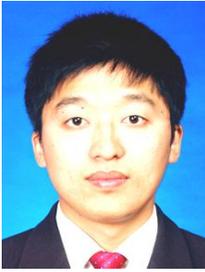


激光焊接 TC4 钛合金组织性能研究

董智军^{1,2} 吕涛¹ 雷正龙¹ 陈彦宾¹ 李俐群¹ 周恺³ 马瑞³

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 3. 北京动力机械研究所, 北京 100074)



摘要: 研究激光焊接对 TC4 钛合金焊缝成形和力学性能的影响, 并利用 OM、XRD 和 TEM 等手段对焊接接头的显微组织特征进行了分析。结果表明, 激光焊接 TC4 钛合金成形较好, 但在焊缝熔合线附近容易产生圆形气孔。焊缝由单一的 α' 马氏体构成, 并呈网篮状分布。热影响区组织为 α' 马氏体和初始 α 相。焊缝和热影响区的显微硬度明显高于母材, 而焊缝的硬度最高且硬度分布平缓。TC4 钛合金焊接接头的室温平均抗拉强度为 1126MPa, 与母材的抗拉强度相当, 延伸率为 11.12%, 比母材略低, 焊接接头均断在母材区域。

关键词: 钛合金; 激光焊接; 微观组织; 显微硬度; 抗拉强度

Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded TC4 Alloys

Dong Zhijun^{1,2} Lv Tao¹ Lei Zhenglong¹ Chen Yanbin¹ Li Liqun¹ Zhou Kai³ Ma Rui³

(1.State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin 150001;

2. Shanghai Spaceflight Precision Mechanism Institute, Shanghai 201600;

3. Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing 100074)

Abstract: The effect of laser welding on the weld appearance and mechanical properties of TC4 (Ti-6Al-4V) alloys were discussed, and the microstructure characterization of the joints was investigated by means of OM, XRD and TEM. The experimental results showed that a good weld appearance could be obtained; however, some round blowholes emerged easily near the weld fusion line. The weld seam is only composed of α' martensite which takes on basket weave structure. And the microstructure of heat affected zone is constituted of α' martensite and the initial α phase. The microhardness of the weld seam and heat affected zone is higher than that of the base metal. And the weld seam exhibits the highest values in the welded joint. The tensile strength of the laser welded joints is 1126 MPa at room temperature, which is equal to that of the base metal. The elongation of the joint, however, is slightly lower than the base metal with a ductility of 11.12%. The welded joints of TC4 alloys are all broken on the area of the base metal.

Key words: Ti alloy; laser welding; microstructure; microhardness; tensile strength

1 引言

钛合金由于具有比强度高、抗腐蚀性能好, 以及良好的耐热性和焊接性等优点, 在航天、航空、核工

业、舰船等国防和民用领域得到广泛应用^[1~3]。其中, Ti-6Al-4V(TC4)钛合金作为一种典型 $\alpha+\beta$ 两相钛合金, 在飞机机身及其各种承力构件、发动机叶片、导弹舵翼等大型结构中广泛使用, 据目前统计, TC4 钛

作者简介: 董智军 (1988-), 硕士, 焊接专业; 研究方向: 钛合金激光焊接组织和性能方面的研究。

收稿日期: 2012-12-11

合金在航空航天中用量超过 80% 以上, 而且关键部件大都采用了 TC4 钛合金焊接结构^[4]。TC4 钛合金在超过 350℃ 时, 容易吸氢吸氧, 因此焊接过程中的保护也至关重要^[5]。而激光焊焊缝熔宽小, 焊接过程易于保护, 加工精度高, 而且焊接大尺寸复杂钛合金具有相当的柔性^[6-7]。因此本文研究激光焊接对 TC4 钛合金焊缝成形、焊接接头组织特性和力学性能的影响规律, 为 TC4 钛合金的焊接应用和合理选择激光焊接工艺奠定基础。

2 试验方法

试验材料是 2.5mm 厚的 Ti-6Al-4V 钛合金热轧板材, 其化学成分如表 1 所示, 抗拉强度为 1136MPa, 延伸率为 14.60%。试验采用的激光器是美国 IPG 公司生产的 YLS5000 光纤激光器。焊前用酸洗液 (3ml HF, 30ml HNO₃ 和 67ml H₂O) 将试样表面的氧化膜除去, 再用丙酮、酒精洗净后放入烘干箱干燥 1h。为了防止氧化焊接时采用双面氩气保护, 保护气流量为 10~15L/min。焊接参数为: 焊接功率 1.2kW, 焊接速度 1.0m/min。

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金化学成分 质量分数, %

Al	V	Nb	O	H	Ti
7.14	5.65	2.48	≤0.08	≤0.01	Balance

焊接完成后, 焊缝宏观组织采用 OLYMPUS GX71 光学显微镜进行分析; 采用 D/MAX-rB 型 X 射线衍射仪和 Tecnai G2 F30 型透射电子显微镜 (TEM) 对焊缝的微观组织进行观察。利用 HVS-1000Z 型显微硬度计进行显微硬度分析, 载荷 200g, 加载时间 10s。室温拉伸性能在 INSTRON 5569 电子万能试验机进行, 拉伸速度为 1mm/min。拉伸试样尺寸如图 1 所示, 标距为 10mm。

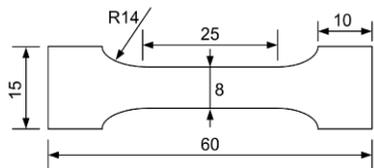


图 1 拉伸试样尺寸

3 试验结果与分析

3.1 焊缝成形

图 2 显示了激光焊接 TC4 钛合金的表面成形。一般地, 钛合金焊缝表面呈银白色表明保护效果好, 焊缝表面呈黄色或蓝色表明保护效果差。图 2 显示的 TC4 钛合金激光焊接焊缝正面银白色中略带黄色, 表明焊缝正面略微氧化。焊缝背面则呈银白色, 焊接过程中保护良好。但是, 在 TC4 钛合金激光焊接过程中熔合线附近容易形成圆形气孔, 如图 3 所示。母材中含有少量的氢以及焊前清理残留的油污、氧化膜等均可能在焊接过程中形成气孔。

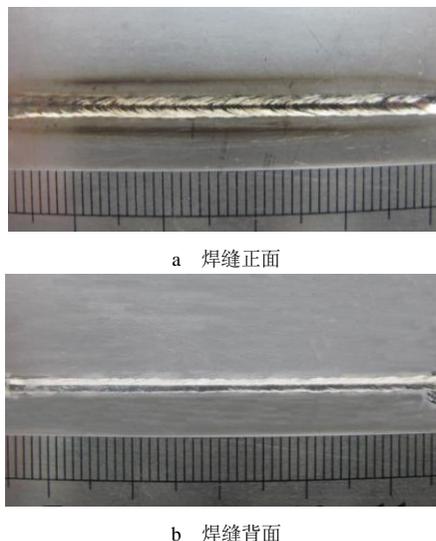


图 2 激光焊接 TC4 钛合金表面成形

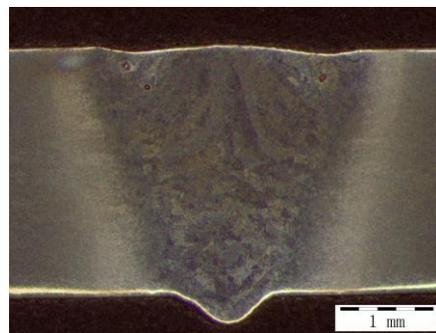


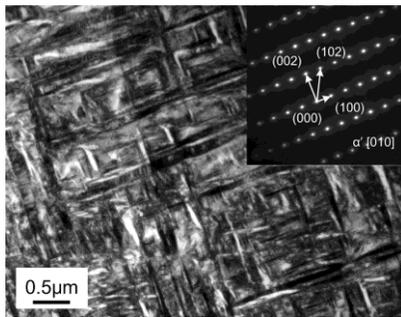
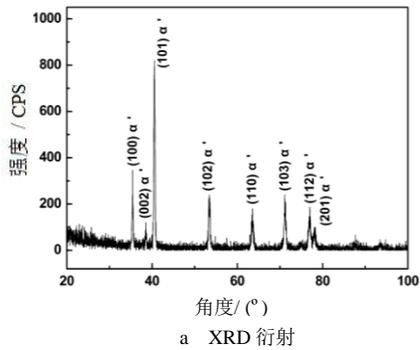
图 3 TC4 钛合金焊缝横截面成形

3.2 焊接接头组织

利用 XRD 和 TEM 对焊缝组成相进行分析, 发现焊缝由单一的 α' 马氏体构成, 如图 4 所示。焊后熔合区自 β 单相区快速冷却至室温, β 相并未通过扩散转变为稳定的 α 相, 而是通过切变形成马氏体。图 5 显示了 TC4 钛合金焊接接头微观组织。从图 5a 可观察到焊缝中高温形成的 β 柱状晶粒, 降温过程中 α' 相马氏体从 β 柱状晶边界形核, 若干相互平行的 α' 马氏体

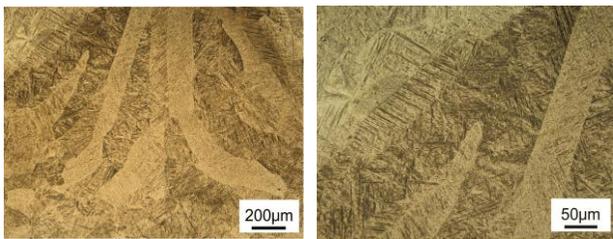
经长大贯穿整个 β 柱状晶 (图 5b)。在相互平行状 α' 马氏体之间还会形成细小的二次针状 α 相, 最终焊缝呈现网篮状组织。

热影响区由 α' 马氏体和初始 α 相构成, 如图 5c 所示。靠近熔合线的热影响区焊接过程中最高温度达到 β 单相区, 快速冷却时 β 相形成 α' 马氏体。远离熔合线区域焊接过程中最高温度达到 $\beta+\alpha$ 双相区, α 相在冷却过程中未发生转变, 形成 α' 马氏体+初始 α 相。图 5d 是母材组织, 母材由初始 α 相和 β 相组成, α 相均匀地分布在 β 相基体上。



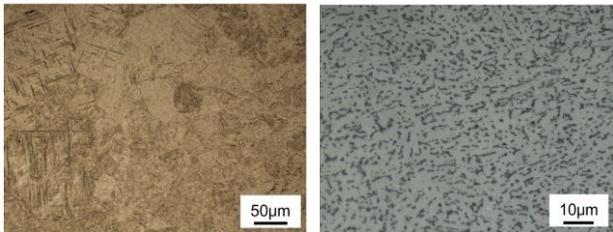
b TEM 分析

图 4 TC4 合金焊缝组成相



a 焊缝上部低倍

b 焊缝上部高倍



c 热影响区

d TC4 母材

图 5 TC4 合金焊接接头组织

3.3 焊接接头显微硬度

图 6 显示了 TC4 钛合金焊接接头显微硬度分布, 焊缝和热影响区的显微硬度明显高于母材, 而焊缝的硬度最高。焊缝区域硬度分布平缓, 平均显微硬度为 405.37HV。靠近熔合线的热影响区显微硬度较高, 随着到熔合线距离的增加, 显微硬度下降较快。焊接接头的硬度和组织有直接关系, 焊缝由 α' 相马氏体构成, α' 相马氏体硬度较高, 因此焊缝的显微硬度最高。靠近熔合线的热影响区 α' 相马氏体较多, 靠近母材的热影响区由少量的 α' 相马氏体和较多的初始 α 相构成, 因此随着到熔合线距离的增加, 显微硬度下降。母材不含 α' 相马氏体则显微硬度最低。

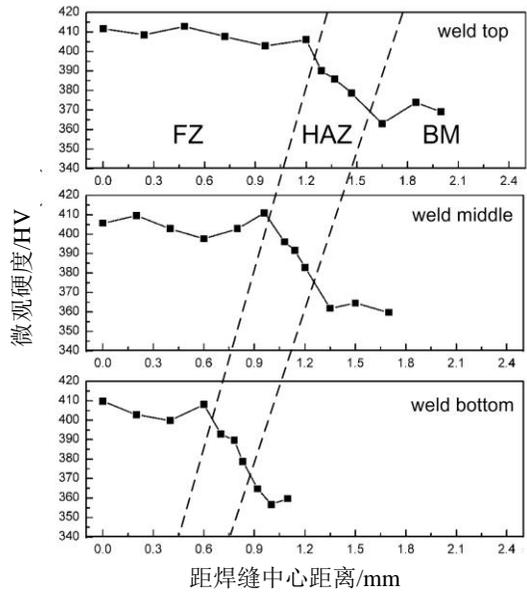


图 6 TC4 钛合金激光焊接接头显微硬度

3.4 焊接接头拉伸性能

表 2 TC4 钛合金激光焊接接头室温拉伸性能

	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断裂位置
1	1165	12.30	母材
2	1088	9.85	母材
3	1126	11.20	母材
平均	1126.34	11.12	

TC4 钛合金激光焊接接头的室温平均抗拉强度为 1126.34MPa, 与母材的抗拉强度相当, 延伸率为 11.12%, 比母材略低, 如表 2 所示。焊接接头的断裂位置均在母材区域, 说明焊缝的抗拉强度稍高于母材。焊缝由 α' 相马氏体构成, 这也表明了 α' 相马氏体的强度高于母材的初始 α 相和 β 相。焊接接头由母材、

热影响区和焊缝构成，塑性受三个区域的共同影响，焊缝和热影响区的塑性都较差，因此焊接接头整体的塑性略低于母材。

4 结束语

a. TC4 钛合金由初始 α 相和 β 相组成。焊缝由单一的 α' 马氏体构成，并呈网篮状分布。热影响区组织为 α' 马氏体和初始 α 相。

b. 焊缝和热影响区的显微硬度明显高于母材，而焊缝的硬度最高且硬度分布平缓。显微硬度较高的 α' 相马氏体是导致焊缝显微硬度升高的直接原因。靠近熔合线的热影响区显微硬度较高，随着距熔合线距离的增加，显微硬度下降较快。

c. TC4 钛合金焊接接头的室温平均抗拉强度为 1126.34MPa，与母材的抗拉强度相当，延伸率为 11.12%，比母材略低，焊接接头均断在母材区域。

参考文献

- 1 Li X Z, Hu S B, Xiao J Z, et al. Effects of the heterogeneity in the electron beam welded joint on fatigue crack growth in Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 529: 170~176
- 2 Wang S G, Wu X Q. Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding[J]. Materials and Design, 2012, 36: 663~670
- 3 许鸿吉, 尹丽香, 李晋炜, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 43~47
- 4 王金友. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 78~79
- 5 Lu W, Shi Y W, Lei Y P, et al. Effect of electron beam welding on the microstructures and mechanical properties of thick TC4-DT alloy[J]. Materials and Design, 2012, 34: 509~515
- 6 Wang S H, Wei M D, Tsay L W. Tensile properties of LBW welds in Ti-6Al-4V alloy at evaluated temperatures below 450°C[J]. Materials Letters, 2003, 57:1815~1823
- 7 Li R F, Li Z G, Zhua Y Y, et al. A comparative study of laser beam welding and laser-MIG hybrid welding of Ti-Al-Zr-Fe titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A 2011, 528:1138~1142

////////////////////////////////////

(上接第 26 页)

气瓶制造完成后对其性能进行了试验验证，主要包括热循环、交变湿热、振动试验、冲击试验、加速度试验、疲劳试验、爆破试验等。各项试验结果都能满足设计要求，其中爆破压力达到 158MPa。气瓶部分试验照片如图 2 所示。

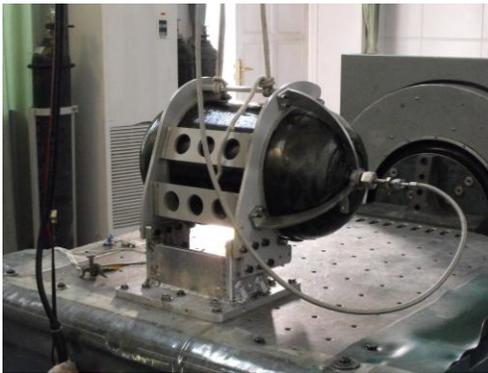


图 2 气瓶振动试验照片

5 结束语

由于气瓶压力很高，爆破压力达到了 150MPa，给研制带来了很大困难，主要有：内衬封头的变壁厚设计和挂丝台结构设计；复合层由于厚度较厚（单边厚度约 10mm），层数较多，在挂丝台附件堆积特别严重，各层间的纤维张力控制也特别困难。经过多次工艺验证，最终产品通过全部试验验证，所有指标达到了设计要求，

参考文献

- 1 王小永. 航天系统用纤维缠绕金属内衬压力容器的寿命分析技术[J], 玻璃钢/复合材料, 2007
- 2 Tam W H, Jackson AC, Nishida E, et al. Design and Manufacture or the ETS VIII Xenon Tank[J].AIAA 2000-3677
- 3 张天平. 空间应用复合材料压力容器研制技术[J]. 上海航天, 2002