

樊融融 编著

# 现代电子装联 无铅焊接技术



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

内容简介

本书在全面总结国内外的无铅焊接技术的基础上，结合我国电子工业发展的需要，参考国外先进经验，编写而成。本书共分五章，主要介绍无铅焊接的概论、无铅焊料、无铅焊接工艺、无铅焊接设备、无铅焊接的可靠性等。本书可作为从事无铅焊接工作的工程技术人员、工艺人员、操作人员、管理人员、培训人员、大专院校师生、科研人员和管理人员的参考书。

# 现代电子装联无铅焊接技术

樊融融 编著

图书在版编目(CIP)数据

现代电子装联无铅焊接技术 / 樊融融编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.10

ISBN 978-7-121-07252-2

I. ①现… II. ①樊… III. ①电子装联—焊接—技术—教材 IV. ①TN602.1—435

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第13289号

凡欲订购本书者，可向各书店或发行所定购。或通过邮局汇款定购。汇款时请注明书名、书号、册数及收款人姓名、地址。邮费在汇款时一并汇出。汇款单据请妥善保管。

责任编辑：李 蕾

封面设计：陈 颖

印刷：北京市海润印刷有限公司

发行：北京市海润印刷有限公司

地址：北京市海润印刷有限公司

北京市海润印刷有限公司 邮编：100076

开本：787×1092 1/16 印张：18.75 字数：216千字

印次：2008年10月第1次印刷

## 电子工业出版社

### Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

客服电话：(010) 88121888

邮购地址：北京市海润印刷有限公司 邮编：100076

服务传真：(010) 88128888

## 内 容 简 介

无铅电子制造正成为电子产业中的大趋势,各企业都将其视为提高竞争力和扩大市场份额的有效手段。然而要实现这一过程是一项系统工程,在无铅生产实施过程中将遇到许多陌生的应用性技术问题。本书从生产实际应用出发,对电子产品无铅制程中的一些典型问题展开讨论,并采用大量来自业界生产实践的典型真实案例进行辅助说明,图文并茂,让从事电子制造的工艺工程师们面对这些问题时,不仅知道如何去处理,还懂得为什么要这样处理。

本书主要面向从事电子产品组装的工艺工程师、质量工程师、物料工程师及相关的管理工程师,对生产现场的操作者也有很好的参考价值。

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

现代电子装联无铅焊接技术 / 樊融融编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.10  
ISBN 978-7-121-07355-7

I. 现… II. 樊… III. 电子设备—装配(机械)—钎焊 IV. TN605 TG454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 137589 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 凡

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 18.75 字数: 516.6 千字

印 次: 2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 43.00 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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

# 言 序

质量意味着能够满足顾客的需要，从而使顾客满意的产品特征；同时，质量也意味着免于不良。这是两项对质量的基本定义。随着科技进步和社会发展，环保问题越来越突出，各国都对环保越来越重视，顾客对环保的要求越来越高。一方面，科技的进步在创造财富、改善人们生活的同时，产生了大量的污染，给人们生活和身体健康造成相当大的危害；另一方面，人们不断追求高品质的生活，尤其电子产品已成为日常生活中不可或缺的工具，电子产品中的有害物质减少或消除势在必行。欧盟、美国、日本及中国相继立法，限制电子产品中有害物质的使用，并已陆续实施。满足 RoHS 要求无疑是质量的一项最基本的要求。

本书作者长期从事电子装联焊接技术的研究，有着丰富的理论造诣和实践经验，始终走在电子装联技术研究和应用的最前列。在电子装联无铅化转换中，它无疑也是技术的先驱和开拓者。中兴通讯是国家“走出去”战略的优秀企业，生产的产品出口到全球各个国家，尤其在欧美和日本比例较大。由于市场的需求，中兴通讯在国内最先实施无铅转换。

无铅化焊接技术不是简单的无铅化处理，而是一项复杂的技术。它包括无铅波峰焊接、无铅再流焊接及无铅人工焊接，和有铅焊接相比发生了重大变化，涉及物理学、化学、金属学、电气学、材料力学等，通过影响可焊性、焊接部腐蚀和焊接强度，最终影响焊接的可靠性。同时，生产过程中工艺设备的兼容性、工艺的可靠性、产能、各种器件引脚表面的涂覆层、焊接炉的热稳定性、加热温度曲线的设定，以及怎样使 PCB 的温度均匀分布等问题也给无铅焊接技术的理论分析和工艺实践增加了相当大的难度。

而无铅化转换更是一项非常复杂的系统工程。它涉及各个方面的协调和配合，包括材料检测 and 选择、供应商的认证和培训、更换工艺和生产装备、生产计划和管理、仓储、市场预测、工程师和生产工人的培训等。在转换阶段，有铅和无铅生产并存，有些产品有铅，有些产品无铅，或有些元器件有铅、有些元器件无铅，稍有不慎，就会造成混乱，影响质量。而且这种配合和协同并不仅在一个企业内部，而是在一个整体供应链上；不仅在一个国家，而且在全球范围内。这种协同和配合最终需要无铅焊接技术在理论上的研究和实践上的创新才能满足对可靠性和质量的要求。

本书从无铅化组装、无铅焊接技术、无铅焊点质量控制等方面全面介绍了无铅化技术，是一本既具有理论意义又极具实践价值的经典之作。作者结合自己从事无铅化的实践和研究心得，编写这本《现代电子装联无铅焊接技术》，无疑为中国电子产品无铅化的技术革命进程做出了重要贡献。



## 前 言

现代电子装联无铅焊接的转换，不仅是一类材料被另一类材料的简单替代；也不仅是温度从 240℃到 260℃的简单演变；更不仅是长期可靠性的简单确认。这种转换是广泛的、系统的、深入的对制造的可行性和测试的确认。如果一种工艺不能高效率地生产出符合质量要求的产品且保持可控，那么这种工艺就是不可行的。理解无铅化生产过程是怎样影响到产品性能、产能和工艺控制的，这才是其转换工作的核心内容。

在电子产品生产中，全面实施有铅向无铅的转换，是一项复杂的系统工程。它涉及组装用的各类材料、电子元器件、PCB、工具、工艺装备、质量控制、可靠性和失效模式、生产和计划管理、环保要求、市场需求等诸多要素的协调和配合。由于各相关部门对实施无铅化的时间表不尽相同，技术上也存在着尚待深入研究的领域，不同地区市场需求也存在着明显的差异……这一切都使转换过程变得更为复杂。

经过几年的技术攻关，元器件等的无铅化取得了突飞猛进的发展，全面满足了终端产品的生产需要。由于绿色无铅化是电子信息产业发展的大趋势，所以元器件生产厂商都将原有的有铅生产线一步到位地改造成无铅生产线，市场上无铅元器件正迅速取代有铅元器件。这又导致了市场尚无无铅化要求的许多有铅产品，因购买不到有铅元器件而不得不选用无铅元器件来替代，于是出现了有铅焊端和无铅焊膏的混用。考虑产品生产成本的压力，电子装备制造厂商又不得不采取无铅元器件有铅焊接的生产方式来过渡。

由有铅向无铅制造的过渡不可能一蹴而就。因此，在一个较长的时间内，电子产品组装都可能是使用双模式的生产线。当有铅、无铅组装交织在一起时，工艺上处理该类组装问题，比处理纯有铅或纯无铅组装中的问题都要更加复杂和棘手。

电子信息产业的绿色无铅化已席卷全球，在无铅化组装这场新的技术革命中，日本是目前处于世界领先水平的。为了加速我国绿色无铅化的技术革命进程，笔者吸取了日本在无铅转换过程中的技术经验，再结合自己从事无铅化的实践和研究心得，编著了《现代电子装联无铅焊接技术》这本专著，以供从事或即将从事此工作的工程师们参考。

本书在编著过程中得到了深圳中兴通讯股份有限公司执行副总裁邱未召先生的热情支持、关心和鼓励，并在百忙之中为本书作序，笔者不胜感激。

中兴通讯公司工艺技术部部长冯力博士、基础工艺科刘哲科长、贾忠中高工等参与了书稿的校阅，我的技术助手孙磊、钟宏基、邱华盛等对本书的完成做出了很大的贡献。中兴通讯公司物流体系汪海涛副总经理、马庆魁高级顾问、戎孔亮副总工艺师、材料实验室宋好强主任也给予了很大的关心和支持，在此对他们一一表示衷心的感谢。

在此还要特别感谢深圳唯特偶化工开发实业有限公司董事长廖高兵先生的热情关心和

支持。

由于时间仓促，作者水平有限，书中错误难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2008 年 3 月

于中兴通讯公司

# 目 录

38	.....	.....	1.1.1
37	.....	.....	1.1.2
37	.....	.....	1.1.3
38	.....	.....	1.2
38	.....	.....	1.2.1
38	.....	.....	1.2.2
38	.....	.....	1.3
38	.....	.....	1.3.1
38	.....	.....	1.3.2
38	.....	.....	1.3.3
38	.....	.....	1.4
38	.....	.....	1.4.1
38	.....	.....	1.4.2
38	.....	.....	1.4.3
38	.....	.....	1.4.4
38	.....	.....	1.4.5
38	.....	.....	1.5
38	.....	.....	1.5.1
38	.....	.....	1.5.2
38	.....	.....	1.5.3
38	.....	.....	1.5.4
38	.....	.....	1.5.5
38	.....	.....	1.6
38	.....	.....	1.6.1
38	.....	.....	1.6.2
38	.....	.....	1.6.3
38	.....	.....	1.7
38	.....	.....	1.7.1
38	.....	.....	1.7.2
38	.....	.....	1.7.3
38	.....	.....	第 2 章
38	.....	.....	2.1

目 录

2.1.1	电子装联的基本概念	37
2.1.2	软焊接在电子装联工艺中的地位	37
2.1.3	软焊接技术所涉及的学科领域及其影响	37
2.2	软焊接原理——冶金连接	38
2.2.1	冶金连接	38
2.2.2	钎料及软钎接	38
2.2.3	电子互连焊接机理	39
2.2.4	钎料的润湿作用	39
2.2.5	扩散	43
2.3	界面的金属状态	45
2.3.1	界面层的金属组织	45
2.3.2	合金层(金属间化合物)的形成	46
2.3.3	毛细现象	52
2.3.4	界面层的结晶和凝固	52
2.4	界面反应和组织	53
2.4.1	Sn 基钎料合金和 Cu 的界面反应	53
2.4.2	Sn 基钎料合金和 Ni 的界面反应	56
2.4.3	Sn 基钎料合金和 Ni/Au 镀层的冶金反应	58
2.4.4	Sn 基钎料合金和 Pd 及 Ni/Pd/Au 涂覆层的冶金反应	59
2.4.5	Sn 基钎料合金和 Fe 基合金的界面反应	60
2.4.6	Sn 基钎料和被 OSP 保护金属的界面反应	61
<b>第 3 章</b>	<b>无铅波峰焊接技术</b>	<b>64</b>
3.1	波峰焊接技术的进化和无铅应用	64
3.1.1	波峰焊接技术的进化	64
3.1.2	无铅波峰焊接的技术特点	64
3.2	无铅波峰焊接设备技术	67
3.2.1	适宜于无铅波峰焊接工艺的设备技术	67
3.2.2	无铅波峰焊接设备技术的新发展	71
3.3	无铅波峰焊接工艺过程控制	75
3.3.1	传统波峰焊接工艺过程控制理论的局限性	75
3.3.2	新的波峰焊接工艺过程控制理论要点	75
3.3.3	波峰焊接机器参数	76
3.3.4	无铅波峰焊接工艺设定参数及其优化	79
3.3.5	波峰焊接工艺过程记录参数	84
3.4	无铅波峰焊接工艺质量控制	85
3.4.1	无铅波峰焊接工艺质量控制中应关注的问题	85
3.4.2	无铅波峰焊接工艺质量控制要素	85
3.5	影响无铅波峰焊接焊点质量的因素	87
3.5.1	无铅波峰焊接的主要缺陷现象	87

3.5.2	影响无铅波峰焊接焊点质量的因素	87
<b>第4章</b>	<b>无铅再流焊接技术</b>	<b>90</b>
4.1	无铅再流焊接技术所面临的挑战	90
4.1.1	无铅应用推动了再流焊接技术的进步	90
4.1.2	无铅再流焊接的技术特点	91
4.2	无铅再流焊接设备技术及其发展	93
4.2.1	无铅再流焊接设备技术面临的挑战	93
4.2.2	无铅再流焊接设备加热技术的发展	96
4.2.3	无铅汽相再流焊接(VPS)	106
4.3	无铅再流焊接工艺技术	107
4.3.1	无铅再流焊接的物理化学过程	107
4.3.2	无铅再流焊接工艺参数	108
4.3.3	再流焊接工艺参数的优化	113
4.4	无铅再流焊接焊点缺陷	116
4.4.1	无铅再流焊接缺陷的主要类型	116
4.4.2	影响无铅再流焊接焊点质量的因素	118
<b>第5章</b>	<b>无铅手工焊接技术</b>	<b>119</b>
5.1	无铅手工焊接技术所面临的问题	119
5.2	无铅钎料合金的手工焊接工艺	119
5.2.1	无铅手工焊接在现代电子装联工艺中的意义	119
5.2.2	无铅手工焊接的物理、化学过程及要求	119
5.3	无铅手工焊接工具	121
5.3.1	无铅手工焊接工具的特性	121
5.3.2	电烙铁分类	123
5.3.3	电烙铁的选择	123
5.3.4	无铅手工焊接电烙铁头温度的选择	123
5.4	影响无铅手工焊接效果的因素	125
5.4.1	无铅钎料丝的选择	125
5.4.2	助焊剂的考虑	125
5.4.3	优化热传递	126
5.5	无铅手工焊接工艺过程控制	127
5.5.1	无铅手工焊接的基本过程	127
5.5.2	无铅手工焊接工艺参数控制	128
5.6	无铅手工焊接中的工艺性缺陷及其对策	130
<b>第6章</b>	<b>有铅、无铅混合组装的工艺问题</b>	<b>135</b>
6.1	由有铅向无铅转换中所面临的工艺问题	135
6.1.1	转换早期的有铅焊端对无铅钎料的混用	135
6.1.2	转换中、后期的无铅焊端对有铅钎料的混用	135



58	6.2	无铅、有铅混用的分类和组合	135
00	6.2.1	混用中的引脚焊端涂覆层	135
00	6.2.2	无铅、有铅混用的几种常见形式	136
00	6.2.3	无铅、有铅混用对焊点质量的影响	137
00	6.3	无铅、有铅混用的工艺性分析	138
10	6.3.1	高温对元器件的不利影响	138
00	6.3.2	电气可靠性	139
00	6.3.3	混合组装的返修工艺问题	139
00	6.3.4	焊膏与 BGA/CSP 焊球的相容性	139
001	6.3.5	炉温曲线与控制问题	141
001	6.4	有铅、无铅混合组装的可行性评估	143
001	6.4.1	焊点机械强度	143
001	6.4.2	分层剥离 (Lift-off) 现象	144
011	<b>第 7 章</b>	<b>无铅焊点的主要缺陷现象和质量标准</b>	<b>145</b>
011	7.1	概述	145
011	7.2	无铅焊接典型缺陷分析及质量要求	146
011	7.2.1	共性的缺陷分析及其质量要求	146
011	7.2.2	无铅波峰焊接特有的缺陷现象及其质量要求	151
011	7.2.3	无铅再流焊接缺陷分析及其质量要求	156
011	7.3	无铅焊接焊点的质量标准	163
011	<b>第 8 章</b>	<b>虚焊和冷焊</b>	<b>164</b>
101	8.1	概述	164
101	8.2	虚焊和冷焊的异同	164
101	8.2.1	相似性	164
101	8.2.2	差异性 & 物理定位	165
101	8.3	虚焊	167
101	8.3.1	定义和特征	167
101	8.3.2	焊接中金属间化合物的生成	167
101	8.3.3	虚焊发生的机理	168
101	8.3.4	影响虚焊的因素	169
101	8.4	冷焊	171
101	8.4.1	定义和特征	171
101	8.4.2	机理	171
101	8.4.3	冷焊焊点的判据	172
101	8.4.4	冷焊焊点缺陷程度分析	174
101	8.4.5	诱发冷焊的原因及其抑制对策	175
101	<b>第 9 章</b>	<b>无铅再流焊接的爆板、分层现象</b>	<b>179</b>
101	9.1	概述	179

9.2	爆板、分层现象的特征	179
9.2.1	现象特征	179
9.2.2	爆板沿厚度方向的分布	181
9.3	分层和爆板的定义	182
9.4	影响分层、爆板的因素	183
9.4.1	有挥发物的形成源是产生分层、爆板的必要条件	183
9.4.2	PP 与铜箔面黏附力差是产生分层、爆板的充分条件	185
9.4.3	再流焊接温度选择不适是分层、爆板的诱发因素	188
9.4.4	可挥发物逃逸不畅是分层、爆板的助长因素	188
9.5	分层、爆板发生的机理	189
9.5.1	分层发生的机理	189
9.5.2	爆板发生的机理	189
9.6	预防分层、爆板的对策	191
9.6.1	根除爆板发生的必要条件	191
9.6.2	抑制爆板发生的充分条件	191
9.6.3	改善大铜箔面的透气性	192
<b>第 10 章</b>	<b>无铅焊接中焊盘、焊缘起翘及芯片变形</b>	<b>194</b>
10.1	无铅焊接过程中的凝固过程	194
10.2	起翘、剥离及对策	194
10.2.1	起翘的定义及研究动向	194
10.2.2	起翘现象发生的机理	195
10.2.3	从起翘发生的机理看抑制的对策	203
10.3	PBGA 封装体翘曲及其对传统 MSL 分级的影响	205
10.3.1	背景	205
10.3.2	PBGA 封装体翘曲发生的机理	206
10.3.3	现行标准的不足	206
10.3.4	B.T. Vaccaro 等人的研究试验结论	207
<b>第 11 章</b>	<b>无铅再流焊接中 PBGA、CSP 焊点空洞和球窝缺陷</b>	<b>209</b>
11.1	概述	209
11.2	无铅焊接中 PBGA、CSP 焊点的空洞	210
11.2.1	PBGA、CSP 焊点中空洞的分类及物理特征	210
11.2.2	空洞的影响因素	213
11.2.3	空洞的形成机理	220
11.2.4	空洞的检测和控制	224
11.2.5	空洞是问题吗	224
11.3	无铅焊接中 PBGA、CSP 焊点的球窝现象	226
11.3.1	球窝现象的表现	226
11.3.2	球窝的分类和形位特征	226
11.3.3	在再流焊接过程中与球窝相关事件的研究	228

11.3.4	球窝发生的机理	232
11.3.5	球窝的危害	234
11.3.6	球窝的抑制措施	234
<b>第 12 章</b>	<b>电子产品无铅制程的可靠性问题与失效分析</b>	<b>235</b>
12.1	电子产品无铅制程的可靠性评估	235
12.1.1	电子产品无铅制程可靠性概述	235
12.1.2	电子产品无铅制程对环境的适应性	235
12.2	无铅焊点的可靠性问题	235
12.2.1	影响无铅焊点可靠性的因素	235
12.2.2	无铅焊点工艺可靠性设计	238
12.2.3	无铅焊点的可靠性评估	240
12.2.4	无铅电子产品长期工作的可靠性问题	242
12.3	焊点失效分析基础	246
12.3.1	名词及定义	246
12.3.2	失效分析的目的和失效率曲线	247
12.3.3	失效分析的层次和原则	248
12.3.4	失效分析方法	248
12.3.5	焊点的主要失效模式	249
12.3.6	焊点的失效机理	251
12.4	批量生产中无铅焊点失效特点及案例分析	257
12.4.1	无铅焊点失效的特有现象	257
12.4.2	SMT/THT 混合组装无铅波峰焊接的可靠性问题	262
12.4.3	批量生产中无铅焊点失效案例分析	263
12.5	无铅焊点的可靠性试验	271
12.5.1	无铅焊点可靠性试验的目的	271
12.5.2	试验分类和检测技术的适用性	272
12.5.3	主要的试验内容和方法	272

**参考文献** ..... 287

11.1 ..... 288

11.2 ..... 288

11.2.1 ..... 288

11.2.2 ..... 288

11.2.3 ..... 288

11.2.4 ..... 288

11.2.5 ..... 288

11.3 ..... 288

11.3.1 ..... 288

11.3.2 ..... 288

11.3.3 ..... 288

# 第1章 概 论

## 1.1 铅污染的危害

### 1.1.1 铅污染的形成

电子制造业中大量使用的锡铅合金 (Sn-Pb) 是污染人类生存环境的重要根源之一。电子产品中的 Pb 用量分布如图 1.1 所示。

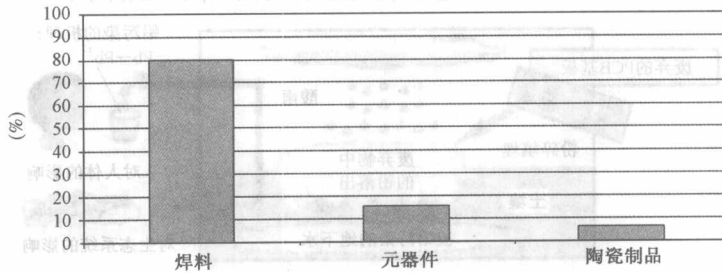


图 1.1 电子产品中 Pb 用量分布

钎料中的铅之所以成为环境问题，是由于铅在酸雨级的 pH 溶液中能溶解。表 1.1 中列出了根据美国的标准溶出试验方法 (TCLP)，测定的各种钎料合金成分中元素的溶出量。

表 1.1 钎料中元素的溶出量 (mg/L, TCLP)

合 金	Sn	Ag	Cu	Sb	In	Bi	Pb
Sn3.2Ag0.5Cu	0.00	9.32	43.75	—	—	—	—
Sn3.5Ag	0.00	11.56	—	—	—	—	—
Sn2.0Ag	0.00	8.46	—	—	—	—	—
Sn0.7Cu	0.00	—	44.52	—	—	—	—
Sn5Sb	0.00	—	—	55.5	—	—	—
Sn20In	0.22	—	—	—	0.39	—	—
Sn5Ag5Bi	0.13	—	—	—	—	1.24	—
Sn57Bi	0.35	—	—	—	—	1.61	—
Sn37Pb	0.082	—	—	—	—	—	1002

E.B.Smith et al.: Surface Mount Technology, p.64 (1990.3)

由表 1.1 可知：在各种元素中，铅是最容易溶出的，它大大超过了环境基准规定值（见表 1.2），尤其是在电子产品废弃物处理场大量积聚，蓄积的毒性更高，因而更容易从钎料中溶出。因此，铅污染和铅中毒已成为污染环境、危害人类身体健康的重要问题。现在，世界上一些发达国家和地区都在制订电子制造领域的无铅计划和时间表。

表 1.2 日本、美国相关法律规定的容限 (mg/L)

元素	日 本			美 国	
	自来水[1]	环境基准[2]	废弃物填埋基准[3]	饮用水	溶出基准 (TCLP)
Pb	0.05	0.01	0.3	0.015	5.0
Cu	1.0			1.0	500
Zn	1.0				
Ag				0.10	5.0
Sb	0.002[4]			0.06	1.0

注: [1] 水管法 1992 年修正; [2] 水质污防止法; [3] 废扫法 1994 年修正; [4] 监视项目指标值。(关于 Sn、Bi、In 尚无规定值, 美国和日本均无规定。)

电子产品废弃物中的铅对人体和生态系统的影响过程如图 1.2 所示。

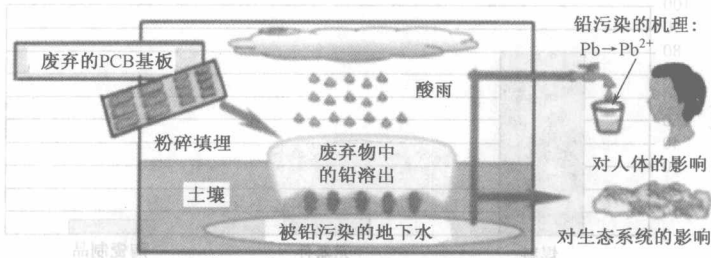


图 1.2 铅对地下水的污染

### 1.1.2 对人类健康的危害

据 2002 年 7 月 15 日中国政策科学研究会铅防治问题研究组、中国医学促进会、妇儿医疗保健委员会、北京儿童医院、北京晚报发表的“零铅工程”调查报告指出, 我国曾对 9 省 19 个城市的 6502 个 3~5 岁幼儿静脉血进行血铅测定, 结果显示儿童血铅浓度的总体均值为 88.3μg/L, 有近 30% 的幼儿血铅超过国际公认的儿童铅中毒水平。该调查结果表明我国儿童血铅水平较发达国家儿童为高, 而血铅增高对儿童发育、神经行为、语言能力的发展等 29 个方面都存在负面影响。该报告还同时列举了 50 种铅中毒的自觉症状。

铅是一种多亲和性的毒素, 主要损害神经系统、造血系统和消化系统。铅中毒也是引发白血病、肾病、心脏病、精神异常的重要因素之一。铅污染现已对我国国民体质造成了巨大危害。

据历史学家分析, 曾称霸西方的古罗马帝国的迅速灭亡就是因为铅在引水工程中大量应用, 引起人们体质恶化而导致的。铅毒污染不仅对水, 而且对土壤、空气均可产生污染。一旦环境发生严重铅污染, 其治理的难度很大, 周期很长, 且经费支出巨大。

## 1.2 电子产品无铅化组装必须关注的问题

### 1.2.1 全面实施有铅向无铅的转换是一项复杂的系统工程

在电子产品生产中, 全面实施有铅向无铅的转换, 是一项复杂的系统工程。它涉及组装用的各类材料、电子元器件、PCB、工具、工艺装备、质量控制、可靠性和失效模式、生产和计划管理、环保要求、市场需求等诸多要素的协调和配合。由于各相关部门对实施无铅化的时间

表不尽相同,技术上也存在着尚待深入研究的领域,不同地区市场需求也存在着明显的差异……这一切都使得转换过程变得更为复杂。

无铅化对我国电子制造企业来说,是一次技术实力和管理能力的挑战。随着“绿色设计和绿色制造”日益成为企业提高竞争力、改变企业形象和扩大市场份额的有效手段,加快无铅制造的转型,实现无铅化已成为我国电子制造产业与国际化接轨的一条必由之路。

RoHS 工业量产化驱动,首先要制定相应的实施策略与方法,特别要加强对无铅量产化过程中一些技术质量问题的预测。

(1) 与 Sn-37Pb 共晶合金相比, Sn-Ag-Cu 钎料的熔点更高、湿润性更差。更高的再流温度给电子制造工艺及供应链带来了一系列的问题与变数。

(2) 充分了解无铅钎料替换对制造工艺的影响。其中一些需要深入调查与了解的问题可分为以下几类。

#### ① 设计:

- PCB 设计/布局;
- 工具/夹具设计。

#### ② PCB、元器件与消耗品:

- PCB 层压材料的选择;
- PCB 表面处理工艺;
- 无铅组装工艺条件下的元器件有效性与重新审查;
- 无铅钎料合金选择;
- 对所选无铅钎料合金的可靠性研究;

- 无铅焊膏的选择;

- 无铅钎料棒的选择;

- 无铅波峰焊助焊剂的选择;

- 无铅返修材料的选择;

- 兼容性管理(向后及向前)。

#### ③ 工艺:

- 再流焊接工艺(对再流焊接温度曲线的要求、工艺窗口的大小);
- 波峰焊接工艺(对波峰焊接温度曲线的要求、无铅钎料槽的维护);
- 返修工艺(对返修温度曲线的要求)。

#### ④ 设备:

- 无铅工艺对再流炉、波峰焊设备和返修设备的影响;
- 无铅制造工艺中的设备能力,在钎料中允许污染的容限;
- 对测试与检查设备及程序的影响。

#### ⑤ 质量:

- 产品质量标准与有铅时的差异化,可能会遇到的焊接缺陷,接受与拒绝的标准;
- 切换到无铅工艺后的缺陷率水平;
- 可靠性的变化。

#### ⑥ 成本:

- 制造材料成本是否会增加;
- 由更高温度所引起的能耗增加,对于总体制造成本的影响;
- 由无铅工艺可能导致的不良品的增加对成本影响。

合金	Sn	Pb	Sp	Bi	Cu	Ag	Zn
Sn-Cu	Rem	0.1	0.05	0.1	0.002	0.02	0.001
Sn-Cu	Rem	0.1	0.05	0.1	0.002	0.02	0.001
Sn-Ag	Rem	0.1	0.1	0.1	0.002	0.02	0.001
Sn-Ag	Rem	0.1	0.1	0.1	0.002	0.02	0.001
Sn-Sn	Rem	0.1	0.1	0.1	0.002	0.02	0.001

### 1.2.2 现代电子产品组装无铅化的核心是无铅焊接

现代电子产品组装由有铅向无铅转换过程中的核心就是焊接技术的转换。现代电子装联焊接技术由有铅向无铅的转换，不仅是一类材料被另一类材料的简单替代；也不仅是温度从 240℃ 到 260℃ 的简单演变；更不仅是长期可靠性的简单确认。这种转换是广泛的、系统的、深入的对制造的可行性和测试的确认。如果一种工艺不能高效率地生产出符合质量要求的产品且保持可控，那么这种工艺就是不可行的。理解无铅焊接生产过程是怎样影响到产品性能、产能和工艺控制的，这才是其转换工作的核心内容。

从材料角度看，影响无铅焊接效果的要素是无铅钎料合金、无铅助焊剂、无铅焊膏的合理选择，元器件和 PCB 对无铅焊接高温的适应能力，以及元器件焊端、PCB 焊盘可焊性保护涂覆层的适配能力。

## 1.3 无铅钎料合金

### 1.3.1 无铅钎料合金的定义

欧盟 RoHS、ISO9453 和日本 JEIDA 等都有明确规定：Pb 含量 < 0.1wt% (1000ppm) 的钎料合金可定义为无铅钎料合金。例如，ISO9453 标准中关于无铅钎料合金的规定见表 1.3。

表 1.3 ISO9453 标准中关于无铅钎料合金的规定 (wt%)

合金	Sn	Pb	Sb	Bi	Cd	Cu	In	Ag	Al	As	Fe	Zn
Sn-1Cu	Rem	0.1	0.05	0.1	0.002	0.45~0.9	0.05	0.05	0.01	0.03	0.02	0.001
Sn-3Cu	Rem	0.1	0.05	0.1	0.002	2.5~3.5	0.05	0.05	0.01	0.03	0.02	0.001
Sn-3Ag	Rem	0.1	0.1	0.1	0.002	0.1	0.05	3.0~3.5	0.01	0.03	0.02	0.001
Sn-4Ag	Rem	0.1	0.1	0.1	0.002	0.05	0.03	3.4~4.0	0.01	0.03	0.02	0.001
Sn-5Sb	Rem	0.1	4.5~5.5	0.1	0.002	0.1	0.05	0.05	0.01	0.03	0.02	0.001

注：各种杂质元素的重量百分比均为其含量的最大允许值。

### 1.3.2 评价无铅钎料合金应用性能的标准

对无铅钎料合金应用性能的要求可综合如下。

- (1) 机械性能（剪切强度、抗蠕变、等温疲劳、热疲劳等能力）要接近或等于 Sn-37Pb。
- (2) 物理性能（电导率、热导率、热膨胀系数）与 Sn-37Pb 应是可比较的。
- (3) 应用特性与现代电子产品的制造基础结构是兼容的。
- (4) 润湿性良好，相变温度（固-液相线）与 Sn-37Pb 钎料相近，金属学组织稳定。
- (5) 无毒性：金属元素对毒性的影响为 Pb > Cu > Ni > Ag > Al > Sn > Au。
- (6) 可以再循环利用，成本低。
- (7) 地球上储量能满足市场需求，一些元素（如 In、Ce 等）因储量小，只能作为添加成分。
- (8) 能加工成工业上所需的棒料、线料及粉料等各种形状。

### 1.3.3 实用的无铅钎料合金

#### 1. 实用的无铅钎料合金分类

实用化的无铅钎料合金，通常按熔点范围做如下分类。

(1) 低熔点无铅钎料合金（熔化温度范围 $<180^{\circ}\text{C}$ ），见表 1.4。

表 1.4 低熔点无铅钎料合金

合金系	成分 (wt%)	熔化温度范围 ( $^{\circ}\text{C}$ )
Sn-Bi	Sn-58Bi	139 (共晶)
Sn-In	Sn-52In	117 (共晶)
	Sn-50In	117~125
Bi-In	Bi-33In	109 (共晶)
Sn-Bi-Ag	Sn-57Bi-Ag	175 (共晶)

(2) 熔点与 Sn-37Pb 相近的无铅钎料合金（熔化温度范围为  $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ ），见表 1.5。

表 1.5 熔点与 Sn-37Pb 相近的无铅钎料合金

合金系	成分 (wt%)	熔化温度范围 ( $^{\circ}\text{C}$ )
Sn-Ag-In	Sn-2.8Ag-20In	179~189
Sn-Zn	Sn-9Zn	198 (共晶)

(3) 中等范围熔点的无铅钎料合金（熔化温度范围为  $200\sim 230^{\circ}\text{C}$ ），见表 1.6。

表 1.6 中等熔点范围的无铅钎料合金

合金系	成分 (wt%)	熔化温度范围 ( $^{\circ}\text{C}$ )
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-4.8Bi	205~210
Sn-Ag-Cu-Bi	Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi	213~218
Sn-Ag-Cu	Sn-3.0Ag-0.5Cu	217~220
	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217 (共晶)
Sn-Ag-In	Sn-3.5Ag-1.5In	218
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221 (共晶)
	Sn-2Ag	221~226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227 (共晶)
Sn-Cu-X	Sn-0.7Cu-0.05Ni (用于波峰焊)	226~227
	Sn-0.5Cu-0.05Co (用于波峰焊)	228

(4) 高熔点无铅钎料合金（熔化温度范围为  $230\sim 350^{\circ}\text{C}$ ），见表 1.7。

表 1.7 高熔点无铅钎料合金

合金系	成分 (wt%)	熔化温度范围 ( $^{\circ}\text{C}$ )
Sn-Sb	Sn-5Sb	232~240



## 2. 实用无铅钎料合金性能解析

### (1) Sn-Ag 二元合金

当组分为 Sn-3.5Ag 时形成共晶合金，熔化温度为 221℃，其状态图如图 1.3 所示，图 1.4 所示为该合金的典型金相组织。

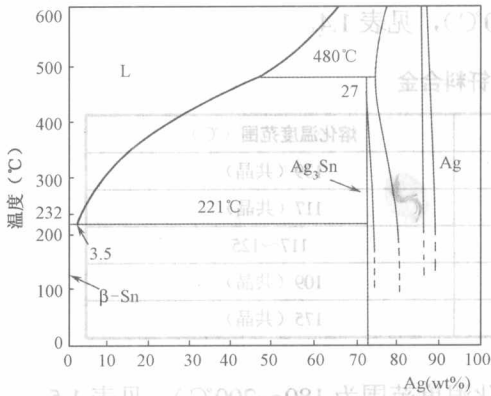


图 1.3 Sn-Ag 合金系状态图

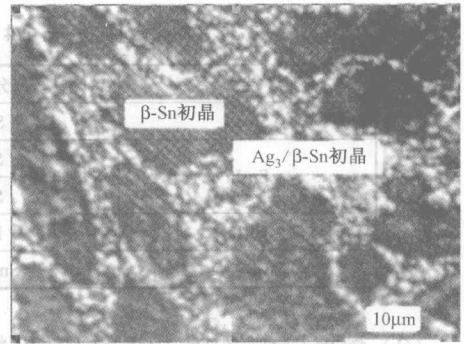


图 1.4 Sn-Ag 合金系的金相组织

因此业内人士认为用 Sn-Ag 钎料作为 Sn-Pb 的替代品应该很方便，但是这种材料也有以下几个问题：

- 熔点为 221℃，相对于许多表面安装器件和工艺来说都太高了；
- 内含 (3.5~4) wt% Ag，将因成本过高而在某些领域的应用中受到限制；
- 当合金内不同区域的冷却速率不同时，会因为 Ag 的相位变化而无法通过可靠性试验。

有人将一 Sn-4Ag 合金块进行再流并从底部强制冷却，然后检查它在不同冷却速率下的微观结构，如图 1.5 所示。

Sn-4Ag 合金由于冷却速率不同而有三种金相结构，这种结构缺陷与焊点上发生的情况很类似。因此，它可能引起现场失效。正是由于这个原因，多数 OEM 厂商和工业组织都反对采用 Sn-Ag 作为主要的无铅钎料合金。Ag 的相变问题还引起了人们对含 Ag 量高的 Sn-Ag-Cu 合金的担心。

合金中 Ag 含量的增加对合金机械性能的影响，如图 1.6 所示。Sn-3.5Ag 合金的物理性能，如图 1.7 所示。

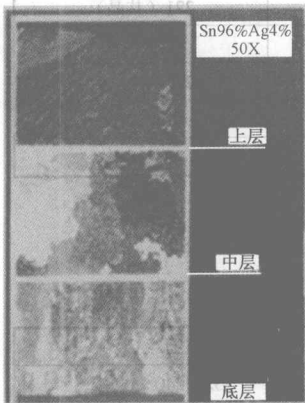


图 1.5 Ag 在不同的冷却速度下的相变

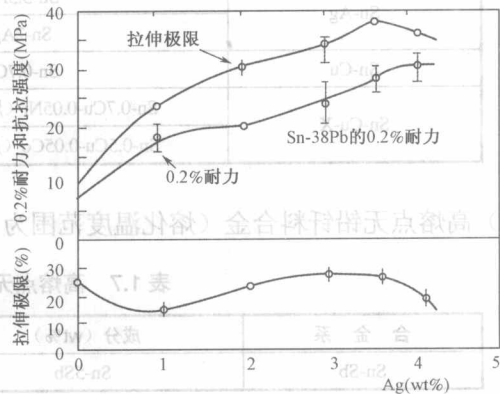


图 1.6 Ag 含量对合金机械性能的影响