

现代电子制造  
系列丛书

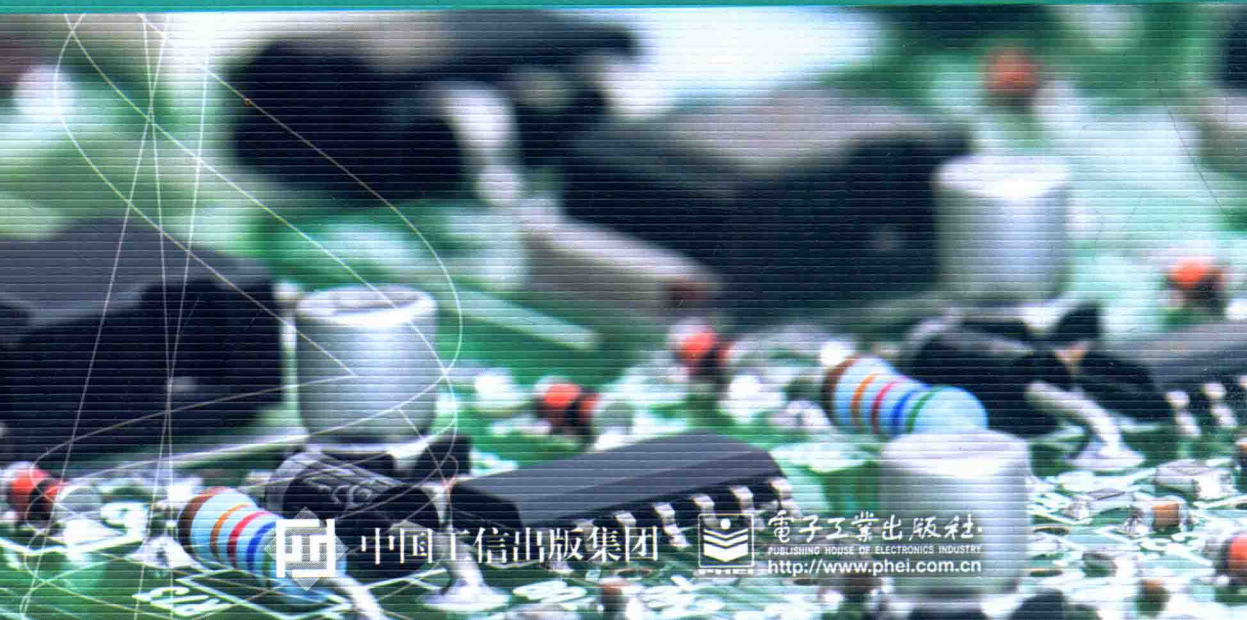
# 现代电子装联 软钎焊接技术

◎ 史建卫 等编著

Modern  
Electronics



Manufacturing



中国通信出版集团



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

现代电子制造系列丛书

# 现代电子装联软钎 焊接技术

史建卫 温粤晖 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书基于对现代电子装联软钎焊技术原理的分析,阐明了焊接过程中的润湿铺展与溶解扩散两个主要过程对焊点形成的重要性,并对典型群焊技术(再流焊、波峰焊)、局部焊接技术(掩膜焊、选择焊、激光焊、热压焊等)及手工焊接技术的工艺特点、工作原理、制程设计与步骤、质量控制、常见焊接缺陷等进行了介绍;针对PCBA可制造性设计(DFM),从PCB加工制作、元器件选型与布局、焊盘设计、布线设计、PCBA安装设计等方面进行了介绍,基于焊点可靠性分析,对焊点界面的组织特征及接头形态设计提出了要求,验证了其工艺参数之间的关联性及对可靠性的影响,为高质量、高可靠电子组装提供了依据和思路。

本书既可作为中兴通讯电子制造职业学院的教学用书,也可作为相关企业员工的专业技能培训教材,还可作为高等院校相关专业师生的教材或教学参考书。

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

现代电子装联软钎焊接技术 / 史建卫, 温粤晖编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.1

(现代电子制造系列丛书)

ISBN 978-7-121-27596-8

I. ①现… II. ①史… ②温… III. ①电子装联—软钎焊—焊接工艺 IV. ①TN305.93②TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第274964号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 谭丽莎

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

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: 16.75 字数: 429 千字

版 次: 2016年1月第1版

印 次: 2016年1月第1次印刷

印 数: 3 000 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 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 总 序

当前，各种技术的日新月异及这个时代的各种应用和需求迅速推动着现代电子制造技术的革命。各门学科的深度融合，例如，物理学、化学、电子学、行为科学、生物学等，提供了现代电子制造技术广阔的发展空间，特别是移动互联网技术的不断升级换代、工业 4.0 技术推动着现代电子技术的高速发展。同时，现代电子制造技术将会在机遇和挑战中不断变革。例如，人们对环保、生态的需求，随着中国人口老龄化的不断加剧，操作工人的短缺和生产的自动化，以及企业对生产效率提高的驱动，将会给现代电子制造技术带来深刻变革。伴随着完全不同的时代特征、运行环境和实现条件，现代电子制造的发展也必须建立在一个崭新的历史起点上。这就意味着，在这样一个深刻的、深远的时代转折时期，电子制造业生态和电子生产制造体系的变革，为增强制造业竞争力提供了难得的机遇。

作为全球电子产品的生产大国，电子制造技术对中国无疑是非常重要的。而中兴通讯作为中国最大的通信设备上市公司，30 年来，其产品经历了从跟随、领先到超越的发展历程，市场经历了从国内起步扩展到国外的发展历程，目前已成为全球领先的通信产品和服务供应商，可以说是中国电子通信产品高速发展的缩影。在中兴通讯成功的因素中，技术创新是制胜法宝，而电子制造技术也是中兴通讯的核心竞争力。

无论是“中国智造”，还是“中国创造”，归根结底都依赖于懂技术、肯实干的人才。中兴通讯要不断夯实自身生产制造雄厚的技术优势和特长，以更好地推动和支撑中兴通讯产品创新和技术创新。为此，2013 年，中兴通讯组建了电子制造职业学院，帮助工程师进修学习新知识和新技术，不断提升工程师的技术能力。为提升学习和培训效果，我们重点下功夫编写了供工程师进修学习的精品教材。为此，公司组织了以樊融融教授为首的教材编写小组，这个小组集中了中兴通讯资深的既有丰富理论又有实践经验的专家队伍，这批专家也可以说是业界顶尖的工程师，这无疑保证了这套教材极高的水准。

“现代电子制造系列丛书”共分为 3 个系列，分别用于高级班、中级班、初级班，高级班教材有 4 本，中级班教材有 6 本，初级班教材有 2 本。本套丛书基本上覆盖了现代电子制造所有方面的理论、知识、实际问题及其答案，体现了教材的系统性、全面性、实用性，不仅在理论和实际操作上有一定的深度，更在新技术、新应用和新趋势方面有许多突破。

本套丛书的内容也可以说是中兴通讯的核心技术，现在与电子工业出版社联合将此丛书公开出版发行，向社会和业界传播电子制造新技术，使现在和未来从事电子制造技术研究的工程师受益，将造福于中国电子制造的整个行业，对推动中国制造提升能力具有深远的影响，这无疑体现了“中兴通讯，中国兴旺”的公司愿景和一贯的社会责任。

中兴通讯股份有限公司董事长

# 前 言

随着电子产品向多功能、微型化、高密度、环保方向发展,电子装联变得越来越重要,如何将现代电子产品可靠、高效、低廉、定制化地完成组装,已经成为现代电子装联的新课题。

现代电子装联是随着封装、印制电路板、组装材料和组装技术共同发展起来的,在这一过程中,我们面临的高密度组装及其可靠性问题必须得到重视,而且基于生产过程的工艺管理为电子装联成功与否提供了保障。

正是基于以上考量,我们根据现代电子装联在新形势下的要求,提出了编制针对专业技术人员的系列教材,以满足现代电子装联的各项要求。

《现代电子装联软钎焊接技术》首先基于对现代电子装联软钎焊技术原理的分析,阐明了焊接过程中的润湿铺展与溶解扩散两个主要过程对焊点形成的重要性;其次对再流焊接技术、波峰焊接技术及手工焊接技术等工艺特点、工作原理、制程设计与步骤、质量控制、常见焊接缺陷等进行了论述;再次针对 PCBA 可制造性设计 (DFM) 进行了介绍,为自动化组装实现高焊接质量、高直通率保驾护航;最后基于焊点可靠性分析,对焊点界面的组织特征及接头形态设计提出了要求,并验证了其与工艺参数之间的关联性及对可靠性的影响,为高质量、高可靠电子组装提供了依据和思路。

本书共分 9 章,分别是:第 1 章,现代电子装联软钎焊技术;第 2 章,现代电子装联软钎焊原理;第 3 章,现代电子装联软钎焊应用材料;第 4 章,再流焊接技术;第 5 章,波峰焊接技术;第 6 章,局部焊接技术;第 7 章,手工焊接技术;第 8 章,PCBA 可制造性设计 (DFM);第 9 章,焊点接头设计及其可靠性。

本书的第 1、2、3、4、7、8、9 章由史建卫编写,第 5、6 章由温粤晖编写。

在本书编写过程中,中兴通讯股份有限公司董事长给予了大力支持、关心和鼓励,并在百忙之中为本系列丛书作序。同时,该公司执行副总裁邱未召先生和高级顾问马庆魁先生也亲力亲为,为本书的按时出版提供了指导,笔者十分感谢!

作为前辈和老师,已八十岁高龄的樊融融研究员亲自审核了全书,并为该书提出了很多好的指导、意见和建议,笔者深表感谢!

在本书的编写过程中,还得到了制造中心工艺部汪芸部长、邱华盛总工程师的关心和支持,在此表示感谢!

笔者在完成这一书稿的过程中得到了制造工程研究院工艺研究部刘哲总工程师、贾忠中资深工艺专家、制造中心工艺部孙磊资深工艺专家的指导与协助,以及吴仙仙、曾慧两位同志在文字处理方面的帮助,在此也表示由衷的感谢!

本书在编写过程中参考了一些专业书籍和网上的相关资料,在此表示衷心感谢!

编著者

2015 年 12 月于中兴通讯股份有限公司

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 现代电子装联软钎焊技术             | 1  |
| 1.1 概述                        | 2  |
| 1.2 焊接与钎焊                     | 2  |
| 1.2.1 焊接                      | 2  |
| 1.2.2 钎焊及其分类                  | 3  |
| 1.2.3 软钎焊技术所涉及的学科领域及其影响       | 3  |
| 1.2.4 软钎焊技术的基本分类              | 4  |
| 1.3 现代电子装联软钎焊技术的新发展           | 6  |
| 1.3.1 “微焊接”技术                 | 6  |
| 1.3.2 无铅化焊接技术                 | 8  |
| 思考题                           | 11 |
| 第 2 章 现代电子装联软钎焊原理             | 13 |
| 2.1 软钎焊特点与常用术语                | 14 |
| 2.1.1 软钎焊连接机理                 | 14 |
| 2.1.2 软钎焊工艺步骤                 | 14 |
| 2.1.3 软钎焊加热方式                 | 15 |
| 2.1.4 可焊性与润湿性                 | 15 |
| 2.1.5 接触角与润湿角                 | 16 |
| 2.2 润湿                        | 16 |
| 2.2.1 固体金属表面结构                | 17 |
| 2.2.2 液态钎料表面现象                | 17 |
| 2.2.3 润湿及分类                   | 19 |
| 2.2.4 杨氏方程 (Young's Equation) | 20 |
| 2.2.5 助焊剂作用下润湿过程中的热动力平衡       | 21 |
| 2.2.6 润湿形式                    | 22 |
| 2.2.7 润湿性影响因素                 | 23 |
| 2.2.8 润湿性评定方法                 | 27 |
| 2.2.9 常用去膜技术                  | 28 |
| 2.3 钎料填缝过程                    | 29 |
| 2.3.1 弯曲液面附加压力                | 29 |
| 2.3.2 拉普拉斯方程 (Young-Laplace)  | 31 |
| 2.3.3 弯曲液面对饱和蒸汽压的影响           | 31 |
| 2.3.4 液态钎料毛细填缝过程              | 32 |
| 2.3.5 液态钎料的平衡形态               | 36 |

|       |                             |    |
|-------|-----------------------------|----|
| 2.4   | 溶解与扩散                       | 37 |
| 2.4.1 | 物质间的互溶条件与界面张力关系             | 37 |
| 2.4.2 | 基体金属的溶解过程                   | 37 |
| 2.4.3 | 钎料与基体金属之间的扩散                | 43 |
| 2.5   | 界面反应组织                      | 47 |
| 2.5.1 | 界面层结合模式                     | 47 |
| 2.5.2 | 界面层金属间化合物的形成与生长             | 49 |
| 2.6   | 钎焊接头性能及接头设计                 | 53 |
| 2.6.1 | 钎焊接头性能                      | 53 |
| 2.6.2 | 钎焊接头强度                      | 53 |
|       | 思考题                         | 57 |
| 第 3 章 | 现代电子装联软钎焊应用材料               | 59 |
| 3.1   | 钎料合金概述及其工艺性要求               | 60 |
| 3.1.1 | 钎料合金概述                      | 60 |
| 3.1.2 | 钎料合金的选择与使用                  | 66 |
| 3.2   | 助焊剂概述及其工艺性要求                | 69 |
| 3.2.1 | 助焊剂概述                       | 69 |
| 3.2.2 | 助焊剂的选择与使用                   | 72 |
| 3.3   | 钎料膏概述及其工艺性要求                | 74 |
| 3.3.1 | 钎料膏概述                       | 74 |
| 3.3.2 | 钎料膏的选择与使用                   | 75 |
| 3.4   | 其他钎料形态概述                    | 76 |
| 3.4.1 | 钎料丝                         | 76 |
| 3.4.2 | 预成型焊片                       | 77 |
| 3.5   | 无铅化兼容性问题                    | 78 |
| 3.5.1 | 无铅化 PCB 焊盘表面镀层工艺要求          | 78 |
| 3.5.2 | 无铅化元器件焊端/引脚表面镀层工艺要求         | 81 |
| 3.5.3 | 从润湿性评估无铅钎料与 PCB 表面保护层之间的兼容性 | 83 |
| 3.5.4 | 从润湿性评估无铅钎料与元器件表面镀层之间的兼容性    | 89 |
|       | 思考题                         | 91 |
| 第 4 章 | 再流焊接技术                      | 93 |
| 4.1   | 再流焊接工艺特点                    | 94 |
| 4.2   | 再流焊接温度曲线                    | 94 |
| 4.2.1 | 温度曲线的基本特征                   | 94 |
| 4.2.2 | 典型温度曲线类型                    | 96 |
| 4.2.3 | 加热因子                        | 96 |
| 4.2.4 | 带宽与工艺窗口                     | 98 |

|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 4.2.5  | 温度曲线设置影响因素 .....        | 100 |
| 4.2.6  | 温度曲线测试及优化 .....         | 100 |
| 4.3    | 再流焊接传热技术 .....          | 103 |
| 4.3.1  | 热传导 .....               | 104 |
| 4.3.2  | 热辐射 .....               | 105 |
| 4.3.3  | 热对流 .....               | 105 |
| 4.4    | 红外再流焊接技术 .....          | 106 |
| 4.4.1  | 红外再流焊接加热原理 .....        | 106 |
| 4.4.2  | 红外再流焊接技术特点 .....        | 106 |
| 4.4.3  | 红外再流焊炉结构 .....          | 107 |
| 4.5    | 热风再流焊接技术 .....          | 109 |
| 4.5.1  | 热风再流焊接加热原理 .....        | 109 |
| 4.5.2  | 热风再流焊接技术特点 .....        | 110 |
| 4.5.3  | 热风再流焊炉结构 .....          | 110 |
| 4.6    | 红外+热风复合加热再流焊接技术 .....   | 112 |
| 4.6.1  | 红外+热风复合加热再流焊接加热原理 ..... | 112 |
| 4.6.2  | 红外+热风复合加热再流焊接技术特点 ..... | 113 |
| 4.6.3  | 红外+热风复合加热再流焊炉结构 .....   | 113 |
| 4.7    | 汽相再流焊接技术 (VPS) .....    | 114 |
| 4.7.1  | 汽相再流焊接加热原理 .....        | 115 |
| 4.7.2  | 汽相再流焊接技术特点 .....        | 116 |
| 4.7.3  | 汽相再流焊炉结构 .....          | 117 |
| 4.8    | 再流焊炉设计参数及应用 .....       | 118 |
| 4.9    | 无铅再流焊接工艺技术 .....        | 119 |
| 4.9.1  | 无铅再流焊接工艺技术特点 .....      | 119 |
| 4.9.2  | 无铅化对再流焊接温度曲线的影响 .....   | 120 |
| 4.9.3  | 无铅化对再流焊炉的影响 .....       | 121 |
| 4.9.4  | 有铅+无铅混装再流焊接温度曲线设置 ..... | 129 |
| 4.10   | 再流焊接常见缺陷及防治措施 .....     | 131 |
| 4.10.1 | 焊点脱焊 .....              | 131 |
| 4.10.2 | 钎料膏再流不完全 .....          | 132 |
| 4.10.3 | 润湿不良 .....              | 132 |
| 4.10.4 | 墓碑 .....                | 132 |
| 4.10.5 | 钎料珠 .....               | 133 |
| 4.10.6 | 钎料球 .....               | 134 |
| 4.10.7 | 桥连 .....                | 134 |
| 4.10.8 | 元器件开裂 .....             | 135 |
| 4.10.9 | 其他 .....                | 136 |
|        | 思考题 .....               | 136 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第 5 章 波峰焊接技术                          | 137 |
| 5.1 概述                                | 138 |
| 5.1.1 波峰焊接的定义                         | 138 |
| 5.1.2 波峰焊接的工艺特点                       | 138 |
| 5.2 波峰焊接中的热、力学现象                      | 138 |
| 5.2.1 波峰焊接入口点的热、力学现象                  | 138 |
| 5.2.2 热交换和钎料供给区的热、力学现象                | 139 |
| 5.2.3 波峰退出点的热、力学现象                    | 139 |
| 5.2.4 波峰焊接过程中的温度特性                    | 140 |
| 5.3 波峰焊接工艺窗口                          | 141 |
| 5.3.1 助焊剂涂覆                           | 141 |
| 5.3.2 预热温度                            | 142 |
| 5.3.3 钎料槽温度                           | 144 |
| 5.3.4 传输速度                            | 146 |
| 5.3.5 传输角度                            | 147 |
| 5.3.6 波峰高度                            | 148 |
| 5.3.7 压波深度                            | 148 |
| 5.3.8 冷却速度                            | 149 |
| 5.4 波峰焊接设备结构及其性能评估指标                  | 149 |
| 5.4.1 波峰焊接设备系统组成                      | 149 |
| 5.4.2 波峰焊接设备性能评估指标                    | 149 |
| 5.5 波峰焊接工艺过程控制                        | 156 |
| 5.5.1 工艺过程控制的意义                       | 156 |
| 5.5.2 基材可焊性的监控                        | 157 |
| 5.5.3 波峰焊接设备工序能力系数 ( $C_{pk}$ ) 的实时监控 | 157 |
| 5.5.4 助焊剂涂覆的监控                        | 158 |
| 5.5.5 波峰焊接温度曲线的监控                     | 159 |
| 5.5.6 波峰焊接中钎料槽杂质污染的危害                 | 159 |
| 5.5.7 防污染的对策                          | 160 |
| 5.6 波峰焊接常见焊点缺陷及防治措施                   | 163 |
| 5.6.1 虚焊                              | 163 |
| 5.6.2 冷焊                              | 164 |
| 5.6.3 拉尖                              | 164 |
| 5.6.4 桥连                              | 165 |
| 5.6.5 金属化孔填充不良                        | 167 |
| 5.6.6 针孔和吹孔                           | 168 |
| 5.6.7 钎料珠和钎料球                         | 169 |
| 5.6.8 芯吸现象                            | 170 |
| 5.6.9 缩孔                              | 171 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 思考题                          | 171        |
| <b>第6章 局部焊接技术</b>            | <b>173</b> |
| 6.1 掩膜波峰焊接技术                 | 174        |
| 6.1.1 掩膜波峰焊接技术特点             | 174        |
| 6.1.2 掩膜板材料分类及特性             | 174        |
| 6.1.3 掩膜板设计技术要求              | 176        |
| 6.2 选择性波峰焊接技术                | 176        |
| 6.2.1 选择性波峰焊接技术特点            | 176        |
| 6.2.2 选择性波峰焊接技术工艺流程          | 177        |
| 6.2.3 选择性波峰焊接设备技术要求          | 178        |
| 6.3 其他局部焊接技术简介               | 179        |
| 6.3.1 激光焊接技术简介               | 179        |
| 6.3.2 热压焊接技术简介               | 179        |
| 6.3.3 电磁感应焊接技术简介             | 180        |
| 思考题                          | 180        |
| <b>第7章 手工焊接技术</b>            | <b>181</b> |
| 7.1 手工焊接工艺特点                 | 182        |
| 7.2 手工焊接物理化学过程               | 183        |
| 7.3 手工焊接工具                   | 185        |
| 7.3.1 电烙铁概述                  | 185        |
| 7.3.2 智能电烙铁的工作原理             | 188        |
| 7.3.3 无铅化对电烙铁性能的影响           | 189        |
| 7.3.4 电烙铁的维护保养               | 190        |
| 7.4 手工焊接工艺操作规范               | 190        |
| 7.4.1 手工焊接工艺过程               | 190        |
| 7.4.2 手工焊接工艺操作要领             | 191        |
| 7.5 手工焊接工艺质量控制               | 194        |
| 7.5.1 手工焊接工艺参数要求             | 194        |
| 7.5.2 电烙铁的选择与使用              | 194        |
| 思考题                          | 198        |
| <b>第8章 PCBA 可制造性设计 (DFM)</b> | <b>199</b> |
| 8.1 电子产品分类及其质量标准要求           | 200        |
| 8.1.1 电子产品分类                 | 200        |
| 8.1.2 电子产品质量标准要求             | 200        |
| 8.2 可制造性设计 (DFM) 对电子产品质量的意义  | 201        |
| 8.3 可制造性设计 (DFM) 概述及主要内容     | 201        |
| 8.3.1 可制造性设计概述               | 201        |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 8.3.2 | 可制造性设计内容          | 202 |
| 8.4   | PCBA 组装方式设计       | 202 |
| 8.4.1 | 电子产品的可生产性等级       | 202 |
| 8.4.2 | 电子产品的组装方式分类       | 203 |
| 8.4.3 | 电子产品的组装方式选用原则     | 204 |
| 8.5   | PCB 可制作性设计        | 204 |
| 8.5.1 | 布线设计的注意事项         | 204 |
| 8.5.2 | 布线设计的基本原则         | 205 |
| 8.5.3 | 电源线与地线设计要求        | 205 |
| 8.5.4 | 导线设计要求            | 205 |
| 8.5.5 | 阻焊膜设计要求           | 207 |
| 8.6   | PCBA 可组装性设计       | 209 |
| 8.6.1 | 基准点标记             | 209 |
| 8.6.2 | 工艺边及传送方向          | 211 |
| 8.6.3 | 元器件选型             | 211 |
| 8.6.4 | 元器件布局             | 213 |
| 8.6.5 | 元器件间隔             | 216 |
| 8.6.6 | 元器件焊盘设计工艺性要求      | 217 |
| 8.6.7 | SMT 工艺中的元器件焊盘设计示例 | 218 |
| 8.6.8 | THT 工艺中的元器件焊盘设计示例 | 220 |
| 8.6.9 | 其他                | 224 |
|       | 思考题               | 224 |

## 第 9 章 焊点接头设计及其可靠性 225

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 9.1   | 电子装联可靠性             | 226 |
| 9.1.1 | 机械可靠性               | 226 |
| 9.1.2 | 电化学可靠性              | 227 |
| 9.2   | 焊点的界面质量模型及焊点接头模型    | 228 |
| 9.2.1 | 软钎焊接焊点质量对电子产品可靠性的影响 | 228 |
| 9.2.2 | 理想焊点的界面质量模型         | 228 |
| 9.2.3 | 焊点的接头模型             | 229 |
| 9.3   | 焊接接头结构设计对焊点可靠性的影响   | 230 |
| 9.3.1 | 焊接接头的几何形状设计与强度分析    | 230 |
| 9.3.2 | 焊接接头的几何形状设计与电气特性    | 233 |
| 9.4   | 焊接接头机械强度的影响因素       | 236 |
| 9.4.1 | 钎料量对接头剪切强度的影响       | 236 |
| 9.4.2 | 与熔化钎料接触时间对接头剪切强度的影响 | 237 |
| 9.4.3 | 焊接温度对接头剪切强度的影响      | 237 |
| 9.4.4 | 接头厚度/间隙对接头剪切强度的影响   | 238 |

9.4.5 接头强度随钎料合金成分和基体金属的变化..... 239

9.4.6 接头的蠕变强度..... 240

9.5 焊接接头三要素与焊点可靠性..... 241

9.5.1 焊点可靠性的影响因素..... 241

9.5.2 可焊性对焊点可靠性的影响..... 243

9.5.3 可焊性的存储期试验及其方法..... 244

9.6 焊点可靠性评估方法..... 247

思考题..... 248

参考文献..... 249

跋..... 251

# 第1章 现代电子装联软钎焊技术



## 本章要点

 概述

 焊接与钎焊

 现代电子装联软钎焊技术的新发展



## 1.1 概 述

电子产品一般分为半导体芯片、电子元器件、电路组件（部件）、整机和系统等形式。为了正确认识和把握不同产品的制造特点，电子产品的制造过程被划分成不同层次或阶段进行研究，封装概念随之采用。根据电子产品的功能特征和制造特点，封装一般分为零级封装（裸芯片级）、一级封装（元器件级）、二级封装（板卡级）和三级封装（系统级）四个等级。在实际生产中，微电子行业一般将零级封装和一级封装称为电子封装（Electronics Packaging），主要是指半导体的制造过程，是微电子技术的核心和发展最为活跃的部分。二级封装也常称为电子装联或组装过程，主要是形成板卡级的电路功能模块。三级封装则是产品的最终装配过程。

因此，电子装联技术（Electronics Assembly Technology）主要涉及工业生产条件下进行的二级封装技术。它是一项根据电路设计要求，将电子元器件准确、可靠地安装在印制电路板上，从而形成符合一定电气与机械连接要求的电路模块的制造技术。近年来，随着装联技术的发展，二级封装也已开始直接采用裸芯片进行装联，这使得一级封装和二级封装之间的界限开始变得模糊起来。目前，几乎所有的电子产品都包含了板卡级（二级封装）的电路模块。因此，电子装联技术成为现代电子产品制造中一项必不可少的基本过程，占有极其重要的作用。

## 1.2 焊接与钎焊

### 1.2.1 焊接

电子装联技术中的“装”表示安装，主要包括结构零部件的安装（螺装、铆接和胶接）和电气元器件的安装（THT 插装、SMT 贴装），“联”表示互联，即将电路元器件互联成电流通路的过程。完成此过程的工艺手段以焊接和压接两种居多，由于焊接不但在宏观上建立了永久性的联系，在微观上也建立了组织之间的内在联系，所以成为电子装联材料连接的主要方法。

焊接是将两种或两种以上的（同种或异种）材料通过原子或分子之间的结合和扩散造成永久性连接的工艺过程，涵盖了熔化焊接、固相焊接和钎焊，其中熔化焊接大多用于金属结构件的连接，如图 1.1 所示。表 1.1 为三类焊接技术特征的对比。



图 1.1 焊接接合部的结合形式



表 1.1 三类焊接技术特征的对比

| 方法   | 母材受热 | 填充材料 | 热源    | 压力 | 接头拆卸性 | 结合特征 |
|------|------|------|-------|----|-------|------|
| 熔化焊接 | 熔化   | 有或无  | 外加    | 无  | 不可拆卸  | 冶金结合 |
| 固相焊接 | 不熔化  | 无    | 内部或外加 | 有  | 不可拆卸  | 冶金结合 |
| 钎焊   | 不熔化  | 有    | 外加    | 无  | 部分可拆卸 | 冶金结合 |

1.2.2 钎焊及其分类

钎焊是指在固体金属（母材或基体金属）与固体金属之间，溶入比固体金属熔点低的钎料（填充金属或合金），靠毛细管作用使其填充并进入金属间隙中，靠润湿和扩散作用获得连接强度的冶金连接方法，其特点是钎料熔化，而母材金属不熔化。

钎焊被区分为硬钎焊和软钎焊，美国钎焊学会将 450℃ 作为分界线，规定钎料液相线温度高于 450℃ 所进行的钎焊为硬钎焊，低于 450℃ 的为软钎焊。ISO 标准规定，以金属钎料熔点 450℃ 为界限来区别硬钎焊和软钎焊，其中又把熔点低于 450℃ 的填充金属（Sn 基钎料）、靠润湿作用达到连接目的的冶金连接方法称为软钎焊（俗称锡焊）。

在电子行业中，绝大多数的钎焊工作是在 300℃ 以下完成的。在电子装联过程中，当使用 Sn 基钎料焊接 Cu 和 Cu 合金时，钎料会在金属表面产生润湿，钎料中的 Sn 就会向基体金属中扩散，在界面上形成合金层，即金属间化合物（IMC），使两者结合在一起。接合处形成的合金层，因钎料成分、母材材质、加热温度及表面处理等不同而不同。关于焊接获得连接强度的机理，比较流行的学说解释包括扩散理论、晶格渗透理论、中间合金理论、润湿合金理论、机械啮合理论等。

在整个电子产品的装联过程中，软钎焊的权重可达 70% 以上，它对电子产品的整体质量和可靠性有着特殊的意义。

为照顾目前电子组装行业已流行的习惯叫法，本书中特将软钎焊称为焊接。

1.2.3 软钎焊技术所涉及的学科领域及其影响

软钎焊技术是一项综合性的系统工程。它涉及的学科是多方面的，它们各自通过其对可焊性、焊接接合部的腐蚀性及焊接强度等因素而最终影响焊接的可靠性，如图 1.2 所示。

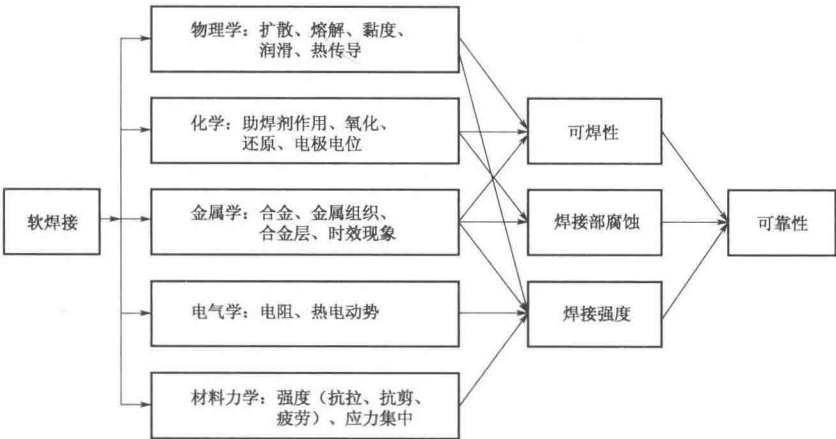


图 1.2 软钎焊涉及的学科领域及影响

构成软钎焊的基本要素是母材（基体金属）、钎料和钎剂（助焊剂）。在软钎焊中，它们相互作用和影响过程，如图 1.3 所示（提示：为了区别硬钎焊，后续章节涉及的软钎焊的基本要素将以基体金属、钎料和助焊剂的形式出现）。

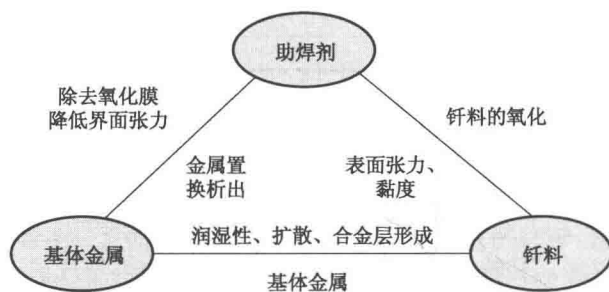


图 1.3 基体金属、钎料、助焊剂的相互反应

在电子工业中，相对于其他连接技术，软钎焊技术由于以下几方面的原因而居于主导地位。

首先是软钎焊的应力匹配能力。软钎料在室温下通常是塑性优良的自退火合金，没有加工硬化等问题，能吸收应力。这种独特的特性使得这种工艺能将不同膨胀系数、不同刚度水平和不同强度等级的材料连接到一起。例如，普通印制电路板的设计与制造几乎违背了所有的结构设计原则，如果不是由于软钎焊连接具有这种应力匹配能力，印制电路板可能就不会存在了。

其次，软钎焊具有显著的优越性、高效性和可靠性。由于连接是在相对较低的温度下完成的，许多常规有机高分子材料和电子元件因受热而改变性能和被破坏等问题得以有效地避免。并且，相对低成本的材料、简单的工具和可控的工艺使得软钎焊具有特别明显的积极性和高效性。

最后，软钎焊具有制造和修理的方便性。与其他冶金连接方法相比，软钎焊是对操作工具要求相对简单和易于操作的工艺，并且由于软钎焊头是可以“拆卸”的接头，或者说软钎焊过程是“可逆”的，因而使得软钎焊连接的修补十分简单方便。另外，修补过的接头可以像原始接头一样可靠。可以预料，只要我们还使用由导体、半导体和绝缘体等构成的基于电脉冲的电路，软钎焊技术就是必不可少的。

## 1.2.4 软钎焊技术的基本分类

### 1. 群焊技术

群焊一词可追述到 20 世纪 40 年代号称供应美国电装焊接设备需求 40% 的霍利斯公司（Hollis）早期的波峰焊接技术。群焊是指对印制电路板上所有的待焊点同时加热进行软钎焊的方法。

电子元件、裸印制电路板或部分装配的印制电路板、助焊剂、熔融焊锡、锡膏、预成型焊片及胶类，每一种物料都有其自身的物理与化学特性，可通过一个单一且不可逆转的步骤来实现正确的相互作用，形成可靠的装配。

群焊技术主要包括浸焊技术、波峰焊接技术与再流焊接技术。群焊技术的特点主要是组件受热均匀，变形小，生产效率快，焊接质量可靠。浸焊技术与波峰焊接技术的焊接时间短，



对组件的热冲击较小,但需要较大的钎料槽,熔融焊锡容易氧化,且易受杂质污染,易产生焊接缺陷,如夹渣、桥接、焊点暗淡或粗糙、润湿不良等,一般应用于引脚间距较大、组装密度不高的产品。再流焊接技术成熟,自动化程度高,焊点缺陷率极低,可进行细间距、高密度组装,但对组装材料的性能要求高,且工艺管控严格。

## 2. 局部焊接技术

随着混装技术的出现,许多电子产品组件同时使用了表面贴装元器件和通孔插装元器件。当出现双面混装,即表面贴装元器件与通孔插装元器件引脚焊接面共面时,由于两种元器件的工艺特性不同,采用群焊技术将无法完成可靠焊接。

通孔再流焊接工艺是通过表面贴装工序对通孔(Pin Through Hole, PTH)元器件进行组装的一种新技术。应用于通孔再流焊接工艺的 PTH 元器件封装材料必须能耐再流焊接高温,且引脚端部大多具有一定锥度以防插装时带走大量钎料。相对于标准再流焊接工艺而言,通孔再流焊接工艺的核心在于钎料膏涂布技术,即首先对通孔填充钎料膏量进行计算,然后采用阶梯模板或扩大开口设计等印刷工艺释放足够钎料膏量,再进行贴片及再流焊接。近年来,此工艺技术发展较快,在一些高可靠性产品上已成功应用。

除此之外,目前行业内多采用局部焊接技术对所需焊接的 PTH 元器件引脚进行加工,常用方法包括掩膜波峰焊接技术、选择性波峰焊接技术、局部浸焊焊接技术、自动烙铁焊接技术、激光焊接技术等。

随着新材料、新器件的不断出现,以及高密度复杂产品组装时,部分表面贴装元器件也必须采用局部焊接技术,常用焊接方法包括激光焊接技术、热压焊接技术、电磁感应焊接技术等。同时,对于部分表面贴装元器件(如 BGA 及 QFP)进行返修时,为提高成功率及可靠性、减少对基板的损伤,也需采用局部加热技术,如专用返修台,通过热风、红外或热板等方式对产品进行局部加热以完成拆焊及重新组装。

## 3. 手工焊接技术

手工焊接是传统的焊接方法,虽然批量电子产品生产已较少采用手工焊接了,但在电子产品的维修、调试中不可避免地还会用到手工焊接。其焊接质量的好坏也直接影响到维修效果。手工焊接是一项实践性很强的技能,当了解其一般方法后,只有多练、多实践,才能取得较好的焊接质量。表面贴装手工焊接有时比通孔(Through Hole)焊接更具挑战性,因为它要求更小的引脚间距和更高的引脚数。在返修工艺中必须小心,不要让印制电路板过热,否则电镀通孔和焊盘都容易损伤。

手工焊接技术主要包括接触焊接与热风焊接。

接触焊接是在加热的烙铁嘴或环直接接触焊接点时完成的。烙铁嘴或环安装在焊接工具上。烙铁嘴用来加热单个焊接点,而烙铁环用来同时加热多个焊接点。对于单个烙铁嘴,有多种设计结构。对于环形式的烙铁嘴,也有多种设计结构。比如有两或四面的离散环,主要用于元件的拆除。环的设计主要用于多脚元件,如集成电路(IC);但是它们也可以用来拆卸矩形和圆柱形的元件。烙铁环对取下已经用胶粘结的元件非常有用。当钎料熔化后,烙铁环可拧动元件,打破胶的连接。当用烙铁环焊接四边引脚器件时,很难同时接触所有的引脚。