

# 热超声倒装键合环状界面的形成

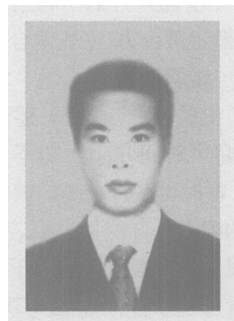
王福亮, 韩 雷, 钟 掘

(中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 采用压力约束模式夹持倒装芯片, 实现了热超声倒装键合, 观察到环状的键合界面微观形貌, 脊状撕裂棱以及表皮层碎片。采用有限元方法计算了键合界面应力、应力场的大小和分布在热超声倒装键合过程中的变化, 从应力的角度揭示了环状界面的形成机理。研究结果表明, 应力分布显示接触面边沿较其它位置更有利于去除表皮层、更有利于原子扩散形成键合强度, 是形成环状界面的重要原因; 振动的加载过程改变了应力和应力场的分布, 使得应力分布进一步集中在振动位移决定的键合界面边沿位置, 促进了环状界面的形成。

**关键词:** 热超声倒装键合; 压力约束模式; 环状界面; 有限元方法

**中图分类号:** TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2006)11-065-05



王福亮

## 0 序 言

热超声倒装键合是一种基于热超声引线键合发展起来的下一代微电子封装技术, 是无铅绿色的阵列 I/O 互连方式, 具有键合温度低、压力小和时间短等优点。目前以其独特优势在低成本、低 I/O 数目的 IC 封装应用中越来越被广泛地采用, 比如智能卡封装、LED 封装以及 SAW Filter 器件封装等<sup>[1~3]</sup>。目前针对热超声倒装键合, 人们已做的大量研究主要是获得各种工况条件下工艺参数对可键合性的影响规律<sup>[4,5]</sup>。随着微电子封装密度的增加、体积的缩小, 特别是高性能 LED 倒装的需求, 热超声倒装的应用需求越来越大, 因而对键合机理的深入研究也越来越重要。事实上热超声倒装键合的研究大多是基于引线键合的应用经验。在引线键合技术中键合界面的相对运动对于键合强度的形成具有重要作用, 在线实时监测结果表明键合过程中早期界面“粘滑”对于高质量的键合强度生成非常重要<sup>[6]</sup>。用 TEM 观察键合界面, 人们发现周围有污染/氧化层碎片, 以及空穴与断层。因此认为在超声键合过程中表面氧化/污染层(表皮层)必须清除。然而对键合参数如何影响强度的机理依然未知。键合界面的微观形貌对于了解键合机理提供了重要信息。在上述研究基础上, 试验观测了热超声倒装过程中界面的

相对运动, 并根据获得的数据, 采用有限元方法计算了界面应力大小和分布在键合过程中的变化, 揭示了倒装键合环状界面这种微观形貌的形成机理。

## 1 热超声倒装键合试验过程

### 1.1 试验平台

热超声倒装键合试验是在自制的平台上展开(超声驱动频率为  $60 \text{ kHz} \pm 2 \text{ kHz}$ )。平台所采用的母体是粗铝丝引线键合机。热超声倒装芯片的夹持方式是超声能量传递环节中的重要组成, 决定了最后键合界面所能获取能量的效率。采用的芯片夹持方式为压力约束模式; 倒装工具是实心的钨钢圆柱体, 末端端面光滑平整, 工具通过键合力所引起的摩擦力约束芯片、传递超声能量。

试验采用的芯片是  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的硅芯片, 表面有 28 个铝焊盘 (Pad), 其中对称分布的 8 个焊盘上植有直径约  $50 \mu\text{m}$ , 高度约  $30 \mu\text{m}$  的金凸点。

试验用的基板是铜基板, 整个表面都被制作成镀银的焊盘。因此, 在键合过程中, 不必进行凸点/焊盘对准。热超声倒装键合试验台的键合力在  $0 \sim 11.76 \text{ N}$  可调; 基板温度在  $\text{RT} \sim 400^\circ\text{C}$  可调; 超声功率在  $0 \sim 5 \text{ W}$  可调; 键合时间在  $0 \sim 500 \text{ ms}$  可调; 声频率是  $60 \text{ kHz} \pm 2 \text{ kHz}$ 。

在上述条件下热超声倒装键合试验过程如下。

(1) 将铜基板固定放置在工作台上, 加热到键合所需温度(一般是  $160^\circ\text{C}$ ); 将芯片放在基板上, 背

面朝上;由于铜基板的整个表面都是焊盘,因此不必进行凸点/焊盘对准。

(2) 键合工具压下接触到芯片背面;并施加所需要的键合力;开启超声,由于键合力的存在,芯片与工具间、金凸点/焊盘之间存在摩擦力,因此,超声振动得以在界面间传递。

(3) 超声开启一段时间后关闭,然后再升起工具,撤走键合力,完成键合过程。

1.2 试验观测

由试验可知,在上述键合装备条件下,当键合力、超声时间和超声功率分别为 2.35 N、100 ms 和 2.8 W 时可获得较高的键合强度。键合完毕后用自制的测力平台测量了倒装界面的抗剪强度,作为键合强度的判断依据。由于自制的测力平台不能确保测量过程中:(1) 推刀与基板的稳定的极小距离(小于 7  $\mu\text{m}$ );(2) 推刀与芯片侧面稳定的高度平行。因此测量的结果会比实际小,上述试验条件下测得的平均抗剪切力为 0.122 N/凸点。

此外还采用 SEM 观测界面的微观形貌,以获得强度产生位置和失效位置的认识。典型的金凸点/银焊盘倒装界面结构如图 1 所示。

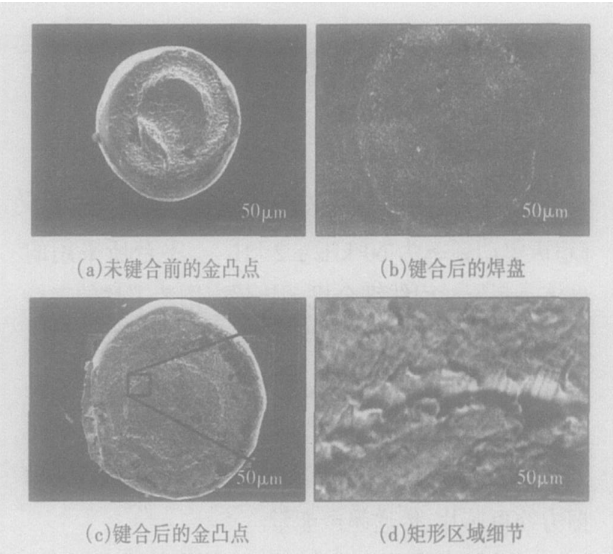


图 1 键合界面的形貌

Fig. 1 Microstructure of bonding interface

金凸点未键合前的形貌如图 1a 所示,凸点是比较规则的圆鼓形,表面不平。键合后如图 1c 所示,在超声、压力和温度作用下变成椭圆柱形状,表面比较平整,中间和边界有两个环带,中间环带非常明显,放大后如图 1d 所示,是一种脊状撕裂棱,表明了良好的键合强度。两个环之间的黑色部分经能谱测定发现以 Ag 为主,这是破碎的银基板表皮层被挤入了金凸点中,并随着凸点变形移动到键合界面边缘。而对应的基板焊盘如图 1b 所示,也显示为两个

环,环带位置经能谱测定发现以 Au 为主,也表明了良好的键合强度。

这种形貌的键合界面被称为环状界面。在文献 [1] 中发现热超声引线键合中有类似的现象。它们表明界面在环带位置形成了牢固的原子间结合,键合强度在界面上分布不均匀,仅仅分布在环状区域。

2 环状界面形成分析

试验发现界面形貌于键合力和超声振动有密切关系。然而,由于键合界面小,键合过程短,无法直接观察键合形貌的形成过程。作者采用有限元方法研究了压力和振动对界面形貌的影响。

2.1 倒装界面模型

热超声倒装键合可认为是金凸点在压应力与切向位移作用下和银焊盘相互作用的过程。SEM 观察显示虽然凸点的分布对界面形貌有影响,但是基本是类似的。因此可通过了解一对凸点/焊盘界面的受力来确定界面形貌的形成原因。由于凸点和焊盘是中心对称的,故可将界面简化为图 2 的二维模型。

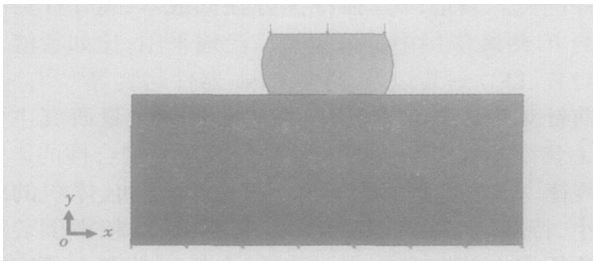


图 2 凸点和焊盘的几何模型

Fig. 2 FEM of lower interface

模型的边界条件为,金凸点上表面有均布压应力 58.6 MPa(每凸点 0.294 N);基板固定在工作台上,故限制底部所有自由度,如图 2 所示。

由于超声对材料作用机理目前依然不清楚,因此无法获得准确的超声作用下的材料数据。在现有研究中的受力分析一般采用常温无超声条件下的材料数据计算<sup>[7]</sup>。模型所采用的材料数据为:忽略银焊盘塑性变形,其  $E$  常数为 7 320 MPa,泊松比为 0.38;而金凸点的  $E$  常数为 7 950 MPa,泊松比为 0.42,塑性阶段的应力应变关系见图 3。

曲线 1 反映的是金在常温、无超声加载条件下的材料特性,事实上超声和温度使金凸点变软,即

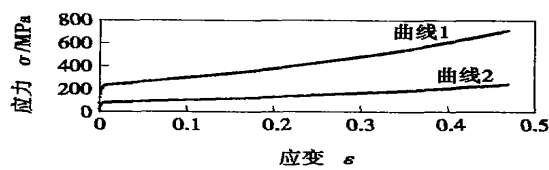


图 3 金凸点材料数据

Fig. 3 Stress-strain relationship of bump

曲线往下移动<sup>[8]</sup>。在上述条件下,分别根据曲线 1 和 2,采用 ABAQUS 计算金凸点和焊盘的 Mises 应力云图。结果发现,材料数据对计算结果的应力大小有影响,对分布形状基本没有影响。曲线 1 计算的最大应力为 181 MPa;曲线 2 计算的最大应力为 137 MPa。而分布直接关系键合界面的微观形貌。因此不会对文中的研究产生根本的影响。事实上材料数据对键合真实状态和过程有重要影响。

2.2 压力对键合界面的影响

根据曲线 1 的计算,以键合界面为  $x$  轴,对称中心为坐标原点,可获得界面正应力和切应力的分布如图 4、图 5 所示。

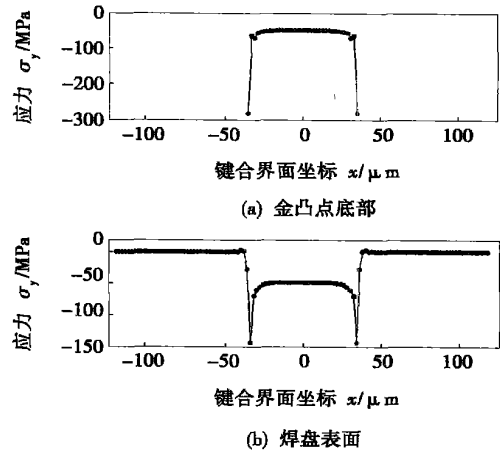


图 4 界面的正应力分布

Fig. 4 Distribution of  $\sigma_y$  on bonding interface

目前人们认为热超声倒装键合过程可分为两个阶段:(1)在键合初期去除金凸点和焊盘接触面上覆盖的氧化层和污染层;(2)氧化层和污染层去除后,在键合力和超声作用下,洁净金属表面接触到一起,原子间产生相互作用,并发生原子间互扩散,产生原子间键合。因此,氧化层和污染层去除和原子扩散是形成键合强度的重要原因,也是决定键合界面形貌的重要原因。

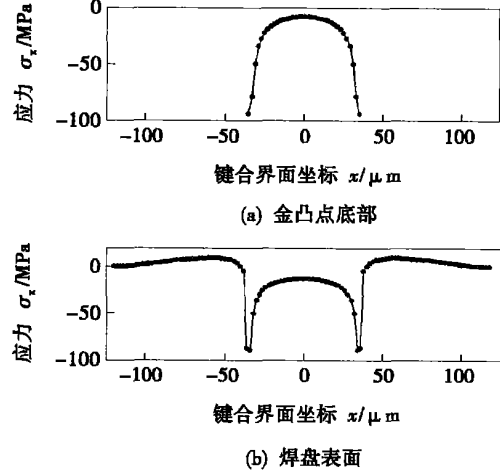


图 5 界面的切应力分布

Fig. 5 Distribution of  $\sigma_x$  on bonding interface

洁净的金属表面具有较高的表面能,并能在接触时形成强的金属间键合;但直接接触的被键合表面往往覆盖有污染层和氧化层,因此键合界面的氧化层和污染层去除是决定键合形貌的主要因素之一。根据金属塑性变形理论,表皮层去除至少需要两个条件:(1)接触表面有足够的应力使表皮层破碎;(2)接触表面间有相对滑动使碎片能够排出接触界面。在键合初期,正应力一方面使界面产生塑性变形,导致界面表皮层破碎;另一方面则限制金凸点与焊盘之间的相对运动。而切应力则一方面使表皮层破碎;另一方面则克服正应力导致的摩擦,使金凸点和焊盘间产生相对运动。上述计算结果表明,接触面边沿较其它位置更有利于去除表皮层,为环状界面的形成提供了基本条件。

根据原子扩散理论,原子扩散是由于物质中存在浓度梯度、温度梯度等化学位梯度所引起的物质运输过程,原子扩散的动力是化学位梯度。应力场梯度是化学位梯度之一,因此应力场梯度是影响键合界面强度和形貌的因素之一。表皮层去除后,金凸点和焊盘之间的正应力梯度场是产生原子扩散的动力。根据上述计算可得到如图 6 所示的正应力场梯度。

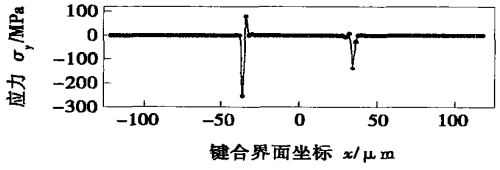


图 6 键合面正应力场梯度

Fig. 6  $\sigma_y$  stress grads field in bonding interface

图 6 表明接触面边沿较其它位置的应力场梯度大, 更有利于原子扩散形成键合强度, 并最终形成环状界面。

2 3 超声振动对界面的影响

上述计算仅仅考虑了键合力, 相当于超声振动在平衡位置的状态。当芯片振动离开平衡位置达到振动最大位移的时候, 凸点的切向位移加载被考虑进来后。试验测量在上述条件下芯片的振动幅值大约为 700 nm。图 7 是在金凸点上表面沿着  $x$  方向正向加入 700 nm 位移载荷后的计算结果。

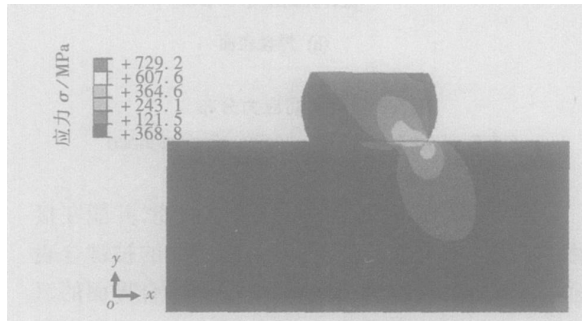


图 7 切向位移加载后的应力分布  
Fig. 7 Stress distribution (with displacement load)

由图可知, 超声振动改变了金凸点和焊盘的应力分布和大小。对于键合界面, 应力的大小和分布如图 8、图 9 所示。

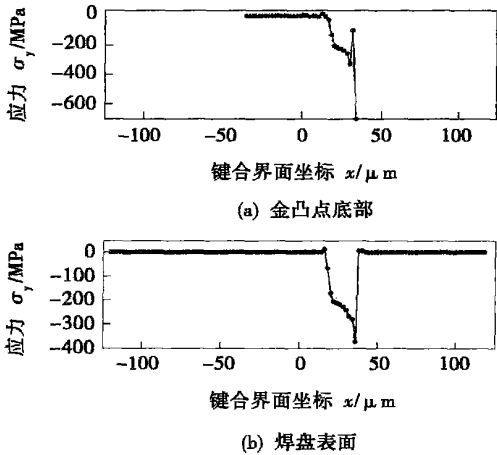


图 8 界面的正应力分布  
Fig. 8 Distribution of  $\sigma_y$  on bonding interface

由图可知: 振动达到在最大位移时, 正应力和切应力在相应的一侧边沿达到最大值。其中正应力最大值增大了约一倍; 切应力增大了约四倍。切应力的迅速增加促进了界面产生切向位移, 将破除的表

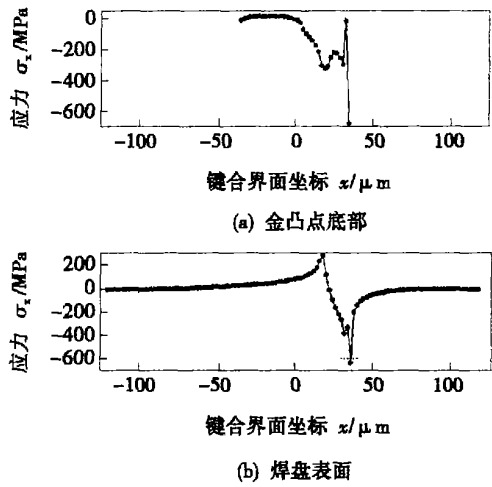


图 9 界面的切应力分布  
Fig. 9 Distribution of  $\sigma_x$  on bonding interface

皮层排出键合界面, 最终形成如图 1c 所示的碎片分布。而界面的正应力场梯度则如图 10 所示。

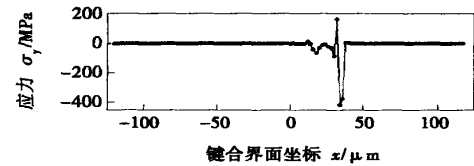


图 10 键合面正应力场梯度  
Fig. 10  $\sigma_y$  stress grads field in bonding interface

上述计算结果表明, 在振动过程中, 在与振动位移对应的键合界面边沿位置, 应力和应力场进一步集中, 促进了环状界面的形成。

3 结 论

- (1) 应力分布表明接触面边沿较其它位置更有利于去除表皮层、更有利于原子扩散形成键合强度, 是形成环状界面的重要原因。
- (2) 振动的加载过程改变了应力的分布, 使得应力分布进一步集中在振动位移决定的边沿位置, 促进了环状界面的形成。

参考文献:

[ 1 ] Yatsuda H. Eimura T. Flip-chip assembly technique for SAW devices. [ A ] . Proceedings of the 1995 ISHM International Symposium on

参考文献:

[ 1 ] Chen Q Z, Chu W Y, Wang Y B. TEM observations of nucleation and bluntness of nanocracks in thin crystals of 310 stainless steel[ J ]. Acta Metallurgica Materialia. 1995, 43(12): 4371—4376.

[ 2 ] 邱新杰, 李午申, 严春妍, 等. 焊接裂纹金属磁记忆信号的特征提取与应用[ J ]. 焊接学报, 2006 27(2): 19—22.

[ 3 ] Li W S, Di X J, Bai S W, *et al.* Feature analysis of metal magnetic memory signals for welding cracking-based on wavelet energy spectrum

[ J ]. Insight, 2006, 48(7): 426—429.

[ 4 ] 王 彬. 熵与信息[ M ]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.

[ 5 ] 钟文定. 铁磁学[ M ]. 北京: 科学出版社, 1998.

[ 6 ] 孙华丽, 谢剑英, 薛耀峰. 基于支持向量机的机械传动方案决策模型[ J ]. 上海交通大学学报, 2005, 39(6): 975—978.

**作者简介:** 邱新杰, 男, 1973 年出生, 博士研究生。主要从事焊接裂纹金属磁记忆的定量化研究。已发表论文 7 篇。

**Email:** welding \_ dxj @yahoo. com. cn

[ 上接第 68 页]

Microelectronics[ C ], 1995.

[ 2 ] Taizo T, Tomohiro I, Ikuro M. Thermosonic flip-chip bonding for SAW filter[ J ], Microelectronics Reliability. 2004, 44(5): 149—154.

[ 3 ] Luk C F, Chan Y C, Hung K C Development of gold to gold interconnection flip chip bonding for chip on suspension assemblies[ J ]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(6): 381—389.

[ 4 ] McLaren T S, Kang S Y, Zhang W, *et al.* Thermosonic bonding of an optical transceiver based on an 8 \* 8 vertical cavity surface emitting laser array[ J ]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging 1997, 20(2), 152 ~ 160.

[ 5 ] 王福亮, 韩 雷, 钟 掘. 超声功率对粗铝丝超声引线键合强度的影响[ J ]. 中国机械工程 2005, 16 (10): 919—923.

[ 6 ] Schwizer J, Mayer M, Bolliger D, *et al.* Thermosonic ball bonding

friction model based on integrated microsensor measurements[ A ]. In proc: 24th IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium[ C ]. Austin, TX, USA, 1999, 108—114.

[ 7 ] Liu D S, Chao Y C, Wang C H. Study of wire bonding looping formation in the electronic packaging process using the three—dimensional finite element method[ J ]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40(9), 263 ~ 286.

[ 8 ] Kang S Y, Williams P M, McLaren T S, *et al.* Studies of thermosonic bonding for flip—chip assembly[ J ]. Materials Chemistry and Physics, 1995 42(7): 31—37.

**作者简介:** 王福亮, 男, 1979 年出生, 博士研究生。主要研究方向: 微电子封装工艺与装备。

**Email:** wangfuliang @mail. csu. edu. cn

welded joint of a liquefied petroleum gas spherical tank made of 16MnR steel. The hydrogen diffusion without the effect of welding residual stress was also taken into account and compared. This method provides a reference for mastering the criterion of hydrogen induced cracking of welded joint. The result shows that under the welding residual stress field, the hydrogen diffuses and accumulates toward the higher stress zone, attaining stability through a period of time. There is a low hydrogen concentration value around the heat affected zone, where the residual stress gradient and concentration gradient are formed, which can cause the hydrogen long-range diffusion to the high stress zone.

**Key words:** hydrogen diffusion; welding residual stress; numerical simulation

#### **Evaporation loss of Mg element in 5A06 aluminium alloy electron beam welding**

WANG Xing-jun, HUANG Wen-rong, WEI Qi-long, SHEN Xian-Feng (Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China). p61—64

**Abstract:** Distribution of Mg in melt pool and its effect on mechanical properties of weld are investigated in 5A06 aluminium alloy electron beam welding, and the influence of welding parameters on evaporation loss of Mg element is analyzed. The following results are obtained: with the fusion penetration increasing, the content of Mg grows, which means that evaporation loss of Mg reduces, and micro-hardness increases; with increasing of accelerating voltage and beam current, the fusion penetration increases, and the evaporation loss rate of Mg decreases; and with increasing of welding speed, the evaporation loss rate of Mg reduces while fusion penetration diminishes. In order to minimize evaporation loss of Mg, the considerable increasing of accelerating voltage, beam current and welding speed are preferred.

**Key words:** 5A06 aluminium alloy; electron beam welding; evaporation loss of Mg

#### **Formation of circle band interface of thermosonic flip chip bonding**

WANG Fu-liang, HAN Lei, ZHONG Jue (School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China). p65—68, 72

**Abstract:** The thermosonic flip chip bonding has been realized under the pressure constrain pattern of flip chip. Fragment of pad, circle band and ridge have been observed on the bonding interface. The ridge indicates high bonding strength, and fragment of pad indicates remove of interface surface, and the circle band indicates distribution of bonding strength. With the FEA tool, the value and distribution of stress were calculated under different bonding phases, and the formation theory of the circle band interface has been revealed on the term of stress. The edge of bonding interface has better stress conditions for surface remove and atom diffusion, which the primary factor for the formation of circle band interface. And the thermo-sonic vibration changed the distribution of stress and stress

field, which caused the edge of bonding interface in better stress conditions, and promoted the formation of circle band interface.

**Key words:** thermosonic flip chip bonding; pressure constrain pattern; circle band interface; finite element method

#### **Two-dimension spectrum entropy feature for metal magnetic memory signal**

DI Xin-jie<sup>1</sup>, LI Wu-shen<sup>1</sup>, BAI Shi-wu<sup>1,2</sup>, LIU Fang-ming<sup>1,2</sup>, XUE Zhen-kui<sup>2</sup> (1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Research Institute of Pipeline, China Petroleum Corporation, Langfang 065000, Hebei, China). p69—72

**Abstract:** Metal magnetic memory (MMM) is one of the most potential non-destructive testing methods which can diagnose welding crack in early stage. The distribution regularities of metal magnetic memory two-dimension spectrum entropy were investigated in tension test condition with the X70 pipeline steel. Using the feature of amplitude spectrum entropy and braycentre frequency, the support vector machine method can distinguish the different state of stress concentration. With the detection instance, the diagnostic method of stress concentration state in weld was gained. Research shows that the stress concentration state within the ferromagnetic material can be identified by the two-dimension spectrum entropy distribution of MMM signal. It is a base for utilizing MMM to detect the micro-cracks.

**Key words:** welding crack; metal magnetic memory; two-dimension spectrum entropy

#### **Investigation of welding seam identifying based on force sensing in remote teaching**

LIU Li-jun<sup>1,2</sup>, GAO Hong-ming<sup>2</sup>, ZHANG Guang-jun<sup>2</sup>, WU Lin<sup>2</sup> (1. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China). p73—76

**Abstract:** Because the identifying precision of welding seam based on vision sensing is too low to meet the requirements of remote welding teaching, the welding seam identifying (WSI) system is designed based on force sensing, which mainly includes the collecting system of WSI signal, software system, the force model and WSI arithmetic. The teaching point is accurately calculated out by the sharp changes of six-dimensional force based on the WSI arithmetic. The experimental results show that the WSI speed is increased, and the precision and efficiency of the remote teaching is improved by WSI arithmetic.

**Key words:** remote welding; remote teaching; welding seam identifying; force sensing

#### **Effects of different shielding gases on slag detachability of type 347L flux-cored wire for stainless steels containing Nb**

ZHAO Yan-chao, WEI Qi, LI Zhuo-xin, REN Chun-ling (The College of Material Science and Engineering, Beijing University of