

# 芯片封装结构对焊点温循可靠性影响研究

[孙瑜、王宇博、雷钧]

[中兴通讯, 518000]

- [摘 要] 本文研究中,首先制作了无铅焊料 SAC305 的拉伸试样,在不同温度和应变率条件下进行了 单轴拉伸试验,研究其力学性能,进行了 Anand 本构模型的研究和参数拟合分析,通过非线 性拟合方法获得了 Anand 模型九个参数。其次,基于以上试验和数据拟合得到的 Anand 模 型参数,建立 BGA 芯片的四分之一对称三维模型,应用 Ansys Mechanical 进行模拟,分析 模型在(-40°C ~ 125°C)温循载荷下的塑性应变功变化,根据分析结果,利用 Darveaux 模型对 焊点寿命进行了预测。对比分析芯片封装结构变化对芯片焊点应力影响,为提升芯片温循可靠 性提供了改进方向。
- [关键词] 通讯行业、温循可靠性、Ansys Mechanical

# Research on the Influence of Chip Encapsulation Structure on Solder Point Temperature Cycling Reliability

[Sun Yu,Wang Yubo,Lei Jun]

[ZTE,518000]

[ Abstract ] In this paper, the tensile specimens of lead-free solder SAC305 were firstly fabricated, and the uniaxial tensile tests were carried out under different temperature and strain rates to study the mechanical properties. The Anand constitutive model was studied and the parameters were fitted. The nine parameters of Anand model were obtained by nonlinear fitting method, based on the Anand model parameters obtained from the above test and data fitting, a quarter-symmetric three-dimensional model of BGA component is established and applied Ansys Mechanical to simulate. The strain energy variation of the model under the thermal cycling load (-40°C~ 125° C) was analyzed. According to the analysis result, the Darveaux model was used to predict the solder point life. The impact of chip encapsulation



2020 ANSYS INNOVATION CONFERENCE



structure changes on chip welding ball stress was compared and analyzed, which provides an improvement direction for improving chip temperature-based reliability.

[Keyword] Communication industry, Temperature cycling reliability , Ansys Mechanical

### 1 前言

电子封装在振动、温循载荷环境下往往会出现失效,其中温循载荷下因热失配而导致的焊点疲劳失效是电子元件失效的主要原因之一,因此电子通讯设备研发过程中,均会对器件的温循可靠性进行评估,但如果仅依靠温循测试的方法进行评估,需要在研发后期器件和产品打样出来,才可能暴露温循失效风险,这会导致产品反复设计改版和温循测试,研发周期及测试成本大大增加。因此在设计前期,即数字化样机设计阶段介入芯片温循可靠性评估,通过仿真分析识别焊点温循失效风险,提供结构设计和芯片选型指导,降低反复测试成本,缩短研发周期,是非常有意义的。

本文对某 BGA 封装无铅焊料(SAC305)焊点温循可靠性进行了研究,首先对无铅焊 料 SAC305 进行了拉伸测试, 拟合了 Anand 本构的参数,建立了电子封装的四分之一对称 三维有限元模型,应用 Ansys 进行仿真,焊点在-40℃~125℃温循载荷下的塑性应变功变 化,根据仿真分析结果,利用 Darveaux 模型对焊点寿命进行了预测,对比不同尺寸封装结 构的温循寿命,为提升芯片温循可靠性提供了改进方向。

### 2 材料本构及参数获取

#### 2.1 Anand 本构模型

Anand模型的基本方程为:

$$\sigma = cs; \quad c < 1 \tag{1}$$

c是与应变率和温度相关的函数:

$$c = \frac{1}{\xi} \sinh^{-1} \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon}^p}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right)^m \right]$$
(2)

稳态塑性流动可以描述为:

$$\dot{\varepsilon}^{p} = \dot{\varepsilon} = A \exp(-\frac{Q}{RT}) \left[ \sinh(\xi \frac{\sigma^{*}}{S^{*}}) \right]^{1/m}$$
(3)

$$s^* = \hat{s} \left[ \frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^n \tag{4}$$

根据如上定义, Anand模型的应力可以表示为:

$$\sigma = \sigma^* - \left[ (\sigma^* - cs_0)^{1-a} + (a-1)(ch_0)(\sigma^*)^{-a} \varepsilon^p \right]^{1/(1-a)}$$
(5)



2020 ANSYS INNOVATION CONFERENCE



其中, *ξ*为应力乘子, *ἐ*<sup>p</sup>为非弹性应变率, A是前指数因子, Q是热激活能, R是气体常数, T是绝对温度, m是应变率敏感系数, 代表在给定温度和应变率下s的饱和值, h<sub>0</sub>是应变硬/软化常数, a是应变硬/软化敏感系数, ŝ 和n分别是形变阻抗系数和应变率敏感指数。

#### 2.2 材料参数的确定

焊点在温循条件下的失效机制是蠕变疲劳的交互作用,焊点的失效断口既有疲劳断裂, 又有蠕变断裂特征。这是因为焊点的熔点较低,在温循过程中会发生不可忽略的蠕变,在 进行有限元分析时,必须考虑蠕变效应,对于焊点材料通常采用统一型粘塑性本构模型来 描述其非弹性行为。统一型粘塑性本构最具代表性的是 Anand 模型。Anand 本构模型可以 反映粘塑性材料与应变速率、温度相关的形变行为,以及应变率历史效应、应变硬化和动 态回复等特征。

本文对 BGA 封装应用的 SAC305 焊料进行了单轴拉伸测试,明确应变率和温度对 SAC305 焊料力学性能的影响规律,对测试结果进行处理,得到 Anand 模型的参数,并用 于后续温循载荷下的有限元仿真分析。

参照金属材料测试标准ASTM E8/E8M,本研究通过加工高纯合金棒,得到哑铃型拉伸 试件,标距段为55 mm,可以充分反映材料本身的拉伸力学行为。在相同工况下,进行5组 独立的重复试验,以提升试验结果的可靠性。SAC305单轴拉伸试样如图1所示。



图 1 SAC305 单轴拉伸试样

拉伸实验共6个测试温度(℃): -55、-10、10、50、90、125;

4个应变率(×10-4 s-1):1、10、50、100;

5组重复试验;

共测试试件120件。

根据在不同应变率、不同温度间的实验数据,可以得到Anand模型相关参数,如表1所示。

参数	数值	说明
so (MPa)	5.7	初始变形阻抗
A (1/s)	36205	前指数因子
ξ	6.13	应力乘子

表 1 Anand模型参数值





m	0.35	应变率敏感系数
no (MPa)	9631	应文硬化市奴
$\hat{s}$ (MPa)	80	形变阻抗系数
n	0.023	应变率敏感指数
a	1.72	应变硬化敏感系数
Q/R (1/K)	8213	激活能

# 3 温度循环疲劳寿命评估方法

本算例中采用 Darveaux 模型进行焊点疲劳寿命的预测。Darveaux 疲劳模型是一种以 应变能为基础的方法。在寿命预测时,首先运用有限元分析计算出在温循过程中所积累的 塑性应变能密度,然后利用得到的应变能密度来计算初始裂纹产生及沿着焊点径向扩展的 循环次数。

Darveaux 指出随着单元尺寸减小,计算得到的应变能密度将增加,因此使用体积平均的方法减少其对网格大小的敏感性。即计算体积平均应变能增量 $\Delta W_{ave}$ ,可表示为:

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta W_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i}$$
(6)

其中, ΔW; 为第i个单元的塑性应变功密度, V; 为第i个单元的体积。

结合 Paris 公式的 Darveaux 模型,裂纹起始和裂纹生长可分别用(7)式和(8)式进行表示:

$$N_0 = K_1 \Delta W_{ave}^{K_2} \tag{7}$$

$$\frac{da}{dN} = K_3 \Delta W_{ave}^{K_4} \tag{8}$$

其中, $\Delta W_{ave}$ 为稳定蠕变状态下的平均应变能密度; $K_1 \ , \ K_2 \ , \ K_3 \ , \ K_4$ 是与失效机 理相关的经验常数; $N_0$ 是出现裂纹时的循环次数;

假设裂纹的生长速度是恒定的,那么焊点总的疲劳寿命为可由公式(9)表示:

$$N = N_0 + \frac{a}{da/dN} \tag{9}$$

其中, a 为焊点与焊盘接触面的直径。

4 Ansys 仿真实现

Ansys INNOVATION CONFERENCE

2020 ANSYS INNOVATION CONFERENCE



### 4.1 有限元模型前处理

利用商业软件 Ansys Mechanical 进行了有限元仿真,分析了温循载荷下芯片焊点应力/ 应变行为和疲劳寿命预测。在本算例的仿真模型中,主要包括印刷电路板、焊点、Substrate、 uBump、Top Die 以及 StiffenerRing 等结构,由于芯片封装结构复杂,而且在生产制造过程 中还有可能存在空穴、微小裂纹等现象,很难创建出与实际产品完全相同的芯片模型,为 缩短分析时间,提高分析效率,需要对模型作简化处理,利用芯片封装轴对称的几何结构 特点,采用 1/4 模型进行建模,对芯片角部的焊点建立详细的有限元网格,其余焊点粗化 处理,仿真模型如图 2。



(a) 1/4 模型



(b) 焊点模型

图2 BGA封装的有限元模型

模型中的铜、印刷电路板、硅片和焊料都假定为各向同性材料,印刷电路板和硅片只 考虑它们的弹性变形,在温循载荷下仿真分析时,焊料考虑其粘塑性行为,焊料应力应变 关系采用本研究项目的 Anand 本构模型描述。其余材料均按照线弹性假设,详细材料参数 见下表 2。

表2	材料参	数

材料	杨氏模量(GPa)	泊松比	CTE(ppm/°C)
Cu	108	0.3	17.5
PCB	24	0.28	18
Al	70	0.33	22.3
SAC305	54.9	0.4	21

为了保证模型收敛,需要给予足够的边界条件,同时必须保证各部分变形充分,以达 到期许的应力应变,边界条件一般设置为: (1)将参考节点选定为模型底部的正中心点, 并在 X、Y、Z 方向固定其平移自由度; (2)根据对称性,将模型中的对称面(非真实封 装模型的边界面)作为对称边界条件(图3)。选取 5 个温度循环进行分析,温度循环载 荷曲线如图 4。







图3仿真边界条件设置



图 4 仿真模型的温度循环曲线

## 4.2 结果分析

在Ansys Mechanical中,支持用户自定义求解变量NLPLWK,可以很方便的计算出所关注焊点的非线性塑性应变功,并利用软件自带的焊点温循疲劳计算插件,应用Darveaux模型,自动提取焊点的塑性应变功密度,计算焊点在温循条件下的疲劳寿命。

以下给出了温循过程中焊点受力的分布及规律,如图5、图6所示。基于Darveaux模型 应用焊点疲劳插件计算焊点疲劳寿命。



图 5 芯片焊点应力及应变云图-高温保温开始 (22145s)







图 6 芯片焊点应力及应变云图-低温保温开始 (24845s)

由应力应变分析可知,应变最大的焊点位于芯片边角,且该焊点芯片侧表面应变最大。基于Darveaux模型的焊点疲劳寿命分析,以芯片边角焊点作为寿命预测对象进行寿命预测。其应力应变迟滞回环如图7所示。



图7 芯片角部焊点应力应变迟滞回线

从图中可看出最终等效塑性应变趋于稳定,由等效塑性应变-应力滞回环中,取第5个 温循周期中塑性应变能变化值,根据Darveaux模型,计算芯片焊点寿命为905个循环。

为进一步提升芯片焊点温循可靠性,需对芯片封装结构进行优化,在芯片封装结构中, 识别出StiffenerRing的厚度、宽度,焊点的高度、厚度,Top Die的面积等结构尺寸会对焊 点温循寿命产生影响,考虑方案的可实现性,选择StiffenerRing的厚度以及焊点直径作为变 量研究其对焊点温循寿命的影响规律。各封装结构要素及其水平如表3所示。

表3:	封装结构	要素及	其水平
-----	------	-----	-----

封装结构要素	水平/mm	
	0.5	
StiffenerRing 的厚度	0.7	
	0.9	
	0.55	
焊点直径	0.60	
	0.65	

从温循仿真结果对比可以看出,在此封装结构中,随着 StiffenerRing 厚度降低,焊点 温循寿命有所提高,如图 8 所示。分析其原因, StiffenerRing 厚度的改变,影响芯片整体





与印刷电路板 CTE 的适配性,当 StiffenerRing 的厚度减小时,二者具有更好的适配性,因此芯片封装焊点温循寿命增加。



图 8 StiffenerRing 厚度对于芯片焊点温循寿命的影响

保持 StiffenerRing 的厚度不变,改变焊点直径,进行温循仿真分析,得到的焊点温循 寿命变化曲线如图 9 所示,从温循仿真结果对比可以看出,在此封装结构中,随着焊点直 径的增加,焊点温循寿命有所提高。



图 9 焊点直径对于芯片焊点温循寿命的影响

# 5 结论

应用有限元仿真软件 Ansys Mechanical 可以较方便的实现芯片封装在温循载荷下的疲劳寿命预测。BGA 封装温循仿真表明,焊点应变最大值位于芯片角部焊点的器件侧表面。

在本封装结构中,随着 StiffenerRing 厚度降低,焊点温循寿命有所提高,经分析认为 这是由于随着其厚度减小,改善了芯片整体与印刷电路板的 CTE 适配性,芯片焊点温循寿 命增加;随着焊点直径的增加,焊点温循寿命有所提高。

本文研究得到的模型参数、仿真方法可用于类似器件的焊点温循寿命预测,后续将考 虑其它封装结构尺寸对芯片温循载荷下的疲劳寿命的影响,进一步指导芯片优化和选型。

#### [参考文献]

Darveaux R . Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation[C]// 2000 Proceedings.
50th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.00CH37070). IEEE, 2002.

[2] Zane Johnson. Implementation of and extensions to Darveaux's approach to finite-element simulation of BGA solder joint reliability[J]. Psychological Reports, 1999, 100(1):167-70.





[3] 李彦辉,黄再兴.塑性球珊阵列封装无铅焊点热疲劳失效分析及寿命预测[C]//中国力学学会学术大会 '2009 论文摘要集. 2009.

