

# 中厚板 TC4 钛合金真空环境激光焊接特性

孟圣昊, 司昌健, 任逸群, 宫建锋, 李俐群, 陶汪

(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)

**摘要:** 在大气和真空环境下使用光纤激光器对 TC4 钛合金进行焊接, 分别对不同激光功率焊接焊缝形貌和组织进行观察, 并对性能进行测试分析. 结果表明, 真空环境激光焊接焊缝成形更加良好, 可明显提高焊缝熔深, 增大焊缝深宽比, 抑制焊接过程中的飞溅, 极大减少焊缝中的气孔缺陷. 大气环境与真空环境焊缝组织特征差别不大, 真空环境热影响区宽度明显减小. 两种环境下焊缝显微硬度均呈马鞍形分布, 焊缝熔化区硬度最高的特点, 大气环境焊缝平均硬度约为 390 HV, 高于真空环境焊缝平均显微硬度 8.3%. 对焊缝进行拉伸强度测试, 拉伸试件全部断裂于母材部位, 试件的抗拉强度为 960 ~ 980 MPa.

**创新点:** (1) 对比探索了钛合金在真空环境与大气环境下焊接特性差异的原因.

(2) 分析了钛合金厚板真空激光焊接组织特征及其与性能的相关性.

**关键词:** 真空环境; 激光焊接; TC4 钛合金; 组织; 力学性能

**中图分类号:** TG 456.7      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20201124001

## 0 序言

钛及钛合金因具有强度高、抗蚀性好、低温性能好及焊接性优异等多项优点, 广泛地应用于航天、汽车、化学工业等领域中, 因此对钛合金焊接的相关研究也十分广泛<sup>[1]</sup>. 而由于钛及钛合金在高温下具有较高活性, 气氛的侵入会造成许多问题, 焊接过程中对焊缝及熔池的保护尤为重要<sup>[2-3]</sup>.

目前对于中厚板 TC4 钛合金常采用 TIG、电子束等焊接方法<sup>[4]</sup>, 其中 TIG 焊接过程中由于受到保护气氛和纯度等因素的限制, 常带来氢、氧或氮含量增加, 使焊后焊缝区氧化或产生气孔及裂纹, 造成焊接接头的力学性能大大下降的现象. 而且 TIG 焊焊接厚板通常采用多层焊, 因此存在焊接速度慢, 残余应力大, 焊缝组织粗大, 焊缝夹钨等缺陷<sup>[5-6]</sup>. 而电子束焊受限于真空室尺寸, 难以实现大厚件焊接, 而且焊接过程需要高真空, 影响焊接效率<sup>[7]</sup>.

激光焊接作为一种发展逐渐成熟的高能束焊接方式, 其能量密度高、加热集中、焊接速度快、焊

缝成形好、焊件变形小、易实现自动化生产, 在钛合金厚板焊接领域的应用也逐渐增多<sup>[8]</sup>. 但常规激光焊接过程中也有羽辉等问题存在, 对入射激光产生折射、散射、吸收等影响, 影响了焊接过程的稳定性, 造成熔池波动, 飞溅等问题<sup>[9]</sup>. 对钛合金焊接问题尤其明显, 钛合金激光焊接非常易产生表面氧化、咬边、气孔和裂纹问题<sup>[10]</sup>.

上个世纪 80 年代, 大阪大学提出了真空激光焊接的方法<sup>[11]</sup>, 真空可以抑制羽辉, 提高激光能量利用率, 增加焊缝熔深. 增强焊接过程的稳定性, 改善焊缝成形, 减少工艺气孔等缺陷. 并且能提升焊缝的保护效果. 而且真空激光焊接对真空度要求低, 而且能够实现局部负压焊接, 一定程度上摆脱了真空度和真空仓对焊接过程的限制.

文中以 20 mm 厚 TC4 钛合金为研究对象, 进行大气和真空环境下的激光焊接, 系统研究了不同焊接环境下焊缝的形貌、微观组织及力学性能的差异, 对 TC4 钛合金真空激光焊接的特性进行较完整的分析, 为真空激光焊接在工业上的应用提供参考.

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

试验选择尺寸为 200 mm × 200 mm × 20 mm

的 TC4 钛合金轧制板材. TC4 钛合金的组成为 Ti-6Al-4V, 属于  $\alpha+\beta$  型双态钛合金, 其母材组织既存在等轴初生  $\alpha$  组织 (图 1 中白色部分), 又存在片状  $\alpha+\beta$  组织 (图 1 中黑色部分), 具有良好的综合力学性能. TC4 的微观组织如图 1 所示, 其主要化学成分及力学性能见表 1.

1.2 试验方法

焊接方法为平板堆焊, 激光入射角度始终保持  $10^\circ$ . 大气和真空环境下整体试验装置如图 2、图 3 所示. 试验所用激光器为 IPG 公司生产的 YLS-30000 光纤激光器, 具有输出功率高、工作波长范围广以及使用寿命长等优点, 最大输出功率 30 kW, 聚焦光斑直径  $600\text{ }\mu\text{m}$ . 试验所用机器人

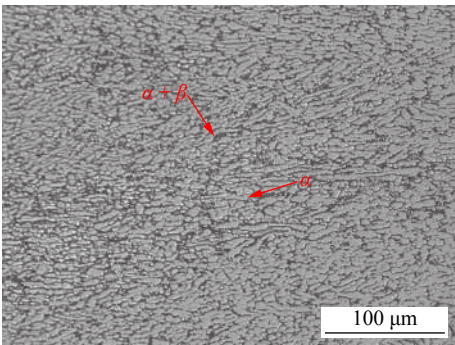


图 1 TC4 钛合金微观组织形貌

Fig. 1 Microstructure and morphology of TC4 titanium alloy

2 型 KUKA 机器人, 所用激光头为 HIGHYAG 激光头.

表 1 TC4 钛合金的化学成分 (质量分数, %) 和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of TC4 titanium alloy

化学成分								力学性能	
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ (%)
5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.10	0.05	0.015	0.20	余量	895	10



图 2 大气环境下激光焊接试验

Fig. 2 Laser welding test under atmospheric environment



图 3 真空环境下激光焊接试验

Fig. 3 Laser welding test under vacuum environment

试验所用真空装置的最低真空度为  $6.6 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ . 可以通过独立的电气控制系统设置焊接速度. 真空舱的行走机构有一个自由度, 行程可超过 250 mm. 真空舱前后有观察口, 上方也有保护镜片.

相关研究表明<sup>[8]</sup>, 真空度对焊接特性的影响存在临界值 10 Pa, 当超过该临界值时, 焊接特性改变不大, 故而采用 10 Pa 的真空环境对钛合金进行试验.

2 试验结果与分析





2.1 大气环境焊接、真空环境激光焊接焊缝成形比较

焊缝的表面成形是焊缝成形最直观反映. 在焊接速度  $v = 1\text{ m/min}$ 、离焦量  $f = -6\text{ mm}$  时, 不同功率下 TC4 钛合金板在大气和真空环境下单激光堆焊焊缝表面成形分别如表 2、表 3 所示.

观察在大气环境下激光焊接 TC4 厚板的焊缝表面, 可以发现功率在 5 kW 以下焊接焊缝表面光亮且具有金属光泽, 焊缝成形良好; 在 7~10 kW 功率下焊接的焊缝表面光洁度降低, 焊接过程中开始出现比较大的飞溅, 焊缝表面部分呈现蓝紫色, 出现了焊缝氧化. 分析其原因是因为激光功率在

表 2 大气环境下单激光堆焊焊缝成形

Table 2 Single laser surfacing welding seam formation under atmospheric environment











激光功率 <i>P</i> /kW	焊缝成形
3	
5	
7	
10	

5 kW 以下时,羽辉尺寸较小,熔池波动也较小,激光、羽辉、母材之间的能量耦合稳定,匙孔大小和熔池流动也比较稳定,所以焊缝成形比较均匀.随着激光功率的增加,羽辉尺寸增大,波动更加剧烈,造成熔池波动剧烈,产生飞溅,影响保护气保护效果,卷入外部气体,造成焊缝氧化<sup>[12]</sup>.

当环境压力为 10 Pa 时,由于真空环境激光焊接特性<sup>[12]</sup>,焊缝熔深显著增加,因此试验最大功率限制在 10 kW 以内.此时焊缝表面成形有着一定的改善,焊缝表面起伏减小,焊缝变得均匀,飞溅减少.并且由于真空环境下无气体对焊接过程的干扰,焊缝表面光亮且具有金属光泽,这说明真空环境对焊缝实现了良好的焊接保护.从表面成形看获得了一般激光焊接无法获得的表面成形良好的焊缝.而且焊缝在 8 kW 功率下实现稳定的全熔透,继续增加功率到 10 kW 时,焊缝背面依然没有严重的下塌,焊接工艺窗口比较宽

表 3 真空环境下单激光堆焊焊缝成形 (10 Pa)

Table 3 Single laser surfacing welding seam formation under vacuum environment (10 Pa)

激光功率 <i>P</i> /kW	焊缝成形(正面)	焊缝成形(背面)
5		未穿透
6		未穿透
7		
8		
9		
10		

2.2 大气环境焊接、真空环境激光焊接焊缝宏观形貌比较

将大气和真空环境下焊接的焊缝进行处理,得到焊缝的宏观形貌,分别如图 4、图 5 所示,对焊缝的熔深、熔宽进行测量,绘制图 6、图 7.

观察图 4 发现在大气环境下,激光功率的增加导致能量密度与热输入的增加,焊缝熔深有明显的增加,同时由于羽辉对激光的散射作用,焊缝熔宽也大幅度增加,并且随着焊接功率的提高,熔深增加的速度不断减慢.其原因是随着激光功率增加,

熔池温度升高,材料气化增多,羽辉尺寸增大,其对激光能量的吸收增多,使到达材料表面能量增加幅度减慢,熔深增加幅度减慢<sup>[13]</sup>.

在真空环境下,随激光功率的增加,焊缝熔深增加显著而熔宽变化不明显,与大气环境下变化规律并不相同.分析其原因是因为真空环境下,对羽辉有较大的抑制作用,其电子密度、电子温度与体积均减小,一方面,羽辉对激光的吸收系数减小,吸收率降低,这样可减少羽辉对激光的阻碍作用,提高了能量的利用率<sup>[14]</sup>.另一方面,产生的羽辉也并不



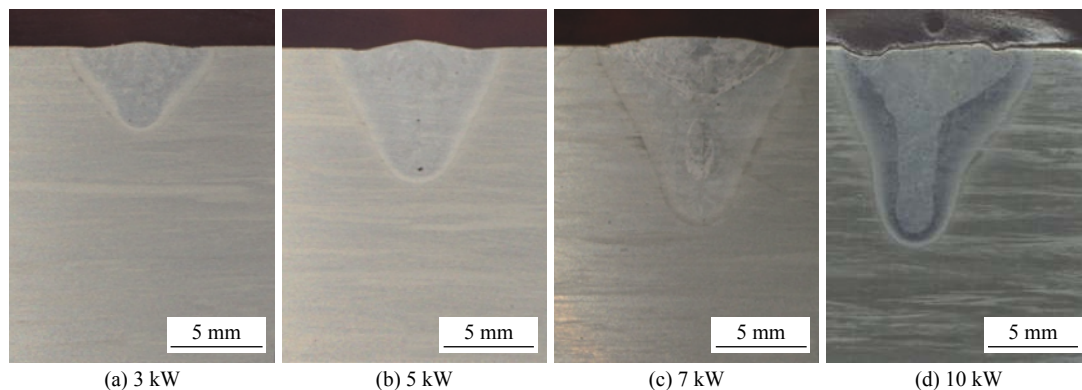


图 4 大气环境下单激光堆焊焊缝宏观形貌

Fig. 4 Macro morphology of single laser surfacing welds in the atmospheric environment. (a) 3 kW; (b) 5 kW; (c) 7 kW; (d) 10 kW

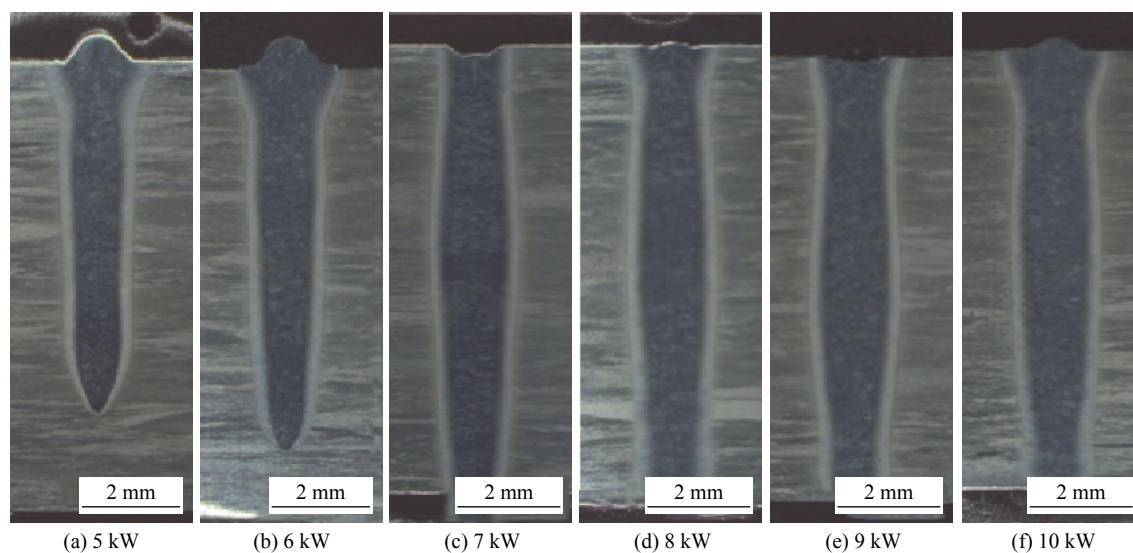


图 5 真空环境下单激光堆焊焊缝宏观形貌

Fig. 5 Macro morphology of single laser surfacing welds under vacuum. (a) 5 kW; (b) 6 kW; (c) 7 kW; (d) 8 kW; (e) 9 kW; (f) 10 kW

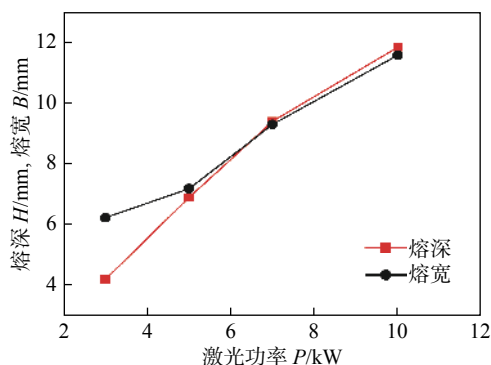


图 6 大气环境熔深、熔宽随激光功率的变化

Fig. 6 Variation of melting depth and melting width of atmospheric environment with laser power

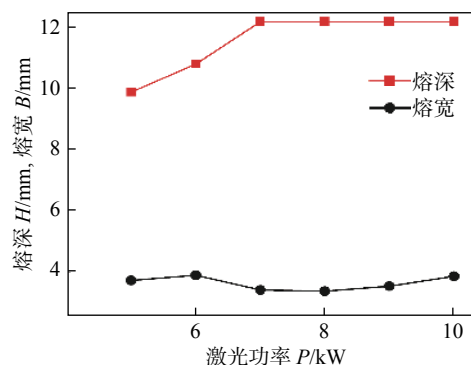


图 7 真空环境熔深、熔宽随激光功率的变化

Fig. 7 Variation of melting depth and melting width in vacuum environment with laser power

非呈均匀分布, 羽辉边缘位置与中心位置电子密度浓度差异较大, 产生了负透镜效应, 在真空环境下对羽辉体积的抑制使得负透镜效应减弱, 羽辉对

入射激光的屏蔽作用也减弱, 激光作用的区域减小, 能量集中, 最后熔深增加的同时熔宽变化不大<sup>[15]</sup>.

### 2.3 大气环境焊接、真空环境激光焊接焊缝微观组织比较

大气环境和真空环境焊缝熔深差异大,说明焊缝内部获得激光能量不同,必然导致组织上的差异,对 7 kW 下大气和真空环境焊缝组织进行观察,观察得到的大气、真空环境焊接焊缝组织分别如图 8、图 9 所示。

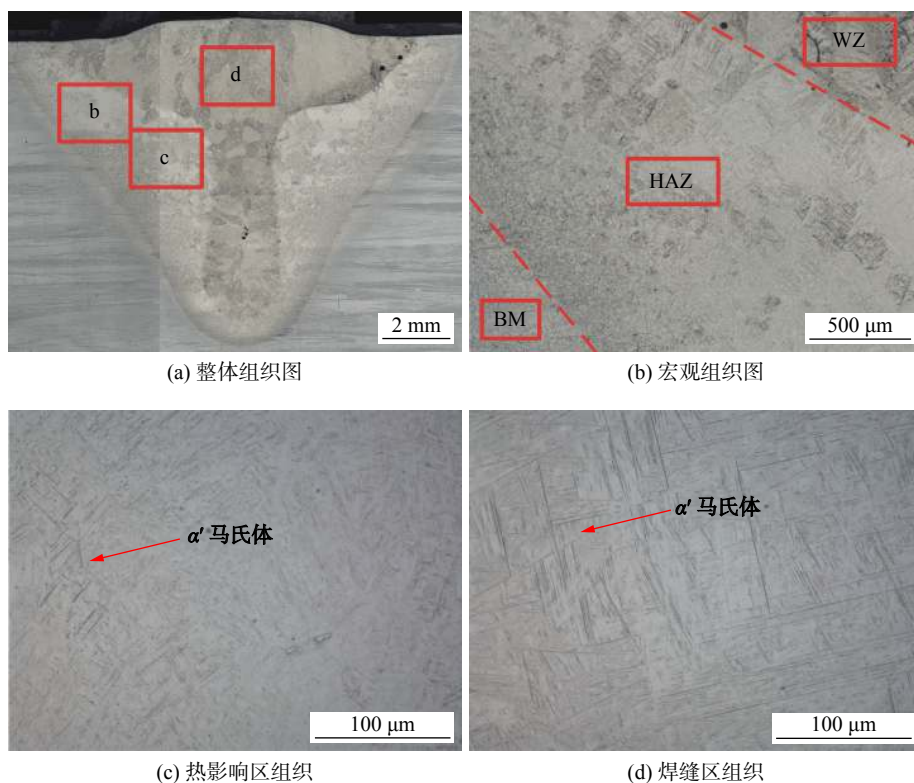


图 8 大气环境下焊接焊缝宏观与微观组织图

Fig. 8 Macro and micro organization chart of welding seam in atmospheric environment. (a) overall organization; (b) macro organization; (c) organization of HAZ; (d) organization of WZ

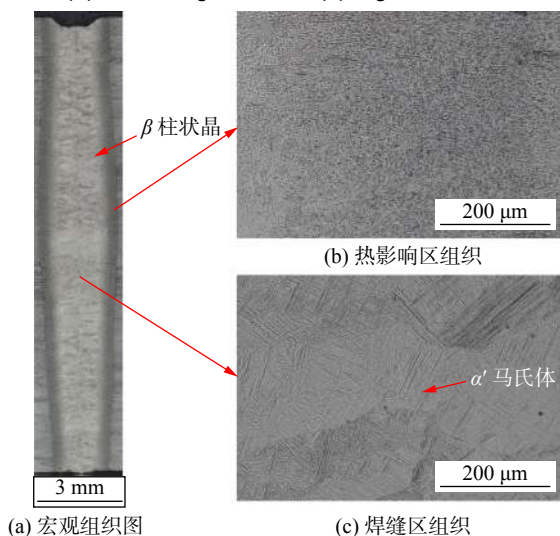


图 9 真空环境下焊接焊缝宏观与微观组织图

Fig. 9 Macro and micro organization chart of welding seam in vacuum environment. (a) macro organization; (b) HAZ organization; (c) WZ organization

TC4 钛合金在激光焊接升温过程中发生  $\beta$  相变,  $\beta$  晶粒迅速长大粗化, 由于焊缝冷却较快, 在快速冷却的过程中, 高温下的  $\beta$  相不能转变为原来  $\alpha$  相, 而是转变为与原  $\alpha$  相晶体结构相同的  $\alpha'$  马氏体. 在 TC4 合金成分中  $\beta$  稳定元素浓度较低, 在相变过程中将发生  $\beta \rightarrow \alpha'$  马氏体的转变, 形成  $\alpha'$  马氏体组织。

大气环境焊接焊缝呈“丁”字形, 热影响区宽度大, 焊缝内能观察到熔池冷却形成的  $\beta$  柱状晶和  $\alpha'$  针状马氏体, 热影响区从母材到焊缝晶粒逐渐增大, 并开始逐渐出现  $\alpha'$  针状马氏体。

真空环境下焊接焊缝呈“手指”形, 热影响区宽度与大气环境焊接焊缝相比宽度明显降低, 焊缝内同样可以观察到  $\beta$  柱状晶和  $\alpha'$  针状马氏体, 焊缝组织与大气环境焊接焊缝组织差距不大. 热影响区宽度与大气环境焊缝相比明显减小, 从母材到焊缝晶粒逐渐增大。

### 2.4 大气环境焊接、真空环境激光焊接焊缝硬度测试

对焊缝进行硬度分析, 用 HVS-1000Z 型显微硬度计对焊缝、热影响区和母材进行显微硬度测试, 设备操作参数: 载荷 0.2 kg, 加载时间 10 s. 分

别对大气(等距 0.5 mm)、真空环境(等距 0.25 mm)焊接焊缝进行熔宽方向的显微硬度测试,测试位置及结果分别如图 10、图 11 所示。

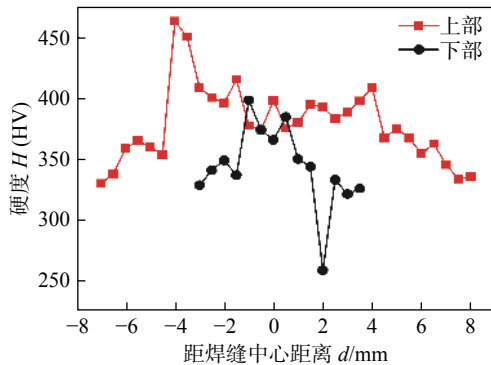


图 10 大气环境下焊接焊缝熔宽方向硬度测试  
Fig. 10 Hardness test of the weld in the width direction of the weld under the atmospheric environment

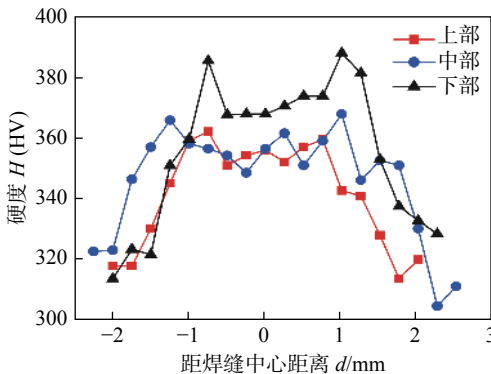


图 11 真空环境下焊接焊缝熔宽方向硬度测试  
Fig. 11 Hardness test of the weld in the melting width direction under vacuum environment

通过观察图 10 和图 11 可以看出,无论是在大气环境还是在真空环境下,整个焊缝的硬度规律是相同的.焊缝显微硬度呈马鞍形分布,焊缝处于高硬度区,为马氏体组织淬硬组织的聚集区域,如图 8、图 9 所示,焊缝区组织为  $\alpha'$  针状马氏体.从熔合线、热影响区至母材显微硬度逐渐降低.热影响区靠近熔合线位置显微硬度最高,主要是由于该区域温度梯度大、冷却速度快、淬硬倾向大,既存在  $\alpha'$  针状马氏体,又因为没有发生重熔,存在等轴晶粒.如图 8b、图 8c 和图 9b 所示。

大气焊缝上部硬度略高于下部焊缝硬度,分析其原因是因为焊缝上部接触外部气体,散热条件更好,冷却速度更快,形成的马氏体更加密集,硬度更高.而真空环境焊缝因为无外部气体干扰,硬度值在深度方向区别不大。

对大气(等距 0.5 mm)、真空环境(等距 0.5 mm)焊接焊缝进行熔深方向的显微硬度测试,测试位置

及结果如图 12 所示。

随着距焊缝顶端距离的增加,大气焊缝硬度略有降低,真空环境焊缝硬度比较均匀.大气环境焊缝平均硬度约为 390 HV,高于真空环境焊缝平均显微硬度 360 HV.分析其原因是大气环境下焊缝冷却速度更快,形成的针状马氏体更加密集,提高了焊缝硬度。

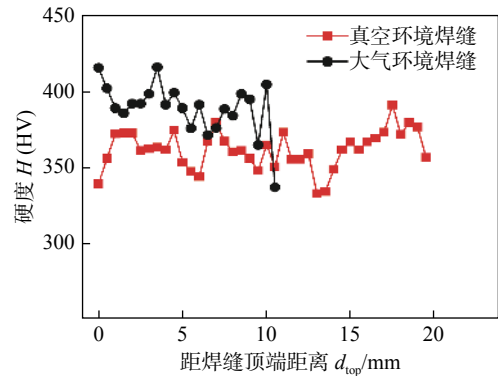


图 12 焊缝熔深方向硬度测试  
Fig. 12 Hardness test in the direction of weld penetration

## 2.5 焊缝拉伸强度测试

为了评价焊接接头基本力学性能,选取激光功率 7 kW 的真空环境与大气环境焊缝进行拉伸试验,为了保证试验结果的可靠性,从上至下切取 3 个试件,真空环境试件为编号 1, 2, 3, 大气环境试件编号为 4, 5, 6, 然后利用扫描电镜对断口进行 SEM 分析,确定其断裂机制.拉伸试验试件尺寸如图 13 所示,断裂位置如图 14 所示,对拉伸试验提取结果绘制了如图 15 所示的抗拉强度条形图,拉伸断口如图 16 所示。

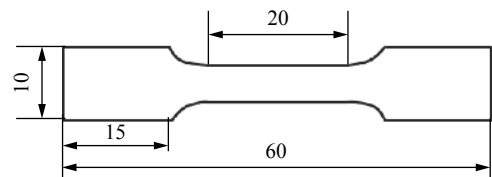


图 13 试件尺寸 (mm)  
Fig. 13 Dimensions of the test piece



图 14 试件断裂位置  
Fig. 14 Fracture locations of test pieces



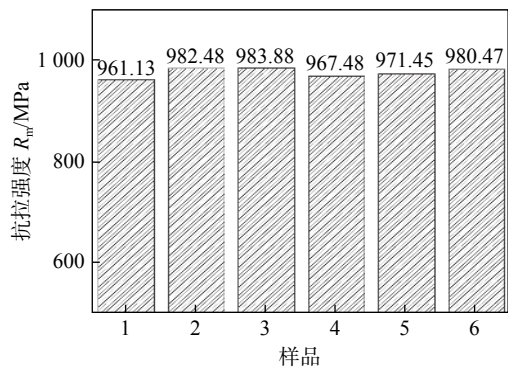
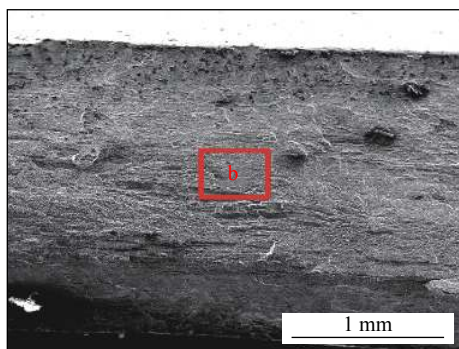
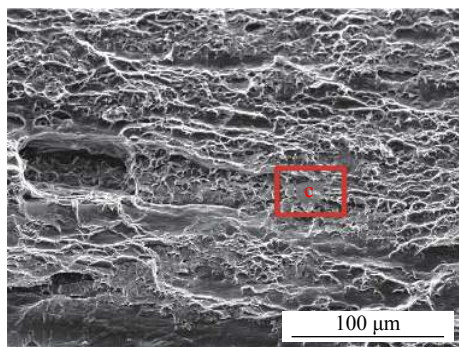


图 15 焊缝抗拉强度

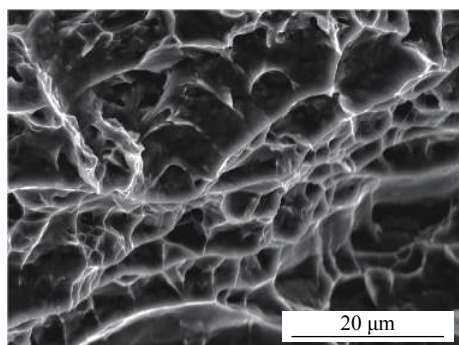
Fig. 15 Tensile strength of weld



(a) 焊缝断口



(b) b 区



(c) c 区

图 16 焊缝断口形貌

Fig. 16 The micrograph of weld fracture. (a) weld fracture; (b) b zone; (c) c zone

对大气与真空环境焊接焊缝进行抗拉强度测试,发现拉伸试件全部断裂于母材部位,说明焊缝

的强度良好且高于母材,试件的抗拉强度为 960 ~ 980 MPa. 观察拉伸曲线发现,拉伸试件发生弹性变形后进入屈服,但不存在明显的屈服台阶,直接进入塑性变形阶段并最终断裂.

对焊缝断口进行分析,断口形貌为呈网络状分布的韧窝,其形态细小,均匀,且凹坑较深. 韧窝的形成分为空洞、形核、生长、集聚和断裂 4 个过程. 在受较小作用力的时候,第二相粒子会阻碍位错的移动,当外力继续增大,位错开始出现滑移,接着第二相粒子与晶粒分离直至产生裂纹撕裂,形成空洞,导致裂纹的扩展. 这些空洞在滑移和撕裂的作用下最终发生断裂,形成凹坑形状. 观察发现,断口上有大量细小的呈网状分布的韧窝,韧窝较为密集. 因此,推断该焊接接头拉伸试样的断口为韧性断口.

## 2.6 真空环境对焊缝质量影响原因分析

激光焊接属于熔焊方法,熔焊都是在焊接热源的作用下完成的,激光束就是激光焊接的热源,不同工艺参数下激光能量在焊缝各区域的分布发生改变,导致整个焊缝各区域焊接热循环的改变,使得整个焊缝组织发生改变. 真空环境激光焊接与常规激光焊接相比,焊接热循环的改变的影响因素主要有两方面,一方面是等离子体被抑制对激光能量的影响,一方面是环境压力改变对散热条件的影响.

在常规激光深熔焊过程中,激光束照射在焊接材料表面,使焊接材料在短时间内发生剧烈的气化现象,形成匙孔. 匙孔会向外喷出大量的金属蒸气,这些金属蒸气中的金属气体原子以及保护气中的气体分子会在激光的高能量作用下发生电离,形成一团致密的光致等离子体. 等离子体对激光发生折射、散射、吸收作用,使激光束的能量密度降低. 真空环境可以抑制焊接过程中的等离子体,减少因为等离子体折射、散射以及吸收造成的激光能量损耗,提高焊接过程热输入,进而增加焊缝熔深.

真空度改变会导致工件散热条件改变<sup>[15]</sup>. 在大气环境下,保护气的流动会加快焊缝顶部对流换热,冷却速度较快. 在真空环境下,由于真空度的提高,气体分子减少,对流换热的载体减少,散热效率也就会下降. 气体分子在真空舱内壁与试板之间进行对流换热,当真空度提高时,对流换热效率将逐渐降低直至接近为 0,散热大部分靠热辐射与热传导进行,试件的整体散热速度下降,焊缝冷却速度下降,使得焊缝组织转变,具体原理图如图 17 所示.

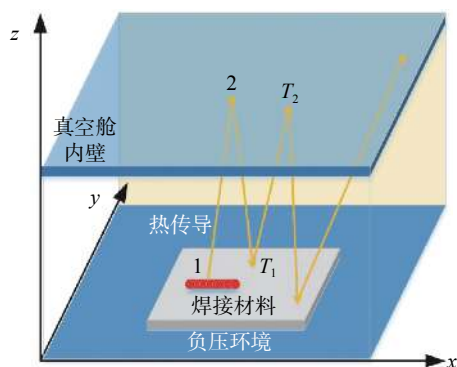


图 17 负压环境对流换热原理示意图

Fig. 17 Schematic diagram of convection heat transfer in negative pressure environment

### 3 结论

(1) 真空环境可明显改善 TC4 钛合金激光焊接工艺特性,相较于大气环境,焊缝由“丁字”形变为“手指”形,焊缝熔深显著增加,焊缝表面成形明显改善。

(2) 真空环境焊缝组织与大气环境焊缝组织种类差异不大,均为  $\alpha'$  针状马氏体。大气环境焊缝热影响区宽度大,存在更多  $\alpha'$  针状马氏体。真空环境下热影响区宽度明显减小,从母材到焊缝晶粒逐渐长大,存在更多的  $\alpha'$  针状马氏体。

(3) 无论是在大气环境还是在真空环境下,整个焊缝的硬度趋势类似。焊缝显微硬度呈马鞍形分布,焊缝处于高硬度区,大气环境焊缝平均硬度约为 390 HV,高于真空环境焊缝平均显微硬度 360 HV。对焊缝进行抗拉强度测试,不同环境下焊缝的拉伸试件全部断裂于母材部位,试件的抗拉强度为 960~980 MPa。

### 参考文献

- [1] Schneider A, Gumenyuk A, Lammers M, *et al.* Laser beam welding of thick titanium sheets in the field of marine technology[J]. *Physics Procedia*, 2014(56): 582 – 590.
- [2] 桂珍珍. 变厚度 TC4-BTi6431S 钛合金激光双面焊接工艺基础研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
Gui Zhenzhen. Basic research on laser double-sided welding of TC4-BTi6431S titanium alloy with variable thickness[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [3] 杨东旭. TC4 钛合金激光焊接接头溶质元素分布及不均匀性的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

Yang Dongxu. Study on solute element distribution and heterogeneity of TC4 titanium alloy laser welded joint[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

- [4] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. Ti-6Al-4V 电子束焊接焊缝区域精细组织特征 [J]. *航空材料学报*, 2005, 25(3): 21 – 24.  
Wu Huiqiang, Feng Jicai, He Jingshan, *et al.* Microstructure characteristics of Ti-6Al-4V electron beam welding area[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2005, 25(3): 21 – 24.
- [5] 吕世雄, 崔庆龙, 黄永宪, 等. 厚板钛合金窄间隙 TIG 焊接头组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2012, 33(8): 81 – 84.  
Lü Shixiong, Cui Qinglong, Huang Yongxian, *et al.* Microstructure and properties of TIG welded joints with narrow gap in titanium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(8): 81 – 84.
- [6] 王翔宇, 杨璟, 芦伟, 等. TC4 钛合金激光窄间隙焊接工艺与组织特征研究 [J]. *航空制造技术*, 2016, 518(23): 104 – 107.  
Wang Xiangyu, Yang Jing, Lu Wei, *et al.* Study on laser narrow gap welding process and microstructure characteristics of TC4 titanium alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 518(23): 104 – 107.
- [7] 李吉帅. 厚板钛及钛合金电子束焊接头组织与性能的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.  
Li Jishuai. Study on microstructure and properties of thick plate titanium and titanium alloy electron beam welding joints[D]. Jinan: Shan Dong University, 2017.
- [8] 陈永城, 张宇鹏, 罗子艺, 等. TC4 钛合金中厚板激光焊接接头显微组织与力学性能 [J]. *应用激光*, 2017(5): 662 – 667.  
Chen Yongcheng, Zhang Yupeng, Luo Ziyi, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy plate welded joints[J]. *Applied Laser*, 2017(5): 662 – 667.
- [9] 苏轩. 中厚度钛合金激光-MIG 复合焊接特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
Su Xuan. Characteristics of medium thickness of titanium plate laser-mig hybrid welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [10] Auwal S T, Ramesh S, Yusof F, *et al.* A review on laser beam welding of titanium alloys[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.
- [11] 彭根琛. 铝与镍合金的真空环境激光焊接特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Peng Genchen. Laser welding characteristics of aluminum and nickel-base alloys under vacuum environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [12] 唐卓. 船用厚板高功率激光焊接工艺适应性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
Tang Zhuo. Research on adaptability of high power laser welding process for marine thick plate[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.