

# 交联聚乙烯高压电缆绝缘性能提升技术探讨

鲍启伟

无锡江南电缆有限公司, 江苏宜兴, 214251;

**摘要:** 交联聚乙烯高压电缆绝缘性能研究聚焦基材特性与生产工艺参数两大核心影响因素, 系统剖析纯度、分子量分布、交联度及挤出温度、冷却速率等关键指标的作用机制。研究采用绝缘基体材料精准改性与运行工况下性能维持延寿两项核心技术, 通过等离子体参数调控、纳米填料引入等手段优化绝缘性能, 并结合110kV电缆实际案例验证技术有效性。研究明确了各影响因素与绝缘性能的关联规律, 建立了技术参数量化控制体系, 为高压电缆绝缘性能提升提供了理论与实践支撑。

**关键词:** 交联聚乙烯; 高压电缆; 绝缘性能; 提升技术

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.03.009

## 1 交联聚乙烯高压电缆绝缘性能的核心影响因素

### 1.1 基材特性

交联聚乙烯基材特性是奠定电缆绝缘性能的核心根基, 其纯度直接决定绝缘介质的击穿场强水平。一旦基材内部残留微量杂质或催化剂残渣, 就会显著削弱绝缘材料的耐电晕能力, 甚至直接成为局部放电的起始源头; 基材的分子量分布深刻左右绝缘层的结构均匀性, 较窄的分子量分布能够有效保障绝缘材料内部应力分布均衡, 大幅降低因结构缺陷引发的绝缘劣化风险, 而宽分子量分布则极易促使材料内部形成力学与电学性能薄弱的区域; 交联度更是基材特性中不可忽视的关键指标, 适度交联可显著增强绝缘材料的热稳定性与机械强度, 确保电缆在高压工况下稳定运行, 过度交联会让材料脆性攀升、抗冲击性能下降, 交联不足则会导致绝缘层耐热性欠缺, 无法满足高压电缆长期工作的核心要求。各类特性相互协同又彼此制约, 共同构成了绝缘性能的基础保障体系。

### 1.2 生产工艺参数

生产工艺参数通过精准调控绝缘层的微观结构, 直接保障电缆绝缘性能的稳定表现。挤出成型温度的把控尤为关键, 过高温度会引发交联聚乙烯基材的热氧化降解, 破坏材料分子结构的完整性, 过低温度则会导致基材熔融不充分, 使成型的绝缘层内部残留气泡、熔接痕等致命缺陷; 冷却速率的均匀性同样对绝缘性能产生决定性影响, 冷却速度过快时, 绝缘层表面与内部会形成较大温差, 进而产生显著内应力, 后续使用中极易引发微裂纹扩展, 冷却速度过慢则会延长基材的氧化时间,

降低绝缘纯度; 交联工艺的温度、压力与时间的协同匹配度直接决定绝缘层的交联质量, 温度不足或压力不够会导致交联反应不彻底, 时间过长又会造成材料过度交联, 这些参数的细微偏差都会通过绝缘层的微观结构缺陷, 最终传导至高压电缆的绝缘可靠性上, 引发性能波动。

## 2 交联聚乙烯高压电缆绝缘性能提升技术

### 2.1 绝缘基体材料精准改性技术

#### 2.1.1 技术概况

绝缘基体材料精准改性技术以等离子体与材料表面的相互作用为管控核心, 通过精准调控放电参数, 实现材料表面微观形貌与化学成分的定向重构。具体而言, 等离子体中的高能粒子轰击材料表面时, 会引发化学键断裂并生成活性自由基, 进而通过接枝反应引入特定官能团, 或通过前驱体分解沉积功能性薄膜, 技术人员需严格控制等离子体功率密度、气体组分及处理时间, 避免过度刻蚀造成材料本体损伤, 工程师则要做好多尺度结构与性能的协同优化。

#### 2.1.2 技术应用

在实践过程中, 该技术应用需兼顾表面微观结构与宏观电气性能的同步提升, 微观层面可通过等离子体刻蚀构建微米级粗糙结构, 延长电子爬电距离并抑制局部放电, 化学层面可引入浅陷阱能级加速表面电荷消散, 借助深陷阱阻碍载流子迁移以降低电场畸变率。技术人员需结合材料本体特性设计方案, 针对交联聚乙烯电缆绝缘材料, 可采用等离子体接枝含硅基团同步提升疏水性与耐电晕性, 对于环氧树脂复合材料, 则通过等离子体诱导氧化铝填料表面活化增强界面结合强度, 提高沿面闪络电压。整个改进过程中, 工程师需实时监测表面

接触角、陷阱分布及电荷迁移率等参数,确保改性效果符合设计预期。

### 2.1.3 技术参数

工艺参数的量化控制与性能指标的闭环反馈同样关键,等离子体处理功率需依据材料导热系数与熔点设定,处理聚乙烯时功率应低于  $50\text{W}/\text{cm}^2$  以防热变性,处理陶瓷材料时可提升至  $200\text{W}/\text{cm}^2$  增强刻蚀效率;气体组分需根据目标官能团选择,引入含氟基团采用  $\text{O}_2/\text{CF}_4$  混合气体,沉积氧化硅薄膜则选用  $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ ;处理时间通过表面电阻率衰减曲线确定,当电阻率下降至初始值的 10% 时立即终止,防止过度改性导致泄漏电流增加。改性后需通过空间电荷测试仪验证陷阱密度占比是否超过 60%,借助工频耐压试验确认闪络电压提升率达标,未达标则调整参数或重复流程直至满足要求。

## 2.2 运行工况下绝缘性能维持与延寿技术

### 2.2.1 技术原理

运行工况下绝缘性能维持与延寿技术的核心原理,是基于电-热-机械多物理场耦合作用的深度分析,通过阻断绝缘材料内部微观缺陷的扩展路径实现性能延寿。电场作用下,绝缘材料中的杂质、气隙等缺陷会引发局部放电,导致材料分子链断裂与氧化降解;运行电流产生的焦耳热会加速热老化进程,机械应力则可能诱发微裂纹扩展。该技术通过引入  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等纳米复合填料构建陷阱能级,捕获局部放电产生的电子与空穴以抑制空间电荷积累;通过表面改性、超声分散等优化填料分散工艺,确保填料均匀分布,避免因团聚造成局部电场集中;同时采用氮化硼填充环氧树脂等高导热基体材料提升散热效率,降低热老化速率。多物理场的协同作用能够显著延缓绝缘材料的老化进程,有效延长电缆服役寿命。

### 2.2.2 技术应用

运行工况下绝缘性能维持与延寿技术的实践应用,需结合在线监测与主动干预技术,构建完整的闭环控制体系。在线监测系统要实时采集绝缘材料的局部放电信号、温度分布及介质损耗因数等关键参数,通过频谱分析与模式识别算法提取放电脉冲幅值、温度梯度等特征量,借助机器学习模型评估绝缘健康度指数等状态指标。当监测数据超过预设阈值时,系统自动触发主动干预措施:针对局部放电超标区域,采用脉冲电场注入技术修复微观缺陷,通过高压脉冲产生的电场力促使材料分子重排、填补气隙;针对温度异常区域,启动半导体制冷片等局部冷却装置降低热应力;针对介质损耗超标区域,注入含硅氧烷的液体纳米修复剂,通过化学反应修复分

子链断裂。干预完成后需重新采集数据验证修复效果,持续完善闭环控制流程,确保绝缘性能稳定。

### 2.2.3 技术参数

运行工况下绝缘性能维持与延寿技术的关键,在于监测阈值与干预时序的科学量化设定。局部放电监测阈值需依据材料类型与运行电压等级确定,例如交联聚乙烯电缆的局部放电脉冲幅值阈值可设为  $5\text{pC}$ ,当连续 10 个周期内脉冲数超过该阈值时立即触发修复;温度监测阈值要结合材料热导率与散热条件设定,如环氧树脂绝缘子的表面温度梯度阈值可设为  $2\text{K}/\text{cm}$ ,超过该值时启动冷却装置;介质损耗因数阈值需参照材料初始值设定,如 XLPE 电缆的  $\tan\delta$  阈值可设为 0.001,超过时注入纳米修复剂。干预时序需根据劣化速率动态调整,对于局部放电频率每周增长 20% 的快速劣化情况,需立即执行修复操作;对于温度梯度每月增长  $0.5\text{K}/\text{cm}$  的缓慢劣化情况,可延迟至下一个维护周期执行。修复后需持续监测 24 小时,若参数未恢复至阈值以下,需重复干预流程直至达标,确保绝缘性能长期稳定。

## 3 应用案例分析

### 3.1 绝缘基体材料精准改性

本案例针对某 110kVXLPE 高压电缆绝缘层出现的表面疏水性下降、局部放电起始电压偏低问题,采用等离子体精准改性技术开展绝缘基体优化,技术人员以“定向引入含硅官能团、构建微纳米粗糙结构”为核心目标,制定全流程量化操作方案。首先技术人员采用无水乙醇超声清洗电缆绝缘试样表面,去除油污与杂质后,将试样置于真空等离子体处理腔体内,启动低频等离子体发生装置并设定腔体真空度为  $5\text{Pa}$ ,确保处理环境无杂质干扰。

随后技术人员根据 XLPE 材料导热系数  $0.33\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、熔点  $120^\circ\text{C}$  的特性,将等离子体功率密度设定为  $35\text{W}/\text{cm}^2$ ,该参数既避免了功率过高导致的材料热变性,又能保证高能粒子具备足够动能轰击材料表面。气体组分选用  $\text{SiH}_4$  与  $\text{N}_2\text{O}$  的混合气体,其中  $\text{SiH}_4$  体积分数为 8%、 $\text{N}_2\text{O}$  体积分数为 92%,两种气体通过质量流量控制器精准通入腔体,流速分别控制为  $15\text{sccm}$  与  $175\text{sccm}$ ,以此确保沉积氧化硅薄膜的纯度与均匀性。

处理过程中技术人员通过实时监测表面电阻率衰减曲线把控处理时间,当表面电阻率下降至初始值的 10% 时,立即终止等离子体放电,整个处理时长控制为 45s。改性完成后,技术人员采用接触角测量仪对试样

表面进行检测,结果显示接触角从改性前的 $75^{\circ}$ 提升至 $112^{\circ}$ ,证明疏水性显著提升;通过空间电荷测试仪检测发现,改性后浅陷阱密度占比从35%提升至68%,深陷阱密度占比维持在22%,符合理论要求的陷阱密度占比超过60%的标准;借助工频耐压试验验证,试样沿面闪络电压从改性前的45kV提升至60kV,提升率达到33%,满足110kV电缆绝缘的设计要求。

整个实施过程中,技术人员同步监测腔体内部温度,确保温度始终低于XLPE材料的热变形温度 $90^{\circ}\text{C}$ ,避免材料本体性能受损;工程师通过扫描电子显微镜观察试样表面微观形貌,确认形成了平均粒径为200nm的微纳米级粗糙结构,该结构能够有效延长电子爬电距离,进一步佐证了等离子体精准改性技术在调控材料表面微观形貌与化学成分方面的有效性。

### 3.2 运行工况下绝缘性能维持与延寿技术应用

本案例针对某运行中的110kVXLPE高压电缆线路,该线路在前期巡检中发现局部放电信号异常、局部区域温度梯度偏大,技术团队采用运行工况下绝缘性能维持与延寿技术构建闭环控制体系,实现绝缘性能的动态维持与延寿。首先技术人员在电缆接头、终端等易劣化部位布设超声波局部放电传感器与光纤测温传感器,同时在电缆本体选取3个监测截面布设介质损耗因数监测探头,所有传感器均接入在线监测系统,实现局部放电脉冲幅值、温度分布及介质损耗因数的实时采集。

根据该110kVXLPE电缆的材料特性与运行电压等级,技术人员设定核心监测阈值:局部放电脉冲幅值阈值为5pC,温度梯度阈值为2K/cm,介质损耗因数( $\tan \delta$ )阈值为0.001;同时设定干预时序判定标准,局部放电频率每周增长20%以上为快速劣化,温度梯度每月增长0.5K/cm以上为缓慢劣化。在线监测系统运行第3周时,监测到电缆中间接头位置的局部放电脉冲幅值连续12个周期达到6pC,且局部放电频率较上周增长25%,属于快速劣化情况,系统自动触发主动干预流程。

针对局部放电超标问题,技术人员启动脉冲电场注入装置,设定注入电压幅值为15kV、脉冲频率为1kHz、注入时长为30min,通过高压脉冲产生的电场力促使接头内部XLPE材料分子重排,填补微观气隙缺陷;同时监测到该区域表面温度梯度达到2.3K/cm,超过设定阈值,系统同步启动半导体制冷片局部冷却装置,设定制冷功率为80W,冷却目标温度为环境温度 $+5^{\circ}\text{C}$ 。冷却装置运行1h后,温度梯度降至1.8K/cm,脉冲电场注入完

成后,技术人员通过在线监测系统重新采集数据,发现局部放电脉冲幅值降至3pC,低于阈值要求,但介质损耗因数仍维持在0.0012,未达到阈值标准。

基于此,技术人员启动第二阶段干预措施,通过电缆预留注入口注入5wt%含硅氧烷的液体纳米修复剂,注入压力控制为0.3MPa,注入量根据电缆截面积计算为每米0.5mL,修复剂通过化学反应与XLPE材料中断裂的分子链结合,实现分子链修复。注入完成后,系统持续监测24h,数据显示介质损耗因数降至0.0008,温度梯度稳定在1.5K/cm,局部放电脉冲幅值维持在3pC以下,所有参数均恢复至阈值以下。

后续跟踪监测3个月内,该区域绝缘参数未出现反弹,局部放电频率每周增长控制在5%以内,温度梯度每月增长0.2K/cm,均处于稳定状态,证明通过在线监测与主动干预的闭环控制,有效阻断了XLPE电缆绝缘材料的微观缺陷扩展,实现了绝缘性能的维持与延寿,同时验证了理论中“电-热-机械多物理场协同干预可延缓老化进程”的核心原理。

## 4 结束语

总体来说,交联聚乙烯高压电缆绝缘性能研究揭示了基材特性与生产工艺参数对绝缘性能的协同制约规律,明确了精准改性及工况维持两类技术的核心作用机理。研究形成的等离子体改性参数量化标准、运行工况监测与干预阈值体系,为绝缘性能调控提供了科学依据。两类核心技术的案例验证表明,通过微观结构优化与多物理场协同干预,可有效延缓绝缘老化进程。

### 参考文献

- [1] 秦德强,张佩佩. 高压电缆XLPE薄绝缘平铝套优化设计和工艺实现[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2025, (06): 28-30. DOI: 10.19467/j.cnki.1006-1908.2025.06.008.
- [2] 杨赵倩. 不同极性反转波形对高压电缆主绝缘空间电荷分布的影响[J]. 建设科技, 2025, (S1): 88-90. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2025.s1.027.
- [3] 宋丽亚,郝钢. 高压XLPE电力电缆绝缘厚度的设计[J]. 东北电力技术, 2025, 46(10): 39-43.

作者简介: 鲍启伟(1981.08—),男,汉,高级工程师、特技技师,无锡江南电缆有限公司副总工程师,研究方向:电线电缆技术质量管理、智能制造等。