

# 高温环境下绝缘材料的老化机制及其防护方法

张莹 季哲 王金梅

南通东泰电工器材有限公司, 江苏省启东市, 226200;

**摘要:** 本文围绕高温环境下绝缘材料的老化机制与防护方法展开深入研究。通过对热老化、氧化老化、化学降解等多种老化机制的分析, 结合材料微观结构变化与性能衰退规律, 探讨影响绝缘材料高温老化的关键因素。同时, 系统总结当前有效的防护方法, 包括材料改性、涂层防护、结构优化等, 并对未来研究方向进行展望, 旨在为高温环境下绝缘材料的合理应用与性能提升提供理论支持和实践指导。

**关键词:** 高温环境; 绝缘材料; 老化机制; 防护方法

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.01.030

## 引言

在现代工业领域, 许多设备和系统的运行环境面临着高温挑战, 如电力系统中的高压电器、航空航天中的发动机部件、新能源汽车的电池系统等。绝缘材料作为保障设备安全运行的关键材料, 在高温环境下的性能稳定性至关重要。然而, 高温会加速绝缘材料的老化进程, 导致其绝缘性能下降、机械强度减弱, 甚至引发设备故障和安全事故。因此, 深入研究高温环境下绝缘材料的老化机制, 并探索有效的防护方法, 对于提高设备可靠性、延长使用寿命、保障工业生产安全具有重要的理论和现实意义。

## 1 高温环境下绝缘材料的老化机制

### 1.1 热老化机制

热老化是高温环境下绝缘材料老化的最基本形式。当绝缘材料处于高温环境中时, 分子链的热运动加剧, 分子间的化学键能逐渐被热能所破坏。对于有机绝缘材料, 如聚氯乙烯(PVC)、环氧树脂等, 高温会导致分子链发生断裂, 产生自由基。这些自由基进一步引发连锁反应, 使分子链不断降解, 材料的分子量降低, 物理和化学性能恶化。例如, PVC在高温下会逐渐脱除氯化氢(HCl)气体, 导致材料变硬、变脆, 绝缘电阻下降<sup>[1]</sup>。

从微观结构来看, 热老化会使绝缘材料的晶体结构发生变化。一些半结晶聚合物在高温下, 结晶度会降低, 非晶区比例增加, 从而影响材料的力学性能和电学性能。同时, 高温还可能使材料内部产生微裂纹和孔隙, 这些缺陷会成为电击穿和水分侵入的通道, 进一步加速材料的老化。

### 1.2 氧化老化机制

在高温环境下, 绝缘材料与空气中的氧气接触, 容易发生氧化反应, 这就是氧化老化。氧化反应通常是自由基引发的链式反应。首先, 高温使绝缘材料分子链中的薄弱环节(如不饱和键、支链等)断裂, 产生自由基。这些自由基与氧气结合, 形成过氧自由基, 过氧自由基又会与其他分子链反应, 生成氢过氧化物。氢过氧化物不稳定, 在高温下会分解产生新的自由基, 从而使氧化反应不断进行。氧化老化会显著改变绝缘材料的性能。例如, 橡胶类绝缘材料在氧化作用下, 分子链发生交联或断裂, 导致材料变硬、变脆或变软、发黏, 弹性和绝缘性能下降。此外, 氧化反应还会使材料的颜色发生变化, 如环氧树脂在氧化老化后可能会变黄<sup>[2]</sup>。

### 1.3 化学降解机制

高温环境可能会使绝缘材料与周围环境中的化学物质发生化学反应, 导致化学降解。例如, 在一些含有腐蚀性气体(如二氧化硫、氯气等)的高温环境中, 绝缘材料会与这些气体发生反应。对于纤维素类绝缘材料, 如纸和纸板, 在高温和酸性气体的作用下, 会发生水解反应, 纤维素分子链中的糖苷键断裂, 聚合度降低, 材料的强度和绝缘性能迅速下降。另外, 一些绝缘材料在高温下还可能与水分发生反应。例如, 某些有机硅树脂在高温高湿环境下, 会发生水解缩合反应, 导致材料的结构和性能发生变化。化学降解不仅会影响绝缘材料的物理和化学性能, 还可能产生有害气体, 对设备和环境造成危害<sup>[3]</sup>。

### 1.4 电热联合老化机制

在电气设备中, 绝缘材料往往同时承受电场和高温的作用, 此时电-热联合老化效应更为显著。电场的存在会加速绝缘材料中电荷的迁移, 当电荷在材料内部积

聚到一定程度时,会产生局部放电现象。局部放电产生的高温、高能粒子和活性气体(如臭氧)会进一步加剧材料的热老化和氧化老化。同时,高温会降低绝缘材料的电气强度,使材料更容易发生电击穿。电-热联合作用下,绝缘材料的老化速度比单一热老化或电老化快得多。例如,在高压电机的定子绕组中,绝缘材料在高温和高电场的长期作用下,会迅速出现老化现象,导致绝缘层变薄、性能下降,最终可能引发电机故障。

## 2 影响绝缘材料高温老化的因素

### 2.1 材料自身性质

绝缘材料的化学结构和组成是影响其高温老化性能的关键因素。含有稳定化学键(如芳香族化合物中的苯环结构)的材料,通常具有较好的耐热性和抗老化性能。例如,聚酰亚胺(PI)由于其分子链中含有稳定的酰亚胺环结构,具有优异的耐高温性能,可在200℃以上的环境中长期使用。

材料的分子量及其分布也对老化性能有影响。一般来说,分子量较高且分布较窄的材料,其分子链间的相互作用力较强,抵抗高温破坏的能力也相对较强。此外,材料中的添加剂(如抗氧化剂、阻燃剂等)也会影响其老化性能。合适的添加剂可以有效地抑制酯化反应的发生,延长材料的使用寿命<sup>[4]</sup>。

### 2.2 环境因素

环境温度是影响绝缘材料老化的最主要因素。温度越高,材料的老化速度越快。根据阿累尼乌斯(Arrhenius)方程,酯化反应速率与温度呈指数关系,温度每升高10℃,老化速度可能增加2-3倍。除了温度,环境中的湿度、氧气含量、化学气体成分等也会对绝缘材料的老化产生重要影响。高湿度环境会加速材料的水解反应和电化学腐蚀;氧气含量的增加会促进氧化老化;而腐蚀性化学气体则会引发化学降解反应。此外,光照、辐射等因素在某些特殊高温环境下,也可能与高温协同作用,加速绝缘材料的老化。

### 2.3 应力因素

在实际应用中,绝缘材料往往会受到机械应力、电场应力等作用。机械应力会使材料内部产生微裂纹,这些裂纹会成为老化因素侵入的通道,加速材料的老化。电场应力则会引发局部放电,产生高温和活性物质,加剧材料的老化。例如,在电缆绝缘材料中,由于电缆的弯曲、拉伸等操作,会在材料内部产生机械应力。同时,

电缆运行时的电场作用也会对材料产生影响。机械应力和电场应力的联合作用,会使电缆绝缘材料的老化速度明显加快。

## 3 高温环境下绝缘材料的防护方法

### 3.1 材料改性

通过共聚和共混的方法,可以将不同性能的聚合物结合在一起,改善绝缘材料的高温性能。例如,将耐高温的聚苯硫醚(PPS)与环氧树脂共混,可以提高环氧树脂的耐热性和机械强度。在共聚改性中,将具有耐热结构的单体引入到聚合物分子链中,如在聚酯分子链中引入芳香族单体,可以增强分子链的稳定性,提高材料的耐高温性能。

纳米材料具有独特的物理和化学性质,将纳米粒子添加到绝缘材料中,可以显著改善材料的性能。例如,添加纳米二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、纳米蒙脱土等粒子到环氧树脂中,可以提高材料的热稳定性、机械强度和电气绝缘性能。纳米粒子的小尺寸效应和表面效应使其能够均匀分散在基体材料中,形成良好的界面结合,从而有效地阻碍分子链的热运动和酯化反应的进行。

交联反应可以使绝缘材料的分子链之间形成化学键连接,形成三维网状结构。这种结构可以限制分子链的热运动,提高材料的耐热性和机械强度。例如,通过对聚乙烯进行交联改性,使其从线性结构转变为网状结构,材料的使用温度可以从70℃左右提高到90-105℃,并且具有更好的耐环境应力开裂性能。

### 3.2 涂层防护

在绝缘材料表面涂覆耐高温涂料是一种常用的防护方法。耐高温涂料通常由耐高温树脂(如有机硅树脂、无机硅酸盐等)、填料和添加剂组成。有机硅树脂涂料具有优异的耐高温性能和绝缘性能,可在200-300℃的环境中长期使用。无机硅酸盐涂料则具有良好的化学稳定性和耐高温氧化性,可在更高温度下保护绝缘材料。

除了耐高温涂料,还可以根据不同的需求制备功能性涂层。例如,抗氧化涂层可以阻止氧气与绝缘材料接触,减缓氧化老化;防腐涂层可以抵抗化学气体的侵蚀,防止化学降解。一些自修复涂层在材料表面出现损伤时,能够自动修复裂纹,恢复材料的性能,提高材料的使用寿命。

### 3.3 结构优化

采用多层复合结构可以充分发挥不同材料的优势,

提高绝缘材料的综合性能。例如，在高压电缆绝缘中，常采用内屏蔽层、绝缘层、外屏蔽层的多层结构。内屏蔽层和外屏蔽层可以均匀电场分布，减少局部放电的发生；绝缘层则采用高性能的绝缘材料，保证绝缘性能。通过合理设计各层材料的性能和厚度，可以有效地提高电缆在高温环境下的运行可靠性。

在一些设备中，通过优化绝缘材料的结构来加强散热，可以降低材料的实际工作温度，从而减缓老化速度。例如，在电机的绝缘结构设计中，可以增加散热槽、采用导热绝缘材料等方式，提高热量的散发效率。此外，合理的通风设计也可以带走设备运行过程中产生的热量，降低绝缘材料的温度<sup>[5]</sup>。

## 4 未来的研究方向

### 4.1 跨学科协同创新

推动材料科学、化学工程、电子技术等多学科交叉融合，依托量子化学计算、分子动力学模拟等先进技术手段，从原子及分子层面深入揭示绝缘材料高温老化的本质机理，为新型材料的设计研发提供坚实的理论支撑。例如，通过第一性原理计算精准预测不同分子结构在高温环境下的化学键稳定性，从而筛选出具有潜在应用价值的高性能绝缘材料单体。

### 4.2 产学研深度合作

构建企业、高校及科研机构一体化的协同创新平台，加速科研成果向实际生产力的转化。企业可提供真实的应用场景与具体需求，高校和科研机构专注于基础研究与技术攻关，三方协同攻克高温绝缘材料领域的关键核心技术难题。例如，针对新能源汽车电池系统的高温绝缘需求，联合开发兼具高导热性、高绝缘性且具备优异热稳定性的新型复合材料。

### 4.3 标准体系完善

随着新型绝缘材料与防护技术的持续涌现，亟需加快相关行业标准与测试规范的制定和完善进程。建立统一的高温老化性能评价指标体系，规范不同环境条件下的老化测试方法，确保材料性能数据的可比性与可靠性，为市场准入机制的建立和质量监管工作的开展提供科学依据。

### 4.4 国际合作与交流

高温绝缘材料研究属于全球性课题，应加强国际间的学术交流与技术合作，实现研究成果与数据资源的共

享，共同应对航空航天、特高压输电等高端领域面临的高温绝缘挑战。积极参与国际标准的制定工作，提升我国在该领域的学术话语权与国际影响力。

## 4.5 新兴技术融合应用

密切关注人工智能、大数据等新兴技术在绝缘材料研究中的融合应用。利用机器学习算法对海量的材料性能数据及老化实验结果进行深度分析，构建更为精准的老化预测模型；通过大数据挖掘技术探寻不同材料在各类工况下的性能演化规律，为材料选型与优化设计提供有力支撑。

## 5 结束语

综上所述，高温环境下绝缘材料的老化机制复杂多样，涉及热、氧化、化学及电 热等多种因素的综合作用。而材料自身性质、环境条件和应力因素共同影响着老化进程。目前，通过材料改性、涂层防护和结构优化等方法，在一定程度上提高了绝缘材料的耐高温性能和使用寿命。然而，面对现代工业不断提出的更高要求，仍需在老化机制研究、新型材料开发、测试标准完善等方面持续深入探索。通过跨学科研究、产学研合作以及新兴技术融合，有望突破现有技术瓶颈，为高温环境下绝缘材料的发展开辟新的道路，推动相关产业的安全、高效运行。

## 参考文献

- [1]李福. 无机复合绝缘扁绕组线的高温环境老化性能研究[J]. 电线电缆, 2020, (02): 5-7. DOI: 10.16105/j.cnki.dxdl.2020.02.002.
- [2]王志廷. 耐高温分离电连接器研究与开发[D]. 浙江工业大学, 2018.
- [3]徐阳. 一种高温环境下绝缘材料电阻及电阻率的测试装置. 陕西省, 西安交通大学, 2018-01-01.
- [4]吴向峰, 李康乐, 张宏亮, 等. 低压电缆绝缘老化对材料力学性能作用机制[J]. 塑料, 2023, 52(06): 116-121+135.
- [5]吴向峰, 李康乐, 张宏亮, 等. 低压电缆绝缘老化对材料力学性能作用机制[J]. 塑料, 2023, 52(06): 116-121+135.

作者简介：张莹（1988.09.29），汉族，女，河北省石家庄市无极县，硕士，中级工程师，研究方向：复合绝缘材料。