

磁致伸缩导波技术在锚杆检测中的应用研究

刘 洋, 项占琴*, 唐志峰

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了创造安全的工作环境, 基于铁磁性材料的磁致伸缩效应, 提出了用磁致伸缩超声导波对锚杆进行检测。论述了检测原理, 对导波在锚杆中的传播进行了理论建模, 提出了非接触式导波激励和接收方法, 研制了相关的实验装置, 并对检测信号进行了处理和分析。实验结果表明, 磁致伸缩导波技术能够有效可靠地测定锚杆长度及缺陷。

关键词: 锚杆; 磁致伸缩超声导波; 无损检测

中图分类号: TH7; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)06-0043-04

Research of anchor rod detection using magnetostrictive guided waves

LIU Yang, XIANG Zhan-qin, TANG Zhi-feng

(Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at creating a safe work environment, based on magnetostrictive effect of ferromagnetic materials, a novel method was proposed for anchor rod detection applying magnetostrictive guided waves. Basic detecting principle of the method was introduced, and model of guided wave propagation in anchor rod was given. Then non-contact method for generating and receiving the guided waves was discussed. A prototype of experimental system was developed and detection signal were treated and analyzed by several signal processing methods. The experimental results show that the method of magnetostrictive guided wave anchor rod detection is feasible and reliable.

Key words: anchor rod; magnetostrictive guided wave; non-destructive testing

0 引 言

锚杆锚固技术由于其安全快速、低成本等特点在铁路、公路、矿业工程等地下结构工程(隧道、洞室等)和边坡护理中应用广泛。在使用过程中, 锚杆由于各种原因会出现裂纹、腐蚀等失效现象, 造成安全隐患, 需要定期对其健康状况进行评估。

本研究基于铁磁性材料的磁致伸缩导波技术, 深入探讨检测锚杆有效长度及缺陷的无损检测新方法。

1 磁致伸缩导波锚杆检测的原理

对铁磁性材料施加适当的交变磁场, 利用磁致

伸缩效应可以产生超声波。超声波在介质中不连续的交界面上产生多次往复反射, 进而产生复杂的干涉和几何弥散而形成超声导波; 相反的, 机械变形会使磁场发生变化, 使在磁场中的线圈产生感应电流, 这种现象叫做磁致伸缩逆效应。利用铁磁性材料这种磁-力换能效应可以实现锚杆中超声导波的激励和检测^[1]。本研究磁致伸缩超声导波锚杆检测原理图如图 1 所示。

磁致伸缩超声导波要求使用窄带脉冲信号进行激励, 作者在实验中采用的正弦脉冲信号如图 2 所示。采用正弦脉冲信号可以减少导波模式数, 降低信号检测的难度。另外正弦信号变化平稳, 有利于功率放大器进行放大以提供脉冲大功率激励信号。信号经过功

率放大器后加载在激励线圈,即可在实验样件中激励出一定强度的超声导波脉冲。

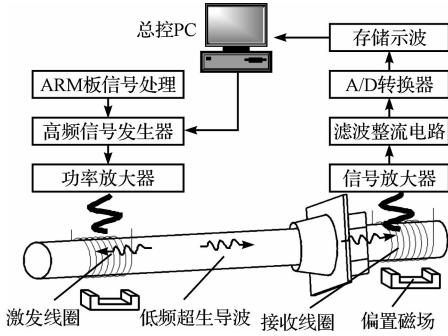


图1 超声导波检测系统框图

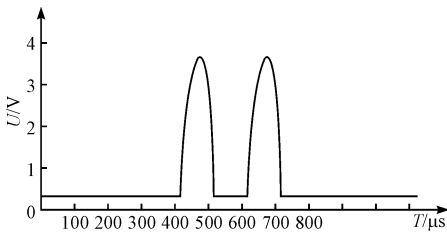


图2 激励电脉冲

超声导波在铁磁体中传播,当铁磁体中存在缺陷时其声阻抗将发生变化,从而引起导波的反射、投射等,进而导致铁磁体内磁感应强度发生改变,而变化的磁感应强度将引起接收线圈的电压变化。接收线圈检测到的电压表达式为:

$$V_R(k, t) = -\frac{2\pi k w \mu_r^2 \lambda^2 n s H_0}{E} \left| \int_0^1 f(\xi) e^{jk\xi} d\xi \right|^2 e^{-jk(d-nt)} \quad (1)$$

式中 k —超声导波波数; n —接收线圈的匝数; s —接收线圈的横截面积; l —接收线圈的长度, d —接收线圈与激励线圈间的轴向距离; v —铁磁材料中超声导波波速; μ_r —铁磁材料相对磁导率; λ —铁磁材料磁致伸缩常数; H_0 —线圈匝数和激励电流的函数, $H_0 = f(I, n)$ 。

接收线圈所接收到的信号非常微弱,而且保存检测信息的信号往往被深埋在噪声之中,因此,要对这样的微弱信号进行处理,一般都要先进行预处理,以将大部分噪声滤除掉,并将微弱信号放大到后续处理器所要求的电压幅度。

2 锚杆中导波传播的理论模型

普通中空注浆锚杆由普通中空注浆体、止浆塞、托板、排气管和螺母等组成,广泛应用于各类岩土的支持工程或地下工程顶部的锚固工程。实验应用的锚杆试件材料为 Q235 钢,杆体长度 l 为 3 m, 外径 d_0 为 30 mm, 壁厚 Δd 为 5 mm, 如图 3 所示。

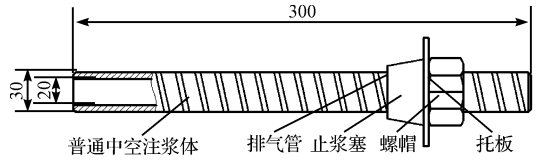


图3 待测锚杆

实验锚杆试件可看作各向同性弹性固体介质,根据弹性力学理论,弹性波在各向同性固体中传播时的位移运动方程矢量式^[2]为:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \mathbf{u} \quad (2)$$

式中 λ, μ — lamb 常数; $\mathbf{u}$ —位移矢量; ρ —材料的密度; ∇ —哈密顿微分算子; $\nabla \cdot$ —散度算符。

普通中空注浆锚杆可作为均匀各向同性的空心长直圆管处理,对其位移场进行求解,其应力自由边界条件为 $\sigma_{rr}|_{r=d_0, d_i} = \sigma_{rz}|_{r=d_0, d_i} = \sigma_{r\theta}|_{r=d_0, d_i} = 0$, 可假设锚杆中导波传播的位移分量形式为:

$$\begin{aligned} u_r &= U_r(r) \cos n\theta \cos (wt + kz) \\ u_\theta &= U_\theta(r) \sin n\theta \cos (wt + kz) \\ u_z &= U_z(r) \cos n\theta \sin (wt + kz) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 u_r, u_θ, u_z —径向、周向、轴向的位移分量; $U_r(r), U_\theta(r), U_z(r)$ —由 Bessel 函数构成的相应的位移幅度。

上式表明超声导波在沿中空注浆锚杆轴向传播时,存在 3 种不同的模式:纵向模式、扭转模式和弯曲模式。纵向模式和扭转模式为轴对称模式,一般用记号 $L(0, m), T(0, m)$ 表示;弯曲模式为非轴对称模式,一般用 $F(n, m)$ 表示(其中, n 表示轴向阶数, m 表示模式数)。求解导波在锚杆中传播的频率方程,可以得到相速度散射曲线。群速度 C_g 和相速度 C_p 之间的关系:

$$C_g = C_p^2 \left[C_p - (fd) \frac{dc_p}{d(fd)} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中 fd —频厚积。

由式(4)可以得到群速度曲线。对本次实验样件锚杆相速度频散曲线和群速度频散曲线进行计算,得到的结果如图 4 所示。

磁致伸缩力在锚杆中激发的超声导波模式,主要由材料本身特性(泊松比、 lamb 常数、材料的几何结构特征等)和交变磁场以及静态偏置磁场等因素决定。静态偏置磁场和交变磁场交互耦合作用下(例如由轴向平行的线圈提供偏置磁场和交变磁场),管状锚杆中只存在径向和轴向位移分量,此时理论上锚杆中只存在纵向模式导波^[3,4]。

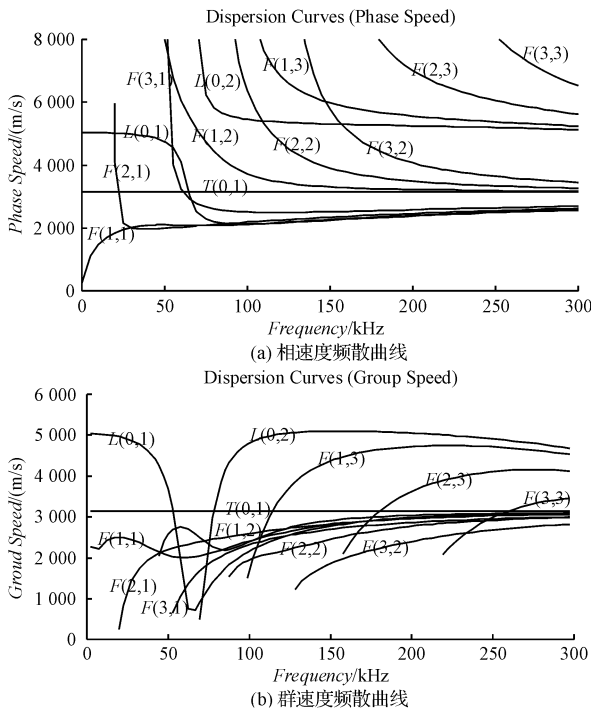


图4 频散曲线

3 磁致伸缩导波锚杆长度测定和缺陷分析

3.1 锚杆长度的测定

利用开发的实验装置,本研究以普通中空注浆锚杆为实验样件,对磁致伸缩超声导波锚杆测长以及缺陷检测进行了实验研究。将线圈和偏置磁场成轴对称布置,理论上在锚杆中激发的是纵向超声导波。磁致伸缩导波激励线圈放置在锚杆右端 500 mm,导波接收线圈放置在距离锚杆右端 1 000 mm 处。选用频率为 70 kHz 的纵向导波激励。对信号进行平均 3 000 次处理,巴特沃斯三阶滤波器的截止频率为 50 kHz ~ 90 kHz。检测信号的波形如图 5 所示。

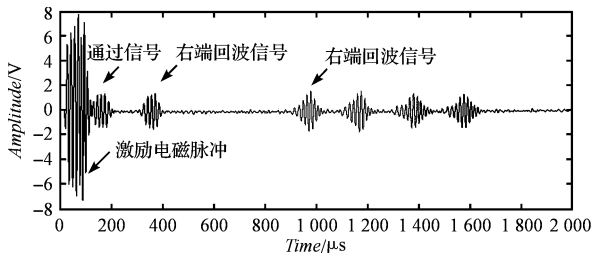


图5 锚杆长度测定检测信号

为了更直观地观察导波频谱含量怎样随时间变化,以确定在特定时间的频率成分,本研究对信号进行了短时傅里叶变换处理^[5]。采用汉明窗得到的短时傅里叶变换结果如图 6 所示。从图中可以看到,在与

检测信号的波形相对应的时刻主频率为激励信号的频率 (70 kHz)。

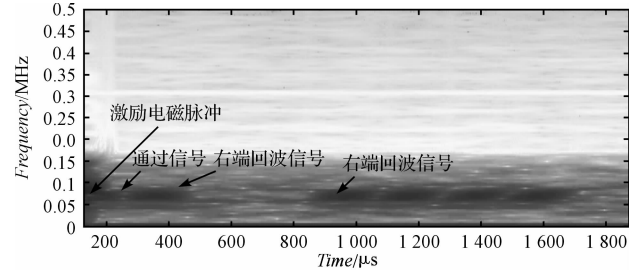


图6 长度测定信号短时傅里叶变换

激励线圈在激励处激发超声导波,弹性波沿锚杆轴向同时向两端传播。向左传播的导波首先到达检测线圈,向右传播的导波经右端面反射后到达检测线圈。从图中可以看到,波形存在频散现象,回波信号非常明显,通过信号到达时间为 0.105 ms,激励线圈和接收线圈的距离为 500 mm,因此波速为 4 761.9 m/s。结合被测锚杆频散曲线分析,可以断定激励处的导波模式为 $L(0,2)$ 模式。通过对导波传播进行分析,在右端回波信号到达时间 T_1 和左端回波信号到达时间 T_2 的总时间内,导波在锚杆中传播的距离为锚杆总长 L 的两倍。由回波信号可知右端回波信号到达时间 T_1 为 0.35 ms,左端回波信号到达时间 T_2 为 0.9 ms,因此:

$$L = \frac{V_{L(0,2)} \times (T_1 + T_2)}{2} = 3\,031.5\text{ mm} \quad (5)$$

被测锚杆实际的长度为 3 000 mm,利用超声纵波对锚杆长度测定,误差率仅为 1.05%。

3.2 缺陷信号的分析

利用超声导波对锚杆进行检测时,检测信号会受到多种因素影响,如空间电磁干扰、锚杆端部反射以及信号处理电路引进的噪声,噪声信号的过大极有可能将有用的弹性波淹没,导致检测不到或无法分辨弹性波信号。因此,必须利用有效的信号处理方法,对检测信号进行处理,以提取有用信号。

相关检测技术是利用有用信号周期性和噪声随机性的特点,通过自相关或互相关运算,以达到除噪声的一种技术^[6-8]。自相关接收机如图 7 所示。

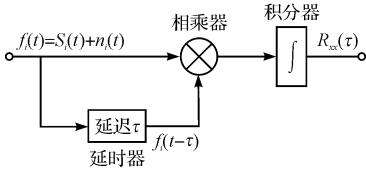


图7 自相关检测原理

设混有随机噪声的信号 $f_1(t) = S_1(t) + n_1(t)$ 。同时输入到相关接收机的两个通道,其中之一将经过延

迟器,使它延迟一个时间 τ 。经过延迟的 $f_i(t - \tau)$ 和未经过延迟的 $f_i(t)$ 均送入相乘器内,再将乘积积分后输出平均值,从而得到相关函数上一点的相关值。变更延迟时间 τ ,重复上述计算,就得到相关函数 $R(\tau)$ 和 τ 之间的关系曲线。 $f_i(t)$ 的自相关函数为:

$$R(\tau) = \frac{1}{2T} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f_i(t) f_i(t - \tau) dt = R_{ss}(\tau) + R_{ns}(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{nn}(\tau) \quad (6)$$

由于信号与噪声是互不相关的随机过程,随机噪声的平均值为零,即上式中的 $R_{ns}(\tau)$ 、 $R_{sn}(\tau)$ 及 $R_{nn}(\tau)$ 为零,则:

$$R(\tau) = R_{ss}(\tau) \quad (7)$$

最后,得到的是信号本身的自相关函数,从而达到除噪目的。

在本研究中,选取与测长实验规格相同的锚杆为实验样本,在距锚杆右端 277 mm 处加人为刻缝,刻缝的深度为 3 mm,宽度为 5 mm。磁致伸缩导波激励线圈放置在锚杆右端 42.5 mm 处,导波接收线圈放置在距离锚杆右端 100 mm 处。选用频率为 50 kHz 的纵向导波激励。对信号进行平均 5 000 次处理,FIR 滤波的截止频率为 40 kHz ~ 90 kHz。检测信号波形如图 8(a)所示。

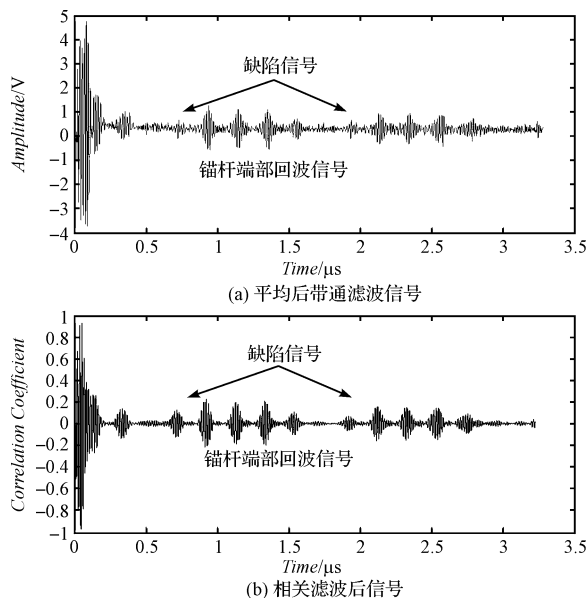


图 8 缺陷检测信号自相关处理

对有人为刻缝的锚杆检测信号进行自相关处理,变换后的信号如图 8(b)所示。从信号的变化结果来

看,经过相关处理后的锚杆缺陷检测信号噪声声明显减小,分辨率更高,而信号的相位、频率等保持不变。因此,在时域中对锚杆导波检测信号进行分析和识别,相关分析是一种有效和实用的方法。

4 结束语

导波检测技术具有在结构上一点激励可对较长距离进行检测的特点,能够检测一些很难或者根本无法达到的区域,极大地提高了检测效率,并且降低了检测成本,成为了近年来无损检测领域中的一个研究热点。本研究在论述锚杆磁致伸缩导波检测原理的基础上,开发了导波检测的实验系统,通过实验对磁致伸缩导波锚杆检测进行了验证。利用 $L(0,2)$ 模态的磁致伸缩导波,对自由锚杆进行了长度的测定和缺陷的检测,实验结果表明, $L(0,2)$ 模态导波可精确测量出自由锚杆的长度,检测出深度为 3 mm 的周向刻缝。然而,对于锚固在混凝土或岩石中的锚杆,需要以后进一步的研究分析。

参考文献 (References):

- [1] ROSE J L, RAJANA K M, CARR F T. Ultrasonic guided wave inspection concepts for steam generator tubing [J]. *Mat. Eval.*, 1994, 52(2): 307 - 311.
- [2] [美] 罗斯 J L. 固体中的超声波 [M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 王悦民, 康宜华, 武新军. 磁致伸缩效应在圆管中激励纵向导波的理论 and 实验研究 [J]. *机械工程学报*, 2005, 41(10): 174 - 179.
- [4] 黄敏, 周建军. 新型超磁致伸缩马达的结构研究 [J]. *机电工程*, 2006, 23(3): 12 - 14.
- [5] KWUN H, HANLEY J J, TELLER C M. The performance of a noncontact acoustic emission sensor on a cylindrical steel rod [J]. *J. Acoustic Emission*, 1993(11): 27 - 32.
- [6] 何大海, 赵文礼, 梅晓俊. 基于随机共振原理的微弱信号检测与应用 [J]. *机电工程*, 2008, 25(4): 71 - 74.
- [7] 刘鹏, 赵文礼, 吴君棋. 基于混沌振子微弱信号检测的改进与比较 [J]. *机电工程*, 2009, 26(4): 9 - 11, 30.
- [8] 曾庆勇. 微弱信号检测 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1986.

[编辑: 张翔]