

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

王建培¹, 黄春跃¹, 梁 颖², 邵良滨³

(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
电子工程系, 四川成都 610021; 3. 安徽神剑科技股份有限公司, 安徽合肥 230022)

摘 要: 建立了球栅阵列 BGA (Ball Grid Array) 焊点有限元分析模型, 选取焊点高度、焊点最大径向尺寸、上焊盘直径和下焊盘直径作为设计变量, 以焊点应力作为目标值, 采用响应曲面法设计了 29 组不同水平组合的焊点模型并建模进行仿真计算, 建立了焊点应力与结构参数的回归方程, 基于回归方程结合遗传算法对焊点结构参数进行了优化, 获得了焊点应力最小的结构参数最优水平组合. 结果表明: 对于无铅焊料 SAC387, 焊点应力随焊点的高度增加而减小, 随最大径向尺寸的减小而减小; 应力最小的焊点水平组合为: 焊点高度 0.38mm、最大径向尺寸 0.42mm、上焊盘直径 0.34mm 和下焊盘直径 0.35mm; 对最优水平组合仿真验证表明优化后焊点最大应力下降了 4.66MPa, 实现了 BGA 焊点的结构优化.

关键词: BGA 焊点; 热应力; 回归分析; 遗传算法; 功率载荷

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)03-0734-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.031

Thermal Stress Analysis and Optimization of BGA Solder Joint Power Load Based on Regression Analysis and Genetic Algorithm

WANG Jian-pei¹, HUANG Chun-yue¹, LIANG Ying², SHAO Liang-bin³

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

2. Department of Electronic Engineering, Chengdu Aeronautic Vocational and Technical College, Chengdu, Sichuan 610021, China;

3. Anhui Shenji Polytorn Technologies Inc, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: The finite element analysis model of BGA (Ball Grid Array) solder joints is established. The height of solder joints, the maximum radial dimension of solder joints, the diameter of upper and lower solder joints are selected as design variables, and the stress of solder joints is taken as target value. 29 groups of solder joints with different levels are designed and simulated by response surface methodology. The regression equation of solder joint stress and structural parameters is established. The structural parameters of solder joint are optimized based on the regression equation and genetic algorithm, and the optimal level combination of structural parameters with minimum solder joint stress is obtained. The results show that for lead-free solder SAC387, the solder joint stress decreases with the increase of solder joint height, and decreases with the decrease of maximum radial dimension; the combination of solder joint level with minimum stress is: solder joint height 0.38mm, maximum radial dimension 0.42mm, upper pad diameter 0.34mm and lower pad diameter 0.35mm. The results show that the maximum stress of the solder joint decreases by 4.66MPa after optimization, and the structure optimization of BGA solder joint is realized.

Key words: BGA solder joint; thermal stress; regression analysis; genetic algorithm; power load

1 引言

球栅阵列 (Ball Grid Array: BGA) 器件由于其具有引脚数量大、成品率高、电性能优越及散热性好等方面的优势已经广泛应用于各种电子产品当中. BGA 器件在实际使用时,存在着通电(开)、运行工作、待机及断电(关)等等这几个过程的交替循环,这样的循环过程即为典型的功率循环过程.

在功率循环产生温升的条件下, BGA 器件本体与印制电路板 (Printed Circuit Board: PCB) 的热膨胀系数失配会导致处于器件本体和 PCB 之间起着连接作用的 BGA 焊点不可避免的产生热应力,进而导致可靠性问题的产生. 针对功率循环条件下电子元器件及其互连焊点可靠性问题,国内外学者展开了相关研究,在国内,王卫宁^[1]等人对功率循环中表面安装器件 (Surface Mounted Devices: SMD) 热变形的实时全息干涉测量进行了研究,结果表明:在功率循环中, PQFP (Plastic Quad Flat Package: 塑料四边扁平封装) 与 PCB 均发生了离面弯曲变形, PQFP 与 PCB 材料的热膨胀系数不同及 PQFP 内部芯片消耗功率所产生的温度梯度,是导致弯曲变形及变形失配的主要原因;王强^[2]等人对功率循环下 CSP (Chip Scale Package: 芯片级封装) 封装结构焊点的疲劳寿命进行了研究,结果表明: 1/8 模型和 1/8 简化模型的焊点温度分布和等效应力基本一致;在国外, Karppinen^[3]等人研究了在固有频率下,功率载荷对块状焊点可靠性的影响,并且建立了 PCB 的应变幅度与断裂模式的关系,结果表明功率载荷加快了焊点的失效;在一般使用条件下, Engelmaier^[4]等人研究了在一定功率循环下 BGA 焊点发生了失效,并指出功率循环引起焊点的疲劳失效问题不可忽略.

以上学者的研究成果,对功率循环条件下的焊点进行应力应变分析有其必要性;而国内外学者对此已开展的研究中也尚存不足,如没有更进一步分析焊点结构相关参数(焊点直径、焊点高度和焊盘直径等)对功率循环条件下焊点内应力应变的影响规律,更没有在焊点结构参数优化方面展开深入研究,尚无以优化方法对焊点结构参数进行优化而实现减小功率循环条件下焊点内应力应变,进而达到提高焊点可靠性的目的相关文献报道. 对此,本文选取 BGA 焊点的焊点高度、焊点最大径向尺寸、上焊盘直径和下焊盘直径这四个结构参数作为设计变量,基于响应曲面法以四个结构参数进行不同水平组合设计,得到 29 组不同水平组合的焊点,建立相应的 COMSOL 仿真模型进行功率循环加载仿真计算,以应力值作为目标值,将得到的 29 组模型的应力值与四个结构参数间关系进

行拟合,得到表达应力值与四个结构参数之间关系的回归方程,再结合遗传算法对回归方程进行了优化,得到了应力值最小的焊点结构参数水平组合,并对最优结构参数水平组合进行了仿真验证,实现了减小功率循环条件下 BGA 焊点内应力应变的目标,为提高 BGA 焊点功率循环条件下的可靠性提供了一定的理论指导.

2 BGA 焊点三维有限元分析模型

文中分析对象为球栅阵列封装,模型实体来源于 TopLine 公司生产的 8 * 8 全阵列产品,总共 64 个焊球,焊球间距 0.8mm. 为了减小 PCB 边缘对焊点应力应变的影响,取 PCB 尺寸为封装体的 2.5 倍,即 PCB 尺寸为 20mm * 20mm * 1.2mm,焊点最大径向尺寸为 0.46mm,焊点高度 0.34mm,上下焊盘直径均为 0.32mm,芯片尺寸 8mm * 8mm * 0.96mm. 选取焊点材料为无铅焊料 SAC387 (Sn95.5Ag3.8Cu0.7),模型中各部分材料参数见表 1 所示,所建立的相应的功率循环加载有限元分析模型如图 1 所示.

表 1 材料参数

| 材料 | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 μ | 热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ |
|--------|------------|-----------|--|
| 硅芯片 | 26.5 | 0.23 | 6.9 |
| FR4 基板 | 22 | 0.28 | 18 |
| SAC387 | 38 | 0.38 | 20 |

本文采用瑞典 COMSOL 公司的 COMSOL Multiphysics 软件对焊点进行有限元分析. 焊点采用粘塑性 Anand 模型描述其力学行为,其余材料全部假设为线弹性. 在弹塑性力学中, Von Mises (范米塞斯) 准则可以用来对疲劳、破坏等进行评价,其考虑了第一、第二、第三主应力. 有限元软件后处理中的“Von Mises Stress”即为范米塞斯等效应力,本文分析中的应力应变均为范米塞斯等效应力应变. 有限元模型施加的边界条件为 PCB 底面全约束,零应力参考温度 20 $^\circ\text{C}$,选取热功率循环作为加载条件,加载曲线如图 2 所示. 从图 2 可见,启动电源时,功率由 0 上升到 8e6W/m³;在高功率 8e6W/m³ 运行 10 分钟;待机时,功率由 8e6W/m³ 下降到 2e6W/m³;在低功率 2e6W/m³ 运行 10 分钟,此为一个周期,连续循环 4 个周期.

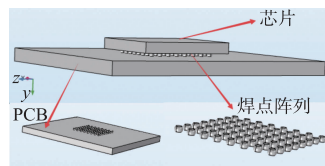


图 1 BGA 焊点功率循环加载应力应变有限元分析模型

经加载图 2 所示的功率循环曲线,对图 1 所示的模型进行有限元应力应变仿真后,所得结果如表 2、图 3、图 4 和图 5 所示.表 2 所示为第三、第四个循环中不同加载时刻上(即图 2 中所示 a、b、c、d、e 和 f 所示时刻,其中 a 所示为第三循环低功率开始时刻)焊点内最大应力应变数值;图 3 所示为功率循环加载条件下各时刻上焊点阵列内的温度云图;图 4 所示为第四周期 8400s 时刻(图 2 中 d 所示时刻)焊点阵列内的应力分布云图,图 5 所示为同一时刻焊点阵列内的应变分布云图.(注:图 3、图 4 和图 5 中右上角所标注出的数值为分别为最高温度、最大应力和最大应变,下同)

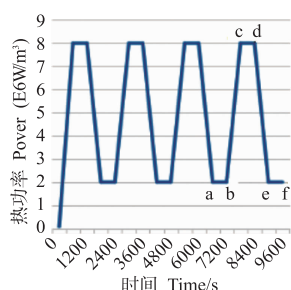


图2 热功率加载曲线图

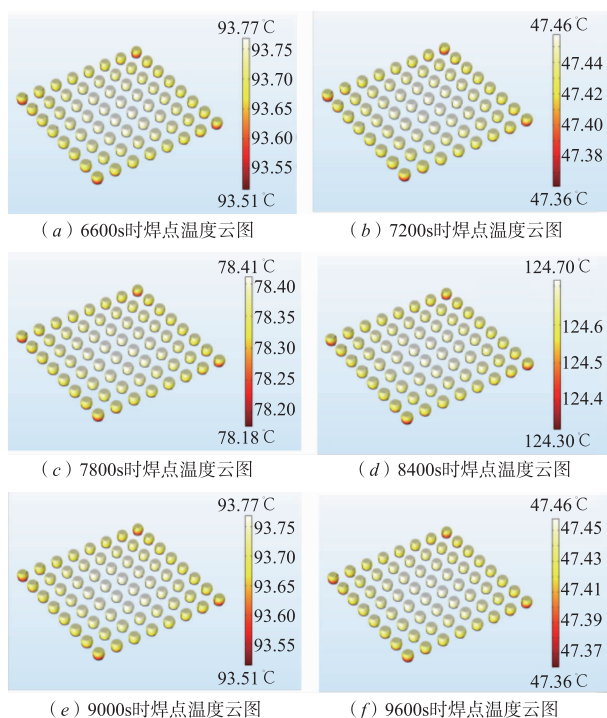


图3 功率循环各时刻焊点阵列温度云图

由表 2 可知,在功率循环的第三、第四个周期中,在功率 $2\text{e}6\text{W}/\text{m}^3$ 时,运行一段时间的过程中(图 2 中 a 到 b 段),焊点内应力由 31.502MPa 下降到 11.816MPa ;当功率由 $2\text{e}6\text{W}/\text{m}^3$ 上升到 $8\text{e}6\text{W}/\text{m}^3$ 的

过程中(b 到 c 段),焊点内应力上升到 27.976MPa ;在功率为 $8\text{e}6\text{W}/\text{m}^3$ 运行一段时间的过程中(c 到 d 段),焊点内应力增加到 47.675MPa ;待机时,当功率由 $8\text{e}6\text{W}/\text{m}^3$ 下降到 $2\text{e}6\text{W}/\text{m}^3$ 的过程中(d 到 e 段),焊点内的应力减小到 31.503MPa ;随后在功率为 $2\text{e}6\text{W}/\text{m}^3$ 的运行过程中(e 到 f 段),焊点内应力减小到 11.819MPa .应变数值随功率变化如同应力变化趋势一样.由此看出焊点阵列最后一个周期各个时刻对应的最高应力应变与所加载的功率循环过程相匹配.

表 2 应力应变随时间变化

| 时间(s) | 应力(MPa) | 应变 |
|-----------|---------|-----------|
| 6600(a 点) | 31.502 | 0.0079412 |
| 7200(b 点) | 11.816 | 0.0029959 |
| 7800(c 点) | 27.976 | 0.0064661 |
| 8400(d 点) | 47.675 | 0.011420 |
| 9000(e 点) | 31.503 | 0.0079411 |
| 9600(f 点) | 11.819 | 0.0029960 |

由图 3 所示的功率循环各时刻焊点阵列温度云图可见,在功率循环的 a 到 b 阶段(见图 2 所示),焊点阵列中最高温度由 93.77°C 下降到 47.46°C ;在 b 到 c 阶段,焊点阵列中最高温度由 47.46°C 上升到 78.41°C ;在功率循环的 c 到 d 阶段,焊点阵列内最高温度由 78.41°C 上升到 124.70°C ;待机时(d 到 e 段),焊点阵列内最高温度由 124.70°C 下降到 93.77°C ;在 e 到 f 段,焊点阵列内最高温度由 93.77°C 下降到 47.46°C .由此看出焊点阵列最后一个周期各个时刻对应的最高温度变化也与所加载的功率循环过程相匹配.

图 4 和图 5 是功率加载到第四循环 8400s 时刻对应的焊点阵列内的应力应变分布云图,选择此时刻进行分析是由于焊点在第四个循环周期循环到 8400s 时,热功率达到最大,此时焊点内应力应变值均最大.由图 4 和图 5 可以看出应力应变在焊点阵列内的分布均是不均匀的,位于四个角落处的焊点应力应变最大.以下图 6 和表 8 中所示应力应变分析结果均来自于焊点阵列中角落处最大应力应变所在焊点.

3 焊点结构参数变化对 BGA 焊点应力的影响

3.1 BGA 焊点高度变化对 BGA 焊点应力的影响

在分析 BGA 焊点高度变化对焊点应力影响时,保持 BGA 焊点其他参数以及仿真求解设置不变,仅改变 BGA 焊点的高度.选取 BGA 焊点高度水平(所谓水平是指所分析的因素所设定的不同量或质的级别)为 0.30mm 、 0.32mm 、 0.34mm 、 0.36mm 和 0.38mm ,分别建立 5 个对应参数水平组合的模型进行仿真分析.所得焊

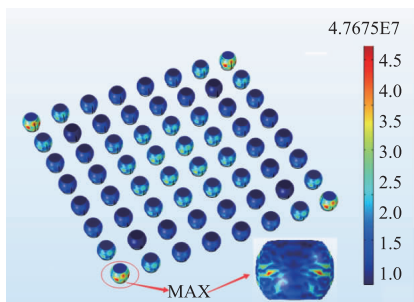


图4 焊点阵列应力分布图

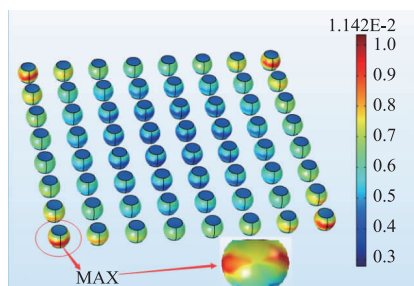


图5 焊点阵列应变分布图

点内应力结果分别如图 6 和表 3 所示。

从图 6 和表 3 可知,焊点高度变化导致焊点内最大应力相应产生变化,在 BGA 焊点其他参数不变的情况下,在所研究的 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减小,最大应力应变从高度 0.30mm 时的 71.785MPa 和 0.012089 减小到高度为 0.38mm 时的 38.375MPa 和 0.0099507。因此,适当增加焊点高度可以降低功率循环下的应力应变。

表 3 不同焊点高度应力应变值

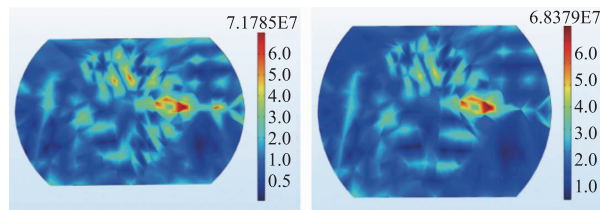
| 焊点高度 H/mm | 0.30 | 0.32 | 0.34 | 0.36 | 0.38 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 应力/MPa | 71.785 | 68.379 | 47.675 | 40.785 | 38.375 |
| 应变 e-3 | 12.089 | 10.363 | 11.420 | 10.507 | 9.9507 |

3.2 焊点最大径向尺寸变化对 BGA 焊点应力的影响

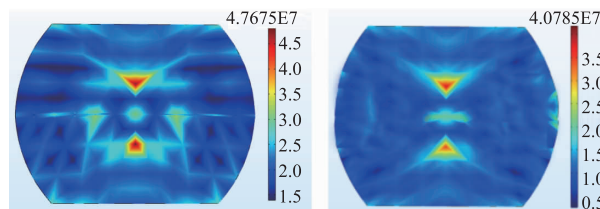
在分析 BGA 焊点最大径向尺寸变化对焊点应力的影响时,在保持其他参数和设置不变的情况下,仅改变 BGA 焊点的最大径向尺寸。选取 BGA 焊点最大径向尺寸水平为 0.42mm、0.44mm、0.46mm、0.48mm 和 0.50mm 分别建立 5 个对应参数水平组合的模型进行仿真分析,所得焊点应力分析结果如表 4 所示。

表 4 不同焊点最大径向尺寸应力应变值

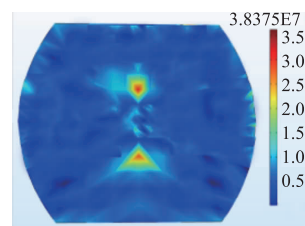
| 最大径向尺寸 D/mm | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.50 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 应力/MPa | 40.172 | 43.364 | 47.675 | 50.938 | 59.057 |
| 应变 e-3 | 11.052 | 11.211 | 11.420 | 11.573 | 12.653 |



(a) 焊点高度为 0.30mm 时应力分布 (b) 焊点高度为 0.32mm 时应力分布



(c) 焊点高度为 0.34mm 时应力分布 (d) 焊点高度为 0.36mm 时应力分布



(e) 焊点高度为 0.38mm 时应力分布

图6 不同焊点高度对应的焊点内应力分布

从表 4 可知,在 BGA 焊点其他参数不变的情况下,随着焊点最大径向尺寸的增加,焊点内的最大应力应变均相应增加,最大应力应变从最大径向尺寸 0.42mm 时的 40.172MPa 和 0.011052 增大到最大径向尺寸为 0.50mm 时的 59.057MPa 和 0.012653。因此,在所研究 BGA 焊点最大径向尺寸范围内,适当减小焊点最大径向尺寸可以降低功率循环下的应力应变。

3.3 焊点上焊盘直径变化对 BGA 焊点应力的影响

在分析 BGA 焊点上焊盘直径变化对焊点应力影响时,保持 BGA 焊点其他参数和设置不变,仅改变 BGA 焊点上焊盘直径。选取 BGA 焊点上焊盘直径水平为 0.28mm、0.30mm、0.32mm、0.34mm、0.36mm,分别建立 5 个对应参数水平组合的模型进行仿真分析。所得焊点应力分析结果如表 5 所示。

表 5 不同的焊点上焊盘直径对应的应力应变值

| 上焊盘直径 $D1/mm$ | 0.28 | 0.30 | 0.32 | 0.34 | 0.36 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 应力/MPa | 50.934 | 47.581 | 47.675 | 47.098 | 62.254 |
| 应变 e-3 | 11.425 | 11.330 | 11.420 | 11.399 | 12.400 |

从表 5 可知,在 BGA 焊点其他参数不变的情况下,增加 BGA 上焊盘直径时,应力值也会相应变化。当焊点上焊盘直径为 0.36mm 时,焊点内最大应力最大,且为 62.254MPa。当上焊盘直径为 0.34mm 时,焊点内最大应力最小,且为 47.098MPa。因此,在固定其他参数不变的

情况下,焊点上焊盘直径为 0.34mm,在功率循环下的焊点的应力值较低。

3.4 焊点下焊盘直径变化对 BGA 焊点应力的影响

在分析 BGA 焊点下焊盘直径变化对焊点可靠性影响时,保持 BGA 焊点其他参数以及仿真求解设置不变,仅改变 BGA 焊点下焊盘直径.选取 BGA 焊点上焊盘直径水平为 0.28mm、0.30mm、0.32mm、0.34mm、0.36mm,分别建立 5 个对应参数水平组合的模型进行仿真分析.所得焊点应力分析结果如表 6 所示

表 6 不同的焊点下焊盘直径对应的应力应变值

| 下焊盘直径 D2/mm | 0.28 | 0.30 | 0.32 | 0.34 | 0.36 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 应力/MPa | 48.445 | 47.661 | 47.675 | 45.867 | 63.431 |
| 应变 e-3 | 10.978 | 11.516 | 11.420 | 11.296 | 12.530 |

从表 6 可知,在 BGA 焊点其他参数不变的情况下,BGA 下焊盘直径的改变也会使得焊点内应力产生相应变化.当焊点下焊盘直径为 0.36mm 时,焊点内最大应力最大,且为 63.431MPa.当下焊盘直径为 0.30mm 时,焊点内最大应力最小,且为 47.661MPa.由此可见,固定其他参数不变的情况下,焊点下焊盘直径为 0.30mm 时,在功率循环下的焊点的应力值较低。

4 基于遗传算法的 BGA 焊点结构参数优化

4.1 基于响应面法的仿真实验设计

4.1.1 响应曲面法

由 BOX 和 Wilson 提出的响应面曲法^[5],其分析的试验设计有以下几种:中心复合设计、Box-Behnken 设计、D-optimal 设计、均匀设计等^[6].根据本文试验所取因素数量,故采用响应面分析的 Box-Behnken 试验设计方法,可减少试验次数。

4.1.2 仿真试验设计

选取焊点最大径向尺寸、焊点高度、上焊盘直径和下焊盘直径为参数,分别对各个因素选取 3 个水平值,其因素水平表如表 7 所示.采用响应面分析的 Box-Behnken 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 29 组模型,得到相应的应力值如表 8 最后一列所示。

表 7 因素水平表

| 因素名称 | 焊点高度 H/mm | 焊点最大径向尺寸 D/mm | 上焊盘直径 D1/mm | 下焊盘直径 D2/mm |
|------|-----------|---------------|-------------|-------------|
| 水平 1 | 0.30 | 0.42 | 0.28 | 0.28 |
| 水平 2 | 0.34 | 0.46 | 0.32 | 0.32 |
| 水平 3 | 0.38 | 0.50 | 0.36 | 0.36 |

表 8 响应曲面组合与应力分析结果

| 试验号 | H/mm | D/mm | D1/mm | D2/mm | VonMises Stress/MPa |
|-----|------|------|-------|-------|---------------------|
| 1 | 0.34 | 0.46 | 0.36 | 0.36 | 60.27 |
| 2 | 0.30 | 0.50 | 0.32 | 0.32 | 56.498 |
| 3 | 0.34 | 0.46 | 0.28 | 0.28 | 83.987 |
| 4 | 0.34 | 0.42 | 0.32 | 0.36 | 49.077 |
| 5 | 0.38 | 0.46 | 0.28 | 0.32 | 74.576 |
| 6 | 0.34 | 0.42 | 0.28 | 0.32 | 55.489 |
| 7 | 0.30 | 0.42 | 0.32 | 0.32 | 84.424 |
| 8 | 0.34 | 0.42 | 0.32 | 0.28 | 52.648 |
| 9 | 0.34 | 0.46 | 0.36 | 0.28 | 51.99 |
| 10 | 0.34 | 0.50 | 0.32 | 0.28 | 49.992 |
| 11 | 0.34 | 0.50 | 0.32 | 0.36 | 52.61 |
| 12 | 0.38 | 0.42 | 0.32 | 0.32 | 34.272 |
| 13 | 0.38 | 0.50 | 0.32 | 0.32 | 42.876 |
| 14 | 0.34 | 0.50 | 0.36 | 0.32 | 53.41 |
| 15 | 0.34 | 0.42 | 0.36 | 0.32 | 50.781 |
| 16 | 0.34 | 0.46 | 0.32 | 0.32 | 47.675 |
| 17 | 0.34 | 0.46 | 0.28 | 0.36 | 53.388 |
| 18 | 0.34 | 0.46 | 0.32 | 0.32 | 47.675 |
| 19 | 0.34 | 0.46 | 0.32 | 0.32 | 47.675 |
| 20 | 0.38 | 0.46 | 0.32 | 0.28 | 77.646 |
| 21 | 0.34 | 0.46 | 0.32 | 0.32 | 47.675 |
| 22 | 0.38 | 0.46 | 0.32 | 0.36 | 38.115 |
| 23 | 0.30 | 0.46 | 0.32 | 0.28 | 71.131 |
| 24 | 0.34 | 0.46 | 0.32 | 0.32 | 47.675 |
| 25 | 0.34 | 0.50 | 0.28 | 0.32 | 47.725 |
| 26 | 0.30 | 0.46 | 0.36 | 0.32 | 86.658 |
| 27 | 0.30 | 0.46 | 0.28 | 0.32 | 72.759 |
| 28 | 0.38 | 0.46 | 0.36 | 0.32 | 38.371 |
| 29 | 0.30 | 0.46 | 0.32 | 0.36 | 52.827 |

4.2 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)、最大径向尺寸(X_2)、上焊盘直径(X_3)、下焊盘直径(X_4)二次多项式回归方程为:

$$\begin{aligned}
 Y = & 2108.69693 - 3322.73646 \times X_1 - 1040.8375 \times X_2 \\
 & - 3869.13021 \times X_3 - 3387.12292 \times X_4 \\
 & + 5907.26562 \times X_1^2 - 1932.65625 \times X_2^2 \\
 & + 5848.75 \times X_3^2 + 3057.89062 \times X_4^2 \\
 & + 5707.8125 \times X_1 \times X_2 - 7828.75 \times X_1 \times X_3 \\
 & - 3316.71875 \times X_1 \times X_4 + 1623.90625 \times X_2 \times X_3 \\
 & + 967.03125 \times X_2 \times X_4 + 6074.84375 \times X_3 \times X_4
 \end{aligned} \quad (1)$$

为了确保拟合所得的回归方程可信,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。

表 9 回归方程分析结果

| Fit Statistics(统计数据) | Value(值) |
|-------------------------|----------------|
| R Value(回归方程相关性系数) | 0.90568 |
| R-Square(回归方程系数) | 0.82025 |
| Adj. R-Square(回归方程调整系数) | 0.6405 |
| Fit Status(拟合情况) | Succeeded(100) |

经过拟合分析得到的模型“回归方程调整系数 R^2 ”大于 0.4 即表示该方程显著;由表 9 中数据可知,Adj R-Squared(即 R^2)为 0.6405,满足方程显著的条件;且回归方程系数 R-Square 为 0.82025,相关系数为 0.90568,表明回归方程拟合度很高.以上结果系数都表明式(1)能够高度拟合表 8 中的试验结果,故回归方程准确可信.

4.3 BGA 焊点结构参数优化

4.3.1 遗传算法(Genetic Algorithm, GA)

遗传算法是一类模拟达尔文的自然选择和自然遗传的生物进化过程的计算模型,由美国密歇根大学的 J. Holland 教授在 1975 年首先提出的,其本质是一种求解问题的高效并行随机化全局搜索方法^[7].遗传算法已经在组合优化、图像处理、系统识别等众多领域得到成功应用^[8].它利用生物进化思想对求解域逐步筛选比较最终搜索得到问题最优解.

4.3.2 BGA 焊点结构参数优化

依据所上节回归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 4 个功率循环周期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: $0.30 \leq X_1 \leq 0.38$, $0.42 \leq X_2 \leq 0.50$, $0.28 \leq X_3 \leq 0.36$, $0.28 \leq X_4 \leq 0.36$, (X_1 为焊点高度、 X_2 为焊点最大径向尺寸、 X_3 为上焊盘直径、 X_4 为下焊盘直径),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 次迭代后目标函数值如图 7 所示,种群均值和最优解变化如图 8 所示.

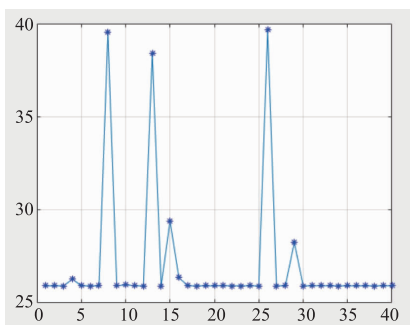


图 7 50次迭代后目标函数值

此时输出各个结构参数的最优水平值如下: $X_1 = 0.38\text{mm}$, $X_2 = 0.42\text{mm}$, $X_3 = 0.34\text{mm}$, $X_4 = 0.35\text{mm}$,图中最优解相比表 8 中应力最小值 34.272MPa 明显减小,

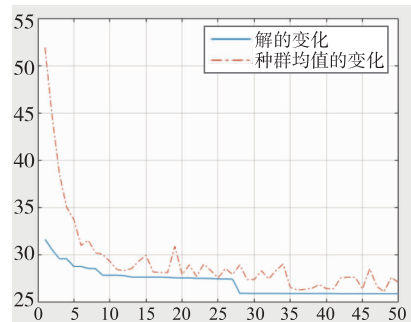


图 8 迭代过程中种群目标函数均值变化和最优解变化

达到了 BGA 焊点结构参数优化的目的.

4.3.3 最优参数水平组合验证

基于回归分析-遗传算法的 BGA 焊点结构参数优化结果在上一节已经给出,即焊点高度 0.38mm、最大径向尺寸 0.42mm、上焊盘直径 0.34mm 和下焊盘直径 0.35mm.为了验证最优参数水平组合是否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 BGA 焊点参数水平组合重新建立 comsol 模型,进行仿真分析,得到功率载荷条件下 BGA 焊点阵列内的应力分布结果如图 9 所示.

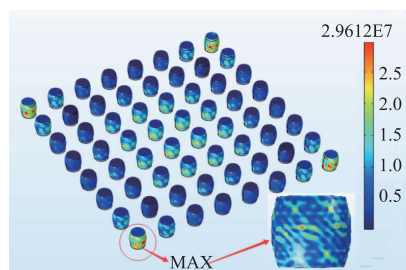


图 9 最优水平组合热应力仿真图

由图 9 所示仿真结果可见,4 个功率循环周期条件下应力值为 29.612MPa,与表 8 中应力最小值 34.272MPa,相比减小了 4.66MPa,由此证明借助回归分析-遗传算法得到的最优水平组合的焊点内应力明显减小.

5 结论

通过建立 BGA 焊点 comsol 仿真模型对 BGA 焊点进行功率循环加载应力应变分析,并结合回归分析-遗传算法优化,对于无铅焊料 SAC387,得到以下结论:

(1) 单因素分析中表明:焊点应力随着焊点的高度增加而减小,随着最大径向尺寸的减小而减小;随着上下焊盘直径的变化也会发生变化.

(2) 经优化分析得到的 BGA 焊点结构参数最优水平组合为:焊点高度为 0.38mm,焊点最大径向尺寸为 0.42mm,上焊盘直径为 0.34mm,下焊盘直径为 0.35mm;并通过仿真验证证实焊点最优水平组合 4 个功率循环加载条件下的应力值减小显著,实现了 BGA

焊点结构参数的优化.

参考文献

- [1] 王卫宁,梁镜明. 功率循环中表面安装器(SMD)热变形的实时全息干涉测量研究[J]. 半导体学报, 1998, 19(8):609-614.
Wang Weining, Liang Jingming. Real-time holographic interferometric measurement of thermal deformation of surface mounted device (SMD) in power cycle[J]. Journal of Semiconductors, 1998, 19(8):609-614. (in Chinese)
- [2] 王强,梁利华. 功率循环下 CSP 封装结构焊点的寿命预测分析[J]. 浙江工业大学学报, 2006, 34(2):157-160.
WANG Qiang, LIANG Li-hua. Life prediction and analysis of solder joints in CSP package under power recycling[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2006, 34(2):157-160. (in Chinese)
- [3] Karppinen J S, Li J, Paulasto-Krockel M. The effects of concurrent power and vibration loads on the reliability of board-level interconnections in power electronic assemblies [J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2013, 13(1):167-176.
- [4] Engelmaier W. Fatigue life of leadless chip carrier solder joints during power cycling [J]. Components Hybrids & Manufacturing Technology IEEE Transactions on, 2003, 6(3):232-237.
- [5] 傅厦龙,胡夏夏. 基于响应面和遗传算法的工艺参数优化[J]. 高分子材料科学与工程学报, 2014, 30(4):123-126.
Fu Xia-long, Hu Xia-xia. Optimization of process parameters based on response surface and genetic algorithm[J]. Journal of Polymer Materials Science and Engineering, 2014, 30(4):123-126. (in Chinese)

- [6] 邵良滨,光互连模块关键位置焊后对准偏移与耦合效率关系研究[D],桂林:桂林电子科技大学, 2016.
Shao Liangbin. Research on the Relationship Between Post Welding Alignment Offset and Coupling Efficiency in Key Position of Optical Interconnect Module[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2016. (in Chinese)
- [7] 张立华,徐文利. 基于遗传算法的点模式匹配方法[J]. 电子学报, 2000, 10(10):36-40.
ZHANG Li-hua, XU Wen-li. Point pattern matching method based on genetic algorithm[J]. Electronic Journal, 2000, 10(10):36-40. (in Chinese)
- [8] 杨帆,张雪霞. 遗传算法在微带线优化中的应用[J]. 电子学报, 2000, 9(9):91-95.
YANG Fan, ZHANG Xuexia. Application of genetic algorithm in microstrip line optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 9(9):91-95. (in Chinese)

作者简介



王建培 女, 1992年7月出生于河北邢台. 桂林电子科技大学机械工程硕士. 研究方向为微电子封装与组装可靠性技术.
E-mail: 1260381899@qq.com

黄春跃(通信作者) 男, 1971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, 主要研究方向微电子封装与组装可靠性技术.
E-mail: hcymail@126.com