

## 应用技术

## 基于临界折射纵波的表面残余应力测试方法

虞付进<sup>1</sup>, 丁金福<sup>1</sup>, 华云松<sup>2</sup>

(1. 浙江师范大学 机械装备与测控技术研究所, 金华 321004;

2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**[摘要]** 针对成形加工表面存在残余应力的问题,从临界折射纵波的特性着手,分析了临界折射纵波与应力的关系,阐述了临界折射纵波应力测量的基本原理和测试方法。采用“一发两收”的探头布置形式,先对被测材料的应力常数加以标定,再测试表面残余应力。测试试验结果表明,达到了测试表面残余应力的目的。该测试方法原理简单,设备轻便,且能够保证较高的精度,可实现现场或在役检测。

**[关键词]** 临界折射纵波;残余应力;应力常数;检测方法

**[中图分类号]** TG157

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2010)06-0104-04

## Test Method of Surface Residual Stress Based on the Critical Refracted Longitudinal Wave

YU Fu-jin<sup>1</sup>, DING Jin-fu<sup>1</sup>, HUA Yun-song<sup>2</sup>

(1. Institute of Machinery Equipment and Measurement &amp; Control Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. College of Optical-Electrical and Computer Engineering,

Shanghai Sci-Tech University, Shanghai 200093, China)

**[Abstract]** Because of the finish surface existed residual stress, it focused to study characteristic of critical refracted longitudinal wave and analyze the relation between the wave and stress, explains the basic principle and test method about residual stress of critical refracted longitudinal wave. The probe design "one emitter and two receiver" was adopted. At first, the stress constant of material was calibrated and then the residual stress was tested. The experiment result shows that the method is effective to achieve the test objective. This test method is convenient, simple and the evaluation has relatively high accurate. This test method can be used in field test or in-service inspection.

**[Key words]** critical refracted longitudinal wave; residual stress; stress constant; test method

残余应力对材料的力学性能有很大影响,在焊接构件的制造和热处理过程中尤为明显。存在残余应力,一方面会降低工件强度,使工件在制造时产生变形和开裂等工艺缺陷;另一方面又会在制造完成后的自然释放过程中使材料的疲劳强度、应力腐蚀等力学性能降低。在工作温度、工作介质及残余应力的共同作用下,构件的抗疲劳强度、抗脆断能力、抗应力腐蚀开裂及抗高温蠕变开裂的能力都将大大下降<sup>[1]</sup>。因此,金属构件表面残余应力的检测对于热处理工艺、表面

强化处理工艺、消除应力工艺的效果以及废品分析等均具有非常重要的意义。

残余应力的检测在国内外均已开展多年,其测定方法较多,目前相对较成熟有 X 射线衍射法和盲孔法等,但由于成形材料形状差异较大,因此在检测表面残余应力时会受到各种因素的制约。而临界折射纵波(即 LCR 波)是纵波以第一临界角入射时产生的特殊模式,能在试件表层下一定深度内传播,不仅具有表面波和体波的特性,而且还具有对应力变化非常敏感这

**[收稿日期]** 2010-08-13; **[修回日期]** 2010-09-30

**[基金项目]** 浙江省自然科学基金(Y106187)

**[作者简介]** 虞付进(1965—),男,浙江义乌人,硕士,副教授,主要研究方向为机械设计制造及自动化、超声波检测。

一特性,所以在一些特殊应用方面具有比传统的表面波和体波更优越的性能,是无损检测方法中最具发展前景的一种<sup>[1]</sup>。文中运用自制的基于临界折射纵波法测应力系统,采用“一发两收”的测试方法,利用轧辊后的 40Cr 钢材进行试验,为进一步研究超声波在金属内部的传播机理,以及在金属构件上的应力测试等方面奠定了良好的基础。

## 1 临界折射纵波测试应力的原理

临界折射角激发的波有 2 种模式:一种是纵向表面爬波,此种模式的波在离开探头后几厘米内会快速衰减;另一种是次表面纵波,即临界折射纵波,此种模式的波能传播很长的距离(超过 300 mm),并能保持适当强的波幅,且传播表面的不规则形状(如表面轻微的裂纹等)对其传播的影响较小<sup>[2]</sup>,纵波的波速相对变化量与应变的关系最敏感<sup>[3-4]</sup>。因此,临界折射纵波应力测量具有灵敏度高的优点,适合于表面应力测量。

### 1.1 临界折射纵波与应力的关系

根据声弹性理论,沿应力方向传播的超声纵波的波速会随应力的改变而改变,这种关系可以表述为:

$$V^2 = C_0^2 (1 + L\sigma) \quad (1)$$

式中: $V$  为沿应力方向传播的纵波波速; $C_0$  为零应力状态下纵波的波速; $\sigma$  为应力大小,正值表示压应力,负值表示拉应力; $L$  为声弹性系数,且  $L = \{[(4\lambda + 10\mu + 4m)/\mu] + \lambda + 2l\} / (3\lambda + 2\mu)$ ,  $\lambda$  和  $\mu$  为二阶弹性系数, $l$  和  $m$  为三阶弹性系数。

应力变化对波速的影响非常小,Duquennoy M 等利用超声波评价各向异性材料应力状态的方法,建立了有应力各向异性材料的超声波传播方程,其波速的变化与应力的关系为<sup>[5]</sup>:

$$d\sigma \approx [2/(L \cdot t_0)] \cdot dV \quad (2)$$

式中: $d\sigma$  是应力的改变量; $dV$  是波速的改变量; $t_0$  表示零应力状态下超声波传播时间。由此可见,介质中纵波传播速度的变化与传播方向上应力值的变化呈近似的线性关系,在某些条件下,只要测得临界折射纵波传播速度的变化量就可以确定介质中应力的改变量。

### 1.2 应力测试的基本原理

根据临界折射纵波的传播特性,采用了“一发两收”的探头布置形式,即利用 2 个接收探头接收到超声波的时间差来衡量超声波在材料中的传播速度,见图 1<sup>[5]</sup>,这种布置形式可以消除电气延时引起的测量误差。与传统“一发一收”的探头布置形式相比,“一发两收”的探头布置形式的测量精度更高。

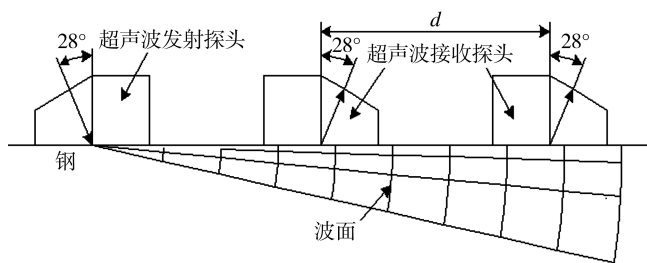


图 1 临界折射纵波的传播模式

Fig. 1 Propagation mode of the critically refracted longitudinal wave

由于在测量工件轴向或周向应力的整个过程中,两接收探头之间的距离是固定的,因此可认为,将两接收探头放置在圆柱体工件某一测量位置进行测量时,超声波从发射探头传播至两接收探头的的时间差,即超声波在两接收探头之间的传播时间(亦称作声时差) $t$ 与接收探头之间被测表面的应力、材料性能(织构、成分)和温度有关,则  $t$  可由下式表示:

$$t = t^* + \Delta t_{RS} + \Delta t_T + \Delta t_F + \Delta t_{TX} \quad (3)$$

式中: $t^*$  为在均质、各向同性、无应力状态以及标准温度条件下测得的传播时间; $\Delta t_{RS}$  为残余应力作用使传播时间产生的偏差; $\Delta t_T$  为测量温度与标准温度的偏差使传播时间产生的偏差; $\Delta t_F$  为工作应力使传播时间产生的偏差; $\Delta t_{TX}$  为材料织构使传播时间产生的偏差。

在测量残余应力时,通常假设  $\Delta t_F$  为零,同时忽略织构对传播时间的影响,则有:

$$\Delta t_{RS} = t - t^* - \Delta t_T \quad (4)$$

因此可得在单轴应力条件下,应力变化与临界折射纵波在两探头之间传播时间的关系为:

$$\sigma - \sigma^* = \frac{E}{L \cdot t^*} (t - t^* - \Delta t_T) \quad (5)$$

式中: $E$  为材料的弹性模量。假定  $t^*$  和  $\Delta t_T$  不变,则可以通过在不同位置获得的两接收探头间传播时间的差值得到应力的改变量。通常将经过消除应力退火处理后的试样看作零应力,记为  $\sigma_0$ ,零应力试样测得的声时差记为  $t_0$ ,而  $E, L$  和  $t^*$  均为常数,则实际工件相对于零应力试样有:

$$\sigma - \sigma_0 = \frac{E}{L \cdot t^*} (t - t_0) \quad (6)$$

改写后为:

$$\Delta \sigma = K \cdot \Delta t \quad (7)$$

式中: $\Delta \sigma$  为应力的改变量; $K$  为超声波的应力常数; $\Delta t$  为实际工件中测得的声时差与零应力试样中声时差的差值。因此,在进行超声法测量时先须确定出该材料的应力常数,只要得出应力常数  $K$ ,即可根据声时差计算出材料中的应力值。

## 2 应力常数的标定

根据应力与速度、时间的关系,应力常数的测定是残余应力测试的关键,不同材料有不同的应力常数,即使同一规格的材料,由于合金含量及组织状态的不同,应力常数也会有差异。由于超声波对材料的组织结构较敏感,因此标定应力常数的试样从实际使用的材料中截取。文中选取轧辊表面的钢板加以说明。因轧辊表面非常硬,高速钢轧辊表面的肖氏硬度为 80~90,同时轧辊体积庞大,因此用普通的方法难以在轧辊上取样,需先用线切割机截取板条状的试样,再将截取后的材料进行充分退火处理以消除材料内部的残余应力,然后进行机加工。试样表面经磨削加工,表面粗糙度  $R_a$  为 0.8,尺寸见图 2。

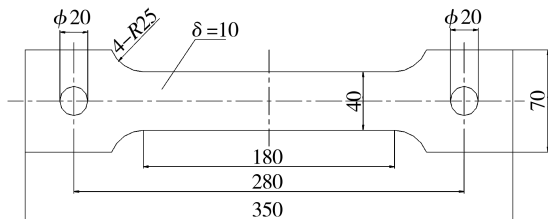


图 2 应力常数标定试样

Fig. 2 Calibration specimen for stress constant

### 2.1 应力常数标定装置

对各种不同的材质的材料进行应力测量时,均需进行超声应力常数的标定才能得出准确的应力大小。自制的超声应力常数的标定装置是超声波应力测量系统(见图 3<sup>[5]</sup>)中的一个重要组成部分,它是通过机械结构变换将 20 t 千斤顶的压力转换成应力标定试样所受的拉力,为使应力标定试样受纯拉力,在超声应力常数标定装置的上、下端部均装有自由铰链。施加在试样上的应力改变量可直接用应力测量仪通过测量试样上粘贴的应变计得到,也可通过测量安装在超声应力常数标定装置上部的粘贴有全桥应变计的测力元件得

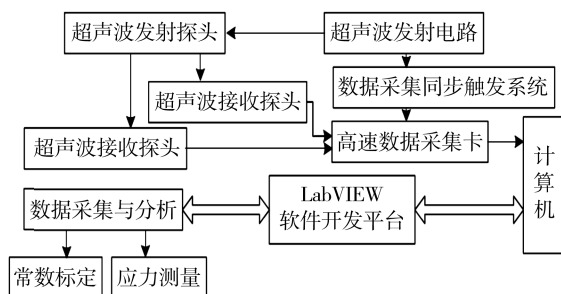


图 3 超声波应力测量系统框图

Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic stress measurement system

到总拉力的大小,再将总拉力除以标定试样的横截面而得到。应力常数标定装置见图 4,该装置的特点是结构简单,测试精度高,并能实现实时测量。



图 4 应力常数标定装置

Fig. 4 Set of arrangement calibrating ultrasonic stress constants

### 2.2 应力常数的测定

截取的 40Cr 钢宽度 39.92 mm,厚度 9.04 mm,截面积 360.88 mm<sup>2</sup>。应力常数标定试样的拉伸试验在室温 22 ℃下进行,步骤如下:

1) 在试样进行超声波应力标定的反面粘贴应变计,并将应变计的接线与 YC-Ⅲ型应力测量仪的信号线焊好,并组成桥路。

2) 旋紧千斤顶的卸压阀,并轻轻用手压加载棒将千斤顶顶到合适的位置,之后用  $\phi 20$  mm 的圆柱销将试样的两端固定在应力常数标定装置上。

3) 将超声波探头安装在试样的中心位置,要求 3 个探头在同一条直线上,并在 3 个探头下面加耦合剂,保证超声波的传递。

4) 打开 YC-Ⅲ型应力测量仪的电源,对应力测量仪预热。按图 3 所示接线,超声波发射装置的输出分成两路,一路接超声波发射探头,另一路接同步触发电路,同步触发电路的输出端与高速数据采集卡的触发端子相连,离入射探头近、远的接收探头的输出信号线分别接入数据采集卡的通道 0 和通道 1。

5) 运行计算机主程序,设置数据采集参数、触发参数及滤波器参数,准备数据采集。

6) 加载前,先测试试样中超声波的传播时间。然后开始加载,加载至 20 MPa 左右用手压加载棒以保持载荷的稳定,测量在该载荷下试样中超声波的传播时间。再加载至 40 MPa 左右保持载荷稳定,测量在该载荷下试样中超声波的传播时间。依此类推,再测量加载至每间隔 20 MPa 时试样中超声波的传播时间,并将测量数据记录下来。

7) 为确保应力常数标定的准确性,卸载后重复步骤 6 的过程测试 3 次,测得的数据见图 5。

最后,据系统显示的数据,按公式  $k = \Delta\sigma/\Delta t$  可求

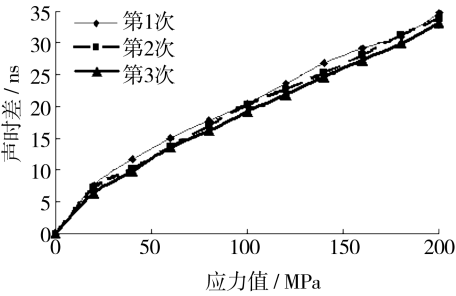


图 5 应力常数标定试验结果

Fig. 5 The results of calibration test for stress constant  
得 40Cr 钢应力常数标定值为 5.78。

3 残余应力测试

超声波中的临界折射纵波在材料表面下以体波的形式传播,且传播速度为纵波的速度,因此临界折射纵波是接收探头最先接收到的波<sup>[6-7]</sup>。材料内部应力发生改变时,超声波传播的时间也会发生微小的变化,例如对于 40Cr 钢,100 MPa 的应力改变引起两接收探头之间声时差的改变量大约为 17 ns 左右。因此,在用超声波法测量应力时,要求测试系统具有非常高的系统分辨率和稳定性。文中采用自制的测试探头,见图 6,右边的为发射探头,左边二只为接收探头。

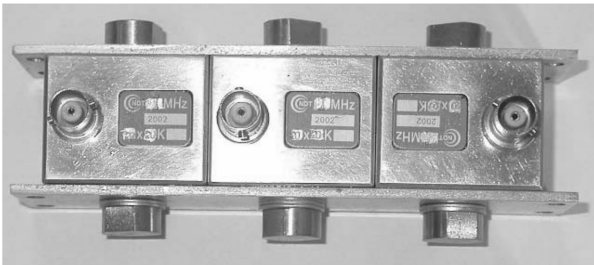


图 6 超声波探头

Fig. 6 The ultrasonic probe

3.1 试验仪器

自研的超声波应力测量系统(见图 7),采用 3 个探头固联在一起的模式来测量声时差,利用 100 MS/s 的高速数据采集卡对采集到的信号进行处理,基于数

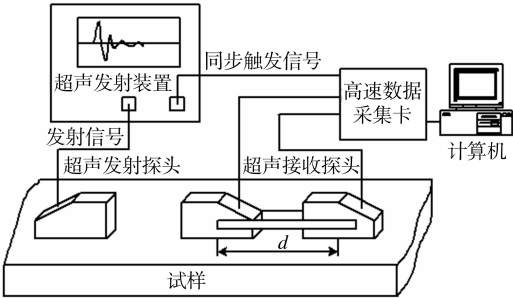


图 7 应力测量系统

Fig. 7 Stress measurement system

据采集卡的虚拟仪器(LabVIEW)软件开发平台实现超声波法应力测量。

3.2 测试条件

从实际轧辊的 40Cr 钢板上取出 2 段制成圆盘,作为 2 块试样,并分别标出 I、II、III 三个位置,见图 8,应力测量时 2 块试样的圆板表面均经磨削加工。因临界折射纵波的渗透深度是超声波激发频率的函数,频率越低,渗透深度越深。如 1.0 MHz 临界折射纵波的渗透深度大约为 5.9 mm,而 2.25 MHz 临界折射纵波的渗透深度大约为 2.6 mm<sup>[8]</sup>。为提高测试的准确性,试验中采用 2 种不同的激发频率,渗透深度 5.9 mm 记为 1 M 探头,渗透深度 2.6 mm 记为 3 M 探头,2 块试样的应力分别表示为  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ 。

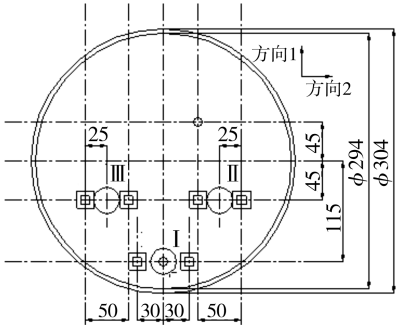


图 8 测量点位置分布

Fig. 8 Location distribution of points in which measuring residual stress

3.3 试验结果及分析

测试结果见表 1。由于两超声波探头的最小长度为 38 mm,因此超声波法测量值是被测圆板表面深度为 5.9 mm(1 M 探头)及 2.0 mm(3 M 探头)的平均应力。

表 1 超声波法 40Cr 圆板残余应力测量结果

Tab.1 Results on measuring the residual stress of circular flat-plate 40Cr with ultrasonic stress measurement method

位置	1 M 探头测量值/MPa		3 M 探头测量值/MPa	
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
I	175	157	152	121
II	203	162	167	131
III	159	97	147	78

从上述测量的数据可以看出,应力的大小与方向趋势基本趋于一致,误差范围在 20% 以内。 $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的数值表明,即使是同一批次轧辊的材料,其表面应力也存在着一一定的差异,且在同一表面上不同区域的残余应力分布也有所不同。

4 结语

基于临界折射纵波的应力测试法是利用材料的声  
(下转第 113 页)



2.4 耐醇性及氧化膜性能检测

耐醇性检验执行标准 WJ 463-95。将染色结构件浸泡在 95%(体积分数)的乙醇中,经 2 h 取出,氧化膜应不变色,为合格。

氧化膜性能检测的结果见表 1。

表 1 物镜筒硬质阳极氧化膜层性能  
Tab.1 The objective material properties  
of hard anodic oxidation film

项目	测试结果	测试方法
外观	光泽柔和,色调均匀	WJ 463-95
硬度	358HV0.1	GB 4340
厚度	38.7 μm	GB 6463
封闭质量	颜色无明显改变	WJ 463-95
耐醇性	颜色无变化	WJ 463-95

3 结语

通过对 7A04 铝合金结构件的硬质阳极氧化配合兵器工业第 59 研究所研制的协合涂层,使某型号光电瞄具完全达到了战术技术指标,产品的性能和外观质

量得到了较大提升。通过对硬质阳极氧化工艺参数的选定,工艺中所用材料的选择,工艺流程的确定,使结构件的装配性、防腐性、耐磨性、外观上有实质性提高。为型号光电瞄具的生产和科研工作奠定了坚实的基础。

[参 考 文 献]

[1] 沈宁一. 表面处理工艺手册[K]. 上海: 上海科学技术出版社,1991.  
[2] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面技术[M]. 北京: 化学工业出版社,2004.  
[3] 薛守昌. 缎面阳极氧化工艺[J]. 电镀与涂饰 2006, 25(7). 44—45.

(上接第 107 页)

弹效应,采用“一发两收”的探头布置形式,利用应力常数的标定,通过准确测定超声波在构件表面或次表面传播速度的变化得出应力分布情况,达到了较好的效果。该测试方法原理简单,设备轻便,计算速度快,可实现现场或在役检测,且能够保证较高的精度。随着计算机和信息处理技术的不断发展,超声波检测的可靠性也在不断提高,必将在工业生产及其它领域具有较广阔的应用前景。

[参 考 文 献]

[1] 虞付进,赵燕伟,张克华. 超声检测表面残余应力的研究与发展[J]. 表面技术,2007,36(4):72—75.  
[2] Leon-Salamanca T, Bray D E. Residual Stress Measure-

ment in Steel Plates and Welds Using Critically Refracted Longitudinal (LCR) Waves[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1996, 7(4):169—184.  
[3] Langenberg K J, Fellingner P, Marklein R. On the Nature of the So-called Subsurface Longitudinal Wave and/or the Surface Longitudinal "Creeping" Wave[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1990, 2(2):59—81.  
[4] 陈振宇. 钢轨应力超声波检测的前期研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.  
[5] Duquennoy M, Ouaftouh M, Ourak M. Ultrasonic Evaluation of Stresses in Orthotropic Materials Using Rayleigh Waves[J]. NDT & E International, 1999, 32:189—199.  
[6] 虞付进,赵燕伟,虞先晓. 超声应力检测中应力常数的标定试验研究[J]. 机械设计与研究,2007,23(4):98—101.  
[7] 詹春晓,李昊,刘一华,等. 轿车横梁的冲压残余应力分析[J]. 合肥工业大学学报,2004,27(2):153—156.  
[8] 孙兰英. 焊接板材毛坯冲压成形中残余应力的测试与分析[J]. 河北科技大学学报,2001,21(1):69—72.