

电子部件失效模式试验与仿真研究

朱广滕¹, 顾晓辉¹, 方道红², 肖坤¹

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 中国人民解放军78666部队, 云南 宜良 652102)

摘要: 目的 研究焊点在热应力下的等效应力和等效蠕性应变。方法 通过测定某子弹电子部件的工作极限温度、破坏极限温度, 利用阶梯变化的温度来验证电子部件的极限适应温度, 找出电子部件的主要失效模式。通过有限元仿真来模拟热载荷作用下焊点的应力应变行为。结果 应用Garofalo模型仿真得出的蠕变效应与实际试验结果基本相近。结论 通过仿真方法与试验结果相对比, 证明使用Garofalo模型来研究电子部件焊点的蠕变效应是可行的。

关键词: 电子部件; 失效模式; 蠕变; 有限元仿真

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.011

中图分类号: TJ610.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)06-0045-05

Electronic Components Failure Mode Test and Simulation Study

ZHU Guang-teng¹, GU Xiao-hui¹, FANG Dao-hong², XIAO Kun¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. No.78666 Unit of PLA. China, Yiliang 652102, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the equivalent stress and equivalent creep strain of lead-free solder joints under thermal stress. **Methods** The ultimate adaptive temperature of the electronic components was verified through staircase pattern increased temperature. The ultimate working temperature and damaging temperature of the electronic components were tested, and the main failure mode of electronic components was obtained. Subsequently, the stress and strain of solder behavior was simulated by FEM. **Results** The simulation results were corresponded with the experimental results. **Conclusion** Our results provided reliable evidence on how to control the solder joint shape and proved that the Garofalo method is feasible to improve the electronic components' life period.

KEY WORDS: electronic components; failure mode; creep; FEM

电子部件对温度变化比较敏感, 产品设计时如果忽略了温度对所用元器件的影响, 当产品工作在

收稿日期: 2013-09-12; 修订日期: 2013-10-25

Received: 2013-09-12; Revised: 2013-10-25

作者简介: 朱广滕(1986—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要研究方向为系统可靠性。

Biography: ZHU Guang-teng(1986—), Male, from Xuzhou, Jiangsu, Postgraduate, Research focus: system reliability.

经常变化的温度环境时,就有可能出现整体电子部件工作失常或故障^[1]。通过对元器件全温度范围的参数测试,可以了解电子部件参数随温度的变化是否满足人们的需求^[2]。文中通过阶梯变化的温度来验证某子弹电子部件的极限适应温度及其失效模式,然后通过有限元仿真来验证该电子部件的失效机理。

1 电子部件的失效模式与失效分析

按照不同的标准来划分,电子部件的失效种类有很多。根据失效场合可分为现场失效和试验失效;根据失效起源可分为人为失效和自然失效;根据失效性质可分为内在失效、电性失效及外来失效^[3]。本文重点讨论试验失效。

失效分析的步骤包括:

- 1) 收集数据,包括样品的测试、使用历史、失效情况等;
- 2) 观察与判定,通过外观检查、电性测试、功能检测、接触检查等;
- 3) 失效机理假定,根据分析的结果,联系原理图、版图等假定失效机理;
- 4) 认定与验证,去除钝化层、金属层、氧化层等,并不断观察直到发现失效位置;
- 5) 通过仿真进一步验证假设内容;
- 6) 总结得出结论^[4]。

2 电子部件的高温失效试验

首先测定某子弹电子部件的工作极限温度、破坏极限温度,通过试验后的结果来分析其在高温环境中的失效模式与失效机理。电子部件包含单片机、电容、电阻、远程解保插头、水处理开关以及其它电子元件。设定电子部件的失效标准为:输出定时时间 $t_1=39\text{ s}$ (允许误差为 20 ms),自毁时间 $t_2>60\text{ s}$,其中任意一项不满足则认为电子部件失效。然后将10个如图1所示的已写入程序的某子弹电子部件分别编号,通过多组试验,减少误差,得到普遍规律,防止试验的偶然性得出错误的结论。

电子部件高温试验涉及的试验应力为高温应力,起始温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$,温度步长为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,试验后期

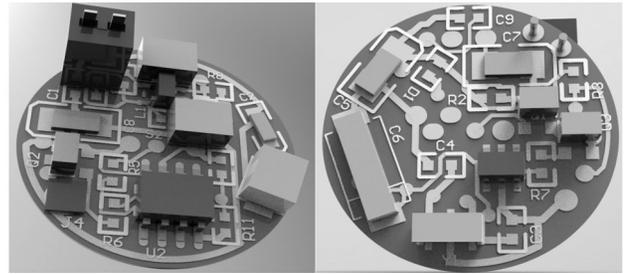


图1 某子弹电子部件三维示意

Fig.1 3D drawing of electronic components of a representative bullet

改为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。每次持续时间为 6 h 。

每次试验的时间步长如图2所示。第1次试验从 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 开始,连续做3次;然后温度升高到 $195\text{ }^\circ\text{C}$,继续做3次试验,以此类推。

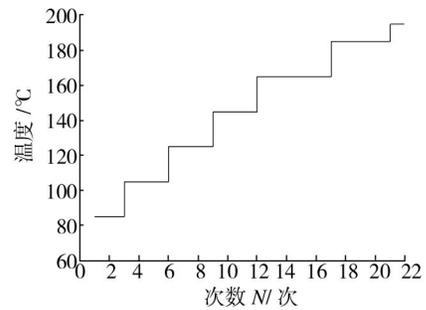


图2 每次试验的时间步长

Fig.2 The staircase pattern of increased temperature

2.1 试验过程

试验前,启动试验恒温箱升温至所需温度,同时检查试件性能参数并记录到试验记录表中。试件的性能参数包括:输入电流、输出电压、作用时间、定时时间和自毁时间。待试验箱升温至所需温度时,将已编号的10个电子部件试件放入试验箱浸泡 6 h ,并指定专人看管。高温浸泡 6 h 后取出在室温下冷却 30 min ,再次进行性能参数检测,并记录到试验记录表中,此为1个试验周期,然后每天进行1次试验。对所记录的各项性能参数变化进行分析,试验前后自毁时间有较为明显的变化。为更好地分析其变化趋势,取试件1测得其变化趋势如图3所示。

经分析可得该试件性能退化不明显,为突发失效电子部件。其工作极限温度为 $175\text{ }^\circ\text{C}$,破坏极限

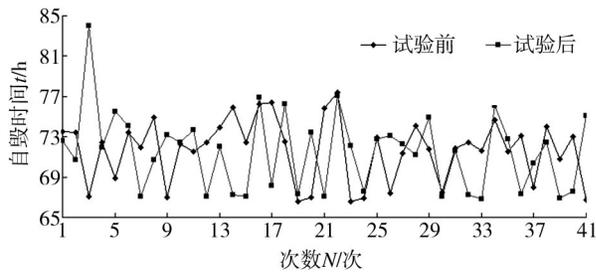


图3 试验前后自毁时间随试验次数的变化

Fig.3 Self-destruction time before and after tests

温度为 185 °C。

2.2 试验后的失效模式与失效机理分析

通过外部检查发现,单片机芯片的引脚与焊盘脱焊,如图4b所示,并且远程解保插头向一侧倾斜,电子部件的助焊剂融化后凝聚成团状。钽电容部分引脚与焊盘脱离并且翘起,如图4a所示。将单片机与钽电容从焊盘中脱焊并取出,单独测试单片机与钽电容的使用性能,结论为各项性能参数正常,说明在高温下,电子部件的元器件没有因为高温的影响而失效。重新焊接单片机与钽电容到原焊盘中,通

过检测整体电子部件工作状态,结果显示工作。确定其失效模式均为引脚与焊盘脱焊导致的开路。

远程解保插头未发生变形,确定导致其倾斜的部位在焊点处。进一步观察发现,焊点形状有变形

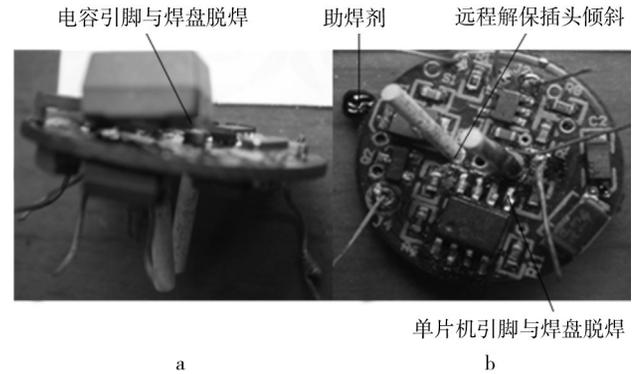


图4 失效后的电子部件

Fig.4 Electronic components after failure

现象。因两试件远程解保插头均发生向不同方向倾斜的现象,如图4b所示,可互为验证,导致其发生倾斜是因其在高温环境中焊点部位变软,试验时处于倾斜状态的远程解保插头在自身重力的作用下倾斜。各部件失效模式与失效机理见表1。

表1 试件的失效模式及失效机理分析

Table 1 Failure mode and failure mechanism analysis of the test-piece

序号	失效模式	失效机理
1	远程解保插头倾斜接触导致短路。	由于表面贴装元件、PCB板和焊料之间的热膨胀不匹配,当环境温度发生变化时,
2	钽电容引脚与焊盘脱焊导致开路。	元器件与基板的热膨胀不一致,焊点内产生热应力,应力的周期性变化导致焊点的
3	单片机引脚与焊盘脱焊导致开路。	热疲劳失效。因试验温度超过熔点温度的一半,主要变形机理是焊点的蠕变。

3 失效模式仿真分析

该试验过程中检测失效的焊点,其主要失效模式为热应力导致的开路失效,包括静态断裂、热疲劳断裂和蠕变断裂,通过有限元仿真可以对试验结果进行补充验证,为同类型电子部件失效模式仿真试验提供参考。

仿真试验采用顺序耦合分析方法,即先进行热分析求得结构的温度场,然后再进行结构分析。且将前面得到的温度场作为体载荷加到结构中,求解结构的应力分布。这里选取无铅焊料的材料为Sn95.5/Ag3.8/Cu0.7,PCB板材料为FR4^[6]。作为有限

元分析的对象,Sn/Ag/Cu的材料参数见表2,载荷为195 °C。

表2 材料的输入参数

Table 2 Input parameters of the material

名称	弹性模量/GPa	泊松比	热导率/(W·m ⁻¹ ·C ⁻¹)	热膨胀/C ⁻¹
FR4	17.7	0.28	0.294	1.1 × 10 ⁻⁵
引脚	70	0.3	237.5	2.1 × 10 ⁻⁵
焊料	30.3	0.35	35	2.9 × 10 ⁻⁵

焊料的蠕变模型使用ANSYS Workbench中的Generalized Garofalo模型,即

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 [\sin h(C_2 \sigma)]^{C_3} e^{-C_4/T} \quad (C_1 > 0)$$

式中： $\dot{\epsilon}_{cr}$ 为等效蠕性应变对时间的导数； σ 为等效应力； T 为绝对温度； $C_1 \sim C_4$ 为材料参数。

焊料的本构模型见表3。

表3 模型的输入参数

Table 3 Input parameters of the model

名称	C_1/s^{-1}	C_2/Pa^{-1}	C_3	C_4/K
焊料	441 000	5×10^{-9}	4.2	5412

3.1 添加载荷

仿真试验中的加载方式为温度加载,加载时间与温度大小(如图2所示)与实物试验一致。利用 ANSYS Workbench 热力学与机构力学耦合模块,进行瞬态非线性分析。

3.2 分析结果

各焊点的等效应力如图5所示。

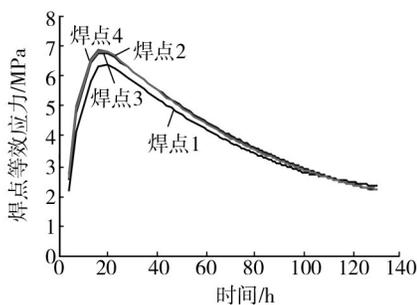


图5 焊点的等效应力

Fig.5 Equivalent stress of weld spots

当时间在 18 h 附近时焊点应力值最大。温度从 85 °C 到 105 °C,焊点的应力值逐渐变大,在 105 °C 到达最大值,超过 105 °C 后,焊点的应力逐渐变小。焊点的等效蠕性应变如图6所示,可以看出,随着时间的增加,累积等效蠕性应变不断增加,

当到达一定程度,焊点的根部发生裂纹,焊点产生断裂失效。各焊点的等效蠕性应变如图7所示,最大应变处在焊点的根部,等效蠕性应变最大值约为0.01。

从试验结果中可知,当电子部件长期所处的温度、载荷低于一定值时,焊接材料的力学性能没有明显的变化;若温度高于一定界限,且引脚对焊点施加

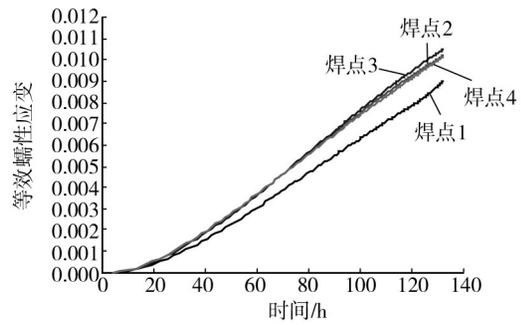


图6 焊点的累积等效蠕性应变

Fig.6 Cumulative equivalent creep strain of weld spots

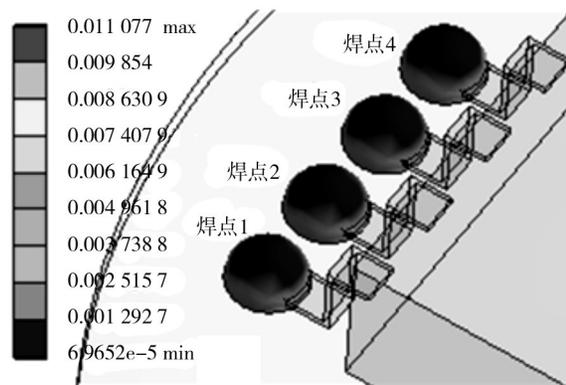


图7 各焊点等效蠕应变

Fig.7 Equivalent creep strain of each weld spot

的外部应力超过某一限度,则焊点材料在这一固定应力和恒定温度条件下,随着时间的增长,变形将会缓慢加大。蠕变形变随时间变化的典型曲线如图8所示。

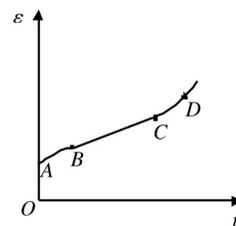


图8 蠕变形变 ϵ 随时间 t 变化

Fig.8 Creep strain ϵ changes with time

从 A 到 B 蠕变速度不断减小,是不稳定的蠕变阶段;从 B 到 C 蠕变速度最小,接近于常量,是温稳定的蠕变阶段;从 C 点开始蠕变速度又增加,是蠕变加速阶段;过 D 点以后,蠕变速度急剧加大以致焊点断裂。

4 结语

在测定某子弹电子部件的工作极限温度、破坏极限温度的基础上,采用有限元软件模拟分析在热载荷作用下焊点的应力应变行为,研究了焊点在热应力下影响应力应变分布的因素。结果表明:在高温下,长期作用载荷将影响材料的力学性能;材料的热膨胀不均衡,导致部件内产生内应力;焊点的蠕变效应,是焊点成为芯片封装失效最高的部位。

通过有限元仿真来模拟热载荷作用下焊点的应力应变行为,研究焊点在热应力下的等效蠕变性应变和等效塑性应变,模拟结果与实际试验基本相近,对控制焊点焊接形态与改进焊接方法提高了参考依据。

参考文献:

[1] LOGSDON W A, LIAW P K, BURKE M A. Fracture Behavior of 63Sn-Pb Solder[J]. Engineering Fracture Mechanics,

1990:183—218.

[2] 付桂翠. 电子元器件使用可靠性保证[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

FU Gui-cui. Operation Reliability Assurance of Rlectronic Components[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[3] BECK F, WILSON S S. Integrated Circuit Failure Analysis [J]. Wiley Series in Quality and Reliability Engineering, 1997:5—6.

[4] 安利全,叶紫薇,郑建明. 无铅焊点可靠性及验证试验 [J]. 装备环境工程,2010,7(6):91—93.

AN Li-quan, YE Zi-wei, ZHENG Jian-ming. Reliability and Validation Test of Lead-free Solder Joint[J]. Equipment Environment Engineering, 2010, 7(6): 91—93.

[5] 盛重,薛松柏,张亮,等. 基于蠕变模型倒装芯片焊点疲劳寿命预测[J]. 焊接学报,2008,29(10):53—55.

SHENG Zhong, XUE Song-bai, ZHANG Liang. Fatigue Life Prediction for Flip Chip Soldered Joints Based on Creep Stain Model[J]. Transactions of the China Welding, 2008, 29 (10): 53—55.

(上接第40页)

[4] 周美立. 仿真系统建模的相似性与复杂性[J]. 系统仿真学报,2004,16(12):2664—2666.

ZHOU Mei-li. Similarity and Complexity of Modeling for Simulation Systems[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(12): 2664—2666.

[5] 康蓉莉,姬广振. 装甲车辆环境剖面分析及环境量值确定[J]. 装备环境工程,2008,5(6):68—71.

KANG Rong-li, JI Guang-zhen. Environmental Profiles Analysis and Environment Value Determination of Armored Vehicle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5 (6): 68—71.

[6] 黄晓英,张剑芳. 物流模数与集装单元化参数相关性分析[J]. 包装工程,2009,30(2):111—112.

HUANG Xiao-ying, ZHANG Jian-fang. Analysis of the

Relativity between Logistics Module and Parameter of Container Unitization[J]. Package Engineering, 2009, 30 (2): 111—112.

[7] 张纬华,韩志强,窦守健. 军用车辆自然环境区划研究[J]. 装备环境工程,2005,2(5):26—32.

ZHANG Wei-hua, HAN Zhi-qiang, DOU Shou-jian. Research on Zoning of Natural Environment for Military Vehicle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(5): 26—32.

[8] 张均享. 高机动性运载车辆动力系统[M]. 北京:中国科学技术出版社,2000:516—519.

ZHANG Jun-xiang. High Mobility Launch Vehicle Dynamic System[M]. Beijing: China Science and Technology publishing house, 2000: 516—519.