

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.08

Al-Si-Cu 药芯焊丝空气钎焊铝合金的接头组织与力学性能

王水庆¹, 娄银斌¹, 刘超峰¹, 曹仕琪^{2,3,4}, 李家诚^{2,3,4}, 李华鑫^{2,3,4*},
贺艳明^{2,3,4}, 杨建国^{2,3,4}

1. 浙江新锐焊接科技股份有限公司, 浙江 绍兴 312000
2. 浙江工业大学 化工机械设计研究所, 浙江 杭州 310023
3. 过程装备及其再制造教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310023
4. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310023

摘要: 采用 Al-Si-Cu 药芯焊丝作为钎料, 在空气气氛中对 3003 系铝合金进行钎焊, 通过 X 射线衍射仪、DSC 热分析仪、扫描电子显微镜、能谱仪、硬度仪、剪切实验等手段研究了钎焊温度与保温时间钎焊铝合金接头的微观组织与力学性能。接头微观组织表征结果表明, 接头主要反应形成相有 AlFeMnSi、Al₂Cu、Si 和 Al₂O₃。焊接工艺窗口较窄, 但在 580~600 °C、保温 25~45 min 的工艺窗口下都能实现铝合金的无明显焊接缺陷的良好界面结合。钎焊温度与保温时间主要通过影响钎料在接头中的扩散渗入距离、残余量及相组成来调控接头组织, 进而影响接头强度与硬度。在 590 °C、保温 35 min 的工艺参数下, 获得的接头强度最高为 114.25±14.50 MPa, 对应的焊缝中心硬度约为 200 HV。

关键词: 铝合金; 钎焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0091-07

Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Joints Brazed using Al-Si-Cu Flux-cored Wire in Air

WANG Shuiqing¹, LOU Yinbin¹, LIU Chaofeng¹, CAO Shiqi^{2,3,4}, LI Jiacheng^{2,3,4}, LI Huaxin^{2,3,4*},
HE Yanming^{2,3,4}, YANG Jianguo^{2,3,4}

1. Zhejiang Xinrui Brazing Technology Co., Ltd., Shaoxing 31200, China
2. Institute of Process Equipment and Control Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China
3. Engineering Research Center of Process Equipment and Remanufacturing, Ministry of Education, Hangzhou 310023, China
4. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

Abstract: In this study, 3003 aluminum (Al) alloys were brazed using Al-Si-Cu flux-cored wire in air. The effects of brazing temperature and holding time on the microstructure and mechanical properties of Al brazed joints were investigated by means of X-ray diffractometer, differential scanning calorimeter, scanning electron microscopy, energy spectroscope, hardness test, and shear test. The microstructural characterization indicates that the reaction phases at the joint mainly consisted of AlFeMnSi, Al₂Cu, Si and Al₂O₃. The brazing process window for Al alloys joint was narrow, but a well-bonded interface bonding without obvious welding defects could be achieved at the brazing process of 580-600 °C for 25-45 min. The influences of brazing temperature and holding time on the joint microstructure were mainly by controlling the diffusion distance of filler metal to the base metal, residual filler metal in the joint as well as its phase compositions, further affecting the me-

收稿日期: 2025-03-07 修回日期: 2025-04-08

基金项目: 浙江省“尖兵”科技计划项目(2024C01085)

作者简介: 王水庆(1979—), 男, 硕士, 主要从事金属学及金属工艺研究。

通讯作者: 李华鑫(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事特种连接技术研究。E-mail: hxli2019@zjut.edu.cn。

chanical properties of joints. The highest joint strength of 114.25 ± 14.50 MPa was achieved at the brazing process of 590°C -35 min, and its corresponding joint center hardness was ~ 200 HV.

Keywords: aluminum alloys; brazing; microstructure; mechanical properties

引用格式:王水庆, 娄银斌, 刘超峰, 等. Al-Si-Cu 药芯焊丝空气钎焊铝合金的接头组织与力学性能[J]. 电焊机, 2025, 55(9): 91-97.

Citation: WANG Shuiqing, LOU Yinbin, LIU Chaofeng, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Joints Brazed using Al-Si-Cu Flux-cored Wire in Air[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 91-97.

0 引言

铝合金密度小、强度高, 具有优良的导电、导热性能, 良好的耐蚀性和可焊性等特点, 是一种非常重要且广泛应用的金属材料^[1-8]。然而, 铝合金固有的物理化学性能, 使其焊接过程中容易出现气孔、氧化、热裂纹等问题, 传统上以熔焊为主, 但对焊接技术要求高。钎焊作为铝合金的一种重要焊接方法, 具有焊接变形小、尺寸精度高、生产效率高的特点, 随着新技术、新材料的发现, 铝合金钎焊技术在近几十年也不断发展, 在钎焊方法、钎料、钎剂等方面都有不同的进步^[9-10]。

目前家用制冷电器行业用铝合金管件广泛采用 Zn-Al 系软钎料作为首选钎料。Zn-Al 钎料钎焊的铝合金接头具有塑性优良、接头强度较高等优点, 但是接头耐蚀性能差, 影响产品的使用寿命^[11]。为此, 亟需采用高性能钎料取代传统的 Zn-Al 钎料钎焊以提高接头的耐蚀性能。其中, 基于 Al-Si 共晶钎料发展起来的 Al-Si-Cu 系列钎料, 因其接头强度与耐蚀性能都优于 Zn-Al 钎料^[12-16], 是工业上最具潜力的 Zn-Al 取代钎料。同时, Al-Si-Cu 钎料钎焊已有大量的研究基础^[17-19], 但是其大部分研究都是采用粉末或薄片形式的 Al-Si-Cu 钎料, 对于工业上常用的药芯焊丝状 Al-Si-Cu 钎料钎焊铝合金研究较少。

基于上述论述, 本文选取了 Al-Si-Cu 药芯焊丝钎焊 3003 铝合金, 探究钎焊温度和保温时间对接头微观组织和力学性能的影响。

1 试验材料、设备及方法

试验所用母材为厚 4 mm 的 3003 系 Al-Mn 铝合金板, 钎料为 Al-Si-Cu (Cu 含量 ≤ 5 wt.%) 药芯焊

丝 (内含钎剂, 钎剂为氟铝酸钾), 直径 2 mm, 通过压片机加工成 0.5 mm 厚的薄片。采用电火花线切割将母材加工成尺寸 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 及 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的方块, 随后经打磨、抛光、清洗后用于钎焊。钎焊过程中, 在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 样品上放置药芯焊丝, 随后把 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 样品堆叠在其正中心, 形成母材/药芯焊丝/母材三明治结构, 如图 1 所示。采用马弗炉 (合肥科晶 KSL-1700X-A47) 对试样进行空气钎焊, 焊接温度: $580^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$; 保温时间: 25~45 min; 升温速率: $10^\circ\text{C}/\text{min}$, 焊后随炉冷却。

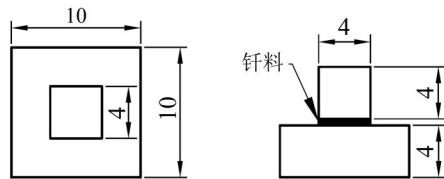


图 1 样品尺寸及钎焊示意

Fig. 1 Schematic diagram of sample size and brazing

采用 X 射线衍射仪 (X'Pert PRO, PANalytical, Netherlands) 对钎料进行物相分析。采用差示扫描量热仪 DSC (北京恒久 HCT-1) 对钎料熔点进行测定。焊后样品经过加工切割、打磨、抛光后用于接头显微组织分析。采用配备能谱仪 (EDS) 的扫描电子显微镜 (蔡司 Gemini 500) 对接头进行微观组织与成分分析。采用维氏硬度计 (上海励盾 MHVS-1000BZ) 测试接头硬度, 硬度测试载荷为 50 gf, 保持时间为 10 s。将试样放入自制的剪切模具中, 使用万能试验机 (MTS CMT4204) 进行剪切试验, 加载移动速度设定为 $0.5\text{ mm}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

图 2 为 Al-Si-Cu 钎料的 XRD 图谱和 DSC 曲线。XRD 图谱显示 Al-Si-Cu 钎料只含有 Al、Si 两

相,与 Al-Si 二元相图相对应^[20]。结果表明,Al-Si-Cu 钎料中 Cu 含量较低,形成的 Al-Cu 金属间化合物含量低于 XRD 检测极限。DSC 图谱显示,Al-Si-Cu 钎料的熔化起始点为 578.9 °C,熔化峰值为 588.9 °C。结果表明,Al-Si-Cu 钎料的最低钎焊温度 ≥ 580 °C,考虑到温度过高会使母材熔化,钎焊温

度区间设置为 580~600 °C。图 3 为不同温度下 Al-Si-Cu 钎料在 3003 铝合金母材上的润湿性。在 580~600 °C 范围内,钎料都具有较为良好的润湿性能,铺展后都有明显的润湿环出现。总体上钎料润湿性能随温度呈先升后降的趋势,钎料在 590 °C 时铺展面积最大,在 600 °C 时明显减小。

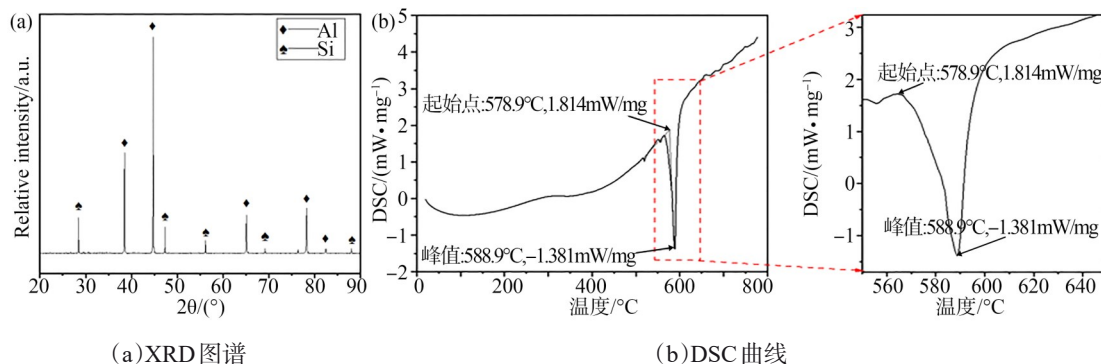


图 2 钎料的 XRD 图谱与 DSC 曲线

Fig. 2 XRD pattern and DSC curve of brazing metal

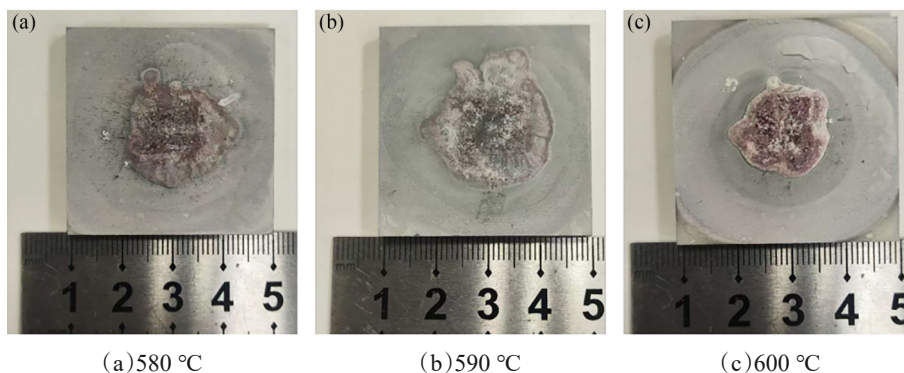


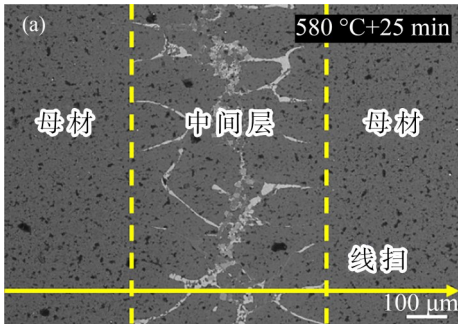
图 3 不同温度下钎料的铺展形貌

Fig. 3 Spreading morphology of brazing metal at different temperatures

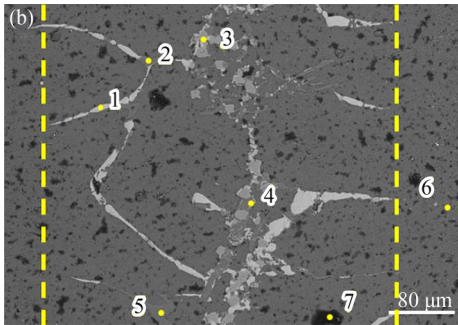
图 4 为 Al-Si-Cu 药芯焊丝空气钎焊铝合金的典型接头组织形貌与线扫描元素分析。接头界面是均匀、等厚度的钎料熔化后凝固形成的中间层,可见钎料灰色、白色相呈树枝状向母材扩散渗入。界面整体结合优良,无裂纹、未焊合区域、孔洞等明显焊接缺陷。接头主要由基底灰色相、浅灰色块状相、条状白色相和长条状深灰色相组成。EDS 线扫描显示,不同衬度区域元素分布有明显波动,表明不同物相的化学成分组成不同。EDS 点能谱分析表明,灰黑色基底相、浅灰色块状相、条状白色相和长条状深灰色相、黑色块状相分别为铝合金母材、AlFeMnSi、Al₂Cu、Si 和 Al₂O₃ (见表 1)。其中,Al-FeMnSi 中的 Fe 和 Mn 元素来源于母材。Al₂O₃ 可能

来源于母材焊接过程中的少量氧化。Si 和 Al₂Cu 为 Al-Si-Cu 钎焊铝合金中形成的典型物相,与其他文献类似^[21]。

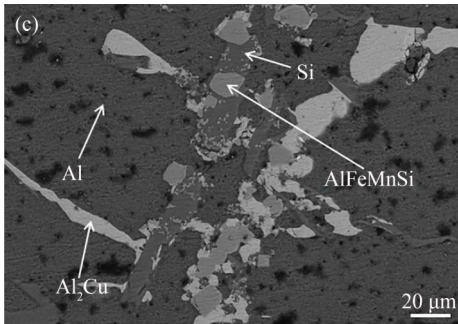
图 5 为在保温时间固定为 25 min 的条件下,不同钎焊温度下接头的显微组织形貌。由图可知,在 580~600 °C 的温度区间内,所有接头均实现了良好的冶金结合,未观察到明显的未焊合区域、裂纹、孔洞等焊接缺陷。随着钎焊温度的升高,钎料含量(接头中灰色、白色相)明显减少,钎料向两侧母材的扩散与渗入距离明显增加。这一现象主要归因于温度升高加速了钎料的挥发与促进了液相钎料向母材的扩散与渗入。在固定钎焊温度为 590 °C 时,保温时间对接头组织的影响规律如图 6 所示。



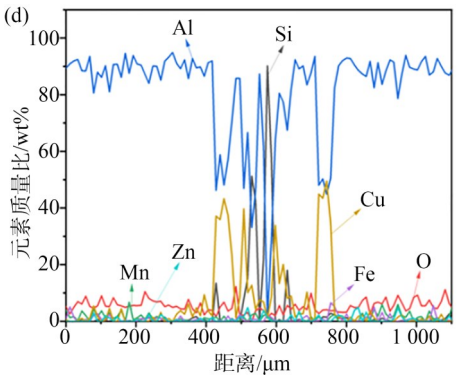
(a)低倍数下接头组织



(b)中倍数下接头组织



(c)高倍数下接头组织



(d)线扫描元素分布

图4 接头的典型形貌及EDS能谱分析

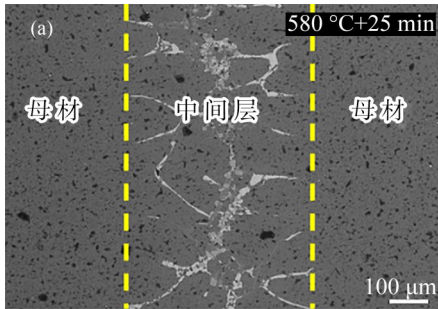
Fig. 4 Typical morphology and EDS analysis of the joint

与不同钎焊温度下获得的接头组织类似,所有接头均呈现良好的界面结合。随着保温时间的延长,钎料向母材的扩散渗入距离呈先减少后趋于相对平

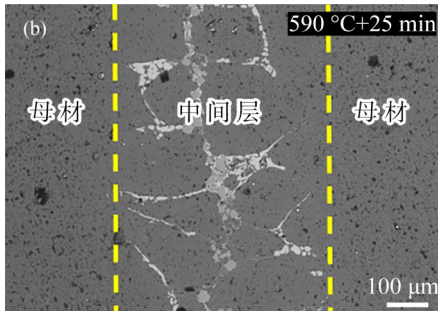
表1 图3中标志点的化学成分(原子分数,%)

Table 1 Chemical compositions of marked points in Fig. 3(at. %)

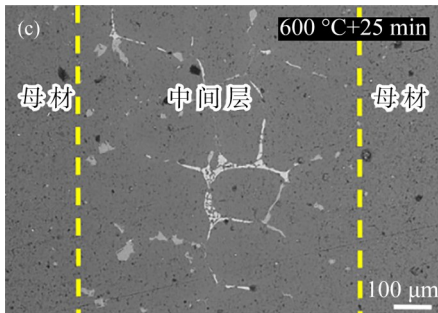
点	O	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn	可能相
1	6.44	56.91	0.45	0	0.07	35.80	0.33	Al ₂ Cu
2	3.74	1.93	93.57	0.14	0.11	0.48	0.04	Si
3	0	64.09	12.81	14.54	6.50	2.06	0	AlFeMnSi
4	1.68	2.50	95.27	0.11	0	0.44	0	Si
5	1.99	3.85	93.48	0.01	0.14	0.39	0.14	Si
6	7.20	92.25	0	0.11	0	0.44	0	Al
7	30.13	65.81	1.39	0.15	0.07	1.54	0.89	Al ₂ O ₃



(a)580 °C



(b)590 °C



(c)600 °C

图5 保温时间为25 min,不同温度下的接头形貌

Fig. 5 Morphology of the joint at different temperatures for 25 min

稳,钎料含量略有下降而后变化不明显。结果表明,钎焊温度与保温时间主要通过调控钎料向母材的扩散渗入距离、中间层及其相组成来改变接头组织形貌。

钎焊温度对接头剪切强度及显微硬度的影响如图7a、7b所示。在相同保温时间下(25 min),接头

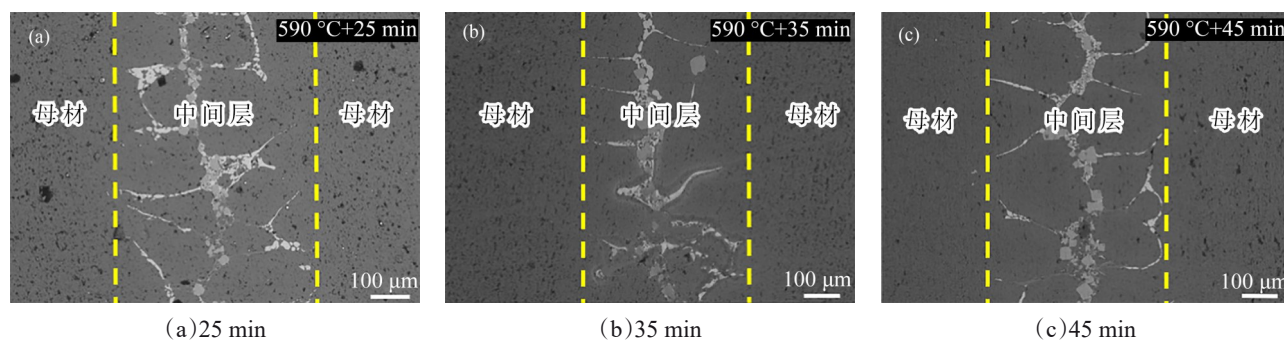


图6 钎焊温度为590 °C,不同保温时间下的接头形貌

Fig. 6 The morphology of the joint at 590 °C for different holding times

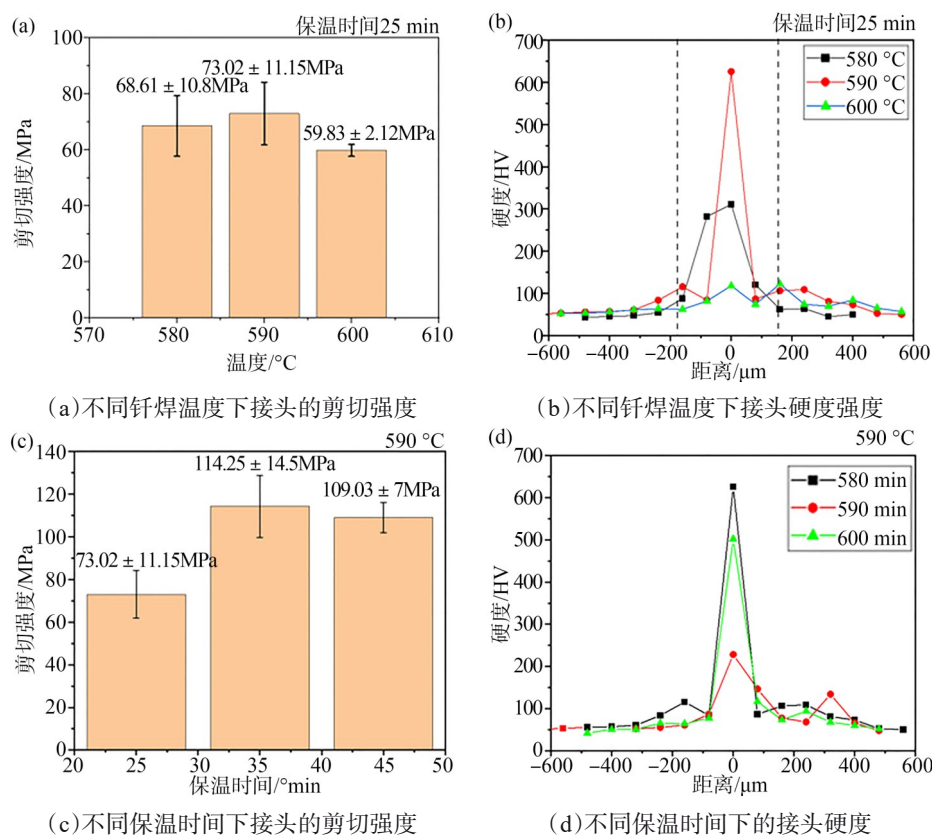


图7 钎焊温度与保温时间对接头剪切强度及硬度的影响

Fig. 7 The influences of brazing temperature and holding time on the shear strength and hardness of the joint

剪切强度随钎焊温度的升高呈先增后减的趋势,并在590 °C时达到峰值 73.02 ± 11.15 MPa(见图7a);接头硬度在焊缝中心最高,随后向两边母材逐渐降低,这是由于焊缝中钎料元素形成的物相(如:Si和 Al_2Cu)的硬度远高于3003母材(约50 HV)。在加热过程中,钎料元素往两边母材方向扩散,提高了母材的硬度,但是随着距离增加,扩散效果随之降低,硬度也相应下降。钎缝中心的显微硬度随温度的变化趋势与剪切强度一致,同样在590 °C获得最

大值(约600 HV),见图7b。钎缝中心硬度的变化趋势主要与中间层厚度变化成正比,与接头组织和接头硬度的变化趋势一致(见图5、图7)。

当钎焊温度固定为590 °C时,保温时间对接头剪切强度及显微硬度的影响如图7c、7d所示。接头的剪切强度随保温时间的延长同样呈现出先升高后略有降低的规律,在保温35 min时达到最大值 114.25 ± 14.5 MPa(见图7c);然而,钎缝中心的显微硬度变化趋势则与剪切强度变化不一致,表现为先降

低后升高的趋势:在 25 min 硬度最高(约 600 HV);在 35 min 时降至最低(约 200 HV),而在 45 min 时又回升至约 500 HV(见图 7d),这主要因为钎缝中心的 Si、 Al_2Cu 两相的含量存在差异。保温时间的延长促进了钎料和母材元素之间能进行充分扩散。在中间层厚度较小的情况下,钎料含量低,由于元素的扩散,硬度较高的 Al_2Cu 相难以在焊缝中心偏聚析出,从而降低了该区域的硬度。虽然脆性 Al_2Cu 金属间化合物较 Si 具有更高硬度,但是该相含量过高时会导致接头强度下降^[22],因此在中间层厚度相似的情况下(保温时间 25 min 和 45 min 的接头),钎缝中心硬度较低的接头具有较高的接头剪切强度。

3 结论

采用 Al-Si-Cu 药芯焊丝空气钎焊 3003 铝合金,研究了钎焊温度和保温时间对接头微观组织和力学性能的影响。主要结论如下:

(1) 接头主要反应形成相有 AlFeMnSi 、 Al_2Cu 、Si 和 Al_2O_3 。

(2) 在 580~600 °C、保温 25~45 min 较小的工艺窗口下均能实现 3003 铝合金的无明显焊接缺陷的良好界面结合。

(3) 钎焊温度与保温时间主要通过影响钎料在接头中的扩散渗入距离、残余量及相组成来调控接头组织。

(4) 接头剪切强度随着钎焊温度的升高先增后减,随着保温时间的延长先增后略有减少,在 590 °C、35 min 的工艺下,接头获得最佳的力学性能,剪切强度为 114.25 ± 14.50 MPa,焊缝中心硬度约为 200 HV。

参考文献:

- [1] 杜行,张乾宁,胡伯毅,等. 6063 铝合金天线喇叭真空钎焊工艺研究[J]. 航空精密制造技术,2023,59(06): 55-57.
- DU H, ZHANG Q N, HU B Y, et al. Research on Vacuum Brazing Process for Horn Structure in Antenna of 6063 Aluminium Alloy[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2023, 59(06): 55-57.
- [2] 杨怀德,肖宁,贾世童,等. 铝合金错位翅片型水冷散

热器真空钎焊工艺[J]. 电焊机, 2023, 53(10): 120-124+130.

YANG H D, XIAO N, JIA S T, et al. Vacuum Brazing of Al Alloy Staggered Finned Water-cooled Radiator [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53 (10): 120-124+130.

- [3] 朱培兰,朱宏. 真空钎焊技术在机载雷达天馈线焊接生产中的应用[J]. 现代雷达, 1998(02): 96-100.
- ZHU P L, ZHU H. The Technology of Vacuum Brazing Applying to the Product of Airborne Radar Antennas and Feeds[J]. Modern Radar, 1998(02): 96-100.
- [4] Mirski Z, Pabian J, Wojdat T. Dissolution and erosion phenomena in the brazing of aluminum heat exchangers [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2021, 66 (4): 1131-1140.
- [5] 李敦运. 汽车用铝制热交换器钎焊工艺[C]//安徽省机械工程学会焊接专委会,安徽省职工焊接协会,安徽省焊接技术交流会论文集,2006.
- [6] 卢清爽,杨杰寅,秦志刚. 汽车车身制造中铝合金连接技术研究[J]. 汽车文摘, 2024(01): 57-62.
- LU Q S, YANG J Y, QIN Z G. Research on Aluminum Alloy Joining Technologies in Automobile Manufacturing[J]. Automotive Digest, 2024(01): 57-62.
- [7] 王学成. 铝合金材料在现代汽车轻量化制造中的应用[J]. 汽车测试报告, 2023(08): 86-88.
- WANG X C. The application of aluminum alloy materials in lightweight manufacturing of modern automobiles [J]. Car Test Report, 2023(08): 86-88.
- [8] 易鹏. 铝合金在汽车轻量化生产中的应用[J]. 汽车测试报告, 2023(13): 101-103.
- YI P. The application of aluminum alloy in lightweight production of automobiles [J]. Car Test Report, 2023 (13): 101-103.
- [9] 李龙,陈鑫,宋友宝,等. 铝合金钎焊技术研究进展及展望[J]. 焊接技术, 2017, 46(06): 1-9.
- LI L, CHEN X, SONG Y B, et al. Research progress and prospects of brazing technology for aluminum alloys[J]. Welding Technology, 2017, 46(06): 1-9.
- [10] 钱乙余,吴希孟. 铝钎焊技术在我国的发展与应用[J]. 焊接, 1984(03): 1-5.
- QIAN Y Y, WU X M. The development and application of aluminum brazing technology in China [J]. Welding & Joining, 1984(03): 1-5.
- [11] 陈晨,张亮,王曦,等. Zn-Al 系钎焊材料的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(22): 142-154.
- CHEN C, ZHANG L, WANG X, et al. Research Prog-

- ress of Zn-Al Brazing Materials[J]. Materials Review, 2023, 37(22): 142-154.
- [12] 赵娟,李辰,仲莹莹,等. Al-Si-Cu 三元共晶合金组织及性能影响因素研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(02): 75-80.
- ZHAO J, LI C, ZHONG Y Y. Influencing Factors on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu Ternary Eutectic Alloy [J]. Foundry, 2021, 42(02): 75-80.
- [13] Niu Z W, Huang J H, Chen S H, et al. Effects of germanium additions on microstructures and properties of Al-Si filler metals for brazing aluminum [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 775-782.
- [14] 廖云飞,杨成刚,黄忠宝,等. Cu、Zn、La 对 Al-Si 基钎料钎焊性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21): 166-168+172.
- LIAO Y F, YANG C G, HUANG B Z, et al. Effect of Cu, Zn and La on Brazing Performance of Al-Si Filler Metal [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(21): 166-168+172.
- [15] 韩磊,孙玉萍. 低温耐蚀铝合金钎料的研究现状[J]. 山西冶金, 2022, 45(06): 64-66+69.
- HAN L, SUN Y P. Research Status of Low Temperature Corrosion Resistant Aluminum Alloy Solder [J]. Shanxi Metallurgy, 2022, 45(06): 64-66+69.
- [16] Ye Z, Huang J H, Yang H, et al. Effect of Si addition on corrosion behaviors of Cu/Al dissimilar joint brazed with novel Zn-Al-xSi filler metals [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(6): 5171-5179.
- [17] Dai W, Xue S B, Ji F, et al. Brazing 6061 aluminum alloy with Al-Si-Zn filler metals containing Sr [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2013, 20(4): 365-370.
- [18] 李小强,肖晴,李力,等. Al-Si-Cu-Zn 钎料钎焊 3003 铝合金的接头组织及力学性能[J]. 材料工程, 2016, 44(09): 32-37.
- LI X Q, XIAO Q, LI L, et al. Microstructure and Mechanical Property of 3003 Aluminum Alloy Joint Brazed with Al-Si-Cu-Zn Filler Metal [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(09): 32-37.
- [19] Tsao L C, Weng W P, Cheng M D, et al. Brazeability of a 3003 Aluminum alloy with Al-Si-Cu-based filler metals [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(4): 360-364.
- [20] 李培. Al 基复合钎料的制备与性能研究[D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2010.
- LI P. Study on Preparation and Characteristic of Aluminum Base Composite Filler Metal [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2010.
- [21] Li H X, Feng Y D, Shen W J, et al. Microstructure and mechanical properties of Cu/Al joints brazed using (Cu, Ni, Zr, Er)-modified Al-Si filler alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(11): 3623-3634.
- [22] Chang S Y, Tsao L C, Li T Y, et al. Joining 6061 aluminum alloy with Al-Si-Cu filler metals [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 488(1): 174-180.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>