

## 超声检测表面残余应力的研究与发展

虞付进<sup>1,2</sup>, 赵燕伟<sup>2</sup>, 张克华<sup>1,2</sup>

(1. 浙江师范大学交通学院, 浙江 金华 321004; 2. 浙江工业大学机电工程学院, 浙江 杭州 310032)

**[摘要]** 金属表面与内部残余应力的存在对构件的力学性能有重大影响。介绍了超声检测残余应力的研究现状和应用领域, 从分析超声检测残余应力的原理、方法和特点着手, 为开发能满足现场使用要求的检测系统, 对几个关键技术进行了重点分析, 并指出超声检测残余应力的发展方向和广阔的应用前景, 为开展进一步研究提供借鉴与指导。

**[关键词]** 超声波; 检测; 残余应力

**[中图分类号]** TG157; TG179

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2007)04-0072-04

### Research and Development of Surface Residual Stress Testing Based on Ultrasonic Wave

YU Fu-jin<sup>1,2</sup>, ZHAO Yan-wei<sup>2</sup>, ZHANG Ke-hua<sup>1,2</sup>

(1. Traffic College of Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**[Abstract]** The interior or exterior residual stress of metal components has importance effect on mechanics performance. The researches and the applications of residual stress testing based on ultrasonic wave at present were introduced. The principles, methods and characteristics of residual stress ultrasonic testing had been analyzed. The key technologies of developing and using the ultrasonic stress measuring system were emphasized. The direction of developments and the broad prospects of its applications were pointed out in order to research further.

**[Key words]** Ultrasonic wave; Measurement; Residual stress

## 0 引言

金属表面残余应力是在构件不论是否承受外加载荷的状态下, 仍以平衡状态存在于构件的应力<sup>[1]</sup>。当此应力平衡被破坏时, 构件会产生宏观的尺寸变化。

残余应力的存在对材料的力学性能有重大影响, 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、抗应力腐蚀开裂及高温蠕变开裂的能力都将大大下降<sup>[2]</sup>, 从而造成使用中的问题, 许多灾难性事故常常由此引发。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。

## 1 超声检测残余应力的特点

超声波法是利用材料的声弹效应(即施加在材料上的内应力变化引起超声波传播速度的变化, 其大小取决于超声波的波型、传播方向、材料组织和应力状况等), 通过准确测定超声波在构件内传播速度的变化得出应力分布<sup>[3]</sup>。与其它一些方法相比, 具有下列特点:

1) 超声波的方向性较好, 具有光波一样良好的方向性, 可以实行定向发射。

2) 对于大多数介质而言, 超声波的穿透能力较强。在一些金属材料中, 其穿透能力可达数米, 故能无损测定实际构件表面和内部(包括载荷作用应力和残余应力)的应力分布。

3) 采用新型电磁换能器, 可以不接触实际构件进行应力测量, 不会损伤构件表面, 使用安全、无公害。

4) 超声测量仪器方便携带到室外或现场使用, 如果配上相应的换能器(探头), 还可用来探伤或测定弹性模量, 可一机多用。

5) 超声法在测量应力时需做标定试验, 且受探头与构件之间声耦合层厚度变化、构件材料组织、环境温度等的影响。

由此可见, 利用超声波法进行表面和次表面残余应力的测量很有潜力, 是无损检测法中较有发展前景的方法之一。

**[收稿日期]** 2007-06-05

**[基金项目]** 浙江省自然科学基金资助项目(Y106187); 浙江省科技计划资助项目(2006C31053)

**[作者简介]** 虞付进(1965-), 男, 浙江义乌人, 高级讲师, 硕士, 主要从事机械设计制造及自动化、超声波检测领域的科研和教学工作。

## 2 超声检测残余应力的应用领域

残余应力的状态如何是设计者、制造者和使用者共同关心的问题。在机械制造、水利水电、热电核电、航空航天、军工、核工业、石油化工、冶金、铁路、交通等行业,高等院校和科研单位等部门已越来越受到关注和重视。目前,超声波测试残余应力归纳起来主要应用在3方面:测量热残余应力、测量螺栓应力和测量焊接应力<sup>[4]</sup>。

随着研究的深入,一些实用的超声波测试应力技术及仪器也相继出现。铁路行业最先把无损超声波应力检测转化为实际应用。1991年,美国国标技术研究院、美国铁协 AAR、波兰科学院基础技术研究所 IPPT-PAN 和波兰国家铁路中央研究院 CNTK 开始联合研究 (Schramm 1999),其目标是基于超声波测试应力技术,找到美国普遍运用的对铸钢车轮的完整性进行临界鉴定的方法。至今,超声波测应力技术在铁路工业方面的应用主要有3个:1)检测被调直机调直后钢轨内的纵向残余应力;2)检测整体车轮轮毂内的应力;3)检测焊接长钢轨内的温差应力,从而提高行车安全性。开发出的仪器已在美国、欧洲及日本等地使用。当前,有实际应用且比较成熟的另一个实例是螺栓应力的超声波测量,它可快速准确地测出螺栓轴向应力的值,并以此作为分析设备运行状况的主要依据。在国内,1995年国家“七五”攻关项目资助的同济大学声学研究所王寅观课题组,承担了秦山30万千瓦单机核电设备的超声波螺栓应力仪的研制工作。上海宝钢已把超声波测应力技术应用于轧辊表面的残余应力测量。

## 3 超声检测表面残余应力的研究现状

各工业国都很重视残余应力的研究。欧洲最重要的残余应力会议——The European Conference on Residual Stress (ECRS) 已举行了6届,欧洲各国的残余应力工作者每次均踊跃参加。跨国的研究也不少,例如:英国发生多起火车事故后,UMIST、Salford 和 Manchester 等大学在有关当局的支持下,已合作研究残余应力对钢轨疲劳强度的影响,其部分实验是与法国的一些科研机构共同进行的。在亚洲,日本有不少关于残余应力的研究开展得不错。在国内,从已发表的文献数量以及科技人员参与国际会议的情况来看,对残余应力的研究仍偏少,但重视程度已日益增加。现有的超声波测量应力技术主要包括以下6种。

### 3.1 声双折射法

用声双折射技术进行应力评估,其原理的根据是施加在材料上的内应力会引起材料的声学各向异性。平行和垂直于应力方向偏振的横波在材料内沿垂直于周向应力的方向传播,两波的速度差与应力值和由材料性能引起的各向异性成比例。若材料的各向异性为已知,则可算出其应力值。

1959年,Berson R W 和 Raelson V J 发现了超声波在有应力材料中的双折射现象<sup>[5]</sup>,为利用超声波的声弹效应测量应力奠定了物理基础。1967年,Crecraft D I 发表了利用超声波测量工件应力和残余应力的文章<sup>[6]</sup>,描述了超声波的双折射现象与在进行光弹应变分析中观测到的光双折射现象类似。该方法用于

测量各向同性介质中的应力效果良好。但由于材料微结构的差异和晶粒取向导致材料呈各向异性,由于各向异性引起剪切波波速的变化比声弹效应引起的波速变化要大,致使测量结果可靠性变差。同时双折射技术得出的应力值是在试样厚度上的平均应力,在厚度方向存在很大的应力梯度时不能反映出来<sup>[6]</sup>。

有人研究了超声波频率对应力和晶体组织的影响及其相关性<sup>[7]</sup>,并测量了频率对双折射的影响,发现晶体结构引起的双折射在很大程度上与频率有依从关系。Bach F 和 Askegaard V 研究了双轴应力场中声波的应用,以及双轴和三轴应力场中应力与超声波速度间相互关系的一般表达式<sup>[8]</sup>。

### 3.2 表面波法

表面波仅适用于评价试件表面和次表面的材料特性。测定表面应力的原理是:根据半无限体在弹性应力作用下表现出的弹性各向异性,可求出平面上表面波速度与表面应力的关系。

1961年,Hayes M 和 Rivlin R S 得出了在均匀变形的弹性体中的表面波沿一个主应力方向传播的第一个理论<sup>[9]</sup>。后来,Iwashimizu Y 和 Kobori O 对该理论进行了概括和总结<sup>[10]</sup>。Gerhart G R 则探讨了波的传播方向与主应力方向不一致的情况<sup>[11]</sup>,而 Hirao M 等探讨了初始应力随深度变化的情况<sup>[12]</sup>,其他一些作者探讨了应力与由于织构引起的各向异性的影响。许多作者研究了瑞利波在铝合金和低碳钢中的声弹效应,Jassby K 和 Saltoun D 利用瑞利波对试件的工作应力进行了测量<sup>[13]</sup>,而 Husson D 则对试件的残余应力进行了测量<sup>[14]</sup>。同济大学声学所王寅观等利用 Rayleigh 表面波对热套圆盘的平面残余应力的无损检测进行了研究<sup>[15]</sup>。

近年来,Luthi T<sup>[16]</sup>提出了测量各向同性材料三维应力的方法,并给出利用 Lamé 常数  $\lambda, \mu$  及 Murnaghan 常数  $l, m$  和  $n$  的表达式。Duquennoy M、Ouaftouh M 和 Ourak M 也研究了利用瑞利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瑞利波传播方程,得出了波速变化与应力的关系<sup>[17]</sup>。

### 3.3 反射纵波法

体波对测量试件内部的材料性能非常有用。反射纵波是在测量试件内部传播的纵波,是测量试件内部体应力的很好方法。其原理是:根据被测物体在弹性应力作用下表现出的弹性各向异性,可求出反射纵波速度与表面测量试件内部体应力的关系。同济大学声学所利用反射纵波法测量了钢轨的应力,取得了良好的效果。

### 3.4 电磁超声法

常规的超声波压电换能器往往需要耦合剂才能实现与被测部件之间的良好耦合,且对被测件的表面质量要求较高,因而难以适用于高温、高速和粗糙表面的测量环境。

电磁声换能器 (EMAT) 是一种在金属表面不需要任何机械 (液体) 耦合就能产生体纵波、横波、Rayleigh 波、Lamb 波和表面波的超声换能器。由于不需要任何液体耦合,EMAT 可以在高温和高速扫描情况下工作。EMAT 的特性很容易在另一个换能器上重复实现,所以可以用于制作标准换能器。另外,它可以很容易地产生一般压电换能器很难激发的 SH 波。横波和纵波的角度可以通过控制频率来控制。EMAT 的缺点是插入损失比普通的压电换能器大得多,所以在激发和接收时必须调整阻抗。因为产生超声波时是一个电流控制的操作,所以不同的 EMAT

需要不同的驱动电路,而且也不能用于非金属材料的测量<sup>[18]</sup>。

### 3.5 激光超声法

激光超声是利用激光束来产生和测量超声波,并开展超声波传播研究和材料特性无损评价的新兴学科。与传统的压电换能器技术相比,激光超声最主要的优点也是非接触测量,它消除了压电换能器技术中的耦合剂的影响,可用于各种较复杂形貌试样的特性测量。加上它又是一种宽带的测量技术,并能利用光波波长为测量标准而精确测量超声位移。因此,利用激光超声技术测量应力是一种极有应用前景的新无损测量技术。近年来,激光超声技术在应力测量方面得到了很大的发展,是一种极具潜力的应力测量技术之一<sup>[19-21]</sup>。

### 3.6 临界折射纵波法

纵波以第一临界角入射时产生的特殊模式就是临界折射纵波。它在试件表层一定深度内传播,兼有表面波和体波的特性,在一些特殊应用方面具有比传统的表面波和体波更优的性能。Brekhovskii、Basatskaya、Ermolov、Junghans、Bray 以及 Langenberg 等学者对临界折射纵波的一些特性进行了系统研究,并在各种材料中进行了测应力试验。早期波兰研究者利用该技术测量钢轨中的应力,并取得了一定的成效。他们成功地测量了钢轨由于制造产生的应力以及钢轨安装在路基上后由于热作用产生的应力。同时,Bray 等人还用该项技术测量了铸铁件、涡轮盘、压缩机转轴的应力,Salamanca 测量了安装在发电站涡轮机转轮上热嵌配合挡圈的应力分布,Tanala E 等人也对焊接铝试样的应力分布进行了测量<sup>[22]</sup>。这些实例都证实了临界折射纵波在应力评价中的独特性,它对应力变化非常敏感。当利用临界折射纵波测试有限厚度的试样时,临界折射纵波的穿透深度是超声波频率的函数,低频波比高频波渗透得深。并且,Bray D E 等人通过试验探讨了实际声波能量的分布与深度的关系,但还没有任何理论能对临界折射纵波的有效渗透深度进行解释。同时 Bray D E 等人还探讨了结构对临界折射纵波的影响,研究表明临界折射纵波对结构不敏感<sup>[23]</sup>。

## 4 超声检测残余应力的发展方向及关键技术

### 4.1 发展方向

超声波的表面残余应力检测技术是一门涉及声学、材料学、微电子学、计算机科学、信号采集与处理、仪表学等领域的综合性学科,纵观国内外的的发展,其趋势可归纳如下。

#### 1) 检测技术的计算机化和自动化

该方面的研究可归结为专用无损检测仪器的计算机化或数字化和特定检测任务或过程的自动化。各种无损检测方法将被检对象的物理信息通过不同类型的传感器(换能器)转换为电量信号,经放大、采样、A/D 转换后,将这些模拟信号变为数字信号进入计算机系统、微处理器执行部件,如放大器的增益数控、自动补偿、自动设置检测灵敏度等,并进行自动运算和质量判断。同时还可根据软件编程进行数字信号处理和图像处理,计算机系统还将控制工序流程。作为一个工程项目的自动化无损检测系统,往往是机械传动、液压、气动、专用传感器、电磁控制、光电控制、电子程控以及信号发射与分析处理系统的综合。

#### 2) 精确测量时间差

超声波的声弹效应是一种弱效应,应力引起的声速变化很小。由实验结果可知,应力变化引起的时间变化量很微弱。因此,精确测量时间变化量很关键,一方面需要灵敏度和精度非常高的测量技术和仪器设备,另一方面抗干扰技术、补偿技术、应力常数标定和零应力状态标定等都与提高检测精度密切相关。

3) 声弹性力学(Sonoelasticity 或 Acoustoelasticity)<sup>[24]</sup>、超声波传播机理的基础理论研究。

超声检测残余应力的实用技术之所以发展较缓慢,还未真正达到大面积推广应用,总体上还处于实验室阶段,一是要更多的投入,二是要加强基础理论研究。基础理论研究工作的滞后,制约了检测技术由定性向定量的快速发展。如声弹性的发现不仅丰富了试验应力分析的测试技术,而且是金属和陶瓷制品残余应力无损检测中具有足够精度的一项实用技术。

#### 4) 研究对象、应用领域的拓展与渗透

当今国防和民用工业各个领域中的应用了大量非金属材料 and 复合材料,尤其是高分子材料和复合材料。由于结构、成分、加工工艺(过程)等方面的不同,带来了此类材料或构件机械性能、失效方式(过程)以及使用寿命等与金属构件的区别。所以对这类材料物理化学性能、结构形式、内在质量以及使用状况的研究与检测(监测)已引起国外众多学者的广泛关注。

## 4.2 关键技术

从开发能满足现场使用要求的检测系统的视角,据国内外的现有产品和本课题组的研究与试验,超声检测金属表面残余应力的技术关键在于:

1) 得出构件的诸如材质、织构、表面状态、耦合层厚度、环境温度等影响检测精度的因素对检测结果的影响程度,以及消除或减小影响检测结果的方法。

2) 在实验的基础上,对实验结果进行分析,得出各种影响构件检测精度的因素对检测结果的影响规律,制定满足现场使用条件和精度要求的超声应力检测规程。

3) 减小由于超声探头与被测构件之间耦合剂厚薄程度变化引起的声波传播时间的变化,提高检测数据的可重复性和可靠性。

4) 在采样频率远低于检测所需时间分辨率的情况下,如何提高检测稳定性以及检测精度。

5) 对焊接构件的“零应力状态”如何进行定标,以便根据现场构件上检测到的声时差确定其上应力分布的状态和大小。

## 5 结论

超声波法是利用材料的声弹效应,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。原理简单,设备轻便,可实现现场或在役检测,能测量构件表面乃至内部的应力分布,对身体无害,其优点是显而易见的。随着计算机和信息处理技术的迅速发展,超声波检测的可靠性和直观性也在不断提高,并取得了显著的经济效益和社会效益,在工业生产、科研院所等各个部门具有十分广阔的应用前景。

### [参考文献]

[1] 米谷茂(日). 残余应力的产生与对策[M]. 北京:机械工业出版社

- 社,1983.7-9
- [2] 林丽华,陈立功. 残余应力测量技术现状及其发展动向[J]. 机械, 1998,25(5):53-57
- [3] 西拉德. 超声检测新技术[M]. 北京:科学出版社,1991.435-460
- [4] 魏智,徐蔚,曲云霞,等. 表面波声弹性应力检测基础[J]. 河北工业大学学报,2002,31(1):10-13
- [5] Benson R W, Raelson V J. Acoustoelasticity[J]. Product Engineering,1959,30:56-59
- [6] Crecraft D I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves[J]. Journal of Sound Vibration,1967,51(5):173-192
- [7] Murnaghan F G. Finite deformation of an elastic solid [M]. New York:Wiley, 1951. 63-64
- [8] Bach F, Askegaard V. General stress-velocity expressions in acoustoelasticity[J]. Experimental Mechanics,1979,19:69-76
- [9] Hayes M, Rivlin R S. Surface waves in deformed elastic materials[J]. Archive of Rational Mechanics and Analysis,1961,8:359-380
- [10] Iwashimizu Y, Kobori O. The rayleigh wave in a finitely deformed isotropic elastic material[J]. Journal of the Acoustical Society America, 1978,48(3):910-916
- [11] Gerhart G R. Rayleigh wave velocity for a stress-induced slight anisotropic solid[J]. Journal of the Acoustical Society America,1976,46(3):1085-1088
- [12] Hirao M, Fukuoka H, Hori K. Acoustoelastic effect of Rayleigh surface wave in isotropic material[J]. Journal of Applied Mechanics, 1981,48:119-124
- [13] Jassby K, Saltoun D. Use of ultrasonic Rayleigh waves for the measurement of applied biaxial surface stresses in aluminium 2024-T352 alloy[J]. Materials Evaluation,1982,40:198-205
- [14] Husson D. A perturbation theory for the acoustoelastic effect of surface waves[J]. Journal of Applied Physics,1985,57(5):1562-1568
- [15] 王寅观,田冲,姚国民,等. 利用 Rayleigh 表面波无损检测热套圆盘的平面残余应力的研究[J]. 声学学报(中文版),1999,24(1):53-57
- [16] Luthi T. Determination of biaxial and triaxial stress distribution using ultrasonics[J]. NDT International,1990,23(6):351-356
- [17] Duquennoy M, Ouafouh M, Ourak M. Ultrasonic evaluation of stresses in orthotropic materials using Rayleigh waves[J]. NDT & E International, 1999,32:189-199
- [18] 罗瑞灵,陈立功,刘毅萍. 电磁超声换能器在残余应力超声测量中的应用[J]. 无损检测,1998,20(11):316-319
- [19] 潘永东,钱梦麟,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(中文版),2004,29(3):254-257
- [20] 钱梦麟. 激光超声学的若干进展[J]. 声学技术,2002,21(1/2):19-23
- [21] 钱梦麟. 激光超声检测技术及其应用[J]. 上海计量测试,2003,30(3):4-6
- [22] Tanala E, Bourse G, Fremiot M, et al. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods[J]. NDT & E International, 1995,28(2):83-88
- [23] Bray D E, Tang W. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the LCR ultrasonic wave[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 207:231-240
- [24] Hirao M, Fukuoka H, Hori K. Acoustoelastic effect of Rayleigh surface wave in isotropic material[J]. Journal of Applied Mechanics, 1981,48(3):119-124

(上接第58页)

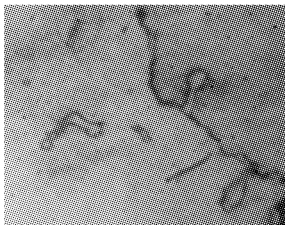


图9 夹杂物 1200 ×

Figure 9 Inclusion accumulation

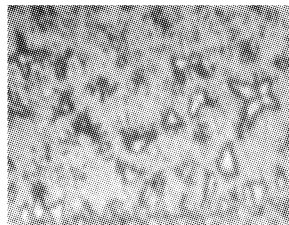


图10 夹杂物的形状 1200 ×

Figure 10 Shape of inclusion

规律可循的。工艺参数的选取,是一个在矛盾中选优的复杂过程。工艺参数选取适当,可以获得高质量的熔覆层。

#### [ 参 考 文 献 ]

(上接第68页)

- [8] 蒋百灵,吴建国,张淑芬. 镁合金微弧氧化陶瓷层生长过程及微观结构的研究[J]. 材料热处理学报,2002,23(1):5-8
- [9] 来永春,陈如意,邓志威. 微弧氧化技术在纺织中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术,1998,10(1):49-52
- [10] 邓志威,来永春,薛文斌. 微弧氧化技术表面陶瓷化机理的探讨[J]. 原子核物理评论,1997,14(3):193-195
- [11] Markov G A, Mironova M K, Potapova O G. Structure of anodic films in the microarc oxidation of Al [J]. Izv Akad Nauk SSSR Neorg Mater, 1983, 19(7):1110-1113
- [12] 曾庆圣,何宏辉,霍天成,等. 镁合金等离子体微弧氧化膜层研究[J]. 表面技术,2005,34(5):26-29
- [13] Barton T F, Johnson C B. The effect of electrolyte on the anodized finish of a magnesium alloy [J]. Plating & surface finishing, 1995, 32(5):138-141
- [14] 蒋百灵,张先锋. 不同电导率溶液中镁合金微弧氧化陶瓷层的生长规律及耐蚀性[J]. 稀有金属材料与工程,2005,34(3):393-396
- [15] Zozulin A J, Bartak D E. Anodized coating for magnesium alloys [J]. Metal Finishing, 1994, 3(5):39-44
- [16] 薛文斌,邓志威,张通和. 铸造镁合金微弧氧化机理[J]. 稀有金属材料与工程, 1999, 28(6):153-156
- [17] 蒋百灵,张淑芬,吴国建. 镁合金微弧氧化陶瓷层耐蚀性的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(5):300-304