

油气管道焊接无损检测方法对比和分析

覃 新 (国家管网集团乌鲁木齐维抢修中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 随着无损检测技术的发展, 管道焊接的无损检测方法更加丰富, 对传统射线检测不能发现的缺陷也能准确识别和定量。本文通过对一次长输管道改造施工中使用相控阵超声波检测、超声波衍射时差法、射线检测出的缺陷进行统计, 并对这三种无损检测方法和原理进行简要介绍, 结合现场实际检测的缺陷图像对缺陷问题进行简要分析, 对实际焊接作业实施具有指导意义, 做好现场管理, 提高焊接质量。

关键词: 相控阵; 衍射时差; 埋藏线状缺陷

0 引言

根据《GB50369 油气长输管道工程施工及验收规范》“10.3.3 输油管道无损检测方法及比例”中规定: 对通过居民区、工矿企业和穿越、跨越大中型水域、一二级公路、铁路、隧道的管道环焊缝, 以及所有“碰死口”焊缝, 应进行 100% 超声检测和射线检测。在输油管道穿越白杨河湿地的泄漏风险治理项目中, 焊接无损检测采用 RT、(PA) UT、TOFD 三种方法, 与长输管道和油气站场动火作业中的 RT 和常规 UT 相比, 采用了 (PA) UT 和 TOFD 两种比较新的无损检测方法, 经验丰富的焊接作业人员也出现了不少问题。

1 无损检测中容易出现的问题

在该项目焊接作业中, 主要出现的缺陷问题 (见表 1, 表 2)。

2 无损检测方法 with 评定标准简介

2.1 相控阵超声波检测

相控阵超声检测基于脉冲回波法, 由不少于 8 个相同的压电晶片组成阵列, 通过一定的规则和时序用激发各个晶片单元, 各阵元发射的声束相位不一, 声束在空间中产生叠加形成入射波波阵面, 并聚焦在一定深度。阵元发射出的声束在工件中遇到缺陷会反射回来, 而处于聚焦区域的缺陷会形成振幅较大的反射

波波阵面。延迟器按照接收聚焦法则计算各阵元的接收延迟, 依次对每个阵元的回波信号进行叠加。

换能器发出一次波和反射的二次波覆盖这个焊缝截面, 如图 1 所示, 利用镜像原理将整个焊缝显示在扇形图像上; 并通过 DDF 动态聚焦, 对不同深度进行聚焦扫描, 在不同深度和上下表面都获得较好的成像。

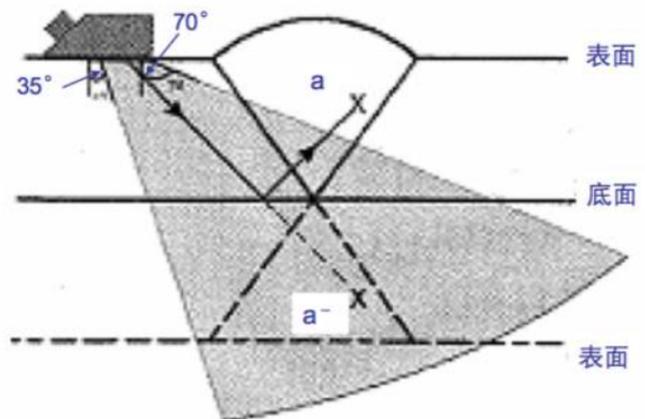


图 1 一次波和二次波覆盖区域

缺陷图像的定量以波幅改变为度量, 通常红色表示波幅改变最大, 白色表示改变最小。扇扫描时, 找到不同位置扇扫描的不同角度 θ 扫描中缺陷的最高回波幅度作为该缺陷的幅度, 如图 2 所示; 线扫描时, 找到不同孔径组合, 缺陷最高回波幅度作为缺陷的幅

表 1 相控阵超声波检测检测的缺陷

管道规格	检测长度 (mm)	缺陷定位 (mm)	缺陷定性	缺陷定量 (mm)	缺陷埋深 (mm)	波幅	评定等级	备注
Φ610*11	1915	1591	埋藏线状	16.0	9.1	82.4%	IV	高度 3.5
Φ508*16	1595	146.0	埋藏线状	28.0	6.5	122.4%	IV	偏离焊缝中心线 -4.4
Φ610*11	1915	1753-1770mm	埋藏线状	17	9.7	115.5%	IV	
Φ610*11	1915	808-827mm	埋藏线状	19	2.0	91.2%	IV	

表 2 衍射时差法超声波检测 (TOFD) 检测的缺陷

管道规格	检测长度 (mm)	位置 X (mm)	长度 l (mm)	深度 d_1 (mm)	高度 h (mm)	偏离中心线位置 Y (mm)	类别	质量等级
Φ508*16	1595	140-240	—	—	—	—	点状 (18 点)	III
Φ508*16	1595	155.1	35.8	6.8	2.2	—	埋藏条状	II

度。

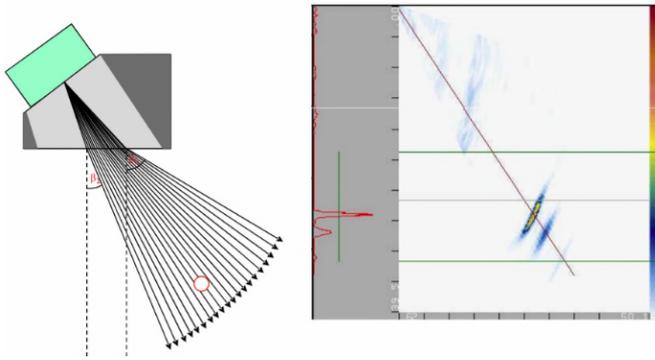


图2 相控阵超声波扫描缺陷示意图

相控阵超声波检测应结合 TOFD 检测进行缺欠评定，分为点状、线状和密集缺欠。其中缺陷反射波幅低于 40% 的非裂纹缺陷应评定为 I 级，最大反射波幅大于等于 80% 的线状缺陷，评定为 IV 级。

2.2 超声波衍射时差法检测

根据 SY/T4109，使用相控阵超声波检测时，被测的焊接接头厚度 $\geq 8\text{mm}$ 时应增加 TOFD 辅助检测（结构上允许时），用于缺欠辅助定性及缺欠高度测量。TOFD 能对缺陷的深度和缺陷本身的高度进行精确测量。

TOFD 基本原理为超声波束在缺陷中振动，在缺陷的端点或端角产生衍射，从而对缺陷定量定位。衍射波的特点是能量低、与角度和缺陷方向无关。采用双探头阵列，分布在焊缝两侧，通过发射和接收，在图像上显示直通波、缺陷上端衍射波、缺陷下端衍射波和底面反射波，考虑理想的情况，裂纹缺陷与表面垂直，可以得到缺陷上下端衍射波幅随检测角度的变化，在钢材中，横波在上尖端的最佳角度是 45° ，在下尖端的最佳角度是 57° ，典型检测角度为 45° 、 60° 和 70° 。

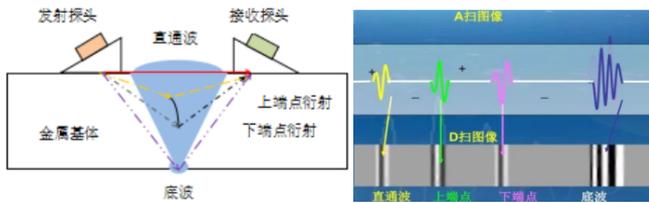


图3 波束在焊缝及缺陷上的传播和衍射和相应的 A 扫描、D 扫描图像

TOFD 成像是将探头所接收到的 A 扫描图像转换为黑白的灰度图，用灰阶度表示振幅，如图 3 所示。波形向正半周变化时，颜色向白色渐变；波形向负半

周变化时，颜色向黑色渐变。

波束在缺陷上端点的衍射波和底面反射波的相位相似，下端点衍射波与直通波相位相似，如果两个衍射信号相位相反，两个信号之间存在连续不间断的缺陷；图像纵坐标为时间，单位为 μs ，利用上下端点时间差测量缺陷深度和缺陷本身的高度。在发射和接收探头中，深度和时间的关系不行线性的，而是平方关系，软件经过线性化计算得出 B 扫描和 D 扫描的线性深度图，深度公式为：

$$d = \sqrt{(c/2)^2 \cdot (t - 2t_0)^2 - s^2}$$

其中：PCS（探头入射点间距离 $=2s$ ；c 为波速， t_0 为超声波在探头中传播时间）。通过减小 PCS 可以提高深度分辨率，但是扫描覆盖范围减小；增加探头频率能有效减少时间误差，但会减小声束扩散，减少有效扫描范围。在超声波束边缘的深度，误差大约为 8%。

对线性缺陷或面积型缺陷，定量误差 $< 1\text{mm}$ ，对裂纹和未熔合缺陷高度测量精度更高。分为非平行扫描、偏置非平行扫描和平行扫描三种方式。使用非平行扫描时，计算的深度和在焊缝中偏离中心线的距离上存在一定的不确定性，通过平行扫描进行验证和精确定位。

2.3 射线检测

射线检测是常规检测方法之一，利用 X 射线透过被检焊缝时，有缺陷部位与无缺陷部位对射线的吸收能力不同，如气孔和非金属夹杂物对射线吸收能力低于金属基体，根据射线强度的差异检测缺陷，在感光胶片上缺陷部位形成黑度较大的影像。射线检测是在垂直方向上形成图像，在射线照射方向上长度越大或者缺陷线吸收系数越大，胶片上缺陷与基体的黑度差异越大，缺陷容易被发现。

3 现场实际无损检测图像分析

3.1 相控阵超声波检测

现场图谱采用 C 扫描（如图 4 所示）、S 扫描（如图 5 所示）和 A 扫描显示，以及 TOFD 测量的 B 扫描和 A 扫描显示。其中一个 A 扫描代表一个扇形扫描中的一个角度，A 扫描显示深度信息；S 扫描视图是波束角度由低到高扫描出的切面视图，由不同角度、单一位置的 A 扫描组成；C 扫描视图由同一角度、不同位置的 A 扫描中采集的图像，形成位置 C 扫描或幅度 C 扫描，C 扫描显示缺陷位置和当量尺寸，实际上缺陷的长度较为明显（16-28mm），从 C 扫描上确定缺陷长

度和在焊缝上的位置。

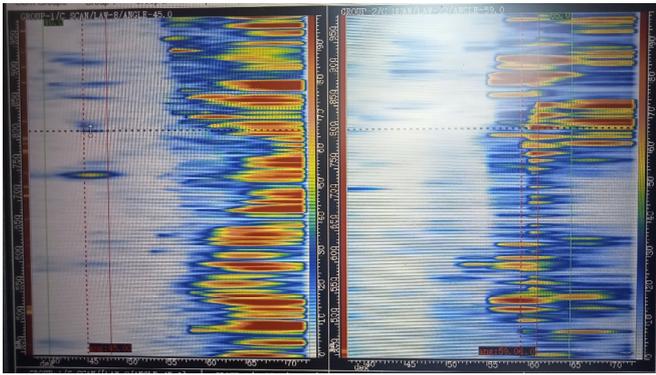


图4 相控阵超声波C扫描实际检测图像

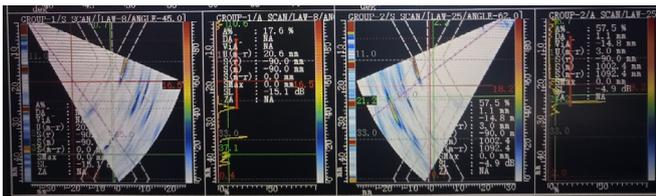


图5 相控阵超声波S扫描实际检测图像

3.2 超声波衍射时差法

现场采用A扫描波形和D扫描灰度成像两种图像,如图6所示,上方是沿金属表面传播在纵波形成的直通波信号,遵循两点之间波束传播最快的费马定理,直通波在金属曲面表面仍然在两探头之间直线传播;中间为底面反射波信号,底部是底面的横波反射信号或波形转换信号,横波反射信号到达接收探头需要较长时间。经过较长的时间后,真正的缺陷会再次出现,经过横波的扩散,缺陷信号会更加清晰。

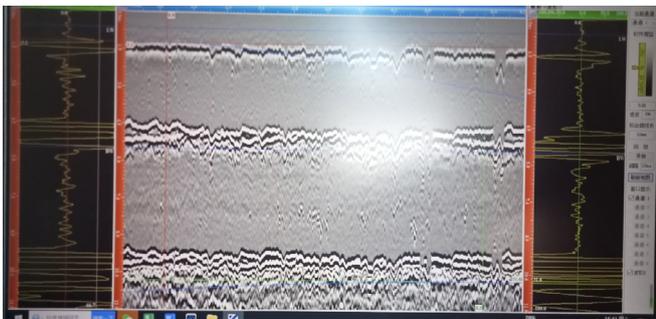


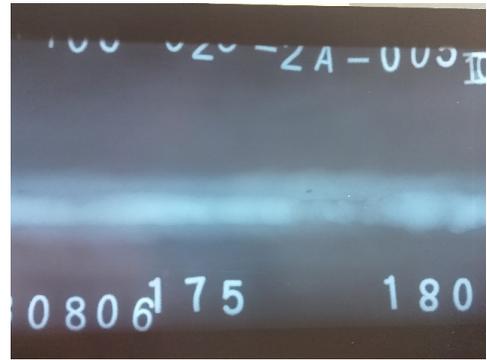
图6 TOFD的A扫描和D扫描实际检测图像

3.3 射线检测

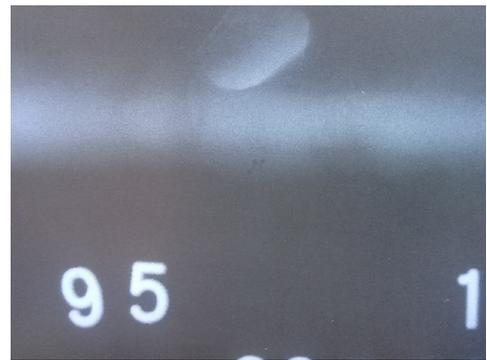
射线检测结果较为直观,并且有明确的评定标准,检测出的缺陷问题如图7所示。

主要表现为条形缺陷和圆形缺陷,如图7所示,在现场返修中发现存在热焊层焊道边缘焊渣清理不干

净的问题,在管口坡面上形成点状夹渣;在焊道接头处容易出现气孔。



(a) 条形缺陷



(b) 密集气孔

图7 射线检测的实际缺陷图像

4 焊接作业过程控制与现场管理

本项目焊接过程中相控阵超声波检测出缺陷的位置,射线检测未发现缺陷,焊接作业人员对缺陷位置进行返修时,并未发现明显缺陷。埋藏线状缺陷属于面积型缺陷,多出现在铁水层间熔合不好的情况,射线对体积型缺陷较为灵敏,并且只能从垂直向下拍照的方式检测,对于埋藏线状缺陷不能精确识别。

实际焊接无损检测中以射线检测、相控阵超声波检测和超声波衍射时差法相结合的方式,对焊接缺陷进行更精准地定位和测量。

参考文献:

- [1] GB/T 32563-2016. 无损检测——超声检测、相控阵超声检测方法[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2016.
- [2] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(9):10.
- [3] 施克仁,郭富岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京:高等教育出版社,2010.