

# 带电作业绝缘工具材料老化机理及寿命预测方法探讨

翁顶翔

汕尾汇能综合能源服务有限公司 广东汕尾 516600

**摘要：**本研究聚焦于带电作业绝缘工具材料的老化机理及寿命预测方法。首先，清晰阐明了绝缘工具于电力系统中所起到的关键作用，指出其在电应力、热应力以及环境应力的共同作用下会产生老化现象，此老化过程对带电作业安全以及电网的稳定运行存在潜在风险，进而凸显了深入探究老化机理与寿命预测方法的重要意义。对绝缘工具的种类、应用场景以及材料性能要求进行了系统的概述。绝缘工具主要划分为操作工具、防护用具和承载工具三大类别，在不同应用场景下，需具备高绝缘强度、耐高温特性以及良好的耐候性等。随后，对绝缘工具材料的老化机理进行了深入分析。在寿命预测方法方面，详细介绍了基于物理模型、统计分析以及人工智能的预测方法，并对各类方法的优势与局限性展开了分析。对现有研究成果进行了总结，提出未来的研究方向应着重聚焦于多应力协同老化机理、混合预测模型的构建以及新型耐老化材料的研发。

**关键词：**带电作业；绝缘工具；老化机理；电应力老化

## 引言

在电力系统中，带电作业绝缘工具是保障工作人员安全、维持电网稳定运行的关键设备。这些工具广泛应用于特高压输电线路及直流输电系统的带电作业中，其性能直接关系到作业的安全性与可靠性。然而，随着运行时间的增加，绝缘工具材料不可避免地会受到电应力、热应力以及环境因素的共同作用，导致老化现象的发生。材料老化不仅会降低工具的绝缘性能，还可能引发短路、击穿等安全事故，进而威胁作业人员的安全与电网的稳定性。

研究带电作业绝缘工具材料的老化机理以及其寿命预测方法，这一课题无疑具有深远的重要意义。首先，深入且全面地理解老化机理，这将对揭示材料性能逐步退化的根本原因起到关键的推动作用。通过对老化机理的剖析，我们能够明确在各种环境因素、工作负荷等条件下，材料内部结构和性能是如何一步步发生变化的，进而为优化材料的设计方案与制造工艺提供坚实的理论依据。这种理论支撑可以指导工程师们在材料研发阶段就充分考虑抗老化性能，从源头上提升绝缘工具的质量。针对不同类型绝缘工具所具有的独特老化特性开展深入细致的研究，也是十分必要的。由于不同类型的绝缘工具在材质、结构、使用场景等方面存在差异，它们的老化过程和表现形式也会各不相同。通过对这些差异化的研究，我们可以为制定科学合理、针对性强的维护策略

提供有力的支持。例如，对于某些在高温环境下使用的绝缘工具，可以根据其特定的老化规律，制定更加频繁或者特殊的维护计划。这种基于研究的维护策略将进一步推动带电作业技术不断向前发展，并促进其在更广泛领域内的应用，如在高压输电线路维护、复杂工业设备检修等场景中发挥更大的作用。

## 一、带电作业绝缘工具概述

带电作业绝缘工具作为电力系统中保障工作人员安全的关键设备，其种类繁多且功能各异。根据用途的不同，可将其分为操作工具、防护用具及承载工具三大类。操作工具主要包括绝缘杆、绝缘绳索等，用于在带电环境中进行设备的操作与维护；防护用具则涵盖绝缘手套、屏蔽服等，旨在保护作业人员免受电场、感应电及高温等危害；承载工具如绝缘梯、绝缘平台等，则为作业人员提供安全的作业支撑。这些工具广泛应用于特高压输电线路、直流接地极线路等多种场景，其工作环境复杂多变，常需面对高电压、强电场、高温以及恶劣天气条件等挑战。

不同种类的带电作业绝缘工具对绝缘材料的性能要求差异显著。例如，在特高压输电线路中，绝缘工具不仅需要具备高电压绝缘强度，还需满足一定的机械强度和耐热性能，以确保在复杂工况下的可靠性。而对于 $\pm 500$  kV直流输电系统接地极线路的带电作业，由于导

线运行温度可能接近 120℃，绝缘工具必须选用耐高温材料，并采取隔热措施以避免作业人员受到热损伤。此外，环境因素如紫外线、湿度和污染物的存在，也会对绝缘材料的性能提出更高要求，尤其是在长期暴露于户外环境的工具中，材料的耐候性成为关键指标之一。因此，合理选择绝缘材料并优化其性能，是提升带电作业绝缘工具可靠性和使用寿命的重要前提。

## 二、绝缘工具材料老化机理

### 1. 电应力老化

在电应力的作用之下，绝缘材料的老化现象主要表现为局部放电以及电树枝生长等多种形式的表现，而这些表现形式对材料的电气性能以及机械性能都会产生极为显著的影响。具体来说，局部放电这一现象是指在电场强度相对较高的区域之中，由于绝缘材料自身内部或者表面存在着诸如气泡、裂纹或者是杂质之类的缺陷，从而致使局部击穿现象的发生。在这个放电的过程当中，会产生高能电子对绝缘材料进行轰击，这种轰击会破坏绝缘材料原本稳定的分子结构，进而大大加速材料的老化进程。

与此同时，电树枝是一种呈现出树枝状的放电通道，它的形成与不断扩展通常都伴随着材料内部电荷注入和抽出的过程。电树枝不断地生长不仅会使绝缘材料的击穿强度有所降低，而且还有可能导致绝缘失效的情况出现，这种情况一旦发生就会对带电作业的安全性和可靠性造成严重的威胁。

通过深入的研究表明，在电应力作用下绝缘材料的老化速率与电场强度之间存在着非线性关系，在高场强的条件之下，老化效应表现得尤为明显和突出。所以，在实际的应用场景之中，合理地设计绝缘工具的结构，以此来降低电场集中效应，这对于延缓电应力所引发的老化现象具有非常重要的意义，这也是保障相关设备和作业安全可靠的重要举措之一。

### 2. 热应力老化

热应力是绝缘材料老化的另一重要因素，其主要通过热降解和热氧化等化学反应改变材料的结构和性能。在高温环境下，绝缘材料分子链的热运动加剧，导致化学键断裂的可能性增加，从而引发热降解反应。热降解过程中，材料的主链或侧链发生断裂，生成低分子量的产物，如甲烷、乙烯等气体，这些产物的逸出会导致材料表面出现微观孔隙，进而降低材料的机械强度和电气性能。与此同时，热氧化反应也在热应力老化过程中扮

演重要角色。当绝缘材料暴露于氧气环境中时，热氧化反应会生成含氧官能团，如羟基、羧基等，这些官能团的引入不仅改变了材料的表面性质，还进一步加速了材料的老化进程。特别是在电缆绝缘材料中，热应力与电应力的联合作用会显著增强老化效应，这已被多项研究所证实。因此，在设计和选择带电作业绝缘工具材料时，必须充分考虑其耐热性能以及热应力对材料寿命的影响。

## 3. 环境因素老化

环境因素如紫外线、湿度和污染等对绝缘材料老化的影响不容忽视，尤其是在复杂的户外工作环境中，这些因素往往与电、热应力协同作用，共同加速材料的老化进程。紫外线辐射是环境因素中最主要的老化驱动因素之一，其能量足以引发聚合物材料表面化学键的断裂，从而产生自由基并诱发氧化反应。研究表明，紫外线作用下硅橡胶材料的 C-Si 键和 C-H 键易发生断裂，生成亲水性基团，这不仅降低了材料的疏水性，还可能导致表面裂纹的形成和扩展。湿度对绝缘材料老化的影响主要体现在水分子的渗透和吸附作用上。高湿度环境下，水分子容易进入材料内部，与极性基团发生相互作用，从而改变材料的介电性能和机械性能。此外，污染物的存在也会加剧绝缘材料的老化过程。例如，盐雾和酸雨中的离子污染物会在材料表面形成导电层，增加表面泄漏电流，进而加速材料的老化。值得注意的是，环境因素与电、热应力的协同作用具有复杂的非线性特征，这使得老化机理的研究更加困难。因此，在实际应用中，需要采取有效的防护措施，如添加抗老化剂或涂覆保护层，以减缓环境因素对绝缘材料的不利影响。

## 三、绝缘工具材料寿命预测方法

### 1. 基于物理模型的寿命预测

基于物理模型的寿命预测方法主要通过建立数学模型来描述绝缘材料在特定应力条件下的老化规律，其中反幂模型和 Arrhenius 模型是两种广泛应用于绝缘材料寿命预测的经典模型。反幂模型通常用于描述电应力对绝缘材料老化的影响，其基本形式为  $(E=AT^{\{-n\}})$ ，其中  $(E)$  表示电场强度， $(T)$  表示击穿时间， $(A)$  和  $(n)$  为模型参数。该模型假设绝缘材料的寿命与施加的电场强度呈反幂关系，适用于短时工频击穿试验数据的分析。Arrhenius 模型则主要用于描述热应力对材料老化的影响，其表达式为  $(\ln(t)=a+b/T)$ ，其中  $(t)$  表示寿命， $(T)$  表示绝对温度， $(a)$  和  $(b)$  为模型参数。该模型基于化学反应速率理论，认为材料的老化速率随温度升高呈指

数增长。这些物理模型在绝缘材料寿命预测中具有重要的应用价值，因为它们能够从理论上揭示材料老化的内在机制，并通过实验数据拟合得到关键参数，从而实现材料寿命的定量评估。

## 2. 基于统计分析的寿命预测

基于统计分析的寿命预测方法通过收集大量实际运行数据，运用统计学方法建立寿命预测模型，从而对绝缘材料的寿命进行预估。这种方法的核心在于利用历史数据中的统计规律来推断未来材料的行为。例如，在35 kV输电线路绝缘材料的研究中，通过对不同运行环境下的绝缘材料性能数据进行统计分析，可以构建以统计数据为基础的寿命预测模型。该方法的优点在于能够充分利用现场数据，反映实际运行条件下的复杂因素对材料老化的影响。然而，其缺点也较为明显：首先，统计分析需要大量高质量的数据支持，数据不足可能导致预测结果不准确；其次，由于统计分析模型通常缺乏物理机制的解释，其预测结果的可解释性较差。此外，统计分析方法难以考虑多应力协同作用对材料老化的影响，这限制了其在复杂工况下的应用范围。

## 3. 基于人工智能的寿命预测

随着人工智能技术的发展，神经网络和支持向量机等算法逐渐成为绝缘材料寿命预测的重要工具。神经网络通过构建多层非线性映射关系，能够处理复杂的非线性问题，适用于多应力协同作用下绝缘材料寿命的预测。例如，在高压电缆绝缘材料的研究中，神经网络模型已被用于分析电-热应力对材料老化的影响，并取得了较高的预测精度。支持向量机则通过寻找最优分类超平面，能够在小样本情况下实现较好的泛化能力。人工智能方法在绝缘材料寿命预测中的优势在于其强大的数据处理能力和灵活性，能够适应不同类型的数据和复杂的工况条件。然而，人工智能方法也面临一些挑战，如模型训练需要大量高质量的数据，且模型的解释性较差，难以揭示材料老化的物理机制。此外，人工智能模型的性能高度依赖于特征工程的质量，如何选择合适的特征变量仍是亟待解决的问题。

## 结论

本研究系统探讨了带电作业绝缘工具材料的老化机

理及寿命预测方法。在老化机理方面，电应力、热应力以及环境因素对绝缘材料性能的影响已被广泛研究。电应力通过局部放电和电树枝生长引发材料降解，热应力则通过热降解和热氧化反应改变材料结构，而环境因素如紫外线、湿度和污染与电、热应力协同作用，加速了老化过程。这些研究成果为深入理解绝缘材料老化提供了理论依据。在寿命预测方法方面，基于物理模型的预测方法适用于特定条件下的寿命评估，但其假设条件可能与实际复杂工况存在差异。基于统计分析的方法通过大数据分析提高了预测的准确性，但对数据质量和数量要求较高。人工智能算法因其强大的非线性建模能力展现出显著优势，但在模型解释性和数据需求方面仍面临挑战。电应力通过局部放电和电树枝生长等方式，破坏材料的分子结构；热应力则引发热降解和热氧化反应，致使材料的机械性能和电气性能出现不同程度的下降；环境因素，如紫外线辐射、湿度变化以及污染物侵蚀等，与电应力和热应力协同作用，进一步加速了材料的老化进程。

未来的研究应聚焦于多应力因子协同作用下的老化机理，尤其是复杂环境条件下的老化行为。此外，结合多种预测方法的混合模型有望提高寿命预测的精度和可靠性。开发新型耐老化材料及其表征技术也将是提升带电作业绝缘工具性能的重要方向。

## 参考文献

- [1] 左周, 姚陈果, DISSADO L A, 高岩峰, DODD S J, CHALASHKANOV N M. 基于化学反应速率理论的绝缘聚合物直流老化演变的仿真研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 832-842.
- [2] 黄烜城, 王政钧, 吕泽鹏, 丁然, 雷志城, 封建宝, 闫志雨, 于洪森, 严彦. 基于Crine模型和逐步升压法的交联聚乙烯及其纳米复合材料老化寿命研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(12): 73-79.
- [3] 罗新. 解析特高压输电线路带电作业安全防护[J]. 低碳世界, 2016, 6(13): 20-21.
- [4] 尹洪, 闫旭东, 程绳, 杜勇, 胡志鹏. ±500 kV直流输电系统接地极线路带电作业安全防护研究[J]. 湖北电力, 2017, 41(8): 10-14.