

# 电子封装中焊点失效机制应对策略综述

毛正辉 张 劼 叶信尉 余斌辉

西京学院机械工程学院 陕西西安 710123

**摘要:** 焊点是连接电子元件、结构部件等的关键环节,其质量直接影响整个产品的性能和可靠性。焊点失效可能导致电路中断、结构松动或断裂,进而引发产品故障,降低产品质量和用户满意度。关注焊点失效问题,有助于提升产品的整体质量和可靠性。本文通过文献回顾、案例分析等方法,总结焊点失效的主要类型、原因和影响,最后提出解决焊点失效问题的策略和建议。

**关键词:** 焊点失效; 温度; 机械应力; 电冲击

## 引言

在电子领域焊点的重要性不言而喻,它作为连接和固定元器件的关键部件,对产品的性能、稳定性和可靠性起着至关重要的作用。焊点不仅连接电路,还提供了元器件与电路板之间的固定力。这对于需要承受外部压力或振动的电子产品尤为重要,能够有效防止元器件脱落或损坏。当然焊点还具有防止氧化的功能,金属表面容易氧化形成氧化层,影响导电性能。焊点能够防止氧化层的生成,保持金属连接的稳定性和导电性。

但是,焊点作为媒介将封装芯片与PCB板子连接起来,受环境因素温度的影响,机械应力以及电应力的影响易造成焊点失效。例如早期的封装形式双列直插技术DIP封装,通过调研这种封装形式的失效原因主要分为:1.材料特性:PCB板材料:PCB板的热膨胀系数(CTE)与DIP封装的材料CTE不匹配时,在温度变化过程中会产生热应力,从而导致焊点失效<sup>[1]</sup>。2.环境因素:电子设备在使用过程中会经历温度冲击,焊点材料在热胀冷缩过程中会产生热应力,从而导致焊点失效。3.机械应力:电子设备在运输、安装或使用过程中可能受到振动、冲击等机械应力,导致焊点损伤或断裂。到80年代出现了SOP封装(Small Outline Package,小外形封装),这种封装失效原因主要有:1.电迁移和热迁移:在高密度封装和3D封装中,由于电流密度和热流密度的增加,焊点

可能受到电迁移和热迁移的影响,导致焊点失效。2.机械应力:封装体在受到振动、冲击等机械应力作用时也可能发生开裂。到了90年代,为了处理功耗急剧增大的问题,球栅阵列封装应运而生(BGA封装)这种封装焊点失效原因的主要有:1.机械应力:受外部应力的作用可能导致IMC层整体脆断,从而导致焊点失效<sup>[2]</sup>。2.温度冲击:受温度冲击的影响,会降低焊点的强度,以至于焊点失效。这几种封装形式焊点失效主要由温度,机械应力,还有电应力的影响以至于焊点失效,所以本文主要针对温度,机械应力还有电应力对电子封装焊点的影响进行分析,然后提出解决问题的策略。

## 一、温度对焊点的影响

### (一) 温度循环的影响

温度循环是指焊点在连续的加热与冷却过程中所经历的热应力。在温度循环试验箱中对SnBi基互连焊点进行1000、2000、3000次循环。从-40℃~85℃,升温速率5℃/min,降温速率5℃/min。在电子显微镜下观察,对其热作用下焊点失效机理分析。将焊点断裂的失效模式分为以下4种:1.基板-焊盘结合失效Type1,即BGA基板与BGA焊盘结合处发生的断裂。这种失效发生在基板与焊盘之间的连接界面。2.焊球-焊盘边缘断裂Type2,描述的是靠近BGA焊盘与BGA焊球结合边缘处的断裂。这种失效往往发生在焊球与焊盘连接的细微边缘<sup>[3]</sup>。3.焊料-焊盘附着失效Type3,指的是PCB焊盘与焊料合金之间结合不牢固导致的断裂。这种失效关乎焊料与焊盘之间的粘附强度。4.基板-焊盘分层失效Type4,描述的是PCB基板与PCB焊盘结合处发生的分层或断裂。这种失效模式涉及到基板与焊盘之间的层间结合强度问题。如图1。

## 项目成果:

西安市科技计划项目(24GXFW0093)

陕西省教育厅服务地方专项科研项目(21JC034)

西安市科技局创新能力强基计划项目(22GXFW0151)

陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202412715020)

西安市科技局高校服务企业项目(24GXFW0093)

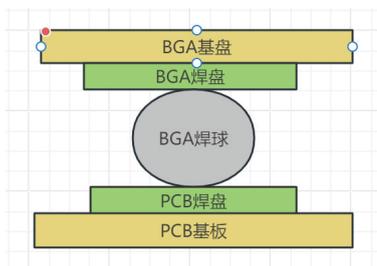


图1 BGA芯片焊点示意图

温度循环后,通过显微镜观察,焊点失效形势如表1:

表1 不同循环次数下失效焊点数

热作用条件	失效焊点数			
	Type1	Type2	Type3	Type4
1000次循环	0	0	160	85
2000次循环	0	0	173	60
3000次循环	0	1	190	38

随着温度循环次数的冲击,由于环境温度的变化或设备内部的发热,焊点会经历温度循环。这种循环可能包括升温、保温和降温等阶段。在这个循环中,温度循环的次数和幅度会对焊点界面处的金属间化合物(IMC)的形成产生显著影响,界面处逐渐形成较厚的IMC,降低了焊点的强度,以至于失效焊点处逐渐增加。

## (二) 控制温度影响的策略

控制温度循环对焊点失效选用: 1.高可靠性的焊料: 选择具有良好疲劳性能和抗环境侵蚀能力的焊料,以抵抗温度循环引起的热应力和环境因素的侵蚀。2.匹配的热膨胀系数(CTE): 确保焊料与基板材料的CTE值相匹配,以减少因CTE失配引起的热应力,从而降低焊点失效的风险<sup>[4]</sup>。3.精确控制焊接参数: 准确控制焊接温度、时间、气氛等参数,确保焊点质量。过高的焊接温度或过长的焊接时间可能导致焊点过热,增加裂纹和失效的风险。4.减少焊接缺陷: 采取措施减少焊接过程中的缺陷,如气泡、夹杂物等,这些缺陷可能成为裂纹萌生的起点。退火处理: 采用退火处理等技术,减少焊点内部残余应力,提高焊点的稳定性和耐久性。增强焊点强度: 通过改进焊接工艺或采用增强措施(如添加增强相),提高焊点的强度和韧性,以抵抗温度循环引起的失效。

## 二、机械应力对焊点的影响

在考虑机械应力对电子元器件焊点的影响时,可以选取振动冲击对元器件的影响,因为装备在工作的过程中,会有许多不确定因素,例如:汽车在不平整的路面上前进时会受到震动载荷,飞行器和气流因为流固耦合会产生震动。于是重点研究随机振动冲击对焊点的影响。

### (一) 振动冲击的影响

振动冲击对焊点的影响是多方面的,具体表现为以

下几个方面:

#### 1. 动态弯曲变形

在振动冲击的作用下,PCB板和电子元件的基板会发生动态的弯曲变形。这种变形随着振动冲击的加剧而增大,导致PCB板和基板之间的相对位置发生变化。由于PCB板和基板之间的连接主要依赖于焊点,因此焊点会承受由此产生的应力。

#### 2. 焊点应力与塑性变形

随着弯曲挠度的增大,焊点受到的应力也会相应增加。这种应力会导致焊点产生塑性变形,即焊点材料在应力作用下发生永久性的形状变化。塑性变形会破坏焊点的原始结构,降低其机械强度和电气性能<sup>[5]</sup>。

#### 3. 焊点结构破坏与信号传输中断

焊点结构上的破坏会导致电信号无法有效传输,进而影响整个电子产品的功能。焊点是PCB板上电子元件之间电气连接的关键部分,一旦焊点失效,就会导致电路中断,使电子产品无法正常工作。

## (二) 控制振动冲击的策略

### 1. 设计优化

合理布局: 在PCB板设计过程中,合理布局电子元件,以减少振动冲击时PCB板的弯曲变形,从而降低焊点所受的应力。

焊点位置优化: 根据振动理论,优化焊点在PCB板上的位置,避免将焊点放置在振动敏感区域或应力集中区域。

增加焊点尺寸: 适当增大焊点的尺寸,以提高焊点的机械强度和抗疲劳性能。

### 2. 材料选择

选用高强度焊料: 选择具有较高抗疲劳强度和良好韧性的焊料,如使用铜核微焊点或者SAC无铅微焊点以提高焊点在振动冲击下的稳定性<sup>[6]</sup>。

增强基板材料: 使用具有较好抗弯曲和抗振动性能的基板材料,以减少振动对焊点的影响。

### 3. 减震措施

安装减震器: 在电子设备中安装减震器或缓冲垫等装置,以降低振动冲击对PCB板和焊点的影响。

使用弹性元件: 在PCB板与电子设备外壳之间安装弹性元件,如橡胶垫、弹簧等,以吸收和分散振动能量。

## 三、电冲击对焊点的影响

### (一) 电流密度的影响

在电子封装中特别容易受到电流的波动影响焊点的可靠性,进而影响电子元器件的可靠性。因为在产品通电以后会发生电迁移,焊点作为电子封装的易损部位,经历了严重的不连续再结晶的晶体取向<sup>[7, 8]</sup>。Liu等人的

研究表明, 电流和热循环的相互作用导致焊球阵列中树枝状Sn基化合物的过度生长, 这是微电子器件潜在的失效源。在探讨单独的电迁移(EM)和热泳(TM)效应时, 界面Cu-Sn金属间化合物的非对称且显著的增长成为了一个引人注目的现象, 这种增长趋势随着应力作用时间的累积而急剧加速。Liao等人的研究[9]深入分析了功率模块在电热环境下的有限元行为, 揭示了长期运行中的高电流密度不仅是电迁移或性能退化的潜在诱因, 更在热效应叠加时, 显著加速了失效过程的步伐。

另一方面, 不同电流密度水平下的失效模式也展现出了差异性。在较低电流密度条件下, 失效往往源于PCB侧焊料内部的细微开裂, 这可能是由于局部应力集中或材料疲劳所致。然而, 当电流密度提升至更高水平时, 失效模式则转变为焊料与芯片之间的直接剥离, 这背后是Cu层因过度溶解而丧失支撑作用的直接后果。进而对焊点的可靠性造成影响。产品通电后, 随着电流的增加会对电流密度及温度造成影响如表二。

**表2 电流和电流密度、温度的关系**

Power current ( A )	2	4	6	8	10
Current density ( A/mm <sup>2</sup> )	5.58	11.36	17.58	23.43	28.82
Temperature ( °C )	25.5	27.3	32.5	37.4	42.8

分析实验数据随着电流的增加, 电流密度和温度持续增加, 进而温度会加快对焊点的侵蚀, 进而降低焊点的可靠性。

## (二) 控制电冲击的策略

1. 优化焊点的设计: 优化焊点的形状、尺寸和分布, 确保焊点能够承受预期的电流密度和电冲击。例如, 对于高电流密度的应用, 可以采用多个小焊点分散电流, 减少单个焊点的负担。

2. 加强焊点的保护和隔离。封装保护: 通过封装技术将焊点与外界环境隔离, 防止电冲击直接作用于焊点。例如, 使用环氧树脂等灌封材料对焊点进行灌封, 提高焊点的绝缘性和抗冲击能力。静电防护: 在电子封装过程中采取静电防护措施, 如使用静电耗散材料、接地手腕带等, 减少静电放电对焊点的影响。

3. 优化电子封装的结构和布局。合理布局: 在电子封装设计中, 合理布局电路板和元器件, 减少电冲击在传输过程中的衰减和反射, 降低对焊点的冲击。增加缓冲层: 在焊点与电路板之间增加缓冲层, 如使用柔性电路板或添加减震材料, 以吸收电冲击产生的能量, 减少对焊点的直接冲击。在电子封装完成后, 进行电冲击测试, 模拟实际使用中可能遇到的电冲击情况, 评估焊点的抗冲击能力。尽可能降低电冲击对焊点的影响, 以便防止由于电冲击造成的焊点失效。

## 总结

本文分析了温度、机械应力、以及电冲击对焊点造成的影响, 这些因素在电子封装中焊点失效及其常见的, 分析了这些因素导致焊点失效的原因以及提出了一些方法策论, 从设计, 材料的选用, 以及工艺的优化等方面来降低焊点失效问题, 防止由于焊点失效带来的安全隐患以及对产品质量带来的损坏。希望本篇文章可以为焊点失效问题的发展以及未来的研究带来参考。

## 参考文献

- [1] Guan X D, Liang W L. An overview of microelectronic packaging technology and its development trend[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2013, 23(01):34-37.
- [2] C Y, Huang Zhang L, Huang W, et al. A study on the reliability of double-bump solder joints based on patran and frequency domain analysis under random vibration load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16):5.
- [3] Shao C X. Heat transfer characteristics of electronic device and its fatigue analysis[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [4] Ma H, Suhling J C, Lall P, et al. Reliability of the aging lead free solder joint[J]. IEEE, 2006.
- [5] Collins M N, Punch J, Coyle R, et al. Thermal Fatigue and Failure Analysis of SnAgCu Solder Alloys With Minor Pb Additions[J]. Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on, 2011, 1(10):p.1594-1600.
- [6] Jih E, Jung W. Vibrational fatigue of surface mount solder joints[C]//Conference on Thermal & Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. IEEE, 1998.
- [7] Zuo Y, Bieler T R, Zhou Q, et al. Electromigration and Thermomechanical Fatigue Behavior of Sn0.3Ag0.7Cu Solder Joints[J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 47(3):1881-1895.
- [8] Zuo Y, Ma L, Guo F, et al. Effects of Electromigration on the Creep and Thermal Fatigue Behavior of Sn58Bi Solder Joints[J]. Journal of Electronic Materials, 2014, 43(12):4395-4405.
- [9] Liao L L, Hung T Y, Liu C K, et al. Electro-thermal finite element analysis and verification of power module with aluminum wire[J]. Microelectronic Engineering, 2014, 120: 114-120.