

## TC2 钛合金 Nd:YAG 激光焊接工艺及微观组织

付鹏飞, 胡芳友, 崔爱永, 赵培仲, 卢长亮, 胡 滨

(海军航空工程学院 航空宇航科学与技术, 山东 青岛 266041)

**摘 要:** 为修复飞机 TC2 钛合金结构裂纹,应用 YAG 激光器进行了 TC2 钛合金的焊接实验。利用扫描电镜(SEM)和电子显微硬度仪分析了工艺参数对焊缝形貌和焊缝截面显微硬度的影响。结果表明:随着电流的升高,焊缝的熔宽逐渐增加,焊缝截面形貌由钉型向 X 型转变;随着焊接速度的增大,焊缝的熔宽呈减小趋势。采用电流 150 A、脉宽 10 ms、频率 4 Hz、焊接速度 2.0 mm/s 的工艺参数可获得宏观质量良好的焊缝。焊缝熔合区可能为针状马氏体  $\alpha'$  交织成的网篮组织;热影响区为 75  $\mu\text{m}$  左右的环形带,其组织可能是由等轴的  $\alpha$  相和针状马氏体组成,靠近熔合线部分较之远离熔合线的区域针状马氏体数量更多且更加密集,靠近熔合线区域有逐渐减弱的再结晶,再结晶尺寸明显大于基材;焊缝截面的显微硬度呈明显的阶梯状分布,基材的硬度在 310~350 HV<sub>0.5</sub> 之间,熔合区的硬度在 500~600 HV<sub>0.5</sub> 之间,熔合区硬度相对于基材提高了 60% 左右。

**关键词:** TC2 钛合金; 激光焊接; 工艺参数; 微观组织; 显微硬度

**中图分类号:** TG 456.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9289(2011)06-0087-05

### The Welding Technology and the Microstructure of TC2 Alloy by Nd:YAG Laser

FU Peng-fei, HU Fang-you, CUI Ai-yong, ZHAO Pei-zhong, LU Chang-liang, HU Bin

(Naval Aeronautical Engineering Institute (NAEI), Qingdao, Shandong 266041)

**Abstract:** In order to repair the cracked structure of aero TC2 alloy, the welding experiment of TC2 alloy was carried out by YAG laser. The effect of process parameters on welding seam was investigated. The microstructure of welding seam was observed by SEM. The microhardness of the cross-sections of welding seam was measured. The results show that the weld width increases with the increasing of electric current. At the same time, the microstructure of welding seam changes from T to X type. The increase of welding rate reduces the weld width. According to the test data, a good quality of welding seam can be obtained by the electric current of 150 A, pulse width of 10 ms, frequency of 4 Hz and the welding rate of 2.0 mm/s. The fusion zone is attributed to basketweave microstructure consisted of needle type martensite  $\alpha'$ . The heat affected zone is a circumferential band with the dimension of 75  $\mu\text{m}$ , which is consisted of needle type martensite and equiaxed  $\alpha$  phases. There is more and denser needle type martensite in the region near the fusion line than that away the fusion line. The trend of recrystallization become weak gradually close to the fusion line. The recrystal grain size is obviously greater than that in the base material. Microhardness along the cross-sections is distributed like a ladder. The microhardness of the base material is from 310 to 350 HV<sub>0.5</sub>. And the microhardness of fusion zone is enhanced by 60% to 500~600 HV<sub>0.5</sub>.

**Key words:** TC2 alloy; laser welding; process parameters; microstructure; microhardness

## 0 引 言

钛合金比强度高,耐腐蚀性好,热加工工艺性优越,广泛应用于航空航天、医疗、汽车、军事、石油化工、核工业等领域<sup>[1-3]</sup>。其中,TC2 钛合金是一种具有中等强度、较好塑性、焊接性和稳定性的近  $\alpha$  型钛合金<sup>[4]</sup>,常通过焊接应用于飞机、

发动机薄壁结构件。目前,TC2 焊接主要采用氩弧焊技术,氩弧焊易造成焊缝应力集中、晶粒组织粗大、热影响区较宽、变形大、气孔缺陷严重,需要后续热处理。YAG 激光具有高能量密度、深穿透、高精度、适应性强等优点而受到人们的关注<sup>[5-9]</sup>。为得到综合性能良好的焊缝,文中探索把 YAG 激光技术应用于 TC2 的焊接,通过分析工艺参数对焊缝形貌的影响规律,优化工艺参数组合;SEM 观察微观组织,测量焊缝显微硬度

分布,从而获得良好焊缝质量的焊接技术。

## 1 试验方法与条件

试验材料为 TC2 钛合金,尺寸为 20 mm×30 mm,板厚为 1.5 mm。化学成分如表 1 所示。

表 1 TC2 钛合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 The composition of TC2 ( $w/\%$ )

元素	Al	Mn	Si
质量分数	4.09	1.66	≤0.10
元素	Fe	Zr	C
质量分数	≤0.10	≤0.05	0.005

试验采用 JHM-1GX-200B 型脉冲 Nd:YAG 激光器。试样焊接面经 400 号砂纸机械打磨,用丙酮清洗。在高纯氩气正反面保护,正面同轴保护气体流量为 0.6 L/min,反面侧吹流量为 0.5 L/min 的条件下,通过正交试验法优化工艺参数,如表 2 所示。

表 2 正交试验表

Table 2 The orthogonal experiment table

编号	电流/ A	脉宽/ ms	频率/ Hz	速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	焊缝 质量*
1	140	6	4	1.5	-1
2	140	8	5	2.0	-2
3	140	10	6	2.5	-3
4	150	6	5	2.5	-1
5	150	8	6	1.5	+1
6	150	10	4	2.0	0
7	160	6	6	2.0	+2
8	160	8	4	2.5	+1
9	160	10	5	1.5	+3
I <sub>j</sub>	-6	0	0	+2	
II <sub>j</sub>	0	0	0	0	
III <sub>j</sub>	6	0	0	-2	
R <sub>j</sub>	6	0	0	2	

(\*注:焊缝未透焊缝质量数值为负,熔透为正,数值越接近 0 焊缝质量越好)

采用 SSX-500 型扫描电镜和 BX51M 型光学金相显微镜观察焊缝熔合区、热影响区和基材区的微观组织;用 HXS-1000 型电子显微硬度仪测量不同电流、焊接速度时焊缝截面的显微硬度分布,显微硬度仪加载重量 500 g,时间 20 s,测量点间隔为 100 μm,测量纵向位置为距焊缝表面 800 μm 处,横向起点位置为焊缝中心线。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 工艺参数对焊缝形貌的影响

由正交试验结果(表 2)可知,电流对焊缝质量的影响最大,其次是焊接速度,而脉宽和频率对其影响可忽略。因此,选择在脉宽 10 ms、频率 4 Hz 不变的前提下,分别分析电流和焊接速度对焊缝形貌的影响。

#### 2.1.1 电流对焊缝形貌的影响

图 1 为不同电流影响下的焊缝截面形貌图,焊缝分为基材区、热影响区和熔合区,形状参数可表征为:表面熔宽 B、中部熔宽 b(如图 1(a)所示)。小孔的直径和深度与激光功率有关,电流升高,激光功率增大,小孔直径和深度增大。图 2 是速度为 2.0 mm/s 时,熔宽随电流变化图。随着电流的升高,焊缝熔宽 B 和 b 均增加;且 b 曲线的斜率大于 B 曲线,表明中部熔宽比表面熔宽增速快,小孔锥角增大,焊缝底部熔宽增大,使得焊缝截面形貌由钉型向 X 型转变(图 1 所示)。主要原因是随着电流的增大,激光热输入增加,金属蒸汽密度增大,在熔池的上下表面形成大量的等离子体,加剧了对熔池上下部的辐射,使表面熔宽和底部熔宽同时增大,形成了 X 型截面形貌。

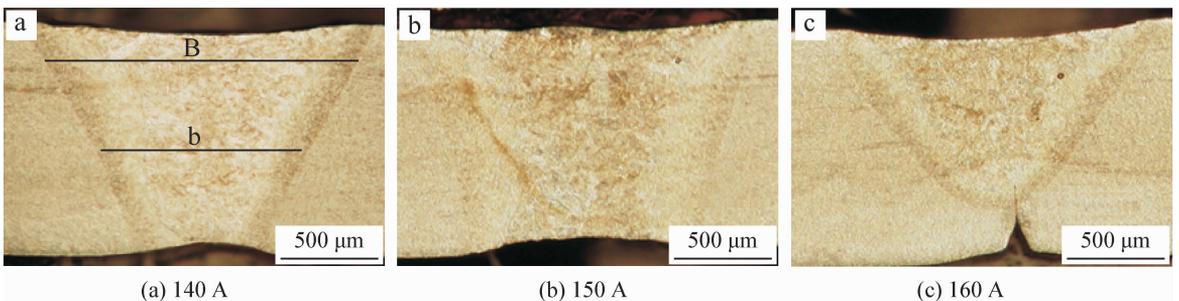


图 1 不同电流值对应的焊缝截面

Fig. 1 The welded cross-section appearances under different electricity

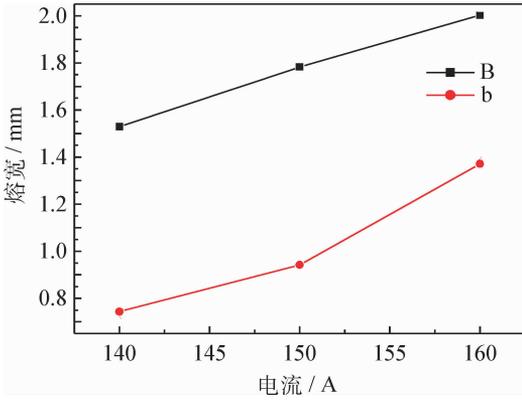


图 2 熔宽随电流的变化规律

Fig. 2 The change of width with electricity

2.1.2 速度对焊缝形貌的影响

图 3 是电流为 150 A 时,熔宽随速度变化图。可以看出,随着焊接速度的增大,焊缝熔宽 B 和 b 均减小,b 曲线与速度几乎成线性关系,B 曲线斜率大于 b 曲线,表明表面熔宽比中部熔宽减速快。主要原因是,在其他工艺参数不变的情况下,随着焊接速度的增大,线能量减小,激光热输入减少,使焊缝熔宽减小。

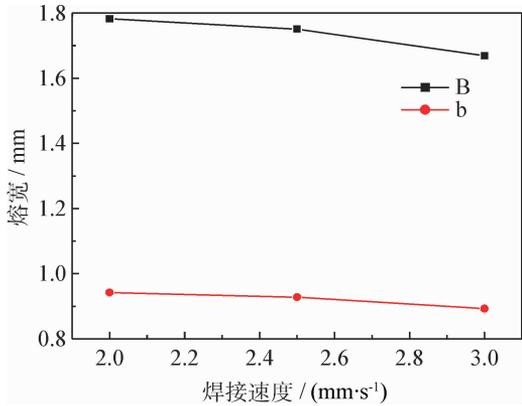


图 3 熔宽随速度的变化规律

Fig. 3 The change of width with speed

宏观质量良好的焊缝主要体现为焊缝的熔透性和密封性。电流为 140 A 时,熔透性较差;电流为 160 A 时,熔宽过大。焊接速度为 1.5 mm/s 时,熔宽过大;速度为 2.5 mm/s 时,密封性较差。综上所述,当工艺参数为电流 150 A、脉宽 10 ms、频率 4 Hz、焊接速度 2.0 mm/s 时,可获得宏观质量良好的焊缝。

2.2 焊缝的显微组织

焊缝的综合力学性能主要体现为焊缝的微

观质量。图 4 是在最优工艺参数条件下获得的焊缝截面图。通过对比熔合区的晶粒尺寸,可发现焊缝组织具有不均匀性,熔合线附近激冷层的晶粒尺寸显著小于熔合区,而明显大于基材,并且组织较为细密,但结晶取向不明显;靠近熔合线的热影响区有逐渐减弱的再结晶,再结晶晶粒尺寸与激冷层相近。

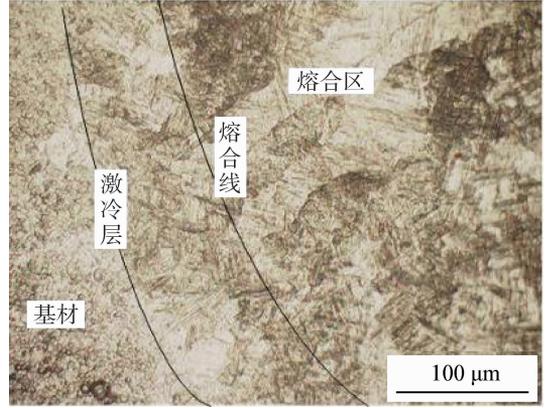


图 4 熔合区晶粒尺寸对比

Fig. 4 The comparison of the grain size

图 5 为熔合区显微形貌图。熔合区内部可能为针状马氏体  $\alpha'$  交织成的网篮组织结构。在熔池快速凝固过程中,由  $\beta$  相析出的过程来不及进行,但  $\beta$  相的晶格结构不易被冷却速度所抑制,仍然发生了转变。这种原始  $\beta$  相的成分未发生变化,但晶格结构发生了变化的过饱和固溶体可能是马氏体  $\alpha'$ 。 $\alpha'$  在原始  $\beta$  晶内部形核长大,使  $\beta$  相区开始变形,其变形量使原始晶粒及晶界破碎,而在长距离内扩展贯穿整个晶粒,遇晶界停止,冷却后  $\alpha'$  丛的尺寸减小, $\alpha'$  条变短,且各丛交错排列,形成网篮组织。

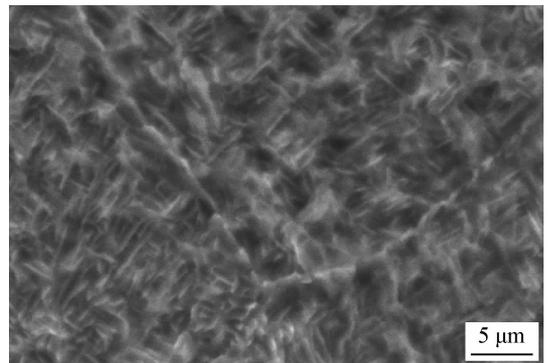


图 5 熔合区显微组织

Fig. 5 Microstructure of the fusion zone

图6为热影响区的微观组织结构。热影响区位于熔合线外侧约 $75\ \mu\text{m}$ 左右的环形带,主要表现为热影响区组织分布的不均匀性。热影响区可能是由等轴的 $\alpha$ 相和针状马氏体组成,并且该区域的针状马氏体相对于熔合区少很多,也更加细小,主要原因是热影响区的最高加热温度大都在 $\beta$ 相转变温度之下,并且其热量来源于熔合区,冷却速度相对焊缝较低。靠近基材热影响区内的等轴 $\alpha$ 相密集且分布不均匀,越靠近熔合线密集性越好、均匀性越差,表明越靠近熔合线,温度越高,越容易达到 $\beta$ 相的转变温度,而远离熔合线的热影响区相对熔合区冷却速度较慢, $\beta$ 相没能转变成针状马氏体 $\alpha'$ ,而是更多转变为等轴的 $\alpha$ 相;靠近熔合线热影响区可能为针状马氏体穿插的等轴组织结构,并且靠近熔合线部分较之远离熔合线的区域针状马氏体数量更多且更加密集,这主要是由焊接过程中以熔合区为中心的温度梯度造成的。

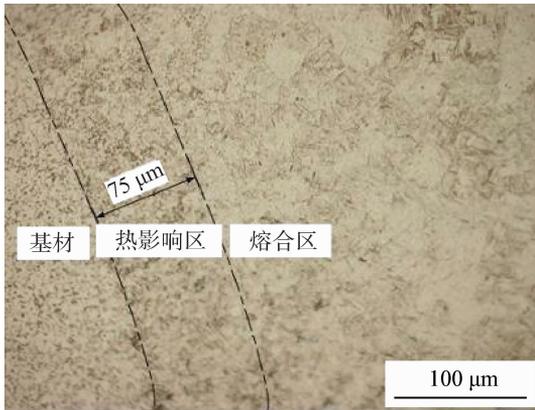


图6 热影响区的微观组织

Fig. 6 Typical microstructure of the heat affected zone

### 2.3 焊缝的硬度分布

硬度是焊缝综合力学性能的主要体现,其值主要取决于焊缝的微观组织。图7、图8为不同电流、焊接速度时焊缝截面的显微硬度分布曲线。可见,熔合区、热影响区以及基材的硬度呈明显的阶梯状分布,基材的硬度在 $310\sim 350\ \text{HV}_{0.5}$ 之间,熔合区的硬度在 $500\sim 600\ \text{HV}_{0.5}$ 之间,熔合区硬度相对于基材提高了 $60\%$ 左右;电流越小,硬度峰值越大,硬度曲线波动越大;焊接速度越快,硬度越高,但焊接硬度曲线波动相对较大。

熔合区及热影响区的硬度是由化学成分和冷却速度决定的。熔合区高的热输入和快速冷却可能使焊缝中心发生马氏体相变,生成针状马氏体交织成的网篮组织,大量的晶界也增强了熔合区的硬度。热影响区的冷却速度相对较慢,但同样生成部分细小的马氏体组织,使得热影响区的显微硬度高于母材,而低于熔合区。由于热影响区组织的不均匀,造成热影响区部分硬度值的跳跃。此外,电流越大,熔池冷却速度越慢,马氏体得到充分长大,并且粗大的晶粒也相对降低了其硬度峰值,硬度值的跳跃也与电流对焊缝熔宽有关;焊接速度越快,冷却速度越快,焊缝的温度梯度越大,造成各区之间组织的差异显著,显微硬度差值增加,由图显示为硬度曲线波动性较大。

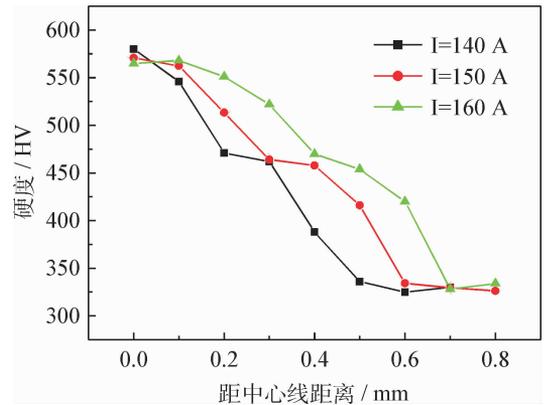


图7 电流对焊缝截面显微硬度分布影响曲线

Fig. 7 Effect of electricity on the microhardness distributions of the welded cross-sections in the cross direction

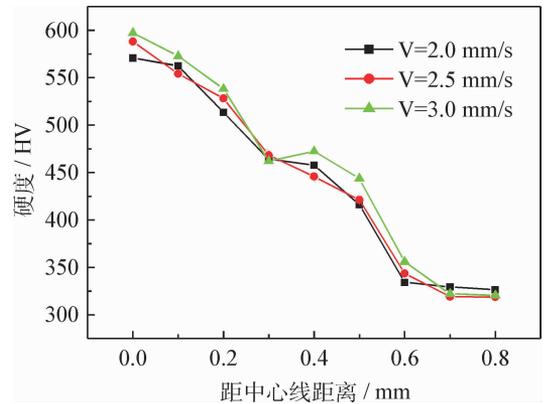


图8 速度对焊缝截面显微硬度分布影响曲线

Fig. 8 Effect of speed on the microhardness distributions of the welded cross-sections in the cross direction

### 3 结 论

(1) 采用电流为 150 A、脉宽为 10 ms、频率为 4 Hz、焊接速度为 2.0 mm/s 的工艺参数可获得质量良好的焊缝。

(2) 随着电流的升高,焊缝的熔宽逐渐增加,焊缝截面形貌由钉型向 X 型转变;随着焊接速度的增大,焊缝的熔宽呈减小趋势。

(3) 熔合区可能为针状马氏体  $\alpha'$  交织成的网篮组织;热影响区为 75  $\mu\text{m}$  左右的环形带,其组织可能是由等轴的  $\alpha$  相和针状马氏体组成,靠近熔合线部分较之远离熔合线的区域针状马氏体数量更多且更加密集,靠近熔合线区域有逐渐减弱的再结晶,再结晶尺寸明显大于基材。

(4) 焊缝截面的横向显微硬度呈明显的阶梯状分布,基材的硬度在 310~350  $\text{HV}_{0.5}$  之间,熔合区的硬度在 500~600  $\text{HV}_{0.5}$  之间,熔合区硬度相对于基材提高了 60% 左右。

### 参考文献

[1] 刘必利, 谢颂京, 姚建华. 激光焊接技术应用及其发展趋势 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42 (9): 43-47.

[2] 崔爱永, 胡芳友, 回丽, 等. 钛基梯度功能涂层组织和腐蚀行为研究 [J]. 中国表面工程, 2011, 24 (5): 18-21.

[3] 崔爱永, 胡芳友, 张忠文, 等. 钛合金表面激光熔覆修复技术 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 61-64.

[4] 欧阳捷, 陈俐, 姚伟, 等. TC2 钛合金 YAG 激光焊接工艺研究 [C], 中国机械工程学会年会论文集, 第 11 届全国特种加工学术会议, 2005: 433-435.

[5] 黄继华, 杨静, 赵兴科, 等. TC4 钛合金激光叠焊成形及显微组织 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 255-258.

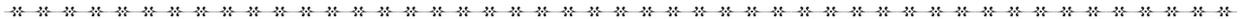
[6] 刘顺洪, 彭善德, 项凡. TC4 钛合金激光搭接焊研究 [J]. 电焊机, 2006, 36(6): 24-29.

[7] Akman E, Demir A, Canel T, et al. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys [J]. Journal of materials processing technology, 2009: 3705-3713.

[8] Cao X, Jahazi M. Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd:YAG laser [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009: 1231-1241.

[9] Blackburn J E, Allen C M, Hilton P A, et al. Modulated Nd : YAG laser welding of Ti-6Al-4V [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010: 433-439.

作者地址: 山东青岛市李沧区四流中路 2 号 266041  
 海军航空工程学院  
 Tel: 189 5426 2376  
 E-mail: fpftracy@126.com



### • 本刊讯 •

#### 祝贺本刊编委雒建斌当选中国科学院院士

《中国表面工程》科技期刊第三届编委雒建斌教授于 2011 年当选为中国科学院院士。《中国表面工程》期刊编委会、编辑部以及中国表面工程界同仁对其表示热烈的祝贺。

雒建斌院士,男,1961 年 8 月出生于陕西省户县。现担任清华大学摩擦学国家重点实验室主任,清华大学机械工程学院精密仪器与机械学系“长江学者”特聘教授、博士生导师,兼任国际摩擦学学会副主席、国际机构学与机器科学联合会(IFToMM)摩擦学技术委员会主席以及中国机械工程学会摩擦学分会主任委员。其主要研究方向为:薄膜润滑,纳米技术在计算机磁盘系统的应用研究以及表面与界面纳米技术与理论等。自 1991 年,以机械中表面/界面问题为主要研究对象,针对纳米间隙运动副中固体表面与液体分子间的相互作用问题展开深入的研究以来,雒建斌教授在摩擦学领域取得了优异的成绩。曾获得国家杰出青年基金资助;先后担任两期 973 项目的首席科学家、国家自然科学基金重大项目负责人、国家自然科学基金创新群体负责人、教育部创新团队负责人。共获科技奖 9 项,其中国家级 3 项、省部级 6 项;出版英文专著 1 部;发表和合作发表主要论文 213 篇,SCI 收录 110 余篇,EI 收录 140 余篇,他引 1100 余次,其中 SCI 他引 400 余次;国际会议特邀报告 13 次,其中 Plenary,Keynote 报告 7 次。

(黄艳斐 供稿)