

# 基于局部视觉的弧焊机器人自主焊缝轨迹规划

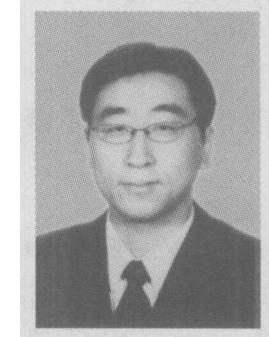
周 律, 陈善本, 林 涛, 陈文杰

(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

**摘要:** 提出了一种基于视觉的弧焊机器人自主焊缝轨迹规划方法。通过使用 CCD 摄像机, 不断地获取枪尖前方一小段焊缝的图像。由主控计算机进行图像处理, 获取枪尖与焊缝间的偏差以及这小段焊缝的走向等信息。根据这些信息控制机器人沿焊缝前进, 同时定时记录用焊缝偏差值修正后机器人坐标值, 生成焊缝在机器人基坐标系下的坐标。当机器人沿焊缝走完一遍后, 主控计算机控制机器人回到焊缝起点, 开始沿焊缝焊接。用此方法对低碳钢曲线焊缝和铝合金曲线焊缝进行试验, 结果表明该方法具有很高的实用价值。

**关键词:** 图像处理; 弧焊机器人; 焊缝轨迹规划; 局部视觉

中图分类号: TG 409 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)01-49-04



周 律

## 0 序 言

机器视觉技术的发展以及性能可靠、体积小、价格低的 CCD 传感器的出现使得视觉成为自动控制中常用的一种传感方法。视觉传感器因其具有非接触, 检查空间范围大, 信息量大, 实时性好等特点, 在焊接应用中也占有重要的地位。

焊接机器人是焊接自动化的革命性的进步, 它突破了焊接刚性自动化的传统方式, 开拓了一种柔性自动化的生产方式。机器人焊接使中小批量的产品自动化焊接成为可能<sup>[1]</sup>。虽然自动化技术在机器人领域得到了大量的应用, 但现在工业机器人仍然主要工作在示教 – 再现模式下, 在焊接新工件前需要依靠大量的人力对焊缝进行示教, 这一点在小批量生产时尤为明显。另一方面示教的机器人不能感知工件尺寸、装夹位置等的变化, 当这些因素变化时, 焊接质量会下降。因此, 作者以 CCD 摄像机作为传感器, 对自主焊缝轨迹规划方法进行了研究, 提出了一种新的生成焊缝坐标的方法。该研究对提高生产效率和焊接质量有重要的意义, 并有助于提高机器人弧焊的智能化水平。

## 1 试验装置及方法

试验装置如图 1 所示, 采用的是中国科学院沈

阳自动化研究所生产的 RH6 机器人。该六轴机器人的控制器, 在进行轨迹规划时降级为带有运动控制功能的伺服控制器。可以由主控计算机每隔 16 ms 向机器人控制器发送数据, 控制机器人运动。这一点是该研究实现工业机器人自主焊缝轨迹规划的基础。机器人控制器与主控计算机之间采用 CAN 总线通讯。焊枪固定在机器人末关节上, CCD 摄像机与焊枪倾斜放置, 位置相对固定, 采集枪尖前方一段焊缝的图像。

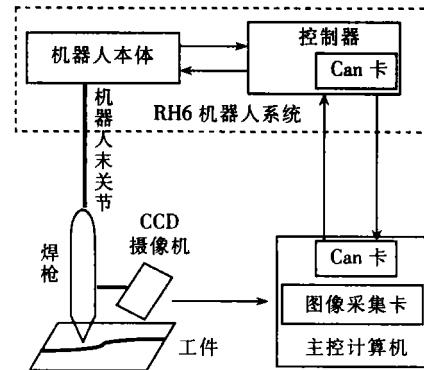


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental equipments

摄像机采集到的图像由中国大恒有限公司生产的 CG400 图像采集卡转换成数字图像, 传送到主控计算机的内存中。由主控计算机循环进行图像处理, 提取图像的特征信息, 包括焊缝的偏差以及焊缝的走向等。以这些信息为基础控制机器人沿焊缝运动, 同时通过 CAN 总线读取机器人坐标值, 定时记

录用焊缝偏差值修正后机器人坐标值。当机器人沿焊缝走完一遍后, 主控计算机用焊缝的偏差值来修正机器人的坐标值。从而生成焊缝的坐标, 并引导机器人回到焊缝起点开始焊接。

试验中采用了平板对接的焊缝形式, 选用了四种工件, 分别为低碳钢的直线形焊缝及“S”形曲线焊缝, 铝的直线形焊缝及“S”形曲线焊缝。用来验证该方法的适应性。

## 2 图像处理及焊缝特征提取

### 2.1 图像处理

所谓图像处理, 就是对图像信息进行加工以满足人的视觉心理或应用需要的行为。焊缝自主轨迹规划所关心的图像中的最主要的信息是焊缝轨迹的中心线。为了准确、可靠地获取这条中心线, 采用的图像处理步骤分别为中值滤波、自动阈值分割和细化。图像处理的基本过程如图 2 所示。图 2a 为摄像机采集到内存中的图像的全貌, 图上的白色方框为接下来进行图像处理的区域。把处理区域的图像和未处理区域的图像一起显示, 可以直观地显示出跟踪的效果。图 2b 为进行中值滤波后的图像, 图 2c 为对图 2b 进行自动阈值分割后的图像, 图 2d 为对图 2c 进行细化后的图像。

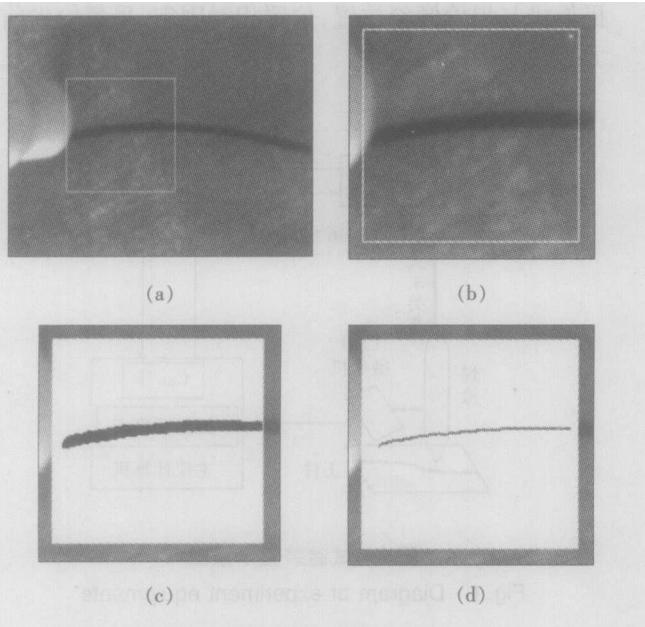


图 2 图像处理的基本过程

Fig. 2 Images processing process

中值滤波是一种非线性的信号处理算法。在这里选用  $3 \times 3$  的窗口, 用 9 个点的灰度中值来替代第 5 点处(即窗口的中心点)的灰度值。

为了提高分割的鲁棒性, 采用了文献 [2] 中的

叠代阈值选择的算法。并把每幅图像经过叠代阈值选择算法求得的阈值减小 20 后作为新的阈值, 这样做使提取的焊缝宽度比实际宽度有所减小, 但不会影响焊缝的位置。

图像处理程序的开发环境为 Visual C++ 6.0 程序中采用了图像卡中提供的回调函数方式循环处理采集到的图像。为了提高图像处理的速度, 采用的是 8 位的灰度图像。

### 2.2 特征提取

#### 2.2.1 标定

为简化所研究问题的难度, 又不失实用性, 在轨迹规划时将工件固定在水平工作台上, 焊枪与工件垂直, 焊枪的轴线与摄像机的轴线在同一平面上, 且该平面与机器人基坐标系的  $x$  轴垂直。另外钨极尖与工件间的距离保持在 5 mm 左右。在此基础上对摄像机进行简单的标定, 标定枪尖点(钨极尖在工件上的投影点)在图像上的位置点, 以及在枪尖附近  $x$  轴方向上单位像素对应的真实尺寸值。

把焊枪与工件垂直时机器人基坐标系中的姿态值记录下来, 并写进程序中, 采用机器人学中的姿态插补算法编程。这样, 在每次轨迹规划前, 可以通过主控计算机控制机器人回复到这种姿态。

#### 2.2.2 焊缝偏差和角度的提取

焊缝偏差和角度的定义如图 3 所示, 在图像坐标系中, 枪尖点与焊缝在  $V$  轴方向上的距离定义为焊缝偏差  $d$  且定义枪尖点在焊缝下方时偏差为正。这样定义时, 当偏差为正时, 机器人沿  $x$  轴正方向调节, 以跟踪焊缝。焊缝的角度定义为焊缝的切线方向与  $U$  轴正方向的夹角  $\alpha$ 。在图像中, 枪尖点右面的一段焊缝斜向上时角度为正。

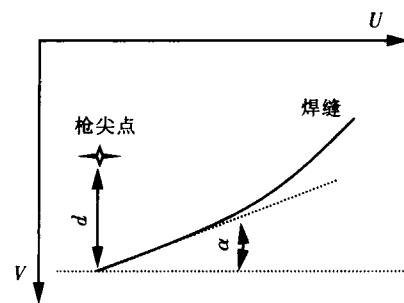


图 3 焊缝偏差和角度的定义

Fig. 3 Definition of welding seam's deviation and angle

对枪尖点前面的一小段焊缝曲线做最小方差直线拟合, 用拟合后的直线来近似代替枪尖点前面的这小段焊缝曲线, 进而提取焊缝的偏差和角度。设拟合后直线方程为

$$y' = a x' + b. \quad (1)$$

并设枪尖点的坐标为  $(x_0', y_0')$ , 则焊缝偏差为

$$d = y_0' - (a x_0' + b) \quad (2)$$

焊缝角度为

$$\alpha = \tan^{-1}(a) \quad (3)$$

### 2.2.3 焊缝末端点的检测

考虑到实际的应用现场, 工件被固定在机器人的工作台上。焊缝末端点处的图像如图 4 所示, 可以看出对图像进行二值化后(图 4a), 焊件的端面能被明显地检查出。细化后的图像(图 4b)则为三条相交的线。

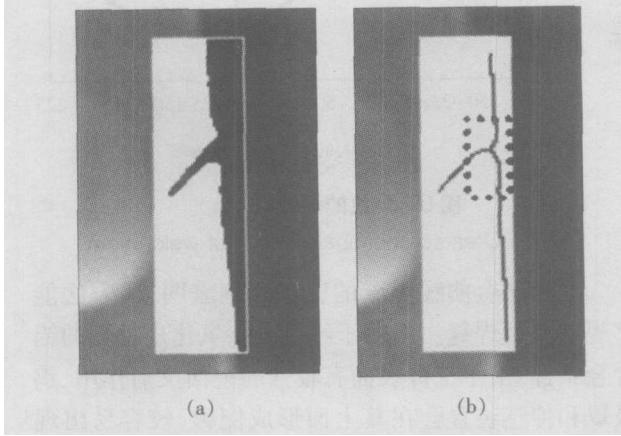


图 4 焊缝的末端点处的图像

Fig. 4 Images at endpoint of welding seam

在图像处理区域内, 定义一个小的方形区域, 如图 4b 中的虚线框所示。该方形区域的宽和高固定, 它的右边和图像处理区域的右边界重合, 左边和焊缝拟合后的直线相交, 且交点为左边的中点。因为焊缝起点和焊缝末端点之间的焊缝图像细化后只有一条线, 这样焊缝末端点处虚线方框内的黑色的像素点的个数会明显地大于不是焊缝末端点处图像中方框内黑色像素点的个数。这一点可以作为判断焊缝末端点的条件。设小方形区域的高和宽分别为  $h$  和  $b$ , 每帧图像中计算出小区域内的黑色像素点的个数为  $n$ , 则该条件可以为

$$n > 1.2 \times \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + b^2} \quad (4)$$

## 3 机器人控制及生成焊缝坐标

RH6机器人的控制周期为 16 ms, 可以每隔 16 ms 向机器人发送增量数据, 增量的大小即为步长, 它们决定了机器人运动的速度。也可以读取机器人的位姿值, 用于记录焊缝的空间坐标值, 以及规划机器人点到点的运动。

控制机器人运动的基本策略是当焊缝偏差为零

时, 使机器人沿焊缝方向以恒定的速度  $v$  前进, 当有偏差时, 机器人向前运动的同时, 在机器人基坐标系的  $x$  轴方向上, 以速度  $v_{x0}$  消除偏差,  $v_{x0}$  的方向和焊缝偏差的方向相同。为了提高消除偏差的速度与精度, 当偏差较大时, 把  $v_{x0}$  定为较大值; 反之亦然。

机器人焊缝跟踪的策略如图 5 所示。

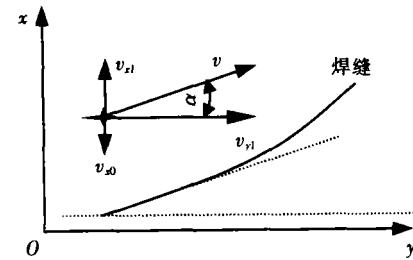


图 5 机器人焊缝跟踪的策略

Fig. 5 Tactic of robotic seam tracking

实际给机器人发送的  $x$  轴方向上步长为

$$L_x = \frac{v \cdot \sin \alpha}{0.016} + \frac{v_{x0}}{0.016} = L \cdot \sin \alpha + L_{x0} \quad (5)$$

$y$  轴方向上步长为

$$L_y = \frac{v \cdot \cos \alpha}{0.016} = L \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

式中:  $L$  为偏差为零时, 机器人运动总的步长;  $L_{x0}$  为有偏差时, 机器人纠正偏差的步长;  $\alpha$  为图像处理得到的焊缝角度。  $L$  和  $L_{x0}$  在程序中设定, 其中  $L_{x0}$  根据图像处理得到的焊缝偏差值设定其大小和正负。给机器人发送的其它增量值为零。控制时假定焊接时, 机器人在基坐标系  $y$  轴方向上沿正方向运动。

在程序中图像处理和机器人运动控制部分需要同时运行。为了使整个程序能够正常的工作, 并使用户界面有良好的响应性, 在程序的整体设计上, 采用了多线程技术。

为了可控的记录跟踪结果, 使用了定时精度高的多媒体定时器技术, 在多媒体的回调函数中, 记录修正后的焊缝坐标的  $x$ 、 $y$  值, 即焊缝轨迹。设第  $i$  个修正后的坐标为  $(x_{ri}, y_{ri})$ , 在回调函数中读到当时焊枪的坐标值为  $(x_i, y_i)$ , 焊缝偏差值为  $d_i$ , 则

$$x_{ri} = x_i + d_i \quad (7)$$

$$y_{ri} = y_i \quad (8)$$

当焊缝到末端点后, 利用机器人学中的两点间直线插补算法。根据记录的第一点的坐标值, 控制机器人运动到焊缝的起始点。当开始焊接后, 依次读取记录的坐标值, 控制机器人沿焊缝轨迹运动, 直至焊缝的末端点。也可把焊缝轨迹储存在文件中永久保存, 在焊接已经规划过的工件时, 不用再进行轨迹规划而直接焊接。

## 4 试验及结果分析

进行轨迹规划前, 先控制机器人使枪尖移到焊缝的起始点, 规定面对机器人时, 焊缝右端点为焊缝的起始点。可以示教的方式或依据立体视觉技术自动生成起始点坐标<sup>[3]</sup>, 控制机器人到达焊缝的起始点。在实际焊接生产中, 平面对接焊缝间隙一般为 0.5~3 mm, 目前使用该方法均可进行轨迹规划, 经过调整该方法也可适合其它接头形式的焊缝。

使用该方法进行轨迹规划时, 就规划精度而言, 一般说来直线焊缝高于曲线焊缝, 反光性差的材料高于反光性好的材料。下面以低碳钢曲线焊缝为例具体说明试验结果。

低碳钢的试验工件尺寸如图 6 所示, 为一 "S" 形对接焊缝。焊缝宽度为 1 mm, 在一般室内光照下进行试验。以 100 ms 的间隔记录生成的焊缝坐标, 共记录了 783 个坐标点和相应的焊缝偏差。

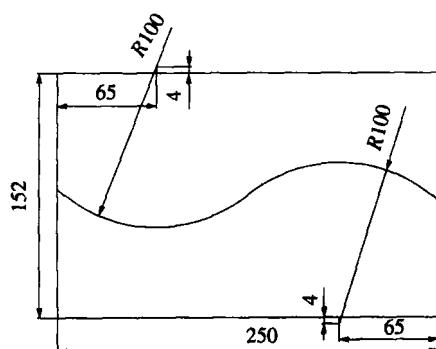


图 6 工件的尺寸

Fig. 6 Size of workpiece

焊缝偏差的曲线如图 7 所示, 当初始点处偏差基本消除后, 即当轨迹规划进行 0.5 s 后到轨迹规划结束期间, 焊缝偏差的绝对值最大值为 0.9842 mm, 平均值为 -0.21428 mm, 标准偏差值为 0.33658 mm。这说明机器人对焊缝的跟踪效果是很好的。

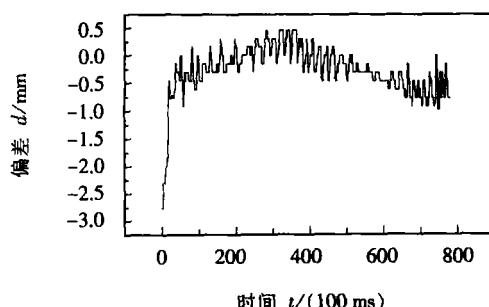


图 7 焊缝偏差曲线

Fig. 7 Curve of weld seam deviation

轨迹规划后生成的机器人坐标系下的焊缝坐标点如图 8 所示。为了便于分析坐标轴的比例相同。对比图 6 和图 8 可以看出生成的焊缝坐标所组成的曲线形状和实际焊缝的曲线形状吻合得很好。坐标点的偏差大多小于 0.3 mm, 即小于图像中两个像素所代表的长度, 而在动态图像处理中两个像素以内的精度是很难稳定达到的, 这说明进一步提高精度, 应该选用大焦距的镜头。

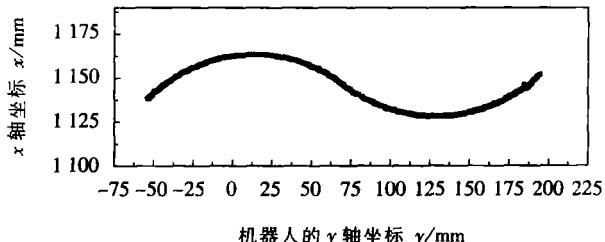


图 8 生成的焊缝坐标点

Fig. 8 Created coordinate points of weld seam

对铝合金曲线焊缝的轨迹规划表明, 该方法能够规划整条焊缝。但对于经过去除氧化皮处理的铝合金工件, 由于工件表面有较强的镜面反射作用, 钨极罩和传感装置会在其上面形成倒影, 较容易出现干扰点。所以精度没有低碳钢的高, 一些生成的坐标点的误差超过 1 mm。但作者认为这可以通过改善工件的表面状态和光源等因素以及使用更好的图像处理和特征提取算法来克服干扰点。

## 5 结 论

给出了一种自主焊缝轨迹规划方法, 它在某种程度上模拟了焊工焊接时的智能行为。通过不断地观察枪尖点前方的一段焊缝曲线来形成焊缝坐标。如果在焊接时再微调偏差, 则这种方法将具有焊工的越来越熟练的特点。试验表明, 该方法能以较高的精度获取低碳钢对接焊缝的焊缝坐标, 且能够跟踪铝合金对接焊缝, 但由于铝合金的图像中容易出现干扰点, 生成的焊缝坐标精度没有低碳钢的高。

### 参考文献:

- [1] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 1~7.
- [2] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi, Schunk Brian G. Machine vision [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. 76~86.
- [3] 朱振友, 林涛, 陈善本. 基于 Lab view 的焊缝起始点视觉识别 [J]. 自动化技术与应用, 2003, 22(9): 81~83.

作者简介: 周律, 男, 1976 年出生, 博士研究生。主要从事机器人焊接智能化方面的研究工作, 发表论文 2 篇。

E-mail: zhoulv@sjtu.edu.cn

welded surface microstructure of steel before welding. If only one surface is eligible for ultra-finishing, the tensile strength of the joint will be also up to that of 40Cr base metal, but the welding time is slightly longer. ISSW belongs to the little deformation welding, the deformation of joint is mainly located in the quenched area near original interface. The deformation of T10A side is larger than that of 40Cr side.

**Key words** steel microstructure ultra-finishing treatment superplastic solid state welding process

**Phase transformation diffusion bonding technology for titanium alloy to stainless steel** QIN Bin<sup>1</sup>, SHENG Guangming<sup>1,2</sup>, HUANG Jiwei<sup>1</sup>, LI Cong<sup>2</sup> (1 College of Material Science and Engineering Chongqing University Chongqing 400044 China, 2 National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Material Nuclear Power Institute of China Chengdu 610041 China). p41-44, 48

**Abstract** The joints of titanium alloy (TA17) and stainless steel (0Cr18Ni9Ti) were obtained by phase transformation diffusion bonding. Effect of parameters on strength of the joint was investigated and the optimum parameters for bonding are as follows: maximum cyclic temperature is 890 °C, minimum cyclic temperature is 800 °C, number of cyclic times is 10, bonding pressure is 5 MPa and heating velocity is 30 °C/s. Strength of the joint under the optimum condition is 307 MPa and the time for bonding is 160 s. Scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were used to study the fracture appearance of the joint. The study showed that the fracture takes place at somewhere between FeTi and  $\beta$ -Ti layers and the FeTi layer is the weakest point in the joints. The joint was analyzed by EDS and the ternary phase diagram for Fe-Cr-Ti. The results indicated the presence of  $\sigma$ ,  $Fe_2Ti$ , FeTi and  $\beta$ -Ti in the reaction zone between stainless steel and titanium alloy.

**Key words** titanium alloy stainless steel phase transformation diffusion bonding

**Metal transfer of twin-wire indirect arc argon welding** CAO Meiqing, ZOU Zengda, DU Bao shuai, QU Shiyao, WANG Xirong, LI De gang (School of Material Science and Engineering Shandong University Jinan 250061, China). p45-48

**Abstract** The metal transfer and the corresponding arc voltage and welding current in twin-wire indirect arc argon welding was investigated with high speed camera system based on a xenon lamp source and digital oscillograph. Results showed that with the different matching of welding current and arc voltage, the mode of metal transfer consists of short circuiting transfer, globular transfer, mixing transfer, projected transfer and streaming transfer etc. With the increasing of welding current, the droplet size reduces and the droplet is refined. With the raising of arc voltage, the size of droplet reduces. There is well corresponding relationship between metal transfer mode and the oscillogram of voltage and

welding

**Key words** indirect arc metal transfer, short circuiting transfer, streaming transfer

**Autonomous seam tracking based on local vision in arc robotic welding** ZHOU Lü, CHEN Shanben, LIN Tao, CHEN Wenjie (Welding Institute Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030, China). p49-52

**Abstract** A method of autonomous seam tracking in arc robotic welding was presented. It could make the robot get rid of traditional teaching and playing back mode and automatically acquired the special coordinates of welding seam. The master computer continuously processed local area images in front of the torch in the images which were acquired by a CCD camera to measure the deviation between the torch and the seam and the orientation of the seam. At the same time, the computer controlled the robot to make the torch move forward along the seam and recorded the seam's coordinates in the robotic basic reference frame which were corrected by the deviations. After the torch arrives at the end point of the seam, the computer controlled the robot to move the torch to the first record coordinate and begin to weld. Experiments were made on the curves seam workpieces of mild steel and aluminum alloy work pieces. The result showed that this method has good practicability.

**Key words** image processing, arc welding robot, autonomous seam tracking, local vision

**Distribution of Au during reaction of eutectic SnPb solder and Au/Ni/Cu pad** LI Furuquan<sup>1</sup>, WANG Chunqing<sup>1</sup>, DU Miao<sup>2</sup> (1 National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China, 2 Harbin Welding Institute Harbin 150080, China). p53-56

**Abstract** Solder bump was fabricated with Sn-Pb eutectic solder droplet on Au/Ni/Cu pad. The solder/pad was then subject to reflow soldering and aging at 125 °C. The MC evolution at solder/pad interface during this process, especially the formation and distribution of Au-Sn compound were investigated. The results showed that Au-Sn compound forms at solder/pad interface during contact reaction and Au does not react fully with solder droplet. During the subsequent reflow soldering, all Au layer at interface is consumed. Ni layer reacts with solder, which leads to the formation of  $Ni_3Sn_4$  compound at the interface. A circular  $AuSn_4$  can be found in the solder bulk.  $AuSn_4$  particles redeposits at the interface as a continuously  $(Au_xNi_{1-x})Sn_4$  layer during aging at 125 °C. The redeposited  $(Au_xNi_{1-x})Sn_4$  at solder/pad interface follows decomposition diffusion mechanism. At the same time, a lead rich phase emerges with  $AuSn_4$  redeposition at the interface. The shear strength of soldered joint is mainly determined by this evolution and distribution of Au-Sn compound.

**Key words** solder bump, Au/Ni/Cu, reflow, aging, interface