

用改进的混合方法分析微电子封装 热应变场¹⁾

汪海英 白以龙

(中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080)

王建军 邹大庆 刘 胜

(美国韦恩州立大学机械工程系, Detroit, MI48202, U.S.A.)

摘要 介绍一种可用于微电子封装局部应变场分析的实验 / 计算混合方法, 该方法结合了有限元的整体 / 局部模型和实时的激光云纹干涉技术, 利用激光云纹干涉技术所测得的应变场来校核有限元整体模型的计算结果, 并用整体模型的结果作为局部模型的边界条件, 对实验难以确定的封装结构局部位置的应力、应变场进行分析. 用这种方法对可控坍塌倒装封装结构在热载荷作用下焊球内的应变场分布进行了分析, 结果表明该方法能够提供封装结构内应力 - 应变场分布的准确和可靠的结果, 为微电子封装的可靠性分析提供重要的依据.

关键词 云纹干涉法, 整体 / 局部方法, 改进的混合法, 应变分布

引 言

在微电子封装的可靠性分析中, 常常需要考察封装内部, 尤其是非常局部区域 (如焊球的角点、芯下材料与基板的界面等) 的应力、应变场的分布. 随着微电子工业的迅速发展, 微电子封装的结构日益复杂, 同时特征尺寸日益减小; 此外, 微电子封装结构通常由几种热力学性质不同的材料构成, 封装结构的复杂性和材料成分的多样性都给局部区域的应力 - 应变场的分析带来了很大困难.

近年来, 很多新的分析和实验技术已被用于在微电子封装的可靠性分析中. 研究者利用有限元方法, 尤其是局部 / 整体结合的有限元方法, 可以得到局部区域应力 - 应变场的关键信息^[1]. 然而, 建立合理简化的整体结构模型和材料模型十分困难, 过分简化的整体结构模型和材料模型常常严重地影响了结果的准确性^[2]. 在实验方面, 高分辨率的实验技术, 如云纹干涉法、微散斑方法等都可以提供封装结构变形的相关信息. 然而, 即使采用最新的相移技术, 这些方法也很难分辨诸如焊球角点、界面附近的局部应变集中^[3]. 实验 / 有限元混合法^[4]将对封装结构位移场的实验测量 (如云纹干涉法) 的结果用作局部有限元模型的位移边界条件, 计算局部的应力 - 应变场分布. 这种方法通过较少量的计算能够得到较精确的应变场分布的数据. 但是, 通过对平面内二维位移场的测量为局部有限元模型提供三维的边界条件非常困难, 局部有限元模型的建立及其边界的选择都会显著地影响结果的准确性.

为了避免用实验方法确定局部模型边界条件的复杂性, 本文提出一种改进的混合方法, 并将此方法用于可控坍塌芯片互连结构中焊点在热载荷作用下的变形行为的分析, 结果表明与实验方法以及整体 / 局部有限元方法相比, 改进的混合法能够提供更准确的结果, 因此, 这是一种有效、可行的应变分析技术.

2001-08-18 收到第一稿, 2002-05-08 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金重大项目“材料的宏微观力学与强韧化设计”(19891180) 资助.

1 改进混合法的原理

在改进的混合法中,首先需要建立一个简化的、粗网格的整体模型,为了保证整体模型对封装结构的简化合理以及模型中材料常数的选择正确,我们将采用实验方法(如云纹干涉法)来校核整体模型的计算结果.通过对整体模型结构以及所采用材料常数的调节,使得整体模型与实验测试之间的误差足够小.确保得到了较准确的整体模型计算结果以后,再建立一个细网格的局部模型,该局部模型的网格应该小到足以刻画封装结构在局部区域的结构,局部模型的边界条件由整体模型提供.此外,在局部模型中,我们可以采用与整体模型不同的材料参数.显然,对整体模型的实验校核可以保证局部模型结果的准确性.

2 可控坍塌芯片互连中焊点热应变分析

作为示范,我们将改进的混合法用于可控坍塌芯片互连(controlled collapse chip connection, C4)结构中焊点的热应变的分析.该封装结构由芯片、芯下材料、焊球以及 FR-4 基板等几部分组成,图 1 给出了该封装的结构.该封装结构中所用的焊料球的直径和高度分别为 0.15 mm 和 0.17 mm.假设在 25 分钟内,将该封装试样由室温(23°C)加热到 115°C,然后在 115°C 保温 10 小时 40 分钟,考察在此过程中封装结构内的热应变分布.

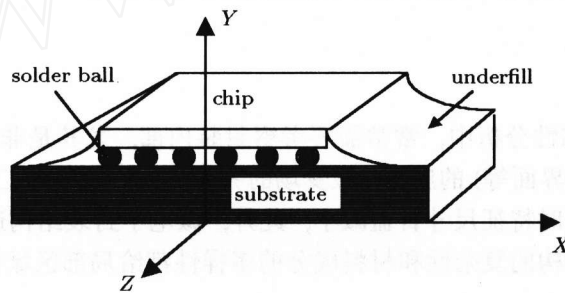


图 1 C4 封装的结构

Fig.1 Structure of a C4 package

2.1 实验

为校核有限元的结果,我们采用实时的云纹干涉技术^[5]对封装试样在热载荷作用下的应变场分布进行了测量.实验中,将封装结构最外侧焊球所在面切开,得到长条状的试样,选择任一焊球所在面作为测量面,借助于特殊卡具,将待测面磨平抛光,并尽量保证测量面位于焊球中间,然后在室温下将光栅转移到待测面上.实验时,将已转移了光栅的封装试样置于热板上,热板的温度由计算机控制,热板和试样之间涂有导热油,为防止外界扰动对测量的影响,将热板和试样都置于真空腔内,真空腔开有大的光学窗口便于实验测量.对试样施加设定的温度载荷,试样的变形由云纹干涉条纹反映,云纹条纹由 CCD 镜头拍摄并储存到计算机内,对这些条纹图进行处理就可以得到不同时刻试样内的应变分布.

2.2 有限元模型

采用商用有限元软件 ABAQUS 进行分析.首先,建立一个简化的、粗网格的三维整体有限元模型来分析该试样大致的变形情况.由于结构的对称性,仅对试样的 1/4 进行分析.通常,在热载荷作用下,封装结构内距离芯片中心最远的焊球(角焊球)承受最大的应力和应变,因

此，在整体模型中，该焊球按其实际形状划分网格，而其他的焊球则被简化成体积相同的立方柱形。整体模型的有限元网格如图 2 所示。

建立一个局部的三维模型来计算失效风险最高的焊球（距芯片中心最远的焊球）内应力 / 应变的分布情况。由于整体模型网格较粗，很难在整体模型中得到焊球与基版、焊球与芯片以及焊球与芯下材料之间界面处的准确的位移边界条件。因此，在局部模型还包含了焊球附近的基版、芯片和芯下材料。图 3 是所建立局部模型的有限元网格图。

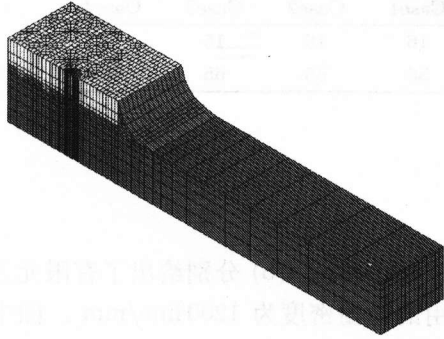


图 2 C4 封装整体模型的有限元网格
Fig.2 FEM mesh of the C4 package

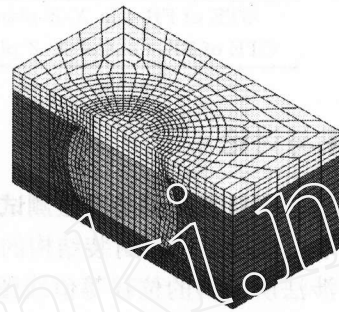


图 3 局部模型的有限元网格
Fig.3 FEM mesh of the local model

在有限元计算中，假设硅芯片由线弹性材料组成，采用各向同性线弹性模型来描述其力学行为。在所考察的温度范围内，其弹性模量和泊松比分别为 169.5 GPa 和 0.278，热膨胀系数 (CTE) 为 $3.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。焊球由共晶焊料组成，因此可将其简化成各向同性弹塑性材料。计算时，假设其泊松比为 0.4，其杨氏模量由下式决定

$$E = 63.875 - 0.137 T \quad (1)$$

式中， T 表示温度，单位为 K； E 是杨氏模量，单位为 GPa。计算时假设材料的热膨胀系数 (CTE) 与温度相关^[6]。芯下材料也被简化成各向同性弹塑性材料。计算时，假设其泊松比为 0.4，其杨氏模量由下式决定

$$E = 17.3 - 0.02795 T \quad (2)$$

式中， T 表示温度，单位为 K； E 是杨氏模量，单位为 GPa。计算时假设材料的热膨胀系数 (CTE) 与温度相关^[6]。FR-4 基板 (印刷电路板) 材料是一种编织纤维增强高分子基的复合材料，材料在厚度方向和垂直于厚度的面内的性质有很大差异。因此，FR-4 基板材料是一种正交各向异性的黏弹塑性材料。然而，由于缺乏 FR-4 基板材料的完整的黏弹塑性数据，在有限元计算时，我们将其假设为正交各向异性的线弹性材料进行处理。采用图 1 的坐标系，在所考察的温度范围内，材料在不同温度下各方向上的杨氏模量在表 1 中列出，泊松比 ν_{xz} , ν_{xy} 和

表 1 FR-4 基板材料的弹性常数

Table 1 Elastic constants of FR-4

Temperature /K	E_x, E_z /MPa	E_y /MPa
303	22 400.0	1600.0
368	20 700.0	1200.0
398	19 300.0	1000.0

ν_{yz} 分别为 0.02, 0.143 和 0.143. 由于文献中所提供的 FR-4 的 CTE 的数据相差很远^[6,7], 在整体模型中, 我们假设了 4 组不同的 CTE 值 (表 2) 进行计算, 将计算结果与实验最接近的一组 CTE 值代入局部模型, 考察焊球角点的应力、应变分布.

表 2 整体模型中所用到 FR-4 基板的 4 组 CTE 值

Table 2 Four cases of CTEs of FR-4 employed in the global model

Case	Case1	Case2	Case3	Case4
CTE of FR-4 in X-Z plane ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16	16	15	14
CTE of FR-4 out of X-Z plane ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	35	65	65	65

3 结果与讨论

3.1 整体模型计算结果与实验测试结果的比较

选取恒温段结束时封装结构的变形进行比较. 图 4(a) 和图 4(b) 分别给出了有限元方法和云纹干涉法所得到的位移等值线图. 本实验中所采用的光栅密度为 1200 line/mm, 图中每一条条纹所代表的位移为 $0.417 \mu\text{m}$. 显然, 有限元分析所得到的封装结构的变形情况与实验测试的结果变化趋势相同. 表 3 中将通过有限元整体模型, 采用不同热膨胀系数所得到的封装结构在

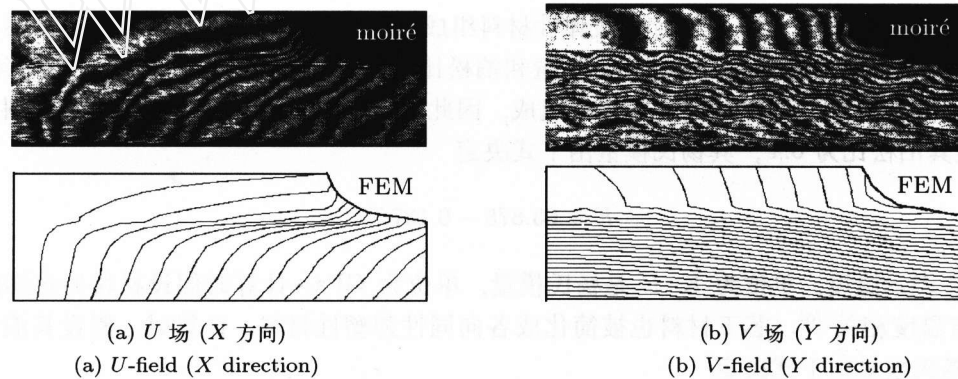


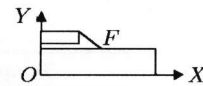
图 4 恒温段结束时有限元所得位移等值线与云纹观测条纹的比较

Fig.4 Displacement contours at the end of thermal loading from experiment and FEM

表 3 恒温段结束时有限元分析所得 F 点的位移与云纹测试数据的比较 (O 点是参考点)

Table 3 Comparison of U , V -displacements at F between FEM and moiré test at 665min (O is selected as reference point)

Case	Direction	FEA(μm)	Test(μm)	Error(%)
Case1	X	5.47	4.80	13.95
	Y	9.35	10.842	-13.76
Case2	X	5.26	4.80	9.58
	Y	12.82	10.842	18.24
Case3	X	5.05	4.80	5.21
	Y	12.34	10.842	13.82
Case4	X	4.84	4.80	0.03
	Y	11.85	10.842	9.30



F 点的变形与实验结果进行了比较,结果表明,与实验数据相比,第四组热膨胀系数所得到的节点位移误差最小.因此,在局部模型的计算中采用第四组热膨胀系数.

3.2 局部模型结果分析

图 5 给出了由局部模型和整体模型所得到的角焊球内等效塑性应变 (PEEQ) 的分布情况.可以看出,在这两个模型中,焊球内的 PEEQ 在高温恒温段 (115°C) 都显著增长,但是,由局部模型所得到的等效塑性应变的变化幅度和梯度都比整体模型高得多,尤其在恒温段结束时.此外,在整体模型中,无论是在恒温段开始时还是结束时,承担最大等效塑性应变的单元都不位于焊球的角上;但是,在局部模型中,等效塑性应变非常集中于焊球的角点处,并且在整个恒温过程中,位于焊球内 - 上角处的单元承担最大的等效塑性应变.显然,与整体模型相比,局部模型可以得到物理上更合理的结果.

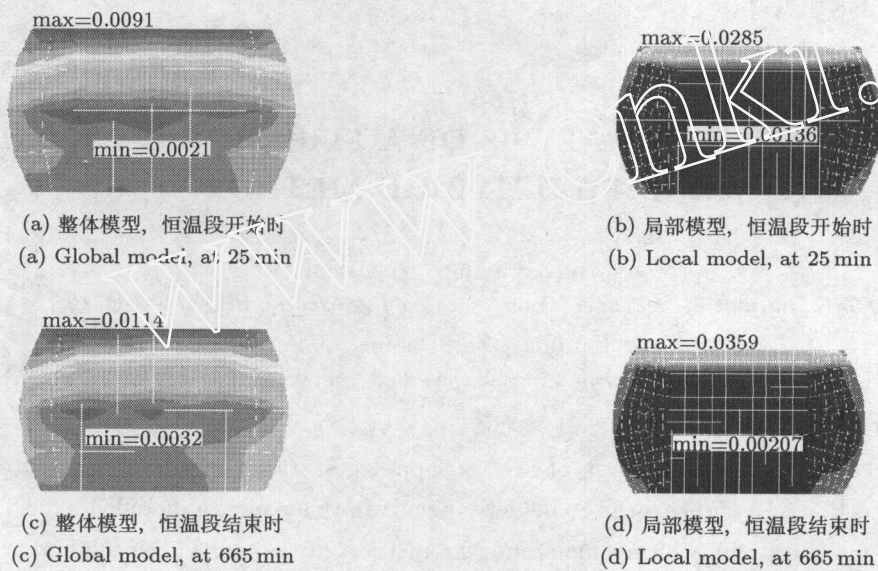


图 5 角焊球内 PEEQ 的分布

Fig.5 Distribution of PEEQ in the corner ball

3.3 讨论

在改进的混合法中,保证计算效率和准确性的因素主要有:(1)适当地简化整体模型;(2)适当选择局部模型的位置;(3)为局部模型正确定义边界条件;(4)选择合理的材料参数.建模的经验和对问题物理过程的认识有助于正确使用该方法,并得到高效、准确的分析结果.

改进的混合法可以提供电子封装中局部区域应力-应变分布的信息,是另一种比较可行的可靠性分析方法.与传统的混合法比,改进的混合法可能比较费时,但是,它避免了用实验方法决定局部模型边界条件可能带来的误差,可以产生更准确的结果.因此,随着计算和实验技术的发展,这种方法在微电子封装的可靠性分析中是很有潜力的.

参 考 文 献

- 1 Stennett M, Bonnell R, Villarreal J. Reliability enhancement for large brazed pin ceramic modules (Modeling and assembly process modifications). In: Proceedings of the 1992 International Symposium on Microelectronics, San Francisco, 1992. 643~647

- 2 Zhu JS. Modeling and validation of thermally-induced failure mechanisms in microelectronic packaging. Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Wayne State University, Dec., 1996
- 3 Wang Z, Dai F, Jiang X. High resolution, high sensitivity moiré method. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 15(2): 176~181
- 4 Guo Y, Li L. Hybrid method for local strain determinations in PBGA solder joints. *Experimental/Numerical Mechanics in Electronic Packaging*. Vol 1, Nashville, Tennessee, 1996. 21~30
- 5 Guo Y, Lim CK, Chen W, et al. Solder ball connect (SBC) assemblies under thermal loading: I. Deformation measurement via moiré interferometry and its interpretation. *IBM J of Research and Development*, 1993, 37(5): 635~647
- 6 Zou D, Wang J, Yang W, et al. CTE measurement and delamination growth by a real time moiré technique. *Proceedings of the 47th Electronic Components & Technology Conference*. May 18~21, 1997. 1124~1127
- 7 Auersperg J. Fracture and damage evaluation in chip scale packages and flip-chip assemblies by FEA and microdac. *Proceedings of the ASME Symposium on Applications of Fracture Mechanics in Electronic Packaging*, November 16~21, 1997. 133~138

THERMAL STRAIN ANALYSIS OF A FLIP-CHIP PACKAGE BY A MODIFIED HYBRID METHOD¹⁾

Wang Haiying Bai Yilong

(*LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Wang Jianjun Zou Daqing Liu Sheng

(*Department of Mechanical Engineering, Wayne State University Detroit, MI48202, U.S.A.*)

Abstract For the reliability analysis of electronic packages, strains in very localized areas, such as an interconnection or a corner, need to be determined. In this paper, a modified hybrid method of global/local modeling and real time moiré interferometry is presented. In this method, a simplified, coarsely meshed global model is developed to get rough information about the deformation of the microelectronic package. In order to make sure the global model has been reasonably simplified and the material properties are properly chosen, an experimental technique (e.g. moiré interferometry) is used to verify the results of global model. A local FEM model is built to calculate the local strain/stress distribution in a critical location. The boundary conditions of the local FEM model come from simulation results of the verified global model. The verification of global model ensures the accuracy of the results from local model. As a demonstration, the thermal strain of a flip-chip package is studied with this method. Results show that this method can produce an accurate and reliable result of stress-strain distribution, especially in very localized areas of microelectronic packaging.

Key words moiré interferometry, global/local method, modified hybrid method, strain distribution

Received 18 August 2001, revised 8 May 2002.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19891180).