

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.13

TC4钛合金薄板锁底接头激光焊接错边适应性研究

张登明, 胡佩佩, 左善超, 陈 勤, 高建新

上海航天精密机械研究所, 上海 201600

摘要: 针对2 mm TC4钛合金薄板锁底结构激光焊接错边适应性进行研究。结果表明,随着错边量的增大,焊缝成形均匀性下降,表面咬边和凹陷加大,错边量1.0 mm时焊缝表面完全凹陷;气孔数量随错边量增大先增多后减少。错边量为0~0.6 mm,可获得表面成形及内部质量均良好的焊缝。接头抗拉强度随错边量增大而降低,但错边量为0.6 mm时,接头的抗拉强度仍可达到1 050 MPa,拉伸试样断裂在焊缝靠近厚板侧边缘,断口呈韧性断裂特征。结果表明,TC4钛合金锁底接头激光焊接对错边具有一定的容忍度,错边量0.6 mm(壁厚30%)以内时,接头仍具有良好的成形与力学性能。该研究结果可为钛合金产品激光焊接生产应用提供参考,尤其对于大型结构件的装配精度控制具有指导意义。

关键词: TC4钛合金; 锁底接头; 激光焊接; 错边适应性

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0094-06

Misalignment Adaptability of TC4 Titanium Alloy Thin Plate Bottom-locking Joint Using Laser Welding

ZHANG Dengming, HU Peipei, ZUO Shanchao, CHEN Qin, GAO Jianxin

Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China

Abstract: Research on the adaptability of laser welding misalignment for 2 mm TC4 titanium alloy thin plate lock bottom structure was conducted. The results show that with the increase of misalignment, the uniformity of weld formation decreases, surface bite and depression increase, and when the misalignment is 1.0 mm, the weld surface is completely depressed; the number of pores increases first and then decreases with the increase of misalignment. When the misalignment is 0-0.6 mm, a good surface formation and internal quality of the weld can be obtained. The tensile strength of the joint decreases with the increase of misalignment, but when the misalignment is 0.6 mm, the tensile strength of the joint can still reach 1 050 MPa, and the tensile specimen breaks near the edge of the thick plate side of the weld, and the fracture surface shows ductile fracture characteristics. The results show that TC4 titanium alloy lock bottom joint laser welding has a certain tolerance to misalignment, and when the misalignment is within 0.6 mm (30% of the wall thickness), the joint still has good formation and mechanical properties. The research results can provide reference for the application of laser welding production of titanium alloy products, and have guiding significance for the assembly accuracy control of large-scale structural parts.

Keywords: TC4 titanium alloy; bottom-locking joint; laser welding; misalignment adaptability

引用格式: 张登明, 胡佩佩, 左善超, 等. TC4钛合金薄板锁底接头激光焊接错边适应性研究[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 94-99.

Citation: ZHANG Dengming, HU Peipei, ZUO Shanchao, et al. Misalignment Adaptability of TC4 Titanium Alloy Thin Plate Bottom-locking Joint Using Laser Welding[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 94-99.

0 引言

TC4钛合金密度较小、比强度高、综合性能及焊

接性良好,在航空航天领域有着广泛的应用^[1-3]。激光焊接的能量集中、焊接变形小、焊接速度快^[4-5],是航天钛合金结构件焊接时常用的高效焊接方法。

收稿日期: 2024-09-24 修回日期: 2025-02-05

作者简介: 张登明(1990—),男,硕士,高级工程师,主要从事激光焊接工艺研究。E-mail: hitzhangdengming@163.com。

为了便于零件加工、焊前装配,常采用锁底结构形式^[6],一般要求装配错边量不超过壁厚的10%,此时,采用激光摆动焊^[7]等手段可以实现这种非穿透接头的低气孔率、可靠焊接。相关研究表明,错边较大,会导致应力集中,显著降低接头的疲劳强度^[8-9]。但错边对接头抗拉强度的影响相对较小,在薄板铝合金、镀锌钢等材料的激光焊接时,错边量约为壁厚15%~17%时,焊缝成形良好,抗拉强度无明显降低^[10-11]。在薄板激光焊时,错边控制通常是一个难题^[12]。尤其是钛合金结构的大尺寸环框+薄板蒙皮接头,零件配合加工难度较大,局部装配错边量超差时有发生,如果直接报废零件,会造成较大的经济损失和生产进度拖延。

目前,关于钛合金激光焊接错边适应性相关的系统研究较少。因此,针对以上实际应用情况,本文以TC4钛合金薄板锁底结构为研究对象,开展了激光焊接错边适应性分析,研究了不同的错边量对焊缝成形质量和接头力学性能的影响,以期为钛合金产品激光焊接生产应用提供参考。

1 试验材料和方法

试验材料为TC4钛合金,化学成分如表1所示。试板厚度分别为6 mm和2 mm,试件尺寸200 mm×100 mm。采用锁底接头形式进行焊接,预制错边量0~1.0 mm,如图1所示。焊前对试板进行酸洗。试验采用6 kW的Trumpf碟片激光器,配以Trumpf D70激光焊接头和KR30HA型KUKA机器人,激光光束参数积4 mm·mrad,聚焦光斑直径0.3 mm。后置侧吹保护气为纯度99.99%的氩气,保护气流量40~50 L/min,激光焊接示意如图2所示。激光焊接后,采用X射线对焊缝的内部质量进行检测。采用线切割制备锁底接头拉伸试样,试样平行段长度100 mm,平行段宽度12 mm,夹持端宽度25 mm,并将厚板侧拉伸夹持部位厚度铣至2 mm,以保证试样两侧夹持段平齐,拉伸时受力均衡。采用Quanta

表1 TC4化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of TC4 (wt. %)

Fe	C	N	Al	V	H	Ti
0.3	0.1	0.05	5.5~6.8	3.5~4.5	0.015	余量

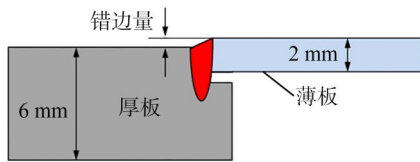


图1 锁底接头形式

Fig. 1 Form of bottom-locking joint

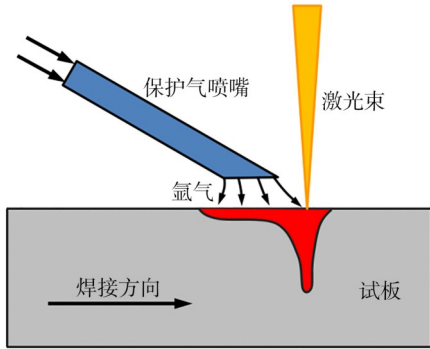


图2 激光焊接示意

Fig. 2 Schematic diagram of laser welding

450扫描电镜对拉伸试样断口进行观察。

2 试验结果与讨论

2.1 错边量对焊缝成形的影响

根据前期工艺研究结果,采用优化的焊接工艺参数:激光功率2.4 kW,焊接速度2 m/min,离焦量+7 mm。错边量为0 mm、0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm,均采用相同的焊接工艺参数。

图3所示为TC4钛合金激光焊接锁底接头的焊缝上表面成形情况。可以看出,错边量为0 mm和0.2 mm时,焊缝表面成形均匀,与母材之间过渡较为光滑;当错边量增大到0.4 mm时,焊缝表面成形均匀性良好,但焊缝两侧靠近母材处有点咬边;当错边量进一步增大到0.6 mm和0.8 mm时,焊缝表面成形均匀性下降,焊缝两侧的咬边程度加剧,且焊缝表面出现明显的下凹,但焊缝整体成形情况还较好,可以实现锁底接头的焊接;将错边量增大到1.0 mm后,焊缝表面严重凹陷,不能实现接头的可靠焊接。

图4为不同错边量下锁底接头的横截面形貌。可以看出,焊缝主要呈上宽下窄的钉子形,为典型的激光焊接焊缝特征。由于焊接过程中热输入保

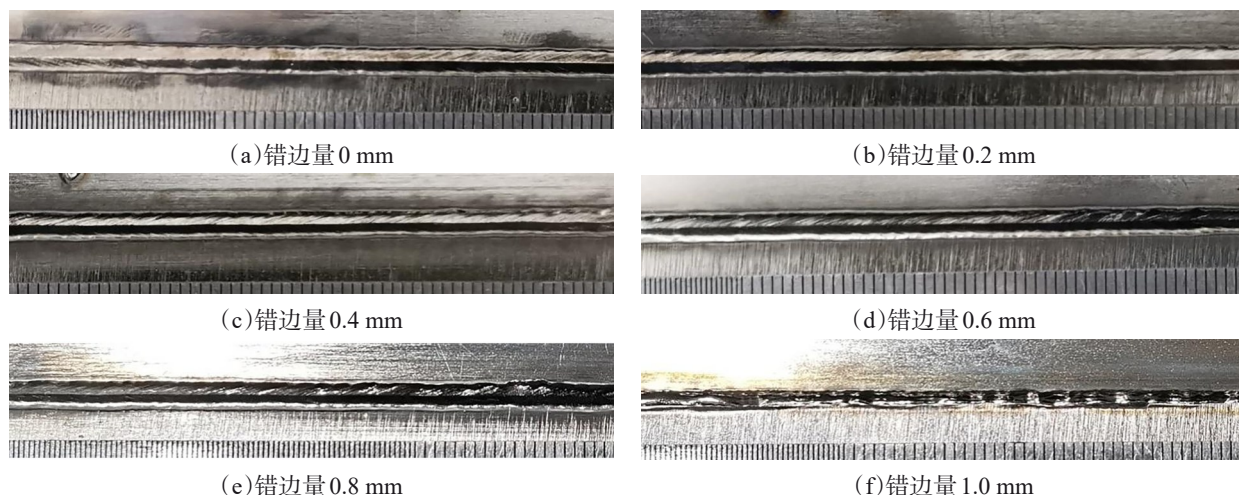


图3 不同错边量的焊缝表面成形

Fig. 3 Surface formation of welded seam with different misalignment values

持一致,焊缝下端的锁底熔化区的熔深也相对接近。在错边量为0.8 mm时,焊缝下端错边空隙位置附近观察到几个小气孔,而其他焊缝横截面均未发现明显的气孔缺陷。当错边量为0 mm和0.2 mm时,焊缝表面较为饱满,有一定余高,向两侧过渡较均匀;当错边量为0.4 mm、0.6 mm和0.8 mm时,随着错边量的增加,薄板与锁底台阶贴合处出现明显的空隙,熔池金属横向流入空隙中,导致焊缝两侧出现咬边,焊缝表面的下凹逐渐加大,但焊缝整体形貌还比较良好;当错边量达到1.0 mm时,由于错

边量过大,熔池整体下塌到错边空隙中,导致焊缝上端材料严重缺损,焊缝上表面完全凹陷下去,从而难以实现焊缝成形。

图5为不同错边量下焊缝的射线检测情况,可以看出,错边量为0 mm、0.2 mm和0.4 mm时,焊缝射线检测结果良好,焊缝成形均匀。错边0 mm和0.2 mm无明显缺陷;错边量0.4 mm时有个别小气孔,如图中箭头所示;错边量为0.6 mm,焊缝中的小气孔有所增加,但仍在标准允许的范围,焊缝近薄板侧边缘呈暗色,这是焊缝下侧在错边空隙处材

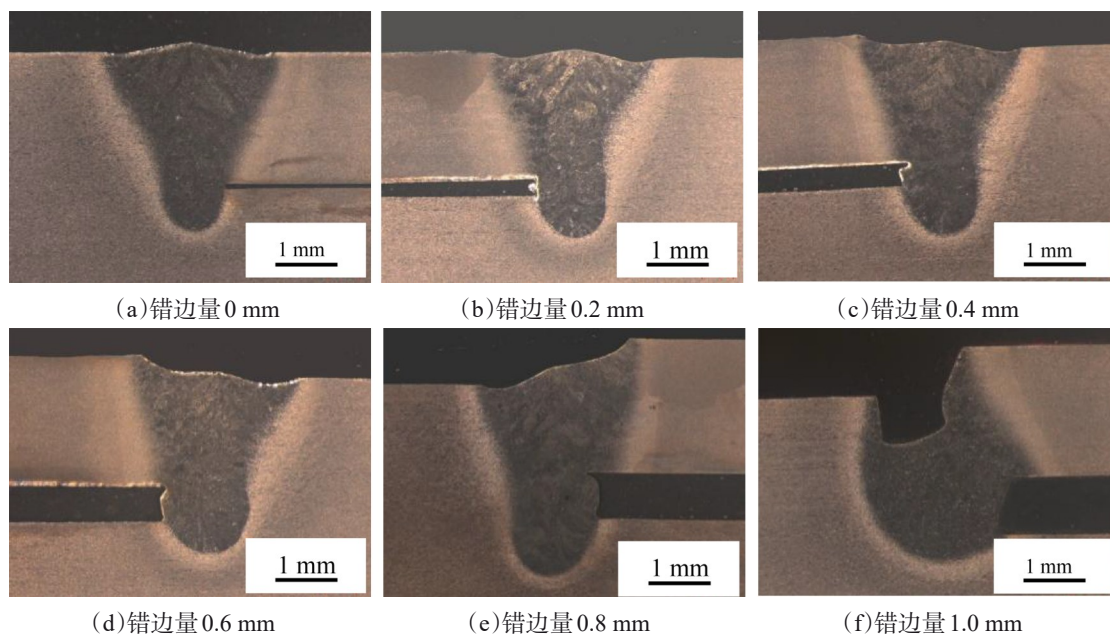


图4 不同错边量的焊缝横截面形貌

Fig. 4 Cross sectional morphology of welded seam with different misalignment values

料缺损所致。错边量 0.8 mm 时,焊缝局部位置气孔较多,超过标准要求。错边量 1.0 mm 时,焊缝厚板侧暗黑色明显,这是因为熔池下塌,焊缝表面凹陷;薄板侧呈明亮色,是因为熔池流入薄板侧错边空隙,透射厚度变大;焊缝中无明显气孔缺陷。

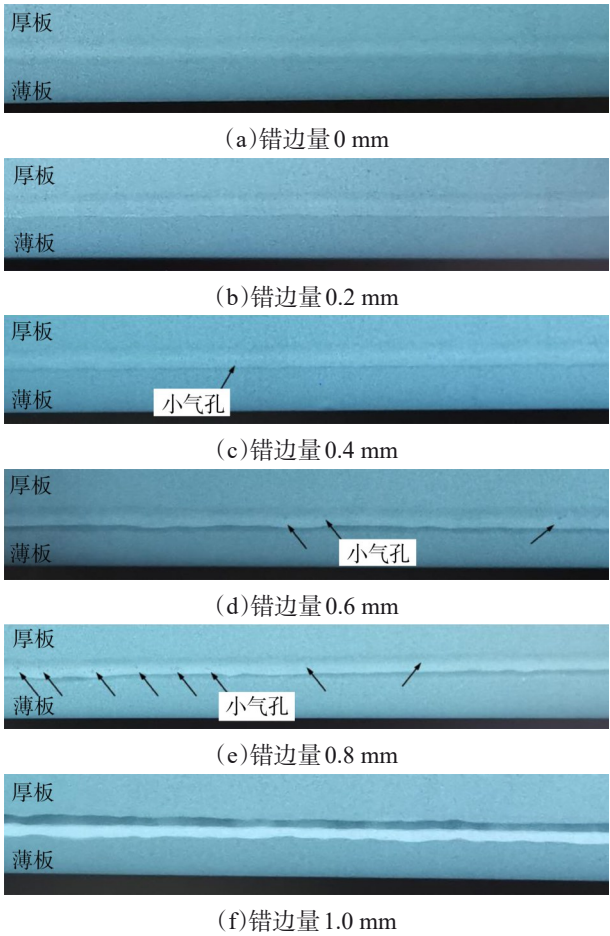


图 5 不同错边量的焊缝射线检测
Fig. 5 RT photos with different misalignment values

分析其原因:(1)错边增大,焊缝上表面存在明显高低差,焊缝左右两侧的激光聚焦特性存在偏差,使匙孔稳定性变差,局部坍塌埋入气体,熔池紊流,不利于气泡逸出,从而导致气孔风险变大;(2)焊缝背面无保护,错边量过大,在薄板与锁底台阶贴合的空隙处,熔池更容易卷入空气,导致根部保护效果不佳,从而导致气孔产生;(3)焊缝完全凹陷后,有效熔深减小,熔池中的气泡更容易逸出,从而出现错边量 1.0 mm 反倒无明显气孔的现象。

2.2 错边量对接头力学性能的影响

错边量 1.0 mm 时,焊缝难以有效成形,不进行

接头力学性能测试,其他错边量下的接头拉伸试验结果如表 2 所示。可以看出,当错边量为 0 mm 和 0.2 mm 时,接头的平均抗拉强度分别为 1 064 MPa 和 1 072 MPa,此时试样均断裂在母材,因此取平均强度 1 068 MPa 作为参考值,用于与错边量进一步增大后的强度比较。当错边量为 0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 时,试样均断裂在焊缝,平均抗拉强度分别为 1 059 MPa、1 050 MPa 和 955 MPa,随着错边量增大,接头抗拉强度降低。总体来说,错边量 0.4 mm、0.6 mm 的抗拉强度略低于 0 mm 和 0.2 mm 时,但仍能保持在较高强度水平;错边量 0.8 mm 时,接头抗拉强度降低幅度较大。

表 2 不同错边量的拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results with different misalignment values			
错边量/mm	抗拉强度/MPa	平均抗拉强度/MPa	断裂位置
0	1 074	1 064	母材
	1 064		
	1 053		
0.2	1 072	1 072	母材
	1 075		
	1 070		
0.4	1 064	1 059	焊缝
	1 059		
	1 053		
0.6	1 048	1 050	焊缝
	1 054		
	1 048		
0.8	955	955	焊缝
	940		
	969		

分析其原因:(1)错边量过大,会导致接头的有效承载面积减小,从而造成接头的力学性能下降;(2)在错边空隙处,薄板与焊缝根部相接的位置通常过渡不光滑,存在应力集中,在拉应力作用下,这些位置更容易成为起裂源;(3)错边较大,焊缝产生缺陷的倾向更大,而且焊缝下侧装配间隙处的保护效果也更差,可能出现局部焊缝性能减弱,从而导致接头抗拉性能降低。

图 6 为错边量 0.2 mm 和 0.6 mm 分别断裂在母材和焊缝的拉伸试样。错边量 0.2 mm 时,试样断裂在母材,均与拉伸方向呈斜 45° 断裂,表现出良好的断裂韧性。错边量 0.6 mm 时,试样均断裂在焊缝近厚板侧。为了更好地看清晰断裂在焊缝时的情况,截

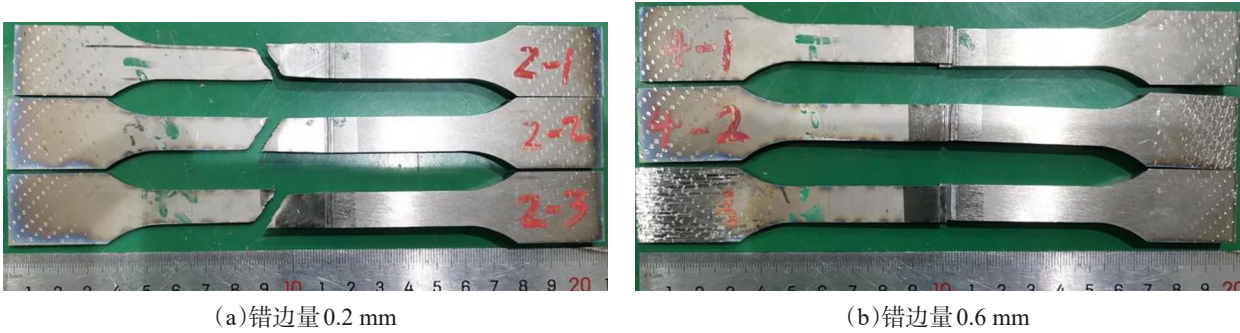


图6 接头拉伸断裂位置

Fig. 6 Tensile fracture position of the weld joint

取错边量0.4 mm、0.6 mm和0.8 mm时的试样横截面,金相形貌如图7所示。试样均沿着焊缝近厚板侧边缘与错边空隙处的连线呈斜45°断裂,表明焊

缝也具有较好的延展性。

图8为错边量0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm时的拉伸试样断口SEM形貌。错边量0.2 mm时,

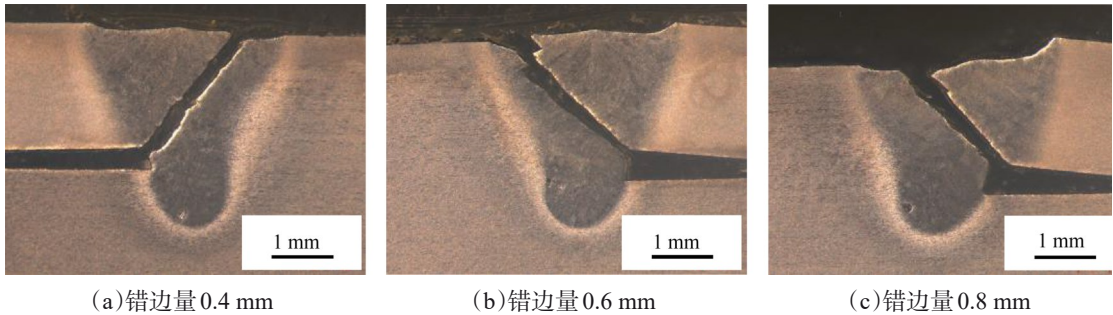


图7 拉伸试样横截面形貌

Fig. 7 Cross sectional morphology of tensile test specimen

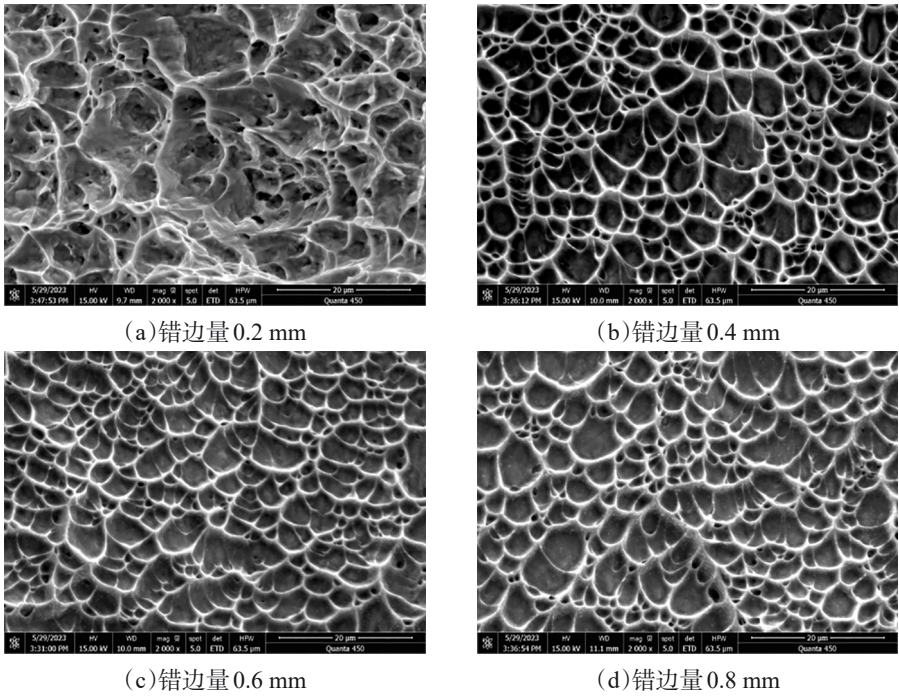


图8 拉伸断口SEM形貌

Fig. 8 The SEM morphology of tensile fracture

断裂在母材,断口分布着大且深的韧窝,为典型的韧性断裂特征,表明母材的韧性较高。错边量为0.4 mm、0.6 mm和0.8 mm时,焊缝断口特征相似,整个断口也布满了韧窝,也表现为韧性断裂,但相比于母材断口,韧窝更浅,尺寸更小,可见焊缝的延展性是低于母材的。

综上所述,对于2 mm厚的TC4锁底接头进行激光焊接时,当错边量控制在0.6 mm时,焊缝能够保持较好的成形质量,内部缺陷可控,接头性能良好,错边容忍度为壁厚的30%,错边适应性较好。尽管在薄板钛合金焊接中,通过要求装配错边控制在壁厚的10%以内以保证焊接质量,但在实际生产过程中,考虑到装配控制的难度和经济性,对于主要承受静载荷的结构件进行激光焊接时,可以考虑适当放宽局部错边量的要求。

3 结论

本研究针对2 mm厚度TC4钛合金锁底结构,探讨了不同错边量对其激光焊接成形质量及接头力学性能的影响。主要结论如下:

(1)随着错边量的增大,焊缝表面成形均匀性下降,咬边和凹陷现象加剧。当错边量超过0.8 mm时,焊缝表面出现严重凹陷,无法实现可靠焊接。

(2)错边量为0~0.6 mm时,焊缝内部质量良好,无超标气孔缺陷;错边量0.8 mm时,焊缝局部位置气孔较多,超过标准要求。

(3)接头抗拉强度随错边量增大而降低。错边量0.6 mm以下,接头抗拉强度保持在较高水平,与无错边接头相当;错边量0.8 mm时,抗拉强度显著下降。

(4)错边量0 mm和0.2 mm,试样断裂在母材;错边量0.4 mm、0.6 mm和0.8 mm,试样断裂在焊缝。断口均为韧性断裂特征,表明焊缝具有良好的延展性。

(5)2 mm TC4锁底接头激光焊接对错边具有一定的适应性,错边量控制在0.6 mm以下时,可以获得成形良好、内部质量合格、力学性能稳定的接头。该研究成果可为钛合金产品激光焊接生产应用提供参考,尤其在难以控制装配精度的大尺寸结构件

中,可适当放宽对错边量的要求,以提高生产效率和降低成本。

(6)目前尚未解决错边量超过0.6 mm后的成形缺陷、内部质量和性能降低等问题。后续可以考虑采用激光填丝焊接工艺对薄板钛合金焊接的错边适应性进行改善。

参考文献:

- [1] 张可召,何超威,戚宋歌,等. 热处理对激光焊接 β 钛合金组织及性能的影响[J]. 电焊机,2020,50(12):59-64.
ZHANG K Z, HE C W, QI S G, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and properties of laser-welded β -titanium alloy[J]. Electric Welding Machine,2020,50(12):59-64.
- [2] Lisiecki A. Welding of titanium alloy by different types of lasers[J]. Materials Science and Engineering,2012,58(2):209-218.
- [3] 赵晓龙,王彬,巩水利,等. 2.0 mm厚TC4钛合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 热加工工艺,2017,46(9):209-211.
ZHAO X L, WANG B, GONG S L, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of 2.0 mm thick TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology,2017,46(9):209-211.
- [4] 李颖,封小松,张聘,等. 0Cr15Ni5Cu4Nb中厚板锁底结构大功率光纤激光焊接工艺特性[J]. 焊接学报,2015,36(7):97-100.
LI Y, FENG X S, ZHANG D, et al. Process characteristics of high-power fiber laser welding for lock-bottom structure of 0Cr15Ni5Cu4Nb medium-thick plate[J]. Transactions of The China Welding Institution,2015,36(7):97-100.
- [5] 陈永城,张宇鹏,罗子艺,等. TC4/TA17异种钛合金激光焊接接头显微组织及力学性能[J]. 电焊机,2017,47(11):82-86.
CHEN Y C, ZHANG Y P, LUO Z Y, et al. Microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of TC4/TA17 dissimilar titanium alloys[J]. Electric Welding Machine,2017,47(11):82-86.
- [6] 付吉远. TA15薄板锁底接头激光焊接特性研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2021.
FU J Y. Research on the laser welding characteristics of TA15 thin-plate lock-bottom joints[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology,2021.