

TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头组织与力学性能分析

岳喜山^{1,2}, 谢宗蕪¹, 徐文豪¹

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(2. 中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

摘要:采用 Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni 和 Ag-Cu28 两种钎料分别对 TC4 钛合金/30CrMnSiNi2 超高强度异种材料进行了钎焊, 对钎焊界面组织以及接头的力学性能进行了分析。结果表明: Ag 基钎料钎焊 TC4 与 30CrMnSiNi2A 异种材料时, 钎缝界面组织为 Ag(s,s)+Ti-Cu 系化合物组成; 因 Ag 固溶体的存在, 钎缝具有一定的韧性, 接头剪切强度较高, 剪切断面呈现出韧性断裂特征。Ti 基钎料钎焊 TC4 与 30CrMnSiNi2A 异种材料时, 钎缝界面组织为 Ti-Zr 固溶体+未完全反应凝固钎料, 钎缝显微硬度较高, 接头剪切强度较低, 呈现出脆性断裂特征。Ag 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 异种材料钎焊接头力学性能明显优于 Ti 基钎料结果, 在钎焊温度 830 °C, 保温时间 15 min 时, 抗剪切强度为 125.52 MPa。

关键词: TC4 钛合金; 30CrMnSiNi2 超高强度钢; 钎焊; 组织; 力学性能

中图分类号: TG44

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)09-3035-06

TC4 钛合金和 30CrMnSiNi2A 超高强度钢分别具有低密度、高比强度/比刚度、耐腐蚀、耐高温等优点和高强度、高韧性等优势, 在航空领域都广泛应用^[1,2]。与 30CrMnSiNi2A 钢相比, TC4 钛合金密度小, 耐腐蚀性能好, 但价格较昂贵。为达到两种材料结构和经济上的最优化, 需要采用焊接/连接方法进行钛合金和超高强度钢异种金属材料连接, 实现由两种材料组成的复合结构。

冯吉才^[3,4]和 B. Shanmugarajan^[5]、T. Wang^[6]、I. Tomashchuk^[7]等人对钛合金和钢异种材料焊接/连接方面的相关研究表明, 采用熔化焊或扩散连接的方法难以实现钛合金与钢异种材料的高强度直接连接, 甚至出现焊后两种材料沿焊接界面处开裂分离等现象。钛合金和钢两种材料难以实现直接连接的主要原因在于界面处易产生脆性金属间化合物和连接接头易形成大的内应力。TiFe 相硬而脆, 在高温下还会形成金属间化合物 TiFe₂, 同时, 钛还与 Ni、Cr、C 形成更加复杂的金属间化合物和碳化物, 使焊缝严重脆化, 甚至产生裂纹。另外, 由于钢和钛合金线膨胀系数、热导率相差较大, 在焊接加热和冷却过程中变形不同, 导致接头中形成较大的内应力。焊缝处大量金属间化合物和高的内应力的存在, 导致钛合金和钢直接熔焊接头的力学性能差。通常需要添加中间层材料, 进行钛合金和钢的熔化焊接或扩散连接, 如 Cu^[6]、Ta^[8]、Ni^[9]和 Ag^[10]等。

与熔焊和扩散焊相比, 钛合金和钢钎焊时, 一方

面钎料的存在可以起到降低应力的作用, 另一方面可通过改变钎料来减小接头界面脆性相(金属间化合物)的生成量及形态分布, 从而实现两种材料的可靠连接^[8]。

TC4 钛合金和 30CrMnSiNi2A 超高强度钢异种材料连接未见相关文献报道。为探索两种材料之间焊接可行性, 参考钛合金和钢异种材料焊接/连接方面的相关文献研究结果, 本研究采用 Ag 基和 Ti 基两种钎料分别对 TC4/30CrMnSiNi2A 异种材料进行搭接钎焊, 并对钎焊接头的成分组织和力学性能进行对比分析, 为 TC4 钛合金和 30CrMnSiNi2A 超高强度钢异种材料连接的工程应用奠定前期工艺基础。

1 实验

实验材料为 TC4 钛合金和 30CrMnSiNi2A 超高强度钢, 名义化学成分分别如表 1 和表 2 所示。

TC4 钛合金和 30CrMnSiNi2A 超高强度钢母材显微组织分别如图 1 所示。由图 1a 看出, TC4 合金母材显微组织为由等轴 α 相和晶界 β 组成的等轴组织。由图 1b 可知, 30CrMnSiNi2A 超高强度钢母材显微组织主要为回火索氏体组织。

表 1 TC4 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy ($\omega/\%$)^[11]

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤ 0.3	≤ 0.2	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.015	Bal.

收稿日期: 2018-09-10

作者简介: 岳喜山, 男, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072, E-mail: yuexs_0@163.com

表 2 30CrMnSiNi2A 超高强钢化学成分

Table 2 Chemical composition of 30CrMnSiNi2A ultra-high strength steel ($\omega/\%$)^[12]

C	Cr	Mn	Si	Ni	S	P	Fe
0.27~0.34	0.9~1.2	1.0~1.3	0.9~1.2	1.4~1.8	≤0.03	≤0.03	Bal.

钎焊试样尺寸为 80 mm×24 mm×2 mm，采用线切割下料，机械打磨处理试样表面后，用丙酮清洗试样。再进行搭接钎焊，搭接长度 4 mm，如图 2 所示。

使用 Ag 基(Ag-28Cu)和 Ti 基(Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni)两种钎料对 TC4 钛合金和 30CrMnSiNi2A 超高强钢进行钎焊，两种钎料的熔点分别为：778 和 830~840 °C。考虑到 TC4 合金和 30CrMnSiNi2A 钢长时间保温钎焊时易产生金属间化合物，实验过程中钎焊时间选择为 15 min。Ag 基和 Ti 基钎料的钎焊温度分别选择为 830 和 870 °C。每种钎焊工艺制备 4 件搭接接头，1 件用于接头组织和成分分析，其余 3 件用于剪切强度测试。

利用线切割在垂直于连接界面方向切取接头试样，经打磨、抛光和腐蚀制备成金相试样。采用 Leica DM6000M 金相显微镜和 ZESS 扫描电子显微镜对连接接头组织进行分析。使用能谱仪对钎焊接头元素分别进行分析。采用 X 射线衍射分析仪对钎焊界面的物相进行分析。

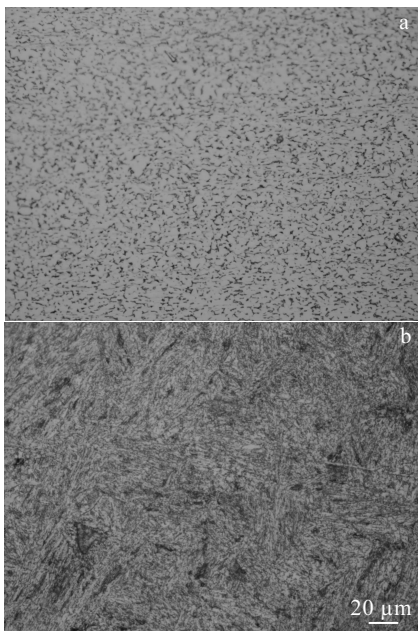


图 1 TC4 钛合金和 30CrMnSiNi2A 超高强钢母材显微组织
Fig.1 Microstructures of TC4 titanium (a) and 30CrMnSiNi2A ultra-high strength steel (b)

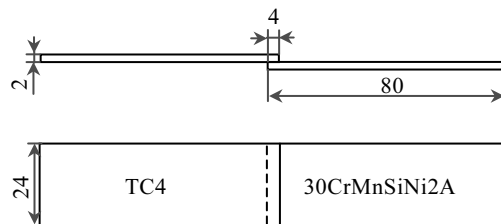


图 2 TC4/30CrMnSiNi2A 搭接接头尺寸示意图
Fig.2 Dimensions of lap joints of TC4/30CrMnSiNi2A

利用 Z100 电子万能材料试验机对 3 种钎料搭接接头的剪切强度进行测试，测试结果取 3 个试样结果的平均值。并使用 ZESS 扫描电镜对搭接试样断口形貌进行分析。

2 结果与分析

2.1 钎焊界面与分析

Ag 基(Ag-28Cu)钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头组织如图 3 所示。由图 3 可以看出 TC4 钛合金与 Ag 基钎料发生明显的界面反应，生成深灰色区域 I 区，对其化学成分进行能谱分析，结果如表 3 所示，该区的主要化学成分为 Ti 和 Cu 元素。对 Ag 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头 XRD 物相分析结果如图 4 所示，接头中可能存在的物相有 Ti₂Cu、Ti₂Cu₃、Ag 等。结合表 3 所示化学成分分析结果，深灰色区域 I 区为 Ti-Cu 系化合物。同时，由图 3 可以看出，Ag 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头钎缝区域(II 区)组织由灰色块状 A 和白色基体区 B 组成，由表 3 可以看出，灰色块状 A 主要由 Ti 和 Cu 元素组成，为 Ti-Cu 系化合物，但与 I 区相比，灰色块状 A 中的 Ti 元素有所减少。由表 3，白色基体区 B 主要成分为 Ag，并含有少量的 Cu 元素，该区域为固溶 Cu 元素的 Ag 基体。钎料与 30CrMnSiNi2A 钢界面区成分如表 3 所示，主要为 Fe 和 Ti 元素，界面处可能存在 Ti-Fe 系金属间化合物。30CrMnSiNi2A 钢的 AC₃ 线约为 800 °C^[13]，AgCu 钎料钎焊温度略高于 30CrMnSiNi2A 钢 AC₃ 线，钎焊过程中，30CrMnSiNi2A 钢发生奥氏体相变，冷却后界面附近组织主要为马氏体以及少量贝氏体和残余奥氏体组织，相比母材组织有所变化。

Ti 基 Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni 钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 异种材料钎焊接头组织如图 5 所示。由图可以看出，距离钎焊界面较远处的 TC4 合金仍表现为由等轴 α 相和晶界 β 组成的等轴组织。TC4 合金和钎料间存在较宽的界面反应区 I，该区域化学成分能谱分析结果如

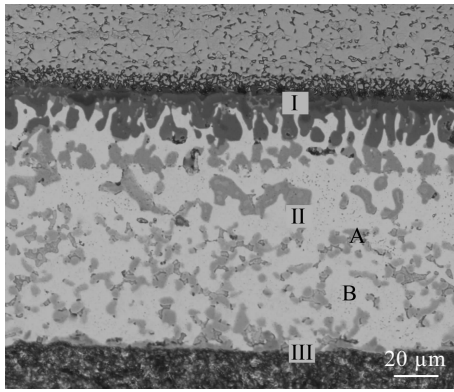


图 3 Ag 基(Ag-28Cu)钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头组织
Fig.3 Microstructure of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joint by Ag-based brazing filler metal (Ag-28Cu)

表 4 所示，主要元素为 Ti(质量分数为 67.4%)，可以确定该区域原始组织为 TC4 合金，另外，该区域含有 Zr、Cu、Ni 等钎料中元素。Cu、Ni 等均为 β 相稳定元素，具有扩大 β 相区或降低 β 相相变点的作用，从而导致钎焊后该区域 β 相含量相比 TC4 合金母材有所增加^[14]。同时，Cu 元素属于 β 共析元素，与 Ti 易进行共析反应，冷却过程中难以将含有 Cu 元素的 β 相保留到室温，易产生 Ti-Cu 金属间化合物^[14]。Ti 基(Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni)

钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头 XRD 物相分析结果如图 6 所示，接头中可能存在的物相有 CuTi₂、TiFe、α-Fe 等。结合表 4 区域 I 成分分析结果，该区域可能存在少量的 Ti-Cu 系金属间化合物。紧邻 I 区的为灰色层 II，由表 4 成分分析结果可以看出，灰色层 II 主要元素为 Zr、Ti、Cu、Ni 等，且元素成本比例与原始钎料成分接近，该区域为钎料凝固区，主要为未完全反应钎料的凝固后形成固溶体组织。紧邻灰色层 II 区的为块状 III 区，化学成分主要为 Ti 和 Zr 元素，Ti 和 Zr 元素可无限互相固溶，可以确定该区域为 Ti-Zr 固溶体。同时，由图 5 可以看出，靠近 30CrMnSiNi2A 钢侧钎缝存在深灰色区域 IV，主要化学成分与区域 II 相似，该区域为钎料凝固区。

2.2 接头力学性能与分析

Ag 基和 Ti 基两种钎料的搭接接头剪切强度结果如表 5 所示。

由表 5 可知，Ag 基钎料钎焊的 TC4/30CrMnSiNi2A 接头抗剪切强度均值为 125.52 MPa。Ag 基钎料 TC4 合金侧剪切断面 SEM 照片如图 7 所示。断面表面存在剪切断裂台阶，不同区域断面形貌微观特征如图 8 所示。相应区域元素成分分析如表 6。如图 8a 所示，断面区域 L 呈现切窝形貌特征，对其断面化学成分进行测试，主要元素为 Ag，并含有少量的 Cu 元素，结合显微组织

表 3 图 3 中 Ag 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头不同区域化学成分能谱分析结果

Table 3 Chemical composition at different regions of TC4/ 30CrMnSiNi2A brazed joint by Ag-based brazing filler metal in Fig.3 (at%)

Region	Ti	Al	V	Ag	Cu	Fe	Ni	O	Possible phase
I	48.56	1.34	0.11	3.01	43.39	0.11	0	3.48	Ti-Cu compound
II-A	32.82	0.31	0	1.58	57.04	1.64	6.62	0	Ti-Cu compound
II-B	0	0	0	92.8	7.2	0	0	0	Ag(s,s)
III	9.59	0	0.11	0	0.34	88.4	1.56	0	Fe(s,s) +Ti-Fe compound

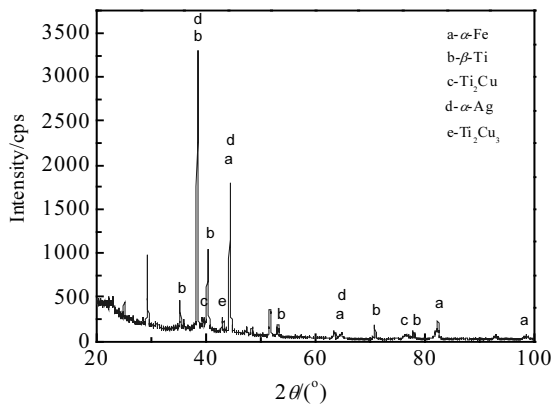


图 4 Ag 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头 XRD 图谱
Fig.4 XRD pattern of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joint by Ag-based brazing filler metal (Ag-28Cu)

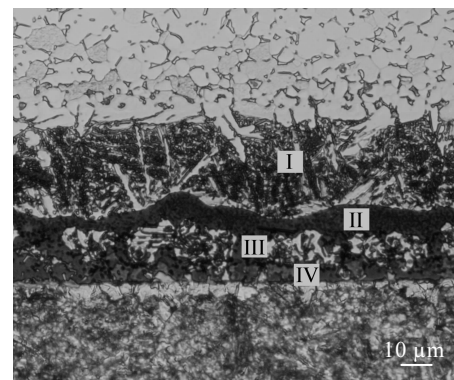


图 5 Ti 基(Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni)钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头组织
Fig.5 Microstructure of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joint by Ti-based brazing filler metal (Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni)

表 4 图 5 中 Ti 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头不同区域化学成分能谱分析结果

Table 4 Chemical composition at different regions of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joint by Ti-based brazing filler metal in Fig.5 (wt%)

Region	Ti	Al	V	Zr	Cu	Ni	Fe	Cr	Mn	Si	Possible phase
I	67.4	3.7	0.7	17.6	6.2	3.7	0.3	0.2	0.1	0	α -Ti, β -Ti, Ti-Cu compound
II	30.1	2.9	0.7	38.7	14.5	12.4	0.7	0	0	0	Solidification solder
III	67.3	1.3	0	20.5	6.2	4.0	0.5	0.2	0	0	Ti-Zr solid solution
IV	30.7	1.6	0.3	37.4	15.6	12.3	2.0	0	0	0	Solidification solder

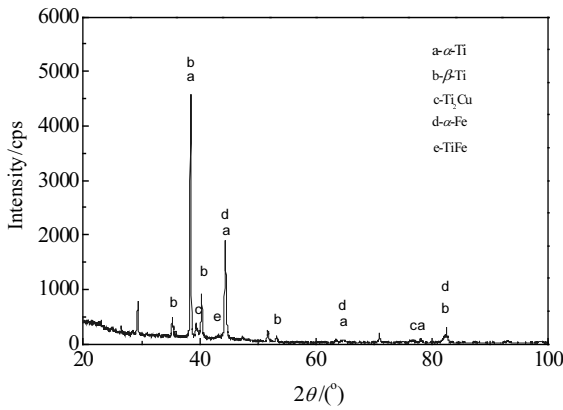


图 6 Ti 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头 XRD 图谱

Fig.6 XRD pattern of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joint by Ti-based brazing filler metal (Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni)

表 5 两种钎料的搭接接头抗剪切强度

Table 5 Shear strength of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joints by both brazing filler metals

Brazing filler metals	Shear strength/MPa	Average shear strength/MPa
Ag based	128.42 130.84 117.30	125.52
Ti based	42.80 39.20 50.93	44.31

分析结果,可以确定区域 L 为 Ag(s,s)+Ti-Cu 系化合物组成的钎缝区。图 8b 表明,断口区域 M 含有大量的解理小断面和微裂纹,呈现准解理断裂特征,对化学成分进行分析,主要为 Ti 和 Cu 元素,结合显微组织分析结果,可以确定该区域为 TC4 侧 Ti-Cu 系化合物层。

Ti 基钎料钎焊的 TC4/30CrMnSiNi2A 接头抗剪切强度均值为 44.31 MPa。Ti 基钎料 TC4 合金侧剪切断口 SEM 照片如图 9 所示,呈现出脆性断裂特征。图 9 中所示断面位置主要化学成分(质量分数)为:36.7% Zr, 28.4% Ti, 20.3% Cu, 8.7% Ni, 4.3% Fe 和 1.5% Al,结合钎焊接头显微组织分析,该处为 Ti 基钎料凝固区。

对比两种钎料钎焊接头剪切强度测试结果可以看出,虽然两种接头剪切力学性能试样均断裂于钎缝处,但 Ag 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头的抗剪切强度明显优于 Ti 基钎料钎焊接头强度值。主要原因在

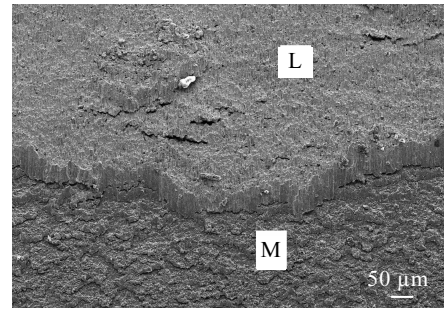


图 7 Ag 基钎料 TC4 合金侧剪切断口

Fig.7 Shear test fracture of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joint by Ag-based brazing filler metal (Ag-28Cu)

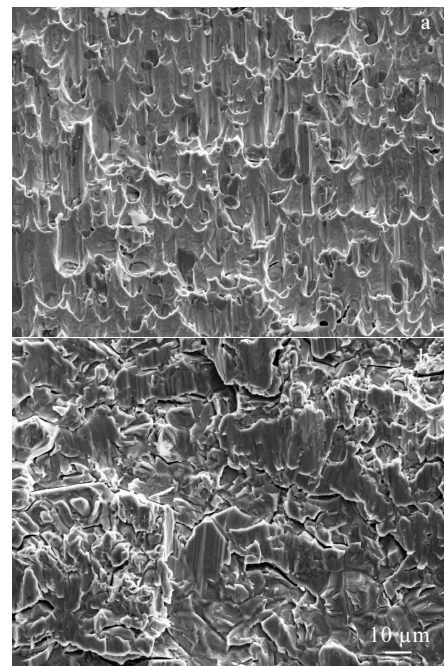


图 8 图 7 中 L、M 放大形貌

Fig.8 Magnification of region L (a) and region M (b) in Fig.7

表 6 图 7 中 Ag 基钎料 TC4 合金侧剪切断口不同区域元素成分

Table 6 Chemical composition at different regions of TC4/30CrMnSiNi2A shear fracture by Ag-based brazing filler metal in Fig.7 (wt%)

Region	Ti	Al	V	Ag	Cu	Possible phase
L	0	94.55	0	0	5.45	Ag(s,s)
M	54.70	2.59	0	3.5	39.21	Ti-Cu

于两种钎料钎缝显微组织不同。Ag 基钎缝主要由 Ag(s,s)+Ti-Cu 系化合物组成, 由图 10a 显微硬度测试结果可以看出, Ag 基钎缝的硬度较低, 尤其是 Ag 固溶体的存在, 钎缝具有一定的韧性, 剪切断口呈现韧性断裂特征。而 Ti 基钎缝的硬度值较高(图 10b), 在剪切载荷作用下, 易发生脆性断裂, 承载能力较差。综合对比两种钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头钎缝界面组织和接头力学性能, 与 Ti 基钎料相比, Ag 基钎料适用于 TC4 与 30CrMnSiNi2A 异种材料的连接。

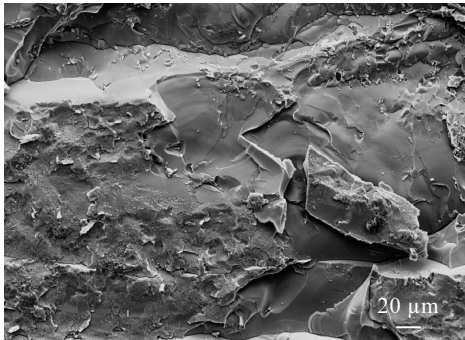


图9 Ti 基钎料 TC4 合金侧剪切断口

Fig.9 Shear test fracture of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joint by Ti-based brazing filler metal (Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni)

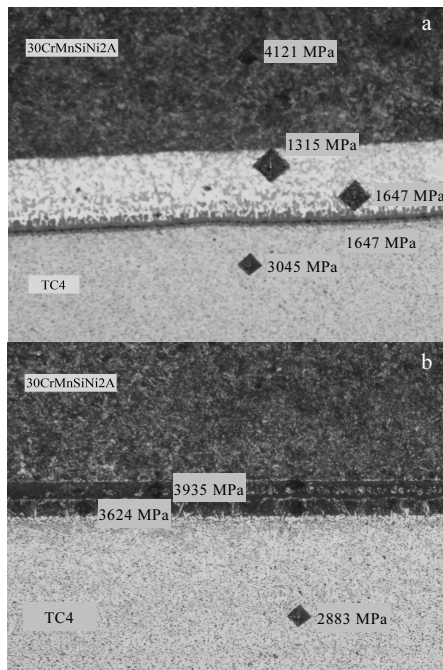


图10 TC4/30CrMnSiNi2A 钎焊接头不同位置显微硬度

Fig.10 Microhardness of TC4/30CrMnSiNi2A brazed joints by Ag-based brazing filler metal (a) and Ti-based brazing filler metal (b)

3 结论

1) Ag 基钎料钎焊 TC4 与 30CrMnSiNi2A 异种材料时, 钎缝界面组织为 Ag(s,s)+Ti-Cu 系化合物组成; 因 Ag 固溶体的存在, 钎缝具有一定的韧性, 接头抗剪切强度较高, 剪切断口呈现韧性断裂特征。

2) Ti 基钎料钎焊 TC4 与 30CrMnSiNi2A 异种材料时, 钎缝界面组织为 Ti-Zr 固溶体+未完全反应凝固钎料, 钎缝显微硬度较高, 接头抗剪切强度较低, 呈现出脆性断裂特征。

3) Ag 基钎料 TC4/30CrMnSiNi2A 异种材料钎焊接头力学性能明显优于 Ti 基钎料结果, 在钎焊温度 830 °C, 保温时间 15 min 时, 抗剪切强度为 125.52 MPa。

参考文献 References

- [1] Leyens C, Peters M. *Titanium and Titanium Alloy*[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- [2] Xie Yonghui(谢永辉). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014
- [3] Feng Jicai(冯吉才), Li Zhuoran(李卓然), He Peng(何鹏) et al. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(1): 162
- [4] Feng Jicai(冯吉才), Wang Ting(王廷), Zhang Binggang(张秉刚) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2009, 30(10): 108
- [5] Shanmugarajan B, Padmanabham G. *Optics and Lasers in Engineering*[J], 2012, 50: 1621
- [6] Wang T, Zhang B G, Chen G Q et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(10): 1829
- [7] Tomashchuk I, Sallamand P, Andrzejewski H et al. *Intermetallics*[J], 2011(19): 1466
- [8] Shen Ronglu(孙荣禄), Zhang Jiuhai(张九海). *Aerospace Materials and Technology*(宇航材料工艺)[J], 1997, 2: 7
- [9] Lee M K, Lee J G, Choi Y H et al. *Materials Letters*[J], 2010, 64: 1105
- [10] Atasoya E, Kahramanb N. *Materials Characterization*[J], 2008, 59: 1481
- [11] China Aeronautical Materials Handbook Edit Committee(中国航空材料手册编委会). *China Aeronautical Materials Handbook Volume 4* (航空材料手册第四卷)[M]. Beijing: China Standard Publishing Company, 2002: 9
- [12] Liu Qibin(刘其斌), Bai Lifeng(白丽锋). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2009, 36(8): 2182
- [13] Zhuang Mingxiang(庄明祥), Li Xiaoman(李小曼), Xu Mei(徐梅) et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空

制造技术)[J], 2017, 6: 100

[14] Zhang Zhu(张 翥), Wang Qunjiao(王群娇), Mo Wei(莫 畏).

Metallurgy and Heat Treatment of Ti Alloy(钛的金属学和热处理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 87

Microstructure and Mechanical Property of TC4/30CrMnSiNi2A Dissimilar Materials Brazed Joints

Yue Xishan^{1,2}, Xie Zonghong¹, Xu Wenhao¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: TC4 titanium alloy was brazed to 30CrMnSiNi2A ultra-high strength steel by Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni and Ag-Cu28 brazing filler metals separately. Microstructure and mechanical property of the both brazed joints were analyzed comparatively. Results show that Ag-Cu28 brazed interface is composed of Ag(s,s) and intermetallic compounds of Ti-Cu system. Ag-Cu28 brazed joint has relatively high shear strength due to the existence of Ag based solid solution and the shear fracture shows the characteristics of ductile fracture. Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni brazed interface consists of Ti-Zr solid solution and solidified brazing filler metals, which lead to the low shear strength of the brazed joint. The shear fracture of Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni brazed joint shows the characteristics of brittle fracture. Compared with Ti-based brazing filler metal, Ag-based brazing filler metal is suitable for brazing TC4 titanium/30CrMnSiNi2A ultra-high strength steel dissimilar materials. Sound brazed joints with the shear strength of 125.52 MPa can be attained at the brazing temperature of 830 °C with the holding time of 15 min by Ag-Cu28 brazing filler metals.

Key words: TC4 titanium alloy; 30CrMnSiNi2 ultra-high strength steel; brazing; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Yue Xishan, Master, Senior Engineer, School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, E-mail: yuerxs_0@163.com