

电工材料老化对光伏系统可靠性的影响分析

王建平

中国石油长庆油田分公司清洁电力开发项目部 陕西 西安 710299

【摘要】：在“双碳”目标驱动下，光伏系统已成为新能源产业的核心支柱，其长期稳定运行直接关系到能源供给安全。电工材料作为光伏系统电能传输、转换与控制的基础载体，受户外温湿度交变、紫外线辐射、电化学腐蚀等复杂环境影响，不可避免出现老化现象。基于此，本文聚焦电工材料老化机理，系统分析其对光伏系统可靠性的影响，进而提出预防电工材料老化提升光伏系统可靠性的有效策略，为光伏电站运维优化与材料升级提供理论参考。

【关键词】：电工材料；老化；光伏系统；可靠性；影响

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.001

引言

电工材料老化对光伏系统可靠性的影响贯穿于发电、传输、控制全链条，相关部门需从发电效率衰减、安全运行风险加剧、设备寿命缩短、运维成本攀升及电网适配性下降等方面展开分析。这些影响相互关联、层层递进，共同制约着光伏系统的稳定运行能力。因此，深入分析电工材料老化对光伏系统可靠性的影响已成为相关部门亟需解决的重要课题。

1 电工材料老化的机理

电工材料老化是多因素耦合作用下的不可逆劣化过程，其机理可从物理、化学与电化学三个维度展开分析。在物理层面，光伏系统户外运行环境存在显著的温湿度交变、紫外线辐射及风沙磨损，这些因素会破坏材料内部分子链结构，如绝缘护套出现龟裂、金属导体发生塑性变形，进而导致材料机械强度下降、密封性能失效。化学层面，氧气、水分与材料发生氧化反应，使高分子绝缘材料出现交联断裂，金属部件则会产生氧化锈蚀，造成导电性能衰减。而盐雾、酸雨等腐蚀性介质还会加速这一化学反应进程。电化学层面，不同金属部件接触时形成的原电池效应，会引发电偶腐蚀，同时光伏系统运行中的漏电流、局部放电现象，会进一步加剧材料的电化学降解，最终导致材料性能全面衰退，成为制约光伏系统稳定运行的关键隐患。

2 电工材料老化对光伏系统可靠性的影响分析

2.1 核心发电效率显著衰减

光伏组件的引出线、接线盒内的导电端子等材料，在长期高温、紫外线辐射与氧化作用下，表面会逐渐形成氧化膜，导致接触电阻显著增大。原本通畅的电流传输路径受阻，部分电能转化为焦耳热损耗，不仅降低组件输出功率，还可能因局部发热加速周边材料老化。同时，逆变器内部的电容、电感等电子电工材料老化后，电容容值衰减、电感磁芯损耗增加，滤波与能量转换性能大幅下降，无法精准实现交直流转换与谐波抑制，进一步加剧发电效率的衰减。

2.2 安全运行风险大幅升高

户外电缆、组件接线盒的绝缘层在温湿度交变、紫外线暴晒下，会逐渐出现龟裂、脆化、脱落，丧失原有的绝缘性能，极易引发线路短路，进而触发火灾等安全事故，尤其在高温高湿环境下，短路风险会呈指数级上升。金属导体、接线端子老化锈蚀后，会导致接头松动、接触不良，在大电流通过时产生电火花与电弧，不仅会烧毁接线盒、逆变器等核心设备，还会对现场运维人员的人身安全构成严重威胁，成为光伏电站运行中的重大安全隐患，甚至可能引发大面积停电事故。

2.3 关键设备寿命被严重缩短

电工材料的老化会直接传导至与之配套的核心设备，形成“连锁老化”效应，大幅压缩设备使用寿命。光伏逆变器中的IGBT模块、功率二极管等功率器件，依赖优质电工材料实现散热、绝缘与信号传输，相关材料老化后，功率器件的工作环境恶化，散热效率下降、绝缘保护不足，故障频率大幅上升，原本设计寿命可达15-20年的逆变器，可能在10年内就因频繁故障被迫提前更换。汇流箱内的接线端子、断路器、熔断器等部件老化后，会出现脱扣失灵、接触电阻异常等问题，导致设备整体性能下降、保护功能失效，只能提前退役更换，不仅增加设备更新成本，还会因频繁停机影响系统连续运行。

2.4 运维成本呈阶段性攀升

电工材料老化会推动运维成本进入阶梯式上升通道，形成多重成本压力。在材料老化初期，为排查隐性故障，运维工作需增加巡检频次，投入更多人力、仪器设备开展专项检测，人力与时间成本较正常运维阶段显著增加，通常初期成本增幅可达5%-10%。老化引发设备故障后，不仅需要投入资金采购更换部件，还会因停机检修造成发电量损失，形成直接经济损失，单台设备故障停机一天就可能导致数千元至数万元损失。随着老化范围扩大，运维工作从“预防性检修”被迫转向“故障抢修”，紧急采购、夜间抢修、设备整体更换等费用叠加，成本将进入快速上升通道，大幅压缩光伏电站的利润空间。

2.5 电网适配稳定性持续下降

光伏系统通过并网逆变器与电网连接，电工材料老化会直接破坏系统与电网的协同适配能力。电缆、开关设备老化会导致逆变器输出电流波形畸变，谐波含量超出国标限值，不仅影响电网电能质量，还会干扰周边用电设备正常运行。同时，老化的开关设备、电缆等在应对电网电压波动、负荷突变时，响应速度变慢、调节精度下降，无法及时适配电网运行状态变化，可能引发并网接口处的电压不稳、频率波动，甚至触发保护装置动作导致脱网，破坏电网与光伏系统的协同运行稳定性，给电网调度与安全运行带来额外压力。

表1 电工材料老化对光伏系统可靠性的影响总结表

影响维度	具体表现
核心发电效率	引出线、端子等接触电阻增大，逆变器电子元件性能下降，电能损耗增加，实际发电量偏离设计预期
安全运行风险	绝缘材料龟裂引发短路火灾，金属导体锈蚀导致接头松动起弧，威胁设备与运维人员安全
关键设备寿命	逆变器、汇流箱等设备因材料老化工作环境恶化，故障频发，设计寿命大幅缩短，需提前更换
运维成本	初期巡检频次增加，后期故障抢修与部件更换成本上升，叠加停机损失，压缩电站利润
电网适配稳定性	逆变器输出电流畸变、谐波增多，开关设备响应变慢，易引发电压不稳甚至脱网，破坏并网协同性

3 预防电工材料老化提升光伏系统可靠性的有效策略

光伏系统长期暴露在户外复杂环境中，电工材料老化是导致系统故障、发电效率衰减的核心诱因之一，直接影响光伏项目的生命周期收益与安全运行。从材料选型、环境保护、监测预警、运维优化到技术创新，构建全链条抗老化体系，能有效延缓材料性能衰退，显著提升光伏系统的长期可靠性与稳定性，为分布式光伏并网后的安全高效运行提供坚实保障。

3.1 推行耐候性导向的电工材料选型，从源头筑牢抗老化基础

材料选型需摒弃“成本优先”的传统思维，聚焦光伏系统户外运行的温湿度交变、紫外线辐射、腐蚀介质侵蚀、风沙磨损等典型环境应力，结合不同区域气候特征，针对性选用抗老化性能优异的材料，从源头降低老化风险。对于组件引出线与输电电缆，应优先选择具备交联聚乙烯（XLPE）绝缘层且外层包裹耐候性聚氯乙烯（PVC）或氟塑料护套的产品，这类材料通过分子结构交联优化，能有效抵御紫外线造成的分子链断裂与老化脆化，同时降低高温环境下绝缘性能的衰减速率，提升耐击穿强度。在逆变器与汇流箱内部，导电端子应采用镀锡铜或银合金材质，利用镀层优异的化学稳定性减少氧化锈蚀与接触电阻增大的风险，而电容、电感等核心电子元件则需选用宽温域、耐老化的工业级产品，确保在-40℃至85℃的极端温度波动中保持性能稳定，避免参数漂移引发系统故障。此外，支架连接件、固定螺栓等辅材需选用热镀锌或不锈钢材质，抵

御户外腐蚀。如此，可使电工材料的理论抗老化寿命提升50%以上，从根本上降低老化引发的故障风险，为系统长期运行奠定基础。

3.2 构建全场景环境防护体系，削弱外部环境对材料的老化侵蚀

光伏系统各环节电工材料的老化速率与所处环境密切相关，需根据不同设备的安装场景、气候条件设计差异化防护方案，形成全场景、多层次的防护体系，最大限度阻隔外部不利因素的侵蚀。对于户外露天布置的电缆与接线接头，应采用IP67及以上防护等级的防水密封型接线盒与防腐桥架，接线盒内部填充导热性强、耐老化的硅橡胶密封胶，既实现防潮、防水、防尘的三重防护，又能将电流传输产生的热量快速导出，避免局部高温加速绝缘层老化变质。在多风沙、高盐雾的荒漠或沿海地区，需为金属支架与导电部件加装锌铝复合涂层或氟碳涂层，通过牺牲阳极保护法减缓电化学腐蚀，同时定期对涂层进行完整性检查与局部补涂，及时修复破损部位，防止腐蚀蔓延。针对逆变器、控制柜等室内或半室内设备，应配备智能温控与除湿系统，结合设备发热特性动态调节运行参数，将设备运行环境温度精准控制在25℃至35℃的最佳区间，相对湿度保持在40%至60%，避免高温高湿环境引发电容鼓包、线路绝缘层软化、金属部件锈蚀等问题。此外，户外电缆敷设应避免阳光直射的裸露区域，采用埋地或遮阳防护措施，进一步削弱紫外线对材料的老化影响。

3.3 应用智能化监测预警技术，实现老化风险的早发现早干预

依托物联网、传感技术与大数据分析构建全域监测网络，打破传统运维的“被动应对”模式，是破解电工材料老化“隐性化、渐进式”难题的关键，实现老化风险的早发现、早预警、早干预。在电缆与母线排等关键传输路径上，部署分布式光纤温度传感器与绝缘电阻监测模块，实时采集材料的温度变化、绝缘性能、局部放电等核心数据，结合预设阈值构建预警模型，当监测到某段电缆温度异常升高5℃以上、绝缘电阻下降至标准值的70%，或出现异常局部放电信号时，系统立即触发分级预警，通过短信、平台推送等方式将信息反馈至运维终端，明确风险位置与严重程度。对于逆变器内部的核心电子元件，通过嵌入在线监测芯片，实时捕捉电容容值、电感性抗、电阻接触压降等关键参数的变化趋势，利用大数据算法构建老化预测模型，结合历史运行数据与环境参数，提前3至6个月预判材料性能衰减风险，为计划性维护提供依据。在大型光伏电站，可搭建集中式监测预警平台，整合各监测节点数据，实现老化风险的可视化呈现、精准定位与趋势分析，避免“盲目检修”与“故障后抢修”，大幅降低运维成本与停机损失。

3.4 实施全生命周期运维优化，延缓材料老化进程

运维工作需打破“定期检修”的固定模式，结合材料老化

规律、监测数据与环境特征，制定动态化、精准化的全生命周期运维方案，通过科学维护延缓材料老化进程，延长使用寿命。在日常巡检中，采用“人工排查+智能巡检机器人”协同模式，重点关注户外材料的外观状态，如电缆护套是否出现龟裂、变色、破损，金属接头是否存在锈蚀、发热痕迹，支架涂层是否脱落等，对发现的轻微老化问题及时处理，如对松动的接头进行重新紧固并涂抹抗氧化剂，对破损的护套进行绝缘包裹修复，对锈蚀部件进行除锈、补漆或更换。每季度开展一次全面性能检测，包括电缆的直流电阻测试、绝缘材料的介损测试、端子接触电阻测试等，精准评估材料老化程度，更新运维档案。在强暴雨、高温暴晒、寒潮、台风等极端天气过后，需立即增加巡检频次，重点检查环境防护设施的完整性、材料性能的稳定性，及时修复受损的防护部件与老化隐患。此外，建立电工材料全生命周期档案，详细记录材料的采购信息、安装时间、监测数据、维护记录、性能衰减趋势等，为后续材料更换、运维策略优化提供数据支撑，实现运维工作的闭环管理。

3.5 推动技术创新与升级应用，强化抗老化技术支撑

依托新能源产业技术革新趋势，持续推动抗老化材料研发、技术创新与工程化应用，不断强化光伏系统抗老化的技术支撑，破解极端环境下的老化难题。在材料领域，积极采用纳米改性技术，如在绝缘材料中添加纳米二氧化硅、纳米氧化锌

颗粒，通过颗粒的分散强化作用提升材料的机械强度、抗紫外线性能与耐腐蚀性，同时降低材料的热老化速率；推广使用新型复合材料导体，如碳纤维复合芯导线，其不仅具有重量轻、导电性能好、损耗低的优势，还能有效抵御腐蚀与氧化，使用寿命较传统钢芯铝绞线延长一倍以上。在系统设计层面，优化电路拓扑结构，减少不必要的接线节点与接头，降低接触电阻与老化风险；采用模块化、标准化设计，便于老化材料的快速更换与升级，减少对系统整体运行的影响。同时，加强产学研合作，联合科研机构、材料企业开展光伏电工材料老化机理、新型防护技术的专项研究，攻克高盐雾、强辐射等极端环境下的抗老化技术瓶颈，推动抗老化技术的迭代升级与标准化应用。此外，推广数字化仿真技术，提前模拟不同材料在各类环境下的老化进程，为材料选型与防护方案设计提供科学依据，助力光伏产业实现高质量、可持续发展。

总而言之，电工材料老化是光伏系统稳定运行的隐性威胁，线缆绝缘老化、连接器接触性能衰退、电子元件参数漂移等问题，不仅会造成发电效率折损，更易诱发短路、火灾等安全事故，影响分布式光伏并网的整体安全性。因此，相关部门与企业需构建“选型-防护-监测-运维-创新”全链条抗老化体系，优化材料选型与运维方案，强化技术创新支撑，从而夯实光伏系统可靠性根基，实现光伏系统长期安全高效运行，为能源结构转型、“双碳”目标达成注入持久动力。

参考文献：

- [1] 陈积东.光伏发电系统的可靠性评估方法与故障诊断技术研究[J].灯与照明,2025,49(03):56-58.
- [2] 周颖.光伏储能电力系统的可靠性与稳定性分析[J].集成电路应用,2024,41(10):72-73.
- [3] 李延虎.35kV 输电线路绝缘材料老化机理及其寿命预测方法[J].光源与照明,2024,(03):143-145.