

正交试验设计在钎焊工艺参数优化中的应用

安利全 叶紫薇 郑建明

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)



摘要: 针对钎焊工艺试验需求量及复杂度越来越高的情况, 提出利用正交试验设计进行钎焊工艺参数优化试验, 减少物理试验的数量, 并介绍了正交试验设计的相关概念和方法, 同时以某纯锡镀层小尺寸封装无铅器件钎焊工艺参数确定试验为例, 进行了钎焊工艺试验设计和评估。

关键词: 正交试验设计; 钎焊; 工艺参数

Application of Orthogonal Experiment Design in Optimization of Soldering Processing Parameters

An Liqun Ye Ziwei Zheng Jianming

(Beijing Automation Control Equipment Institute, Beijing 100074)

Abstract: As the demand of soldering process experiment and its complexity become higher and higher, the orthogonal experiment design is put forward to reduce the quantity of physical experiment. Concepts and methods of the orthogonal experiment design are introduced. At the same time, design and assessment of soldering processing parameters are conducted by taking the experiment to establish processing parameters of pure Sn deposits SOP Pb-free component as an example.

Key words: orthogonal experiment design; soldering; processing parameters

1 引言

随着电子器件中的焊点越来越小, 其所承载的力学、电学和热力学负荷越来越重, 对焊点质量要求日益提高, 而焊点质量的提高又很大程度依赖于钎焊工艺参数的优化。

影响焊点质量的参数非常多, 不仅包括钎焊设备、钎焊材料(焊料、助焊剂等)、元器件焊端引脚和印制板表面镀层, 还包括钎焊温度、时间等, 这些因数和参数的选择和优化, 都需要通过大量的试验积累, 而试验需要花费时间, 消耗人力、物力, 我们希望做尽量少的试验, 得到尽可能好的结果。要达到这一目的, 就必须事先对试验作合理的安排, 也就是要进行试验设计。本文以钎焊工艺参数选择和试验为例, 进行正交试验设计的应用介绍。

2 试验设计

在科学试验中, 如何科学地安排组织试验包括很多环节, 这些环节有的属于管理科学, 有的需要数学和统计学的方法来设计试验方案, 后者称为统计试验设计。统计试验设计包括正交试验设计、最优试验设计、稳健试验设计和均匀试验设计等多种设计方法, 正交试验设计是其中较为简单有效的一种, 使用正交表来安排实验, 是部分因子设计(fractional factorial designs)^[1]的主要方法, 它是在所有可能的试验参数组合中挑选出有代表性的少数几个组合进行试验, 通过数据分析, 找到最优的一组参数的试验方法, 具有很高的效率。

2.1 基本概念

因素: 实验因素又称为因子, 是实验设计者希望

作者简介: 安利全(1983-), 助理工程师, 飞行器制造工程专业; 研究方向: 电子装联工艺研究及可靠性分析。

收稿日期: 2010-11-06

考察的实验条件；

水平：因素的具体取值称为水平，又称为位级；

指标：实验处理欲考察的效果，是衡量实验结果好坏程度的标志，又称为响应变量；

处理：按照因素的给定水平对实验对象所做的操作称为处理。接受处理的实验对象称为实验单元。

2.2 试验结果分析方法

“直接看”的好条件：从表中的所有实验结果中直接看；

“算一算”的好条件：用各因素平均指标最高（或最低）的水平组合的方案；

极差分析：确定各因素的重要程度；

画趋势图：进一步画出各因素对实验指标影响的趋势图，确定进一步实验时各因素的水平选取方向或合适点。

3 应用

3.1 试验目的

通过试验分析，确定某纯锡镀层小尺寸封装无铅器件在有铅环境下钎焊时，焊接烙铁温度、预热温度和焊接时间参数，使上述因素导致的焊点不合格率低于 0.297%（本指标是试验前的预设目标值）。

3.2 制定因素水平表

本试验需考察的因素为焊接烙铁温度、预热温度和焊接时间。

3.2.1 因素 A——焊接烙铁温度

第一位级 $A_1=270^{\circ}\text{C}$ ，第二位级 $A_2=290^{\circ}\text{C}$ ，第三位级 $A_3=310^{\circ}\text{C}$ 。

位级制定依据：由锡铅共晶金相线图（见图 1）可知，63Sn37Pb 熔点是 183°C ，Sn 熔点是 232°C ，理论上在焊接过程时，焊点的温度只要达到焊料合金的熔点温度即可。但在实际操作中，刚达到熔点温度的焊料，其润湿性非常差，所以必须提高实际焊点温度以增加润湿能力。同时由于焊接过程中热传递的衰减，航天标准 QJ2465《片状电阻器、电容器手工表面装联工艺技术要求》要求采用恒温烙铁 260°C 进行有铅器件焊接，即在有铅熔点上增加了 77°C 。而作为无铅器件镀层的 Sn 镀层熔点是 232°C ，且无铅合金的润湿性比锡铅合金还差，而且其热传导率 K_{Sn} 随温度的升高会下降，由傅立叶定律可知，见式（1），热传导率 K 是传递热量 Q 的正比函数，所以在其他参数一定情况下，传热量 Q 会降低。

$$Q=KA(T_{\text{hot}}-T_{\text{cold}})t/d \tag{1}$$

式中： t 为传导时间， d 为传递距离， A 为传递平面面积， T_{hot} 为焊接烙铁温度， T_{cold} 为焊点熔融区温度。

综上所述，温度必须在有铅 260°C 焊接的基础上提高，但也不能无限提高，因为传递到无铅器件本体的温度必须低于 260°C ；制定以 270°C 为起点，每 20°C 一段的方案制定位级，参考有铅器件焊接经验（有铅熔点上增加 77°C ），封顶温度控制为 $(232+77)^{\circ}\text{C} \approx 310^{\circ}\text{C}$ 。

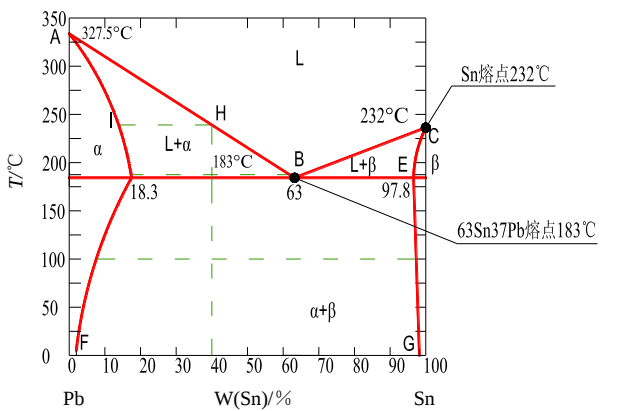


图 1 锡铅共晶金相线图

3.2.2 因素 B——预热温度

第一位级 $B_1=180^{\circ}\text{C}$ ，第二位级 $B_2=200^{\circ}\text{C}$ ，第三位级 $B_3=220^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.3 因素 C——焊接时间

第一位级 $C_1=2\text{s}$ ，第二位级 $C_2=3\text{s}$ ，第三位级 $C_3=4\text{s}$ 。

位级制定依据：航天焊接标准中有铅焊接允许时间为 $1\sim 3\text{s}$ ，美军标中无铅焊接允许时间为 $2\sim 5\text{s}$ ，同时结合实际焊接情况制定上述 3 个位级。

根据以上位级，制定因素位级表，如表 1 所示。

表 1 因素位级表

因素	焊接烙铁温度/ $^{\circ}\text{C}$	预热温度/ $^{\circ}\text{C}$	焊接时间/ s
位级 1	270	180	2
位级 2	290	200	3
位级 3	310	220	4

3.3 设计及实施试验方案

采用正交表 $L_9(3^3)$ 来安排试验，试验方案及试验结果见表 2。

表 2 正交试验表^[2]

试验计划					试验结果
试验号		因素			不合格率/%
		A	B	C	
		焊接烙铁温度/℃	预热温度/℃	焊接时间/s	
1		1	1	1	0.738
2		1	2	2	0.615
3		1	3	3	0.492
4		2	1	2	0.615
5		2	2	3	0.246
6		2	3	1	0.369
7		3	1	3	0.246
8		3	2	1	0.123
9		3	3	2	0.492
不合格率	I	0.615	0.533	0.410	I+II+III=1.312
	II	0.41	0.328	0.574	
	III	0.287	0.451	0.328	
	R	0.328	0.205	0.246	

3.4 试验结果分析

- a. “直接看”的好条件：比较试验结果，第 8 号试验 A₃B₂C₁的不合格率最低，为 0.123%；其次是第 5 号和第 7 号试验，为 0.246%；
- b. “算一算”的好条件：通过计算，第一列的不合格率平均 III 最低，说明 A₃=310℃的焊接烙铁温度要优于 270℃和 290℃；同样，由第二列可以看出，采用 B₂=200℃的预热温度要优于采用 180℃和 220℃；由第三列可以看出，采用 C₃=4s 焊接时间要优于 2s 和 3s。所以，“算一算”的好条件为 A₃B₂C₃。按照“算一算”的好条件 A₃B₂C₃对电路板进行试验，不合格率是 0.246%，满足≤0.297%的指标要求，但比“直接看”的好条件 A₃B₂C₁ 不合格率高，证明“直接看”的好条件 A₃B₂C₁ 取得的效果更好；

- c. 极差分析：根据极差可见，焊接烙铁温度 A 是影响不合格率的主要因素，其次是焊接时间 C；
- d. 画趋势图：由不合格率与三因素关系（见图 2）可以看出，焊接烙铁温度越高，不合格率越低，以 A₃=310℃为最好，还应进一步探索温度更高的情况；预热温度为 B₂=200℃不合格率最低；焊接时间以 C₃=4s 为最好，还应进一步探索时间更低或更高的情况。

3.5 确定参数指标

按照“直接看”的好条件 A₃B₂C₁ 选定参数指标，以该参数进行试验，通过统计判断是否达到试验目的。同时，在该参数试验样品的基础上进行温度循环

试验、潮热试验、机械振动试验、跌落试验、锡须评价、三点弯曲以及温冲等试验，是进行焊点可靠性和寿命评估的基础。

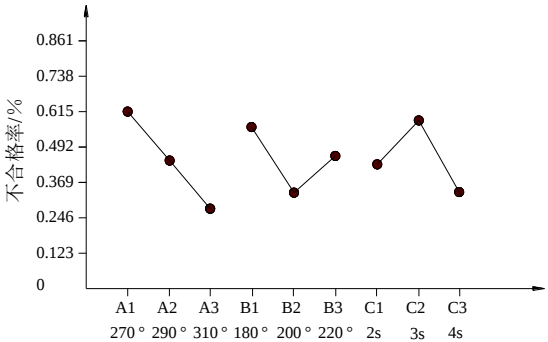


图 2 不合格率与三因素关系图

4 结束语

随着目前新材料、新工艺和新设备的不断引入和应用，工艺试验量越来越大，通过正交试验设计，可以缩小试验范围，本文将原本要做 27 次的试验缩短为 9 次，大大减少人力、物力和财力的投入，而且为工艺试验设计的科学合理性提供了保障，为后续型号的高质量生产奠定了基础。

参考文献

1 方开泰，马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京：科学出版社，2001

2 曾凤章. 稳健性设计原理技术方法案例[M]. 北京：兵器工业出版社，2004

