

文章编号: 1001-4888(2007)06-0588-05

超声纯横波法测试 45[#] 钢的内部应力^{*}

魏 勤, 董师润, 徐颖梅

(江苏科技大学数理学院, 镇江 212003)

摘要: 声各向同性的金属材料在应力作用下, 材料表现出声各向异性, 这是用声弹性法分析材料内部应力的基础。本文用垂直于应力方向传播的超声纯横波对 45[#] 钢进行测试, 测试时横波的偏振化方向分别平行和垂直于应力方向。实验结果表明: 材料在拉、压应力作用下, 相互正交的两超声纯横波的声速都发生了变化, 且声各向异性因子与应力成线性关系。利用此关系可测试材料内部应力, 提供了一种无损测试材料内部应力的方法, 另外本实验方法也可以对材料内部残余应力进行评估。实验中利用回振法测量声速, 可测量声速的微小变化, 精度高。

关键词: 声双折射; 回振法; 应力测试; 残余应力

中图分类号: TG115.28⁺⁵ **文献标识码:** A

0 引言

声弹性理论是由 Benson 和 Raelson 于上个世纪提出的一种利用超声双折射现象测试材料内部应力而发展起来的一门应力分析理论^[1]。正如光测弹性理论一样, 用偏振化的超声纯横波沿垂直于主应力方向在弹性材料中传播时, 偏振化方向平行和垂直于应力方向的两种超声波声速发生了变化, 导致了声各向异性, 称为超声双折射现象^[2]。Toknoka 和 Iwashimizu 在文[3]中指出: 对于各向同性的材料在弹性范围内, 由偏振化方向垂直和平行主应力方向的偏振化超声横波声速所表现出的声各向异性与主应力的差值成正比, 并在此基础上提出了一种利用超声测试应力的方法。但当时该理论应用受到了实验仪器精度的限制。利用超声双折射测试材料内部的应力尤其是残余应力, 与传统的应力测试方法相比, 具有无损、适时、操作简单快捷等特点, 因此在工业生产中具有广阔的应用前景^[4]。本文主要利用回振法研究 45[#] 钢在拉压应力作用下的声双折射现象, 提出一种测试材料内部应力以及评估残余应力的实验方法。

1 声弹性双折射测试应力理论

在自由状态的非结晶结构金属材料内部若无应力作用, 则超声波传播速度与传播方向无关, 同时超声横波的传播速度与横波的振动方向无关, 即金属材料呈声各向同性。当金属材料受应力系统作用时, 声波的传播速度会发生变化, 金属材料呈声各向异性。

若声波的传播方向垂直于载荷应力方向^[5], 则:

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \quad (1)$$

$$\rho V_{T1}^2 = \mu - \frac{T}{3K} \left[m + \frac{\lambda l}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \quad (2)$$

* 收稿日期: 2007-04-10; 修订日期: 2007-12-03

基金项目: 江苏省重点实验室开放研究基金课题(SJ05046)

通讯作者: 魏勤(1973-), 男, 硕士, 江苏科技大学讲师, 主要从事超声测试以及应力测试方面的研究。

$$\rho V_{T_2}^2 = \mu - \frac{T}{3K} \left[m - \frac{\lambda + \mu}{4\mu} n - 2\lambda \right] \quad (3)$$

式中 ρ 为未受载时材料密度； V_L, V_{T_1} 和 V_{T_2} 分别表示纵波声速、偏振化方向平行和垂直于应力方向的横波声速； T 为静压力，规定压为正，拉为负。 λ 和 μ 为二阶弹性 Lamé 常数； l, m, n 为三阶弹性 Murnaghan 常数^[6]。 K 为各向同性材料在初始状态的体积模量， $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ 。本实验所加载荷的方向与声波传播方向垂直，则由(2)式和(3)式得：

$$\frac{V_{T_1} - V_{T_2}}{(V_{T_1} + V_{T_2})/2} = -\frac{T}{2\mu} \left(1 + \frac{n}{4\mu} \right) \quad (4)$$

式中 $\frac{V_{T_1} - V_{T_2}}{(V_{T_1} + V_{T_2})/2}$ 定义为声各向异性^[7]。如果通过实验能测得偏振化方向分别平行和垂直于应力方向横波在材料中的传播时间为 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ ，直接将时间带入(4)式得：

$$\frac{\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2}{(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)/2} = \frac{T}{2\mu} \left(1 + \frac{n}{4\mu} \right) \quad (5)$$

(5)式则提供了一种利用超声双折射法测量材料内部应力的方法^[8]。本文使用 UVM-2 型超声回振模块精确地测量 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ ，由(5)式测试材料内部应力。

2 实验方法与实验装置

本实验采用回振法^[9,10]测量超声波在材料中的传播时间。为了提高实验精度，本文采用超声双换能器测试模式，以消除声波在材料中传播时间的系统误差。原理图如图 1 所示。图中(a)为加载情况下发射换能器和接收换能器的布置情况，由回振法测得其回振的周期为 τ ，包括信号在电路中的传输时间、信号在换能器和耦合剂中的传输时间、超声波在工件中的传播时间以及电路的延时。(b)图将发射换能器和接收换能器直接利用耦合剂耦合，测得回振法的周期为 τ' ，包括信号在电路中的传输时间，信号在换能器和耦合剂中的传输时间以及电路延时。由此 $\Delta\tau = \tau - \tau'$ 则为声波在工件中的传播时间。通过本实验方法消除了信号在电路中以及信号在耦合剂中的传播时间引起的实验误差，提高了实验精度。

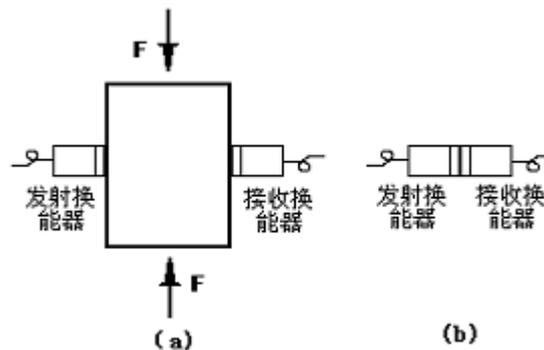


图 1 超声双换能器测试方法图

Fig. 1 Schematic diagram of dual transducers

实验利用 UVM-2 型回振测试模块以及 Tektronix1012 型数字示波器搭建的测试系统，通过 CMT5205 电子万能试验机进行加载，如图 2 所示。声波探头为美国 PANANETRICS 公司纯横波换能器，频率为 2MHz。其特点是该种换能器所产生的声波在材料中传播时引起介质质点振动方向是偏振化，其偏振化方向在探头上用红线标出。普通工业探伤用横波是由纵波经波型转换得到的，介质中质点的振动方向虽与传播方向垂直，但其偏振化方向是不确定的。实验采用回振法测试声波在材料中的传播时间，时间测试精度为 10^{-11} s，测试时室温为 23℃。

测试试样为 45# 钢，经锻打后，920℃ 保温 2.5 小时随炉冷却，经机械加工，做成压试样(50.00mm×50.78mm×72.60mm)和拉试样(厚度为 19.70mm)，如图 3 所示。



图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup



图 3 实验测试 45# 钢试样图

Fig.3 Specimen of 45 steel

3 实验数据及处理

利用 CMT5205 电子万能试验机对试样进行拉伸压缩试验,试样拉伸时载荷从 0kN 至 50kN,间隔为 5kN;压缩时为 0kN 至 100kN,间隔为 10kN,每次加载有 10 分钟的稳定时间。45# 钢拉伸和压缩时 V_{T1} 和 V_{T2} 随应力变化情况如图 4 所示。为了便于分析,规定应力正时为拉伸,应力负时为压缩。

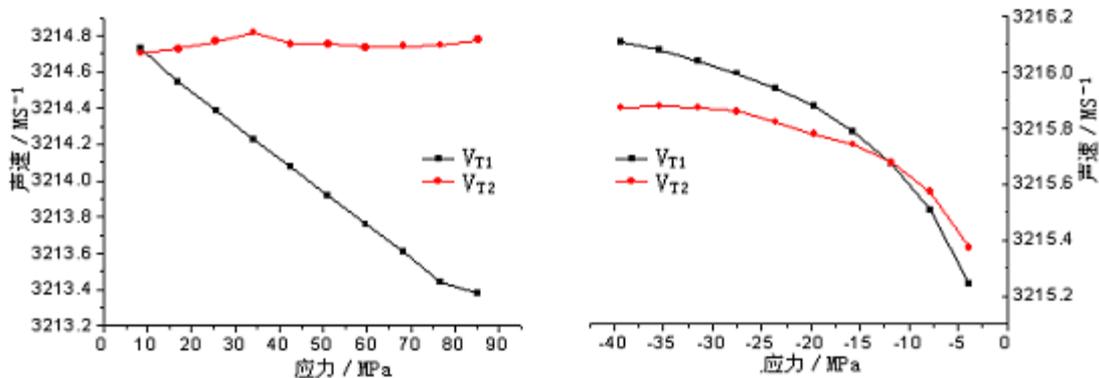


图 4 45# 钢拉伸和压缩时两超声纯横波的声速与应力关系图

Fig.4 Relation of shear waves velocities with stress

由图 4 可知,当 45# 钢拉伸或压缩时, V_{T1} 和 V_{T2} 都发生了变化,即存在超声双折射现象。试样受拉时, V_{T1} 随应力增大而减小,而 V_{T2} 几乎不变化;试样压缩时, V_{T1} 和 V_{T2} 同时随应力增大而减小。

图 5 给出在应力作用下,试样的声各向异性因子随应力变化关系图。

由图 5 可知,试样在受压应力和拉应力时所对应的声各向异性与应力 σ 值成线性关系。图 5 中声各向异性因子与应力关系可拟合为:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = \alpha + Ca \cdot \sigma \quad (6)$$

式中 α 为材料试样在自然状态下的声各向异性,一般是由材料的组织结构和残余应力等因素产生的; Ca 为拟合直线的斜率,即声弹性双折射系数^[7,8]。

在实际工程应用中,若通过实验得到(6)式的表达式,就能通过该式测试材料内部的载荷应力。图 5 材料拉伸和压缩时声各向异性的线性拟合结果分别为:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = 3.47853 \times 10^{-5} - 5.688035 \times 10^{-6} \cdot \sigma \quad (\sigma > 0) \quad (7)$$

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = 3.97989 \times 10^{-5} - 2.9939 \times 10^{-6} \cdot \sigma \quad (\sigma < 0) \quad (8)$$

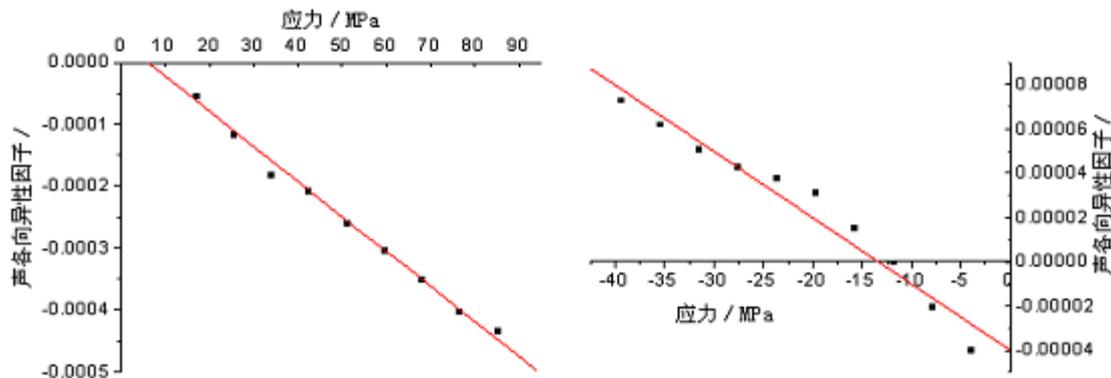


图5 45# 钢在应力作用下声各向异性因子与应力的关系图

Fig. 5 Relation of acoustic anisotropy with stress

材料试样在未知单轴载荷应力作用下,利用本实验测试系统测试出材料中沿垂直应力方向传播的横波速度 V_{T1} 和 V_{T2} ,可由 V_{T1} , V_{T2} 的大小以及变化趋势确定材料是受压状态还是受拉状态,并根据数值由(7)式和(8)式计算出材料内部应力值。

另外,在(6)式中 α 表示材料试样在自然状态下的声各向异性,若试样声各向同性,则可忽略材料组织结构的影响, α 主要是残余应力因素产生的。令 $\alpha = Ca \cdot \sigma_0$,则可将(6)式改写为:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = Ca \cdot (\sigma + \sigma_0) \quad (9)$$

式中 σ_0 表示试样内部残余应力在平行于外加应力方向上的折合分量。当试样无载荷应力时,则方程变为:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = Ca \cdot \sigma_0 \quad (10)$$

图5中 σ_0 即为直线与应力轴的交点处的数值,可根据 V_{T1} , V_{T2} 和 σ_0 的大小进行评估残余应力的拉压性质和大小。

与传统的应力测试方法相比,本测试方法具有无损的特点,同时实验过程方便快捷,实验结果精确。利用本实验方法不仅可以测试材料中的载荷应力,也可以用该方法来确定材料残余应力的性质和大小,在实际应用中有着广泛的应用范围和重要的应用价值。本文主要研究在拉压应力状态下利用超声双折射现象测试材料内部的应力以及评估材料内部的残余应力,对平面应力状态下材料的应力测试正在研究之中。

4 结论

本文用偏振化方向平行和垂直于应力方向的超声纯横波对 45# 钢进行测试,实验结果表明:材料在拉、压应力作用下,横波传播速度 V_{T1} 和 V_{T2} 都发生了微小变化,且声各向异性因子与应力成线性关系;可根据 V_{T1} 和 V_{T2} 的大小以及变化趋势确定材料所处的应力状态是拉还是压,根据声各向异性因子与应力的关系测试材料内部应力,提供了一种无损测试材料内部应力的方法。本实验方法也可以对材料内部残余应力进行评估。

参考文献:

- [1] Benson R W, Raelson V J. Acousticelasticity[J]. Prod. Eng. , 1959,30:56~59.
- [2] Hsu N N. Acoustical Birefringence and Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis[J]. Exp. Mech. , 1975,14(5):147~152.
- [3] Toknoka T, Iwashimizu Y. Acoustical Birefringence of Ultrasonic Waves in Deformed Isotropic Elastic material[J]. Int. J Solids Struct, 1968, 4:383~389.
- [4] Arai Y, Kobayashi H. Measurement of Welding Residual Stresses by Acoustoelastic Technique Using Longitudinal

- and Transverse Waves[J]. Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng, 1990,56:81~87.
- [5] Hughes D S, Kelly J L. Second-Order Elastic Deformation of Solids[J]. Physical Review, 1953, 92(5):1145~1149.
- [6] Murnaghan F D. Finite Deformation of an Elastic solid[M]. John Wiley, New york,1951.
- [7] Masumi Hasegawa, Yasutoshi Sasaki. Acoustoelastic Birefringence effect in wood I:effect of applied stresses on the velocities of ultrasonic shear waves propagating transversely to the stress direction[J]. The Japan Wood Research society, 2004,50:47~52.
- [8] Hirao M, Pao Y H. Dependence of Acoustoelastic Birefringence on Plastic Strain in a Beam[J]. J Acoust Soc Am, 1985,77:1659~1664.
- [9] 王庆光. 残余应力检测技术及其应用[J]. 重型机械科技, 2002,4:39~41(Wang Qingguang. The technology and application of residual stress measurement. Heavy Machinery Science and Technology, 2002, 4: 39 ~ 41 (in Chinese))
- [10] 徐虹,滕宏春,崔波等. 残余应力非破坏性测量技术的发展现状简介[J]. 理化检验—物理分册, 2003,39(11):595~598(Xu hong, Tun Hongchun, Cuibo. The state of the art and development on nondestructive residual stress measurement. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2003, 39(11): 595 ~ 598 (in Chinese))

Stress Measurement of 45[#] Steel By Ultrasonic Pure Mode Shear Wave

WEI Qin, DONG Shi-run, XU Ying-mei

(Department of Physics, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Acoustic anisotropy effect occurs when an isotropic metal material is under stress action. This is the basis of stress measurement in material based on acoustoelastic effect. In this paper, pure mode shear waves propagating perpendicularly to the direction of stress were used to test 45[#] steel. The directions of polarized shear wave are parallel and perpendicular to the direction of stress respectively. Experimental results show that the presence of tensile and compression stresses cause small changes in phase velocities of shear waves, which is called acousto-elastic birefringence effect. Acoustic birefringence provides a practical non-destructive technique for stress measurement. Furthermore, this result can also be used to evaluate the residual stress. The phase velocities were tested and small changes in velocity were detected by sing-around methods in the experiment.

Keywords: acoustic birefringence; sing-around methods; stress measurement; residual stress