

# Analysis of performance of new insulation materials for high voltage transmission lines

Long Chen

Shaanxi Coal Industry and Chemical Construction (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

## Abstract

As a critical component of power transmission systems, high-voltage transmission lines (HVTLs) are responsible for transmitting large-capacity electricity over long distances. With the continuous expansion of HVTL networks and increasing voltage levels, the performance requirements for insulation materials have become increasingly stringent. Traditional insulation materials can no longer meet modern power transmission demands, leading to the emergence of innovative alternatives. This study systematically reviews various advanced insulation materials used in HVTLs, conducting in-depth analyses of their electrical, thermal, and environmental characteristics. Through practical engineering case studies, it demonstrates their application effectiveness while forecasting future development trends. The research provides valuable references for selecting suitable insulation materials and advancing technological innovation in HVTL applications.

## Keywords

high voltage transmission line; new insulation material; performance analysis

# 应用于高压输电线路的新型绝缘材料性能分析

陈龙

陕西煤业化工建设(集团)有限公司, 中国·陕西 西安 710000

## 摘要

作为电力系统重要组成部分的高压输电线, 担负着大容量和远距离输电任务, 随着高压输电线规模的不断扩大和电压等级的不断提高, 对绝缘材料的性能要求越来越高。传统的绝缘材料已不能满足现代电力传输的要求, 于是就出现新的绝缘材料。本课题将对高压输电线路中使用的各种新型绝缘材料进行系统的梳理, 对它们的电、力、热、环境等性能特征进行深入分析, 并结合实际工程实例阐述其应用效果, 预测其发展趋势, 为高压输电线路绝缘材料的选择和技术开发提供参考。

## 关键词

高压输电线路; 新型绝缘材料; 性能分析

## 1 引言

绝缘材料是高压输电线的重要组成部分, 它既要保证导线与杆塔、地面等不同电位的物体间的电绝缘, 又要承担导线自重、风力、覆冰等机械荷载和多种复杂环境因素的影响。为解决这些难题, 研究者们不断地研究和开发新的绝缘材料, 其中一些已经应用于实际工程, 表现出良好的性能。对这类新型绝缘材料进行深入研究, 对提高高压输电线路运行可靠性, 降低运行成本, 推动电力工业的可持续发展具有十分重要的意义。

## 2 高压输电线路对绝缘材料的性能要求

### 2.1 电气性能

绝缘材料必须具有较高的击穿电压, 才能抵抗强的电场, 防止电流击穿; 低的介电损耗系数, 降低能耗和热量的产生; 良好的抗电晕性能, 延缓因局放引起的老化。污秽环境要求高沿面闪络电压, 防止沿面形成导电通道而诱发闪络, 是保证高压线路安全运行的核心指标, 与输电可靠性直接相关<sup>[1]</sup>。

### 2.2 机械性能

要经受住电线的自重、拉力、风吹和覆冰的荷载, 所以必须具有很高的拉伸、压缩和弯曲强度, 以防止断裂变形。同时还需要具有良好的柔韧性和抗疲劳性, 以适应长期振动引起的重复应力, 保证结构在复杂工况(如山区多风环境)中的持续机械冲击。

### 2.3 热性能

在电流加热和环境温差作用下仍能保持热稳定, 高温

【作者简介】陈龙(1997-), 男, 中国甘肃天水人, 本科, 助理工程师, 从事工程施工研究。

度下不软化分解，低温度下不脆裂。同时，高导热系数及时散热，避免局部过热加速老化，特别是在高压电缆等密闭环境下。

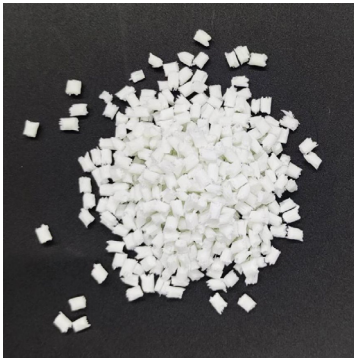
## 2.4 耐环境性能

能耐日晒，耐紫外线，耐高低温，耐老化性能好，长期使用性能稳定。在工业污染区和沿海地区，应具有良好的耐酸碱、耐盐性能；在潮湿环境下保持憎水状态，降低因吸水而引起的绝缘劣化，是实现其长期服役的前提<sup>[2]</sup>。

## 3 应用于高压输电线路的新型绝缘材料种类

### 3.1 复合绝缘材料

采用“芯棒+伞裙套+金具”的复合绝缘材料，芯棒多采用玻纤增强树脂（图1），抗张强度超过1100 MPa，比高强瓷高3~5倍；伞裙的外壳采用有机硅橡胶材料制成，具有良好的防水和耐候性能。其重量仅为同级别陶瓷绝缘子的1/7-1/10，同时具有较高的机械强度和电气绝缘性，特别适合高压和特高压输电线路，特别是在污秽、大风等复杂环境下性能更佳。



### 3.2 芳纶纤维材料

芳纶纤维（芳纶）具有高强、高模量、耐高温等特点。常用作绝缘纸或与树脂复合，氧指数>28，具有优良的阻燃性。耐潮性能优良，即使在潮湿环境下也能保持稳定的绝缘特性，被广泛用于变压器、电动机等设备的绝缘结构中，提高设备的耐温等级和使用寿命<sup>[3]</sup>。

### 3.3 聚丙烯绝缘材料

聚丙烯作为绝缘材料，其生产能耗低，可循环利用。它具有较低的介电损耗和较高的击穿场强，并且比传统的交联聚乙烯具有更好的耐电树生长能力。该电缆具有较高的传输能力和较高的工作温度，适合城市高压电缆线路，可适应地下管廊等复杂敷设环境，生产周期比传统材料缩短80%以上。

### 3.4 超憎水高自洁防污闪涂料

该涂料通过构筑接触角>150°、卷动角<10°、自清洁系数>95%的微-纳双级结构涂料，实现超疏水。该涂料能显著减少绝缘子表面积污量，使闪络电压提高50%以上，预计使用寿命可达15-20年，大大优于传统涂料。适用于污染严重的地区，如工业污染区和沿海地区，输电线路绝缘子的保护<sup>[4]</sup>。

## 4 新型绝缘材料的性能分析

### 4.1 电气性能分析

#### 4.1.1 复合绝缘材料

在复合绝缘材料中，硅橡胶伞裙的强憎水特性显著提高沿面闪络电压，在污秽环境中抑制沿面电导，降低漏电流。它具有较高的绝缘强度和较低的介电损耗系数，降低操作时的发热。

#### 4.1.2 芳纶纤维材料

芳纶纤维绝缘材料具有较高的电阻和较低的介电常数，极化程度和漏电流较小，具有较高的绝缘性能。应用于变压器等设备中，提高绝缘等级，提高耐高压大电流，延长设备使用寿命，减少绝缘失效。

#### 4.1.3 聚丙烯绝缘材料

聚丙烯绝缘材料具有较低的介电损耗系数和较高的击穿场强（图2），在传输过程中损耗较小，效率较高，承受较高的工作电压。与传统材料相比，它对电树生长的抑制作用更强，延缓绝缘老化。某110 kV线路投入运行后，输电能力提高10%，运行平稳。



图2 聚丙烯绝缘材料

#### 4.1.4 超憎水高自洁防污闪涂料

涂料的超憎水特性使其避免连续的导电膜的形成，从而大大提高沿面闪络电压。结果表明，在同等污秽水平条件下，涂料绝缘子的闪络电压可提高50%以上，有效地降低污闪事故，保证线路的安全运行。

## 4.2 机械性能分析

### 4.2.1 复合绝缘材料

其核心优势是玻纤增强树脂芯棒的高机械强度，拉伸强度超过1100 MPa，远远超过传统陶瓷绝缘子。这种特性使得它很容易地承受导线拉力、覆冰量和强风的拉力，特别是在多风的山区路段。前期研究发现，在8级短时强风条件下，硅橡胶伞裙具有较好的柔韧性，能有效缓冲外部冲击。

### 4.2.2 芳纶纤维材料

芳纶纤维具有较高的强度和较高的模量，可作为绝缘结构的支撑和缓冲材料。当绝缘纸厚度为0.18-0.76毫米时，不仅保持足够的硬度，以应对槽楔位置的挤压，而且具有适应线圈弯曲的柔性韧性。某风力发电机采用芳纶纤维作为绝缘材料，其绝缘寿命比传统材料提高3倍。与树脂复配后，抗压强度超过300 MPa，满足变压器铁芯长期使用的锁模力要求。

### 4.2.3 聚丙烯绝缘材料

聚丙烯绝缘电缆的力学性能能适应复杂敷设环境，断

裂伸长率高达4倍,弯曲半径可降低到6倍,在城市地下管廊狭小的空间中,不容易发生弯曲开裂。某110 kV电缆工程在敷设时遭遇机械碾压时,绝缘层仅有轻微变形,未被破坏。长期运行表明,该电缆具有较好的抗蠕变性能,在持续径向压强作用下,绝缘厚度变化率不超过3%,从而保证电缆结构的完整性。

#### 4.2.4 超憎水高自洁防污闪涂料

结果表明,该涂料对绝缘子基体附着力大于5 MPa,在100,000次振动下无剥离现象,能够承受线路长时间运行时的轻微振动。该涂料具有70 A的邵氏硬度,具有一定的抗风、抗风、抗风能力,3年后,该涂料厚度仅降低5%。此外,该材料的断裂伸长率高达200%,且可随绝缘体的膨胀与收缩而同步变形,避免低温环境下的开裂问题,在-40℃低温区试验中,涂料保持100%完好率。

### 4.3 热性能分析

#### 4.3.1 复合绝缘材料

复合绝缘子芯料为玻纤增强树脂,耐高温,力学、电学性能无显著下降。硅橡胶伞裙护套导热系数低,对导线与芯棒之间的热传递有一定的阻隔作用,从而达到隔热效果。同时,硅橡胶热膨胀系数与芯模材料匹配,避免因热胀差过大引起的热应力,确保复合绝缘子结构的稳定。

#### 4.3.2 芳纶纤维材料

芳纶纤维耐高温达220级,理化性能稳定。应用于变压器等设备时,能有效地承受设备工作时所产生的热,不因温度升高而软化或融化,保证绝缘性能。同时,芳纶纤维纸等材料导热系数低,能有效降低绝缘结构内部热量传递,有利于降低设备整体温度。

#### 4.3.3 聚丙烯绝缘材料

聚丙烯绝缘材料熔点高,热稳定性好。在高压电缆运行时,即使大电流通过,聚丙烯绝缘层仍能保持绝缘性能及物理形态的稳定性。它的热膨胀系数很小,与电缆导线、屏蔽层等材料的热膨胀系数很好地匹配,当温度变化时,由于热胀冷缩,绝缘层与其它元件之间不会产生间隙或脱粘,从而确保电缆绝缘结构的完整性。

#### 4.3.4 超憎水高自洁防污闪涂料

超疏水高自洁防污闪涂料经1000小时紫外线照射老化后,涂料表面结构、组成未发生变化,超憎水性能基本保持不变,显示出优异的耐高温抗老化性能。结果表明,该涂料具有良好的耐高温、耐污闪性能,能适应输电线路在不同温度条件下的温度变化。如我国北方寒区冬季最低温度可低于-30℃,采用超憎水高自洁防污闪涂料的绝缘子,即使在低温条件下,也能保持较好的超憎水和防污闪性能,有效地避免在寒冷潮湿环境下绝缘子的闪络事故。

### 4.4 耐环境性能分析

#### 4.4.1 复合绝缘材料

复合绝缘子硅橡胶伞裙护套具有优良的耐候性能,抗紫外线、抗氧、抗湿度、抗老化性能好。经长期室外使用,其憎水性及力学性能仍保持稳定。同时,有机硅橡胶材料还

具有良好的抗化学腐蚀性能,能耐酸碱等化学腐蚀,特别适合在工业污染区及沿海地区使用。

#### 4.4.2 芳纶纤维材料

芳纶纤维具有优良的耐候、耐化学腐蚀性能。它的分子结构稳定,不受外界环境因素的影响,如紫外、氧等,长期暴露于室外,性能不会退化。在潮湿环境中,芳纶纤维具有良好的耐潮性能,不会因受潮而降低绝缘强度。芳纶纤维对酸性、碱性和盐类有很强的抵抗力,在工业污染区等苛刻的环境下,能有效地抗化学腐蚀。

#### 4.4.3 聚丙烯绝缘材料

聚丙烯绝缘材料具有良好的耐气候性,对紫外、氧等因素具有一定的抗老化性能。无论在室外还是地下敷设环境下,经过长时间的使用,其理化性能基本不会发生变化。同时,聚丙烯还具有良好的耐水、耐酸、碱等腐蚀性能,可广泛应用于各种环境中。以某城市地下电缆隧道为例,使用6年的聚丙烯绝缘电缆,其绝缘层没有发生明显的老化和腐蚀,各项性能指标均满足使用要求,从而保证地下电缆的安全稳定运行。

#### 4.4.4 超憎水高自洁防污闪涂料

超强憎水性高自洁防污闪涂料具有优良的耐候性,可长时间抵御自然侵蚀,如日晒,雨淋,风沙等。其特殊的涂膜结构决定它在紫外光照射下不会退化,不会老化,同时具有超强的憎水性和自清洁能力。即使是在酸性、碱性、酸性、腐蚀性的环境下,涂料仍能保持稳定,不受腐蚀的损害。如在酸雨多发地区对500 kV输电线路绝缘子涂敷3年后,涂料完好,超憎水性能没有显著下降,绝缘子表面积污量很小,可有效避免闪络事故。

## 5 结论

新型绝缘材料的问世为高压输电线路的研制提供强有力的支撑。复合绝缘材料,芳纶纤维材料,聚丙烯绝缘材料,超憎水高自洁防污闪涂料等,在电、力学、热学、环境等方面都表现出优良的性能,与传统绝缘材料相比,具有明显的优势。随着高压输电线路的电压等级越来越高,传输能力越来越强,环境也越来越复杂,新型绝缘材料正朝着高性能、功能复合、绿色环保、智能化方向发展。相关科研生产单位应加大研发投入,持续优化材料性能,改进生产工艺,促进新型绝缘材料在高压输电线路上的广泛应用,为电力工业可持续发展奠定坚实的材料基础。

### 参考文献

- [1] 李爽. 新型绝缘材料在高压输电线路中的应用探究[J]. 模型世界,2023(17):74-76.
- [2] 黄雄峰,颜城,姜岚,等. 特高压输电线路新型碳纤维更换绝缘子闭式卡具力学性能研究[J]. 高压电器,2021,57(4):172-180.
- [3] 萧潇,汪钦. 新型节能导线在高压输电线路设计中的选型研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2015(10):5338-5343.
- [4] 王丽艳,孙正. 电力工程中新型材料在输电线路与变电设备中的应用研究[J]. 汽车博览,2024(3):34-36.