应用超声波技术对材料应力特征的提取与分析

郭 芳, 杨 录, 张艳花
(中北大学信息与通信工程学院, 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

摘要: 超声波技术能够对材料(零件或部件)进行快速、准确、便捷的应力测量。对基于超声波技术的应力检测问题作了初步分析,列举了目前我国已用超声波技术测量材料应力的若干试验方法和工程实践应用,阐述了超声波技术对材料应力特征提取的方法。结合现有的理论基础设计了一个应力测量的实验系统,并以此为基础描述了超声波技术在应力测量方面的发展前景。

关键词: 超声波;无损检测;应力
中图法分类号: TB556 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2008)-02-0217-04

Measurement and analysis of material stress with ultrasonic technology

GUO Fang, YANG Lu, ZHANG Yan-hua
(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Ultrasonic technology is competent for testing material stress with speediness, accuracy and facility. In this paper, the theoretical study is made the ultrasonic stress measurement issues, and some experimental methods and practical applications of the measurement are compared and analyzed. The material feature extraction method based on ultrasonic technology is also expatiated. Furthermore, an experimental system for stress measurement is designed, and the developing prospect of ultrasonic technology on stress measurement is described.

Key words: ultrasonic; nondestructive testing; stress

1 引 言

在材料的生产加工过程中, 宏观缺陷的出现是难以避免的。随着结构的大型化,高强度工程材料(如高合金的金属材料)的采用,低应力断裂事故愈发严重,同时为了保证材料的可靠性,设计人员就必须利用无损检测技术来全面地了解材料的特征。在几乎所有的机械设备中,都是用金属构件来承受负载的。这些构件内部应力的大小及其变化是造成失效(如疲劳等)的主要原因,历史上许多灾难性破坏事件大都是由结构中的应力引起的。因此研究和测量构件中的应力对生产和科学试验有着重大的意义。长期以来人们是很关注应力检测的, 了解到金属构件内部应力的大小变化除了与其受力情况有关外,还与其加工过程、形变及周围的温度有关。应力的测量方法也很多[1],如盲孔法、X 射线法、磁力法、超声方法等。由于超声波所固有的特性,如穿透能力强、仪器设备简单、测量速度快、无损等,利用超声波无损测量材料应力状况的潜力是显而易见的。目前在测量材料应力的若干试验和工程实践中, 我国已经应用到超声波检测技术了。比如:材料残余应力的超声波检测方法;螺栓应力的超声测量;无缝钢轨的热应力测量;试件加载应力的测量等。

收稿日期: 2007-03-26; 修回日期: 2007-06-30
作者简介: 郭芳(1982-),女,硕士研究生,研究方向为超声检测和信号处理。
通讯作者: 郭芳, E-mail: aoxue142@163.com

2 声速与应力变化关系的 Hughes 和 Kelly 理论

超声波测量应力的方法都是基于声弹理论的，其理论基本假设为：(1)固体连续性假设；(2)声波的小扰动叠加在物体静态有限变形上；(3)物体是超弹性的、均匀的；(4)物体在变形中可视为等温或等熵过程。1949 年 Hughes 利用超声波测量晶体的三阶弹性常数，以此为基础，随后超声波应力测量技术得到了较大的发展。1953 年 Hughes 和 Kelly 利用Lame 常数 λ 和 μ，以及 Murnaghan 常数 l、m 和 n 提出了各向同性材料的声弹性理论表达式，建立了超声波在材料中传播速度与应力之间的关系，并通过六种传播情况将声速和应力联系起来了。在此理论基础上，对于应力的测量又具体可分为：基于声弹性双折射理论的应力测量；基于纵波声弹性公式的应力测量；基于瑞利波声弹性公式的应力测量。

超声波在材料内部传播时，利用声双折射效应对应力进行测量。其理论基础为：

由于应力引起材料各向异性使得入射的横波分解成两个波[2]，这两个波的传播速度不同，这种现象称为声弹性双折射。考虑平面应力状态下的弱正交异性板，取坐标系 oxyz，其中 x，y 分别为主应力 T_1、T_2 的方向，z 为板材的厚度方向。当有两个沿方向 x，y 偏振的横波沿 z 方向入射，有：

$$\frac{V_{Zx}-V_{Zy}}{V_T}=\frac{\Delta C_{55}-\Delta C_{44}}{2\mu}+\frac{1}{2\mu}\left(1+\frac{V_3}{\mu}\right)(T_1-T_2)=\alpha+C_A(T_1-T_2) \quad (1)$$

其中 V_{Zx}，V_{Zy} 分别是沿方向 x，y 的偏振沿 z 方向传播的横波的波速；$V_T=\frac{V_{Zx}+V_{Zy}}{2}$ 为两个横波的平均速度；α 为织构效应引起的声各向异性，对各向同性材料 $\alpha=0$；T_1、T_2 为主应力；C_A 为声弹性双折射系数。在实际应用中，通常固定距离，测量横波传播时间 t_{Zx}、t_{Zy}，则上表达式可写成：

$$\frac{V_{Zx}-V_{Zy}}{V_T}=\frac{t_{Zy}-t_{Zx}}{(t_{Zy}+t_{Zx})/2} \quad (2)$$

由此可以看出，可以不用测定板的厚度，仅通过传播时间的测量就可获得应力，这是双折射方法的一大优点。

3 材料超声表征

波速是波传播研究中的主要参数之一，它是振动在某给定材料中的传播速度，其大小与材质、结构以及激励形式有关。对于波速有许多不同形式的表述。在超声无损检测中最常用的波速是体纵波波速。一般认为纵波波速正比于弹性模量与密度之比的平方根。在无限大介质中纵波波速 C_l 可表示为：

$$C_l=\sqrt{\frac{E}{\rho}\cdot\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (3)$$

式中 E-杨氏模量；ρ-密度；σ-泊松比；

可见，试样的杨氏模量是可以用声速来表征的。在研究应力对超声波传播影响的过程中，当物体存在初始变形(存在应力)时，会出现两种可能。一种可能是初始形变与形变梯度很小，以至于线性应力-应变关系仍然适用，那么所有的基本控制方程仍然是线性的。只要我们使用线性方程，就能使用叠加原理来研究波在具有初始变形的介质中的传播问题。在受单向应力作用的介质中，波传播的速度是两个 ‘方向 ’或相应方位的函数[3]：

(1)波的传播方向相对于单向应力方向；

(2)波的质点振动方向相对于应力方向；

则沿应力方向传播的纵波波速与应力的关系为：

$$\rho_0 c^2=\lambda+2\mu+\frac{\sigma}{3K_0}\left[\frac{\lambda+\mu}{\mu}(4\lambda+10\mu+4m)+\lambda+2l\right] \quad (4)$$

其中 λ 和 μ 表示介质的二阶弹性常数：$K_0=\lambda+\frac{2}{3}\mu$；l，m 表示三阶弹性系数；$\rho_0$ 表示材料发生形变之前的密度；σ 表示施加的单向应力(正表示拉伸，负表示压缩)。

在此基础上，根据声波的速度 $C_L=(E/\rho)^{1/2}$，推导应力与声速关系[4]。其中 E 为介质的杨氏模量，ρ 是介质的密度，C_L 是声波在介质中传播的速度。当声波在存在一定应力的固体中传播时，随着应力的变化，弹性模量也有变化，在一般的近似中，变化是线性的。则得应力与声速的线性关系，对于各向同性材料

$$d\sigma=\frac{E(dV_{11}V_{11})}{L_{11}}=\frac{E}{L_{11}t_0}dt \quad (5)$$

其中，$d\sigma$ 是应力变化量(MPa)；E 是弹性模量(MPa)；L_{11} 是声波的声弹常数。t_0 是波在被研究材料中通过自由应力路径的时间(s)；

4 声时测量实验的设计

4.1 测量系统

基于上述理论基础，测量构件应力的关键在于准确地测量声时。利用应力变化与声速的线性关系可建立一套实验系统，如图 1 所示。从超声发射/接

收仪发出电脉冲使发射换能器辐射纵波，纵波以第一临界角从楔块进入待测材料，在材料中产生沿近表面传播的临界折射纵波。由近距离接收换能器输出的电信号经过电位器与远距离接收换能器输出的电信号耦合，经过前置放大电路和超声发射/接收仪放大器的放大，通过采集系统，输入计算机。

检测材料应力变化是通过测量发射换能器和接收换能器之间声波的传播声时实现。在本试验中以双接收换能器模式测量声时变化，两接收换能器的距离固定后，通过声时来表示应力的大小。实验时，两个接收换能器之间的距离约为 25cm。在这个距离的换能器能接收到足够大的信号，又可以充分利用应力的积累提高测量的精度。

由于声速随应力变化产生的改变量很小，实验中 100MPa 的应力变化引起的 L_{CR} 波在大约 25cm 的距离上变化只有大约 50ns，所以电路上的延时不能忽略。用不同通道分别采集两个接收换能器的信号时，易引起很大的误差，所以实验中用一个电位器将两个换能器耦合在一起实现单通道采集数据，这在过去的测量系统没有用过。连接电路如图 2 所示，近距离接收换能器的能量相对较大，其通过电位器衰减后进入采集系统，使近距离接收换能器获得信号的幅值与远距离接收换能器获得信号的幅值相近，更加方便测量。

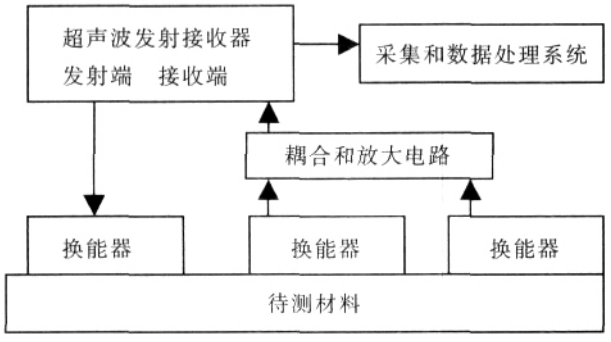


图 1　试验测量系统框图

Fig.1　System diagram for experimental measurement

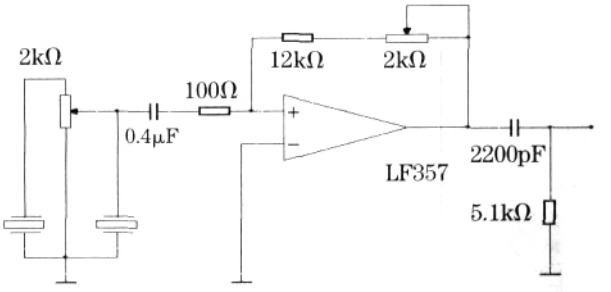


图 2　电路连接图

Fig.2　Circuit diagram

4.2　数据处理

4.2.1　总体设计

软件部分的主要功能以及目的在于逐点计算声时差进而计算相应应力。通过对同一点在不同应力下声时差的分析，验证声时差与应力的线性关系，并与理论计算的结果进行对比，分析该方法的误差。基本思路为：对于一个接受到的原始超声信号，如图 3 所示，先选取一段较为清晰的数据，在能分辨出相邻脉冲的情况下计算其间隔点数，以此为基础计算声时差，如图 4 所示。在建立关系图时，由各个应力下的数据构成数组，然后制图，即可分析结果和误差。

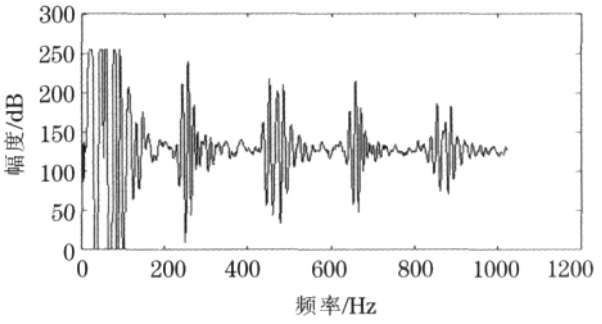


图 3　原始信号

Fig.3　Original signal

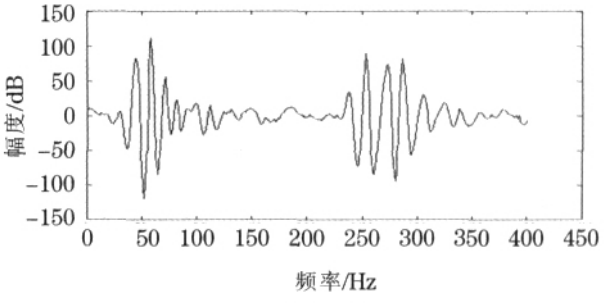


图 4　截取信号

Fig.4　Truncated signal

4.2.2　声时计算

由上述测试系统所获得的信号为两个超声接受探头所接收到的信号叠加而成。由于超声发射器发射的是脉冲信号，则通过计算信号中相邻脉冲峰值的时间间隔就能得到所需的声时信息。具体计算方法如下：根据某一压力下采集到的信号波形图估算脉冲间隔，并以此为基准将其分割成若干段数据。然后分别求出每个数据段的最大值的坐标，结合相应数据段的起止点计算出相邻脉冲的间隔点数。最后，根据采样频率可得出相邻点时间间隔，乘以间隔点数就得到相邻脉冲时间间隔。另外，可在一个数据中计算若干时间间隔取平均值以获得较准确的时差。其框图如图 2 所示。

实际测量时，将所得声时代入上述关系式即可

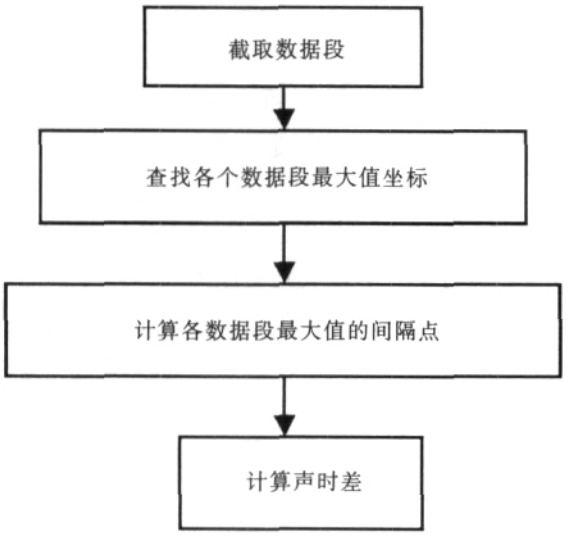


图 5 声时差的计算

Fig.5 Calculation of sound time difference

得当前应力值。但是由于单个数据误差较大，所以采用对同一点不同应力下的声时数据作直线拟合，根据实验中标定的压力值来获得较为准确的数据。

4.2.3 声时差-应力关系图的生成及直线拟合

主程序中，为获得不同应力下的声时差信息，将依次读取超声信号并调用声时差子程序，以获得一系列声时差数据，并结合试验中的压力数据，绘制声时差-应力关系图，如图 6 所示，纵坐标为超声波的传播时间(s)，横坐标为应力(MPa)。

由于各方面误差的影响，所得到的图形是一条折线，不能直接反映声时差与应力的线性关系，且不利于实际应用时实时获取准确数据。基于前面提到的声时差与材料应力间的线性关系，可将所得到的数据进行直线拟合。拟合后得到的结果是声时差与

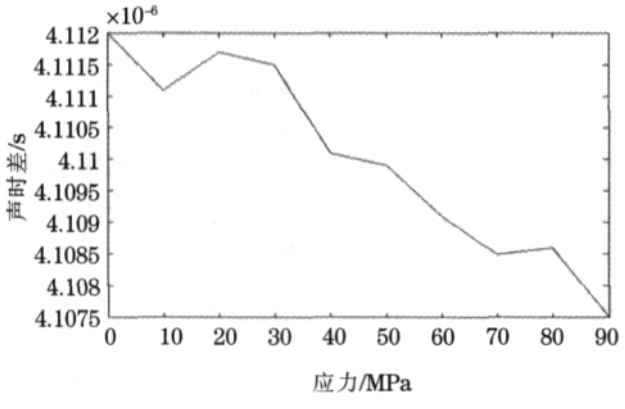


图 6 实验测量的声时差-应力关系

Fig.6 Relationship between sound time difference and stress measured by experiment

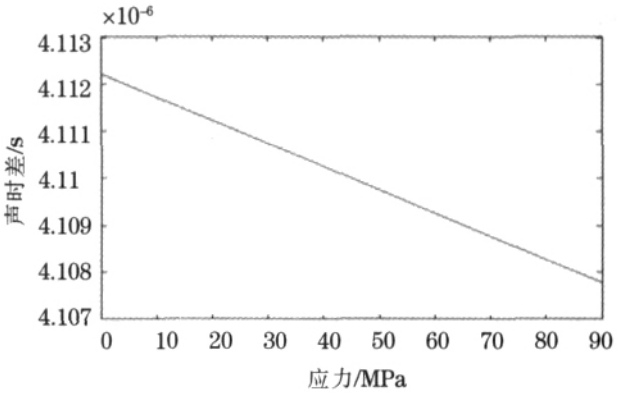


图 7 直线拟合的结果

Fig.7 Result of straight line fitting

材料应力之间的关系图，如图 7 所示。若有大量实验数据作为依据，则可以对某种材料的声时差和应力之间的关系作准确的标定。

5 结 论

该方法是基于声弹理论，即应力变化与声速的线性关系来检测材料的纵向应力，实验测量的是材料应力变化量，实际应用中只需对材料自由状态时(近似看成零应力)进行定标，就可以得知被测材料的应力状况。但在实际应用中还存在一些问题：①测量结果受试件材料组织结构干扰大；②对表层或内部应力急剧变化的构件和形状复杂受三向应力的构建，用超声波法测定的应力要解决得问题较多；③由于声波波长太长，利用干涉法很难解决，而这也将影响到测量精度。如果能够很好地解决这些应力测量问题，就可以更好地提高产品的质量、生产的效率和生产使用中的安全性、可靠性。

参 考 文 献

[1] Kandil F A, Lord J D, Fry A T, Grant P V. A review of residual stress measurement methods-A guide to technique selection[R]. NPL Report MATC(A)04, 2001.

[2] 贺玲凤，刘军. 声弹性技术[M]. 北京：科学出版社，2002, 142-158.
HE Lingfeng, LIU Jun. The technology of sound elasticity [M]. BeiJing: The SciencePress, 2002, 142-158.

[3] J L 罗斯[美]. 固体中的超声波[M]. 北京：科学出版社，2004. 246.
J L Ross[USA]. The ultrasonic in solid[M]. Beijing: The Science Press, 2004. 246.

[4] 刘蕊，王寅观，陈振宇，等. 利用临界折射纵波检测钢轨应力[J]. 声学技术，2004, 23(4): 246-249.
LIU Rui, WANG Yinguan, CHEN Zhenyu, et al. Checkking rail stress used of the critical refraction longitudinal wave[J]. Technology Acoustics, 2004, 23(4): 246-249.