

CLGA 封装器件高可靠性装联工艺研究

张咪藏 徐伟玲 权亮 赵亚娜 杨瑞栋

(北京空间机电研究所, 北京 100089)

文 摘 为了保证陶瓷栅格阵列 (CLGA) 封装器件装联可靠性, 本文以 CLGA 封装器件为研究对象, 采用 $Pb_{90}Sn_{10}$ 焊球、 $Pb_{90}Sn_{10}$ 与 $Pb_{80}Sn_{20}$ 焊柱、Be-Cu/Sn₆₀Pb₄₀ 微弹簧圈 (MCS) 和 $Sn_{63}Pb_{37}$ 共晶焊料, 实现了对 CLGA 封装器件的二次工艺设计, 并采用回流焊工艺方法将器件装联在印制电路板上。通过有限元分析及试验相结合的方法, 探索了适用于此类器件的高可靠性装联工艺。对 3 种元器件建立有限元仿真模型来模拟应力应变情况, 同时对印制板组件进行了力学、热学实验分析。结果表明, 仿真发现弹簧所受的应力和应变最小, 焊柱其次, 焊球最大; 试验验证与仿真结果相符, 植弹簧的器件可靠性最高, 植焊柱的其次, 植焊球的最差; 500 个温度循环与振动试验表明植弹簧器件无裂纹, 植焊柱、植焊球的器件出现裂纹, 焊点金相剖切与 SEM 能谱显微组织分析均符合航天标准要求。植焊球、植焊柱的器件焊点断裂失效位置均出现在焊球、焊柱与钎料印制板接触的位置, 且裂纹处金属间化合物 (IMC) 层厚度与能谱成分未见异常。

关键词 陶瓷栅格阵列, 植球, 植柱, 植弹簧, 高可靠性

中图分类号: TN605

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.010

High Reliability Assembly Process of CLGA Packaged Devices

ZHANG Meicang XU Weiling QUAN Liang ZHAO Yana YANG Ruidong

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100089)

Abstract In order to ensure the reliability of CLGA (Ceramic Land Grid Array) packaged devices, in this paper, secondary process design of the CLGA packaged devices were investigated by using $Pb_{90}Sn_{10}$ solder ball, $Pb_{90}Sn_{10}$ and $Pb_{80}Sn_{20}$ solder column, and Be-Cu/Sn₆₀Pb₄₀ Micro-Coil Spring (MCS) and $Sn_{63}Pb_{37}$ eutectic solder paste to assemble the devices on the printed circuit board through reflow soldering process. Through combination of finite element analysis and test, a high reliability assembly process suitable for such devices was explored. The finite element simulation models were established for the three components to simulate the stress and strain level. Mechanical and thermal experiments of the printed board assemblies were carried out. The simulation found minimum stress and strain in the micro-coil spring, lower stress and strain in the solder column, and maximum stress and strain in the solder ball. The research showed that the experimental verification was consistent with simulation results. The attaching Micro-Coil Spring devices had the highest reliability, whilst the attaching solder column devices had lower reliability, and the attaching solder ball devices had the worst. There were no cracks in the attaching micro-coil spring devices after 500 thermal cycles and vibration test. But some cracks appeared in the attaching solder column devices and the attaching solder ball devices. Solder joint metallographic microsection and SEM energy spectrum microstructure analysis met the requirements of aerospace standard. The fracture failure positions of the attaching solder ball and the attaching solder column devices all appeared in the touching position between the solder ball, the solder column and the printed circuit board. The thickness of the intermetallic compounds (IMC) layer and energy spectrum composition at the crack were normal.

Key words CLGA (Ceramic Land Grid Array), Attach solder ball, Attach solder column, Attach micro-coil spring, High reliability

收稿日期: 2022-02-10

第一作者简介: 张咪藏, 1989 年出生, 硕士, 主要从事宇航电子产品装联工艺与高可靠性研究工作。E-mail: 1060303105@qq.com

0 引言

随着电子封装行业的不断发展,大功率、高集成度、微型化、高可靠性的LGA封装器件在宇航电子产品中得到了越来越多的应用。目前,某陶瓷栅格阵列(Ceramic Land Grid Array, CLGA)封装器件,焊盘数量为400个,尺寸为21.06 mm×21.06 mm×5.07 mm,间距为1 mm。该器件陶瓷本体的线胀系数为 $6.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,而印制板FR4材料的线胀系数为 $(15 \sim 21) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[1],两者差异较大。ECSS^[2]标准中提到:当两者的线胀系数相差约 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时,焊点可靠性会受到明显影响。文献[3]指出CCGA(Ceramic Colum Grid Array)封装是CBGA(Ceramic Ball Grid Array)封装的发展,采用钎料柱来替代球栅阵列,更能缓解由热失配引起的氧化铝陶瓷基板与印制板之间的剪切应力。IPC-7095D^[4]描述,在其他条件相同的情况下,3种焊柱高度为0.41、0.76、2.29 mm,所对应的CBGA焊点疲劳寿命之比为1:4:45。林鹏荣等^[5]研究得出CCGA焊点可靠性要高于CBGA焊点,边角处焊点在温度循环过程中应力最大,最先开裂。研究表明,大尺寸CCGA焊点的可靠性无法满足高冲击试验条件,NASA最早推出了用微弹簧圈来替代传统的焊柱。结果显示微弹簧圈能够承受最大 $5 \times 10^4 g$ 的机械冲击^[6],但目前国内很少研究。

本文以CLGA封装器件为研究对象提出了一种新的装联工艺技术:采用 $\text{Pb}_{90}\text{Sn}_{10}$ 焊球、 $\text{Pb}_{90}\text{Sn}_{10}$ 与 $\text{Pb}_{80}\text{Sn}_{20}$ 焊柱、 $\text{Be-Cu/Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$ 微弹簧圈(MCS)和有铅 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ 共晶焊料,实现了对CLGA封装器件的二次工艺设计,形成了CBGA/CCGA封装器件,并采用回流焊工艺方法将器件装联在印制板上。通过有限元分析及试验相结合的方法,探索了适用于此器件的高可靠性装联工艺。

1 钎料的力学行为及热循环疲劳理论

钎料的力学行为分析即考察在整个载荷加载过程中钎料内部的应力应变情况。目前很多文献中选用Darveaux模型对各类SnPb钎料的蠕变行为进行了描述,应用于有限元数值分析中,取得了与实验结果相符的结论。热循环载荷作用下,共晶钎料的蠕变行为由如下本构方程描述^[7]:

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = C_4 \frac{G}{T} \left[\sinh \left(\alpha \frac{\sigma}{G} \right) \right]^n \exp \left(-\frac{Q}{kT} \right)$$

$$G = G_0 - G_1(T - 273)$$

式中, $\frac{d\varepsilon_c}{dt}$ 为等效蠕变应变率; C_4, α 为材料常数; σ 为Von Mises应力; n 为蠕变硬化指数; Q 为蠕变激活能; k 为Boltzmann常数; T 为开氏温度。

蠕变变形材料参数如表1所示^[7]。

表1 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ 钎料蠕变材料参数

G_0/GPa	$G_1/\text{GPa} \cdot \text{K}^{-1}$	$C_4/\text{K} \cdot (\text{s} \cdot \text{MPa})^{-1}$	α	n	$Q/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
13.1	0.0558	8.28	1300	3.3	60

2 仿真分析

2.1 模型建立

采用有限元分析法,根据实际焊盘尺寸、基板厚度、印制板厚度等参数,按照材料参数对焊球/焊柱/微弹簧焊点分别建立模型,仿真模型见图1所示。

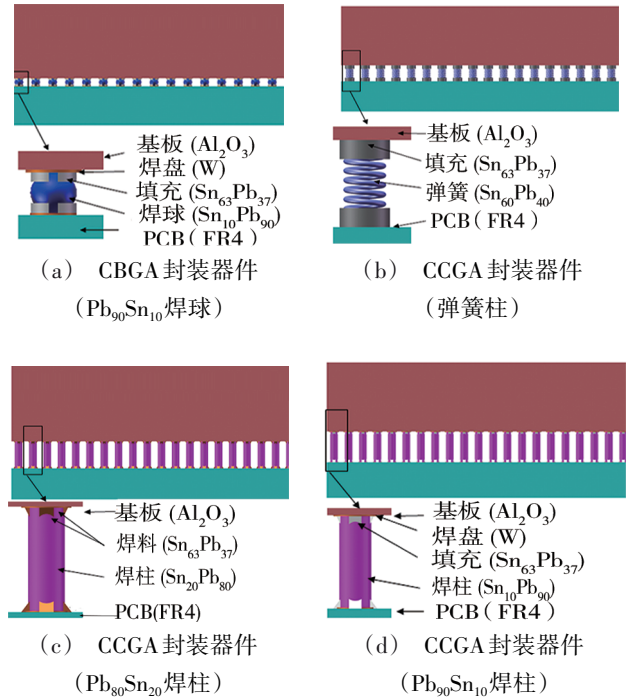


图1 仿真模型

Fig. 1 Simulation model

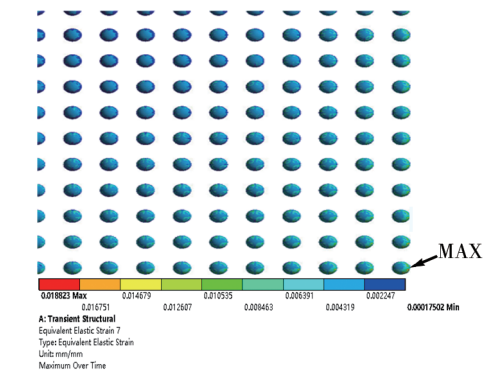
2.2 载荷施加与仿真结果

对基板中心点与竖直线施加位移约束,并结合宇航电子产品力、热试验条件,对CLGA封装器件焊接在印制板上后进行力学与热学仿真分析,模拟3种元器件在力、热试验条件下的应力应变情况。对印制板组件进行温度循环试验与振动试验载荷施加与网格划分,环境试验条件如下:(1)热循环试验, $-55 \sim 100^{\circ}\text{C}$,温变速率不超 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$,温度达极限值时保持时间15 min,每个循环1 h,500个温度循环试验考核;(2)正弦及随机振动试验按QW1263A^[8]进行。

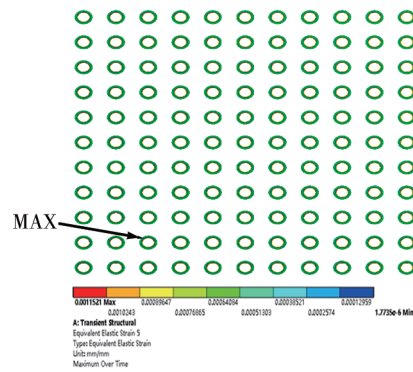
结果显示: $\text{Pb}_{90}\text{Sn}_{10}$ 焊球的最大等效应力与应变位于尖角处; $\text{Pb}_{90}\text{Sn}_{10}$ 焊柱的最大等效应力与应变位于中心线上距尖角两个焊柱单位处; $\text{Pb}_{80}\text{Sn}_{20}$ 焊柱的最大等效应力与应变位于焊柱的尖角处;弹簧的最大等效应力位于对称边界距中心约3/5处,最大等效应变位于距中心约4/5处。4个模型的最大应力与应变均出现在温度最低点,如图2所示。

依据蠕变本构方程,考虑到焊接工艺过程中残余应力的影响,每个温度循环周期内低温开始阶段是整体应力水平最高的时期。图2(e)中仿真结果与其符合。结合图1与图2分析植弹簧、植球、植柱的

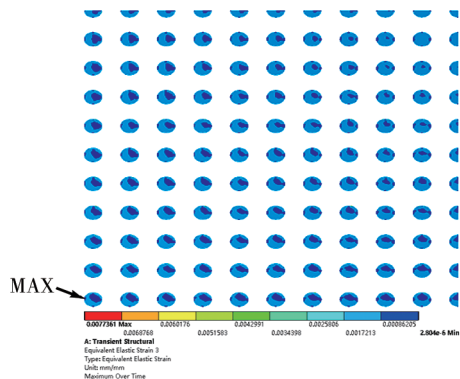
器件应力、应变仿真数据发现:焊柱的应力和应变最小,弹簧其次,焊球最大;从焊盘下、填充焊膏、焊盘上及焊球/柱/弹簧综合所受应力来看,弹簧的应力和应变最小,焊柱其次,焊球最大。



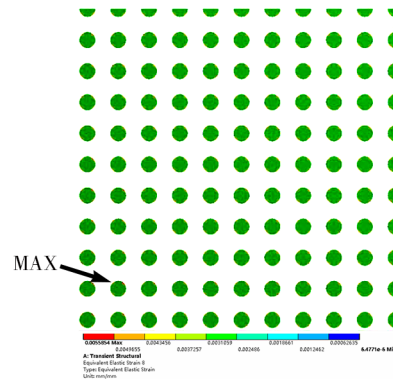
(a) CBGA($Pb_{90}Sn_{10}$ 焊球)最大等效应变



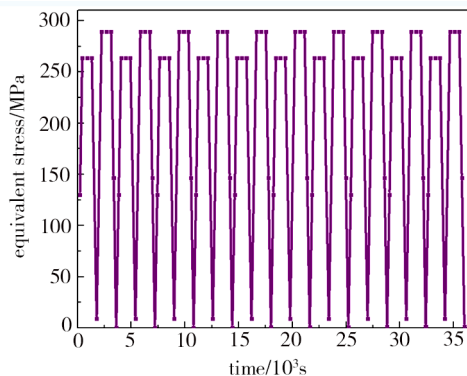
(b) CCGA(弹簧柱)最大等效应变



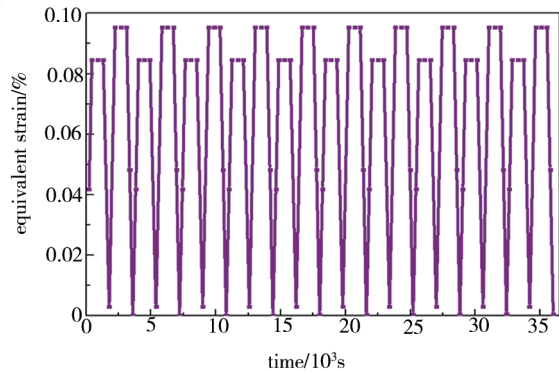
(c) CCGA($Pb_{80}Sn_{20}$ 焊柱)最大等效应变



(d) CCGA($Pb_{90}Sn_{10}$ 焊柱)最大等效应变



(e) CCGA($Pb_{90}Sn_{10}$ 焊柱)温度循环周期内等效应力



(f) CCGA($Pb_{90}Sn_{10}$ 焊柱)温度循环周期内等效应变

图2 仿真最大应力与应变

Fig. 2 Simulated maximum stress and strain

3 试验结果与分析

3.1 印制板组件试样制作

通过优化再流焊温度曲线设置、专用工装设计、钢网设计等技术研究,完成了CLGA封装器件植球/柱/弹簧的试验。器件检测合格后贴装在印刷有锡膏($Sn_{63}Pb_{37}$)的印制板上。钢网厚度为0.18 mm,温度曲线参数设置如表2。元器件型号规格与位号关系

见表3。印制板组件试样焊接完成进行了水清洗,检验合格,试验样件见图3。

表2 印制板装联温度参数

Tab. 2 PCB assembly temperatures		℃								
温区	ZONE							冷却		
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
上下	140	150	160	150	195	275	245	80	50	30

表3 元器件型号规格与位号关系

Tab. 3 Correlation between component model specification and tag number

元器件型号规格	位号	样品数量	备注
CBGA(Pb ₉₀ Sn ₁₀ 焊球)	U1_6	1个	
CCGA(Pb ₉₀ Sn ₁₀ 焊柱)	U1_4	1个	回流焊接工艺
CCGA(弹簧柱)	1#	1个	
CCGA(Pb ₈₀ Sn ₂₀ 焊柱)	2#	1个	

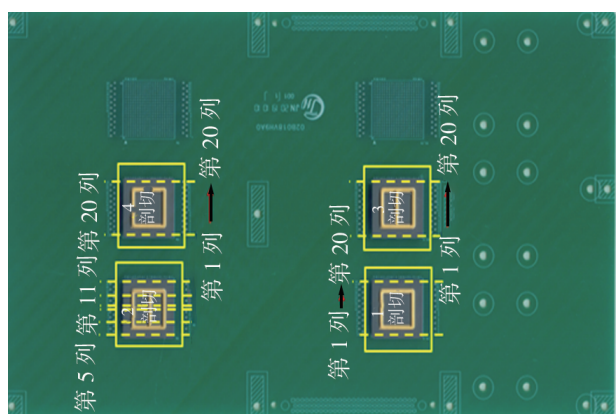


图3 印制板组件试样

Fig. 3 Printed board assembly sample

3.2 印制板组件环境试验后分析

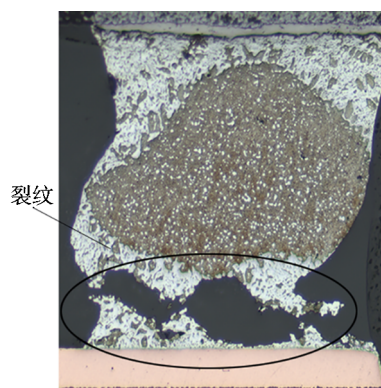
印制板组件试样按照2.2的环境试验要求进行了振动与温度循环试验。

3.2.1 电性能测试

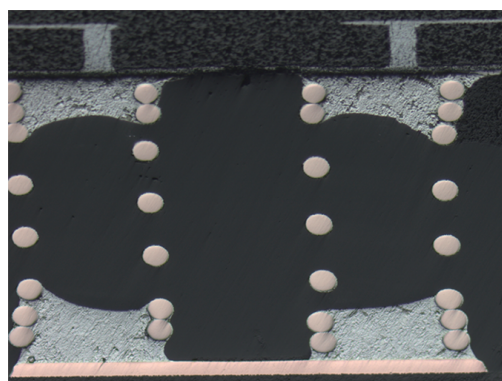
电性能检测初步判断:经过500个温度循环后,在室温下测试,图3印制板组件的U1_6的第1~4排、第16~20排,2#的第2排、第20排电性能测试出现异常,阻抗连续变化大于10%。

3.2.2 金相显微镜剖切分析

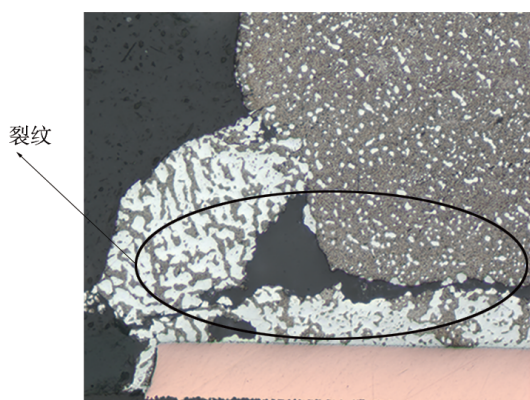
结合图3环境试验后对样品进行金相显微镜剖切分析发现:U1_6的第1、20排;U1_4的第1、20排;2#的第2、20排所检焊点存在开裂现象。1#器件均未见焊点开裂现象。其他裂纹位置均发生在焊球/柱与钎料印制板接触部位,具体见图4。环境试验后CBGA(Pb₉₀Sn₁₀焊球)/CCGA(弹簧柱)/CCGA(Pb₉₀Sn₁₀焊柱)/CCGA(Pb₈₀Sn₂₀焊柱)器件印制板端与器件端IMC层平均厚度分别为:0.596~1.675、0.564~1.563、0.584~1.507、0.535~1.340 μm,满足Q/QJB 235—2014的要求^[9]。SEM能谱分析显示印制板端焊点IMC层主要成分为Cu₆Sn₅,器件端IMC层主要成分为Cu、Sn、Ni、Pb元素(图5、图6),裂纹处的IMC层厚度与能谱成分未见异常。



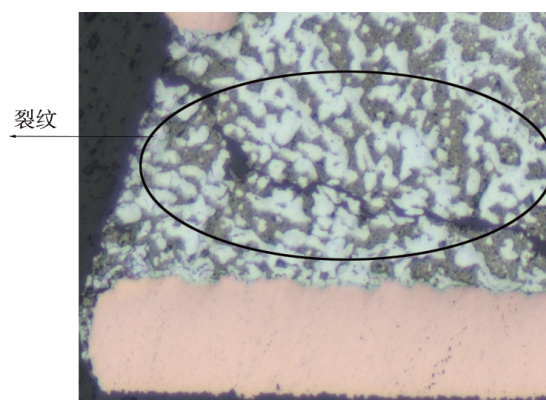
(a) CBGA(Pb₉₀Sn₁₀焊球)开裂



(b) CCGA(弹簧柱)未开裂



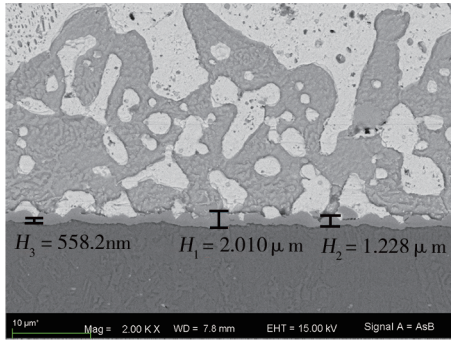
(c) CCGA(Pb₉₀Sn₁₀焊柱)开裂



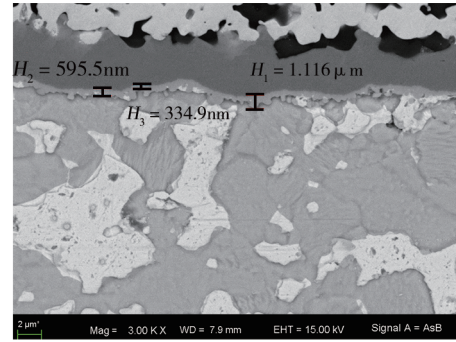
(d) CCGA(Pb₈₀Sn₂₀焊柱)开裂

图4 500个温度循环与力学试验后显微剖切图

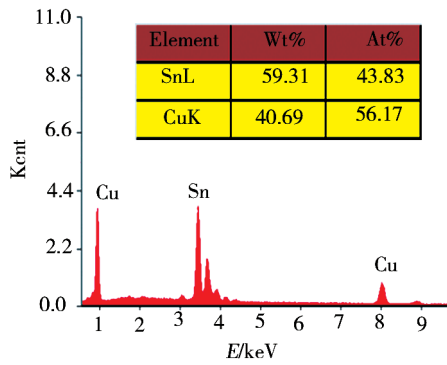
Fig. 4 Micrograph after 500 thermal cycles and mechanical tests



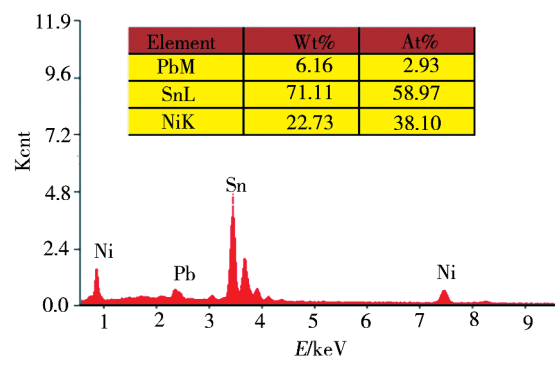
(a) 印制板端IMC层



(b) 器件端IMC层



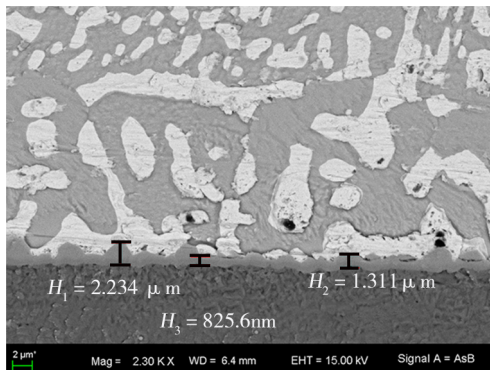
(c) 印制板端SEM成分



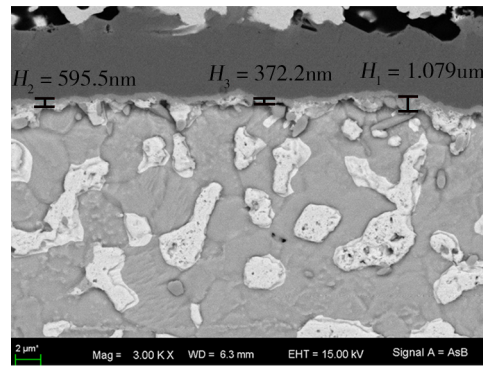
(d) 器件端SEM成分

图5 CCGA($Pb_{90}Sn_{10}$ 焊柱)器件(500个循环后)IMC层及SEM成分图

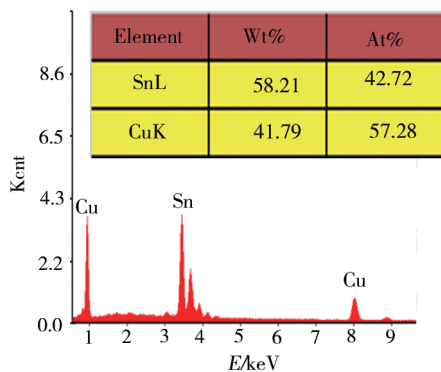
Fig. 5 IMC layer and SEM composition of CCGA($Pb_{90}Sn_{10}$ solder column)device (after 500 cycles)



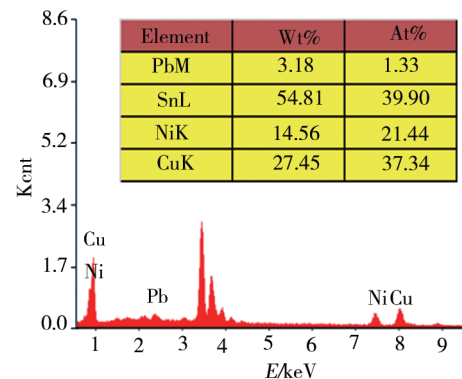
(a) 印制板端IMC层



(b) 器件端IMC层



(c) 印制板端SEM成分



(d) 器件端SEM成分

图6 CCGA(弹簧柱)器件(500个循环后)IMC层及SEM成分图

Fig. 6 IMC layer and SEM composition of CCGA(micro-coil spring)device (after 500 cycles)

4 结论

本研究为 CLGA 封装器件高可靠性装联提供了一种可行的方法,在航天产品中提出了植弹簧的工艺技术,达到了航天电子产品高可靠、高寿命服役的要求。

(1)仿真发现,弹簧所受的应力和应变最小,焊柱其次,焊球最大,试验验证与仿真结果相符;植弹簧后的器件可靠性最高,植焊柱的其次,植焊球的最差。

(2)环境试验后植球、植柱、植弹簧后的 CLGA 封装器件的印制板端与器件端 IMC 层平均厚度在 $0.535\sim 1.675\ \mu\text{m}$ 之间,满足 Q/QJB 235—2014 的要求。SEM 能谱分析印制板端焊点 IMC 层成分是 Cu_6Sn_5 ,器件端 IMC 层成分显示主要由 Cu、Sn、Ni、Pb 元素组成。

(3)500 个温度循环与振动试验后植球、植柱的器件焊点断裂失效位置均出现在焊球、焊柱与钎料印制板接触的位置,且裂纹处的 IMC 层厚度与能谱成分未见异常。

参考文献

- [1] 丁颖,周岭. CCGA 器件的结构特征及其组装工艺技术[J]. 电子工艺技术,2010,31(4):205-208.
- DING Ying, ZHOU Ling. Structural characteristics and assembly process technology of CCGA devices [J]. Electronic Process Technology, 2010,31(4):205-208.
- [2] High reliability soldering for surface mount and mixed technology. ECSS-Q-ST-70-38C-2008[S].
- [3] 张伟,孙守红,孙慧. CCGA 器件的可靠性组装及力学加固工艺[J]. 电子工艺技术,2011,32(6):349-352.
- ZHANG Wei, SUN Shouhong, SUN Hui. Reliability assembly and mechanical reinforcement technology of CCGA devices [J]. Electronic Process Technology, 2011, 32 (6) 349-352.
- [4] Design and assembly process implementation for BGAs. IPC-7095D-2019[S].
- [5] 林鹏荣,黄颖卓,练滨浩,等. CBGA、CCGA 器件植球/柱工艺板级可靠性研究[J]. 中国集成电路,2013,175(12):55-59.
- LIN Pengrong, HUANG YingZhuo, LIAN Binhao, et al. Research on board level reliability of ball/column planting process for CBGA and CCGA devices [J]. Chinese Integrated Circuit,2013,175(12):55-59.
- [6] Microcoil spring interconnects for ceramic grid array integrated circuits. NASA/TM-2011-216463[S].
- [7] 陈莹磊. 高密度大尺寸 CCGA 二级封装可靠性分析及结构设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:12-12.
- CHEN yinglei. Reliability analysis and structure design of high density and large size CCGA secondary package [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010:12-12.
- [8] 航天器电子电气产品表面安装技术要求. QW1263A-2017[S].
- Technical requirements for surface mounting technology of spacecraft electronic and electrical products. QW1263A-2017[S].
- [9] 航天电子电气产品有铅、无铅混合再流焊技术要求. Q/QJB 235-2014[S].
- Technical requirements for lead and lead-free hybrid reflow soldering of aerospace electronic and electrical products. Q/QJB 235-2014[S].