

TC4 钛合金激光窄间隙焊接工艺与组织特征研究

王翔宇, 巩水利, 杨 璟, 芦 伟, 单飞虎

(中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 使用 IPG YLS-5000 多模光纤激光器实现了 12mm 厚 TC4 钛合金激光窄间隙焊接, 优化了焊接工艺, 并对焊缝组织和显微硬度进行了分析。结果表明: 激光窄间隙焊接容易产生气孔和侧壁未熔合缺陷, 优化后的焊接工艺能显著减少气孔并消除未融合缺陷。母材显微组织为典型的等轴组织, 焊缝区显微组织由粗大的 β 柱状晶和网篮状马氏体 α' 组成。热影响区晶粒尺寸明显细化。热影响区组织由细小的针状马氏体 α' 、转变 α 组织和 β 转变组织构成。焊缝区和热影响区的显微硬度高于母材, 近焊缝热影响区显微硬度达到最大值。

关键词: 窄间隙; TC4 钛合金; 激光焊接; 显微组织; 显微硬度

Study on the Process Parameters Optimizing and Microstructure Characteristics in Narrow-Gap Laser Welding of Thick TC4 Plate

WANG Xiangyu, GONG Shuili, YANG Jing, LU Wei, SHAN Feihu

(Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The IPG YLS-5000 multi-mode fiber laser is used for the 12mm thick TC4 plate by the multiple-pass narrow-gap approach. Optimized process parameters are attained, as well as the microstructure in laser beam welds of TC4 titanium alloy is investigated. The result shows that incomplete fusion and porosity could be reduced using the optimized welding parameters. The microstructure of the base metal (BM) is typical equiaxed structure. The microstructure of fusion zone (FZ) is composed of β columnar crystal and basket weave martensite α' phase. The grain size of heat affected zone (HAZ) is obviously refined. The HAZ partially transformed is made up of martensite α' phase, transformed α and transformed β . Moreover, the microhardness of weld metal and heat affected zone is higher than that of base metal, and the hardness reaches to peak value in the heat affect zone near weld metal.

Keywords: Narrow-gap; TC4 titanium alloy; Laser welding; Microstructure; Microhardness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.104

钛合金有高比强度, 良好的抗腐蚀、抗蠕变和焊接性等优点, 广泛用于航空航天、船舶、汽车和化学工业^[1]。传统 TC4 厚板焊接方法主要有 TIG 焊和真空电子束焊等^[2-3]。TIG 焊焊接厚板一般采用开坡口多层多道焊接方式, 焊接坡口角度一般大于 30°, 因此存在焊接速度较慢、焊接变形大、残余应力大、焊缝组织粗大、焊缝中会存在夹钨等缺陷^[4-5]。真空电子束焊构件结构尺寸受限于真空室尺寸, 因而不能焊接大型结构件。近年来, 光纤激光器飞速发展, 其器输出功率高、光束质量好, 焊接柔性高, 有望成为金属材料厚板焊接的理想选择。与传统焊接技术相比, 激光窄间隙焊接能量较小, 焊接厚板时冷却速度较快, 热影响区窄, 焊接接头的残余应力和变形较小^[6]。传统焊接技术窄间隙焊接时, 通常通过开坡口、多道多层填丝焊实现。激光窄间隙焊接一般

采用开 I 型或 V 型坡口的单道多层焊, 填充面积较少, 有效节约了焊材, 使焊接效率进一步提高^[7-9]。目前, 国内外有关光纤激光焊接厚板钛合金的研究还鲜见报道。因此, 本研究以 12mm 厚 TC4 钛合金为对象, 研究窄间隙激光焊接工艺对钛合金焊缝成型和焊接缺陷的影响, 并分析接头各区域组织和显微硬度, 为后续大厚度钛合金窄间隙激光焊接打下良好的工艺基础。

1 试验材料与设备

试验使用的材料为退火态的 TC4 钛合金, 试板尺寸为 200mm × 100mm × 12mm, 化学成分如表 1 所示。焊接材料采用直径为 1.0mm 的 TC4 钛合金焊丝, 焊丝化学成分和母材相同。试样焊前清洁工艺过程为: 除油处理 → 水冲洗 → 酸洗 → 水冲洗 → 烘干保存。

表1 TC4化学成分质量分数 %

Al	V	Fe	O	H	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.01	其余

试验采用 IPG 公司生产的 YLS-5000 光纤激光器,最大输出功率为 5000W,波长 1070nm,光束模式为多模。采用芯径 0.3mm 的光纤传输激光,光纤连接到固定在 ABB 机械手上的 160mm 焦长的激光头上,最小光斑直径为 0.3mm。送丝机为德国 BINZEL M-DRIVE 型送丝机。焊接过程中工件静止,由机械手控制激光头移动进行激光焊接。焊接时通过同轴、侧吹和尾罩保护装置保护熔池和焊缝高温区。

2 TC4 钛合金激光窄间隙焊接工艺研究

2.1 坡口设计

窄间隙焊接坡口形式设计如图 1。根据激光自熔焊焊接工艺及前期大量试验和激光光路参数,坡口形状选择为 I 型,坡口钝边厚度 2mm,坡口宽度 2mm。

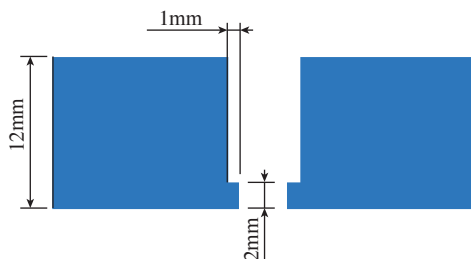


图1 坡口形状与尺寸
Fig.1 Groove geometry

2.2 焊接工艺优化

试验在离焦量为 +10mm、保护气为工业纯 Ar、气流量 15L/min 不变的条件下进行。焊接工艺参数范围如表 2 所示。

表2 窄间隙激光焊接工艺参数

	激光功率/kW	焊接速度 / (m·min ⁻¹)	送丝速度 / (m·min ⁻¹)
激光自熔焊	1.5~4.5	0.9~3	0
激光填丝焊	2~4	0.9~3	0~4

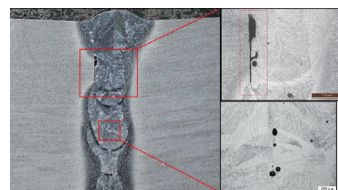
分别优化窄间隙激光焊接工艺中的激光自熔焊和激光填丝焊焊接工艺。在对坡口钝边激光自熔焊工艺参数进行优化时,发现激光在窄间隙坡口内进入进行焊接时会导致钝边背部出现凹坑,如图 2 (a) 所示。分析原因认为熔化的金属在窄间隙坡口内受到的毛细作用力和自身重力综合作用,使熔化的金属在焊缝内上升,致使坡口背面成形不良,形成凹坑。优化工艺后,在坡口钝边背面进行激光自熔焊焊接,发现在较大的激光功

率下焊缝成形不良。这是由于激光功率过高导致焊接过程中飞溅较多,从而影响后续的焊接。激光功率较小时,焊缝背面的熔宽小于坡口钝边平台宽度时坡口底部不出现凹坑,坡口钝边激光自熔焊焊缝成形良好。

对窄间隙激光填丝焊接工艺进行优化,发现激光功率较小时,因不能稳定熔化焊丝,导致焊接过程不稳定,焊缝易出现未熔合缺陷且气孔较多,如图 2 (b) 所示;当激光功率较大时,有利于减少焊缝中的未熔合缺陷和气孔缺陷,焊接稳定性较高,但是过大的激光功率会因热输入过大而导致焊缝晶粒严重长大。



(a) 钝边背部凹坑



(b) 焊缝未熔合且气孔较多

图2 TC4焊接接头缺陷

Fig.2 Defect of the welding joint

优化后的焊接工艺参数如表 3,使用优化后的工艺参数焊接 12mm 厚 TC4 钛合金。第 1 道焊接为激光自熔焊,2~4 道焊接为激光填丝焊。焊接接头截面形貌如图 3 所示。对焊缝进行 X 射线检测发现:焊缝无未融合缺陷,焊缝气孔数量显著减少,但并未完全消除。

3 显微组织特征研究

3.1 焊接接头的显微组织

图 4 为 TC4 钛合金母材显微组织照片,可以看出 TC4 钛合金母材显微组织为典型的等轴组织,由均匀分布的初生 α 相和少量转变 β 组织构成。

焊缝区显微组织如图 5 所示,可看出焊缝区组织为粗大的 β 柱状晶和 β 柱状晶内快冷形成的网篮状马氏体组成。 β 柱状晶以熔合线附近半融化的金属为基底向焊缝中心外延生长,边界较为清晰。第 1 道激光自熔焊的 β 柱状晶生长方向垂直于融合线向下生长,长大到焊缝中心停止,如图 5 (a) 所示;如图 5 (b) 所示,

表3 窄间隙激光焊接工艺参数

焊道	激光功率/kW	焊接速度 / (m·min ⁻¹)	送丝速度 / (m·min ⁻¹)
1	2.5	2.1	0
2~5	2.5	1.2	0~4



图3 焊缝截面形貌

Fig.3 Macro-photo of TC4 joint

第2~5道激光填丝焊的 β 柱状晶生长方向为垂直于融合线向上生长,且在最后一道填丝焊向上生长现象最为明显。分析原因认为,这种现象可能是由于激光自熔焊和激光填丝焊的热源分布特点及热传导不同导致的。对比图5(a)和(b),可以看出激光自熔焊焊缝的 β 柱状晶晶界明显,晶粒尺寸较小, α' 马氏体密度较低;而激光填丝焊的 β 柱状晶晶界模糊,晶粒尺寸较大,且 α' 马氏体密度较大。分析认为,这是激光自熔焊焊接速度快,金属冷却速度较快,而填丝焊焊接速度慢,热输入大,冷却速度较慢引起的。

由图6(a)可以看出,热影响区宽度约为0.6mm,与母材的边界较为清晰。该区域晶粒尺寸与母材晶粒尺寸相比明显细化。从图6(b)可以进一步看出,热影响区显微组织由细小的针状马氏体 α' 、转变 α 组织和 β 转变组织构成。

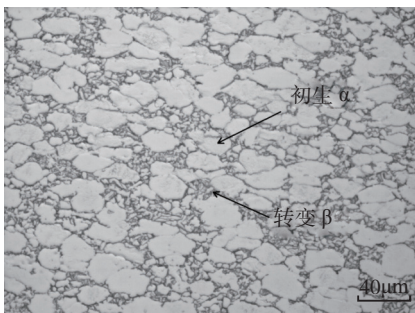
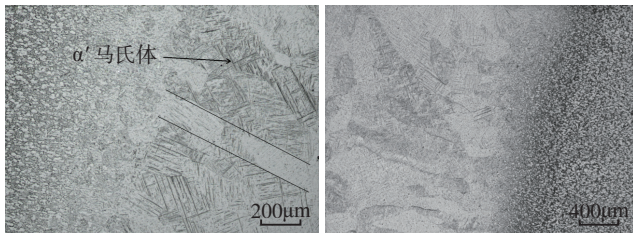


图4 母材显微组织

Fig.4 Microstructure of TC4 alloy



(a) 焊道1

(b) 焊道2~5

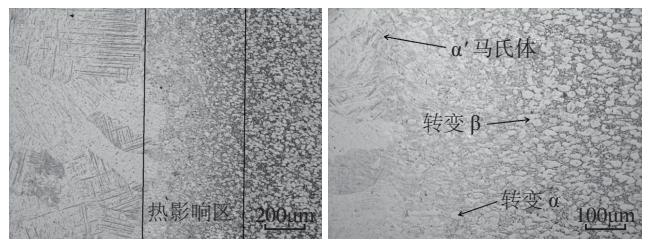
图5 TC4钛合金焊缝区显微组织

Fig.5 Microstructure of weld metal of TC4 alloy

3.2 TC4钛合金激光窄间隙焊接接头的显微硬度

对激光窄间隙焊接接头横截面每一道焊缝的显微硬度进行了测试分析,如图7所示。可以看出5道焊缝的显微硬度分布趋势相似:焊缝和热影响区显微硬度较高,母材显微硬度较低,显微硬度在近焊缝热影响区达到峰值。焊缝区及热影响区硬度值较高是由于存在 α' 马氏体组织。在靠近焊缝区域的热影响区中存在大量细小的针状 α' 马氏体组织,马氏体密度较高,由于 α' 马氏体的大小和密度都会影响显微硬度值,所以因此整个焊缝中距离近焊缝热影响区的显微硬度值最高。

如图8所示,可以看出每道焊缝硬度平均值逐渐升高。这是由于与激光填丝焊相比,第一道激光自熔焊的 α' 马氏体组织密度较小,因此激光自熔焊显微硬度较低,且后续的激光填丝焊对前一道焊接有热处理作用,降低了焊缝的显微硬度值。



(a) 热影响区宽度

(b) 组织构成

图6 热影响区显微组织

Fig.6 Microstructure of HAZ

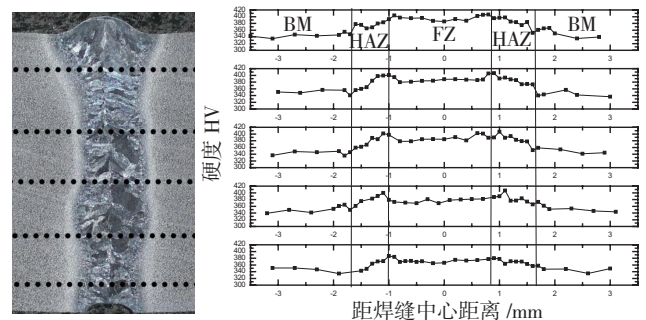


图7 焊缝横截面显微硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution in cross-section of welded joint

4 结论

(1) 通过优化激光窄间隙焊接工艺参数,成功焊接了12mm厚TC4钛合金板材,焊缝成形良好,消除了未融合缺陷,并有效减小了气孔,焊缝深宽比可达5:1。

(2) 钛合金母材显微组织由等轴 α 相和 β 相组成的等轴组织构成。焊缝区显微组织为粗大 β 柱状晶和网篮状 α' 马氏体组织。

(3) 热影响区组织由细小的针状马氏体 α' 、转变 α 组织和 β 转变组织构成。

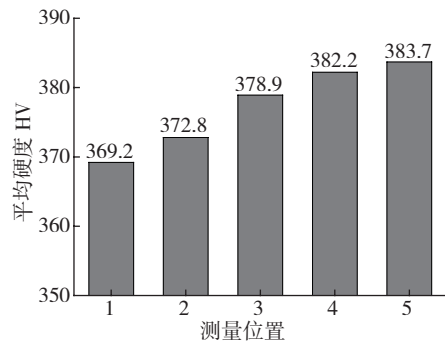


图8 焊缝显微硬度平均值

Fig.8 Average microhardness distribution in cross-section of welded joint

(4) 焊缝区和热影响区显微硬度较高,近焊缝热影响区的硬度达到峰值。激光自熔焊与激光填丝焊相比焊缝硬度值较低。

参考文献

[1] 巩水利,张雁,柴国明.高能束流焊接技术的发展及其在航空领域的应用[J].国防制造技术,2009,6(3):12-15.

GONG Shuili, ZHANG Yan, CHAI Guoming. Application and development of power beam processing technology[J]. Defense Manufacturing Technology, 2009, 6(3): 12-15.

[2] QI Y L, DENG J, HONG Q, et al. Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet [J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 280(1):177-181.

[3] 赵博,李国元,许广兴.钛合金焊接技术在飞机制造中的应用和展望[J].航空制造技术,2013(16):122-125.

ZHAO Bo, LI Guoyuan, XU Guangxing. Application and prospect of titanium alloy welding technology in aircraft manufacture [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16): 122-125.

[4] ELMESALAMY A, FRANCIS J A, LI L. A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2014, 113: 49-59.

[5] LIU H, NAKATA K, YAMAMOTO N, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties in laser beam welds of Ti6Al4V alloy[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(3): 1460-1470.

[6] 黄坚.厚板窄间隙激光多层焊接技术进展[J].金属加工2013(S2):95-98.

HUANG Jian. Development of the multiple-pass narrow-gap laser welding of thick plate[J]. Metal Working, 2013(S2): 95-98.

[7] ELMESALAMY A S, LI L, FRANCIS J A, et al. Understanding the process parameter interactions in multiple-pass ultra-narrow-gap laser welding of thick-section stainless steels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1): 1-17.

[8] ATABAKI M M, NIKODINOVSKI M, CHENIER P, et al. Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 59(4): 68-92.

[9] YU Y C, YANG S L, YIN Y, et al. Multi-pass laser welding of thick plate with filler wire by using a narrow gap joint configuration[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(7): 2125-2131.

(责编 海山)

(上接第103页)

Genetic algorithm applied to investigate cutting process parameters influence on workpiece price formation[J]. Material and Manufacturing Processes, 2011, 26(3): 550-557.

[3] SARDIFIAS R Q, SANTANA M R, BRINDIS E A. Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2006, 19(2): 127-133.

[4] ZAIN A M, HARON H, SHARIF S. Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process[J]. Expert Systems With Applications, 2010, 37(6): 4650-4659.

[5] ÖZEL T, SIMA M, SRIVASTAVA A K, et al. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations[J]. Annals of the CIRP-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 77-82.

[6] 陈建玲,孙杰,李剑峰.钛合金铣削加工参数多目标优化研究[J].中国机械工程,2014,25(2):169-173.

CHEN Jianling, SUN Jie, LI Jianfeng. Multi-objective optimization of cutting parameters during milling of titanium alloys[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(2): 169-173.

[7] 时政博,黄筱调,丁文政,等.基于自适应控制技术的铣削参数优化[J].组合机床与自动化加工技术,2012(4):105-107.

SHI Zhengbo, HUANG Xiaodiao, DING Wenzheng, et al. Based on adaptive control technology to manufacture of machine tool research intelligent modular[J]. Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(4): 105-107.

[8] 张青,陈志同,张平,等.基于粒子群算法的切削参数优化及其约束处理[J].航空精密制造技术,2010,46(1):32-36.

ZHANG Qing, CHEN Zhitong, ZHANG Ping, et al. An algorithm for cutting parameter optimization and constraint handling based on particle swarm optimization[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(1): 32-36.

[9] 贾兴民,李剑峰,孙杰,等.基于切削力与振动特性钛合金铣削工艺参数研究[J].机械设计与制造,2014,286(12):204-208.

JIA Xingmin, LI Jianfeng, SUN Jie, et al. Study on cutting parameter optimization for milling titanium alloys based on cutting force and vibration characteristics[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, 286(12): 204-208.

[10] 毛文革.钛合金的切削加工[J].航空制造技术,2001(1):64-66.

MAO Wenge. Cutting of Ti alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2001(1): 64-66.

[11] 任军学,姚倡锋,田卫军,等.球头铣刀结构参数对钛合金铣削表面完整性的影响[J].航空制造技术,2010(1):81-84.

REN Junxue, YAO Changfeng, TIAN Weijun, et al. Effect of ball-end milling structural parameters on surface integrity for titanium alloy milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(1):81-84.

[12] VAPNIK V N. Statistical learning theory[M]. New York: Springer, 1998.

[13] GILL S S, SINGH J. An adaptive neuro-fuzzy inference system modeling for material removal rate in stationary ultrasonic drilling of sillimanite ceramic[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(8): 5590-5598.

[14] International Organization for Standardization. Tool-life testing with single-turning tools: ISO 3685-1993[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1993.

(责编 海山)