

绝缘材料的热稳定性研究及其在电气设备中的应用

季哲 王金梅 张莹

南通东泰电工器材有限公司，江苏省启东市，226200；

摘要：绝缘材料作为电气设备的核心组成部分，其热稳定性直接关系到设备的安全运行与使用寿命。本文系统探讨绝缘材料热稳定性的影响因素、评价指标及研究方法，深入分析热老化机制，结合实际案例阐述其在变压器、高压电机等电气设备中的应用，引入相关公式辅助说明，并对提升热稳定性的技术路径与未来发展趋势进行展望，为电气设备绝缘系统的优化设计提供参考。

关键词：绝缘材料；热稳定性；热老化；电气设备；应用案例

DOI：10.69979/3060-8767.25.12.026

引言

在电力系统与电气设备运行过程中，绝缘材料长期处于电场、温度、机械应力等多因素耦合作用的复杂环境中，其中温度是导致绝缘性能劣化的关键因素。统计显示，超 50% 的电气设备故障源于绝缘材料热老化失效。随着电力系统向高电压、大容量、高集成化发展，设备损耗与发热问题加剧，对绝缘材料热稳定性要求更严苛。绝缘材料热稳定性即长期高温下保持力学与电气绝缘等核心性能稳定的能力。研究其热稳定性、揭示热老化规律、开发高耐热材料及优化散热设计，对提升设备可靠性、降低运维成本意义重大。本文从基础理论出发，结合应用场景，全面剖析其研究现状与应用实践。

1 绝缘材料热稳定性的影响因素与评价指标

1.1 影响热稳定性的关键因素

分子结构是决定绝缘材料热稳定性的内在核心因素。聚合物绝缘材料的分子链结构直接影响其耐热性能。例如，含芳香环、杂环结构的聚合物比脂肪族聚合物具有更高的热稳定性，这是由于芳香环的共轭结构使分子链刚性增强，抗热断裂能力提升。交联密度对热稳定性也存在显著影响。适度交联可通过限制分子链运动提高材料的耐热性，但过度交联会导致材料脆性增加^[1]。

温度是影响热稳定性的最直接外部因素。根据阿伦尼乌斯定律，温度每升高 10°C，绝缘材料的老化速率可增加 1-3 倍，其热老化速率公式为：

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

式中， k 为老化速率常数， A 为指前因子， E_a 为老化活化能， R 为气体常数， T 为绝对温度。该公式定量描述了温度对老化速率的指级数影响。此外，氧气、湿度与污染物也会加速热老

化进程。氧气参与氧化反应导致分子链断裂，湿度会促进水解反应，而灰尘、盐分等污染物可作为催化剂降低热老化活化能。

抗氧化剂、热稳定剂等添加剂可有效延缓热老化。抗氧化剂通过捕获自由基中断氧化链式反应，其效率与添加量存在临界关系：当添加量超过 0.5wt% 后，热稳定性提升趋缓。纳米填料（如 Al_2O_3 、 SiO_2 ）通过界面效应阻碍热量传递与分子链运动，实验表明，添加 5wt% 的纳米 Al_2O_3 可使环氧树脂的热分解温度提高 15-20°C^[2]。

1.2 热稳定性评价指标

热分解温度是材料重量损失 5% 时的温度，通过热重分析 (TGA) 测定。例如，普通环氧树脂的 T_d 约为 350°C，而添加纳米氮化硼后可提升至 380°C 以上。RTI 表示材料在长期使用中保持关键性能（如绝缘电阻、拉伸强度）不低于初始值 50% 的最高温度，是电气设备设计的重要参数。如聚酰亚胺薄膜的 RTI 可达 220°C，而聚酯薄膜仅为 130°C。OIT 通过差示扫描量热法 (DSC) 测定，反映材料抵抗热氧化的能力。OIT 越长，热稳定性越好。变压器油的 OIT 通常需大于 30 分钟，否则需更换抗氧化剂^[3]。

2 绝缘材料热老化机制与研究方法

2.1 热老化的微观机制

高温下，聚合物分子链的共价键发生断裂，形成自由基并引发连锁反应。对于聚乙烯等饱和聚合物，主要发生 C-C 键断裂，反应式为 $-\text{(CH}_2\text{-CH}_2\text{)} - \xrightarrow{\Delta} -\text{(CH}_2\text{-CH}\cdot\text{)} + \cdot\text{CH}_2-$ 。断裂产生的自由基进一步与氧气反应生成过氧化物，导致分子链降解。而对于酚醛树脂等材料，高温会促进分子间交联，形成三维网状结构，使材料变硬变脆。

热老化过程中，材料内部的增塑剂、残留溶剂等小分子会逐渐挥发，导致材料硬化、收缩。同时，若设备中存在绝缘油等介质，高温可能使材料溶胀，引发体积电阻率下降。

2.2 热稳定性研究方法

通过提高温度加速老化进程，基于阿伦尼乌斯方程推算材料在正常使用条件下的寿命。试验温度通常选取材料 RTI 的 1.5~2 倍，公式如下：

$$L(T) = L_0 \exp\left(\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \text{ 其中，}$$

$L(T)$ 为温度 T 时的寿命， L_0 为参考温度 T_0 时的寿命。某研究对硅橡胶进行加速试验，在 180°C 下寿命为 500 小时，推算 25°C 下寿命可达 30 年以上。DMA 通过测定材料在不同温度下的储能模量 (E') 与损耗因子 ($\tan \delta$)，表征其力学性能随温度的变化。当温度接近玻璃化转变温度 (T_g) 时， E' 急剧下降， $\tan \delta$ 出现峰值。

高温会导致绝缘材料的介电常数 (ϵ') 与介电损耗 (ϵ'') 发生变化。通过监测宽频范围内的介电响应，可评估热老化程度。其关系表达式为：

$$\epsilon''(\omega, T) = \epsilon_0 \int_0^{\infty} \alpha(t, T) \exp(-i\omega t) dt$$

其中， $\alpha(t, T)$ 为温度相关的松弛函数， ω 为角频率。变压器绝缘纸在热老化后，1kHz 下的 ϵ'' 会从 0.01 增至 0.05 以上。

3 高耐热绝缘材料的类型与性能对比

3.1 有机聚合物绝缘材料

聚酰亚胺具有优异的综合性能，其重复单元含酰亚胺环结构，RTI 达 220°C，在 250°C 下可长期使用。玻璃化转变温度通常高于 300°C，800°C 时的残炭率超过 50%。某型号 PI 薄膜的性能参数为：拉伸强度 150MPa，体积电阻率 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ，介电强度 180MV/m，广泛应用于高温电机与航天器电缆。PEEK 是一种半结晶聚合物，具有良好的耐化学性与机械强度。其热变性温度为 260°C，RTI 为 180°C，介电常数 3.2 (1MHz)，介电损耗 0.002。在新能源汽车电机中，PEEK 绝缘部件可承受 150°C 的长期工作温度^[4]。

3.2 无机绝缘材料

氧化铝陶瓷 (Al_2O_3) 的热导率达 $30\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，绝缘电阻大于 $10^{14} \Omega$ ，击穿强度 15MV/m，可在 1000°C 以上使用。但脆性大、加工难，主要用于高压断路器的绝缘支柱。云母具有层状结构，耐热温度达 600°C，

击穿强度 20~30MV/m。将云母片用玻璃布补强并浸渍硅树脂，制成的云母带广泛用于发电机定子绝缘。

3.3 复合绝缘材料

通过添加纳米 BN、AlN 等填料，可同时提高环氧树脂的热导率与热稳定性。当 BN 含量为 20wt% 时，复合材料的热导率从 $0.2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增至 $1.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， T_g 从 350°C 提升至 380°C。该材料已用于风力发电机的绝缘封装。变压器用绝缘纸经环氧树脂浸渍后，形成致密的复合结构。其热导率从 $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高到 $0.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， T_g 从 80°C 升至 120°C，介损在 100°C 时仍低于 0.01。某 500kV 变压器采用该体系后，过载能力提升 20%。

3.4 性能对比与选型原则

不同绝缘材料的关键性能参数对比见表 1：

材料类型	长期工作温度 (°C)	热导率 W/m·K	介电强度 (MV/m)	典型应用
聚酰亚胺薄膜	220	0.17	180	高温电机
环氧树脂	150	0.2	20	变压器套管
氧化铝陶瓷	1000+	30	15	高压开关
云母带	180	0.25	25	发电机定子
纳米 BN/环氧	180	1.5	22	新能源电机

选型时需综合考虑工作温度、散热条件与机械应力：在 150°C 以下环境，可选用环氧树脂或聚酯；150~250°C 宜采用聚酰亚胺或云母制品；250°C 以上则需陶瓷或复合材料。

4 热稳定性在电气设备中的应用案例

4.1 电力变压器绝缘系统

变压器的绝缘系统由绝缘油、绝缘纸、垫块等组成，工作温度通常在 60~105°C。传统变压器油与普通纤维素纸的组合在长期运行中易发生热老化，导致纸的聚合度从 1000 降至 200 以下，油中酸值升高。某 220kV 变压器采用纳米改性绝缘油与热稳定绝缘纸的复合系统：纳米 TiO_2 颗粒 (0.05wt%) 的加入使绝缘油的抗氧化性能提升 40%，OIT 从 30 分钟延长至 45 分钟；绝缘纸经三聚氰胺树脂处理后，RTI 从 105°C 提高到 120°C；运行数据显示，该系统在 90°C 下的预期寿命从 20 年延长至 30 年，介损在 100°C 时仍低于 0.005。

4.2 高压电机绝缘结构

电机绝缘系统承受电磁力与热应力的双重作用，定子绕组绝缘的热老化是主要失效模式。某 6MW 风力发电机采用多层复合绝缘结构：基材为聚酰亚胺薄膜，中间层为云母带，外层涂覆纳米 Al₂O₃ / 硅树脂；经测试，该结构的 T_g 达 180°C，在 150°C 下的拉伸强度保持率（1000 小时）为 85%；实际运行中，绕组热点温度从 140°C 降至 125°C，年度故障率降低 30%。

4.3 新能源汽车电机绝缘

新能源汽车电机的工作环境苛刻，温度波动范围大（-40°C 至 180°C）。某型号永磁同步电机采用耐油耐高温绝缘系统^[5]：漆包线绝缘为聚酰胺酰亚胺（PAI），耐温等级 220°C；槽绝缘采用 PEEK 薄膜，介电强度 150MV/m，在 150°C 机油中浸泡 1000 小时后性能保持率 90%；台架试验表明，该电机在 160°C 下连续运行 500 小时后，绝缘电阻仍大于 100MΩ。

4.4 高压电缆附件绝缘

电缆附件（如终端、中间接头）是绝缘薄弱环节，易因局部过热导致故障。某 110kV 交联聚乙烯（XLPE）电缆附件采用硅橡胶 / 陶瓷复合绝缘，硅橡胶中添加 10wt% 的氮化硼纳米片，热导率从 0.2W/(m·K) 提高到 0.8W/(m·K)；内部绝缘屏蔽层采用梯度结构设计，降低电场集中，使局部温升控制在 5°C 以内；运行 3 年后的介损测试显示， $\tan \delta$ 在 1MHz 下仍小于 0.002，无明显老化迹象。

5 提升绝缘材料热稳定性的技术路径

5.1 材料改性技术

通过共聚或接枝引入耐热基团如在聚酯分子链中引入芳香环或硅氧键，可使 T_g 提高 30–50°C。某研究团队合成的聚醚酰亚胺共聚物，其热分解温度达到 450°C，比均聚物提高 60°C。纳米填料的选择需匹配基体特性：对于环氧树脂，BN 或 AlN 可提升热导率；对于硅橡胶，SiO₂ 或 TiO₂ 能增强界面结合。优化分散工艺（如超声 – 球磨联用）可使纳米颗粒的团聚尺寸控制在 50nm 以下，最大限度发挥界面效应。对无机绝缘材料进行表面改性，如用硅烷偶联剂处理玻璃纤维，可改善与有机基体的相容性，使复合材料的热稳定性提升 15%。某陶瓷绝缘子经 γ - 氨丙基三乙氧基硅烷处理

后，在湿热环境中的寿命延长 2 倍。

5.2 散热结构优化

通过仿真计算优化绝缘层厚度与排布，减少热阻。变压器绝缘结构中，采用薄纸层（0.05mm）与油道交替设计，使热阻从 $0.1K\cdot m^2/W$ 降至 $0.06K\cdot m^2/W$ 。在高密度电气设备中，将绝缘材料与冷却系统结合，电机绕组采用浸漆 – 热管复合结构，散热效率提升 50%；变压器内置纳米流体冷却通道，纳米 Cu / 油的导热系数比纯油高 20%，热点温度降低 10°C。

6 结束语

综上所述，绝缘材料热稳定性是电气设备安全运行的关键，受分子结构、环境及添加剂影响。热重分析、差示扫描量热法等可准确评价其热稳定性并揭示热老化机制。实际应用中，需依设备工况选适配绝缘材料，通过材料改性、优化散热等技术提升热稳定性，延长设备寿命。未来，新型耐高温材料、智能监测及绿色绝缘材料的发展将推动该领域突破，多学科交叉研究也将助力相关理论与技术创新，为电气设备高效、安全、环保运行提供保障。

参考文献

- [1] 钟力生, 瞻锐, 高景晖, 等. 超高压挤包直流电缆绝缘系统关键技术探讨 [J/OL]. 高电压技术, 1-16 [2025-07-10]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250354>.
- [2] 马彬彬, 宋红, 宋益凯. 新型变压器绝缘材料的应用与性能分析 [J]. 中国战略新兴产业, 2025, (18): 82-84.
- [3] 王亮, 孙鑫. 阻燃聚氯乙烯电线绝缘材料的制备及性能研究 [J]. 塑料助剂, 2024, (05): 33-35.
- [4] 肖丁文, 张洪恺, 苏志林. 高性能绝缘材料在 LED 照明设备中的应用与性能研究 [J]. 中国照明电器, 2024, (05): 35-37.
- [5] 李志辉. 高频电力变压器浇注绝缘与匝间包覆绝缘电-热性能调控方法研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2024. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2024.000104.

作者简介：季哲，1986 年 01 月 18 号，男，汉族，江苏省启东市茅家港镇，本科，中级工程师，研究方向：高性能绝缘材料。