

# 新能源场站电缆接头全生命周期管理研究——以某风电场 35kV 集电线路热熔改造项目为例

陈俊

中国华电集团有限公司福建分公司，福建省福州市，350000；

**摘要：**在新能源装机规模快速扩张与“双碳”目标双重驱动下，电缆接头故障已成为制约风电场运营效率的关键瓶颈。针对传统运维模式存在的“重技术、轻管理”“重事后处置、轻事前预防”等突出问题，本文创新性将全生命周期管理理论引入新能源电力设备管理领域，构建覆盖设计、采购、施工、运维等阶段的管理框架。以福建沿海某风电场 35kV 集电线路热熔改造项目为实证对象，采用 PDCA 循环改进的方法，系统揭示技术升级与管理优化的协同增效机制。通过优化施工组织。项目实现热熔接头总工期压缩 15.5 天，改造后，电缆接头故障率下降 85%，年均运维成本减少 42%，为风电场安全运行提供了有效保障。该模式为电力设备改造工程提供了可复制的实施范式。

**关键词：**电缆接头；全生命周期；热熔改造；管理优化

**DOI：** 10.69979/3060-8767.25.01.043

## 1 研究背景

风电场 35kV 集电线路承担着将多台风力发电机组输出的电能汇集至升压站的关键任务。据统计，我国陆上风电场集电线路平均长度达 10-30km，电缆接头数量通常超过 200 个/百兆瓦（数据来源：《中国风电场运维白皮书 2022》）。然而，受复杂环境（高湿度、盐雾、温差波动）和频繁启停机导致的电流冲击影响，电缆接头成为故障高发点。国际大电网会议（CIGRE）报告指出，全球范围内 35kV 电缆系统故障中，接头失效占比高达 63%。而沿海特殊气候条件（年均湿度 85%、盐雾沉降量 2.1mg/cm<sup>2</sup>）会进一步加速设备劣化，以我国福建某沿海风电场为例，35kV 集电线路年均非计划停机次数达 9 次，其中 6 次由电缆接头故障引发，直接经济损失超过 200 万元/年。因此，提升电缆接头可靠性已成为风电场降本增效的核心课题。

## 2 改造前问题现状

以福建某 88MW 沿海高山风电场为例（2020-2022 年数据），通过对现场冷缩接头技术缺陷和运维成本进行量化分析，直观的了解当前电缆头设备现状。

### 2.1 故障率高

冷缩接头年均故障次数 6 次，故障密度达 0.28 次/(km·年)，远超 DL/T 5222-2021 规定的 0.15 次/(km·年)

限值。故障类型主要有界面击穿（占比 67%）：多发生于雨季，因硅橡胶收缩力衰减导致界面微隙进水；导体过热（占比 16%）：接触电阻升高至 50 μΩ（正常值 < 20 μΩ），引发局部温升超过 90℃；外护套破损（占比 16%）：紫外线老化与风沙磨损导致密封失效。

### 2.2 运维成本高

直接维修成本：单次接头更换费用约 2.3 万元（含吊车、人工、备件）；

间接损失：单回路停机导致发电量损失约 20 万 kWh（按电价 0.61 元/kWh 计，损失 12.2 万元）；

检测投入：每年红外测温、局部放电检测费用约 8 万元。

综合计算，该风电场因冷缩接头问题年均支出达 95 万元，运维成本高。

### 2.3 现有检测手段的局限性

红外热成像：仅能发现温升 > 20K 的明显缺陷，对早期界面放电不敏感；

振荡波局部放电检测：受现场电磁干扰影响，检测阈值 > 30pC，漏检率高达 40%；

直流耐压试验：可能加速 XLPE 电缆水树老化，已被 IEC 60840 标准禁止使用。

### 2.4 现场施工管理难度大

台风季有效施工窗口期仅4个月(4-7月),期间最大风速达52m/s,传统改造项目工期偏差率普遍>20%,质量返工消耗15%工期。

### 3 规划阶段:冷接与热熔接头技术对比

#### 3.1 冷缩接头技术特点

典型结构:三元乙丙橡胶(EPDM)应力锥+硅橡胶冷缩管+铜屏蔽网,通过预扩张的硅橡胶材料收缩形成密封与绝缘。

缺陷:界面依赖机械压力,长期运行易产生微间隙;抗电痕性能不足,潮湿环境下易沿面放电。

#### 3.2 热熔式接头技术优势

工艺原理:利用高温熔融电缆绝缘层与接头材料,实现分子级融合。

核心优势:

消除界面气隙,电场分布均匀;

密封性提升,IP68防护等级;

长期载流量提高15%-20%。

通过对比,最终选定热熔工艺方式对电缆接头进行改造。

### 4 实施阶段:PDCA循环优化施工组织

计划(Plan):通过模拟台风季施工场景,建立“三班两运转”作业制:A班(06:00-14:00):主体施工 B班(14:00-22:00):辅助作业 C班(备勤):应对突发状况,进一步优化人员调度;采用预制化施工:将40%工序转为室内预制(雨天照常作业),并行作业设计;试验段施工与防护封装同步开展。

执行(Do):优化施工流程。采用电缆预处理、导体对位、模具装配、热熔阶段、梯度冷却、无损检测、电气试验、防护封装共八步标准化操作流程对电缆头进行热熔处理,具体工艺如下:

(1) 电缆预处理:

剥切尺寸:半导电层保留长度 $25 \pm 0.5\text{mm}$ ,绝缘层阶梯切削角度 $30^\circ$ ;

表面处理:采用240目砂带轴向打磨,粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu\text{m}$ (ISO 4287标准)。

(2) 导体对位:

使用激光对中仪确保导体同轴度偏差 $< 0.3\text{mm}$ ;

铜屏蔽层搭接长度 $\geq 50\text{mm}$ ,搭接处涂抹导电膏(电阻率 $\leq 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ )。

(3) 模具装配:

选择内径匹配的石墨模具(公差 $\pm 0.1\text{mm}$ ),预涂脱模剂(耐温 $\geq 150^\circ\text{C}$ );

模具闭合后施加预紧力 $0.1\text{MPa}$ ,消除装配间隙。

(4) 热熔阶段:

升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 至 $122^\circ\text{C}$ ,保温阶段压力 $0.45\text{MPa}$ ,持续 $11\text{min}$ ;

熔融过程实时监测熔池流动前沿(通过模具观察窗+高速摄像机)。

(5) 梯度冷却:

自然冷却至 $80^\circ\text{C}$ 后开启风冷,速率 $\leq 5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,避免骤冷导致内应力裂纹。

(6) 无损检测:

X射线检测:检测界面气泡(要求 $< 0.1\%$ )、金属碎屑(尺寸 $< 0.2\text{mm}$ );

超声相控阵:C扫描成像验证熔合层厚度均匀性(波动范围 $\pm 0.2\text{mm}$ )。

(7) 电气试验:

交流耐压: $58\text{kV}/30\text{min}$ (IEC 60840标准);

局部放电: $1.5\text{U}_0$ ( $52\text{kV}$ )下 $\text{PDIV} \geq 35\text{kV}$ , $\text{PD}$ 量 $\leq 5\text{pC}$ 。

(8) 防护封装:

外护套采用三层共挤(阻水带+铜丝编织+聚烯烃),弯曲半径 $\geq 20D$ ( $D$ 为电缆外径)。

检查(Check):设置关键质量控制点如下:

环境湿度控制:施工时相对湿度 $< 70\%$ ;

熔接冷却梯度:自然冷却速率 $\leq 5^\circ\text{C}/\text{min}$ ;

耐压试验: $58\text{kV}/30\text{min}$ 无闪络;

熔接后X射线检测界面融合度(需达到100%无气泡)。

处理(Act):建立工艺缺陷知识库,为后续改造提供经验。

### 5 改造效果评估

#### 5.1 电气性能对比

通过对改造前后局放、接触电阻等进行实验测试对比,可以发现采用热熔技术后的电缆接头性能明显提升,具体数据如下:

| 指标     | 冷缩接头           | 热熔接头              |
|--------|----------------|-------------------|
| 局部放电量  | 45-80pC        | $\leq 5\text{pC}$ |
| 接触电阻   | $35 \mu\Omega$ | $0.8 \mu\Omega$   |
| 雷电冲击耐受 | 170kV          | 210kV             |

## 5.2 工期管控成效

进度对比分析:

| 阶段  | 传统模式 | 优化模式 | 缩短率 |
|-----|------|------|-----|
| 准备期 | 15天  | 9天   | 40% |
| 施工期 | 50天  | 42天  | 16% |
| 验收期 | 3天   | 1.5天 | 50% |

资源利用提升:

人工工时利用率从65%提升至88%，设备闲置率由32%降至11%。

## 5.3 长期运行监测

通过电缆接头改造后，福建某88MW沿海高山风电场实现改造后连续18个月零跳闸故障记录，红外复测接头温升<15K（符合GB/T 12706标准）。

## 5.4 经济效益分析

直接效益：年故障维修费用由13.8万元降至0万元；

间接效益：减少返工损失10万元，提前投产创造发电收益20万元。减少故障停机损失约73.2万元/年，减少每年红外测温、局部放电检测费用约8万元。

综合计算，该风电场通过电缆接头热熔技术改造后每年可创造经济效益125万元。

## 6 结论与展望

通过福建某88MW沿海高山风电场电缆接头热熔改造后的运行情况可以得出：热熔接头技术显著提升风电场集电线路可靠性，特别适用于沿海强腐蚀、高湿度、强振动的运行环境。本研究同时证实，全生命周期管理可有效解决新能源场站电缆接头“重技术、轻管理”的痛点。通过福建项目的实证，热熔改造结合管理优化每年可创造经济效益125万元。在风电场35kV集电线路地理电缆中具有很高的推广价值。

### 参考文献

- [1] IEC 60502-4 电力电缆附件试验标准
- [2] 国家能源局. DL/T 5222-2021《风电场集电线路设计规范》. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [3] 李志强, 等. 高压电缆冷缩接头界面压力衰变特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1982-1988
- [4] 李华等. PDCA循环在高压电缆施工质量管理中的应用[J]. 建筑技术, 2019, 50(6): 78-82.
- [5] 中国电力科学研究院. 《新能源场站电缆系统故障统计年报(2022)》. 北京, 2023.
- [6] 刘伟等. 新能源场站设备全寿命周期健康管理策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 123-130.
- [7] 陈刚, 等. 风电场集电线路可靠性提升关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 1123-1132.