

薄壁 TC4 钛合金激光焊缝成形试验研究

杨烁¹, 宋文清¹, 曲伸¹, 周恒², 雷正龙²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

2. 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: 以 TC4 薄壁钛合金为研究对象, 开展激光焊工艺研究及焊缝成形控制。主要研究了焊接过程保护方式、激光能量控制、离焦量和倾斜角度等焊接参数对焊缝成形的影响。研究表明, 激光低速焊接 TC4 薄板钛合金工艺窗口较窄, 需要进行精确的能量输入控制。采用高速激光焊接 TC4 薄板结构, 有效地扩大工艺窗口。提高激光离焦量也可以提高熔化宽度, 激光功率与离焦量比值为 100 ~ 140 W/mm 可得到良好的熔透效果。激光大角度斜向焊接会出现散射现象, 提高能量输入可以良好地保证成形质量。

关键词: 薄壁钛合金; 激光焊; 焊接工艺; 焊缝成形

中图分类号: TG456.7

0 前言

随着航空发动机制造技术的迅猛发展, 钛合金由于具有强度高、密度低、耐高温等优良的性能, 在航空发动机零部件制造领域有着广泛的应用^[1-3]。TC4 钛合金是一种研究广泛、较为成熟、应用量大的钛合金。钛合金的焊接质量对焊接保护效果具有较大的敏感性, 高温下特别是熔融状态下对空气中某些气体(O₂, N₂, H₂) 有较大的活性, 极易发生气体的吸收现象, 严重影响焊接接头的塑性^[4-5]。

激光焊接技术是近年来快速发展的焊接方法之一, 具有能量密度高、热影响区小、焊缝较窄、可实现高速焊接的优良特性^[6-7], 在工业制造领域有着广阔的应用前景。TC4 钛合金的薄板激光焊接技术在某些零部件的制造中有着实际的应用背景, 但是薄板的激光焊接技术对于激光能量的控制有着更为严格的要求^[8-9]。目前, 国内外学者主要研究厚度为 1 mm 以上的钛合金激光焊接技术^[10-11], 针对于 0.5 mm 的薄壁结构的焊接还罕有人研究。除此之外, 激光大角度斜向焊接技术罕有学者进行研究, 对于空间受限制的焊接结构件, 该技术的实际意义。

文中着眼于 TC4 薄板的激光焊接的实际应用背景, 研究了薄壁钛合金激光焊接能量控制工艺, 焊接过

程焊缝氧化性的控制措施, 激光焊接参数对焊缝成形的影响, 以及激光大角度斜向焊接对焊缝成形的影响。

1 试验条件和方法

试验所使用的材料为 0.5 mm 厚的 TC4 板材, 焊接接头采用对接形式。TC4 钛合金具有良好的机械加工性和焊接性, 广泛应用于航空零部件中, 其化学成分见表 1。

表 1 TC4 合金的成分(质量分数, %)

Al	V	Nb	O	H	Ti
7.14	5.65	2.48	≤0.08	≤0.01	余量

焊接所用的激光器是美国 IPG 公司生产的 YLS-5000 光纤激光器, 最大输出功率为 5 kW, 输出波长为 1 060 nm。焊接过程由德国 KUKA 公司生产的 KR16 型机器人控制, 其可以实现六轴联动运动过程, 控制精度可达 0.1 mm。焊前对 TC4 板材进行酸洗处理, 去除板材表面的氧化膜, 酸洗溶液为 HF:HNO₃:H₂O = 1:3:6 的混合溶液。酸洗后将板置于烘干箱内烘干 2 h, 以去除板材表面的水分。焊接过程采用高纯氩气进行焊接保护, 正面和背面焊缝同时进行保护。焊后的接头采用线切割切取 5 mm × 10 mm 的金相试件。依次采用 60 号、240 号、400 号、600 号、800 号、1 000 号金相砂纸研磨并用机械抛光的方式进行抛光处理。抛光后的金相试件用 Kroll 试剂进行腐蚀处理, 并置于 VHX-1000E 光学显微镜下进行宏观形貌观察。

收稿日期: 2018-08-28

doi: 10.12073/j.hj.20180828005

2 试验结果及分析

2.1 激光焊缝成形控制

2.1.1 低速焊接下激光能量输入对焊缝成形的影响

激光焊接技术对能量输入的大小可以进行有效地控制,激光焊接的能量输入主要受激光功率和焊接速度的影响。激光焊接相比于传统的电弧焊接技术来说,可以实现更高焊接速度的焊接过程,常用的焊接速度为0.8~1.5 m/min。在该试验中采用了1.5 m/min的焊接速度进行焊接试验,图1中列出了在该焊接速度下,激光功率对焊缝成形的影响。在300 W的激光功率下,正面焊缝表面光滑连续,熔化宽度较窄,背面焊缝只存在激光热作用而留下的痕迹,未出现明显的背面余高,因此可

以判断在该功率下焊缝未焊透。随着激光功率增加至350 W,焊缝正面成形宽度增加,背面出现了余高,背面焊缝宽度较窄。当激光功率增加到380 W时,焊缝正面宽度有了进一步增大的趋势,焊缝的背面熔化宽度与相应增大,成形效果良好。对比激光功率350 W和380 W的焊缝的宏观形貌,如图2所示。二者均具有良好的焊缝成形,正面下塌量较小,背面余高适宜。但是激光功率380 W时的焊缝的正面宽度、背面宽度和热影响区宽度均明显增加。随着激光功率的进一步增加,焊接过程的能量输入增大,当激光功率达到400 W时,焊缝发生明显焊漏的现象,焊接质量难以保证。对于0.5 mm的钛合金低速焊接来说,焊接过程的工艺窗口较窄,不利于焊接成形质量的控制。

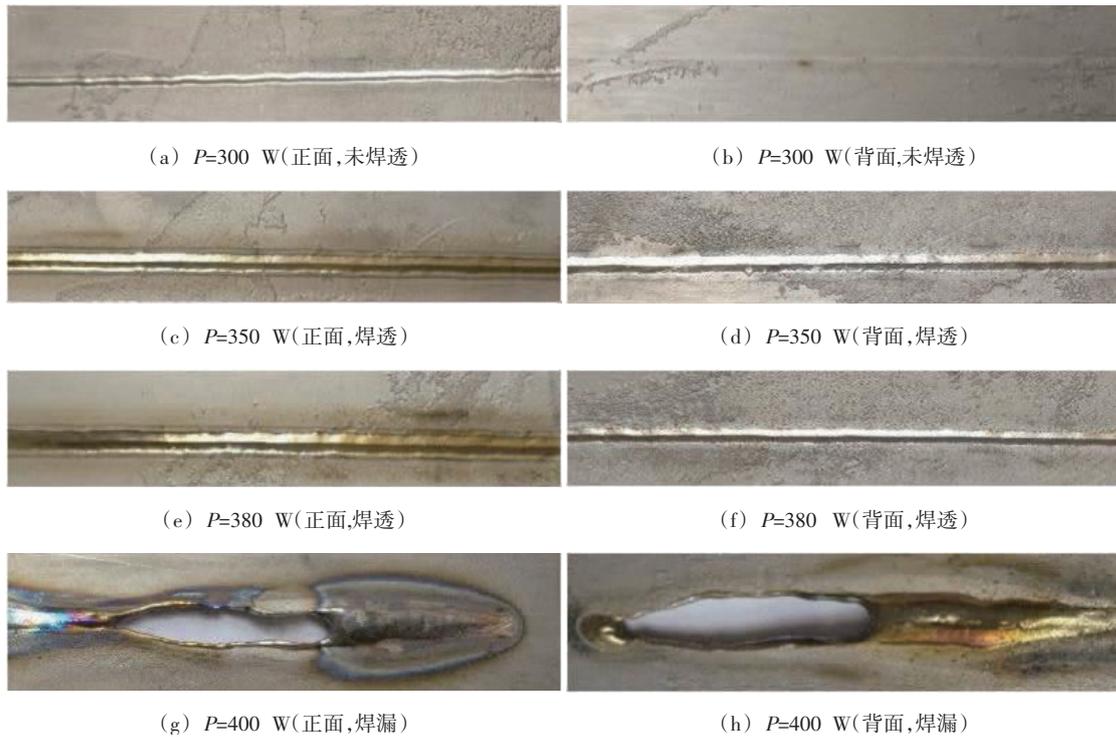
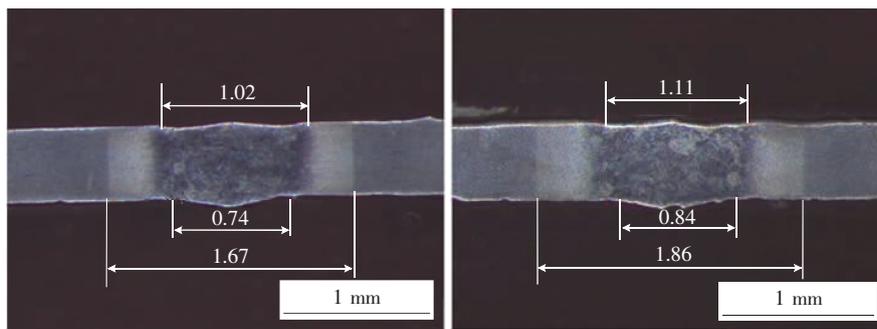


图1 焊接速度1.5 m/min时激光功率(P)对焊缝成形的影响



(a) 350 W 焊缝宏观形貌

(b) 380 W 焊缝宏观形貌

图2 不同功率的焊缝宏观形貌

2.1.2 高速焊接下激光能量输入对焊缝成形的影响

焊接速度是激光焊接能量输入的重要影响因素,采用高速焊接的方式可以有效地扩大焊接工艺窗口。在1.5 m/min的焊接速度下,单位长度的激光能量输入约为1.2~1.5 kJ/min。采用3 m/min的速度进行焊接,激光功率的工艺窗口约为600~780 W,有效地扩大了激光焊接的工艺窗口,焊缝成形控制更加灵活。图3列出了在3 m/min的焊接速度下,不同的激光功率对

焊缝成形的影响。当激光功率为600 W时,焊缝正面成形光滑连续,熔化宽度较窄,焊缝背面未焊透,不存在余高,只有激光作用留下的白色痕迹。随着激光功率的增加至700 W,激光作用在单位长度的能量增加,板厚方向的金属全部熔化。焊缝正面光滑平直,背面存在一定高度的余高,背面焊缝熔化宽度较宽,如图4所示。随着激光功率增加到800 W时,作用在单位长度上激光能量进一步增加,使得激光能量输入过大,发

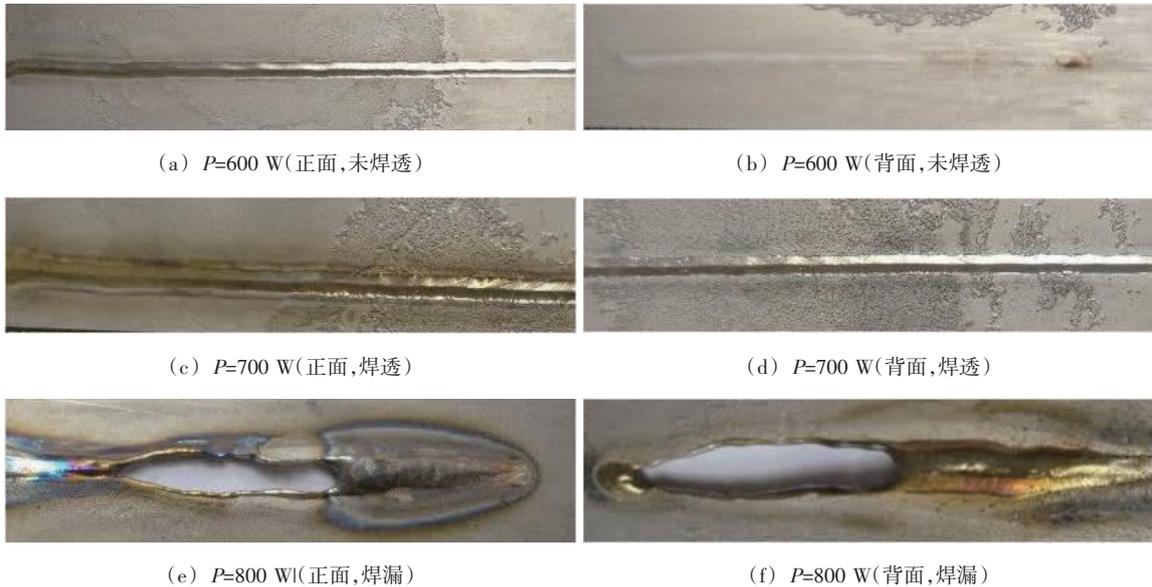


图3 焊接速度3 m/min时激光功率(P)对焊缝成形的影响

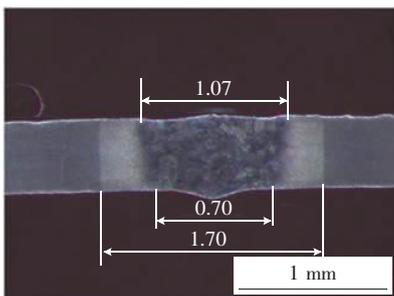


图4 800 W,3 m/min的焊缝宏观形貌

生了焊漏的现象,严重影响焊接质量。

2.1.3 激光离焦量对焊缝成形的影响

钛合金薄板的正离焦激光焊接的焊缝成形如图5所示。为保证激光能量的有效输入,控制焊接速度为1.5 m/min,当激光离焦量为3 mm,激光功率为430 W时,可以得到良好的焊缝,正面焊缝与背面焊缝成形连续、宽度适宜。随着激光离焦量的增加到5 mm,单位面积的板材上的能量减小,适当的增加激光功率到500 W时,激光的能量并未使板材在厚度方向全部熔化。

焊缝的正面成形连续光滑,背面焊缝未焊透,只留下激光热作用的白色印记。当激光功率增加到700 W时,板材在激光的作用下发生熔透,焊缝正面宽度较宽,表面光滑,但是存在不连续的焊缝。背面焊缝虽然较为光滑,但是同样存在不连续现象。因此,对于钛合金薄板的激光焊而言,大离焦量的焊接参数不利于焊接过程的稳定性,易产生不连续的焊缝。对比3 mm和7 mm离焦量的焊缝宏观形貌,如图6所示。7 mm离焦量的焊缝正面宽度明显大于3 mm的焊缝,这是激光光斑尺寸增大的结果。二者的焊缝背面宽度基本相当,7 mm离焦量的焊缝稍大于3 mm离焦量的焊缝。由于7 mm离焦量的焊缝激光功率高达700 W,较大的激光热输入使得热影响区的宽度明显大于3 mm离焦量的焊缝。随着离焦量的继续增加,激光作用在薄板表面的斑点尺寸进一步增加,单位面积上的能量会减小,因此需要增大激光功率来提高能量密度。采用1 300 W的激光功率可以得到良好的焊缝成形,正面焊缝连续光滑,背面焊缝熔透且宽度较宽。

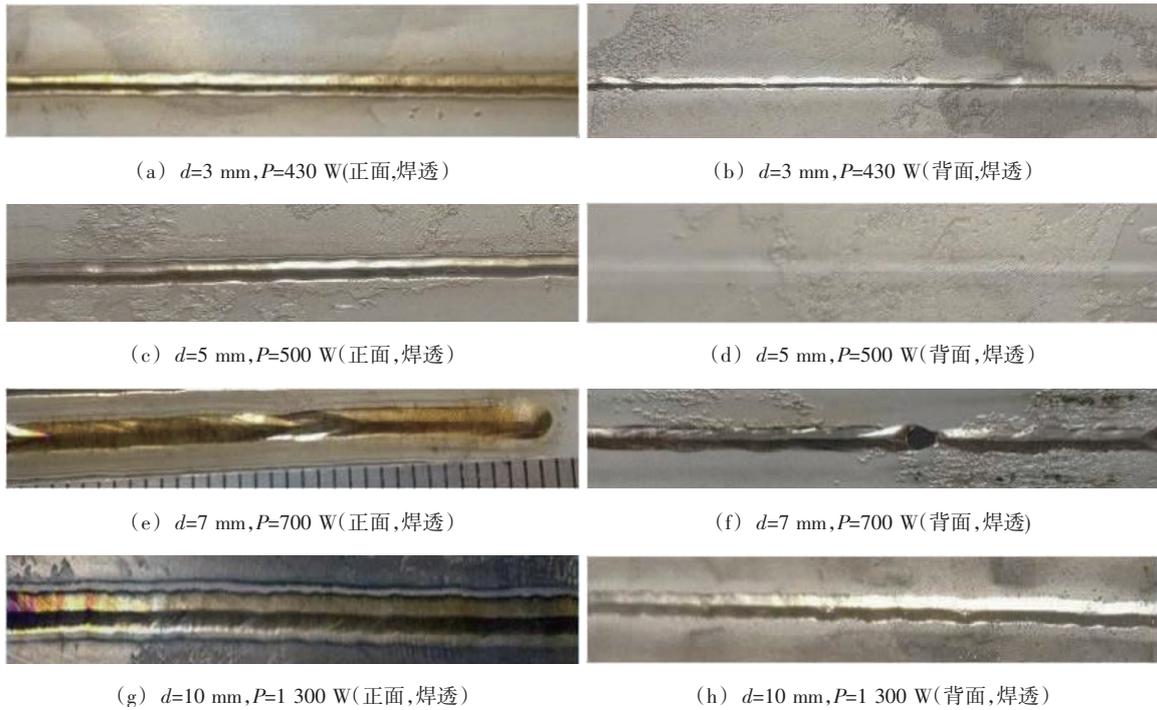


图5 焊接速度 1.5 m/min 时离焦量 (d) 及激光功率 (P) 对焊缝成形的影响

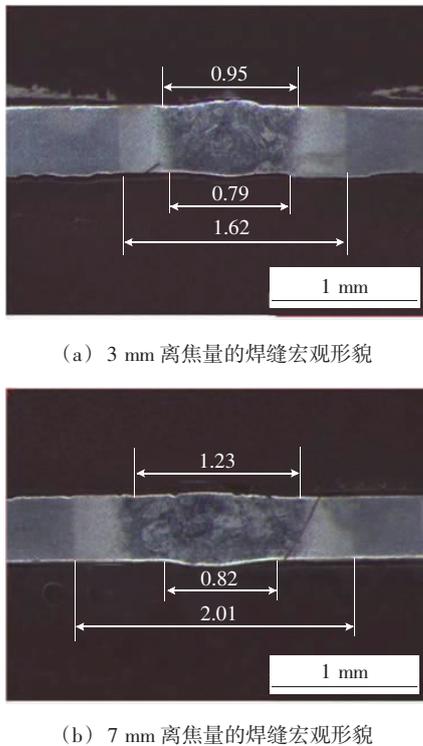


图6 不同离焦量的焊缝宏观形貌

2.2 激光焊缝氧化性控制

钛合金焊接对于保护效果较为敏感,采用高速激光焊的方式延长了焊缝高温区域的长度,这对焊接过程的保护提出了更高的要求。文中采用正面保护和背

面保护相结合的方式,同时对焊缝正面和背面进行良好的焊接过程保护。正面保护气体主要保护焊接熔池和高温金属区域,背面保护气沿着焊缝背面侧吹,可以保护整个焊缝的背面。

2.2.1 正面保护特性研究

钛合金激光焊对保护气流量的大小比较敏感,钛合金的氧化程度可以通过表面的颜色加以区分,银白色的焊缝为保护效果较好,黄色的焊缝氧化轻微,紫色的焊缝氧化较为严重,灰色的焊缝氧化极其严重。图7中给出了不同保护气流量下的正面保护效果图。当保护气体流量为 10 L/min 时,采用直径为 10 mm 的保护气体喷嘴进行焊接保护,焊缝表面呈现金黄色,焊缝氧化程度较轻,还在可接受的范围内。为了提高焊缝的保护效果,增大保护气体流量至 20 L/min,采用直

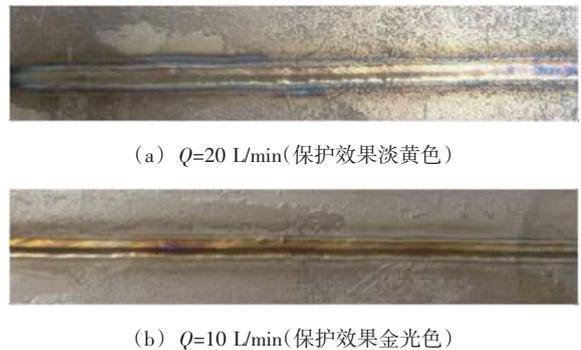


图7 气体流量 (Q) 对焊缝正面保护效果的影响

径为 20 mm 的喷嘴进行焊接保护,在同样的气体流量下,焊接保护效果有了明显的改善,焊缝表面颜色由金黄色向淡黄色转变,焊缝的氧化问题得到有效的改善。

2.2.2 背面保护特性研究

激光焊接过程背面保护也占有重要地位,背面保护的效果严重影响焊缝的性能,尤其是在背面焊透的情形下。图 8 为背面保护气流量对焊缝保护效果图,采用 3 L/min 和 5 L/min 的保护气流量均可以得到银白色的焊缝表面,背面保护效果良好。这是由于背面保护气体是从侧面吹进板材与夹具之间的狭小空间,惰性气体不易从该空间中逸出,因此较小的背面保护气流量也可以得到良好的背面保护效果。

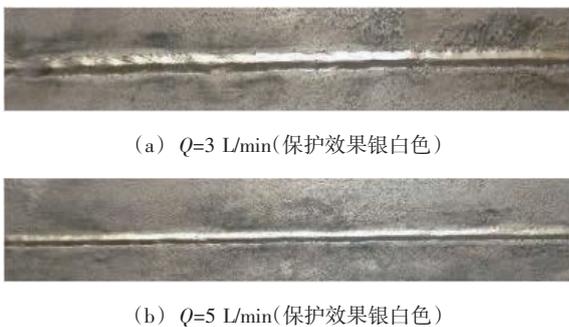


图 8 气体流量(Q)对焊缝背面的保护效果的影响

2.3 激光大角度斜向焊接工艺及焊缝成形控制

针对于某些复杂的钛合金结构件,激光头的运动空间受到了结构件的限制,为此需要运用激光可以进行远距离传输而不改变光束质量的特性,开展长焦距大角度斜向焊接的工艺研究。激光大角度斜向焊接的示意图如图 9 所示,激光沿着焊接方向向前倾斜一个

大角度,即激光入射角。在激光与板材相互作用的同时,激光会发生一定的反射,这部分反射激光会影响入射激光对板材的热输入,造成一定能量的散失。

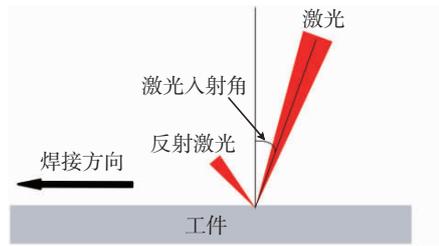


图 9 激光大角度斜向焊接示意图

2.3.1 20°激光斜向焊接工艺研究

20°激光斜向焊接的焊缝成形如图 10 所示。由于激光在板材表面会产生一定的反射作用,激光对板材的能量输入会大幅减小,因此采用的降低焊接速度的方式控制能量输入,焊接速度采用 1 m/min 的工艺参数。当激光功率为 400 W 时,焊缝正面成形连续,背面焊缝出现未焊透的现象,激光能量的输入较小。继续增加激光功率到 500 W 时,焊缝正面成形良好,焊缝连续光滑、宽度较大。背面焊缝成形连续光滑,焊缝宽度较窄。随着激光的功率进一步增加至 600 W,激光能量的输入过大,出现焊缝被焊漏的现象,严重影响焊缝成形质量。

2.3.2 30°激光斜向焊接工艺研究

30°的激光焊接焊缝成形如图 11 所示。由于激光在板上反射的结果,与垂直入射的激光相比,激光的能量有了较大的提高,并且焊接速度下降到了 1 m/min。在激光功率为 500 W 时,焊缝正面连续,存在明显的

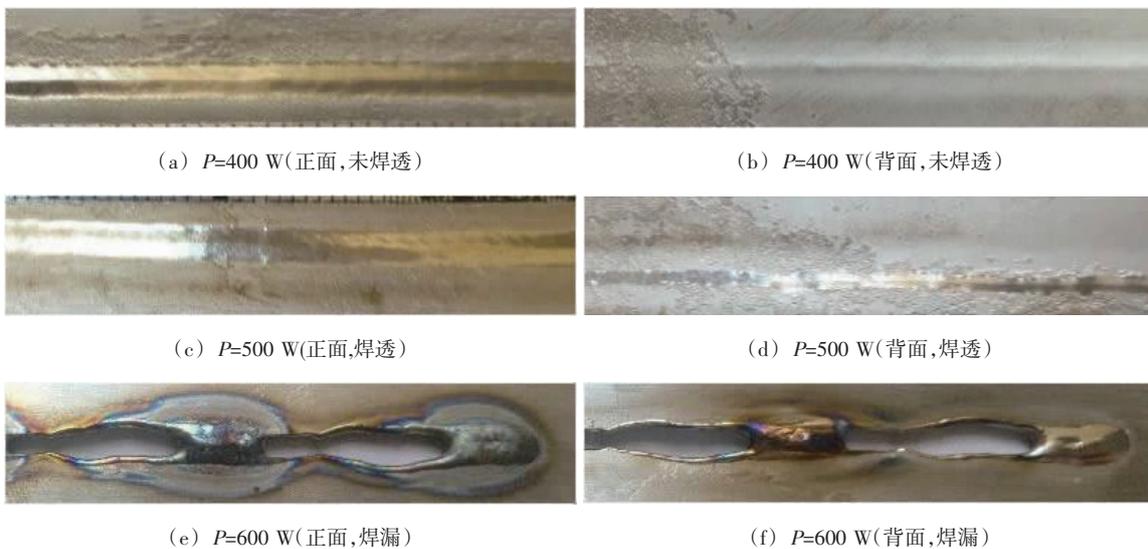


图 10 20°斜向焊接时激光功率(P)对焊缝成形的影响

鱼鳞纹,焊缝成形良好。焊缝背面余高较小,并且呈现不连续状,因此 500 W 的激光功率不能得到良好的焊缝成形。继续增加激光功率至 600 W,焊缝正面连续,鱼鳞纹

明显整齐,焊缝成形质量良好。背面焊缝余高较小,但是焊缝连续,具有一定的熔透性。当激光功率增加到 700 W 时,焊缝明显出现焊漏的现象,激光能量输入过高。

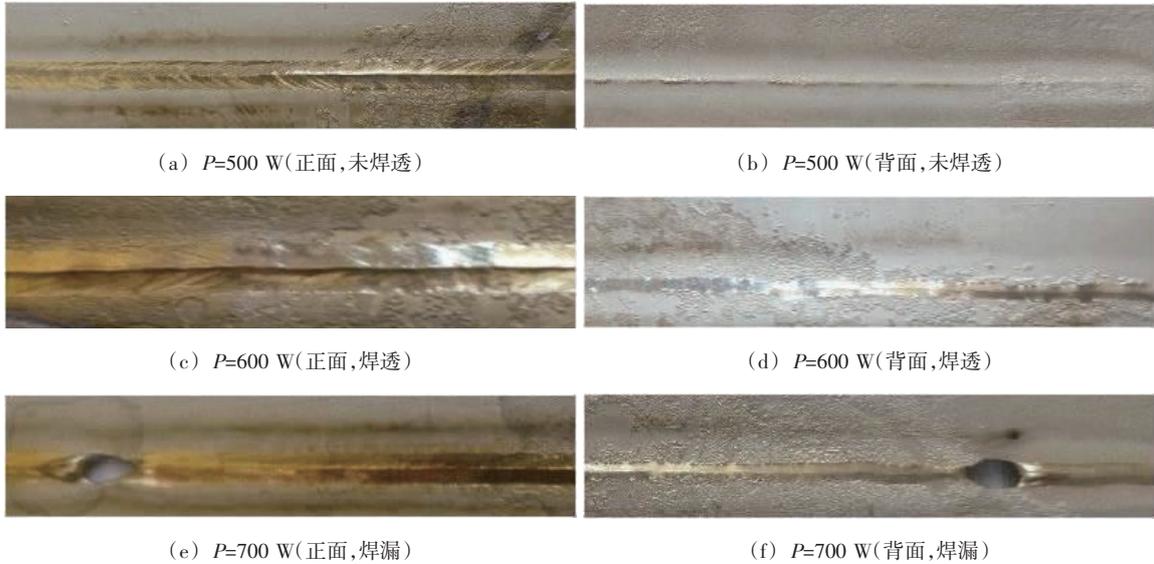


图 11 30°斜向焊接时激光功率(P)对焊缝成形的影响

2.3.3 40°激光斜向焊接工艺研究

40°斜向激光焊接的焊缝成形如图 12 所示,在该角度激光进行激光焊接的工艺窗口较窄。当激光功率为 800 W、焊接速度为 1 m/min 时,焊缝正面成形连续,表面鱼鳞纹明显,成形效果良好。焊缝背面出现未焊

透的现象。当激光功率增加到 850 W 时,焊缝正面成形光滑连续,鱼鳞纹整齐有序,焊缝背面熔透效果良好,成形连续、余高较小。激光功率进一步增加到 900 W 时,焊缝成形恶化,板材出现焊漏的现象,焊接过程不稳定。

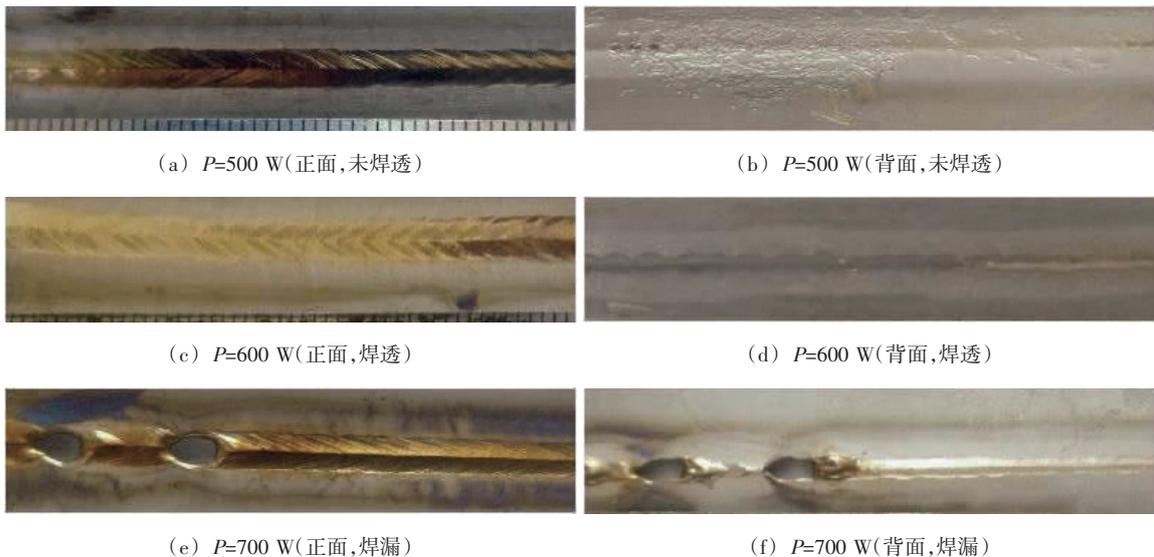


图 12 40°斜向焊接时激光功率(P)对焊缝成形的影响

对于钛合金薄板激光斜向大角度的焊接,其优化工艺窗口较窄,相对于激光垂直与板的焊接方式,应采用降低焊接速度和提高焊接功率相结合的方式。在焊

接速度为 1 m/min 的条件下,20°,30°,40°的斜向入射焊接所对应的优化激光焊接功率分别为 500 W,600 W,850 W。

3 结论

(1) 薄壁钛合金的低速激光焊工艺窗口较窄,需要对激光能量进行严格的控制;高速激光焊接技术扩大了激光能量的工艺范围。

(2) 焊缝宽度随着离焦量的增加而增大,离焦量的增加减少了激光的能量密度,需要采用提高激光功率的方式增大熔透。

(3) TC4 薄壁钛合金高速激光焊接中,采用较大流量的保护气体可以得到更好的保护效果,较小流量的背面保护气体也可得到质量良好的焊缝。

(4) 激光大角度斜向焊接存在明显的激光反射作用,需要降低焊接速度和提高激光功率以控制良好的焊缝成形。

参考文献

- [1] 张喜燕,赵永庆,自晨光. 钛合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 李亚江,刘坤. 钛合金在航空领域的应用及其先进连接技术[J]. 航空制造技术, 2015, 486(16): 34-37.
- [3] 刘全明,张朝晖,刘世锋,等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
- [4] 王牛俊. 钛及钛合金焊接特性与工艺要点分析[J]. 中国设备工程, 2017(18): 209-210.
- [5] 史吉鹏,王红阳,杨林波,等. 钛合金激光-TIG复合焊接保护状态对焊缝成形及性能影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 61-65.
- [6] 王志,胡芳友,崔爱永,等. 激光焊接技术的研究现状及发展趋势[J]. 新技术新工艺, 2016(3): 42-44.
- [7] 王晶,王俊恒,林久,等. 激光焊接技术的发展及研究现状[J]. 东方电气评论, 2013, 27(4): 21-26.
- [8] 高晓龙,刘晶,张林杰,等. Nd:YAG激光器焊接钛合金薄板的工艺研究[J]. 焊接, 2014(2): 19-23.
- [9] 陈锡源,陈俐,常明,等. SP700钛合金激光焊缝的焊缝成形与性能分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 121-125.
- [10] 徐洁洁,蔡华,杨武雄,等. TC4钛合金薄板激光焊接实验研究[C]. 长沙:中国机械工程学会年会之全国特种加工学术会议, 2007.
- [11] 许良,马闯,周松,等. 载荷方向对TC4钛合金激光焊缝疲劳性能的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(6): 15-18.

第一作者简介: 杨烁,1981年出生,硕士,高级工程师;主要从事高能束焊接、电弧焊接及钎焊新工艺开发、产品研制、科研课题和标准编制工作;已发表论文2篇,获授权发明专利7项。

通信作者简介: 雷正龙,1977年出生,博士,副教授,博士生导师;主要从事多能场激光复合加工基础与应用、绿色激光清洗、特种材料激光制造以及激光焊接质量检测与控制等方向的研究。

[上接第4页]

断裂于K9玻璃并延伸至钎料中。

参考文献

- [1] Xu S Z, Yao C Z, Dou H Q, et al. An investigation on 800 nm femtosecond laser ablation of K9 glass in air and vacuum [J]. Applied Surface Science, 2017, 406: 91-98.
- [2] Liu C X, Wei W, Fu L L, et al. Optical properties of K9 glass waveguides fabricated by using carbon-ion implantation [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2016, 69(2): 169-173.
- [3] Zhang Z, Huang J, Geng F, et al. Transient absorption and luminescence spectra of K9 glass at sub-damage site by ultraviolet laser irradiation [J]. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B, 2014, 318(1): 219-222.
- [4] 张贝. 高速磨削工艺参数对K9玻璃表面粗糙度的影响规律研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 124-127.
- [5] Song X G, Zhao Y X, Niu H W, et al. Vacuum brazing of C_t/β -spodumene composites and Ti-6Al-4V alloy using Ag-Cu filler metal [J]. Materials Characterization, 2017, 132: 354-362.
- [6] 元琳琳,唐超,黄晓猛,等. 采用Al-Cu-Si-Ni钎料钎焊5A06合金接头组织与性能[J]. 焊接, 2018(6): 33-36.
- [7] 韩桂海,赵洪运,付伟,等. 钎焊时间对TZM合金与 ZrC_p-W 复合材料接头界面组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(1): 69-72.
- [8] 刘多,牛红伟,赵宇,等. C_t/LAS 复合材料的钎焊接头组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 105-108.
- [9] 卞红,田晓,冯吉才,等. TC4/Ti60合金钎焊接头界面组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 33-36.
- [10] 刘多,牛红伟,宋晓国,等. SiO_2 陶瓷-TC4接头陶瓷侧的界面行为[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 39-42.

第一作者简介: 丁业立,1963年出生,大学本科,副教授;主要从事熔焊方面的理论与实践教学以及科研工作;已发表论文10余篇。