

热循环载荷下 POP 堆叠焊点应力分析与优化

高超¹, 黄春跃¹, 梁颖^{2,3}, 刘首甫⁴, 张怀权¹

(1. 桂林电子科技大学, 桂林, 541004; 2. 成都大学, 模式识别与智能信息处理四川省高校重点实验室, 成都, 610106; 3. 成都航空职业技术学院, 成都, 610021; 4. 工业和信息化部电子第五研究所, 广州, 511370)

摘要: 建立叠层封装 (packaging on packaging, POP) 堆叠焊点有限元模型, 基于 ANAND 本构方程, 分析了热循环载荷下焊点应力分布状态及热疲劳寿命; 基于灵敏度法分析了 POP 封装结构参数对焊点热应力的影响显著性; 基于响应面法建立 POP 堆叠焊点热应力与结构参数的回归方程, 并结合粒子群算法对结构参数进行了优化. 结果表明, 焊点与铜焊盘接触处应力最大, 该处会率先产生裂纹, 上层焊点高度和下层焊点高度对 POP 堆叠焊点热应力影响较为显著; 最优结构参数水平组合为上层焊点高度 0.35 mm、下层焊点高度 0.28 mm、中层印刷电路板厚度 0.26 mm, 优化后上、下两层焊点的最大热应力分别下降了 0.816 和 1.271 MPa, 延长了 POP 堆叠焊点热疲劳寿命.

创新点: (1) 基于 ANAND 本构方程, 模拟了 POP 堆叠焊点在热循环载荷下的应力分布.

(2) 基于灵敏度法分析了 POP 封装结构参数对焊点热应力的影响显著性.

(3) 采用响应面-粒子群算法优化 POP 封装结构, 得到最优结构参数组合.

关键词: POP 堆叠焊点; 热应力; 灵敏度分析; 响应面法; 粒子群算法

中图分类号: TG 404

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20220330001

0 序言

便携式移动设备如智能手机、平板电脑及新一代可穿戴设备对集成电路芯片的强劲需求已成为推动半导体集成电路行业持续发展的动力. 为满足便携式移动设备的多功能灵活性、高电性能、小体积、低成本等特殊要求, 叠层封装 (packaging on packaging, POP) 成为针对移动设备的集成电路芯片的优选封装的技术之一^[1]. POP 技术能在同一封装中集成整合逻辑芯片和存储芯片以满足更高密度的封装技术要求, 提高封装效率. 在 POP 中由于焊点与基板及元器件之间存在热膨胀系数失配问题, 使焊点成为 POP 结构中最薄弱的部位, 在服役过程中由于温度变化会造成焊点内应力循环变化. 长期应力循环变化使得焊点产生裂纹, 破坏焊点结构, 最终致使整个 POP 器件失效^[2-3].

因此, 应该重视由 POP 内焊点热应力导致器件失效的问题. 国内外学者针对 POP 焊点在温度载荷下的可靠性已开展了相关的研究, 如王洋^[4]对比分析了不同温度冲击环境下 POP 堆叠焊点热应力的分布情况; 孙磊等人^[5]基于有限元研究了热循环载荷下 POP 焊点的可靠性, 通过田口法分析了封装结构和工艺参数对焊点热应力影响的显著性, 从大到小依次为焊点阵列、焊点高度、芯片厚度和焊点材料. 王红霞等人^[6]分析了穿透模塑通孔结构的 POP 焊点热翘曲变形, 结果表明, 底部填充热膨胀系数匹配的材料将提升堆叠焊点的温度循环可靠性; 刘昭云等人^[7]研究表明热循环载荷下阵列中应力集中的位置多发生在底层的外侧焊球, 承受应力最大点位于对角线处焊球与上下侧材料的连接部位; Shen 等人^[8]研究了回流焊接过程中热翘曲变形对 POP 堆叠焊点焊接可靠性的影响, 结果表明, 使用低温回流工艺制备的焊点在 POP 技术中具有良好的可靠性和耐久性; Sitek 等人^[9]分析了焊接材料、焊接温度曲线和印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 涂层对 POP 堆叠焊点机械强度的影响显著性; 还有学者基于蠕变应变累积寿命预测模型预测了 POP 堆叠焊点在热循环载荷下的疲劳寿

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62164002); 广西自然科学基金资助项目 (2020GXNSFAA159071); 成都大学模式识别与智能信息处理四川省高校重点实验室开放基金资助项目 (MSSB-2022-02); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目 (2023YCXB01, 2022YCX008).

命^[10-11]. 以上研究结果一方面表明了环境温度变化对 POP 堆叠焊点可靠性的影响显著,另一方面也反映出国内外学者针对 POP 堆叠焊点热应力的研究尚有不足,如没有针对性的研究封装结构参数对焊点热应力的影响规律,进而优化封装结构参数以进一步提高堆叠焊点服役可靠性. 以 POP 堆叠焊点为研究对象,基于 ANAND 本构方程对热循环载荷下堆叠焊点的应力进行有限元分析,计算焊点热疲劳寿命,分析上层焊点高度、下层焊点高度、顶层 PCB 厚度和中层 PCB 厚度对焊点热应力的影响规律及显著性. 在此基础上,采用响应面法 (response surface methodology, RSM) 与粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 相结合的优化方法完成结构参数的优化,获得最优结构参数水平组合,降低 POP 堆叠焊点内的最大热应力,延长焊点热疲劳寿命,从而提高 POP 封装元器件在热循环载荷下的服役可靠性. 研究结果对热循环载荷下 POP 堆叠焊点服役可靠性具有一定指导意义和参考价值.

1 堆叠焊点有限元分析

1.1 POP 堆叠焊点三维模型的建立

根据 Amkor 公司生产的 POP 堆叠封装芯片,建立如图 1 所示的 POP 堆叠焊点封装有限元分析模型. 为了便于分析,在一定程度上简化了模型,假定焊点无空穴和气孔等缺陷^[12].

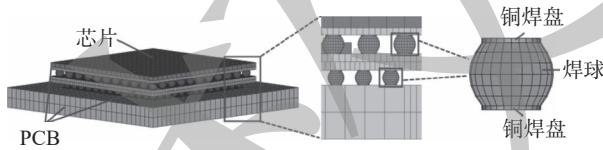


图 1 POP 堆叠焊点三维封装模型

Fig. 1 3-D model for POP stacked solder joints

POP 堆叠焊点三维有限元分析模型由 PCB、POP 焊点、铜焊盘和芯片 4 部分组成,其中共有

3 层 PCB、2 层焊点和 2 层芯片,封装的结构尺寸如表 1 所示. 顶层 PCB 尺寸为 $7.15 \text{ mm} \times 7.15 \text{ mm} \times 0.13 \text{ mm}$, 中层 PCB 尺寸为 $7.15 \text{ mm} \times 7.15 \text{ mm} \times 0.30 \text{ mm}$, 底层 PCB 尺寸为 $10.15 \text{ mm} \times 10.15 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$; 上层铜焊盘尺寸为 $\phi 0.28 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$, 下层铜焊盘尺寸为 $\phi 0.21 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$; 顶层芯片尺寸为 $7.15 \text{ mm} \times 7.15 \text{ mm} \times 0.20 \text{ mm}$, 中层芯片尺寸为 $4.5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm} \times 0.20 \text{ mm}$. 对模型进行有限元网格划分时, POP 堆叠焊点单元类型为 Visco107, 其它结构的单元类型为 Solid45, 采用映射网格划分方式对模型进行网格划分,并对 POP 堆叠焊点、铜焊盘与芯片和 PCB 接触部位进行网格细化,模型网格划分后单元数为 239 176 个,节点数为 315 826 个. 模型中不同结构材料参数如表 2 所示, T 为温度.

表 1 POP 堆叠焊点尺寸

Table 1 POP stacked solder joint dimensions mm					
上层焊点			下层焊点		
高度 h_1	直径 d_1	间距 δ_1	高度 h_2	直径 d_2	间距 δ_2
0.30	0.40	0.65	0.23	0.30	0.50

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$
SAC305	$38.7 - 16.9T$	0.35	1.25
芯片	163	0.28	2.5
PCB板	300	0.20	3.5
铜焊盘	117	0.30	14.3

为了准确模拟 SAC305 钎料在热循环载荷下的应力响应,文中对焊点进行有限元分析时采用了 ANAND 模型来描述钎料的变形行为. ANAND 本构模型能够准确的反应粘塑性材料与温度相关的变形行为, SAC305 钎料 ANAND 模型参数^[13]如表 3 所示.

表 3 SAC305 钎料 ANAND 模型参数

Table 3 SAC305 filler metal ANAND model parameters

初始形变阻抗值 S_0/MPa	应力乘子 ξ	常数 $A/10^4\text{s}^{-1}$	变形阻力饱和值系数 \hat{S}/MPa	激活能常数 $(Q/R)/\text{K}^{-1}$	硬化/软化常数 h_0/MPa	应变率敏感性指数 m		
						饱和值	应力	软硬化
45.9	2	587	58.3	7460	9350	0.0942	1.5	0.015

1.2 热循环载荷下焊点应力分析

对 POP 堆叠焊点三维封装模型施加热循环

载荷时, 选用温度范围为 $-55 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$. 升、降温速率均为 $36 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 高、低温保温时间均为 10 min,

从 125 °C 开始进行温度循环加载, 共 4 个温度循环周期. 在对 POP 堆叠焊点进行有限元分析时, 边界条件为对底层 PCB 的底面施加全约束. 热循环加载曲线如图 2 所示.

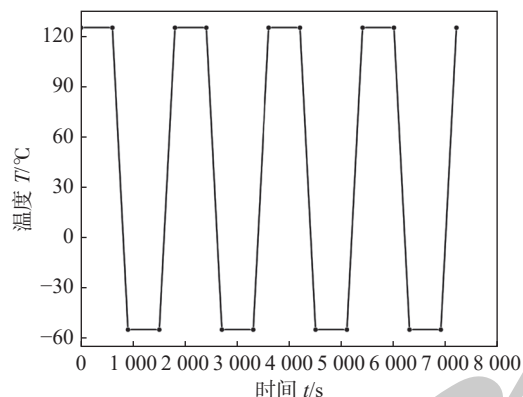


图 2 热循环加载曲线

Fig. 2 Thermal cycle loading curve

POP 堆叠焊点封装中上、下层关键焊点内的范式等效应力随时间变化曲线如图 3 所示. 由图 3 可知, 随时间累积 POP 堆叠焊点内的范式等效应力不断增大. 在低温保温开始时, 焊点内的范式等效应力达到最大; 而在高温保温结束时, 范式等效应力达到最小, 焊点内等效应力随热循环加载曲线做周期变化. 完成 4 个热循环加载后, 选取第 4 个热循环中低温保温开始时间点 (即 6 300 s) 读取 POP 堆叠焊点的范式等效应力.

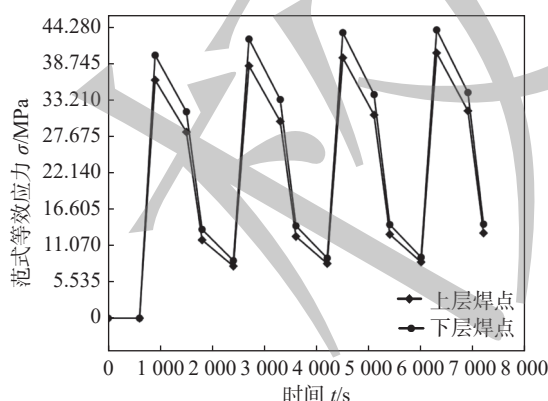


图 3 堆叠焊点等效应力曲线

Fig. 3 Equivalent stress curve of stacked solder joints

模型中上、下层焊点的等效应力分布图如图 4 所示. 由图 4 可见, 热循环载荷下 POP 堆叠焊点热应力在焊点阵列中呈不规则状态分布, 焊点最大热应力从阵列内侧向外侧逐渐增大, 位于阵列边角处焊点的热应力最大. 在 POP 封装中, 下层焊点的热应力要大于上层焊点的热应力, 下层焊点最大热应

力为 43.908 MPa, 上层焊点最大热应力为 40.422 MPa. 单个焊点内部的热应力呈不均匀状态, 但焊点内应力的变化趋势一致, 均是从焊点的中间部位向端面两侧逐渐递增. 最大热应力出现在焊点与 PCB 铜焊盘的连接处, 长期的应力集中会使该处产生裂纹, 导致焊点与铜焊盘剥离, 影响器件服役的可靠性.

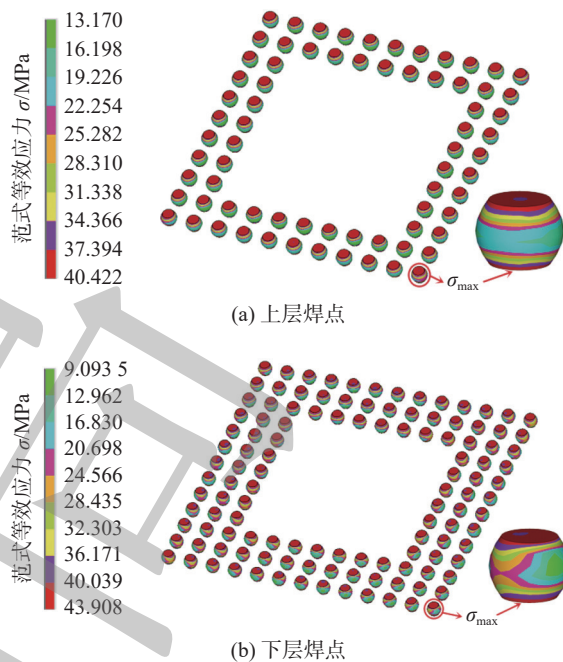


图 4 上层和下层焊点热应力分布

Fig. 4 Thermal stress distribution of upper and lower solder joints. (a) upper solder joints; (b) lower solder joints

1.3 热循环载荷下焊点疲劳寿命预测

基于 ANAND 本构模型和 Darveaux 疲劳模型计算 POP 堆叠焊点的热循环疲劳寿命. Darveaux 疲劳模型通过焊点非弹性变形过程中的应变能密度计算焊点产生初始裂纹及裂纹扩展至整个焊点的热循环次数, 从而预测焊点的疲劳寿命, 判定焊点是否失效. 通过有限元分析可以获得 POP 堆叠焊点的粘塑性应变能密度, 根据 Darveaux 模型寿命预测公式^[14]进行计算.

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta W_i V_i}{\sum_{i=1}^{i=n} V_i} \quad (1)$$

$$N_0 = K_1 \Delta W_{ave}^{K_2} \quad (2)$$

$$\frac{dD}{dN} = K_3 \Delta W_{ave}^{K_4} \quad (3)$$

$$N_f = N_0 + \frac{D}{\frac{dD}{dN}} \quad (4)$$

式中: ΔW_{ave} 为每个热循环过程积累的塑性应变能密度; ΔW_i 为体积 V_i 的第 i 个单元在每个循环中积累的塑性应变能密度; n 为单元总数; N_0 为焊点裂纹萌生时的寿命; dD/dN 为焊点裂纹扩展时的寿命; N_f 为焊点热疲劳寿命; D 为焊点断裂特征长度(即焊盘直径); K_1, K_2, K_3 和 K_4 为焊点裂纹扩展常数。

针对 POP 堆叠焊点封装有限元分析模型, 分别选取模型中上层、下层焊点阵列中边角处热应力最大的焊点, 通过 ANSYS 的后处理器提取每个热循环过程中焊点的 ΔW_{ave} , 如表 4 所示。

表 4 焊点粘塑性应变能密度增量
Table 4 Viscoplastic strain energy density increment of solder joints

焊点位置	应变能密度增量 ΔW_{ave} J/m ³
上层	82 822.671, 83 134.183, 83 208.574
下层	26 745.566, 26 810.497, 26 863.966

从表 4 看出, 每个热循环过程中焊点的粘塑性应变能密度增量相差不大, 并在 3~4 个循环后逐渐趋于稳定, 取第 4 个循环结束后焊点的粘塑性应变能密度增量计算 POP 堆叠焊点的热疲劳寿命。基于式 (1)~式 (4) 求得 POP 封装中上层焊点的热疲劳寿命为 2506 个热循环、下层焊点的热疲劳寿命为 455 个热循环, 上层焊点的热疲劳寿命是下层焊点热疲劳寿命的 5.5 倍。

2 堆叠焊点热应力灵敏度分析

为研究 POP 封装结构参数(上层焊点高度、下层焊点高度、上层 PCB 厚度、中层 PCB 厚度)对 POP 堆叠焊点热应力的影响规律及显著性, 基于 ANSYS 分析软件中的 PDS 模块对 POP 封装模型进行灵敏度分析^[15], 获得各结构参数的散点图及灵敏度图, 从而确定各结构参数对 POP 堆叠焊点热应力的影响规律及显著性。

2.1 上层焊点热应力灵敏度分析结果

以 POP 堆叠焊点封装体结构参数, 上层焊点高度 (SB-H2)、下层焊点高度 (SB-H1)、顶层 PCB 厚度 (PCB-H3)、中层 PCB 厚度 (PCB-H2) 作为输入变量, 以上层焊点最大热应力为输出, 均服从正态分布。

完成 POP 堆叠焊点封装体中上层焊点热应力的灵敏度分析, 图 5 为上层焊点各结构参数散点图。各输入变量的取值范围如表 5 所示。从图 5 可

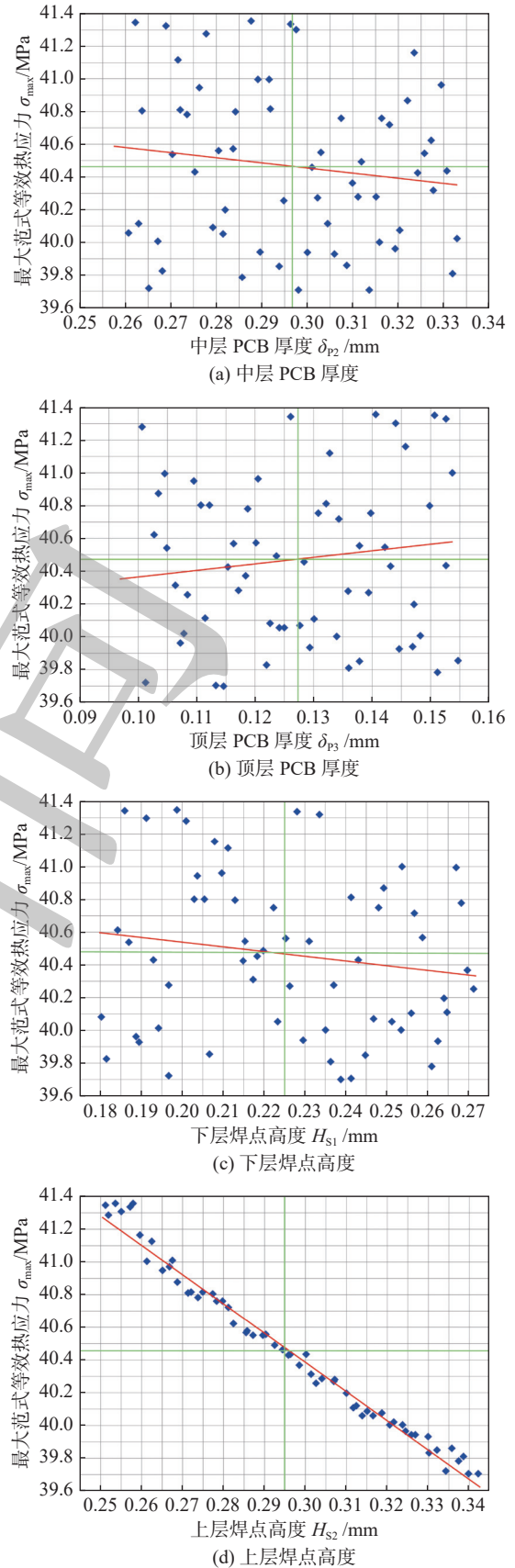


图 5 上层焊点的散点图

Fig. 5 Scatter diagram of upper solder joints. (a) thickness of intermediate PCB; (b) thickness of top PCB; (c) height of lower solder joint; (d) height of upper solder joint

表 5 封装体结构参数取值

Table 5 Value of package structure parameters mm

上层焊点高度 H_{S2}	下层焊点高度 H_{S1}	中层PCB厚度 δ_{p2}	顶层PCB厚度 δ_{p3}
0.25 ~ 0.35	0.18 ~ 0.28	0.26 ~ 0.34	0.10 ~ 0.16

知, 在 POP 堆叠焊点封装体中, 随中层 PCB 厚度、上层焊点高度、下层焊点高度的增大, 上层焊点热应力呈现出减小趋势; 随顶层 PCB 厚度的增大, 上层焊点热应力呈现出增大趋势。

图 6 为上层焊点热应力灵敏度图。从图 6 可知, 置信度为 90% 时, 在 POP 堆叠焊点封装体中上、下层焊点高度及中层 PCB 厚度对上层焊点热应力影响较为显著。因此为有效减小 POP 堆叠焊点封装体中上层焊点热应力, 优先考虑上、下层焊点高度及中层 PCB 厚度的取值, 其次考虑顶层 PCB 板厚度的取值。

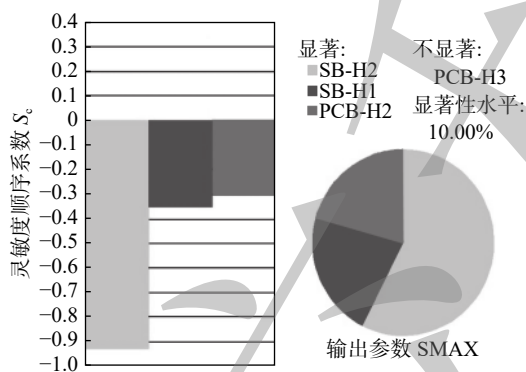


图 6 上层焊点热应力灵敏度图

Fig. 6 Thermal stress sensitivity diagram of upper solder joints

2.2 下层焊点热应力灵敏度分析结果

以 2.1 节所述的 POP 堆叠焊点封装体中 4 个结构参数为输入变量, 完成封装体中下层焊点热应力的灵敏度分析。图 7 为下层焊点各结构参数散点图。从图 7 可知, 在 POP 堆叠焊点封装体中, 随顶层 PCB 厚度、下层焊点高度、中层 PCB 厚度的增大, 下层焊点热应力呈现出减小趋势; 随上层焊点高度的增大, 下层焊点热应力呈现出增大趋势。

图 8 为下层焊点热应力灵敏度图。从图 8 可知, 置信度为 90% 时, 在 POP 堆叠焊点封装体中, 上、下层焊点高度对下层焊点热应力影响较为显著。因此为有效减小 POP 堆叠焊点封装体中下层焊点热应力, 优先考虑上、下层焊点高度的取值, 其次顶层、中层 PCB 厚度的取值。

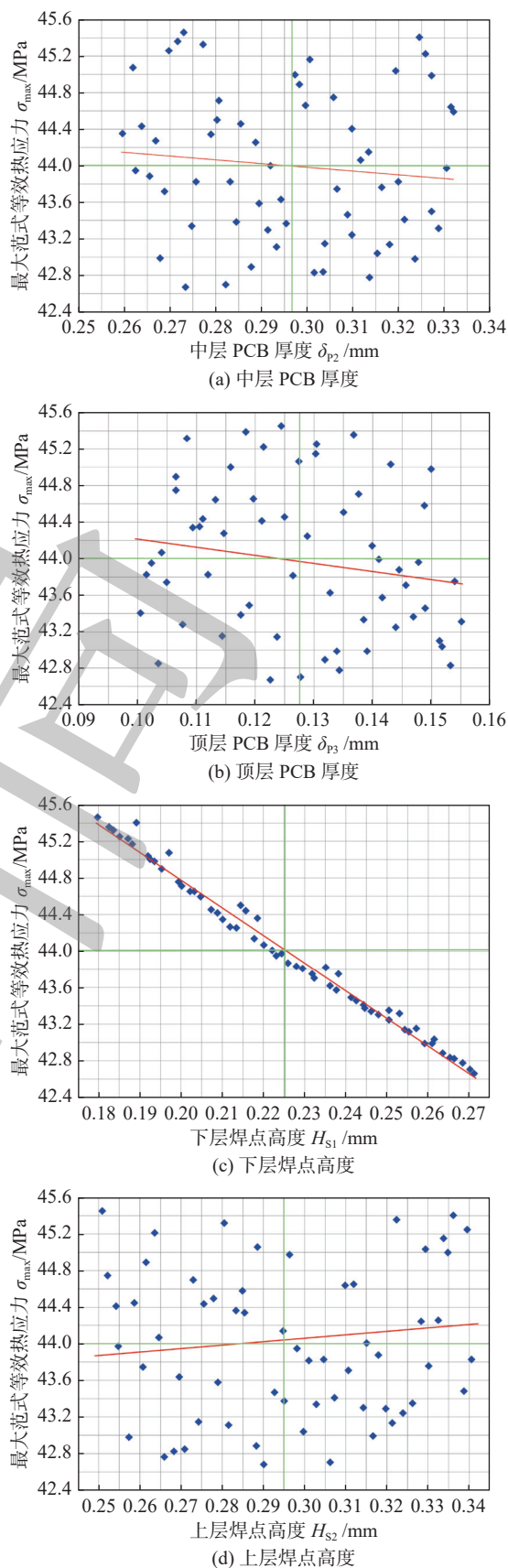


图 7 下层焊点的散点图

Fig. 7 Scatter diagram of lower solder joints. (a) thickness of intermediate PCB; (b) thickness of top PCB; (c) height of lower solder joint; (d) height of upper solder joint

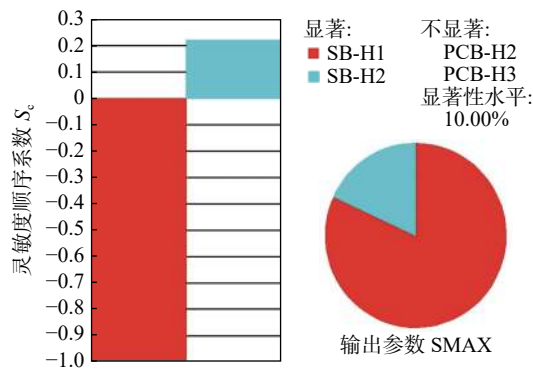


图 8 下层焊点热应力灵敏度图

Fig. 8 Thermal stress sensitivity diagram of lower solder joints

3 堆叠焊点封装体结构参数优化

POP 堆叠焊点封装体结构参数的变化会影响焊点热应力. 为有效降低 POP 堆叠焊点在热循环载荷下的应力以提高元器件在温度冲击环境下的可靠性, 有必要对封装体的结构参数进行优化设计, 从而获得 POP 堆叠焊点热应力最低的封装体结构参数组合. 对此, 利用响应面法与粒子群算法相结合的优化方法, 针对影响 POP 堆叠焊点热应力较为显著的结构参数, 即上层焊点高度、下层焊点高度、中层 PCB 厚度, 以焊点热应力最小为优化目标, 获得最优的封装体结构参数水平组合.

3.1 堆叠焊点仿真试验组合设计

POP 堆叠焊点进行仿真试验设计时, 固定焊点材料为 SAC305, 顶层 PCB 厚度 0.13 mm. 选取上层焊点高度、下层焊点高度、中层 PCB 厚度这 3 个结构参数, 每个参数均取 3 个水平值, 其不同结构参数水平值如表 6 所示.

表 6 因素水平表

Table 6 Factor level table

水平	上层焊点高度 H_{S2} /mm	下层焊点高度 H_{S1} /mm	中层PCB厚度 δ_{p2} /mm
-1	0.25	0.18	0.26
0	0.30	0.23	0.30
1	0.35	0.28	0.34

根据影响因数水平值基于 Box-Behnken 试验设计得到相应的组合, 如表 7 所示. 其中有 12 组数据作为分析因子, 其余 5 组完全相同的组合作为试验误差估计的零点因子, 对这 17 组不同 POP 堆叠焊点封装结构参数水平组合, 分别建立 17 组 POP 封装体模型完成热循环加载分析, 获得封装体中上层焊点和下层焊点的最大热应力值, 如表 7 所示.

3.2 堆叠焊点热应力响应面分析

文中设计影响 POP 堆叠焊点热应力的因素变量为 3 个, 通过分析可知因素变量和目标值之间存

表 7 响应面设计组合与热应力分析结果

Table 7 Response Surface design combination and thermal stress analysis results

试验编号	上层焊点高度 H_{S2} /mm	下层焊点高度 H_{S1} /mm	中层PCB厚度 δ_{p2} /mm	下层焊点应力 y_1 /MPa	上层焊点应力 y_2 /MPa
1	0.25	0.18	0.30	45.726	41.402
2	0.30	0.23	0.30	43.908	40.422
3	0.35	0.18	0.30	45.731	39.720
4	0.35	0.23	0.26	43.876	39.629
5	0.25	0.23	0.26	43.887	41.488
6	0.35	0.28	0.30	42.661	39.681
7	0.30	0.18	0.26	45.453	40.380
8	0.30	0.28	0.26	42.642	40.363
9	0.30	0.23	0.30	43.908	40.422
10	0.30	0.23	0.30	43.908	40.422
11	0.30	0.18	0.34	45.516	40.416
12	0.30	0.28	0.34	42.682	40.451
13	0.30	0.23	0.30	43.908	40.422
14	0.25	0.23	0.34	43.931	41.311
15	0.25	0.28	0.30	42.669	41.356
16	0.35	0.23	0.34	43.923	39.755
17	0.30	0.23	0.30	43.908	40.422

在着非线性的函数关系. 根据表 7 所示的 17 组试验样本数据, 计算模型选用基于泰勒展开式的二阶多项式模型, 即

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5)$$

式中: α_0 为常数项; α_i 为线性项系数; α_{ii} 为二次项系数; α_{ij} 为线性交叉项系数; ε 为随机误差; x 为因素变量; y 为目标值; n 为变量数量.

将表 7 中参数水平组合及分析热应力结果进行响应面分析, 得到 POP 堆叠焊点封装体中下层焊点最大热应力 y_1 、上层焊点最大热应力 y_2 分别与下层焊点高度 x_1 、上层焊点高度 x_2 、中层 PCB 厚度 x_3 的回归分析方程, 即

$$y_1 = 53.676\,79 - 70.290\,5x_1 - 14.238\,5x_2 + 25.014\,37x_3 - 1.3x_1x_2 - 2.875x_1x_3 + 0.375x_2x_3 + 91.55x_1^2 + 23.95x_2^2 - 39.765\,62x_3^2 \quad (6)$$

$$y_2 = 53.425\,16 + 0.018\,5x_1 - 59.773\,5x_2 - 10.098\,13x_3 + 0.7x_1x_2 + 6.5x_1x_3 + 37.875x_2x_3 - 5.1x_1^2 + 52.2x_2^2 - 4.218\,75x_3^2 \quad (7)$$

为了确保计算模型的可靠, 进一步完成了回归方程式 (6) 和式 (7) 方差分析和显著性检验, 有关评价指标如表 8 所示.

根据表 8 中的数据可知 P 值小于 0.000 1, 表明 POP 堆叠焊点封装体中上、下层焊点的计算模型显著. 且两个模型回归方程系数 R^2 分别为 0.999 0 和 0.998 3; 回归方程调整系数 R_a^2 分别为 0.997 8 和 0.996 2; 回归方程预测系数 R_p^2 分别为 0.987 4 和 0.973 6, 进一步表明回归方程式 (6) 和式 (7) 拟合度较高且具有优良的预测性能, 可以高度拟合表 7 中的数据并完成准确预测.

表 8 响应面分析结果
Table 8 Response surface analysis results

焊点	P 值	回归方程系数 R^2	回归方程调整系数 R_a^2	回归方程预测系数 R_p^2
上层	<0.000 1	0.999 0	0.997 8	0.984 7
下层	<0.000 1	0.998 3	0.996 2	0.973 6

3.3 堆叠焊点封装体结构参数优化

文中基于粒子群算法对回归方程式 (6) 和 (7) 进行最优解搜索, 优化 POP 堆叠焊点封装体结构参数, 从而降低 POP 堆叠焊点封装体中上层焊点和下层焊点的热应力, 延长堆叠焊点热疲劳寿命. 根据

表 7 分别对下层焊点高度 x_1 、上层焊点高度 x_2 、中层 PCB 厚度 x_3 设置各自的约束条件, 即 $0.18 \leq x_1 \leq 0.28$, $0.25 \leq x_2 \leq 0.35$, $0.26 \leq x_3 \leq 0.34$. 粒子的数量为 100, 最大迭代次数为 80 次, 学习参数都设置为 1.499 62, 惯性权重为 0.6, 粒子各维最大速度限制为 0.1 倍该维自变量的上限, 各维最小速度限制 -0.1 倍该维自变量的下限^[16], 迭代后目标函数值如图 9 所示.

图 9 为回归方程式 (6) 和式 (7) 基于 PSO 的寻优过程, 上层焊点最优个体应力值为 39.599 6 MPa, 下层焊点最优个体应力值为 42.589 5 MPa. 输出各个参数的最优水平组合为: 上层焊点高度 0.35 mm、下层焊点高度 0.28 mm、中层 PCB 厚度 0.26 mm. POP 堆叠焊点封装体中上层焊点和下层焊点的最优个体应力值与 1.2 节中上、下层焊点最大热应力 40.422 和 43.908 MPa 相比, 分别减小了 0.822 4 和 1.318 5 MPa. 达到了 POP 堆叠焊点封装体结构参数的优化目的.

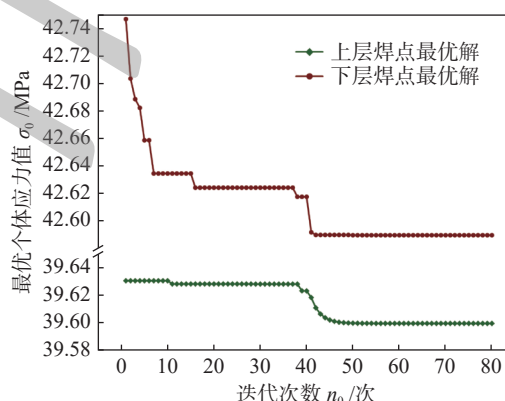


图 9 迭代最优解变化图

Fig. 9 Variation diagram of optimal solution in iterative

3.4 最优结构参数水平组合验证

为了验证最优水平组合的有效性, 在其它参数不变的情况下, 以 POP 堆叠焊点封装体中的上层焊点高度 0.35 mm、下层焊点高度 0.28 mm、中层 PCB 厚度 0.26 mm. 建立仿真分析模型进行热循环加载分析, 所得结果如图 10 所示.

根据图 10 的仿真结果可知, 热循环载荷下 POP 堆叠焊点封装体中上、下层焊点最大应力值分别为 39.606 和 42.637 MPa, 与 1.2 节仿真分析时 POP 堆叠焊点封装体上、下层焊点最大热应力 40.422 和 43.908 MPa 相比, 分别减小了 0.816 和 1.271 MPa. 与响应面-粒子群算法拟合所得最优结

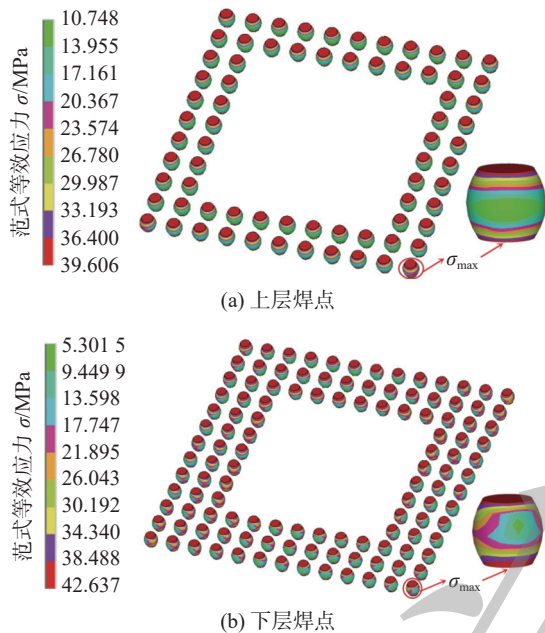


图 10 最优参数组合上层和下层焊点热应力分布

Fig. 10 Thermal stress distribution diagram of upper and lower solder joints with optimal parameter combination. (a) upper solder joints; (b) lower solder joints

果 39.5996 和 42.5895 MPa 相比, 仅分别相差了 0.0064 和 0.0475 MPa. 基于疲劳寿命预测公式求得最优参数水平组合下堆叠焊点封装体中上、下层焊点的热疲劳寿命分别为 3280 和 807 个热循环, 与 1.3 节所示堆叠焊点热疲劳寿命相比, 很大程度上延长了 POP 堆叠焊点的热疲劳寿命. 由此验证了采用响应面法和粒子群算法相结合的优化方法对 POP 堆叠焊点封装体结构参数优化的合理性和正确性.

4 结论

(1) 热循环载荷下 POP 堆叠焊点热应力在焊点阵列中呈不规则状态分布, 焊点热应力由阵列内侧向外侧逐渐增大, 单个焊点热应力最大的位置位于焊点与铜焊盘接触处, 该处会率先产生裂纹, 上层焊点热疲劳寿命是下层焊点热疲劳寿命的 4~5 倍.

(2) POP 堆叠焊点中上层焊点热应力随中层 PCB 厚度、上层焊点高度、下层焊点高度的增大而减小, 随顶层 PCB 厚度增大而增大; 下层焊点热应力随顶层 PCB 厚度、下层焊点高度、中层 PCB 厚度的增大而减小, 随上层焊点高度增大而增大.

(3) 对 POP 堆叠焊点, 上、下层焊点高度及中层 PCB 厚度对上层焊点热应力影响较为显著, 上、下层焊点高度对下层焊点热应力影响较为显著.

(4) POP 堆叠焊点封装体最优结构参数水平组合为: 上层焊点高度 0.35 mm、下层焊点高度 0.28 mm、中层 PCB 厚度 0.26 mm; 该最优参数组合的仿真验证表明, POP 堆叠焊点最大热应力明显下降, 焊点热疲劳寿命显著延长.

参考文献

- [1] 弗林·卡森. 封装体叠层 (PoP) 技术及其应用 [J]. 集成电路应用, 2015(2): 38 - 41.
Flynn Carson. Package-on-Package (PoP) technology and its applications[J]. Application of IC, 2015(2): 38 - 41.
- [2] Honarvar S, Nourani A, Karimi M. Effect of thermal treatment on fracture behavior of solder joints at various strain rates: Comparison of cyclic and constant temperature[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 128(8): 105636.
- [3] 韦何耕, 黄春跃, 梁颖, 等. 热循环加载条件下 PBGA 叠层无铅焊点可靠性分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 91 - 94.
Wei Hegeng, Huang Chunyue, Liang Ying, et al. Reliability analysis of plastic ball grid array double-bump lead-free solder joint under thermal cycle[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 91 - 94.
- [4] 王洋. 不同温度环境下 POP 堆叠封装的可靠性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
Wang Yang. Research on the reliability of package-on-package in different temperature environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [5] 孙磊, 张屹, 陈明和, 等. 3D 封装芯片焊点可靠性有限元分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42(1): 49 - 53.
Sun Lei, Zhang Yi, Chen Minghe, et al. Finite element analysis of solder joint reliability of 3D packaging chip[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(1): 49 - 53.
- [6] 王红霞, 王蓓, 冉红锋, 等. TMV POP 热翘曲变形及可靠性 [J]. 半导体技术, 2018, 43(6): 462 - 467.
Wang Hongxia, Wang Bei, Ran Hongfeng, et al. Warpage behaviors and reliability in TMV POP[J]. Semiconductor Technology, 2018, 43(6): 462 - 467.
- [7] 刘昭云, 杨雪霞. 热循环载荷下 POP 堆叠电子封装的可靠性研究 [J]. 太原科技大学学报, 2018, 39(6): 473 - 478.
Liu Zhaoyun, Yang Xuexia. Research on reliability of POP stacked electronic package under thermal cycling load[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2018, 39(6): 473 - 478.
- [8] Shen Y A, Zhou S, Li J, et al. Sn-3.0Ag-0.5Cu/Sn-58Bi composite solder joint assembled using a low-temperature reflow process for PoP technology[J]. Materials & Design, 2019, 183: 108144.
- [9] Sitek J, Koscielski M, Borecki J, et al. The dependence of reliability and mechanical strength of the solder joints in 3D PoP struc-

- tures from sizes of solder powders applied in soldering materials[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2017, 29(1): 23 – 27.
- [10] Chen L, Lai X, Xiao Y, *et al.* Analysis of POP solder ball thermal cycling fatigue life based on stress strain[C]// 2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. IEEE, Guilin, China, 2012.
- [11] Li D B, Wang J P, Yang B, *et al.* Thermal performance and fatigue life prediction of POP stacked chip assembly under thermal cycling load[J]. Microelectronics International, 2020, 34(7): 165 – 171.
- [12] 田茹玉, 王晨曦, 田艳红, 等. 极限温度下 CBGA 焊点热冲击疲劳寿命预测 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 93 – 97.
- Tian Ruyu, Wang Chenxi, Tian Yanhong, *et al.* Life prediction of CBGA soldered joints under extreme temperature thermal shock[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 93 – 97.
- [13] Zhang L, Han J G, Guo Y H, *et al.* Anand model and FEM analysis of SnAgCuZn lead-free solder joints in wafer level chip scale packaging devices[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 281 – 286.
- [14] Darveaux R. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation and fatigue life prediction[J]. Journal of Electronic Packaging, 2002, 124(3): 147 – 154.
- [15] 赵胜军, 黄春跃, 梁颖, 等. BGA 无铅焊点再流焊后残余应力分析与优化 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 86 – 94.
- Zhao Shengjun, Huang Chunyue, Liang Ying, *et al.* Analysis and optimization of residual stress after reflow soldering of BGA lead free solder joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 86 – 94.
- [16] 关挺, 钟绍华, 周才, 等. 基于响应面和粒子群算法的悬置多目标优化 [J]. 物流技术, 2017(10): 107 – 114.
- Guan Ting, Zhong Shaohua, Zhou Cai, *et al.* Multi-objective optimization of Cab suspension based on response surface and PSO[J]. Logistics Technology, 2017(10): 107 – 114.

第一作者: 高超, 博士研究生; 主要从事微电子封装及组装技术方面的科研工作; Email: gaochao6951@163.com.

通信作者: 黄春跃, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: hcymail@163.com.

(编辑: 张芷晴)

[上接第 66 页]

- [4] Han Yongquan, Han Jiao, Chen Yan, *et al.* Stability of fiber laser-MIG hybrid welding of high strength aluminum alloy[J]. China Welding, 2021, 30(3): 7 – 11.
- [5] Jia C B, Liu X F, Wu C S, *et al.* Stereo analysis on the keyhole and weld pool behaviors in K-PAW with triple CCD cameras[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 754 – 762.
- [6] Jia C B, Liu X F, Zhang G K, *et al.* Penetration/keyhole status prediction and model visualization based on deep learning algorithm in plasma arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(11): 3577 – 3597.
- [7] 张洪涛, 桑健, 王琪晨, 等. TATM700 钢等离子-MIG 复合焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 25 – 30.
- Zhang Hongtao, Sang Jian, Wang Qichen, *et al.* Plasma MIG hybrid welding of TATM700 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 25 – 30.
- [8] Yu J, Zhang H, Yang X, *et al.* Arc characteristics and welding process of magnetic field assisting plasma-GMAW-P[J]. Welding Journal, 2021, 100(1): 1s – 12s.
- [9] Yu J, Wang B, Zhang H, *et al.* Characteristics of magnetic field assisting plasma GMAW-P[J]. Welding Journal, 2020, 99(1): 25s – 38s.
- [10] Wu H, Chang Y, Lu L, *et al.* Review on magnetically controlled arc welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 4263 – 4273.
- [11] 李岩, 王领, 张冀翔, 等. 基于电弧-熔池耦合的小孔型等离子弧焊接简化模型 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 144 – 152.
- Li Yan, Wang Ling, Zhang Jixiang, *et al.* Simplified model of small-pass plasma arc welding based on arc-molten pool coupling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 144 – 152.
- [12] 王林, 武传松, 杨丰兆, 等. 外加磁场对高速 GMAW 电弧和熔池行为的主动调控效应 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 1 – 6.
- Wang Lin, Wu Chuansong, Yang Fengzhao, *et al.* Active regulation effect of applied magnetic field on high speed GMAW arc and molten pool behavior[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 1 – 6.

第一作者: 张鸿昌, 博士研究生, 讲师; 主要研究方向为先进高效复合焊接装备及方法; Email: hongchangzhang123@163.com.

通信作者: 李一楠, 博士, 教授; Email: liyinan2004@163.com.

(编辑: 温宇航)