

[文章编号] 1004- 0609(2000)03- 0404- 07

表面组装焊点内部应力—应变场的数值模拟(I)^①

——应力—应变场分布特征及其动态特性

马 鑫¹, 钱乙余¹, 吉田综仁²

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 广岛大学 工学部弹塑性工学研究室, 日本, 739)

[摘 要] 针对表面组装焊点的实际服役条件, 对温度循环载荷下其内部应力—应变场的分布特征进行了有限元数值模拟。结果表明, 温度循环在焊点内部导致应力循环, 应力循环导致热棘轮效应, 即非弹性应变累积; 在温度历史过程中, 应力—应变场等值分布图呈现动态特性, 且与温度历史相关。

[关键词] 温度循环载荷; 表面组装焊点; 应力—应变场; 动态特性; 有限元数值模拟

[中图分类号] TG404

[文献标识码] A

近年来表面组装工艺(Surface Mount Technology, SMT)焊点在温度循环载荷下的失效问题受到了广泛关注。陶瓷芯片载体与树脂印刷电路板之间的热膨胀系数差将导致焊点内部形成交变的应力—应变场, 从而为裂纹的萌生与扩展提供条件, 并最终导致表象为裂纹萌生与扩展、实质为电信号传输失真的失效现象。SMT 焊点的几何尺寸一般为 1 mm × 1 mm × 0.2 mm 量级, 即使采用干涉法, 焊点内部力学信息的实时变化也很难通过实验手段获得。因此, 有限元数值模拟方法在此得到了广泛应用^[1]。

目前, 温度循环载荷下 SMT 焊点内部力学参量分布信息的有限元分析研究集中于温度历史某一时刻的等值分布, 并由此确定出最大值点所在位置, 从而预测裂纹的萌生地点^[2~5]。事实上, 温度载荷的循环特征决定了温度历史中焊点内部的力学参量的分布应该是动态变化的, 同时考虑到构成焊点的软钎料合金力学性能的温度相关性, 焊点内部力学参量分布信息的分析应结合其温度历史, 以反映温度历史过程中的动态变化特征。

1 有限元模型

图 1 为作者所在研究室多年来用于温度循环寿命试验的 SMT 模拟焊点结构形式^[6]。图 2 为相应的二维有限元网格划分(取图 1 中 Z = 0 截面)。采

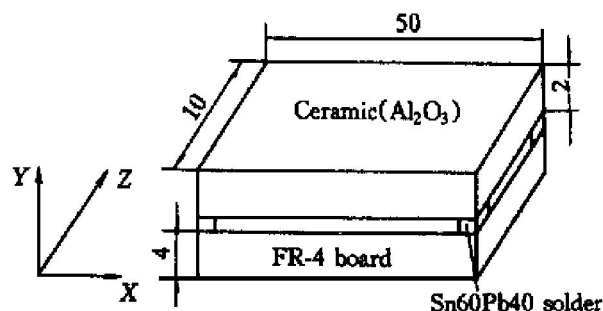


图 1 表面组装模拟焊点结构示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic of simulated surface mount technology (SMT) solder joint

用 4 节点等参元, 共 364 个单元, 418 个节点。

有限元数值模拟软件为商用非线性有限元程序包 MARC7.0, 前后处理程序为 MENTAT3.1, 硬件环境为 Sun-Ultra1 工作站。计算中采用的材料性能参数示于表 1。陶瓷芯片载体与树脂基板均只考虑弹性变形, 其中树脂基板在服役温度范围内热稳定性较好, 一般在有限元计算中不考虑其力学参数的温度相关性^[8]。钎料合金的本构方程采用同时考虑时间相关的蠕变应变和时间无关的塑性应变的粘塑性本构模式, 但是没有考虑蠕变与塑变的交互作用; 其多轴应力—应变关系如下:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^c \quad (1)$$

其中弹性应变速率为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{d}{dt} \left(\frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

① [收稿日期] 1999- 06- 28; [修订日期] 1999- 10- 26

[作者简介] 马 鑫(1972-), 男, 博士研究生。

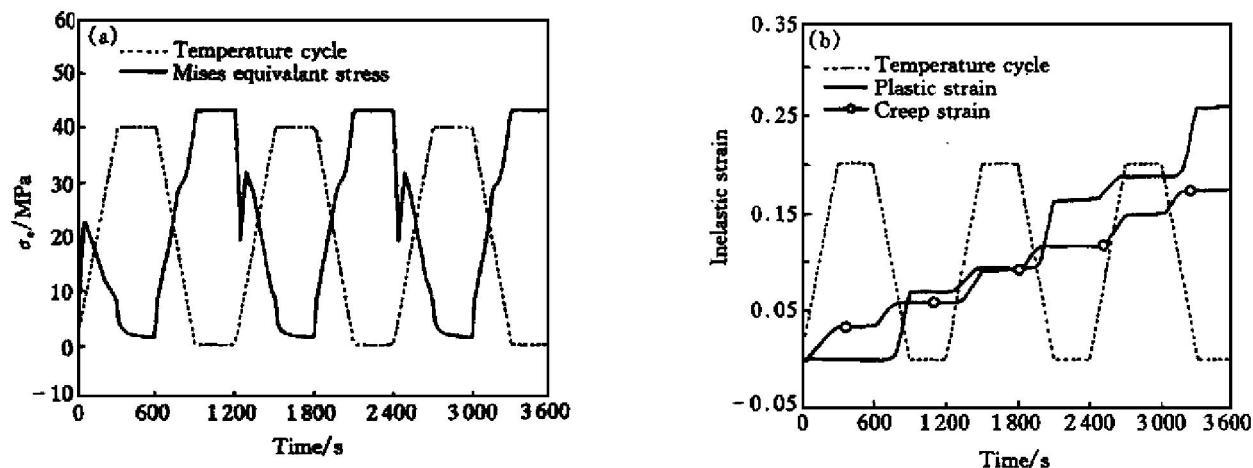


图4 焊点内部某处等效应力及等效非弹性应变随时间变化曲线

Fig. 4 Equivalent stress (a) and inelastic strain history (b) in SMT solder joint

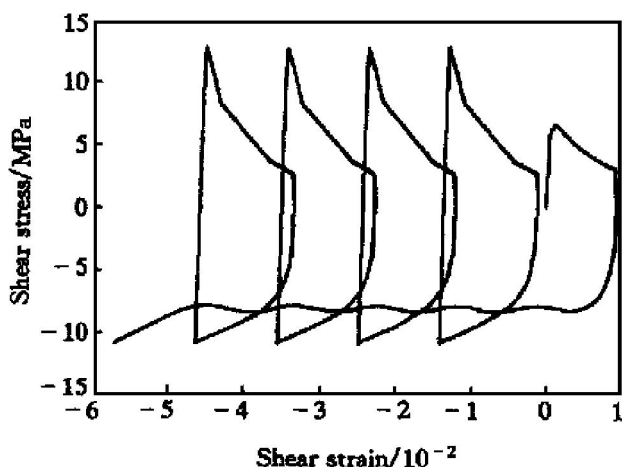


图5 焊点内部某处剪切应力—剪切应变曲线

Fig. 5 Shear stress-strain curve in solder joint showing ratchetting behavior

点 A, B, C, D, E), 图 6 和 7 为相应的焊点内部等效应力及等效应变分布图(为节省篇幅, 同时因为塑性应变的时间无关性及不可回复性, 仅给出三个时刻的累积等效塑性应变分布图)。由图可见, 在温度历史的不同阶段, 等效应力的等值分布有很大变化。低温阶段在焊点的界面处存在相当大的应力集中, 而高温阶段由于软钎料合金蠕变行为的应力松弛作用导致应力分布较为均匀。同时整个温度历史过程中等效应力峰值所在位置发生变化, 尽管相比之下仍有一最大值位置或应力集中最严重位置, 但考虑到焊点的界面空洞损伤失效机制^[9~11]及不同温度下构成焊点的软钎料合金的力学性能亦有不同, 因此不能仅以某一时刻的等效应力分布图来预测裂纹的可能萌生地点, 这一问题将在下文[12]中作进一步讨论, 并引入相对损伤应力概念。与等效应力的分布不同, 不同温度阶段的累积等效非弹性

应变的等值分布大致相同, 均为焊点内侧焊趾处出现应变峰值及应变集中。从损伤力学的角度来讲, 以等效应力或等效应变, 或是其它力学参量作为损伤判据尚存在很大争议, 考虑到表面组装焊点的特殊结构形式及失效方式, 下文^[12]中将结合应力三轴度的分布作进一步分析。

2.2.2 剪切应力与剪切应变场

由于 SMT 焊点的热应力失效是由陶瓷芯片载体和树脂基板的热膨胀系数不匹配引起的, 而焊点结构的特点是长度和高度之比很大, 因此剪切应力和应变是通常的力学分析对象。图 8 和图 9 分别为焊点内部剪切应力、应变场(此处为总应变的剪切分量), 可以看出焊点内侧存在相对较大的应力/应变集中而且应力/应变峰值始终位于焊点内侧上下两个焊趾位置。与等效应力不同, 从剪切分量的分布可以分析应力的拉压状态。由图可以看出, 不仅剪切分量的峰值位置发生变化, 而且其拉压状态也发生变化, 从而进一步证明温度循环历史下焊点内部应力—应变场呈现动态特性, 仅以某一时刻的分布来作判断是片面的。

3 结论

1) 有限元数值模拟结果表明, 循环温度历史下表面组装焊点内部应力—应变场分布的基本特征为温度循环导致焊点内部出现应力循环, 应力循环导致棘轮效应, 即非弹性应变不断累积。

2) 温度历史过程中, 焊点内部应力—应变场分布呈现动态特性, 主要表现在等效应力峰值及其所在位置、拉压应力—应变状态变化等方面。这一

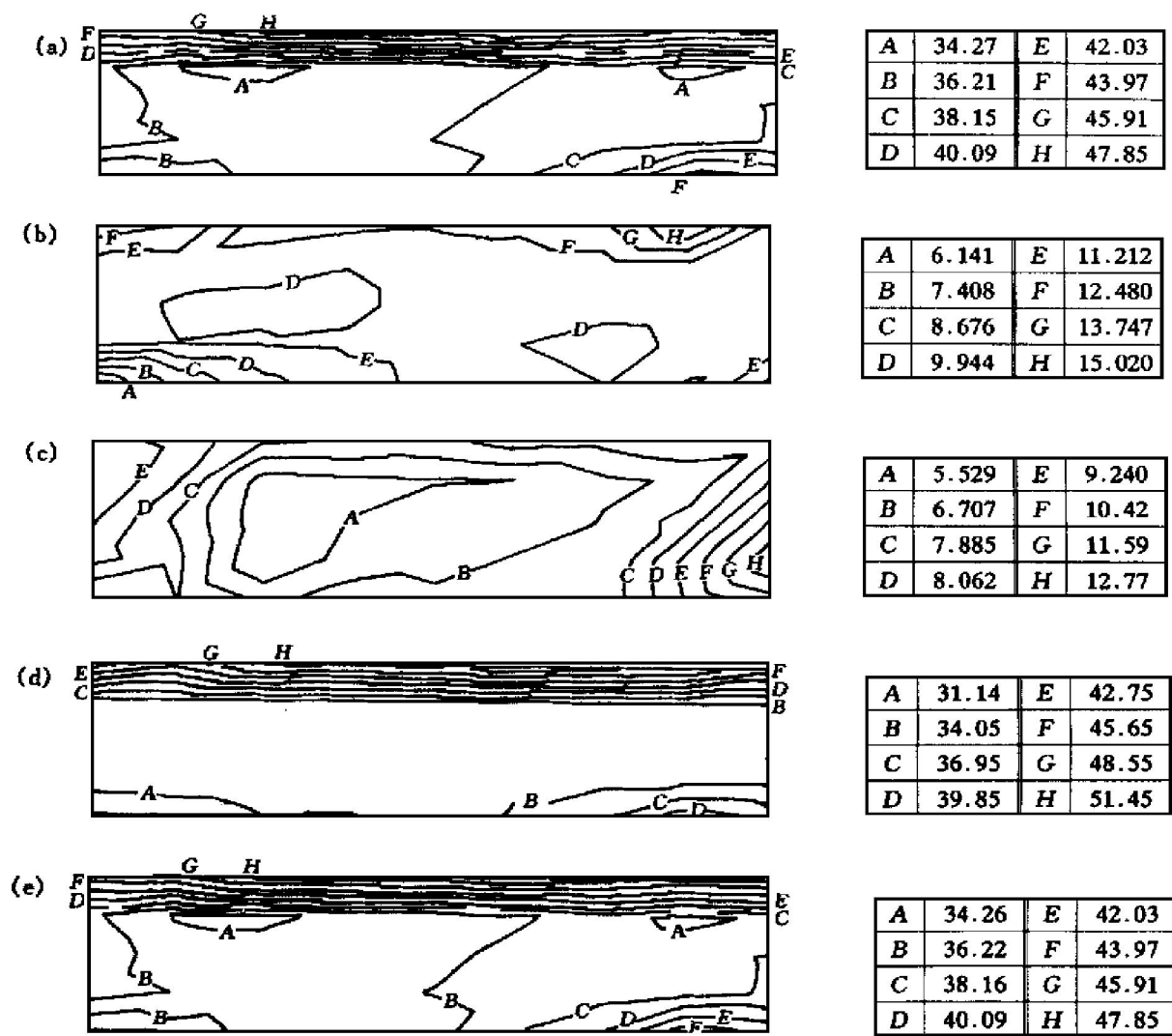


图 6 第 5 个温度循环内不同时刻焊点内部的等效应力分布等值图(MPa)

Fig. 6 Equivalent stress distribution in solder joint at different stages during 5th temperature cycle (MPa)

(a) —At point A; (b) —At point B; (c) —At point C; (d) —At point D; (e) —At point E

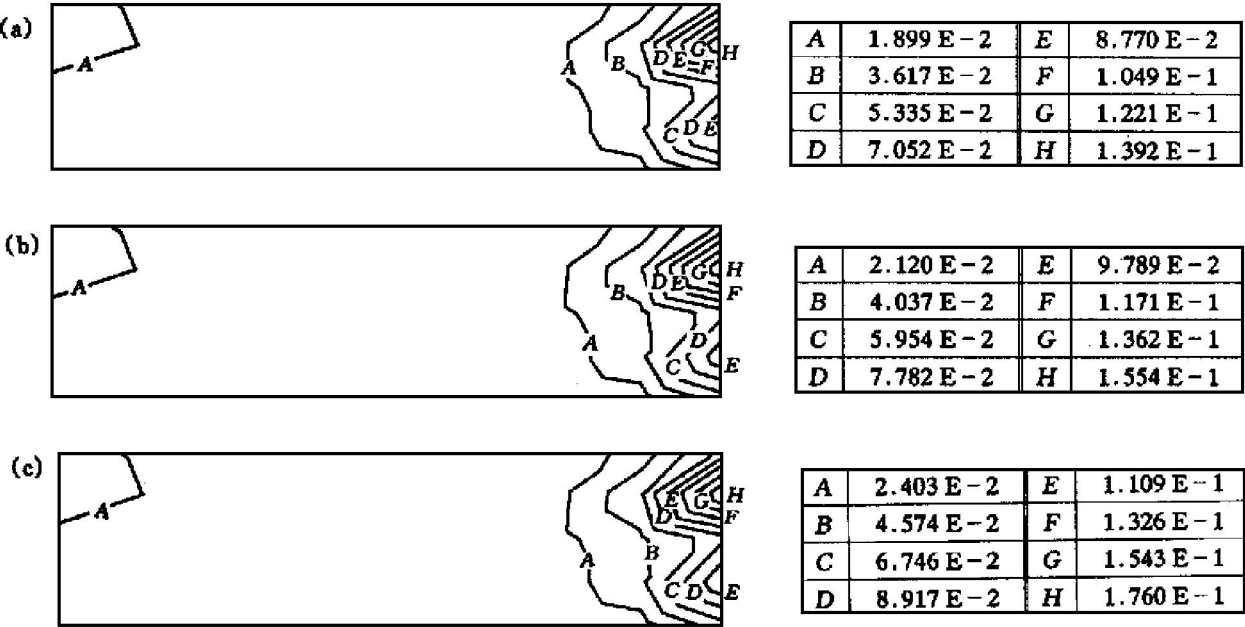


图 7 第 5 个温度循环内不同时刻焊点内部累积等效塑性应变分布图

Fig. 7 Cumulative equivalent plastic strain distribution in solder joint at different stages during 5th temp. cycle

(a) —At point A; (b) —At point B; (c) —At point D

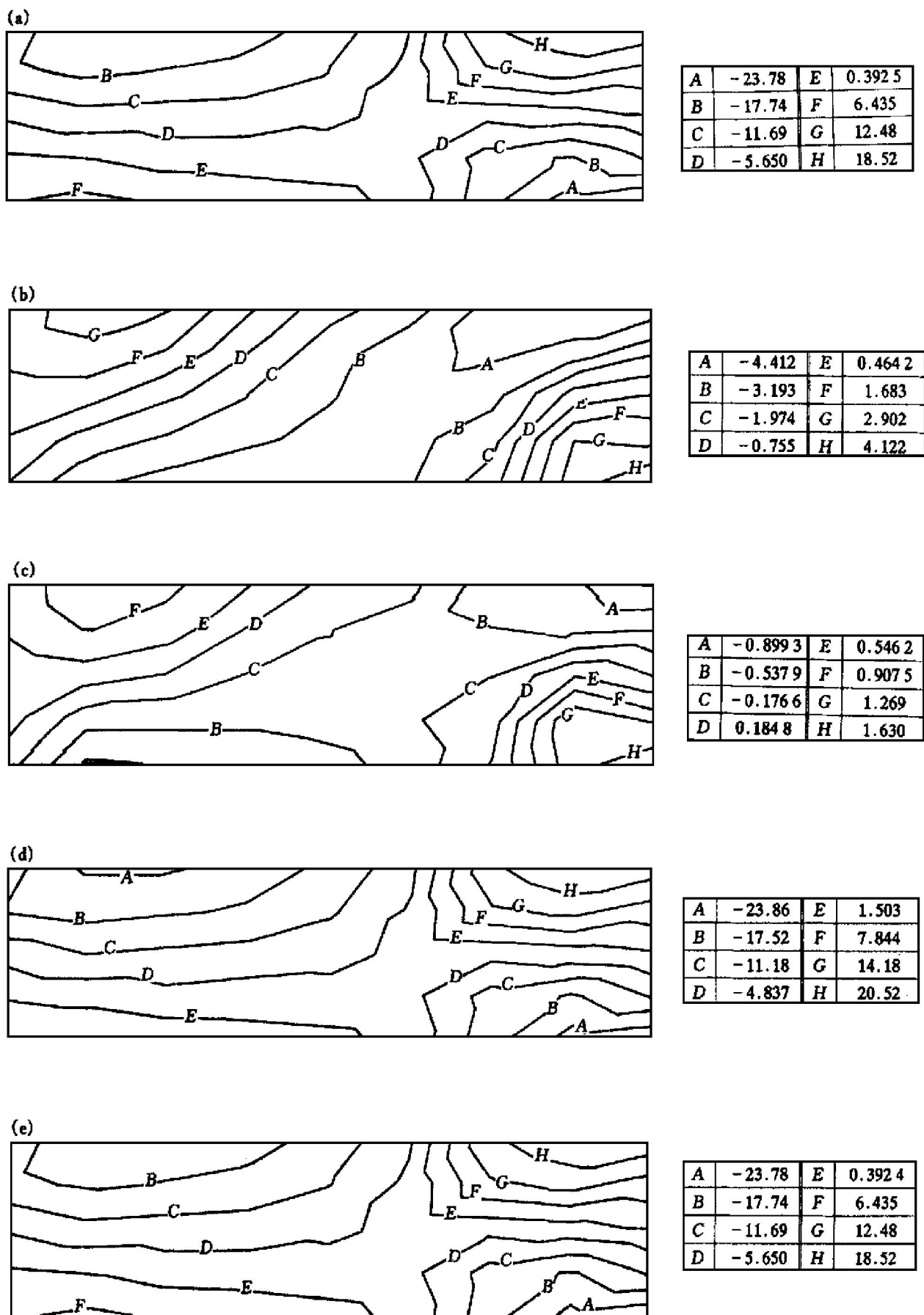


图 8 第 5 个温度循环内不同时刻焊点内部剪切应力分布等值图 (MPa)

Fig. 8 Shear stress distribution in solder joint at different stages during 5th temperature cycle (MPa)

(a) —At point A; (b) —At point B; (c) —At point C; (d) —At point D; (e) —At point E

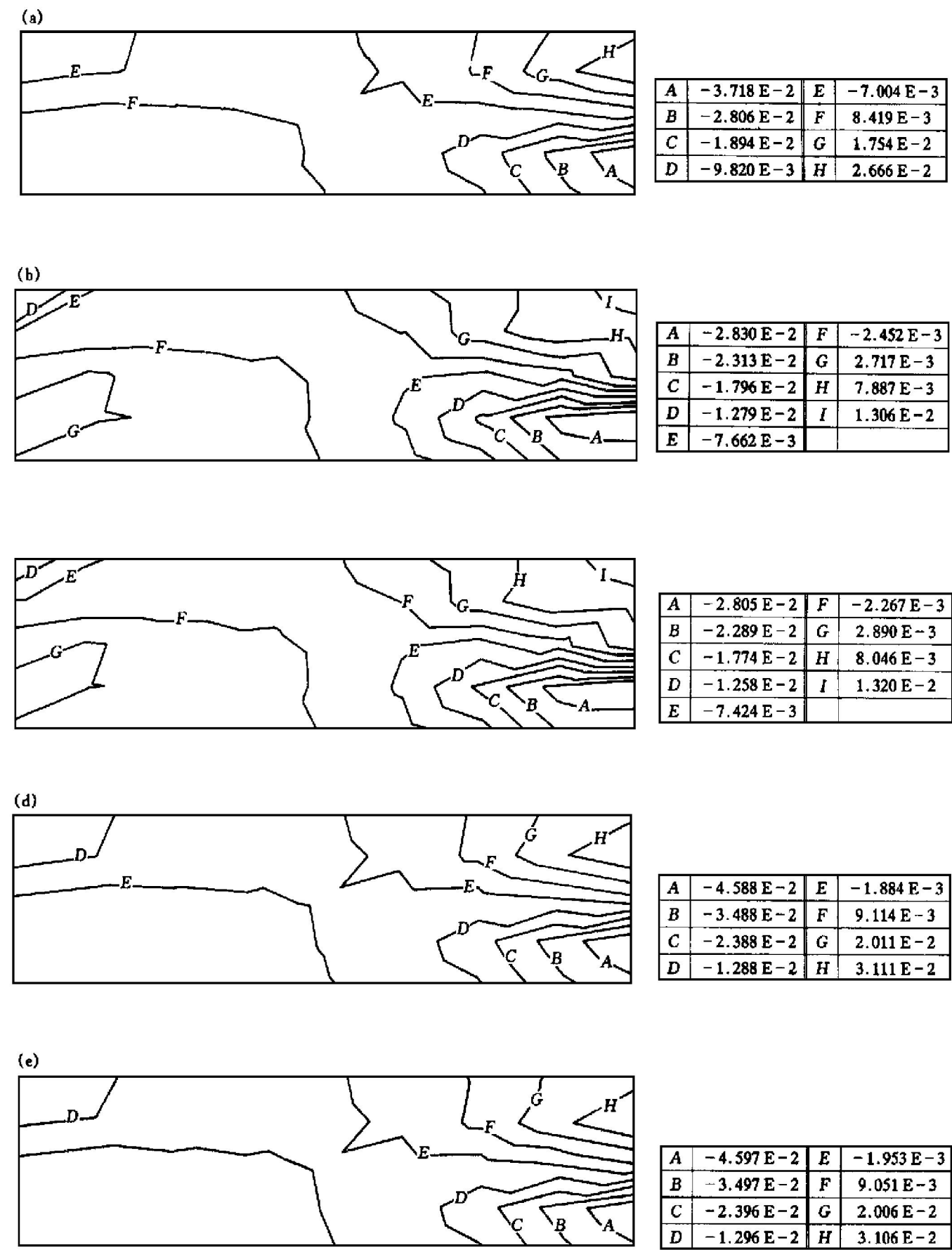


图 9 第 5 个温度循环内不同时刻焊点内部剪切应变分布等值图

Fig. 9 Shear strain distribution in solder joint at different stages during 5th temperature cycle

(a) —At point A; (b) —At point B; (c) —At point C; (d) —At point D; (e) —At point E

动态特性是与温度历史紧密相联的,因此仅分析温度历史中某一时刻的应力-应变场分布并作出焊点失效行为的相关判断是片面的。

[REFERENCES]

- [1] Mackerle J. Finite element analysis and simulation of adhesive bonding, soldering and brazing: A bibliography (1976~ 1996) [J]. Modelling Simul Mater Sci Eng, 1997, 5: 159- 185.
- [2] Lau J H and Harkins C C. Thermal stress analysis of SOIC packages and interconnections [J]. IEEE Trans CHMT, 1988, 11(4): 380- 389.
- [3] Lee S M and Lee K W. Thermal fatigue life prediction of gull-wing solder joints in plastic thin small outline packages [J]. Jpn J Appl Phys, 1996, 35(11B): L1515- 1517.
- [4] Jung W, Lau J. H and Pao Y-H. Nonlinear analysis of full-matrix and perimeter plastic ball grid array solder joints [J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 1997, 119(3): 163- 170.
- [5] Ling S and Dasgupta A. A nonlinear multi-domain stress analysis method for surface-mount solder joints [J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 1996, 118(2): 72- 79.
- [6] ZHU Ying(朱 颖). 锡铅稀土钎料 SMT 焊点热循环失效机制研究 [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1996: 30.
- [7] Wong B, Helling D E and Clark R W. A creep-rupture model for two-phase eutectic solders [J]. IEEE Trans CHMT, 1988, 11(3): 284- 290.
- [8] Hong B Z and Burrell L G. Modeling thermally induced viscoplastic deformation and low cycle fatigue of CBGA solder joints in a surface mount package [J]. IEEE Trans CPMT, 1997, 20(3): 280- 285.
- [9] MA Xin(马 鑫), WANG Guo-zhong(王国忠), FANG Hong-yuan(方洪渊), et al. 剪切载荷下软钎焊接头界面失效行为 [J]. Transaction of the China Welding Institution(焊接学报), 1997, 18: 44- 49.
- [10] Logsdon W A, Liaw P K and Burke M A. Fracture behavior of 63Sn-37Pb solder [J]. Engng Fracture Mech, 1990, 36: 183- 218.
- [11] Skipor A F, Harren S V and Botsis J. The effect of mechanical constraint on the flow and fracture of 63/37 Sn/Pb eutectic alloy [J]. Engng Fracture Mech, 1995, 41: 647- 669.
- [12] QIAN Yi-yu(钱乙余), MA Xin(马 鑫) and Yoshida F. 表面组装焊点内部应力-应变场的数值模拟(II) [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2000, 10(3): 411- 415.

Finite element analysis of stress-strain distribution characteristics in SMT solder joints (I)

——Dynamic feature of stress-strain field distribution

MA Xin¹, QIAN Yi-yu¹, F. Yoshida²

(1. National Key Laboratory of Welding, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China;

2. Department of Mechanical Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, 739, Japan)

[Abstract] Based on the real service conditions of surface mount solder joints, the finite element numerical simulation was made in order to get the feature of stress-strain distribution in the solder joints under temperature cycling. Analysis results show that temperature cycling leads to stress cycling and the later leads to thermal ratchetting effect and the accumulation of inelastic strain. Furthermore, stress-strain distribution in the solder joints has dynamic feature during temperature cycling and is related to temperature history.

[Key words] temperature cycling load; surface mount solder joints; stress-strain field; dynamic feature; finite element numerical simulation

(编辑 袁赛前)