

# 3D 封装微尺度 CSP 焊点随机振动应力应变分析

韩立帅<sup>1</sup>, 黄春跃<sup>1</sup>, 梁颖<sup>2</sup>, 匡兵<sup>1</sup>, 黄根信<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学, 桂林 541004; 2. 成都航空职业技术学院, 成都 610021)

**摘 要:** 基于 ANSYS 软件建立了 3D 芯片尺寸封装有限元模型, 对模型中微尺度 CSP 焊点在随机振动载荷条件下进行有限元分析, 获得了 CSP 焊点应力应变分布情况; 分析了不同焊点材料、焊盘直径和焊点体积对应力应变的影响; 并以焊点体积、焊点高度、焊盘直径为设计参数, 以随机振动条件下 CSP 焊点应力值作为目标值, 设计 17 组试验仿真计算, 采用响应曲面法对 17 组应力值与微尺度 CSP 焊点形态参数间关系进行拟合, 结合遗传算法对拟合函数进行优化. 结果表明, 随机振动环境下应力值最小的 CSP 焊点组合参数为焊点最大径向尺寸 0.093 mm、焊点高度 0.077 mm、焊盘半径 0.068 mm, 并对最优组合参数仿真验证, 最优组合仿真结果优于 17 组试验仿真结果, 实现了随机振动环境下微尺度 CSP 焊点的结构优化.

**关键词:** 3D 封装; 芯片尺寸封装; 微尺度焊点; 响应面法; 遗传算法

**中图分类号:** TG 40 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400156

## 0 序 言

作为新型 3D 封装技术<sup>[1]</sup>之一的芯片尺寸封装 (chip scale package, CSP) 焊点承担着电气连接、机械支撑及散热作用. 目前主流 CSP 焊点的直径已小至 50~100  $\mu\text{m}$  (甚至更小)<sup>[2]</sup>. 由于尺寸效应的存在, 当电子元器件中互连焊点的体积小于  $6.96 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  (即直径与高度大约均为 110  $\mu\text{m}$  的焊点) 时, 通过体钎料获取的相应数据应用于微互连焊点将不再可靠<sup>[3]</sup>, 因此对微尺度焊点可靠性进行研究极其必要. 已有学者如周洪彪等人<sup>[4-7]</sup>对微尺度焊点在热循环加载条件下的可靠性进行了研究; Kim 等人<sup>[8]</sup>对 PBGA 电子产品在随机振动载荷下的可靠性进行了分析; Tang 等人<sup>[9]</sup>对板级组件产品在随机振动下的失效模式进行了分类; 王红芳等人<sup>[10]</sup>研究了振动环境对倒装焊点可靠性的影响; 黄春跃等人<sup>[11]</sup>研究了随机振动环境下 PBGA 焊点结构方式、焊点材料、底充胶弹性模量和密度对叠层无铅焊点可靠性的影响. 以上学者的研究成果表明了针对微尺度焊点可靠性开展相关研究的必要性. 文章以 3D 封装微尺度 CSP 焊点为研究对象, 分析随机

振动载荷下焊点结构参数对微尺度 CSP 焊点应力应变的影响, 并以焊点结构参数为设计因素, 以 CSP 焊点最大等效应力为目标值, 采用遗传算法进行优化得到焊点结构参数最优水平组合, 为提高微尺度 CSP 焊点随机振动可靠性提供理论指导.

## 1 3D 封装微尺度 CSP 焊点随机振动环境下有限元分析

### 1.1 微尺度 CSP 焊点三维有限元模型

文中采用有限元分析方法对微尺度 CSP 焊点进行随机振动环境下应力应变分析. 采用 ANSYS 软件建立的微尺度 CSP 焊点应力应变有限元分析三维模型如图 1 所示. 模型中底层 PCB 尺寸为  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ , 中间层基板尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 顶层基板尺寸为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ , 底层芯片尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ , 顶层芯片尺寸为  $1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ ; 底层 BGA 焊点为高度 0.6 mm、焊点直径 0.76 mm、焊盘直径 0.5 mm 的  $5 \times 5$  焊点全阵列, 中间层 BGA 焊点尺寸为焊点高度 0.5 mm、焊点直径 0.6 mm、焊盘直径 0.4 mm, 顶层与底层微尺度 CSP 焊点的几何尺寸均为焊点高度 0.08 mm、焊点直径 0.1 mm、焊盘直径 0.08 mm, 其中底层微尺度 CSP 焊点为  $3 \times 3$  全阵列, 顶层微尺度 CSP 焊点为  $4 \times 4$  全阵列模

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51465012); 军委装备发展部“十三五”装备预研领域基金项目; 四川省科技计划资助项目 (2018JY0292)

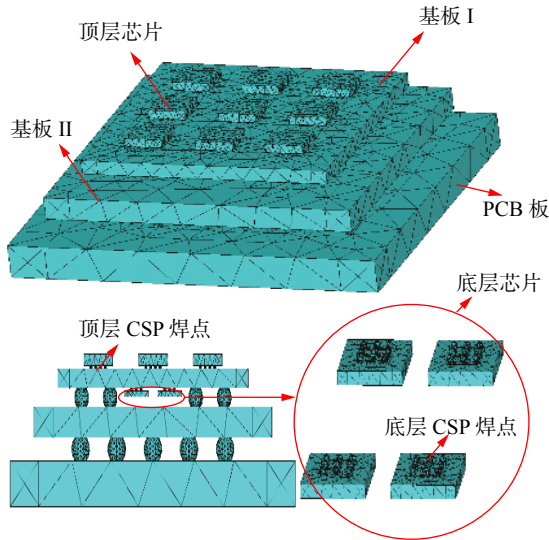


图 1 3D 封装微尺度 CSP 焊点有限元模型

Fig. 1 3D finite element model of micro-scale CSP solder joint

型. 为确保所建立的微尺度 CSP 焊点模型的精确性, 采用基于最小能量原理的 surface 软件模拟获得微尺度 CSP 焊点的外形尺寸参数, 有效减少焊点形态建模所带来的形态参数误差. 由于 3D 封装模型的复杂性, 有限元分析过程中采用自由网格划分方式, 并且对微尺度 CSP 焊点与芯片和 PCB 板接触部分进行局部网格细化以得到更精确的有限元分析结果. 模型中各部分材料参数如表 1 所示.

表 1 材料参数  
Table 1 Material parameters

材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
芯片	130	0.28	2 320
PCB板	18.2	0.25	1 800
SAC387	49.8 ~ 0.14 $t$	0.4	7 390
BT基板	22.3	0.3	1 200

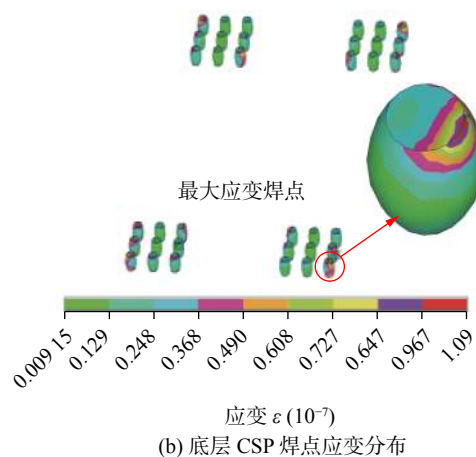
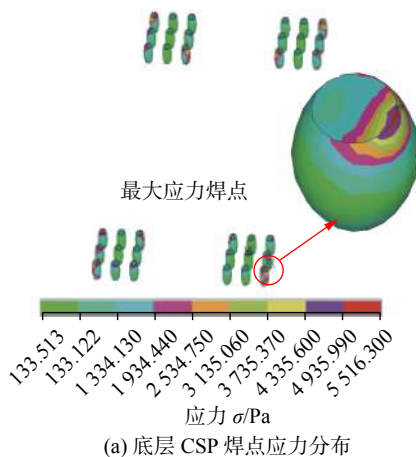


图 3 底层微尺度 CSP 焊点阵列应力应变分布云图

Fig. 3 Array stress and strain distribution of bottom microscale CSP solder joint

文中采用的 PSD 加速度功率谱条件来源于美国军标 MIL-STD NAVMAT P9492, PSD 加速度功率谱曲线如图 2 所示. 当随机振动频率在 20 ~ 80 Hz 时, 曲线上斜率为 +3 dB/oct, 对应的加速度功率谱密度幅值范围为 0.01 ~ 0.04  $\text{g}^2/\text{Hz}$ , 80 Hz 时为 0.04  $\text{g}^2/\text{Hz}$ ; 当随机振动频率在 80 ~ 350 Hz 时, 对应的加速度功率谱密度幅值为 0.040  $\text{g}^2/\text{Hz}$ , 当随机振动频率在 350 ~ 2 000 Hz 时, 曲线以 -3 dB/oct 的斜率下降, 对应的加速度功率谱密度幅值范围为 0.040 ~ 0.010  $\text{g}^2/\text{Hz}$ .

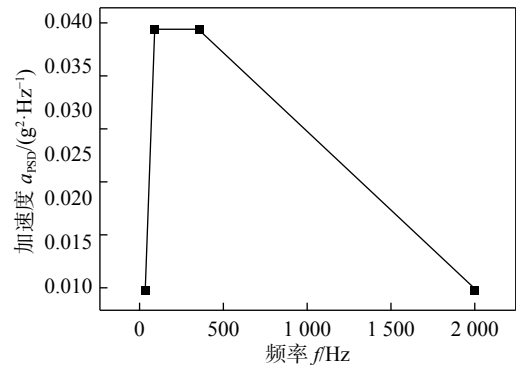


图 2 随机振动加速度功率谱密度曲线

Fig. 2 Random vibration PSD curve

## 1.2 微尺度 CSP 焊点随机振动分析结果

在 ANSYS 软件中进行随机振动有限元分析, 首先要对微尺度 CSP 焊点有限元模型进行模态分析, 之后在进行 PSD 谱分析, 分析载荷作用过程中的统计规律. 通过有限元分析得出 3D 封装模型中微尺度 CSP 焊点应力应变分布情况如图 3 所示, 图 3 为底层 CSP 焊点阵列应力分布情况, 最大等效应力焊点位于右下侧位置芯片的右下角焊点, 最大等效应力为 5 516 Pa, 最大等效应变为 0.109 ×

$10^{-6}$ ; 图 4 为顶层微尺度 CSP 焊点阵列应力分布情况, 最大等效应力焊点位于左侧中间芯片的右下角焊点处, 最大等效应力为 27 806.2 Pa, 最大等效应变为  $0.558 \times 10^{-6}$ ; 表 2 为 3D 封装模型在随机振动载荷下、上层微尺度 CSP 焊点与下层微尺度 CSP 焊点应力应变值, 通过表 2 可知, 上层微尺度 CSP 焊点的应力应变大于下层微尺度 CSP 焊点。

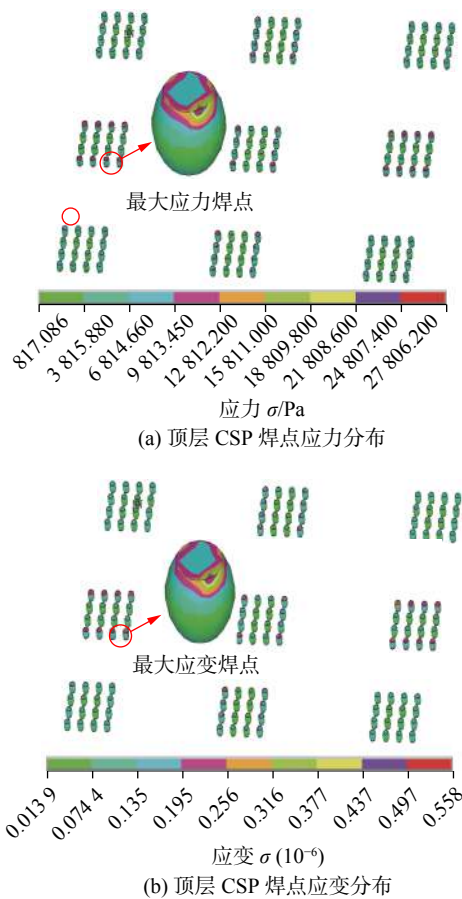


图 4 顶层微尺度 CSP 焊点阵列应力应变分布云图  
Fig. 4 Array stress and strain distribution of top micro-scale CSP solder joint

表 2 随机振动环境下微尺度 CSP 焊点分析结果  
Table 2 Analysis results micro-scale CSP solder joint unde random vibration

CSP焊点位置	最大等效应力 $\sigma/\text{Pa}$	最大等效应变 $\epsilon(10^{-6})$
底层CSP焊点	5 516.3	0.109
顶层CSP焊点	27 806.2	0.558

2 材料参数与几何参数对微尺度焊点随机振动应力应变影响分析

2.1 焊点材料对微尺度 CSP 焊点应力应变影响  
将微尺度 CSP 焊点焊盘直径、焊点体积和焊

点高度分别固定为 0.075 mm,  $5.23 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  (直径约为 0.1 mm) 和 0.08 mm, 其它参数保持不变, 在只改变焊点材料的条件下, 研究焊点材料的变化对微尺度 CSP 焊点随机振动应力应变的影响. 分别选取四种焊点材料为 SAC305, SAC387, 63Sn37 Pb 和 62Sn36 Pb2Ag, 建立相应的有限元分析模型并进行随机振动加载仿真分析, 其中研究焊点材料的变化对微尺度 CSP 焊点应力应变的影响, 焊点材料参数如表 3 所示. 有限元分析结果如表 4 所示. 从表 4 中应力应变数据可以看出, 在四种材料中采用无铅焊料 SAC387 的微尺度 CSP 焊点内的最大应力最大, 采用有铅焊料 63Sn37 Pb 的焊点内的最大应力最小。

表 3 不同焊点材料参数  
Table 3 Different solder material parameters

材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
SAC387	49.8 – 0.14t	0.4	7 390
SAC305	38.7 – 0.176t	0.36	7 300
62Sn36 Pb2Ag	34.3 – 1.5t	0.35	8 400
63Sn37 Pb	34.4 – 0.15t	0.35	8 400

表 4 随机振动环境不同焊点微尺度 CSP 焊点分析  
Table 4 Analysis of random vibration of CSP solder joint with different solder material

材料	等效应力 $\sigma/\text{Pa}$	等效应变 $\epsilon(10^{-6})$
SAC387	27 806.2	0.588
SAC305	24 081.2	0.622
62Sn36 Pb2Ag	22 831.3	0.664
63Sn37 Pb	15 913.6	0.462

2.2 焊点体积对微尺度 CSP 焊点应力应变影响  
将微尺度 CSP 焊点焊盘直径和焊点高度均固定为 0.08 mm, 焊点材料选用 SAC387, 改变微尺度 CSP 焊点体积, 将焊点体积分别选取为  $6.06 \times 10^{-4}$ ,  $5.23 \times 10^{-4}$ ,  $4.49 \times 10^{-4}$  和  $3.81 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  (最大径向直径近似为 0.105, 0.100, 0.095, 0.090 mm), 建立相应的有限元分析模型并进行随机振动加载仿真分析, 研究微尺度 CSP 焊点体积的变化对焊点应力应变的影响, 所得有限元分析结果表 5 所示. 从表 5 应力应变数据可知, 随着微尺度 CSP 焊点体积的增加, 焊点内的最大应力、应变均随之相应减小, 焊点体积为  $3.81 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  时, 最大应力、应变分别为 29 738.4 Pa 和  $0.569 \times 10^{-6}$ . 焊点体积为



$6.06 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ , 最大应力、应变为 23 296.2 Pa 和  $0.468 \times 10^{-6}$ , 由此可见, 其它参数不变, 在焊点直径不大于 110  $\mu\text{m}$  前提下, 仅改变微尺度 CSP 焊点体积, 微尺度 CSP 焊点在随机振动加载条件下焊点中的应力随焊点体积的增大而减小。

表 5 不同体积微尺度 CSP 焊点随机振动分析结果  
Table 5 Analysis of random vibration of CSP solder joint with different volume

焊点体积 $V/10^{-4} \text{ mm}^3$	等效应力 $\sigma/\text{Pa}$	等效应变 $\epsilon(10^{-6})$
6.06	23 296.2	0.468
5.23	27 806.2	0.588
4.49	28 079.3	0.563
3.81	29 738.4	0.569

### 2.3 焊盘直径对微尺度 CSP 焊点应力应变影响

将微尺度 CSP 焊点体积和焊点高度分别固定为  $5.23 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  和 0.08 mm, 焊点材料选用 SAC387, 改变微尺度 CSP 焊点焊盘直径, 将焊盘直径分别选取为 0.09, 0.08, 0.07 和 0.06 mm, 建立有限元分析模型并进行随机振动加载仿真, 研究微尺度 CSP 焊点焊盘直径的变化对焊点应力应变的影响, 所得有限元分析结果如表 6 所示。从表 6 中所示应力、应变数据可知, 随着微尺度 CSP 焊点焊盘直径的增加, 焊点内的最大应力、应变随之相应减小, 最大应力、应变从焊盘直径为 0.06 mm 时 32 668.3 Pa 和  $0.659 \times 10^{-6}$  减小到焊盘直径为 0.09 mm 时 23 487.7 Pa 和  $0.475 \times 10^{-6}$ , 因此对于微尺度 CSP 焊点而言, 适当增加焊盘直径有利于减小焊点内的应力应变。

表 6 不同焊盘直径微尺度 CSP 焊点随机振动分析结果  
Table 6 Analysis of random vibration of CSP solder joint with different pad diameter

焊盘直径 $P/\text{mm}$	等效应力 $\sigma/\text{Pa}$	等效应变 $\epsilon(10^{-6})$
0.09	23 487.7	0.475
0.08	27 806.2	0.588
0.07	28 829.3	0.579
0.06	32 668.3	0.659

### 2.4 焊点高度对微尺度 CSP 焊点应力应变影响

将微尺度 CSP 焊点体积和焊盘直径分别固定为  $5.23 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  和 0.08 mm, 焊点材料选用 SAC387, 改变微尺度 CSP 焊点焊盘直径, 将焊点高度分别选取为 0.09, 0.08, 0.07 和 0.06 mm, 建立

相应的有限元分析模型并进行随机振动加载仿真分析, 研究微尺度 CSP 焊点高度的变化对焊点应力应变的影响, 所得有限元分析结果如表 7 所示。从表 7 中所示应力、应变数据可知, 随着微尺度 CSP 焊点高度的增加, 焊点内的最大应力、应变均总体呈现减小趋势, 最大应力、应变从焊点高度为 0.006 mm 时的 31 846.73 Pa 和  $0.643 \times 10^{-6}$  减小到焊盘直径为 0.009 mm 时的 25 370.3 Pa 和  $0.513 \times 10^{-6}$ , 因此对于微尺度 CSP 焊点而言, 适当增加焊点高度有利于减小焊点内的应力、应变。

表 7 不同焊点高度微尺度 CSP 焊点随机振动分析结果  
Table 7 Analysis of random vibration of CSP solder joint with different

焊点高度 $H/\text{mm}$	等效应力 $\sigma/\text{Pa}$	等效应变 $\epsilon(10^{-6})$
0.09	25 370.3	0.513
0.08	27 806.2	0.588
0.07	23 891.5	0.478
0.06	31 846.7	0.643

## 3 基于响应面法-遗传算法的微尺度 CSP 焊点形态优化

经过以上分析获得了随机振动环境下 3D 封装模型中微尺度 CSP 焊点阵列中应力、应变分布情况以及焊点结构尺寸单因素变化时对应力、应变分布规律的影响。为进一步提高微尺度 CSP 焊点焊接可靠性, 以随机振动环境下 CSP 焊点应力值减小为研究目的, 对焊点形态参数进行优化分析。文中利用响应面法与遗传算法相结合, 获得 3D 封装模型中微尺度 CSP 焊点等效应力最小的最优参数组合。

### 3.1 响应曲面法

由于工程结构的复杂性, 结构的功能常常无法直接用结构设计的随机变量做函数表达, 因此不能直接运用一阶二阶矩方法计算, 于是 BOX 和 Wilson 提出了响应面曲法<sup>[12]</sup>。响应曲面法也称为回归分析, 是数学方法和数理统计结合的产物, 是一种用近似的函数关系式表示变量与目标的拟合设计方法。首先利用中心复合、Box-Behnken 设计、均匀等试验设计、均匀等试验方法建立因素的若干试验组合, 分别对其进行获得相应目标值然后选择方法建立因素的若干试验组合, 然后选择合适的数学模型对因素与目标结果表示, 再运用

最小二乘原理求得中未知系数,最后得到变量与结果的拟合函数表达式. RSM(response surface method)能通过较少的试验次数在一定范围内比较精确地逼近因素与目标值之间的函数关系,并用简单表达式展现出来,而且通过对回归模型的选择在一定范围内可以拟合复杂响应关系,计算较为简单,为后期参数优化设计带来极大方便,因此文中采用响应面法建立微尺度 CSP 焊点等效应力与焊点形态参数的关系式.

### 3.1.1 仿真试验设计

响应曲面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<sup>[12]</sup>. 根据文中试验所取因素数量,故采用响应面分析的 Box-Behnken 试验设计方法,可减少试验次数. 基于上述分析,选取影响微尺度 CSP 焊点应力分布的焊点形态参数:焊点最大径向尺寸  $D$ 、焊点高度  $H$ 、焊盘直径  $P$ . 分别对各个因素选取 3 个水平值,其因素水平如表 8 所示.

表 8 因素水平  
Table 8 Table of levels and factors

水平	焊点直径 $D/\text{mm}$	焊点高度 $H/\text{mm}$	焊盘直径 $P/\text{mm}$
-1	0.08	0.07	0.07
0	0.09	0.08	0.08
1	0.10	0.09	0.09

在表 9 中共有 17 组仿真模型水平组合,其中 12 组为分析因子,5 组为零点因子,即参数水平组合相同,用于试验误差估计. 由表 9 可知,共有 17 组不同的水平组合,以此为基础即可建立出相应的仿真模型进行分析,可以得到相应的微尺度 CSP 焊点等效应力值.

### 3.1.2 响应曲面分析

RSM 可选用的数学模型比较多,其中包括一元线性回归模型、多元线性回归模型和多项式回归模型等. 根据微积分知识,任一函数都可由若干个多项式分段近似表示,因此在实际问题中,无论变量和结果间关系复杂程度如何,总可以用多项式回归来分析计算,由于文中设计变量为 3 个且变量与目标之间函数关系为非线性,结合表 9 的试验样本数,选用基于泰勒展开式的二阶多项式模型

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

表 9 响应曲面组合与分析结果

Table 9 Array and result of response surface

试验号	焊点直径 $D/\text{mm}$	焊点高度 $H/\text{mm}$	焊盘直径 $P/\text{mm}$	等效应力 $\sigma/\text{Pa}$
1	-1	-1	0	26 667.3
2	1	0	-1	30 093.7
3	-1	1	0	25 178.7
4	0	-1	-1	28 277.5
5	0	1	1	26 384.6
6	-1	0	-1	29 782.4
7	0	0	0	27 806.2
8	1	1	0	24 402.7
9	0	1	-1	22 343.2
10	0	0	0	27 806.2
11	0	0	0	27 806.2
12	0	0	0	27 806.2
13	1	0	1	22 439.5
14	-1	0	1	24 784.6
15	1	-1	0	23 831.8
16	0	-1	1	28 277.5
17	0	0	0	27 806.2

式中:常数项  $\alpha_0$ 、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  $\sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2$ .  $\alpha_i$  为线性项系数;  $\alpha_{ij}$  为线性交叉项系数;  $\alpha_{ii}$  为二次项系数;  $\varepsilon$  为随机误差;  $x$  为设计变量;  $Y$  为目标值;  $n$  为变量个数.

对表 9 中试验因子组合及其结果进行二次多元回归拟合,得到 CSP 焊点应力 ( $Y$ ) 与焊点最大径向尺寸 ( $X_1$ )、焊点高度 ( $X_2$ )、焊盘直径 ( $X_3$ ) 二次多项式回归方程为

$$Y = 27\,806 - 35\,114.62X_1 + 1\,283.75X_2 - 31\,180.88X_3 - 8\,611X_1^2 + 797.75X_2^2 - 9\,364X_3^2 - 14\,024.75X_1X_2 - 1\,963.5X_1X_3 + 15.251X_2X_3 \quad (2)$$

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 10.

由表 10 中数据可知,响应曲面分析得到的模型“Preb>F”小于 0.007 2(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 0.906 2,表明回归方程拟合度很高;回归方程调整系数 Adj R-Squared 为 0.934 8,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 0.824 3,表明方程预测准确度良好. 以上结果系数都表明

表 10 响应面分析结果  
Table 10 Response surface analysis

方差来源	均方差 $\sigma^2/\text{Pa}$	F值	Prob>F	显著性	R-Squared	Pred R-Squared	Adj R-Squared
模型	785	56.25	<0.007 2	显著	0.906 2	0.824 3	0.934 8

式 (2) 能够高度拟合表 9 中的试验结果, 故回归方程准确可信。

### 3.2 基于遗传算法的微尺度 CSP 焊点应力优化

通过表 9 的响应面法组合数据拟合出关于焊点最大径向尺寸  $D$ 、焊点高度  $H$ 、焊盘直径  $P$  的数学模型如式 (2) 所示。在所取 3 个因素给定参数范围内, 文中采用遗传算法对式 (2) 数学模型进行优化, 从而获得 3D 封装模型中微尺度 CSP 焊点等效应力最小的最优焊点形态参数组合。

#### 3.2.1 遗传算法 (genetic algorithm, GA)

遗传算法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。该算法首先从定义域中随机确定一组初始解, 进而搜索领范围内目标函数的最优或算法首先从定义域中随机确定一组初始解, 进而搜索领范围内目标函数的最优或次优解。用“染色体”代表每一代求解得到的一个解, 通过适值函数对所有解进行评价比较, 筛选出优秀染色体作为下一代, 从而选择往好的方向发展的基因, 使得染色体不断进化, 而且为确保种群的数量合适, “选择”操作后需要淘汰一部分后代。这样, 当达到设定的终止条件后, 遗传算法停止搜索, 最终得到适合问题的最好染色体, 在所设定求解范围内它很可能即为问题的最优解或者次优解。

#### 3.2.2 微尺度 CSP 焊点应力优化

依据影响随机振动环境下微尺度 CSP 焊点等效应力的焊点形态参数, 得到焊点形态参数与 CSP 焊点应力的二次多项式回归方程, 如式 (2) 所示。在此基础上将响应曲面所得拟合函数与遗传算法相结合, 通过 MATLAB 遗传算法工具箱以随机振动为加载环境, 微尺度 CSP 焊点应力值最低为目标进行参数优化。根据表 8 设置的约束条件,  $0.08 \leq X_1 \leq 0.10$ ,  $0.07 \leq X_2 \leq 0.09$ ,  $0.07 \leq X_3 \leq 0.09$ , 种群个体数为 40, 最大遗传代数 50, 目标变量数 3, 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 5 所示。此时,  $X_1 = 0.092\ 85$ ,  $X_2 = 0.076\ 54$ ,  $X_3 = 0.087\ 62$ 。Y 取的最小值约为 20 500 Pa。相比表 9 中 CSP 焊点应力最小值 22 343.2 Pa 减小了接近 2 000 Pa。达到了微尺度 CSP 焊点结构参数优

化的目的。问题均值和最优解变化如图 5、图 6 所示。

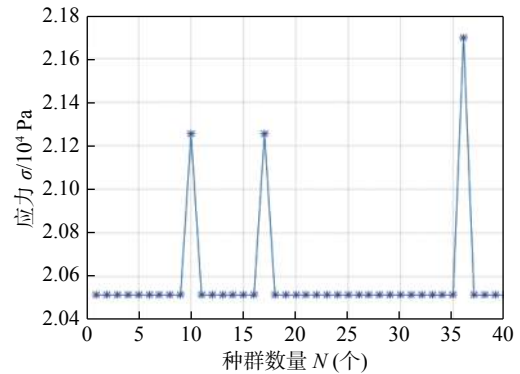


图 5 50 次迭代后目标函数值

Fig. 5 Objective function value after 50 iterations

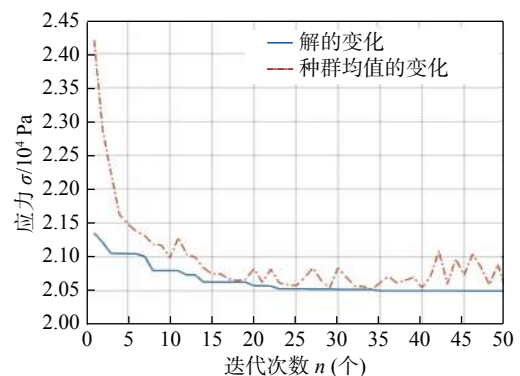


图 6 迭代过程中种群目标函数均值变化和最优解变化

Fig. 6 Mean change and optimal solution of population objective function during the iterative process

#### 3.2.3 最优参数组合验证

基于响应面法-遗传算法的微尺度 CSP 焊点结构参数优化结果在上一节已经给出, 将上节最优组合值分别取整, 即焊点最大径向尺寸为 0.093 mm、焊点高度为 0.077 mm、焊盘半径为 0.088 mm, 为了验证最优参数组合是否达到优化等效应力的目的, 在设定其它条件不变的情况下, 根据以上微尺度 CSP 焊点参数重新建立 3D 封装有限元分析模型, 进行仿真分析, 得到随机振动条件下微尺度 CSP 焊点结果如图 7 所示。

由仿真结果所知, 3D 封装顶层微尺度 CSP 焊点应力分布如图 7 所示, 应力最大焊点位置没发生变化, 应力值有所下降, 模型可靠性得到一定优化。在随机振动载荷下微尺度 CSP 焊点应力值为



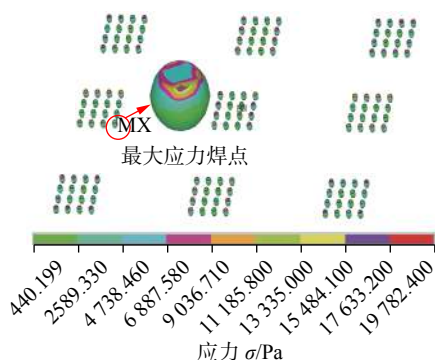


图 7 优化模型上层 CSP 焊点应力分布云图

Fig. 7 Optimization model top layer CSP solder joint stress distribution

19 782.4 Pa, 与遗传算法预测值 20 500 Pa 相比仅相差 700 Pa, 说明遗传算法对应力值预测相对准确。由此证明借助响应面-遗传算法得到的最优组合的微尺度 CSP 焊点的应力值明显减小, 实现了随机振动载荷下 3D 封装微尺度 CSP 焊点结构的优化。

## 4 结 论

(1) 随机振动环境下, 微尺度 CSP 焊点形态参数对应力应变分布存在一定的影响。保持其它条件不变的情况下, 对于 SAC305, SAC387, 63Sn37 Pb 和 62Sn36 Pb2Ag 四种焊料, 采用无铅焊料 SAC387 焊料的微尺度 CSP 焊点内的应力最大; CSP 焊点体积四个水平中, 焊点体积为  $6.06 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  时, 微尺度 CSP 焊点的应力最小; CSP 焊盘直径尺寸四个水平中, 增加 CSP 焊点焊盘直径尺寸, 微尺度 CSP 焊点的应力随之减小的规律。CSP 焊点高度尺寸四个水平中, 随着焊点高度的增加, 此时微尺度 CSP 焊点所承受的应力呈现减小趋势。

(2) 采用响应曲面-遗传算法相结合的方法, 对所取因素水平范围内进行最优参数组合求解。得到最有利于 3D 封装微尺度 CSP 焊点参数水平组合为: 焊点最大径向尺寸 0.093 mm, 焊点高度 0.077 mm, 焊盘直径 0.088 mm, 并通过仿真验证证实最优组合在随机振动加载条件下, 微尺度 CSP 焊点所承受的应力显著减小, 实现了随机振动载荷下微尺度 CSP 焊点形态参数的优化。

## 参考文献:

[1] 张 翼, 薛齐文, 王云峰. 微电子封装发展历史与新动态 [J]. 机械工程自动化, 2016, 2(1): 215 - 216.

Zhang Yi, Xue Qiwen, Wang Yunfeng. Development history and new trends of microelectronic packaging[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016, 2(1): 215 - 216.

[2] 尹立孟, 张新平. 无铅微互连焊点力学行为尺寸效应的试验及数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 55 - 60.

Yin Limeng, Zhang Xinping. Experiment and numerical simulation of size effect of mechanical behaviors of lead-free micro-interconnect solder joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 55 - 60.

[3] 尹立孟, 杨 艳, 刘亮岐. 电子封装微互连焊点力学行为的尺寸效应 [J]. 金属学报, 2009, 45(4): 422 - 427.

Yin Limeng, Yang Yan, Liu Liangqi. Size effect of mechanical behavior of miniature solder joint interconnections in electronic packaging[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(4): 422 - 427.

[4] 周洪彪. 无铅微焊点热循环可靠性及寿命预测研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[5] 沈 星. 基于 3D-TSV 叠层封装的 Sn 单晶粒微凸点研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[6] Zha X, Liu C, Silberschmidt V V. Thermo-mechanical behaviour analysis of Micro-solder Joints by finite element modeling [C]// IEEE Conference Publications, 2012: 1329 - 1332.

[7] Wei Guoqiang, Liu Henglin, Du Longchun, *et al.* Effect of electromigration and isothermal aging on interfacial microstructure and tensile fracture behavior of SAC305/Cu solderjoint[J]. China Welding, 2016, 25(3): 42 - 48.

[8] Kim Y K, Hwang D S. PBGA packaging reliability assessments under random vibrations for space applications[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(1): 172 - 179.

[9] Tang W, Jing B, Huang Y F, *et al.* Feature extraction for latent fault detection and failure modes classification of board-level package under vibration loadings[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(11): 1905 - 1914.

[10] 王红芳, 赵 玫, 陈永国. Flip Chip 焊点振动疲劳寿命预测模型 [J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(12): 1855 - 1857.

Wang Hongfang, Zhao Mei, Chen Yongguo. Vibration fatigue life prediction model for Flip Chip solder joint[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2001, 35(12): 1855 - 1857.

[11] 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.

[12] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

第一作者简介: 韩立帅, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事微电子封装组装技术研究. Email: 18290010236@163.com

通信作者简介: 黄春跃, 男, 1971 年出生, 博士, 教授. Email: hcymail@163.com