

# 核电站一回路冷却剂泄漏监测技术改进

石 磊

中广核苍南核电有限公司 浙江 温州 325000

**摘 要：**本文聚焦核电站一回路冷却剂泄漏监测技术改进。首先阐述一回路冷却剂系统的重要性、构成及泄漏对核电站安全的多方面严重影响。接着综述现有监测技术，分析其原理与局限。随后探索新型监测技术，如安全壳空气监测、局部辐射监测等。最后提出技术改进方案，包括综合监测技术应用、智能监测系统开发及人员培训与技术提升，旨在提高泄漏监测的准确性与可靠性，保障核电站安全运行。

**关键词：**核电站；一回路冷却剂；泄漏监测技术；改进

## 1 核电站一回路冷却剂泄漏概述

### 1.1 核电站一回路冷却剂概述

核电站一回路冷却剂系统是核反应堆安全运行的核心组成部分，承担着将反应堆堆芯产生的热量带出并传递给二回路，实现热能转换与发电的关键任务。该系统通常由反应堆压力容器、蒸汽发生器、主泵以及连接这些设备的管道等构成，冷却剂在高温高压环境下循环流动。一回路冷却剂泄漏是核电站运行中需高度警惕的严重问题，对核电站安全有着多方面深远影响。从反应堆安全角度，泄漏可能导致冷却剂流失，降低堆芯冷却能力，若不能及时处理，可能引发堆芯过热、熔化等灾难性后果。在辐射防护方面，泄漏的冷却剂可能携带放射性物质，对周围环境和人员造成辐射危害。因此准确、及时地监测一回路冷却剂泄漏情况，对于保障核电站安全稳定运行至关重要，是核电行业持续关注和研究的重点领域。

### 1.2 一回路冷却剂系统介绍

一回路冷却剂系统作为核电站的“心脏”系统，其设计和运行极为复杂且关键。反应堆压力容器是堆芯的“外壳”，内部装有核燃料组件，冷却剂在此处吸收核裂变产生的巨大热量。主泵则如同系统的“心脏”，为冷却剂提供循环动力，确保冷却剂能够持续不断地流经堆芯，将热量带走。蒸汽发生器是一回路和二回路的换热设备，一回路的高温冷却剂在蒸汽发生器中将热量传递给二回路的水，使其变成蒸汽，进而推动汽轮机发电<sup>[1]</sup>。该系统中的冷却剂通常采用轻水（普通水）或重水，它们不仅具有良好的热传导性能，还能在一定程度上减缓中子速度，起到慢化剂的作用。为维持系统的高效运行和安全性，冷却剂需要保持在特定的温度、压力和流量范围内。同时系统中还设置各种安全保护装置，如安全阀、稳压器等，以应对可能出现的异常工况，确

保系统在各种情况下都能安全稳定运行，防止冷却剂泄漏等事故的发生，保障核电站的整体安全。

### 1.3 泄漏对核电站安全的影响

一回路冷却剂泄漏对核电站安全的影响是多维度且极其严重的。在反应堆安全层面，冷却剂泄漏会直接导致堆芯冷却能力下降。堆芯是核裂变反应的核心区域，产生大量热量，若冷却剂不足，无法及时带走这些热量，堆芯温度将迅速上升。当温度超过一定限度时，燃料棒包壳可能损坏，释放出放射性物质，进一步加剧堆芯的恶化情况，甚至引发堆芯熔化，造成类似于切尔诺贝利和福岛那样的严重核事故。从辐射防护角度看，泄漏的冷却剂中携带的放射性物质会随着泄漏路径扩散到周围环境中。这些放射性物质可能通过空气、水等介质传播，对核电站工作人员、周边居民以及生态环境造成长期的辐射危害。泄漏还会对核电站的设备造成损害。冷却剂泄漏可能导致设备腐蚀、短路等问题，影响设备的正常运行，增加维修成本和停机时间。而且，泄漏事故的发生会引发社会公众的恐慌和担忧，对核电行业的形象和发展产生负面影响。

## 2 核电站一回路冷却剂现有泄漏监测技术综述

### 2.1 温度监测法

温度监测法是通过在一回路系统关键部位安装温度传感器，实时监测冷却剂温度变化来发现泄漏。当发生泄漏时，冷却剂流失会导致局部温度异常升高或降低。例如，在管道泄漏处，由于冷却剂减少，该区域温度可能上升；而在泄漏进入的封闭空间，温度可能因冷却剂的冷却作用而下降。然而，这种方法存在一定局限性。温度变化可能受到多种因素干扰，如设备运行工况改变、环境温度波动等，难以准确判断是否由泄漏引起。而且，对于微小泄漏，温度变化可能不明显，难以及时检测到。

## 2.2 声音波动监测法

声音波动监测法利用泄漏产生的声音信号来检测泄漏。当冷却剂从管道裂缝或孔洞泄漏时,会产生特定频率的声音波动。通过在系统周围布置高灵敏度麦克风,采集这些声音信号并进行分析处理,可判断是否存在泄漏以及泄漏位置。但该方法也面临挑战,核电厂内设备众多,运行过程中会产生各种背景噪音,容易掩盖泄漏声音,增加检测难度。不同泄漏情况和环境条件下,声音信号特征差异较大,需要建立复杂的模型进行准确识别。

## 2.3 标记气体监测法

标记气体监测法是向一回路冷却剂中添加特定标记气体,如氦气等。通过在系统不同位置采集气体样本,检测标记气体的浓度变化来确定泄漏情况。如果某处检测到标记气体浓度异常升高,则可能存在泄漏。这种方法灵敏度较高,但对于标记气体的选择和添加量需要严格控制,以免影响系统正常运行。同时标记气体在系统内的扩散和分布情况复杂,需要精确建模分析才能准确判断泄漏位置和程度<sup>[2]</sup>。

## 2.4 液体流量监测法

液体流量监测法是核电厂一回路冷却剂泄漏监测中较为常用的一种手段,其核心原理是通过精准测量一回路冷却剂的流量情况来判断是否存在泄漏。实际操作中,需在系统管道的关键位置科学合理地安装流量计,这些流量计如同敏锐的“流量哨兵”,能够实时、不间断地监测冷却剂的流量数据。一旦发生泄漏,系统内的冷却剂总量减少,总流量也会随之降低。通过将实时监测到的流量数据与正常运行时的标准流量数据进行细致对比,就能从中发现潜在的泄漏迹象。不过,流量变化易受泵性能波动、系统阻力改变等多种因素干扰,必须全面综合考量,才能准确判定是否由泄漏引发。特别是面对微小泄漏,流量变化微乎其微,检测难度极大。

# 3 核电厂一回路冷却剂新型泄漏监测技术探索

## 3.1 安全壳空气粒度和稀有气体活度监测器

安全壳作为核电厂防止放射性物质泄漏至环境的关键屏障,其完整性对于保障周边生态与公众安全意义重大。安全壳空气粒度和稀有气体活度监测器在其中发挥着不可或缺的作用,它能够实时、精准地监测安全壳内空气中的粒度以及稀有气体活度。当一回路冷却剂发生泄漏时,其中携带的放射性物质会迅速进入安全壳内。这些放射性物质会改变空气中粒子的分布和性质,使空气粒度出现异常变化;同时,稀有气体的活度也会随之改变。该监测器凭借高精度传感器,能够敏锐捕捉到这些极其微小的变化。先进的监测系统会对采集到的数据

进行快速分析和处理,通过与预设的正常工况参数进行对比,及时准确地判断是否发生泄漏以及泄漏的大致情况。此技术具备高灵敏度和实时性的显著优势,能在泄漏初期就发出预警,为工作人员争取宝贵的应对时间,有效降低事故的危害程度。不过,由于监测的信号微弱且易受干扰,该技术对监测设备的精度和稳定性要求近乎苛刻。此外,还需建立完善且精准的数据分析和判断模型,以准确区分正常工况和泄漏工况,避免误判和漏判,确保核电厂的安全稳定运行。

## 3.2 局部辐射监测法(N13-F18检测)

局部辐射监测法巧妙地利用了特定放射性核素N13和F18的独特特性来开展泄漏检测工作。在核电厂一回路冷却剂系统中,当发生泄漏情况时,N13和F18这些核素会在泄漏部位附近产生具有鲜明特征的辐射。通过在系统关键部位科学合理地布置辐射探测器,能够实现对辐射水平变化的实时、连续监测。随着泄漏的发展,辐射水平会相应地发生改变,通过对这些变化数据的分析,就可以准确判断出泄漏的具体位置以及泄漏的严重程度。N13和F18具有较短的半衰期,这使得它们能够迅速对泄漏情况做出响应,快速反映出泄漏的动态变化,而且对微小泄漏也极为敏感,哪怕是极细微的泄漏也能被察觉。然而,该技术在实际应用中也面临诸多挑战。需要精确掌握这些核素在系统内的产生、分布和衰变规律,任何一点偏差都可能导致监测结果的不准确。同时核电厂内存在众多其他辐射源,要避免它们的干扰并非易事,这对监测系统的设计和数据分析能力提出了极高的要求,需要不断优化和完善相关技术和方法。

## 3.3 定量测量泄漏率的系统(如F-18微粒探测装置)

定量测量泄漏率的系统对于核电厂一回路冷却剂泄漏监测而言至关重要,它能够直接测量出冷却剂的泄漏率,为准确评估泄漏的严重程度以及制定科学合理的应对策略提供关键、准确的数据支持。以F-18微粒探测装置为例,其工作原理是通过捕捉泄漏冷却剂中携带的F-18微粒。这些微粒就像是泄漏的“信号使者”,携带了泄漏的相关信息<sup>[3]</sup>。装置结合先进的检测技术和精密的算法,对捕捉到的微粒数量、分布等情况进行深入分析,从而精确计算出冷却剂的泄漏率。这种定量测量方法具有较高的准确性和可靠性,能够实时提供泄漏率信息,让工作人员随时掌握泄漏的动态变化。但该装置的研发和应用并非一帆风顺,面临着诸多技术难题。例如,如何提高微粒捕捉效率,确保能够捕捉到足够数量的微粒以获得准确的测量结果;如何降低检测下限,以便能够检测到更微小的泄漏。同时设备的成本较高,且后续维护

要求也较为严格,需要专业的技术人员进行定期维护和校准,以保证其正常运行和测量精度。

#### 4 技术改进方案与实施策略

##### 4.1 综合监测技术应用

综合监测技术应用旨在将多种现有和新型泄漏监测技术巧妙融合,充分发挥每种技术的独特优势,以此显著提升泄漏检测的准确性与可靠性。以温度监测法、声音波动监测法与安全壳空气粒度和稀有气体活度监测器的结合为例,温度和声音监测如同敏锐的“侦察兵”,能快速捕捉到可能存在的初步泄漏迹象,为后续检测提供方向指引。而安全壳监测器则像精准的“验证官”,可进一步确认泄漏是否真实发生,还能详细了解泄漏的放射性状况。同时,将液体流量监测法和局部辐射监测法相结合,能从流量变化和辐射特征等不同维度对泄漏进行全面监测与深入分析。通过综合多种数据,运用先进算法建立多参数融合的泄漏判断模型,能够更加精准地识别泄漏位置、精确判断泄漏程度以及科学预测发展趋势,大大减少误判和漏判的概率。在实际应用中,需构建统一的数据采集和处理平台,打破各监测系统间的数据壁垒,实现数据共享与协同工作,保障综合监测技术高效、有序实施,为核电厂安全保驾护航。

##### 4.2 智能监测系统的开发

智能监测系统的开发是借助先进信息技术,如人工智能、大数据、物联网等,达成对一回路冷却剂泄漏的智能化监测与管理。在系统中广泛部署各类传感器,它们如同无数个“感知触角”,实时采集温度、声音、流量、辐射等丰富的监测数据,并迅速传输至智能监测平台。利用机器学习、深度学习等人工智能算法,对海量数据进行深度分析与挖掘,构建精准的泄漏预测模型和故障诊断模型。该系统具备强大的智能分析能力,能自动识别异常数据,提前精准预测泄漏风险,并及时发出清晰明确的预警信息。同时依据历史数据和实时监测结果,为运维人员提供科学合理的决策支持,优化维修计划,合理分配资源。另外,智能监测系统还具备远程监控和诊断功能,专家可通过网络随时随地实时了解核电厂的泄漏情况,提供远程专业指导和支持。在开发过程中,要高度重视数据的安全性和隐私保护,确保系统稳

定可靠运行,并加强对运维人员的培训,使其熟练掌握操作和维护技能。

##### 4.3 人员培训与技术提升

人员培训与技术提升是保障泄漏监测技术有效应用的关键环节。核电厂应制定系统的人员培训计划,针对不同岗位人员开展有针对性的培训。对于监测设备操作人员,要重点培训设备的操作规程、维护保养知识和常见故障排除方法,确保其能够熟练掌握监测设备的使用方法,及时发现设备异常并进行处理。对于数据分析人员,要加强数据分析和处理能力的培训,使其能够运用先进的数据分析方法,从海量监测数据中提取有价值的信息,准确判断泄漏情况<sup>[4]</sup>。同时要组织全体人员学习新型泄漏监测技术的原理和应用,提高全员对泄漏监测工作的认识和重视程度。核电厂还应鼓励技术人员开展技术创新和研究活动,与科研机构、高校等建立合作关系,引进先进的技术和理念,不断提升自身的技术水平和创新能力。通过持续的人员培训和技术提升,打造一支高素质、专业化的泄漏监测团队,为核电厂的安全运行提供有力保障。

#### 结束语

核电厂一回路冷却剂泄漏监测技术的改进是保障核安全的关键。现有技术各有优劣,新型技术展现出潜力但也面临挑战。通过综合应用多种监测技术、开发智能监测系统以及加强人员培训与技术提升等改进方案,有望显著提高泄漏监测的效能。未来,需持续投入研发,不断优化技术,提升核电厂应对泄漏风险的能力,确保核能安全、稳定地服务于社会发展。

#### 参考文献

- [1]刘主根,杨魁.核反应堆一回路溶解氢浓度理论计算及影响因素分析[J].核科学与工程,2021,41(03):538-543.
- [2]喻灵斌,严磊,昌桐.海南核电机组一回路冷却剂泄漏率试验优化[J].电工技术,2022(014):000.
- [3]罗慧.先进非能动核电机组一回路冷却剂流量系统化测量方法[J].核技术,2023,46(10):69-77.
- [4]于淼,顾钰,曾晓敏,等.核电厂一回路硼碱曲线的研究[J].辐射防护,2023,43(6):671-677.