

初始应力对瑞利波无损评价 45 钢表层应力的影响

Influence of Initial Stress on Surface Stress
Measurement of 45 Steel by Rayleigh Wave

刘 彬^{1,2},董世运²,徐滨士²,何 鹏¹,闫世兴²

(1 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室,哈尔滨 150001;

2 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室,北京 100072)

LIU Bin^{1,2},DONG Shi-yun²,XU Bin-shi²,HE Peng¹,YAN Shi-xing²

(1 State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2 National Defense Key Laboratory for Remanufacturing Technology, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

摘要: 基于瑞利波声弹效应理论,在瑞利波无损表征 45 钢表层应力的基础上分析了 45 钢表层初始应力状态对应力评价结果的影响。采用声程固定不变中心频率为 5MHz 的双瑞利波探头对 45 钢表层应力进行评价,在归一化互相关函数基础上计算了应力引起的瑞利波信号间时间差。结果表明:初始应力不会影响瑞利波在 45 钢表层中传播速度随拉伸应力的变化规律,即随拉伸应力的增加,瑞利波在 45 钢表层中的传播速度基本呈线性规律增加,当应力达到一定值时,再随应力的增加,瑞利波传播速度不再呈线性规律变化;但初始应力和去应力退火状态 45 钢的名义瑞利波声弹性系数不同,分别为 0.838 和 1.041,最大时间差对应的应力值也不同,去应力退火前后应力评价结果的误差约为 22%。

关键词: 45 钢;声弹效应;瑞利波;拉伸应力

中图分类号: TB115.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)05-0035-04

Abstract: Based on Rayleigh wave acoustoelastic theory, surface stress measurement of 45 steel and the influence of initial stress state on stress measurement were introduced. Two Rayleigh wave transducers with 5MHz frequency, the fixed distance, were employed to detect the surface of 45 steel as an emitter and a receiver. The difference in time of flight between free loaded signal and loaded signal corresponding to different tensile stress was determined with normalized cross correlation function. Results show that the influence of initial stress state on relationship between propagation velocity of Rayleigh wave and tensile stress is faint, the propagation velocity of Rayleigh wave increases linearly with tensile stress increasing, when tensile stress attains a value, the relationship between velocity of Rayleigh wave propagating in the surface of 45 steel and tensile stress is nonlinear further. Nominal Rayleigh wave acoustoelastic coefficients corresponding to different initial stress state of 45 steel are obtained, and they are 0.838 and 1.041, respectively. The stress corresponding to the maximum difference in time of flight is also different, the relative error of stress measurement corresponding to different initial stress state is about 22%.

Key words: 45 steel; acoustoelastic effect; Rayleigh wave; tensile stress

研究表明,表层应力(应用应力或残余应力)是造成机械零部件过早失效(如应力腐蚀、断裂等)的重要因素之一,目前主要采用钻孔法^[1,2]、弯曲法^[3]、X 射线法、磁记忆^[4,5]等方法对其进行评价,但由于上述方法都存在一定的局限性,如破坏工件整体性、辐射、使用不方便等,因而寻找适于机械材料表层应力无损表征

的方法成为目前应力评价领域的研究重点。瑞利波法又称表面波法^[6],它是在声速测量的基础上实现表层应力评价的一种方法,由于它使用方便安全、无辐射、检测材料范围广等而引起众多学者的关注。

瑞利波法是在应力标定基础上实现应力评价的一种方法,目前对铝^[7,8]、铝合金及航空透明玻璃等声弹

效应明显材料的表层应力的评价已有较多报道,但对弱声弹效应材料(如钢铁材料)表层应力的评价以及影响应力评价结果因素的研究较少。针对这一问题,本实验以 45 钢为研究对象,结合力学静载拉伸实验,采用瑞利波对去应力退火前后 45 钢表层应力进行评价,并在应力评价结果基础上分析了 45 钢表层初始应力状态对应力评价结果的影响。

1 实验系统

实验系统组成如图 1 所示。其中超声发生器采用 5800PR 泛美超声脉冲发射接收仪,示波器采用 TDS3034B,其最大采样频率为 2.5GHz。为避免检测过程中瑞利波传播距离的改变对应力评价结果的影响,本实验采用中心频率为 5MHz 的一发一收模式的双瑞利波探头对 45 钢表层应力进行评价。

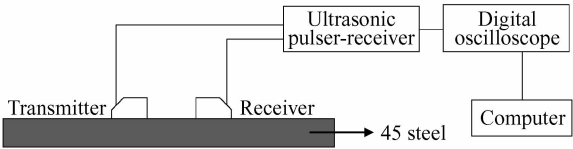
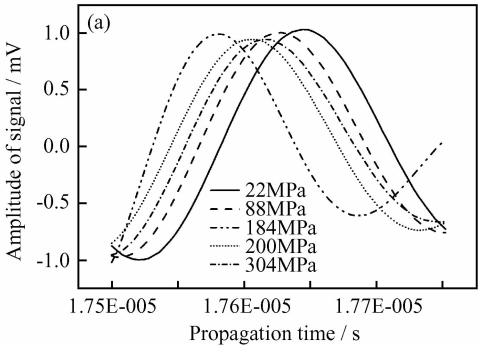


图 1 应力评价的超声波系统

Fig. 1 Testing system for stress measurement with ultrasonic wave

2 瑞利波应力检测理论

Duquennoy 等^[9]研究表明,小幅度表面波在应力作用的各向同性弹性体表面上传播时,应力会影响



瑞利波的传播速度,具有质点速度 v 的瑞利波在沿着应力场为 T 的弹性体表面传播一定距离后,相位会发生一定变化。

$$\delta\phi(\omega) = -\frac{\omega}{4P} \int_V G dV \tag{1}$$

式中: ω 为圆频率; V 为瑞利波的传播区域; G 为材料弹性常数和位移梯度的函数; P 为一定时间内通过一定面积的瑞利波能量流。

基于上述理论,Husson 等^[10]对声弹性效应进行讨论,在一维应力场中瑞利波声速改变量为

$$\frac{\Delta v}{v} = \beta \cdot \sigma \tag{2}$$

式中 β 取决于材料二阶弹性常数(λ, μ)和三阶弹性常数(l, m, n)。

由式(2)可知,不同应力状态下,瑞利波沿应力方向在 45 钢表层传播通过一定距离 L_0 所用时间的时间差为

$$\Delta t = t_0 \cdot \beta \cdot \sigma = k \cdot \sigma \tag{3}$$

式中: t_0 是声速为 v 的瑞利波通过距离 L_0 所用的时间; k 为声弹性常数。

因而,当材料的初始应力不同时,瑞利波沿应力方向通过相同距离所用的时间也不同,即声弹性常数 k 不同。

3 实验结果

结合力学静载拉伸实验,对 45 钢试样进行逐级加载拉伸,不卸载持续加载直至 45 钢试样出现明显塑性变形,停止实验。不同应力状态时,45 钢中瑞利波信号如图 2 所示。

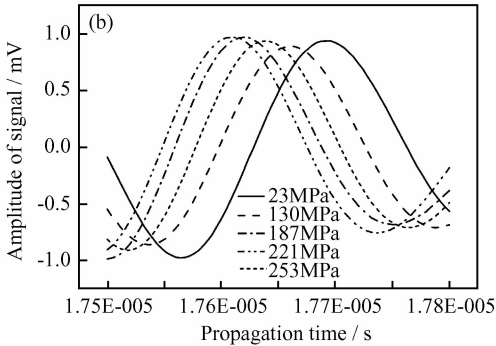


图 2 45 钢表层瑞利波信号 (a)初始状态;(b)去应力退火状态

Fig. 2 Rayleigh wave signal of 45 steel (a)initial state;(b)relief annealing state

对比图 2 中 45 钢表层瑞利波信号可知,瑞利波在不同初始应力状态的 45 钢表层中的传播规律基本相同,即随拉伸应力的增加瑞利波信号逐渐向左移动。

由于实验中瑞利波在 45 钢表层中的传播距离固定不变,这也就表明随拉伸应力的增加,瑞利波在 45 钢表层中的传播速度逐渐变大;而当拉伸应力达到一定值

后再随拉伸应力的增加,瑞利波在 45 钢表层中的传播速度开始出现“忽大忽小”的无规律变化。对比图 2(a)和图 2(b)中瑞利波信号可知,虽然 45 钢表层的初始应力状态对瑞利波传播速度随应力变化规律的影响基本相同,但瑞利波速度达到最大值时对应的拉伸应力并不同。

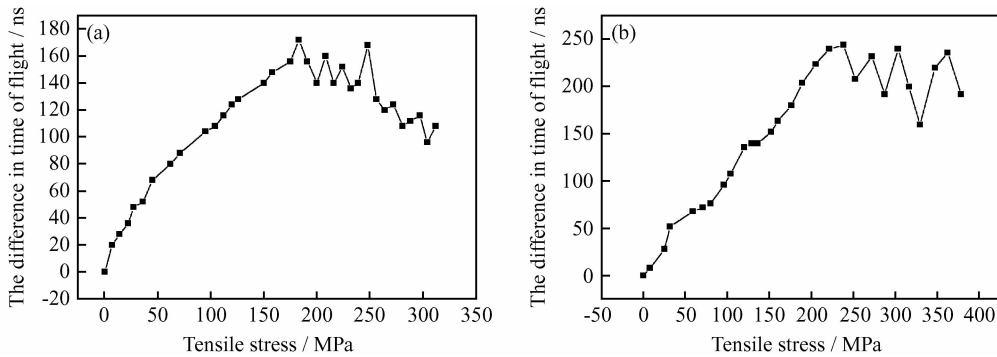


图 3 45 钢试样拉伸应力-时间差曲线 (a)初始状态;(b)去应力退火状态

Fig. 3 Curves between tensile stress and difference in time of flight of 45 steel (a)initial state;(b)relief annealing state

图 3 中 45 钢表层拉伸应力-时间差结果表明,不同初始应力状态时 45 钢表层拉伸应力-时间差曲线变化规律基本相同,即随拉伸应力的增加,信号间时间差基本呈线性规律增大,直至时间差达到最大值;之后再随拉伸应力的增加,时间差开始呈“跳跃式”规律变化。分析认为,当应力较小时,45 钢表层仍处于弹性变形阶段,应力对瑞利波声速的影响仍符合瑞利波声弹效应理论,但由于 45 钢在受载过程中,其表层会“早于”整体材料而进入提前塑性变形阶段,使得应力与声速的关系不再符合表面超声波声弹理论,即时间差随应

力呈线性变化阶段最大值对应的应力值小于 45 钢的弹性极限,分别为 184MPa 和 238MPa,如图 3(a)和图 3(b)所示。由于应力对材料造成的损伤具有“累积”效应,因而在承受拉伸载荷时,45 钢表层损伤程度会逐渐变大,即初始应力较大的 45 钢表层会“早于”去应力退火状态 45 钢表层进入塑性变形,这也是造成线性变化阶段最大时间差对应的应力值不同的主要原因。

采用线性函数对符合声弹效应的 45 钢表层应力-时间差结果进行拟合,结果如图 4 所示。

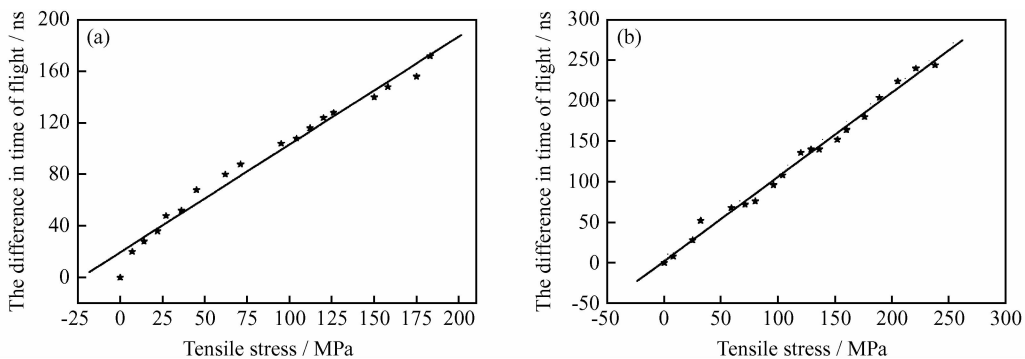


图 4 45 钢拉伸应力-时间差线性拟合结果 (a)初始状态;(b)去应力退火状态

Fig. 4 Linear fitting results of stress and difference in time of flight of 45 steel (a)initial state;(b)relief annealing state

由图 4 中应力-时间差线性拟合结果可知,初始应力状态和去应力退火状态时 45 钢表层的声弹性常数 k 值分别为 0.838 和 1.041,即声弹性公式可表示为

$$t = 0.838\sigma \quad (4)$$

$$t = 1.041\sigma \quad (5)$$

式中: t 为时间差; σ 为拉伸应力。

为了分析初始应力状态对应力评价结果的影响程度,本实验采用图 1 中检测设备对 45 钢试样进行加载

拉伸至 146MPa,并在离散归一化互相关函数的基础上计算各应力状态下瑞利波信号与参考信号间的时间差,分别为 152ns 和 148ns,将其代入式(4)和式(5)中得到理论拉伸应力分别为 181MPa 和 142MPa,其相对误差约为 22%,这也就表明评价 45 钢表层初始应力状态对保证瑞利波无损评价 45 钢表层应力结果精度至关重要。

4 结论

(1)初始应力状态不同时,瑞利波在 45 钢表层中的传播规律基本相同,即瑞利波的传播速度基本呈线性规律随拉伸应力的增加而增大;当拉伸载荷达到一定值时,再随拉伸载荷的增加,瑞利波在 45 钢表层中的传播速度呈“跳跃式”规律变化。

(2)线性拟合结果表明,初始应力会影响 45 钢表层的声弹性常数值,初始应力和去应力退火状态的 45 钢表层的声弹性常数分别为 0.838 和 1.041。

参考文献

- [1] 李朝弟,王克鹏,吴强胜,等.表面涂层材料的残余应力测量技术[J].力学与实践,1996,18(4):43—45.
- [2] 冯宝富,赵恒华,蔡光起.平面磨削残余应力的测试方法[J].机械制造,2003,41(461):35—37.
- [3] 马维,潘文霞,张文宏,等.热喷涂涂层中残余应力分析和检测研究进展[J].力学进展,2002,32(1):41—56.
- [4] SHI Chang-liang, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, et al. Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferromagnetic steel under dynamic tension load[J]. NDT&E International, 2010, 43(1):8—12.

tional, 2010, 43(1):8—12.

- [5] 董丽虹,徐滨士,董世运,等.拉伸及疲劳载荷对低碳钢磁记忆信号的影响[J].中国机械工程,2006,17(7):742—744.
- [6] 张连芳,柯伟平.超声波波型转换与表面波的检测[J].物理实验,2006,26(2):8—10.
- [7] DUQUENNOY M, OUAFTOUH M, QURAK M. Ultrasonic evaluation of stress in orthotropic materials using Rayleigh waves[J]. NDT&E International, 1999, 32(4):189—199.
- [8] 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.
- [9] DUQUENNOY M, OUAFTOUH M, OURAK M. Determination of stresses in aluminium alloy using optical detection of Rayleigh wave[J]. Ultrasonics, 1999, 37(5):365—372.
- [10] HUSSON D. A perturbation theory for the acoustoelastic effect of surface waves[J]. American Institute of Physics, 1985, 57(5):1562—1568.
- [11] 张晓东,高波,宋之平.互相关函数法在声学测温技术中的应用研究[J].中国电机工程学报,2003,23(4):185—188.
- [12] 路炜,文玉梅.供水管道泄漏定位中基于互谱的时延估计[J].仪器仪表学报,2007,28(3):504—509.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975287);国家 973 项目(2011CB013405)

收稿日期:2011-07-26;**修订日期:**2012-03-06

作者简介:刘彬(1983—),男,博士研究生,主要从事材料无损检测及寿命评估方面研究工作,联系地址:北京市丰台区杜家坎 21 号装甲兵工程学院再制造重点实验室(100072),E-mail:liubindely@163.com

通讯作者:何鹏(1972—),男,教授,博士生导师,联系地址:哈尔滨市南岗区西大直街 92 号哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室(150001),E-mail:hithepeng@hit.edu.cn

(上接第 34 页)

- [12] HOERLING A, SJÖLÉN J, WILLMANN H, et al. Thermal stability, microstructure and mechanical properties of $Ti_{1-x}Zr_xN$ thin films[J]. Thin Solid Films, 2008,516(18):6421—6431.
- [13] 高玉周,史雅琴,林国强,等.(Ti,Zr)N 复合薄膜的微观结构及性能[J].大连海事大学学报,2002,28(2):81—84.
- [14] LIN Y W, HUANG J H, YU G P. Effect of nitrogen flow rate on properties of nanostructured TiZrN thin films produced by radio frequency magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(24):7308—7311.
- [15] MILOŠEV I, STREHLOW H H, NAVINŠEK B. Oxidation of ternary TiZrN hard coatings studied by XPS[J]. Surface and Interface Analysis, 1998,26(4):242—248.
- [16] RANMANA J V, KUMAR S, DAVID C, et al. Structure, composition and microhardness of (Ti,Zr)N and (Ti,Al)N coatings prepared by DC magnetron sputtering[J]. Materials Letters, 2004,58(20):2553—2558.
- [17] PATTERSON A L. The Scherrer formula for X-ray particle size

determination[J]. Physical Review, 1939,56(10):978—982.

- [18] YAN P, DENG J X, CUI H B, et al. Finite element analysis of thermal stress in multi-arc ion plated ZrTiN hard coatings[J]. Advanced Materials Research, 2010,139—141:369—373.
- [19] DURUPHTY O, BILL J, ALDINGER F. Bioinspired synthesis of crystalline TiO_2 : effect of amino acids on nanoparticles structure and shape[J]. Crystal Growth & Design, 2007,7(12):2696—2704.

基金项目:国家“973”计划项目(2009CB724402);国家自然科学基金项目(51075237);山东省杰出青年基金项目(JQ200917);山东省自然科学基金重点项目(ZR2010EZ002)

收稿日期:2011-04-06;**修订日期:**2011-11-13

作者简介:颜培(1984—),男,博士研究生,主要从事刀具表面涂层技术及其性能研究,联系地址:山东省济南市经十路 17923 号山东大学(千佛山校区)机械工程学院(250061),E-mail:sduyanpei@hotmail.com