

一种耐火防水多芯电力电缆设计研究

王元元，罗锡群，胡乐云

(浙江威尔鹰新材料线缆有限公司，浙江 温州 325000)

摘 要 本文提出了一种耐火防水多芯电力电缆的设计，电缆采用 7 芯结构，每芯直径为 2.5 mm，导体为高纯度无氧铜，绝缘层为交联聚乙烯，具有优异的电气性能。耐火填充物采用复合防火泥材料，外护组件采用多层结构设计，包括低烟无卤阻燃材料、铝塑复合带防水层、钢带铠装层及外护套，提高了电缆的耐火防水性能。电缆总外径约为 18.0 mm，能在 950 ℃ 高温下保持结构完整，持续供电时间不低于 90 分钟，水深 1.5 m 环境中长时间使用不进水、不漏电。经过一系列测试，该电缆表现出优异的耐火、防水、电气及机械性能，适用于高温、潮湿及易燃易爆等特殊环境，为工业生产和人民生命财产安全提供了有力保障。

关键词 耐火防水多芯电力电缆设计；缆芯；耐火填充物；耐火防水外护组件

中图分类号：TM247

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.03.022

0 引言

耐火性能是电缆在火灾等极端情况下的安全保障，而防水性能则关系到电缆在潮湿环境中的使用寿命和稳定性，多芯结构则能够满足复杂电路布局和信号传输的需求，提高电缆的适用性和灵活性。在城市化进程加快和工业化水平不断提升的背景下，对电力电缆的性能要求也日益严格，尤其是在一些特殊环境下，如高温、潮湿或易燃易爆场所，传统电缆难以满足长期稳定运行的需求，所以需要研发一种既耐火又防水，且具备多芯结构的新型电力电缆。

1 背景分析

1.1 传统电缆的局限性

在耐火性能方面，许多电缆在高温下容易熔化、燃烧，甚至引发火灾，严重威胁到人们的生命财产安全，比如核电站、化工厂等，电缆的耐火性能直接关系到整个系统的安全稳定运行。防水性能也是传统电缆的一大短板，在潮湿或水下环境中，电缆容易受潮、进水，导致绝缘层损坏，引发短路、漏电等故障，不仅影响电缆的正常使用，还可能造成设备损坏，甚至引发触电事故。此外，随着现代电力系统的发展，对电缆的传输容量、信号传输质量以及布线灵活性也提出了更高的要求，传统单芯或双芯电缆在复杂电路布局和信号传输方面存在明显不足，难以满足现代电力系统的多样化需求。

1.2 市场需求与技术挑战

面对传统电缆的局限性，市场对新型高性能电缆的需求日益迫切。例如，随着高层建筑和智能建筑的

兴起，对电缆的耐火、防水以及布线灵活性提出了更高要求，比如在商场、医院、学校等公共场所，电缆的安全性能直接关系到人们的生命安全；地铁、隧道、桥梁等交通设施对电缆的耐火防水性能有着极高的要求，电缆一旦出现故障，不仅会影响交通运行，还可能引发严重的安全事故。在化工厂、炼油厂、煤矿等易燃易爆环境中，电缆的耐火防水性能具有重要作用，对电缆的安全性能要求极高，传统电缆难以满足。

2 耐火防水多芯电力电缆设计整体方案

2.1 缆芯设计

缆芯是电力电缆的核心部分，负责电力的传输。本设计采用多芯结构，7 芯设计，每芯直径为 2.5 mm，满足复杂电路布局和信号传输的需求；导体采用高纯度无氧铜，电阻率低，导电性能好，确保电力传输的高效性；绝缘层采用交联聚乙烯(XLPE)材料，厚度为 1.0 mm；屏蔽层采用半导体材料，厚度为 0.1 mm，屏蔽层能有效消除导体表面的电势差，防止局部放电现象的发生，提高电缆的电气性能。

2.2 耐火填充物设计

耐火填充物位于缆芯之间，起到隔热、阻燃的作用。本设计采用复合防火泥材料作为耐火填充物；耐火填充物的厚度为 2.0 mm，确保在高温下能有效隔热、阻燃；该防火泥材料在高温下能迅速膨胀形成致密的防火层，有效阻隔火焰和热量的传递，提高电缆的耐火性能^[1]。

2.3 耐火防水外护组件设计

耐火防水外护组件是电缆的最外层，起到保护缆芯、增强电缆耐火防水性能的作用。本设计采用多层

结构设计, 第一防火层采用低烟无卤阻燃材料绕包而成, 厚度为 0.5 mm; 防水层采用铝塑复合带纵包而成, 厚度为 0.2 mm; 铠装层采用钢带编织而成, 厚度为 0.3 mm; 第二防火层同样采用低烟无卤阻燃材料绕包而成, 厚度为 0.5 mm, 该层与第一防火层共同构成双重防火屏障, 提高电缆的耐火性能。外护套采用低烟无卤阻燃聚烯烃材料挤包而成, 厚度为 1.5 mm。

2.4 总体尺寸与性能参数

电缆的总外径约为 18.0 mm; 每米电缆的重量约为 1.5 kg, 便于运输和安装; 电缆能在 950 °C 高温下保持结构完整, 不燃烧、不熔化, 持续供电时间不低于 90 分钟; 在水深 1.5 m 的环境中长时间使用, 不进水、不漏电; 电缆的额定电压为 450/750 V, 最大载流量为 125 A, 满足大多数电力传输需求。同时, 电缆具有良好的抗拉、抗压、抗弯曲等机械性能, 能承受较大的外力冲击和弯曲变形。

3 耐火防水多芯电力电缆设计细节

3.1 材料选择与特性分析

导体选用纯度达到 99.99% 的无氧铜作, 其电阻率极低, 仅为 $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (20 °C 时), 确保了电力传输的高效性, 且无氧铜具有良好的延展性和抗腐蚀性能, 保证了电缆的长期稳定性; 每芯导体采用圆形设计, 直径为 2.5 mm, 截面积约为 4.91 mm^2 , 既能满足电流传输的需求, 又能保持电缆的柔韧性。

绝缘层选用 XLPE 材料, 其厚度精确控制在 1.0 mm, XLPE 具有优异的电气绝缘性能, 介电常数低, 介损小, 且能在高温下保持稳定的绝缘性能, XLPE 还具有良好的耐老化性能和抗裂性能, 延长了电缆的使用寿命^[2]。

耐火填充物采用特制的复合防火泥材料, 由氯化石蜡、瓷土粉、黏结剂、阻燃剂、增塑剂及碳化剂等组成, 该材料在高温下能迅速膨胀, 形成致密的防火层, 有效阻隔火焰和热量的传递; 防火泥还具有良好的附着力和可塑性, 能紧密贴合缆芯, 确保耐火性能的稳定发挥。

第一防火层和第二防火层均选用低烟无卤阻燃材料, 厚度为 0.5 mm, 该材料在燃烧时产生的烟雾少、毒性低, 符合环保要求, 其阻燃性能优异, 能有效阻止火焰的蔓延。防水层采用厚度为 0.2 mm 的铝塑复合带, 铝塑复合带由铝箔和聚乙烯膜复合而成, 具有优异的防水性能和机械强度, 其铝箔层能有效阻隔水分子的渗透, 而聚乙烯膜层则提供了良好的柔韧性和耐候性。铠装层选用厚度为 0.3 mm 的钢带编织而成, 钢带具有良好的抗拉强度和抗冲击性能, 能有效保护电缆免受外力破坏, 同时钢带还具有良好的导电性能,

可作为接地线使用。外护套采用厚度为 1.5 mm 的低烟无卤阻燃聚烯烃材料, 该材料具有优异的防火性能、耐候性能和耐腐蚀性, 能长期保护电缆不受外界环境的侵蚀。

3.2 结构设计细节

7 芯导体按照特定星形排列方式固定在缆芯支架上, 以确保各芯之间的间隙均匀, 减少电磁干扰; 采用非金属材料制成的缆芯支架和绑扎带进行固定, 缆芯支架具有良好的绝缘性能和机械强度, 能确保缆芯的稳定性和安全性; 绑扎带则采用耐高温、耐腐蚀的材料制成, 紧固力适中, 不会损伤缆芯^[3]。

耐火填充物均匀填充在缆芯之间的空隙中, 确保每个缆芯都能被有效包裹, 并在缆芯支架的外部也包裹一层耐火填充物, 形成双重保护; 通过精确计算和控制填充物的用量和密度, 确保在高温下填充物能迅速膨胀并形成致密的防火层, 且填充物的密度也需考虑到电缆的重量和柔韧性。

外护组件按照第一防火层、防水层、铠装层、第二防火层和外护套的顺序进行层叠, 每层之间采用特定的粘结剂或热熔技术进行黏合, 确保各层之间的紧密结合; 在电缆的接头和端部位置进行特殊的密封处理, 以防止水分和潮气的侵入, 密封材料选用与电缆外护套相容的低烟无卤阻燃材料, 确保密封效果的长期稳定性。

4 测试应用

4.1 测试准备与方案

测试地点选择在化工厂的配电室内, 该区域环境复杂, 存在高温、潮湿、易燃等多种不利因素, 且为了更全面地测试电缆的性能, 在室外设置了一段模拟环境, 包括水坑、火源等, 以模拟极端条件下的使用情况。测试电缆规格为 7 芯, 导体截面积为 4.91 mm^2 , 绝缘层厚度为 1.0 mm, 耐火填充物厚度为 2.0 mm, 外护组件包括两层低烟无卤阻燃材料 (各 0.5 mm)、一层铝塑复合带防水层 (0.2 mm)、一层钢带铠装层 (0.3 mm) 和一层外护套 (1.5 mm)。电缆总外径约为 20.0 mm。

模拟火灾环境的燃烧测试箱, 能够模拟 950 °C 的高温环境, 并记录电缆的燃烧情况、结构完整性和烟雾产生量; 准备水深 1.5 m 的水槽, 用于浸泡测试电缆的防水性能, 并配备绝缘电阻测试仪, 用于测量电缆的绝缘电阻变化。

在测试过程中, 将电缆置于燃烧测试箱中, 模拟 950 °C 的高温环境进行燃烧测试, 测试时间为 90 分钟, 记录电缆的燃烧情况、结构完整性和烟雾产生量; 将电缆置于水深 1.5 m 的水槽中进行浸泡测试, 测试时

间为 72 小时, 定期测量电缆的绝缘电阻变化; 在测试前后分别测量电缆的导电性能(电阻率)、绝缘性能(绝缘电阻)和介损等指标, 以评估电缆的电气性能稳定性。同时, 对电缆进行抗拉、抗压、抗弯曲等机械性能测试, 模拟实际使用过程中的受力情况, 测试过程中记录电缆的形变、断裂等情况^[4]。

4.2 测试过程与数据记录

测试过程与数据记录时, 将电缆置于燃烧测试箱中, 设定温度为 950 ℃, 开始燃烧测试; 测试过程中, 电缆表面迅速形成一层致密的防火层, 有效阻隔了火焰和热量的传递, 且电缆内部保持结构完整, 未出现燃烧、熔化或断裂现象。经过 90 分钟的燃烧测试后, 电缆的燃烧长度仅为 0.5 m (总长度为 10 m), 烟雾产生量极低, 符合环保要求; 电缆的残余长度保持完整, 未出现明显的形变或断裂。

防水性能测试时, 将电缆置于水深 1.5 m 的水槽中进行浸泡测试; 在测试过程中, 定期测量电缆的绝缘电阻变化, 经过 72 小时的浸泡测试后, 电缆的绝缘电阻保持稳定, 未出现明显下降; 浸泡前电缆的绝缘电阻为 1 000 MΩ·km, 浸泡后绝缘电阻仍为 950 MΩ·km 以上, 变化率小于 5%, 符合防水性能要求。

在电气性能测试方面, 在测试前后分别测量电缆的导电性能、绝缘性能和介损等指标; 测试前电阻率为 $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ (20 ℃时), 测试后电阻率变化小于 1%, 导电性能稳定; 测试前绝缘电阻为 1 000 MΩ·km, 测试后绝缘电阻仍为 980 MΩ·km 以上, 绝缘性能良好; 测试前介损为 0.002, 测试后介损变化小于 0.001, 介损性能稳定。

在机械性能测试方面, 对电缆进行抗拉、抗压、抗弯曲等机械性能测试; 电缆的抗拉强度为 200 N/mm², 断裂伸长率为 15%, 满足抗拉性能要求; 电缆在承受 500 N 的压力下未出现形变或破裂现象, 满足抗压性能要求; 电缆在弯曲半径为电缆直径 10 倍的情况下进行弯曲测试, 未出现断裂或形变现象, 满足抗弯曲性能要求^[5]。

4.3 测试效果与结论

经过一系列严格的测试后, 本文所提出的耐火防水多芯电力电缆表现出了优异的性能。在耐火测试中, 电缆能够迅速形成防火层, 有效阻隔火焰和热量的传递; 在防水测试中, 电缆的绝缘电阻保持稳定, 未出现漏电或短路现象; 在电气性能测试中, 电缆的导电性能、绝缘性能和介损性能均表现稳定; 在机械性能测试中, 电缆的抗拉、抗压、抗弯曲等性能均满足设计要求。

4.4 后续优化改进方向

虽然耐火防水多芯电力电缆在测试中表现出了优异的性能, 但在实际应用和后续研究中仍存在一些可以优化和改进的方向, 以进一步提升电缆的综合性能和适用性。

首先, 在材料选择方面, 可以进一步探索新型高性能材料的应用, 比如针对耐火填充物, 可以尝试使用更加环保、高效的防火材料, 以降低电缆在生产和使用过程中的环境影响; 对于绝缘层和外护组件的材料, 也可以考虑采用具有更高耐热性、耐老化性和机械强度的材料, 以延长电缆的使用寿命和提高其在极端环境下的稳定性。其次, 在结构设计方面, 可以进一步优化缆芯的排列方式和固定方式, 以减少电磁干扰和提高电缆的传输效率; 还可以考虑增加一些附加的保护措施, 比如增设防水密封层、加强铠装层的厚度或采用更加先进的铠装材料等, 以提高电缆的防水性能和抗外力破坏能力。最后, 针对电缆在不同环境下的应用需求, 可以开展更加深入的研究和试验工作, 比如可以针对高温、潮湿、易燃易爆等特殊环境, 对电缆的耐火性能、防水性能和电气性能进行更加严格的测试和评估, 以验证其在实际应用中的可靠性和稳定性; 还可以根据用户的反馈和需求, 对电缆的设计和生产进行持续改进和优化, 以满足不同用户的需求和期望。

5 结束语

本文提出了一种耐火防水多芯电力电缆设计方案, 在化工厂等特殊环境下表现出了优异的性能和可靠性。该电缆不仅能够满足电力传输的需求, 还能有效应对火灾、潮湿等极端情况, 为工业生产和人民的生命财产安全提供了有力保障。未来, 需要继续优化该电缆的设计和生产工艺, 提高其性能和可靠性, 为电力行业的发展和社会的进步贡献力量。

参考文献:

- [1] 位巍, 欧阳康百, 许文强. 船舶电缆设计及预裁的优化应用 [J]. 船舶标准化与质量, 2022(06):33-37.
- [2] 张馨丹, 王银顺, 李冠华, 等. 700 MVA/20 kV 单相高载流低损耗高温超导电缆设计 [J]. 低温与超导, 2022, 50(12): 6-13.
- [3] 刘雪峰, 吴中伟. 面向智能化开采的加强型橡胶套牵引电缆设计与研发 [J]. 煤炭科技, 2022, 43(06):53-57, 64.
- [4] 王二强. 煤矿井下 6 kV 动力电缆绝缘线监测系统的的设计与应用 [J]. 矿业装备, 2022(06):132-133.
- [5] 赵亚星. Eca 等级细径聚乙烯绝缘同轴射频电缆的阻燃设计 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2022(03):20-22, 26.