

纳米填料对聚合物绝缘材料性能的影响及应用探索

王金梅 张莹 季哲

南通东泰电工器材有限公司, 江苏省启东市, 226200;

摘要: 随着电力系统朝着高电压、大容量的方向不断发展, 对聚合物绝缘材料的性能提出了更为严苛的要求。纳米填料的引入为提升聚合物绝缘材料的综合性能开辟了全新路径。本文深入剖析了纳米填料对聚合物绝缘材料性能的影响机制, 涵盖了电气性能、机械性能和热性能等多个方面, 并详细介绍了在不同领域的应用实例, 同时对未来的发展趋势进行了展望, 旨在为推动纳米复合绝缘材料的进一步发展和广泛应用提供有力的理论支持。

关键词: 纳米填料; 聚合物绝缘材料; 性能影响; 应用探索

DOI: 10.69979/3041-0673.25.12.095

引言

聚合物绝缘材料凭借优良的电气绝缘性、加工性及成本优势, 在电力、电子等领域应用广泛。但在高电压、大电流及复杂环境等严苛工况下, 其电气、机械及热性能的局限性凸显: 如高压输电电缆绝缘易因电场强度高而发生击穿, 高温环境下机械强度下降导致设备可靠性降低。纳米技术的突破为解决上述问题提供了新方案。通过向聚合物基体中引入纳米填料制备的纳米复合绝缘材料, 可借助纳米粒子的小尺寸效应、高比表面积效应等特性, 显著优化聚合物绝缘材料的综合性能, 现已成为绝缘材料领域的研究热点, 应用前景广阔。

1 纳米填料提升绝缘材料性能的作用机理

1.1 表面效应与界面强化

纳米颗粒 (如 SiO_2 、 Al_2O_3 等) 具有巨大的比表面积, 这使得它们能够与聚合物基体形成强大的界面结合。一方面, 纳米颗粒表面存在丰富的活性位点, 这些活性位点能够与高分子链通过氢键或范德华力相互作用。这种相互作用能够有效地抑制分子链段的运动, 进而提高聚合物的玻璃化转变温度。例如, 在关于纳米 SiO_2 改性聚乙烯的研究中发现, 随着纳米 SiO_2 含量的增加, 聚乙烯的玻璃化转变温度逐渐升高, 材料的耐热性能得到了明显改善。另一方面, 纳米颗粒在聚合物基体中能够形成三维网络结构, 这种结构能够有效地阻断裂纹的扩展, 从而提高材料的机械性能。当材料受到外力作用时, 纳米颗粒能够分散应力, 阻止裂纹的进一步发展, 使得材料的拉伸强度和断裂韧性得到显著提升^[1]。

1.2 体积效应与缺陷修复

纳米颗粒的尺寸通常小于 100nm, 这一尺寸优势使

其能够填充到微米级填料无法进入的微观缺陷中。在聚合物基体的制备过程中, 由于各种因素的影响, 内部往往存在一些微孔、裂纹等缺陷。这些缺陷会成为电场集中的区域, 降低材料的电气性能。纳米颗粒能够有效地修复这些微观缺陷, 使材料的内部结构更加均匀。通过填充缺陷, 纳米颗粒能够均匀化电场分布, 降低局部放电的概率。研究表明, 在纳米复合绝缘材料中, 局部放电起始电压明显提高, 放电强度显著降低, 从而提高了材料的绝缘可靠性^[2]。

2 纳米填料对聚合物绝缘材料性能的影响

2.1 电气性能

适量纳米填料能显著提升聚合物绝缘材料的电气性能。在击穿强度方面, 以交联聚乙烯添加 5wt% SiO_2 为例, 其击穿场强可提升 18%, 原因在于纳米填料与基体的强界面结合阻碍电子运动、修复缺陷减少电场集中点, 以及形成三维网络结构分散电场。纳米填料对介电常数和介电损耗影响显著。根据相关理论, 复合绝缘材料的介电常数可通过公式计算。低体积分数 ($\phi < 7\%$) 时, 合理调控能抑制介电损耗增加; 高体积分数 ($\phi > 10\%$) 时, 可提升耐电晕性能, 如聚酰亚胺 / 纳米 TiO_2 复合薄膜, 随 TiO_2 含量增加, 介电常数增大, 介电损耗在一定范围稳定。此外, 纳米填料能改善空间电荷特性^[3]。

2.2 机械性能

纳米填料能显著改善聚合物绝缘材料的机械性能。在拉伸强度和断裂韧性方面, 如 SiO_2 / Al_2O_3 复合体系 (3:1 配比), 拉伸强度可提升 25%。这是因为纳米填料与基体形成强界面结合能有效传递应力, 避免应力集中, 其三维网络结构还能阻止裂纹扩展, 增加裂纹扩

展的路径和能量消耗。对电力电缆绝缘层而言,可增强抗机械损伤能力,延长使用寿命。此外,纳米填料能提高材料的硬度和耐磨性。高硬度的纳米颗粒均匀分散在基体中可作增强相提升整体硬度,比如环氧树脂中添加纳米 SiC 后硬度明显增加;同时,它能减少聚合物分子链相对滑动,降低摩擦时的磨损。这对电机电刷与换向器间等需承受摩擦的绝缘部件,可减少磨损,提高设备运行的可靠性和稳定性。

2.3 热性能

纳米填料能显著提升聚合物绝缘材料的热性能。在热稳定性方面,以 Al_2O_3 为例,其高导热性可改善散热,降低内部温度梯度,减少热降解,使材料热分解温度提高,这对变压器等高温设备的可靠性和寿命有益。同时,纳米填料能提高材料热导率。像氮化硼、碳化硅等可在基体中形成导热通路,例如添加一定量氮化硼纳米片后,热导率可提升数倍。这有助于解决电子器件因集成度提高带来的散热问题,保障其在正常温度下工作,提升性能与可靠性^[4]。

3 典型纳米填料改性聚合物绝缘材料的案例分析

3.1 SiO_2 改性 XLPE 电缆绝缘材料

在电力电缆领域,XLPE 是一种广泛应用的绝缘材料。然而,随着电网电压等级的不断提高和输电容量的不断增大,XLPE 的性能面临着严峻挑战。将 SiO_2 纳米填料添加到 XLPE 中,能够有效提升其综合性能。 SiO_2 纳米颗粒表面富含羟基,这些羟基能够与 XLPE 分子链之间形成氢键等相互作用,增强界面结合力。实验结果表明,添加 5wt% 的 SiO_2 纳米填料后,XLPE 的击穿场强提升了 18%,同时其拉伸强度也有所提高。这使得改性后的 XLPE 电缆绝缘材料能够更好地承受高电压和大电流,提高了电缆的输电安全性和可靠性。在实际电网运行中,采用 SiO_2 改性 XLPE 绝缘的电缆,其故障率明显降低,有效减少了停电事故的发生。

3.2 Al_2O_3 改性环氧树脂在电气设备绝缘中的应用

环氧树脂具有良好的电气绝缘性能、粘结性能和加工性能,在电气设备绝缘领域应用广泛。但环氧树脂的热稳定性和机械性能有待进一步提高。通过添加 Al_2O_3 纳米填料,可以显著改善环氧树脂的性能。 Al_2O_3 纳米填料的高导热系数使得环氧树脂基复合材料的热导率提高,热稳定性增强。同时, Al_2O_3 纳米颗粒与

环氧树脂基体之间的强界面结合能够有效提高材料的机械性能。例如,在某高压开关设备的绝缘外壳中,采用 Al_2O_3 改性环氧树脂材料后,外壳的机械强度提高,能够更好地承受设备运行过程中的机械应力。此外,由于热稳定性的提升,在高温环境下设备的绝缘性能更加可靠,减少了因温度过高导致的绝缘故障风险。

3.3 氮化硼纳米片增强聚合物基复合材料用于电子器件散热

在电子器件领域,随着芯片性能的不不断提升,散热问题成为制约器件发展的关键因素之一。将氮化硼纳米片添加到聚合物基体中制备的复合材料,具有优异的热导率和良好的绝缘性能,在电子器件散热方面具有广阔的应用前景。氮化硼纳米片具有较高的平面热导率,在聚合物基体中能够形成有效的导热通路。当在聚酰亚胺基体中添加适量的氮化硼纳米片后,复合材料的热导率相比纯聚酰亚胺大幅提高。在实际应用中,将这种复合材料作为电子芯片的散热基板,能够快速将芯片产生的热量传递出去,使芯片工作温度降低,从而提高芯片的性能和稳定性,延长芯片的使用寿命。

4 纳米填料在聚合物绝缘材料中的应用现状与挑战

4.1 应用现状

目前,纳米复合绝缘材料在电力、电子、航空航天等多个领域已得到了一定程度的应用。在电力领域,纳米改性的电缆绝缘材料、变压器绝缘油等产品已开始逐步推广应用。例如,一些电力公司采用了纳米 SiO_2 改性的 XLPE 电缆,提高了输电线路的可靠性和稳定性。在电子领域,纳米复合绝缘材料被广泛应用于电子器件的封装、印刷电路板等方面。例如,含有纳米填料的环氧树脂基封装材料能够提高电子器件的散热性能和机械保护性能。在航空航天领域,纳米复合绝缘材料因其优异的性能,被用于制造飞行器的电气绝缘部件,如发动机的绝缘涂层、电缆的绝缘层等,能够有效减轻部件重量,提高飞行器的性能。

4.2 面临的挑战

纳米填料因高比表面积和表面能,易在聚合物基体中团聚,反而成为缺陷降低材料性能。现有机机械分散、超声分散、表面改性等方法存在局限,如前两者难实现大规模生产中的均匀分散,后者过程复杂、成本高,故开发高效低成本的分散技术是重要挑战。纳米填料与聚合物基体的界面稳定性影响材料长期性能,在温度、湿

度、电场等作用下,界面结合力可能下降,例如湿热环境下界面可能水解脱粘,导致绝缘和机械性能下降,因此提高界面稳定性以保障长期服役性能是关键问题。纳米填料制备成本较高,且为实现良好分散和界面结合需复杂工艺与昂贵试剂,进一步增加成本,这限制了纳米复合绝缘材料的大规模应用。降低成本、平衡性能与成本,是推动其广泛应用的重要前提。

5 未来发展趋势与展望

5.1 新型纳米填料的开发

未来,研究人员将致力于开发具有更优异性能的新型纳米填料。例如,开发具有特殊结构和功能的纳米粒子,如核壳结构、多孔结构的纳米填料。核壳结构的纳米填料可以通过设计不同的壳层和核层材料,实现对材料性能的精确调控。以制备具有高储能密度的聚合物复合电介质为例,可以设计一种核为高介电常数材料、壳为绝缘材料的核壳结构纳米填料,在提高材料介电常数的同时,有效抑制漏电流,提高材料的储能性能。此外,开发具有自修复功能的纳米填料也是一个重要的研究方向。当材料受到损伤时,自修复纳米填料能够自动修复材料内部的缺陷,恢复材料的性能,提高材料的使用寿命和可靠性。

5.2 纳米复合技术的创新

创新纳米复合技术,以实现纳米填料在聚合物基体中的更均匀分散和更强界面结合,将是未来的研究重点之一。例如,采用原位聚合技术,在聚合物单体聚合过程中引入纳米填料,使纳米填料能够在聚合过程中均匀分散在聚合物基体中,并与聚合物分子链形成化学键合,从而增强界面结合力。此外,利用 3D 打印技术制备纳米复合绝缘材料也是一个新兴的研究方向。通过 3D 打印技术,可以精确控制纳米填料在材料中的分布和取向,实现材料性能的定制化设计^[5]。

5.3 多场耦合下材料性能的研究

在实际应用中,聚合物绝缘材料往往会受到电场、磁场、温度场、机械应力场等多种场的耦合作用。因此,深入研究多场耦合下纳米复合绝缘材料的性能变化规律,建立相应的性能预测模型,对于材料的合理设计和应用具有重要意义。例如,在高压电机运行过程中,绝

缘材料不仅要承受高电场强度,还要承受电机运转产生的机械振动和温度变化。通过研究电场、温度场和机械应力场耦合作用下纳米复合绝缘材料的性能变化,能够为高压电机绝缘材料的选型和优化提供理论依据。未来,需要进一步加强多场耦合实验设备的研发和多物理场数值模拟方法的研究,以深入揭示多场耦合下纳米复合绝缘材料的性能演变机制。

6 结论

综上所述,纳米填料是提升聚合物绝缘材料性能的有效途径,通过表面效应、界面强化等机理,能显著改善其电气、机械和热性能,像 SiO₂ 改性 XLPE 电缆绝缘等案例体现了其优势与潜力。不过,它仍面临纳米填料分散、界面稳定性及成本等挑战。未来,随着新型填料开发、复合技术创新及多场耦合性能研究深入,这类材料有望在更多领域广泛应用,为相关技术发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]隋洋. 纳米填料对聚合物基体降黏机理的研究进展[J/OL]. 石油化工,1-6[2025-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2361.TQ.20250627.0959.012.html>.
- [2]张文强. 不同相结构高效绿色纳米填料对 P(VDF-HFP) 聚合物电介质储能性能研究[D]. 杭州电子科技大学,2024. DOI:10.27075/d.cnki.ghzdc.2024.001026.
- [3]殷霄飞,王辉,陈柏旭,等. 复合型聚合物电解质纳米填料研究进展[J]. 化工新型材料,2024,52(01):13-17. DOI:10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2024.01.001.
- [4]董丽杰,潘萌,冯锐,等. 高性能聚合物电介质薄膜研究进展[J]. 长春工业大学学报,2025,46(03):200-206. DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2025.3.02.
- [5]周磊,闫旭,郝斌,等. 阻燃、防火硅橡胶复合材料的研究进展[J]. 有机硅材料,2025,39(02):79-90.

作者简介:王金梅,1982 年 2 月 15 日,女,汉族,江苏省海安市墩头镇,本科,中级工程师,研究方向:复合绝缘材料。