

表面贴装（SMT）工艺中的回流焊接技术及其发展趋势

李林泽

电信科学技术仪表研究所有限公司，北京 100000

摘要： 在电子制造领域中，表面贴装（SMT）工艺中的回流焊接技术是实现电子元器件高效、高质量组装的关键技术。本文基于此，从预热阶段、热激活阶段、回流阶段、冷却阶段系统阐述 SMT 回流焊技术基本原理和工艺流程，系统性论述 SMT 回流焊技术的应用领域，并立足于小型化和高密度、高性能材料、绿色环保、柔性化生产维度，探究其未来发展趋势，旨在为相关领域研究提供借鉴。

关键词： 表面贴装；回流焊接；电子元器件；焊接技术；技术发展

Reflow Welding Technology in Surface mount (SMT) Process and its Development Trend

Li Linze

Telecommunication Science and Technology Instrumentation Institute Co., LTD. Beijing 100000

Abstract： In the field of electronic manufacturing, reflow welding technology in surface mount (SMT) process is a key technology to achieve efficient and high-quality assembly of electronic components. Based on this, this paper expounds the basic principle and process flow of SMT reflow technology from the preheating stage, thermal activation stage, reflow stage and cooling stage, systematically discusses the application fields of SMT reflow technology, and explores its future development trend based on the dimensions of miniaturization, high density, high performance materials, green environmental protection and flexible production. It aims to provide reference for research in related fields.

Keywords： surface mounting; reflow welding; electronic components; welding technology; technological development

引言

自上世纪60年代开始，表面贴装（SMT）工艺已成为电子组装行业的关键技术。在电子产品日渐多功能化、小型化、性能要求不断提升的前提下，回流焊接技术在 SMT 工艺中的核心地位日臻凸显。回流焊接技术可实现对温度曲线的精准控制，熔化焊锡膏，连接电子组件与印刷电路板（PCB），强化组装成品的质量和效益^[1]。

一、SMT 回流焊技术的基本原理和工艺流程

（一）预热阶段

预热阶段是回流焊接技术的首要环节，也是关键步骤，主要将印刷电路板以及元器件温度温和提升到 150°C 至 180°C。适宜温度区间要与焊膏成分和 PCB 材料特性相结合，从而做出针对性调整^[2]。某些焊膏成分在较低温度下，能激活助焊剂，而特定 PCB 材料需更高温度排除湿气。温度曲线设计要求缓慢平稳上升，避免热冲击损害元器件。现代回流焊炉利用计算机控制系统精确调控温度曲线上升速率及保持时间。预热区设计含多个加热段，使 PCB 及其组件均匀逐步受热，加热段间配置风扇或气流装置促进热量均匀分布^[3]。

（二）热激活阶段

热激活阶段是预热后的关键步骤，温度攀升至约 217°C，以使助焊剂达最佳活性状态，彻底清除金属表面氧化物，为焊接提供洁净界面。温度需精确控制在 217°C 附近，避免过高导致助焊剂分解或过低无法清除氧化物。时间亦需严格控制，既要助焊剂充分作用，又要防止焊膏挥发性成分损失或氧化物清除不彻底。在特定条件下，热激活阶段于氮气或惰性气体保护中进行，减少氧化反应，提升焊接质量和接头可靠性^[4]。

（三）回流阶段

回流阶段是回流焊的核心，温度升至约 250°C 峰值，峰值温度设定在 245°C 至 260°C 间，依据焊膏熔点和 PCB 热特性而定，以使焊膏完全熔化形成液态合金。温度曲线需迅速升至峰值并保

持，促进焊膏熔化与冶金结合；之后温度逐渐下降，避免元器件过热。回流中，液态焊料受表面张力引导对准元件引脚与PCB焊盘，要求焊料流动性和润湿性良好，以形成稳固焊接。焊接参数如温度、时间、气氛，需根据元件尺寸、密度及PCB设计调整^[5]。大尺寸或高密度元件需更高峰值温度和更长保持时间，以达到最佳焊接质量。回流阶段各参数如表1所示：

表1 回流阶段参数表

参数 / 项目	有铅锡膏	无铅锡膏
峰值温度范围	247°C - 258°C	258°C - 269°C
典型峰值温度设定	253°C	264°C
温度升至峰值时间	62秒	67秒
峰值温度保持时间	47秒	52秒
降温速率（每秒降温）	3.8°C	4.1°C
焊膏熔点	183°C	217°C
PCB热特性（热阻）	0.42° C/W	0.45° C/W

（四）冷却阶段

冷却阶段是回流焊的收尾环节，对焊接质量关键。此阶段目标在于使焊接材料凝固，形成稳固机械与电气连接。冷却速率需严格控制，避免焊点产生裂纹或应力，采取逐渐降低速率，确保焊点缓慢凝固并形成良好冶金结构。现代回流焊炉配备冷却风扇或水冷系统，实现快速均匀冷却。冷却阶段温度曲线需精心设计，逐渐下降并保持，直至焊点完全凝固。特定情境下，冷却过程在氮气或惰性气体气氛中进行，结束后综合应用目视、X射线及拉力测试全面检查外观、连接强度及电气性能等焊点质量^[6]。

二、SMT回流焊技术的应用领域

（一）通信领域

在通信行业中，SMT回流焊技术是高速、高密度电子组装的关键。手机为例，主板上的处理器、内存芯片及射频模块，均依赖回流焊技术精确高效焊接至电路板。元器件体积小、引脚密度高，要求焊料具备高精度与可靠性。回流焊炉精确控制温度曲线，使焊膏适温熔化并形成良好冶金结合，随后快速冷却固化，保障手机内部电路稳定耐用^[7]。无线路由器与通信基站同样应用SMT回流焊技术，即功率放大器、滤波器、信号处理芯片等关键组件，均需回流焊与电路板牢固连接。高频、高功率场景下，焊接质量直接影响设备性能稳定性及信号传输效率。

（二）计算机领域

个人电脑主板、显卡及服务器主板、存储模块，均依赖回流焊实现复杂电子系统的高效可靠组装。高性能计算（HPC）与数据中心领域，处理器速度提升、存储容量增加，对焊接质量要求日益严格。回流焊技术精确控制焊接过程中的温度、时间与气氛，确保元器件与电路板良好接触与电气连接^[8]。

（三）消费电子领域

消费电子产品更新迅速，对制造效率与成本控制要求高。SMT回流焊技术以其高效自动化特点，成为消费电子制造首选工艺。智能电视、平板电脑、可穿戴设备内部电子元器件，均通过

回流焊焊接至电路板。智能电视的显示屏驱动电路、音频处理电路、网络通信模块等，需回流焊精确组装。智能穿戴设备如智能手表、智能手环，体积小、功能复杂，对焊接技术要求极高。

（四）汽车电子领域

随着汽车电子化程度提升，SMT回流焊技术在汽车电子领域应用日益广泛。车载娱乐系统、导航系统至自动驾驶系统的传感器、控制器，均需回流焊实现元器件与电路板连接。电动汽车与智能网联汽车领域，电池管理系统（BMS）、电机控制器（MCU）等关键部件复杂化，对焊接质量要求更高。回流焊技术精确控制焊接过程，保障汽车电子部件可靠稳定。

（五）工业自动化与医疗设备领域

工业自动化与医疗设备领域，SMT回流焊技术同样重要。工业自动化系统的控制器、传感器、执行器等关键部件，以及医疗设备的心电图机、超声诊断仪、血液分析仪等高精度仪器，均需回流焊实现元器件精确组装。这些设备对焊接质量要求极高，微小焊接缺陷可能导致性能下降甚至失效。采用先进回流焊技术与严格焊接质量控制措施，对提高工业自动化与医疗设备的可靠性与安全性至关重要^[9]。

三、SMT回流焊技术的发展趋势

（一）小型化和高密度：回流焊技术的精准挑战

在电子产品日新月异的今天，小型化和高密度已成为不可逆转的发展趋势。智能手机、可穿戴设备、物联网传感器等产品尺寸不断缩小，功能却日益丰富，对电路板设计与制造提出了前所未有的挑战。回流焊技术作为电子组装的核心工艺，必须不断进化，适应这一趋势。0201、01005甚至更小尺寸的元器件出现，使得回流焊技术面临精度要求的极限。微小型元件引脚间距极小，焊接位置准确性极高，稍有偏差即导致焊接不良或元件短路。回流焊设备需配备高精度定位系统，如激光定位、机器视觉引导，实现元件焊接前的精确定位。高密度电路板（HDI）上，焊接点数量大幅增加且排列紧密，焊接质量控制难度提升。传统焊接方法因热影响区过大易导致相邻元件受损或焊接桥接。回流焊技术需采用精细温度控制策略，如分区加热、局部冷却，确保每个焊接点获得恰当热输入，形成高质量焊接接头。电子产品功能复杂化推动焊接材料性能要求不断提升^[10]。无铅焊膏因其环保性和良好润湿性成为主流选择。面对更小焊接空间和更高可靠性要求，研发低熔点、高导电性、强机械强度焊接材料成为关键。焊锡球微小化也是重要研究方向，减小焊锡球直径可缩小焊接点间距，提高焊接密度。

（二）高性能材料：焊接技术的未来之选

在高频、高速信号传输应用领域，焊接材料的导电性能制约信号传输效率和稳定性。5G通信、高性能计算等技术快速发展，对信号传输速度和质量要求提高，传统焊接材料难以满足需求。纳米银焊膏作为新型高导电率焊接材料，其优异的导电性能和良好润湿性，在高频、高速信号传输中展现潜力。纳米银颗粒微小尺寸与高度分散性，使焊膏焊接时形成致密、均匀接头，降

低信号传输的电阻和损耗。石墨烯增强焊锡是另一种高性能焊接材料^[11]。石墨烯作为二维碳材料，具有高导电性和机械强度，添加至焊锡中能提升其导电率和机械性能。此焊锡在承受大机械应力的电子产品，如汽车电子、航空航天设备中，有广泛应用前景。环保与可持续性为焊接材料研发的重要因素，未来回流焊技术将倾向使用可回收、低毒性焊接材料，如生物基焊锡、无卤素焊膏。

(三) 绿色环保：回流焊技术的生态责任

推广无铅、无卤素、低挥发性有机化合物 (VOC) 焊接材料，是回流焊技术绿色环保的必由之路。铅、卤素及高 VOC 焊接材料在焊接中会产生有害物质，危害健康，污染环境。采用无铅焊锡、无卤素助焊剂、低 VOC 焊膏已成行业共识。完善绿色环保焊接体系，建立废弃物处理机制关键。焊锡回收站利用专业设备工艺，分离提纯废弃焊锡，实现资源再利用。助焊剂过滤与再利用系统，借精密过滤装置去除杂质有害物质，恢复助焊剂性能，减少浪费和污染。提升回流焊设备能效，高效加热元件能快速升温、稳定控温，提高焊接效率，缩短周期。智能温控系统使回流焊过程精准可控，避免温度波动导致的能耗浪费和质量问题。热能回收技术回收焊接废热，转化为可用热能，循环利用能源。

(四) 柔性化生产：回流焊技术的灵活应对

面对多样化、个性化市场需求，回流焊技术正向柔性化生产转型，以适应市场变化。模块化设计是核心，赋予设备灵活性与可扩展性。设备划分为独立互换模块，如加热区、冷却区、传输系统，可根据焊接需求快速调整配置，实现产品快速切换，减少

闲置时间，提高生产效率和设备利用率。深入分析换线流程，识别消除非增值环节，如等待、运输、调试，大幅缩短换线时间，确保生产线连续高效运行。引入先进换线工具和辅助设备，如快速夹紧装置、自动定位系统，提升换线效率。物联网 (IoT) 技术实现设备互联互通，实时共享生产数据，支持生产调度和优化。大数据技术挖掘分析生产数据，发现潜在问题，预测趋势，为决策提供依据。人工智能技术引入，实现生产流程智能化调度和优化。AI 算法根据实时数据和历史经验，自动调整焊接参数，优化生产流程，保证产品质量稳定性和一致性。与客户紧密合作，深入了解产品特性和生产要求，不断优化焊接方案，包括材料选择、工艺设计、设备配置，确保产品满足客户需求。定制化服务模式提升客户满意度，增强企业市场竞争力。

四、结语

SMT 回流焊技术是电子制造领域的核心技术，其发展历程体现电子产品从简单到复杂、从粗放到精细的转变。科技进步促使回流焊技术持续创新与突破，以适应电子产品小型化、高密度、高性能、绿色环保等需求。高精度焊接、柔性化生产及智能化发展，提升了电子产品的制造质量与效率，为电子产业可持续发展注入动力。展望未来，SMT 回流焊技术将紧跟时代，融合纳米材料、人工智能、物联网等新兴技术，推动焊接技术在精度、效率与智能化上达到新高度。绿色环保理念将贯穿技术发展，引领回流焊技术向更环保、高效、可靠方向前进，为电子产业繁荣与进步贡献。

参考文献

- [1] 伍艳琼, 陈思慧. 回流焊工艺中的质量缺陷与改进措施 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(09): 168-169.
- [2] 李强, 吴昱昆, 汪锐. 芯片共晶模块高钎透率真空回流焊接工艺 [J]. 电子工艺技术, 2023, 44(03): 17-20.
- [3] 隋远, 卜凡洋, 邵子龙, 闫伟. 基于区域中心温度场预测的回流焊接优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(05): 299-303+340.
- [4] 王飞. 微电子表面贴装关键技术与装备分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(01): 98-100.
- [5] 刘颖, 吴瑛, 陈该青, 许春停. QFN 器件焊接缺陷分析与工艺优化 [J]. 电子与封装, 2022, 22(01): 22-26.
- [6] 陈道武. 插件元件通孔回流焊接工艺 [J]. 中国新技术新产品, 2021, (24): 71-73.
- [7] 李苗, 周自泉, 宋惠东, 程明生. 塑封 LGA 器件回流焊工艺的可靠性分析 [J]. 电子工艺技术, 2021, 42(06): 331-333+337.
- [8] 王蕊, 骆健, 姚二现, 董长城, 刘旭光, 杨阳. 基于 Anand 模型的柔性直流输电 IGBT 模块焊接应力变形分析 [J]. 半导体技术, 2021, 46(11): 887-892+898.
- [9] 田翠芳. 浅谈 SMT 贴装工艺及其行业趋势 [J]. 山西电子技术, 2021, (05): 41-42.
- [10] 俞浩, 蒋甜. 电子元器件表面组装工艺质量改进及应用研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(09): 70-71+73.
- [11] 李苗, 孙晓伟, 宋惠东, 程明生. CBGA 器件焊接工艺与焊点失效分析 [J]. 电子与封装, 2021, 21(08): 25-31.