

焊点热力学模型和激光束聚焦 状态对焊点热信号的影响

冯伟亭 丁世昌 施树怀

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——根据印刷电路焊点热辐射功率的时间变化,提出了确定焊点的焊接质量的新方法,建立了焊点热力学模型,从数学角度阐述了焊点局部过热的产生机理。

一、引 言

用激光红外检测技术检查印刷电路板焊点焊接质量是可行的^[1,2],但从理论上对各种缺陷影响焊点热信号的程度进行探讨还很少。在焊点表面发射率 ϵ_s 和表面状况正常时,仅仅用焊点峰值温度就可以区分焊点的各类缺陷,但当焊点表面受到污染、或焊接温度过高而产生冷焊、或焊点表面有较大刻痕和裂纹时,这种方法就难以适用了。我们尝试建立焊点热力学模型,通过被检焊点热辐射功率的峰值和随时间辐射功率的变化来检测焊点缺陷。我们用这种方法研究了印刷电路板上模拟制作的四种类型焊点,并研究了由于激光束不均匀产生的焊点局部过热对焊点热信号的影响。

二、理 论 分 析

本工作采用主动检测方法,以恒定的激光注入焊点表面。

1. 均匀激光束入射

取焊点下表面为 $Z=0$ 面(见图1),焊点上下表面与空气对流换热,可看作绝热边界。焊点两个侧面与印刷电路板、铜衬底和导线之间存在热交换,我们用热对流系数 h 等效表示这种热交换。由于印刷电路板热容量较大,而激光注入焊点时间较短($<150\text{ms}$),可假定工作期间印刷电路板温度保持不变。激光脉冲垂直入射到焊点上表面,相当于上表面存在一个脉冲热源,焊点热辐射能量较焊点热交换能量小得多,可忽略不计。为简单起见,可以认为入射激光束布满整个焊点。这样,热传导方程及其特定解条件分别可写为

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\omega(r, t)\alpha_0}{k\pi b^2}, \quad (1)$$

$$T(r, z, t)|_{t=0} = T_0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0, L} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=b} + H(T - T_0) = 0, \quad (4)$$

其中:

$$\omega(r, t) = \begin{cases} \omega_0 \delta(z-L) & (0 \leq t \leq A), \\ 0 & (t > A). \end{cases}$$

式(1)~(4)中 $a = \frac{k}{\rho c}$ 为热扩散率, k 、 ρ 、 c 分别为焊点焊锡热导率、密度和定压比热; h 为焊点与印刷板接触换热系数 $H = \frac{h}{k}$; α_0 为焊点表面吸收系数; A 为激光脉冲宽度; ω_0 为激光功率密度; T_0 为焊点初始温度; T 为焊点温度; 并假定焊点吸收的激光能量全部转换为热量。

解方程(1)~(4)得

$$T = T_0 + \frac{2\omega_0\alpha_0 H}{\pi k b^3} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{J_0(\beta_m r) \cos \eta_n L \cos \eta_n Z}{J_0(\beta_m b) (H^2 + \beta_m^2) (\beta_m^2 + \eta_n^2) N(\eta_n)} C(\beta_m, \eta_n, t), \quad (5)$$

其中
$$C(\beta_m, \eta_n, t) = \begin{cases} 1 - \exp[-a(\beta_m^2 + \eta_n^2)t] & (0 \leq t \leq A), \\ \exp[-a(\beta_m^2 + \eta_n^2)(t - A)] & (t > A), \end{cases}$$

特征值 β_m 和 η_n 可由 $\beta_m J_1(\beta_m b) - H J_0(\beta_m b) = 0$ 、 $\eta_n = \frac{n\pi}{L}$ 、 $N(\eta_n) = \frac{L}{2}$ ($n \neq 0$) 或 $N(\eta_n) = L$ ($n = 0$) 确定。可见, $T-t$ 函数关系是指数关系, H 值表明焊点与周围材料热交换状况, 当焊点与导线脱落时, 一部分热量就积贮在焊点内部, 引起焊点温度急剧上升。从式(6)可知, 当注入焊点能量一定时, H 值下降, 导致焊点温度曲线变陡, 焊点温度超过正常焊点。图2为计算机按照式(5)绘制的三种类型焊点。曲线1模拟正常焊点, 曲线2模拟表面受污染焊点, 曲线3模拟导线与焊点接触不良焊点。

关于含有空洞焊点温度场的精确求解, 可采用圆柱坐标系的有限差分法^[3,4]。图3是由计算机得到的一组解, 其中曲线1表示正常焊点、曲线2表示表面受污染焊点、曲线3表示导线松动焊点, 曲线4表示有空洞焊点。从图2、图3可以看出, 通过比较焊点峰值温度来

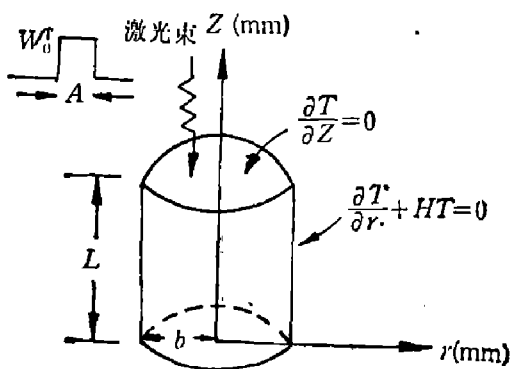


图1 焊点模型

Fig. 1 Model of solder joint.

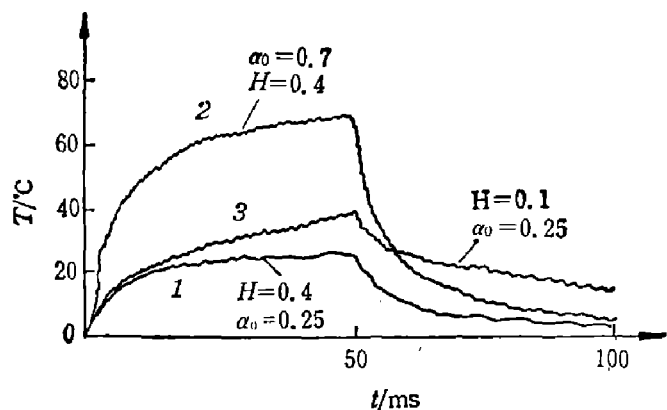


图2 三种类型焊点的理论温度曲线

Fig. 2 Theoretical temperature curves of three types of solder joints.

评价焊点质量是有局限性的,这种方法仅仅在焊点表面发射率 ϵ_s 和表面状况正常情形下才适用。当焊点表面状态差异较大(如表面受到污染、冷焊点、表面有较大裂纹等缺陷)时,这些焊点的电接触性、机械强度仍正常,但它的峰值温度却大大高于正常焊点,应属不合格焊点,这就造成了不允许的“误判”。

我们发现,这类焊点的峰值温度虽与内部含空洞或导线脱落的焊点峰值温度等值,但其冷却速率较后两者快得多,在几毫秒内温度值就降到正常范围,据此,可以很方便地将这类焊点与含有疵病的焊点区分开。

2. 非均匀激光束照射

实际上,入射激光光斑各处功率密度是不同的,在光束中央存在一个最大值,我们假设激光器功率密度的空间分布为余弦函数^[5],可表示为

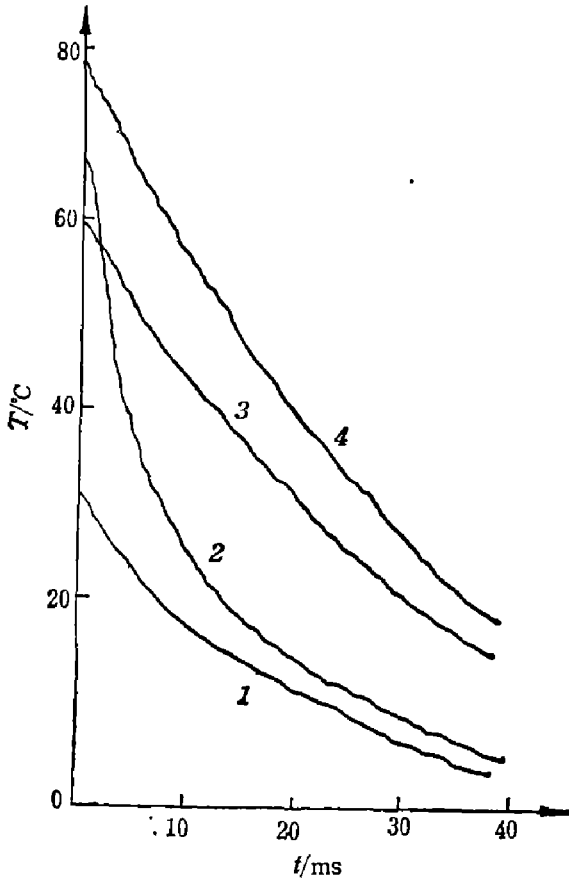


图3 由不同的峰值温度和温度衰减确定焊点质量差异
Fig. 3 Quality of solder joints revealed by different peak temperature and temperature decay.

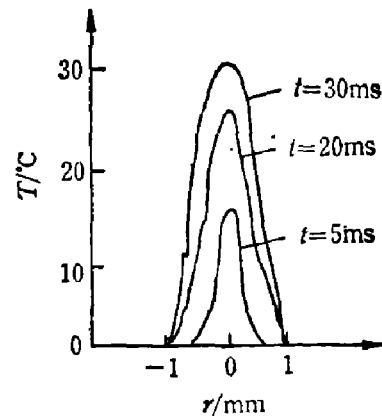


图4 焊点表面温度随时间分布情况
Fig. 4 Temperature distribution as a function of time on the surface of a solder joint.

$$P(x, y) = \frac{P_0}{\alpha} \left[1 + \cos \left(\pi \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{r_L^2}} \right) \right],$$

式中 P_0 为峰值功率密度, r_L 为光束曲率半径, 温度 T 与激光功率 P 关系为

$$cd \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \nabla \cdot [k \cdot \nabla T(x, y, z, t)] + P(x, y, z, t). \quad (8)$$

图4为式(8)的一组解,激光斑直径 r 为2mm。由图可见,与激光束中央相对应的焊点部分的温度大大高于周围部分,激光光斑越小,这种效应就越明显。由此会引起两种后果:(1)焊点局部温度上升过快,超过焊点熔点,而导致焊锡熔化;(2)由于激光束能量集中在中央附近,所以激光对于焊点表面毛刺、刻痕和工作台震动非常敏感,尤其当印刷电路板安置在会聚透镜焦点时,由于此时激光束极窄,周围仪器工作时产生的震动常常使焊点信号变得很差,甚至无法正常工作。

三、实验装置和结果

图5是我们实验装置方框图。采用CO₂激光器作热源,调节其工作电流可控制其输出功率。红外探测仪由红外光学系统,碲镉汞红外探测器,锗聚焦镜和前置放大器组成,信号输入OMC-80双板机处理。可以证明:当恒定热流注入焊点表面时,红外探测器输出电压V_s与焊点温度T的关系为

$$V_s = \frac{V_N A_D A_t \tau_0 \varepsilon(\Delta\lambda)}{\pi \sqrt{A_d \Delta f} L^2} \cdot T^4 \cdot D^*(\Delta\lambda),$$

其中V_N为噪声电压均方根幅值,D*为归一化探测率,τ₀为红外光学光谱通带的平均透射比,A_D为会聚镜通光孔径,A_t为视场限定的被探测面积,Δf为等效噪声带宽,A_d为探测器敏感元件的面积,L为会聚镜至焊点距离,ε(Δλ)为焊点平均发射率。

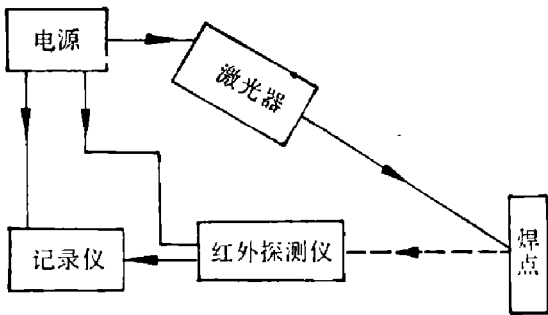


图5 实验系统

Fig. 5 Laboratory system used in the study of feasibility.

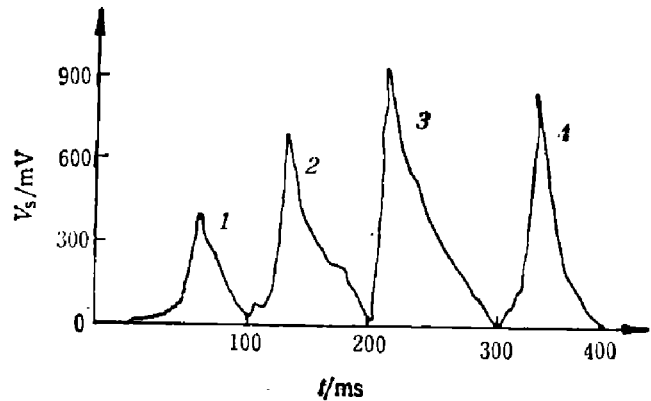


图6 焊接质量不同的四种焊点的信号电压

Fig. 6 Voltage signals of four solder joints with various qualities.

表1 四种模拟焊点的测量结果

Table 1 Experimental results of four simulated solder joints.

编号	峰值电压(V)	延迟 10 ms 电压值(V)	延迟 15 ms 电压值(V)	延迟 20 ms 电压值(V)
1	0.44	0.19	0.14	0.11
2	0.72	0.48	0.40	0.35
3	0.91	0.59	0.47	0.43
4	0.83	0.29	0.17	0.13

在印刷电路板上模拟四种情况制作了四只焊点。焊点1是正常焊点,焊点2未接导线,焊点3内设置一个空洞缺陷,焊点4表面涂少许指甲油。图6为加热焊点1、2、3和4时测得的信号电压波形,测量时激光功率25W,离焦大约50mm,信号经OMC-80采样分析,结果如表1。

四、结果分析

1. 当焊点表面注入恒定热流时,其温升曲线大体上具有式(5)所描述的指数规律,可见,我们建立的焊点热力学模型是可取的,有助于检测焊点的焊接质量。

2. 当焊点内部有空洞时,焊点的表面温升比无缺陷时高,利用等效热惯量的概念,可以反映出空洞对表面温度的影响。反之,也可由表面温升曲线的差异推知其相应等效热惯量的差异,从而确定缺陷的存在与否。焊点3注入恒定热流后,峰值信号最大,经过25ms延迟后温度尚未降到正常温度附近,只要这类焊点温度阈值取值合适,就可以将它识别出来。

3. 当焊点表面涂上红指甲油薄层后,由于焊点表面发射率显著升高,焊点4注入恒定热流后,它所吸收的热量比正常焊点大许多,因而温度峰值信号高达0.83V,然而,热流停止注入后,焊点4的热信号很快降到正常焊点附近,延迟10ms时,焊点4的热信号已与焊点1接近,实验结果与理论分析一致,证明用这种方法判断焊点质量是可行的。

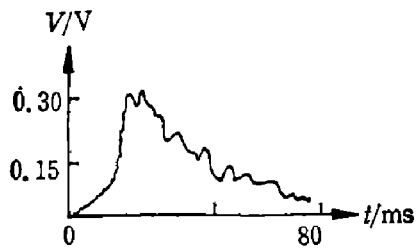


图7 焊点位于焦点

Fig. 7 Signal for solder joint on focus.

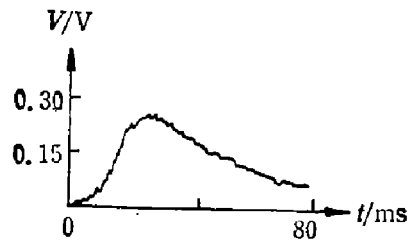


图8 焊点离焦

Fig. 8 Signal for solder joint out of focus.

4. 我们将印刷电路板移到透镜焦点附近,用CO₂激光束照射焊点1,观察碲镉汞探测器输出,由于步进电机震动影响,焊点峰值温度稍后信号出现抖动,印刷电路板偏移焦点一段距离后,信号又恢复正常,证明离焦可以提高信号信噪比。图7、8分别为焊点位于焦点和离焦50mm的热波形。

参 考 文 献

- [1] AD-780550.
- [2] AD-A112703.
- [3] Schaltz A. W., *Proc. intern. conf. on NDT*, 1967, 74.
- [4] [美]M. N. 奥齐西克,热传导(第一版),俞昌铭译,高等教育出版社,1983.
- [5] Marijia Scholl, *Appl. opt.*, **21**(1982), 12, 2146~2152.

THERMODYNAMIC MODEL AND EFFECT OF CO₂ LASER BEAM FOCUS-OUT ON THERMAL SIGNAL OF SOLDER JOINTS

FENG WEITING, DING SHICHANG, SHI SHUHUAI
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A new method of infrared non-destructive test (IRNDT), which is on the basis of the temporal change of radiative power from every point of solder joints, is presented for determining the defects of solder joints. A thermodynamic model of solder joints is set up. The mechanism of local overheat of solder joints is elaborated from the mathematical viewpoint.