

温度循环和随机振动载荷下堆叠封装焊点 可靠性模拟研究

潘 碑* 王宏光 李宇轩 葛振霆 陈鹏鹏

(南京电子器件研究所, 南京, 210016)

2023-12-20 收稿, 2024-01-31 收改稿

摘要: 采用有限元模拟研究了堆叠封装(Package on package, PoP)在温度循环和随机振动载荷下的焊点可靠性, 包括封装内部的基板堆叠焊点和封装外部的板级互连焊点。通过应力分析定位危险焊点并计算焊点在温度循环下的疲劳寿命。模拟结果表明: 在温度循环载荷下, 应力主要集中于基板边角处焊点, 基板堆叠焊点的疲劳寿命为3 002周次, 板级互连焊点的疲劳寿命为1 552周次; 在随机振动载荷下, 两层焊点的应力值均较低, 在50~2 000 Hz的随机振动频率范围内具有较高的可靠性。

关键词: 焊点可靠性; 温度循环; 随机振动; 疲劳寿命预测; 有限元模拟

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2024)02-0161-06

Simulation Study on Reliability of Solder Joints in PoP Package Subjected to Temperature Cycling and Random Vibration Load

PAN Bei WANG Hongguang LI Yuxuan GE Zhenting CHEN Pengpeng

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, 210016, CHN)

Abstract: In this paper, the reliability of solder joints in package on package (PoP) subjected to temperature cycling and random vibration load was studied by finite element simulation, including the solder joints inside the package for substrate stacking and the solder joints outside the package for board-level interconnection. The dangerous solder joints were located through stress analysis, and the fatigue life of solder joints subjected to temperature cycling was calculated. The simulation results show that the stress is mainly concentrate on the solder joints at the corner of the substrate subjected to thermal cycling. The fatigue life of solder joints for substrate stacking is 3 002 cycles, and the fatigue life of solder joints for board-level interconnection is 1 552 cycles. The stress value of solder joints in both two layers is relatively small subjected to random vibration load, with relatively high reliability in the random vibration frequency range of 50-2 000 Hz.

Key words: reliability of solder joint; temperature cycling; random vibration; fatigue life prediction; finite element simulation

引 言

随着各类电子产品逐步向小型化、高密度化和

多功能化方向发展, 堆叠封装(Package on package, PoP)因其具有尺寸小、集成度高、加工周期短等优点而得到广泛应用^[1]。PoP封装作为一个具备多材料、多结构、跨尺度特点的复杂系统, 在服役过程中

* 联系作者: E-mail: panbei1981@126.com

更容易受到各类热、力学载荷的影响,其可靠性面临着严峻的挑战。

焊点作为封装中电气互连和机械支撑的主要结构,由热力载荷引起的焊点失效问题不容忽视。在各种载荷中,常见的是温度循环和随机振动载荷。在温度循环载荷下,由于材料的热膨胀系数不匹配,在热应力集中处不断累积损伤进而产生裂纹萌生和扩展,最终导致焊点开裂并引发器件失效^[2]。另一方面,封装器件在服役时不可避免地要受到振动载荷,振动使基板发生动态的微小弯曲变形,随着挠度增大和频繁变化,焊点可能发生裂纹萌生和扩展,最终引起焊点开裂^[3]。因此,焊点在热力载荷下的可靠性直接制约着器件的服役寿命,焊点的可靠性评估对提高封装器件服役寿命具有重要意义。

目前,针对焊点的可靠性研究包括实验法和仿真法。实验法主要通过研究焊点在温度循环、随机振动等载荷下的变形、裂纹萌生及扩展行为,直观观测焊点的缺陷形式。仿真法则利用有限元分析得到焊点在热力载荷下的应力应变状态并基于此进行可靠性评估,定位危险焊点位置以及裂纹开裂区域。目前,已有许多学者针对PoP封装中温度循环和随机振动下的焊点可靠性进行了研究。任超等^[4]基于ANSYS对热循环载荷下的PoP封装焊点进行了应力应变分析,并利用Engelmaier修正的Coffin-Manson疲劳公式对焊点疲劳寿命进行了预测。夏江等^[5]利用振动疲劳试验结合有限元分析研究了PoP封装焊点在随机振动载荷下的失效行为和疲劳特性,并对失效模式和失效机理进行了分析,研究发现焊点为脆性断裂和韧性断裂的混合断裂模式。刘昭雪^[6]基于有限元分析研究了PoP封装焊点在热-振动耦合作用下的焊点可靠性,分别研究了温度变化率、保温时间等因素对焊点可靠性的影响。

多数学者对PoP封装焊点的可靠性研究主要针对有机基板互连焊点,而本研究PoP封装中存在有机基板和陶瓷基板,故需同时考虑封装内部的基板堆叠焊点和封装外部的板级互连焊点。目前此方面的焊点可靠性研究较少,因此有必要对其可靠性进行评估。本研究将基于ANSYS有限元分析研究PoP封装在温度循环和随机振动载荷下的焊点可靠性,对焊点进行力学分析,定位危险焊点并预测其疲劳寿命。

1 有限元分析设置

1.1 有限元模型

根据PoP封装实际尺寸构建三维几何模型并导入至ANSYS仿真软件。本研究中的PoP封装使用上层基板和下层基板形成堆叠结构,如图1(a)所示,上层基板和下层基板的厚度均为0.3 mm,外层陶瓷基板的厚度为0.5 mm。由于各层基板上分布着大量电子元器件且并非本研究的关注重点,因此进行了适当简化处理。整个PoP封装互连至厚度为0.72 mm的PCB上,PCB的四个角上存在用于固定的螺钉孔。此外,由于该模型具有近似对称性,为减少网格单元数,提高计算效率,故采用四分之一对称简化模型。研究所用PoP封装的四分之一剖面模型及其实物样品如图1所示。

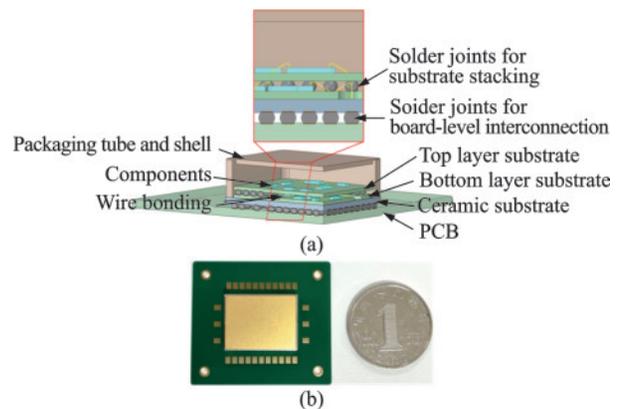


图1 (a) 1/4对称PoP封装结构;(b) PoP封装样品

Fig.1 (a) 1/4 symmetric PoP package structure; (b) The sample of PoP package

PoP封装中的焊点分布在两处位置:一是在上层基板和下层基板之间,用于基板堆叠,为便于区分,称其为基板堆叠焊点,在上层基板和下层基板间的排布情况如图2(a)所示;二是在陶瓷基板和PCB之间,用于板级互连,称其为板级互连焊点,其在陶瓷基板和PCB间的排布情况如图2(b)所示。基板堆叠焊点和板级互连焊点的直径均为500 μm ,间距为0.8 mm,材料均为Sn3.0Ag0.5Cu。

采用六面体主导的实体单元对模型整体进行共节点网格划分,网格划分情况如图3所示。

在进行随机振动试验时,封装体通过螺钉固定在不锈钢材质的测试工装上,根据实际尺寸构建几何模型,如图4所示。由于该模型同样具有近似对称性,故在后续仿真时同样采取四分之一对称处理。



图2 焊点排布情况: (a) 基板堆叠焊点; (b) 板级互连焊点
Fig.2 Solder joints arrangement: (a) Solder joints for substrate stacking; (b) Solder joints for board-level interconnection

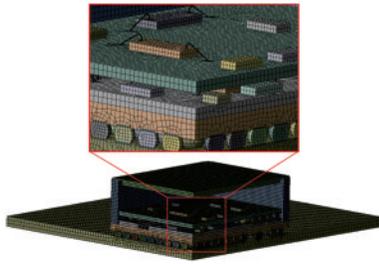


图3 PoP封装有限元模型
Fig.3 Finite element model of PoP package

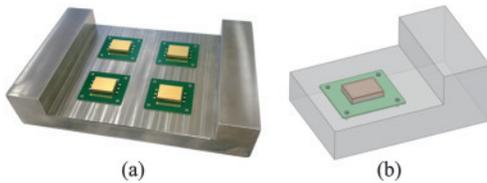


图4 随机振动试验的 (a) 样品和 (b) 1/4几何模型
Fig.4 (a) Sample and (b) 1/4 geometric model of random vibration test

1.2 材料属性

PoP封装中包含多种材料且大多为非线性弹性材

料,若将各材料都真实还原,容易造成收敛困难。此外,考虑到主要关注对象为焊点,其它结构对其影响不大,故将焊点外的其它材料视作各向同性线弹性材料,相关的材料参数如表1所示,其中 T 为温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

考虑到焊点温度循环载荷下会产生不同程度的塑性变形和蠕变,采用Anand本构模型来表征焊点的非线性行为。Anand和Brown从连续介质力学的角度,认为塑性变形和蠕变是基于位错理论,并利用流动方程和演化方程统一了焊点的塑性变形和蠕变行为,不仅可以表现出粘塑性材料与应变速率和温度相关的形变行为,还反映出应变率历史效应、应变硬化和动态回复等特征^[7]。Anand本构模型包含材料非弹性流动方程和内变量 s 的演化方程,其中流动方程采用双曲蠕变规律,可表示为:

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

其中, $\dot{\epsilon}_p$ 为非弹性应变速率, A 为常数, Q 为激活能, R 为气体常数, T 为绝对温度, ζ 为应力乘子, m 为应变敏感指数。内变量 s 表征了材料非弹性流动的各向同性变形阻抗,其演化方程可表示为:

$$\dot{s} = \left[h_0 \cdot |1 - s/s^*|^a \cdot \text{sign}(1 - s/s^*) \right] \dot{\epsilon}_p \quad (2)$$

$$s^* = \hat{s} \left\{ \dot{\epsilon}_p / A \exp[Q/(RT)] \right\}^n \quad (3)$$

其中, h_0 和 a 为应变硬化参数, s^* 为内变量 s 的饱和值, \hat{s} 为系数, n 为指数。 s_0 为内变量初始值,用于参与计算。

在ANSYS中调用Anand模型只需输入本构方程中的9个参数: $s_0, Q/R, A, \zeta, m, h_0, \hat{s}, n, a$ 。Sn3.0Ag0.5Cu焊料的Anand本构模型参数如表2所示^[8]。

表1 模型的材料参数

Tab.1 Material parameters of the model

Structure	Material	Elastic modulus	Poisson's ratio	Density	Coefficient of thermal expansion
		E/GPa	μ	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\alpha/(\times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1})$
Ceramic substrate	Al_2O_3	370	0.22	3.98	6.8
Top layer substrate & Bottom layer substrate	PTFE	15.4	0.26	1.86	$x: 14.0, y: 16.0, z: 35.0$
PCB	PTFE	16.2	0.28	2.17	$x: 8.0, y: 8.0, z: 20.0$
Solder joint	Sn3.0Ag0.5Cu	$38.7 - 0.176T$	0.36	7.37	22.4
Solder pad	Cu	117	0.34	8.96	17.7
Packaging tube and shell	4J29	138	0.30	7.90	5.5
Wire bonding	Au	79	0.42	19.32	14.2

表2 Sn3.0Ag0.5Cu焊料的Anand模型参数

Tab.2 Parameters of Anand model for Sn3.0Ag0.5Cu solder

Param.	s_0/MPa	$(Q/R)/\text{K}$	A/s^{-1}	ζ	m	h_0/MPa	\hat{s}/MPa	n	a
Value	21	9 320	3 501	4	0.25	1.8×10^5	30.2	0.01	1.78

1.3 载荷及边界条件

1.3.1 温度循环载荷

根据实际试验条件对整体模型施加温度循环载荷。焊点的热疲劳寿命预测通常需要根据前几个循环下的塑性应变能密度增量来进行计算,因此本研究模拟封装经历5个循环周期的变化状态。温度载荷曲线如图5所示,温度区间为 $-55\sim 125^{\circ}\text{C}$,变温速率为 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$,峰值温度保持时间为30 min,将模型的无应变参考温度设置为 25°C 。由于采用四分之一对称模型,故在切割边界施加对称边界条件,在PCB螺钉孔位置施加固定约束。

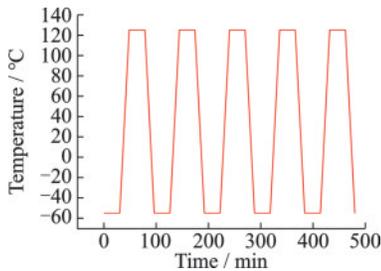


图5 温度循环曲线

Fig.5 Temperature cycling curve

1.3.2 随机振动载荷

研究采用的随机振动激励功率谱密度(Power spectral density, PSD)曲线如图6所示。当随机振动频率在 $50\sim 100\text{ Hz}$ 时,曲线以 $+6\text{ dB/oct}$ 的斜率上升,100 Hz下的功率谱密度达到 $100\text{ (m/s}^2)^2/\text{Hz}$;当随机振动频率在 $100\sim 1\,000\text{ Hz}$ 时,功率谱密度保持 $100\text{ (m/s}^2)^2/\text{Hz}$;当随机振动频率在 $1\,000\sim 2\,000\text{ Hz}$ 时,曲线以 -6 dB/oct 的斜率下降。在随机振动试验时,振动载荷通过固定的测试工装由振动台传递至器件,故在测试工装底部施加固定约束,在四分之一对称模型的切割边界施加对称边界条件。

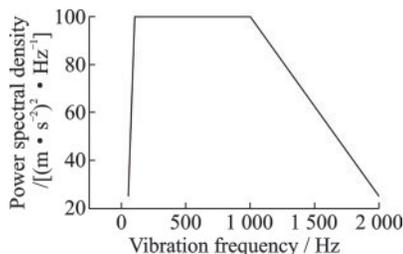


图6 随机振动加速度功率谱密度曲线

Fig.6 Random vibration acceleration PSD curve

2 仿真结果分析

2.1 温度循环载荷下的焊点可靠性

为评估焊点在温度循环载荷下的可靠性,先对焊点进行应力分析,确定焊点应力集中区域,定位危

险焊点的位置,后对危险焊点进行疲劳寿命预测。

2.1.1 焊点应力分析

分别提取基板堆叠焊点(位于上层基板和下层基板间的焊点)和板级互连焊点(位于陶瓷基板和PCB间的焊点)在第5个温度循环周期峰值温度下(-55°C 和 125°C)的 von Mises 应力分布,如图7和8所示。

根据基板堆叠焊点的应力分布,可以看到应力主要集中于基板边角处焊点;焊点在 -55°C 下最大 von Mises 应力值约为 55.11 MPa ,在 125°C 下最大 von Mises 应力值约为 8.15 MPa ,故焊点在低温下更容易发生开裂。

根据板级互连焊点的应力分布,可以看到应力同样主要集中于基板边角处焊点。相比于基板堆叠焊点,其最大 von Mises 应力值有所增大,在 -55°C 下最大 von Mises 应力值约为 57.16 MPa ,在 125°C 下最大 von Mises 应力值约为 8.07 MPa ,危险焊点同样分布在基板边角处。

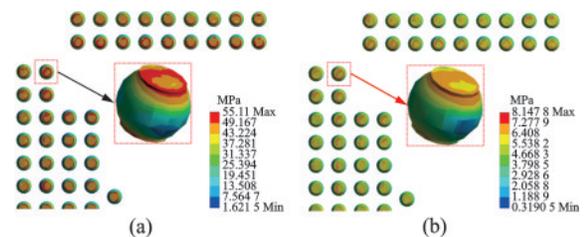


图7 基板堆叠焊点 von Mises 应力分布:(a) -55°C ;(b) 125°C
Fig.7 The von Mises stress distributions of solder joints for substrate stacking: (a) -55°C ; (b) 125°C

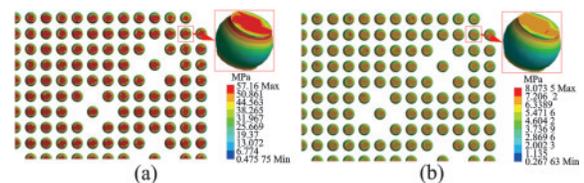


图8 板级互连焊点 von Mises 应力分布:(a) -55°C ;(b) 125°C
Fig.8 The von Mises stress distributions of solder joints for board-level interconnection: (a) -55°C ; (b) 125°C

2.1.2 焊点疲劳寿命预测

根据焊点应力分析结果,焊点在温度循环载荷下存在较为明显的应力集中,有可能引起焊点开裂失效,因此有必要对焊点的疲劳寿命进行预测。焊点的疲劳寿命预测根据不同的参量,如塑性变形、蠕变、断裂或能量参量,可分为多种疲劳寿命预测模型。其中基于能量的疲劳寿命预测模型认为焊点在循环载荷下吸收的塑性应变能累积到一定程度时将发生裂纹萌生及扩展,据此预测焊点寿命。基于能量的模型可以同时表征焊点在循环加载过程的应力应变变化,因而得到广泛使用。本研究采用基于能量的 Darveaux 模型^[9],该模型利用平均粘

塑性应变能密度增量 ΔW_{ave} 预测焊点疲劳寿命,其表达式为:

$$N_w = N_0 + a/(da/dN) \quad (1)$$

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

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

其中 N_w 为焊点的特征疲劳寿命, a 为焊点界面处的直径, N_0 为裂纹萌生时对应的循环周次, da/dN 为裂纹扩展速率, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 是与裂纹扩展相关的常数, 分别为 56 300、-1.62、 3.34×10^{-7} 、1.04。^[10]

分别提取基板堆叠焊点和板级互连焊点的边角处危险焊点在温度循环载荷下的 ΔW_{ave} , 代入 Darveaux 模型计算得到其疲劳寿命预测结果, 如表 3 所示。

可见, 在温度循环载荷下, 虽然两处焊点的最大 von Mises 应力相近, 但基板堆叠危险焊点裂纹萌

表 3 疲劳寿命预测结果

Solder joints	Cycle number as crack initiation	Cycle number as fatigue failure
Substrate stacking	909	3 002
Board-level interconnection	230	1 552

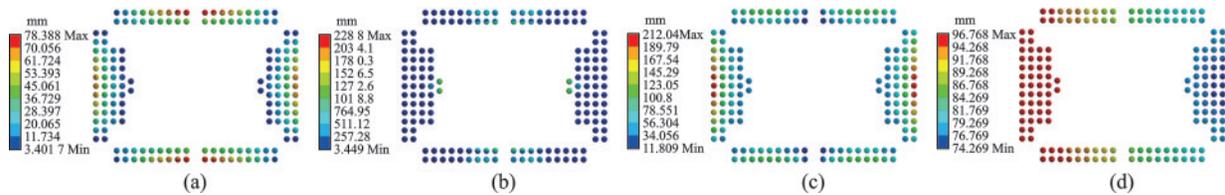


图 9 基板堆叠焊点在固有频率下的变形: (a) 6 230 Hz; (b) 10 362 Hz; (c) 12 332 Hz; (d) 16 257 Hz

Fig.9 Deformations of solder joints for substrate stacking at natural frequency: (a) 6 230 Hz; (b) 10 362 Hz; (c) 12 332 Hz; (d) 16 257 Hz

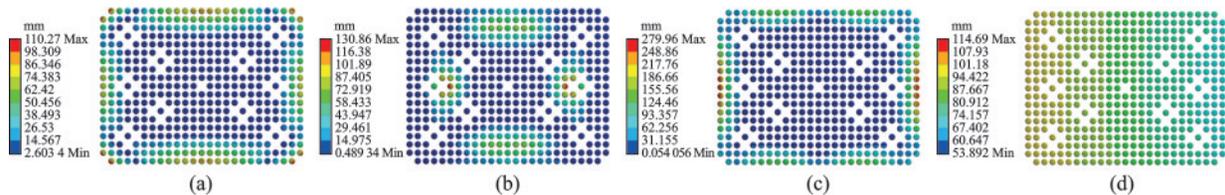


图 10 板级互连焊点在固有频率下的变形: (a) 6 230 Hz; (b) 10 362 Hz; (c) 12 332 Hz; (d) 16 257 Hz

Fig.10 Deformations of solder joints for board-level interconnection at natural frequency: (a) 6 230 Hz; (b) 10 362 Hz; (c) 12 332 Hz; (d) 16 257 Hz

分别提取基板堆叠焊点和板级互连焊点在 3σ (概率为 99.73%) 下的 von Mises 应力分布以及焊点在拉伸方向(垂直于焊盘方向)和剪切方向(平行于焊盘方向)的应力分布, 如图 11 和 12 所示。对于基板堆叠焊点, 仅有少数焊点存在应力集中, 最大 von Mises 应力值约为 0.60 MPa, 拉伸方向和剪切方向最大应力值分别约为 0.97 MPa 和 0.06 MPa; 对于板级互连焊点, 应力主要集中于基板边缘处焊点, 最大 von Mises 应力值约为 0.13 MPa, 拉伸方向和剪切方向最大应力值分

生时的循环周次和疲劳失效循环周次(即疲劳寿命)均明显高于板级互连危险焊点。这是由于基板堆叠焊点位于同种材料的基板(上层基板和下层基板)中间, 而板级互连焊点位于不同材料的基板中间, 上层为陶瓷基板, 下层为 PCB, 二者的热膨胀系数差异较大, 在温度循环载荷下热膨胀失配更加严重, 导致焊点产生更大的粘塑性应变, 因而板级互连焊点的疲劳寿命相较于基板堆叠焊点存在明显降低。另外, 研究采用的温度循环条件相较于封装的实际服役条件更加严苛, 且在封装设计时, 也避免了将信号传输焊点设置在基板边角处, 接地焊点距离基板边缘也限制在一定的距离之外, 因此封装在服役过程中, 两层焊点发生疲劳断裂的概率较低, 均具有较高的可靠性。

2.2 随机振动载荷下的焊点可靠性

在对 PoP 封装进行随机振动分析前, 首先进行模态分析得到封装的前 4 阶 (Mode 1-4) 固有频率, 分别为 6 230、10 362、12 332、16 257 Hz。提取基板堆叠焊点和板级互连焊点在固有频率下的变形情况, 分别如图 9 和 10 所示。

别约为 0.19 MPa 和 0.02 MPa。许多文献表明, 直径为 500 μm 的 Sn3.0Ag0.5Cu 焊点在铜界面的拉伸断裂强度和剪切断裂强度均可达到 50 MPa^[11-13], 相较之下, 本研究随机振动载荷下基板堆叠焊点和板级互连焊点的应力值均处于较低水平, 发生焊点断裂的可能性较低。这是由于本研究中封装的固有频率高于随机振动载荷的频率范围, 固有频率不会被激励, 焊点不会产生较大的振动应力。因此, 焊点在 50~2 000 Hz 的随机振动频率范围内具有较高的可靠性。

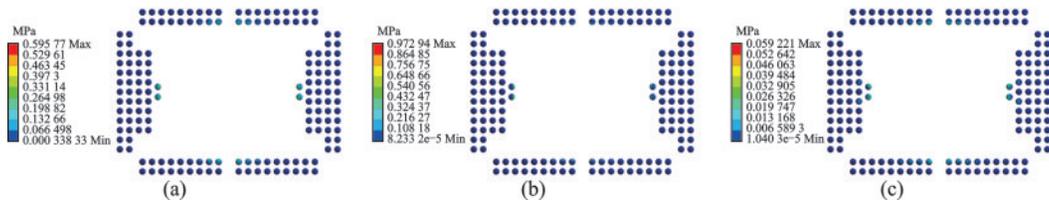


图11 基板堆叠焊点在随机振动载荷下的应力分布:(a) Von Mises 应力;(b) 拉伸方向应力;(c) 剪切方向应力

Fig.11 Stress distributions of solder joints for substrate stacking subjected to random vibration load: (a) Von Mises stress; (b) Stress in tensile direction; (c) Stress in shear direction

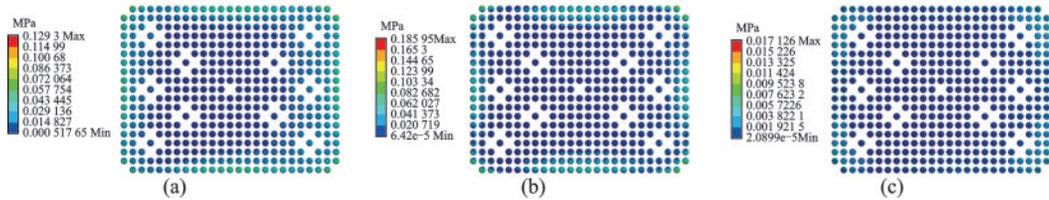


图12 板级互连焊点在随机振动载荷下的应力分布:(a) Von Mises 应力;(b) 拉伸方向应力;(c) 剪切方向应力

Fig.12 Stress distributions of solder joints for board-level interconnection subjected to random vibration load: (a) Von Mises stress; (b) Stress in tensile direction; (c) Stress in shear direction

3 结 论

通过有限元分析研究了 PoP 封装在温度循环和随机振动载荷下的焊点可靠性。对基板堆叠焊点和板级互连焊点进行应力分析,定位危险焊点位置。基于 Darveaux 模型预测了焊点在温度循环载荷下的疲劳寿命,基于仿真结果可以到如下结论:

(1)在温度循环载荷下,应力集中分布于基板边角处焊点。相较于同种材质的上层、下层有机基板,陶瓷基板和 PCB 间的热膨胀系数差异较大,使得板级互连焊点的疲劳寿命低于基板堆叠焊点,基板堆叠焊点的疲劳寿命为 3 002 周次,板级互连焊点的疲劳寿命为 1 552 周次;两层焊点在实际服役条件下均具有较高的可靠性。

(2)在随机振动载荷下,由于封装的固有频率高于振动频率,基板堆叠焊点和板级互连焊点在 50~2000 Hz 随机振动频率范围内应力值处于较低水平,两层焊点在器件服役时均具有较高的可靠性。

参 考 文 献

- [1] Loh W K, Kulterman R, Purdie T, et al. Package-on-package (PoP) warpage characteristic and requirement [C]. Proceeding of IEEE 17th Electronics Packaging Technology Conference. Singapore: IEEE, 2015: 1-5.
- [2] Libot J B, Alexis J, Dalverny O, et al. Microstructural evolutions of Sn3.0Ag0.5Cu solder joints during thermal cycling [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 83(2): 64-76.
- [3] Liu F, Meng G. Random vibration reliability of BGA lead-free solder joint [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 226-232.

- [4] 任超, 罗成, 谢秀娟, 等. 层叠封装热疲劳寿命的有限元法分析[J]. 电子元器件与材料, 2011, 30(6): 70-73.
- [5] 夏江, 黄林轶, 刘群兴, 等. 振动载荷下三维封装的失效行为和疲劳特性分析[J]. 半导体技术, 2018, 43(2): 148-153.
- [6] 刘昭雲. Sn3.0Ag0.5Cu 粘塑性及 POP 封装热振可靠性研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2021.
- [7] Chen Z N, Wang G Z, Chen L, et al. Viscoplastic Anand model for solder alloys and its application [J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2000, 12(2): 31-36.
- [8] Basit M, Ahmed S, Motalab M, et al. The Anand parameters for SAC solders after extreme aging [C]. Proceeding of IEEE 15th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Las Vegas: IEEE, 2016: 440-447.
- [9] Li L T, Bo J, Hu J X. The degradation study for QFP interconnection structure based on PCMD health index and Darveaux model [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 109(11): 113662.
- [10] Darveaux R. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation and fatigue life prediction [J]. Journal of Electronic Packaging, 2002, 124(3): 147-154.
- [11] 谷柏松, 孟工戈, 孙凤莲, 等. Sn3.0Ag0.5Cu/Ni/Cu 微焊点剪切强度与断口的研究 [J]. 电子元件与材料, 2013, 32(3): 70-72, 76.
- [12] 王春青, 王学林, 田艳红. SnAgCu 无铅微焊点剪切力学性能的体积效应 [J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 1-4, 133.
- [13] 尹立孟, 杨艳, 刘亮岐, 等. 电子封装微互连焊点力学行为的尺寸效应 [J]. 金属学报, 2009, 45(4): 422-427.



潘 碑(PAN Bei) 男,1981年生,2004年毕业于东南大学获学士学位,2007年毕业于中国科学院研究生院中国科学院空间科学与应用研究中心获硕士学位,主要研究方向为微波毫米波系统级封装(SiP)技术、频率合成技术等。