

电子设备无铅焊点的热疲劳评估进展与展望

景 博, 胡家兴*, 黄以锋, 汤 巍, 盛增津, 董佳岩

(空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038)

摘要 随着电子器件的广泛应用,其表现出了较高的故障率,而热疲劳是表面贴装器件焊点失效的主要原因。通过分析总结国内外无铅焊点热可靠性研究,着重阐述了钎料 Ag 含量、焊点微观组织结构演变以及温度循环参数对无铅焊点寿命的影响,最后,论述了无铅焊点热可靠性研究在微观方面的发展趋势,以及在焊点物理失效模型建立和特征损伤参量提取等方面存在的研究挑战。

关键词 无铅焊点;Ag 含量;温度循环;金属间化合物;Ag₃Cu 颗粒;再结晶

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.007

中图分类号 TP206.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0035-06

Evaluation and Prospect of Thermal Fatigue on Lead-free Solder Joints in Electronic Equipment

JING Bo, HU Jiaying*, HUANG Yifeng, TANG Wei, SHENG Zengjin, DONG Jiayan

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Thermal fatigue is a major source of failure of solder joints in surface mount electronic components. Through analyzing and summarizing the lead-free solder joint thermal reliability at home and abroad, this paper emphatically expounds the influence of the solder Ag content, thermal cycle parameters and solder joint microstructure on the thermal reliability of lead-free solder joints. Finally, the paper analyzes the challenges and the developing trend of the lead-free solder joint thermal reliability. The hotspot and challenges in the future research by microstructure analysis and modeling, the influence of thermal load analysis and the construction of physical failure model of solder joint, etc. are going to be researched further.

Key words: lead-free solder joint; Ag content; thermal cycle; Ag₃Cu precipitates; recrystallization

近年来,随着电子器件向着密集化、无铅化发展,尤其是电子器件更加广泛地应用于航空、航天、汽车等行业,电子设备表现出了较高的故障率。根据统计,70%以上的电子器件失效都是由于器件内部互连焊点的失效导致的^[1]。影响焊点可靠性的因

素众多,美国空军航空电子统计分析中心的统计数据显示温度对电子设备的影响最严重为 55%。在温度条件下,热疲劳是表面封装器件失效的主要原因,焊点是表面封装器件中最薄弱的环节^[2]。

由于铅及其化合物对人和环境具有严重的危

收稿日期:2016-04-05

基金项目:陕西省自然科学基金(S2015YFJM041)

作者简介:景 博(1965—),女,河北邯郸人,教授,主要从事故障预测与电子封装器件可靠性研究.E-mail:jingboj_sensor@163.com

* 通讯作者:胡家兴(1991—),男,湖南永顺人,硕士生,主要从事电子封装器件可靠性研究.E-mail:1148452526@qq.com

引用格式:景博,胡家兴,黄以锋,等. 电子设备无铅焊点的热疲劳评估进展与展望[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(6):35-40. JING Bo, HU Jiaying, HUANG Yifeng, et al. Evaluation and Prospect of Thermal Fatigue on Lead-free Solder Joints in Electronic Equipment[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 35-40.

害,上世纪90年代以来,世界上主要国家相继颁布了关于禁止在电子封装行业中使用含铅钎料的法案。SnAgCu系列钎料因其优良的力学性能、可焊性和相对低的熔点以及较好的可靠性,成为传统SnPb钎料较好的替代品,广泛地应用于电子产品。

随着钎料中银含量的不同,无铅焊点的性能会表现出较大的差异。高银含量钎料中 Ag_3Cu 颗粒对再结晶过程及其粗糙过程起到一定的抑制作用,从而使焊点表现出更好的抗热疲劳性能^[3-4]。温度在焊点微观组织的演变过程中起着不可忽略的作用,并且较为显著地影响着焊点内部应力应变响应。无铅回流焊后,在焊球与铜盘界面上形成金属间化合物(Intermetallic Compound, IMC),该化合物层有效地保证了焊料与基体的良好连接;在服役过程中,IMC层会不断地生长变厚。研究表明,金属间化合物是影响无铅焊点可靠性的重要因素^[5-6]。Mattila等^[7]发现IMC层成分对IMC结构力学性能有着重要的影响。Wang等^[8]在冲击试验中发现,随着载荷的变化,裂纹萌生位置在焊球/ Cu_6Sn_5 、 Cu_3Sn/Cu 以及焊球内变化。由于器件与PCB板之间热膨胀系数(the Coefficient of Thermal Expansion, CTE)失配,焊点在温度作用下产生应力应变作用,在应力集中的部位发生较大的塑性形变及蠕变,引发裂纹的萌生、扩展,以至于整个焊点完全断裂,发生疲劳失效^[9-10]。

在外部热-机械载荷的作用下,焊点表现出复杂的失效机制与模式。通过分析归纳国内外关于焊点热疲劳可靠性的研究,主要阐述和总结了钎料银含量和微观组织结构演变以及温度循环参数对焊点热机械性能及其失效模式的影响,并分析了无铅焊点热可靠性研究的发展趋势和研究挑战。

1 热疲劳评估研究现状

1.1 热疲劳评估方法

电子器件由于温度梯度循环引起的热应力循环(或热应变循环),而导致的疲劳破坏现象,称为热疲劳。电子产品在服役过程中,器件工作时升温,不工作时降温,造成温度循环效应。由于各器件间热膨胀系数的差异,使各元件内部形成温度梯度,在长期的温度循环负载下,焊点承受周期性的应力-应变作用,最终导致焊点热疲劳失效。

目前焊点热疲劳性能研究方法主要包括温度循环(Thermal Cycle, TC)、温度冲击(Thermal Shock, TS)和温度时效(Thermal Aging)实验及相关的有限元模拟^[11-12]。温度循环试验是目前通用的

物理模拟方法,模拟焊点在实际服役中的抗热疲劳能力。温度冲击试验的温度变化速率要快于温度循环试验,试验样品在2个极端温度室之间做循环试验,因此测试条件更为苛刻。军用电子产品一般采用温度冲击试验,而民用产品一般采用温度循环试验。温度循环与温度冲击实验统称温度加速实验,温度加速实验方案主要分为3类:高度加速实验、中度加速实验和温和加速实验。常用实验的方案见表1。在温度加速试验中,驻留时间、温度范围及温变速率都是影响焊点热可靠性的重要因素。

表1 高度加速实验方案

Tab.1 High acceleration experiment scheme

温度实验代号	温度范围/°C	驻留时间/min	爬升/下降率/(°C/min)	循环长度/min
TC165-42.5C-D0	-40~125	0/0	8/-8	42
TC165-42.5C-D30	-40~125	30/30	8/-8	102
TS165-42.5C-D0	-40~125	0/0	24/-24	14
TS165-42.5C-D5	-40~125	5/5	24/-24	24
TS165-42.5C-D10	-40~125	10/10	24/-24	34
TS165-42.5C-D15	-40~125	15/15	24/-24	44
TS165-42.5C-D30	-40~125	30/30	24/-24	74
TS165-76C-D10/0	-40~125	10/0	24/-24	24
TS130-60C-D10	-5~125	10/10	26/-26	30

表2 中度加速实验方案

Tab.2 Moderate acceleration experiment scheme

温度实验代号	温度范围/°C	驻留时间/min	爬升/下降率/(°C/min)	循环长度/min
TC100-75C-D15	25~125	15/15	2/-2	130

表3 温和加速实验方案

Tab.3 Smooth acceleration experiment scheme

温度实验代号	温度范围/°C	驻留时间/min	爬升/下降率/(°C/min)	循环长度/min
TS130-0C-D10	-65~65	10/10	26/-26	30
TC50-54C-D24/14	25~75	24/14	4/-2	75

1.2 热疲劳影响因素及结果分析

由于焊点自身合金成分和微观组织结构的差异,焊点在外部载荷的作用下,往往表现出复杂的失效机制与模式,主要有4种失效模式:①两侧焊球与IMC交界处都有裂纹产生;②焊球中产生裂纹;③芯片侧焊球与IMC中裂纹形核扩展;④由于孔洞作用使芯片侧 Cu_3Sn 层中有裂纹产生。裂纹的扩展路径随着温度载荷的变化而不同,在高/中度加速试验中,裂纹沿着再结晶而形成的结晶界面扩展,在温和加速试验中,裂纹沿着IMC层与焊球交界面扩

展。且焊料中银含量对焊点可靠性影响显著。

1.2.1 Ag 含量的影响

在温度循环加速失效试验中,无铅焊点的 Ag 含量对无铅焊点的可靠性影响显著,并且随着温度循环条件的变化以及封装类型的不同,其影响效果也不尽相同。大量的研究表明,高 Ag 含量的无铅焊点比低 Ag 含量的无铅焊点在热可靠性上更有优越性^[13-14]。其原因有 3 个,一方面,经过回流焊后,焊点中散布着微小的 Ag_3Cu 颗粒,由于 Ag_3Cu 颗粒的早期弥散强化作用,增加了焊点的强度^[3];另一方面,随着 SAC 焊点中 Ag 含量的提高, β -Sn 晶粒的大小以及晶粒间的间距都会下降,提高了焊点的强度从而使在温度循环过程中焊点塑性应变的产生减少^[15]。再一方面,随着 Ag 含量的增加,焊点的杨氏模量与 CTE 会有所增加和减少,减小封装中各材料之间的 CTE 差异,减小在温度循环载荷下由于 CTE 失配而产生的应力和应变,提高焊点的疲劳寿命。然而,在温度循环的作用下 Ag_3Cu 颗粒会粗化长大,一定程度上降低了焊点的可靠性。在比较苛刻的温度循环条件下,由于较快的温度变化以及较高的峰值温度加快了 Ag_3Cu 颗粒的粗糙速度,从而使 Ag_3Cu 颗粒的弥散强化作用又变得微乎其微,使其不再是影响焊点寿命的主要因素^[16]。

1.2.2 金属间化合物的影响

在温度载荷下,常常伴随着金属间化合物的生长与演变。IMC 层主要由 Cu_6Sn_5 和 Ag_3Cu 组成,在温度作用的过程中形成,其中 Cu_6Sn_5 是 IMC 层的主要部分。在温度作用下,IMC 层的生长规律与时效时间的平方根线性相关^[17],早期 IMC 层对焊点强度没有劣化作用,随着 IMC 层的继续增长,表面逐渐平坦化,由凹凸不平的扇贝状变成了几乎平坦的大波浪状,且在 Cu_6Sn_5 与 Cu 焊盘之间形成了新 IMC 物质 Cu_3Sn , Cu_3Sn 层中生成柯肯达尔孔洞,IMC 表现出很强的脆性^[18],降低了焊点的可靠性。由于温度载荷的不同,IMC 层的生长也会表现出一定的差异。非等温时效中 IMC 层的生长速度快于等温时效^[19]。芬兰阿尔托大学 Hokka 等^[10]发现,在温和试验条件下,裂纹在 IMC 层与焊球交界处形核,并沿着交界界面扩展。太原理工肖革胜等^[21]分析了 IMC 层厚度对焊点疲劳寿命的影响,结果表明焊点寿命随 IMC 厚度升高而降低。重庆大学 Shen 等^[17]发现在大温变温度冲击作用下裂纹起源于焊球中,沿着 IMC 与焊球的界面扩展,最后撕裂 IMC 层进入其中。

1.2.3 Ag_3Cu 颗粒与再结晶的影响

在应力集中的区域,由于应变与温度的双重作

用,金属间颗粒粗糙化及再结晶过程更加明显。在低应变的区域,颗粒粗糙化速度明显低于裂纹产生的地方^[22]。裂纹的产生过程可以描述为在高应变的区域金属间化合物的加速粗糙化和再结晶后,结晶界面发生滑移和一些亚晶的旋转导致裂纹的产生,并沿着晶体界面扩展^[23]。在国外,Kerr 和 Chawla^[24]研究了 $\text{Sn}_{3.5}\text{Ag}$ 共晶钎料合金的蠕变行为,发现 Ag_3Sn 颗粒对 Sn 基焊点具有弥散强化作用。Christine 等^[22]通过电镜扫描以及 EBSD 发现,焊点裂纹发生在近芯片侧焊球与 IMC 层界面处,并沿着再结晶形成的晶界边界扩展,且既有穿晶形式也有沿晶形式。Zhou 等^[25]研究发现由于晶格的旋转,在温度循环中形成新的晶粒取向,裂纹沿着再结晶形成的晶体界面扩展。他们认为足够多的应变积累就会诱发再结晶过程,且焊点损伤过程及裂纹的扩展路径受到晶体界面特征的影响,裂纹更倾向于沿着随机高角度晶界扩展;且在连续再结晶过程中,晶界的演变以及晶粒取向变化都与晶粒滑移有关。Mattile 等^[12]研究发现,高度加速试验中再结晶过程比较剧烈,且在再结晶界面主要发生穿晶断裂,他们认为再结晶形成的晶体界面为裂纹扩展提供了更优的路径。在国内,哈工大汉晶等^[26]研究人员得出了相似的结论。

1.2.4 温度循环参数的影响

温度循环参数包括高/低温驻留时间、爬升率、温度范围以及平均温度。通过改变温度参数,焊点的可靠性会表现出一定的差异。Fan 等^[27]研究发现,在温度循环的过程中,非弹性应变能的积累主要发生在温度爬升和下降阶段,高温驻留阶段对其的贡献很微弱。芬兰阿尔托大学 Mattila 等^[12,28]较为系统地研究了温度参数对互联焊点可靠性的影响,研究发现裂纹的萌生与驻留时间及温变速率无关;随着最低温度的上升,焊点寿命明显上升,即使在低于 0.5 倍对比温度时,低温阶段的蠕变和高温一样对焊点失效机制起着重要的作用;随着平均温度和爬升率的降低,焊点疲劳寿命显著上升,应变范围变小而应力范围变大;但存在驻留时间值使焊点寿命最短,Clech 等^[29]从损伤率角度得出了相似的结论。Otiaba 等^[30]模拟分析发现,焊点寿命随着温度范围的扩大而减小。Coyle 等^[31]研究发现随着驻留时间的延长,无铅焊点的 TC 可靠性下降显著为 25%~40%。然而在 $-45\text{ }^\circ\text{C}\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 循环中延长驻留时间对焊点特征寿命的影响并没有 $0\text{ }^\circ\text{C}\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 时那么显著。目前还没有发现国内关于此类研究。

2 热疲劳评估展望

现如今,焊点合金的发展有2种趋势。一方面,由于低Ag含量钎料具有较好的抗跌落/振动性能、较低熔点以及低成本,其将会在低温服役条件下得到广泛应用;另一方面,通过在高Ag含量钎料中添加多种稀土元素以提高其在恶劣服役条件中抗热疲劳性能。

目前大量的研究已经证明无铅焊点的可靠性与微观组织演变及温度载荷紧密相关,然而,微观组织演变及温度载荷对其失效模式的影响尚未有定论,且微观组织结构演变动力学研究及其模型的建立仍不成熟。在定量分析温度载荷与焊点疲劳寿命潜在关联,提取能够表征无铅焊点疲劳状态的特征参数,建立无铅焊点物理失效模型等方面仍有大量工作。

2.1 Ag₃Cu 颗粒分析

Ag₃Sn颗粒的形貌、数量及其间距都是影响SnAgCu焊点可靠性的重要因素。与间距较大、数量较少的颗粒相比较,大量小间距颗粒能更有效地阻止混乱运动。现如今,关于Ag₃Cu颗粒的进化演变过程以及其与焊点力学性能定性关系的研究还比较少,更没有发现关于Ag₃Sn颗粒与焊点热性能之间潜在关系的文章。

2.2 Sn 晶体取向及形貌分析

在SAC无铅焊点中,Sn是钎料和β-Sn的主要成分。Sn是一个四边形的单元结构,由于晶体方向的不同,通常在物理和机械上表现出各向异性,特别是在热膨胀系数和杨氏模量上^[32]。因此Sn晶体的取向是决定SAC焊点热机械反应的一个关键参数。且裂纹的扩展与温度加速试验中再结晶所形成的Sn结晶有直接的关系。研究发现Sn晶体的形貌对SnAgCu焊点热疲劳性能有很大的影响^[33]。通过测试了解温度加速试验中Sn晶体的取向与形貌有助于理解焊点早期与晚期的失效以及再结晶与焊点失效之间的潜在联系,也有助于优化微观结构模型,更精确地实现热疲劳寿命预测。

2.3 参数监测及特征损伤参量提取

在研究焊点的可靠性及失效机制的试验中,大多文献都利用扫描电子显微镜(SEM)对试验结果进行分析,观察裂纹的形貌和位置判断焊点的断裂模式,研究晶体的形状和分布判断IMC层的生长行为。然而,SEM的观察结果只能反应焊点在试验各阶段的状态,并不能实时反应焊点在环境加载过程中的真实变化过程和失效规律。一些研究者^[34-35]尝试实时监测焊点在加载过程中的阻值变化,寻求焊

点失效过程在电信号上的征兆模式,但焊点的电阻只有在焊点完全断裂的时候才会有明显的变化,并且裂纹的扩展初期是一个相对缓慢的过程,微裂纹的产生并不会对焊点的导电性能产生明显的影响。文献[36]将应变片贴装在芯片关键焊点附近/背面的PCB板上,通过研究焊点附近处的应变变化规律,为焊点的寿命预测提供参考依据。但是焊点附近/背面PCB板上应变信号的可行性及有效性仍需进一步验证。如何选择和设计在试验过程中焊点损伤过程的监测信号,以及利用监测信号构建焊点损坏特征参量仍是一个需要解决的难题。

2.4 物理失效模型研究

温度循环过程中,焊点产生的应力应变响应、Ag₃Cu颗粒粗糙长大以及焊点微观组织演变规律都与温度参数密切相关。在不同的温度范围、平均温度、驻留时间以及温变速率下,焊点的失效模式与断裂机制都会发生相应变化。如何科学合理地设计温度循环试验,研究多种温度循环下焊点的损伤过程,分析焊点的失效机理,探索温度条件与焊点失效模式的潜在关联,建立统一的物理失效模型仍是今后研究的重要方向。

3 结语

随着电子器件的广泛应用及其恶劣的服役环境,焊点可靠性的研究不仅利于优化电子器件研制生产工艺,也有利于推进电子设备维修保障模式改革,提高电子设备使用寿命。

在国外,研究者对焊点可靠性问题进行了大量的研究,得出了一些具有实际意义的结论和相关应用。而国内起步较晚,研究深度不够,特别是在再结晶及温度参数对焊点可靠性影响等方面。在今后的研究中,除了从材料角度研究钎料合金可靠性,改进优化制造工艺外,还应重点关注和研究焊点微观组织结构演变及其失效内在动力,分析温度载荷对焊点寿命影响,建立焊点物理失效模型,探索表征焊点失效信号,构建焊点失效特征参数,以期实现其失效过程的在线监测及健康管理^[37]。

参考文献(References):

- [1] MIRMAN B. Tools for Stress Analysis of Microelectronic Structures[J]. Journal of Electronic Packaging, 2010, 122(3): 280-282.
- [2] KIM D S, YU Q, SHIBUTANI T, et al. Nonlinear Behavior Study on Effect of Hardening Rule of Lead Free Solder Joint[C]//ASME 2003 International E-

- lectronic Packaging Technical Conference and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 2003: 837-843.
- [3] KARIYA Y, HOSOI T, TERASHIMA S, et al. Effect of Silver Content on The Shear Fatigue Properties of Sn-Ag-Cu Flip-Chip Interconnects[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(4): 321-328.
- [4] TERASHIMA S, KARIYA Y, HOSOI T, et al. Effect of Silver Content on Thermal Fatigue Life of $\text{Sn}_x\text{Ag}_{0.5}\text{Cu}$ Flip-Chip Interconnects[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(12): 1527-1559.
- [5] 田野, 吴懿平, 安兵, 等. 倒装芯片组装中微米级互连焊点的界面金属间化合物生长及动力学[J]. 金属热处理, 2013, 38(3): 24-27.
- TIAN Ye, WU Yiping, AN Bing, et al. Interfacial Intermetallic Compound Growth and Kinetic in the Micro-Solder Joint of Flip Chip Assembly[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(3): 24-27. (in Chinese)
- [6] XIAO H, LI X Y, ZHU Y X, et al. Intermetallic Growth Study on SnAgCu/Cu Solder Joint Interface During Thermal Aging[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013, 24(7): 2527-2536.
- [7] MATTILA T T, KIVILAHTI J K. Reliability of Lead-Free Interconnections under Consecutive Thermal and Mechanical Loadings[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(2): 250-256.
- [8] WANG J X, NISHIKAWA H. Impact Strength of $\text{Sn}_{3.0}\text{Ag}_{0.5}\text{Cu}$ Solder Bumps During Isothermal Aging[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(8): 1583-1591.
- [9] ZHANG L, HAN J, GUO Y, et al. Anand Model and FEM Analysis of SnAgCuZn Lead-Free Solder Joints in Wafer Level Chip Scale Packaging Devices [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 281-286.
- [10] ZHU Y, LI X, WANG C. Investigation on High Temperature Mechanical Fatigue Failure Behavior of SnAgCu/Cu Solder Joint [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2014, 25(3): 1429-1434.
- [11] HOKKA J, MATTILA T T, XU H, et al. Thermal Cycling Reliability of Sn-Ag-Cu Solder Interconnections—Part 2: Failure Mechanisms[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(6): 963-972.
- [12] MATTILA T T, XU H, RATIA O, et al. Effects of Thermal Cycling Parameters on Lifetimes and Failure Mechanism of Solder Interconnections [C]//2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2010: 581-590.
- [13] MUSTAFA M, CAI Z, SUHLING J C, et al. The Effects of Aging on the Cyclic Stress-Strain Behavior and Hysteresis Loop Evolution of Lead Free Solders [C]//Proceedings of the 61st Electronic Components and Technology Conference. 2011: 927-939.
- [14] COLLINS M N, PUNCH J, COYLE R, et al. Thermal Fatigue and Failure Analysis of SnAgCu Solder Alloys with Minor Pb Additions[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(10): 1594-1600.
- [15] TERASHIMA S, KOBAYASHI T, TANAKA M. Effect of Crystallographic Anisotropy of β -tin Grains on Thermal Fatigue Properties of $\text{Sn}_1\text{Ag}_{0.5}\text{Cu}$ and $\text{Sn}_3\text{Ag}_{0.5}\text{Cu}$ Lead Free Solder Interconnects[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2008, 13(8): 732-738.
- [16] LEE T K, MA H. Aging Impact on the Accelerated Thermal Cycling Performance of Lead-Free BGA Solder Joints in Various Stress Conditions [C]//2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2012: 477-482.
- [17] YU D Q, WANG L. The Growth and Roughness Evolution of Intermetallic Compounds of Sn-Ag-Cu/Cu Interface During Soldering Reaction [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 458(1): 542-547.
- [18] PANG J H L, LOW T H, XIONG B S, et al. Thermal Cycling Aging Effects on Sn-Ag-Cu Solder Joint Microstructure, IMC and Strength [J]. Thin Solid Films, 2004, 462: 370-375.
- [19] LI S, YAN Y. Intermetallic Growth Study at $\text{Sn}_{3.0}\text{Ag}_{0.5}\text{Cu}/\text{Cu}$ Solder Joint Interface During Different Thermal Conditions [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(12): 9470-9477.
- [20] 肖革胜, 杨雪霞, 李志刚, 等. $\text{Sn-Ag}_{3.0}\text{Cu}_{0.5}/\text{Cu}$ 金属间化合物生长行为及其对 PBGA 焊点热疲劳可靠性的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2315-2320.
- XIAO Gesheng, YANG Xuexia, LI Zhigang, et al. Growth Behavior of Sn-Ag_{3.0}-Cu_{0.5}/Cu Intermetallic Compounds and Their Effect on the Thermal Fatigue Reliability of PBGA Solder Joints [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2315-2320. (in Chinese)
- [21] SHEN J, ZHAI D, CAO Z, et al. Fracture Behaviors of Sn-Cu Intermetallic Compound Layer in Ball Grid Array Induced by Thermal Shock [J]. Journal of Electronic Materials, 2014, 43(2): 567-578.
- [22] LEE C J, CHEN W Y, CHOU T T, et al. The Investigation of Interfacial and Crystallographic Observation in the Ni (V)/SAC/OSP Cu Solder Joints with High and Low Silver Content During Thermal Cyc-

- ling Test[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, 26(12): 10055-10061.
- [23] MATTILA T T, KIVILAHTI J K. The Role of Recrystallization in the Failure of SnAgCu Solder Interconnections under Thermomechanical Loading [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2010, 33(3): 629-635.
- [24] KERR M, CHAWLA N. Creep Deformation Behavior of Sn-3.5 Ag Solder/Cu Couple at Small Length Scales[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(15): 4527-4535.
- [25] ZHOU B, ZHOU Q, BIELER T R, et al. Slip, Crystal Orientation, and Damage Evolution During Thermal Cycling in High-Strain Wafer-Level Chip-Scale Packages[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(3): 895-908.
- [26] 汉晶. Sn基无铅互连焊点局部再结晶与弱化损伤机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
HAN Jing. Localized Recrystallization and Damage Evolution Mechanism of Sn-Based Lead-Free Solder Joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [27] FAN X, RAISER G, VASUDEVAN V S. Effects of Dwell Time and Ramp Rate on Lead-Free Solder Joints in FCBGAs [C]// *Electronic Components and Technology Conference*. IEEE, 2005: 901-906.
- [28] HOKKA J, MATTILA T T, XIUH, et al. Thermal Cycling Reliability of Sn-Ag-Cu Solder Interconnections. Part 1: Effects of Test Parameters[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(6): 1171-1183.
- [29] CLECH J P. Acceleration Factors and Thermal Cycling Test Efficiency for Lead-free Sn-Ag-Cu Assemblies [C]// *Proceedings SMTA International Conference*. Chicago, IL, 2005: 902-917.
- [30] OTIABA K C, BHATTI R S, EKERE N N, et al. Finite Element Analysis of the Effect of Silver Content for Sn-Ag-Cu Alloy Compositions on Thermal Cycling Reliability of Solder Die Attach[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 28: 192-207.
- [31] COYLE R J, SWEATMAN K, ARFAEI B. Thermal Fatigue Evaluation of Pb-Free Solder Joints: Results, Lessons Learned, and Future Trends [J]. *JOM*, 2015, 67(10): 2394-2415.
- [32] BIELER T R, JIANG H, LEHMAN L P, et al. Influence of Sn Grain Size and Orientation on the Thermomechanical Response and Reliability of Pb-free Solder Joints[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2008, 31(2): 370-381.
- [33] ARFAEI B, MAHIN-SHIRAZI S, JOSHI S, et al. Reliability and Failure Mechanism of Solder Joints in Thermal Cycling Tests [C]// *2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference*. IEEE, 2013: 976-985.
- [34] 蒋礼, 张健, 潘毅, 等. 电阻法测量无铅焊点蠕变的有效性实验研究[J]. *电子元件与材料*, 2011, 30(9): 43-46.
JIANG Li, ZHANG Jian, PAN Yi, et al. Effectiveness Experimental Study on Resistance Test Method for Measuring Creep of Lead-Free Solder Joints[J]. *Electronic Components and Materials*, 2011, 30(9): 43-46. (in Chinese)
- [35] KWON D, AZARIAN M H, PECHT M G. Detection of Solder Joint Degradation Using RF Impedance Analysis [C]// *Electronic Components and Technology Conference*. IEEE, 2008: 606-610.
- [36] TANG W, JING B, HUANG Y F, et al. Feature Extraction for Latent Fault Detection and Failure Modes Classification of Board-Level Package under Vibration Loadings[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(11): 1905-1914.
- [37] 景博, 黄以锋, 张建业. 航空电子系统故障预测与健康管理技术现状与发展[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2010, 11(6): 1-6.
JING Bo, HUANG Yifeng, ZHANG Jiange. Status and Perspectives of Prognostics and Health Management Technology of Avionics System[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2010, 11(6): 1-6. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)