

# 无铅焊点热疲劳状态估计

毛书勤<sup>1,2</sup> 刘 剑<sup>1</sup> 陈 媛<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130031)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**文 摘** 为获取元器件焊点的热疲劳状态信息, 采用了焊点剪切力测试方法和非线性最小二乘数据拟合法。以 1210 片式电阻器件无铅焊点为研究对象, 开展了剪切力-热疲劳状态试验研究工作。依据 0、300、600、900、1200、1500 个周期温度冲击下的焊点剪切力试验数据, 采用非线性最小二乘的 Gauss-Newton 法, 并利用 Matlab 编程的手段获取了剪切力数据的拟合曲线。以“剪切力值下降 30%”的失效标准划定失效界线, 利用拟合曲线推算出焊点失效时的循环周期数为 1439.04。试验证明焊点剪切力能够反映出焊点的热疲劳状态, 该方法可用于焊点的疲劳状态监测、估计, 满足对于焊点疲劳状态的监测需要, 同样适用于其他类型焊点的疲劳状态估计。

**关键词** 片式元件焊点, 热疲劳状态, 剪切力, Gauss-Newton 法

中图分类号: TG4

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.004

## Estimation of Thermal Fatigue State of Lead-Free Solders

MAO Shuqin<sup>1,2</sup> LIU Jian<sup>1</sup> CHEN Yuan<sup>1</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** In order to get solder information of thermal fatigue state, shear force test method and nonlinear least square method are used. A lead-free solder joint with 1210 chip resistor is the research object. A solder joint thermal fatigue life prediction method based on the solder joint shear strength test is put forward. The test of shear force-thermal fatigue life is done. According to 0, 300, 600, 900, 600, 1500 cycle data, Gauss-Newton of nonlinear least square method is used to fit curves based on Matlab programming. By using the shear force value fell by 30% failure criteria defined, the solder joint failure cycle number is 1439.04. The method can be used to solder joint shear strength of solder joint fatigue state monitoring, estimates, the same to the other kinds of solders.

**Key words** Chip component soldering joint, Thermal fatigue state, Shearing force, Gauss-Newton method

### 0 引言

焊点是连接电子元器件使其实现预定功能的重要单元。它同时肩负着电气连接与机械支撑的双重作用。电子产品在使用过程中, 通、断电或者环境温度的变化均会造成 PCB 基材、焊点与元器件焊端的体积变化, 由于三者的热胀系数并不匹配, 这会导致在温度变化过程中产生交变的应力和应变, 焊点局部应力最大处在循环应力作用下会首先形成微裂纹, 微裂纹逐步发展为宏观裂纹并最终形成断裂面, 此即为焊点的热疲劳失效。伴随着无铅化进程的不断深入, 军用电子产品的无铅化组装也早已被提上日程<sup>[1]</sup>。由于焊接材料的改变, 研究无铅焊点的热疲劳失效问题, 对于军品研制单位而言有着特殊的重要

意义。一直以来, 焊点的热疲劳可靠性问题都是电子组装可靠性研究的重要方向之一。目前, 部分学者的主要研究方向集中在焊点的热循环应力-应变模拟技术研究上。周斌等作者以片式元件焊点为研究对象, 开展了基于 Manson-Coffin 方程的疲劳寿命研究工作——通过软件仿真办法得到剪切应力-应变滞后回线, 进而求得循环剪切应变范围并代入 Manson-Coffin 方程。在其仿真条件下, 得到片式元件焊点的热疲劳寿命为 6959 次循环<sup>[2]</sup>。王斌等开展了带空洞无铅焊点的可靠性研究工作, 将空洞这一普遍存在于焊点中的现象考虑到有限元模型中去, 并对空洞的位置、面积等因素的影响分别进行了建模、仿真, 使得建模、仿真结果更贴近实际情况<sup>[3]</sup>。魏鹤林等开展

收稿日期: 2015-04-10

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20126016)

作者简介: 毛书勤, 1982 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事电子产品可靠性研究工作。E-mail: translation2002@163.com

了考虑 IMC 影响的 PBGA 无铅焊点温度循环有限元数值模拟工作,将研究对象转向 BGA 焊点并在建模时考虑了金属间化合物的影响,使得有限元模型更加的精细、准确<sup>[4]</sup>。国内在元器件焊点热疲劳寿命的研究领域,有限元建模仿真结合 Manson-Coffin 方程的方法已经被广泛接受。

目前,仍有很多学者在不同焊点的有限元模型建立、焊点有限元模型的修正方面开展工作。但这种研究方法存在一定的局限性。这主要体现在两个方面:其一,元器件焊点的疲劳寿命难以获得实测数据,从而无法对理论推算值进行试验验证;其二,其焊点热疲劳寿命是指焊点完全断裂时所经历的温度循环周期数,而很多时候,即使焊点尚未完全开裂就因为导通电阻增大或者机械支撑能力不足而无法使用需求了。因此,本文主要寻找一种可测量的焊点热疲劳状态测试方法,通过这个方法可以定量的反映出焊点的热疲劳状态与温度循环周期之间的关系。

### 1 焊点热疲劳寿命试验

针对焊点疲劳损伤的形成机制,设计了焊点热疲劳状态测试的试验方法。焊点的热疲劳寿命试验由两部分试验组成,其一是焊点的温度循环试验,其二是焊点的剪切力试验。试验由 6 组样本组成,这 6 组样本分别经过 0、300、600、900、1 200 和 1 500 周期的温度循环试验,试验结束后再进行剪切力试验,测得焊点的剪切力值。

#### 1.1 试验样本

试验样本共焊接 6 块电阻板,每块电阻板中含有 10 个 1210 封装的电阻。印制电路板基材选用实际工程应用中常见的 FR4 基材,焊料为 Sn96.5/Ag3/Cu0.5 无铅焊料,焊接方法为设备回流焊接。元器件本体与 PCB 焊盘应严格对正,以免在后续剪切力试验中影响测试结果。

#### 1.2 焊点温度循环试验

温度循环条件为  $-40 \sim 100^{\circ}\text{C}$ , 高低温各保持 30 min, 温度转换时间为 30 s, 升温 and 降温速率均为单个试验周期为 61 min, 温度周期曲线如图 1 所示。整个试验共进行 1 500 个周期, 每 300 个周期为一个数据采样点, 取出一块印制电路板进行焊点剪切力试验, 从 0 ~ 1 500 个周期共设置 6 个数据采样点。

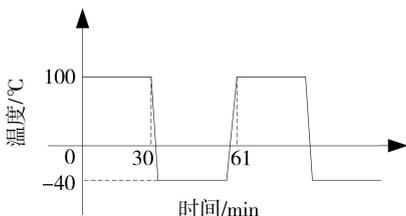


图 1 温度循环曲线

Fig. 1 Curve of thermal cycle

### 1.3 焊点剪切力试验

#### 1.3.1 试验条件

焊点剪切力试验是测量经过温度冲击试验后的焊点剪切力值。通过焊点的剪切力水平反映焊点的疲劳状态。本剪切试验根据日本 JIS Z 3198—7 标准,在 WDW-500 万能试验机上进行,见图 2。具体试验中要求:

- (a) 环境温度在  $10 \sim 35^{\circ}\text{C}$ ;
- (b) RH 为 20% ~ 60%;
- (c) 剪切力工装与 PCB 基板的间隙值要小于元件厚度的 1/4;
- (d) 剪切力工装的移动速度为  $5 \sim 30 \text{ mm/min}$ 。

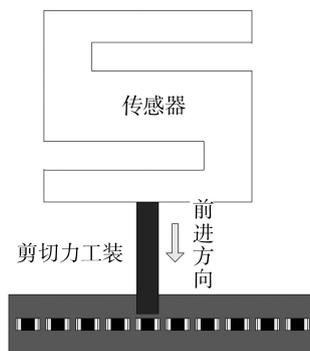


图 2 剪切力测试示意图

Fig. 2 WDW-500 experiment machine

#### 1.3.2 试验方法

一般而言,当电阻器件本体受到横向推力作用时,元器件本体与焊点之间会有产生相对位移的趋势,当推力增大到一定程度时,二者会沿着疲劳积累损伤所形成的微裂纹断裂。微裂纹越小,试验测得的焊点剪切力值越大;微裂纹越大,试验测得的焊点剪切力值越小。因此,焊点剪切力峰值可间接反映焊点的热疲劳损伤情况,即焊点的热疲劳状态。

焊点剪切试验的基本原理如图 3 所示,是利用电机推动剪切力工装匀速前进,直至接触到电阻器件本体。此时,压力传感器发生变形,并输出相应的数值,这个数值被记录软件以曲线的形式记录下来。当电阻器件与焊点之间发生剥离时,数值记录曲线发生陡降,软件自动记录下曲线的峰值,此峰值即为焊点剪切力的最大值。其主要试验步骤如下:

- (a) 安装传感器,根据所测样本的剪切力值情况选择 500 N 力学传感器附带剪切力工装安装于设备上;
- (b) 开机,打开万能试验机开关,打开电脑并进入设备软件操作界面;
- (c) 参数设置,根据选用传感器的情况以及待测样本的情况设置软件参数;
- (d) 固定待测 PCB,应确保固定牢靠,不得在剪切力测试过程中出现滑动;
- (e) 剪切力测试,测试前应保证剪切力工装前端

与电阻侧边平行,测试后保证工装及时复位;

(f)全部 10 组数据测试完成后及时保存。

### 1.3.3 试验结果

试验结束后,共得到 6 组试验数据。每隔 300 个温度循环周期记录一次,0 ~ 1 500 个温度循环周期,共测得 6 组样本数据,每组样本含有 10 个焊点剪切力值,取每组样本剪切力的平均值,试验数据见表 1。

表 1 焊点剪切力试验数据

Tab.1 Shearing test data of soldering joint

周期/个	剪切力均值/N	周期/个	剪切力均值/N
0	168.008	900	156.621
300	167.890	1200	144.490
600	162.097	1500	107.373

将表 1 中的数据用直线连接,形成了如图 3 所示的焊点剪切力折线数据图,可以直观反映出元器件焊点随温度循环周期变化情况。

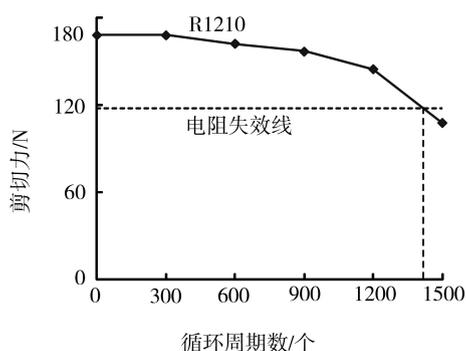


图 3 循环周期—剪切力曲线

Fig.3 Circling period-shearing curve

(a)焊点剪切力值随温度循环周期的延长而不断下降,并且通过折线斜率不断增大反映出这种下降有逐渐加速的趋势;

(b)焊点剪切力值在 1 200 ~ 1 500 个温度循环周期内下降明显;

(c)以焊点剪切力值下降 30% 为失效判定标准,则此时的焊点剪切力值为 117.606 N,失效周期数接近 1 500 个。

## 2 数据处理及分析

在表 1 中的数据在坐标系中表现为一些离散的数据点,通过观察可以发现这些数据点之间呈现出一种非线性关系。因此,可以通过最小二乘法得到拟合曲线<sup>[5-7]</sup>。

### 2.1 基于变换的线性最小二乘估计

对于图 3 中所示数据点的分布情况,采用方程  $y' = A - a'e^{bx}$  进行拟合。这是一个非线性最小二乘估计问题,求取系数  $a'$  和  $b$ 。对于形如  $y' = A - a'e^{bx}$  的方程,为便于计算将其转换为直线函数,可做如下变换:

$A - y' = a'e^{bx}$ ,两边取对数,得  $\ln(A - y') = \ln a' + bx$ ,  $A - y'$

$> 0$ 。令  $y = \ln(A - y')$ ,  $\ln a' = a$ ,则方程转变为  $y = a + bx$ ,  $A - y' > 0$ 。这样,非线性最小二乘问题就转变为了线性最小二乘问题。由于  $A$  为焊点剪切力最大值,在 0 周期时,  $A - y' = 0$ ,为使计算能够进行,取  $A = 168.009$ 。因为温度循环周期数  $x$  处于方程的指数位置,  $x$  值过大会造成运算不便,在不影响运算精度的情况下采取归一化处理的办法,6 个数据采样点  $x$  的取值分别为 0、1、2、3、4、5。经函数变换及归一化处理后的数据表见表 2。

表 2 函数变换后数据

Tab.2 Data after functional transformation

$x$	$y = \ln(A - y')$	$x$	$y = \ln(A - y')$
0	-6.9078	3	2.4326
1	-2.1286	4	3.1578
2	1.7770	5	4.1049

将表 2 中的数据绘制成散点图,如图 4 所示。观察图中数据点的分布情况可以发现,经函数变换处理后的数据点不具有直线函数特征,不宜采用线性最小二乘法进行拟合。

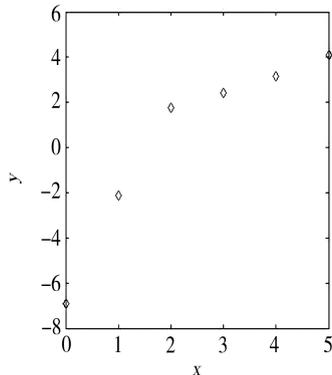


图 4 散点图

Fig.4 Scatter diagram

## 2.2 非线性最小二乘的 Gauss-Newton 法

### 2.2.1 Gauss-Newton 法推导

考虑目标函数  $F(x) = \sum_{i=1}^m f_i^2(x)$ ,  $x \in R^n$ ,  $m > n$  (1)

当  $f_i(x)$  为非线性函数,当求取  $F(x)$  的极小值时,就成为非线性最小二乘问题。

引入向量函数

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T \quad (2)$$

则公式(1)可改写为:

$$F(x) = f(x)^T f(x) \quad (3)$$

定义雅克比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则  $F(x)$  的梯度向量可写为:  $g(x) = 2J(x)^T f(x)$  (5)  
Hesse 矩阵可写为:

$$G(x) = 2J(x)^T J(x) + 2 \sum_{i=1}^m f_i(x) \nabla^2 f_i(x) \quad (6)$$

令  $S(x) = \sum_{i=1}^m f_i(x) \nabla^2 f_i(x)$ , 则有:

$$G(x) = 2J(x)^T J(x) + 2S(x) \quad (7)$$

又牛顿迭代有以下形式:

$$(J_k^T J_k + S_k) \delta^k = -J_k^T f^k \quad (8)$$

$$x^{(k+1)} = x^k + \delta^k \quad (9)$$

在牛顿迭代中忽略  $S_k$ , 得:

$$J_k^T J_k \delta^k = -J_k^T f^k \quad (10)$$

公式(9)、(10)就定义了 Gauss-Newton 法。

### 2.2.2 Gauss-Newton 法计算过程

Gauss-Newton 算法主要过程如下:

- (1) 给出初值及制定精度  $\xi$ ;
- (2) 当  $\|J_k^T f^k\| \leq \xi$  时, 停止计算;
- (3) 求解线性方程组  $J_k^T J_k \delta^k = -J_k^T f^k$ , 得到  $\delta^k$ ;
- (4) 代入迭代公式  $x^{(k+1)} = x^k + \delta^k$ , 转入(2)步。

### 2.2.3 Matlab 软件实现

编写拟合模型的函数 funex1。

function y hat = funex1(beta0, x) % 拟合模型的函数形式

a = beta0(1);

b = beta0(2);

y hat = 168.008 - a \* exp(b \* x);

编写 M 文件 ex1.m 对数据进行非线性最小二乘拟合和处理。

% ex1.m 非线性最小二乘法拟合曲线

clear all

x = [0.00 1.00 2.00 3.00 4.00 5.00]';

y = [168.008 167.89 162.097 156.621 144.490 107.373]';

beta0 = [0.001 2]; % 系数初值

[beta, r, j] = nlinfit(x, y, @ funex1, beta0); % 系数最小二乘估计值

beta

ci = nlparci(beta, r, j) % 求 95% 置信区间

nlintool(x, y, @ funex1, beta0, 0.05) % 显示拟合结果和置信区间

运行 ex1.m 文件后得到参数  $a$ 、 $b$  的最小二乘估计值为 0.7087 和 0.8890, 它们的 95% 置信区间分别为 [0.2689 1.1485] 和 [0.7602 1.0177]。所以用最小二乘法对该模型系数进行估计, 最终的模型表达式为  $y = 168.008 - 0.7087e^{0.889x}$ 。拟合曲线如图 5 所示,

中间的实线为拟合曲线, 连侧的虚线标出其 95% 的置信区间。

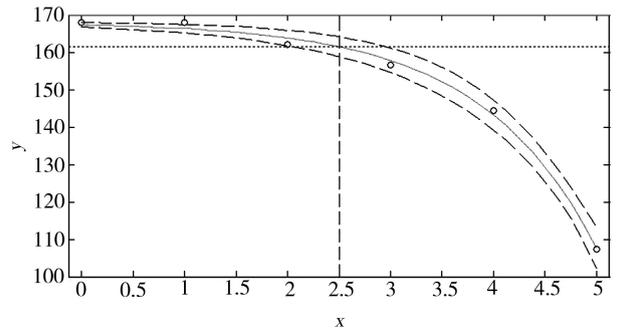


图 5 循环周期—剪切力拟合曲线

Fig. 5 Circling period-shearing fitting curve

当焊点剪切力下降 30% 时, 其值为 117.606 N, 代入函数  $y = 168.008 - 0.7087e^{0.889x}$ , 得  $x = 4.7968$ , 对应的循环周期数为  $4.7968 \times 300 = 1439.04$ 。

通过试验可以发现, 焊点的剪切力水平能够定量反映焊点的疲劳状态。当需要以焊点疲劳损伤刚刚开始直至完全疲劳断裂的某个中间状态作为焊点失效状态时, 剪切力测试法就显现出了其自身的优势——可对焊点热疲劳的整个过程进行监测。因此, 这个方法适用于焊点热疲劳失效的全过程状态监测。

### 3 结论

本文提出了基于焊点剪切力试验的无铅焊点热疲劳状态估计方法。开展了 1210 片式电阻器件焊点剪切力试验研究工作, 并获得了规定试验条件下的热疲劳状态拟合方程  $y = 168.008 - 0.7087e^{0.889x}$ 。以焊点剪切力值下降 30% 为失效标准, 1210 封装片式电阻焊点的失效周期为 1 439.04 个。

### 参考文献

- [1] Engelmaier W. The use environments of electronic assemblies and their impact on surface mount solder attachment reliability[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrid, and Manufacturing Technology, 1990, 13(4): 903-908
- [2] 周斌, 邱宝军, 罗道军. 片式元件焊点的热循环应力应变模拟技术研究. 电子元件与材料, 2008, 27(7): 58-61
- [3] 王斌, 黄春跃, 李天明. 热循环加载片式元器件带空洞无铅焊点的可靠性. 电子元件与材料, 2011, 30(6): 66-69
- [4] 魏鹤琳, 王奎升. 考虑 IMC 影响的 PBGA 无铅焊点温度循环有限元数值模拟. 焊接学报, 2012, 33(1): 109-112
- [5] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001
- [6] 刘晓石, 陈鸿建, 何腊梅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [7] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001

(编辑 李洪泉)