◇ 研究报告 ◇

斜入射SH波厚壁管道内壁裂纹检测方法*

赵亮张金†董子华王鑫王学彬

(陆军炮兵防空兵学院 合肥 230031)

摘要:厚壁管道常被用于军事装备及其他流程工业中,长期使用后内壁会产生较多微裂纹,成为影响构件安全运行的重大隐患。为此,该文针对厚壁管道内壁裂纹难以检测的问题,提出基于斜入射 SH 波的厚壁管道检测方法,对厚壁管道内壁不同深度的裂纹进行检测。首先对斜入射 SH 波的激励原理进行分析,建立声场模型优选激励频率,研究斜入射 SH 波与厚壁管道内壁裂纹径向深度的作用规律,并通过实验对仿真结果进行验证。研究结果表明,斜入射 SH 波对该型管道最佳检测频率为1 MHz;随着裂纹径向深度增加,缺陷回波幅值呈现曲折型上升;斜入射 SH 波可对厚壁管道内壁轴向长 8 mm、径向深 1 mm 和周向宽 1 mm 的微裂纹进行有效检测,验证了斜入射 SH 波厚壁管道内壁裂纹检测方法的科学性和可行性。 关键词:厚壁管道;裂纹检测;斜入射 SH 波;频率优选 中图法分类号:TG115.28 文献标识码:A 文章编号: 1000-310X(2020)05-0747-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.05.013

The detection method of cracks on the inner wall of thick wall pipes with inclined beams of SH waves

ZHAO Liang ZHANG Jin DONG Zihua WANG Xin WANG Xuebin

(Army Artillery Air Defense Academy, Heifei 230031, China)

Abstract: Thick-walled pipes are often used in military equipment and other process industries. After longterm use, the inner wall will produce more cracks, which will become a major hidden danger affecting the safe operation of components. For this reason, this paper proposes a thick-walled pipeline detection method based on inclined beams of SH waves for the problem that the cracks on the inner wall of thick-walled pipelines are difficult to detect, and detects cracks at different depths on the inner wall of thick-walled pipelines. In this paper, the excitation principle of inclined beams of SH waves is analyzed firstly, the excitation frequency of sound field model is established, and the action law of inclined beams of SH waves and radial depth of thick wall inner wall crack is studied. The simulation results are verified by experiments. The results show that the optimal detection frequency of the inclined beams of SH waves is 1 MHz. With the increase of the radial depth of the crack, the amplitude of the defect waves increases in a zigzag pattern. The inclined beams of SH waves can effectively detect micro-cracks with an axial length of 8 mm, a radial depth of 1 mm and a circumferential width of 1 mm in thick-walled pipelines.

Keywords: Thick-walled pipe; Crack detection; Inclined beams of SH waves; Frequency optimization

†通信作者 E-mail: jgxyzhangjin@163.com

²⁰¹⁹⁻¹¹⁻¹³ 收稿; 2020-03-31 定稿

^{*}装备预研基金项目 (914A17050312JB91202)

作者简介:赵亮 (1995-),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向:装备测试计量与维修。

0 引言

厚壁管道指管道外径和壁厚之比小于20的管 道,常被用于武器装备、化工液体运输和高压气体 输送等,在加工和服役的过程中,受各种复杂的交 变应力、循环应力的影响,内表面会不可避免地产 生各种裂纹。如果不能及时有效地对裂纹进行检 测,裂纹会逐渐扩展加深、增长形成网状裂纹,进而 影响整个武器装备或化工流程的稳定性和安全性, 甚至可能导致灾难性的突发后果,造成巨大的经济 损失^[1-2]。

SH波是超声波剪切波的一种形式,质点振动 方向与试样表层平行,并与传播方向垂直,因此SH 波不易转换成SV波或纵向模态导波^[3],在遇到界 面不连续或边界处损失能量较少,信号分析较为容 易,更适合用于缺陷检测。SH波难以用传统的压 电超声方式进行激励,目前主要是通过周期性永磁 体阵列(Permanent periodic magnet, PPM)的电磁 超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer EMAT)进行激励^[4]。通过改变EMAT探头激励频 率可将SH导波变为具有一定方向性的斜入射SH 波^[5-7]。相比SV波和纵向模态导波,斜入射SH波 具有较强的穿透性,常被用于焊缝检测^[8-9]、管道 检测^[4-5]、缺陷板检测^[10-11]、试样测厚^[12]等。

由于斜入射SH波的检测效果与激励方式密 切相关,因此近些年大部分学者主要对斜入射 SH波的激励方式进行了深入研究。2016年,Isla 等^[13-14]改进了斜入射SH波电磁超声探头的激励 编码算法,使其在低功率下也有较好的损伤分辨 率。2017年,Isla等^[15]采用编码激励斜入射SH波 8端电磁超声相控阵探头,并减少了不同跑道线圈 之间的涡流干扰,对铝板底部的预制裂纹进行了 有效检测。

然而,大部分学者利用斜入射SH波检测管道 或板的缺陷往往是焊缝或较大尺寸的裂纹,对管道 内壁较小尺寸的裂纹检测及裂纹径向深度与回波 信号的作用规律并没有相关研究。本文在分析斜 入射SH波激励原理的基础上,在COMSOL Multiphysics仿真软件中对厚壁管道进行参数化建模,探 究斜入射SH波与裂纹径向深度的作用规律,并通 过实验验证斜入射SH波厚壁管道内壁裂纹检测方 法的可行性和科学性。

1 EMAT 探头换能机理

EMAT 换能器由提供偏置磁场的永磁铁和跑 道线圈组成,其中永磁铁的极性呈周期性交替排列。 在跑道线圈中通入高频电流,将会在被测试样表面 感生出频率相同、方向相反的电感应涡流,在偏置 磁场的作用下会在试样表面产生洛伦兹力,试样产 生周期性的振动,这种振动在试样内以波的形式传 播,便实现了EMAT 斜入射 SH 波的激励过程,如 图1所示。



图 1 洛伦兹力斜入射 SH 波工作机理

Fig. 1 Lorentz force inclined beams of SH waves working mechanism

在试样表面,感应电涡流 J_x 在永磁场 B_z 作用 下所引起的洛伦兹力为

$$F = J_x \times B_z. \tag{1}$$

当两个相同极性产生的声波互相干涉且满足一定 条件时会形成斜入射SH波,波长等于2倍相邻永磁 体中心间距*d*,且激励形成的斜入射SH波会沿着某 一方向传播,入射角度与法线夹角θ与相邻永磁体 中心间距*d*和激励频率*f* 有关,满足^[13]

$$\sin\theta = \frac{v}{2df},\tag{2}$$

式(2)中,v为超声波在试样中传播波速。如果相邻 永磁体中心间距d固定,则入射角只与激励频率f 有关。

2 斜入射SH波检测厚壁管道内壁裂纹

2.1 斜入射 SH 波激励频率优选

斜入射SH波的检测效果与激励频率密切相关, 因此需要对斜入射SH波的声场特性进行分析,选 择合适的激励频率。在COMSOL Multiphysics软 件中建立半径100 mm、高10 mm的半圆柱体固体 力学频域模型,为了模拟斜入射SH波在厚壁管道 中的传播,在其圆心建立长40 mm的弧面区域,曲 率与外径205 mm厚壁管道相同,在弧面上与永磁 体尺寸相同区域交替加载大小相同、方向相反的载 荷,一方面可以模拟EMAT探头在激励斜入射SH 波时产生的交替作用的洛伦兹力,另一方面可以降 低仿真模型的运算量。永磁体宽度为3 mm,长度为 8 mm,相邻永磁体中心间距d取3.2 mm,仿真模型 力学参数如表1所示,仿真模型如图2所示。

表1 模型相关参数

Table 1 Model related parameters

参数	数值
试样杨氏模量/GPa	200
试样泊松比	0.241
试样密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	7932
剪切波波速 $/(m \cdot s^{-1})$	3260



图 2 仿真模型 Fig. 2 Simulation model

在斜入射 SH 波激励有限元模型中,试样中形成的斜入射 SH 波幅值受计算时间步长和网格尺寸的影响,当计算时间步长不大于 $1/(100 \times f)$ 、最大网格大小不大于 $\lambda/10$ 时,有限元结果收敛,仿真结果准确可靠^[16]。因此计算时间步长取 0.1 μ s,最大网格取 0.6 mm,得到声压分布如图 3 所示。

对较大半圆弧面进行积分得到径向位移极值 如图4所示。由图4可知,随着激励频率增加,斜入 射SH波主瓣束向性变好,径向位移极值增加,并在 频率为1 MHz时达到极值。但随着频率继续增加, 主瓣径向位移逐渐减小,旁瓣能量随之增加,对主 瓣能量进行干扰,影响检测效果。因此,斜入射SH 波的检测频率取1 MHz较为合适,此时主瓣能量最 高,束向性较好,旁瓣能量适中,适宜对厚壁管道进 行检测。



图3 激励频率为1 MHz 时声压分布

Fig. 3 Sound pressure distribution at excitation frequency of 1 MHz







2.2 斜入射 SH 波检测厚壁管道内壁裂纹

在 COMSOL Multiphysics 软件中建立内径 155 mm、外径205 mm的厚壁管道固体力学时 域模型,管道力学参数与表1相同,在管道内壁预 制长8 mm、周向宽1 mm的轴向裂纹,径向深度由 0.01 mm增加到3 mm,网格划分和计算时间步长与 声场模型相同,如图5 所示,声场快照如图6 所示。







在管道内壁预制10组轴向长度为8 mm、周向 宽度为0.01 mm的轴向裂纹,径向深度由0.01 mm 增加到3 mm。在EMAT激励端提取径向位移得到 裂纹径向深度与径向位移的变化规律如图7所示。 从图7中可以看出,随着裂纹径向深度增加,径向位 移呈现曲折型上升。





一般情况下认为随着裂纹径向深度增加,反射 面积增加,缺陷回波幅值应增加。然而,由于裂纹 尖端衍射波与缺陷反射回波相互叠加导致超声波 幅值出现"多峰"现象。当裂纹径向深度为1 mm、 2 mm、3 mm,分别取到达裂纹径向顶端和裂纹径向 底端的超声波幅值进行对比,仿真云图如图8所示, 在裂纹上下端面提取回波信号如图9所示。

由图9可知,随着裂纹径向长度增加,裂纹底端 反射波幅值增加,相位不变,而裂纹顶端衍射波幅值 先增加后降低,且相位发生变化,裂纹上下端面的波 峰时间差逐渐增加。这是由于斜入射SH波在检测 裂纹时,首先遇到裂纹顶端,产生裂纹顶端衍射波 后,再遇到裂纹底端,产生裂纹底端反射波,而激励 端接收到的裂纹回波信号是由裂纹顶端衍射波和 裂纹底端反射波叠加形成的,因此当裂纹径向深度 增加时,裂纹底端反射波由于反射面增大,回波信号





增强,传播距离和相位不变;裂纹顶端衍射波由于传播距离减小且入射到裂纹顶端的能量逐渐减小,顶端衍射波能量与相位不停改变,使回波幅值随着径向深度增加而起伏变化。

3 实验验证

3.1 实验方案

实验采用相同EMAT探头激励/接收斜入射 SH波,在缺陷一侧放置激励端探头,在同一侧 放置接收端探头,探头沿圆弧外表面中心间距为 83 mm,EMAT采用12对双排周期性永磁体,尺寸 为20 mm×3 mm×2 mm,相邻永磁体中心间距为 3.2 mm,跑道线圈有效换能区域为40 mm×40 mm, 探头内部结构如图10(a)所示。被测试样为内径 155 mm、外径205 mm、长1 m的45[#]钢厚壁钢管, 在管道内壁预制3组长方形刻槽轴向裂纹,尺寸分 别为8 mm×1 mm×1 mm、8 mm×1 mm×2 mm、 8 mm×1 mm×4 mm。

实验采用 Agilent 33220A 信号发生器产生激励 1.0 MHz 的正弦脉冲串,经功率放大器放大,通过阻抗匹配将激励电压加载到 EMAT 探头上,再由接收端 EMAT 探头接收到感生电压,经过滤波处理后,由数据采集卡完成模数转换后将数据送入数据采集显示处理终端,从而完成数据采集、波形显示和数据存储,实验装置如图 10(b)所示,实验原理如图 10(c)所示。

3.2 实验结果分析

实验得到回波信号如图11所示,缺陷波经过3 次反射被接收端探头接收到,通过几何关系计算得 到缺陷波包理论出现时间为58.84 μs处,因此第3 个波包为缺陷波包。提取不同深度裂纹的缺陷波包 的幅值如图12所示。

随着裂纹径向深度增加,回波幅值也随之增加, 如图 12 中红线所示。随着裂纹径向深度增加,裂纹 反射面增加,相同激励频率下,回波幅值逐渐增加, 但由于斜入射 SH 波到达缺陷上下端面会存在时间 差,所以当裂纹长度达到某一值时,裂纹上下端面反 射回波相位相消,因此回波幅值出现曲折型上升,与 仿真模型中曲线变化一致,验证了斜入射 SH 波检 测厚壁管道内壁微裂纹方法的可行性。



(a) EMAT探头内部结构



(b) 实验装置















Fig. 12 Amplitude of wave with different depth of crack

4 结论

本文以厚壁管道为研究对象,建立了斜入射SH 波检测有限元模型,在管道中激励出斜入射SH波, 并对管道内壁不同径向深度的轴向裂纹进行检测, 并通过实验验证了仿真结果的正确性,得到主要结 论如下:

(1)通过扫频实验对斜入射SH波的激励频率 进行了频率优选,当入射频率为1MHz时,此时激励信号束向性最好,旁瓣宽度和旁瓣能量也符合要求,适宜检测微裂纹。

(2)用斜入射SH波分别对厚壁管道不同深度的轴向裂纹进行检测,研究发现,由于裂纹尖端衍射波和裂纹反射回波相位不同,相互叠加导致超声波幅值出现"多峰"现象,当裂纹径向深度增加时,斜入射SH波回波幅值呈现曲折型增加。

(3)本文根据SH波检测原理,设计并搭建斜入 射SH波和表面SH波实验检测环境,开展了厚壁管 道内壁轴向裂纹检测实验研究。实验结果表明,斜 入射SH波的检测方法可以用于厚壁管道内壁轴向 裂纹,并且最小可检测出8 mm×1 mm×1 mm的轴 向裂纹,实验结论与仿真结论一致,验证了斜入射 SH波检测厚壁管道内壁微裂纹方法的可行性与科 学性。

参考文献

 Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528–533.

- [2] Forman R G, Kearney V E, Engle R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures[J]. Journal of Basic Engineering, 1967, 89(3): 459–463.
- [3] Rose J L. Ultrasonic guided waves in solid media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Hirao M, Ogi H. An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection[J]. Nondestructive Testing and evaluation International, 1999, 32(3): 127–132.
- [5] Ohtsuka Y, Higashi M, Nishikawa M. Fundamental experiment for inspection of cooling pipes in operation by using ultrasonic technique[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81(8–14): 1583–1587.
- [6] Moran T J, Panos R M. Electromagnetic generation of electronically steered ultrasonic bulk waves[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(5): 2225–2227.
- [7] Gao H, Lopez B. Development of single-channel and phased array electromagnetic acoustic transducers for austenitic weld testing[J]. Materials Evaluation, 2010, 68(7): 821–827.
- [8] Ogilvy J A. Ultrasonic beam profiles and beam propagation in an austenitic weld using a theoretical ray tracing model[J]. Ultrasonics, 1986, 24(6): 337–347.
- [9] Fortunko C M, Moulder J C. Ultrasonic inspection of stainless steel butt welds using horizontally polarized shear waves[J]. Ultrasonics, 1982, 20(3): 113–117.
- [10] Demma A, Cawley P, Lowe M. Scattering of the fundamental shear horizontal mode from steps and notches in plates[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(4 Pt 1): 1880–1891.
- [11] Rajagopal P, Lowe M J S. Scattering of the fundamental shear horizontal guided wave by a part-thickness crack in an isotropic plate[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(5): 2895–2904.
- [12] Nurmalia, Nakamura N, Ogi H, et al. Mode conversion behavior of SH guided wave in a tapered plate[J]. NDT & E International, 2012, 45(1): 156–161.
- [13] Isla J, Cegla F. Coded excitation for low SNR pulse-echo systems: enabling quasi-real-time low-power EMATs[C]//2016 Institute of Electrical and Electronics Engineers International Ultrasonics Symposium (IUS). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016: 1–4.
- [14] Isla J, Cegla F. Coded excitation for pulse-echo systems[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 64(4): 736–748.
- [15] Isla J, Cegla F. EMAT phased array: a feasibility study of surface crack detection[J]. Ultrasonics, 2017, 78: 1–9.
- [16] 石文泽, 吴运新, 龚海, 等. 非铁磁性金属材料螺旋线圈电磁 超声换能器接收效率场路耦合分析 [J]. 中南大学学报 (自然科 学版), 2017, 48(12): 3200–3208.

Shi Wenze, Wu Yunxin, Gong Hai, et al. Circuit-field coupled analysis of receiving efficiency of spiral coil electromagnetic acoustic transducer in non-ferromagnetic metal material[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3200–3208.