

残余应力的超声检测方法

徐春广,宋文涛,潘勤学,李 晓,靳 鑫,刘海洋

(北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081)

摘 要:建立超声应力检测与校准系统,分别利用该系统和 X 射线应力分析仪对 Q235 钢、685 钢、45 号钢、铝合金等试样进行残余应力检测,通过对比研究表明两种方法的应力检测值并不相同,但是应力趋势基本相同。利用超声法对焊缝、平板类零件、轴类零件、管类内壁、螺栓、涂覆层下、玻璃及陶瓷等的残余应力分布进行检测,取得较好的应用效果。

关键词:残余应力;无损检测;超声波;X 射线

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)07-0025-07

Residual Stress Nondestructive Testing Method Using Ultrasonic

XU Chun-guang, SONG Wen-tao, PAN Qin-xue, LI Xiao, JIN Xin, LIU Hai-yang

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A system of ultrasonic stress testing and calibration was established, and respectively using the system and X-ray stress analyzer to detect the residual stress in specimen of Q235 steel, 685 steel, 45 # steel, and aluminum alloy. The comparative study shows that the detected stress values of the two methods are different, but the stress trend is almost the same. Finally, through using ultrasonic method, we obtain satisfied application result on the residual stress testing of weld joint, flat parts, shaft parts, the tube inner wall, bolt, coating parts, glass and ceramic component, and so on.

Keywords: Residual stress; Nondestructive testing; Ultrasonic; X-Ray

残余应力是材料内部不均匀塑性变形引起的自身保持平衡的弹性应力。根据德国学者 Macherauch(马赫劳赫)博士于 1973 年提出的内应力模型^[1],可将残余应力分为三类。第Ⅰ类内应力是材料中晶粒之间的平均应力,作用范围是毫米级;第Ⅱ类内应力作用在单个晶粒内,各晶粒之间因弹性和塑性各向异性而不同;第Ⅲ类内应力存在于晶粒中,其本质上是由晶粒内存在的位错和其它缺陷造成的。第Ⅰ类内应力称为宏观残余应力,第Ⅱ类和第Ⅲ类内应力统称为微观应力。通常检测到的是宏观残余应力。

残余应力的产生主要源于不均匀的弹塑性变形、不均匀的温度变化以及不均匀的相变。在很多情况下,残余应力的产生是以上三种因素综合作用的结果^[2]。加工制造过程中,残余应力不可避免,其影响有利有弊,一方面希望消除残余拉应力,另一方面希望预置残余压应力。如对于大型拼焊构件,焊接残余应力可能导致构件变形或开裂,造成早期失效;而对于轧辊、齿轮、轴承、弹簧、曲轴、身管之类的零部件,主要考虑如何通过施加残余压应力来提高零件的疲劳强度^[3]。

为了有效地控制和利用残余应力,需要准确地检测出残余应力值,并对其状态进行合理的评估。目前残余应力检测的方法有很多,如 X 射线法、盲孔法、巴克豪森法等。2012 年,意大利 Rossini 教授对比分析各种检测方法后认为,超声波法是残余应力的无损检测发展方向上最有前途的技术之一^[3]。超声波应力检测是基于超声波波速与材料应力间的线性关系,这个关系即为在材料弹性极限内表现

收稿日期:2013-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275042);国家重大科技工程专项(2011ZX04014-081)和科技部国际合作专项资助项目(S2012ZR0084)

作者简介:徐春广(1964—),男,博士,教授,主要从事超声无损检测与控制,测量与计量技术的研究。

出的声弹性效应,该效应表明了声时与应力的线性相关。笔者首先介绍了残余应力超声临界折射纵波法的基本原理;然后搭建了超声应力检测与校准系统,分别利用超声临界折射纵波法和X射线衍射法对Q235钢、45号钢、铝合金等试样进行残余应力检测,并对比研究不同方法检测的结果;最后,利用建立的超声应力检测与校准系统,应用到对焊缝、平板类零件、轴类零件、管类内壁、螺栓、涂覆层下、玻璃及陶瓷等的残余应力分布检测中。

1 超声检测基本理论

经研究发现,沿应力方向传播临界折射纵波(L_{CR})波速与应力之间的关系如下^[5-7]:

$$\rho_0 v^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right] \quad (1)$$

式中: v 为有应力情况下 L_{CR} 波的传播速度; ρ_0 为被测材料的密度; λ 和 μ 为材料的二阶弹性常数; l 和 m 为三阶弹性常数; σ 为应力值,正值表示拉应力,负值表示压应力。

对式(1)两边分别求导得出声速的变化量与应力的变化量之间的关系:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{dv}{d\sigma} = \frac{K}{2} \quad (2)$$

式中: $d\sigma$ 为应力的改变量; dv 为 L_{CR} 波传播速度的改变量; v_0 为零应力条件下纵波的传播速度; K 为声弹性常数。

由式(2)可得,在固定传播距离内,应力与声速的关系可以简化为:

$$d\sigma = K_0 dt \quad (3)$$

式中: $K_0 = \frac{2}{Kt_0}$; K_0 为应力常数; t_0 为零应力条件下 L_{CR} 波传播固定距离所需要的时间。

由式(3)可知,通过精确测量 L_{CR} 波传播的声时或声时差,就可以计算得到对应的应力值。

2 超声应力检测与校准系统

基于Snell定律,采用一发一收模式,利用第一临界角加工出有机玻璃透声楔,激励出的超声临界折射纵波可检测工件表面以下一定深度的残余应力值,渗透深度是其频率的函数,如图1所示。通常情况下频率太低,在较薄构件中容易激发出导波^[8],同时对应力敏感度降低;频率太高,渗透深度太浅,表面粗糙度对测试结果影响增大,同时波形衰减很严重。

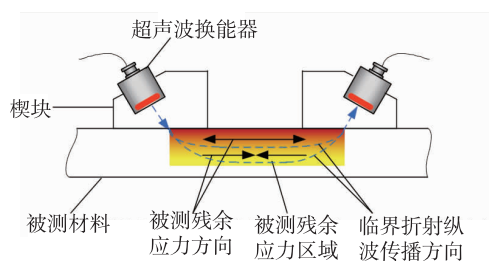


图1 L_{CR} 波的激励与被测残余应力区域

在残余应力检测过程中,环境温度造成的检测误差不可忽视,尤其是在户外长期作业时。研究表明,对于普通钢材,1℃的温度变化平均可以引起75 MPa左右的应力变化^[9]。因此,必须在检测系统中引入温度补偿。系统通过理论分析和温度时差试验,得到温度与声时的关系表达式,然后编入系统软件,由系统软件根据采集的温度数值自动消除温度造成的误差。

为了确保检测值准确(精度始终维持在其误差范围之内),需要定期对残余应力超声检测系统进行校准。图2是利用微机控制拉伸机进行绝对校准的流程图,图3是对685钢拉伸试样进行校准时的声时-应力曲线图,从图中看出,校准后的曲线更接近实际加载应力曲线,满足检测精度在-20~20 MPa范围之内。

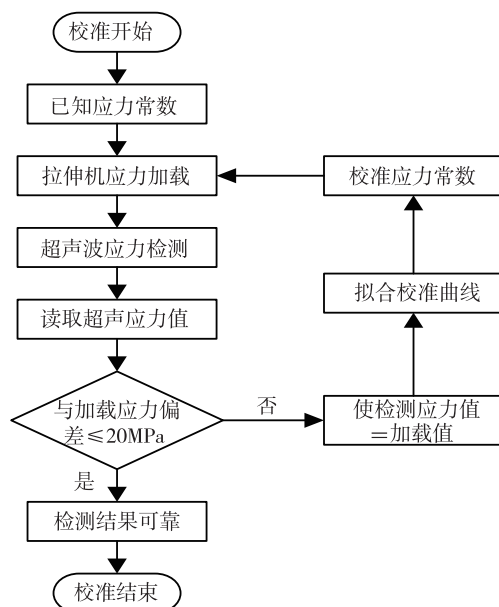


图2 系统绝对校准流程图

系统适用材料范围为金属、玻璃、陶瓷等,适用工件类别为平板、轴类、盘类、管道、螺栓、涂覆层下等;检测范围(σ_s 为被测材料屈服强度)为 $-\sigma_s \sim \sigma_s$ MPa;检测误差为-20~20 MPa;温度范围为0~

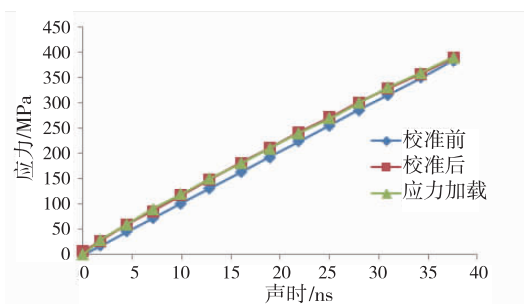


图3 系统绝对校准的声时-应力曲线

30℃;检测深度为0.5~150 mm;每个检测点的时间为0.5~2 min。

3 残余应力检测对比试验

X射线检测设备采用日本 Rigaku 公司生产的 MSF-3M 射线应力分析仪。其主要参数分别是:管电压为 30 kV(固定);管电流为 0.5~10 mA(连续可调);X射线类型为 Ka;靶材为 Cr;有效聚焦为 4 mm×4 mm;2 θ 测角范围为 140°~170°; ψ 测角范围为 0°~45°。

试验前,确保 X 射线应力分析仪的检测精度,利用 X 射线应力分析仪对零应力铁粉进行检测,结果在 -2.74~1.5 MPa 范围内,满足精度要求。

3.1 Q235 钢

选用 Q235 钢,试样表面粗糙度 R_a 不大于 3.2 μm 。试样共 12 块,分为 A、B 两组,每组 6 块,按顺序编号。

对 A、B 两组试样分别采用超声和 X 射线应力进行检测,超声检测前需要进行零应力标定,取每组的编号 1 试样作为零应力标定,每个试样都重复检测直至稳定。由于残余应力在不同方向上具有一定的差异,所以在用 X 射线法检测残余应力时,应保证其检测方向与超声检测方向相同。使用的超声应力传感器两个换能器的间距为 50 mm,在超声检测区域选取 3 个等分区域,每次利用 X 射线检测其中一个区域,每个试样都检测 3 次,如图 4 所示。

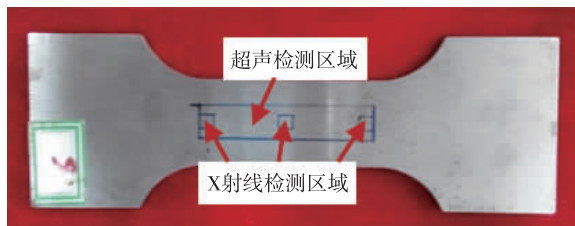


图4 Q235钢超声与X射线检测区域示意图

3.2 685 钢定值试块

采用喷丸工艺制作残余压应力定值试块,试块材料为 685 钢,表面粗糙度 R_a 不大于 3.2 μm 。喷丸前对试块进行退火处理(加热到 450℃保温 2 h,然后再随炉冷却),以消除初始应力。热处理后,对工件表面氧化膜进行清理,然后对试块采用单个喷嘴进行喷丸处理。将试块放入保温箱(温度在 18~22℃),以防止长时间昼夜温差大造成试块应力自然释放。

对 6 mm 厚和 20 mm 厚定值试块的残余应力分别采用超声法与 X 射线法进行长期监测。超声法零应力标定采用不同厚度分开标定,即利用 6 mm 厚经退火处理而未喷丸的试块标定 6 mm 厚定值试块零应力,20 mm 厚经退火处理而未喷丸的试块标定 20 mm 厚定值试块零应力。定值试块的监测区域如图 5 所示。

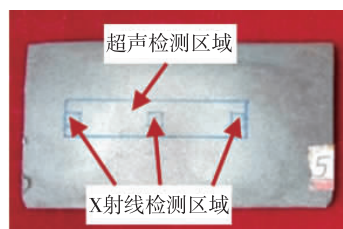


图5 685钢喷丸定值试块残余应力长期监测区域

3.3 45 钢 C 形环

加工一 45 号钢 C 形环,试样表面粗糙度 R_a 不大于 3.2 μm 。通过旋动螺母,调节 C 形环的径向压缩量,从而实现应力加载。分别采用超声法和 X 射线法检测加载的应力,超声法零应力标定在径向压缩量为 0 mm 时,检测的现场和检测区域如图 6 所示。

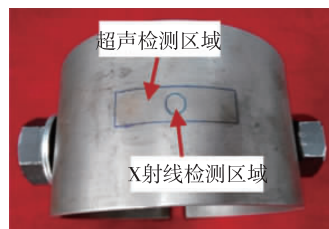


图6 45号钢C形环应力检测区域示意图

3.4 铝合金

对 LY12 铝合金:试样分别采用超声与 X 射线进行残余应力检测。试样表面经过精磨加工,图 7 为铝合金试样的检测区域示意图,其中超声检测区域为 5 个长方形区域,从左到右依次编号;X 射线检测区域为 15 个方形区域,即每个超声检测区域对应

3个X射线区域。超声检测的零应力标定等方法与3.1中Q235钢的试验方法相同。

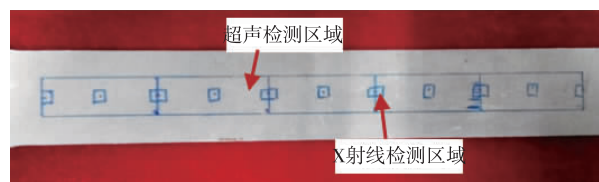


图7 铝合金超声与X射线检测区域示意图

4 试验结果

4.1 Q235钢

将A、B两组的检测均值绘制成对比折线图如图8,9。

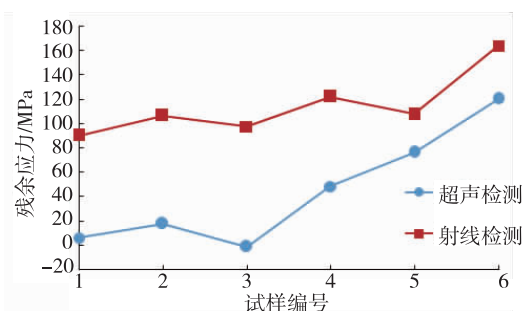


图8 Q235钢A组试样超声与射线检测结果对比

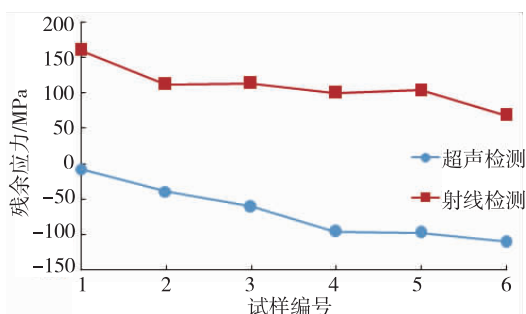


图9 Q235钢B组试样超声与射线检测结果对比

4.2 685钢定值试块

对6mm厚685钢定值试块的残余应力长期监测结果如图10;对20mm厚定值试块的残余应力长期监测结果如图11。

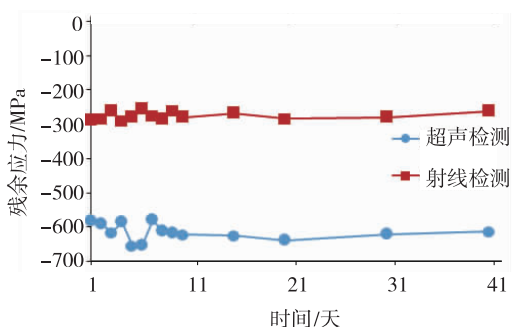


图10 6mm厚定值试块超声与射线监测结果对比

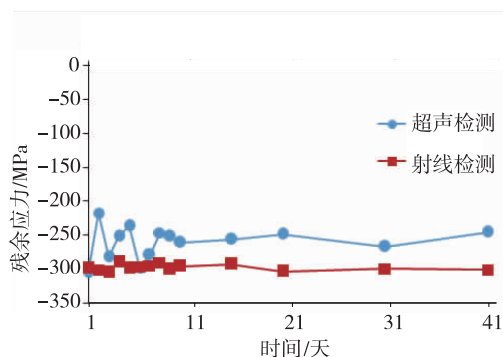


图11 20mm厚定值试块超声与射线监测结果对比

4.3 45钢C形环

将C形环应力加载试验的两种方法检测值绘制成对比折线图如图12。

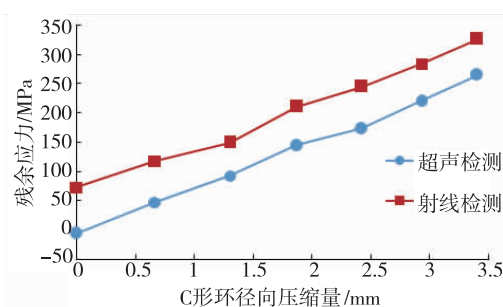


图12 C形环两次应力加载的超声与射线检测结果对比

4.4 铝合金

将铝合金试验检测均值绘制成对比折线图如图13所示。

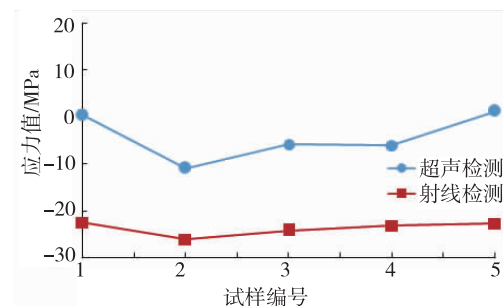


图13 铝合金超声与射线检测结果对比

5 讨论

综合对Q235钢、685钢、45号钢、铝合金等材料的超声与X射线检测结果可以看出,超声法残余应力检测值和X射线法应力检测值并不相同,这是因为超声法检测的面积和深度与X射线法不同,但是应力趋势基本相同,尤其是从4.3中对C形环应力加载后的应力折线图可以看出。

由此可见,超声法与X射线法都可以反应构件残余应力状态和趋势,其理论上应该有一定的对应

关系,但是目前缺乏确切的理论依据。

X射线法的理论与应用都较为完善,各国都有其检测标准。超声波法是近几年才发展起来的新技术,因此暂无可执行的标准。据此,北京理工大学检测与控制研究所拟定了《无损检测——残余应力的超声临界折射纵波无损检测方法》的国家标准,该标准已于2013年11月通过国家标准化管理委员会的初步审定。该团队通过对标准总则的进一步完善以及制定残余应力超声检测的校准和试块标准,最终形成一整套的超声残余应力检测标准体系。

6 工程应用

6.1 管焊缝残余应力分布

在我国“西气东输”工程中,为提高输气速度与输气量,须提高输送压力。然而由于管道焊缝残余应力的影响,压力提高后,焊缝附近很容易因残余拉应力而出现裂纹,进而导致爆管事故。

利用残余应力超声检测与校准系统,对新疆克拉玛依“西气东输”管道焊缝残余应力进行现场检测,评估其危险区域,如图14所示,该管道材料为X70钢,焊接工艺为手工电弧焊。为了说明评估结果的准确性,将危险段切下进行打压爆管试验,结果如图15所示,爆破处与评估得出的危险区域基本相符。



图14 管道焊缝残余应力检测现场图

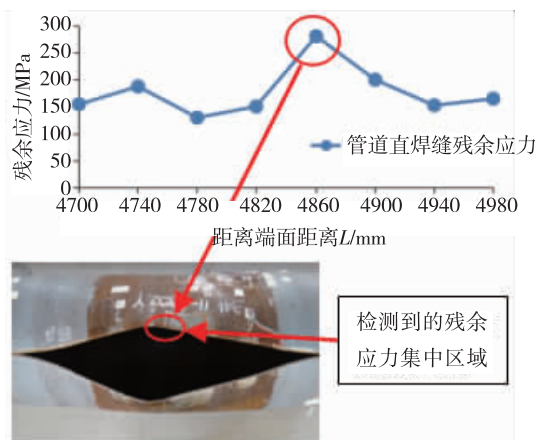


图15 管道爆管试验验证

6.2 平板焊缝残余应力分布

焊接残余应力的分布不均,会导致车辆在服役过程中重要部位会发生弯曲变形,甚至产生裂纹,最终开裂。利用该装置先后对内蒙古一机集团和北方重工集团的车辆焊缝及母材的残余应力进行了超声无损检测适应性研究,如图16所示。该材料为685钢,焊接工艺为氩弧焊。



图16 焊接残余应力检测

图17是针对其中一条焊缝的检测结果,是焊缝两侧区域残余应力声时差分布情况,与理论应力状态相符。

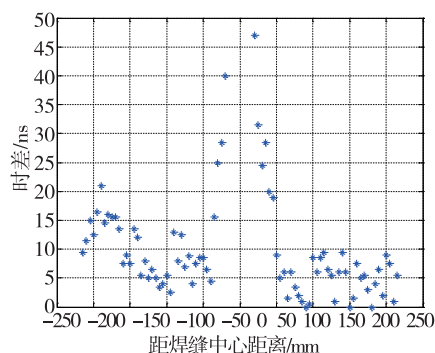


图17 焊缝两侧焊接残余应力分布

6.3 轴类零件残余应力分布

车辆扭力轴为承力部件,容易失效。如果在加工制造过程中,扭力轴产生较大残余拉应力,则会加快扭力轴的疲劳断裂。因此,需要在使用前对扭力轴的残余应力进行评估。试验针对某一型号的扭力轴,沿着扭力轴 0° , 90° , 180° 和 270° 四条母线方向,每移动50mm进行一次超声残余应力检测,将数据绘制成应力云图如图18所示。从图中可看出,扭力轴整体应力为残余压应力,局部地区有50MPa左右的拉应力。

6.4 管类内壁残余应力分布

通常身管内壁要人为产生自紧应力层,但是,往往由于自紧应力层应力分布不均会引起弯曲变形。无损地检测出身管自紧应力分布状况并及时采取修正措施,可以提高管类构件的生产质量和使

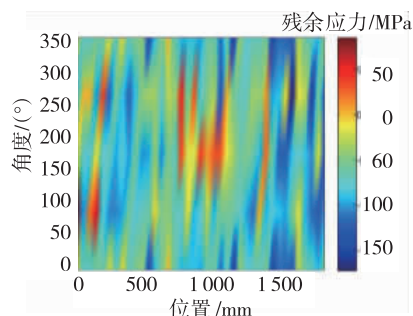


图 18 扭力轴残余应力的分布云图

用寿命。图 19 为试验研究结果,这是国际上首次检测到身管内部的残余应力分布状态,与实际结果吻合。

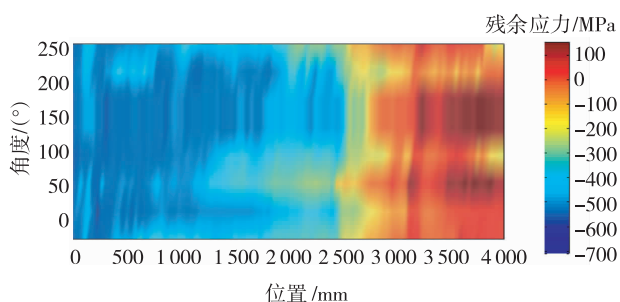


图 19 身管自紧应力分布云图

6.5 螺栓轴向应力分布

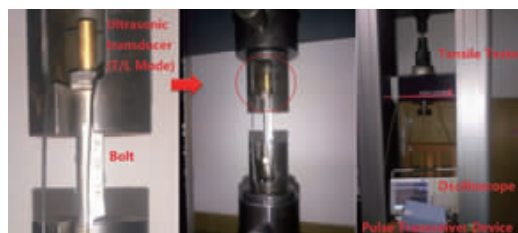
利用超声波横纵波探头,对 3 种不同材料(奥氏体不锈钢、低碳钢、碳钢)的螺栓进行轴向应力检测,如图 20(a)所示,应力加载试验在拉伸机上进行。试验前,将螺帽处铣削平整,保证横纵波探头与螺栓良好接触,达到理想耦合效果。图 20(b)为奥氏体不锈钢螺栓的加载应力与超声波检测对比图,试验结果表明,检测平均误差在 10% 以内。

6.6 涂覆层下残余应力分布

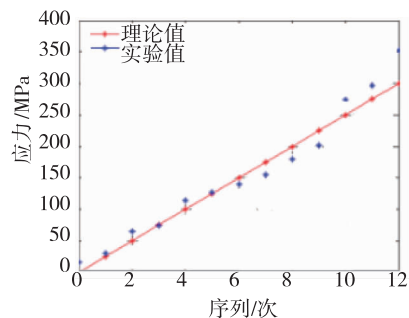
对于含有较薄防腐层的构件,超声波可以渗透防腐层,对构件涂覆层下的残余应力进行检测。图 21 是对涂有漆膜的铝合金试件进行残余应力超声检测的现场。试验表明,利用超声波法,铝板涂覆层下的表面应力分布可以较好的检测出来,但是对于漆膜内部以及漆膜与铝板之间的粘接层应力大小还无法检测。

6.7 玻璃与陶瓷残余应力分布

很早人们就发现玻璃、液晶平板等材料中的应力分布通常是不均匀的,严重时会降低玻璃制品的强度和热稳定性,影响制品的安全使用,甚至会发生自裂现象。然而,考虑到检测的效率和准确性,玻璃的应力检测一直没有较好的手段。



(a) 螺栓应力加载和超声测量现场



(b) 加载应力与超声测量值对比图

图 20 螺栓轴向应力测量

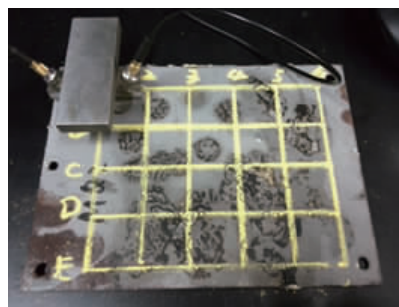


图 21 涂有漆膜的铝合金试件残余应力检测

对 6 mm×120 mm×120 mm 的平板玻璃采用超声残余应力检测。检测前,对玻璃中部区域进行加热处理(100~150 ℃),然后风冷到室温,从而人为预置一定残余应力。残余应力检测结果如图 22 所示,从图中看出,通过加热处理后,平板玻璃产生最大 16 MPa 的残余应力。

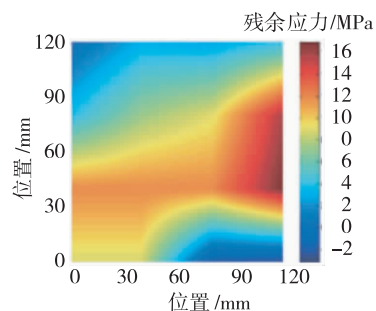


图 22 玻璃表面残余应力分布云图

7 结论

(1) 采用斜入射一发一收模式,激励出的超声

临界折射纵波(L_{CR} 波)可检测工件表面以下一定深度(与换能器的频率有关)的残余应力值,实现对残余应力的快速无损检测。

(2) 对比超声法与 X 射线法的试验结果表明,两种方法的检测值并不相同,这是因为超声法检测的面积和深度与 X 射线法不同,但是应力趋势基本相同。超声法与 X 射线法都可以在一定程度上反应构件残余应力状态和趋势,其理论上应该有一定的对应关系。

(3) 对比超声法与 X 射线法的优缺点可以看出,超声法具有普遍使用、非常快速、低成本、较佳的分辨率和渗透力、手持式、无辐射污染等诸多优点,具有广阔的发展空间。但是目前还没有相关的国际和国家标准,阻碍了技术的推广。目前,研究团队已经拟定了《无损检测——残余应力的超声临界折射纵波无损检测方法》的国家标准,并已于 2013 年 11 月通过国家标准化管理委员会的初步审定。

(4) 通过将超声应力检测与校准技术应用到焊缝、平板类零件、轴类零件、管类内壁、螺栓、涂覆层下、玻璃及陶瓷等的残余应力分布检测中,说明了残余应力超声临界折射纵波检测方法的准确性、实用性以及应用领域的广泛性。

参考文献:

- [1] MACHERAUCH E, WOHLFAHRT H, WOLFS-TIEG U, etc. Definition Von Eigenspannungen[J]. Harterei-Techn. Mitt., 1973, 28; 201-211.

- [2] VIKTORH. Structural and residual stress analysis by nondestructive methods[M]. Netherlands: Elsevier Press, 1997.
- [3] 王树志,任学冬,乔海燕,等. 铁磁性材料表面残余应力巴克豪森效应的评价[J]. 无损检测, 2013, 35(6): 26-28.
- [4] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, etc. Methods of measuring residual stresses in components[J]. Mater. and Des., 2012, 35: 572-588.
- [5] PAN Q X, LI Y, BAI X G, etc. Inspecting integrity and residual stress of plate by ultrasonic wave[C]// Proceedings of 2011 International Conference on Mechatronics and Automation, 2011: 1137-1141.
- [6] YASHAR J, VAGELIS P, MEHDI A N. Using L_{CR} ultrasonic method to evaluate residual stress in dissimilar welded pipes[J]. International Journal of Innovation Management and Technology, 2013(4): 170-174.
- [7] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [8] SADEGHI S, NAJAFABADI M A, JAVADI Y, etc. Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates[J]. Materials and Design, 2013, 52: 870-880.
- [9] SONG W T, PAN Q X, XU C G, etc. Benchmark of residual stress for ultrasonic nondestructive testing[C]//2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology & Application, 2013, 73-76.

2014 全国特种设备安全与节能学术会议暨展览会征文与招展通知

由国家质量监督检验检疫总局科技委特种设备安全与节能专业技术委员会和特种设备科技协作平台共同主办、中国特检院等 50 多家特种设备检验检测机构支持的 2014 全国特种设备安全与节能科技活动周将于 2014 年 11 月 20—30 日期间在广东举行。本届科技活动周将有来自全国特种设备行业的 800 到 1000 人参加活动,其主题是“推进科技创新,引领特检未来”,旨在交流最新特检科技成果,培育科技创新环境,不断促进特检科技进步。

本届科技活动周期间将举办 2014 全国特种设备安全与节能学术会议和全国特种设备科技成果与仪器展。征文内容为在国内外杂志和学术会议上未发表的有关锅炉、压力容器、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场(厂)内专用机动车辆、大型常压储罐和大型钢结构等设备的设计、制造、安装、检验检测、使用、安全监察和节能监管等环

节的安全和节能技术研究和应用方面的论文。展览会招展范围为有关锅炉、压力容器、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场(厂)内专用机动车辆、大型常压储罐和大型钢结构等设备的设计、制造、安装和检验检测等方面的新成果、新技术、新产品和先进的检验检测仪器设备等。

本次活动周是 2014 年度我国特种设备行业一次盛大的活动,真诚邀请您踊跃投稿和参展,详细信息请登陆中国特种设备科技协作平台门户网站 www.setp.org.cn。

会议和展览秘书处联系方式:

地址:北京市朝阳区和平街西苑 2 号楼;邮政编码:100013 联系人:吴莱,张硕;电话:010-59068302,59068108;传真:010-59068113;电子邮箱:aqjyn_setp@163.com(学术会议);kjcgz_setp@163.com(科技成果展)

(中国特种设备科技协作平台)