第 52 卷 第 9 期：4396-4406 高电压技术 Vol.52, No.9: 4396-4406
2026 年 9 月 30 日 High Voltage Engineering September 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250887

考虑电-热协同效应的 MXene/PI 复合薄膜耐电晕性能

乌　江[1,2]，王晓敏[1,2]，刘佳怡[1,2]，曹　雯[1,2]，王　琎[3]，尚鹏辉[4]
（1. 西安工程大学电子信息学院，西安 710048；2. 西安市电气设备互联感知与智能诊断重点实验室，西安 710048; 3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院，西安 710055; 4. 电子科技大学长三角研究院(湖州)，湖州 313000）

摘　要：聚酰亚胺(polyimide, PI)因其优异的热稳定性和绝缘性能被广泛用于变频电机绝缘，但其在高频电压下的耐电晕性能较差，严重影响设备寿命。该研究选取一种具有高热导率与高电导率的 MXene 二维材料，采用原位聚合法制备了 0%、1%、2%、5%掺杂质量分数的 MXene/PI 复合薄膜，对未掺杂与不同掺杂比例的复合薄膜进行了表面官能团、元素分布以及微观形貌表征，再通过陷阱分布特性、表面电导率、热导率以及耐电晕特性的测量。实验结果表明，随着 MXene 掺杂含量的增加，MXene/PI 复合薄膜的耐电晕时间逐渐增加，5%MXene/PI 复合薄膜的平均耐电晕时间相比于 PI 提升了 443.75%，达到 142 min。综合分析了复合薄膜的耐电晕性能中的电学与热学作用因素，随着 MXene 含量的增加，深陷阱密度显著减小，而深陷阱能级和浅陷阱分布整体变化较小，同时复合薄膜的表面电导率逐渐增加。分析认为，MXene 在薄膜内相互搭接形成导电网络，促进了表面电荷的消散，抑制了电场畸变。而对于含有 MXene 的复合薄膜，其热导率和散热特性均明显高于 PI，减小了长时间电晕下热积累对薄膜分子结构的破坏。对于复合薄膜的电晕放电现象，在短时间内的主导机制为高能带电粒子的撞击与表面电荷积聚所形成的快速破坏过程，而随着耐电晕时长的增加，电晕放电逐渐转为电-热协同破坏作用。
关键词：聚酰亚胺；MXene；耐电晕；电热协同；陷阱特性

Corona Resistance of MXene/PI Composite Films Considering the Synergistic Effect of Electricity and Heat

WU Jiang[1,2], WANG Xiaomin[1,2], LIU Jiayi[1,2], CAO Wen[1,2], WANG Jin[3], SHANG Penghui[4]
(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Interconnected Sensing and Intelligent Diagnosis for Electrical Equipment, Xi'an 710048, China;
3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
4. Yangtze Delta Region Institute of University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313000, China)

Abstract: Polyimide (PI) is widely used in the insulation of variable frequency motors due to its excellent thermal stability and insulation performance. However, its poor corona resistance under high-frequency voltage significantly affects the lifespan of equipment. In this study, a two-dimensional MXene material with high thermal conductivity and high electrical conductivity were selected, and MXene/PI composite films with 0%, 1%, 2%, and 5% doping mass percentages were prepared by in-situ polymerization. Surface functional groups, elemental distribution, and microscopic morphology of undoped and different doping ratio composite films were characterized, followed by measurements of trap distribution characteristics, surface conductivity, thermal conductivity, and corona resistance. The experimental results showed that, with the increase of MXene doping content, the corona resistance time of MXene/PI composite film gradually increased. The average corona resistance time of 5% MXene/PI composite film increased by 443.75% compared to PI, reaching 142 minutes. A comprehensive analysis was conducted on the electrical and thermal factors affecting the corona resistance of composite films. With the increase of MXene content, the density of deep traps significantly decreases, while the overall changes in deep trap energy levels and shallow trap distribution are relatively small. At the same time, the surface conductivity of the composite film gradually increases. Analysis suggests that MXene overlaps with each other within the thin film to form a conductive network, promoting the dissipation of surface charges and suppressing electric field distortion.

基金资助项目：陕西省科技厅自然科学基础研究重点项目(2022JZ-35)；湖州市自然科学资金项目(2023YZ-04)。
Project supported by Natural Science Basic Research Key Program of Shaanxi Provincial Science and Technology Department (2022JZ-35), S&T Special Program of Huzhou (2023YZ-04).

For composite films containing MXene, their thermal conductivity and heat dissipation characteristics are significantly higher than those of PI, reducing the damage to the molecular structure of the film caused by long-term corona heat accumulation. For the corona discharge phenomenon of composite films, the dominant mechanism in a short period of time is the rapid destruction process formed by the impact of high-energy charged particles and the accumulation of surface charges. As the corona resistance time increases, the corona discharge gradually turns into an electric thermal synergistic destruction effect.

Key words：polyimide; MXene; resistance to corona discharge; electric thermal synergy; trap characteristics

0　引言

近年来，随着高速铁路的飞速发展，聚酰亚胺(PI，polyimide)薄膜因其优异的电气绝缘性能，被广泛应用于高速列车变频电机的绝缘系统如绝缘绕组[1-3]。然而，在实际应用中，高频高压的工作环境下薄膜表面易产生电晕放电现象，放电现象一方面导致绕组绝缘性能下降[4]，进而影响绝缘系统安全，另一方面电晕放电产生的高能粒子和热效应会破坏有机高分子结构，加速聚酰亚胺的降解，造成材料损伤，威胁变频电机运行安全[5-6]。因此，提高聚酰亚胺薄膜的耐电晕性能对保障列车安全运行十分重要。

目前，国内外学者对于提高聚酰亚胺薄膜的耐电晕性能展开了大量的研究。由于电晕放电和材料表面电荷积聚程度密切相关，部分学者专注于提升电学性能以增强绝缘能力。郭小霞等认为添加 Al_2O_3 可以提高聚酰亚胺的电导率，使得电荷在介质表面更容易进行迁移和扩散，能够改善材料的局部放电特性[7]。徐萌等认为表面电导率增大，加快纳米复合薄膜表面电荷消散的速度,避免局部场强的集中产生表面放电,从而提高了薄膜的耐电晕寿命[8]。从微观角度分析，表面电导特性往往与表面陷阱分布相关，谢东日等重点分析了商用聚酰亚胺薄膜 Kapton 100HN 和 100CR 表面陷阱分布特性[9]，发现 100CR 型耐电晕薄膜的深陷阱能级和密度均减小，耐电晕时间提升 400%，改变了复合薄膜的陷阱特性，提升了复合薄膜的耐电晕性能。上述研究主要聚焦于通过调整薄膜的电导率和表面陷阱分布参数来提高其耐电晕性能。然而，电晕放电过程中除了快速的放电现象,可能还存在热的累积效应，产生一定的热破坏。

由于介质损耗等因素会导致材料不断升温，同时局部放电在高温下更加严重[10]，会对绝缘材料产生不可逆的破坏。因此，一部分学者则通过改善热学性能来提高薄膜的耐电晕能力。钟鑫等认为温度升高会缩短薄膜耐电晕寿命[11]，而且 Al_2O_3/PI 复合薄膜的热导率高于 PI，高热导率有利于将热及时传导散发避免引起局部高温，保证其在高温下寿命缩短速度较慢，优于 PI。李鸿岩等认为通过提高绝缘材料在较高温度下耐空间电荷的破坏能力，可以提高变频电机使用寿命[12]。张明玉等认为电晕老化击穿是由电晕放电产生的热量积累且散热困难引起薄膜发生热击穿[13]。Liu 等通过制备 OBNNS/PI 复合薄膜，发现其热导率随着 OBNNS 的加入而增加，热量更快传递，热积累效应减弱，复合薄膜的寿命明显提升[14]。马莉莉等将高导热 f-BN 加入到聚酰亚胺薄膜中构建导热网络[15]，当 f-BN 质量分数为 15%时，耐电晕寿命最长。

综上所述，聚酰亚胺薄膜表面长时间的电晕破坏往往是电、热共同作用的结果，但是当前对其在电-热协同效应下的耐电晕性研究仍不充分。此外，近年来 MXene 二维材料因出色的物理化学性质(如高电导率和高热导率)而受到广泛关注[16]，相较于常规具有高热导率和高电导率的耐电晕掺杂颗粒 Al_2O_3，其独特的二维结构使其在低掺杂状态下能够形成高效的电-热传输通道，但目前尚未有报道将 MXene 引入聚酰亚胺薄膜以提高其耐电晕特性，因此，本研究选择 MXene 二维材料作为研究对象，旨在从电-热协同效应的角度分析耐电晕影响机理。采用原位聚合法制备 0%、1%、2%、5%掺杂质量分数的 MXene/PI 复合薄膜，通过扫描电子显微镜观察其表面形貌的变化，测量表面电位衰减特性、表面电导率、热导率以及耐电晕时间，结合薄膜的微观结构、表面电导特性、表面陷阱参数变化以及热量的扩散传递机制分析，共同探究了电-热协同效应下的 MXene/PI 复合薄膜的耐电晕机理。

1　实验

1.1　样品制备

在本研究中，所使用的 MXene 二维材料为 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片，其制备步骤如下：用去离子水清洗容量瓶，将 1.6 g 氟化锂置于 50 mL 的容量瓶中，

加入 18 mL 的盐酸和 2 mL 的去离子水共计 20 mL，制成蚀刻液，加入 1 g 的前驱体 Ti_3AlC_2 粉末，在 45 ℃水浴锅内，持续搅拌 24 h。将刻蚀后的溶液置于离心管，加入去离子水进行配平，3 500 r/min 低速离心处理 7~9 次，直至上清液 pH 达到 5.0。将低速离心后的离心管取出，倒掉上清液，加入 N,N-二甲基乙酰胺(DMAC)，通过 12 000 r/min 高速离心机，使溶液基体由去离子水转换为 DMAC 溶液。最后，利用微量紫外分光光度计得到 $Ti_3C_2T_x$/DMAC 溶液浓度，后续按需加入。

MXene/PI 复合薄膜制备流程如下(见图 1)：初始阶段，根据 $Ti_3C_2T_x$/DMAC 浓度计算每个不同掺杂含量，使得掺杂质量分数为 0%、1%、2%、5%，$Ti_3C_2T_x$/DMAC 溶液与 DMAC 溶剂共 50 mL，置于 3 口烧瓶中超声震荡。随后在 5 ℃低温下，加入 4,4'-二氨基二苯醚(ODA)并超声搅拌 30 min，接着每 30 min 添加一次均苯四甲酸酐(PMDA)，分 5 次逐步加入，维持 ODA 与 PMDA 的摩尔比为 1:1.02。低温超声搅拌 6 h 后，进行旋涂铺膜。随后，进行抽真空，通过梯度升温以去除 DMAC 并固化，梯度升温设置为 80 ℃-30 min、120 ℃-30 min、150 ℃-1 h、250 ℃-1 h、300 ℃-1 h。完成固化后，将薄膜从玻璃板上剥离。根据前期实验发现，由于高掺杂含量会导致聚酰亚胺基底的力学性能逐渐受到破坏，因此实验制备 0%、1%、2%、5%的 MXene/PI 复合薄膜，试验中使用的原料见表 1。

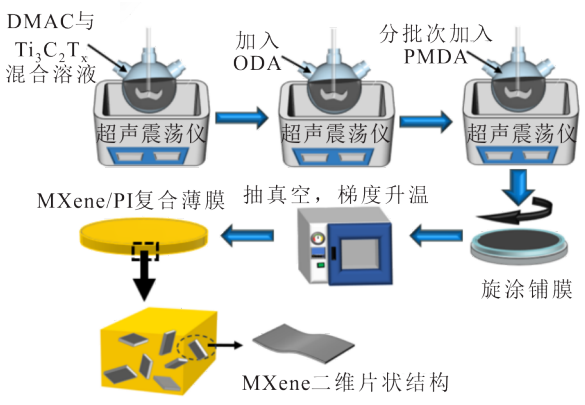


图 1 MXene/PI 复合薄膜的制作流程

Fig.1 Production process of MXene/PI composite film

1.2 表征实验

1.2.1 TEM 结果分析

使用场发射透射电子显微镜 Talos F200X 观察 MXene 的片状结构，由 MXene 的 TEM 图可以看到，MXene 呈现片状，展现出其典型的二维片状结构特征，如图 2 所示。

表 1 MXene/PI 复合薄膜制备原材料

Table 1 Raw materials for the preparation of MXene/PI composite Films

名称	分子式	纯度或浓度
N,N-二甲基乙酰胺(DMAC)	C_4H_9NO	纯度≥99%
4,4'-二氨基二苯醚(ODA)	$C_{12}H_{12}N_2O$	纯度≥99%
均苯四甲酸酐(PMDA)	$C_{10}H_2O_6$	纯度≥99%
$Ti_3C_2T_x$/DMAC 溶液		质量浓度为 56.58 mg/mL

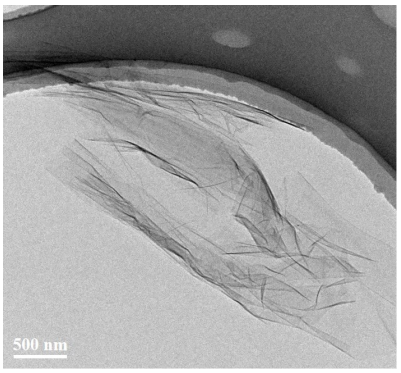


图 2 MXene 片状结构 TEM 图

Fig.2 TEM image of MXene sheet structure

1.2.2 FTIR 结果分析

图 3 中红外光谱结果表明，在 1 776 cm^{-1} 和 1 710 cm^{-1}附近分别出现了 C═O 键不对称伸缩振动吸收峰和 C═O 键对称伸缩振动吸收峰，在 1 494 cm^{-1} 和 819 cm^{-1} 的吸收峰与苯环相关，1 372 cm^{-1} 对应的是 C—N 伸缩振动峰，以上都是 PI 分子的典型特征峰[17]，说明 MXene/PI 复合薄膜亚胺化反应成功。

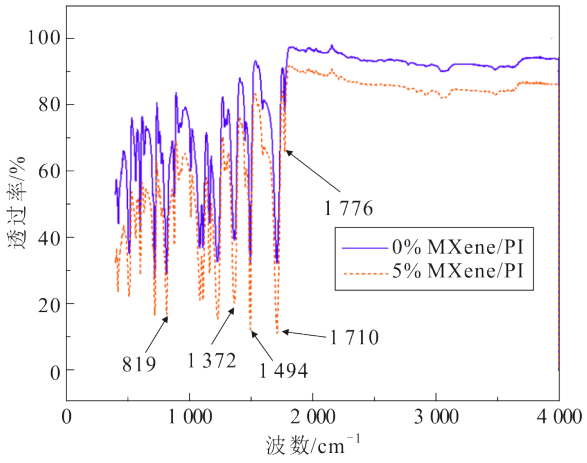


图 3 MXene/PI 复合薄膜与 PI 薄膜红外光谱

Fig.3 Infrared spectra of MXene/PI composite films and PI films

1.2.3　XRD 与 EDS 结果分析

使用 X 射线单晶衍射仪 DX-2700BH 对 PI 薄膜以及 5%MXene/PI 的薄膜进行元素分析，通过观察 X 射线衍射图谱可以看到，在 PI 薄膜中没有 MXene 的特征峰，而在 5%MXene/PI 的图谱中 6.56°出现了 MXene 的特征峰[18]，薄膜成功引入了 MXene，如图 4(a)所示。

使用场发射扫描电镜 QUANTA-450-FEG 对 1%、2%、5%MXene/PI 薄膜中的 Ti 元素进行扫描，随着 MXene 含量的增加，图像中呈现的 Ti 元素逐渐变多[19]，并且发现 MXene 在薄膜中分布均匀，如图 4(b)、4(c)、4(d)所示。

1.2.4　薄膜截面 SEM 结果分析

由图 5 可知，PI 薄膜的截面较为平整，随着 MXene 含量的增加，5%MXene/PI 复合薄膜截面呈现层状结构，这可能是 MXene 二维材料的加入在薄膜内部相互搭接所产生的微观结构变化。

1.3　实验设备与方法

1.3.1　耐电晕放电特性测试平台

耐电晕放电特性测试平台见图 6。采用 CTP-2000K 正弦交流电源，电压幅值为 30 kV，电压频率为 20 kHz。通过棒-板电极对试样加压，铜棒电极直径 6 mm，曲率半径为 1 mm，铜板电极为直径 8 cm 的圆板。通过罗氏线圈及示波器，获得包括耐电晕放电时间、起晕电压参数。

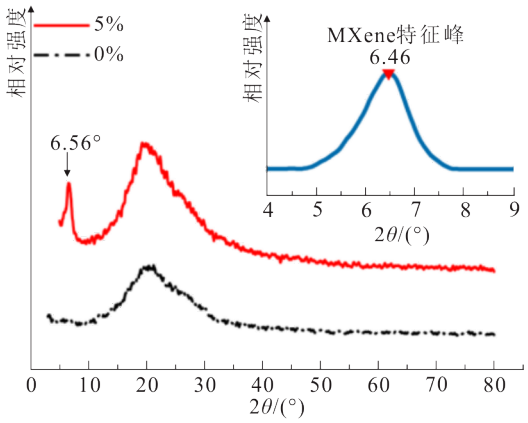
1.3.2　等温表面电位衰减测试平台

采用等温表面电位衰减测试系统(见图 7)测量样品表面陷阱分布特性[20-21]。实验在室温下进行，电晕放电装置与栅极和样品间距均为 50 mm，设定栅极电位为−3 kV，对材料表面进行均匀充电 2 min。随后，移开充电模块，并迅速将测试模块放置在试样上方。采用 Trek 347B 型电位计，静电探头在样品上方 3 mm 处实时监测，并将采集到的信号传输至计算机，通过分析计算陷阱能级和陷阱密度的变化趋势[22]。

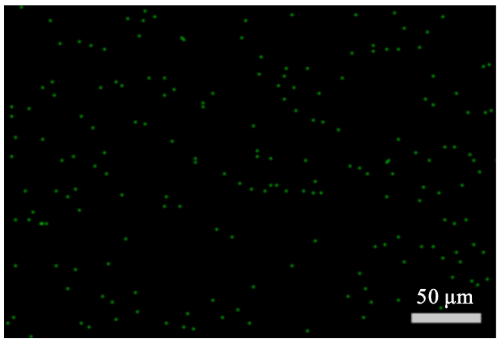
1.3.3　表面电导率测试

采用 Keithley 6487 皮安表测量样品表面电导率。实验在温度为 25 ℃、湿度为 30%的环境下，采用直流+500 V 电压，为确保结果准确，每组样品测试 5 次，取 1 min 后电流稳定时的平均值。利用式(1)计算各样品表面电导率。

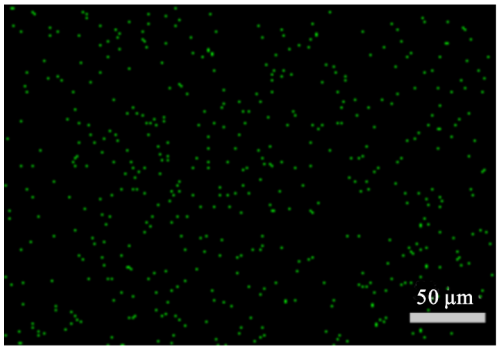
$$\gamma_s = \frac{I_s / l}{U / d} \tag{1}$$



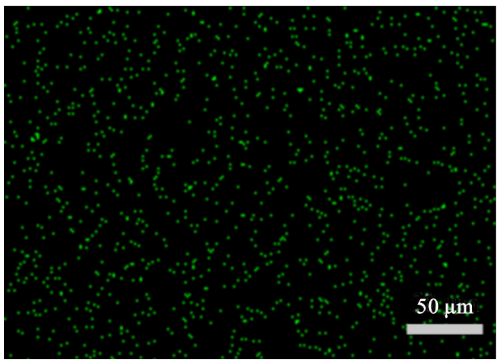
(a) MXene与MXene/PI的XRD



(b) 1%MXene/PI的EDS



(c) 2%MXene/PI的EDS

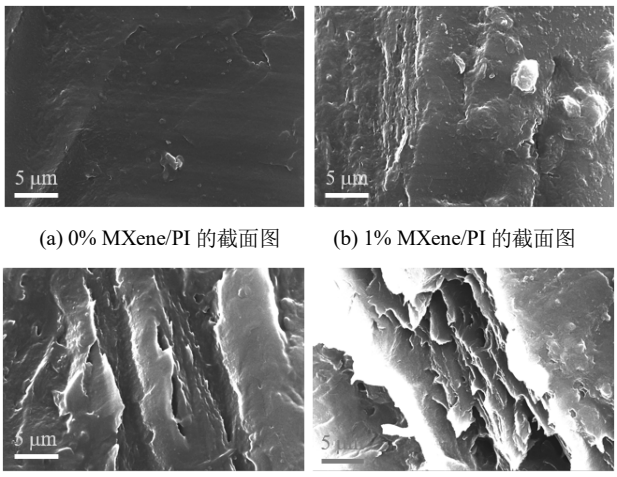


(d) 5%MXene/PI的EDS

图 4　复合薄膜的 XRD 与 EDS 结果

Fig.4　XRD and EDS results of composite films

式中：γ_s为材料表面电导率；d 为导体间的距离，m；l 为导体长度，m，d 与 l 均为 1 cm；U 为所加直流电压，取 500 V；I_s为通过样片表面的电导电流。



(a) 0% MXene/PI 的截面图 (b) 1% MXene/PI 的截面图

(c) 2% MXene/PI 的截面图 (d) 5% MXene/PI 的截面图

图 5 不同掺杂比例复合薄膜的截面图

Fig.5 Cross-section of composite films with different doping ratios

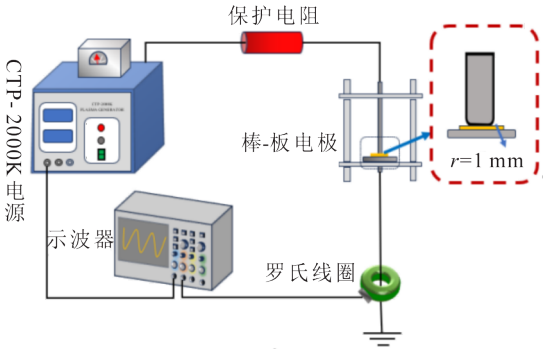


图 6 耐电晕放电特性测试平台

Fig.6 Test platform for corona discharge resistance characteristics

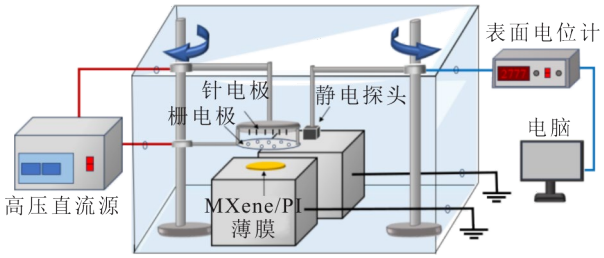


图 7 等温表面电位衰减测试平台

Fig.7 Test platform for isothermal surface potential decay

1.3.4 散热能力检测

将不同 MXene 掺杂比例复合薄膜平整覆盖于加热片表面，测试中加热片施加恒定电压 6 V，使用 Fluke Ti450 红外热成像仪以 5 s 为间隔持续监测表面温度变化 120 s。通过温度-时间曲线表征填料含量对薄膜散热能力的影响。实验在(18±1) ℃恒温环境中进行，每组重复测试 3 次取平均值。

2 实验结果

2.1 电学实验结果

2.1.1 耐电晕实验

为避免因 MXene 掺杂不均导致的耐电晕时长误差，确保实验结果的准确性和可靠性，绘制 Weibull 分布图来描绘不同掺杂含量薄膜的耐电晕时长，每组测试 10 次，如图 8 所示。由图 8 可以看到，随着 MXene 含量的增加，复合薄膜的耐电晕能力逐渐增强。在掺杂比例为 5%时，复合薄膜的平均耐电晕时间达到了 142 min(见表 2)，是未掺杂 PI 薄膜耐电晕时间的 4 倍以上，添加高浓度的 MXene 后，复合薄膜的耐电晕时间得到了极大延长。由威布尔分布图可发现，耐电晕时长测试结果在 5%时有一定的分散性，这主要是由于高比例 MXene 的引入在材料内部的不均匀性，产生一定的团聚，但 5%整体的耐电晕时长明显高于其他比例。

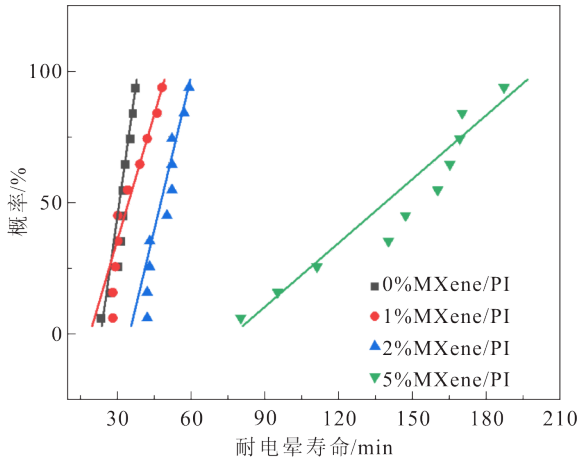


图 8 不同掺杂质量分数复合薄膜的耐电晕时间

Fig.8 Corona resistance time of composite films with different doping ratios

表 2 不同掺杂质量分数复合薄膜的平均耐电晕时间

Table 2 Average corona resistance time of composite films with different doping ratios

掺杂质量分数/%	平均耐电晕时间/min	掺杂质量分数/%	平均耐电晕时间/min
0	32	2	49
1	35	5	142

由图 9 可见，随着二维纳米片 MXene 的加入，聚酰亚胺复合薄膜的临界起晕电压呈现出显著的提

升趋势。这一现象主要源于 MXene 材料独特的二维结构和优异的导电特性。随着掺杂含量的增加，MXene 在薄膜内逐渐相互搭接，构建了高效的导电网络，使得表面电荷的消散更快，有效抑制了空间电荷的积累，降低了电极-薄膜界面的残余电场，从而减弱了初始电晕放电的产生。

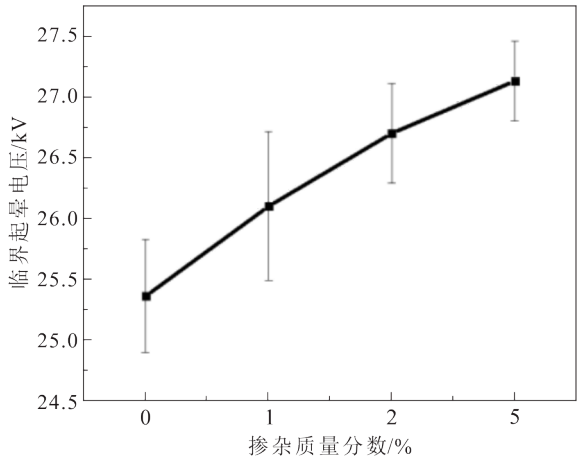


图 9　不同掺杂比例复合薄膜临界起晕电压

Fig.9　Critical corona voltage of composite films with different doping ratios

2.1.2　表面陷阱特性分析

图 10 中显示了随着 MXene 含量的增加，复合薄膜浅陷阱能级和密度呈现先增大后减小的趋势，在 MXene 质量分数为 1%时达到最大值，总体都高于 PI 薄膜；深陷阱能级整体变化幅度较小，而深陷阱密度随着 MXene 质量分数的增加显著减小。

2.1.3　表面电导率结果

由图 11 可以看到，随着 MXene 含量的逐渐提

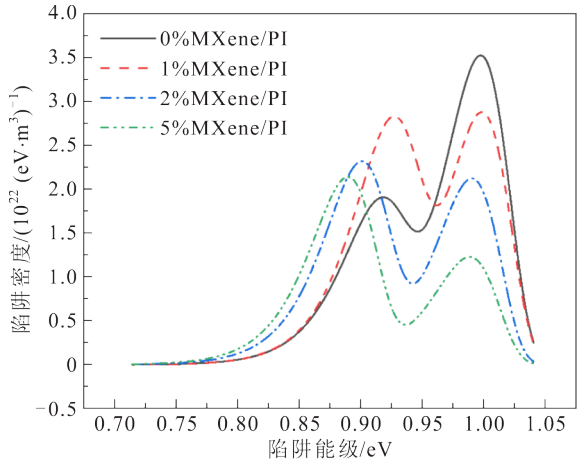


图 10　不同掺杂质量分数表面电子陷阱分布情况

Fig.10　Distribution of electron traps on surfaces with different doping ratios

升，聚酰亚胺复合薄膜表面电导率逐渐增加，这一现象主要由于随着 MXene 的添加，导电路径逐渐形成以及薄膜表面深陷阱密度显著减小。

随着掺杂含量的增加，MXene 在薄膜中的分散和排列变得足够密集，彼此之间相互搭接，能够形成稳定的导电网络，为电荷提供了有效的传输路径，提高了薄膜的电导能力，使得电导电流大幅上升[23]。同时，从图 10 陷阱分布进行分析，当 MXene 掺杂含量不断增加时，复合薄膜中的深陷阱密度逐渐减小。深陷阱通常阻碍电荷的移动，随着深陷阱密度的降低，电荷在材料中的迁移率得到显著提升，从而加快了电荷的流动，使得表面电导率随之逐渐上升。

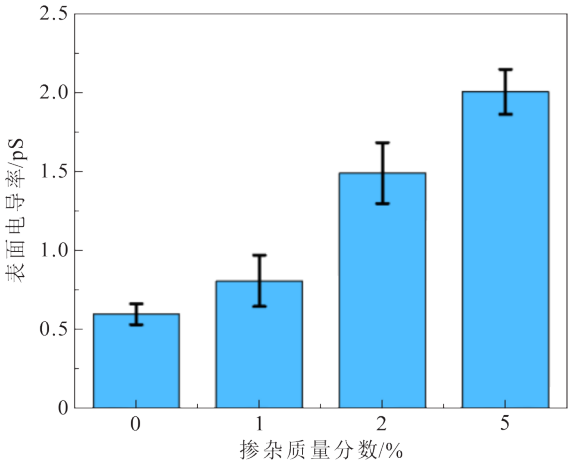


图 11　不同掺杂质量分数的表面电导率

Fig.11　High field conductance with different doping ratios

2.2　热导率实验结果

根据表 3 数据可知，随着 MXene 含量的增加，MXene/PI 复合薄膜的热导率先增大后减小再增大，但整体都高于 PI 薄膜的热导率，当 MXene 质量分数为 1%时，其热导率最大。在低掺杂浓度阶段，由于 MXene 本身具有良好的热导率，其均匀分散在聚酰亚胺基体中，热量能够通过 MXene 快速传递，因此热导率显著提高。

表 3　不同掺杂质量分数复合薄膜的热导率

Table 3　Thermal conductivity of composite films with different doping ratios

掺杂质量分数/%	0	1	2	5
导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.066	0.135	0.098	0.107

随着填料含量的进一步增加，热导率降低的现象可能与二维填料的团聚有关，可能因团聚形成局

部堆叠，导致界面数量剧增。声子在两种不同材料之间传递时，如果两种材料的声学阻抗差别大，声子就很难顺利穿过界面，反而会被散射，使得热阻上升，整体导热性能下降[24]。当 MXene 含量较高时，材料片层间通过物理接触形成连续的导热网络，声子可通过 MXene-MXene 直接通路高效传输，形成了高效导热路径，导致热导率再次上升。

3 讨论分析

3.1 表面电荷积聚特性的影响

根据图 10 陷阱分布，进一步分析其陷阱变化规律，如图 12 所示。

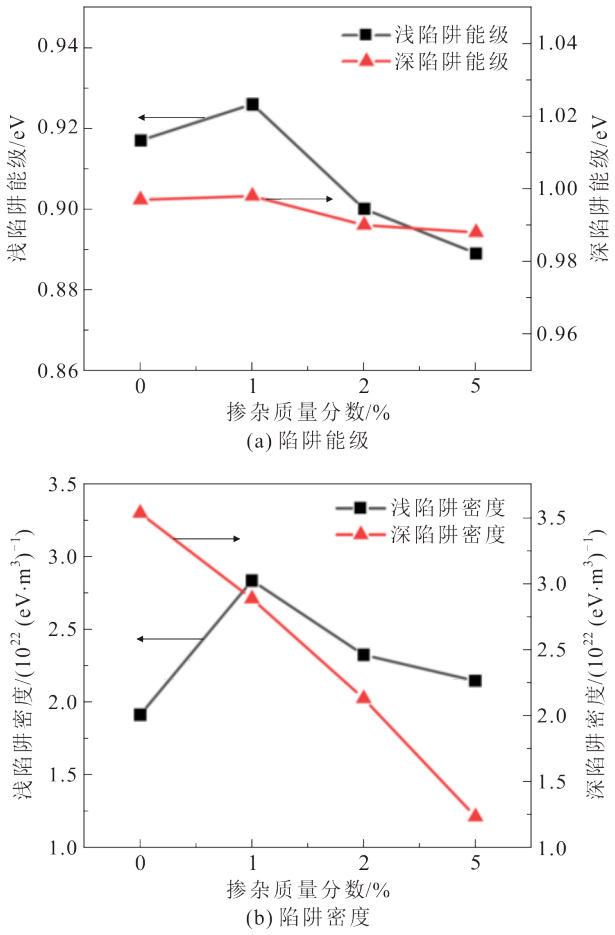


图 12 不同掺杂质量分数薄膜深浅陷阱峰值参数变化

Fig.12 Variation of trap peak parameters of thin films with different doping ratios

MXene 含量的增加导致深陷阱密度的大量减少，减少了电子和空穴在迁移过程中遇到的障碍，被长期捕获的电荷减少，更多电荷可通过浅陷阱脱陷或直接参与传导，使更多的载流子在电场作用下自由移动，进而提高了载流子的迁移率。

而随着 MXene 增加到较高含量时，聚酰亚胺薄膜中深浅陷阱能级都减小，表明电荷脱陷势垒降低，导致电荷更容易逃散，这可能与 MXene 含量增加，在薄膜中逐渐形成导电网络有关，使得浅陷阱电荷脱陷后经 MXene 快速传导，同时未被捕获的电荷直接通过导电网络迁移。

图 13 为棒板电极之间的电场示意图。由于电源是高频交流电，在棒电极电压为负压时，会在电极缝隙产生向下的残余电场 E_{res}，当电压反转，棒电极为正压时，向下的电压 E_1 会与残余电场 E_{res} 叠加共同作用，导致场强增大，导致电晕放电更加频繁和强烈[25]。与此类似，对于正棒负板转为负棒正板来说同样有向上的残余电场加强电晕效果。

在电压为负棒正板转为正棒负板时，残余电场会在薄膜表面残留仍未消散的负电荷，由上述对薄膜施加负压的表面电位衰减来看，随着 MXene 含量的增加，复合薄膜的深陷阱密度逐渐降低，薄膜表面对于负电荷的消散能力逐渐上升，减弱了残余电场对于电晕的作用。

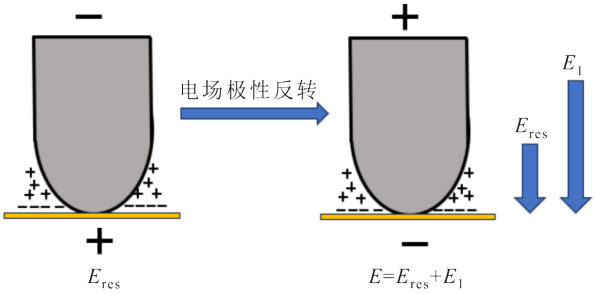


图 13 电场示意图

Fig.13 Schematic diagram of electric field

随着 MXene 含量的增加，深陷阱密度的减少有利于减少薄膜表面电荷积聚，同时，当 MXene 含量较高时，深浅陷阱能级逐渐减小，意味着陷阱对电荷的束缚能力减弱，这使得电荷更容易从陷阱中逃逸并迁移到薄膜的其他区域，加快表面电荷迁移速率，减小了残余电场对薄膜电晕的影响。同时，由图 11 可知，复合薄膜的表面电导率随 MXene 的加入逐渐提高，这使得电荷消散速度逐渐加快，减小了残余电场，薄膜的耐电晕性能进一步提高。

3.2 散热特性的影响

在电晕放电过程中，高能电子轰击引发局部高温，而热积累又会促进介质分解，降低薄膜绝缘能力，形成电-热协同的恶性循环。通过图 14 可以看到，复合薄膜经过长时间的电晕后表面出现烧蚀碳化区域，这一现象明确证实电晕老化是电场与热场

协同作用的结果。

根据表 3 的数据分析，MXene 的引入提升了复合薄膜的热导率，当质量分数为 1%时，复合薄膜的热导率达到峰值。为分析复合薄膜的散热特性，对复合薄膜进行红外测温，通过加热片控制加热温度以及时间，观察其散热能力，见图 15。

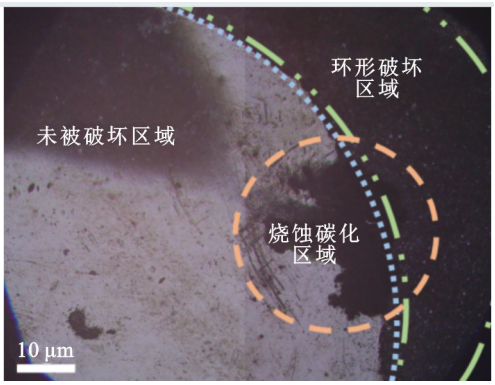


图 14　复合薄膜电晕后的烧蚀碳化痕迹

Fig.14　Ablative carbonization marks of composite film after corona

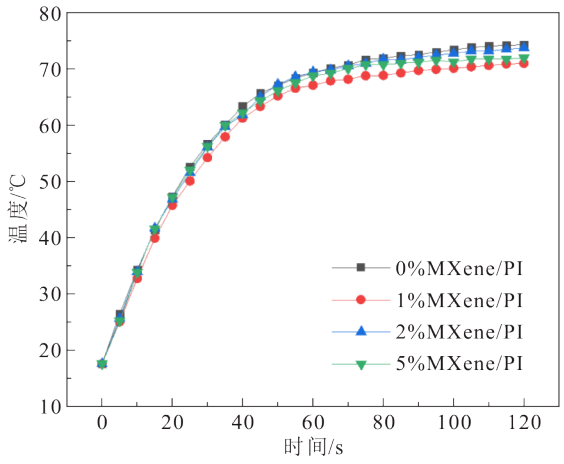


图 15　不同掺杂比例复合薄膜的散热能力

Fig.15　Heat dissipation capacity of composite films with different doping ratios

由图 15 可以看出，未掺杂聚酰亚胺薄膜表现出最高的稳态温度，表明其散热能力相对较弱。随着 MXene 纳米片掺杂含量的增加，1%掺杂质量分数样品展现出最优异的散热性能，其稳态温度最低，这与热导率结果相符。

电晕放电产生的热量会加速聚酰亚胺的热老化，而热分解产物又会进一步加剧电晕老化。高温还会增加自由电子能量，提升其在介质中的迁移速率，不仅增大了电子与分子链的碰撞概率，也使电子脱陷-入陷过程更加频繁，这种反复的注入-抽出过程会对聚合物基体造成更严重的损伤。通过提高复合薄膜的热导率以及散热能力，可以抑制电晕对薄膜的破坏作用，提升薄膜的耐电晕时长。

3.3　电-热协同效应

电晕放电会通过 3 种主要机制加速 PI 材料的老化过程，如图 16 所示。首先，从电极发射的电子在电场作用下获得高能量，与空气中的氧气、氮气和水分子等发生碰撞电离，产生大量高能活性粒子。这些带电粒子以极高的动能轰击 PI 材料表面，直接导致聚合物分子链的断裂和分解，破坏材料原有的分子结构，使其绝缘性能逐步下降[26]。其次，电晕放电过程中会产生多种具有强腐蚀性的活性产物，包括臭氧、氮氧化物等，这些活性物质会加速高分子材料的化学裂解过程。同时，在放电和化学反应过程中会持续释放大量热能，使材料局部温度显著升高。这种长时间的高温环境会引发并加速材料的热老化，最终导致 PI 薄膜的绝缘性能完全失效。这 3 种机制(高能粒子轰击、化学腐蚀和热老化)往往协同作用，共同加速了聚酰亚胺材料在电晕放电环境下的老化降解过程[27]。

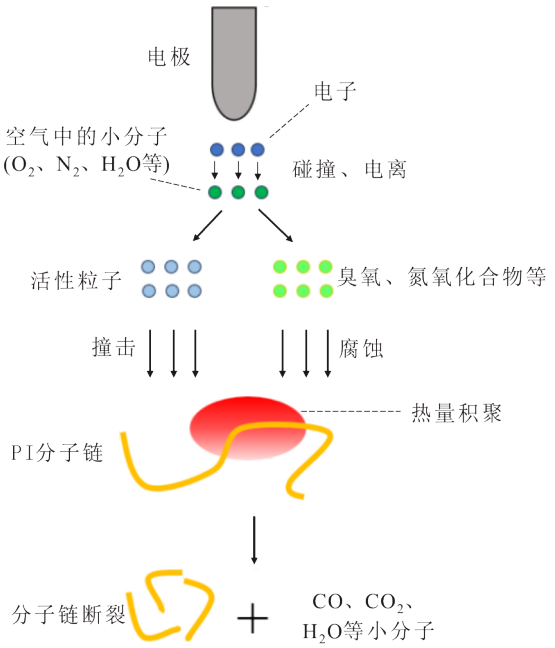


图 16　薄膜的电晕老化过程示意图

Fig.16　Schematic diagram of corona aging process of thin film

为区分比较 MXene/PI 复合薄膜在不同电晕时长的破坏作用，在本研究中根据相对耐电晕时长，将电晕破坏时长分为“短时耐电晕时间”和“长时

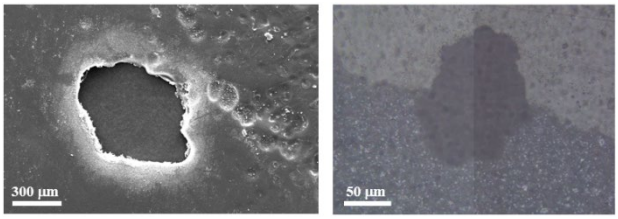
耐电晕时间”，如表 4 所示。在低含量 MXene 时，薄膜的耐电晕时长较短，电晕放电在薄膜表面形成较高的局部电场，尽管掺杂质量分数为 1%时热导率高，但电导率较低，电荷消散能力差，电子轰击占主导，释放的能量使材料分子链断裂，击穿点形成边缘清晰的微孔结构。当 MXene 含量较高时，在长时间电晕作用下，持续放电会导致热量不断积累，使薄膜局部温度升高，引发热氧化降解，击穿点呈现区域碳化状。

表 4 不同电晕时长的主导机制

Table 4 Dominant mechanism of different corona durations

电晕时长	短时间的电晕破坏	长时间的电晕破坏
主导机制	电子撞击	电-热协同

图 17(a)微孔状是 0%掺杂质量分数的 PI 薄膜在承受电晕 30 min 后的击穿点情况；图 17(b)烧蚀碳化状是 5%掺杂质量分数 MXene/PI 复合薄膜在承受电晕 147 min 后的击穿点情况。



(a) 微孔状 (b) 烧蚀碳化状

图 17 电晕后击穿点形貌

Fig.17 Morphology of breakdown points after corona discharge

聚酰亚胺薄膜在电晕作用下的破坏形态与作用时间密切相关，主要表现为短时间内高能带电粒子主导作用的孔状击穿，以及长时间由热积累和电子共同主导的烧蚀碳化状。对不同掺杂比例的复合薄膜电晕后击穿点的形貌数量进行了统计，每组样品 10 次，如表 5 所示。

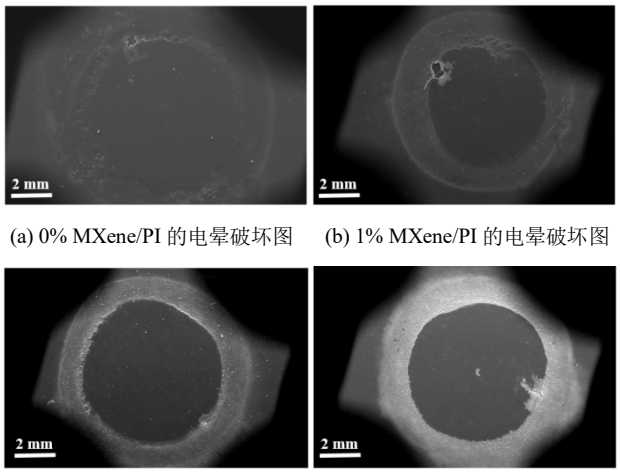
表 5 不同掺杂比例复合薄膜电晕后击穿点形貌分析统计

Table 5 Analysis and statistics of breakdown point morphology after corona of composite thin films with different doping ratios

掺杂质量分数/%	微孔状数量	烧蚀碳化状数量
0	6	4
1	6	4
2	3	7
5	2	8

同时，在电晕过程中，电晕放电产生的电子、紫外光以及局部高温等在强电场的作用下对聚酰亚胺高分子链进行撞击，使得有机高分子链断裂、熔融，形成了很多的小分子物质[28]。因此，薄膜被电晕破坏后析出了很多颗粒。

对于 MXene/PI 复合薄膜，随着 MXene 含量的增加，复合薄膜的耐电晕时长不断增加，析出的颗粒逐渐变多，电晕后复合薄膜的粗糙度逐渐变大，如图 18 所示。这些析出颗粒在薄膜表面形成一定的物理屏障，增加了薄膜的粗糙度和表面积，从而对电晕放电产生的电子形成更强的阻挡作用[29]，对电晕的冲击能量起到了一定的耗散作用。



(a) 0% MXene/PI 的电晕破坏图 (b) 1% MXene/PI 的电晕破坏图

(c) 2% MXene/PI 的电晕破坏图 (d) 5% MXene/PI 的电晕破坏图

图 18 电晕后颗粒析出形貌

Fig.18 Particle precipitation morphology after corona discharge

4 结论

1）MXene/PI 复合薄膜的深陷阱密度降低，这有助于促进表面电荷的消散，减小残余电场对电晕作用的加剧；此外，随着 MXene 含量的增加，复合薄膜的表面电导率逐渐增加，MXene 在薄膜内部逐渐形成导电网络，促进电荷的传递与消散，防止电场畸变，从而从电学方面提高了聚酰亚胺的耐电晕性能。

2）不同掺杂比例的 MXene/PI 复合薄膜的热导率和散热特性均高于 PI 薄膜，这有助于薄膜在长时间受到电晕破坏时，减少热积累，防止局部高温使薄膜受到热老化加剧薄膜的分子链断裂。

3）对于复合薄膜的耐电晕特性，在短时间内的主导机制是高能带电粒子的撞击产生的表面电荷积聚，而随着耐电晕时长的增加，转为电—热协同

破坏的作用。为提高薄膜耐电晕水平，应从增强薄膜电荷输运能力和提升热消散效率两方面入手。

参考文献　References

[1] 刘金刚，张秀敏，田付强，等. 耐高温聚合物电介质材料的研究与应用进展[J]. 电工技术学报，2017，32(16)：14-24.
LIU Jingang, ZHANG Xiumin, TIAN Fuqiang, et al. Recent progress of research and development for high-temperature resistant polymer dielectrics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 14-24.

[2] 张博，郭建华，王晓敏，等. 高导热 MXene 改性 PI 的多温度直流闪络特性[J]. 高电压技术，2025，51(12)：5859-5868.
ZHANG Bo, GUO Jianhua, WANG Xiaomin, et al. Multi-temperature DC flashover characterization of high thermal conductivity MXene-modified PI[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(12): 5859-5868.

[3] 乌江，何敏恒，王廷玉，等. 等离子体与化学氟化叠加处理对聚酰亚胺薄膜表面绝缘性能影响[J]. 高电压技术，2025，51(4)：2025-2036.
WU Jiang, HE Minheng, WANG Tingyu, et al. Synergistic effect of plasma and chemical fluorination treatment on the surface insulation properties of polyimide film[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 2025-2036.

[4] 杨俊，吴建东，罗响，等. 方波脉冲电场参数对聚酰亚胺中空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1413-1421.
YANG Jun, WU Jiandong, LUO Xiang, et al. Influence of square wave pulsed electric field parameters on the space charge characteristics of polyimide[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1413-1421.

[5] YIN W J. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6): 18-23.

[6] 曹开江，吴广宁，罗杨，等. 高频脉冲下牵引电机绝缘的局部放电特性[J]. 高电压技术，2012，38(6)：1376-1382.
CAO Kaijiang, WU Guangning, LUO Yang, et al. Partial discharge characteristics of insulation used in inverter-fed traction motor under high frequency impulse[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1376-1382.

[7] 郭小霞，吴广宁，周凯，等. 高压方波脉冲对聚酰亚胺薄膜表面形貌的影响[J]. 高电压技术，2008，34(8)：1656-1661.
GUO Xiaoxia, WU Guangning, ZHOU Kai, et al. Influence of continuous square impulses voltage on surface shape of polyimide film[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1656-1661.

[8] 徐萌，安钊，王野，等. 低温等离子体处理对聚酰亚胺纳米复合薄膜表面特性的影响[J]. 绝缘材料，2021，54(5)：47-53.
XU Meng, AN Zhao, WANG Ye, et al. Effect of non-thermal plasma modification on surface characteristics of polyimide nanocomposites film[J]. Insulating Materials, 2021, 54(5): 47-53.

[9] 谢东日，闵道敏，黄印，等. 纳米复合电介质击穿与耐电晕性的纳米掺杂效应[J]. 中国电机工程学报，2018，38(19)：5909-5918.
XIE Dongri, MIN Daomin, HUANG Yin, et al. Nano-doping effects on dielectric breakdown and corona-resistance properties of polymeric nanocomposites[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5909-5918.

[10] 罗杨，吴广宁，王鹏，等. 连续方波脉冲电压下温度对聚酰亚胺薄膜局部放电特性的影响[J]. 中国电机工程学报，2012，32(19)：154-160.
LUO Yang, WU Guangning, WANG Peng, et al. Effect of temperature on partial discharge properties of polyimide film under continuous square impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 154-160.

[11] 钟鑫，吴广宁. 温湿度对掺杂纳米氧化铝的聚酰亚胺薄膜耐电晕性能影响研究[J]. 高压电器，2017，53(7)：60-66.
ZHONG Xin, WU Guangning. Study on influence of corona resistance of temperature and humidity on polyimide film doped with nano alumina oxide[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 60-66.

[12] 李鸿岩，王峰，郭磊，等. 变频电机的匝间绝缘电老化机理[J]. 绝缘材料，2005，38(2)：57-60.
LI Hongyan, WANG Feng, GUO Lei, et al. Electric aging mechanism of wire insulation in inverter-fed motors[J]. Insulating Materials, 2005, 38(2): 57-60.

[13] 张明玉，刘立柱，翁凌，等. 聚酰亚胺/氧化铝复合薄膜在电晕放电下的老化过程及击穿特点[J]. 高电压技术，2016，42(12)：3941-3947.
ZHANG Mingyu, LIU Lizhu, WENG Ling, et al. Aging process and breakdown characteristic of polyimide/Al_2O_3 composite film under corona discharge[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3941-3947.

[14] LIU X X, JI T Y, LI N, et al. Preparation of polyimide composites reinforced with oxygen doped boron nitride nano-sheet as multifunctional materials[J]. Materials & Design, 2019, 180: 107963.

[15] 马莉莉，马涛，王宝祥，等. 聚酰亚胺/改性六方氮化硼复合薄膜的耐电晕性能研究[J]. 绝缘材料，2018，51(4)：28-31.
MA Lili, MA Tao, WANG Baoxiang, et al. Study on corona resistance properties of polyimide/f-BN composite films[J]. Insulating Materials, 2018, 51(4): 28-31.

[16] WANG J F, SHEN M M, LIU Z X, et al. MXene materials for advanced thermal management and thermal energy utilization[J]. Nano Energy, 2022, 97: 107177.

[17] 张兴涛，吴广宁，杨雁，等. 介质阻挡放电等离子体处理对聚酰亚胺表面放电的影响[J]. 高电压技术，2018，44(9)：3097-3104.
ZHANG Xingtao, WU Guangning, YANG Yan, et al. Influence of dielectric barrier discharge plasma treatment on the surface discharge of polyimide film[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 3097-3104.

[18] 储娜，骆春佳，晁敏，等. 多功能 MXene-CCNT/聚酰亚胺电磁屏蔽薄膜的制备与性能[J]. 复合材料学报，2024，41(8)：4146-4159.
CHU Na, LUO Chunjia, CHAO Min, et al. Preparation and properties of multifunctional MXene-CCNT/polyimide electromagnetic shielding films[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4146-4159.

[19] GUO D Y, TAN B Z, JIANG X J, et al. Multifunctional polyimide/boron nitride nanosheet/$Ti_3C_2T_x$ MXene composite film with three-dimensional conductive network for integrated thermal conductive, electromagnetic interference shielding, and Joule heating performances[J]. Composites Science and Technology, 2024, 254: 110690.

[20] HAN Y S, LI S T, MIN D M. Trap energy distribution in polymeric insulating materials through surface potential decay method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 639-648.

[21] 董曼玲，杨知非，詹振宇，等. 高压套管用液体硅橡胶闪络性能的直接氟化改善[J]. 高电压技术，2025，51(1)：290-298.
DONG Manling, YANG Zhifei, ZHAN Zhenyu, et al. Improvement of flashover performance of liquid silicone rubbers for high voltage

bushings by direct fluorination[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 290-298.

[22] SIMMONS J G, TAM M C. Theory of isothermal currents and the direct determination of trap parameters in semiconductors and insulators containing arbitrary trap distributions[J]. Physical Review B, 1973, 7(8): 3706-3713.

[23] 张贝，晁敏，李晓东，等. 具有恶劣环境耐受性的柔性 MXene-炭黑/聚酰亚胺电磁屏蔽复合薄膜的制备与性能[J]. 复合材料学报，2025，42(6)：3110-3121.
ZHANG Bei, CHAO Min, LI Xiaodong, et al. Preparation and properties of flexible MXene-carbon black/polyimide electromagnetic shielding composite films with harsh environment resistance[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(6): 3110-3121.

[24] TAO K K, SUN G H, FENG C C, et al. Structural design and research progress of thermally conductive polyimide film-a review[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2023, 44(13): 2300060.

[25] 吴广宁，张兴涛，杨雁，等. 方波脉冲下不同纳米添加物对聚酰亚胺薄膜电气性能影响[J]. 高电压技术，2017，43(12)：3819-3826.
WU Guangning, ZHANG Xingtao, YANG Yan, et al. Effects of different nano fillers on electrical properties of polyimide films under impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3819-3826.

[26] 罗杨，吴广宁，刘继午，等. 表面放电对聚酰亚胺薄膜材料的电气损伤特性研究[J]. 中国电机工程学报，2013，33(25)：187-195.
LUO Yang, WU Guangning, LIU Jiwu, et al. Electrical damage characteristics of polyimide film caused by surface discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 187-195.

[27] 张镱议，赵梓炜，刘捷丰，等. 耐电晕聚酰亚胺薄膜研究进展[J]. 电工技术学报，2023，38(5)：1190-1205.
ZHANG Yiyi, ZHAO Ziwei, LIU Jiefeng, et al. Research progress of corona resistant polyimide films[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1190-1205.

[28] LUO Y, WU G N, LIU J W, et al. Investigation of temperature effects on voltage endurance for polyimide/Al_2O_3 nanodielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1824-1834.

[29] 张兴涛，吴广宁，杨雁，等. 聚酰亚胺纳米复合薄膜耐电晕机理研究[J]. 绝缘材料，2016，49(8)：17-20，25.
ZHANG Xingtao, WU Guangning, YANG Yan, et al. Research on corona resistance mechanism of polyimide nano composite films[J]. Insulating Materials, 2016, 49(8): 17-20, 25.



乌　江
1986—，男，博士，副教授，硕导
主要从事极端环境下聚合物介质充放电效应与放电抑制技术研究
E-mail: wujiang@xpu.edu.cn

WU Jiang
Ph.D.
Associate professor



王晓敏
1999—，女，硕士生
主要从事固体电介质表面绝缘性能提升与特性测量研究
E-mail: 1447710179@qq.com

WANG Xiaomin



曹　雯(通信作者)
1983—，女，博士，教授，硕导
研究方向为绝缘老化与失效机理研究、电力设备状态检测与资产管理、电力系统防雷接地等
E-mail: caowen@xpu.edu.com

CAO Wen
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-06-14　在线出版日期　2025-12-16　　编辑　曹昭君