

小口径管扭转模态导波在线检测

马书义,武湛君,王奕首,刘科海

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:采用扭转模态导波 $T(0,1)$ 开展了小口径管在线检测研究。考虑管线服役环境及其结构特征,研制了一种适用于小口径管在线检测的新型传感器阵列。传感器采用剪切型压陶瓷晶片作为敏感元件,具有柔性、轻质的特点。实验表明,环向布置的传感器阵列能够在管线中高效激励 $T(0,1)$ 模态导波;通过提取回波信号中的各模态导波信息,实验系统能有效辨识管线中缺陷的状态变化;对于含有支撑结构的小口径管,比较并分析管线中导波散射信号及特征结构处回波信号的变化有助于辨识支撑结构附近区域损伤的产生及扩展。

关键词:小口径管;扭转模态导波;在线监测

中图分类号:O348.8

文献标识码:A

On-line Inspection of Small Diameter Tubes Using Torsional Guided Waves

MA Shuyi, WU Zhanjun, WANG Yishou, LIU Kehai

(State Key Lab. of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The on-line inspection of small diameter tubes is studied by using torsional guided wave $T(0,1)$. Considering the service environment of tubes and their structural characteristics, a novel transducer array applicable to on-line inspection of tubes is developed. The transducer employs shear piezoelectric ceramic as the sensitive element, and has the characteristics of flexible and lightweight. Experimental results show that a ring of transducers can efficiently excite the $T(0,1)$ mode guided wave in tubes. By extracting each of guided wave modes information in echo signals, the experimental system can effectively identify the state of the defects in tubes. For the tubes that contain support structure, comparing and analyzing the changes of scattered signal and echo signal from characteristic structure in tubes is contributed to identify the generation and extension of defects near the support region.

Key words: small diameter tubes; torsional guided waves; on-line inspection

0 引言

小口径管在航空、核能等领域有广泛的应用,具有数量多,密度大,交叉分布的特点。内部输送介质对管壁的腐蚀是小口径管线的主要失效模式。随着管线服役时间的增加,腐蚀缺陷将会进一步扩展而使管线丧失承载能力。因此,实时检测管线状态变化对于指导管线维护、保证管线安全运行至关重要。

针对小口径管线,传统的检测方法(如涡流检测及超声检测等)灵敏度高,可靠性好,但均为逐点扫描,效率低,对于交叉分布的管线在线检测难。超声导波无损检测技术现已广泛应用于管径大于 $\varnothing 50$ mm 工业管线的损伤探测,该技术采用脉冲-回波原理,通过在管线一处布置传感器即可实现数十米范围内管线的全局检测,效率高,成本低。

Vogt 等^[1]通过在管壁内布置压电传感器并

在管线中激励轴对称纵向模态导波 $L(0,1)$ 进行了小口径热交换管线的损伤检测实验,取得了较好的效果。TAE 等^[2]利用布置于管壁内的环形激光传感器激励轴对称模态导波开展了小口径管线的损伤检测实验。这两种检测方法面临如下问题:

1) 在管壁内布置传感器不适于开展管线在线检测。

2) 受传感器结构设计及安装卡具限制,不能沿管壁圆周布置足够数量的传感器,这不利于在管线中激励出高信噪比的轴对称模态导波用于检测,另一方面难以在回波信号中正确提取各模态导波,进而给损伤特征辨识带来困难。

Hay 和 Rose^[3]发展了一种柔性 PVDF 梳状传感器,该传感器可表面粘接于任意口径管壁的外壁进而在管线中激励轴对称纵向模态导波进行管线损

收稿日期:2014-02-20

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2008ZX05026);国家自然科学基金资助项目(91016024);教育部新世纪人才基金资助项目(NCET-11-0055)和中央高校基本科研业务费基金资助项目(DUT12LK33)

作者简介:马书义(1980-),男,河北衡水人,博士生,主要从事结构无损检测与健康评价,结构健康监测技术研究。武湛君(1972),男,内蒙古人,教授,博士,主要从事复合材料结构设计与分析,智能材料与结构,结构健康监测技术研究。

伤检测。马书义等^[4]发展了一种基于长度伸缩型压电陶瓷的柔性压电夹层传感器阵列,该阵列可在管线中激励纵向模式导波进而实现管线的损伤检测。然而,这两种传感器阵列一方面仅能提取回波信号中的轴对称模式导波;另一方面,纵向模式导波用于充液管线检测时,其自身衰减较大,不利于管线的长距离检测^[5]。郭秋娟等^[6]采用周向导波技术开展了小口径薄壁管损伤检测实验,由于周向导波沿圆管周向传播,传感器安装后仅能检测其所在的圆管周向,要实现整条管线检测需沿管线轴向移动传感器,对于交叉分布的管线难以实现在线检测。

小口径管线包含支撑结构,而支撑结构的反射回波与其附近的损伤反射回波叠加,进而使支撑结构附近的损伤辨识难。通过对小口径管进行实时在线检测,比较支撑结构附近损伤产生或扩展前、后信号变化将有助于解决此问题。

本文基于扭转模式导波 $T(0,1)$ 开展了小口径管在线检测研究。为在管线中高效激励 $T(0,1)$ 模式导波,同时考虑提取回波信号中的弯曲模式,基于厚度剪切型压电陶瓷发展了一种新型传感器阵列。在此基础上,开展了含支撑结构的小口径管损伤扩展检测实验,并对实验结果进行了分析。

1 圆管中的导波

1959 年, Gazis 首先提出了无限长空心圆柱体中弹性波传播问题的通解。考虑应力自由边界条件,由弹性动力学理论可得到空心圆管中导波传播的频散方程,对其求解可得到空心圆管中导波传播的频散曲线。图 1 为外径 $\varnothing 16$ mm、壁厚 1 mm 的空心铝管群速度频散曲线。由图可看出,圆管中沿轴向传播的导波有 3 种模式,即轴对称纵向模式 $L(0,n)$ 、轴对称扭转模式 $T(0,n)$ 和非轴对称弯曲模式 $F(M,n)$, 其中 $M=1,2,3,\dots$ 为周向阶次, $n=1,2,3,\dots$ 为模数。

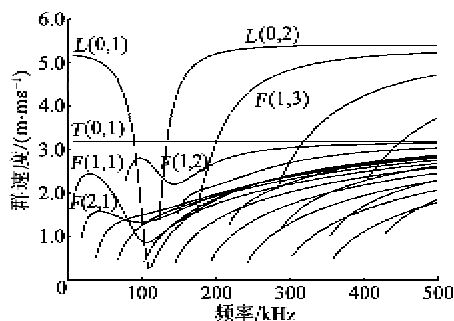


图 1 铝管群速度频散曲线

在导波的众多模式中,轴对称 $T(0,1)$ 模式导波^[5]具有在整个频段内非频散,这使其具有较宽的检测频率范围。另外,还可在管线中传播较远的距离而波形不会发生畸变;沿管壁的位移分布中仅存在周向位移,且周向位移在管线壁厚中的分布几乎为常数,理论上可分辨管线截面任意位置的损伤;由于周向位移不支持非粘性液体,因此该模式导波可在充水等管线中传播较远的距离。因此,本文选择 $T(0,1)$ 模式导波用于小口径管线的在线检测。

2 检测实验

2.1 传感器阵列设计

为实现小口径管线的实时检测,传感器阵列设计应考虑为抑制 $T(0,1)$ 导波激励过程中产生的弯曲模式,同时能在回波信号中正确提取损伤处反射的弯曲模式导波以辨识损伤特征,沿管线圆周方向应均匀布置足够数量的传感器;实际应用中的小口径管线并行排布,密度大,应设计合理的传感器封装形式以使其能方便安装于管线外壁。

将压电晶片及连接压电晶片电极的铜箔导线内嵌于非导电的聚酰亚胺材料中所构成的柔性传感器网络称为压电智能夹层,其在复合材料结构健康监测中应用广泛^[7]。 $T(0,1)$ 模式导波激励要求传感器阵列对管线表面施加轴对称的切变载荷。考虑上述针对小口径管线的传感器阵列设计要求,同时参考压电智能夹层传感器网络的设计方法,设计了用于小口径管线检测的新型传感器阵列。传感器阵列敏感元件采用了厚度剪切型压电陶瓷晶片,其长度方向沿管线轴向布置,振动方向沿管线切向。传感器阵列总长度与被检测管线外壁周长相等,所包含的压电晶片数量要求大于导波激励频率处所出现的弯曲模式最高阶数,且各压电晶片等间距分布。各压电晶片的正极分别通过内嵌于夹层内部的铜箔导线与置于夹层端部的焊盘连接进而与实验系统接线,各压电晶片负极在夹层内部通过铜箔导线连接在一起,并与焊盘接地连接。图 2 为所设计的包含 8 片压电晶片的压电夹层传感器阵列,压电片尺寸为长 12 mm,宽 3 mm,厚 0.5 mm。

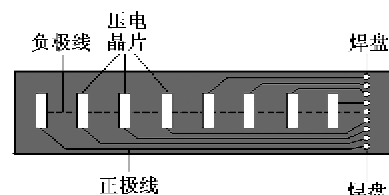


图 2 传感器阵列(包含 8 片压电晶片)

2.2 缺陷设置

检测实验分别在2根(记为1[#]和2[#])参数一致的空心铝管中进行(见图3),铝管长1500 mm,且两铝管初始均无损伤。2[#]铝管中在距离A端750 mm处用环氧树脂粘接一钢制圆环用于模拟管线上的支撑结构,圆环厚1 mm,轴向长3 mm。在距1[#]铝管A端约750 mm处切割一刻痕作为初始损伤,刻痕圆周长度约为铝管周长的1/5,深度约为壁厚的1/2,通过使刻痕沿铝管周向扩展,进而检测铝管的损伤变化。在距离2[#]铝管A端760 mm处设置一圆柱形通孔作为初始损伤,通孔直径为 $\varnothing 3$ mm,通过扩大通孔直径,来检测铝管支撑附近的损伤扩展。

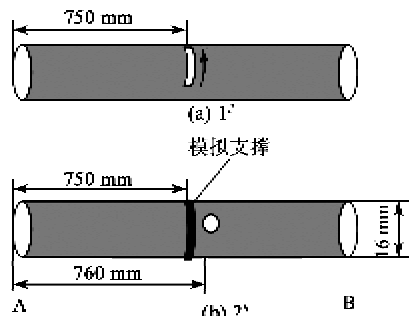


图3 铝管中损伤类型及轴向位置

2.3 导波激励接收系统

图4为系统原理图。该系统包括多通道的信号发生单元、功率放大单元、激励接收转换单元及数据采集单元。采用传感器阵列包含8片压电晶片,两传感器阵列分别通过环氧树脂粘接于各被检测铝管A端外壁。激励信号采用经Hanning窗调制的10周期正弦信号,该信号可有效保证信号的信噪比,对回波信号有良好的分辨率。激励信号由PC控制任意波形发生单元并行产生,并分别经功率放大单元线性放大至150 V后加载至各压电晶片进而使各压电晶片被分别同时激励。各压电晶片接收到的回波信号由高速数据采集单元并行采集后送入PC处理和显示。激励接收转换单元用于高压激励信号和低压回波信号间的隔离及无延时切换。

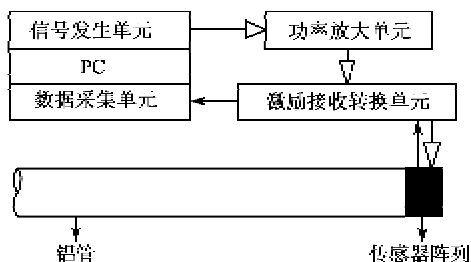


图4 实验系统原理图

$T(0,1)$ 导波与损伤相互作用会发生散射,使回波信号中包含部分弯曲模态导波 $F(1,2)$,由 $F(1,2)$ 导波沿管壁的位移分布特点可知,其能在一定程度上反映圆管周向损伤的扩展情况^[8]。因此,实验系统在回波信号中提取轴对称 $T(0,1)$ 导波的同时最好也能提取弯曲模态导波 $F(1,2)$ 。由于 $F(1,2)$ 导波沿管壁的位移分布随频率变化,当 $F(1,2)$ 导波的切向位移与 $T(0,1)$ 导波的切向位移相近时损伤处反射的 $F(1,2)$ 导波具有较大的幅值,这在回波信号中有利于辨识 $F(1,2)$ 导波。因此 $T(0,1)$ 导波的激励频率选择应依据二者切向位移相近的原则。根据被检测管线尺寸及其对应的频散方程,本文 $T(0,1)$ 导波激励频率选择了200 kHz。由图1可知, $T(0,1)$ 模态导波在200 kHz时的群速度为3.178 m/ms。以与初始损伤所在管线圆周角度相同的压电晶片接收到的回波信号为参考,其余压电晶片接收到的回波信号相对该点数据相移 $\varphi/2\pi$ 后相加可提取回波信号中的 $F(1,2)$ 模态导波,其中 φ 为各压电晶片相对参考压电晶片的角距离^[8]。考虑2[#]铝管中支撑结构及其附近损伤反射的弯曲模态较复杂,为简化分析,这里我们仅提取回波信号中的 $T(0,1)$ 模态导波。

3 检测结果分析

图5为铝管无损伤检测结果。结合 $T(0,1)$ 导波的群速度分析,图5(a)中管端回波信号主要是 $T(0,1)$ 模态,且管端回波前无其他反射回波。管端回波中包含部分弯曲模态导波,这主要是因传感器阵列中各压电晶片与管线的粘接效果不一致造成。由图5(b)可看出,铝管中支撑结构反射的回波信号在时域空间上的走行距离约为32 cm。

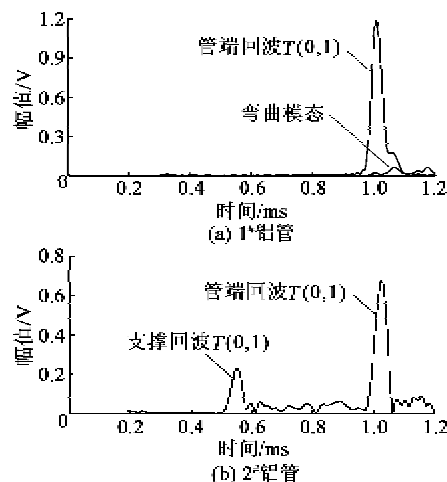


图5 铝管无损伤检测结果

图6为1#铝管损伤扩展前后的实时检测结果。由图可看出,随着损伤沿铝管周向扩展,损伤回波 $T(0,1)$ 幅值逐渐增大,而 $F(1,2)$ 导波幅值在逐渐增大后又逐渐减小,这与文献[8]中的损伤扩展检测结果相同。由此可见,通过提取回波信号中的弯曲模态 $F(1,2)$ 有助于辨识损伤的扩展趋势。

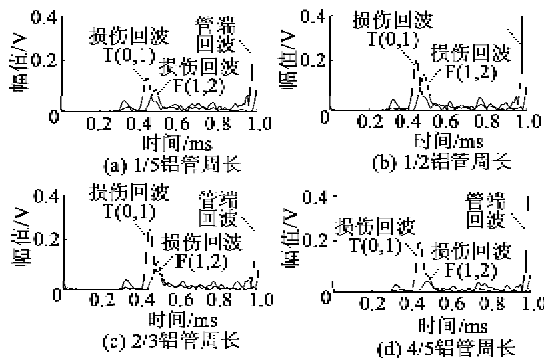


图6 1#铝管损伤周向扩展检测结果

图7为2#铝管中3 mm通孔缺陷检测结果。由图7(a)可看出,铝管无损伤时支撑结构反射的回波与铝管有损伤时支撑结构及损伤反射的回波在时域上仅存在细微差别,这是由于损伤距离支撑结构较近且损伤较小,其反射的回波幅值也较小,大部分损伤回波淹没在了支撑结构反射的回波信号中。因此,仅分析支撑结构附近的反射回波幅值变化将给支撑结构附近的较小损伤辨识带来困难。

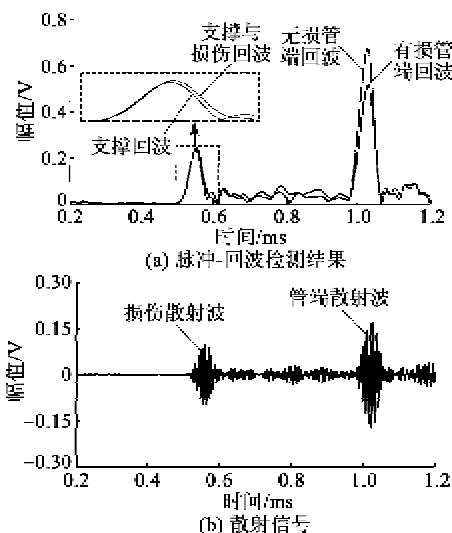


图7 2#铝管中含有3 mm通孔损伤检测结果

由图7(b)可看出,支撑结构附近由于损伤的产生仍出现了较明显的散射信号。由图7(a)可看出,损伤产生后的管端回波幅值明显小于无损伤时的管端回波幅值。这种现象主要是由3方面因素造成:

1) 对于图3(b)所示的支撑结构及损伤位置,

$T(0,1)$ 导波透射过支撑结构后遇到损伤时会部分反射回铝管A端。

2) 透射过损伤的 $T(0,1)$ 导波遇到管端B后发生全反射,该反射波再次遇到损伤时会被部分反射回管端B。

3) 从铝管B端反射的 $T(0,1)$ 导波遇到损伤时会部分转换为弯曲模态导波。

结合上述实验现象及产生原因可看出,通过分析支撑结构附近散射信号的变化,同时结合管端回波信号变化将有助于辨识支撑结构附近存在的损伤。

图8为2#铝管中6 mm通孔损伤检测结果。由图可看出,由于损伤较大,支撑结构附近的反射回波幅值有明显变化。由图7(b)及图8(b)可看出,随着损伤的扩展,支撑结构附近的导波散射信号及管端散射信号均增大。由此可见,通过分析导波散射信号幅值变化有助于辨识支撑结构附近损伤的大小。

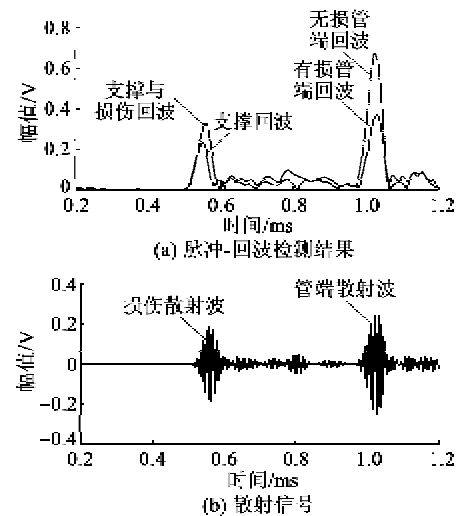


图8 2#铝管中含有6 mm通孔损伤检测结果

4 结束语

针对常规检测方法的不足,本文基于超声导波无损检测技术开展了小口径管在线检测研究。为适应现场小口径管线并行排布、密度大的特点,设计了一种新型传感器阵列。该传感器阵列具有柔性、轻质特点,可表面贴装于任意尺寸管线的外壁。实验结果表明,传感器阵列能够在管线中高效激励和接收 $T(0,1)$ 模态导波。对于简单管线结构,通过提取传感器阵列接收到的反射回波信号的幅值、模态等信息,可有效辨识管线中损伤的大小、扩展等状态

(下转第986页)