

核辐射监测防护技术现状与展望

王鹏 王君

武汉舍鱼环境与健康检测评价有限公司, 中国·湖北 武汉 430070

摘要: 自从核能的发现以来, 其巨大的能量潜力被广泛应用于发电、医疗和科学研究等领域。然而, 伴随着核能应用的同时, 核辐射安全问题也成为全球关注的焦点。有效的监测和防护技术对于确保人类与环境的安全至关重要。鉴于此, 论文综述了当前核辐射监测与防护技术的发展状态, 并对其应用过程中存在的问题以及未来的发展趋势进行分析。旨在为该领域同仁提供有价值的洞见, 并对公众的安全意识起到一定的普及作用。

关键词: 核辐射; 监测技术; 现状; 展望

Current Status and Prospects of Nuclear Radiation Monitoring and Protection Technology

Peng Wang Jun Wang

Wuhan Sheyu Environmental and Health Testing and Evaluation Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430070, China

Abstract: Since the discovery of nuclear energy, its enormous energy potential has been widely applied in fields such as power generation, healthcare, and scientific research. However, along with the application of nuclear energy, nuclear radiation safety has also become a global focus of attention. Effective monitoring and protection technologies are crucial for ensuring human and environmental safety. In view of this, the paper summarizes the current development status of nuclear radiation monitoring and protection technology, and analyzes the problems existing in its application process and future development trends. Intended to provide valuable insights for colleagues in this field and play a certain role in promoting public safety awareness.

Keywords: nuclear radiation; monitoring technology; current situation; expectation

1 引言

核能, 作为一种清洁能源, 在全球能源供应中占据了不可或缺的地位。然而, 核事故的潜在危害和日常核设施的辐射泄漏风险也对环境和公共健康构成了威胁。由于核辐射的无色无味特性, 有效的监测防护技术是确保安全的基石。伴随着科技的进步, 核辐射监测与防护面临着从传统方法向高科技方向的转变。

的防护材料和设计, 如铅橡胶、铅玻璃和铅膜, 显著降低了个人受到的辐射剂量。在环境防护层面, 通过构建屏障阻隔技术和污染防治措施, 有效减少放射性物质对自然环境和公众健康造成的影响; 此外, 现场应急响应设备和流程也在不断优化, 以确保在紧急事态下能迅速有效地应对核辐射风险 (见图 1)。

2 核辐射监测防护技术现状与问题

2.1 核辐射监测防护技术的发展现状

核能作为一种清洁能源, 其在各行各业的应用持续扩展, 伴随而来的对核辐射监测防护技术的需求也不断增长。当前核辐射监测领域, 采用了一系列先进技术和设备, 如高效能谱仪和多道分析仪, 以提高探测和测量放射性物质的敏感度与精确度^[1]; 在剂量监测方面, 热释光剂量计和电离室剂量计成为主要的工具, 它们能够精确评估工作人员和周围环境中的辐射水平, 从而确保辐射暴露控制在安全门槛之下; 放射性物质监测技术, 通过高效液相色谱-质谱联用系统 (HPLC-MS) 等分析技术, 实现了对环境样本中放射性同位素的准确定量与定量, 确保了监测数据的科学性和可靠性; 同时, 环境辐射监测网络的建立与发展, 利用遥感技术, 地理信息系统 (GIS), 以及网络传感器等现代技术, 实现了对辐射状况的实时动态监控; 在个人防护上, 采用了新型



图 1 CTLD-J5000 型卡片热释光剂量计

2.2 核辐射监测防护技术存在的问题

2.2.1 核辐射测量分析技术

当前的测量分析技术尽管在不断进步, 但在捕捉极低水平辐射和进行实时快速分析方面, 依旧面对一系列技术难题。例如, 在环境监测和人员安全领域, 对于微量或散发性

的辐射场, 现有技术往往难以提供及时准确的测量结果。此外, 监测设备在使用过程中通常涉及复杂的运行机制和高技能的操作要求; 这种复杂性不光增加了用户的使用门槛, 而且也提高了后期的维护成本。至于设备本身的造价, 由于采用了尖端的传感器技术和复杂的电子组件, 价格往往也是高昂的^[2]。例如, 一台商用高纯锗 γ 射线探测器成本可能高达数十万不等, 对许多机构来说, 这是一笔不小的投资。然而, 即使是投资了高价的设备, 由于缺乏统一的国际或中国标准, 不同设备甚至同一设备不同时间的测量结果也可能存在差异, 这对于确保辐射监测的精确性和可靠性构成了障碍。数据一致性和比较性的不足, 可能会影响核事故应急处理的决策质量。

2.2.2 核辐射安全防护技术

当前核辐射安全防护技术在减轻或避免辐射暴露方面存在一些不足, 尤其是在极端环境下, 如发生核事故时, 现有技术的抵御能力尚不能完全达到预期标准。面对高剂量辐射, 普遍的防护措施可能无法提供足够的保护效果。例如, 在福岛核事故后, 现场工作人员所受辐射剂量远超过国际放射防护委员会 (ICRP) 建议的年剂量限值, 这一限值通常设为 50 毫西弗 (mSv); 在防护材料方面, 用于建造防辐射屏障和服装的铅、钨和铀基复合材料虽具有一定的防护性能, 但在厚度、重量及灵活性上未能达到理想平衡, 使用者的活动能力被大幅限制, 长时间作业可能导致疲劳甚至健康问题。且针对不同类型的辐射 (如 α 、 β 、 γ 射线), 各种材料的抵御效能差异显著, 找到既能适应多种辐射又能兼顾效率与成本的防护材料是一个技术挑战; 在辐射防御系统方面, 关键基础设施保护如核电站防护罩的抗冲击性能测试, 目前不能完全模拟实际灾难场景, 如强烈地震联合辐射泄漏的情形。并且, 现行防护技术在屏蔽剂量率较高的中子辐射方面效果有限, 这针对运营中和退役的核反应堆尤其是挑战; 从探测与预警系统来看, 精确检测低水平辐射并实时告警的技术也有待进步。实现早期预警和快速反应对于公共安全和首响人员的保护至关重要, 但现有系统的灵敏度与反应速度尚无法完全满足需求 (见图 2)。



图 2 在线辐射监测系统

2.2.3 放射性污染清除与环境修复技术

放射性污染清除与环境修复技术所面临的核心问题在于, 现有的处理方法通常难以在去除放射性污染物、成本控制以及最小化对生态系统影响三者间取得平衡。这主要是因为放射性污染的形式多样, 包括土壤、水体、植被以及建筑物表面的广泛污染, 并且涉及多种放射性同位素, 每种都有其独特的物理和化学行为。例如, 策略性地移除土壤表层 (通常 5~15cm 深) 能去除多数污染物, 但这同样造成了大量土地资源的损失, 并可能破坏地表生态; 传统的去污方法, 诸如洗涤、吸附或固化等, 往往伴随着去污效率和成本的权衡。高去污效率的技术可能涉及昂贵的材料或密集的人工操作, 导致清理工程成本过高, 从经济角度而言难以承受。而低成本的方法可能去污效率不足, 需要多次处理或长期监控, 延长了整个清除过程; 对于水体的放射性污染, 技术难点在于如何有效分离并浓缩含放射性同位素的水, 特别是当处理大量或低浓度的污染水时。福岛第一核电站事故后的处理工作就揭示了这一问题, 处理放射性水体依赖的多重过滤和吸附系统不仅设备和运营成本高昂, 而且产生了大量二次废物; 此外, 放射性废物的最终处置也是环境修复技术中的一个难题。虽然深地层处置和表面临时储存是目前的主流选择, 但如何确保放射性废物长期安全、稳定以及对生态的风险管理, 每一个方案都要面对密封性、监控方法和潜在渗漏的问题。

3 核辐射监测防护技术发展趋势

3.1 核辐射测量分析技术

核辐射测量与分析技术正持续朝高灵敏度、快速响应以及经济实用的方向发展。对灵敏度的追求推动着探测器材料和电子读出系统的创新, 以便于甚至在极低辐射强度下也能准确测量, 这对于环境监测和人员暴露评估至关重要。例如, 使用高纯锗探测器, 辐射探测的灵敏度可以提升至每小时数百微希沃特 ($\mu\text{Sv/h}$) 的量级, 这种水平的灵敏度甚至允许在环境本底辐射水平上察觉到微小的变化; 另外, 速度是关键, 因为在紧急情况下, 快速识别辐射水平对于指导人员疏散和采取应对措施至关重要。通过优化算法和信号处理流程, 现代辐射监测设备的响应时间已缩短至秒级, 即时地为健康物理专家和应急响应团队提供数据。即时性的提升不仅来自技术进步, 还得益于无线通讯技术的集成, 这允许在辐射事件发生时, 监测数据可以迅速上传至中央数据库或指挥中心, 从而加速决策过程; 同时, 经济性的考虑推动了小型化和集成化技术的应用。现代集成电路 (IC) 技术使得功能更为复杂的电路能够在更小的芯片上集成, 从而缩小了整个探测器的尺寸和成本。例如, 采用微机电系统 (MEMS) 技术, 传统的辐射测量器件的大小和成本已经显著降低, 同时仍然保持高性能的标准。便携式设备的普及, 使得非专业人员也能够进行基本的辐射监测, 并以此作为个人健康和安

全的第一道防线。

3.2 核辐射安全防护技术

核辐射安全防护技术正经历一场由材料科学和纳米技术引领的变革。未来的防护装备将不仅仅是被动的屏障,而是具有多功能性和智能化特点的系统。智能防护服,通过嵌入传感器和微处理器,能够实时监测辐射水平并提供必要的信息反馈。这意味着防护服可以动态地调整其防护属性,如通过改变其表面的反射或吸收特性来适应不同级别的辐射暴露^[1]。此外,基于纳米技术的防护材料正展现出革命性的进步,其防护能力远超传统材料。纳米结构的材料能够在分子层面吸收、反射或分散辐射能量,极大地提高了用户的安全性。研究表明,某些纳米结构材料,如层状硼氮化物,能够高效吸收中子并减少伽马射线的穿透,从而有力地增强了个人防护器材的性能。进一步地,这些新型防护材料的厚度和重量相较传统材料有大幅度减少,这意味着在不牺牲防护效能的同时提高了防护服的舒适性和灵活性,极大提升了佩戴者的工作效率和活动自由度。

3.3 放射性污染清除技术和环境修复技术

放射性污染的清除和环境的修复是核事故后处理的重要环节,对于保障生态环境和公共健康有着至关重要的意义。面对这一挑战,研究者们正朝着开发更高效、经济可行且对生态影响降至最低的技术努力。目前,生物修复技术和基于纳米技术的清除方法展现出了巨大的潜力和优势。

生物修复技术利用特定微生物或植物的天然代谢能力来去除或稳定放射性污染物,这一方法已被证实对于某些放射性同位素(如铯和锶)特别有效。例如,使用改良的微生物株来富集和固定辐射物质,使得随后的污染物收集和处理成为可能。这些微生物可以通过自然代谢过程将放射性元素转化为更稳定的形态,或者将其从环境介质中移除。而植物修复(植物萃取)技术则通过特定植物吸收土壤中的放射性物质,经由其生物量的收集和处理来减轻土壤中的放射性

污染。

纳米材料技术利用其独特的化学和物理性质来吸附、封装或转化放射性污染物。例如,具有高比表面积的纳米吸附剂能够有效地吸附放射性物质,这些纳米吸附剂能在污染场地直接投放使用,或者被制备成过滤材料用于水体净化。纳米零价铁等一些纳米材料能够在化学层面还原放射性物质,将放射性离子转化为不溶且毒性较低的固态形态,从而减少其环境流动性和生物利用度。

在开发放射性污染清除与环境修复技术时,成本效益和可持续性是两个关键因素。未来的技术必须在确保低成本和高效能的同时最小化对环境的长期负面影响。因而,在设计新一代清除和修复策略时,研究人员将综合考虑这些技术在实际操作中的应用前景、经济可行性以及对生态系统的影响,最终促使这些技术朝着更环保、更可持续的方向发展。

4 结语

总而言之,核辐射监测防护技术的发展对于确保核能安全利用和环境保护至关重要。面对现有技术的局限性,未来的研究需要聚焦于提高测量分析的准确性和速度、增强安全防护的有效性以及优化污染清除与环境修复的效率。通过跨学科合作和技术创新,有望解决当前面临的挑战,推动核辐射监测防护技术向更高水平发展。

参考文献:

- [1] 王善强,齐圣,李军,等.核辐射监测防护技术现状与展望[J].防化研究,2023,2(1):20-24.
- [2] 李承政,何娜.浅谈核辐射监测技术的发展与趋势[J].皮革制作与环保科技,2023,4(22):39-41.
- [3] 王哲贤.辐射监测防护与安全应对措施[J].化工管理,2023(5):21-23.

作者简介:王鹏(1990-),男,中国贵州贵阳人,本科,工程师,从事环境检测研究。