

航天电子产品 CQFP 封装器件加固工艺可靠性研究

王海超 文奕格 费义鹍 赵富贵 丁颖洁

(上海航天控制技术研究所, 上海 201100)

文 摘 CQFP封装器件大量应用在航天各型号电子单机中,其装焊质量影响整个电子单机可靠性。本文对CQFP封装器件不同加固工艺对焊点可靠性的影响进行试验分析。结果显示,使用EC-2216环氧胶加固CQFP器件四角位置满足宇航类电子产品高可靠装焊要求,该点胶方式最优;仅用GD414硅胶加固CQFP器件四角的加固方式抗振性能较差,必须使用硅胶填充印制板和器件陶瓷本体底部或四边之间间隙才能提升其抗振性能;但硅橡胶D04完全包裹并填充CQFP鸥翼型引脚时,温循试验过程中引线应力无处释放,焊点出现微孔聚集断裂,抗热疲劳性能大幅下降,因此此类器件使用硅胶加固时,应留出引线应力释放部位。本研究将为航天电子产品CQFP封装器件加固工艺提供参考。

关键词 CQFP加固工艺,机械应力,热疲劳,焊点可靠性

中图分类号: TG454

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.012

Reliability Study on Reinforcement Process of CQFP Packaged Devices for Aerospace Electronic Products

WANG Haichao WEN Yige FEI Yikun ZHAO Fugui DING Yingjie

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201100)

Abstract CQFP packaged devices were extensively applied in various aerospace electronic units, and their soldering quality directly impacted the reliability of the entire electronic system. This paper experimentally investigated the influence of different reinforcement methods for CQFP packaged devices on solder joint reliability. The results indicate that reinforcing the four corners of CQFP devices with EC-2216 epoxy adhesive satisfies the high-reliability soldering requirements of aerospace electronic products, making this the optimal adhesive method. Reinforcement of CQFP devices solely with GD414 silicone adhesive at the four corners exhibits inferior vibration resistance; therefore, silicone adhesive must be used to fill the gap between the printed circuit board and the ceramic body bottom or edges to enhance vibration resistance. However, when silicone rubber D04 completely encapsulates and fills the gull-wing leads of CQFP devices, lead stress cannot be relieved during temperature cycling tests, resulting in solder joint micro-void aggregation and cracking, thus significantly degrading thermal fatigue resistance. Therefore, when silicone reinforcement is applied to such devices, stress-relief regions must be provided around the leads. This study offers a valuable reference for the reinforcement techniques used in aerospace electronic products utilizing CQFP packaged devices.

Key words CQFP reinforcement process, Mechanical stress, Thermal fatigue, Solder joint reliability

0 引言

CQFP封装器件大量应用在航天各型号电子单机中,其扁平鸥翼型引脚阵列有利于应力释放,作为电子单机中运算、数据处理/存储核心器件,其装焊质量影响整个电子单机可靠性^[1-3]。CQFP器件重量较大,引脚间距较密导致引线尺寸较小,整体刚性不足,为保证器件抗振性能满足航天电子产品可靠性要求,需对器件点胶加固。各工艺标准对加固要求没有明确规定,不

同加固工艺对器件服役可靠性,如抗疲劳性能和抗振性能影响不明确,航天电子产品研制过程中易出现CQFP焊点失效和引线断裂问题。目前各项研究聚焦于如何提升器件抗振性能^[4-7],但对焊点热疲劳性能和抗振性能的综合研究较少,热疲劳失效多在产品研制末期出现,危害较大。因此通过研究CQFP封装器件不同加固工艺下焊点/引线失效机理,为宇航用该类器件加固工艺制定提供参考。

收稿日期: 2023-03-05

第一作者简介: 王海超, 1990 出生, 硕士研究生, 主要从事可靠性分析及数值模拟分析工作。Email: 1152268387@qq.com

本文对CQFP封装不同的加固方式进行可靠性实验,分析不同加固方式对器件焊点服役可靠性的影响,找出最优点胶加固方式,提高航天电子产品CQFP器件焊点可靠性。

1 试验

选取CQ208封装器件为实验对象,进行器件装焊及可靠性试验。参照QJ3086A—2016《表面和混合安装印制电路板组件的高可靠性焊接》和ECSS-Q-ST-70-38C^[8]要求,制定以下判别依据:经历可靠性测试后,焊点内未出现占比超过25%的裂纹为合格。

对样件引脚点胶加固,加固方式分为4种,见图1所示。加固方式(1):环氧胶固定CQFP器件本体四角位置,不允许碰触周围焊点和引脚,见图1(a);加固方式(2):CQFP器件本体四角点GD414硅橡胶,见图1(b);加固方式(3):器件本体四角点GD414硅橡胶,使用D04将器件四边和引脚全部灌封,见图1(c);加固方式(4):GD414固定四角,D04硅胶填充印制板和器件本体四周/底部之间的间隙,但器件侧引脚应力释放弯位置未填充D04硅胶,见图1(d)。固化后进行可靠性验证实验。D04硅橡胶和EC-2216部分材料参数见表1所示。

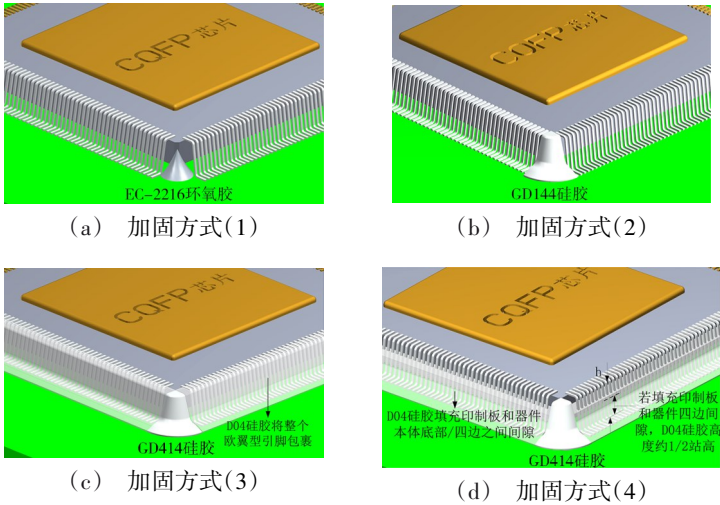


图1 CQFP器件不同点胶加固方式

Fig. 1 Different reinforcement process of CQFP devices

表1 D04和EC-2216部分物理性能

Tab. 1 Physical properties of D04 and EC-2216s

材料	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	热膨胀系数/ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	剪切强度/ MPa	断裂伸长 率/%
D04	1.03	300	5	>300
EC-2216	1.7	60	22	>5

可靠性验证试验包括温度循环、振动试验,温循环条件:−50~100℃,温变速率10℃/min,温循次数200次。振动条件见表2,各样件分配见下表3。

表2 随机振动实验条件

Tab. 2 The test conditions of random vibration

振动方向	振动量级			振动 时间
	频率范围/Hz	功率谱密度	Gravity Root Mean Square	
垂直于印制板	20 ~ 100	+6 dB/Oct	28.5	5 min
	100 ~ 500	1.0 g^2/Hz		
	500 ~ 2 000	−6 dB/Oct		
平行于印制板	20 ~ 100	+6 dB/Oct	27.1	5 min
	100 ~ 500	1.0 g^2/Hz		
	500 ~ 2 000	−6 dB/Oct		

表3 各CQFP样件状态

Tab. 3 Test conditions of exemplars

样件	焊接方式	加固方式	试验顺序
1#	回流焊接	加固方式(1)	振动+温循 (先振动后温循)
2#	手工焊接		
3#	回流焊接	加固方式(2)	
4#	手工焊接		
5#	回流焊接	加固方式(3)	
6#	手工焊接		
7#	手工焊接	加固方式(4)	
8#	回流焊接		

2 试验结果

2.1 试验后检查

可靠性试验后使用X光、显微镜等对器件焊点进行检查,并对器件鸥翼型引线焊点进行拉拔力测试。

图2为可靠性试验后1#~8#样件显微镜和X光照片。1#、2#样件引脚和焊点无损伤;3#、4#样件出现引脚断裂现象,但焊点无损伤;5#样件引线焊点外观无异常,而6#样件温循后焊点内部出现大量类似“空洞”的损伤,焊点内部有效连接面积不足焊点总面积

的1/3,焊点热疲劳性能大幅下降;7#、8#器件引线和焊点均无损伤。

以上结果证明,点胶方式(1)、点胶方式(2)、点胶方式(4)对手工焊接和回流焊接的样件的影响差异较小,而点胶方式(3)的加固方法将对焊点的抗热疲劳性能产生严重影响。而5#和6#样件X光和显微

镜检查呈现出不同结果,是因为回流焊接鸥翼型引线根部焊锡填充高度较高,根部焊料光滑过渡,根部位置焊点应力集中系数较小,外观上未发现焊点异常;而手工焊接样件根部焊锡量较少,温循过程中因不同材料间的热线胀系数不匹配导致的热应力在焊点根部局部放大,焊点出现损伤。

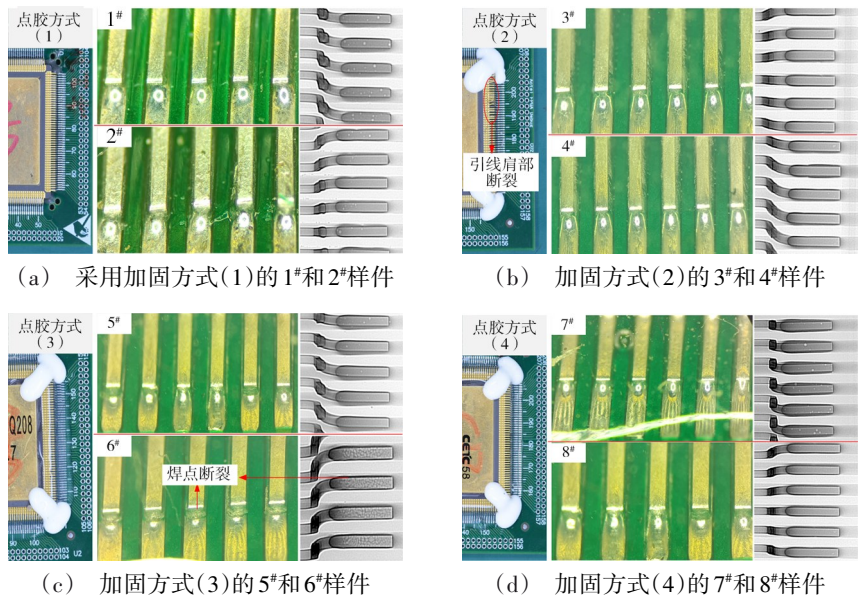


图2 各样件可靠性试验后焊点显微镜和X光检查

Fig. 2 Microscope and X-ray inspection after reliability test of various exemplars

2.2 拉力测试

现对1#、2#、5#、6#、7#、8#各样件焊点进行拉力测试,研究加速失效试验对不同加固方式下的焊点可靠性的影响,测试采用XYZTEC的sigma-lite推拉力测试仪,选用10 kg拉力测试针勾住引脚肩部部位进行引脚拉力测试,拉力测试如图3(a)所示。由2.1节可知,加固方式(2)无法满足抗振要求,因此3#和4#不再进行拉力试验。各样件单边测试点为20个引脚,对各样件数据取平均值并计算标准差,见图3(b)所示。

采用加固方式(1)的1#和2#样件焊点平均拉拔力分别超过12.5和11.5 N;采用加固方式(3)的5#样件焊点拉力平均值约10 N,最低拉力值约5.8 N,未出现焊点断裂情况,6#样件拉力平均值约8 N,拉力值标准差达到3.91,拉力最低值为0.2 N(该焊点已断开),5#和6#样件拉力标准差相对于其他样件显著增大;采用加固方式(4)的7#样件平均拉拔力测试值为13 N,8#样件平均拉拔力测试值为10.1 N,最低值约为9 N。

分析各样件拉力值,加固方式(1)和(4)的样件试验后焊点拉力均在10 N以上,且各样件焊点拉力值标准差较小,焊点强度一致性良好,满足航天电子产品高可靠装焊要求。采用加固方式(3)时,同一样件不同焊点拉力值出现了较大波动,部分焊点已断

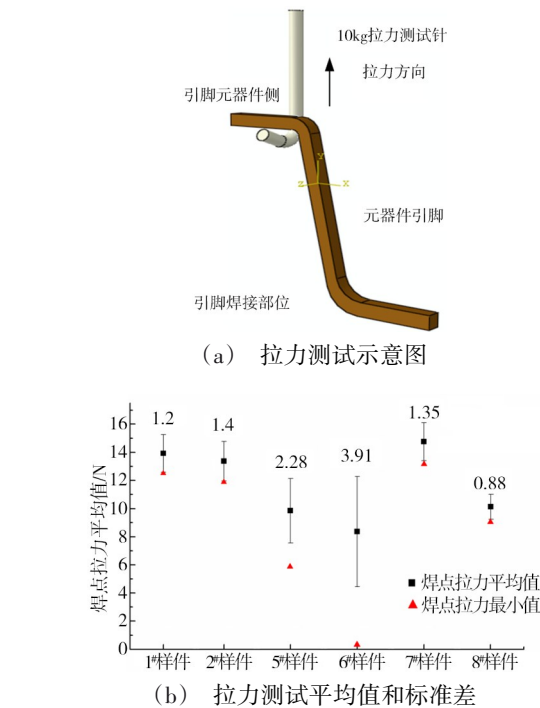


图3 各样件拉力测试和结果

Fig. 3 Tensile test and results of various samples

开,证明使用D04硅橡胶将整个焊点和引线包裹时,焊点抗疲劳性能大幅下降,其中部分焊点温循试验后拉力值大幅下降直至断裂。

同时从图3中可看出,采用回流焊接的样件焊点强度高于手工焊接样件。以5#(回流焊接)和6#(手工焊接)样件为例,试验过程中因硅胶热膨胀收缩对焊点施加较大的热应力,焊料的热疲劳性能显著降低,但5#样件未出现焊点断裂现象,X射线检查焊点内也未出现类似6#样件的疲劳损伤现象。

3 加固工艺可靠性影响分析

3.1 CQFP 器件加固工艺抗振性能分析

对振动试验后各焊点结果进行分析,结论如下。

点胶方式(1)使用环氧胶加固器件本体四角,环氧胶刚度大,可大幅抑制振动过程中器件与印制板之间的相对运动,将绝大部分器件振动导致的焊点受力转移至印制板上。

采用点胶方式(2)的3#和4#样件,硅胶弹性较大,器件本体与印制板之间仅有四角位置填充硅橡胶,填充面积过小,振动过程中四角位置硅胶无法支撑器件本体,导致器件引线承受绝大部分机械应力而出现断裂现象,无法满足航天电子产品抗振性能要求。

点胶方式(3)和加固方式(4)情况下器件本体底部/四边与印制板之间均有硅橡胶填充,硅橡胶作为缓冲,限制器件本体和印制板之间的相对位移,降低器件引脚受力。点胶方式(4)虽然减少了引脚上D04硅胶点胶量,点胶高度降低,将鸥翼型引线肩宽弯折部位露出,但器件本体和印制板之间硅橡胶填充效果不变,与点

胶方式(3)相比,对CQFP抗振性能影响较小。

以上结果和分析显示,点胶方式(1)、点胶方式(3)、点胶方式(4)均通过振动试验考核,未出现焊点或引线断裂现象,而点胶方式(2)无法满足QJ3086A—2016中焊点抗振性能要求。因EC-2216刚度大,振动过程中器件四角位置环氧将承受绝大部分机械应力,因此点胶方式(1)抗振性能更好,在板级PCB组件中适用性更强。

3.2 CQFP封装焊点抗热疲劳性能

实验后焊点X光特征和拉力测试(图2、3)结果显示,CQFP器件采用加固方式(3)加固时,焊点强度和抗疲劳性能大幅下降。现对2#、6#、8#样件焊点拉力测试后的印制板侧焊盘断面进行扫描和EDS分析,并进行数值仿真计算,研究该加固方式下焊点失效机理。

图4和图5分别为2#、6#样件焊点拉拔力测试后焊点断面SEM形貌,从2#样件SEM组织形貌来看,拉拔力测试过程中,引脚后跟部首先受力断裂,该处断口呈韧窝状,为韧性断裂,断裂位置主要成分为锡和铅;焊点中部断裂位置成分主要为锡、铅、铜、镍,也即该位置焊点断裂位置位于引脚和焊锡结合处(IMC层),此断裂形貌为典型的正常拉力断裂状态。结合2.2拉力测试结果分析,证明机械振动和温循热应力未对焊点造成损伤。8#样件SEM微观组织形貌和EDS结果与2#基本一致。

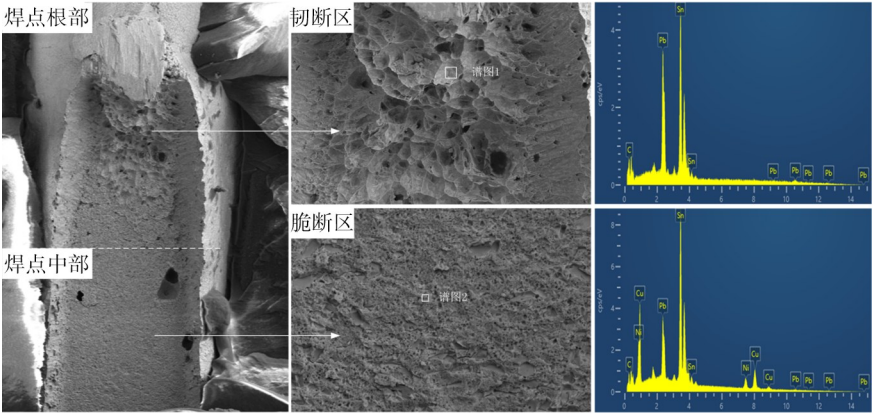


图4 2#样件的SEM照片

Fig. 4 SEM images of 2# samples

图5显示6#样件大部分位置均已断裂,焊点仅少部分位置引脚和焊盘连接。6#样件焊点内整个断面无金属光泽,大尺寸“韧窝”形貌显示该断裂为微孔聚集型断裂,与图3中X光照片中焊点“空洞”形貌相契合。6#样件焊点根部断裂面聚集众多小韧窝和大尺寸“韧窝”,EDS结果显示主要为Sn和Pb,也即在温循过程中,陶瓷器件本体、印制板两者之间CTE不匹配形成热应力,D04硅橡胶自身膨胀收缩(热胀系数约 $300 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)对引线施加的热应力,引线完全被D04硅胶包裹的情况下,热应力无法通过引线鸥翼型弯释放,6#样件根部焊料部

位存在应力集中,产生韧性断裂。根部产生裂纹后,裂纹尖端应力集中系数放大,在热应力作用下IMC层和焊料结合多个位置晶界上出现微孔聚集现象(图6所示为焊点中部位位置断面SEM图),在多次热循环条件下微孔聚集面积扩展,孔洞逐步生长,当裂纹发展到一定面积,孔洞相遇并形成大尺寸韧窝形貌,最终断裂面贯穿整个焊点。

使用ABAQUS软件对点胶加固方式(3)、加固方式(4)在温循过程中焊点应力分布情况仿真。仿真模型见图7(a),应力分布云图见图7(b)、图7(c)所

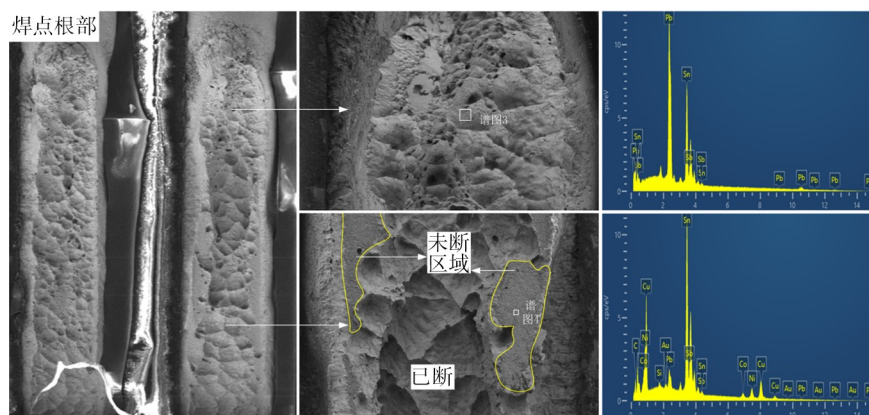


图5 6#样件的SEM照片

Fig. 5 SEM images of 6# samples

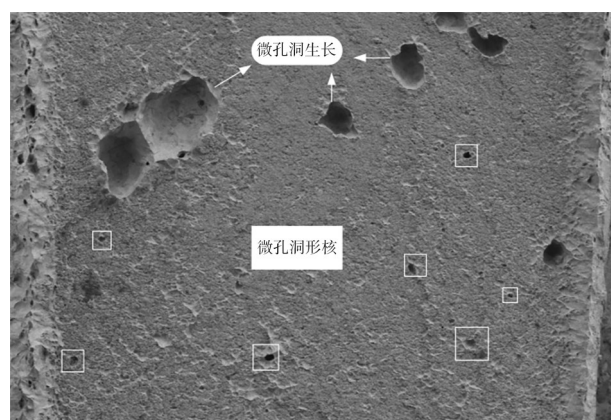


图6 焊点内微孔洞形核与生长

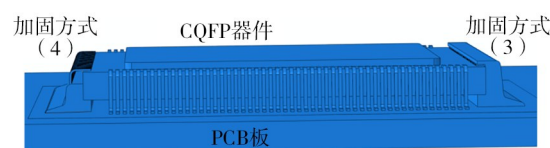
Fig. 6 Nucleation and growth of microporous hole in the solder joint

示。结果显示,加固方式(4)中引脚应力释放弯处未灌封,硅胶在温循中产生的热应力可通过自身变形和引脚应力释放弯释放,引脚和焊点内应力小于3 MPa;而采用加固方式(3)时,引脚内侧灌封的D04硅

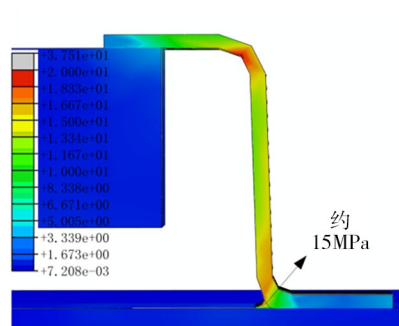
胶温循过程中导致的热应力全部施加在引脚和焊点上,焊点承受的最大应力约15 MPa,焊点内部在较大的低应力状态下经历多次温循后产生不可逆的疲劳损伤。仿真结果与图5、6中疲劳损伤焊点断面SEM分析结果一致。

对比5#和6#样件(见图8),6#焊点的后润湿焊锡爬升位置较低,后润湿部位的应力集中系数大于5#样件,加速焊点断裂,而采用回流焊接的5#焊点的后润湿部位焊锡量充足,应力集中系数较小,在热应力循环作用后并未形成裂纹,因此5#样件使用D04全部包裹引角的焊点内未出现类似6#样件的断裂痕迹,但因施加在焊点上的热应力升高,焊点的抗热疲劳性能下降,拉力测试耐拉力值也下降。采用回流焊接的元器件焊点一致性好,鸥翼型引线焊点根部焊锡填充高度和焊料形貌满足要求,可降低焊点受力时此部位应力集中系数,可显著提升焊点可靠性。

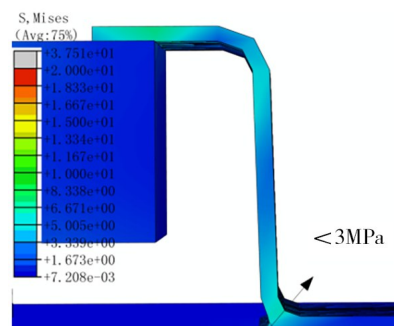
经上分析,CQFP器件加固胶和加固方式对焊点



(a) 仿真模型



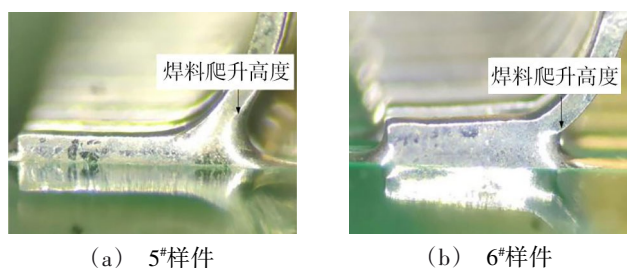
(b) 加固方式(3)焊点应力分布



(c) 加固方式(4)焊点应力分布

图7 仿真分析模型和焊点应力分布仿真结果

Fig. 7 Simulation model and stress distribution of solder joint



(a) 5#样件

(b) 6#样件

图8 5#和6#样件焊点根部焊料爬升高度对比

Fig. 8 Comparison of solder climb height at the root of solder joints between samples 5 # and 6 #

可靠性影响显著。使用EC-2216环氧胶加固器件四角可增加器件刚性,振动过程中器件四角位置环氧将承受绝大部分机械应力,因此点胶方式(1)抗振性能更好,同时环氧胶量控制严格,加固四角对焊点热疲劳性能无影响,在板级PCB组件中适用性更强,该加固方式最优。而使用硅胶加固CQFP时,单纯使用硅胶加固器件四角位置抗振性能不足,因此应使用硅胶填充器件本体底部/四周与印制板之间间隙,确保器件抗振性能。同时为降低加固胶对CQFP焊点热疲劳性能的影响,鸥翼型引脚弯曲(肩部弯曲部位)作为热应力释放位置不允许使用硅胶整体灌封,降低硅胶对焊点抗热疲劳性能的影响。

4 结论

(1)CQFP封装器件使用EC-2216环氧胶加固器件本体四角满足宇航类电子产品高可靠装焊要求,振动、温循后焊点和器件引线均完好无损,振动过程中器件四角位置环氧承受绝大部分机械应力,因此点胶方式(1)抗振性能更好,在板级PCB组件中适用性更强。

(2)仅用GD414硅胶加固CQFP器件四角时,引脚抗振性能不满足要求,必须在器件底部/四周和印制板之间填充硅橡胶才能提升其抗振性能。

(3)使用硅橡胶完全包裹CQFP引线并填充器件引线、PCB、器件本体之间缝隙,在温循试验过程中,因CTE不匹配导致的热应力无处释放,焊点出现微孔聚集断裂现象,焊点热疲劳性能大幅下降。因此使用硅胶加固CQFP器件时,应预留出引脚应力释放部位。

(4)鸥翼型引线焊点根部焊料爬锡高度显著影响焊点抗热疲劳性能。

参考文献

- [1] 张亮,薛松柏,卢方焱,等. 不同钎料对QFP焊点可靠性影响有限元分析[J]. 焊接学报,2007,28(10):45-48,52.
- ZHANG Liang, XUE Songbai, LU Fangyan, et al. Finite element analysis on soldered joint reliability of QFP device with different solders [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007,28(10):45-48,52.
- [2] 韩宗杰,薛松柏,王俭辛,等. QFP器件半导体激光钎焊焊点力学性能和显微组织[J]. 焊接学报,2006,27(10):41-44.
- HAN Zongjie, XUE Zongbai, WANG Jianxin, et al. Mechanical properties and microstructures of QFP micro-joints solders with diode-laser soldering system[J]. Transactions of the China Welding Institution,2006,27(10):41-44.
- [3] YAMADA S E. A bonded joint analysis for surface mount components [J]. Journal of Electronic Packaging, 1992, 114(01):1-7.
- [4] 孟宪刚,杨会平. 提高CQFP封装器件加工的工艺可靠性试验[J]. 航天器工程,2006,15(04):64-67.
- MENG Xiangang, YANG Huiping. Process reliability test for CQFP package components[J]. Spacecraft Engineering, 2006, 15 (04):64-67.
- [5] 孙慧,徐抒岩,孙守红,等. 航天大尺寸CQFP器件管脚断裂失效分析[J]. 电子元件与材料,2017,36(02):77-81.
- SUN Hui, XU Shuyan, SUN Shouhong, et al. Analysis on pin fracture-induced failure of large CQFP components used in aerospace [J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36 (02):77-81.
- [6] 李思阳,于方,丁颖,等. CQFP焊接与粘接一次成型工艺研究[J]. 电子工艺技术,2019,40(05):283-287.
- LI Siyang, YU Fang, DING Ying, et al. Study on one-step forming technology of CQFP soldering and bonding [J]. Electronics Process Technology, 2019,40(05):283-287.
- [7] 虞勇坚,郁骏,吕栋. 高密度CQFP封装IC的CA结构分析研究[J]. 电子与封装,2017,17(04):1-8.
- YU Yongjian, YU Jun, LYU Dong. Research of construction analysis for high-density CQFP-packaged ICs [J]. Electronics & Packaging, 2017, 17(04):1-8.
- [8] ESA-ESTEC. High-reliability soldering for surface-mount and mixed technology: ECSS-Q-ST-70-38C[S]. Noordwijk: ESA Requirements& Standards Division, 2008.