

温度循环下塑封器件可靠性评估分析

李永正, 李昕昕, 党炜, 孙卓午, 张泽明

(中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

摘要: 目的 评估塑封器件的热疲劳寿命和可靠性。方法 分析 NASA 和 ECSS 空间任务用低等级器件评估标准, 针对某型号任务用的两种塑封器件制定了温度循环评估方案。在 $-55\sim+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行 500 次温度循环, 配合外观检查、X 射线检查、声学扫描显微镜检查、常温测试检测项目。结果 SOP-8 (Small Out-line Package) 器件评估合格, 各项检测试验项目合格, 其可靠性寿命满足某型号任务单机载荷 2 年需求。SOT-23 (Small Out-line Transistor Package) 器件出现功能失效, 分层扩展至整个焊板区域, 内部键合丝断裂, 电参数失效比例为 95%。结论 塑封器件评估需要制定有针对性的评估方案, 经评估验证, 部分塑封器件的可靠性可满足高可靠领域任务需求, 兼备高可靠性与高性能。

关键词: 塑封器件; 温度循环; 评估; 可靠性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.08.016

中图分类号: TN406

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)08-0083-05

Reliability Evaluation and Analysis of Plastic Encapsulated Device Based on Temperature Cycle

LI Yong-zheng, LI Xin-xin, DANG Wei, SUN Zhuo-wu, ZHANG Ze-ming

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: **Objective** To assess thermal fatigue life and reliability of plastic encapsulated devices. **Methods** Low-level device evaluation standards of NASA and ECSS were analyzed and a temperature cycling evaluation scheme was developed for two types of plastic encapsulated devices used for a certain type of task. 500 cycles were carried out at $-55\sim+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ with the external visual inspection, X-ray examination, scanning acoustic microscopy examination and electrical test. **Results** The SOP-8 (Small Out-line Package) device was qualified, and the test items were qualified, and its reliability life could meet the requirements single machine of a certain type of task for 2 years. The functions of SOT-23 (Small Out-line Transfer Package) were invalid, and the delamination was extended to the whole welding plate area. The internal bonding wire was broken and the failure rate of electrical parameters was 95%. **Conclusion** Evaluation of plastic encapsulated devices needs to develop a targeted evaluation plan. After evaluation and verification, and the reliability of some plastic encapsulated devices can meet the mission requirements of high reliability field through evaluation, with high reliability and high performance.

KEY WORDS: plastic encapsulated device; temperature cycle; evaluation; reliability

随着空间站空间应用系统有效载荷对高性能、高精度、大容量的指标需求, 传统的高质量等级元器件逐渐不能满足其部分指标性能需求。COTS

(Commercial Off-The-Shelf) 器件具有高性能、低成本的优势, 能够满足高性能需求, 但不能满足空间高可靠要求^[1]。由于 COTS 器件一般为塑封的工业级或

收稿日期: 2018-05-03; 修订日期: 2018-06-20

基金项目: 中国科学院青年创新促进专项基金 (CASYI2014135)

作者简介: 李永正 (1985—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事元器件可靠性及其检测技术研究。

商业级器件,应用于高可靠领域需要开展评估试验,验证其可靠性。

塑封器件的可靠性通常开展温度循环、高温贮存、高温寿命等可靠性试验,其中温度循环是最有效的预示可靠性的试验^[2]。塑封器件在高温、低温应力交替下会出现膨胀与收缩,由于塑封料与芯片、基板和引线架等材料的膨胀系数差异,接触界面的结合点会产生剪切力。随着应力的累积,会导致塑封料与芯片、基板和引线架等接触界面产生裂纹和分层缺陷,甚至造成器件的电参数漂移以致失效。通常,机械应力的疲劳与电学应力的疲劳和失效具有相同的物理规律^[3]。

温度循环试验主要是利用不同材料热膨胀系数的差异,加强其因温度快速变化所产生的热应力对试件所造成的劣化影响^[4-5]。根据温度循环加速试验应力水平,采用 Coffin-Manson 加速模型可以评估塑封器件的可靠性。

由于器件封装形式的多样性,国外已针对 CCGA (Ceramic Column Grid Array)^[6]、BGA (Ball Grid Array)^[7]、LQFP (Low-profile Quad Flat Packages)^[8] 封装的 COTS 器件开展了温度循环评估其可靠性的相关研究。国内关于温度循环与器件封装的研究相对较多。陈颖等人对下 PBGA 封装焊点寿命进行了研究^[9-10]。李志刚等人对温度循环下 IGBT 热阻退化特性进行了相关研究^[11]。文中针对某型号任务常用的 SOP-8、SOT-23 两种封装的 COTS 器件开展温度循环评估验证。

1 温度循环试验

通过对单个温度循环试验周期的分析,可以得到温度循环的环境应力剖面图,如图 1 所示^[12]。温度循环试验环境应力的关键参数包括:上限温度 T_h ,下限温度 T_l ,温度变化范围 ΔT ($\Delta T = T_h - T_l$),温度变化速率 v ,高低温贮存停留时间 t ,循环次数 N 。

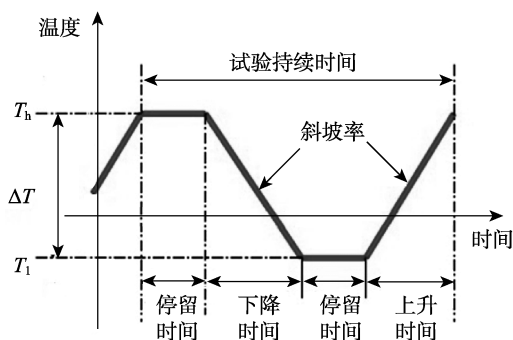


图 1 温度循环应力剖面

温度循环试验中温度变化范围 ΔT 越大,高低温交变的应力越大,加速因子的值越高。但高低温的极

限温度不应超过塑封器件的额定贮存温度。温度循环次数 N 越高,在塑封器件内部累积的交变应力越多,加速效果越显著。

温度循环加速应力下的 Coffin-Manson 修正模型为^[13]:

$$N_f = C \cdot F^{-a} \cdot (\Delta T)^{-b} \exp\left(\frac{E}{KT_{\max}}\right) \quad (1)$$

式中: N_f 为失效循环数; C 为常数; F 为循环频率; ΔT 为温度变化范围; E 为激活能; K 为波尔兹曼常数; $T_{\max}$ 为温度循环最高温度。

温度循环的加速因子为低应力的失效循环数 N_L 与高应力失效 N_H 循环数之比,根据公式 (1) 计算得到公式 (2)。

$$AF = \frac{N_L}{N_H} = \left(\frac{\Delta T_H}{\Delta T_L}\right)^b \cdot \left(\frac{F_L}{F_H}\right)^{-a} \cdot \exp\left(\frac{E}{K} \cdot \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H}\right)\right) \quad (2)$$

式中: ΔT_H 和 ΔT_L 为低应力和高应力的温度变化范围; F_L 和 F_H 为低应力和高应力下的循环频率; T_L 和 T_H 为低应力和高应力下的最高温度; K 为玻尔兹曼常数; E 为激活能,半导体材料一般取 0.42; 常数 a 与循环频率相关,一般取 1/3; 常数 b 与温度循环的最高温度相关,一般取平均值 1.9。

2 评估标准

应用于高可靠领域的塑封器件,需要经过评估试验、破坏性物理分析/结构分析、筛选试验项目,考核其可靠性,并剔除存在早期缺陷的器件。针对塑封器件在空间任务领域的应用, NASA 和 ECSS 分别制定了低等级器件评估标准, NASA/TP—2003-212244^[14] 和 ECSS-Q-ST-60-13C^[15] 低等级器件评估、筛选标准规范。两种规范属于通用性总规范, NASA/TP—2003-212244 仅适用于低等级塑封器件, ECSS-Q-ST-60-13C 适用于所有塑封和密封的低等级器件。

在低等级器件评估试验中,温度循环是必须进行的一项试验。NASA 和 ECSS 的低等级器件评估规范中,对温度循环的试验条件参见表 1。对于风险等级为 Level 1 任务,评估试验中直接进行 500 次的温度循环试验。一次性进行 500 次温度循环试验后,再进行 Electrical measurement、C-SAM、DPA/CA 等分析项目,分析是否满足任务周期的需求。

目前,应用于高可靠领域的塑封器件温度循环试验方法一般按照 GJB 548B—2005 方法 1010.1 执行^[16]。该方法中对温度循环的高温、低温的应力条件和停留时间作了明确要求,对温度循环次数无明确规定。元器件行业内, JEDEC 制定的 JESD47H.01 标准对塑封器件鉴定试验中温度循环作出明确规定,要求在

-55~+125 ℃应力下，进行 700 次温度循环，不允许出现失效器件^[17]。

表 1 温度循环评估标准				
标准	应力条件	I	II	III
NASA/TP—2003-212244	-55~+125 ℃	500 次	200 次	100 次
ECSS-Q-ST-60-13C	-55~+125 ℃	500 次	500 次	NA

注：应力条件不得超过额定贮存温度，取小者

3 评估方案

某工程型号中，某单机有效载荷预期工作周期 2 年，实际工作环境剖面为-25~+60 ℃，高低温的循环频率 15 次/天。考虑器件额定贮存温度和评估试验周期，温度循环的应力条件选取-55~+125 ℃，停留时间 15 min，循环频率 48 次/天。根据式（2）计算，加速因子 $AF=33.24$ ，得到温度循环次数与可靠性的数据图，如图 2 所示。预计 2 年周期，需要在该应力条件下开展约 350 次温度循环评估。为了确保可靠性，参考行业内评估标准，决定进行 500 次循环评估试验。

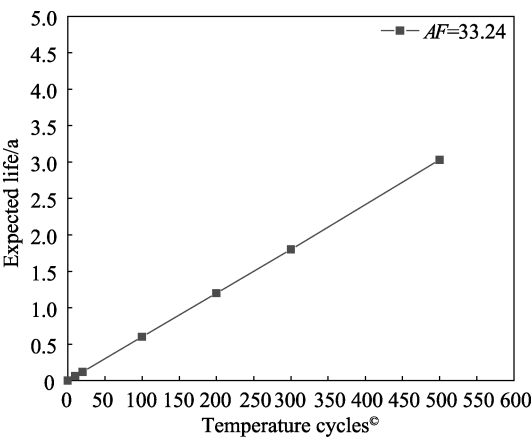


图 2 可靠性与循环次数

选取该工程型号常用的两种封装类型的塑封器件，SOP-8 封装和 SOT-23 封装的塑封器件各 20 只，制定相应的评估试验方案。与 NASA 和 ECSS 的评估标准不同，该评估方案不是一次性执行 500 次循环。在评估期间，设置温度循环次数的节点进行检测试验，这样的优势可以有效判断器件缺陷和失效时间节点，准确评估可靠性。根据以往工程检验经验，塑封器件经过 100 次温度循环，X 射线检查不会发现明显变化，故 10 次、20 次、100 次不进行此项检查。评估方案中，所有检测试验项目均按照 GJB 548B—2005 相应的试验方法进行，具体流程试验项目见表 2。

表 2 温度循环评估方案						
试验项目	0 次	10 次	20 次	100 次	200 次	500 次
外观检查	▲	▲	▲	▲	▲	▲
X 射线检查	▲	NA	NA	NA	▲	▲
C-SAM 检查	▲	▲	▲	▲	▲	▲
常温测试	▲	▲	▲	▲	▲	▲

注：C-SAM（Scanning Acoustic Microscope SAM）；NA（Not Applicable，10 次、20 次、100 次未进行此项）

4 评估试验

4.1 外观检查和 X 射线检查

评估试验中，SOP-8 封装的器件在初始检查和温度循环至 500 次的最终检查中，外观和 X 射线检查结果无明显差异，未出现失效。两种器件典型的 X 射线检查初始图像如图 3 所示。而 SOT-23 封装的器件在评估试验后，X 射线检查发现内部的键合引线断裂，如图 4 所示。

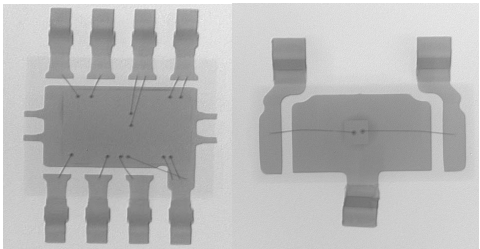


图 3 SOP-8 和 SOT-23 X 射线图

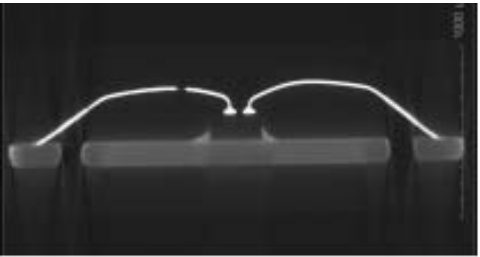


图 4 SOT-23 键合引线断裂

4.2 C-SAM 检查

由于温度循环的高低温交变应力会导致塑封器件产生分层、裂纹缺陷。因此，C-SAM 检查是温度循环评估试验中的重要检测项目。

随着温度循环次数的增加，塑封器件内部应力累积效应明显。SOT-23 器件由于存在初始分层缺陷，在 10 次循环后，分层扩展趋势明显；20 次循环后，顶视图焊板与塑封料界面完全分层。SOP-8 器件在 500 次循环后，部分器件顶视图引线架的位置出现分层，C-SAM 示例结果如图 5 所示。

4.3 电参数测试

电参数是器件的重要特性指标，电参数的各项指

标均有严格的判定依据。特别是高性能的塑封器件,运算速度快,参数指标精度高。随着温度循环应力的累积,某一项电参数的漂移均可能导致塑封器件失效。

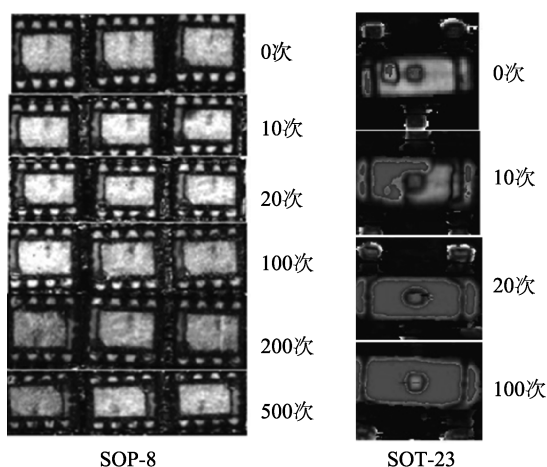


图5 C-SAM变化趋势

在电参数测试项目中,在常温下测试了器件的主要电参数。其中,SOP-8 器件重点监测参考电压 V_{FB} 和输入直流电流 I_Q 。随着温度循环次数的增加,该器件的电参数特性无明显变化,均在合格范围内。参考电压和输入直流电流部分测试数据如图6和图7所示。

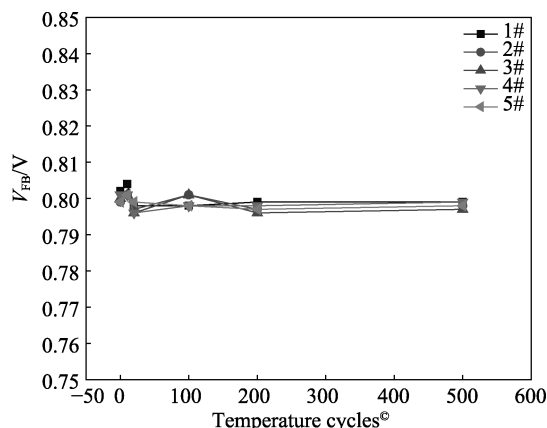


图6 参考电压测试数据

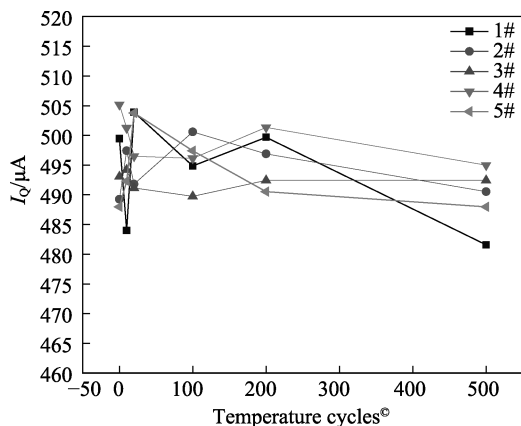


图7 输入直流电流测试数据

SOT-23 器件重点监测门极开启电压 $V_{GS(th)}$ 和源漏开态电阻 $R_{DS(on)}$ 两项参数。10 次循环后,SOT-23 器件的电参数失效数量达到 13 只,失效数量随循环次数的变化如图8所示。

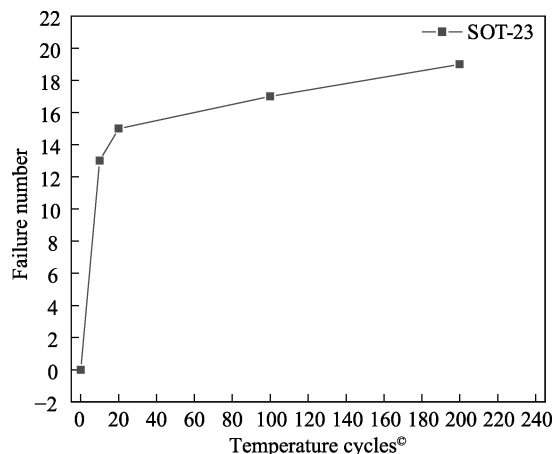


图8 SOT-23 失效数

4.4 评估结果

经 500 次温度循环评估试验,SOP-8 封装的塑封器件评估合格,各项检测试验项目合格。C-SAM 检测内部引线架位置出现少量分层缺陷,电参数特性正常,预期可靠性满足工程型号任务需求。

SOT-23 封装的塑封器件,由于存在初始分层缺陷,随着循环次数增加分层扩展趋势明显。评估试验后,分层扩展至整个焊板区域。X 射线检查发现,内部键合引线由于应力形变被拉断,电参数失效比例达到 95%,可靠性不能满足型号任务需求。

5 结语

温度循环的高低温交变应力可以激发塑封器件分层、裂纹缺陷,是评估塑封器件可靠性的有效手段。

塑封器件应用于高可靠领域,需要结合型号任务的任务剖面和环境剖面制定相应的评估方案,实现低成本、高可靠的目标。

经过温度循环评估验证,配合有效的检验测试项目,可有效评估塑封器件的可靠性是否满足高可靠领域任务的需求。

参考文献:

- [1] 党伟,孙惠中,李瑞莹. COTS 器件空间应用的可靠性保证技术研究[J]. 电子学报,2009(11): 2589-2594.
- [2] TACHIBANA M, FANG J J. An Estimation of Thermal Stress of Thermoelectric Devices in the Temperature Cycling Test[J]. Procedia Engineering, 2012(27): 177-185.
- [3] HE X T, FU J Y. Experimental Evidence That Electrical Fatigue Failure Obeys a Generalized Coffin-Manson

- Law[J]. *Phys Lett A*, 2017, 381(18): 1598-1602.
- [4] 曹耀龙, 黄杰. 电子组件温度循环试验研究[J]. *半导体技术*, 2011, 36(5): 487-491.
- [5] 王学孔, 张钟文, 钟云龙. 可靠性强化试验技术在机电产品中的应用研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2016, 34(5): 51-56.
- [6] REZA G. CCGA Packages for Space Applications[J]. *Microelectronics Reliability*, 2006(46): 2006-2024.
- [7] ALBERTI R, R E VAION, MERVIC A. Metal Fatigue in Copper Pillar Flip Chip BGA: A Refined Acceleration-model for the Aluminium Pad Cracking Failure Mechanism[J]. *Microelectronics Reliability*, 2015(55): 1838-1842.
- [8] CZERNY B, MAZLOUM-NEJADARI A, KHATIBI G. Fatigue Testing Method for Fine Bond Wires in an LQFP Package[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016(64): 270-275.
- [9] 陈颖, 康锐. PBGA 封装焊点寿命影响因素的有限元分析[J]. *半导体技术*, 2008, 33(7): 563-566.
- [10] 吕晓瑞, 林鹏荣, 黄颖卓, 等. CBGA 器件焊点温度循环失效分析[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2016, 34(3): 19-22.
- [11] 李志刚, 张亚玲, 梅霜. 温度循环下 IGBT 热阻退化模型的研究[J]. *电子技术应用*, 2016, 42(2): 25-31.
- [12] CUI H. Accelerated Temperature Cycle Test and Coffin-Manson Model for Electronic Packaging[J]. *Reliability and Maintainability Symposium*, 2005: 556-560.
- [13] IKUO S, HIDEO M, YASUMITSU O. Solder Joint Reliability Evaluation of Chip Scale Package Using a Modified Coffin-Manson Equation[J]. *Microelectronics Reliability*, 2004(44): 269-274.
- [14] NASA/TP—2003-212244, PEM-INST-001: Instructions for Plastic Encapsulated Microcircuit (PEM) Selection, Screening, and Qualification[S].
- [15] ECSS-Q-ST-60-13C, Commercial Electrical, Electronic and Electromechanical (EEE) Components[S].
- [16] GJB 548B—2005, 微电子器件试验方法和程序[S].
- [17] JESD47H.01, Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits[S].