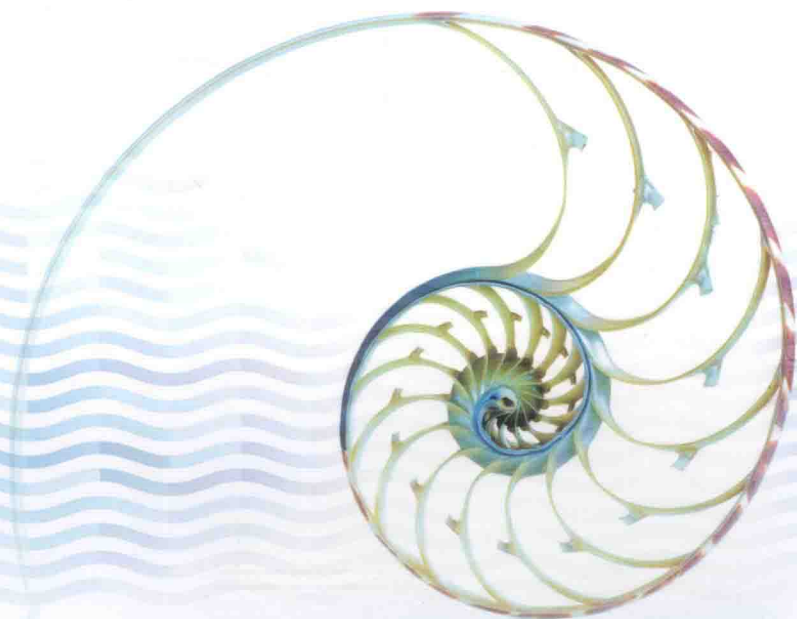


可靠性技术丛书
工业和信息化部电子第五研究所 组编



电子组装工艺 可靠性技术与案例研究 (全彩)

◎ 罗道军 贺光辉 邹雅冰 著

- ✓ 集中国赛宝实验室多名专家二十多年经验
- ✓ 汇集电子产品质量与可靠性一线案例及其解决方案

2



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>

可靠性技术丛书
工业和信息化部电子第五研究所 组编



电子组装工艺 可靠性技术与案例研究 (全彩)

◎ 罗道军 贺光辉 邹雅冰 著

◎ 罗道军 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了绿色电子组装工艺过程所涉及的环保、标准、材料、工艺、质量与可靠性技术,其中包括工艺可靠性基础、试验分析技术、材料与元器件的选择与应用技术、18个类型的近40个典型的失效与故障案例研究、工艺缺陷控制技术。这些内容汇聚了作者及同事多年从事电子制造工艺与可靠性技术工作的积累,案例以及技术都来自生产一线,具有重要的参考价值。

本书可供从事电子组装领域的研发设计、工艺研究、检测分析、质量管理等工程技术人员参考,也可作为相关领域的大专院校和职业技术教育的参考教材。

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

图书在版编目(CIP)数据

电子组装工艺可靠性技术与案例研究 / 罗道军, 贺光辉, 邹雅冰著; 工业和信息化部电子第五研究所组编. —北京: 电子工业出版社, 2015.9

(可靠性技术丛书)

ISBN 978-7-121-27278-3

I. ①电… II. ①罗… ②贺… ③邹… ④工… III. ①电子元件—组装—可靠性—研究
IV. ①TN605

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第228944号

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: 中国电影出版社印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

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: 720×1000 1/16 印张: 23.75 字数: 413千字

版 次: 2015年9月第1版

印 次: 2015年9月第1次印刷

定 价: 98.00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。

可靠性技术丛书编委会

主 任 谢少锋

副主任 王 勇 陈立辉

委 员(按姓氏笔画排序)

王晓晗 王蕴辉 刘尚文 纪春阳

张 铮 张增照 张德平 罗道军

赵国祥 胡湘洪 莫郁薇 恩云飞

潘 勇

丛书序

以可靠性为中心的质量是推动经济社会发展永恒的主题，关系国计民生，关乎发展大局。把质量发展放在国家和经济发展的战略位置全面推进，是国际社会普遍认同的发展规律。加快实施制造强国建设，必须牢牢把握制造业这一立国之本，突出质量这一关键内核，把“质量强国”作为制造业转型升级、实现跨跃发展的战略选择和必由之路。

质量是建设制造强国的生命线。作为未来10年引领制造强国建设的行动指南和未来30年实现制造强国梦想的纲领性文件，《中国制造2025》将“质量为先”列为重要的基本指导方针之一。在制造强国建设的伟大进程中，全面夯实产品质量基础，不断提升质量品牌价值和“中国制造”综合竞争力，坚定不移地走以质取胜的发展道路。

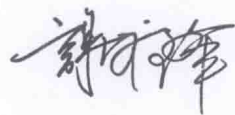
高质量是先进技术和优质管理高度集成的结果。提升制造业产品质量，要坚持从源头抓起，在产品的设计、定型、制造的全过程中按照先进的质量管理标准和技术要求去实施。可靠性是产品性能随时间的保持能力。作为衡量产品质量的重要指标，可靠性管理也充分体现了现代质量管理的特点。《中国制造2025》提出要加强可靠性设计、试验与验证技术开发应用，使产品的性能稳定性、质量可靠性、环境适应性、使用寿命等指标达到国际同类产品先进水平，就是要将可靠性技术作为核心应用于质量设计、控制和质量管理，在产品全生命周期各阶段，实施可靠性系统工程。

工业和信息化部电子第五研究所是国内最早从事电子产品质量与可靠性研究的权威机构，在我国的质量可靠性领域开创了许多“唯一”和“第一”：唯一一个专业从事质量可靠性研究的技术机构；开展了国内第一次可靠性培训；研制了国内第一套环境试验设备；第一个将质量“认证”概念引入中国；建立起国内第一个可靠性数据交换网；发布了国内第一个可靠性预计标准；研发出第一个国际先进、国内领先水平的可靠性/维修性/保障性工程软件和综合保障

软件……五所始终站在可靠性技术发展的前沿。随着质量强国战略的实施，可靠性工作在我国得到空前的重视，在新时期的作用日益凸显。五所的科研工作者们深深感到，应系统地梳理可靠性技术的要素、方法和途径，全面呈现该领域的最新发展成果，使之广泛应用于工程实践，并在制造强国和质量强国建设中发挥应有作用。鉴于此，五所在建所六十周年之际，组织专家学者编写出版了《可靠性技术丛书》。这既是历史的责任，又是现实的需要，具有重要意义。

《可靠性技术丛书》内容翔实，涉及面广，实用性强。它涵盖了可靠性的设计、工艺、管理，以及设计生产中的可靠性试验等各个技术环节，系统地论述了提升或保证产品可靠性的专业知识，可在可靠性基础理论、设计改进、物料优选、生产制造、试验分析等方面为产品设计、开发、生产、试验及质量管理等从业者提供重要的技术参考。

质量发展依赖持续不断的技术创新和管理进步。以高可靠、长寿命为核心的高质量是科技创新、管理能力、劳动者素质等因素的综合集成。在举国上下深入实施制造强国战略之际，希望该丛书的出版能够广泛传播先进的可靠性技术与管理方法，大力推动可靠性技术进步及实践应用，积极推进专业人才培养建设。帮助广大的科技工作者和工程技术人员，为我国先进制造业发展，落实好《中国制造2025》发展战略，在新中国成立100周年时建成世界一流制造强国贡献力量！





序

任何电子整机都是将各种电子零部件通过线路板组装在一起形成的一种电子产品，而将电子元器件组合形成电子整机的过程就是人们常说的“电子组装”过程，该过程涉及原材料、元器件、印制电路板（PCB）及其工艺和设计、绿色环保、质量与可靠性分析等众多关键环节和复杂的工程技术内容。

该书的作者长期在我国唯一的专业进行电子产品质量与可靠性研究的权威机构——中国赛宝实验室（CEPREI）工作，对于电子组装技术领域从相关材料的检测分析到产品的研究开发、可靠性试验、产品质量解析和改进，以及工艺研究咨询等，几乎涵盖整个电子组装技术领域中所涉及的电子产品质量与可靠性方面的问题，进行过广泛而深入的研究，积累了十分丰富的知识与宝贵的经验。

该书是作者在多年工作过程中有关电子组装技术与可靠性方面部分科技文章的一个整理与汇集，也是一种工作经验与心得的汇集与交流。全书主要介绍了绿色电子组装工艺过程所涉及的环保、质量与可靠性技术，其中包括各种近代试验与分析技术、电子材料与电子元器件的选择与应用技术、典型的失效与故障案例研究等。内容十分丰富，是一本近年来电子制造业十分稀缺、少见，而在产业界又十分需求的有关质量与可靠性方面特色鲜明的专著。

我在阅读了该书的书稿之后，深感该书的出版不仅可为从事电子组装技术领域工作的相关技术人员提供参考和借鉴，还可为从事电子产品质量与可靠性研究、从事新型电子产品开发的相关部门和相关技术人员提供有益参考。同时，也可作为工科高等院校电子科学与技术专业和微电子与固体电子学专业的教学参考资料。

电子科技大学
微电子与固体电子学院
杨邦朝（教授、博导）



前言

人们生活品质日新月异的变化得益于21世纪初以来电子信息技术取得了飞速的发展，从而带动了电子制造业在国内特别是珠三角与长三角地区的快速成长。电子组装作为电子制造业的核心环节，决定了电子信息产品的品质水平，也是制造业价值的核心来源。电子组装就是将各种零部件通过线路板组装在一起形成电子产品的核心部分——PCBA电子组件，该过程涉及了材料、元器件、PCB以及工艺和设计等多个关键环节和复杂的技术内容。一直以来，业界一直存在重设计轻工艺的根深蒂固的观念，导致组装生产出来的产品质量问题不断，给需要大规模生产的消费类电子产品带来成本的显著增加与品牌形象的损失。与此同时，由于以欧盟RoHS指令为代表的国内外环保法规的要求和限制，许多传统上含有有毒有害物质的电子材料和零部件将逐步不能继续使用，这股绿色环保的旋风导致了整个电子制造业产业链的技术革命，也给电子组装工艺技术与产品的可靠性带来了更加严峻的挑战。我国如要从制造大国迈向制造强国则必须经过“使产品可靠”这道坎。

随着消费电子产品从极度匮乏到极大丰富再到好品牌的形成，人们经历了对产品质量与可靠性问题认识的深刻转变，从当初哪里有质量事故或投诉就到哪里的消防队员工作模式，亦即客户要我做的被动迎接质量审核的模式开始到主动进行产品的可靠性设计、试验、分析评价以及改进增长等各种质量可靠性技术手段的应用，再到今天产品的可靠性已经成为品牌与竞争力的体现，可靠性已经真真正正成为了当今最时髦的工业技术词汇了。作者有幸参与了这一转变过程，并且体会和感慨良多，现将部分经验技术汇集于此跟各位分享。

本书作者20世纪90年代初期进入电子组装技术这个领域，从相关材料的检测技术到产品的研究开发、工艺研究咨询、可靠性试验、分析和改进等，几乎涉猎整个电子组装技术领域。同时还参与了国内外有关电子绿色环保法规和标准的制定工作。本书汇聚了作者及其团队在电子组装技术与可靠性方面的实际经验与技术的积累，与传统类似技术专著不同的是，本书主要是通过介绍工艺可靠性基础知识加活生生的案例集的方式来呈现这些成果或经验积累，内

容包括环保、材料、元器件与PCB、可靠性试验技术、失效分析技术、工艺改进、失效案例研究等，其中的案例都是众多企业实际碰到的问题的研究和解决方法。希望本书可以为从事该技术和工作领域的工程技术人员，相关企业的品质、工程、设计等部门的管理人员提供有益的参考。

本书主要内容包括介绍工艺可靠性技术的基础篇、环保与标准篇，包括电子组装材料与元器件和PCB的材料篇、方法篇和案例研究篇等，由中国赛宝实验室可靠性研究分析中心的许多同仁共同完成。其中1.1 ~ 1.3节以及2.3、3.2、4.1 ~ 4.4、5.3、5.14、5.15节由罗道军编写，3.4和5.17节由贺光辉编写，4.5、5.1、5.11和5.12节由邹雅冰编写，3.5、4.7、5.7 ~ 5.9节由肖慧编写，5.4 ~ 5.6和5.10节由胡朝辉编写，3.1和3.7节由刘子莲编写，3.3节由王宏芹编写，5.13和5.16节由许慧编写，2.1和2.2节由雷敏编写，4.6和5.2节由李勇编写，3.6节由李伟明编写，5.18节由赵振博编写；全书最后由罗道军统一修改定稿。此外，书中的许多内容得到了作者单位许多同事的大力支持和帮助，图谱绘制和论文与案例中的试验部分基本上都是他们完成的，在此一并感谢；同时，本书成书还得到许多电子行业的相关企业的大力支持，是它们提供给我们很好的学习和研究案例的机会，由于保密的原因我们隐去其相关信息，在此深表感谢！

编著者

目录

Contents

第 1 章 基础篇 / 1

- 1.1 电子组装技术与可靠性概述 / 1
 - 1.1.1 电子组装技术概述 / 1
 - 1.1.2 可靠性概论 / 3
- 1.2 电子组件的可靠性试验方法 / 11
 - 1.2.1 可靠性试验的基本内容 / 12
 - 1.2.2 焊点的可靠性试验标准 / 12
 - 1.2.3 焊点的失效判据与失效率分布 / 13
 - 1.2.4 主要的可靠性试验方法 / 14
 - 1.2.5 可靠性试验中的焊点强度检测技术 / 25
- 1.3 电子组件的失效分析技术 / 32
 - 1.3.1 焊点形成过程与影响因素 / 32
 - 1.3.2 导致焊点缺陷的主要原因与机理分析 / 33
 - 1.3.3 焊点失效分析基本流程 / 36
 - 1.3.4 焊点失效分析技术 / 36

第 2 章 环保与标准篇 / 54

- 2.1 电子电气产品的环保法规与标准化 / 54
 - 2.1.1 欧盟 RoHS / 55
 - 2.1.2 中国 RoHS 最新进展 / 58
 - 2.1.3 REACH 法规——毒害物质的管理 / 60
 - 2.1.4 废弃电子电气产品的回收处理法规 / 62
 - 2.1.5 EuP/ErP 指令——产品能源消耗的源头管控 / 65

- 2.2 电子电气产品的无卤化及其检测方法 / 66
 - 2.2.1 电子电气产品的无卤化简介 / 66
 - 2.2.2 无卤的相关标准或技术要求 / 67
 - 2.2.3 电子电气产品无卤化检测方法 / 68
- 2.3 无铅工艺的标准化进展 / 69
 - 2.3.1 无铅工艺概述 / 69
 - 2.3.2 无铅工艺标准化的重要性 / 71
 - 2.3.3 无铅工艺的标准体系 / 72
 - 2.3.4 配套中国 RoHS 实施的无铅标准制定情况 / 75
 - 2.3.5 国内外已有的无铅标准简介 / 76
 - 2.3.6 无铅工艺及其标准化展望 / 79

第3章 材料篇 / 81

- 3.1 无铅助焊剂的选择和应用 / 81
 - 3.1.1 无铅助焊剂概述 / 81
 - 3.1.2 无铅助焊剂的选择 / 84
 - 3.1.3 无铅助焊剂的发展趋势 / 95
- 3.2 无铅元器件工艺适应性要求 / 97
 - 3.2.1 无铅工艺特点 / 97
 - 3.2.2 无铅元器件的要求 / 98
 - 3.2.3 无铅元器件工艺适应性 / 100
 - 3.2.4 结束语 / 105
- 3.3 无铅焊料的选择与应用 / 106
 - 3.3.1 电子装联行业常用无铅焊料 / 106
 - 3.3.2 无铅焊料的选择与应用 / 117

- 3.4 印制电路板的选择与评估 / 123
 - 3.4.1 印制电路板概述 / 123
 - 3.4.2 绿色制造工艺给印制电路板带来的挑战 / 124
 - 3.4.3 绿色制造工艺对印制电路板的要求 / 129
 - 3.4.4 印制电路板的选用 / 132
 - 3.4.5 印制电路板的评估 / 139
 - 3.4.6 印制板及基材的检测、验收通用标准 / 144
 - 3.4.7 印制板技术的发展 / 147
- 3.5 元器件镀层表面晶须风险评估与对策 / 148
 - 3.5.1 锡须现象及其危害 / 149
 - 3.5.2 锡须的生长机理 / 151
 - 3.5.3 锡须生长的影响因素 / 153
 - 3.5.4 锡须评估方法 / 156
 - 3.5.5 锡须生长的抑制 / 159
 - 3.5.6 结束语 / 164
- 3.6 电子组件的三防技术及最新进展 / 168
 - 3.6.1 湿热、盐雾以及霉菌对电子组件可靠性的影响 / 170
 - 3.6.2 电子组件的防护技术 / 172
 - 3.6.3 传统防护涂料及涂覆工艺 / 174
 - 3.6.4 电子组件三防技术最新进展 / 177
 - 3.6.5 结束语 / 182
- 3.7 焊锡膏的选用与评估 / 185
 - 3.7.1 焊锡膏概述 / 185
 - 3.7.2 焊锡膏的选用与评估 / 189
 - 3.7.3 焊锡膏的现状与发展趋势 / 195

第4章 方法篇 / 196

- 4.1 助焊剂的扩展率测试方法的研究 / 196
 - 4.1.1 扩展率的物理含义 / 196
 - 4.1.2 目前的测试方法 / 197
 - 4.1.3 试验方法研究 / 198
 - 4.1.4 结果与讨论 / 199
 - 4.1.5 结论 / 202
- 4.2 SMT 焊点的染色与渗透试验方法研究 / 202
 - 4.2.1 染色与渗透试验的基本原理 / 203
 - 4.2.2 染色与渗透试验方法描述 / 203
 - 4.2.3 染色与渗透试验结果分析与应用 / 205
 - 4.2.4 试验过程的质量控制 / 207
 - 4.2.5 结论 / 209
- 4.3 热分析技术在 PCB 失效分析中的应用 / 210
 - 4.3.1 热分析技术 / 210
 - 4.3.2 典型的失效案例 / 212
 - 4.3.3 结论 / 215
- 4.4 红外显微镜技术在组件失效分析中的应用 / 216
 - 4.4.1 红外显微镜分析技术的基本原理 / 216
 - 4.4.2 显微红外技术在电子组件失效分析中的应用 / 217
 - 4.4.3 结论 / 219
- 4.5 阴影云纹技术在工艺失效分析中的应用 / 220
 - 4.5.1 阴影云纹技术的测试原理 / 220
 - 4.5.2 阴影云纹技术的特点 / 221
 - 4.5.3 阴影云纹技术在失效分析中的典型应用 / 222

- 4.5.4 典型分析案例 / 224
- 4.6 离子色谱分析技术及其在工艺分析中的应用 / 227
 - 4.6.1 离子色谱的基本原理 / 228
 - 4.6.2 离子色谱系统 / 228
 - 4.6.3 色谱图 / 229
 - 4.6.4 基本分析程序 / 230
 - 4.6.5 离子色谱分析法在电子制造业中的应用 / 230
- 4.7 应变电测技术及其在 PCBA 可靠性评估中的应用 / 232
 - 4.7.1 应变电测技术的基本原理 / 233
 - 4.7.2 应变电测技术在 PCBA 可靠性评估中的应用 / 235
 - 4.7.3 典型应用案例 / 241
 - 4.7.4 结束语 / 244

第 5 章 案例研究篇 / 245

- 5.1 阳极导电丝 (CAF) 生长失效案例 / 245
 - 5.1.1 CAF 生长机理 / 245
 - 5.1.2 CAF 生长影响因素 / 246
 - 5.1.3 CAF 生长失效典型案例 / 247
 - 5.1.4 启示与建议 / 249
- 5.2 兼容性试验方案设计及案例 / 250
 - 5.2.1 兼容性试验原理 / 250
 - 5.2.2 兼容性试验方案 / 251
 - 5.2.3 案例研究 / 251
 - 5.2.4 启示与建议 / 254
- 5.3 波峰焊中不熔锡产生的机理与控制对策 / 254
 - 5.3.1 不熔锡产生机理分析 / 255

- 5.3.2 不熔锡产生的机理 / 258
- 5.3.3 不熔锡产生的控制对策 / 259
- 5.4 PCB 导线开路失效案例研究 / 259
 - 5.4.1 主要开路机理 / 259
 - 5.4.2 表面导线开路影响因素 / 260
 - 5.4.3 PCB 表面导线开路典型案例 / 260
 - 5.4.4 启示与建议 / 263
- 5.5 PCB 爆板分层案例研究 / 263
 - 5.5.1 主要爆板分层机理 / 264
 - 5.5.2 主要爆板分层模式 / 264
 - 5.5.3 PCB 爆板分层典型案例 / 264
 - 5.5.4 启示与建议 / 266
- 5.6 PCB 孔铜断裂失效案例研究 / 267
 - 5.6.1 主要孔铜断裂机理 / 267
 - 5.6.2 孔铜断裂主要影响因素 / 268
 - 5.6.3 孔铜断裂典型案例 / 268
 - 5.6.4 启示与建议 / 270
- 5.7 电迁移与枝晶生长失效案例 / 271
 - 5.7.1 电迁移与枝晶产生的机理 / 271
 - 5.7.2 枝晶生长风险分析 / 272
 - 5.7.3 电迁移与枝晶生长失效典型案例 / 273
 - 5.7.4 启示与建议 / 277
- 5.8 波峰焊通孔填充不良案例研究 / 278
 - 5.8.1 通孔波峰焊焊点填充不良现象描述 / 278
 - 5.8.2 波峰焊通孔填锡的物理过程 / 279

- 5.8.3 影响波峰焊通孔填充不良的因素分析 / 281
- 5.8.4 PTH 填充不良典型案例 / 281
- 5.8.5 启示与建议 / 287
- 5.9 PCBA 组件腐蚀失效案例研究 / 287
 - 5.9.1 PCBA 腐蚀机理 / 287
 - 5.9.2 PCBA 腐蚀失效典型案例 / 288
 - 5.9.3 启示与建议 / 293
- 5.10 漏电失效案例研究 / 293
 - 5.10.1 主要漏电失效机理 / 294
 - 5.10.2 漏电主要影响因素 / 294
 - 5.10.3 漏电失效典型案例 / 294
 - 5.10.4 启示与建议 / 300
- 5.11 化学镀金黑焊盘失效案例 / 300
 - 5.11.1 黑焊盘形成机理 / 301
 - 5.11.2 黑焊盘形成的影响因素及控制措施 / 302
 - 5.11.3 黑焊盘失效案例 / 302
 - 5.11.4 启示与建议 / 308
- 5.12 焊盘坑裂失效案例 / 309
 - 5.12.1 焊盘坑裂机理 / 309
 - 5.12.2 焊盘坑裂形成的影响因素 / 310
 - 5.12.3 焊盘坑裂失效案例 / 311
 - 5.12.4 启示与建议 / 318
- 5.13 疲劳失效案例研究 / 318
 - 5.13.1 疲劳失效机理 / 318
 - 5.13.2 引起疲劳的因素 / 319

- 5.13.3 疲劳失效典型案例 / 319
- 5.13.4 启示与建议 / 325
- 5.14 HASL 焊盘可焊性不良案例研究 / 325
 - 5.14.1 HASL 焊盘可焊性不良的主要机理 / 326
 - 5.14.2 HASL 焊盘可焊性不良的主要影响因素 / 327
 - 5.14.3 HASL 焊盘可焊性不良案例 / 327
 - 5.14.4 启示与建议 / 330
- 5.15 混合封装 FCBGA 的典型失效模式与控制 / 331
 - 5.15.1 FCBGA 的封装结构和工艺介绍 / 331
 - 5.15.2 混合封装 FCBGA 的典型失效案例分析 / 332
 - 5.15.3 针对混合封装 FCBGA 类似失效模式的控制对策 / 335
- 5.16 混装不良典型案例研究 / 336
 - 5.16.1 混装常见缺陷与机理 / 337
 - 5.16.2 混装工艺失效典型案例 / 338
 - 5.16.3 启示与建议 / 341
- 5.17 枕头效应失效案例 / 341
 - 5.17.1 枕头效应产生的机理 / 341
 - 5.17.2 枕头效应形成的因素 / 343
 - 5.17.3 枕头效应失效案例 / 343
 - 5.17.4 启示与建议 / 348
- 5.18 LED 引线框架镀银层腐蚀变色失效案例 / 348
 - 5.18.1 LED 支架镀银层的腐蚀变色机理 / 349
 - 5.18.2 LED 支架镀银层的腐蚀影响因素 / 349
 - 5.18.3 LED 支架镀银层的腐蚀典型案例 / 350
 - 5.18.4 启示与建议 / 353