

激光超声检测铝合金材料的残余应力分布*

潘永东¹ 钱梦騄¹ 徐卫疆² M.OURAK²

(1 同济大学声学研究所 上海 200092)

(2 D.O.A.E., Université de Valenciennes BP 311, 59304 Valenciennes, France)

2002 年 8 月 9 日收到

2002 年 12 月 12 日定稿

摘要 为了有效检测铝合金材料上的残余应力分布,研究了用激光超声技术来检测铝合金材料上的残余应力分布的方法。该方法用 Nd:YAG 脉冲激光激发声表面波,并用外差激光干涉仪接收。理论分析表明可通过测量表面波在不同位置上声速的相对变化,来确定试样的残余应力分布。并对无残余应力、有压缩残余应力、有拉伸残余应力的三个试样应力分布,进行了实验测定。结果证实了试样的残余应力分布可引发声表面波在不同位置上声速的相对变化,也证实了激光激发声表面波及其接收技术是一种无损检测材料内残余应力分布的有效方法。

PACS 数: 43.35, 43.20

Residual stress profiling of an aluminum alloy by laser ultrasonics

PAN Yondong¹ QIAN Menglu¹ XU Weijiang² M.OURAK²

(1 Institute of Acoustics, Tongji University Shanghai 200092)

(2 D.O.A.E., Université de Valenciennes BP 311, 59304 Valenciennes, France)

Received Aug. 9, 2002

Revised Dec. 12, 2002

Abstract In order to effectively determine the residual-stress profile of an aluminum alloy, the measuring method was studied by the laser ultrasonic technique. In this method, surface acoustic waves are generated by a Nd:YAG pulse laser and detected by a heterodyne interferometer. Theoretical analysis shows that the residual-stress profile could be determined by measuring the relative velocity-variation of the surface waves at different locations of the sample. Three samples with no stress, compressive or stretched stress were measured experimentally. The results show that the residual-stress distribution can cause surface waves vary in velocity at different locations, and that this method is an effective technique of nondestructively detecting the residual-stress profile.

引言

材料残余应力分布的无损检测在其被加工前非常必须,因为若知道此分布,可以优化此材料的加工工艺,如切割面、刀具、切割速度等的选择,来尽可能地减少此材料因残余应力存在而引起的变形。目前已有 X 光散射、中子散射、磁探测和超声检测等多种非破损检测材料残余应力的方法^[1,2],而超声是一种很有前景的方法。因为材料有声应力效应,当存在残余应力时,其弹性波传播速度将发生变化^[3]。因此可以根据所测声速的变化来反映其传播路

径上的应力大小。

人们对用 PZT 换能器、EMAT 探头和声显微镜等技术测量表面波声速来评估其近表面的应力分布,作了大量研究^[4-7]。结果表明,可以用测得的材料自由表面上传播的表面波声速的大小变化来评估其残余应力的分布。但应力所引起的声速相对变化很小(通常小于千分之一),对测量精度要求很高,检测难度很大。激光超声是最近发展起来的无损检测技术,其显著优点是非接触、高的空间和时间分辨率,容易实现高精度测量,已被成功用来表征材料的表面特性^[8,9]。因此,本文研究了用激光超声检测

* 中法先进研究计划 (PRA MX00-02) 和国家自然科学基金 (10134020 和 10174052) 资助项目

铝合金材料的表面波声速变化来确定其残余应力分布。文中给出了其检测原理和实验,并用实验测得的三种不同的残余应力分布来说明此方法的可行性。

1 原理

图 1 是被检测的铝合金板及其坐标系。图中坐标轴 x_1, x_2, x_3 分别对应铝合金板的成形方向、被其侧面的法向和其厚度方向。若忽略该合金材料轻微的各向异性,并假设其初始应力是均匀的,则在侧面中传播的表面波声速的相对变化率可由其静态应变表示,即:

$$(v_{R1} - v_{R0})/v_{R0} = a_1 e_{11} + a_2 e_{22}, \quad (1)$$

其中 v_{R1} 和 v_{R0} 分别对应变形后和变形前该材料的表面波声速, e_{11} 和 e_{22} 分别对应 x_1 和 x_2 方向上的主应变, a_1, a_2 是由该材料一阶和二阶弹性常数决定的系数^[3]。

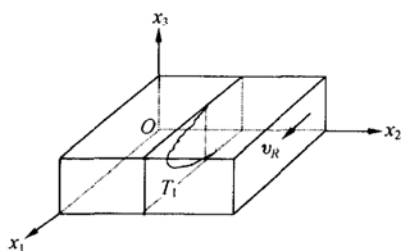


图 1 被测材料 (铝合金板) 及其坐标系

如图 1 所示,若仅有 x_1 方向上的残余应力 F_1 ,则只在此 x_1 方向上有变形,且 $e_{11} = -\nu e_{22}$, (ν 为泊松比),方程 (1) 可简化为:

$$(v_{R1} - v_{R0})/v_{R0} = K_1 F_1, \quad (2)$$

其中 K_1 为声应力系数,也是由该材料一阶和二阶弹性常数决定的系数^[6]。残余应力 F_1 使在不同的板厚处 x_3 的 v_{R1} 有变化,考虑残余应力形成时的对称性,其沿此板厚方向上的平均残余应力可认为零或接近零。因此,公式 (2) 中变形前的表面波声速 v_{R0} 可由变形后厚度方向上的表面波声速 v_{R1} 的平均值来近似。若声应力系数 K_1 已通过定标确定,则只要测量此铝合金板沿其厚度方向的表面波声速,就可确定其残余应力分布。

2 实验

图 2 是材料残余应力分布激光超声检测系统。图中 Nd:YAG 脉冲功率激光器产生一个 10.8 ns 宽、532 nm 波长和 7.5 mJ 能量的光脉冲经水平扫描平台上的反射镜 M_1, M_2 和柱透镜入射至试样侧表面。所

激发产生的瑞利波用 SH130 激光干涉仪来检测,然后用 HP54522A 示波器记录测量其传播时间 t ,并将波形记录在软盘上以便进一步处理。部分的入射功率脉冲激光被散射后由光电检测器接收来触发示波器采样。试样表面需抛光以得到足够高的反射光,并用 HP8590B 频谱仪来监测此反射光的强弱,以调整被检平面与入射检测激光垂直,得到尽可能高的信噪比。

实验中令检测点与试样上表面的距离 X_3 一定,改变激发激光光源与此检测点的间距 X_{1k} ($k = 2, 3, \dots, n$),可得到一组不同 X_1 下的表面波波形及对应的传播时间 t_{Rk} ($k = 2, 3, \dots, n$)。由于此时两者有关式:

$$X_{1k} = X_0 + v_R * t_{Rk}, \quad (3)$$

其中 X_0 为测量的系统偏差,经线性拟合可以确定其表面波声速 v_R 。图 3 是沿试样厚度方向不同位置上 ($x_3 = 5 \text{ mm}, 15 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$) 记录的一组表面波波形,图中 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 分别对应激光光源与检测点的间距为 19 mm, 18 mm, 17 mm, 16 mm, 15 mm。为了保证此表面波声速的测量精度,所用示波器的采样频率要尽可能地高。同时波形要经多次平均以减少激发激光光源功率和形状的不稳定对测量的影响。这里所用 HP54522A 示波器的时基为 50 ns/格,采样的平均次数为 128 次。每次测量线性拟合 X_{1k} 和 t_{Rk} 的相关系数 r 达 0.9999 以上,说明实验已有较好的测量精度。

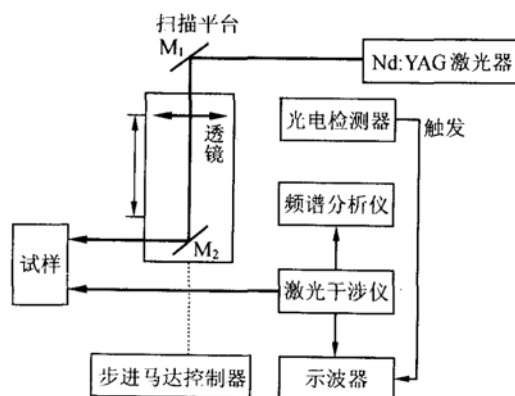
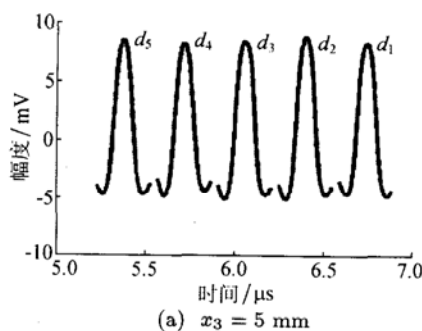


图 2 材料残余应力分布激光超声检测系统



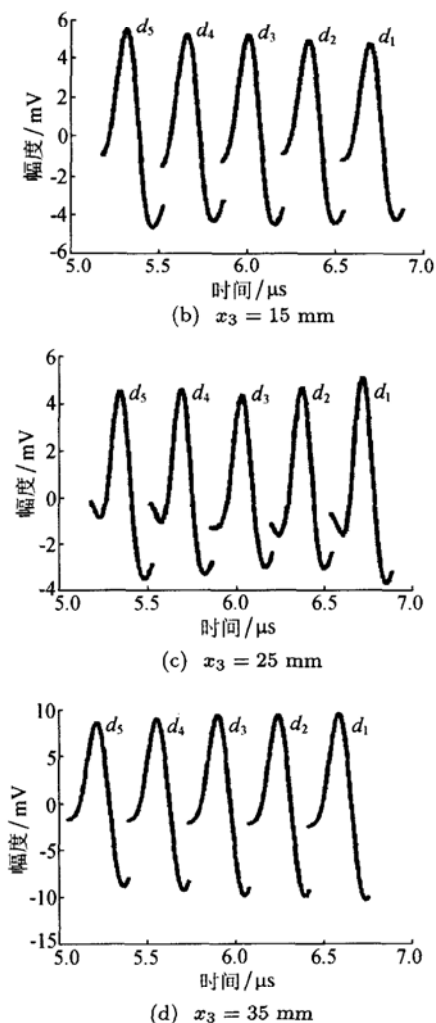


图 3 沿试样厚度方向不同位置上 ($x_3 = 5 \text{ mm}$, 15 mm , 25 mm , 35 mm) 记录的一组表面波波形 (其中 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 对应激光光源与检测点的距离分别为 19 mm , 18 mm , 17 mm , 16 mm , 15 mm)

3 结果与讨论

选 3 个认为有不同残余应力分布的试样来做实验, 以验证上述方法的可行性。这 3 个试样分别是无残余应力、有压缩和拉伸残余应力分布, 它们的尺寸分别为: $100 \times 100 \times 45 \text{ mm}^3$, $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ 和 $157 \times 127 \times 42 \text{ mm}^3$, 对应的抛光检测表面为 $100 \times 45 \text{ mm}^2$, $100 \times 50 \text{ mm}^2$ 和 $157 \times 127 \text{ mm}^2$ 。试样为铝合金, 成份为 Cu 4.33%, Mg 0.4%, Mn 0.59%, Cr 0.01%, Si 0.76%, Fe 0.26%, Ti 0.02%, Zn 0.08%, Zr 0.01%。

图 4 是 $100 \times 100 \times 45 \text{ mm}^3$ 大小铝合金试样 $100 \times 45 \text{ mm}^2$ 抛光面上用激光超声检测的碗状残余应力分布结果。图中横坐标为检测点离上表面的距离, 纵坐标是检测到的表面波声速的相对变化率。若公式 (2) 中的声应力系数已知, 即可确定此残余应力分布的大

小。该图反应试样中间是一个相对低声速区, 而两侧是高声速区。对于 K_1 为负值时, 则表明中间残余应力高, 两侧低。这是一个较典型的残余应力分布, 这与已发表的用不同于激光超声检测方法相一致 [6,7]。

图 5 是 $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ 大小铝合金试样 $100 \times 50 \text{ mm}^2$ 抛光表面上检测到的倒碗状的残余应力分布结果。该结果反映了试样中间是一个相对高声速度区, 而两侧是相对低声速度区。对于 K_1 为负值时, 则表明中间残余应力低, 两侧高。这也是一个较典型的残余应力分布。这个残余应力分布于图 4 的结果正好相反, 反映该试样的成形工艺不同与图 4 中的试样, 这与工厂反映的情况相吻合。

图 6 是 $157 \times 127 \times 42 \text{ mm}^3$ 大小铝合金试样 $157 \times 127 \text{ mm}^2$ 抛光表面上检测到的材料无残余应力分布的结果。该结果反映试样没有集中的残余应力。该结果说明上述实验系统的测量误差不大于 $\pm 0.5 \times 10^{-3}$, 因而同时说明图 4 和图 5 结果的可靠性。

以上三个不同残余应力分布的实验结果, 表明激光超声是一种检测材料残余应力分布的有效手段。

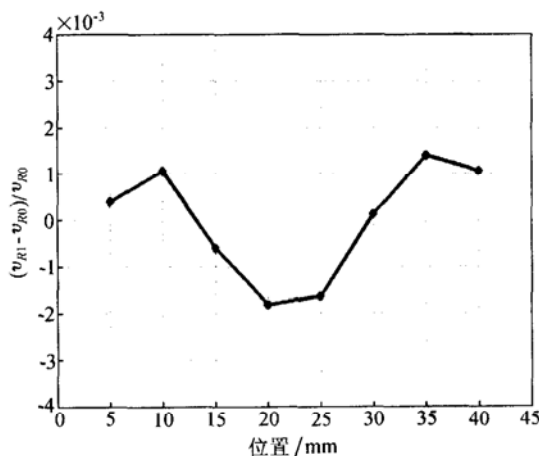


图 4 激光超声检测到铝合金试样碗状的残余应力分布

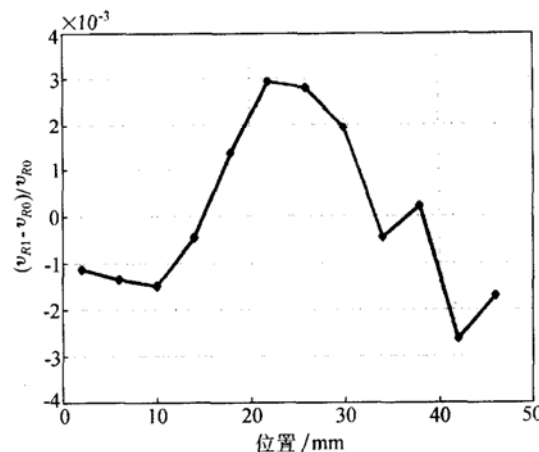


图 5 激光超声检测到铝合金试样倒碗状的残余应力分布

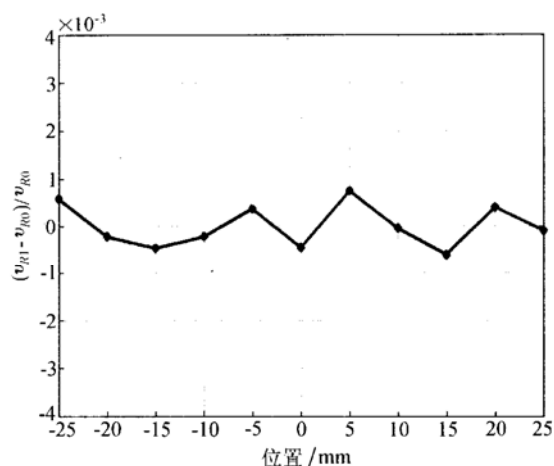


图6 激光超声检测到铝合金试样无残余应力分布的结果

4 结论

用激光超声可以激发和检测表面波, 并通过测得的表面波声速的相对变化来反映材料的残余应力分布。本文用激光超声检测三个铝合金试样沿厚度方向上不同的残余应力分布。结果表明该方法可以非破损和非接触地检测到表面波声速因残余应力引起地相对变化, 从而为材料残余应力分布的无损评估提供一种的新方法。

参 考 文 献

- 1 Shang C H, Heerden D V, Gavens A J, Weihs T P. An X-ray study of residual stress and bending stress in free-standing Nb/Nb₅Si₃ microlaminates. *Acta materialia*, 2000; **48**(13): 3533—3543
- 2 Webster G A, Wimpory R C. Non-destructive measurement of residual stress by neutron diffraction. *J. Mater. Processing Technology*, 2001; **117**(3): 395—399
- 3 Pao Y, Sache W, Fukuoka Y H. Physical acoustics. Academic Press, 1984, **17**: 61—143
- 4 Jassby K, Saltoun D. Use of ultrasonic Rayleigh waves for the measurement of applied biaxial surface stresses in aluminum 2024-T351 alloy. *Materials Evaluation*, 1982; **40**(2): 198—205
- 5 Man C S, Lu W Y, Li J B. Effects of crystallographic texture on the acoustoelastic coefficients for Rayleigh waves in aluminum. *Rev. of Progress in QNDE*, 1999; **18B**: 1879—1886
- 6 Duquennoy M, Ouaftouh M, Ourak M. Ultrasonic evaluation stresses in orthotropic materials using Rayleigh waves. *NDT & E International*, 1999; **32**(11): 189—199
- 7 Duquennoy M, Ouaftouh M, Ourak M. Determination of stresses in aluminum alloy using optical detection of Rayleigh waves. *Ultrasonics*, 1999; **37**(5): 365—372
- 8 Neubrand A, Hess P. Laser generation and detection of surface acoustic waves: elastic properties of surface layers, *J. Appl. Phys.*, 1992; **71**(1): 227
- 9 Knight B, Braunstein J, Cox J F, Frankel J. Laser-ultrasonic characterization of electrodeposited chromium coatings. *Rev. of Prog. in QNDE*, 1999; **18**: 365—372