

铜柱栅阵列互连结构的剪切行为

赵智力¹, 徐希锐¹, 孙凤莲¹, 杨建国²

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 鉴于柔性铜柱与钎料球显著的性能差异, 采用试验和数值模拟方法研究了铜柱栅阵列互连结构的剪切行为。结果表明, 与焊球抛物线形的剪切曲线相比, 阵列铜柱互连剪切曲线呈现不同的新特征, 随剪切位移增加, 剪切力首先呈大斜率的线性增加; 随后由于焊柱开始挠曲变形, 位移增加引起的应力增加被部分释放, 故剪切力呈小斜率的线性增加; 最后阶段, 与 BGA 焊球相同, 剪切力呈抛物线形变化, 并在钎料/铜柱界面拉脱断裂。第一、二阶段曲线斜率均随铜柱长径比的增加和铜焊柱刚度的降低而减小。

关键词: 铜柱栅阵列; 剪切曲线特征; 挠曲变形; 剪切力

中图分类号: TG 425.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)04-0079-04

0 序 言

面阵列封装是目前电子制造业中采用的主流封装形式, 包括球栅阵列(ball grid array, BGA)封装和柱栅阵列(column grid array, CGA)封装。与 BGA 相比, CGA 由于封装高度更高、散热性更好, 功率循环中陶瓷芯片载体基板和印刷电路板(printed circuit board, PCB)之间热失配在钎料互连中引起的剪切应变也更小, 故具有更高的可靠性^[1,2]。CGA 封装形式在服役条件恶劣、可靠性要求高的航空航天、汽车、军用电子产品制造和长服役寿命要求的电信装备制造上占有非常重要的地位。

传统的 CGA 互连是采用低熔点共晶钎料将高熔点的高铅钎料(10Sn90Pb)柱的两端分别回流焊接到芯片载体基板和 PCB 板的焊盘上。为适应电子产品的无铅化要求, IBM 提出了铜柱代替高铅钎料柱的铜柱栅阵列(copper column grid array, CuCGA)封装。在柱间距 1.0 mm、热循环周期 30 min、循环温度范围 0~100 °C 的 CuCGA 器件热疲劳寿命较传统 CGA 增加显著^[3,4]。文献[5~7]采用试验和数值分析的方法研究了热循环和跌落冲击过程中 CGA 器件的力学响应及器件寿命; 但关于 CuCGA 的内容仅在文献[3,4,6]中有涉及。

阵列排布的铜焊柱在机械外载作用下、在两侧基板及钎焊圆角约束下的变形特点及其对 CuCGA

器件承载能力的影响都有待补充。文中设计并进行了阵列铜柱互连结构的剪切试验, 结合数值模拟结果分析和阐述了剪切曲线特征、其原因及器件的承载优势。

1 试验方法

1.1 试样设计

标准 CuCGA 器件的焊柱数量多、至断剪切力大, 限于设备的测试能力, 文中简化为 3×3 的阵列互连。因非热循环试验, 故焊柱两侧均采用 24 mm×24 mm PCB 板, 板厚 1.00 mm; 铜焊盘直径 1.50 mm、间距 4.0 mm; 紫铜丝直径 0.32 mm, 钎料采用 SAC 305 锡膏; 按长径比 8, 10 和 12 分别截取 2.56, 3.20 和 3.84 mm 三种铜柱高度, 各做 5 个阵列互连备用。

1.2 剪切测试

试验采用 PTR-1100 接合强度测试仪, 剪切速度 0.1 mm/s、剪切行程 7.0 mm。样品放置见图 1, 装夹固定下方 PCB 板, 调整推刀高度和水平位置至上方 PCB 板侧面中心后开始测试。最大剪切力高于同类数据平均值 2/3 的视为有效数据。

2 辅助分析用数值模拟

为分析试验现象与结构应力、变形之间的关系, 按试验尺寸建立有限元模型。考虑到结构及加载的对称性, 模型简化为 1/2 列互连结构, 网格划分情况



图 1 试验样品的放置
Fig. 1 Setting of test sample

如图 2 所示,采用八节点六面体单元,应力集中区网格细化处理,网格数为 47 880,最小单元尺寸 0.001 5 mm. 下方 PCB 板因剪切过程中被夹持固定,为减少单元数量不必按实际板厚建模. 通过与 PCB 板接触、并以 0.1 mm/s 水平匀速运动的刚体平面施加剪切位移.

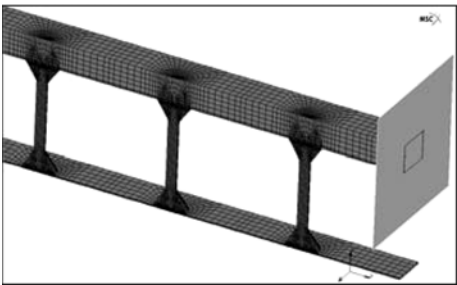


图 2 1/2 列铜柱互连有限元模型
Fig. 2 Finite element model of 1/2 rank Cu columns interconnect

锡膏 SAC305 的蠕变行为采用式(1)的广义 Garofalo 蠕变本构模型来描述,即

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_1 [\sinh(C_2 \sigma)] C_3 \exp\left(\frac{-C_4}{T}\right) \quad (1)$$

式中: T 为热力学温度; σ 为应力; ε 为蠕变应变, t 为时间, $C_1 \sim C_4$ 为蠕变相关的材料参数. 基板和铜分别按线弹性和弹塑性材料处理,材料性能见表 2^[8].

表 2 材料性能
Table 2 Material properties

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	蠕变参数			
					$C_1/10^6 \text{ s}^{-1}$	C_2/MPa^{-1}	C_3	C_4/K
PCB	27.00	0.39						
Cu	117.00	0.35	70	270				
SAC305	52.34	0.40			6.385	0.086 38	5.84	159.97

3 试验结果及分析

3.1 剪切曲线特征

图 3 为长径比 8,10,12 的阵列铜柱互连的剪切试验曲线. CuCGA 剪切曲线的共同特征是,剪切力在 3 个阶段呈现出完全不同的变化规律:初始阶段剪切力随剪切位移的增加呈大斜率的线性增加;第二阶段剪切力仍呈线性增加,但增加缓慢,斜率降低;第三阶段,剪切力呈抛物线形迅速增加至最大剪切力后回落,仅该阶段趋势与 BGA 焊球的剪切曲线部分相似. 与 BGA 相比,CuCGA 的剪切曲线出现了第一、二阶段完全不同的新特征.

3.2 长径比对曲线第一阶段斜率的影响

提取长径比为 10 的阵列铜柱互连结构的有限元结果辅助分析,发现第一阶段在铜柱/钎料界面钎焊圆角尖端局部区域已经产生非弹性变形,见图 4,其中左侧调取的是推刀侧包含钎焊圆角的单个焊柱,右侧为铜柱,变形被放大 10 倍.

故第一阶段特点是,除应力集中的局部区域外,

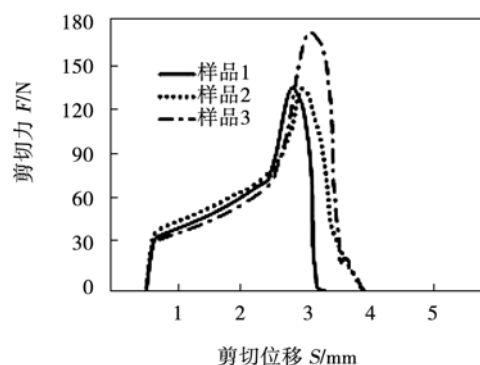
弹性变形占铜柱变形的绝大比例. 根据力学概念,第一阶段斜率除以柱的数量即为图 5 所示的焊柱刚度,其中连线的 3 点为不同长径比刚度的平均值,表现为随长径比增加铜焊柱刚度降低.

刚度是应力释放起作用的门槛参数,刚度越大,挠曲变形越不易发生,故发生挠曲变形的第二阶段的临界剪切力随长径比增加而减小,如图 3 曲线所示.

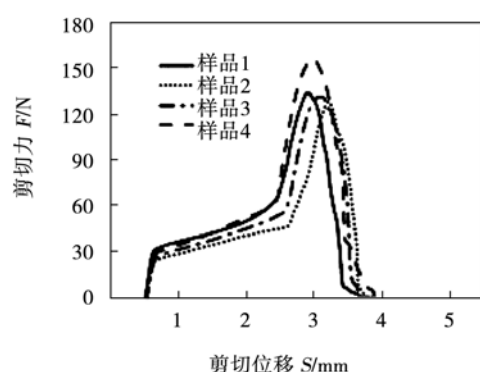
3.3 长径比对曲线第二阶段斜率的影响

长径比为 10 的有限元结果显示,第二阶段随剪切位移增加,非弹性变形区由铜柱拐点附近向铜柱中间区迅速扩展至整个铜柱. 该阶段焊柱发生挠曲变形,PCB 高度不断降低,但各焊柱的变形及应变分布的一致性仍较好,见图 6,此时剪切位移 1.20 mm,放大倍数为 1 倍.

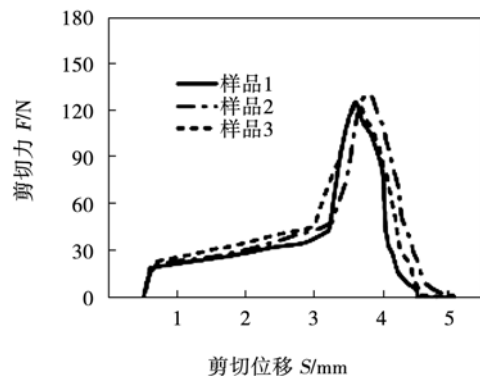
图 7 为不同长径比单个铜焊柱第二阶段斜率,为达到相同剪切位移,第二阶段比第一阶段推刀所需施加的剪切力增量大大降低,这是由于焊柱挠曲变形、应力增加被部分释放掉引起的;长径比越大,相同剪切位移下第二阶段的斜率越小.



(a) 长径比为8



(b) 长径比为10



(c) 长径比为12

图3 阵列铜柱互连剪切曲线

Fig. 3 Shear curves of CuCGA interconnects

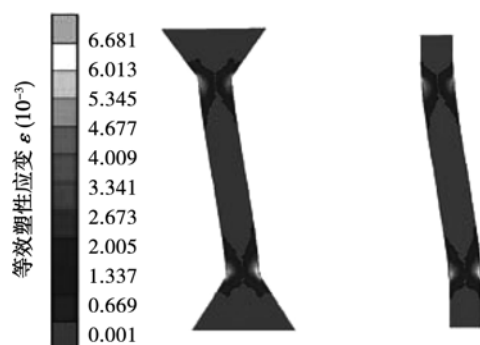


图4 铜柱互连的应变分布

Fig. 4 Strain distribution of Cu column interconnect

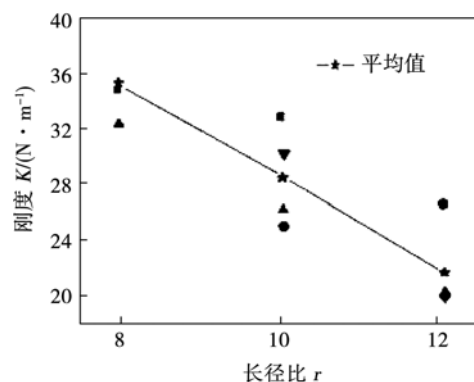


图5 铜焊柱的刚度

Fig. 5 Stiffness of Cu solder columns

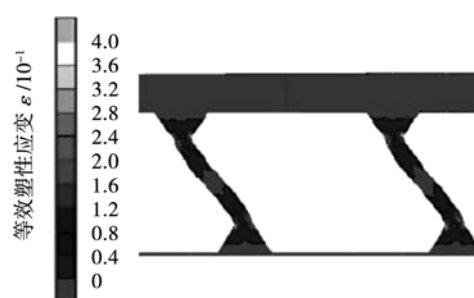


图6 铜柱互连的应变分布

Fig. 6 Strain distribution of Cu column interconnects

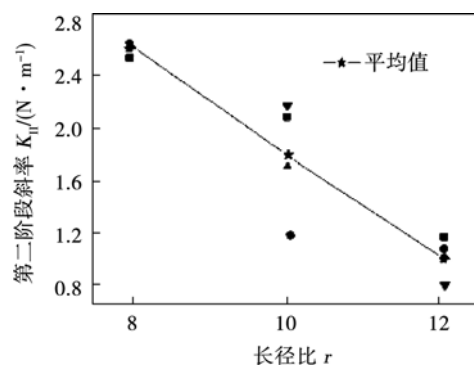


图7 铜焊柱第二阶段的斜率

Fig. 7 Slope coefficient of Cu solder columns in second stage

3.4 剪切曲线第三阶段的焊柱变形及断裂

断裂前观察到上方 PCB 板略有倾斜,其推刀侧焊柱略高。图8 剪切位移 2.50 mm、长径比 12 的有限元结果说明第三阶段焊柱变形一致性变差、PCB 倾斜不是试验失误造成的,其与 PCB 板尺寸、板厚、柱数量、柱间距等因素有关。由于两板相对移动所致的拉伸应变与大挠曲变形所致的弯曲应变在钎料/铜柱界面、钎焊圆角尖端区域叠加,成为最大主应变峰值位置,又因性能更薄弱,故样品均在钎料/铜柱界面拉脱断裂。

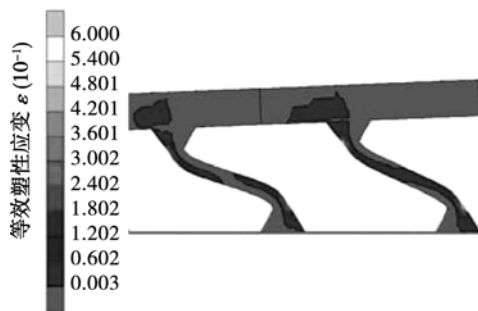


图 8 铜柱互连的主应变分布

Fig. 8 Principal strain of Cu column interconnect

4 结 论

(1) 与 BGA 焊球抛物线形的剪切曲线相比,阵列铜柱互连的剪切曲线在三个加载阶段呈现完全不同的变化趋势。

(2) 阵列铜柱互连剪切曲线第一阶段特征是,随剪切位移增加,剪切力呈大斜率的线性增加;随焊柱长径比增加,第一阶段斜率(焊柱刚度)降低,发生挠曲变形的临界剪切力降低。

(3) 阵列铜柱互连剪切曲线第二阶段特征是,随剪切位移增加,剪切力呈较小斜率的线性增加;焊柱发生挠曲变形、位移增加引起的应力增加被部分释放,剪切力增加速度低于第一阶段;长径比增加,第二阶段斜率减小。

(4) 阵列铜柱互连剪切曲线第三阶段特征是,随剪切位移增加,剪切力呈抛物线形变化,最终在钎料/铜柱界面拉脱断裂。

参考文献:

[1] Ghaffarian R. Thermal cycle reliability and failure mechanisms of CCGA and PBGA assemblies with and without corner staking[J].

IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, 31(2): 285–296.

[2] 薛松柏, 胡永芳, 禹胜林. BGA 封装器件焊点抗剪强度的试验[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 62–64.

Xue Songbai, Hu Yongfang, Yu Shenglin. Study on shear strength of soldered joints of BGA packing devices[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(10): 62–64.

[3] Lau J, Dauksher W. Reliability of an 1657CCGA (Ceramic Column Grid Array) package with Sn3.9Ag0.6Cu lead-free solder paste on PCBs[J]. Journal of Electronic Packaging, 2005, 127: 97–105.

[4] Park S B, Joshi R. Comparison of thermo-mechanical behavior of lead-free copper and tin-lead column grid array packages[J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48: 763–772.

[5] 皋利利, 薛松柏, 张亮, 等. CCGA 元器件焊柱可靠性影响的有限元分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(7): 93–96.

Gao Lili, Xue Songbai, Zhang Liang, et al. Finite element analysis on influencing factors of soldered column reliability in a CCGA device[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(7): 93–96.

[6] 肖正香, 薛松柏, 金春玉, 等. CuCGA 器件焊点热疲劳行为数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(12): 77–81.

Xiao Zhengxiang, Xue Songbai, Jin Chunyu, et al. Numerical simulation on thermal fatigue behavior of CuCGA soldered joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(12): 77–81.

[7] Vikram N, Chen C F, Daniel C P. Failure mechanism of stacked CSP module under board-Level drop impact[C]// Institute for Electrical and Electronic Engineers. Proceeding 59th Electronic Components and Technology Conference. New Orleans, LA: IEEE, 2009: 2039–2045.

[8] Kim J, Jung S. Design of solder joint structure for flip chip package with an optimized shear test method[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(6): 690–696.

作者简介: 赵智力,女,1972 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要从事焊接结构可靠性、微电子封装及可靠性方面的研究。发表论文 20 余篇。Email: 860557798@qq.com

[上接第 46 页]

[8] Knacke O, Kubaschewski O, Heselmann K. Thermochemical Properties of Inorganic Substances, 2nd Edition[M]. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991.

[9] Zhang Guifeng, Su Wei, Zhang Jianxun, et al. Wetting behavior of a novel Al-Si-Ti active brazing filler metal foil on aluminum

matrix composite[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(7): 1982–1994.

作者简介: 王 鹏,男,1988 年出生,硕士研究生。主要从事铝基复合材料连接方面的研究。发表论文 5 篇。Email: wangpeng88626@163.com