

电子制造焊点疲劳失效演化过程图示研究

刘洋艺

成都天奥电子股份有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8735

[摘要] 在电子制造业领域，电路板元器件焊点作为实现电连接与机械固定的核心部位，其可靠性能直接关联电子设备的实际使用寿命。疲劳失效是焊点在温度循环、振动载荷等实际工作环境中最主要的失效模式，且该失效的演变进程具有隐蔽性与渐进性特征，给失效机理的剖析及寿命预估工作带来诸多难题。本文以电子制造工艺中典型的焊点为研究对象，融合实验测试与仿真模拟两种技术手段，重点探究焊点疲劳失效演化的关键阶段，通过构建微观组织变迁图谱、应力应变分布图谱、失效路径延伸图谱等，直观展现失效从孕育、发展到断裂的完整历程。基于图谱分析结果，阐明温度循环频次、载荷幅值等因素对失效演化的作用规律，明确焊点界面金属间化合物生长、微裂纹孕育及扩展等核心失效机理。本研究成果可为电子制造环节的焊点工艺优化、可靠性提升及失效预警提供直观的理论依据与技术保障。

[关键词] 电子制造；焊点；疲劳失效；演化过程；图示分析

Research on Fatigue Failure Evolution of Electronic Manufacturing Solder Joints by

Liu Yangyi

Chengdu Tianao Electronics Co., Ltd.

[Abstract] In the field of electronic manufacturing, solder joints on circuit board components serve as critical components for electrical connections and mechanical fixation, with their reliability directly impacting the actual service life of electronic devices. Fatigue failure represents the predominant failure mode of solder joints under practical working conditions such as temperature cycling and vibration loads. The evolutionary process of this failure exhibits hidden and progressive characteristics, posing significant challenges for failure mechanism analysis and lifespan prediction. This study focuses on typical solder joints in electronic manufacturing processes, integrating experimental testing and simulation techniques to investigate key stages of fatigue failure evolution. Through constructing microstructural transformation maps, stress-strain distribution maps, and failure path extension maps, the complete failure process from initiation to fracture is visually demonstrated. Based on the analysis of these maps, the study elucidates the impact of factors such as temperature cycle frequency and load amplitude on failure evolution, clarifying core failure mechanisms including intermetallic compound growth at solder interfaces and microcrack initiation and propagation. These findings provide theoretical foundations and technical support for optimizing solder joint processes, enhancing reliability, and implementing failure early warning systems in electronic manufacturing.

[Key words] electronic manufacturing; solder joint; fatigue failure; evolution process; graphical analysis

引言

伴随电子技术的迅猛发展，电子设备正朝着微型化、高密度化、高功率化方向升级迭代，电路板元器件焊点的服役环境

也日趋恶劣。在汽车电子、航空航天、消费电子等重要领域，设备长期处于温度交替、机械振动、湿度波动等复杂工况中，焊点极易发生疲劳失效，进而引发设备功能异常甚至完全失效。据电子制造行业可靠性统计数据显示，超过 60% 的电子设备故障源于焊点失效，其中疲劳失效占比高达 75% 以上，已成为限制电子设备可靠性提升的核心瓶颈。

在电子制造工艺中，焊点的成型质量与其后续服役可靠性密切相关，焊膏组分、回流焊温度曲线、贴装精度等工艺参数均会对焊点疲劳性能产生显著影响。当前，关于焊点疲劳失效的研究多集中于失效机理解析、寿命预测模型搭建等方向，采用的技术手段包括加速老化实验、有限元仿真等，但现有研究成果多以数据表格、曲线图表等形式呈现，难以直观反映失效演化过程中微观组织、应力分布及裂纹扩展的动态变化规律。图示作为一种直观的信息传递形式，可将抽象的失效演化过程具象化，清晰呈现各阶段的核心特征及演变逻辑，为深入解析失效机理提供有力支撑。

基于此，本文聚焦电子制造焊点的疲劳失效演化过程，通过设计加速疲劳实验，结合金相分析、扫描电子显微镜 (SEM) 观测等方法，系统采集失效演化各阶段的相关数据，构建涵盖微观组织变迁、应力应变分布、裂纹孕育与扩展的系列图示。通过对图示的深度分析，明确失效演化的关键节点及影响因素，揭示疲劳失效的内在机理，为电子制造工艺优化、焊点可靠性设计及失效预警提供理论与技术参考，助力提升电子设备的整体服役可靠性。

1 实验方案与研究方法

1.1 实验样本制备

本实验选用电子制造行业常用的 0402 封装片式电阻、Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) 无铅焊膏作为实验原材料，依照标准表面贴装技术 (SMT) 流程制备焊点样本。回流焊工艺参数设定如下：预热温度区间为 150~180℃，保温时长 60~90s；峰值温度控制在 245±5℃，峰值保温时长 10~15s；冷却速率维持在 3~5℃/s。样本制备完成后，对其进行外观检测，剔除存在虚焊、假焊、焊膏溢出等缺陷的样本，保障实验样本的一致性。本次实验共制备有效样本 30 个，分为 5 组，每组 6 个样本，用于不同条件下的加速疲劳实验。

1.2 加速疲劳实验设计

采用温度循环加速疲劳实验模拟焊点的实际服役工况，实验设备选用高低温湿热试验箱，依据 IEC 60068-2-14 标准设定实验参数。温度循环范围为 -40℃~125℃，升温速率与降温速率均为 10℃/min，在高温 (125℃) 和低温 (-40℃) 阶段分别保温 30min，单个循环周期总计 320min。实验过程中，分别在循环次数为 0 次 (初始状态)、50 次、100 次、200 次、300 次、400 次时，从每组中取出 1 个样本进行后续微观分析与检测，追踪失效演化的完整过程。

1.3 检测与仿真手段

借助金相显微镜观察焊点横截面的微观组织，分析不同疲劳阶段焊点微观结构的变化规律；利用扫描电子显微镜 (SEM)

观测焊点界面金属间化合物 (IMC) 的形貌、厚度及微裂纹的孕育与扩展情况；通过电子万能试验机测试焊点的剪切强度，评估其力学性能的退化程度。同时，采用 ANSYS 有限元仿真软件构建焊点三维模型，模拟温度循环过程中焊点的应力应变分布状态，获取不同循环阶段的应力集中区域及应变累积情况，为失效演化图示的构建提供数据支撑。

2 焊点疲劳失效演化过程图示构建与分析

2.1 初始状态焊点特征图示分析

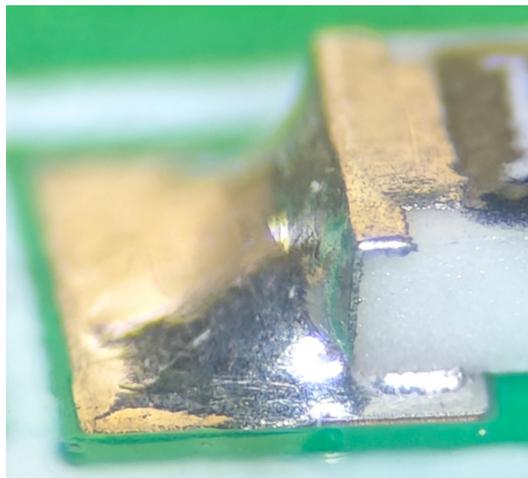


图1 贴片电阻焊点初始状态

图 1 为贴片电阻焊点初始状态 (温度循环 0 次) 的相关图示。从微观组织图示可见，初始焊点的焊料组织均匀致密，主要由 β -Sn 相和细小的 Ag_3Sn 金属间化合物构成， Ag_3Sn 相均匀弥散分布于 β -Sn 基体中，晶粒排列规整有序。焊点与基板、元器件引脚的界面结合紧密，形成连续且均匀的 IMC 层，厚度约为 1.2 μm ，无明显孔隙、裂纹等缺陷。从应力分布图示来看，初始状态下焊点的应力分布较为均匀，最大应力值仅为 25MPa，主要集中在焊点与引脚的接触边缘区域，但此时应力水平较低，不足以诱发微裂纹孕育。

2.2 疲劳失效萌生阶段图示分析

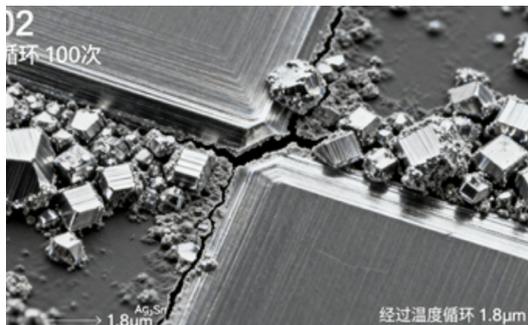


图2 焊点微观组织图示

疲劳失效萌生阶段对应温度循环 50~100 次，此阶段焊点的宏观性能无明显变化，但微观结构已开始出现退化迹象。图 2 为温度循环 100 次时焊点的微观组织变迁及应力应变累积图示。由图 2 可知， β -Sn 基体晶粒出现长大趋势， Ag_3Sn 相的弥散度下降，部分区域出现 Ag_3Sn 相聚集现象。界面 IMC 层

厚度增至 $1.8\ \mu\text{m}$, 且局部区域呈现不连续状态, 这是由于温度循环过程中原子扩散作用加剧, 促使 IMC 层持续生长所致。从图 2 的应力应变累积图示可以看出, 经过 100 次温度循环后, 应力集中区域主要分布在焊点的拐角及界面位置, 该区域的塑性变形逐步累积, 为微裂纹的孕育创造了条件。从图 2 的微裂纹萌生图示可观察到, 在焊点与基板界面的应力集中区域出现长度约为 $2\ \mu\text{m}$ 的微裂纹, 裂纹方向平行于界面, 此时裂纹处于孕育初期, 尚未贯穿焊点整体。

2.3 疲劳失效发展阶段分析

疲劳失效发展阶段对应温度循环 200~300 次, 此阶段微裂纹开始逐步扩展, 焊点的力学性能呈现明显退化趋势。温度循环 300 次时焊点的裂纹扩展及应力分布变化图示。从裂纹扩展, 前期孕育的微裂纹持续扩展, 长度增至 $25\ \mu\text{m}$, 裂纹方向由平行于界面向垂直于界面转变, 且出现多分支裂纹, 裂纹主要沿 $\beta\text{-Sn}$ 晶粒边界及 IMC 层与基体的结合面扩展。这是因为晶粒边界及界面属于原子排列的薄弱区域, 在温度循环作用下, 应力应变反复累积, 导致这些区域产生应力集中, 进而推动裂纹扩展。从应力分布变化可知, 随着裂纹的扩展, 焊点的应力分布发生显著改变, 裂纹尖端出现明显的应力集中现象, 最大应力值升至 125MPa , 而裂纹周围区域的应力则有所降低, 形成应力重分布。此时, 焊点的剪切强度降至初始值的 65%, 力学性能退化显著。

2.4 疲劳失效断裂阶段图示分析

疲劳失效断裂阶段对应温度循环 300~400 次, 此阶段裂纹快速扩展并贯穿整个焊点, 最终导致焊点断裂失效。温度循环 400 次时焊点的断裂形貌及失效路径图示。从断裂形貌可见, 焊点已完全断裂, 断裂面主要分为两个区域: 一是靠近界面的脆性断裂区域, 该区域存在大量 IMC 层碎片, 断裂特征表现为解理断裂; 二是位于焊料基体的韧性断裂区域, 该区域分布有较多韧窝, 断裂特征为微孔聚集型韧性断裂。这表明焊点的断裂过程是脆性断裂与韧性断裂协同作用的结果。从失效路径可以看出, 裂纹从焊点与基板界面的应力集中区域孕育后, 先沿界面扩展, 随后转向焊料基体内部, 沿晶粒边界及缺陷区域快速延伸, 最终贯穿整个焊点, 导致电连接中断。此时, 焊点的剪切强度仅为初始值的 28%, 完全丧失承载能力与电连接功能。

3 失效演化影响因素及机制分析

3.1 关键影响因素分析

基于上述图示分析结果, 结合实验数据可知, 焊点疲劳失效演化过程主要受温度循环参数、微观组织特征及工艺缺陷等因素影响。温度循环次数直接决定失效演化的进程阶段, 循环次数越多, 失效程度越严重; 温度循环范围越大、升降温速率越快, 应力应变累积速率越高, 失效演化周期越短。在微观组织方面, $\beta\text{-Sn}$ 晶粒尺寸、 Ag_3Sn 相的分布状态及 IMC 层的厚度与连续性对失效演化具有显著影响, 晶粒粗大、 Ag_3Sn 相聚集以及 IMC 层过厚或不连续, 都会降低焊点的疲劳性能, 加速失效演化进程。此外, 制造过程中产生的虚焊、气孔、焊膏残留等工艺缺陷, 会成为应力集中源, 促使微裂纹提前孕育, 缩

短焊点的疲劳寿命。

3.2 疲劳失效机制揭示

结合各阶段图示特征, 可将焊点疲劳失效机制总结为: 在温度循环载荷作用下, 焊点与引脚、基板之间因热膨胀系数不匹配, 产生周期性热应力与热应变, 导致应力应变反复累积。初始阶段, 应力应变累积促使 $\beta\text{-Sn}$ 晶粒长大、 Ag_3Sn 相聚集及界面 IMC 层生长; 随着循环次数增加, 应力集中区域的塑性变形持续累积, 在界面、晶粒边界等薄弱区域孕育微裂纹; 后续循环过程中, 裂纹沿薄弱区域不断扩展, 应力重分布进一步加速裂纹延伸; 当裂纹贯穿整个焊点时, 焊点丧失承载能力与电连接功能, 发生疲劳断裂失效。

4 结论与展望

4.1 结论

本文通过加速疲劳实验、微观检测及有限元仿真技术, 构建了电子制造焊点疲劳失效演化过程的系列图示, 直观呈现了失效从孕育、发展到断裂的完整历程。研究表明: 焊点疲劳失效演化可划分为初始阶段、萌生阶段、发展阶段及断裂阶段四个关键阶段, 各阶段具有显著的微观组织及应力分布特征; 温度循环参数、微观组织特征及工艺缺陷是影响失效演化的核心因素; 失效机制为温度循环引发的应力应变累积, 导致微观结构退化、微裂纹孕育及扩展, 最终造成断裂失效。图示分析能够清晰展现失效演化的动态规律, 为失效机理解析提供了直观支撑。

4.2 展望

后续研究可进一步拓展图示类型, 结合原位检测技术构建动态失效演化图示, 更精准地捕捉裂纹孕育与扩展的实时过程; 针对不同焊料成分、封装形式及服役工况开展专项研究, 构建多场景下的失效演化图示库; 将图示分析与寿命预测模型有机结合, 实现基于图示特征的焊点疲劳寿命精准预估, 为电子制造行业的可靠性设计与质量管控提供更全面的技术支撑。

[参考文献]

- [1]林健, 王春青, 刘雪松. 无铅焊点在温度循环下的疲劳失效机制[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 1-6+128.
- [2]张勇, 李建军, 陈光雄. 电子封装焊点疲劳失效的有限元模拟与实验验证[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 156-163.
- [3]王宏, 赵海燕, 朱松然. Sn-Ag-Cu 无铅焊点微观组织演变与疲劳性能研究[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(8): 1589-1597.
- [4]Liu Y, Wang L, Li J. Fatigue failure analysis of solder joints in electronic packaging under thermal cycling[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 108: 113568.
- [5]陈立海, 张显程, 田艳红. 电子制造工艺对焊点可靠性的影响研究[J]. 电子工艺技术, 2021, 42(3): 141-144.