

Cu75Pt 钎料钎焊 Ti60 与 TC4 接头界面组织及性能

郭民¹, 雷玉珍², 赵健¹, 宋晓国², 于治水¹, 石铭霄³

(1. 上海工程技术大学, 上海, 201620; 2. 哈尔滨工业大学(威海), 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海, 264209;
3. 江苏科技大学, 镇江, 212003)

摘要: 采用 Cu75Pt 钎料实现了 Ti60 钛合金与 TC4 钛合金的真空钎焊, 采用 SEM, EDS, XRD 分析了钎焊接头显微结构。结果表明, 接头典型组织结构为 Ti60/Ti₂Cu + α -Ti/Ti₂Cu/Ti₂Cu + Ti₃Pt/Ti₂Cu/Ti₂Cu + α -Ti/TC4。对不同钎焊温度下获得的接头界面组织结构进行了分析, 结果表明, 随着钎焊温度的增加, 扩散反层厚度增加, 钎缝中 Ti₂Cu 和 Ti₃Pt 金属间化合物减少, 钎缝厚度逐渐减小。接头抗剪强度随钎焊温度的升高先增加后减小, 当钎焊温度 970 ℃, 保温时间 10 min 时获得最大抗剪强度 130.9 MPa。接头的断口分析表明, 接头断裂在钎缝处, 断裂方式为脆性断裂。

创新点: (1) 采用 Cu75Pt 实现了 Ti60 与 TC4 的钎焊连接, 通过调整钎焊温度, 获得了良好的钎焊接头。

(2) 研究了钎焊温度对 Ti60 与 TC4 钎焊接头微观组织和力学性能的影响。

(3) 钎焊接头典型微观组织结构为 Ti60/Ti₂Cu + α -Ti/Ti₂Cu/Ti₂Cu + Ti₃Pt/Ti₂Cu/Ti₂Cu + α -Ti/TC4。

关键词: 真空钎焊; 钎焊温度; 界面结构; 力学性能

中图分类号: TG 454

文献标识码: A

doi: 10. 12073/j. hjxb. 20210918001

0 序言

Ti60 钛合金是 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-Ta-Si 系多元复合强化的近 α 型高温钛合金, 具有良好的高温抗氧化性和高温热稳定性, 是航空发动机高温部件的候选材料之一^[1]。Ti-6Al-4V(TC4) 是一种应用广泛的钛合金由于它具有高的断裂韧性, 良好的延展性和可加工性而成为钛合金工业中的王牌合金^[2-3]。基于 Ti60 与 TC4 钛合金的优良性能, 实现二者的精密连接对于拓宽其在航空航天等领域的应用具有重要的意义^[4-5]。

传统钎焊钛合金的钎料主要有银基钎料和钛基钎料。由于使用银基钎料得到的钎焊接头钎缝中主要由银基固溶体构成, 其高温强度低, 使银基钎料在连接高温钛合金方面受到限制^[6]。钛基钎料是连接钛合金使用最广泛的高温钎料之一, 由于 Cu 元素对 Ti 元素具有较强的亲和性^[7], 钛基钎料往往会掺入 Cu 元素来促进钎焊连接, 因此部分学

者采用纯铜箔或铜基钎料也实现了钛合金的连接^[8]。此外 Pt 原子为惰性原子, 在钎料中添加金属铂可以提高焊接接头的抗氧化性和耐腐蚀性^[9]。

文中采用 Cu75Pt 高温钎料真空钎焊 Ti60 和 TC4 钛合金, 研究接头界面组织形成机理, 分析不同钎焊温度对接头的微观组织和力学性能的影响。

1 试验方法

试验采用的母材是 Ti60 钛合金和 TC4 钛合金, 微观组织结构如图 1 所示。图 1a 为 Ti60 钛合金 (Ti-5.6Al-3.7Sn-3.0Zr-0.6Mo-0.9Ta-0.3Si-0.01C, 质量分数, %), 由 α -Ti 和 β -Ti 组成, 图 1b 为 TC4 钛合金。钎料为 Cu75Pt 箔片, 熔化区间为 1 125~1 170 ℃, 主要成分是 Cu(s,s) 和部分 Pt(s,s)。先将 Ti60 和 TC4 母材用线切割设备加工成尺寸分别为 5 mm × 5 mm × 5 mm 和 20 mm × 10 mm × 3 mm 大小的试样, 依次采用 180 号、300 号、600 号、800 号、1000 号的金相砂纸对母材进行打磨抛光以去除表面氧化膜, 然后将制备好的 Ti60 和 TC4 试样进行超声清洗。将试样以 Ti60 钛合金/Cu75Pt/TC4 钛合金由

上向下的顺序进行装配,如图 1c 所示. 装配完成后,将试样放入真空炉中进行钎焊. 设置保温时间为 10 min,温度分别为 930, 950, 970, 990, 1 010 °C 的条件下进行试验,研究不同温度对钎焊接头组织和力学性能的影响. 钎焊过程中,炉中的真空度保持在 5×10^{-3} Pa,先以 10 °C/min 从室温升温至 800 °C,保温 10 min,使钎焊炉中温度均匀化,再以 10 °C/min 升温至钎焊温度,在钎焊温度下保温 10 min,再以降温速度 10 °C/min 降温至 400 °C,然后随炉冷却至室温. 采用 X 射线衍射仪 (XRD),扫描电子显微镜 (SEM) 以及能谱分析仪 (EDS) 对钎焊接头进行组织分析,采用电子万能试验机对钎焊接头进行剪切测试.

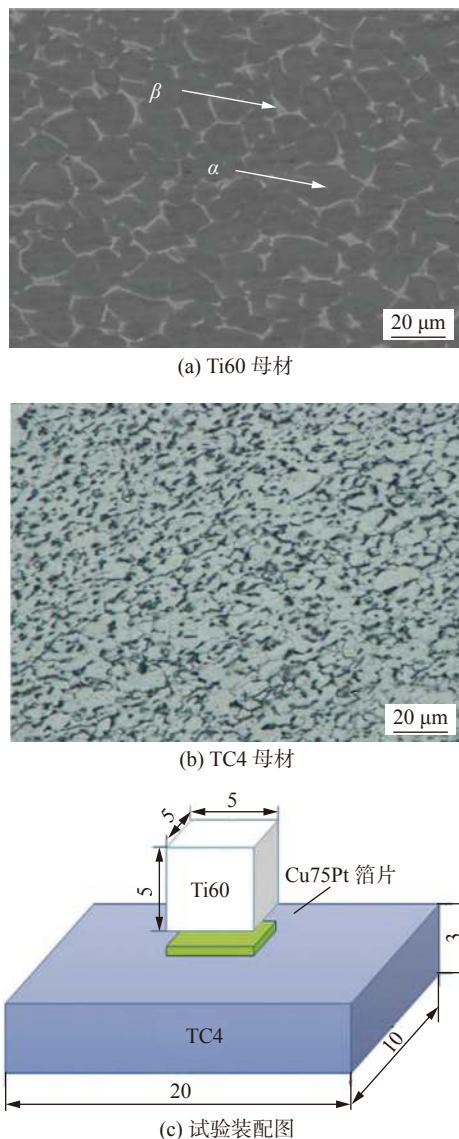


图 1 母材与装备示意图 (mm)

Fig. 1 Microstructures of substrates and schematic diagram of brazing assembly. (a) Ti60 alloy; (b) TC4 alloy; (c) brazing assembly

2 试验结果与分析

2.1 钎焊接头界面微观组织结构分析

图 2 所示为钎焊温度 970 °C, 保温 10 min 条件下获得的 Ti60/Cu75Pt/TC4 典型接头界面组织和主要元素面扫描分布结果. 从图 2a 中可以看出, 接头界面组织中没有气孔和微裂纹等缺陷, 钎料与 Ti60 和 TC4 实现了良好的冶金结合. 从接头的形貌可以将接头界面划分为 3 个区域: 位于 Ti60 侧分布灰色相和灰黑色相扩散区 I 区, 分布有亮白色块体和灰色相的钎缝中间区域 II 区, 以及靠近 TC4 侧分布有枝状灰黑色相和灰色相扩散区 III 区. 图 2b, 2c 的结果表明, 母材中的 Ti 元素向钎缝中发生了扩散, 钎料中的 Cu 元素在母材侧发生了聚集, Ti60 钛合金与 TC4 钛合金侧的界面反应层主要由 Ti 和 Cu 元素组成, 表明 Ti 和 Cu 元素在钛合金的连接中起到了关键作用, 母材中的 Al 元素也向钎缝中扩散, 钎料中的 Pt 元素在焊缝中分布均匀.

为了进一步分析界面化合物组成, 对典型接头界面区域进行了局部放大和物相分析. 图 3 为 970 °C/10 min 条件下获得的接头典型界面中各区域局部放大图, 对应的各相点扫描元素分析结果如表 1 所示. A 点的白色化合物主要含有 Ti 和 Pt 两种元素, 且二者的原子比接近 3:1, 结合 Ti-Pt 二元相图推测 A 点主要为 Ti_3Pt 化合物. 根据 Ti-Cu 二元相图推测, B 点、D 点和 E 点为 Ti_2Cu 化合物^[10], C 点为 $\alpha\text{-Ti} + \text{Ti}_2\text{Cu}$ 相, F 点为 $\alpha\text{-Ti}$ 相^[11]. 因此扩散层 I 区主要由 $\alpha\text{-Ti}$ 和 Ti_2Cu 组成, 钎缝中间区域 II 区中的亮白色相为 Ti_3Pt 化合物, 灰色区域为 Ti_2Cu 化合物层, III 区主要由 Ti_2Cu 和 $\alpha\text{-Ti}$ 组成. 由以上分析可以得出, 使用 Cu75Pt 钎料钎焊 Ti60 和 TC4 获得的接头典型界面组织为 $\text{Ti60}/\text{Ti}_2\text{Cu} + \alpha\text{-Ti}/\text{Ti}_2\text{Cu}/\text{Ti}_2\text{Cu} + \text{Ti}_3\text{Pt}/\text{Ti}_2\text{Cu}/\text{Ti}_2\text{Cu} + \alpha\text{-Ti}/\text{TC4}$.

在升温过程中, 当温度未达到钛铜共晶液相时, 发生固相的原子扩散, 根据相关文献 [12] 可知, Ti 元素的扩散速率大于 Cu 元素的扩散速率, Ti 原子优先进入 Cu75Pt 中间层, 由 Ti-Cu 二元相图可知, 当 Ti 元素和 Cu 元素的浓度达到一定含量, 且温度达到 Ti-Cu 共晶液相线时, 钎料合金与母材界面处产生共晶液相. Cu 元素扩散至母材处, 形成扩散区, 随着母材与钎料界面液相的产生, 会加速钎缝中各元素的扩散速率, 液相不断扩展, 钎料中的

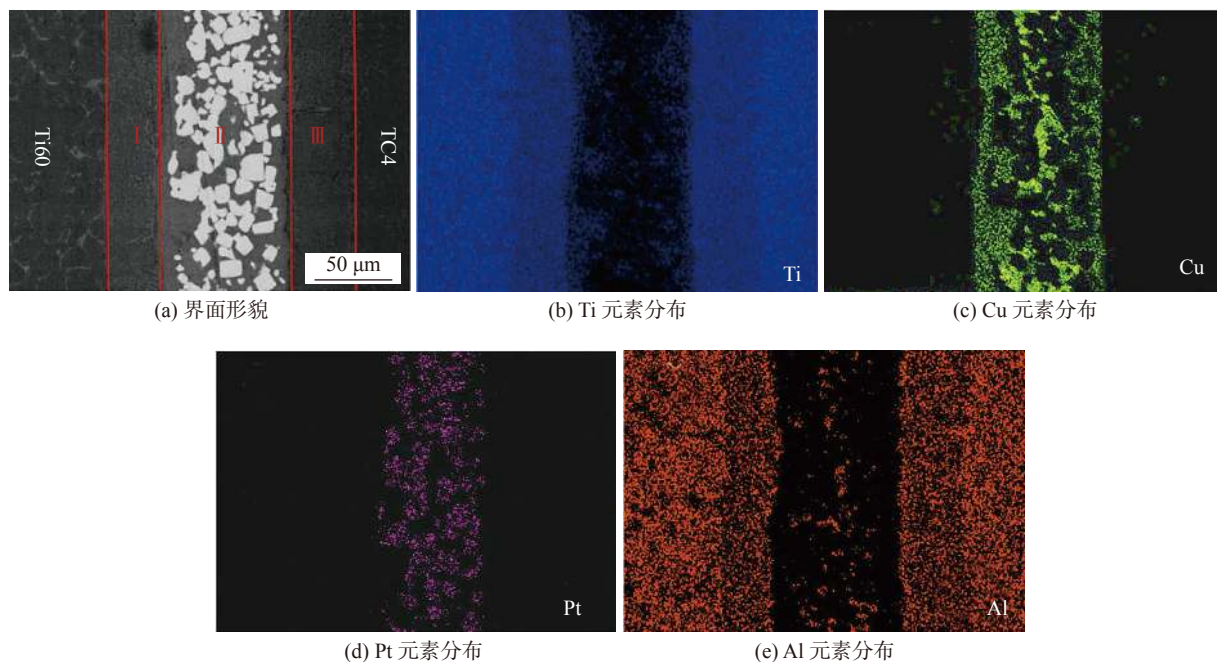


图 2 970 °C/10 min 典型接头界面结构和接头不同元素面扫描

Fig. 2 Microstructure and corresponding element distribution of the Ti60/Cu75Pt/TC4 joint brazed at 970 °C for 10 min. (a) microstructure maps; (b) Ti element; (c) Cu element; (d) Pt element; (e) Al element

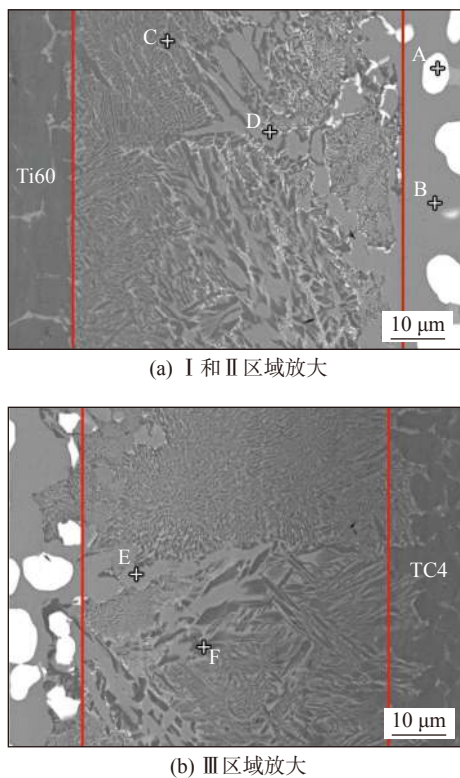


图 3 钎焊接头界面组织结构 (970 °C, 10 min)

Fig. 3 Interfacial microstructure of Ti60/Cu75Pt/Ti60 at 970 °C for 10 min. (a) magnified zone I and zone II; (b) magnified zone III

Pt 元素也会向液相中溶解, 使 Ti-Cu 二元液相转变为 Ti-Cu-Pt 三元液相. 随着钎焊温度的升高, 钎料完全液化. 在等温阶段, Ti 与 Pt 元素发生反应, 在

界面处生成 Ti_3Pt . 在降温过程中, 随着温度的降低, 液相逐渐凝固, 在钎缝处析出 Ti_2Cu 金属间化合物. 此外扩散区处的 Cu 作为 β 稳定元素, 可以降低 β 相的转变温度, 提高了扩散区宽度, 在母材侧形成大量的富 Cu 相 β 相, 当温度低于 α 相与 β 相的转变温度时, β 相发生共析转变, 生成 α 相和 Ti_2Cu 组织, 由于等温凝固发生不完全, 在扩散区形成残余液相, 这些残余液相逐渐凝固, 并反应生成 Ti_2Cu 金属间化合物. 最终靠近母材侧的扩散反层由 α -Ti 和 Ti_2Cu 组成, 钎缝中间区域主要由 Ti_3Pt 和 Ti_2Cu 组成.

2.2 钎焊温度对界面微观组织的影响

图 4 为不同钎焊温度下保温时间 10 min 获得的 Ti60/Cu75Pt/TC4 接头界面组织背散射图. 由图可知, 在不同的钎焊温度下, 钎焊接头均无孔洞和裂纹等缺陷. 随着温度的升高, 接头界面形貌变化显著, 尤其位于母材侧的扩散区组织变化明显. 随着温度升高, 元素的扩散速率提高, 在温度到达 970 °C 前, 钎料中 Cu 元素与母材中扩散的 Ti 元素反应加剧, 引起钎缝中间区域的 Ti_3Pt 相和 Ti_2Cu 相减少, 钎缝宽度随之减小. 当钎焊温度高于 970 °C 时, 随着温度的进一步升高, 钎料中的 Cu 元素减少, Ti 和 Cu 元素反应速率减缓, 钎缝宽度变化不大. 对于扩散区, Cu 元素作为 β -Ti 稳定元素可使钛合金的 β 相相变温度降低和促进 α -Ti 向

表 1 图 3 中各点元素含量及可能相 (原子分数, %)
Table 1 Element content and possible phase of each point in Fig.3

位置	Ti	Al	Cu	Pt	可能相
A	80.40	—	—	19.60	Ti ₃ Pt
B	64.32	4.27	31.41	—	Ti ₂ Cu
C	73.06	15.43	11.51	—	Ti ₂ Cu + α-Ti
D	66.99	2.69	30.32	—	Ti ₂ Cu
E	64.49	5.33	30.18	—	Ti ₂ Cu
F	88.40	8.80	—	—	α-Ti

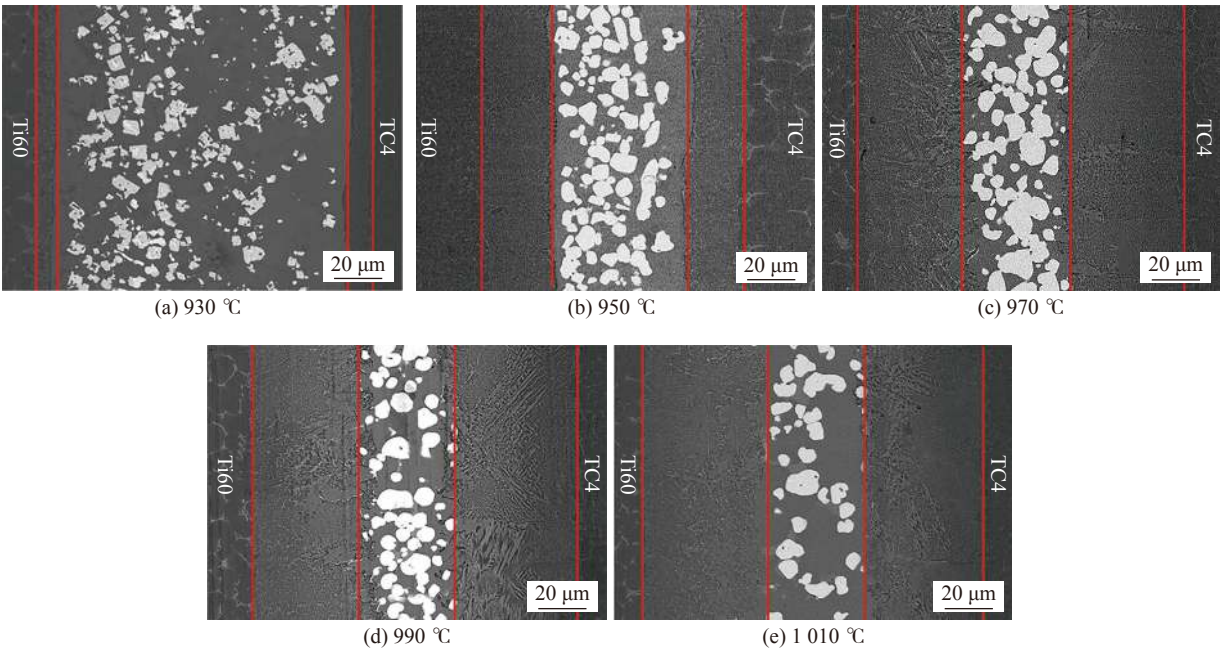


图 4 不同钎焊温度接头界面微观组织 (保温 10 min)

Fig. 4 Microstructure of joint interface at different brazing temperatures ($t=10$ min). (a) 930 °C; (b) 950 °C; (c) 970 °C; (d) 990 °C; (e) 1 010 °C

β -Ti 的转变. 温度的逐渐升高, Cu 元素加剧向母材方向扩散, 增加了扩散区 β -Ti 的含量. 当温度降低时, 通过 β -Ti $\rightarrow$ α -Ti + Ti₂Cu 的共析反应, 接头中的 β -Ti 转变成 α -Ti + Ti₂Cu, 扩散反应区厚度增加.

2.3 钎焊温度对接头力学性能的影响与断口形貌

图 5 为保温 10 min, 不同钎焊温度对接头抗剪强度的影响. 从图结果可知, 随着钎焊温度的升高, 钎焊接头的抗剪强度先上升后下降, 当钎焊温度为 970 °C 时, 接头达到最大抗剪强度 130.9 MPa. 随着钎焊温度的升高, 位于母材侧的扩散反应层厚度逐渐增加, 钎缝中间区厚度减小, 钎缝中 Ti₂Cu, Ti₃Pt 金属间化合物含量减少. 金属间化合物的减少, 有利于提高接头性能, 然而温度的不断升高, 会导致接头中晶粒不断长大, 粗化, 导致接头力学性能下降. 图 6 为 970 °C/10 min 条件下获得的接头断口形

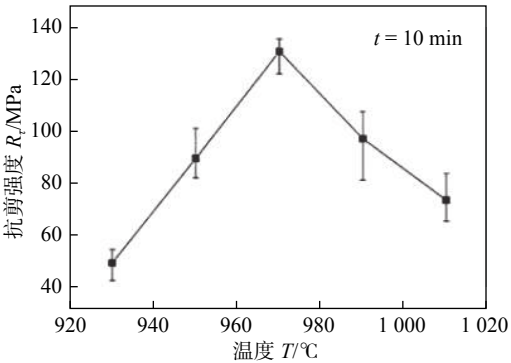


图 5 钎焊温度对接头抗剪强度的影响

Fig. 5 Influence of different brazing temperatures on the shear strength of the joints

貌, 图 7 为物相 XRD 分析. 从图中可知接头断裂为脆性断裂特征. 断口内主要化合物为 Ti₂Cu 和 Ti₃Pt, 由于钎缝中脆性相化合物会由于钎缝中脆性相化合物会引起接头裂纹产生, 并最终导致接头发生断裂.

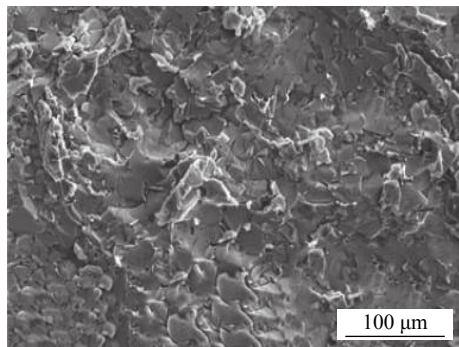


图 6 970 °C/10 min 条件下接头断口形貌
Fig. 6 Morphology of the fracture surface

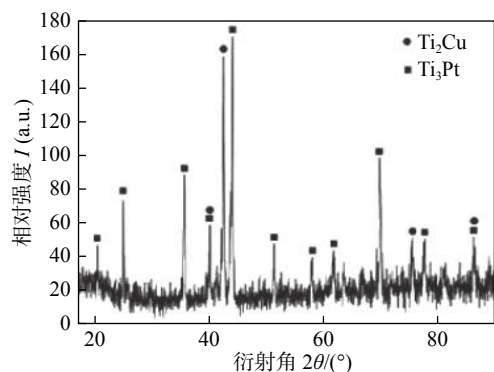


图 7 断口产物 XRD 分析

Fig. 7 XRD pattern of the fracture surface

3 结论

(1) 采用 Cu75Pt 钎料实现了 Ti60 与 TC4 钛合金的钎焊连接, 接头的典型界面组织结构 Ti60/Ti₂Cu + α-Ti/Ti₂Cu/Ti₂Cu + Ti₃Pt/Ti₂Cu/Ti₂Cu + α-Ti/TC4。随着钎焊温度的升高, 扩散反应层厚度增加, 钎缝区厚度减小, 钎缝中 Ti₂Cu, Ti₃Pt 金属间化合物含量减少。

(2) 随着钎焊温度的升高, 接头的抗剪强度先升高后减小, 当钎焊温度 970 °C, 保温 10 min 时, 接头的抗剪强度最大为 130.9 MPa, 接头的断裂方式为脆性断裂, 断裂发生在钎缝中间区域。

参考文献

- [1] Song Debin, Wang Ting, Jiang Siyuan, *et al.* Influence of welding parameters on microstructure and mechanical properties of electron beam welded Ti60 to GH3128 joint with a Cu interlayer[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 39 – 46.
- [2] 常敬欢, 曹睿, 闫英杰. 钛合金/不锈钢冷金属过渡焊接头组织及性能 [J]. 焊接学报, 2021, 42(6): 44 – 51.
- [3] Chang Jinghuan, Cao Rui, Yan Yingjie. Microstructure and properties of titanium alloy/stainless steel joint by cold metal transfer joining technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(6): 44 – 51.
- [4] Hou Jijun, Dong Junhui, Bai Xueyu, *et al.* Weld shape and microstructure of TC4 laser welding with activating flux of Na₂SiF₆[J]. China Welding, 2020, 29(4): 19 – 24.
- [5] Chen Yankun, Zhou Jianping, Zhang Yan, *et al.* Single-pass laser brazing of TC4 alloy and 304 stainless steel with Cu interlayer and Cu-Zn filler metal[J]. Materials Letters, 2021, 291: 129357.
- [6] Qin Youqiong, Zhang Danfeng, Jiang Wenxiang, *et al.* Microstructure and mechanical properties of welded joints of titanium alloy Ti60 after laser welding and subsequent heat treatment[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2021, 62(15): 689 – 695.
- [7] Wang Yifeng, Liu Manqin, Zhang Hao, *et al.* Fabrication of reliable ZTA composite/Ti6Al4V alloy joints via vacuum brazing method: Microstructural evolution, mechanical properties and residual stress prediction[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(7): 4273 – 4283.
- [8] Liu Shilei, Miao Jiakai, Zhang Weiwei, *et al.* Interfacial microstructure and shear strength of TC4 alloy joints vacuum brazed with Ti–Zr–Ni–Cu filler metal[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 775(1-3): 138990.
- [9] Wang Xiaoyang, Li Chun, Si Xiaolin, *et al.* Brazing ZTA ceramic to TC4 alloy using the Cu foam as interlayer[J]. Vacuum, 2018, 155: 7 – 15.
- [10] Hu Shengpeng, Hu Tianyi, Lei Yuzhen, *et al.* Microstructural evolution and mechanical properties of vacuum brazed Ti2AlNb alloy and Ti60 alloy with Cu75Pt filler metal[J]. Vacuum, 2018, 152: 340 – 346.
- [11] Song Xiaoguo, Zhang Te, Feng Yangju, *et al.* Brazing of TiBw/TC4 composite and Ti60 alloy using TiZrNiCu amorphous filler alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(10): 2193 – 2201.
- [12] 魏志祥, 李国选, 汪月勇, 等. TIG 电弧增材制造 TC4 钛合金的组织与性能 [J]. 有色金属工程, 2021, 11(10): 14 – 19, 63.
- [13] Wei Zhixiang, Li Guoxuan, Wang Yueyong, *et al.* Microstructure and properties of TC4 titanium alloy produced by TiG arc additive manufacturing[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(10): 14 – 19, 63.
- [14] 牛超楠, 宋晓国, 胡胜鹏, 等. 钎焊温度对 TC4/Ti60 接头组织及性能的影响 [J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 81 – 84.
- [15] Niu Chaonan, Song Xiaoguo, Hu Shengpeng, *et al.* Effect of brazing temperature on the interfacial microstructure and mechanical properties of TC4/Ti60 brazed joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 81 – 84.

第一作者: 郭民, 硕士; 主要从事异种材料连接的科研工作; Email: g19960413mbs@163.com.

通信作者: 雷玉珍, 博士; Email: lei.yuzhen@163.com.

(编辑: 郑红)