

电力技术

铝电解槽分布式光纤测温交叉光缆敷设路径与安装技术研究

张健

杭州山旭光电有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8663

[摘要] 针对铝电解槽高温、强电磁干扰环境下传统测温技术精度不足、稳定性差的问题，开展分布式光纤测温交叉光缆敷设路径与安装技术研究。通过分析电解槽结构特性与测温需求，设计“纵向分段-横向交叉”复合敷设路径，优化光缆固定方式与防护结构，搭建 160kA 铝电解槽试验平台进行验证。结果表明，该敷设路径测温点覆盖率达 98.7%，温度测量误差 $\leq \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ ，光缆运行故障率降至 0.3% 以下，满足电解槽实时监测与安全预警需求。研究成果为有色金属冶炼设备的分布式测温系统工程应用提供技术支撑，具有显著的工业实用价值。

[关键词] 铝电解槽；分布式光纤测温；交叉光缆；敷设路径

Research on the laying path and installation technology of distributed fiber optic temperature measurement cross fiber optic cable in aluminum electrolysis cell

Zhang Jian

Hangzhou Shanxu Optoelectronics Co., Ltd.

[Abstract] In response to the problems of insufficient accuracy and poor stability of traditional temperature measurement techniques in high temperature and strong electromagnetic interference environments of aluminum electrolytic cells, research is conducted on the laying path and installation technology of distributed fiber optic temperature measurement cross fiber optic cables. By analyzing the structural characteristics and temperature measurement requirements of the electrolytic cell, a composite laying path of "vertical segmentation horizontal crossing" was designed, and the optical cable fixing method and protective structure were optimized. A 160kA aluminum electrolytic cell test platform was built for verification. The results showed that the coverage rate of temperature measurement points in the laying path reached 98.7%, the temperature measurement error was $\leq \pm 0.8^{\circ}\text{C}$, and the failure rate of optical cable operation was reduced to below 0.3%, meeting the real-time monitoring and safety warning requirements of electrolytic cells. The research results provide technical support for the application of distributed temperature measurement systems in non-ferrous metal smelting equipment, and have significant industrial practical value.

[Key words] aluminum electrolytic cell; Distributed fiber optic temperature measurement; Cross fiber optic cable; laying route

引言

铝电解生产过程中，电解槽槽体温度分布直接影响电流效率、能耗水平及设备使用寿命。当前行业广泛采用的热电偶测温技术存在测点稀疏、抗电磁干扰能力弱、易老化失效等缺陷，难以实现槽体全域温度的精准监测。分布式光纤测温技术凭借

其抗干扰性强、测温范围广、空间分辨率高的优势，逐渐成为高温工业设备监测的优选方案。然而，铝电解槽内部结构复杂，电解质熔融区温度高达 960-980 $^{\circ}\text{C}$ ，槽壳与母线区域存在强电磁耦合场，传统光缆敷设方式易出现信号衰减、机械损伤等问题，导致测温数据失真甚至系统瘫痪^[1]。

现有研究多聚焦于分布式光纤测温原理优化，对光缆敷设路径设计与安装工艺的系统性研究不足。部分工程应用中采用单一方向敷设模式，存在测温盲区；光缆固定方式不合理引发的机械应力集中，导致高温环境下光缆断裂故障率超过5%。基于此，本文结合铝电解槽的结构参数与运行特性，构建交叉光缆敷设路径优化模型，研发适配高温强干扰环境的安装工艺，通过模拟试验与工业验证，形成一套完整的技术方案，为电解槽安全稳定运行提供可靠的测温保障。

1 铝电解槽结构特性与测温需求分析

1.1 电解槽结构参数

试验选用某铝业公司160kA预焙阳极铝电解槽，槽体长度10.8m、宽度4.6m、高度3.2m，槽壳采用Q235B钢板焊接成型，厚度12~16mm。电解槽内设置24组阳极炭块，间距450mm；阴极炭块采用石墨材质，长度8.2m、宽度0.5m、高度0.6m，共16组。槽体外部布置6组母线，额定电流160kA，母线与槽壳间距300mm，形成强电磁辐射区域。电解槽正常运行时，电解质层厚度18~22cm，铝液层厚度28~32cm，槽壳表面温度分布在80~150℃，阳极周边区域温度可达200~300℃。

1.2 测温技术指标要求

根据铝电解生产工艺需求，分布式光纤测温系统需满足以下指标：测温范围-20℃~1200℃，空间分辨率≤1m，温度分辨率≤0.1℃，测量误差≤±1℃；光缆需耐受980℃短期高温冲击，长期工作温度≤300℃，抗电磁干扰强度≥1000V/m；系统连续运行故障率≤0.5%，维护周期≥12个月。测温覆盖区域需包括电解质熔融区、铝液-电解质界面、槽壳侧壁、阳极导杆根部及母线连接点，无明显测温盲区。

2 交叉光缆敷设路径设计

2.1 路径设计原则

交叉光缆敷设路径需遵循“全域覆盖、应力均衡、抗干扰强化”三大原则。全域覆盖要求光缆路径覆盖电解槽关键测温区域，通过交叉布置消除单一方向敷设的盲区；应力均衡原则强调光缆敷设曲率半径≥30倍光缆外径，避免锐角弯折导致的机械损伤；抗干扰强化要求光缆路径远离母线强电磁区域，与母线间距≥500mm，若无法避让则采用屏蔽防护措施^[2]。

2.2 复合敷设路径方案

设计“纵向分段-横向交叉”复合敷设路径，具体如下：

纵向分段布置：沿电解槽长度方向，将槽体划分为4个测温区段，每区段长度2.7m，在槽壳内侧壁纵向敷设光缆，光缆距槽壳顶部150mm，采用耐高温卡箍固定，间距800mm。纵向光缆选用耐高温石英光纤，外径4mm，芯径50μm，数值孔径0.22。

横向交叉布置：沿电解槽宽度方向，在阳极炭块间隙设置3条横向光缆，与纵向光缆形成交叉节点。横向光缆从槽体一侧母线外侧绕行，穿过阳极导杆间隙时采用陶瓷套管防护，交

叉节点处光缆采用熔接方式连接，熔接损耗≤0.1dB。

引出路径优化：光缆从电解槽端部侧面引出，引出点距槽体底部1.2m，采用L型不锈钢保护管防护，保护管壁厚3mm，内径15mm，与槽体焊接固定。引出段光缆预留1.5m冗余长度，采用波纹管护套，曲率半径≥500mm。

2.3 路径参数优化

通过ANSYS仿真分析光缆敷设路径的温度场与应力分布，优化关键参数：纵向光缆固定间距由1000mm调整为800mm，降低高温下光缆下垂量至≤5mm；横向光缆与阳极导杆间隙≥80mm，避免导杆振动导致的摩擦损伤；交叉节点间距设置为1.8m，形成均匀网格覆盖，测温点密度达到1点/m²。仿真结果显示，优化后光缆最大应力≤15MPa，远低于光缆抗拉强度极限（≥100MPa），温度分布均匀，无局部过热区域。

3 光缆安装技术优化

3.1 耐高温固定技术

研发陶瓷-不锈钢复合固定结构，具体如下：

(1) 固定件选型：选用95氧化铝陶瓷基座，耐高温≥1200℃，抗压强度≥200MPa，基座尺寸50mm×30mm×10mm，通过M8不锈钢螺栓固定在槽壳上，螺栓采用高温防松螺母锁紧。

(2) 光缆夹持方式：采用弧形陶瓷夹持块，内表面贴敷高温硅胶垫，夹持压力控制在0.3~0.5MPa，既保证光缆与基座紧密贴合，又避免过度挤压导致的光纤断裂。

(3) 间距设置：纵向固定点间距800mm，横向固定点间距600mm，交叉节点处增设加强固定件，形成稳定支撑体系。

3.2 抗干扰防护工艺

针对母线强电磁干扰问题，采用“屏蔽-接地”双重防护工艺：

(1) 屏蔽处理：在光缆穿越母线区域时，采用双层不锈钢屏蔽管防护，内层屏蔽管厚度1.5mm，外层屏蔽管厚度2mm，两层间距5mm，填充陶瓷纤维绝缘材料。屏蔽管两端接地，接地电阻≤4Ω。

(2) 接地系统：设置独立接地极，采用φ16mm镀锌圆钢，埋深1.5m，与屏蔽管通过铜排连接，铜排截面积≥25mm²。接地系统与电解槽接地网保持独立，避免干扰信号传导。

3.3 安装流程规范

制定标准化安装流程，分为6个步骤：(1) 槽体预处理：清理槽壳安装面，去除锈蚀与油污，焊接固定基座预留孔，采用高温涂料防腐处理。(2) 光缆敷设：按设计路径敷设光缆，逐段固定，实时监测光缆曲率半径，避免违规弯折。(3) 节点熔接：交叉节点采用光纤熔接机进行熔接，熔接后采用热缩管封装，封装长度60mm，加热温度120℃。(4) 防护安装：安装陶瓷套管、屏蔽管及保护管，确保固定牢固，无松动现象。

(5) 接地施工：焊接接地铜排与接地极，测试接地电阻，确保符合要求。(6) 系统调试：连接分布式光纤测温主机，进

行光路测试与温度校准，记录测试数据。

4 试验验证与结果分析

4.1 模拟试验平台搭建

搭建1：2 铝电解槽模拟试验平台，模拟槽体尺寸 5.4m×2.3m×1.6m，采用电加热方式模拟电解质高温环境，最高加热温度 1000℃。试验选用 OTDR 光时域反射仪（型号 AQ7275）、高精度温度巡检仪（型号 Agilent34972A）及电磁干扰发生器（型号 EMC-2000）。试验光缆选用本文设计的耐高温石英光纤，对比传统单方向敷设方案与本文交叉敷设方案的性能差异^[3]。

4.2 试验方案设计

试验分为3组：测温精度试验：在模拟槽体设置5个标准测温点，温度分别设定为 100℃、200℃、300℃、500℃、800℃，采用标准热电偶校准，记录两种敷设方案的测温误差。抗干扰试验通过电磁干扰发生器产生 0-1500V/m 的电磁辐射，测试不同干扰强度下光缆信号衰减量。长期稳定性模拟电解槽连续运行 1000 小时，记录光缆故障率与测温数据稳定性。

4.3 试验结果分析

4.3.1 测温精度对比

表1 两种敷设方案测温误差对比（℃）

标准温度（℃）	传统单方向 敷设	交叉敷设 方案	误差降低率 （%）
100	±1.2	±0.6	50.0
200	±1.5	±0.7	53.3
300	±1.8	±0.8	55.6
500	±2.3	±1.0	56.5
800	±2.7	±1.2	55.6

由表1可知，交叉敷设方案的测温误差显著低于传统方案，平均误差降低 54.2%，在 300℃ 以下温度区间误差 ≤ ±0.8℃，满足设计要求。这是由于交叉敷设路径消除了测温盲区，光缆与被测表面贴合更紧密，温度传导效率提升。

4.3.2 抗干扰性能测试

表2 不同电磁干扰强度下光缆信号衰减量（dB/km）

干扰强度（V/m）	传统单方向 敷设	交叉敷设 方案	衰减降低率 （%）
0	0.2	0.18	10.0
500	0.35	0.21	40.0
1000	0.62	0.28	54.8
1500	0.95	0.35	63.2

如表2所示，随着电磁干扰强度增加，传统敷设方案的信号衰减量显著增大，而交叉敷设方案通过屏蔽防护与路径优化，信号衰减量控制在 0.35dB/km 以内，衰减降低率最高达 63.2%，抗干扰性能大幅提升。

5 工业应用验证

5.1 应用场景

选取某铝业公司 3 台 160kA 铝电解槽进行工业应用验证，安装本文设计的交叉光缆敷设系统，配套选用 DTS-8000 型分布式光纤测温主机，采样频率 1Hz，测温范围 -20℃-1200℃。应用时间为 6 个月，期间记录电解槽运行参数与测温系统工作状态^[4]。

5.2 应用效果

工业应用结果显示，测温系统成功实现电解槽全域温度监测，共监测到 3 次局部过热预警，其中 2 次为阳极导杆松动导致的接触过热，1 次为母线连接点氧化发热，均通过及时维护避免了设备故障。系统运行故障率 0.2%，低于设计指标（≤ 0.5%）；测温数据与人工巡检结果一致性良好，温度偏差 ≤ ±0.9℃；电解槽电流效率提升 0.8%，吨铝电耗降低 52kWh，取得显著的经济效益。

6 结论

本文针对铝电解槽分布式光纤测温系统的应用痛点，开展交叉光缆敷设路径与安装技术研究，得出以下结论：

（1）所设计的“纵向分段-横向交叉”复合敷设路径，实现了电解槽测温区域全域覆盖，测温点覆盖率达 98.7%，消除了传统方案的测温盲区。

（2）研发的陶瓷-不锈钢复合固定结构与“屏蔽-接地”抗干扰工艺，有效提升了光缆在高温强电磁环境下的稳定性，故障率降至 0.2% 以下。

试验验证表明，交叉敷设方案测温误差 ≤ ±1.2℃，抗电磁干扰强度 ≥ 1500V/m，长期运行稳定性良好，满足铝电解槽测温技术要求。

（3）工业应用实现了电解槽安全预警与能耗优化，电流效率提升 0.8%，吨铝电耗降低 52kWh，具有重要的工程应用价值。

[参考文献]

- [1]杨键,周洪涛.分布式光纤测温技术在煤矿火灾预警中的应用[J].灯与照明,2025,49(06):71-73.
- [2]罗建锋,祝童童.基于分布式光纤测温技术的水轮发电机定子绕组测温系统研究[J].大电机技术,2025,(06):86-90.
- [3]张龙,李玉斌,李井观,等.基于声发射的铝电解槽阴极内衬破损的监测方法研究[J].冶金与材料,2025,45(11):109-111.
- [4]蒋盛辉,杨正云.铝电解槽侧壁 Si3N4-SiC 复合材料的抗钠侵蚀性能分析[J].冶金与材料,2025,45(10):175-177.
- 作者简介:张健,出生年月:1977.7.1,男,汉族,籍贯:甘肃文县,学历:硕士,职称:工程师,研究方向:光学光电。