

## 核级电缆的辐射阻抗研究与评估

## Research and Evaluation of Radiation Impedance of Nuclear Grade Cable

汪盛昌 王巧云 曹玉呈 王中原 乔文玮\*

Shengchang Wang Qiaoyun Wang Yucheng Cao Zhongyuan Wang Wenwei Qiao\*

江苏赛德电气有限公司 中国·江苏 高邮 225600

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

**摘要:** 随着核能技术的广泛应用,核级电缆的性能研究变得尤为重要。本研究主要针对核级电缆的辐射阻抗及其变化进行了深入探讨。通过实验研究,我们观察到受到辐射后电缆的阻抗确实发生变化,且这种变化与电缆的种类、辐射强度和时间有关。进一步的研究揭示了这些变化背后的微观机制,包括材料微观结构的改变、杂质与缺陷的产生等。基于这些发现,我们为核电站提供了电缆选择、设计和维护的建议。总体上,本研究为核电站提供了关于电缆的宝贵信息,有助于其安全、稳定的运行。

**Abstract:** With the widespread application of nuclear technology, the performance study of nuclear-grade cables has become crucial. This research primarily delves into the radiation impedance of nuclear-grade cables and its variations. Through experimental research, we observed that the impedance of cables indeed changes after radiation exposure, and this change is related to the type of cable, radiation intensity, and duration. Further study revealed the microscopic mechanisms behind these changes, including alterations in the material's microscopic structure and the emergence of impurities and defects. Based on these findings, we provided recommendations for cable selection, design, and maintenance in nuclear power plants. Overall, this research offers valuable insights into cables for nuclear power plants, contributing to their safe and stable operation.

**关键词:** 核级电缆; 辐射阻抗; 微观机制; 核电站; 电缆维护

**Keywords:** nuclear grade cable; radiation impedance; microscopic mechanism; nuclear power plant; cable maintenance

**DOI:** 10.12346/etr.v5i11.8730

## 1 引言

随着核电技术的发展,核级电缆已经成为核电站的核心组成部分。它们在电力传输、仪器控制以及各种安全系统中都有着不可替代的作用。对核级电缆的辐射阻抗进行研究和评估,不仅有助于更好地了解电缆在极端环境下的性能,也为核电行业提供了宝贵的技术支持,以确保其安全、稳定且高效地运行。

## 2 文献综述

核级电缆在核电领域中起着至关重要的作用,因此对其性能的研究吸引了众多学者和工程师的关注。特别是电缆的辐射阻抗问题,在过去几十年里,已经有大量的文献进行了深入的探讨。

### 2.1 核级电缆的历史与发展

早期的核级电缆主要是基于传统的电缆技术,但随着核

技术的进步和对安全要求的提高,核级电缆逐渐发展出了自己的特色。最初的研究集中在电缆的基本电气性能,如导电性、绝缘性等。但随着时间的推移,研究的重点逐渐转向了电缆在特定条件下,尤其是高辐射环境下的性能。

### 2.2 辐射阻抗的基本理论及研究进展

辐射阻抗是描述电缆在受到辐射时电气性能变化的参数。早期的研究大多基于实验方法,探讨电缆在不同辐射水平下的辐射阻抗变化。随着理论研究的深入,人们开始对辐射阻抗背后的物理机制和化学过程有了更深入的理解。例如,电缆材料中某些化合物在受到辐射时可能发生分解或重组,从而影响电缆的电气性能<sup>[1]</sup>。

## 3 材料与方法

在研究核级电缆的辐射阻抗时,确保实验条件的准确和一致性以及使用的材料的代表性是至关重要的。详细描述了

【作者简介】汪盛昌(1983-),男,中国江苏灌南人,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-),正高级工程师。

本研究中使用的材料和方法,旨在为读者提供清晰的实验步骤和操作指南。

### 3.1 样品的选择与准备

本研究选择了三种常用的核级电缆材料,分别是A、B和C型电缆。这三种电缆在核电领域中均有广泛的应用,因此具有很高的代表性。材料的来源:这三种电缆样品分别从国内三家大型核电设备供应商处购得。样品的处理:所有电缆样品在收到后都进行了外观检查、绝缘性测试和导电性测试,确保样品没有明显的缺陷或损伤。每种电缆都被切割成了长20cm的小段,并标记好编号,以方便后续的实验操作。

### 3.2 辐射源与辐射条件设定

考虑到核电站的实际工作环境,我们选择了 $\gamma$ 射线作为辐射源,因为这种辐射在核反应中是最常见的。

辐射设备:使用了D型 $\gamma$ 辐射器,该辐射器能够提供稳定的辐射输出,且具有辐射区域大小调节功能。

辐射剂量:根据文献和前期实验的结果,选择了五个不同的辐射剂量:10kGy、50kGy、100kGy、500kGy和1000kGy。每个剂量下,所有三种电缆样品都进行了辐射。

### 3.3 辐射阻抗的测量技术与设备

测量原理:辐射阻抗的测量是基于电缆的阻抗在受到辐射后会变化的原理。我们使用了交流阻抗测量技术,因为这种方法能够准确地测量电缆在不同频率下的阻抗。

测量设备:使用了E型交流阻抗分析仪。该仪器能够在0.1Hz~10MHz的范围内测量样品的阻抗,并且具有高精度和稳定性。

测量步骤:每次测量前,都确保设备已经预热并校准。将电缆样品连接到阻抗分析仪的输入端,并设置适当的测量参数。测量过程中,记录电缆在不同频率下的阻抗值。

### 3.4 数据分析与处理方法

原始数据记录:所有的测量数据都被记录在专用的实验日志中,并被保存在电子表格中。

数据处理:使用专门的软件对原始数据进行处理,包括数据平滑、噪声消除和曲线拟合。统计分析:对三种电缆在不同辐射剂量下的阻抗数据进行统计分析,包括平均值、标准偏差和方差分析,以评估辐射对电缆阻抗的影响。

综上所述,详细描述了核级电离辐射阻抗研究的所有相关材料和方法,为确保实验的准确性和可重复性提供了重要的指导<sup>[2]</sup>。

## 4 实验结果

论文将详细阐述通过前述材料与方法得出的实验数据及其分析结果。为了更好地呈现和解释实验结果,我们将其分为不同的部分,从总体到细节展示电缆在受到不同辐射剂量下阻抗的变化规律。

### 4.1 A型电缆的阻抗变化

①初始阻抗数据,在辐射实验之前,A型电缆的平均阻抗为10 $\Omega$ (在1MHz下),在0.1Hz~10MHz的范围内,阻

抗随频率的变化较为平稳。②辐射后的阻抗变化,在10kGy的辐射下,A型电缆的阻抗上升到了12 $\Omega$ 。当辐射剂量增加到1000kGy时,其阻抗进一步上升至18 $\Omega$ 。整体而言,随着辐射剂量的增加,A型电缆的阻抗呈现出逐步上升的趋势。

### 4.2 B型电缆的阻抗变化,

①初始阻抗数据。B型电缆的初始阻抗为8 $\Omega$ (在1MHz下),其阻抗随频率的变化特性与A型电缆类似。

②辐射后的阻抗变化,10kGy的辐射使B型电缆的阻抗上升到了9.5 $\Omega$ ,而在1000kGy的辐射下,其阻抗增加到了16 $\Omega$ 。与A型电缆相比,B型电缆的阻抗增长速度较慢。

### 4.3 C型电缆的阻抗变化

①初始阻抗数据。C型电缆的初始阻抗为11 $\Omega$ (在1MHz下)。其阻抗随频率的变化特性与前两种电缆略有不同,具有较明显的阻抗谷值。

②辐射后的阻抗变化,在10kGy的辐射下,C型电缆的阻抗上升到了12.5 $\Omega$ 。当辐射增加到1000kGy时,其阻抗达到了21 $\Omega$ 。显然,C型电缆对辐射的敏感度最高。

### 4.4 阻抗变化的对比分析

综合三种电缆在不同辐射剂量下的阻抗数据,我们发现以下几点:①所有电缆的阻抗在受到辐射后都呈上升趋势。

②C型电缆对辐射的反应最为敏感,其阻抗变化幅度最大。

③B型电缆的阻抗变化较为稳定,其上升速度介于A型和C型之间。

### 4.5 统计分析

通过对实验数据进行统计分析,我们发现:①三种电缆的阻抗增加都与辐射剂量呈正相关。②辐射剂量与阻抗增加之间的关系可以用二次方程来描述,且拟合度很高。③C型电缆的阻抗变化与辐射剂量之间的相关系数最高,达到了0.95,而A型和B型分别为0.9和0.92。

综上所述,通过对三种常用核级电缆进行辐射实验,我们得出了它们在不同辐射条件下的阻抗变化规律。这些结果为核电缆的设计和应用提供了重要的理论依据,同时也为其他相关研究提供了参考数据。

## 5 讨论

### 5.1 实验结果与预期的对比与分析

在任何科学实验中,实验结果与研究者的预期之间的对比都是至关重要的,因为这有助于更好地理解实验过程中可能出现各种因素,以及它们如何影响最终的结果。在本研究中,我们的预期是核级电缆在受到辐射后会发​​生阻抗变化,而这种变化的程度和辐射剂量之间存在关联。以下是对比和分析的细节。

预期与实验结果的一致性:实验结果确实证明了核级电缆在受到辐射后,其阻抗会发生变化。这与我们的预期相吻合。所有三种电缆的阻抗在受到辐射后都出现了上升趋势,这证明了辐射对电缆阻抗的影响是普遍存在的。

预期与实验结果的差异性:对于电缆阻抗的具体变化程

度和辐射剂量之间的关系,实验结果与我们的预期存在一些差异。原先我们预测的是一个线性关系,即辐射剂量越高,阻抗的增长率也越高。但实验数据显示,这种关系更接近于二次方程的形式。尤其是当辐射剂量超过一定值后,阻抗的增长速度有所放缓。

此外,我们预期的是三种电缆对辐射的反应会相对一致,但实验结果显示,C型电缆对辐射的敏感度最高,其阻抗变化幅度也最大。这可能与C型电缆的材料成分、制造工艺或其他未知的因素有关。

潜在原因分析:对于上述差异,我们考虑了以下几个可能的原因:

材料差异:三种电缆可能使用了不同的材料或制造工艺,这导致它们对辐射的反应存在差异。辐射类型和能量:虽然我们使用的是 $\gamma$ 射线作为辐射源,但其能量分布可能与实际核场景中的辐射有所不同,这可能会影响实验结果。

其他环境因素:实验过程中可能存在的温度、湿度等环境因素变化也可能对结果产生一定的影响。

总的来说,虽然实验结果与预期存在一些差异,但这些差异为我们提供了更多的启示和思考方向。它们强调了在实际应用中考虑更多的变量和因素的重要性,同时也为后续的研究提供了有价值的参考。

## 5.2 辐射阻抗变化的原因与机制探讨

电缆在受到辐射后阻抗变化的现象引起了我们的充分关注。为了更深入地理解其背后的原因与机制,我们进行了以下探讨。

### 5.2.1 材料的微观结构变化

在受到辐射的影响下,电缆材料的微观结构可能会发生一定的变化。例如,辐射可能导致聚合物分子链的断裂、交联或重组。这样的微观结构变化可能会影响材料的电导性,从而改变电缆的阻抗。

### 5.2.2 杂质和缺陷的产生

辐射可能会引发电缆材料中的离子或原子移位,导致杂质和缺陷的产生。这些杂质和缺陷可能作为电子的“陷阱”,降低了电缆的电导性,结果电缆的阻抗会随之增加。

### 5.2.3 热效应

辐射在与电缆材料相互作用时,可能会释放出能量,从而引起材料的局部加热。这种热效应可能会导致电缆材料的热膨胀,从而改变其电导性和阻抗。

### 5.2.4 氧化与还原过程

辐射可能会导致电缆材料中的某些元素发生氧化或还原反应。这些化学反应可能会改变材料的电导性,从而影响其阻抗。

## 5.3 可能的工程应用与建议

随着对电缆辐射阻抗变化原因与机制的深入探讨,相应地,我们也可以根据这些认识为核电工程应用提供一些建议和方向。以下为基于实验结果的工程应用与建议:

### 5.3.1 材料选择与设计选择耐辐射材料

鉴于不同材料对辐射的响应差异性,建议在核电工程中

优先选择对辐射敏感度较低的材料,从而确保电缆的稳定性和可靠性。

材料改进:可以考虑研发新的聚合物材料或进行材料改性,例如增加抗氧化剂、稳定剂或其他添加剂,以增强电缆对辐射的抗性。

### 5.3.2 电缆设计与布局,增加屏蔽层

考虑在电缆外部增加专门的辐射屏蔽层,以减少辐射对电缆内部材料的影响。距离与布局优化:将电缆尽可能远离高辐射区域,或者采用特定的布局方式,如螺旋布线,以降低辐射的累积效应。

### 5.3.3 监控与维护,辐射阻抗监测系统

建议在核电站内部部署电缆辐射阻抗监测系统,以实时跟踪和预测电缆的健康状况。

定期检查与更换:建议对处于高辐射环境中的电缆进行定期检查和评估,如有必要,应及时更换受损的电缆,以确保核电站的安全和稳定运行<sup>[1]</sup>。

## 6 结语

经过系统的研究与实验,我们对核级电缆的辐射阻抗及其变化机制有了更深入的了解。以下是我们的主要结论:

阻抗变化现象:实验结果明确显示,核级电缆在受到辐射后,其阻抗确实会发生变化。这一变化与电缆类型、辐射强度以及辐射时间都存在关联。

变化机制:电缆阻抗的变化可以归因于多种原因,包括但不限于材料的微观结构变化、杂质和缺陷的产生、热效应、氧化与还原过程以及电荷的积累。

工程应用:对于核电工程应用,选择对辐射响应较为稳定的电缆材料、加强电缆的设计与布局、实施辐射阻抗监测系统以及进行定期检查和更换都是至关重要的。后续研究方向:尽管我们已经对电缆的辐射阻抗变化有了初步的认识,但仍有许多深入的机制研究和其他类型辐射的影响值得探索。

对核电行业的建议:鉴于电缆在核电站中的关键作用,为确保安全和稳定,建议核电行业采纳我们的研究建议,并持续投资于相关的技术研究和创新。

总之,这项研究不仅为核电站提供了关于电缆选择和维护的宝贵建议,而且为电缆材料的进一步研发和改进提供了理论基础。希望这些结论能为核电行业的长远发展提供指导,确保其持续、安全和高效运营。

## 参考文献

- [1] 郭华山.基于电力线通信的电缆绝缘老化在线监测新原理研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [2] 庄功伟.埋入电缆的复合材料构件力学性能分析及其优化设计[D].桂林:桂林电子科技大学,2020.
- [3] 唐铭志.电缆圆周面图像拼接及检索方法[D].沈阳:沈阳工业大学,2021.