

# 钛合金激光填丝焊接

陈新松, 姚 伟, 巩水利

(北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

**摘要** 在大量工艺实验的基础上,研究了钛合金激光填丝焊接中影响焊接过程稳定性的主要因素和影响焊缝形成的主要工艺参数,获得了一定条件下送丝速度与焊接速度的合理匹配范围。研究表明,熔滴过渡方式和离焦量是影响焊接过程稳定性的主要因素,送丝速度和焊接速度是影响焊缝形成的主要工艺参数,为了获得良好的焊缝成形,送丝速度与焊接速度必须合理匹配。

**关键词** 激光技术; 激光填丝焊接; 钛合金; 焊接过程稳定性; 焊缝成形

**中图分类号** TG46.7 **文献标识码** A

## Laser Welding with Filler Wire of Titanium Alloy

CHEN Xin-song, YAO Wei, GONG Shui-li

(National Key Laboratory For High Energy Density Beam Processing Technology,

Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract** The factors influencing the welding stability and the procedure parameters affecting the weld shaping in laser welding with filler wire of titanium alloy are investigated experimentally, and the reasonable matching sketch between wire feeding rate and welding speed is obtained. It shows that the melting dropt transition and the focus position have significant influences on laser welding stability, while the procedure parameters such as wire feeding rate and welding speed have important effects on weld shaping. In order to obtain the weld shaping with good quality, it is necessary that wire feeding rate must reasonably match with welding speed.

**Key words** laser technique; laser welding with filler wire; titanium alloy; welding stability; weld shaping

## 1 引 言

激光焊接具有焊接速度快、焊缝和热影响区窄以及焊接变形小等优点,在航空航天常用钛合金薄壁结构件的焊接领域具有极大的应用潜力。然而,激光焊接对焊件坡口加工精度以及对焊接边垂直度、间隙和错边量等的要求很高<sup>[1]</sup>,这使得激光焊接在实际工程中的推广应用非常困难。另外,钛合金在高速激光焊接条件下,焊缝一般都存在不同程度的咬边缺陷,这将严重影响焊接接头力学性能,尤其是接头疲劳性能。采用填加焊丝激光焊接钛合金不仅可以有效地解决钛合金激光焊接在实际工程应用中存在的问题,而且可以改变焊缝成分,改善焊缝组织,降低接头硬度,改善接头与母材的强度匹配。目前,国内外对激光填丝焊接的研究多限于钢<sup>[2,3]</sup>和铝合金<sup>[4]</sup>等材料,对钛合金的研究鲜见报道,因此有必要对钛合金激光填丝焊接的工艺特性进行系统研究。本文在大量工艺实验的基础上,研究了钛合金

激光填丝焊接中影响焊接过程稳定性的主要因素和影响焊缝形成的主要工艺参数,获得了一定条件下送丝速度与焊接速度的合理匹配范围。

## 2 实验条件和方法

焊接材料采用轧制后退火的 BT20 钛合金板材,焊接试板尺寸规格为 100 mm×80 mm×2.5 mm,对接试板采用铣削加工焊接边。焊前采用碱洗液去除试板表面油污,采用酸洗液(体积分数)5% HF + 10% HNO<sub>3</sub> + 85% H<sub>2</sub>O 去除试板表面氧化膜。焊丝采用直径 0.8 mm 纯钛焊丝。惰性保护气体采用工业纯氩。

激光焊接设备采用以 PRC4000 型 CO<sub>2</sub> 激光器为核心的 LMC-2 型四轴大型数控 CO<sub>2</sub> 激光加工机。PRC4000 CO<sub>2</sub> 激光器最大功率为 4000 W,激光模式为 Q 模,焦斑直径为 0.4 mm。另外设计一套自动填丝装置和气体保护装置。填丝装置中的导

丝机构与气体保护装置连接,并能保证送丝位置的  
可调与稳定。焊接时送丝方向与焊接方向相反,且  
送丝方向与水平方向间夹角呈  $30^\circ$ 。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 焊接过程稳定性的影响因素

##### 3.1.1 熔滴过渡方式的影响

实验研究表明,焊丝熔滴与熔池前沿之间能否  
形成稳定的液桥是焊接过程能否稳定进行的关键。  
如果将焊丝准确地送到熔池前沿,熔滴与熔池前沿

之间即可形成稳定的液桥,熔滴顺着液桥平稳过渡  
进入熔池,形成连续稳定的焊缝,如图 1(a)所示。  
反之,如果熔滴与熔池前沿之间不能形成稳定的液  
桥,而是呈不连续的滴状向熔池过渡,这种熔滴过渡  
方式将破坏焊接匙孔和焊接过程的稳定性,形成不  
连续的焊缝,如图 1(b)所示。图 1(b)还表明,送丝  
速度较低时,熔滴向熔池过渡的频率较低,焊缝连续  
性较差。提高送丝速度,熔滴向熔池过渡的频率增  
大,焊缝连续性得到改善。

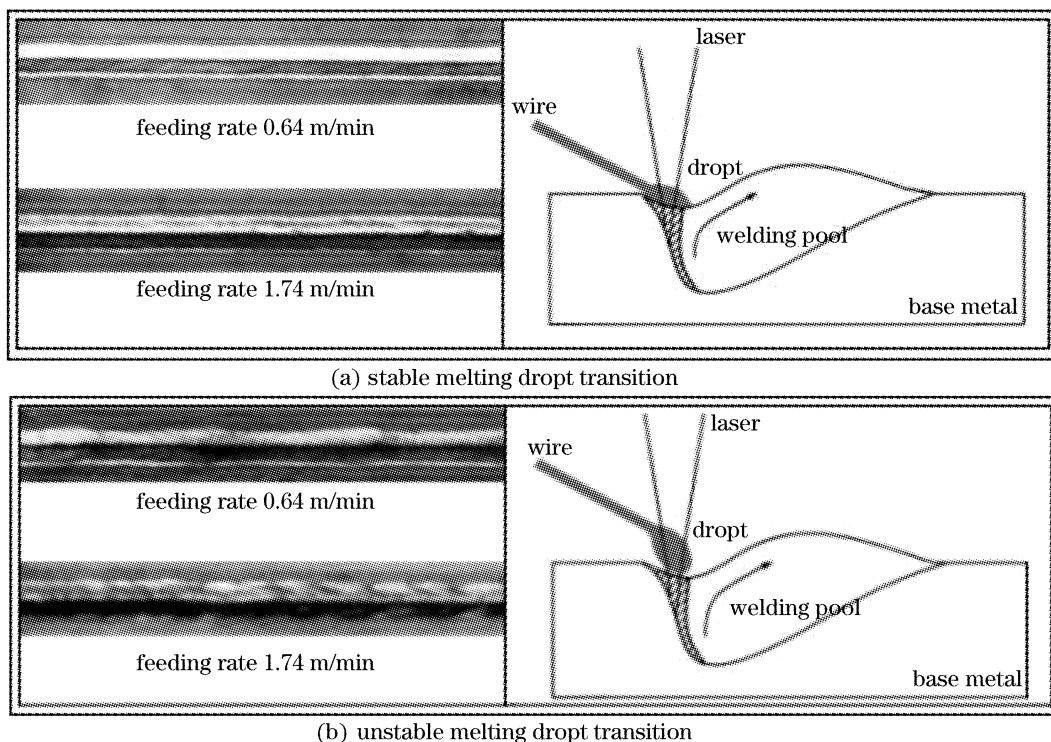


图 1 熔滴过渡方式对焊接过程稳定性的影响

Fig.1 Effect of melting droplet transition on welding stability

##### 3.1.2 离焦量的影响

图 2(a)为填加焊丝时离焦量对焊接过程稳定  
性的影响,并与不填加焊丝时[图 2(b)]进行比较。  
从图 2(a)可以看出,填加焊丝时,随离焦量从零焦

向正离焦或负离焦方向变化,激光焊接从稳定的深  
熔焊接模式向不稳定的深熔焊接模式及不稳定的热  
导焊接模式转变。而不填加焊丝时,如图 2(b)所  
示,随离焦量从零焦向正离焦或负离焦方向变化,激

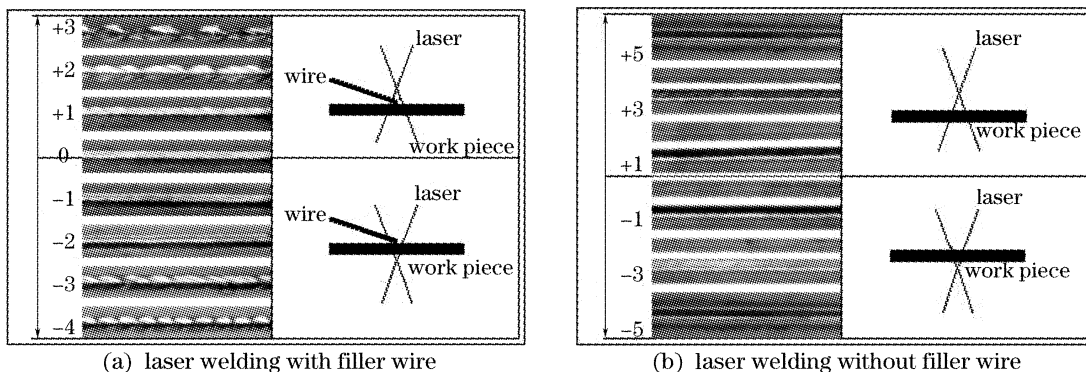


图 2 离焦量对焊接过程稳定性的影响

Fig.2 Effect of focus position on welding stability

光焊接从稳定的深熔焊接模式向稳定的热导焊接模式转变。与不填丝焊接相比,填丝焊接获得稳定深熔焊缝的离焦量范围要小得多。这主要是由于离焦量的变化使得填丝过程不稳定所致。观察正离焦和负离焦不稳定填丝的状态发现,在正离焦时,熔滴倾向于大滴状过渡,且过渡频率较低;而在负离焦时,熔滴倾向于小滴状过渡,且过渡频率较高。这可能是由于激光在焊接试板内聚焦状态不同导致等离子体对焊丝加热不同造成的。

### 3.2 焊接工艺参数对焊缝成形的影响

#### 3.2.1 送丝速度的影响

图3为焊缝正面熔宽(a)、熔宽比(b)(焊缝背面

与焊缝正面熔宽的比值,反映焊缝熔透性)和余高(c)(反映焊缝咬边状况)随送丝速度的变化关系。从图中可以看出,其他焊接参数一定时,存在一个送丝速度值使焊缝正面熔宽最小。当送丝速度小于该值时,随送丝速度增大,焊丝吸收激光能量和等离子体能量增多,焊缝正面熔宽和焊缝背面熔宽减小,而焊缝熔宽比没有明显变化,填丝量的增加使得焊缝余高略为增大,而咬边减小。当送丝速度大于该值时,随送丝速度增大,大部分激光能量被焊丝吸收,焊缝正面有明显的焊丝堆积,焊缝正面熔宽和余高迅速增大,而焊缝熔宽比迅速减小,焊缝熔透性明显降低。

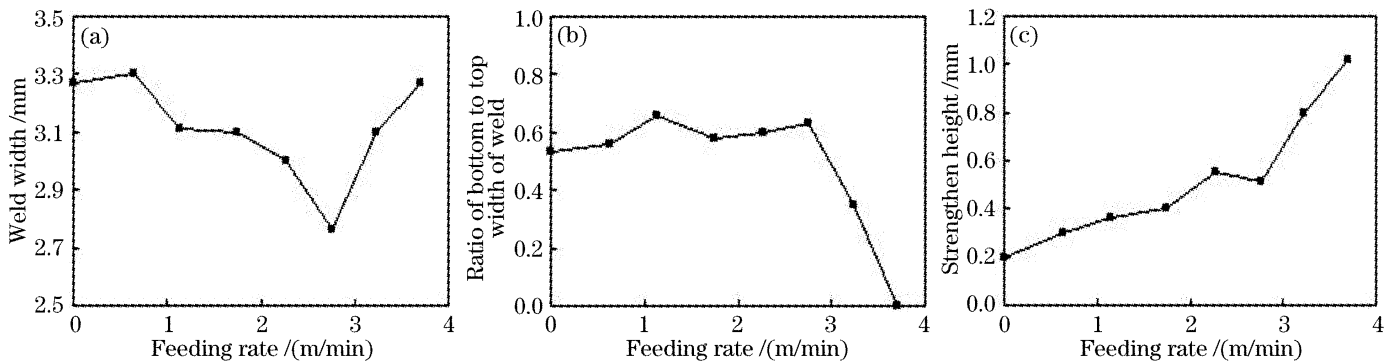


图3 焊缝熔宽(a)、熔宽比(b)和余高(c)随送丝速度的变化关系

Fig. 3 Relationship between feeding rate and weld width (a), ratio of bottom to top width of weld (b) and strength height (c)

#### 3.2.2 焊接速度的影响

图4为不同送丝速度条件下焊缝正面熔宽(a)、熔宽比(b)和余高(c)随焊接速度的变化关系。从图

中可以看出,随焊接速度增大,焊缝正面熔宽和熔宽比明显减小,焊缝熔透性显著降低,而焊缝余高和咬边没有明显变化。

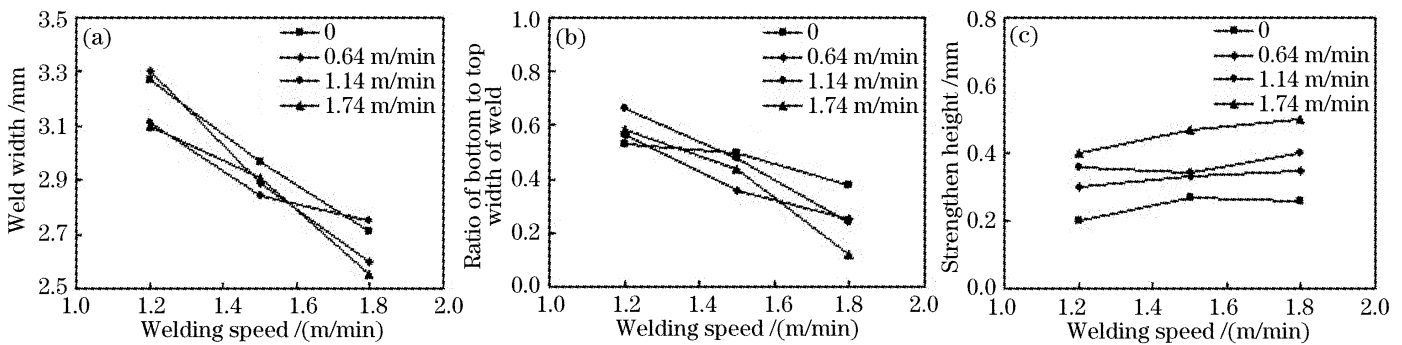


图4 焊缝熔宽(a)、熔宽比(b)和余高(c)随焊接速度的变化关系

Fig. 4 Relationship between welding speed and weld width (a), ratio of bottom to top width of weld (b) and strength height (c)

### 3.3 送丝速度与焊接速度的合理匹配范围

在一定离焦量和激光功率条件下,按0和0.25 mm(板厚的10%)间隙进行对接焊实验,对比不同送丝速度-焊接速度匹配的焊缝成形,分别获得了送丝速度与焊接速度的合理匹配范围,如图5所示。结果表明,在一定焊接速度条件下,0间隙不填丝对接焊时,焊缝存在明显的咬边缺陷,而0.25 mm间隙不填丝对接焊时,焊缝表面存在严重的塌陷。随送

丝速度增加,焊缝余高增大,焊缝塌陷和咬边得到逐步改善。但随送丝速度进一步增大,焊缝正面将有明显的焊丝堆积,焊缝熔透性明显降低。提高焊接速度,由于焊缝熔透性降低,获得良好焊缝成形(焊缝全熔透且无咬边缺陷)的送丝速度范围减小。与0间隙对接焊相比,0.25 mm间隙对接焊的送丝速度-焊接速度合理匹配范围向较高送丝速度方向移动。换句话说,在相同焊接速度条件下,较大间隙对接焊需

要较高的送丝速度才能获得良好的焊缝成形。

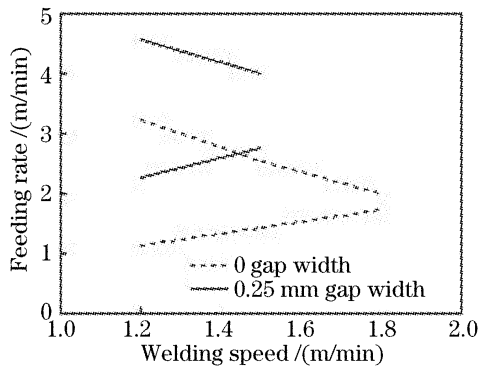


图5 送丝速度-焊接速度合理匹配范围

Fig. 5 Matching Sketch between wire feeding rate and welding speed

## 4 结 论

1) 熔滴过渡方式和离焦量是影响焊接过程稳定性的主要因素。其中焊丝熔滴与熔池前沿之间能否形成稳定的液桥是焊接过程能否稳定进行的关键。

2) 送丝速度和焊接速度是影响焊缝成形的主

要工艺参数。其他焊接参数一定时,随送丝速度在一定范围内增大,焊缝熔透性不会有明显变化,而焊缝咬边状况可以得到改善。但当送丝速度超过该范围时,随送丝速度增大,焊缝熔透性明显降低。焊接速度增大将使焊缝熔透性显著降低,但对焊缝咬边状况没有明显影响。

3) 为了获得良好的焊缝成形,送丝速度与焊接速度必须合理匹配。提高焊接速度,获得良好焊缝成形的送丝速度范围减小。与0间隙对接焊相比,在相同焊接速度条件下,较大间隙对接焊需要较高的送丝速度才能获得良好的焊缝成形。

## 参 考 文 献

- 1 C. J. Dawes. Laser welding of butt joints in low carbon steel sheets—process tolerance data[R]. TWI. No. 228/1983
- 2 M. N. Watson. Laser welding of structural steel with wire feed[R]. TWI. No. 264/1985
- 3 A. S. Salminen, V. P. Kujanpää. Effect of wire feed position on laser welding with filler wire[J]. *J. Laser Applications*, 2003, **15**(1): 2~10
- 4 I. A. Jones, S. T. Riches, J. W. Yoon *et al.*. Laser welding of aluminium alloys[R]. TWI. No. 517/1995