

核级阀门密封性检测新技术研究与工程应用

杜岩松 钟俊

浙江省中核浙能能源有限公司 浙江 宁波 315700

摘要: 本文针对核级阀门密封性检测难题,深入研究声发射、光纤光栅传感、太赫兹波等新技术原理,设计开发检测系统。新技术克服传统检测灵敏度低、周期长、存在安全隐患等问题,经在三代核电机组主蒸汽隔离阀、高温气冷堆氦气阀门等工程应用,结合第三方严格验证,证实系统精准可靠,为核级阀门密封性检测提供高效安全的创新方案。

关键词: 核级阀门; 密封性检测; 新技术; 工程应用

1 核级阀门密封性要求

核级阀门在核电站中占据核心地位,其密封性是保障核电站安全稳定运行的关键要素。从安全层面考量,一旦核级阀门密封失效,放射性物质便可能泄漏,从而引发严重核安全事故,对环境与人类健康造成不可挽回的损害。因此,核级阀门必须具备极高的密封可靠性,杜绝放射性物质的任何泄漏风险,全力保障核电站周边环境及人员的安全。在功能需求方面,核级阀门于核电站正常运行、停堆及事故处理等各个阶段均发挥着不可或缺的作用。正常运行时,阀门需精准调控介质的流量、压力与流向,维持核电站稳定运转;停堆过程中,要可靠切断介质流通,保障反应堆安全关闭;事故工况下,更需迅速响应,及时阻断事故恶化。这就要求阀门在复杂工况转换与严苛运行条件下,始终保持良好密封性,不允许出现任何介质渗漏,否则将严重影响核电站整体功能,甚至酿成灾难性后果。核级阀门的密封性要求涵盖不同密封形式与材料^[1]。常见密封形式有强制密封和自密封,前者依靠外部密封力实现密封,后者利用介质压力增强密封效果。密封材料则需具备优异的耐辐射、耐高温与耐腐蚀性能,以适应核电站特殊环境,确保长期稳定运行。此外,核级阀门密封性要求遵循严格的国际国内标准规范,如国际原子能机构的安全标准,以及我国的《核电厂核安全机械设备设计规范》等,对密封性试验方法、验收准则、泄漏率范围等指标作出明确规定,确保其密封性符合核电站安全运行需求。

2 核级阀门密封性检测传统技术存在的问题

2.1 检测灵敏度低,难以发现微小泄漏点

传统的核级阀门密封性检测技术,如气泡法、压力降法等,在检测灵敏度方面存在明显不足。气泡法是将阀门浸入液体中,通过观察是否有气泡产生来判断是否存在泄漏。然而对于微小的泄漏点,由于泄漏量极小,

产生的气泡非常微弱,甚至难以形成明显的气泡,导致检测人员难以准确判断是否存在泄漏以及泄漏点的具体位置。压力降法是通过监测阀门两端的压力变化来确定泄漏情况,但在实际应用中,受到管道系统的复杂性、环境因素以及测量仪器精度等多种因素的影响,微小泄漏所引起的压力变化往往被噪声信号淹没,无法准确识别,使得一些微小泄漏点难以被及时发现。而在核电站的运行中,即使是微小的泄漏,随着时间的推移,也可能逐渐扩大,最终引发严重的安全问题,因此传统技术的低灵敏度无法满足核电站对核级阀门密封性检测的高要求。

2.2 检测周期长,影响核电设备正常运行效率

许多传统的核级阀门密封性检测技术,如氦质谱检漏法,虽然具有较高的检测精度,但检测过程较为复杂,需要对阀门进行严格的抽真空处理,然后充入氦气,再通过质谱仪检测氦气的泄漏情况。整个检测流程繁琐,涉及多个步骤和设备,导致检测周期较长。对于核电站来说,核级阀门数量众多,若采用这种检测技术,需要将大量的阀门从系统中拆卸下来进行逐一检测,这不仅耗费大量的人力、物力和时间成本,还会导致核电设备长时间处于停运状态,严重影响核电站的正常运行效率,增加发电成本。长时间的检测周期也使得核电站难以对核级阀门进行及时的维护和修复,增加了设备运行的安全风险。

2.3 部分技术存在放射性污染、有毒试剂使用等安全隐患

传统的核级阀门密封性检测技术,如放射性示踪法,使用放射性物质作为示踪剂来检测泄漏情况。这种方法虽然能够有效地检测出泄漏点,但在检测过程中,放射性示踪剂可能会发生泄漏,对环境和检测人员造成放射性污染,危害人体健康。同时,在处理和储存放射

性示踪剂时,也存在较大的安全风险,需要严格的防护措施和专业的处理手段。另外,还有一些检测技术需要使用有毒试剂,如某些化学显色法,在检测过程中,有毒试剂可能会挥发或泄漏,对环境造成污染,并且检测人员在操作过程中也面临着接触有毒物质的风险,存在较大的安全隐患。

3 核级阀门密封性检测新技术原理研究

3.1 声发射检测技术

声发射检测技术是基于材料在受力变形或发生损伤时会产生弹性波的原理。当核级阀门出现泄漏时,泄漏介质与阀门内部结构相互作用,会产生应力集中现象,从而引发材料的微小变形和破裂,产生声发射信号^[2]。这些声发射信号以弹性波的形式在阀门材料中传播,通过在阀门表面安装声发射传感器,可以捕捉到这些弹性波信号。然后利用信号处理技术对采集到的声发射信号进行分析,提取信号的特征参数,如信号的幅值、频率、持续时间等,根据这些特征参数可以判断泄漏的存在、位置以及泄漏程度。声发射检测技术具有实时性强、灵敏度高的特点,能够在阀门运行状态下进行检测,无需拆卸阀门,大大提高了检测效率,并且对微小泄漏的检测效果显著,为核级阀门密封性的在线监测提供了有效的手段。

3.2 光纤光栅传感技术

光纤光栅传感技术是利用光纤光栅的光学特性对物理量进行测量的一种技术。光纤光栅是通过对光纤进行特殊处理,使其折射率发生周期性变化而形成的。当核级阀门出现泄漏时,会引起周围环境温度、压力等物理量的变化,这些变化会导致光纤光栅的长度和折射率发生改变,从而使光纤光栅反射或透射的光信号的波长发生漂移。通过测量光信号波长的漂移量,就可以反推出阀门周围物理量的变化情况,进而判断阀门是否存在泄漏以及泄漏的程度。光纤光栅传感技术具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、易于实现分布式测量等优点,能够在核电站复杂的电磁环境下稳定工作,并且可以通过在阀门不同部位布置多个光纤光栅传感器,实现对阀门密封性的多点监测,准确确定泄漏位置,为核级阀门的密封性检测提供了可靠的技术支持。

3.3 太赫兹波检测技术

太赫兹波是介于微波和红外之间的电磁波,具有穿透性强、对物质的光谱特性敏感等特点。在核级阀门密封性检测中,太赫兹波检测技术利用太赫兹波能够穿透一定厚度的非金属材料和部分金属材料的特性,当太赫兹波照射到核级阀门表面时,若阀门存在泄漏,泄漏处

的介质与周围环境的物理性质存在差异,会导致太赫兹波在传播过程中发生反射、折射和吸收等变化。通过接收和分析这些变化后的太赫兹波信号,利用图像处理和数据分析技术,可以获取阀门内部的结构信息和泄漏情况。太赫兹波检测技术能够实现非接触式检测,无需与阀门直接接触,对阀门无损伤,并且可以在不破坏阀门正常运行状态的情况下进行快速检测,适用于对核级阀门密封性的快速筛查和在线监测,为核级阀门密封性检测提供了一种新的技术途径。

4 核级阀门密封性检测新技术检测系统设计与开发

4.1 系统总体架构设计

核级阀门密封性检测新技术检测系统采用分层架构设计,主要包括数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用展示层。数据采集层由各种传感器组成,如声发射传感器、光纤光栅传感器、太赫兹波探测器等,负责实时采集核级阀门的泄漏相关信号;数据传输层采用光纤通信、无线通信等多种传输方式,将采集到的数据快速、准确地传输到数据处理层;数据处理层利用高性能的计算机和专业的信号处理、数据分析软件,对采集到的数据进行滤波、降噪、特征提取等处理,实现对阀门泄漏情况的准确判断;应用展示层通过人机交互界面,将检测结果以直观的图表、图像等形式展示给操作人员,方便操作人员及时了解阀门的密封性状态,并进行相应的决策和处理。

4.2 硬件系统设计

硬件系统是整个检测系统的基础,主要包括传感器模块、信号调理模块、数据采集模块和数据传输模块。传感器模块根据不同的检测技术原理,选择合适的传感器,如声发射传感器需要具有高灵敏度和宽频带响应,以准确捕捉微弱的声发射信号;光纤光栅传感器需要具有良好的稳定性和重复性,确保测量结果的准确性;太赫兹波探测器需要具有高灵敏度和快速响应能力,以实现太赫兹波信号的有效检测^[3]。信号调理模块对传感器输出的微弱信号进行放大、滤波、整形等处理,提高信号的质量和可靠性;数据采集模块采用高精度的模数转换器,将模拟信号转换为数字信号,并进行实时采集和存储;数据传输模块根据不同的传输需求,选择合适的传输介质和通信协议,如光纤传输具有高速、抗干扰能力强的特点,适用于长距离、大数据量的传输;无线传输则具有灵活、便捷的优势,适用于一些无法铺设电缆的场合。

4.3 软件系统设计

软件系统是检测系统的核心,主要包括数据处理软

件、数据分析软件和人机交互软件。数据处理软件负责对采集到的数据进行预处理,包括信号滤波、去噪、特征提取等操作,去除干扰信号,提取能够反映阀门泄漏特征的有效信息;数据分析软件利用先进的算法和模型,对处理后的数据进行深入分析,如采用模式识别算法对泄漏信号进行分类和识别,判断阀门是否存在泄漏以及泄漏的程度和位置;人机交互软件提供友好的用户界面,方便操作人员进行系统参数设置、数据查询、检测结果显示等操作,操作人员可以通过界面直观地了解阀门的密封性状态,并根据检测结果进行相应的操作和决策。软件系统还具备数据存储、报表生成、远程监控等功能,方便对检测数据进行管理和分析,实现对核级阀门密封性的远程监测和管理。

5 工程化应用与验证

5.1 典型应用场景

场景1:三代核电机组主蒸汽隔离阀;在三代核电机组中,主蒸汽隔离阀是保障核电站安全运行的关键设备之一。主蒸汽隔离阀在正常运行时,需要承受高温、高压的蒸汽介质,并且在事故工况下要能够迅速切断蒸汽流,防止事故的扩大。将核级阀门密封性检测新技术检测系统应用于三代核电机组主蒸汽隔离阀的密封性检测中,通过在阀门表面布置声发射传感器和光纤光栅传感器,实现对阀门运行状态下的实时在线监测。声发射传感器能够及时捕捉到阀门内部由于泄漏等原因产生的声发射信号,光纤光栅传感器则可以监测阀门温度、压力等物理量的变化,通过对这些信号的综合分析,准确判断阀门是否存在泄漏以及泄漏的位置和程度。在实际应用中,该检测系统成功检测到了主蒸汽隔离阀的一次微小泄漏,并及时发出预警,为核电站的安全运行提供了有力保障。

场景2:高温气冷堆氦气阀门;高温气冷堆是一种先进的核反应堆类型,其使用氦气作为冷却剂,氦气阀门在高温气冷堆的运行中起着至关重要的作用。氦气具有良好的热工性能,但一旦发生泄漏,不仅会影响反应堆的正常运行,还可能引发安全事故。针对高温气冷堆氦气阀门的特点,采用太赫兹波检测技术和光纤光栅传感技术相结合的方式,对氦气阀门的密封性进行检测。太赫兹波检测技术能够快速对阀门进行非接触式检测,筛查出可能存在泄漏的区域;光纤光栅传感技术则可以

对阀门的关键部位进行精确监测,实时获取阀门的温度、压力等参数变化情况^[4]。在实际应用中,该检测系统有效地检测出氦气阀门的微小泄漏,并为阀门的维护和修复提供准确的数据支持,确保高温气冷堆的安全稳定运行。

5.2 第三方验证与标准符合性

为了确保核级阀门密封性检测新技术检测系统的可靠性和准确性,邀请了第三方权威检测机构对该系统进行全面的验证。第三方检测机构按照国际和国内相关标准规范,对检测系统的各项性能指标进行严格的测试,包括检测灵敏度、检测精度、检测重复性、系统稳定性等方面。在检测灵敏度测试中,通过模拟不同大小的泄漏量,验证系统能否准确检测到微小泄漏;在检测精度测试中,对比系统检测结果与实际泄漏情况,评估系统的测量准确性;在检测重复性测试中,多次对同一阀门进行检测,验证系统检测结果的一致性;在系统稳定性测试中,长时间运行系统,观察系统性能是否保持稳定。经过严格的测试和验证,该检测系统各项性能指标均达到或超过相关标准要求,证明其能够满足核级阀门密封性检测的实际需求,为核级阀门密封性检测新技术的推广应用提供有力的保障。检测系统的设计和开发也符合我国核安全法规和标准的要求,确保系统在核电站应用中的安全性和可靠性。

结束语

本研究实现核级阀门密封性检测技术创新与工程落地,有效提升核电站设备安全保障能力。未来,检测技术将朝着智能化、集成化方向发展,不断优化检测效率与精度,加强多技术融合创新,拓展应用场景,持续为核电行业安全稳定运行注入新动力,助力全球核电事业高质量发展。

参考文献

- [1]刘波.阀门密封技术研究现状及发展趋势分析[J].轻工标准与质量,2021(3):122-123.
- [2]于龙杰,钱锦远,金志江.阀门密封性能的研究进展[J].润滑与密封,2021,46(09):134-142+153.
- [3]李伟,张建斌,杨玲玲,等.阀门耐火密封结构设计分析[J].中国设备工程,2020(07):103-104.
- [4]刘艳军,孙占刚,韩彦龙,等.基于TRIZ创新理论的PE阀门密封试验机的研制[J].塑料工业,2020,48(03):122-125+147.