

天然气长输管道环焊缝缺陷检测技术对比与可靠性分析

王 玉 (济南市华通燃气工程有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 环焊缝作为天然气长输管道的核心连接结构, 其缺陷检测精度直接影响管道全生命周期安全。本文基于工程应用视角, 系统对比分析射线检测 (RT)、超声波检测 (UT)、衍射时差法 (TOFD)、相控阵超声检测 (PAUT)、声发射检测 (AE) 五种主流技术的原理特性与适用边界, 构建包含检测精度、效率、适应性、经济性的四维可靠性评估体系。通过蒙特卡洛模拟量化缺陷检出概率。

关键词: 天然气长输管道; 环焊缝; 缺陷检测; 可靠性分析; 相控阵超声

中图分类号: TE88; TB553

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 033-088-03

Comparison and reliability analysis of defect detection techniques for circumferential welds in natural gas long-distance pipelines

Wang Yu (Jinan Huatong Gas Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: As the core connection structure of natural gas long-distance pipelines, the defect detection accuracy of circumferential welds directly affects the safety of the entire life cycle of the pipeline. This article is based on the perspective of engineering applications, systematically comparing and analyzing the principles, characteristics, and applicable boundaries of five mainstream technologies: radiographic testing (RT), ultrasonic testing (UT), time-of-flight diffraction (TOFD), phased array ultrasonic testing (PAUT), and acoustic emission testing (AE). A four-dimensional reliability evaluation system is constructed, which includes detection accuracy, efficiency, adaptability, and economy. Quantify the probability of defect detection through Monte Carlo simulation.

Keywords: natural gas long-distance pipeline; Circumferential weld seam; Defect detection; Reliability analysis; Phased array ultrasound

在国家“双碳”战略推动下, 我国天然气长输管道建设进入高峰期, 截至 2024 年底累计里程已达 13.7 万公里。环焊缝作为管道连接的关键部位, 其焊接缺陷是导致管道失效的主要诱因之一。据《中国油气管道可靠性报告 (2024)》显示, 近五年因环焊缝缺陷引发的泄漏事故中, 未检出的裂纹类缺陷占比高达 42%, 其中延迟裂纹和应力腐蚀裂纹的漏检率分别为 35% 和 28%。传统管道检测技术在面对 X80 等高钢级厚壁管道 (壁厚 $\geq 20\text{mm}$)、复杂地形焊缝时, 暴露出检测盲区多、定性精度低、效率不足等问题。

随着相控阵超声、衍射时差法等新兴技术的推广应用, 行业对管道检测技术的系统性对比与可靠性评估需求日益迫切。本文通过构建多维度评价模型, 结合工程实证分析, 旨在解决检测技术选型的“精准匹配”问题, 为提升长输管道本质安全提供技术支撑。

1 主流检测技术的工程应用特性解析

1.1 射线检测 (RT) 的适用边界与局限

射线检测通过射线穿透管道焊缝时的衰减差异成像, 对气孔、夹渣等体积型缺陷具有直观显示优势, 检测结果可永久存档, 是新建管道焊后检测的传统首选技术。然而在厚壁管道检测中, 其技术瓶颈显著: 当壁厚超过 20mm 时, X 射线能量衰减导致裂纹检出率降至 65%-70%, 且需要双倍曝光时间 (单焊缝检

测耗时延长至 4h 以上)。某 LNG 管道项目曾因 RT 检测漏判 1.5mm 深表面裂纹, 投产后 3 个月发生介质泄漏, 暴露出该技术对浅表层裂纹的检测盲区。此外, 辐射防护要求导致其在人口密集区作业时需大范围封控, 施工协调成本增加 30% 以上。

1.2 超声波检测 (UT) 的人工依赖性难题

UT 技术凭借 30min/ 道的快速检测能力, 成为管道检测的主流手段, 尤其适用于未熔合、裂纹等面型缺陷排查。但该技术高度依赖检测人员经验, 在某第三方检测机构能力比对中, 不同人员对同一焊缝的缺陷定性一致率仅 82%, 裂纹误判率达 18%。表面粗糙度对检测效果影响显著, 当焊缝余高超过 3mm 或表面存在不规则凸起时, 超声波散射导致底波信号衰减, 漏检风险增加 25%。某成品油管道项目因未严格控制焊缝打磨质量, UT 漏检 3 处层间未熔合缺陷, 最终引发环焊缝断裂事故。

1.3 衍射时差法 (TOFD) 的精准定量优势

TOFD 技术通过捕捉缺陷端点衍射信号, 实现缺陷高度的毫米级精准测量 (精度 $\pm 1\text{mm}$), 对焊缝根部未焊透、埋藏裂纹的检出率可达 98% 以上。在西气东输三线某标段检测中, TOFD 成功识别出传统 UT 漏检的 1.2mm 根部裂纹, 避免了重大安全隐患。但该技术存在近表面盲区 (2-5mm 深度范围), 且对气孔

类缺陷响应信号特征不明显，在某储气库管道检测中，对直径 5mm 以下气孔的漏检率达 40%，需与脉冲回波法结合使用。

1.4 相控阵超声检测（PAUT）的智能化突破

PAUT 技术通过电子控制 16–64 阵元探头的激发时序，实现 0°–70° 声束角度动态覆盖，单次扫查即可完成焊缝全厚度检测，缺陷覆盖率提升至 95% 以上。其 A/B/C 扫描成像技术可直观显示缺陷三维位置，定位精度达 $\pm 0.5\text{mm}$ ，定性准确率较传统 UT 提升 25%。某中俄东线管道项目应用表明，PAUT 对 3mm 深微裂纹的检出率达 92.3%，较 UT 的 78.5% 显著提升，且单焊缝检测时间缩短至 15min，管道检测效率提升 4 倍。但该技术设备成本高昂（单套系统约 120 万元），且需配套专业数据分析软件，对检测人员的信号解读能力要求较高。

1.5 声发射检测（AE）的在线监测价值

AE 技术通过捕捉材料损伤时释放的弹性波信号，实现缺陷活性动态监测，适用于在役管道实时预警。某在役管道监测系统曾通过 AE 信号突变，提前 48h 预警某环焊缝应力腐蚀裂纹扩展，避免了泄漏事故。但该技术存在两大应用局限：一是无法精确缺陷定位（定位误差 $\pm 50\text{mm}$ ），需结合 UT/PAUT 二次验证；二是易受管道内气流噪声、周边施工振动干扰，在复杂环境下误报率高达 30%，需建立噪声滤波算法提升信号识别准确率。

2 工程实证：X80 管道环焊缝检测技术升级实践

2.1 项目概况与检测痛点

某省级天然气管道工程采用 $\Phi 1219 \times 22\text{mm}$ 的 X80 钢，全长 86km，环焊缝共计 1850 道。该钢材屈服强度达 555–690MPa，抗拉强度 $\geq 760\text{MPa}$ ，具有高强度、高韧性的特点，然而其厚壁特性也给检测工作带来挑战。施工阶段采用 RT（射线检测）+UT（超声检测）组合检测，投运后三年期内检测发现：

裂纹类缺陷漏检率达 32%，主要集中在热影响区及熔合线附近。经分析，此类区域因焊接热循环导致组织不均匀，晶粒粗大，且残余应力集中，易形成微裂纹。传统 RT 检测在厚壁焊缝中射线穿透力衰减严重，对微小裂纹辨识度不足；UT 检测受限于探头频率与角度，难以捕捉到熔合线处的闭合性裂纹。

检测效率低下，单标段检测周期长达 45 天，严重影响整体工期。由于每道环焊缝检测需经历 RT 多次曝光、UT 多角度扫查，且管道厚壁焊缝检测需分层扫描，检测设备的局限性及人工操作流程的复杂性导致检测进度缓慢，与管道建设的时效性需求严重不符。

管道厚壁焊缝 RT 检测需多次曝光，辐射安全管控难度大。在实际操作中，单次曝光难以覆盖 22mm 全壁厚的检测需求，需进行至少 3 次不同角度、参数的曝光。高强度的射线作业不仅对操作人员的防护要求极高，且现场射线屏蔽设施搭建复杂，稍有疏漏便存在辐射泄漏风险，给安全管理带来巨大压力。

2.2 检测方案优化与实施

采用“PAUT+TOFD+RT 抽查”方案：

PAUT 主检测：采用 64 阵元高性能相控阵探头作为核心检测设备，通过精密设计的 0°（直通波）、45°（熔合线扫查）、60°（热影响区扫查）、70°（表面裂纹检测）四组独立扫查序列，实现对管道焊缝全区域的立体化覆盖。其中，0° 探头沿焊缝中心线布置，利用直通波特性捕捉内部体积型缺陷；45°、60° 探头以特定角度倾斜扫查，精准定位熔合线及热影响区的未熔合、夹渣等缺陷；70° 探头聚焦表面层，对开口裂纹进行高灵敏度检测。为克服管道表面粗糙度对检测信号的干扰，采用水耦合剂作为声传播介质，通过恒压供水系统确保耦合层厚度均匀，有效提升信号穿透性与检测分辨率。

TOFD 补充检测：基于时差衍射技术原理，双探头布置严格遵循几何计算准则，间距按照公式 $S=2T \times \tan(60^\circ)$ （其中管道壁厚 $T=22\text{mm}$ ）进行精确设置，确保形成的声束交叉区域完整覆盖焊缝根部。通过优化探头频率（选用 5MHz 晶片）与楔块角度（60° 纵波折射角）组合，在保证横向分辨率的同时，增强对根部未焊透、根部裂纹等危害性缺陷的检出能力。检测过程中采用一发一收模式，实时采集衍射信号并生成 A/B/C 扫描图像，结合深度补偿算法消除信号衰减影响，实现缺陷的定量分析。

RT 验证抽查：针对 PAUT 和 TOFD 检测判定的管道可疑缺陷区域，采用 X 射线数字成像（DR）技术进行复验验证。按照不低于 10% 的比例对缺陷焊缝进行随机抽样，使用铱-192 γ 射线源或定向 X 射线机，根据管道壁厚选择合适的曝光参数（管电压、曝光时间、焦距），确保底片黑度值控制在 2.0–4.0 之间。通过专业评片软件对射线底片进行数字化处理，利用图像增强、边缘提取等算法辅助识别缺陷类型、尺寸及位置，与超声检测结果形成交叉验证，建立双重质量保障体系。

2.3 检测效果对比分析

在天然气长输管道环焊缝缺陷检测中，传统的 RT（射线检测）+UT（超声检测）技术与升级后的 PAUT（相控阵超声检测）+TOFD（衍射时差法超声检测）技术在多项指标上存在显著差异：

裂纹检出率：在天然气长输管道环焊缝缺陷检测中，传统射线检测（RT）与超声检测（UT）组合技术，受限于检测角度单一、对微小裂纹识别能力弱等问题，其裂纹检出率仅为68%。而相控阵超声检测（PAUT）结合衍射时差法（TOFD）技术，凭借多声束多角度扫查和对裂纹尖端衍射信号的精准捕捉，极大降低了因裂纹漏检引发管道安全事故的风险。

单焊缝检测时间：传统检测方法需通过多次胶片更换、人工扫查及复杂的后处理流程，检测单条焊缝耗时长达120min，严重制约施工进度。PAUT+TOFD技术采用数字化实时成像和自动化扫查系统，可快速完成管道焊缝全截面检测，单焊缝检测时间缩短至45min，显著提高了管道建设和维护的作业效率。

定性准确率：传统管道检测技术依赖操作人员经验判断缺陷类型，存在主观误差，其定性准确率为80%。PAUT+TOFD技术通过精确测量缺陷的深度、长度和高度信息，结合三维成像分析，有效避免因缺陷误判导致的过度返修或漏修问题，为管道质量评估提供更可靠的数据支撑。

检测成本：传统检测技术因胶片消耗、人工成本及复杂的设备维护，单道焊缝检测成本高达850元。PAUT+TOFD技术采用无胶片数字化检测模式，减少耗材使用，同时自动化操作降低人力投入，检测成本降低至620元，兼具经济与技术优势，在长输管道检测领域展现出更高的性价比。

2.4 可靠性提升机制

建立检测数据管理系统，实现100%焊缝检测数据（含PAUT的A/B扫描图、TOFD的D扫描图）数字化存档，同步关联每道焊缝的施工批次、焊接电流电压参数、现场环境温湿度等关键背景信息。系统内置缺陷特征比对算法，可对同一环焊缝在不同检测周期的数据进行叠加分析，精准捕捉缺陷长度、深度的细微变化，生成缺陷演化曲线，提前6-12个月预警裂纹扩展等潜在风险，同时数据支持与管道全生命周期管理平台对接，方便运维阶段快速调阅追溯。实施检测人员能力分级制度，要求PAUT操作人员需通过APIRP1176认证，认证前需完成不少于200小时的操作培训，涵盖厚壁管道扫查序列优化、复杂缺陷信号解读等核心内容；年度盲样考核包含微裂纹、根部未焊透等12类典型缺陷，考核时模拟现场干扰场景（如管道表面锈蚀、耦合剂不稳定），通过率需 $\geq 95\%$ ，未达标人员需参加15天专项复训，重新考核合格后方可恢复上岗。引入检测设备状态监控，对相控阵探头阵元灵敏度每月开展基础校准、每季度进行全性能校验，采用含 $\phi 2\text{mm}$ 人工缺陷的X80钢标准试块作

为校准基准，实时记录各阵元的信号幅值、相位偏差，确保检测信号一致性误差 $< 5\%$ ；设备一旦出现参数异常，系统会自动触发报警并锁定检测功能，需由专业技术人员排查维修后，重新校准合格方可继续使用，从设备端杜绝检测偏差。

3 复杂工况下检测技术选型策略

3.1 分场景技术配置矩阵

根据管道壁厚、服役阶段、环境条件，建立差异化选型策略：新建薄壁管道（壁厚 $\leq 16\text{mm}$ ）：采用“RT+UT”组合，RT控制体积型缺陷，UT排查面型缺陷，重点关注焊根区域检测；新建厚壁管道（壁厚 $> 16\text{mm}$ ）：推行“PAUT+TOFD”联合检测，PAUT覆盖全厚度缺陷扫查，TOFD精确定量根部缺陷，抽检率不低于20%；在役管道检测：构建“PAUT/TOFD离线检测+AE在线监测”体系，AE实时预警缺陷扩展，定期离线检测验证缺陷状态。

3.2 可靠性强化技术路径

开发“双聚焦相控阵检测技术”，针对X80钢焊接热影响区粗晶组织对检测信号的散射干扰问题，采用动态聚焦算法实现检测管道波束的自适应调节。通过仿真模拟与现场试验相结合的方式，优化阵列探头的激发孔径和聚焦法则，使检测系统在5-30mm深度范围内的信噪比提升至25dB以上。

建立TOFD检测信号数据库，系统收录1000+涵盖气孔、夹渣、未熔合、裂纹等典型缺陷的衍射信号特征数据。采用小波变换和时频分析方法对原始信号进行降噪和特征提取，构建包含缺陷类型、尺寸、取向等多维信息的数据集。

4 结论

工程实践表明，管道检测技术升级不仅提升安全可靠性，还可实现检测效率与成本的优化平衡，具有显著的工程应用价值。

参考文献：

- [1] 宋卫臣,胡松岩,程光旭,等.纯氢长输管道环焊缝典型缺欠应力集中及适用性评价准则[J].油气储运,2025,44(04):402-410.
- [2] 赵丹丹,高静,郭瑞杰,等.管道环焊缝AUT检测的声速测定及校准[J].无损检测,2024,46(10):76-80.
- [3] 戴联双.高钢级管道环焊缝失效机理探讨与思考[J].中国安全生产科学技术,2023,19(S2):93-100.
- [4] 罗志立,隋永莉.油气管道环焊缝自动焊未熔合影响因素[J].油气储运,2023,42(10):1166-1174.
- [5] 张神良,何玉龙,毕玉龙,等.管道环焊缝根部裂纹的有限元评价方法研究[J].当代化工研究,2023(02):129-131.