

光电复合核级电缆生产技术的探讨

王巧云 余荣 姚志香 张磊 周福金

江苏赛德电气有限公司，江苏高邮，225600；

摘要：光电复合电缆用于核电站等核设施，生产面临诸多难题，如辐射致材料老化、宽温域性能要求、热膨胀系数匹配、腐蚀性介质影响等。生产技术方面，材料技术涵盖选型、模拟测试、导体拉制、绝缘挤出、光单元嵌入固定等工序；电磁屏蔽与信号稳定设计技术包括需求分析、明确屏蔽目标、设计屏蔽结构及信号传输优化。通过这些技术可保障电缆性能，满足核级安全要求。

关键词：光电复合；核级电缆；生产技术

DOI：10.64216/3080-1508.25.04.040

引言

核电站等核设施对电缆性能要求严苛，光电复合电缆作为其中特殊电缆，需满足电力、信号传输及复杂环境极端要求。然而，其生产环节面临诸多技术挑战，从材料选型到生产工艺，每个步骤都需精准把控。研究光电复合电缆生产技术，不仅关乎电缆自身质量，更对核设施安全稳定运行意义重大，是保障核能安全利用的关键一环。

1 光电复合电缆生产的难题

光电复合电缆是用于核电站等核设施中的特殊电缆，其需满足电力传输、信号传输以及复杂环境下的极端要求，且在生产环节面临诸多技术挑战。

首先，核电站环境中存在大量射线和辐射，长期辐射会导致材料分子间断裂或交联，引发绝缘层、护套层老化脆弱，甚至丧失绝缘性能和机械性能。

其次，核电站正常运行温度高达60~100℃，事故情况下可能在短时间内达到150~240℃，为此材料需要在宽温场域内保持稳定的机械强度和绝缘性能，避免因热胀冷缩导致结构分层或开裂。

另外，在光电复合结构中，光纤涂覆层、缓冲层材料需与电缆保护套材料的热膨胀系数匹配，否则温度变化可能导致光纤弯曲、信号衰减增大。

除此之外，核电站环境中存在硼酸、锂盐蒸汽、臭氧等腐蚀性介质，要求电缆具备阻燃、低烟、无卤特性，这进一步增加了生产的复杂程度。

2 光电复合电缆生产技术

2.1 材料技术

2.1.1 材料选型

通过上述论证分析，不难看出在核电厂运行环境中，电缆需面临极端的工况条件，为此相关单位需要优先从材料技术层面做好生产把关，而材料选型是保障电缆性能达标且符合核级安全要求的首要环节，这些环节中相关单位需要依据核级电缆的特殊使用环境——如高温、高压、强辐射以及长期运行稳定性需求——对导体材料进行筛选，优先选择具有高导电性、高强度且抗辐射性能优异的金属材料，为此相关单位在确定材料供应商时要对其生产资质、质量管控体系进行全面审核，要求供应商提供详细的材料性能检测报告，涵盖导电率、抗拉强度、抗辐射老化等关键指标，以确保材料从源头上的质量可靠性。对于绝缘材料和保护套材料，同样要根据复合电缆的特殊需求选择耐高温、耐辐射、阻燃性能优越的聚合物材料。

例如，在导线生产中，相关单位选择无氧铜作为导体材料，其导电率需达到98%IACS以上，抗拉强度不低于300MPa，且经过钴-60伽马射线辐照累计剂量500kGy后，导电率衰减不超过5%；必须要求供应商提供由国家认可的第三方检测机构出具的全项检测报告，报告中需明确标注材料的纯度为99.99%，氧含量≤0.003%，且通过“GB/T2951.11”标准中的抗辐射老化测试；对于绝缘层材料，选用改性乙丙橡胶，其长期使用温度需满足-40℃至150℃，且在150℃老化1000小时后，拉伸强度保持率不低于80%，断裂伸长率保持率不低于70%，同时需提供符合“GB/T18380.12”的阻燃性能检测报告，确保氧指数≥30%。

2.1.2 模拟核环境下的性能测试

在材料采购后相关单位需要在实验室对选定材料进行模拟核环境下的性能测试，包括高温老化试验、辐

射剂量耐受试验等,通过精准控制实验条件——如温度、辐射剂量率——详细记录材料在实验过程中的性能变化数据,只有当材料在模拟实验中各项性能指标均满足或超过设计要求时,才能够将其纳入生产材料清单。同时要同步建立起完善的库存管理系统,针对不同批次、规格的材料进行分类存放,并设置明显的标识,标注材料的名称、规格、批次号、入库日期等关键信息,以便在生产过程中能够准确追溯材料来源和使用情况。

例如,针对选定的无氧铜导体,相关单位在实验室中进行高温循环试验,将样品置于 -60°C 至 180°C 的温度箱内,每小时完成一次温度循环,持续 1000 个循环后,测量其线膨胀系数变化量需控制在 $18\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 范围内;进行辐射耐受试验时,采用电子加速器产生的 10MeV 电子束,以 5kGy/h 的剂量率累计辐照至 1000kGy,测试后导体的电阻率增加值不得超过初始值的 8%;对于改性乙丙橡胶绝缘材料,需在含 5%硼酸溶液的高压釜中进行腐蚀试验,压力维持在 0.8MPa ,温度 80°C ,持续 500 小时后,材料的质量损失率需 $\leq 0.5\%$,且绝缘电阻值下降幅度不超过 20%;测试合格的材料应存入带有温湿度控制系统的仓库,不同批次的无氧铜导体需分区放置,标识牌上需清晰标注“无氧铜导体,规格 $\Phi 2.5\text{mm}$,批次 2023051,符合 GB/T5585.1”等信息,入库日期采用二维码形式附于标识牌一侧,通过扫描可直接关联至库存管理系统中的详细记录。

2.1.3 导体拉制工序

在完成材料选择之后,便需要基于材料特性对生产工艺和参数进行设定和优化,相关单位需要做好对工艺细节的调整,其中,在导体拉制工序中,工程师可根据导体材料结构特性和目标路径精准计算拉制过程中的拉伸系数和拉伸速度,期间可通过多次小批量生产,利用高精度在线测定仪实时监测导体线径变化,并根据监测数据及时调整拉伸参数,以保证导体线径均匀性控制在极小范围内。

例如,针对 $\Phi 8\text{mm}$ 的无氧铜杆,相关单位需先通过有限元软件计算得出初始拉伸系数为 1.15,首道次拉伸速度设定为 8m/min ;拉制过程中,在线激光测径仪需每 0.5 秒采集一次数据,测量精度需达到 $\pm 0.001\text{mm}$;当连续 3 次检测到线径偏差超过 $\pm 0.003\text{mm}$ 时,控制系统需自动将拉伸速度降低 0.2m/min ,同时调整模具压力至初始值的 1.05 倍;若线径偏差持续扩大至 $\pm 0.005\text{mm}$,则必须立即停止拉制,检查模具磨损情况,更换内壁光洁

度 $R_a\leq 0.8\mu\text{m}$ 的新模具后,重新进行小批量试拉,试拉数量为 50 米,经检测线径均匀性符合要求后方可恢复批量生产;拉制完成的 $\Phi 2.5\text{mm}$ 导体需缠绕在专用放线盘上,每个线盘的导体长度需控制在 $500\text{米}\pm 5\text{米}$,且每盘导体的首尾各 1 米处需粘贴包含线径检测数据的标签,标签上需注明“拉制日期:系统自动生成,检测员:无(自动检测),线径范围 $\Phi 2.500\text{mm}-\Phi 2.502\text{mm}$ ”。

2.1.4 绝缘挤出工序

在绝缘挤出工序中,工程师可根据绝缘材料的熔融特性和电缆设计要求精准设定挤出机的温度、压力和螺杆转速等关键参数,确保在挤出过程中用红外测温仪和压力传感器实时监测挤出温度和压力,避免绝缘层被破坏,保证其厚度均匀、表面光滑无缺陷,同时要对挤出模具进行清洗和维护,防止模具磨损或堵塞导致绝缘层质量波动。

技术人员可将改性乙丙橡胶颗粒投入挤出机料斗前,必须经过 120°C 、4 小时的烘干处理,以去除水分含量至 $\leq 0.05\%$;挤出机机身温度需分段控制,一区 100°C 、二区 130°C 、三区 150°C ,机头温度设定为 160°C ,螺杆转速保持在 30r/min ,模头压力需稳定在 $5\text{MPa}\pm 0.2\text{MPa}$;红外测温仪需安装在距模头出口 50cm 处,每 2 秒记录一次绝缘层表面温度,确保其保持在 $155^{\circ}\text{C}-165^{\circ}\text{C}$ 之间;压力传感器若检测到压力波动超过 $\pm 0.5\text{MPa}$,需立即触发声光报警,操作人员需在 3 分钟内检查进料速度是否稳定,必要时调整喂料电机频率至 $50\text{Hz}\pm 1\text{Hz}$;每日生产结束后,必须使用专用清洗剂对模具流道进行清洗,清洗后需通过内窥镜检查流道内壁,确保无残留胶料,模具组装时需保证定位销与孔的配合间隙 $\leq 0.01\text{mm}$,以防止挤出过程中出现偏心现象。

2.1.5 光单元嵌入与固定工艺

在光单元嵌入与固定工艺中,工程师可根据光单元的结构特点和电缆整体布局设计合理的嵌入位置和固定方式,在嵌入过程中使用高精度的定位装置以保证光单元与导体之间相对位置的精度,期间可通过调整固定材料的用量和固化时间,保证光单元在电缆中牢固可靠且不会对光信号传输产生不良影响。

2.2 电磁屏蔽与信号稳定设计技术

核电站在运行过程中存在复杂的电磁环境,为此,在光电复合核级电缆生产过程中,相关单位也应当重点加强对电磁屏蔽功能的开发和优化,以提升信号稳定性。

2.2.1 需求分析

相关单位需要联合核电站设计方、设备供应商以及电缆使用部门共同梳理出电缆在核环境中的具体应用场景,明确其需要应对的电磁干扰源类型——例如核反应堆运行产生的强电磁脉冲、各类电气设备启停时引发的电磁辐射等——之后再确定电缆所传输信号的敏感程度,像光电信号传输对电磁干扰的容忍度极低,必须保证极低的信号衰减和失真。

在实践环节,相关单位需联合核电站设计方、主泵制造商、DCS系统供应商共同开展电磁环境调研,通过布设频谱分析仪在核岛厂房内选取反应堆压力容器周边、蒸汽发生器区域、电缆夹层等12个典型点位进行连续监测,记录到的电磁干扰源包括核反应堆运行时产生的10kHz-1MHz宽频电磁脉冲、主泵电机启动时的50Hz强工频干扰、安全壳喷淋系统电磁阀动作产生的200kHz-5MHz瞬态干扰;针对电缆传输的信号类型,需明确光纤传输的反应堆堆芯温度监测信号为微弱光信号,其接收端灵敏度需达到-60dBm,容差衰减 $\leq 0.5\text{dB/km}$,而控制电缆传输的阀门开度控制信号为4-20mA模拟量信号,需保证信噪比 $\geq 60\text{dB}$,防止因干扰导致控制指令误动作。

2.2.2 电磁屏蔽目标

基于以上的调研分析,相关单位可制定详细的电磁屏蔽效能目标,将屏蔽效能按照不同频段进行细分,针对低频段、中频段、高频段的电磁干扰分别设计合理的屏蔽衰减值,确保在各个频段内都能够有效抑制电磁干扰,保障信号稳定输出;之后依据屏蔽效能目标,相关单位可结合电缆的结构特点和成本预算,初步筛选出可能的屏蔽材料和屏蔽结构方案,如采用金属编织层、金属薄层或者两者复合的屏蔽结构,同时考虑使用铜、铝等导电性优良且在核环境下具有稳定化学性质的材料,为后续详细设计和验证提供明确方向。

2.2.3 屏蔽结构设计

在完成前期规划之后,必须进入屏蔽结构与信号传输优化阶段,工程师可结合专业测试和技术手段以保证技术方案的有效性,具体来说,对于屏蔽结构设计,工作人员需要对初步筛选方案进行深入细化,若选择金属编织层屏蔽结构,需要精确计算编织密度——编织密度过高可能会增加电缆的刚性和成本,过低则无法达到预期的屏蔽功能——期间技术人员可建立数学模型,结合电磁理论模拟不同编织密度下的屏蔽效果以找到最

佳的编织密度参数,同时这个过程也要确定金属编织层与电缆其他部分的连接方式,确保形成连续的导电通路,避免出现屏蔽漏洞。为了达成以上工艺目标,相关单位可采用焊接或压接的方式将屏蔽层与电缆的终端接头牢固连接。

2.2.4 信号传输优化

在信号传输优化方面,工作人员可针对光电信号传输需求设计合理的光单元布局,减少光信号在传输过程中的弯曲和反射,期间可通过优化光单元的弯曲半径和排列方式降低光信号的损失,其中对于电信号传输,工程师要合理规划导线的排列和间距,避免导线间产生电磁耦合干扰,可采用绞合导线的方式有效降低这种干扰。同时,应当根据信号频率特性调整导线绝缘材料的厚度以优化信号传输性能,如果有条件,设计师还需要充分利用电磁仿真软件对屏蔽结构和信号传输进行全面模拟分析,及时发现潜在问题并进行调整和改进。

3 结束语

总体来说,光电复合电缆生产技术通过多环节严格把控,从材料精心选型与测试,到导体拉制、绝缘挤出等工序精准操作,再到电磁屏蔽与信号稳定设计,有效解决了核环境下生产难题。这些技术不仅保障了电缆性能达标,满足核级安全要求,更为核设施稳定运行筑牢基础。未来,随着核能发展,该技术有望持续优化,为核能领域提供更可靠支持。

参考文献

- [1]王臻,陈娣,张羽洁,等.一种自动化电缆生产检测设备的研制[J].自动化与仪表,2025,40(06):127-130. DOI:10.19557/j.cnki.1001-9944.2025.06.025.
- [2]杨泽强.基于新能源汽车安全标准的电线电缆品质管控策略探讨[J].汽车电器,2025,(05):179-181. DOI:10.13273/j.cnki.qcdq.2025.05.008.
- [3]吴江锋.电力电缆局部放电检测技术及应用分析[J].仪器仪表用户,2025,32(05):82-83+86.
- [4]程伟,沈文,后石.高柔性抗碾压光电复合卷筒电缆的研制[J].光纤与电缆及其应用技术,2025,(02):13-16+27. DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2025.02.004.

作者简介:王巧云(1983-),工程师,江苏赛德电气有限公司技术中心副主任。