

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.06.002

湿热环境下聚丙烯基直流电缆绝缘材料的应用前景

杜 钢, 杨 杰, 蔡汉贤, 朱 晨, 王 勇, 李光茂
(广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510420)

摘要: 直流输电已经成为电网建设的关键环节, 高压直流电缆是直流输电的关键电力设备。随着柔性直流输电方式的应用, 挤包塑料绝缘电缆得以在实际直流输电工程中逐渐使用。然而, 在高温高湿气候地区, 湿热环境下的绝缘材料加速老化现象给电缆安全稳定运行带来极大挑战。为促进环保新型挤包塑料绝缘电缆的发展, 文中分析了可回收聚丙烯绝缘材料在湿热环境下应用的关键技术问题, 总结聚丙烯纳米改性复合材料、共混改性复合材料、化学改性材料等方面的研究进展, 并对高性能环保型聚丙烯直流电缆材料在湿热环境下的应用前景进行展望。

关键词: 直流输电; 聚丙烯; 湿热环境; 纳米改性; 共混改性

Application Prospect of Polypropylene-based DC Cable Insulation Materials in Humid and Hot Environment

DU Gang, YANG Jie, CAI Hanxian, ZHU Chen, WANG Yong, LI Guangmao
(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: DC power transmission has become the key link of power grid construction and HVDC cable is the key power equipment of DC power transmission. With the application of flexible DC transmission, extruded plastic insulated cable is used gradually in actual DC transmission projects. However, in the region with high temperature and high humidity climates, the accelerated aging of insulation materials in humid and hot environment poses a great challenge to safe and stable operation of DC cables. In order to promote the development of environmentally protected extruded plastic cable, the key technical issues of recyclable polypropylene insulation materials in humid and hot environment are analyzed in this paper and the research progress of polypropylene nano-modified composites, blend modified composites and chemical modified materials are summarized and, moreover, the future application of high-performance and environment-friendly polypropylene DC cable materials is prospected.

Key words: DC power transmission; polypropylene; humid and hot environment; nano-modification; blend modification

0 引言

20世纪50年代以来, 随着电力电子技术的不
断革新发展, 作为直流输电核心设备的换流器走
过了从汞弧阀到晶闸管再到全控型半导体晶体
管的发展历程, 高压直流输电功耗小、调节快
速方便、线路造价低、环境友好的技术优势也
日渐突显。“交直

交”这一直流输电应用新思路的可行性和稳
定性得到大量工程实践的论证, 高压直流输
电技术在至今几十年时间内受到广泛重视并
得到快速发展^[1]。

高压直流电缆是高压直流输电技术的重要
组成部分, 相比于高压交流电缆, 直流电缆
传输过程中无容性电流且不存在集肤效应,
因此功率损耗小、传输效率高。目前, 我国
在直流输电技术领域

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-03-27

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20190110)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GZHKJXM20190110).

投入较大科研力量,在大力发展多段直流、柔性直流等现代直流输电技术的同时,还在不断探索新柔性直流和常规直流组合的输电模式。国内已经建成并投运多条直流输电工程线路,并在电压等级和输送距离上取得跨越式发展,标志着中国直流输电技术进入世界前列^[2-10]。然而,在我国高压直流输电技术快速发展的同时,直流电缆主绝缘材料长期依靠从国外企业进口,高压直流电缆主绝缘材料的自主化生产是现阶段亟需解决的问题。

按绝缘类型的不同,高压直流电缆可以分为绕包油纸绝缘电缆和挤包塑料绝缘电缆两大类^[11],前者以浸渍低粘度绝缘油的纤维纸作为主绝缘材料通过绕制的方式生产,后者则采用高分子聚合物作为直流电缆的主绝缘材料。绕包油纸绝缘电缆早在20世纪50年代就开始被应用到工程实践当中,其空间电荷特性优良,能够承受极性反转,是早期高压直流输电系统最常用的地下和海底电缆,但其生产工艺十分复杂且运行维护成本高,随着柔性直流输电技术的发展,电压源换流器(VSC)的应用使极性反转问题的到了很好的解决,挤包塑料绝缘电缆制造维护方便、污染小重量轻等优点逐渐凸显出来^[12],得到广泛关注,目前挤包型直流电缆多采用交联聚乙烯(XLPE)作为主绝缘材料。相对于聚乙烯,聚丙烯用作电缆绝缘无需进行交联过程,可以保持热塑性特性,并且聚丙烯熔点比聚乙烯高,允许长期工作温度高,可提升电缆载流量,因此聚丙烯基热塑性电缆绝缘材料展现出巨大的应用前景。

进入21世纪后,日本和欧洲的学者就开始对聚丙烯用作电力电缆主绝缘材料的可行性进行初步探索^[13-15],结果发现常规聚丙烯材料因其高结晶度、低温韧性差等缺陷,不能直接作为电缆绝缘,而改性聚丙烯材料在不同温度下均可满足电缆主绝缘的实际应用需求。北欧化工等欧美国家的公司已经拥有数十项相关专利。近年来,改性聚丙烯用于高压直流电缆的研究进程明显加快,意大利的普睿斯曼公司在2015年公布了320 kV改性聚丙烯直流电缆原型样品后^[16],于2016年9月在其官网宣布成功研制出600 kV改性聚丙烯直流电缆。截止目前,意大利和荷兰是运用改性聚丙烯直流电缆最多的国家,在运线路已达到数万公里,西班牙、芬兰等欧洲国家也开始陆续使用这一新型环保直流电缆。

我国幅员辽阔,各地气候条件差异显著,其中华南地区大部分处于热带、亚热带气候区域,夏季太阳高度较大,气温较高,且南季风带来丰沛降水,雨热同期,属于典型的高温高湿气候环境。湿和热

环境的联合作用将加快电气设备金属材料的腐蚀和绝缘材料的老化^[17],给电网设备安全稳定运行带来了极大挑战,因此,亟需研发适应华南地区高温高湿环境的高性能电工材料。文中重点分析了湿热环境下聚丙烯用于高压直流电缆绝缘材料存在的关键问题,综述了目前关于聚丙烯基复合材料在纳米改性、共混改性、化学改性以及三元复合体系方面的研究现状,为开发高性能聚丙烯直流电缆绝缘材料提供参考。

1 湿热环境下聚丙烯基直流电缆绝缘材料的关键问题

新型可回收直流电缆绝缘材料的研发是我国电缆行业最具挑战性的课题之一,国外电缆行业为了维护自身权益,只对外公布有限的产品物性,通常是密度、熔融指数、力学性能下限、电学性能指标等,这些参数并不能区分材料的绝缘性能,因此无法指导材料的研究开发。我国电缆绝缘材料的开发需要多种技术发展作为支撑,以求实现电缆料的国产化,追赶欧美先进水平。基于以往直流电缆的实际运行经验和未来发展趋势,尽管聚丙烯材料具有熔点高、绝缘性能优良等优点,但其用作高压直流电缆绝缘料还存在以下关键问题需要进行进一步探讨。

1.1 聚丙烯直流电缆料的导热性能

直流电缆绝缘层中的电场分布与交流情形不同,交流电缆绝缘层中的电场分布与介电常数成反比,而介电常数受温度影响小,因此温度对电场在交流电缆绝缘层的分布影响并不明显。对于直流电缆,电场的分布与绝缘层电阻率正相关,且材料电阻率随温度一般呈现类指数规律变化,因此电缆运行过程中温度的分布变化将直接影响绝缘层中的电场分布。高压直流电缆的预先设计中,考虑电缆绝缘层中的电场分布应是内高外低的静电场方程形式。然而在电缆负载运行过程中,导体流过电流产生热量,绝缘层两侧出现内高外低的温度梯度,导致绝缘材料均一的电阻率出现导体侧电阻率降低而外侧电阻率升高的现象。由于直流电场分布与绝缘电阻率成正比,因此电缆绝缘层导体侧的场强相对减小,外侧场强相对增大。在温度梯度达到一定数值时,就会出现绝缘外侧场强高于导体侧场强的“反转现象”^[18]。同时,高场强下导体侧注入的同极性电荷在低温侧(绝缘层外侧)抽出速率受限,出现堆积现象,进一步加剧电场的畸变,使电缆绝缘失效风险增加。温度梯度下直流电缆绝缘层

内外电场分布的情况见图1。

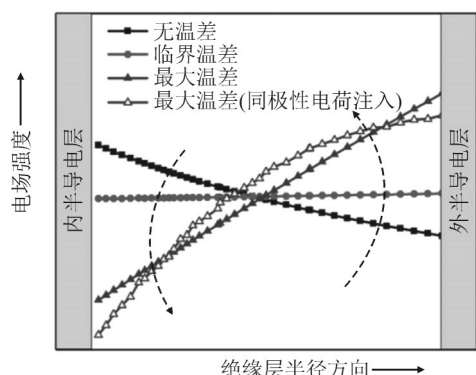


图1 直流电缆绝缘层内外电场分布

Fig. 1 Electric field distribution inside the DC cable insulation

通过添加高导热的纳米填料,降低绝缘层内外的温度梯度,可以有效的抑制直流电缆绝缘层内外温度梯度的变化,解决上述出现的问题,提高绝缘材料性能的温度稳定性,因此提高聚丙烯直流电缆绝缘材料的导热性能对其在高温高湿环境下应用的至关重要。

1.2 聚丙烯直流电缆料的空间电荷特性

直流电场下,固体电介质中存在的空间电荷主要分为异极性电荷和同极性电荷两种。其中,异极性电荷主要由介质内部杂质的电离形成,同极性电荷主要来源于高场强下电极材料的注入电荷,受电极材料和介质材料界面特性的影响。空间电荷的存在会造成绝缘内部电场分布畸变,导致绝缘材料的电老化,当空间电荷大量聚集使局部场强大于绝缘击穿场强,电缆绝缘将击穿失效。直流电缆在温度梯度下低温侧电荷密度增加,使电场严重畸变^[19],特别在湿热条件下,电场畸变现象更加严重,导致电缆老化加速绝缘寿命显著降低,并且使直流电缆绝缘层中实际电场的计算复杂,设计变得困难。

近年来,随着空间电荷测量技术的发展,科研人员对空间电荷的产生、积聚及消散进行了深入研究,研发出了如热脉冲法、电脉冲法等多种空间电荷测量方法^[20]。空间电荷的积聚与电荷陷阱特性相关,高压直流电缆绝缘材料的电荷陷阱可分为基体材料的本身固有的“基体陷阱”和不同研究路线所引入的“特殊陷阱”。利用陷阱理论可以很好得解释空间电荷分布特性和直流击穿特性,通过聚丙烯材料的接枝、熔融共混及纳米填料填充改性等方式,调控材料中陷阱深度和陷阱密度,可以达到抑制空间电荷的目的。此外,电荷得注入与抽出是导致材料绝缘劣化的主要因素,通过对绝缘材料与电极及屏蔽料间界面进行改性,调控空间电荷的注入

和抽出,也是抑制直流场下电缆绝缘内部空间电荷的有效手段。

2 聚丙烯电缆绝缘材料的研究现状

2.1 纳米填充改性聚丙烯基复合材料

纳米技术应用领域广阔,量子尺寸效应和比表面积大的特点使纳米级别的无机粒子在复合材料改性方面有着突出表现。早在1994年,T. J. Lewis就提出了纳米复合材料的概念,文[21]指出纳米尺寸的无机粒子的引入可以提升电介质的电学性能,并阐述了纳米粒子发挥作用的机理,为后续纳米复合材料的研究提供了重要的理论基础。近年来,国内外研究人员对纳米填充后复合材料的性能提升及其改性机理进行了大量研究,不同纳米粒子的选取,粒径、粒状及掺杂比例的设置不同,都会对纳米复合材料所表现出的各项性能产生影响。聚丙烯基纳米复合材料是指以聚丙烯为基体,将纳米级别的无机填料作为分散相以适当的制备方法均匀分散在聚丙烯中所形成的复合材料目前,对聚丙烯复合材料纳米添加改性的方面的研究也在逐渐展开。

聚丙烯是非极性有机物,与强极性的无机填料相容性差;同时,两者在密度、热膨胀系数、表面能等属性上相差较大,因此在制备过程中,直接将基体与分散相混合会使纳米填料发生团聚现象,并且复合材料的界面粘合性差,从而导致改性效果下降,甚至出现绝缘失效的现象。在聚丙烯纳米复合材料的制备中,通过对无机填料进行适当的表面处理,可以增加填料与聚丙烯基体间的相容性,改善界面粘合状况,使无机填料在聚丙烯基体中达到良好的分散性。操卫康等^[22]研究了纳米填料表面处理对MgO/PP纳米复合材料内部纳米填料分散性和团聚的影响。以经表面处理和未经处理纳米MgO为填充颗粒制备聚丙烯纳米复合材料,分别通过透射电镜观察2组MgO/PP纳米复合介质中MgO填料的分散性和团聚现象。未经表面处理和经表面处理MgO/PP纳米复合材料的TEM图见图2。从图2结果显示,未经表面处理的MgO/PP纳米复合材料分散较为均匀,但从图中粒子半径增大可看出纳米填料发生了团聚现象,而经表面处理过的MgO/PP纳米复合材料没有明显的团聚现象,粒子半径要比未经表面处理的试样小,分散也更为均匀。

对于高压直流绝缘材料而言,空间电荷的积聚会造成绝缘层内部电场产生严重畸变,引发介质内局部放电及加速绝缘老化,最终导致绝缘失效或击

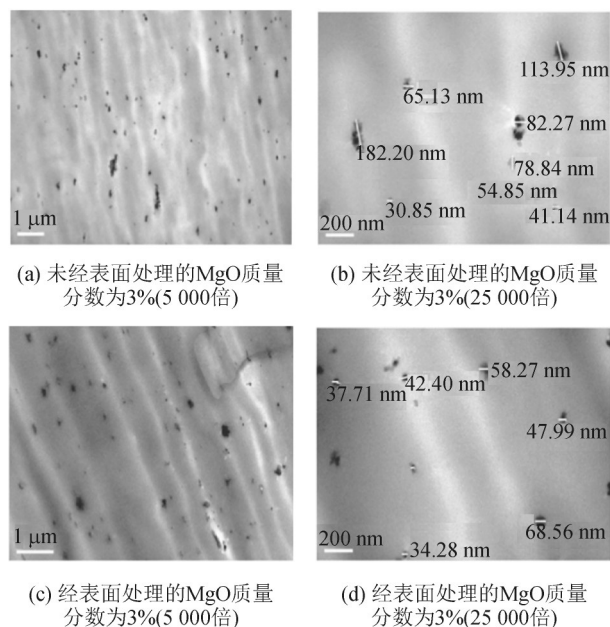


图2 MgO/PP纳米复合材料的TEM图

Fig. 2 TEM image of MgO/PP nanocomposite

穿,严重影响电缆性能及使用寿命^[23-24]。因此,改善聚丙烯纳米复合材料的空间电荷特性,是开发高性能聚丙烯基直流电缆绝缘材料的重要课题。周珏等^[25-26]研究了纳米MgO含量对聚丙烯空间电荷特性的影响。实验中,将不同含量经KH570硅烷偶联剂表面处理过的MgO颗粒与聚丙烯熔融共混,制备了MgO/PP纳米复合材料。通过对比发现,纯聚丙烯在60 kV/mm直流电场作用下电荷注入现象明显,而纳米MgO填充改性后的复合材料中的空间电荷注入得到了明显抑制,其中1 phr和3 phr纳米MgO填充含量的复合材料中的空间电荷抑制效果明显,5 phr纳米MgO填充含量的样品空间电荷又有所增加,但仍低于纯聚丙烯。实验还发现,填充纳米MgO颗粒后的聚丙烯直流击穿强度都明显提高,3 phr纳米MgO填充含量复合材料的直流击穿场强从纯聚丙烯的389 kV/mm提升到了503 kV/mm,提升幅度达到了约29.3%。

不同纳米填料的选取,会对纳米复合材料改性效果产生不同的影响,因此,研究不同纳米填料对聚丙烯复合材料性能的影响,对开发高性能聚丙烯直流电缆绝缘材料具有重要的指导意义。清华大学的何金良等^[27]全面分析了不同填充含量的4种纳米颗粒(MgO, ZnO, TiO₂和Al₂O₃)对等规聚丙烯电学性能的影响。结果表明,随着纳米颗粒含量的增加,4种纳米复合材料的介电常数均增大,但在介电损耗方面,TiO₂/PP复合材料的介电损耗明显大于纯PP,Al₂O₃/PP复合材料的介电损耗与纯PP对比基本保持不变,只有MgO和ZnO与聚丙烯的复合材料的

介电损耗相比纯PP情况下有所下降。不同含量的4种PP纳米复合材料的直流体积电阻率见图3。从图3可以看出,不同纳米颗粒的引入均提高了聚丙烯的直流体积电阻率。其中Al₂O₃的提升效果最为明显,并且在含量增加到5 phr时还未达到最大值,MgO和ZnO在3 phr时对电阻率的提升达到峰值,而TiO₂只有在1 phr时提高了电阻率,随后含量增加电阻率反而降低至低于纯PP。实验还采用脉冲电声法测量了复合材料在直流电场下的空间电荷分布并对直流击穿场强进行了测试,结果显示空间电荷抑制效果和直流击穿强度是相关联的,都随着纳米填充含量的增加呈先上升后下降的变化趋势,4种纳米颗粒中,只有ZnO纳米颗粒对空间电荷的抑制作用不明显,而MgO和TiO₂表现出更良好的空间电荷抑制能力,在3 phr MgO和1 phr TiO₂的聚丙烯纳米复合材料中空间电荷的几乎完全消失,相对于纯聚丙烯它们分别提升了43%和29%左右的直流击穿强度。

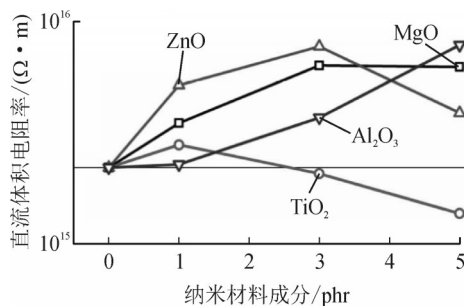


图3 4种聚丙烯纳米复合材料的直流体积电阻率

Fig. 3 DC volume resistivity of various polypropylene nanocomposites

直流电缆在运行过程中绝缘层内外会出现较大的温度梯度,导致“电极反转”现象,加剧空间电荷的积聚。填充具有高热导率的金属或无机填料,提高聚丙烯复合材料导热能力以抑制温度梯度产生是一种有效的方法^[28]。复合材料的导热性能不仅与填料的热导率有关,还与填料的形状、分散性及取向有关。片状或管状导热填料具有较大比表面积,更容易在聚合物基体中形成导热通道,提高聚丙烯复合材料的导热性能^[29-31]。H. Yan等^[32]研究了石墨烯纳米片的磁性取向对复合材料导热性能提升的影响,结果表明垂直取向和平行取向的GNSs复合材料导热系数均大幅提高。Zhou Y等^[33]对氮化铝纳米填充的聚丙烯复合材料的导热性能进行了研究,不同温度下AlN/PP纳米复合材料的热导率见图4。图4结果表明,通过填充AlN纳米颗粒,可有效提高PP的导热能力,且提高效果随填充含量的同步增加。通过构建3D结构的导热网络,可以实现

低添加量下的高效导热能力, Lu H 等^[34]通过将碳纳米管连接在石墨烯片上构成三维分层结构, 获得了超高导热系数的碳纳米管/石墨烯薄膜, 含量为 15 wt% 的碳纳米管的导热系数为 1 388.7 W/mK, 这为提高聚丙烯导热性能提供了良好的参考。

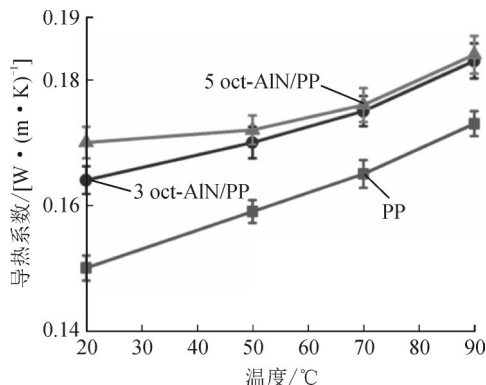


图4 不同温度下 AlN/PP 纳米复合材料的热导率

Fig. 4 Thermal conductivity of AlN/PP nanocomposite at different temperatures

经表面处理后的纳米填料, 可以减少团聚现象、促进纳米颗粒的分散以达到更好的改性效果。通过纳米填充在聚丙烯基体引入大量陷阱, 改变复合材料的深浅陷阱的相对浓度, 对空间电荷的注入和分布产生影响, 从而改善聚丙烯绝缘中的电场分布。本征热导率较高的纳米填料在聚丙烯基体中的填充, 可以形成良好的导热通道提高导热系数, 抑制在直流情况下温度梯度对电缆产生的不良影响。可以看出, 纳米填充改性是提高聚丙烯基复合材料各项性能的有效途径, 但目前学者们对于纳米改性机理的解释尚未达成共识, 对于纳米颗粒的选型、填充比例、表面处理以及分散性等因素对聚丙烯复合材料性能提升效果的影响还需要进行进一步的研究和系统的分析, 为聚丙烯直流电缆绝缘材料的生产及投运提供理论支撑。

2.2 共混改性聚丙烯基复合材料

聚丙烯在纳米改性领域的研究展示了其应用于高压直流电缆的巨大的潜力, 但实际应用当中还有一些问题需要解决。低温脆性是阻碍聚丙烯应用于高压直流电缆绝缘最主要的原因, 通过与聚丙烯相容性良好的弹性体熔融共混进行增韧, 可以有效提升聚丙烯的低温韧性和抗冲击强度, 徐航等^[35]通过熔融共混法在聚丙烯中分别添加质量分数为 40% 的 EPDM、EVA 和 POE, 制备了 3 种不同类型的聚丙烯/弹性体复合材料。将它们在液氮中脆断后刻蚀掉断面的弹性体, 用扫描电子显微镜观察, 纯聚丙烯及其 3 种复合材料的断面 SEM 图见图 5。

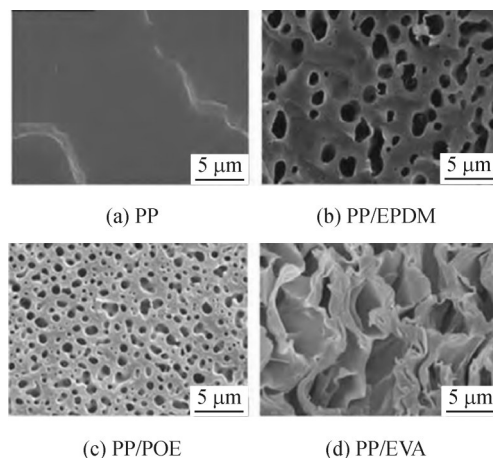


图5 纯聚丙烯及其 3 种复合材料的断面 SEM 图

Fig. 5 SEM image of cross-section of pure polypropylene and its nanocomposites

由图 5 可以看出, 在 PP/EPDM 共混材料中, 大小粒径的 EPDM 颗粒同时存在, 分散较为均匀; 在 PP/POE 共混材料中, POE 颗粒的粒径明显小于另外两种弹性体颗粒, 且在聚丙烯基体中分散性好, 表明聚烯烃弹性体与聚丙烯的相容性较为良好。3 种弹性体颗粒中, 只有 EVA 颗粒与 PP 的共混物中发生团聚现象, 分散性最差。同时, 文^[35]对 3 种聚丙烯共混材料的机械韧性进行了测量和分析, 聚丙烯不同共混体系断裂伸长率的比较见图 6。实验数据表明, PP/POE 共混材料的断裂伸长率高于另外两种颗粒的共混物, 这是由于 PP/POE 共混材料中弹性体颗粒数目最多、分散最为均匀, 能够对施加的应力起到缓冲作用, 并形成应力集中点, 阻止聚丙烯基体裂纹的发展, 实验表明聚烯烃弹性体对聚丙烯的增韧效果最为优异。Zhou Y 等^[36]采用熔融共混法制备了不同含量 POE 的聚丙烯共混物, 系统地研究了 PP/POE 共混材料用于高压直流电缆绝缘的可能性。扫描电镜图和机械性能测试结果表明, POE 与 PP 的相容性较好, 在共混物中分散比较均匀, 当含量超过 25% 时部分 POE 颗粒开始发生团聚; 随着 POE 含量的增加, 共混物的断裂伸长率以及韧性显著提高, 但拉伸强度和储能模量降低。电学方面的测试结果显示, 随着 POE 含量的增加, 直流介电强度小幅下降, POE 含量为 30 wt% 时仅下降 10%; POE 在低添加量时共混物的体积电阻率呈下降趋势, 但含量超过 15% 时, 电阻率开始上升, 体积电阻率数值与 XLPE 的水平相当。

目前, 聚丙烯共混改性的研究仍处于探索阶段, 其制备过程均采用熔融共混法, 将弹性体与聚丙烯基体按比例混合均匀后通过挤出机挤出成型。这种方法虽简单有效, 但由于存在剧烈的机械

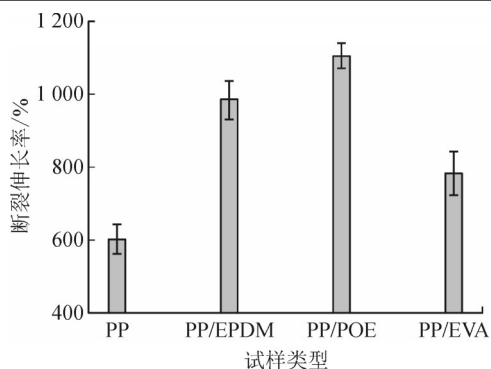


图6 聚丙烯不同共混体系的断裂伸长率

Fig. 6 Elongation at break of various blends of polypropylene

剪切和热效应会造成材料的热老化以及聚合物分子链的断裂等不利于共混体系机械性能和电学性能的后果。大量实验的结果都表明^[35-36],相同温度和电场强度下极化相同时间,聚丙烯共混材料中空间电荷的积累要比纯PP材料严重,这是由于共混体系中弹性体与聚丙烯形成大量的界面并在界面处引入大量陷阱,从而导致界面处空间电荷积聚,造成电场畸变加速绝缘材料的老化。因此,在下一步的研究中需要对聚丙烯共混改性复合材料的空间电荷特性进行重点研究,建立有机/有机复合界面的电荷输运模型,抑制共混材料中空间电荷的积累,为制备同时具备良好低温韧性和空间电荷特性的聚丙烯直流电缆绝缘材料提供理论基础。

2.3 化学改性聚丙烯材料

在非极性的聚丙烯主链上引入特殊官能团进行化学改性,利用这些接枝基团改变聚丙烯的极性和形态,也可以达到提高聚丙烯力学、热学以及电学性能的目的。Zha J W等^[37]采用极性官能团马来酸酐(MAH)对聚丙烯进行化学改性,实验结果表明马来酸酐成功地接枝到聚丙烯地分子链上,并且与纯PP相比,接枝率2%的改性材料能有效抑制空间电荷的注入和积聚。Zhou Y等^[38]系统研究了聚丙烯接枝马来酸酐的电学性能,结果表明,马来酸酐的接入显著抑制了空间电荷的积累并将击穿强度提高到453 kV/mm。进一步研究发现,接枝马来酸酐后聚丙烯中的陷阱密度大幅增加,说明接枝极性基团引入了大量深陷阱,PP和PP-g-MAH的热刺激电流谱及对应的陷阱水平见图7。深陷阱的引入降低了电荷迁移率,提高了注入势垒,这可能是聚丙烯电气性能提高的主要原因。

通过添加剂(抗氧化剂、电压稳定剂、成核剂等)改善聚丙烯绝缘材料的电气性能,也是一种行之有效的化学改性方式。量子化学计算方法的发展,推动

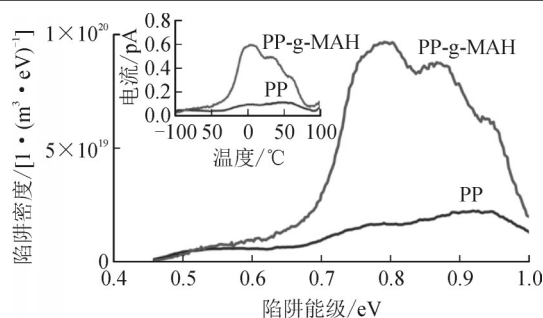


图7 PP和PP-g-MAH的热刺激电流谱

Fig. 7 TSC spectra of PP and PP-g-MAH

更高效添加剂的理论研究和设计评估,Wu Y H等^[39]通过掺杂二环己基对苯二胺(DCTH)作为成核剂诱导聚丙烯中 β 晶型的形成。实验结果显示,PP-0.1% DCTH中 α 和 β 晶型的浓度分别为16.8%和83.2%,有效抑制了空间电荷的注入,提高了材料的击穿强度。

化学改性聚丙烯材料的优势在于可以灵活地实现电学性能地调控,不同特殊官能团的接入可以达到不同地改性效果。然而,化学反应的不充分可能会使材料中存在未接枝的杂质分子,不利于材料的绝缘性能。因此,化学接枝改性技术的反应均匀性和充分性仍需要进一步的研究探讨。

3 结论

随着高压直流输电技术的快速发展,高压直流挤包塑料电缆将成为重要的电力设备。聚丙烯具有熔点高、绝缘性能优良等优点,但存在导热率低、低温脆性和空间电荷易于积聚等关键性问题。为解决这些问题,开发高性能聚丙烯直流电缆绝缘材料,国内外研究人员开展了大量的研究实验。

1)通过对纳米填料进行表面处理,能够使纳米颗粒在聚丙烯基体中达到更好的分散性,避免团聚现象。无机纳米颗粒的填充,能有效抑制聚丙烯绝缘材料中空间电荷的积累,改善电场分布提高直流击穿场强。本征热导率高的纳米颗粒的填充,能提高复合材料的导热系数,抑制温度梯度对直流电缆产生的不利影响。未来需要对纳米颗粒选型、填充比例、表面处理方法进行进一步的研究和系统分析,保证纳米改性聚丙烯材料的稳定性。

2)通过与相容性良好的弹性体颗粒进行共混改性可以有效提升聚丙烯复合材料的低温韧性和抗冲击强度。下一步的研究中,应重点关注熔融共混过程中发生的热老化和分子链断裂和弹性体与聚丙烯界面处空间电荷积聚这两个问题。

3)通过化学改性接入不同的官能团,能够灵活的调控聚丙烯材料的各项性能,量子化学计算方法

的发展,使得更高效添加剂的设计成为可能,在解决接枝率低导致杂质引入这一关键问题后,化学改性可以协同纳米改性或共混改性,为高性能聚丙烯电缆料的开发提供新方向。

在湿热环境下,入侵水分的极化损耗将导致直流电缆绝缘层内的温度梯度更为明显,由此造成的电场反转及空间电荷积聚现象愈发严重。通过添加纳米导热填料提升聚丙烯材料的热传导效率,改善电缆绝缘层中的热场分布,可以有效缓解材料的热分解及老化进程,是提高聚丙烯基直流电缆在高温高湿地区运行可靠性的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 饶宏,冷祥彪,潘雅娴,等.全球直流输电发展分析及国际化拓展建议[J].南方电网技术,2019,13(10):1-7.
RAO Hong, LENG Xiangbiao, PAN Yaxian, et al. Analysis of the global HVDC power transmission development and the suggestion of the HVDC export[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10):1-7.
- [2] 李德军,刘志民, KOSSE M, 等.一种先进的 ± 550 kV 高压直流 GIS 及其潜在应用[J].高压电器,2020,56(6):32-41.
LI Dejun, LIU Zhimin, KOSSE M, et al. State-of-the-art ± 550 kV direct current high voltage gas insulated switchgear and potential applications[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6):32-41.
- [3] 陈佳浩,王琦,朱鑫要,等.谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J].高压电器,2020,56(5):196-202.
CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5):196-202.
- [4] 李刚,孙伟,李峰,等.谐波电压对变压器绝缘纸击穿电压的影响研究[J].变压器,2020,57(6):6-8.
LI Gang, SUN Wei, LI Feng, et al. Study on effect of harmonic voltage on breakdown voltage of insulation paper in transformer[J]. Transformer, 2020, 57(6):6-8.
- [5] 刘子腾,徐永海,丁一博,等.考虑背景谐波电压波动和阻抗变化的多谐波责任划分[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(3):84-91.
LIU Ziteng, XU Yonghai, DING Yibo, et al. Multi-harmonic responsibility division considering background harmonic voltage fluctuation and impedance variation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3):84-91.
- [6] 代双寅,刘书铭,赵麒哲,等.基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):141-147.
DAI Shuangyin, LIU Shuming, ZHAO Qizhe, et al. A harmonic voltage measurement method based on CVT capacitor current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20):141-147.
- [7] 李智琦,罗日成,李稳,等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业电位转移特性分析[J].高压电器,2020,56(3):164-168.
LI Zhiqi, LUO Richeng, LI Wen, et al. Analysis of potential shift characteristics of live working on ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3):164-168.
- [8] 褚旭,孙锦琛.直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):47-56.
CHU Xu, SUN Jinchun. Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2):47-56.
- [9] 王思华,赵磊,王军军,等.基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(11):9-17.
WANG Sihua, ZHAO Lei, WANG Junjun, et al. Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11):9-17.
- [10] 王跃进,樊艳芳,唐勇,等.考虑强非线性和波速变化特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(5):17-25.
WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHVDC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5):17-25.
- [11] MAZZANTI G, MARZINOTTO M. Extruded cables for high voltage direct current transmission: advances in research and development[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013: 23-27.
- [12] JEROENSE M. HVDC, the next generation of transmission highlights with focus on extruded cable systems[C]//International Symposium on Electrical Insulating Materials. Yokkaichi, Japan: IEEE, 2008: 10-15.
- [13] KATSUMI K, YOSHINO I, TSUYOSHI U, et al. The application of novel polypropylene to the insulation of electric power cable[J]. IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2002, 122(9):872-879.
- [14] GREEN C, VAUGHAN A, STEVENS G, et al. Thermoplastic cable insulation comprising a blend of isotactic polypropylene and a propylene-ethylene copolymer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(2): 639-648.
- [15] BELLI S, PEREGO G, BAREGGI A, et al. P-laser: Breakthrough in power cable systems[C]//Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (SEI). San Diego, CA, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [16] ALBERTINI M, BAREGGI A, CARMÍ L. Development and high temperature qualification of innovative 320 kV DC cable with superiorly stable insulation system[C]//9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France: Jicable, 2015: A7.3.
- [17] 曾磊磊,张宇,缪雪梅,等.复合绝缘子芯棒湿热老化与吸湿特性研究[J].绝缘材料,2020,53(1):58-63.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, MIAO Xuemei, et al. Study on

- hygrothermal ageing and hygroscopic characteristic of composite insulator mandrel[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(1):58-63.
- [18] FOTHERGILL J C. The coming of age of HVDC extruded power cables[C]//IEEE Electrical Insulation Conference. Philadelphia, USA: IEEE, 2014: 124-137.
- [19] ZHANG Y W, LEWINER J, ALQUIE C, et al. Evidence of strong correlation between space - charge buildup and breakdown in cable insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1996, 3(6): 778-783.
- [20] AHMED N H, SRINIVAS N N. Review of space charge measurements in dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997, 4(5):644-656.
- [21] LEWIS T J. Nanometric dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1994, 1(5):812-825.
- [22] 操卫康, 李 喆, 龚 瑾, 等. 纳米颗粒填充浓度和表面处理对纳米 MgO/PP 空间电荷行为的影响[J]. *高电压技术*, 2015, 41(5):1495-1504.
- CAO Weikang, LI Zhe, GONG Jin, et al. Influence of nanoparticle concentration and surface treatment on space charge behavior in nano - MgO/PP[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(5):1495-1504.
- [23] 雷清泉, 李盛涛. 关于工程电介质中几个经常涉及的问题与思考[J]. *高电压技术*, 2015, 41(8): 2473-2480.
- LEI Qingquan, LI Shengtao. Several important issues and thinking about engineering dielectrics[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(8): 2473-2480.
- [24] 李 化, 方 田, 张晨晨. 电容器级新型储能电介质的储电性能研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(2):54-58.
- LI Hua, FANG Tian, ZHANG Chenchen. Study on electrical storage performance of capacitor level new energy storage dielectrics[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2021, 42(2):54-58.
- [25] 周 珪, 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.
- ZHOU Yao, DANG Bin, HU Jun, et al. Effect of magnesium oxide nanoparticles on tailoring the properties of polypropylene[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(24):6619-6626.
- [26] 潘毓娴, 储松潮, 黄云锴, 等. 蒸镀 Al_2O_3 复合聚丙烯薄膜及其电容器性能研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(4):25-30.
- PAN Yuxian, CHU Songchao, HUANG Yunkai, et al. Study on properties of evaporated Al_2O_3 composite polypropylene film and its capacitors[J]. *Power Capacitors & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(4):25-30.
- [27] ZHOU Y, HU J, DANG B, et al. Effect of different nanoparticles on tuning electrical properties of polypropylene nanocomposites[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(3):1380-1389.
- [28] HUANG X Y, JIANG P K, TANAKA T. A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2011, 27(4): 8-16.
- [29] 江平开, 陈 金, 黄兴溢. 高导热绝缘聚合物纳米复合材料的研究现状[J]. *高电压技术*, 2017, 43(9):2791-2799.
- JIANG Pingkai, CHEN Jin, HUANG Xingyi. Research status of thermally conductive but electrically insulating polymer nanocomposites[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(9):2791-2799.
- [30] 李 征, 李 化, 林福昌, 等. 聚丙烯纳米复合材料的介电特性研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(4):1-6.
- LI Zheng, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on dielectric properties of polypropylene nanocomposite[J]. *Power Capacitors & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(4):1-6.
- [31] 朱建军, 余光凯, 刘 庭, 等. 铜包铝复合材料用于特高压携带型短路接地线的轻型化方案研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(2):170-177.
- ZHU Jianjun, YU Guangkai, LIU Ting, et al. Research on lightweight scheme of copper-clad aluminum composites in UHV portable earthing and short - circuiting wires[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2):170-177.
- [32] YAN H, TANG Y, LONG W, et al. Enhanced thermal conductivity in polymer composites with aligned graphene nanosheets[J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(15): 5256-5264.
- [33] ZHOU Y, HU J, CHEN X, et al. Thermoplastic polypropylene/aluminum nitride nanocomposites with enhanced thermal conductivity and low dielectric loss[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(5): 2768-2776.
- [34] LU H, ZHANG J, LUO J, et al. Enhanced thermal conductivity of free-standing 3D hierarchical carbon nanotube-graphene hybrid paper[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017(102):1-8.
- [35] 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 Hang, DU Boxue, LI Jin, et al. Mechanical and space charge properties of polypropylene/elastomer blends[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10):3214-3220.
- [36] ZHOU Y, HE J, HU J, et al. Evaluation of polypropylene/polyolefin elastomer blends for potential recyclable HVDC cable insulation applications[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(2):673-681.
- [37] ZHA J W, WU Y H, WANG S J, et al. Improvement of space charge suppression of polypropylene for potential application in HVDC cables[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(4):2337-2343.
- [38] ZHOU Y, HU J, DANG B, et al. Mechanism of highly improved electrical properties in polypropylene by chemical modification of grafting maleic anhydride[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(41):415301.
- [39] WU Y H, ZHA J W, LI W K, et al. A remarkable suppression on space charge in isotactic polypropylene by inducing the β -crystal formation[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(11):1-5.

杜 钢(1990—),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备试验研究及状态评价工作(E-mail: dudu-2566@163.com)。