

# 光束偏移对 $Ti_2AlNb/TC4$ 异种钛合金激光焊接特性的影响

雷正龙 刘 鸣 张可召 陈彦宾

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 针对  $Ti_2AlNb/TC4$  异种钛合金利用激光焊接焊缝容易产生气孔的问题, 提出了采用激光光束偏移来焊接  $Ti-22Al-27Nb$  与  $Ti-6Al-4V$  异种材料的方法。试验结果表明, 光束偏向  $Ti-22Al-27Nb$  侧时能够有效抑制焊缝中气孔缺陷产生; 光束居中及偏向  $Ti-22Al-27Nb$  一侧焊接时, 焊缝相组成为 B2 相, 光束偏向  $Ti-6Al-4V$  一侧进行焊接时, 焊缝相组成为  $B2+\alpha'$  相;  $Ti-22Al-27Nb$  侧热影响区为单一的 B2 相,  $Ti-6Al-4V$  侧热影响区为针状  $\alpha'$  相和原始  $\alpha$  相。由于激光光束偏向  $Ti-6Al-4V$  一侧时焊缝中针状  $\alpha'$  相的第二相强化作用, 使其抗拉强度及塑性高于光束居中和偏向  $Ti-22Al-27Nb$  一侧时的性能。

**关键词** 激光技术;  $Ti_2AlNb$ ; TC4; 激光焊接; 光束偏置; 显微组织; 拉伸性能

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.1203008

## Effect of Laser Beam Displacement on Characteristics of Laser Welded $Ti_2AlNb/TC4$ Dissimilar Alloy

Lei Zhenglong Liu Ming Zhang Kezhao Chen Yanbin

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** In view of the high porosity susceptibility in laser welded  $Ti_2AlNb/TC4$  dissimilar alloy, different beam displacements are applied in laser welding of  $Ti-22Al-27Nb$  and  $Ti-6Al-4V$  alloy. The results show that porosity can be successfully suppressed when laser beam acts on  $Ti-22Al-27Nb$  alloy. The fusion zones consist of B2 and  $B2+\alpha'$  when the beam acts on  $Ti-22Al-27Nb$  and  $Ti-6Al-4V$  alloy, respectively. The heat affected zone (HAZ) of  $Ti-22Al-27Nb$  is entirely composed of B2. A mixture of acicular  $\alpha'$  and primary  $\alpha$  are formed in the HAZ of  $Ti-6Al-4V$  alloy. Due to the second phase strengthening of acicular  $\alpha'$  in the fusion zone when laser acts on  $Ti-6Al-4V$  alloy, the welded joint exhibits higher tensile strength and ductility compared with those produced when the beam acts on  $Ti-22Al-27Nb$  alloy or at the middle of two base metals.

**Key words** laser technique;  $Ti_2AlNb$  alloy; TC4 alloy; laser welding; beam displacement; microstructure; tensile properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

$Ti_2AlNb$  基合金作为最新的一种有序斜方晶系钛铝金属间化合物, 相较于  $TiAl$ 、 $Ti_3Al$  等具有较高的比强度、断裂韧性和高温抗氧化等良好性能, 是具有发展前景的航空高性能材料之一<sup>[1-2]</sup>。TC4 是具有比强度高、塑性好和易焊接等优点的  $\alpha+\beta$  型钛合金, 在航空航天领域应用十分广泛<sup>[3-4]</sup>。宇航使用的大多为复杂构件, 有些情况会遇到  $Ti_2AlNb/TC4$  异种材料的焊接<sup>[5]</sup>。目前国内外对  $Ti_2AlNb/TC4$  系列异种钛合金焊接特性的研究较少, 主要集中在电子束焊接和激光焊接工艺上<sup>[6-11]</sup>。西北工业大学姚泽坤等开展了  $Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/$

收稿日期: 2015-04-27; 收到修改稿日期: 2015-07-05

基金项目: 中国航天支撑基金

作者简介: 雷正龙(1977—), 男, 副教授, 博士生导师。主要从事激光-电弧复合焊接基础与应用、特种材料激光焊接、激光焊接过程质量监测与智能控制等方面的研究。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

TC11 异种合金电子束焊接研究,发现可得到成形良好的焊缝,但对组织性能分析较少,同时其研究的 Ti-22Al-25Nb/TC11 异种合金电子束焊接焊缝组织为 $\alpha_2+O+B2$ 三相,拉伸试样均断裂在 TC11 侧;哈尔滨工业大学雷正龙等研究的 Ti-22Al-25Nb/TC4 激光焊接技术,焊缝中存在一定的气孔缺陷,拉伸强度可达到 TC4 母材(BM)的 90%,但是延伸率只为母材的 40%。同时,本课题组在前期的研究中发现,激光焊接 TC4 合金时气孔倾向较严重,但焊缝性能较好;而激光焊接 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金时焊缝基本没有气孔,但焊缝存在严重脆性,因此,针对 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 异种钛合金激光焊接焊缝容易产生气孔及力学性能变化的问题,提出研究在不同光束偏移情况下的 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 异种钛合金激光焊接特性。

本文研究了激光光束偏移对 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 焊缝接头的影响,初步分析了偏移位置对接头组织、性能和焊接气孔的影响,为优化 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 异种合金激光焊接工艺提出了一种新途径。

## 2 试验条件

试验采用材料为 1 mm 厚的 Ti-22Al-27Nb(原子数分数,%)的固溶态板材和 Ti-6Al-4V 热轧态板材,组织显微结构如图 1 所示。图 1(a)为 Ti-22Al-27Nb 固溶态板材组织,母材中均为 B2 相;图 1(b)为 TC4 热轧态板材组织,其中 $\beta$ 相均匀分布在基体 $\alpha$ 上。两种母材的具体化学成分如表 1 所示。

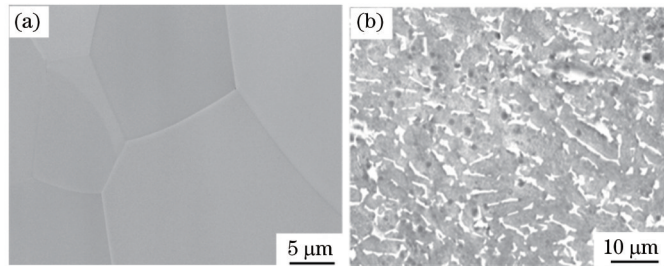


图 1 母材显微组织。(a) Ti-22Al-27Nb 合金;(b) Ti-6Al-4V 合金

Fig.1 Microstructure of base metals. (a) Ti-22Al-27Nb alloy; (b) Ti-6Al-4V alloy

表 1 母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metals (mass fraction, %)

Alloys	Elements						
	Ti	Al	Nb	V	O	N	H
Ti-22Al-27Nb	41.65	9.64	44.18	4.42	≤0.08	≤0.02	≤0.01
Ti-6Al-4V	84.63	7.14	2.48	5.75	-	-	-

焊接试样尺寸为 150 mm×25 mm×1 mm,焊前首先经过 Kroll 试剂(体积分数,3% HF+37% HNO<sub>3</sub>+60% H<sub>2</sub>O)进行酸洗以清除表面氧化膜及油污,然后用丙酮清洗后放在 80 °C 的烘干箱中烘干 1 h。焊接实验采用德国 ROFIN-SINAR 公司的 DC 030 型扩散冷却式 CO<sub>2</sub> 激光器,其最大输出功率为 3000 W,最小光斑直径为 0.15 mm。采用的焊接工艺参数为:焊接功率 700 W,焊接速度 1 m/min。为更好的保护焊缝,在焊缝正、背面进行双面氩气保护,其中正面、背面保护气流量分别为 15、5 L/min,焊接过程示意图如图 2 所示。在其他工艺参数相同的情况下,使光束分别偏向 Ti<sub>2</sub>AlNb 一侧 0.5 mm、居中及偏向 TC4 一侧 0.5 mm 进行三次焊接试

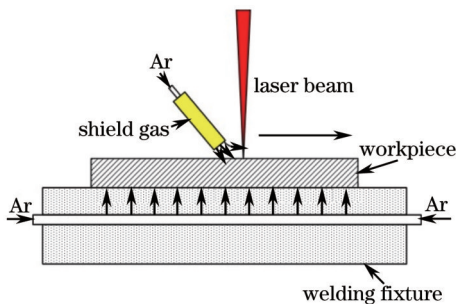


图 2 焊接过程示意图

Fig.2 Schematic of welding process

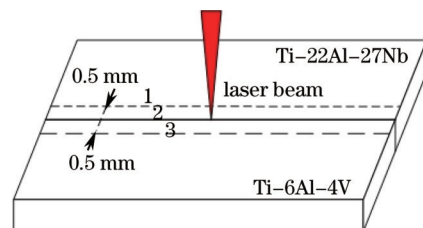


图 3 光束作用位置示意图

Fig.3 Schematic of laser beam acting position

验,光束作用位置如图3所示。

在 Olympus GX71 光学显微镜及 FEI Quanta-200 场发射扫描电子显微镜下观察接头组织,并通过 AXS D8 ADVANE X 射线衍射仪和 Tecnai G2 F30 型透射电子显微镜对焊缝组织进行物相确定。拉伸试样尺寸如图4所示,利用 INSTRON 5569 万能试验机测量焊缝接头的在室温下的拉伸性能,加载速率为 1mm/min,并通过 HITACHI S-3400 扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌。

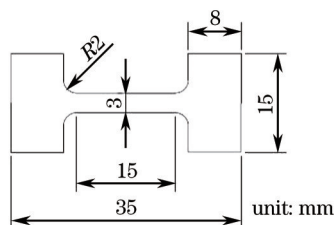


图4 拉伸试验尺寸

Fig.4 Dimensions of tensile test specimen

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 偏移量对焊缝成形的影响

图5为 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 异种钛合金激光焊接焊缝表面成形。焊缝表面为银白色,说明焊缝表面得到了较好的保护,同时表面成形光滑平整,没有咬边、裂纹、未熔合、未焊透等缺陷。进一步观察焊缝宏观金相,如图6所示,光束偏向 TC4 一侧和光束居中时的 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 激光焊,焊缝中存在一定数量的气孔,光束偏向 Ti<sub>2</sub>AlNb 一侧时,焊缝中没有气孔缺陷。为了进一步分析气孔形成特征,进行了 TC4 对接接头和 Ti<sub>2</sub>AlNb 对接接头同种材料的激光焊接,宏观金相如图7所示。试验发现在 TC4 对接焊时,焊缝中存在较多的气孔缺陷,而 Ti<sub>2</sub>AlNb 对接焊缝中没有出现气孔,这也表明 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 激光焊接过程中气孔可能主要与 TC4 合金的材料焊接特性有关,至于具体原因还有待进一步深入研究。

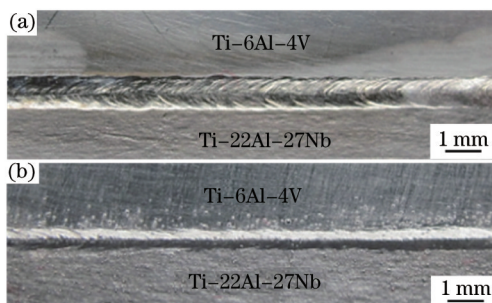


图5 焊缝表面成形。(a) 焊缝正面;(b) 焊缝背面

Fig.5 Bead appearance of welded joint. (a) Front bead; (b) back bead

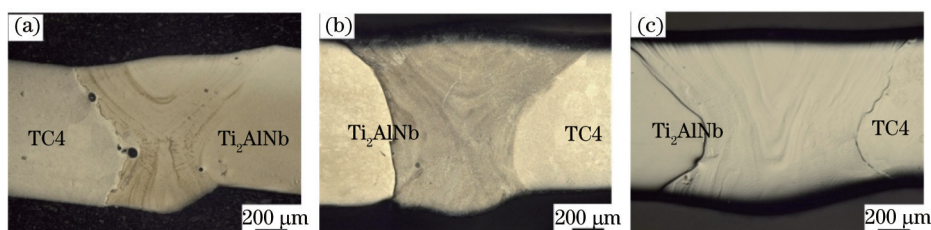


图6 光束偏移对 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 激光焊缝气孔的影响。(a) 光束偏 TC4 一侧;(b) 光束居中;(c) 光束偏 Ti<sub>2</sub>AlNb 一侧

Fig.6 Effect of laser beam displacement on porosity of welded joint. (a) Beam acting on TC4 alloy; (b) beam acting at middle of two base metals; (c) beam acting on Ti<sub>2</sub>AlNb alloy

#### 2.2 光束偏移对焊缝组织的影响

##### 2.2.1 焊缝组织分析

图8为光束偏移情况时 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 异种钛合金激光焊接焊缝熔合区(FZ)组织。可以看出,光束偏向

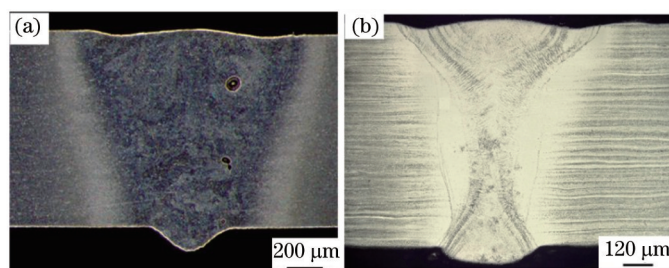


图 7 (a)TC4对接和(b)Ti<sub>2</sub>AlNb对接接头激光焊缝宏观金相

Fig.7 Cross-section profile of butt welded joint of (a) TC4 and (b)Ti<sub>2</sub>AlNb alloy

Ti<sub>2</sub>AlNb和光束居中时,在熔合线附近由于较大的成分过冷,熔池结晶为明显的柱状晶,随着成分过冷度的降低,熔池在焊缝中心结晶成等轴晶。虽然可明确的判断熔池结晶行为,但没有明显的相组织,考虑到母材为固溶态Ti<sub>2</sub>AlNb,焊缝组织可能为单一的B2/β相。而光束偏向TC4时相组织与前两者有明显的不同,焊缝中有针状α'相组织,如图8(d)所示。这是因为光束偏置于TC4一侧时,高能量密度的激光使得TC4母材迅速熔化,且其在该区域相对Ti<sub>2</sub>AlNb母材熔化较多,β相稳定元素Nb的含量较低,在随后的冷却过程中,实际冷却速度大于α相的极限冷却速度,β相来不及转变成α相,而是转变成针状的马氏体α'相。

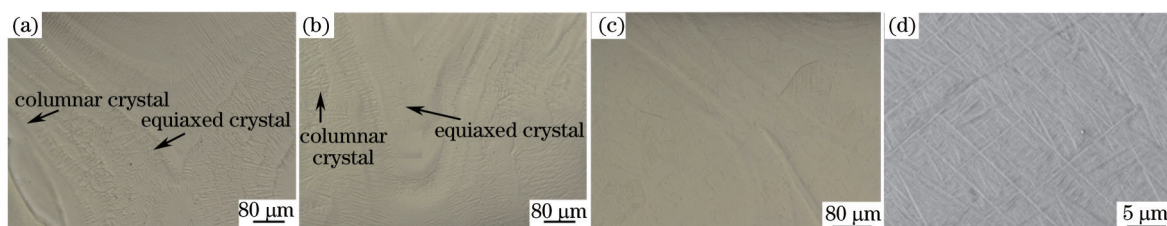


图 8 焊缝组织金相。(a) 光束偏Ti<sub>2</sub>AlNb侧;(b) 光束居中;(c) 光束偏TC4侧;(d) 光束偏TC4时焊缝中的针状α'相组织

Fig.8 Microstructure of weld. (a) Beam acting on Ti<sub>2</sub>AlNb alloy; (b) beam acting at middle of two base metals;

(c) beam acting on TC4 alloy; (d) acicular α' in the fusion zone when laser beam acts on TC4 alloy

图 9 为焊缝组织的 XRD 分析。物相检索结果表明,光束居中和光束偏向Ti<sub>2</sub>AlNb一侧时,焊缝中的相成分均为单一的体心立方结构的B2/β相。出现这种情况的原因可能主要是因为激光能量输入使熔池组织为B2/β相,在随后的冷却过程中,过快的冷却速度使得熔池中的B2/β相来不及向其他相转变,只是部分无序的β相转变为有序的B2,使得焊缝相组成为单一的B2/β相。

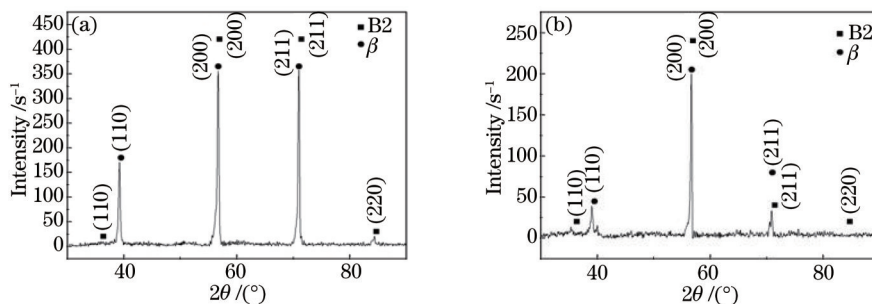


图 9 Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4焊缝的 X 射线衍射谱。(a) 光束偏Ti<sub>2</sub>AlNb侧XRD物相分析;(b) 光束居中XRD物相分析

Fig.9 XRD pattern of the Ti<sub>2</sub>AlNb/TC4 weld. (a) Beam acting on Ti<sub>2</sub>AlNb alloy; (b) beam acting at middle of two base metals

图 10 为焊缝组织的透射电子显微镜分析结果。图 10(a)为光束居中焊缝组织形貌,组织尺寸粗大,衍射花样标定结果确定焊缝组织为B2相,并未发现其他相结构。确定光束居中及光束偏Ti<sub>2</sub>AlNb侧焊缝中组织均为单一的B2相。而在光束偏向TC4时,如图10(c)所示,可以看到,焊缝中出现了板条状的组织形貌,其中黑色的为B2相,亮白色的为针状α'马氏体。对衍射花样进行标定,确定光束偏向TC4时焊缝组织为B2/β相和α'相,与金相结果一致。

### 2.2.2 热影响区组织分析

图 11 为 Ti<sub>2</sub>AlNb 侧热影响区(HAZ)金相图片与扫描电镜(SEM)图片。由于 Ti<sub>2</sub>AlNb 母材为固溶态,故观察

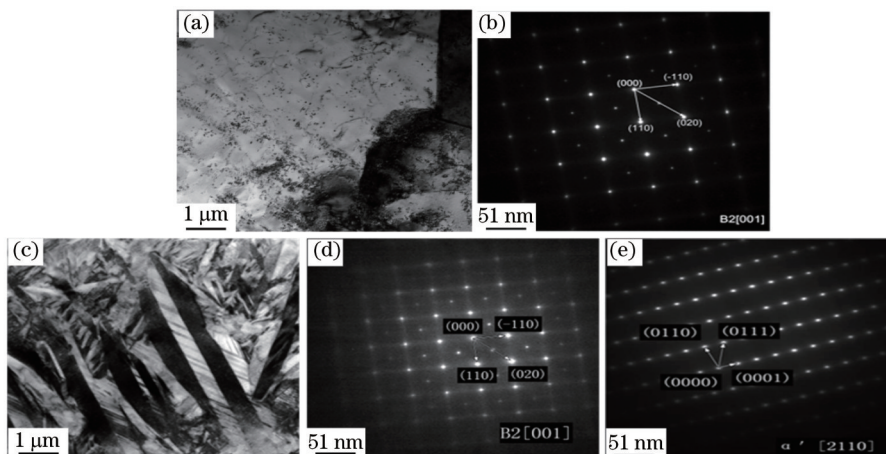


图 10 焊缝组织的 TEM 分析。(a) 光束居中时焊缝相组织形貌; (b) 光束居中时焊缝中 B2 相衍射花样; (c) 光束偏 TC4 侧时焊缝组织形貌; (d) 光束偏 TC4 侧时焊缝 B2 相衍射花样; (e) 光束偏 TC4 侧时焊缝  $\alpha'$  相衍射花样

Fig.10 TEM of weld microstructure. (a) Microstructure of weld when beam acts at middle of two base metals; (b) diffraction pattern of B2 phase when beam acts at middle of two base metals; (c) microstructure of weld when beam acts on TC4 alloy; (d) diffraction pattern of B2 phase when beam acts on TC4 alloy; (e) diffraction pattern of  $\alpha'$  phase when beam acts on TC4 alloy

到  $Ti_2AlNb$  侧热影响区为成分均匀一致的组织,且确定该组织为 B2/ $\beta$ 相。这是因为在熔池冷却过程中,其冷却速度大于 CCT 曲线中得到 B2/ $\beta$ +O 相的极限冷却速度为 120 K/s,高温下的 B2/ $\beta$ 相没有足够的时间向其他组织转变,故形成单一 B2/ $\beta$ 相的热影响区。

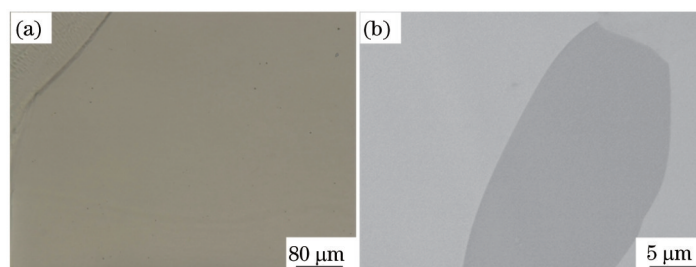


图 11  $Ti_2AlNb$  侧热影响区组织图。(a) 热影响区光学照片; (b) 热影响区的 SEM 图

Fig.11 Microstructure of HAZ of  $Ti_2AlNb$  alloy. (a) Optical micrograph of HAZ; (b) SEM micrograph of HAZ

图 12 为 TC4 侧热影响区组织。从图中可以看出,TC4 侧热影响区主要由针状  $\alpha'$  相和原始  $\alpha$  相两种组织组成,其中  $\alpha'$  马氏体形成了典型的网篮组织。靠近焊缝的热影响区在高能量的光束作用下,全部转变为  $\beta$  相,熔池凝固过程中冷却速度很快, $\beta$  相随着温度降低并未转变为  $\alpha$  相,而是转变为针状  $\alpha'$  相的马氏体组织。在远离焊缝的热影响区,加热升高的温度较低,部分  $\alpha$  相未发生转变,直接保留下来。

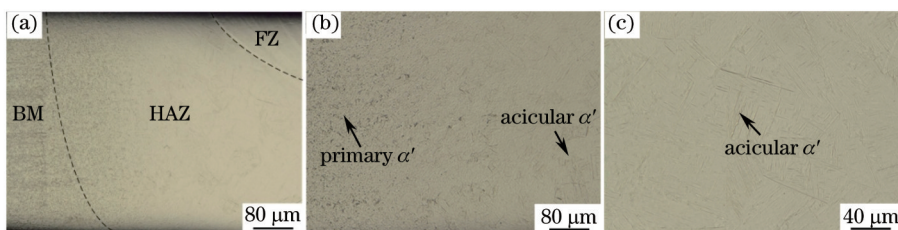


图 12 TC4 侧热影响区组织图。(a) 热影响区低倍; (b) 热影响区组织; (c) 针状  $\alpha'$  相高倍

Fig.12 Microstructure of HAZ of TC4 alloy. (a) HAZ at low magnification; (b) microstructure of HAZ; (c) acicular  $\alpha'$  at high magnification

### 2.3 光束偏移对力学性能的影响

表 2 为  $Ti_2AlNb/TC4$  异种钛合金激光焊接接头在室温下的拉伸结果。不难发现,不同的光束偏移对焊接接头的拉伸性能影响不同,偏向 TC4 时接头抗拉强度和延伸率最高,而偏向  $Ti_2AlNb$  一侧抗拉强度和延伸率最低,光束居中的接头的拉伸性能居中。分析认为,焊缝接头在室温中性能与焊缝中相组成有关,焊缝组织为粗大的 B2 相柱状晶时,变形时晶粒间相互协调能力较差,抗拉强度及延伸率都相对较低;当焊缝中有针状

$\alpha'$  马氏体时,第二相强化作用提高了抗拉强度。光束居中及光束偏向  $Ti_2AlNb$  一侧时,焊缝中为单一的 B2 相,晶粒粗大且不存在第二相强化作用,焊缝抗拉强度与延伸率较低;光束偏向 TC4 一侧时,焊缝组织存在针状  $\alpha'$  相,第二相强化作用使其强度达到 TC4 母材的 95% 以上,且其延伸率略高于  $Ti_2AlNb$  母材。

表 2  $Ti_2AlNb/TC4$  对接接头室温拉伸结果

Table 2 Tensile properties of  $Ti_2AlNb/TC4$  butt welded joint at room temperature

	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Fracture position
Act on TC4 side	1001	8.73	FZ
Act on $Ti_2AlNb$ side	938	4.82	FZ
In the middle	951	5.43	FZ
TC4 base metal	1017	12.08	-
$Ti_2AlNb$ base metal	1154	7.67	-

图 13 为焊接接头室温拉伸试样断口 SEM 形貌。图 13(a) 和 13(b) 中同时存在一定数量的解理台阶和韧窝,当光束居中时相较于光束偏向  $Ti_2AlNb$  侧时韧窝的比例明显增大;从图 13(c) 中可以看出当光束偏向 TC4 一侧时,断口基本上以韧窝为主,表明断裂方式为韧性断裂,是由于焊缝中存在的  $\alpha'$  相的第二相强化作用造成的,同时光束偏向 TC4 一侧时拉伸强度和延伸率较高。

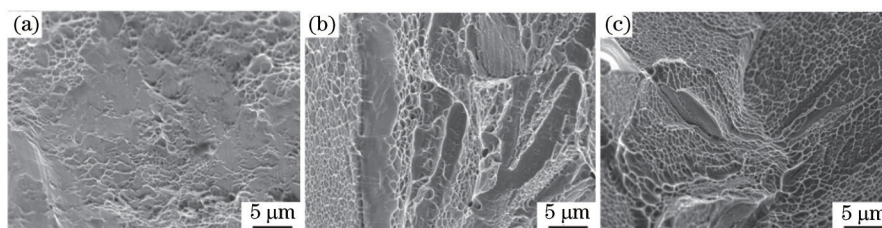


图 13 接头室温拉伸断口形貌。(a) 光束偏向  $Ti_2AlNb$  一侧;(b) 光束居中;(c) 光束偏向 TC4 一侧

Fig.13 SEM image of joint after tensile test at room temperature. (a) Beam acting on  $Ti_2AlNb$  alloy;

(b) beam acting at middle of two base metals; (c) beam acting on TC4 alloy

### 3 结 论

1)  $Ti_2AlNb/TC4$  异种钛合金激光焊接可以得到表面成形良好的焊缝,在光束居中和偏向 TC4 时,焊缝中出现了一定数量的气孔,而在偏向  $Ti_2AlNb$  一侧时焊缝中没有出现气孔缺陷。

2) 光束居中和偏向  $Ti_2AlNb$  一侧时,焊缝中心为单一的 B2/ $\beta$  相;而光束偏置 TC4 时,焊缝中心为 B2/ $\beta$  相和针状  $\alpha'$  相的双相组织;TC4 侧热影响区为针状  $\alpha'$  相和原始  $\alpha$  相的混合组织; $Ti_2AlNb$  侧热影响区为单一的 B2/ $\beta$  相。

3) 光束偏 TC4 侧时,激光焊缝拉伸强度和延伸率最高,其次为光束居中时,光束偏向  $Ti_2AlNb$  一侧时最低。光束偏向 TC4 时焊缝中存在针状  $\alpha'$  相,第二相强化作用使其抗拉强度达到 TC4 母材的 95% 以上,且延伸率略高于  $Ti_2AlNb$  母材。

### 参 考 文 献

- Boehlert C J, Majumdar B S, Seetharman V, *et al.*. The microstructural evolution in Ti-Al-Nb O+Bcc orthorhombic alloys[J]. *Metalurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30(9): 2305-2323.
- Feng Aihan, Li Bobo, Shen Jun. Recent advances on  $Ti_2AlNb$ -based alloys[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2011, 10(1): 30-38. 冯艾寒,李渤渤,沈 军.  $Ti_2AlNb$  基合金的研究进展[J]. *材料与冶金学报*, 2011, 10(1): 30-38.
- Zhu Xiujun, Xiong Jiangang. Laser welding of TC4 Ti alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2004, 34(9): 13-16. 朱秀军,熊建刚. 钛合金 TC4 的激光焊接[J]. *电焊机*, 2004, 34(9): 13-16.
- Dong Zhijun, Lei Zhenglong, Chen Yanbin. Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 alloys[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2012, 2(1): 27-30. 董智军,雷正龙,陈彦宾. 激光焊接 TC4 钛合金组织性能研究[J]. *航天制造技术*, 2012, 2(1): 27-30.
- Yu Gang, Zhao Shushen, Zhang Yongjie. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(2): 261-267.

- 虞 钢, 赵树森, 张永杰. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261-267.
- 6 Zhang Jian, Yang Rui. Control of laser power during titanium alloy thin plate welding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103003.
- 张 健, 杨 锐. 激光焊接钛合金薄板时的功率控制[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103003.
- 7 Ma Ran, Dong Bizhe, Wu Shikai, *et al.*. Study on fiber laser-tungsten inert gas welding of titanium sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 101-106.
- 马 然, 董韶喆, 吴世凯, 等. 薄板钛合金光纤激光钨极惰性气体保护电弧复合焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 101-106.
- 8 Zhang H T, He P, Feng J C, *et al.*. Interfacial microstructure and strength of the dissimilar joint Ti3Al/TC4 welded by the electron beam process[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 425: 255-259.
- 9 Tan L J, Yao Z K, Zhou W. Microstructure and properties of electron beam welded joint of Ti-22Al-25Nb/TC11[J]. Aerospace Science and Technology, 2010, 14: 302-306.
- 10 Yao Z K, Guo H Z. Microstructure and property of the Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 joint welded by electron beam welding[J]. International Journal of and Materials, 2009, 16(5): 568-575.
- 11 Z L Lei, Z J Dong, Y B Chen. Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti-22Al-27Nb/TC4 dissimilar alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 559: 909-919.

栏目编辑: 宋梅梅