

薄板钛合金光纤激光-钨极惰性气体保护焊电弧 复合焊接工艺研究

马 然 董丽喆 吴世凯 杨武雄 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 针对 1 mm 厚 TC4 钛合金薄板进行光纤激光-钨极惰性气体保护焊(TIG)电弧复合焊接试验,研究了激光功率、电弧电流、热源间距、保护气成分等工艺参数对焊缝成形的影响,同时分析了焊接接头的显微组织及力学性能。研究表明:随着电弧电流增加、主保护气中 He 气比例升高,焊缝的熔化量逐渐增加;随着激光功率和两热源间距的增加,焊缝熔化量呈波动性变化。焊缝咬边程度和复合热源的热输入有关,输入的能量越大越集中,焊缝咬边深度越小。焊接保护效果主要由电弧输入的热量决定,输入的热量越大,保护效果越差。在优化的工艺参数下,复合焊接的接头抗拉强度高于母材,延伸率低于母材,这与焊缝中马氏体组织的分布有关,拉伸断裂位于母材。

关键词 激光技术;光纤激光;复合焊接;TC4 钛合金;焊缝成形;接头性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0503003

Study on Fiber Laser-Tungsten Inert Gas Hybrid Welding of Titanium Sheet

Ma Ran Dong Bizhe Wu Shikai Yang Wuxiong Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Fiber laser-tungsten inert gas (TIG) hybrid welding is applied to TC4 sheet with the thickness of 1 mm. The influences of welding parameters such as laser power, arc current, the distance of heat sources and the shielding gas on weld bead formation are studied. The metallographic structure and mechanical properties are also analyzed. The results indicates that with the increasing of arc current and the ratio of He in main shielding gas, the welding fusion area gradually increases. With the increasing of laser power and the distance of heat sources, the welding fusion area changes in fluctuation. The tendency of undercut is related to the heat input of hybrid heat sources. With the rising of concentration and input of the energy, the undercut depth on the back side of the welding seam decreases. The efficiency of shielding is mainly determined by the heat input of arc. The more input heat is, the poorer protective effect is. The tensile strength of hybrid welding joint under optimum welding conditions is larger than the base metal, and the elongation is smaller than the base metal. This is related to the distribution of martensite in the welding seam. The fracture takes place in the base metal.

Key words laser technique; fiber laser; hybrid welding; TC4 titanium; weld bead formation; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

钛合金具有密度低、比强度、比刚度高、耐腐蚀性好^[1]等优点,被广泛应用于航空航天、化工、医疗以及体育器械等领域^[2-3]。目前,钛合金焊接最常用的方法是钨极惰性气体保护焊(TIG)和熔化极惰

性气体保护焊(MIG),焊接工艺成熟,然而,电弧的热输入量大导致薄板焊接时产生的变形难以得到控制。相比之下,高能束流的焊接,例如电子束焊接和激光焊接^[4-5],由于热输入小、焊接接头质量高等特点,在实现小变形的全熔透焊接方面具有很大的发

收稿日期: 2013-11-04; **收到修改稿日期:** 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51275013)

作者简介: 马 然(1989—),女,硕士研究生,主要从事钛合金光纤激光-TIG 电弧复合焊接研究。

E-mail: maran890107@gmail.com

导师简介: 肖荣诗(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用、先进材料激光加工、激光加工新工艺、新方法以及外围技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(中国光学学会会员号: s040111702)

展潜力。然而,电子束的焊接必须要在真空室里进行,因此激光焊接被越来越多地用于连接钛合金,但是这种焊接方法也存在局限性——对工件的装配精度要求高,焊接桥连性差,焊缝容易产生咬边等。

激光-电弧复合焊接是将激光和电弧两种热源通过旁轴或同轴相结合并作用于工件的同一位置,实现金属材料连接的过程,它综合了激光焊接的高速度、高效率、低热输入和电弧焊接良好的桥连性,成为近年来焊接领域的一个研究热点。Steen^[6]在上世纪 80 年代末首次提出 CO₂ 激光-TIG 电弧复合焊接概念时就对 0.8mm 厚度的纯钛板进行了复合焊接试验,发现采用复合焊接,焊接速度可以提高 2 倍,显示出了复合焊接在薄板连接方面的优势。2009 年,崔丽等^[7]研究了工业纯钛(1.5 mm)的光纤激光-熔压极惰性气体保护焊复合焊接,发现离焦量和两热源之间的距离对焊缝横截面形状、缝宽、余高影响不大,而激光功率、电流、焊接速度对线能量

的输入有直接影响,对焊缝成形的影响则更大。2012 年 Murakami 等^[8]采用光纤激光-MIG 电弧复合焊接钛板时发现可以通过调整工艺参数来优化焊缝的咬边程度,并且认为焊接接头的力学性能和焊缝内的化学成分有关。但是对于薄板钛合金,MIG 焊接时易发生电弧不稳定,且易产生烧穿和飞溅^[9],因此开展光纤激光-TIG 电弧复合焊接工艺研究具有一定的应用价值。

本文针对 1 mm 厚 TC4 钛合金薄板进行光纤激光-TIG 电弧复合焊接试验,研究了工艺参数对焊缝成形的影响规律,并对接头的显微组织及力学性能进行了分析。

2 试验材料及方法

试验材料为 TC4 钛合金,尺寸是 100 mm × 50 mm × 1 mm。母材化学成分如表 1 所示。

表 1 Ti-6Al-4V(TC4)钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V (TC4) (mass fraction, %)

Al	V	Si	Fe	C	N	O	H	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	0.03	0.096	0.01	0.013	0.05	0.0048	residual

试验装置如图 1 所示。焊接热源为 IPG 公司生产的 YLS-6000 光纤激光器和 Fronius 公司生产的 TS5000 模块式全功能数字焊机,激光波长为 1.07 μm,通过焦距为 200 mm 的准直镜和 250 mm 的聚焦镜后照射到板材表面,光斑直径为 0.25 mm, TIG 电弧为直流正接,焊枪倾斜角度为 45°。试验中采用激光在前、TIG 电弧在后的焊接方式,保护气采用惰性气体 He 气和 Ar 气,保护方式分为主保护、尾保护和背保护,主保护气保护焊接熔池并作为电弧放电气体,尾保护气保护焊后高温区免受污染。

焊接前对试样表面进行处理:先用碱洗的方法除去待焊试样表面的油污,碱洗液的配置为:质量分数 5%~10% 的 NaOH + 丙酮;再用酸洗的方法清除待焊试样表面的氧化层,酸洗液的配置为:2% HF + 30% HNO₃ + 蒸馏水(余量),然后用水冲洗干净并烘干,此时待焊试样的表面为银白色。

焊接过程中,调整激光功率、电弧电流、两热源间距离 D_{al} 、保护气成分及流速等参数焊接钛合金。焊后对每道焊缝选取 3 个不同的位置切割、研磨、抛光、腐蚀,侵蚀液为 Kroll 试剂(HF 3 mL + HNO₃ 6 mL + H₂O 100 mL)。在体式显微镜(OLYMPUS-SZ61)下进行焊缝的宏观金相检测,从正面熔宽、背面熔宽、咬边深度几个方面定量分析焊缝成形和咬边情况,焊接

过程中板材是全部熔透的。在光学显微镜(OLYMPUS-PMG 3)下观察焊接接头的低倍组织,用显微硬度计(FM-300)测量焊缝横截面的维氏硬度,加载为 200 g,两个压痕的中心距离为 0.25 mm。在万能试验机上对接头进行室温拉伸试验。

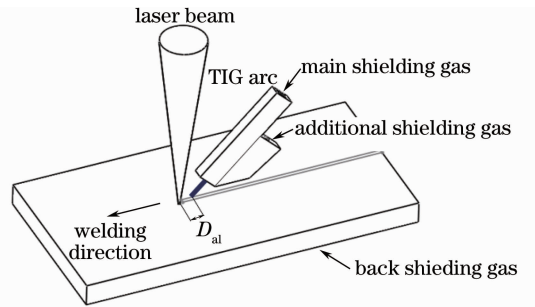


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

3 试验结果与分析

3.1 单热源与复合热源焊接的焊缝形貌对比

图 2 给出了在 1100 W 激光功率、60 A 电流、3 m/min 焊接速度和纯氩气保护条件下单热源焊接和复合热源焊接的焊缝成形。可以看出焊缝表面均为银白色,说明熔池的保护情况良好。单电弧焊接时,电流小,热输入小,板材没有产生熔化;单激光焊接时,板材

的快速熔化和凝固使得焊缝狭窄,并在焊缝的正面和背面均产生咬边缺陷;加入电弧后,热输入量增加,焊

缝和热影响区宽度变大,焊缝正面的咬边消失,焊缝表面鱼鳞纹平滑,但是焊缝背面仍然存在咬边。

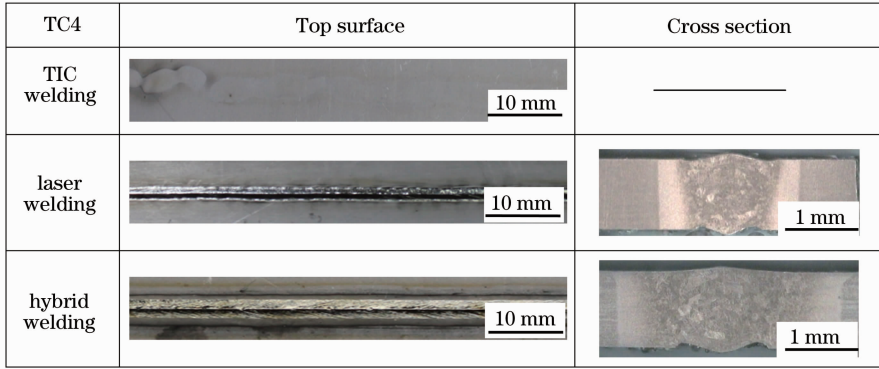


图 2 单热源焊接和复合热源焊接的焊缝成形

Fig. 2 Weld formation of single heat source welding and hybrid welding

3.2 电弧电流对焊缝成形的影响

图 3 表示电弧电流对焊缝熔宽和咬边深度的影响,其中,激光功率为 1100 W,焊接速度为 3 m/min,离焦量 $\Delta f=0$, $D_{al}=0$,主保护气 Ar 流速为 10 L/min,尾保护气 Ar 流速为 15 L/min,背保护气 Ar 流速为 10 L/min。从图中可以看出随着电弧电流的升高,焊缝背面熔宽变化范围很小,而正面熔宽则逐渐升高,咬边深度逐渐下降。这是由于在实验条件下,正面熔宽由于电弧热输入的增加而不断

升高^[10],而电弧的能量主要作用于板材表面,所以焊缝背面熔宽主要由激光功率决定,又因为光纤激光波长短,电弧等离子体对激光能量的损耗可以忽略不计^[11-13],最终使得焊缝背面熔宽基本不变。焊缝上面熔化金属的增加,由于热传导作用会使焊缝下部熔池的凝固速度变慢,进而熔化的金属能够铺展到焊趾处,焊缝的咬边深度逐渐减小,且当电流为 100 A 时焊缝咬边倾向达到最小。

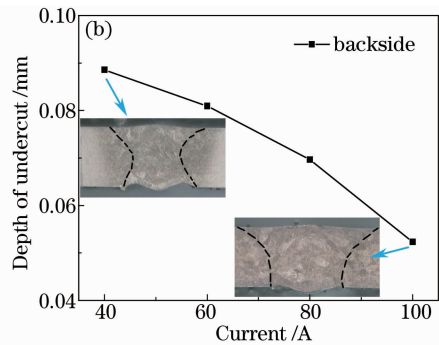
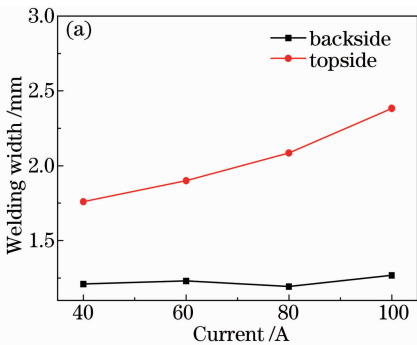


图 3 焊缝熔宽和咬边深度随电弧电流的变化

Fig. 3 Change of welding width and undercut depth with arc current

图 4 表示电弧电流对焊缝表面保护效果的影响,其中,激光功率为 1100 W,焊接速度为 3 m/min, $\Delta f=0$, $D_{al}=0$,主保护气 Ar 气流速为 10 L/min,尾保护气 Ar 气流速为 15 L/min,背保护气 Ar 气流速为 10 L/min。从图中看出保护效果随着电弧电流的升高逐渐变差。因为随着热输入量的增加,焊缝的高温区间增大,即板材需要保护的面积增加;此外,钛是一种活泼金属,在高温下对氧、氢、氮具有极大的亲和力,且材料的温度越高,钛合金对氧、氢、氮的吸气性越强^[14]。

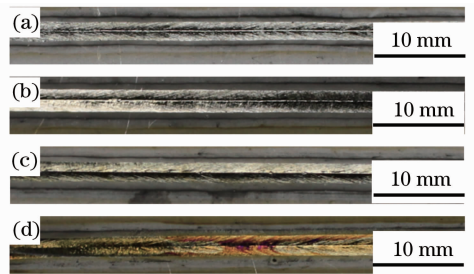
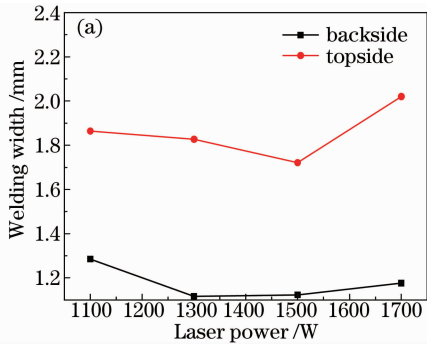


图 4 焊缝保护效果随电弧电流的变化。(a) 40 A; (b) 60 A; (c) 80 A; (d) 100 A

Fig. 4 Change of efficiency of shielding with arc current. (a) 40 A; (b) 60 A; (c) 80 A; (d) 100 A

3.3 激光功率对焊缝成形的影响

图 5 表示激光功率对焊缝熔宽和咬边深度的影响,其中,电弧电流为 60 A,焊接速度为 3 m/min, $\Delta f=0$, $D_{al}=0$,主保护气 Ar 气流速为 10 L/min,尾保护气 Ar 流速为 15 L/min,背保护气 Ar 气流速为 10 L/min。从图中看出随着激光功率的增加,焊缝熔宽和咬边深度均呈波动性变化,前者先减小后增加,后者则先增加后减小,说明焊缝的熔化量影响了焊缝的咬边深度^[15]。这和复合热源及两热源之间的相互作用有关系。已有研究结果表明光纤激光全



熔透焊接过程中,板材正面熔宽和背面熔宽受激光功率的影响^[16],同时小孔向上喷发出的金属蒸气改变电弧等离子体的面积,从而影响焊缝的正面熔宽^[11,17],因此板材的熔化情况与激光和电弧两个热源均有联系。当激光功率为 1700 W 时,焊缝上部熔化金属最多(正面熔宽最大),焊缝背面宽度较小,热传导作用使焊缝下部熔化的金属填满背面焊缝的概率最大,咬边程度最小。然而此时,正面熔宽过大,反而使得焊缝上部出现了轻微咬边,如横截面照片所示。

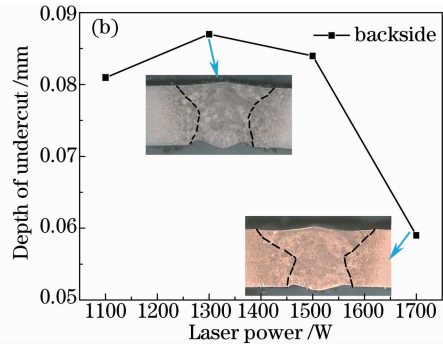


图 5 焊缝熔宽和咬边深度随激光功率的变化

Fig. 5 Change of welding width and undercut depth with laser power

图 6 表示激光功率对焊缝表面保护效果的影响,其中,电弧电流为 60 A,焊接速度为 3 m/min, $\Delta f=0$, $D_{al}=0$,主保护气 Ar 气流速为 10 L/min,尾保护气 Ar 气流速为 15 L/min,背保护气 Ar 气流速为 10 L/min。因为板材薄,加上激光自身的能量密度高,需要输入的激光功率小,使得激光功率的变化对保护效果的影响不大。

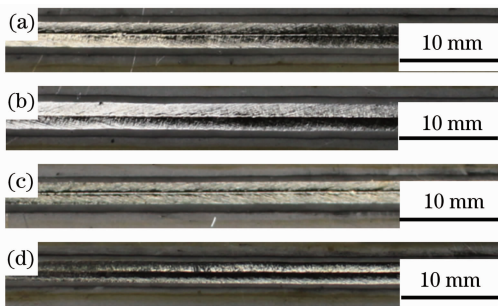


图 6 焊缝保护效果随激光功率的变化。

(a) 1100 W; (b) 1300 W; (c) 1500 W; (d) 1700 W

Fig. 6 Change of efficiency of shielding with laser power.

(a) 1100 W; (b) 1300 W; (c) 1500 W; (d) 1700 W

3.4 保护气成分对焊缝成形的影响

图 7 表示焊接气体成分对焊缝熔宽和咬边深度的影响,其中,激光功率为 1100 W,焊接速度为

3 m/min, $\Delta f=0$, $D_{al}=0$,尾保护气 Ar 气流速为 15 L/min,背保护气 Ar 气流速为 10 L/min。随着主保护气中 He 气比例的升高,正面熔宽逐渐升高后有小幅度下降,背面熔宽在 He 气所占比例达到 100%时有所升高,咬边深度则逐渐下降,当用纯 He 气焊接时,咬边完全消失,这主要与保护气体的物理性质有关。因为 He 气电离能为 24.5 eV,高于 Ar 气电离能 15.7 eV^[18],当输入相同电流时,He 弧电压大于 Ar 弧电压,从而使得 He 弧输入的能量大于 Ar 弧;同时,He 气热导率较高,根据最小电压原理,He 弧弧柱会自动收缩^[19],使得体积要小于 Ar 弧,如图 8 所示。其中,电弧电流为 60 A,焊接速度为 3 m/min,主保护气 Ar 气流速为 10 L/min,尾保护气 Ar 流速为 15 L/min,背保护气 Ar 气流速为 10 L/min。综合得出 He 弧输入的能量大于 Ar 弧且更加集中。从而使得随着主保护气中 He 气所占比例的升高,板材正面熔宽逐渐升高,熔池的凝固速度逐渐变慢,熔化的金属铺展到焊趾处,最终导致咬边程度降低^[20],当达到纯 He 气保护焊接时,热源能量更大更集中,导致了正面熔宽有所下降,背面熔宽有所增加,但这同样降低了熔池的凝固速度,并在重力的共同作用下使得焊缝背面咬边消失^[21]。

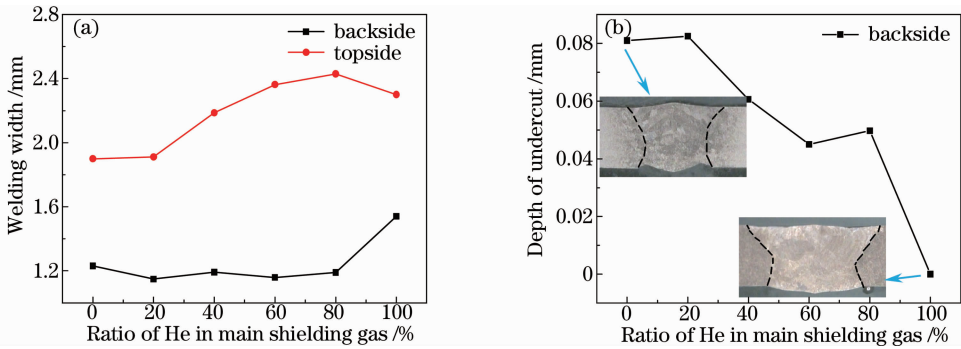


图 7 焊缝熔宽和咬边深度随主保护气成分的变化

Fig. 7 Change of welding width and undercut depth with main shielding gas

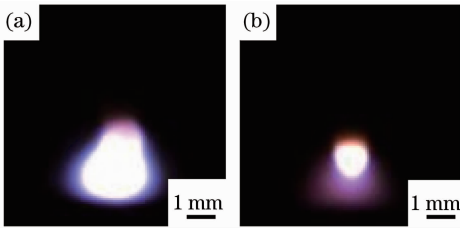


图 8 电弧的高速摄像图像。(a) 氩弧；(b) 氦弧

Fig. 8 High speed photograph of arc. (a) Ar; (b) He

图 9 表示焊接气体成分对焊缝表面保护效果的影响,其中,激光功率为 1100 W,电弧电流为 60 A,焊接速度为 3 m/min, $\Delta f=0$, $D_{al}=0$,尾保护气 Ar 气流速为 15 L/min,背保护气 Ar 气流速为 10 L/min。从图中看出 He 弧焊接时焊缝污染严重,一方面是因为 He 弧的热输入量大于 Ar 弧,使得焊缝高温区间增大和焊缝中氧、氢、氮含量升高^[14];另一方面是因为 He 的原子质量小于 Ar,He 弧焊接时所用的气体流量要远远大于 Ar 弧焊接所用的气体流量^[18]。

3.5 热源间距对焊缝成形的影响

图 10 表示激光和 TIG 电弧之间的距离对焊缝熔化宽度和咬边深度的影响,其中,激光功率为 1100 W,焊接速度为 3 m/min, $\Delta f=0$, $D_{al}=0$,主保护气 Ar 气流速为 10 L/min,尾保护气 Ar 气流速为 2.2

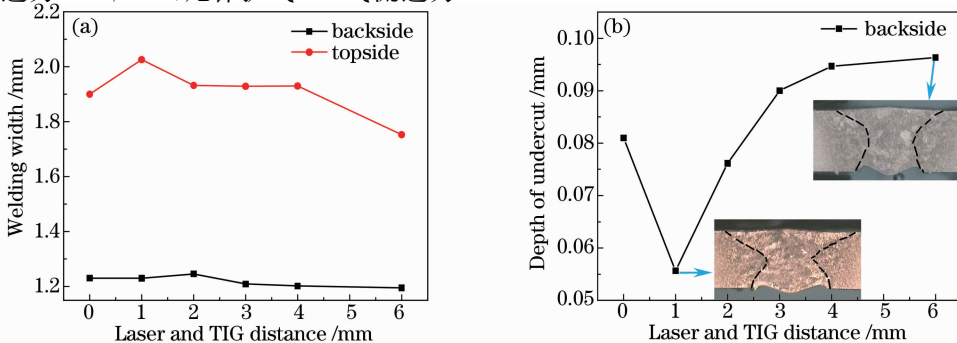


图 10 焊缝熔宽和咬边深度随热源间距的变化

Fig. 10 Change of welding width and undercut depth with distance of heat sources

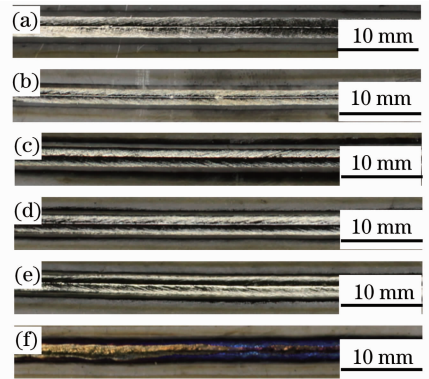


图 9 焊缝保护效果随 He 气占主保护气比例的变化。(a) 0%; (b) 20%; (c) 40%; (d) 60%; (e) 80%; (f) 100%
Fig. 9 Change of efficiency of shielding with main shielding gas. (a) 0%; (b) 20%; (c) 40%; (d) 60%; (e) 80%; (f) 100%

15 L/min,背保护气 Ar 气流速为 10 L/min。焊缝正面熔宽和咬边深度随着热源间距的增加呈波动性变化,热源间距为 1 mm 时,正面熔宽最大,咬边深度最小,背面熔宽则无明显变化。这是由于热源间距为 1 mm 时,电弧被吸引到激光产生的匙孔上方时长度增加,面积膨胀,从而使得作用于工件表面的热能能量增加,焊缝正面熔宽达到最大值^[11-12],电弧能量主要作用于板材上半部,使得焊缝背面熔宽

基本不变,两者共同导致了咬边程度的降低;随着热源间距的继续增加,小孔产生的金属蒸气对电弧的吸引作用减小,热源间距为 6 mm 时,这种相互作用趋于 0,焊缝表面的鱼鳞纹消失,只是电弧在激光焊

接后的高温区继续加热产生的材料熔化[图 11 (f)],此时正面熔宽达到最小值,咬边程度最高。

图 11 表示激光和 TIG 电弧之间的距离对焊缝保护效果的影响,其中,激光功率为 1100 W,焊接速度为 3 m/min, $\Delta f = 0$,主保护气 Ar 气流速为 10 L/min,尾保护气 Ar 气流速为 15 L/min,背保护气 Ar 流速为 10 L/min。在热源间距变化的过程中,复合热源输入的能量变化范围不大,导致焊道的保护效果都很好。

通过以上对工艺参数的研究,发现高速焊接条件下,薄板钛合金光纤激光-TIG 电弧复合焊接面临的两个主要难题是焊缝咬边和保护情况,根据上面获得的结果,为了保证焊缝的保护情况良好和咬边程度最低,减小咬边所带来的应力集中和焊缝污染导致的接头塑性、韧性下降^[15],最终选取激光功率为 1100 W、电弧电流为 80 A、焊接速度为 3 m/min、 $D_{al}=1$ 、 $\Delta f=0$ 、主保护气 Ar 气流速为 5 L/min 加上 He = 10 L/min、尾保护气 Ar 气流速为 15 L/min、背保护气 Ar 流速为 10 L/min 进行焊接,获得了成形良好、无污染的焊缝,如图 12 所示。

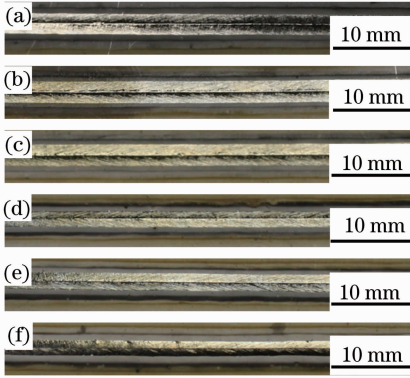


图 11 焊缝保护效果随热源间距的变化。(a) $D_{al}=0$; (b) $D_{al}=1$; (c) $D_{al}=2$; (d) $D_{al}=3$; (e) $D_{al}=4$; (f) $D_{al}=6$

Fig. 11 Change of efficiency of shielding with distance of heat sources. (a) $D_{al}=0$; (b) $D_{al}=1$; (c) $D_{al}=2$; (d) $D_{al}=3$; (e) $D_{al}=4$; (f) $D_{al}=6$

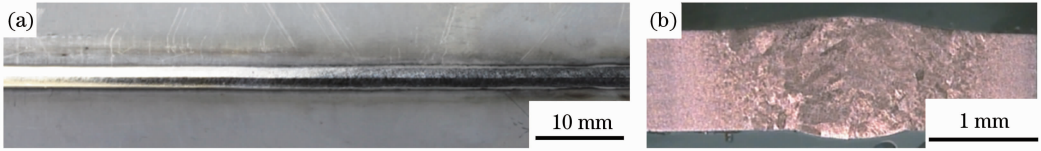


图 12 优化后 TC4 激光-电弧复合焊接的焊缝成形。(a) 上表面; (b) 横截面

Fig. 12 Welding formation of TC4 after laser-TIG hybrid welding with optimized parameters.

(a) Top surface; (b) cross section

3.6 TC4 复合焊接焊缝微观组织形态

图 13 为光学显微镜下钛合金激光-TIG 复合焊缝的低倍组织,分为焊缝(WM)、母材(BM)、近焊缝的热影响区(HAZ1)和近母材的热影响区(HAZ2)。结合 TC4 三元相图^[22]可知,母材组织为 $\alpha+\beta$ 两相组织,白色为 α 晶粒,黑色为 β 晶粒。在焊接

过程中,母材首先熔化,发生 $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ 相变,温度降低时,发生共析转变,从 β 相中析出 α 相,焊缝组织由 β 相转变为单一的马氏体 α' 相。热影响区组织为 $\alpha+\beta+\alpha'$ 混合组织,这是因为此区域的温度较低,使得 α 相并没有完全转变,已转变的 α 相会形成马氏体组织,且越靠近焊缝的区域含有的马氏体越多。

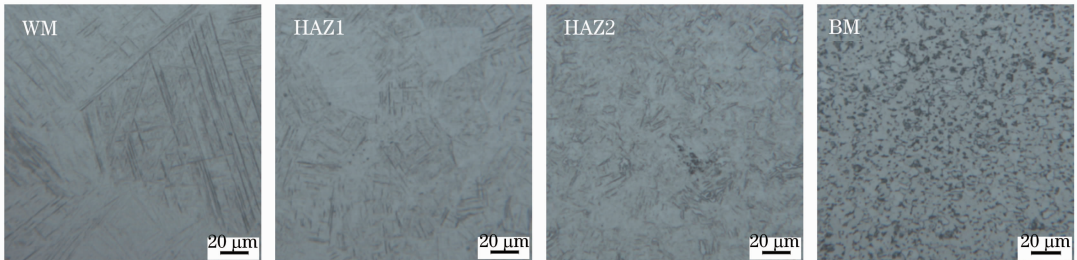


图 13 焊接接头显微组织

Fig. 13 Microstructure of welding seam

3.7 TC4 复合焊接接头力学性能

利用扫描焊优化的工艺参数进行对接焊试验。

图 14 为复合焊接接头横截面的硬度分布。分别在焊缝的上部、中部、下部沿着垂直于焊缝中心线的

方向进行测量,上部、下部测量点距离板材表面 0.25 mm。可以看出三个部分的硬度分布变化趋势相同。焊缝的硬度在 380~480 HV 之间,高于母材

的硬度 300~380 HV,热影响区的硬度在焊缝和母材中间,越靠近焊缝,硬度越高,这是由于焊缝中形成的马氏体组织提高了原始材料的硬度。

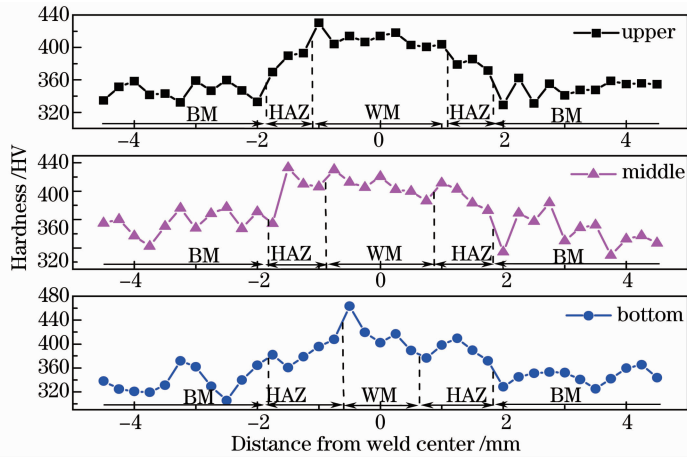


图 14 焊缝横截面不同位置的硬度分布

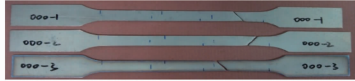

Fig. 14 Microhardness testing of welding seam in different places

按照 GB/T228-2008 进行拉伸性能测试,结果如表 2 所示。复合焊接接头的抗拉强度高于母材,拉伸试样均断裂于母材,这是因为焊缝中存在较多

的马氏体 α' 相,从而使得焊缝显微硬度和力学性能高于母材。同时复合焊接过程中产生的粗大组织使得断后延伸率低于母材。

表 2 TC4 母材及复合焊接接头拉伸性能

Table 2 Tensile strength of TC4 base metal and hybrid welding joint

Tested specimen	Gap / mm	Tensile strength / Mpa	Elongation / %	Fracture position	Photographs of tested specimens
BM	-	1046	3.77	-	
Hybrid weldings	0	1064	2.21	BM	

4 结 论

1) 薄板钛合金光纤激光-TIG 电弧复合焊接时,焊缝咬边的程度和复合热源输入的能量有关,输入能量越大越集中,咬边程度越低。

2) 焊缝污染的程度主要由电弧产生的热量决定,热输入越高,污染越严重,通过对工艺参数的优化可以获得成形良好的焊缝。

3) 采用优化的复合焊接工艺参数获得的焊接接头,接头抗拉强度高于母材,断后延伸率低于母材,这与焊缝中的马氏体组织分布有关。

参 考 文 献

1 Liu Qixian, Liu Yang, Gao Kai. Research process and application of titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011. 45-48.
刘奇先,刘 扬,高 凯. 钛合金的研究进展与应用[J]. 航天制

造技术, 2011. 45-48.

2 Akman E, Demir A, Canel T, *et al.*. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3705-3713.
3 Zhang Y, Sato Y S, Kokawa H, *et al.*. Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1-2): 448-455.
4 Mesharam S D, Mohandas T A. Comparative evaluation of friction and electron beam welds of near- α titanium alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31(4): 2245-2252.
5 Fellman A, Salminen A. Study of the phenomena of fiber laser-MAG hybrid welding[C]. In Proceedings of 26th international congress on applications of lasers and electro-optics (ICALEO), 2007. 871-880.
6 Steen W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5636-5641.
7 Cui Li, He Dingyong, Li Xiaoyan, *et al.*. Effect of welding parameter on weld shape in fiber laser-MIG hybrid welding of titanium alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, (10): 120-125.
崔 丽,贺定勇,李晓延,等. 光纤激光-MIG 复合焊参数对钛合

- 金焊缝成形的影响[J]. 航空制造技术, 2009, (10): 120—125.
- 8 Murakami T, Nakata K, Yamamoto N, *et al.*. Formation of one pass fully-penetrated weld bead of titanium plate by fiber laser and MIG arc hybrid welding[J]. Materials Transactions, 2012, 53(5): 1017—1021.
- 9 Boyer R, Welsch G, Collings E W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys[M]. USA: Materials Park, 1994. 159.
- 10 Zhao Yaobang, Lei Zhenglong, Chen Yanbin. Analysis of melting characteristics of laser-arc double-sided welding for stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0203001.
- 赵耀邦, 雷正龙, 陈彦宾. 不锈钢激光-电弧双面焊接头熔化特征分析[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0203001.
- 11 Zhao Ziqiang. Study on Plasma Shape and Weld Characteristic During Laser-TIG Hybrid Welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. 38.
- 赵子强. 激光-TIG 电弧复合焊接等离子体形态与焊缝特征的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011. 38.
- 12 Cui Li, He Dingyong, Li Xiaoyan, *et al.*. Effects of welding direction on weld shape of fiber laser-MIG hybrid welded titanium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103002.
- 崔 丽, 贺定勇, 李晓延, 等. 焊接方向对光纤激光-MIG 复合焊接钛合金焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103002.
- 13 H Hitoshi, I Takashi, K Shigeharu, *et al.*. Effect of shielding gas and laser wavelength in laser welding of magnesium alloy sheet [J]. Quarterly J Japan Welding Society, 2001, 19(4): 591—599.
- 14 Cao Na. The Study on Working Head for Titanium Laser Welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. 3.
- 曹 娜. 钛合金激光焊接工作头研制[D]. 北京: 北京工业大学, 2006. 3.
- 15 Xu Jiejie. Research on Microstructures and Properties of Laser Welding Joints of TC4 Titanium Alloy [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. 15.
- 徐洁洁. TC4 钛合金激光焊接接头组织性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009. 15.
- 16 Fang Junfei. Study on the Mechanism of Penetration Mode for Thin Sheet Laser Deep Penetration Welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. 62.
- 方俊飞. 薄板激光深熔焊接熔透模式的机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. 62.
- 17 Zhang Shenghai, Shen Yifu, Zhu Zuojun. Thermodynamic study on laser-induced plasma in CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s103008.
- 张盛海, 沈以赴, 朱作军. 铝合金 CO₂ 激光深熔焊接过程中等离子体的热力学行为研究[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s103008.
- 18 Yin Shuyan. The Base Theory and Application of Gas Shielded Welding[M]. Beijing: China Machine Press, 2012. 9.
- 殷树言. 气体保护焊工艺基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012. 9.
- 19 Shen Yifu, Zhang Shenghai. Current research status and development trends of laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s103002.
- 沈以赴, 张盛海. 激光深熔焊接技术的研究与动向[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s103002.
- 20 Feng Lei, Chen Shujun, Yin Shuyan. Mechanism of undercut phenomenon in high speed welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(1): 16—21.
- 冯 雷, 陈树君, 殷树言. 高速焊接时焊缝咬边的形成机理[J]. 焊接学报, 1999, 20(1): 16—21.
- 21 Lu Zhenyang. Research on the Mechanism of Undercut Formation and High Speed Welding Technology [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. 69.
- 卢振洋. 焊缝咬边形成机理及高速焊工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006. 69.
- 22 C Leyens, M Peters. Titanium and Titanium Alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 13.
- C 莱茵斯, M 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 13.

栏目编辑: 宋梅梅