

TC4 钛合金光纤激光摆动焊抑制小孔型气孔的原因分析

李 坤¹, 王 威², 单际国¹, 王旭友², 陈武柱¹

(1. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150028)

摘 要: 采用光纤激光器对 8 mm 厚 TC4 钛合金板进行振镜摆动焊接, 采用光谱仪和高速摄像机采集等离子体的光谱、图像及小孔的图像, 分析摆动焊接抑制小孔型气孔的原因。结果表明, 摆动光束对抑制钛合金小孔型焊接气孔具有显著作用; 光束未摆动焊接时, 焊缝中的气孔率达 9.8%; 光束摆动后焊缝中的气孔率均降低, 其中焊接参数为 5 kW, 2 m/min, 摆动参数为 80 Hz, 0.5 mm 时, 小孔形气孔被完全抑制。与光束未摆动相比, 光束摆动焊接的小孔稳定性显著增加, 其原因是光束摆动提高了光束与熔池液面的接触面积, 金属蒸发增强, 驱动小孔张开的径向力和轴向力得以增加。

关键词: 光纤激光摆动焊; 小孔型气孔; 等离子体光谱和图像; 小孔稳定性; 钛合金

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)11-0043-04

0 序 言

TC4 钛合金广泛用于航空航天等重要领域, 但因饱和蒸汽压高、元素活泼等原因, 焊接时极易产生气孔^[1]。钛合金激光非穿透焊接时会产生氢气孔和小孔型气孔等两类气孔。氢气孔可以通过控制氢的来源以及改善熔池凝固过程的析氢条件加以预防, 但小孔型气孔是激光焊接过程不稳定导致的, 抑制小孔型气孔必须寻找新的途径。Haboudou 等人^[2]采用双光束焊接在一定程度上减少了小孔型气孔。国内外同行们对激光摆动焊抑制小孔型气孔也进行了一些研究。赵琳等人^[3]在研究 CO₂ 激光焊时发现, 光束摆动能显著减少焊缝中的小孔型气孔。Choi 等人^[4]研究表明, 激光摆动焊在减少小孔型气孔的同时还能抑制裂纹产生。已有的研究工作重点关注了激光摆动焊对抑制小孔型气孔的效果, 对于摆动焊抑制小孔型气孔的原因尚未见公开报道。

文中采用振镜摆动光纤激光束对 TC4 钛合金进行焊接, 并与光束未摆动焊接的焊缝进行对比, 考察焊缝中的气孔情况, 并通过观察焊接过程中小孔图像、等离子体图像、等离子体光谱成分及光强的变化, 分析了光束摆动对小孔稳定性的影响, 揭示了激光摆动焊抑制小孔型气孔的原因。研究结果对于深入认识激光摆动焊的物理本质以及优化摆动焊工艺参数具有重要意义。

1 试验方法

TC4 钛合金焊接试样的尺寸为 200 mm × 70 mm × 8 mm, 其化学成分见表 1。

表 1 TC4 钛合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of TC4

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.5 ~ 6.8	3.5 ~ 4.5	0.3	0.1	0.05	0.015	0.15	余量

激光焊接系统包括 6 kW 光纤激光器(波长为 1.07 μm, 聚焦光斑直径为 0.6 mm), 光束振镜摆动装置 PFO-33D 及四轴三联动数控机床。焊接时激光头保持不动, 振镜使光束做圆周运动, 同时工作台直线移动, 形成的摆动轨迹如图 1 所示, 焊接熔池及热影响区采用氩气进行保护。同时采用高速摄像和光谱仪记录试验过程, 焊接系统构成如图 2 所示, 采用 SP-2750i 瞬态光谱仪在垂直于焊接方向的轴向上采集等离子体的光谱信号, 同时采用 Photron Fastcam 1024 高速摄像机在熔池的另一侧拍摄等离子体图

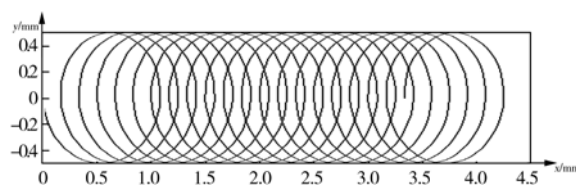


图 1 光束运动轨迹示意图

Fig. 1 Schematic drawing of laser beam trajectory

像,相机镜头轴线与水平面平行;采用 Optronis GmbH Cam 高速摄像机在熔池的正上方拍摄小孔图像. 焊前试板经过严格的化学清洗和机械处理,以避免氢气孔的形成.

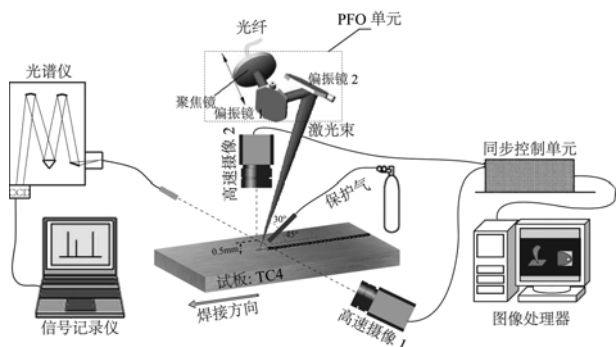


图2 焊接系统示意图

Fig. 2 Schematic drawing of welding system

图3为激光功率为5 kW、速度为2 m/min、零离焦下光束未摆动时的焊缝成形及气孔分布情况. 可以看出,焊缝未熔透且仅存在小孔型气孔. 试验以此为最大热输入,改变激光功率、光束摆动频率及摆动半径进行非穿透焊接,得到了不同小孔型气孔倾向的未熔透焊缝. 焊后采用光镜观察焊缝表面成形,采用X射线对焊缝进行无损检测,观察焊缝中气孔情况. 采用Matlab及Origin软件对小孔图像和等离子体光谱数据进行处理和统计,获得小孔的面积及等离子体光谱特征的变化曲线.

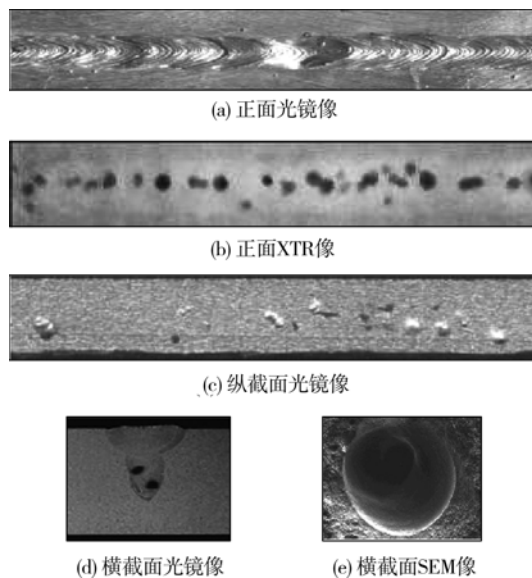


图3 光束未摆动时焊缝成形及气孔分布(5 kW-2 m/min-0 mm D_f)

Fig. 3 Weld quality under parameter

2 试验结果

图4为不同的光束摆动参数及光束未摆动条件下的焊缝形貌及气孔分布情况. 可以看出,光束未摆动条件下,焊缝中气孔严重,气孔率为9.8%,同时焊缝表面有明显的因飞溅导致的弹坑. 光束摆动条件下,不同的摆动频率和摆动半径的焊缝中气孔均明显减少,气孔率降至1%以下,焊缝表面也较平整. 其中,当摆动频率为80 Hz、摆动半径为0.5 mm时,气孔被完全抑制. 由此可知,摆动焊接工艺方法能够有效抑制钛合金激光非穿透焊接时的小孔型气孔.

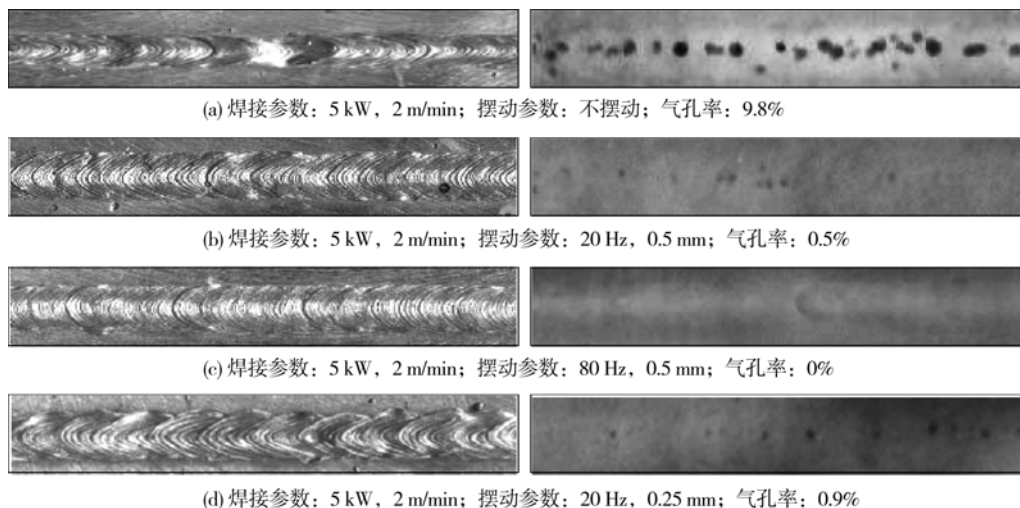


图4 不同光束摆动参数下焊缝成形及气孔分布

Fig. 4 Weld quality of titanium alloy under different process parameters

3 分析与讨论

Katayama 等人^[5]研究表明,激光非穿透焊接时小孔始终处于不稳定的波动状态,小孔的周期性坍塌和不规则的变化,使孔内气体被包裹其中,导致了在凝固过程中形成小孔型气孔,小孔稳定性是影响小孔型气孔形成的关键. 第 2 节的研究表明,摆动焊接显著降低了气孔率,优化的摆动工艺参数下,小孔型气孔被完全抑制. 但是,光束摆动是否对小孔稳定性产生了根本影响,值得进一步观察和分析.

图 5 是光束未摆动以及摆动参数为 80 Hz, 0.5 mm 条件下,焊接过程进入准稳态以后的小孔俯视图的瞬时变化情况,图像中心白亮区为小孔. 由图可知,在非常短暂的时间周期内,光束未摆动焊接时,小孔的尺寸存在由大变小、再由小变大的动态变化过程,同时小孔的形状也在椭圆形和多边形之间无规律的变化,小孔的张合状态极其不稳定(图 5a);光束摆动焊接时,小孔孔径变大,表面形状趋于稳定,且一直处于张开状态(图 5b). 这说明,光

束摆动提高了焊接过程中小孔的稳定性. 小孔的稳定性一般也会反映在等离子体的波动上面,亦即等离子体的波动情况,也可间接反映小孔的稳定性. 图 6 是与图 5 的小孔相对应时刻的等离子体图像的瞬时变化. 由图 6 可知,在短暂的时间周期内,光束未摆动焊接时,等离子体形态和体积波动很大,并伴随大量的飞溅(图 6a);光束摆动焊接时,等离子体形态比较稳定,周围的羽状物质减少,也没有飞溅产生(图 6b). 观察光束摆动和未摆动条件下钛的原子谱线 TiI503.646nm 的强度变化曲线(图 7). 可以看出,光束未摆动焊接时,焊接过程中等离子体光谱强度的波动剧烈,光束摆动焊接时的等离子体光谱强度的波动程度明显减弱. 等离子体形态及其辐射光谱强度的波动情况间接说明,光束摆动条件下小孔的稳定性确实提高了. 但摆动焊接提高小孔稳定性的原因尚需要进一步分析. 小孔主要是在金属蒸气的反冲力、熔池液态金属重力和表面张力三个力共同作用平衡而形成的^[5],这三个力的改变必然会

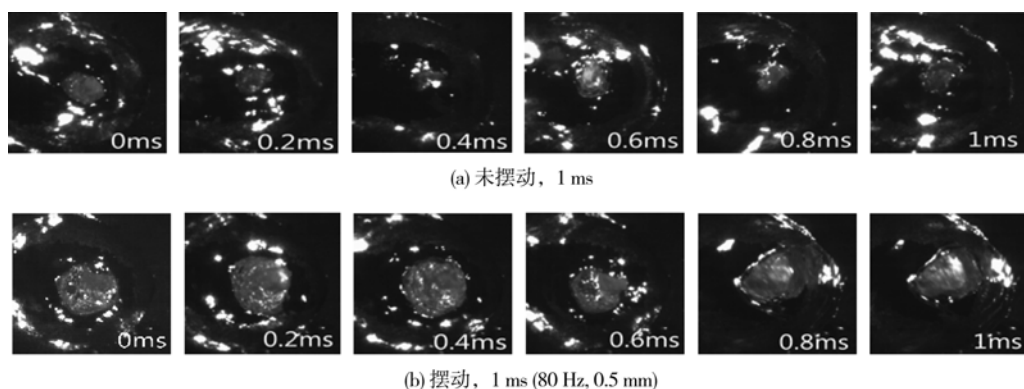


图 5 光束摆动焊接和未摆动焊接时小孔俯视图的瞬时变化(5 kW, 2 m/min)

Fig. 5 Keyhole images with beam weaving welding and non-weaving welding(5 kW, 2 m/min)

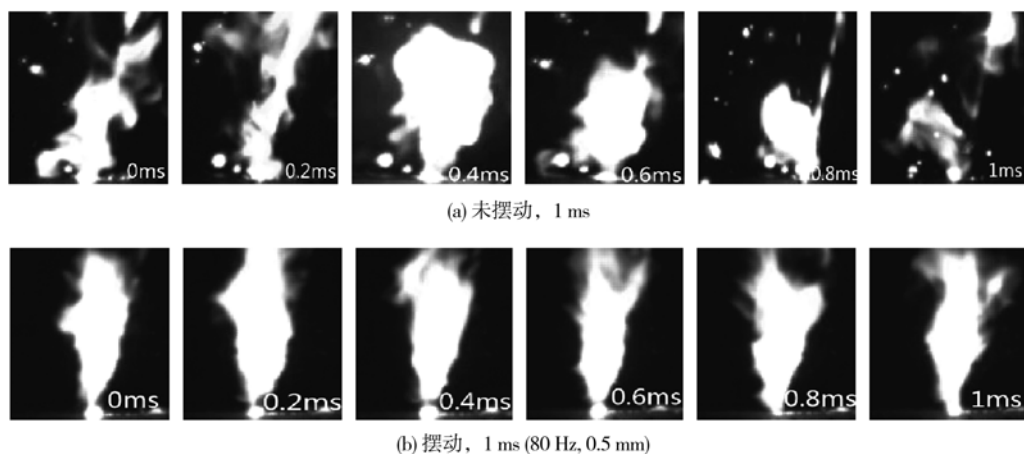


图 6 光束摆动和未摆动焊接时等离子体图像的瞬时变化(5 kW, 2 m/min)

Fig. 6 Plasma images with beam weaving welding and non-weaving welding (5 kW, 2 m/min)

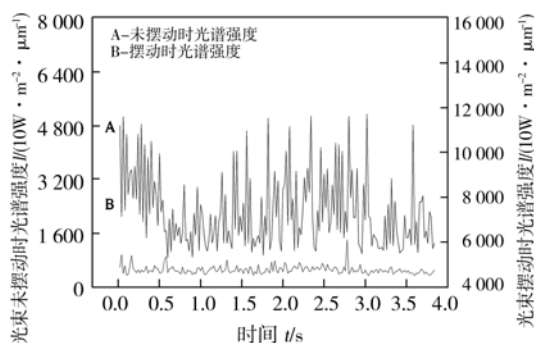


图 7 光束摆动和未摆动时 Ti1503.646nm 光谱强度的变化

Fig. 7 Variation of plasma spectrum intensity with beam weaving welding and non-weaving welding

图 8 为小孔上方任取一点金属液体的受力状况,金属蒸气反冲力 F_v ,沿金属液体表面切线方向的表面张力 F_τ ,重力 F_g 这三个力的作用维持小孔的平衡. F_v 、 F_τ 、 F_g 三个力按轴向和径向分解可得

$$\text{轴向力: } Fa_1 + Fa_2 - Fg = 0 \quad (1)$$

$$\text{径向力: } Fr_2 - Fr_1 = 0 \quad (2)$$

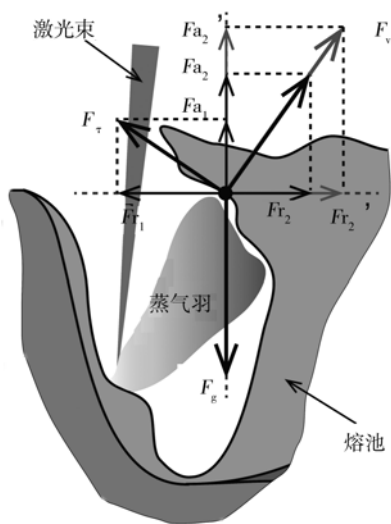


图 8 激光焊小孔壁的受力状态

Fig. 8 Force state of keyhole wall in laser welding

式(1)、式(2)成立时,小孔处于稳定状态. 其中, Fa_2 、 Fr_2 及 Fa_1 是小孔张开的驱动力, Fr_1 及重力 F_g 是小孔张开的阻力. 在光束未摆动条件下,小孔上方的金属液体通过 F_v 、 F_τ 、 F_g 三个力的作用处于准平衡态. 由于焊接过程始终存在瑞利不稳定带来的波动^[6],所以小孔的准平衡态很容易被破坏,导致小孔上方金属液体塌陷,小孔内部的气体被裹入熔池内,凝固后在熔池的尾部形成小孔型气孔. 文献[5]的研究表明,相同激光能量密度下激光与熔池作用面的增大会导致金属蒸发加剧. 文中研究条

件下,激光的摆动导致能量密度相同的激光与熔池的作用面增大,金属蒸发加剧(图 6). 蒸气反冲力 F_v 增大,分解后 Fa_2' 、 Fr_2' 使式(1)、式(2)均大于零,即驱动小孔张开的轴向力和径向力增大,这使得小孔上方的金属液体向维持小孔张开的方向(右上方)移动,从而使小孔俯视图中的孔径变大,小孔更易趋于张开状态,其稳定性因而增加.

4 结 论

(1) 光束未摆动焊接时,气孔率为 9.8%. 相同的激光能量参数下进行光束摆动焊接时,不同摆动参数下焊缝气孔率均降低至 1% 以下. 在焊接参数为 5 kW、2 m/min,摆动参数为 80 Hz、0.5 mm 时,小孔型气孔被完全抑制.

(2) 与光束未摆动焊接相比,小孔的表面形状变得规则,孔径变大,张开状态波动程度减小,等离子体的喷发更加稳定,周围的羽状物质减少,无飞溅现象发生,说明光束摆动提高了小孔的稳定性.

(3) 相同激光能量参数下,光束摆动增加了光束与熔池液面的接触面积,加剧了金属的蒸发. 金属蒸发反冲力的增加,导致驱动小孔张开的轴向力和径向力增加,小孔稳定性因而得以提高.

参考文献:

- [1] Du H, Hu L, Hu X, *et al.* Laser welding of TC-1 titanium alloy [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2003, 19(5): 475–478.
- [2] Haboudou A, Peyre P, Vannes A B, *et al.* Reduction of porosity content generated during Nd: YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 363(1/2): 40–52.
- [3] 赵琳, 张旭东, 陈武柱, 等. 光束摆动法减小激光焊接气孔倾向[J]. *焊接学报*, 2004, 25(1): 29–32.
Zhao Lin, Zhang Xudong, Chen Wuzhu, *et al.* Repression of porosity with beam weaving laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(1): 29–32.
- [4] Choi K, Ahn Y. Weldstrength improvement for Al alloy by using laser weaving method[J]. *Journal of Laser Applications*, 2010, 22(3): 116–119.
- [5] Katayama S, Iviutanf M, Matsljana A. Development of porosity prevention procedures during laser welding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003(4831): 281–288.
- [6] Fabbro R. Melt pool and keyhole behavior analysis for deep penetration laser welding[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2010, 43: 1–9.

作者简介: 李 坤,男,1988 年出生,博士研究生. 主要从事激光焊接方面的研究. 发表论文 4 篇. Email: likun11@ mails. tsinghua. edu. cn

通讯作者: 单际国,男,教授. Email: shanjg@ tsinghua. edu. cn