

残余应力超声测量技术影响因素研究

徐丽霞 李伟煜 吕海清 刘战捷 李大海

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

文 摘 针对大型空间站寿命和质量进一步提高带来的残余应力精确测量问题,开展了影响残余应力测量准确性的因素和校正方法研究,在对温度、工件表面粗糙度、换能器耦合状态等原因分析的基础上,对主要影响因素引起的测量误差进行试验测定。试验结果表明:温度变化、工件表面粗糙度、换能器耦合状态等因素都可能引起较大的测量偏差,需引入温度补偿系数、表面粗糙度试块校正、优选耦合剂等修正与控制方法;有效控制影响因素,能够提高超声波检测残余应力的精准度,减小测量误差。该研究可为超声波残余应力测试技术在航天器舱体结构的应用发展提供技术参考。

关键词 残余应力, 铝合金, 临界折射纵波, 因素分析

中图分类号: TG115. 28

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.05.021

Effect Factors Study of Ultrasonic Measurement Technology of Residual Stress

XU Lixia LI Weiyu LYU Haiqing LIU Zhanjie LI Dahai

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract Aiming at accurate measurements of residual stress caused by further improvement of service life and quality of large space station, factors of affecting measurement accuracy of residual stress and calibrating methods were studied. Based on theoretical analysis of temperature, surface roughness and transducer coupling state, measurement errors caused by main influencing factors were tested. Results show that temperature variation, surface roughness and transducer coupling state may cause large measurement deviation. In order to improve ultrasonic detection accuracy of residual stress and reduce measurement errors, modification methods such as compensating temperature, correcting surface roughness sample, optimizing coupling agent should be introduced. This study can provide a technical reference for application and development of spacecraft cabin structure ultrasonic residual stress measurement.

Key words Residual stress, Aluminum alloy, LCR wave, Biaxial-residual stress

0 引言

残余应力的存在会导致焊接结构的疲劳寿命降低、尺寸稳定性差和抗腐蚀能力下降,因此我国对航天产品的残余应力检测日益重视^[1]。目前比较成熟的检测方法有X射线衍射法、中子衍射法、小孔释放法(电子散斑法、应变片法)、环芯法、切槽法等^[2-4]。超声波残余应力检测技术具有无损伤、材料组织敏感度高、检测速度快、无污染、适合现场操作和成本低等优点,成为残余应力无损检测发展方向上最有前途的技术之一^[5-6]。

本文主要分析影响超声残余应力测量的因素及各种因素的影响机理,通过试验结果总结影响规律,

然后给出相应的措施,避免这些因素给测量结果带来误差。

1 温度对应力测量的影响研究

被测物体材质为5A06铝合金,采用一发一收模式进行测量,两探头之间间距固定为40 mm,实际测试确定第一临界角折射纵波角度为27°

1.1 机理分析

固体温度的升高会引起声速的降低,因此被检产品中超声波传播速度不仅与残余应力的大小相关,还与被检产品的温度相关。关于温度对超声测量的影响,相关国内外学者都已做过深入研究并给出了温度补偿系数公式和温度补偿曲线^[7-8]。

收稿日期:2020-11-23

第一作者简介:徐丽霞,1986年出生,硕士,高级工程师,研究方向为无损检测技术。E-mail:xulixiabuaa@163.com

温度会影响超声波的传播速度,温度升高,超声波传播速度变慢,温度降低,超声波传播速度变快。根据热弹性理论,在一定温度范围内,超声波在介质中的传播速度与温度成近似的线性关系^[9]:

$$v(T) = V_0(1 - \alpha\Delta T) \quad (1)$$

此外,温度的改变将导致超声波传感器发生热胀冷缩的现象,导致超声波的声程发生变化,由原来的 L_0 变为 $L = L_0(1 + \beta\Delta T)$ 。因此温度对声时的变化量为:

$$\Delta t = \frac{L_0(1 + \beta\Delta T)}{V_0(1 - \alpha\Delta T)} - \frac{L_0}{V_0} \quad (2)$$

上述公式中, $v(T)$ 是温度为 T 情况下的声速, V_0 为基准温度下的超声波传播速度, α 为声速随温度变化的声速系数, β 为超声波传感器的热膨胀系数, ΔT 为被测材料的温度变化量, L_0 为两个探头的中心固定距离。

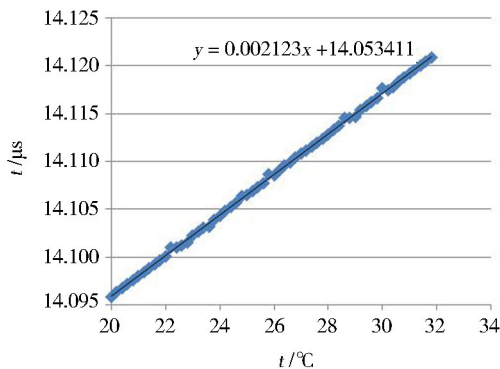


图1 5A06铝合金的60组温度的声时变化曲线

Fig. 1 Acoustic time variation curve of 60 groups temperatures of 5A06 aluminum alloy

由公式可知温差变化较大的环境下,需要消除温度对测量结果的影响,故本次试验的试验系统也引入了5A06铝合金的温度补偿,规定基准温度为22℃,将每次试验测量得到的不同温度下的声时根据温度补偿系数转化为基准温度下的声时。记录在相同测试条件下不同温度下的 $n(n=60)$ 组5A06铝合金的温度和声时

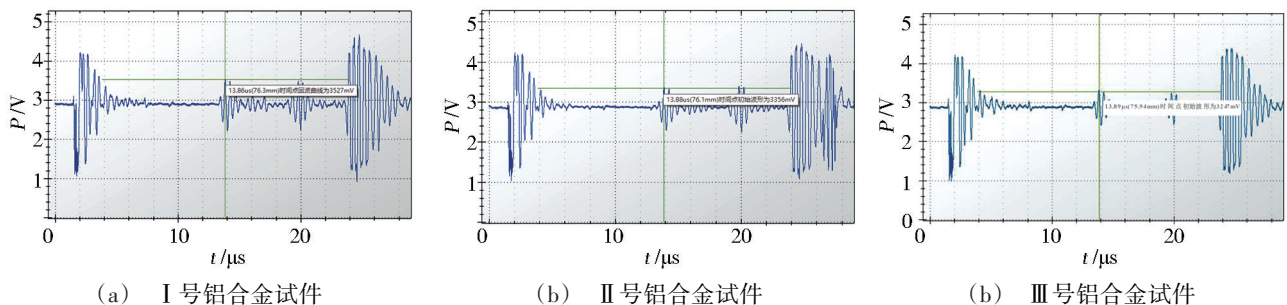


图2 三种不同粗糙度表面铝合金试件的LCR波形

Fig. 2 LCR waveform of aluminum alloy specimens with three different roughness surface

提取波形图信息见表1。试验证明,表面粗糙度不同,LCR波传播时间和波峰值不同,传播时间越短说明

数据,见图1,得到声时温度拟合曲线为:

$$t = 0.002123 T + 14.053411 \quad (3)$$

该式是在20~32℃测试条件下拟合得到的,建议该公式使用条件限于20~32℃温度范围内。

在探头中心距离为40 mm条件下,1℃的温度变化可以引起5A06铝合金残余应力测量 $2.123 \times 10^{-3} \mu\text{s}$ 的声时误差。将式(3)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。

1.2 结果分析

从计算结果可知,在固定距离为40 mm的情况下1℃的温度变化可以引起5A06铝合金残余应力测量 $2.123 \times 10^{-3} \mu\text{s}$ 的声时偏差。因此,在实际测量的结果中,应该精确测试环境温度,并进行温度矫正,才能保证超声波检测结果的精确性。

2 工件表面粗糙度对应力测量的影响研究

2.1 机理分析

LCR波在材料的近表面传播,试验件的表面粗糙度对信号传播有影响,试验件表面粗糙度越小,入射到工件中的LCR波能量就越多,LCR波的波形效果越好,而粗糙度较大时,声耦合效果变差,出现较大的侧向散射,导致LCR波声束的指向性差,降低测量灵敏度。

2.2 试验验证

加工试件为表面平面度为0.03, $Ra \leq 6.4 \mu\text{m}$ 的5A06铝合金试件,试件均分为三部分,将二、三部分用粗砂纸打磨,工件放置在窗外3 d,之后在实验室内对未经砂纸打磨的第一部分和打磨过的第二部分用清水和丙酮清洗干净,分别记为状态I、II,打磨过的第三部分留有灰尘,记为状态III,以此打造表面粗糙度不同的三种5A06铝合金试件表面粗糙度。理论上,三种表面粗糙度大小依次为:III > II > I。在三种表面进行三组试验,根据接收到的LCR波的时间和幅值判断表面粗糙度的影响,得到的波形图见图2。

LCR波传播的路径越短,LCR波峰值越大说明入射到工件中的LCR波能量就越多,声衰减越小,声耦合效果

越好。砂纸打磨过的两种状态相差 20 ns。试验证明了表面粗糙度影响 LCR 波的传播时间和能量,粗糙度越大 LCR 波的传播时间越长,能量越小。主要原因是超声波在传播过程中,表面粗糙度大的工件材料中晶粒或其他微小颗粒对声波的散射,被散射的超声波一部分可能最终变为热能,降低超声波幅值。

表 1 三种不同表面粗糙度下的 LCR 波信息

Tab. 1 LCR waveform information of three different roughness surface

粗糙度状态	传播时间/ μs	传播距离/mm	LCR 波波峰电压/mV
I	13.86	76.1	3527
II	13.88	76.1	3356
III	13.89	76.1	3247

结合实际工程应用考虑,测量原材料和精密加工后不同表面粗糙度状态下的 LCR 波信息,根据接收到的 LCR 波的时间和幅值测定表面粗糙度的具体影响。两种原材料的表面状态如实物图 3 所示,可以看出,(a)图的原材料表面较为光滑,此状态记为状态 IV,为而(b)图的原材料表面状态较差,此状态记为状态 V。再选择之前试验所用的表面平面度为 0.03, R_a 为 6.4 μm 的 5A06 铝合金试件,即状态 I。三种状态下得到的 LCR 波信息见表 2。

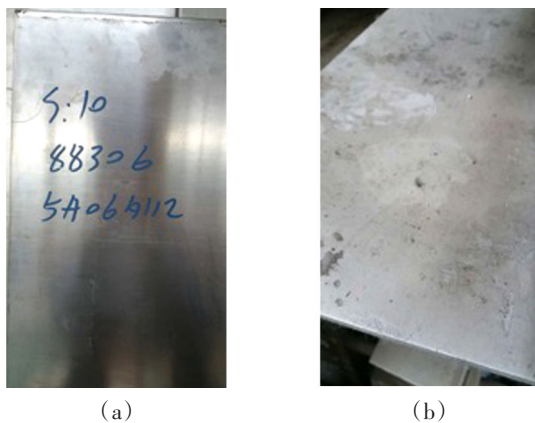


图 3 原材料表面状态实物图

Fig. 3 Photos of raw material surface

表 2 不同原材料表面得到的 LCR 波信息

Tab. 2 LCR waveform information of different roughness surface

粗糙度状态	传播时间/ μs	传播距离/mm	LCR 波波峰电压/mV
I	13.86	76.1	3527
IV	13.86	76.1	3477
V	13.88	76.2	3052

2.3 结果分析

试验表明,表面状态较差的原材料与精密加工后两种状态 LCR 波传播时间相差 20 ns,约 48.8 MPa

的应力变化。因此表面状态声对耦合效果具有较大的影响,进一步影响到超声波的传导,从而影响 LCR 波声束的指向性以及测量的灵敏度。

考虑以上分析结果,为了避免粗糙度不同带来的试验误差,采取超声波探伤常用的对比试件的方法,制作一系列已知表面粗糙度的标准样件进行表面粗糙度影响因子校正,分别测量标准样件在基准温度(22 $^{\circ}\text{C}$)下的初始声时,统计整理并记录在册,测量具体待测件时,先与标准件的粗糙度一一比对,然后调用与标准件粗糙度一致的初始声时数据。

3 耦合状态对应力测量的影响研究

3.1 机理分析

超声耦合状态可用超声波在检测面上的声压往复透过率表征。超声耦合好则声压往复透过率高。当换能器和待测件之间有很薄的一层空气时,声压往复透过率也几乎达到 0%,因此,接触法超声检测排除换能器和待测件之间的空气尤为重要。为了改善换能器和待测件之间声能的传递而加在换能器和检测面之间的液体称为耦合剂,耦合剂的主要作用是填充换能器与待测件间的空气间隔,从而使超声波有效地传入,耦合剂在超声残余应力检测中有重要影响。

3.2 耦合剂的选择

从声传递角度来说,耦合剂的选择应遵循声阻抗匹配和低衰减的原则,从实用性角度来说,还应具有对人体无害、对试件无腐蚀性、成本低廉等特点,几种常用耦合介质的声学性能参数见表 3。

表 3 常用介质的声学性能参数

Tab. 3 Acoustic performance parameters of common media

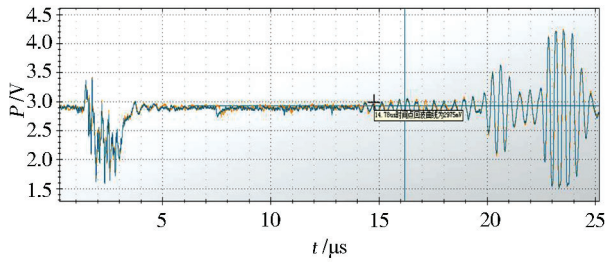
耦合介质	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	声速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	声阻抗/ $10^5\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	衰减系数/ $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$
水	1	1483	14.8	0.444
机油	0.95	1250	19.23	330
甘油	1.26	1923	24.3	0.27
空气	0.0012	330	0.004	11

由表 3 可知,甘油是常用耦合剂中声阻抗最高的,机油是声衰减率最小的,所以选择机油和甘油进行耦合效果的对比试验,择优作为残余应力检测的耦合剂。试验时在 LCR 波换能器上放置了相同质量的压块,在两种耦合条件下得到的 LCR 波形图如图 4 所示。由图 4 可知,机油和甘油作为耦合剂时,接收到的 LCR 波声时不同,相差 440 ns,所以试验过程中一定要保持耦合剂的统一。

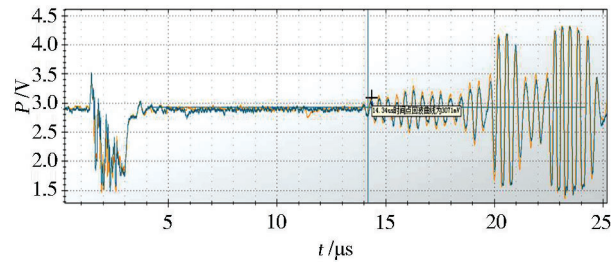
机油作为耦合剂时接收到的 LCR 波传播峰值 2 975 mV,甘油作为耦合剂时接收到的 LCR 波传播峰值 3 071 mV,说明甘油作为耦合剂时 LCR 波衰减较

小。LCR波的能量相比于其他波(纵波、横波等)的能量较低,能量低则波形效果不明显,因此,试验过

程中选择甘油作为耦合剂,以便更准确的提取LCR波信息。



(a) 机油作为耦合剂



(b) 甘油作为耦合剂

图4 机油和甘油作为耦合剂时LCR波波图形

Fig. 4 LCR waveform with engine oil and glycerin as coupling agent

3.3 耦合强度

耦合强度为固定耦合剂数量的条件下换能器的压实程度。通过在换能器上加不同质量的砝码来反映耦合强度的大小。

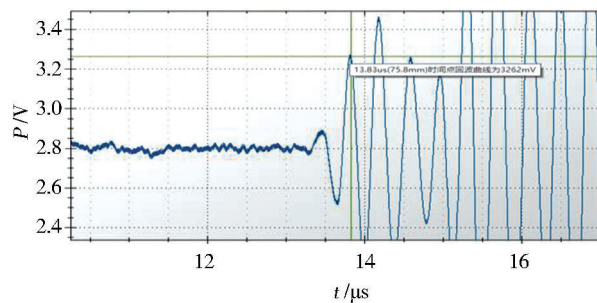
选择甘油作为耦合剂,进一步研究耦合强度对

LCR波形效果的影响。试验在LCR波换能器上放置四组不同质量的砝码,砝码质量1 kg,砝码个数分别为0、1、2、3个,耦合剂数量统一用滴管滴取2滴,操作见图5。四组不同质量压块条件下得到的LCR波形图见图6。

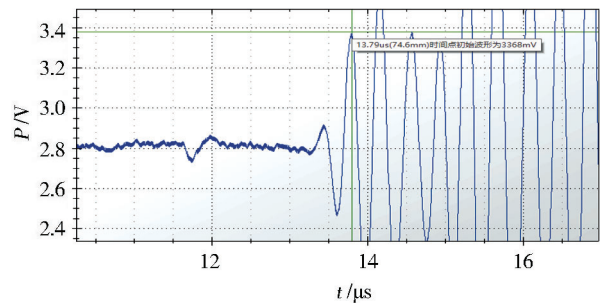


图5 LCR波换能器上放置压块操作图

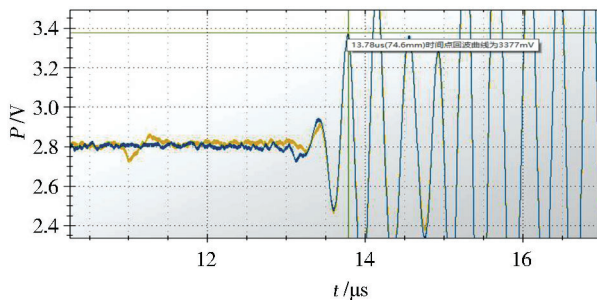
Fig. 5 Operation diagram of LCR transducer with different pressure block



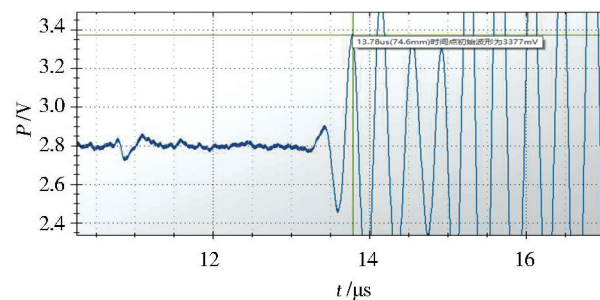
(a) 未加压块



(b) 加1 kg压块



(c) 加2 kg压块



(c) 加3 kg压块

图6 加不同质量压块的LCR波形图

Fig.6 LCR Waveform with different weight block

提取图中的LCR波信息,见表4。分析表4数据可知:甘油作为耦合剂,耦合强度不同LCR波的接收时间有差别,压块质量大则传播时间短,传播时间的不同说明不同压块质量下,换能器与待测件之间的耦合剂厚度不同,从而波的传播距离有所差别。未加压块与加1 kg砝码的压块传播时间差别很大,相差40 ns,即97.6 MPa;1和2 kg的压块对比LCR波传播时间变化不大,有10 ns的变化,即24.4 MPa;2和3 kg的压块对比LCR波传播时间和传播距离都不再变化,说明在2 kg质量的压块下,换能器与待测件之间的耦合剂被压实。耦合强度不同对LCR波的幅值也有影响,压块的质量越大,LCR波的幅值越大,即LCR波衰减越小,换能器与试件的耦合效果越好。

结合实际工程应用考虑人工操作带来的测量误差问题,对超声探伤工作者和非专业人员在操作过程中因耦合强度引起的测量误差进行了对比试验,两人分先后测量5个做好标记的测量点,记录声时数据,见表5。取5组应力差值的平均值9.7792 MPa作为结果。

表4 不同耦合强度下的LCR波信息

Tab. 4 LCR waveform information with different coupling strength

压块质量 /kg	传播时间 / μ s	传播距离 /mm	LCR波波峰电压 /mV
0	13.83	75.8	3262
1	13.79	74.6	3368
2	13.78	74.6	3377
3	13.78	74.6	3377

表5 不同人测量的操作偏差

Tab. 5 Operational deviations by different operators

超声探伤工作者测量的声时/MPa	非专业人员测量的声时/MPa	应力差值 /MPa
14.09653	14.09213	10.736
14.09607	14.09260	8.466
14.09731	14.09393	8.247
14.09725	14.09281	10.833
14.09737	14.09302	10.614

3.4 结果分析

试验结果表明,超声探伤工作者和非专业人员在操作过程中因耦合强度引起的测量误差约为10 MPa,有必要在试验过程中统一耦合强度。综合考虑以上影响因素分析结果,为了避免人工操作带来的测量误差,试验最终的耦合条件为:耦合剂类型为甘油,用量为2滴,选择用滴管滴取,加载质量为2 kg。

4 双向应力测试

按照校正后的影响因素参量,采用超声临界纵

波测试双向拉伸载荷条件下的双向应力系数,以应力为横坐标、声时差为纵坐标的曲线拟合如图7所示。

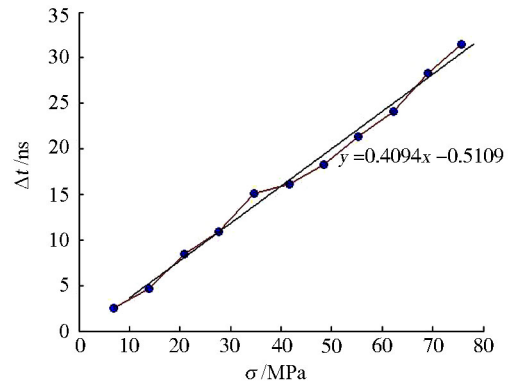


图7 平行加载方向测量的双向应力系数标定图

Fig. 7 Calibration diagram of bidirectional stress coefficient measured in parallel loading direction

由图7可知,应力与声时差之间存在良好的线性关系,拟合得到双向应力系数 $K_B=2.94$ MPa/ns。根据超声测量得到的声时差,计算得到超声波实测的应力值。以拉力值为横坐标,分别以应变片计算的应力值和超声测量应力值为纵坐标进行曲线拟合,结果见图8。可知,两者斜率只相差 6×10^{-3} ,截距仅相差1.257,说明标定的平行加载方向双向应力系数线性度良好,超声测量结果与真实应力值最大偏差小于4 MPa。

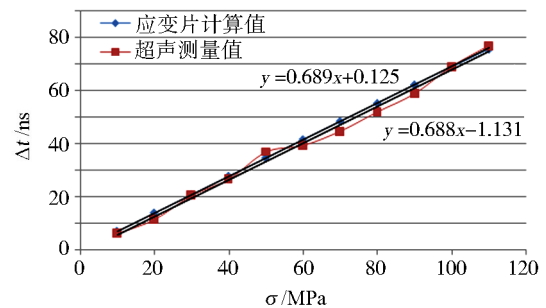


图8 应变片计算应力与超声测量应力对比图

Fig. 8 Comparison diagram of strain gauge calculation stress and ultrasonic measurement stress

5 结论

(1)温度高则LCR波声时增加,温度低则LCR波声时减小,通过60组不同温度下的声时数据,计算得到了5A06铝合金的温度补偿系数,试验结果表明,1℃的温度变化可以引起5A06铝合金残余应力测量 $2.119 \times 10^{-3} \mu$ s的声时偏差,依据试验结果在试验系统中引入了温度补偿系数。

(2)在相同温度、耦合状态条件下,通过三组不同表面粗糙度下换能器接收到的LCR波信息的试验,证明了表面粗糙度越大,LCR波传播时间越长、

能量越小。结合实际工程应用考虑,测量原材料和精密加工后两种表面粗糙度状态下的LCR波信息,两种状态下LCR波传播时间相差20 ns,约48.8 MPa的应力变化,工程应用需要制作一系列已知表面粗糙度的标准样件进行表面粗糙度影响因子校正。

(3)通过实验室常用耦合剂,机油和甘油接收到的LCR波信息的对比试验,证明了甘油作为耦合剂时LCR波的衰减比机油时小;在相同温度、表面粗糙度的条件下,通过不同耦合强度下的试验,证明了耦合强度在一定范围内影响LCR波的传播声程,超声探伤工作者和非专业人员在操作过程中因耦合强度引起的测量误差约为10 MPa,必须在试验过程中统一耦合强度。

对以上影响因素进行校正后,进行双向加载条件下平面双向应力测试,测试结果显示标定的平行加载方向双向应力系数线性度良好,超声测量结果与真实应力值最大偏差小于4 MPa。测试结果说明控制影响因素在合理范围,能够有效提高超声波检测残余应力的精准度,减小测量误差。

参考文献

[1] 刘战捷. 无损检测技术在载人航天工程中的应用 [R]. 宇航材料工艺, 2015(增刊1):1-4.

LIU Zhanjie. Application of nondestructive testing technology in aerospace engineering [R]. Aerospace material technology, 2015(Z1):1-4.

[2] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al.

Methods of measuring residual stresses in components [J]. Mater, and Des., 2012(35):572-588.

[3] 李晨, 楼瑞祥, 王志刚. 残余应力测试方法的研究进展 [J]. 材料导报. 2014, 28(24):153.

LI Chen, LOU Ruixiang, WANG Zhigang. Research progress of residual stress testing methods [J]. Material Guide. 2014, 28(24):153.

[4] LUAN Z J, ZHU C L. Residual stress analysis in Al-50Si alloy after laser beam welding by X-ray diffraction [J]. Material Research Innovations, 2014, 18(1):27-32.

[5] JAVADI Y, HIOCH S. Employing the LCR waves to measure longitudinal residual stresses in different depths of a stainless steel welded plate [J]. Adv. Mater. Sic. Eng., 2013: 187-189.

[6] DONE. Bray, WEI Tang. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the LCR ultrasonic wave [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 207(2):231-240.

[7] 舒雄. 极限折射纵波检测钢轨温度应力的理论研究及应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.

SHU Xiong. Theoretical study and application of limiting LCR wave to detect temperature stress of seamless rail [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006.

[8] YASHARJavadi. Nondestructive evaluation of welding residual stresses in dissimilar welded pipes [J]. Nondestruct Eval, 2013(32):29-32.

[9] 徐浪, 潘勤学, 宿亮. 焊接残余应力超声无损检测技术 [J]. 计测技术, 2012, 32(6):231-240.