

应变率效应对无铅焊锡接点跌落冲击力学行为的影响

秦 飞¹, 李建刚¹, 安 彤¹, 刘亚男¹, WANG Yngve²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124;

2. Intel(中国)有限公司, 上海 200000)

摘 要: 采用应变率相关的 Johnson-Cook 材料模型和率无关的弹塑性模型分别计算了跌落/冲击载荷下焊锡接点的应力及应变, 研究应变率对焊锡接点力学行为的影响, 预测了焊锡接点的破坏情况, 并与动态 4 点弯曲实验结果进行了比较. 结果表明: 焊锡材料的应变率效应对电路板的挠度几乎没有影响, 但对焊锡接点的应力及应变有较大影响; 不考虑应变率效应的弹塑性模型低估焊锡接点的应力值而高估等效塑性应变值; 采用率相关的 Johnson-Cook 模型能更好地预测焊锡接点的力学行为, 能较真实地预测焊锡接点的破坏情况.

关键词: 应变率效应; 焊锡接点; 跌落冲击; 电子封装

中图分类号: TB 12; TN 47

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2010)08-1015-05

由于铅对环境的危害, 采用无铅焊料(如 SnAg、SnAgCu 系合金)代替含铅焊料(SnPb 系合金)已成为趋势. 然而, 实验表明无铅焊锡接点的跌落/冲击可靠性和含铅焊锡接点相比有 1 个数量级的下降^[1], 无铅焊锡接点在跌落/冲击过程中的力学行为成为移动电子产品可靠性研究的重要内容. 研究表明^[2-3], 无铅焊料的力学行为对应变率比较敏感, 因此, 在分析焊锡接点跌落/冲击载荷下的力学行为时必须考虑应变率效应. 而目前的数值模拟主要采用线弹性或者弹塑性材料模型模拟焊锡接点跌落/冲击力学行为^[4-7], 完全忽略了焊料的应变率效应, 导致模拟结果不准确. 本文首先通过电子封装板级 4 点动态弯曲实验得到封装焊点失效情况, 为预测结果提供实验依据; 然后建立了 4 点动态弯曲有限元模型, 分析比较了跌落/冲击载荷作用下焊锡材料的应变率效应对电路板(printed circuit board, PCB)变形和焊锡接点应力及应变的影响, 并预测了焊锡接点的破坏情况, 将预测结果与动态 4 点弯曲实验结果进行了比较.

1 板级封装动态弯曲实验

1.1 实验装置与方法

本文所采用的实验装置和方法与文献[8]中 4 点动态弯曲实验相同. 实验样品 PCB 板尺寸为 75 mm × 40 mm × 1.0 mm, 在其中心位置采用球栅阵列(ball grid array, BGA)封装技术贴装尺寸为 13 mm × 11 mm × 1.4 mm 的器件(component), 安装方位角为 45°. BGA 封装中共有 165 个焊锡接点, 均为直径为 0.38 mm、高度为 0.3 mm 的截冠球体. 焊锡接点 2 个方向间距分别为 0.580 mm 和 0.570 mm.

实验时, PCB 板无约束平放在支座辊子上, PCB 板上放置支架, 支架的作用是将自由跌落钢球产生的冲击载荷通过支架传递给 PCB 板. 支架上方放置直径为 10 mm、高度为 3.5 mm 的圆形橡胶垫, 作用是缓冲钢球跌落产生的冲击载荷. 钢球可以从不同高度自由跌落到橡胶垫上. 为测量 PCB 板的挠度, 在 PCB 板侧面制作散斑, 用高速摄像机拍摄 PCB 变形图. 采用高速摄影技术结合数字图像相关方法^[8-9]测量跌落/冲击过程中 PCB 板中心的挠度.

收稿日期: 2009-03-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572010); 北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目.

作者简介: 秦 飞(1965—), 男, 河南新郑人, 教授, 博士生导师.

1.2 实验结果与分析

根据跌落高度不同,实验分5组(68、110、163、228、304 mm),每组有6个相同封装工艺的测试板.在测试板的图像采集区的一侧制作散斑,并用高速摄像机记录变形过程.实验结束后,将测试板进行失效分析,并采用数字图像相关分析软件 DICAI.0 计算 PCB 板挠度.实验结果表明:在跌落高度为 68 mm 和 110 mm 时,没有焊锡接点发生破坏;跌落高度为 163 mm 时,6 个测试板只有 1 个样品出现 1 个焊锡接点破坏,可以认为在此高度下不会发生破坏;跌落高度为 228 mm 时,有 5 个测试板共出现 8 个焊锡接点破坏,平均每个测试板大约有 1.3 个焊锡接点发生破坏,由于器件安装并非左右完全对称,因此只有一侧的远角焊锡接点发生破坏;跌落高度为 304 mm 时,有 5 个测试板共出现 23 个焊锡接点破坏,平均每个试样大约有 4 个焊锡接点发生破坏.因此,可以认为 228 mm 是焊锡接点发生破坏的临界高度,即当跌落高度小于 228 mm 时,焊锡接点不会发生破坏;大于 228 mm 时,焊锡接点开始破坏,而且随着跌落高度的增加发生破坏的数目逐渐增加.失效焊锡接点的位置多数位于 BGA 阵列的远角处,在靠近 PCB 板一侧开裂.

2 动态弯曲实验的有限元分析

2.1 BGA 阵列的有限元模型

BGA 阵列共有 165 个焊锡接点,为得到其较精确的应力及应变,需要采用精细实体单元划分网格,计算量很大,甚至无法进行.因此,本文仅在 BGA 阵列危险焊锡接点处采用截冠球体,而将其余部分焊锡接点处理成均匀连续分布的焊层,如图 1 所示. Tsai 等^[6]的研究表明,即使把整个 BGA 阵列用均匀焊层代替,也不会显著影响 PCB 的挠度.每个焊球划分 192 个单元,整个模型共有 9 400 个单元.考虑到 PCB 板的支座、支架和钢球的相对刚度较大,为简化计算将它们处理成刚体.在支架与 PCB 板、PCB 板与支座之间的接触面采用无摩擦接触单元.跌落刚球采用 ABAQUS / Explicit 分析软件提供的 C3D4 单元,共 3 289 个;其余部件为 C3D8R 单元,共 96 243 个.钢球从高度 h 自由跌落,在钢球接触橡胶垫的瞬间,钢球的速度为 $v = \sqrt{2gh}$,其中 g 为重力加速度.为简化模拟过程,本文不考虑钢球自由跌落过程,而是将钢球接触到橡胶垫时的速度作为初速度施加在钢球上.橡胶垫处理为不可压缩材料,采用 Mooney-Rivlin 不可压缩橡胶模型;PCB 板采用横观各向同性线弹性材料模型,器件内部结构考虑了铜垫、基板、芯片、封装树脂和阻焊层等细节,各材料具体参数见文献[8].

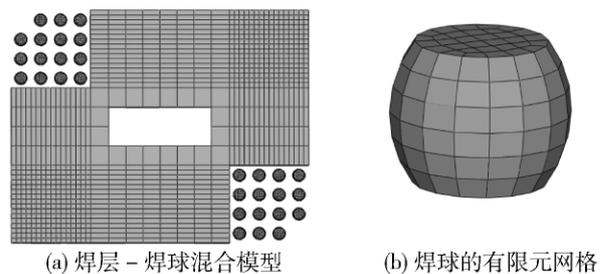


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element models

2.2 焊锡材料的材料模型

焊球和焊层采用文献[3]给出的应变率相关的 Johnson-Cook 材料模型和率无关的弹塑性模型. Johnson 等^[10]在 1983 年提出了金属在大变形、高应变率以及高温情况下的 Johnson-Cook 模型一般表达式为

$$\sigma = [A + B(\varepsilon^p)^n] (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中 σ 为 Von Mises 流动应力; ε^p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲应变率, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$, 其中 $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率,一般取准静态实验时的应变率; T^* 为归一化温度, $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, 其中 T_r 和 T_m 分别为参考温度和材料的熔点,这里参考温度为室温;模型中有 5 个材料常数 A 、 B 、 C 、 m 和 n , 其中 A 是由准静态压缩实验得到的屈服应力, B 和 n 表征了应变硬化效应, C 用来描述应变率敏感性, m 定义了温度软化效应.利用 ABAQUS / Explicit 分析软件可以直接输入 Johnson-Cook 材料模型,各参数分别为 $\rho = 7\,384 \text{ kg/m}^3$, $E = 54 \text{ GPa}$, $\nu = 0.363$, $A = 38 \text{ MPa}$, $B = 275 \text{ MPa}$, $C = 0.071\,3$, $n = 0.710$, $m = 1$, $T_r = 298 \text{ K}$, $T_m = 490 \text{ K}$, $\dot{\varepsilon}_0 =$

0.001 ,比热容 $C_p = 233.6 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. 率无关弹塑性模型采用三线性材料模型 ,各参数分别为 $\sigma_1 = 45 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 50.4 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 55 \text{ MPa}$, $\epsilon_1 = 0.065\%$, $\epsilon_2 = 4.3\%$, $\epsilon_3 = 40\%$.

3 应变率效应的影响

3.1 应变率效应对焊锡接点应力的影响

为比较应变率效应的影响 ,分别采用应变率相关的 Johnson-Cook 材料模型和率无关的弹塑性模型计算了钢球从不同高度跌落时 PCB 板最大挠度、焊锡接点的应力及应变. 图 2 给出了采用不同材料模型时 PCB 板中心的最大挠度和实验结果的比较. 模拟结果与实验结果比较吻合 ,而且焊锡接点的材料模型对 PCB 板挠度影响不大. 图 3 给出了高度为 163 mm 时 ,PCB 板中心挠度以及最危险焊锡接点的 Von Mises 应力随时间变化曲线. 危险焊锡接点位于 BGA 阵列的远角 ,其最大 Von Mises 应力处靠近 PCB 板侧. 随着 PCB 板挠度的增加 ,焊锡接点的 Von Mises 应力逐渐增大. 从图 3 可以看出 ,当焊锡接点处于弹性阶段时 2 种材料模型得到的 Von Mises 应力基本一致 ,1.2 ms 后焊锡接点开始进入塑性变形阶段 ,这时弹塑性材料模型计算的 Von Mises 应力增加趋于缓慢 ;而采用 Johnson-Cook 模型时 ,虽然焊锡接点已经进入塑性变形阶段 ,但由于考虑焊料的应变率效应 ,Von Mises 应力仍显著增加.

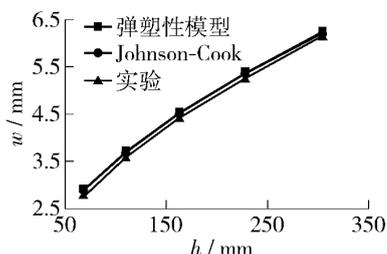


图 2 PCB 板中心最大挠度
Fig. 2 Max deflection of PCB center

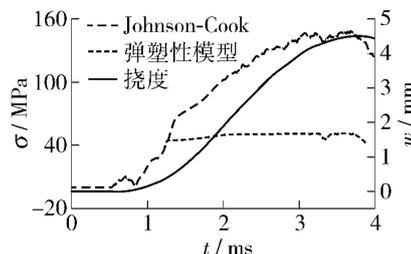


图 3 焊锡接点 Von Mises 应力和 PCB 中心挠度时间历程
Fig. 3 Time histories of Von Mises stress and deflection of PCB

图 4(a) 给出不同跌落高度下危险焊锡接点的最大 Von Mises 应力. 当焊锡接点采用 Johnson-Cook 材料模型时 ,由于焊料的应变率效应 ,焊锡接点的最大 Von Mises 应力随着跌落高度的增加逐渐增大. 而采用弹塑性模型时 ,最大 Von Mises 应力增加不大 ,几乎为一条水平线 ,因此 ,很难通过焊锡接点的 Von Mises 应力来预测焊锡接点是否会发生破坏. 图 4(b) 给出了焊锡接点采用 Johnson-Cook 材料模型时 ,不同跌落高度下焊锡接点中的应变率变化情况. 随着跌落高度的增加 ,应变率也逐渐增大. 当跌落高度为 304 mm 时 ,焊锡接点中最大应变率为 140 s^{-1} .

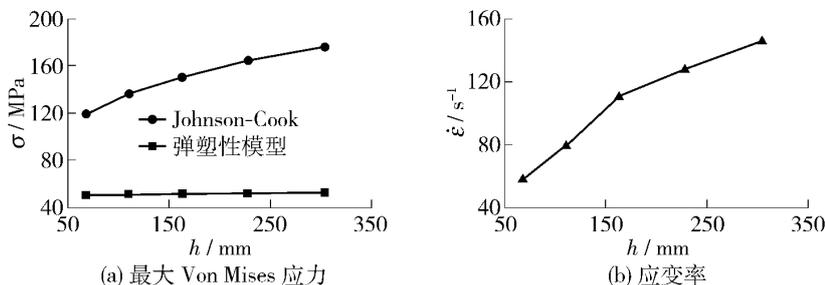


图 4 不同跌落高度下焊锡接点的应力和应变率
Fig. 4 Von Mises stress and strain rate in solder joints at different dropping heights

3.2 应变率效应对焊锡接点等效塑性应变的影响

图 5(a) 给出了钢球在 163 mm 高度跌落时采用不同材料模型计算的焊锡接点等效塑性应变时间历程曲线. 焊锡接点在 1.2 ms 时由弹性变形进入塑性阶段 ,等效塑性应变逐渐增大 ,由于 Johnson-Cook 材料

模型能反应焊料在冲击载荷作用下的应变率硬化效应,得到的等效塑性应变比弹塑性模型小. 图5(b)为不同跌落高度对等效塑性应变的影响,从图5(b)可以看出,跌落高度越高,等效塑性应变越大,而且弹塑性模型明显高估了焊锡接点的等效塑性应变.

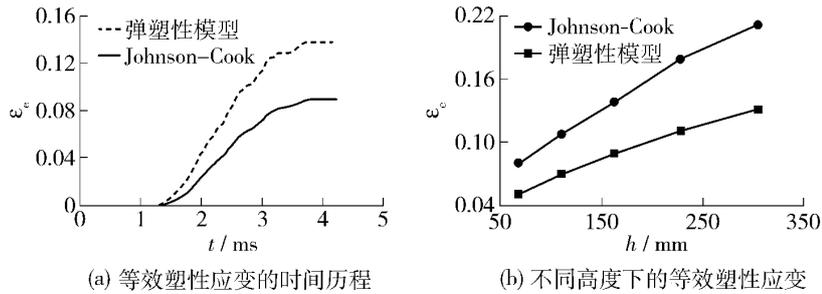


图5 应变率效应对焊锡接点等效塑性应变的影响
Fig.5 Equivalent plastic strains in solder joints computed by different material models

3.3 应变率效应对焊锡接点失效预测结果的影响

实验结果显示,钢球在228 mm高度跌落时,平均每个测试板有1个焊锡接点发生破坏. 采用2种材料模型计算得到危险焊锡接点的最大 Von Mises 应力和等效塑性应变如图6所示. 在228 mm高度时,采用 Johnson-Cook 材料模型计算出的危险焊锡接点的最大 Von Mises 应力为164 MPa,等效塑性应变为0.11,该应力值与实验测得的拉伸强度基本一致^[3]. 弹塑性模型计算的最大 Von Mises 应力和等效塑性应变分别为52.2 MPa和0.179,如果采用应力值作为焊锡接点破坏的准则,显然弹塑性模型无法判断是否破坏. 304 mm高度时,Johnson-Cook 材料模型计算出的最大 Von Mises 应力为176 MPa,根据应力准则可以预测远角最外侧2个焊锡接点会发生破坏,而里侧紧邻的焊点(图6中标圆圈的焊点)不发生破坏,与实验观察基本一致. 如果采用等效塑性应变作为预测准则,Johnson-Cook 材料模型可以得到同样的预测结果. 然而,弹塑性模型计算得到的最远角焊点和里侧紧邻焊点的等效塑性应变均大于0.179,均应发生破坏,这与实验观察不符.

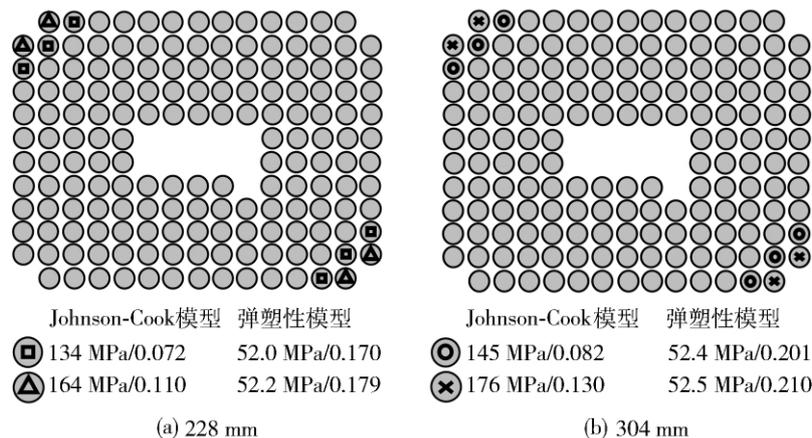


图6 焊锡接点的失效预测
Fig.6 Failure prediction of solder joints

4 结论

1) 焊锡材料的应变率效应对 PCB 板的挠度几乎没有影响,但对焊锡接点的应力及应变有较大影响. 不考虑应变率效应的弹塑性材料模型低估焊锡接点的应力值而高估等效塑性应变值.

2) 考虑应变率效应的 Johnson-Cook 材料模型能更好预测焊锡接点在跌落/冲击载荷作用下的力学行为。无论采用应力准则或者应变准则,均能较真实预测焊锡接点的破坏情况。

参考文献:

- [1] ZENG K, TU K N. Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology [J]. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 2002, 38(2): 55-105.
- [2] PLUMBRIDGE W J, GAGG C R. Effects of strain rate and temperature on the stress-strain response of solder alloys [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1999, 10(5): 461-468.
- [3] QIN Fei, AN Tong, CHEN Na. Strain rate effect and Johnson-Cook models of lead-free solder alloys [C]//2008 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. Shanghai: IEEE, 2008: 734-739.
- [4] TEE T Y, NG H S, LIM C T, et al. Impact life prediction modeling of TFBGA packages under board level drop test [J]. *Microelectronics Reliability*, 2004, 44(7): 1131-1142.
- [5] DESMOND Y R C, CHE F X, PANG J H L, et al. Drop impact reliability testing for lead-free and lead-based solder IC packages [J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46(7): 1160-1171.
- [6] TSAI T Y, YE H C L, LAI Y S, et al. Transient submodeling analysis for board-level drop tests of electronic packages [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2007, 30(1): 54-62.
- [7] 秦飞,白洁,安彤. 板级电子封装跌落/冲击中焊锡接点应力分析[J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(10): 1038-1043.
QIN Fei, BAI Jie, AN Tong. Drop/impact stress analysis of solder joints in board level electronics package [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(10): 1038-1043. (in Chinese)
- [8] 秦飞,金玲,WANG Yngve. 板级电子封装动态弯曲实验及其数值模拟[J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(增刊): 58-62.
QIN Fei, JIN Ling, WANG Yngve. Experimental and numerical study of board level electronics package with dynamic bending [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(Supp.): 58-62. (in Chinese)
- [9] 秦飞,魏建友. 数字图像相关方法中的应变测量平滑算法[J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(8): 815-819.
QIN Fei, WEI Jian-you. Smoothing algorithm for strain measurement in digital image correlation method [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(8): 815-819. (in Chinese)
- [10] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands: [s. n.], 1983: 541-547.

Influence of Strain Rate Effect on Behavior of Solder Joints Under Drop Impact Loadings

QIN Fei¹, LI Jian-gang¹, AN Tong¹, LIU Ya-nan¹, WANG Yngve²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Intel (China) Co. Ltd, Shanghai 200000, China)

Abstract: The strain rate dependent Johnson-Cook material model and the rate independent elastic-plastic model of lead-free solders are used to investigate the influence of strain rate effect on the mechanical behavior of solder joints under drop impact loadings. Failure of the solder joints is predicted and the results are compared with the experimental observations. The strain rate effect of lead-free solders has no influence on the deflection of the PCB during the drop impact but has significant influence on the stress and strain in solder joints. The rate independent elastic-plastic solder material model always underestimates the stress and overestimates the strain of the solder joints. The material model that takes the strain rate effect into account can predict more realistic behavior of the solder joints.

Key words: strain rate effect; solder joints; drop impact; electronics package

(责任编辑 刘 潇)