

# 回流焊工艺参数对温度曲线的影响

冯志刚, 郁鼎文, 朱云鹤

(中电科技集团电子科学研究院 EDMI 中心, 北京 100041)

**摘要:** 回流焊炉的工艺参数对于回流温度曲线及其关键指标具有显著的影响, 本文采用正交实验法, 对回流焊炉的工艺参数对回流温度曲线及其关键指标的影响进行了全面的研究, 掌握了对回流温度曲线各个关键指标影响最大的工艺参数及其影响方向。

**关键词:** 回流焊炉工艺参数; 回流温度曲线

**中图分类号:** TG44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3474(2004)06-0243-04

## Effect of parameters of reflow oven on the Reflow Profile

FENG Zhi-gang, YU Ding-wen, ZHU Yu-he

(EDMI of China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

**Abstract:** Parameters of reflow oven have distinct effect on reflow profile and its key specifications. The author adopted Taguchi method to study thoroughly how parameters of reflow oven influenced on reflow profile and found out the most important parameters of reflow oven and interactive results which impacted on each specification of reflow profile and needed to adjust finely further.

**Key words:** Parameters of reflow oven; Reflow profile

**Document Code:** A

**Article ID:** 1001-3474(2004)04-0243-04

回流焊接是 SMT 生产过程中的关键工序, 回流焊接工艺过程直接影响电子产品, 因此, 必须对回流焊接过程进行严格的控制。在设置和调整回流焊接工艺参数时, 需要了解回流焊接的各项工艺参数对回流焊接温度曲线的影响作用。本文主要研究回流焊炉工艺参数对回流温度曲线关键指标的影响, 为回流焊接工艺参数的设置和调整提供指导。

### 1 简化加热模型分析

回流焊接的过程本质上是一个热量传递的过程, 在这个过程中, 影响因素众多, 如果对每个因素都进行精确的分析是非常复杂的, 根据美国 ACI 研究院 EMPF 中心的研究结果, 回流焊接的加热模型可以简化为<sup>[1]</sup>:

$$T_t - T_i = (T_s - T_i)(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

式中:  $T_t$ —当时间为  $t$  时, PCB 的温度;

$T_i$ —PCB 的初始温度;

$T_s$ —加热环境的温度;

$R$ —传热的热阻;

$C$ —PCB 的热容。

其中, 热阻  $R$  与回流焊炉的传热效率及 PCB 的结构特征有关, 热容与 PCB 的材料特性有关。通过这个简化的数学模型, 可以很方便地对回流焊接加热过程中各因素的影响进行定性的分析。

### 2 影响分析

我们知道, 加热区的温度设置、热风对流风扇的速度对于 PCB 的最终温度是有影响的, 但在回流焊接过程中, PCB 不是在一个特定的温度下持续加热, 而是在以一个恒定的速度通过不同的温度的加热

段,在这种情况下,PCB的运动速度对于PCB的最终温度也具有很大的影响。我们可以对回流焊炉的三个主要工艺参数对回流温度曲线的关键指标的影响进行分析。

## 2.1 加热区的设定温度

从(1)式可以看出,以热风对流加热为主的回流焊炉中,在热风对流速度不变的情况下,加热区的设定温度越高,单位时间内PCB的温升( $T_f - T_i$ )越高。在以红外辐射加热方式为主的回流焊炉中,炉温变化对温升具有4次方的影响,这种情况更为明显。

在多温区的回流焊炉中,各温区的设定温度是按照回流曲线的不同阶段来设定的,因此,各温区的设定温度对于回流温度曲线的各个关键指标的影响是不同的,这一点将通过实验研究来分析。

## 2.2 回流焊炉的传送速度

PCB在回流焊炉中的运动速度是由轨道的传送速度决定的,传送速度越快,PCB在每个加热区的停留时间越短。从(1)式可以看出,PCB在每个加热区的停留时间会影响PCB的温升,从而对回流温度曲线的各个关键指标都会有影响。从理论上讲,停留时间越长,PCB的温度越接近加热区的设定温度,但在自动化生产中,要考虑生产效率和生产节拍,传送速度要设定在一个合理的范围,既要保证生产效率,又要使回流温度曲线的关键指标在“工艺窗口”的范围内。

## 2.3 热风对流风扇的速度

对于强制对流热风回流焊炉,热风对流的速度会影响对流导热率 $\lambda_\alpha$ 的大小<sup>[3]</sup>,如图1所示。

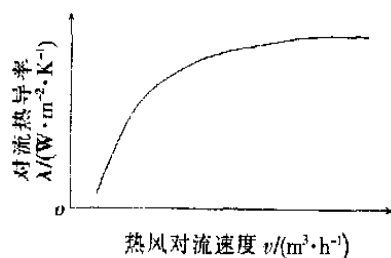


图1 热风对流速度与对流导热率的关系

增加对流导热率可以增加从热源向PCB传送的热量。随着热传递速度的增加,可以缩短PCB达到相同最终温度的时间,从而可以提高传送带的速度。如果传送带的速度保持恒定,那么可以降低加热区的设定温度,从而降低能耗。

## 3 实验研究方案

回流温度曲线有4项关键指标:最大升温速率 $R_S$ 、保温时间 $T_S$ 、回流区峰值温度 $P_T$ 、超过焊料熔点温度的时间 $T_{AL}$ 。通过本项实验研究,将确定各项工艺参数对温度曲线关键指标的影响程度和影响方向,为调整参数的目的性和准确性提供基础。

在Omniflo7回流焊炉中,热风对流风扇的速度可以设置为高速、中速、低速三级,增加热风对流速度,可以相应降低加热区的设定温度,在实际生产中,为了降低能耗,通常将热风对流风扇的速度设为高速。在本项研究中,将热风对流速度作为固定值,重点考虑传送带的速度、各温区的设定温度两项因素对温度曲线关键指标的影响。

在Omniflo7回流焊炉中,传送带的速度和7个加热区的温度可以进行调整,不同的参数组合会对温度曲线的关键指标有不同的影响。7个加热区各包括上、下两个加热器,每个加热器的温度可以单独控制和设置,因此实际上可变动的参数共有15个,为了便于进行研究,在实验中,将每个加热区的上、下两个加热器设置为同一温度,这样,可变动的参数为8个。

在工程研究中,通过正交实验的方法,可以以最少的实验次数获得所需要的实验数据和实验结果<sup>[3]</sup>,并找出对于质量指标影响最大的因素。在本项实验研究中,为了减少参数之间的相互作用对实验结果的影响,正交表选用 $L_{18}(2^1 \times 3^7)^{[4]}$ ,在这个正交表中,可以容纳8个因素,其中1个因素取二水平,另外7个因素取3水平,共需要进行18次实验。

在本项研究中,控制参数是传送带速度和7个加热区的设置温度共8个因素,设置水平是在标准参数的基础上,将传送带速度设置变化取两个水平,每个加热区的温度设置水平是以标准参数为水平2,再加、减5℃确定的水平3和水平1,影响因素水平见表1。实验过程共需要18次温度曲线测试,测试采用标准实验样板进行,通过正交实验,对实验数据进行分析,确定这8个变动参数对4项关键指标的影响水平。

## 4 实验研究及数据分析

### 4.1 实验研究过程

在实验研究过程中,以标准样板作为温度曲线测试的对象,在标准样板上共设置了4个测试点,热电偶用高温胶带固定。由于各个测试点之间有温差,以位于PCB中间的3号测试点的数据进行统计。

表 1 影响因素水平表

因素符号	说 明	水平 1	水平 2	水平 3
$S$	传送带速度 $v/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	85	75	
$T_1$	加热区 1 的设定温度 $t/^\circ\text{C}$	90	95	100
$T_2$	加热区 2 的设定温度 $t/^\circ\text{C}$	135	140	145
$T_3$	加热区 3 的设定温度 $t/^\circ\text{C}$	160	165	170
$T_4$	加热区 4 的设定温度 $t/^\circ\text{C}$	160	165	170
$T_5$	加热区 5 的设定温度 $t/^\circ\text{C}$	165	170	175
$T_6$	加热区 6 的设定温度 $t/^\circ\text{C}$	200	205	210
$T_7$	加热区 7 的设定温度 $t/^\circ\text{C}$	235	240	245

注: 水平 2 为标准参数

为了保证数据的稳定性, 采用了连续测试的方式, 开机后回流焊炉的温度从室温升到设定温度用时约 40 min, 测试时要求各加热区的温度设定值与温度显示值之差在  $\pm 1^\circ\text{C}$  范围内, 每次测试后调整参数值, 要等待温度稳定后才能进行下次测试, 同时 PCB 的温度在每次测试之前必须在室温范围, 即  $25^\circ\text{C}\pm 30^\circ\text{C}$ , 因此, 每次测试的时间间隔约为 20 min。

4.2 正交实验数据

回流焊炉工艺参数对温度曲线影响因素的正交实验计划和实验数据见表 2。

表 2 正交实验计划和实验数据

实验	$S/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$	$T_4/^\circ\text{C}$	$T_5/^\circ\text{C}$	$T_6/^\circ\text{C}$	$T_7/^\circ\text{C}$	$R_S/(\text{C}^\circ\cdot\text{s}^{-1})$	$T_S/\text{s}$	$P_T/^\circ\text{C}$	$T_A/\text{s}$
1	85	90	135	160	160	165	200	235	1.48	36.98	210.80	42.30
2	85	90	140	165	165	170	205	240	1.59	38.10	216.50	52.07
3	85	90	145	170	170	175	210	245	1.57	41.95	220.10	56.74
4	85	95	135	160	165	170	210	245	1.47	33.62	219.10	53.08
5	85	95	140	165	170	175	200	235	1.55	46.63	211.30	43.83
6	85	95	145	170	160	165	205	240	1.62	33.60	215.10	47.88
7	85	100	135	165	160	175	205	245	1.56	35.99	219.60	52.04
8	85	100	140	170	165	165	210	235	1.54	39.72	211.60	51.71
9	85	100	145	160	170	170	200	240	1.53	46.78	211.60	44.36
10	75	90	135	170	170	170	205	235	1.41	58.27	213.70	60.27
11	75	90	140	160	160	175	210	240	1.37	39.37	218.10	62.49
12	75	90	145	165	165	165	200	245	1.42	58.12	218.10	51.41
13	75	95	135	165	170	165	210	240	1.37	43.65	218.10	62.04
14	75	95	140	170	160	170	200	245	1.42	49.22	219.50	55.50
15	75	95	145	160	165	175	205	235	1.43	54.46	213.80	59.09
16	75	100	135	170	165	175	200	240	1.43	57.90	216.50	56.28
17	75	100	140	160	170	165	205	245	1.38	58.14	220.30	59.75
18	75	100	145	165	160	170	210	235	1.43	41.17	214.80	61.82

从实验测试所得的温度曲线中可以看出, 最大升温速率是在一段非常短的时间内发生的, 在实验结束后发现, 由于每次实验的条件略有差异, 最大升温速率所发生的时间段及实际数值有比较大的波动, 为了更好地分析数据, 升温速率的实验数据是以 PCB 上的 3 号测试点在  $40^\circ\text{C}\sim 120^\circ\text{C}$  范围内的平均升温速率的数值进行记录的。

4.3 正交实验数据分析

为了能够直观地看到各项因素对不同指标的影响, 通过因素效应表的形式对实验数据进行了分析。因素效应表采用平均值进行分析, 由于每个因素在不同水平出现的次数是相同的, 因此, 可以将某项指标在每项因素处于水平 1 时的所有数据结果取

平均值, 作为该因素在水平 1 时针对某项指标的效应值<sup>[4]</sup>。以因素  $S$  (传送带速度) 和指标  $R_S$  (升温速率) 为例, 当传送带速度  $S$  处于水平 1 时, 共进行了 9 次实验, 升温速率  $R_S$  共有 9 个实验结果, 将这 9 个数值取平均值, 结果如下:

$(1.48+1.59+1.57+1.47+1.55+1.62+1.56+1.54+1.53)/9=1.546$

这个平均值 1.546 就是因素  $S$  在水平 1 时针对指标  $R_S$  的效应值, 以同样的方法可以计算出因素  $S$  在水平 2 时针对指标  $R_S$  的效应值为 1.407。在因素效应表中, 每个因素在不同水平时针对某项指标的效应值的变化量及变化方向可以反应出该因素对这项指标的影响程度和影响方向。

通过因素效应表的形式可以更加直观地表现出各项因素从水平 1 变动到水平 3 时对某项指标的影响程度。

4.3.1 针对升温速率  $R_S$  的因素效应表

针对升温速率  $R_S$  的因素效应见表 3。

表 3 针对升温速率  $R_S$  的因素效应表 单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$

	$S$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
水平 1	1.546	1.473	1.453	1.443	1.480	1.468	1.472	1.473
水平 2	1.407	1.477	1.475	1.487	1.480	1.475	1.498	1.485
水平 3		1.478	1.500	1.498	1.468	1.485	1.458	1.470

从表 3 可以看出,对于升温速率  $R_S$  影响较大的因素依次为传送带的速度  $S$ 、加热区 3 的设定温度  $T_3$  和加热区 2 的设定温度  $T_2$ 。

从数值上来看,传送带的速度  $S$  从 85 cm/min 变动为 75 cm/min 时,升温速率  $R_S$  减小了 0.139  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;加热区 3 的设定温度  $T_3$  从 160  $^{\circ}\text{C}$ 变动为 170  $^{\circ}\text{C}$ 时,升温速率  $R_S$  上升了 0.055  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;加热区 2 的设定温度  $T_2$  从 135  $^{\circ}\text{C}$ 变动为 145  $^{\circ}\text{C}$ 时,升温速率  $R_S$  上升了 0.047  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。由此可见,传送带速度对于升温速率的影响比加热区的设定温度的影响大 2 倍多,随传送带速度的降低,升温速率也会下降,加热区 3 和加热区 2 的设定温度提高,升温速率也会有所提高。

4.3.2 针对保温时间  $T_S$  的因素效应表

针对保温时间  $T_S$  的因素效应见表 4。

表 4 针对保温时间  $T_S$  的因素效应表 单位: s

	$S$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
水平 1	39.263	45.465	44.402	44.892	39.388	45.085	49.272	46.205
水平 2	51.144	43.530	45.197	43.943	46.987	44.527	46.427	43.233
水平 3		46.617	46.013	46.777	49.237	46.050	39.913	46.173

从表 4 可以看出,对于保温时间  $T_S$  影响较大的因素依次为传送带的速度  $S$ 、加热区 4 的设定温度  $T_4$  和加热区 6 的设定温度  $T_6$ 。

从数值上来看,传送带的速度  $S$  从 85 cm/min 变动为 75 cm/min 时,保温时间  $T_S$  提高了 11.881 s;加热区 4 的设定温度  $T_4$  从 160  $^{\circ}\text{C}$ 变为 170  $^{\circ}\text{C}$ 时,保温时间  $T_S$  提高了 9.849 s;加热区 6 的设定温度  $T_6$  从 200  $^{\circ}\text{C}$ 变动为 210  $^{\circ}\text{C}$ 时,保温时间  $T_S$  减少了 9.359 s。由此可以看出,传送带的速度比加热区 4 和加热区 6 的设定温度对保温时间的影响略大。随着传送带的速度降低,保温时间会提高;加热区 4 的设定温度提高,保温时间也会提高;而加热区 6 的设定温度提高,保温时间会减少。

4.3.3 针对回流区峰值温度  $P_T$  的因素效应表

针对回流区峰值温度  $P_T$  的因素效应见表 5。

从表 5 可以看出,对于回流区峰值温度  $P_T$  影响较大的因素依次为加热区 7 的设定温度  $T_7$ 、加热区 6 的设定温度  $T_6$  和传送带的速度  $S$ 。

表 5 针对回流区峰值温度  $P_T$  的因素效应表 单位:  $^{\circ}\text{C}$

	$S$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
水平 1	215.080	216.217	216.300	215.617	216.317	215.667	214.633	212.667
水平 2	216.990	216.150	216.217	216.400	215.933	215.867	216.500	215.983
水平 3		215.730	215.583	216.083	215.850	216.567	216.967	219.450

从数值上来看,加热区 7 的设定温度  $T_7$  从 235  $^{\circ}\text{C}$  提高到 245  $^{\circ}\text{C}$ 时,回流区峰值温度  $P_T$  提高了 6.783  $^{\circ}\text{C}$ ;加热区 6 的设定温度  $T_6$  从 200  $^{\circ}\text{C}$ 提高到 210  $^{\circ}\text{C}$ 时,回流区峰值温度  $P_T$  提高了 2.334  $^{\circ}\text{C}$ ;传送带的速度  $S$  从 85 cm/min 变动为 75 cm/min 时,回流区峰值温度  $P_T$  提高了 1.91  $^{\circ}\text{C}$ 。可以明显看出,加热区 7 的设定温度  $T_7$  比加热区 6 的设定温度  $T_6$  和传送带的速度  $S$  对回流区峰值温度  $P_T$  的影响要大许多。随着加热区 7 的设定温度和加热区 6 的设定温度的提高,回流区峰值温度会明显提高;传送带的速度降低,回流区的峰值温度也会有所提高。

4.3.4 针对超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  的因素效应表

针对超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  的因素效应见表 6。

表 6 针对超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  的因素效应表 单位: s

	$S$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
水平 1	49.334	54.213	54.335	53.512	53.672	52.515	48.947	53.170
水平 2	58.739	53.570	54.225	53.868	53.940	54.517	55.183	54.187
水平 3		54.327	53.550	54.730	54.498	55.078	57.980	54.753

从表 6 可以看出,对于超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  影响较大的因素依次为传送带的速度  $S$ 、加热区 6 的设定温度  $T_6$ 。

从数值上来看,传送带的速度 (下转第 251 页)

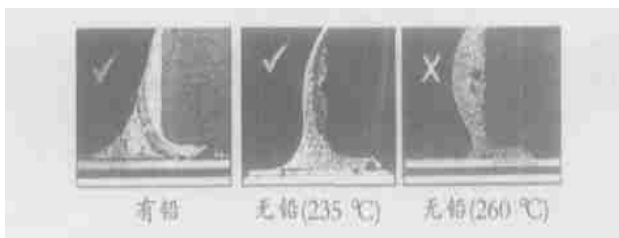


图5 无铅焊点外观与有铅焊点外观的对比图

生产线员工的技术技能素质也是 PCBA 无铅化可制造性中的一个重要方面。由于焊膏、焊料、焊丝的无铅化, 引发 PCBA 整个制程工艺、操作等方面的众多变化, 必须经系统培训特别是还要经过较长一段时间的无铅化生产, 才能完全转轨。

#### 4 结束语

PCBA 无铅化可制造性涉及到 PCB 制造、元器件制造、焊料(焊膏)的制造以及 PCBA 装联等众多领域。本文仅从 PCBA 装联的角度对无铅化条件下的 PCBA 可制造性作了初步的分析探讨。

PCBA 装联无铅化的核心是无铅再流焊和无铅波峰焊。采用 Sn—Ag—Cu 系的焊膏, 利用条件较好的有铅再流焊炉改造后有望实现无铅再流焊; 应用 Sn—Cu 系的焊料, 则应优先考虑采购相应的无

铅波峰焊机实现无铅波峰焊。如能应用价格合理的液相线温度在 210℃以下的 Sn—Ag—Cu—In—X 多元焊料, 则有可能利用现有有铅波峰焊机实现无铅波峰焊。

#### 参考文献:

- [1] Andy C maceie. Reflow atmospheres in the lead-free era [J]. Circuits assembly, 2003, (3): 26—35.
- [2] Jim Raby, David Heller. New no-lead solder paste and reflow Techniques [J]. Circuits assembly, 2002 (3): 28—30.
- [3] 马鑫, 董本霞. 无铅钎料发展现状 [J]. 电子工艺技术, 2002, 23(2): 47—52.
- [4] 田民波. 电子封装无铅化现状 [J]. 现代表面贴装资讯, 2003(5): 26—30.
- [5] 刘利吉. 在我国电子制造业中推广无铅焊接技术的建议 [J]. SMT china 2003(5/6): 19—20.
- [6] Dongkai Shangguan. Strategy for environmental leader ship in electronics manufacturing: lead-free and beyond [C]. 2004 上海国际 SMT 技术高级研讨会论文集, 2004 14—22.
- [7] Ronald Lasky, Timothy Jensen. An overview of a Successful pb-free Implementation [C]. 2004 上海国际 SMT 技术高级研讨会论文集, 2004, 23—31.

收稿日期: 2004—09—16

(上接第 246 页)  $S$  从 85 cm/min 变动为 75 cm/min 时, 超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  增加了 9.405 s; 加热区 6 的设定温度  $T_6$  从 200℃ 提高到 210℃ 时, 超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  增加了 9.033 s。传送带的速度  $S$  和加热区 6 的设定温度  $T_6$  对超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  的影响程度相近, 都远大于其他因素的影响。随着传送带速度的降低, 超过焊料熔点温度的时间会明显增加, 加热区 6 的设定温度提高, 超过焊料熔点温度的时间也会明显增加。

#### 5 结论

在对回流焊炉的主要工艺参数对温度曲线关键指标的影响进行理论分析的基础上, 通过正交实验并对实验数据进行全面分析, 掌握对温度曲线各个关键指标影响最大的工艺参数及其影响方向。

(1) 对于升温速率  $R_S$  影响较大的因素依次为传送带速度  $S$ 、加热区 3 设定温度  $T_3$  和加热区 2 设定温度  $T_2$ , 其中传送带速度  $S$  影响最为明显。

(2) 对于保温时间  $T_S$  影响较大的因素依次为传送带的速度  $S$ 、加热区 4 的设定温度  $T_4$  和加热区 6

的设定温度  $T_6$ 。

(3) 对于回流区峰值温度  $P_T$  影响较大的因素依次为加热区 7 的设定温度  $T_7$ 、加热区 6 的设定温度  $T_6$  和传送带的速度  $S$ , 其中加热区 7 的设定温度  $T_7$  的影响最为明显。

(4) 对于超过焊料熔点温度的时间  $T_{AL}$  影响较大的因素依次为传送带的速度  $S$ 、加热区 6 的设定温度  $T_6$ 。

#### 参考文献:

- [1] EMPF. Computer thermal modeling of a convective IR reflow oven [DB]. <http://www.empf.org/library/abstracts/db0005.html> 1992
- [2] James Hall W, Ronald W Lawler. 红外辐射能在热风再流焊炉中的作用 [C]. 第五届 SMT/SMD 学术研讨会论文集, 1999, 210—219.
- [3] 殷纯永. 质量工程导论 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1998.
- [4] 田口玄一. 实验设计法(上) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

收稿日期: 2004—08—13