

超声应力换能器指向性校准方法研究

牛淼^{1,2,3,4}, 吴德林^{2,3,4}, 姚磊^{2,3,4}, 郑慧峰¹, 高申平^{2,3,4}, 俞醒言^{2,3,4}

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018;

3. 国家市场监管重点实验室(声学振动精密测量技术), 浙江 杭州 310018;

4. 浙江省声学振动精密测量技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 超声应力换能器指向性对超声应力检测精度具有重要影响。该文提出了半圆柱试块法, 被校准换能器向半圆柱试块内部辐射声波, 接收换能器在试块圆柱面各角度接收到信号, 分析得到被校准换能器的指向性。利用半圆柱试块法校准得到纵波换能器指向性, 其-3 dB波束宽度为 5.01° , 这与水听器法测量值、理论值相对偏差分别为3.09%、2.66%。利用半圆柱试块法校准得到临界折射纵波换能器指向性, 其-3 dB波束宽度为 10.55° , 这与仿真值相对偏差为2.23%。半圆柱试块法更符合超声应力的实际使用工况, 不受换能器水密性、换能器工作原理等限制, 适用于任意型号超声应力换能器, 且校准更高效、快捷。

关键词: 超声应力; 换能器; 指向性; 纵波; 临界折射纵波

中图分类号: TB552; TN384 **文献标志码:** A

Study on Calibration of Directivity of Ultrasonic Stress Transducer

NIU Miao^{1,2,3,4}, WU Delin^{2,3,4}, YAO Lei^{2,3,4}, ZHENG Huifeng¹, GAO Shenping^{2,3,4}, YU Xingyan^{2,3,4}

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China;

3. Key Laboratory of Acoustics and Vibration Precision Measuring Technology for State Market Regulation, Hangzhou 310018, China;

4. Key Laboratory of Acoustics and Vibration Precision Measuring Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The directivity of ultrasonic stress transducer has an important influence on the accuracy of ultrasonic stress detection. In this paper, the semi-cylindrical block method is proposed. The transducer to be calibrated radiates sound waves to the interior of the semi-cylindrical block, and the receiving transducer receives the signals at various angles on the cylindrical surface of the block, and the directivity of the calibrated transducer is obtained by analysis. The directivity of the longitudinal wave transducer is calibrated by the semi-cylindrical block method, and its -3 dB beam width is 5.01° , the relative deviations from the measured value and theoretical value of the hydrophone method are 3.09% and 2.66%, respectively. The directivity of the critical refracted longitudinal wave transducer is obtained by the semi-cylindrical block method, and its -3 dB beam width is 10.55° and the relative deviation from the simulated value is 2.23%. The semi-cylindrical block method is more in line with the actual working conditions of ultrasonic stress, and is not limited by the water tightness of the transducer and the operating principle of the transducer. It is suitable for any type of ultrasonic stress transducer, and the calibration is more efficient and fast.

Key words: ultrasonic stress; transducer; directivity; longitudinal wave; critical refracted longitudinal wave

0 引言

近年来, 超声应力广泛应用于栓体、燃气管道、高压容器焊缝等被测件的应力检测。超声应力采用纵波与临界折射纵波进行应力检测, 是最便捷、准确、经济的方法, 亦是目前各国研究的热点和今后超

声应力检测的主要发展方向^[1-3]。通过超声对应力的敏感度分析表明, 沿应力方向的纵波与临界折射纵波敏感度较高, 应力的检测精度最高^[4]。但实际检测时, 超声波与应力在方向上存在一定的夹角, 影响应力的测量结果。因此, 换能器指向性校准方法

收稿日期: 2022-04-28

基金项目: 浙江省基础公益计划项目(LGF22A040005); 浙江省科技计划项目(2022C01002); 浙江省市场监督管理局雏鹰计划培育项目(CY2022216, CY2022001); 浙江省市场监督管理局科研计划项目(20210105)

作者简介: 牛淼(1996-), 男, 安徽省合肥市人, 硕士生, 主要从事超声计量的研究。通信作者: 姚磊(1980-), 男, 山东省济宁市人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事医疗超声和工业超声检测方法与技术的研究。

的研究对超声应力检测具有重要意义。

换能器指向性的理论分析是校准方法研究的重要组成部分。张明等计算出 5 种典型活塞声源辐射声场的远场声压分布和指向性函数^[5]。超声换能器声束指向性的校准,常在水介质中进行测量。采用水听器法进行声场特性的校准,利用扫描定位装置带动水听器对若干平面进行扫描,得到的一 3 dB 声束扩散角是描述声场指向性的重要参数^[6]。将被校准换能器固定在旋转轴上并置于水中,在一定距离处放置标准水听器,通过旋转待测换能器来记录信号绘制指向性图^[7]。在水中校准超声换能器指向性的方法较成熟,但有些超声应力换能器因水密性而不能置于水中,另外某些基于电磁超声转换原理的超声应力换能器无法往水中辐射声波,在水中的测量方法不适用于此类超声应力换能器指向性的校准。因此,许多学者选择超声探伤仪标准试块进行临界折射纵波声束指向性的实验测量,实验结果与理论结果保持一致^[8-9]。标准试块法利用其相对平面对纵波声束扩散角进行测量,但各角度下接收换能器与被校准换能器的距离不同,以此表征换能器的指向性会带来较大的误差。

本文提出采用半圆柱试块法,被校准换能器向半圆柱试块内部进行声波辐射,在同一水平面下接收换能器在圆柱面围绕被校准换能器进行各角度等距离接收信号,进而分析被校准换能器的指向特性。相比水中测量方法,该方法更符合超声应力检测的实际使用工况,适用于任意型号的超声应力换能器指向性校准,方便快捷且适用于现场。

1 半圆柱试块法

半圆柱试块法可以测量纵波与临界折射纵波声场指向性,如图 1 所示。测量纵波指向性时,被校准换能器向半圆柱试块内部进行声波辐射,在同一水平面下接收换能器在圆柱面围绕被校准换能器进行各角度等距离接收信号,进而分析被校准换能器的指向特性。在此基础上测量临界折射纵波的指向性,需要将校准换能器更换为临界折射纵波换能器,临界折射纵波入射点对准试块圆心,接收换能器在圆柱面端点处开始各角度等距离下接收信号。临界折射纵波换能器由纵波换能器与声楔块螺纹配合组成,入射纵波以第一临界角为入射角,在试块圆心处产生临界折射纵波。

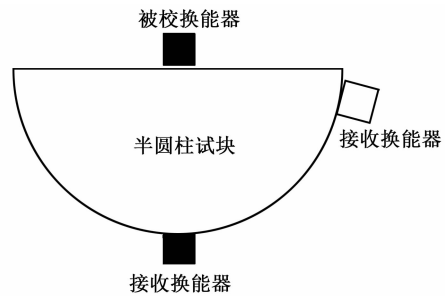


图 1 半圆柱试块法示意图

2 纵波指向性

为了对纵波进行指向性测量,通过半圆柱试块法设计了如图 2 所示的实验系统。试块为半圆柱体,表面光滑,在其上面贴合半圆刻度盘,便于精准角度调整。被校准换能器放在试块平面中心保持不变,接收换能器与被校准换能器中心对准后,接收换能器在半圆柱面同一水平面围绕被校准换能器各个方向接收信号。被校准换能器和接收换能器表面均涂有耦合剂。在激励源选择上,为了避免试块边缘的反射波对接收信号产生影响,且保证接收信号的稳定,故采用脉冲波。由信号发生器生成 10 个周期幅值为 10 V、频率 5 MHz 正弦脉冲信号激励被校准换能器。采用泰克数字示波器测量接收信号,得到的换能器纵波指向性如图 3 所示。

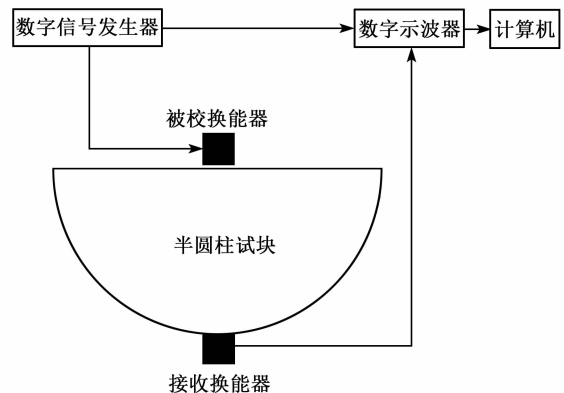


图 2 纵波指向性实验系统示意图

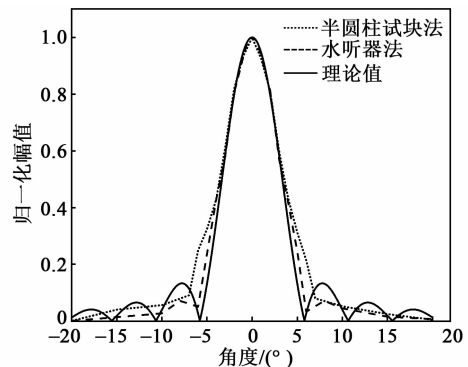


图 3 半圆柱试块法、水听器法与理论值

为了验证半圆柱试块法的可行性,利用水听器法对换能器的指向性进行测量。以被校准换能器的正对方向为中心,水听器绕被校准换能器各个方位转动扫描^[6]。纵波活塞式换能器的指向性由贝塞尔函数得出:

$$D(\theta) = \left| \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right| \quad (1)$$

式中: k 为超声波波数; a 为活塞半径; θ 为位置矢量与换能器声轴的夹角。

由图3可知,实验所用纵波换能器的声场靠近中心轴线的周围区域,能量幅值较高,其余区域能量幅值较低,在中心轴线的两侧声场基本呈现对称分布的特点,且具有明显的指向性分布。纵波换能器的声场主要集中于中心轴线两侧 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 区域。

通过半圆柱试块法、水听器法与理论计算得到 -3 dB的波束宽度,即主声束两侧下降到主极大值 0.707 处的夹角。利用半圆柱试块法校准得到纵波换能器指向性,其 -3 dB波束宽度为 5.01° ,与水听器法测量值、理论值相对偏差分别为 3.09% 、 2.66% 。实验值与计算仿真的结论一致,这说明了半圆柱试块法的可行性,同时验证了换能器指向性在声场中分布的理论。

3 临界折射纵波指向性

3.1 声场仿真

低频的声波信息传输常采用固体力学中的边界载荷,但是超声波频率高,波长短,继续使用结构力学分析,则计算量大,且难以收敛。因此,采用弹性波时域显式物理场模拟波在线弹性介质中的传播。构造的临界折射纵波仿真模型如图4所示,其中声楔块材质为有机玻璃,半圆柱试块材料为钢。通过计算得到第一临界角为 28° 。

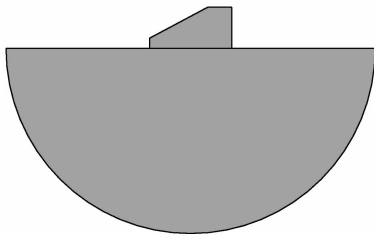


图4 临界折射纵波仿真模型

换能器的中心频率为 2.5 MHz时,激励波形的周期数目需要考虑两方面:一是接收的波形达到稳

态;二是试块的边界反射不会对接收的直达波形产生影响。

通过有限元软件对临界折射纵波传播特性进行仿真,得到临界折射纵波在不同时刻的快照图,如图5所示。 $3.5 \mu\text{s}$ 时,超声波在有机玻璃声楔块与半圆柱试块表面发生折射,产生了临界折射纵波与反射横波,在半圆柱试块中圆弧形波纹就是其波阵面。因为临界折射纵波的速度最快,在一定深度下近似平行沿着试块平面进行传播,所以在 $10.5 \mu\text{s}$ 时第一个到达圆柱面。试块内部还有头波、反射横波与表面波,其中近似斜线的波纹是头波。

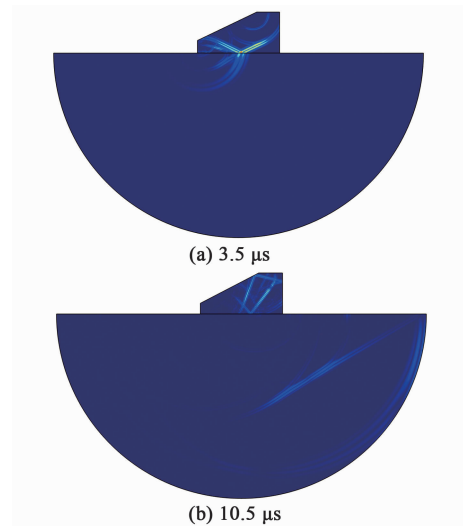


图5 临界折射纵波声场快照图

3.2 实验测量

为了测量临界折射纵波的指向性,在纵波指向性实验系统的基础上,被校准换能器更换为 2.5 MHz的临界折射纵波换能器,入射角为 28° 。接收换能器从圆柱面端点处开始各角度测量。实验中,横波向试块内部进行传播,通过计算得出横波折射角为 34° ,故选取 $0^\circ \sim 30^\circ$ 进行测量,排除横波的干扰。采取适合的耦合剂进行涂抹,使接收信号较稳定。

通过计算得出临界折射纵波指向性的仿真值与实验值,如图6所示。声场基本呈现轴对称分布,仿真值的主瓣指向角为 16° ,实验值的主瓣指向角为 15° ,两者较一致,符合相关研究($10^\circ \sim 20^\circ$)的结论^[10]。利用半圆柱试块法校准得到临界折射纵波换能器指向性,其 -3 dB波束宽度为 10.55° ,与仿真值相对偏差为 2.23% 。

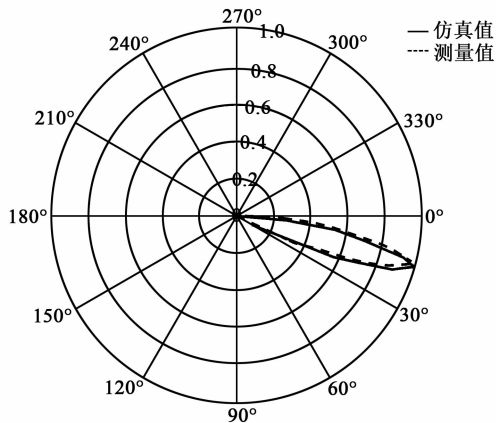


图6 临界折射纵波指向性的仿真值与实验值

4 结论

1) 半圆柱试块法校准得到纵波换能器指向性, 其一3 dB波束宽度为 5.01° , 与水听器法测量值和理论值相对偏差分别为 3.09% 、 2.66% 。实验值与计算仿真的结论保持一致, 说明了半圆柱试块法的可行性, 同时验证了换能器指向性在声场中分布的理论。

2) 利用有限元软件仿真临界折射纵波的传播特性, 仿真值的主瓣指向角为 16° , 实验值的主瓣指向角为 15° , 两者较一致。利用半圆柱试块法校准得到临界折射纵波换能器指向性, 其一3 dB波束宽度为 10.55° , 与仿真值相对偏差为 2.23% 。临界折射纵波的指向性为超声应力检测的渗透深度提供了依据。

3) 与水中测量方法相比, 半圆柱试块法更符合超声应力检测的实际使用工况, 不受换能器水密性、换能器工作原理等限制, 可适用于任意型号的超声应力换能器, 且校准更为方便快捷。

参考文献:

- [1] 徐春广, 宋文涛, 潘勤学, 等. 残余应力的超声检测方法[J]. 无损检测, 2014, 36(7): 25-31.
XU Chunguang, SONG Wentao, PAN Qinxue, et al. Ultrasonic testing method for residual stress[J]. Non-destructive Testing, 2014, 36(7): 25-31.
- [2] 何星亮, 陈平, 刘华强. 基于超声模式转换的螺栓轴向应力测量方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21): 201-206.
HE Xingliang, CHEN Ping, LIU Huaqiang. Bolt axial stress measurement method based on ultrasonic mode

conversion[J]. Vibration and Shock, 2021, 40(21): 201-206.

- [3] 刘海波, 刘天然, 李亚鹏, 等. 金属材料表面残余应力超声测量方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 118-125.
LIU Haibo, LIU Tianran, LI Yapeng, et al. Ultrasonic measurement method of residual stress on the surface of metal materials[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 118-125.
- [4] 宋文涛. 残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [5] 张明, 宋蕊, 江雨春, 等. 典型活塞换能器声场分布及其指向性[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(5): 412-421.
ZHANG Ming, SONG Rui, JIANG Yuchun, et al. Investigation on sound distribution and directivity of typical piston transducer[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 15(5): 412-421.
- [6] 韩冥生, 杨平. 脉冲回波法与水听器法测量超声探头声场参数比较研究[J]. 计量学报, 2015, 36(2): 166-170.
HAN Mingsheng, YANG Ping. Experimental research of push-echo and hydrophone methods for measurement of sound field of ultrasonic transducers [J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(2): 166-170.
- [7] 盛勇杰, 王月兵, 佟昊阳, 等. 开阔水域下换能器指向性实船校准方法研究[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 581-586.
SHENG Yongjie, WANG Yuebing, TONG Haoyang, et al. Research on ship-board calibration method for transducer directivity in open water [J]. Acoustics Technology, 2021, 40(4): 581-586.
- [8] 廉德良, 魏天阳. 超声爬波探头声场指向特性的试验研究[J]. 无损检测, 2005(9): 479-481.
LIAN Deliang, WEI Tianyang. Study on the spread angle of the sound field of ultrasonic creeping wave probe [J]. Nondestructive Testing, 2005(9): 479-481.
- [9] 卢超, 黎连修, 涂占宽. 临界折射纵波探头声束特性的边界元分析与测量[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2570-2575.
LU Chao, LI Lianxiu, TU Zhankuan. Boundary element analysis and measurement of acoustic beam characteristics of critically refracted longitudinal wave probes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2570-2575.
- [10] 徐春广, 李卫彬. 无损检测超声波理论[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 322-323.