

热振载荷下某星载 SAR 有源单机焊接疲劳损伤研究

董好志,张雨,任海林

(中国电子科技集团第三十八研究所,安徽 合肥 230088)

摘要:针对某星载 SAR 有源单机焊接部位断裂故障,采用数值方法分析热振载荷下焊接部位疲劳损伤,探究故障发生机理,提出结构优化方案。结果表明:温度循环和振动载荷下,焊接部位等效应力均小于材料强度极限;温度循环载荷作用下,焊接部位达到过疲劳状态;随机振动载荷作用下,焊接部位远未达到疲劳破坏水平;造成故障的原因是热循环试验产生初始裂纹,振动试验加速裂纹扩展;为释放焊接局部热应力,连接器采用金箔软搭接方式,可有效避免此类故障。

关键词:有源单机;温度循环;随机振动;疲劳损伤;结构优化

中图分类号:TG405 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0062-04

Research on Welding Fatigue of Satellite SAR Active Single Machine under Thermal and Vibration Load

DONG Haozhi, ZHANG Yu, REN Hailin

(The 38th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: Aimed at the fracture of welding part of a satellite SAR active single machine, numerical method was adopted to analyze the fatigue damage of welded position under thermal and vibration load and explore the mechanism of fault occurrence, thus structural optimization scheme being proposed. The results show that the equivalent stress of welding parts under temperature cycle and vibration load is less than the material strength limit. Under temperature cycle load, the welded positions reach over-fatigue state, while under random vibration load, the welded parts are far from fatigue failure level. The initial crack caused by thermal cycle test and crack propagation accelerated by vibration test result in breakdown. To release welding local thermal stress, gold foil soft lap connection can effectively avoid such failure.

Keywords: active single machine; temperature cycle; random vibration; fatigue damage; structural optimization

0 引言

星载合成孔径雷达(SAR)以卫星为运动平台,具有全天候、全天时、高穿透性的成像能力,广泛应用于军事侦察、自然资源普查、自然灾害监测等领域^[1]。有源单机作为星载 SAR 有源相控阵天线的重要组成部分,在卫星发射阶段,需承受复杂的温度和振动环境。美国空军统计数据表明,超过 75% 的电子设备失效是由温度和振动造成的^[2]。因此,为确保进入太空环境的有源单机能够正常高效地工作,需要在研制阶段进行相应的温度和振动筛选试验。

有源单机中存在多处焊接,如板级元器件焊接、连接器与印制板(PCB板)焊接等,在外部载荷作用下,焊点部位会产生应力、应变。常用锡铅焊料内部晶粒随机排布,晶粒在应力作用下发生相对滑移,出现微小孔洞,逐渐扩展合并形成微裂纹,最终造成焊接失效^[3],因此,焊接寿命很大程度决定有源单机的整体寿命。张云等^[4]数值分析某装甲车通信控制盒内 PCB 板在随机载荷作用下疲劳寿命,并对可能出现故障的区域进行试验验证,发现纯铜

印制线疲劳断裂。秦飞等^[5]以塑封球栅阵列封装器件的锡铅焊点为研究对象,试验与仿真对比研究焊点在随机载荷作用下的疲劳寿命。苏佩琳等^[6]研究板级元器件热循环失效问题,分析采用不同材料的 FR4 基板、焊料和芯片之间的应力、应变,评估焊点的热循环寿命,并对现有结构进行优化,提高焊点的疲劳寿命。佟川等^[7]选取典型的塑封球栅阵列封装器件为研究对象,采用黏塑性材料模式描述锡铅焊料,基于应变的 Engelmaier 疲劳模型,分析热循环载荷下焊点的疲劳寿命。上述的研究只单一考虑振动载荷或温度载荷,实际工况下单机会承受复杂的热振耦合作用。UPADHYAYULA K 等^[8]基于损伤增量叠加法研究了温度循环与振动载荷复合作用下焊点的可靠性问题。王欢等^[9]在线性损伤叠加法的基础上,将温度循环和振动载荷分析作用下焊点的变形总量作为结构边界条件,分析多轴加载下焊点的应力、应变情况。

本文以某星载 SAR 有源单机为研究对象,该有源单机射频连接器搭焊后经 X 光探测焊点质量满足要求,单机电性能测试无问题,但在经历温度循环和随机振动试验后出现射频信号不稳定的故障,采用数值模拟法,分别分析该单机连接器焊接部位在温度循环载荷和随机振动载

荷下的疲劳损伤,探究故障发生机理,提出结构优化方案,以期指导相关产品的结构设计。

1 计算模型

1.1 有限元模型

该有源单机主要由壳体、盖板、电路板(PCB 接口板)、连接器、紧固件等结构组成。其中 PCB 板固定在壳体内部,盖板固定在壳体上方,连接器固定在壳体侧面,均通过螺钉连接;射频连接器由内导体、支撑介质和外介质组成,其中内导体通过铅锡合金焊料搭焊到 PCB 板上。单机外形尺寸 160 mm×140 mm×53 mm,如图 1 所示。

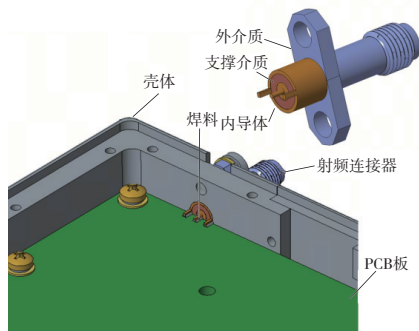


图 1 连接器与 PCB 板搭焊示意图

有源单机现有故障为连接器信号不稳,因此数值分析时主要关注连接器焊接部位。综合考虑计算精度和计算效率,建立有限元模型时需要将单机结构做以下简化:

1) 连接器按内导体、外介质、支撑介质等结构详细建模,并对焊接部位进行建模分析,忽略部分倒角和小圆孔;

2) 主体结构选用高阶实体单元 solid95,低频连接器简化为质量点,选用 rbe3 单元与安装孔连接,确保模型质量分布与实际基本一致;

3) 工程中盖板与壳体采用螺钉点胶加固连接,连接面不发生相对滑移,仿真时接触面采用绑定接触处理,忽略螺钉结构。

对有源单机进行数值离散,图 2 给出单机的有限元模型和局部去盖板示意图, x 、 y 、 z 分别表示单机的长度、宽度和高度方向。

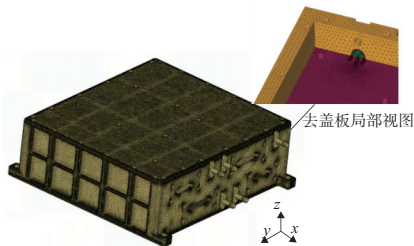


图 2 有源单机有限元模型

1.2 材料参数

有源单机壳体、盖板采用 5A06 铝合金,PCB 接口板采

用 FR4 基板,射频连接器的内导体采用铍青铜 QBe2,外介质采用可伐合金 4J29,支撑介质采用聚四氟乙烯,焊料采用铅锡合金 Pb37Sn63,材料性能参数如表 1 所示。

表 1 有源单机材料性能参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数×10 ⁻⁶ /K
铝合金 5A06	71.0	0.32	23.0
基板 FR4	21.0	0.26	20.0
铅锡焊料 Pb37Sn63	23.0	0.40	25.0
铍青铜 QBe2	117.0	0.33	16.6
聚四氟乙烯	0.7	0.30	120.0
可伐合金 4J29	138.0	0.32	5.9

1.3 Anand 黏塑性模型

有源单机连接器焊料采用铅锡合金 Pb37Sn63,施加载荷后有明显蠕变和黏塑性的力学行为,热循环仿真分析时选用蠕变和塑性统一的 Anand 模型来描述焊点的力学行为,离散单元类型为 Visco 187。Anand 统一黏塑性方程^[10]如下:

$$\frac{d\varepsilon_{eq}}{dt} = A e^{-\frac{Q}{RT}} \arcsin^{\frac{1}{m}} \left(\frac{\xi Q}{s} \right) \quad (1)$$

式中: ε_{eq} 为等效塑性应变值; t 为时间; A 为指数前系数; Q 为能量激活值; R 为气体常数; T 为温度; m 为应变速率敏感指数; ξ 为应力乘数因子; s 为形变阻抗因子。

ANSYS 中采用 Anand 模型需要设置 Pb37Sn63 的 9 个材料参数,如表 2 所示^[11]。

表 2 Pb37Sn63 黏塑性 Anand 参数

Anand 参数	数值	Anand 参数	数值
S_0 /MPa	12.41	h_0 /MPa	1 378.95
$(Q/R)/K^{-1}$	9 400	$\hat{\Lambda}_s$ /MPa	13.79
A/s^{-1}	4×10^6	n	0.07
ξ	1.5	a	1.3
m	0.303	—	—

1.4 试验条件与边界条件

有源单机先后经历温度循环和随机振动试验后出现故障,为探究故障发生原因,仿真分析时采用同样的加载顺序,具体加载条件同试验保持一致。

热循环试验是将试验样品放置在预设的高低温度交替的试验环境,暴露产品中潜在的材料缺陷和制造缺陷,以提高产品的可靠性。有源单机的热循环边界为 -55℃ ~ 70℃,升降温速率 10℃/min,高温保持 2h,低温保持 1.5h,温度循环 24.5 次,无应力应变态温度为室温 20℃。图 3 给出了有源单机温度循环试验中温度随时间的变化曲线。

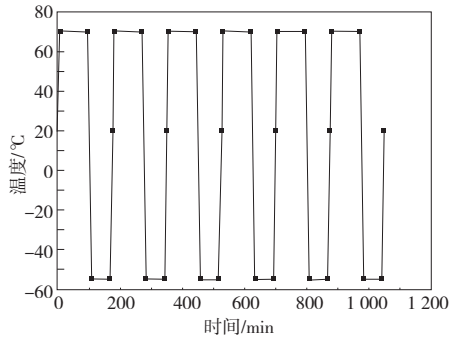


图3 温度循环载荷曲线

随机振动试验采用单轴振动试验台,单机试验条件如表3所示。

表3 随机振动试验条件

频率/Hz	加速度功率谱密度/(g ² /Hz)	总方均根加速度/grms	试验条件
20~80	0.010~0.040 (按+3dB/oct增加)		x、y、z 三向各 4 min
80~350	0.040	6	
350~2 000	0.040~0.007 (按-3dB/oct衰减)		

有源单机底部设置4处安装座,在安装座区域施加全约束。

2 疲劳分析

运用 ANSYS 软件分别分析有源单机在温度循环和随机振动载荷下焊接部位的应力、应变,进一步评估在该载荷工况下焊点的疲劳损伤。

2.1 温度载荷

在温度循环载荷施加过程中,由于不同材料间热膨胀系数相差较大,形成局部应力、应变。图4和图5分别给出高温和低温工况下,连接器焊接部位应力分布云图。

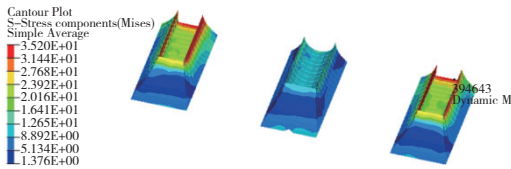


图4 高温工况下焊接部位应力分布云图

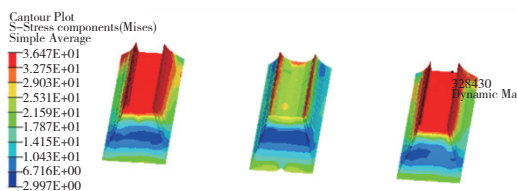


图5 低温工况下焊接部位应力分布云图

由图4—图5可知,焊料在高低温工况下最大应力分别为35.2 MPa和36.5 MPa,均小于铅锡焊料Pb37Sn63的强度极限52.7 MPa,具有一定的安全裕度,焊接危险区域位于焊料与连接器的连接位置。

Engelmaier同时考虑热循环加载频率和平均温度对焊点疲劳影响,提出修正Coffin-Manson方程^[12],如下所示。

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\gamma_p}{2\varepsilon_f} \right)^{1/c} \quad (2)$$

式中: N_f 为焊点的热循环寿命; $\Delta\gamma_p$ 为热疲劳循环周期中焊点最大等效塑性应变范围; ε_f 为疲劳韧性系数,取0.325; c 为疲劳韧性指数。

$$\Delta\gamma_p = \sqrt{3} \Delta\varepsilon \quad (3)$$

$$c = -0.442 - 6 \times 10^{-4} T_m + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1+f) \quad (4)$$

式中: $\Delta\varepsilon$ 为焊点应变范围; T_m 为平均温度; f 为热循环频率。

提取热循环加载条件下焊接危险位置的等效塑性应变曲线,如图6所示。分析各循环周期下焊接危险位置的等效塑性应变增量,以增量稳定后循环周期为研究对象,分析焊点的疲劳寿命。代入式(2)—式(4)得到焊点热循环疲劳寿命 N_f 为22.9个循环。

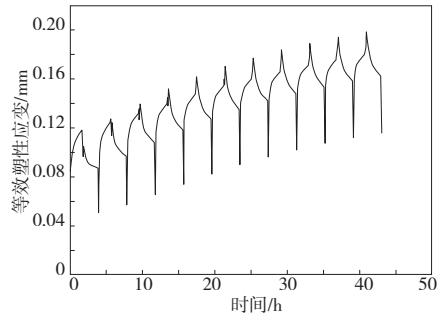


图6 危险位置等效塑性应变曲线

热循环载荷造成的疲劳损伤:

$$D_T = \frac{n_T}{N_f} = \frac{24.5}{22.9} = 1.07 \quad (5)$$

式中: D_T 为热循环下焊点疲劳损伤; n_T 为焊点实际承受热循环次数。

由此可知,有源单机的连接器焊接部位在热循环载荷下出现过疲劳,可能已萌发初始裂纹甚至裂纹已扩展。

2.2 随机振动载荷

有源单机在热循环试验结束后,进行随机振动试验。采用 ANSYS 数值模拟单机的随机振动,表4给出有源单机焊接部位在各方向随机载荷作用下的 Von-Mises 应力。

表4 各方向随机振动下 Von-Mises 应力 单位:MPa

方向	Von-Mises 应力		
	1σ	2σ	3σ
x	7.9	15.8	23.7
y	0.6	1.2	1.8
z	9.2	18.4	27.6

由表4可知,有源单机焊接部位最大 Von-Mises 等效应力发生在z向随机载荷,位于焊料与连接器的连接区

域,如图7所示。根据“ 3σ ”法则,焊料极限强度为52.7 MPa,焊接部位具有较大的安全裕量。

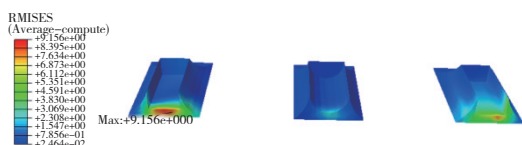


图7 z向随机振动焊接部位应力分布云图

有源单机连接器在随机振动下焊接失效主要是由弹性形变引起的高周疲劳产生^[13],焊点寿命如下所示。

$$N_{nL} = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{el} \times E}{\sigma'_f} \right)^{1/b} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{el}}{\sigma'_f} \right)^{1/b} \quad (6)$$

式中: N_{nL} 为随机载荷下焊点疲劳寿命; σ'_f 为焊料疲劳强度系数, $\sigma'_f = 0.01E$; b 为焊料疲劳强度指数,取-0.13; σ_{el} 为焊点等效应力,由数值模拟获得。

结合“ 3σ ”法则,根据各方向振动载荷下焊点的 1σ 、 2σ 和 3σ 等效应力,分别求得对应应力水平下焊接材料的许用疲劳寿命,分别记为 $N_{nL,1\sigma}$ 、 $N_{nL,2\sigma}$ 和 $N_{nL,3\sigma}$ 。

根据模态分析得到该有源单机在随机载荷下统计学平均频率 v_0^+ ,结合单机各方向试验时间 t_L ,获得各频域下焊接部位实际振动次数为:

$$\begin{aligned} n_{1\sigma} &= 68.26\% v_0^+ t t_L \\ n_{2\sigma} &= 27.18\% v_0^+ t t_L \\ n_{3\sigma} &= 4.3\% v_0^+ t t_L \end{aligned} \quad (7)$$

由Miner线性累积损伤可知,焊点在该方向随机振动下疲劳累积损伤 D_i 如下式所示, i 表示振动方向。

$$D_i = \frac{n_{1\sigma}}{N_{nL,1\sigma}} + \frac{n_{2\sigma}}{N_{nL,2\sigma}} + \frac{n_{3\sigma}}{N_{nL,3\sigma}} \quad (8)$$

有源单机在完成 x 、 y 、 z 3个方向各4min的随机振动试验,总疲劳累积损伤 D_L 为

$$D_L = D_x + D_y + D_z \quad (9)$$

结合表4和式(6)~式(9),获得随机振动试验下有源单机总疲劳累积损伤为0.0058,远未达到焊接部位疲劳破坏水平。

3 故障分析与结构优化

通过对有源单机疲劳损伤数值分析可知,有源单机在温度循环试验时焊点已达到疲劳破坏水平,热应力无法释放导致焊接部位出现初始裂纹。在随机振动试验下,虽然焊点疲劳累积损伤远未达到破坏水平,但有源单机连接器焊接部位已存在缺陷,其疲劳寿命大大降低,在振动作用下,裂纹加速扩展,最终导致焊接部位断裂。这与实际测试中温度循环试验后未发现连接器信号不稳定,随机振动试验后连接器信号不良的现象一致。图8给出有源单机连接器焊接部位裂纹图。

为避免连接器焊接部位断裂,需要降低焊接局部温度应力,运用金箔延展性好的特点,在连接器与印制板焊盘之间采用金箔软搭接,如图9所示。经过温度循环试验和随机振动试验,有源单机测试正常,开盖检查未发现连接器焊接部位出现裂纹等现象。



图8 连接器焊接部位裂纹图 图9 连接器金箔软搭接图

4 结语

针对某星载SAR有源单机出现连接器信号不稳的故障,数值分析该有源单机在温度循环和随机振动试验作用下焊接部位的疲劳损伤,得到以下结论:

- 1) 温度循环和振动载荷下,有源单机焊接部位等效应力均小于材料强度极限,并具有一定的安全裕度;
- 2) 温度循环载荷作用下,有源单机焊接部位达到过疲劳水平,可能会导致疲劳破坏;随机振动载荷作用下有源单机焊接部位疲劳损伤较小,远未达到疲劳破坏水平;
- 3) 造成连接器焊接断裂的故障原因是热循环试验产生初始裂纹,振动试验加速裂纹扩展;
- 4) 为释放焊接部位局部温度应力,结构改进为金箔软搭接方式,可有效避免这类焊接故障。

参考文献:

- [1] 唐宝富,钟剑锋,顾叶青. 有源相控阵雷达天线结构设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2016.
- [2] 汤巍,景博,盛增津,等. 多场耦合下基于传递熵的电路板级焊点疲劳寿命模型[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(5):484-494.
- [3] 汤巍,景博,黄以锋,等. 温度与振动耦合条件下的电路板级焊点失效模式与疲劳寿命分析[J]. 电子学报,2017,45(7):1613-1619.
- [4] 张云,吴圣陶,曾柯杰,等. 某电子设备随机振动疲劳寿命仿真分析[J]. 电子机械工程,2016,32(6):25-28.
- [5] 秦飞,别晓锐,陈思,等. 随机振动载荷下塑封球栅阵列含铅焊点疲劳寿命模型[J]. 振动与冲击,2021,40(2):164-170.
- [6] 苏佩琳,李涛,彭雄奇. PCB焊点热循环失效分析和改进设计[J]. 应用数学和力学,2015,36(4):414-422.
- [7] 佟川,曾声奎,陈云霞. 塑封球栅阵列焊点热疲劳寿命预测有限元方法[J]. 焊接学报,2007,28(10):89-92,117.
- [8] UPADHYAYULA K, DASGUPYA A. An incremental damage superposition approach for reliability of electronic interconnects under combined accelerated stresses. [C]// ASME international mechanical engineering congress & exposition conference. Dallas, Texas: ASME, 1997:32-35.
- [9] 王欢,杨平,谢方伟,等. 复合加载下焊点寿命的数值模拟[J]. 焊接学报,2012,33(12):65-68,116.
- [10] 赵福斌,仇原鹰,贾斐,等. 热振加载条件下电子封装结构的疲劳寿命分析[J]. 西安电子科技大学学报,2019,46(2):54-60.
- [11] 贾小平. 军用电子模块无铅焊点可靠性的研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [12] 吕强,尤明懿,郭细平,等. 工业级FPGA空间应用器件封装可靠性分析[J]. 电子元件与材料,2015,34(2):69-73.
- [13] 谢定君,王畅,谢劲松. 电路板焊点在工程环境条件下寿命分析[J]. 电子质量,2013(5):20-24.

收稿日期:2022-06-06