

激光功率对 Al/Ti 激光-GMAW 复合熔钎焊 接头组织及力学性能的影响

王伟¹, 张恒泉¹, 朱宗涛², 王晶¹, 李洪玉¹, 张然¹

(1. 中国核动力研究设计院 核燃料元件及材料研究所, 四川 成都 610213; 2. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:采用激光-GMAW 复合熔钎焊方法进行了 3 mm 厚的 6061 铝合金与 Ti-6Al-4V 钛合金的平板对接焊接试验, 结合宏观金相观察、扫描电镜分析、抗拉强度测试对比分析了激光功率对焊缝成形、接头组织及力学性能的影响规律。结果表明, 当激光功率小于 3.0 kW 时, 对接面下部无法产生有效的冶金结合, 接头强度仅为 80 MPa; 界面化合物 (IMC) 层厚度随着激光功率的增大而增大, 但在同一个接头中, 界面层形态及厚度沿对接面存在差异; 接头抗拉强度随着激光功率的增加呈现出先上升后降低的变化趋势, 接头最高强度为 230 MPa, 达到铝合金母材强度的 80%。

关键词: Al/Ti 异种接头; 激光-GMAW 复合熔钎焊; 微观组织

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20200963

中图分类号: TG457.19; TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)5-0051-04

Effects of Laser Power on Microstructure and Mechanical Properties of Al/Ti Laser-GMAW Hybrid Welding-brazing Joints

WANG Wei¹, ZHANG Hengquan¹, ZHU Zongtao², WANG Jing¹, LI Hongyu¹, ZHANG Ran¹

(1. Institute of Nuclear Fuel Elements and Materials, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Butt welding of 6061 aluminum alloy and Ti-6Al-4V titanium alloy with thickness of 3 mm was carried out by using laser-GMAW hybrid welding-brazing, the effect of laser power on the weld appearance, microstructure and mechanical properties of joints were investigated by metallographic observation, SEM analysis and tensile test. The results show that when the laser power is less than 3.0 kW, there is no metallurgical bonding in the lower region of the butt interface, and the tensile strength of the joint is only 80 MPa. The thickness of interfacial intermetallic compound (IMC) layer increases with the increase of laser power, but the morphology and thickness of the IMC layer vary along the butt interface in joint. With the increase of laser power, the tensile strength of the joint first increases and then decreases, the highest tensile strength of the joint is 230 MPa, approximately 80% of that of the aluminum alloy base metal.

Key words: Al/Ti dissimilar joint; laser-GMAW hybrid welding-brazing; microstructure

Al/Ti 复合构件兼有钛合金及铝合金的优势, 满足现代航天航空及汽车工业对于轻量化、低成本结构材料的需求^[1]。然而, 由于两种材料的冶金相容性较差, 且热物理性能及力学性能差别较大, 若采用熔化焊将导致界面处出现大量的脆性金属间化合物^[2], 难以获得有效连接, 而固相连接方式如扩散焊、钎焊却受限于生产成本及接头形式^[3]。

激光熔钎焊作为一种适用于熔点差别大的异种

合金的焊接方式^[4], 逐渐受到了各国学者的关注。Song 等人^[5]研究了激光偏移量对 AA6061 与 TC4 激光熔钎焊接头强度的影响规律, 结果表明, 将热源向铝侧偏移可有效提高接头强度。Tomashchuk 等人^[6]采用双束激光进行了 AA5754 与 T40 激光填丝焊研究, 发现硅元素可有效抑制界面脆性化合物的生成。Chen 等人^[7]则分别采用矩形及圆形光斑配合 Al12Si 药芯焊丝实现了 5A06 铝合金和 Ti-6Al-4V 钛合金的激光熔钎焊连接。

上述研究结果表明, 通过优化热源能量分布是获得高质量 Al/Ti 熔钎焊接头的有效途径。激光-GMAW 作为一种复合热源, 不仅具有激光热源作用位置精确, 焊接熔深大的特性, 同时由于电弧的预

收稿日期: 2020-04-26

作者简介: 王伟(1993-), 男, 云南楚雄人, 实验员, 硕士研究生, 主要研究方向: 异种材料激光熔钎焊接; 电话: 18200289837;
E-mail: doublewwyy@163.com

热及填丝作用,可改善焊缝成形,提高接头强度^[8-9]。本研究采用激光-GMAW复合热源,进行3mm厚6061铝合金与Ti-6Al-4V钛合金的平板对接熔钎焊研究,探索激光功率对接头的微观组织及力学性能的影响规律。

1 试验方法

试验所用铝合金母材牌号为6061,热处理状态为T6;钛合金为Ti-6Al-4V,即常见的TC4。母材厚度均为3mm,采用平板对接方式焊接,试板无预制坡口,填充材料采用直径为1.2mm的4047铝合金焊丝。焊前对待焊位置进行机械及化学清洗,并在钛侧涂覆Nocolok(KAlF₄)钎剂以防止氧化。母材及焊丝的化学成分见表1。

表1 母材与焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base metals and welding wire (wt%)

材料	Fe	Si	Mg	V	Mn	Cu	Zn	Ti	Al
Ti-6Al-4V	0.3	-	-	3.5	0.5	-	-	余量	6.8
AA6061	0.70	0.68	1.00	-	0.15	0.25	0.25	-	余量
ER4047	0.8	12.00	0.10	-	0.15	0.35	0.25	0.15	余量

激光-GMAW复合焊接系统中的激光器为TruDisk 10002碟片激光器,激光波长为1030nm,光斑直径为0.4mm;采用Fronius TransPuls Synergic 4000脉冲焊机,通过调节送丝速度改变焊接电流及电压,激光与焊炬采用旁轴复合的方式。为防止热源直接作用于钛合金表面导致其熔化,将热源整体向铝侧进行偏移,偏移量为0.8mm。试验激光功率 P_{laser} 为3.0~3.8kW,焊接速度为15mm/s;送丝速度为3.5m/min,焊接电压为15V,焊接电流为60A。激光-GMAW复合熔钎焊过程如图1所示。

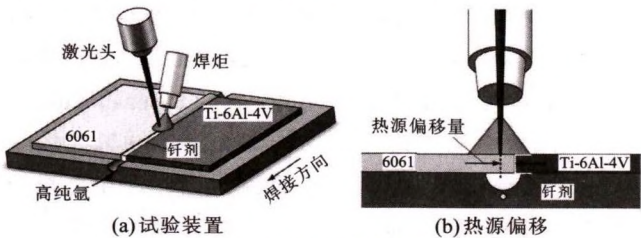


图1 激光-GMAW复合熔钎焊过程
Fig.1 Laser-GMAW hybrid welding-brazing process

焊后分别使用ZEISS Stemi 2000-C体式显微镜及CarlZeiss-A1M显微镜观察接头的横截面形貌和金相组织。使用CMT4304电子万能试验机进行保留余高试样及磨平余高试样的拉伸试验。使用

GENESS 2000XMS扫描电镜对接头界面化合物层进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形

不同激光功率作用下的焊缝表面成形及横截面形貌如图2所示。从横截面形貌可见接头具有熔化焊及钎焊接头的双重特征。当激光功率为3.0kW时,填充金属堆积于焊缝正面,焊缝背面的钛合金则由于受热不充分出现成形不连续现象,分析认为这是由于激光功率过小使得焊缝有效熔深较小造成的。当激光功率增大至3.2kW,未焊透缺陷得以避免,焊缝成形得到明显改善。相比之下,激光功率为3.4kW时,焊缝上部熔宽增加,焊趾处过渡更加圆滑,有效地减小了应力集中倾向。进一步增大激光功率至3.8kW,由于激光功率过大导致金属蒸汽对匙孔底部反冲压力增大,造成焊缝下陷严重,正面出现咬边缺陷,且大量低熔点合金元素蒸发使得焊缝下部出现大尺寸的圆形气孔^[10]。

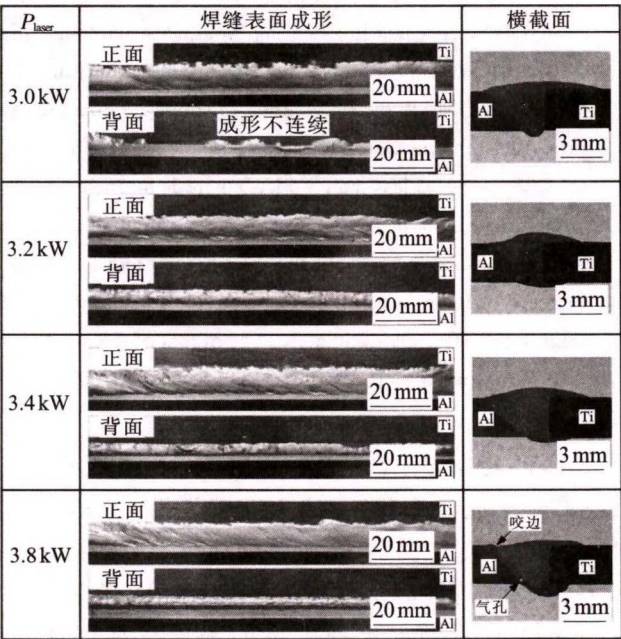


图2 不同激光功率下的焊缝表面成形及横截面形貌
Fig.2 Surface and cross-section views of joints with different laser powers

2.2 焊缝组织

激光功率为3.4kW时接头不同区域的金相组织如图3所示。焊缝组织主要由 α (Al)基体及Al-Si共晶组织组成,靠近界面及焊缝中心处晶粒为等轴晶形态,如图3(a)~(c)所示。分析认为:界面前沿

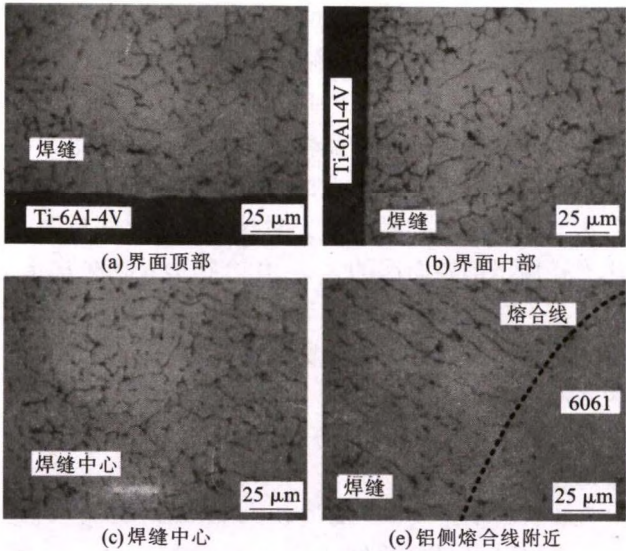


图 3 接头各区域微观组织
Fig.3 Microstructure of each region in welded joint

的液相中存在元素偏聚使得溶质浓度较高，加之钛合金导热慢，导致该位置成分过冷程度较大^[11]，而焊缝中心由于温度较高，且存在大量异质形核点，同样有利于等轴晶的形成。铝侧熔合线附近则为具有明显方向性的柱状晶，其生长方向垂直于熔合线，原因是铝合金的高热导率使得垂直于熔合线具有最大的温度梯度，当晶粒的生长方向与散热最快方向相同时，有利于柱状晶的形成^[12]。

如图 4 所示，在扫描电镜下可见焊缝中心弥散分布着短棒状及针状的金属间化合物，EDS 结果显示化合物为 $TiAl_3$ 相，见表 2。可见 $TiAl_3$ 相的尺寸及数量随着激光功率的增大而增加，其原因是激光功率增大使得 Ti 原子的溶解量增加，导致原本位于界面附近的 Ti 原子随着熔池的流动而迁移至焊缝中心，与 Al 原子反应生成 $TiAl_3$ 相。文献指出，焊缝中适量的 $TiAl_3$ 可起到弥散强化作用^[13]，对提高接头强度有利。

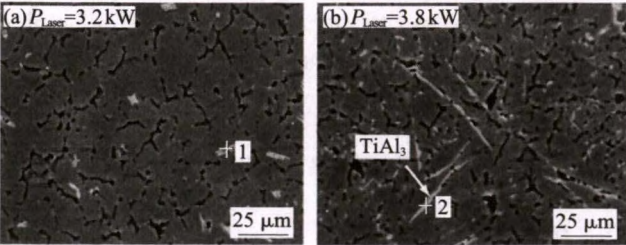


图 4 不同激光功率作用下的焊缝中心组织
Fig.4 Microstructure the weld center with different laser powers

2.3 界面化合物层

不同激光功率下接头的界面化合物层形貌及厚

表 2 图 4 及图 5 中各点 EDS 分析结果(质量分数, %)
Tab.2 EDS analysis results of each point in figure 4 and figure 5 (wt%)

位置	Ti	Al	Si	V	化合物
1	26.59	71.39	1.20	0.82	$TiAl_3$
2	36.73	59.18	2.63	1.46	$TiAl_3$
3	35.12	62.08	1.46	1.34	$TiAl_3$
4	28.42	68.37	1.80	1.41	$TiAl_3$

度分别如图 5、6 所示。图 5 中各图均为左下角小图中标识框的放大图。界面化合物层厚度随激光功率的增大而增大，这是因为增大激光功率提高了熔池温度，加大了界面反应的剧烈程度。然而，在局部热源快速加热及冷却的作用下，熔池中不可避免地存

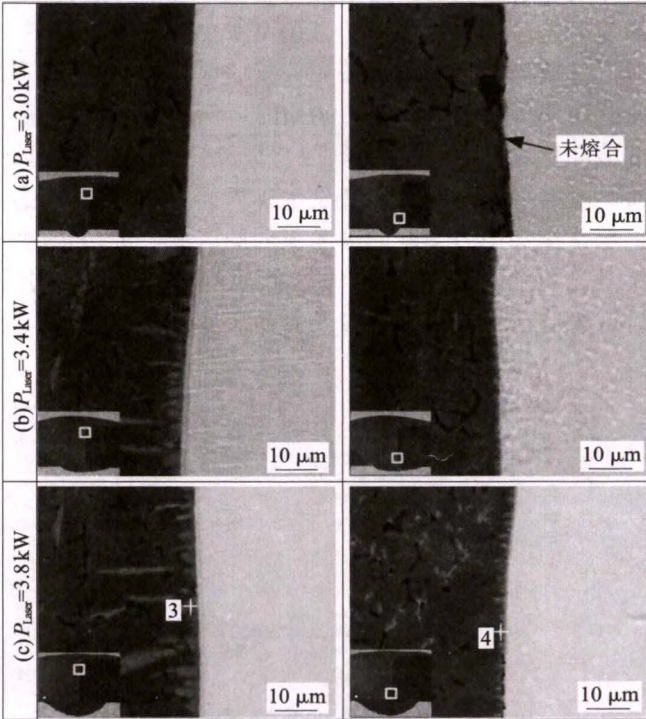


图 5 不同激光功率作用下的界面层形貌
Fig.5 Interfacial microstructure of joints with different laser powers

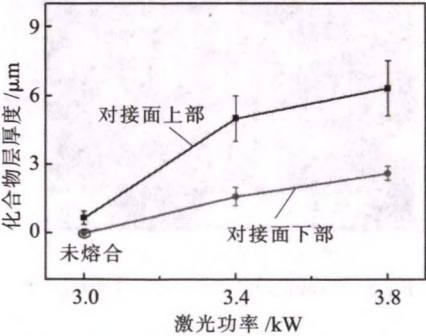


图 6 不同激光功率作用下界面层厚度
Fig.6 Thickness of the interfacial layer with different laser powers

在温度梯度,导致界面层形貌及厚度沿对接面存在差异。由图 5(a)可以看出,当激光功率较小时,由于界面反应温度较低,对接面上部仅生成一层极薄的化合物层,而对接面下部并未产生有效的冶金结合。而当激光功率增大至 3.8kW 时,对接面上部由于峰值温度高及高温停留时间长,导致钛合金溶解加剧,生成了大量具有择优取向的针状 TiAl_3 ,而对接面下部则因温度相对较低,界面层厚度约为 $2\mu\text{m}$,并保持了锯齿状形貌。

2.4 接头强度

不同激光功率下接头的抗拉强度如图 7 所示。保留余高接头强度略高于磨平余高接头,两类接头的强度随着激光功率的增加均呈现出先上升后降低的变化趋势。激光功率为 3.0kW 时,由于激光功率较低导致界面下部存在未充分反应区,如图 8 所示,此时接头强度最低,仅为 80MPa。保留余高接头强度最高达到 230MPa,达到铝合金母材强度的 80%,而此时磨平余高接头断裂发生于界面,表明界面层仍然是接头中力学性能最为薄弱的区域。进一步增大激光功率,两种类型接头强度均出现明显下降,分析认为这与接头成形不良及界面层厚度增加有关。

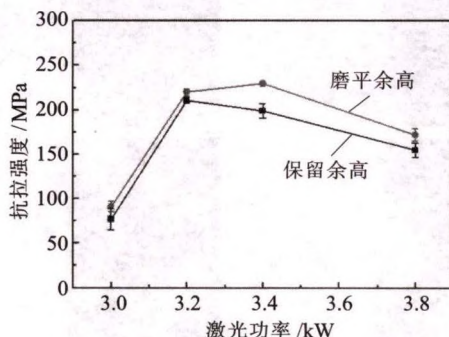


图 7 不同激光功率下接头的抗拉强度

Fig.7 Tensile strength of joints with different laser powers

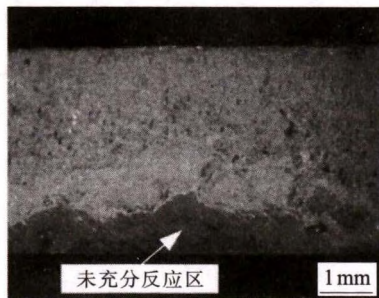


图 8 接头的断口形貌

Fig.8 Fracture morphology of the joint

3 结论

(1) Al/Ti 激光-GMAW 复合熔钎焊接头具有

熔化焊及钎焊接头的双重特征。激光功率小于 3.0 kW 时,接头出现未焊透缺陷;激光功率为 3.8kW 时,接头下陷严重,出现咬边及大尺寸气孔缺陷。

(2) 界面附近焊缝晶粒为等轴晶,铝侧熔合线附近则为具有明显方向性的柱状晶;界面层厚度随着激光功率的增加而增加,对接面上部界面层厚度比对接面下部界面层的大,且化合物形貌存在差异。

(3) 接头抗拉强度随着激光功率的增加均呈现出先上升后降低的变化趋势。带余高接头最大强度为 230MPa,达到铝合金母材强度的 80%。

参考文献:

- [1] 魏守征, 李亚江. 钛/铝异种轻金属熔焊缺陷及解决工艺[J]. 焊接技术, 2014(4):59-63.
- [2] Ohnuma I, Fujita Y, Mitsui H, et al. Phase equilibria in the Ti-Al binary system [J]. Acta Materialia, 2000, 48 (12): 3113-3123.
- [3] 冯立桥, 马港恒, 刘亚鑫, 等. 钛合金与铝合金异种轻金属熔焊技术研究进展[J]. 世界有色金属, 2017(13):227-229.
- [4] Kreimeyer M, Wagner F, Vollertsen F. Laser processing of aluminum-titanium-tailored blanks [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2005, 43(9):1021-1035.
- [5] Song Z, Nakata K, Wu A, et al. Interfacial microstructure and mechanical property of Ti6Al4V/A6061 dissimilar joint by direct laser brazing without filler metal and groove[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 560:111-120.
- [6] Tomashchuk I, Sallamand P, Méasson A, et al. Aluminum to titanium laser welding-brazing in V-shaped groove[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245:24-36.
- [7] Chen S, Li L, Chen Y, et al. Improving interfacial reaction nonhomogeneity during laser welding-brazing aluminum to titanium[J]. Materials & Design, 2011, 32(8):4408-4416.
- [8] Wang W, Zhu Z, Xue J. Microstructure and mechanical properties of Ti/Al dissimilar joints produced by laser-MIG welding-brazing [J]. International Journal of Modern Physics B, 2019, 33:23.
- [9] Zhu Zongtao, Wang Wei, Li Yuanxing, et al. Effect of laser-arc offset and laser-deviation angle on the control of a Ti-Al interlayer [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271:336-345.
- [10] 王伟, 王浩, 陈辉, 等. 6N01S-T5 铝合金高速激光-MIG 复合熔焊工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(7):55-60.
- [11] 陈凯华. 铝/钛异种合金激光深熔钎焊新工艺[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [12] Chen S, Li L, Chen Y, et al. Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(3):891-898.
- [13] 吕世雄, 崔庆龙, 黄永宪, 等. Ti/Al 异种合金电弧熔钎焊接头界面断裂行为分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(6):37-40. H