

船用核安全级电缆的研制与关键性能测试

胡君臣

扬州光明电缆有限公司，江苏高邮，225652；

摘要：船用核安全级电缆研制面临材料体系兼容、结构设计与工艺协同、标准化与测试体系破碎化等挑战。为应对挑战，研制策略聚焦材料选型与配方优化，通过环境应力分解选材，以性能协同优化配方；在结构设计与工艺上，采用拓扑优化及参数协同控制；同时构建核环境耐受、海洋环境适应、电气与燃烧安全性能等关键测试方法，确保电缆满足复杂工况下的安全需求。

关键词：船用核安全级电缆研制；关键性能测试

DOI：10.64216/3104-9672.25.01.023

引言

随着船舶核动力技术的持续发展，船用核安全级电缆的重要性愈发凸显。其不仅需适应海洋环境，还要满足核设施的严苛安全标准。然而，目前研制此类电缆面临诸多挑战，如材料体系需兼顾多极端条件、结构设计与工艺控制需协同、标准化与测试体系存在破碎化问题等。因此，探索有效的研制策略，提升电缆性能与安全性，成为船舶核动力领域亟待解决的关键问题。

1 船用核安全级电缆研制面临的挑战

1.1 材料体系的多极端条件兼容难题

船用核安全级电缆材料需同时承受辐射、高温、高压、含氧腐蚀及机械应力的多重叠加作用，实现性能平衡的难度极大，传统乙丙橡胶与交联聚乙烯在射线辐照下易发生分子断裂导致性能退化，而添加抗辐射剂又会牺牲材料的柔韧性，使其难以适应船舶的振动环境。同时船舶封闭空间对高阻燃性与低烟无卤特性的高要求，常与材料的耐辐射性、力学性能产生冲突，例如无卤阻燃剂的高填充量会使材料的抗张强度下降 20%至 30%。

1.2 结构设计与工艺控制的协同问题

船舶空间紧凑性与电缆多功能需求之间的矛盾，对结构设计提出了更高要求且在设计时面临更大挑战，电缆的导体、绝缘层、屏蔽层、铠装层等多界面材料因物理特性差异，在高温循环中易出现分层开裂问题。船舶轻量化需求与机械强度要求需找到平衡点且要求较高，钢丝铠装虽能提升强度但会增加船舶重量，轻质铝合金虽满足重量需求但耐腐蚀性不足。此外工艺上大截面电缆挤出均匀性控制、辐照交联剂量精准性以及小批量电子束生产一致性保障，在高精度控制方面均存在难度。

1.3 标准化与测试体系的破碎化问题

电缆需同时满足核安全要求与船舶行业双重标准，但现有体系存在指标冲突与覆盖盲区问题，核安全标准与船舶规范的交叉应用使认证流程复杂且缺乏专项船用核电缆标准。同时现有测试手段无法模拟辐射、高温、盐雾、震动等多因素耦合工况，极端事故模拟设备成本高昂，长期可靠性评估的加速老化实验与实际寿命相关性误差可能较大，进而无法全面验证电缆全生命周期的安全性。

2 船用核安全级电缆的研制策略

2.1 材料选型与配方优化

2.1.1 基于环境应力分解的材料选型

船用核安全级电缆需同时满足海洋环境与核环境双重要求，企业在材料筛选过程中需通过环境应力分解实现针对性匹配。针对海洋环境，企业应选择具有耐盐雾腐蚀特性的金属护套材料或非金属护套材料，并通过电化学腐蚀试验验证其耐腐蚀性；针对湿热环境，企业需采用稀释率低于 0.5%的乙丙橡胶或交联聚乙烯材料作为绝缘体，并通过湿热循环试验验证其尺寸稳定性。针对核环境，企业需重点解决高温高压下的热塑性变形问题，通过热重分析筛选热分解温度高于 500℃的交联聚乙烯基材，并结合动态机械分析优化其玻璃化转变温度，确保在 150℃长期运行工况下保持弹性模量，针对射线辐照要求，企业需引入含受阻胺光稳定剂的防老体系，通过辐照老化实验验证其断裂伸长率保留率大于等于 80%。

如某电缆公司在海洋环境材料选型中，不仅明确选用某品牌耐盐雾腐蚀金属护套材料，还在电化学腐蚀试验中设定了模拟海洋高盐度的特定盐雾浓度，试验数据显示该材料腐蚀速率比行业最低标准还低 30%；针对湿热环境，除采用稀释率 0.4%的乙丙橡胶作绝缘体外，湿

热循环试验持续进行了多个周期,每个周期都严格监测尺寸变化,最终得出尺寸变化率仅 0.2% 的结果,充分证明其稳定性。面对核环境高温高压,筛选出热分解温度 520℃ 的交联聚乙烯基材,通过动态机械分析详细记录不同温度下的性能数据,确认在 150℃ 长期运行时弹性模量完全符合要求;引入含受阻胺光稳定剂的防老体系后,专门开展辐照老化实验,精确测量断裂伸长率变化,最终保留率达 82%,满足使用标准。

2.1.2 基于性能协同的配方优化

材料配方优化需通过主成分促进工艺的三维协同实现性能平衡,解决无机填料与有机填料的相容性问题是核心环节。针对低烟无卤阻燃体系,企业需以氢氧化铝和氢氧化镁为主阻燃成分,通过硅烷偶联剂对其表面进行改性,将填料与基材的界面结合强度提升至 1.5MPa 以上,同时引入乙烯醋酸乙烯共聚物作为相溶剂以平衡材料的柔韧性 with 阻燃性。在交联体系设计过程中,企业需采用过氧化物交联与硅烷交联的复合交联模式,从而全面提升材料的老化性能。此外配方优化时需考虑工艺兼容性,如为避免挤出过程中产生熔体断裂,需将螺杆长径比控制在标准范围,并通过双阶式挤出机实现内外层材料的梯度融合,同时为解决无机填料导致的加工流动性下降问题,需增加适量的聚乙烯蜡作为润滑剂,并将温度控制在 160℃ 至 180℃ 之间,最后配方需通过全能性能验证,包括机械性能、断裂伸长率、电气性能等^[1]。

2.2 结构与工艺优化

2.2.1 结构拓扑优化方法

船用核安全级电缆的结构设计需从宏观、介观、微观等多尺度解析环境应力传递路径,进而构建出梯度缓冲、能量耗散、功能隔热的复合结构体系。针对海洋环境的机械应力与核环境的热应力,企业需采用弹性体-金属-弹性体的三明治夹层结构,内层为高弹性模量的硅橡胶缓冲层,中间层为铜合金铠装层,外层为低弹性模量的交联聚烯烃护套。针对核辐射环境下的材料性能退化,企业需在绝缘层与屏蔽层之间引入功能隔离层,采用含纳米二氧化钛的聚酰亚胺复合材料,同时通过纳米颗粒的散射效应降低伽马射线穿透率,此外在结构设计时还需考虑 DBA 事故工况下的瞬态热冲击,通过有限元模拟优化导体与绝缘层的界面热阻,避免因热应力集中导致界面脱粘。

2.2.2 工艺参数协同控制

工艺优化需建立材料-设备-参数的三维映射模型,通过工艺窗口分析与过程能力指数验证实现全流程可

控。针对挤出工序,企业需根据材料流变特性匹配螺杆结构,如采用屏障型螺杆实现高填充中无机阻燃剂的均匀分布,同时通过双阶设计控制内外层材料的熔融温度梯度,避免因温度差异导致层间结合强度下降。针对交联工序,企业需通过差示扫描量热法确定材料的交联动力学参数,进而优化蒸汽交联工艺。针对屏蔽层编织工序,企业需采用高速编织机配合高强度镀锡铜丝,通过正交实验优化编织角度与节距,使屏蔽效能能在 10MHz 至 1GHz 频段内大于等于 80dB,同时控制编织层覆盖率大于等于 90%,最后针对工艺参数需通过过程能力分析验证其稳定性,确保所有关键尺寸参数满足 GB/T9330-2020 及 IEC60092-353 等标准要求。

如某电缆公司建材料-设备-参数三维映射模型,用工艺窗口分析与过程能力指数验证全流程:挤出工序按材料流变数据配屏障型螺杆,螺槽深度 12mm,使无机阻燃剂分布均匀度达 96%,双阶设计控内外层熔融温度梯度 4℃,层间结合强度 2.1MPa;交联工序用差示扫描量热法测交联动力学参数,将蒸汽交联温度定在 175±2℃,交联度达标率 98%;屏蔽层用转速 300r/min 的编织机,配直径 0.3mm 镀锡铜丝,正交实验定编织角度 45°、节距 12mm,10MHz 至 1GHz 频段屏蔽效能 85dB,覆盖率 92%,关键尺寸参数均满足 GB/T9330-2020 及 IEC60092-353 标准。

3 船用核安全级电缆的关键性能测试方法

3.1 核环境耐受性能测试

船用核安全级电缆的核环境耐受性能测试需构建应力加载-过程监控-失效判定的全链条闭环管理体系。在此过程中需从测试条件精准设定、多物理场参数实时采集、性能退化临界阈值判定三个维度共同推进。首先,企业需根据核设施设计基准事故工况参数,通过有限元仿真确定电缆各层材料在辐射、高温、蒸汽冲击负荷应力下的热-力-辐射耦合模型,并据此制定分阶段测试方案,明确各阶段应力加载顺序与持续时间。其次,企业需部署高精度传感器网络,在电缆关键部位集成电化学阻抗谱仪、热电偶、声发射传感器,通过数据采集系统实现多参数同步采集,并利用边缘计算模块对原始数据进行预处理。最后,企业需建立基于材料退化机理的失效判定准则,结合动态力学分析测定的玻璃化转变温度漂移量、差示扫描量热法测定的氧化诱导期衰减量等设定性能退化的明确阈值,同时对历史数据进行训练,构建应力-时间-性能的三维预测模型,进而保证测试数据的可追溯性与可重复性^[2]。

如某电缆公司为船用核安全级电缆构建应力加载-

过程监控-失效判定的全链条闭环管理体系,从三个维度推进:用某品牌有限元仿真软件,依核设施设计基准事故参数,建电缆各层材料在辐射、高温、蒸汽冲击下的热-力-辐射耦合模型,制定分阶段测试方案,先加150kGy伽马辐射(剂量率5kGy/h)、再加载200℃高温(升温速率5℃/min)、最后0.8MPa蒸汽冲击,各阶段持续时长明确。部署高精度传感器网络,在导体用PT100热电偶测温度,绝缘层装阻抗谱仪(精度 $10^{-4}\Omega$),屏蔽层设声发射传感器(采样率1MHz),经数据采集系统同步采集,边缘计算模块做降噪、滤波预处理。按材料退化机理定失效准则,动态力学分析测玻璃化转变温度漂移量 $\leq 5^\circ\text{C}$,差示扫描量热法测氧化诱导期衰减量 $\leq 20\%$,用过往100组同类数据训练应力-时间-性能三维模型,确保测试数据可追溯、可重复。

3.2 海洋环境适应性性能测试

在对船用核安全级电缆进行海洋环境适应性性能测试的过程中,企业需建立盐雾腐蚀、机械应力、湿热老化的三重环境耦合效应测试体系,在此过程中也需从环境参数等效模拟、多物理场同步监测、性能退化动态评估三个维度形成闭环管控。首先,企业需基于海洋环境实测数据,通过环境试验箱与振动台的协同控制实现盐雾浓度、湿度梯度、振动幅度的精确复现,同时采用湿度控制系统模拟海洋高湿环境,确保测试条件与实际工况等效。其次,企业需在电缆关键部位部署多参数传感器阵列,集成电化学阻抗谱仪、应变片等,通过数据采集系统实现对盐雾腐蚀速率、机械疲劳次数等相关数据的同时采集与动态关联分析。最后,企业还需建立基于材料微观结构演变的失效判定模型,结合扫描电子显微镜观察的护套表面腐蚀形貌、X射线光电子能谱分析的氯离子渗透深度等数据设定性能退化的临界阈值,为后续电缆在海洋环境中的长期可靠性评估提供量化依据。

3.3 电气与燃烧安全性能测试

要想保证船用核安全级电缆的电气与燃烧安全性能测试工作有序开展,企业需围绕绝缘耐压、阻燃耐火、毒性控制三大核心安全指标构建一个一体化测试框架。在此过程中,首先企业需根据国际标准,通过高精度校准设备对测试仪器进行参数溯源,确保绝缘电阻测试电压的波动范围小于等于 $\pm 2\%$ 、燃烧试验氧气浓度的控制精度以及毒性气体检测灵敏度满足标准要求。其次,企业需在复合应力环境下模拟实际工况,通过工频耐压试验装置施加交流电压以验证绝缘层击穿强度,同时利用垂直燃烧试验箱对电缆样品施加明火,通过氧气浓度梯

度调节测试材料极限氧指数,并采用锥形量热仪记录燃烧过程中的热释放速率、质量损失速率等关键参数,所有应力加载需通过PLC控制系统实现温度、湿度、气流速度的协同控制。最后,企业需建立基于多参数耦合的失效判定准则,结合热重分析测定的材料热分解温度以及扫描电子显微镜观察的碳化层结构设定安全性能的临界阈值,进而为后续电缆的防火安全等级划分提供量化依据^[3]。

如电缆公司围绕绝缘耐压、阻燃耐火、毒性控制三大核心指标构建一体化测试框架,确保测试有序开展:首先,依国际标准用某品牌高精度校准仪对设备溯源,使绝缘电阻测试仪(型号XX)电压波动 $\pm 1.5\%$,燃烧试验箱氧气浓度控制精度 $\pm 0.2\%$,气相色谱仪(型号XX)毒性气体检测灵敏度0.1ppm,均达标。其次,在复合环境模拟工况,用工频耐压装置(型号XX)加3kV交流电压测绝缘层击穿强度,垂直燃烧试验箱(型号XX)对样品施明火,通过氧气浓度梯度测极限氧指数,锥形量热仪(型号XX)记录热释放速率峰值 $\leq 50\text{kW}/\text{m}^2$ 、质量损失速率 $\leq 0.01\text{g}/\text{s}$,PLC控制系统协同控温 $60\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $85\pm 3\%$ 、气流速度 $1.5\pm 0.2\text{m}/\text{s}$ 。最后,建多参数耦合失效准则,以热重分析仪测材料热分解温度 $\geq 350^\circ\text{C}$,扫描电子显微镜观察碳化层结构完整度 $\geq 90\%$ 为临界阈值,为防火等级划分提供量化依据。

4 总结

通过对船用核安全级电缆研制策略与关键性能测试方法的深入研究,我们成功构建了从材料选型、结构工艺优化到性能测试的完整体系。该体系有效解决了材料兼容、结构协同、标准统一等难题,显著提升了电缆在核环境与海洋环境下的适应性与安全性。未来,我们将持续优化该体系,推动船用核安全级电缆技术不断进步,为船舶核动力安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]王云帆,樊群,杨佳昱,等.船用核安全级电缆研制[J].电线电缆,2024,67(01):21-25.
- [2]李广杰.核安全级电缆设计与制造与鉴定试验注意事项[J].电线电缆,2023,(05):7-11+39.
- [3]陶革,高轩,马回明,等.核安全级电缆鉴定寿命的分析再评估技术[J].核动力工程,2022,43(S1):22-26.

作者简介:胡君臣(1966.09—) 工程师,扬州光明电缆有限公司副总经理。