

改性聚丙烯电缆绝缘材料的制备及介电性能研究

袁志文¹, 许侃¹, 张金丽¹, 邓洪冈²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;

2. 上海恒能泰企业管理有限公司璞能电力科技工程分公司, 上海 200437)

摘要: 为了获得具有优异介电性能的聚丙烯基电缆绝缘材料, 本文采用硅烷偶联剂KH570对纳米MgO进行表面改性处理, 基于熔融共混法制备出添加改性纳米MgO的聚丙烯基复合材料, 研究纳米MgO的添加对复合材料微观形貌、介电性能和力学性能的影响。结果表明: 纳米MgO有助于促进聚丙烯从 α 晶型向 β 晶型的转变, KH570改性之后的纳米MgO与聚丙烯界面粘接较好。纳米MgO的添加对电荷注入有抑制作用, 添加改性纳米MgO质量分数为1%的复合材料的空间电荷密度最小, 为 0.6 C/m^2 , 过量MgO的添加会导致复合材料出现局部电荷累积。纳米MgO质量分数为1%的复合材料的拉伸强度达到最大, 为 24.6 MPa , 断裂伸长率因MgO的添加而降低。纯聚丙烯基材料的直流击穿强度最低, 在 100°C 时, 纳米MgO质量分数为1%的复合材料的直流击穿强度最大, 为 302 kV/mm , 相比 20°C 下的击穿强度仅下降28.77%。

关键词: 聚丙烯; 电缆; 绝缘材料; MgO; 介电性能; 击穿性能

中图分类号: TM215; TM247 DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.06.006

Study on preparation and dielectric properties of modified polypropylene based cable insulating materials

YUAN Zhiwen¹, XU Kan¹, ZHANG Jinli¹, DENG Honggang²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China;

2. Shanghai Hengnengtai Enterprise Management Co., Ltd., Puneng Power Technology Engineering Branch, Shanghai 200437, China)

Abstract: In order to obtain polypropylene based cable insulating materials with excellent dielectric properties, polypropylene based composites adding with nano MgO modified by silane coupling agent KH570 was prepared by melt blending method. The effect of nano MgO addition on the microstructure, dielectric properties, and mechanical properties of the composites was studied. The results show that nano MgO promotes the transformation of polypropylene from α crystallographic orientation β , the interface of polypropylene and nano MgO is well bonded after the nano MgO is modified by KH570. The addition of nano MgO can inhibit charge injection, when the mass fraction of MgO is 1%, the composite has the smallest space charge density, which is 0.6 C/m^2 , while excessive addition of MgO can lead to local charge accumulation in the composites. When the mass fraction of nano MgO is 1%, the composite shows the highest tensile strength (24.6 MPa), while the breaking elongation decreases with the addition of MgO. The direct current breakdown strength of pure polypropylene based material is the lowest. At 100°C , the direct current breakdown strength of polypropylene based composite materials with a MgO mass fraction of 1% is the highest (302 kV/mm), which is only 28.77% lower than that at 20°C .

Key words: polypropylene; cable; insulating materials; MgO; dielectric performance; breakdown performance

0 引言

随着城市建设、生产制造以及人类日常工作生活的用电需求显著提升, 电力系统的正常且稳定地运行愈发重要^[1]。电缆绝缘材料是保障电力系统稳定安全运行的关键, 其性能和质量的优劣直接影响到电力系统的稳定和可靠运行^[2]。电缆绝缘材料用

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(52094020005P)。

于包裹电线电缆导体, 其主要功能是保护导体不受磨损、氧化或其他环境因素的损伤。高质量的电缆绝缘材料可以减少绝缘破坏和故障发生的概率, 保障电力系统的稳定运行^[3]。优质的电缆绝缘材料可以有效减少电量损失, 提高电力设备的能效和安全性, 从而达到节能减排的目的^[4]。电线电缆绝缘材料大体上可以分为塑料绝缘材料和橡胶绝缘材料, 往往需要根据其所能承受的电气特性、温度、湿度、

化学环境和机械压力等因素进行合理选择^[5-6]。相比其他电缆绝缘材料,聚丙烯(PP)具有较高的熔点、良好的耐热性能、较低的介电常数和介质损耗、抗腐蚀性能以及良好的力学性能等优势,是一种优良的电缆绝缘材料^[7-8]。

介电性能作为聚丙烯基电缆绝缘材料的重要性能之一,主要包括介电常数、介质损耗和击穿强度^[9-10]。聚丙烯具有较高的绝缘阻抗,能够有效地隔离电缆中的导体,防止电流泄漏和电介质击穿。此外,聚丙烯绝缘材料在高温环境下仍能保持较好的力学和绝缘性能,其热变形温度通常在90℃以上,并且具有较高的拉伸强度和韧性,使其在电缆绝缘材料中能够承受一定的机械应力和拉伸^[11-13]。在不同的环境条件下,聚丙烯绝缘材料的介电性能会发生改变^[14]。研究表明,聚丙烯基电缆绝缘材料的介电性能受到材料成分、结构、加工工艺等因素的影响。优化材料成分的配比、改进制备工艺等方法可以有效地提高聚丙烯绝缘材料的介电性能^[15-17]。展云鹏等^[18]通过介电频谱、交流击穿等实验,分析了不同含量聚烯烃弹性体(POE)的引入对晶型调控聚丙烯基绝缘材料(PPB)共混体系介电性能的影响,实验发现POE质量分数小于40%时,该共混体系的介电性能最强。高俊国等^[19]通过对蒙脱土-弹性体/聚丙烯纳米改性共混材料进行击穿性能测试,探讨了相区分散对该纳米改性共混材料性能的改善效果,研究发现调控纳米颗粒有助于PP相均匀分散,可正向提升共混物材料的介电性能。

纳米MgO的粒径为1~100 nm,具有高比表面积、高热稳定性、高化学活性和优异的电学性能等许多特殊性质^[20]。由于纳米MgO的粒径较小,可以减小电场梯度,提高介电强度^[21]。同时MgO具有良好的导热性、热稳定性和力学性能,将纳米MgO充分分散在聚丙烯基质中,可以显著增强聚丙烯的绝缘性能,提高聚丙烯在高温下的稳定性,延长其作为电缆绝缘材料的使用寿命。但MgO与聚丙烯的结合能力较差,它的分散和溶解需要一定的加工控制和调整,以确保在材料中得到均匀分散。KH570作为一种良好的偶联剂,具有亲水性和亲硅性,通过偶联剂KH570对纳米MgO表面接枝后能够提高纳米MgO与聚丙烯之间的界面相容性,同时可以减少纳米MgO颗粒的团聚现象,提高其在聚丙烯基体中的分散性,有助于增强材料的热稳定性,使纳米MgO改性聚丙烯材料能够在高温环境下保持较好的性能。此外,KH570改性处理纳米MgO还可以提高纳米MgO与聚丙烯基体之间的粘合强度,加强界

面结合,进而增加材料的机械强度、弹性模量和耐冲击性能,提高材料的抗张强度、抗剪切强度和耐磨性。

为获取具有优异性能的聚丙烯基电缆绝缘材料,本文采用硅烷偶联剂KH570对纳米MgO进行表面改性处理,基于熔融共混法制备出添加改性纳米MgO的聚丙烯基复合材料,研究纳米MgO的添加对复合材料微观形貌、介电性能和力学性能的影响。为进一步拓宽聚丙烯基电缆绝缘材料的应用提供理论参考。

1 实验

1.1 试剂和仪器

硅烷偶联剂(KH570)、无水乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;甲苯,工业级,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;聚丙烯(PP),密度为0.895 g/cm³,广州溪川塑胶原料有限公司;硅油,工业级,山东华晨新材料有限公司;去离子水,实验室自制。

D8 ADVANCE型X射线衍射仪,布鲁克AXS有限公司;HD-2700型扫描电子显微镜,日本日立公司;IRAffinity-1S型傅里叶红外光谱仪,日本岛津公司;ZJL-200型转矩流变仪单螺杆挤出机,上海准权仪器设备有限公司;YF-900型拉伸测试仪,扬州市源峰检测设备有限公司;DMS-2000型介电谱仪,武汉佰力博科技有限公司;AHDZ-10/100型介电强度测试仪,上海蓝波有限公司。

1.2 纳米MgO聚丙烯复合材料的制备

将纳米MgO粉末放在真空干燥箱中在100℃下真空干燥处理24 h,将表面水分彻底去除,然后称取10 g纳米MgO分散于210 mL甲苯中,超声搅拌30 min保证MgO分散均匀。将5 mL硅烷偶联剂KH570逐滴加入到上述甲苯分散液中,在80℃下加热回流24 h,反应完成后用无水乙醇离心洗涤处理3~5次,将样品放入真空干燥箱中在70℃下烘焙12 h,即得硅烷偶联剂改性的纳米MgO,命名为KH570-MgO。

称取45 g聚丙烯,分别按照0.5%、1%、2%的质量分数称取对应质量的KH570-MgO,设置转矩流变仪的温度为200℃,额定转速为65 r/min,将聚丙烯和KH570-MgO混合,在2 MPa压力、120℃温度下用平板硫化机压成尺寸分别为100 mm×100 mm×0.5 mm和50 mm×50 mm×0.1 mm的试样,在80℃真空条件下热处理24 h以消除应力,制得不同纳米MgO质量分数的纳米MgO/PP复合材料,分别命名为0.5%-MgO/PP、1%-MgO/PP、2%-MgO/PP。

1.3 样品表征

采用扫描电子显微镜观察纳米 MgO/PP 复合材料的微观形貌;采用傅里叶红外光谱仪测试纳米 MgO/PP 复合材料的红外光谱;根据电声脉冲法测量纳米 MgO/PP 复合材料在 20 kV/mm 电场下的空间电荷分布情况,脉冲发生器输出幅值为 0~2 000 V、宽度为 5~30 ns 的窄脉冲,上电极为半导体电极,下电极为铝电极,以硅油为声耦合剂;采用拉伸测试仪测试纳米 MgO/PP 复合材料的拉伸性能,测试温度为室温,拉伸速率为 250 mm/min;采用介电强度测试仪测试纳米 MgO/PP 复合材料的直流击穿性能,将试样浸在硅油中,以直径为 10 mm 的圆形铜电极接触试样,下电极接地,直流电压以 1 kV/s 的速度升压,直至样品击穿,记录击穿时刻的电压值。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

对纳米 MgO 接枝硅烷偶联剂进行表面改性处理有助于改善纳米颗粒与聚合物基体之间的界面强度,从而改善复合材料的强度和介电性能。图 1 为硅烷偶联剂 KH570 对纳米 MgO 改性前后的红外光谱图。从图 1 可以看出,KH570 存在丰富的含氧官能团例如三甲氧基,而三甲氧基会水解生成活泼的硅羟基,3 195 cm^{-1} 处为烷基的伸缩振动峰,925 cm^{-1} 处为 Si-O-CH₂-基团的特征峰,1 141 cm^{-1} 处为 Si-O 键的伸缩振动峰^[22]。纳米 MgO 在 3 693 cm^{-1} 处为氢氧键的伸展振动峰,1 491 cm^{-1} 处为羧酸键的伸展振动峰。经过 KH570 的偶联改性后,KH570-MgO 在 2 924 cm^{-1} 处出现了饱和亚甲基的对称振动峰,在 2 853 cm^{-1} 处出现了饱和亚甲基的反对称伸缩振动峰,说明烷基已经存在于改性后的纳米 MgO 中,在 1 103 cm^{-1} 处出现了新的振动峰为 Si-O-C 的吸收振动峰,说明经过偶联反应后,KH570 与 MgO 上的 -OH 基团发生了反应,MgO 表面已经接枝上甲氧基硅烷偶联剂^[23]。

2.2 纳米 MgO/PP 复合材料的结构

图 2 为添加不同质量分数纳米 MgO 的纳米 MgO/PP 复合材料的 XRD 谱图。从图 2 可以看出,在 14.03°、16.83°、18.45°、21.17°、21.81° 分别出现了聚丙烯 α (110)、 β (040)、 α (130)、 α (111)、 α (131) 的特征衍射峰,说明熔融共混法制备出的纳米 MgO/PP 复合材料均具有 α 晶型。1%-MgO/PP 的 β 晶型衍射峰强度最高,并且其余 α 衍射峰的强度出现了降低;而 2%-MgO/PP 的 β 晶型衍射峰强度出现了降低,说明纳米 MgO 有助于促进聚丙烯从 α 晶型向 β 晶型的转

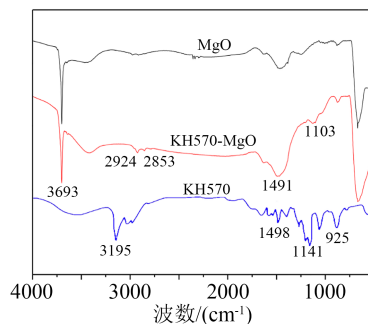


图 1 KH570 改性 MgO 前后的红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of MgO before and after KH570 modification

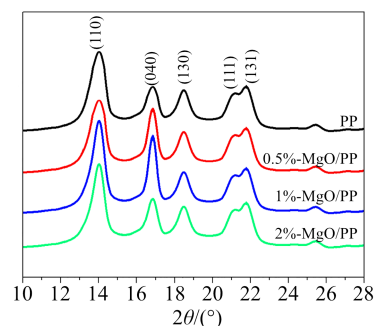


图 2 纳米 MgO/PP 复合材料的 XRD 谱图

Fig.2 XRD of nano-MgO/PP composites

变,属于 β 晶型促进剂。当纳米 MgO 添加过多时,会导致聚丙烯的衍射峰强度降低,阻碍结晶的进行,使复合材料中的缺陷数量增多。适量的纳米 MgO 可以均匀分散在聚丙烯中,在聚丙烯的熔融状态下提供晶核形成的局部位置。聚合物结晶是一个核化和生长的过程,而晶核是结晶的起始点。晶核的生成需要克服结晶体积的约束,并且需要一定的能量来启动晶体的形成。纳米 MgO 作为成核剂具有一定的表面能和结晶能,可以提供这种能量,并有效地降低聚丙烯形成晶核的能垒,发挥出晶型成核剂的作用。此外,添加纳米 MgO 可以在一定程度上增强聚丙烯链段的有序性,从而促进晶体的形成,吸附高分子链段有序排列而进行成核,减少结晶所需的界面自由能,促进结晶反应的进行。

2.3 纳米 MgO/PP 复合材料的微观形貌

图 3 为添加不同质量分数纳米 MgO 的纳米 MgO/PP 复合材料的断面 SEM 图。从图 3 可以看出,纯聚丙烯的断面平整,没有纳米 MgO 的存在,属于典型的脆性断裂。从纳米 MgO/PP 复合材料的 SEM 图中能够明显观察到纳米 MgO 粒子的存在,其粒径约为 250 nm,分散均匀性较差,但纳米 MgO 和聚丙烯基体结合紧密,未观察到空洞或者间隙的存在,说明 KH570-MgO 具有较高的界面粘接能力。从图 3(d)可以明显观察到纳米 MgO 的数量增多,分

散均匀性最差,在局部已经出现了团聚现象,出现了较多的孔隙和孔洞,这些孔洞中部分为纳米MgO脱落导致,这是由于过量的纳米MgO添加到聚丙烯中,会超过聚丙烯与MgO颗粒之间相互作用能力的范围,从而导致纳米MgO颗粒在聚丙烯体系中聚集,并最终脱离聚丙烯基体。当纳米MgO颗粒脱离聚丙烯基体后,将在聚丙烯中形成孔洞和孔隙结构。这些孔洞和孔隙会降低聚丙烯的密度和机械强度,并可能对聚丙烯的物理性质和加工性能产生负面影响。此外,这些孔隙还可能导致聚丙烯在使用过程中的吸湿性增加,进而影响其耐久性和稳定性。由此可见,为保证纳米MgO与聚丙烯基体结合稳定,MgO颗粒的添加质量分数不宜超出1%。

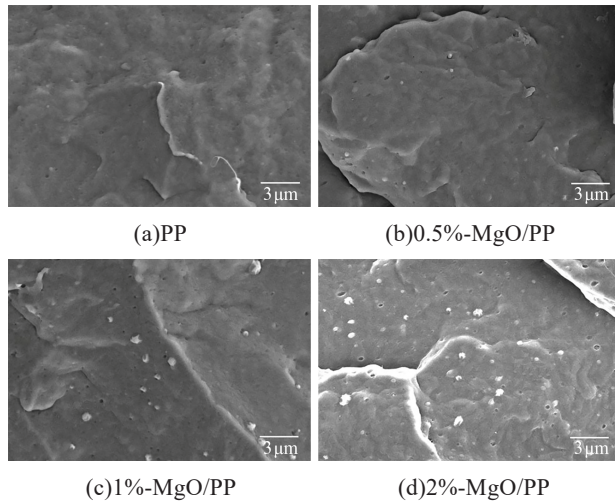


图3 纳米MgO/PP复合材料的SEM图

Fig.3 SEM images of nano-MgO/PP composites

2.4 纳米MgO/PP复合材料的空间电荷

图4为添加不同质量分数纳米MgO的纳米MgO/PP复合材料的空间电荷分布图。样品在40 kV电压下加压1 h,对比复合材料加压时电荷密度的变化情况。从图4可以看出,所有纳米MgO/PP复合材料的空间电荷量随时间的增加而增加。纯PP在短路10 s时出现了少量同极性电荷的注入,纳米MgO的添加使聚丙烯基复合材料的两极同极性电荷减少,说明纳米MgO颗粒对电荷注入有一定程度的抑制效果,主要是因为纳米MgO的添加引入了大量的缺陷,游离电荷遇到这些缺陷会被吸附掉,导致自由电荷的数量减少。2%-MgO/PP复合材料的注入电荷不减反增,介质内部有小的电荷包出现,这是因为偶联剂KH570发生了分解,导致聚合物中的杂质数量增多,使复合材料中出现了局部电荷累积^[24]。

对纯聚丙烯材料和添加不同质量分数MgO的

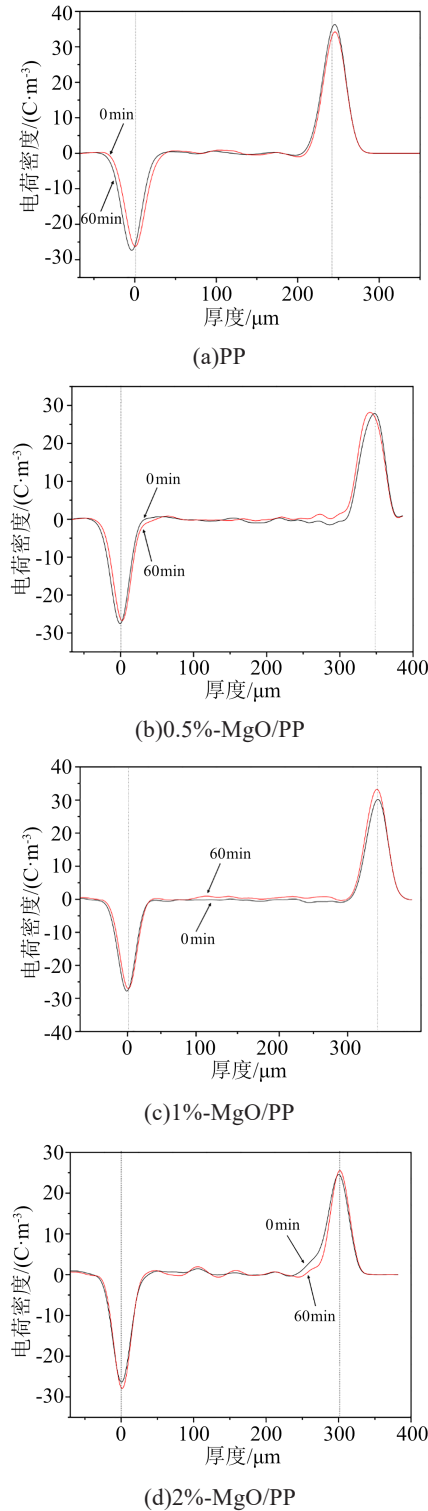


图4 纳米MgO/PP复合材料的空间电荷分布图

Fig.4 Space charge distribution of nano-MgO/PP composites

聚丙烯基复合材料进行空间电荷密度测试,得到纯PP的空间电荷密度为 0.8 C/m^2 ,随着纳米MgO添加质量分数的增大,聚丙烯基复合材料的空间电荷密度呈现出减小低后增大的趋势,其中0.1%-MgO/PP的空间电荷密度最小,为 0.6 C/m^2 ,2%-MgO/PP的空间电荷密度增至 1.0 C/m^2 。过量的纳米MgO引入

了额外的电荷,引起聚丙烯分子的极化和电荷重新分布,导致聚丙烯基复合材料的空间电荷密度增大。由此可见,纳米 MgO 的最佳添加质量分数为 1%。

2.5 纳米 MgO/PP 复合材料的力学性能

图 5 为添加不同质量分数纳米 MgO 的纳米 MgO/PP 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率测试结果。从图 5 可以看出,当 MgO 质量分数为 0、0.5%、1%、2% 时, MgO/PP 复合材料的拉伸强度分别为 23.5、24.1、24.6、24.8 MPa, 断裂伸长率分别为 513.8%、505.7%、501.3%、497.6%。MgO 的添加改善了聚丙烯基复合材料的拉伸强度,这是因为 KH570 改性后的纳米 MgO 能与聚丙烯基体发生较好的粘结,并且能够吸收附近区域的应力,固化基体的强度。断裂伸长率随 MgO 的添加出现了降低,这是因为纳米 MgO 的存在使分子运动变得困难,并且能够作为大分子链间的物理交联点,降低拉伸链段的长度,阻碍链运动,导致断裂伸长率降低。

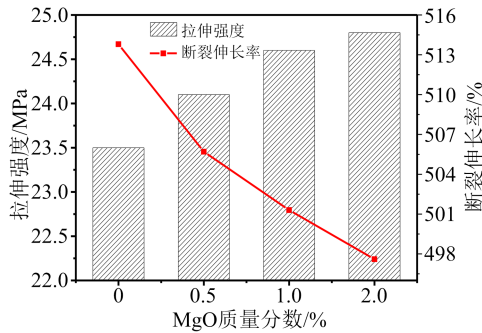


图 5 纳米 MgO/PP 复合材料的力学性能随 MgO 含量变化
Fig.5 Mechanical properties of nano-MgO/PP composites with MgO content

2.6 纳米 MgO/PP 复合材料的直流击穿强度

直流击穿强度是绝缘材料的核心参数之一,以纳米材料作为添加剂不仅能改善和平衡聚合物电介质的综合性能,还能够明显提高材料的本征击穿强度^[1]。图 6 为纳米 MgO/PP 复合材料在 20~100℃ 的直流击穿强度测试结果。从图 6 可以看出,随着温度的升高,所有聚丙烯基复合材料的直流击穿强度均有不同程度的降低。在 20℃ 下,PP 的直流击穿强度最低,为 413 kV/mm。随着温度的升高,PP 的直流击穿强度迅速降低,而纳米 MgO/PP 的聚丙烯基复合材料的直流击穿强度下降明显减慢。在 100℃ 下,纯 PP、0.5%-MgO/PP、1%-MgO/PP、2%-MgO/PP 的直流击穿强度分别为 169、234、302、269 kV/mm。在 100℃ 下,1%-MgO/PP 的直流击穿强度最大,相比 20℃ 下的击穿强度(424 kV/mm)下降

了 28.77%,而 PP 此时的直流击穿强度比 20℃ 时的下降了 59.08%。这是因为纳米 MgO 的添加会在聚丙烯材料中形成陷阱,这些陷阱会将游离的电荷束缚住,阻碍击穿通道的形成,因此改善了聚丙烯基复合材料的直流击穿强度,减缓了聚丙烯基复合材料的直流击穿强度对于温度的依赖性,提高了击穿性能。

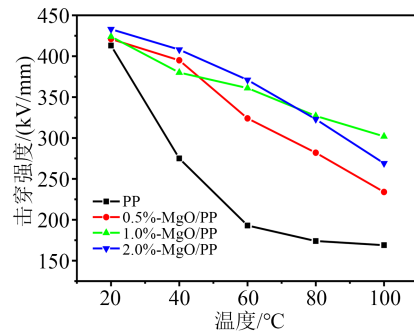


图 6 纳米 MgO/PP 复合材料的直流击穿强度与温度的关系
Fig.6 Relationship between DC breakdown strength and temperature of nano-MgO/PP composites

3 结论

(1)KH570 改性之后的纳米 MgO 具有较高的界面粘接能力,使 KH570-MgO 和聚丙烯基体结合紧密,未出现空洞或间隙,且 KH570-MgO 的添加促进了聚丙烯从 α 晶型向 β 晶型的转变。

(2)纳米 MgO/PP 复合材料的空间电荷密度随纳米 MgO 添加质量分数的增加呈现出先减小后增大的趋势,其中 1%-MgO/PP 复合材料的空间电荷密度最小,为 0.6 C/m^2 。

(3)当纳米 MgO 的质量分数为 1% 时,纳米 MgO/PP 复合材料的拉伸强度最大,为 24.6 MPa,断裂伸长率为 501.3% 在 100℃ 时,纳米 MgO/PP 复合材料的直流击穿强度为 302 kV/mm,较 20℃ 下的直流击穿强度仅下降了 28.77%。

参考文献:

- [1] 李圣,谷良贤. 玻璃微珠/聚丙烯复合材料力学性能及介电性能研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(12):1621-1624,1629.
- [2] FLORKOWSKI M. Influence of insulating material properties on partial discharges at DC voltage[J]. Energies,2020,13(17):1-17.
- [3] 宋佳宁,杜斌,张振莉,等. 聚丙烯基直流电缆绝缘材料的研究进展[J]. 中国塑料,2022,36(11):174-182.
- [4] SEKIGUCHI Y, TAKADA T, MIYAKE H, et al. The influences on dielectric and insulating behaviors of introducing styrene groups into polyethylene[J]. IEEE Transactions on Fundamentals and Materials,2017,137(11):614-619.
- [5] 杜伯学,韩晨磊,李进,等. 高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J]. 电工技术学报,2019,34(1):179-191.

- [6] YANG L, ZHU Z, YANG R, et al. Insulation material and structure design of HVDC flexible cables[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):117-124.
- [7] 张雅茹,邵清,李娟,等. 接枝改性高压直流电缆绝缘材料的研究进展[J]. 石油化工,2022,51(5):587-592.
- [8] 陈卓正,李华强,钟力生. 聚丙烯层压纸绝缘电缆发展现状[J]. 绝缘材料,2022,55(11):1-9.
- [9] 张子琦,刘宏博,马宇威,等. 铅钛酸钡/聚丙烯纳米复合介质的电学性能及储能特性研究[J]. 绝缘材料,2022,55(12):61-68.
- [10] AHMED S Z, ILLIAS H A, ANG B C, et al. Electrical properties of polyethylene/polypropylene compounds for high-voltage insulation[J]. Energies,2018,11(6):1448.
- [11] 李喆,龚瑾,操卫康,等. 聚丙烯绝缘材料电导特性与空间电荷研究[J]. 高电压技术,2015,41(5):1451-1457.
- [12] 胡世勋,张雅茹,邵清,等. 不同改性技术路线的聚丙烯基高压直流电缆绝缘材料综合性能比较[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1243-1252.
- [13] 赵鹏,欧阳本红,黄凯文,等. 不同改性聚丙烯电缆绝缘料热氧化特性和选型[J]. 高电压技术,2022,48(7):2642-2649.
- [14] 张恒源,刘建叶,王绍杰,等. 聚丙烯在溶液中的等温结晶行为[J]. 中国塑料,2023,37(1):13-17.
- [15] 王晶. 苯甲酸锂的合成及其对聚丙烯结晶行为的影响[J]. 塑料工业,2023,51(12):146-153.
- [16] 邵满智,万玉鑫,牛越,等. 电压稳定剂接枝改善聚丙烯基绝缘材料性能研究[J]. 绝缘材料,2022,55(5):35-41.
- [17] 李光吉,童奇勇,冯晖. 聚丙烯/四针状氧化锌晶须/氧化镁导热绝缘复合材料的制备与性能研究[J]. 中国塑料,2010,24(6):28-35.
- [18] 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.
- [19] 高俊国,姚子恒,刘艳丽,等. 蒙脱土-弹性体/聚丙烯复合体系纳米颗粒相区分散对结晶形态与介电性能的影响[J]. 复合材料学报,2023,40(4):2085-2095.
- [20] ZHE L, CAO W, SHENG G, et al. Experimental study on space charge and electrical strength of MgO nano-particles/polypropylene composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(3):1812-1819.
- [21] 周垚,党斌,胡军,等. 纳米氧化镁颗粒对聚丙烯的性能调控[J]. 中国电机工程学报,2016,36(24):6619-6626,6914.
- [22] 王维,张可,房冉冉,等. KH570 原位改性纳米 SiO₂ 球状颗粒的制备及疏水效果评价[J]. 中国粉体技术,2019,25(3):42-47.
- [23] 申红艳,刘有智. 纳米氢氧化镁的制备及其原位改性[J]. 化工进展,2017,36(1):294-298.
- [24] 陈曦,吴锴,王霞,等. 纳米粒子改性聚乙烯直流电缆绝缘材料研究(I)[J]. 高电压技术,2012,38(10):2691-2697.

收稿日期:2023-05-10;修回日期:2023-07-06。

作者简介:袁志文(1972-),男(汉族),浙江温州人,高级工程师,主要从事电缆材料及电网计量检测的研究。