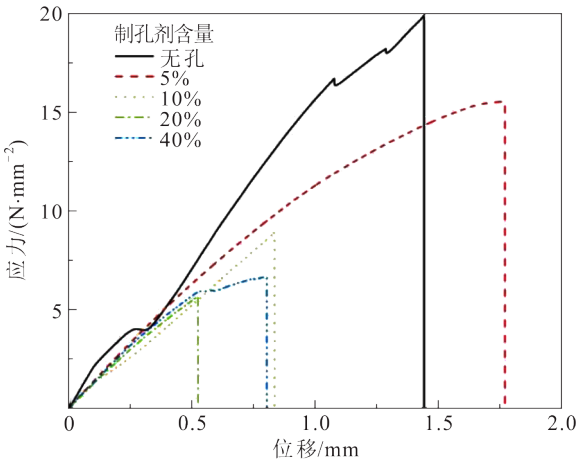
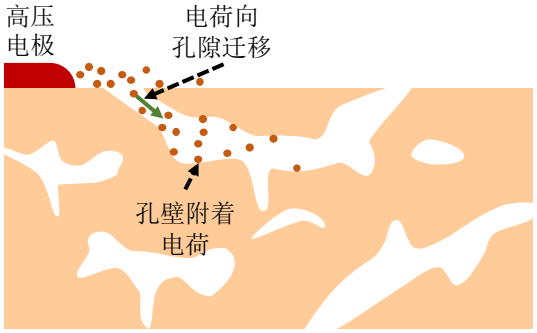
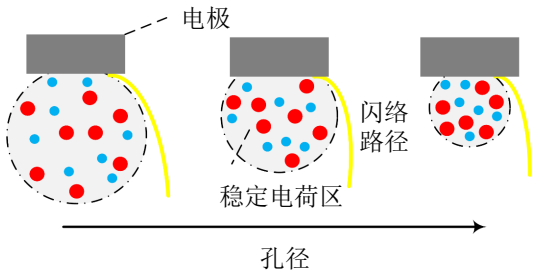


图 15 多孔环氧树脂的拉伸强度与位移关系曲线

Fig.15 The relationship curve between tensile strength and displacement of porous epoxy resin



(a) 多孔结构对电荷运动示意图



(b) 孔径对电晕稳定效果的影响

图 16 多孔材料提升闪络强度的机理与模型

Fig.16 Mechanism of porous materials on improving flashover strength

3 结论

1）利用油水相分离法在环氧树脂绝缘材料内部形成了均匀分布的孔隙结构，随着去离子水含量的提高，孔径整体呈增大趋势，孔隙率先增高后降低。

2）多孔结构使沿面闪络强度及疏水性均得到有效改善，当制孔剂(水相)含量为 10%~20%时，直流闪络电压提升效果最优，较无孔材料最高提升 24.8%，接触角增至 122.4°。

3）多孔结构对沿面闪络强度的提升可以归因于孔隙促进表面电荷消散及电晕稳定化作用，抑制空间电荷积累引起的电场畸变；而高比表可以有效附着电荷，在三结合附近形成稳定电荷区，使得电

场更加均匀，两种作用协同使闪络强度提升。

参考文献 References

[1] LI Z, LIU J, OHKI Y, et al. Surface flashover in 50 years: theoretical models and competing mechanisms[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 853-877.

[2] 郭裕钧，杨晨光，张血琴，等. 川藏铁路环境车顶绝缘子闪络特性研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(2)：472-483.
GUO Yujun, YANG Chenguang, ZHANG Xueqin, et al. Review on flashover characteristics of train roof insulators under environments on Sichuan-Xizang railway[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 472-483.

[3] 李庆民，王昌柱，武文琪，等. 直流 GIS/GIL 绝缘子沿面绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术，2025，51(3)：987-1009.
LI Qingmin, WANG Changzhu, WU Wenqi, et al. Advance in research of insulation performance enhancement methods along the surface of DC GIS/GIL insulators[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 987-1009.

[4] 王 超，李文栋，江智慧，等. 氟硅烷修饰的纳米复合光固化涂层提升绝缘真空闪络特性[J]. 高电压技术，2021，47(3)：3456-3463.
WANG Chao, LI Wendong, JIANG Zhihui, et al. Study on the vacuum flashover of insulator with fluorosilane modified nanocomposite UV curable coating[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 3456-3463.

[5] AN Z L, SUN J P, YANG Y, et al. DC flashover performance of GIS spacers fluorinated at different temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29 (3): 1200-1207.

[6] 戚相成，同向前，任鹏荣，等. 氟化协同高分子助剂调控环氧复合材料绝缘性能机制[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4517-4526.
QI Xiangcheng, TONG Xiangqian, REN Pengrong, et al. Insulation performance mechanism of epoxy composites regulated by fluorinated synergistic polymer additives[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4517-4526.

[7] 方 志，管秀晗，祝 曦，等. 大气压低温等离子体绝缘材料表面改性研究进展及展望[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4263-4284.
FANG Zhi, GUAN Xiuhan, ZHU Xi, et al. Review and prospects on insulation surface modification by atmospheric pressure low temperature plasma[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4263-4284.

[8] ZHANG Y H, RUAN H O, WANG S S, et al. Enhanced DC insulation strength of PMIA paper by CF_4/Ar plasma treatment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29 (3): 874-882.

[9] GUAN H L, CHEN X R, DU H, et al. Surface potential decay and DC surface flashover characteristics of DBD plasma-treated silicone rubber[J]. Nanotechnology, 2020, 31(42): 424005.

[10] QI B, GAO C J, LV Y Z, et al. The impact of nano-coating on surface charge accumulation of epoxy resin insulator: characteristic and mechanism[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(24): 245303.

[11] TU Y P, ZHOU F W, JIANG H, et al. Effect of nano-TiO_2/EP composite coating on dynamic characteristics of surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1308-1317.

[12] 许天蕾，王青于，宋顺喜，等. 竹纤维绝缘纸/环氧复合材料的制备与性能分析[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4535-4546.
XU Tianlei, WANG Qingyu, SONG Shunxi, et al. Preparation and performance analysis of bamboo insulating paper/epoxy composites[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4535-4546.

[13] YANG X, WANG S J, ZHAO X L, et al. Stability of self-adaptive dielectrics under various electrical-thermal stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(2): 625-633.

[14] PAN Z J, PAN C, TANG J, et al. Influence of SiC/epoxy coating on surface charging phenomenon at DC voltage-Part I: charge accumulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1333-1342.

[15] XUE J Y, LI Y, DONG J H, et al. Surface charge transport behavior and flashover mechanism on alumina/epoxy spacers coated by SiC/epoxy composites with varied SiC particle size[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(15): 155503.

[16] LI S T, HUANG Y, MIN D M, et al. Synergic effect of adsorbed gas and charging on surface flashover[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 5464.

[17] 李姚亦桐，杨 洋，牛广乾，等. 打印微结构对表面电荷积聚特性的影响[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2237-2246.
LI YaoYitong, YANG Yang, NIU Guangqian, et al. Influence of printed microstructures on surface charge accumulation characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2237-2246.

[18] XIN M, CHANG Z S, LUO H Y, et al. An electrical super-insulator prototype of 1D gas-solid Al_2O_3 nanocell[J]. Nano Energy, 2017, 39: 95-100.

[19] SIMA W X, CHEN X X, SUN P T, et al. Environmentally friendly super-insulating material with three-dimensional nanoporous structure: a promising candidate for future gas insulated transmission lines and carbon sequestration[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479: 147673.

[20] SIMA W X, CHEN X X, SUN P T, et al. High-performance insulating materials with high breakdown strength and low permittivity for eco-friendly electrical equipment[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 680: 2-8.

[21] SONG B, REN M, LIU Y J, et al. Tailoring the electron free path in an ultra-lightweight gas-solid composite insulation system for high dielectric strength[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 278: 111429.

[22] YANG X, SUN G Y, SONG B P, et al. Design and 3D printing of porous cavity insulation structure for ultra-high electrical withstanding capability[J]. High Voltage, 2023, 8(4): 717-727.

[23] LI M T, ZHU M X, LUO L Y, et al. Regulation mechanism of porous structures on flashover performances: combined effect of hindering collision ionization and corona stabilization[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(48): 485205.

[24] SUN P T, LI C, SIMA W X, et al. Super electrical insulating materials based on honeycomb-inspired nanostructure: high electrical strength and low permittivity and dielectric loss[J]. Advanced Electronic Materials, 2022, 8(4): 2100979.

[25] WU Z C, ZHANG Q G, ZHANG L S, et al. Neglected culprit of nonlinear discharge characteristics in SF_6: shielding effect induced by positive glow corona discharge[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28: 085018.

[26] HAYAKAWA N, HATTA K, OKABE S, et al. Streamer and leader discharge propagation characteristics leading to breakdown in electronegative gases[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 842-849.

[27] XIA Z F, WEDEL A, DANZ R. Charge storage and its dynamics in porous polytetrafluoroethylene (PTFE) film electrets[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(1): 102-108.



任杰睿
2002—，男，硕士生
主要研究方向为高电压绝缘方向
E-mail: by2001040414@s.upc.edu.cn

REN Jierui



朱明晓(通信作者)
1988—，男，博士，讲师
主要从事电气绝缘劣化及改性、电力设备绝缘状态检测及诊断等方面的研究工作
E-mail: zhumx@upc.edu.cn

ZHU Mingxiao
Ph.D.
Corresponding anthor

收稿日期 2025-03-24 修回日期 2025-07-25 编辑 曹昭君