

新型电力变压器的绝缘材料与性能研究

李 俊 宋兆文

特变电工沈阳变压器集团有限公司 辽宁 沈阳 116600

摘 要：电力变压器作为电网核心设备，其绝缘材料的性能直接决定运行稳定性与寿命。本文聚焦新型绝缘材料体系，系统梳理固体、液体、气体及复合绝缘材料的分子设计机制与核心特性，解析绝缘强度、热导率、耐老化等关键性能指标的调控路径，揭示材料组分、制备工艺、使用环境与结构-性能的关联机制。结合不同电压等级变压器的运行需求，提出绝缘材料在特高压、中高压及低压场景的适配策略，并从材料改性、工艺优化、结构设计及技术融合维度探讨应用优化方向，为电力设备绝缘技术升级提供理论支撑。

关键词：新型绝缘材料；电力变压器；性能指标；结构优化；应用适配

引言：随着电力系统向特高压、大容量及智能化方向发展，传统绝缘材料在电气强度、热稳定性及环境适应性方面的局限性日益凸显。新型绝缘材料通过分子结构优化、组分协同设计及复合体系构建，在提升绝缘性能、延长使用寿命及降低环境影响方面展现出显著优势。本文从材料分类与特性出发，系统分析新型绝缘材料的关键性能指标及其影响因素，结合不同类型变压器的运行需求，探讨绝缘材料的应用适配方向与优化路径，为电力设备绝缘技术的创新发展提供参考。

1 新型电力变压器绝缘材料的分类与核心特性

1.1 固体绝缘材料

新型环氧类绝缘材料依托分子结构的优化设计，形成稳定的交联网络结构，其分子链段的规整排布有效提升材料内部的电荷束缚能力，在长期电场作用下可维持较低的电荷迁移率。这类材料通过改性工艺引入功能性基团，调节分子间作用力，进一步优化材料的物理与电气属性，成为高压电力变压器中承担主绝缘功能的核心载体之一。新型聚酰亚胺类绝缘材料凭借分子主链中酰亚胺环的刚性结构，展现出优异的热稳定性与机械强度，酰亚胺环的共轭结构赋予材料良好的耐电晕性能，可在高温环境中持续保持绝缘界面的完整性，适配变压器运行过程中多工况下的温度变化需求^[1]。其他新型固体绝缘材料则围绕材料组分的多元化展开研发，通过无机填料与有机基体的协同作用，弥补单一材料在性能维度的短板，逐步形成适配不同电压等级变压器的固体绝缘材料体系。

1.2 液体绝缘材料

新型环保绝缘油以可再生天然物质为基础，通过精炼工艺去除杂质与不稳定组分，保留其优良的绝缘与散热特性，这类材料在降解过程中对环境的影响程度显著

低于传统绝缘介质，契合电力行业绿色发展的整体导向。新型合成绝缘液体依托有机合成技术，精准调控分子链的支化结构与分子量分布，实现绝缘性能与流动特性的平衡，其分子结构的定制化设计可针对性满足特高压变压器等复杂工况的使用需求，成为液体绝缘材料领域技术创新的重要方向。

1.3 气体绝缘材料

新型SF₆替代气体绝缘材料围绕分子结构的电子亲和力与灭弧性能展开优化，通过引入氟化物基团与惰性气体组分的组合设计，替代传统SF₆气体的高绝缘与灭弧特性，同时大幅降低材料的全球变暖潜能值，实现绝缘性能与环保属性的统一。其他新型气体绝缘介质则聚焦于混合气体的配比调控，基于不同气体分子的物理化学特性互补，构建多元气体绝缘体系，通过气体分子间的相互作用优化绝缘强度与击穿特性，为气体绝缘电力变压器的小型化与轻量化发展提供技术支撑。

1.4 复合绝缘材料

固-液复合绝缘材料通过固体绝缘基材的孔隙结构调控，与液体绝缘介质的浸润性匹配，构建连续的绝缘相界面，液体介质可填充固体材料的微观缺陷，抑制局部电场集中，固体基材则为复合体系提供机械支撑，二者形成性能互补的协同体系，有效提升整体绝缘结构的稳定性。固-气复合绝缘材料依托固体基体的多孔结构与气体介质的绝缘特性，通过界面改性技术增强固气两相的结合强度，避免界面电荷积聚引发的绝缘失效问题，其结构设计可灵活适配变压器不同部位的绝缘需求，成为新型绝缘材料体系中拓展性较强的研究分支。

2 新型绝缘材料的关键性能指标

2.1 电气性能

2.1.1 绝缘强度

绝缘强度是衡量新型绝缘材料抵御电场击穿能力的核心电气参数,由材料内部分子结构、缺陷密度及界面特性共同决定。依据电气绝缘材料测试标准,绝缘强度通过击穿电场强度表征,材料内部杂质、气泡及分子链缺陷会显著降低击穿电场强度,优质新型绝缘材料需通过组分优化与制备工艺管控,减少内部缺陷,提升电场耐受能力,满足电力变压器长期高压运行的绝缘需求。

2.1.2 介电常数与介电损耗

介电常数反映绝缘材料储存电场能量的能力,介电损耗则体现材料在电场作用下能量转化的损耗程度,二者直接关联变压器运行效率与绝缘可靠性。介电常数需与变压器绕组、铁芯等部件特性匹配,避免局部电场集中;介电损耗的大小与材料分子极化特性相关,新型绝缘材料通过分子结构改性,调控极化速率,降低电场作用下的能量损耗,适配高压、高频运行工况。

2.1.3 耐电晕性能

耐电晕性能指绝缘材料在局部强电场作用下抵御电晕放电侵蚀的能力,电晕放电产生的臭氧、高能粒子会破坏材料表面及内部结构,引发绝缘老化失效。新型绝缘材料通过引入抗电晕基团或优化表面结构,抑制电晕放电的产生与发展,延缓材料老化进程,延长绝缘使用寿命,适配变压器绕组端部等易产生电晕的关键部位使用需求。

2.2 热性能

2.2.1 耐热温度

耐热温度界定绝缘材料长期稳定运行的最高温度阈值,超过该阈值会导致材料分子链断裂、结构破坏,进而丧失绝缘性能^[2]。新型绝缘材料通过分子结构设计与改性,提升分子链的热稳定性,不同类型绝缘材料依据GB/T11026系列标准划分耐热等级,其耐热温度需匹配变压器运行过程中的最高工作温度,保障长期运行安全性。

2.2.2 热导率

热导率表征绝缘材料传递热量的能力,直接影响变压器的散热效率与运行温度控制。新型绝缘材料通过添加高导热填料或优化材料微观结构,提升热导率,加速变压器内部热量传递,避免局部温度过高引发绝缘老化,尤其适配特高压、大容量变压器的散热需求,平衡绝缘性能与散热效率。

2.2.3 热稳定性

热稳定性指绝缘材料在长期高温环境下保持自身物理化学性能不变的能力,主要取决于分子链的键能与交联程度。新型绝缘材料通过交联改性、引入耐热基团等方式,增强分子链的抗热断裂能力,减少高温下的热分

解与氧化反应,确保在变压器全生命周期内维持稳定的绝缘性能,降低热老化引发的故障风险。

2.3 机械性能

2.3.1 硬度与强度

硬度与强度决定绝缘材料抵御外部机械冲击、挤压的能力,是保障变压器绝缘结构完整性的重要指标。硬度反映材料表面抵抗变形的能力,强度则体现材料抵御断裂、破损的能力,新型绝缘材料通过组分调控与工艺优化,实现硬度与强度的合理匹配,避免运输、安装及运行过程中因机械应力导致的绝缘破损。

2.3.2 韧性与耐磨性

韧性体现绝缘材料承受冲击载荷时的抗断裂能力,耐磨性则反映材料表面抵抗摩擦损耗的性能。新型绝缘材料通过引入柔性基团或增强相,提升材料韧性,避免脆性断裂;同时优化表面结构,降低摩擦系数,减少运行过程中与其他部件接触产生的磨损,延长绝缘结构使用寿命。

2.3.3 尺寸稳定性

尺寸稳定性指绝缘材料在温度变化、湿度波动及长期受力情况下,保持自身尺寸不变的能力。尺寸变形会导致绝缘结构间隙变化,引发电场集中,新型绝缘材料通过优化分子结构与成型工艺,降低热膨胀系数与吸湿变形率,确保在不同工况下维持稳定尺寸,保障绝缘结构的密封性与可靠性。

2.4 环境适应性

2.4.1 耐湿性

耐湿性指绝缘材料抵御水分侵蚀的能力,水分会降低材料绝缘性能,引发内部放电与腐蚀。新型绝缘材料通过表面疏水改性或内部结构优化,减少水分吸附与渗透,即使在潮湿环境中也能维持稳定绝缘性能,适配户外、潮湿地区等复杂运行环境下的变压器使用需求。

2.4.2 耐化学腐蚀性

耐化学腐蚀性体现绝缘材料抵御酸碱、油污、臭氧等化学物质侵蚀的能力,化学物质会破坏材料分子结构,导致绝缘性能劣化。新型绝缘材料通过分子改性提升化学稳定性,抵御各类化学介质侵蚀,避免与变压器油、外部环境中的化学物质发生反应,保障绝缘性能长期稳定。

2.4.3 耐老化性能

耐老化性能指绝缘材料在光、热、电场、湿度等综合环境因素作用下,长期维持自身性能的能力。新型绝缘材料通过添加抗老化剂、优化分子结构,延缓光氧化、热氧化及电老化进程,减少性能衰减,确保材料使用寿命与变压器全生命周期匹配,降低绝缘老化引发的安全隐患。

3 影响新型绝缘材料性能的关键因素

3.1 材料组分影响

材料组分是决定新型绝缘材料基础性能的核心前提,组分种类、配比及纯度直接调控材料的物理化学与电气特性。有机组分的分子结构的差异的会影响材料介电性能与热稳定性,无机组分的添加比例则关联材料机械强度与导热能力^[3]。依据绝缘材料组分设计理论,组分间的协同作用可弥补单一组分性能短板,而组分中微量杂质会破坏分子链规整性,降低绝缘强度与稳定性,需通过精准调控组分配比、提升组分纯度,实现材料性能优化。

3.2 制备工艺参数影响

制备工艺参数贯穿材料成型全过程,直接影响材料内部结构完整性与性能均一性。成型温度、压力及保温时间的细微变化,会改变材料分子交联程度与微观缺陷密度,进而影响绝缘强度与热稳定性;混合、搅拌及固化工艺的合理性,决定组分分散均匀性,避免局部组分聚集引发的性能波动。参考电气绝缘材料制备工艺规范,精准控制各环节工艺参数,可减少内部气泡、裂纹等缺陷,保障材料性能稳定达标。

3.3 使用环境因素影响

使用环境中的温度、湿度、化学介质及电场强度,长期作用于新型绝缘材料会引发性能劣化。环境温度过高会加速分子链热分解,湿度超标会导致水分渗透,降低绝缘性能;酸碱、臭氧等化学介质会破坏分子结构,强电场则易引发局部放电,加剧材料老化。结合电力变压器运行环境特性,环境因素的综合作用会缩短材料使用寿命,需针对性优化材料环境适应性,抵御各类环境因素侵蚀。

3.4 材料结构与性能的关联

材料结构涵盖宏观结构与微观结构,与性能形成紧密的内在关联,结构的合理性直接决定性能表现。微观层面,分子链的规整度、交联程度及化学键类型,决定材料介电性能、热稳定性与机械强度;宏观层面,材料孔隙率、表面平整度及界面结合状态,影响电场分布与应力传递,避免局部电场集中与机械应力破损。基于材料结构-性能关系理论,通过优化材料微观结构、调控宏观形态,可实现性能精准匹配变压器运行需求。

4 新型绝缘材料在电力变压器中的应用方向

4.1 不同类型变压器的绝缘材料适配方向

新型绝缘材料在电力变压器体系内的应用布局,围绕变压器的电压等级、结构特征及运行场景展开精准匹配。特高压变压器对绝缘介质的电气强度与热稳定性提出严苛要求,固体绝缘材料需构建致密的交联结构,以

承受长期极端电场负荷,液体绝缘材料则侧重绝缘性能与流动特性的平衡,保障大容量工况下的散热与绝缘可靠性^[4]。中高压变压器的应用场景更强调经济性与实用性的统一,固体绝缘材料可通过轻量化设计降低整体负载,液体绝缘材料聚焦环保属性与使用寿命的协同,适配电网分布式接入的发展需求。低压电力变压器则注重绝缘材料的机械性能与加工效率,固体绝缘材料凭借优异的尺寸稳定性保障绕组结构完整性,液体绝缘材料通过简化配方体系提升运行维护便捷性,满足工业与民用配电场景的多样化使用需求。

4.2 绝缘材料的应用优化方向

绝缘材料的应用优化围绕性能提升、寿命延长与成本控制三大核心维度推进,形成系统性的改进路径。材料层面的优化可通过分子结构改性引入功能性基团,强化电气与热机械性能的协同效应,适配变压器全生命周期内的工况变化。工艺层面的优化聚焦制备流程的精准调控,细化成型温度、压力及固化时间等参数,减少微观缺陷生成,提升材料性能均一性与批次稳定性。应用场景层面的优化依托绝缘结构的创新设计,通过复合绝缘体系的构建实现不同介质的优势互补,优化电场分布与应力传递,拓展材料的适用边界。技术体系的优化则融合材料科学与电气工程的交叉研究,推动新型绝缘材料与变压器设计理念的深度融合,提升设备运行的安全性与经济性,支撑电力系统向高效化与智能化方向发展。

结束语

新型电力变压器绝缘材料的研究与应用是推动电力行业发展的关键环节。通过对绝缘材料分类、特性、性能指标及影响因素的深入分析,明确了不同类型变压器绝缘材料的适配方向与应用优化路径。在实际应用中,需综合考虑材料性能、制备工艺、使用环境等多方面因素,不断优化材料性能与应用方案,以提升电力变压器运行的安全性与可靠性,促进电力行业的高质量发展,为构建安全、高效、绿色的电力系统奠定坚实基础。

参考文献

- [1]朱国辉.基于新型绝缘材料的变压器绝缘性能试验优化[J].中国新技术新产品,2025(16):71-73.
- [2]桑旺,卢琴,王志同,等.新能效电力变压器的优化策略[J].变压器,2024,61(08):2832.
- [3]梁苏宁.植物油与固体绝缘材料在电力变压器中的相容性研究[J].《高压电器》,2024,(4):17-23.
- [4]张思明.电力变压器用高性能电工绝缘纸板存储时间与性能关系研究[J].《变压器》,2025,(3):46-52.