

引文格式: 陈伟兵, 董德秀, 陈振华, 等. 飞机壁板钛合金 T 型焊缝的高频超声相控阵检测技术[J]. 航空制造技术, 2023, 66(23/24): 66-69, 78.

CHEN Weibing, DONG Dexiu, CHEN Zhenhua, et al. High frequency ultrasonic phased array inspection technology for T-shaped welds of titanium alloy in aircraft wall panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(23/24): 66-69, 78.

飞机壁板钛合金 T 型焊缝的高频超声相控阵检测技术*

陈伟兵¹, 董德秀², 陈振华¹, 李承庚¹, 卢超^{1,3}

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

3. 赣南师范大学, 赣州 334001)

[摘要] 飞机壁板钛合金双束激光焊逐渐成为高性能机身结构的主要连接方式。鉴于壁板焊缝质量要求高、缺陷类型多、焊缝规模大, 亟须一种兼顾高效率和高精度的无损检测技术保障其安全性能。本研究提出飞机壁板焊缝的高频超声相控阵检测技术, 设计了相控阵超声检测探头及对对比试块对焊缝内外部缺陷进行扇扫成像检测, 并通过金相方法验证了检测结果。结果表明, 高频超声相控阵检测技术可有效检测壁板 T 型焊缝中的典型内外部缺陷, 包括未熔合、气孔、咬边、焊缝成形不良, 高频相控阵检测技术的高效率、高精度、直观可靠的特点使其适用于飞机壁板焊缝的无损检测。

关键词: 双束激光焊; 超声相控阵; 飞机壁板; 缺陷检测; 金相法

High Frequency Ultrasonic Phased Array Inspection Technology for T-Shaped Welds of Titanium Alloy in Aircraft Wall Panel

CHEN Weibing¹, DONG Dexiu², CHEN Zhenhua¹, LI Chenggeng¹, LU Chao^{1,3}

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;

3. Gannan Normal University, Ganzhou 334001, China)

[ABSTRACT] Dual-beam laser welding of titanium alloys for aircraft wall panels has gradually become the main connection method for high-performance fuselage structures. In view of the high requirements of wall panel welds, variety of defects, and large-scale welds, there is an urgent need for a non-destructive testing technology that takes into account the characteristics of high efficiency and high precision to ensure its safety performance. The high-frequency ultrasonic phased array inspection technology for the welding seam of aircraft wall panels is proposed in the research. The phased array ultrasonic inspection probe and the contrast test block are designed to perform fan-scan imaging detection of the internal and external defects of the weld seam, and then, the detection is verified by the metallographic method result. The research results show that the high-frequency ultrasonic phased array inspection technology can effectively detect the typical internal and external defects in the wall T-weld seam, including: non-fusion, pores, undercut, poor weld formation. The advantages of high efficiency, high precision, intuitive and reliable characteristics, make it suitable for non-destructive testing of aircraft wall welds.

Keywords: Dual-beam laser welding; Ultrasonic phased array; Aircraft wall panels; Defect inspection; Metallographic method

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.23/24.066

* 基金项目: 装备预研重点实验室基金(6142908180102); 江西省自然科学基金(20202BABL201023)。

双束激光焊具有整体无缝隙、重量轻、自动化水平高、强度高以及设计自由度高等优势,逐渐成为钛合金航空壁板的主要连接方式^[1-2]。法国空客公司将激光焊接技术取代传统的铆接技术应用在机身壁板制造中,使空客飞机自重减少约20%、成本降低约10%^[3]。然而,受激光功率、焊接速度、送丝速度和角度、光束入射位置和入射角等焊接参数波动的影响,焊缝可能产生未熔合、气孔、夹杂和裂纹、咬边等缺陷^[4]。由于机身结构在高速运动中受周期性内外部载荷的作用,制造缺陷将严重危害飞行安全^[5]。因此,钛合金壁板双束激光焊缝的无损检测已得到广泛的关注。射线检测对飞机壁板激光焊缝中的气孔较为敏感,而对薄层型缺陷(未焊透)则存在边界灰度对比不明显、易漏检的问题^[6-7]。超声检测技术虽能克服焊缝未熔合导致检测灵敏度低的问题,但常需进行逐点扫描检测,效率较低,且无法应用于长焊缝、批量化无损检测。超声相控阵技术通过电子方式控制传感器中各阵元晶片的发射接收延时,实现在指定焊缝深度的声束同相位叠加增强(声场聚焦),可快速实现焊缝深度方向的聚焦成像检测^[8-11]。此外,由于具有声束聚焦的优势,超声相控阵检测技术可在快速检测的同时保证对焊缝全厚度范围内缺陷的高精度检测,更易实现对缺陷的定性定量检测^[12-14]。

基于相控阵超声成像速度快、检测灵敏度高、定量精度高的优势,研究了飞机壁板钛合金双束激光焊T型焊缝的高频超声相控阵检测技术。通过探头参数的优化实现了焊缝典型内外部缺陷的快速、高精度成像检测,同时分析典型缺陷的扇扫图像特征,为缺陷类型的判定提供依据。高频超声相控阵检测技术可快速、有效的对焊缝的典型内外部缺陷进行定性定量检测,是一种兼顾检测精度和检测效率,适用于飞机壁板长焊缝的新型无损检测方法。

1 试样制备及试验方法

1.1 试样制备

检测试样为飞机壁板钛合金双束激光焊T型焊缝,板材牌号为TC4(Ti-6Al-4V)钛合金,化学成分如表1所示。

T型焊缝试样的背板厚度2 mm、筋板厚度1.5 mm,共制备了3种规格的检测试样,分别命名为A₁、A₂、A₃。翼板和腹板尺寸分别为 $l \times w_1$ 、 $l \times w_2$,如图1所示,各种试样的尺寸如表2所示。

1.2 高频超声相控阵探头设计

超声相控阵检测仪具有32通道的发射接收模式,最大发射电压为100 V,采样频率为100 MHz。超声相控阵探头的设计方案为阵元中心频率15 MHz、阵元宽度0.2 mm、阵元中心间距0.25 mm、阵元间隙0.05 mm、阵元长度5 mm、阵元数32;为提高近表面检测精度,探头端部安装了高度为30 mm的有机玻璃楔块,如图2(a)所示。在试验中,探头置于试样背板面上,阵元排列方向与焊缝宽度方向平行,调整探头位置使探头阵列中心线与焊缝中心轴线垂直;扇扫的角度范围设置为 $-30^\circ \sim 30^\circ$,声束完全覆盖焊缝,如图2(b)所示。

1.3 检测灵敏度调整

为调整灵敏度并验证检测能力,设计和制备了TC4钛合金对比试块,试块厚4 mm、垂直于试块表面加工深度2 mm、直径 $\Phi 0.3$ mm和 $\Phi 0.4$ mm的平底孔,如图3(a)所示。将探头对准 $\Phi 0.3$ mm平底孔,调整探头位置及聚焦深度使反射回波最高,调节增益使反射回波最大幅度达到满屏的50%。在此检测灵敏度下, $\Phi 0.3$ mm平底孔和 $\Phi 0.4$ mm平底孔的扇扫图像如图3(b)和(c)所示,在深度为2.3 mm和2.4 mm处可清晰观察到 $\Phi 0.3$ mm和 $\Phi 0.4$ mm平底孔的扇扫图像,深度4 mm处为对比试块底部的扇扫图像;相控阵扇扫图像按右侧的幅度-颜色标尺染色。

2 焊缝内部缺陷特征图像

2.1 完好焊缝扇扫图像特征

完好焊缝的扇扫图像和结构示意图如图4所示,1 mm深度附近为楔块-背板界面的反射波图像,3 mm附近为焊缝坡口面反射波图像(背板厚度2 mm),5 mm、7 mm、9 mm附近为焊缝坡口面的多次反射回波图像。因此,2.5~3.5 mm深度为焊缝区(图4中黑色虚线),内部缺陷位于该区域、焊缝表面缺陷深度在3.5 mm附近的焊缝坡口图像附近。

表1 TC4钛合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (mass fraction)

%

| 合金元素 | | 杂质不大于 | | | | | | 其他元素 | |
|---------|---------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| Al | V | Ti | Fe | C | N | H | O | 单个 | 总和 |
| 5.5~6.8 | 3.5~4.5 | 余量 | 0.30 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | 0.10 | 0.40 |

2.2 缺陷超声相控阵扇扫图像特征

图5为A₁试样的超声相控阵扇扫图像及相应截面的金相图,超声相控阵扇扫图中3mm深处清晰地显示了焊缝缺陷,经金相解剖可确定该缺陷为长度0.61mm的面型未熔合;由于未熔合缺陷为面型缺陷,聚焦声束可垂直入射至该面型缺陷上,且反射回波的方向性较好,未熔合缺陷的反射回波高度可达满屏的75.5%。

图6(a)为A₂试样的超声相控阵扇扫图像,在3mm深处、4mm深处及4.5mm深处发现异常图像;

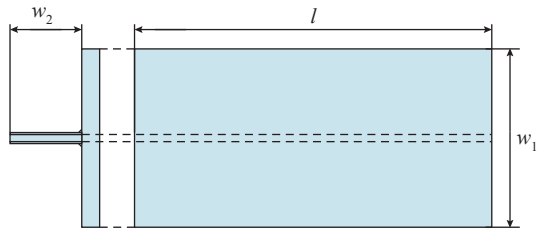
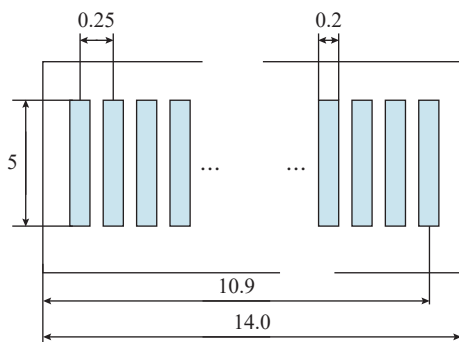


图1 检测试样
Fig.1 Testing specimen

表2 试样尺寸参数
Table 2 Specimen size mm

| 试样 | <i>l</i> | <i>w</i> ₁ | <i>w</i> ₂ |
|----------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| A ₁ | 150 | 100 | 18 |
| A ₂ | 150 | 100 | 18 |
| A ₃ | 150 | 100 | 18 |



(a) 阵元分布设计图 (mm)

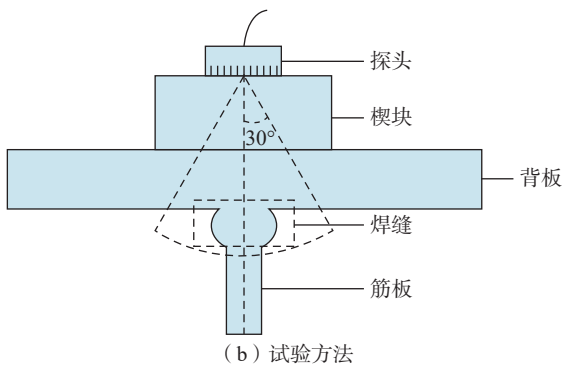
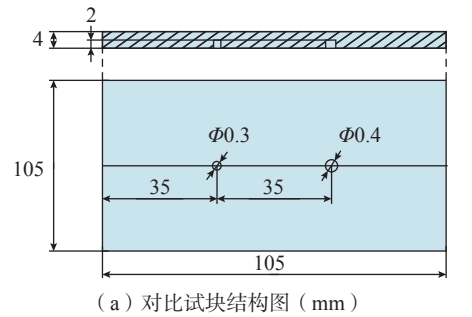


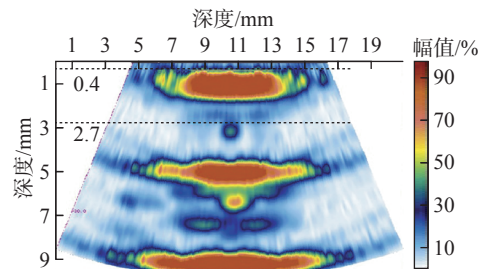
图2 探头设计及试验方法
Fig.2 Transducer design and experimental setup

其中,3mm深处为焊缝内部缺陷,其他4mm深处及4.5mm深处的异常图像在焊缝坡口上,是焊缝表面缺陷。图6(b)和(c)的金相图验证了检测结果为扇扫图中3mm深处为 $\Phi 0.17$ mm的球形气孔缺陷,由于气孔球面的反射回波较弱,类似于球面波,指向性交叉,因此该气孔缺陷的反射回波相对于同尺寸的未熔合缺陷更弱,其波高只能达到满屏的38.1%;而4mm和4.5mm深处的异常图像位于焊缝外侧表面,显然为焊缝成形不良。

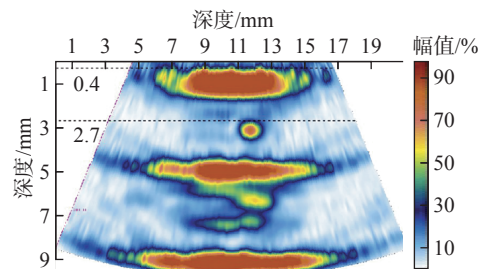
图7(a)为A₃试样的扇扫图像,发现深度3mm处



(a) 对比试块结构图 (mm)



(b) $\Phi 0.3$ mm平底孔扇扫



(c) 0.4 mm平底孔扇扫

图3 对比试块及不同平底孔的扇扫图像

Fig.3 Testing block and its sector images with different flat bottom hole

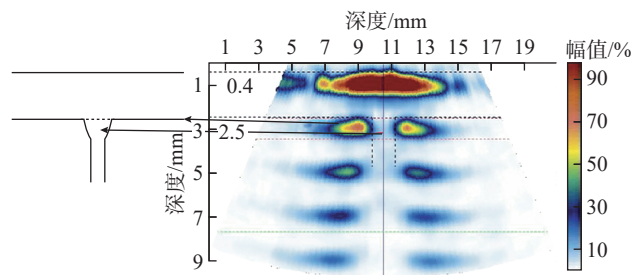


图4 完好焊缝扇扫图像

Fig.4 Sector image of intact welds

出现一异常图像,该异常图像与焊缝坡口面图像相连。金相图显示,该异常图像对应咬边缺陷,深度 0.28 mm;同时,金相图中还发现焊缝中出现了直径 0.05 mm 的气孔,由于检测精度不足,该缺陷未显示在扇扫图上,如图 7 (b) 所示。焊缝表面缺陷(成形不良)容易产生应力集中、引起裂纹、降低疲劳强度等问题,因此焊缝表面缺陷或成形不良也是无损检测中需要关注的重要缺陷。

3 结论

高频超声相控阵检测技术具备精度高、速度快、图像直观的优势,是一种针对飞机壁板钛合金双束激光焊行之有效的无损检测方法,具体结论如下。

(1) 设计和制备了高频超声相控阵检测探头及检测用对比试块,实现对飞机壁板 T 型焊缝内部缺陷的无损检测,可进行 $\Phi 0.17$ mm 的焊缝内部气孔缺陷检测。

(2) 标定了完好焊缝的背板上下表面反射及完好

焊缝坡口反射形成的检测对象结构特征图像,该特征图可作为缺陷辨识的参照。

(3) 高频超声相控阵扇扫图像中可显示焊缝未熔合、气孔、咬边、焊缝成形不良等内外部焊接缺陷,通过反射波幅度、异常图像位置分布能够判别缺陷类型。

参考文献

[1] 占小红,赵艳秋,陈帅,等. 轻合金 T 型结构双激光束双侧同步焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(11): 20-31.

ZHAN Xiaohong, ZHAO Yanqiu, CHEN Shuai, et al. Research progress on double laser-beam bilateral synchronous welding of T-joints for light alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(11): 20-31.

[2] MA X Y, GONG S L, ZHANG J X, et al. Formation, microstructure and mechanical properties of double-sided laser beam welded Ti-6Al-4V T-joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 729-735.

[3] 占小红, 欧文敏, 魏艳红, 等. 飞机壁板先进焊接技术应用现状[J]. 航空制造技术, 2013, 56(22): 42-44.

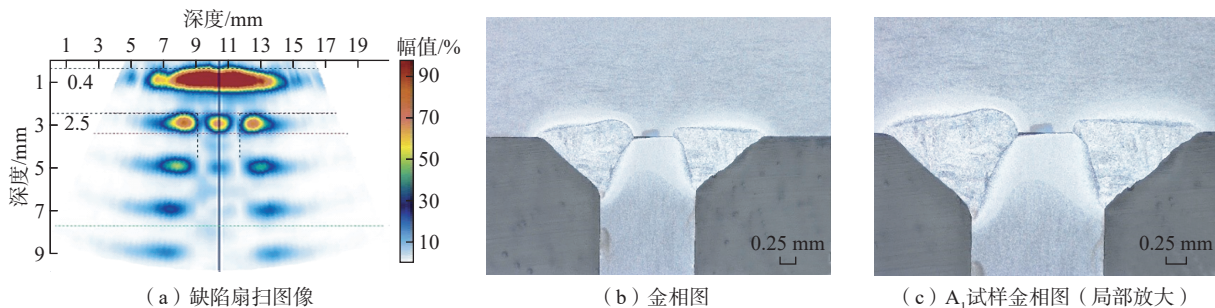


图 5 典型未熔合缺陷的扇扫图像和金相图(A₁ 试样)

Fig.5 Sector image and metallurgy photo of typical non-fusion defects (Sample A₁)

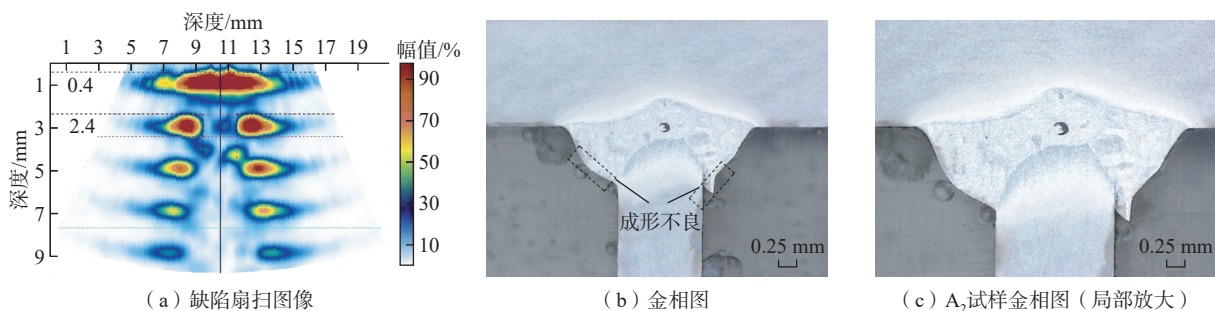


图 6 气孔及焊缝成形不良的扇扫图像和金相图(A₂ 试样)

Fig.6 Sector image and metallurgy photo of porosity and welds (Sample A₂)

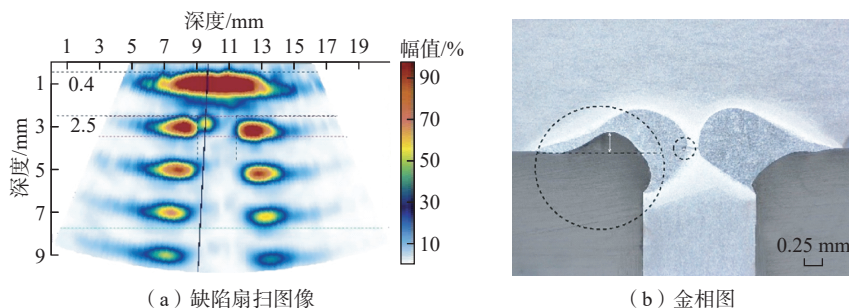


图 7 焊缝咬边缺陷的扇扫图和金相图(A₃ 试样)

Fig.7 Sector image and metallurgy photo of weld undercut defects (Sample A₃)

(下转第 78 页)