

基于阻焊层设计的大尺寸 COTS 器件焊点可靠性优化

李庚^{1,2}, 王尚¹, 孙宇欣¹, 孟俊豪¹, 吴文志³, 田艳红^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 哈尔滨工业大学郑州研究院, 郑州, 450000; 3. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 合肥, 230008)

摘要: 高可靠应用领域常常需要专用器件, 其迭代更新较慢且成本较高, 商用现货 (commercial off-the-shelf, COTS) 器件更新速度快且质量一致性较好, 然而在专用领域的适用性和可靠性尚未得到验证, 为此, 提出了一种基于阻焊层设计的大尺寸 COTS 器件焊点可靠性方法. 首先, 通过焊点形态仿真获得了不同阻焊层参数下的焊点形态, 然后对不同参数下的器件进行板级热循环仿真. 结果表明, 阻焊层设计会影响焊点形态, 从而影响在热循环过程中的应力—应变状态, 通过计算焊点预期寿命得到优化参数, 优化后的焊点预测寿命提高了 118%, 证明了从封装设计角度提高 COTS 器件焊点可靠性的可行性, 推动了 COTS 器件在高可靠性领域的应用进程.

创新点: (1) 提出了一种基于阻焊层设计的大尺寸 COTS 器件焊点可靠性方法.
(2) 明确了阻焊层对焊点形貌和可靠性的影响规律和作用机理.

关键词: 商用现货器件; 可靠性; 有限元仿真; 阻焊层

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10. 12073/j. hjxb. 20240319003

Reliability optimization of solder joints in large-sized COTS devices based on solder mask layer design

LI Geng^{1,2}, WANG Shang¹, SUN Yuxin¹, MENG Junhao¹, WU Wenzhi³, TIAN Yanhong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 2. Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou, 450000, China;
3. CETC No. 38 Research Institute, Hefei, 230008, China)

Abstract: High reliability application fields often require specialized devices, which have slower iteration updates and higher costs. COTS devices have a fast update speed and good quality consistency, but their applicability and reliability in specialized fields have not been fully verified. Therefore, a reliability method for large-size COTS device solder joints based on solder mask layer design is proposed. Firstly, solder joint morphology simulation is used to obtain solder joint morphology under different solder mask layer parameters; Furthermore, plate level thermal cycling simulations were conducted on devices with different parameters. The results showed that the design of the solder mask layer would affect the shape of the solder joints, thereby affecting their stress-strain state during the thermal cycling process. The optimized parameters were obtained by calculating the expected lifespan of the solder joints, and the predicted lifespan of the optimized solder joints was increased by 118%. This proved the feasibility of improving the reliability of COTS device solder joints from the perspective of packaging design, and promoted the application process of COTS devices in the field of high reliability.

Highlights: (1) Proposed a method to improve the reliability of large-size COTS components based on solder mask layer design.
(2) Clarified the influence and mechanisms of the solder mask layer on the shape and reliability of solder joints.

Key words: commercial off-the-shelf devices; reliability; finite element simulation; solder mask layer

0 序言

COTS 器件与高可靠性领域的特种器件相比具有性能优异、产量高、成本低等诸多优势,因此在高可靠性领域的应用需求日益增加^[1],得益于其丰富的品类,可以通过性能、尺寸、功耗、重量等需求快速选型,极大缩短了研发周期,提升了器件性能,降低生产成本^[2-3].然而,COTS 器件缺乏可靠性数据,往往难以适应高温、热循环、振动等恶劣环境,因此,提出 COTS 器件的可靠性评估与优化方法具有重要意义^[4-5].

器件异质连接界面的材料热膨胀系数不同,在热载荷作用下会产生热应力,因此器件的失效往往发生在互连焊点处^[6-8],根据电子产品完整性大纲(avionics integrity program, AVIP)中的调查统计结果,在与力学环境相关的电子设备故障中,约有 55% 的故障是由于温度与温度循环引起的.此外,在钻探设备的运转、近日点远日点的变换、大功率设备的启停等大温变应用场景下,热循环是特种器件所承受的普遍载荷,在器件可靠性评估环节,器件热循环加速寿命试验更是一种重要的评估方法^[9-11],因此,探究器件焊点在热循环载荷作用下的可靠性具备代表性和典型性.

有限元仿真是探究器件热循环可靠性的有力手段,SINGH 等人^[12]发现较大尺寸的器件,焊点在热载荷下受到的峰值应力更大,由于焊点的形态影响了焊点的应力-应变状态,LI 和撒子成等人^[13-14]使用焊点形态仿真为有限元仿真提供了更为精准的模型输入.在参数优化方面,焊缝高度^[15]、焊点节距^[16]、钎料体积^[17]等参数对焊点可靠性的影响均有一定的研究,然而,印制电路板 (print circuit board, PCB) 的阻焊层作为极有可能影响焊点可靠性的因素之一却鲜有相关研究.

文中针对大尺寸 COTS 器件的焊点热循环可靠性问题,进行焊点形态仿真以确定不同阻焊层参数对焊点形态的影响规律,采用有限元仿真与试验

验证相结合的方法,优化阻焊层参数并明确阻焊层对焊点可靠性的作用机理.

1 试验方法

1.1 焊点形态仿真

文中研究对象为 TOP Line 公司 SBGA560T1.27-DC87 型大尺寸通用 COTS 器件,其尺寸及截面形态如图 1 所示,SnPb 共晶钎料由于出色的润湿性、抗疲劳性等优势广泛应用于高可靠性领域,因此使用 Sn63Pb37 钎料重新植球取代器件原有的 SAC305 焊球.

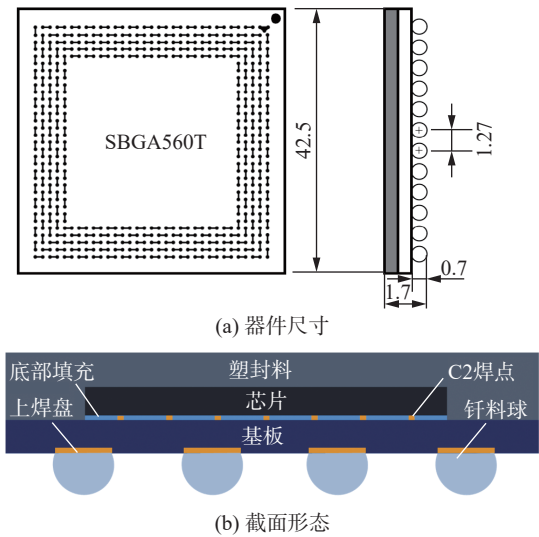


图 1 COTS 器件示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic of COTS device. (a) size of device; (b) cross-sectional morphology

使用 Surface Evolver 软件计算不同阻焊层厚度 h 及阻焊层与下焊盘间距 d 影响下的焊点形态,IPC-7351B 中规定的阻焊层厚度为 20 ~ 80 μm ,铜盘和阻焊层之间的间隔最小值为 75 μm ,标准中未明确指出此间隔的上限,但此间隔过大时,阻焊层将与钎料脱离接触从而不会影响焊点形态.因此,为更充分的探究阻焊层对焊点形态的影响,所取的阻焊层距焊盘距离范围为 50 ~ 100 μm , h 与 d 各取 6 个值进行 36 组仿真计算见表 1.

表 1 焊点形态仿真中的阻焊层参数
Table 1 Parameters of solder mask layer in solder joint shape simulation

参数	取值1	取值2	取值3	取值4	取值5	取值6
阻焊层与下焊盘间距 $d/\mu\text{m}$	50	60	70	80	90	100
阻焊层厚度 $h/\mu\text{m}$	20	28	41	54	67	80

采取自下而上的建模方法建立模型, 为了兼顾形态模拟的可行性和准确性, 做出以下几点假设: 考虑器件自重和钎料重力势能影响; 假设焊盘为理想光滑平面; 忽略焊接过程中钎料密度的变化; 忽略温度对表面能的影响; 忽略凝固过程中相变对焊点形态影响; 假设焊点成分均匀无气孔等缺陷; 假设焊点形态为钎焊过程中熔融钎料达到的势能最低的平衡状态, 在平衡状态下气、液、固三相交界点满足 Young 方程。

为得到正确的仿真结果, 必须施以准确的能量控制方程和体积恒定控制方程, 在 Surface Evolver 中这些方程均以微分的形式施加于钎料的边界线, 对于能量控制, 焊点达到平衡形态时, 系统总能量最小, 焊点体系总能量包括界面势能和重力势能, 即

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

式中: E 为焊点体系总能量; E_I 为界面势能; E_G 为重力势能, 根据 Young 方程, 界面势能可由下式描述

$$E_T = \iint_{A_1} \sigma dA + \iint_{A_2} (-\sigma \cos \theta_1) dA + \iint_{A_3} (-\sigma \cos \theta_2) dA \quad (2)$$

式中: σ 为熔融钎料表面张力; θ_1 为钎料与焊盘润湿角; θ_2 为钎料与焊接元件润湿角; A_1 为钎料与空气接触面积; A_2 为钎料与上焊盘的接触面积; A_3 为钎料与下焊盘的接触面积. 总重力势能即对于钎料体积微元在其高度上重力势能的积分为

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

式中: ρ 为熔融钎料密度; g 为重力加速度常数; z 为距零势能面高度, 对于体积不变约束条件, 即对于钎料部分的体积积分为

$$V = \iiint_V dV \quad (4)$$

式中: V 为熔融钎料体积。

1.2 板级热循环仿真

将 Surface Evolver 仿真得到的焊点形态导入到有限元仿真软件 Ansys 中, 并进行板级器件建模, 为了兼顾有限元仿真的准确性和效率做出以下假设: 模型初始状态下的残余应力和应变值为零; 不同实体之间的接触视为理想接触, 接触部位的节点共用; 考虑材料的密度、弹性模量、泊松比等参数随温度变化; 忽略芯片表面的钝化层、硅芯片和基板内部的布线等局部细微结构, 最终建立的模型如

图 2 所示, 由于应力集中效应往往出现在边角处的焊点, 边角处的焊点采用高密度网格以提升求解精度. 使用热—力间接耦合的方式进行分析, 热循环载荷采用 IPC-9701 标准 TC3 等级: 温度 $-40 \sim 125$ $^{\circ}\text{C}$, 保持时间 10 min, 变温时间 20 min. 焊点在温度循环作用下的失效模式是蠕变和疲劳的共同作用, 使用 Anand 本构模型描述焊点在低应力状态下的粘塑性行为, 研究表明在仿真计算中, 焊点的应力和塑性应变累积一般在 6 个循环内达到稳定, 因此取 8 个热循环周期进行计算。

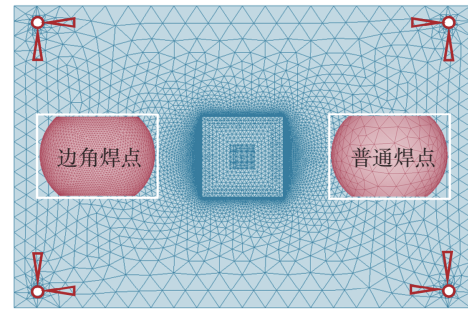


图 2 有限元模型

Fig. 2 Model of finite element analysis

电子封装焊点的寿命预测有基于应变或基于能量的多种模型, 其中 Engelmaire 修正的 Coffin-Manson 模型进一步考虑了热循环载荷的周期、温度差等参数, 具有着更高的准确性^[18-19], 即

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \gamma}{2 \varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (5)$$

$$\Delta \gamma = \sqrt{3} \Delta \varepsilon \quad (6)$$

$$c = -0.442 - 6 \times 10^{-4} T_m + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1 + f) \quad (7)$$

式中: N_f 为热疲劳失效的平均寿命; $\Delta \gamma$ 为等效非弹性剪切应变幅; $\Delta \varepsilon$ 为等效非弹性总应变幅; ε_f 为疲劳延性系数; c 为疲劳延性指数; T_m 为热循环的平均温度 ($^{\circ}\text{C}$); f 为循环频率 (次/天)。

在热循环仿真结果中提取等效非弹性总应变范围 $\Delta \varepsilon$ 代入 Engelmaire 模型中, 即可得焊点的理论寿命。

2 试验结果与讨论

2.1 焊点形态仿真

阻焊层对焊点形态的影响, 如图 3 所示, 首先在不施加阻焊层边界条件下确定表 1 中 36 组阻焊层参数是否会对焊点形态产生影响, 根据 Surface

Evolver 得到的焊点形态, 观察钎料与阻焊层是否相交, 当 h 较大 d 较小时见图 3 (a), 阻焊层与钎料相交, 此时阻焊层影响焊点形态, 需要进一步的仿真计算. 当 h 较小 d 较大时见图 3 (b), 阻焊层与钎料不接触, 此时阻焊层不影响焊点形态. 为了验证焊点形态仿真的准确性, 按仿真参数进行试验, 焊点真实形态与仿真结果如图 4 所示, 可见二者得到的焊点形态完全一致, 验证了焊点形态仿真的准确性. 最终确定的 8 组对焊点形态有影响的阻焊层参数组合见表 2 中参数 2~ 参数 9, 参数 1 为设置的阻焊层对焊点形态无影响时的对照组.

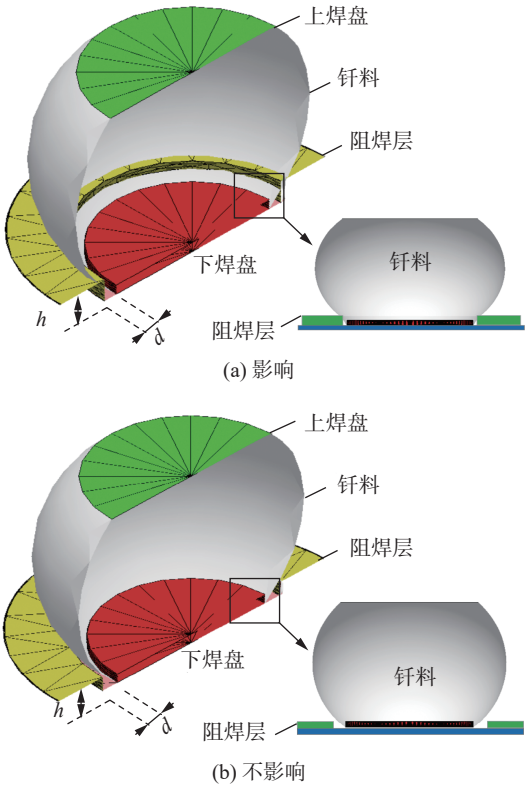


图 3 阻焊层对焊点形态的影响
Fig. 3 Effect of solder mask layer on solder joint shapes.
(a) effect; (b) no effect

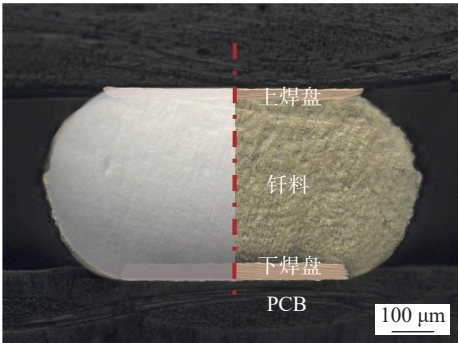


图 4 焊点形态仿真的试验验证
Fig. 4 Verification of solder joint shape simulation
施加阻焊层边界条件, 使钎料与阻焊层不润

表 2 影响焊点形态的阻焊层参数组合
Table 2 Parameters of solder mask layer affecting solder joint shapes

参数序号	阻焊层厚度 h/mm	阻焊层与下焊盘间距 d/mm
1	20	0.07
2	54	0.05
3	67	0.05
4	80	0.05
5	67	0.06
6	80	0.06
7	67	0.07
8	80	0.07
9	80	0.08

湿, 进一步计算上述 8 组参数下的焊点形态, 如图 5 所示, 随着 h 的增大和 d 的减小, 阻焊层会挤压焊点, 使得下焊盘处的钎料量减少, 导致焊点高度的增加和宽度的减小, 并影响上下焊盘与钎料外轮廓的夹角. 一系列研究表明, 球栅阵列器件在热循环载荷下的失效位置为钎料与上焊盘或下焊盘接触的边角处^[10-13], 因此阻焊层对于此处焊点形态的改变将显著影响焊点的可靠性, 进一步分析有限元仿真十分必要.

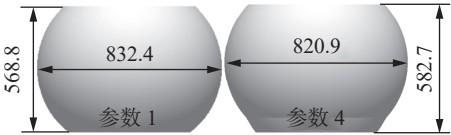


图 5 不同阻焊层参数下的焊点形态 (mm)
Fig. 5 Solder joint shapes under different parameters of solder mask layer

2.2 板级热循环仿真

为确定热循环变温阶段对 COTS 器件焊点可靠性的影响, 提取升温阶段的温度分布如图 6 所示, 在变温阶段整板温差为 $2.65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 焊点的温差仅为 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$, 导致焊点温差显著小于整板温差的原因是钎料的导热系数较高, 在变温的各个时刻温差基本保持不变, 焊点形态的差异对器件温度场几乎无影响. 在升温阶段, 焊点温度从中心至四周呈减小趋势, 降温阶段反之, 板级器件较小的温差表明因温度梯度产生的应力梯度较小.

进一步对不同阻焊层参数的器件焊点进行应力—应变分析, 其中 4 号阻焊层参数下的焊点应力幅值最大, 为 32.4 MPa , 小于钎料的断裂强度, 其

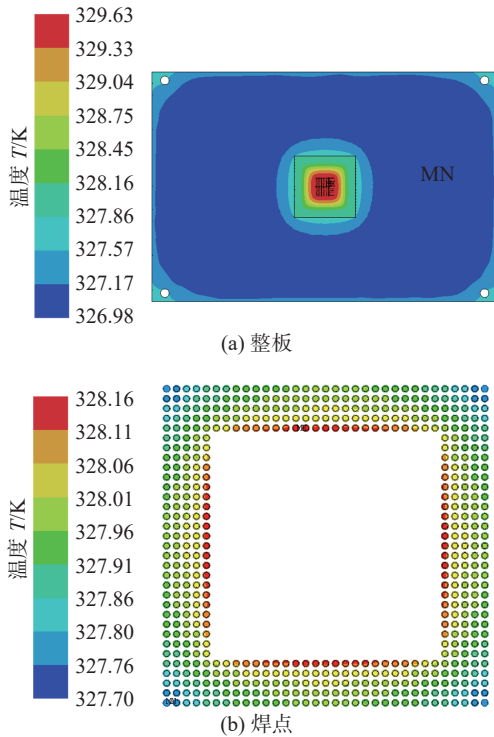


图 6 热循环过程中的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of solder joints with thermal cycling. (a) PCB; (b) solder joint

热循环过程中焊点的最大应力如图 7 所示,热循环过程中单个焊点的峰值应力出现在与上焊盘接触的边角处,这是由于异质连接界面因材料热膨胀系数产生的热失配.应力水平最高的焊点位于器件的边角处,这是由于边角处的应力集中效应,应力最大时刻为极低温时刻,这是由于该互连材料体系在极低温的材料热膨胀系数差异最大,不同阻焊层参数下的焊点在热循环过程中的应力—应变分布状态相近,但应力—应变幅值存在一定差异.

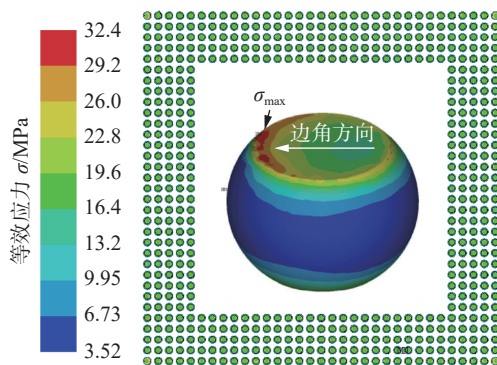


图 7 焊点应力分布

Fig. 7 Stress distribution of solder joints

提取危险焊点的应力最大处在热循环过程中的变化曲线,如图 8 所示,可见焊点应力呈周期性变化并在第 2 个循环后达到稳定,结合焊点的塑性

应变曲线,如图 9 所示,焊点的塑性应变呈周期性变化,提取最后一个循环中的焊点等效非弹性总应变幅 $\Delta\epsilon$,代入到式 (5) 至式 (7) 中计算得到不同阻焊层参数下的焊点热循环寿命.

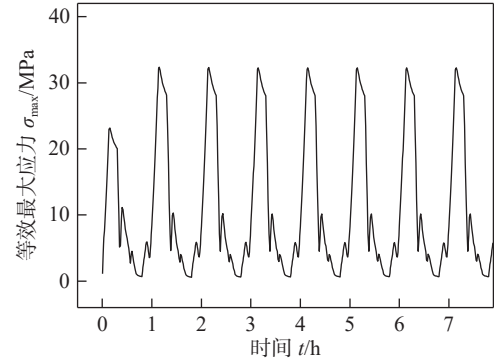


图 8 热循环过程中的焊点最大应力

Fig. 8 Maximum stress of solder joints with thermal cycling

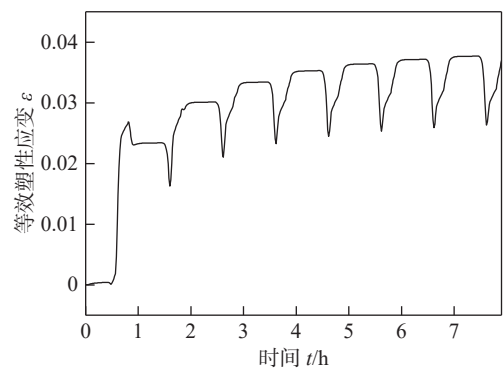


图 9 热循环过程中的焊点塑性应变

Fig. 9 Plastic strain of solder joints with thermal cycling

不同阻焊层参数下的大尺寸 COTS 器件焊点热循环寿命见表 3,可见随着 h 的增大和 d 的减小,焊点的应力增大,寿命逐渐降低,当阻焊层与焊点不接触时,焊点的热循环寿命最高,为 2 342 个循环

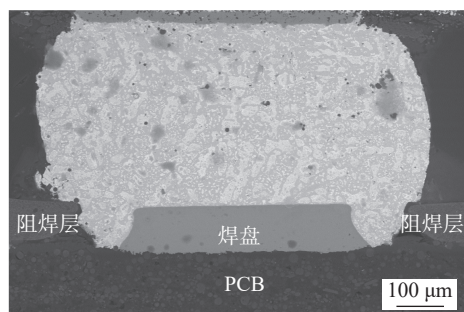
表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding experiment paraments

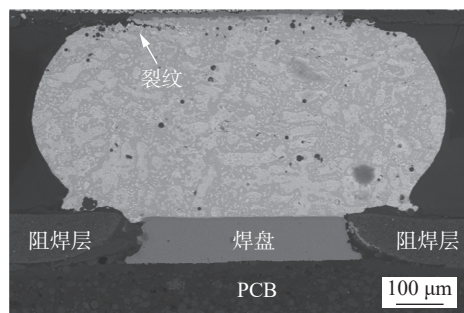
参数序号	塑性应变 ϵ	热循环寿命 N_f
1	0.011 584 9	2 342
2	0.011 618 0	2 326
3	0.012 935 8	1 792
4	0.014 569 5	1 342
5	0.011 624 8	2 323
6	0.015 993 9	1 070
7	0.012 744 7	1 858
8	0.012 442 6	1 969
9	0.013 557 2	1 599

周期,较最低寿命提升了 118%.导致热循环寿命差异的原因是阻焊层对焊点应力集中部位形态的影响,改变了焊点的应力—应变幅值。

为验证仿真结果,采用阻焊层不影响焊点形态、阻焊层与焊盘接触两种极端条件下的阻焊层参数进行焊点热循环可靠性试验,在 500 个热循环周期后边角焊点的金相照片如图 10 所示,可见阻焊层对焊点形貌无影响的焊点在 500 个循环后连接良好,无分层、裂纹等缺陷的出现见图 10(a);而受阻焊层影响的焊点在边角方向出现了开裂,与有限元仿真得到的最大应力处吻合(图 7),该结果证明了有限元仿真个阻焊层参数优化的正确性。



(a) 无阻焊层影响的焊点



(b) 受阻焊层影响的焊点

图 10 500 个温度循环后的焊点 SEM

Fig. 10 SEM of solder joints after 500 thermal cycles. (a) without the influence of solder mask; (b) with the influence of solder mask

3 结论

(1) 焊点高度随 h 增加和 d 减小而增大,焊点宽度随 h 增加和 d 减小而减小。

(2) 阻焊层的参数决定了焊点形态从而影响焊点在热循环中的应力—应变状态,导致了焊点热循环可靠性的差异。

(3) 优化后的焊点预测寿命提升了 118%,且在 500 个温度循环试验后界面连接良好,证明了通过阻焊层设计提升 COTS 器件焊点可靠性的显著效果。

参考文献

- [1] DI R R, BRANDOLINI E, SPARVIERI G, *et al.* Best practices on adopting open-source and commercial low-cost devices in small satellites missions[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 211: 37 – 48.
- [2] MATTHEWS P. The great debate: should COTS components be used in space[J]. *Microwave Journal*, 2022, 65(10): 80.
- [3] BUDROWEIT J, PATSCHEIDER H. Risk assessment for the use of COTS devices in space systems under consideration of radiation effects[J]. *Electronics*, 2021, 9(10): 1008.
- [4] ELBURN E, SOOD B, DAS D, *et al.* Utilization of data and models for COTS part reliability assessment[C]//2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS), 2019: 751 – 758.
- [5] CHAN S. Reliability evaluation of COTS integrated circuits for military and space applications[J]. *Journal of Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 2012, 40(12): 1093 – 1098.
- [6] 杨东升, 张贺, 冯佳运, 等. 电子封装微纳连接技术及失效行为研究进展 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(11): 126 – 136.
- YANG Dongsheng, ZHANG He, FENG Jiayun, *et al.* Research progress on micro nano connection technology and failure behavior in electronic packaging[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(11): 126 – 136.
- [7] XIAN J W. Cu_6Sn_5 crystal growth mechanisms during solidification of electronic interconnections[J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 540 – 551.
- [8] BAI T, QIAO Y, WANG X, *et al.* Finite element method modeling of temperature gradient-induced Cu atomic thermo migration in Cu/Sn/Cu micro solder joint[J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 129: 114479.
- [9] FANG Y. Coupling effects of mechanical vibrations and thermal cycling on reliability of CCGA solder joints[J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, 55(11): 2396 – 2402.
- [10] MAO M, WANG W, LU C, *et al.* Machine learning for board-level drop response of BGA packaging structure[J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 134: 114553.
- [11] LIU Y, YAO C, SUN F, *et al.* Numerical simulation of reliability of 2.5D/3D package interconnect structure under temperature cyclic load[J]. *Microelectronics Reliability*, 2021, 125: 114343.
- [12] SINGH B, MENEZES G, MCCANN S, *et al.* Board-level thermal cycling and drop-test reliability of large, ultrathin glass BGA packages for smart mobile applications[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2017,

7(5): 726 – 733.

- [13] LI G, FENG J, TIAN Yanhong, *et al.* Finite element analysis of underfill effect on the CBGA package reliability under thermal cycling[C]//International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2022.
- [14] 撒子成, 王尚, 冯佳运, 等. SiP 器件组装焊点形态预测及其随机振动可靠性仿真研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(2): 276 – 283.
- SA Zicheng, WANG Shang, FENG Jiayun, *et al.* Simulation of SiP solder joint geometry and random vibration reliability prediction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(2): 276 – 283.
- [15] LI G, WANG S, TIAN Y, *et al.* Solder joint shape optimization and thermal-mechanical reliability improvement for microwave RF coaxial connectors[J]. *Microelectronics Reliability*, 2024, 154: 115345.
- [16] 杨雪霞, 孙勤润, 张伟伟. 基于响应曲面法的 BGA 焊点结构参数优化设计 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(11): 36 – 41.
- YANG Xuexia, SUN Qinrun, ZHANG Weiwei. Optimization design of BGA solder joint structure parameters based on response surface methodology[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(11): 36 – 41.
- [17] WU W, LI G, WANG S, *et al.* Study on the solder joint reliability of new diamond chip resistors for power devices[J]. *Coatings*, 2023, 13(4): 748.
- [18] PECHT M. Creep fatigue models of solder joints: A critical review[J]. *Microelectronics and Reliability*, 2016, 59: 1 – 12.
- [19] LEE W W, NGUYEN L T, SELVADURAY G S. Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale packages[J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, 40(2): 231 – 244.
- 第一作者: 李庚, 博士研究生; 主要研究方向为电子封装可靠性与印刷电子; Email: li-geng@hit.edu.cn.
- 通信作者: 田艳红, 博士, 教授; Email: tianyh@hit.edu.cn.

(编辑: 刘启明)

(上接第 34 页)

- [12] WANG Q, JIAO W, WANG P, *et al.* A tutorial on deep learning-based data analytics in manufacturing through a welding case study[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 63: 2 – 13.
- [13] CHENG Y, WANG Q, JIAO W, *et al.* Detecting dynamic development of weld pool using machine learning from innovative composite images for adaptive welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 908 – 915.
- [14] 刘秀航, 叶广文, 黄宇辉, 等. 激光-MIG 复合焊根部驼峰缺陷预测 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(12): 47 – 52, 99.
- LIU Xiuhang, YE Guangwen, HUANG Yuhui, *et al.* Root hump defect prediction for laser-MIG hybrid welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(12): 47 – 52, 99.
- [15] JIAO W, WANG Q, CHENG Y, *et al.* Prediction of weld penetration using dynamic weld pool arc images[J]. *Welding Journal*, 2020, 99(11): 295S – 302S.
- [16] GAO P, WU Z, WANG Y, *et al.* Method for monitoring and controlling penetration of complex groove welding based on online multi-modal data[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2024, 35(3): 1247 – 1265.
- [17] WU D, HU M, HUANG Y, *et al.* In situ monitoring and penetration prediction of plasma arc welding based on welder intelligence-enhanced deep random forest fusion[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 153 – 165.
- [18] LIU T, BAO J, ZHENG H, *et al.* Learning semantic-specific visual representation for laser welding penetration status recognition[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(2): 347 – 360.
- 第一作者: 洪宇翔, 博士, 副教授; 主要从事机器人与智能化焊接方面的科研和教学工作; Email: hongyuxiang@cjlu.edu.cn.

(编辑: 郑红)