

铝合金和不锈钢低温软钎焊工艺试验

王奇娟 赖小明

(北京卫星制造厂, 北京 100190)



摘要: 通过对环路热管结构中的铝合金和不锈钢异种金属低温软钎焊试验研究, 采用锡基钎料配合活性钎剂, 将铝合金表面进行预镀镍处理, 镀镍层厚度 $10\mu\text{m}$ 左右, 钎焊间隙为 $0.2\sim 0.5\text{mm}$, 钎焊温度 220°C , 能够获得质量和传热性能满足要求的热管钎焊结构。

关键词: 铝合金; 不锈钢; 软钎焊

Experimental Research on the Low Temperature Soldering of Aluminum Alloys and Stainless Steels

Wang Qijuan Lai Xiaoming

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190)

Abstract: The experimental study was operated on the low temperature soldering of aluminum alloys and stainless steels, which are used in the loop heat pipe structure. Using the optimized parameters (Tin-based alloy and active flux; surface nickel plating treatment on the substrate of aluminum alloy; plating thickness is about $10\mu\text{m}$; the brazing clearance is selected from 0.2mm to 0.5mm ; soldering temperature is 220°C) in this study, the heat pipe soldering structure with good quality and thermal conducting performance can be obtained.

Key words: aluminum alloy; stainless steel; soldering

1 引言

热管^[1]作为一种利用管内工质的相变和循环流动而工作的器件, 其在航天器上的应用, 主要是通过热量的传递来实现对星内仪器设备的温度控制和星内局部或整体的等温化。目前航天器上使用的热管主要是铝氨轴向槽道热管。随着空间技术的发展, 尤其是载人飞船、空间平台、空间站以及大功率卫星等大型航天器的应用, 对航天热控技术提出了新的挑战^[2]。环路热管就是近年来发展起来的一项重要的航天器流体循环热控系统。环路热管 (Loop Heat Pipe, 简称 LHP), 是一种新型的依靠工质汽化时汽液界面产生的毛细力来驱动两相流体循环的传热工具, 具有传热功率大、传输距离远、反重力能力强、管线易弯折等

特点, 是高功率卫星热控制的有效手段。其中的管路采用不锈钢材料以保证管路的抗腐蚀性, 而蒸发器的集热座和冷凝器的散热翅片作为换热器件则采用铝合金。热控系统最关键的性能就是高热流密度排散能力, 因此铝合金与不锈钢之间的连接就是关乎热控系统热传输能力的关键问题之一。

本文重点针对新型环路热管结构中的铝合金与不锈钢钎焊制造技术开展试验研究, 采用合理的钎焊材料和工艺方法, 在低于 220°C 的温度条件下, 对热管结构进行了软钎焊, 并进行了钎焊质量检测和结构热测试, 研究结果对于环路热管的设计和制造提供了技术基础。

2 试验材料组合和试验设备

作者简介: 王奇娟 (1972-), 高级工程师, 机械制造及其自动化专业; 研究方向: 先进材料焊接工艺、GJB9001A—2001 质量体系认证审核。
收稿日期: 2010-03-26

2.1 试验材料组合

环路热管结构中的集热座材料采用变形铝合金，而不锈钢管材料采用奥氏体不锈钢。

由于铝合金与不锈钢的软钎焊存在较大难度，如铝合金化学活性大，并且钎料和铝合金母材之间电极电位相差悬殊，给钎焊接头的抗腐蚀性能带来不利影响，因此铝合金表面需要预先进行镀镍处理，镀镍层厚度 $10\mu\text{m}$ 左右。

钎焊材料选择锡基钎料和酸性活性钎剂。

2.2 试验用设备

本研究采用可开启式圆型管式电炉（额定功率 6kW ，额定电流 27A ），附属装置为调压器（可调压范围 $0\sim 220\text{V}$ ）、热电偶测温仪、浸焊炉（额定功率 2kW ，最高加热温度 350°C ）、电烙铁（功率 100W 、 75W ）。

3 软钎焊试验工艺

3.1 试件结构

铝合金集热座采用梯形或 Ω 形截面结构，内孔直径 25mm 、长度 300mm ；不锈钢管外径为 25mm 、长度 330mm 。两者之间的装配间隙控制在 0.5mm 之内。

3.2 钎焊工艺过程

a. 试件焊前清理：对于铝合金，采用化学清洗方法去除母材表面氧化膜和其它油污。对于不锈钢，先去除表面的油污，机械清理母材表面氧化膜，然后用丙酮将表面擦拭干净。

b. 试件焊前表面处理：将铝合金内孔进行镀镍处理，镀镍层厚度 $10\mu\text{m}$ 左右。不锈钢外壁上用电烙铁均匀浸镀一层锡基钎料，直至无不锈钢露出，然后清洗表面残留钎剂。

c. 试件焊接：预热圆型管式电炉，将铝合金集热座装于工装上，随工装一起放入电炉中进行加热，热电偶测温仪紧密接触铝合金集热座外表面；同时预热不锈钢管，严格要求温度低于 220°C 。待铝合金集热座加热至钎焊温度（ 220°C ）时，把钎剂和熔化钎料灌满整个铝合金集热座的内孔，再将不锈钢管插进铝合金集热座内孔中，流出多余钎料。然后取出试件、冷却试件。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 钎焊样件

焊接样件如图 1 所示。



图 1 铝合金与不锈钢环路热管焊接样件

3.3.2 钎焊接头内部质量测试

对 5 件环路热管钎焊样件进行内部质量测试，测试结果如下：4 件样件接头内部存在最大尺寸小于 $\Phi 2\text{mm}$ 的密度不均匀影像（面积小于 3.14mm^2 ），1 件样件接头内部存在最大尺寸为 $\Phi 2.8\text{mm}$ 的密度不均匀影像（面积小于 6.16mm^2 ），满足设计技术要求。

3.3.3 钎焊样件的热模拟试验结果

对其中 3 件环路热管钎焊样件进行热模拟试验，测试方法采用试验测试结果与理论计算结果比较的方法，建立环路热管的实体模型，假设集热座与不锈钢管完全贴合，接触热阻为零，进行热分析计算，计算结果表明：传热 150W 时，集热座的温差为 3.16°C 。

试验测试时，在集热座底板采用电热板加热，传热量为 150W ，热电偶测各点温度，测试结果表明：

1#集热座最大温差为 4.1°C ，集热座与不锈钢热管的钎焊工艺造成温差为 $0.94^\circ\text{C}/150\text{W}$ ；

2#集热座最大温差为 1.5°C ，集热座与不锈钢热管的钎焊工艺造成温差为 $1.66^\circ\text{C}/150\text{W}$ ；

3#集热座最大温差为 3.6°C ，集热座与不锈钢热管的钎焊工艺造成温差为 $0.44^\circ\text{C}/150\text{W}$ 。

由上可知，2#温差略大，经分析认为，由于不锈钢管内孔进行螺纹攻丝时，夹具对其挤压，不锈钢管变形，导致该区域不锈钢管与毛细芯贴合不紧密，从而使局部温度偏高。

3.3.4 接头微观组织

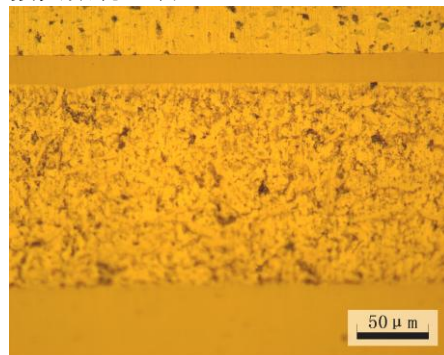


图 2 钎焊接头

图 2 为钎焊接头的微观组织。由图 2 可看出，钎

料与不锈钢表面和铝合金的镀镍面均形成良好的连接。钎焊接头可分为五个区域，即：不锈钢母材区、钎料区、钎料与镀镍层的相互扩散区和镀镍区、铝合金母材区。在钎料与镀镍层之间形成了一层平齐、均匀、光亮的过渡带，在靠近不锈钢一侧的界面，由于温度下降较快，Pb 首先析出结晶，形成暗色带。

图 3 为钎料与不锈钢之间过渡层的结合面线分析，由图 3 可以看出，不锈钢中的 Cr 元素向钎料中扩散，钎料中的 Sn 向不锈钢中渗透，钎料与不锈钢

结合良好。

由于锡非常容易与多种金属元素形成金属间化合物，镀镍层中含有铜元素，由锡铜二元合金相图^[3]（图 4）可知铜与锡在液态下可无限互溶，固态下铜在锡中的溶解度极小，但在钎料熔化后与镀层金属快速反应，在界面处会形成金属间化合物相 Cu_3Sn 、 Cu_6Sn_5 。在本试验中，由于钎焊温度低，钎焊时间短，因此金属间化合物的厚度较薄。

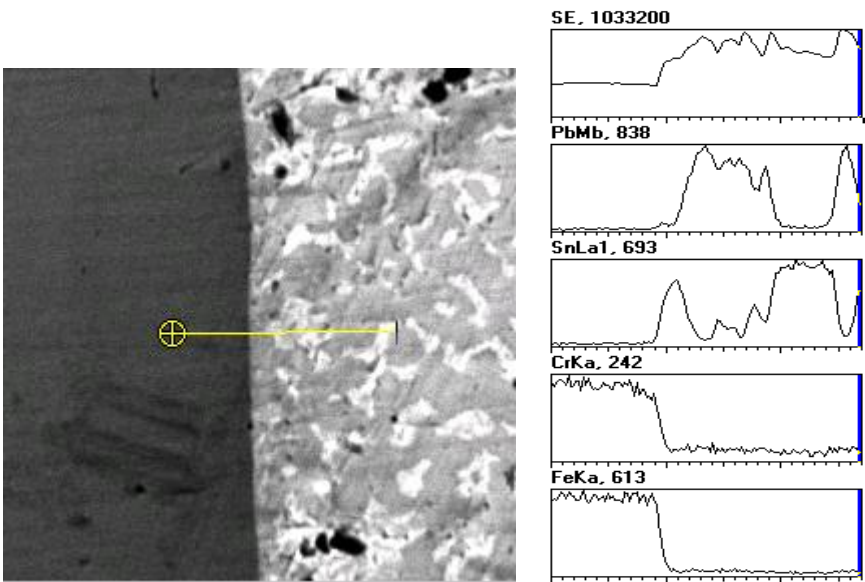


图 3 钎料与不锈钢的结合面线分析

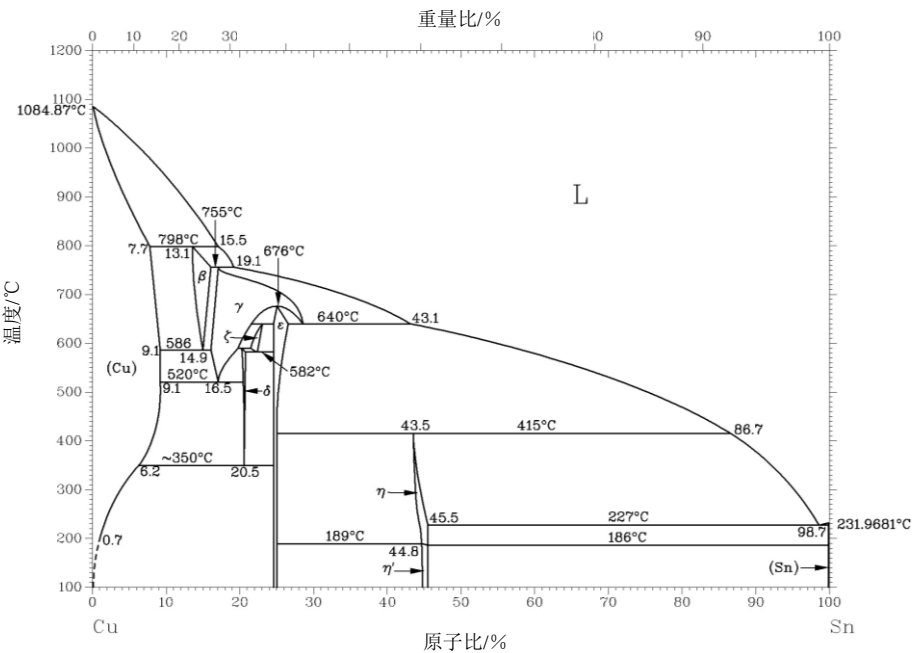


图 4 Sn-Cu 二元合金相图

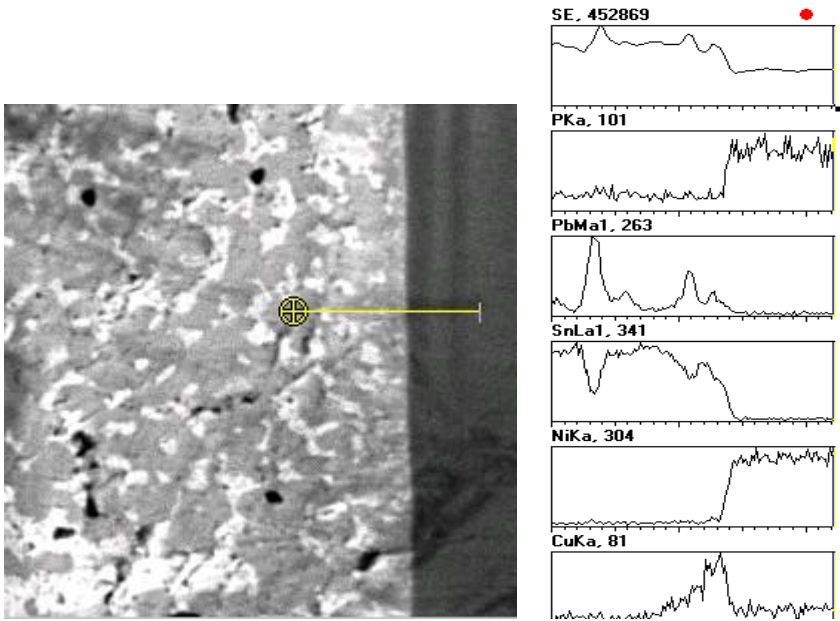


图 5 钎料与镀镍层的结合面线分析

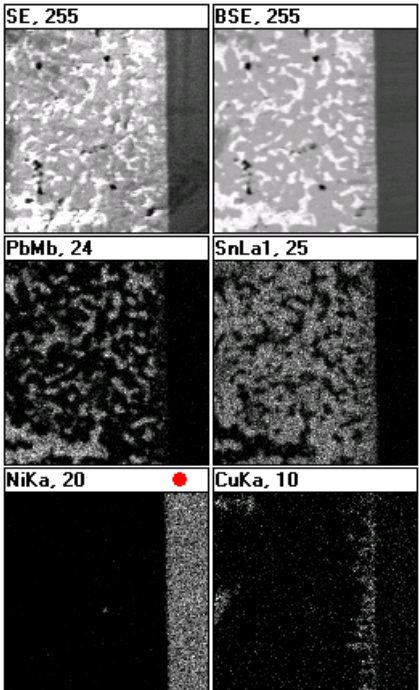


图 6 钎料与镀镍层结合面面分析结果

量的 Cu 元素富集在结合面钎料的一侧，钎料内部也存在一定数量的 Cu。对钎料与镀镍层的结合面取点，如图 7 所示，分析成分见表 1，由分析结果可发现，在钎料与镀镍层的结合面附近存在大量的 $\eta\text{-Cu}_6\text{Sn}_5$ 相，有少量 $\delta\text{-Ni}_3\text{Sn}_4$ 相，另外在结合面处 Pb 的含量非常少。

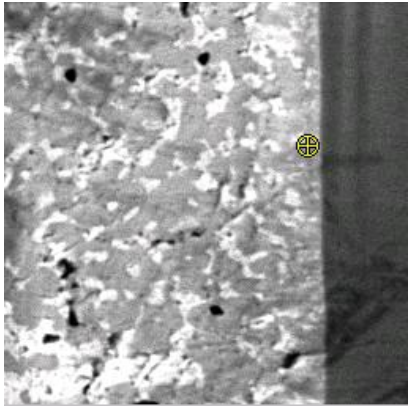


图 7 钎料与镀镍层的结合面点分析

表 1 钎料与镀镍层结合面成分分析结果 %

元素	重量比	原子比
镍	2.16	3.71
铜	21.55	34.09
锡	69.65	58.98
铅	6.64	3.22

4 结束语

(下转第 19 页)

由图 5 钎料与镀镍层的结合面线分析可看出，钎料中的 Sn、Pb 元素向镀镍层中略有扩散，镀镍层中的 Cu 元素大量向钎料中扩散，Ni 元素向钎料中的扩散相对较少。由于 Cu 与 Sn 的亲合力非常强，镀镍层中的 Cu 元素在加热时迅速与钎料中的 Sn 发生反应，并不断向钎料中渗透，形成金属间化合物相 $\eta\text{-Cu}_6\text{Sn}_5$ ，分布在焊缝内部，在钎料与镀镍层结合面处达到最大量，对该处进行面分析，如图 6 所示，大

