

BGA 封装互连焊点温度及电流密度分布的模拟与验证

Simulation and Verification of Temperature and Current Density Distribution of BGA Package Solder Joint

华南理工大学机械与汽车工程学院 薛明阳 卫国强 黄廷禄 姚 健

[摘要] 芯片互连焊点承受的电流密度越来越大,给电子产品的服役可靠性带来了新的挑战。本文利用有限元软件对 BGA 封装互连焊点内温度及电流密度分布进行了模拟分析,结果表明:互连焊点的芯片端和基板端存在很大的温度差,在本模拟条件下,最大温度梯度可达到 $5.38 \times 10^3 \text{K/cm}$;在焊点的电流入口/出口处存在电流拥挤,其电流密度比平均电流密度大 2-3 个数量级。并和实际测量的焊点温度进行了比较,模拟分析与实际器件温度测量结果吻合较好。

关键词: BGA 数值模拟 温度梯度 电流密度

[ABSTRACT] The current density in the interconnecting solder joint is increased significantly, which brings new challenges to the reliability of electronic products. Finite element software is used to simulate the distribution of temperature and current density in BGA package solder joints, the numerical simulation results show that there is a great temperature difference between chip side and substrate side of solder joints, the maximum temperature gradient reaches $5.38 \times 10^3 \text{K/cm}$, the current crowding exists at the entrance/exit of current in solder joints, the current density is 2-3 orders of magnitude higher than the average one. Meanwhile, the results of simulation are also compared with the well-designed experiment, which are in good agreement with the actual experimental ones.

Keywords: BGA package Numerical simulation Temperature gradient Current density

随着电子信息产业的飞速发展,芯片制造技术不断得到更新,同时也对芯片封装技术提出了更高的要求。为满足电子产品微型化、多功能化的发展,芯片封装互连方式也由传统的通孔组装技术(THT)向表面贴装技术(SMT)、球栅阵列(BGA)、芯片尺寸封装(CSP)等更高效、更高集成度的封装形式发展,其中 BGA 封装以引线寄生电感电容小、封装密度高、信号处理速度快、成品率高等优点而备受青睐^[1-2]。

芯片集成度和印制电路板组装密度的不断提高给封装技术带来了新的挑战,芯片特征尺寸越来越小,功

率却越来越大,使得芯片的服役温度不断升高。元器件的失效与其服役温度密切相关,有研究表明,元器件的工作温度每升高 10°C ,其失效率就会增加一倍左右^[3]。封装芯片不合理的温度分布,不仅会影响信号的传输特性,还会引起热应力,产生翘曲、裂纹甚至是失效和破坏。当互连焊点温度梯度达到一定的值(一般认为 $dT/dx > 10^3 \text{K/cm}$),将会引起焊点内部原子由高温端向低温端迁移,产生热迁移(Thermomigration, TM)现象,致使互连焊点的力学性能急剧下降,结构完整性也将受到破坏^[4-5]。另外芯片特征尺寸的不断减小使互连焊点的电流密度不断增大,当电流密度足够大时(一般认为 $j > 10^4 \text{A/cm}^2$),原子会沿着电子流方向发生迁移,产生电迁移(Electromigration, EM)现象^[6]。尤其是在高温、高电流时,将会严重降低焊点的可靠性,缩短元器件的使用寿命。因此,在当前电子产品的发展趋势下,研究 BGA 封装焊点的温度及电流密度分布是十分必要的^[7],它为研究互连焊点的失效形式及可靠性奠定了基础。本文利用有限元软件 ANSYS 对 BGA 封装互连焊点的温度及电流密度分布进行模拟分析,揭示了 BGA 封装焊点温度及电流密度分布规律,并通过实际测量的温度分布对模拟的结果进行了验证。

1 数值模拟

1.1 BGA 物理模型

实际的塑封 BGA (Plastic Ball Grid Array, PBGA) 封装芯片由多种不同性质的元器件构成。现模拟的器件结构参数 PCB 尺寸 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 2\text{mm}$, 芯片尺寸 $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 0.3\text{mm}$, 焊球直径 0.283mm , 焊球高度 0.171mm , 共 256 个焊球,呈 16×16 阵列排布。在 ANSYS 中创建模型时,为简化问题的求解,忽略了焊盘、芯片粘结剂等的影 响。该模型主要包括焊球、PCB 基板和芯片,并假设各部位间的结合良好。由于 BGA 封装芯片是由一组整列焊点连接芯片端与基板端,焊点相互之间为串联结构,模拟时加载电流分别为 0.5A 、 1.5A 、 2.5A ,因此可认为每个焊点的通电情况是一致的。为进一步简化计算、提高效率,根据对称性原则可将实际的 BGA 封装芯片简化为单个焊点。在模型建立后,采用自

由网格划分,且在焊点的电流入口处/出口处的网格划分较密,该模型共有 1205 个节点,2817 个单元,如图 1 所示。由于电流密度分布是对于单个焊点而言的,因此可进一步简化为图 2 所示的模型。

1.2 材料参数的选择

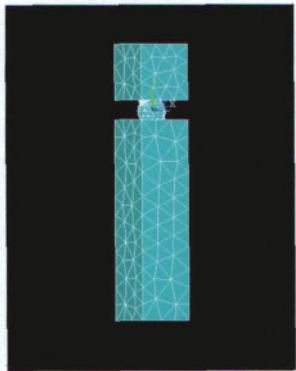


图1 剖分示意图

Fig.1 Cross-sectional diagram

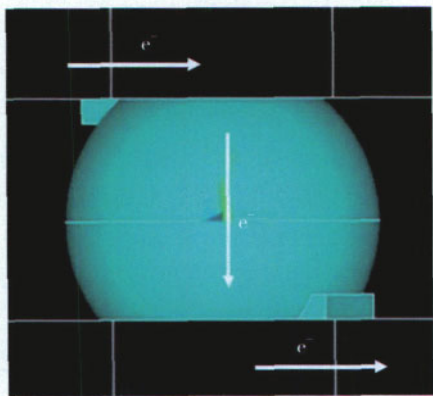


图2 电流方向示意

Fig.2 Direction of current

在各种无铅钎料系统中, Sn-Ag-Cu 系无铅钎料由于其良好的钎焊工艺性能和力学性能,在生产实际中已经得到了较为广泛的应用。本试验采用 Sn-3Ag-0.5Cu 无铅钎料,并假设所有材料均为各向同性,且材料物理性能不随温度变化而变化,其材料特性见表 1。

表1 PBGA封装各组成部分的材料性能

封装组件	热传导系数 ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	密度 ($kg \cdot m^{-3}$)	比热 ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	电导率 ($\Omega \cdot m$)
Si 芯片	150	2330	712	—
焊球	56	7300	230	1.2×10^{-7}
PCB 基板	0.35	1900	369	—

1.3 控制方程和边界条件

本试验中 PBGA 内的传热为三维稳态导热问题,初始温度为 $25^\circ C$,温度场模拟时,其控制方程 (1) 及边界条件 (2) 为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v ; \quad (1)$$

$$k (\frac{\partial T}{\partial n}) = -h(T - T_0) \quad (2)$$

式中, ρ 为材料密度 (kg/m^3); C_p 为材料等压比热容 ($J/(kg \cdot ^\circ C)$); t 为过程进行的时间 (s); q_v 为内热源的发热率 (W/s); k 为材料的热传导系数 ($W/(m \cdot ^\circ C)$); n 为介质表面法线方向; h 为换热系数 ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$); T_0 为环境温度 ($^\circ C$)。

对电流密度进行模拟时,由于我们采用恒流源进行加载,所以利用电流连续方程 (3) 和欧姆定律 (4) 及边界条件 (5) 可对焊球建立数学模型,如下:

$$\nabla \cdot J = 0 ; \quad (3)$$

$$J_x = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} , J_y = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} , J_z = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} ; \quad (4)$$

$$J_x = J_y = J_z = \frac{I}{\pi R^2} \quad (5)$$

式中, σ 为电导率 (S/m); ϕ 为电势 (V); I 为电流 (A); R 为焊点半径 (m)。

2 试验方法

针对实际 PBGA 封装芯片,为和计算模拟的结果进行比较,我们测量了不同电流加载条件下芯片端和基板端的温度分布。具体测试方法:对封装芯片采取连续加载电流 ($0.5A \sim 3A$),每隔 5min 用热电偶直接测量封装芯片基板端和芯片端的温度,来测定芯片端和基板端的温度差。为了减小误差,每组数据测量 3 次,最后对所有的试验数据进行归一化处理,并与模拟分析的结果进行对比。

3 有限元模拟结果与试验验证

3.1 温度分布模拟结果及试验验证分析

利用有限元数值模拟,可得到加载电流分别为 $I_1=0.5A$ 、 $I_2=1.5A$ 、 $I_3=2.5A$ 时 BGA 封装焊点的温度及电流密度分布。图 3 为加载电流为 $I_3=2.5A$ 时的温度分布情况。

加载电流 $I_1=0.5A$ 和 $I_2=1.5A$ 时的温度场分布特征与图 3 大致相似,为了更好地反映加载电流与温度的关系,将焊点两侧离焊点最近的位置作为取样点,对模拟结果作图,如图 4 (a) 所示。由图可知,随着加载电流的增大,芯片端和基板端的温度差越来越大。当加载电流为 $2.5A$ 时芯片端和基板端的温度差已经达到 $92^\circ C$,温度梯度为 $5.38 \times 10^3 K/cm$ 。由图 3 可知,此时焊球的温度为 $229^\circ C$,而 Sn-3Ag-0.5Cu 无铅焊料的熔点为 $217 \sim 220^\circ C$,所以此时焊点很可能已经开始失效。

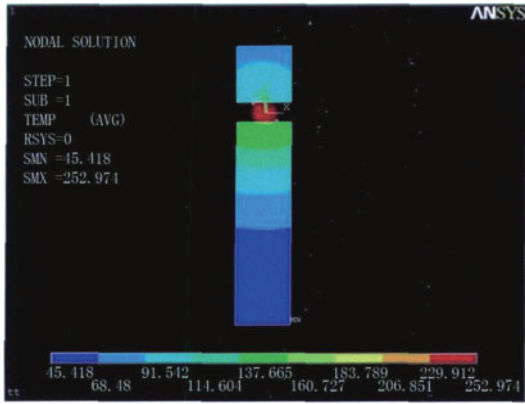
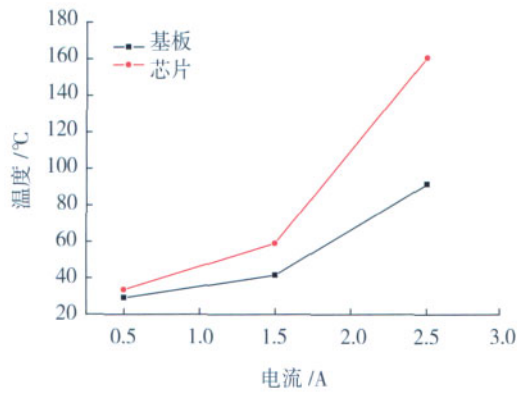


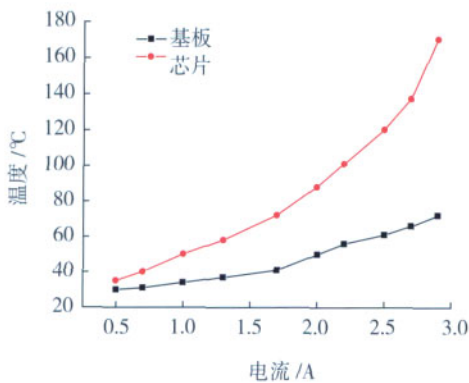
图3 $I_3=2.5A$ 时焊点的温度分布

Fig.3 Distribution of temperature in solder joint under $I_3=2.5A$

为了探究实际服役环境下 BGA 封装焊点芯片端和基板端的温度差,我们采取连续加载电流(0.5A~3A),观察互连焊点两端的温度变化,实测结果如图 4(b)所示。由图可知,芯片端和基板端的温度差也随着加载电流的增大而不断增加,最大温差达 98℃,此时互连焊点两端的温度梯度为 $5.73 \times 10^3K/cm$,与图 4(a)数值模拟的结果基本上是一致的。



(a) 数值模拟



(b) 实际测量

图4 BGA焊点两侧温度随加载电流的变化

Fig.4 Evolution of temperature at both sides of BGA solder joint with loading currents

由模拟和实测的温度曲线可知,温度随加载电流近似呈抛物线上升。这是因为只考虑热传递时,由 $Q=C_{pm} \Delta T$ 和焦耳定律 $Q=I^2Rt$ 知,热量与温度呈线性关系,热量与电流呈二次方关系,更进一步定性说明模拟结果和实测试验的正确性。在服役过程中由于芯片端和基板端材料不同,散热系数不一样,导致焊点两端存在温度差。这种过大的温差很容易引发热迁移现象,从而造成焊点的快速失效。实际加载时,当电流增加到 2.9A 时,7min 后焊点失效,而数值模拟的结果显示当电流增加到 2.5A 时焊球的温度已经接近熔化温度。二者有一定的偏差,其原因可能是由于实际材料并非均匀理想的材料,其各项材料参数会随温度的增加有一定的变化,而模拟时将材料的各种热物理参数均视为常数。再者数值计算采用的是简化模型,与实际芯片组成结构有一定的差异,从而造成模拟计算时出现偏差。

3.2 电流密度模拟结果分析

电流流经焊点时由于焊点的几何形状的变化,会导致焊点纵截面内电流密度分布不均匀。由图 5 和表 2 可知,焊点的电流入口处/出口处的电流密度比较大,并且比平均电流密度大 2~3 数量级,而且随着加载电流的增加还在不断增大,这种现象称之为电流拥挤。电流拥挤会导致焊点局部发热量增大,温度升高,致使互连焊点快速失效^[8-9]。

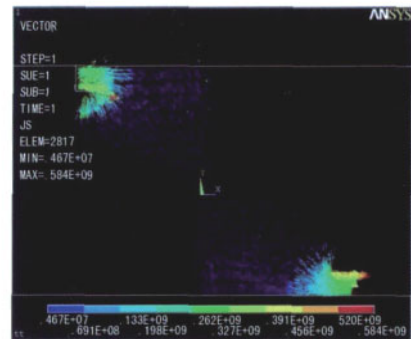


图5 $I_1=0.5A$ 时焊点的电流密度分布

Fig.5 Distribution of current density in solder joint under $I_1=0.5$

表2 不同加载电流下BGA焊点电流密度大小

加载电流 /A	电流密度 / ($A \cdot cm^{-2}$)		
	最小值	最大值	平均值
$I_1=0.5$	4.67×10^2	5.84×10^4	7.95×10^2
$I_2=1.5$	9.34×10^2	1.17×10^5	2.38×10^3
$I_3=2.5$	1.87×10^3	2.34×10^5	3.97×10^3

4 结论

(1) 建立了 PBGA 封装芯片单个焊球的几何模型

(下转第 93 页)

参考文献

- [1] Jurgen Seidel, Stefan Siegel, Kelly Cohen, Thomas McLaughlin. POD based Separation Control on the NACA0015 Airfoil. AIAA 2005-297.
- [2] Willcox K. Unsteady Flow Sensing and Estimation via the Gappy Proper Orthogonal Decomposition. AIAA 2004-2415.
- [3] Patrick A LeGresley, Juan J Alonso. Airfoil Design Optimization Using Reduced Order Models Based on Proper Orthogonal Decomposition. AIAA 2000-2545.
- [4] Patrick A LeGresley, Juan J Alonso. Investigation of Non-Linear Projection for POD Based Reduced Order Models for Aerodynamics. AIAA 2001-0926.
- [5] 姚伟刚. 非线性气动弹性系统时域仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学. 2010.1.
- [6] Bui-Thanh T, Danodaran M, Willcox K. Aerodynamic Data Reconstruction and Inverse Design Using Proper Orthogonal Decomposition. AIAA Journal, 2004.
- [7] Bui-Thanh T, Danodaran M, Willcox K. Proper Orthogonal Decomposition Extensions for Parametric Applications in Compressible Aerodynamics. AIAA 2003-4213.
- [8] Sefan Volkwein. Proper Orthogonal Decomposition for Nonlinear Dynamical Systems. DISC Summerschool 2005.
- [9] 阎超. 计算流体力学方法及应用. 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [10] 黄守智. 基于动态变形网格的非定常粘性流动数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2005. (责编 侧卫)

(上接第 74 页)

衬套, 而这个衬套具有一定的弹塑性, 使接头在受外载时, 通过各自塑性, 改变了应力场, 使得各列钉受力近似

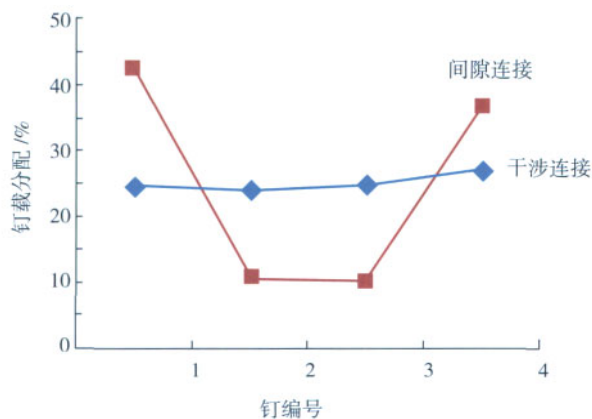


图9 干涉与间隙接头钉载分配结果对比

Fig.9 Comparison between pin load distribution of interference-fit joining and gap joining

一致, 从而提高了复合材料接头的钉载分配能力, 进而使得复合材料在飞机上达到较高的许用应变能力。

3 结论

采用模拟和试验的方法对复合材料干涉钛环槽紧

固系统连接的双搭接连接接头进行了钉载分配研究, 模拟分析研究和试验研究表明, 复合材料采用干涉连接后, 由于脱胶分层和中间金属衬套在受力中弹塑性的共同作用, 较大地改善了钉载分配能力, 进而提高了复合材料结构应变许用能力, 满足了设计对复合材料结构的减重、高寿命、高可靠性要求。

参考文献

- [1] 牛春匀. 飞机复合材料结构设计与制造. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [2] 王武, 陶华, 刘风雷, 等. 复合材料多排螺栓连接钉载分配的研究. 绝缘材料, 2006, 39(1):28-32. (责编 良辰)

(上接第 77 页)

和数学模型, 并利用 ANSYS 软件对其温度和电流密度分布进行了模拟, 数值模拟和试验测量的结果吻合较好。

(2) BGA 封装焊点的芯片端和基板端的温度随加载电流的增大而增加, 芯片边为热边, 基板边为冷边, 热边的温升大于冷边的温升。因此, 焊点两端的温度梯度也随加载电流的增大而增加, 并且增加方式满足抛物线规律。

(3) 互连焊点内部电流密度分布不均匀, 在电流入口处/出口处存在电流拥挤现象。在本模拟条件下, 其电流密度数值比平均电流密度大 2-3 数量级。

参考文献

- [1] 胡强. BGA 组装技术与工艺. 电子元件与材料, 2006, 25(6): 10-12.
- [2] 李禾, 傅艳军, 李仁增, 等. 球栅阵列倒装焊封装中的热应变值的测试. 半导体学报, 2002, 23(6):655-659.
- [3] 杨邦朝, 熊流锋, 杜晓松, 等. 集成电路封装的三维热模拟与分析. 功能材料, 2002, 33(1): 57-59.
- [4] TU K N, Gusak A M, LI M. Physics and materials challenges for lead-free solders [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(3): 1335-1353.
- [5] 卫国强, 石永华, 黄延禄, 等. 倒装芯片焊点中的热迁移. 材料科学与工艺, 2009.10(17):128-133.
- [6] 姚健, 卫国强, 石永华. 无铅电子封装中的电迁移. 焊接技术, 2010, 39(3): 1-5.
- [7] Kirsten W Z. Simulation of migration effects in solder bumps. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2008, 8(3):442-448.
- [8] Nah J W, Suh J O, Tu K N. Effect of current crowding and joule heating on electromigration induced failure in flip chip composite solder joints tested at room temperature. Journal of Applied Physics, 2005, 98: 013715.
- [9] Tu K N, Yeh C C, Liu C Y, et al. Effect of current crowding on vacancy diffusion and void formation in electromigration. Journal of applied physics, 2000, 76(8):988-990. (责编 晓立)