

文章编号: 1001-4888(2002)01-0001-09

管道超声导波检测技术研究进展^{*}

焦敬品, 何存富, 吴 斌, 费仁元, 王秀艳

(北京工业大学 机电学院, 北京 100022)

摘要: 综述管道超声导波检测技术及其应用研究进展, 着重对超声导波技术和模态声发射技术在管道检测中的最新应用进行了评述, 内容涉及超声导波的传播特性、实验检测方法及其数值模拟等。

关键词: 管道; 超声导波; 模态声发射; 数值模拟

中图分类号: O348 **文献标识码:** A

1 引言

管道作为五大运输工具之一, 在运输液体、气体、浆液等方面具有特殊的优势。世界上管道主要干线已达 230 多万 km, 1994 年末我国油气管道干线已达 17387 km, 城市供水系统更是极为庞大的管道网络^[1]。然而管道在长期使用中受冲刷和腐蚀导致管壁减薄, 常常发生泄漏事故, 不仅造成经济上的巨大损失, 且会污染环境、影响生态平衡。据统计, 世界各大中城市自来水的泄漏损失率在 20% 左右^[2]。近年来有许多管道发生事故, 更引起世人的极大关注。例如, 1993 年委内瑞拉一条气体管道发生泄漏, 气体爆炸, 致使 51 人死亡; 1994 年美国新泽西州的一条管道泄漏, 造成火灾, 致使 1 人死亡, 50 多人受伤。近年来还有其他一些国家如俄罗斯、加拿大和英国等国家的管道发生各种事故的报道。据不完全统计, 截止 1990 年, 我国仅输油管道在 20 年时间里, 共发生大小事故 628 次。天然气管道也曾多次发生事故, 后果特别严重, 给人民生命财产造成了严重的损失^[3]。更为严重的是管道泄漏造成了严重的环境污染, 加剧了原本已经恶化的人类赖以生存的地球空间。

尽管使用常规无损检测方法 (如超声检测爬机、漏磁检测爬机等) 对管道检测有着众多的优势所在^[4-9], 如技术成熟, 只需对工人稍加培训, 就可以利用现有的专门设备进行检测。但常规无损检测技术都存在一个严重的不足: 检测过程为逐点扫描式, 因此常规无损检测方法不可

^{*} 收稿日期: 2001-05-23; 修订日期: 2002-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (19972003)、北京自然科学基金 (3992006)、北京市教委科技发展项目、教育部高等学校骨干教师资助计划项目

作者简介: 焦敬品 (1973-), 女, 北京工业大学机电学院讲师, 在读博士研究生, 主要研究领域: 结构安全监控研究。

能有效的用于当前工业中广泛使用的成千上万公里的管道检测.而超声导波检测技术和模态声发射技术是解决这一问题的潜在可行的方法.

本文旨在概述超声导波技术和模态声发射技术在管道检测中的最新研究进展及发展趋势.

2 超声导波技术

多年以来,超声导波在空心圆柱体中传播课题的研究备受国外学者关注. Gazis^[10,11]利用弹性理论求得简谐波在无限长的空心圆柱体中传播的通解. Greenspon^[12,13]也对弹性理论进行了研究,并且发表了有关圆柱壳弥散曲线和位移场的论文.由于工业生产中迫切需要先进的管道无损检测技术,因此出现了将导波技术应用于管道缺陷检测的研究. 1979年, Thompson等^[14]将 EMAT(电磁声传感器)应用于蒸汽发电机管道的裂缝检测. Silk和 Bainton^[15]利用压电超声探头在热交换管道中激励超声导波,他们也对裂纹检测进行了实验,证明了利用超声导波技术对管道检测的可能性. Brook et al^[16]证明了利用柱状导波对管道进行检测的可行性,柱状导波由管道一端施加法向载荷激励.有趣的是 Silk和 Bainton利用 $L(0,1)$ 模式导波对管道进行检测,而 Brook等利用的却是 $L(0,2)$ 模式导波.这是由于不同的激励方法产生的不同的激励模式. Silk和 Bainton是从管道内部激励导波的,而 Brook等是从管道一端横截面处激励导波的.这些实验证明了利用超声导波对管道检测的有效性,但是现场应用尚处于空白.根据选用导波模式数量的不同,可将管道超声导波检测技术分为单一模式导波检测技术和多模式导波检测技术两种方法.

2.1 单一模式导波检测

导波模式的选择是管道检测系统的一个关键问题.若不能很好解决,导波技术就毫无优势可言.通常,激励源将产生出在其频率带宽内的所有模式,导致接收信号非常复杂而无法分析.但是可通过某些特殊的激励方式激励单一模式的导波.

目前,在国外超声导波管道检测中常用的单一模式导波为 $L(0,2)$ 模式导波.这是因为此模式在以下几方面具有显著优势: 1)在某一特定频率附近的很宽频率范围内,此模式几乎是非频散的,即群速度、相速度不随频率明显变化,因此使得信号形状在传播过程中基本保持不变; 2)它是传播最快的模式,因此任何不希望出现的模式信号都在其后到达; 3)它对任意圆周向内表面与外表面缺陷具有相同的灵敏度,即此模式导波既可检测内外表面,也可检测沿厚度方向的缺陷.选择的激励信号一般为一个窄带信号,如 Hanning窗调制的 5到 10周期的音频脉冲信号,这样的信号既能保证具有一定的强度,并且避免了在较长传播距离时的弥散.一般采用沿管道表面圆周向均匀布置的若干个压电传感器来激励信号.压电传感器的数量必须大于信号频率范围内的出现的导波模式的最高阶次(即大于在激励信号的截止频率范围内出现的导波模式的最高阶次,也就是 $F(n,1)$ 模式中的 n).例如,图 1所示激励信号(Hanning窗调制的 10个周期的 70kHz单音频脉冲)的 -40dB截止频率为 84kHz,而在 76mm的 40# 钢管(管壁厚 5.5mm)中下限截止频率小于 84kHz的最高阶次弯曲导波模式为 $F(11,1)$ (如图 2所示), 152mm的 40# 钢管(管壁厚 7mm)为 $F(20,1)$.因此将 16个和 32个压电传感器分别用于 76mm管和 152mm的 40# 钢管的激励就可以满足以上要求.只有将足够数量、等间距、等特性的传感器对称、均匀地沿管道圆周向布置,才能只激励轴对称模式导波.但此时仍有

$T(0,1)$, $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 三个对称模式存在.利用只激励管道轴向运动的传感器可避免扭转模式 $T(0,1)$ 的出现;通过相距为 $L(0,1)$ 模式导波波长的两个传感器环来削弱 $L(0,1)$ 模式而增强 $L(0,2)$ 模式.为优化检测系统,一个很实用的方案是尽量激励向前传播的波,而使向后传播的波的能量尽可能小,这可通过在距离为激励的导波模式的 $1/4$ 波长远处布置另一传感

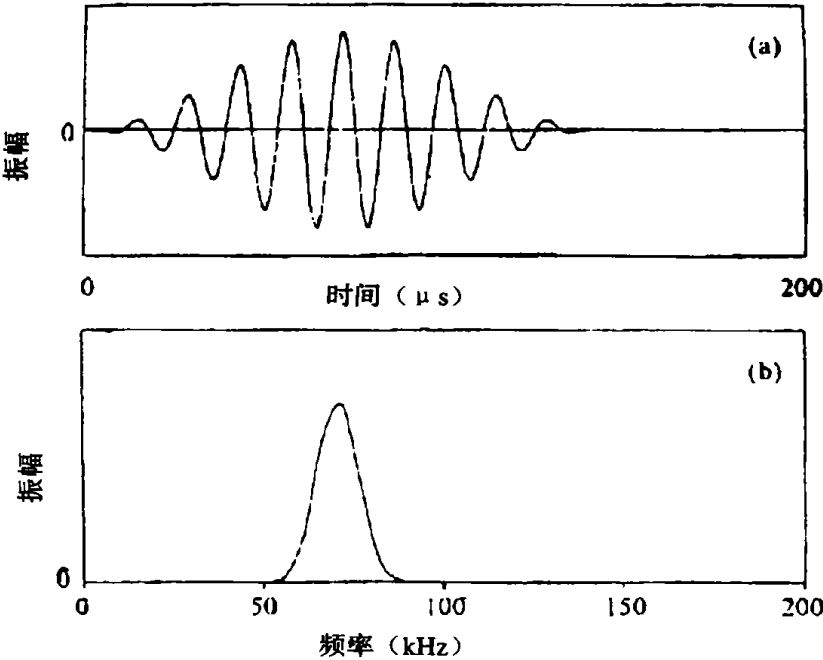


图 1 Hanning窗调制的 10个周期的窄带脉冲信号
(a)时域 (b)频域

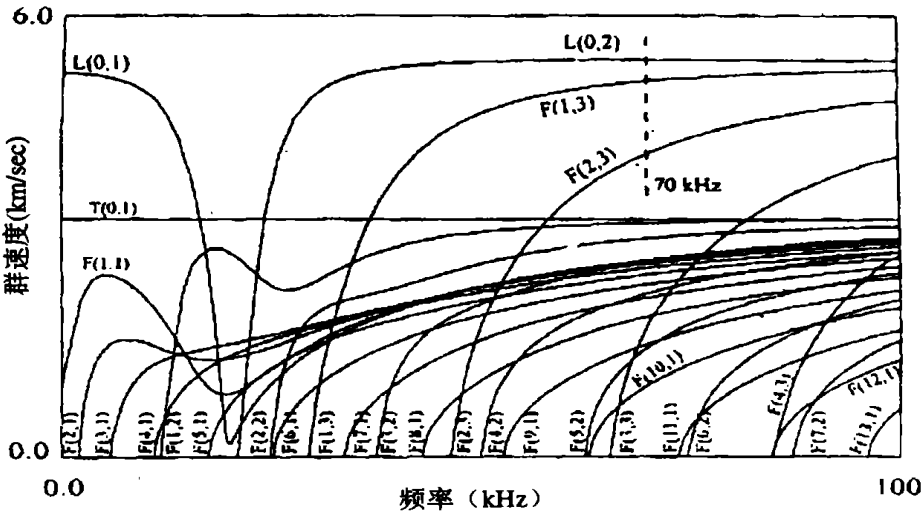


图 2 76mm直径管群速度弥散曲线^[17]

器环(相位相差 $\pi/2$)来实现^[17].

超声导波在管道中传播时,遇到缺陷、端面、焊缝及弯曲处都将发生反射.同样,管道中激励的轴对称 $L(0,2)$ 模式导波(或其它单一的轴对称模式导波),传播过程中遇到非轴对称的缺陷时,缺陷回波不仅含有 $L(0,2)$ 模式,还会发生模式转换而产生其它模式导波.尤其是当管道中近似轴对称的焊缝中出现非轴对称的周向小裂纹时, $L(0,2)$ 模式回波能明显反映焊缝回波.当缺陷与焊缝不重合时, $L(0,2)$ 模式也能鉴别缺陷;当缺陷与焊缝重合时, $L(0,2)$ 模式的回波并不能显示出与前一种情况(只有焊缝,没有缺陷)的明显差异.而反射回波中的 $F(1,3)$ 模式导波,对轴对称焊缝不敏感,却对缺陷及焊缝中的缺陷都极敏感^[18].因此,对更高阶次模式的导波的研究,将更有利于对缺陷的全面检测.

2.2 多模式导波检测:

一种模式的导波可能只对某一种缺陷敏感,而对其它类型缺陷不敏感.在实际检测中,缺陷的类型和位置都是未知,因此有必要对多模式导波检测技术进行研究.

可以通过多种方式激励所需要的多模式导波,如梳状传感器、兰姆波传感器和可变入射角度传感器方法等.

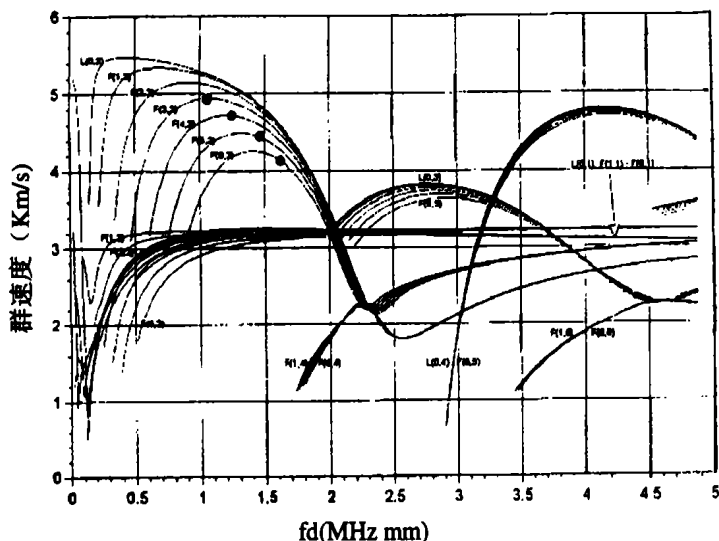


图 3 直径 18.9mm,壁厚 1.22mm 镍管群速度弥散曲线^[21]

通过梳状传感器激励多模式导波时,梳状传感器可看作为相速度的筛选器^[19].众所周知,当传感器的布置方式关于管道周向对称时,将只会激励轴对称的导波模式.梳状传感器由四个传感器环组成(保证关于管道周向对称),中间用窄塑料环来保证传感器环之间的距离,不同的间隔距离将产生不同模式的导波.这是因为单独一个传感器环会激励多模式导波,多个环激励的导波模式将相互作用,当环间距为某一个模式导波波长时,将只激励该波长的模式导波.而且导波波长为频率的函数,在相速度频散曲线上对应一条斜线,如图 3 所示.对一根直径 101.6mm 长 6.4m 外包硅酸钙绝缘层的 40# 钢管进行缺陷检测,利用梳状传感器激励多模式导波,并通过频率扫描不同模式的导波以识别所有类型的缺陷.实验表明:400kHz 的 $L(0,2)$ 模式导波可检测出 40% 壁厚减薄的人工缺陷,480kHz 的 $L(0,3)$ 模式导波可检测出 3%

排列的焊孔,因此也表明了多模式导波检测技术较单一模式导波检测的优势:通过多种不同模式的导波可实现对多种缺陷的同时检测。

专门用于管道检测的兰姆波传感器是利用市场上现有的超声传感器,通过一种新的耦合机理来实现多模式导波激励的^[20]。其中的一些传感器需要在超声传感器和管道之间添加耦合液体,这种传感器可以检测水平管道;另外一些传感器则使用固体耦合介质,这样的传感器可用于检测水平、垂直、倾斜管道。设计这种传感器的目的是在管道中激励不同模式的柱状导波。通过改变激励频率、倾斜角度和传感器的数量,这种基于新耦合机理的超声传感器可以在管道中激励轴对称或非轴对称的兰姆波。将这种激励多模式兰姆波技术应用于管道检测表明,即使当缺陷距离传感器较远时,传感器也可实现对缺陷的检测,并且可估计出受损程度。

通过局部载荷斜入射方法激励非轴对称的多模式导波也可实现管道缺陷检测^[21]。对蒸汽发电机的铬镍铁合金管施加局部载荷激励,其声场分布中轴向场和周向场完全不同。虽然非轴对称模式导波的声场比轴对称模式导波的声场要复杂的多,但还是有必要对非轴对称模式导波进行研究。这是因为:由于空间的有限性和传感器的效率,通常难于激励单一轴对称模式导波;导波在缺陷处反射后也会有模式转变。通过三维调谐(距离、频率和入射角度)的方法,避免了距离、频率和入射角度单一组合可能造成的管道“盲点”处的漏检,实现管道 100% 范围的检测。非轴对称模式导波在长距离检测方面的较强地有效性也得以证实。

为了更好地将导波技术应用于管道检测,就有必要深入地对轴对称模式导波和非轴对称模式导波在空心圆柱体中的传播进行研究^[22]。首先对轴对称和非轴对称面载荷激励的导波模式进行研究。为了对导波的叠加进行理论分析,引入简正模式的概念,并对每一模式导波的振幅系数随面压力载荷形状的变化进行了研究。实验利用一个梳状传感器和函数发生器在一个镍管上施加面载荷,通过改变面载荷条件,如周向加载角度、轴向加载长度、频率、相速度,来控制轴对称和非轴对称模式导波的激励。实验研究表明,可以利用非轴对称的局部载荷方法激励轴对称的导波模式,这对于周向尺寸有限的管道检测特别有用;缺陷反射回波中的弯曲模式导波包含反射物周向角度和类型、大小的特征信息。

利用安放在管道内部的永久电磁铁式 (PPM) 电磁声传感器 (EMAT) 来激励和接受沿管道圆周方向传播的 SH 波也可实现管道检测^[23]。PPM-EMAT 装置固定在轮上,轮可以方便地沿管道轴向运动,有利于实现快速检测。在检测的每一位置,利用一个超外差式相速度灵敏探测器可以测得 SH0 和 SH1 模式的往返信号的幅度和相角偏移,这些信息可以反映管道表面的缺陷状况,并可提供有关轴向缺陷位置和缺陷深度的信息。实验结果表明,SH1 模式的导波的幅度和相位偏移比 SH0 模式对缺陷的灵敏度更高。虽然实验管道的外包层降低了信号强度,但实验证明该方法对管道缺陷检测也较为有效。

此外,在管道一端通过轴对称布置的压电传感器激励低频窄带脉冲信号,低频窄带脉冲信号的空间相位和幅度大小具有一些特殊的波传播特性,这些特性可用于确定结构中的缺陷状况。这种技术特别适用于径向不均匀和轴向各向异性的管道的缺陷检测,如由复合薄层绕成的纤维强化管道。^[24, 25]

目前,国内关于管道的超声导波检测技术的研究还鲜见报道。尤其在实验检测方面,如导波的激励方法、激励接收系统、波形模式和激励频率的选择等还未见报导,但已有此研究方向的综述^[26]。

3 模态声发射技术

声发射(AE)是本世纪五十年代后迅速发展起来的一种无损检测方法,它是指物体在形变或受外界作用时,因迅速释放(弹性)能量而产生瞬态应力波的一种物理现象.与超声、涡流等其它无损检测方法相比,声发射具有能动态监测且覆盖面大的优势,因此在材料研究、压力容器评价、飞机构件的强度监视和测定等方面已取得了较明显的效果.霍臻^[27]利用声发射技术对压力管道的泄漏进行了检测,实验证明应用泄漏应力波信号检测气体和液体的泄漏是可行的,并具有较高的灵敏度,但还存在一些问题,如难于准确确定泄漏源的位置,检测灵敏度受噪声的影响很大等.因此要将声发射技术进一步推广应用,必须首先解决以下问题:

- 1) 源定位不准确问题;
- 2) 信号解释问题;
- 3) 噪声问题.

模态声发射是近年来发展起来的声发射检测新技术,它克服了传统基于体波传播的共振传感器(RSP)参数声发射检测的上述诸多不足.模态声发射认为被测材料结构中的源或声发射事件在负载作用下,产生的是频率和模式丰富的导波信号,而且可以利用导波理论和牛顿力学定律将上述困扰声发射发展的问题得以解决,从理论上得到了较好的解释和表达,并通过建立简单明确的物理数学模型表征问题.

模态声发射自 90 年代初期在美国问世以来,便迅速得到较好应用. M. Surgeon, M. Wevers^[28]对 CFRP 薄板的声发射信号进行了模式分析,实验结果表明,利用模态声发射技术既可以对声发射信号作出合理解释,也可以实现准确的源定位和分离噪声的目的.

由于充液管网的弥散特征,使得传统相关分析方法难以准确确定管网中泄漏源的位置. Lance E. Rewerts 等^[29]建立了管网泄漏理论模型,获得了其声发射事件的基本特征.并采用了两种算法对泄漏源定位中超声信号的弥散进行了补偿:时间—空间转换法可以准确确定模拟模型和现场实验中的噪声源;空间—频率转换的方法,理论证明可以通过一个或两个探头来确定泄漏位置,但这种方法有待实验的进一步证实.

Osama Hunaid, Wing T. Chu^[30]在一定实验条件下模拟塑料管道的多种泄漏形式,并对其泄漏信号的声特征进行研究.包括声信号或振动信号各频率成分的特征,即各频率成分与泄漏形式、流量、管压的关系,以及衰减率和波速与频率之间的关系.泄漏信号的特征研究对于泄漏检测如下方面将会有很大帮助:选择合适的实验仪器、设计合适的检测系统、确定传播速度和精确确定泄漏源的位置.

H. V. Fuchs^[2]从事了多年的管道的泄漏检测的研究.研究表明,若能将声发射技术推广用于管道泄漏检测,可将平均每年 $1000\text{m}^3/\text{km}$ 的泄漏量减小到 $500\text{m}^3/\text{km}$.

目前,国内声发射研究大多基于传统共振传感器声发射研究.模态声发射研究工作较少,研究范围更为有限.刘松平等^[31, 32]介绍了模态声发射检测技术的原理、信号特征及信号源识别和定位,并对其在飞机疲劳裂纹的监测中的应用进行了介绍.而在泄漏声发射应力波在管道中的传播机理的研究,尤其在实验检测应用方面,如导波波形模式和频率的选择等还未见报导.可以预见模态声发射技术的研究必将会成为国内外声发射研究的一个热门方向.

4 管道超声无损检测方法的数值模拟

超声波在结构(如杆、管、板等)中的传播问题,在数学上归结为处理一组偏微分方程的初值或初值-边值问题.然而实际问题中由于物体几何形状的不规则或介质的不均匀等原因,要得到问题的解析解,除了一些简单的问题外往往是十分困难的,因此常常应用各种数值方法来解决弹性波在结构中的传播问题进行求解.

弹性波传播问题的数值求解主要有两种途径:特征线法和半离散化法(半离散化法包括有限差分法、有限元法和边界元法).在特征线法中,偏微分方程转化为沿可能发生间断的特征方向积分,而半离散化法首先将偏微分方程在空间域上离散化,然后在时间域上沿平行线积分.由于在半离散化法中,积分路线与可能存在间断的曲面相交,因此在相同的计算效力的水平上,半离散化法的精度低于特征线法的精度.对于本来无弥散的偏微分方程,半离散化法还会引入离散化弥散.但是在许多情况下,特征线法的程序是相当复杂的,而半离散化法相对来说比较简单,并可得到期望的精度^[33].在此主要对有限元法和边界元法在波传播问题中的应用进行介绍.

Friedrich Moser^[34]利用有限元的方法对波导中弹性波的传播问题进行了模拟.以薄板和管状结构中弹性波传播问题为例,对其进行了有限元模拟和实验测试.有限元法求解结果和实验结果完全吻合,证明了有限元方法对于模拟波传播问题的有效性,并进一步指出有限元法对传统分析方法无法处理的复杂几何形状结构的波传播问题求解的可能性.

D. N. Alleyne^[35]利用有限元法对轴对称的 $L(0, 2)$ 模式弹性导波在管道切槽处的反射进行了研究.贯穿整个壁厚但周向长度不同的切槽的反射系数问题简化为三维薄膜有限元模型,并用一个轴对称模型来模拟沿整个圆周但深度不同的切槽的反射系数问题.有限元计算结果表明, $L(0, 2)$ 模式导波的反射系数是切槽周向宽度的线性函数,是切槽深度的更高阶函数.

M. J. S. Lowe^[36]用有限元的方法对管道局部切槽引起的导波模式转换进行了研究.有限元模拟结果表明,轴对称的 $L(0, 2)$ 模式导波入射到切槽处,反射波包含 $L(0, 2)$ 、 $F(1, 3)$ 、 $F(2, 3)$ 三种模式的导波;并且当切槽长度很短时,反射得到的 $L(0, 2)$ 模式和 $F(1, 3)$ 模式数量相同.通过对比实验进一步证明了有限元法对导波传播问题求解的有效性.

基于边界元的高效性和对缺陷的精确识别性,Cho^[37]应用边界元法对导波散射问题进行了求解.通过边界元法确定了在任意形状缺陷处由于模式转换而产生的多模式导波的反射系数,该反射系数表示为缺陷大小、取向、波导几何形状和施加频率的函数.应用这种方法还可以估算出从缺陷处反射的多模式导波所携带的超声能量.

Cho 利用混合边界元法对兰姆波在缺陷处的散射进行了分析,从而为解决由于波导厚度变化引起的复杂的导波模式转换问题提供了理想的数值工具.通过混合边界元法对特定模式的兰姆波入射位置和波导截面特定的能量分布问题进行研究,估计各种散射物(如波导的间断点和锥形部分等)处的散射和模式转换.并进一步通过计算散射场随入射模式、频率和散射物形状的变化,来研究单一兰姆波模式与散射物(波导厚度的变化)间的相互作用.理论计算结果对于提高无损检测的灵敏度和渗透力有很大帮助.

5 展望

从国外近几年的研究进展可以看出,各种超声无损检测技术发展势头强劲,尤其是超声导波技术和模态声发射技术,取得了前所未有的长足发展.管道超声无损检测可能的发展方向包括:波传播理论的深入化研究,检测技术的实用化转变,检测技术向监控技术的转化,检测信息的数量化等等.鉴于国内这方面的理论研究还很少,实验方法研究更为匮乏,因此应进一步加强国内这方面的研究工作.

参考文献:

- [1] 唐秀家,颜大椿. 基于神经网络的管道泄漏检测方法及其仪器 [J]. 北京大学学报, 1997, 33(3): 319– 327.
- [2] Fuchs H V. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis [J]. Applied Acoustic, 1999, (33): 1– 19.
- [3] 高福庆. 管道检测的必要性 [J]. 管道技术与设备, 1998, 14(2): 40– 42.
- [4] 王玉忠,陈建兰. 漏磁检测技术在我国管道中的应用 [J]. 化学清洗, 1998, 14(5): 48– 50.
- [5] 陈积懋. 管道无损检测与评价技术 [J]. 状态检测与分析, 1997, 18(1): 59– 62.
- [6] 李永年等. 国内外埋地管道腐蚀状况物理检测技术现状 [J]. 岩土工程界, 2000, 3(9): 43– 45.
- [7] 范弘等. 钢管漏磁检测的新方法 [J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(6): 50– 54.
- [8] 陈华波,涂亚庆. 输油管道泄漏检测方法综述 [J]. 管道技术与设备, 2000, 22(1): 38– 41.
- [9] 冉启芳. 无损检测方法的分类及其特征简介 [J]. 无损检测, 1999, 21(2): 75– 80.
- [10] Gazis D C. Three- dimension investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I analytical foundation [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1959, 31(5): 568– 573.
- [11] Gazis D C. Three- dimension investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1959, 31(5): 573– 578.
- [12] Greenspon J E. Analysis of wave propagation in a cylindrical waveguide. I [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1960, 32(5): 571– 578.
- [13] Greenspon J E. Analysis of wave propagation in a cylindrical waveguide .II [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1960, 32(8): 1017– 1025.
- [14] Thompson R B, Elsley R K, Peterson W E *et al*. An EM AT system for detecting flaws in steam generator tubes [J]. Ultrasonic Symposium, 1979. 246– 249.
- [15] Silk M G, Bainton K P. Propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to lamb waves [J]. Ultrasonics, 1979, 17(1): 11– 19.
- [16] Brook M, Bgoc T D K, Eder J. Ultrasonics inspection of steam generator tubing by chemical guided waves [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1990, 9 243– 249.
- [17] Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves [J]. Ultrasonics, 1998, 36 147– 154.
- [18] Michael Lowe, David Alleyne, Peter Cawley. Mode conversion of guided waves by defects in pipes [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16 1261– 1268.
- [19] Michael J. Quarry, Joseph L. Rose. Multimode guided wave inspection of piping using comb transducers [J]. Material Evaluation, 1999 1089– 1090.
- [20] Guodongshan, Kundu, Tribikram. Lamb wave sensors for detection wall defects in pipes [C]. Proceeding of SPIE, 2000. 610– 618.
- [21] Hyeon Jae Shin, Joseph L. Rose. Guided wave tuning principles for defect detection in tubing [J]. Journal of nondestructive evaluation, 1998, 17(1): 27– 36.

- [22] Hyeon Jae Shin, Rose, Joseph L. Guided waves generated by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders [J]. Ultrasonics, 1999, 37(5): 355– 363.
- [23] Hirao, Masahiko, Hirotsugu. SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection [J]. NDT&E International, 1999, 32(3): 127– 132.
- [24] Kohl Thomas W. Ultrasonic guided waves in cylinders: theory and experiment [M]. Boulder: University of Colorado, 1994.
- [25] Kohl T, Datta S K. Axially symmetric pulse propagation in semi-infinite hollow cylinders [J]. AIAA Journal, 1992, 30(2): 1627– 1624.
- [26] 何存富,吴斌,范晋伟. 超声柱面导波技术及其应用研究进展 [J]. 力学进展, 2001, (2).
- [27] 霍臻,陈翠梅,朱润祥. 压力管道声发射泄漏检测 [J].无损检测, 1997, 19(4): 105– 107.
- [28] Lance E. Rewerts, Ron A. Roberts, and M. Amanda Clark. The role of propagation characteristics in acoustic emission pipeline leak location [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1998, 17: 501– 8.
- [29] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates [J]. NDT&E, 1999, 32: 311– 22.
- [30] Osama Hunaidi, Wing T. Chu. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes [J]. Applied Acoustics, 1999, 58: 235– 254.
- [31] 刘松平, Steve Zola,刘晶. 疲劳裂纹的模式声发射检测 [J]. 无损检测, 2000, 22(3): 122– 5.
- [32] 刘松平, Michael Gorman, 陈积懋. 模式声发射检测技术 [J]. 无损检测, 2000, 22(1): 38– 41.
- [33] 马宏伟,吴斌. 弹性动力学及其数值方法 [J]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [34] Friedrich Moser, Laurence J Jacobs, Jianmin Qu. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method [J]. NDT&E International, 1998, 32: 225– 234.
- [35] Alleyne D N, Lowe M J S, Cawley P. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes [J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65: 635– 640.
- [36] Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65: 649– 656.
- [37] Cho, Younho. Defect characterization potential via guided waves [M]. The pennsylvania state university, 1995.
- [37] Cho, Younho. Estimation of ultrasonics guided wave mode conversion in plate with thickness variation [C]. IEEE Trasaction on Ultrasonics, 2000. 591– 603.

Application of Ultrasonic Guided Waves in Pipe's NDT

JIAO Jing-pin, HE Cun-fu, WU Bin, FEI Ren-yuan, WANG Xiuyan

(Beijing Polytechnic University College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing 100022)

Abstract The recent research advances in the application of ultrasonic guided waves for pipe's nondestructive detection are briefly reviewed. Emphasis is given to the ultrasonic guided wave technology and modal acoustic emission technology, including the propagation characteristic of guided waves, the method of experiment and numerical simulation etc.

Key Words pipes; ultrasonic guided waves; modal acoustic emission; numerical simulation