

基于 2-2 压电复合晶片的 SH 波探头研究及应用

李旺明,刘晴岩,邵佩玉

(华东理工大学 承压系统安全科学教育部重点实验室,上海 200237)

摘要:为了获得水平偏振横波(SH波),研制开发了基于 2-2 压电复合晶片的 SH 波斜探头。通过研制的 SH 波探头对小口径奥氏体不锈钢管标准试块和对比试块进行测试对比试验,研究其声衰减及信噪比特性。试验结果表明,基于 2-2 压电复合晶片的 SH 波探头可实现对小口径奥氏体不锈钢管焊缝缺陷的检测,且具有较高的检测灵敏度和信噪比。

关键词:奥氏体不锈钢管;焊缝;超声检测;SH波;小口径;2-2 压电复合晶片

中图分类号:TN384;TB552

文献标识码:A

Research and Application of SH Wave Probe Based on 2-2 Piezoelectric Composite Chip

LI Wangming, LIU Qingyan, SHAO Peiyu

(Key Lab. of Safety Science of Pressurized System, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In order to achieve horizontally-polarized shear wave (SH wave), SH wave angle transducers with 2-2 piezoelectric composite chips has been developed. A small diameter austenitic stainless steel tube calibration block and reference block with artificial defects are tested by the developed SH wave probe to study the attenuation and signal to noise ratio of SH wave. Experimental results show that SH wave based on 2-2 piezoelectric composite chips can achieve the purpose of testing defects in weld of small diameter austenitic stainless steel tube. The defect detection sensitivity and the signal-to-noise ratio are relatively high.

Key words: austenitic stainless steel tube; weld; ultrasonic testing; SH wave; small diameter; 2-2 piezoelectric composite chip

0 引言

在超声检测中,斜入射探伤用的横波,一种是垂直偏振横波(SV波),另一种是水平偏振横波(SH波)。20世纪90年代开始,随着对各向异性材料、固体物理模型实验等方面的研究,能生成SH波的剪切型换能器应运而生,并逐步发展应用。李衍^[1-2]介绍了SH波的声场特性和特点,通过研究指出,SH波适合于检出近表面与板面垂直的面状缺陷,且有利于探测小口径薄壁管环焊缝,克服一般横波探伤的弊病。严晓东等^[3]提出利用水平偏振横波对支柱瓷绝缘子进行超声检测,并取得了较好的效果,但可以产生水平偏振横波的压电晶片难以制作、换能器难以符合要求、耦合难等问题也限制了水平偏振横波应用的进一步发展,不具有广泛应用性。随

着压电晶片制造工艺的发展,发现利用 2-2 压电复合材料制作的压电复合晶片可产生水平偏振横波^[4]。目前,利用 2-2 型压电复合材料制作水平偏振横波换能器并进行应用的实例较少。在奥氏体不锈钢焊缝的超声波检测中,由于焊缝金属晶粒呈柱状粗晶结构,使超声波在传播过程中,产生强烈的晶粒散射和衰减;同时焊缝组织的各向异性会造成超声波声束扭曲偏转,从而使信噪比下降,缺陷的定位误差增加^[5]。因此采用常规超声波探头已无法对奥氏体不锈钢焊缝进行有效检测,在实际中应用难度大。特别是在小口径奥氏体不锈钢管对接焊缝超声波检测技术方面的研究工作更少。本文在相关研究的基础上,研制开发了基于 2-2 压电复合晶片的水平偏振横波斜探头,并用于小口径奥氏体不锈钢管对接焊缝的检测应用研究。

收稿日期:2014-07-15

作者简介:李旺明(1987-),男,湖北咸宁人,硕士生,主要研究方向为超声波检测技术与应用。

1 水平偏振横波

常用横波斜探头所采用的 SV 波是纵波经过波型转换后得到的横波(偏振方向与水平偏振方向垂直的横波);而 SH 波则是压电晶片发射的横波未经过波型转换直接在界面上经过折射而产生的横波,其在工件内作剪切振动(即偏振方向与界面平行的横波),如图 1 所示。

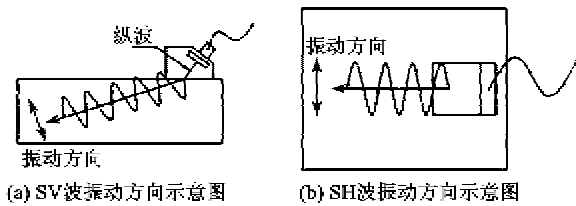


图 1 横波的振动方向

SH 波在自由界面上满足下列波动方程:

$$\begin{cases} \ddot{\psi}_x = c_2^2 \nabla^2 \psi_x \\ \ddot{\psi}_y = c_2^2 \nabla^2 \psi_y \end{cases} \quad (1)$$

其中满足波动方程的解 ψ_x 、 ψ_y 可设为

$$\begin{cases} \psi_x = E_1 \exp[j(\omega t - k_{2x}x + k_{2y}y)] + E_2 \exp[j(\omega t - k_{2x}x - k_{2y}y)] \\ \psi_y = F_1 \exp[j(\omega t - k_{2x}x + k_{2y}y)] + F_2 \exp[j(\omega t - k_{2x}x - k_{2y}y)] \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \psi_{x,x} + \psi_{y,y} = 0 \Rightarrow k_{2x}E_1 = k_{2y}F_1 \\ k_{2x}E_2 = -k_{2y}F_2 \\ k_2^2 = \omega^2 / c_2^2 = k_{2x}^2 + k_{2y}^2 \\ k_{2x} = k_2 \sin \theta_2 \\ k_{2y} = k_2 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

将上述解代入自由表面上的边界条件:

$$\tau_{yx} = \mu(\psi_{y,xy} - \psi_{x,yy}) = 0 \quad (y=0) \quad (4)$$

求解出系数 E 和 F , 则有 $E_1 = -E_2$, $F_1 = F_2$ 。

计算表明,当从平行于偏振方向的表面反射时,水平偏振横波不会转化为其他类型的波。

1.1 SH 波的特点^[1]

1) 能有效检出与探测面相垂直的平面状缺陷,当检测到与工件表面相垂直的面状缺陷时,可以得到波幅很高的回波,对于该类缺陷可以很好地判断。

2) 探头与缺陷之间的工件表面即使有障碍物,超声波仍能很好传播,而通常的表面波会被障碍物返回。

3) SH 横波波长小于纵波,可以检出更小尺寸的缺陷。在传播过程中衰减很小,探测距离得到大

大提高,可以在更大的范围内检测出缺陷。

4) 水平偏振横波几乎全波透射入焊缝金属中,其声束指向偏转最小,畸变较小,声速各向异性也较小,有利于粗晶奥氏体焊缝的检测。

5) 由于 SH 波为横波入射,甘油类耦合剂几乎不能传播此类超声波,必须用 SH 波专用耦合剂,但专用耦合剂粘度高,在工件表面涂匀摊薄前,探伤灵敏度很不稳定。

1.2 水平偏振横波的获得

SH 波可通过具有剪切特性的压电晶片制成换能器获得。该类晶片的基本原理如图 2 所示,当剪切压电晶片得到一个电信号后会产生一个剪切振动,当电信号反向时,振动方向也会随之相反,其中与振动方向垂直的面称为辐射面。剪切换能器产生的剪切振动方向与波的传播方向相垂直。

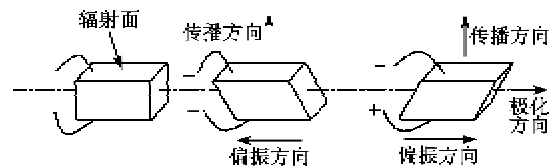


图 2 剪切换能器的工作方式

2 传感器的研制

上文已介绍了剪切换能器的工作方式,获得 SH 波的关键点就是获得能产生具有剪切特性的压电晶片。前人已对这方面作过很多工作,且研制出了能产生剪切振动的换能器,其中由 2-2 型压电复合材料制作的剪切换能器兼具压电陶瓷的压电活性和聚合物的柔韧性,具有较高的机电耦合系数、较大的带宽和较低的声阻抗及干扰耦合小等特点^[6]。本文在总结前人的研究成果基础上,研制出一种采用 2-2 型压电复合材料制作的 SH 波探头,压电晶片产生厚度切变模振动,会在固体中辐射出 SH 波。

2.1 2-2 压电复合晶片振动原理

2-2 型复合材料是聚合物相与陶瓷相均为二维连接的^[7],两者间隔排列,即陶瓷相与聚合物相在各自的平面内延伸,形成层叠结构,当压电陶瓷层与外加电场平行时为并联模式,与外加电场垂直时为串联模式。根据压电相的极化方式不同,2-2 型压电复合材料有不同的工作模式,包括 LP, TP, SP 以及混合振动模式。对于并联结构(见图 3),主要有 LP 和 SP 两种主要模式。由于常规工作模式下的复合材料内部压电陶瓷和聚合物的介电常数相差太大,外加电场主要分布在聚合物上,所以串联结构的压

电常数很小^[8],应用不广泛。



图3 并联2-2压电复合材料的工作模式

2.2 2-2压电复合晶片的研制

为得到SH波,晶片的工作模式选择SP模式,本文采用切割-填充法制作2-2型复合晶片,即将PZT陶瓷块经过一次切割和一次填充制作2-2型复合晶片。制作具体步骤如图4所示,制作完成的压电晶片显微照片如图5所示,未见裂纹和气泡,且压电陶瓷相和聚合物相分布均匀。

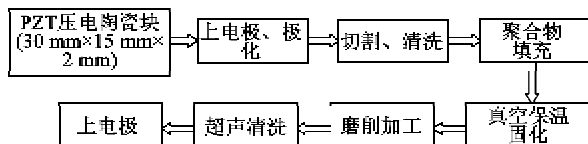


图4 晶片制作步骤

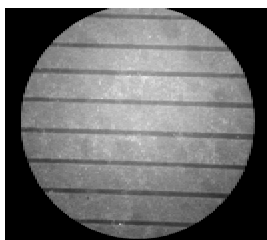


图5 晶片样品显微照片(×30)

2.3 SH波斜探头的设计制作

SH波斜探头的具体制作过程和普通SV波斜探头的制作过程类似,重点注意电极与导线的焊接、阻尼块的浇注和压电元件的粘接3方面的工艺。

利用横波直探头测出奥氏体不锈钢的横波声速,结合楔块材料的横波声速,由斯涅耳定律可计算出SH波的入射角,加工出相应的透声楔块,并按照普通SV波斜探头的制作过程制作相应的SH波斜探头。在延迟斜楔的底部加工与待测试块曲率半径一致的曲面,保证探头与试块接触良好,探头如图6所示。

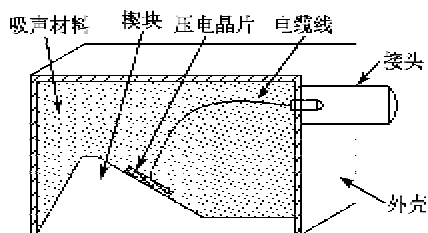


图6 SH波斜探头示意图

采用上述方法制作的SH波斜探头通过测试,其时域响应和频域响应如图7所示,分析可知该探

头具有高灵敏度、窄脉冲特性。

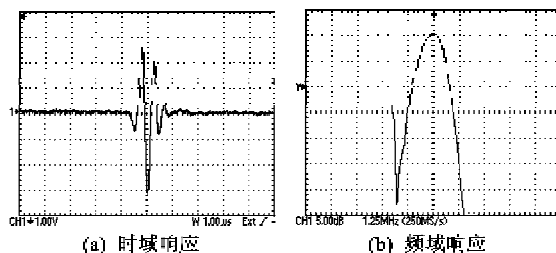


图7 SH波斜探头的时域响应和频域响应

3 SH波探头检测应用试验与结果分析

为确定SH波对小口径奥氏体不锈钢管焊缝缺陷超声检测的可行性,利用研制的SH波探头对小口径奥氏体不锈钢管标准试块和模拟试块进行测试,研究其声衰减及信噪比特性。

3.1 试验条件

标准试块采用与被检实物试块材质相同的奥氏体不锈钢(304)制成,该材料在直探头检测时不得有 $\geq \phi 1$ mm平底孔当量直径的缺陷。标准试块为分布有4个不同深度,规格为 $\phi 1$ mm $\times$ 20 mm横通孔的圆弧试块,如图8所示。所采用的试块圆弧半径R为24 mm,测试仪器选用USM GO数字式超声波探伤仪,耦合剂为SLC70高粘度耦合剂,对试块的超声检测按有关标准进行,确保试验可靠性。

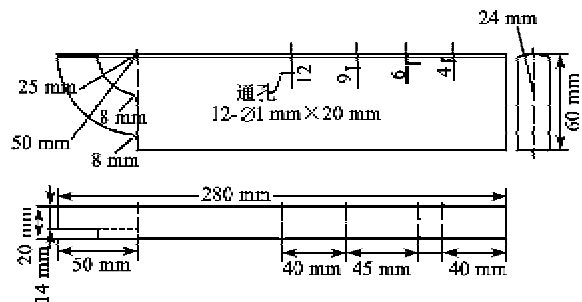


图8 标准试块结构图

对比试块规格为 $\phi 48$ mm $\times$ 5.2 mm,加工的人工缺陷为:两个距管壁外表面深1 mm,宽0.4 mm,长6 mm;深1.4 mm,宽0.4 mm,长6 mm的焊缝外表面中心线刻槽,两个距管壁内表面深1 mm,宽0.4 mm,长6 mm;深1.4 mm,宽0.4 mm,长6 mm的焊缝内表面中心线刻槽,如图9所示。

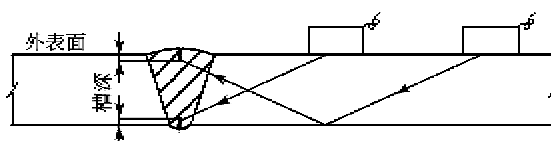


图9 对比试块结构图

3.2 测试结果

选用与试块弧度相同的 SH 波探头对 2 组试块进行测试,结果如表 1、2 所示。

表 1 $\varnothing 48$ mm 弧顶标准试块横通孔测试

人工缺陷量值		人工缺陷实测值		信噪比/ dB
横通孔 规格/mm	深度/ mm	dB 值 (80%波高)	深度/ mm	
$\varnothing 1 \times 20$	4	46.4	3.8	23
$\varnothing 1 \times 20$	6	50.3	6.1	22
$\varnothing 1 \times 20$	9	54.8	8.9	20
$\varnothing 1 \times 20$	12	59.9	11.8	21

表 2 $\varnothing 48$ mm $\times$ 5.2 mm 人工缺陷模拟试块测试

人工缺陷量值		人工缺陷实测值		信噪比/ dB
刻槽部位	深度/ mm	dB 值 (80%波高)	深度/ mm	
内表面中心刻槽	1	55.0	4.1	19.2
外表面中心刻槽	1	60.5	9.6	18.0
内表面中心刻槽	1.4	52.2	3.9	21.0
外表面中心刻槽	1.4	57.6	8.8	18.4

3.3 数据分析

实验数据表明,SH 波斜探头能发现标准试块中 $\varnothing 1$ mm 横通孔人工缺陷,对于横通孔波高测试信噪比达 20 dB,且有足够灵敏度余量。对于小口径奥氏体不锈钢管对接焊缝对比试块的表面缺陷检测有足够的灵敏度和信噪比,外表面 1 mm 深刻槽的波高比 1.4 mm 的波高低约 3 dB;对根部裂纹或未焊透类缺陷也有足够的灵敏度和信噪比,内表面 1 mm 深刻槽的波高比 1.4 mm 的波高低约 3 dB,对于该类缺陷的信噪比都在 18 dB 以上。

4 结论

1) 采用切割-填充法制作的 2-2 压电复合晶片质量较好,且基于该晶片制作的 SH 波探头具有高灵敏度、窄脉冲特性,可用于奥氏体不锈钢焊缝的检测。

2) 水平偏振横波(SH 波)探头可实现对 $\varnothing 48$ mm $\times$ 5.2 mm 规格的小口径奥氏体不锈钢管焊缝中 1 mm 当量缺陷的检测,检测灵敏度及精度较高。

3) 在检测过程中,耦合剂的选取对于 SH 波探测影响较大,所用的横波耦合剂价格昂贵,且易水解

失去耦合效果,不便于实际现场操作,需要在以后工作中继续改进。

参考文献:

- [1] 李衍. SH 波斜探头的特性及其应用[J]. 无损检测, 2004, 26(12): 622-644.
LI Yan. Performance and application of SH wave angle transducer[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(12): 622-644.
- [2] 李衍,冯兆国. 不锈钢焊缝的超声检测——现状与进展[J]. 无损探伤, 2005, 29(3): 1-6.
LI Yan, FENG Zhaoguo. Ultrasonic testing of stainless steel weld——status and progress [J]. Nondestructive Inspection, 2005, 29(3): 1-6.
- [3] 严晓东. 支柱瓷绝缘子的超声波探伤检测方法和换能器: 中国, 200510030426. 2[P]. 2007-10-15
- [4] 魏建新,王椿镛. 横波测试技术的实验室研究[J]. 石油地球物理勘探. 2003, 38(6): 630-635.
WEI Jianxin, WANG Chunyong. Laboratory study of transverse wave testing technique[J]. Oil Geophysical Prospecting. 2003, 38(6): 630-635.
- [5] 卢威,聂勇,许远欢,等. 宽频带窄脉冲 TRL 探头在奥氏体不锈钢焊缝超声检测中的优越性[J]. 无损检测, 2010, 35(6): 77-80.
LU Wei, NIE Yong, XU Yuanhuan, et al. The advantage of using broad bandwidth and narrow pulse TRL probe for ultrasonic inspection of austenitic stainless steel welds[J]. Nondestructive Testing, 2010, 35(6): 77-80.
- [6] SAFARI A, ALLAHVERDI M, AKDOGAN E K. Solid free form fabrication of piezoelectric sensors and actuators[J]. J Mater Sci, 2006, 41: 177.
- [7] HAYWARD G, HYSLOP J. Determination of lamb wave dispersion data in anisotropic plates using time domain finite element analysis. part II: application to 2-2 and 1-3 piezoelectric composite transducer arrays [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 2(53): 449-455.
- [8] 严继康,甘国有,孙加林,等. 串联 2-2 型压电复合材料的进一步研究[J]. 压电与声光, 2000, 4(22): 262-265.
YAN Jikang, GAN Guoyou, SUN Jialin, et al. Further study on 2-2 piezoelectric composites with series model[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000, 4(22): 262-265.