

超声偏振横波与铝合金棒材内部应力的关系研究

靳聪¹, 卢超¹, 史亦韦², 梁菁², 王晓²

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 利用垂直入射的偏振横波换能器, 首先研究了偏振方向与铝合金棒材挤压方向成不同角度的超声横波速度的差异, 然后对不同应力下与应力方向成不同角度偏振的超声横波速度的变化进行了研究。试验结果表明: 在无应力时, 平行于挤压方向偏振的横波和垂直于挤压方向偏振的横波的速度差异不大, 棒材的各向异性对不同方向偏振横波速度的影响不明显。当施加应力后, 平行于应力方向偏振的横波传播时间升高, 垂直于应力方向偏振的横波传播时间降低; 在剔除材料弹性变形所带来的声传播距离变化的影响后发现, 平行于应力方向偏振的横波声速降低, 垂直于应力方向偏振的横波声速升高; 与偏振方向平行的应力对横波速度的影响大于与偏振方向垂直的应力对声速的影响。

关键词: 无损评价; 铝合金棒材; 超声; 应力

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2015.1.012

中图分类号: TB553

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2015)01-0071-06

铝合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好、热处理强化效果好和价格成本低等特点, 广泛应用于飞机结构零件的制造中, 在航天航空、汽车、船舶、核工业及兵器工业等科技领域中都具有广泛的应用前景。内部应力也被称为残余应力, 它经常产生于材料的热机械处理过程中, 直接影响航空铝合金结构件的力学性能、尺寸稳定性与使用寿命, 使铝合金低频疲劳强度降低, 应力腐蚀倾向升高^[1], 所以有必要对其内部应力进行测量与评价。目前比较常用的机械测定法主要有切条法、切槽法、小孔法等, 但这些方法均属于破坏性检测方法, 使得对内部应力的测量存在着不可逆性, 因而限制了在一些领域的应用^[2]。因此, 在不破坏原有内部应力或残余应力状态的前提下快速、无损测量其大小和分布更加具有实际意义, 这样能够提高对材料状态的认识, 为材料性能、寿命等方面的评价提供更多信息^[3]。

目前主要的无损应力检测方法包括 X 射线衍射法、磁性测定法、巴克豪森噪声法、中子衍射法和超声波法^[4]等。其中, 前三种方法的测量深度只有表面几个或十几微米, 不足以反映出对材料性能造

成影响的深处的内部应力情况, 中子衍射虽然能测量几十毫米深的内部应力, 但设备过于复杂, 目前仅有少数国家具备试验能力^[5,6]。超声测量内部应力的基础是声弹性效应, 即材料中的应力会影响超声波的传播速度, 压应力使波速增加, 拉应力使波速降低, 利用这一原理可以测量构件整体的内部应力。超声法的测量具有检测成本较低, 设备简单, 测量范围灵活等优势, 在工业生产、科学研究等方面均有良好且十分广阔的发展前景^[7,8]。超声波作为在工程方面广泛应用的无损检测手段, 根据其“声弹性”可以反映超声传播路径上平均应力的大小。声弹性理论是由 Benson 和 Raelson 于上世纪提出的一种利用超声速度变化反应材料内部应力而发展起来的一门应力分析理论^[9]。正如光测弹性力学理论一样, 偏振化的超声纯横波在弹性材料中传播时, 材料中的应力会引起偏振化方向平行和垂直于主应力方向的超声波速度的变化, 从而出现声的各向异性, 此称为超声波的双折射现象^[10]。折射本质上是由超声波的“声弹性”引起的, 它主要体现为其传播速度受应力的影响, 利用声弹性可以分析非透明材料中的应力^[11-14]。

利用超声波测量材料应力的方法主要有: 纵波法、横波法、临界折射纵波法、表面波法等, 其中后两种方法只能测量表面或近表面的应力, 无法测量内部应力。纵波虽然能反映材料内部的应力, 但其对应力不敏感, 测量精度较低, 并且只能反映其传播方

收稿日期: 2017-07-07; 修订日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51265044, 11374134)

通讯作者: 史亦韦(1962—), 女, 研究员, (E-mail) yiwei_shi@yahoo.com.cn。

向上的应力,对于垂直于其传播方向的应力不能测量。而在实际的检测过程中,超声传播方向往往是材料较薄的方向,这一方向上的残余应力较小,因此,本文选用偏振横波作为研究手段,以便测量垂直于其传播方向上的残余应力。

本文研究了超声偏振横波的传播特性与铝合金棒材内应力的关系,特别分析了应力对不同偏振方向横波声速影响的差异,并说明造成这种差异的原因,给出了一种利用超声偏振横波测量材料内部应力的新方法。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

在 LC4 铝合金棒材中沿挤压方向截取出标准拉伸试样,如图 1 所示。试样厚度为 7.58mm,初始宽度为 29.97mm。利用万能拉伸试验机对试样施

$$\rho_0 v_{L//}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right]$$

$$\rho_0 v_{L\perp}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right]$$

$$\rho_0 v_{S//}^2 = \mu - \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right]$$

$$\rho_0 v_{S\perp}^2 = \mu - \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[m - \frac{(\lambda + \mu)n}{2\mu} - 2\lambda \right]$$

其中, $v_{L//}$ 和 $v_{L\perp}$ 分别表示传播方向与应力方向平行、垂直的纵波速度, $v_{S//}$ 和 $v_{S\perp}$ 分别表示传播方向与应力方向垂直,偏振方向与应力方向平行、垂直的横波波速, l, m, n 是材料的 Murnaghan 常数, λ 和 μ 是材料的 Lamé' 常数, ρ_0 和 σ 分别表示材料在无应力时的密度和应力^[17]。

可以看到,当材料性质保持不变时,超声波速度 v 和应力大小 σ 呈线性关系:

$$v - v_0 = K\sigma \quad (2)$$

其中 v_0 为在无应力状态下材料中声波速度, K 表示应力对声波速度的影响,是综合了上述多种因素的一个常量,称为声弹性系数,它是声弹性应力测量的关键参数。

试验采用“自发自收”的方式,使用一个中心频率为 5MHz 的 Y 型切割晶片垂直发射横波探头,探头的布置方式,应力测量试验装置以及万能拉伸试验机和数字示波器如图 2 和图 3 所示。采用信号发生器激励探头,探头发出的横波垂直入射到试样表面,经底面反射后再被同一探头接收。发射和接收信号由信号发生器传给示波器,信号发生器与示波

加逐渐增加的轴向载荷,由于厚度方向上无法添加引伸计,因而在宽度方向上加引伸计,运用体积不变原理将宽度方向上的距离变化转化为厚度方向上的距离变化。

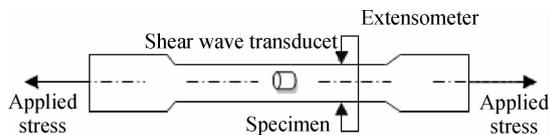


图 1 拉伸试样及引伸计和横波探头的安放位置

Fig. 1 Tensile specimen and position of extensometer and shear wave transducer

1.2 试验方法

声弹性理论经过多年的研究和发展后,最终建立了各种不同类型的超声波应力-声速关系公式。不同传播方向和偏振方向的超声波在弹性固体中的传播速度与应力存在如下关系^[15,16]:

器保持时间同步。利用信号发生器激发探头并用示波器测量超声信号的时间间隔,试验系统所能测量的最小时间变化为 1ns。

在对试样逐渐施加单轴拉伸应力的过程中,通过旋转探头,使其发出的横波偏振方向与应力方向保持平量偏振方向平行和垂直于应力方向的横波的传播时间。

耦合条件也会对测量造成影响,测量过程中需要尽量保持探头与试样之间的耦合条件不变。将探

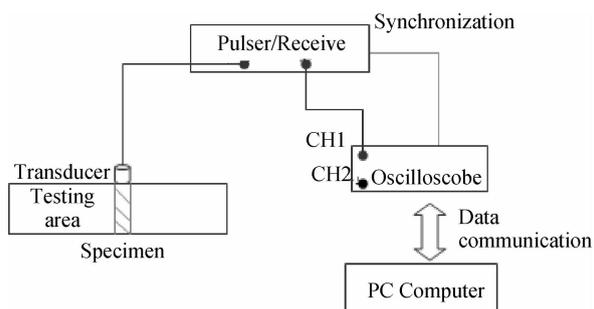


图 2 应力测量试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for stress measurement

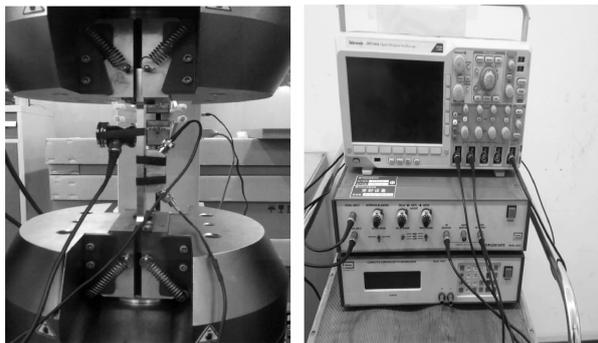


图 3 万能拉伸试验机和数字荧光示波器

Fig. 3 The picture of universal tensile testing machine and digital phosphor oscilloscope

行或垂直,分别测头以固定的压紧力紧贴在试样中心,横波偏振换能器需要采用专用耦合剂,使探头在测量时能够转动以调节横波的偏振方向,使其与最大应力方向保持平行或垂直,并用试样的一次底波与二次底波测量声速,进而消去耦合剂对测量结果的影响。

本试验的传播距离的测量精度是 $\pm 0.01\text{mm}$,示波器显示的传播时间的测量精度是 $\pm 1\text{ns}$,利用误差传递公式得出声速的相对测量精度 y 的表达式为 y

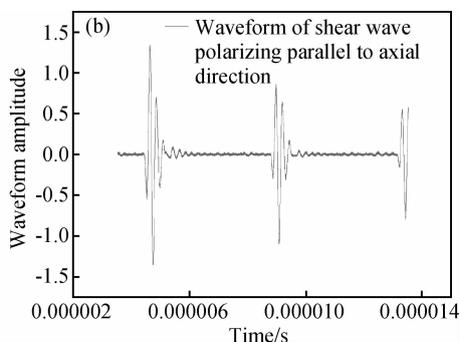
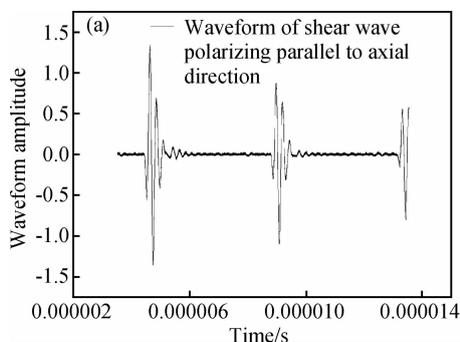


图 4 平行(a)和垂直(b)于轴向偏振横波的波形

Fig. 4 Waveform of shear wave polarizing parallel (a) or perpendicular (b) to axial direction

由上图可见,两个波形几乎一致,经试验测得未加载荷时,二者的声速分别是 $3490\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3491\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,二者差异不大,这说明该铝合金棒材的各向异性对偏振横波的声速影响不大,在研究不同偏振方向的横波声速这一问题时,可以近似将其看作各向同性材料。

2.2 平行于轴向偏振横波的变化

对试样施加逐渐增加的单轴载荷,从 6kN 到 72kN ,每次间隔增加 6kN ,共 12 组。测量平行于轴向偏振的横波传播时间随应力的变化,如图 5 所示。

$$= \pm \left(\frac{0.01}{s} + \frac{1}{t} \right) \left(\text{其中由于试样减薄微小, } s \approx 29.97\text{mm, 而 } t \text{ 为该试验测得的在含有应力试样中超声横波的传播时间,其单位为 ns} \right)$$

因此经过简单计算,对于平行于应力方向和垂直于应力方向偏振的横波来说,其声速的相对测量精度均约为 $\pm 0.06\%$ 。所以测量精度等于相对测量精度乘以横波的传播速度,约为 $\pm 2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

另外,因为温度对材料中声速的影响很大,一般固体材料中的声速随其温度升高而降低,是所以进行应力测量时不能忽略温度的影响,试验过程中需要尽量保持偏振横波换能器及拉伸试样等设备的温度恒定。本研究中的试验均在室内 20°C 下进行。

2 试验结果与分析

2.1 各向异性的影响

挤压棒材具有一定的各向异性,可能会对不同方向偏振横波的速度造成影响,在未加载荷时,平行于挤压方向和垂直于挤压方向偏振横波的波形如图 4 所示。

虽然在试验中尽量保证耦合良好,但 $10\mu\text{m}$ 的耦合层厚度的变化就会造成 7ns 的时间变化,因此整个试验中耦合条件是最不确定的因素,也是造成数据点与拟合的直线并不完全一致的现象。

由于每次测量时的耦合条件存在微小变化,会造成声时差或声速测量时的误差,使得应力相差不大的两点处,声时差或声速的相对大小可能不满足一般规律。但当应力值变化较大时,声时差或声速与应力之间的线性关系较为明显,这是因为本文中试验方法的测量精度主要取决于温度和耦合条件,当温度一定时,耦合差异造成的误差与待测工件表

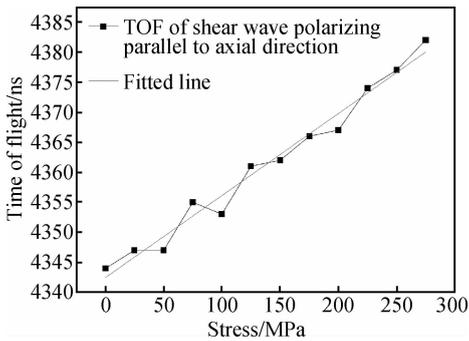


图5 平行于轴向偏振的横波传播时间随应力的变化

Fig. 5 Time of flight (TOF) of shear wave polarizing parallel to axial direction as a function of applied stress

面质量有关,当材料表面的粗糙度在3.2左右时,声时差的测量精度约为5ns,应力测量精度约为50MPa,所以该试验方法测量时,传播路程越长,声时差的测量精度越高,相应的应力测量精度也会提高。

在该试验中,采用直线拟合的原因是波动方程解出的应力与声速呈线性关系,由于是用直线拟合离散数据点,所以该试验方法客观上会产生数据点分布在拟合直线两侧的现象。由图可见,随着应力的增加,平行于轴向偏振横波的传播时间不断增加,二者线性关系良好。线性拟合后,获得的直线斜率为0.137ns/MPa。

另外,利用引伸计实时测量试样宽度的变化,利用体积不变原理获得试样厚度的变化,并运用公式 $v_{\sigma} = \frac{2l_{\sigma}}{t_{\sigma}}$ (其中 l_{σ} , t_{σ} , v_{σ} 分别表示在含有应力试样中超声横波的传播距离、传播时间和传播速度),进而可以得到平行于轴向偏振横波的速度随应力的变化关系,如图6所示。

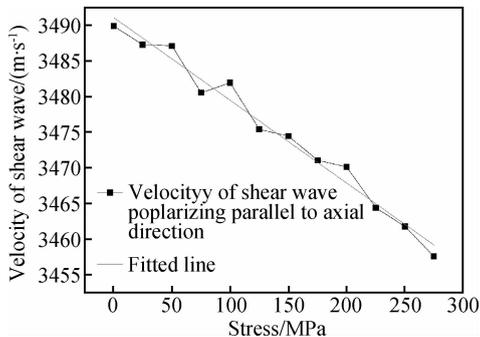


图6 平行于轴向偏振的横波的声速随应力的变化

Fig. 6 Velocity of shear wave polarizing parallel to axial direction as a function of applied stress

波的声速不断减小,应力与声速变化呈现良好的线性关系,线性拟合后的直线斜率即为声弹性系数,该系数的绝对值越大,说明应力对声速的影响越明显,线性拟合后,获得的平行于应力方向偏振横波的声弹性系数为 $-0.116 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。

平行于应力方向偏振横波所造成的质点振动方向与轴向拉应力方向相同。随着轴向载荷的增加,拉应力使轴向上原子间距扩大,原子间的相互牵扯减小,其对振动的传递作用减弱。因此,沿这一方向偏振的横波速度下降。虽然拉伸过程中材料的减薄使得传播距离略有下降,但由于速度下降较快而减薄较小,传播时间仍随应力的增加而升高。

2.3 垂直于轴向偏振横波的变化

按相同方式对试样施加单轴载荷,获得垂直于轴向偏振横波传播时间随应力的变化,如图7所示。

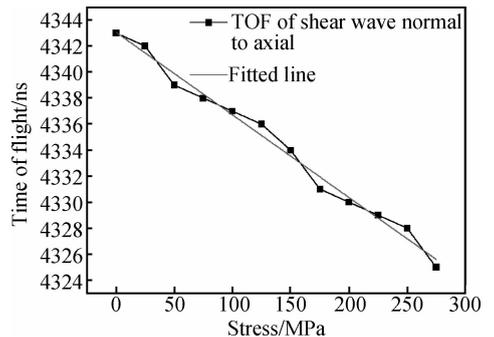


图7 垂直于轴向偏振的横波传播时间随应力的变化

Fig. 7 Time of flight (TOF) of shear wave polarizing perpendicular to axial direction as a function of applied stress

可以看到,随着应力的增加,垂直于轴向偏振横波的传播时间逐渐减小,二者呈现良好的线性关系,线性拟合后,获得的斜率为 $-0.064 \text{ ns} / \text{MPa}$ 。

垂直于轴向偏振横波的速度随应力的变化关系如图8所示。

可以看到,随着应力的增加,垂直于轴向偏振横波的声速不断增加,线性拟合后,获得的垂直于应力方向偏振横波的声弹性系数为 $0.044 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。

垂直于应力方向偏振横波所造成的质点振动方向与轴向拉应力方向相垂直。在单轴拉伸时,试样垂直轴向上的原子间距减小,原子间的相互牵扯增加,对振动的传递作用增强,因而使超声的传播速度增加。试样减薄所带来的传播距离的减小促进了传播时间的下降。

可以看到,随着应力的增加,平行于轴向偏振横

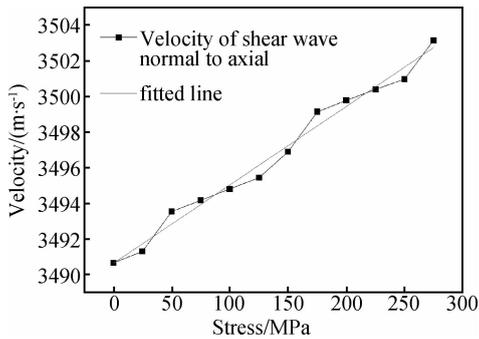


图 8 垂直于轴向偏振的横波的声速随应力的变化

Fig. 8 Velocity of shear wave polarizing perpendicular to axial direction as a function of applied stress

2.4 横波偏振方向与应力方向的关系

平行于轴向方向偏振的横波和垂直于轴向方向偏振的横波的波速随应力变化对比如图 9 所示。

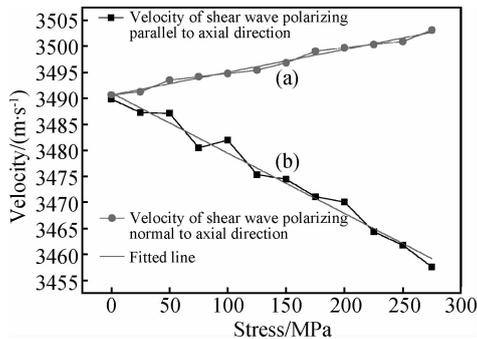


图 9 垂直(a)与平行(b)于轴向方向偏振的横波声速随应力的变化

Fig. 9 Velocity of shear wave polarizing perpendicular (a) or parallel (b) to axial direction as a function of applied stress

在未加载应力时不同偏振方向横波的传播时间存在一定差异,这是由试样的各向异性造成的。但从图 9 可以看到,各向异性造成的速度差异小于应力造成的差异。这说明在利用横波测量应力时,材料各向异性的差异可忽略不计。

由上图可以看到,偏振横波的传播速度不仅受到与其偏振方向平行的应力的影响,还受到与其偏振方向垂直的应力的影响,只不过前者的影响比较明显,而后者的影响比较小,但不能忽略。两条直线的斜率所代表的声弹性系数分别表示与横波偏振方向相同以及与偏振方向垂直的应力对声速的影响,分别为 $-0.116 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 和 $0.044 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$,说明横波声速随着平行于偏振方向的应力增大而减小,随着垂直于偏振方向的应力增大而增大,并且平行于偏振方向的应力对横波声速的影响

约为垂直于偏振方向的应力对横波声速影响的 2.64 倍。当采用沿厚度方向传播的偏振横波时,在平面应力状态下,假设长度方向的应力分量为 σ_x ,宽度方向的应力分量为 σ_y ,并且平行于应力方向偏振的横波速度为 v_x ,垂直于应力方向偏振的横波速度为 v_y ,本研究中所使用的铝合金棒材中偏振横波声速变化与应力变化之间的关系可用下式表示:

$$\begin{aligned} \Delta v_x &= -0.116 \Delta \sigma_x + 0.044 \Delta \sigma_y \\ \Delta v_y &= -0.116 \Delta \sigma_y + 0.044 \Delta \sigma_x \end{aligned} \quad (3)$$

进而可获得下式:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_x &= -3.813 \Delta v_y - 10.066 \Delta v_x \\ \Delta \sigma_y &= -3.813 \Delta v_x - 10.066 \Delta v_y \end{aligned} \quad (4)$$

因此,在平面应力状态下,如果能测得不同位置之间两个相互垂直的偏振横波的速度差异,即可获得这两个位置之间的相对应力值。通过扫查,可以获得不同位置的相对应力分布。

3 结论

(1) 铝合金棒材中,平行和垂直于棒材轴向偏振的横波波形几乎一致,未加载时,二者声速差别不大,对于研究超声传播速度而言,可将其做各同性近似。

(2) 施加轴向载荷后,平行于轴向偏振的横波声速降低,垂直于轴向偏振的横波声速升高。横波速度不仅受与其偏振方向平行应力的影响,还受与其偏振方向垂直应力的影响,前者对横波速度的影响约为后者的 2.64 倍,但后者对横波声速的影响不可以忽略。

(3) 超声横波法是一种有效的无损应力测量方法,可以对材料的内部应力进行无损测量和评价。在平面应力状态下,通过测量不同点之间两列相互垂直的偏振横波速度的差异,可以获得各点之间的相对应力差,进而获得相对应力分布。

参考文献:

- [1] DUQUENNOY M, OUAFLLOUH M, QIAN M L, *et al.* Ultrasonic characterization of residual stresses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers [J]. *NDT&E International*, 2001, 34: 355 - 362.
- [2] 袁发荣,伍尚礼. 残余应力测试与计算[M]. 长沙:湖南大学出版社,1987.
- [3] WITHERS P J, BHADSHIA D H. Residual stress Part 1- Measurement techniques [J]. *Materials Science and Technology*, 2001, 17(4): 355 - 365.

- [4] 赵翠华. 残余应力超声波测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [5] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, *et al.* Methods of measuring residual stresses in components[J]. *Materials and Design*, 2012, 35: 572 – 588.
- [6] 王晓, 史亦韦, 梁菁, 等. 超声测量非均匀应力场及应力梯度的研究[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(1): 56 – 61. (WANG X, SHI Y W, LIANG J, *et al.* Study on measurement of non-uniform stress field and stress gradient by using ultrasonic[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(1): 56 – 61.)
- [7] KARABUTOV A, DEVICHENSKY A, IVOCHKIN A, *et al.* Laser ultrasonic diagnostics of residual stress[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(6): 631 – 635.
- [8] BRAY D E. Ultrasonic Stress measurement and material characterization in pressure vessels, piping and welds[J]. *Journal of pressure vessel technology*, 2002, 124(3): 343 – 348.
- [9] BENSON R W, RAELSON V J. Acousticelasticity[J]. *Prod. Eng.*, 1959, 30: 56 – 59.
- [10] HSU N N. Acoustical birefringence and use of ultrasonic waves for experimental stress analysis [J]. *Exp Mech*, 1975, 14(5): 147 – 152.
- [11] 吴运新, 龚海, 廖凯. 铝合金预拉伸板残余应力场的评估模型[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 90 – 94. (WU Y X, GONG H, LIAO K. Evaluation model of residual stress field of pre-stretched aluminum alloy plate[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 39(1): 90 – 94.)
- [12] 吴克成. 声弹性应力测量[J]. *实验力学*, 1987, 2(4): 3 – 13. (WU K C. Acoustoelastic Measurement of Stress [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1987, 2(4): 3 – 13.)
- [13] PRITCHARD S E. The use of ultrasonics for residual stress analysis[J]. *NDT International*, 1987, 20(1): 57 – 60.
- [14] LU H, LIU X S, YANG J G, *et al.* Ultrasonic stress evaluation on welded plates with Lcr wave [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(1): 70 – 74.
- [15] NELSON N H. Acoustical birefringence and the use of ultrasonic waves for experimental stress analysis[J]. *Experimental Mechanics*, 1974, 14(5): 169 – 176.
- [16] SAYERS C M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1982, 15(11): 2157 – 2167.
- [17] WANG X, TAO C H, SHI Y W, *et al.* Study on Ultrasonic Measurement for Non-uniform Stress Field[J]. *Advanced Material Research*, 2013, 800(2013): 213 – 217.

Relationship between Ultrasonic Polarized Shear Wave and Internal Stress in Aluminum Alloy Bar

JIN Cong¹, LU Chao¹, SHI Yi-wei², LIANG Jing², WANG Xiao²

(1. Key Laboratory of Non-destructive Testing Technique (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The difference in velocities of ultrasonic shear waves at different angles between polarization direction and the direction of extrusion of aluminum alloy bar was first investigated by using a normal incidence polarized shear wave transducer, then the change of velocity of the ultrasonic shear wave polarizing at different angles with respect to the stress orientation under different applied stresses was studied. The experimental results indicate that there is a little difference of velocity of shear wave polarizing between parallel and perpendicular to the direction of extrusion in unstressed state, and anisotropy of the bar has little effect on the velocity of the polarized shear wave in different directions. When the specimen is submitted to an increasing axial loading, the time of flight of shear wave polarizing parallel to the direction of stress increases, the travelling time of shear wave polarizing perpendicular to the direction of stress decreases; after eliminating the influence of change of the propagation length of the ultrasonic wave brought by the elastic deformation of material, the results find that velocity of shear wave polarizing parallel to stress orientation decreases, velocity of shear wave polarizing perpendicular to stress orientation increases; the effect of stress which is parallel to polarization direction on velocity of the shear wave is more than that of stress which is normal to polarization direction on ultrasound velocity. This experiment provides a non-destructive method for the measurement of the plane stress field within material, which can non-destructively evaluate internal stress of material.

Key words: non-destructive evaluation; aluminum alloy bar; ultrasonic; stress