

钛合金焊接接头残余应力 超声波检测技术研究*

丁稳稳^{1,2}, 刘继雄³, 刘 晶^{1,2}, 张永强³,
王小翔³, 高晓龙^{1,2}, 王 俭³

- (1. 宝鸡文理学院 机械工程学院, 陕西 宝鸡 721016;
2. 陕西省机器人关键零部件先进制造与评估省市共建重点实验室, 陕西 宝鸡 721016;
3. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘 要: 针对钛合金无磁特性导致的超声残余应力测试结果不准确问题, 设计了超声楔块贴合辅助装置, 研究了超声楔块贴合辅助装置对超声信号采集的影响规律, 并对 TC4 钛合金激光焊接试板残余应力分布特征进行了测量。试验结果显示, 采用超声楔块贴合辅助装置后, 超声楔块与钛合金表面耦合稳定性大幅提高, 获得的钛合金焊接接头应力测试结果与小孔法测试结果基本一致。研究表明, 超声楔块贴合辅助装置设计合理、实用性强。

关键词: 钛合金; 焊接残余应力; 无损检测; 超声波法

中图分类号: TG404

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.06.005

Research on Ultrasonic Testing Technology of Residual Stress in Titanium Alloy Welded Joints

DING Wenwen^{1,2}, LIU Jixiong³, LIU Jing^{1,2}, ZHANG Yongqiang³,
WANG Xiaoxiang³, GAO Xiaolong^{1,2}, WANG Jian³

- (1. School of Mechanical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Evaluation of Robot Key Components, Baoji 721016, Shaanxi, China; 3. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, Shaanxi, China)

Abstract: To solve the inaccuracy of ultrasonic residual stress test results caused by the non-magnetic characteristic of titanium alloy, an ultrasonic wedge fitting auxiliary device was designed. The influence of the ultrasonic wedge fitting auxiliary device on the ultrasonic signal acquisition was studied, and the residual stress distribution characteristic of TC4 titanium alloy laser welded the was measured. The experiment results show that the coupling stability between the ultrasonic wedge and the coupling stability between the ultrasonic wedge and the titanium alloy surface was elevated significantly when the ultrasonic wedge fitting auxiliary device was used. The stress test results of the titanium alloy welded joint are basically consistent with blind hole method. These results shows that the ultrasonic wedge fitting auxiliary device is reasonable and practical.

Key words: titanium alloy; welding residual stress; non-destructive testing; ultrasonic method

* 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金“钛/钢异种金属超声辅助双光束激光熔焊-熔钎焊双界面调控及成形机制研究”(项目编号51905006); 陕西省重点研发计划“航空航海用钛合金大厚板高速高质超声辅助激光填丝焊关键技术及设备研发”(项目编号2021GY-322); 宝鸡文理学院研究生创新科研项目“残余应力超声波检测关键技术研究”(项目编号YJSCX21YB25)。

0 前 言

TC4 钛合金具有轻质高强、耐腐蚀性能好等优良特性，被广泛应用于船舶、航空航天、石油化工等诸多领域^[1-3]。随着工业技术的不断发展，钛合金焊接结构应用日益增加，但焊接的局部快速加热冷却特性，极易在构件中产生较高的残余应力^[4-5]。在服役过程中高的残余应力会显著降低钛合金构件的强度及整体稳定性，造成重大经济损失甚至伤亡性事故^[6]。因此准确测量钛合金焊接构件的残余应力，对其服役安全至关重要。

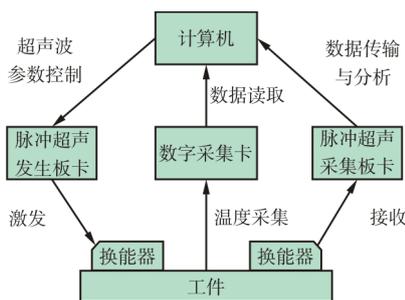
目前残余应力检测方法根据其对构件破坏程度差异可分为破坏性的机械法（小孔法、裂纹柔度法等）和无损的物理法（超声波法、X 射线法、磁测法等）。其中机械法是通过去除被测构件部分区域材料，释放被去除区域应力，测量因应力释放导致构件产生的应变，计算出残余应力的大小。物理法是采用 X 射线、超声波等信号，检测由于外加应力导致的晶格畸变及传播声速的变化，从而计算残余应力值。相比机械残余应力测试方法，物理法不会对构件产生任何损伤，在精密、贵重、大型设备制造及服役过程中的应力检测中具有独特优势，成为目前残余应力测试研究的热点^[7-9]。超声波法具有穿透性强、操作简单、无辐射等优

点，克服了 X 射线测量深度浅、操作复杂等问题，已被广泛应用于机车车轮、石油管道等领域^[10-13]。针对钢等磁性材料，超声楔块主要采用磁铁进行固定吸附，而钛合金无磁特性使得超声楔块与待测表面无法用磁铁固定，导致检测结果漂不稳定，检测难度较高。

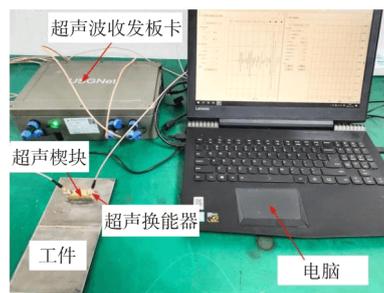
本研究针对钛合金无磁特性引发的超声残余应力测试结果不准确的问题，设计了超声楔块贴合辅助装置，并对其实用性进行了验证，以期提升钛合金残余应力超声波检测结果的稳定性。

1 超声波残余应力检测原理

超声波残余应力检测系统原理及实物如图 1 所示。图 1 (a) 所示为超声波残余应力检测原理图，通过计算机控制超声波发射板卡激发超声波换能器，将超声波导入被测材料，超声波接收板卡对超声回波信号进行采集并将数据传输到计算机做分析计算，结合声时差与应力之间的对应关系即可计算出被测材料内部残余应力的大小^[14]。根据超声波应力检测系统原理图自主搭建的超声波残余应力检测平台如图 1 (b) 所示，其最大激励电压 400 V，采样频率 100 MHz，最大增益 100 db，并设有收发分离、收发一体两种检测模式。



(a) 原理框图



(b) 实物图

图 1 超声波残余应力检测系统

图 2 所示为超声临界折射纵波（LCR 波）产生示意图。根据 Snell 定律，当超声波以一定入射角进入被测材料时，会使折射纵波的折射角达到 90°，此时产生的折射纵波被称为临界折射纵波。因超声 LCR 波对于材料内部的残余应力变化表现出较好的敏感性，所以现阶段

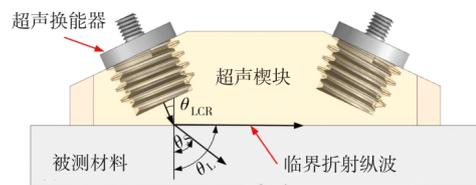


图 2 LCR 波产生示意图

段的超声波法大多采用 LCR 波进行残余应力测量^[15-16]。

根据声弹性原理，超声折射纵波在应力方向上进行传导时，其声速会受到传导区域内应力的影响而发生变化，变化之后的声速^[17]为

$$v^2=v_0^2(1+k\sigma) \quad (1)$$

式中： v ——有应力时的折射纵波声速，m/s；

v_0 ——无应力时折射纵波的声速，m/s；

σ ——应力，正值为拉应力，负值为压应力，MPa；

k ——声弹性系数。

对式(1)做近似线性处理，可得临界折射纵波声速随残余应力变化关系^[18]

$$\Delta v = \frac{kv_0}{2} \Delta \sigma \quad (2)$$

式中： Δv ——声速变化量，m/s；

$\Delta \sigma$ ——应力变化量，MPa。

式(2)中参数 k 和 v_0 为常量，测量超声波波速变化即可计算出应力值。但精确测量临界折射纵波声速的微小变化难以实现，实际应力测量时通常将超声波在固定传播距离 L 的内传播时间变化来反应声速的变化。将其代入式(2)中，可推导出

$$\Delta \sigma = -\frac{2}{kt_0} \Delta t \quad (3)$$

将 $-\frac{2}{kt_0} \Delta t$ 简化为应力系数 K ，可得到

$$\Delta \sigma = K \Delta t \quad (4)$$

式中： t_0 ——无应力时临界折射纵波在传播距离 L 内传播的时间；

$\Delta \sigma$ ——应力变化量，MPa；

Δt ——因应力引起超声临界折射纵波在传播距离 L 内的传播时间变化量，ns。

从超声临界折射纵波残余应力测量公式简易推导过程来看，超声波固定传播距离 L 对应应力检测结果影响极大。若传播距离 L 发生改变，应力检测结果随之变化，不仅难以反映超声临界折射纵波的声速变化，还会直接影响检测结果的精度。

钛合金的无磁特性导致超声楔块与被测材料表面的贴合状态稳定性大幅降低，耦合剂厚度的轻微变化将导致固定传播距离 L 发生变化，降低超声波残余应力测量结果的准确性。

2 试验设计

2.1 试验材料与方法

焊接材料选用 100 mm×100 mm×4 mm 的退火态 TC4 钛合金薄板，采用对焊形式进行激光焊接。焊接试验使用 nLIGHT-alta-TM 光纤激光器，其最大功率 6 000 W，波长 1 080 nm，光纤直径 200 μm，焦距 300 mm，整个焊接过程采用氩气进行保护。本次焊接所用激光功率 4 000 W，焊接速度 1 200 mm/min，离焦量 0 mm。激光焊接试验装置如图 3 所示。



图 3 激光焊接试验装置

残余应力测量之前，采用 80#、280#、600#、1000#、1500# 砂纸对焊接接头表面进行打磨，加工出平整光滑的待测面以满足应力测试要求。小孔法残余应力测试参照 GB/T 31310—2014《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》进行，应变片型号为 BE120-2CA-K-Q30，电阻值 $120.3 \Omega \pm 0.3 \Omega$ ，灵敏系数 $2.23\% \pm 1\%$ 。应变仪型号为澄科-CT2110，其最大量程 $\pm 2\,000 \mu\epsilon$ ，分辨率 $0.5 \mu\epsilon$ ，系统示值误差 $0.3\% \pm 0.5 \mu\epsilon$ 。应变释放系数根据 GB/T 31310—2014 进行计算，钻孔直径与深度均为 2 mm。超声法测试流程按照 GB/T 32073—2015《无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法》进行。超声波法与小孔法测量点布置如图 4 所示，在焊接试板上排布 A、B 两条测

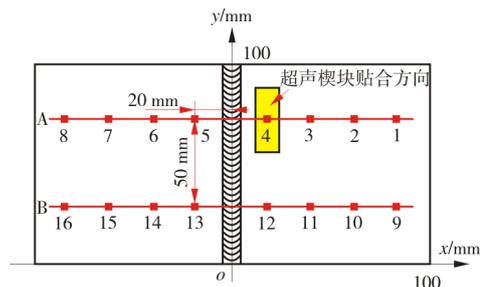


图 4 超声波法与小孔法测量布点图

试线，测试线间隔 50 mm，各测量点之间等间距 20 mm，共计 16 个测量点。规定垂直于焊缝方向为 x 轴、平行于焊缝方向为 y 轴。

2.2 超声楔块贴合辅助装置设计

图 5 为未使用超声楔块贴合辅助装置时 TC4 钛合金试板超声 LCR 波形采集图。波形采集时的参数分别为：超声换能器频率 5 MHz、激励电压 300 V、阻抗匹配值 200 Ω 、滤波频率 2.5 MHz。

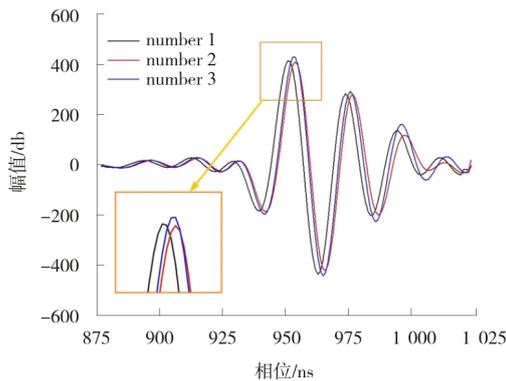
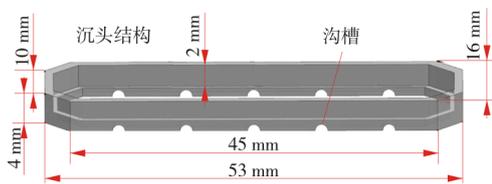
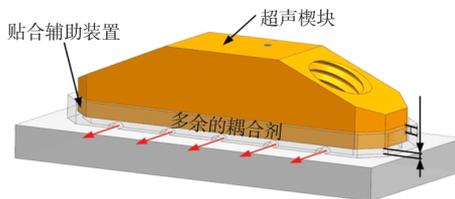


图 5 未使用超声楔块贴合辅助装置时超声 LCR 波形图

从图 5 可以看出，即使在同一点进行超声 LCR 波的多次采集，波形数据之间重合度依然



(a) 辅助装置尺寸



(b) 超声楔块与辅助装置装配示意图

图 6 超声楔块贴合辅助装置示意图

为了进一步明确耦合剂厚度对超声 LCR 波形的影响，在耦合剂填充厚度 H 分别为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 时对 TC4 钛合金试板同一位置进行超声 LCR 波形采集，结果如图 7 所示。

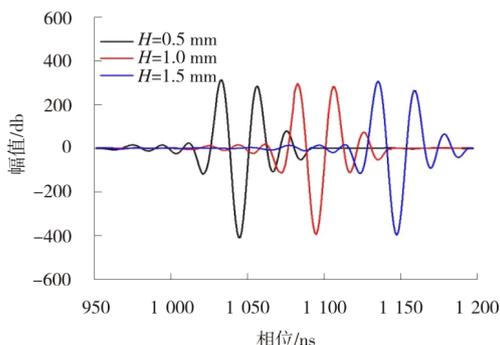


图 7 不同耦合剂厚度时超声 LCR 波形对比图

较低，存在较大的相位差异。这可能是由于超声楔块贴合时耦合剂厚度不一致引起超声波传播距离 L 发生变化所导致。在超声波残余应力检测过程中，需在被测表面涂抹耦合剂以减少超声能量损失。钛合金的无磁特性需人为将超声楔块固定在试样表面。人为因素的引入使得残余应力测试过程中超声楔块与测试面的耦合剂厚度不能保持稳定，造成超声残余应力测试结果的不稳定性加大。当人为施加力过大时，超声楔块与被测表面之间的耦合剂被排出、厚度减小，反之耦合剂厚度增大，从而出现同一点多次采集的 LCR 波形相位偏移现象。

图 6 为贴合辅助装置示意图。该装置采用一定刚度的亚克力玻璃制作，尺寸如图 6 (a) 所示。在超声波残余应力测量过程中，将超声楔块与辅助装置进行组装，如图 6 (b) 所示。辅助装置的沉头结构可确保超声楔块与辅助装置结合稳固，将耦合剂填充至贴合辅助装置底部，用力按压超声楔块，多余的耦合剂从辅助装置底部的沟槽流出，使得超声楔块与待测面的耦合剂填充厚度始终为 H 。

当耦合剂厚度从 0.5 mm 增至 1.5 mm 时，超声 LCR 波形相位整体右移，耦合剂厚度每增加 0.5 mm，超声 LCR 波形相位滞后约 50 ns，这将使超声波残余应力检测结果减小，甚至改变应力检测结果的拉压性质。为了保证超声残余应力测试的精度，在测量过程中耦合剂厚度应该保持一致。

在耦合剂厚度保持 1.5 mm 时，在同一位置对 LCR 波形图进行了多次采集，其波形图如图 8 所示。当耦合剂厚度保持一致时，在同一点采集的三组 LCR 波形数据几乎重合，表明超声楔块贴合辅助装置可以有效改善超声楔块与被测表面之间的贴合状态，使超声波传播距离 L 固定，提高了超声波形采集稳定性。

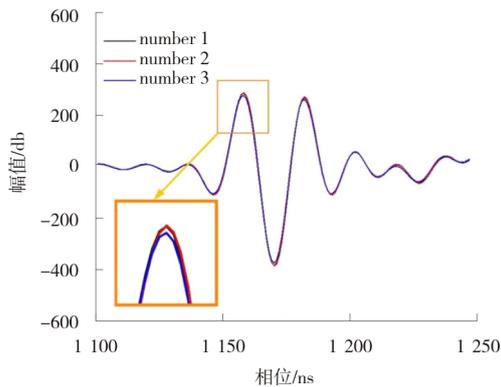


图8 使用超声楔块贴合辅助装置后超声LCR波形图

3 结果及分析

3.1 应力系数标定

被测材料的应力系数在超声波残余应力测量过程中至关重要，标定试样制作完成后需按照热处理标准对其进行去应力退火，在应力水平较低时进行超声基准波形采集，去应力退火参数根据 GJB 3763A—2004《钛及钛合金热处理》选用 600 ℃、3 h、空冷。标定试验采用 WDW3100 型万能试验机施加外部载荷，其载荷精度可达 0.001 N，控制方式为载荷控制，载荷达到预定值后保载 10 s 进行标定。为保证超声楔块与标定试样表面的稳定贴合，采用橡皮筋辅助固定。图 9 是根据 GB/T 32073—2012 设计的拉伸标定试样尺寸图，伸长段宽度取 26 mm，以确保超声楔块实现纵向贴合。

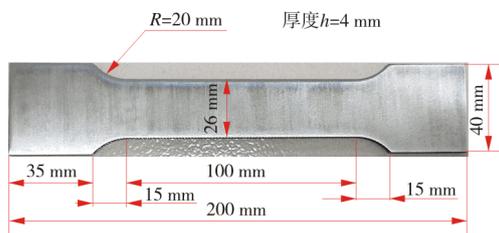


图9 拉伸试样尺寸

依据公式 (5) 设置标定数据，见表 1。从表 1 中可以看出，随着附加应力的逐渐增加，接收到的超声信号相较于基准波形的相位差逐渐增大，声时差近似呈线性增长。

$$\sigma = F/A \tag{5}$$

式中： σ ——产生的应力值，MPa；

F ——拉力，N；

表1 标定数据表

A/mm^2	F/N	σ/MPa	声时差/ns
105.37	0	0	-0.50
105.37	2 107.4	20	0.20
105.37	4 214.8	40	1.00
105.37	6 322.2	60	1.95
105.37	8 429.6	80	2.85
105.37	10 537.0	100	4.12
105.37	12 644.4	120	5.00
105.37	14 751.8	140	6.50
105.37	16 859.2	160	7.30
105.37	18 966.6	180	8.20
105.37	21 074.0	200	9.10

A ——横截面积， mm^2 。

对声时差数据点进行线性拟合如图 10 所示。从图 10 可看出，残余应力与声时差之间存在良好的线性关系。经过标定得到 TC4 钛合金应力系数 $K=19.923\ 5\ \text{MPa/ns}$ ，应力常量 $b=-0.888\ 127\ \text{MPa}$ 。

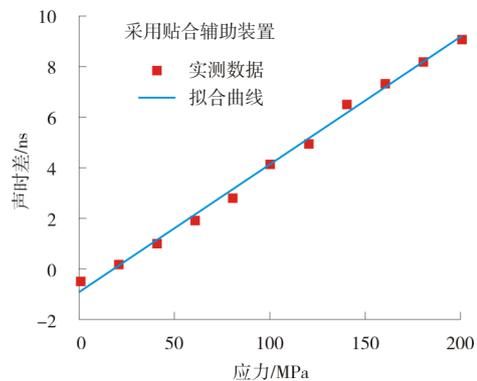


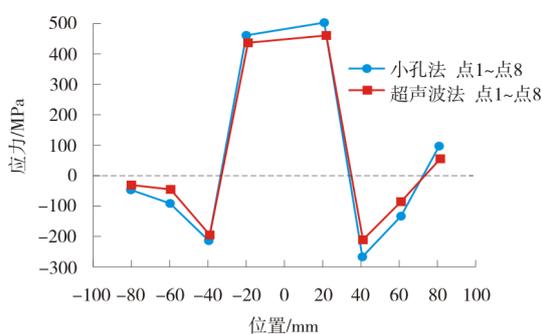
图10 TC4 钛合金应力系数标定曲线

3.2 残余应力测量结果与分析

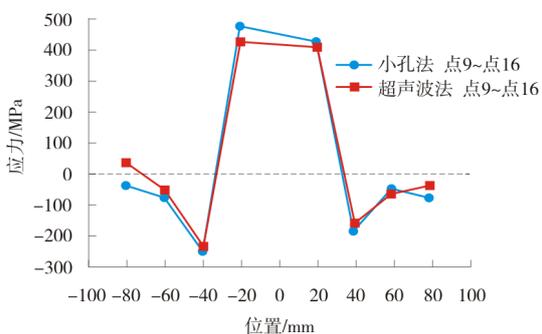
表 2 和图 11 分别为 TC4 钛合金焊接试板沿 A、B 线 (图 4) 残余应力测量结果及对比曲线图。超声波法测量结果显示，TC4 钛合金试板焊后最大拉应力出现在焊缝两侧，最高可达 458 MPa。随着距焊缝中心距离增加，拉应力逐渐降低；在距焊缝中心 40 mm 处表现为压应力，最高可达 233 MPa。从图 11 可以看出，小孔法与超声波法获得的残余应力测量结果在数值与分布趋势上基本一致，表明应用超声楔块贴合辅助装置的超声波法可以快速、准确地获得钛合金焊接残余应力分布状态。

表 2 残余应力测试结果

测试线	测试位置	残余应力/MPa	
		超声波法	小孔法
A	1	52	94.1
	2	-89	-137.7
	3	-209	-268.4
	4	458	502.5
	5	436	457.5
	6	-197	-214.6
	7	-47	-94.7
	8	-33	-47.8
B	9	-34	-76.4
	10	-62	-47.9
	11	-159	-185.3
	12	416	432.5
	13	433	479.8
	14	-233	-249.2
	15	-51	-75.7
	16	38	-35.8



(a) 测试线A



(b) 测试线B

图 11 TC4 钛合金焊接试板残余应力测量结果对比

4 结 论

(1) 超声波法残余应力测量过程中，耦合剂

厚度对超声 LCR 波形相位影响较大，耦合剂厚度每增加 0.5 mm，超声 LCR 波形相位滞后约 50 ns，这将导致超声波应力检测结果出现压应力减小及拉应力增大现象。

(2) 超声楔块贴合辅助装置使耦合剂填充厚度保持一致，实现超声波传播距离 L 的固定，提高了超声波形采集稳定性及残余应力测试结果稳定性。

(3) 经标定，TC4 应力系数 $K=19923.5 \text{ MPa/ns}$ ，应力常量 $b=-0.888127 \text{ MPa}$ 。

(4) 采用贴合辅助装置后的超声波法和小孔法获得的 TC4 钛合金焊接试板残余应力分布特征基本一致，表明超声楔块贴合辅助装置设计合理、实用性强。

参考文献:

- [1] 李倩. 表面处理对 TC4 钛合金激光焊接的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 151-155.
- [2] 徐春广, 马朋志, 肖定国, 等. 航空发动机叶片机械手无损检测技术[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 42-48.
- [3] 王林青, 周永涛, 王军军, 等. TC4 钛合金在模拟海水中腐蚀-磨损交互行为研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(2): 206-212.
- [4] 陈素明, 张颖云, 张天宇, 等. 焊接顺序对钛合金 H 型单桁条结构残余应力分布的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(13): 142-146, 150.
- [5] 余陈, 张宇鹏, 房卫萍, 等. 焊后热处理对 100 mm TC4 钛合金电子束焊接头残余应力的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(7): 151-155.
- [6] 徐春广, 李培禄. 无应力制造技术[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 113-132.
- [7] GUO J, FU H Y, PAN B, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 54-78.
- [8] 刘海波, 刘天然, 李亚鹏, 等. 金属材料表面残余应力超声测量方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 118-125.
- [9] 徐丽霞, 李伟煜, 刘战捷, 等. 航天器铝合金结构残余应力超声波检测方法研究[J]. 失效分析与预防, 2019, 14(1): 43-48.
- [10] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components [J]. Materials & Design, 2012(35): 572-588.

(下转第 38 页)