

# SMT-PGA 封装焊点热疲劳寿命预计模型研究

夏丽娇<sup>1</sup>, 李小岩<sup>2</sup>

(1.中国信息通信研究院, 北京 100191; 2.中国航空综合技术研究所, 北京 100191)

**摘要:** 目的 研究 SMT-PGA 封装焊点热疲劳寿命预计模型。方法 运用 Engelmaier 模型预测 SMT-PGA 封装焊点的热疲劳寿命, 并将 Engelmaier 模型计算结果与美国马里兰大学 CALCE PWA 寿命评估软件仿真结果作对比。结果 模型计算结果与马里兰大学寿命评估软件仿真结果存在较大差异。结论 表明 Engelmaier 模型中的工程因子  $F$  并不是一个固定常数, 而是受封装最低稳态温度的影响。

**关键词:** 热疲劳; SMT-PGA 封装; 焊点; 工程因子  $F$

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.01.006

**中图分类号:** TJ07                      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)01-0021-03

## Thermal Fatigue Life Predication Model of Solder Joints for SMT-PGA Package

XIA Li-jiao<sup>1</sup>, LI Xiao-yan<sup>2</sup>

(1.China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100191, China;

2.China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the thermal fatigue life prediction model of solder joints for SMT-PGA package. **Methods** The thermal fatigue life of SMT-BGA package solder joints was predicted based on the Engelmaier model; and then it was compared with simulation results of CALCE PWA life assessment software of University of Maryland. **Results** The calculated results were quite different from the simulation results of CALCE PWA software. **Conclusion** Engineering factor  $F$  in the Engelmaier model is not a fixed constant but affected by the minimum steady state temperature of package.

**KEY WORDS:** thermal fatigue; SMT-PGA package; solder joint; engineering factor  $F$

Engelmaier 通过对 Coffin-Mason 模型的改正, 并基于 Wild<sup>[1]</sup>对于 63Sn37Pb 焊点热疲劳寿命统计结果, 于 1980 年提出了无引线型电子封装热疲劳寿命预计模型<sup>[2]</sup>, 并在随后提出了有引线型封装的热疲劳寿命预计模型<sup>[3-4]</sup>。焊点热疲劳故障的主要原因是由于焊点周边材料的热膨胀系数 (Coefficient of Thermal Expansion) (CTE) 不同, 从而导致在热膨胀或者收缩时, 各种材料产生的热应变不匹配, 并在应变不协调处产生应力集中, 导致裂纹的萌生和扩展, 从而引起焊点的热疲劳破坏。研究表明, 当 CTE 相差  $2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  时就会出现不匹配的现象。CTE 之差小于

$5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  时, 产品焊接的可靠性才能得到一定的保证, 而较大的 CTE 差异往往会导致焊点在温度循环或使用过程中产生更大的应力, 进而导致焊点产生疲劳裂纹直至失效<sup>[2]</sup>。经过多年的实践检验, Engelmaier 模型对于表面贴装型封装的寿命预计具有很好的适用性, IPC-SM-785<sup>[5]</sup> and IPC-D-279<sup>[6]</sup> 也将其作为电子封装热疲劳寿命预计模型。

文中应用 Engelmaier 模型对 SMT-PGA 封装进行寿命预计, 并与美国马里兰大学 CALCE 中心的 CALCE PWA<sup>[14]</sup> 评估软件比对, 一般情况针对有引线型封装, 工程因子  $F$  为固定值, 且  $F=1$ <sup>[3]</sup>。然而结果

表明,模型中的工程因子  $F$  并不是一个固定值,而是受封装工作的最低稳态温度的影响。文中绘制出了  $F$  与封装最低稳态温度的相关曲线,表明了  $F$  因子是如何影响模型计算结果的,这为随后的研究者提供了一种新的思路。

## 1 Engelmaier 模型介绍

Engelmaier 研究了焊点的热疲劳失效,于 1980 年提出了焊点热疲劳寿命预计模型,称之为 Engelmaier 模型,如式(1)所示:

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\gamma}{2\varepsilon_f} \right)^c \quad (1)$$

对于有引线型封装:

$$\Delta\gamma = \frac{F \cdot kd \cdot (L_D \Delta\theta)^2}{A \cdot h \cdot 200 \text{psi}} \quad (2)$$

对于共晶焊料,  $2\varepsilon_f=0.625$ 。

$$c = -0.442 - (6 \times 10^{-4})\theta_{sj} + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1 + 360/t_d) \quad (3)$$

$$\theta_{sj} = 0.25(\theta_{Cmax} + \theta_{Cmin} + \theta_{Smax} + \theta_{Smin})$$

式中:  $N_f$  为失效循环数;  $\Delta\gamma$  为焊点循环剪切应变范围;  $\varepsilon_f$  为焊点疲劳延伸系数;  $F$  为工程因子,对于有引线型封装一般取 1;  $kd$  为引线刚度;  $2L_D$  为焊点之间最大距离(对于正方形取封装长度方向引线最大跨度);  $A$  为焊点有效面积,一般取焊点实际面积的 2/3;  $h$  为焊点有效高度,一般取焊点高度的 1/2;  $c$  为焊点疲劳延伸指数;  $t_d$  为高温驻留时间;  $\theta_{sj}$  为平均循环温度。

$$\Delta\theta = |\partial_c \Delta\theta_c - \partial_s \Delta\theta_s|$$

式中:  $\partial_c$  为封装热膨胀系数,  $\partial_s$  为基板热膨胀系数。

$$\Delta\theta_c = \theta_{Cmax} - \theta_{Cmin}$$

式中:  $\theta_{Cmax}$  为封装工作最高稳态温度;  $\theta_{Cmin}$  为封装工作最低稳态温度。

$$\Delta\theta_s = \theta_{Smax} - \theta_{Smin}$$

式中:  $\theta_{Smax}$  为基板工作最高问题稳态温度,  $\theta_{Smin}$  为基板工作最低稳态温度

### 1.1 SMT-PGA 引线抗弯刚度计算模型

Sharon X.Ling 和 Abhijit Dasgupta 于 1993 年基于能量原理,提出了 PGA 封装多个引线刚度求解方法<sup>[15]</sup>;考虑到工程实际使用时只关注引线最大刚度,通过对两种不同引线材料多个封装类型计算,表明最大引线刚度出现在同一个计算公式;因此为了简化引线刚度求解过程,PGA 引线刚度按公式(4)计算。SMT-PGA 封装模型如图 1 所示,SMT-PGA 封装引线模型如图 2 所示。

$$kd = \frac{\pi E r^2}{L} \quad (4)$$

式中:  $E$  为引线弹性模量;  $r$  为引线半径;  $L$  为引线长度。

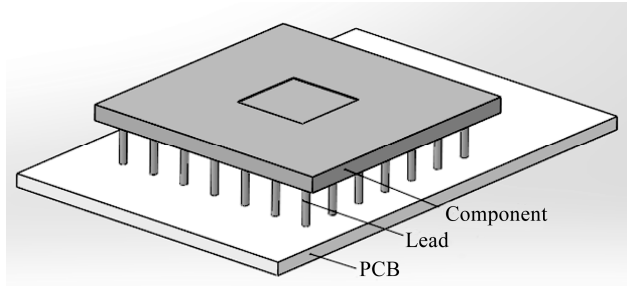


图 1 SMT-PGA 封装模型

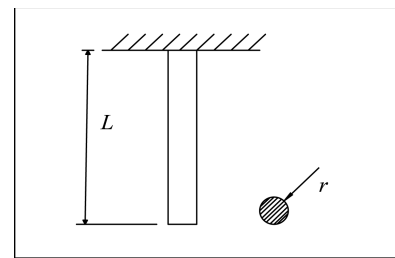


图 2 PGA 引线模型

### 1.2 工程因子

$F$  是容差系数(也称为工程因子),一般情况下针对有引线型封装  $F$  为常数,且  $F$  等于 1。Perry E.Bake<sup>[9]</sup>使用 FEA 求解 CQFP 焊点循环剪切应变范围,并代入到 Engelmaier 模型预测封装热疲劳寿命,最后将预测结果与试验结果比对,指出 Engelmaier 模型中的  $F$  因子受温度循环范围的影响,不过 Perry E.Bake 并未说明  $F$  与温度循环的具体关系。因此在此基础上,针对 SMT-PGA 封装进行进一步研究。在文中的测试中,  $F$  作为唯一的变量。根据不同的温度循环测试条件,应用 Engelmaier 模型预计 SMT-PGA 热疲劳寿命,根据 CALCE PWA 软件评估结果调整  $F$  因子的大小。结果表明,  $F$  因子受封装最低稳态温度的影响。

## 2 温度循环测试

SMT-PGA 封装模型的封装长度为 27.4 mm,封装宽度为 27.4 mm,最大引线跨度(长度方向)为 25.4 mm,焊点面积为 0.85 mm<sup>2</sup>,焊点高度为 0.95 mm<sup>2</sup>,封装热膨胀系数为  $6.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,PCB 热膨胀系数为  $17.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,引线弹性模量为 138 000 MPa,引线长度为 1.27 mm,引线直径为 0.46 mm,封装焊点材料为 62Sn36Pb2Ag。在 CALCE PWA 中共进行了 7 组温度循环测试。温度循环剖面见表 1。由于低温驻留时间和温升时间对 Engelmaier 模型的预计结果无影响,因此低温驻留时间控制为 110 min,温升时间为 10 min。

表 1 温度循环剖面

Profile No	$\theta_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{upper dwell}}/\text{min}$
TC2	-5	70	25
TC3	-10	70	35
TC4	-15	70	45
TC6	-25	70	65
TC8	-35	70	85
TC10	-45	70	105
TC12	-55	70	125

### 2.1 测试结果分析

将上述信息代入到 Engelmaier 模型中求解,并在 CALCE PWA 中建立相应模型计算,相应结果见表 2。在表 2 中给出了 PGA 封装在不同温循剖面下的工作最低稳态温度  $T_{Cmin}$ ,表中  $F$  的值表示:当  $F$  取该值时 Engelmaier 模型的寿命预计结果与 PWA 结果吻合。

表 2 模型和 PWA 计算结果以及  $F$  因子

Profile No	N50-PWA	N50-模型	$\theta_{Cmin}$	$F$
TC 2	238633	744663	1.42	1.613
TC 3	181338	478185	-3.81	1.507
TC 4	147029	336401	-8.65	1.422
TC 6	105631	184890	-18.82	1.271
TC 8	82235	114273	-28.71	1.151
TC 10	65970	72067	-40.19	1.039
TC 12	55853	50457	-50.08	0.958

从表 3 中可知,控制其他量不变的情况下,随着 PGA 封装工作最低稳态温度的降低,工程因子  $F$  的值也随之降低。这表明  $F$  受封装工作最低稳态温度的影响,为了更好地反应它们的关系,运用 SPSS19.0 进行回归分析,如图 3 所示。

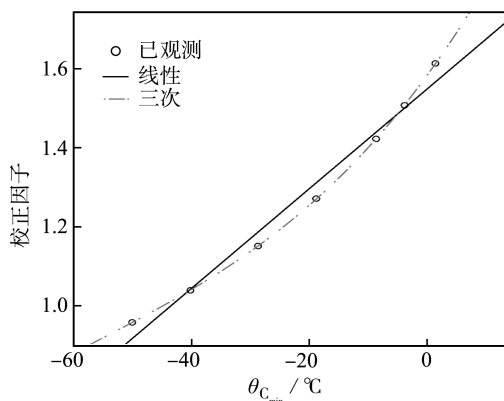


图 3 工程因子与封装工作最低稳态温度关系

回归分析表明,封装工作最低稳态温度与校正因子成 3 次方关系,拟合度  $R^2=1$ 。回归模型为:

$$F=1.583+2.039e-2\theta_c+2.243e-4\theta_c^2+1.329e-6\theta_c^3$$

### 3 结语

运用 Engelmaier 模型预计 SMT-PGA 封装焊点的

热疲劳寿命。通过与美国马里兰大学 CALCE 中心的 CALCE PWA 软件仿真分析结果比对,发现模型中的工程因子  $F$  并不是一个固定常数 1,而是受封装最低稳态温度的影响,且回归分析表明工程因子与其成三次方的比例关系。

需要注意的是上述回归模型只是为了说明工程因子  $F$  与 SMT-PGA 封装最低稳态温度的关系,如果封装参数信息和温循剖面与表 1,表 2 存在较大差异时上述模型求解的  $F$  并不具备一般适用性。因此在实际的工程应用中,可以通过对以往数据分析统计,建立 SMT-PGA 封装校正因子的模型,再运用 Engelmaier 模型进行寿命评估,这样可以提高模型的寿命预测结果。

### 参考文献:

- [1] WILD R N. Some Fatigue Properties of Solders and Solder Joints[J]. IBM Tech Rep, 1973, 5(3): 56—60.
- [2] ENGELMAIER W. Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints during Power Cycling[J]. Compon Hybrids Manuf Technol, 1983, 8(3): 232—237.
- [3] ENGELMAIER W. Surface Mount Solder Joint Reliability Controlling the Thermal Expansion[J]. IEEE/CHMT Eur Int Electron Manuf Technol Symp, 1988, 13(7): 62—65.
- [4] ENGELMAIER W, ATTARWALA A I. Surface-mount Attachment Reliability of Clip-leaded Ceramic Chip Carriers on FR-4 Circuit Boards[J]. IEEE Trans Compon Hybrids Manuf Technol, 1989, 12(1): 284.
- [5] ENGELMAIER W. Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments[J]. IPC-SM-785, 1992, 6(3): 58—63.
- [6] ENGELMAIER W. Design Guidelines for Reliable Surface Mount Technology Printed Circuit Boards[J]. IPC-D-279, 1996, 18(5): 256—259.
- [7] MUKAI M, KAWAKAMI T. Fatigue Life Estimation of Solder Joints in SMT-PGA Packages[J]. Journal of Electronic Packaging, 1998, 120(15): 207—212.
- [8] LING S X, DASGUPTA A. A Design Model for Through-hole Components Based on Lead-Fatigue Considerations [J]. Advances in Electronic Packaging, 1993, 4(1): 217—225.
- [9] BAKER P E, KASPARI D K. Low Cycle Fatigue Analysis and Test Methodology for Fine Pitch Lead Surface Mount Components[C]// Intersociety conference on thermal Phenomena. Washington: Washington Hilton, 1996.
- [10] GEORGE E, OSTERMAN M, PECHT M. An Evaluation of Dwell Time and Mean Cyclic Temperature Parameters in the Engelmaier Model[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(7): 582—587.
- [11] DASGUPTA A. Physics-of-Failure: An Approach to Reliable Product Development[C]// Final Report, International IEEE. California: Integrated Reliability Workshop, 1995.
- [12] TILGNER R. Physics of Failure for Interconnect Structures: An Essay[J]. Microsystem Technologies, 2009, 151: 168—172.
- [13] PATIL N, DAS D, PECHT M. A Prognostic Approach for Non-punch through and Field Stop IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 15(4): 523.
- [14] OSTERMAN M, STADTERMAN T. Failure Assessment Software for Circuit Card Assemblies[C]// Reliability and Maintainability Symposium. Loews Ventana Canyon: Proceedings Annual IEEE, 1999: 269—276.
- [15] DASGUPTA Barker. A Numerical Study of Fatigue Life of J-Leaded Solder Joints Using the Energy Partitioning Approach[J]. Journal of Electronic Packaging, 1993, 115(4): 416—423.