

⑦ 273-278

# SMT 激光微钎焊焊点质量 红外传感的计算机模拟

TG456.7  
TG441.7  
TG

梁旭文

(传感技术国家重点实验室,中国科学院上海冶金研究所,上海,200050)

王春青 钱乙余

(现代焊接生产技术国家重点实验室,哈尔滨工业大学,黑龙江,哈尔滨,150001)

**摘要** 研制出 SMT 激光微钎焊焊点质量红外检测系统,建立了微细焊点红外传感的数学模型并进行计算机数值求解.计算表明,焊点红外传感信号可识别出钎料的熔化及润湿过程,并能用于激光微钎焊焊点质量实时控制.

**关键词** SMT, 激光微钎焊, 红外辐射, 计算机模拟, 质量控制.

焊接质量

## 引言

研究表明,表面组装(Surface mount technology,得称 SMT)激光微钎焊方法具有提高钎焊接头致密性、控制界面金属间化合物的形成及细化晶粒的特点,因此良好的激光微钎焊焊点具有极高的可靠性.但是,激光定位偏差或工艺控制不良极易产生焊点缺陷,如何避免缺陷的产生,保证焊点质量一直是人们研究的课题.而采用 PID 控制方法不能保证接合质量<sup>[1,2]</sup>.1994 年 J. Nicolics<sup>[3]</sup>采用红外传感方法对激光微钎焊接合过程进行实时监测,根据红外信号特征可避免误定位时元件、焊点或基板的烧毁,并提出润湿识别方法可控制焊点质量,但由于作者没有系统研究红外信号与焊点质量的关系,且单一红外信号可能无法准确捕捉到润湿时刻,控制算法可靠性较差.

要分析焊点红外辐射信号的特征,首先要研究焊点的动态形成过程并计算焊点形成过程中的瞬态热场分布,这包含对流、相变的复合结构的复杂热过程计算问题;在此基础上,建立焊点质量红外传感的数学模型,并进行数值求解.文献[4]建立了焊点形成过程中包含传质的传热数学模型并给出了有限元解,本文在此基础上对焊点质量红外传感信号进行计算机数值模拟,研究结果可以直接指导焊点质量的控制及其算法的建立.

## 1 激光微钎焊焊点质量红外传感系统

图 1 为激光微钎焊焊点质量红外传感系统结构,其中光学系统物镜为折射式物镜,探

测器为视场光阑,放在光学系统焦面上,并与出窗重合;目标与物窗重合;系统能有效克服焊点外背景辐射的影响。

焊点红外信号的检测与激光加热同步进行,因而从焊点表面反射回来的激光,一方面会影响红外检测信号,另一方面会损伤红外探测器,这就要求光学系统具有对  $0.63\mu\text{m}$ 、 $1.06\mu\text{m}$  波长全反射,对  $2\sim 7\mu\text{m}$  波长全透射的选择传输特性.采用在  $\text{CaF}_2$  分色镜上镀干涉膜的方法,膜的结构采用计算机辅助设计.为了保护这至关重要的膜层,采用胶合方法将膜层封闭在两块  $\text{CaF}_2$  红外平板材料之间,与空气、水及其它有害介质彻底隔离.镀膜后分色镜的透射特性见图 2.

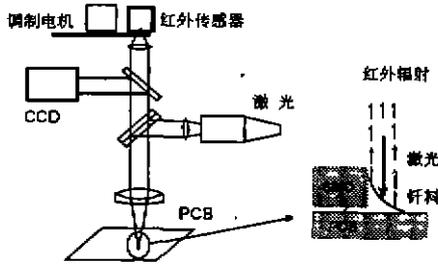


图 1 激光微软钎焊点质量红外传感系统  
Fig. 1 Joint quality infrared detecting system in laser microsoldering

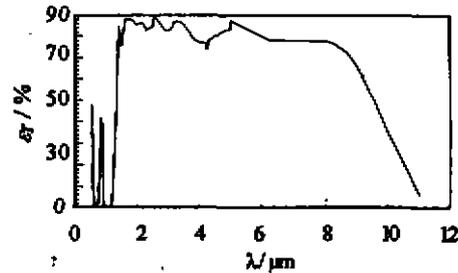


图 2 分色镜透射特性  
Fig. 2 Transmission characteristics of the dichroic mirror

系统要求物镜有极宽的透过波段,达  $0.63\sim 7\mu\text{m}$ ,在该波段有两个大气透过窗口,即  $2\sim 2.6\mu\text{m}$ , $3\sim 5\mu\text{m}$ ,不同波长折射率不同,使透镜焦距在数值上相差很大,产生严重的轴向色差,因此消除色差是折射式红外物镜设计的关键.综合考虑消色差和使用波段内材料的透过率,选用一种折射率与  $\text{CaF}_2$  相差很大的材料与  $\text{CaF}_2$  组成双分离复合透镜,不仅可以设计得使色差为 0,而且有利于高级球差的校正。

## 2 焊点质量红外传感数学模型

焊点质量红外传感以黑体辐射理论为基础,根据 Planck<sup>[5]</sup>公式,绝对黑体的光谱发射量  $R_{\lambda}$  与绝对温度  $T(\text{K})$  的关系为:

$$R_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} [\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1]^{-1}, \quad (1)$$

式(1)中, $\lambda$  为波长; $C_1$ 、 $C_2$  分别为第一、二辐射常数。

绝对黑体的波段辐射出射率为:

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = M_{0 \sim \lambda_2} - M_{0 \sim \lambda_1}$$

而  $M_{0 \sim \lambda_2} = \int_0^{\lambda_2} R_{\lambda} d\lambda$ , 代入式(1)得:

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} \frac{d\lambda}{\exp(C_2/\lambda T) - 1}, \quad (2)$$

令  $x = \frac{C_2}{\lambda T}$ , 则  $d\lambda = -\frac{\lambda^2 T}{C_2} dx$ , 式(2)可写为:

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = -\frac{C_1}{C_2^4} T^4 \int_{C_2/\lambda_2 T}^{C_2/\lambda_1 T} \frac{x^3}{\exp x - 1} dx, \quad (3)$$

式(3)采用数值积分方法求解. 当所检测到的辐射波段为  $2 \sim 7 \mu\text{m}$  时, 得到波段辐射出射度与目标辐射温度的关系如图 3 所示.

因此, 如果测得黑体的波段辐射出射率, 则可以计算得到黑体的温度. 对于实际焊点, 式(3)右边添加发射率  $\epsilon$ . 激光直接加热钎料时, 钎料在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段的平均发射率是温度的函数, 当钎料发生相变时  $\epsilon$  突变, 同时由于焊点表面状态的动态变化及钎料熔化要吸收熔化潜热使得焊点波段辐射量发生突变; 钎料完全熔化后, 其平均发射率  $\epsilon$  不再变化, 温度  $T$  的作用使  $R_e$  成单调上升趋势. 因此, 如果实时检测焊点在一定立体角内某波段范围内的辐射出射率, 则焊点红外辐射信号反映了焊点的动态形成过程及其质量.

图 4 为焊点辐射量计算模型. 忽略光学系统对焊点红外辐射能量的吸收, 根据 Stefan-Boltzman<sup>[5]</sup>定律, 焊点辐射功率为:

$$\Phi = \epsilon_1(T_1)\epsilon_2(T_2)\sigma(T_1^4 - T_2^4) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi L^2} dA_2 dA_1, \quad (4)$$

式(4)中,  $A_1$ 、 $A_2$  分别为有效辐射源面积及传感器有效检测面积;  $T_1$ 、 $T_2$  分别为有效辐射源温度及传感器灵敏元表面绝对温度;  $L$  为焊点与物镜间的距离;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为焊点和传感器单位面积元法线方向与轴线的夹角;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别为有效辐射源及传感器灵敏元发射率.

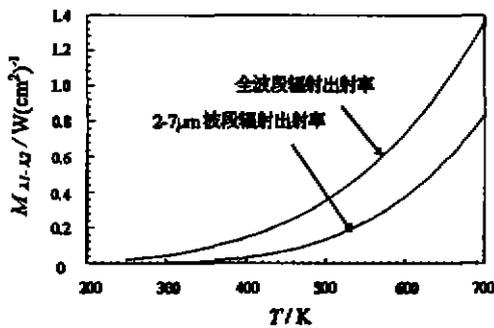


图 3 波段辐射出射率与辐射温度的关系  
Fig. 3 Relationship between the wave band radiant exit energy and surface temperature

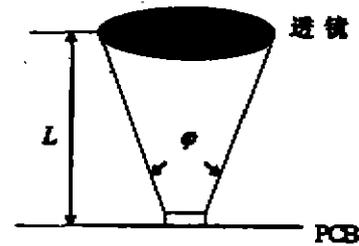


图 4 焊点辐射量计算模型  
Fig. 4 Calculating model of infrared radiation of the solder joint

由于  $A_1$  和  $A_2$  的值很小, 可设  $\theta_1 = \theta_2 = 0$ , 忽略传感器灵敏元的反射损失 ( $\epsilon_2 = 0$ ), 并考虑光路损耗, 则式(4)变成:

$$\Phi = (1 - \eta)\epsilon_1(T_1)\sigma(T_1^4 - T_2^4) \frac{A_1 \varphi}{\pi}, \quad (5)$$

式(5)中,  $\eta$  为光学系统辐射能量损耗系数,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\varphi$  为辐射立体角.

利用图 3 的数值积分计算结果, 改写式(5)可得  $2\sim 7\mu\text{m}$  波段焊点辐射功率为:

$$\Phi_{2\sim 7\mu\text{m}} = (1 - \eta)\varepsilon_1(T_1)\{M_{2\sim 7\mu\text{m}}(T_1) - M_{2\sim 7\mu\text{m}}(T_2)\} \frac{A_1\varphi}{\pi}. \quad (6)$$

### 3 数值计算结果

#### 3.1 计算步骤

(1) 用有限单元法对激光钎焊焊点动态形成过程中包含传质、相变的非稳态传热过程进行数值计算<sup>[4]</sup>;

(2) 焊点红外辐射信号的数值模拟, 对式(6)进行离散得焊点红外辐射与焊点表面温度及状态的离散关系模型:

$$\Phi_{2\sim 7\mu\text{m}} = \sum_{k=1}^n (1 - \eta)\varepsilon_1(T_k)\{M_{2\sim 7\mu\text{m}}(T_k) - M_{2\sim 7\mu\text{m}}(T_2)\} \frac{A_k\varphi_k}{\pi}, \quad (7)$$

式(7)中,  $n$  为节点数,  $A_k, \varphi_k$  分别为第  $k$  节点的有效辐射面积和辐射立体角.

在三维热过程计算基础上, 可计算出每一时间步长的辐射量  $\varphi$  值, 所有  $\varphi$  值构成焊点红外传感信号曲线.

#### 3.2 膏状钎料 $2\sim 7\mu\text{m}$ 波段发射率的测定

采用图 1 所示光学系统近似测量式(7)中  $\varepsilon_1(T)$  的值. 标准辐射体或钎料置于温控平台上, 先测量已知发射率的物体在各温度时的波段辐射量, 再测量在该温度下膏状钎料的波段辐射量, 则发射率为:

$$\varepsilon_f = \varepsilon' \cdot \frac{M_f}{M}, \quad (8)$$

式(8)中,  $\varepsilon'$  是参照物发射率,  $M_f$  为钎剂波段辐射量测量信号,  $M$  为参照物体辐射量测量结果(见图 5). 钎料熔化前发射率约为 0.9, 对温度的变化不敏感, 在计算时取其平均值; 钎料熔化后发射率降为 0.3 左右, 相当于钎料金属的发射率.

#### 3.3 焊点质量红外传感信号的数值模拟计算结果

图 6 是焊点质量红外传感信号的数值计算结果. 由图 6 可见, 打开激光输出快门后, 焊膏的吸收率和辐射率都较高, 因此焊点表面温度上升极为迅速, 因此焊点表面温度上升极为迅速, 使此后红外曲线进入加速上升阶段; 约 200ms 左右焊膏开始显著熔化(点 A), 由于熔化潜热的作用, 温度上升减慢, 红外信号上升速度降低, 在激光斑点中心出现小的钎料球, 并不断积聚, 钎料处于不断的熔化、流动的状态, 并逐渐形成躺滴(点 B), 此时钎料表面状态的变化造成发射角、发射率发生变化使红外信号幅值下降; 加热至点 C, 积聚成躺滴的熔化钎料开始在焊盘上铺展, 由于铺展后钎料的表面状态为近似平面, 使红外传感器接收的焊点热辐射能量增强, 红外信号曲线出现拐点, 斜率逐渐增大; 躺滴外其余钎料全部熔化后, 红外信号波动减小, 呈单调上升特征; 点 D 发生钎料在元件金属化端的攀移, 由于钎料和元件的接触面积增大, 散热作用增强, 红外信号上升速度减慢; 点 E 是钎料攀移过程结束的标志.

计算结果表明, 焊点动态形成过程中的实时红外传感信号识别出钎料的熔化和润湿过

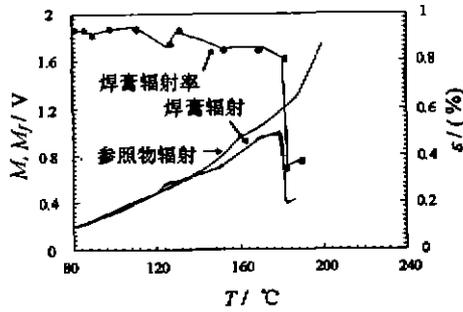


图 5 发射率的测量结果  
Fig. 5 Measurement of  $\epsilon$  of the paste

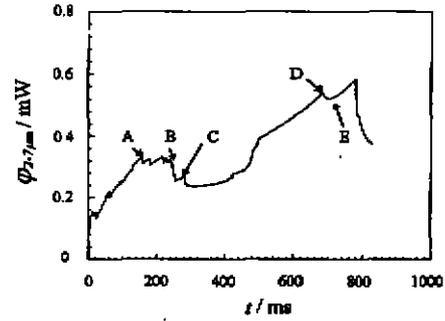


图 6 焊点红外传感信号的计算结果  
Fig. 6 Calculated results of the infrared signal of the joint

程. 计算结果与同步高速摄影试验结果相吻合<sup>[4]</sup>, 从而为焊点质量控制研究提供了理论依据. 图 7 为高速摄影拍摄的焊点动态形成过程典型照片.

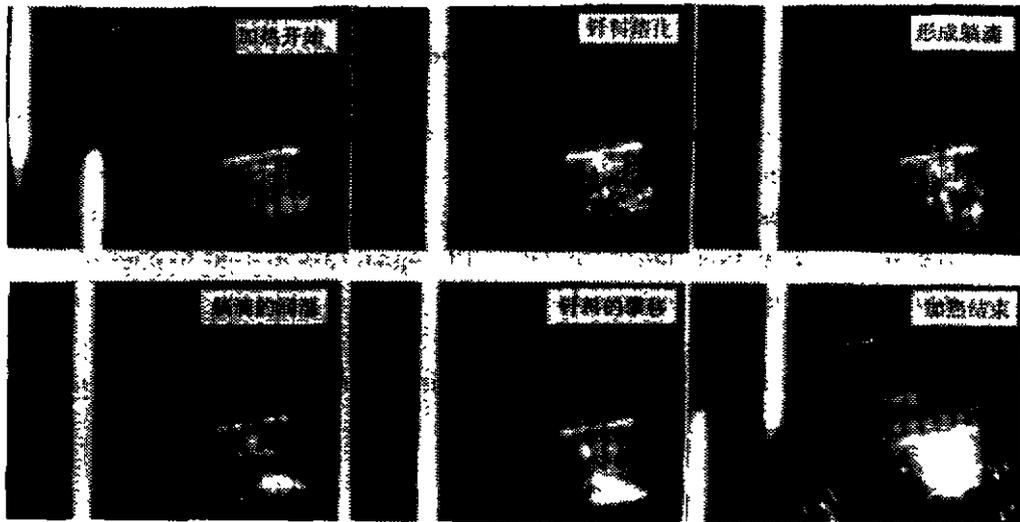


图 7 焊点形成过程高速摄影照片  
Fig. 7 High speed photographs of the solder joint formation process

#### 4 结论

(1) 研制焊点质量红外传感系统. 系统能消除轴向色差, 光谱导通范围宽, 且在不同波段有选择性传输特性, 可满足激光软钎焊的要求;

(2) 建立激光软钎焊微焊点质量红外传感的计算模型并进行数值求解. 计算表明, 钎料的熔化、润湿过程发生时, 红外信号曲线出现拐点, 从而为激光软钎焊焊点质量控制采用润湿识别的控制算法提供了理论依据.

## 参考文献

- 1 Vanzetti R. *Surface Mount 90 Exposition and Conference*, 1990, 89~104
- 2 Traub A C. *NDT International*, 1988, 21(2): 63~39
- 3 Nicolics J, et al. *Selection of IR Detectors for a Fast Laser Solder Joint Qualification. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging Technology*. 1994, 17(4): 596~602
- 4 梁旭文等. *焊接学报*, 1997, (待发表)
- 5 P W 克罗塞. *红外技术基础*, 上海: 上海科学技术出版社, 1985, 80~91

## COMPUTER SIMULATION OF THE INFRARED RADIATION SIGNAL OF THE SOLDER JOINT IN SMT LASER SOLDERING

Liang Xuwen

(State Key Laboratory of Transducer Technology Shanghai Institute of Metallurgy,  
Chinese Academy of sciences, Shanghai 200050, China)

Wang Chunqing Qian Yiyu

(National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The solder joint infrared radiation detecting system was developed in SMT laser micro-soldering, and a numerical model of infrared sensing of the micro-joint was put forward. The calculated results show that the melting and wetting of the solder were recognized by the infrared radiation signal, therefore the signal can be used to control the joint quality simultaneously in laser micro-soldering.

**Key words** SMT, laser soldering, infrared radiation, computer simulation, quality control