

铝/钛异种金属激光/激光-CMT 复合熔钎焊工艺及其组织与力学性能

王佳杰¹, 宋晓国², 武鹏博³, 胡佩佩⁴, 滕彬³, 黄瑞生³, 于久灏¹

(1. 黑龙江工程学院, 哈尔滨, 150050; 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;
3. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028; 4. 上海航天精密机械研究所, 上海, 201600)

摘要: 选用 5A06 铝合金和 Ti6Al4V 钛合金为母材, ER4047 焊丝和粉状 Nocolok 钎剂为填充材料, 采用激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊两种焊接方法, 并对两种焊接接头的微观组织和力学性能进行对比分析. 结果表明, 激光熔钎焊与激光-CMT 复合熔钎焊在合适的焊接工艺下均容易获得连续、稳定的焊接接头. 铝/钛激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊焊缝中部组织均为 α -Al 固溶体和 Al-Si 共晶组织. 激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊均在钛合金上表面处界面反应层最厚, 其厚度分别小于 10 和 6 μm . 激光熔钎焊焊缝偏钛侧界面主要为锯齿状, 激光-CMT 复合熔钎焊焊缝偏钛侧界面主要为层片状. 激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊焊接接头均断裂在焊缝区, 焊接接头平均抗拉强度分别为 252 和 209 MPa, 激光熔钎焊比激光-CMT 复合熔钎焊接头抗拉强度高 20%, 而激光-CMT 复合熔钎焊比激光熔钎焊焊接效率提升约 1.5 倍.

创新点: 针对铝/钛异种金属开展了激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊工艺研究, 并对比分析了两种接头的微观组织和力学性能.

关键词: 激光熔钎焊; 激光-CMT 复合熔钎焊; 铝/钛异种金属; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20220617003

0 序言

异种金属复合结构在航空航天、海洋工程和轨道交通等领域得到广泛应用^[1-3]. 铝/钛异种金属构件结合铝合金和钛合金各自的性能优势, 即兼具钛合金比强度和熔点高、耐腐蚀性好等优点, 也兼具铝合金导电性强、导热性好等优点, 使得铝/钛异种金属结构件具有广阔的应用前景^[4]. 铝/钛异种金属在物理性能和冶金性能方面存在较大差异, 在焊接接头往往会出现大量气孔、微裂纹和金属间化合物层, 因此实现铝/钛可靠焊接是铝/钛复合结构工程应用的关键.

近几年, 熔钎焊作为熔点差异较大的异种金属理想焊接方法之一受到国内外相关从业人员的广

泛关注. 目前国内外关于铝/钛异种金属熔钎焊技术主要包括激光熔钎焊技术和电弧熔钎焊技术^[5-9]. 激光熔钎焊具有热源能量精准可控、光束灵活等特点, 是熔钎焊常用的热源之一. 陈树海等人^[10]采用矩形光斑 CO_2 激光为热源, 分析铝/钛异种金属激光熔钎焊气孔形成机制, 结果表明, 光束的偏移量及激光功率是影响气孔产生的主要原因. 兰天等人^[11]利用激光深熔焊原理完成 3 mm 厚铝/钛异种金属激光熔钎焊, 结果表明, 合理的控制焊接工艺参数可以实现铝/钛异种金属的优质连接. 但激光熔钎焊为保证充分的界面反应, 在焊接过程中需要较高的激光功率, 较高的激光功率易产生液态金属在焊缝正面及背面铺展差的问题. 电弧熔钎焊具有适应性强、成本低的优势, 马志鹏等人^[12]采用钨极氩弧熔钎焊技术研究焊接电流对焊接接头显微组织和力学性能的影响, 结果表明, 当焊接电流超过 140 A 时, 会导致接头抗拉强度显著降低. 孙军浩等人^[13]采用冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 技

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFB3401100); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金资助项目 (AWJ-23M23); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (LH2022E102).

术实现铝/钛异种金属熔钎焊, 结果表明, 钎焊界面化合物生长均匀良好, 接头断裂在铝母材的热影响区, 最高抗拉强度达到 198 MPa. 但 CMT 电弧熔钎焊因其熔深较小, 使其应用在厚板焊接时受到限制, 同时 CMT 电弧熔钎焊热输入较大, 会加剧界面反应程度, 进而降低接头性能.

根据激光熔钎焊和电弧熔钎焊的特点, 将两者相结合提出激光-CMT 复合熔钎焊. 将激光-CMT 复合热源深熔钎焊应用于较厚的铝/钛异种金属焊接时, 不仅能利用电弧的预热作用促进钎料向钛表面铺展实现较好的桥接, 还可以通过激光的深熔焊机制实现较大的熔深, 并且通过改变两个热源的相对空间位置, 可以改变界面处的温度场分布, 从而实现对界面化合物层均匀性的调控. 因此提出激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊两种焊接方法对 5A06 铝合金和 Ti6Al4V 钛合金进行焊接工艺开发, 分析焊接工艺参数对焊接接头成形的影响规

律, 并对两种焊接接头的微观组织和力学性能进行对比分析.

1 试验方法

焊接试验材料母材为 5A06 铝合金和 Ti6Al4V 钛合金, 5A06 铝合金平均抗拉强度为 340 MPa, Ti6Al4V 钛合金平均抗拉强度为 950 MPa. 焊接试板尺寸为 300 mm×100 mm×3 mm. 焊丝为直径 1.2 mm 的 ER4047, 钎剂为粉状 Nocolok 钎剂, 该钎剂是铝钎焊典型的高温无腐蚀性钎剂. 母材、焊丝和焊剂化学成分如表 1、表 2 和表 3 所示. 保护气体为高纯氩气, 试验设备采用 Interpublic Group of Companies 生产的 YLR-6000 连续型输出的光纤激光器、Fronius TPS4000 焊机、KUKA 机器人、自行设计的工装夹具, 焊接示意图如图 1 所示. 焊接接头坡口示意图如图 2 所示.

表 1 铝合金母材和焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of aluminium alloy base metal and welding wire

材料	Mg	Fe	Si	Zn	Ti	Mn	Cu	Al
5A06	5.82	0.35	0.072	0.011	0.022	0.69	0.026	余量
ER4047	0.014	0.20	11.22	0.005	—	0.006	0.007	余量

表 2 Ti6Al4V 合金母材的化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of Ti6Al4V alloy base metal

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.20	4.20	0.30	0.10	0.05	0.01	0.20	余量

表 3 Nocolok 钎剂的化学成分 (质量分数, %)

Table 3 Chemical compositions of Nocolok flux

K	Al	F	Fe	Ca
28~31	16~18	49~53	≤0.03	≤0.2

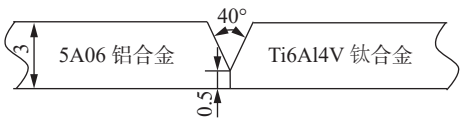


图 2 焊接坡口示意图 (mm)

Fig. 2 Welding groove schematic

施焊前, 对 5A06 铝合金焊接试板机械加工打磨去除表面氧化膜, 并用酒精清理坡口焊接区域的油污; 对 Ti6Al4V 钛合金板用 40% HNO_3 + 5% HF 水溶液酸洗 3~5 min 以去除氧化膜. 施焊前, 需要对焊接区域的所有表面进行钎剂涂覆, 待试件表面钎剂干燥后, 即可进行焊接. 主要焊接工艺参数如表 4 所示.

表 4 焊接工艺参数

Table 4 Welding parameters

焊接方法	激光功率 P/kW	光丝间距 D/mm	离焦量 f/mm	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
激光熔钎焊	4	0	+30	0.4	4
激光-CMT 复合熔钎焊	1.4	3	+30	1	6

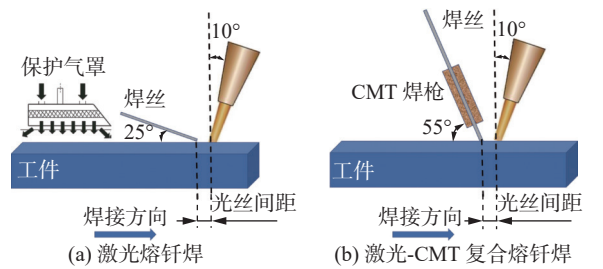


图 1 焊接示意图

Fig. 1 Welding schematic. (a) laser welding-brazing; (b) laser-CMT hybrid welding-brazing

按照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》采用 AG-X plus 型拉伸试验机进行室温拉伸试验, 拉伸速率为 1 mm/min. 金相试样经打磨、抛光、腐蚀后采用 OLYMPUSGX71 型光学显微镜(optical microscope, OM)、FEI Quanta-200 型扫描电子显微镜对焊接接头的微观组织进行观察和分析.

2 试验结果与分析

2.1 激光/激光-CMT 复合熔钎焊

2.1.1 激光熔钎焊

激光光斑中心对准 Y 形对接接头中部时, 不同激光功率条件下焊接所得焊缝正面和背面成形如图 3 所示. 由图 3 可知, 当激光功率小于 3.5 kW 时, 焊缝未熔透, 同时由于激光能量不足以完全熔化快速送进的焊丝, 在焊缝正面存在较多的未熔化焊丝夹杂. 而当激光功率达到 4 kW 时, 激光能量大量熔化钛合金金属, 钛合金熔融金属与铝合金焊丝、铝合金母材的熔融金属大量混合, 从而形成大量脆性铝钛金属间化合物, 导致焊缝熔透并开裂, 无法得到连续的焊缝.

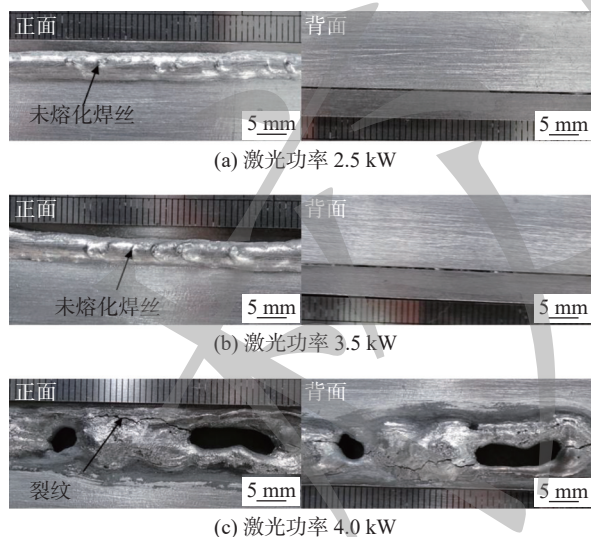


图 3 激光光斑不偏转对焊缝成形的影响

Fig. 3 Effect of non-deflection laser spot on weld formation. (a) laser power 2.5 kW; (b) laser power 3.5 kW; (c) laser power 4 kW

激光光斑中心偏向 Y 形对接接头铝合金一侧 0.5 mm 时, 不同激光功率及焊接速度条件下焊接所得的焊缝正面和背面成形如图 4 所示. 焊接速度为 0.5 m/min 保持不变, 对比图 4a 和图 4b 可以发现, 激光功率为 3.8 kW 仍无法获得熔透的焊缝且焊缝正面成形不连续; 激光功率为 4 kW 虽然可以

获得完全熔透的焊缝, 但焊缝正面、背面成形连续性、稳定性较差, 同时钛合金一侧焊缝背面铺展较少. 当激光功率为 4 kW, 适当减小焊接速度至 0.4 m/min, 提高焊接热输入, 可以获得成形连续、稳定的焊接焊缝, 如图 4c 所示, 其焊缝成形最优.

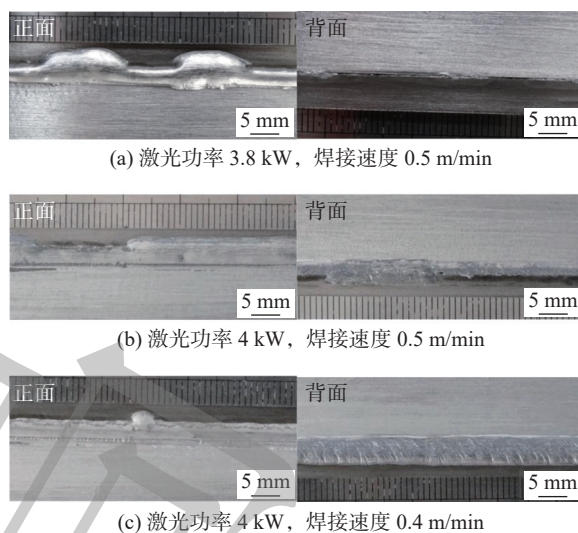


图 4 激光光斑偏向铝合金对焊缝成形的影响

Fig. 4 Effect of laser spot bias to aluminum alloy on weld formation. (a) laser power 3.8 kW, welding speed 0.5 m/min; (b) laser power 4 kW, welding speed 0.5 m/min; (c) laser power 4 kW, welding speed 0.4 m/min

2.1.2 激光-CMT 复合熔钎焊

激光光斑中心对准 Y 形对接接头中部, 当对接间隙为 0.5 mm 时, 不同激光功率条件下焊接所得焊缝正面和背面成形如图 5 所示. 当对接间隙较大时, 焊缝正面、背面成形连续性较差; 同时随着激光

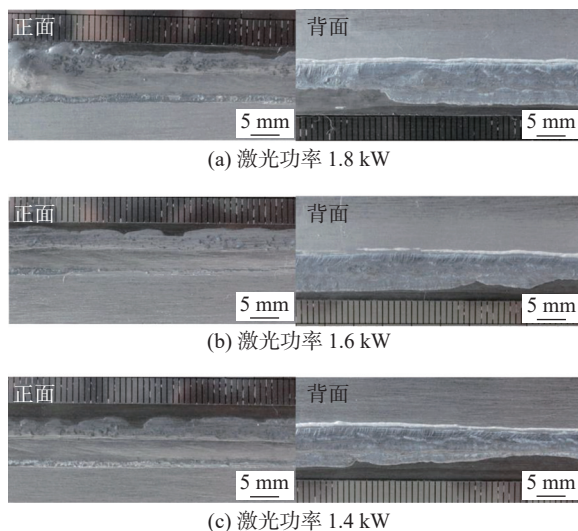


图 5 激光功率对焊缝成形的影响

Fig. 5 Effect of laser power on weld formation. (a) laser power 1.8 kW; (b) laser power 1.6 kW; (c) laser power 1.4 kW

功率的增大,焊缝正面下凹深度增大;随着激光功率的减小,钛合金一侧焊缝金属铺展宽度减小。

激光光斑中心对准Y形对接接头中部,当激光功率为1.4 kW时,不同对接间隙条件下焊接所得焊缝正面、背面成形如图6所示。由图6可知,当对接间隙低于0.2 mm时,容易获得成形连续、稳定的焊缝;同时,钛合金一侧焊缝金属铺展宽度较大。其中,间隙为0.2 mm时的焊缝成形最优,同时钛合金一侧焊缝金属铺展宽度最大。

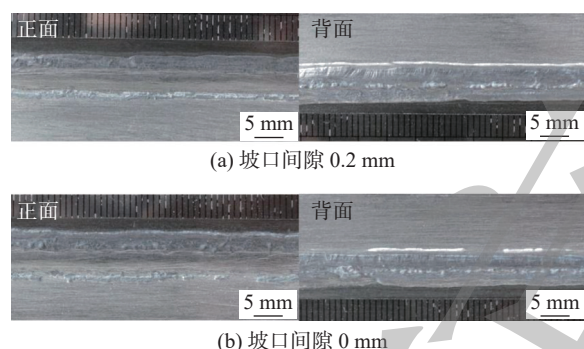


图6 坡口间隙对焊缝成形的影响
Fig. 6 Effect of groove gap on weld formation. (a) groove gap 0.2 mm; (b) groove gap 0 mm

2.2 焊接接头微观组织与力学性能

2.2.1 焊接接头显微组织分析

图7为母材5A06铝合金和Ti6Al4V钛合金的微观组织。其中5A06属于Al-Mg系合金,为非时效

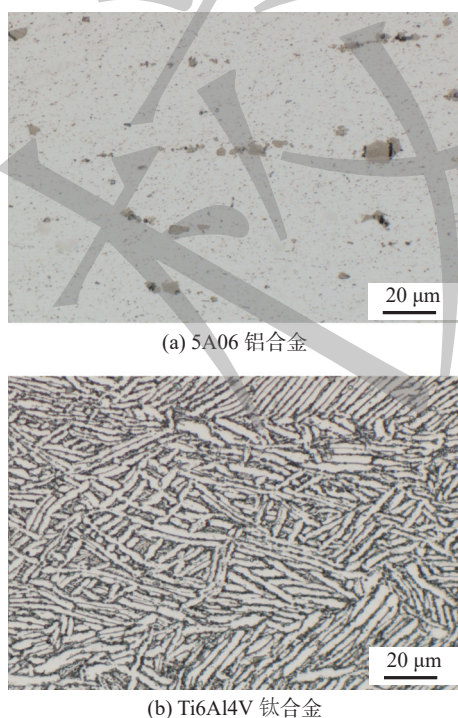


图7 母材微观组织

Fig. 7 Microstructure of base metal. (a) 5A06 aluminum alloy; (b) Ti6Al4V titanium alloy

强化铝合金,常温下5A06铝合金组织为 α 固溶体和 β 相(Al_3Mg_2)及弥散分布的二次强化相 β' ($\text{Mg}_{23}\text{Al}_{30}$); Ti6Al4V合金属于 $\alpha + \beta$ 双相钛合金。

图8和图9分别为激光熔钎焊和激光-CMT复合熔钎焊焊接接头不同区域微观组织。如图8a和图9a所示,对激光熔钎焊和激光-CMT复合熔钎焊焊接接头各区域(焊缝中部1区、铝合金中部熔合区2区、钛合金上表面焊缝金属铺展区3区、钛合金中部熔合区4区、钛合金下表面焊缝金属铺展区5区)进行微观组织分析;从焊接接头截面可知,接头具有熔焊与钎焊双重性质,低熔点5A06铝合金母材局部熔化,高熔点Ti6Al4V钛合金母材与焊缝形成钎焊界面。如图8b和图9b所示,激光熔钎焊和激光-CMT复合熔钎焊焊接接头焊缝区中部组织均为 α -Al固溶体+Al-Si共晶组织。如图8c和图9c所示,对激光熔钎焊和激光-CMT复合熔钎焊焊接接头铝合金中部熔合区组织均为 α -Al固溶体+块状析出物,块状析出物略有母材的原始带状分布特征。如图8d~图8f所示,激光熔钎焊钛合金一侧的钎焊接头在热源作用下钛合金母材与熔融金属发生相互作用形成金属间化合物。激光熔钎焊钛合金界面存在是锯齿状的钎焊界面反应层,且沿厚度方向上(焊缝上表面至下表面)界面反应层厚度减小。在钛合金上表面焊缝金属铺展区,界面反应层最厚,但其厚度小于10 μm ,一般呈锯齿状,在钛合金中部熔合区,界面反应层厚度小于5 μm ,在近钛合金背面焊缝熔合区及钛合金下表面焊缝金属铺展区,其界面反应较弱,反应层较薄,界面反应层厚度小于2 μm ,一般呈胞状。如图9d~图9f所示,激光-CMT复合熔钎焊在钛合金上表面焊缝金属铺展区,界面反应层最厚,但其厚度小于6 μm ,一般呈片状,在钛合金中部熔合区,界面反应层厚度小于3 μm ,在近钛合金下表面焊缝熔合区及钛合金下表面焊缝金属铺展区,其界面反应较弱,反应层较薄,界面反应层厚度小于2 μm ,一般呈胞状。上述激光熔钎焊和激光-CMT复合熔钎焊焊接接头界面反应层厚度均是从焊缝上表面到下表面依次降低,可能是因为焊缝上表面温度较高,同时凝固时间较长给予界面充足的反应时间,所以在焊缝上表面界面反应层厚度最厚。上述激光熔钎焊和激光-CMT复合熔钎焊焊接接头不同区域界面反应层厚度差异可能是因为激光-CMT复合熔钎焊焊接速度过快,熔池凝

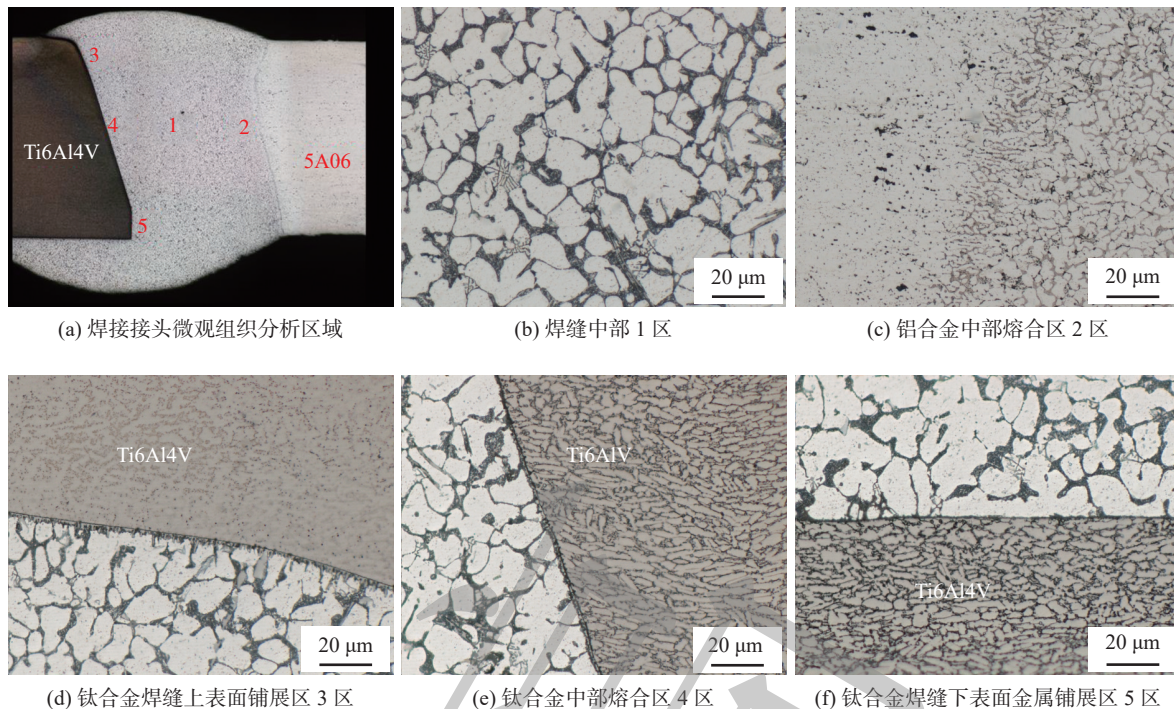


图 8 激光熔钎焊接头的微观组织

Fig. 8 Microstructure of laser welding-brazing joint. (a) microstructure analysis zone of welded joint; (b) zone 1 in central weld; (c) zone 2 in central fusion zone of aluminum alloy; (d) spreading zone 3 on the weld upper surface of titanium alloy front weld spreading; (e) zone 4 in the central fusion zone of titanium alloy; (f) spreading zone 5 on the weld back of titanium alloy

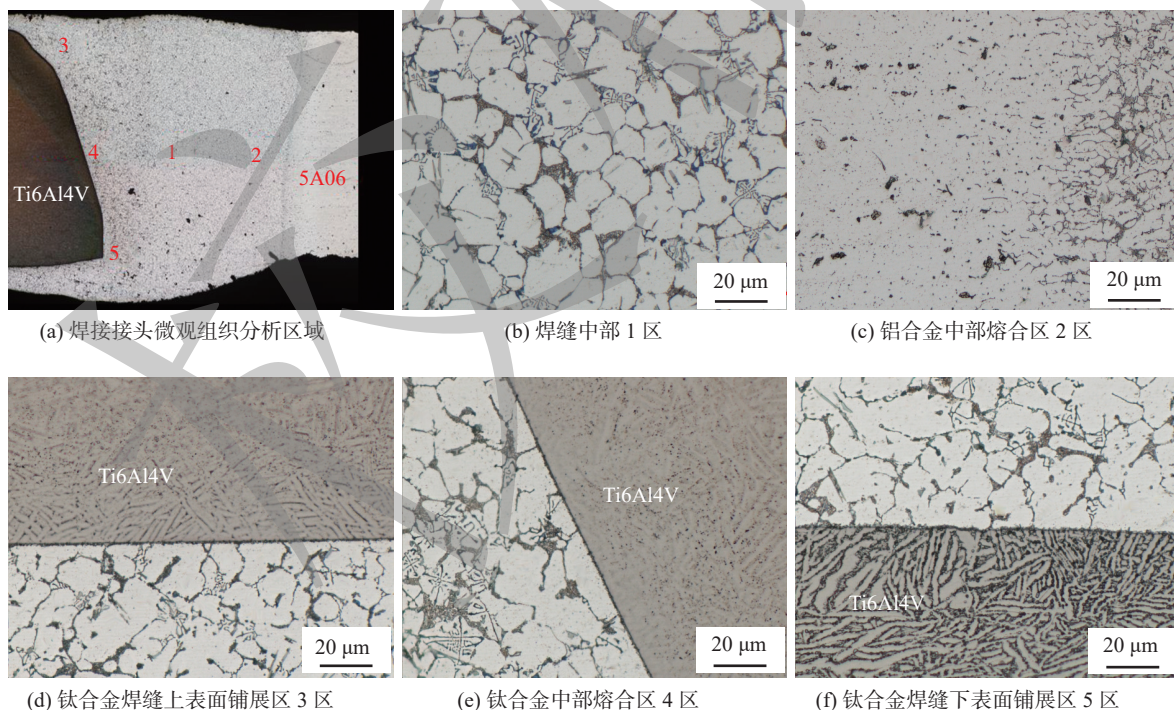


图 9 激光-CMT 复合熔钎焊接头的微观组织

Fig. 9 Microstructure of laser-CMT hybrid welding-brazing joint. (a) microstructure analysis zone of welded joint; (b) zone 1 in central weld; (c) zone 2 in central fusion zone of aluminum alloy; (d) spreading zone 3 on the weld upper surface of titanium alloy; (e) zone 4 in the central fusion zone of titanium alloy; (f) spreading zone 5 on the weld back of titanium alloy

固时间较短, 界面没有充分的时间进行反应, 从而导致界面反应层厚度较薄。

2.2.2 焊接接头微观物相分析

对激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊焊缝金

属与钛合金母材之间的钎焊界面进行 SEM 分析, 为了进一步分析界面反应层, 对其进行线扫描, 其结果如图 10 所示. 激光熔钎焊的钎焊界面金属间化合物层为锯齿状, 金属间化合物层大体分为芽状的非连续层和絮状连续层, 连续层最大厚度小于 $5\text{ }\mu\text{m}$, 如图 10a 所示. 激光-CMT 复合熔钎焊的钎焊界面金属间化合物层为层片状, 连续层最大厚度小于 $3\text{ }\mu\text{m}$, 如图 10b 所示. 激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊 Al, Ti 和 Si 元素在金属间化合物层内各区域质量浓度有所差异, 局部呈台阶分布. Al 和 Ti 元素在界面渐变过程十分明显, Si 元素在界面层偏铝一侧出现富集现象. 因此在界面区靠近钛侧易形成 AlTi 金属间化合物, 而界面靠近焊缝侧易形成 Al_3Ti , TiSi_2 等金属间化合物.

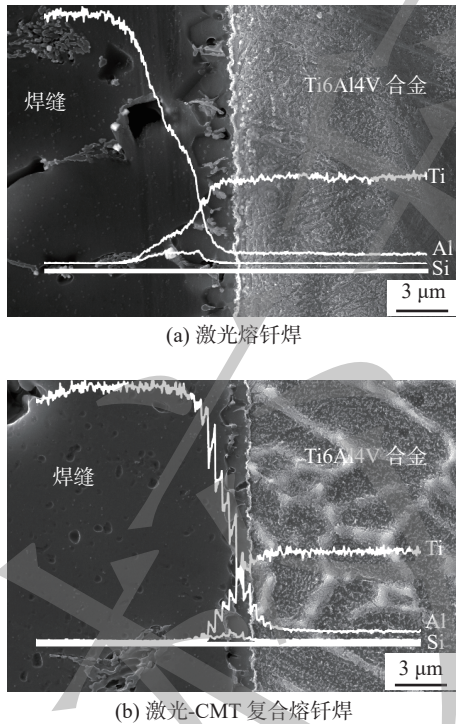


图 10 偏钛侧钎焊界面反应层 SEM 图像
Fig. 10 SEM image of interface reaction layer of titanium side brazing. (a) laser welding-brazing; (b) laser-CMT hybrid welding-brazing

2.2.3 焊接接头拉伸性能测试和断口分析

激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊焊接接头力学性能如表 5 所示. 激光熔钎焊的断裂位置为焊缝区, 焊接接头的平均抗拉强度为 252 MPa ; 激光-CMT 复合熔钎焊的断裂位置为焊缝区, 焊接接头平均抗拉强度为 209 MPa , 激光熔钎焊焊接接头比激光-CMT 复合熔钎焊强度高 20% . 上述结果可能是因为与激光熔钎焊相比激光-CMT 复合熔钎焊焊

接速度较快, 导致界面反应不充分, 相比激光熔钎焊界面反应层厚度较薄, 从而导致接头力学性能降低.

表 5 拉伸试验结果
Table 5 Results of tensile test

焊接方法	抗拉强度 R_m /MPa		断裂位置
	实测值	平均值	
激光熔钎焊	264, 226, 265	252	焊缝
激光-CMT复合熔钎焊	187, 204, 236	209	焊缝

图 11 和图 12 分别为激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊焊缝断口扫描形貌. 激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊, 断口均为典型的撕裂棱, 撕裂棱深度大, 有少量韧窝, 断裂发生在金属内部. 上述结果可能是因为在焊缝处应力集中, 界面反应层厚度沿厚度方向减少, 焊缝底部反应不充分, 金属化合物层较小, 在受外部载荷的作用下易生成裂纹^[14]; 并且焊缝主要为 Al-Si 共晶组织, 裂纹易于在 Al-Si 共晶组织扩展, 因此断口呈一定脆性特征.

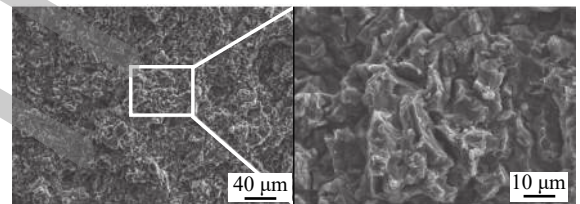


图 11 激光熔钎焊拉伸断口 SEM 形貌
Fig. 11 SEM images of tensile fracture of laser welding-brazing

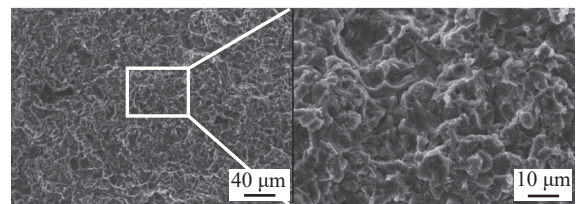


图 12 激光-CMT 复合熔钎焊拉伸断口 SEM 形貌
Fig. 12 Fracture morphology of laser-CMT hybrid welding-brazing

3 结论

(1) 激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊均获得连续、稳定的焊接接头; 激光-CMT 复合熔钎焊比激光熔钎焊效率提升约 1.5 倍.

(2) 激光熔钎焊钛合金上表面焊缝金属铺展区界面反应层最厚, 但其厚度小于 $10\text{ }\mu\text{m}$, 一般呈锯齿

齿状;激光-CMT 复合熔钎焊上表面所得的界面反应层厚度小于 $6\text{ }\mu\text{m}$,一般呈层片状。

(3) 激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊焊缝组织均为 α -Al 固溶体 + Al-Si 共晶组织。激光熔钎焊和激光-CMT 复合熔钎焊焊接接头均断裂在焊缝区,焊接接头平均抗拉强度分别为 252 和 209 MPa,激光熔钎焊接头的抗拉强度比激光-CMT 复合熔钎焊的抗拉强度高 20%。

参考文献

- [1] 邓呈敏,程东海,张华,等. 焊丝成分对铝/铜激光熔钎焊接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(1): 16–21.
Deng Chengmin, Cheng Donghai, Zhang Hua, *et al.* Effect of welding wire composition on microstructure and properties on Al/Cu laser welding-brazing joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(1): 16–21.
- [2] 石珏,梁琪,张刚,等. 激光毛化对铝/钢电弧熔钎焊接头界面与性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 25–29.
Shi Yu, Liang Qi, Zhang Gang, *et al.* Effect of laser texturing on the interface and properties of aluminum/steel arc fusion brazed joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(5): 25–29.
- [3] 秦国梁,武传松. 铝合金/钢异种材料熔钎焊接工艺及其研究现状[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 24–35.
Qin Guoliang, Wu Chuansong. State-of-art of brazing-fusion welding processes of dissimilar metals between aluminum alloy and steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 24–35.
- [4] 敬小军,王远荣,张巨鹏,等. 钛与铝异种金属连接的研究现状与进展[J]. 焊接, 2013(12): 10–15.
Jing Xiaojun, Wang Yuanrong, Zhang Jupeng, *et al.* Research status and progress of titanium and aluminum dissimilar metal connection[J]. Welding & Joining, 2013(12): 10–15.
- [5] Zhang Z J, Huang J, Yao C W, *et al.* Effect of Ag alloying on the microstructure and mechanical properties of laser welded-brazed Ti/Al dissimilar joints[J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 848(19): 143359.
- [6] 王廷,李洪剑,蒋思远,等. 铝/钛异种金属填丝电子束熔钎焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(8): 1–4.
Wang Ting, Li Hongjian, Jiang Siyuan, *et al.* Microstructure and properties of Al/Ti dissimilar metal filler wire electron beam brazing joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(8): 1–4.
- [7] Sohn W H, Bong H H, Hong S H. Microstructure and bonding mechanism of Al/Ti bonded joint using Al-10Si-1Mg filler metal[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 355(1): 231–240.
- [8] Li Y J, Wang J, Liu P, *et al.* Microstructure and XRD analysis near the interface of Ti/Al diffusion bonding[J]. International Journal for the Joining of Materials, 2005, 17(2): 53–57.
- [9] Kreimeyer M, Wagner F, Vollertsen F. Laser processing of aluminum-titanium-tailored blanks[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(9): 1021–1035.
- [10] 陈树海,李俐群,陶汪,等. 电流辅助钛/铝异种合金激光熔钎焊的特性[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 1942–1947.
Chen Shuhai, Li Liqun, Tao Wang, *et al.* Laser welding-brazing characteristics of Ti/Al dissimilar alloy with assistant current[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(11): 1942–1947.
- [11] 兰天,董鹏,肖荣诗. 铝/钛异种合金激光深熔钎焊试验分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 109–112.
Lan Tian, Dong Peng, Xiao Rongshi. The experimental analysis of laser deep penetration brazing of Al/Ti dissimilar alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 109–112.
- [12] 马志鹏,于心波,孟庆武. 钛/铝异种合金电弧熔钎焊接头的组织与断裂行为[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3067–3076.
Ma Zhipeng, Yu Xinlong, Meng Qingwu. Microstructure and fracture behavior of arc welding-brazing joints between titanium and aluminum dissimilar alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3067–3076.
- [13] 孙军浩,曹睿,陈剑虹. 铝/钛异种金属冷金属过渡熔钎焊接头分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 51–54.
Sun Junhao, Cao Rui, Chen Jianhong. Analysis of welding-brazing joints of Ti/Al dissimilar metals obtained by cold metal transfer method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(3): 51–54.
- [14] 方乃文,郭二军,徐锴,等. 钛合金激光填丝焊缝晶粒生长及相变原位观察[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1665–1672.
Fang Naiwen, Guo Erjun, Xu Kai, *et al.* In-situ observation of grain growth and phase transformation in laser welding of titanium alloy with filler wire[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1665–1672.

第一作者:王佳杰,博士,教授;主要研究方向为高效焊接和热喷涂技术研究;Email: wangjiajie2006@126.com.

通信作者:黄瑞生,博士,研究员,博士研究生导师;Email: huangrs8@163.com.

(编辑: 戴红)