

压力管道检验检测技术综述及优化研究： 方法、应用和展望

郭宏炜（江西省检验检测认证总院特种设备检验检测研究院宜春分院，江西 宜春 336000）

摘要：压力管道作为各种工业系统的重要承压类设备，其安全与否直接关乎安全生产及经济效益。随着材料技术、无损检测等的发展，使得压力管道检验检测技术体系越发成熟，先进的检测手段从单一参数测量发展为全方位综合判断，借助声发射、超声导波等多种方法进行管道缺陷早期预警，实现了管道管理由被动向主动的进步。

关键词：压力管道；检验检测技术；优化方法；应用和展望

中图分类号：TH49 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）029-0016-03

Review and Optimization Research on Inspection and Testing Technologies for Pressure Pipelines: Methods, Applications, and Prospects

Guo Hongwei (Yichuan Branch, Special Equipment Inspection and Testing Institute, Jiangxi Academy of Inspection, Testing and Certification, Yichun Jiangxi 336000, China)

Abstract: As critical pressure-bearing equipment in various industrial systems, the safety of pressure pipelines is directly related to production safety and economic benefits. With advancements in material technology and non-destructive testing, the inspection and testing technology system for pressure pipelines has become increasingly mature. Advanced detection methods have evolved from single-parameter measurements to comprehensive multi-dimensional assessments. Techniques such as acoustic emission and ultrasonic guided waves enable early warning of pipeline defects, facilitating a shift from passive to proactive pipeline management.

Keywords: pressure pipelines; inspection and testing technology; optimization methods; applications and prospects

在能源化工等工业领域，压力管道长期处于复杂工况下运行，对检测技术提出了更高要求。当前检测方法正朝着智能化、自动化的方向发展，融合机器学习算法的缺陷识别技术显著提升了检测效率。

1 压力管道检验检测技术方法综述

1.1 无损检测方法

无损检测是压力管道检验的基本手段，主要有超声、射线、磁粉、渗透这四种传统的无损检测方法。超声波检查是根据声音在物体中传播的规律，来探测到管壁变薄或管道内部有缺陷的现象；X射线与 γ 射线透过照相显示，在显示屏上可以看到管道焊口等的部分情况；磁粉探伤法用来对铁磁性材料制品的表面和近表面缺陷进行检测，简单易行且灵敏度较高；透光法是一种用一种非多孔性质地材料对管道表层的裂缝开口情况进行判断的一种检测方法。声发射是指对管道实时在线监测的方法，当材料发生变形时，发出能被仪器拾取到的声音，进而发现设备异常情况。

1.2 理化检验方法

化学成分测试主要是通过光谱、色谱等方式测定材料中各种元素的含量；金相检验主要是通过对显微镜下材料显微组织进行观察，对材料热处理状态及老

化程度作出评价；力学性能测试主要有拉伸、冲击等各种试验证明材料的强度及韧性等；硬度测试可以短时间内得到材料加工硬化情况和各个局部的改变。

1.3 耐压试验方法

水压试验是最古老的试验方法，加上试验压力大于工作压力考核管路的强度和严密性；此种方法用于不允许进水的特殊情况而且安全系数大。气压试验的优点是允许对管道进行更苛刻的安全实验，适合一些有特殊要求的一些部位，此法与水压相比较成本较高，如果要做气压试验时应找好合适的气源接口位置并加以固定便于施工，尽量不影响整个系统的正常使用并且保证自身有足够的操作空间范围的工作区域，在试验中应该监视控制压力线以及变形做好相关的事故记录以便于后续查找原因分析解决。保压试验是在规定的时间内保持一定的压力以此来测试系统中的压力保持度。近的发展起来的一种在线的能够停机检验某些部分的能力使得生产在不停产的情况下就可以完成某些特定的压力试验，试验期间要监控压力线的变化及变动发现其他任何异常事件并及时做好记录。

1.4 泄漏检测方法

直接检测包含气泡法、压力降法等，方法简便却

灵敏度低。声学检漏通过监听泄漏时产生的高音波来定位；无需与管线接触，具有一定的便利性。利用温差成像技术得到的红外热像能检测到地埋管道微量泄漏点。使用示踪气体进行检测，可以达到极高精度；其主要缺点是仅可测量固定位置，不适合连续长距离管段的检漏工作。光纤传感能够探测连续的距离很长的管线，非常适用于一些重要的管线需要被监控的情况，而且该系统对泄漏处气体内的示踪物质也无特别要求。内部行走球能够检测泄漏情况并给出泄露位置。

2 压力管道检验检测技术的应用

2.1 在工业生产领域的应用

针对石油化工等流程工业中的压力管道，重点对其关键装置、管线等进行定期检验：高温高压反应器连接管道利用声发射在线监测技术发现材料劣化现象；长距离工艺管道应用超声导波技术进行快速筛查，提高检测效率；腐蚀严重的管线利用脉冲涡流技术检测剩余壁厚从而做出维修决策；对于新建的装置在投用前全面检测（射线/水压等）；对于特殊的材质管道，应用相控阵超声的技术进行传统的难点问题探测；工厂大修期间组织全面的管路系统性检查并形成设备健康档案。

2.2 在建筑工程领域的应用

集中在建筑领域，常见的检测对象为暖通空调及消防系统。中央空调冷冻水管道使用红外热像对保温缺陷、隐蔽泄露进行检查；消防喷淋系统采用气压试验的方法进行管网完整性检查；高层建筑立管利用超声测厚方法检查腐蚀情况；地源热泵系统下的埋地管道用一种电化学方法对防腐层进行检查；新建筑物的管道安装完毕后在隐藏之前对其进行全部检测以确保其施工质量。

2.3 在能源输送领域的应用

针对长输油气管道的检测，形成了自己鲜明的专业特色。长输管道外检测利用漏磁检测器（MFL）、超声波检测器（UT）等智能内检测手段，对管体进行全面评价；阴极保护系统检验评价防腐质量、指导优化完善；地质灾害区段基于 InSAR 技术进行地面形变监测，预防管道位移危险；站场管道采用相控阵检测技术检查焊接缺陷；海底管道采用 ROV 搭载式检测设备，不惧水下障碍物。LNG 低温管道形成独特的检测新技术等等。

2.4 在市政设施领域的应用

针对市政压力管道特点，主要解决了城市特殊环境中的问题：供水管网基于声学检测的方法快速查找暗漏，减少水资源浪费；燃气管网运用激光甲烷车检测路面，发现泄漏更加及时；热力管网利用红外检测

评判保溫效果，并用于节能升级改造；管廊的压力管道运用机器人群进行巡检，突破狭小空间的局限性；对于老旧小区老旧管网的改造，在改造前先进行全面检测评估后才可制定更新计划；同时重要的点位上管道将运用光纤传感技术实现在线实时监测；最后新建市政的管道将在竣工验收的时候采用不同的方法来确保施工质量。

3 压力管道检验检测技术现存问题

①检测精度问题。对于相近尺寸大小的缺陷类型传统超声检测不能较好区分，造成缺陷定性不准确。射线对微小裂纹检出率低，存在安全隐患而未能及时发现。磁粉容易受到工件表面情况的影响，非连续性的缺陷不一定能完整显示出来。导波在结构比较复杂的地方衰减严重，检测结果可靠性不高。漏磁对于轴向位置缺陷的敏感度不足，有可能遗漏重大缺陷。②检测效率问题。传统的手动超声是逐点扫查，效率低、工作量大；射线是有损检测，安健环准备繁琐，耗时长、检验周期长；泄漏检查一般都是要求停运，影响正常的生产活动；管道长距离检测必须分段进行，涉及较多单位，进度缓慢；复杂的结构部位需要多次修改仪器参数，重复作业的工作多；大部分的数据分析靠人工判读，报告出具时间过长，不能及时高效完成。③检测成本问题。先进的检测设备比较昂贵，小型企业难以承受；专业的检测人员时间较长，人力成本不断上涨；特殊的检测项目需要聘请专家提供技术支持，增加了费用；高空、受限空间特殊作业环境，成本过高；长输管道检测组织大量的现场人员，差劳费占比最大；试卷分析需精密的实验器具和耗材，日常维护成本较高。④检测安全问题。射线检测容易遭受辐射伤害，需要严谨的防护。高空管道容易发生坠落风险，对工作人员的安全要求十分严格。在易燃易爆场所进行的检验作业需要使用到专门的防爆设备；进行密闭空间检验时面对的是各种毒气和缺氧等危险。带电检验需要特别注意绝缘保护工作，并且由于受到水里等因素的影响，在开展此类检验活动的过程中极易影响实际的工作质量。

4 压力管道检验检测技术问题优化策略

4.1 检测精度提升策略

压力管道检测精度提高需要技术标准要求制定完善的检查程序和判断准则，保证检测方法及参数的一致性。设备升级重点关注高分辨率检测设备的升级（如数字射线检测系统、相控阵超声等），人员培训要定期开展技能评定和技术练兵，保证熟练运用先进的检测设备，并借助人工智能识别辅助分析手段降低因人工判读失误造成的错误检出率和定位准确性问题。建

立检测数据档案库以便比对历史记录，可以进一步提升检测准确度。

4.2 检测效率优化策略

压力管道效率的提升需与自动化检测相结合，借助于自动化手段减少人工干预（利用爬行机器人/无人机等实现长距离管道快速检测）。流程上进行最优化选择，确定合理路径，尽量避免重复作业并使用模块化方案检测不同直径与材质。智能调度管理基于以往数据进行异常点判断，优先检测高危管段，缩短检测周期；将实时数据传递，使得各检测项可即刻进行数据处理和分析而无需经过离线阶段，并在最终成稿时提供标准版报告单以降低大量后续处理数据的时间成本。

4.3 检测成本控制策略

控压管检测成本，关键是从资源的合理配置、技术上的适配选取和长期的成本规划出发：人力资源上既不能多配人手也不能使用多余的仪器，多功能检测仪器可一物多用；技术和设备都需选用最合适的技术与价格相结合的方案进行更换或采用其它方案，而非单纯考虑最前沿但代价高昂的高端产品及检测手段；时间选择要根据管道具体工况制定合理的检测周期，并在后续运营期间尽可能少开展突发性检测，而是按照计划进行预防性检测维修。建立资源租借（区域化租用）或者组建一个联合检测团队的形式共享资源来减少整体的花费比例。将相关数据标准化存储，在后期检测中多次利用同样的组数据也能实现长久减费目的。

4.4 检测安全保障策略

保证压力管道检测的安全问题需要从人的安全保护、仪器设备以及作业环境这三个方面来做加强。人要配备相关专业的防护用品比如防爆电台、气体检测报警仪、救援设备等，严格执行安全作业。仪器方面要校准检测仪器仪表，在一些特殊的环境下如高温、高压、腐蚀条件下仍能正常工作。作业环境要进行危险辨识，做好应急预案并且配置实时检测的设备防止有毒气体渗透和发生压力突变等情况并及时警示，同时定期组织工作人员做逃生演习熟悉应急疏散和救援的相关措施等，使用远程探伤等方式尽量减少人员进入高风险区，因此减少了安全事故的发生。

5 压力管道检验检测技术的未来展望

①技术创新发展趋势。压管道检验检测方面，发展智能化、自动化及多种方式相互结合等，智能化将与人工智能相结合可以自动识别缺陷并定量计算，并降低主观因素的判断误差；今后自动化将是各种不同的检验检测设备走向无人化使用的过程，例如现在应用较广泛的爬行机器人、无人机以及全自主式的各种检测手段逐步代替人工作业，提高效率，降低一些由

人员安全带来的问题。除单一手段检测外，将会出现多种方式融合在一起所构成的融合模式，如：超声、射线、电导、红外等，利用每种检测方式的优点在更复杂的情况下检出缺陷。数字孪生的发展趋势能让整条管始终处于一个虚拟空间当中，并利用物联网中的各种传感器来持续进行监测，通过收集到的数据存储于云端，并利用区块链技术保证不可更改信息以达到合规的要求。②标准规范完善方向。技术适配，对新型检测技术制定标准单独条款，解决未来新型检测手段应用的规范性以及结果可比性；国际协同，推进检测标准同 ISO、API 等并轨发展，实现不同国家间项目的联动和项目数据互认。动态更新，定期进行标准更新，加入实践反馈的技术改进内容与实践经验，补充复合材料管、高温高压等新工况的要求。③人才培养需求展望。未来压力管道检测领域的人才培养将转变为复合型人才、专精人才培养和终身教育。因为对智能化的检测仪器需要具备机械、材料、数据等各方面的知识才能够胜任；专业性的培训要进行更细致的方向区分，如相控阵超声、数字射线的专业认证。④行业应用拓展前景。对于压力管道的检测技术在传统能源行业基础上向更多新行业发展，比如页岩气、深海管道的恶劣环境下对更精准的耐腐蚀方案的要求；氢能源储运行业的诞生、碳捕集封存管道和核电冷却介质等等会带来全新的材质、全新介质对现有检测设备的新需求；城市综合管廊的大范围使用将会促进快速检测与长期检测结合的应用；国际化市场背景下会有更多的跨境项目对统一的检测标准提出要求；“检测即服务”的产业链也会在云平台上实现远程监测和诊断。

6 结束语

压力管道检验检测技术的持续创新对保障工业安全具有重要意义，未来研究应着力突破现有技术瓶颈，发展更精准的缺陷量化评估方法。通过整合多学科技术优势，构建智能化的管道健康监测体系。

参考文献：

- [1] 沈锦军,罗展慧.无损检测技术在压力容器和压力管道检验中的应用[J].设备监理,2024,(03):58-61.
- [2] 程凯.无损检测技术在压力管道检验中的运用研究[J].中国设备工程,2024,(08):185-187.
- [3] 徐卓.无损检测技术在压力管道检验中的运用[J].化工管理,2023,(31):113-115.
- [4] 蔺健宁.压力管道检验检测技术综述及优化研究:方法、应用和展望[J].产品可靠性报告,2023(08):146-148.
- [5] 刘林勇.压力管道检验检测技术的发展[J].化学工程与装备,2022,(10):211-213.