

基于有限元分析的 BGA 焊点可靠性研究

路 佳

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了应用最小能量原理对球栅阵列(BGA)器件焊点建立三维形态预测模型, 以及利用有限元方法分析不同形态焊点在热循环条件下的应力应变分布特征. 基于分析结果对三种不同引脚中心距的 BGA 进行组装工艺优化设计, 通过环境筛选试验的验证, 考核了工艺设计的可靠性. 证明热应力交变下, 焊点内部疲劳损伤现象与理论预测一致, 有限元分析(FEA)在焊点可靠性研究中是一种有效的途径.

关键词: 球栅阵列; 焊点形态; 最小能量原理; 有限元分析

中图分类号: TG40

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)03-0113-06

Research on BGA Solder Joint Reliability Based on Finite Element Analysis

LU Jia

(The Institute of Electronic Engineering of CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper develops 3-D shape predicting model of BGA through minimal energy principle, analyses stress distributing characteristic of different shape solder joint under thermal cycle. Based on analysis result, assembly technology is optimized of three kind of BGA with different lead center distance. Validated by environment screen testing, technical dis-assembly reliability is examined. The result indicates that, solder joint inner fatigue failure phenomenon is consistent with theory prediction under thermal stress, finite element analysis is an effective in solder joint reliability research.

Key words: ball grid array (BGA); solder joint shapes; minimal energy principle; finite element analysis (FEA)

1 引言

BGA 封装器件在基板底面以阵列形式排布球形触点作为引脚, 与尺寸相近的翼形引脚器件(如: QFP 和 PLCC)相比, 引脚数多很多; 球形引脚很短, 缩短了信号的传输路径, 引线电感和电容减小; 球形引脚增加了引脚与印制板的接触面积, 共面性和散热性能得到提高. 正是因为 BGA 的这些优点, 在通信、航天和军事领域高集成度的电子产品组装和 MCM 的封装中, BGA 器件及封装技术得到了广泛应用.

然而, 器件底部的球栅阵列引脚排布形式导致了 BGA 器件存在以下不足: 焊点不外露, 焊点组装

质量检测困难, 不能进行局部焊点修整, 器件的功率更大, 温度更高. 因此采用 SMT 工艺技术必须保证 BGA 器件组装后的焊点质量. 焊点的失效主要是热失效, 不同形态焊点的热疲劳寿命是表征焊点质量的关键数据. 文中通过对焊点形态的预测和热疲劳寿命的分析, 为优化 BGA 组装工艺参数提供理论依据, 提高了 BGA 组装焊点一次性合格率.

2 基于有限元分析法的理论思路

根据热力学基本定律, 自然界中任何封闭系统的存在总符合能量最小原理. 当固-气-液三相共存时, 在气-液两相界面形成液面, 液面形态由作用在系统上的力所确定, 这些力包括重力、表面张力或

其它形式的力.从能量最小原理出发,系统能量最小时,液体界面形态达到平衡形态^[1].对 SMT 焊点,认为熔融钎料在金属表面润湿铺展时,系统能量(E)是表面势能(E_S)和重力势能(E_G)之和,即:

$$E = E_S + E_G \quad (1)$$

$$E_S = \iint_{A_0} T dA + \sum_{i=1}^n \iint_{A_i} T_i dA \quad (2)$$

$$E_G = \iiint_V \rho g z dv \quad (3)$$

式中, T 为自由液面表面张力; A_0 为自由液面总面积; T_i 为固液界面张力; n 为固液界面个数; A_i 为标号为 i 的固液界面面积; ρ 为钎料密度; g 为重力加速度; z 为竖直方向坐标.

焊点形态是焊点成形后的外观结构形状.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的钎料圆角形态.因此,焊点形态与器件引脚、焊盘的几何特性、焊料特性、焊接温度、焊料量等诸多因素紧密相关.在已知这些参数的情况下,利用液态钎料润湿理论、最小能量原理等焊点形态相关理论和方法,能唯一确定对应的焊点形态^[2].

SnPb 钎料合金具有粘塑性,其本构关系的描述适宜于粘弹塑性材料模式,采用 Darveaux 能量法得到 BGA 焊点内部蠕变的最大应变值.用三维有限元数值方法,对 BGA 焊点在热循环加载条件下的应力应变过程进行分析,通过计算焊点钎料的薄弱部位在热循环过程中的塑性应变范围和蠕变应变范围,得到焊点热疲劳寿命.

3 BGA 焊点形态参数与热疲劳寿命的关系

3.1 有限元模型的建立

文中分析对象为引脚中心距 1.0mm、1.27mm 和 1.5mm 三种 BGA 器件.器件底部球形引脚的特性参数如表 1 所示.组装用的印制板(PCB)为 FR-4 环氧树脂纤维覆铜板.组装用的焊膏锡铅比例为 Sn62Pb36Ag2、金属含量 90%.

通过对每种 BGA 器件分别改变模板开口尺寸和 PCB 焊盘的设计尺寸,而改变钎料量,对不同的焊点形态进行预测,具体预测方案见表 2. BGA 器件在再流焊过程中,熔融钎料在成形过程中由于重力作用其高度不断发生变化.因此形态预测的重点是考虑器件自身的重量以及不同钎料量下焊点的形态.

表 1 分析对象引脚特性

器件 编号	器件引 脚分布	引脚中心距 (mm)	引脚直径 (mm)	引脚数目	引脚材料
A	完全分布	1.0	0.6	256	Sn63Pb37
B	四周分布	1.27	0.75	256	Sn63Pb37
C	完全分布	1.5	0.75	225	Sn63Pb37

表 2 BGA 器件焊点形态预测方案

器件 编号	器件重量 (g)	上焊盘直径 (mm)	下焊盘直径 (mm)	钎料量 (mm ³)	编号
A	0.855	0.53	0.53	0.146	A1
			0.60	0.155	A2
			0.72	0.174	A3
			0.80	0.188	A4
			0.90	0.208	A5
B	2.39	0.65	0.65	0.271	B1
			0.70	0.279	B2
			0.80	0.296	B3
			0.90	0.316	B4
			1.00	0.339	B5
C	2.61	0.65	0.65	0.271	C1
			0.70	0.279	C2
			1.08	0.359	C3
			1.18	0.385	C4
			1.37	0.442	C5

焊点形态的计算采用了通用的液面分析软件 Surface Evolver. 该软件由美国 Minnesota 大学国家科学和几何结构计算与可视化技术研究中心开发的^[3].它是一种交互式软件,采用基于最小能量原理的有限元数值分析方法,对在表面势能和其他形式的能量(如重力势能)作用下,对得到的液态静平衡形态进行三维成形预测.在 Surface Evolver 软件中,通过定义上下焊盘直径、表面张力、钎料密度、钎料体积、器件重量等参数,程序利用最小能量原理即可预测焊点的高度和其最大外径.

焊点形态预测结果见图 1,焊点高度与最大外径随焊点下焊盘尺寸变化曲线如图 2 所示.通过预测结果可见,随着下焊盘尺寸的增加,焊点的高度逐渐减小,但最大外径逐渐增加.

3.2 BGA 焊点的可靠性分析

由于元器件体、焊点和印制板材料相互的热膨胀系数(CTE)差别较大,当温度变化时,在焊点内产生热应力,呈周期性变化的热应力会造成焊点的疲劳损伤与蠕变损伤,导致焊点失效.通过一些文献研究结果^[3-5]表明,热疲劳载荷作用下,BGA 器件边角区域焊点最先产生裂纹,随着疲劳周期的增加也最先断裂.因此,文中重点探讨 BGA 器件斜对称面上的两个边角焊点热应力分布情况.

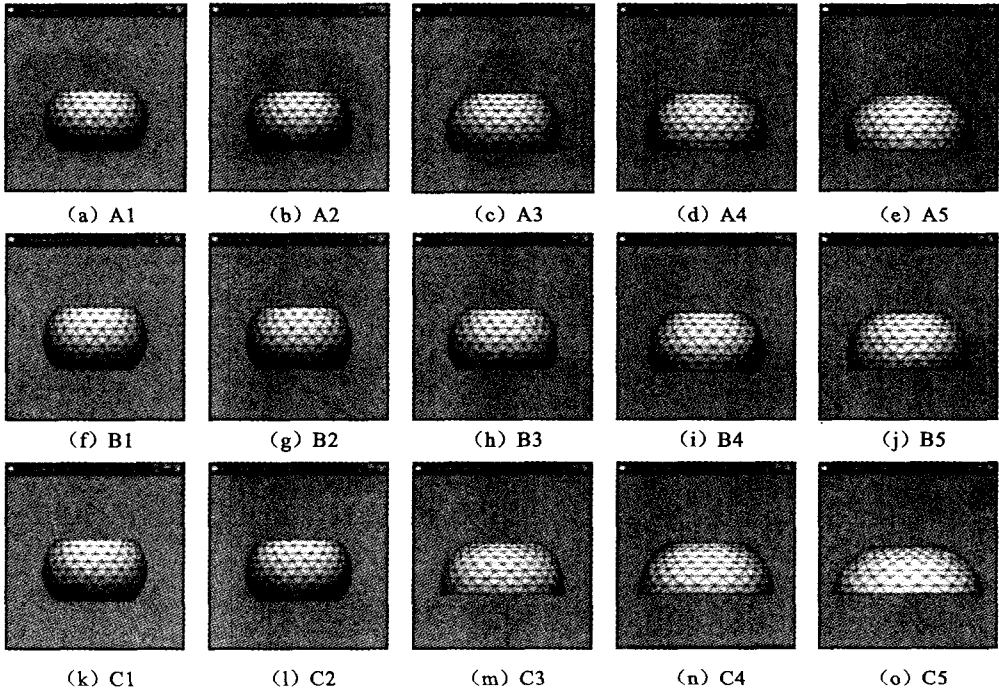


图 1 三种 BGA 器件不同钎料量的焊点形态图

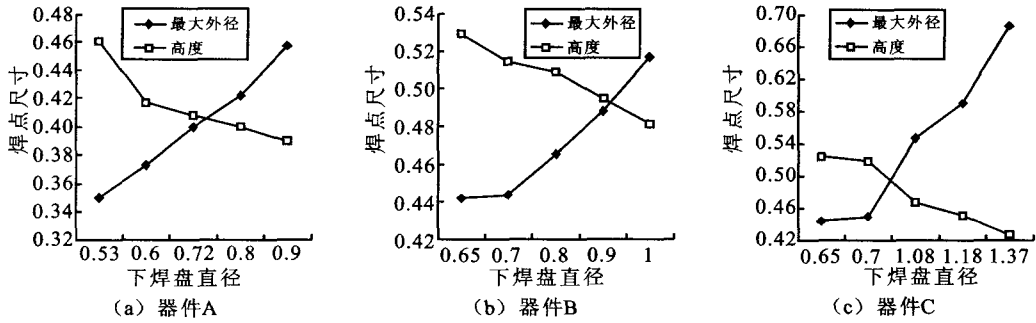


图 2 三种 BGA 器件焊点尺寸变化曲线

有限元分析采用美军标 MIL-STD-883E 中温度循环试验条件,作为加载条件如图 3 所示,温度范围 $-55^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$,高低温各保温 10min,升降温速率 $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$,热循环频率 $f=13.2(\text{cycle}/\text{day})$,零应力应变时的参考温度为 27°C 。

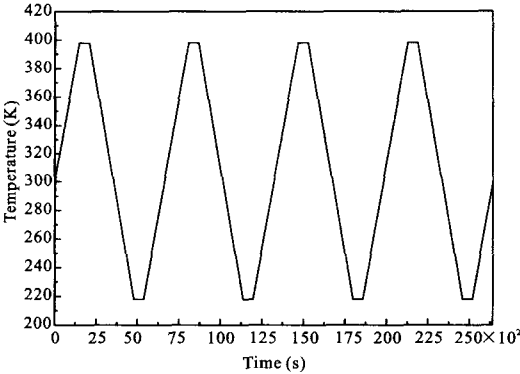


图 3 热循环曲线

热循环过程中,焊球的应力、应变随温度变化作周期性变化,并且应力-应变变化区间所确定的非弹性剪切应变范围在热循环第三、四周期已趋于稳定^[5-6].图 4~图 6 为热循环第四周期低温结束时,三种 BGA 器件的不同形态焊点蠕变应变分布状态图.应力应变过程分析是用 MARC 有限元分析软件进行。

按照疲劳寿命试验条件,使用目前比较著名的低循环疲劳 Coffin-Manson 模型进行寿命评估,得到需要的 BGA 器件焊盘直径设计推荐值,以及 BGA 器件的最佳钎料量和焊点的热疲劳寿命预测值.图 7 是三种 BGA 器件焊点寿命随焊点钎料量的变化曲线。

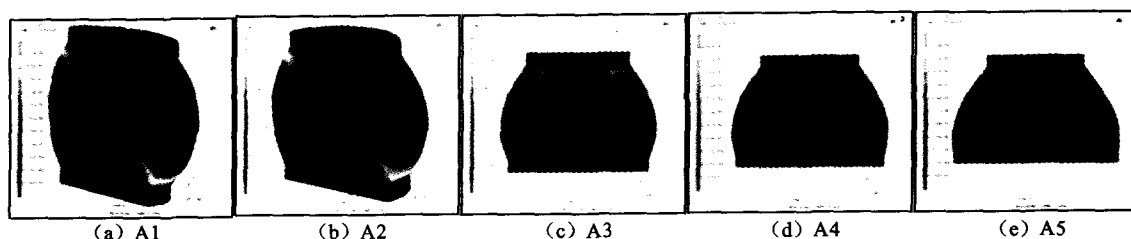


图4 器件A焊点的薄弱部位随焊点形态的变化

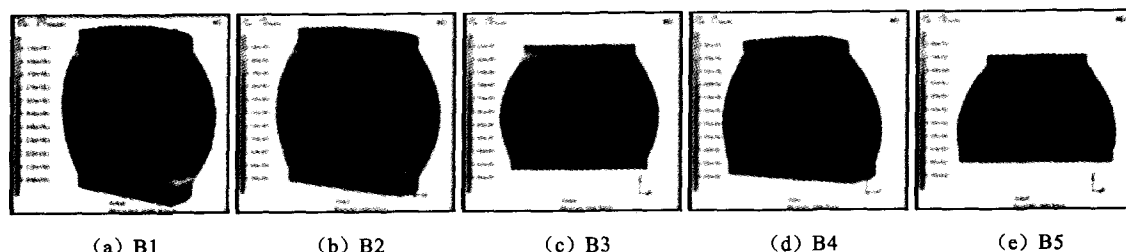


图5 器件B焊点的薄弱部位随焊点形态的变化

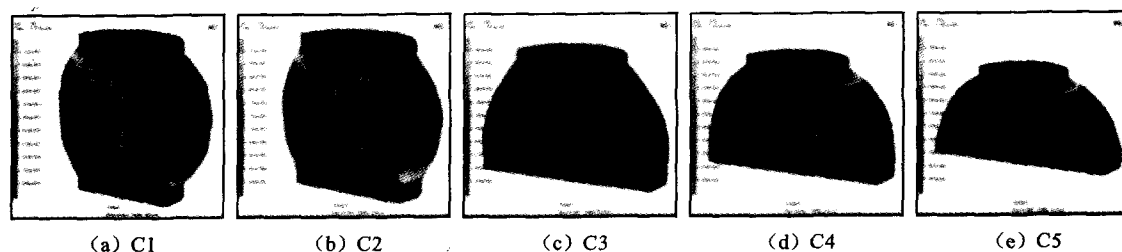


图6 器件C焊点的薄弱部位随焊点形态的变化

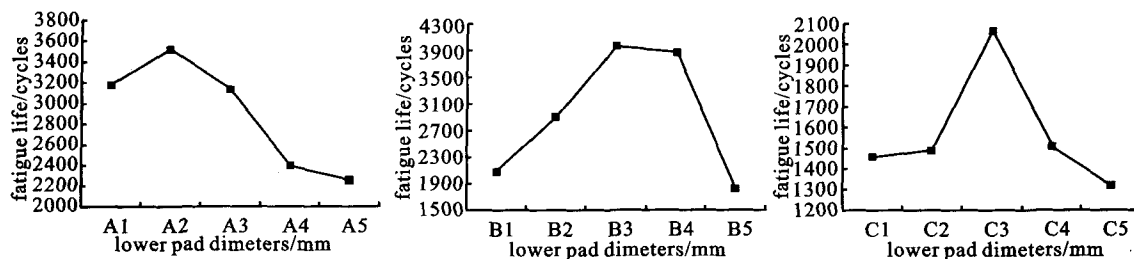


图7 焊点寿命随焊点钎料量的变化曲线

4 基于有限元分析的组装工艺优化

基于有限元仿真分析结果,下面主要开展对BGA 器件焊盘物理结构、模板开口结构关键工艺的优化设计,并通过环境筛选试验考证。

4.1 BGA 器件焊盘物理结构和模板开口结构设计优化

针对三种 BGA 器件 A、B、C,优选热疲劳寿命预测周期数最多的焊点所对应的焊盘直径,分别为 0.6mm、0.7mm 和 1.08mm。

BGA 焊盘结构设计采用了由铜层确定的焊盘设计方法(Non-Solder Mask Defined, NSMD),它比

阻焊膜确定的焊盘设计方法(SMD)焊盘制作精度高、焊盘间走线面积较大,易于在焊盘附近设计导通孔。如图8所示

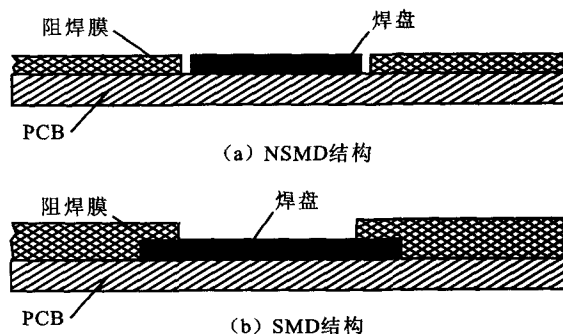


图8 BGA 焊盘结构设计方法

在不锈钢模板厚度确定(0.15mm)的情况下,模板开口尺寸和形状直接影响BGA焊点形态,根据开口的面积与开口孔壁的面积比应大于0.66的理论确定了模板开口尺寸下限,再结合优选的焊盘尺寸和理论仿真的最佳钎料量,得到了实验用模板开口尺寸.根据不同形状开口的脱膜性,选择圆形开口.表3为优选的焊盘、模板结构参数.

表3 焊盘和模板结构参数

器件 编号	引脚中心距 (mm)	焊盘直径 (mm)	模板开 口形状	模板开 口直径 (mm)	面积比
A	1.0	0.6	圆形	0.50	1.25
B	1.27	0.7	圆形	0.63	1.57
C	1.5	1.08	圆形	0.75	1.56

4.2 BGA焊点检测情况

4.2.1 焊点外观及X射线检测

对焊点的焊接位置、焊点外形、内部缺陷的观察采用光学显微镜和X-ray方式(见图9).按IPC-A-610C标准检验,只存在部分焊点有空洞的现象,但空洞面积比小于10%,因此组装焊点全部合格.

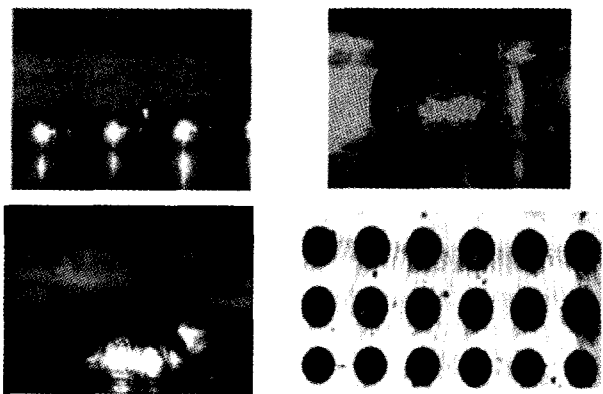


图9 焊点外观和X-ray检测照片

4.2.2 温度循环试验检测

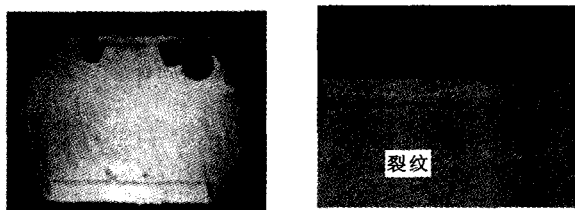
按GJB1032温度循环试验条件,对试验板进行10次循环筛选,其中三种器件各16个.对试验板做环境应力试验的目的是想通过施加加速环境应力,在最短时间内尽可能暴露出焊点缺陷,找出焊点中的薄弱部分^[7-9].根据制定的应力参数,温度循环筛选度SS为:

$$SS = 1 - \exp(-0.0017 \times (R + 0.6)^{0.6} [\ln(e + V)]^3 N) = 0.9998 \quad (4)$$

式中,SS为温度循环筛选度;R为温度变化范围(180℃);V为温度变化速率(15℃/min);N为循环

次数(10次);e为自然对数的底.

温度循环后检测到焊点中空洞更多、更大,有的甚至形成连续的大空洞,明显超出IPC规定的失效标准.焊点裂纹位置主要位于焊点上部.如图10所示.

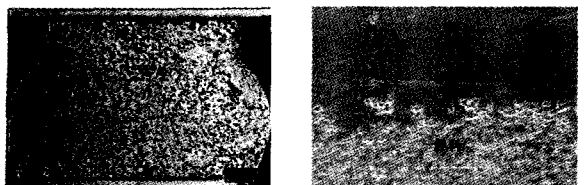


(a) 焊点空洞增加

(b) 界面处焊点裂纹

图10 温度循环后焊点内部出现的缺陷

通过试验观察,随着温度循环的进行,焊点内部晶粒明显粗化.粗化结构的等效塑性应力大于焊点其他区域,因此成为焊点内部的薄弱部位.并且Cu焊盘和Sn-Pb焊料界面会有Cu₆Sn₅和CuSn金属间化合物(IMC),金属间化合物普遍很脆导致焊点容易脆性断裂.图11显示了原始焊点内部金相组织情况,以及热循环后的焊点内部缺陷情况^[10].



(a) 原始金相组织照片

(b) IMC处的粗化晶粒及裂纹

图11 热疲劳载荷对焊点金相组织的影响

这次筛选试验中,被筛选的焊点总数(n)为11792个,开裂焊点数(F_1)为183个,空洞超标焊点数(F_2)为95个,根据贝泽-普拉特公式^[10],计算此次试验成败型数据的二项分布可靠度单侧置信下限:

$$h(R_L) + U_\gamma = 0 \quad (5)$$

式中:

$$h(R_L) = \frac{d}{|F + 0.5 - n(1 - R_L)|} \cdot \left\{ \frac{2}{1 + \frac{1}{6n}} \left[(F + 0.5) \ln \frac{F + 0.5}{n(1 - R_L)} + (n - F - 0.5) \ln \frac{n - F - 0.5}{nR_L} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$d = F + 0.5 + \frac{1}{6} - (n + \frac{1}{3})(1 - R_L) + 0.02 \left(\frac{R_L}{F + 1} - \frac{1 - R_L}{n - F} + \frac{R_L - 0.5}{n + 1} \right) \quad (7)$$

其中, $F = F_1 + F_2$; R_L 为二项分布可靠度单侧置信下限; γ 为置信水平度(0.9); U_γ 为标准正态分布的 γ 分位数(1.2816).

由以上公式算得, 试验板上焊点可靠寿命的单侧置信下限 $R_L = 0.9861$, 从一定程度上反映了工艺设计技术的可靠性.

5 结束语

文中通过焊点形态与热疲劳寿命预测, 指导焊点形态参数和相关工艺参数的选取; 通过工程应用研究获得了理想的一次性焊接合格率和焊点热疲劳寿命. 通过环境筛选试验的考核, 证明焊点故障模式与有限元分析的应力应变分布一致, 证明有限元分析在焊点可靠性研究中是一种有效的技术途径.

参考文献:

- [1] 王青春. 基于 SMT 焊点形态的可靠性研究[C]//全国第六届 SMT/SMD 学术研讨会论文集. 中国: 武汉, 2000.
- [2] 周德俭, 潘开林, 吴兆华. 表面组装焊点形态建模与分析[J]. 桂林电子工业学院学报, 1997, 17(4): 34-37.
- [3] 刘常康, 周德俭, 潘开林, 等. PBGA 焊点的热疲劳寿命分析[J]. 机械强度, 1999, 21(3): 212-214.
- [4] 顾永莲. 球栅阵列封装焊点的失效分析及热应力模拟[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- [5] 黄春跃. 热循环加载条件下 CCGA 焊点形态参数对热疲劳寿命的影响分析[C]//全国第六届 SMT/SMD 学术研讨会论文集. 中国: 武汉, 2000.
- [6] 许杨剑, 刘勇, 梁利华, 等. 芯片叠层球栅阵列尺寸封装的焊球疲劳寿命预测[J]. 浙江工业大学学报, 2004(32): 668-673.
- [7] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [8] 路佳. 表面组装元器件焊盘设计的可靠性研究[J]. 电子工艺技术, 2001, 22(6): 256-259.
- [9] 国防科学技术工业委员会. GJB1032-1990, 电子产品环境应力筛选方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1991.
- [10] 国家标准局. GB4087.3-85, 数据的统计处理 and 解释 二项分布可靠度单侧置信下限[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.

作者简介:

路佳女, (1967-), 工程师, 工艺师. 研究方向为电子设备装联工艺技术.

(上接第 112 页)

- [4] Wang X Y, Wang Z O. Stock market time series data mining based on regularized neural network and rough set [C]// Proc of the First Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Beijing, 2002: 315-318.
- [5] 刘臻, 陈统坚, 彭永红, 等. 基于粗集理论的模糊神经网络建模方法研究[J]. 中国机械工程, 2001(11): 1256-1259.
- [6] 薛安荣, 韩红霞, 潘雨青. 基于可辨识矩阵的快速粗糙集属性约简算法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(20): 4987-4989.
- [7] 徐冠, 夏克文, 徐乃勋. 基于 LM 算法的神经网络在冠心病诊断中的应用[J]. 微电子学与计算, 2006, 23(6): 189-192.
- [8] 张铁. 液压挖掘机结构、原理及使用[M]. 东营: 石油大学出版社, 2002.

作者简介:

胡大江 男, (1983-), 硕士研究生. 研究方向为计算机控制、故障诊断技术.

朱小文 女, (1983-), 硕士. 研究方向为计算机控制算法应用、工程设备远程检测.