

# 基于再流焊冷却过程应力分析的 板级组件 BGA 焊点参数优化

唐香琼<sup>1</sup>, 黄春跃<sup>1</sup>, 梁颖<sup>2</sup>, 匡兵<sup>1</sup>, 赵胜军<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西桂林 541004; 2. 成都航空职业技术学院信息工程学院, 四川成都 610021)

**摘要:** 建立了板级组件 BGA (Ball Grid Array) 焊点有限元分析模型, 对 BGA 焊点进行了再流焊冷却过程应力仿真分析, 设计并完成了验证性实验以验证仿真分析方法的有效性, 分析了焊点结构参数和材料变化对焊点再流焊冷却过程应力应变的影响, 采用响应面法建立了焊点应力与结构参数的回归方程, 结合遗传算法对焊点结构参数进行了优化。结果表明: 实验结果证明了仿真分析的有效性; 焊点应力随着焊点高度的增加而增大, 随着焊点直径的增加而减小; 最优焊点结构参数水平组合为: 焊点高度 0.44mm、焊点直径 0.65mm、焊盘直径 0.52mm 和焊点间距 1.10mm; 对该最优焊点仿真验证表明最大应力下降了 0.1101MPa。

**关键词:** 板级组件 BGA 焊点; 再流焊冷却过程; 应力应变; 响应面分析; 遗传算法

**中图分类号:** TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)06-1117-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.06.011

## Parameter Optimization of the Board Level Assembly BGA Solder Joints Based on Stress Analysis of Reflow Cooling Process

TANG Xiang-qiong<sup>1</sup>, HUANG Chun-yue<sup>1</sup>, LIANG Ying<sup>2</sup>, KUANG Bing<sup>1</sup>, ZHAO Sheng-jun<sup>1</sup>

(1. School of Electro-Mechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Chengdu Aeronautic Vocational and Technical College, Chengdu, Sichuan 610021, China)

**Abstract:** A finite element model of board level assembly BGA (Ball Grid Array) solder joint is established, the stress simulation analysis of BGA solder joint in the cooling process of reflow soldering is carried out, the confirmatory experiment is designed and carried out to verify the validity of simulation analysis method, and the influence of solder joint structure parameters and material on the stress and strain of solder joint are analyzed. The regression equations of the stress and structure parameters of the solder joints is established by the response surface method, and solder joint structure parameters are optimized by genetic algorithm. The results show that the experiment results verify the effectiveness of the simulation analysis, the stress of the solder joint increases with the increase of the height of the solder joint, and decreases with the increase of the diameter of the solder joint, and the optimal level combination of solder joint structure parameters is the height of 0.44mm, the diameter of 0.65mm, the pad diameter of 0.52mm and the solder joint pitch of 1.10mm, the simulation results of the optimal level combination of solder joint show that the maximum stress decreases by 0.1101MPa.

**Key words:** board level assembly BGA solder joint; cooling process of reflow; stress and strain; response surface analysis; genetic algorithm

### 1 序言

BGA (Ball Grid Array) 封装器件的焊点在 BGA 封装中起着电气连接、机械支撑及散热等作用, 是封装

结构中最薄弱的环节<sup>[1,2]</sup>。由于 BGA 器件的封装体与印制电路板 (PCB) 的热膨胀系数不匹配, 致使 BGA 器件在再流焊焊接冷却过程所产生的冷却应力基本由 BGA 焊点承担, 与具有引脚的表面贴装器件相比,

收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-08-09; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 军委装备发展部“十三五”装备预研领域基金项目; 广西科技重大专项 (桂科) (No. AA19046004); 四川省科技计划资助项目 (No. 2018JY0292)

其服役可靠性明显降低<sup>[3]</sup>. 针对焊点在再流焊过程中应力变化和再流焊工艺对焊点焊接质量的影响, 国内外学者展开了相关研究. 在国内, 姚焕<sup>[4]</sup>通过优化再流焊曲线提高了焊点的焊接质量从而实现提高板级组件的可靠性; 徐波<sup>[5]</sup>发现在再流焊过程中在焊点凝固前强制制冷能有效提高焊点质量; 魏鹤林<sup>[3]</sup>等人发现 PBGA 焊点在再流焊冷却结晶后等效应力随温度降低而增加且焊点温度降至室温时等效应力为最大之后再逐步降低. 在国外, Ochoa<sup>[6]</sup>等人发现再流焊冷却过程焊点的冷却速率越低, 焊点在低应力或循环应力条件下工作越容易出现缺陷; Chun-Sean<sup>[7]</sup>等人通过优化再流焊峰值温度和冷却速率等工艺参数以实现降低 BGA 焊点在焊接过程的缺陷率; W. H. Zhong<sup>[8]</sup>等人发现 BGA 组件经多次再流焊后, 焊点剪切强度降低从而加快了焊点失效.

以上学者的研究成果表明了良好的再流焊工艺能有效地提高焊点的焊接质量及其服役后的可靠性, 因而对再流焊焊接过程焊点的应力应变开展相关研究有其必要性; 但同时也反映出已有研究工作中尚未考虑焊点结构参数和焊点材料对焊点在再流焊冷却过程应力应变的影响, 并且也尚无以优化方法对板级组件 BGA 焊点结构参数进行优化而实现减小焊点在再流焊冷却过程的应力应变, 进而提升焊点服役可靠性的相关文献报告. 对此, 本文分析了 BGA 焊点结构参数和材料变化对焊点再流焊冷却过程应力应变的影响; 采用响应面法和遗传算法相结合对焊点结构参数进行了优化, 得到了应力最小的焊点最优结构参数水平组合, 实现了减小 BGA 焊点再流焊冷却过程应力应变的目标.

## 2 板级组件 BGA 焊点再流焊冷却过程应力仿真分析

### 2.1 板级组件 BGA 焊点有限元模型

对板级组件 BGA 焊点进行再流焊冷却过程应力应变有限元仿真分析时采用热结构间接耦合方法. 仿真分析所用材料参数如表 1 所示. 为方便问题分析而简化了模型, 即不考虑焊点与 PCB 板之间的铜焊盘并假设焊点无空穴和气孔等缺陷<sup>[9]</sup>, 采用 ANSYS 软件所建立的板级组件 BGA 焊点有限元分析模型如图 1 所示. 模型中包括 4 块 BGA 芯片、BGA 焊点和 PCB 板. BGA 芯片及焊点参数来源于美国 Micron 公司生产的型号为 M29W128GL70ZA6E 的芯片, 其长度、宽度和厚度为 13mm × 11mm × 0.8mm; 模型中 BGA 焊点均为 8 × 8 全阵列, 焊点材料为无铅焊料 SAC305, 焊点的直径、高度、焊盘直径和焊点间距分别为 0.6mm、0.40mm、0.48mm 和 1mm; PCB 板尺寸为 132mm × 77mm × 1mm.

表 1 材料参数

材料	热传导系数 W/(m <sup>2</sup> ·k)	线膨胀系数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	弹性模量 (GPa)	泊松比 μ	密度 Kg/m <sup>3</sup>	比热容 J/(Kg·°C)
SAC305	50	25	38.70 - 0.176T	0.35	8410	192
芯片	84	2.6	130	0.28	2320	750
PCB	0.32	13.62	6.50	0.28	1870	1150

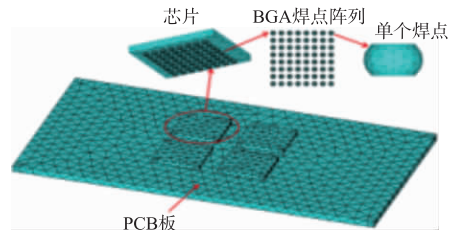


图1 板级组件BGA焊点有限元分析模型

### 2.2 板级组件 BGA 焊点冷却过程应力分析

无铅再流焊再流区的焊接峰值温度在 230°C ~ 240°C 范围内, 板级组件 BGA 焊点经过再流区后即进入冷却区. SAC305 焊点的熔点温度为 217°C, 而其凝固温度与熔点温度相差 29.8°C, 即焊点的凝固温度为 187.2°C, 焊点由凝固温度冷却至室温过程承受结构载荷而产生应力应变<sup>[3]</sup>.

进行再流焊冷却过程热分析时, 对模型的所有外表面施加对流载荷, 焊点初始温度设置为其凝固温度 187.2°C, 将该凝固温度所对应时刻作为仿真分析的初始开始时刻, 且将冷却时长设置为 150s, 冷却 150s 后得到板级组件整体及 BGA 焊点阵列在该时刻上的温度场分布分别如图 2 和图 3 所示.

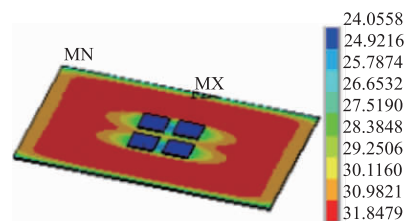


图2 板级组件BGA焊点冷却150s时温度场分布图

由图 2 可见, 板级组件最高温度为 31.8479°C, 最低温度为 24.0558°C, 其温度场分布不均匀, 存在温度梯度; 由图 3 可知, BGA 焊点经过 150s 冷却后其温度已经降至室温, 但仍然存在一定的温差分布. 由于芯片传热能力比 PCB 板强, 焊点的最高温度 (25.1294°C) 出现在焊点与 PCB 板接触区, 而焊点与芯片接触区温度较低 (24.4795°C).

在对模型进行热结构耦合分析时, 将 PCB 底面的四个角点进行全约束, 再将上一步热分析所得的结果作为载荷施加到有限元模型上继续进行热结构分析, 得到板级组件 BGA 焊点阵列从凝固温度开始冷却 150s

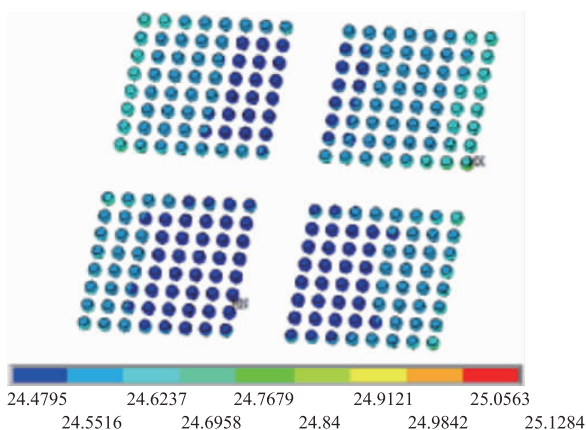


图3 板级组件BGA焊点阵列冷却150s时温度场分布图

后的等效应力分布如图 4 所示. 由图 4 可知,再流焊冷却过程的冷却应力在焊点阵列内分布不均匀,最大应力值为 40.896MPa,焊点的最大应力出现在芯片与焊点的连接处,这是由于芯片、焊点和 PCB 板的组成材料不同,材料之间热膨胀系数不匹配所致,焊点的热膨胀系数最大,芯片热膨胀系数最小,即在再流焊冷却过程中,焊点的收缩程度最大且形变受到芯片与 PCB 板的制约作用,焊点与芯片热膨胀系数相差最大,故焊点的最大应力应变出现在其与芯片的连接处.

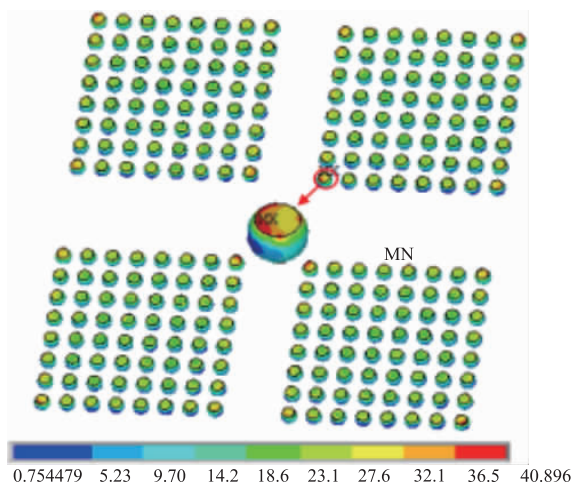


图4 板级组件BGA焊点阵列冷却150s时应力分布图

### 3 板级组件 BGA 焊点再流焊冷却过程应力应变测量实验验证

为验证 BGA 焊点应力应变仿真分析的准确性,本文设计并完成了相应的验证性实验. 对应力应变的测量一般通过采用应变片来完成,由于本文所分析的 BGA 焊点尺寸过小无法直接在其上粘贴应变片,对此本文设计制作了如图 5 所示的模拟板级 BGA 组件的实验样件,样件包括上下两层 PCB 板及放大的 BGA 焊点,通过在放大的 BGA 焊点上实现应变花的粘贴从而

完成对焊点应力应变的测量. 后再建立与实验样件相同的仿真模型进行仿真分析获得仿真应力应变,将实验测量所得应力应变与仿真应力应变进行对比,即可验证仿真方法所得结果是否准确.

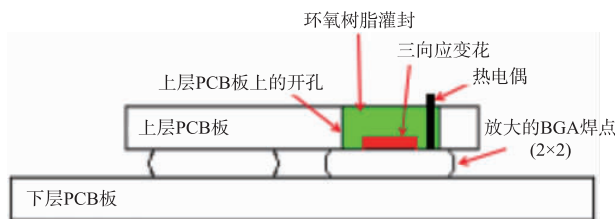


图5 板级BGA组件模拟实验样件结构示意图

图 6 所示即为制作完成的实验样件实物图. 实验样件中放大的 BGA 焊点直径为 16mm、高度为 0.5mm,焊点为 2 × 2 阵列,上层和下层 PCB 板的尺寸分别为 48mm × 48mm × 1mm 和 132mm × 77mm × 1mm. 从图 5 和图 6 可知,在放大的 BGA 焊点上方的 PCB 板上开孔足以放置入应变片花的孔,粘贴好应变花后再使用环氧树脂灌封好开孔(图 6 中所示开孔中尚未灌封环氧树脂). 为了更好的监控焊点在实验过程中温度变化,在焊点顶部设置了热电偶进行温度的测量(见图 5 所示).

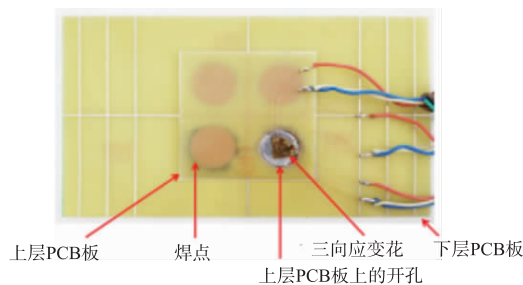


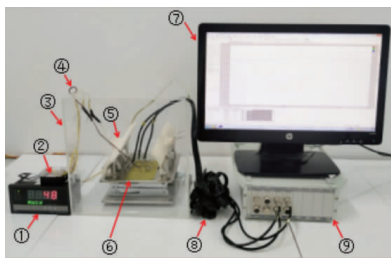
图6 实验样件

为实现模拟再流焊冷却过程以完成冷却过程 BGA 焊点应力应变测量,设计制作了如图 7 所示的 BGA 焊点再流焊冷却过程应力应变测量平台. 该测量平台主要包括:温控仪、固态继电器、J 型热电偶、红外加热板、空气箱(符合 JEDEC JESD 51-2 标准)和动态应变仪等. 该测量平台通过温控仪设置温度曲线,先将实验样件加热到焊点凝固温度,随后通过热电偶测量 BGA 焊点的温度以控制固态继电器接通和断开红外加热板电源,从而实现焊点温度变化与再流焊冷却过程温度变化一致直至室温 25℃,并在此冷却过程中采用动态电阻应变仪记录下焊点冷却过程的应变值.

通过完成上述实验过程后,测得 BGA 焊点冷却至室温 25℃ 时应变数值为:  $\varepsilon_{0^\circ} = 72.37 \times 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_{45^\circ} = -46.58 \times 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_{90^\circ} = -207.85 \times 10^{-6}$ , 通过应变花的应变和应力计算公式可以计算得到相对应的 BGA 焊点

主应力值  $\sigma_1 = 29097.77501\text{Pa}$ ,  $\sigma_3 = -7178273.16\text{Pa}$ .

根据实验样件建立对应的有限元仿真模型如图 8 所示,图 9 所示为仿真分析后冷却至室温时 BGA 焊点的应力云图. 结合实际测量时应变花测量的区域,在仿真模型中选取焊点相同区域的节点,可得到相同区域节点的主应力仿真值分别为  $25074\text{Pa}$ ,  $-8330000\text{Pa}$ . 对比实验结果与仿真结果可知,实验与仿真应力的结果误差分别为  $16.05\%$  和  $13.83\%$ ,仿真结果和实验测量结果吻合度较好,实验测试结果验证了仿真分析结果的准确性,故采用仿真方法对板级组件 BGA 焊点再流焊冷却过程应力应变分析是有效的.



①-温控器 ②-固态继电器 ③-空气箱 ④-J型热电偶  
⑤-红外加热板 ⑥-实验样件 ⑦-测量界面显示  
⑧-信号输入线 ⑨-动态应变仪

图7 应变测量平台

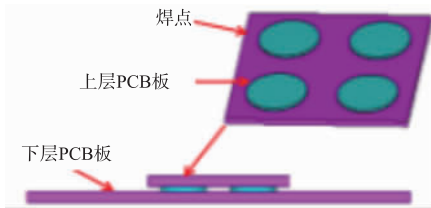


图8 与实验样件相同的仿真分析模型

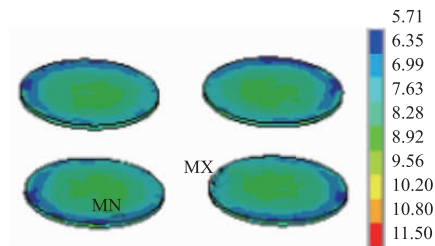


图9 仿真分析焊点应力分布云图

#### 4 焊点结构参数和材料变化对板级组件 BGA 焊点应力应变影响分析

为了分析再流焊冷却过程板级组件 BGA 焊点各个结构参数(焊点高度、焊点直径、焊盘直径和焊点间距)及焊点材料单独变化时对焊点应力应变所产生的影响,仅单独改变所分析的该参数和焊点材料而保持其他参数和焊点材料不变,建立相应的有限元分析模型进行再流焊冷却过程应力应变分析,获取该参数变化

条件下的 BGA 焊点应力应变从而进行对比分析.

在分析板级组件 BGA 焊点高度变化对焊点应力应变影响时,选取的焊点高度分别为  $0.36\text{mm}$ 、 $0.38\text{mm}$ 、 $0.40\text{mm}$ 、 $0.42\text{mm}$  和  $0.44\text{mm}$ ,建立相应的仿真模型进行分析后,所得对应的再流焊冷却过程焊点内应力应变结果如表 2 所示.

表 2 不同焊点高度应力应变值

焊点高度 $H/\text{mm}$	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44
应力/MPa	39.845	40.386	40.896	40.940	41.000
应变 $10^{-3}$	1.1964	1.1976	1.1979	1.1982	1.1985

由表 2 可见,在所分析的 BGA 焊点高度范围内,随着焊点高度的增加焊点内的最大应力均相应增大,最大应力应变从高度  $0.36\text{mm}$  时的  $39.845\text{MPa}$  和  $0.0011964$  增大到高度为  $0.44\text{mm}$  时的  $41.000\text{MPa}$  和  $0.0011985$ . 焊点的剪切刚度随焊点高度增加而减小<sup>[10]</sup>,因此,适当减小焊点高度可以降低焊点再流焊冷却过程的应力应变.

采用同样的分析方法,依次分别选取不同的焊点直径为  $0.55\text{mm}$ 、 $0.60\text{mm}$ 、 $0.65\text{mm}$ 、 $0.70\text{mm}$  和  $0.75\text{mm}$ ,进行仿真分析后所得 5 组焊点应力应变如表 3 所示;依次选取不同的焊盘直径为  $0.44\text{mm}$ 、 $0.46\text{mm}$ 、 $0.48\text{mm}$ 、 $0.50\text{mm}$  和  $0.52\text{mm}$ ,进行仿真分析后所得 5 组焊点应力应变如表 4 所示;依次选择不同的焊点间距为  $0.90\text{mm}$ 、 $1.00\text{mm}$ 、 $1.10\text{mm}$ 、 $1.20\text{mm}$  和  $1.30\text{mm}$ ,进行仿真分析后所得 5 组焊点应力应变如表 5 所示;依次选取不同的焊点材料为  $62\text{Sn}36\text{Pb}2\text{Ag}$ 、 $63\text{Sn}37\text{Pb}$ 、 $\text{SAC}305$ 、 $\text{SAC}387$  和  $\text{Sn}3.5\text{Ag}0.75\text{Cu}$ ,所得 5 组焊点应力应变结果如表 6 所示.

表 3 不同焊点直径应力应变值

焊点直径 $D/\text{mm}$	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
应力/MPa	40.993	40.896	40.680	40.432	39.465
应变 $10^{-3}$	1.1983	1.1979	1.2086	1.1959	1.1616

表 4 不同焊盘直径应力应变值

焊盘直径 $P/\text{mm}$	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52
应力/MPa	41.181	40.963	40.896	40.818	41.078
应变 $10^{-3}$	1.2107	1.1978	1.1979	1.1911	1.2074

表 5 不同焊点间距应力应变值

焊点间距 $d/\text{mm}$	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30
应力/MPa	40.591	40.896	40.912	40.950	41.057
应变 $10^{-3}$	1.1892	1.1979	1.19851	1.2013	1.2028

表 6 不同焊点材料应力应变值

焊点材料	63Sn37Pb	62Sn36 Pb2Ag	SAC305	SAC387	Sn3.5Ag 0.75Cu
应力/MPa	47.812	41.181	40.896	43.000	44.116
应变 $10^{-3}$	1.1108	1.2107	1.1979	0.9966	0.9453

由表 3 可知在所分析的 BGA 焊点直径范围内,最大应力应变从直径 0.55mm 时的 40.993MPa 和 0.0012107 减小到直径为 0.75mm 时的 39.465MPa 和 0.0011616,焊点的剪切刚度随焊点直径增加而增大<sup>[10]</sup>,因此,适当增大焊点直径可以降低焊点再流焊冷却过程的应力应变;由表 4 可知 BGA 焊点焊盘直径变化导致焊点应力值也会相应变化,当焊点焊盘直径为 0.44mm 时,焊点内最大应力最大,且为 41.181MPa,当焊盘直径为 0.50mm 时,焊点内最大应力最小,且为 40.818MPa;由表 5 可知在所分析的 BGA 焊点间距范围内,最大应力应变从间距 0.90mm 时的 40.591MPa 和 0.0011892 增大到间距为 1.30mm 时的 41.057MPa 和 0.0012028;由表 6 可知 BGA 焊点材料改变导致焊点内最大应力值产生相应变化,其中 63Sn37Pb 材料的焊点应力最大,无铅材料 SAC305 材料的焊点应力值最小.由以上分析可知,在再流焊冷却过程中增大焊点直径和减小焊点间距且采用无铅焊料的焊点的应力值较低.

## 5 基于响应面-遗传算法的板级组件 BGA 焊点结构参数优化

为了降低板级组件 BGA 焊点在再流焊冷却过程下的应力应变,有必要对焊点结构参数进行优化分析,以获得优化的焊点结构参数水平组合.故本文利用响应面与遗传算法结合,以焊点应力最小为优化目标,获得焊点结构参数的最优水平组合<sup>[11]</sup>.

### 5.1 基于响应面法的仿真实验设计

根据本文研究对象所涉及的结构参数数量,采用响应面分析的中心复合试验设计方法,可减少试验次数,并且计算简单有便于后期的参数优化设计,故本文采用中心复合试验设计法建立焊点内应力与其结构参数的关系式.

确定焊点材料为 SAC305,选取焊点高度、直径、焊盘直径和焊点间距这四个因素作为研究对象,分别对这四个因素选取 5 个水平值,其因素水平表如表 7 所示.采用响应面分析法的中心复合设计试验设计方案设计出的焊点因素水平组合如表 8 所示,根据表 8 建立出相应的 30 组焊点模型,仿真得到相应的应力值如表 8 最后一列所示.

表 7 因素水平表

因素	水平				
	-1	-0.5	0	0.5	1
焊点高度 $H/mm$	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44
焊点直径 $D/mm$	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
焊盘直径 $P/mm$	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52
焊点间距 $d/mm$	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30

表 8 响应曲面组合与应力分析结果

试验号	$H/mm$	$D/mm$	$P/mm$	$d/mm$	应力/MPa
1	1	-1	1	-1	38.467
2	-1	-1	1	1	40.972
3	1	1	1	1	38.658
4	-1	-1	-1	-1	40.451
5	1	-1	-1	-1	38.586
6	1	1	1	-1	38.486
7	-1	1	1	-1	40.741
8	1	-1	-1	1	38.599
9	0	0	0	0	40.51
10	-1	-1	1	-1	40.584
11	0	0	0	0	40.51
12	-1	1	1	1	40.69
13	1	1	-1	-1	39.871
14	-1	1	-1	-1	40.531
15	-1	-1	-1	1	40.541
16	-1	1	-1	1	40.771
17	1	-1	1	1	38.532
18	0	0	0	0	40.51
19	0	0	0	0	40.51
20	1	1	-1	1	39.582
21	0	-0.5	0	0	40.916
22	0.5	0	0	0	39.698
23	0	0.5	0	0	41.144
24	0	0	0	0.5	41.188
25	0	0	0.50	0	40.671
26	0	0	0	-0.5	40.680
27	0	0	-0.5	0	40.665
28	0	0	0	0	40.51
29	0	0	0	0	40.51
30	-0.5	0	0	0	40.076

### 5.2 拟合分析

对表 8 中试验因子组合及其结果进行二次多元回归拟合,得到应力值 ( $Y$ ) 与焊点高度 ( $X_1$ )、焊点直径 ( $X_2$ )、焊盘直径 ( $X_3$ ) 和焊点间距 ( $X_4$ ) 二次多项式回归方程为:

$$\begin{aligned}
 Y = & 40.57 - 0.89 \times X_1 + 0.16 \times X_2 - 0.11 \times X_3 + 0.053 \times X_4 \\
 & - 3.16 \times X_1^2 + 1.41 \times X_2^2 - 0.035 \times X_3^2 + 1.03 \times X_4^2 \\
 & + 0.14 \times X_1 \times X_2 - 0.20 \times X_1 \times X_3 - 0.044 \times X_1 \times X_4 \\
 & - 0.16 \times X_2 \times X_3 + 0.03 \times X_2 \times X_4 + 0.033 \times X_3 \times X_4
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

为了确保回归方程可信,对上式中数据进行了方差分析和模型的显著性验证,得到回归方程相关评价

指标,结果见表9所示。

表9 响应面分析结果

方差来源	Prob > F	显著性	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared
模型	<0.0001	显著	0.9711	0.9421	0.8113

由表9所示数据可知,响应曲面分析得到的模型“Prob > F”小于0.0001(一般小于0.05即表示该项显著),即响应曲面模型回归效果明显;回归方程系数 R-Squared 为0.9711,表明回归方程拟合度很高;回归方程调整系数 Adj R-Squared 为0.9421,更准确的反映出方程的拟合度很高;回归方程预测系数 Pred R-Squared 为0.8113,表明方程预测准确度良好。以上结果系数都表明式(1)能够高度拟合表8所示的试验结果,故回归方程式(1)准确可信。

### 5.3 基于遗传算法的 BGA 焊点结构参数优化

依据上节响应面分析所得焊点结构参数与应力的二次多项式回归方程式(1),采用遗传算法,以再流焊冷却过程条件下应力最低为目标进行参数优化。

根据表7设置约束条件如下: $0.36 \leq X_1 \leq 0.44$ ,  $0.55 \leq X_2 \leq 0.75$ ,  $0.44 \leq X_3 \leq 0.52$ ,  $0.90 \leq X_4 \leq 1.30$ , ( $X_1$  为焊点高度、 $X_2$  为焊点直径、 $X_3$  为焊盘直径、 $X_4$  为焊点间距),种群个体数为40,最大遗传代数50,目标变量数4,变量二进制为25,代沟0.9,经过50次遗传迭代后种群中个体的目标函数值分布如图10所示,种群均值和最优解变化如图11所示。

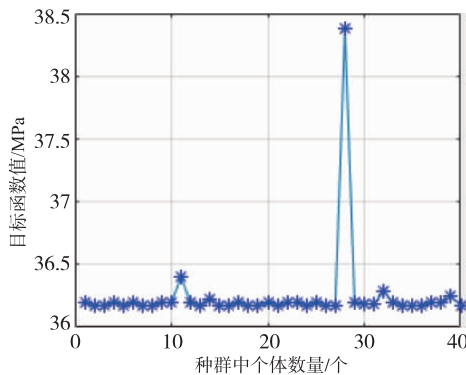


图10 50次迭代后目标函数值

此时输出各个结构参数的最优水平值如下: $X_1 = 0.44\text{mm}$ ,  $X_2 = 0.65\text{mm}$ ,  $X_3 = 0.52\text{mm}$ ,  $X_4 = 1.10\text{mm}$ ,图11所示的最优解为36.1731MPa,与表8所示的最小应力38.467MPa相比减小了2.2954MPa,达到了板级组件BGA焊点结构参数优化的目的。

### 5.4 焊点最优结构参数水平组合验证

经优化后的BGA焊点最优水平组合为焊点高度0.44mm、焊点直径0.65mm、焊点焊盘直径0.52mm和焊点间距1.10mm,为了验证该结构参数水平组合是否

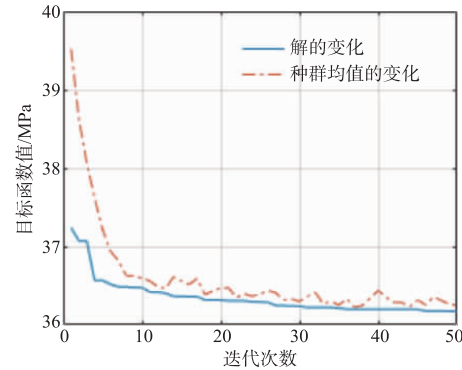


图11 迭代过程中种群目标函数均值变化和最优解变化

达到减小焊点应力的目的,在设定其他条件不变的情况下,根据以上焊点最优结构参数水平组合重新建立有限元模型后进行仿真分析,得到BGA焊点阵列内的应力分布结果如图12所示。

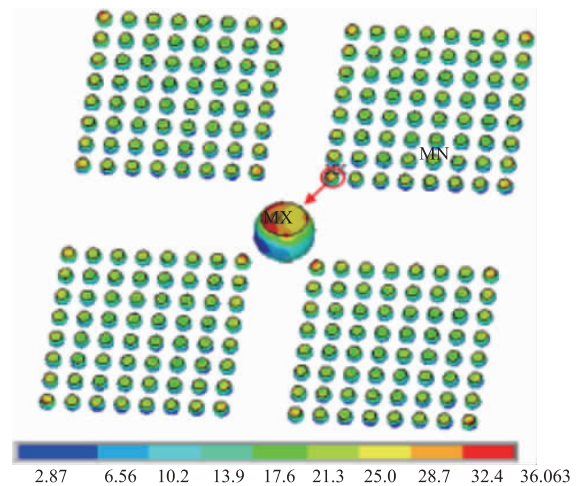


图12 最优水平组合焊点应力图

由图12可知,再流焊冷却过程下焊点最大应力值为36.063MPa,与表8所示的30组焊点中的最小应力38.467MPa相比减小了2.404MPa;与图11所示的由遗传算法求解所得的最优解36.1731MPa相接近且有所减小(减小了0.1101MPa),由此验证了焊点最优结构参数水平组合的有效性。

## 6 结论

通过建立板级组件BGA焊点有限元仿真模型进行再流焊冷却过程应力分析,并结合响应面-遗传算法对焊点结构参数进行优化,得到以下结论:

(1)再流焊冷却过程BGA焊点应力均随着焊点高度的增加而增大,随着焊点直径的增加而减小。

(2)经优化分析得到的板级组件BGA焊点结构参数最优水平组合为:焊点高度0.44mm、焊点直径0.65mm、焊点焊盘直径0.52mm和焊点间距1.10mm,仿真验证

证实了该焊点最优结构参数水平组合在的有效性。

#### 参考文献

- [1] 黄春跃,韩立帅,梁颖,李天明,黄根信. 微尺度 CSP 焊点温振耦合应力应变有限元分析[J]. 振动与冲击,2018,37(15):171-178.  
Huang Chunyue, Han Lishuai, Liang Ying, Li Tianming, Huang Genxin. Finite-element analysis of temperature-vibration coupling stress and strain for microscale CSP solder joint[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 171-178. (in Chinese)
- [2] 汤巍,景博,黄以锋,盛增津,胡家兴. 温度与振动耦合条件下的电路板级焊点失效模式与疲劳寿命分析[J]. 电子学报,2017,45(07):1613-1619.  
Tang Wei, Jing Bo, Huang Yifeng, Sheng Zengjin, Hu Jiaying. Analysis of failure modes and life of solder joints under coupling of vibration and thermal loads[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(07): 1613-1619. (in Chinese)
- [3] 魏鹤琳,王奎升. 回流焊冷却过程中 PBGA 焊点力学行为分析[J]. 焊接学报,2012,33(07):85-88.  
Wei Helin, Wang Kuisheng. Mechanical behavior of PBGA lead-free solder joints under cooling process of reflow soldering[J]. Transactions of the China Welding, 2012, 33(07): 85-88. (in Chinese)
- [4] 姚焕. 基于 Ansys Icepak 的板级回流焊接建模与仿真[D]. 廊坊:北华航天工业学院,2018.  
Yao Huan. Modeling and Simulation of Board Level Reflowbased on Ansys Icepak[D]. Langfang:North China Institute of Aerospace Engineering, 2018. (in Chinese)
- [5] 徐波. 无铅回流焊冷却速率对焊点质量的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.  
Xu Bo, Effect of Cooling Rate on Quality of Solder Joints in Lead-Free Reflow Soldering[D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] Ochoa F, Williams J J, Chawla N. Effects of cooling rate on the microstructure and tensile behavior of a Sn-3.5Ag solder[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(12): 1414-1420.
- [7] Chun-Sean Lau, M Z Abdullah, C Y Khor. Optimization of the reflow soldering process with multiple quality characteristics in ball grid array packaging by using the grey-based Taguchi method[J]. Microelectronics International, 2013, 30(3): 151-168.
- [8] W H Zhong, Y C Chan, M O Alam, B Y Wu, J F Guan. Effect of multiple reflow processes on the reliability of ball grid array (BGA) solder joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 30(3): 151-168.
- [9] 田茹玉,王晨曦,田艳红,赵利有. 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, Zhao Liyou. Life prediction of CBGA soldered joints under extreme temperature thermal shock[J]. Transactions of the China Welding, 2017, 38(10): 93-97. (in Chinese)
- [10] Heinrich S M, Schaefer M, Schroeder S A, et al. Prediction of solder joint geometries in array-type interconnects[J]. Journal of Electronic Packaging, 1996, 118(3): 114.
- [11] 王建培,黄春跃,梁颖,等. 基于回归分析和遗传算法的 BGA 焊点功率载荷热应力分析与优化[J]. 电子学报,2019,47(3):734-740.  
Wang Jianpei, Huang Chunyue, Liang Ying, et al. Stress-strain analysis and optimization of CSP solder joint power load-harmonic response based on response surface analysis and genetic algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(3): 734-740. (in Chinese)

#### 作者简介



唐香琼 女,1994年4月出生于广西桂林. 桂林电子科技大学机电工程学院机械工程硕士. 研究方向为微电子封装与组装可靠性技术.  
E-mail:2804684192@qq.com

黄春跃(通信作者) 男,1971年出生于广西龙州,博士,现为桂林电子科技大学机电工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为微电子封装与组装可靠性技术.  
E-mail:hcy@mail@163.com