

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆生产工艺探讨

徐勇

江苏赛德电气有限公司, 江苏 扬州 225651

DOI:10.61369/EPTSM.2025030016

摘 要： 核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆是保障核电站安全运行的重要基础设施。本文简要介绍了该类电缆的主要性能要求、结构特点及其生产工艺流程，分析了关键技术挑战，并展望了未来的发展方向。通过材料创新和工艺优化，旨在提升电缆在极端环境下的可靠性和安全性，为核电站的安全运行提供有力支持。

关 键 词： 核电站；柔性电缆；耐辐射

Discussion on the Production Process of Flexible, Radiation-Resistant, Spray-Proof, and Fire-Resistant Cables for Nuclear Power Plants

Xu Yong

Jiangsu Saide Electric Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225651

Abstract： Flexible radiation-resistant fire-resistant cables for nuclear power plants are vital for ensuring operational safety. This paper briefly outlines the main performance requirements, structural features, and production processes of these cables, analyzes key technical challenges, and looks ahead to future development trends. Material innovation and process optimization are aimed at improving reliability and safety in extreme environments, providing strong support for the safe operation of nuclear power plants.

Keywords： nuclear power plant; flexible cables; radiation resistance

引言

随着核电技术的不断发展和核电站建设规模的扩大，核电站的安全性和可靠性成为社会广泛关注的焦点。在核电站各类重要系统的安全运行中，电缆作为电力传输和信号控制的关键基础设施，发挥着至关重要的作用。核电站环境复杂，局部区域长期存在高温^[1]、高湿、辐射等严苛环境条件，这对电缆的性能提出了极高的要求。传统的普通电缆在遇到辐射环境或者火灾、水喷淋等突发事件时，往往存在耐久性差、绝缘性能下降、柔性不足等问题，不仅难以满足核电站特殊场景的需求，还可能成为潜在的安全隐患。

随着核电站运行环境对安全保障的极致追求，研发具备柔性^[2]、耐辐射、防喷淋、耐火等多种性能于一体的高性能特种电缆成为行业发展的重要趋势。柔性电缆便于复杂空间的布线和安装，提高了系统的可维护性和施工效率；耐辐射性能确保电缆在强烈辐射环境下能够长期稳定工作，不发生性能衰退；防喷淋性能则保证在火灾联动喷淋系统启动时，电缆不会因被水淋湿而失效；耐火性能则确保电缆即使在高温火灾环境下，仍能维持一段时间内的电气功能，保证应急系统的正常运转。因此，针对核电站特殊工况下柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的研发与应用，具有重要的工程价值和现实意义。

目前，国际上针对核电站电缆的研究与应用已取得一定成果，欧美、日本等发达国家在高性能特种电缆生产工艺及标准体系等方面具备较为先进的技术基础。我国在核电站电缆的设计和制造方面起步较晚，但近年来随着核电行业的快速发展，自主研发能力逐步提升，相关技术规范 and 标准也日益完善。然而，受制于材料^[3]、工艺及检测等多方面因素，国产柔性耐辐射防喷淋耐火电缆在关键材料选择、结构复合与制造工艺等方面与国际先进水平仍有一定差距，亟需系统梳理现有工艺，强化关键技术攻关。

鉴于上述背景，本文围绕核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆展开，系统梳理了该类电缆的性能需求和结构设计，详细探讨了生产工艺流程与关键技术瓶颈。通过对国内外技术现状的比较，分析当前存在的主要问题，探讨未来创新方向，为推动我国核电站电缆国产化进程和提升装备安全水平提供理论支撑和技术借鉴。

一、柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的性能要求和结构设计

1. 性能指标分析

核电站运行环境具有辐射强、温度高、湿度大以及在事故情

况下可能存在火灾和喷淋水等多重复杂因素。因此，核电站用电缆的性能必须满足如下几方面的核心要求：

· 柔性性能：电缆需具备良好的柔软性和弯曲性能^[4]，以适应核电站复杂空间的布线和安装要求，提高系统维护和检修的便利性。

作者简介：徐勇（1983.12—），男，汉族，江苏高邮人，学历：大专，职称：工程师，从事的研究方向：核级电缆研发与应用。

- 耐辐射性能：电缆材料和结构需能承受长期 γ 、 β 等射线辐照，确保在规定剂量下机械、电气和物理性能无显著劣化。

- 防喷淋性能：在火灾联动或事故喷淋工况下，电缆应防止水渗入影响绝缘性能，保证应急系统的持续可靠运行。

- 耐火性能：电缆可在950℃~1000℃高温火焰和喷淋双重作用下，维持一定时间的正常输电和信号传输功能，保障关键系统安全。

- 其他性能：还包括阻燃、低烟无卤、耐腐蚀和耐湿热等特性^[5]，以提高电缆的综合适应能力。

2. 电缆主要结构组成

柔性耐辐射防喷淋耐火电缆通常由以下主要结构层组成，各层协同作用，以实现综合性能的有机统一：

- 导体层：多采用多股细铜丝绞合结构，提高柔性，减少流动损耗，常用无氧铜丝或镀锡铜丝，以提升其抗氧化和耐腐蚀性能。

- 绝缘层：关键采用耐辐射、耐高温的高分子材料（如辐照交联聚烯烃、氟塑料、硅橡胶等），提升绝缘和耐热能力。

- 屏蔽层：以铜带或铜丝编织结构为主，防止信号干扰，提升安全性；部分高要求场所采用双层屏蔽以提升电磁兼容性。

- 防火层/耐火层：采用云母带、陶瓷硅胶带等复合材料紧密包覆，增强电缆在火焰环境下的耐火性能。

- 防喷淋层：一般为高密度聚乙烯（HDPE）、特殊防水带或自愈型防水胶^[6]等，增强电缆防水性能，防止喷淋水渗透至内部。

- 护套层：采用低烟无卤、耐辐射高分子外护套材料，提高整体机械保护与环境适应能力。

3. 各层材料的选择及先进材料研究进展

材料选择直接决定了电缆的各项综合性能。目前，国内外对于耐辐射聚烯烃^[7]、聚四氟乙烯（PTFE）、聚全氟乙丙烯（FEP）、氟塑料以及新型无机云母带、硅橡胶陶瓷化带等材料深入研究。尤其是辐照改性聚烯烃、耐辐射硅橡胶等新材料的开发，有效提升了电缆在高辐照、高温和复杂环境下的长期服役能力。同时，针对防喷淋层，纳米防水材料和自愈性防水胶的应用成为新的发展方向。

4. 结构设计优化与仿真分析

为实现多性能需求的最优耦合，结构设计需结合理论模拟与实验验证：

- 导体分股设计：优化绞合节距与股数，提高电缆柔性和抗机械疲劳能力^[8]。

- 绝缘厚度与结构多样性：通过仿真与试验，确定最优绝缘层厚度与多层结构，提高耐电压和绝缘寿命。

- 防火防喷淋复合结构：采用分层复合与包覆，提高界面结合强度和整体密封性，提升火灾及喷淋工况下的使用可靠性。

- 仿真分析：采用有限元分析（FEM）等手段进行热、机械与电气性能模拟，优化结构参数，提升整体安全裕度。

通过科学合理的结构设计和先进材料^[9]的应用，柔性耐辐射防喷淋耐火电缆能够高效满足核电站复杂环境下的应用需求，为保障核电站安全稳定运行提供关键技术支撑。

二、生产工艺流程分析

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆对材料性能与成品质量有极高要求，其生产过程较常规电缆更为复杂和精细。科学合理的工艺流程^[10]不仅关乎电缆产品的性能稳定，还直接影响其在核电站等严苛环境下的安全性与可靠性。以下从原材料准备、各功能层的制造及整体流程控制等方面进行系统分析。

1. 原材料准备及预处理工艺

优质电缆的制造始于高标准的原材料选用。导体材料需采用高纯度无氧铜或镀锡铜丝，保证良好的电气与机械性能。绝缘、护套、防火等层材料需经过严格筛选，如耐辐射聚烯烃、氟塑料、硅橡胶、云母带、陶瓷化带等。这些材料到厂后，要进行含水率、杂质、粒度和物理性能等多项检测，以防原材料缺陷影响后续生产。部分高分子材料还需进行干燥、预混与改性处理，以提升其加工适应性及终端性能。

2. 导体绞合与成型工艺

为提升电缆柔性及导电性能，多采用多股细铜丝绞合结构。绞合过程需控制股线直径、一致性及绞合节距，通过精密的绞线设备确保各股导体的紧密结合和整体圆整度。此外，为避免绞合过程中产生机械损伤或表面氧化，生产环境要保证洁净和相对恒温。

3. 绝缘层挤出与交联工艺

绝缘层通常为耐高温耐辐射高分子材料。挤出工艺中需精确控制温度、压力与线速度，保证绝缘层厚度均匀和致密无气泡。对于某些绝缘材料，还需采用辐照交联或化学交联工艺，通过物理或化学反应改变分子结构，提升其耐热、绝缘和辐射稳定性。交联后还需进行热处理和性能检测，确保无异味、无脆化、无裂纹。

4. 屏蔽、铠装及护套挤出流程

部分信号电缆和动力电缆需加屏蔽层，以防止电磁干扰。屏蔽多为铜带或铜网编织，采用缠绕、编织等方式紧密包覆绝缘层。铠装工艺采用钢带或金属丝绕包，增强电缆机械强度和防护性能。外护套挤出时采用低烟无卤、耐辐射高分子材料，需控制护套厚度和表面质量，防止气泡及杂质夹杂。整个过程需实现全自动化连续作业，提高一致性和成品率。

5. 防火及防喷淋层的复合工艺

防火层多采用云母带、陶瓷化带等耐高温材料紧密缠绕包覆，缠包工艺需保证搭接宽度、缠绕张力合适，以防漏包或死角。防喷淋层常采用高密度聚乙烯复合包裹，部分产品还采用防水胶带自缠形成多重密封结构，防止水汽渗入电缆核心区。上述层的组装需在恒温无尘车间完成，以确保界面粘接性能和整体密封性。

6. 整体工艺流程控制要点与质量保证措施

高性能特种电缆的生产过程需实现精细化管理和全过程质量监控。一方面，采用自动化生产线和智能监控系统，保障每道工序的工艺参数可追溯和实时调控；另一方面，设置关键质量控制点，如导体电阻、绝缘厚度、护套密实度、粘结强度等，建立完善的出厂检测体系（包含介电强度、耐火、耐喷淋、耐辐射等实验）。此外，工艺过程中要注意环保和安全措施，合理控制废气废

水排放，保障操作人员及生产环境的安全。

综上所述，核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的生产工艺是一项集材料科学、工艺工程和自动化控制于一体的综合性系统工程。每个工序的精细管理与技术创新，都是保障电缆性能和可靠性的关键环节，为高安全性要求的核电应用提供坚实基础。

三、关键技术与工艺难点

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆因其特殊应用环境，对生产制造技术提出了极高要求。如何兼顾多种极端性能，确保长期服役的安全可靠，是产业发展的关键所在。当前在材料创新、复合工艺、长效稳定性、质量控制及智能制造等方面，均面临挑战。具体分析如下：

材料创新与应用难点：柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的核心在

于材料性能的突破。要求绝缘、护套、防火、防喷淋等功能层材料必须同时具备柔性、耐高温、耐辐射、耐火、耐腐蚀等多种特性。目前主要材料包括辐射交联聚烯烃、氟塑料、陶瓷化硅橡胶、云母带等。但多项性能兼容性不易，部分高性能外源材料如高端耐辐射氟塑料、陶瓷化材料依赖进口，国产化难度较大。此外，部分辐射耐受材料易发生高剂量辐射老化、机械疲劳失效，如何开发兼具柔性和高稳定性的复合高分子材料，是未来技术发展方向之一。

四、结论

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆作为核电站安全运行的重要保障，其生产工艺涵盖了高性能材料研发、精密复合结构设计、严格的多层工艺控制以及全过程质量管理。

参考文献

[1] 通过 CC-Link IE Field 认证的高柔性以太网电缆，适用于拖链运动 [J]. 木材加工机械 ,2019,30(04):62.

[2] 通过 CC-Link IE Field 认证的高柔性以太网电缆，适用于拖链运动 [J]. 木材加工机械 ,2019,30(05):62.

[3] 易格斯高柔性拖链专用电缆 [J]. 港口装卸 ,2008,(01):44.

[4] 吴伟 . 可用于极小弯曲半径的高柔性控制电缆 [J]. 航空制造技术 ,2005,(08):94.

[5] 孙建生,宗曦华,张智勇,等 . 电缆结构设计和材料消耗计算软件的开发与应用 [J]. 电线电缆 ,2006,(06):29-32.DOI:10.16105/j.cnki.dxdl.2006.06.008.

[6] 陈大勇,董春,赵禹尘,等 . 核电站消防系统用电缆设计方案研究 [J]. 上海电气技术 ,2024,17(04):97-100.

[7] 李福,李小虎,产江涛 . 核电站氢点火器用耐高温电缆的性能研究 [J]. 合成材料老化与应用 ,2020,49(03):12-14.

[8] 孙延蒙,陈静,赵增,等 . 高柔性拖链电缆结构设计浅谈 [J]. 光纤与电缆及其应用技术 ,2020,(02):37-38.DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2020.02.011.

[9] 新型易格斯高柔性电缆 Chainflex CF98[J]. 数控机床市场 ,2005,(02):60.

[10] 李启,石垒,王洪祥,等 . 低烟无卤阻燃 A 级电缆结构的试验验证 [J]. 光纤与电缆及其应用技术 ,2020,(06):39-40.DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2020.06.010.