

电路板的高加速应力筛选仿真设计技术研究

彭丽

(空军军械通用装备军事代表局,北京 100166)

摘要: 针对某型电路板高加速应力筛选剖面设计中耗费大量人力物力的实际情况,结合目前计算机辅助及仿真技术所具有的成本低、周期短、精度高等特点,将高加速应力筛选及计算机仿真技术融合,提出了运用计算机仿真手段来研究产品的高加速应力筛选剖面的方法及基本思路。对剩余有效寿命的预计、缺陷影响以及应力影响等方面进行了研究分析。从而在高加速应力筛选剖面设计信息量的扩充、成本的节省、周期的缩短等方面起到了一定的促进作用。

关键词: 高加速应力筛选; 计算机仿真; 电路板

中图分类号: TB114.37 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)05-0112-06

Research of Circuit Board Highly Accelerated Stress Screening Simulation Design

PENG Li

(Military Representative Bureau of Air Force Ordnance for General Equipment, Beijing 100166, China)

Abstract: The existing large resource consuming problem of highly accelerated stress screening was analyzed. Method and consideration of using computer simulation for studying highly accelerated stress screening profile was put forward by integrating the technologies of highly accelerated stress screening and computer simulation and making use of the low cost, short cycle and high-precision characteristics of simulation technique. The remaining useful life, defect influence, and stress influence were studied and analyzed. The method has promotion function in extending information, saving cost, and shortening time of highly accelerated stress screening profile design.

Key words: highly accelerated stress screening; simulation; circuit board

在产品的制造、生产过程中,往往会因为工艺、材料等方面的问题不可避免地使产品产生一定的缺陷。这些缺陷如果不经鉴别和剔除而进入用户手中,在使用的早期便会演变为故障(早期故障),从而为产品的制造商带来经济及声誉上的损失。为了避

免这种损失,同时为了给产品的制造、工艺、材料等方面的改进提供依据,工程上通常使用环境应力筛选(Environment Stress Screening, ESS)的方法来鉴别和剔除产品的这种早期故障。ESS是产品生产中的一种工艺手段,虽然已有相应的标准并对其进行了

收稿日期: 2012-04-10

作者简介: 彭丽(1976—),女,湖南长沙人,硕士研究生,工程师,主要研究方向为可靠性系统分析、可靠性试验技术、可靠性保障等。

规定,但实践表明有时按照这些标准进行筛选,不但耗时、耗力,且效果并不理想;有时筛选不出早期故障,浪费了时间和经费;有时造成了产品的损坏;有时筛选出的早期故障很少,而现场使用中早期故障却频繁出现。在这些情况下,高加速应力筛选(Highly Accelerated Stress Screening, HASS)应运而生,并取得了较好的效果^[1-3]。

HASS是由美国的Gregg K. Hobbs博士等学者经过多年对ESS的研究后,于1984年提出的。该技术采用温度循环和三轴六自由度随机振动综合应力以及比ESS高得多的应力量值对产品进行加速筛选。它是结合产品的实际情况,满足既能够快速、经济、有效地激发出在使用环境下可能导致产品失效的各类缺陷,又不过量消耗产品的有效寿命要求的情况下,根据一定的设计准则而得到的。

然而,在HASS的剖面设计及产品的实际生产中,由于技术及经费的限制,一定程度上阻碍了HASS的开展与进一步发展。如为了研究HASS剖面对产品有效寿命的消耗程度,通常对产品重复施加多次HASS,观察是否有故障发生,推断出HASS剖面对受试产品有效寿命的消耗程度,需要投入较多的人力物力且评估精度难以保障。与之相对应的是,目前计算机辅助及仿真技术日益成熟,且具有成本低、周期短、精度高等特点,如果能将计算机辅助及仿真技术融入到产品的HASS设计之中,在节省了大量人力物力的同时也势必会为产品及企业的竞争力提高发挥一定的作用。针对某电路板,对仿真技术及HASS剖面的融合进行了研究,为电路板的HASS设计节约成本并提高精度。

1 产品描述及研究思路

1.1 产品描述

某电路板为PBGA电路板,它是由器件、焊点、PCB板组成的三明治结构,其中焊点的材料为63Sn37Pb,数量为16,器件分为塑封层、芯片、基板3层。对其施加温度上下限分别为110, -55 °C,上下限保温时间为10 min,温变率为45 °C/min,循环次数为2,振动量级为6g_{rms}的HASS, HASS剖面如图1所示。在研究HASS剖面对产品有效寿命的影响时,若

使用试验的方法对产品反复施加多次HASS,会耗费大量试验资源,因此考虑通过计算机仿真的方法研究HASS剖面对产品有效寿命的影响。

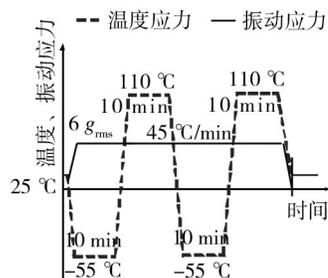


图1 PBGA的HASS剖面

Fig. 1 HASS profile of PBGA

1.2 HASS剖面的仿真研究思路

利用计算机仿真的方法对电路板的HASS剖面进行研究,主要目的就是通过计算机仿真的手段来搜集、提取电路板在HASS作用下与失效相关的特征量,并利用特征量及相应的评价手段来研究HASS剖面对产品及其缺陷的作用效果,从而在不断修正的过程中得到一个满足要求的HASS剖面。在具体实施计算机仿真的过程中,主要分为以下几个步骤。

1) 依据电路板自身的特性,研究产品的薄弱环节以及影响其失效的关键环节,对产品的结构、组成、失效模式等因素进行简化。

2) 在步骤1)的基础上,建立能够评价HASS对产品作用效果的相应准则及数值模型,并确定需要搜集、提取的特征量。

3) 通过计算机仿真的方法对产品进行建模,并对所建立的模型施加HASS剖面中的应力,从而得到仿真结果及所需的特征量。

4) 将特征量带入步骤2)中的模型中,研究HASS剖面对产品的作用效果,并以此为依据对HASS剖面进行相应的修正。

2 产品简化及数值模型

2.1 产品的简化

研究表明,电子器件失效中70%是由封装及组装的失效所引起的,而在电子封装及组装的失效中,

焊点的失效是主要原因^[4],因此可以将焊点看作是产品的薄弱环节。根据短板理论,在对产品的HASS剖面进行仿真研究时,可以将焊点作为研究对象,通过研究HASS剖面对焊点的作用效果来研究它对产品的作用效果。

2.2 数值模型

由于HASS中的温度循环和随机振动都是循环的过程,因此可以用疲劳累积损伤来描述产品在温度循环和随机振动应力作用下对失效的趋近程度。对于在HASS的温度循环和随机振动综合应力作用下焊点的疲劳累积损伤评估,可以由1991年Barker提出的综合应力下的疲劳累积损伤公式得到。综合应力下的疲劳累积损伤公式为^[5]:

$$D = D_{th} + D_v \quad (1)$$

式中: D_{th} 为温度循环造成的疲劳累积损伤值; D_v 为随机振动造成的疲劳累积损伤值。由此可知,如果得到了温度循环和随机振动的累积损伤值,那么便可得到综合应力的疲劳累积损伤值。

2.2.1 温度的累积损伤预测模型

Darveaux提出的焊点寿命预测方程,目前被广泛应用于新型芯片封装的寿命预测中。Darveaux将每一循环中的平均塑性功密度的累积 ΔW_{avg} 与焊点起裂时的循环数 N_0 以及裂纹扩展速率 da/dN 相关联,并给出如下关系式^[6]:

$$N_0 = K_1 \Delta W_{avg}^{K_2} \quad (2)$$

$$da/dN = K_3 \Delta W_{avg}^{K_4} \quad (3)$$

$$N_f = N_0 + \frac{a}{da/dN} \quad (4)$$

式中: K_1, K_2, K_3, K_4 为与裂纹扩展有关的常数; a 为裂纹长度; N_f 为特征寿命(失效概率为63.2%的循环数)。若对焊点实施了 n 个循环,便可知焊点的温度循环的累积损伤值为:

$$D_{th} = n/N_f \quad (5)$$

温度上下限、温变率等因素对损伤的影响,是通过设置上述方程及模型的参数来体现的。

2.2.2 随机振动的累积损伤预测模型

为了估计随机振动对焊点的累积损伤,2000年T.E.Wong等人提出了基于合金材料焊点的高周疲劳的修正coffin-manson方程,并给出了相关经验参数。公式的具体形式为^[7]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{3.5 S_u}{2E} N^{-0.12} \left(\frac{A_i}{A_D} \right)^{0.12} \quad (6)$$

式中: ε 为应变幅值; $\Delta \varepsilon$ 为总应变幅值; S_u 为最终拉伸强度,MPa; E 为弹性模量,GPa; A_i 为焊点开裂面积, mm^2 ; A_D 为特征面积, mm^2 。

将上述内容结合Steinberg于1988年提出的基于高斯分布的三区间法便可求得焊点在随机振动条件下的疲劳寿命。三区间法为 $1\sigma, 2\sigma, 3\sigma$ 的应变发生在68.31%,27.1%,4.33%的时间内,它们所对应的疲劳寿命为:

$$i\varepsilon = \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{3.5 S_u}{2E} N_i^{-0.12} \left(\frac{A_i}{A_D} \right)^{0.12}, \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

由此便可以得到焊点在3个区间内的疲劳寿命 N_1, N_2, N_3 。假设振动试验中的平均频率为 N_0^+ ,振动时间为 t 。随机振动的循环数为:

$$\begin{aligned} n_{1\sigma} &= 0.6831 N_0^+ t \\ n_{2\sigma} &= 0.271 N_0^+ t \\ n_{3\sigma} &= 0.0433 N_0^+ t \end{aligned} \quad (8)$$

由Miner定理可知,焊点的随机振动疲劳损伤值为:

$$D_v = \frac{n_{1\sigma}}{N_1} + \frac{n_{2\sigma}}{N_2} + \frac{n_{3\sigma}}{N_3} \quad (9)$$

因此在分别得到 D_{th} 和 D_v 后,便可通过公式(1)得到HASS剖面对焊点的疲劳累积损伤值,以此为依据对产品的HASS剖面进行研究。求解上述模型所需的特征量,则可以通过计算机仿真的手段获得。

3 计算机仿真建模

3.1 剩余有效寿命的仿真预计

应用ANSYS仿真软件对HASS剖面作用下的焊点进行仿真,进而得到其疲劳累积损伤值,从而研究HASS剖面对产品有效寿命的影响。

3.1.1 温度的仿真

首先定义材料的属性,结合产品属性及ANSYS有限元分析的原理,需要的材料属性为弹性模量、线膨胀系数、泊松比,塑封层、芯片、基板、焊点、PCB板的具体参数见表1^[8],相应的有限元分析模型采用Anand本构模型,其具体形式为:

$$\dot{\varepsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right)\right]^{1/m} \quad (10)$$

$$\dot{s} = \left[h_0 \left(1 - \frac{s}{s^*}\right)^\alpha \operatorname{sgn}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right)\right] \dot{\varepsilon}_p \quad (11)$$

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)\right]^n \quad (12)$$

表1 模型材料参数

Table 1 Material parameters of the model

材料	塑封层	芯片	基板	焊点	PCB板
弹性模量/GPa	15.5	168.9	26	30	22
线膨胀系数/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	1.5	2.6	15	24.5	18
泊松比	0.25	0.3615	0.22	0.35	0.28

式中: $\dot{\varepsilon}_p$ 为非弹性应变速率; s 为内部状态变

量; σ 为等效应力; m 为应变速率敏感指数; ξ 为应力乘子; R 为气体常数; Q 为激活能; A 为常数; T 为热力学温度; \dot{s} 为内部状态变化速率; h_0 为硬化/软化常数; α 为与硬化/软化相关的应变速率敏感指数; s^* 为给定温度和应变速率时内部变量的饱和值; \hat{s} 为系数; n 为指数。可知在粘塑性 Anand 方程中, 共有 9 个材料参数: $A, Q, \xi, m, h_0, s^*, n, \alpha$ 和初始变形阻抗 s_0 , 它们的参数见表 2^[9]。其次定义单元类型, 焊料的单元类型为粘塑性单元 Visco107, 其它部分采用单元 Solid45。再次, 由于产品是对称的, 因此采用 1/4 模型来建立产品的模型。然后, 对模型进行网格划分, 如图 2 所示。而后以 HASS 剖面为依据, 对模型施加约束并求解。最后, 将仿真求解得到的 ΔW_{avg} 代入 Darveaux 模型中的式(2), (4)中, 其中基于 1/4 模型

表2 Anand模型参数

Table 2 Parameters of Anand model

s_0	Q	A	ξ	m	h_0	s^*	n	a
12.41	9400	4.0×10^6	1.5	0.303	1378.95	13.79	0.07	1.3

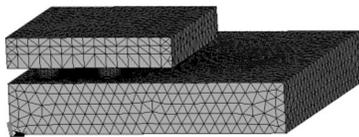


图2 1/4模型及网格

Fig. 2 1/4 model and grid

的 Darveaux 模型参数为 $K_1=56\ 300, K_2=-1.62, K_3=3.34, K_4=1.04$, 计算出焊点的特征寿命 N_f 及其疲劳累积损伤值。

表 3 为 1/4 模型中 4 个焊点的特征寿命 N_f , 可以确定危险焊点为芯片边缘远离中心的焊点, 以危险焊点的特征寿命为产品的特征寿命, 得到温度循环作用下产品 N_f 为 1230, D_{th} 为 0.163%。

表3 4焊点寿命预测

Table 3 Lifetime prediction of solder joints

序号	1	2	3	4
预测循环数	3500	3100	3100	1230

3.1.2 随机振动的仿真

对产品进行随机振动仿真, 首先取焊点的单元

类型为 Solid73, 其它材料的单元类型为 Shell63, 材料参数见表 1。其次, 建立有限元模型。再次, 建立模型后, 通过定义载荷和边界条件, 进行模态求解、获得谱解、模态合并等步骤, 从而仿真得到总应变幅值 $\Delta \varepsilon$ 。最后, 将仿真得到的结果代入公式(6), (9)中, 可知产品在随机振动作用下的疲劳累积损伤为 8.4×10^{-10} 。

结合温度循环和随机振动的仿真结果, 由公式(1)可以得到 HASS 综合应力对焊点的疲劳损伤值约为 0.095%, 即 HASS 剖面对产品的有效寿命的消耗为 0.095%。在设计 HASS 剖面的过程中, 可以以此为依据对 HASS 剖面进行适当的修正, 从而节省了一定的人力物力。

3.2 缺陷影响的仿真研究

空洞是锡点内微小“气泡”由加热期间焊锡中夹住的空气或助焊剂等化合物膨胀所引起的, 空洞的位置和大小及其对可靠性的影响具有很大的随机性, 因此这类缺陷在 HASS 中很难被激发^[10]。文中以空洞为研究对象, 研究 HASS 对存在缺陷产品的影响。

对 PBGA 电路板中的一个焊点植入一个半径为

焊点半径 1/10 的空洞,而其它焊点不植入缺陷,对其进行仿真研究,通过这两个焊点疲劳寿命的对比,来研究 HASS 对焊点缺陷激发的有效性。

在模型中,植入缺陷的焊点同与其对称焊点的疲劳寿命见表 4,显然应力对有缺陷的焊点作用比较明显,有缺陷的焊点损伤较大。

表 4 疲劳寿命
Table 4 Fatigue life

序号	2	3
预测循环数	245	3100

焊点的受力情况如图 3 所示,可见植入缺陷的焊点,受力相对明显。通过这种方法,不但可以考察存在缺陷的产品在 HASS 作用下的反应及寿命情况,还可以通过它来研究产品的各种故障,扩展仿真方法的使用范围。

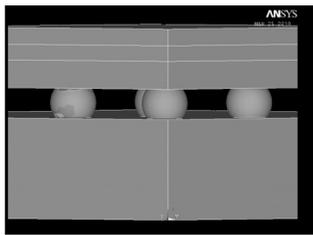


图 3 焊点的受力情况
Fig. 3 Stress of the solder joints

3.3 HASS 应力的仿真研究

从焊点寿命的角度研究筛选应力的选择对筛选效果的影响,为筛选剖面的设计及修改提供依据。以图 1 的 HASS 剖面为基准,在其它应力条件不变的基础上,分别改变其中的一个应力变量,以此来研究某应力变量对筛选效果的影响。研究的对象分别为高温/低温、温变率以及振动量级,其单位分别为 $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以及 g_{rms} 。分析结果如图 4—7 所示。

4 结论

针对电路板的 HASS 设计,提出了应用计算机仿真手段来研究产品 HASS 剖面的方法及基本思路,给出了一套完整的作用于电路板的 HASS 设计研究方法,从而为 HASS 成本的节省、周期的缩短等方面起

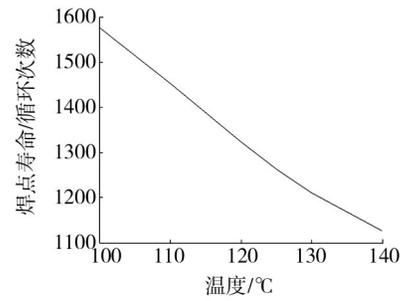


图 4 高温影响
Fig. 4 Effect of high temperature

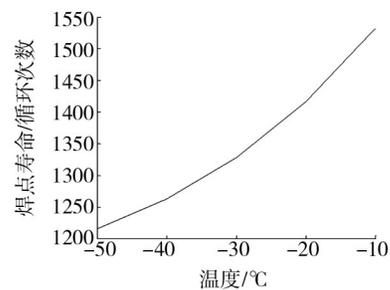


图 5 低温影响
Fig. 5 Effect of low temperature

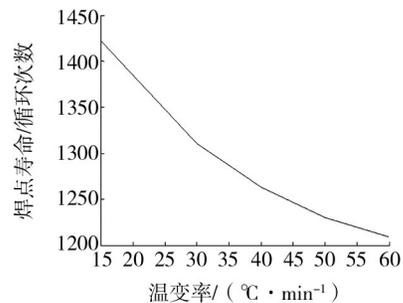


图 6 温变率的影响
Fig. 6 Effect of temperature changing rate

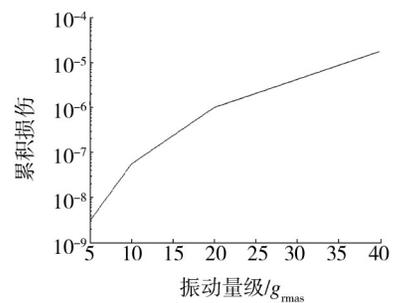


图 7 振动量级的影响
Fig. 7 Effect of vibration magnitude

到了一定促进作用。对于其它产品的 HASS 仿真等

方面仍需进一步开展更深入的研究工作。

参考文献:

- [1] 原艳斌,李晓钢.高加速应力筛选试验技术研究[J].装备环境工程,2005,2(2):22—27.
- [2] 李根成.环境应力筛选与应力激发试验[J].装备环境工程,2005,2(4):23—27.
- [3] 苏恺伦,郑建明.电路板环境应力筛选方法效能分析[J].装备环境工程,2010,7(6):157—159.
- [4] 王国忠.电子封装SnPb钎料焊点可靠性研究[D].上海:中国科学院上海冶金研究所,1999.
- [5] BARKER Donald B, DASGUPTA Abhijit, PECHT Michael G. PWB Solder Joint Life Calculations Under Thermal and Vibrational Loading[J]. Journal of the IES, 1992, 35(1):

17—25.

- [6] 元鑫.多芯片组件焊点可靠性的有限元模拟与寿命的预测[D].天津:天津大学,2006.
- [7] WONG T E, PALMIERI F W, REED B A, et al. Durability/Reliability of BGA Solder Joints under Vibration Environment[C]// Electronic Components and Technology Conference, 2000:1083—1088.
- [8] 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.
- [9] 许杨剑.球栅阵列尺寸封装的有限元模拟及焊点的寿命预测分析[D].杭州:浙江工业大学,2001.
- [10] 褚卫华.模块级电子产品可靠性强化试验方法研究[D].长沙:国防科技大学,2003.

(上接第66页)

- 能影响研究[J].兵器材料科学与工程,2010,33(3):41—43.
- [6] 张静,张琦,马会平,等. G827 /5224 和 G803 /5224 碳纤维增强环氧树脂湿热老化的研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3):16—20.
- [7] 田莉莉,刘道新,张广来,等.温度和应力对碳纤维环氧复合材料吸湿行为的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(3):14—17.
- [8] 张玲玲,张陵,马建勋.海洋环境下碳纤维增强复合材料片材的耐久性[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6):732—735.
- [9] ACHEABACH J D, ZHU H. Effect of Interfacial Zone on Mechanical Behavior and Failure of Fiber-reinforced Composites[J]. Mech Phys Solid, 1989, 37(3):381—393.

- [10] 贾普荣,矫桂琼.模型复合材料弹塑性界面应力分析[J].应用力学学报,1999,16(4):40—45.
- [11] 肖万伸,周建平,刘又文.粘弹塑性界面的断裂特性[J].固体火箭技术,2004,27(2):133—135.
- [12] 邹国发,龙国荣,万建平,等. NY9200树脂基复合材料老化性能研究[J]. 洪都科技, 2005(1):24—28.
- [13] 王琦,檀琳琳,王洁.碳纤维环氧复合材料盐雾老化试验研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5):39—42.
- [14] 罗漪,王全凤,杨勇新,等.华东自然环境浸润树脂耐久性对CFRP片材耐久性的影响[J]. 华侨大学学报, 2009, 30(6):691—693.
- [15] 张颖军,朱锡,梅志远,等.海洋环境玻璃纤维增强复合材料自然老化试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(3):14—17.

(上接第101页)

理的方法获得退化图像的模糊长度和模糊角度,从而能够很好很方便地对图像进行恢复。

参考文献:

- [1] 贺卫国,黎绍发.匀速直线运动模糊长度的精确估计[J]. 计算机应用, 2005, 25(6):1316—1320.
- [2] TANAKA Masayuki, YONEJI Kenichi, OKUTOMI Masatoshi. Motion Blur Parameter Identification from a Linearly Blurred Image[C]// International Conference on Consumer

Electronics Digest of Technical Papers, 2007:1—2.

- [3] 周玉,彭召意.运动模糊图像的维纳滤波复原研究[J]. 计算机与工程应用, 2009, 45(19):181—183.
- [4] 李宇成,贾宝华,杨光明.运动模糊图像的参数估计与恢复[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(19):4247—4249.
- [5] 王晓红,赵荣椿.任意方向运动模糊的消除[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(6):525—529.
- [6] 王明军,李应乐.基于形态滤波遗传算法对目标红外图像特征检测[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1):5—9.