

再流焊炉温曲线优化研究

龚雨兵

(桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:在再流焊接期间,封装器件及电路板通过升温区、保温区、焊接区和冷却区。由于热膨胀系数的不同,材料界面处产生热应力。减小热应力能提高焊点与封装器件的可靠性。本文对再流焊期间器件温度场进行数值建模及仿真,获得温度分布及热应力分布;进一步地,以器件在再流焊期间最大热应力为优化目标,以各温区炉温及传送带速率为优化变量,以加热因子、最高温度等为约束条件,采用遗传算法寻优使得最大热应力得到减小。研究结果为再流焊工艺设计提供参考和依据。

关键词:SMT;再流焊;炉温;优化;仿真

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2013)15-0187-04

Study on Optimization of Furnace Temperature Profile Under Reflow Soldering

GONG Yubing

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The packages undergo different temperature load during the reflow soldering process, such as preheating zone, soak zone, reflow zone and cool zone. The thermal stress appears during several zones, especially in the interface due to the difference in the coefficient of thermal expansion (CTE). Normally, with the thermal stress decreasing, the reliability of the solder joints increases. The thermal model of reflow soldering process was built based on the heat transfer theory. The temperature distribution and thermal stress distribution of the packages during reflow soldering process was simulated. The maximum thermal stress in the package, with the constraint of Q-factor and maximum temperature, etc, was minimized by optimizing the oven temperature profile and conveys belt speed using genetic algorithm. The results provide the reference and basis for reflow soldering process design.

Key words: SMT; reflow soldering; furnace temperature; optimization; simulation

再流(回流)焊接是表面组装技术(SMT)生产过程中的关键工序,再流焊接工艺过程直接影响电子产品的焊接质量和可靠性^[1-3]。再流曲线设置直接决定了再流焊接工艺的好坏,与焊膏特性、各器件的几何特征和物理特性、再流焊炉温控制方式、传送带带速等等多种因素有关。Lee^[4]分析了炉温与焊点失效模式的关系,提出了炉温曲线设置的一般性定量指标。赵俊伟等^[5]从钎焊机理入手,经过金相分析指出,再流区峰值温度一般应在 220℃左右,峰值温度低于 200℃会形成不良焊接。再流温度与再流时间达到最佳配置,是确定再流焊温度曲线的关键。冯志刚等^[6]采用正交实验法,对再流焊炉的工艺参数对再流温度曲线及其关键指标的影响进行了全面的研究,指出传送带速度和焊接区炉温温度的影响最

明显。冯志刚等^[7]指出,PCB 的厚度是对再流温度曲线关键指标影响最大的 PCB 结构特征因素。可以看出^[8],以上研究主要从焊接缺陷机理分析入手,从避免焊接缺陷发生的角度,结合焊膏制造商的要求,对再流焊的目标温度曲线提出要求和半定量指标,可以应用于指导焊接炉温曲线的设置。但是应用到实践中,一般需要先进行若干次的物理试验,再根据试验数据来调节焊接工艺参数,以匹配特定形状要求的炉温曲线设置;同时不能将再流焊炉温设置与焊点可靠性的关系直接关联起来。吴懿平教授^[9]提出加热因子概念,为再流曲线优化提供了一个量化的试验前的评价指标。高金刚等^[10]从工程实际应用出发,以加热因子理论为依据,提出对“冷点”加热因子取最优范围下限值控制策略,并给出了确定冷点加热因子下限值的工程试验方法,具有很好的工程应用价值。但是,通过数值模拟的方法对冷点加热因子进行数值模拟和计算,分析再流焊接各关键工艺参数对焊点可靠性的影响,以及对再流曲线进行数值

收稿日期:2013-01-16

作者简介:龚雨兵(1978-),男,湖北人,副教授,博士,主要研究方向为电子封装与组装技术、优化算法;电话:15296003473;
E-mail:gybcome@guet.edu.cn

优化的研究内容目前还很少。而这一研究工作的成功,将可以减少物理实验次数而获得可行的炉温曲线设置,并能通过优化获得特定约束条件下的最优炉温曲线设置。

本文首先对某 BGA 器件的再流焊接过程温度场进行仿真,然后以数值计算的加热因子为主要依据,考虑再流曲线设置时的特定要求,得到合适的炉温曲线;并在此基础上,通过数值仿真,对炉温曲线进行优化,包括优化各温区设定温度以及传送带速度,使得焊点最大等效热应力达到最小化。

1 再流焊数值仿真及结果

1.1 再流焊接的传热过程

在再流焊接过程中,热量传递主要通过对流换热 Q_c 、辐射换热 Q_r 和接触界面间的热传导 Q_k 完成,可用下式表示^[11-12]:

$$Q=Q_c+Q_r+Q_k \quad (1)$$

PCB 组件裸露表面与热风的对流换热热量可用牛顿冷却公式表示:

$$Q_c=hA(T_w-T_f) \quad (2)$$

式中: A 为 PCB 以及元器件与空气的接触面积; Q_c 为对流换热热量; T_w 和 T_f 分别为热风的温度和 PCB 组件的温度; h 为平均对流换热系数。 h 的大小反映对流换热的强弱。影响对流换热系数的因素很多,在再流焊中,对流换热系数主要由热风的流速和 SMA 的外观结构等因素决定,可由下式计算出平均对流换热系数:

$$h=0.664u^{1/2}Pr^{1/3}\lambda/(vL)^{1/2} \quad (3)$$

式中: u 为热风速度; L 为基板长度; v 为气体粘度; λ 为气体的运动粘滞系数; Pr 为普朗特数。

加热板对 PCB 组件的辐射换热热量为:

$$Q_r=(T_H^4-T_S^4)\varepsilon_H\sigma_A \quad (4)$$

式中: T_H 、 T_S 分别为高、低温物体的表面温度; σ_A 为平均辐射吸收常数; ε_H 为平均发射率。

在有限元模型中,相邻节点间的热传导量可表示为:

$$Q_k=\sum_{x,y}=(T_i(x,y)-T_j)R(x,y) \quad (5)$$

式中: $T_i(x,y)$ 表示相邻节点温度; $R(x,y)$ 表示节点 (x,y) 与相邻节点间的热阻值。在强制对流再流焊接中,主要的热量传递是对流换热 Q_c ,因此忽略了热辐射 Q_r 对 PCB 组件的影响。

1.2 有限元模型

1.2.1 有限元模型

选取了一种 PCB 装器件作为研究对象(见图 1),包含 BGA、chip 和各类陶瓷封装器件。PCB 的外形尺寸为 200 mm×180 mm×1.5 mm。为节约计算资源,建立了二维平面应变有限元模型,对其他片式元件做了简化,重点对 BGA 器件进行建模。BGA 器件芯片尺寸为 40 mm×40 mm×1.25 mm,焊点直径为 2.54 mm,高度为 1 mm,间距 1.27 mm。整个有限元模型包含 1314 个节点和 1604 个单元。

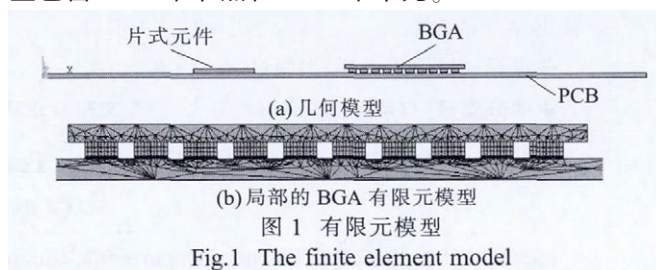


Fig.1 The finite element model

1.2.2 材料模式

足够准确的材料模式和参数,对于准确模拟组装器件在再流焊接时的温度场分布至关重要。比热容、热传导率、弹性模量等力学和热学参数都影响温度场的分布,而且这些参数随着温度的变化而变化。其中比热容的影响更为明显。表 1、2 中列出了铜焊盘和 FR4 基板的部分材料参数。材料的其余属性参数见文献[13-15]。

表 1 Cu 焊盘的热传导率和比热容
Tab.1 The thermal conductivity (K) and specific heat (c_p) of copper foil at different temperatures

温度 / °C	20	80	120	160	200	225	240
$K/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	521.5	532	539	546	553.3	557.7	560
$c_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	356.8	375.5	388	400.4	412.8	420.6	425.3

表 2 FR4 基板的比热容
Tab.2 The specific heat (c_p) of FR-4 substrate at different temperatures

温度 / °C	20	70	120	240	250
$c_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1200	1380	1500	1650	1600

1.3 再流焊炉温设置

本文选取红外强制热风加热方式的再流焊炉,包含 5 个温区(1 个预热区,2 个升温区,1 个焊接区和 1 个冷却区),各温区长度均为 1 m,传送带速度为 10 mm/s。预热、升温、焊接和冷却各区的设定温度分别为 260、180、280、25 °C。假设再流焊炉处于稳定工作状态,各温区设定温度等于炉内热风温度。

1.4 有限元分析结果

再流焊接时,在不同时刻(不同温区),PCB 组件

的温度分布如图 2 所示。可看出,PCB 基板上存在温差,尤其 PCB 基板两端存在明显温差。这是因为 PCB 板有一定长度,PCB 基板从一个温区完全过渡到另一个温区需要一定的时间,计算中该过渡时间为基板长度/带速($200\text{mm}/10\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}=20\text{s}$)。由于芯片与基板的遮挡,在加热区段,BGA 焊点温度上升缓慢而温度较低;在冷却区时,同样由于遮挡,焊点散热较慢而温度较高。

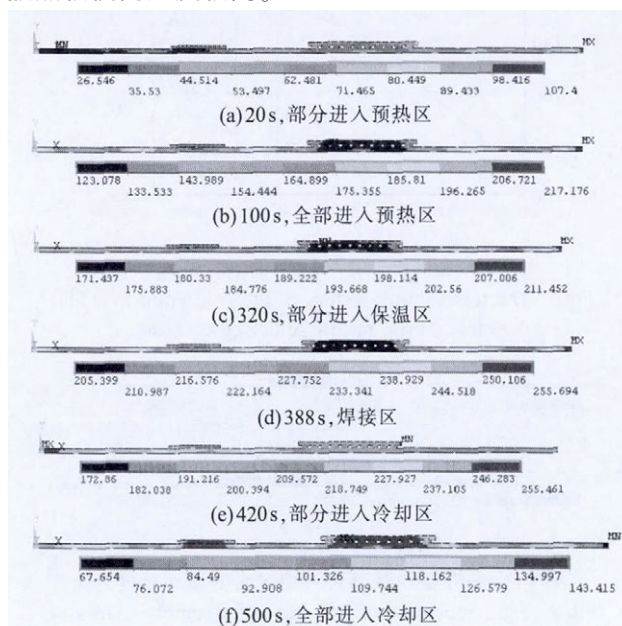


图 2 不同时刻的温度分布

Fig.2 The temperature distribution in assembly at different time

处于中部位置的 SnPb 焊点是所有焊点中的低温焊点,此处也就是加热因子理论中的“冷点”。该“冷点”的温度曲线如图 3 所示。可看出,该曲线满足再流焊接曲线的一般要求,预热区速度为 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,最高温度为 $214\text{ }^{\circ}\text{C}$,超过液相线($183\text{ }^{\circ}\text{C}$)的时间为 108s 。

PCB 组件的最大等效应力出现在芯片与焊点的界面处,如图 4 所示。最大等效应力出现的时间处

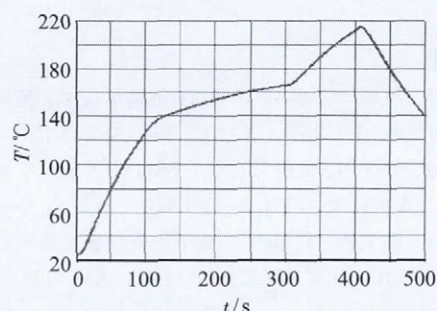


图 3 “冷点”在再流焊过程中的温度曲线

Fig.3 The temperature history of cold point in solder joints during reflow soldering process



图 4 器件出现最大应力时的应力分布云图

Fig.4 The maximum stress distribution of the assembly

冷却区的温差最大,当 PCB 基板的一端进入冷却区(温区中的最低温区),而另一端在焊接区时(最高温区),此时 PCB 组件上的温差较大,产生最大的等效应力。这同时也说明,再流焊接时,PCB 组件在各温区过渡期间(尤其是焊接区与冷却区的过渡)的热力学变化需要予以考虑。

2 再流焊炉温曲线优化

2.1 加热因子

以 Sn/Pb 合金焊料为例,典型的再流曲线如图 5 所示^[16]。

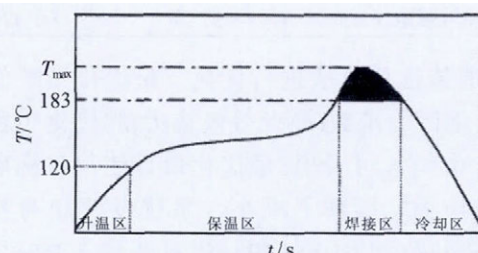


图 5 典型共晶锡铅焊膏再流温度曲线

Fig.5 The typical temperature history of eutectic Sn/Pb solder paste

因为 IMC 的形成和再流过程中再流温度与再流时间有直接关系,吴懿平^[9]提出“加热因子” Q_{η} 这一参数,即再流温度曲线在液相线上的温度 $T(t)$ 对时间 t 的积分:

$$Q_{\eta} = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt \quad (6)$$

式中: $t_2 - t_1$ 为液相线上停留时间。

结合再流温度曲线,加热因子 Q_{η} 就是曲线在液相线上的面积,可以将它简化为一个三角形^[9,17],底为 $\Delta t = t_2 - t_1$,高为 $\Delta T = T_{\max} - T_m$,即:

$$Q_{\eta} = 1/2 \times (t_2 - t_1) \times (T_{\max} - T_m) \quad (7)$$

由此可见,知道了组装板在再流焊设备中的运行速度和经历的最高温度,就可以近似的计算出再流焊的特征工艺参数——加热因子。

2.2 再流焊炉温优化模型

选择再流曲线的各温区温度(预热区温度,加热区温度,焊接区温度及冷却区温度)以及传送带速度作为优化变量;以下条件作为约束条件:①整个组装件的最高温度小于 $245\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证 PCB 的可靠性;②

SnPb 焊点的最高温度小于 225°C , 保证焊点温度不致过高; ③SnPb 焊点超出液相线时间在可接受的范围内(60~120 s); ④加热因子在 630~810 之间^[8]; 优化目标是使得 SnPb 焊点的最大热应力最小化。优化模型说明见表 3。再流焊包括 1 个升温区、2 个保温区、1 个焊接区、1 个冷却区。

表 3 炉温曲线优化模型

Tab.3 The optimization model description of reflow oven temperature profile

变量	类型	取值范围
SnPb 焊点的最大等效应力	目标函数	最小化
预热区温度 / $^{\circ}\text{C}$	设计变量	140~240
加热区温度 / $^{\circ}\text{C}$	设计变量	160~200
焊接区温度 / $^{\circ}\text{C}$	设计变量	200~280
冷却区温度 / $^{\circ}\text{C}$	环境温度	25
传送带速度 /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	设计变量	5~20
加热因子	约束条件	630~810
组件的最高温度 / $^{\circ}\text{C}$	约束条件	<245
SnPb 焊点中的最高温度 / $^{\circ}\text{C}$	约束条件	<225
SnPb 焊点超出液相线时间 /s	约束条件	60~120

采用遗传优化算法进行优化。最优化结果如表 4 所示。优化目标函数(最大等效应力)的优化历程如图 6 所示。由图 6 可看出,最优化设计使得目标函数(最大等效应力)得到了减小。最优设计相对初值(444.56 MPa)减少约 10.5 MPa; 相对减少 2.35%。最优目标值相对初值得到减少, 对提高焊点可靠性有利。但相对减少的幅度较小, 说明在满足所需约束

表 4 最优化结果

Tab.4 The optimization results

变量	最优值
SnPb 焊点的最大等效应力 / Pa	4.3411E8
预热区温度 / $^{\circ}\text{C}$	123.92
加热区温度 / $^{\circ}\text{C}$	173.16
焊接区温度 / $^{\circ}\text{C}$	214.32
传送带速度 /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	6.57
加热因子	639.6533
组件的最高温度 / $^{\circ}\text{C}$	210.05
SnPb 焊点的最高温度 / $^{\circ}\text{C}$	202.5
“冷点”超出液相线时间 /s	97.41
“冷点”的最高温度 / $^{\circ}\text{C}$	196.133

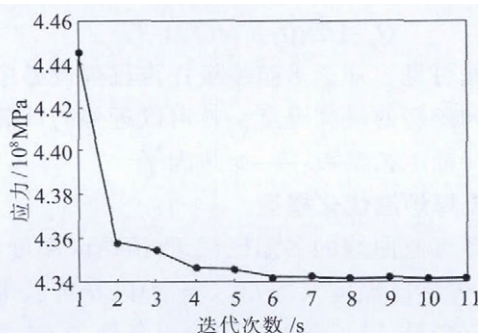


图 6 最大应力变化历程图

Fig.6 The history of maximum equivalent stress

下,特别是满足加热因子 Q_n , 则产生的最大等效应力差别不大。

最优设计中的“冷点”温度曲线图如图 7 所示。可以看出,温度曲线满足一般性的温度指标。冷点升温到液相线和降温到液相线时的器件温度分布图分别如图 8(a)、(b)所示。

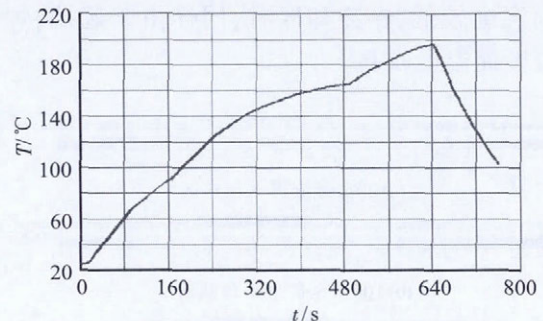


图 7 最优设计中“冷点”的温度曲线图
Fig.7 The temperature history of the cold point in solder joints during reflow soldering process

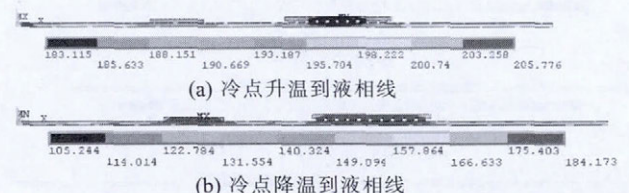


图 8 冷点升温和降温到液相线时的器件温度分布
Fig.8 The temperature distribution of assembly decreasing from liquidus and increasing from liquidus

根据再流焊工艺特点,分析和建立某封装器件的传热模型,对封装器件再流焊接期间的温度及热应力分布进行数值仿真。仿真结果表明,器件在再流焊时最高热应力发生在焊接区与冷却区过渡过程中。以 Q_n 加热因子为主要约束条件,对再流焊各温区设置温度以及传输带速度进行优化,使器件在整个焊接过程中的最大等效 VonMises 应力减少 10MPa, 相对减少 2.35%。本文模型与方法,经过适当对应修改,也可应用于其他约束条件下的炉温曲线优化。

参考文献:

- [1] 潘开林,周德俭,覃匡宇. SMT 再流焊接工艺预测与仿真技术研究现状[J]. 电子工艺技术, 2000(5):185-187.
- [2] 毛信龙,韩国明,黄丙元,等. SMT 中再流焊工艺建模与仿真[J]. 焊接技术, 2004,33(5):17-20.
- [3] 朱桂兵,陈文所,赵雄明. 基于回流焊温度曲线优化预防缺陷的研究[J]. 热加工工艺, 2011,40(19):133-135, 138.
- [4] Lee Ning-cheng. Optimizing the reflow profile via defeat mechanism analysis [J]. Soldering & Surface Mount Technology, 1999,(11):13-20.

(下转第 193 页)

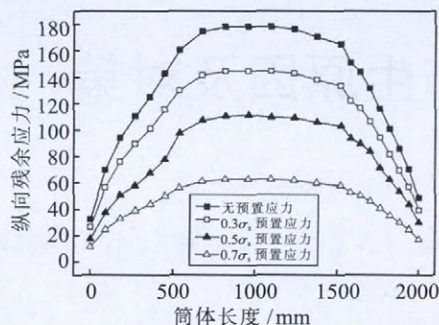


图5 在不同预置应力下沿圆筒长度方向纵向残余应力分布
Fig.5 Longitudinal residual stress generated at different longitudinal pre-stressing

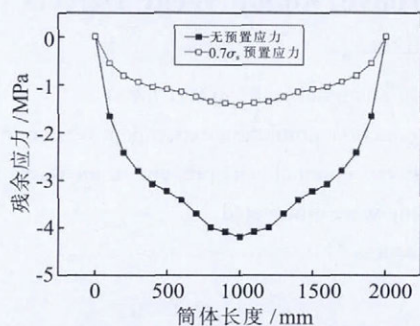


图6 沿圆筒长度方向的残余变形分布
Fig.6 Distribution map of residual deformation along cylinder length

缝的残余角变形下降了76%。可见,预置应力可以减小焊接残余变形。

3 计算结果分析

在焊接件取6个点实测值来检验模拟结果是否正确。由图7可知,模拟值与实测值的基本走向一致,说明预置应力焊接可以改变焊接过程中加热和冷却的应力应变分布特征;对于焊缝金属而言,在冷却过程中的拉伸塑性变形不足以抵消其加热过程中产生的挤压塑性变形,而致使焊缝和近缝区金属承受压应变,焊后出现了较高的残余应力和变形;若焊前纵向施加预置应力对焊缝金属产生一定的额外拉

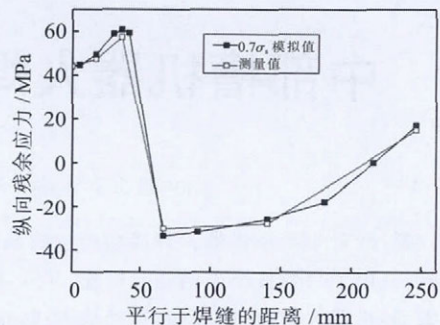


图7 焊缝中心横截面圆周上纵向残余应力对比
Fig.7 Comparison of longitudinal residual stress of cross-section in the center of weld seam

伸应变,从而补偿残余压缩塑性应变,使得整个筒体的应力重新分布,最终形成了新的拉、压应力平衡,达到降低焊接残余应力、减小焊接变形的目的,获得优质焊件。

4 结论

焊接残余应力及变形在预置应力焊接中均能得到有效的控制,可以得到低应力小变形的焊件;选择预置应力为材料屈服强度的70%时,其焊缝残余应力峰值仅为62.4 MPa,较无预置应力时的峰值178.2 MPa下降了约65%,残余变形也大幅递减,由4.19 mm减小到1.43 mm,仅为无预置应力时的34%,实测筒体表面即可得到外观平整的焊缝。

参考文献:

- [1] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [3] 李敬勇,王虎,刘志鹏,等. 预拉伸条件下铝合金筒体焊接残余应力和变形的数值模拟[J]. 材料开发与应用,2008,23(5): 52-55.
- [4] 汪建华,陆皓. 焊接预测理论的最新发展[C]. 第八次全国焊接会议论文集(3). 北京:机械工业出版社,1997.
- [5] 迟露鑫. 工艺参数对筒体纵向焊接残余应力影响的模拟研究[J]. 压力容器,2011,28(9):1-6.
- [6] 子工艺技术,2005,(6):26-28.
- [7] 周斌,潘开林,颜毅林. 无铅PCB组件再流焊焊接工艺的热变形仿真分析[J]. 上海交通大学学报,2007:111-115.
- [8] Sarvar F, Conway P P. Effective modeling of the reflow process: use of a modeling tool for product and process design[J]. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 1998, (21):126-133.
- [9] Eftychiou M A, Bergman T L, Masada G Y. Thermal effects during infrared solder reflow: a model of the reflow process[J]. Journal of electronic packaging, 1992, (114): 48-54.
- [10] 黄丙元. SMT再流焊温度场的建模与仿真[D]. 天津:天津大学,2005.
- [11] 李松,张同俊,安兵,等. 微电子封装领域焊膏回流曲线的优化研究[J]. 材料工程,2006:183-185.
- [12] 李岩,赵立博,张伟,等. 对回流焊炉温度设定的分析与优化[J]. 船电技术,2010,(7):44-46.
- [13] 赵俊伟,聂延平,赵志平. 再流区工艺参数对焊接可靠性的影响[J]. 电子工艺技术,2001,(2):60-63.
- [14] 冯志刚,郁鼎文,朱云鹤. 回流焊工艺参数对温度曲线的影响[J]. 电子工艺技术,2004,(6):243-246.
- [15] 冯志刚,郁鼎文,朱云鹤. PCB的结构特征对回流温度曲线的影响研究[J]. 电子元件与材料,2004,(12):36-39.
- [16] 高金刚,吴懿平,丁汉. 基于加热因子的回流曲线的优化与控制[J]. 电子工业专用设备,2006,(8):23-29.
- [17] 吴懿平. 加热因子-回流焊曲线的量化参数[J]. 现代表面贴装资讯,2002,(1):63.
- [18] Gao Jingang, Wu Yi Ping, Ding Han. Micro-BGA Package Reliability and Optimization of Reflow Soldering Profile [C]// 2005 International Conference on Asian Green Electronics, 2005, 135-139.
- [19] 黄丙元,孙桂珍,张同岭. SMT温度场的数学模型[J]. 电