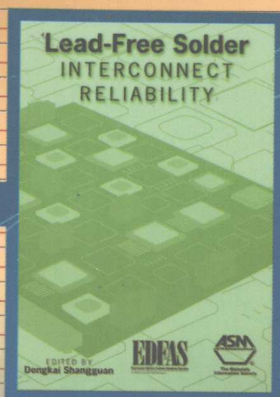


LEAD-FREE SOLDER INTERCONNECT RELIABILITY

无铅焊料 互联及可靠性

[美] Dongkai Shangguan 著

刘建影 孙 鹏 译



无铅焊料互联及可靠性

**Lead-Free Solder
Interconnect Reliability**

[美] Dongkai Shangguan 著

刘建影 孙 鹏 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了无铅焊料焊点及其可靠性研究的最新成果,涵盖了无铅焊料焊点及其可靠性相关的各个方面,包括无铅合金焊料的各种组份、无铅焊料中的金属间化合物、“锡晶须”生长、锡铅焊料与无铅焊料的可靠性比较,以及焊点失效机理、失效模式和失效测试估计方法等。导电胶也是一种常用的锡焊料替代品,本书也专门讲述了和导电胶相关的一些可靠性问题。

本书可供从事电子产品研制、生产和使用的工程技术人员学习与参考,也可作为高等院校电子、材料和信息类等相关专业的师生的教学参考书。

Original English language edition copyright ©2005 by ASM International

The Chinese Translation Edition Copyright © 2008 by Publishing House of Electronics Industry.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

本书中文简体版专有版权由 ASM International 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2008-0504

图书在版编目(CIP)数据

无铅焊料互联及可靠性/(美)上官东恺(Shangguan, D.)著;刘建影,孙鹏译. —北京:电子工业出版社, 2008.1

书名原文: Lead-Free Solder Interconnect Reliability

ISBN 978-7-121-05467-9

I. 无… II. ①上…②刘…③孙… III. 软钎料 IV. TG42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 183180 号

责任编辑:宋 梅

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

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:787×980 1/16 印张:24 字数:537 千字

印 次:2008 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:49.00 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 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

译者的话

本书是介绍“无铅焊料互联及可靠性”的专著。

电子封装生产工艺过程比较复杂,并且生产工艺的技术含量很高。目前全球电子封装产业界正全力推广的电子封装无铅化,迫使电子封装技术面临一个飞跃。在电子封装的发展中,器件尺寸越来越小,结构越来越复杂。并且,电子产品对尺寸、速率、功率、稳定性及新型材料开发和应用等各方面的要求都在不断提高。为了能够满足这些不断增长的需求,同时又能提供安全可靠的无铅焊接,全世界电子封装开发人员正在开拓一个全新的前沿科学领域。

尽管焊接问题是所有从事材料学、力学和热学等领域的工作者们共同面临的课题,但是国内大多数的大学尚未将无铅焊料连接作为教学和研究的对象。为了填补这项空白,我们翻译了上官东恺博士组织编写的本书。

随着我国《电子信息产品污染防治管理办法》自2007年3月1日起的实施,无铅焊料的开发和无铅电子产品可靠性研究已迫在眉睫。

为了保护人类的健康和生存环境,欧盟提出了两个相关的指令:RoHS(The Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, 电器电子产品中有害物质禁用指令)和WEEE(Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, 废弃电器电子产品指令)。WEEE指令对废弃电子产品的分类收集和再循环利用提出了严格的要求,其目的是为了减少进入垃圾掩埋场的电气设备与电子产品的数量。RoHS指令则要求在产品源头限制或减少使用那些严重危害人类健康的有害物质。

无铅电子产品正逐步向市场推广。为了能够制造可靠的无铅焊料电子系统和设备,工业界和学术界已经开展了大量的无铅焊接材料的研究,并深入开展了无铅焊料焊接可靠性的研究。为了在电子封装中应用无铅焊料和实现可靠的无铅焊料连接,全世界各国政府和工业界已经投入了巨大的人力物力,为了满足不断增加的可靠性、产品性能以及低成本制造要求,还将继续投入人力物力开展进一步的研究开发。

本书内容对于电子封装无铅化有着十分重要的意义。本书由上海大学中瑞联合微系统集成技术中心负责组织翻译。初译稿和初审稿的分工如下:

第1章 上海大学/瑞典查尔默斯理工大学孙鹏(译),美国钢公司刘伟平(审);

第2章 大连理工大学程从前(译),英国拉夫堡大学刘长清(审);

第3章 大连理工大学赵宁(译),中科院上海微系统与信息技术研究所程兆年(审);

第4章 中科院上海微系统与信息技术研究所林小芹(译),华中科技大学吴懿平(审);

第5章 中科院上海微系统与信息技术研究所林小芹(译),复旦大学肖斐(审);

第6章 中科院上海微系统与信息技术研究所朱大鹏(译), 北京科技大学王西涛(审);

第7章 中科院上海微系统与信息技术研究所朱大鹏(译), 香港科技大学李世玮(审);

第8章 华中科技大学陶军晖(译), 华中科技大学吴懿平(审);

第9章 华中科技大学奚弘甲(译), 华中科技大学吴懿平(审);

第10章 瑞典查尔默斯理工大学王腾(译), 英特尔美国吕道强(审);

第11章 上海大学/瑞典查尔默斯理工大学张燕(译), 英特尔上海曹立强(审);

第12章 上海大学/瑞典查尔默斯理工大学孙鹏(译), 美国钢公司刘伟平(审)。

本书由中国科学院上海微系统与信息技术研究所程兆年教授总校对, 由瑞典查尔默斯理工大学教授、教育部长江学者讲座教授、上海大学特聘教授、上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室主任、上海大学中瑞联合微系统集成技术中心主任、上海大学-英特尔先进封装技术研究中心主任刘建影负责总审校。

由于译者水平有限, 书中错误在所难免, 另外, 有部分电子封装中的专用名词, 虽然翻译者已经尽量仔细推敲, 但不可避免会出现词不达意之处, 还请读者多加指正。

刘建影

2007年8月6日

上海

中文版序

随着 2006 年欧盟 RoHS 指令案和 2007 年中国《电子信息产品污染防治管理办法》的实施, 电子产品的无铅化进程已在全球全面展开。本书之英文版《Lead-Free Solder Interconnect Reliability》正是在此国际背景下, 于 2005 年由美国 ASM International 正式出版, 受到世界电子产业界和学术界的普遍欢迎。由于电子产业在中国的迅猛发展, 无铅焊料互联可靠性在中国也受到广泛关注。为了推动电子产品在中国的无铅化和绿色制造的进程, 本书的中文版《无铅焊料互联及可靠性》于 2008 年初和读者见面了。

在上海大学长江学者讲座教授、瑞典查尔莫斯理工大学 (Chalmers University of Technology, Sweden) 教授刘建影博士的精心组织下, 参与本书翻译工作的同事们精益求精, 力求能够在中译本中体现原著的精髓。各章译稿分别由美国 Indium Corporation[®] 刘伟平博士、英国 Loughborough University 刘长清博士、中国科学院上海微系统与信息技术研究所程兆年研究员、中国华中科技大学吴懿平博士、中国复旦大学肖斐博士、中国北京科技大学王西涛博士、中国香港科技大学李世玮博士、Intel[®] 美国吕道强博士和 Intel[®] 中国曹立强博士等相关领域的专家进行了校阅, 并由程兆年先生对最终稿进行了统校。在本书出版之际, 我要特别感谢刘建影博士、孙鹏博士、程兆年先生和其他许多专家学者及工作人员为本书的译校和出版所做的大量工作。

我希望本书中译版的出版发行能够对中国电子产业的无铅化和绿色制造的进程起到一定的推动作用, 并对中国电子产业界和学术界的同仁有所裨益。这将使原作者和中文版译校人员倍感欣慰。

Vice President & Senior Technical Fellow, Flextronics International (伟创力国际)

IEEE Fellow

中国上海大学客座教授

上官东恺 (Dr. Dongkai Shangguan)

于美国加利福尼亚州

序 1

电子封装技术过程复杂且技术要求高。现今全球业界正全力推广的电子封装无铅化使电子封装技术面临着更大的困难和挑战。目前电子器件的发展趋势是结构越来越复杂的同时，器件尺寸却越来越小。在复杂电路中，各个电路元件焊接所面临的问题和挑战并不亚于开发小尺寸电路元件本身。电子产品对尺寸、速率、功率、稳定性及新型材料开发和应用等各方面的要求都在不断提高。为了能够满足这些不断增长的需求，同时又能提供安全可靠的焊接，全世界电子电气开发人员已经逐渐踏入一个全新的前沿科学领域。

尽管焊接问题是全世界所有从事材料学、力学和热学等领域的工作者们共同面临的巨大挑战，但是，世界上大多数的大学尚未将无铅焊料连接作为主要的教学和研究对象。为了填补这项空白，上官东恺博士组织了一支顶尖的专家团队进行该领域的研究，这些专家来自世界各地的政府科研机构、大学以及工业界，正是他们的努力，使得当代的无铅焊料连接可靠性研究有了长足的发展。

电子封装的焊料连接自始至终一直是一项非常有挑战性的技术。为了实现可靠的无铅焊料连接，工业界投入了巨大的资源，为了满足不断增加的可靠性、产品性能以及低成本制造要求，这种资源投入还将长期地持续下去。

对于本书的问世，国际材料工程与科学协会（ASM）及其下属的电子器件失效分析分会（EDFAS）感到十分欣慰。本书适合各类工作在无铅焊接可靠性与失效分析领域的专家及学者阅读。为了使这本书能够达到较高的专业技术水准，EDFAS 和 ASM 协同本书作者、出版者及各方评论家一起进行了广泛深入的合作。在这里，我们真诚地向所有为本书做出过贡献的人们致以衷心的感谢。

Gary F. Shade

国际电子器件失效分析分会主席

Thomas S. Passek Executive

国际电子器件失效分析分会主任

直到最近几年，地球上的居民才真正关心起我们所居住星球的生存环境，才真正开始对一些环境问题采取积极主动的救治措施。目前，在全世界的各个阶层里正在悄悄建立一个全球性的环保意识文化。

事实上，除此之外我们别无选择。

举例而言，电子工业的发展使我们的生活变得更加安全、舒适和便利，但是我们也因此更加依赖于电子产品，人类社会也因此每年产生了数以百万计的电子垃圾。

电子垃圾的与日剧增不仅挑战着垃圾掩埋场的容量，同时也源源不断地消耗着我们的生活资源，不断加重了对我们生存环境的污染与破坏。为了保护人类的健康和生存环境，欧盟提出了两个相关的指令：RoHS (The Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, 电器电子产品中有害物质禁限用指令) 和 WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, 废弃电器电子产品指令)。

WEEE 指令对废弃电子产品的分类收集和再循环利用提出了严格的要求，其目的是为了减少进入垃圾掩埋场的电气设备与电子产品的数量。RoHS 指令则要求在产品源头限制或减少使用那些严重危害人类健康的有害物质。

各个国家（尤其在中国）也正在建立相似的法律。尽管目前对这些法律法规还存有一定程度的异议，但是这些指令指标对全球电子工业的冲击无疑是巨大的，可以毫不夸张地说，这些指令指标正在引领全球电子工业的革命。

RoHS 明令禁止在电子设备生产中使用 6 种有害物质。其中铅的禁令对微电子封装所产生的冲击最大，同时也引起了巨大的争议。每年大约有 1 亿磅（1 磅=0.45 千克）的焊料（绝大多数是“锡铅”合金焊料）用于生产 10 万亿个焊点，而这些焊点是集成电路与印制电路板之间最主要的连接。因此，无铅焊料的使用与推广对全球电子工业界能否履行 RoHS 指令至关重要。

目前学术界加强了无铅焊料封装相关问题的科学研究工作，然而对无铅焊点的科学研究仍然处于起步阶段。

无铅电子产品正逐步向市场推广。对于工业界来说，为了能够制造可靠的无铅焊料电子系统和设备，深入无铅焊料焊接可靠性的研究就显得十分必要了。

作为工程产业，电子产业同时面临着不断增长的客户需求以及行内竞争压力。与其他领域一样，电子工业界成功地履行环保任务离不开整个业界的协作。幸运的是业界一批专家学者挺身而出，正是他们引领我们战胜那些挑战。上官东恺博士无疑是其中的佼佼者。

上官东恺博士拥有世界领先的封装技术和经验，同时具备了杰出的可靠性研究能力和环保设计能力。我们公司已经从上官东恺博士的技术和经验中获得了巨大的效益，我们也欣慰地看到上官东恺博士组建的全球化专家团队正在对无铅焊料焊点可靠性问题进行着

更深入的研究。

本书并不仅以受欢迎为目的，更是因为书中的内容至关重要。通过阅读本书，读者可以体会到环保意识与尖端知识完美结合的旅程。

Nicholas Brathwaite

技术主管

伟创力公司

前言

当我完成并放下这本书时，2004 年已经快要谢幕了。

透过书房的窗口，我能看见绿草、蓝天、明亮的阳光……在这硅谷的中心……刹那间，我的记忆回溯到了 1991 年。那时我坐在位于底特律市郊的书房里为福特电子公司准备无铅焊料的项目计划书，而窗外正飘着片片雪花……

电子工业自那时开始就踏上了一条漫长的发展道路。在过去 13 年间，无铅焊料领域也有了长足的发展。欧盟的 RoHS 立法，使全球无铅焊料的应用成为势不可挡的世界潮流。此后在集成电路封装、印制电路板组装，以及电子产品生产中必须使用无铅焊料。尽管现在对 RoHS 立法的争议仍然存在，但是无铅焊料的应用已经成为全球不可阻挡的发展潮流。

全球所推广的无铅焊料工艺流程包括焊料合金的选择、评价、工艺设计以及结构设计。全球学术界与工业界都呼吁提高研究工作的重要性。然而无铅焊料焊接的可靠性研究仍然是一个发展中的课题。目前，我们有大量“锡铅”焊料在不同应用环境下可靠性的研究数据，正是这个巨大的优势，使得“锡铅”焊料能够在各类焊料中脱颖而出。因此，在全面替换锡铅焊料前，工业界需要无铅焊料的各种相关的研究数据。

然而，由于焊料的应用环境存在广泛多样性，比如热机、动力、电化学和电气等领域都对焊料及焊料的可靠性有着不同程度的要求，因此焊料的可靠性研究是一个非常复杂的课题。失效机理与可靠性问题有着直接的联系，因此在无铅焊料的可靠性研究中，失效机理和判据也是一个重要的基本问题。由于焊料应用环境非常多样，锡铅焊料与无铅合金焊料之间的可靠性差别，也会随着应用环境的变化而变化，因此在研究焊料可靠性问题时，使用失效机理进行分析也不是一项简单的工作。所有这些复杂的因素，使得发展适当的加速测试方法和产品可靠性估计产生了巨大的困难。发展合适的加速测试手段和可靠性估计是产品设计的关键因素。由于该课题内容的复杂性，电子工业界在无铅焊料的可靠性问题上仍然存在着争议，这些争议阻碍了无铅焊料的应用与推广。如果在某些关键电子产品中没有正确有效地处理好可靠性问题，将会导致巨大的、灾难性后果。

全球的专家学者们已经着手研究不同环境下的无铅焊料可靠性，但是大多数研究成果只是发表在各种学术杂志和研讨会上。电子工业界急需一本集合该领域所有重要成果的著作，以提供与汇集在不同应用环境下的各种无铅焊料焊点及其可靠性研究的最新知识与成果。本书尽力深入覆盖与无铅焊料焊点可靠性相关的各个方面，包括基础知识的综合和实践应用的分析。本书可以为各类学者和教师提供参考，尤其针对那些在焊点可靠性研究领域工作的人员，以供进行产品设计、测试和维护时参考。

本书第 1 章介绍了无铅焊接的概况（包括材料、工艺和可靠性），对电子产品的环保问题进行了综合的阐述，还介绍了焊点连接系统中（包括元件、基板和焊料）各种不同的

相互错综在一起的失效环境、失效机理、失效模式，以及失效测试估计方法。在随后各章节中，分别详细地论述了以下几方面研究成果：微结构技术的基本原理、无铅合金焊料的组成原理与失效原理、锡铅焊料与无铅焊料的可靠性比较、化学元素的相互间作用与可靠性，以及“锡晶须”的生长等。这些章节深入地讨论了所研究的对象，涉及基本概念及应用问题。我们将在实际应用案例中讨论加速测试方法、可靠性估计、可靠性设计，以及失效测试分析等问题。目前世界的电子工业界内主要使用“锡-银-铜”合金和“锡-铜”合金这两种无铅焊料，因此，书中主要讨论“锡-银-铜”合金和“锡-铜”合金。需要提及的是，现实世界中还存在相当一部分其他类型的无铅合金焊料，对此本书将不一一讨论。但是书中许多的分析法和方法论，也同样适用于其他类型的无铅合金焊料系统。导电胶是另一种非常重要的锡铅焊料替代品，本书的后面部分将专门讨论关于导电胶的可靠性问题。本书最后将讨论无铅焊料连接可靠性领域在未来需要研究的最重要的课题与方向。

在全球范围内实现电子产品的无铅焊料可靠连接，是一条漫长的道路，可以毫不夸张地说，我们只是在漫漫征途中踏出了一小步而已。我们希望本书能够为工业界和学术界的该领域同行们提供一些帮助。毫无疑问，现实中还存在着各种各样的问题，还有许多工作需要去完成，然而我们也坚信这些问题都将逐一得到解决，这些工作也终将完成。谨希望本书能够在无铅焊料可靠性研究领域扮演一个重要角色，为无铅焊料领域的发展做出一份贡献。

上官东恺

2004年12月

致 谢

自我向 ASM 递交了本书的计划后，已过去了 16 个月了。我有幸在这个充满激情的征程上与许多朋友和同事一起紧密协作。我想感谢各章节的作者在过去一年中对我的充分信任，感谢他们为本书所做的巨大贡献。Keith Newman 先生为本书初稿做校订，并且提了许多非常有帮助的意见和建议，在此表示我对 Keith Newman 先生的深深谢意。

还要感谢我在 Ford, Visteon 和 Flextronics 的那些以前的和现在的同事们，与他们一起工作，是我非常愉快的经历和体验。我十分珍惜能够有向他们学习、了解他们并与他们一起共事的机会，我在他们身上学到了许多对人生有意义的东西。

我还要衷心感谢世界各地的工业界和研究机构的同行们，因为他们是我在这个科学领域里的工作的动力和灵感来源。特别值得一提的是在 EMS Forum 和 IPC, Soldertec, HDPUG 的众多领导，以及在中国上海大学的朋友们。同时我也从各类学术研讨会中获取到了大量有用的信息，他们提出的建议、问题以及反馈无时无刻提醒着我，那些需要进一步学习的东西，远远多于我已经掌握的东西。

另外，特别感谢 Scott Henry，以及 ASM 的编辑与出版部门员工的协作与支持。

没有我的家人的支持，本书将是一个不可能完成的项目。为了完成这项工作，我有将近一半的时间是待在离家非常遥远的地方。而且无论在哪里，我都是把大量的时间花在了工作上，这些花在工作上的“额外”的时间，本应该用来陪伴他们。当我正在写这一段的时候，我的小儿儿子刚好完成了他的松林小帽车，下星期他就将带着这个小车参加比赛，但是那个时候，作为父亲的我，将不得不因为工作而再一次离开他们。我只能让他的哥哥为我录下整个比赛。家人的爱是我探索真理的最终动力，虽然这样的探索有可能只为社会带来微不足道的贡献。家人的支持和理解使我能够有足够的时间来完成这个重要的项目，而我正在踏上另一段科学征途。

上官东恺
2004 年 12 月

目 录

第 1 章 无铅焊接与和谐环境：综述	1
1.1 引言	1
1.2 无铅焊接材料	2
1.2.1 无铅焊接合金	2
1.2.2 其他合金选择	3
1.2.3 助焊剂	4
1.2.4 印制电路板	4
1.2.5 器件	6
1.3 无铅焊接的工艺、设备和质量	7
1.3.1 SMT 回流焊接	7
1.3.2 波峰焊接	10
1.3.3 返工和修理	10
1.3.4 设备	11
1.4 无铅焊接可靠性	12
1.4.1 器件的可靠性	12
1.4.2 印制电路板的可靠性	16
1.4.3 电化学可靠性	17
1.4.4 热和力学可靠性	18
1.5 无铅焊接设计和环境兼容	20
1.6 环境兼容展望	21
1.6.1 环保规则要求	21
1.6.2 电子产品循环和报废处理	22
1.6.3 环境兼容的挑战	23
1.7 总结	24
致谢	25
参考文献	25
第 2 章 无铅焊料互联中显微组织的演化和界面反应	35
2.1 引言	35
2.2 无铅焊料显微组织的演化	35
2.2.1 相图和平衡凝固	35

2.2.2	形核和生长	36
2.2.3	凝固后的显微组织	37
2.2.4	固相老化中显微组织的演化	39
2.3	基体和焊料间的反应: 引言	40
2.4	熔化焊料-基板间的反应	40
2.4.1	焊接中的溶解行为	40
2.4.2	Cu-Sn 界面金属间化合物的形成	45
2.4.3	Ni-Sn 界面金属间化合物的形成	47
2.4.4	Cu-Sn 界面金属间化合物的生长	51
2.4.5	液态焊料中 Ni_3Sn_4 的动力学	57
2.4.6	界面 IMC 的显微组织	57
2.5	固相焊料-基板间的反应	59
2.5.1	实验数据	60
2.6	界面可靠性	60
2.6.1	富 Pb 相区域	60
2.6.2	块状 Ag_3Sn	61
2.6.3	IMC 的临界厚度	61
2.6.4	IMC 中的柯肯达尔空洞	61
2.6.5	黑盘	62
2.6.6	Au 脆	71
	致谢	77
	参考文献	77
第 3 章	无铅焊料合金的疲劳和蠕变: 基本性质	84
3.1	引言	84
3.2	材料的变形	86
3.2.1	时间无关的变形	86
3.2.2	微观组织	87
3.2.3	无铅焊料	90
3.2.4	无铅焊料的微观组织	95
3.2.5	疲劳变形	95
3.2.6	微观组织	99
3.2.7	无铅焊料	100
3.2.8	无铅焊料的微观组织	105

3.3	蠕变变形	108
3.3.1	描述	108
3.3.2	微观组织	113
3.3.3	无铅焊料	113
3.3.4	无铅焊料的微观组织	126
3.4	总结	128
	致谢	128
	参考文献	128
第 4 章	无铅焊点可靠性研究进展	134
4.1	引言	134
4.2	SAC 热循环测试数据的经验曲线	135
4.3	无铅与 Sn-Pb 的比较	137
4.4	关键组件数据	140
4.5	含 Pb 或 Sn-Pb 合金对无铅可靠性的影响	142
4.6	讨论	145
4.7	结论	153
	参考文献	154
第 5 章	无铅焊料互联的化学反应与可靠性测试	159
5.1	前言	159
5.2	助焊剂化学的背景知识	159
5.3	电迁移	162
5.4	表面绝缘电阻 (SIR)	165
5.4.1	SIR 测试程序	165
5.5	腐蚀测试方法	167
5.6	导电阳极细丝的形成	170
5.6.1	描述	170
5.6.2	影响 CAF 形成的因素	173
5.6.3	测试	176
5.7	助焊剂残留物和 RF 信号完整性	176
5.8	结论	178
	参考文献	178
第 6 章	无铅焊料表面的锡晶须生长	182
6.1	前言	182

6.2	无铅焊料表面锡晶须形貌	183
6.3	锡晶须生长过程中应力的产生(驱动力)	185
6.4	锡铜生成 Cu_6Sn_5 的室温反应	186
6.5	锡晶须生长中的应力松弛(动力学过程)	187
6.6	影响锡晶须生长的参数的测量	189
6.7	抑制锡晶须的生长	198
6.8	锡晶须生长的加速实验	199
6.9	总结	200
	致谢	201
	参考文献	201
第 7 章 无铅焊料互联的加速试验方法		203
7.1	前言	203
7.2	金属学基础	203
7.3	锡基焊料合金的变形	208
7.4	加速试验	210
7.5	试验设计	218
	致谢	222
	参考文献	222
第 8 章 无铅焊料的热机械可靠性		224
8.1	引言	224
8.2	无铅焊料合金的基本模型	224
8.2.1	热机械性能	225
8.2.2	非弹性变形的性能	225
8.3	几何模型	230
8.3.1	二维模型	231
8.3.2	广义平面形变(GPD)或 2.5D 模型	232
8.3.3	三维模型	233
8.3.4	其他的考虑	234
8.4	加载条件和热机械应力	234
8.4.1	工艺曲线	234
8.4.2	加速热循环	235
8.4.3	各种领域中使用的模拟	235
8.5	形变机理	236

8.6	封装中热机械可靠性	237
8.6.1	焊料的疲劳行为	237
8.6.2	无铅焊料的寿命预测模型	239
8.6.3	基于损伤力学的方法	241
8.7	模型的证实	241
8.8	结论	243
	参考文献	243
第 9 章	可靠性设计——无铅焊料互联的有限元模拟	248
9.1	引言	248
9.2	模拟	249
9.3	模型的几何结构	250
9.4	材料性质的讨论	252
9.5	失效判据的讨论	257
9.6	模拟中的困难	259
9.7	推荐的有限元几何模型	261
9.8	一个模拟 256 PBGA 的例子	261
9.9	用文献数据对失效理论作检验	267
9.10	可靠性设计	276
9.11	进一步研究的需要	278
9.12	结论	279
	致谢	279
	参考文献	280
第 10 章	无铅焊料缺陷的检测及失效分析	285
10.1	前言	285
10.2	锡铅和无铅合金	285
10.3	检测及分析技术	286
10.3.1	金属组织学研究和腐蚀	287
10.3.2	锡铅和无铅合金的微结构特征	289
10.3.3	无铅焊料光学外观较差的原因	297
10.3.4	锡铅和无铅焊料多次回流焊后的微结构	298
10.3.5	无铅焊料深腐蚀后的微结构特征	298
10.4	有各种表面镀层的无铅和混合组装中的空洞出现程度	304
10.5	跌落测试前后的微结构	305