http://pmse.scu.edu.cn

接枝改性对聚丙烯/弹性体直流电缆绝缘材料性能的影响

廖雁群[1], 展云鹏[2], 侯 帅[2], 傅明利[2], 曹安瑛[1], 何 伟[1]
(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局,广东 珠海 519000; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司,广东 广州 510663)

摘要:为克服聚丙烯(PP)电缆绝缘材料刚性过大的问题,常采用弹性体共混改性改善其力学性能,但其作为直流电缆绝缘材料仍需提升其直流电性能。文中选用热塑性弹性体(POP)来改善 PP 力学性能,并采用接枝极性基团马来酸酐(MAH)来改善 PP/POP 复合材料的直流电性能。为探究 MAH 在两相共存体系中接枝位置对复合材料性能的影响,分别制备了单相接枝改性和两相接枝改性材料,对复合材料的微观形貌、力学性能和直流电性能进行了测试。结果表明,PP 相单独接枝有助于改善弹性体分散性,提高复合材料力学性能,但无法显著改善其空间电荷特性;POP 相单独接枝能够抑制弹性体相中的空间电荷积累,但对复合材料均匀性带来负面影响;两相接枝后,两相材料中空间电荷积累得到显著抑制,且复合材料均匀性得到显著改善,各项性能均得到显著提升。

关键词:聚丙烯;共混改性;接枝改性;直流电性能
中图分类号:TB332 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7555(2025)10-0066-10

聚丙烯(PP)绝缘性能优异,耐温等级高,易于回收再利用,成为替代传统交联聚乙烯的新一代绿色电缆绝缘材料[1~3]。但 PP 作为电缆绝缘材料,面临的首要问题是其刚性大、韧性差,无法满足电缆绝缘材料的力学性能要求,需进行增韧改性[4~6]。实现 PP 电缆绝缘材料增韧主要有 2 套方案,其一是共混改性,将模量较大的 PP 和模量较低的弹性体共混[6~9];其二为共聚改性,在均聚 PP 中共聚乙烯和丙烯单体,形成本征弹性体相,可降低 PP 模量[7,10]。国内现有共聚改性 PP 仅能将乙烯含量提高到 30%,共聚改性后依然需要与弹性体共混。但无论是共混改性还是共聚改性,都不可避免地要在 PP 中引入低模量的弹性体相,达到增韧目的,而这些异质结构的引入会对 PP 材料的绝缘性能带来负面影响[10~12]。

对于高压直流电缆绝缘材料而言,材料中会累积空间电荷,空间电荷积聚会导致电场畸变与电荷包迁移,缩短材料使用寿命[13]。在 PP/弹性体复合材料中,一方面,由于两相材料的结晶动力学存在较大差异,材料中会出现两相界面,储存空间电荷;另一方面,弹性体相具有相对更高的电导率,而为保证两相电流通量连续,弹性体相中将累积空间电荷。因此,抑制弹性体中的载流子输运是解决 PP 基高压直流电缆绝缘材料中空间电荷积聚问题的方法之一[14]。

在抑制载流子方面,通过纳米复合改性和接枝极性基团改性是已被验证的、行之有效的方法,2 种改性方式均可以引入能够俘获电荷的深陷阱,限制载流子迁移,抑制空间电荷积聚[15~17]。由于低模量弹性体本身自由体积较大、密度较小,纳米填料在弹性体中的分散很难控制,这使得纳米填料易在弹性体相中团聚,复合材料均匀性难以保障。Yang 等[18]研究了炭黑在 PP/POE 材料中的分散性,发现炭黑更倾向于分散在弹性体相中,导致材料性能劣化。与之相比,用于接枝改性的极性基团尺寸较小,更易于在基体中分散,且接枝反应将极性基团以键合的方式固定在大分子链上,不会在基体中迁移,因此,

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0177
收稿日期: 2024-10-09
基金项目: 中国南方电网有限责任公司引领类科技项目(GDKJXM20222108)
通讯联系人: 展云鹏, 主要从事高压电缆及绝缘材料应用技术研究, E-mail: zhanyp@csg.cn

接枝改性是更适用于 PP 基电缆绝缘材料的改性手段[17,19]。但影响 PP/弹性体性能的关键要素不只有两相电导率匹配,还应兼顾两相的分布均匀性。

为改善 PP/弹性体共混材料的直流电性能,探究单相接枝和两相接枝对复合材料性能的影响。本文以具有良好电性能改善效果的极性基团马来酸酐(MAH)为接枝单体,选取与 PP 具有较好相容性的热塑性弹性体(POP)增韧材料,以紫外光辐照方式获取 GPP 和 GPOP 2 种高接枝改性材料以制备单相接枝和两相接枝材料,对其直流电性能和相关理化性能进行了测试。

1　实验部分

1.1　原料与试剂

共聚型 PP:K8003,熔点为 169 ℃,密度为 0.90 g/cm^3,中国燕山石化;POP:Versify 2220,熔点为 82 ℃,密度为 0.88 g/cm^3,美国陶氏化学;二苯甲酮(BP)、马来酸酐(MAH):纯度>98%,阿拉丁试剂(上海)有限公司。

1.2　样品制备

接枝改性采用紫外光辐照方式制备,步骤参照文献[19]进行。利用哈尔滨哈普电气生产的紫外光辐照平台和转矩流变仪。引发剂 BP 为 0.2 phr,接枝单体 MAH 为 3 phr,制得的高接枝含量的接枝改性材料分别记为 GPP 和 GPOP。

进一步将 PP,POP,GPP 及 GPOP 按 Tab.1 中的配比方案进行共混。共混方案中,PP 与 POP 的质量比设为综合性能较好的 6∶4[9],接枝 MAH 改性材料质量分数为 10%,即复合材料体系总接枝率为 0.3%,保证材料具备较好的电性能改善效果[19]。在温度为 180 ℃、转速为 60 r/min 的转矩流变仪中熔融共混 7 min,随后将共混的复合材料按照不同试验需求,由平板硫化仪于 200 ℃,以 5 MPa/5 min 逐级升压至 15 MPa 成型,并在 15 MPa 压力、10 ℃/min 速率下冷却制得。测试前将试样置于 80 ℃真空干燥箱短路处理 48 h,以释放试样制备过程中的残余应力及杂散电荷。

Tab. 1　Ratio of composite materials

Name	w(PP)/%	w(POP)/%	w(GPP)/%	w(GPOP)/%
PP/POP	60	40		
GPP/POP	50	40	10	
PP/GPOP	60	30		10
GPP/GPOP	55	35	5	5

1.3　测试与表征

1.3.1　*红外光谱分析*:为测试材料中接枝 MAH 含量,通过佳司科(上海)公司生产的 FT-IR 6100 型傅里叶变换红外光谱分析(FT-IR)仪对 PP,GPP,POP 和 GPOP 试样进行分析。采用透射光谱分析,试样厚度为 200 μm,波数扫描范围为 1000~3000 cm^{-1},测试精度为 2.0 cm^{-1}。

1.3.2　*扫描电镜表征*:为研究接枝 MAH 对 POP 在 PP 中分散性的影响,采用日本日立 SU8020 扫描电子显微镜(SEM)观测复合材料微观形貌。为了得到清晰的断面微观结构图,将厚度为 1 mm 的试样在 85 K 下脆断后,使用正庚烷于 60 ℃对断面刻蚀 10 min,同时进行超声处理,蚀去复合材料中 POP 相后用去离子水超声清洗试样,晾干后对断面喷金处理。扫描条件设置为加速电场为 10 kV,探针电流 7 μA,探针高度 8 mm。

1.3.3　*差示扫描量热分析*:接枝及共混改性会影响复合材料的大分子结构,从而影响材料的熔融特性。为表征接枝与共混对熔融行为的影响,采用瑞士 DSC-1(Mettler Toledo)差示扫描量热仪(DSC)进行测试。称取样品 5~10 mg 置于坩埚中,随后放入试样仓中,在氮气气氛下,首先升温至 180 ℃,随后降温至 25 ℃,以去除材料的热历史,然后在 25 ℃保持 2 min 再升温至 180 ℃,升、降温速率设置为 10 ℃/min,保护氮气通入流速为 150 mL/min。根据 DSC 曲线计算 POP 相和 PP 相的结晶度,计算式如式(1,2)所示[17]

$$X_i = \frac{\Delta H_{m,i}}{\Delta H^0_{m,i}} \quad (1)$$

$$X_{total} = X_{PP} + X_{POP} \quad (2)$$

式中：$\Delta H_{m,i}$——样品 i 的实际熔融焓；X_i——样品 i 的结晶度；i = PP, POP, 分别代表 PP 晶和 POP 晶；$\Delta H^0_{m,i}$——标准熔融焓，PP 晶的标准熔融焓为 209 J/g，POP 晶的标准熔融焓为 288 J/g；X_{total}——复合材料结晶度。

1.3.4 弯曲模量测试：选用德国 ZiwichiLine 弯曲模量测试仪获取各组复合材料弯曲模量。参照标准 ASTM D790 进行三点弯曲试验，试样采用厚度为 3.2 mm 的长方形试样，测量 5 次取平均值作为测试结果。

1.3.5 拉伸性能测试：选用采用深圳美斯特公司生产的 CMT6000 多功能电子拉力机对材料拉伸性能进行测试。采用标准中规定的 5A 型哑铃试样，厚度为(1±0.05)mm，按照国标 GB/T 1040.2—2006 进行应力-应变试验，拉伸速度为 50 mm/min，测量获取试样应力-应变曲线，每组试样测试 10 次，选取重复性较高的 1 条曲线作为实验结果。

1.3.6 空间电荷特性测试：为探究复合材料中不同组分接枝 MAH 对空间电荷的抑制效果，采用上海荷仪公司生产的基于电声脉冲法原理的空间电荷测试系统探究复合材料的空间电荷分布特性。试样厚度为 300 μm，脉冲源电场强度设置为 1 kV/mm，宽度为 3 ns，试样极化电场强度为 40 kV/mm，极化时间 1800 s，去极化短路时间为 1800 s，测试温度为 70 ℃。

1.3.7 体积电阻率测试：在电缆运行温度范围与工作场强下，测试 200 μm 试样在 30 ℃与 70 ℃，场强为 20 kV/mm 与 40 kV/mm 下的体电流，获得材料的 *J-E* 曲线。采用屏蔽良好的三电极系统进行测试，测试温度采用恒温烘箱控制，每温度点测试前预热 30 min 以保证测试系统的温度稳定。测试时，每个电场强度下极化 30 min 后，通过美国吉时利 6517B 测量试样体电流值。

1.3.8 击穿特性测试：直流击穿强度测试采用圆柱电极系统测试试样的耐电强度。电极直径为 25 mm，将测试系统与试样完全浸于二甲基硅油中，以防止发生沿面闪络，测试过程中直流电压的升压速率为 1 kV/s，直至试样击穿，每组试样测试 10 个击穿电压，并采用 Weibull 分布对直流击穿电压进行处理。

1.3.9 陷阱分布特性分析：通过热刺激退极化电流(TSDC)对复合材料陷阱分布特性进行表征。试样厚度为 100 μm，电极直径为 25 mm，利用美国吉时利 6517B 采集退极化电流。首先，将试样在真空环境升温至 60 ℃，在 40 kV/mm 的场强下极化 30 min 后利用液氮将试样快速冷却至 0 ℃，降温速率为 0.5 ℃/s。降温完成后撤去极化电场，将静电计接入测试系统，短路以消除杂散电荷对测试的影响，释放极化引起的电流，以 3 ℃/min 的升温速率将试样升温至 140 ℃并采集过程中的退极化电流。

2 结果与讨论

2.1 红外分析

利用红外光谱表征接枝改性复合材料中 MAH 极性基团的含量。4 种接枝共混复合材料的 FT-IR 测试结果如 Fig.1 所示。接枝 MAH 的复合材料体系在 1783 cm^{-1} 处新增的特征吸收峰与 MAH 的羰基(C═O)相对应[19]，可以看出，MAH 成功接枝于 PP 与 POP 大分子链上。GPP 和 GPOP 中的 MAH 特征吸收峰发生小幅变化，其原因是 MAH 上羰基吸收峰受主链结构影响发生漂移。GPP/GPOP 特征吸收峰占全。但整体来看，3 种接枝改性共混材料中，MAH 的特征吸收峰面积相近，表明各组材料中 MAH 含量相当。

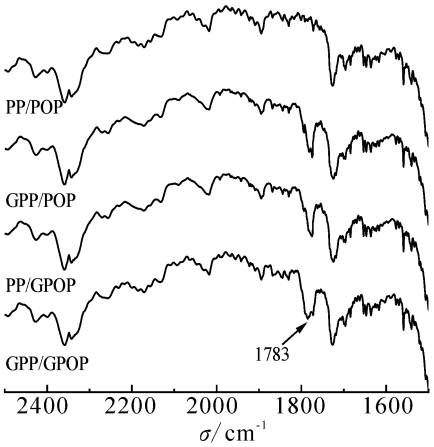


Fig. 1 FT-IR spectra of PP composites

2.2　微观形貌分析

经正庚烷刻蚀后,各组复合材料微观形貌测试结果如 Fig.2 所示。图中的孔洞是复合材料中的 POP 组分被刻蚀形成的,PP 相和 POP 相呈现明显的“海-岛”式分布,POP 为岛相,PP 为海相。PP/POP 中呈椭球体形状分布,长轴直径在 2 μm 到 10 μm 不等,分布不均匀。PP 相接枝后,GPP/POP 材料中 POP 相分散性有所改善,形状更接近球形,直径在 2 μm 到 6 μm 之间。POP 相接枝改性后,PP/GPOP 中弹性体相分散性最差,且形状极不规则。两相均接枝后,GPP/GPOP 材料中 GPOP 呈岛相均匀的分散在 GPP 基体中,GPOP 相直径减小至 5 μm 内,且 GPOP 相形状接近球形。

PP 分子链结构较为规整,不存在较长支链,在较高温度即可结晶,且为典型的非极性材料;弹性体 POP 主链上存在较多长支链,结晶温度较低,且表现出一定的极性。PP 和 POP 二者结晶动力学和极性上存在差异,使得 PP/POP 复合材料表现出两相结构特征。当 PP 接枝改性后,MAH 一方面作为支链破坏了其分子链结构的规整性,另一方面增加了 PP 的极性,因此,GPP/POP 中,POP 相分散性有所改善。而当仅 POP 接枝时,GPOP 极性进一步增强,增加了其与 PP 基体之间极性的差异,相容性进一步变差,因此,PP/GPOP 中 GPOP 相表现出较差的分散性。两相接枝后,2 种材料都引入了极性较强的 MAH 基团,GPP 的极性有所增强,有助于提高相容性,得益于 MAH 基团之间较强的分子间作用力,GPP 与 GPOP 界面黏合力增强,在一定程度上克服了由结晶动力学差异导致的分相,因此,GPP/GPOP 中弹性体相尺寸最小,分布最均匀。

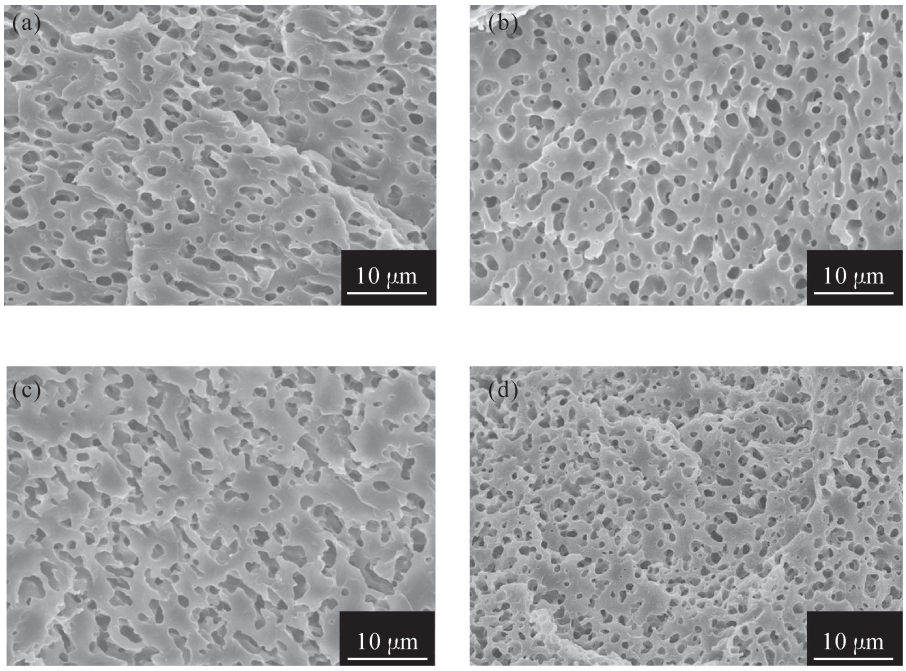


Fig. 2　SEM images of PP composites: (a) PP/POP; (b) GPP/POP; (c) PP/GPOP; (d) GPP/GPOP

2.3　熔融特性

4 种复合材料的 DSC 熔融特性曲线如 Fig.3 所示,DSC 特征参数如 Tab.2 所示。POP 材料熔融吸收峰在 80 ℃附近,而复合材料中,受 PP 影响出现 2 个熔融吸收峰,可能来自 2 种不同的结晶结构。PP 相接枝改性后,GPP/POP 中 GPP 的熔融峰形状改变且熔融峰温度略有增加,可能来源于接枝对 PP 熔融特性的影响,PP 接枝 MAH 侧基后,相对分子质量变大,使部分 PP 熔融峰温度略微向高温方向移动。而 GPP/POP 复合材料中,POP 相仅出现 1 个熔融峰,且两相材料的结晶度均有所下降,其原因来自二者相容性的改善。极性 MAH 侧基一方面增加了 GPP

与 POP 相容性,另一方面可能与 POP 的长支链发生相互作用,使得 POP 分散性变好,两相晶体细化,结晶度降低。当 POP 相接枝改性后,GPOP 与 PP 的相容性进一步变差,PP/GPOP 中的 GPOP 相再次出现如 PP/POP 中 POP 相 2 个熔融峰同时出现的情况。与此同时,结合 Fig.2 中 SEM 表征结果得知,GPOP 相尺寸增大,且 GPOP 较差的分散使得连续的 PP 相体积变大,两相各自的结晶更加完善,最终导致复合材料表现出较高结晶度。

两相均接枝后,弹性体相仅表现出单一熔融峰,且复合材料两相结晶度均有所下降,表明 GPOP 对 GPP 起到了较为有效的增韧软化效果。对两相均接枝的 GPP/GPOP 材料而言,接枝 MAH 支链的 GPP 分子更易与弹性体分子发生缠结,GPP 与 GPOP 之间极性基团 MAH 的分子间作用力加强了 GPP 与 GPOP 的相互作用,使得二者相容性大幅改善。相容性的改善使得共混后复合材料中弹性体相分布更加均匀,异质界面数量增加,冷却过程中 PP 球晶生长受到破坏,PP 大分子的结晶规整度下降。

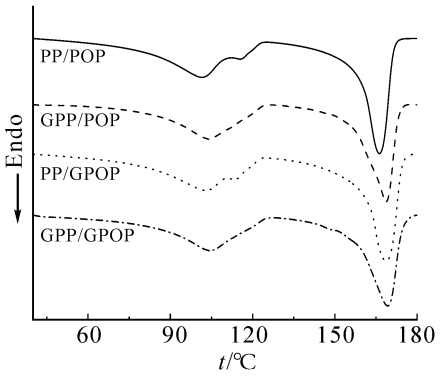


Fig. 3 DSC melting characteristic curves of different PP/POP composites

Tab. 2 DSC parameters of different PP/POP composites

Name	Melting peak temperature/℃		Crystallization degree/%		
	POP phase	PP phase	POP phase	PP phase	Totalcrystallization degree
PP/POP	101.6	166.5	11.0	19.4	30.4
GPP/POP	104.2	168.7	10.3	18.3	28.6
PP/GPOP	102.2	168.7	10.7	21.6	32.3
GPP/GPOP	104.4	169.1	10.2	18.3	28.5

2.4 力学性能

4 种复合材料弯曲模量测试结果如 Fig.4 所示。测试结果表明,各组材料均得到充分的增韧软化,其弯曲模量满足电缆绝缘材料对柔软性的要求。4 种复合材料的应力-应变曲线如 Fig.5 所示,力学特性参数如 Tab.3 所示。接枝共混材料的屈服应力较 PP/POP 的 14.4 MPa 均有不同程度的下降,其中 GPP/GPOP 的屈服应力最低,为 12.7 MPa,可能来源于 PP 与 POP 接枝 MAH 后更好的相容性,PP/GPOP 的拉伸应力上升,而断裂伸长率下降。这可能来自于较差的相容性,导致 PP 相仍具有较大的晶体体积,表现出较高的屈服强度,而较差相容性带来的非均匀程度升高使得复合材料在冷拉阶段更容易遭到破坏,因此断裂伸长率显著降低。GPP/GPOP 相容性更好,软化程度更高,拉伸强度与断裂伸长率提高至 20.8 MPa 与 613.1%。说明对复合材料进行双相接枝处理有助于提高 POP 的分散性,同时 MAH 能够作为支链在结晶过程中限制 POP 分子运动,增强的界面黏合力使弹性体的增韧效果更加突出,力学特性更为优异。力学性能测试结果与 GPP/GPOP 复合材料在微观形貌上表现出更好的均匀性相符。

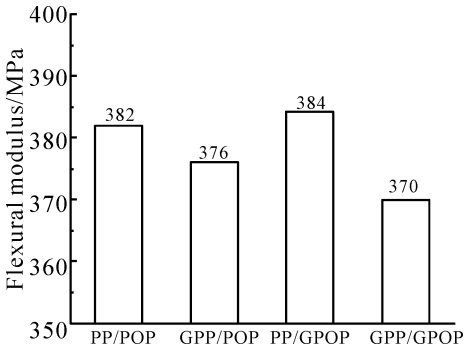


Fig. 4 Flexural modulus of different PP/POP composites

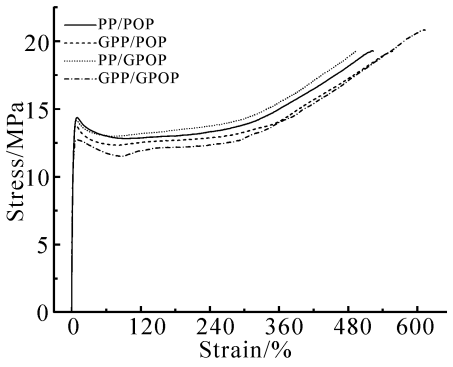


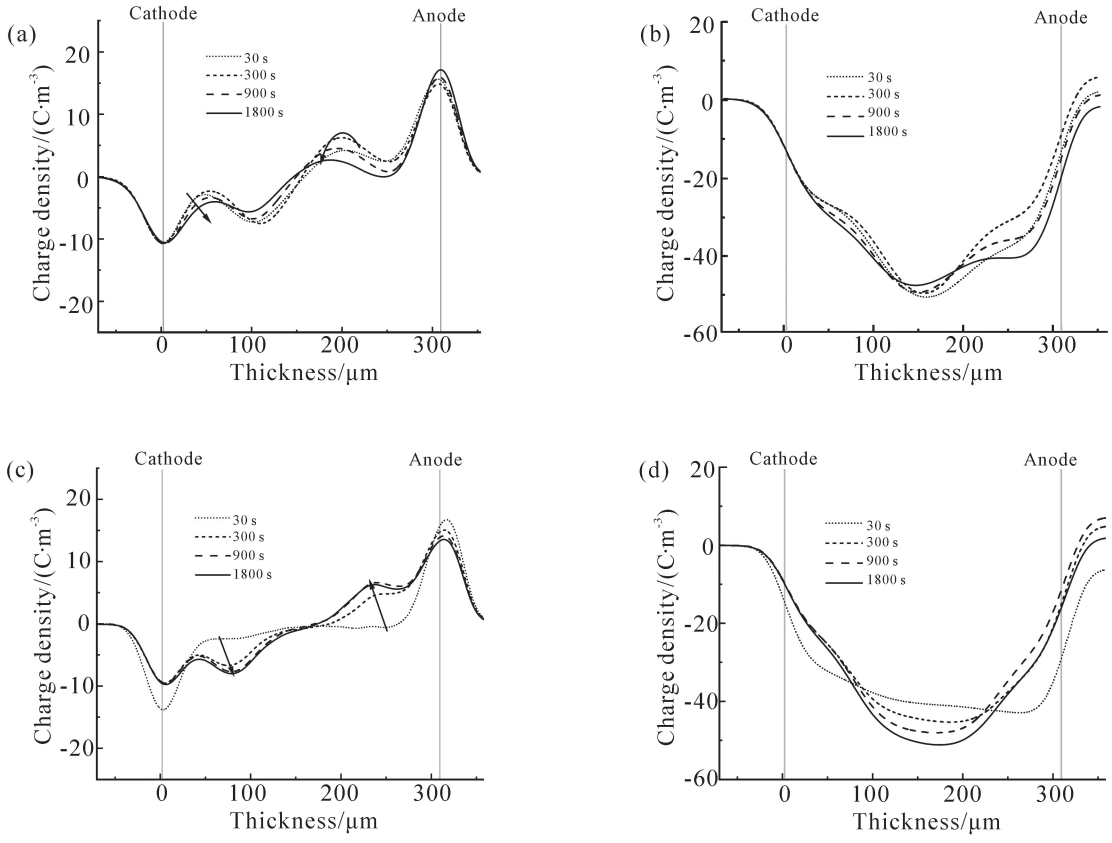
Fig. 5　Stress-strain curves of different PP/POP composites

Tab. 3　Mechanical parameters of PP/POP composites

Name	Elongation at break/%	Tensile strength/MPa
PP/POP	523.3	19.2
GPP/POP	555.4	19.3
PP/GPOP	495.7	19.3
GPP/GPOP	613.1	20.8

2.5　空间电荷特性

70 ℃,40 kV/mm 电场作用下,接枝前后复合材料的空间电荷分布和电场分布图如 Fig.6 所示。从结果中可以看出,在未改性 PP/POP 复合材料中,加压初始阶段试样中即出现了严重的空间电荷积累,且随极化进程的继续,电荷包逐渐向材料内部迁移,极化 1800 s 后,试样内部畸变后最大电场强度超过 50 kV/mm。PP 接枝后,加压极化初期,GPP/POP 材料空间电荷注入速度有所下降,但随着极化过程的进行,电荷逐渐向试样内部注入,材料中出现大量空间电荷积聚,局部电场最大值超过 50 kV/mm。导致 PP/POP 材料性能劣化的原因是由于电荷更易于在弹性体 POP 中储存和迁移,极化电场施加后,材料内部注入了大量的空间电荷。对弹性体 POP 接枝改性后,PP/GPOP 材料中的空间电荷注入速度大幅下降,极化 1800 s 后,材料内部累积的空间电荷量降低,局部电场最大值降低至 49 kV/mm。PP 和 POP 均接枝改性后,GPP/GPOP 材料中的空间电荷注入现象被显著抑制,空间电荷的注入量和注入深度大幅降低,材料内部空间电荷密度下降,局部最大电场在 45 kV/mm,表现出良好的高温空间电荷抑制特性。



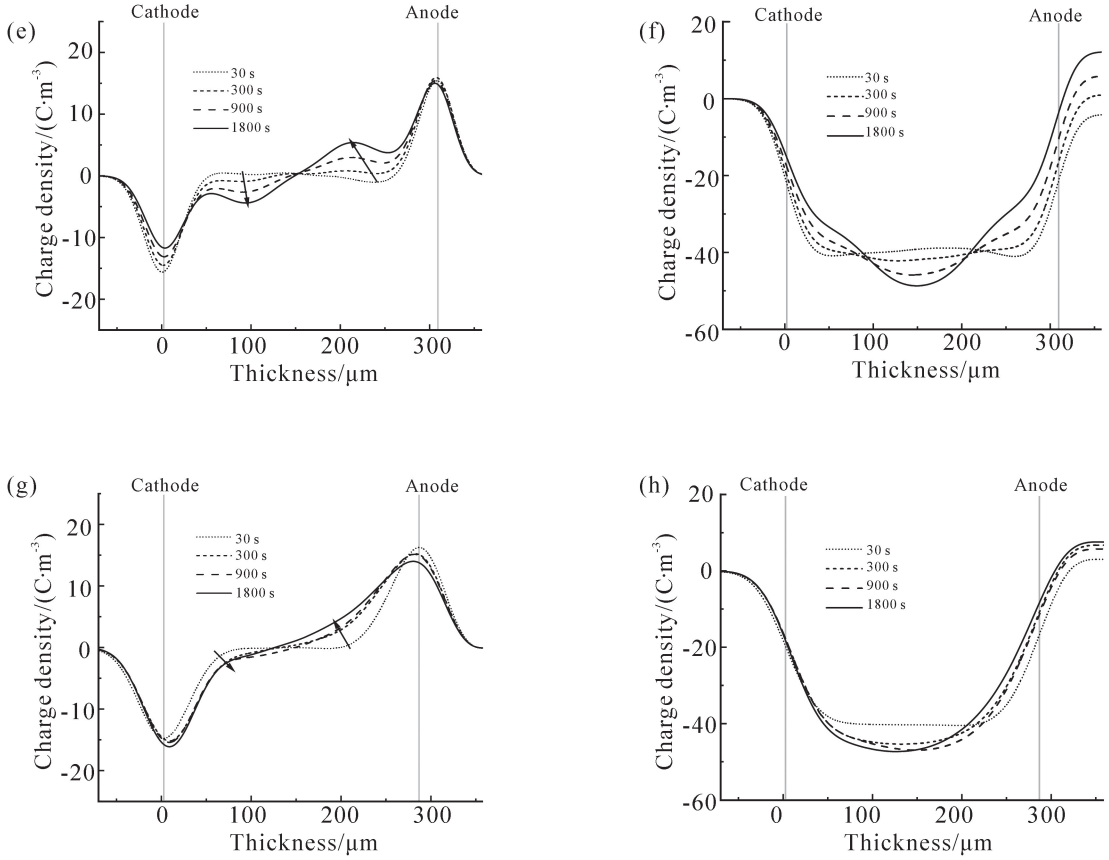


Fig. 6 Spatial charge distribution and electric field distribution of different composites during polarization with 40 kV/mm compression at 70 ℃: (a) space charge distribution of PP/POP; (b) electric field distribution of PP/POP; (c) space charge distribution of GPP/POP; (d) electric field distribution of GPP/POP; (e) space charge distribution of PP/GPOP; (f) electric field distribution of PP/GPOP; (g) space charge distribution of GPP/GPOP; (h) electric field distribution of GPP/GPOP

2.6 体积电阻率

如 Fig.7 所示,3 种接枝改性复合材料的体积电阻率均有不同程度的提高,电阻率提升幅度与空间电荷抑制程度相似,两相同时接枝的 GPP/GPOP 材料电阻率提升效果最佳,仅弹性体相接枝的 PP/GPOP 材料次之,仅 PP 相接枝的 GPP/POP 材料体积电阻率提升效果最小。直流电缆绝缘层电场分布受电阻率控制,因此,电阻率的温度敏感性是直流电缆材料设计的关键问题。从 Fig.7 中可以看出,PP/POP 在 20 kV/mm 下,30 ℃与 70 ℃电阻率的比值为 200 倍,超过国标 GB/T31489 中规定的不超过 100 倍。共混材料的电阻率温度敏感性在弹性体相接枝后获得抑制,GPP/GPOP 材料的电阻率比值下降为 56 倍,其作为直流电缆绝缘时的电场分布得到改善。

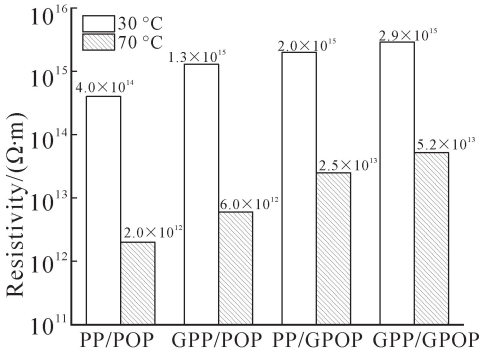


Fig. 7 Volume resistivity of different PP/POP composites

2.7 击穿场强

70 ℃时,4 组复合材料的直流击穿场强 Weibull 统计结果如 Fig.8 所示。从结果可以看出,随着接枝组分的引入,复合材料直流击穿强度整体上呈现上

升趋势,其中 GPP/POP 材料不仅直流击穿强度提高,且形状参数也得到显著提升,说明材料可靠性增强。PP/GPOP 直流击穿场强提高,这得益于接枝极性基团 MAH 对材料 POP 电性能的提升。但 PP/GPOP 形状参数较低,说明材料均匀性较差,这与复合材料中 GPOP 的非均匀分散相关,与 Fig.2 中 SEM 相印证。两相均接枝改性的 GPP/GPOP 材料表现出最高的直流击穿场强,且形状参数获得显著提高,数据重复性较高,说明该材料具有较高的可靠性,这与 GPP/GPOP 中弹性体较小尺寸的分布和较均匀的分散性有关。

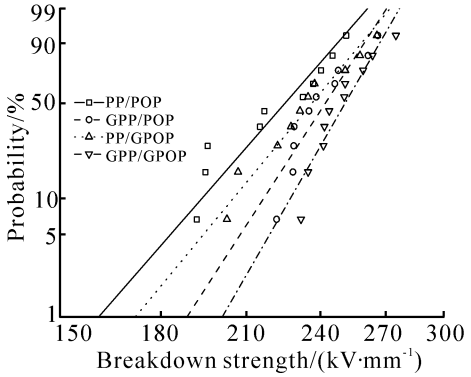


Fig. 8　Weibull distribution of DC breakdown strength at 70 ℃

Tab. 4　Weibull distribution parameters of PP/POP composites

Name	Breakdown strength/ (kV · mm^{-1})	Shape parameter
PP/POP	231.5	12.7
GPP/POP	247.2	17.0
PP/GPOP	242.6	13.4
GPP/GPOP	255.5	19.2

2.8　热刺激退极化电流

4 组复合材料的热刺激退极化电流测试结果如 Fig.9 所示。测试结果中,PP/POP 在 70 ℃和 90 ℃附近出现电荷释放峰,分别对应弹性体 POP 和 PP 中存储的入陷电荷。接枝改性后 3 种复合材料的 TSDC 曲线均于高温侧 125 ℃附近新增电荷释放峰,其为接枝 MAH 引入的深陷阱电荷释放峰。PP 接枝改性后,GPP/POP 材料中 70 ℃附近 POP 相存储电荷的释放峰略有下降,90 ℃附近 PP 相的电荷释放峰显著下降。与之相比,在 PP/GPOP 中出现了 POP 相电荷释放峰大幅下降,而 PP 相电荷释放峰几乎无变化的现象。此现象表明,接枝 MAH 可以通过其深陷阱功能抑制材料本征的电荷积累,但是在两相共混材料中,接枝改性仅能作用于接枝相,对非接枝相的电荷存储与输运无法起到有效的调制作用。

在 PP 与 POP 两相均接枝改性的材料 GPP/GPOP 中,PP 相和 POP 相所对应的电荷释放峰均出现显著下降,在相同电、热场下极化相同时间,GPP/GPOP 中累积的电荷量最小,MAH 有效的抑制了两相复合材料中的电荷输运。但是由于接枝改性同时降低了两相的电阻率,未有效平衡二者电阻率,GPP/GPOP 材料中依然存在空间电荷积聚。

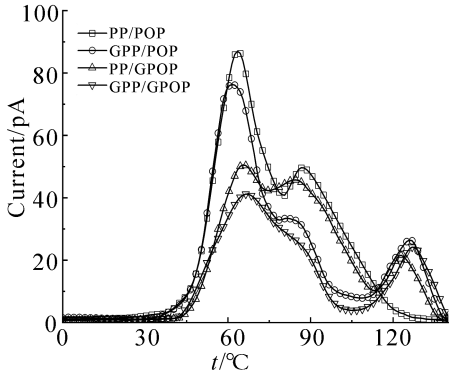


Fig. 9　TSDC curves of different PP/POP composites

3　结论

本文对比了接枝 MAH 位置对 PP/POP 复合材料性弹性体相分布、熔融结晶特性、力学性能与直流电性能的影响。结果表明,PP 相接枝 MAH 后,复合材料两相相容性提高,力学性能、电阻特性和击穿场强提高,但两相体积电阻率差值较大,空间电荷特性未显著改善。POP 相接枝 MAH 后,两相电阻率差距减小,空间电荷积聚量降低,但弹性体相分散性变差,力学与击穿性能劣化。PP 与 POP 两相均接枝后,相分布更均匀,力学性能提高,且两相材料均获得俘获电荷能力,直流电性能进一步提高。但两相电阻率相差较大,依然存在空间电荷积聚。PP 基高压直流电缆绝缘共混改性,在调控相分布和相间结合力的同时,还应平衡各相的电阻率,降低不均匀极化带来的空间电荷积聚。

参考文献：

[1] Li J, Yang K, Wu K, *et al.* Eco-friendly polypropylene power cable insulation: present status and perspective[J]. IET Nanodielectrics, 2023, 6: 130-146.

[2] 欧阳本红, 黄凯文, 赵鹏, 等. 电力电缆聚丙烯材料的研究进展[J]. 绝缘材料, 2022, 55(8): 6-15.
Ouyang B H, Huang K W, Zhao P, *et al.* Research progress of polypropylene materials for power cables[J]. Insulating Materials, 2022, 55(8): 6-15.

[3] 黄兴溢, 张军, 江平开. 热塑性电力电缆绝缘材料: 历史与发展[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1377-1398.
Huang X Y, Zhang J, Jiang P K. Thermoplastic insulation materials for power cables: history and progress[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1377-1398.

[4] 展云鹏, 侯帅, 朱闻博, 等. 弹性体对聚丙烯基电缆绝缘材料力学及介电性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(6): 111-117.
Zhan Y P, Hou S, Zhu W B, *et al.* Effect of elastomers on mechanical and dielectric properties of polypropylene-based cable insulation materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(6): 111-117.

[5] 徐航, 杜伯学, 李进, 等. 聚丙烯/弹性体复合材料机械与空间电荷特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3214-3220.
Xu H, Du B X, Li J, *et al.* Mechanical and space charge properties of polypropylene/elastomer blends[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3214-3220.

[6] Green C D, Vaughan A S, Stevens G C, *et al.* Thermoplastic cable insulation comprising a blend of isotactic polypropylene and a propylene-ethylene copolymer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22: 639-648.

[7] Hosier I L, Vaughan A S, Swingler S G. An investigation of the potential of polypropylene and its blends for use in recyclable high voltage cable insulation systems[J]. Journal of materials science, 2011, 46: 4058-4070.

[8] Huang X Y, Zhang J, Jiang P K, *et al.* Material progress toward recyclable insulation of power cables part 2: polypropylene-based thermoplastic materials[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2019, 36: 8-18.

[9] 蒋毅恺, 徐曼, 王若霏, 等. 电缆绝缘用聚丙烯/弹性体复合材料的高温介电性能[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 99-109.
Jiang Y K, Xu M, Wang R F, *et al.* High temperature dielectric properties of polypropylene and elastomer blends for cable insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 99-109.

[10] 杨凯, 任颙若, 李建英, 等. 乙烯共聚调控晶态结构对聚丙烯电缆绝缘料电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 982-989.
Yang K, Ren Y R, Li J Y, *et al.* Effect of regulating crystalline structure by copolymerizing with ethylene on the electrical performance of polypropylene cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 982-989.

[11] Yang K, Ren Y, Wu K, *et al.* Enhancing electrical properties of impact polypropylene copolymer for eco-friendly power cable insulation by manipulating the multiphase structure through molten-state annealing[J]. Composites Science and Technology, 2022, 223: 109422.

[12] 展云鹏, 侯帅, 惠宝军, 等. 含本征型弹性体聚丙烯合金的力学与电气性能[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2841-2847.
Zhan Y P, Hou S, Hui B J, *et al.* Mechanical and electrical properties of polypropylene alloys containing intrinsic elastomer [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2841-2847.

[13] Li Z L, Du B X. Polymeric insulation for high-voltage dc extruded cables: challenges and development directions[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34: 30-43.

[14] Dang B, Li Q, Zhou Y, *et al.* Suppression of elevated temperature space charge accumulation in polypropylene/elastomer blends by deep traps induced by surface-modified ZnO nanoparticles[J]. Composites Science and Technology, 2017, 153: 103-110.

[15] Zhou Y, Zhu Y, Yuan C, *et al.* Enabling high-performance polypropylene nanocomposites with interfacial deep traps [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 30: 484-487.

[16] Yuan C, Zhou Y, Zhu Y, *et al.* Improved high-temperature electrical properties of polymeric material by grafting modification [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10: 8685-8693.

[17] 彭向阳, 姚驰, 余欣, 等. 硅烷接枝聚丙烯的直流电性能与陷阱机制[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4480-4489.
Peng X Y, Yao C, Yu X, *et al.* DC electrical properties and trap mechanism of silane-grafted polypropylene [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4480-4489.

[18] Yang J M, Zhang R, Yang X, *et al.* Optimisation method for carbon black distribution of polypropylene-based semi-conductive screen materials and its effect on charge emission behaviour at screen/insulation interface[J]. High Voltage, 2023, 8: 239-250.

[19] Yang X, Zhao H, Li C Y, *et al.* Improved wide-temperature-range insulation properties of block polypropylene by UV-irradiated cografting of maleic anhydride and 4-tert-butylstyrene [J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5: 247-258.

Effect of Grafting Modification on the Performance of Polypropylene/Elastomer Direct Current Cable Insulation Materials

Yanqun Liao[1], Yunpeng Zhan[2], Shuai Hou[2], Mingli Fu[2], Anying Cao[1], Wei He[1]

(*1. Zhuhai Power Supply Company, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;*
2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: To address the issue of excessive rigidity of PP used as cable insulation material, it is common to improve its mechanical properties through blending with elastomers. However, its direct current (DC) electrical performance still needs enhancement for use as DC cable insulation. In this study, thermoplastic elastomer (POP) was utilized to improve the mechanical properties of PP, and the DC electrical performance of PP/POP composites was enhanced by grafting polar groups of maleic anhydride (MAH). To further investigate the impact of the MAH grafting location on the properties of the composites in a two-phase system, materials with single-phase grafting modification and both-phase grafting modification were prepared. The microscopic morphology, mechanical properties, and DC electrical performance of the composites were tested. The results show that grafting solely onto PP phase helps to improve the dispersion of elastomers and enhance the mechanical properties of the composites, but cannot significantly improve its space charge characteristics. Grafting solely onto the POP phase can inhibit the space charge accumulation in the elastomer phase but negatively impacts the uniformity of the composites. When both phases are grafted, the significant suppression of space charge accumulation in the both phases is achieved, resulting in notable improvements in the uniformity and overall performance of the composites.

Keywords: polypropylene; blending modification; graft modification; direct current electrical properties