

文章编号: 0258-7025(2008)10-1627-05

# 激光激发瑞利波测量铝合金焊接残余应力

石一飞 沈中华\* 倪晓武 陆建

(南京理工大学理学院信息物理与工程系, 江苏 南京 210094)

**摘要** 根据声弹性原理提出了一种新的测量材料表面焊接应力的激光超声方法。利用 Nd:YAG 脉冲激光在材料表面激发高频率超声瑞利波,采用非线性激光干涉仪对检测焊接应力的超声瑞利波进行探测。探测点的位置保持不变,通过激发源的扫描来改变激发源和探测点之间的距离,干涉仪探测到一系列超声脉冲波形信号。采用波形相关技术计算相邻超声瑞利波的传播时间延迟,得出瑞利波的传播速度,进而根据声弹性理论计算出相应的应力值。通过激光源在焊缝附近的扫描,得到焊缝周围的应力分布。测量了铝焊接平板表面的残余应力,得到了样品表面的焊接应力分布。实验结果表明,这种方法可以实现样品表面焊接应力的快速扫描测量,使其在材料表面焊接应力分布无损检测领域具有一定的应用价值。

**关键词** 激光技术;声弹性;瑞利波;残余应力

中图分类号 TN249; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083510.1627

## Welding Stress Measurement Using Laser-Generated Rayleigh Waves in Aluminum Alloys

Shi Yifei Shen Zhonghua Ni Xiaowu Lu Jian

(Department of Information Physics and Engineering, School of Science, Nanjing University of  
Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094 China)

**Abstract** A new method based on laser ultrasonic was proposed to survey welding stress distributions on the material surface according to the acoustoelastic principle. The high frequency Rayleigh waves excited by the Nd:YAG pulsed laser were used to measure the welding stress and picked up by a nonlinear interferometer. A serial of ultrasonic pulsed signals can be detected by the interferometer through changing the distance between fixed detecting point and ultrasonic source point by the scanning of the laser source. The waveform cross-correlation technique was applied to compute the propagation time delay of the adjacent Rayleigh waves, and the propagation velocity of the Rayleigh waves was obtained, by which the stress value was figured out via acoustoelastic relation. The residual stress distribution can be measured around welded joint while the laser source scans around the welded joint. This experimental installation was utilized to test the welding stress on the surface of a welded aluminum plate and the stress distribution was measured. The experimental results indicate that this method can scan over the specimen surface and measure the welding stress quickly, which make it have potential in the non-destructive evaluation of the surface welding stress distribution.

**Key words** laser technique; acoustoelasticity; Rayleigh wave; residual stress

### 1 引言

焊接是一个局部快速加热到高温,并随后快速冷却的过程。随着热传导,整个焊件的温度随时间

和空间急剧变化,材料的物理性能也随温度剧烈变化,同时还存在熔化和相变时的潜热现象。因此焊接温度场分布十分不均匀,在焊接和焊后都将产生

收稿日期:2007-10-15;收到修改稿日期:2008-01-10

基金项目:国家自然科学基金(60778006),江苏省自然科学基金(BK2007203),教育部新世纪优秀人才支持计划和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目。

作者简介:石一飞(1982-),男,江苏人,博士研究生,主要从事激光超声无损检测方面研究。E-mail:syfnjust@126.com

导师简介:倪晓武(1955-),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用研究。

\*通信联系人。E-mail:shenzh@mail.njust.edu.cn

相当大的变形和焊接应力。焊接件的残余应力是控制焊接工艺质量的重要参量。

随着新材料、新技术的不断涌现,焊接残余应力的无损检测方法发展很快<sup>[1,2]</sup>,主要有 X 射线衍射法、巴克豪斯法、超声法等,其中超声法具有操作方便、成本低等优点,倍受人们的关注。超声法检测应力的理论基础是声弹性效应,声弹性理论指出材料表面及内部的应力分布会引起传播超声波的速度改变。因此,可以通过测量材料表面传播的超声瑞利波的速度来检测材料表面的焊接应力分布。Hayes 等<sup>[3]</sup>首先给出了在弹性均匀变形材料沿主应力方向的瑞利波传播的声弹性理论,这一理论后来被推广到任意传播方向<sup>[4~6]</sup>。Osetrov 等<sup>[7]</sup>研究了残余应力沿深度方向变化的情况下,瑞利波的速度变化。Kumon 等<sup>[8]</sup>利用声表面波频谱研究残余应力对薄膜弹性系数的影响。Duquennoy 等<sup>[9]</sup>研究了材料的各向异性与残余应力对声速的综合效应。另外,多种金属材料的瑞利波声弹性效应都有所报道<sup>[4~10]</sup>。Bray 等<sup>[11]</sup>应用超声法测量了焊接应力。

激光超声<sup>[12]</sup>是利用高能激光束激励被检测物体表面材料产生宽频带的超声波,并采用光学方法进行探测,具有高分辨率、非接触、可远距离探测等许多优点,尤其适合于一些恶劣环境场合,如在高温、具有腐蚀性、辐射性以及被检件具有较快的运动速度等环境下使用,且激励光束与被检测物体表面无需保持严格的垂直等固定的角度关系,亦不需要复杂的扫描机构。因此,激光超声特别容易实现快速自动化扫描检测。这一技术既具有超声检测定量准确、又具有非接触的特点,能实现构件的准确快速的无损检测。激光超声在平板<sup>[13,14]</sup>和管材<sup>[15]</sup>表面传播的特性已应用到材料属性标定<sup>[16]</sup>、表面及内部缺陷检测<sup>[17]</sup>等领域。利用激光作为超声源来探测残余应力,在具备超声波法无损、可测任意深度的残余应力分布的优点以外,还可发挥激光易扫描、空间分辨率高、远距离激发及接收等优点。Duquennoy 等<sup>[18]</sup>利用激光产生的瑞利波研究了圆杆表面的残余应力。潘永东等<sup>[19]</sup>也利用激光激发瑞利波测量残余应力在材料深度方向的变化。

基于超声瑞利波的声弹性理论,本文提出一种全光式的表面焊接应力分布的探测方法。用 Nd:YAG 脉冲激光在材料表面激发高频率超声瑞利波,非线性激光干涉仪探测瑞利波,利用这一套实验测量了铝焊接平板表面的残余应力。为了得到样品表面焊接应力的二维分布,采用移动激发激光及样品

相结合的扫描方式。通过测量声波的渡越时间,采用波形相关技术计算相邻的瑞利波的传播时间延迟,得到瑞利波在材料表面的传播速度。为减小数字示波器采样频率引入的误差,对波形相关计算得到的相关系数进行多项式拟合,进一步提高波形相关法的计算精度。

## 2 声弹性方程

根据声弹性理论,材料表面的应力分布会引起瑞利波的传播速度变化。如图 1 所示,在各向同性的均匀弹性材料中,应力主方向为  $x, y, z$  轴方向,  $x, y$  为材料表面的正交方向,  $z$  为深度方向。假设瑞利波传播产生的表面位移为无限小,则瑞利波波速的相对变化可以表示为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\Delta v_{R12}}{v_{R12}^0} = \frac{v_{R12} - v_{R12}^0}{v_{R12}^0} = A_{R12}^{(1)} \sigma_1 + A_{R12}^{(3)} \sigma_3 \\ \frac{\Delta v_{R21}}{v_{R21}^0} = \frac{v_{R21} - v_{R21}^0}{v_{R21}^0} = A_{R21}^{(2)} \sigma_2 + A_{R21}^{(3)} \sigma_3 \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $v_{R12}$  为传播方向沿  $x$ , 振动方向沿  $z$  的瑞利波速度,  $v_{R21}$  为传播方向沿  $y$ , 振动方向沿  $z$  的瑞利波速度,  $v_R$  和  $v_R^0$  分别表示在有应力和无应力情况下的瑞利波速度,  $A_{R12}^{(1)}$ ,  $A_{R12}^{(3)}$ ,  $A_{R21}^{(2)}$  和  $A_{R21}^{(3)}$  为瑞利波在这种材料中的声弹性系数<sup>[20]</sup>, 其不仅与声波的传播及振动方向有关,而且与应力的主方向有关,上标表示应力的主方向,下标表示瑞利波的传播方向。 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为沿三个方向的应力大小。

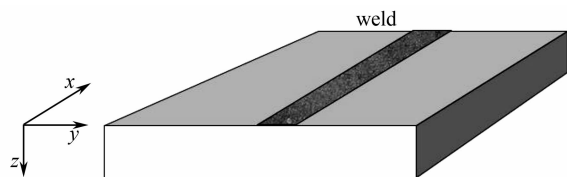


图 1 主应力方向示意图

Fig. 1 Schematic of the directions of the principal stress

在实验中,由于焊接深度很浅,在  $z$  方向的变形远小于  $x$  和  $y$  方向的变形,并且只分析了沿  $x$  方向传播的瑞利波速度变化,所以(1)式可以简化为

$$\frac{\Delta v_{R12}}{v_{R12}^0} = \frac{v_{R12} - v_{R12}^0}{v_{R12}^0} = \frac{v_{R12}}{v_{R12}^0} - 1 = A_{R12}^{(1)} \sigma_1. \quad (2)$$

## 3 实验装置

实验装置如图 2 所示,瑞利波的激发光源是输出波长 1064 nm,脉宽 10 ns 的 Nd:YAG 脉冲激光器,其单脉冲输出能量为 13.4 mJ。脉冲激光经过分光镜时,有一小部分能量被反射入光电二极管作

为示波器(Tektronix 3054B)的触发信号,其余能量衰减后经发射三棱镜反射,通过焦距为 100 mm 的柱面凸透镜会聚成长 10 mm,宽 300  $\mu\text{m}$  的线状光斑作用于水平放置的样品。三棱镜和柱面镜放置在精密电控平移架上,通过整体平移可以实现线光源的扫描;样品水平放置在精密电控平移台上,通过移动样品实现另一个方向的扫描;干涉仪(Bossa Nova TEMPO interferometer)通过非线性晶体实现双波混频,可以实现 1 GHz 的超声信号测量。非线性干涉仪的探测光束经反射镜反射,聚焦在声表面波的传播路径上。当脉冲激光在材料表面激发出瑞利波时,瑞利波沿表面传至探测点位置,由于声扰动会导致材料表面发生微小形变,通过非线性干涉仪测量位移信号,并把输出的电信号接入到数字示波器,再传输到计算机,经程序计算得到应力分布。

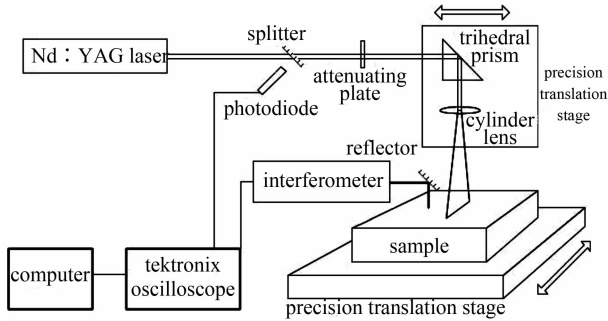


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic of experimental arrangement

样品为两块 10cm $\times$ 5cm 的铝合金 3031 焊接而成,为了防止在焊接过程中样品表面被氧化,采用氩弧焊的方式进行缝焊。

图 3 是实验步骤示意图。超声法测量材料表面的焊接应力分布是间接测量,必须先测量瑞利波在无应力状态下的传播速度  $v_{R12}^0$  和有应力状态下的速度  $v_{R12}$ ,因此分两步分别测量  $v_{R12}^0$  和  $v_{R12}$ 。

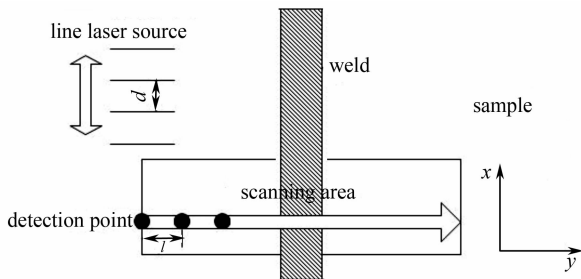


图 3 实验步骤示意图

Fig. 3 Schematic of experimental procedure

首先在远离焊缝的位置(可以认为无焊接应力区域)测定  $v_{R12}^0$ ,在测量时采用固定探测点,激发线

光源沿  $x$  轴平行移动,移动间距为  $d = 0.5\text{mm}$ ,得到一系列瑞利波波形序列,运用波形相关技术计算相邻两个瑞利波由于传播路程变化产生的到达时间差  $\Delta t$ ,则无应力状态下的传播速度为

$$v_{R12}^0 = \frac{d}{\Delta t}. \quad (3)$$

然后沿  $y$  轴移动样品,步长为  $l = 1\text{mm}$ ,重复上面的过程,就可以得到在  $y$  轴方向不同位置的瑞利波速度变化曲线。根据式(2),就可以得到样品的焊接应力曲线在  $y$  轴方向的变化趋势。

#### 4 实验信号与处理

采用波形相关技术测量表面波的速度。设两个包含瑞利波波包的探测信号为  $r(t)$  和  $s(t)$ ,用数字示波器对这两个连续信号进行数字采样,得到如图 4(a)所示的离散信号  $r[n]$  和  $s[n]$ 。

$$r[n] = \sum_{n=0}^N r(t) \cdot \delta(t - nT), \quad (4)$$

$$s[n] = \sum_{n=0}^N s(t) \cdot \delta(t - nT), \quad (5)$$

其中  $T$  为示波器的采样周期,  $N$  为离散后的信号长度,  $\delta(g)$  是  $\delta$  函数。

需要计算的表面波波形也包含在离散信号中,用  $R[n]$  表示  $r[n]$  中的瑞利波波形部分,通过对  $r[n]$  进行加矩形窗运算就可以得到  $R[n]$

$$R[n] = r[n] \cdot (u[n - n_R] - u[n - n_L]), \quad (6)$$

式中  $u[n]$  为单位阶跃函数;  $n_R$  和  $n_L$  分别为矩形窗的右边界和左边界。将  $R[n]$  作为相关运算的参考信号。

将测量信号  $s[n]$  与参考信号  $R[n]$  进行归一化相关运算,

$$C\{R[n + (n_L - n_0) - i], s[n]\} = \frac{\text{cov}\{R[n + (n_L - n_0) - i], s[n]\}}{\sqrt{\text{cov}(R[n], R[n]) \cdot \text{cov}(s[n], s[n])}}, \quad (7)$$

其中  $n_0$  为  $s[n]$  的起始位置,  $i \in [0, N]$  的整数,  $\text{cov}(g, g)$  函数为相关函数,可以表示为

$$\text{cov}(A[n], B[n]) = E\{[A[n] - E(A[n])] \cdot [B[n] - E(B[n])]\}, \quad (8)$$

式中  $E(g)$  为数值期望函数。

如图 4(b)所示,当  $i$  从 0 变化到  $N$  时,参考信号  $R[n]$  与测量信号  $s[n]$  的各部分进行相关运算。根据式(7),相关系数  $C\{R[n + (n_L - n_0) - i], S[n]\}$  在 0 到 1 之间发生相应的变化,当相关系数

到达最大值时,即  $s[n]$  中参与相关运算的部分与参考信号  $R[n]$  最为相似,设这个时刻的  $i = n_{\max}$ ,即此时  $s[n]$  中瑞利波波包的位置。从上面的分析可以看出  $i$  的取值只能是整数,因此瑞利波的定位精度最大为示波器的采样周期  $T$ ,为了进一步提高这一精度,采用多项式拟合的方法,选取在归一化相关函数  $C\{R[n+(n_L-n_0)-i],S[n]\}$  上以  $i = n_{\max}$  为中心点左右各提取  $N_0$  个值,用二次多项式对这  $2N_0+1$  个点进行最小二乘拟合,如图 4(c)所示。得到下式

$$f(x) = ax^2 + bx + c, \quad (9)$$

这样  $x_{\max} = -\frac{b}{2a}$  就对应  $f(x)$  的最大值,把这个值作为归一化相关函数  $C\{R[n+(n_L-n_0)-i],S[n]\}$  取最大值时的位置。

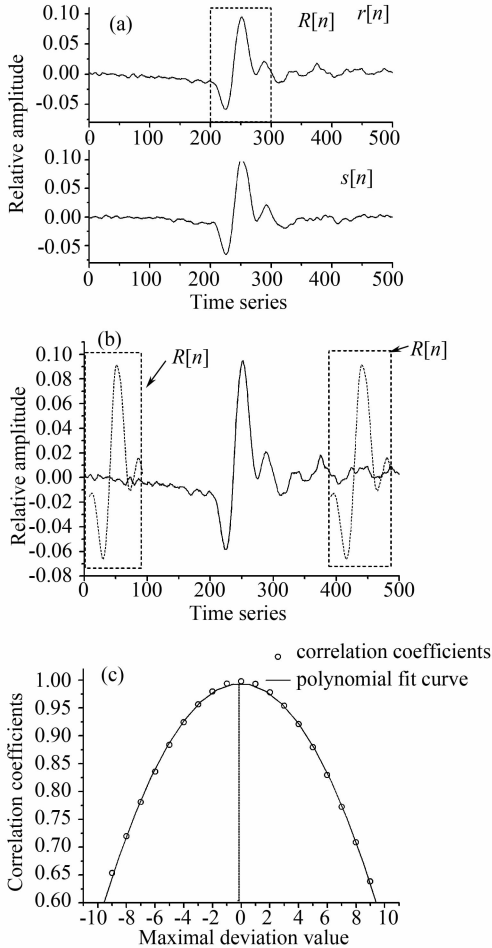


图 4 实验信号与处理结果

Fig. 4 Experimental signals and the processed result

对于两个包含表面波成分的探测信号  $S_1[n]$  和  $S_2[n]$ ,与参考信号  $R[n]$  进行上述运算后得到对应的拟合函数分别为  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$

$$\begin{cases} f_1(x) = a_1x^2 + b_1x + c_1 \\ f_2(x) = a_2x^2 + b_2x + c_2 \end{cases}, \quad (10)$$

则这两个信号  $S_1[n]$  和  $S_2[n]$  中瑞利波到达的时间差为

$$\Delta t = \left(\frac{b_1}{2a_1} - \frac{b_2}{2a_2}\right) \cdot T, \quad (11)$$

并且时间差的精度不受示波器的采样周期限制。

## 5 结果与讨论

图 5 是沿垂直焊缝方向测出的瑞利波传播速度分布,图中阴影区域为焊缝区域。可以看出,在远离焊缝的位置,瑞利波的速度基本不变,在离焊缝 5 mm 的位置时,瑞利波的速度减小,当探测位置继续靠近焊缝,瑞利波的速度明显提高,当进入焊缝区域后,波速先减后增,变化剧烈。拉应力引起超声波声速减小,而压应力引起超声波声速增大。

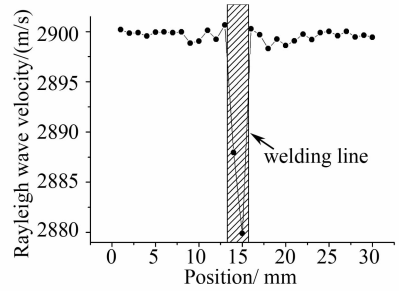


图 5 瑞利波速度分布

Fig. 5 Velocity distributions of Rayleigh waves

由文献[9]可知材料的声弹性系数  $A_{R12}^{(1)} = -15.9 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ ,将测到的瑞利波速度代入

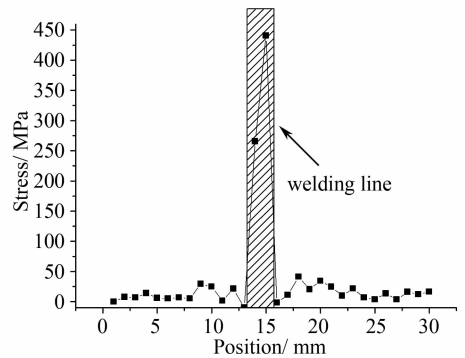


图 6 铝板上的焊接应力分布

Fig. 6 Welding stress distributions on the aluminum plate (2)式,计算得到焊接应力分布,如图 6 所示。可以看出,焊缝周围存在小幅度压应力区域,在焊缝内部是较大幅度的拉应力区域,这是一个较典型的焊接残余应力分布,与文献[21]采用传统超声法测定的结果类似。实验结果中的压应力区域相比拉应力区

域小很多,这是由于为了使得干涉仪测得的波形有较好的信噪比,样品表面必须有较好的反射率,所以对焊缝附近的粗糙表面进行了抛光,因此一定程度上破坏了样品表面的应力分布,尤其对于绝对值较小的压应力产生较大的影响。

上述实验方法,焊接应力在样品近表面的分布以及样品表面的粗糙度对于表面波的传播速度都有一定的影响,因此对于应力的测量造成误差,但是对于金属样品,这种探测方法具有无损、快速的优点。

## 6 结 论

在超声瑞利波的声弹性理论上,提出一种全光式表面焊接应力分布的探测方法。用 Nd:YAG 脉冲激光在材料表面激发超声瑞利波,非线性激光干涉仪探测瑞利波测量声波的渡越时间,并采用波形相关技术计算相邻的瑞利波的传播时间延迟,计算瑞利波在材料表面传播的速度。为减小数字示波器采样频率引入的误差,对计算出的相关系数进行多项式拟合,进一步提高了波形相关法的计算精度。随着激光源在焊缝周围的扫描,可以测到焊缝周围的应力分布。利用这一套实验装置测量了铝焊接平板表面的残余应力,得到了较为典型的焊接残余应力分布曲线,结果表明这种方法可以用于表面焊接应力分布的无损检测。

## 参 考 文 献

- 1 R. Halmshaw. Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 1996
- 2 P.J. Withers, H. D. H. Bhadeshia. Residual stress part 1 - measurement techniques [J]. *Materials Science and Technology*, 2001, **17**(4): 355~365
- 3 M. Hayes, R. S. Rivlin. Surface waves in deformed elastic materials[J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1961, **8**(5): 358~380
- 4 Yukio Iwashimizu, Osami Kobori. The Rayleigh wave in a finitely deformed isotropic elastic material[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1978, **64**(3): 910~916
- 5 G. R. Gerhart. Rayleigh wave velocity for a stress-induced slightly anisotropic solid[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1976, **60**(5): 1085~1088
- 6 M. Hirao, H. Fukuoka, K. Hori. Acoustoelastic effect of Rayleigh surface wave in isotropic material[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1981, **48**(1): 119~124
- 7 A. V. Osetrov, H. J. Frohlich, R. Koch. Acoustoelastic effect in anisotropic layered structures[J]. *Phy. Rev. B*, 2000, **62**(21): 13963~13969

- 8 R. E. Kumon, D. C. Hurley. Effects of residual stress on the thin-film elastic moduli calculated from surface acoustic wave spectroscopy experiments[J]. *Thin Solid Films*, 2005, **484**(1-2): 251~256
- 9 M. Duquenooy, M. Ouafthouh, M. Ourak. Ultrasonic evaluation of stresses in orthotropic materials using Rayleigh [J]. *NDT & E International*, 1999, **32**(4): 189~199
- 10 P. Rajagopal, K. Balasubramaniam, S. Maddu *et al.* A new approach to inversion of surface wave dispersion relation for determination of depth distribution of non-uniform stresses in elastic materials [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, **42**(3-4): 789~803
- 11 D. E. Bray, P. Junghans. Application of the LCR ultrasonic technique for evaluation of post-weld heat treatment in steel plates[J]. *NDT & E International*, 1995, **28**(4): 235~242
- 12 H. G. Georgiadis, G. Lykotrafitis. Rayleigh waves generated by a thermal source: a three-dimensional transient thermoelasticity solution [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, **72**(1): 129~138.
- 13 Xu Baiqiang, Ni Xiaowu, Shen Zhonghua *et al.* Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the plate material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 621~625.
- 许伯强, 倪晓武, 沈中华 等. 激光激发板状材料中超声导波的有限元数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 621~625
- 14 Wang Jijun, Shen Zhonghua, Xu Baiqiang *et al.* Analysis on precursor in laser ultrasonics in metal and non-Metallic Materials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1127~1132
- 王纪俊, 沈中华, 许伯强 等. 金属和非金属材料中激光超声前驱小波分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1127~1132
- 15 He Yuejuan, Zhu Rihong, Shen Zhonghua *et al.* Analysis of laser-induced surface Rayleigh wave's polarity in hollow cylinders by finite element method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 765~769.
- 何跃娟, 朱日宏, 沈中华 等. 圆管中激光激发表面瑞利波极性的有限元分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 765~769
- 16 Xu Xiaodong, Zhang Shuyi, Zhang Feifei *et al.* Characterizing of thin film materials by optical difference detection of laser generated SAW[J]. *Acta Acustica*, 2003, **28**(3): 201~206
- 徐晓东, 张淑仪, 张飞飞 等. 利用光差分技术检测激光激发声表面波定征薄膜材料[J]. *声学学报*, 2003, **28**(3): 201~206
- 17 T. Tanaka, Y. Izawa. Nondestructive detection of small internal defects in carbon steel by laser ultrasonics[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3A): 1477~1481
- 18 M. Duquenooy, M. Ouafthouh, M. Ourak. Determination of stresses in aluminium alloy using optical detection of Rayleigh waves[J]. *Ultrasonics*, 1999, **37**: 365~372.
- 19 Pan Yondong, Qian Menglu, Xu Weijiang *et al.* Residual stress profiling of an aluminum alloy by laser ultrasonics[J]. *Acta Acustica*, 2004, **29**(3): 254~257
- 潘永东, 钱梦露, 徐卫疆 等. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布[J]. *声学学报*, 2004, **29**(3): 254~257
- 20 M. Duquenooy, M. Ouafthouh, M. Ourak *et al.* Theoretical determination of Rayleigh wave acoustoelastic coefficients: comparison with experimental values[J]. *Ultrasonics*, 2002, **39**(8): 575~583
- 21 Zhang Wenjun, Jiao Fujie, Yuan Zhikang. Acoustoelastic technique for residual welding stress in aluminium alloy [J]. *Nondestructive Test*, 1993, **15**(8): 211~214.
- 张文珺, 焦复杰, 袁智康. 声弹性法测定铝合金焊接残余应力 [J]. *无损检测*, 1993, **15**(8): 211~214