

# 超声双折射法测试铝合金的内部应力\*

魏勤<sup>1†</sup> 董师润<sup>1</sup> 徐秉汉<sup>2</sup> 徐颖梅<sup>1</sup>

(1 江苏科技大学数理学院 镇江 212003)

(2 中国船舶科学研究中心 无锡 214082)

**摘要** 声各向同性的金属材料在应力作用下表现出声各向异性,这是用声弹性法分析材料内部应力的基础。本文用偏振方向平行或垂直于应力方向的超声纯横波对 LY11 型铝合金进行测试。实验结果表明:材料在拉、压单轴应力作用下,偏振方向平行和垂直于应力方向的超声纯横波的声速都发生了变化。实验在分析材料声各向异性的基础上计算材料声弹性双折射系数,得到测试 LY11 型铝合金内部应力的理论公式,并对其内部的残余应力进行评估。实验中利用双换能器回振法测量声速,时间测试精确度可达  $10^{-11}$  s,可精确测量声速的微小变化量。

**关键词** 声双折射,回振法,应力测试,残余应力

## Measurement of stress in aluminum alloy by acoustic birefringence

WEI Qin<sup>1</sup> DONG Shi-Run<sup>1</sup> XU Bing-Han<sup>2</sup> XU Ying-Mei<sup>1</sup>

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

(2 China Ship Scientific Research Center, Wuxi Jiangsu 214082)

**Abstract** Acoustic anisotropy effect occurs when a isotropic metal is submitted to stress which is the base of measurement of stress in material by acoustoelastic effect. In this paper, orthogonally polarized pure mode shear waves were used to test LY11 Aluminum alloy. Experimental results show that the presence of stress causes small changes in phase velocities of shear waves, which is called acoustoelastic birefringence effect. The acoustoelastic coefficients are acquired by the analysis of the acoustic anisotropy, and theoretical equations of measuring stress in material are obtained. Furthermore, the residual stress is evaluated. The phase velocities are measured by a sing-around method by which small changes in velocity can be detected. The precision of time interval can reach to  $10^{-11}$  s.

**Key words** Acoustic birefringence, Sing-around methods, Stress measurement, Residual stress

2007-03-37 收稿; 2008-06-25 定稿

\* 江苏省船舶先进设计制造技术重点实验室开放课题资助(163220129)

作者简介:魏勤(1973 - ),江苏镇江人,男,讲师,硕士,研究方向:材料物理性能表征和超声检测。

董师润(1950 - )男,研究员,博士。徐秉汉(1933 - 2007)男,中国工程院院士。

徐颖梅(1981 - ),女,江苏科技大学材料学院硕士研究生。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail:future\_good@163.com

## 1 引言

Benson 和 Raelson<sup>[1]</sup>于上个世纪中期利用超声双折射现象测试材料的内部应力。偏振的超声纯横波垂直于主应力方向在弹性材料中传播时,偏振方向分别平行和垂直于应力方向的两种超声波的声速会发生变化,导致声各向异性,称为超声双折射现象<sup>[2]</sup>。Toknoka 和 Iwashimizu 在文中<sup>[3]</sup>指出:对于各向同性的材料在弹性范围内,偏振方向垂直和平行主应力方向的超声横波声速所表现出的声各向异性与应力成正比,并在此基础上测试了处于平面应力状态下材料内部的应力分布。但该理论的应用受到实验仪器精度和材料的组织结构效应的制约。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,在工业生产中具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。本文采用双换能器回振法研究组织结构效应小的 LY11 型铝合金在拉压应力状态下的纵横波声速变化,分析了材料的双折射效应,得到利用超声双折射法测试 LY11 型铝合金单轴载荷应力的理论公式,并分析了材料内部的残余应力。

## 2 声弹性双折射测试应力理论

在自由状态下声各向同性的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(即偏振方向)无关。当该金属材料受应力作用时,金属材料呈声各向异性,此时相应声速的表达式分成以下两种情况。

若传播方向平行于载荷应力方向<sup>[5]</sup>,则:

$$\rho V_l^2 = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K} \left[ 2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \quad (1)$$

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

若声波的传播方向垂直于载荷应力方向<sup>[5]</sup>,则:

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

$$\rho V_{T_1}^2 = \mu - \frac{T}{3K} \left[ m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \quad (4)$$

$$\rho V_{T_2}^2 = \mu - \frac{T}{3K} \left[ m - \frac{\lambda + \mu}{4\mu} n - 2\lambda \right] \quad (5)$$

式中  $\rho$  为材料密度,  $V$  为声速,  $T$  为单轴应力, 规定压为正, 拉为负。下标  $L$  表示纵波, 下标  $T_1$  和  $T_2$  分别表示偏振方向分别平行和垂直于应力方向的横波。  $\lambda$  和  $\mu$  为二阶弹性 Lamé 常数,  $l, m, n$  为三阶弹性 Murnaghan 常数<sup>[6]</sup>。  $K$  为各向同性材料在初始状态的体积模量,  $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ 。图 1 表示试样在单轴应力作用下横波垂直于纸面向里传播时其偏振方向的示意图,  $T_1$  和  $T_2$  分别横波的偏振方向。

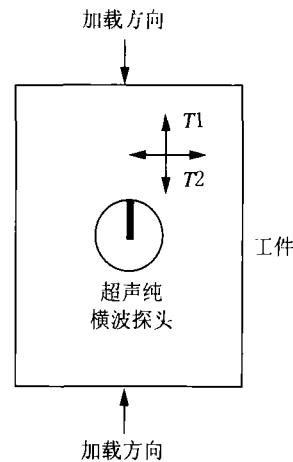


图 1 单轴应力状态下超声波的传播方向和横波偏振方向

当单轴应力方向与横波传播方向垂直,则由(4)式和(5)式得:

$$\frac{V_{T_1} - V_{T_2}}{(V_{T_1} + V_{T_2})/2} = -\frac{T}{2\mu} \left( 1 + \frac{n}{4\mu} \right) \quad (6)$$

式中  $\frac{V_{T_1} - V_{T_2}}{(V_{T_1} + V_{T_2})/2}$  定义为声各向异性<sup>[7]</sup>。通

过实验测得偏振方向分别平行和垂直于应力方向的横波在材料中的传播时间为  $\Delta\tau_1$  和  $\Delta\tau_2$ , 直接代入 (6) 式得:

$$\frac{\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2}{(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)/2} = \frac{T}{2\mu} \left(1 + \frac{n}{4\mu}\right) \quad (7)$$

(7) 式等式左边是用声波传播时间表示声各向异性, 可以避免因计算声速测量声程而引入的误差, 提供了用超声双折射法测量材料内部应力的方法<sup>[8]</sup>。只需精确地测量出声波在材料中传播时间的微小变化  $\Delta\tau_1$  和  $\Delta\tau_2$ , 则由 (7) 式测试应力。

### 3 实验方法与实验装置

本实验为了分辨在应力作用下声波传播速度的微小变化, 采用双换能器模式回振法<sup>[9,10]</sup>测量超声波在材料中的传播时间, 其原理图如图 2 所示。由超声脉冲发生器产生一负脉冲激励超声发射换能器, 并由接收换能器

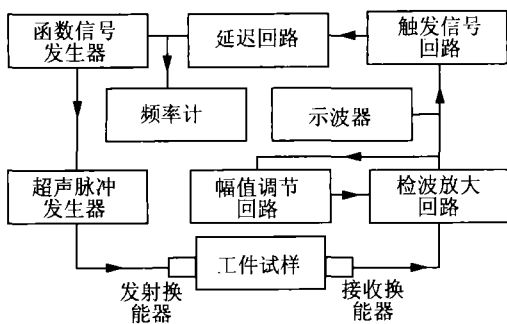


图2 回振法原理结构图

接收信号, 经检波放大后, 并由触发信号回路产生触发信号。触发信号经延迟后触发函数信号发生器产生触发脉冲信号, 并由它触发超声脉冲发生器产生负脉冲激励发射换能器, 由此形成循环, 轮回往复。在此过程中可通过幅值调节回路自动调节信号的幅值, 通过示波器观察信号的强弱, 并由频率计测试经延迟后信号的频率。频率的倒数即为信号循环一次所需时间, 其中包括信号在电路中的传递时间、声波在探头、耦合剂以及试样中的传播时间。

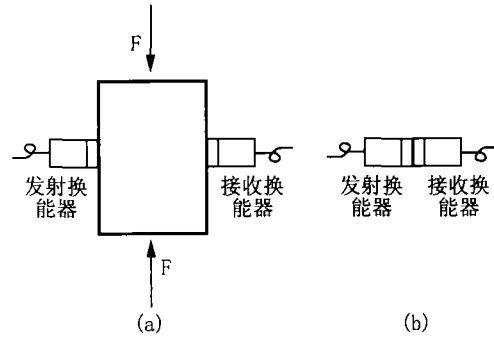


图3 超声双换能器测试方法图

采用该实验方法的目的是为了消除信号在电路中传播时间引起的误差以精确测量声波在材料中传播时间的微小变化, 其原理如图 3 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设为  $\tau$ , 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  $\tau'$ , 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。

在实验中采用 UVM-2 型回振测试模块、Tektronix1012 型数字示波器和 CMT5205 电子万能试验机搭建测试系统, 如图 4 所示。回振模块中设置了测试电子门, 将门内信号动态监测便于观测波形和设置时间测试点, 如图 5 所示。设置信号的回振次数为 10000 次, 时间测试精度为  $10^{-11}$  s。与传统单换能器测试声速的飞行时间法相比, 本实验方法消除了信号在电路和耦合剂中对传播时间的影响, 同时又具备了回振法能分辨声速微小变化的优点。另外单换能器接收的是反射信号, 有时要求考虑相位跃迁等因素, 而双换能器接收的只是透射信号, 无需考虑相位跃迁。

测试试样为 LY11 型铝合金, 其化学成份是 3.8 ~ 4.8% Cu, 0.4 ~ 0.8% Mg, 0.4 ~ 0.8% Mn, 余量为 Al。试样的外部尺寸: 铝合

金压试样为长方体(49.00mm × 49.02mm × 68.72mm),拉试样为板条形,厚度为19.15 mm。所用声波探头为美国 PANANETRICS 公司生产的纯横波换能器,频率为2MHz。其特点是该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的,而普通

工业探伤用横波是由纵波经波型转换得到的,其介质中质点的振动方向虽与传播方向垂直,但其振动方向是完全不确定的。所用换能器的偏振化方向由厂家探头上用红线标出,每次测量时要确保发射接收换能器偏振方向平行。

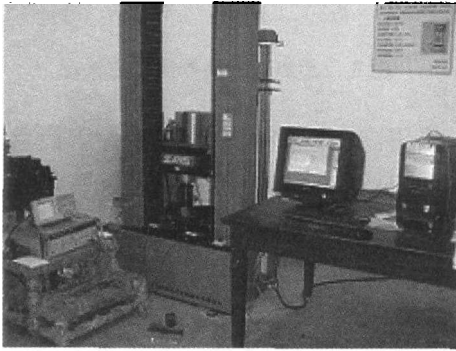


图4 实验测试系统图

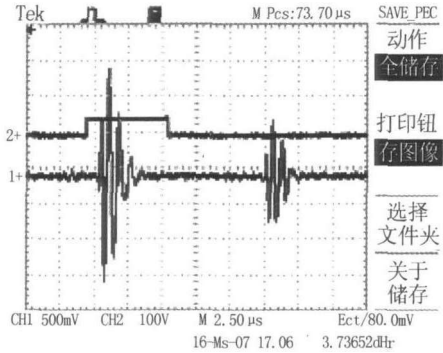


图5 实验中超声波形图与电子门

#### 4 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 0 至 100kN,间隔为 10kN,每次加载有十分钟的稳定时间。LY11 铝合金拉伸和压缩时偏振方向分别平行与垂直于应力方向的横波声速变化情况如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知,当 LY11 型铝合金受压或受拉时,偏振方向平行和垂直于应力方向的两列横波传播速度发生了变化。试样受压应力时,偏振方向平行于应力方向的横波声速  $V_{T1}$  随应力增大而增大;偏振方向垂直于应力方向的横波声速  $V_{T2}$  随应力增大而减小,变化趋势相反。试样受拉应力时,  $V_{T1}$  随拉应力增大而减小,  $V_{T2}$  随应力增大而减小,变化趋势也相反。

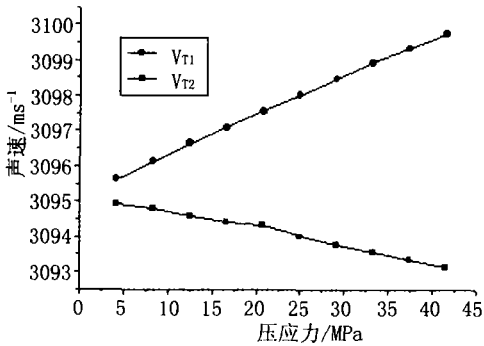


图6 铝合金试样受压时声速与应力的关系图

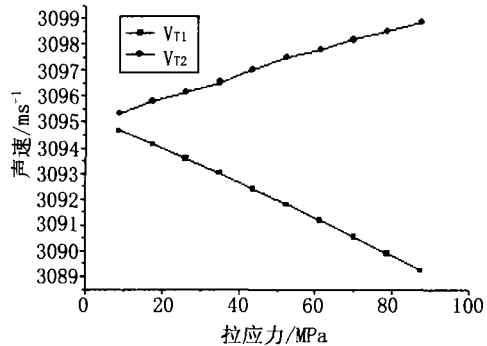


图7 铝合金试样受拉时声速与应力的关系图

图 8 和图 9 分别给出在压应力和拉应力作用下,试样声各向异性随应力的变化。

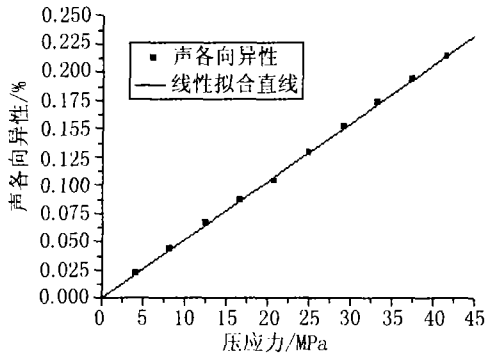


图 8 铝合金受压时声各向异性与应力的关系图

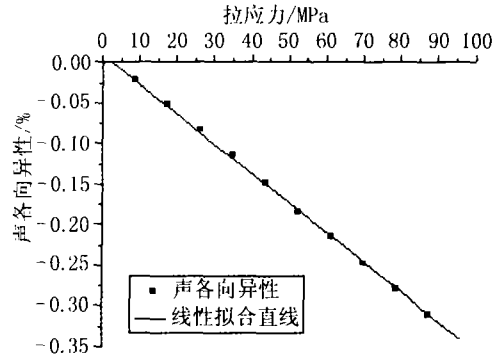


图 9 铝合金受拉时声各向异性与应力的关系图

由图 8 和图 9 可知,铝合金试样在受压和受拉时所对应的声各向异性与单轴载荷应力  $T$  成线性关系,并与公式(6)相符。图 8 与图 9 中声各向异性与应力关系可拟合成:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = \alpha + Ca \cdot T \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为材料试样在自然状态下的声各向异性,  $Ca$  为声各向异性与应力拟合直线的斜率,为声弹性双折射系数<sup>[7,8]</sup>。由于材料在受压应力和拉应力时  $V_{T1}$ 、 $V_{T2}$  变化趋势和幅度不一样,所以在受压和受拉时声弹性双折射系数不等。

在实际工程应用中,若通过实验得到如(8)式,就能通过该式测试材料内部的载荷应力。图 8 与图 9 的线性拟合结果分别为:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = 1.32631 \times 10^{-5} + 5.12773 \times 10^{-5} \cdot T_{\text{压}} \quad (9)$$

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = 1.27755 \times 10^{-4} - 3.70109 \times 10^{-5} \cdot T_{\text{拉}} \quad (10)$$

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横波传播速度  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$ ,可由  $V_{T1}$ 、 $V_{T2}$  的大小确定试样是受压状态还是受拉状态,并根据数值由(9)(10)两式计算出材料内部应力值。

此外,(9)式中  $\alpha$  表示试样在自然状态下的声各向异性,若各向同性试样在自然状态下无残余应力,则  $\alpha = 0$ ;但材料在制备加工时内部常存在残余应力,残余应力会导致  $\alpha \neq 0$ ;令  $\alpha = C\alpha \cdot T_0$ ,则可将(9)式改写为:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = C\alpha \cdot (T + T_0) \quad (11)$$

式中  $T_0$  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,利用本实验测试系统测试出材料中横波传播速度  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$ ,则方程变为:

$$\frac{V_{T1} - V_{T2}}{(V_{T1} + V_{T2})/2} = C\alpha \cdot T_0 \quad (12)$$

一方面可根据  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  的数值大小判定在主应力方向上材料内部残余应力是压应力还是拉应力,同时可根据  $T_0$  的大小进行评估残余应力的大小。在图 8 图 9 中可根据拟合直线与  $X$  轴的截距来表征残余应力的拉压性质和大小。本文所测试的铝合金材料本身材质均匀,残余应力小,这与图 8 和图 9 的结论是一致的。

利用超声双折射法测试材料内部应力具备无损,快捷等特点,不仅可以测试材料中的载荷应力,而且可用该方法来评估材料残余应力的性质和大小,因此在实际应用中有一定的应用价值。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,对平面应力状态下材料的应力测试我们正在研究之中。

## 5 结论

本文利用偏振方向平行和垂直于应力方向的超声纯横波研究处于单轴应力状态下的LY11型铝合金的声各向异性。实验结果表明:铝合金在拉、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,且两横波速度的变化趋势相反,因此可根据 $V_{T1}$ 和 $V_{T2}$ 的大小以及变化趋势确定材料所处的应力状态(拉压)。实验得到了LY11型铝合金材料在单轴应力作用下声各向异性与应力之间的线性关系,可根据其测试材料内部的载荷应力,评估材料内的残余应力。

## 参 考 文 献

- [1] Benson R W, Raelson V J. Acousticelasticity, Product Engineering 30. 1959: 56 - 59.
- [2] Hsu N N. Acoustical Birefringence and Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis, Exp. Mech., 1975,14(5): 147 - 152.
- [3] Toknoka T, Iwashimizu Y. Acoustical Birefringence of Ultrasonic Waves in Deformed Isotropic Elastic material, 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, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng56, 1990: 81 - 87.
- [5] Hughes D S, Kelly J L. Second-order elastic deformation of solids. Phy. Rev.92, 1953:1145.
- [6] Murnaghan F D. Finite Deformation of an Elastic solid, 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. 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 Acoust Soc Am. 1985 (77):1659 - 1664.
- [9] 王庆光. 残余应力检测技术及其应用. 重型机械科技. 2002(4):39 - 41.
- [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. 理化检验 - 物理分册. 2003,39(11):595 - 598.