

基于扭转载荷的微尺度 CSP 焊点应力应变分析与优化

梁颖¹, 黄春跃², 邹涯梅¹, 高超², 匡兵²

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

摘要: 建立了微尺度芯片尺寸封装焊点有限元分析模型并对其进行扭转应力应变仿真分析与实验验证. 分析了焊点材料、焊点直径、焊盘直径和焊点高度对焊点扭转应力应变的影响; 以焊点材料、焊点直径、焊盘直径和焊点高度为设计变量, 采用响应面法设计了 29 组不同水平组合的焊点模型并获取了相应焊点扭转应力, 建立了焊点扭转应力与焊点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: 焊点材料为 SAC305 时扭转应力应变最大, 焊点最大扭转应力应变随焊点直径和焊盘直径增加而减小、随焊点高度增大而增大; 最优焊点结构参数水平组合为: 焊点材料 SAC305、焊点直径 0.22mm、焊盘直径 0.14mm 和焊点高度 0.14mm; 仿真验证表明最优焊点最大扭转应力下降了 3.7MPa.

关键词: 微尺度焊点; 扭转载荷; 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)10-2033-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.10.022

Stress and Strain Analysis and Optimization of Micro-scale CSP Solder Joints Based on Torsion Load

LIANG Ying¹, HUANG Chun-yue², ZOU Ya-mei¹, GAO Chao², KUANG Bing²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Chengdu Aeronautic Vocational and Technical College, Chengdu, Sichuan 610021, China;

2. School of Electro-Mechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The finite element analysis model of micro-scale chip scale package (CSP) solder joints is set up and stress and strain analysis are performed under torsion load, and the verification experiment is also carried out. The influence of solder joint diameter, solder joint diameter, pad diameter and solder joint height on the torsion stress and strain of micro-scale CSP solder joints are analyzed. The solder joint material, solder joint diameter, pad diameter and solder joint height are selected as design variables; 29 groups of solder joints with different levels are designed and simulated by response surface methodology. The regression equation of solder joint torsion stress and structural parameters is established. The structural parameters of solder joint are optimized based on the regression equation and genetic algorithm. The results show that the maximum torsion stress and strain occurs with the solder joints material of SAC305, the maximum solder joint torsion stress and strain decreases with the increase of solder joint diameter and pad diameter, and increases with the increase of solder joint height; the optimal combination of solder joint level is the solder joint material of SAC305, the solder joint diameter of 0.22mm, the pad diameter of 0.14 mm and the solder joint height of 0.14mm, and simulation verification result shows the maximum stress of the solder joint decreases by 3.7MPa after optimization.

Key words: micro-scale solder joints; torsion load; stress and strain; response surface analysis; genetic algorithm

1 引言

由于消费者对超薄、轻便和大屏幕电子产品的需求的不断提高, 由此一方面使得方形扁平无引脚封装

(Quad Flat No-lead Package, QFN)、球栅阵列封装 (Ball Grid Array, BGA) 和芯片尺寸封装 (Chip Scale Package, CSP) 等各种面阵列型器件广泛应用此类电子产品中, 以提高产品中电路模块组装密度降低产品重量, 但在

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-12-26; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 四川省科技计划 (No. 2018JY0292); 军委装备发展部“十三五”装备预研领域基金; 广西自然科学基金 (No. 2019JJA160101); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划 (No. 2020YCX012)

这类面阵列型器件中起着信号传递和机械支撑重要作用的互连焊点的焊点间距、焊点高度以及焊点直径都非常小(乃至小至微尺度),因此大大降低了其连接刚度;而另一方面,由于电子产品的轻、薄和大屏幕并且经常要承受各种机械载荷,这往往使得产品中的电路板出现反复的挠曲变形(即弯曲扭转),导致出现印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)铜线剥离、元器件和连接焊点开裂等情况,由此抗弯曲和抗扭性能成为此类产品使用性能的重要指标. 而为保证此类产品的抗弯曲和抗扭转性能,则必须确保面阵列型器件焊点具有良好的抗弯扭能力. 对于面阵列型器件焊点扭转条件下的性能问题,国内外学者已开展了相关研究工作,如梁永丰^[1]通过纯扭疲劳试验获得了 Sn3Ag0.5Cu 和 Sn0.7Cu 两种钎料的疲劳特性数据并进行了钎料纯扭疲劳特性对比;李鑫^[2]通过纯扭疲劳试验发现 Sn0.7Cu 的耐扭转疲劳性能优于 63Sn37Pb; Vikram 等人^[3]建立了面阵型器件低银焊点扭转载荷机械疲劳耐久曲线; Métais 等人^[4]采用实验和仿真方法研究了无铅锡基焊料在纯扭转及拉扭复合载荷下的低周疲劳失效; Maia Filho 等人^[5]将扭转实验和有限元分析相结合对 BGA 焊点扭转疲劳寿命进行了预测; John 等人^[6]通过四点扭曲试验研究了 PCB 扭曲变形对 BGA 焊点的影响; Seung 等人^[7]采用周期扭曲试验研究了多种不同的 CSP 焊点在扭曲载荷作用下的失效模式; Quayle Chen 等人^[8,9]采用扭曲方法对柔性印刷电路板和超扭曲向列(Super Twisted Nematic; STN)型液晶显示屏等电子产品的扭曲性能进行了研究,得出了影响其可靠性主要因素. 上述学者的研究工作一方面表明对面阵列型器件焊点开展扭转载荷作用下性能研究有其必要性,另一方面也表明已有研究工作中尚有不足,如未能对面阵列型器件各种焊点结构参数如何影响其扭转应力应变进行分析,也未能对扭转载荷下焊点结构参数进行优化以提高焊点抗扭转性能,致使相关研究成果缺乏. 对此,本文以面阵列型器件中的 CSP 器件微尺度焊点为研究对象,对其进行扭转载荷加载应力应变分析,研究焊点材料、焊点直径、焊盘直径和焊点高度等结构材料参数变化对焊点扭转应力应变的影响,并采用响应面法和遗传算法对焊点结构材料参数进行优化,以降低焊点内最大扭转应力,从而实现 CSP 微尺度焊点抗扭转性能的提高.

2 微尺度 CSP 焊点扭转应力应变有限元分析

2.1 微尺度 CSP 焊点扭转应力应变有限元分析模型

本文采用 ANSYS 软件建立了微尺度 CSP 焊点扭转

应力应变三维有限元分析模型如图 1 所示. 考虑到文中后续需要进行验证性实验,因此图 1 中所示模型中的 PCB 尺寸和芯片数量及芯片布局参考自固态技术协会(JEDEC)所制订的 JESD22B113 标准中的相关规定.

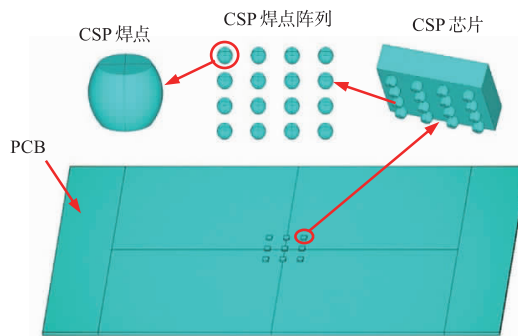


图1 微尺度CSP焊点扭转应力应变有限元分析模型

为方便问题分析,对模型进行一定的简化,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^[10]. 有限元模型由 CSP 芯片、微尺度 CSP 焊点和 PCB 板三部分组成,其中 CSP 芯片共 9 块(3 × 3 布局),9 块芯片下的微尺度 CSP 焊点(以下简称为 CSP 焊点)阵列均为 4 × 4 全阵列焊点, CSP 芯片及其焊点参数来源于美国 Fairchild 公司生产的型号为 FAN48632UC33X 的 CSP 芯片,芯片尺寸均为 1.63mm × 1.63mm × 0.4mm, CSP 焊点直径 0.25mm、焊盘直径 0.20mm、焊点高度 0.20mm, PCB 尺寸 132mm × 77mm × 1mm, CSP 焊点材料为无铅焊料 SAC305,模型中各部分材料参数如表 1 所示. 进行有限元分析时 CSP 焊点单元类型为 Visco107,模型中其余部分单元类型为 Solid45,对模型完成有限元网格划分后共有 184580 个单元.

为对模型施加扭转载荷,通过在 PCB 板的四个脚点上施加大小相等而方向不同的位移载荷,在方向不同位移载荷作用下使 PCB 产生扭转,从而相应的在 CSP 焊点内产生扭转应力应变.

表 1 材料参数

材料	弹性模量(GPa)	泊松比
CSP 焊点(SAC305)	35.18	0.35
芯片	178	0.28
PCB 板	4.2	0.25

2.2 微尺度 CSP 焊点扭转应力应变有限元分析

对模型加载点上施加 1.5mm 位移载荷(使 PCB 产生扭转)进行扭转仿真分析,所得结果分别如图 2 ~ 图 5 所示. 图 2 为施加扭转位移载荷前后模型位移变形对比图,图 3 为扭转位移施加后模型中的位移变形云图,图 4 和图 5 分别为 CSP 焊点内的扭转范米塞斯(Von Mises)等效应力和等效应变(以下简称应力应变)云图.

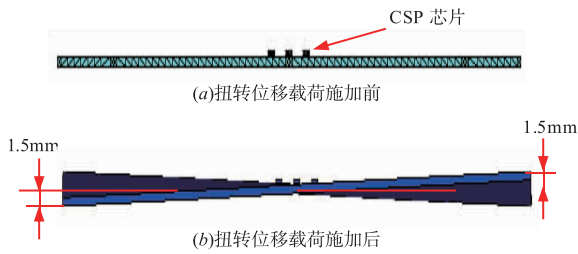


图2 模型扭转前后对比图

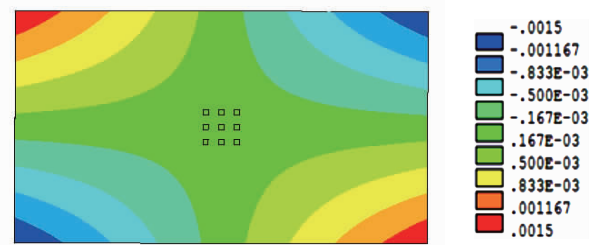


图3 模型扭转变形位移云图

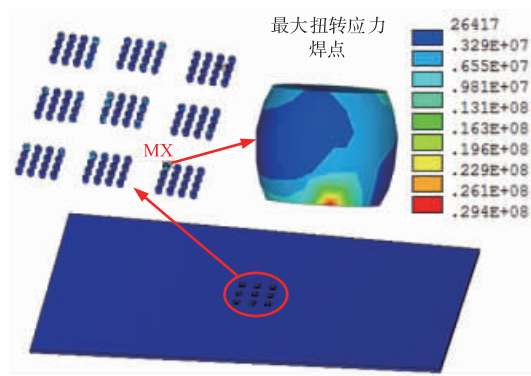


图4 微尺度CSP焊点内扭转应力分布云图

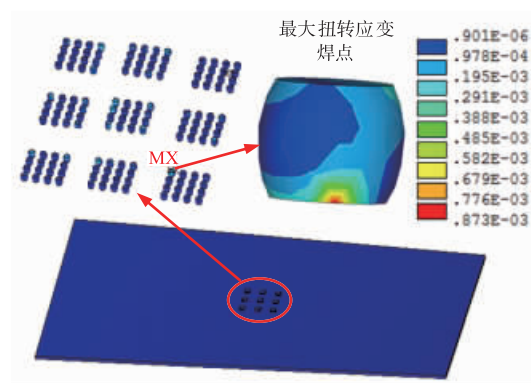


图5 微尺度CSP焊点内扭转应变分布云图

由图2可见模型中PCB基板在位移载荷作用下已产生明显扭转变形;由图3可见模型中产生的最大位移分别位于PCB四个角点上,且位移值为1.5mm,扭转位移由PCB角点向中间部分逐步减小;由图4和图5可见,在PCB基板产生扭转变形后,CSP焊点内相应产生扭转应力应变,并且扭转应力应变呈不均匀分布状态,

最大扭转应力应变出现于距离中心位置芯片最远端对角线上的芯片焊点上,且最大扭转应力应变位于焊点与PCB相接触面上,最大扭转应力和最大应变分别为29.4MPa和0.000873,由此可知,若在反复扭转加载下,CSP焊点与PCB接触面最容易产生由于扭转应力应变所致的微裂纹,在微裂纹扩展到整个接触面后导致互连失效,从而造成互连可靠性问题。

3 微尺度 CSP 焊点模型扭转应力应变测量实验验证

采用仿真分析方法对CSP焊点扭转应力应变进行分析其结果是否准确需要通过实验加以验证,对此本文设计并完成了相应的扭转验证性实验.对应力应变的测量一般是通过采用应变片来完成,本文设计制作了与图1所示仿真模型相同的应力应变测试实验样件,并采用应变片来对实验样件扭转应力应变进行测量。

如文中2.1节所述建立仿真模型时参考了JESD22B113标准中的相关规定,同样制作实验样件时也参考了该标准中对应变片在实验样件上布置的规定,对应变片放置位置进行了规划,应变片放置位置如图6中所示,共放置2片应变片,其中一片位于右下角芯片对角线外侧(测试点1),另外一片放置于该芯片中心点所对应的印制板背面处(测试点2),即在实验样件上设计了测试点1和测试点2,并在这两个测试点上分别放置应变片1和应变片2进行应力应变测量.图7所示为制作好的实验样件,样件包括按 3×3 阵列布局的9块CSP芯片(型号FAN48632UC33X),通过在测试点上粘贴的应变片完成对测试点上扭转应力应变的测量.通过实验测量到实验样件上测试点处的应力应变后,与仿真模型上相同位置点处的仿真分析所得的扭转应力应变进行对比,即可验证仿真结果是否准确。



图6 应变片放置位置示意图

为了实现应力应变测量,设计并搭建了CSP焊点扭转应力应变测量平台如图8所示.该测量平台主要包括:测试样件(含直角应变花)、扭转装置、动态应变仪和计算机等.测量平台通过扭转装置对测试样件施加扭转位移载荷,并通过动态电阻应变仪记录位移扭转加载过程测试样件测试点处的应变值,在获取测试样件测试点处应变值后,通过直角应变花主应变和主应力计算式(1)~(3)即可计算出测试点处的应力值。

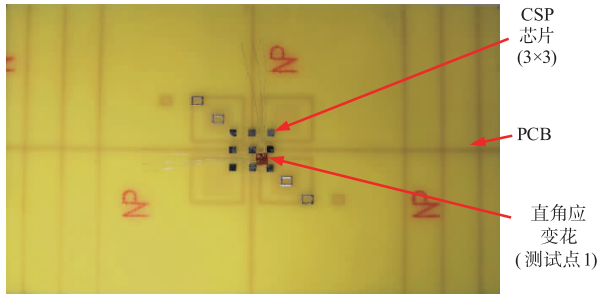
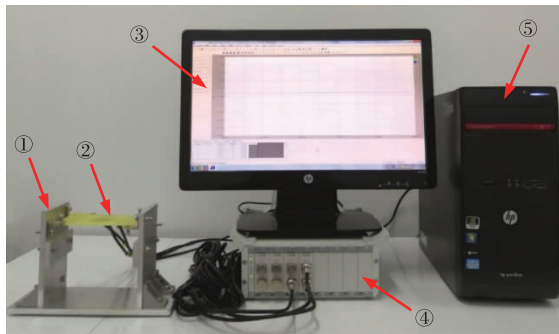


图7 实验样件



①扭转装置 ②实验样件 ③测量界面显示器 ④动态应变仪 ⑤计算机

图8 扭转应变测量系统

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{aligned} \right\} = \frac{\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2} \quad (1)$$

式中 ε_1 和 ε_2 为主应变, ε_{0° 、 ε_{45° 和 ε_{90° 分别为直角应变花 0° 、 45° 和 90° 三个方向上应变片所测量到的应变。

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \quad (3)$$

式中 σ_1 和 σ_2 为主应力, E 和 μ 分别为弹性模量和泊松比。

通过扭转装置,在测试样件上施加 1.5mm 位移载荷并对测试点 1 和测试点 2 处的应变进行测量。通过实验测量到的测试点 1 处三个方向上的应变 ε_{0° 、 ε_{45° 和 ε_{90° 分别为 -1.68×10^{-4} 、 2.88×10^{-4} 和 8.9×10^{-5} , 测试点 2 处三个方向上的应变 ε_{0° 、 ε_{45° 和 ε_{90° 分别为 1.06×10^{-4} 、 2.97×10^{-4} 和 7.0×10^{-6} , 再采用式(1)~(3)计算则可得测试点 1 和测试点 2 处的应力应变数据如表 2 中所示。根据实验测试样件上测试点 1 和测试点 2 应变片测量的区域,在图 1 所示的仿真模型中选取相同区域的节点,可得到相同区域节点的应力应变仿真值也列出在表 2 中。

对比表 2 中所示实验测量结果与仿真结果可知,测试点 1 和测试点 2 的主应力和主应变的仿真值和实验

测量值间的最大误差均小于 16%, 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 CSP 焊点扭转应力应变分析是有效的。仿真值和实验测量值间存在偏差的原因在于: 试验方面的测试样件表面状况、测量仪器调整、扭转装置稳定性等和仿真方面的仿真模型简化、材料参数偏差、有限元模型约束设置和网格划分精度等方面。

表 2 扭转应力应变实验测量数据

		应力 σ_1 (MPa)	应变 ε_1	应力 σ_2 (MPa)	应变 ε_2
测试点 1	实验数据	0.09609	0.00031231	-0.14033	-0.00039131
	仿真数据	0.11327	0.0003598	-0.15142	-0.00042798
	误差率	15.17%	13.20%	7.32%	8.57%
测试点 2	实验数据	0.09024	0.00030158	-0.14568	-0.00040058
	仿真数据	0.10683	0.00033077	-0.13036	-0.00037516
	误差率	15.53%	8.82%	11.75%	6.78%

4 微尺度 CSP 焊点扭转应力应变单因素影响分析

4.1 焊点材料对焊点扭转应力应变影响分析

根据文中第 2.1 节中所建立的 CSP 焊点扭转应力应变有限元分析模型,在只改变焊点材料而其他参数不变的情况下,建立 SAC305、SAC387、63Sn37Pb 和 62Sn36Pb2Ag 这四种不同焊点材料的有限元模型并进行扭转加载应力应变分析,获得不同焊点材料的 CSP 焊点扭转应力应变结果如表 3 所示。

表 3 不同焊点材料的微尺度焊点扭转应力应变

焊点材料	SAC305	SAC387	63Sn37Pb	62Sn36Pb2Ag
最大应力 (MPa)	29.4	19.7	18.6	26.3
最大应变	0.000873	0.000432	0.000613	0.000880

由表 3 可见,焊点材料为 SAC305 的 CSP 焊点内的最大扭转应力最大,为 29.4MPa,焊点材料为 63Sn37Pb 的 CSP 焊点最大扭转应力最小,为 18.6MPa。焊点材料为 62Sn36Pb2Ag 的 CSP 焊点扭转应变最大,为 0.000880,焊点材料为 SAC387 的 CSP 焊点扭转应变最小,为 0.000432。

4.2 焊点直径对焊点扭转应力应变影响分析

在只改变焊点直径而其他参数不变的情况下,建立 0.20mm、0.23mm、0.25mm 和 0.27mm 这四种不同焊点直径的有限元模型进行扭转加载应力应变分析,获得不同焊点直径的 CSP 焊点最大扭转应力应变,结果如表 4 所示。

表 4 不同焊点直径的焊点扭转应力应变

焊点直径(mm)	0.20	0.23	0.25	0.27
最大应力(MPa)	38.6	37.9	29.4	24.5
最大应变	0.001133	0.001112	0.000873	0.000723

由表 4 可知,不同焊点直径的 CSP 焊点在扭转载荷下的最大扭转应力应变各不相同,且随着焊点直径的增大,焊点最大扭转应力应变在逐渐的减小,当焊点直径为 0.20mm 时,焊点的最大扭转应力应变最大,分别为 38.6MPa 和 0.001133,随着焊点直径增加到 0.27mm 时,焊点最大扭转应力应变最小,分别为 24.5MPa 和 0.000723。

4.3 焊盘直径对焊点扭转应力应变影响分析

在只改变焊盘直径而其他参数不变的情况下,建立 0.16mm、0.18mm、0.20mm 和 0.22mm 这四种不同焊盘直径的有限元模型进行扭转加载应力应变分析,获得不同焊盘直径的 CSP 焊点最大扭转应力应变,结果如表 5 所示。

表 5 不同焊盘直径的焊点扭转应力应变

焊盘直径(mm)	0.16	0.18	0.20	0.22
最大应力(MPa)	38.7	35.8	29.4	18.6
最大应变	0.001101	0.001091	0.000873	0.000560

由表 5 可知,不同焊盘直径的 CSP 焊点在扭转载荷下的最大扭转应力应变各不相同,而随着焊盘直径的增大,CSP 焊点内扭转最大应力应变逐渐减小,当焊盘直径为 0.16mm 时,CSP 焊点的最大扭转应力应变最大,分别为 38.7MPa 和 0.001101,随着焊盘直径增加到 0.22mm 时,CSP 焊点的最大扭转应力应变最小,分别为 18.6MPa 和 0.000560。

4.4 焊点高度对焊点扭转应力应变影响分析

在只改变焊点高度而其他参数不变的情况下,建立 0.16mm、0.18mm、0.20mm 和 0.22mm 这四种不同焊点高度的有限元模型进行扭转加载应力应变分析,获得不同焊点高度的 CSP 焊点最大扭转应力应变,结果如表 6 所示。

表 6 不同焊点高度的焊点扭转应力应变

焊点高度(mm)	0.16	0.18	0.20	0.22
最大应力(MPa)	21.6	28.1	29.4	39.6
最大应变	0.000682	0.000871	0.000873	0.001135

由表 6 可知,不同焊点高度的 CSP 焊点在扭转载荷下的最大扭转应力应变各不相同,且随着焊点高度的增大,CSP 焊点最大扭转应力应变逐渐增大,当焊点高度为 0.16mm 时,CSP 焊点的最大扭转应力应变最小,分别为 21.6MPa 和 0.000682,随着焊点高度增加到 0.22mm 时,CSP 焊点的最大扭转应力应变最大,分别为 39.6MPa 和 0.001135。

5 基于响应面-遗传算法的微尺度 CSP 焊点结构参数优化

为了降低 CSP 焊点在扭转加载下的应力应变,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。本文利用响应面法^[11]与遗传算法结合,以焊点扭转应力最小为优化目标,获得微尺度 CSP 焊点的最优参数水平组合。

5.1 基于响应面法的仿真实验设计

本文采用响应面法建立焊点内应力与焊点结构参数的关系式。选取材料属性、焊点直径、焊盘直径和焊点高度为参数,对各个参数均选取 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,共有 29 组不同的结构参数水平组合,以此为基础建立出相应 29 组仿真模型进行分析,得到相应扭转应力值如表 8 最后一列所示。

表 7 因素水平表

因素	水平		
	-1	0	1
材料属性 X_1	SAC305	SAC387	63Sn37Pb
焊点直径 X_2 /mm	0.18	0.20	0.22
焊盘直径 X_3 /mm	0.12	0.13	0.14
焊点高度 X_4 /mm	0.14	0.15	0.16

5.2 响应曲面分析

由于本文设计变量为 4 个且变量与目标之间函数关系为非线性,结合表 8 的试验样本数,选用基于泰勒展开式的二阶多项式模型如式(4)所示:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

式中包括常数项 α_0 、线性项 $\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i$ 、线性交叉项 $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n \alpha_{ij} x_i x_j$ 、二次项 $\sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2$ 。 α_i 为线性项系数; α_{ij} 为线性交叉项系数; α_{ii} 为二次项系数; ε 为随机误差; x 为设计变量; Y 为目标值; n 为变量个数。

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(Y)与材料属性(X_1)、焊点直径(X_2)、焊盘直径(X_3)、焊点高度(X_4)二次多项式回归方程为:

$$Y = 33.2 + 9.56 \times X_1 - 4.56 \times X_2 + 2.66 \times X_3 - 1.04 \times X_4 - 4.76 \times X_1^2 - 2.41 \times X_2^2 - 2.81 \times X_3^2 + 1.07 \times X_4^2 + 1.28 \times X_1 \times X_2 + 2.57 \times X_1 \times X_3 - 2.32 \times X_1 \times X_4 - 1.1 \times X_2 \times X_3 + 1.85 \times X_2 \times X_4 - 4 \times X_3 \times X_4 \quad (5)$$

为了确保回归方程可信,对上式中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8 响应曲面组合与应力分析结果

实验号	材料属性 X_1	焊点直径 X_2/mm	焊盘直径 X_3/mm	焊点高度 X_4/mm	应力 /MPa
1	-1	-1	0	0	28.6
2	0	1	-1	0	21.1
3	1	0	0	1	29.5
4	1	-1	0	0	31.1
5	1	1	0	0	26.5
6	-1	0	0	-1	24.0
7	1	0	-1	0	20.3
8	0	0	0	0	33.2
9	0	-1	-1	0	30.9
10	1	0	1	0	32.4
11	0	0	-1	1	29.4
12	0	1	0	1	25.9
13	0	0	0	0	33.2
14	-1	0	0	1	36.9
15	0	0	-1	-1	28.1
16	-1	1	0	0	18.9
17	0	0	1	1	27.3
18	-1	0	1	0	26.2
19	0	-1	0	1	30.4
20	0	1	0	-1	30.0
21	0	-1	1	0	36.2
22	0	0	0	0	33.2
23	0	0	0	0	33.2
24	-1	0	-1	0	24.4
25	1	0	0	-1	25.9
26	0	-1	0	-1	41.9
27	0	0	0	0	33.2
28	0	0	1	-1	42.0
29	0	1	1	0	22.0

表9 响应面分析结果

方差来源	Prob > F	显著性	R-Squared (回归方程系数)	Adj R-Squared (回归方程调整系数)	Pred R-Squared (回归方程预测系数)
模型	<0.0001	显著	0.7684	0.5367	0.8342

由表9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特别明显;回归方程系数 R-Squared 为0.7684,表明回归方程拟合度很高;回归方程调整系数 Adj R-Squared 为0.5367,反映出方程的拟合度较好;回归方程预测系数 Pred R-Squared 为0.8342,表明方程预测准确度良好.以上结果系数都表明式(5)能够高度拟合表9中的试验结果,故回归方程准确可信.

5.3 微尺度 CSP 焊点结构参数优化与验证

依据所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(5),采用遗传算法^[11]以扭转加载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: X_1 为SAC305、SAC387和Sn63Pb37, $0.18 \leq X_2 \leq 0.22$, $0.12 \leq X_3 \leq 0.14$, $0.14 \leq X_4 \leq 0.16$,(X_1 为材料属性、 X_2 为焊点直径、 X_3 为焊盘直径、 X_4 为焊点高度),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9所示,种群均值和最优解变化如图10所示.此时输出各个结构参数的最优水平值如下: X_1 为SAC305, $X_2 = 0.22\text{mm}$, $X_3 = 0.14\text{mm}$, $X_4 = 0.14\text{mm}$,而图10中所示的最优解为17.58MPa,相比表8中应力最小值18.9MPa减小了1.32MPa,达到了焊点结构参数优化的目的.

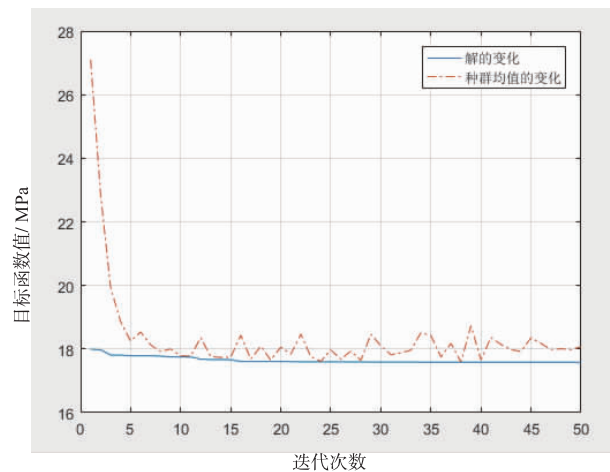


图9 迭代过程种群目标函数均值变化和最优解变化

基于响应面-遗传算法的CSP焊点结构参数优化结果计算出之后,为了验证该最优参数水平组合是否达到减小焊点扭转应力的目的,在设定其他条件不变的情况下,根据最优焊点参数水平组合重新建立有限元模型进行扭转加载仿真分析,得到CSP焊点内应力分布结果如图11所示.由图11所示仿真结果可见,经过优化后扭转载荷下CSP焊点内最大应力为15.2MPa,与表8中所示的所有组合焊点中最大应力中最小的18.9MPa相比减小了3.7MPa,最大扭转应力下降了19.6%,由此验证了借助响应面-遗传算法所得到的最优结构参数水平组合CSP

焊点内最大扭转应力有效减小。

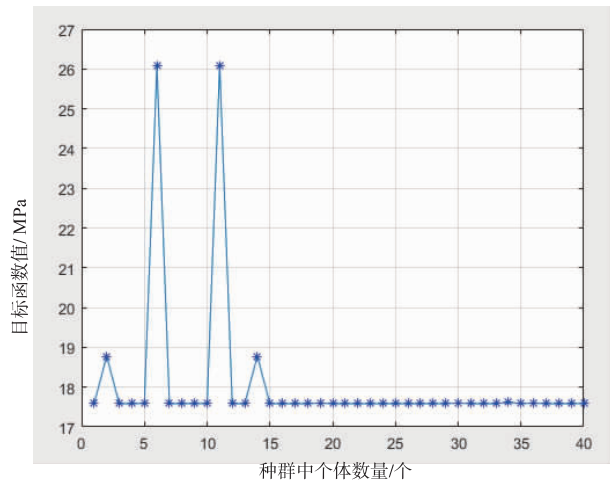


图10 遗传迭代后种群个体目标函数值分布

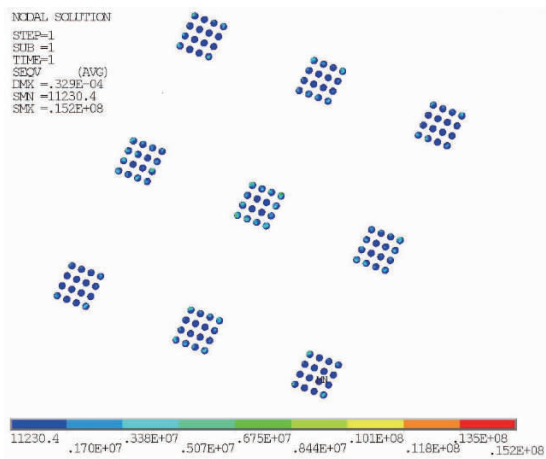


图11 CSP焊点最优水平组合扭转应力分布图

6 结论

通过建立微尺度 CSP 焊点有限元仿真模型进行扭转载荷应力应变分析,并结合响应面-遗传算法优化,得到以下结论:

(1) 单因素分析中表明:焊点材料为 SAC305 时 CSP 焊点内扭转应力应变最大,焊点最大扭转应力应变随着焊点直径和焊盘直径的增加而减小、随着焊点高度的增大而增大。

(2) 经优化分析得到的 CSP 焊点结构参数最优水平组合为:焊点材料 SAC305、焊点直径 0.22mm、焊盘直径 0.14mm 和焊点高度 0.14mm;对该最优焊点仿真验证表明最大扭转应力下降了 19.6%,实现了 CSP 焊点结构参数的优化。

参考文献

[1] 梁永丰. 无铅钎料的纯扭疲劳和多轴棘轮疲劳研究[D].

天津:天津大学,2010.

Liang Yong-feng. Torsion Fatigue and Multiaxial Ratcheting Fatigue of Lead-Free Solder[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)

[2] 李鑫. 焊锡钎料的多轴力学性能与低周疲劳寿命研究[D]. 天津:天津大学,2006.

Li Xin. Mechanical Properties and Low Cycle Fatigue Life of Solder under Multiaxial Loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)

[3] Vikram S, Sandeep M, Michael O, et al. Modeling the rate-dependent durability of reduced-Ag SAC interconnects for area array packages under torsion loads[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(8): 2606 - 2614.

[4] Métails B, Kuczynska M, Kabachiev A, et al. Experimental and numerical investigation of fatigue damage development under multiaxial loads in a lead-free Sn-based solder alloy [A]. 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems [C]. New York: IEEE, 2016. 1 - 7.

[5] Maia F W C, Brizoux M, Frémont H, et al. Lifetime prediction of BGA assemblies with experimental torsion test and finite element analysis [A]. International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems [C]. New York: IEEE, 2008. 1 - 7.

[6] Lau J H. Solder joint reliability of flip chip and plastic ball grid array assemblies under thermal, mechanical, and vibration conditions [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 1996, 19(4): 723 - 735.

[7] Seung W Y, Jun K H, Hwa J K, et al. Board-level reliability of Pb-free solder joints of TSOP and various CSPs [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2005, 28(2): 168 - 175.

[8] Chen Q, Xu L, Salo A. Reliability of flexible display by simulation and strain gauge test [A]. 10th Electronics Packaging Technology Conference [C]. New York: IEEE, 2008. 322 - 327.

[9] Chen Q, Xu L, Salo A. Reliability study of flexible display module by experiments [A]. International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging [C]. New York: IEEE, 2008. 1 - 6.

[10] 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 Ru-yu, Wang Chen-xi, Tian Yan-hong, et al. Life prediction of CBGA soldered joints under extreme temperature thermal shock [J]. Transactions of the China Weld-

ing, 2017, 38(10): 93 - 97. (in Chinese)

- [11] 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)

作者简介

梁 颖 女, 1974 年生于四川成都, 硕士, 现为四川成都航空职

业技术学院信息工程学院教授, 主要研究方向为微电子封装可靠性技术、计算机控制与电路仿真及计算机应用技术.

E-mail: almaliang@sina.com

黄春跃 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: hcymail@126.com

邹涯梅 女, 1979 年生于四川自贡, 硕士, 现为四川成都航空职业技术学院汽车工程学院副教授, 主要研究方向为汽车电子技术、通信技术及计算机辅助设计等.

E-mail: zymyaya@163.com