

# LLT 探头在厚壁窄间隙焊缝检测中的应用

汪明辉, 严小波, 庞天国

(国核电站运行服务技术公司, 上海 200233)

**摘要:**探讨了 LLT 技术的基本原理, 及其在厚壁窄间隙焊缝检测中的实际应用。同时验证了该技术在实际工件上的检测能力。研究表明, LLT 技术对垂直于检测面的面积性缺陷有着非常高的检测灵敏度, 虽然该技术不能对缺陷进行定量分析, 但能够比较准确的对缺陷进行定性, 因此, LLT 技术可以作为常规检测方法的有效补充。

**关键词:**厚壁; 窄间隙; 超声波检测; LLT 技术

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)03-0175-04

## Application of LLT Probe in Testing of Welds of Thick Wall and Narrow Gap

WANG Ming-Hui, YAN Xiao-Bo, PANG Tian-Guo

(State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The principle of LLT method, and practical inspection experience were introduced. Result showed that LLT method could detect defects perpendicular to the test surface with high sensitivity, but could not measure its sizing. By the combination of the Tip method and LLT method, the characteristics and sizes of defects could be analyzed.

**Keywords:** Thick wall; Narrow gap; Ultrasonic testing; LLT technique

厚壁窄间隙焊缝中可能产生侧壁未熔合和裂纹等垂直于焊缝表面的区域性缺陷。由于上述缺陷的方向特性, 导致常规超声波检测方法对该类缺陷表现出较低的检测灵敏度和检出率。因此, JB/T 4730—2005 标准中规定, 针对厚壁窄间隙焊缝的超声检测, 除了采用常规斜探头检测外, 还应增加针对可能存在的坡口未熔合等缺陷的有效检测方法。而 LLT 探头由于其检测机理上的优势, 对垂直于检测面的区域性缺陷有着非常高的检测灵敏度, 虽然该技术不能对缺陷高度进行定量分析, 但在缺陷定性方面有很好的效果。因此, 可以结合使用 LLT 技术和端点反射技术对厚壁窄间隙焊缝的常规超声检测进行补充检测。

### 1 LLT 探头的检测原理

收稿日期: 2009-04-11

作者简介: 汪明辉(1982—), 男, 本科, 工程师, 从事超声检测及超声技术研究工作。

LLT 探头即纵波-纵波-横波探头。该类型探头采用发射晶片和接收晶片前后布置的双晶模式, 发射晶片发出的纵波经底面反射后, 继续以纵波模式传播, 然后在缺陷表面反射时产生波型转换, 产生横波。波型转换后的横波被接收晶片接收, 最终完成了对缺陷的检测。LLT 探头的检测原理见图 1<sup>[1]</sup>。从 LLT 探头的声波传播途径来看, 如果工件中没有缺陷, 或缺陷的方向是倾斜的, 那么发射纵波经底面反射后, 由于缺少波型转换这一环节, 则接收晶片无回波可接收。

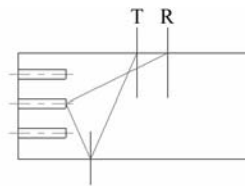


图 1 LLT 探头工作机理示意图

从图 2 所示的纵波斜入射声压反射率可以看出, 在确定 LLT 探头发射/接收晶片的角度时, 应注

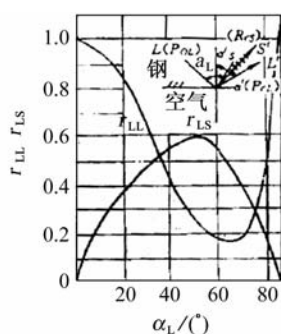


图2 纵波斜入射时的声压反射率

意以下几点:

(1) 纵波斜入射至钢/空气界面  $\alpha_L = 60^\circ$  左右时,  $r_{LL}$  很低,  $r_{LS}$  较高, 所以, 如有可能,  $\alpha_L$  尽量在  $10^\circ \sim 45^\circ$  范围内选取, 尽量避开  $45^\circ \sim 60^\circ$  范围。

(2) 为使纵波在缺陷界面上能反射出较强的横波, 则纵波在缺陷界面上的入射角尽量保持在  $20^\circ \sim 75^\circ$  范围内。

(3) 根据  $61^\circ$  角反射定律, 为获得较高的检测灵敏度, 确定接收晶片的角度时应考虑使其适合于接收传播方向与入射纵波方向相垂直的横波。

## 2 LLT 探头的深度覆盖范围

从 LLT 探头的检测原理可以看出, 当探头的发射和接收晶片角度确定以后, 则该探头只能检测固定深度范围的缺陷, 因此, 需要使用多个角度不同的 LLT 探头分别对不同深度区域进行检测, 最终覆盖整个工件厚度范围。以厚度为 90 mm 的工件为例, 至少需要采用 3 个探头才能覆盖整个厚度范围, 探头的结构如表 1 所示, 其声束传播路径图见图 3~图 5。

采用上述探头在厚度为 90 mm 的试块上进行

表1 LLT 探头结构(适用于 90 mm 厚度)

探头	晶片布置模式	发射角度 / ( $^\circ$ )	接收角度 / ( $^\circ$ )	前沿 / mm	入射点间距 / mm
UP	后发前收	17	59	12	27
MID	前发后收	24	60	17	26
LOW	前发后收	43	65	15	25

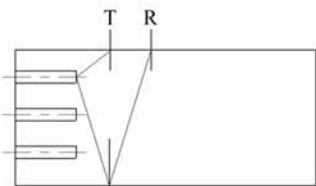


图3 探头声束传播图(上部区域)

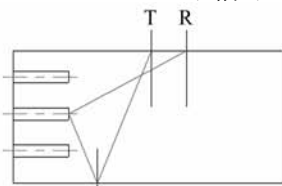


图4 探头声束传播图(中部区域)

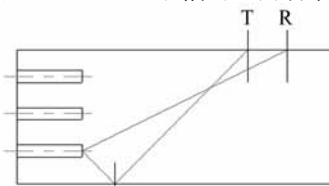


图5 探头声束传播图(下部区域)

试验, 以便研究各个探头实际覆盖的深度范围。将探头分别对准试块端面无缺陷区域, 移动探头找到端面回波最高峰, 此时用手指沾油触摸试块端面, 找到回波跳动最明显的部位, 记录该位置距离试块上表面的深度值; 向前和向后移动探头, 当回波降低 6 dB 时, 采用上面的方法测出 LLT 探头 -6 dB 覆盖区域。将此深度区域作为该探头的有效覆盖深度范围。

试验测试结果见表 2, 从试验结果来看, 除上下表面分别存在一定区域的盲区外, 上述三组探头能有效覆盖该试块的大多数区域。

表2 LLT 探头深度覆盖范围试验数据记录表

探头	反射位置	反射位置距上表面距离/mm	探头前端距端面距离/mm
上部区域	前推 -6 dB	9	6
	最大回波	21	12.5
	后移 -6 dB	39	21.5
中部区域	前推 -6 dB	38	32.5
	最大回波	50	45.0
	后移 -6 dB	61	52.0
下部区域	前推 -6 dB	60	76.0
	最大回波	69	85.5
	后移 -6 dB	80	100.0

## 3 现场检测情况介绍

2008 年 11 月, 检测人员对国内某石化企业乙二醇反应器装置上的一条厚度为 90 mm 的环焊缝进行检测时, 发现该焊缝根部多处存在横向回波信号, 检测人员随后采用端点反射法、直探头和 LLT 法对 2 处显示信号高度进行了测量。

### 3.1 端点反射法检测

针对横向扫查发现的 2 处信号, 用 2Z10  $\times$  10A45 探头检测时发现找到根部最大反射波时, 提高灵敏度后将探头向前移动, 根部反射波降落的同时在根部反射波前面会断断续续出现多个信号, 且最终的端点反射信号非常明显。测量结果显示, 1 号信号的自身高度  $> 16$  mm, 2 号信号的自身高度

>17 mm。从信号的动态波形来看,检测人员初步判断该缺陷可能是裂纹,但需采用其他方法加以验证。信号波形见图 6~10。

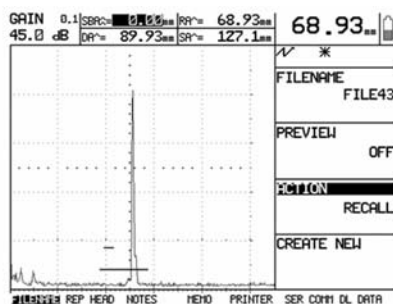


图 6 1 号信号底部反射波形

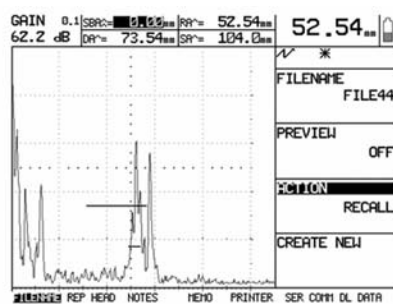


图 7 1 号信号端点反射波形



图 8 2 号信号底部反射波形

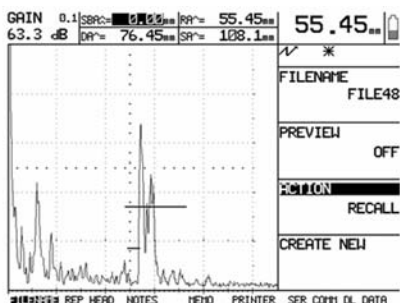


图 9 2 号信号端点反射波形

### 3.2 直探头检测

针对 2Z10×10A45 探头横向扫查发现的两处信号,检测人员用 K10K 探头在相同位置进行了扫查,发现个别地方有非常微弱的反射信号,反射信号深度在 70 mm 左右。调节仪器增益,发现此时焊缝

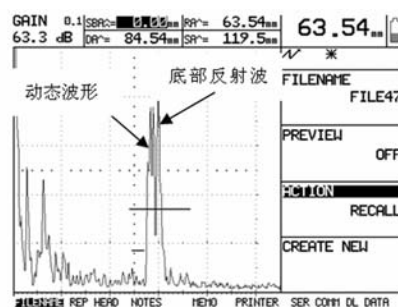


图 10 2 号信号动态波形

母材第一次底面回波高度至屏幕 80% 时,仪器增益读数为 42 dB,由此可以比较出,K10K 探头检测时,上述两处缺陷回波与焊缝无缺陷部位大平底回波的波高差>40 dB。根据缺陷当量计算公式,可以对该缺陷的当量进行计算。计算结果显示缺陷当量< $\phi$  1 mm 平底孔,这说明缺陷的反射面非常小。波形图见图 11 和 12。

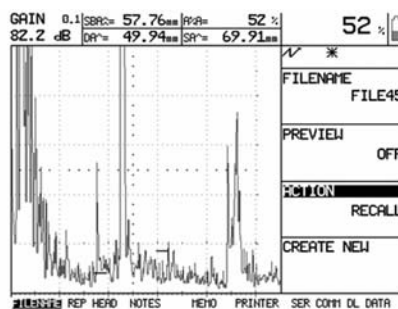


图 11 1 号信号检测波形图

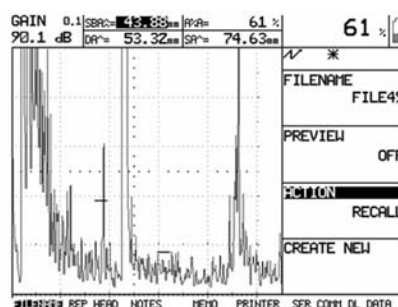


图 12 2 号信号检测波形图

### 3.3 LLT 探头检测

由于 2Z10×10A45 探头发现该信号在根部,因此,采用下部区域 LLT 探头扫查了附近区域,发现存在明显的回波信号。在仪器参数完全一致的情况下,用该探头在试块上扫查,发现在仪器屏幕上相同位置发现回波信号,经过对比判定试块上的信号反射点深度为 30 mm 左右。但由于 LLT 探头纵波声束扩散角比较大,能有效覆盖的区域>20 mm,且在有效覆盖区域内,缺陷反射回波声程几乎完全一致,



因此,如果根据反射信号的声程信息来判断缺陷的深度,误差较大。现场焊缝和试块上的波形图见图 13 和图 14。



图 13 现场焊缝检测波形图

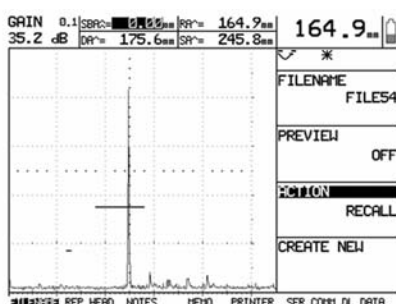


图 14 试块上的波形图

### 3.4 检测结果分析

从上述检测结果来看,LLT 探头能发现明显的回波,信噪比 $>20$  dB,而无缺陷区域则没有任何明显的回波显示,这说明焊缝中确实存在有利于 LLT 探头声束传播的反射体;2Z10 $\times$ 10A45 探头发现信



(上接第 174 页)

- [6] Kapustin A E, Bardusova I I. Computer technologies and X-ray flaw detection of welds[C]// Proceeding of 15th WCNDT. Roma:[s. n.],2000.
- [7] Nacereddine N, Tridi M. Weld defects in industrial radiography based invariant attributes and neural networks[J]. Image and Signal Processing and Analysis, 2005(7):15-17.
- [8] Burges C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data mining and knowledge discovery,1998,2(2):121-167.
- [9] Hus C W, Lin C J. Acompaision of methods for multi-class support vector machines[J]. IEEE Transaction on Neural Networks,2002,26(13):414-425.
- [10] Brown M P, Grundy W N, Lin D, et al. Knowledge-based analysis of microarray gene expression data by using support vector machines[C]// Proceeding of

号时信噪比也比较高,同时移动探头时能观察到明显的端点反射信号,而这是裂纹的典型特征;直探头检测时需要将仪器增益提高到很高的数值才能发现微弱的反射信号,据此可以辅助判断该缺陷是面积性缺陷,而不是体积性缺陷。

根据以上分析,检测人员最终确定该缺陷为裂纹,并对裂纹的自身高度进行了测量。

## 4 结语

从现场检测效果来看,LLT 探头对垂直于检测面的区域性缺陷有着很高的检测灵敏度和信噪比。因此,对厚壁窄间隙焊缝进行超声检测时,除采用传统斜探头检测外,在现场条件允许的情况下,还应采用 LLT 探头尽量扫查到整个焊缝截面,发现信号后再采用端点反射法对缺陷高度进行测量。但是,肯定 LLT 技术检测能力的同时,也应该注意该技术在工件上、下表面存在检测盲区,且当缺陷方向倾斜角度较大时,采用 LLT 技术也可能得不到很好的效果。因此,LLT 法必须结合其他超声检测方法一起使用,才能保证检测结果的准确性。

致谢:本文得到了国核电站运行服务技术公司毕炳荣老师的指导和提出的宝贵意见。

## 参考文献:

- [1] Komura Ichiro. Nondestructive inspection technologies for the inservice inspection of NPP[J]. Journal of the Japan Institute of Energy,2004,83(7):485-492.
- [2] the National Academy of Sciences of the USA. USA:[s. n. ],2000:262-267.
- [11] 孙林,付静. 基于二叉树的支持向量机旋转机械故障诊断方法[J]. 设计与研究,2008,35(3):1-4.
- [12] Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman. The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction[M]. American: Springer-verlab,2004. 263-272.
- [13] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2003:427-431.
- [14] Crespo J, Serra J. Theoretical aspects of morphological filters by reconstruction[J]. Signal Processing, 1995,47(2):201-225.
- [15] Katoh Y, O kumura T,Itoga K,et al Development of the automatic system for radiographic film interpretation[J]. NDT of Japan,1992,41(4):186-195.
- [16] 张晓光,林家骏. X 射线检测焊缝的图像处理与缺陷识别[J]. 华东理工大学学报,2004,30(2):199-202.