

## 钢板内应力激光超声导波检测方法研究

姬保平<sup>1\*</sup>, 曹建树<sup>2</sup>, 黄钢<sup>1</sup>, 于铭洋<sup>1</sup>, 陈志君<sup>1</sup>, 张清东<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>北京科技大学机械工程学院, 北京 100083;

<sup>2</sup>北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617

**摘要** 为了在钢板生产过程中实现钢板内应力的在线非接触无损检测,研究了基于激光超声导波的钢板内应力检测方法。搭建了激光超声导波应力测试装置,开发了相应的信号采集、处理及分析软件,组建了激光超声应力检测实验研究平台。通过拉伸加载装置,给实验试样两端施加预先计算的拉伸载荷,实现了所需要的各种工况下的钢板内应力场。通过激光超声检测单元采集各种载荷下的激光超声导波信号,实验研究了激光超声导波对钢板内应力的表征能力与关联规律。实验结果表明,脉冲激光可以在硅钢板中激发出以 A0 模式为主的宽频激光超声导波;激光超声导波相速度随拉力的增大而增大,群速度随拉力的增大而减小;拉应力与激光超声导波信号的首波超前时间差和波包延迟时间差都存在明显的线性关系。激光超声导波检测方法可用于带钢内应力的非接触无损检测,有可能成为钢板带内应力在线检测的新方法。

**关键词** 测量; 钢板; 应力; 激光超声导波; 无损检测

**中图分类号** TN249; TN247; TG115.28

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202249.0604001

### 1 引言

板带材是钢铁工业的主干产品,板形是汽车板、硅钢片、马口铁等高档板带产品的主要质量指标之一<sup>[1]</sup>。冷轧钢板或带钢的板形主要是指其表观平直性,板形平直性缺陷的本质是钢板的纵向延伸在其宽度和/或厚度方向上呈现不均匀分布,它可以导致钢板内出现不均匀分布的纵向应力,严重时会导致钢板出现瓢曲或翘曲等几何缺陷。板形平直性缺陷总是对应一定的不均匀分布的纵向内应力,这种纵向内应力是表征板形缺陷的有效指标。在板形控制理论中,把这种与板形平直性缺陷对应的纵向应力称为板形应力,在带钢冷轧生产过程中主要通过检测张应力的横向分布来实现板形的自动控制<sup>[2]</sup>。

目前,已有多种钢板内应力检测方法,如小孔法、X 射线法、磁测法、超声导波法等<sup>[3-5]</sup>。带钢冷轧生产过程中主要采用板形仪对带钢张应力的分布进行在线检测,板形仪包括分段式、分片式、空气轴承式、整辊压电式等接触式板形仪以及基于气流激振

和涡流检测振幅的非接触式板形仪<sup>[6]</sup>。然而,接触式板形仪的灵敏度和分辨率都相对较低,辊面易划伤,维护、标定的成本高且难度大,非接触式板形仪的检测精度也比较低。因此,迫切需要探索新的非接触钢板内应力检测方法。

超声法具有操作方便快捷、对被测对象表面的要求不高等优点,受到人们的广泛关注<sup>[7-8]</sup>。超声波在薄板带中是以导波的形式传播,超声导波检测带钢内应力是基于声弹原理,即当带钢内部应力发生改变时,超声导波速度发生变化。该技术已被应用于薄板、钢绞线、钢轨等结构的应力检测。Kwun 等<sup>[9]</sup>研究了在不同预应力状态下超声导波纵向模式在钢绞线中传播的变化规律,证明了利用超声导波的速度变化来表征钢绞线预应力是可行的。Chen 等<sup>[10]</sup>研究了板和杆等简单截面波导,发现导波相速度随着拉伸载荷的增大而增加,导波群速度随着拉伸载荷的增大而减小,导波群速度与相速度的变化都可以用于表征应力。刘增华等<sup>[11]</sup>针对钢绞线建立了拉应力与最低阶纵向模式群速度之间的关系模

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-06-29; 录用日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51075031)、北京市自然科学基金(3202019, 3182008)

通信作者: \*jibaoping08@163.com; \*\*zhang\_qd@me.ustb.edu.cn

型,并通过实验标定得到最低阶纵向模式的群速度变化和拉应力之间的关系。许西宁等<sup>[12]</sup>提出了一种指标模型,用于应力检测时导波模式的快速选取。王嵘等<sup>[13]</sup>基于半解析有限元方法,研究了钢轨中导波频散特性与应力的关系,并实验研究了钢轨中导波的群速度和相速度随温度应力变化的规律。以上研究工作表明,利用超声导波检测带钢应力是切实可行的。

激光超声是利用激光远距离激发和检测超声波的一种新技术,具有非破坏、非接触、时空分辨率高等特点,适用于高温辐射环境<sup>[14-17]</sup>。Lévesque 等<sup>[18]</sup>利用激光超声在 1000 °C 左右的高温环境中在线测量了无缝钢管的厚度,将其用于轧机的反馈控制,减小了无缝钢管的厚度误差,并提出了一种基于激光超声的奥氏体晶粒在线测量方法。Hutchinson 等<sup>[19]</sup>在热轧车间利用激光在高温、高速的热轧板带上激发和检测超声波,表征了奥氏体到铁素体的转变状态。Duquennoy 等<sup>[20]</sup>用激光超声表面波测量了钢棒表面的残余应力分布。潘永东等<sup>[21]</sup>用激光超声表面波对铝合金样品不同位置的应力状态进行表征,得到了材料表面的残余应力分布。石一飞等<sup>[22]</sup>利用扫描激光源法在铝板焊缝附近激发超声波,利用干涉仪实现超声波的非接触检测,得到焊缝附近的应力分布状态。Zhan 等<sup>[23]</sup>利用激光超声表面波检测了 7075 铝合金搅拌摩擦焊焊缝区域的残余应力。

本文以电工钢薄板为例进行研究,搭建了激光超声导波应力检测实验装置,实验研究了不同应力状态下激光超声导波群速度和相速度的变化规律,确定了表征参数,建立了导波信号的首波相位超前时间和波包延迟时间与拉应力间的线性关系,探索了钢板内应力的非接触高精度无损检测新方法。

## 2 钢板内应力超声导波检测原理

### 2.1 声弹原理

超声法检测应力的理论基础是声弹性效应,带钢内应力的变化会引起超声导波速度的变化。在声弹性效应下,纵波速度、横波速度与应力的关系式<sup>[24-25]</sup>分别为

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

$$\rho c_T^2(\sigma) = \mu + \frac{\sigma}{3K} \left( \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu + m \right), \quad (2)$$

式中: $c_L$  为纵波速度; $c_T$  为横波速度; $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$  为体积模量; $\rho$  为材料密度; $\sigma$  为主应力; $\lambda$  和  $\mu$  为拉梅常数; $l$ 、 $m$  和  $n$  为三阶弹性常数。

### 2.2 导波模式分析

多模式和频散是导波的两个固有特性。多模式是指在某一频率下,存在多个不同导波模式的现象;频散特性是指导波的相速度和群速度会随着频率的变化而变化。钢板中的导波以 Lamb 波为主,根据质点的移动特性,Lamb 波振动形态可分为对称模式和反对称模式。以 0.2 mm 厚的硅钢板为例,根据频散方程可以得到硅钢板在零应力状态下的导波群速度频散曲线,如图 1 所示。由图 1 可知,在 0~8 MHz 的频率范围内,0.2 mm 厚硅钢板中的 Lamb 波只有 A0 反对称模式和 S0 对称模式,两者群速度不同,可以通过到达时间的先后在时域上区分;当频率大于 8 MHz 时,增加了 A1 反对称模式,三种模式群速度随频率的增大而逐渐接近,最终混叠在一起,使得导波信号分离困难,信号难以识别。

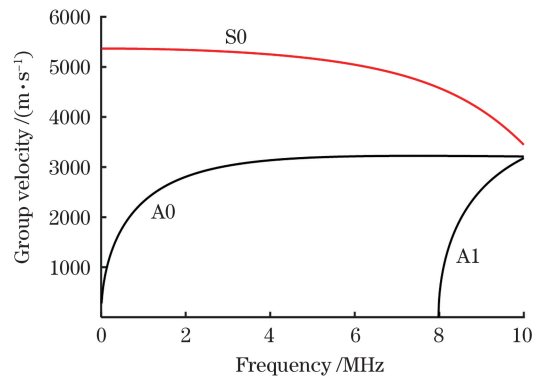


图 1 0.2 mm 厚硅钢板中的 Lamb 波频散曲线  
Fig. 1 Lamb wave dispersion curves of 0.2 mm thick silicon steel plate

## 3 钢板内应力超声导波检测方法

### 3.1 导波群速度测量方法

群速度是指超声导波波包的传播速度,导波群速度测量方案如图 2 所示。采用“一发一收”模式,脉冲激光在带钢表面位置  $a$  处激发超声导波,在位置  $b$  处检测导波信号,已知位置  $a$  和  $b$  之间的距离为  $L$ ,超声导波到达时间为  $t$ ,则导波群速度可近似表达为

$$c_g = \frac{L}{t}. \quad (3)$$

通过固定激发光与检测光的间距,将导波群速度的测量转变为导波传播时间的测量。最后,通过在带钢试样两端施加不同的张力,得到导波群速度与拉

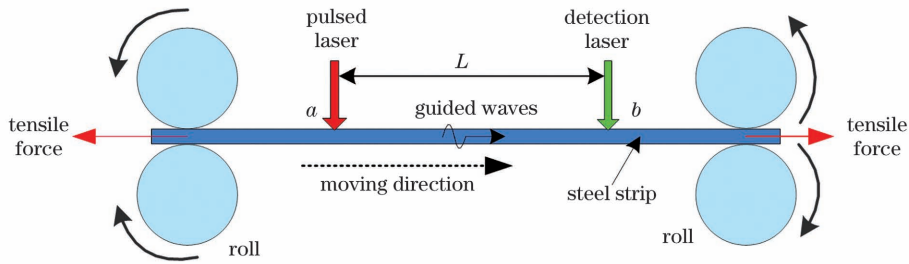


图 2 基于激光超声导波的带钢内应力测量方法示意图

Fig. 2 Schematic of method for measuring internal stress of strip steel based on laser ultrasonic guided waves

应力的关系。

### 3.2 时差计算方法

声弹性应力检测的关键在于超声导波传播时间差的精确测量。为了实现时间差的精确测量,采用波形相关方法计算时间差。假设两个包含导波波包的信号分别为  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$ ,利用数据采集卡进行数据采集后<sup>[22]</sup>,有

$$s_1(i) = \sum_{i=1}^N s_1(t) \delta(t - iT), \quad (4)$$

$$s_2(i) = \sum_{i=1}^N s_2(t) \delta(t - iT), \quad (5)$$

式中: $T$  为数据采集卡采样的时间间隔; $N$  为采样点数; $i$  为采样点编号; $\delta(\cdot)$  为狄拉克函数。将  $s_1(t)$  设为基准信号, $s_2(t)$  设为测量信号,则两者之间的归一化相关运算可以表示为

$$C_{12} = \frac{\sum_i s_1(i) s_2(i) - \sum_i s_1(i) \sum_i s_2(i) / N}{\left\{ \sum_i s_1^2(i) - \frac{[\sum_i s_1(i)]^2}{N} \right\} \left\{ \sum_i s_2^2(i) - \frac{[\sum_i s_2(i)]^2}{N} \right\}}^{1/2} \quad (6)$$

找到相关系数  $C_{12}$  最大值对应的时刻点  $n_{\max}$ , 则时差  $\Delta t = T n_{\max}$ , 这种时间差计算方法的精度取决于数据采集卡的最高采样频率。为了进一步提高时差计算精度,以  $n_{\max}$  时刻为中心,在两侧各取  $M$  个点,利用最小二乘法对  $2M+1$  个点进行二次多项式拟合,得到

$$f(x) = ax^2 + bx + c, \quad (7)$$

式中: $f(x)$  为拟合得到的二次多项式; $0 \leq x \leq N - 2M$ ,  $x$  表示采样时间间隔  $T$  的倍数; $a, b, c$  为常数。

当  $x = -b/2a$  时, $f(x)$  取最大值,计算得到的时间差为

$$\Delta t = (-b/2a)T. \quad (8)$$

## 4 超声导波应力检测实验研究平台的研制

### 4.1 模拟实验装置的研制

激光超声导波应力检测系统原理如图 3 所示,其中  $F$  表示加载装置施加在带钢两端的张力。由图 3 可知,整个实验系统由激光超声检测单元和加载装置两部分组成。激光超声检测单元采用 Q 开关 Nd:YAG 脉冲激光器激发产生超声导波,脉冲激光的波长为 1064 nm,脉冲时间宽度为 8 ns,最大重复频率为 20 Hz,单个脉冲激光的能量范围

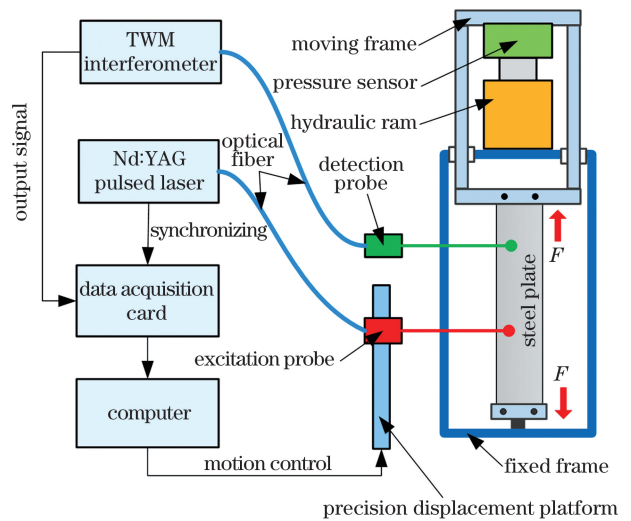


图 3 激光超声应力检测系统示意图

Fig. 3 Schematic of laser ultrasonic stress detection system

为 0~50 mJ;采用美国 Intelligent Optical Systems 生产的双波混合 (two-wave mixing, TWM) 激光干涉仪检测超声信号,检测激光的功率范围是 0~2 W,波长为 1550 nm,检测光斑直径为 0.1~0.2 mm。采用精密调节机构调节检测探头相对于带钢的相对位置,使检测探头轴线垂直于试样表面。激发探头被安装在一维精密位移平台上,计算机控制位移平台带动激发探头上下移动,调

节激发点与检测点的距离。加载装置由液压缸、压力传感器、固定框架和移动框架组成,液压缸最大载荷为 20 t,压力传感器的量程为 0~10 t。实验材料为硅钢板,试样如图 4 所示,硅钢板厚度依次为 0.20, 0.23, 0.27, 0.30 mm,平行段表面宽度为 35 mm。

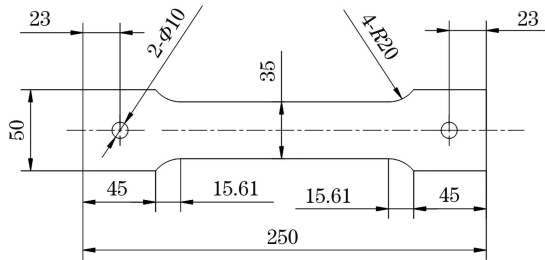


图 4 硅钢板拉伸试样

Fig. 4 Tensile specimen of silicon steel plate

## 4.2 数据处理方法及检测软件开发

激光超声导波信号分析流程如图 5 所示,数据预处理消除信号中的直流分量。数据采集卡采用美国 NI 公司的 PCI-5114,最高采样频率为 250 MHz,采样时间间隔为 4 ns;采用拉格朗日插值法在原始采样点之间插入 7 个数据点,将采样率提高到 2 GHz,采样时间间隔为 0.5 ns。通过带通滤波选择合适频带的波群信号,利用希尔伯特变换得到波群包络线。利 3.2 节中的方法计算时间差,得到拉应力引起的导波波群时延,最后得到导波群速度变化与拉应力的关系。

## 5 实验研究及结果讨论

### 5.1 钢板中激光超声导波信号及其变化规律

以热弹方式在 0.2 mm 厚的硅钢板中激发超声导波,在距离激发位置 50 mm 处采集激光超声导波

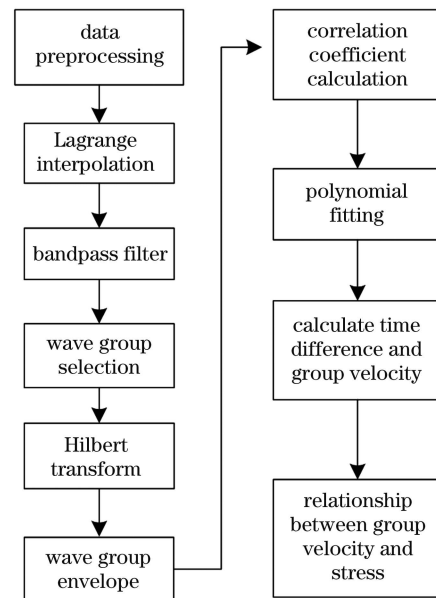


图 5 数据分析流程图

Fig. 5 Flow chart of data analysis

时域信号,对原始信号进行 32 次时域平均以提高信噪比,并对其进行频谱分析,如图 6 所示。因受到双波混合干涉仪检测超声导波原理的限制,检测激光轴线必须与钢板表面保持相对垂直,检测激光对导波面外的位移更加敏感,因此采集的激光超声导波信号主要为反对称模式。由图 6(a)可知,激光超声导波信号具有明显的频散效应,表现为高频成分速度快、能量低,低频成分速度慢、能量较高,与图 1 中 A0 模态群速度频散曲线的变化规律一致。因此,激光超声导波信号主要为 A0 反对称模式。由图 6(b)可知,激光超声导波信号以低频为主,是典型的宽频信号,能量主要集中在 20 kHz~1.9 MHz 区间,中心频率为 0.32 MHz。采用反切比雪夫滤波器对原始激光超声导波信号进行带通滤波,提取 20 kHz~

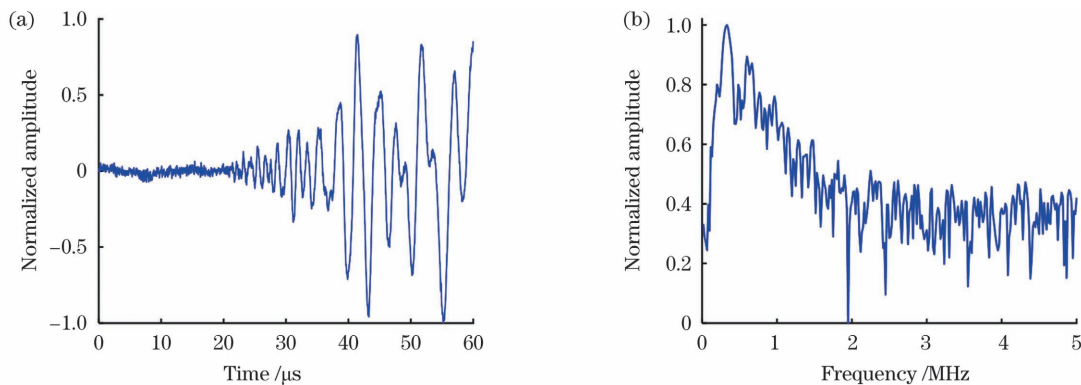


图 6 激光超声导波的时域波形和归一化频谱。(a)时域信号;(b)归一化频谱

Fig. 6 Time-domain waveform and normalized spectrum of laser ultrasonic guided wave. (a) Time domain waveform; (b) normalized spectrum

1.9 MHz 区间的信号分量,通过希尔伯特变换,求解带通滤波后的信号包络线。带通滤波后的时域波形及包络线如图 7 所示,包络线峰值时刻为 A0 模态波包的到达时间。由于 40~50 μs 时段内的信

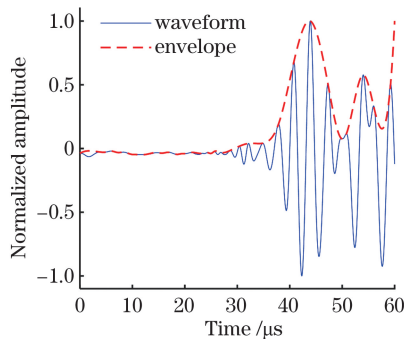


图 7 带通滤波后的时域波形及包络线

Fig. 7 Time domain waveform and envelope after band-pass filtering

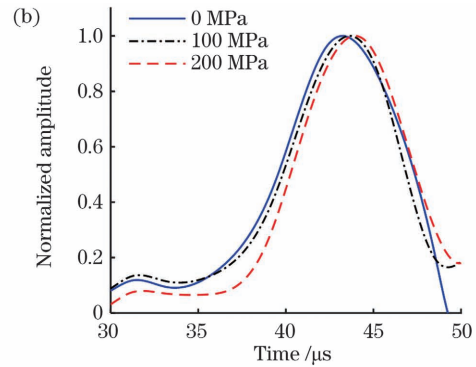
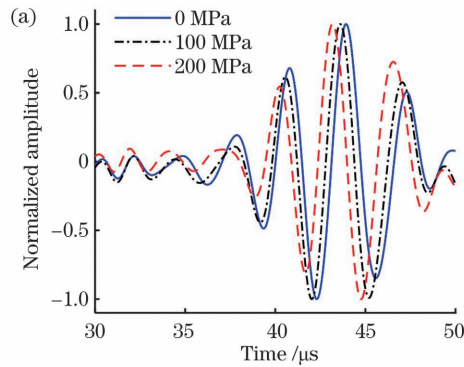


图 8 不同应力状态下的激光超声导波信号。(a)首波;(b)波包

Fig. 8 Laser ultrasonic guided wave signals under different stress states. (a) Head wave; (b) wave packet

### 5.3 导波检测应力的三种表征方法

以零应力状态下采集的激光超声导波信号作为基准信号,对其他拉力载荷下采集的信号分别与基准信号进行互相关运算,计算应力引起的激光超声导波信号的首波超前时间和波包延迟时间,并对其

号幅值较大、信噪比高,且边界回波对波形的影响较小,故该时间窗口的信号适合用于表征钢板内应力。

### 5.2 导波信号的应力敏感性

利用加载装置进行单向拉伸实验,每次加载应力增量为 25 MPa,等待一段时间,待压力传感器数值稳定后采集不同应力状态下的激光超声导波信号,最大应力载荷为 250 MPa。图 8 为 0.2 mm 厚的硅钢板试件在不同拉应力状态下的激光超声导波波形,测量过程中激发光与检测光之间的距离为 50 mm,且保持不变。由图 8(a)可知,拉力增大导致首波到达时间提前,即激光超声导波的相速度随拉力的增大而增大;由图 8(b)可知,拉力增大导致波包整体向右偏移,即激光超声导波的群速度随拉力的增大而减小。因此,可以采用激光超声导波的相速度或群速度的变化来表征板带内应力的分布。

进行线性拟合,结果如图 9 所示。

#### 5.3.1 首波超前时间表征内应力

图 9(a)是首波超前时间的线性拟合结果,可以看出,拉应力与激光超声导波信号的首波超前时间差存在明显的线性关系,将测量得到的首波超前时间差代

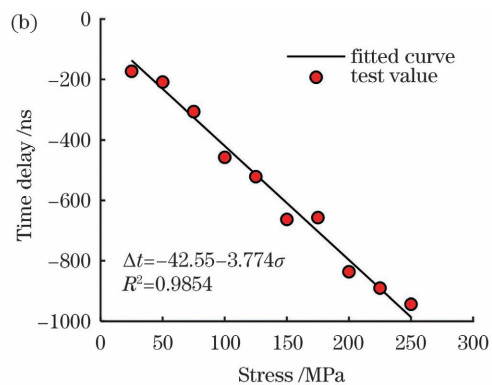
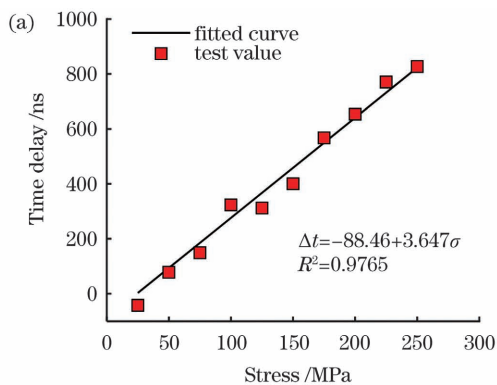


图 9 拉应力对激光超声导波的影响。(a)首波超前;(b)波包延迟

Fig. 9 Influence of tensile stress on laser ultrasonic guided waves. (a) Head wave advance; (b) wave packet delay

入对应拟合公式即可计算得到板带的内应力。

### 5.3.2 波包延迟表征内应力

图 9(b)是波包延迟时间的线性拟合结果,可以看出,拉应力与激光超声导波信号的波包延迟时间差也存在明显的线性关系,将测量得到的波包延迟时间差代入对应的拟合公式同样可以计算得到板带的内应力。

### 5.3.3 群速度的相对变化率表征内应力

由于“一发一收”模式无法测量导波相速度,因此仅讨论导波群速度与拉应力的关系。激光超声导波群速度相对变化率计算公式为

$$\eta = \frac{c_{g\sigma} - c_{g0}}{c_{g0}} = \left( \frac{L}{t_{\sigma}} - \frac{L}{t_0} \right) / \frac{L}{t_0} = \frac{\Delta t}{t_{\sigma}}, \quad (9)$$

式中: $\eta$  为导波群速度的相对变化率; $c_{g0}$  和  $c_{g\sigma}$  分别表示零应力和有应力状态下的导波群速度。 $t_0$  和  $t_{\sigma}$  分别表示零应力和有应力状态下的波包峰值到达时间; $L$  表示激发点与检测点的距离; $\Delta t$  为有应力与无应力时的传播时间差。

激光超声导波群速度的相对变化率与拉应力的关系如图 10 所示,对拉伸实验测量数据进行线性拟合,拟合后直线斜率即为 0.2 mm 厚硅钢板中激光超声导波 A0 模态的声弹性系数,声弹性系数的取值约为  $-8.613 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ ,0.2 mm 厚硅钢板的导波声弹性方程为

$$\frac{c_{g\sigma} - c_{g0}}{c_{g0}} = -8.613 \times 10^{-5} \sigma - 1.056 \times 10^{-3}. \quad (10)$$

结合(10)式,通过检测硅钢板带中的导波群速

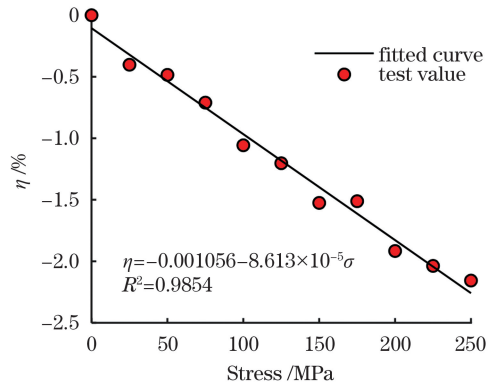
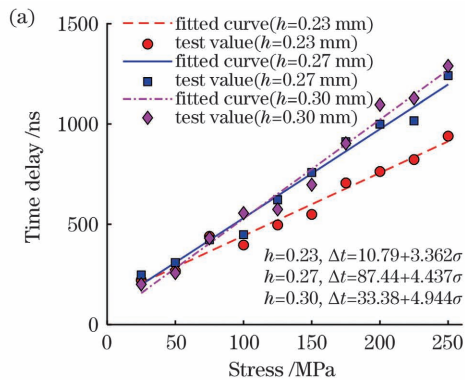


图 10 导波群速度相对变化率与拉应力的关系

Fig. 10 Relationship between relative change rate of guided wave group velocity and tensile stress

度的变化,计算得到其内应力,验证了基于激光超声导波的带钢内应力非接触无损检测的可行性。

### 5.4 不同厚度钢板中的声弹性效应

厚度( $h$ )为 0.23,0.27,0.30 mm 的硅钢板是某钢厂产量较大的产品,针对这三种厚度的硅钢板进行拉伸实验,研究不同厚度硅钢板中的导波相速度和群速度与拉应力的关系。拉伸实验结果如图 11 所示,结果表明,不同厚度硅钢板中激光超声导波的首波超前时间、波包延迟时间与拉应力之间均存在明显的线性关系。将波包时延代入(9)式进行线性运算,可得到群速度的相对变化率,所以群速度的相对变化率与拉应力之间也满足线性关系。综上所述,不同厚度硅钢板中激光超声导波的首波超前时间、波包延迟时间、群速度的相对变化率与拉应力均满足特定的线性关系,该规律具有普适性,可以满足在线检测的需要。

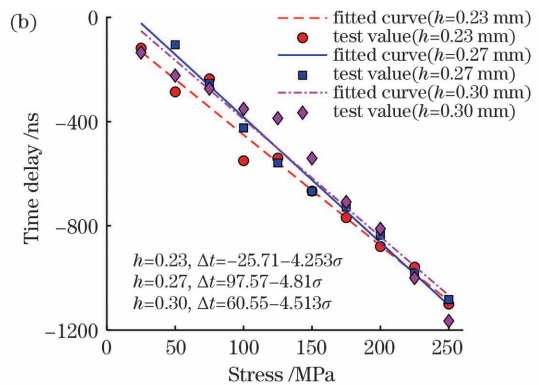


图 11 不同厚度钢板中的拉应力对激光超声导波的影响。(a)首波超前;(b)波包延迟

Fig. 11 Influences of tensile stress on laser ultrasonic guided waves in steel plates with different thicknesses. (a) Head wave advance; (b) wave packet delay

## 6 结 论

利用自行搭建的钢板内应力非接触激光超声无损检测实验平台,研究了基于激光超声导波的钢板

内应力非接触无损检测方法。该实验装置使用脉冲激光在钢板中激发出超声导波,采用双波混合干涉仪接收导波信号,同时研制了小型拉伸加载装置,对实验试样施加所需要的张力。

实验研究发现,脉冲激光可以在较薄的硅钢板中激发出宽频的超声导波,且以 A0 模式为主;导波相速度随着拉应力的增大而增大,导波群速度随着拉应力的增大而减小;导波的首波超前时间和波包延迟时间与拉应力之间具有线性关系,导波群速度相对变化率与拉应力也具有近似线性关系。实验结果表明,导波的首波超前时间、波包延迟时间和群速度相对变化率都能用于表征钢板内应力,可以满足在线检测的需要。

当然,在板带轧制过程中,采用激光超声导波检测钢板带内应力还有许多问题需要研究和解决,比如钢板的横向及纵向的厚度均匀性、温度分布、织构、晶粒等诸多因素都会影响导波的传播行为及规律,因此需要进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- [1] Zeng J W, Su L H, Xu L P, et al. Research on the stress measurement of steel plate based on inverse magnetostrictive effect [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(8): 17-22.  
曾杰伟, 苏兰海, 徐立坪, 等. 逆磁致伸缩效应钢板内应力检测技术研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(8): 17-22.
- [2] Dai J T, Zhang Q D. Analysis and experiment on central buckling and post buckling of thin cold-rolled sheet [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 44-50.  
戴杰涛, 张清东. 冷轧薄板中浪板形缺陷的屈曲及后屈曲理论与轧制试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 44-50.
- [3] Chen T R, Xiang Y X, Chen H, et al. Ultrasonic characterization of residual stress in materials based on phase-frequency relationship [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(22): 9-14.  
陈天瑞, 项延训, 陈虎, 等. 基于相位-频率测量的材料残余应力超声表征方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(22): 9-14.
- [4] Wang N, Luo L, Liu Y, et al. Research progress on stress measurement technology for metal components [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2508-2517.  
王楠, 罗岚, 刘勇, 等. 金属构件残余应力测量技术进展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10): 2508-2517.
- [5] He S J, Yang W Y, Guo B P, et al. Research progress on evaluation of surface residual stress and fatigue life of machined products [J]. *Surface Technology*, 2015, 44(6): 120-126, 132.  
何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. *表面技术*, 2015, 44(6): 120-126, 132.
- [6] Yu B Q, Yang L P, Sun J L. Research status of shape detecting roller of cold rolled strip [J]. *Steel Rolling*, 2011, 28(2): 44-46.  
于丙强, 杨利坡, 孙建亮. 冷轧带钢板形检测辊研究现状[J]. *轧钢*, 2011, 28(2): 44-46.
- [7] Xu C G, Li H X, Wang J F, et al. Ultrasonic shear and longitudinal wave testing method of residual stress [J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(2): 195-204.  
徐春广, 李焕新, 王俊峰, 等. 残余应力的超声横纵波检测方法[J]. *声学学报*, 2017, 42(2): 195-204.
- [8] Javadi Y, Sadeghi S, Najafabadi M A. Taguchi optimization and ultrasonic measurement of residual stresses in the friction stir welding [J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 27-34.
- [9] Kwun H, Bartels K A, Hanley J J. Effects of tensile loading on the properties of elastic-wave propagation in a strand [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 103(6): 3370-3375.
- [10] Chen F, Wilcox P D. The effect of load on guided wave propagation [J]. *Ultrasonics*, 2007, 47(1/2/3/4): 111-122.
- [11] Liu Z H, Liu S, Wu B, et al. Experimental research on acoustoelastic effect of ultrasonic guided waves in prestressing steel strand [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2): 22-27.  
刘增华, 刘溯, 吴斌, 等. 预应力钢绞线中超声导波声弹性效应的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(2): 22-27.
- [12] Xu X N, Ye Y S, Jiang C, et al. Research on method for mode selection of guided ultrasonic waves in stress measurement of rails [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2473-2483.  
许西宁, 叶阳升, 江成, 等. 钢轨应力检测中超声导波模式选取方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2473-2483.
- [13] Wang R, Yu Z J, Zhu L Q, et al. Detection method for stress in continuously welded rail based on guided wave velocity [J]. *China Railway Science*, 2018, 39(2): 18-27.  
王嵘, 余祖俊, 朱力强, 等. 基于导波速度的无缝钢轨应力检测方法[J]. *中国铁道科学*, 2018, 39(2): 18-27.
- [14] Cao J S, Luo Z X, Ji B P. Laser ultrasonic signal processing by differential algorithm in special pipeline thickness measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1197-1205.  
曹建树, 罗振兴, 姬保平. 应用微分算法处理特种管道测厚激光超声信号[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1197-1205.

- [15] Zhang Y Y, Ni C Y, Shen Z H. Laser ultrasonic monitoring of reversible/irreversible changes in photo-thermal modulation crack closure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204006.  
张月影, 倪辰荫, 沈中华. 光热调制裂纹闭合可逆/不可逆变化的激光超声监测[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204006.
- [16] Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214002.  
张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214002.
- [17] Zhan C, Peng X Y, Li Y. Nondestructive testing cracks on inner surface of thick pipes by laser ultrasonic visualization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0628004.  
詹超, 彭笑永, 李阳. 基于激光超声可视化的厚壁管内壁缺陷无损检测[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0628004.
- [18] Lévesque D, Kruger S E, Lamouche G, et al. Thickness and grain size monitoring in seamless tube-making process using laser ultrasonics[J]. NDT & E International, 2006, 39(8): 622-626.
- [19] Hutchinson B, Moss B, Smith A, et al. Online characterisation of steel structures in hot strip mill using laser ultrasonic measurements [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2002, 29(1): 77-80.
- [20] Duquennoy M, Ouaftouh 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(5): 355-362.
- [21] Pan Y D, Qian M L, Xu W J, et al. Residual stress profiling of an aluminum alloy by laser ultrasonics [J]. Acta Acustica, 2004, 29(3): 254-257.  
潘永东, 钱梦霖, 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.
- [22] Shi Y F, Shen Z H, Ni X W, et al. Welding stress measurement using laser-generated Rayleigh waves in aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(10): 1627-1631.  
石一飞, 沈中华, 倪晓武, 等. 激光激发瑞利波测量铝合金焊接残余应力[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1627-1631.
- [23] Zhan Y, Li Y M, Zhang E D, et al. Laser ultrasonic technology for residual stress measurement of 7075 aluminum alloy friction stir welding [J]. Applied Acoustics, 2019, 145: 52-59.
- [24] Cantrell J H, Salama K. Acoustoelastic characterisation of materials[J]. International Materials Reviews, 1991, 36(1): 125-145.
- [25] Liu F, Wu B, He C F, et al. Analysis of acoustoelastic effect for low-order guided wave modes in elastic plate[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6): 823-827.  
刘飞, 吴斌, 何存富, 等. 弹性板中低阶导波模态声弹性效应分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6): 823-827.

## New Method for Detecting Steel Strip Stress Distribution Based on Laser Ultrasonic Guided Waves

Ji Baoping<sup>1\*</sup>, Cao Jianshu<sup>2</sup>, Huang Gang<sup>1</sup>, Yu Mingyang<sup>1</sup>, Chen Zhijun<sup>1</sup>, Zhang Qingdong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup> College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

### Abstract

**Objective** The flatness of a strip mainly refers to its apparent flatness, and the longitudinal internal stress is an effective index to characterize the flatness defect. In the cold rolling process of a strip steel, the automatic shape control is realized mainly by detecting the transverse distribution of tensile stress, and the strip shape meter is mainly used to measure the tensile stress distribution on line. However, the sensitivity and resolution of the contact shape meter are relatively low and the roll surface is easy to scratch, and thus it is difficult to maintain and calibrate. In addition, the detection accuracy of the non-contact shape meter is relatively low. Therefore, it is urgent to explore a new non-contact test method for the internal stress of a steel plate. In order to realize the non-contact detection of internal stress in the steel plate production process, this paper proposes a method for detecting the internal stress of a steel plate based on laser ultrasonic guided waves.



**Methods** The theoretical basis of stress detection based on the ultrasonic method is the acoustic-elastic effect. The change of internal stress in the strip causes the velocity change of an ultrasonic guided wave, and the Lamb wave is the main guided wave in a steel plate. According to the moving characteristics of particles, the Lamb wave vibration patterns include a symmetric mode and an antisymmetric mode. The group velocity dispersion curve of the guided wave in the silicon steel plate under zero stress can be obtained according to the dispersion equation. In the 0.2 mm thick silicon steel plate, the Lamb waves are dominated by the A0 antisymmetric mode and the S0 symmetric mode. By fixing the distance between excitation light and detection light, the measurement of the guided wave group velocity is transformed into the measurement of the guided wave propagation time. The relationship between guided wave propagation time and tensile stress is obtained by applying different tension on both ends of the strip steel sample. The key of the acoustic elastic stress measurement lies in the accurate measurement of the ultrasonic propagation time difference. In order to accurately measure the time difference, the waveform correlation method is used to calculate the time difference. A laser ultrasonic guided wave stress testing device is set up in the laboratory, and a software system for signal acquisition, processing, and analysis is developed. The pre-calculated tensile load is applied to both ends of the experimental sample by the tensile loading device unit and the internal stress fields of the steel plate under various working conditions required by the experiment are obtained. The laser ultrasonic signal detection unit collects the laser ultrasonic guided wave signals under various loading conditions. The characterization ability and correlation law of the laser ultrasonic guided wave to the internal stress in the steel plate are experimentally studied.

**Results and Discussions** Due to the limitation of the detection principle of the two-wave mixing interferometer, the detection laser axis must be perpendicular to the steel plate surface, and the detection laser is more sensitive to the out-of-plane displacement of guided waves. Therefore, the laser ultrasonic guided wave signals collected in experiments are mainly the antisymmetric modes. The laser ultrasonic guided wave signal in a 0.2 mm thick silicon steel plate is mainly at the low frequency, and its energy is mainly concentrated between 20 kHz and 1.9 MHz (Fig. 6(b)). Therefore, the laser ultrasonic guided wave signal is mainly the A0 antisymmetric mode. With the increase of tension, the arrival time of the head wave is advanced, that is, the phase velocity of the laser ultrasonic guided wave increases with the increase of tension (Fig. 8(a)). With the increase of tension, the wave packet shifts to the right, that is, the group velocity of the laser ultrasonic guided wave decreases with the increase of tension (Fig. 8(b)). The change of phase velocity or group velocity of the laser ultrasonic guided wave can be used to characterize the internal stress distribution in the strip. Tensile tests are carried out on the silicon steel plates with different thicknesses. The results show that there is an obvious linear relationship between the time difference of the head wave advance and the wave packet delay and the tensile stress of the laser ultrasonic guided wave in silicon steel plates with different thicknesses (Fig. 11).

**Conclusions** In this paper, a method for detecting the internal stress of a steel plate based on laser ultrasonic guided waves is proposed. The experimental results show that a pulsed laser can excite broadband laser ultrasonic guided waves in the silicon steel plate, and the A0 mode is the main mode. The phase velocity of the laser ultrasonic guided wave increases with the increase of tensile force, while the group velocity decreases with the increase of tensile force. There is an obvious linear relationship between tensile stress and the time difference of head wave advance and wave packet delay of the laser ultrasonic guided wave signal. The laser ultrasonic guided wave testing method can be used to realize the non-destructive, non-contact, and high-precision detection of internal stress of a strip steel, and this method may become a new method for the on-line stress detection of strip steels.

**Key words** measurement; steel plate; stress; laser ultrasonic guided waves; non-destructive testing