

# 潮湿环境下电缆组装件的防腐蚀处理技术及效果验证

张立 刘宁 黄颖

四川航天燎原科技有限公司 四川 成都 610000

**摘要:** 潮湿环境下电缆组装件以电化学腐蚀为主, 存在多种失效形式。本文构建防腐蚀技术体系, 涵盖材料优化、结构密封、电化学防护等技术。通过模拟加速老化与现场暴露实验, 设置四组对照组与实验组对比, 测试腐蚀速率、电性能、机械性能等指标。结果表明, 完整防腐蚀技术体系能显著降低腐蚀速率, 维持电性能稳定, 减缓机械性能衰减, 综合得分高, 可保障电缆组装件在潮湿环境长期可靠运行。

**关键词:** 潮湿环境; 电缆组装件; 防腐蚀技术; 电化学腐蚀; 效果验证

引言: 在诸多工业与民用场景中, 电缆组装件常处于潮湿环境, 这使其面临严峻的腐蚀挑战, 电化学腐蚀主导下, 导体、绝缘层等部件易出现多种失效形式, 严重影响电缆性能与运行安全。为应对这一难题, 构建有效的防腐蚀处理技术体系迫在眉睫。本文聚焦潮湿环境下电缆组装件, 深入探究其腐蚀机理与失效形式, 构建涵盖多种技术的防腐蚀体系, 并通过实验验证其效果, 为相关防护提供参考。

## 1 潮湿环境下电缆组装件的腐蚀机理与失效形式

### 1.1 核心腐蚀机理

潮湿环境里, 电缆组装件核心腐蚀以电化学腐蚀为主, 化学与物理侵蚀协同作用。水分在绝缘层表面形成连续水膜, 溶解腐蚀性介质后成为导电电解质溶液。电缆导体常用金属与连接件、屏蔽层存在电极电位差, 构成原电池, 阳极金属离子溶解, 如铜变铜离子进入溶液。水分渗透绝缘层缝隙引发界面腐蚀, 破坏结合界面。潮湿还会加速绝缘材料老化降解, 增加水分渗透, 形成恶性循环。而且温度升高会提升溶液导电性, 加快反应进程, 使腐蚀速率呈指数级上升。

### 1.2 典型失效形式

潮湿环境下, 电缆组装件典型失效形式多样且相互关联。导体腐蚀失效表现为表面有均匀斑点或局部点蚀坑, 严重时产物堆积, 有效截面积减小、电阻增大、通电发热。绝缘失效是绝缘层电阻下降、介损增大甚至击穿放电, 因水分和腐蚀产物破坏绝缘结构。界面失效在导体与绝缘层等结合部位, 腐蚀破坏结合力致界面剥离、电场畸变。机械性能失效是抗张强度等下降、弯曲性能变差, 接头密封失效易断裂<sup>[1]</sup>。另外, 腐蚀产物还可能使屏蔽层失效, 影响信号传输稳定性。

## 2 潮湿环境下电缆组装件的防腐蚀处理技术体系

### 2.1 材料优化防护技术

材料优化防护技术通过选用耐蚀性优异的基础材料和功能改性材料, 从源头提升电缆组装件的抗腐蚀能力。导体材料采用镀锡、镀银或镀锌处理的铜导体, 镀层厚度控制在5-10 $\mu\text{m}$ , 利用镀层的牺牲阳极保护作用或屏障保护作用隔绝水分与腐蚀介质接触。绝缘材料选用交联聚乙烯、聚四氟乙烯等耐水解聚合物, 通过添加纳米二氧化硅、蒙脱土等无机填料改善材料抗渗透性能, 使水分渗透速率降低40%以上。接头密封材料采用硅橡胶、氟橡胶等弹性体, 这些材料具有优异的耐候性和耐化学腐蚀性, 且通过引入氟原子或硅氧键增强分子结构稳定性, 在85 $^{\circ}\text{C}$ 、85%相对湿度环境下长期使用无明显老化。在材料表面涂覆新型陶瓷基涂层, 涂层厚度为20-30 $\mu\text{m}$ , 采用溶胶-凝胶法制备, 形成致密的无机防护膜, 有效阻挡水分和腐蚀性离子渗透, 同时具备良好的耐高温和耐磨性能。

### 2.2 结构密封防护技术

结构密封防护技术通过优化电缆组装件的结构设计和密封工艺, 构建多重密封屏障阻挡水分侵入。电缆接头采用“阶梯式密封”结构, 从外到内依次设置金属外壳、弹性密封圈、密封胶层和绝缘密封套, 金属外壳采用螺纹连接并涂抹螺纹密封胶, 弹性密封圈选用邵氏硬度70-80的丁腈橡胶, 确保装配后压缩量达到30%以上。电缆终端头采用伞裙结构设计, 增加爬电距离至25mm/kV以上, 伞裙之间设置排水槽, 防止雨水积聚<sup>[2]</sup>。对于多芯电缆的缆芯间隙, 采用环氧树脂灌封处理, 灌封前对间隙进行真空脱气, 确保灌封胶充分填充无气泡, 形成整体密封结构。在电缆弯曲部位采用可弯曲密封套管, 套管与电缆本体通过热缩工艺紧密结合, 热缩温度控制在120-150 $^{\circ}\text{C}$ , 使套管收缩率达到50%以上, 有效密封弯曲部位的微小缝隙, 阻止水分沿电缆轴向渗透。

### 2.3 电化学防护技术

电化学防护技术针对电缆组装件的金属部件，通过调控电极电位抑制电化学腐蚀反应。牺牲阳极防护技术适用于电缆接头的金属外壳和屏蔽层，选用锌合金或镁合金作为牺牲阳极，将阳极与被保护金属部件电连接，阳极发生优先溶解，使被保护金属处于阴极极化状态，电位维持在-0.85V至-1.0V（相对于饱和甘汞电极），有效抑制腐蚀发生。外加电流阴极防护技术用于大型电缆桥架和接地系统，通过恒电位仪向被保护金属施加阴极电流，使金属表面形成稳定的钝化膜，电流密度控制在0.1-0.3mA/cm<sup>2</sup>，定期监测极化电位并调整电流参数。采用阳极保护技术对电缆组装件中的不锈钢部件进行防护，通过施加阳极电流使不锈钢表面形成致密的氧化铬钝化膜，钝化电位控制在0.2-0.5V，钝化时间持续30分钟，形成的钝化膜厚度达到5-8nm，显著提升不锈钢在潮湿酸性环境中的耐蚀性，腐蚀速率降低90%以上。

### 3 防腐蚀效果验证实验设计

#### 3.1 实验方法

采用模拟潮湿腐蚀环境的加速老化实验方法，结合现场环境暴露实验验证防腐蚀效果。加速老化实验选用温湿度循环腐蚀试验箱，设定实验参数为：温度循环范围-40℃至85℃，湿度范围40%至95%RH，循环周期为12小时（8小时高温高湿+4小时低温低湿），实验总时长为1000小时，每200小时取出样品进行检测。同时，进行盐雾腐蚀实验，选用5%氯化钠溶液，喷雾压力0.7MPa，喷雾量1-2mL/(h·cm<sup>2</sup>)，实验温度35℃，持续喷雾720小时。现场暴露实验选取沿海高湿度工业区和多雨山区两个典型环境，将样品固定在暴露架上，暴露高度1.5m，避免阳光直射和雨水直接冲刷，暴露时间12个月，每3个月进行一次现场检测。实验过程中采用实时监测系统，记录样品表面温度、湿度及腐蚀电位变化，确保实验条件稳定可控。

#### 3.2 测试指标

测试指标涵盖腐蚀状态、电性能、机械性能三大类，全面评估防腐蚀效果。腐蚀状态指标包括：腐蚀速率（采用重量损失法测定，计算单位面积每月腐蚀质量）、腐蚀面积率（通过高清显微镜观察，计算腐蚀区域占总表面积的百分比）、腐蚀产物成分（采用X射线衍射仪分析，确定腐蚀产物种类和含量）。电性能指标包括：绝缘电阻（采用2500V兆欧表测定，测试环境温度25℃，湿度50%RH）、介损角正切值（采用介损测试仪测定，测试频率50Hz）、导体直流电阻（采用双臂电桥测定，精度0.001Ω）、击穿电压（采用高压击穿试验仪测定，升压速率1kV/s）。机械性能指标包括：抗张强

度（采用万能材料试验机测定，拉伸速率50mm/min）、断裂伸长率（同步测定，计算断裂时伸长量与原长度的百分比）、接头拉伸强度（测定接头部位承受的最大拉力）、弯曲性能（采用弯曲试验机进行往复弯曲试验，记录断裂时弯曲次数）<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 对照组设置

为精准评估完整防腐蚀技术体系中各防护技术的作用效果，特设置四组对照组与实验组进行对比实验。对照组1作为空白对照组，选用未进行任何防腐蚀处理的电缆组装件。其导体为裸铜导体，未做任何表面处理；绝缘层采用普通聚乙烯材质，防护性能有限；接头处无密封处理，极易受到外界环境侵蚀。对照组2是单一材料防护组，仅运用材料优化防护技术。导体选用镀锡导体，可增强抗氧化能力；绝缘层采用交联聚乙烯绝缘，提升绝缘性能与耐热性。但不进行结构密封、电化学防护和工艺优化处理。对照组3为结构-工艺防护组，采用结构密封防护技术和工艺优化防护技术。通过合理的结构设计实现密封，防止外界物质侵入；对生产工艺进行优化，提高组装质量。但不进行材料优化和电化学防护。对照组4是电化学-材料防护组，采用材料优化防护技术和电化学防护技术，不进行结构密封和工艺优化。实验组则采用上述完整防腐蚀技术体系。各组样品规格统一，导体截面积均为4mm<sup>2</sup>，绝缘层厚度1.5mm，接头类型为压接式。每组设置5个平行样品，以此确保实验数据的可靠性和重复性，为后续分析各防护技术效果提供坚实依据。

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 腐蚀速率对比

实验结果显示，实验组与各对照组的腐蚀速率存在显著差异。加速老化实验1000小时后，实验组的平均腐蚀速率为0.02g/(m<sup>2</sup>·月)，腐蚀面积率仅为2.1%，X射线衍射分析显示腐蚀产物主要为少量氧化铜，无明显氯化物腐蚀产物。对照组1的平均腐蚀速率达到0.85g/(m<sup>2</sup>·月)，腐蚀面积率高达68.3%，腐蚀产物包含氧化铜、氢氧化铜及氯化铜。对照组2平均腐蚀速率0.15g/(m<sup>2</sup>·月)，腐蚀面积率15.7%；对照组3平均腐蚀速率0.18g/(m<sup>2</sup>·月)，腐蚀面积率18.2%；对照组4平均腐蚀速率0.16g/(m<sup>2</sup>·月)，腐蚀面积率16.5%。现场暴露12个月后，实验组腐蚀速率0.03g/(m<sup>2</sup>·月)，对照组1则达到0.92g/(m<sup>2</sup>·月)，充分表明完整防腐蚀技术体系能有效抑制腐蚀反应，单一或部分防护技术虽有效果，但远不及完整体系。

#### 4.2 电性能稳定性

电性能测试结果表明，实验组在实验过程中电性能

保持稳定,而对照组电性能衰减明显。加速老化1000小时后,实验组绝缘电阻为 $2.3 \times 10^{12} \Omega \cdot m$ ,仅较初始值( $2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot m$ )下降8%;介损角正切值为0.003,与初始值基本持平;导体直流电阻为 $0.0048 \Omega/m$ ,变化率 $\leq 1\%$ ;击穿电压为25kV,较初始值下降5%。对照组1绝缘电阻降至 $3.2 \times 10^8 \Omega \cdot m$ ,下降99.9%;介损角正切值升至0.085,增长27倍;导体直流电阻升至 $0.0092 \Omega/m$ ,增长91.7%;击穿电压降至8kV,下降68%。对照组2-4的电性能衰减程度介于实验组与对照组1之间,其中对照组2绝缘电阻下降45%,对照组3下降52%,对照组4下降48%。现场暴露12个月后,实验组各项电性能指标变化率均 $\leq 10\%$ ,而对照组1电性能已无法满足使用要求,证明完整防护体系能有效维持电性能稳定性。

#### 4.3 机械性能衰减

机械性能测试结果显示,实验组机械性能衰减幅度远低于对照组。加速老化1000小时后,实验组抗张强度为18.5MPa,较初始值(20MPa)下降7.5%;断裂伸长率为350%,下降8.3%;接头拉伸强度为12kN,下降6.2%;弯曲试验断裂次数为2000次以上,与初始值基本一致。对照组1抗张强度降至5.2MPa,下降74%;断裂伸长率降至80%,下降77.8%;接头拉伸强度降至3.5kN,下降70.8%;弯曲试验断裂次数仅为120次,下降94%。对照组2抗张强度下降28%,断裂伸长率下降32%,接头拉伸强度下降25%,弯曲断裂次数下降40%;对照组3抗张强度下降32%,断裂伸长率下降35%,接头拉伸强度下降28%,弯曲断裂次数下降38%;对照组4抗张强度下降30%,断裂伸长率下降30%,接头拉伸强度下降26%,弯曲断裂次数下降42%。现场暴露12个月后,实验组机械性能衰减率均 $\leq 15\%$ ,仍满足使用标准,而对照组2-4衰减率均超过50%。

#### 4.4 综合评价

结合各项实验数据进行综合评价,采用权重评分法

(腐蚀速率30%、电性能30%、机械性能40%)计算综合得分(满分100分)。实验组综合得分为92分,其中腐蚀速率得分28分、电性能得分29分、机械性能得分35分,表现出优异的防腐性能和使用稳定性,在加速老化1000小时和现场暴露12个月后,各项指标仍满足相关行业标准要求,可适用于高湿度、高腐蚀环境长期使用。对照组1综合得分仅为22分,各项指标均严重超标,无法在潮湿环境中使用<sup>[4]</sup>。对照组2综合得分65分,对照组3得分62分,对照组4得分64分,三者表现相近,表明单一或部分防护技术虽能提升防腐能力,但存在明显短板,如材料优化组易出现结构缝隙腐蚀,结构密封组易出现材料老化问题。综合分析表明,只有采用材料、结构、电化学、工艺相结合的完整防腐技术体系,才能实现电缆组装件在潮湿环境下的长期可靠运行。

#### 结束语

潮湿环境对电缆组装件危害大,易引发多种腐蚀与失效问题。本文提出的完整防腐技术体系,融合多种防护技术,经实验验证效果显著。与单一或部分防护技术相比,完整体系优势突出,能有效抑制腐蚀,保障各项性能稳定。此体系为潮湿环境下电缆组装件的防护提供了可靠方案,有助于提升其运行可靠性与安全性,对相关领域的发展具有积极推动作用。

#### 参考文献

- [1]王强,李明.天馈线系统腐蚀机理及防护技术研究[J].通信技术,2021,53(4):112-118.
- [2]陈建国,赵鹏.天馈线系统防腐蚀处理技术综述[J].电子工程,2022,50(6):78-83.
- [3]刘凤莲,卢金奎,张涵轶,等.高压电缆接头防火隔爆措施的有效性研究[J].高压电器,2023,59(11):258-268.
- [4]张华,刘伟.潮湿环境下电缆绝缘材料性能及维护方法分析[J].电气绝缘,2020,56(12):45-50.