

厚壁筒形件内表面径向缺陷超声波检测灵敏度试验

郭伟灿^{1,2}, 郑津洋¹, 刘仲强², 施建峰¹

(1. 浙江大学 化工机械研究所, 杭州 310027; 2. 浙江省特种设备检验研究院, 杭州 310020)

摘要:对厚壁筒形件进行周向超声检测时,超声波对内表面径向缺陷的检测灵敏度受到多种因素的影响。在研究厚壁筒形件内表面裂纹周向超声检测的主要技术难点的基础上,系统地分析了纯横波技术、双重波型检测法、小角度纵波切内壁法、变型横波端角反射法、变型横波切内壁法等方法的技术特点。通过理论分析提出上述方法的内表面径向缺陷回波波高公式。对含有人工表面缺陷的对比试块进行了灵敏度试验,并对试验结果进行了分析与探讨。

关键词:超声波检测;厚壁筒形件;内表面缺陷

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2012)02-0024-04

The Experimental Investigation of Ultrasonic Testing Sensitivity for Internal Surface Radial Defects in Cylindrical Item with Thick Wall

GUO Wei-Can^{1,2}, ZHENG Jin-Yang¹, LIU Zhong-Qiang², SHI Jian-Feng¹

(1. Institute of Chemical Machinery and Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Zhejiang Inspection Center of Special Equipment, Hangzhou 310020, China)

Abstract: When circumferential ultrasonic testing is performed on cylindrical item with thick wall, the testing sensitivity of internal surface radial defects is affected by various factors. The authors systematically analyze the characteristic of SW technique, double wave modes technique, small angle LW tangent internal surface technique, deformation SV corner-echo technique and deformation SW tangent internal surface technique, based on the investigation of technical problems of circumferential ultrasonic testing for internal surface radial defects in cylindrical item with thick wall. The formula of ultrasonic echo of internal surface radial defects detected using above techniques is presented based on theoretical analysis. The ultrasonic testing sensitivity experiments are performed on test samples with artificial internal surface radial defects, and the experimental results are analyzed and discussed.

Keywords: Ultrasonic testing; Cylindrical item with thick wall; Internal surface defect

对厚壁筒形件进行周向超声波检测时,超声波对内表面裂纹的检测灵敏度受到多种因素的影响。如果缺陷自身高度远小于曲率半径,则缺陷与内外表面形成的夹角可近似为直角,表面裂纹和内表面形成小端角,超声波以一定角度入射至小端角形成部分端角反射。对于厚壁筒形件,其内外径比值较小,采用的纯横波技术通常使声束轴线与内表面缺陷的夹角接近于 90° ,理论上端角反射率很高,但实

际上由于入射波、反射波在边界上互相干涉导致超声波对内表面裂纹检测灵敏度降低,这也是厚壁筒形锻件周向超声检测主要技术难点之一。笔者针对厚壁筒形件内表面裂纹周向超声检测的主要技术难点,系统地分析了纯横波技术、双重波型检测法、小角度纵波切内壁法、变型横波端角反射法、变型横波切内壁法等方法的技术特点。通过理论分析提出上述方法的内表面径向缺陷回波高度公式。加工了含有人工表面缺陷的对比试块,对上述方法进行超声检测的灵敏度比较试验,并对试验结果进行分析与探讨。

收稿日期: 2011-03-18

作者简介: 郭伟灿(1968—),男,教授级高级工程师,研究方向为承压设备检验与无损检测等。

1 方法概述

厚壁筒形件内表面裂纹的周向超声检测方法主要有纯横波技术、双重波型检测法、小角度纵波切内壁法、变型横波端角反射法和变型横波切内壁法。

1.1 全横波检测技术

全横波检测技术的简单示意图见图 1。为确保实施全横波检测及一次横波能扫查到筒体内壁,横波折射角 β_s 应满足公式(1)的限制^[1-2]:

$$\frac{c_{s_2}}{c_{l_2}} \leq \sin \beta_s \leq \frac{r}{R} \quad (1)$$

式中 c_{s_2} 为钢中横波声速; c_{l_2} 为钢中纵波声速。

1.2 双重波型检测法

双重波型检测法(小折射角横波检测内壁缺陷)方法采用纵波入射角小于第一临界角的双重波型探头,如图 2,用小角度横波探测内表面,而筒体中上部采用纵波检测。根据工件规格和声压往复透射率等因素选择合适的折射角。

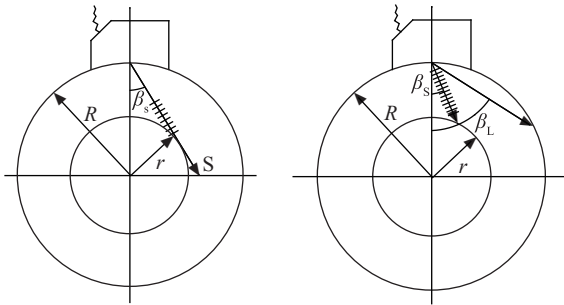


图 1 全横波检测技术示意 图 2 双重波型检测法

1.3 小角度纵波切内壁法

小角度纵波切内壁法主要利用折射的纵波与内壁相切来检测内壁径向裂纹,选择的入射角应使得折射的纵波轴线与内壁相切,检测原理如图 3,其入射角可由公式(2)选取。

$$\alpha_L = \sin^{-1} \frac{rc_{l_1}}{Rc_{s_2}} \quad (2)$$

式中 c_{l_1} 为有机玻璃中纵波声速, m/s。

1.4 变型横波端角反射法

变型横波端角反射法利用横波的端角反射和外壁对声束的汇聚作用,通过探头楔块将入射的纵波转换成具有较高能量的折射纵波。此纵波在筒形件中传播至外壁产生反射和波型转换,得到具有较高能量的横波,以 45° 左右对内壁裂纹入射,裂纹与管内壁表面形成的端角将该声波反射,并沿原路返回,从而达到检测缺陷的目的(图 4)^[3]。在图 4 中,其

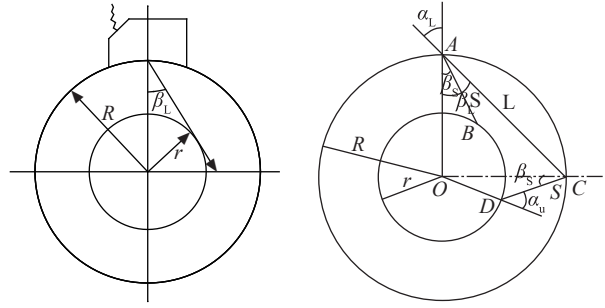


图 3 小角度纵波切内壁法 图 4 变型横波端角反射法
入射角 α_L 由以下公式导出:

$$\alpha_L = \arcsin \left(\frac{rc_{l_1}}{Rc_{s_2}} \sin \alpha_u \right) \quad (3)$$

1.5 变型横波切内壁法

变型横波切内壁法与变型横波端角反射法的区别在于变型横波切内壁法的变型横波与管子内壁相切,其检测原理如图 5 所示^[4]。根据筒形件的 r/R 值,可以求出纵波入射角 α_L 为:

$$\alpha_L = \arcsin \frac{rc_{l_1}}{Rc_{s_2}} \quad (4)$$

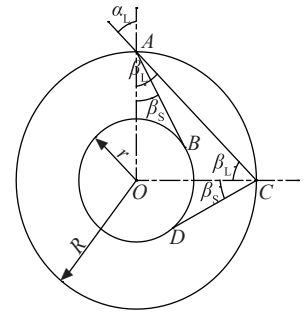


图 5 变型横波切内壁法

2 理论分析

笔者采用线切割槽模拟表面裂纹,超声波对表面线切割槽的反射类似于端角反射。实际检测时,当人工槽深度 t 远小于声束截面尺寸时,根据几何声学的原理(不考虑声波干涉,并假设端角反射率为 1),切割槽反射的折射横波波高 H_s 为^[4-5]:

$$H_s = K_{0.4} T_{LS} \left(\frac{\pi}{\lambda_{s_2} x} \right)^{\frac{3}{2}} 2t \sin \alpha_u \quad (5)$$

式中 $K_{0.4}$ ——定量比例系数;

T_{LS} ——横波声压往复透射率, %;

x ——声程, mm;

λ_{s_2} ——钢中横波波长, mm。

如果考虑横波入射时的端角反射率和材质衰减,则 H_s 为:

$$H_s = K_{0.4} T_{LS} D_s \left(\frac{\pi}{\lambda_{s_2} x} \right)^{\frac{3}{2}} 2t \sin \alpha_u e^{-\kappa_s x} \quad (6)$$

式中 D_s 为横波入射时端角反射率, %; κ_s 为横波材质衰减系数, NP/mm。

同样,切割槽反射的折射纵波波高 H_L 、变型横波波高 H_{LS} 分别为:

$$H_{L} = K_{0.4} T_{LL} D_L \left(\frac{\pi}{\lambda_{S_2} x} \right)^{\frac{3}{2}} 2t \sin \alpha_u e^{-\kappa_L x} \quad (7)$$

$$H_{LS} = K_{0.4} T_{LL} R_{L-S} F D_S \left(\frac{\pi}{\lambda_{S_2} x} \right)^{\frac{3}{2}} 2t \sin \alpha_u e^{-(\kappa_S S + \kappa_L L)} \quad (8)$$

式中 T_{LL} 为纵波声压往复透射率, %; D_L 为纵波入射时端角反射率, %; R_{L-S} 为钢、空气界面的往复声压反射率, %; λ_{L_2} 为钢中纵波波长, mm; L 为纵波声程, mm; S 为横波声程, mm; κ_L 为纵波材质衰减系数, NP/mm; F 为变型波聚焦声压增强系数。

对于人工槽深度分别为 t_1, t_2 的浅切割槽, 根据式(6)和(7), 两者回波差为:

$$\Delta_{dB} = 20 \lg \frac{t_1}{t_2} \quad (9)$$

3 灵敏度对比试验

3.1 试验用对比试块的设计

试验用对比试块的规格见表 1, 试块筒图见图 6。试块上内外表面的线切割槽用以模拟表面裂纹, 所有试块的宽度为 40 mm。

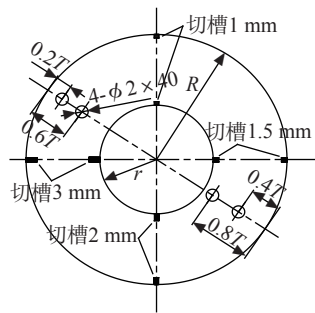


图 6 试块筒图

表 1 试块规格 mm

编号	R	r	编号	R	r
B1	200	120	B3	150	75
B2	200	100	B4	100	50

3.2 灵敏度对比试验

对筒形件进行周向超声检测, 一般采用纯横波检测技术, 但该技术通常只适用于内外径之比 ≥ 0.6 的筒形件周向检测^[6-7]。笔者用横波折射角为 35° 的横波斜探头对 B1 试块(内外径比为 0.6)进行内壁缺陷检测灵敏度对比试验, 并与横波折射角为 28.5° 双重波型斜探头进行对比, 试验结果见表 2。

从表 2 结果可以得出, 对于内外径比为 0.6 的厚壁筒形件, 采用纯横波技术的灵敏度优于双重波

表 2 内表面缺陷的信噪比对比试验 dB

试块编号	探头	检测技术	槽深度/mm			
			1	1.5	2.0	3.0
B1	2.5P13×13A35	全横波法	23	26	29	33
	2.5P13×13A28.5	双重波型检测法	19	21	24	27

型技术, 且波型单一, 缺陷容易判断。

对于内外径比 < 0.6 的厚壁筒形件, 一般不推荐采用纯横波技术。根据有关文献^[1-4], 目前国内对于内外径比 < 0.6 的厚壁筒形件采取的检测方法主要有双重波型检测法、小角度纵波切内壁法、变型横波切内壁法、变型横波端角反射法。笔者采用上述方法对 B2, B3, B4 试块(内外径比均为 0.5)进行灵敏度对比试验, 试验结果如表 3。

表 3 灵敏度对比试验结果 dB

试块编号	探头	检测技术	槽深度/mm			
			1	1.5	2.0	3.0
B4	2.5P13×13A28.5	双重波型检测法	29	32	34	37
	2.5P13×13A15.9	小角度纵波切内壁法	24	28	32	36
	2.5P13×13A20.7	变型横波端角反射法	40	43	45	48
	2.5P13×13A30	变型横波切内壁法	33	36	38	41
B3	2.5P13×13A28.5	双重波型检测法	23	26	29	32
	2.5P13×13A15.9	小角度纵波切内壁法	19	22	25	30
	2.5P13×13A20.7	变型横波端角反射法	26	29	31	33
	2.5P13×13A30	变型横波切内壁法	22	24	26	29
B2	2.5P13×13A28.5	双重波型检测法	17	20	23	26
	2.5P13×13A15.9	小角度纵波切内壁法	13	16	19	23
	2.5P13×13A20.7	变型横波端角反射法	14	17	19	22
	2.5P13×13A30	变型横波切内壁法	12	15	18	21

4 分析探讨

从表 3 的试验结果可以得出, 对直径较小的厚壁筒形件(外径 200~300 mm), 变型横波端角反射法对内壁缺陷的检测灵敏度相对其它方法要高。对直径较大的厚壁筒形件(外径 ≥ 400 mm), 变型横波端角反射法的检测灵敏度下降很快, 不如双重波型检测法。究其原因, 根据式(6)和(8), 采用变型横波法和直接用小折射角横波检测时两者内壁缺陷回波差为:

$$\Delta_{dB} = 20 \lg \frac{T_{LL} R_{L-S} F}{T_{LS}} e^{-\kappa_L L} \quad (10)$$

对不同纵波入射角的有机玻璃探头入射到钢界面, 其相应的 T_{LL}, T_{LS} 值见图 7^[2], 在钢中其 $T_{LL} R_{L-S}$ 见图 8^[4]。

对 B2, B3, B4 试块而言, 由于内外径之比为 0.5, 如采用变型横波端角反射法, 并使变型横波以 45° 入射至内表面线切割槽, 根据 Snell 定律计算其横波折射角为 15.9° , 从图 7 和图 8 查得 $T_{LS} = 5\%$,

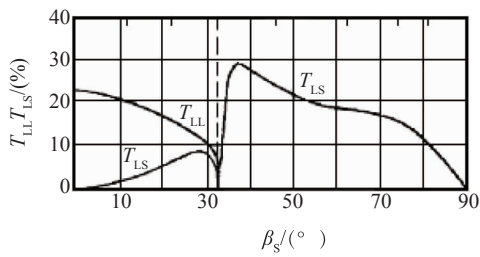
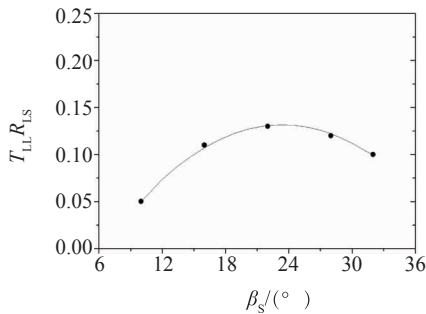


图7 声压往复透射率

图8 有机玻璃探头入射到钢界面的 $T_{LL}R_{L-S}$

$T_{LL}R_{L-S}=10\%$,则两者回波差为:

$$\Delta_{dB} = 20\lg \frac{0.1F}{0.05} e^{-\kappa_L L} = 20\lg 2Fe^{-\kappa_L L} \quad (11)$$

当圆周面引起的聚焦作用 F 大于材质引起的衰减,则变型横波端角反射法比小角度折射横波法灵敏度至少高 6 dB。

同样,如采用变型横波切内壁法,根据 Snell 定律计算其横波折射角为 30° ,从图 7 和图 8 查得 $T_{LS}=9\%$, $R_{L-S}=12\%$,则两者回波差为:

$$\Delta_{dB} = 20\lg \frac{0.12F}{0.085} e^{-\kappa_L L} = 20\lg 1.4Fe^{-\kappa_L L} \quad (12)$$

当圆周面引起的聚焦作用 F 大于材质引起的衰减,则变型横波端角切内壁法比折射横波切内壁法灵敏度至少高 3 dB。

通过上述分析,直径较小时变型横波端角反射法灵敏度较高的原因有:① 变型横波端角反射法声束的主要部分在内壁上形成一个聚集区域,而且入射到内壁上的声束与法线交角大多在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 之间,端角会产生全反射,反射的横波在外壁圆弧的作用下,产生汇聚;而变型横波切内壁法仅有部分反射的横波在内壁产生汇聚。② 采用变型横波法,对尺寸固定的探头,直径越小,变型横波端角反射法和变型横波切内壁法聚焦作用越强,而材质衰减相对减小,由式(15)可知,其检测灵敏度比直接采用折射横波法要高。③ 小角度纵波切内壁法、变型横波切内壁法由于入射角与缺陷夹角为 90° ,反射的纵波和横波与直接传播至缺陷的声波会产生互相干扰,干

扰的结果改变了探头的指向性和对称性,导致检测灵敏度和缺陷定位精度的下降。④ 纵波的波长比横波大一倍,对小缺陷的检测灵敏度不如横波检测。

同样,对直径较大时变型横波端角反射法的检测灵敏度下降的原因有:① 筒形件外表面曲率增大,使外壁的聚集作用相对减弱,导致检测灵敏度降低。② 筒形件外半径增大,使对应的筒体壁厚增大,变型横波端角反射法检测声程增大,由超声波衰减而导致检测灵敏度降低。③ 变型横波端角反射法由于进行多次反射和波型转换,不仅会导致超声波能量的损失,还会造成缺陷的定位误差增大,检测声程越大,其定位误差也相应增加。

5 结论

(1) 对于内外径比为 0.6 的厚壁筒形件,采用全横波技术的灵敏度优于双重波型技术,且波型单一,缺陷容易判断。

(2) 对于内外径比 < 0.6 的厚壁筒形件,纯横波技术对内壁缺陷的检测灵敏度降低。

(3) 对于内外径比 < 0.6 的厚壁筒形件,对直径较小厚壁筒形件,变型横波端角反射法对内壁缺陷的检测灵敏度较高。对直径较大的厚壁筒形件,变型横波端角反射法的检测灵敏度下降很快,不如双重波型检测法。

(4) 文中提出的内表面径向缺陷回波灵敏度的经验公式可以解释上述试验结果。

参考文献:

- [1] 李以善. 在役超高压人造水晶釜的超声检测[J]. 无损检测, 1998, 20(1):114-115.
- [2] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会. 超声波探伤[M]. 北京:劳动部中国锅炉压力容器安全杂志社, 1997
- [3] 张家骏. 超声波检验厚壁管内壁裂纹的新方法—变型横波端角反射法[J]. 无损检测, 1994, 16(5):121-24.
- [4] 杨世维. 大口径厚壁无缝钢管超声波探伤[J]. 无损检测, 1984, 6(2):31-33.
- [5] 陈勇, 韦玉屏. 槽形缺陷对超声波反射当量的研究[J]. 机械设计与制造, 2005, 9(9):101-103.
- [6] Sony Baby. Ultrasonic study for detection of inner diameter cracking in pipeline girth welds using creeping waves[J]. Pressure Vessels and Pipeing, 2003(80): 139-146.
- [7] 日本非破坏检查协会编写. 超声波探伤 B[M]. 马羽宽, 译. 长春:吉林科学技术出版社, 1985.