

Ag-Cu-Ti 钎焊蓝宝石/中间层/TC4 合金接头剪切性能

刘全明¹, 肖俊峰¹, 唐文书¹, 高松¹, 孙华为², 龙伟民²

(1. 西安热工研究院有限公司, 西安, 710032; 2. 郑州机械研究所有限公司, 郑州, 450001)

摘要: 陶瓷/金属钎焊连接面临钎料对陶瓷表面润湿性差和钎焊接头残余应力难缓解等问题, 文中分析了 Ag-Cu-Ti 系活性钎料和中间层特性对蓝宝石/TC4 合金钎焊接头剪切性能的影响. 结果表明, 随着 Ti 元素含量增加, Ag-Cu-Ti 系钎料熔化温度升高, 固液相线温度区间相同. Ag-Cu-3Ti 钎料熔化物相主要包括银基、钛基和晶体相等, 晶体相主要包括 CuTi, Cu₃Ti, CuO, TiO, Cu₂O, Ti₂O 和 TiAg 等; 蓝宝石与钎料之间形成致密冶金反应层, 其组织主要由银基、铜基固溶体和多种稳定金属间化合物组成. 采用 Ag-Cu-3Ti 钎料在 870 °C/20 min 钎焊工艺下, 添加 0.2 mm 4J29 片、铜片、钼片、钛纤维多孔材料、2 mm 铜和钼片作中间层, 钎焊蓝宝石/TC4 合金接头剪切强度分别为 26.74 MPa, 15.20 MPa, 15.78 MPa, 3.11 MPa, 23.73 MPa 和 30.49 MPa, 蓝宝石/2 mm 钼片/TC4 合金钎焊接头剪切强度较理想.

创新点: (1) 表征了 Ag-Cu-Ti 系钎料的熔化特性、微观组织和物相组成.

(2) 研究了 Ag-Cu-3Ti 钎料对蓝宝石和 TC4 合金表面润湿性.

(3) 分析了中间层对蓝宝石/TC4 合金钎焊接头剪切强度的影响.

关键词: 蓝宝石; TC4 合金; Ag-Cu-Ti 钎料; 中间层; 剪切强度

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240826001

Shear properties of the sapphire/ interlayer / TC4 alloy brazed joints using Ag-Cu-Ti filler metals

LIU Quanming¹, XIAO Junfeng¹, TANG Wenshu¹, GAO Song¹, SUN Huawei², LONG Weimin²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, 710032, China; 2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, 450001, China)

Abstract: Ceramic/metal brazing connection faces problems such as poor wetting of the ceramic surface by brazing metal and difficulty in alleviating the residual stress of joints. The effects of Ag-Cu-Ti active filler metal and the interlayer on the shear properties of the sapphire/TC4 alloy brazed joints were studied. The results show that with the increase of Ti elements content, the melting temperature of Ag-Cu-Ti filler metals increased slightly, the solid-liquid temperature range remained unchanged. The melted phases of Ag-Cu-3Ti brazing metal mainly included Ag base phase, Ti base phase, crystal phase, etc., the crystal phase included CuTi, Cu₃Ti, CuO, TiO, Cu₂O, Ti₂O, TiAg, etc. A dense metallurgical reaction layer formed between the sapphire and filler metals, its structure was mainly composed of Ag based, Cu based solid solutions and various stable intermetallic compounds. The sapphire/TC4 alloy brazing was completed at 870 °C/20 min using Ag-Cu-3Ti filler metal and adding 0.2 mm 4J29 sheet, Cu sheet, Mo sheet, titanium fiber porous material, and 2 mm Cu and Mo sheet as the interlayer. The shear strengths of brazed sapphire/TC4 alloy joints were 26.74 MPa, 15.20 MPa, 15.78 MPa, 3.11 MPa, 23.73 MPa, and 30.49 MPa, respectively. The shear strength of brazed sapphire/2 mm Mo sheet/TC4 alloy joints was ideal.

Highlights: (1) The melting characteristics, microstructure, and phase composition of Ag-Cu-Ti brazing filler metals were characterized.

(2) The wettability of Ag-Cu-3Ti brazing filler metals on the surface of the sapphire and TC4 alloy was studied.

(3) The effects of the interlayer on the shear strength of the sapphire/TC4 alloy brazed joints were analyzed.

收稿日期: 2024 - 08 - 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52304385); 陕西省重点研发计划 (2024GX-YBXM-214); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2023-JC-QN-0478); 中国华能集团科技项目 (HNKJ18-H11)

Key words: sapphire; TC4 alloy; Ag-Cu-Ti filler metal; interlayer; shear strength

0 序 言

为保护新型导弹内部探测及光电系统,需在其头部安装最优光学窗口^[1],窗口材料需拥有良好光学、机械、物理、化学等综合性能^[2].蓝宝石(单晶 Al_2O_3 陶瓷)具备高熔点、高强度、高硬度、抗热冲击、低散射系数等优势,成为制造透波、光电窗口和红外整流罩的理想材料^[3],但蓝宝石本身脆性高、韧性差,推广应用受制于尺寸和形状^[4].TC4合金凭借强度高、比强大、抗腐蚀、耐高温和冲击韧性好等优异特性^[5],成为制造金属弹体的理想材料,蓝宝石与金属弹体或法兰连接成为当前研究热点之一.针对此结构,国内多用胶接工艺和机械连接,但粘接剂易软化且不宜长期放置,机械连接承载能力低.国外已普遍采用钎焊技术,构件服役性能大幅提升,但关键钎焊技术对国内严控.钎焊技术是实现陶瓷/金属连接的重要手段^[6-10],陶瓷/金属钎焊连接面临钎料对陶瓷表面润湿性差和钎焊接头残余应力难缓解两大问题,优化活性钎料和引入中间层可提升陶瓷与金属钎焊可靠性.高活性钎料及其钎焊技术成为推进陶瓷/金属构件工程应用的重要前提.文中拟对 Ag-Cu-Ti 系钎料成分进行优化设计,引入多种中间层材料钎焊蓝宝石/TC4 合金,分析

Ag-Cu-Ti 系钎料熔化特性、微观组织、物相组成及其对蓝宝石和 TC4 合金表面的润湿性,研究钎焊蓝宝石界面组织、中间层材料、厚度对蓝宝石/TC4 合金钎焊接头剪切性能的影响.

1 试验方法

试验用热轧态 TC4 合金由西北有色金属研究院提供,经金相法测得 β 相变温度约为 998 °C,其名义成分为 Ti-6Al-4V,合金板原始尺寸为 200 mm × 200 mm × 10 mm,采用线切割沿板纵向将其切成数块尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm 正方块.陶瓷母材为蓝宝石(99.99% Al_2O_3),由东海县晶纳晶体科技有限公司生产,尺寸为 6 mm × 6 mm × 4 mm 正方块和 10 mm × 10 mm × 1 mm 正方块,连接面为 c(0001),表 1 为蓝宝石主要物理性质^[11],蓝宝石上下表面抛光处理为光滑镜面,表面粗糙度约为 6 nm. TC4 合金和蓝宝石正方块供钎焊接头剪切性能测试用,蓝宝石正方块供 Ag-Cu-Ti 系钎料润湿性能测试用.选用中间层材料包括 Cu, Mo, 4J29 (Kovar, 可伐合金)片和钛纤维多孔材料, Cu 和 Mo 片厚度为 0.2 mm 和 2 mm, 4J29 片和多孔材料厚度为 0.2 mm.

表 1 蓝宝石主要物理性质
Table 1 Main physical properties of the sapphire

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	熔点 $T_{\text{m.p}}/^{\circ}\text{C}$	导热系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$	杨氏模量 E/GPa	比热 $c/(\text{g}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{K}$
3.9	2050	0.07	350 ~ 420	0.1	7.6

钎料选用自制 Ag-Cu-Ti 系钎料膏,钎料膏以 Ag72-Cu28 共晶合金为基体,加入定量 TiH_2 粉末,机械混合 89%(质量分数)金属粉末和 11% 粘结剂调制,粘结剂最佳配方为 61% 溶剂(松油醇:二乙二醇丁醚 = 3:2)、12% 聚乙二醇 600、5% 硬脂酸、6% 聚酰胺蜡、11% 乙二酸和 5% 石蜡油^[12]. Ag-Cu-Ti 系钎料中最佳 Ti 元素含量控制在 1% ~ 5%^[13],试验选择 Ti 元素含量依次为 3%, 5% 和 7%,钎料名义成分为 72Ag-28Cu-3TiH₂, 72Ag-28Cu-5TiH₂, 72Ag-28Cu-7TiH₂. Sn 元素可降低钎料熔点, 72Ag-28Cu-10Sn-2Ti 钎料液相线温度仅为

750 °C^[14],另外配制了 72Ag-28Cu-10Sn-2TiH₂ 钎料,以尝试降低蓝宝石/TC4 合金钎焊温度.

待钎焊试样装配具体如下:蓝宝石块和 TC4 合金块上下叠放,中间填入 $0.05\text{ g} \pm 0.001\text{ g}$ 优化 Ag-Cu-Ti 系钎料膏(剪切试样);蓝宝石板和 TC4 合金块表面分别放 $0.2\text{ g} \pm 0.001\text{ g}$ 优化 Ag-Cu-Ti 系钎料膏(润湿试样);将装配试样移至高温真空钎焊炉(工作真空度为 $2.2 \times 10^{-3}\text{ Pa}$)加热.钎焊工艺具体为 15 °C/min 升温至 300 °C,保温 30 min,确保粘结剂充分挥发;10 °C/min 升温至 750 °C,5 °C/min 升温至钎焊温度(850 ~ 950 °C),保温 5 ~ 35 min;待

钎焊完成, 5 °C/min 降温至 300 °C, 随炉冷却至室温取样.

采用热分析仪测定 Ag-Cu-Ti 系钎料固液相线温度, 按照国家标准 GB/T 11364—2008《钎料润湿性试验方法》^[15] 完成钎料润湿性测试, 采用 X 射线衍射仪分析熔化后钎料的物相成分, 由扫描电镜及配带的能谱仪 (EDS) 观察钎焊接头界面组织及分析微区成分, 按照国家标准 GB/T 11363—2008《钎焊接头强度试验方法》^[16] 完成钎焊接头剪切试验, 压头移动速度 0.5 mm/s, 钎焊接头剪切强度结果为 3 个有效试验值的平均值.

2 试验结果及分析

2.1 Ag-Cu-Ti 系钎料熔化特性

图 1 为 Ag-Cu-Ti 系钎料 DTA 曲线, 曲线均存在吸热峰和放热峰, 表明钎料熔化过程中既有钎料吸热熔化又有物相分解放热. 钎料熔化后生成的某一些物相随 Ti 元素含量增加发生分解越明显, 导致放热峰越清晰. 表 2 为 Ag-Cu-Ti 系钎料固液相线温度测试结果, Ag-Cu-3Ti, Ag-Cu-5Ti 和 Ag-Cu-7Ti 钎料熔化温度区间分别为 776.37 ~ 784.76 °C, 776.64 ~ 785.10 °C 和 776.85 ~ 785.35 °C, 固液相线温度差值分别为 8.39 °C, 8.46 °C 和 8.5 °C, Ag-Cu-7Ti 钎料液相线温度最高, Ag-Cu-3Ti 钎料液相线温度最低. 随着 Ti 元素含量增加, Ag-Cu-Ti 钎料熔化温度升高, 固液相线温度差值相同, 熔化温度升高不利于钎焊, 选择 Ag-Cu-3Ti 钎料作为蓝宝石/TC4 合金钎焊试验用钎料. Ag-Cu-Sn-Ti 钎料 DTA 曲线无明显吸热峰和放热峰, 72Ag-28Cu-10Sn-3TiH₂ 钎料熔化过程中 DTA 曲线紊乱, 钎料

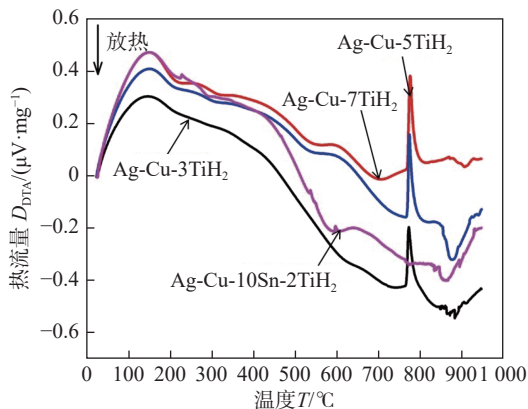


图 1 Ag-Cu-Ti 系钎料 DTA 曲线
Fig. 1 DTA curves of Ag-Cu-Ti filler metals

未完全熔化, Ag-Cu-Ti 系钎料中简单混入锡粉无法获得低熔点钎料.

表 2 Ag-Cu-Ti 系钎料固液相线温度测试结果
Table 2 Solid-liquidus temperature test results of Ag-Cu-Ti brazing metals

编号	钎料组成 w (%)	固相线温度 $T_s/^\circ\text{C}$	液相线温度 $T_l/^\circ\text{C}$	温度差 $\Delta T/^\circ\text{C}$
1	72Ag-28Cu-3TiH ₂	776.37	784.76	8.39
2	72Ag-28Cu-5TiH ₂	776.64	785.10	8.46
3	72Ag-28Cu-7TiH ₂	776.85	785.35	8.50
4	72Ag-28Cu-10Sn-2TiH ₂	—	—	—

2.2 Ag-Cu-3Ti 钎料熔化后微观组织

图 2 为 Ag-Cu-3Ti 钎料熔化后 SEM + EDS 测试结果, 表 3 为图 2 中点和面的化学成分. 钎料组织由白亮色基体和灰、黑色不规则状相组成, 点 1 EDS 分析表明, 白亮色相为银基相, 元素百分比与名义成分相差较大, Ag 元素含量增加、Cu 元素含量明显下降, Ag, Cu 和 Ti 元素在钎料熔炼过程发生重新再分布; 点 2 EDS 分析表明, 灰色相为高 Cu 和 Ti 相, 原子比接近 1:1, 推测为 CuTi 相; 点 3 EDS 分析表明, 黑色相为高 Cu 和 Ti 相, 无 Ag 元素, 原子比接近 3:1, 推测为 Cu₃Ti 相. 此外, Cu 和 Ti 与 O 亲和力强, 结合 Ag-Cu-3Ti 钎料熔化相变特点, 推测灰、黑色物相中含有 TiO, CuO, Ti₂O 和 Cu₂O 相等.

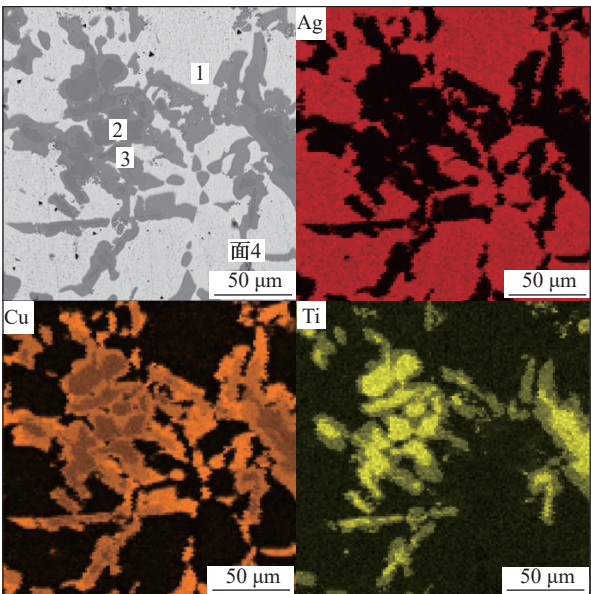


图 2 Ag-Cu-3Ti 钎料熔化后 SEM + EDS 测试结果
Fig. 2 SEM + EDS test results of Ag-Cu-3Ti brazing metal after melting

表 3 图 2 中点和面的化学成分
Table 3 Chemical composition of points and surfaces in Fig. 2

位置	原子分数 $a(\%)$				质量分数 $w(\%)$			
	Ag	Cu	Ti	O	Ag	Cu	Ti	O
点1	90.20	9.80	—	—	93.98	6.02	—	—
点2	1.73	45.01	35.45	17.82	3.71	56.88	33.74	5.67
点3	—	69.77	19.28	10.95	—	80.15	16.68	3.17
面4	36.69	35.94	9.76	17.61	56.61	32.67	6.68	4.03

2.3 Ag-Cu-3Ti 钎料熔化后物相成分

图 3 为 Ag-Cu-3Ti 钎料熔化后 XRD 衍射曲线. 钎料 XRD 曲线中出现多个尖锐晶态衍射峰, 曲线在 $2\theta = 35^\circ \sim 45^\circ$ 范围内衍射峰较宽化. 熔化后钎料中主要包括银基、钛基、晶体相和其他等, 晶体相主要包括 CuTi, Cu₂Ti, Cu₃Ti, CuO, TiO, Cu₂O, Ti₂O 和 TiAg 等. 钎料膏调制及钎焊试验过程中易引入 O, O 与 Cu, Ti 亲和力较强, 晶体相多为氧化物.

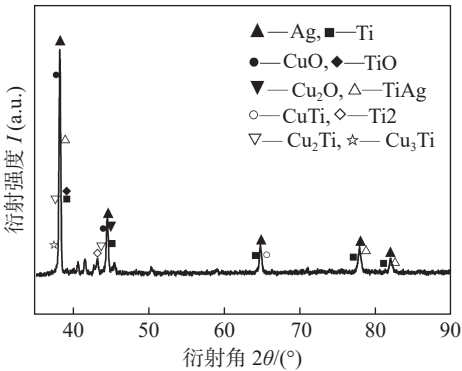


图 3 Ag-Cu-3Ti 钎料熔化后 XRD 衍射曲线
Fig. 3 XRD diffraction curves of Ag-Cu-3Ti brazing metal after melting

2.4 Ag-Cu-3Ti 钎料对蓝宝石和 TC4 合金的润湿性

钎料润湿性是衡量焊接性能的重要指标, 钎料对基体润湿好, 钎料流动好, 钎焊接头钎着率、强韧性提升^[17-18]. 基于 Ag-Cu-3Ti 钎料 DTA 测试结果, 选取 870 °C/20 min 钎焊工艺在 TC4 合金和蓝宝石表面上完成润湿试验.

图 4 为 Ag-Cu-3Ti 钎料润湿铺展宏观形貌. 如图 4(a) 所示, 熔化后的钎料在 TC4 合金表面铺展面积大, 钎料中心全铺展, 钎料对合金润湿良好; 如图 4(b) 所示, 熔化后的钎料在蓝宝石表面中心位置略有凸起, 有轻微不铺展痕迹, 但钎料边缘对蓝宝石表面润湿较好. 相比钎料在 TC4 合金表面润湿性, 钎料对蓝宝石润湿性差, 但 Ag-Cu-Ti 活性钎料也可直接钎焊金属—陶瓷^[19].

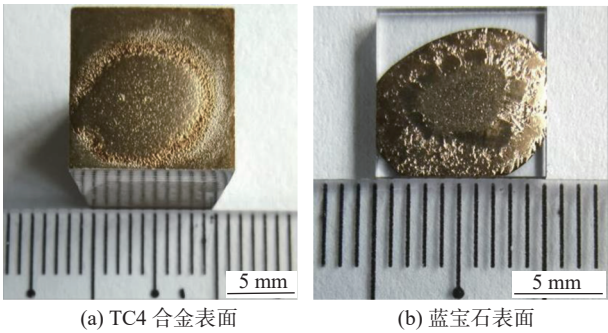


图 4 Ag-Cu-3Ti 钎料表面润湿性
Fig. 4 Wettability of Ag-Cu-3Ti brazing metal. (a) TC4 alloy; (b) sapphire

2.5 蓝宝石钎焊界面微观组织分析

图 5 为蓝宝石/Ag-Cu-3Ti 钎焊接头界面组织 SEM + EDS 测试结果, 表 4 为图 5 中点和面的化学成分. 蓝宝石与钎料之间形成致密冶金反应层, 点 1 EDS 分析显示蓝宝石 Al 和 O 原子比接近 2:3, 为 Al₂O₃ 相; 点 2 处于冶金反应层, EDS 分析表明 Cu 和 Ti 元素在致密冶金反应层中分布均匀, 且原子比接近 1:1, 推测其为 CuTi 相. 基于 Cu, Ti 与 O 亲和力强, 结合 Ag-Cu-3Ti 钎料反应层相变特点, 推测致密冶金反应层中还存在 CuO, Cu₂O, TiO, Ti₂O 相等; 点 3、点 4、点 5 EDS 分析表明, 钎料反应层主要由白色基体、长棒状灰色组织和类椭圆状黑色组织组成, 其中白色基体主要为银基相 (固溶体), 元素百分比与名义成分相差较大, Cu 元素含量增加、Ag 元素含量明显下降, Ag 和 Cu 在钎料熔炼过程发生重新再分布, 灰色相为高铜相 (固溶体), 黑色相为高 Cu 和 Ti 相, Ag 元素较少, 原子比接近 1:1, 推测为 CuTi 相; 点 6 EDS 分析表明, 钎料调膏引入的粘结剂引发钎焊接头微观组织存在残留高碳相.

2.6 中间层特性对钎焊接头剪切强度的影响

添加中间层钎焊促进钎料在陶瓷表面发生冶金反应, 改变或抑制界面产物形成, 缓释接头残余应力, 有效提升接头力学性能^[20-21], 中间层特性对

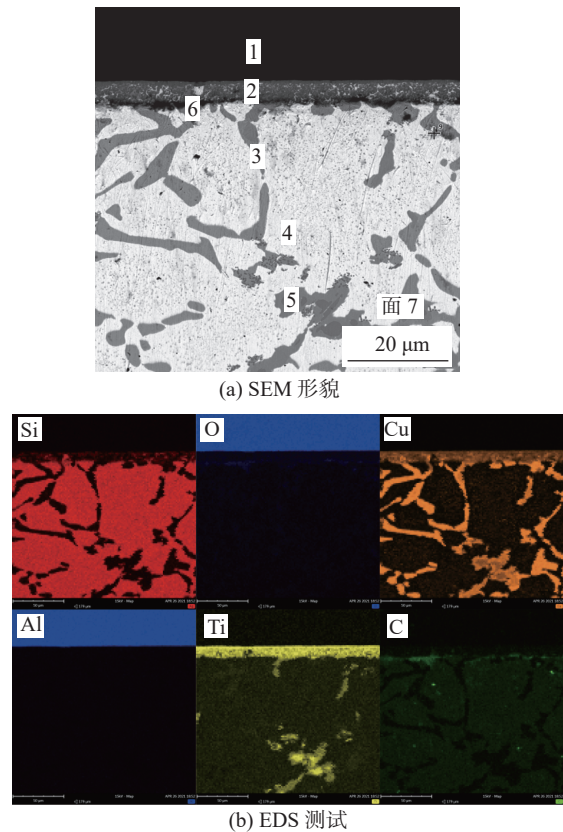


图 5 蓝宝石/Ag-Cu-3Ti 钎焊接头界面组织 SEM + EDS 测试
Fig. 5 SEM + EDS test results of interface structure of the sapphire/Ag-Cu-3Ti brazed joint. (a) SEM; (b) EDS

表 4 图 5 中点和面的化学成分 (原子分数, %)
Table 4 Chemical composition of points and surfaces in Fig. 5

位置	O	Ag	Al	Cu	Ti	C
点 1	70.18	—	29.82	—	—	—
点 2	40.95	1.01	1.69	28.03	28.32	—
点 3	—	2.58	—	97.42	—	—
点 4	26.85	47.63	—	25.52	—	—
点 5	18.29	1.95	—	44.85	34.91	—
点 6	78.94	11.29	—	—	—	9.77
面 7	64.71	11.53	13.73	6.73	1.40	1.91

图 7 为中间层厚度 (材料一致) 与钎焊接头剪切强度关系。添加 0.2 mm 和 2 mm 铜片作中间层, 随着铜片厚度增加, 接头剪切强度提升, 增加 8.53 MPa, 接头剪切强度达到 23.73 MPa。添加 0.2 mm 和 2 mm 钼片作中间层, 随着钼片厚度增加, 接头剪切强度大幅提升, 增加 14.71 MPa, 接头剪切强度达到 30.49 MPa。采用 Ag-Cu-3Ti 钎料在 870 ℃/20 min 钎焊工艺下, 添加 2 mm 钼片作中间层钎焊蓝宝石/TC4 合金接头剪切强度较理想。

陶瓷/金属钎焊接头组织性能存在重要影响。试验选用 Ag-Cu-3Ti 钎料在 870 ℃/20 min 钎焊工艺下分别添加 0.2 mm 4J29 片、0.2 mm 铜片、0.2 mm 钼片、0.2 mm 钛纤维多孔材料、2 mm 铜片和 2 mm 钼片作中间层钎焊蓝宝石/TC4 合金, 完成钎焊接头剪切性能测试。

图 6 为中间层材料 (厚度一致) 与钎焊接头剪切强度关系。添加 0.2 mm 4J29 片, 钎焊接头剪切强度为 26.74 MPa, 添加 0.2 mm 铜片、0.2 mm 钼片, 接头剪切强度分别为 15.20 MPa 和 15.78 MPa, 两者处于同一剪切强度水平, 且低于添加 0.2 mm 4J29 片时的接头剪切强度。但添加 0.2 mm 钛纤维多孔材料作中间层, 接头剪切强度最低, 仅为 3.11 MPa, 多孔材料、钎料、陶瓷界面在该钎焊工艺下难以形成理想界面反应层。

4J29 片作为常用中间层材料, 耐热性好, 随温度升高, 热膨胀系数未发生剧烈变化, 但钎焊接头剪切强度提升有限, 铜片和钼片作中间层与 Ag-Cu-Ti 钎料反应更为强烈, 成为中间层材料研究热点之一。添加 0.2 mm 厚度中间层, 钎焊接头剪切强度提升有限, 中间层厚度对蓝宝石/TC4 合金钎焊接头剪切强度影响需进一步深入研究。

Ag-Cu-3Ti 钎料与 Al₂O₃ 陶瓷通过充分固液相作用在钎焊界面处形成多种冶金产物, 实现可靠性连接。引入中间层可吸收异质材料之间线膨胀系数、弹性模量差异所产生的较大残余应力, 更能有效提升接头强度, 但中间层特性差异致使钎焊接头的质量存在较大差异, Al₂O₃ 与界面活性元素通过冶金反应形成的多数金属间化合物为脆性相, 过多脆性相又导致钎焊接头强度显著降低。

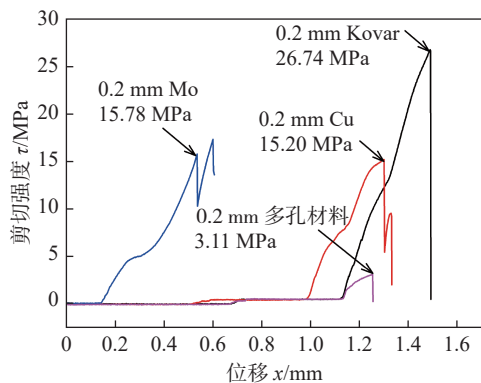


图 6 中间层材料与钎焊接头剪切强度关系

Fig. 6 Relationship between the material of the middle layer and the shear strength of the brazed joint

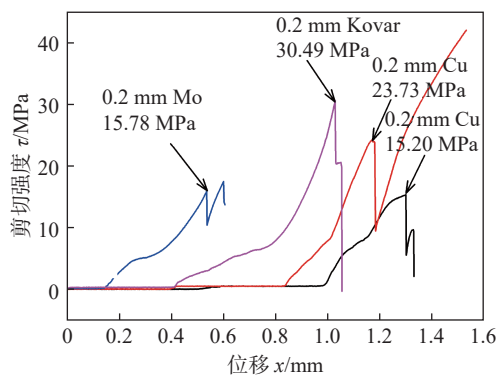


图 7 中间层厚度与钎焊接头剪切强度关系

Fig. 7 Relationship between the thickness of the middle layer and the shear strength of the brazed joint

3 结 论

(1) 随着 Ti 元素含量增加, Ag-Cu-Ti 系钎料熔化温度升高, 固液相线温度区间不变。

(2) Ag-Cu-3Ti 钎料熔化后物相主要包括银基、钛基相和晶体相等, 晶体相主要包括 CuTi, Cu₂Ti, Cu₃Ti, CuO, TiO, Cu₂O, Ti₂O 和 TiAg 等。Ag-Cu-3Ti 钎料在 TC4 合金表面润湿性好, 在蓝宝石表面, 钎料中心未铺展。

(3) 蓝宝石与钎料之间形成致密冶金反应层, 除形成银基固溶体、铜基固溶体外, 还形成 CuO, TiO, Ti₂O, Cu₂O 和 CuTi 等多种稳定金属间化合物。

(4) 采用 Ag-Cu-3Ti 钎料在 870 °C/20 min 钎焊工艺下, 添加 0.2 mm 4J29 片、铜片、钼片、钛纤维多孔材料、2 mm 铜片和钼片作中间层, 钎焊蓝宝石/TC4 合金接头剪切强度分别为 26.74 MPa, 15.20 MPa, 15.78 MPa, 3.11 MPa, 23.73 MPa 和

30.49 MPa, 蓝宝石/2 mm 钼片/TC4 合金钎焊接头剪切强度较理想。

参考文献

- [1] 张元, 范华平, 蒋小寒, 等. 整流罩快速对接设计及其结构特性分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(2): 53-58.
Zhang Yuan, Fan Huaping, Jiang Xiaohan, *et al.* Design and structural characteristics analysis of fast docking for the fairing [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2019, 24(2): 53-58.
- [2] 黄秋, 陈亦庆, 高志峰, 等. 红外导引头整流罩技术研究 [J]. 应用光学, 2009, 30(5): 840-843.
Huang Qiu, Chen Yiqing, Gao Zhifeng, *et al.* Consideration to radome technology for IR seeker [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(5): 840-843.
- [3] 殷胜昔, 楚建新. 蓝宝石整流罩与金属弹体新型的连接方法研究 [J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(1): 54-57.
Yin Shengxi, Chu Jianxin. Joining of sapphire dome and metal housing [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(1): 54-57.
- [4] 王建彬, 朱永伟, 王加顺, 等. 研磨方式对单晶蓝宝石亚表面损伤层深度的影响 [J]. 人工晶体学报, 2014, 43(5): 1099-1104.
Wang Jianbin, Zhu Yongwei, Wang Jiashun, *et al.* Effect of lap-ping methods on subsurface damage depth of single crystal sapphire [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(5): 1099-1104.
- [5] 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): 77-80.
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): 77-80.
- [6] Sivaprahasam D, Sujitha T, Gowtham U, *et al.* Microstructure and heat transfer characteristics of active brazed ceramic-metal joints [J]. Ceramics International, 2021, 47(11): 16133-16140.
- [7] 王星星, 吴港, 何鹏, 等. 陶瓷/金属异质钎焊连接研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7): 2689-2697.
Wang Xingxing, Wu Gang, He Peng, *et al.* Research progress of ceramic/metal dissimilar brazing technology [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(7): 2689-2697.
- [8] Wu Qilong, Long Weimin, Zhang Lei, *et al.* The microstructure and wear behavior of WC-reinforced diamond composite coating [J]. Welding in the World, 2024, 68: 1685-1692.
- [9] Zhang Lei, Long Weimin, Du Dong, *et al.* The microstructure and wear properties of diamond composite coatings on TC4 made by induction brazing [J]. Diamond and Related Materials, 2022, 125: 109032.
- [10] Long Weimin, Liu Dashuang, Dong Xian, *et al.* Laser power ef-

- fects on properties of laser brazing diamond coating[J]. *Surface Engineering*, 2020, 36(12): 1315 – 1326.
- [11] 李丹丹. 蓝宝石低温超声钎焊工艺及界面形成机理 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Li Dandan. Mechanism of interfacial formation and progress of ultrasonic aided soldering of sapphire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [12] 熊丽媛. Ag-Cu-Ti 活性焊膏的制备与性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- Xiong Liyuan. Preparation and characterization of Ag-Cu-Ti active paste for brazing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [13] 王轶, 贾志华, 郑晶, 等. Ag-Cu-Ti 合金制备技术及钎焊应用综述 [J]. *贵金属*, 2018, 39(S1): 59 – 63.
- Wang Yi, Jia Zhihua, Zheng Jing, *et al.* Review on preparation technology and brazing application of Ag-Cu-Ti alloy[J]. *Precious Metals*, 2018, 39(S1): 59 – 63.
- [14] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册—第 3 版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- Zhang Qiyun, Zhuang Hongshou. Handbook of brazing and soldering (Third Edition) [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 11364—2008 钎料润湿性试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 11364—2008 Test method of wettability for brazing filler metals[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 11363—2008 钎焊接头强度试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 11363—2008 Test method of the strength for brazed and soldered joint[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [17] Xia Yueqing, Ma Zhuang, Du Qiang, *et al.* Microstructure and properties of the TiAl/GH3030 dissimilar joints vacuum-brazed with a Ti-based amorphous filler metal[J]. *Materials Characterization*, 2024, 207: 113520.
- [18] Long Fei, Zhang Guanxin, He Peng, *et al.* Effects of oxygen content on the melting characteristics and brazing mechanical properties of silver-based powder brazing filler metals[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(2): 385 – 390.
- [19] 刘玉华, 庄宇, 胡建东, 等. Ag-Cu-Ti 合金与 ZrO_2 陶瓷的润湿性及界面特征 [J]. *电子显微学报*, 2014, 33(1): 34 – 39.
- Liu Yuhua, Zhuang Yu, Hu Jiandong, *et al.* Wettability and interface characteristics of Ag-Cu-Ti/ ZrO_2 system[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2014, 33(1): 34 – 39.
- [20] 刘多. 基于 AgCu/Ni 中间层的 SiO_2 陶瓷与 TC4 钛合金钎焊工艺及机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Liu Duo. Technology and mechanism of brazing SiO_2 ceramic to TC4 alloy using Ag Cu/Ni composite interlayer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [21] Li Shengnan, Du Dong, Long Weimin, *et al.* Brazing of C/C composite and TiAl alloy using TiNiSi filler metal added Cu interlayer[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31: 1277 – 1284.
-
- 第一作者: 刘全明, 博士, 高级工程师; 主要从事燃气轮机高温部件焊接技术研发及应用研究; Email: liuquanming1988@126.com.
- 通信作者: 肖俊峰, 硕士, 正高级工程师; Email: xiaojunfeng@tpri.com.cn.

(编辑: 郑红)