

基于数值模拟的印制电路板低透锡率焊盘焊接温度分析

王海超 施海健 丁颖洁 马力

(上海航天控制技术研究所, 上海 201100)

文 摘 部分印制电路板通孔焊盘与接地层连接, 手工焊接过程中接地层散热严重, 焊点透锡率不足。为解决此问题, 通过 ABAQUS 软件计算多层印制板手工焊接普通焊盘、低透锡率焊盘的温度分布情况, 分析整板预热对温度及透锡率的影响。分析结果显示, 未预热状态下低透锡率焊盘的镀铜层散失热量约为普通焊盘孔的 4 倍, 低透锡率焊盘非焊接面温度为 125~126℃, 远低于锡铅共晶焊料熔点(183℃); 预热 85、100、115℃ 情况下低透锡率焊盘非焊接面温度分别提高至 171.5、179、187.5℃。模拟与实验结果表明, 整板预热 85~115℃ 可有效改善通孔焊盘透锡率、提高焊点服役可靠性。

关键词 数值模拟, 温度分布, 热流密度, 透锡率

中图分类号: 0242.1

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.04.006

Temperature Analysis of Low Tin-permeability-rate Pads of Printed Circuit Board Based on Numerical Simulation

WANG Haichao SHI Haijian DING Yingjie MA Li

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201100)

Abstract Some through hole pads of printed circuit board connected to ground layer. Large heat dissipation in ground layer would lead to low solder tin-permeability rate during the manual welding process. To solve the problem, temperature distribution of common and low tin-permeability rate pads was calculated by ABAQUS software. And the influence of whole board preheating on the peak temperature and permeability rate was analyzed. The results show that without preheating printed circuit board, the heat dissipation in ground layer is 4 times as that of the common through hole pads. The peak temperature of non-welded surface of low tin-permeability rate pads is 125 to 126 °C, which was far lower than the melting point of the tin-lead eutectic solder (183 °C). When printed circuit board is preheated to 85, 100 and 115 °C, the peak temperature of non-welded surface of low tin-permeability rate pads is increased to 171.5, 179 and 187.5 °C, respectively. Simulation and experimental results indicate that preheating Printed Circuit Board at 85 to 115 °C is beneficial to improve the permeability rate and solder-joint reliability of Sn-Pb eutectic solder.

Key words Numerical thermal simulation, Temperature filed, Heat flux density, Permeability-rate,

0 引言

为提高电子元器件板级焊点可靠性, PCB 焊点微观组织形成、组织形貌焊料改进等方面研究已非常透彻, 如通过调整锡铅焊料成分、温度控制、改变封装结构等形式, IMC 层微观组织和焊点强度均有明显改善^[1-3]。且随着技术发展, 焊点失效方式研究(如金脆断裂^[4]和热循环失效^[5-6])也助力提高焊点寿命。

随着航天电子产品向小型化、多功能方向发展, 航天产品配电单元印制板承载大电流焊盘、电源接地层、信号地层、屏蔽地等覆铜层逐步增多, 同时为提升印制板上焊盘大电流承载能力, 连接焊盘的印

制线覆铜层宽度及厚度也逐步增加, 若 PCB 上通孔焊盘(THP)与接地同层或大电流印制线相连, 易导致部分金属化过孔透锡率不足, 以下称此类焊盘为低透锡率焊盘。航天电子产品在服役过程中, 电路板组件需经历复杂的使用环境, 如剧烈的震动、高低温的冲击等, 若插装器件装配过程中透锡率不足, 焊点易产生微裂纹或焊盘剥离现象。

数值模拟广泛应用于焊点寿命预测、热力耦合分析、非线性问题分析(如冲击、贯穿、超塑性问题)。如通过模拟仿真预测不同状态下焊点疲劳寿命并加以改进^[7-8], 计算印制板受热状态下应力分布场, 分

收稿日期: 2020-02-24

第一作者简介: 王海超, 1990 年出生, 工程师, 研究方向为: 电子装联、数值模拟分析。E-mail: 1152268387@qq.com

析焊盘剥离原因。本文采用大型模拟分析软件 ABAQUS 建立模型并进行分析计算。通过建立 PCB 手工焊接模型,模拟普通焊盘、低透锡率焊盘手工焊接的热传导性能及热流分布。

1 模型计算及实验验证

以某 2 mm 厚印制板为例进行计算,建立印制板模型,并通过更改金属化过孔连接覆铜层大小、预定义场等方式实现低透锡率焊盘的手工焊接热温度场计算。

1.1 模型前处理

1.1.1 模型建立

通过 ABAQUS 前处理功能建立 3 个印制板模型。其中印制板尺寸为 60 mm×40 mm×2 mm,各印制板模型中通孔焊盘直径均为 0.9 mm,接地覆铜层和印制线厚度为 0.07 mm,且接地覆铜层和大电流印制线位于印制板中间层。Model a 中焊盘为普通金属化孔(连接 0.5 mm 宽印制线),Model b 通孔焊盘连接 25 mm×25 mm 接地铜镀层,Model c 通孔焊盘孔一角连接宽度为 4 mm、长度 35 mm 的大电流印制线。印制板焊盘及接地层、大电流印制线尺寸及分布如图 1(a)所示。其中金属化过孔与接地层之间采用花盘方式连接,如图 1(b)所示。实际模型网格划分见图 1(c)和图 1(d)。模型中近焊盘部位采用细网格提高此部位计算精度,远离焊盘位置采用较粗网格,在保证焊接位置计算精度的同时提升计算效率。

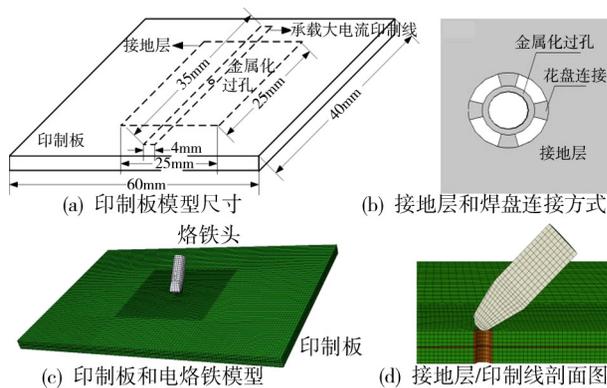


图 1 模型相关尺寸

Fig. 1 Dimensions of models

1.1.2 热模拟分析材料参数、边界条件

模型中印制板基材采用 FR4, 镀铜层材料主要热物理性能参数如表 1 所示^[9-10]。实验中烙铁头选用 OK International 公司的 1 系列烙铁头,烙铁头温度 365 ℃,手工焊接时间 3 s。焊接结束后去除烙铁头截面热源,模拟手工焊接后去除烙铁后印制板自然冷却的状态。忽略焊锡流动过程,仅考虑在空焊盘状态下普通焊盘和低透锡率焊盘加热时温度分布,通过适当调整材料热传导系数,保证计算结果与实际加焊锡手工焊接状态下热传导状态一致。

表 1 印制板基材 FR4、烙铁头和镀铜层材料的热物理性能

Tab. 1 The thermophysical properties of FR4, copper plating and soldering bit

材料	热传导率 /W·(m·K) ⁻¹	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹
FR-4	0.35	1130
镀铜	350	385
紫铜(烙铁)	390	385

1.2 实验设计

针对某印制板上普通焊盘和低透锡率通孔焊盘进行测温试验,该低透锡率通孔焊盘连接印制板内层接地覆铜层,4 个热电偶分别位于两种焊盘正反面金属镀层上,如图 2 所示。测温结果与 Model a 和 Model b 温度场模拟结果对比分析,验证模型正确性。

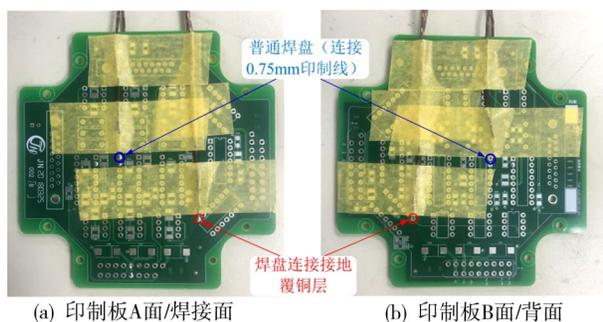


图 2 实验过程中热电偶贴装位置

Fig. 2 Positions of thermocouples on PCB front side and reverse side

模拟计算和实测曲线对比(表 2)发现,Model a 和 Model b 计算的正反面峰值温度与实测温度差值最高 5 ℃。PCB 正反面峰值温度两者差异较小,且实测曲线和模拟计算温度场曲线吻合较好,试验证明了模型的准确性。

表 2 计算结果和实测曲线峰值温度对比

Tab. 2 The comparison of peak temperature of simulation and experiment

模型	计算值(正/反面) /℃	实测值(正/反面) /℃	差值(正/反面) /℃
Model a	245 /198	245.5 /200	0.5 /2
Model b	205 /125	205 /120	0 /5

2 计算结果分析

首先对未预热情况下三种模型的热流密度和温度场分布分析;再对模型 Model b(低透锡率焊盘)分别预热 85、100、115 ℃情况下温度分布场进行计算,分析预热温度对带接地覆铜低透锡率焊盘正反面温度的影响。

2.1 未预热情况下各种模型的热流密度和温度分析

2.1.1 热流密度结果分析

热流密度可直观反映焊接过程中热量传递方向。手工焊接加热过程中通过覆铜层散失的热量 Q 计算公式见式(1), q 为热流密度, S 为散热通道面积,

根据各模型覆铜层与金属化孔接触面积可知 S_a (Model a)、 S_b (Model b)、 S_c (Model c) 之间的关系见式 (2), t 为手工焊接加热时间。热流密度 $q = -k \cdot T$, k 为传热系数, T 为温度梯度。

$$Q = S \cdot \int_0^t q dt \quad (1)$$

$$\Delta S_c \approx 3 \cdot S_b \approx 5.5 \cdot S_a \quad (2)$$

图3为各模型焊接时间为3 s时的焊盘及相应镀铜层上热流密度分布云图。各模型中径向热流密度沿镀铜层方向(径向)延伸。图4为各模型连接镀铜层和焊盘间的单元采样点上轴向热流密度随时间分布图。

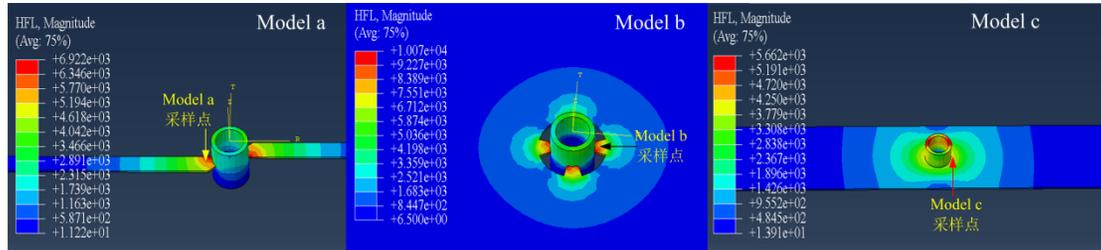


图3 焊接时间为3 s时采样点热流密度分布云图

Fig. 3 Hot-flow distribution of 3 s soldering time

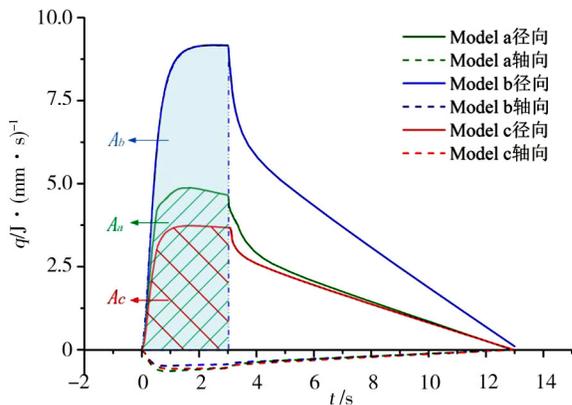


图4 各模型采样单元沿径向和轴向热流密度随时间变化曲线

Fig. 4 The variation curves of radial and axial heat flux density in different models

由式(1)和式(2), Model a、Model b、Model c 中 $\int_0^t q dt$

即图4中0~3 s热流密度与 x 轴间的面积, 分别取该面积为 A_a 、 A_b 、 A_c 。从图4中可看出 $A_b \approx 2.8 \cdot A_c \approx 2 \cdot A_a$, 手工

焊接加热过程中各模型在覆铜层上散失的热量 Q_a (Model a)、 Q_b (Model b) 和 Q_c (Model c) 如表3所示。

表3 各模型加热过程中散失的热量

Tab. 3 Thermal loss in soldering time of Model a, Model b, and Model c

散热量	$\int_0^t q dt$	散热通道面积 ΔS	散热量 $Q_a/Q_b/Q_c$
Model a	A_a	ΔS_a	$\Delta S_a \cdot A_a$
Model b	$2A_a$	$2 \cdot \Delta S_a$	$4 \cdot \Delta S_a \cdot A_b$
Model c	$0.71A_c$	$5.5 \cdot \Delta S_a$	$3.9 \cdot \Delta S_a \cdot A_c$

在热流密度和散热通道面积两方面作用下, Model b 和 Model c 在手工焊接过程中通过覆铜散失的热量远大于普通焊盘, 焊盘反面温度受此影响较大。

2.1.2 温度场结果与分析

图5为各模型手工焊接过程中第3 s时焊接面和覆铜层的温度分布云图。

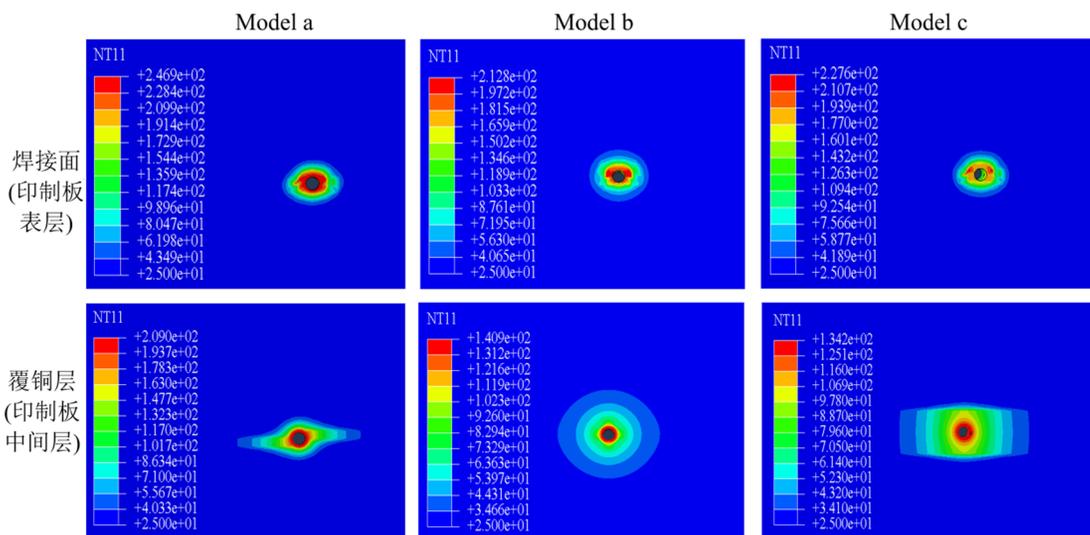


图5 加热第3 s时各模型焊接面和覆铜层温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution of PCB front side and copper plating for 3 s soldering time

焊盘焊接面 Model a 焊接峰值温度高于 Model b 和 Model c。从覆铜层的温度分布云图中可以看出印制板接地层和印制线层温度分布与覆铜部位高度一致, Model a 由于印制线较窄, 面积较小, 热量散失通道较小, Model b 接地层和 Model c 印制线层温度较高, 证明此处镀铜层散热效果明显。

图 6 为 Model a、Model b、Model c 模型焊盘正、反面测温点的模拟温度(实线)和实测温度(虚线)随时间的变化曲线。从图 6 中可以看出 Model a、Model b、Model c 三种情况下焊接面测温点位置峰值温度分别为 245、

205、210 °C, 背面焊盘部位峰值温度分别为 198、125、126 °C。对比不同模型同一位置峰值温度变化发现, Model b、Model c 正面焊盘位置比 Model a 峰值温度分布降低 40 和 35 °C, 反面焊盘位置 Model b、Model c 比 Model a 峰值温度降低 70 °C 左右。也即镀铜层热量散失导致 Model b 和 Model c 反面焊盘峰值温度大幅降低, 宇航元器件焊接使用 Sn63Pb37 焊料, 熔点 183 °C, Model b 和 Model c 焊盘反面温度远低于焊锡熔化温度, 焊锡流动性变差提前凝固, 最终焊接透锡率不足。

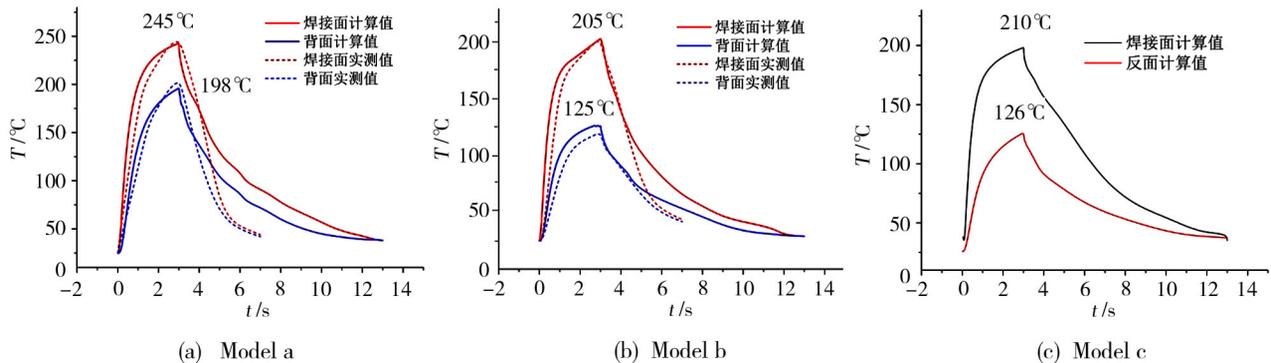


图 6 Model a、Model b、Model c 模型上焊接面同一位置采集点(位于焊盘边缘)上温度随时间的变化曲线

Fig. 6 Temperature vs time curves of Model a, Model b, and Model c at same acquisition point on welding surface (at the edge of pad)

2.2 预热温度对温度场分布的影响

实际焊接过程中会采用预热方式改善焊点透锡率, 预热温度越高, 透锡率越好, 但预热温度达到一定值, 对印制板和板上元器件影响不可忽视, 需设定预热温度上限, 根据元器件和印制板预热温度限制, 设定预热上限 115 °C。

现对 Model b 设定预热温度 85、100、115 °C, 其他条件与 Model a 一致, 分析预热情况下焊盘反面温度分布情况。图 7 为 Model b 未预热和预热 85、100、115 °C 情况下焊盘反面温度曲线。可以看出, 预热情况下焊盘反面温度明显上升, 预热 85、100、115 °C 焊

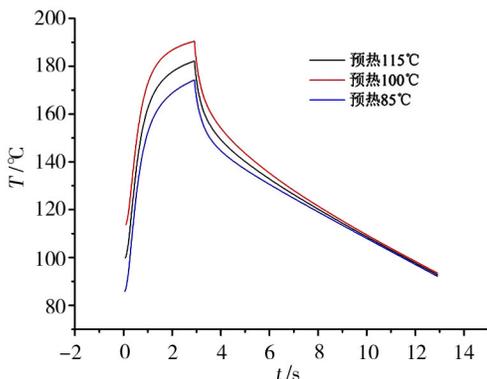


图 7 Model b 预热不同温度情况下背面焊盘温度随时间变化曲线

Fig. 7 Temperature vs time curve of Model b in different preheating temperature

盘反面峰值温度由 125 °C 分别上升至 171.5、179、187.5 °C。三种情况下低透锡率焊盘反面温度接近甚至超过 Sn63Pb37 焊料熔点(183 °C)。

焊盘反面峰值温度增加将显著改善焊接过程中焊点透锡率。现对 1.2 节中印制板(厚度 2 mm, 焊盘连接接地覆铜层)进行焊接实验, 使用 JBC 红外预热台对印制板预热, 过程中 JBC 预热台可通过印制板面贴装的 K 型热电偶进行温度反馈控制。参照第 1.2 节选取印制板上该 DIP 封装器件的低透锡率焊盘和旁边的普通焊盘进行手工焊接试验, 器件引脚为扁平状, 宽度 0.6 mm, 采用 Sn63Pb37 焊料, 烙铁选用与模型一致的 OK International 公司 1 系列烙铁头[烙铁头部为扁平状, 如图 1(d)所示, 宽度约 2 mm], 焊接时间仍为 3 s, 并与旁边的普通焊盘对比。

图 8 分别为 PCB 未预热、预热 85、100、115 °C 状态下两个焊点透锡情况。从实际焊接透锡率来看,

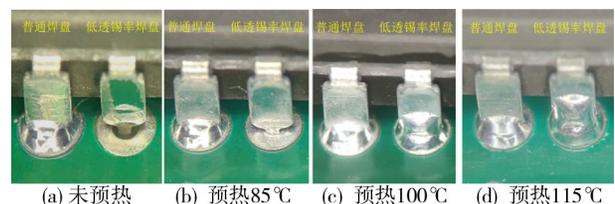


图 8 不同情况下背面焊盘透锡率效果图

Fig. 8 Pictures of low-permeability-rate solder pad at different preheating temperatures

普通焊盘未预热情况下焊点透锡率已达100%。而连接接地覆铜层的低透锡率焊盘在未预热情况下焊点透锡率小于75%,不符合航天标准要求,预热85℃情况下焊盘反面焊锡仅与焊盘平齐,但并未完全润湿焊盘;预热100℃情况下反面焊盘润湿良好,模型预测峰值温度179℃,虽未达到焊料熔化温度,但在高温液态焊料作用下实现良好润湿;预热115℃情况下焊盘反面预测温度187.5℃,液态高温流动性良好,焊料爬升高度过高。使用PCB通孔焊盘连接接地覆铜层时,预热温度低于85℃难以达到100%透锡率,预热115℃情况下焊料爬升过高,预热100℃焊盘润湿良好。此现象与各模型峰值温度计算结果一致,预热85℃情况下低透锡率焊盘背面温度171.5℃较低,未达到温度要求;

实际焊接过程中,应视PCB厚度、镀铜层大小、层数等具体情况对预热温度进行调整,建议低透锡率焊盘手工焊接预热温度为85~115℃。

3 结论

通过建立印制板手工焊接模型,模拟相同焊接状态下连接普通印制线、接地镀铜层、大电流印制线的焊盘正反面的温度变化曲线及中间铜层的热流密度分布情况,通过实验验证了模型及各参数设置的准确性。总结结果如下。

(1)低透锡率连接接地覆铜层和大电流宽印制线的模型焊盘背面温度分别为125、126℃,普通焊盘焊接时反面焊盘最高温度为198℃,镀铜层热量散失明显。

(2)连接接地层焊盘和大电流印制线焊盘通过覆铜部位散失热量约为普通焊盘的4倍。

(3)Model b在预热情况下反面焊盘温度明显升高,所用PCB预热100℃时焊盘反面润湿良好。在实际焊接过程中需考虑不同情况下的印制板布局,焊盘预热温度推荐85~115℃。

但在印制板存在多个接地镀铜层,或同一焊盘连接两处大电流印制线的情况下,预热难以改善通孔焊盘透锡率,需同时进行设计和工艺优化。

参考文献

[1] 梁晓波,李晓延,姚鹏,等. 电子封装中Cu/Sn/Cu焊点组织演变及温度对IMC立体形貌影响[J]. 焊接学报,2018,39(9):49-54.

LIANG Xiaobo, LI Xiaoyan, YAO Peng, et al. Microstructural

evolution of Cu/Sn/Cu joints and effect of temperature on three-dimensional morphology of IMCs in packaging technology [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(9): 49-54.

[2] CHE F X, PANG J H L. Characterization of IMC layer and its effect on thermomechanical fatigue life of Sn-3.8Ag-0.7Cu solder joints [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 6-13.

[3] 秦飞,安彤. 焊锡材料的应变率效应及其材料模型[J]. 力学学报,2010,42(3):439-447.

QIN Fei, AN Tong. Strain rate effects and material models of solders [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(3): 439-447.

[4] 孙晓伟,程明生,陈该青. Sn-Pb焊点金脆失效行为研究进展评述[J]. 电子工艺技术,2017,38(6)315-318.

SUN Xiaowei, CHENG Mingsheng, CHEN Gaiqing. Review of research progress on gold embrittlement failure behavior of Sn-Pb solder joints [J]. Electronics Process Technology, 2010, 42(3): 439-447.

[5] 苏佩琳,李涛,彭雄奇. PCB焊点热循环失效分析和改进设计[J]. 应用数学和力学,2015,36(2):414-422.

SU Peilin, LI Tao, PENG Xiongqi. Fatigue failure analysis and structural improvement of PCB solder joints under thermal cycles [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 36(2): 414-422.

[6] XIAO H, LI X, YAN Y, LIU N, SHI Y. Damage behavior of SnAgCu solder under thermal cycling [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(2): 221-226.

[7] 孔达,张亮,杨帆. 基于Anand模型SnAgCu-X焊点疲劳寿命预测[J]. 焊接学报,2017,29(10):53-56.

KONG Da, ZHANG Liang, YANG Fan. Microstructure and mechanical properties of Mg/Al friction stir lap welding joint assisted by stationary shoulder [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 29(10): 53-56.

[8] 周嘉诚,刘芳. 基于ANSYS/LS-DYNA板级焊点跌落分析[J]. 电子元件,2018,37(2):75-78.

ZHOU Jiacheng, LIU Fang. Drop analysis of board level solder joints based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(2): 75-78.

[9] SIDHU R S, CHAWLA N. Thermal fatigue behavior of Sn-rich (Pb-free) solders [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(4): 799-810.

[10] ZULKIFLI M N, JAMAL Z A Z, QUADIR G A. Temperature cycling analysis for ball grid array package using finite element analysis [J]. Microelectronics International, 2011, 28(1): 17-28.