



王丽萍, 金华东, 梁福才. 核电站用耐火电缆选型与结构优化[J]. 电线电缆, 2025, 68(11): 49-54.

WANG L P, JIN H D, LIANG F C. Selection and structural optimization of fire resistant cables for nuclear power plants[J]. Wire & Cable, 2025, 68(11): 49-54.

DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.20250177

核电站用耐火电缆选型与结构优化

王丽萍, 金华东, 梁福才

(江苏上上电缆集团有限公司, 溧阳 213300)

摘要: 为明确核电站用耐火电缆的特性以支撑其选型及生产制造, 通过分析其种类、安全分级、质保等级、结构设计, 对比不同耐火试验标准(如 GB/T 19666—2019、BS 6387: 2013 等), 并开展结构验证试验探究结构对性能的影响。分类上, 核电站用耐火电缆主要包括耐火低压电力电缆、控制电缆、测量电缆等, 安全分级有 1E 级、非 1E 级等, 质保分级多为 Q2、Q3 等; 结构上, 耐火层以云母带为主, 耐喷淋层采用陶瓷化硅橡胶带、挤包陶瓷化聚烯烃或无卤阻燃结壳型聚烯烃可提高 GB/T 19666—2019 中 NS 耐火试验通过率; 不同场景需要结合环境特性、安全等级及标准要求选型。研究表明, 合理设计结构、选择材料及遵循相关标准, 可保障核电站用耐火电缆在复杂环境中的可靠性, 可为其选型与生产提供参考。

关键词: 耐火电缆; 核电站; NS 耐火

中图分类号: TM249

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2025)11-0049-06

0 引言

随着全球能源需求的不断增长, 核电作为一种清洁、高效的能源, 在能源结构中的占比日益提升。核电站运行环境具有高辐射、高温等特点, 潜在火灾风险较高。电缆作为核电站电力传输与信号传递的核心载体, 其在火灾条件下的持续工作能力直接关乎核反应堆安全、放射性物质控制及人员疏散等关键环节。其中, 耐火电缆凭借其在特定火灾环境下仍能够保持电路完整性的优势, 成为保障核电站安全运行的重要组成部分。核电站用耐火电缆也逐渐成为工程公司采购电缆的独立类别, 甚至开始单独打包采购。作为核电站用电缆, 低烟无卤阻燃是电缆应具备的基本性能, 因此核电站用耐火电缆应兼顾此项性能^[1]。

本工作将围绕核电站用耐火电缆的种类、安全分级、质保等级、结构、耐火试验要求及选型建议展开探讨, 以期为该类型电缆的选型及生产制造提供参考。

1 核电站用耐火电缆

核电站环境复杂且风险特殊, 耐火电缆的种类划分、安全分级及质保等级界定, 是匹配不同功能需求、防控火灾风险的基础, 影响电力与信

号传输系统的可靠性, 是核电站安全运行的关键技术支撑。从电缆产出的角度来看, 电缆种类划分直接影响电缆产品结构和性能设计, 安全分级及质保等级决定制造过程中的质量控制和输出文件的类别。

1.1 主要种类

核电站用耐火电缆主要分为核电站用耐火电力电缆、核电站用耐火控制电缆和核电站用耐火测量电缆 3 类。

1) 核电站用耐火电力电缆。核电站用耐火电力电缆目前仅涉及额定电压为 0.6/1 kV 的电力电缆; 在工程采购的详细划分中, 还包含低压动力耐火电缆、低压动力照明耐火电缆、火警耐火低压电力电缆、耐火低压交流电力电缆、耐火直流电力电缆等。

2) 核电站用耐火控制电缆。核电站用耐火控制电缆电压等级一般要求 0.6/1 kV 或 450/750 V。工程采购上一般描述为耐火控制电缆、火警耐火控制电缆、铠装屏蔽耐火控制电缆、硅橡胶耐火控制电缆等。

3) 核电站用耐火测量电缆。核电站用耐火测量电缆的电压等级一般要求为 300/500 V。工程采购上一般描述为耐火测量电缆、火警耐火测量电缆、耐火仪表电缆、火警耐火仪表电缆等。

1.2 安全分级与质保等级

1.2.1 安全分级

在核电站的安全管理中,设备、系统或构筑物的安全分级是基于其对核安全的重要性划分的,核心目的是通过差异化的设计、制造、质保和运行要求,确保关键安全功能的可靠性。

基于核电站的技术路线不同,安全分级使用的名称也不相同,通常包括:安全级、非安全级;1E级、非1E级;F-SCI级、NC级等。不同级别在电缆的鉴定寿命、辐照剂量、耐火性能、阻燃性能等方面均有不同要求。安全级、1E级、F-SCI级一般会选用较高要求的电缆。目前,核电站用耐火电缆通常按照非1E级、NC级采购,个别回路会归类到1E级或F-SCI级。

1.2.2 质保等级

核电站的质保等级根据物项、活动或服务对核安全的重要性制定差异化控制要求,目的是在确保核安全的前提下,合理分配资源,避免过度质保或质保不足。质保等级的核心逻辑与安全分级直接关联,即安全级别越高的物项,对应的质保等级越严格。

核电站的质保等级通常分为:Q1、Q2、Q3、QNC;QR1、QR2、QR3、NQR;QSA1、QSA2、QSA3、NQA等。目前,核电站用耐火电缆的质保分级大多按照Q2、Q3、QR2、QR3,以及QSA2、QSA3级别采购。除此之外,核电站用耐火电缆的质保输出文件一般要求具备竣工文件和质量记录。

2 核电站用耐火电缆的结构设计

2.1 导体与绝缘层

由于需要保持火焰条件下的线路完整性,受材料熔点的限制,导体通常采用铜或镀锡铜。因核电站用电缆需要满足低烟无卤阻燃性能,一般要求绝缘材料的鉴定寿命为40 a或60 a。因此,绝缘层设计与选材受到限制。在现有试验技术条件下,比较理想的材料为乙丙橡胶、交联聚乙烯和交联聚烯烃材料,高温环境下也可使用氧化镁矿物绝缘。需要注意的是,硅橡胶类材料不适合进行现有条件下的热寿命评定。

2.2 耐火层与耐喷淋

耐火层一般采用导体外绕包云母带的方案,工艺简单且可兼顾核电站用电缆的其他特殊性能,是目前应用最广泛的方案。硅橡胶在燃烧后可结壳起到绝缘的作用,在不要求鉴定寿命的产

品中可使用硅橡胶作为核电站耐火电缆的耐火层,同时也是绝缘层。

耐喷淋层需要满足BS 8491: 2008、BS 6387: 2013或GB/T 19666—2019《阻燃和耐火电线电缆通则》中的NS耐火性能。一般采用缆芯外挤包结壳型聚烯烃、陶瓷化聚烯烃结构或绕包陶瓷化硅橡胶带等方案。

2.3 屏蔽层与外护套

屏蔽层一般采用铜丝编织屏蔽、金属带绕包屏蔽。外护套需要满足核电站用电缆低烟无卤阻燃的要求,尤其是对于需要同时满足B₂级阻燃的耐火电缆,外护套选材的阻燃性能更加重要。目前通常采用乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(ethylene vinyl acetate, EVA)为基材的低烟无卤阻燃聚烯烃材料,配合护套的挤压式挤包和辐照交联工艺,共同实现阻燃和耐火的三重条件考验。需要注意的是,使用氧化镁矿物绝缘时需要配套使用铜护套。

3 核电站用耐火电缆的耐火试验要求

核电站用耐火电缆材料和结构设计的主要依据为性能要求。除耐火试验外,需要同时兼顾电性能、耐长期热老化、耐辐照、低烟无卤阻燃等核电站用电缆的基本性能。

3.1 耐火试验方法对比

采购选型时,核电站用耐火电缆的耐火性能需要满足GB/T 19666—2019、BS 8491: 2008和BS 6387: 2013。

GB/T 19666—2019对不同形式耐火试验的电缆进行了分类标识。代号N为单纯耐火电缆,试验方法执行GB/T 19216.21—2003《在火焰条件下电缆或光缆的线路完整性试验 第21部分:试验步骤和要求——额定电压0.6/1 kV及以下电缆》;代号NJ为耐火+冲击耐火电缆,试验方法执行IEC 60331-1: 2018、IEC 60331-2: 2018;代号NS为耐火+喷淋(喷射)耐火电缆,试验方法执行IEC 60331-1: 2018、IEC 60331-2: 2018和GB/T 19666—2019的附录A、附录B。

GB/T 19216.1—2021《在火焰条件下电缆或光缆的线路完整性试验 第1部分:火焰温度不低于830℃的供火并施加冲击振动,额定电压0.6/1 kV及以下外径超过20 mm电缆的试验方法》等同采用了IEC 60331-1: 2018。GB/T 19216.2—2021《在火焰条件下电缆或光缆的线路完整性试验 第2部分:火焰温度不低于830℃的供火并施

加冲击振动, 额定电压 0.6/1 kV 及以下外径不超过 20 mm 电缆的试验方法》等同采用了 IEC 60331-2: 2018。

GB/T 19216 系列标准的试验方法(火焰+振动)对比见表 1。GB/T 19666—2019、BS 8491:

2008、BS 6387: 2013 包含喷水试验条件的耐火试验方法对比见表 2。其中, C、Z、W 为试验方法的 3 个组成协议。由表 1 和表 2 可知, 在 GB/T 19666—2019 中, NS 耐火试验在供火时间、附加敲击及喷淋条件等方面均较为严苛^[2]。

表 1 标准中试验方法对比(火焰+振动)

Tab.1 Comparison of test methods in standards (flame + vibration)

项目	GB/T 19216.21—2003	GB/T 19216.1—2021	GB/T 19216.2—2021
供火时间/min	90	30, 60, 90, 120	30, 60, 90, 120
供火温度/℃	750~800	830~870	830~870
试验条件	火焰	火焰+振动	火焰+振动
对应GB/T 19666—2019中耐火性能代号	N	NJ	NJ

表 2 标准中试验方法对比(火焰+振动+喷水)

Tab.2 Comparison of test methods in standards (flame + vibration + water spraying)

项目	BS 8491: 2008	BS 6387: 2013	GB/T 19666—2019
供火时间/min	30, 60, 120	C: 180; Z: 15; W: 30	120
供火温度/℃	830~870	C: 950±40; Z: 950±40; W: 650±40	830~870
试验条件	火焰+振动+水冲击	C: 火焰; Z: 火焰+振动; W: 火焰+振动+水喷淋	N: 火焰; NJ: 振动; NS: 振动+水喷淋(水喷射)

3.2 NS 耐火电缆结构验证

通过对比可知, 耐火性能试验方法由单纯耐火向耐火+振动、耐火+喷淋等模拟火灾实际场景的方向发展, 机械振动和消防水被引入试验条件, 而水的引入对于火焰条件下保持线路完整性无疑是更大的挑战。

核电站用耐火电缆从 20 世纪 90 年代起迅速发展, 通过采用导体外加绕云母带耐火层的方式很容易通过 GB/T 19216.21—2003 中的耐火试验(即 GB/T 19666—2019 中规定的 N 耐火性能)。同时, 越来越多的用户也提出核电站用耐火电缆需要满足 GB/T 19666—2019 中规定的 NS 耐火性能的要求。除了采用氧化镁矿物绝缘电缆外, 传统耐火电缆的结构难以通过该项试验, 需要通过优化耐喷淋层设计实现。

本文以满足 GB/T 19216.21—2003 要求的核电站用耐火电缆为基础, 并增加多种耐喷淋层的方案, 进行了以下对比验证。

3.2.1 确定选样型号规格

选取 WZNS-YJY 电力电缆、WZNS-KYJYP 控制电缆两个验证样本。该电缆原始结构为导体、云母带、交联聚乙烯绝缘、成缆、外护套。

3.2.2 验证思路和方案

首先, 以增加成缆绕包带作为加强耐喷淋层为思路开展电缆制样, 见方案 1、2; 然后, 增加内衬层作为第 2 次探索, 见方案 3、4; 最后, 结合绕包和挤包两种方式进行验证, 见方案 5、6^[3-5]。具体验证样本的结构见表 3 和表 4。记录的 NS 耐火试验结果见表 5。

表 3 验证样本结构(导体至成缆)

Tab.3 Structure of verification samples (conductor to cabling)

样本型号	芯数	截面积/mm ²	方案	导体+耐火层		绝缘		成缆	
				材料	外径/mm	材料	外径/mm	材料	外径/mm
WZNS-YJY	3	1.5	1~6	镀锡铜+云母带	2.7	交联聚乙烯	4.4	低烟无卤阻燃带	10.1
WZNS-KYJYP	3	1.5	1~6	镀锡铜+云母带	2.7	交联聚乙烯	4.4	低烟无卤阻燃带	10.1

表 4 验证样本结构(耐喷淋层至外护套)

Tab.4 Structure of verification samples (spray-resistant layer to outer sheath)

样本型号	芯数	截面积/ mm ²	方案	耐喷淋层		编织屏蔽		外护套	
				材料	外径/mm	材料	外径/mm	材料	外径/mm
WDZNS-YJY	3	1.5	1	成缆外加绕铜带	10.4	—	—	低烟无卤阻燃热塑性聚烯烃	14.4
			2	成缆外加绕陶瓷化硅橡胶带	11.0				15.0
			3	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃	14.1				18.1
			4	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃	13.1				17.1
			5	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃加绕铜带	14.4				18.4
			6	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃加绕铜带	13.4				17.4
WDZNS-KYJYP	3	1.5	1	成缆外加绕铜带	10.4	镀锡铜丝	11.2	低烟无卤阻燃热塑性聚烯烃	15.2
			2	成缆外加绕陶瓷化硅橡胶带	11.0		11.8		15.8
			3	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃	14.1		14.9		18.9
			4	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃	13.1		13.9		17.9
			5	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃加绕铜带	14.4		15.2		19.2
			6	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃加绕铜带	13.4		14.2		18.2

表 5 6种结构方案的 NS 耐火试验结果对比

Tab.5 Results comparison of NS fire resistance tests for six structural schemes

样本型号	芯数	截面积/mm ²	方案	增加耐喷淋层方案	GB/T 19666—2019中NS耐火试验
WDZNS-YJY	3	1.5	1	成缆外加绕铜带	未通过
			2	成缆外加绕陶瓷化硅橡胶带	通过
			3	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃	通过
			4	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃	通过
			5	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃加绕铜带	未通过
			6	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃加绕铜带	未通过
WDZNS-KYJYP	3	1.5	1	成缆外加绕铜带	未通过
			2	成缆外加绕陶瓷化硅橡胶带	未通过
			3	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃	未通过
			4	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃	通过
			5	成缆外挤包陶瓷化聚烯烃加绕铜带	未通过
			6	成缆外挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃加绕铜带	未通过

3.2.3 试验结果分析

对不同结构验证样本进行 GB/T 19666—2019 中 NS 耐火试验, 得出以下结论。

1) WDZNS-YJY 电力电缆。方案 1 未通过试验, 可能是因为铜带在高温下的隔热性能有限, 无法阻挡火焰和热量对电缆内部结构的破坏。方案 2 通过试验, 说明陶瓷化硅橡胶带在受热时能够发生陶瓷化转变成坚硬的陶瓷层, 有效阻

挡了火焰和热量的传递, 保护了电缆内部的导体和绝缘层。方案 3 通过试验, 说明陶瓷化聚烯烃在受热时形成的陶瓷层具有良好的隔热性能, 能够阻止热量的传递。方案 4 通过试验, 说明无卤阻燃结壳型聚烯烃在燃烧时形成的结壳能够阻止火焰的蔓延, 提高了电缆的防火性能。当结合绕包和挤包方式时, 方案 5、方案 6 均未通过试验, 可能是因为铜带的存在影响了陶瓷化聚烯烃

的陶瓷化效果和结壳型聚烯烃的结壳效果, 或者在喷水过程中, 水分通过铜带与挤包层之间的缝隙进入电缆内部, 导致绝缘击穿。

2) WDZNS-KYJYP 控制电缆。方案 1、方案 5、方案 6 与电力电缆相似均未通过试验。方案 2 与电力电缆不同, 未通过试验, 说明了陶瓷化硅橡胶带在提高电缆耐火性能方面的局限性。方案 3 与电力电缆结果也不同, 在 105 min 喷水时的击穿未通过试验, 可能是因为控制电缆的结构中包含铜丝编织屏蔽, 破坏了陶瓷化聚烯烃的陶瓷化转变效果。只有方案 4 通过了试验, 表明该材料在控制电缆中具有较好的适用性, 能够有效提高电缆的耐火性能。

经以上验证, 核电站用耐火电缆在保证长寿命、耐辐照、低烟无卤阻燃等性能的基础上通过增加挤包结壳型耐喷淋层, 可提高 NS 耐火试验的通过率。

4 核电站用耐火电缆的选型建议

4.1 基于材料特性与结构适配的性能选型建议

满足 GB/T 19666—2019 中 NS 耐火试验的电力电缆需要优先选择成缆绕包陶瓷化硅橡胶带或挤包陶瓷化聚烯烃、无卤阻燃结壳型聚烯烃作为耐喷淋层的结构, 避免铜带与其他耐喷淋材料复合使用。控制电缆和测量电缆因含屏蔽层, 宜采用挤包无卤阻燃结壳型聚烯烃, 慎用金属带绕包屏蔽, 防止破坏陶瓷化材料的结壳效果。同时, 导体选用镀锡铜或高纯度铜, 绝缘层优先采用乙丙橡胶或交联聚烯烃, 兼顾 40 a 或 60 a 热寿命、耐辐照等要求。

4.2 基于使用环境和试验的选型建议

核电站的 1E 级、F-SCI 级关键安全回路用耐火电缆, 如需要满足 GB/T 19666—2019 中 NS 耐火试验, 优先选用氧化镁矿物绝缘电缆 (RTTZ 型), 对柔软性要求较高区域的电力电缆可选用 NS 级耐火电缆, 控制电缆和测量电缆需要谨慎选择该级别。核电站非 1E 级非关键回路 (如照明、普通动力), 采用电缆桥架敷设, 能够阻隔一定程度的机械冲击和水喷淋 (喷射), 可选用经济型的云母带 + 聚烯烃组合结构, 即 GB/T 19666—2019 中 N 级耐火电缆。另外, 消防、疏散系统主要保障火灾初期报警、照明及应急指挥, 需要持续工作至人员疏散完毕 (通常不大于 90 min), 且较少直接受消防水喷淋冲击, 可选择满足 GB/T 19666—2019 中 N 级或 NJ 级要求的耐火电缆, 避

免性能冗余。需要注意的是, 耐火电缆均应通过成束阻燃 B 类试验 (炭化长度不大于 2.5 m), 避免火灾蔓延扩大。

5 结束语

核电站用耐火电缆的种类划分、结构与试验标准执行直接影响其在高辐射等复杂环境中的可靠性。本文针对核电站用耐火电缆的技术需求, 开展了分析与验证: 明确了电缆类别及电压等级, 梳理了安全分级与质保分级, 可作为选型基础依据; 对比了耐火试验标准, 明确了 NS 耐火试验的严苛性; 优化结构设计, 确定了导体、绝缘材料, 验证了通过合理选择耐火层、耐喷淋层可提升 NS 耐火试验的通过率; 描述了按场景选型策略, 如普通回路用经济型 N 类阻燃耐火电缆等。

建议采购方构建全链条保障体系, 不追求某种性能的极致要求; 制造方设计时选择合适的结构和材料, 确保耐火性能等全性能合格。这样供需双方紧密配合, 才能为火灾工况下的电力与信号传输安全提供保障, 为核电站安全运行提供支撑。

参考文献 References

- [1] 产业调研网. 2025 年中国耐火型电缆市场现状调查与未来发展前景趋势报告 [R]. 2025.
Industrial research network. Research report on China's fire-resistant cable market: Survey of current status and future development prospects and trends (2025)[R]. 2025.
- [2] 梁兆荣, 邱懿涛, 杨辉. 耐火电缆试验标准差异分析 [J]. *电线电缆*, 2025, 68(5): 1-4.
LIANG Z R, QIU Y T, YANG H. Difference analysis of fire-resistant cable test standards[J]. *Wire & Cable*, 2025, 68(5): 1-4.
- [3] 丁运生, 周意杨, 周劲松, 等. 一种耐 γ -射线辐照可陶瓷化阻燃耐火电缆护套材料及其制备方法: CN 115785576B[P]. 2024-04-05.
DING Y S, ZHOU Y Y, ZHOU J S, et al. A γ -ray radiation-resistant, ceramizable, flame-retardant, and fire-resistant cable sheathing material and its preparation method: CN 115785576B[P]. 2024-04-05.
- [4] 黄万里, 赵迪. 燃烧性能等级 A 级矿物绝缘柔性耐火电缆优化设计 [J]. *电线电缆*, 2024, 67(4): 58-61.
HUANG W L, ZHAO D. Optimization design of mineral insulated flexible fire-resistant cables with Level A combustion performance[J]. *Wire & Cable*, 2024, 67(4): 58-61.
- [5] 高振军, 张开拓. 一级建筑用难燃耐火电缆的研制及应用 [J]. *电线电缆*, 2024, 67(1): 31-35.

GAO Z J, ZHANG K T. Development and application of refractory cables for first-class buildings[J]. *Wire & Cable*, 2024, 67(1): 31-35.

修回日期: 2025-09-17

作者简介: 王丽萍 WANG Liping
1987—, 女, 高级工程师
研究方向为核电站用低烟无卤阻燃电
缆、耐火电缆
E-mail: wlp0460@163.com

收稿日期: 2025-08-06

Selection and Structural Optimization of Fire Resistant Cables for Nuclear Power Plants

WANG Liping, JIN Huadong, LIANG Fucui

(Jiangsu Shangshang Cable Group Co., Ltd., Liyang 213300, China)

Abstract: To clarify characteristics of fire resistant cables for nuclear power plants and support their selection and manufacturing, an analysis was conducted on their types, safety classifications, quality assurance grades, and structural designs. A comparison was made between different fire resistance test standards (such as GB/T 19666—2019 and BS 6387: 2013), and structural verification tests were carried out to explore the impact of structures on performance. In terms of classification, fire resistant cables for nuclear power plants mainly include fire resistant low-voltage power cables, control cables, and measurement cables, with safety classifications such as Class 1E and non-Class 1E, and most quality assurance grades being Q2 and Q3. In terms of structure, fire resistant layer is mainly made of mica tape, and the use of ceramic silicone rubber tape, extruded ceramifiable polyolefin, or halogen-free flame retardant crusting polyolefin for the spray-resistant layer could improve the pass rate of NS fire resistance test specified in GB/T 19666—2019. Selection in different scenarios should be based on environmental characteristics, safety levels, and standard requirements. The study showed that reasonable structural design, appropriate material selection, and compliance with relevant standards could ensure the reliability of fire resistant cables for nuclear power plants in complex environments, providing a reference for their selection and manufacturing.

Key words: fire resistant cables; nuclear power plant; NS fire resistance