

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024
July 8-11, 2024
Guangzhou, China

**D31-先进电工材料电气绝缘技术
及应用**

**D31-Advanced Electrical Material
Electrical Insulation Technology and
Applications**

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

D31-先进电工材料电气绝缘技术及应用

分会主席：别朝红、杨庆新、高克利、蔡希鹏、李盛涛

D31-01**大型发电机高导热主绝缘关键技术**

陈庆国

哈尔滨理工大学

D31-02**电力设备绝缘气体 SF₆ 环保替代技术**

高克利

中国电力科学研究院

D31-03**面向未来装备的智能绝缘材料**

何金良

清华大学电机系

D31-04**先进电工材料发展战略研究**

周敏

华中科技大学

D31-05**具备高导热、高机械强度的 BNNT/SiC/BNNT 叠层复合芳纶纸**

任俊文*、陈钰、卞超、张稼程

四川大学电气工程学院

随着新能源汽车驱动电机不断朝着高速高效、高功率密度、轻量紧凑化方向发展，传统芳纶绝缘纸无法应对超高电压平台带来的电机局部放电、热应力集中问题。本文以高力学强度一维芳纶纳米纤维（ANF）为网络骨架，以高导热一维氮化硼纳米管（BNNTs）为导热基元，以非线性电导纳米碳化硅（SiC）为防电晕基元，通过真空辅助抽滤和热压技术制备了一种具有三明治结构的 BNNT/SiC/BNNT 叠层复合芳纶纸，并系统研究了叠层复合芳纶纸的微观形貌、导热特性、介电特性和机械性能。其中，ANF/BNNT 为上下表层材料，以 ANF/SiC 为芯层材料。所制得的复合纸具有高导热系数、低介电损耗和优异的耐热性能。得益于特殊的三明治结构和高力学强度 ANF 网络骨架，叠层复合芳纶纸在外层 BNNT 的保护下，弥补了 SiC 的加入引起电导率下降的不足，整体仍然保持较高的击穿场强和良好的机械性能。高场电流测试结果表明随着负载增加，电导率呈现出明显的非线性特性，有限元仿真验证了电场分布得到有效改善。此研究可为新能源汽车电压平台的更高发展提供技术参考。

D31-06**AI 辅助的高温储能聚合物电介质的模块化分子设计方法**

仵超*、周颖、梁曦东

清华大学电机系

聚合物电介质被广泛用于国防、航空航天、能源和运输等领域，是实现能量储存与转化的重要媒介。工业级聚合物电介质大多是柔性聚烯烃或刚性芳烃材料，具有高能量密度或高热稳定性，但不能两者兼而

有之。本研究提出 AI 辅助的聚合物分子设计方法 polyVERSE, 通过单体-聚合物结构生成、聚合物特性计算-预测与性能筛选三大步骤, 提出并制备得到兼具耐高温性、击穿强度、储能密度等多项性能的储能聚合物。研究获得了 200℃ 极端温度条件下具有目前最高储能密度的聚合物电介质薄膜, 并针对聚合物合成过程开发出多种可绿色生产的高性能聚合物。所用方法在多项性能上预测结果与实验结果误差较小, 单体均可通过商用渠道获得, 具有规范化合成制备流程, 为规模化合成制备提供了可能, 实现了多种性能的协同提升。本项工作所用的人工智能辅助分子设计方法具有广阔的应用空间, 可针对电、热、回收特性以外的其它性能进行预测与筛选, 相关方法可推广至绝缘液体、树脂等其他电工装备绝缘新材料高通量设计。

D31-07

Research on the Insulation Enhancement of Epoxy Based Nanocomposites with Plasma Treated Nano-alumina at High Temperature

Chao Dai*, Man Ding
Hohai University

To improve the thermal stability and insulation performance of epoxy resin (EP), the surface of alumina nanoparticles was treated by low-temperature plasma generated by a dielectric barrier discharge (DBD) device. The plasma-treated EP/alumina nanocomposites with a mass fraction of 1 wt% were fabricated. The variations of functional groups in the EP composites with/without plasma treatment were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, and the thermal stability of the specimens was analyzed by differential scanning calorimetry analysis. The space charge distributions, DC breakdown field strength, and the conductivity of the specimens were measured at 90 °C. Moreover, the results were further analyzed in depth. The results showed that the composites prepared with plasma-treated nano-alumina led to the improvement of the thermal stability of the composites. The plasma-treated nano-alumina significantly increased the charge injection threshold, suppressed the internal electric field distortion, and suppressed the space charge accumulation and dissipation of the EP. It was elucidated that plasma-treated nano-alumina particles can effectively reduce deep trap density, trapped charges, charge injection and transportation and improve composites' insulation performance at high temperatures.

D31-08

基于硫脲-亚胺双重动态键的可修复硅氧烷电气性能及修复性能研究

翟涵君、吕泽鹏*、张磊、徐毅明、王琪瑄、吴锴、成永红
西安交通大学

实验目的

可修复材料作为一种新型材料, 受到损伤后能在一定条件下进行自我修复, 恢复一定的原始性能。然而, 目前对可修复材料的研究多集中在医学、航海等领域, 对于材料的基本性能及修复性能多集中在机械强度方面, 较少研究关注电气性能及其修复特性。同时, 由于化学键的动态特性, 可修复材料难以实现机械性能和修复性能的共同提升。本文以聚二甲基硅氧烷为基体, 选择具有动态性的亚胺键提升材料修复性能, 选择刚度较强且具有一定动态性的硫脲键提升材料机械性能, 通过调整二者比例调整材料性能, 聚二甲基硅氧烷作为材料基体, 为材料提供了良好的绝缘特性。本研究旨在研究可修复材料基本电气性能, 以及不同动态键比例对材料修复性能和机械性能的影响, 为可修复材料在电气领域的应用提供了参考。

实验方法

本研究采用氨基双封端的聚二甲基硅氧烷 (分子量为 3000) 与对苯二甲醛和对苯二异硫氰酸酯合成同时含有硫脲键和亚胺键的自修复材料, 调整硫脲键和亚胺键的比例制备五组样品。首先对样品的基本性能进行表征, 通过傅里叶变换红外光谱分析验证了硫脲键和亚胺键含量的比例变化, 通过电导电流测量, 击穿电压测量和宽带介电谱测量得出样品的基本电学性能, 通过 PEA 法测量样品内部空间电荷分布情况, 通过万能试验机得到样品基本力学性能。对样品进行切割损伤处理后, 将样品切口贴合并并在 90℃ 条件下进行热处理, 随后每隔 24 h 观察样品损伤位置修复情况。待确认所有样品切口已基本修复完毕后, 再次进行

基本电学性能和力学性能实验, 并对修复前后样品性能下降情况进行分析, 以修复前后击穿场强、电导电流、宽带介电谱、拉伸强度和断裂伸长率等对修复效率进行表征。

实验结果及结论

随着硫脲键的加入, 制备的样品由原本的液态向固态过度, 只含有亚胺键样品呈现液态, 其他固态样品的拉伸强度呈现上升趋势。所制备的样品具有良好的击穿强度、电阻率和空间电荷分布情况, 由于动态键的加入, 样品相对介电常数和损耗相比于商用硅氧烷略有提高。进行切割损伤后, 样品修复时间随着硫脲键的增加而增加, 含有 50%亚胺键的样品在热处理 48h 后, 划痕基本愈合, 仅含硫脲键的样品则需要 96h。修复后的材料基本性能有所下降, 但仍具有良好的绝缘性能。得到以下结论:

1. 亚胺键的加入提升了材料的修复性能, 使其可以在更短时间内修复损伤; 硫脲键的加入提升了材料的机械强度。通过调整二者的比例可得到具有良好修复性和机械性能的材料;

2. 含有硫脲-亚胺双动态键的聚二甲基硅氧烷材料仍然具有良好的电气性能, 并且在机械损伤修复后, 电气性能也得到不同程度的恢复。

D31-09

面向高性能微纳能源器件的先进电介质材料

李祎*¹、肖淞¹、唐炬¹、张晓星²

1. 武汉大学
2. 湖北工业大学

以摩擦纳米发电机为代表的微纳能源器件作为微电源或自取能传感器, 有望推动输配电装备状态的自供电感知。TENG 的输出性能与作为摩擦起电层的电介质材料接触起电和电荷输运特性密切相关。本报告首先介绍了 TENG 及电介质摩擦起电层的相关基础理论和模型; 其次, 阐述了 TENG 电介质材料的选材、改性(表面改性、体改性)和结构设计策略。其中, 表面改性和体改性涉及表面粗糙度控制、官能团调控、电介质材料介电参数优化。在电介质的结构设计方面, 重点介绍了电荷传输层、捕获层、阻挡层的原理及通过多层结构来提高 TENG 介电性能的典型方法。最后, 强调了本领域发展面临的挑战和未来发展趋势, 有望为面向高性能 TENG 的先进电介质材料开发提供参考。

D31-10

电场作用下蒸发冷却介质 C₆F₁₂O 的相变演化与沸腾状态数值模拟

田双双、王家浩*、胡峰、刘本立、骆永超

湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心

相变冷却技术冷却效率高、安全可靠, 是实现高功率、大容量电工装备高效散热的新途径。冷却介质配方是相变冷却技术的核心, 但已有介质在相容性、稳定性、经济性、环保性等方面仍存在不足, 可考虑将综合性能更优、满足相变潜热要求的 C₆F₁₂O 介质应用于相变冷却装备中。本文利用数值模拟的方法, 将基于 Cahn-Hilliard 方程的相场法与电流体动力学理论相结合, 考虑电-流-热-相场的相互耦合作用, 研究了温度、电场强度、电场方向等因素对 C₆F₁₂O 介质沸腾过程中气泡运动演化与体系的沸腾状态影响。数值结果表明: 无电场条件下, T=330-335 K、T=335-350 K、T≥355 K 时, 体系分别处于初始核态沸腾、核态沸腾以及膜态沸腾阶段; 加入合适的电场可促进 C₆F₁₂O 气泡的运动演化, 但也需注意过高场强下气泡通道的形成, 避免绝缘性能降低的可能; 竖直方向的不均匀电场比均匀电场更能有效提高气泡释放速率; 水平方向的不均匀电场可在一定程度上避免气泡在高场强区域的大量聚集。研究可为 C₆F₁₂O 相变冷却介质的工程应用提供理论指导。

D31-11

基于相变材料的超疏水光热防冰涂层

王鹏*、张佳轩、邓皓通

表面积冰严重危害设备安全运行造成经济损失, 太阳能光热除冰因其良好的光热除冰效果吸引了人们的注意。但由于夜间缺乏太阳能导致需额外输入能源, 例如电能, 才可避免夜间冰沉积, 而这一特性也限制了其广泛应用。本文受北极熊皮毛长效防冰机理启发, 制备了一种超疏水光热涂层, 该涂层以室温硫化硅橡胶存储相变材料氟化正十四烷微胶囊, 并掺入黑色素染色剂进一步提高光热效果, 将超疏水、光热和箱变材料三者协同作用以实现长效节能防冰。其中, 通过溶剂中乙酸乙酯的挥发使得相变微胶囊突出到涂层表面, 从而形成微米级粗糙度。此外, 由于事先对相变微胶囊进行氟化处理, 不仅实现了涂层表面超疏水从而使得表面水分快速流失从而延缓结冰, 而且利用了正十四烷的高潜热从而实现白天吸收热能晚上释放热能从而加速冰层融化。该涂层接触角高达 162° , 滚动角为 2° , 可延缓结冰时间 145%, 并在 1kW/m^2 的光照强度下相比无涂层试板除冰时间减少 87.5%。除此之外, 优异的稳定性以及电性能也为输电线路除冰技术的发展提供了崭新的方向和可能性。

D31-12

Design and Optimization of All-Organic Dielectric Films with High Energy Storage Performance via Electrospinning Process

Kun Xing¹, Shao-Long Zhong², Xin-Jie Wang², Lei Huang², Yi Gao¹, Zhi-Min Dang^{*2}

1. Beijing University of Posts and Telecommunications

2. Tsinghua University

High dielectric constant PVDF-based polymers have always been a research hotspot in the field of energy storage polymers. However, their low breakdown strength and excessive residual polarization have significantly limited their application potential in dielectric films. In this work, an all-organic dielectric film with a three-layer structure was designed using an electrospinning-hot pressing process. The outer layer is a nanoscale PMMA layer, the middle layer is a coaxial structure with PMMA as the shell layer and PVDF as the core layer. Based on this structural design, by adjusting the mass fraction of the ferroelectric material P (VDF-HFP) and the linear material PMMA in the coaxial structure and the thickness of the outer PMMA nanolayer, the dielectric constant and breakdown strength are simultaneously greatly improved. Finally, under a high field of 740 kV/mm, an excellent discharge energy density was obtained. Surprisingly, the discharge efficiency has also reached an extremely high level. Experimental results and computational simulations show that PMMA evenly separates P(VDF-HFP) in the coaxial structure. While not affecting polarization capability, many P(VDF-HFP)/PMMA interfaces limit the movement of carriers. In addition, the outer PMMA nanolayer further increases the barrier height for charge injection at the dielectric/electrode interface and inhibits electrical conduction, thereby greatly improving the breakdown strength of the all-organic film. The superiority of the structural design allows the film to maximize the P(VDF-HFP) component and obtain a high dielectric constant without sacrificing breakdown strength. This work presents a novel idea for preparing all-organic high-energy storage dielectric films with high breakdown strength and high discharge efficiency.

D31-13

Preparation and space charge characteristics of boron nitride/epoxy nanocomposite dielectric modified by iron oxide

Ruizhe Li¹, Leiyu Hu¹, Weiwang Wang^{*1}, Yongsheng Xu², Mingli Fu²

1. Xi'an Jiaotong University

2. CSG Electric Power Research Institute

The accumulation of space charge can lead to local electric field distortion, resulting in insulation breakdown,

thus affecting the dielectric life. In this paper, the space charge characteristics of boron nitride/epoxy nanocomposite dielectrics modified with iron oxide are studied for the problem of space charge accumulation in the dielectric under direct current field. Firstly, doped boron nitride nanosheets and nano-magnetic γ -Fe₂O₃ epoxy nanocomposites were prepared. It was found that more nanoparticles were distributed near the surface by scanning electron microscopy. Then, the space charge characteristics and electric field distribution were measured by PEA method. It was found that filling 0.5 wt% of nanoparticles can achieve the overall optimal space charge suppression effect, while filling 0.1 wt% of nanoparticles can achieve the overall optimal electric field distortion improvement effect. Finally, the trap properties of the composite were studied by thermal stimulation current. It is found that the interface modification can reduce the space charge accumulation by introducing deep traps near the electrode/sample. The results of this study show that nano-doping can inhibit the space charge accumulation in the direct current field of epoxy dielectric, which provides a theoretical basis and experimental basis for optimizing the insulation design of power electronic equipment.

D31-14

电压稳定剂在 EPDM 绝缘表面的接枝方法及其对界面击穿强度的增强作用

纪多、李春阳*、杨旭、邵满智、赵洪

哈尔滨理工大学

三元乙丙橡胶 (EPDM) 增强绝缘是交联聚乙烯 (XLPE) 绝缘高压电缆附件的关键组成部分。EPDM/XLPE 界面的沿面放电威胁着电力电缆系统的安全运行, 也限制了其电压等级的进一步提高。为提高 EPDM/XLPE 界面电气强度, 以 4-烯丙氧基-2-羟基二苯甲酮(AOHBP)为电压稳定剂, 分别以 1:2、1:3 和 1:4 三种质量比制备的 DCP/AOHBP 混合试剂对 EPDM 试样进行表面接枝改性, 利用液相浸渍法和随后的 DCP 热引发自由基接枝反应, 实现了电压稳定剂 AOHPBP 在 EPDM 表面的针对性接枝。

SEM 和 XRD 分析结果表明, 经过液相浸渍后 EPDM 表面形成了均匀覆盖的添加剂结晶层, 致使试样表面粗糙度增大, 经过丙酮溶剂萃取后结晶完全消失, 试样粗糙度恢复至与未改性试样一致。通过 FTIR 和 ATR 对萃取前后 EPDM 样品表面化学成分进行分析, 结果表明, AOHPBP 分子能通过 DCP 引发的自由基加成反应接枝在 EPDM 表面, 萃取前 EPDM 表面存在大量未接枝的 AOHPBP 分子并形成结晶, 萃取后未接枝的添加剂分子被丙酮溶剂溶解, 而接枝的 AOHPBP 分子在 EPDM 表面保持较好的分散性和稳定性, 不再析出或形成结晶, 且混合试剂中 DCP 的比重越大, AOHPBP 的接枝量越高。在 0.2MPa 界面压力下, 对采用不同 EPDM 试样构成的 EPDM/XLPE 界面分别进行了交流和直流界面击穿实验, 对于未经萃取的改性 EPDM 试样, EPDM/XLPE 的交流界面击穿电压和直流界面击穿电压相比未改性 EPDM 均有一定提升, 且改性试样表面经过萃取后提升效果进一步增强; 当 DCP/AOHBP 混合溶液质量比为 1:2 时, 由于 AOHPBP 接枝率最高, 其界面击穿电压提升效果最优。

本工作探索了采用功能有机分子接枝方法提高聚合物绝缘材料界面耐电性能的新思路, 并提出电压稳定剂接枝是实现聚合物绝缘表面改性稳定可控的必要条件, 电压稳定剂接枝改性 EPDM 表面提升其界面耐电性能的效果可能与其吸收高能电子的作用有关, 且在光滑的界面上能更充分地发挥出电压稳定剂改性的作用效果。

D31-15

全有机微交联填料改性聚丙烯储能电介质的制备与性能研究

冒杰*

宁夏大学

BOPP 是应用最广泛, 工艺最成熟的电容器薄膜, 然而在高温下面临严重击穿场强降低和漏电流增加的问题, 难以满足新兴应用领域对电容器薄膜击穿性能和高温储能性能的更高要求。因此, 为了提高材料的耐高温性能, 抑制漏导损耗, 获得可批量生产的电容器薄膜, 这项工作将微交联聚丙烯作为柔性有机填

料添加到聚丙烯基体中,通过熔融流延的工艺实现了 CPP/PP 有机共混电容器复合薄膜的制备。微交联结构填料的异相成核作用提升了基体的结晶度,并且在聚丙烯基体内引入了大量电荷深陷阱,从而捕获和稳定自由电荷,进而提升聚丙烯高温下的击穿性能和储能性能。与无机纳米填料复合薄膜对比,发现柔性微交联填料的使用,克服了传统无机填料共混团聚和加工缺陷的问题,使连续化大批量制备成为可能。最终,改性后的 CPP/PP 复合薄膜在 125 °C 的高温下表现出优异的储能性能,充放电效率>95%的放电能量密度为 2.95 J/cm³,相比于纯 PP (0.37 J/cm³) 增强了 697%,且充放电循环和不同区域的储能性能测试结果证明其具有良好的储能性能稳定性。

D31-16

IGBT 封装用三氟丙基和苯基改性硅凝胶的改进电绝缘性能

王争东*、罗盟、曹晓龙、周远航、王然

西安建筑科技大学

本文报道了在有机硅凝胶中引入三氟丙基/苯基,制备了一种新型的增强电绝缘性能的硅凝胶,并通过分子模拟和实验对比分析了不同侧基对硅凝胶电绝缘性能的影响机理。结果表明,仅含高电子亲和苯基的硅凝胶击穿强度最高,达到 32.87kV/mm;强极化三氟丙基的引入使得硅凝胶在工频处的介电常数达到 5.1673,是纯硅凝胶的 1.88 倍。更重要的是,三氟丙基和苯基改性的硅凝胶在工频条件下的介电常数和击穿强度分别提高到 3.0725 和 29.42kV/mm。同时,它还表现出优异的热稳定性。这项工作将为开发新型高绝缘性能的有机硅凝胶提供重要信息。

D31-17

高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀机理及检测方法综述

刘雨丰*

湖南大学

阻水缓冲层作为我国高压 XLPE (交联聚乙烯) 电缆的重要组成部分,起到电气连接、吸潮阻水、机械缓冲等作用。然而近年来波纹铝护套电缆缓冲层烧蚀问题多发,影响设备和系统安全。本文从电缆结构、缓冲层故障机理、缓冲层故障检测方法等方面进行了综述。首先,梳理了电缆缓冲层三维结构、发展历程、等效电路原理及关键电气参量。其次,对化学/电化学腐蚀、悬浮电位、径向电流集中三类缓冲层烧蚀机理进行了系统分析,建立了电路模型或多物理场仿真模型,总结了故障形式、反应或作用机理和关键影响因素。最后,讨论了 X 射线检测、局部放电检测、特征气体检测等三类方法在缓冲层故障检测中的应用可行性及存在的问题。论文为高压电缆缓冲层烧蚀问题研究、检测技术研发、高效运维策略制定等提供参考。

D31-18

交联高分子绝缘材料的低应力灌封技术研究

李悦芳*、李想、茹佳胜、贾进、赵先航、刘鑫、曾志斌、钟华、陈磊

中国工程物理研究院电子工程研究所

有机硅弹性体、环氧树脂等交联高分子绝缘材料以其良好的电气绝缘性能、热稳定性和工艺操作性而广泛应用于电子电气灌封领域。然而,在固化成型、低温环境与交变温度下交联高分子存在灌封应力所导致的本体开裂、界面脱层等问题,严重制约电子电气灌封的绝缘性能可靠性。本研究围绕电子灌封的应力形成机制及其调控,重点开展了三方面研究工作:

1、灌封应力建模研究:设计交联高分子多轴粘弹性模量表征实验装置,测试获得环氧树脂体积与剪切松弛主曲线并构建了基于双弹性力学参数粘弹性本构的灌封应力有限元模型,验证模型精度优于 70%。

2、结构约束对灌封应力形成机制的阐释:实验监测到受限约束结构下低模量有机硅弹性、高弹态环氧树脂均可形成可观的灌封应力,有限元建模揭示高弹态体积松弛影响随结构约束增大,提出基于抑制高

弹态应力增长策略的灌封应力调控方法。

3、多层卷绕浸渍结构灌封应力形成机制的研究：建立多层复合筒状结构层间应力解析模型，实测验证显示解析模型预测误差在 12% 以内，揭示了温度受载下多层复合材料筒状结构层间应力的产生机制是由于其面内与面外热膨胀系数存在差异。

D31-19

工程电介质气-固界面表面电荷输运理论及表面处理策略研究

李枕*

哈尔滨理工大学

气-固界面沿面放电一直是高电压与绝缘技术学科的基本科学问题之一，也是制约先进输变电设备、航空航天设备、电子功能器件发展的技术瓶颈。然而，由于对沿面闪络中复杂的表面电荷输运过程缺乏清晰的认知，尚未形成统一理论指导未来表面处理技术进一步发展。本报告从“介观-微观-宏观”角度回顾现阶段表面改性技术（化学体改性、高能粒子辐照、氟化处理、表面涂覆、等离子体处理和物理处理技术）对直流沿面闪络的影响规律，建立微观分子结构-陷阱/电导参数-电荷输运-表面电荷-沿面闪络的关联，通过载流子电荷输运方程研究了陷阱参数对沿面闪络的影响机制。研究表明，陷阱对沿面闪络的影响分为三个区域：(I) 泄露电流区、(2) 浅陷阱主导区、(3) 深陷阱主导区。经过表面电荷输运仿真分析，获得了三个区域影响沿面闪络电压的主导因素分别为表面电流密度、表面电荷消散速率和表面电荷注入特性。本报告建立了不同区域陷阱对直流沿面闪络的影响统一理论，有望指导相关设备未来表面处理技术的进一步发展。

D31-20

高性能酯基绝缘油及其变压器研究进展

李剑

重庆大学

D31-21

多类型环氧材料开发及其在电力设备中的应用

王国利

南方电网科学研究院

D31-22

高压电缆交联聚乙烯绝缘技术与展望

李盛涛

西安交通大学

D31-23

交流 GIL/GIS 介电梯度绝缘子设计与金属微粒驱除

杜伯学

天津大学

D31-24

纳米锚固界面对环氧树脂-铝合金界面机械/绝缘性能的影响及机制研究

赵宇泉*、吴治诚、张乔根

西安交通大学

环氧树脂 (Epoxy, EP) -铝合金 (Aluminum, Al) 界面作为气体绝缘输电线路 (Gas-insulated Transmission Lines) /气体绝缘金属封闭组合电器 (Gas-insulated metal-enclosed Switchgear, GIS)绝缘件中的薄弱之处, 其机械强度和绝缘强度直接决定着设备能否在强电场、力场及温度场作用下正常运行。为了提高环氧树脂-铝合金的界面性能, 本研究利用界面锚固技术在 EP-Al 界面形成了纳米锚固界面相, 提高了 103.36% 的 EP-Al 界面机械强度, 对界面击穿场强的提升高达 51.67%。同时, 研究了纳米锚固界面的机械/绝缘增强效应。结果表明, 纳米锚固机械增强效应是固化后形成的“锚”结构带来的物理锚固作用和界面 Al-O-C/P-O-C 共价键合及氢键吸附等化学因素共同作用的结果; 而纳米锚固绝缘增强效应的作用机制是通过提高势垒高度和电荷束缚能力来抑制强电场下电荷的进一步注入和迁移, 同时我们发现纳米锚固界面的存在能在一定程度上减轻支柱绝缘子环氧侧的表面电场不均匀程度。研究以期为制备具有高机械/电气强度的 GIL/GIS 绝缘件提供理论依据和指导。

D31-25

高压直流海底电缆 XLPE 绝缘挤出模塑接头空间电荷和电场动态特性

李忠磊*、郑重、吴优、杜伯学

天津大学

本文重点研究了 ± 500 kV 高压直流海底电缆挤出模塑接头 (Extrusion molded joint, EMJ) 绝缘中空间电荷和电场特性。制备了双层交联聚乙烯试样来模拟 EMJ 中本体绝缘和恢复绝缘之间的界面, 并利用电声脉冲法评估绝缘内部空间电荷特性。然后, 基于 EMJ 几何结构, 建立了一个二维的电子-离子混合输运 (Bipolar electronic-ionic charge transport, BEICT) 模型。结果表明, 通过测量电子和空穴的迁移率及陷阱特性, 基于 BEICT 模型的空间电荷仿真结果与实验结果一致。全尺寸 EMJ 绝缘的空间电荷仿真结果表明, 负极性空间电荷主要聚集在界面附近, 这导致本体绝缘中最大电场可达到 30.2 kV/mm, 比平均电场 (18.5 kV/mm) 高 63.2 %。同时, 空间电荷增大了界面处电场的角度和切向分量。当恢复绝缘的交联温度被调整为 180 °C 时, 接头绝缘内部电场畸变被有效抑制。本文提出的全尺寸接头绝缘中空间电荷和电场的仿真方法可以为直流海底电缆 EMJ 的设计和制造提供研究手段。

D31-26

Evolution characteristics of aging properties of epoxy resin insulation in vegetable insulating oil

Siqi Luo*

School of Electrical Engineering, Chongqing University

Purpose/Aim

The research on the change characteristics of physical, chemical and dielectric properties of recyclable high-performance solid insulation materials in insulating oil can accurately grasp the performance evolution law of recyclable solid insulation materials under actual operating conditions, meet the demand of power equipment for high thermal conductivity insulation materials, provide key data support for the development of recyclable solid insulation materials power equipment, and have important guiding significance for the efficient and green operation of high-voltage recyclable solid insulation materials dry equipment.

Experimental/Modeling methods

In this study, the epoxy resin polymer material containing ester exchange dynamic covalent bond was used as the research basis, and the influence of the introduction of Dynamic Bond on the mechanical properties, dielectric properties and other physical and chemical properties of epoxy resin was explored by using the working principle of digital light processing (DLP) combined with 3D printing, so as to learn the chemical recovery process. In this study, epoxy resin insulation samples were put into aging tank and accelerated aging at 90°C and 130°C for 7, 14, 21 and 28 days. At the end of aging, the evolution of sample properties was studied by measuring the bending strength, tensile strength, relative dielectric constant, dielectric loss factor and breakdown strength before and

after aging.

Results/discussion

Based on the comprehensive analysis of the experimental results, it can be concluded that the mechanical properties and dielectric properties of epoxy resin insulation devices have declined during the oil immersion aging process. The research provides a theoretical basis for the on-line monitoring and maintenance of oil immersed power equipment.

Conclusions

In this paper, we studied the efficient degradation method of recyclable high-performance epoxy resin and the performance evolution law of recyclable epoxy resin under different aging conditions. According to the research results, more aging and corrosion-resistant epoxy resin insulation devices can be designed to improve their reliability and stability. At the same time, the equipment can be monitored and diagnosed through the online monitoring system to timely find and deal with aging, failure and other problems, prevent accidents, and prolong the service life of the equipment and reduce the operation and maintenance cost. This research meets the demand for high thermal conductivity insulation materials in power equipment, provide key data support for the development of recyclable solid insulation materials in power equipment, and have important guiding significance for the efficient and green operation of high-voltage recyclable solid insulation material dry equipment.

D31-27

拉伸作用下聚丙烯绝缘微观结构演变机制及电力电缆弯曲半径关联分析

赵鹏*、欧阳本红、黄凯文、章红军

中国电力科学研究院有限公司

电力电缆及在制造、安装和使用过程中会受到各种机械应力的影响，在极端情况下，电缆绝缘内部结构出现缺陷，使得绝缘在较低的电场强度下就能引发树枝，导致绝缘损伤。特别地，对于具有高模量、低韧性特征的新型聚丙烯绝缘，由于缺少运行经验，现行标准要求参考了 XLPE 绝缘电缆的规定，但是在外部机械应力作用下能否保证绝缘性能可靠，是一项值得思考的重要问题。本文通过聚丙烯绝缘材料的拉伸过程曲线、微观结构变化测试数据，探索应力作用下聚丙烯绝缘的弹性和屈服形变中的结构演变过程，并对电力电缆的最小弯曲半径进行了关联分析。结果表明，对于含有多相结构的聚丙烯绝缘材料，在拉伸应变过程中存在结晶滑移和多重应变过程，直至结构断裂，因此，决定电力电缆最小弯曲强度的指标为弹性极限应变，超过该极限值就会产生电缆绝缘不可逆的损伤。

D31-28

Effect of Assisted Electric Field on DC Electrical Properties of Cross-Linked Polyethylene

Yongjun Li, Yongsan Han*, Shanshan Wang, Di Jin

Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology

The direct current (DC) electrical properties of high-voltage direct current (HVDC) cable insulating material are closely related to its microstructure. The assisted electric field is usually used to regulate the polymers' microstructure, but there are few researches about the effect of assisted electric field on the microstructure and DC electrical properties of electrical insulating materials. In this paper, the cross-linked polyethylene (XLPE) was prepared under the assisted electric field of 0, 0.7 and 3.0 kV/mm, respectively. The microstructure, DC breakdown strength and space charge behavior were investigated. It is proved that the assisted electric field can not only reduce the spherulite size, but also increase the spherulite amount and the crystallinity of XLPE. This increases the trap density and improves the DC electrical properties. Compared with the untreated XLPE, the XLPE treated by the assisted electric field has higher breakdown strength and lower space charge density.

Especially, the XLPE with the assisted electric field of 0.7 kV/mm is the highest in the breakdown strength, and is the lowest in the space charge density. This work provides a new way for the improvement of high-voltage DC cable insulating materials.

D31-29

功能电介质超强极化介观机制的研究

高景晖*、李盛涛、钟力生、任晓兵、刘文凤、吴明
西安交通大学

电力设备传感技术是电网安全运行与数智化转型的基础，是实现能源互联网建设国家重大需求的关键。压电传感器实现了机械能-电能相互转换，是电力设备放电超声、机械振动等传感的核心。目前大多数压电传感器仍依赖有铅压电功能电介质材料，对环境危害严重。随着我国绿色环保可持续发展战略的实施，对压电功能电介质材料的无铅化的需求日益迫切。围绕无铅压电材料性能提升这一国际学术前沿和技术难题开展研究，提出了通过调控介观纳米电畴结构降低极化转向势垒，大幅度提升无铅压电传感材料性能的功能电介质超强极化介观新机制，突破了无铅压电材料高性能化瓶颈。将无铅压电材料相对介电常数由 1 万提高到 5.4 万，压电系数由 180pC/N 提高到 620pC/N，转换效率由 68% 提高到 90%，达到含铅压电材料的性能水平。进一步开发了无铅压电传感新器件，突破了海上风电浮式动态缆复杂振动、高压电缆护层烧蚀微小放电等精密传感新技术，为压电材料在电力设备传感等工业、国防领域的绿色化发展和应用奠定基础。

D31-30

基于梯度共聚物的绝缘材料

刘波*
中国科学院长春应用化学研究所

直流电场下绝缘材料结构中阻碍载流子跃迁的势垒陷阱将导致空间电荷聚集，引发材料内电场畸变，被认为是绝缘材料老化加剧及绝缘失效而产生击穿的重要原因。1994 年 T.J.Lewis 率先提出了“纳米电介质”的概念，通过将一定量尺度在 1-100 nm 的无机颗粒均匀分散到聚合物基体中，利用纳米颗粒-聚合物界面构建空间电荷的扩散层，进而减小空间电荷的集聚，达到提高击穿电压的目的，成为近年 30 年的研究热点。然而，无机纳米颗粒表面能高，颗粒间作用力较强，加之极性较强的纳米颗粒与非极性的聚合物相容性差，导致纳米颗粒易团聚，限制了纳米电介质的大规模应用。针对该问题，我们通过催化剂设计，合成乙烯/苯乙烯、乙烯/ α 烯烃梯度共聚物，构建“海岛”结构，利用不同聚合物链段之间的相分离形成相界面以模拟“纳米颗粒-聚合物”产生的界面，从而达到提升材料击穿强度的目的。

D31-31

电介质薄膜空间电荷诊断与深紫外光改性

黄邦斗*、章程、邵涛
中国科学院电工研究所

薄膜电容器是特高压直流/柔性直流输电、电磁能装备、新能源汽车等的关键储能器件，在高电场、瞬时强流、电-热-力联合冲击下，电介质薄膜易发生绝缘失效，是制约系统寿命的重要因素。为探究电介质薄膜绝缘失效机理，本工作建立了皮秒脉冲激光诱导压力波(LIPP)空间电荷诊断方法，通过激光照射薄膜金属化层、产生压力波在介质中传播，扰动空间电荷在外电路产生电流，其正比于空间电荷密度，实现了对微米级电介质薄膜、亚微米分辨的空间电荷动态测量；进一步，基于空间电荷反演空间电场分布，揭示了介质内部电荷导致电场畸变是绝缘劣化的重要因素。为提升电介质薄膜储能性能，本工作采用准分子介质阻挡放电高效产生深紫外光，具有光子能量高、环境友好、“软”改性等优势，在常压空气中直接辐照改性 BOPP，可无损实现 BOPP 断键、重构；深紫外光裂解氧分子、产生氧原子，形成更加热稳定的 C-O

键，并避免引入新的界面问题，改性后击穿电场、高效储能密度获得显著提升；LIPP 测量发现深紫外光改性可以显著减少介质内电荷量、弱化电场畸变；结合密度泛函理论计算，阐明氧原子引入 BOPP 链形成深陷阱、限制载流子迁移；深紫外光还改性可拓展到 PET、PEN、PEI 等高温电介质薄膜，具有较好的通用性。本工作为研究微米级电介质薄膜空间电荷效应及其绝缘性能优化提供参考。

D31-32

基于螺环结构的新型耐高温聚合物介电储能薄膜材料研究

冉昭玉*、王瑞、付靖、杨明聪、何金良、胡军、李琦

清华大学

介质电容器是电子电路和电力系统中普遍存在的基本储能器件，随着新能源发电、航空电子工业和电动汽车领域迅速发展，要求电容器聚合物介质在更高温度下运行。目前普遍使用的商用电容薄膜双向拉伸聚丙烯 (BOPP) 最高工作温度仅为 105℃，这是因为在高温、强电场下聚合物内部电导损耗呈指数级上升并产生大量焦耳热，导致器件性能迅速下降，并最终过热损坏。尽管已有多种耐热高分子被用于开发电容储能薄膜，然而，在极端温度和电场条件下，这类材料无法避免焦耳热的大量生成，不能满足极端工况电容储能应用需要，其根本原因在于无法有效抑制高温、强电场下的载流子传导。

受生物大分子双链螺旋结构启发，首次将螺环分子结构引入到耐热高分子体系并应用于高温介电储能领域。一方面，螺环结构中单环旋转势能极大，导致其形成稳定的三维立体结构，有助于抑制聚合物分子中共轭平面从而调控电荷输运过程；另一方面，由于螺环结构由两条键链构成，只有当两条键链同时破坏才会引发主链断裂，从而具有更强的热稳定性。螺环结构的引入为设计具有优异高温储能性能的聚合物介质材料提供了新的思路。

传统方法主要利用纳米粒子、电压稳定剂或极性基团提高电荷陷阱能级，通常伴随填料团聚、电场畸变和/或损耗增加等缺点。相比之下，基于螺环结构的 PI 分子结构设计改善了聚合物陷阱态分布，而不会产生传统方法的负面影响。得益于显著受阻的载流子迁移过程，在 150℃ 和 200℃ 下，PI-spiro-2-5 的最大放电能量密度分别达到 7.29 和 6.13 J/cm³ ($\eta \geq 90\%$)。该研究结果不仅显著提升了聚合物电介质在高温下的介电储能特性，还拓展了对于分子构型调控电荷输运的认识，为高温聚合物结构设计提供了新的思路，以实现耐热、介电和储能性能的综合调控。

D31-33

巨磁电容多层电介质的制备与物性研究

张营堂*、张静

河南工学院

二维铁电材料具有独特物理性能和广阔应用前景，对该体系材料结构设计与性能研究是近年材料与凝聚态物理领域关注重点。利用先进技术设计与制备铁电/铁磁多层异质结的物理特性更是目前研究热点。在铁电/铁磁多层异质结中发现的磁电容 (Magnetocapacitance, MC, 指材料电容在磁场作用下发生变化的物理特性) 在未来储能、数据存储、非易失性存储器、传感器、探测器等电子器件上具有重要的潜在应用前景。尤其，磁电容材料在磁探测和电力电缆的工况故障探寻领域更具有实际应用价值。研究发现可以通过应变工程、界面工程、厚度控制和化学置换等策略来调控界面结构和极化响应，进而操控二维铁电材料物理性能。因此，该领域的研究成为构筑多功能复合材料最有价值的途径。

本课题组采用固体反应法制备所需的铁电材料和铁磁材料靶材，利用激光分子束外延技术制备纳米级铁电极化层和铁磁极化层 BaTiO₃ 基铁电/铁磁多层异质结。研究了 BZT/FeMn 纳米多层异质结在频率从 100Hz 到 106Hz、温度从 5K 到 400K、磁场强度从 0T 到 7T 范围内介电特征曲线，发现在较小磁场作用下电容值下降了 2-3 个数量级，获得了巨负磁电容效应，最高可获得-98%磁电容效应，在 50Oe 磁场下可以获得-78%磁电容效应。同时，设计制备了 BZT/LSMO/BZT 纳米多层异质结，发现存在很大磁电容效应，并且展现出了随着磁场增大从负磁电容到正磁电容再到负磁电容变化。这些物理特性可能与磁场对纳米多

层异质结界面束缚电荷极化和自由电荷输运之间相互耦合作用起着关键作用。

D31-34**合成酯绝缘油的热氧老化及其影响绝缘性能的机制**

张颖、王飞鹏*

重庆大学

合成酯绝缘油具有闪点高、稳定向强、可生物降解和碳排放量低的优点，在高环保和安全要求场所具有重要应用。由于其特有的酯基结构，其老化酸值明显高于矿物绝缘油。酸性老化产物不仅会显著缩短绝缘油的使用寿命，还会加速变压器内部绝缘纸和金属等其他材料的腐蚀和劣化。本文研究 Midel 7131、SJ 和 ZK 三种合成酯绝缘油在 130℃ 时热氧老化试验中酸性产物的生成规律，并根据绝缘油分子构型特征，分析了酸性老化产物对合成酯绝缘油绝缘性能的影响机制。

D31-35**高压功率器件封装绝缘材料及失效研究**

尹毅

上海交通大学

D31-36**液态金属电池关键材料与技术**

蒋凯

华中科技大学

D31-37**高压高温宽禁带功率半导体封装研究**

王来利

西安交通大学

D31-38**高温超导材料及高场超导磁体研究进展**

张子立

中国科学院电工研究所

D31-39**高压开关硅凝胶灌封密闭性脱层对绝缘性能的影响研究**

边浩然、钟华*、李想、李悦芳

中国工程物理研究院电子工程研究所

高压开关器件（IGBT、GTO 等）广泛应用于功率模块中，研究表明三分之一功率模块失效由高压开关器件引起。高压开关器件通常采用如图所示的硅凝胶灌封对芯片、基板表面进行绝缘防护，实际应用中高压开关会经历复杂的环境条件，冲击、温度变化等过程引起硅凝胶与基板表面形成密闭性分层，导致开关器件绝缘性能下降，从而降低器件可靠性。然而，现有开关器件绝缘性能的研究集中于粘接良好的情况，对于分层后硅凝胶-基板界面绝缘性能研究鲜见报道。本文基于应力仿真方法设计了密闭性分层模拟件，建立了分层界面绝缘性能测试方法，研究了时间、固化温度、电场均匀度与极性对分层界面绝缘性能的影响规律，并通过气体渗透理论和巴-申标定曲线解释了分层界面绝缘性能变化的物理过程。结果显示，分层界面闪络电压随时间先增长后减小，最终平衡到无硅凝胶灌注时的水平，固化温度低样品平衡时间更短，其

过程为气体向界面渗透, 引发气压、组分随时间动态平衡, 改变了界面闪络电压, 而固化温度降低增加了气体渗透率, 从而加速以上过程。电场均匀度越低则闪络电压越低, 正极性闪络电压低于负极性, 其因为正极性电场产生的正极性空间电荷增强了界面电场, 从而更易击穿。

主要结论:

①界面分层形成后, 由于气体渗透改变分层区域的气压、组分, 使得绝缘性能先下降后增加, 最后平衡到无硅凝胶灌注时的水平; 硅凝胶渗透率越高则平衡时间越快。

②电场均匀度低的界面分层绝缘性能更低, 由于正极性空间电荷增强界面电场从而更易引发击穿, 正极性界面低于负极性。

D31-40

脉冲功率电缆波传播特性及其对绝缘影响研究

刘泳斌*、郭玉鹏、高景晖、钟力生

西安交通大学

脉冲功率电缆是承担高功率电脉冲传输的特种电缆, 是脉冲功率 X 射线闪光照相、脉冲金属丝爆等脉冲功率系统的重要装备之一。相比于直流/交流电力电缆, 脉冲功率电缆具有脉冲波传播特性对电路阻抗匹配特性敏感等特点, 并且脉冲功率系统如 X 射线闪光照相等, 负载呈现脉冲内动态变化特性。因此, 脉冲电缆容易出现波反射引起的电压升高导致电缆绝缘故障。对此, 本文针对微秒级脉宽在脉冲功率电缆中传播特性, 通过电缆高频传输特性仿真计算和试验, 研究了不同电源和负载阻抗条件下波传播特性及其对电缆绝缘影响。首先以峰值电压 500kV 特征阻抗 59Ω 同轴电缆为对象, 建立了脉冲功率同轴电缆高频等效电路拓扑, 获得脉冲信道模型及其特征参数。其次, 研究了电源阻抗分别为 59Ω (与电缆匹配) 和 10Ω (常见电容器特征阻抗), 负载阻抗从短路 (阻抗为 0) 逐渐变化至阻抗匹配 (59Ω) 再到开路 (阻抗无穷大), 脉冲波在电缆的传播特性。发现阻抗不匹配条件下, 电缆电压可达峰值电压的 1.8 倍。最后研究了交联聚乙烯等电缆绝缘材料在脉冲工况和直流工况的击穿特性, 获得了绝缘料微秒级脉冲击穿与厚度效应关系。

D31-41

基于介观接触形貌分析的电缆附件绝缘界面击穿特性研究

李泽瑞*

四川大学

固-固复合绝缘界面的切向绝缘强度远低于固体介质本体绝缘强度, 是绝缘系统的薄弱环节。包括界面空腔尺寸及比例等在内的界面介观接触形貌参数是决定固-固复合界面切向绝缘水平的关键, 但目前仍缺乏针对界面介观尺度接触形貌特性及其与界面切向绝缘强度关联关系的有效分析方法。本文首先基于超弹性本构关系建立了 XLPE-SiR 绝缘界面介观接触特性的有限元分析模型, 实现了界面介观接触形貌的定量计算, 并通过 Micro-CT 技术观测了实际 XLPE-SiR 接触界面的空腔尺寸分布, 验证了分析模型的准确性; 进而基于该模型研究了表面粗糙度和接触压力等外部因素对实际接触面积占比、空腔尺寸及比例等介观接触特性的影响规律; 最后, 采用 Voronoi 网络法计算了不同接触形貌绝缘界面的放电发展路径及击穿强度, 并结合界面击穿实验阐明了界面空腔尺寸、比例和实际接触面积占比参数对界面击穿特性的影响规律。研究表明 XLPE-SiR 复合绝缘界面的实际接触面积占比随材料表面粗糙度增加呈指数减小, 而随界面压力增大呈线性增长。XLPE-SiR 复合绝缘界面的击穿强度随界面实际接触面积占比呈线性增长。本文为固-固复合绝缘界面的接触特性及击穿特性研究提供了一种有效的数值模拟计算分析方法。

D31-42

调控非线性电导复合涂层参数以优化不同温度下高压 IGBT 模块的电场应力

姚欢民*、穆海宝、李鹤、李文栋、张大宁、张冠军

西安交通大学

研究背景: 高压 IGBT 模块是新型电力系统的关键部件。但由于 IGBT 长期承受正极性方波电压, 在三结合点处极易发生空间电荷积累, 引起电场畸变, 最终导致绝缘破坏。近年来, 非线性电导聚合物 (Nonlinear conductive polymer, NCP) 涂层在优化 IGBT 场强方面显示出巨大潜力。然而, 最佳电场分布所对应 NCP 的非线性参数 (非线性系数 g 和开关场强 E_b) 在不同 IGBT 绝缘结构中存在差异。正确选择材料参数可以增强绝缘性能, 而不合适的材料参数可能会加剧电场畸变。此外, 电导率也对温度变化表现出高敏感性。为此, 本文基于交流介电泳构建了一种具有可调 g 和 E_b 的非线性电导涂层, 以实现电场均匀化。进一步通过仿真和实验分别验证了该方法在不同温度下的可行性, 为增强高压 IGBT 绝缘性能提供了新思路。

实验及建模方法: 首先, 选取硅弹性体 (Silicone elastomer, SE) 和碳化硅晶须 (Silicon carbide whiskers, SiCw) 分别作为绝缘基体与非线性填料。利用 5 种交流场强诱导 SiCw 在未固化 SE 中沿电场方向排列, 制备具有不同填料取向度的非线性电导复合绝缘样片 (编号为 SwE0~SwE4)。其中, 取向度由制备过程中的暂态归一化电流确定。其次, 测试不同取向度样品分别在 30℃、60℃ 和 90℃ 下的非线性电导特性, 并构建取向度与非线性参数的关联模型。在此基础上, 通过有限元仿真确定 10 kV 电压下 IGBT 模型最优电场分布所对应的 NCP 非线性参数。最后, 搭建了局部放电测试平台, 并测试对比了未使用涂层以及使用具有不同非线性参数涂层 IGBT 模块的局部放电起始电压 (Partial discharge inception voltage, PDIV), 验证了所提出方法的有效性。

结果和讨论: 在非线性电导特性方面: 随着测试温度的增加, 每个样品的低场电导率 s_0 和 g 都逐渐增大, E_b 逐渐减小, 且三者 30℃~60℃ 间的变化幅度均大于 60℃~90℃ 间。其次, 在同一温度下随着样品取向程度的增加, s_0 呈现先增大后减小的趋势。仿真研究表明, 30℃ 下随着涂层内填料取向度的增加, 电场均匀度在 SwE3 所对应非线性参数下达到最大。60℃ 下和 90℃ 下电场均匀度均在 SwE2 所对应非线性参数下达到最大。因此, 30℃、60℃ 和 90℃ 下最优电场分布所对应的非线性电导涂层分别为 SwE3, SwE2 和 SwE2。实验结果与仿真结果具有一致性, 相比于 SE 灌封样品和涂覆商用非线性电导涂层样品, 30℃ 下 SwE3 涂层可以将 PDIV 提升 63.8%, 60℃ 和 90℃ 下 SwE2 涂层可以将 PDIV 分别提升 83.4 和 44.5%。

结论: 本文采用交流介电泳在 IGBT 模块的三相点处构建了非线性导电涂层。研究发现, 通过控制介电泳场强可以调节涂层的非线性系数 g 和开关场强 E_b 。在此基础上, 结合有限元仿真结果, 可以实现优于商用非线性导电涂层的电场优化效果, 为高压 IGBT 局部电场的精确优化提供了技术支撑。

D31-43

基于等离子体射流的金属缺陷处理及交流电树枝劣化特性研究

吴泽轩、陆天和、蒋佳驹、胡章军、房婉、骆康蕙、祝曦*、方志
南京工业大学

有机硅灌封胶在高压变压器的绕组中发挥着关键的保护作用, 但受限于工艺问题, 导体金属不可避免地在表面留下 μm 级尖端缺陷, 容易产生局部放电进而诱发电树枝生长, 增加变压器过载或故障的风险。为了研究抑制金属微缺陷而导致局部放电的方法, 本文提出了一种基于大气压等离子体射流的金属微缺陷处理方法, 用于改善微缺陷的电场畸变并提升含缺陷样品的电气绝缘强度。通过 APPJ/Ar/六甲基二硅氧烷 (HMDSO) 在金属针尖处进行处理制备出含硅功能薄膜。制备有机硅灌封胶-针-板电极结构, 实时记录在工频交流电压下灌封胶内电树枝的生长特性以及局部放电特征参量。结果表明, 沉积薄膜后的样品起树电压从 9kV 最高提升至 13kV, 起树时间延长明显。处理针尖后的电树枝的长度、宽度均有所减小。局部放电强度明显降低, 放电次数有所减少, 有效增强了缺陷样品的电气绝缘强度。通过进一步的仿真模拟与分析, 发现沉积薄膜后的缺陷处电场分布得以改善, 导体表面二次电子发射、导体表面的电子场致发射能力也受到了抑制, 从而改善金属微缺陷对绝缘封装的损害, 提升封装绝缘的电气绝缘性能。

D31-44

低压断路器产气材料新进展

曹伟东、李兴文*、罗超杰

随着新型直流工业和断路器小型化高电压带来的空气电弧开断新问题，基于产气材料的气吹灭弧技术逐步成为低压断路器领域的研究热点。为此，文中介绍了空气电弧与产气材料相互作用的实验、理论、建模的最新进展，包括典型工程热塑性材料的直流和低频燃弧实验、电弧辐射诱导烧蚀新理论、考虑光化学和光热行为的密度泛函和分子动力学建模分析。此外，还提出了需要进一步深入研究的若干问题，包括完善产气材料评价体系、评价弧后碳沉积、优化产气材料配方、设计基底新材料等。

D31-45

Investigation of the Vacuum Arc Ignition Characteristics and Erosion Morphology Microstructure Characteristics of CuCr55 Contact Materials

Siyuan Liu*, Xianglai Bo, Zhiyuan Liu
Xi'an Jiaotong University

Copper-chromium alloy material, as one of the most important electrode contact materials in the field of electrical contact, has been widely used in vacuum interrupters. To replace SF6 circuit breakers with higher voltage levels and larger breaking capacities, there is an urgent need for new electrode contact materials to meet the comprehensive electrical performance requirements of high withstand voltage, high insulation, and erosion resistance. In this study, a novel material CuCr55 was prepared by arc melting method, and the microstructures of arc-cast CuCr25, melt-infiltrated CuCr50, and arc-melted CuCr55 materials were compared. The vacuum arc ignition and erosion characteristics of arc-melted CuCr55 contact materials were analyzed in detail. A high-speed camera was used to capture the arc ignition characteristics of short-circuit currents, and the critical currents for the formation of anode spots for different materials were obtained. A convolutional neural network was built using a deep learning framework to classify the captured arc images and to understand the evolution of arc modes for different materials. X-ray fluorescence spectrometry was used to determine the changes in the content of Cu and Cr elements before and after erosion for different materials, and the micro-morphology of the contact surface after erosion was observed using electron microscopy. The research results show that there is no material fracture or significant protrusion on the surface of CuCr55 contacts, and the arc-melted CuCr55 contacts have a fine and uniform distribution of chromium particles with spherical and dispersed microstructures. They exhibit a higher critical current for anode spot formation and good uniform erosion characteristics.

D31-46

直流电压下硅弹性体纳米复合材料高温空间电荷特性分析

王启隆、宋家乐、张添胤、刘嘉浩、阴凯、陈向荣*
浙江大学 电气工程学院

本研究提出了一种改善硅弹性体 (SE) 在高温高电场下空间电荷特性的新策略。通过接枝纳米 POSS 填料和掺杂有机半导体分子 (ITIC)，制备了超低含量的 POSS 接枝的 SE/ITIC 纳米复合材料，并测试了其在室温和 150°C 高温下的空间电荷特性。结果表明：接枝 POSS 纳米填料在室温下有效抑制了 SE 的空间电荷注入和输运，但在 150°C 下未能发挥作用，导致阳极附近产生大量异极性空间电荷积聚和电场畸变。在接枝 POSS 纳米填料的基础上，进一步掺杂 ITIC 小分子改善了 150°C 和 20 kV/mm 条件下的空间电荷特性，减少了空间电荷积聚和电场畸变。该研究发现，纳米结构接枝和有机半导体分子掺杂的协同作用可以有效改善 SE 在高温高电场下的空间电荷特性。

D31-47

高污湿环境分段绝缘结构工频放电特性研究

孙继星^{*1}、刘继永^{1,3}、雷栋²、胡凯旋¹、张坤¹

1. 北京交通大学

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司

3. 国能朔黄铁路发展有限责任公司原平分公司

中国高速铁路快速发展, 东南沿海环境线路接触网分段绝缘装置频繁闪络, 绝缘装置电极与绝缘结构的适用性降低, 影响系统的安全运行。针对该问题, 论文开展了高污湿环境分段绝缘结构工频放电特性研究, 建立典型结构的初始放电分析模型, 结合分段绝缘器的材料条件, 建立了污秽放电分析模型, 揭示了不均匀电场条件下电极放电过程; 开展高污湿环境分段绝缘结构工频放电过程试验, 得到了染污绝缘表面的放电起始和电弧通道转移过程, 发现电极不均匀是诱发电弧产生, 推动电弧发展的关键, 提出了分段绝缘结构优化方法, 为电气化铁路牵引供电系统的安全运行提供理论依据和数据支持。

D31-48

等离子体表面处理增强电缆 PP/SiR 复合绝缘界面电气性能研究

陆天和、吴泽轩、蒋佳驹、鲍佳睿、周士琦、祝曦*、方志

南京工业大学

随着我国城市化进程快速推进, 工业化和居民用电需求逐年递增, 聚丙烯 (PP) 作为电缆主绝缘材料, 近年来对于它的研究也成为热点之一。然而电缆中间接头是电缆系统中最薄弱的环节之一, 在电缆主绝缘和附件硅橡胶 (SiR) 绝缘之间的界面存在较强的切向电场, 容易导致界面放电和击穿事故。本文利用大气压等离子体材料改性装置, 在纯 Ar 下进行等离子体刻蚀处理, 或在 Ar 下通入六甲基二硅氧烷 (HMDSO) 反应媒质, 改性绝缘以期提升 PP 电缆界面绝缘性能。结果表明, 等离子体刻蚀处理后的 PP/SiR 界面可以实现界面耐压性能大幅提升, 升幅达到 97.3%, 但其材料表面呈现为亲水性; 等离子体对于绝缘材料表面的沉积处理使其具有良好的疏水性, 水接触角由 92.2° 提升至 151.9°, 且界面击穿电压最大升幅达到 137.3%。等离子体薄膜沉积处理不仅实现了对电缆绝缘界面耐压性能的大幅提升, 同时调控了材料以及界面的疏水性, 综合提高电缆接头或附件的绝缘性能。

D31-49

Analysis on the gas-solid interface discharge characteristics and evolution process of silicone gel in salt spray environment

Hanwen Ren*, Feng Wang, Siyang Zhao, Jian Mu, Wei Wang, Zhihui Li, Zhiyun Han, Yaoyuan Han, Yateng Yang
North China Electric Power University

The IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) power module is a core component of offshore wind power converters, and the rapid development of the offshore power generation industry has led to a significant increase in its demand. However, under long-term operating conditions, IGBT modules are susceptible to corrosion and failure due to the penetration of high salt spray. The insulation performance of organic silicone gel, the main insulation material used for IGBT devices, is also affected by salt spray particles. Therefore, it is necessary to study its insulation performance in salt spray environment. In this paper, controlled variable experiments were conducted on silicone gel under different salt spray concentrations to investigate surface discharge characteristics, surface damage, and gas-solid interface discharge evolution. The research shows that the starting voltage of surface discharge in silicone gel decreases with increasing salt spray concentration. Under a high-frequency positive square wave of 10 kV/10 kHz, high concentration salt spray exhibits the highest total discharge amplitude and an upward trend in insulation surface temperature rise. By controlling the concentration tests, it is revealed that salt spray particles are important factors affecting gas-solid surface discharge. Chlorides and sulfides are generated on the insulation surface, which have an impact on the development of surface discharge. The research

results can provide reference for the insulation design of IGBT packaging.

D31-50

极端条件下电磁轨道发射材料的微观结构演化与力学性能劣化关联关系研究

李成成、李兴文*、石桓通、陈立

西安交通大学

电磁轨道发射装置是一种新型的超高速发射装置，能够突破传统火炮发射的速度极限。然而，在这种极端的电磁发射条件下，轨道材料的力学性能劣化机理仍不清晰，这限制了电磁轨道装置的发展。本研究选用一种商业的 Cu-Cr-Zr 合金作为轨道材料，在峰值电流为 655 kA 的条件下进行了 12 次发射实验。通过详细的微观表征分析以及相应的理论计算，确定了电磁发射轨道材料的微观结构演化规律与力学性能劣化之间的关联关系。实验结果显示，在电磁热力多场耦合作用下，轨道表层的晶粒尺寸基本保持不变，动态再结晶比例上升，位错缠结程度和位错密度显著下降，析出相细化并增多。轨道表层的硬度有所下降，其中中速段轨道表层硬度下降最明显。理论计算结果表明，轨道晶粒尺寸和位错密度是影响轨道材料强度和硬度的主要因素。位错密度的显著下降是材料屈服强度和硬度下降的主要原因，但是析出相的细化和增多有助于减缓材料性能劣化速率。本研究结果为未来电磁轨道发射材料以及其他类似极端环境下材料的设计提供了重要参考。

D31-51

Breakdown Characteristics of High Frequency Transformer Insulation Materials at High Temperature and High Frequency

Fengshuo Liu, Lingyu Zhu, Yongliang Dang, Shengchang Ji*

Xian Jiaotong University

High frequency transformer (HFT) is the core magnetic component of power electronic transformer. Its insulation performance has a serious impact on the stability and security of power system. The transformer is subjected to high frequency square wave voltage with steep edges and high operating temperature. This exposure significantly influences the discharge behavior of the insulating material.

To elucidate the effects of voltage frequency on breakdown characteristics, a square-wave loading platform was established. Epoxy resin and DMD paper, two widely utilized insulating materials, were selected for analysis. The investigation spanned frequencies ranging from 2 kHz to 14 kHz and temperatures between 20°C to 120°C. The probability of insulation failure was assessed using the two-parameter Weibull statistical method.

The correlation between breakdown voltage and frequency was examined. The voltage-frequency (V-f) and voltage-temperature (V-T) characteristics were analyzed. Experimental findings indicate that the breakdown voltage diminishes with an escalation in voltage frequency and with a rise in temperature. The voltage-temperature characteristic accords with the polymer free volume theory.

D31-52

A novel environment-friendly gas screened using machine learning method

Yuyang Yao, Boya Zhang*, Xingwen Li, Jiaxin Tan

State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, City, 710049, China

Sulfur hexafluoride (SF₆) is a widely used insulating gas in the electric power industry due to its excellent insulation properties and arc extinguishing ability. However, it has a strong greenhouse effect and brings serious environmental problems. New gases, such as perfluoro-isobutyronitrile (C₄F₇N) and perfluoropentanone (C₅F₁₀O),

are difficult to take into account in terms of their electrical properties and environmental safety at the same time. A gas that is appropriate for insulating must possess a variety of properties simultaneously, and the standards required to meet these are more strict. It has been nearly half a century since a breakthrough in environmental insulation gas was made. It can be argued that the urgent need for the power industry to identify a viable environmentally friendly alternative to SF₆ gas has become apparent. This paper establishes the relationship between gas properties and structure, utilizing a machine learning method. This method was applied to screen new environmentally friendly insulating gas molecules with high throughput and identify a molecule with the potential to replace SF₆, Bis(trifluoromethyl) sulfide. This method effectively avoids the drawbacks of requiring gases for experiments and can obtain the corresponding properties of molecules when only the molecular formula is known, saving manpower and material resources. It also provides an efficient method for the search of SF₆ alternative gases.

墙报

D31-P01

氢气烧制对 95wt%氧化铝陶瓷绝缘性能的影响研究

王蒙蒙、黄晓军、杜继实*、陈虎

中国工程物理研究院电子工程研究所

氧化铝陶瓷被广泛用于制造真空电子器件的绝缘管壳，并通过金属化、钎焊与金属连接。限制其有效性的最重要因素之一是陶瓷在高电压下会发生绝缘失效。陶瓷绝缘耐压与其化学成分及微观结构有关。值得注意的是，当用金属电极封接时，绝缘氧化铝陶瓷通常需要在还原气氛中烧制。在这个过程中，陶瓷内部点缺陷的化学反应平衡会发生变化，从而影响氧化铝陶瓷的绝缘性能。然而，关于氢气烧制对氧化铝陶瓷绝缘性能的影响这方面研究工作相对较少。本文研究了在湿氢、干氢和补充空气中烧制对 95wt%氧化铝陶瓷的介电击穿强度 (DBS) 和闪络电压 (FV) 的影响。这项工作的结果为处理工艺对氧化铝陶瓷绝缘性能的影响提供了新的见解。研究结果表明不同的氧分压引入了不同的点缺陷浓度，点缺陷对 DBS 和 FV 的影响处于一种竞争关系。点缺陷浓度越高，FV 越高，DBS 越低；而点缺陷浓度低则 FV 越低，DBS 越高。此外，本研究提供了一种通过调整点缺陷浓度来提高陶瓷绝缘性能的有效方法。

D31-P02

电力电缆绝缘材料的近红外光谱机理及其性能预测模型的建立

黄凯文*

中国电力科学研究院有限公司

近红外光谱分析技术是一项新的无损检测技术，能够快速、准确地对材料的理化性能和力学等性质进行检测和预测。本文以近红外光谱在电力电缆绝缘材料性能研判及应用出发，分析电缆绝缘材料的近红外光谱特征指纹变化情况，研究了基于电缆绝缘层的特性因素对近红外光谱图的一致性影响。结果表明，近红外光谱的特征峰吸光度随老化时间的增加而递减，1730、1764 nm 峰强减弱，1710、1762 nm 肩峰扩大，代表着晶区长螺旋分子链断裂并进入无定型区。近红外光谱中 C-H (-CH₂-) (1730nm/1764nm) 吸收峰可以反映链段的相对数量和强度。采用随机蛙跳法 (RF) 和偏最小二乘回归法，将 XLPE 的近红外光谱与绝缘材料的断裂伸长率参数相关联，建立 XLPE 断裂伸长率的预测模型，预测误差减小至 5% 以内。由于交联聚乙烯的高透光性，内外半导体层的光谱信号会削弱绝缘层近红外光谱图的特征指纹信息，采用透反模式的光学探头可有效减少干扰。综合来看，本文将为近红外光谱技术定性以及定量评价电缆绝缘材料的机械性能等关键指标性能奠定基础。

D31-P03**基于等离子体的金属/陶瓷界面缺陷精准处理及其绝缘性能提升**管秀晗¹、张峰杰¹、罗赵睿¹、方子肖¹、韦鹏飞¹、祝曦^{1,2}、方志*¹

1. 南京工业大学电气工程与控制科学学院

2. 复旦大学宁波研究院

随着宽禁带材料高压功率模块在能源电力领域的广泛应用，其封装结构的电绝缘性能逐渐成为研究热点。然而受制备工艺限制，封装绝缘结构中金属/陶瓷/灌封材料构成的“三结合点”处可能存在 μm 级尖端缺陷，造成局部电应力集中并加速封装材料的老化失效。因此，亟需选取靶向高效的界面增强措施抑制封装绝缘“三结合点”电场畸变，提升高压功率模块的可靠性。本文建立了适用于封装绝缘界面尖端缺陷精准处理的大气压微等离子体射流 ($\mu\text{-APPJ}$) 改性装置，以雾化 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ /钛酸四乙酯(TEOT)作为反应媒质，在模拟 Cu 电极/ Al_2O_3 陶瓷基板界面尖端缺陷沉积球状颗粒堆积分布的高介电常数含 Ti 薄膜。结果表明，基板温度显著影响含 Ti 薄膜的氧化程度，其中 Ti 元素占比及 $\text{O}:\text{C}$ 比值在 150°C 时分别为 30.3%和 4.53，较 50°C 时提升了 43.6%和 113.7%； $\mu\text{-APPJ}$ 在尖端缺陷处构建的含 Ti 薄膜改变了 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面介电常数分布，降低电场畸变程度，对模拟样品灌封硅凝胶后，沉积高氧化程度薄膜的样品在 8~12 kVrms 交流阶梯电压下均无明显局部放电现象，样品击穿电压由 11.8 kV 提升至 21.2 kV，甚至优于无缺陷样品(20.1 kV)，实现对金属/陶瓷界面尖端缺陷的精准处理与封装结构绝缘性能的提升。

D31-P04**基于含氟类紫精的电力设备故障带电变色指示材料的研究**

曹俸华、江以航、柯浚鑫、李盛涛、朱远惟*

西安交通大学

随着经济的快速发展和用电需求的增加，为了提高输电效率以及降低能源损耗，特高压输电技术得到广泛应用。电压等级的提升会增加绝缘材料击穿、放电的风险，严重影响供电的可靠性与稳定性，而故障带电等特殊工况亦对运维人员的人身安全构成威胁。而现阶段电力设备带电、漏电主要通过停送电、验电等操作判断，存在检测效率低、实时性差等缺点。为突破以上瓶颈问题，本研究采用电致变色技术实现电力设备的带电可视化自感知。紫精是常见的变色小分子材料，二聚体是紫精氧化还原过程中的一种不可逆状态，其形成导致变色的循环稳定性显著降低，不利于工程实践应用。为此，本研究分别合成了三种侧基为 $-(\text{CH}_2)_2\text{-CF}_3$ 、 $-(\text{CH}_2)_2\text{-C}_2\text{F}_5$ 、 $-(\text{CH}_2)_2\text{-C}_3\text{F}_7$ 新型的含氟对称烷基紫精。结果表明，含氟基团的强吸电子特性，结合紫精分子中 $\pi\text{-}\pi$ 共轭的增加，协同提升了紫精的显色对比度。紫外可见吸收光谱显示，随着氟原子的引入，紫精分子在 600nm 处的吸收增加。另一方面，氟原子的高电子密度使得含氟基团相互排斥，避免了紫精的团聚，经过多次循环测试其伏安特性曲线仍高度重合，证明其具有良好的循环稳定性。以上含氟紫精有望提升电致变色器件的显色对比度和长时稳定性，并推动此类器件在电力设备带电可视化指示方面的工程应用。

D31-P05**不同苯乙烯含量对梯度共聚物材料绝缘性能的影响**

栗浩淼、刘捷、李嘉慧、李盛涛、朱远惟*

西安交通大学

随着远距离跨海输电、分布式新能源发电的蓬勃发展，输送容量大、耐老化能力强、绝缘性能好的高压电缆成为了电网建设的关键。现阶段，国外企业关于电缆绝缘料建立的技术壁垒是我国电缆国产化的主要瓶颈之一，因而实现高性能乙烯基聚合物的自主研发成为“十四五”规划的一个重点方向。乙烯/苯乙烯梯度共聚物是一种新兴的乙烯基聚合物，具有和聚乙烯相似的理化、电气特性，但其击穿场强更高、高温工作性能更稳定，有望开发为一种新型电缆绝缘材料。本文通过改变苯乙烯含量调控乙烯-苯乙烯梯度共聚

物的微相界面结构, 进而实现界面陷阱深度与密度的优化, 最终实现击穿场强的提升。当苯乙烯含量为 25% 时, SAXS 结果表明乙烯/苯乙烯微相界面尺寸 $<10\text{ nm}$, 构建了较多的界面深陷阱, 阻碍极端电场下载流子的加速和倍增过程, 带来超过 500 kV/mm 的击穿场强, 相较低密度聚乙烯, 提升约 70%。通过分子模拟仿真, 构建了苯乙烯含量与陷阱密度的关联, 揭示了聚合物链内相界面陷阱对介电、绝缘特性的影响机制。

D31-P06

双层构筑提高低介电多孔聚酰亚胺材料的力学及击穿性能

张盼盼^{*1}、张科²、李焱²

1. 太原科技大学
2. 哈尔滨工业大学

受制于自身较高的介电常数, 传统的聚酰亚胺已无法满足高频电路板的使用要求。如何在引入空气降低介电常数的同时, 尽可能保持甚至提高材料的综合使用性能, 对于聚酰亚胺在 5G 通信领域的发展和具有重要的理论和实践意义。本工作以氟化石墨烯/聚酰亚胺 (FG/PI) 为增强层构筑双层结构的低介电聚酰亚胺, 借此改善多孔聚酰亚胺的力学及耐击穿性能。采用逐层涂覆的方式成功制备了聚酰亚胺多孔复合薄膜, 研究了不同膜层结构对聚酰亚胺介电、力学及热性能的影响, 得到了低介电常数且具综合性能较好的聚酰亚胺双层薄膜。三种薄膜 PI-1、PI-2 和 PI-3 的介电常数分别为 2.01、1.90 和 1.70, 拉伸强度分别为 42.69 MPa, 37.54 MPa 和 24.41 MPa, 击穿场强分别为 180.75 kV/mm, 138.70 kV/mm 和 89.77 kV/mm。因此, 多层结构的设计可进一步改善多孔薄膜的耐击穿和力学性能, 对于多孔低介电聚酰亚胺材料的应用至关重要。

D31-P07

All-organic polymer dielectrics for high-temperature capacitive energy storage

Yao Zhou*, Yuhang Chen, Yanzhi Li, Yuxin Cui, Zhiyuan Li, Changwu Zhou, Lu Cheng, Wenfeng Liu

School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University

The research of high-energy-density polymer dielectrics capable of enduring high temperatures, e.g., $\geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, has been motivated by the ever-increasing demand for electrical energy storage under extreme conditions. However, the best commercially available polymer dielectric, biaxially oriented polypropylene (BOPP), can only stably operate at temperatures below $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Compared to high-temperature polar polymers (e.g., polyimide and polyetherimide), nonpolar polyolefin dielectrics exhibit more stable dielectric properties with ultralow dissipation factor, which is crucial for capacitor film applications. Despite significant improvements in discharged energy density and charge-discharge efficiency achieved in nonpolar polyolefin-based polymer dielectrics, these materials can only operate efficiently at temperatures below $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

In this paper, we present a novel all-organic polymer composite comprising nonpolar polyolefin and organic semiconductor that demonstrates superior capacitive energy storage performance at $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. The composite achieves a remarkable discharged energy density of 5.5 J/cm^3 with 90% charge-discharge efficiency at $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, outperforming current polymer dielectrics based on nonpolar polyolefins. Notably, the composite also shows ultralow dissipation factor on the order of 10^{-5} at temperatures above $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, which is two orders of magnitude lower than that of the high-temperature polar polymers. Additionally, the composite demonstrates excellent cyclability at elevated temperatures (e.g., $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) and high applied electric fields (e.g., 500 MV/m), along with the ability to be fabricated into large-area high-quality films with uniform performance. The underlying mechanism of the improved capacitive performance is confirmed by the phase-field simulations. Moreover, we show the breakdown self-healing ability of the composite at elevated temperatures, which offers high reliability to metalized film capacitors and further suggests the promise of the composite for practical applications under

extreme environments.

D31-P08

电爆炸制备金属纳米氧化物

刘康琪、刘帅*、杨兰均

西安交通大学

金属丝电爆炸法相比于传统的金属纳米粉体制备方法,具有能耗低,无污染,所得粉体粒径分布均匀,不易形成团聚体等优点,被认为是制备新型材料的有效方法。研究了氧气中金属丝电爆炸产物的物相组成和粒径分布,在单金属丝爆炸方面,生成了不同价态和种类的金属氧化物。如铜丝电爆炸生成氧化铜和氧化亚铜,钛丝电爆炸生成的二氧化钛具有晶红石和锐钛矿两种物相。在多金属丝爆炸方面,实验合成了二元金属氧化物,如铁酸铜(CuFe_2O_4)等。探究金属丝沉积能量对爆炸产物的物相组成和粒径分布的影响,结果表明能量越高,金属氧化越充分,粒径越小且分布均匀。

D31-P09

基于 XCT 成像技术理解纳米取向骨架对绝缘材料导热性能的影响

唐昕宇*、孙魄韬、司马文霞、杨浩瀚

重庆大学

尽管纳米电介质在 1994 年就被提出,但微纳米结构对复合材料性能的影响机制仍未完全了解。造成这种认知空白的一个关键原因是缺乏材料内部微纳米结构的原位表征。在这项研究中,我们通过冰晶诱导定向化调控技术结合真空辅助浸渍工艺制备了取向排列的 BNNS 导热骨架/硅凝胶复合材料;并利用 XCT 成像技术获取了复合材料内部微纳米填料与绝缘基体的空间介观结构。此外,通过成像获取的微纳填料原位形貌结合有限元计算方法,模拟了微纳米导热填料在硅凝胶基体内部输送单相流体的能力,探明了硅凝胶复合材料在不同取向 BNNS 填料影响下的渗流特性,从微观层面揭示了导热填料对聚合物基体传热行为的影响机制。

D31-P10

Impact of Graphene Oxide Content on the Electrical Properties of Silicone Gel Composites: An Investigation of Mechanisms and Performance

Minghan Yao, Kaixuan Li, Boya Zhang*, Xingwen Li

Xian Jiaotong University

The impact of graphene oxide (GO) content on silicone gel composites was investigated with an emphasis on their electrical properties. Composites with GO concentrations ranging from 0.025wt% to 0.2wt% were synthesized and characterized for their breakdown strength, volume resistivity, dielectric permittivity and thermal stability. Isothermal surface potential decay (ISPD) tests were conducted to evaluate the insulation performance. Significant enhancements in breakdown strength (53%) and volume resistivity (two orders of magnitude) were observed as GO content increased, peaking at 0.1wt% GO. The dielectric permittivity also increased with GO content. ISPD results indicated the addition of GO increased the energy level and density of deep traps, while decreasing shallow trap density, optimizing at 0.1wt% GO. Deep traps effectively captured charges, reducing free charge accumulation and improving internal charge distribution, while the decrease in shallow trap density reduced charge migration and enhanced insulation properties. This study elucidates that optimizing GO content can significantly enhance the electrical properties of silicone gel composites while maintaining thermal stability. The findings elucidate the mechanisms by which GO content influences composite breakdown performance through trap dynamics modulation, laying a foundation for the design of advanced

D31-P11**叠层结构 BOPP 基全有机薄膜的构筑与介电储能性能研究**

李乐源、杨卓凡、王国隆*

西安交通大学金属材料强度国家重点实验室

双向拉伸聚丙烯 (BOPP) 由于高击穿场强、低介电损耗、优异的机械强度、几乎和频率与温度无关的介电常数以及可靠的自愈能力等优点而被广泛用于商用薄膜电容器介质材料。然而, BOPP 较低的介电常数 (~2.2) 致使其储能密度较低, 极大限制了相应器件的高能化、小型化和集成化发展。

为提升 BOPP 基薄膜的介电储能表现, 本研究使用由聚乙二醇二丙烯酸酯 (PEGDA, P)、三羟甲基丙烷三丙烯酸酯 (TMPTA, T)、光引发剂组成的高介电常数光固化材料作为功能中间层 (PT) 来提升 BOPP 基有机薄膜的介电常数。该叠层结构 BOPP 基薄膜的制备工艺简单, 可批量化制备。在所得的 BOPP|PT|BOPP 叠层结构薄膜中, PT 中间层具有较高的介电常数 (可达 10@1kHz), 而外层的 BOPP 具有高击穿强度 (735MV/m) 和低介电损耗 ($\tan\delta=0.001@1\text{kHz}$)。得益于强极化 PT 中间层和耐击穿 BOPP 外层的协同作用, 相应叠层全有机薄膜实现了综合性能的提升。实验结果显示: 在 300MV/m 时, BOPP|PT|BOPP 叠层结构薄膜的储能密度达到了 1.5068 J/cm³, 相比于纯 BOPP 提升了 74%, 同时, 其介电损耗在仍然保持在 0.003 (@1kHz) 的低水平。

综上, 本研究提出了一种简单高效且易工业化生产的 BOPP 基薄膜制备方法, 可提高 BOPP 及薄膜的储能密度, 为发展高储能密度薄膜电容器提供了新思路。

D31-P12**光纤绝缘子填充介质内部气隙放电演化过程**赵九辉¹、卢文浩²、崔彦捷²、冯阳¹、李盛涛*¹

1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室
2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科学研究院

昆柳龙直流工程中频繁发生光纤烧蚀导致的测量异常。光纤绝缘子内部填充膏 (主要成分为矿物油) 中的气隙放电是故障的关键原因。设计了预置气泡缺陷的光纤绝缘子短样, 开展了 12h 长时耐压试验, 提取直流局放特征参量, 探究填充膏中气隙放电的演化过程。结果表明: 长时累积放电导致气体受热膨胀, 同时填充膏分解产生更多气体, 小气泡逐渐发展为大气泡、空腔, 并不断产生新的小气泡; 随着耐压时间的增加, 最大放电幅值和平均放电幅值均显著增大, 气泡体积越大, 电容量越大, 放电幅值越大; 小气泡含量维持动态平衡, 由小气泡产生的低幅值放电重复率基本不变, 而大气泡、空腔在放电发展的过程中逐渐产生并不断增多, 由其产生的高幅值放电逐渐出现且重复率不断升高。

D31-P13**长时短路下低压电气贯穿件温度和电磁力时空分布特性研究**

李欣潞、安若萌、郭凌岐、张闯、李盛涛*

西安交通大学

电气贯穿件是一种安装于核电厂反应堆安全壳墙体上的专用电气设备, 具有为反应堆供电、动态监测、防止核泄漏等功能, 对核电站反应堆安全稳定运行至关重要。由于低压电气贯穿件电路保护装置缺乏冗余配置, 发生短路故障时可能无法及时动作, 引起极高的热量累积和极大的电磁力, 导致贯穿件密封失效。因此, 研究电气贯穿件在极端短路(短路时间较长)情况下的性能尤为重要。为研究短路条件下电气贯穿件的温度和电磁力时空分布特性, 设计并定制了电气贯穿件试样进行短路试验。利用光纤传感器获得电气贯穿件温度随短路时间的变化关系, 通过压力传感器监测短路过程中电气贯穿件所受的电磁力。此外, 建立

了低压电气贯穿件及其连接电缆的三维热电耦合模型，模拟了短路条件下导体、绝缘、密封端子和电缆的温度分布，并计算短路时电气贯穿件电磁力的时空分布。结果表明，发生短路故障时，电气贯穿件各组件及电缆温度随时间增加近似线性升高，电气贯穿件可承受 3s 短路电流。电缆导体的温升低于贯穿件导体，却先于电气贯穿件失效。通过 DSC、TGA 测试，获取了电气贯穿件绝缘层、密封层聚醚-醚-酮(PEEK)材料和电缆绝缘层交联聚乙烯 (XLPE)、聚烯烃 (PO) 材料的玻璃化转变温度、结晶温度、融化温度和分解温度等，表明电气贯穿件耐热性能优于电缆。电气贯穿件导体所受电磁力随短路电流增大呈二次方增加，使电气贯穿件在短路试验时产生明显的振动，但不影响其密封效果。通过仿真和试验研究，结合电气贯穿件温度和电磁力的时空分布，可以有效评估低压电气贯穿件的气密性，因而本研究可为工程应用中电气贯穿件的性能评估和结构优化提供参考。

D31-P14

Research on sample preparation and performance improvement of polypropylene insulation for power cables based on blending modification

Man Ding^{1,2}, Qingfeng Zheng¹, Chao Dai^{*1}

1. Hohai University

2. State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd. Research Institute

With the higher thermostability and superior dielectric performance under high temperature as well as the recyclable characteristic, polypropylene (PP) has become a competitive and potential insulation material for HVDC power cables instead of cross-linked polyethylene. The preparing process and blending modification technic to improve the thermal, physical and dielectric properties of PP was studied in this paper. Granular isometric polypropylene and the PP/SEBS (styrene ethylene butylene styrene) were mixed in torque rheometer, and then pressed into thin films by using flat vulcanizing machine under 200°C and 15MPa for 10 minutes and then cooled to room temperature under the same pressure. The influence of the cooling rate and the antioxidant during processing on the aggregate structure and thermal properties of PP were studied by using X-ray diffraction method and differential scanning calorimetry. The DC conductivity and breakdown characteristics were also studied. Furtherly, SEBS were blended with PP with a range of weight fraction, and mechanical and dielectric properties of the PP/SEBS composite were also studied. The results showed that the crystallinity of PP was higher and the DC resistivity and DC breakdown strength were also improved in samples with lower cooling rate. The antioxidant didn't change the aggregate structure of PP but the melting temperature and DC breakdown strength of PP were increased with antioxidant. Moreover, the tensile strength and elongation at break properties were higher in PP/SEBS composite compared with the pure PP sample, however the DC breakdown strength decreases in corresponding samples. The preparation process would affect the aggregate structure and dielectric properties of PP resulting from the change of crystallization process, and the blending of SEBS can improve the mechanical property with the sacrifice of electrical strength, and nano-fillers can be considerer to add into PP/SEBS composite to improve both the mechanical and dielectric properties of PP.

D31-P15

Effects of Al₂O₃ microstructure and distribution on the breakdown characteristics of epoxy resin composites under DC voltage with phase field simulation

Jie Li, Boya Zhang*, Xingwen Li

The State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University

Epoxy resin/ Al₂O₃ is widely used in high-voltage DC GIS/GIL insulators and cable terminals due to its excellent electrical and mechanical properties. However, as voltage levels and current densities increase, insulation failures often occur under complex conditions. Therefore, understanding the breakdown behavior of

dielectrics is crucial to the design of composite insulation with reliable performances. In this study, a comprehensive phase-field simulation model is developed to analyze the dielectric breakdown process with electrical, thermal and mechanical effects. The study explores how the distribution of Al_2O_3 particles and sheets influences electrical breakdown evolution and predicts breakdown strength using the simulation model. This work is expected to provide valuable insights for developing composite dielectric materials with optimized filler gradient distribution for high performance electrical insulation.

D31-P16

绝缘纸孔隙度对换流变压器油纸绝缘热分布和击穿性能的影响

王梦琦¹、赵宸瑄¹、禹家琛²、杨柳青*¹、李盛涛¹

1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室

2. 国网湖南省电力有限公司超高压变电公司

油纸绝缘是换流变压器的主绝缘系统，其中油纸复合特性是影响其散热和电气绝缘性能的关键因素。本文研究了绝缘纸孔隙度和透气率对绝缘油在纸中的扩散特性、结合饱和量的影响，进一步研究了绝缘油扩散特性对油纸绝缘散热和击穿性能的影响。建立了油在纸中的扩散模型，得到了弱点热分布特性，揭示了绝缘纸孔隙度所引起的油纸绝缘散热特性改变是油纸绝缘发生不均匀热老化的决定因素之一；此外，绝缘油在纸中的扩散特性、结合饱和量使油-纸双电层结构变化，从而影响油纸绝缘击穿性能。本研究将为我国换流变压器用绝缘纸性能调控和换流变压器国产化提供一定的数据和理论支撑。

D31-P17

Effect of CuCr Alloy Contact Material Produced by Metal 3D Printing on High-current Vacuum Arc Characteristics

Hui Ma*, Yirui Zhang, Hao Cheng, Yueheng Yang, Zhiyuan Liu, Yingsan Geng, Jianhua Wang
Xi'an Jiaotong University

Due to their excellent insulation performance, eco-friendly, compactness and some other advantages, vacuum circuit breakers (VCBs) are widely used in the power system of 12-40.5 kV levels and are extending to higher voltage levels of above 126 kV to reduce the usage of SF_6 circuit breaker. Contact material is key factor for the high voltage VCBs, which has a decisive effect on the vacuum arc and insulation characteristics. The metal 3D printing, also known as metal additive manufacturing process, is becoming the next industrial revolution. The advantages of the metal 3D printing include zero tooling, waste less, design freedom, producing near-net-shape parts, complex topology parts, lattice structure parts, and customization.

The objective of this paper is to determine the effect of the CuCr alloy contact material produced by metal 3D printing on the high-current vacuum arc characteristics. A pair of 58 mm diameter AMF contacts were installed inside a detachable vacuum chamber. The contact material was CuCr25 (25% Cr), produced by Metal 3D printing. The arc modes were observed with a high-speed charge-coupled device video camera. The microstructure of the cross section of the anode surface melt layer was observed by scanning electron microscopy. The experimental arc currents increased from 15 to 23 kA (rms).

The experimental results reveal the high-current vacuum arc characteristics of the CuCr alloy contact material produced by metal 3D printing. Then, the anode spot formation threshold current of the CuCr alloy contact material produced by metal 3D printing were determined. Finally, the results show the anode erosion pattern in anode surface of the CuCr alloy contact material, which should be caused by an interactive process of thermal and mechanical effects. In detail, the depth and the Cr content of the melt layer was determined experimentally.

D31-P18**高压大功率 IGBT 用电场自适应硅凝胶复合材料特性研究**

张闯、安若萌、李欣璐、郭凌岐、王诗航、李盛涛*

西安交通大学

高压大功率 IGBT 呈现高压 (>10kV)、高频 (>100kHz)、大电流 (>2kA) 发展趋势, 其绝缘安全面临重大挑战。硅凝胶作为高压大功率 IGBT 的灌封绝缘, 需承受高频方波脉冲电压和温度梯度的共同作用, 硅凝胶、陶瓷基板和金属电极构成的三结合点位置电场极易畸变, 从而引发体电树枝或者界面放电, 严重制约了高压大功率 IGBT 的进一步发展。因此, 急需研究能减弱电场畸变的硅凝胶材料。本文制备了一种基于碳化硅 (SiC) 非线性电导效应的硅凝胶/纳米 SiC 复合材料体系, 纳米 SiC 掺杂质量分数分别为 0%、0.5%、1%、5%和 10%, 表征了其击穿强度、电导率和表面陷阱特性, 结合电场强度仿真, 对硅凝胶/纳米 SiC 复合材料改善电场畸变进行了深入解析。结果表明, 硅凝胶/纳米 SiC 复合材料击穿强度和陷阱能级均随纳米 SiC 掺杂含量增加先上升后下降, 这主要因为纳米 SiC 和硅凝胶形成的界面区对硅凝胶分子链和载流子的调节作用。硅凝胶/纳米 SiC 复合材料非线性系数随纳米 SiC 掺杂含量增加而增大, 阈值场强随纳米 SiC 掺杂含量增加而降低, 表明硅凝胶/纳米 SiC 复合材料电场自适应能力得到提升。考虑到高压大功率 IGBT 的实际服役场强和绝缘结构, 提出了一种提高 IGBT 工作场强和结构优化设计方法。本文研究表明基于 SiC 非线性电导效应的硅凝胶/纳米 SiC 复合材料能够促进高压大功率 IGBT 的进一步发展, 为相关研究提供理论与实验基础。

D31-P19**微米氮化硼-纳米氧化铝掺杂对环氧复合材料导热性 能与绝缘性能的影响**

钟承志、冯阳、李盛涛*

西安交通大学

环氧树脂(EP)绝缘材料具备优异的绝缘性能和高黏附性, 常应用固态变压器的绝缘结构中。针对固态变压器在高频的应用条件下, 环氧树脂较差的导热性所引发的温升会使器件的工作稳定性劣化。本文以环氧树脂为研究基体, 微米氮化硼(BN)和纳米氧化铝(Al_2O_3)作为填料, 采用原位聚合法分别制备了不同含量比的微纳米复合掺杂的环氧树脂绝缘材料。并聚焦其导热性能、击穿性能、耐压性能等进行了系统的研究。实验结果表明, 相较于纯 EP, 高含量 (27 wt%) 微米 BN 和低含量 (3 wt%) 纳米 Al_2O_3 复合掺杂的环氧复合材料的热导率可达到 $1.21 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, 提升了 476%。同时, 试样在工频和高压下的击穿强度分别提高了 10.4%和 13.2%。此外, 厚度为 0.2 mm 的微纳掺杂试样在 10 kV、20 kHz 双极性方波电压下的耐压时间可达到 230 秒, 相较于纯 EP 提高了 820%。研究表明: 通过调节微米/纳米掺杂含量可显著改善环氧材料的导热性能和高压绝缘性能, 为固态变压器在特定的高频的应用环境下的工作稳定性提供了重要保障。

D31-P20**Effect of M-site element on the interaction of M_2AlC and Ag and the induced properties of Ag/ M_2AlC electrical contact materials**Dandan Wang^{*1}, ZhengHui Xia¹, JianXiang Ding², ChengJie Lu³, ZhengMing Sun³

1. Changzhou University

2. Anhui University of Technology

3. Southeast University

The deintercalation of weakly bonded A element affects the microstructure and properties of MAX phases and their reinforced composites. In this work, the effect of M-site element on the interaction of Al-containing M_2AlC (M=V, Cr) phase and Ag, and the induced properties of Ag/ M_2AlC electrical contact materials (ECMs)

were investigated. Though Ag and Al are soluble to each other and can form intermetallics, the variation of M element significantly affected the vacancy formation of Al, and thereby the interfacial reaction of Ag/M₂AlC. The difficult formation of Al vacancy in V₂AlC contributed to no obvious interfacial reaction in Ag/V₂AlC. But the easy deintercalation of Al atoms in Cr₂AlC led to their massive replacement by Ag, which generated Ag nano-twins and Cr₃C₂ with the same crystallographic relationship in one original Cr₂AlC, and Cr₇C₃ and Ag₃Al as well. Due to the distinct interactions, the resistivities of Ag/V₂AlC and Ag/Cr₂AlC increased by roughly 1 and 5 times after sintering, respectively. The low resistivity and proper hardness of the sintered Ag/V₂AlC, which were very close to those of the “all-purpose” commercial Ag/CdO, contributed to its superior arc erosion resistance.

D31-P21

界面突起缺陷对交联聚乙烯电气强度的影响

奚锐¹、何佳迅²、张亚²、詹陶²、曹亮*¹、桂银刚¹、唐超¹

1. 西南大学

2. 重庆泰山电缆有限公司

交联聚乙烯电缆绝缘层与半导体屏蔽层间的界面突起缺陷会导致其邻域内电场发生畸变, 威胁电缆安全可靠运行。本研究基于中压与高压两种绝缘料在实验室条件下制备出含不同形态界面突起的试样, 通过击穿试验评价界面突起缺陷对绝缘材料电气强度与寿命指数的影响。结果表明: 随着屏蔽向绝缘凸起尺寸的增加, 中压与高压两种绝缘料试样的击穿场强均呈现下降趋势。中压绝缘料片状试样的寿命指数为 13.50, 高压绝缘料片状试样的寿命指数大于中压绝缘料试样, 为 17.23。中压绝缘料片状试样的寿命指数随着界面凸起尺寸的增加, 其寿命指数呈现下降的趋势, 在 200μm 时, 寿命指数达到最小为 10.84。高压绝缘料片状试样的寿命指数随着界面凸起尺寸的增加, 呈现出增大的趋势。研究结果可为中高压交联聚乙烯绝缘电缆的设计与制造提供参考。

D31-P22

天然酯电容式变压器套管结构优化设计

刘鹏*¹、范玥霖^{1,2}、牛清华¹、刘丽岚¹

1. 西安交通大学电气工程学院

2. 国家电网湖北省电力公司武汉市供电公司

我国 110kV 及以上变压器套管通常采用矿物油浸纸绝缘结构, 但矿物油不可再生, 燃点低且难以降解, 存在环境污染和安全隐患。近年来, 矿物油纸套管故障频发, 危及电网安全。本文提出天然酯电容式变压器套管的研发技术路线, 测试分析套管用天然酯绝缘油及油浸纸材料的材料性能, 研究其材料适用性。研究天然酯电容式变压器套管的参数和结构设计方法, 建立电场和温度场仿真模型, 并试制套管样机, 通过型式试验验证其可行性及合理性。研究成果为天然酯电容式变压器套管的国产化和应用提供了重要基础。

D31-P23

接枝改性提升聚丙烯的介电储能特性

张硕、刘培焱、周彬、冯阳*、钟承志、杨皓翔、赵九辉、李盛涛

西安交通大学

基于结构设计研制高介电常数、高击穿场强 (“双高”参数) 聚合物电介质是提高薄膜电容器储能密度的关键。以聚丙烯为研究对象, 通过固相法制备接枝聚丙烯, 开发高介电常数、高击穿场强聚合物电介质。结合实验测试、第一性原理计算与耗散粒子动力学模拟探究接枝种类和含量对电极化和电荷输运的影响, 揭示接枝改性对聚丙烯介电常数与直流击穿场强的影响机理。测试结果表明, 接枝种类和含量会通过影响聚丙烯共混物的偶极极化与陷阱特性, 改变材料的介电性能和储能密度。通过改变接枝种类与含量, 改性

后聚丙烯的介电常数增大了 6.3%，击穿场强提高了 10%，储能密度提高了 13%，实现了介电常数与击穿场强的同时提高。结合共混体系的动力学性质与电子结构计算结果，明确接枝种类与含量对深陷阱的作用机制。研究结果为高储能聚合物的结构设计和性能优化提供了理论基础和技术支撑。

D31-P24

环氧树脂高频介质损耗特性及计算方法研究

刘占磊*、祝令瑜、党永亮、汲胜昌

西安交通大学

环氧树脂具有良好的电气绝缘性能，在电气封装中得到广泛应用，高压大功率高频变压器采用环氧固封的形式可以提高击穿电压，减小绝缘间距，提高功率密度。然而，环氧树脂在高频激励下会产生介质损耗，在高频变压器总损耗中不可忽略。正弦激励下环氧树脂的介质损耗可以通过宽频介电谱测试得到的介电常数虚部值来计算，且随着激励电压和工作频率的提高而提高，方波激励下的介质损耗通过给环氧树脂样片施加方波电压激励，测量方波电压和脉冲电流波形乘积并积分得到。方波激励下的介质损耗可以基于傅里叶分解的方法，通过各次谐波正弦激励下的介质损耗相加来计算。环氧树脂介质损耗的准确计算对于高频变压器损耗的准确计算具有重要意义。

D31-P25

Influence of nonlinear polarization of solid insulating dielectrics on the interpretation of space charge measurement results

Yunlong Sun*, Jinjiang Pang, Zhonghua Li

Harbin University of Science and Technology

The basic principle of space charge measurement is to apply certain perturbations (e.g., high-voltage pulses, thermal pulses) to the charge that exists in the dielectrics, and to obtain information on the temporal and spatial distribution of the space charge by measuring and analyzing the relevant signals (e.g., acoustic signals, electric currents) generated by the charge response to the applied perturbations. The measured signals generated by the charge perturbation are the signal of net charge perturbation in the dielectrics. In other words, the measured volume density of space charge is the sum of the volume density of the real charge and the spatial gradient of the polarization. Here, the real charge refers to the charge accumulated by electrode injection or impurity dissociation, as well as the charge captured by the traps and localized in some regions across the thickness of the dielectrics.

Starting from the basic physical process of dielectric polarization, the physical information embodied in the space charge measurement results is analyzed in this paper when the dielectrics reflects nonlinear polarization. The results show that the space charge measurement results at this time no longer only reflect to the trapped space charge behavior, but reflect the combined effect of the trapped space charge and the spatial gradient of polarization. At the same time, in order to understand the space charge measurement results correctly, an analysis method of the space charge measurement results is proposed based on the combined measurement technique of space charge time-space spectrum and current and potential time-domain spectrum, which realizes the decoupling of polarization information and charge information in the space charge measurement results.

D31-P26

基于红外光谱和声发射技术的复合绝缘材料缺陷识别与评估

张楚岩*¹、刘嘉¹、刘文婷¹、邓禹²

1. 中国地质大学 (北京)

2. 中国电力科学研究院有限公司

复合绝缘子是实现高压输电线路外绝缘的重要设备,其在运行过程中的主要问题在于硅橡胶材料的老化和芯棒材料的缺陷。当前针对复合绝缘子用硅橡胶材料老化程度量化评估方法的研究尚不成熟,对复合绝缘子内部芯棒的质量检测方法尚不完整。为此,本文提出了一种基于傅里叶红外光谱技术的复合绝缘子表面老化程度的快速评估方法,并基于声发射(AE)技术构建了一个针对复合绝缘子芯棒拉伸及弯曲实验监测的智能控制系统可用于识别基体开裂、界面分层及纤维断裂三种缺陷类型。首先,在硅橡胶材料方面,以憎水性、硬度、表面粗糙度及光泽度四项特征作为老化指标对硅橡胶样品进行老化程度综合定标,将不同老化程度的硅橡胶样品分为轻微老化、中等老化及严重老化三个等级,而后开展傅里叶红外光谱测试并将 890 个硅橡胶样品不同特征官能团的吸收峰面积作为特征变量,将其老化程度作为标签构成数据集,再基于随机森林算法建立复合绝缘子用硅橡胶老化程度评估模型,并与支持向量机(SVM)及多层感知器(MLP)模型进行对比。其次,在芯棒缺陷识别方面,基于采用声发射技术获取的芯棒组分材料的缺陷特征样本库,采用 K 均值聚类(K-means)算法对数据进行去噪处理以提升数据质量,并利用主成分分析(PCA)方法对去噪后的数据进行降维处理,最后综合应用了决策树、随机森林、支持向量机、朴素贝叶斯以及 BP 神经网络等多种机器学习算法,建立了针对复合绝缘子芯棒不同类型缺陷的识别模型。研究结果发现:采用随机森林算法的基于红外光谱技术的复合绝缘子用硅橡胶老化评估模型可以实现对硅橡胶的老化程度进行快速准确评估,准确率可达 94.44%;多模型综合方法在复合绝缘子芯棒缺陷识别中展现出了较高的准确性,总识别率达到了 88.2%。

D31-P27

Effect of plasma fluorination modified epoxy resin powder on the insulating properties of composite materials

Chuang Wang*, Yuyao Wang, Mingyu Mu, Chi Chen, Ni Zhao, Haoting Li
Xi'an University of Technology

After curing, epoxy resin produces a three-dimensional mesh structure of polymers, which gives epoxy resin materials excellent performance, but also leads to the production of trimmings and difficult to be degraded and recycled after the expiry of the product's life or after the failure of the product. The need for a viable recycling strategy for such materials is all the more urgent as our country proposes to enhance the recycling of renewable resources and reduce the pressure on the environment. In this paper, mechanical grinding was used to grind the epoxy resin to micron-sized powder, which was subsequently fluoridated using plasma technology and reintroduced into the epoxy resin in the form of a filler and then prepared, to test the microscopic morphology, chemical composition, and insulating properties of epoxy powder and specimens before and after modification. The experimental results show that after 30 min of plasma fluorination, the agglomeration of small-sized particles of filler is improved, the crack distribution of the specimen is diversified, and the degree of brittleness is reduced. Increased glass transition temperature (T_g) and better heat resistance compared to pure epoxy. Decrease in dielectric constant and dielectric loss indicates that the filler is tightly bonded to the matrix, limiting some of the local chain and molecular movement. After plasma fluorination, the particles are dispersed, resulting in a slight decrease in volume resistivity, which is still higher than that of pure epoxy resin. The breakdown voltage was significantly increased by about 11.7% and 35% compared to the specimen with unfluorinated filler and the pure epoxy resin specimen, respectively, and the two-parameter Weibull distribution indicated that the breakdown voltage dispersion was also reduced. The results demonstrated the feasibility of plasma filler treatment to enhance the insulating properties of epoxy resins and provided a new research idea for the recycling of epoxy resins and their composites.

D31-P28

基于芳纶复合薄膜的热导率调控及其高温电容储能应用

庾翔*、王齐斌

华北电力大学

聚合物电介质电容器以其超高功率密度、超快放电速度和稳定的循环能力在电子工业中扮演关键角色。它们具有高击穿强度、低介电损耗、柔性和轻量化等优点。然而，热稳定性和导热性差限制了它们在高温下的应用。在混合动力汽车、电磁发射系统和输电系统等高温场景下，传统双向拉伸聚丙烯（BOPP）薄膜因操作温度低于 105℃ 而不足。当温度升至 125℃ 时，其放电能量密度和效率因漏电流增加而下降。因此，开发具有高导热能力的复合材料对于恶劣条件下的实际应用至关重要。

课题组前期开展了一系列基于芳纶材料的高导热绝缘复合薄膜。本工作将表面改性聚多巴胺（PDA）的纳米金刚石（ND）填料插入到自组装的芳纶纳米带（ANR）层之间，沿平面方向形成 ND@PDA-ANR 复合电介质薄膜。通过优化填料负载比至 20 wt%，实现了优异的面内热导率 17.13 W/(m·K) 和高达 39.84 的各向异性比。通过使用相场法模拟电热场耦合仿真模型，发现热击穿得到有效抑制，使得在 150℃ 下实现 302 kV/mm 的击穿强度，高温储能密度达到 2.42 J/cm³，比传统芳纶薄膜材料高出 806.7%，储能效率保持在 80% 以上。此外，复合电介质薄膜材料展示了出色的循环稳定性、热稳定性、杨氏模量和柔韧性。

D31-P29

轻质高强度高导电性铝基纯钙复合材料在高压输电线缆中的应用

田亮*

西安交通大学

可再生能源如太阳能、风能等是实现双碳目标的重要途径。然而可再生能源通常在偏远地区，远距离高压输电作为一种低损耗长距离传输能源的方式而备受关注。高压输电线缆材料需满足高导电性、高强度、低密度三个关键性能参数。针对材料高强度、高导电性、低密度难兼容的关键技术难题，作者采用新型的离心雾化技术方法和仪器设备制备了微米级别、极易反应的纯钙金属粉末，以此研发了一种新型的轻质、高强度、高导电性铝基纯钙复合材料，相比于工业常用同类铝基电缆材料，该材料的密度减轻了 28%，强度提高了 58%，导电性提高了 28%，节省了 22% 电能输送损耗，有利于提升导电线缆材料服役的可靠性和高压输电能源的利用效率。

D31-P30

纤维增强氰酸酯复合材料介电梯度构筑方法研究

李进*

天津大学

采用双酚 A 型氰酸酯与双酚 A 型环氧树脂共混，利用 0.1 wt% 辛酸亚锡降低反应活化能，通过非等温 DSC 测试和 T-β 拟合方法确定环氧树脂占比分别为 10 wt%、30 wt% 和 40 wt% 时氰酸酯/环氧树脂/辛酸亚锡混合体系的固化工艺。采用真空浸渍的工艺，改变树脂混合比例和纤维填充条件制备出介电常数从 2.79 增至 4.23、介电损耗低于 0.024 的 9 种纤维增强复合材料样板，并依此数据分析确定树脂混合比例和纤维填充条件对复合材料介电情况的影响规律。基于复合材料样板的介电数据，以电磁仿真的形式构筑出介电常数由小到大的梯度介电结构，使得平板介质在 2-18 GHz 内的反射率整体降低 7.3%，有效带宽增加了 0.87 GHz，透波率整体提高 2.8%，由此确定了连续介电梯度对吸透波材料在高频带内的宽频效果。

仅发表论文

D31-PO01

Effect of low-melting-point oxide B₂O₃ on the microstructure and electrical properties of ZnO from defect perspective

Haibo She^{1,2}, Qirui Guo^{1,3}, Peitao Ye¹, Linda Qi¹, Yangfan Liu², Bing Tian², Yayun Liu², San Ai², Changhao

Zhao¹, Shengtao Li^{*1}

1. Xi'an Jiaotong University

2. Jinguan Electric Limited Liability Company

3. State Grid Fuzhou Power Supply Company

Zinc oxide (ZnO) varistors play an important role in transient voltage surge protection for power equipment. B₂O₃ doping was reported to be able to improve the nonlinearity of the I-V behavior of ZnO varistors, which is the figure-of-merit for arrester applications. The present work unravels the mechanism of B₂O₃ doping effects on the microstructure and electrical properties from a perspective of defect structure. The low-melting-point of B₂O₃ prompts a uniform distribution of the spinel intergranular phase, which hinders the grain growth of ZnO. Combining experiment and calculation, it is revealed that the B₂O₃ doping reduces the concentrations of intrinsic defects and the interface states, leading to an enhanced Schottky barrier. A moderate B₂O₃ doping (≤ 1.0 mol%) can enhance the nonlinear coefficient and the potential gradient and reduce the leakage current, while a heavy doping (> 1.0 mol%) may deteriorate the electrical properties, resulting from an over-sintering during the liquid-phase sintering.

D31-PO02**Research on the characteristics of industrial frequency discharge of sectional insulating structure in high pollution and humidity environment**Jixing Sun^{*1}, Dong Lei², Jiyong Liu^{1,3}, Kaixuan Hu¹, Xiaoxing Zhang⁴, Kun Zhang¹

1. Beijing Jiaotong University

2. China Academy of Railway Sciences Group Co., LTD

3. Guoneng Shuohuang Railway Development Co., LTD

4. Shandong Xunshi Electric Co., LTD

With the rapid development of China's high-speed railroad, the southeast coastal tunnel environment contact network segmental insulating device frequently flashover, the applicability of insulating device electrodes and insulating structure is reduced, affecting the safe operation of the system. To address this problem, the paper carries out the research on the frequency discharge characteristics of segmented insulation structure in highly polluted and wet environment, establishes the initial discharge analysis model of typical structure, reveals the electrode discharge process under the condition of inhomogeneous electric field; carries out the test on the frequency discharge process of segmented insulation structure in highly polluted and wet environment, obtains the discharge initiation of the tainted insulating surface and the transfer process of the arc channel, and finds that the electrode is inhomogeneous which is the key to inducing the generation of electric arc and promoting the development of arc, and puts forward the optimization method of the segmented insulation structure, which affects the safe operation of the system. It is found that the unevenness of electrode is the key to induce the arc generation and promote the arc development, and the optimization method of sectional insulation structure is proposed to provide theoretical basis and data support for the safe operation of the traction power supply system of electrified railroad.

D31-PO03**高压电缆附件硅橡胶应力松弛特性及失效机理研究**

魏艳慧*、郭昊、陈小龙、李雪静、李国倡

青岛科技大学 先进电工材料研究院 高压绝缘系统与先进电工材料山东省工程研究中心

高压电缆附件中硅橡胶绝缘与交联聚乙烯之间充足的界面压力是保证电缆附件正常运行的基本条件。

但在电缆及附件的实际运行过程中，高温老化和机械老化都会导致硅橡胶材料的力学性能衰退，从而导致绝缘界面压力的减小，影响电力系统的稳定运行。首先，通过测量力-热协同老化下的压缩应力，得到硅橡胶材料的压缩应力松弛规律；根据实测数据建立时-温等效模型，评估电缆附件的使用寿命；其次，对不同老化时间的硅橡胶进行理化性能测试，分析其力学性能变化；最后，采用分子模拟从微观层面计算了温度对硅橡胶应力松弛特性的影响，进一步分析其力学失效机理。实验结果表明：硅橡胶材料的压缩应力随老化时长的增加呈现先下降后稳定的趋势，这是由于在外力与高温的共同作用下，硅橡胶内部发生了分子链运动和化学反应。此外，随温度升高硅橡胶压缩应力松弛速率加快。分子模拟计算表明，随着温度的升高，硅橡胶的自由体积增大，均方回转半径增大，均方位移升高，导致硅橡胶内部分子链松弛加快，在宏观上表现为随着温度的升高，硅橡胶材料的压缩应力松弛加快。本文研究可以为电缆附件设计与运行可靠性提供理论依据。

D31-PO04

高压功率模块中硅凝胶-钛酸钡复合材料的高温特性

毕蓝天、王来利*、闫飞飞、袁天舒、马定坤

西安交通大学

碳化硅 (SiC) 器件的阻断电压大于 10 kV。高电压会在 SiC 功率模块内部产生高电场。提高功率模块封装材料的绝缘性能成为迫切的要求。由硅凝胶和钛酸钡 (BaTiO_3) 组成的电场依赖性介电常数 (FDP) 材料可以用于降低电场强度。然而，FDP 材料的相关研究仅限于室温条件且由于功率损耗的原因，功率模块的工作温度高于室温，因此需要研究温度对 FDP 材料的性能影响。

本文重点研究了该复合材料在高温下对于电场的降低作用。首先通过仿真验证了功率模块中金属化、陶瓷和硅凝胶之间的三结合点同时承受高电场和高温的压力。其次，本文分析了硅凝胶和复合物的击穿电压和老化特性，并实验测量了 FDP 材料的居里温度，证明硅凝胶不会改变 FDP 材料的居里点。接着，本文研究了 FDP 材料在不同温度下的介电常数以及降低电场应力的机制。以及硅凝胶在室温和 50°C 下固化后的介电特性，包括介电常数和介电损耗。

最后得出结论，由 BaTiO_3 和硅凝胶制成的 FDP 材料可用于降低功率模块中的高电场应力。FDP 材料的添加减少了频率对硅凝胶击穿电压的影响，并且老化实验结果证明了复合材料在阻碍电气树生长方面比硅凝胶更有效。研究还发现，在接近居里点的温度下，FDP 材料的介电常数并没有出现预期的急剧变化，这可能与复合材料中 BaTiO_3 含量较低以及密实陶瓷与微米级陶瓷颗粒之间的不同性质有关。

本文研究对于理解和改进高温功率模块的绝缘性能具有重要意义，并为未来的绝缘材料研究提供了有价值的见解。

D31-PO05

基于陶瓷基板新结构的高压功率模块电场强度优化

闫飞飞、王来利*、马定坤、袁天舒、毕蓝天

西安交通大学

高电压级功率模块在牵引、可再生能源系统、HVDC 系统和柔性交流传输系统等应用广泛。随着 SiC 器件制造技术的发展，功率模块的电压等级得到了显著提升。但是，高电压转化为高电场，加上 SiC 器件上的电压是具有高频率、高电压过冲和高重复率的脉冲宽度调制 (PWM) 电压，这为绝缘系统创造了一个恶劣的环境在高电压功率模块中，增加局部放电 (PD) 的风险，威胁绝缘的可靠性。

本文聚焦于功率模块中金属电极、硅胶和陶瓷之间的三结合点，全面分析了不同三结合点处电场的影响因素。通过进行 PD 实验，结果表明硅胶和陶瓷之间的界面是绝缘的弱点。因此，本文提出了三结合点处既是绝缘弱点也是高电场强度的区域。为了解决这个问题，本文提出了一种新的陶瓷基板结构，通过改变金属电极边缘的设计，将三重点移至陶瓷基板的金属电极底部，它将界面区域与高电场隔离开来，同时显著降低了电场强度。

本文通过有限元分析计算电场, 使用 COMSOL Multiphysics 5.4 软件进行了模拟陶瓷基板的厚度、电极间隙和金属化偏移对三结合点点电场强度的影响。进行了在不同电极间隙距离的 DBC 陶瓷基板上的 PD 实验, 分析了增加间隙距离对绝缘能力的影响。

总之, 这篇文献通过理论分析和实验验证, 提出了一种新的陶瓷基板结构, 有效地降低了高电压功率模块中的临界电场, 提高了绝缘性能, 为 SiC 器件在功率模块中的应用提供了有力的技术支持。

D31-PO06

高压电缆附件复合绝缘界面匹配特性及硅橡胶改性研究

李国倡*、陈小龙、郭昊、李雪静、魏艳慧

青岛科技大学 先进电工材料研究院 高压绝缘系统与先进电工材料山东省工程研究中心

电缆附件作为高压直流输电系统的重要组成部分, 其可靠性直接影响整个电缆输电系统的安全性与稳定性。但由于电缆附件涉及双层绝缘界面, 两种绝缘介质之间的界面是否匹配对电缆附件整体具有重要的影响。尤其是随着聚丙烯电缆的发展, 聚丙烯电缆附件中主绝缘与附件绝缘材料界面匹配问题不可避免。本研究首先测试了交联聚乙烯 (XLPE) /硅橡胶 (SiR)、聚丙烯 (PP) /SiR 两种组合界面的电学性能, 并对比分析了两种组合界面的电学匹配特性。其次, 根据匹配结果向 SiR 中添加钛酸锶钡 (BST), 以改善 SiR 绝缘与主绝缘材料的界面电学匹配性。最后, 通过分子模拟软件对 XLPE、PP、SiR 进行分子水平上的模拟计算, 探究微观结构对材料匹配性能的影响。研究表明: 界面电学匹配方面, PP/SiR 较 XLPE/SiR 界面积聚更多的空间电荷, 但添加了 BST 的 SiR 与 PP 绝缘之间的界面电荷积聚大大减小, 同时少量的 BST 可以提升 SiR 的击穿性能。分子模拟结果表明: SiR 的自由体积变化及陷阱深度最大。综合实验与分子模拟结果可知, XLPE/SiR 较 PP/SiR 的界面电学匹配性更好。BST 可以提升 SiR 与 PP 的界面电学匹配性。该工作对于提高电缆附件的安全可靠性及促进环保型聚丙烯电缆的发展具有重要的参考意义。

D31-PO07

聚合物基粒子填充型导电复合材料的宏观电导率预测模型

曹亮*、邹才海、桂银刚、唐超

西南大学

在聚合物中添加导电粒子形成导电复合材料, 具有成本低、工艺简单等优点, 在电磁屏蔽、生物医疗、传感器件等领域得到广泛应用。为实现聚合物基粒子填充型导电复合材料的宏观电导率预测, 本研究基于导电通道理论与聚合物非线性电导特性建立了球形粒子填充型导电复合材料的物理模型, 包括均匀分布三维模型和非均匀分布三维模型, 分析了导电颗粒与电极的距离、导电颗粒的接触状态及导电填料的体积分数与复合材料宏观电导率的关系。结果表明: 复合材料的导电颗粒距离上表面越近, 其电导率越大; 复合材料电导率随接触通道的数量增加呈非线性增大的趋势; 同时, 复合材料中导电填料的体积分数越高, 其电导率也越大。经与实测值进行对比, 利用模型获得的电导率与实验测得数据误差相对较小, 认为模型可以实现聚合物基粒子填充型导电复合材料宏观电导率的预测。

D31-PO08

Effect of AC Electric Field Assist on the Nonlinear Conductivity of Epoxy/SiC Composites

Jie Chen, Yongsan Han*, Yuanhong Qin, Zechao Zhang

Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology

Nonlinear resistive field grading material presents nonlinear electrical conductivity and self-homogenizes the electric field distribution. In this paper, epoxy /SiC composites were prepared with micron silicon carbide as filler and AC assisted electric field applied, while epoxy /SiC composites without AC assisted electric field treatment

were prepared as a comparison. The fourier infrared spectrum(FT-IR), SEM, dielectric spectra and direct current(DC) conduction of epoxy /SiC composites were measured. The results show that the AC assisted electric field helps the SiC filler form chains structure in the matrix. Compared with the untreated epoxy /SiC composite, the electric-field assisted composites show superior nonlinear conductivity characteristics. This may be due to the presence of SiC particle chains, which contribute to the percolation phenomenon inside the composite.

D31-PO09

高电流密度下典型轨道材料高速剪切特性研究

陈立*

西安交通大学

轨道材料性能是影响电磁发射精确度和轨道寿命的关键因素。目前,在电磁发射装置上实时开展轨道材料研究难以实现,大电流密度高速剪切条件下轨道材料变形机理尚不明晰,限制了轨道材料的进一步发展。本文基于电磁斥力盘和脉冲功率源模拟轨道剪切过程,基于铆接原理设计了一种实现高应变率变形同步耦合电流且易产生剪切的新试样,开展高应变率剪切 ($>10^4\text{s}^{-1}$) 耦合高电流密度 ($10^8\sim 10^{10}\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$) 条件下典型轨道材料变形特性研究。通过对比不同条件下材料微观特征和力学性能得到脉冲电流对材料动态变形的作用规律。结果表明,剪切变形导致屈服强度增大,应变硬化指数减小,随电流密度增大,屈服强度进一步增大,应变硬化指数进一步减小。剪切变形和脉冲电流均促进了第二相粒子溶解于基体。仅黄铜产生绝热剪切带产生,含铜量越高,轨道材料绝热剪切敏感性越低。

D31-PO10

具有优异电荷稳定性的超轻耐热共聚聚酰亚胺气凝胶驻极体

孙维凯、宋波、董明*

西安交通大学电气工程学院

在“双碳”目标下,轻质聚合物气凝胶电介质材料因其生产运输成本低和电荷稳定性好的特点,成为驻极体材料的关注热点,其中聚酰亚胺气凝胶 (PIA) 更是综合了 PI 优良电气性能和气凝胶轻质多孔的优点。本文在实验室通过制备 PIA 样品,进行等温表面电位衰减 (ISPD)、热刺激去极化电流 (TSDC)、击穿性能和压电系数等参数的测试,研究验证了共聚 PIA 作为一种具有超轻、优异热稳定性的驻极体材料的可行性,并阐明其电荷传输特性和电荷稳定性增强机制。结果表明,室温电晕充电后,PIA 在 120°C 下表现出优异的驻极体性能,并且在高温充电或热处理后,其电荷稳定性得到进一步提升。进一步的 ISPD 和 TSDC 研究表明,PIA 的电荷稳定性机制是由于多孔结构增加了局部缺陷、弱化了内部电场、增长了导电路径。此外,PIA 的多孔结构提高了击穿强度,有效限制了击穿感应电导率,从而保证了 PIA 驻极体的高空间电荷密度和高压电系数。综合 PIA 的低密度、高化学稳定性和本征优异性能,将其作为驻极体在高温下的轻质传感器和能量转换器件等应用场景中具有广阔的前景。

D31-PO11

三元乙丙橡胶自熔式接头的界面特性老化演变规律

李秀峰*

山东理工大学

自熔式接头采用三元乙丙橡胶(EPDM)绝缘自粘带,以半重叠方式绕包在电缆本体上,经低温熔融制成电缆接头的 EPDM 自熔式绝缘。其与交联聚乙烯(XLPE)绝缘粘合形成的复合绝缘层,利用 EPDM 自熔式绝缘本身黏胶的粘合特性消除了绝缘界面间的气隙缺陷,同时还满足了接头所要求的界面压力及密封性能,且最大的优势是“无物理界面”结构可以从根本上解决传统冷缩式接头由于“热胀冷缩”的呼吸效应而产生的活动界面问题。为了研究 EPDM 自熔式接头复合绝缘层与 XLPE 本体绝缘间的界面特性老化演变

规律, 本文对 XLPE/EPDM 双层试样进行加速热老化处理, 以模拟接头内部的复合绝缘层在高温环境下的实际工况, 对复合试样开展了界面双层微观结构形貌的观察, 剥离性能测试及红外光谱分析。结果表明: 在老化初期, EPDM 自熔式绝缘中的黏胶进入 XLPE 中发生溶胀, 形成融合交界面, 复合交界面处宽度增加, 结合更加牢固; 但随着老化继续进行, 黏胶因长期受到热氧作用, 发生氧化降解, 融合交界面遭到破坏直至消失, 复合绝缘层发生两相分离, 黏附性能逐渐下降。即短期老化会在界面间形成牢固粘接面, 而长期老化会引起更强的黏胶溶胀效应从而发生相分离。因此, 剥离强度随着老化的进行呈现先增后减的变化趋势。老化后的 EPDM 自熔式绝缘, 亚甲基指数 M1 和甲基指数 M2 略有下降, 羰基指数 C 明显升高, 说明 EPDM 分子链上的亚甲基主链和甲基侧链发生断裂, 发生热氧反应生成含有羰基基团的老化副产物。

D31-PO12

A synthesis and film-stretching technology of electric ultra-low ash and high isotacticity polypropylene

Sen Meng, Cheng Yao, Gang Liu*, Xipeng Cai, Lei Jia, Shangmao Hu

Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd.

Polypropylene (PP) is widely used in the field of electrical engineering due to its excellent performance in terms of heat resistance, insulation, chemical stability and mechanical properties. The electrical properties of PP are primarily dependent on the isotacticity and ash of the pellets. The control of ash in PP pellets is typically achieved through an additional washing and de-ashing process, however, which entails significant energy consumption and environmental pressure. In this work, based on the highly efficient catalyst system, a polymerization processing technology for ultra-clean PP pellets was developed using direct polymerization without introducing washing and de-ashing process, and an adaptable film-stretching technology was established with it. We investigated the control methods of internal and external electron donor on polymerization technology and improved isotacticity of the pellets ($\geq 98\%$), evaluated the effects of catalyst activity, impurities, additives and polymerization process on ash and established a clean ash control strategy for the entire process, achieving ultra-low ash (≤ 20 ppm) in the production of raw material-powder-pellet. Furthermore, the role of the external field stretching process on film structure has been clearly elucidated, providing a novel, cost-effective and environmentally-friendly processing and manufacturing strategy for the industrial production of electrical ultra-clean PP pellets.

D31-PO13

Tailoring the Properties of Polypropylene Roughened Films for Capacitors via Chain Architecture and Polymorphic Form

Gang Liu*, Xipeng Cai, Lei Jia, Shangmao Hu

China Southern Power Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd.

Biaxially oriented polypropylene (BOPP) roughened film is a dielectric material for matching high-voltage oil-immersed capacitors, which has important applications in the field of electrical engineering. The properties of surface roughening of the film determines whether it can be completely infiltrated by the oil-medium for stable storage and discharge function. However, it has been difficult to balance the surface roughening properties and high temperature breakdown strength of BOPP roughened films. In this work, we take three electrical polypropylene resins with similar isotacticity ($\sim 97\%$) as the research object. The differences in chain architecture of the three were elucidated by GPC and successive self-nucleation annealing thermal fractionation. We discussed the relationship between the chain architecture, polymorphism and film roughening. It was found that the chain architecture with short methylene sequence length (MSL ~ 80 nm), uniform distribution of stereo-defects, and wide distribution of molecular weight ($Pd=5.35$) were more favorable for β -bundle crystal generation on the cast sheets. Which is favored for uniform "craters" formed on the film surface during biaxially stretching. While the

breakdown strength and mechanical properties are degraded due to the decrease in crystallinity and melting point. By adjusting the chain architecture, MSL~100 nm, Pd~4.4, which eliminated the contradiction between β and ontology crystallization, the films were able to meet the industry standard for surface roughening and the high-temperature breakdown strength could be significantly improved (518 V/ μm at 120 °C, compared with 489 V/ μm in the counterpart sample). These results provide a useful reference for the development of resins for BOPP capacitor films that balanced high-temperature resistance and surface roughening.

D31-PO14

低介电常数绝缘纸的制备

任俊文*、夏紫璇、卞超、张稼理

四川大学

电力变压器作为电力系统的关键设备，其绝缘系统的可靠性对电力系统的稳定运行有着重要意义。油纸绝缘是电力变压器的主要绝缘形式，由于绝缘纸与绝缘油的介电常数不匹配，绝缘系统存在电场分布不均的问题。随着输电电压等级的提升，制造低介电常数的绝缘纸，同时保证其具有优异的综合性能，成为提升变压器油纸绝缘稳定性的关键。

本研究以纤维素作为基体，以纤维素纳米纤维（CNF）及芳纶纳米纤维（ANF）作为填料，通过真空辅助抽滤和热压的方法，制备了不同填料浓度梯度的复合绝缘纸，研究了复合绝缘纸的介电性能、机械性能及热性能。结果表明，在纤维素原浆中加入 CNF 及 ANF，能够有效降低绝缘纸的介电常数及介电损耗，同时增强绝缘纸的介电强度。通过对样品的 TSDC 测试结果进行分析发现，加入 CNF 及 ANF 的纤维素绝缘纸的陷阱密度较纯纤维素绝缘纸增加，说明 CNF 及 ANF 均匀分散在纤维素基体中，填补了纤维素分子间的空隙，同时有效阻止了载流子的电荷输运，从而减少了绝缘纸内部局部放电的产生，有效提升了介电性能。与此同时，复合绝缘纸的拉伸强度、韧性与热稳定性也较纯纤维素绝缘纸有了稳定的提升，其原因可能与 CNF 与 ANF 间依靠氢键形成了稳定的交联网络，以及 ANF 本身具有优异的机械性能及热稳定性有关。

D31-PO15

构筑多级分子链交联网络实现环氧绝缘材料电学与力学性能协同提升

沈昊¹、赵玉顺*¹、赵羽¹、郑尧²、陈秋霖²、高超²

1. 合肥工业大学

2. 南方电网科学研究院有限责任公司

环氧树脂是干式电力设备的核心绝缘材料，环氧树脂交联后形成的三维网络具有极高的交联密度，这在赋予环氧绝缘材料高介电强度的同时，也导致了材料的韧性较差，目前协同提升环氧绝缘材料的电学与力学性能仍是一个具有挑战性的难题。本文提出一种基于多级分子链和网络刚性调控的环氧绝缘材料电学与电学性能协同提升方法。通过将环氧值分别为 0.20 和 0.54 的环氧单体进行复配，构建具有多级链长的环氧交联网络以分散冲击应力，同时低环氧值树脂分子链上的羟基在交联后形成的大量醚键，也赋予了环氧交联网络更好的延展性和更深的载流子陷阱。材料性能测试结果表明，当两种环氧单体的质量配比为 4:1 时，环氧绝缘材料的弯曲、冲击和介电强度分别可达 123.8Mpa、25.45kJ/m² 和 37.15kV/mm，相较于环氧值 0.54 环氧树脂制备的绝缘材料分别提升了 20.3%、79.8%和 8.9%，这也为开发多维性能协同的电工环氧绝缘材料提供了新思路。