

# 球栅阵列(BGA)器件焊点 形态成形建模与预测\*

周德俭 潘开林 吴兆华

陈子辰

(桂林电子工业学院电子机械系 桂林 541004)

(浙江大学机械系 杭州 310027)

**摘要** 本文基于最小能量原理建立了塑料球栅阵列(PBGA)焊点形态成形模型,运用有限元方法预测 PBGA 焊点形态,并对预测结果与其它不同模型的预测结果和实验结果进行了对比。结果表明,有限元方法预测结果与其它模型结果和实验结果吻合良好。

EEACC: 0170J, 0170N, 0290T, 7320W

## 1 引言

球栅阵列(BGA: Ball Grid Array)封装技术是近年来国外迅速发展起来的一种新型封装技术。BGA 封装器件在基板底面以阵列方式制出球形触点作用引脚,具有引脚短、引线电感和电容小;引脚多、引出端数与本体尺寸的比率高;焊点中心距大、组装成品率高;引脚牢固、共面状况好;适合 MCM 的封装需要,有利于实现 MCM 的高密度、高性能要求等一系列优点。它的应用和发展使表面组装技术(SMT)进入了一个新阶段。

BGA 也存在一些缺陷,如组装后焊点不外露,组装质量检测困难;它不能进行焊点的局部近修,焊点中只要有一个不良,也必须整体从基板上脱离下来重新焊接。为此,如何使所有焊点达到完全良好,是 BGA 器件组装中的关键技术之一。研究 BGA 器件组装焊点的几何形态及其预测控制方法,其目的是优化 BGA 焊点结构和工艺参数,保证组装焊点具有高的一次合格率。

## 2 BGA 器件的焊点形态

### 2.1 焊点形态及其研究内容

焊点形态一般是指元器件焊脚与印刷电路板(PCB)焊盘结合处熔融钎料沿金属表面润湿铺展所能达到的几何尺寸,以及与金属表面接触和钎料圆角形态。简而言之,是焊点成

\* 电子部电科院预研基金资助项目(编号 DJ3 2 4 2)

周德俭 男,1954 年出生,副教授,硕士生导师,浙江大学在职博士生,从事 SMT 和 CAD/CAM 方面的教学科研工作

1997-10-25 收到,1998-02-01 定稿

形后的外观结构形状 焊点形态与器件引脚和焊盘的几何尺寸及几何形状、焊料性质、焊接温度、焊料量等诸多因素紧密相关

SMT 焊点形态研究内容包含焊点成形机理研究和失效机理、焊点力学行为与焊点形态关系、焊点形态成形建模及形态控制、焊点形态 CAD 方法等<sup>[1]</sup>。其中焊点形态成形建模及预测是焊点形态研究的核心内容。

## 2.2 BGA 器件的焊点形态

SMT 焊点以及相应的焊点形态有多种形式, BGA 焊点是 SMT 焊点中形态较为简单的一种。依据 BGA 的种类和制造工艺不同, 它的形态有些差异, 图 1 示意的是几种 BGA 器件和 PCB 结合形成的单个焊点形态的截面图。其中 (a) 为 PBGA 形成的焊点形态; (b) 为陶瓷球栅阵列 (CBGA) 焊点形态; (c) 为陶瓷柱栅阵列 (CCGA: Ceramic Column Grid Array) 焊点形态。

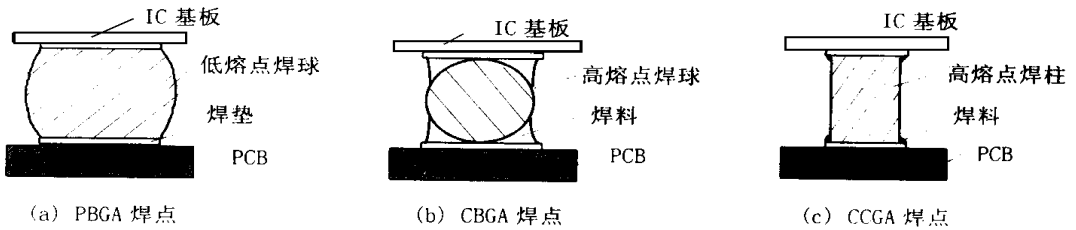


图 1 BGA 器件的焊点形态截面图

本文以 PBGA 焊点形态为建模研究对象。PBGA 一般使用环氧树脂基板和共晶焊料球, 焊料球的典型成分为 63Sn/37Pb 或 62Sn/36Pb/2Ag, 直径为 0.76mm。在再流焊时焊球在基板和 PCB 焊垫之间实现机械和电气连接, 同时焊球发生“塌陷”, 与焊垫上涂布的焊膏一起形成焊点, 焊点高度比原焊球低。焊球中心距常用 1.27 和 1.5mm, 目前 1mm 间距 PBGA 也已问世。

## 3 PBGA 焊点形态建模和预测

### 3.1 PBGA 焊点成形建模与预测方法

自 90 年代以来, 国外对 SMT 焊点形态的预测和控制的研究进一步加强。研究方法由数学分析方法逐步演变为数值分析方法 (如: 有限元方法); 研究对象由起初的无引脚片式元件二维焊点形态逐步演变为三维焊点形态; 研究趋势由单纯的焊点形态数学分析研究, 逐步演变为焊点形态预测与后续的应力分析、热分析等可靠性分析相结合的研究。

PBGA 三维焊点形态的研究工作国内未见报道。国外已有学者开始进行研究, 焊点预测方法以 Henrich 基于轴对称和焊点轮廓子午线为圆弧的假设提出的数学分析方法为代表<sup>[5]</sup>。这里所说的数学分析方法, 是指利用焊点形态控制方程——Laplace 方程导出的微分方程和附加的边界条件求解 PBGA 焊点形态。

Henrich 分析模型的主要思想为假设 PBGA 焊点轮廓是一圆弧子午线旋转面, 由此推导焊点轮廓圆弧曲率中心计算公式、焊点体积表达式等数学公式, 进而对 PBGA 焊点的形

态展开计算分析预测。该分析模型具有假设条件、计算方法复杂、预测内容局限性较大等缺陷。

数学分析方法只能在极有限的规则几何约束条件下才能求解,对于复杂的焊点三维形态则无能为力<sup>[2]</sup>。另外,数学分析方法的数学模型与焊点形态的后续研究——应力分析/热分析等可靠性研究不易衔接。而数值分析方法,不仅不受焊点几何形态复杂性的限制,而且能与后续的可靠性研究有机地结合起来。为此,该方法在 SMT 焊点形态研究中应用得越来越多。

关于 SMT 焊点三维形态建模和预测方法的分析比较,可参见本文作者撰写的文献 [2]。本文采用数值分析(有限元)方法对 PBGA 焊点形态进行建模和分析。

### 3.2 PBGA 三维焊点形态模型假设

为简化问题的求解,据 PBGA 焊点形成过程的实际情况对建立的模型作以下假设:

- (1) 球栅阵列中所有焊球、焊盘几何尺寸相同,呈轴对称分布,受力相同;
- (2) 焊接过程中,焊球焊料整体熔融,焊点因表面张力作用而理想对位,并在其固化前已达静态平衡;
- (3) 焊盘为圆形,并具有良好的润湿性;焊盘周围材料为完全不润湿,即焊点与焊盘边缘的接触角为  $0 \sim 180^\circ$ ;
- (4) 熔融焊点各处的表面张力均匀恒定,熔融钎料的密度均匀一致;
- (5) 焊点致密,无空穴、气孔等缺陷。

依据以上假设, PBGA 焊点形态的模型可表示成图 2 所示形式,其中  $r_1$  和  $r_2$  分别为 PCB 和芯片基板焊盘半径,同时也是焊点形态上下两圆平面的半径,  $h$  为焊点高度,  $\theta$  和  $\theta_2$  为接触角,  $W$  为焊点最大径向尺寸。

### 3.3 基于最小能量原理的 PBGA 焊点三维形态建模

研究表明:三维焊点形态的液态成形遵循最小能量原理,当熔融钎料达静态平衡体时,液态钎料以及与液态钎料接触的固相、气相所组成的焊点三相系统能量最小<sup>[3]</sup>。

熔融钎料在金属表面润湿铺展时,焊点三相系统能量( $E$ )是表面势能( $E_s$ )、焊点自身重力势能( $E_G$ )和外力作用势能( $E_f$ )之和。针对本文研究的 PBGA,有:

$$E = E_s + E_G + E_f \quad (1)$$

其中:

$$E_s = \int_A \gamma dA \quad (2)$$

$$E_G = \int_V \rho_g z dV \quad (3)$$

$$E_f = Fh \quad (4)$$

式中  $\gamma$  为表面张力;  $A$  为焊点自由表面面积;  $\rho$  为熔融钎料密度;  $g$  为重力加速度;  $z$  为焊点高度坐标;  $V$  为钎料体积;  $F$  为 PBGA 重量作用在该焊点上的压力;  $h$  为 PBGA 和 PCB 间隙高度。

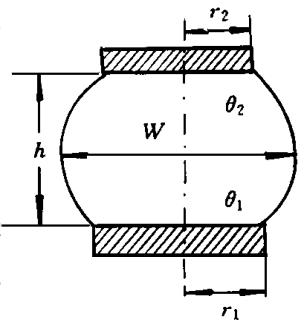


图 2 PBGA 焊点形态模型

系统最小能量可描述为:

$$\min E = \min \left( \int_A \gamma dA + \int_V \rho g z dV + Fh \right) \quad (5)$$

式(5)为焊点形态的能量控制数学模型 焊点钎料量给定的约束条件为:

$$\int_V 1 dV - V_0 = 0 \quad (6)$$

将(5)、(6)式写成泛函形式:

$$I = \int_A \gamma dA + \int_V \rho g z dV + Fh + \lambda \left[ \int_V 1 dV - V_0 \right] \quad (7)$$

式中  $\lambda$  是拉格朗日乘子 式(7)的被积函数满足欧拉-拉格朗日方程时, 可得泛函极值, 利用变分问题的数值解法可求解钎料的平衡形态

### 3.4 焊点三维形态的有限元方法

运用有限元方法对焊点三维形态进行分析的步骤如下:

- (1) 确定包含表面势能、重力势能和外力势能在内的焊点总势能;
- (2) 将重力势能的体积分等三维体积分转换为二维焊点自由表面积分;
- (3) 用有限元离散化焊点自由表面(本文采用的离散单元为等边三角形);
- (4) 用插值函数扩展每个有限元元素坐标, 如:

$$x^{(e)} = \sum_{i=1}^n \Phi_i^{(e)}(\xi, \eta) q_i^{(e)}$$

式中  $x^{(e)}$  为元素空间变量;  $\Phi^{(e)}(\xi, \eta)$  为形函数(或插值函数);  $q_i^{(e)}$  为未知元素节点坐标;  $\xi, \eta$  为参数;  $n$  为元素节点坐标数目;

(5) 使用最小能量原理确定元素节点坐标:  $\min E = \sum_{e=1}^m E^{(e)}$ ; 约束条件  $V_0 = \sum_{e=1}^m V^{(e)}$ ; 式中  $V_0$  为预置体积;  $E^{(e)}$  为各元素势能;  $V^{(e)}$  为各元素体积;  $E$  为总势能;  $m$  为元素数目.

### 3.5 PBGA 焊点三维形态问题解法的程序实现

本文采用 Surface Evolver 软件<sup>[4]</sup>计算 PBGA 焊点三维形态 该软件为一种交互式软件, 通过定义初始条件、能量形式和相关的几何约束条件, 运用有限元方法求解包含表面势能、重力势能以及外力作用势能等作用下的液态系统能量最小时的静平衡形态

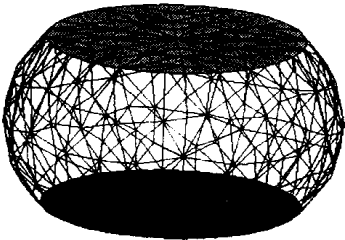


图3 PBGA 焊点形态图

图3所示为一种典型的PBGA焊点形态预测结果输出图形, 预测模型的形态定义在假设条件中已描述, 输入条件为上下焊盘半径, 钎料体积、密度、表明张力等 以定义的能量形式按 Surface Evolver 软件语言系统建立模型文件后进行形态计算, 其输出的主要参数为焊点高度、最大径向尺寸.

## 4 PBGA 焊点形态预测结果及对比分析

### 4.1 与各种不同模型结果对比

为了方便对比, 本模型选择的初始条件与国外学者用其它方法建模的初始条件相同 本模型与 Katyl & Pmbly 及 Nigro 建立的变分法分析模型, Henrich 基于轴对称和焊点于午

线为圆弧的假设提出的数学分析模型<sup>[5,6]</sup>的结果对比分别见表 1 和表 2

表 1 焊点高度预测结果对比(忽略重力影响)

$F/10^{-5}N$	Katyl&Pim bly/mm	Henrich/mm	本文模型/mm
23.0	0.469	0.453	0.4893
0	0.526	0.524	0.5355
-32	0.750	0.753	0.7872

有关参数:  $r_1 = 0.3175mm$ ;  $r_2 = 0.3175mm$ ;  $V = 0.24132mm^3$ ;  $\gamma = 325g/cm$ .

表 2 焊点高度预测结果对比

$F/10^{-5}N$	Katyl&Pim bly/mm	Henrich/mm	本文模型/mm
19.453	0.0578	< 0.055	0.05785
12.968	0.0624	0.0593	0.06271
0	0.0731	0.0731	0.07505
-8.8422	0.0886	0.0915	0.09224
-10.553	0.1062	0.1028	0.1252

有关参数:  $r_1 = 0.072mm$ ;  $r_2 = 0.060mm$ ;  $V = 0.001214mm^3$ ;  $\rho = 11.4g/cm^3$ ;  $\gamma = 430g/cm$ .

## 4.2 与实验结果的对比

由于目前国内 BGA 尚处于研究开发阶段,与 BGA 器件实际焊点对比有一定困难。为此,本文采用 Henrich 的实验数据和相应的理论结果进行焊点高度和焊点最大径向尺寸( $W$ )的预测结果对比。参数  $W$  是关系到焊点是否会发生桥接的关键尺寸,必须控制在一定的范围之内。Henrich 采用的实验样件为: PBGA 器件焊点阵列  $15 \times 15$ ,重量 1.8g。对比结果见表 3。

表 3 预测结果与实验数据以及 Henrich 的理论结果的对比

焊点尺寸	实验数据(16个样品平均值/mm)	Henrich/mm	本文模型/mm
焊点高度 $h$	0.52	0.51	0.5152
焊点最大径向尺寸 $W$	0.86	0.87	0.8454

有关参数:  $r_1 = 0.35mm$ ;  $r_2 = 0.30mm$ ;  $V = 0.26mm^3$ ;  $\gamma = 400g/cm$ .

从以上几组对比分析可以看出,采用本文建立的 PBGA 焊点三维形态模型与国外学者的几种模型的预测结果吻合良好,说明本文基于最小能量原理建立的 PBGA 焊点三维形态模型能对焊点形态进行有效预测。

## 4.3 焊点相对高度与相对体积和外力之间的关系

考虑到实际应用时一般焊点呈轴对称分布,且焊点尺寸完全相同,上下焊盘半径也相同,即( $r = r_1 = r_2$ )。为便于设计运用,特采用无量纲坐标,运用本模型得出相对焊点高度、相对体积和外力之间的关系如图 4 所示。

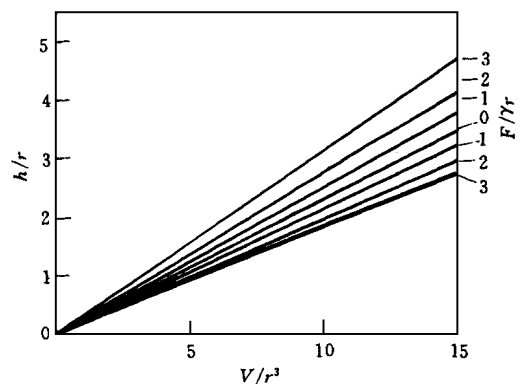


图 4 焊点相对高度与相对体积和外力的关系

## 5 结 论

(1) 本文基于最小能量原理建立了在表面势能、重力势能和外力势能作用下的 PBGA 焊点三维形态成形模型, 运用有限元方法对 PBGA 焊点形态主要参数进行了预测

(2) 本文建立的模型预测结果与国外学者建立的变分法模型预测结果、基于焊点子午线为圆弧假设下的数学分析模型结果有很好的—致性, 而且与实验数据吻合良好。

(3) 为方便设计采用, 运用预测模型得出了焊点相对高度、相对体积和外力之间的关系图, 可用于指导实际的焊点形态设计。

(4) 研究表明: 基于最小能量原理的 SMT 焊点三维形态建模和有限元方法, 能有效地对 BGA 类焊点形态进行预测

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 吴兆华, 周德俭, 陈子辰, SMT 焊点形态应力解析计算机辅助设计, 计算机辅助设计与制造(全国第四届 CAD/CAM 学术报告会专刊), 1996, 8: 155~ 157.
- [ 2 ] 周德俭, 潘开林, 吴兆华, 桂林电子工业学院学报, 1997, 17(4): 34~ 37.
- [ 3 ] N. J. Nigro *et al* , A S M E Journal of Electronic Packaging, 1993, 115(6): 141~ 146
- [ 4 ] K. A. Brakke, Surface Evolver Manual, Version 2.01, Susquehanna University, 1996
- [ 5 ] S. M. Heinrich *et al* , A S M E Journal of Electronic Packaging, 1996, 118(9): 114~ 121.
- [ 6 ] R. H. Katyl, W. T. Pimbley, A S M E Journal of Electronic Packaging, 1992, 114(3): 336~ 341.

## M o d e l i n g a n d P r e d i c t i n g S o l d e r J o i n t S h a p e s o f B a l l G r i d A r r a y

Zhou Dejian, Pan Kailin, Wu Zhaohua

*(Guilin Institute of Electronic Technology, Guilin 541004)*

Chen Zichen

*(Zhejiang University, Hangzhou 310027)*

**Abstract** In this paper, solder joint shapes evolving model of plastic ball grid array based on minimal energy principle is developed, the finite element method is employed to predict solder joint shapes of PBGA. Comparisons are made between the joint heights predicted by the current model here and those generated by other various models. The results show that the predicted results of current model are identical to that of other various models and in excellent agreement with experimental measurements.

**EEACC:** 0170J, 0170N, 0290T, 7320W