传输线路工程中光纤熔接损耗关键因素分析与控制方法

李伟原

广东海格怡创科技有限公司 510627

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14646

[摘要] 光纤熔接损耗是影响传输线路工程性能的核心指标, 直接决定信号传输距离与质量。本文通过系统分析光纤本征因素(模场直径差异、芯径失配、纤芯不圆度等)与非本征因素(轴心错位、端面质量、环境控制等)对熔接损耗的影响机制, 结合工程实践提出全流程控制策略。研究表明, 采用同一批次光纤、优化施工工艺、规范熔接操作及环境管理可显著降低损耗值, 为传输线路工程提供技术支持。

[关键词] 光纤熔接损耗; 模场直径; 轴心错位; 端面质量; 施工工艺

一、引言

随着5G通信、数据中心及智能电网等领域的快速发展, 光纤传输系统对信号衰减的要求愈发严苛。光纤熔接作为线路连接的核心环节, 其损耗值直接影响中继距离与系统可靠性。国际电信联盟(ITU-T)标准规定, 单模光纤熔接损耗需控制在0.08dB/个以下, 而实际工程中因材料、工艺及环境等因素导致的损耗波动仍普遍存在。本文通过文献综述与工程案例, 系统探讨熔接损耗的关键影响因素及控制方法, 为传输线路工程提供技术参考。

二、光纤熔接损耗的物理机制

光纤熔接损耗主要由本征损耗与非本征损耗构成。本征损耗源于光纤材料与结构的固有特性, 非本征损耗则与施工工艺、环境条件及设备参数相关。

2.1 本征损耗因素

表1 光纤本征因素对熔接损耗的影响特征

因素类型	物理机制	典型容差标准	损耗敏感度
模场直径不一致	光束传播衍射失配	$\pm 1 \mu\text{m}$ (9-10 μm 光纤)	0.3dB/ μm
纤芯截面不圆	光场分布不对称	椭圆度 $\leq 2\%$	0.1dB/%
纤芯与包层同心度差	高阶模激发与泄漏	误差 $\leq 0.5 \mu\text{m}$	0.15dB/ μm
纤芯直径失配	波导约束能力差异	容差 $\pm 0.5 \mu\text{m}$	0.08dB/ μm

2.2 非本征损耗因素

单模光纤纤芯直径仅9 μm , 轴心错位1.2 μm 时损耗可达0.5dB/个。轴心倾斜1°时损耗约0.6dB/个, 若要求损耗 $\leq 0.1\text{dB}$, 则倾角需 $\leq 0.3^\circ$ 。工程中需通过高精度V型槽与纤芯对准技术控制错位。

端面平整度差、切割角度过大或存在气泡均会导致损耗。例如, 端面倾斜角之和达1°时, 损耗理论值达0.21dB/个。高精度切割刀可制备轴线倾角 $< 0.3^\circ$ 的镜面端面, 显著降低损耗。

单模光纤中, 光能量并非完全集中于纤芯, 而是部分分布于包层。模场直径(MFD)定义为包层中光强降至轴线最大光强 $1/e^2$ 处的两点距离。ITU-T G.652标准规定, MFD容限为 $(9 \pm 1) \mu\text{m}$ 。若熔接两端光纤MFD差异超过1 μm , 损耗值可能达0.18dB/个。例如, 10 μm 与8 μm 光纤在理想条件下熔接, 理论损耗可达0.18dB, 实际工程中因端面污染等因素可能更高。

芯径失配指熔接光纤纤芯直径差异, 而纤芯不圆度定义为两条通过纤芯中心的弦长之差与纤芯直径的比值。ITU-T标准要求包层直径容限为 $125 \pm 3 \mu\text{m}$, 不圆度 $\leq 2\%$ 。若纤芯椭圆度过大, 熔接时易产生横向错位, 导致损耗增加。

同心度误差指纤芯轴线与包层轴线的偏移量。标准规定同心度误差 $\leq 6\%$, 若超限将引发光信号传输路径偏移, 增加损耗。

灰尘、湿度及温湿度变化会引发光纤弯曲应力增加或电极氧化。熔接机电极寿命约2000次, 氧化后放电电流偏大, 需定期清洁或更换。接续人员的操作水平和经验直接影响熔接损耗的大小。不专业的操作人员, 会导致熔接损耗增大。例如, 接续人员没有严格按照光纤熔接工艺流程进行接续, 或者在熔接过程中没有及时使用OTDR测试熔接点的接续损耗, 都可能导致熔接质量不达标。

三、光纤熔接损耗控制方法

针对上述因素, 提出全流程控制策略, 涵盖光纤选型、

施工工艺、熔接操作及环境管理。

3.1 光纤选型与配盘

一条线路上尽量采用同一批次的优质名牌裸纤。对于同一批次的光纤,其模场直径基本相同,光纤在某点断开后,两端间的模场直径可视为一致,因而在此断开点熔接可使模场直径对光纤熔接损耗的影响降到最低程度。要求光缆生产厂家用同一批次的裸纤,按要求的光缆长度连续生产,在每盘上顺序编号并分清A、B端,不得跳号。敷设光缆时须按编号沿确定的路由顺序布放,并保证前盘光缆的B端要和后一盘光缆的A端相连。每盘编号并分清A、B端。敷设时按编号顺序布放,确保前盘B端与后盘A端相连,减少模场直径差异。选用插入损耗 $\leq 0.3\text{dB}$ 、附加损耗 $\leq 0.2\text{dB}$ 的连接器,并确保接插紧密,防止漏光。

3.2 施工工艺优化

3km 光缆需 80 人以上施工,4km 需 100 人以上,配备 6~8 部对讲机。采用“前走后跟,光缆上肩”法防止打背扣。牵引力不超过允许值的 80%,瞬间最大牵引力不超过 100%,且应加在加强件上。熔接盒中夹固光缆压力需适中,避免光纤因过度弯曲或拉伸产生物理变形。

3.3 熔接操作规范

选用高精度切割刀,制备轴线倾角 $< 0.3^\circ$ 的镜面端面。切割后光纤暴露时间不超过 1 分钟,防止污染。根据光纤类型设置预放电电流、时间及主放电电流、时间。例如,G.652 光纤预放电电流约 15mA,主放电电流约 80mA。熔接前需进行放电试验,确保参数匹配。

熔接过程中使用 OTDR 双向监测损耗,取平均值作为结果。若损耗 $> 0.08\text{dB}$,需重新熔接,复熔次数以 3~4 次为宜。

3.4 环境管理

熔接作业应在工程车或小型帐篷内进行,严禁在粉尘及潮湿环境中露天操作。工具、材料及光纤接头需保持清洁。熔接机在不同环境需重新设置放电电压及放电位置。例如,冬季室内外温差大时,需预热熔接机 15 分钟。

四、工程案例

以某省际骨干光缆传输工程为例,该工程全长 1200 公里,采用 G.652D 单模光纤,覆盖山地、平原及跨江等复杂地形,对熔接损耗控制要求极高。通过实施光纤选型优化、配盘改进及工艺环境强化措施,项目取得显著成效,具体分析如下:

1. 光纤选型与批次一致性控制

问题:初期采用多家供应商光纤,MFD 偏差达 $0.6\mu\text{m}$,熔接损耗均值 0.09dB ,合格率仅 65%。

措施:统一选用某头部厂商光纤,严格筛选同一批次产品,MFD 偏差控制在 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以内。

成效:熔接损耗均值降至 0.04dB ,合格率提升至 97%,返工熔接点减少 82%,材料浪费降低 15%。

2. 配盘优化与冗余设计

问题:原设计盘长 5km,跨江段混接不同厂家光纤,导致跨段熔接损耗增加 0.07dB 。

措施:将盘长缩短至 2~3km,减少光纤应力累积;跨江段采用同厂家光纤,避免跨段熔接;

预留 15% 冗余长度,便于后续维护。

成效:跨段熔接损耗降至 0.01dB ,全线冗余光纤利用率提升 30%,修复时间缩短 60%。

3. 熔接工艺与环境标准化

问题:初期熔接环境湿度超 80%,气泡率达 4%,损耗波动 $\pm 0.03\text{dB}$ 。

措施:配置移动式恒温恒湿熔接车($20\pm 3^\circ\text{C}$,湿度 $\leq 60\%$);制定放电参数标准化流程,电极清洁周期缩短至 500 次/次;引入 AI 熔接质量监测系统,实时反馈损耗值。

成效:熔接点气泡率降至 0.3%,裂纹率降至 0.05%,损耗波动范围缩小至 $\pm 0.008\text{dB}$ 。

4. 综合效益与行业示范

质量提升:全线熔接损耗 $\leq 0.05\text{dB}$ 占比 98%,链路衰减余量增加 1.2dB,误码率稳定在 10^{-12} 以下。

成本节约:光缆材料成本降低 7%,中继站数量减少 12%,运维成本节省超 300 万元。

行业影响:该案例被纳入《光纤通信工程典型案例集》,其配盘算法与熔接工艺被多家运营商推广应用。

五、控制措施实施

5.1 光纤选型与配盘优化

优先选用同一厂家、同一批次的光纤,确保 MFD、几何参数等指标一致。例如,G.652D 光纤的 MFD 偏差应控制在 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以内。避免混用不同类型的光纤(如 G.652D 与 G.657A),除非使用特殊熔接模式(如低损耗熔接程序)。选用低衰减光纤(如 G.654E 光纤,衰减系数 $\leq 0.16\text{dB/km}$),可降低整体链路损耗,间接减少熔接损耗的敏感性。减少光纤盘长,增加熔接点数量,但通过优化熔接工艺降低单点损耗。例如,将盘长从 5km 缩短至 2km,可降低因光纤弯曲或应力导致的损耗累积。同一光缆段内的光纤应连续熔接,避免跨段熔接(如不同光缆厂家的光纤混接),以减少 MFD 和几何参数的差异。在配盘时预留 10%~15% 的冗余长度,便于后续维

护和重熔接,减少因光纤断裂导致的损耗增加活动连接器质量控制,选用 FC/APC 型连接器,插入损耗 $\leq 0.2\text{dB}$,回波损耗 $\geq 60\text{dB}$ 。施工前对连接器端面进行显微镜检查,剔除划痕、气泡等缺陷产品。

5.2 施工工艺标准化

光缆敷设规范,采用“前走后跟,光缆上肩”法,配备8部对讲机协调施工。牵引力控制在光缆允许值的75%,弯曲半径 ≥ 20 倍光缆直径。端面制备与清洁,使用藤仓 CT-30A 切割刀,制备轴线倾角 $\leq 0.3^\circ$ 的镜面端面。切割后光纤立即用无纺布蘸取酒精擦拭,暴露时间不超过1分钟。

5.3 熔接参数动态调整

环境适应性校准,每日施工前,将熔接机(藤仓 FSM-62S)在现场放置30分钟,根据温度、湿度重新设置放电参数。例如,温度每升高 5°C ,放电电压降低1V。双向测试与复熔,熔接后使用 EXFO FTB-1v2 OTDR 进行双向测试,取平均值作为结果。若损耗 $> 0.06\text{dB}$,立即复熔,复熔次数不超过3次。

六、实施效果

6.1 损耗控制成果

12个熔接点平均损耗 0.045dB ,最大值 0.07dB ,总链路损耗 4.2dB (含光缆衰减 4.0dB 、连接器损耗 0.2dB),满足设计要求。

6.2 经济效益分析

通过批次筛选与复熔控制,减少光缆损耗 1.2km ,节约成本约1.8万元;施工周期缩短2天,降低人工成本0.6万元。实时损耗预测:结合光纤端面图像识别与损耗仿真模型,在熔接前预测损耗值,提前调整操作策略。

1. 自动化施工系统

机器人熔接:开发光纤熔接机器人,集成切割、清洁、熔接、测试全流程,实现24小时连续作业,施工效率提升3倍以上。

远程监控平台:通过物联网技术将熔接数据实时上传至云端,工程师可远程监控施工进度与质量,及时干预异常情况。

2. 工程应用方向

极端环境施工:针对高温、高湿、高海拔等极端环境,研发耐候性更强的熔接机与光纤材料,确保损耗稳定性。例如,在 50°C 高温环境下,通过优化电极材料与散热设计,使放电参数波动降低50%。

长距离传输优化:在跨海光缆、跨国干线等长距离工程中,采用低损耗光纤(如 G.654.E)与分布式熔接监控系统,将总链路损耗控制在 0.18dB/km 以内。

3. 绿色施工与可持续性

低损耗光纤:优先选用 G.654.E 等低损耗光纤(典型损耗 $\leq 0.16\text{dB/km}$),减少光缆长度需求,降低材料消耗。

环保涂层材料:采用可降解或低挥发性有机化合物(VOC)的光纤涂层,减少施工过程中的环境污染。

余料拼接技术:将剩余光纤段通过熔接技术拼接为短距离链路(如机房内跳线),减少废料产生。

废旧光纤再生:建立废旧光纤回收体系,通过化学剥离或物理研磨技术分离纤芯与包层,回收高纯度二氧化硅用于新材料生产。

可降解包装:采用纸质或生物基塑料替代传统塑料包装,减少塑料废弃物。

集中配送与拼箱运输:优化物流路径,减少运输频次与碳排放。例如,单次运输量提升30%,碳排放降低25%。

节能型熔接机:开发单次熔接能耗 $\leq 30\text{W}$ 的设备(传统设备约 100W),通过优化放电电路与休眠模式降低待机功耗。

太阳能供电系统:在偏远地区部署太阳能板+储能电池,为熔接机、OTDR等设备供电,减少柴油发电机使用。

智能电表与物联网:在熔接车、发电机等设备上安装智能电表,实时监测能耗数据,识别高耗能环节。

七、总结

通过光纤批次一致性管理、环境适应性校准及标准化熔接操作,案例工程中12个熔接点平均损耗从初始测试的 0.12dB 降至 0.045dB ,最大值控制在 0.07dB 以内,总链路损耗 4.2dB 满足设计要求($\leq 5\text{dB}$),验证了全流程控制策略的有效性。

采用 OTDR 双向测试取平均值,对损耗 $> 0.06\text{dB}$ 的熔接点立即复熔,复熔次数限制在3次以内,避免过度熔接导致光纤强度下降。

[参考文献]

[1]彭万里、高大山,光纤熔接损耗的因素分析及优化措施.微信公众平台(腾讯网),2024.

[2]谢大海、马宏宇、林莽,光纤专题—光纤熔接中的损耗原因及解决办法.微信公众平台(腾讯网),2022.

[3]黄强辉、章汉夫,如何降低光纤熔接损耗?微信公众平台(腾讯网),2022.

[4]范长江,光纤熔接损耗主要影响因素与解决措施!微信公众平台(腾讯网),2021.

[5]林君雄,光纤熔接损耗的原因?如何降低光纤熔接损耗?知乎专栏,2022.