

轨道交通用阻水电缆的应用现状与发展趋势

余荣

江苏赛德电气有限公司，江苏高邮，225651；

摘要：轨道交通用阻水电缆市场正不断扩大，2024年市场规模破千亿元且持续增长。其应用策略涵盖精准选型与标准化适配，依环境参数选电缆并校验标准；全生命周期施工管理，做好前期准备、安装、敷设后处理及建数字化监控平台；智能化运维与状态评估，构建健康状态评估模型、快速响应机制和生命周期数据库。未来将注重材料与工艺融合、数字化管控升级、标准化与定制化协同及绿色施工与成本管理融合。

关键词：轨道交通；阻水电缆；应用现状；发展趋势

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.009

1 轨道交通用阻水电缆的应用现状

1.1 整体需求攀升

轨道交通用电缆市场规模正随着当前市场动态变化以及轨道交通与高速铁路建设规模的不断扩大而持续扩张，至2024年，我国轨道交通用电缆市场规模已然突破千亿元大关，且在未来，其复合年增长率将持续稳定维持在8%以上。其中，高速铁路用电缆因高密度、长距离传输等特殊需求，在市场中占据了绝大部分份额。而城市轨道交通和地铁建设用电缆，则会随着城市的持续扩张，其需求逐步呈现上升态势。

1.2 细分市场分化

在高速铁路领域，鉴于高速铁路具备高速、高可靠性等显著特点，其对电缆性能的要求极为严苛，市场集中度相对较高。国内企业如南瑞集团、许继电气等，凭借自身技术实力与市场布局，占据了主要市场地位。在城市轨道交通领域，随着我国地铁、轻轨等项目需求不断攀升，国外企业凭借技术优势积极参与到我国市场竞争中，例如西门子、阿尔斯通等。而国内企业则主要依靠性价比优势和本地化服务，逐步扩大自身市场份额。在新兴市场方面，随着我国中西部地区基础设施建设步伐不断加快、投资力度持续加大，轨道交通用电缆需求也随之增长，进而成长为行业新的增长点。

2 轨道交通用阻水电缆的应用策略

2.1 精准选型与标准化适配

2.1.1 建立选型模型

轨道交通用阻水电缆的应用需以系统需求为导向，首先应当构建以环境参数为基准的选型模型，同时综合考量线路敷设方式（如隧道、高架、地面等）、气候条件（如温度、湿度、腐蚀性气体浓度）以及运行情况（如电压等级、电流负载、机械应力）等因素。通过量化分

析，精准确定电缆的阻水等级、护套材料及结构参数。例如，在潮湿隧道施工过程中，应当优先选用具备优异阻水性能的铝塑复合护套电缆，并确保纵向阻水层膨胀率大于等于30%，以此快速阻断水分渗透路径。

如某轨道交通线路含潮湿隧道（日均渗水3处，每处渗水量约0.5L/h）、多风高架（年强风天数超60天，最大瞬时风速12m/s）、酸性土壤工业区（土壤pH4.2-4.5，空气中二氧化硫浓度0.05mg/m³）。团队用传感器监测各段环境参数，结合线路10kV电压、800A峰值电流及敷设方式（隧道沿墙架设、高架桥体悬挂、地面直埋），经分析选定隧道用铝塑复合护套电缆（纵向阻水层膨胀率32%）、高架用钢带铠装电缆、地面用氟碳防腐涂层电缆。

2.1.2 标准化适配

依据IEC60502或GB/T12706等相关标准，在选择电缆时，应当严格校验电缆的绝缘厚度、屏蔽层覆盖率及外护套耐磨性。唯有如此，才能保证电缆满足轨道交通场景下长期运行的安全性与可靠性要求。同时，还需建立电缆选型数据库，将环境参数、选型结果与历史故障数据进行关联分析，通过引入新型机器学习算法优化当前选型模型，确保其能够实现动态适配与精准决策。

如上述案例的工程团队按IEC60502标准校验电缆，确保绝缘厚度达2.5mm、屏蔽层覆盖率超90%，外护套经500次摩擦无破损。建分布式数据库，录入环境参数、选型结果及十年故障数据，引入随机森林算法优化模型，当隧道湿度降至75%时，能自动调整选型建议并附成本对比表，保障决策精准。

2.2 全生命周期施工管理

2.2.1 前期准备

施工过程是阻水电缆性能得以实现的关键阶段，因此需要构建覆盖安装前、中、后的全流程管控体系。在

安装之前,需对电缆进行预处理,包括检查外观有无破损变形、进行绝缘电阻测试及阻水性能抽检,唯有如此,才能进一步保证电缆本体质量符合规定及相关标准。同时,在敷设工作开展之前,应当对敷设路径进行环境复核,及时清除尖锐物、积水坑等隐患,并铺设防潮垫层,如聚乙烯薄膜,以此减少地下水汽的渗透^[1]。

如前期准备时,施工团队建全流程管控体系,逐段查电缆外观,测绝缘电阻 $\geq 1000\text{M}\Omega$,抽3%样本浸常温水中24小时测阻水性能。施工人员清路径尖锐物,抽排超5cm积水,直埋段铺0.5mm聚乙烯薄膜防渗水。

2.2.2 安装阶段

在安装过阶段需要严格控制阻水电缆的弯曲半径大于等于15倍电缆外径,牵引张力小于等于 $0.3\text{kN}/\text{cm}^2$,从而有效避免机械损伤,防止阻水层破裂隐患。同时,在接头制作时,需要采用专用冷缩或热缩套件,保证整体气密性达到IP68等级,并通过气密性测试,确保整体能够在 0.5MPa 压力下30分钟无泄漏。

如安装阶段,80mm直径电缆弯曲半径 $\geq 1200\text{mm}$,张力计控张力 $\leq 0.25\text{kN}/\text{cm}^2$ 。接头用冷缩套件,清理绝缘层套入套管收缩, 0.5MPa 水压测试30分钟无气泡,保气密性达IP68等级。

2.2.3 敷设完成后处理

在阻水电缆敷设完成之后,需要及时对电缆进行整体阻水性能测试。在此过程中,可采用压力净水法,在1m水深条件下观测24小时,查看护套有无鼓包、渗水等问题,并详细记录相关测试数据,形成可追溯档案,进而为后续异常问题处理提供重要数据依据。

如轨道交通地下线路阻水电缆敷设完毕后,施工团队即刻启动测试:密封电缆两端,浸入1m清水池用压力净水法观测24小时,每3小时检查护套,记录鼓包、开裂及接缝渗水情况。若某段出现2cm鼓包且渗水,需标注里程坐标、尺寸,附现场照片,数据按“编号—时段—异常—建议”录入系统,形成电子与纸质档案。若不达标,技术人员调取质检报告,对比敷设参数,确认因挤压破损后切割重接,修复后重测至符合规范,所有记录为后期维护提供依据。

2.2.4 建立施工过程数字化监控平台

要想对轨道交通阻水电缆全生命周期进行精确合理的管控,则需要搭建施工过程数字化监测平台。在此过程中首先需要在合理的位置精确布置传感器,结合施工现场的特点及施工环节的相关需求,将传感器安装在合适位置,保证其能够持续采集温度、湿度、张力等真实有效数据。同时需要引进先进的AI图像识别技术,安排专业人员对设备、软件进行先前调试与优化,保证系统能够精确的采集到施工现场的各项细节及数据,并

且能够将数据转化为可视化内容,进而为后续管理人员制定施工策略、调整施工方案奠定重要依据。

此外也需要安排专人实时监测数据画面,对施工流程进行监督,严格按照施工规范及标准作业,一旦发现施工人员存在作业偏差,则需要立即制止并纠正。最后需要建立风险隐患启动预警机制,通过数字化监控平台及时将异常数据发送给责任人并记录跟进情况、跟进进度,并提供相应的反馈方案,进而形成完整闭环,实现质量风险动态预警与闭环管理^[2]。

如施工方为实现全生命周期管控,施工方需搭建施工过程数字化监控平台,在敷设设备上安装温度传感器、湿度传感器和张力的传感器,实时采集施工环境温度(范围控制在 $-5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(不超过80%)及牵引张力数据。同时在关键工位架设高清摄像头,引入AI图像识别技术对施工画面进行分析,当识别到电缆弯曲角度过大或接头制作不符合规范时,平台会自动发出预警信号,管理人员可通过平台查看实时数据和场景图像,及时下达整改指令,形成质量风险的动态预警和闭环管理流程。

2.3 智能化运维与状态评估

2.3.1 健康状态评估模型

在阻水电缆应用的运维过程中,需要以数据驱动为核心,构建预防、监测、修复三位一体的运维体系。首先,企业需要制定以风险等级为基础的巡检周期,定时、定期对高湿度、高腐蚀区域的电缆实施专项检测。在此过程中,需要重点核查护套的完整性、接头的密封性以及阻水层的状态。同时还需要部署分布式光纤测温系统和局部放电传感器,进而实时监测电缆温度分布是否在精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 左右,以及监测绝缘缺陷灵敏度是否小于等于 5pC ,进而结合大数据分析建立健康状态评估模型,预测剩余寿命,并生成相应的维护建议。

如健康状态评估模型构建时,运维团队以数据驱动制定巡检周期,对隧道湿度超85%、工业区土壤 $\text{pH}<4.5$ 的区域每两周专项检测,其他区域每月一次。检测人员用内窥镜查护套裂纹、气密性检测仪核接头密封、取样析阻水层膨胀。每50米设光纤测温点(精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$),接头装局部放电传感器(灵敏度 $\leq 5\text{pC}$),数据传至平台,结合运行年限等建模型,可算剩余寿命并生成维护建议,如某段剩3年则建议每季度增测。

2.3.2 快速响应机制

企业应当建立快速响应机制,当监测到数据出现异常时,例如温度突升大于等于 10°C 或局部放电量超标,则立即触发3级预警,班组、车间、中心同时启动应急处置流程,包括局部隔离、临时加固及专项检测,进一

步保证故障不扩散、影响不扩大。对于已经确认的阻水层失效或护套破损,应当采用模块化修复技术,如使用阻水胶带缠绕修复或热缩套管热熔密封修复,之后需要通过高压水射流测试进行密封验证^[3]。

如快速响应机制中,若10分钟内电缆温升12℃或放电量达8pC,系统触发3级预警。班组15分钟到现场隔离,车间调设备加固,中心派带超声波检测仪的人员。阻水层失效用无水乙醇清洁后,以50%重叠率缠阻水胶带(厚度不小于原护套),护套破损用热缩套管密封,修复后用0.6MPa高压水射流喷3分钟,观有无气泡验密封。

2.3.3 电缆生命周期数据库

在上述基础上需要构建电缆全生命周期数据库,将设计、施工、运维等相关数据进行整合、收集、分析,通过数字孪生技术模拟电缆老化的全过程。并对当前的维护策略进行优化迭代,进而指导新一代阻水电缆的研发,进而形成设计应用改进的闭环迭代机制。

如电缆全生命周期数据库构建时,运维中心整合设计材料参数、施工测试数据、运维巡检记录,导入数字孪生系统,模拟不同环境下电缆老化,如高湿度中阻水层膨胀衰减、腐蚀性气体中护套老化。据此优化维护策略,如工业区巡检从每月缩至20天,数据反馈研发部门,指导新一代电缆用更耐腐护套和更高膨胀率阻水层,形成闭环迭代。

3 轨道交通用阻水电缆的展望

3.1 材料创新与施工工艺的深度融合

在未来,轨道交通用阻水电缆的施工将更加注重材料性能与工艺的协同优化。例如,采用线性低密度聚乙烯作为防水材料,其透水率更低,耐磨性较传统材料更强,可以显著延长电缆在潮湿环境中的使用寿命。

同时,膨胀型阻水带的研发也更加聚焦于更高膨胀倍率和更高响应速度,通过纳米级吸水树脂能够实现纵向阻水性能的突破。针对施工工艺,激光焊接技术将取代传统的热熔焊接,可提升焊接强度,并且能够精确控制焊接温度,有效避免过热导致的护套材料老化问题。

3.2 数字化施工管控体系的全面升级

对轨道交通用阻水电缆施工全生命周期进行数字化管控将成为未来的核心发展趋势,通过有效部署物联网传感器,能够实现实时采集电缆弯曲半径、牵引长度和环境温湿度等相关参数,进而结合BIM模型进行三维可视化监控,实现对施工偏差的实时预警与纠正。

同时,基于机器学习的预测模型,也能够对历

史施工数据进行深度挖掘分析,进而提前识别当前施工过程中可能存在的风险点,进而使施工团队及时响应,及时采取有效的防护性措施。

3.3 标准化与定制化施工方案协同发展

由于轨道交通场景具备多样性与复杂性,施工方案将逐步走向标准化基础加定制化模块的模式。在标准化方面,需要制定统一的电缆敷设规范,并通过智能化工具,例如牵引机器人等确保执行的精确度。在定制化方面,可以针对不同的线路环境参数(如渗水等级、土壤腐蚀性)以及运行工况(如电压等级、负载波动等),开发出模块化的施工组件。

3.4 绿色施工与成本管理的融合

在新时代背景下,环保材料的应用和施工能耗优化已经成为未来的重要发展方向。在全生命周期成本管理过程中,应当建立以LCC(生命周期成本)为基础的施工决策模型,将材料成、施工成本、运维成本和故障损失成本纳入统一框架,通过敏感性分析识别关键成本驱动因素,降低后期维护成本,进而实现全生命周期视角的成本最优化。

4 总结

轨道交通用阻水电缆的应用策略,从精准选型到全生命周期施工管理,再到智能化运维与状态评估,形成了一套完整体系。展望未来,材料与工艺融合、数字化管控升级等趋势,将为电缆应用带来新机遇。行业需紧跟趋势,持续创新,不断优化应用策略,以适应轨道交通发展需求,推动行业向更高质量、更高效益方向迈进。

参考文献

- [1]张炳勋,王江兴,张一伟,等.新型光电综合阻水电缆的研制[C]//中国标准化协会电线电缆专业技术论文集(2024).惠州市金龙羽电缆实业发展有限公司;,2025:112-117.
- [2]高文达,苑光辉.阻水电缆专利技术分析[J].河南科技,2016,(12):45-46.
- [3]刘彦军,郑金香,宋冬冬,等.电缆径向防水和纵向阻水结构分析及应用[J].电世界,2017,58(11):5-7.

作者简介:余荣(1980年8月),男,民族:汉,籍贯:江苏省高邮市,学历:大专,职称:工程师,研究方向:特种电缆研发与产业化,单位:江苏赛德电气有限公司,职务:技术中心副主任。