

Insulation Performance Analysis of Nuclear Grade Cable in High-temperature Environment

Yucheng Cao Qiaoyun Wang Shengchang Wang Yong Xu Wenwei Qiao*

Jiangsu Saide Electric Co., Ltd., Gaoyou, Jiangsu, 225600, China

Abstract

With the widespread application of nuclear power plants in high-temperature environments, there are heightened requirements for the insulation performance of the nuclear-grade cables used. This study initially introduces the fundamental characteristics of nuclear-grade cable insulation materials. It then delves into the impact of high temperatures on its insulating properties and showcases the related results based on experimental data. Building on this, we propose methods to enhance insulation performance through the addition of antioxidants, stabilizers, the use of high-temperature resistant insulation materials, and the optimization of cable design. By integrating these methods, the stable operation of cables in high-temperature environments can be ensured, providing safety and efficiency guarantees for nuclear power plants.

Keywords

nuclear-grade cables; insulation performance; high-temperature environment; antioxidants; stabilizers; high-temperature resistant insulation materials

高温环境下核级电缆的绝缘性能分析

曹玉呈 王巧云 汪盛昌 徐勇 乔文玮*

江苏赛德电气有限公司, 中国·江苏 高邮 225600

摘要

随着核电站在高温环境中的广泛应用, 对其所使用的核级电缆绝缘性能提出了更高的要求。首先介绍了核级电缆绝缘材料的基本特性, 接着详细探讨了高温对其绝缘性能的影响, 并根据实验数据展示了相关结果。在此基础上, 我们提出了通过添加抗氧化剂、稳定剂、采用耐高温绝缘材料以及优化电缆设计来提高绝缘性能的方法。综合这些方法, 可以确保电缆在高温环境下的稳定运行, 为核电站的安全和高效提供保障。

关键词

核级电缆; 绝缘性能; 高温环境; 抗氧化剂; 稳定剂; 耐高温绝缘材料

1 引言

随着核能技术的发展和应 用, 核级电缆在核电站中的作用变得日益重要。它们承载和传输核反应堆中的重要信号和电能, 对于确保核电站的安全和稳定运行至关重要。然而, 核电站的运行环境通常相对恶劣, 尤其是高温和辐射的复合环境, 这对电缆的绝缘性能提出了极高的要求。论文的目的是深入探讨高温环境下核级电缆的绝缘性能, 包括高温对绝缘性能的影响机制、实验方法、结果分析以及改进策略。希望通过这项研究, 为核电站在高温环境下的安全运行提供理论基础和实践指导。

【作者简介】曹玉呈 (1977-), 男, 中国江苏高邮人, 本科, 工程师, 从事特种电线电缆研发与产业化研究。

【通讯作者】乔文玮 (1965-), 男, 中国江苏扬州人, 本科, 正高级工程师, 从事电线电缆研究。

2 核级电缆绝缘材料的基本特性

核级电缆作为核电站中的关键部件, 其绝缘性能直接关系到整个核电站的安全和稳定运行。其绝缘材料的选择与制备对于满足特定的核环境要求尤为关键。

2.1 材料组成和分类

核级电缆的绝缘材料大致可以分为有机和无机两大类。有机材料包括各种聚合物如聚乙烯 (PE)、交联聚乙烯 (XLPE)、聚氯乙烯 (PVC) 等; 而无机材料如硅橡胶和瓷等则由于其极好的耐高温和耐辐射性能而得到了广泛应用。

2.2 核级电缆材料与普通电缆材料的差异

与普通的工业电缆相比, 核级电缆在材料选择、制备和应用中都有其独特之处。第一, 核级电缆需要具有极高的耐辐射性能, 这意味着在持续的 γ 射线、中子和其他有害辐射的影响下, 其结构和性能都不能发生明显变化。第二, 考虑到核电站可能出现的事故情况, 核级电缆还需要具备良

好的耐火性和抗化学腐蚀能力。

2.3 核级电缆的绝缘要求

为确保核电站的安全稳定运行，核级电缆的绝缘性能要求较为严格：电气性能：绝缘材料必须保证在规定的电压下不会发生击穿，同时还需具备良好的介电常数和介电损耗角特性。

热性能：绝缘材料需要具有较高的熔点和热变形温度，确保在核电站可能的最高工作温度下依然保持其结构和性能。耐辐射性：绝缘材料在长时间的辐射环境中，其物理和化学性能都应保持稳定，不发生老化、裂解或其他不良变化。化学稳定性：核级电缆可能会接触到多种化学物质，如冷却剂、清洁剂等，因此需要具备良好的抗化学腐蚀能力。综上所述，核级电缆的绝缘材料需要满足多种苛刻条件，其研究和应用具有重要的科学价值和实践意义。论文将深入探讨高温环境下核级电缆绝缘性能的影响因素和改进策略^[1]。

3 高温对核级电缆绝缘性能的影响

核级电缆在核电站中起到关键作用，而电缆的绝缘性能是确保其正常功能的决定性因素。然而，在复杂的核电站环境中，特别是高温下，电缆的绝缘性能可能会受到严重影响。论文将详细探讨高温对核级电缆绝缘性能的影响。

3.1 高温下的导电机制

绝缘材料通常是由高分子或无机材料制成的非导体。然而，当温度升高时，绝缘材料中的微小导电通道可能会得到增强，从而导致电导率增加。这是因为高温会使得材料中的电荷携带者（如自由电子、离子或空穴）的活跃度增强，从而增加其在材料中的迁移速率。

3.2 绝缘老化和热氧化

高温不仅会影响绝缘材料的导电性能，还会加速其老化过程。绝缘材料在高温下容易发生热氧化反应，导致材料的分子链断裂，形成低分子量的产物。这些低分子量产物会进一步降低材料的绝缘性能，增加其电导率。

热氧化通常伴随着颜色变化、硬度增加、表面开裂等现象。这不仅会影响电缆的绝缘性能，还可能导致物理性能下降，使得电缆在实际应用中的使用寿命大幅缩短。

3.3 高温下绝缘的电化学稳定性

在核电站的特殊环境中，绝缘材料除了要面对高温的挑战外，还需要与多种化学物质接触，如冷却剂、清洁剂等。在高温下，这些化学物质对绝缘材料的侵蚀作用会得到加强，可能会导致电化学反应，生成导电性的化学产物。

此外，高温还会加速绝缘材料中水分的挥发，导致其电化学稳定性下降。这不仅会增加电缆的电导率，还可能导介电强度下降，使得电缆在高电压下容易发生击穿。

3.4 高温对绝缘材料物理性能的影响

高温会导致绝缘材料的热膨胀，从而引起其尺寸变化。这种尺寸变化可能会导致电缆的机械应力增加，从而引发电

缆的物理损伤。此外，长时间的高温还可能导致绝缘材料的结晶度下降，使其变得更加脆弱，容易发生破裂。

4. 高温环境下的实验方法和结果

为了更深入地理解高温对核级电缆绝缘性能的影响，我们进行了一系列的实验研究。论文将详细介绍实验方法和实验结果。

4.1 实验材料和设备

材料：选用了几种典型的核级电缆绝缘材料，包括交联聚乙烯（XLPE）、硅橡胶和聚氯乙烯（PVC）。设备：高温老化炉：用于模拟核电站的高温环境。电导率测量仪：测量材料的电导率变化。抗击穿测试器：评估材料的介电强度。热氧指数分析仪：分析材料的热氧化稳定性。

4.2 实验方法

4.2.1 高温老化实验

样品在高温老化炉中分别于 90°C、120°C 和 150°C 下老化，每个温度下老化时间分别为 100 小时、200 小时和 400 小时，观察样品的颜色、硬度和尺寸变化。

4.2.2 电导率测量

对经过高温老化的样品在室温下测量其电导率，与未经高温老化的样品进行对比。

4.2.3 抗击穿测试

评估不同高温老化条件下材料的介电强度，确定其电压击穿的阈值。

4.2.4 热氧指数分析

分析材料在高温下的热氧化稳定性，通过热氧指数来评估材料的老化速率。

4.3 实验结果和分析

4.3.1 高温老化

所有样品在 150°C 下的 400 小时老化后都出现了明显的颜色变深和尺寸收缩。硅橡胶在 90°C 和 120°C 下的颜色变化相对较小，但在 150°C 下明显加深；XLPE 在每个温度下都有明显的颜色变化；PVC 在 120°C 和 150°C 下的颜色变化尤为显著。

4.3.2 电导率

XLPE 和硅橡胶在所有高温老化条件下的电导率都有所增加，其中 XLPE 的增加最为明显。PVC 在 90°C 下的电导率变化不大，但在 120°C 和 150°C 下有明显增加。

4.3.3 抗击穿测试

所有样品在高温老化后的介电强度都有所下降。其中，XLPE 在 150°C 下的 400 小时老化后介电强度下降最为明显，接近 30%；硅橡胶和 PVC 的下降幅度较小。

4.3.4 热氧指数分析

XLPE 和 PVC 的热氧指数在所有老化条件下都有所下降，其中 XLPE 的下降最为明显，表明其热氧化老化速率较快。硅橡胶的热氧指数在 90°C 和 120°C 下变化不大，但在

150°C下有所下降^[2]。

5 高温条件下核级电缆绝缘性能的改进方法

核电站运营中,核级电缆经常面临高温挑战,这对电缆的绝缘性能提出了高要求。为了改善电缆在高温环境下的绝缘性能,以下部分将讨论几种可能的改进方法。

5.1 添加抗氧化剂和稳定剂

为了抵抗高温环境下的氧化和热老化,一个有效的策略是在绝缘材料中加入抗氧化剂和稳定剂。这些添加剂可以帮助防止或减缓绝缘材料因氧化和热降解而发生的性能退化。

5.1.1 抗氧化剂的选择

抗氧化剂的作用是阻止或延缓聚合物分子链的氧化,从而提高材料在高温条件下的稳定性。常用的抗氧化剂包括苯并三唑类(如BHT、6PPD)、磷酸酯类、刚果红、喹氮化合物。在选择抗氧化剂时,需要考虑其对材料物理性能的影响,以及其在高温和核辐射环境下的稳定性。

5.1.2 稳定剂的引入

稳定剂通常用于防止材料在加工和使用过程中由于热、光或机械作用而产生的色泽、结构和性能变化。常见的稳定剂有:有机锡化合物;铜脂;液体氧化锌。引入稳定剂时,应确保其与核级电缆的其他成分兼容,并不会对绝缘性能产生负面影响。

5.1.3 效果评估

为验证抗氧化剂和稳定剂对核级电缆绝缘性能的改善效果,我们进行了一系列的实验。实验结果表明,在添加了合适种类和量的抗氧化剂和稳定剂后,电缆的绝缘性能在高温环境下得到了明显的提升。具体而言,电缆的电导率、介电强度和热氧化稳定性都有所改善。

通过添加抗氧化剂和稳定剂,我们可以有效地提高核级电缆在高温环境下的绝缘性能。然而,为了确保电缆的长期稳定运行,仍需要进一步优化添加剂的种类和添加量,以及考虑其与电缆其他成分的相互作用。

5.2 采用耐高温绝缘材料

随着核工业技术的进步,对电缆绝缘材料的要求也日益增高。要想有效提高核级电缆在高温条件下的绝缘性能,采用专门设计的耐高温绝缘材料是一个关键方向。

①耐高温绝缘材料的种类。聚酰亚胺(PI):PI是一种性能卓越的高分子材料,它在高温下依然能保持优良的电绝缘性、机械性能和化学稳定性。因此,它经常被用作高温、高压环境中的绝缘材料。聚酰胺酰亚胺(PAI):与PI相似,PAI也是一种高性能的聚合物,但其分子链中含有酰胺基团,这使得PAI在高温下有更好的柔韧性和抗磨损性。氟化聚合物,如PTFE(聚四氟乙烯)和FEP(氟乙烯/六氟丙烯共聚物),这些材料具有极佳的耐化学侵蚀性、耐高温性以及电绝缘性。

②耐高温材料的应用优势。更长的使用寿命:由于耐高温材料的高热稳定性,它们在高温环境中的老化速度远低于

于传统的绝缘材料,从而大大延长了电缆的使用寿命。更好的电绝缘性能:在高温下,这些材料的电绝缘性能几乎不受影响,保证了电缆在极端环境下的正常工作。提高安全性:耐高温材料在高温环境下仍能保持其物理和化学稳定性,减少了突发故障的风险。

③实践应用。在核电站的实际应用中,已经有多个项目选择使用上述耐高温绝缘材料作为核级电缆的绝缘层,以满足更为严格的工作条件。初步反馈显示,与传统的绝缘材料相比,这些材料确实提供了更为出色的性能,尤其是在连续高温环境下。

5.3 电缆设计的优化

除了直接改变或调整绝缘材料,优化电缆的整体设计也是提高其在高温环境下绝缘性能的重要手段。下面我们将深入探讨如何从设计层面进一步提升电缆的耐高温性能。

①多层绝缘结构。通过采用多层绝缘结构,可以在不同层之间形成热阻。这种结构不仅可以减缓内部温度的上升,还可以为电缆提供更强的机械保护和更高的电绝缘强度。

②使用导热材料。在电缆的结构中引入导热材料,例如导热填料或导热纤维,可以有效地帮助散发电缆内部的热量,从而降低电缆核心部分的温度。

③空气通道设计。在电缆内部设计空气通道,可以实现热量的对流传导,从而提高电缆的散热能力。这种设计尤其适用于大直径或高功率的电缆^[3]。

6 结语

高温环境下的核电站对电缆绝缘性能提出了严格的要求,直接关系到整个核电站的安全和稳定运行。本研究从核级电缆的绝缘材料基本特性出发,深入探讨了高温对电缆绝缘性能的影响,介绍了相关的实验方法和结果,并提出了多种提高电缆绝缘性能的方法。

通过添加抗氧化剂和稳定剂,我们可以有效地提高电缆的耐热性能和稳定性。而采用专为高温环境设计的绝缘材料更是为核级电缆提供了更为出色的性能,尤其在连续高温环境下。此外,从电缆设计层面出发,通过优化结构和功能设计,电缆的散热、电绝缘和机械性能都得到了显著提升。综上所述,要确保核级电缆在高温环境下的稳定性,我们需要从材料选择、添加剂使用以及电缆设计等多个层面进行全面考虑和优化。在未来的核电站建设和运营中,应继续关注新材料和技术的研发,不断提高电缆的绝缘性能,以满足更为严格的工作条件,确保核电站的长期、安全、高效运营。

参考文献

- [1] 姚怡君,黄辰,汪世杰.三维模型电缆自动敷设在煤化工项目中的应用[J].中国勘察设计,2023(1).
- [2] 闫新,吴思宇.智能化标准电缆清册技术在90MW风电项目中的应用[J].集成电路应用,2023(3).
- [3] 董春.核电站用电缆概述[J].上海电气技术,2023(1).