

基于聚丙烯的高性能电绝缘材料的研究

王 俊 郝青青 刘军平 贺进军 董少永

陕西延长中煤榆林能源化工股份有限公司 陕西榆林 718500

摘 要: 在高性能电缆绝缘材料领域, 有着广阔应用前景的聚丙烯 (PP) 材料, 凭借其优异的电学性能、热学性能以及可回收性而备受关注。不过, PP材料自身存在的刚性大、脆性高这类问题, 对其在电缆绝缘领域的应用受到了限制。近年来, 针对PP材料改性这一方面, 国内外众多学者开展了大量的研究工作, 所采用的方法主要有填充改性、共混改性、化学接枝改性等, 且在提升PP复合材料综合性能上收获了显著的成效。

关键词: 聚丙烯; 电缆绝缘材料; 填充改性

引言

对于电力系统安全稳定运行而言, 电力电缆起着重要的保障作用。随着新型电网不断发展, 像特高压、智能电网这类, 对电力电缆绝缘材料性能的要求也在持续提高。当下广泛运用的交联聚乙烯 (XLPE) 绝缘, 其性能虽说较为优异, 然而在使用寿命完结之后, 回收利用起来却存在困难。聚丙烯 (PP) 属于一种热塑性可回收材料, 有成为XLPE替代品的可能性。只是PP材料本身存在诸如模量高、韧性差等不足的情况, 难以达到电缆使用方面的要求。所以, 借助改性手段提升PP的综合性能显得尤为重要。

一、PP 电缆绝缘材料的关键性能要求

(一) 电学性能要求

PP 电缆绝缘材料需要具有高的击穿强度和体积电阻率, 以保证长期安全运行。通常要求PP绝缘材料的击穿强度不低于 60 kV/mm, 体积电阻率不低于 $1 \times 10^{16} \Omega \cdot m$ 。此外, 为了抑制运行过程中空间电荷的积累, 还需要PP绝缘材料具有低的介电常数和介电损耗。

(二) 热学性能要求

电缆运行过程中由于电流产生的焦耳热会使导体温度显著升高, PP绝缘层需要承受较高的长期工作温度。通常要求PP绝缘材料的长期工作温度不低于 90℃, 热变形温度不低于 115℃。为了保证PP绝缘材料在高温下

的尺寸稳定性, 还需要PP具有高结晶度和均匀的球晶尺寸。

(三) 力学性能要求

电缆在制造、运输、敷设过程中不可避免会受到外力作用, PP绝缘层需要具备一定的机械强度和柔韧性。通常要求PP绝缘材料的拉伸强度不低于 20 MPa, 断裂伸长率不低于 350%。在热塑性PP电缆的连续挤出加工过程中, PP熔体的流动性也是影响生产效率和产品质量的关键因素。

二、PP 电缆绝缘材料的改性研究进展

(一) 填充改性

在PP基体中填充纳米颗粒是改善PP材料性能的有效途径之一。常见的纳米填料包括层状硅酸盐、金属氧化物等。纳米粒子由于其尺寸小、比表面积大, 能与PP基体形成大量界面, 从而显著影响PP的结晶行为和力学性能^[1]。用硅烷偶联剂改性蒙脱土, 再填充到PP中, 复合材料的拉伸强度和冲击强度分别提高了 23% 和 45%。分析表明, 经硅烷改性后, 蒙脱土在PP基体中分散性提高, 且与PP形成了良好的界面结合, 从而有效传递应力, 提高了复合材料的力学性能。

除了改善力学性能, 纳米填料对PP复合材料的电学性能也有重要影响。将纳米 MgO 填充到PP中, 发现 MgO 能抑制空间电荷在PP中的注入和积累。当 MgO 含量为 3 wt% 时, PP/MgO 复合材料的空间电荷密度比纯PP降低了约 70%。研究认为, MgO 纳米颗粒能捕获载流子, 降低载流子在PP中的迁移率, 从而抑制了空间电荷的积累。此外, MgO 还能改善PP的电场分布, 提高其击穿强度。

作者简介: 王俊, 1987.10, 男, 汉, 陕西省渭南市富平县, 大学本科, 目前职称: 中级工程师 (化工), 研究方向: 化工与工艺。

（二）共混改性

将PP与其他高分子材料进行共混，是提高PP韧性、降低脆性的有效方法。将SEBS加入到PP中，发现SEBS能有效增韧PP材料。当SEBS含量为30 wt%时，PP/SEBS共混材料的缺口冲击强度提高了20倍以上。SEBS在PP基体中形成岛状分散相，受到冲击时能有效吸收和耗散能量，从而提高了PP的韧性。

除了SEBS，POE和EPDM等弹性体也能有效增韧PP材料。将弹性体加入PP能形成海岛结构，PP为连续相，弹性体为分散相。在外力作用下，分散相能起到应力集中和裂纹钝化的作用，从而提高复合材料的冲击韧性^[2]。此外，部分极性基团偏高的弹性体还能改善PP的介电性能。

（三）化学接枝改性

通过化学方法在PP分子链上接枝功能基团，能在分子水平上调控PP材料的性能。在PP链上接枝马来酸酐(MAH)，再与端羟基液体丁腈橡胶(HTBN)反应，可以制备PP-g-MAH-HTBN嵌段共聚物。研究发现，接枝HTBN能显著改善PP的低温冲击韧性，PP-g-MAH-HTBN的-40℃冲击强度达到了45 kJ/m²，远高于纯PP的2.6 kJ/m²。分析表明，HTBN柔性链段赋予了PP更多自由体积，提高了PP分子链的运动能力，从而增强了PP在低温下的抗冲击能力。

除了提高PP韧性，接枝改性对PP的电学性能也有重要影响。在PP链上接枝4-甲基苯乙烯(PMS)，发现PMS的加入能提高PP的介电常数和击穿强度。当PMS接枝量为5 wt%时，PP的介电常数从2.4提高到3.1，击穿强度从37.5kV/mm提高到45.8kV/mm。研究认为，PMS大π键能产生更多的诱导偶极，提高了PP的极化强度，从而改善了其介电性能。

（四）β成核剂改性

β成核剂是一类能诱导聚丙烯形成β晶型的添加剂，常见的β成核剂包括稀土有机化合物、焦磷酸钙、β-石英等。β晶型聚丙烯具有比α晶型更大的分子链间距和更低的堆积密度，因此表现出更优异的抗冲击性能。当焦磷酸钙添加量为1.5 wt%时，聚丙烯的β晶含量从0提高到了34.7%，材料的缺口冲击强度从2.7 kJ/m²大幅提升到11.3 kJ/m²，提高了3倍多。进一步的机理分析表明，β晶比α晶具有更高的位错密度和更多的晶间缺陷，在受到冲击载荷时能诱导更多的屈服变形和塑性形变，大大提高了材料吸收冲击能量的能力，从而显著改善了韧性^[3]。

（五）动态硫化改性

动态硫化是指在聚丙烯熔融加工过程中加入过氧化物交联剂和助剂，使聚丙烯在高温、高剪切条件下发生交联反应，从而制备兼具热塑性和弹性的热塑性弹性体聚丙烯(简称PP-TPV)。以PP/EPDM共混物为原料，过氧化二异丙苯为交联剂，采用动态硫化方法制备了PP/EPDM TPV材料。研究发现，随着交联EPDM含量的提高，TPV的力学性能明显改善。当交联EPDM含量为30%时，TPV的拉伸强度达到15.7 MPa，断裂伸长率高达618%，远远超过了PP/EPDM简单共混物。形态结构分析表明，在动态硫化过程中EPDM相发生选择性交联，形成连续的橡胶弹性网络结构^[4]。这种交联网络不仅能增强PP基体，还能有效吸收和耗散外力作用下的应力，从而大大提高了材料的强度和韧性。

（六）工业化生产案例

陕西延长石油榆林能源化工股份有限公司的聚丙烯(二线)装置采用了INEOS专利技术的Innovene气相法聚丙烯工艺，设计年产能为30万吨，年操作时长8000小时，每小时生产能力达到37.5吨。该装置能够生产包括均聚物、无规共聚物以及抗冲共聚物在内的全系列聚丙烯原色粒料产品。此次生产的环保型聚丙烯绝缘材料正是基于这一先进的INEOS Innovene气相法聚丙烯工艺，致力于打造高品质的环保型电缆绝缘材料。该生产工艺以其高效性、环保性和产品质量稳定性而著称，在整个制备过程中扮演着关键角色。催化剂的选择对于聚丙烯电缆绝缘材料性能至关重要，因此我们特别选用了专为此工艺设计的催化剂，这种催化剂使用非邻苯内给电子体，能够生成颗粒形态优良、接近球形的产品，粉料粒度分布集中且细粉含量低，确保了树脂产品的高规格度和良好的氢调性能。在抗冲共聚段中，粉料不会出现粘连或结块现象，橡胶相在聚合物中的均匀分布进一步增强了材料的综合性能。此外，催化剂孔道结构均匀，内部空间可容纳大量橡胶相聚合物，非常适合制造超高橡胶含量的树脂产品。同时，为了优化多相共聚工艺，我们还采用了一种特殊的助剂，这种助剂能够在丙烯与乙丙橡胶的多相共聚过程中实现同步交联聚合，从而制备出高熔体强度的抗冲聚丙烯。通过在聚丙烯、乙丙橡胶及其界面处构建多重H型支化结构，解决了随着乙丙橡胶比例增加而导致电气绝缘性能下降的问题，实现了直接聚合制备高性能聚丙烯基电缆绝缘材料的目标。这不仅提高了聚丙烯树脂在熔融混合过程中的流动性和

加工性能，也为后续工序打下了坚实的基础。在挤压造粒阶段，精确控制聚丙烯粉料与各类添加剂的比例，并将其投入熔融混合机中进行精细调配，严格管理筒体温度、切粒水温及其他挤压参数，以确保各组分间的充分融合，从而保证材料性能的一致性。随后，经过细致混合的物料进入挤压机，在挤出过程中严密监控挤出速度与冷却速率，利用螺杆的旋转及推力作用使物料在模具中精确成型，赋予绝缘材料卓越的机械性能和电学性能。这一过程不仅体现了对产品质量的高度重视，也彰显了公司在环保型材料领域的技术实力和发展潜力。

三、展望

聚丙烯基高性能电缆绝缘材料是高压电力传输领域的关键基础材料，对于提高输电效率、保障电网安全稳定运行具有重要意义。未来应重点关注以下几个方面：

（一）协同增强改性

采用填充、共混、接枝等多种改性手段的协同作用，可在更大程度上提升PP材料的综合性能。比如将填料表面接枝极性基团再填充到PP中，填料不仅起到增强作用，其表面基团还能提高PP的介电性能。因此，亟需开展PP复合改性的协同机制及调控方法研究。

（二）改性工艺优化

目前PP改性主要采用熔融共混和化学接枝等方法，存在分散性差、接枝率低等问题。水相悬浮接枝、固相机械化学改性等新型PP改性技术有望克服这些不足。需要系统开展改性工艺参数对PP结构与性能的影响规律研究，建立性能导向的改性工艺优化设计方法。

（三）绝缘结构设计

电缆绝缘层的结构设计对其电场分布、散热性能等有重要影响。采用功能梯度材料、多层绝缘结构能有效均化电场，改善电缆的散热和抗电老化性能。需要系统开展PP基多层复合绝缘结构的界面效应、老化机理及性

能演变规律研究。

（四）全生命周期评估

充分发挥PP材料可回收、低碳环保的优势，开展PP电缆的全生命周期过程评估，建立覆盖材料制备、电缆生产、运行、报废全过程的生态设计、清洁生产、回收利用技术体系，推动PP电缆的规模化应用和产业化发展。

结语

聚丙烯基电缆绝缘材料改性是一项涉及多学科交叉的综合性研究课题。近年来，填充改性、共混改性、化学接枝、 β 成核、动态硫化等多种改性方法均取得了可喜的研究进展，极大地促进了聚丙烯电缆料性能的提升。但在实际应用中，改性聚丙烯材料的综合性能与稳定性、工业化制备与加工性能等方面还存在不足。未来，亟需在多组分协同增强、结构性能演变机理、加工工艺优化等方面开展深入研究，为我国特高压输电和新型电网建设提供坚实的材料基础。

参考文献

- [1] 赵明伟, 马天祥, 李丹, 等. 硅橡胶绝缘材料温度及场强依赖特性对XLPE绝缘直流电缆预制接头内电场分布的影响[J]. 绝缘材料, 2024, 57(12): 58-65.
- [2] 张润博, 殷悦, 遇家运. 树脂基纤维增强复合材料在绝缘领域的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2024, 41(04): 60-66.
- [3] 黄博, 杨铭远, 聂永杰, 等. 绝缘材料热老化对电缆终端接头典型缺陷处电场畸变的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 124-132.
- [4] 周远翔, 黄继宇, 陈健宁, 等. 低频电压下XLPE绝缘材料电老化性能研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(01): 1-10.