

CBGA 焊点机电热可靠性分析

王道畅

中国电子科技集团公司第 38 研究所, 安徽 合肥 230088

摘要: 陶瓷球栅阵列封装 CBGA 是一种高密度、面阵排布的表面贴装封装形式, 具有高互连密度、优异的热性能和电性能。随着电子元器件的封装技术向着轻、薄、小以及系统整合的趋势发展, 封装元器件的互联焊点增多, 而焊点一旦失效, 将直接导致电子元器件的失效。故本文采用 ANSYS 及 HFSS 建立了 CBGA 焊点的热-振-电参数化有限元模型, 研究其结构动力学、热力学和电性能性质, 并进行形态优化设计, 为分析互联焊点对结构可靠性及信号传输性能的影响提供参考。

关键词: CBGA; 机电热可靠性; 形态优化

DOI: 10.63887/fet.2025.1.2.13

引言

如今电子产品的多功能、小型化、低功耗和高可靠性发展趋势给微电子封装技术带来了严峻挑战。电子元器件集成度变高, 导致作为封装元器件关键结构的焊点的密度增大, 直接影响了封装工艺的可靠性。而在众多封装技术中, 陶瓷球栅阵列封装 CBGA 作为一种高密度、面阵排布的表面贴装封装形式, 具有优异的热性能和电性能, 因此近年来被广泛应用于各领域。

由于 CBGA 焊点的可靠性与其结构动力学特性相关, 所以可以通过对焊点结构模型的模态分析、随机振动分析及谐响应分析, 得到由焊点连接的组件整体的结构动力学特性, 以此来预防共振、疲劳以及其他受迫振动对焊点产生有害效果^[1]。本文以 CBGA 焊点为研究对象, 针对 CBGA 焊点的机电热可靠性分析, 建立整体结构-热和单一焊球的电磁有限元模型, 进行结构动力学、热力学以及电性能分析, 给出

CBGA 焊点的振动特性以及焊点对振动的响应情况; 给出温循条件下 CBGA 焊点的可靠性疲劳寿命, 并进行基于可靠性的焊点形态优化; 给出温循条件下基于应力分布的 CBGA 焊点布局设计优化方案。

一、CBGA 焊点机电热分析

(一) CBGA 热-振-电参数化有限元模型

1 建立 CBGA 焊点参数化表征模型

CBGA 封装体结构由基板、上焊盘、焊球、下焊盘、PCB 板组成, 其结构示意图如图 1.1:

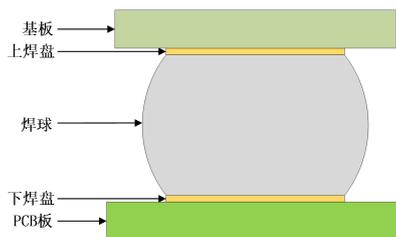


图 1.1 CBGA 结构示意图

为建立 CBGA 结构有效并准确的几何模型, 获取了 CBGA 封装模型材料参数和结构参数如表 1.1。

表 1.1 封装模型材料参数表

部件名称	材质	损耗角正切	介电常数	密度 (Kg/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ / °C)	热导率 (W / K·m)

焊球	Sn ₆₃ Pb ₃₇	0	1	8420	29970	0.35	29	25
基板	聚酰亚胺	0.008	3.5	1280	13000	0.2	7	0.17
PCB 板	FR4	0.02	4.4	1500	17200	0.28	8.8	0.56

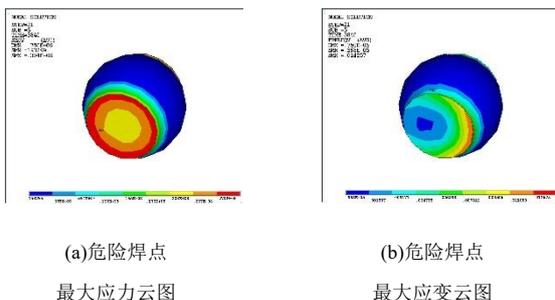
2 建立振动、热分析的 ANSYS 模型

3 建立单焊球电性能分析的 HFSS 模型

建立 HFSS 参数化有限元模型，定义相关辐射边界条件，在焊点上下焊盘处添加波端口激励。

(二) CBGA 焊点的热力学分析

在描述焊点在温度循环载荷下的力学行为时，给结构施加的温度范围为 50℃-150℃、循环周期为 78 分钟（包括 24 分钟的升温、降温和各 15 分钟的高低温保温），并规定零应力应变下的参考温度为 22℃，将每个载荷步分为 10 个载荷子步，以提高迭代精度^[2]。图 1.2 为危险焊点最大应力应变云图：



(a)危险焊点最大应力云图 (b)危险焊点最大应变云图

图 1.2 危险焊点最大应力应变云图

由图 1.2 可知，最大应力分布于 CBGA 焊球封装的角点位置且应力应变向中心呈逐渐减小趋势。由于温度循环载荷以及焊点和 PCB 板的热膨胀系数失配，导致焊点局部区域产生应力集中现象，且通常位于焊点根部，最大应力为 31.533MPa，最大应变为 0.014257。

由于焊点的塑性变形累积和应力松弛作用，应力和应变的最大值并不同时出现，有一定的滞后。随着热循环载荷的周期性加载，应力应变滞后环所围成的面积达到稳定^[3]。滞后环内的面积为每一个周期热循环加载下结构积累的塑性功，随着塑性功不断积累，达到某一临界值后，结构产生裂纹，裂纹扩展直至断裂。CBGA 焊点应力应变滞后环如图 1.3 所示：

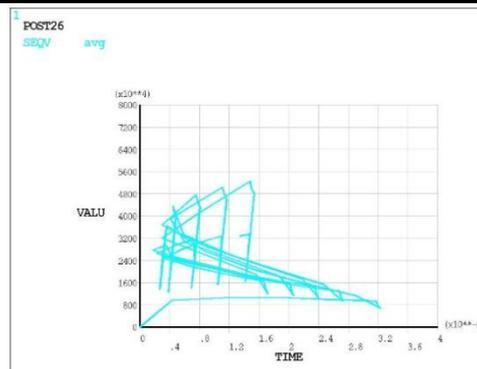


图 1.3 焊点应力应变滞后环曲线图

(三) CBGA 焊点的温循可靠性寿命计算

采用综合考虑焊点的塑性变形和蠕变的基于能量的 Darveaux 模型，如式 (1-1)：

$$\begin{aligned}
 N_0 &= k_1 (\Delta W_{ave})^{k_2} \\
 \frac{da}{dN} &= k_3 (\Delta W_{ave})^{k_4} \\
 N_{TV} &= N_0 + \frac{a}{da/dN} \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

其中 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为裂纹扩展相关参数，分别为 22400、-1.52、 $5.86e10^{-7}$ 和 0.98。在 ANSYS 后处理阶段选取第 21 和第 26 个载荷步，分别选取前者循环起点及后者循环终点的体积平均应变能密度，断裂特征长度为：

$$a = 0.6\text{mm} \div 25.4 = 0.0236\text{in}$$

裂纹扩展直至破坏时的循环数为：

$$\frac{a}{da/dN} = 10212\text{cycle}$$

由公式 (1-6) 可得焊点热疲劳寿命为：

$$\begin{aligned}
 N_f &= N_0 + \frac{a}{da/dN} \\
 &= 2662 + 10212 = 12874\text{cycle}
 \end{aligned}$$

因此，球栅阵列封装结构的热疲劳寿命为 12874 个循环。

二、CBGA 焊点形态优化设计

由于电路板组件中不同材料的热膨胀系数不一致，电路板会在变化的温度场下发生翘曲变形，导致其结构失效^[4]。为提高电路板结

构可靠性, 应尽可能减小焊点最大热应力, 以下基于该目标对焊点结构参数进行优化:

(1) 建立优化数学模型

确定优化变量: 将焊点最大径向直径、焊盘直径、焊点高度设为关键参数进行优化; 确立优化目标: CBGA 焊点最大热应力; 确立约束条件: 3 个优化变量的参数范围。综上建立优化数学模型如下所示:

$$\begin{aligned} \text{Find } R &= [D_{\max}, D, H] \\ \text{Min } f &= \sigma_{\max} \\ \text{S.T } R_{\min} &\leq R \leq R_{\max} \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中, R 表示 CBGA 焊点关键结构参数矩阵, f 表示 CBGA 焊点最大热应力, R_{\min} 为优化变量最小值矩阵, R_{\max} 为优化变量最大值矩阵。

(2) 建立 CBGA 焊点最大热应力快速预测代理模型

针对 CBGA 焊点最大热应力预测, 为获得更精准的神经网络预测模型且减少前期训练样本, 采用 sobol 取样法, 共获得 500 组样本, 为防止神经网络出现过拟合, 将 500 组样本随机排列并取前 450 组作为训练样本, 后 50 组样本不参与训练但作为测试样本验证神经网络预测性能。建立网络时将结构参数作为输入层, 最大热应力结果作为输出层。

(3) 优化结果验证

根据优化结果所得结构参数, 进行热力学分析, 结果对比如表 2.1 所示:

表 2.1 优化结果对比分析表

	结构参数(mm)			最大热应力 (MPa)
	焊点径向最大直径	焊盘直径	焊点高度	
优化前	0.72	0.52	0.52	32.863
优化后	0.7	0.5	0.5822	30.0777

由表 2.1 知, 选取焊点径向最大直径、焊盘直径、焊点高度分别为 0.7mm、0.5mm 及 0.5822mm 时较于初始值, 最大热应力值下降 8.47%, 证明优化算法的有效性^[5]。

三、总结

本文通过对 CBGA 焊点的结构进行讨论, 建立 CBGA 组件参数化有限元模型, 并对模型进行结构动力学、热力学及电性能分析, 以这些性能指标为参数, 建立数学优化模型, 应用粒子群算法对模型进行优化分析, 并通过预测模型及 ANSYS 仿真分析, 对比预测结果, 得出相应结论。

参考文献

- [1] 宜紫薇. 热循环与随机振动加载下电子封装结构的寿命预测[D]. 西安电子科技大学, 2018.
- [2] 吕晓瑞, 林鹏荣, 黄颖卓等. CBGA 器件焊点温度循环失效分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(3): 19-22.
- [3] 杨耀鹏, 张福成, 张书忠. CBGA 焊接过程关键控制点的工艺设计[C]. 天津市电子工业协会 2019 年年会, 天津, 2019.
- [4] Modeling of Combined Temperature Cycling and Vibration Loading on PBGA Solder Joints Using an Incremental Damage Superposition Approach[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2008, 31(3): 463-472.
- [5] 吕晓瑞, 林鹏荣, 黄颖卓, 等. CBGA 器件焊点温度循环失效分析 [J]. 电子工艺技术, 2023, 44(2): 111-115.