

TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 在油气田地面建设工程管道环焊缝的可行性探讨

田化池（庆阳长庆工程检测有限责任公司，陕西 西安 710018）

曹鹏章（长庆油田分公司技术监测中心，陕西 西安 710018）

摘 要：通过 TOFD 检测技术在油气田地面建设中的应用，对母材厚度为 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 薄壁焊接接头 TOFD 检测工艺技术实践，提出 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 在油气田地面建设工程管道环焊缝的可行性探讨。

关键词：TOFD 检测； $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ ；聚焦法则； $T < 12\text{mm}$ 扫描面盲区高度测定
中图分类号：TE973.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）026-0121-03

TOFD detection of wall thickness $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ in oil and gas field surface construction projects Feasibility Study of Pipeline Circumferential Weld Seam

Tian Huachi (Qingyang Changqing Engineering Testing Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710018, China)

Cao Pengzhang (Technical Monitoring Center of Changqing Oilfield Branch, Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: Through the application of TOFD detection technology in oil and gas field surface construction, this paper presents a practical exploration of the feasibility of using TOFD to detect the wall thickness of $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ in pipeline circumferential welds in oil and gas field surface construction projects, based on the practical application of TOFD detection technology in thin-walled welded joints with a base material thickness of $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$.

Keywords: TOFD detection; $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$; Focusing law; Determination of blind zone height on scanning surface with $T < 12\text{mm}$

随着国内油气田地面建设规模的不断扩大，环保、智能、效率、可靠性、功能等要求，对无损检测工艺方法、设备等提出越来越高的要求，TOFD 检测技术以其独有的优势成为无损检测技术发展的重要方向。将其适用范围由目前的 $T \geq 12\text{mm}$ 扩展到 $T=5\text{mm}$ 是本文探讨重点。

1 TOFD 检测与射线、超声波检测优劣对比

目前，油气田地面建设工程中，普遍应用的无损检测技术有 X 射线检测和超声波检测，相比较这两种检测方法，TOFD 检测具有以下特点，见表 1。

2 TOFD 检测标准适用范围探讨

我国现行《承压设备无损检测》NB/T47013.10—

2015 标准仅有 $T \geq 12\text{mm}$ 对接焊缝检测标准，对 $T<12\text{mm}$ 的对接焊缝无 TOFD 检测标准，但油气田地面工程中， $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 的管线大量存在，能否将 TOFD 检测技术进行推广需要对比实践，以事实来论证。

3 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 管道环焊缝实验论证

3.1. 硬件准备

为满足 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 要求，设计、制作了 $T=5\text{mm}$ 、 $T=7\text{mm}$ 、 $T=10\text{mm}$ 专用盲区试块，形成盲区高度测试方法，制作了不同规格的管道专用试件验证。

表 1

| 检测方法 | TOFD | RT | UT |
|--------|----------|----------|----------|
| 安全环保检测 | 无辐射、无污染 | 有辐射、有污染 | 无辐射、无污染 |
| 劳动强度 | 低 | 高 | 低 |
| 操作工艺 | 操作简单 | 操作复杂 | 操作简单 |
| 检测工件厚度 | 厚工件效果好 | 薄工件效果好 | 厚工件效果好 |
| 检测精度 | 高 | 较好 | 一般 |
| 即时判读结果 | 可即时判读 | 不可即时判读 | 即时判读困难 |
| 重复检测 | 可随时重复检测 | 不可随时重复检测 | 可随时重复检测 |
| 检测效率 | 较高 | 低 | 较高 |
| 检测成本 | 不用胶片，成本低 | 用胶片，成本高 | 不用胶片，成本低 |
| 检测数据记录 | 电子图谱 | 胶片 | 脉冲波 |

3.2 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 检测难点及解决办法

3.2.1 TOFD 检测 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 难度

①难度 1: 由于国产 TOFD 仪器难以准确区分薄板始波和缺陷波的位置; ②难度 2: 由于常规 TOFD 探头难以准确区分薄板缺陷波的位置; ③难度 3: 由于管道多环焊缝, 定制可折叠式扫查架, 解决管道焊缝 TOFD 检测因曲率变化带来的接触不良等问题; ④难度 4: 由于仪器和探头发生变化, 需要加工薄板盲区专用试块, 确定 $T < 12\text{mm}$ 薄板盲区高度; ⑤难度 5: TOFD 检测 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 国内没有标准。

3.2.2 解决措施

①使用 ISONIC 2007 进口设备解决薄板始波和缺陷波的精确定位; ②使用 $10\text{MHz} \phi 3\text{mm}$ 楔块角度为 70° 高频纵波直探头, 精准识别薄板始波和缺陷波的位置; ③定制可折叠式扫查架, 解决 TOFD 检测管道环焊缝因曲率变化接触不良导致漏检等问题; ④加工薄板盲区专用试块, 实测确定 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 薄板盲区高度; ⑤定制 6 套管道焊件, 进行适用性实验研究。

3.2.3 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 薄壁焊缝聚焦法则

根据 TOFD 检测 $2/3T$ 深度聚焦法则, 检测 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 时探头间距太小, 存在盲区, 探头横跨在焊缝上, 不能正常检测, 通过实验 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 改为聚焦深度为 T 的法则。

3.2.4 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 扫查面盲区高度测定方法

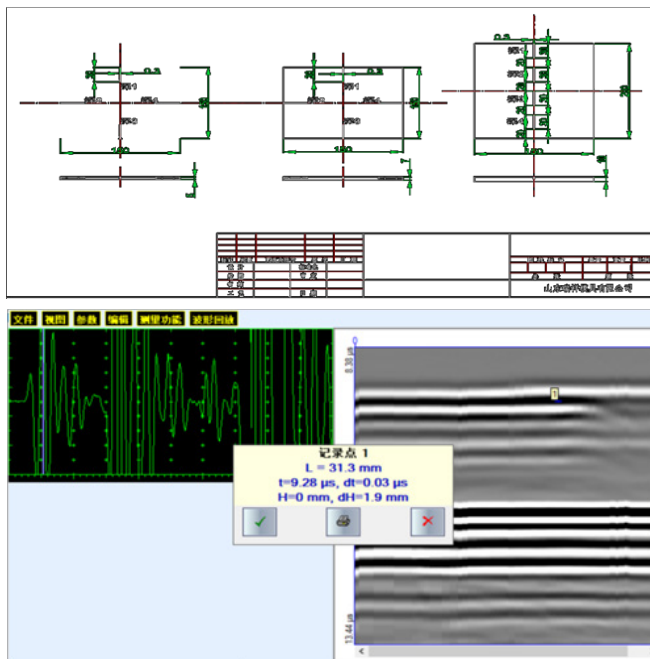
使用 ISONIC 2007 设备, $10\text{MHz} \phi 3\text{mm}$ 楔块角度为 70° 纵波直探头, 5mm 、 7mm 、 10mm 薄板盲区专用试块。

①首先按照被检工件的公称厚度计算好 TOFD 第一检测通道的 PCS 值; ②按照选择的探头频率和晶片尺寸设置好检测基本参数, 测试其探头延时, 调整测量参数, 激发参数, 接收参数和闸门; ③在被检工件上调试好 TOFD 检测灵敏度, 第一通道即为直通波调整灵敏度; ④在调整好的灵敏度基础上初步进行 TOFD 检测, 对厚度进行校准测量, 分析检测精度; ⑤在盲区试块上分别对八个不同深度的盲区孔进行扫查, 并保留数据, 分析在此组合性能下的测试盲区深度; ⑥如果测量盲区深度与盲区试块上的实际孔深误差很大, 可在盲区试块上没有缺陷的位置重新调整检测灵敏度, 使直通波和盲区试块底波能够调整的合适的灵敏度和声程位置, 再次重新测量盲区试块上八个

孔的深度, 直到能够准确测量出某相邻两个孔中一个孔的精确深度, 不能测量的孔深即为该探头系统的盲区深度。

3.2.5 TOFD 检测壁厚 $5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 扫查面盲区高度测定

5mm 、 7mm 、 10mm 薄板盲区专用试块设计图纸:



经过实测试验, 表面盲区高度测量值为 1.9mm , 再偏置扫查可将表面盲区高度降低到 1mm 以下。

3.2.6 TOFD 扫查

①安装扫查架: $\text{PCS}-2L0$ (探头前沿长度) = 两探头的间距, 为了避免扫查图谱不清晰, 根据需要可将 PCS 聚焦在根部。然后将扫查架安装在被检工件焊缝上, 在被检工件母材上均匀涂上耦合剂, 来回移动扫查架, 查看波形显示, 保证探头与工件接触良好。

②扫查参数设置

| 扫查长度 | 入射点距离 (mm) | 扫查速度 (mm/s) | 平均优化 |
|---------------|------------|-------------|------|
| 周长 +20mm 重叠长度 | PCS-2L0 | 10 | 2 |

③在被检工件表面实施加水液体耦合剂, 定位扫查起始点, 将装有探头的扫查架沿管道焊口环绕一周完成扫查。

3.2.7 TOFD 检测质量分级

$T \geq 12\text{mm}$ 按照 NB/T 47013.10-2015 标准进行质量分级。

$5\text{mm} \leq T < 12\text{mm}$ 采用《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109-2020 标准超声检测的允许长度执行。

表 6 套焊接专用管件检测数据采集记录表结果对比表

| 序号 | 规格 (mm) | RT 检测 | | | | | TOFD 检测 | | | | UT 检测 | |
|----|----------|-----------|--------------|------------|---------|------|---------|------|-----|------|-----------|------|
| | | 缺陷位置 | 缺陷性质及长度 (mm) | 最高波位置 (mm) | SL±XdB | 缺陷深度 | 位置 | 长度 | 深度 | 自身高度 | SL±XdB | 缺陷深度 |
| 1 | Φ323.9×8 | 206-223 | 夹渣 17 | 211 | SL+19dB | 6 | 215 | 25 | 6 | | SL+20.4dB | 6.72 |
| | | 564-586 | 裂纹 22 | 577 | SL+16dB | 5 | 574 | 29 | 5.2 | | SL+27.2dB | 5.97 |
| | | 逆 116-139 | 未熔合 23 | 逆 127 | SL+20dB | 5 | 890 | 20 | 6.3 | | SL+22.3dB | 5.64 |
| 2 | Φ273×6 | 130-152 | 未焊透 22 | 141 | SL+32dB | 5 | 135 | 20 | 2.6 | | SL+34dB | 4.37 |
| | | 408-440 | 裂纹 32 | 421 | SL+16dB | 4 | 417.5 | 30 | 穿透 | | SL+17.2dB | 5.62 |
| | | 逆 126-152 | 未熔合 26 | 141 | SL+27dB | 2 | 713 | 22 | 5 | | SL+28.5dB | 2.67 |
| 3 | Φ159×6 | 89 | 点状气孔 | 89 | SL+12dB | 3 | 95 | 0 | 2 | | | |
| | | 341-359 | 未焊透 18 | 346 | SL+32dB | 4 | 253.2 | 12 | 3.1 | 2.9 | | |
| | | 逆 72-94 | 裂纹 22 | 逆 88 | SL+18dB | 4 | 412.8 | 20 | 5.6 | | | |
| 4 | Φ114×5 | 65 | 点状气孔 | 65 | SL+17dB | 1 | 65.7 | 0 | 2 | | SL+15.3dB | 1 |
| | | 188-205 | 未焊透 17 | 193 | SL+32dB | 4 | 192.4 | 18.1 | 2.9 | 2.1 | SL+32.6dB | 3.32 |
| | | 逆 33-53 | 裂纹 20 | 逆 43 | SL+22dB | 1 | 310.5 | 14.3 | 穿透 | | SL+14.2dB | 1.42 |
| 5 | Φ89×10 | 62-85 | 夹渣 23 | 71 | SL+25dB | 4 | 67.7 | 28 | 2.4 | 4.8 | SL+21.1dB | 5.37 |
| | | 217 | 点状气孔 | 217 | SL+3dB | 4 | 224.8 | 4.5 | 1.7 | 4.3 | SL+2.7dB | 5.08 |
| 6 | Φ89×5 | 53-74 | 裂纹 21 | 63 | SL+16dB | 1 | 65.4 | 20 | 2.6 | | | |
| | | 226-247 | 未熔合 21 | 235 | SL+27dB | 2 | 238.3 | 16 | 2.6 | | | |

3.3 5mm ≤ T < 12mm 管道环焊缝 TOFD 检测适用性研究

3.4 试验结论

① TOFD 可随机重复检测，数据图谱即时存储，显示直观，可即时判读，特别适合应急状态下的焊口检测。

②使用 TOFD 检测安全环保，用电子图谱代替胶片，大大降低了胶片成本和竣工底片存储场所费用，无废液造成的环境污染；

③检测结果即时成像、即时判读，并可随时重复检测、时效性强等优点，检测质量高，一次扫查、即时成像，检测效率至少提高 30% 以上。

④通过加工专用试块、参照 SY/T 4109-2020 标准判定检测结果，解决 TOFD 检测壁厚小于 12mm 焊缝的难题，极大地提高了油气田地面建设工程无损检测的及时性和实用性，对油气田地面建设工程提供技术保障具有重要意义，发展前景广阔。

⑤填补母材厚度为 5mm ≤ T < 12mm 对接焊接接头的 TOFD 检测标准空白，形成中国石油天然气股份有限公司企业标准《石油天然气铜质对接焊缝 TOFD 检测标准》Q/SY CQ 4003-2021。

⑥根据对长庆油田地面建设工程历年来管线、工艺管网焊缝壁厚的统计，5mm ≤ T < 12mm 占有 T ≥ 5mm 焊缝比例达 95% 以上，TOFD 检测壁厚小于 12mm 焊缝难题的解决，仅在人力方面每年可节约成本 40 余万元，效率方面的优势更加明显。

3.5 上古天然气处理总厂工程中的应用论证

经过在长庆油田分公司上古天然气处理总厂工程

工程中进一步应用，该技术可靠、稳定。

4 应用前景

通过大量的现场评定论证，TOFD 检测工艺技术环保、高效、评定结果稳定可靠、经济价值高。在油气田地面建设薄壁管线规模大的情况下，将应用范围扩展到母材厚度应用范围扩展到 T=5mm，具有一定的可行性和可观的社会价值。希望在更多论证的支持下，完善 TOFD 检测标准，制定 5mm ≤ T < 12mm TOFD 检测的评定依据，使 TOFD 检测技术在油气田行业得到广泛认可和推广采用。

参考文献：

[1] 姚登樽,张瑞尧,孙巧飞,等.基于轮廓法的 X80 管线钢环焊缝残余应力分析[J/OL].热加工工艺,1-5[2025-07-21].

[2] 梁中红,李怡,袁银春,等.L360QS 管线钢环焊缝在湿硫化氢中损伤行为的研究[J].热加工工艺,2025,54(12):155-160.

[3] 刘彤.X80 天然气管道环焊缝疲劳性能试验研究[J].管道保护,2025,2(03):74-79.

[4] 郭勇,刘璞,刘善民,等.影响在建输气管道环焊缝质量控制常见问题及分析[J].化工机械,2025,52(03):519-525.

[5] 王凤仙.裂纹缺陷油气管道环焊缝特征分析及修复方法研究[J].石油和化工设备,2025,28(06):22-24.

作者简介：

田化池(1975-),女,汉族,陕西周至人。本科学历,经济师,研究方向为招投标管理,合同管理。