

飞机钛合金结构激光焊接修复工艺

Laser Welding Repairing Technology of Aircraft Ti-Alloy Structure

空军第一航空学院 代永朝 王东锋
9 4 2 0 8 部 队 杨玉光

[摘要] 基于 IPG 的 4kW 光纤激光器,研究了拼接间隙和等效焊接线能量等工艺参数对 TC4 合金激光焊接接头强度的影响,发现在最佳工艺参数下,接头强度可达母材强度的 99.5%,可以满足飞机钛合金结构损伤的修复要求。

关键词: 激光焊接 拼接间隙 等效焊接线能量 接头强度

[ABSTRACT] On the basis of IPG's 4kW fibre laser equipment, the effect of jointing interspace, equivalent welding line energy and other technology parameters on the TC4 alloy's joint strength are researched. It is found that under the optimal parameters, the joint's strength can reach 99.5% of the matrix's strength, which can meet the demand of damage's repairing of aircraft Ti-alloy structure.

Keywords: Laser welding Jointing interspace Equivalent welding line energy Joint strength

钛合金由于具有比强度高、热稳定性和热加工工艺性好及耐腐蚀等特点,在现代新型飞机结构材料中得到广泛应用,如在某些新型战斗机中,钛合金的用量已占机体结构总重量的 25% 以上^[1]。然而由于钛合金对缺口、划伤以及其他表面缺陷的敏感性高,所以容易产生裂纹和断裂等各种损伤^[2],其修复技术研究也成为世界各国必须重视的机体修理技术之一。

钛合金结构损伤的主要传统修复方法为铆接和氩弧焊焊接。但是,铆接时易于产生新的裂纹且铆接质量不易保证,氩弧焊焊接时对基体的热影响区较大,生成过热组织并形成脆性的析出相,降低了接头强度。激光焊接作为一种新型的焊接工艺,具有焊缝成形好、焊件变形小、操作简单和生产效率高等优点,而且焊接能量密度高,特别适用于高熔点、高反射率的钛合金,是理想的修复工艺^[3-4]。由于 TC4 型钛合金的使用量已占全部钛合金的 75%~80%,故研究采用便于外场修复使用的光纤激光器对 TC4 合金进行了激光填丝焊接试验,以期激光焊接修复技术在飞机钛合金结构损伤中的推广提供参考依据。

1 激光焊接方法

1.1 焊前清理

氧化膜、油污、灰尘、锈迹和机加工残留的冷却液等均可能对钛合金激光焊接质量造成严重的不良影响^[5],在焊接前需对试件表面进行酸洗法清理。其配方为:3%左右的 HF 酸+35%左右的 HNO₃ 水溶液。完成清理工作后,立即进行焊接试验,拿取试样时带棉布手套,禁止直接用手触及试样。

1.2 试验条件

试验材料为 TC4 合金板材,厚度为 2mm,所用激光器为 IPG 公司的 4kW 光纤激光器。基本激光参数为焦点直径 0.3mm,焦距 $f=239\text{mm}$ 。为防止氧化,试验专用焊接喷嘴,保护气为氩气。激光焊接时激光功率、焊接速度和保护气体流量由前期试验所得的激光焊接工艺参数表 1 初步确定。按照国家标准 GB/T 228-2002 金属材料拉伸试验方法进行激光焊接接头的拉伸试验,测试的结果为 3 个试样的平均值。

试验分为 4 个基本步骤:(1)激光焊接参数设计及激光焊接试验;(2)对激光焊接接头进行力学性能测试;(3)以接头强度值为评估指标对工艺参数进行优化;(4)对激光焊接接头进行微观组织分析。

表1 激光焊接工艺参数表

| | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 焊接功率/kW | 1.3 | 1.6 | 1.9 | 2.2 | 2.5 |
| 焊接速度/(m·min ⁻¹) | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 |
| 流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 2.40 | 3.15 | 3.30 | 3.60 | 3.80 |

2 试验结果与分析

2.1 拼接间隙对抗拉强度的影响

考虑到激光填丝焊接时,待焊试样的拼接间隙过小不利于填丝,拼接间隙过大又会使焊缝成形困难,故首先在激光功率 $P=1.9\text{kW}$ 、焊接速度 $V=2.0\text{m/min}$ 和保护气体流量 $Q=3.30\text{m}^3/\text{h}$ 等固定参数下试验,研究拼接间隙对焊接接头抗拉强度的影响,以期确定在满足接

头强度大于90%母材强度(997MPa)的修复要求下,获得最佳拼接间隙值。在本试验的TC4板材对接填丝焊条件下,拼接间隙值对抗拉强度的影响曲线如图1所示。可见在给定激光焊接工艺参数范围内,其间隙值在0.05~0.25mm范围时,接头强度均可满足修复要求;但当拼接间隙为0.20mm时,可得到最佳的焊接修复强度;而当拼接间隙增大到超过0.30mm时,焊缝成形变差,且接头组织还将存在宏观气孔缺陷,不能满足技术指标要求。所以,在进行激光对焊时,拼接间隙不易过大。

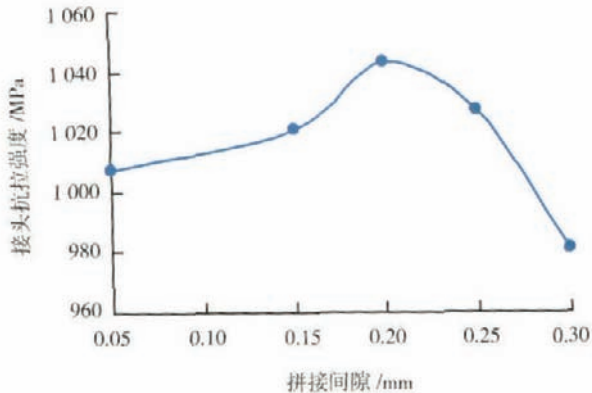


图1 拼接间隙对接头抗拉强度的影响

Fig.1 Effect of jointing interspace on joint strength

2.2 焊接接头的力学性能及焊缝宏观形貌

在激光功率 $P=1.9\text{kW}$ 、焊接速度 $V=2.0\text{m/min}$ 、拼接间隙 $d=0.2\text{mm}$ 和保护气体流量 $Q=3.30\text{m}^3/\text{h}$ 的条件下,TC4合金焊接接头的抗拉强度如表2所示。可见,在该参数下,激光填丝焊接头的平均抗拉强度及平均延伸率值分别为1042MPa和1.37%,各达到母材的94%和11.4%。3个试样的断裂位置均在热影响区(焊接接头处断裂)。

表2 TC4焊接接头的抗拉强度及延伸率

| 性能 | | 抗拉强度/MPa | 延伸率/% |
|------|-------|----------|-------|
| 试样编号 | 1-6-1 | 1084.08 | 1.41 |
| | 1-6-2 | 1032.77 | 1.38 |
| | 1-6-3 | 1011.63 | 1.32 |
| 平均值 | | 1042 | 1.37 |
| 基材性能 | | 1108 | 12 |

焊缝外观成形及截面形貌见图2,可见,激光填丝焊缝正面成形良好,波纹均匀,并向上微小凸起,而在截面图上可以看到焊缝完全焊透,和母材交接处无咬边,背面也形成微小凸出,消除了自熔焊时焊缝的凹陷和咬

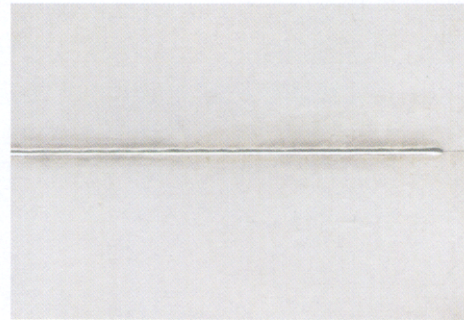


图2 激光填丝焊缝的宏观形貌

Fig.2 Macroscopic shape of laser welding seam

边等缺陷。

2.3 工艺参数对接头拉伸强度的影响

在试验工艺参数为激光功率1.6~3.1kW、扫描速度2.0~3.0m/min,其他参数固定的条件下,研究了工艺参数对接头强度的影响。图3所示为在焊接速度 $V=2.0\text{m/min}$ 的条件下激光功率对接头抗拉强度的影响曲线,可见在1.6~3.1kW的激光功率范围内,随着激光功率的增大,接头抗拉强度呈下降趋势,尤其当激光功率大于2.5kW时,接头强度急剧减小。这是由于输入热量的大幅增加导致了接头区组织迅速粗化,从而强度显著下降。

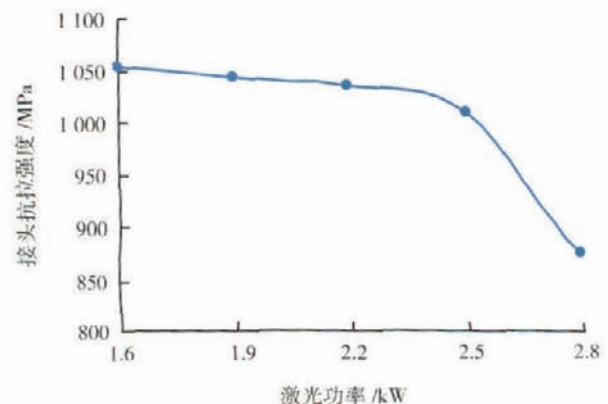


图3 激光功率对接头抗拉强度的影响

Fig.3 Effect of laser power on tensile strength of joint

进一步研究表明,焊接工艺参数中的激光功率、焊接速度对接头成形及力学性能的影响并不是相互独立的,而是有一种相互匹配关系。单独分析一个参数时很难了解其对焊接质量影响的本质原因,故采用常用的等效焊接线能量(激光功率/焊接速度)的综合指标来考查工艺参数对接头抗拉强度的影响,其影响曲线见图4。可以看出,当等效焊接能量为560J/cm(对应激光功率2.8kW、焊接速度3.0m/min)时,接头抗拉强度达到最大值1102MPa。该值为母材抗拉强度的99.5%,完全可以满足修复要求。

对于2.0mm厚的TC4钛合金而言,在线能量保证

焊透的情况下,其变化范围为 440~840J/cm,随等效焊接线能量变化,其强度值变化不大,但都大于母材强度的 90%,可以满足外场修复要求。所以,对焊接速度和激光功率的选择只要能满足获得稳定的焊接过程,得到无缺陷的接头即可,可以根据需要做小范围微调,不会影响焊接接头强度。

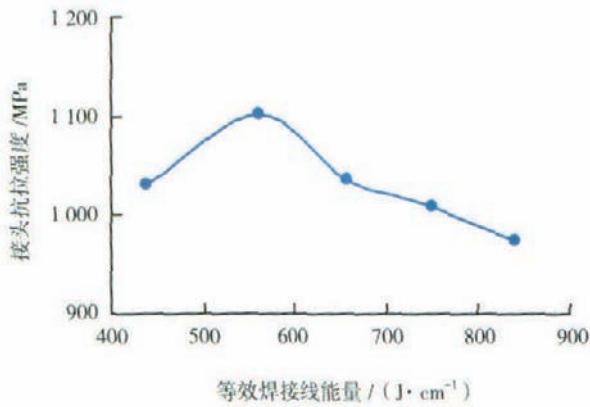


图4 等效焊接线能量对接头抗拉强度的影响
Fig.4 Effect of equivalent welding line energy on joint tensile strength

3 微观组织分析

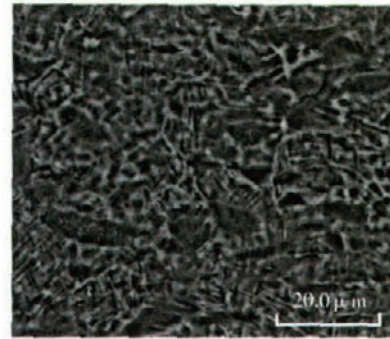
图 5 为等效焊接线能量为 560 J / cm 时, TC4 合金焊缝接头不同区域的微观组织。可见激光填丝焊接头的热影响区(图 5 (a))晶粒有一定程度的粗化,较传统氩弧焊等焊接接头的热影响区小得多。这是由于激光加热后的冷却速度非常快,晶粒可以被显著细化,热影响区的尺寸也非常小。所以形成的焊缝接头组织细小致密,热影响区粗化不明显,没有明显的软化区,保证了接头具有良好的力学性能,这是其抗拉强度高达基材 90% 以上的根本原因。

但由于焊缝区和基体材料间存在着巨大的温度梯度,同时,焊缝的散热方向是垂直于熔合线,在熔合区内,固态晶粒核心是液相焊缝金属开始结晶的基础,所以焊缝金属在靠近熔合线附近的焊缝组织为细小致密的方向垂直于熔合线的柱状晶(图 5 (b))。理论分析表明,焊速越大时,晶粒主轴的成长方向越垂直于焊缝的中心线。

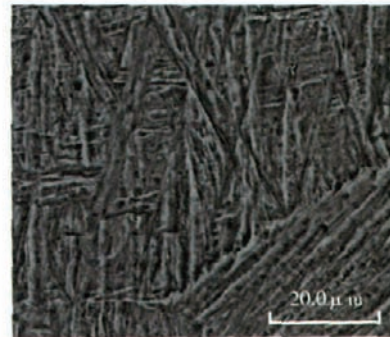
由于上述焊缝区柱状晶凝固组织的变形协调性不如热影响区和母材,裂纹往往先在焊缝中出现,而后再向热影响区和母材中扩展,结果导致接头的塑性下降,故表 2 所列的激光焊接试样的延伸率只有 1.37%。

4 结论

(1) 利用填充焊丝进行 TC4 的激光焊接,可以消除



(a) 热影响区



(b) 焊缝中心区

图5 激光焊接接头的微观组织
Fig.5 Microstructure of laser welding joint

激光自熔焊时的下塌、咬边等宏观缺陷对接头强度的减弱作用,有利于提高接头强度。但填充焊丝时必须首先确定最佳拼接间隙,对于本试验条件下的 2mm 厚 TC4 合金板材,最佳拼接间隙为 0.2mm。

(2) 在等效焊接能量为 560J/cm 及其他优化参数下,激光焊接接头强度可达母材强度的 99.5% 以上,完全可以满足修复要求。

(3) 激光焊接接头的组织细小致密,热影响区粗化不明显,没有明显的软化区,是接头力学性能良好的根本原因。可以预见,激光焊接将在飞机钛合金结构损伤修复方面发挥重要作用,应用前景广阔。

参考文献

[1] 代永朝, 郑立胜. 飞机结构检修. 北京: 航空工业出版社, 2006.
 [2] 段爱琴, 陈俐, 丁立民. YAG 激光焊接钛合金 TA15 熔池特征. 航空制造技术, 2009(10):74-76.
 [3] 杜汉斌, 胡伦骥, 胡席远. TC1 合金激光焊接工艺探索. 应用激光, 2002, 22 (6) : 539 -542.
 [4] Yoon J W. Effect of filler wire composition on the Nd: YAG laser weldability of 6061aluminum alloy. Materials Science Forum.2005, 475-479:2 591-2 594.
 [5] 姜伟, 胡芳友, 沈国瑾. TC4 的激光焊接工艺研究. 现代制造工程, 2007(8):74-75.

(责编 小颖)