

# 铝/镀锌钢复合热源熔—钎接头的局部“未钎合”缺陷分析

雷 振， 秦国梁， 王旭友， 林尚扬  
(机械科学研究总院 哈尔滨焊接研究所， 哈尔滨 150080)



雷 振

摘 要: 对铝/镀锌钢复合热源熔—钎连接过程中出现的局部“未钎合”缺陷的原因进行了研究,并制定了相应的抑制和消除缺陷的措施。结果表明,焊接热输入不足是导致铝母材熔合线根部位置产生局部“未钎合”缺陷的根本原因,而铝母材熔合线根部位置的熔池金属和钢板达不到 Al-Si 钎料与钢所需要的钎焊温度是产生局部“未钎合”缺陷的直接原因。局部“未钎合”缺陷的产生还与熔池的流动及母材金属的散热等因素有间接的关系。铝/钢熔—钎焊缝熔合线根部局部“未钎合”缺陷可以通过适当地增大焊接热输入及改变激光与电弧的空间位置以提高激光对钢母材的加热效果来抑制和消除。  
关键词: 激光; 脉冲 MIG 电弧; 复合热源; 熔—钎连接; 局部“未钎合”  
中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)10-037-05

## 0 序 言

随着铝及铝合金在加工制造中的广泛应用,铝与钢的连接成了设计制造者所关心的问题。焊接作为一种最常用的连接手段,在异种金属的连接中得到了较为广泛的应用。大光斑激光—电弧复合热源熔—钎连接方法可以实现铝与镀锌钢的优质、高效连接<sup>[1]</sup>。但在铝与镀锌钢的大光斑激光—电弧复合热源熔—钎连接中,如果焊接工艺参数控制不当,在铝/镀锌钢熔—钎接头中的铝母材熔合线根部区域易出现局部“未钎合”缺陷。局部“未钎合”缺陷的存在会严重地影响接头的抗拉强度和疲劳强度。因此,研究铝母材熔合线根部局部“未钎合”缺陷的产生原因,并制定相应的抑制和消除措施,对提高铝/镀锌钢熔—钎接头的质量具有重要意义。

利用 X-Y 函数测温仪对熔池不同区域的热影响区温度进行了测量,根据测量结果并结合铝/镀锌钢大光斑激光—电弧复合热源熔—钎连接方法的特点,对产生局部“未钎合”缺陷的原因进行了分析。最后,通过铝/镀锌钢大光斑激光—电弧复合热源熔—钎连接工艺试验制定了抑制和消除局部“未钎合”缺陷的措施。

## 1 试 验

### 1.1 试验材料

试验所用镀锌钢母材为 SECC 冷轧热镀锌钢,镀锌钢试板规格为 200 mm×30 mm×1.2 mm; 铝合金母材为 5A02 铝合金,铝合金试板规格为 200 mm×30 mm×1.5 mm。试验中采用直径为  $\phi 1.2$  mm 的 AISi5 焊丝。

### 1.2 试验设备

试验所用激光器为额定功率 2 kW 的连续波 Nd:YAG 激光器,试验中采用焦距为 200 mm 的激光输出透镜;所用焊机为奥地利 Fronius 公司生产的 TPS5000 型数字化 MIG 焊机,焊接过程采用脉冲 MIG 焊,过渡形式为 1 滴/脉冲。

### 1.3 试验方法

试验采用大光斑 Nd:YAG 激光—脉冲 MIG 复合热源熔—钎连接方法,接头形式为铝板在上钢板在下的搭接接头。利用函数记录仪对钎焊接头热影响区和铝母材熔合线热影响区温度进行测量。测量前,先通过试验确定镀锌钢表面熔—钎接头中铝母材熔合线的位置,如图 1 中的位置 A 所示,该位置为焊后接头中产生局部“未钎合”缺陷的位置;图 1 中的位置 B 为镀锌钢表面的熔池中心,在熔—钎连接过程中该位置能达到相对较高的钎焊温度。测温试验所用的主要焊接工艺参数见表 1。铝母材熔合线

位置标定后,对待测镀锌钢在接头搭接界面位置进行划线,然后从镀锌钢板背面钻一盲孔,盲孔的深度为 1.0 mm(镀锌钢板厚度为 1.2 mm),再用触能点焊的方法将镍铝热电偶固定于盲孔的底部,如图 2 所示,最后根据镀锌钢表面的划线痕迹组合成搭接接头进行温度测量试验(不同区域测两组数据,最后取其平均值)。

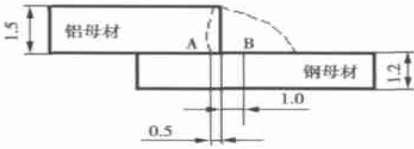


图 1 温度测量位置示意图(mm)

Fig. 1 Measurement position of temperature

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters of hybrid welding

焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	激光功率 $P/W$	焊接电流 $I/A$	离焦量 $\Delta Z/mm$	光丝间距 $D/mm$
1.0	800	51	+20	4

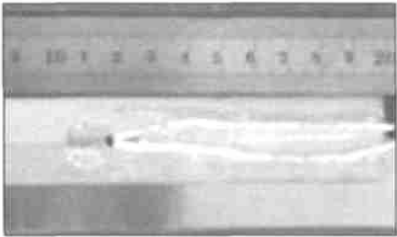


图 2 热电偶的固定

Fig. 2 Fixing of thermocouple

根据温度测量结果及分析,调整工艺参数进行铝/镀锌钢大光斑 Nd:YAG 激光—脉冲 MIG 复合热源熔—钎试验。焊后沿垂直于熔—钎焊缝的方向将试件切开,制成金相试样,对接头的横截面进行观察,最后制定抑制和消除局部“未钎合”缺陷的有效措施。

2 试验结果及讨论

2.1 温度测量结果及分析

测量过程中函数记录仪显示的最高值分别为 14.04, 16.27, 33.00, 34.14 mV, 查热电偶分度表<sup>[4]</sup>,确定测量温度分别为 344, 397, 793, 821 ℃。铝母材熔合

线根部位置热影响区的平均测量温度为 370.5 ℃,钎焊接头区域热影响区的平均测量温度为 804 ℃。

通过对温度测量结果的分析发现,在铝/镀锌钢大光斑 Nd:YAG 激光—脉冲 MIG 复合热源熔—钎连接中,熔池热影响区的温度是不均匀的,而且不同热影响区域的温度具有较大的差异,其中,铝母材熔合线根部区域的熔池热影响区温度相对较低,由此可以确定该位置的熔池金属及镀锌钢表面温度也较低。如果该区域的熔池金属温度及镀锌钢表面温度低于 Al-Si 钎料与钢板的钎焊温度,则无法实现铝与钢的钎焊连接,这样在其它一系列因素的共同作用下,最终便可能会产生局部“未钎合”缺陷。

2.2 局部“未钎合”缺陷的产生原因

造成铝母材熔合线根部位置产生局部“未钎合”缺陷的因素很多,熔合线根部的熔池温度和钢板表面温度过低(达不到 Al-Si 钎料与钢板的钎焊温度)是造成局部“未钎合”缺陷的直接原因。但是,局部“未钎合”缺陷的产生还与母材的散热、熔池的流动、熔池的温度梯度以及表面张力等因素有一定的关系。

图 3 为铝/镀锌钢熔—钎接头熔池内部金属的流动及散热示意图。焊接过程中,大光斑激光及电弧的热作用使得熔池上表面的金属温度较高,而熔池底部及两侧金属的温度相对较低,并且电弧能量相对较小,电弧对熔池的搅拌作用有限,从而导致了熔池金属温度的分布不均。熔池温度分布不均最终会导致熔池的表面张力不均匀,于是在熔池内部便存在一个表面张力梯度,其中,熔池上表面的表面张力较小,而铝母材熔合线位置及钢母材表面的熔池金属表面张力相对较大,在这一表面张力梯度的作用下,熔池金属内部发生流动,产生表面张力流,即所谓的“马朗戈尼流”(Marangoni flow)<sup>[3]</sup>(图 3 中的  $f_M$ ),在马朗戈尼流的作用下,熔池中上表面的高温金属往低温区域流动,金属流动的结果还会在熔池底部产生一个微弱的热浮力流  $f_B$ ,马朗戈尼流和热浮力流使得熔池内流体的流动和换热作用加强<sup>[4]</sup>,有助于促进熔池金属的温度均匀化。但是铝母材熔合线根部区域基本上处于熔池的“死角”,上表面的高温金属很难到达此处,即使能够流动到该位置,由于在流动过程中的热传导作用,当其到达熔合线根部时,损失了大量的热量,因此铝母材熔合线根部区域总是熔池金属温度最低的区域。

铝母材和钢母材的散热作用(图 3 中箭头方向)也会影响熔池金属的温度分布。铝母材熔合线根部区域位于铝母材与钢母材的交叉位置,此处铝母材和钢母材对熔池的散热作用很强,使得该区域的熔

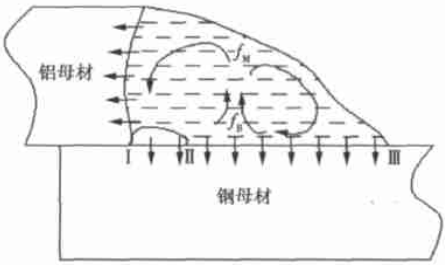


图 3 熔池内部金属的流动及散热示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fluid flow and heat dissipation in molten pool

池金属冷却较快。

通过以上分析发现, 熔池金属的温度分布不均及母材的散热作用致使铝母材熔合线根部的熔池金属温度较低, 并且凝固较快。熔合线根部的熔池温度和钢板表面温度过低(达不到 Al-Si 钎料与钢板的钎焊温度), 是造成局部“未钎合”缺陷的直接原因, 但造成局部“未钎合”缺陷的根本原因是焊接热输入能量不足。

2.3 局部“未钎合”缺陷的形成过程

图 4 为实际熔—钎连接过程中在铝母材熔合线根部出现的局部“未钎合”形貌。从图 4 中可以看出, 熔合线根部出现的局部“未钎合”缺陷内壁圆滑, 并且靠近铝母材一侧的“未钎合”缺陷内壁的焊缝金属的铺展角为钝角, 说明熔池金属未凝固前该位置的铝熔池金属未能在钢母材表面润湿; 而缺陷内壁的另一侧焊缝金属的铺展角为较小的锐角, 说明熔池金属凝固前该位置的熔池金属在钢表面有一定的铺展。

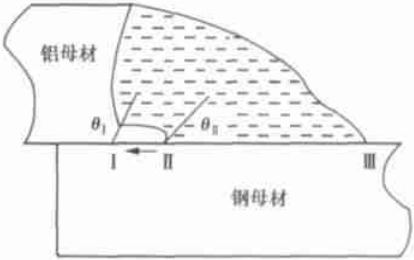


图 4 局部“未钎合”缺陷形貌

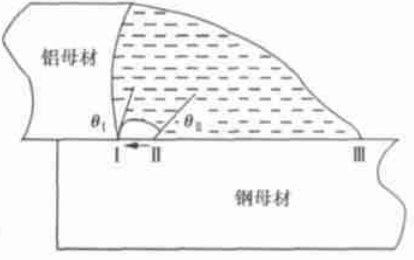
Fig. 4 Photo of partial incomplete brazing defect

图 5 为熔合线根部局部“未钎合”缺陷形成过程示意图。铝/镀锌钢大光斑 Nd: YAG 激光—脉冲 MIG 复合热源熔—钎焊接过程中, 在形成熔池的初期, 熔合线根部区域的熔池温度相对较低, 并且该区

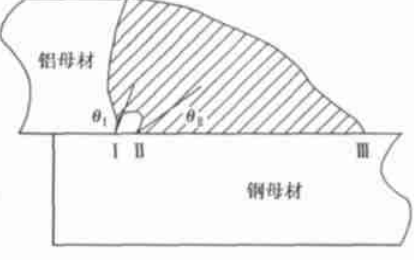
域的钢板较难被激光充分加热, 如果此时的焊接热输入不足(焊接工艺参数较小), 那么该区域的熔池金属将不能在钢表面润湿并铺展, 如图 5a 中的 I - II 之间的区域, 此时润湿角  $\theta_I$  较大。而对于 II - III 区域而言, 不但熔池金属温度较高, 熔池对钢板的传热作用充分, 而且焊接过程中激光会对该区域的钢板进行预热, 熔池的传热和激光的加热作用使得该区域的钢板温度迅速升高, 铝熔池金属在该区域的钢板表面迅速润湿并铺展, 此时润湿角  $\theta_{II}$  较小。随着时间的推移, II - III 区域的熔池金属继续对该区域的钢板进行传热, 传热的结果使得 I - II 区域靠近 II 位置的钢板表面温度升高, 当该位置的钢板温度达到钎焊温度后, 熔池金属将会在其钢板表面继续铺展, 即 II 位置的液态熔池金属将沿着箭头方向向 I 位置移动, 如图 5b 所示。由于 I 位置的熔池金属温度相对较低, 并且该位置铝母材和钢母材的散热作用较强, 因此 I 位置熔池金属的凝固速度非常快, 这样焊后该位置的熔池金属迅速冷却并凝固。由于对



(a) “未钎合”缺陷的初期形貌



(b) “未钎合”缺陷的中期形貌



(c) “未钎合”缺陷的最终形貌

图 5 局部“未钎合”缺陷形成过程示意图  
Fig 5 Schematic diagram of formation of partial incomplete brazing defect

流、热传导等一系列散热作用的存在, 熔池金属的温度逐渐降低, 熔池金属对钢母材的传热作用越来越弱, II 位置熔池金属的表面张力增大, 熔池金属在钢表面的铺展速度变慢, 如果焊接热输入不足以使得 II 位置的熔池金属铺展到 I 位置, 那么熔池金属完全凝固后便产生了熔合线根部局部“未钎合”缺陷, 如图 5c 所示。

2.4 抑制局部“未钎合”缺陷的措施

局部“未钎合”缺陷可以通过采取有效措施加以抑制和消除, 抑制和消除局部“未钎合”缺陷的根部出发点是适当增加焊接热输入, 提高熔合线区域的熔池温度和钢板温度。适当地提高焊接热输入及调整激光与电弧间的相对位置可以较好地抑制和消除局部“未钎合”缺陷。

图 6 为在焊接速度为 1 m/min 及其它条件保持不变时, 不同激光功率和焊接电流下的熔—钎焊缝横截面。从图 6a 可以看出, 在激光功率  $P=1\ 000\ \text{W}$ , 焊接电流  $I=49\ \text{A}$  时, 焊缝出现了较为严重的局部“未钎合”缺陷。在其它焊接参数相同的条件下, 改变送丝速度, 将焊接电流增大到 58 A 时, 焊缝中的局部“未钎合”缺陷消失(图 6b); 但是在焊接平均电流  $I=58\ \text{A}$  时, 将激光功率降低到 800 W, 焊缝熔合线根部区域又产生了局部“未钎合”缺陷(图 6c)。这种现象并非是偶然的, 在相同的焊接条件下具有良好的重复性。由此可见, 适当地提高电弧功率和激光功率均可以抑制和消除局部“未钎合”缺陷。

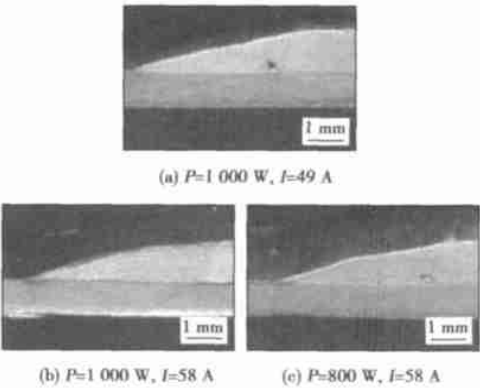


图 6 不同工艺参数下的熔—钎焊缝横截面  
Fig. 6 Cross section of fusion-brazed joint at different parameters

图 7 为其它焊接参数相同的条件下得到的不同光丝间距下的焊缝横截面。所谓的光丝间距指的是焊丝端头到激光光斑中心的距离, 在复合热源焊接中表征了激光与电弧的距离。从图 7 可以看出, 在

光丝间距较小( $D=2\ \text{mm}$  和  $D=3\ \text{mm}$ )时, 焊缝铝母材熔合线根部位置出现了局部“未钎合”缺陷, 随着光丝间距的增大( $D=4, 5, 6\ \text{mm}$ ), 熔合线根部局部“未钎合”缺陷消失, 但光丝间距增大到一定程度( $D=7\ \text{mm}$ )后, 焊缝熔合线根部位置又出现了局部“未钎合”缺陷。并且从产生的局部“未钎合”缺陷的形貌来判断,  $D=2\ \text{mm}$  时焊缝的局部“未钎合”缺陷要比  $D=3\ \text{mm}$  时的局部“未钎合”缺陷严重, 前者焊缝金属在钢板表面完全没有润湿, 而后的焊缝金属在钢板表面已经发生润湿, 但熔池金属凝固时缺陷没有得到彻底消除。由此可见, 在焊接热输入一定的条件下, 增大光丝间距可以抑制和消除局部“未钎合”缺陷, 但光丝间距过大, 焊缝又将出现局部“未钎合”缺陷, 这主要是由光丝间距变化改变了激光对钢母材的预热效果造成的, 也就是说合适的光丝间距在一定程度上可以抑制和消除局部“未钎合”缺陷。

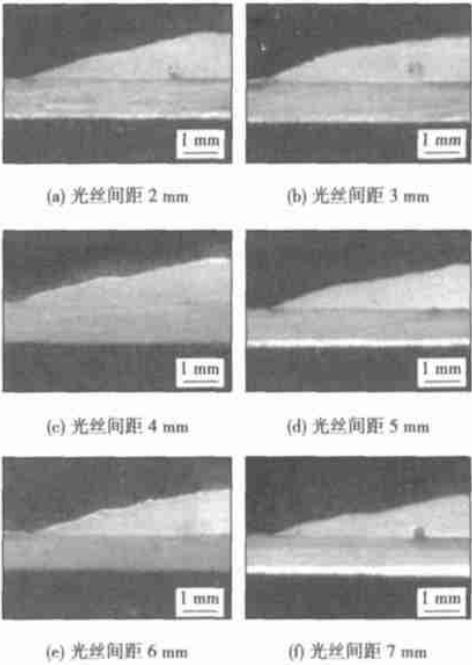


图 7 不同光丝间距下的熔—钎焊缝横截面  
Fig. 7 Cross section of fusion-brazed joint at different laser-arc distance

3 结 论

(1) 在铝/镀锌钢大光斑激光—电弧复合热源熔—钎连接中, 不同区域的熔池金属温度具有较大的差异, 而铝母材熔合线根部区域的温度相对较低。母材对熔池金属的散热作用和熔池内金属对流不充分是造成该位置温度相对较低的重要原因。

(2) 通过基于共享力觉遥示教焊缝辨识策略, 完成了半盒形试件遥示教, 示教再现平均偏差小于  $\pm 0.5\text{ mm}$ , 满足遥控焊接工艺要求。

参考文献:

[1] 李华忠, 杨维萍, 柳长安. 基于虚拟现实的空间机器人共享控制系统及其仿真[J]. 宇航学报, 2000, 21(3): 100—105.  
[2] 李华忠, 洪炳熔, 柳长安. 空间站大臂机械手共享控制系统及其仿真[J]. 高技术通讯, 1999, 9(2): 15—21.  
[3] 吕伟新. 遥控弧焊运动控制新方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工

业大学, 1997.

[4] Choi M H, Lee W W. Quantitative evaluation of an intuitive teaching method for industrial robot using a force/ moment direction sensor[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2003, 1(3): 395—400.  
[5] Murakami, Tsudoi. Application of off-line teaching system for arcwelding robots[J]. Technology Review, 1990, 28(9): 58—61.

作者简介: 刘立君, 男 1968 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要从事焊接自动控制方面的科研和教学工作。发表论文 40 余篇。

Email: 888liulijun@163.com

[ 上接第 40 页]

(2) 铝母材熔合线根部区域的熔池温度和钢板表面温度达不到 Al-Si 钎料所需要的钎焊温度是造成局部“未钎合”缺陷产生的直接原因, 而局部“未钎合”缺陷产生的根本原因是焊接热输入不足。

(3) 在铝/镀锌钢大光斑激光—电弧复合热源熔—钎连接中, 接头中铝母材熔合线根部位置产生的局部“未钎合”缺陷可以通过适当地提高焊接热输入及调整激光与电弧间的相对位置以提高激光对钢母材的加热效果来抑制和消除。

参考文献:

[1] 雷 振, 秦国梁, 林尚扬, 等. 铝/镀锌钢异种金属 Nd:YAG 激

光-MIG 复合热源熔—钎焊接工艺[J]. 焊接, 2006(6): 35—37.

[2] 吴 旗. 传感器与自动检测技术[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
[3] 陈学俊, 陈立勋, 周芳德. 气液两相流与传热基础[M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
[4] 杨立新, 彭晓峰. 固体表面激光加工熔池特性的数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(2—3): 215—221.

作者简介: 雷 振, 男, 1981 年出生, 硕士。主要从事激光加工、激光—电弧复合热源焊接及异种金属连接等方面的研究。发表论文 8 篇。

Email: laser\_lei@126.com

on 45 steel substrate with the home-made special gas-filled-closed electric-spark deposition device and electric-spark deposition machine modeled DZ—1400, and the industry pure titanium (TA2) was used for electrode and the industry pure nitrogen for shielding and reactive gas. The phase of coatings was analyzed using X-ray diffractometer. The microstructure of coatings was investigated with scanning electron microscope. The microhardness of coatings was tested by hardness-testing device. The wear-resisting property of coatings was compared with that of W18Cr4V rapid steel treated by quenching using the home-made abrasion machine. The results indicated that excellent bonding between the coating and the carbon steel substrate is ensured by the strong metallurgical interface. The coatings was mainly made up of Ti coming from electrode, TiN ceramic particle synthesized in-situ and Fe coming from substrate. The average microhardness of coating is 1 323 HV0.1 and its wear-resisting property is better than that of W18Cr4V rapid steel treated by quenching.

**Key words:** electric-spark deposition; reactive synthesis; TiN; composite coating

**Analysis for local incomplete brazing in fusion-brazed joints between aluminium and zinc coated steel by hybrid welding**

LEI Zhen, QIN Guoliang, WANG Xuyou, LIN Shangyang (Harbin Welding Institute, China Academy of Machinery Science and Technology, Harbin 150080, China), p37—40, 44

**Abstract:** The cause of the local incomplete brazing at the root of the bond line of the fusion-brazed joint between aluminium and steel was studied, and the relevant measures were developed to restrain or avoid the defect. Analysis results showed that insufficient heat input is the essential cause to form the local incomplete brazing defect, and the temperature of the molten pool and the steel sheet at the root of the bond line can not reach the critical brazing temperature to achieve a brazing joint using Al-Si brazing filler metal which is the direct reason of local incomplete brazing. Moreover the local incomplete brazing is indirectly influenced by the fluid flow of the molten pool and the heat dissipation of base metals. The local incomplete brazing defect can be restrained or avoided by increasing the heat input or adjusting the location of the laser spot and arc.

**Key words:** laser; plus metal inert-gas arc; hybrid welding; fusion-brazing joining; local incomplete brazing

**Welding identifying strategy based on sharing control in force tele-teaching**

LIU Lijun<sup>1,2</sup>, DAI Hongbin<sup>2</sup>, GAO Hongming<sup>3</sup>, WU Lin<sup>3</sup> (1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, China; 2. School of Material Science & Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China), p41—44

**Abstract:** The tele-teaching was achieved by the shared technology in some cases, such as the probe locked by complex curve welding seam, and turning point. A welding seam identifying plat was founded based on the shared control in tele-teaching. The shared control mainly makes the operator in cooperate with robot to ensure the operating mode to transform smoothly, and the control in-

struction to superimpose in real-time. Sharing control mode was defined in tele-teaching. The control right between operator and remote robot is effectively shared by self-adjusting teaching and manual adjusting control. Tele-teaching experiment of half-box workpiece on shared control was completed. The experimental results show that the position precision of tele-teaching-playback is less than  $\pm 0.5$  mm, which can meet remote welding process.

**Key words:** remote welding; tele-teaching; force; shared technology; welding identifying

**Finite element analysis on soldered joint reliability of QFP device with different solders**

ZHANG Liang, XUE Songbai, LU Fangyan, HAN Zongjie (College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China), p45—48, 52

**Abstract:** Finite element method was used to study the reliability of soldered joints of QFP device with three kinds of solders. The results indicate that the strain concentration areas in soldered joint locates at the heel and toe of the soldered joint and the area between the lead and soldered joint. Comparing with the simulating results about Sn3.8Ag0.7Cu, Sn9Zn and Sn63Pb37, from the diagrams of equivalent stress curves, it is found that the stress value in the soldered joint with Sn63Pb37 solder is the largest, and the value in the joint with Sn3.8Ag0.7Cu solder is the least. Sn3.8Ag0.7Cu is considered one of the most favorable solder as a lead-free standard alloy for packaging of micro-devices. By analyzing stress diagrams of curves of solder of the two kinds of QFP64 and QFP208 devices, the stress of solder of QFP208 is lower than that of QFP64, so its reliability is better.

**Key words:** finite element method; reliability; micro-devices; stress diagrams

**Microstructures and high-temperature properties of TC4 titanium alloy joints welded by electron beam**

YIN Lixiang<sup>1</sup>, XU Hongji<sup>1</sup>, WEI Zhiyu<sup>1</sup>, XIE Ming<sup>1</sup>, WANG Yajun<sup>2</sup> (1. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China), p49—52

**Abstract:** The microstructures and high-temperature properties of TC4 titanium alloy joints welded by the electron beam were investigated by high-temperature tensile test, high-temperature endurant tensile test and metallographic examination. The results showed that the joint of TC4 alloy with good performance at high-temperature can be obtained by means of electron beam welding. The high-temperature tensile strength of welded joint was 630 MPa, almost the same with that of the base metal. The endurant tensile strength of welded joint under 400 °C for 100 h was greater than 600 MPa, not less than that of the base metal. The microstructure of the weld is  $\alpha'$  phase (needle martensite) which is transformed from the primary  $\beta$  matrix. The grain size of the weld which were obtained after high-temperature tensile test and high-temperature endurant tensile test becomes larger than that of weld at room-temperature, but the growth degree of the grain was not dependent on the high-temperature duration.

**Key words:** TC4 titanium alloy; electron beam welding;