

☆☆☆☆

SMT

全彩

工艺不良与 组装可靠性

贾忠中 著

汇集作者近**30**年SMT行业经验

精选**45**个典型案例

聚焦工程应用 突出组装问题

图文并茂 简明实用 是SMT工程师不可多得的工具书



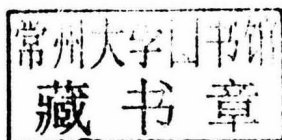
中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

SMT 工艺不良与组装可靠性

贾忠中 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是写给那些在生产一线忙碌的工程师的。全书以工程应用为目标，聚焦基本概念与原理、表面组装核心工艺、主要组装工艺问题及最新应用问题，以图文并茂的形式，介绍了焊接的基础原理与概念、表面组装的核心工艺与常见不良现象，以及组装工艺带来的可靠性问题。

本书适合于从事电子产品制造的工艺与质量工程师学习与参考。

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

SMT 工艺不良与组装可靠性 / 贾忠中著. —北京：电子工业出版社，2019.6
ISBN 978-7-121-36809-7

I. ①S… II. ①贾… III. ①SMT 技术 IV. ①TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 113253 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：天津千鹤文化传播有限公司

装 订：天津千鹤文化传播有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：22 字数：563.2 千字

版 次：2019 年 6 月第 1 版

印 次：2019 年 6 月第 1 次印刷

定 价：168.00 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）88254888，88258888。

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

本书咨询联系方式：lijie@phei.com.cn。

序 言

忠中的这本书给我带来了很大的惊喜。

本书的前半部分着重点在 SMT 不良工艺的成因及解决方法。在进入实际的工艺问题前，忠中很系统地介绍了 SMT 的工艺基础，包括 SMT 的组装基础知识、焊接基础及焊接材料本身，以及助焊剂及焊膏。除此之外，还介绍了跟焊接紧密相关的 PCB 表面镀层工艺及元件表面镀层工艺。这些背景资料的铺垫，为接下来的不良工艺的讨论提供了必要的基础知识。

不良工艺的成因及解决方法是本书的“大菜”。它包括了焊膏印刷和相关的钢板设计、再流焊、波峰焊及返修几个主要环节。忠中详细地介绍了各环节常见的不良种类，讨论了它们的成因及解决办法，还包括了对特定封装所遭遇问题的解决方法。在讨论成因时，忠中展示了深厚的功力，对问题的解决办法提供了周详的选择。

本书的后半部分是更精彩的可靠性的论述。在这部分忠中着重介绍了可靠性的概念及评估方法，以及其用在焊点上所表现出的特质。随后忠中重点讨论了组装应力失效、温度循环疲劳失效、环境因素影响及锡须等现象。

在组装应力部分，着重讨论了三种常见的元件，包括应力敏感封装、片式电容及 BGA；在温度循环失效部分，以深入浅出的方式向读者说明了基本的失效机理；而在环境失效方面，则详细介绍了四个主要的失效模式，这对读者是一个很大的帮助。

在锡须方面，忠中做了相当深入的讨论；对于控制锡须的生长，则给出了极其实用的建议。

综观全书，固然脉络分明、析理深入，但让我最感惊喜的还是极其丰富的实例。忠中以其在业界数十年的经验，实例信手拈来，包括材料、设计、组装及应用，将理论与实际紧密、生动地结合起来，在工业界实难一见。

我觉得此书不仅可以在生产线上作为工程师的随身参考书，更可以作为教材在课堂上传诸莘莘学子！

李宁成

2019年3月25日

前言

表面组装技术(SMT)的发展,如果从彩色电视机调谐器的广泛应用作为起点算起,已经有30年以上的历史了,但是,其发展仍然日新月异,每隔半年,我们都会看到新的材料、新的封装或新的工艺出现。技术的进步远比我们解决问题的步伐要快,旧的问题还没有完全解决,新的问题又出现了,挑战不断,这就是表面组装技术的魅力,也是作者写作此书的动力。

本书是写给那些在生产一线忙碌的工程师的,以核心工艺为纲、工程实战经验为目来组织材料。内容上聚焦工程应用主题,突出基本概念与原理、核心工艺、主要组装问题及最新应用,希望能够为读者提供全新视角、接地气的SMT应用工程知识。同时,也探讨了一些新出现的工艺问题,如ENIG表面处理Ni氧化现象,这部分内容带有一点学术性质,分析不一定完全正确,仅供参考。

表面组装过程中出现的不良现象很多,但是,对焊接质量影响比较大的主要是印刷的少印(少锡)、漏印,再流焊接的桥连、开路、焊点应力开裂,波峰焊接的桥连与透锡不良等。统计数据表明,只要解决了这些问题,就等于解决了90%以上的组装不良问题。这些组装不良现象之所以难以有效地管控,主要是这些问题不全是现场工艺问题,往往与元器件的封装、PCB的设计、焊膏的选用与模板的设计等很多因素有关,如波峰焊的透锡问题,很大程度上是一个设计问题。要解决这些问题,需要从产生问题的根本原因入手。

本书写作风格延续了本人作品一贯的“图文并茂”的特点。现代社会,生活节奏很快,读图比读文字更加高效与有趣,希望读者在快乐中学习。写作上力求简明、实用,使读者入得门、看得懂,结论性的论述做到有言必有据,经验性的论述做到背后有案例支持。希望能够为读者提供适用、实用、管用的电子制造知识。

本书聚焦三部分内容:工艺基础、工艺原理与不良及组装可靠性。

工艺基础部分:主要介绍表面组装技术的概念、工艺流程与核心;软钎焊的基本原理——加热、润湿、扩散和界面反应,以及润湿、界面反应、可焊性等重要概念;焊点的微观组织与机械性能、焊料合金组分和工艺条件的关系;焊点焊接与元器件焊接的异同,这是理解SMT工艺原理、优化生产工艺条件的依据与基础。这部分内容是电子制造工程师必须了解的知识。

工艺原理与不良部分,主要介绍SMT主要工艺辅料、核心工艺的原理与常见的工艺不良现象及产生的原因,包括:①焊膏、焊剂;②模板设计;③焊膏印刷原理与常见不良现象及产生原因;④再流焊接、波峰焊接原理与常见不良现象及产生原因。这部分内容是电子制造工程师必须掌握的知识。

组装可靠性部分,重点介绍组装过程中产生的、有潜在可靠性风险的组装不良问题,

诸如应力引发的焊点开裂、焊剂引发的绝缘下降等，聚焦板级互联的工艺失效，如焊点开裂、绝缘性能下降、腐蚀失效。

电子组件焊接的内涵，归根到底就是一个“特”字。不同的封装结构，工艺特性不同；不同的焊点结构，焊料的熔化顺序与流动过程不同，等等。这些“特”决定了模板开口的图形形状与尺寸、焊膏量的大小及温度曲线形状设计，即每个封装的焊接工艺都是独特的。只有理解了这点，才可称之为“入了门、摸到了边”，希望读者阅读本书时始终思考“特”这样一个内涵。

本书采用了45个案例来强化对工艺原理的理解，这些案例及实物图均具有工艺的典型性，对于理解工艺的原理有很大的帮助。这些案例是本书的“亮点”，也是价值所在。

读完本书，希望读者能够了解以下五点：

(1) 焊点的焊接与封装的焊接有很大的不同，封装的焊接必须考虑封装本身的结构、焊点的结构、焊点的微观形成过程——焊料的熔化顺序、流向与流动过程及封装的变形。

(2) SMT的核心是工艺，工艺的核心是焊膏印刷，印刷工艺的核心是支撑和擦网（有人把支撑和擦网称为工艺中的工艺）。影响焊膏印刷的因素包括但不限于焊膏黏度与触变性、模板、PCB的设计（布局与阻焊）、印刷参数、印刷支撑与擦网。

(3) SMT焊接不良主要与焊膏用量有关，焊盘大小决定其相关性的大小即敏感度，与微焊盘、下锡性能相关联。

(4) 焊点微观组织决定焊点机械性能，焊料合金的成分与工艺条件决定焊点的微观组织。对焊点可靠性而言，界面微观组织是主要的影响因素。对于高可靠性产品，需要关注界面金属间化合物形貌与尺寸（如连续层厚度、IMC高宽比等）。

(5) 工艺技术是一门工程技术，往往先有实践后有理论，因此，在解决实际生产中的疑难工艺问题时，如果无从下手，“试”是一个比较有效的方法——换元件、换焊膏、调参数，通过“试”，往往能够找到解决问题的方向或思路。必须意识到，业界仍然有很多的工艺疑难问题，机理不是很清楚，但这不妨碍我们解决这些问题，只要了解这些问题发生的场景，就可以避免再次发生同样的问题。

本书部分机理性解析是基于本人的工程实践，不一定正确，不当之处敬请批评指正，反馈邮箱：1079585920@qq.com。

李宁成博士是一位在SMT业界享有很高声望的顶级专家，对电子焊接技术有非常系统、全面和深入的研究，对SMT的发展有诸多贡献，参与和主导了多份IPC标准的编制。他在百忙之中审阅了本书的原稿，并提出了很好的建议，同时为本书题写了序言，在此深表感谢。还需要说明的是，本书焊膏和再流焊接与常见不良两章，部分参考了李宁成博士所著《再流焊接工艺及缺陷诊断》一书有关内容，再次表示感谢。

还要感谢东莞市凯格精密机械有限公司的大力支持，使得本书能以全彩的形式呈现给读者。在此特别感谢邱国良董事长和刘勇军总经理的支持。

我的同事，中兴通讯工艺专家刘哲、邱华盛、王玉、孙磊阅读了本书初稿并提出了很多很好的建议，在此深表感谢！

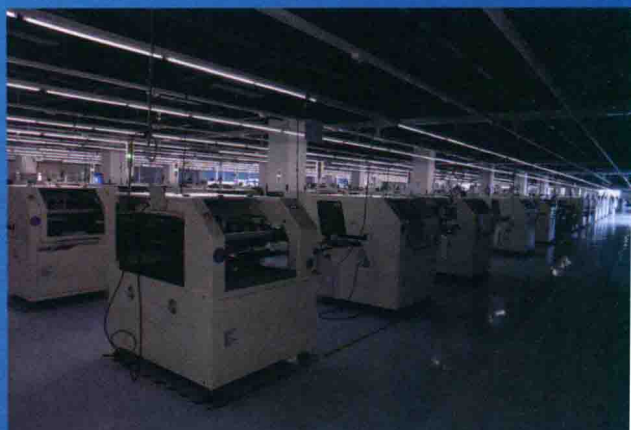
贾忠中
2018年10月于深圳

公司简介

东莞市凯格精密机械有限公司(GKG Precision Machine Co.,Ltd.)是一家专注于精密自动化装备研发、生产、销售和服务的制造以及工艺方案提供商，是国家级高新技术企业。

公司秉持“卓越品质是价值与尊严的起点，满足客户是创新与发展的源泉”的理念，积极进取，科学管理，始终坚持高效的运作、世界同步的技术、国际认证的品质、精益求精的精神，为客户提供高质量的精密自动化装备和服务，产品远销海外50多个国家和地区。

旗下拥有印刷设备事业部、点胶设备事业部、LED封装设备事业部、精密自动化设备事业部。



三大产品



GD68P-V全自动高速固晶机

高效率
多功能
高精度

GKG

未来源自今天的选择

GT++全自动锡膏印刷机

高精度
高速度

满足03015
元器件印刷工艺



DH350全自动高速点胶机

芯片本体识别
双阀同步点胶
双阀异步点胶
旋转倾斜点胶



东莞市凯格精密机械有限公司

地址: 东莞市东城科技工业园沙朗路2号

电话: 0769-38823222

网址: www.gkg.cn



目 录

第一部分 工艺基础

| | |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 3 |
| 1.1 电子组装技术的发展 | 3 |
| 1.2 表面组装技术 | 4 |
| 1.2.1 元器件封装形式的发展 | 4 |
| 1.2.2 印制电路板技术的发展 | 5 |
| 1.2.3 表面组装技术的发展 | 6 |
| 1.3 表面组装基本工艺流程 | 7 |
| 1.3.1 再流焊接工艺流程 | 7 |
| 1.3.2 波峰焊接工艺流程 | 7 |
| 1.4 表面组装方式与工艺路径 | 8 |
| 1.5 表面组装技术的核心与关键点 | 9 |
| 1.6 表面组装元器件的焊接 | 10 |
| 案例 1 QFN 的桥连 | 11 |
| 案例 2 BGA 的球窝与开焊 | 11 |
| 1.7 表面组装技术知识体系 | 12 |
| 第 2 章 焊接基础 | 14 |
| 2.1 软钎焊工艺 | 14 |
| 2.2 焊点与焊锡材料 | 14 |
| 2.3 焊点形成过程及影响因素 | 15 |
| 2.4 润湿 | 16 |
| 2.4.1 焊料的表面张力 | 17 |
| 2.4.2 焊接温度 | 18 |
| 2.4.3 焊料合金元素与添加量 | 18 |
| 2.4.4 金属在熔融 Sn 合金中的溶解率 | 19 |
| 2.4.5 金属间化合物 | 20 |
| 2.5 相位图和焊接 | 23 |
| 2.6 表面张力 | 24 |
| 2.6.1 表面张力概述 | 24 |
| 2.6.2 表面张力起因 | 26 |
| 2.6.3 表面张力对液态焊料表面外形的影响 | 26 |
| 2.6.4 表面张力对焊点形成过程的影响 | 26 |



| | | |
|--------------|-----------------------|----|
| 案例 3 | 片式元件再流焊接时焊点的形成过程 | 26 |
| 案例 4 | BGA 再流焊接时焊点的形成过程 | 27 |
| 2.7 | 助焊剂在焊接过程中的作用行为 | 28 |
| 2.7.1 | 再流焊接工艺中助焊剂的作用行为 | 28 |
| 2.7.2 | 波峰焊接工艺中助焊剂的作用行为 | 29 |
| 案例 5 | OSP 板采用水基助焊剂波峰焊时漏焊 | 29 |
| 2.8 | 可焊性 | 30 |
| 2.8.1 | 可焊性概述 | 30 |
| 2.8.2 | 影响可焊性的因素 | 30 |
| 2.8.3 | 可焊性测试方法 | 32 |
| 2.8.4 | 润湿称量法 | 33 |
| 2.8.5 | 浸渍法 | 35 |
| 2.8.6 | 铺展法 | 35 |
| 2.8.7 | 老化 | 36 |
| 第 3 章 | 焊料合金、微观组织与性能 | 37 |
| 3.1 | 常用焊料合金 | 37 |
| 3.1.1 | Sn-Ag 合金 | 37 |
| 3.1.2 | Sn-Cu 合金 | 38 |
| 3.1.3 | Sn-Bi 合金 | 39 |
| 3.1.4 | Sn-Sb 合金 | 39 |
| 3.1.5 | 提高焊点可靠性的途径 | 40 |
| 3.1.6 | 无铅合金中常用添加合金元素的作用 | 40 |
| 3.2 | 焊点的微观结构与影响因素 | 42 |
| 3.2.1 | 组成元素 | 42 |
| 3.2.2 | 工艺条件 | 44 |
| 3.3 | 焊点的微观结构与机械性能 | 44 |
| 3.3.1 | 焊点(焊料合金)的金相组织 | 45 |
| 3.3.2 | 焊接界面金属间化合物 | 46 |
| 3.3.3 | 不良的微观组织 | 50 |
| 3.4 | 无铅焊料合金的表面形貌 | 61 |

第二部分 工艺原理与不良

| | | |
|--------------|-------------------------|----|
| 第 4 章 | 助焊剂 | 65 |
| 4.1 | 助焊剂的发展历程 | 65 |
| 4.2 | 液态助焊剂的分类标准与代码 | 66 |
| 4.3 | 液态助焊剂的组成、功能与常用类别 | 68 |
| 4.3.1 | 组成 | 68 |





| | | |
|------------|----------------------|------------|
| 4.3.2 | 功能 | 69 |
| 4.3.3 | 常用类别 | 70 |
| 4.4 | 液态助焊剂的技术指标与检测 | 71 |
| 4.5 | 助焊剂的选型评估 | 75 |
| 4.5.1 | 桥连缺陷率 | 75 |
| 4.5.2 | 通孔透锡率 | 76 |
| 4.5.3 | 焊盘上锡饱满度 | 76 |
| 4.5.4 | 焊后 PCB 表面洁净度 | 77 |
| 4.5.5 | ICT 测试直通率 | 78 |
| 4.5.6 | 助焊剂的多元化 | 78 |
| 4.6 | 白色残留物 | 79 |
| 4.6.1 | 焊剂中的松香 | 80 |
| 4.6.2 | 松香变形物 | 81 |
| 4.6.3 | 有机金属盐 | 81 |
| 4.6.4 | 无机金属盐 | 81 |
| 第5章 | 焊膏 | 83 |
| 5.1 | 焊膏及组成 | 83 |
| 5.2 | 助焊剂的组成与功能 | 84 |
| 5.2.1 | 树脂 | 84 |
| 5.2.2 | 活化剂 | 85 |
| 5.2.3 | 溶剂 | 87 |
| 5.2.4 | 流变添加剂 | 88 |
| 5.2.5 | 焊膏配方设计的工艺性考虑 | 89 |
| 5.3 | 焊粉 | 89 |
| 5.4 | 助焊反应 | 90 |
| 5.4.1 | 酸基反应 | 90 |
| 5.4.2 | 氧化-还原反应 | 91 |
| 5.5 | 焊膏流变性要求 | 91 |
| 5.5.1 | 黏度及测量 | 91 |
| 5.5.2 | 流体的流变特性 | 92 |
| 5.5.3 | 影响焊膏流变性的因素 | 94 |
| 5.6 | 焊膏的性能评估与选型 | 96 |
| 5.7 | 焊膏的储存与应用 | 100 |
| 5.7.1 | 储存、解冻与搅拌 | 100 |
| 5.7.2 | 使用时间与再使用注意事项 | 101 |
| 5.7.3 | 常见不良 | 101 |



| | |
|-----------------------------|-----|
| 第 6 章 PCB 表面镀层及工艺特性 | 106 |
| 6.1 ENIG 镀层 | 106 |
| 6.1.1 工艺特性 | 106 |
| 6.1.2 应用问题 | 107 |
| 6.2 Im-Sn 镀层 | 108 |
| 6.2.1 工艺特性 | 109 |
| 6.2.2 应用问题 | 109 |
| 案例 6 镀 Sn 层薄导致虚焊 | 109 |
| 6.3 Im-Ag 镀层 | 112 |
| 6.3.1 工艺特性 | 112 |
| 6.3.2 应用问题 | 113 |
| 6.4 OSP 膜 | 114 |
| 6.4.1 OSP 膜及其发展历程 | 114 |
| 6.4.2 OSP 工艺 | 115 |
| 6.4.3 铜面氧化来源与影响 | 115 |
| 6.4.4 氧化层的形成程度与通孔爬锡能力 | 117 |
| 6.4.5 OSP 膜的优势与劣势 | 119 |
| 6.4.6 应用问题 | 119 |
| 6.5 无铅喷锡 | 119 |
| 6.5.1 工艺特性 | 120 |
| 6.5.2 应用问题 | 122 |
| 6.6 无铅表面耐焊接性对比 | 122 |
| 第 7 章 元器件引脚/焊端镀层及工艺性 | 124 |
| 7.1 表面组装元器件封装类别 | 124 |
| 7.2 电极镀层结构 | 125 |
| 7.3 Chip 类封装 | 126 |
| 7.4 SOP/QFP 类封装 | 127 |
| 7.5 BGA 类封装 | 127 |
| 7.6 QFN 类封装 | 127 |
| 7.7 插件类封装 | 128 |
| 第 8 章 焊膏印刷与常见不良 | 129 |
| 8.1 焊膏印刷 | 129 |
| 8.2 印刷原理 | 129 |
| 8.3 影响焊膏印刷的因素 | 130 |
| 8.3.1 焊膏性能 | 130 |
| 8.3.2 模板因素 | 133 |
| 8.3.3 印刷参数 | 134 |



| | | |
|--------------|---------------------|------------|
| 8.3.4 | 擦网/底部擦洗 | 137 |
| 8.3.5 | PCB 支撑 | 140 |
| 8.3.6 | 实际生产中影响焊膏填充与转移的其他因素 | 141 |
| 8.4 | 常见印刷不良现象及原因 | 143 |
| 8.4.1 | 印刷不良现象 | 143 |
| 8.4.2 | 印刷厚度不良 | 143 |
| 8.4.3 | 污斑/边缘挤出 | 145 |
| 8.4.4 | 少锡与漏印 | 146 |
| 8.4.5 | 拉尖/狗耳朵 | 148 |
| 8.4.6 | 塌陷 | 148 |
| 8.5 | SPI 应用探讨 | 151 |
| 8.5.1 | 焊膏印刷不良对焊接质量的影响 | 151 |
| 8.5.2 | 焊膏印刷图形可接受条件 | 152 |
| 8.5.3 | 0.4mm 间距 CSP | 153 |
| 8.5.4 | 0.4mm 间距 QFP | 154 |
| 8.5.5 | 0.4 ~ 0.5mm 间距 QFN | 155 |
| 8.5.6 | 0201 | 155 |
| 第 9 章 | 钢网设计与常见不良 | 157 |
| 9.1 | 钢网 | 157 |
| 9.2 | 钢网制造要求 | 160 |
| 9.3 | 模板开口设计基本要求 | 161 |
| 9.3.1 | 面积比 | 161 |
| 9.3.2 | 阶梯模板 | 162 |
| 9.4 | 模板开口设计 | 163 |
| 9.4.1 | 通用原则 | 163 |
| 9.4.2 | 片式元件 | 165 |
| 9.4.3 | QFP | 165 |
| 9.4.4 | BGA | 166 |
| 9.4.5 | QFN | 166 |
| 9.5 | 常见的不良开口设计 | 168 |
| 9.5.1 | 模板设计的主要问题 | 168 |
| 案例 7 | 模板避孔距离不够导致散热焊盘少锡 | 169 |
| 案例 8 | 焊盘宽、引脚窄导致 SIM 卡移位 | 170 |
| 案例 9 | 熔融焊锡漂浮导致变压器移位 | 170 |
| 案例 10 | 防锡珠开孔导致圆柱形二极管炉后飞料问题 | 171 |
| 9.5.2 | 模板开窗在改善焊接良率方面的应用 | 171 |
| 案例 11 | 兼顾开焊与桥连的葫芦形开窗设计 | 171 |



| | | |
|-------|------------------|-----|
| 案例 12 | 电解电容底座鼓包导致移位 | 173 |
| 案例 13 | 超薄 BGA 变形导致桥连与球窝 | 174 |

第 10 章 再流焊接与常见不良 175

| | | |
|--------|--------------------------------|-----|
| 10.1 | 再流焊接 | 175 |
| 10.2 | 再流焊接工艺的发展历程 | 175 |
| 10.3 | 热风再流焊接技术 | 176 |
| 10.4 | 热风再流焊接加热特性 | 177 |
| 10.5 | 温度曲线 | 178 |
| 10.5.1 | 温度曲线的形状 | 179 |
| 10.5.2 | 温度曲线主要参数与设置要求 | 180 |
| 10.5.3 | 炉温设置与温度曲线测试 | 186 |
| 10.5.4 | 再流焊接曲线优化 | 189 |
| 10.6 | 低温焊料焊接 SAC 锡球的 BGA 混装再流焊接工艺 | 191 |
| 10.6.1 | 有铅焊料焊接无铅 BGA 的混装工艺 | 192 |
| 10.6.2 | 低温焊料焊接 SAC 锡球的混装再流焊接工艺 | 196 |
| 10.7 | 常见焊接不良 | 197 |
| 10.7.1 | 冷焊 | 197 |
| 10.7.2 | 不润湿 | 199 |
| 案例 14 | 连接器引脚润湿不良现象 | 200 |
| 案例 15 | 沉锡板焊盘不上锡现象 | 201 |
| 10.7.3 | 半润湿 | 202 |
| 10.7.4 | 渗析 | 203 |
| 10.7.5 | 立碑 | 204 |
| 10.7.6 | 偏移 | 207 |
| 案例 16 | 限位导致手机电池连接器偏移 | 207 |
| 案例 17 | 元器件安装底部喷出的热气流导致元器件偏移 | 208 |
| 案例 18 | 元器件焊盘比引脚宽导致元器件偏移 | 208 |
| 案例 19 | 片式元件底部有半塞导通孔导致偏移 | 209 |
| 案例 20 | 不对称焊端容易导致偏移 | 209 |
| 10.7.7 | 芯吸 | 210 |
| 10.7.8 | 桥连 | 212 |
| 案例 21 | 0.4mm QFP 桥连 | 212 |
| 案例 22 | 0.4mm 间距 CSP (也称 μ BGA) 桥连 | 213 |
| 案例 23 | 铆接锡块表贴连接器桥连 | 214 |
| 10.7.9 | 空洞 | 216 |
| 案例 24 | BGA 焊球表面氧化等导致空洞形成 | 218 |
| 案例 25 | 焊盘上的树脂填孔吸潮导致空洞形成 | 219 |



| | | |
|---------------|---------------------------------------|-----|
| 案例 26 | HDI 微盲孔导致 BGA 焊点空洞形成 | 219 |
| 案例 27 | 焊膏不足导致空洞产生 | 220 |
| 案例 28 | 排气通道不畅导致空洞产生 | 220 |
| 案例 29 | 喷印焊膏导致空洞产生 | 221 |
| 案例 30 | QFP 引脚表面污染导致空洞产生 | 221 |
| 10.7.10 | 开路 | 222 |
| 10.7.11 | 锡球 | 223 |
| 10.7.12 | 锡珠 | 226 |
| 10.7.13 | 飞溅物 | 229 |
| 10.8 | 不同工艺条件下用 63Sn/37Pb 焊接 SAC305 BGA 的切片图 | 230 |
| 第 11 章 | 特定封装的焊接与常见不良 | 232 |
| 11.1 | 封装焊接 | 232 |
| 11.2 | SOP/QFP | 232 |
| 11.2.1 | 桥连 | 232 |
| 案例 31 | 某板上一个 0.4mm 间距 QFP 桥连率达到 75% | 234 |
| 案例 32 | QFP 焊盘加工尺寸偏窄导致桥连率增加 | 235 |
| 11.2.2 | 虚焊 | 235 |
| 11.3 | QFN | 236 |
| 11.3.1 | QFN 封装与工艺特点 | 236 |
| 11.3.2 | 虚焊 | 238 |
| 11.3.3 | 桥连 | 240 |
| 11.3.4 | 空洞 | 241 |
| 11.4 | BGA | 244 |
| 11.4.1 | BGA 封装类别与工艺特点 | 244 |
| 11.4.2 | 无润湿开焊 | 245 |
| 11.4.3 | 球窝焊点 | 246 |
| 11.4.4 | 缩锡断裂 | 248 |
| 11.4.5 | 二次焊开裂 | 249 |
| 11.4.6 | 应力断裂 | 250 |
| 11.4.7 | 坑裂 | 251 |
| 11.4.8 | 块状 IMC 断裂 | 252 |
| 11.4.9 | 热循环疲劳断裂 | 253 |
| 第 12 章 | 波峰焊接与常见不良 | 256 |
| 12.1 | 波峰焊接 | 256 |
| 12.2 | 波峰焊接设备的组成及功能 | 256 |
| 12.3 | 波峰焊接设备的选择 | 257 |
| 12.4 | 波峰焊接工艺参数设置与温度曲线的测量 | 257 |



| | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|
| 12.4.1 | 工艺参数 | 258 |
| 12.4.2 | 工艺参数设置要求 | 258 |
| 12.4.3 | 波峰焊接温度曲线测量 | 258 |
| 12.5 | 助焊剂在波峰焊接工艺过程中的行为 | 259 |
| 12.6 | 波峰焊接焊点的要求 | 260 |
| 12.7 | 波峰焊接常见不良 | 262 |
| 12.7.1 | 桥连 | 262 |
| 12.7.2 | 透锡不足 | 265 |
| 12.7.3 | 锡珠 | 266 |
| 12.7.4 | 漏焊 | 268 |
| 12.7.5 | 尖状物 | 269 |
| 12.7.6 | 气孔——吹气孔/针孔 | 269 |
| 12.7.7 | 孔填充不良 | 270 |
| 12.7.8 | 板面脏 | 271 |
| 12.7.9 | 元器件浮起 | 271 |
| 案例 33 | 连接器浮起 | 272 |
| 12.7.10 | 焊点剥离 | 272 |
| 12.7.11 | 焊盘剥离 | 273 |
| 12.7.12 | 凝固开裂 | 274 |
| 12.7.13 | 引线润湿不良 | 275 |
| 12.7.14 | 焊盘润湿不良 | 275 |
| 第 13 章 | 返工与手工焊接常见不良 | 276 |
| 13.1 | 返工工艺目标 | 276 |
| 13.2 | 返工程序 | 276 |
| 13.2.1 | 元器件拆除 | 276 |
| 13.2.2 | 焊盘整理 | 277 |
| 13.2.3 | 元器件安装 | 277 |
| 13.2.4 | 工艺的选择 | 277 |
| 13.3 | 常用返工设备/工具与工艺特点 | 278 |
| 13.3.1 | 烙铁 | 278 |
| 13.3.2 | 热风返修工作站 | 279 |
| 13.3.3 | 吸锡器 | 281 |
| 13.4 | 常见返修失效案例 | 282 |
| 案例 34 | 采用加焊剂方式对虚焊的 QFN 进行重焊导致返工失败 | 282 |
| 案例 35 | 采用加焊剂方式对虚焊的 BGA 进行重焊导致 BGA 中心焊点断裂 | 282 |
| 案例 36 | 风枪返修导致周边邻近带散热器的 BGA 焊点开裂 | 283 |
| 案例 37 | 返修时加热速率太大导致 BGA 角部焊点桥连 | 284 |



| | |
|---------------------------------------|-----|
| 案例 38 手工焊接大尺寸片式电容导致开裂 | 284 |
| 案例 39 手工焊接插件导致相连片式电容失效 | 285 |
| 案例 40 手工焊接大热容量插件时长时间加热导致 PCB 分层 | 285 |
| 案例 41 采用铜辫子返修细间距元器件容易发生微桥连现象 | 286 |

第三部分 组装可靠性

| | |
|--|-----|
| 第 14 章 可靠性概念 | 291 |
| 14.1 可靠性定义 | 291 |
| 14.1.1 可靠度 | 291 |
| 14.1.2 MTBF 与 MTTF | 291 |
| 14.1.3 故障率 | 292 |
| 14.2 影响电子产品可靠性的因素 | 293 |
| 14.2.1 常见设计不良 | 293 |
| 14.2.2 制造影响因素 | 294 |
| 14.2.3 使用时的劣化因素 | 295 |
| 14.3 常用的可靠性试验评估方法——温度循环试验 | 296 |
| 第 15 章 完整焊点要求 | 298 |
| 15.1 组装可靠性 | 298 |
| 15.2 完整焊点 | 298 |
| 15.3 常见不完整焊点 | 298 |
| 第 16 章 组装应力失效 | 304 |
| 16.1 应力敏感封装 | 304 |
| 16.2 片式电容 | 304 |
| 16.2.1 分板作业 | 304 |
| 16.2.2 烙铁焊接 | 306 |
| 16.3 BGA | 307 |
| 第 17 章 使用中温度循环疲劳失效 | 308 |
| 17.1 高温环境下的劣化 | 308 |
| 17.1.1 高温下金属的扩散 | 308 |
| 17.1.2 界面劣化 | 309 |
| 17.2 蠕变 | 309 |
| 17.3 机械疲劳与温度循环 | 310 |
| 案例 42 拉应力叠加时的热疲劳断裂 | 310 |
| 案例 43 某模块灌封工艺失控导致焊点受到拉应力作用 | 310 |
| 案例 44 灌封胶与 PCB 的 CTE 不匹配导致焊点早期疲劳失效（开裂） | 312 |
| 第 18 章 环境因素引起的失效 | 313 |
| 18.1 环境引起的失效 | 313 |