

宇航微波组件连接技术可靠性分析

吴奇 温学思 许迪 金蓓蓓 王晓涵

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

文 摘 针对宇航微波组件制造过程中的射频同轴电连接器与微带板之间的连接技术,以焊料硬连接、镀金铜带 Ω 形连接及金带包焊为研究对象,分析比较了不同连接技术的原理与特点,提出了相应的工艺控制要求与注意事项,并以SMA型电连接器为试验对象,对不同连接技术进行了鉴定试验验证、电性能测试及热应力仿真等可靠性评估与分析。结果表明:焊料硬连接焊点在经历力学鉴定试验和200次温度循环试验后出现疲劳纹,镀金铜带 Ω 形连接和金带包焊焊点则未出现异常;金带包焊的电性能与焊料硬连接较为接近,在1~8 GHz内基本满足使用要求,镀金铜带 Ω 形连接的电性能一致性较差;相同温度载荷下,硬连接焊点的最大热应力远大于镀金铜带 Ω 形连接及金带包焊,采用金带包焊的力学设计裕度远大于硬连接。

关键词 宇航,微波组件,硬连接,镀金铜带 Ω 形连接,金带包焊,可靠性

中图分类号:TN605

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.016

Reliability Analysis of Aerospace Microwave Module Connection Technology

WU Qi WEN Xuesi XU Di JIN Beibei WANG Xiaohan

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract For the connection technologies between RF coaxial electrical connectors and microstrip circuit boards in manufacturing process of aerospace microwave components, the principles and characteristics of solder hard connection, Ω -shaped gold-plated copper band connection and gold band cladding welding were analyzed. The process control requirements and considerations of different connection technologies were proposed. The experiments, reliability evaluations and analysis of different connection technologies were carried out with electrical connectors of SMA, including qualification test, electrical properties test and thermal stress simulation. The results show that fatigue striations appear at the joints of solder hard connection after mechanical qualification test and 200 cycles of temperature cycling test, while the abnormality does not appear in the joints of Ω -shaped gold-plated copper band connection and gold band cladding welding. The electrical properties of gold band cladding welding are similar with hard solder connection, which can meet the service demand basically in the range of 1 GHz to 8 GHz. The electrical properties of the connection of Ω -shaped gold-plated copper band have poor consistency; Maximum thermal stress of the solder joint of solder hard connection is much more than that of Ω -shaped gold-plated copper band connection and gold band cladding welding in the same temperature load, the mechanical design margin of gold-strip cladding welding is much more than that of solder hard connection.

Key words Aerospace, Microwave module, Hard solder connection, Gold-plated copper strip Ω -type connection, Gold-strip cladding welding, Reliability

0 引言

微波通信系统是宇航系统的重要组成部分之一,随着微波信号的无线传输距离、传输功率等要求的不断提高,宇航系统对微波通信系统的信号频率和通信指标要求也相应提高^[1]。宇航用射频同轴连接器类产品具有体积小、质量轻、频带宽等特点,可

实现微波信号传输路径的阻抗匹配与能量传输,因此被广泛应用于航天器舱外天线模块,舱内导航载荷及通信载荷等微波组件之中^[2-3]。在微波组件制造过程中,射频同轴电连接器与微带板之间的互连方式对信号传输质量和组件服役过程的可靠性具有重要影响^[4-6],具体的互连方式和连接技术主要包括

收稿日期:2021-08-11

第一作者简介:吴奇,1994年出生,硕士,助理工程师,主要从事航天电子产品电装工艺工作。E-mail:wuqi941002@163.com

焊料硬连接、镀金铜带 Ω 形连接、金带包焊等。传统焊料硬连接信号差损小,驻波较好,但因常用铝基壳体与陶瓷微带板的热膨胀系数不匹配易带来较高的焊点热应力,存在焊点开裂风险;镀金铜带 Ω 形连接有利于热应力释放,但高频信号电性能较差,且具有一定的焊接难度;金带连接是将金带、射频同轴连接器芯线与微带线上的金镀层之间进行电阻点焊,该连接方式可有效释放热应力和机械应力,且信号电性能较佳,但对于母材的纯度和质量要求较高,可应用的电连接器类型少。

本文针对以上三种连接技术在微波组件射频同轴电连接器与微带板之间的互连应用,通过比较分析不同连接技术的原理,提出不同连接技术的工艺方法控制要求与注意事项,并以SMA型电连接器为试验对象,对不同互连方式和连接技术进行鉴定试验验证、电性能测试、热应力仿真等可靠性评估与分析,以期对微波组件的设计、制造及可靠性评估提供技术参考。

1 工艺控制要求

1.1 焊料硬连接

焊料硬连接,即采用锡铅焊料将射频电连接器芯线直接焊接至微带线被焊接部位,其焊接形式主要包含以下两种:(1)芯线与微带板平行焊接;(2)芯线与微带板垂直焊接,焊接示意图如图1所示。

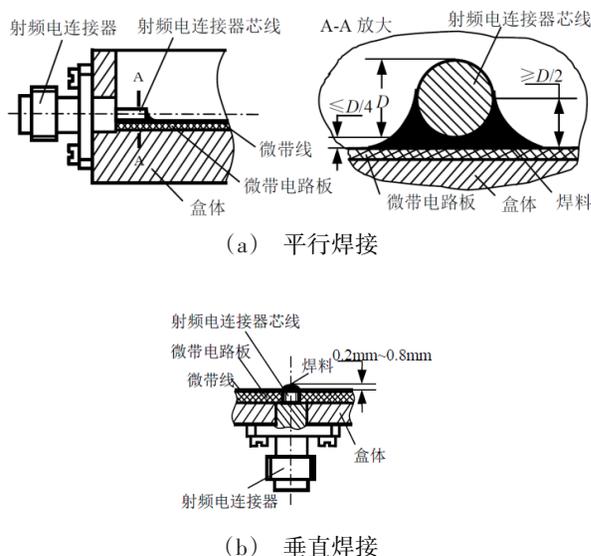


图1 射频同轴电连接器与微带板焊接示意图^[9]

Fig. 1 Welding schematic diagram of RF coaxial electrical connector and microstrip circuit board

硬连接搭焊传递电信号的差损小,电压驻波较好,但由于硬连接是直接通过焊料将安装在壳体上的电连接器芯线与微带板印制线进行搭焊连接,因

此,该种连接方式无应力释放措施,结合航天产品服役环境的影响因素,当接插件、微波器件引线与基板进行硬搭焊连接时,由于铝基壳体与微带板陶瓷基片材料的热膨胀系数不同(盒体材料LY12热膨胀系数为 $23.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ ^[7],陶瓷基片的热膨胀系数为 $6.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ ^[8]),在周期性温度循环条件的加载下易产生周期性热应力,焊点受热应力后可能会产生疲劳裂纹甚至开裂,从而影响连接的可靠性。基于此,空间电子技术研究院电子产品禁(限)用工艺清单中新增指出,“禁止18 GHz以下频段的产品,在没有应力释放弯条件下带线隔离器、模块引线直接与FR4、4003、5880等介质基板进行搭焊(不涉及模块内部元器件搭焊互连)”及“限制18 GHz及以下频段的产品,在没有应力释放弯条件下SMA引线直接与FR4、4003、5880等介质基板进行搭焊(不涉及模块内部SMA搭焊互连)”。

为提升硬连接焊点的可靠性与质量把控,当电连接器芯线与微带电路板平行焊接时,与微带线焊接的最小接触长度应不小于芯线直径 D 的2倍,焊缝长度与芯线等长,芯线轮廓在焊料中应可见。芯线离开微带线的高度应不大于 $D/4$ (此间隙越小越好),焊缝高度至少应从微带线上升到芯线侧面 $1/2$ 高处^[9]。此外,在进行产品保证与工艺检查时,应对硬连接焊点的属性参数进行记录,包括生产批次编号,硬连接的具体位置、作用及照片,芯线与微带板材料,芯线直径,有效焊接长度,焊缝高度,芯线离开微带线高度等。

1.2 镀金铜带 Ω 形连接

镀金铜带 Ω 形连接,俗称拱形连接、 Ω 桥连接,通常采用拱形状铜箔制带状导线,并以此为焊接媒介对微带板之间,微带板与接插件或微波器件之间进行连接,其连接示意图如图2所示。



图2 镀金铜带 Ω 形连接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Ω -shaped gold-plated copper band connection

镀金铜带 Ω 形连接的形式存在拱形设计,可以适应温度和振动应力环境,有效释放异种材料热膨胀系数不匹配带来的热应力,但在2 GHz以上的频段,使用铜带连接的方式会大大增加信号差损,恶化驻波比,且其焊接质量难以控制,易出现虚焊或爬锡过高现象,因此在应用铜带连接时,应严格控制其焊接质量。

在拱形桥的焊接过程中,由于铜带的传热能力较强,因此,为避免焊接一端时另一端出现重熔,应采取酒精棉等散热措施,同理,当铜带两端线宽不一致时,尺寸大的一端热容大,应先与尺寸小的一端进行焊接。铜带的有效焊接长度应控制在0.8~2.5 mm,禁止铜带连接焊点之间高度差大于2.5 mm,禁止焊点多次返工,避免焊锡爬升至拱形处影响应力释放效果。此外,在进行拱形铜带制备时,应注意铜带轧制时形成的金属择优取向,轧制铜的延展性和韧性往往呈现各向异性,平行于轧制方向的性能更佳^[10],因此,铜带的拱形弯曲方向应与金属的择优取向平行。

1.3 金带包焊

金带包焊,属于平行间隙电阻焊的一种方式,通过配备脉冲电源对焊接过程的输出电压进行精细控制,对两根微间距的上电极施加电流和下压力,利用焊接界面处的电阻热作用,击碎界面氧化膜、激活界面原子完成扩散再结晶的固相结合或微区域的材料熔化连接,在每一个电极的下部分形成键合点,从而实现金带与微带线,金带与电连接器芯线的单面连接,其焊接示意图如图3所示。

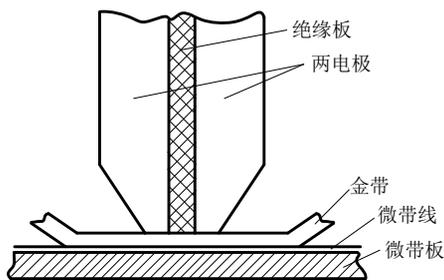


图3 金带包焊示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gold band cladding welding

金带包焊的高频信号指标在18 GHz以下电性能优异:一方面,该种连接方式可在较大程度上释放热应力与机械应力,连接强度较高,此外,因芯线与镀金铜带连接部位属同种材料连接,因此有效降低了焊接时因材料热膨胀系数差异导致的焊点质量问题;另一方面,由于电阻焊接对于焊接区域的材料纯

度要求较高,因此需在微带线及电连接器芯线键合区域表面镀软金,纯度为99.99%,镀金层厚度大于2.5 μm,电连接器需选用键合型,芯线与微带板表面间隙一般应不小于0.3 mm,形状为圆柱形或扁平形,微带板上的键合区域尺寸一般应大于0.8 mm×1 mm。电连接器芯线焊接时应考虑所施加的下压力是否超出器件的耐受值。此外,在电阻焊过程中,焊头会在电极与被焊材料、焊接界面之间形成电流回路,焊接电流约100 A,焊接电压约1 V,焊接时间约30 ms。此时,在印制板上其他部位可能会存在一定的电流分流,因此,为避免印制板上已装配的元器件损伤,应采取措施对焊接区域与电路之间进行隔离,如部分元件在金带包焊完成后再进行焊接,如图4所示。

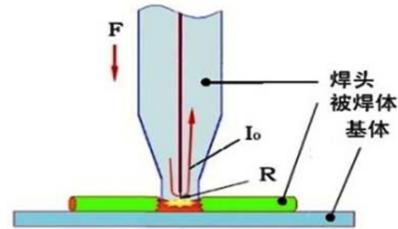


图4 焊头工作原理示意图

Fig. 4 Working principle diagram of welding electrode

2 可靠性评估与分析

2.1 鉴定试验验证

设计投产试验结构件与陶瓷微带板进行硬连接、镀金铜带Ω形连接及金带包焊的试验验证工作,微带板与壳体的加工信息如图5所示。

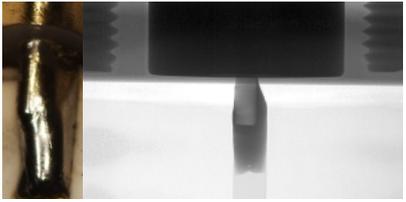
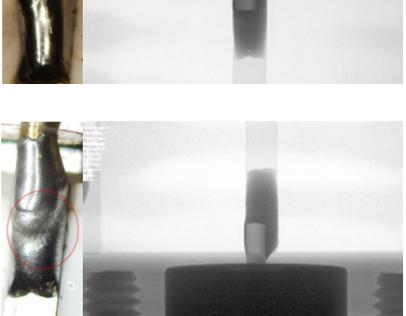
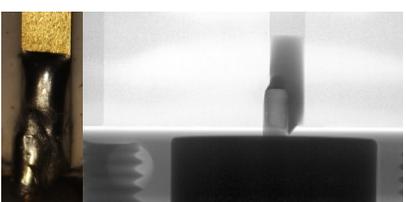
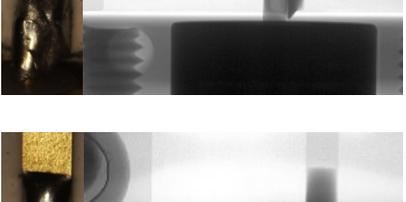
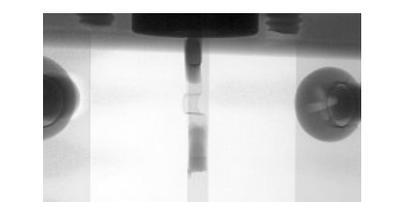
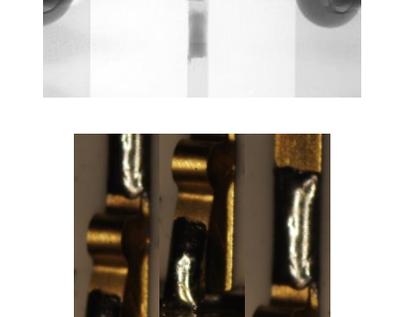
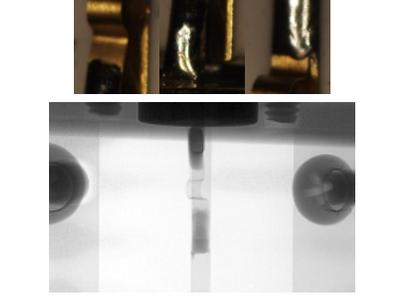
鉴定试验的内容包括SMA型电连接器与微带板的平行焊接、力学试验、温循试验、焊点质量检测与电性能测试。焊接方式分别为硬连接、铜带连接及金带包焊,其中,硬连接分别设置芯线离开微带线的不大于和大于D/4接插件芯线直径两种参数,以验证硬连接芯线焊接抬高距离对焊点可靠性的影响。焊接后按照QJ 3086A—2016进行力学和温循试验,得到的不同连接方式下的焊点质量情况如表1所示。

表1 不同连接方式鉴定试验后的焊点质量

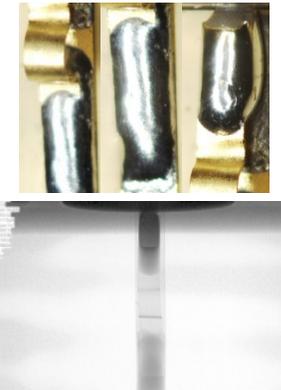
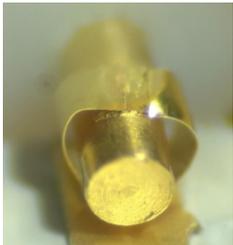
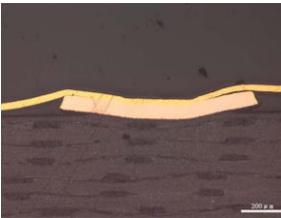
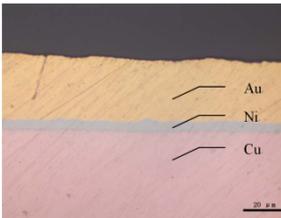
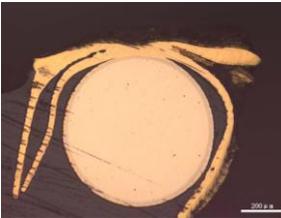
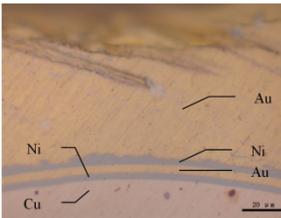
Tab. 1 Solder joint quality of different connections after qualification test

连接方式	焊接参数	鉴定试验	X光检验/显微镜镜检/金相分析
硬连接	焊接温度 (300±20)℃ 焊接时间<2 s 芯线离开微带线 高度≤D/4	力学试验	

续表

连接方式	焊接参数	鉴定试验	X光检验/显微镜镜检/金相分析
		100次温循	
		200次温循	
硬连接(抬高 间隙)	焊接温度 (300±20)℃ 焊接时间<2 s 芯线离开微带线 高度>D/4	力学试验	
		100次温循	
		200次温循	
镀金铜带Ω形连接	有效焊接长度 0.8~2.5 mm 拱形高度 0.2~1 mm	力学试验	
		100次温循	
			

续表

连接方式	焊接参数	鉴定试验	X光检验/显微镜镜检/金相分析
		200次温循	
金带包焊	微带线-金带: 焊接电压 (0.95±0.10) V 焊接时间 29.9 ms 电极压力 (25±5) oz; 芯线-金带: 焊接电压 (1.00±0.10) V 焊接时间 29.9 ms 电极压力 (30±5) oz	力学试验、 温循试验	    

由表1可知,硬连接焊点在经历力学试验和200次温循后出现疲劳纹,而间隙过高硬连接在经历力学试验后则出现开裂,且温循后同样出现疲劳纹;镀金铜带Ω形连接在经历热力试验后焊点质量良好,未出现明显异常;金带包焊焊点在经历热力试验后同样未出现明显异常,且由金相照片可知,在电阻焊

作用下,金带金层与微带线金层、电连接器芯线金层完全熔合,接头均匀致密无缺陷,具有良好的焊接质量。通过以上鉴定结果可知,焊料硬连接的焊点形式由于不具备释放应力的部位,因此抵抗环境应力的效果较差,在环境试验中存在开裂风险,并且当芯线与微带线间隙过大时,用于填充间隙的焊料量相

应增大,焊点的脆性升高,释放应力的效果变差,因此更易在环境试验中出现疲劳纹和开裂问题。镀金铜带 Ω 形连接与金带包焊的接头方式可以利用细长带状金属的延展性和韧性进行环境应力的有效释放,因此,在经历环境试验后未出现焊点质量问题。

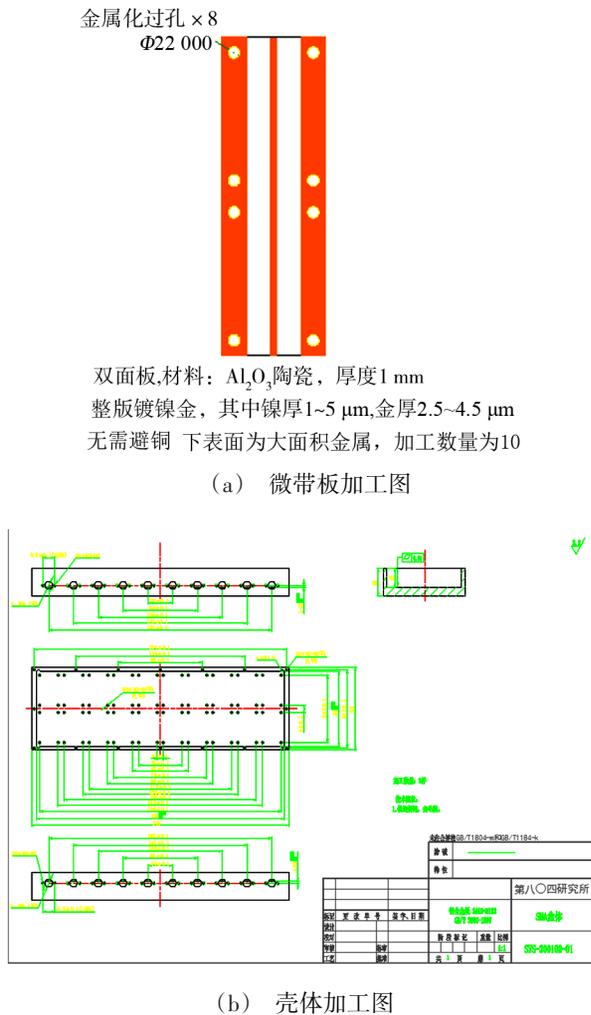


图5 微带板与壳体加工图

Fig. 5 Drawings of microstrip circuit board and shell

2.2 电性能测试

针对射频同轴电连接器与微带板之间的连接,其电性能指标的影响因素主要由电连接器本身的阻抗特性以及芯线与微带线装配过程中引入的不连续性构成,具体包括电连接器与安装孔的同心度、结构的安装间隙以及焊点的结构与形态等^[11-12]。因此,在鉴定试验完成后,采用网络矢量分析仪对不同连接方式形成的组件进行电性能测试,对不同连接方式的电信号质量进行比较分析,得到的试验数据曲线如图6~图7所示。

由图6~图7可知,从曲线趋势上看,陶瓷介质板微波组件中,硬连接与抬高间隙硬连接的微波性能

较为接近,而镀金铜带 Ω 形连接的电性能曲线出现异常,分析认为可能存在焊接与装配问题,此外,镀金铜带 Ω 形连接对于50 Ω 匹配不佳,需通过仿真进行设计方式优化。金带包焊在1~8 GHz内的电性能基本满足使用要求,且与硬连接相比,在各频段下的波形较为接近。综上所述,硬连接对于电信号的控制较佳,而镀金铜带 Ω 形连接虽然具有较强的环境应力抵抗性能,但其电性能相对硬连接一致性较差,金带包焊则二者俱佳。

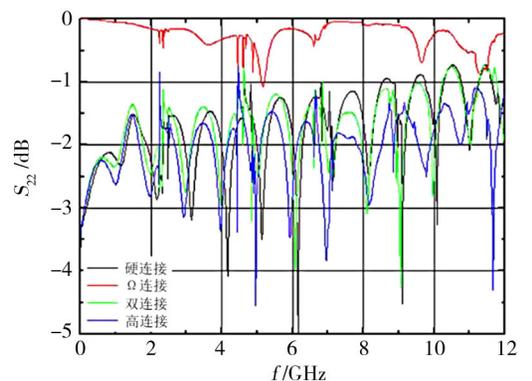
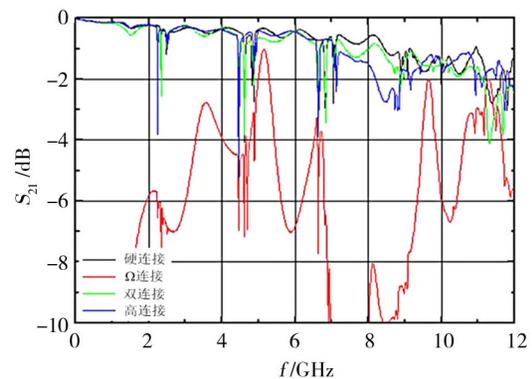
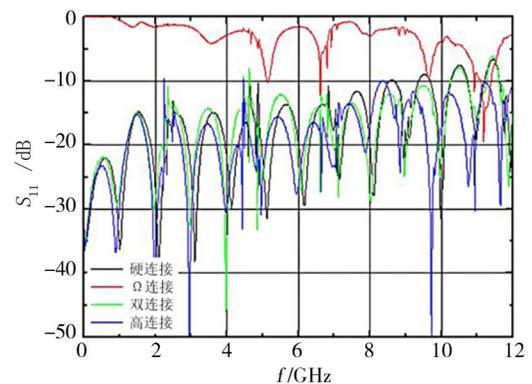
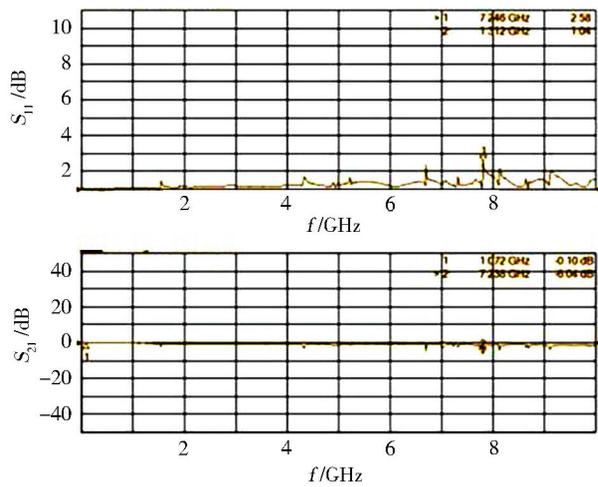
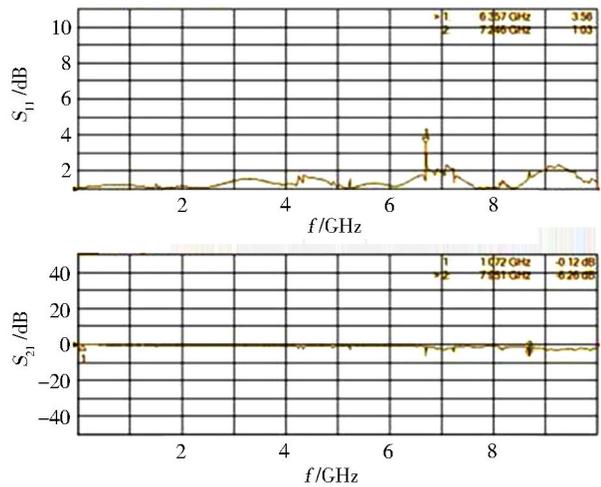


图6 焊料硬连接与镀金铜带 Ω 形连接的电性能对比

Fig. 6 Electrical properties comparison of solder hard connection and Ω -shaped gold-plated copper band connection



(a) 焊料硬连接的输入阻抗 S_{11} 与频率响应 S_{21}



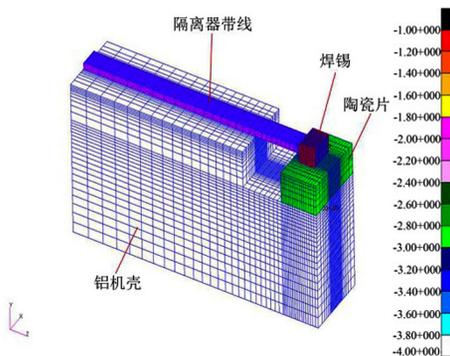
(b) 金带包焊的输入阻抗 S_{11} 与频率响应 S_{21}

图7 焊料硬连接与金带包焊的电性能对比

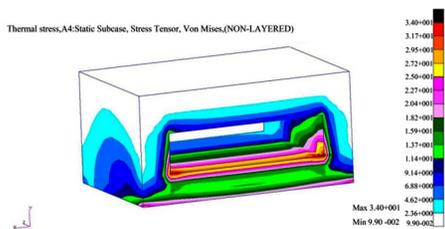
Fig. 7 Electrical properties comparison of solder hard connection and gold band cladding welding

2.3 热应力仿真

为直观验证三种连接方式对于热应力的释放性能,采用有限元模拟分别对焊料硬连接、镀金铜带 Ω 形连接及金带包焊的焊点热应力分布进行了仿真计算,不同连接技术的应力场分布云图如图8~图10所示。



(a) 硬连接焊点结构

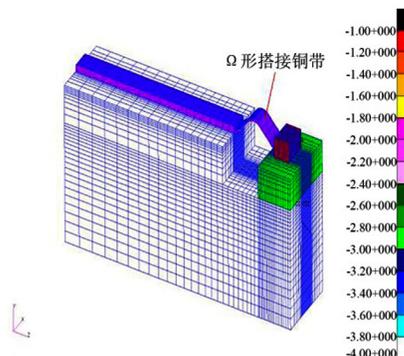


(b) 硬连接焊点应力分布

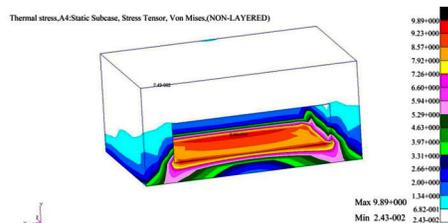
图8 硬连接焊点热应力分布云图

Fig. 8 Thermal stress distribution of solder joint by solder hard connection

通过分析不同连接技术的应力场有限元仿真结果可知,相同温度载荷下,硬连接、镀金铜带 Ω 形连接及金带包焊焊点的最大热应力分别为34.9、8.9及0.43 MPa,而焊锡的抗拉强度约为47 MPa,金带的抗拉强度大于118 MPa,因此,金带包焊焊点的抗拉强度远高于2倍—



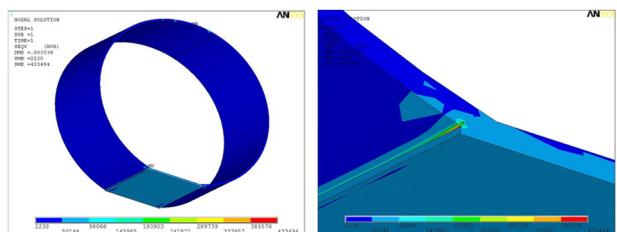
(a) 镀金铜带 Ω 形连接焊点结构



(b) 镀金铜带 Ω 形连接焊点应力分布

图9 镀金铜带 Ω 形连接焊点热应力分布云图

Fig. 9 Thermal stress distribution of solder joint by Ω -shaped gold-plated copper band connection



(a) 金带包焊焊点结构 (b) 金带包焊焊点应力分布

图10 金带包焊焊点热应力分布云图

Fig. 10 Thermal stress distribution of solder joint by gold band cladding welding

大应力,采用金带包焊的力学设计裕度远大于硬搭焊。

3 结论

(1)宇航微波组件SMA型电连接器与微带板之间的三种连接方式中,硬连接焊点在经历力学鉴定试验和200次温度循环试验后出现疲劳纹,间隙过高硬连接焊点在经历力学试验后出现开裂,温循后同样出现疲劳纹;镀金铜带 Ω 形连接和金带包焊焊点在经历力学试验和温循试验后质量未出现异常。

(2)在宇航陶瓷介质板微波组件中,硬连接与间隙抬高硬连接的驻波电性能曲线较为接近;镀金铜带 Ω 形连接的驻波电性能一致性较差,需通过改进设计方式进行优化;金带包焊的驻波电性能曲线与硬连接较为接近,在1~8 GHz内基本满足使用要求。

(3)相同温度载荷下,硬连接的焊点最大热应力远大于镀金铜带 Ω 形连接及金带包焊焊点,采用金带包焊的力学设计裕度远大于硬连接。

(4)硬连接与镀金铜带 Ω 形连接在电信号传递与环境应力抵抗方面各有利弊,但均经历过宇航型号的飞行验证,金带连接作为一种新型连接形式,在电信号传递与环境应力抵抗方面性能俱佳,但用于键合的电连接器类型及该技术在宇航型号上的应用相对较少。

参考文献

[1] 甘军宁,李翔,姚望,等. 宇航微波太赫兹传输技术研究[C]// 航天电子军民融合论坛暨第十四届学术交流会论文集, 2017:92-100.

GAN J, LI X, YAO W, et al. Research on microwave and terahertz transmission technology in aerospace [C]// Space Electronic Civil-Military Integration Forum and the 14th Academic Exchange Conference Papers, 2017:92-100.

[2] 冯永芳. 宇航用射频连接器及电缆组件的可靠性研究[J]. 机电元件, 2018, 38(1):13-15,22.

FENG Y. Reliability study of RF connectors and cable assemblies for aerospace applications [J]. Electromechanical Components, 2018, 38(1):13-15,22.

[3] 史广芹,李海岸,华熙,等. 空间环境对射频电缆组件性能影响的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2019(2):1-4.

SHI G, LI H, HUA X, et al. Study on the effect of space environment on the RF cable assembly performance [J]. Optical Fiber & Electrical Cable and Their Application, 2019(2):1-4.

[4] 黄森,李亚南. 宇航用射频连接器可靠性分析[J].

中国设备工程, 2020(7):199-200.

HUANG S, LI Y N. Reliability analysis of radio frequency connectors for aerospace [J]. China Plant Engineering, 2020(7): 199-200.

[5] 齐登钢,赵超颖,杨晨,等. 太赫兹器件中石英微带-同轴转换优化设计[J]. 电子工艺技术, 2019, 40(4):220-223.

QI D, ZHAO C, YANG C, et al. design optimization of quartz microstrip-coaxial conversion in terahertz devices [J]. Electronics Process Technology, 2019, 40(4):220-223.

[6] 蒋玲玲,郭芮岐,刘刚,等. 热循环对金带微电阻点焊接头连接界面及抗拉力的影响[J]. 强度与环境, 2021, 48(3):53-58.

JIANG L, GUO R, LIU G, et al. The effect of thermal cycle on the joint interface and tensile force of gold strip micro-resistance spot welding joints [J]. Structure & Environment Engineering, 2021, 48(3):53-58.

[7] 《中国航空材料手册》委员会. 中国航空材料手册[M]. 中国标准出版社, 2002.

Committee of《China Aeronautical Material Handbook》. China aeronautical material handbook [M]. Standards Press of China, 2002.

[8] 温秉权,黄勇. 非金属材料手册[M]. 电子工业出版社, 2006.

WEN B, HUANG Y. Handbook of Non-metallic Materials [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2006.

[9] 微波元器件安装技术要求: QJ 3172-2003[S]. 2003. Technical requirements for installation of microwave components: QJ 3172-2003[S]. 2003.

[10] 李学帅,郭丽丽,张建波,等. 深冲紫铜各向异性及织构相关性分析[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(4):44-48.

LI X, GUO L, ZHANG J, et al. Anisotropy and texture correlation analysis of deep-drawing copper strip [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2020, 11(4):44-48.

[11] 孙乎浩,陈澄,王成. 微波组件同轴-微带连接转换工艺研究[J]. 电子工艺技术, 2017, 38(5):276-279.

SUN H, CHEN C, WANG C, et al. Research on converting and connecting process of coaxial connector to micro strip line for microwave module [J]. Electronics Process Technology, 2017, 38(5):276-279.

[12] 应康. 引线搭焊互联点形态与信号传输性能影响机理研究[D]. 陕西:西安电子科技大学, 2019.

YING K. Study on the influence mechanism between the interconnection point morphology and signal transmission performance of lead lap [D]. Shanxi: Xidian University, 2019.