

“十二五”国家重点出版规划精品项目

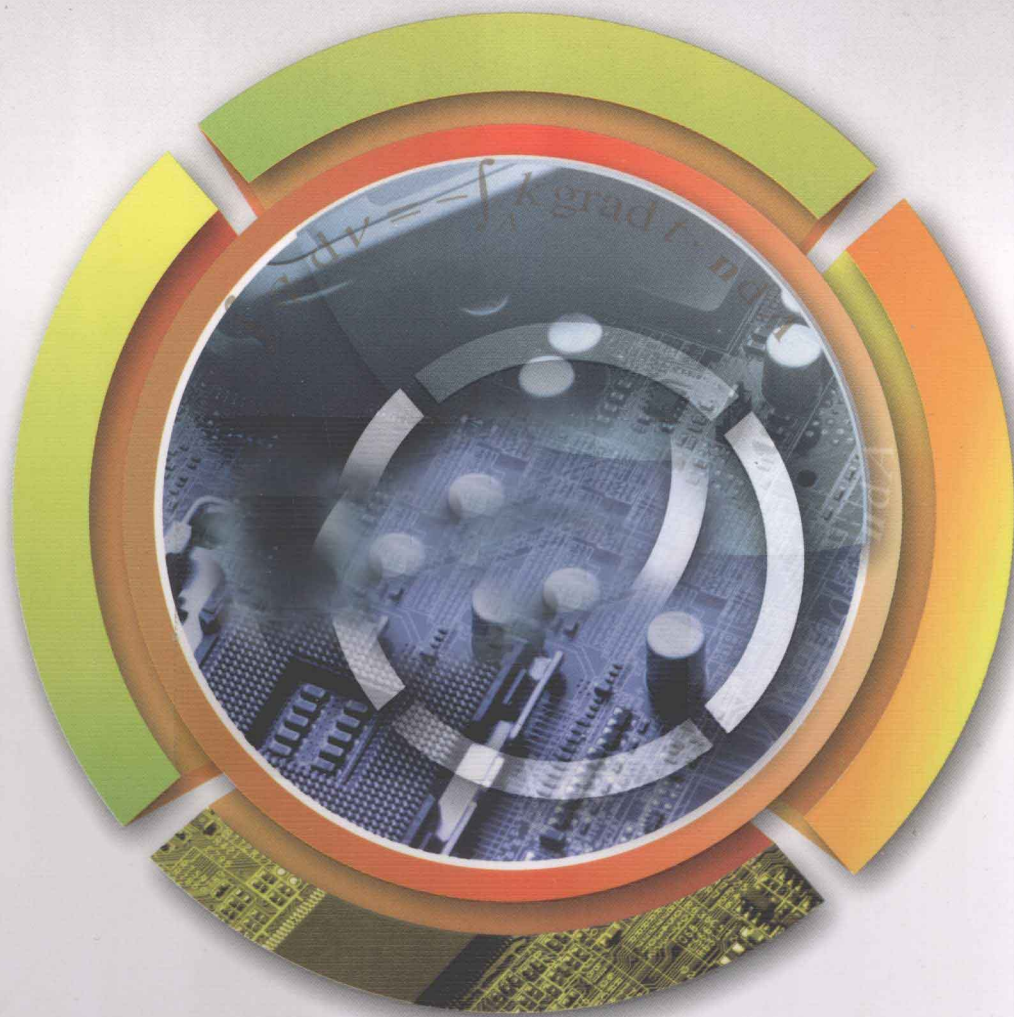


现代电子机械工程丛书

现代电子

樊融融 编著

装联工艺可靠性



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

现代电子机械工程丛书

“十二五”国家重点出版规划精品项目

现代电子装联工艺可靠性

樊融融 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电子产品的工艺可靠性问题,存在于产品在工厂生产和市场服役的全过程。笔者从事电子装联工艺及其装备等技术研究整 50 年,深感电子制造中的工艺可靠性问题,随着微组装和微焊接技术应用的日趋广泛和深入而愈显突出。因此,加强电子装联工艺工程师们对工艺可靠性基础理论的掌握和技术素质的提升,是关系到一个公司的产品实施“低成本、优质、可靠”战略的关键一环,编著本书的出发点就是在不断发展的现代电子产品制造中,当面对形形色色的缺陷和故障现象时,能为他们提供技术支持。

本书适合广大从事电子产品制造的工艺工程师、质量管理工程师、材料技术工程师、生产现场管理工程师及用户服务工程师等技术人员阅读和借鉴。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子装联工艺可靠性 / 樊融融编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.4

(现代电子机械工程丛书)

“十二五”国家重点出版规划精品项目

ISBN 978-7-121-16130-8

I. ①现… II. ①樊… III. ①电子装联—生产工艺—可靠性 IV. ①TN305.93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 034816 号

广告经营许可证号: 京海工商广字第 0258 号

策划编辑: 李 洁

责任编辑: 刘真平

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 20.25 字数: 518.4 千字

印 次: 2012 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

序

电子产品向多功能化、集成化、高密度化、模组化、3D 化、微型化发展的趋势，为元器件、PCB、工艺辅料的演进提供了驱动力。电子装联技术作为组成产品的核心技术为适应产品的进步正在经历着深刻的变革。在经历这场变革的过程中，工艺可靠性问题已经变得越来越重要，已成为业界同人必须面对的技术问题之一。

作为电子产品组装工艺过程主要的技术核心，软钎焊已经成为其主流技术之一。其过程可靠性将直接影响到电子系统产品的可靠性，因此，软钎焊的可靠性必须得到业界的充分重视。

我们知道，当前电子产品的组装技术已经从 THT（通孔插件技术）发展到 SMT（表面贴装技术）时代，而且目前已发展到了 Post-SMT（后 SMT）时期。

在 THT（通孔插件技术）时期，一个电子组装工程师只需要了解装备的结构原理和构成，按照设计预定的可靠性期望值和目标，依靠经验积累就能将其组装成独立的产品。在传统的组装和电子互连过程中，影响工艺组装质量的因素相对比较单一，工艺研究的范畴仅局限于工艺控制过程、工艺方法、工艺管理等行为科学的经验积累，而产品的可靠性大部分是由产品设计所左右的。

与 THT 技术相比，SMT 一个最大的特点就是电子产品的高度集成，细间距 BGA、PoP、MCM、SIP 等新型封装器件越来越多地得到了应用。组成电子系统产品的器件封装技术已经从传统的组装技术脱胎换骨地发展成为一个全新的应用性学科。但是这些新型器件由于其封装的高度集成，以及引脚形式、间距、材料、耐温等因素的变化，导致了越来越多的可靠性问题。

电子装联的可靠性依赖于各个元器件的可靠性，以及这些元器件界面间的力学、热学及电学的可靠性。在这些接触界面中，表面贴装焊接层是唯一的不仅提供了电气连接，而且还提供了电子元器件到 PCB 基板的机械连接与元器件严重发热时的散热功能。一个单独的焊点很难说可靠还是不可靠，但是电子元器件通过焊点连接到 PCB 上时，这个焊点也就具有了可靠性的意义。

本书作者结合多年来的工作经验，从电子装联可靠性基本概念入手，对电子装联可靠性的重要性、影响因素、形成机理、失效模型、有铅/无铅差异等技术点进行了系统阐述。从焊点可靠性设计、焊点加固、可靠性试验等方面给出了提高电子装联工艺可靠性的各种指导原则。因此，期待本书的出版能够给广大的电子装联技术工程师提供重要参考，推动国内电子装联工艺可靠性技术研究不断向前发展。

中兴通讯股份有限公司执行副总裁



前 言

现代电子制造以微电子学器件的大规模应用为标志，这也是有别于传统电子制造的主要之点。电子产品更快、更小、更廉价的要求推动了电子工业的革命，不断缩小的封装很快使周边引线方式走到了极限。因此，当面阵列封装成为关注的焦点时，“封装革命”开始了。直接芯片粘接或倒装芯片技术直接把芯片连接到 PCB 上，几乎摒弃了传统的封装方式，完全改变了传统产品制造技术的格局，从此产品的可靠性更多地依赖于封装和电气互连的工艺可靠性了……这一切都构成了现代电子制造工艺可靠性的技术内容，极大地丰富了工艺可靠性理论，使之日趋完善成为一个独立的理论体系。

一项电子产品的工艺可靠性问题，存在于产品在工厂生产和市场服役的全过程。因此，日本有专家针对上述情况，给出了下述描述：

- (1) 产品在企业内发生的不良称为缺陷；
- (2) 产品投放市场服役期发生的性能异常称为故障。

不管是缺陷还是故障，产品发生的这些不良，在剔除外部元器件和材料等的不良因素外，剩下的均属内部的产品制造问题，与工艺的不良紧密相关。因此，我们可以把电子产品生产后工序中所发生的将要影响系统可靠性的各种质量现象统称为现代电子装联工艺可靠性问题。

电子产品由各种电子元器件组装而成，在组装过程中最大量的工作就是软钎接。因此，软钎接的可靠性已成为影响现代电子产品可靠性的关键因素。

现代电子制造工艺可靠性的工程问题主要表现在：

- (1) 产品在企业制造过程中发生的缺陷

此类缺陷都是发生在产品的工厂制造过程中，它具有显性特点，即大部分是肉眼可见的。通常这类缺陷都可以通过修理予以排除。只有少数在目检中不可能发现的所谓潜在的蜕变因素，一旦流入市场后，便构成早期失效故障。

- (2) 产品在用户服役期间发生的故障

电子产品进入用户服役后发生的故障，几乎都具有隐性的特点，即产品卖给用户后，要经过一定的时间后才因焊点失效而发生电气故障。一般这种潜在的蜕变因素很少能在电子产品的制造过程中引起明显的缺陷，但它却是未来性能异常的潜在隐患。这种在有效寿命期内发生的故障现象，因具有不经常出现和不可预测的属性而称为随机故障，它构成现代电子产品在有效寿命期内发生故障的主要模式。

现代电子装联工艺可靠性具有鲜明的实践性和分析手段的微观性。

- 日本现代电子装联工艺技术专家田中和吉说：“现在已有许多专著以数学为基础来论述可靠性问题。但是，这些专著难免流于形式而脱离实际，远未能触及焊接的具体问题。我们认为通过总结以往多次失败的教训和积累解决问题的经验，更容易加深理解。任何人都不愿意亲口说出自己的失败，那是因为成功之谈既体面又富有魅力。但是焊接却是实实在在的工作，非亲身实践是不能理解其难度和要领的。所以，即使是失败的教训也可以借鉴。”

- 解决一个案例往往都要通过微观分析手段，深入到分子和原子级的微观组织结构中去提取信息。通过对获取的信息的判读和识别，才能迅速搞准失效模式和机理，使缺陷和故障能迅速得到正确的纠正和解决。

笔者从事电子装联工艺及其装备等技术研究和攻关工作整 50 年（前 41 年在军工系统，后 9 年在中兴公司），深感电子制造中的工艺可靠性问题，随着微组装和微焊接技术应用的日趋广泛和深入而愈显突出，在现代电子产品和装备的失效中几乎有 70% 属于工艺可靠性范畴。因此，加强电子装联工艺工程师们对工艺可靠性基础理论的掌握和技术素质的提升，是关系到一个公司的产品实施“低成本、优质、可靠”战略的关键一环，编著本书的出发点就是在不断发展的现代电子产品制造中，当面对形形色色的缺陷和故障现象时，能为他们提供技术支持。

在编著本书的过程中，得到了中兴通讯股份有限公司执行副总裁田文果先生及他的高级顾问马庆魁先生的关怀和鼓励。特别是田总在日理万机中还挤出宝贵的时间为本书作序，这不仅是对一个从事科技工作的普通老兵的关怀，从中更是折射出了中兴公司高层领导一贯的“崇尚科学、尊敬人才”的优良传统。

我还要深深感谢我的直接领导：公司副总经理、制造中心主任张强先生，制造工程研究院院长刘剑锋先生，在本书的编写过程中，得到了他们多方位的关怀和帮助。

本书在撰写过程中还得到了工艺研究部刘哲总工、工艺专家贾忠中的帮助，我的学生邱华盛（制造中心总工）、付红志、钟宏基、孙磊、曾福林、辛宝玉、林晓秋、周杨、韩念春、冯延鹏、程定军、陈德鹅及朱林林、潘华强等参与了书稿的校对工作，在此也表示衷心的感谢。

四川省 SMT 专委会秘书长兼广东省 SMT 专委会秘书长苏曼波先生对本书的出版给予了热情的关注，我女儿樊颜博士就书稿的结构和文字协助做了许多工作，在此均表示谢意。

编 著 者

2011 年 5 月于中兴通讯股份有限公司

目 录

| | |
|---|------|
| 第 1 章 现代电子装联工艺可靠性概论 | (1) |
| 1.1 电子设备可靠性的基本概念 | (1) |
| 1.1.1 电子设备可靠性问题的产生 | (1) |
| 1.1.2 电子设备可靠性的定义与数学描述 | (1) |
| 1.1.3 可靠性准则 | (5) |
| 1.1.4 可靠性的数量特征 | (5) |
| 1.2 现代电子装联工艺可靠性 | (10) |
| 1.2.1 电子装联工艺的变迁和发展 | (10) |
| 1.2.2 现代电子装联工艺可靠性问题的提出 | (11) |
| 1.2.3 现代电子装联工艺可靠性的研究对象和现实意义 | (14) |
| 第 2 章 影响现代电子装联工艺可靠性的因素 | (17) |
| 2.1 概述 | (17) |
| 2.1.1 现代电子装联工艺可靠性的内涵 | (17) |
| 2.1.2 现代电子装联焊接过程中的缺陷现象 | (17) |
| 2.1.3 应用中焊点可靠性的蜕变现象 | (20) |
| 2.2 电子元器件电极表面状态对互连焊接可靠性的影响 | (22) |
| 2.2.1 从可靠性看对电子元器件引脚材料的技术要求 | (22) |
| 2.2.2 电子元器件引脚用材料对焊接可靠性的影响 | (22) |
| 2.2.3 引脚的可焊性涂层对焊接可靠性的影响 | (24) |
| 2.3 PCB 焊盘涂层对焊接可靠性的影响 | (28) |
| 2.3.1 PCB 常用可焊性涂层的特性描述 | (28) |
| 2.3.2 目前国内外电子业界在 PCB 镀层的应用情况和评价 | (31) |
| 2.3.3 综合提升 PCB 镀层可焊性和抗环境侵蚀能力对改善工艺可靠性的现实意义 | (31) |
| 2.3.4 Im-Sn+重熔工艺在恶劣环境下改善抗腐蚀能力和可焊性的机理 | (32) |
| 2.4 镀层可焊性的储存期试验及试验方法 | (34) |
| 2.4.1 储存期对可焊性的影响 | (34) |
| 2.4.2 加速老化处理试验 | (35) |
| 第 3 章 焊接界面合金层的形成及其对焊点可靠性的影响 | (36) |
| 3.1 焊接界面 | (36) |
| 3.1.1 焊接界面的物理状态 | (36) |
| 3.1.2 界面合金层的形成 | (36) |
| 3.1.3 影响合金层生长的因素 | (41) |
| 3.2 IMC 对焊点可靠性的影响 | (45) |
| 3.2.1 IMC 对焊接连接的意义 | (45) |
| 3.2.2 IMC 状态对焊点可靠性的影响 | (46) |

| | | |
|--------------|--------------------------------------|-------------|
| 3.2.3 | IMC 厚度对焊点可靠性的影响 | (48) |
| 3.2.4 | IMC 微组织结构对焊点可靠性的影响 | (49) |
| 第 4 章 | 环境因素对电子装备可靠性的影响及工艺可靠性加固 | (52) |
| 4.1 | 在环境作用下电子产品性能的变化 | (52) |
| 4.1.1 | 湿度的影响 | (52) |
| 4.1.2 | 热和冷的影响 | (54) |
| 4.1.3 | 大气压力的影响 | (56) |
| 4.1.4 | 日光、灰尘和沙粒的影响 | (56) |
| 4.2 | 大气中腐蚀性元素和气体对电子装备可靠性的影响 | (56) |
| 4.2.1 | 大气中腐蚀性元素和气体的种类及其容许的浓度 | (56) |
| 4.2.2 | 大气腐蚀 | (57) |
| 4.2.3 | 在天然水介质中的腐蚀 | (58) |
| 4.2.4 | 接触腐蚀 | (58) |
| 4.2.5 | 离子迁移现象的机理及其对可靠性的危害 | (59) |
| 4.3 | 金属镀层的腐蚀(氧化)对可靠性的危害 | (59) |
| 4.3.1 | 金属腐蚀的定义 | (59) |
| 4.3.2 | 腐蚀介质的分类 | (59) |
| 4.3.3 | 引脚基体金属和镀层间的电化学腐蚀现象 | (61) |
| 4.3.4 | 非金属及金属的接触偶电极电位对可靠性的潜在影响 | (63) |
| 4.4 | 工艺可靠性加固措施 | (66) |
| 4.5 | 免清洗助焊剂在应用中的隐患 | (68) |
| 4.5.1 | 助焊剂残余物的潜在危险性 | (68) |
| 4.5.2 | 助焊剂残余物的分类及其对可靠性影响的预防 | (69) |
| 第 5 章 | 影响电子产品在服役期间的工艺可靠性问题 | (70) |
| 5.1 | 产品服役期的工艺可靠性 | (70) |
| 5.1.1 | 概述 | (70) |
| 5.1.2 | 影响产品制造缺陷的工艺可靠性问题 | (71) |
| 5.1.3 | 影响市场服役期故障的工艺可靠性问题 | (71) |
| 5.2 | 金属偏析现象 | (71) |
| 5.2.1 | 偏析的定义及分类 | (71) |
| 5.2.2 | 偏析对焊点可靠性的影响 | (72) |
| 5.2.3 | 焊接过程中 Pb 偏析形成机理 | (73) |
| 5.2.4 | 抑制焊点出现偏析的措施 | (74) |
| 5.3 | 黑色焊盘现象 | (74) |
| 5.3.1 | 黑盘现象 | (74) |
| 5.3.2 | 黑盘现象的形成机理 | (75) |
| 5.3.3 | 有关“黑盘现象”隐患的背景资料 | (77) |
| 5.4 | Au 脆现象 | (78) |
| 5.4.1 | Au 脆现象的发现 | (78) |

| | | |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 5.4.2 | 焊点中 Au 含量对脆性的影响 | (78) |
| 5.4.3 | Au 脆现象发生的冶金机制 | (80) |
| 5.4.4 | Au 脆的控制 | (81) |
| 5.4.5 | Au 脆危害可靠性的案例 | (81) |
| 5.5 | 金属离子迁移现象 | (83) |
| 5.5.1 | 金属离子迁移的定义和分类 | (83) |
| 5.5.2 | Ag 离子迁移现象的发现 | (83) |
| 5.5.3 | Ag 离子的迁移机理 | (84) |
| 5.5.4 | Ag 迁移现象对可靠性的危害 | (85) |
| 5.5.5 | 导电阳极细丝 (CAF) 现象 | (86) |
| 5.5.6 | CAF 的生长机理及危害 | (87) |
| 5.5.7 | 对 CAF 生成因素的控制 | (87) |
| 5.6 | 钎料的电子迁移现象 | (88) |
| 5.6.1 | 钎料电子迁移概述 | (88) |
| 5.6.2 | 电子迁移对接合界面的影响 | (89) |
| 5.6.3 | 电子迁移对倒装片接续的影响 | (90) |
| 5.7 | Sn 晶须生长现象 | (91) |
| 5.7.1 | 金属晶须 | (91) |
| 5.7.2 | Sn 晶须生成的环境条件 | (92) |
| 5.7.3 | Sn 晶须生长的机理 | (95) |
| 5.7.4 | Sn 晶须生长的抑制 | (97) |
| 5.8 | 爬行腐蚀现象 | (98) |
| 5.8.1 | 问题的提出 | (98) |
| 5.8.2 | 爬行腐蚀 | (99) |
| 5.8.3 | 对爬行腐蚀的防护措施 | (101) |
| 5.8.4 | 爬行腐蚀、离子迁移枝晶及 CAF 等的异同 | (101) |
| 5.8.5 | 失效案例分析 | (101) |
| 5.9 | 柯肯多尔空洞 | (104) |
| 5.9.1 | 柯肯多尔空洞的形成 | (104) |
| 5.9.2 | 柯肯多尔空洞对焊点可靠性的影响 | (104) |
| 5.10 | 产品在用户服役期中工艺可靠性的蜕变现象 | (105) |
| 5.10.1 | 工艺可靠性蜕变现象 | (105) |
| 5.10.2 | 固相老化中显微组织演化 | (105) |
| 第 6 章 理想焊点的质量模型及其影响因素 | | (107) |
| 6.1 | 软钎接焊点对电子系统可靠性的贡献 | (107) |
| 6.1.1 | 软钎接在电子装联工艺中的地位 | (107) |
| 6.1.2 | 软钎接是影响电子产品制造质量的主要根源 | (107) |
| 6.2 | 理想焊点接续界面的质量模型 | (107) |
| 6.2.1 | 理想焊点界面结构的质量要求 | (107) |

| | | |
|--------------|---------------------------------------|-------|
| 6.2.2 | 理想焊点的质量模型对提高产品质量的贡献 | (108) |
| 6.3 | 构成理想焊点质量模型的主要条件分析 | (108) |
| 6.3.1 | 低的基板 Z 轴方向的 CTE 值 | (108) |
| 6.3.2 | 平整且厚度合适的均匀 IMC 层 | (110) |
| 6.3.3 | 界面体内粒度小于 100nm 的微细强化粒子 | (114) |
| 6.3.4 | 偏析少的钎料组织 | (117) |
| 6.3.5 | 弱的氧化膜 | (121) |
| 6.4 | 软钎接焊点在用户服役中所能耐受的最高温度 | (122) |
| 第 7 章 | 有铅和无铅混合组装的工艺可靠性 | (124) |
| 7.1 | 有铅和无铅混合组装 | (124) |
| 7.1.1 | 概述 | (124) |
| 7.1.2 | 有铅向无铅技术转变的过渡时期 | (124) |
| 7.1.3 | 有铅与无铅混合组装的相容性 | (125) |
| 7.2 | 混合组装合金焊点的可靠性 | (126) |
| 7.2.1 | 概述 | (126) |
| 7.2.2 | Intel 公司组织的对混合合金焊点的可靠性试验和评估 | (127) |
| 7.2.3 | Jennifer Nguyen 等人对混合合金焊点的可靠性评估 | (133) |
| 7.2.4 | 混合合金焊点的可靠性综合评估 | (136) |
| 7.3 | 影响混合合金焊点工艺可靠性的因素 | (136) |
| 7.3.1 | 无铅、有铅混用所带来的工艺问题 | (136) |
| 7.3.2 | 混合合金焊点的工艺可靠性设计 | (137) |
| 7.3.3 | PCB 焊盘及元器件引脚焊端涂敷层 | (138) |
| 7.3.4 | 混合组装再流焊接时应注意的事项 | (138) |
| 7.3.5 | 混合组装再流焊接温度曲线的优化 | (140) |
| 第 8 章 | 电子产品无 Pb 制程的工艺可靠性问题 | (142) |
| 8.1 | 电子产品无 Pb 制程工艺可靠性概述 | (142) |
| 8.1.1 | 前言 | (142) |
| 8.1.2 | 无 Pb 制程定义及系统考虑 | (142) |
| 8.1.3 | 电子产品无 Pb 制程工艺可靠性 | (143) |
| 8.2 | 影响电子产品无 Pb 制程工艺可靠性的因素 | (144) |
| 8.2.1 | 影响无 Pb 焊点工艺可靠性的因素 | (144) |
| 8.2.2 | 钎料合金 | (144) |
| 8.2.3 | 元器件 | (145) |
| 8.2.4 | PCB | (146) |
| 8.2.5 | 工艺因素 | (149) |
| 8.2.6 | 对环境的适应性 | (151) |
| 8.2.7 | 环境影响因素 | (151) |
| 8.2.8 | 导电阳极丝及柯肯多尔空洞 | (152) |
| 8.3 | 脆变现象 | (152) |

| | | |
|--------------|------------------------------------|--------------|
| 8.3.1 | 无 Pb 焊接脆弱性问题 | (152) |
| 8.3.2 | 脆变机理 | (153) |
| 8.4 | 无 Pb 焊点的质量和可靠性测试 | (154) |
| 8.4.1 | 无 Pb 制程所面临的挑战 | (154) |
| 8.4.2 | 无 Pb 焊点的质量和可靠性试验 | (155) |
| 8.5 | 无 Pb 制程焊点可靠性评估 (与 SnPb 钎料比较) | (155) |
| 8.5.1 | 等温机械疲劳测试 | (155) |
| 8.5.2 | 热疲劳测试 | (156) |
| 8.5.3 | 热机械负荷测试 | (159) |
| 8.5.4 | 高温和高低温温度冲击试验 | (159) |
| 8.5.5 | BGA、CSP 由有 Pb 到无 Pb 制程的可靠性变化 | (160) |
| 8.5.6 | 无 Pb 钎料的机械振动 | (161) |
| 8.5.7 | 微组织和合金层 | (161) |
| 8.6 | 无 Pb 再流焊冷却速率对焊点可靠性的影响 | (162) |
| 8.6.1 | 问题的提出 | (162) |
| 8.6.2 | 冷却对无 Pb 钎料的影响 | (163) |
| 8.6.3 | 冷却在生产中的应用 | (164) |
| 8.7 | 无 Pb 焊点特有的工艺缺陷现象 | (165) |
| 8.7.1 | 凝固过程生成的缺陷 | (165) |
| 8.7.2 | Pb 污染引起的现象 | (172) |
| 第 9 章 | 波峰焊接焊点的工艺可靠性设计 | (175) |
| 9.1 | 概述 | (175) |
| 9.1.1 | 波峰焊接焊点接头工艺可靠性设计的意义 | (175) |
| 9.1.2 | 波峰焊接焊点的形成过程及控制因素 | (175) |
| 9.2 | 焊点的接头 | (175) |
| 9.2.1 | 焊点的接头模型 | (175) |
| 9.2.2 | 波峰焊接的基本接头结构和工艺设计要求 | (176) |
| 9.3 | 焊接接头结构设计对接头机电性能的影响 | (178) |
| 9.3.1 | 接头的几何形状设计及对强度的影响 | (178) |
| 9.3.2 | 焊接接头的电气特性 | (180) |
| 9.4 | 影响焊接接头机械强度的因素 | (183) |
| 9.4.1 | 施用的钎料量对焊点剪切强度的影响 | (183) |
| 9.4.2 | 与熔化钎料接触的时间对焊点剪切强度的影响 | (184) |
| 9.4.3 | 焊接温度对接头剪切强度的影响 | (184) |
| 9.4.4 | 接头厚度对强度的影响 | (185) |
| 9.4.5 | 接头强度随钎料合金成分和基体金属的变化 | (186) |
| 9.4.6 | 钎料接头的蠕变强度 | (187) |
| 9.5 | 基体金属的可焊性和焊点的可靠性 | (189) |
| 9.5.1 | 可焊性 | (189) |

| | | |
|---------------|-------------------------------------|--------------|
| 9.5.2 | 影响焊点可靠性的因素 | (190) |
| 9.5.3 | 波峰焊接表面的净度和电子污染 | (192) |
| 9.5.4 | 镀层可焊性的储存期试验及试验方法 | (194) |
| 第 10 章 | SMT 再流焊接焊点的工艺可靠性设计 | (196) |
| 10.1 | SMT 再流焊接焊点的结构特征 | (196) |
| 10.2 | 再流焊接接合部工艺可靠性设计概述 | (198) |
| 10.2.1 | 接合部工艺可靠性设计的目的和任务 | (198) |
| 10.2.2 | 接合部工艺可靠性设计的定义和内容 | (198) |
| 10.3 | 片式元器件再流焊接接合部工艺可靠性设计及举例 | (200) |
| 10.3.1 | 片式元器件焊点工艺可靠性设计 | (200) |
| 10.3.2 | 片式元器件焊点工艺可靠性设计举例 | (207) |
| 10.4 | QFP 再流焊接接合部工艺可靠性设计及举例 | (210) |
| 10.4.1 | QFP 接合部工艺可靠性设计 | (210) |
| 10.4.2 | QFP 接合部工艺可靠性设计举例 | (213) |
| 10.5 | BGA、CSP 再流焊接接合部工艺可靠性设计 | (217) |
| 10.5.1 | 工艺可靠性设计(确定必要的钎料量) | (217) |
| 10.5.2 | 焊盘设计 | (219) |
| 10.5.3 | 印刷钢网开口尺寸的确定 | (220) |
| 第 11 章 | PCBA 常见的危及可靠性的故障现象及其分析 | (222) |
| 11.1 | PCBA 和故障 | (222) |
| 11.1.1 | 概述 | (222) |
| 11.1.2 | 失效分析基础 | (222) |
| 11.1.3 | PCBA 失效分析的层次和原则 | (223) |
| 11.1.4 | 失效分析方法 | (224) |
| 11.2 | PCBA 在生产过程中发生的缺陷现象 | (224) |
| 11.2.1 | PCBA 的翘曲和应力 | (224) |
| 11.2.2 | 再流焊接的爆板 | (226) |
| 11.2.3 | 再流焊接中的分层现象 | (230) |
| 11.2.4 | 潮湿敏感元器件的爆米花现象 | (231) |
| 11.2.5 | 拼板安装分板时对产品质量和可靠性的影响 | (233) |
| 11.2.6 | 某键盘板再流焊接后焊盘变黑 | (233) |
| 11.2.7 | 某按键镀金面变色 | (234) |
| 11.2.8 | USB 尾插焊后脱落 | (236) |
| 11.2.9 | 功放过孔断线现象 | (241) |
| 11.3 | PCBA 服役期中发生的缺陷现象 | (243) |
| 11.3.1 | 服役期中 PCBA 板面发现化学腐蚀 | (243) |
| 11.3.2 | 某背板产品在用户服役期间焊点发白 | (244) |
| 11.3.3 | 某背板产品在加电工作中因绝缘击穿而烧毁 | (247) |
| 11.3.4 | PTH 绿油塞孔口发生黑色物堆积现象 | (248) |

| | | |
|---------------|-----------------------------------|--------------|
| 11.4 | PCBA 多余物 | (250) |
| 11.5 | PCBA 的清洁度标准 | (251) |
| 11.5.1 | 概述 | (251) |
| 11.5.2 | PCBA 清洁度要求 | (252) |
| 第 12 章 | PCBA 焊点失效分析 | (254) |
| 12.1 | PCBA 焊点失效分析基础 | (254) |
| 12.1.1 | 名词及定义 | (254) |
| 12.1.2 | 损坏机制和焊点失效概述 | (254) |
| 12.1.3 | 焊点和焊接层类型 | (255) |
| 12.1.4 | 焊接连接部失效 | (256) |
| 12.2 | 虚焊及冷焊 | (258) |
| 12.2.1 | 概述 | (258) |
| 12.2.2 | 虚焊 | (259) |
| 12.2.3 | 冷焊 | (261) |
| 12.3 | BGA 焊点的常见失效模式及机理 | (265) |
| 12.3.1 | 界面失效 | (265) |
| 12.3.2 | 钎料疲劳失效 | (265) |
| 12.3.3 | 张力载荷引起蠕变断裂 | (267) |
| 12.3.4 | 弯曲试验常见的失效 | (267) |
| 12.4 | BGA 组装异常案例分析 | (268) |
| 12.4.1 | 概述 | (268) |
| 12.4.2 | BGA 焊盘定义 | (269) |
| 12.4.3 | BGA 钎料球过度坍塌 | (269) |
| 12.4.4 | 焊膏的印刷状态 | (269) |
| 12.4.5 | BGA 中介层的变形 | (270) |
| 12.4.6 | 焊接的焊点状态 | (271) |
| 12.5 | 生产中 PCBA 焊点失效典型案例 | (273) |
| 12.5.1 | 案例 1: MP3 主板器件焊点脱落 | (273) |
| 12.5.2 | 案例 2: 某单板角焊点断裂 | (275) |
| 12.5.3 | 案例 3: 某批终端产品在生产中发生不开机现象 | (278) |
| 12.6 | PCBA 在服役期焊点失效的典型案例 | (279) |
| 12.6.1 | 案例 1: 某产品 PCBA 主板在用户服役中 BGA 焊点断裂 | (279) |
| 12.6.2 | 案例 2: X-FPBA 失效 | (283) |
| 12.6.3 | 案例 3: 某计算机用 PCBA 上 BGA 的部分钎料球焊点开裂 | (285) |
| 12.7 | 焊点可靠性蜕变现象讨论 | (286) |
| 12.7.1 | 镀层因素 | (286) |
| 12.7.2 | 老化与 IMC 长厚 | (287) |
| 第 13 章 | 工艺可靠性试验 | (289) |
| 13.1 | 工艺可靠性试验概论 | (289) |

| | | |
|---------|------------------------------|-------|
| 13.1.1 | 工艺可靠性试验的目的 | (289) |
| 13.1.2 | 试验分类和检测技术的适用性 | (290) |
| 13.2 | 主要的试验内容和方法 | (291) |
| 13.2.1 | 外观检查 | (291) |
| 13.2.2 | 接合强度评价 | (292) |
| 13.2.3 | X 射线透视检查 | (294) |
| 13.2.4 | 红外热敏成像 | (296) |
| 13.2.5 | 红外显微镜分析 (FT) | (297) |
| 13.2.6 | 声频显微扫描检测技术 | (297) |
| 13.2.7 | 扫描电镜与能谱分析 | (298) |
| 13.2.8 | 内窥镜光学检验 | (299) |
| 13.2.9 | 着色探伤检测法 | (300) |
| 13.2.10 | 金相切片 | (301) |
| 13.2.11 | 温度循环试验 | (303) |
| 13.3 | 获得焊点可靠性的基础——基体金属的可焊性试验 | (304) |
| 13.3.1 | 可焊性的定义 | (304) |
| 13.3.2 | 可焊性和可靠性 | (305) |
| 13.3.3 | 焊接过程中与可焊性相关的物理参数 | (305) |
| 13.3.4 | 可焊性试验 | (305) |
| | 参考文献 | (309) |

第1章 现代电子装联工艺可靠性概论

1.1 电子设备可靠性的基本概念

1.1.1 电子设备可靠性问题的产生

现代电子设备，特别是军用电子装备越来越朝向轻、薄、短、小、高密度化、高自动化和高精度方向发展，其发展的主要技术矛盾在于：若不采取专门措施来提高其可靠性，那么设备越复杂、越精确，则其可靠性就越低。例如，一台现代电子装备系统由若干元器件及各种制造环节（工艺）集合而成，它们彼此间又是相互依赖的复杂系统。如果其中有一个元器件损坏或某一个制造环节不完善，那么整个系统就会失效。可见一个现代电子装备系统工作的可靠性并不超过构成系统中可靠性最小的元器件的工作可靠性及各制造环节的工艺可靠性。

在第二次世界大战末期（1944—1945年），特别是在朝鲜战争时期（1950—1952年），据美国相关资料报导，无线电通信设备有14%的时间，水声设备有48%的时间，雷达设备约有84%的时间等是处于非工作状态的；仅1949年就约有70%的海洋用无线电电子设备是处于非工作状态的……因此，查明不可靠性的原因，提高无线电电子设备可靠性问题，在美国就已经成为全国性的刻不容缓的事情。美国陆军、海军的数十个军事部门大规模地进行了设备的调查工作。也就是从这时开始，可靠性的统计研究方法得到了公认。

1.1.2 电子设备可靠性的定义与数学描述

1. 可靠性的定义

根据国家标准 GB 6583—1994 的规定，产品的可靠性是指产品在规定的条件下、在规定的时间内完成规定的功能的能力。

电子设备或系统实际使用的可靠性叫做工作可靠性。工作可靠性又可分为固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性是产品设计和制造者必须确立的可靠性，即按照可靠性规划，从原材料和零部件的选用，经过设计、制造、试验，直到设备或系统出产的各个阶段所确立的可靠性。使用可靠性是指已生产的产品，经过包装、运输、储存、安装、使用、维修等因素影响的可靠性。

从现代观点看，随着微组装工艺技术的不断引入，可靠性包含了耐久性、可维修性、设计可靠性及工艺可靠性四大要素。

- 耐久性：产品使用的无故障性或使用寿命长就是耐久性。例如，当空间探测卫星发射后，人们希望它能无故障地长时间工作，但从某一个角度来说，任何产品都不可能100%不会发生故障。
- 可维修性：当产品发生故障后，能够很快、很容易地通过维护排除故障，就是可维修性。而像飞机、汽车都是价格很高而且非常注重安全可靠性的要求，这一般通过日常的维护和保养来大大延长它的使用寿命，这是预防维修。

- 设计可靠性：这是决定产品质量的关键，由于人-机系统的复杂性，以及人在操作中可能存在的差错和操作使用环境的种种因素影响，发生错误的可能性依然存在，所以设计的时候必须充分考虑产品的易使用性和易操作性，这就是设计可靠性。
- 工艺可靠性：高密度、微组件、微焊接技术在现代电子制造中越来越普遍。美国是世界上第二个发射卫星的国家，就是这种提高国家威望的大事，也曾因为涉及焊接的一点小问题而受挫折。当今国内外电子产品由制造因素导致的失效中，约有 80% 是出自焊接质量问题。而在焊点的失效中，面阵列封装器件（如 BGA、CSP、FCOB 等）焊点的失效又约占整个焊接缺陷的 80% 左右。显然解决面阵列封装器件（如 BGA、CSP、FCOB 等）的焊点失效问题，是改善现代电子产品制造质量和可靠性的重中之重，这就是工艺可靠性所面临的挑战。

2. 电子设备可靠性的数学描述

在可靠性的定量测定方面，使用最广泛的是统计方法，概率论和数学统计学是研究可靠性问题的主要工具。概率论能确定影响可靠性的可变随机变数的大数与可靠性数量特征之间的相互关系。因此，可靠性理论的许多概念与概率论中所用的概念有关。

概率论能研究普遍现象，多次试验时重复的现象称为普遍现象。如果在多次试验时，每一次试验必然发生某一事件，则该事件称为必然事件。如果某一事件明知不会发生，则称为不可能事件。在每一次单独试验中不可能预言的事件称为随机事件。

除随机事件之外，概率论还研究随机变数及随机过程（随机函数）。由于试验的结果可取某一值的变数，如产品尺寸与其额定值的误差，焊点失效前的工作时间等，因而称为随机变数。

与某些非随机变数的不同值相符的随机变数的集合，如焊接温度的起伏等，称为随机过程或随机函数。

准确地预言随机变数、随机过程及随机事件是不可能的。但是，如果研究的不是每一个随机事件、随机变数或随机过程，而是它们的集合，则可用数学方法来说明其特征。

假设做 N 次试验时，某一事件 A 出现 K 次，这时， K/N 的比例称为随机事件 A 的频率并以 $W(A)$ 表示，即

$$W(A) = K/N$$

当试验次数增多后，事件 A 出现的频率就显得较稳定，即在相同条件下进行多次试验时，事件的频率近似于 P ，即

$$P(A) = K/N \quad (1.1)$$

$P(A)$ 称为事件 A 的概率并写成

$$P = P(A) \quad (1.2)$$

从式 (1.1) 和式 (1.2) 可看出，做 N 次试验时，事件 A 约发生 NP 次，而不发生 $N(1-P)$ 次。

显然，随机事件的概率在数量上符合条件

$$0 \leq P \leq 1$$

如果 A 是不可能事件，则 $P = 0$ ；如果 A 是必然事件，则 $P = 1$ 。

对于随机事件，研究计算概率的基本法则是：

(1) 如果事件 A_1, A_2, \dots, A_n 是不相容的，则

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$$

(2) 对立事件 \bar{A} 的概率可表示为

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A)$$

(3) 几个独立事件联合发生的概率等于这些事件的概率之积, 即

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i)$$

(4) 如果事件 A 和 B 不是对立和独立的, 即如果 A 和 B 是任何随机事件, 则

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(AB);$$

$$P(AB) = P(A)P_A(B)$$

式中 $P_A(B)$ ——在发生事件 A 的条件下, 事件 B 出现的概率。

随机变数往往是离散的或连续的, 它可用概率分布函数来说明。设 ζ 为一随机变数, 取小于某个 x 的值, 有

$$P(\zeta < x) = F(x)$$

这一事件的概率称为概率分布的积分函数或随机变量的概率分布定律。如果其导数存在, 则该函数的导数为

$$F(x) = F'(x)$$

称为随机变量的概率分布函数或密度。

随机变量与概率分布函数一样, 可用下列数量分布特征来说明。

(1) 随机变量 ζ 的平均值或数学期望:

$$\bar{\xi} = W(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

(2) 随机变量绝对值的平均算术值或数学期望:

$$|\bar{\xi}| = M|\xi| = \int_{-\infty}^{+\infty} |x| f(x)dx$$

(3) 随机变量的随机(平均)值 b , 即其值在区间 $(-b < \zeta < b)$ 内, 存在于区间内的概率等于 0.5。

b 值由下式计算。

$$\int_{-b}^{+b} f(x)dx = 0.5$$

(4) 随机变量 ζ 的平方平均值:

$$M(\xi^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x)dx$$

(5) 随机变量的方差:

$$D(\xi) = M\left[(\xi - \bar{\xi})^2\right] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{\xi})^2 f(x)dx$$

(6) 随机变量的概率分布函数。

在电子装联工艺随机变量的概率分布函数最常用的是下述几种。

① 正态分布。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}}$$

$$P(\xi \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\alpha)^2}{2\sigma^2}} dt$$

式中 σ ——随机变量的方差;

α ——当 $f(x)$ 具有最大值时的 x 值 (α 为随机变量 ζ 的平均值)。