

异种铝合金低温钎料研制与低温钎焊工艺研究

刘 鑫 薛忠明 姜 坤

(北京卫星制造厂, 北京 100094)



摘要: 为实现可展开式热辐射器产品中环路热管(2A14 铝合金)与外贴热管(6063 铝合金)低温钎焊(80℃), 研制新型的低温钎料, 经过一系列试验后确定新型超低温钎料为镓基钎料(Ga60Cu40), 试验结果表明, 镓基钎料在镀有 Ag 或 Cu 的铝合金表面具有良好的润湿性, 并进行了相应的工艺试验, 接头的剪切强度性能和二次重熔温度满足可展开式热辐射器的要求。

关键词: 热管; 镓基钎料; 低温钎焊

Study on Low-temperature Filler Metal and Brazing Technology of Dissimilar Aluminium Alloy

Liu Xin Xue Zhongming Jiang Kun

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract: In order to realize the low-temperature(80℃) brazing between loop heat-pipes(2A14 aluminium alloy) and external heat-pipes(6063 aluminium alloy) in extensible heat-radiator, the new low-temperature filler metal is developed. After a series of experiments, a new Ga-based low-temperature filler metal(Ga60Cu40) is determined. The experiment results show that, the Ga-based filler metal has well wettability on the surface of aluminium alloy which electroplated Ag or Cu. After technics experiments, the shear strength and secondary remelting temperature of the soldering joints can well satisfy the demands of extensible heat-radiator.

Key words: heat-pipes; Ga-based filler metal; low-temperature brazing

1 引言

可展开式热辐射器是以柔性环路热管 LHP 热控技术与可展开式辐射板及其动作装置相结合, 并辅以两者相互耦合的一项新型技术, 可有效解决大功率通信卫星平台散热能力的不足^[1]。其中环路热管与外贴热管之间采用钎焊技术实现连接所产生的传热效果将远大于胶接等方式, 使接触换热系数较导热填料高一个数量级。但环路热管是在充工质状态下进行钎焊, 钎焊温度要求小于 80℃, 钎焊后二次重熔温度需 120℃ 以上。现阶段未见任何国内外报道中有如此低温度的铝合金钎焊用钎料, 即需要配置实现异种铝合金低温钎焊的新型超低温钎料, 而超低温钎料的研制

就成为实现可展开式热辐射器同大尺度热管网络强热耦合的关键技术之一。

重点针对可展开式热辐射器结构中环路热管(2A14)与外贴热管(6063)异种铝合金之间超低温钎焊的钎料开展试验研究, 通过分析筛选低熔点元素 Ga 作为钎料基体材料, 考虑钎料的润湿性、组织性能和二次重熔温度等, 最后确定超低温钎料镓基钎料成分为 Ga60Cu40。并在钎焊涂镀层、钎料对母材的扩散性能、钎焊接头的微观组织、钎焊接头力学性能、二次重熔温度等方面开展工艺试验, 确定适合可展开式热辐射器低温钎焊的工艺过程, 研究结果为可展开式热辐射器的设计和制造提供了技术基础。

2 试验材料和方法

实验材料为 2A14 铝合金和 6063 铝合金。焊前经酸碱化学清洗，除去油污和表面氧化膜。实验材料化学成分见表 1、表 2。

2.1 试验材料

表 1 2A14 铝合金标准化学成分表 %

Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Cr	Ni	Fe	Al
0.60~1.20	3.90~4.80	0.40~0.80	≤0.30	0.40~1.00	≤0.15	≤0.15	≤0.10	≤0.70	余量

表 2 6063 铝合金标准化学成分表 %

Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Cr	Fe	Al
0.20~0.60	≤0.10	0.45~0.90	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.35	余量

2.2 试验方法

钎焊与熔焊或压力焊相比，具有外形美观、对母材本体组织和性能的影响小、生产效率高、焊件变形小等优点^[2]。由于受到可展开式热辐射器生产过程的限制，需在焊接前完成被焊件环路热管的充质，并且由于工质的特殊性，要求焊接需在 80℃ 以下进行，所以采取气保护低温钎焊的方法进行可展开式热辐射器中环路热管（2A14）与外贴热管（6063）的焊接。

向低熔点的 Ga 基体中添加高熔点的合金元素。在一定温度压力及时间条件下，使其相互扩散反应，形成新的高熔点化合物，以此提高钎焊接头二次重熔温度。经过大量试验筛选选定 Cu、Ag 和 AgCu 等高熔点合金作为镓基钎料的高熔点添加材料，但关键在于 Cu、Ag 以及 CuAg 等高熔点合金元素在钎焊材料中的比例。

3 试验及结果分析

3.1 钎料配方设计

由于钎焊温度不得超过 80℃，但二次熔化温度要求大于 120℃。在如此低的钎焊温度下，钎焊材料中低熔点元素的选择就显得尤为重要。表 3 是可供选择的几种低熔点元素，主要包括 Ga、Sn、In、Bi、Pb、Cd 等元素。经多方筛选，确定选用 Ga 元素为基体元素的钎料作为研究对象。Ga 的熔点 29.78℃，比重约 5.9，半金属性很强，对人体无害。

试验首先在液态纯 Ga 中加入 Ag、Cu 粉，混合制成新的中间层材料。当钎料中 Ga 含量超过 65% 时，钎焊后中间层材料中仍含有液态 Ga，钎料无法凝固；当钎料中 Ga 含量低于 50% 时，钎料凝固过快，难于铺展，无法完成装配钎焊。在钎料研制过程中，对 Ga 与 Ag、Cu 质量配比进行了一定的调配，当 Ag 粉含量较少时，接头强度较低，当 Ag 粉含量较高时，Ag 与 Ga 反应太快，钎料难于铺展。由此可知，Ag 粉的加入无法满足使用要求。

然后进行了在镓基钎料中添加 Cu 粉的试验，混合制成新的中间层材料。根据 Cu-Ga 二元合金相图^[3]，当 Cu 向 Ga 中扩散量达到 34%（原子百分比）左右能形成熔点达 254℃ 的 ε 金属化合物。对液态纯 Ga 与 Cu 粉的质量比也进行了一定的调配，具体情况如表 4 所示。通过钎料的铺展性试验，最后确定镓基钎料成分为 Ga60-Cu40。

表 3 常用低熔点元素的熔点

元素种类	Ga	Sn	In	Bi	Pb	Cd
熔点/℃	29.78	232	156.6	271	321	321

由于钎焊接头要求二次重熔温度大于 120℃，需

表 4 铝合金低温钎焊钎料成分及性能

	1	2	3	4	5	6
Ga（质量比）	75	70	65	60	45	40
Cu（质量比）	25	30	35	40	55	60
钎料状况	未能完全凝固	未能完全凝固	未能完全凝固	凝固较快	凝固较快	凝固较快

3.2 钎焊工艺对接头质量的影响分析

3.2.1 铝合金表面处理方法对钎焊接头微观组织的

影响

由于 Ga 元素与铝合金母材接触会在接触面发生化学反应,进而腐蚀整个铝合金结构,为防止镓基钎料对铝合金母材的腐蚀,需在铝合金表面镀(喷)上一层涂镀层。涂镀层需要起到阻止 Ga 与铝合金接触而发生化学反应、提高镓基钎料在待焊结构表面的润湿性、提高镓基钎料与铝合金本体连接强度的作用。因为 Ga 能扩散到 Ag、Cu 中并与其反应形成化合物,所以采用这两种金属的涂镀层可以增强钎料与母材的连接,本文采用了电镀铜/喷涂铜、镀银、以及电镀铜/喷涂铜之后再镀银等表面处理方法进行试验。

对采用镀银层的铝合金和镀铜层的铝合金进行润湿和钎焊试验,试验发现,有镀银层和镀铜层的铝合金与镓基钎料之间润湿程度增大,如图 1 所示,钎焊材料能涂抹地更均匀,但由于镀银工艺所限,镀银层厚度较薄($<20\mu\text{m}$),Ga 元素能够很快与 Ag 反应完全并扩散到铝合金母材本体,进而和铝合金反应,导致整个焊接结构破坏。

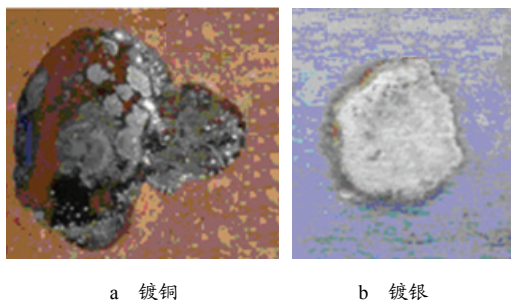


图 1 Ga 基钎料在镀银层的铝合金表面铺展效果图

对采用镀银层和喷涂铜层的铝合金,分别进行钎焊试验,钎焊温度为 80°C ,保温时间 48h,钎焊后接头剪切断面处的中间层钎料进行 XRD 物相分析检测,进一步确认中间层钎料生成的化合物相,其 XRD 曲线如图 2、图 3 所示。

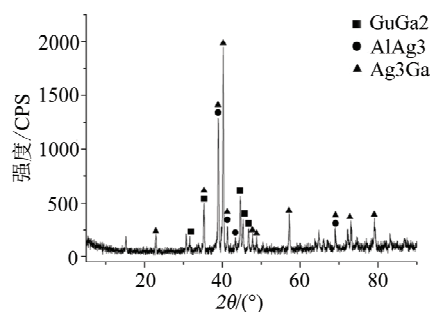


图 2 镀银层铝合金钎焊形成的中间层物相 XRD 图谱

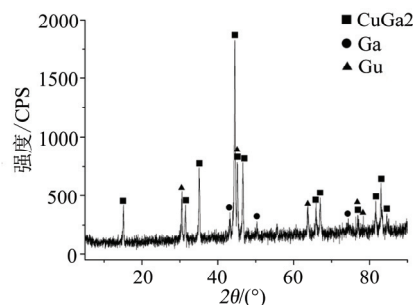


图 3 热喷涂铜层铝合金钎焊形成的中间层物相 XRD 图谱

由以上试验可以看出,采用喷涂铜层的铝合金钎焊时,焊接后的试样中间层会残留少量的纯 Ga,而这部分纯 Ga 如接触到铝合金表面是十分危险的,需要严格控制 Cu 层的厚度。同时也可以看出 Ga 与 Ag 的结合能力很强,相同工艺参数下有镀银层存在时就不会有纯 Ga 的存在。

此外,镀层的厚度对钎焊接头微观组织也有很大的影响。图 4 是在 80°C 扩散温度下,等温加热 10h 后,不同镀层处理后的铝合金低温扩散钎焊接头金相照片。从图中可以看出,铝合金低温扩散钎焊接头分成三个层,依次是铝合金层、镀层、中间层,不同镀层对铝合金母材的保护能力不同。

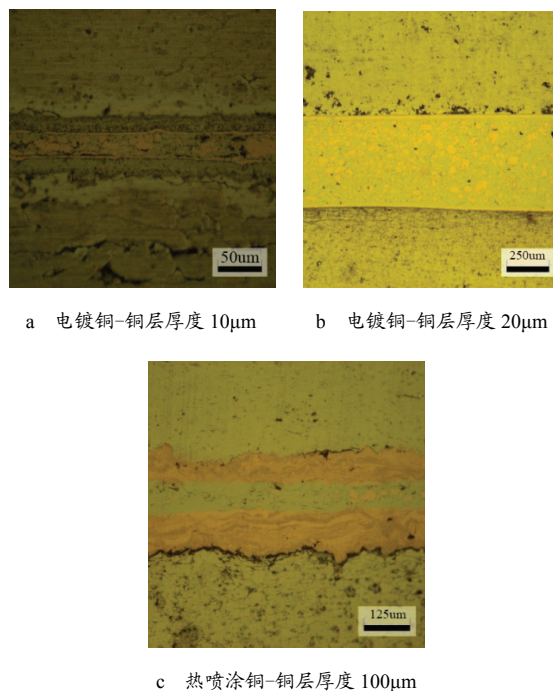


图 4 不同表面处理后的铝合金低温扩散钎焊接头(扩散温度 80°C 、保温时间 10h)

如图 4a 所示, 电镀铜 $10\mu\text{m}$ 的试样在经过 10h 的等温扩散, 中间层 Cu 和 Ga 相互扩散, 同时中间层中 Ga 与镀层铜也发生了相互扩散, Ga 扩散到镀层中, 与镀层中铜生成新的化合物, 镀层变薄, 在一些地方中间层中的 Ga 完全消耗掉了镀层, 致使母材铝合金失去保护, 中间层中的 Ga 进一步扩散进入了铝合金母材。Ga 和 Al 相互扩散阻碍铝合金表面形成致密的氧化膜, 由于 Al 很活泼很容易与空气发生反应, 从而破坏铝合金组织, 铝合金变得疏松, 抛光后的铝合金母材上面很容易聚集杂物而发黑。图 4b 为镀层厚度为 $20\mu\text{m}$ 的试样, 镀层变厚, 对铝合金母材的保护变好, 不过仍有一些地方镀层破坏, 少量 Ga 扩散进了铝合金母材。图 4c 为喷涂铜层厚度为 $100\mu\text{m}$ 的试样, 由于热喷涂铜层致密、与铝合金母材结合力强且喷涂层厚, 对铝合金母材起到了非常好的保护作用。

通过对试件金相组织的观察, 发现镀层越厚、越致密, 对铝合金母材的保护越好, 且中间层中的 Ga 会向镀层扩散与镀层 Cu 形成新的化合物。因此镀层太薄或者与母材结合力不强的, 都不能用做铝合金低温扩散钎焊的保护层。从试验结果看, $10\mu\text{m}$ 厚的镀铜层并不能很好的保护铝合金母材, $20\mu\text{m}$ 厚镀铜层对铝合金母材的保护明显变好, 而镀层致密, 且与母材结合力好的厚度为 $100\mu\text{m}$ 的热喷涂铜层, 无疑具有更好的保护效果。

通过以上分析, 确定采用喷涂铜 $100\mu\text{m}$ 或先电镀铜 $20\mu\text{m}$ 然后整体镀银 $20\mu\text{m}$ 的技术作为镓基钎料低温钎焊的工艺方法。

3.2.2 钎焊温度对钎焊接头微观组织的影响

由于中间层钎料合金中的镓元素熔点很低只有 29.78°C , 为了研究扩散温度对中间层接头金相组织、微观成分的影响规律, 根据可展开式热辐射器的焊接要求, 在相同的 10h 等温时间条件下, 分别开展了针对铝合金母材 70°C 、 80°C 扩散温度下的对比试验。

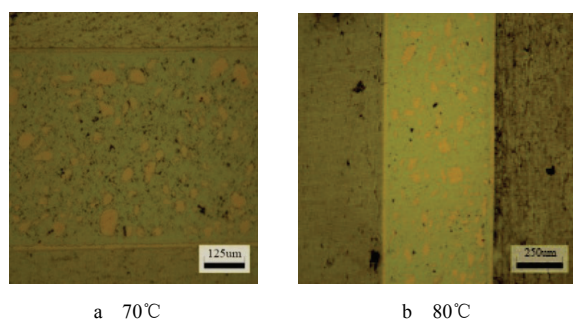


图 5 不同温度条件下, 扩散 10h 的接头金相组织照片 (镀铜层厚度 $20\mu\text{m}$)

如图 5 所示, 铝合金表面电镀铜在 70°C 扩散温度下等温加热 10h, 中间层扩散不够完全, 未扩散的 Cu 弥散分布在接头中, 有大量小型缩孔分布在接头, 整个接头组织不致密, 未扩散的 Cu 也比较多, 接头组织不够理想。当扩散温度升高至 80°C 时 (如图 5b 所示), 扩散缩孔明显减少, 中间层中未扩散的 Cu 明显减少, 中间层 Ga 和 Cu 粉和镀铜层实现了较好的扩散, 整个接头组织变的致密, 接头质量有所提高。

这可以解释为温度越高, 原子的能量越高, 从而使中间层钎料合金之间及铜镀层与钎料之间的原子相互扩散变快 (主要是 Cu 元素向液态 Ga 中的扩散溶解), 等温凝固过程所需时间变短, 相同时间内接头成分均匀化所需时间变短。同时, 扩散温度越高, 中间层合金中液相 Ga 的流动性越好, 更有利于接头成分均匀化。所以扩散温度越高扩散接头组织越好。在 5h、20h 等温加热时间下, 进行的扩散温度影响试验, 与在 10h 条件下规律一致。

综上所述, 镓基钎料的铝合金低温钎焊, 扩散温度越高, 中间层扩散越充分。最后确定钎焊温度 80°C 。

3.2.3 保温时间对钎焊接头微观组织的影响

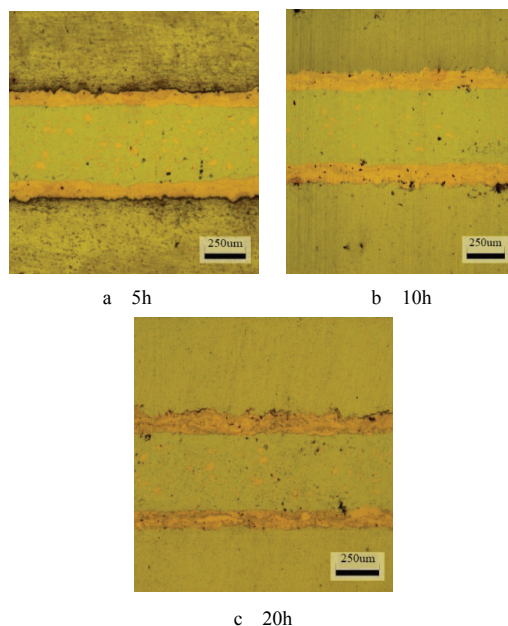


图 6 不同保温时间的接头金相照片

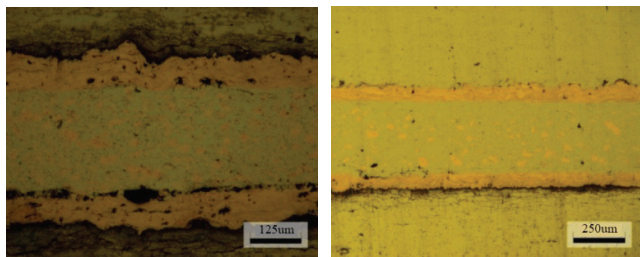
图 6 是铝合金表面热喷涂铜 $100\mu\text{m}$, 扩散温度为 80°C , 保温时间分别为 5h、10h 和 20h 的金相照片。保温时间为 5h 时, Cu、Ga 混合中间层中还存在大量的 Cu 粉颗粒, 扩散非常不充分; 保温时间延长到 10h 时, 中间层中 Cu 粉颗粒减少, 但存在较多的孔洞;

保温时间为 20h 时, 中间层中 Cu 进一步减少, 孔洞也减少。由此可知, 80℃ 扩散温度条件下中间层在不同保温时间下的扩散规律为: 保温时间越长, 中间层中 Ga 与 Cu 相互扩散越充分。随着扩散时间的延长, 未扩散的 Cu 越来越少, 颗粒越来越小, 接头组织越来越均匀。保温时间从 10h 到 20h 接头组织并没有特别明显的改善, 接头组织变化较小。

综上所述, 经电镀铜处理的铝合金的低温扩散钎焊, 保温时间越久中间层扩散越充分, 扩散温度越高, 中间层扩散越快。一般从原子扩散的角度来说, 在扩散过程中, 当温度与压力一定时, 随着扩散时间的延长, 连接效果会变好, 原子有充足的时间扩散移动。当扩温时间增长到某一程度后, 虽然原子继续扩散移动, 但是因为不同原子之间的浓度差越来越小, 扩散动力减小, 不同原子之间的扩散会达到一个动态的平衡, 即热力学和动力学的平衡, 结构的改变达到一个平衡点, 将无法获得更好的扩散接头。另外, 就工程应用而言, 过长的扩温时间会增加生产成本, 降低生产效率, 导致工艺过程无法应用。最后确定镓基钎料的铝合金低温钎焊的保温时间为 20h。

3.2.4 试验压力对钎焊接头微观组织的影响

图 7 是铝合金表面热喷涂铜层 100μm, 扩散温度为 80℃, 保温时间分别为 20h, 压力为 2MPa、5MPa 的金相照片。从图 7 以看出, 当钎焊压力为 5MPa 时由于喷涂层承受了更大的压力, Cu 涂层表面变得更为平整, 涂层组织更加致密, 中间层也更为均匀致密。较大的钎焊压力不仅有利于阻止镓基钎料向铝合金母材的扩散, 而且有利于提高钎焊接头的结合力。



a 2MPa

b 5MPa

图 7 不同试验压力的接头金相照片

3.3 钎焊接头的二次熔化温度和接头强度试验

测量二次熔化温度常用重量法。测量时对连接试样施加一定的负重, 再将试件加热到预定的温度。观察接头在此温度的环境中接头是否发生重熔。该实验在电阻炉中进行, 把负重试件装吊在电阻炉中 (分别在每个铝片上打孔, 以便吊挂砝码), 缓慢升温直至砝码下落, 接头断开。经测试, 喷铜镀银后的铝合金, 采用镓基钎料 80℃ 温度下钎焊 20h, 钎焊接头的二次重熔温度为 250℃, 满足可展开式热辐射器的工作温度要求。

此外, 根据国标 GB11363《钎焊接头强度试验方法》对钎料接头进行剪切强度试验, 试验结果显示, 喷铜镀银后的铝合金, 采用镓基钎料 80℃ 温度下钎焊 20h, 钎焊接头的剪切强度平均可达 16.06MPa, 满足可展开式热辐射器的要求。

4 结束语

综合上述试验和结果, 得出以下结论:

a. 研制了一种适于异种铝合金低温 (80℃) 钎焊的镓基钎料 (Ga60Cu40), 通过钎料铺展性试验与钎焊接头试验优化了钎料配方。

b. 铝合金镓基钎料的低温钎焊工艺为: 在铝合金表面电镀铜层/喷涂铜层+镀银层, 扩散温度 80℃, 保温时间 20h 以上, 试验压力 5MPa。此种工艺参数下的钎焊接头强度高, 二次熔化温度大于 120℃, 满足可展开式热辐射器外贴热管和鞍座的低温钎焊需求。

参考文献

- 1 牟其峥. 可展开式热辐射器技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2002
- 2 赵征, 李京龙, 李碧芳, 等. 高性能电磁屏蔽方舱低温钎焊技术研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(11): 36~41
- 3 Massalski T B. Binary alloy phase diagrams[M]. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990