

文章编号: 0258-7025(2008)01-0120-05

# 激光冲击硬化层中激光声表面波的实验研究

袁 玲<sup>1</sup> 任旭东<sup>2</sup> 严 刚<sup>3</sup> 沈中华<sup>1</sup> 倪晓武<sup>1</sup> 陆 建<sup>1</sup> 张永康<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094  
<sup>2</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; <sup>3</sup> 南京邮电大学应用物理系, 江苏 南京 210046)

**摘要** 激光冲击硬化通过在材料的近表面产生残余压应力来提高材料的表面硬度和抗疲劳寿命。材料近表面性质的变化能够导致在其中传播的声表面波发生色散。为了研究激光冲击硬化后金属 Al 合金样品中的激光声表面波(SAW)的传播,提出一种合理的宽带激发和接收方法,搭建了由激光激发、聚偏二氟乙烯(PVDF)传感器接收超声信号的实验装置。分别对不同条件下激光冲击的 Al 合金样品中的激光声表面波进行了探测,通过对接收到的超声信号进行时频分析得到了信号的频谱以及声表面波的相速度色散曲线,速度色散主要是由于晶粒方向改变和错位密度的增加引起的。

**关键词** 激光技术;激光冲击硬化;声表面波;色散

**中图分类号** TN 249;O 426.2 **文献标识码** A

## Experimental Study of Laser-Generated Surface Acoustic Waves in Laser Shock Hardening Metals

Yuan Ling<sup>1</sup> Ren Xudong<sup>2</sup> Yan Gang<sup>3</sup> Shen Zhonghua<sup>1</sup>  
Ni Xiaowu<sup>1</sup> Lu Jian<sup>1</sup> Zhang Yongkang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China  
<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China  
<sup>3</sup> Department of Applied Physics, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China

**Abstract** Laser shock hardening is a well-known method for prolonging the fatigue life of metals components by introducing near-surface compressive residual stresses. The surface acoustic wave can disperse when the material properties of near-surface change. The near-surface properties, such as elastic properties, residual stresses, can be analyzed by the phase velocity dispersion. An experiment method is presented to detect laser surface acoustic wave (SAW) of Al alloy by laser shock. Based on the advantage of broad bandwidth generation and detection, the experiment use laser exciting and polyvinylidene fluoride (PVDF) as transducer. The SAW signals in aluminum alloy material under different conditions by laser shock hardening were detected. The signals spectrum and phase velocity dispersive curves were obtained and analyzed. The SAW velocity dispersion is mainly caused by the near-surface grain reorientation and the increasing of dislocation density.

**Key words** laser technique; laser shock hardening; surface acoustic wave; dispersion

## 1 引 言

激光冲击强化是一种新型的材料表面改性处理技术。利用高功率脉冲激光与材料相互作用过程中产生的高压冲击应力波,使冲击后材料的近表面层

具有残余压应力和高的错位密度,改变金属材料表面的物理机械性能,从而大大提高金属材料的表面硬度和抗疲劳寿命<sup>[1,2]</sup>。与传统的喷丸硬化相比激光冲击硬化具有影响层深,易于自动化,处理后的材

收稿日期:2007-05-15;收到修改稿日期:2007-09-10

基金项目:南京理工大学青年学者基金(NJUST200503)资助项目。

作者简介:袁 玲(1980—),女,湖北人,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail:yl117@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的研究。

E-mail:shenzh@mail.njust.edu.cn

料表面粗糙度小等特点,尤其是在常规喷丸无法处理的局部或不规则表面(如拐角、焊缝、小孔),因此在航空材料上得到了越来越广泛的应用。范勇等<sup>[3]</sup>对激光冲击的航空铝合金进行了 X 射线应力分析,从而得到不同条件下受激光冲击强化铝合金中的残余应力分布。Ruiz 等<sup>[4]</sup>讨论了不同的喷丸强度及不同的表面粗糙度对喷丸硬化材料中的声表面波的色散影响。Chenni 等<sup>[5]</sup>利用换能器激发、光学接收的方法探测了硬化钢中的声表面波,并将硬化钢视为两层材料,对其弹性系数进行了评估。

传统研究冲击硬化材料中的声表面波时,都是采用压电换能器激发、用光学方法接收超声波。然而压电换能器是窄带激发,一次只能激发单频波,要得到速度随频率的变化则需多次更换换能器<sup>[4]</sup>。且用光学方法接收的灵敏度低,对于粗糙表面灵敏度尤其低。本文采用激光激发超声波<sup>[6~9]</sup>,利用自行设计的劈尖状聚偏二氟乙烯(PVDF)传感器对冲击硬化金属中的激光声表面波进行探测,实现信号的宽带激发和宽带接收。激光超声具有非接触激发,能一次同时在样品中激发多种模式的超声波和频带宽等特点,因此在无损检测领域的应用非常广泛。另外,利用聚偏二氟乙烯传感器进行探测无需耦合剂,对粗糙表面同样适用。由于声表面波渗透到表面层下约一个波长的深度,因此声表面波受到近表面层材料性质的影响,是检测材料近表面性质的一个理想手段。通过对超声信号的速度、色散特征、散射和衰减等的研究,可以对近表层材料性质的变化进行评估。本文对两种不同条件下进行的激光冲击铝合金样品进行实验研究,探测到了样品中传播的激光声表面波,通过时频分析得到了声表面波的色散特性,并对产生该色散的原因进行了分析。若通过实验得到的色散曲线与理论计算的进行拟合,可对硬化层的深度及近表面层材料弹性性质的变化进行反演,真正达到无损检测的目的。

## 2 实验样品

激光冲击实验选用型号为 1060H24 的 Al 合金样品,该种 Al 合金样品的密度为  $2705 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,杨氏模量为  $6.89 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,泊松比为 0.33。样品尺寸为  $19 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0.6 \text{ cm}$ 。冲击用的激光器采用江苏大学强激光技术研究所的高功率钕玻璃(Nd:glass)激光器。激光器的最大输出能量为 50 J,脉宽为 20 ns,激光波长为  $1.054 \mu\text{m}$ ,激光光束为矩形。为了得到不同的冲击效果,在冲击时采用了两种不同

焦斑直径的激光分别对两块样品进行冲击,一块样品冲击时所用激光的焦斑直径为 6 mm,称为样品 A,另一块样品冲击时所用激光的焦斑直径为 8 mm,称为样品 B。在激光冲击硬化时,受冲击金属材料的表面涂上黑漆涂层,一方面由于理想金属表面对激光的反射率很高,不易吸收能量,表面加覆涂层后,能够很好地吸收激光能量,从而诱发更大能量的冲击波作用于样品表面。另一方面,黑漆涂层吸收了激光大部分的热量,这样起到保护样品表面的作用,冲击后的样品表面无损伤。

## 3 实验系统

利用聚偏二氟乙烯传感器检测激光冲击样品中激光声表面波的实验装置如图 1 所示。检测激光为 Nd:YAG 激光器,波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns。脉冲激光束经过衰减片后通过柱透镜在样品表面聚焦成宽度约为  $100 \mu\text{m}$ ,长度约为 7 mm 的线光源。聚焦在样品上的激光能量较低,未引起材料融蚀,表面没有受到破坏,仅引起材料辐照区域的温升。由于热膨胀,该瞬态温度梯度场就成为激发超声的力源,从而在样品上激发出向体内传播的体波和沿表面传播的表面波。实验中采用了激光线源激发,因此激发的声表面波在垂直于线光源方向上传播占绝对优势,可以近似成平面波信号处理。实验触发信号是通过光电二极管(上升时间为 100 ps)获取激光源经分光片的反射光来实现的。为了记录传播不同距离的声表面波信号,通过固定探测位置、改变激发位置来实现。因此,整个光源部分安装在一个重复定位精度达  $0.32 \mu\text{m}$  的精密电控平移台上,可以通过计算机很方便地控制光源的精密平移,这也是通过激光来激发声波的一大优势。

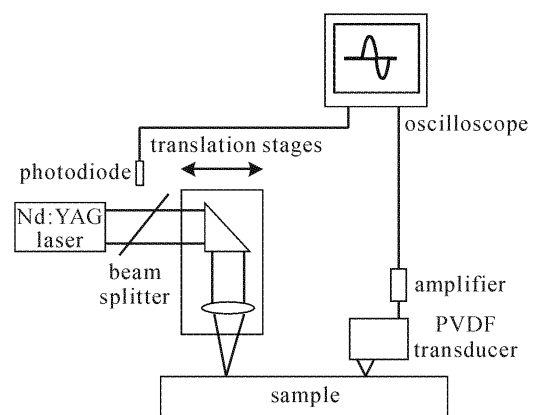


图 1 激光声表面波的激发和探测示意图

Fig. 1 Experimental scheme of laser induced surface acoustic waves

聚偏二氟乙烯是一种新型压电高分子聚合物材料,它具有独特的压电效应,与传统的压电材料相比具有压电系数高、质量轻、密度小、柔韧性好、频响宽、动态范围大、机电转换灵敏度高、机械性能强、声阻抗易匹配等特点,把它加工成薄膜作为传感器对系统的振动响应很灵敏。因此在超声的体波检测,尤其是纵波检测中聚偏二氟乙烯压电薄膜传感器得到了越来越广泛的注意<sup>[10]</sup>。由于聚偏二氟乙烯压电薄膜探测是一种接触式探测,对于声表面波,沿波传播方向的接触面的大小直接影响到接收信号的带宽,因此为了获得较大的探测带宽必须使接触面尽量小。

实验设计了一个金属尖劈,尖劈的长度为5 mm左右,沿表面波传播方向的接触面,约为6  $\mu\text{m}$ 左右。采用边缘钳紧方法,将单面镀有铝膜作电极的聚偏二氟乙烯薄膜包裹在尖劈上,并装入一金属固定块,尖劈与金属固定块之间用特富龙绝缘。尖劈处的聚偏二氟乙烯薄膜直接与样品表面接触,无需耦合剂耦合,聚偏二氟乙烯薄膜也只有几微米厚,能够获得更高频率的超声信号,而刀口的长度为几毫米,相对于刀口宽度大3个数量级,因而实现了线检测。安装过程中要确保薄膜不被损坏,安装后还要检测探头内部是否导通,保证内外部导通,使得信号能有效被传感器接收。探测到的表面波信号经前置放大器(美国 MITEQ 公司)转换为电压信号输入 TDS3054B 数字示波器。

## 4 实验结果及讨论

### 4.1 实验结果

由于实验样品的厚度达6 mm,而激光冲击硬化层的典型厚度在1 mm左右,因此样品的反面即未被冲击的一面不会受到激光冲击的影响。为了检测实验装置的精度,先对样品A的反面进行实验。在样品A的反面探测瑞利(Rayleigh)波,图2为光源间隔17 mm的两点接收到的两个瑞利波的波形,横轴为信号到达的时间,纵轴为接收到的信号的电压值。从图中可以看出波形基本无色散。两个位置波形到达的时间间隔约为5.88  $\mu\text{s}$ ,可以计算得未经冲击的该Al合金样品中瑞利波的速度约为2.887 km/s,而根据第2节实验样品Al合金样品的参数计算得到的瑞利波的速度约为2.885 km/s,实验误差约为0.07%。

对样品A冲击过的正面进行探测,实验前先将表面的黑漆涂层去掉。先在光源距接收点30 mm处

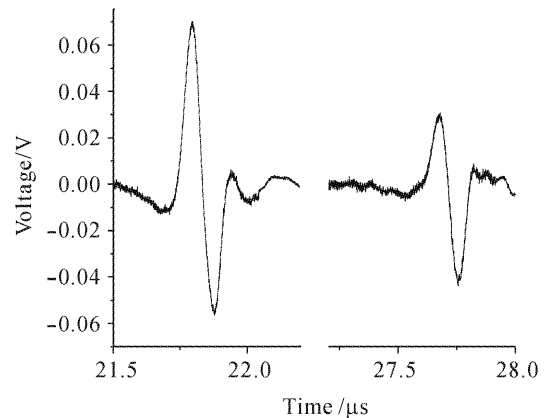


图2 样品A未冲击面上间隔17 mm的两点接收到的表面波形

Fig. 2 Two SAW signals of two points on the back side of sample A with the distance of 17 mm

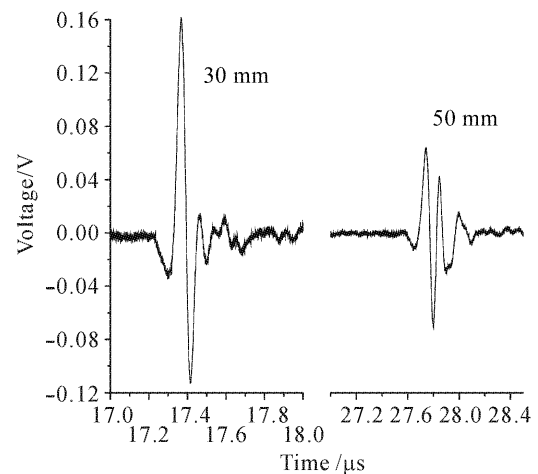


图3 激发点距接收点分别为30 mm和50 mm的两点接收到的表面波形

Fig. 3 SAW signals of the two points departing from excited point 30 mm and 50 mm separately

的点a探测,大约在17  $\mu\text{s}$ 时接收到表面波信号,实验过程中保证接收点不动,通过电控平移台改变发光源的位置来改变激发点距接收点的距离。移动光源到距聚偏二氟乙烯约50 mm的b点再进行探测,此次接收到的瑞利波的到达时间约为27  $\mu\text{s}$ ,两次接收到的波形见图3,由图可以看出,受冲击硬化后的样品中的声表面波波形出现了明显的色散特征。当激发点距接收点较近时接收到的波形的幅度大,色散小。随着传播距离增加,表面波发生衰减,接收到的波形的幅度小,色散明显。

### 4.2 讨论

利用相位谱方法对在样品A正面的a,b两点接收到的信号求相速度<sup>[11]</sup>。令a,b两点测得的超声信号的相位谱分别为 $\Phi_1(\omega)$ 和 $\Phi_2(\omega)$ ,相位谱之差为 $\Delta\Phi(\omega)$ 。实际所得到的相位一般在 $-\pi \sim \pi$ 之

间,所以在求  $\Delta\Phi$  之前先要将相位谱  $\Phi_1(\omega)$  和  $\Phi_2(\omega)$  去卷绕,然后进一步求出相速度  $V(f)$

$$V(f) = 2\pi f \Delta d / \Delta\Phi, \quad (1)$$

式中  $\Delta d$  为两次激发源之间的距离,这里为 30 mm。 $f$  为频率。

得到如图 4 所示的典型频谱及图 5(a)所示的相速度色散。从频谱图中可以看出,激发出来的最高频率约为 16 MHz,中心频率约为 8 MHz。由相速度色散图 5(a)中可以看出经冲击硬化后的 Al 合金中的激光声表面波出现正常色散,低频时的相速度趋近于样品未受冲击区域的瑞利波的速度,这是由于低频成分波的渗透深度大,主要受远离表面层的材料性质的影响,而高频成分波主要受表面层的影响,速度趋向于 2.846 km/s,受激光冲击硬化后的表面层中表面波的速度低于未受冲击的原始速度。

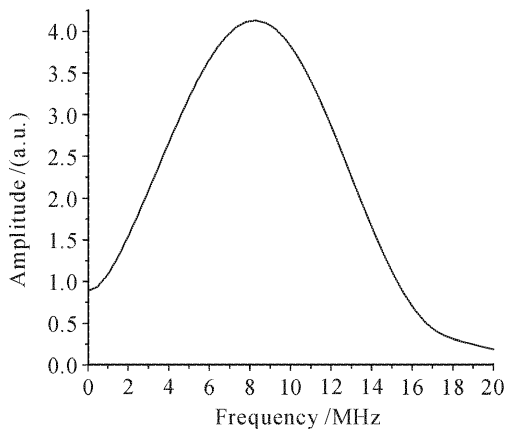


图 4 接收到的表面波信号的频谱图

Fig. 4 Spectrum of the SAW signal

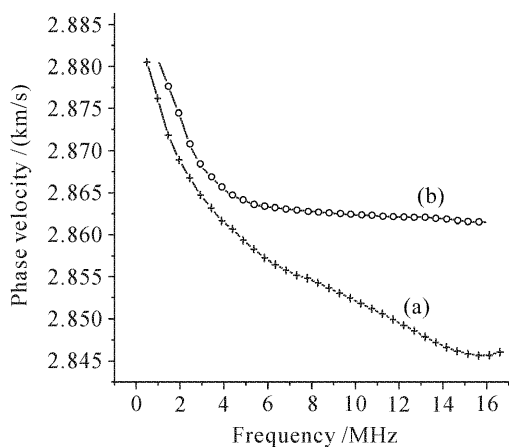


图 5 样品 A(a)和样品 B(b)的相速度色散图

Fig. 5 Phase velocity dispersion curves with sample A (a) and sample B (b)

采用同样的方法对样品 B 的正面进行探测,得到了激光声表面波的相速度色散曲线图 5(b)。由图 5 可以看出两个样品在低频时的相速度都趋近于

反面瑞利波的相速度即 2.887 km/s,但样品 B 中的激光声表面波的速度色散小。因为当激光能量一定时,激光冲击时采用的光斑直径越小,功率密度越大,产生的冲击波的峰值压力就越大,冲击强化的效果好,则激光冲击后的近表面层的性质改变越大,与文献[12]一致。由两条色散曲线可知,低频部分的速度变化率大,高频部分色散曲线比较平缓,变化率小,因此,对硬化层而言,越远离表面材料性质变化得越快,越接近表面材料性质变化得越慢。

从相速度色散图 5 中可以计算出在两个样品中,相速度的变化分别为 1.4% 和 0.9%。而对于冲击硬化的 Al 合金样品中的声表面波的色散主要由三个方面引起<sup>[4]</sup>:表面粗糙导致声表面波衍射、冲击后在近表面产生的残余压应力以及冲击后材料的近表面硬度增加,而硬度的增加是由于受到冲击的样品表面发生塑性变形,使得晶粒方向改变和错位密度的增加引起的。对于传统的喷丸硬化,由粗糙引起的表面波的速度色散大约为 0.2%,它使表面波的速度随频率的增加而减小<sup>[4]</sup>,但对于喷丸硬化由于是金属球直接以高速喷击于样品表面使样品近表面产生残余压应力,故经喷丸处理的样品表面是相当粗糙的。本文的 Al 合金样品利用的是激光冲击硬化处理,是非接触式的,且受冲击的 Al 合金样品表面覆盖了黑漆涂层,起到了保护样品表面的作用,冲击后的样品表面无损,故实验中粗糙对声表面波的影响是可以忽略的。而残余压应力会导致瑞利波的速度随着频率的增加而增加<sup>[13]</sup>,故由于晶粒方向改变和错位密度的增加引起的速度色散应该分别大于 1.4% 和 0.9%。因此可以认为,硬化层的出现减小了材料中的声表面波的速度,使声表面波出现色散特征。

## 5 结 论

提出了一种新的利用激光激发超声、利用劈尖状聚偏二氟乙烯传感器对冲击硬化 Al 合金中的激光声表面波进行探测的方法。该装置实现了信号的宽带激发和宽带接收,并且具有结构简单、易于调节、灵敏度高等特点。利用该实验装置对不同条件下激光冲击的样品中的激光声表面波进行了研究。结果表明,由于经过激光冲击硬化后 Al 合金近表面层的材料性质发生变化,导致了在其中传播的声表面波的速度减小。声表面波在 Al 合金样品中的相速度色散主要是由于晶粒方向改变和错位密度的增加引起的,并且在冲击硬化过程中采用的冲击激

光的焦斑直径的大小对冲击后材料性质的改变有明显的影 响,当冲击用的激光能量一定时,光斑半径越小冲击效果越好。

### 参 考 文 献

- 1 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3):1497~1502
- 2 Zhang Yongkang, Zhang Suyi, Tang Yaxing *et al.*. Study of anti-fatigue fracture laser shock processing technology [J]. *Science in China (Series E)*, 1997, **27**(1):28~34  
张永康,张淑仪,唐亚新等. 抗疲劳断裂的激光冲击强化技术研究[J]. 中国科学(E辑), 1997, **27**(1):28~34
- 3 Fan Yong, Wang Shengbo, Wu Hongxing *et al.*. Research of residual compressive stress induced by laser shock processing on 7075 aerial aluminum alloy [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(1):6~8  
范 勇,王声波,吴鸿兴等. 7075 航空铝合金激光冲击强化残余压应力研究[J]. 应用激光, 2003, **23**(1):6~8
- 4 Alberto Ruiz, Peter B. Nagy. Laser-ultrasonic surface wave dispersion measurements on surface-treated metals [J]. *Ultrasonics*, 2004, **42**(1-9):665~669
- 5 B. Chenni, J. Pouliquen. Non-destructive evaluation of gradient properties of hardened steel by surface acoustic waves measurements [J]. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2002, **615**:1629~1636
- 6 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):1127~1131  
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):1127~1131
- 7 Shen Zhonghua, Xu Baiqiang, Ni Xiaowu *et al.*. Numerical simulation of pulsed laser induced ultrasound in monolayer and double layer materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1275~1279  
沈中华,许伯强,倪晓武等. 单层和双层材料中的脉冲激光超声数值模拟[J]. 中国激光, 2004, **31**(10):1275~1279
- 8 Yan Gang, Xu Xiaodong, Shen Zhonghua *et al.*. An experimental method of the laser-generated ultrasonic waves for detecting the surface-breaking defects [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(1):107~110  
严 刚,徐晓东,沈中华等. 激光超声表面缺陷检测的实验方法[J]. 光子·激光, 2006, **17**(1):107~110
- 9 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
- 10 Kwang Yui Kim, Wei Zou, Steve Holland *et al.*. Measurements of the longitudinal wave speed in thin materials using a wideband PVDF transducer [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, **114**(3):1450~1453
- 11 Liu Zhenqing. A phase spectrum method for determination of ultrasonic wave velocity [J]. *Technical Acoustics*, 1993, **12**(2):19~22  
刘镇清. 测量超声波速度的相位谱方法[J]. 声学技术, 1993, **12**(2):19~22
- 12 Yang Chaojun, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Analysis and experiment on deformation of sheet metal by laser shock wave [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, **37**(Suppl.):40~43  
杨超君,张永康,周建忠等. 金属材料的激光冲击变形分析及其实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, **37**(增刊):40~43
- 13 Anton I. Lavrentyev, William A. Veronesi. Ultrasonic characterization of shot peened metal surfaces [C]. *SPIE*, 2001, **4336**:88~99