

本文参考文献引用格式 赵佳佳,戴忠晨,火巧英,等.表面耦合状态对 A7N01 铝合金残余应力检测误差的影响[J].电焊机,2018,48(03):163-166.

表面耦合状态对 A7N01 铝合金 残余应力检测误差的影响

赵佳佳¹,戴忠晨¹,火巧英¹,孟宪伟¹,朱忠尹²,祝鹏飞²

(1.中车南京浦镇车辆有限公司,江苏南京 210031;2.西南交通大学材料科学与工程学院,四川成都 610031)

摘要 超声波法检测轨道车辆残余应力时,由于被检测部位的表面附着物、表面粗糙度、表面弧度的差异会造成检测结果出现很大误差,这对有效评判被检测部位的残余应力峰值及分布会产生很大影响。基于上述考虑,以轨道车辆常用的 A7N01 铝合金为研究对象,从表面附着物、表面粗糙度、表面弧度 3 个方面系统研究表面耦合状态对残余应力检测误差的影响。结果表明,表面存在圆弧过渡时,应采用修正后的圆弧探头;使用砂纸对喷砂面适度打磨,可以提高超声法应力测试精度,但过度打磨会破坏喷砂层或者形成新的附加机械应力层,对测试结果产生明显影响。超声法可对涂装油漆件直接进行应力测试,油漆层对 t_0 影响极其明显,但 K 值与第一临界入射角影响不大,所以必须修正 t_0 大小。

关键词 表面耦合;A7N01 铝合金;残余应力;表面弧度;表面粗糙度;表面附着物

中图分类号 TG457.14;TG404 **文献标志码** A **文章编号** 1001-2303(2018)03-0163-04

DOI 10.7512/j.issn.1001-2303.2018.03.30

Effect of surface coupled state on detection errors of residual stress of A7N01 aluminum alloys

ZHAO Jiajia¹, DAI Zhongchen¹, HUO Qiaoying¹, MENG Xianwei¹, ZHU Zhongyin², ZHU Pengfei²

(1.CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, China; 2.School of Material Science and Engineering, South-west Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract The surface radius, surface roughness and surface adhesive materials will affect the detection errors of residual stress of the components when the vehicles were under ultrasonic wave residual stress detection, then the detection results will affect the residual stress distribution and peak value greatly. This paper is focused on the research of the effect of surface radius, surface roughness and surface adhesive materials of A7N01 aluminum alloys. The results showed that the arc probes should be adopted when the surface was in the circular arc transition. The abrasive papers should be used to polish the sandblasted surface and it would promote the detection precision but the detection results would be affected if the surface was in excessive polished and formed additive stress layer and destroyed the surface. The painting coating could be detection directly and the painting layer did not affect the first critical incident angle greatly but affect the t_0 greatly. So the t_0 must be amended.

Key words surface coupled; A7N01 aluminum alloys; residual stress; surface radius; surface roughness; surface adhesive materials

收稿日期:2018-01-19

基金项目:城轨车辆铝合金车体焊接残余应力检测标准技术研究(KJ 16-67 C048)

作者简介:赵佳佳(1986—)男,学士,高级工程师,主要从事轨道车辆总体工艺的研究工作。E-mail:15996479135@139.com。

0 前言

残余应力是影响轨道车辆服役安全可靠性的的重要因素。研究发现^[1]，以铝合金为主要材料的轨道车辆，其关键结构的残余应力峰值可达 146.3 MPa。过大的残余拉应力会导致车辆结构产生裂纹扩展，过大的残余压应力会导致车辆结构失稳变形。因此，获得车辆结构关键部位准确的残余应力分布状态及峰值非常必要^[2-4]。超声波法是目前测量车辆结构残余应力的有效方法，但是超声波对被测工件表面的状态较为敏感，如表面弧度、表面粗糙度、表面附着物等都会影响测试精度，造成较大的测试误差^[5]。

在此以 A7N01 铝合金为研究对象，分别从表面附着物、表面粗糙度、表面弧度 3 个方面分析研究表面耦合状态对残余应力测试误差的影响。

1 规则表面弧度对临界折射纵波测试结果的影响

圆柱体或者球体的测试平面称为规则的表面弧度。已有学者研究了在稳定固定状态下，LCR 波对平面状态下工件残余应力的影响测试^[6-7]。

在平面状态下 LCR 波应力测试的第一临界折射角如图 1 所示，并根据 Snell 定律确定

$$\frac{\sin\theta}{V_1} = \frac{\sin\theta_s}{V_{2s}} = \frac{\sin\theta_L}{V_{2L}} \quad (1)$$

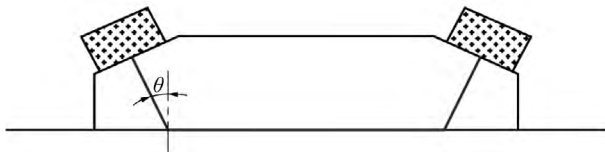


图 1 临界折射纵波圆柱面中声波传播路径

如果产生 LCR 波，即 $\theta_L=90^\circ$ ，则入射角计算方程为

$$\theta = \arcsin\left(V_1 \cdot \frac{\sin 90^\circ}{V_{2L}}\right) \quad (2)$$

研究材料为 A7N01，固定超声换能器的材质为有机玻璃楔块，LCR 波在有机玻璃中的传播速度约为 2730 m/s，在铝合金中的传播速度约 6700 m/s，代入式(2)可以得出第一临界入射角值为 24.05°。

在实际残余应力测试中，需要制作一个有机玻璃楔块，该楔块可以保证在圆弧面工件测试过程中的耦合状态良好。临界折射纵波圆柱面中声波传播路径如图 1 所示，在圆弧面工件应力测试过程中，通过作切线的法线方法，根据 Snell 定律得出第一临界入射角，在测试过程中为了保证耦合状态的稳定，需

根据工件本身直径制作出不同曲率半径的有机玻璃楔块。

圆弧面 k 值标定很重要，因为实际生产实践中的实验条件很复杂，进行标定的成本很高，难以满足工程应用中高效与便于操作的要求。不管测试的是平行面还是圆弧面，声波传播的实际距离均为射入点、射出点与测试界面的结合处，即 LCR 波是平行沿测试表面进行传播。因此为降低标定难度，提高实际测试中的标定效率，可以用平板探头来替代圆弧探头的标定。临界折射纵波平面中声波传播路径如图 2 所示。

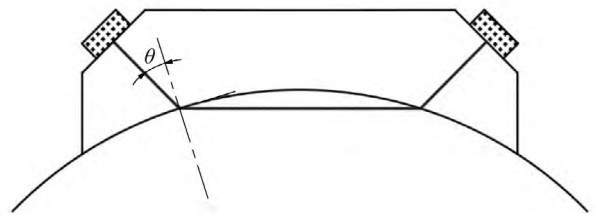


图 2 临界折射纵波平面中声波传播路径

2 表面粗糙度对临界折射纵波测试结果影响

在测试材料上切取拉伸试样，具体尺寸按照标准 ASTM B557-10 进行制备，然后对试样进行喷砂处理。实验过程中采集到的测试波形如图 3 所示。利用 X 射线法分别测试喷砂最后两次打磨态、未打磨、母材的残余应力，得到每种测试波形状态下的临界折射纵波相对母材初始状态的传播时间，测试结果如表 1 所示。

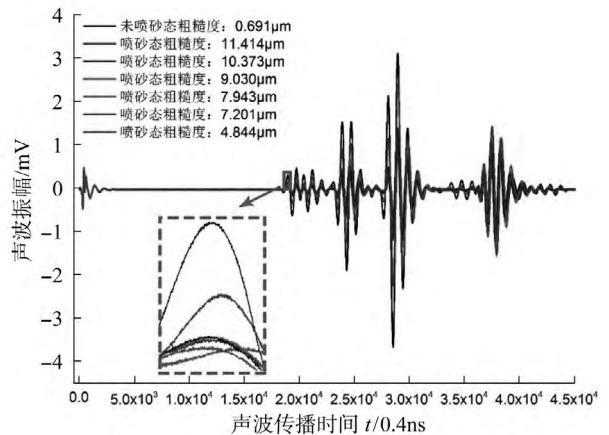


图 3 不同粗糙度超声初始信号对比

由表 1 和图 3 可知，当试件打磨次数为 0~240 次，次数为 60 次时超声波的传播时间 t 发生很大

表 1 不同打磨次数后声波传播时间及粗糙度

打磨次数 /次	粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	声波传播时间 t/ns	残余应力 σ/MPa
0	11.414	-8.4	-130.54
60	10.373	36.4	—
120	9.030	-10.4	—
180	7.943	-10.0	—
240	7.201	-10.8	-137.95
300	4.844	4.8	50.52
未喷砂	0.691	0	74.21

变化,而周围几个打磨态声波传播时间 t 与表面粗糙度均无明显变化,整体趋势较为稳定。当打磨次数超过 240 次,超声传播时间 t 与残余应力值发生明显变化,并且随着打磨次数的增加,声波的幅值整体呈现上升趋势。60 次打磨状态下数值突变的原因可能是超声测试反应很敏感,位置换过后造成耦合状态的不一致,出现明显的误差。

母材的轧制工艺直接决定未喷砂处理的表面应力状态。实验中选取的母材原始应力为 74.21 MPa,喷砂之后形成的应力值为-130.54 MPa。当打磨次数由 240 次增加到 300 次后,表面粗糙度明显下降,并且表面的应力由压应力变为拉应力,LCR 波相对于母材的传播时间也由负值变为正值,说明打磨量较多时会对打磨面造成额外的附加机械应力或者破坏压应力层。

分析测试结果可知,粗糙度在 10 μm 以内没必要对试样进行机械打磨。虽然可以通过打磨降低测试面粗糙度,但这是因为轻微的打磨并未破坏喷砂的压应力层,而过度的打磨极易破坏表面压应力层或者形成附加机械应力层,从而对测试数据造成明显影响。在实际测试过程中,手动打磨方式的打磨量很难把握。

3 表面附着物对 LCR 波测试结果影响

切取 A7N01P-T4 试验材料,其中一件未涂装油漆,一件涂装油漆。试验过程中采用的探头频率分别为 2.25 MHz、3.5 MHz、5 MHz 和 10 MHz。其中选取探头频率为 5 MHz 分别对未涂装油漆件与涂装油漆件进行 K 值标定拟合。

根据声波传播原理可知,超声波可以通过油漆层,但油漆层的厚度势必对第一临界角与初始传播速度产生影响。未涂装油漆样与油漆样在 2.25 MHz、3.5 MHz、5 MHz 和 10 MHz 试验条件下的计算如表 2

所示,在 5 MHz 探头下标定拟合的 K 值如图 4 所示。

表 2 涂装油漆件与未涂装油漆件传播时间 t_0

探头频率 f/MHz	涂装油漆件传播时间 t_0/ns	未涂装件传播时间 t_0/ns
2.25	108.8	0
3.5	115.2	0
5.0	124.0	0
10.0	130.4	0

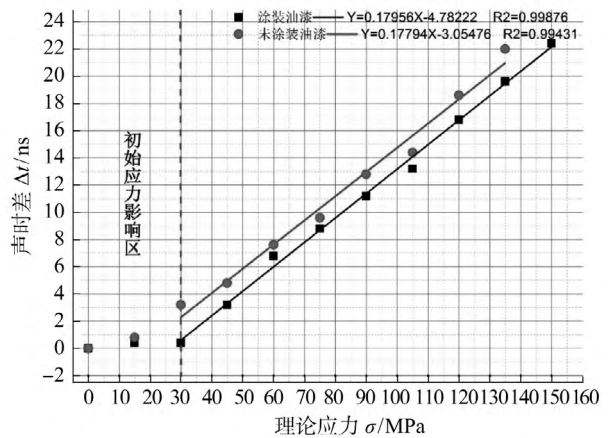


图 4 油漆件与未涂装油漆件

由表 2 可知,在理想实验条件下,即试样与油漆接触面状态良好、无其他缺陷,根据超声波在油漆中传播原理可知,油漆其实充当了传播路径以提高超声波的传播时间,因为随着路径的增大,超声波初始状态下的传播时间 t 肯定会发生变化。

在超声波探头频率由 10 MHz 降至 2.25 MHz 的过程中,声波传播时间呈持续减小趋势,这是因为频率越小,所测得的深度就越大,油漆层表面的厚度影响就会很小。以国内常用的底架为例,在没有添加防火材料的情况下,底架油漆层的厚度为 240 μm ,实际防火涂料深度约为 1 000 μm ,可得出超声波传播路程的增加量为 480~2 000 μm ,通过查阅相关资料,LCR 纵波在油漆中的传播速度约为 3 000 m/s,通过以上数据可计算出超声波初始时间的增加范围为 160~668 ns。

由图 4 可知,未涂装油漆试样和涂装油漆试样的应力常数 K 值相差仅为 0.9%, K 值受油漆层影响相对很小,根据式(3)

$$d\sigma = \frac{E}{L_{11}t_0} dt = K dt \quad (3)$$

K 值会受 LCR 波状态下 t_0 的影响,但影响很小。本研究中收发换能器之间的距离为 30 mm,预估油

漆层厚度为 240~1 000 μm ,若考虑传播速度的差异性 t_0 相对无油漆层状态的变化仅为 1.5%~12.7% ,若不考虑差异性 t_0 相对无油漆层状态下的变化范围为 0.8%~6.7% 。最后限定油漆层较薄且低于 400 μm ,因 K 值受到油漆层的影响变化率在 5% 范围以内 ,所以不考虑修正应力常数 K 。

若超声波在有机玻璃块与涂装油漆层中的传播速度差异明显 ,需修正第一临界入射角。但本研究并不考虑超声波在油漆层界面的折射情况 ,因为超声在油漆层和有机玻璃块中传播速度大小几乎相同。但实际生产中并非所有种类的油漆都具有声透性 ,对其进行超声检测时不用涂装这类油漆工件。

3 结论

(1)在残余应力测试中 ,若测试的是圆弧面 ,则必须根据测试工件的具体直径制作出不同曲率半径的有机玻璃楔块 ,使得耦合状态处于稳定状态。

(2)利用砂纸对喷砂面进行适度范围内的打磨来提高超声法应力测试精度 ,但若打磨过度则会破坏喷砂层或者形成附加的机械应力层 ,对测试结果产生巨大影响。

(3)由于超声波能直接穿过油漆层 ,所以可以直接对其进行应力测试 ,油漆层对 t_0 影响极其明

显 ,但 K 值对第一临界入射角的影响不大 ,必须修正 t_0 大小。

参考文献 :

- [1] 苟国庆,黄楠,陈辉,等. X射线衍射法测试高速列车铝合金车体残余应力[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(4): 618-622.
- [2] 苟国庆,于金朋,张立民,等. 铝合金车体结构焊接残余应力研究[J]. 电焊机, 2011, 41(11): 35-38.
- [3] 路浩,马子奇,刘雪松,等. 300 km/h 高速列车车体残余应力超声波无损测量[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 29-32.
- [4] 路浩,刘雪松,孟立春,等. 高速列车车体服役状态残余应力超声波无损测量及验证[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 81-83.
- [5] 朱其猛. 临界折射纵波(LCR)应力测试修正方法与机理研究[D]. 四川:西南交通大学, 2017.
- [6] Qimeng Zhu, Jia Chen, Guoqing Gou et al. Residual Stress Measurement and Calibration for A7N01 Aluminum Alloy Welded Joints by Using Longitudinal Critically Refracted (LCR) Wave Transmission Method[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016(25): 4181-4189.
- [7] Qimeng Zhu, Jia Chen, Guoqing Gou et al. Ameliorated Longitudinal Critically Refracted-Attenuation Velocity Method for Welding Residual Stress Measurement[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017(246): 267-275.

Page 152 

场强度因子越大。

(3)缺陷容限尺寸与应力水平存在必然关系 ,随着应力水平的增加 ,缺陷容限尺寸明显降低。

参考文献 :

- [1] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 四川:西南交通大学出版社, 2008.
- [2] 杨亚强. 转向架焊接构架疲劳强度研究[D]. 四川:西南交通大学, 2010.
- [3] 王文静,刘志明,李强,等. CRH2 动车转向架构架疲劳强度分析[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 5-9.

- [4] 张乐乐,李培,刘晨. 焊接缺陷对转向架强度的影响[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 67-72.
- [5] 张俊清. 高速列车空心车轴表面裂纹应力强度因子研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [6] INSTITUTION BRITISH STANDARD. Guide to fatigue design and assessment of steel products [S]. BS 7608-2014. BSI Standards Limited, 2014.
- [7] 日本钢结构协会. 钢结构疲劳设计规范及说明[M]. 日本:技报堂出版, 1993.
- [8] 日本铁路车辆工业协会. JIS E 4207-2004 ,铁路车辆—转向架—转向架构架设计通则[S].