

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.04.010

聚丙烯薄膜高温储能特性与载流子输运调控研究进展

刘标¹, 肖果¹, 贾华¹, 盖斌¹, 戚相成¹, 尤鸿芃¹, 闫飞飞¹, 皇甫泓玮², 米晓峰¹

(1. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077; 2. 中国西电电气股份有限公司, 西安 710075)

摘要: 薄膜电容器是柔性直流输电、新能源并网等领域的核心设备, 承担稳压支撑、直流滤波、无功补偿等关键作用。目前, 高端直流干式电容器及高性能聚丙烯(PP)介质薄膜在核心应用场景仍主要依赖进口, 国外企业在材料配方、薄膜加工与装备制造环节形成系统性技术壁垒, 制约了我国电力设备供应链的自主可控发展。高温储能特性是国产薄膜与国外先进产品的主要差距之一, 高温下 PP 分子链段热运动加剧, 热激活载流子输运显著增强, 导致电导损耗上升、击穿强度衰减。本文系统综述了纳米复合、全有机复合和表面修饰三类改性策略的最新研究进展, 重点从载流子产生-迁移-复合全过程剖析了不同方法的高温调控机制及其与储能性能的构效关系。结合国产化需求, 指出了当前研究的科学瓶颈与技术挑战, 为突破 PP 薄膜高温性能短板、支撑行业自主可控发展提供科学依据。

关键词: 聚丙烯; 高温储能特性; 载流子输运; 电导损耗; 薄膜电容器

Research Progress on High-temperature Energy Storage Properties and Carrier Transport Regulation of Polypropylene Films

LIU Biao¹, XIAO Guo¹, JIA Hua¹, GAI Bin¹, QI Xiangcheng¹, YOU Hongpeng¹,
YAN Feifei¹, HUANGFU Hongwei², MI Xiaofeng¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;
2. China XD Electric Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Film capacitors are core equipment in fields such as VSC-HVDC transmission and renewable energy grid integration, undertaking such critical functions as voltage stabilization support, DC filtering and reactive power compensation. At present, high-end DC dry-type capacitors and high-performance polypropylene (PP) dielectric films in core application scenarios still rely predominantly on imports. Foreign enterprises have established systemic technological barriers in material formulation, film processing, and equipment manufacturing, which constrain the development of a self-controllable supply chain for power equipment in China. High-temperature energy storage performance is one of the main gaps between the domestic polypropylene (PP) films and advanced foreign products. At elevated temperatures, the intensified thermal motion of PP molecular chain segments and the significantly enhanced transport of thermally activated charge carriers lead to increased conduction loss and reduced breakdown strength. In this paper, the recent progress of such three modification strategies as nanocomposite modification, all-organic composite modification and surface modification is systematically reviewed. Emphasis is placed on the systematic analysis of the entire process of carrier generation, migration, and recombination, aiming to reveal the high-temperature modulation mechanisms of various modification strategies and their corresponding structure-performance correlations with energy storage properties. Considering the national demand for localization, this paper identifies the prevailing scientific bottlenecks and technical hurdles, providing a scientific foundation for addressing the high-temperature performance deficiencies of PP films and for supporting the

收稿日期:2026-05-13; 修回日期:2026-06-03

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401505)。

Project Supported by the National Key R & D Program of China (2021YFB2401505)。

independent and controllable development of the power equipment industry.

Keywords: polypropylene; high-temperature energy storage performance; carrier transport; conduction loss; film capacitor

0 引言

在我国“双碳”目标深入推进与全球能源转型加速的双重战略背景下,柔性直流输电、新能源并网及电动汽车等战略性新兴产业对电力装备的功率密度、宽温域稳定性及长期可靠性提出了严苛要求^[1-3]。开发高性能储能器件已成为突破技术瓶颈、支撑产业高质量发展的关键任务之一。当前主流储能器件依据储能机制可分为化学储能(锂离子电池、铅酸电池等)、电化学储能(双电层电容器、赝电容器等)和静电储能(薄膜电容器)3大类,其功率密度与能量密度的性能对比如图1所示^[4-6]。其中,薄膜电容器基于电介质极化与去极化的物理过程,可在纳秒至微秒级时间内完成充放电,功率密度可达 $10^4 \sim 10^7$ W/kg,显著优于锂离子电池($1 \sim 10^2$ W/kg)及电化学电容器($10^1 \sim 10^6$ W/kg)^[7]。这一独特优势使其能够良好适配高频、高压及大电流的极端工况,成为电力系统与新能源装备中不可或缺的核心元件。例如,在电力系统中,薄膜电容器广泛应用于无功补偿、滤波等环节,能够保障电网安全稳定运行、提升新能源消纳能力^[8];在新能源汽车领域,其作为电机驱动逆变器的直流支撑电容,可平抑母线电压波动、吸收浪涌电流,提升制动再生能量回收效率,直接影响整车的动力性能与可靠性^[9]。

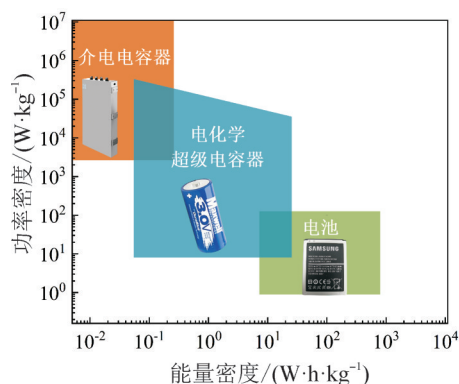


图1 介电电容器、电化学电容器与电池的能量密度和功率密度的对比图

Fig. 1 Comparison diagram of energy density and power density among dielectric capacitors, electrochemical capacitors and batteries

金属化薄膜电容器以聚合物薄膜为电介质基材,通过在薄膜表面蒸镀纳米级金属电极,经高速卷绕、喷金、热定型、焊接、入壳等工艺制成^[10]。得益于

其优异的自愈特性,薄膜电容器可在绝缘故障发生时快速隔绝故障区域、切断局部电极通路,保障器件在复杂工况下的稳定运行^[11]。其中,双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene, BOPP)凭借室温下高击穿强度(> 700 MV/m)、低介电损耗(< 0.001)、低成本及优异的加工性能,成为目前商业薄膜电容器中应用最广泛的介电材料^[12]。然而,BOPP的储能密度偏低(室温下仅 $1 \sim 2$ J/cm³),需通过增大器件体积与重量予以弥补;更为突出的是,BOPP的长期额定工作温度仅为 85°C ,最高短时使用温度不超过 105°C ,而混合动力汽车逆变器、柔性直流换流阀等核心部件附近的长期服役温度常高达 120°C ,局部热点温度甚至超过 140°C ^[13-14]。当服役温度超过阈值时,BOPP非晶区分子链段的布朗运动显著增强,自由体积急剧增大,载流子迁移势垒降低,漏电流呈指数级增长,引发电导损耗激增——这不仅导致电介质薄膜充放电效率降至70%以下、储能密度衰减50%以上;更严重的是,聚合物材料本征热导率极低(≈ 0.2 W/(m·K)),电导损耗产生的焦耳热难以快速散发,与漏电流形成热-电正反馈循环,最终导致器件热失控、绝缘击穿,引发严重的安全事故^[15-16]。针对上述高温应用瓶颈,目前主流的液冷、风冷等外部被动降温方案需额外增加20%~30%的设备成本,且占用15%~20%的安装空间^[17],既推高了终端产品造价,又与电力装备小型化、高集成化的发展趋势相冲突;即使采用强化液冷,也无法从根本上解决 120°C 以上长期服役时BOPP的老化与寿命衰减问题^[18]。当前,高端PP介电薄膜及核心改性技术仍被日本东丽(Toray)、德国创斯普(Treofan)、韩国晓星(Hyosung)等国外企业垄断,其生产装备则主要由德国布鲁克纳(Brückner)公司提供^[19-21]。国内产品在高温稳定性、批次一致性等方面存在明显差距,这一现状已成为制约我国电力电容器产业自主可控发展的关键短板^[22-24]。因此,开发具有高储能密度、优异高温稳定性的PP介电薄膜,具有重要的科学意义与工程价值。

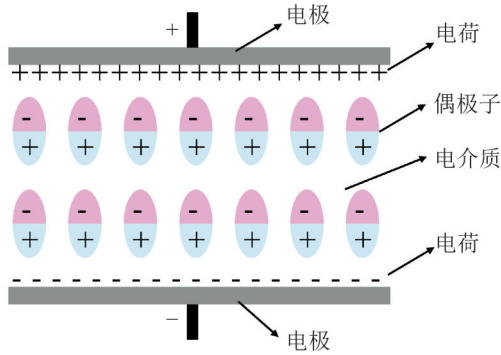
现有综述多侧重于PP薄膜储能特性的提升效果总结,对高温下载流子多尺度输运行为的调控机制、以及改性方法与工业化生产的兼容性问题缺乏系统深入的分析^[25]。基于此,本文系统梳理了近年来PP薄膜高温储能特性与载流子输运调控领域的研究进展:首先介绍了PP电介质的储能机制及高温性能

衰减机理;随后从纳米复合、全有机复合及表面修饰3类主流改性策略出发,重点剖析了不同方法对高温载流子产生、迁移与复合过程的调控规律;最后结合我国电力电容器产业国产化的核心需求,总结了当前研究面临的关键科学瓶颈与工程技术挑战,并对未来高性能PP介电薄膜的发展方向进行了展望。

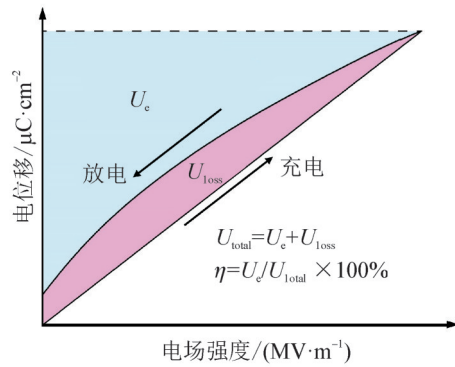
1 聚丙烯电介质的储能机制与高温性能衰减机理

1.1 静电储能基本原理

薄膜电容器的能量存储与释放过程基于电介质的极化与去极化物理机制^[26]。电介质电容器结构及 D - E 特性曲线如图2所示。



(a) 两个金属电极之间的电介质电容器示意图



(b) 电介质材料的电位移-电场强度关系曲线

图2 电介质电容器结构及 D - E 特性曲线^[32]
Fig. 2 Dielectric capacitor structure and D - E characteristic curves^[32]

图2(a)所示,在外加电场下,电介质内部的正、负电荷中心发生相对位移,产生宏观极化;同时,金属电极表面感应并积累等量异号的自由电荷,实现电能向电场能转换与存储的充电过程^[27]。当外电场撤去时,电介质发生去极化,电极上的自由电荷通过外电路流动,实现电场能向电能转换与释放的放电过程。电介质的总储能密度(U_{total})是指单位体积储存的能量,可通过对电位移-电场强度曲线(D - E 曲线)的充电分支进行积分计算^[28],公式为

$$U_{\text{total}} = \int_0^{D_{\text{max}}} E dD \quad (1)$$

式中: D 为电位移矢量, $\text{mC} \cdot \text{cm}^{-2}$; E 为电场强度矢量, $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$; D_{max} 为最大电位移矢量, $\text{mC} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

根据电磁学基本理论,电位移矢量与极化强度、电场强度的关系为

$$D = P + \varepsilon_0 E \quad (2)$$

式中: P 为极化强度矢量, $\text{mC} \cdot \text{cm}^{-2}$; ε_0 为真空介电常数,取值为 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$; E 为电场强度矢量,单位为 $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

对于理想线性电介质, P 与 E 成正比,因此 D 与 E 满足线性关系 $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$ 。代入式(1),可推导出线性电介质总储能密度的简化公式为

$$U_{\text{total}} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E_b^2 \quad (3)$$

式中: ε_r 为相对介电常数; E_b 为击穿强度, $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

需要指出的是,PP是典型的线性电介质,其电子极化过程与电场强度呈线性关系。但上述简化式(3)仅在室温、低电场($<200 \text{ MV/m}$)、无明显电导损耗的条件下近似成立^[29]。在高温高电场下,PP内部的非线性电导效应显著增强,导致宏观 D - E 曲线偏离线性关系,式(3)将产生较大误差,此时应采用式(1)直接积分计算储能密度^[30]。值得注意的是,除了计算方法的差异外,不同文献中采用的测量方法、测试设备、PP粒料型号以及薄膜制备工艺的差异,也会导致储能密度数值存在一定离散性。

充放电效率 η 是衡量电介质储能性能的另一核心指标,反映能量转换过程中的损耗程度。如图2(b)所示, D - E 回线的总面积对应总储能密度 U_{total} ,放电分支的积分面积对应有效放电能量密度 U_e ,两者差值为损耗能量密度 U_{loss} 。充放电效率的计算公式为^[31]

$$\eta = \frac{U_e}{U_{\text{total}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: U_e 为放电能量密度, J/cm ; U_{total} 为总储能密度, J/cm^3 。

1.2 聚丙烯高温储能性能衰减的微观机理

PP高温储能性能衰减的本质,是高温下载流子输运行为的异常增强及其引发的一系列连锁反应^[25]。作为典型的非极性半结晶聚合物,PP的介电性能与微观结构和载流子动力学过程密切相关。其半结晶结构由规整折叠的结晶区和无规缠结的非晶区两相组成:在常规电场和温度下,结晶区分子链被晶格紧密束缚,载流子迁移率比非晶区低3~4个数量级,对电导的贡献可忽略不计;而非晶区分子链

呈无规卷曲状态,存在大量自由体积和结构缺陷,是载流子产生、迁移与复合的主要场所^[33-35]。

等规 PP 的玻璃化转变温度 T_g 约为 $-10\sim 0^\circ\text{C}$, 工程应用中关注的 $85\sim 120^\circ\text{C}$ 服役温度远高于其 T_g ^[15]。在此温度区间,非晶区分子链段获得足够的热运动能量,发生以若干个重复单元为单位的协同布朗运动,导致体系自由体积急剧膨胀^[36-37]。自由体积的增大不仅为载流子提供了更多的输运通道,更显著降低了载流子跳跃迁移的势垒^[38]。同时,热激发效应使本征载流子浓度呈指数级增加,杂质离子和缺陷态载流子的电离程度也随之提高。二者共同作用导致漏电流激增数个数量级,使电导损耗成为高温下的主导损耗形式^[39]。高温高电下载流子输运机理如图 3 所示。

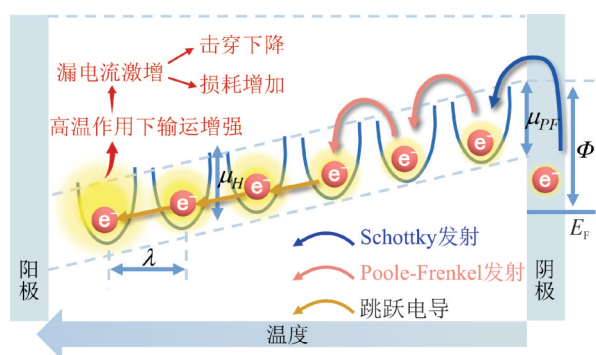


图3 高温高电下载流子输运机理示意图^[3]
Fig. 3 Schematic diagram of carrier transport mechanism under high temperature and high electric field^[3]

从载流子输运的微观机制来看,高温下 PP 中载流子迁移主要遵循跳跃电导模型;载流子被局域在陷阱中心,需要通过热激发获得足够能量才能克服陷阱势垒,从一个陷阱跳跃到另一个陷阱^[40]。当温度升高时,载流子自身获得的热能量增加,跳跃频率加快;更为重要的是,剧烈运动的分子链段会与局域载流子发生频繁能量交换,使载流子不断积累能量,从而更容易克服陷阱势垒发生跳跃^[41]。此外,高温下分子链段的运动还会破坏结晶-非晶界面区域无定形相结构,导致原有的深陷阱分布发生改变,部分深陷阱转变为浅陷阱,载流子更容易从陷阱中逸出,进一步加剧了载流子的输运过程^[42]。

载流子输运行为的异常增强会从 4 个维度导致 PP 薄膜宏观储能性能的全面衰减:1)对于介电常数而言,高温下自由体积增大和载流子浓度增加会引发微弱的界面极化和空间电荷极化,导致介电常数略有上升,但这种上升幅度远小于击穿强度和充放电效率的衰减幅度,无法弥补储能密度的损失^[43]。2)对于击穿强度而言,载流子在电场下加速运动,

碰撞电离产生电子雪崩,同时焦耳热累积导致局部温度升高,进一步降低材料的绝缘性能,最终引发电击穿或热击穿^[44]。3)对于充放电效率而言,电导损耗随温度呈指数级增长,大量电能以焦耳热的形式耗散,导致充放电效率急剧下降^[37]。4)对于循环稳定性而言,载流子的持续注入和抽出会在材料内部形成空间电荷积累,引发电树枝老化;同时,焦耳热累积导致的热氧化降解会破坏分子链结构,加速材料的老化失效^[45]。

综上所述,调控高温下载流子输运过程是提升 PP 薄膜高温储能性能的核心科学问题。基于这一思路,国内外研究者发展了纳米复合、全有机复合和表面修饰 3 类主要改性策略,通过构建深电荷陷阱、限制分子链段高温运动、抑制电极-介质界面电荷注入等方式调控载流子输运行为,从而实现 PP 薄膜高温储能性能的提升^[25]。

2 聚丙烯薄膜高温储能性能提升与载流子输运调控研究现状

2.1 纳米复合改性及载流子调控国内外研究现状

纳米复合改性的核心是向 PP 基体引入不同特性的无机纳米填料,通过界面极化提升介电常数,同时利用界面陷阱抑制载流子迁移以降低损耗,从而改善复合薄膜的高温储能性能^[46]。早期研究多聚焦于掺杂高介电常数填料(例如钛酸钡(BaTiO_3)^[47]、二氧化钛(TiO_2)^[48]),但填料易团聚并产生大量界面缺陷,导致薄膜击穿强度下降、储能性能降低。因此,界面调控是提高纳米粒子在基体中相容性和分散性的关键^[49]。双轴拉伸前后的 PP 聚集态结构示意图如图 4 所示。

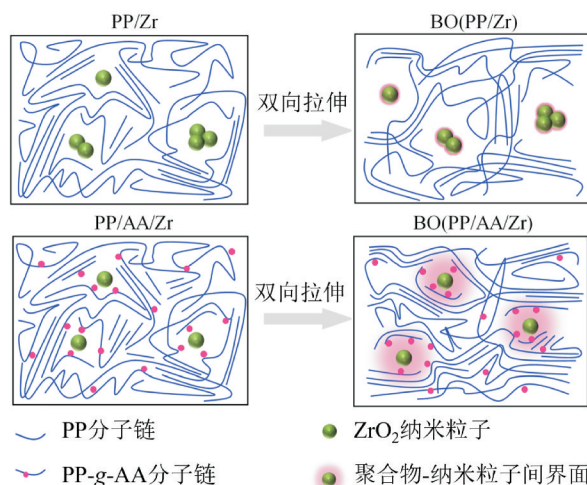


图4 双轴拉伸前后的PP聚集态结构示意图^[50]
Fig. 4 Schematic diagram of the aggregation structure of PP before and after biaxial stretching^[50]

Zhou 等采用聚丙烯接枝马来酸酐(PP-*g*-MAH)对氧化镁(MgO)纳米粒子功能化,既提升填料与 PP 基体的相容性,又通过极性基团扩大界面区域、引入局域深电荷陷阱;扫描开尔文探针显微镜(KPFM)表征显示,该陷阱可有效捕获体相载流子,抑制其高温迁移。最终,120℃下 PP-MAH-MgO/PP 复合薄膜的放电能量密度达 1.66 J/cm³,相较于 PP 提升 615%,充放电效率超 90%^[51]。Liu 等将丙烯酸接枝聚丙烯(PP-*g*-AA)与二氧化锆(ZrO₂)/PP 共混,发现接枝基团和纳米填料可增加分子链段运动活化能、加深电子陷阱能级,有效抑制高温下分子链的热运动,从而阻碍载流子的传输。此外,接枝物还在改善薄膜力学性能的同时,改性链抵消纳米粒子引发的弹性刚度增加,增强无机纳米填料与聚合物链的相互作用(见图 4)。最终,BO(PP/AA/Zr)复合薄膜在 120℃下的最大放电能量密度为 3.9 J/cm³,较 BOPP 薄膜提升 2.43 倍^[50]。

针对高介电填料与低介电 PP 间局部电场畸变的问题,研究者通过提高纳米分散性并设计介电梯度等方法予以改善^[52]。Xie 等通过高速挤出机使 BaTiO₃ 纳米填料均匀分散,再引入低介电常数和高击穿强度的二维氮化硼(BNNS)纳米片构成杂化填料。BNNS 的片状结构形成物理屏障阻断载流子迁移路径,同时缓解电场集中,提高击穿强度。该复合 PP 薄膜介电常数提高至 2.92,能量密度提升至 2.82 J/cm³,击穿强度保持在 460 MV/m,且介电损耗极低(0.0012)^[53]。

纳米填料的表面修饰可有效阻止载流子迁移、降低电导损耗。Yu 等通过氟化修饰宽带隙 BNNS,在复合薄膜中构建 II 型异质结界面,在 575 MV/m 下放电能量密度达 5.73 J/cm³,充放电效率为 91.22%^[54]。结果表明,表面氟化可通过能带结构调控实现电子和空穴的电荷双重捕获,显著抑制高温漏电流;同时,氟化 BNNS 与聚合物基体的界面作用可约束分子链运动,缓解其高温击穿强度衰减,如图 5 所示。Xie 等通过透射电镜(TEM)观察到,经烷基修饰的 BNNS 在 PP 中实现单分散状态,在 1 kHz 下,介电损耗仅为 0.002,较未修饰体系降低 80% 以上^[55]。

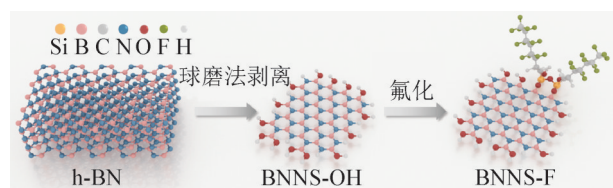


图5 BNNS 纳米片剥离及氟化工艺示意图^[54]
Fig. 5 Schematic diagram of exfoliation and fluorination process of BNNS nanosheets^[54]

通过对纳米粒子进行表面功能化改性,可有效改善其与聚丙烯基体的相容性,同步提升复合薄膜的介电常数和击穿强度,结合双轴拉伸工艺可制备无宏观缺陷的复合薄膜^[15]。但无机-有机两相间的物性差异导致界面相容性较差,拉伸时易产生空隙,难以获得商业薄膜级别的高质量均匀复合薄膜^[31]。

2.2 全有机复合改性及载流子调控国内外研究现状

与纳米复合改性相比,全有机复合改性通过引入极性/耐高温有机组分,可有效规避无机填料团聚和界面相容性问题^[49]。

Ma 等在熔融挤出造粒时引入缺电子极性 8-羟基喹啉(8-HQ),8-HQ 既可在高电场下捕获注入电荷降低漏电流,又能促进 PP 晶界晶粒的生长,从而提升机械强度,使击穿强度提高到 814 MV/m。最终,PP/8-HQ 复合薄膜在 125℃下放电能量密度高达 6.96 J/cm³,但其充放电效率仅为 83%^[56]。该团队进一步在 PP 链上接枝甲基丙烯酸三氟乙酯(TFEMA)单体,发现适量 TFEMA 可使分子链段排列更有序,有助于减少偶极转向的摩擦与损耗,进而降低薄膜电场下的介电损耗。此外,高结晶度带来的缺陷减少可显著抑制非晶区的极化和电导损耗,增强薄膜高频/高温稳定性(见图 6)。在 125℃下,PP-*g*-TFEMA2 复合薄膜的击穿强度达 717 MV/m,相较于 PP 的 490 MV/m 提高了 71.1%,放电能量密度达 8.2 J/cm³,充放电效率超 90%;且在 30℃、200 MV/m 下经 1×10⁴ 次充放电循环后性能无明显衰减^[57]。

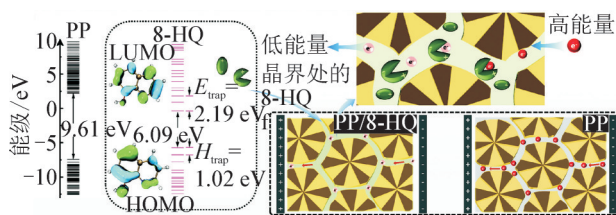


图6 在晶界处构建电荷陷阱以捕获电荷的示意图^[56]
Fig. 6 Schematic diagram of constructing charge traps at grain boundaries to capture charges^[56]

在 PP 链上接枝吸电子基团可调控电荷陷阱分布,提升高温击穿强度与漏电流抑制能力^[58]。Ran 等将有机分子半导体[6,6]-苯基-C₆₁-丁酸甲酯(PCBM)化学接枝到 PP 链上,二者强相互作用既提升相容性,又引入深陷阱,有效抑制高温漏电流激增。结果表明,PCBM-*g*-PP/PP 复合薄膜储能密度达 1.59 J/cm³,较 PP 提升约 680%,充放电效率超 90%^[59]。Meng 等在 PP 中引入 0.5 wt% 高吸电子性

的1-(2,4-二羟基苯基)-2-(4-羟基苯基)乙基酮(DPHPE),通过构建电荷陷阱抑制高温载流子迁移、减少漏电流密度,进而提高复合薄膜高温击穿强度。复合薄膜在105℃下的击穿强度提升至527 MV/m,相较于PP提升21.1%^[60]。

构建微交联结构可限制PP分子链段的高温运动,进而减少因链段运动加剧导致的介电损耗升高与击穿强度衰减^[15]。Liu等人将1,6,7,12-四氯化二萘-N-2-丙烯酸氨乙酯-N'-十二烷基胺-3,4,9,10-四羧酸双酰亚胺(PTCDA)接枝到PP分子链上,使PP-g-PTCDA在120℃下放电能量密度达2.34 J/cm³,充放效率超90%。他们发现,PTCDA接枝不仅在分子链间构建微交联结构,限制链段运动,从而提高载流子跨链运输势垒(见图7),还通过强电负性引入深陷阱,抑制电子运输,进而提升击穿强度与储能密度^[38]。

在釜式反应器中直接在PP分子链上接枝极性聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),是提升其介电常数并抑制高温介电损耗的极具潜力的工业化策略。Li等采用悬浮接枝技术在PP中接枝PMMA,双轴拉伸后BO-(PP-g-MMA)的高温击穿强度由537 MV/m增至764 MV/m。在125℃、 $\eta > 90\%$ 下,最大放电能量密度从PP的0.1 J/cm³提升至4.5 J/cm³;在125℃、300 MV/m下经 1.2×10^3 次充放电循环仍具有良好稳定性。这归因于PMMA自聚物与PP基体之间良好的相容性,并且接枝基团改变BOPP高温高电场传导机制,促进深陷阱形成以阻碍高场载流子运输(见图8)^[61]。

相比于填充型改性,全有机化学改性无需引入无机填料、可规避团聚缺陷与界面相容性问题,更利于同步提升PP复合薄膜的力学性能与击穿强度^[62]。然而,极性基团(如酯基、氨基)虽能通过偶极极化提升体系介电常数,但可能因链段极性过强增加高温介电损耗;刚性链段(如芳香环、交联结构)虽能通过抑制分子链热运动提升高温稳定性,但易使薄膜脆性增加、加工难度上升^[63-64]。

2.3 薄膜表面修饰及载流子调控国内外研究现状

薄膜表面修饰技术通过在聚合物表面构建功能层或引入活性基团,在不破坏基膜本体结晶结构、力学性能的前提下,调控电极-介质界面的电荷注入与运输,从而改善高温下的击穿强度、储能效率与电场分布均匀性,实现聚合物薄膜高温储能性能的有效提升^[27]。目前,用于储能电介质高温改性的表面修饰技术主要包括化学气相沉积(CVD)、物理气相沉积(PVD)、等离子体处理及紫外线(UV)辐

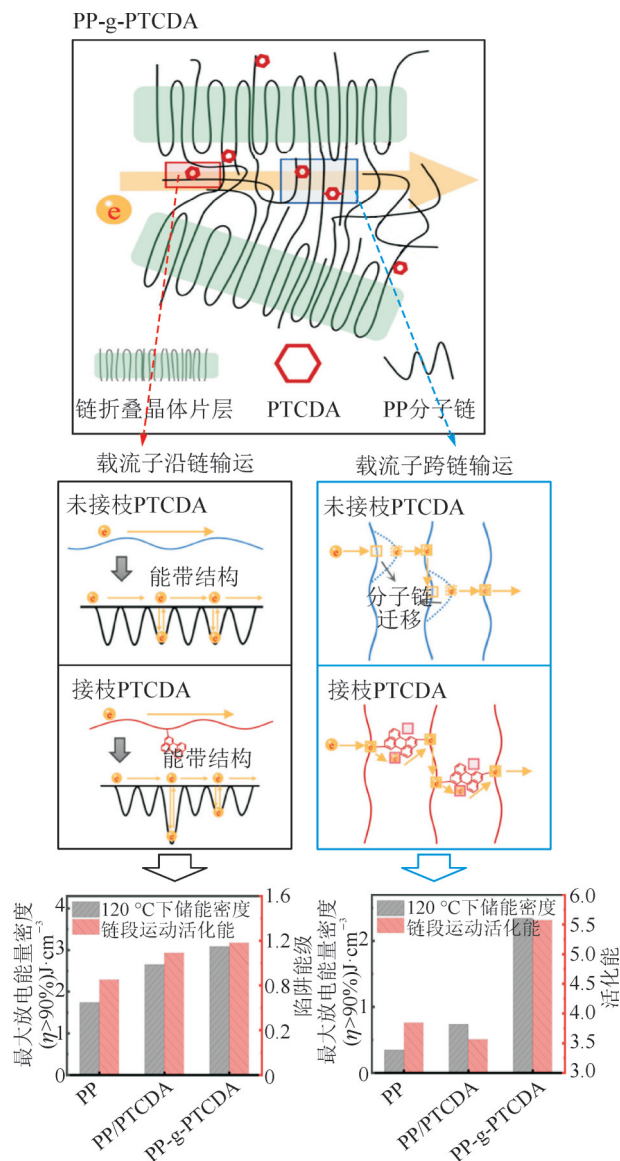


图7 PP-g-PTCDA中载流子运输行为对高温储能性能的影响^[38]

Fig. 7 Influence of carrier transport behavior on high-temperature energy storage performance of PP-g-PTCDA^[38]

照等^[27]。按照调控机制,可以将表面修饰技术分为两类:电荷注入阻挡型(如氧化铝(Al₂O₃)、氮化铝(AlN)、二氧化硅(SiO₂)涂层)和表面陷阱调控型(如等离子体处理、紫外辐照接枝)。

表面沉积技术通过在BOPP薄膜表面沉积功能层,构建载流子注入阻挡层与电荷捕获层以改善高温储能性能。Xiong等采用CVD法,将兼具高绝缘、高熔点、深陷阱能级的聚对二甲苯衍生物(Parylene)沉积于BOPP双侧,形成均匀的载流子捕获层,有效地抑制了高温和高电场下的漏电流;同时Parylene聚合物的高熔融温度也降低了BOPP复合薄膜在高温下的热损伤。最终,改性BOPP薄膜在120℃下获得了5.52 J/cm³的超高充放电能量密度,较BOPP提升42倍,充放效率超90%^[65]。为

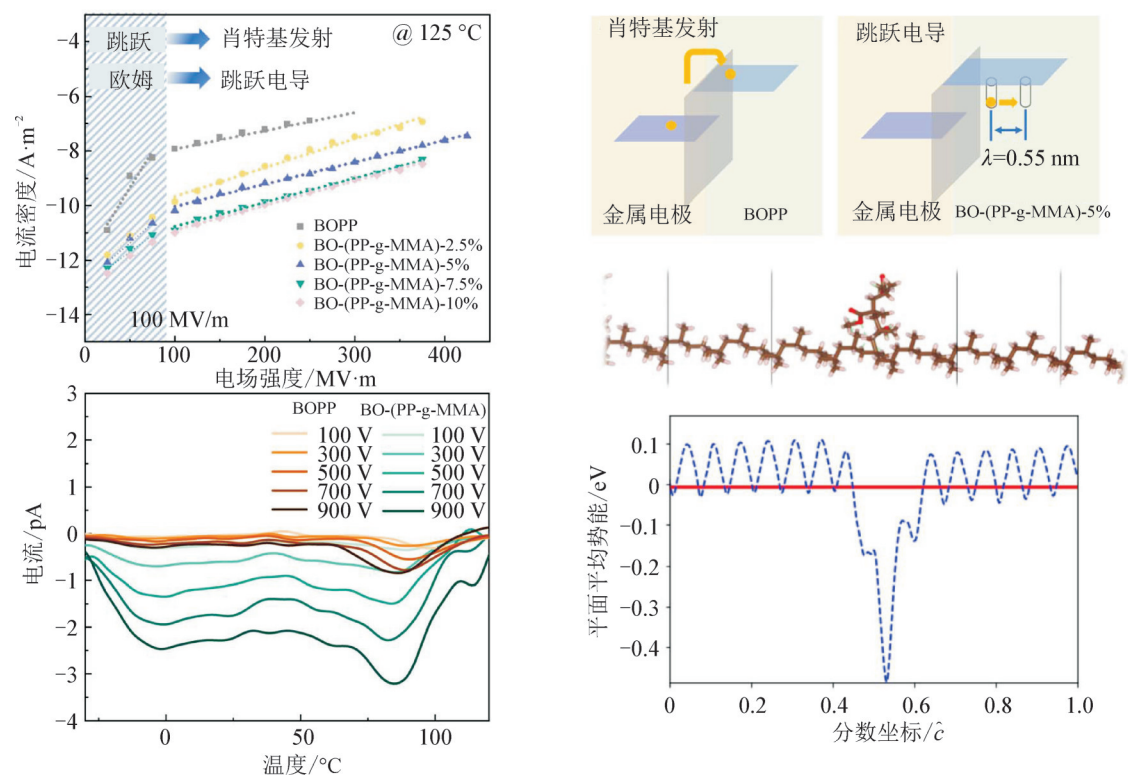


图8 BO-(PP-g-MMA)中局域态和电荷输运特性^[61]
Fig. 8 Localized states and charge transport characteristics in BO-(PP-g-MMA)^[61]

进一步优化性能,该团队又通过 UV-CVD 联用技术改进工艺。在沉积过程中引入非共轭乙烯基与极性氯原子,既破坏芳香族主链的长程共轭效应,又借助氯原子的强诱导效应,有效削弱其与芳香环共轭导致的带隙降低问题。最终,改性 BOPP 薄膜在 400 MV/m 下最大放电能量密度为 3.47 J/cm³;在 150 °C、200 MV/m 下,其放电能量密度为 1.2 J/cm³,超过大多数市售高温聚合物(0.5 J/cm³)的 2 倍^[66]。

相较于 CVD,磁控溅射属于物理气相沉积 PVD,其原理是通过靶材进行高能粒子轰击使其物理沉积到薄膜表面。Bao 等团队利用 PVD 技术在 BOPP 表面沉积 Al₂O₃ 涂层,借助 Al₂O₃ 的宽禁带效应阻断载流子注入通道。在 125 °C、200 MV/m 下,改性 BOPP 薄膜的放电能量密度为 0.45 J/cm³,较 BOPP(0.1 J/cm³)提升 350%,充放电效率达 97.7%^[67]。Zhang 等通过磁控溅射在 BOPP 两侧沉积氮化铝 (AlN) 涂层,如图 9 所示。结果表明,AlN 的宽禁带特性(6.2 eV)可显著提升电极/介质界面势垒,减少高温下载流子注入;其高热导率能加速焦耳热消散,避免薄膜因局部过热引发的热失控问题。为了避免涂层脱落,采用紫外辐照预处理增强 AlN 涂层与 BOPP 基体的界面结合力。最终,125 °C 下改性薄膜的击穿强度为 589.8 MV/m,较 BOPP 提高 18%;

200 MV/m 下放电能量密度达 1.5 J/cm³,较 BOPP 增加 1 750%,同时充放电效率超 90%^[68]。

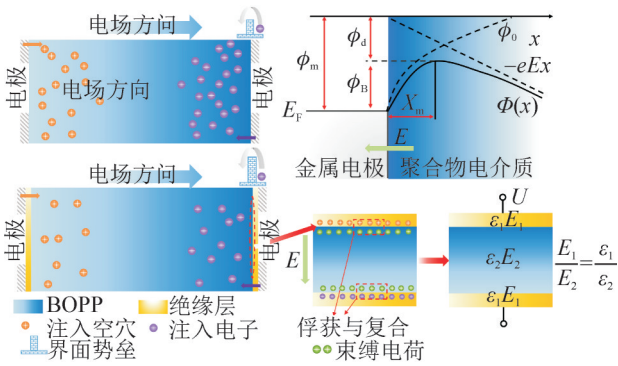


图9 漏电流和电导损耗抑制机理示意图^[68]
Fig. 9 Schematic diagram of the suppression mechanism for leakage current and conduction loss^[68]

PECVD 技术通过等离子体电离使前驱体气体(如硅烷(SiH₄)、氧气(O₂)、六甲基二硅氧烷((CH₃)₃SiOSi(CH₃)₃)等)产生高反应性自由基与离子,可在低温、低真空甚至常压下实现功能涂层在 PP 表面的快速沉积,构建界面防护层。Zhou 等通过等离子体增强化学气相沉积技术(PECVD),利用电离和激发态的高反应性化学物质以及放电区域的自由基将 SiO₂ 快速沉积在 BOPP 两侧,如图 10 所示。研究表明,表面 SiO₂ 层在电极-电介质界面区提高了电荷注入势垒,减少电荷注入量,进而降低薄膜电

场畸变。在 120 °C 和 100 MV/m 下, BOPP 的电场畸变因子为 29.7%, 而 PP-SiO₂ 的电场畸变因子仅为 4.3%。在 120 °C、 $\eta > 90\%$ 下, BOPP-SiO₂ 的储能密度为 1.33 J/cm³, 几乎是 BOPP (0.076 J/cm³) 的 18 倍; 击穿强度从 496 MV/m 提高到 584 MV/m, 较 BOPP 提升 17.7%^[69]。

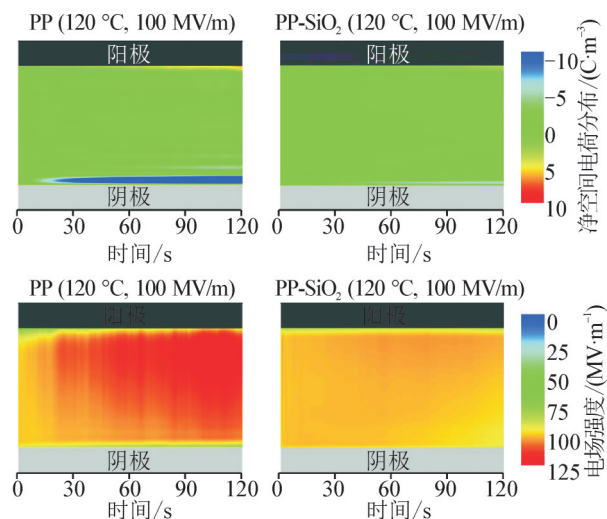


图 10 PP 和 PP-SiO₂ 薄膜中净空间电荷分布和电场畸变图^[69]

Fig. 10 Net space charge distribution and electric field distortion diagrams in PP and PP-SiO₂ films^[69]

Huang 等采用气体放电等离子体产生 KrCl (222 nm) 和 Xe₂ (172 nm) 准分子深紫外光, 在常压空气中直接辐照处理 BOPP 薄膜表面, 实现 BOPP 分子链断键、重构, 裂解氧分子生成氧原子, 形成热稳定性更好的 C—O 键, 如图 11 所示。

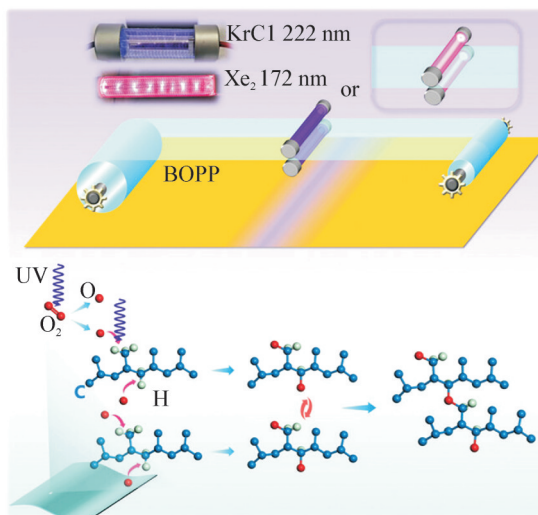


图 11 放电准分子光辐照改性 BOPP 原理图^[70]

Fig. 11 Schematic diagram of the modification principle for BOPP by discharge excimer light irradiation^[70]

研究表明, 该深紫外光改性可显著减少空间电荷积累量、弱化电场畸变; 密度泛函理论计算证实,

BOPP 链上引入氧原子后形成的深陷阱, 能有效限制载流子迁移, 从而使改性后 BOPP 在 120 °C 下的击穿强度从 428 MV/m 提升至 651 MV/m, 增幅达 52.0%^[70]。

Chi 等采用中紫外 365 nm 光照射结合引发剂辅助, 将丙烯酸(AA)接枝到商业化 BOPP 薄膜表面, 如图 12 所示。结果表明, AA 接枝改性不仅略微提高了介电常数, 而且显著降低了高温下的漏电流密度, 这归因于表面接枝结构提供的深陷阱可以抑制高温高电下载流子注入。125 °C 下改性 BOPP-AA 薄膜的放电能量密度为 1.32 J/cm³, 较 BOPP 薄膜提高 474%, 同时充放电效率超 90%^[71]。

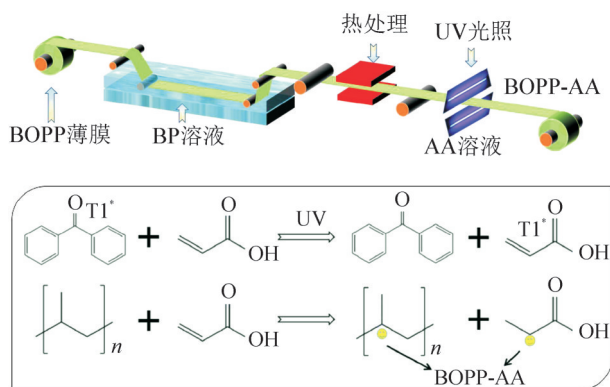


图 12 BOPP-AA 的 IGM 模拟以及紫外辐照接枝过程示意图^[71]

Fig. 12 Schematic diagram of the IGM simulation and UV irradiation-induced grafting process for BOPP-AA^[71]

3 当前研究的核心问题与国产化技术瓶颈

总体而言, 上述 3 类改性方法已覆盖从 PP 薄膜体相到表面、从单一改性到多元协同的技术维度, 在实验室层面实现了 BOPP 薄膜高温储能性能的显著提升。但无论是国际前沿研究还是国内产业化实践, PP 基复合薄膜高温储能性能的提升仍面临关键科学与技术瓶颈, 在工程化层面难以实现高温下高储能密度、低介电损耗、高可靠性的同步优化。其根源在于高温下载流子输运的多尺度调控机制尚未完全厘清, 且实验室基础研究与大规模工业化生产之间存在脱节^[10, 19]。具体问题如下:

3.1 高温载流子输运调控机制与多物理场老化失效机理尚未阐明

多数研究仍停留在单一改性策略的性能表征层面, 尚未建立高温下 PP 基复合薄膜中载流子产生-迁移-复合全过程的系统性理论框架。虽然已证实分子链段热运动通过能量交换促进载流子热激活积累、以及结晶-非晶界面刚性层破坏导致浅陷阱增多是高温电导激增的两个核心机制, 但二者

的协同作用规律、不同改性方法对这两个机制的调控优先级,以及载流子输运全过程与宏观储能性能的定量构效关系仍不明确,导致改性研究难以实现

对高温储能性能的精准调控^[72]。实际服役中的 PP 薄膜同时承受电场、温度、机械应力等多物理场的耦合作用,其老化失效是一个涉及载流子注入、空间电荷积累、分子链断裂、结晶结构演化的多尺度复杂过程^[73]。现有研究多集中于短期高温高电场下的性能测试,对长期服役过程中的性能衰减规律和失效机理研究不足,特别是高温下载流子输运与热老化、电老化的耦合作用机制尚未阐明^[74]。现有加速老化试验方法与实际服役工况的等效性存在差异,缺乏能够准确预测薄膜长期寿命的理论模型和统一的加速评价标准,无法为工程应用提供可靠的设计依据^[75-76]。

3.2 纳米复合体系界面相容性与工艺适配性存在短板

纳米填料与 PP 基体的本征物性差异导致界面相容性差,易团聚产生界面缺陷,引发局部电场畸变和电导损耗激增^[31]。更为关键的是,纳米填料的引入会显著改变 PP 熔体的流变性能和结晶行为,导致复合薄膜在工业化双向拉伸过程中易产生微孔、厚度不均、力学性能下降等问题,无法达到商业 BOPP 薄膜 $\pm 2\%$ 的厚度均匀性要求^[29]。目前实验室制备的纳米复合薄膜厚度多在 20~100 μm ,而工业用直流电容器薄膜主流厚度已降至 2~6 μm ,二者之间存在巨大的工艺代差^[77]。

此外,纳米填料的引入会显著劣化 PP 薄膜的自愈特性:高熔点的无机纳米粒子会阻碍自愈过程中金属电极的蒸发与绝缘层的形成,导致自愈失败并引发灾难性击穿,这是制约纳米复合 PP 薄膜在电力电容器中应用的核心瓶颈^[78]。即使是日本 Toray、德国 Treofan 等少数国际领先企业,也仅实现了纳米复合 PP 薄膜的小批量试生产,尚未进入大规模商业化应用阶段^[79]。

3.3 全有机复合改性的性能协同与工业化生产存在固有矛盾

极性基团接枝或耐高温组分共混是提升 PP 高温储能性能的有效途径,但该类改性方法存在难以兼顾的性能冲突:极性基团的引入虽能提高材料的介电常数和高温极化稳定性,但不可避免地会增加介电损耗;而刚性链段或交联结构的引入虽能抑制分子链热运动、提高玻璃化转变温度,但会导致薄膜脆性增加、加工性能变差^[74]。如何在提升高温

储能性能的同时,保持较低的介电损耗和良好的双向拉伸加工性能,是全有机复合改性面临的共性难题。

极性基团接枝会改变 PP 的结晶动力学和取向行为,导致双向拉伸过程中薄膜的横向与纵向力学性能失衡,无法满足工业生产对薄膜各向同性的要求。在工业化生产方面,实验室研究多采用可控性较好的溶液接枝法,但该方法无法实现大规模连续生产;具有工业化应用潜力的反应挤出接枝法目前仍存在接枝率低、副反应多、产物分子量分布宽等问题,导致生产成本显著升高,难以满足产业化要求^[80]。

3.4 薄膜表面修饰对载流子输运的调控作用存在局限

表面修饰技术因不破坏基膜本体结构而具有独特优势,但在规模化应用中仍面临诸多挑战:1)大面积均匀性问题,现有实验室研究多采用小尺寸样品($< 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$),而工业用 BOPP 薄膜宽度可达 8~10 m、长度达万米级,如何实现连续化生产过程中薄膜表面的均匀修饰是亟待解决的关键问题^[79];2)长期服役稳定性问题,表面修饰层与基膜的结合力较弱,在高温高电场长期服役过程中易发生界面分离和热分解,导致载流子抑制效果衰减^[27];3)工艺兼容性问题,表面改性层会影响金属化电极的附着力和蒸镀均匀性,进而影响电容器的自愈性能和长期可靠性^[81];4)生产成本问题,传统化学气相沉积、磁控溅射等真空沉积技术设备投资大、生产效率低,难以满足 BOPP 薄膜 200~350 m/min 的工业化生产速度要求^[29,77]。近年来发展的大气压等离子体技术虽在一定程度上提高了生产效率,但仍存在处理均匀性和稳定性不足的缺陷。

3.5 我国高端介质薄膜装备与产业链协同创新体系亟待完善

在上述共性问题的基础上,我国还面临着更为严峻的产业与装备自主化挑战。当前全球高端 BOPP 薄膜生产线几乎全部被德国 Brückner 公司垄断,其核心技术包括高精度熔体挤出系统、同步双向拉伸技术、在线 X 射线厚度控制系统和高速恒张力收卷系统等^[82]。国内虽已实现中低端 BOPP 薄膜生产线的自主化,但在高端直流电容器薄膜生产线方面仍存在显著差距,特别是在薄膜厚度均匀性控制、结晶度和取向度精准调控、表面质量提升等核心工艺上尚未达到国际先进水平。进口生产线可实现薄膜结晶度 $\pm 1.1\%$ 的控制精度,而国产生产线

通常只能达到 $\pm 3.2\% \sim \pm 4.8\%$ ^[83]。

这导致国内企业只能生产中低端通用型 BOPP 薄膜,而高端直流电容器用薄膜仍主要依赖进口。即使采用相同的改性配方,国内生产线制备的薄膜在高温稳定性、批次一致性和长期可靠性等方面也与国外先进产品存在明显差距。此外,我国高端 PP 专用树脂的开发严重滞后,目前用于直流电容器的 PP 专用树脂仍主要依赖进口,制约了高端 BOPP 薄膜的国产化进程^[20]。更为关键的是,我国 PP 专用树脂开发、薄膜制备、电容器制造等产业链环节之间缺乏有效的协同创新机制,导致基础研究成果难以快速转化为工程化产品^[85]。高校和科研院所的研究多聚焦于实验室层面的性能提升,对工业化生产中的工艺问题和实际服役中的可靠性问题关注不足;企业则更关注短期经济效益,缺乏对基础研究和前沿技术的长期投入。这种“产学研用”脱节的现状,严重制约了我国高性能 PP 介电薄膜产业的高质量发展。

4 结语

PP 基介电薄膜是柔性直流输电、新能源并网等领域电力电容器的核心介质材料。随着新型电力系统电压等级和运行温度的不断提升,传统 PP 薄膜的高温储能性能已难以满足工程需求,高性能耐高温 PP 介电薄膜因此成为当前研究热点。目前,纳米复合改性、全有机复合改性和表面修饰 3 类技术路线均在实验室层面取得了显著进展,通过构建深电子陷阱、约束分子链段热运动、阻碍载流子注入等机制,有效提升了 PP 薄膜的高温储能密度和充放电效率。但总体而言,现有研究仍未突破高温下高储能密度、低介电损耗、高可靠性的同步优化难题,其核心科学瓶颈在于高温下载流子输运的多尺度调控机制尚未完全阐明;同时,实验室基础研究与大规模工业化生产之间的脱节,也成为制约技术落地的关键工程瓶颈。

未来研究应重点围绕上述核心问题展开:首先,针对高温下载流子输运多尺度调控机制尚未阐明的科学瓶颈,应聚焦于载流子产生-迁移-复合全过程的定量表征与多尺度理论模拟,建立载流子微观行为与宏观储能性能的定量构效关系,为材料改性设计提供精准的理论指导;其次,针对单一改性方法难以实现高储能密度、低介电损耗与高可靠性同步优化的技术难题,应加强纳米复合、全有机复合与表面修饰等多技术路线的协同改性研究,充分发挥不同方法的优势互补效应,在实现高温储能性

能综合提升的同时,兼顾薄膜的自愈特性和加工性能;同时,针对实验室基础研究与大规模工业化生产脱节的工程障碍,需高度重视材料的工业化工艺适配性、多物理场长期服役可靠性和加速评价方法研究,重点开发与现有 BOPP 工业化生产线兼容的改性技术和装备。其中,全有机复合改性因不引入无机填料、与现有工艺兼容性最好,有望率先实现产业化突破。对于我国而言,亟需突破高端 BOPP 薄膜专用树脂和生产装备的“卡脖子”技术,建立“粒料-薄膜-电容器”全链条协同创新平台,推动我国高性能 PP 介电薄膜产业的自主可控发展,为国家新型电力系统建设提供关键材料支撑。

参考文献

- [1] YANG Minhao, ZHAO Shiang, ZHAO Yanlong, et al. Superior high-temperature electrostatic energy storage in flexible dielectric films enabled by metal-coordination cross-linked networks[J]. *Energy & Environmental Science*, 2026, 19(7):2300-2310.
- [2] LI Qi, CHEN Lei, GADINSKI MATTHEW R., et al. Flexible high-temperature dielectric materials from polymer nanocomposites[J]. *Nature*, 2015, 523(7562):576-579.
- [3] LI Xin, HU Penghao, JIANG Jianyong, et al. High-temperature polymer composite dielectrics: energy storage performance, large-scale preparation, and device design[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(9):2411507.
- [4] YANG Minzheng, GUO Mengfan, XU Erxiang, et al. Polymer nanocomposite dielectrics for capacitive energy storage[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19(5):588-603.
- [5] 李琦, 李曼茜. 高温聚合物薄膜电容器介电材料评述与展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9):3105-3123.
LI Qi, LI Manxi. Review and prospect of dielectric materials for high-temperature polymer film capacitors[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9):3105-3123.
- [6] 董久锋, 邓星磊, 牛玉娟, 等. 面向高温介电储能应用的聚合物基电介质材料研究进展[J]. *物理学报*, 2020, 69(21):43-58.
DONG Jiufeng, DENG Xinglei, NIU Yujuan, et al. Research progress of polymer-based dielectric materials for high-temperature dielectric energy storage applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(21):43-58.
- [7] ZHOU Yao, CHEN Yuhan, CHENG Lu, et al. High-temperature all-organic polymer dielectrics for capacitive energy storage[J]. *Advanced Materials*, 2025(12):e13978.
- [8] WU Xudong, CHEN Xin, ZHANG Qiming, et al. Advanced dielectric polymers for energy storage[J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 44:29-47.
- [9] CHENG Lu, CHI Xiaohong, YAN Chenyu, et al. Polypropylene nanocomposite for power equipment: a review[J].

- IET Nanodielectrics, 2018, 1(2):92-103.
- [10]党智敏. 干式直流电容器全链条国产化关键技术探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1):1-14.
- DANG Zhimin. Discussion on key technologies for full-chain localization of dry-type DC capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1):1-14.
- [11]肖萌,陈毓妍,赵亦烁,等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术, 2024, 50(6):2319-2331.
- XIAO Meng, CHEN Yuyan, ZHAO Yishuo, et al. Research progress on insulation performance improvement methods of HVDC metallized film capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6):2319-2331.
- [12]BI Chunhui, XIE Congzhen, WANG Qingyu, et al. Polymer dielectrics with customized substituent for high temperature capacitive energy storage[J]. Energy Storage Materials, 2026, 86:104945.
- [13]YANG Minhao, WANG Zepeng, ZHAO Yanlong, et al. Unifying and suppressing conduction losses of polymer dielectrics for superior high-temperature capacitive energy storage[J]. Advanced Materials, 2024, 36(52):2309640.
- [14]ZHANG Qiyan, LI Dongmou, ZHONG Yueqi, et al. Low-entropy amorphous dielectric polymers for high-temperature capacitive energy storage[J]. Energy & Environmental Science, 2024, 17(21):8119-8126.
- [15]LIU Biao, ZHOU Yihan, ZHOU Yao, et al. Synergistic enhancement of high-temperature energy storage performance in polypropylene composites via hierarchical BNNS@BTNC nanofillers[J]. Nano Research, 2025, 18(9):94907632.
- [16]劳斯佳,何樱,唐勇,等. 交直流复合电压下温度和膜厚对金属化膜击穿特性影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4):12-17.
- LAO Sijia, HE Ying, TANG Yong, et al. Study on influence of temperature and film thickness on breakdown characteristics of metallized film under AC-DC composite voltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):12-17.
- [17]ZHANG Xiaobin, ZHAO Xiaoliang, LI Wei, et al. Ultra-thermostable embedded liquid cooling in SiC 3D packaging power modules of electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 276:116499.
- [18]何晓靓,高琪,刘水平,等. 大容量柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4):81-85.
- HE Xiaoliang, GAO Qi, LIU Shuiping, et al. Technical research on DC support capacitors for large-capacity flexible DC transmission projects[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):81-85.
- [19]党智敏,杨旻昊. 高储能薄膜电容器用介质材料研发的挑战与思考[J]. 高电压技术, 2025, 51(5):2210-2218.
- DANG Zhimin, YANG Minhao. Challenges and thoughts on R&D of dielectric materials for high energy storage film capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5):2210-2218.
- [20]王昕劫,黄磊,王健涛,等. 电容器用超净聚丙烯薄膜综合性能比较[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1):49-55.
- WANG Xinjie, HUANG Lei, WANG Jiantao, et al. Comprehensive performance comparison of ultra-clean polypropylene films for capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1):49-55.
- [21]贝楠,王光科. BOPP电容膜生产设备对产品质量的影响[J]. 绝缘材料, 2015, 48(1):59-63.
- BEI Nan, WANG Guangke. Influence of BOPP capacitor film production equipment on product quality[J]. Insulating Materials, 2015, 48(1):59-63.
- [22]黄传兵,祝志东,邓兆敬. 电容器薄膜用聚丙烯树脂的发展现状[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1):27-34.
- HUANG Chuanbing, ZHU Zhidong, DENG Zhaojing. Development status of polypropylene resins for capacitor films[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1):27-34.
- [23]刘强,邢照亮,周昌浩,等. 电容器用BOPP薄膜及其专用树脂研究进展[J]. 绝缘材料, 2023, 56(4):1-6.
- LIU Qiang, XING Zhaoliang, ZHOU Changhao, et al. Research progress of BOPP films and their special resins for capacitors[J]. Insulating Materials, 2023, 56(4):1-6.
- [24]赵燕,徐典宏,陈红,等. 我国电容膜聚丙烯专用树脂生产现状及其技术进展[J]. 石化技术与应用, 2021, 39(5):365-370.
- ZHAO Yan, XU Dianhong, CHEN Hong, et al. Production status and technical progress of special polypropylene resins for capacitor films in China[J]. Petrochemical Technology & Application, 2021, 39(5):365-370.
- [25]FAN Kun, LI Xiang, LIU Xiangyang, et al. Regulating carrier transport behavior for capacitive energy storage of polymer dielectrics in harsh environments[J]. Advanced Materials, 2025, 37(20):2417181.
- [26]平江波,冯启琨,郑明胜,等. 表面改性聚丙烯薄膜的制备与介电/储能特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(5):49-55.
- PING Jiangbo, FENG Qikun, ZHENG Mingsheng, et al. Preparation and dielectric/energy storage properties of surface-modified polypropylene films[J]. Insulating Materials, 2022, 55(5):49-55.
- [27]YANG Minhao, LI Qingmin, ZHANG Xianming, et al. Surface engineering of 2D dielectric polymer films for scalable production of high-energy-density films[J]. Progress in Materials Science, 2022, 128:100968.
- [28]DANG Zhimin, YUAN Jinkai, YAO Shenghong, et al. Flex-

- ible nanodielectric materials with high permittivity for power energy storage[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(44): 6334-6365.
- [29] 张传升, 章程, 任成燕, 等. 聚丙烯基薄膜储能的影响机制及优化策略研究进展[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(7): 2193-2213.
- ZHANG Chuansheng, ZHANG Cheng, REN Chengyan, et al. Research progress on influence mechanism and optimization strategy of polypropylene-based film energy storage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(7): 2193-2213.
- [30] ZHAO Zixuan, CHEN Geng, TONG Yujing, et al. Effect of temperature on condensed state structure and conductivity characteristics of micron-level biaxially oriented polypropylene films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(5): 8417-8423.
- [31] LIU Biao, YANG Minhao, ZHOU Wenying, et al. High energy density and discharge efficiency polypropylene nanocomposites for potential high-power capacitor[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 27: 443-452.
- [32] YANG Minzheng, REN Weibin, GUO Mengfan, et al. High-energy-density and high efficiency polymer dielectrics for high temperature electrostatic energy storage: a review[J]. *Small*, 2022, 18(50): 2205247.
- [33] 周一涵, 李志元, 程璐, 等. 双向拉伸聚丙烯薄膜分子链有序性调控及其对储能特性的影响[J]. *高电压技术*, 2024, 50(12): 5415-5423.
- ZHOU Yihan, LI Zhiyuan, CHENG Lu, et al. Regulation of molecular chain order of biaxially oriented polypropylene films and its influence on energy storage properties[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(12): 5415-5423.
- [34] 马宇威, 程璐, 刘宏博, 等. 双向拉伸聚丙烯薄膜聚集态结构与击穿特性的关联[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(1): 1-7.
- MA Yuwei, CHENG Lu, LIU Hongbo, et al. Correlation between aggregate structure and breakdown characteristics of biaxially oriented polypropylene films[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(1): 1-7.
- [35] 王昕劼, 黄磊, 宋延晖, 等. 单轴拉伸聚丙烯薄膜的微观结构演变及其对电学性能的影响[J]. *高电压技术*, 2025, 51(5): 2260-2267.
- WANG Xinjie, HUANG Lei, SONG Yanhui, et al. Microstructure evolution of uniaxially stretched polypropylene films and its influence on electrical properties[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(5): 2260-2267.
- [36] YANG Xinru, FENG Yang, LIU Peiyan, et al. Achieving superior high-temperature capacitive energy storage in all-organic dielectric random copolymer[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(31): e27297.
- [37] 张志成, 张美荣. 耐高温聚合物基储能电介质材料的研究进展[J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2309-2318.
- ZHANG Zhicheng, ZHANG Meirong. Research progress of high-temperature resistant polymer-based energy storage dielectric materials[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(6): 2309-2318.
- [38] LIU Hongbo, CHENG Lu, LI Zhiyuan, et al. Enhanced high-temperature energy storage density of polypropylene-based materials by micro-crosslinked structure design with N-type organic semiconductor[J]. *High Voltage*, 2025, 10(3): 738-745.
- [39] ZHOU Jierui, MAO Jiaohao, GAO Wenqiang, et al. High field conduction in biaxially oriented polypropylene at elevated temperature[J]. *High Voltage*, 2025, 10(3): 595-602.
- [40] ZHOU Tianchun, CHEN George, LIAO Ruijin, et al. Charge trapping and detrapping in polymeric materials: Trapping parameters[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(4): 043724.
- [41] LI Shengtao, XIE Dongri, LEI Qingquan. Understanding insulation failure of nanodielectrics: tailoring carrier energy[J]. *High Voltage*, 2020, 5(6): 643-649.
- [42] MIN Daomin, YAN Chenyu, MI Rui, et al. Carrier transport and molecular displacement modulated dc electrical breakdown of polypropylene nanocomposites[J]. *Polymers*, 2018, 10(11): 1207.
- [43] LUO Hang, ZHOU Xuefan, ELLINGFORD CHRISTOPHER, et al. Interface design for high energy density polymer nanocomposites[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(16): 4424-4465.
- [44] 蔡姝娆, 高梓巍, 纪民尊. 聚丙烯载流子输运与能量积累调制直流击穿威布尔分布特性仿真研究[J]. *电气工程学报*, 2021, 16(2): 50-52.
- CAI Shurao, GAO Ziwei, JI Minzun. Simulation study on DC breakdown Weibull distribution characteristics modulated by carrier transport and energy accumulation in polypropylene[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2021, 16(2): 50-52.
- [45] 褚洋, 李志元, 崔宇馨, 等. 电-热-油耦合作用下聚丙烯薄膜老化特性研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2025, 46(6): 19-26.
- CHU Yang, LI Zhiyuan, CUI Yuxin, et al. Study on aging characteristics of polypropylene films under electro-thermal-oil coupling[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2025, 46(6): 19-26.
- [46] PEI Jiayao, YIN Lijuan, ZHONG Shaolong, et al. Suppressing the loss of polymer-based dielectrics for high power energy storage[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(3): 2203623.
- [47] ZHENG Mingsheng, ZHENG Yuting, ZHA Junwei, et al. Improved dielectric, tensile and energy storage properties of surface rubberized BaTiO₃/polypropylene nanocomposites[J]. *Nano Energy*, 2018, 48: 144-151.

- [48] ZHANG Xi, ZHU Dongzhi, YOU Hui, et al. Dielectric properties of biaxially oriented polypropylene nanocomposites prepared based on reactor granule technology[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(3): 1257-1265.
- [49] 程璐, 刘宏博, 刘标, 等. 三元复合聚丙烯电介质材料性能调控研究进展[J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2332-2343.
- CHENG Lu, LIU Hongbo, LIU Biao, et al. Research progress on performance regulation of ternary composite polypropylene dielectric materials[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(6): 2332-2343.
- [50] LIU Wenfeng, LI Zhiyuan, LIU Hongbo, et al. Bi-axially oriented ternary polypropylene composite film with enhanced energy storage property at elevated temperature[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(41): 28531-28540.
- [51] ZHOU Yao, YUAN Chao, WANG Shaojie, et al. Interface-modulated nanocomposites based on polypropylene for high-temperature energy storage[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 28: 255-263.
- [52] ZHANG Guoqiang, BRANNUM DANIEL, DONG Daxuan, et al. Interfacial polarization-induced loss mechanisms in polypropylene/BaTiO₃ nanocomposite dielectrics[J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(13): 4646-4660.
- [53] XIE Zilong, LIU Dingyao, WU Kai, et al. Improved dielectric and energy storage properties of polypropylene by adding hybrid fillers and high-speed extrusion[J]. *Polymer*, 2021, 214: 123348.
- [54] YU Xiang, YANG Rui, ZHANG Wenqi, et al. Interface engineering of polymer composite films for high-temperature capacitive energy storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 154056.
- [55] XIE Zilong, WU Kai, LIU Dingyao, et al. One-step alkyl-modification on boron nitride nanosheets for polypropylene nanocomposites with enhanced thermal conductivity and ultra-low dielectric loss[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 208: 108756.
- [56] MA Dong, HOU Jingchun, ZHANG Guanxiang, et al. Significantly enhancing the energy-storage properties of polypropylene films by physically manipulating their permittivity and crystalline behavior with polar organic molecules[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(28): 2418631.
- [57] LI Wenxuan, WANG Qiuwei, ZHANG Guanxiang, et al. Ultrahigh energy density achieved at high efficiency in dielectric capacitors by regulating α -phase crystallization in polypropylene films with fluorinated groups[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(52): 2410959.
- [58] SIMA Wenxia, MAI Yuxiang, SUN Potao, et al. Achieving exceptional high-temperature capacitance energy storage in polyimide through aromatic structure-based electron induced effects[J]. *Energy Storage Materials*, 2025, 74: 103974.
- [59] RAN Zhaoyu, ZHANG Yaru, LUO Zhen, et al. Significantly improved high-temperature capacitive performance in polypropylene based on molecular semiconductor grafting[J]. *Materials Today Energy*, 2023, 38: 101429.
- [60] MENG Sen, YAO Cheng, LIU Gang, et al. Tuning the electron trapping for enhancing the dielectric energy storage performance of polypropylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142(28): e57162.
- [61] LI Junluo, WANG Shaojie, ZHU Yujie, et al. Biaxially oriented films of grafted-polypropylene with giant energy density and high efficiency at 125 °C[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(20): 10659-10668.
- [62] ZHONG Peiyao, YIN Ningning, MAO Jie. All-organic polystyrene-based copolymer dielectrics for superior high-temperature charge energy storage with robust stability[J]. *Small*, 2025, 21(14): 2411858.
- [63] WU Zhiqiang, PENG Yiwen, SONG Ying, et al. Polyimide dielectrics with cross-linked structure for high-temperature film capacitors[J]. *Materials Today Energy*, 2023, 32: 101243.
- [64] LI Zhonglei, ZHAO Shuai, YIN Yifan, et al. Effect of functional grafting modification on dielectric properties of polypropylene insulation—Part 1: frequency domain spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, 31(4): 1748-1755.
- [65] XIONG Jie, FAN Xing, LONG Dajiang, et al. Significant improvement in high-temperature energy storage performance of polymer dielectrics via constructing a surface polymer carrier trap layer[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(46): 24611-24619.
- [66] XIONG Jie, LI Meng, LU Teng, et al. Excellent high-temperature energy storage performance of polymer dielectrics through the synergistic action of conjugation effect inhibition and dipole modulation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507: 160661.
- [67] BAO Zhiwei, DU Xinzhe, DING Song, et al. Improved working temperature and capacitive energy density of biaxially oriented polypropylene films with alumina coating layers[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5(3): 3119-3128.
- [68] ZHANG Tiandong, YU Hainan, JUNG Young Hoon, et al. Significantly improved high-temperature energy storage performance of BOPP films by coating nanoscale inorganic layer[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2024, 7(2): e12549.
- [69] ZHOU Yao, LI Qi, DANG Bin, et al. A scalable, high-throughput, and environmentally benign approach to polymer dielectrics exhibiting significantly improved capacitive performance at high temperatures[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(49): 1805672.

- [70] HUANG Bangdou, YU Jiachuan, DONG Jie, et al. Improving charge storage of biaxially-oriented polypropylene under extreme electric fields by excimer UV irradiation[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(52): 2311713.
- [71] CHI Qingguo, WANG Tianqi, ZHANG Changhai, et al. Significantly improved high-temperature energy storage performance of commercial BOPP films by utilizing ultraviolet grafting modification[J]. *iEnergy*, 2022, 1(3): 374-382.
- [72] LIU Yuqi, DONG Jiufeng, LIU Kaixin, et al. Enabling superior high-temperature capacitive performance in polymer dielectrics by multifunctional alternating nanolaminate coating[J]. *Energy & Environmental Science*, 2026: 10.1039. D6EE00769D.
- [73] 钟少龙, 方立龙, 王昕劼, 等. 金属化薄膜电容器元件电-磁-热耦合特性仿真研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2025, 46(3): 51-60.
- ZHONG Shaolong, FANG Lilong, WANG Xinjie, et al. Simulation study on electro-magnetic-thermal coupling characteristics of metallized film capacitor elements[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2025, 46(3): 51-60.
- [74] 程璐, 刘文凤, 马宇威, 等. 电容器用聚丙烯树脂微观结构对电学性能的影响机理研究[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(10): 33-38.
- CHENG Lu, LIU Wenfeng, MA Yuwei, et al. Influence mechanism of microstructure of polypropylene resins for capacitors on electrical properties[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(10): 33-38.
- [75] 刘泳斌, 曹均正, 黄金魁, 等. 金属化膜电容器可靠性研究进展[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(1): 53-58.
- LIU Yongbin, CAO Junzheng, HUANG Jinkui, et al. Research progress on reliability of metallized film capacitors[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2019, 40(1): 53-58.
- [76] 陈松, 李兆林, 卢有盟. 影响金属化膜脉冲电容器寿命试验的因素研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(2): 64-72.
- CHEN Song, LI Zhaolin, LU Youmeng. Study on factors affecting life test of metallized film pulse capacitors[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2019, 40(2): 64-72.
- [77] RYTÖLUOTO Ilkka, NIITYMÄKI Minna, SERI Paolo, et al. Biaxially oriented silica - polypropylene nanocomposites for HVDC film capacitors: morphology-dielectric property relationships, and critical evaluation of the current progress and limitations[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(6): 3025-3043.
- [78] 李化, 章妙, 林福昌, 等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(9): 218-230.
- LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Self-healing theory and law of metallized film capacitors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(9): 218-230.
- [79] LAHTI Kari, RYTÖLUOTO Ilkka, NIITYMÄKI Minna, et al. From laboratory to industrial scale: comparison of short- and long-term dielectric performance of silica-polypropylene capacitor films[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: IEEE, 2020: 661-664.
- [80] 杜伯学, 冉昭玉, 刘浩梁, 等. 干式直流电容器聚丙烯薄膜绝缘性能及其改进方法研究进展[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(5): 1363-1374.
- DU Boxue, RAN Zhaoyu, LIU Haoliang, et al. Research progress on insulation performance and improvement methods of polypropylene films for dry-type DC capacitors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1363-1374.
- [81] 李化, 易博思, 李露, 等. 直流支撑电容器用聚丙烯膜击穿和自愈特性研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(3): 79-83.
- LI Hua, YI Bosi, LI Lu, et al. Study on breakdown and self-healing characteristics of polypropylene films for DC support capacitors[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2019, 40(3): 79-83.
- [82] 刘刚, 汪鹏, 姚成, 等. 聚丙烯电容膜链结构与表面粗化、物理性能的关系[J]. *塑料科技*, 2024, 52(2): 59-63.
- LIU Gang, WANG Peng, YAO Cheng, et al. Relationship between chain structure and surface roughening, physical properties of polypropylene capacitor films[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(2): 59-63.
- [83] 戴熙瀛, 张翀, 万彩霞, 等. 双向拉伸聚丙烯电容器薄膜双向拉伸过程中工艺参数与晶体结构关系探究[J]. *高分子通报*, 2024, 37(1): 80-88.
- DAI Xiyang, ZHANG Chong, WAN Caixia, et al. Exploration on relationship between process parameters and crystal structure during biaxial stretching of biaxially oriented polypropylene capacitor films[J]. *Polymer Bulletin*, 2024, 37(1): 80-88.
- [84] 周昌浩, 邢照亮, 姜涛, 等. 电工膜用高纯聚丙烯脱灰技术研究[J]. *化学工业与工程*, 2024, 41(1): 103-110.
- ZHOU Changhao, XING Zhaoliang, JIANG Tao, et al. Study on deashing technology of high-purity polypropylene for electrical films[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2024, 41(1): 103-110.

作者简介:

刘标(1992—),男,博士,主要从事高温储能电介质材料与薄膜电容器技术研究。E-mail:liubiao@xihari.com。

肖果(1986—),女,高级工程师,主要从事电力电容器及其材料的研究工作。

贾华(1975—),男,正高级工程师,主要从事电容器的设

计、工艺、试验研究和行业管理工作。

盖斌(1988—),男,高级工程师,主要从事电力电容器及成套装置的检测和试验研究工作。

戚相成(1996—),男,博士,主要从事电工材料及绝缘电介质研究工作。

尤鸿芑(1985—),男,高级工程师,主要从事电力电容器产品研发、应用以及状态监测等研究工作。

闫飞飞(1990—),女,工程师,主要从事电力电容器,功率器件绝缘材料及陶瓷电容器的相关研究工作。

皇甫泓玮(1966—),男,工程师,主要从事生产运营管理、质量管理、精益管理、能源管理等。

米晓峰(1990—),男,工程师,主要从事高压电器试验及科技创新管理工作。