

搅拌摩擦焊接头形成过程的二维观察与分析

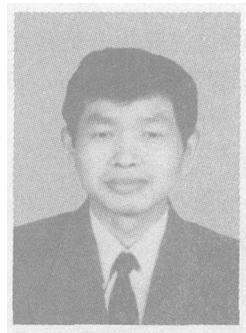
柯黎明, 邢 丽, 黄奉安

(南昌航空工业学院 材料科学与工程学院, 南昌 230034)

摘 要: 用紫铜作标示材料, 进行了 LF6 铝合金的搅拌摩擦焊试验, 焊后在与焊缝表面平行的截面上, 观察了标示材料在焊缝中流动的痕迹。结果表明, 搅拌摩擦焊过程中, 焊缝材料在水平面的流动与焊缝中心是不对称的, 在焊缝的前进边, 材料既向搅拌头前方流动也向搅拌头后方流动; 在焊缝的返回边, 材料只是向搅拌头后方流动, 且有部分材料进入前进边。根据试验观察结果, 建立了焊缝金属在水平面上的二维挤压模型, 并用运动分解、合成的方法研究了探针周围热塑性材料的流动趋势, 模拟了标示材料在焊接过程中的流动状态, 模型能较好地解释试验所观察到的现象。

关键词: 搅拌摩擦焊; 标示材料; 挤压模型

中图分类号: TG 453.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)03-01-04



柯黎明

0 序 言

搅拌摩擦焊是英国焊接研究所于 1991 年发明的一种固相塑化连接工艺, 主要用于低熔点的有色金属焊接。这种工艺通过将具有特殊形状的搅拌头的探针插入工件的待焊部位, 搅拌头的轴肩与工件表面紧密接触, 当搅拌头高速旋转时, 在工件结合界面处产生的摩擦热使探针周围的金属达到热塑性状态, 并在压力的作用下从其前端向后部塑性流动, 从而使待焊件压焊为一个整体。由于焊接过程中, 接头部位不存在金属的熔化过程, 故不会出现在熔焊时的各种缺陷, 焊接质量高, 已受到世界主要工业发达国家的重视^[1]。近年来, 国内外研究者对搅拌摩擦焊接工艺开展了大量的研究工作^[2,3], 并已经有部分技术用于工业生产。但是, 人们对搅拌摩擦焊焊接过程中热塑性材料在搅拌头作用下的流动行为尚无一致的认识。

搅拌摩擦焊过程中, 在搅拌头作用下的热塑性材料流动形态是影响焊缝质量的关键因素, 国外的一些学者对这一问题进行了研究。Midling 观察了焊接速度对不同的铝合金焊缝材料流动的影响, 率先报导了搅拌摩擦焊焊缝界面的形状^[4]; K. Colligan 通过焊前沿着焊缝中心线方向埋放小钢球, 焊后观察钢球在焊缝中分布的方法研究了搅拌摩擦焊焊缝材料的流动行为^[5]; Reynolds and Seidel 用插入标示材料的方法, 焊后观察了标示材料在焊缝中的流动痕迹, 并通过重

构标示材料在焊缝中的三维流动, 研究了焊缝材料的空间流动形态^[6]。文中用紫铜片作为标示材料镶嵌于 LF6 铝合金中, 观察了搅拌摩擦焊过程中标示材料的流动痕迹, 并对焊缝金属的流动行为进行了分析研究。

1 试验材料及试验方法

采用在试板内嵌于标示材料的方法观察焊接接头内材料的塑性流动状态。首先在铝合金待焊部位预先切割 0.38mm 宽的狭缝, 其宽度方向与焊接方向一致。选用 0.4mm 厚的工业纯铜片作为标示材料, 嵌于已开好的狭缝中。由于铜片在焊缝中只占很少部分, 因此它的嵌入对母材塑性流动的影响较小, 可以忽略不计。图 1 为标示材料嵌于试样中的示意图。

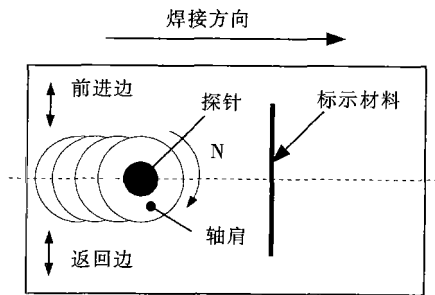


图 1 标示材料镶于试样中的位置

Fig 1 Position of tracer material

收稿日期: 2004-04-12

基金项目: 江西自然科学基金(0450090); 江西省材料科学与工程研究中心基金(KG20021002)

焊接试验在改装的铣床上进行, 搅拌头的探针直

径为 6 mm。焊接过程中, 搅拌头旋转速度不变, 改变焊接速度。焊后在与试板表面平行的截面上制备水平截面金相试样, 用 Leica 图像分析仪观察不同焊接规范参数时标示材料的流动痕迹。

2 试验结果

图 2 为搅拌头旋转速度为 1 180 r/min 焊接速度分别为 95 mm/min、118 mm/min、150 mm/min、

190 mm/min 时, 焊后在距焊缝上表面 1 mm 处所观察到的平行于试板表面的内部截面的宏观金相形貌。图中, 箭头 v 所指为焊接方向, 水平细线为标示材料的原始位置, 垂直细线为焊缝接合面位置, 搅拌头沿接合面向上移动并绕自身轴线顺时针方向旋转。颜色较深的是纯铜在该截面的分布状态。为方便起见, 将焊接方向与搅拌头旋转方向相同的焊缝侧称为前进边, 焊接方向与搅拌头旋转方向相反的焊缝侧称为返回边。

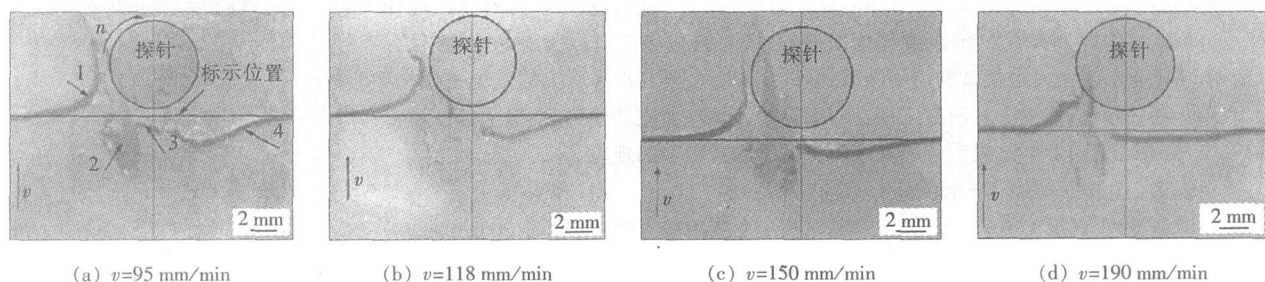


图 2 距焊缝上表面 1 mm 处标示材料流动痕迹
Fig 2 Distribution of tracer material at plane with 1 mm from top surface

由图 2a 可见, 在前进边的母材内部, 探针边缘的标示材料沿焊接方向移动并呈弯曲形态, 基本保持了其原有的厚度, 与铝合金基体界面清晰, 如图中箭头 1 所示。这种分布表明, 焊缝的前进边附近的母材发生了与探针的旋转方向一致的整体塑性流动, 邻近区域的材料没有发生混合, 即没受到搅拌作用。在前进边的焊缝内部, 在标示材料的原始位置的后方存在弥散分布的标示材料, 最远的标示材料与原始位置的距离约等于探针直径, 这种分布表明, 前进边焊缝内部的材料发生了剧烈的混合, 其流动状态与母材的流动状态有显著的不同。在返回边母材内部, 标示材料向搅拌头后方移动且与铝合金基体界面清晰, 这种状况一直延伸到焊缝内部, 如箭头 4 所示。在返回边焊缝内部, 由母材延伸过来的标示材料处于其原始位置的后方并向焊接方向弯曲, 部分标示材料呈断续分布, 如箭头 3 所示。上述观察结果表明, 返回边的母材在搅拌头的旋转作用下发生了整体的向后移动, 进入焊缝内部后焊缝材料又发生沿焊接方向的流动, 在焊缝中心部位, 相邻区域的材料会发生混合。

在图 2b、c、d 中, 尽管焊接速度不同, 标示材料的分布规律与图 2a 类似, 但返回边标示材料向后移动的距离有明显的不同。比较图 2a、b、c、d 四种规范的流动形态可见, 当搅拌头转速一定时, 返回边标示材料向后移动的最大距离随焊接速度的增大而减小, 表明在搅拌摩擦焊过程中, 母材流动状态与焊接规范有

一定关系。

3 分析与讨论

为分析搅拌摩擦焊过程中接头区域热塑性材料的流动状态, 文中在一定的假设条件下, 建立了一个描述焊接接头中平行于工件表面的平面内材料塑性流动的二维挤压-剪切模型。

(1) 焊接过程中探针的变形相对其周围的塑性材料而言可忽略不计, 即认为探针是刚性的。同时, 分析模型中截取的平面层为远离焊缝表面区域, 因此不考虑搅拌头轴肩对材料流动的影响。

(2) 根据 McClure J C^[7] 模拟计算的结果, 文中认为当焊接温度处于稳态时, 探针周围的热塑性区域形状是不变的, 该区域的形状可以由温度场等值线来确定。

图 3 为二维挤压-剪切模型区域划分示意图。设 T_0 为材料的塑性温度, 定义温度大于 T_0 的区域为热塑性区。处于该区域的材料温度高、流动性好, 而在该区域之外的材料流动差, 其在焊接过程中的塑性流动可以忽略不计。由于搅拌头沿焊接方向移动, 模型中热塑性区的边界用 x 轴上沿焊接方向不同心的两个圆所截的面积表示。为了利于描述, 以探针中心为原点建立运动直角坐标系, I、II、III、IV 表示 $x-y$ 平面内坐标的象限。

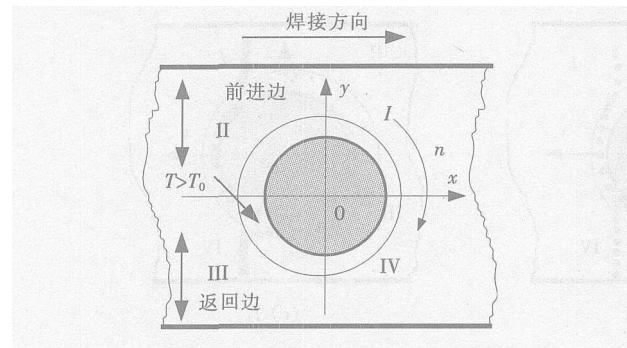


图 3 二维挤压-剪切模型

Fig 3 Schematics of two dimensional extrusion shearing model

焊接过程中, 探针的运动可分解为沿焊接方向的平移和绕探针轴线的旋转运动, 其对周围材料的作用也可以分两个方面考虑。当探针仅沿焊接方向平移时, 其周围的热塑性材料受到的是探针与其前方金属

之间的挤压作用。图 4a是此时热塑性区材料的流动趋势, 图中箭头表示的是材料的流动方向。可见, 当探针向前平移时, 探针的前半圆柱面挤压前方的塑性材料使其由两侧 (前进边和返回边) 流向后方, 即流动方向为由 I 象限→II象限、IV象限→II象限, 在探针运动的正后方, 两股流动的材料相遇并有可能出现回流, 即材料运动方向与探针运动方向一致。当探针仅绕其轴线旋转时, 在探针表面与其周围的塑性材料之间摩擦力的作用下, 周围的塑性材料跟随探针一起旋转。图 4b是此时热塑性区材料的流动趋势, 图中探针顺时针方向旋转。由于只有 I、IV 象限的圆柱面对周围的材料有挤压力, 因此, 在探针的近表面附近, 摩擦力驱动焊缝材料绕探针流动, 即由 I→IV→III→II→I; 而离探针较远的塑性材料流动趋势为: I→IV→III→II, 在 I 象限, 因为受到的摩擦力较小, 导致材料和探针分离。

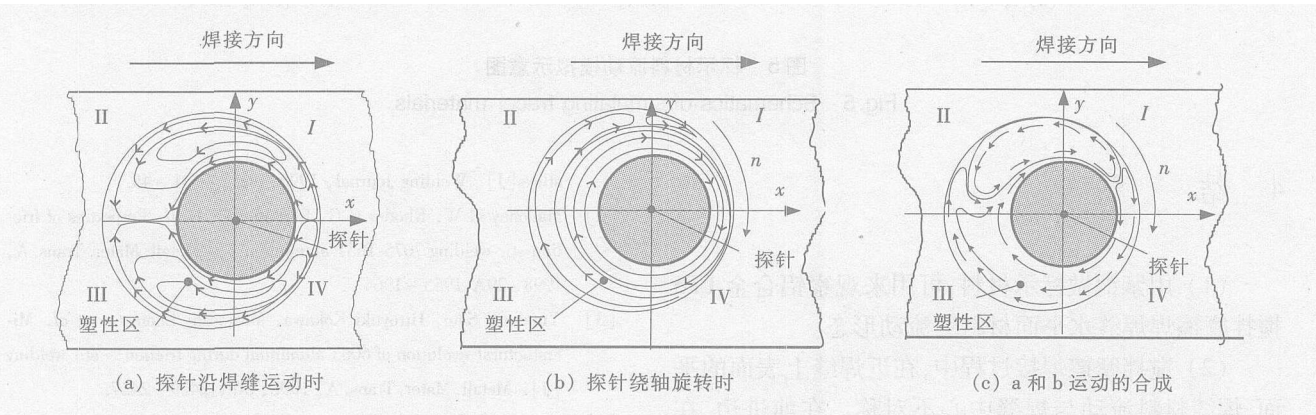


图 4 塑性区材料运动合成

Fig 4 Materials flow trend in plasticized zone

图 4c是将探针的平移和旋转运动对周围塑性材料的作用合成后, 得到的热塑性区材料流动趋势。可见, 在返回边, 材料绕探针以顺时针方向由前往后流, 即由 IV→III→II方向流动, 并有部分材料流入前进边, 在探针正后方, 部分材料的流动方向与搅拌头运动方向一致; 在前进边, 靠近探针的材料绕探针由前方进入返回边, 与探针的旋转运动一致, 而离探针较远的材料则由 I→II方式被挤向后方, 与搅拌头的旋转方向相反, 并在 I 象限与从前进边流过来的材料相汇。

图 5为在二维挤压-剪切流动模型的基础上, 对搅拌摩擦焊过程中塑性区材料的流动状况的模拟计算结果。图中, 待焊材料固定, 探针绕其轴线顺时针高速旋转, 并沿 x 方向运动, 标示材料垂直焊接方向安置, 在图中用小圆球表示。图 5a b c d e f 表示的是不同时刻标示材料在二维平面上的分布。t₁ 时刻为探针远离标示材料, 即标示材料还未进入热塑性区。t₂ 时刻为标示材料已进入热塑性区域, 并开始受

到探针的挤压作用, 发生大的弹塑性变形, 此时, 原直线分布的标示材料变成“弓形”, 同时, 部分标示材料在探针旋转摩擦力的作用下沿探针向后运动。在 t₃ 时刻到 t₄ 时刻的过程中, 随着探针沿 x 方向的运动, 大部分标示材料进入热塑性区, 靠近探针前方表面的标示材料沿 I→IV→III→II→I 方向流动, 而离探针表面较远的塑性材料主要受探针挤压的作用, 分别由 I→II 和 IV→II 方向流动。因此, 在 II 象限内, 两股运动方向相异的材料交汇, 导致材料有较程度的混合, 如图 2a 箭头 2 所指的浅颜色的区域。在返回边的热塑性区边缘, 挤压和旋转作用导致材料的流动方向是一致的, 因而标示材料的分布比较清晰。这与图 2 所观察到的返回边标示材料流动形态一致。此外, 在前进边远离探针的热塑性区金属因为受到内部材料向后流动影响很小, 因而其受探针挤压作用发生的向前的塑性变形得以保留, 使前进边标示材料向前流动。

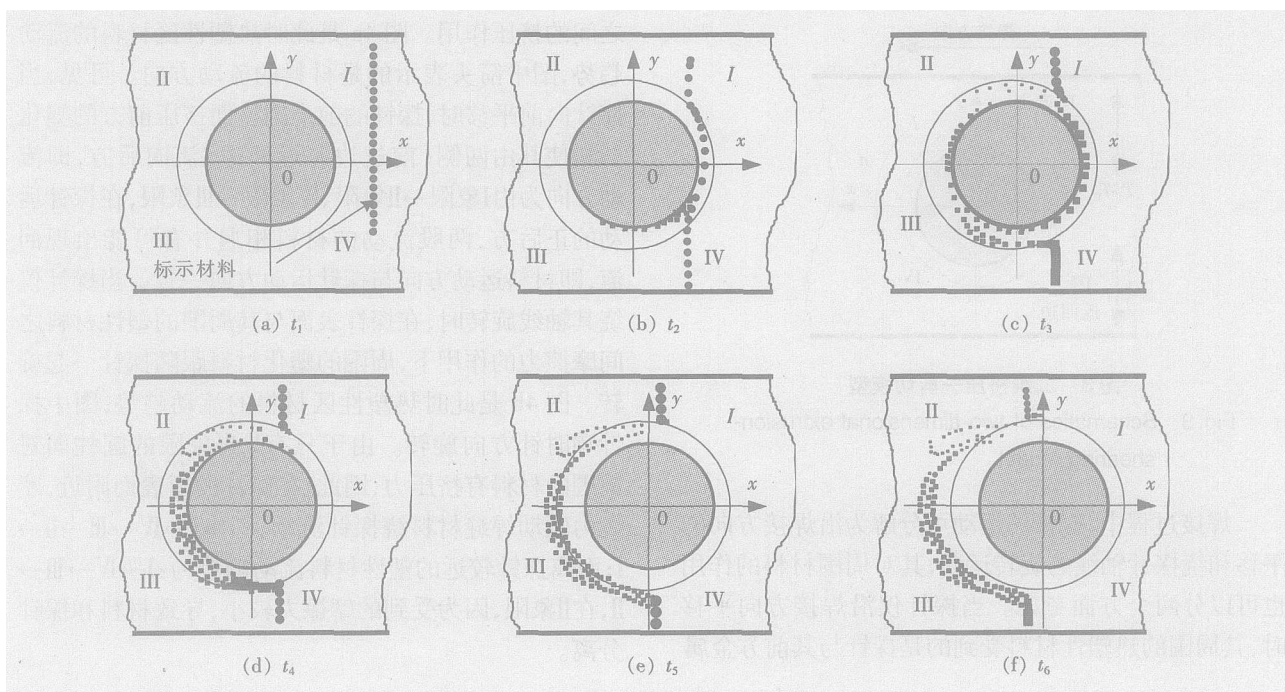


图 5 标示材料流动模拟示意图

Fig 5 Schematics of simulating tracer materials

4 结 论

(1) 用紫铜做标示材料, 可用来观察铝合金 LF6 搅拌摩擦焊焊缝水平面材料的流动形态。

(2) 搅拌摩擦焊接过程中, 在近焊缝上表面的平面, 焊缝材料流动与焊缝中心不对称。在前进边, 在探针边缘的标示材料沿焊接方向流动, 呈弯曲形态; 在靠近焊缝中心的部位, 标示材料沿着焊接相反的方向流动, 并在该区域发生了较大的材料混合。在返回边, 标示材料只是随搅拌头的旋转向搅拌头后方流动, 其中部分材料流入了焊缝的前进边, 且标示材料在焊缝中的分布痕迹较清晰。

(3) 焊接规范参数会对材料的流动形态有影响。

(4) 文中提出的二维挤压模型可以较好地解释试验观察到的现象。

参考文献:

[1] Daves C J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum

alloys[J]. Welding Journal, 1996, 76(3): 41-45.

- [2] Mahoney M W, Rhodes C G, Flinck J G, *et al*. Properties of friction stir welding 7075 T651 aluminum[J]. Metall Mater Trans A, 1998, 29A: 1955-1964.
- [3] Yutaka S, Satō H, Iroyuki Kokawa M, Masatoshi Enomoto, *et al*. Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding[J]. Metall Mater Trans A, 1998, 30A: 2429-2437.
- [4] Milding M. Material flow behaviour and microstructural integrity of friction stir butt weldments[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Al Alloys (ICAA) Atlanta GA, 1994.
- [5] Colligan K. Materials flow behavior during friction stir welding of aluminum[J]. Welding Journal, 1999, 78(7): 229-s-237-s.
- [6] Seidel T U, Reynolds A P. Visualization of the material flow in AA2195 friction stir welds using a marker insert technique[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(11): 2879-2884.
- [7] McClure J C. A thermal model of friction stir welding[C]. Trends in Welding Research Proc. Int Conf 5th, 1999.

作者简介: 柯黎明 男, 1960年 6 月出生, 教授、硕士生导师 江西省高校学科带头人。主要从事焊接冶金、电弧焊工艺及特种材料连接工艺的科研工作。

Email: linlingke@yahoo.com

MAN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Two dimensional flow of plasticized materials in friction stir welded joints

KE Li Ming XING Li HUANG Feng an(School of Material Science and Engineering Nanchang Institute of Aeronautical Technology Nanchang 330034 China). p1-4

Abstract The two dimensional flow behavior of the plasticized materials in friction stir welded joints of aluminum LF6 was investigated with the copper sheet as an insert tracer material. The distribution of the copper on the plane parallel to the surface was observed by optical microscopy. The results indicate that the material flow was asymmetrical on the plane parallel to surface during friction stir welding. On the advancing side, the material in the parent metal flowed along the welding direction and the material in the weld flowed opposite to the welding direction; on the retreating side, the material only flowed opposite to the welding direction and some flowed into advancing side behind the pin. To analyze the material flow pattern on the plane parallel to the surface, a tentative two dimensional extrusion mode was presented based on the assumption that there was a thermal plasticized zone close to the pin. During welding, the shape of the zone was steady if the center of the pin was taken as the original point of the coordinate. The effect of the pin's rotational and linear movement on the plasticized material within the thermal plasticized zone was analyzed separately and the flow pattern could be given according to these movements, which could explain the distribution of the tracer material observed.

Key words friction stir welding tracer material extrusion mode aluminum

Depositing light ceramic coating on high temperature polymer matrix composite substrate

ZHANG Yan-liang^{1,2} GUO Min-Huan¹, LIU Ai-guo¹, ZHAO Min-hai¹ (1. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China; 2. Wendeng Cutting Tool Factory Wendeng 264000 Shandong China). p5-8

Abstract Feasibility of depositing Al_2O_3 coating on carbon fiber reinforced polymer matrix composite (PMC) with Ni-3% Al powder as aluminum or zinc as the bond layer was investigated. Shear strength and thermal cycling resistance of the coatings were tested. The results showed that plasma sprayed Ni-3% Al powder would damage the PMC substrate and was not suitable for bonding ceramic coating on PMC substrate. Arc sprayed aluminum would make some damage to the substrate too. And the shear strength and thermal cycling resistance of the coating were low. Arc sprayed zinc with low voltage and low current would form good bond layer on PMC substrate and the shear strength could be as high as 10.45 MPa. Thermal cycling resistance of Al_2O_3 coating deposited on zinc bond layer was good.

Key words high temperature polymer matrix composite ceramic coating spray bond layer

Impact wear resistant hardfacing austenitic material

LIU Zheng jun LIU Chen CHEN Hong LI Yong kui CHENG Jiang bo SU Yun-hai LIU Duo(Department of Material Sciences and Engineering Shenyang University of Technology Shenyang 110023 China). p9-12

Abstract One kind of hardfacing austenitic electrode for impact wear resistance named EKM50, which is a Fe-Mn-Cr-Mo-V alloy system, was developed. Experiments and analysis show that the wear resistance properties of the deposited metal are higher than that of the D256 electrode. After work hardening, impact experiments, the hardness of EKM50 bead weld layer increases from 32HRC to 45HRC. After 40 min of impact wear experiments, the weight loss of deposited metal is very slight. The mechanism of strain hardening and wear resistance of welding material and the influence of these alloying elements on wear resistance was discussed.

Key words impact wear hardfacing work hardening

Microstructure characteristics of induction brazed TiAl/35CrMo joint with Ag-Cu-Ni-Li filler metal

XU Wei HE Jing-shan FENG Ji-cai(National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China). p13-16

Abstract Microstructure of the induction brazed TiAl/Ag-Cu-Ni-Li/35CrMo joints was analyzed by means of scanning electron microscope, electron probe microanalysis and energy dispersive X-ray spectrometry. The results show that there is a wide reaction zone and narrow reaction zone in the brazed seam along radial orientation of the brazed joints. The two zones are situated outside and inside of the brazing seam respectively. The boundary of two zones is obvious. The interface structure of the joint brazed at 900°C for 5 min can be expressed as TiAl / the diffusion layer between TiAl and brazing filler metal / Ag rich - Cu rich phase / $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Al})_2$ / Ag rich phase / Al_2Ti (M represents Fe, Cu, Ni) / the diffusion layer between brazing filler metal and 35CrMo / 35CrMo. The morphoses of the reaction layer near TiAl side is equiaxial crystal and columnar crystal of $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Al})_2$. There exists orientation relationship between $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Al})_2$ and TiAl.

Key words induction brazing microstructure characteristics Ag-Cu-Ni-Li filler metal TiAl

Investigation of digital controlling in welding power system based on DSP and MCU

LI He qi LI Chun xu GAO Zhong lin WANG Rui LIU Guang(Education Ministry Key Lab of Advanced Processing