

硅橡胶涂层厚度对玻璃纤维套管耐电压绝缘性能的影响

孔德凯¹ 张 龙²

1.天津沃尔法电力设备有限公司 天津 301700

2.深圳市沃尔核材股份有限公司 深圳 518000

【摘 要】：电子线束绝缘结构中玻璃纤维坯管作为关键基础基材，表面缺陷容易造成成品套管耐电压性能不足，硅橡胶是当前主流防护涂层材料，涂层厚度直接关系复合绝缘体系各项核心指标的变化。本文针对厚度差异引发的性能波动，分析厚度偏小、偏大以及厚度波动对击穿耐压性能和绝缘稳定性的负面作用，制定相应厚度管控策略，合理补足涂层厚度、把控最优区间并保持厚度均匀，能够全面优化绝缘表现，这类管控思路有助于提升玻璃纤维套管运行可靠性，也为电子绝缘涂层工艺管控与工程应用提供实操依据。

【关键词】：硅橡胶涂层；玻璃纤维套管；涂层厚度；耐电压性能；绝缘稳定性

DOI:10.12417/3041-0630.26.10.012

引言

电子设备长期运行于复杂工况，玻璃纤维坯管因机械特性优良而被广泛用于绝缘结构，但其原生表面缺陷制约耐电压能力，硅橡胶涂层能有效弥补基材绝缘短板，涂层厚度成为决定复合绝缘体系综合性能的关键因素。当前厚度失控引发的耐压下降及性能波动等问题逐渐影响设备安全运行，结合绝缘技术发展要求，探究涂层厚度与玻璃纤维套管绝缘性能的内在关联，建立系统化厚度管控方案，对于提升电子绝缘装备品质、推动涂层工艺标准化具有现实参考价值。

1 硅橡胶涂层玻璃纤维套管绝缘应用基础研究

玻璃纤维坯管作为电子设备中常用的绝缘基材，机械性能优异且整体结构牢固，因其编织结构存在大量编织缝隙，带电运行环境中容易积聚水汽与杂质，形成天然绝缘缺陷并大幅降低耐电压能力。硅橡胶具备优异的绝缘性能、柔韧性以及表面疏水性，涂覆后可紧密贴合玻璃纤维坯管表面，封堵微观编织缝隙进而形成均匀连续的复合绝缘体系^[1]。该涂层不仅能隔绝外界环境介质侵蚀，还能优化表面电场分布、抑制泄漏电流产生。涂层厚度是影响复合绝缘体系的核心参数，厚度变化会直接改变介质耐压极限以及运行稳定性，深入探究厚度带来的性能差异，对于保障玻璃纤维套管绝缘指标达标、实现长期可靠运行构成重要前提。

2 硅橡胶涂层厚度差异化对玻璃纤维套管耐电压性能的影响表现

2.1 涂层厚度偏小弱化玻璃纤维套管击穿耐压能力

硅橡胶涂层厚度不足时，难以完整覆盖玻璃纤维套管表面的微观编织缝隙与凹凸结构，绝缘层会因此出现局部薄区甚至局部裸露，在外施电压作用下电场于绝缘薄弱位置集中聚集，

局部场强快速升高并不断冲击绝缘介质耐受极限。薄层硅橡胶无法有效阻隔导电通道形成，水汽和导电杂质更容易穿透涂层接触基材，促使表面泄漏电流持续增大，随着运行电压逐步提升，集中电场会率先击穿局部薄层区域再延伸至整个绝缘结构，大幅拉低玻璃纤维套管整体的击穿电压，持续的电场侵蚀还会逐步损伤涂层与基材的结合界面，进一步压缩绝缘安全余量，使得玻璃纤维套管即便在常规工况下也更容易发生击穿故障。

2.2 涂层厚度偏大造成玻璃纤维套管制造成本偏高

硅橡胶涂层超出合理厚度范围后，整体涂层用料体积显著增加，过量硅橡胶原料投入随之增多，批量生产过程中多余涂层材料无法回收利用，直接造成单件产品制造成本持续上升，过厚的涂层会增大涂层与玻璃纤维坯管之间的接触界面，多余涂覆物料持续形成不可逆的原料浪费，长期运行过程里还会出现局部热量堆积^[2]。热量无法及时散出会改变硅橡胶本身的物理与电气状态进而形成恶性循环，过高的原料投入不仅降低产品批量生产的经济效益，还会加速涂层材料老化、弱化硅橡胶原本具备的绝缘与防护性能，间接影响玻璃纤维套管在长期带电工况下的使用状态与安全水平。

2.3 涂层厚度波动破坏玻璃纤维套管绝缘稳定性

涂层厚度分布不均时，玻璃纤维套管表面会形成多处绝缘层薄厚不一的区域，各处绝缘耐受能力自然存在明显差距，电场在厚区与薄区之间重新分配，薄绝缘区域不得不持续承受更高电场负荷，泄漏电流分布随之变得杂乱且无规律，均匀性缺失的绝缘层无法构建统一稳定的防护体系，外界温湿度变化及污染物附着等环境因素会在绝缘薄弱位置诱发更明显的性能波动，连续运行过程中局部绝缘状态反复变化，整体耐电压指标难以保持恒定，绝缘表现时好时坏，这种不稳定状态大幅抬

升突发绝缘故障的概率，彻底打乱玻璃纤维套管既定的运行工况，严重威胁整套电子绝缘设备的平稳运行。如图1。



图1 硅橡胶涂层厚度管控逻辑与效果示意图

3 适配耐电压指标的硅橡胶涂层厚度管控方案

3.1 补足适配厚度强化玻璃纤维套管击穿耐压能力

按照绝缘运行要求将硅橡胶涂层补足至合理厚度后，玻璃纤维套管表面所有微观编织缝隙与凹凸结构能被完整覆盖，基材外侧随之形成连续、致密且均匀的绝缘防护层，完整涂层可有效阻断水汽、粉尘及各类导电杂质向基材内部渗透，从源头减少导电通路生成并避免局部区域出现电场集中现象。标准厚度的绝缘层能够均匀分担外部施加的电压载荷，促使电场在涂层表面与内部平稳分布，进而提升整体介质对高压电场的耐受上限，充足涂层厚度还能加固硅橡胶与玻璃纤维套管之间的结合界面、增强界面结合强度，防止长期带电运行过程里出现界面开裂或剥离等问题。依托这种完整的绝缘结构，玻璃纤维套管整体击穿耐压性能获得稳步提升，绝缘安全余量进一步加大，即便面对电压小幅波动或环境湿度偏高的工况，也能抵御电场冲击，有效规避局部击穿以及整体绝缘失效风险，保障设备稳定承受额定工作电压。

3.2 管控最优厚度控制玻璃纤维套管生产成本

严格将硅橡胶涂层控制在最优厚度区间内，既能保障基础绝缘能力又能有效缩减硅橡胶原料整体用量，批量生产中可减少不必要的物料投入，最优厚度不会造成涂层材料过度堆叠，

能够减少涂层内部以及涂层与基材之间多余附着层，从用料层面控制单件产品制造成本。适中的涂层厚度同时具备良好的散热条件，电场作用下生成的少量热量可以快速向外散发而不出现积聚问题，避免高温加速涂层老化失效，维持这一厚度标准可使硅橡胶始终保持稳定的电气特性、延缓材料老化速度，长期运行过程中产品生产经济性维持在合理区间，整套绝缘体系运行稳定性得到保障，不会因涂层过厚积热引发性能衰减，让玻璃纤维套管在长期带电工况下维持良好的绝缘状态。

3.3 均衡涂层厚度维系玻璃纤维套管绝缘稳定性

对硅橡胶涂层实施全表面厚度均衡管控后，玻璃纤维套管表面绝缘层厚薄不一的问题得以消除，各处绝缘介质因而具备一致的电气参数与耐压水平，厚度均匀的涂层可实现电场全域均匀分布，各处泄漏电流保持稳定状态，不会因局部绝缘薄弱出现电流突变或场强异常升高。统一的绝缘结构对外界环境变化拥有同等抵御能力，温湿度改变及污染物附着等外界干扰不会对局部区域造成差异化影响，涂层整体绝缘性能始终维持统一标准^[3]。厚度均衡的涂层结构受力与受热状态更加均衡，长期运行中不会出现局部应力集中或局部过热等问题，涂层形态与电气性能不易发生改变。依靠这种稳定统一的绝缘层，玻璃纤维套管耐电压指标能够长期保持恒定，绝缘表现不会出现大幅起伏，从结构层面杜绝突发绝缘故障，持续维持整套电子设备安全且平稳的运行状态。

4 结语

硅橡胶涂层厚度与玻璃纤维套管耐电压绝缘性能之间关联紧密，厚度不足会削弱击穿耐压能力，厚度过大则抬高产品制造成本，厚度不均又会破坏绝缘运行状态。依据绝缘运行需求落实厚度补足、区间管控与均匀化处理，各项绝缘指标均可得到有效改善，严格执行涂层厚度管控标准能够充分发挥硅橡胶的绝缘防护优势、弱化外界环境对玻璃纤维套管的干扰。这套管控思路还可规范涂层施工工艺，持续提升玻璃纤维套管整体绝缘水平与运行寿命，为电子绝缘构件的稳定应用提供必要保障。

参考文献：

[1] 陈奕昆.硅橡胶二氧化硅纳米复合材料的制备及阻隔应用[D].成都大学,2025.
[2] 曹阳,安义岩,刘会斌,等.套管用玻璃纤维增强环氧树脂老化后强度与色差演化研究[J].工程塑料应用,2023,51(1):109-114.
[3] 冉海燕.复合硅橡胶涂层对 GIS 中金属颗粒运动抑制研究[D].西安工程大学,2023.