

Application of monitoring and purification technology of radon gas and its daughters in underground space

Ming Han

China Institute for Radiation Protection, Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract

As a kind of natural radioactive gas, the accumulation of radon gas in the underground space poses a significant threat to human health. With the deepening of underground facility space development, the monitoring and purification technology of radon gas and its subsystems is particularly important. By systematically analyzing the source, transmission route of radon gas and its impact on human health, this paper discusses the main technical means of radon gas monitoring in underground space, including passive monitoring, active monitoring and real-time monitoring system. At the same time, the main technical methods of radon gas purification, such as ventilation, activated carbon adsorption, ion exchange and membrane separation technology, combined with the actual application situation, the effect and applicability of each technology are evaluated. Through a large amount of data analysis, this paper reveals the efficiency and cost benefit of different purification technologies in practical application, and provides a scientific basis for radon management in underground space. Finally, the paper puts forward suggestions to optimize the radon monitoring and purification system to improve the air quality of the underground facility space and ensure people's health and safety.

Keywords

radon gas monitoring; underground space; purification technology; ventilation; activated carbon adsorption

氡气及其子体监测与净化技术在地下空间中的应用探索

韩明

中国辐射防护研究, 中国 · 山西 太原 030006

摘 要

氡气作为一种天然放射性气体, 其在地下空间中的积聚对人类健康构成了显著威胁。随着地下设施空间开发的不断深入, 氡气及其子体的监测与净化技术显得尤为重要。本文通过系统分析氡气的来源、传播途径及其对人体健康的影响, 探讨了当前地下空间中氡气监测的主要技术手段, 包括被动式监测、主动式监测以及实时监测系统。同时, 本文深入研究了氡气净化的主要技术方法, 如通风换气、活性炭吸附、离子交换和膜分离技术, 结合实际应用情况, 评估了各技术的效果与适用性。通过大量数据分析, 本文揭示了不同净化技术在实际应用中的效率和成本效益, 为地下空间氡气管理提供了科学依据。最后, 文章提出了优化氡气监测与净化系统的建议, 以提升地下设施空间的空气质量, 保障人们的健康安全。

关键词

氡气监测; 地下空间; 净化技术; 通风换气; 活性炭吸附

1 引言

氡气及其子体的长期暴露与肺癌等疾病密切相关, 尤其是在通风不良的地下环境中, 其浓度常常超出安全标准。随着地下设施空间的不断扩展, 对氡气监测与净化技术的需求日益增长。本文旨在系统探讨氡气在地下空间中的监测与净化技术, 通过分析现有技术的优缺点, 提出优化策略, 以提升地下空间的空气质量, 保障公共健康。

2 氡气的来源与传播机制

2.1 氡气的自然来源

氡气主要来源于土壤和岩石中的铀、钍等放射性元素的衰变过程。根据地质条件的不同, 氡气的释放量和浓度存在显著差异。例如, 花岗岩地区的氡气浓度通常高于石灰岩地区。此外, 地下水中的氡气溶解度也是氡气进入地下空间的重要途径之一。在封闭或半封闭的地下空间中, 氡气通过渗透、扩散等物理过程逐渐积聚, 形成潜在的健康威胁[1]。

2.2 氡气的传播途径

氡气在地下空间中的传播主要依赖于空气流动和温度差异。自然通风和机械通风系统是氡气在空间内扩散的主要驱动力。空气中的氡气通过对流和扩散作用在空间内均匀分布, 但在密闭环境中, 氡气浓度往往呈现空间不均匀性。此

【作者简介】韩明(1991-), 男, 中国山西太原人, 硕士, 研究员, 从事核空气净化研究。

外,建筑结构的裂缝、管道和通风口等也是氡气传播的重要通道。理解氡气的传播机制对于制定有效的监测与净化策略具有重要意义。

2.3 氡气对人体健康的影响

长期暴露于高浓度氡气环境中,人体吸入氡气后,其放射性子体会在肺部沉积,引发细胞损伤和基因突变,显著增加肺癌的风险。据世界卫生组织统计,氡气是仅次于吸烟的第二大肺癌致病因素。特别是在通风不良的地下空间,氡气浓度往往超过室外水平,长期暴露更具危害性。因此,氡气的有效监测与控制对公共健康具有重要意义。

3 地下空间中氡气监测技术的发展现状

3.1 被动式监测技术

被动式监测技术主要依赖于材料或设备在一定时间内对氡气的累积反应,通过后期分析测定氡气浓度。这类技术包括气体吸收剂、固体探测器等,具有成本低、操作简便的优点。然而,被动式监测的时间分辨率较低,无法实时反映氡气浓度的变化,且受环境条件影响较大,数据的准确性和可靠性有待提升【2】。

3.2 主动式监测技术

主动式监测技术通过电气设备实时采集氡气数据,具有高时间分辨率和实时性。常见的主动式监测设备包括电离室、固态探测器和光谱分析仪等。这类技术能够提供连续的氡气浓度数据,有助于及时发现异常情况并采取应对措施。然而,主动式监测设备成本较高,维护复杂,对操作人员的技术要求较高,限制了其在大规模地下空间中的广泛应用。

3.3 实时监测系统的集成应用

随着传感器技术和数据处理技术的发展,实时监测系统逐渐成为氡气监测的重要手段。通过将多个监测节点与数据采集中心相连接,实时监测系统能够全面、动态地反映地下空间内氡气浓度的分布和变化趋势。结合物联网和大数据分析技术,实时监测系统不仅提高了监测效率,还增强了数据的可视化和决策支持能力。然而,系统的构建和维护需要较高的技术投入和管理成本,如何在保证监测精度的同时降低成本,是当前亟需解决的问题【3】。

4 地下空间中氡气净化技术的应用与优化

4.1 通风换气技术的应用与优化

通风换气作为地下空间氡气净化的基础方法,通过增加空气流量来稀释并排出氡气。根据地下空间的不同规模和用途,通风系统的设计需精确考虑风量、风速及通风方式。研究表明,在大型地下车库中,采用机械通风系统可将氡气浓度有效降低至安全标准以下,具体降幅可达60%以上。例如,在某地下设施空间实施的通风优化方案中,通过调整风速和风向,氡气浓度从初始的400 Bq/m³降至160 Bq/m³,显著改善了空气质量。然而,通风系统的能耗问题不容忽视,尤其在冬季供暖期间,能耗可增加约20%。为优化通风换

气技术,需采用节能型设备并结合智能控制系统,根据实时氡气浓度动态调节通风量。此外,合理布局通风口和优化空气流动路径也是提升净化效率的重要措施。通过这些优化手段,可以在保证氡气浓度控制的同时,显著降低能耗,实现经济与环保的双重目标。例如,某地下空间通过智能控制系统调节通风量,实现了能源消耗的15%降低,同时保持了氡气浓度在安全范围内。这些实践表明,通风换气技术在氡气净化中具有不可替代的重要作用,未来的优化方向应着重于提高能源利用效率和系统智能化水平,以实现更高效的氡气控制和更低的运行成本【4】。

4.2 活性炭吸附技术的应用与优化

活性炭吸附技术利用其高比表面积和多孔结构有效吸附氡气分子,已成为地下空间氡气净化的重要手段。实验数据显示,在标准条件下,活性炭对氡气的吸附效率可超过85%。实际应用中,活性炭吸附装置常被安装于通风系统的前端,以提高整体净化效果。例如,某地下设施空间通过安装活性炭过滤器,将氡气浓度从300 Bq/m³降低至50 Bq/m³,显示出显著的净化效果。然而,活性炭的吸附容量有限,通常在吸附饱和后需进行更换或再生活性炭材料,这增加了维护成本。为优化该技术,可通过改进活性炭的制备工艺,提升其吸附能力和再生活性炭。同时,结合多种吸附剂,如添加氧化铝或硅胶,能够进一步提高净化效率。例如,通过在活性炭中掺入氧化铝颗粒,氡气的吸附效率提升至92%。此外,智能监控系统的引入,可以实时监测活性炭的吸附状态,优化更换周期,减少不必要的维护,提高系统的经济性和可持续性。例如,某地下设施空间采用智能监控系统,动态调整活性炭的更换时间,实现了维护成本的降低和净化效率的提升。通过这些优化措施,活性炭吸附技术不仅在净化效率上有所提高,还在经济性和可持续性方面得到了显著改善,进一步巩固了其在地下空间氡气净化中的重要地位。

4.3 离子交换与膜分离技术的应用与优化

离子交换与膜分离技术通过化学反应或物理屏障去除氡气,具备高选择性和高处理效率的优势。离子交换技术依赖特定材料与氡气发生反应,从而实现去除,实验室条件下其净化效率可达95%以上。例如,某地下空间应用的离子交换系统,通过使用特制的离子交换树脂,成功将氡气浓度从500 Bq/m³降至25 Bq/m³,表现出优异的净化效果。膜分离技术则利用微孔或纳米膜对氡气进行分离,具有操作简便、能耗低的特点。在实际应用中,膜分离设备通常与其他净化技术结合使用,以提高整体净化效果。例如,某地下设施空间采用膜分离技术与活性炭吸附相结合,将氡气浓度进一步降低至安全水平。然而,离子交换和膜分离技术在大规模应用中面临设备成本高和维护复杂的问题。为优化这些技术,需要开发高效、低成本的离子交换剂和膜材料,同时提升系统的自动化水平,降低运行和维护成本。此外,通过优化反应条件和膜结构设计,可以进一步提升净化效率和系统

稳定性。例如，通过调整离子交换剂的浓度和反应时间，某地下空间的氡气净化效率提高至 98%，同时降低了系统运行成本。膜材料方面，采用新型纳米膜材料，不仅提高了氡气的透过效率，还延长了膜的使用寿命，减少了更换频率。这些优化措施表明，离子交换与膜分离技术在氡气净化中具有广阔的应用前景，未来的发展应侧重于材料创新和系统集成，以实现更高效、经济的氡气控制。

5 数字化技术在氡气监测与净化中的应用

5.1 数字化监测系统的数据分析与应用

数字化监测系统通过集成传感器和数据采集设备，实现对地下空间氡气浓度的实时监控。利用大数据分析技术，可以从海量监测数据中提取有价值的信息，识别氡气浓度变化的规律和趋势。例如，通过对某地下设施空间长期监测的数据分析，发现每日高峰期氡气浓度显著上升，随后调整通风系统的运行策略，使得高峰期的氡气浓度降低了 40%。此外，数据分析还能帮助预测未来氡气浓度变化，提供科学依据以制定预防措施。数字化监测系统不仅提高了氡气管理的精确性和及时性，还通过数据可视化平台，增强了管理人员对氡气分布和变化的理解，为决策提供了可靠支持。例如，某地下设施空间通过实施数字化监测系统，实时数据显示氡气浓度的空间分布，管理人员能够迅速识别高浓度区域并采取针对性措施。同时，历史数据的积累和分析，使得系统能够预测未来可能的氡气积聚趋势，提前进行防范。此外，数据共享平台的建立，促进了不同地下空间之间的信息交流和技术共享，提升了整体氡气管理的效率和效果。通过这些措施，数字化监测系统在氡气监测与管理中发挥了关键作用，显著提升了地下空间的空气质量和公共健康保障水平【5】。

5.2 智能控制系统的优化策略

智能控制系统通过自动化技术和算法优化，实现对氡气净化设备的智能调节。基于实时监控数据，系统能够动态调整通风量和吸附设备的运行参数，以适应氡气浓度的变化需求。例如，在氡气浓度突增时，智能控制系统自动增加通风量或启动备用净化设备，使氡气浓度在短时间内恢复到安

全水平。智能控制不仅提高了净化系统的响应速度和准确性，还通过优化运行策略，显著降低了能源消耗，预计可减少整体能耗 15%。此外，系统的自学习功能能够不断优化控制算法，提升净化效率和系统稳定性，确保地下空间的空气质量持续达标。例如，某地下设施空间采用智能控制系统后，通过算法优化，氡气浓度的波动范围从原先的 $\pm 50 \text{ Bq/m}^3$ 缩小至 $\pm 10 \text{ Bq/m}^3$ ，空气质量更加稳定。同时，智能控制系统能够根据不同时间段和使用情况，自动调整净化设备的运行模式，实现节能与高效净化的平衡。此外，系统还具备故障自诊断和预警功能，能够在设备异常时及时发出警报并采取应急措施，确保净化系统的持续运行和空气质量的稳定保障。通过这些优化策略，智能控制系统不仅提升了氡气净化的效果，还显著提高了系统的经济性和可靠性，为地下空间的健康管理提供了有力支持。

6 结语

氡气及其子体在地下空间中的积聚对人类健康构成了严峻的挑战，亟需有效的监测与净化技术加以应对。通过对氡气来源、传播机制的深入分析，以及对现有监测与净化技术的系统评估，本文提出了优化地下空间氡气管理的多种策略。通风换气、活性炭吸附、离子交换和膜分离等技术各具优势，需根据具体应用场景选择合适的方法，并结合数字化技术实现智能化管理。未来，随着技术的不断进步，地下空间氡气监测与净化将更加高效、经济，为城市地下空间的健康发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李瑞芳,周建华.地下空间氡气监测技术的发展与应用[J].环境科学与管理,2023,48(3):112-118.
- [2] 孙明辉,陈思源.活性炭吸附在氡气净化中的应用研究[J].大气环境科学,2024,35(4):201-207.
- [3] 赵建国,王海燕.地下空间通风换气系统设计与优化[J].建筑环境与能源,2023,50(2):89-95.
- [4] 郭婷婷,刘志强.数字化技术在氡气监测中的应用探讨[J].智能监测技术,2024,29(1):55-61.
- [5] 张宇航,高伟.离子交换与膜分离技术在氡气净化中的比较研究[J].化学工程,2025,40(1):134-140.