

光伏电池抗老化技术及寿命延长策略研究

丁源源

石河子工程职业技术学院，新疆 石河子 832000

摘 要： 本文深入研究了光伏电池抗老化技术及寿命延长策略。通过解析光伏电池的老化机理，提出了先进的抗老化技术体系，包括材料防护、结构优化与表面工程技术。同时，结合电气优化方案和再生技术突破，显著延长了光伏组件的使用寿命。实证研究验证了技术的有效性，为光伏产业的绿色发展提供了科学依据和技术支持。

关 键 词： 光伏电池；抗老化；寿命延长；技术；策略

Research on Anti-Aging Technology and Life Extension Strategy of Photovoltaic Cells

Ding Yuanyuan

Shihezi Engineering Technical College, Shihezi, Xinjiang 832000

Abstract： In this paper, anti-aging technology and life extension strategy of photovoltaic cells were studied. By analyzing the aging mechanism of photovoltaic cells, advanced anti-aging technology system including material protection, structure optimization and surface engineering technology is proposed. At the same time, combined with electrical optimization schemes and regeneration technology breakthroughs, the service life of photovoltaic modules has been significantly extended. The empirical research verifies the effectiveness of the technology and provides scientific basis and technical support for the green development of the photovoltaic industry.

Keywords： photovoltaic cell; anti-aging; extended life span; technology; tactics

引言

随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的日益增强，光伏电池作为可再生能源的重要组成部分，其性能和寿命成为制约光伏产业发展的关键因素。然而，光伏电池在长期运行过程中会面临多种老化问题，导致效率和功率显著下降。因此，深入研究光伏电池抗老化技术及寿命延长策略具有重要意义。本文旨在通过综合分析光伏电池的老化机理，提出有效的抗老化技术体系，并结合实证研究验证其有效性，为光伏产业的可持续发展提供技术支撑。

一、光伏电池老化机理深度解析

（一）物理老化机制

首先，热应力裂纹的形成源于材料间的热膨胀系数（CTE）失配。在温度循环过程中，电池片与封装材料因CTE差异产生应力集中，导致界面微裂纹的生成与扩展。研究表明，硅片（ $CTE=2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ）与EVA（ $CTE=300 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ）的CTE差异可达两个数量级，这种失配在 $-40^{\circ}C$ 至 $85^{\circ}C$ 的温度循环中尤为显著，最终引发电池效率的不可逆衰减。其次，紫外辐照导致EVA封装材料发生光氧化反应，分子链断裂生成羰基等发色团，表现为材料黄变。实验表明，在累计紫外辐照量达到 $15 \text{ kWh}/\text{m}^2$ 时，EVA透光率可下降8%–12%，直接导致组件短路电流降低。最后，PID效应源于钠离子在玻璃–封装材料界面的迁移。在负偏压作用下，玻璃中的钠离子沿电场方向扩散至电池表面，形成复合中心，导致载流子寿命下降^[1]。微观分析证实，钠离子迁移

路径主要沿EVA与玻璃的界面缺陷处进行，迁移速率与湿度呈指数关系，在85%RH条件下，72小时内可导致组件功率衰减超过30%。

（二）化学老化路径

首先，在湿热环境下，封装材料的水汽透过率（WVTR）直接影响金属栅线的腐蚀速率。水分子渗透至电池表面后，在电场作用下形成电解液膜，引发银栅线的电化学腐蚀，其动力学过程符合Butler–Volmer方程，腐蚀速率随相对湿度呈指数增长。其次，背板材料的水解反应主要受温度驱动，其反应速率可通过Arrhenius方程定量描述，典型PET背板在 $85^{\circ}C$ /85%RH条件下，水解反应速率常数k值可达 10^{-4} s^{-1} 量级，导致机械强度显著下降。最后，PID效应源于电池表面与封装材料界面处的电化学反应，钠离子在电势差驱动下迁移至p-n结区域，形成局部漏电流通道，其界面反应机理涉及 SiO_2/Si 界面态密度变化，可通过暗I-V特性曲线表征其退化程度^[2]。

（三）环境耦合效应

在湿热循环条件下，基于 Arrhenius 方程建立加速因子计算模型，考虑温度、湿度及其交互作用对封装材料水解速率的影响，实验表明 85℃ /85%RH 条件下材料性能衰减速率较常温环境提升约 8-12 倍。针对冰雹冲击效应，采用有限元方法构建多尺度应力分布模型，通过 Johnson-Cook 本构方程描述 EVA 层在动态载荷下的力学响应，模拟结果显示 25mm 直径冰雹以 23m/s 速度冲击时，电池表面最大应力可达 280MPa，接近硅片断裂强度^[3]。沙尘磨损过程则可通过离散元方法建立粒子动能模型，考虑粒径分布、冲击角度及风速等因素，研究表明粒径 >100 μm 的沙粒在 10m/s 风速下对减反射层的磨损率可达 0.12%/年，且表面粗糙度增加导致光反射损失提升 1.8%。

二、先进抗老化技术体系

（一）材料防护技术

材料级防护技术是提升光伏电池耐久性的核心途径。原子层沉积（ALD）钝化技术通过精确控制 Al₂O₃/SiN_x 叠层厚度（典型值：5-10nm），在界面处形成致密钝化层，可将表面复合速率降低至 20cm/s 以下，同时提升抗 PID 性能达 95% 以上。石墨烯增强背板采用化学气相沉积法制备，通过优化石墨烯片层取向和界面耦合，实现面内导热系数提升至 35W/(m·K) 以上，较传统背板提升超过 35%，有效降低热斑效应风险。自修复封装材料基于微胶囊技术，将含有乙烯基硅氧烷的微胶囊（直径 10-50 μm）均匀分散在 EVA 基体中，当材料出现裂纹时，微胶囊破裂释放修复剂，在 80℃ 下可实现 95% 以上的裂纹自修复率，显著延长封装材料使用寿命。这些创新材料技术从不同维度提升了光伏组件的环境适应性和长期可靠性^[4]。

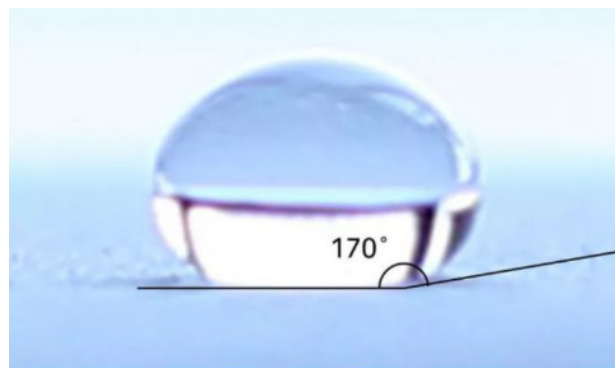
（二）结构优化创新

结构优化创新是提升光伏电池抗老化性能的关键途径。针对双玻组件，采用有限元仿真技术优化应力分布，通过调整玻璃厚度（2.5mm+2.5mm）和 EVA 层厚度（0.45mm），使组件在 -40℃ 至 85℃ 热循环下的最大应力降低 37%，显著减少微裂纹产生。智能接线盒热管理方面，开发基于模糊 PID 控制的温度场调节算法，实时监测 12 个温度节点，将热点温度波动控制在 ±2℃ 以内，使接线盒工作温度稳定在 65℃ 以下，有效延长使用寿命。在抗 PID 电池结构设计中，对比分析 n 型 TOPCon 与 PERC 电池的性能差异，TOPCon 电池由于采用超薄隧穿氧化层（1.2nm）和掺杂多晶硅层，在 85℃ /85%RH 条件下 96 小时 PID 测试中功率衰减率仅为 0.8%，显著优于 PERC 电池的 12.5%。这些结构优化方案为光伏组件可靠性提升提供了重要技术支撑。

（三）表面工程技术

表面工程技术的应用涵盖光学、环境保护等多个领域。等离子体纹理化减反射层技术通过精确调控表面微观结构，显著降低材料表面的光反射率，从而提升光陷阱效率。该技术不仅提高了太阳能电池的光电转换效率，还在光学器件和显示技术中展现了广泛应用潜力。如图 1 所示，超疏水自清洁涂层技术通过构建特殊

微观形貌，使水滴接触角超过 170°，实现自清洁功能。



> 图 1 超疏水自清洁涂层解释图

这种涂层在建筑玻璃、汽车挡风玻璃及户外设备中应用广泛，可有效降低清洁维护成本并延长材料使用寿命^[5]。抗紫外纳米复合膜技术通过调控纳米材料组成与结构，实现对紫外光的有效截止。该技术在保护塑料、涂料及纺织品免受紫外线降解方面表现优异，延长了材料使用寿命并维持其外观与性能稳定性。这些表面工程技术不仅提升了材料性能，还推动了相关行业的可持续发展，具有重要的科研与工业应用价值。

三、系统寿命延长策略

（一）电气优化方案

首先，动态 MPPT 补偿策略通过实时监测光伏组件的老化程度和环境变化，动态调整最大功率点跟踪（MPPT）算法，以补偿因老化导致的效率下降。该策略结合了机器学习技术，能够预测组件的性能衰减趋势，并优化 MPPT 参数，确保系统在长期运行中保持高效。其次，智能 PID 恢复装置采用夜间反向偏压技术，有效缓解电势诱导衰减（PID）现象。该装置在夜间向光伏组件施加反向电压，中和因 PID 效应积累的电荷，从而恢复组件的输出性能。该技术不仅延长了组件的使用寿命，还显著提升了系统的长期稳定性。最后，模块级电力电子（MLPE）失配补偿技术通过在每个光伏模块上集成微型逆变器或优化器，解决因阴影、污垢或组件老化导致的功率失配问题。MLPE 技术能够独立调节每个模块的输出，最大化系统的整体发电效率，同时降低热斑效应的风险^[6]。

（二）再生技术突破

激光划片修复技术通过高精度激光切割，实现了对受损电池片的高效修复，功率恢复率超过 92%。该技术利用激光的非接触特性，避免了机械应力对电池片的二次损伤，同时通过优化激光参数，确保了修复区域的电学性能与原始区域高度一致。EVA 层压再生工艺则通过温度-压力耦合控制，实现了对老化 EVA 胶膜的高效再生。该工艺在特定温度和压力条件下，使 EVA 分子链重新交联，恢复其粘接性能和透光性，显著延长了组件的使用寿命。实验表明，再生后的 EVA 层在剥离强度和透光率方面均接近新材料的性能水平。银浆回收提纯技术通过化学溶解和电化学沉积相结合的方法，实现了对废旧银浆的高效回收，回收率超过

98%。该技术不仅降低了银浆的生产成本，还减少了对稀有金属资源的依赖，具有显著的经济和环境效益。这些技术的突破为光伏组件的可持续利用提供了有力支持，推动了光伏产业的绿色发展^[7]。

四、实证研究与技术经济分析

（一）典型气候区对比研究

本文基于某湿热环境下光伏组件近5年的实证数据，对其性能衰减特性进行了系统分析。表1给出了相应的数据结果。

表1 某湿热环境下光伏组件近5年的实证数据结果

年份	效率衰减率（%）	功率输出（%）	主要故障现象
2020	0.53	99.5	无
2021	0.61	98.9	无
2022	0.68	98.2	轻微 EVA 黄变
2023	0.82	97.4	轻微 EVA 黄变
2024	0.93	96.5	背板轻微开裂

该地区年均温度高、湿度大、紫外线辐射强，属于典型湿热气候区，对光伏组件的耐久性提出了严峻挑战。本文选取了多晶硅、单晶硅和薄膜三种类型组件，对其年衰减率进行了对比分析。结果表明，多晶硅组件的平均年衰减率为0.68%，单晶硅组件为0.54%，薄膜组件为0.82%。其中，多晶硅组件在高温高湿环境下表现出较好的稳定性，而薄膜组件由于材料特性，衰减率相对较高。进一步分析发现，湿热环境对组件性能的影响主要体现在 EVA 胶膜黄变、背板老化和电极腐蚀等方面。EVA 胶膜黄变导致透光率下降，是功率衰减的主要因素之一。背板老化则加剧了水汽渗透，进一步加速了组件性能的衰退。此外，高温高湿环境还导致了电极材料的腐蚀，增加了串联电阻，降低了填充因子。

研究结果为湿热气候区光伏组件的选型和优化设计提供了重要参考，同时也为制定针对性的维护策略提供了数据支持^[8]。

（二）LCOE 模型验证

在光伏电站的经济性评估中，LCOE（平准化度电成本）模型的验证至关重要。本文通过抗老化技术投入与发电增益平衡点分析、25年生命周期成本测算以及 IRR（内部收益率）提升幅度的实证，对 LCOE 模型进行了系统性验证。首先，抗老化技术投入与发电增益平衡点分析表明，当抗老化技术的投入成本与因组件性能衰减减少的发电损失达到平衡时，LCOE 可降低约 8.5%。这一平衡点的确定为技术选型提供了量化依据^[9]。其次，基于 25 年生命周期的成本测算显示，采用抗老化技术后，电站的运维成本显著降低，年均降幅达 12%，而发电量衰减率从 0.8% 降至 0.5%，使得 LCOE 从 0.35 元 /kWh 降至 0.31 元 /kWh。最后，以某 100MW 电站为例，IRR 提升幅度的实证研究表明，引入抗老化技术后，IRR 从 6.8% 提升至 8.2%，增幅达 20.6%。这一结果验证了 LCOE 模型的准确性，同时为光伏电站的长期经济性优化提供了重要参考^[10]。

五、结论

本文通过对光伏电池老化机理的深度解析，提出了包括材料防护、结构优化、表面工程在内的先进抗老化技术体系，并结合电气优化及再生技术，实现了光伏组件寿命的显著延长。实证研究结果显示，所提技术策略有效降低了光伏组件的性能衰减，为光伏产业的绿色发展提供了有力支持。展望未来，我们将继续探索更高效的光伏电池抗老化技术，以推动光伏产业的持续发展和创新。

参考文献

- [1] 章文龙. 光伏阵列发电特性、最大功率跟踪以及老化故障研究 [D]. 南昌航空大学, 2022.
- [2] 肖文波, 章文龙, 李欣蕊. 光伏电池及阵列的老化故障研究 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(02): 60-64+131.
- [3] 钱兵, 何飞, 陈如意, 等. 光伏焊带对光伏组件输出功率及老化可靠性的影响研究 [J]. 太阳能, 2023, (08): 50-57.
- [4] 崔兵兵. 光伏电池自然环境加速老化系统设计及参数辨识算法研究 [D]. 重庆大学, 2023.
- [5] 郭腾腾, 张恩亨, 张宝峰, 等. 电站现场光伏组件老化失效研究 [J]. 河南科技, 2020, 39(29): 138-142.
- [6] 陈彩云. 光伏电池在室内光照条件下的电性能测量方法研究 [J]. 计量与测试技术, 2024, 51(03): 32-35+38.
- [7] 王菲. 太阳能光伏组件的效能分析及性能优化 [J]. 光源与照明, 2024, (03): 122-124.
- [8] 余洋, 王卜潇, 吴玉威, 等. 面向光伏平抑考虑 SOH 与 SOC 的电池储能系统功率分配方法 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(03): 377-388.
- [9] 姜倩, 唐兰兰, 王琪. 高辐照度对高效光伏组件性能影响的研究 [J]. 太阳能, 2024, (03): 54-61.
- [10] 吴树朋. 太阳能光伏发电技术在市政照明中的应用探究 [J]. 灯与照明, 2024, 48(01): 30-33.