第 28 卷 第 5 期
2007 年 5 月
焊 接 学 报
TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION
Vol. 28 No. 5
May 2007

不锈钢板翅结构钎焊残余应力对蠕变的影响

蒋文春， 巩建鸣， 涂善东， 陈 虎
（南京工业大学 机械与动力工程学院，南京 210009）

蒋文春

摘 要：利用有限元法，对微小尺寸的镍基钎焊不锈钢板翅结构进行 600 ℃下的蠕变有限元分析，讨论钎焊残余应力对蠕变变形的影响。结果表明，由于镍基钎料 BNi－2 和不锈钢母材 SS304 力学性能的差异以及钎焊夹具的约束作用，钎焊后在接头处产生了较大的残余应力，对不锈钢板翅结构高温下的蠕变行为产生很大影响，在强度设计中不能忽略。初始应力和蠕变应变的分布规律具有一致性。隔板和翅片具有不同的应力应变分布特征，隔板侧的蠕变开裂的倾向比翅片大。钎角处蠕变应力和应变集中，易萌生蠕变裂纹。研究结果为不锈钢板翅结构钎焊接头的高温强度设计提供参考。

关键词：不锈钢板翅结构；钎焊残余应力；蠕变；有限元
中图分类号：TG111.8 文献标识码：A 文章编号：0253－360X(2007)05－005－04

0 序 言

不锈钢板翅式换热器作为航空航天、化工、原子能等工业使用的高效换热设备，耐压极限已达 14 MPa，最高温度达850 ℃，解决了铝制板翅式换热器耐腐蚀性差、承压低等缺点。作为不锈钢板翅式换热器的核心部件——板翅结构，多层槽道板的封焊引入了大量的钎焊接头。而在高温构件失效引发的事故中，焊接接头先行失效的例子已屡见不鲜[1－5]。服役在高温高压环境下的不锈钢板翅结构尤其是钎焊接头，材料的蠕变行为仍是其最主要的破坏形式[6]。

由于不锈钢板翅结构体积小，翅片厚度薄，钎料尺寸非常小(不超过 50 μm)，使得板翅结构的高温蠕变试样难以加工，因此，高温下的蠕变参数也难以通过常规单轴拉伸的方法获得。因此对板翅结构进行高温蠕变断裂行为的研究还鲜有报道。文中利用有限元软件 ABAQUS，对不锈钢板翅结构进行蠕变分析。并对板翅结构在真空钎焊过程中产生的残余应力进行分析，得到残余应力的分布规律，讨论钎焊残余应力对蠕变变形的影响，为钎焊接头高温强度设计准则提供参考，保证板翅结构在高温环境下可靠运行。

收稿日期：2006－06－19
基金项目：国家自然科学基金资助项目(10472043)；江苏省自然科学基金预研资助项目(BK2004214)；江苏省“六大人才高峰”资助项目(06－D－035)

1 有限元模型

1.1 逆流板翅结构几何模型

典型逆流板翅结构见图 1，四层隔板夹装三层平直翅片形成三层流体通道，翅片与隔板之间预置钎料箔片。隔板厚1.1 mm，翅片高6.5 mm，翅节距 2.0 mm，翅片厚0.3 mm，钎焊间隙0.05 mm。

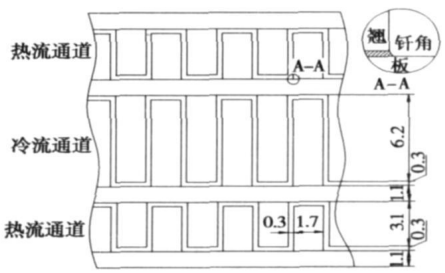

图 1 逆流板翅结构
Fig. 1 Countercurrent plate-fin structure

1.2 有限元分析思路

首先对钎焊残余应力进行有限元计算模拟，然后施加内压，计算残余应力与内压的合应力，最后进行蠕变有限元计算。并与不考虑焊接残余应力、只有内压作用下的蠕变进行比较。

1.3 材料参数

焊接残余应力计算用的 SS304 和 BNi－2 材料参数见文献[7]。蠕变方程采用常用的 Norton 形式，即稳态蠕变速率方程表示为

$$\varepsilon_c = B\sigma^n, \tag{1}$$

式中：ε_c 为稳定阶段的应变速率；σ 为应力水平；B，n 为蠕变材料参数，由于商用钎料厚度非常薄，蠕变参数难以获得。文献[8] 通过模拟实际钎焊工艺参数获取铸态钎料来代替钎缝材料，在600 ℃的温度下通过拉伸试验的方法获得了蠕变参数。BNi－2 钎料 B 和 n 的值分别为 8.75×10^{-40} 和 14.75，SS304 不锈钢 B 和 n 的值分别为 1.56×10^{-25} 和9.04。

1.4 网格划分

根据模型的结构特点，分析可简化为二维平面应变问题，整体一共划分128 947 节点，123 747 单元。局部区域网格划分见图 2。

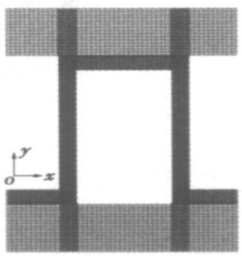

图 2 网格划分

Fig. 2 Mesh plot of model

2 结果与讨论

定义 x 方向的应力为R_x，y 方向的应力为R_y，xy 平面的剪切应力为 R_{xy}。定义 x 方向的蠕变应变为 ε_x，y 方向的蠕变应变为 ε_y，xy 平面内的剪应变为 ε_{xy}。

2.1 仅有内压作用下的蠕变分析

不考虑钎焊残余应力的影响，计算模拟在5 MPa 的内压作用下模型服役10^5 h的蠕变变形情况。计算结果显示，蠕变应变最大值位于钎角以及界面附近，各方向拉、压应变的最大值见表 1。

表 1 最大拉应变与压应变(%)

Table 1 Maximum tension strain and compression strain

蠕变应变		无残余应力	有残余应力
ε_x	最大拉应变	0.053	0.370
	最大压应变	－0.224	－0.781
ε_y	最大拉应变	0.232	0.627
	最大压应变	－0.038	－0.452
ε_{xy}	最大拉应变	0.373	2.840
	最大压应变	－0.373	－2.840

由表 1 可知，最大蠕变应变都很小，根据蠕变变形破断强度控制准则[6]，只有内压作用下，服役10^5 h 发生蠕变断裂的可能性很小。与下文考虑焊接残余应力下的结果相差很大，因此，在进行板翅结构的高温强度设计时，仅考虑内压不能够准确反映板翅结构的蠕变情况。

2.2 考虑钎焊残余应力作用下的蠕变分析

为考虑钎焊残余应力的影响，首先对钎焊残余应力进行计算模拟，再与5 MPa内压下的应力进行叠加，蠕变发生之前的合应力分布云图如图 3 所示。

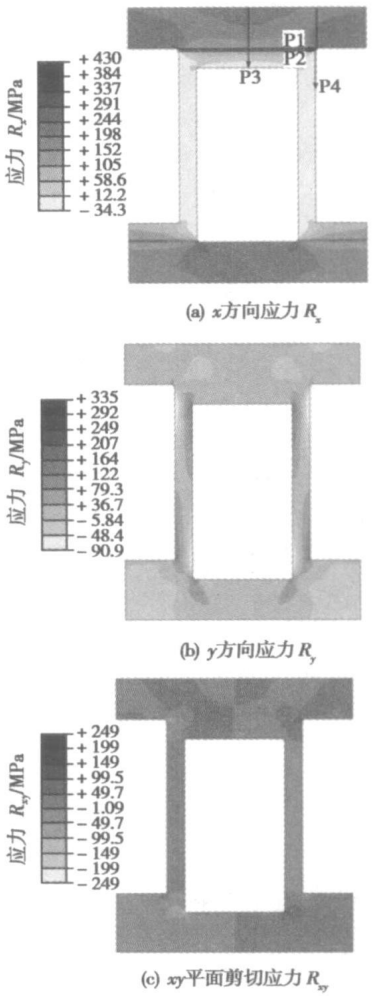

图 3 合应力分布云图

Fig. 3 Contour of total stress

从图 3 可见，在钎角和钎缝处存在较大的应力，峰值位于钎角处，R_x，R_y，R_{xy} 最大值分别为430，335，249 MPa。

在图 3a 上取四条路径 P1，P2，P3，P4 来观察应力和应变分布，P1 与 P2 分别为接头与隔板和翅片的界面，P3 与 P4 则垂直界面分别过接头中部和钎角处。

图 4 给出了路径 P1 和路径 P2 的应力分布，沿着钎焊接头的 R_x 与 R_y 呈对称分布，而 R_{xy} 则呈反对称分布，峰值位于接头两端钎角处，远离钎角区域应力分布相对均匀。在隔板侧路径 P1 处，R_x 由钎角迅速衰减至中部的均值200 MPa 的水平，在中部区域，R_y 和 R_{xy} 的值比较小；在翅片侧路径P2处，R_x 由钎角处的低应力迅速上升至中部的160 MPa 均值水平，R_y 由钎角处迅速降到很低的应力水平；在远离钎角的区域，R_x 的值较大，R_y 和 R_{xy} 的值很小。

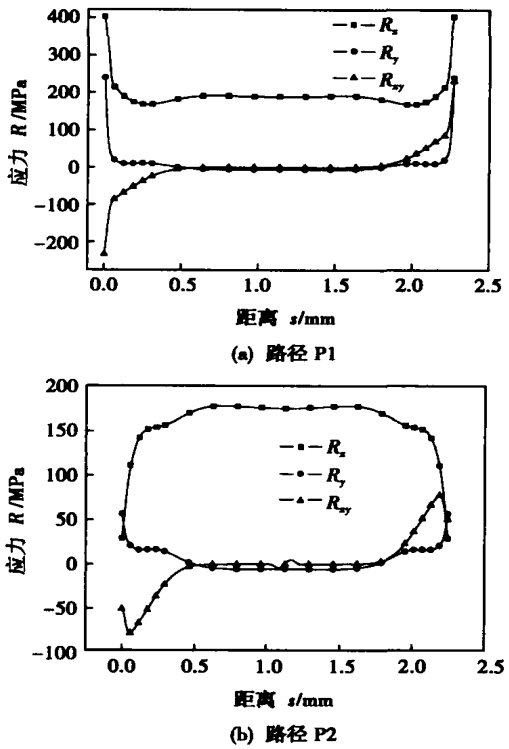

图 4　沿接头界面两条路径的应力分布

Fig. 4　Stress distribution along two paths of joint interface

图 5 给出了路径 P3 和路径 P4 的应力分布，钎角处应力具有极值，隔板侧的应力水平相对较高，而翅片部分的应力值较低，隔板侧界面区域更具有发生诱发裂纹的倾向。

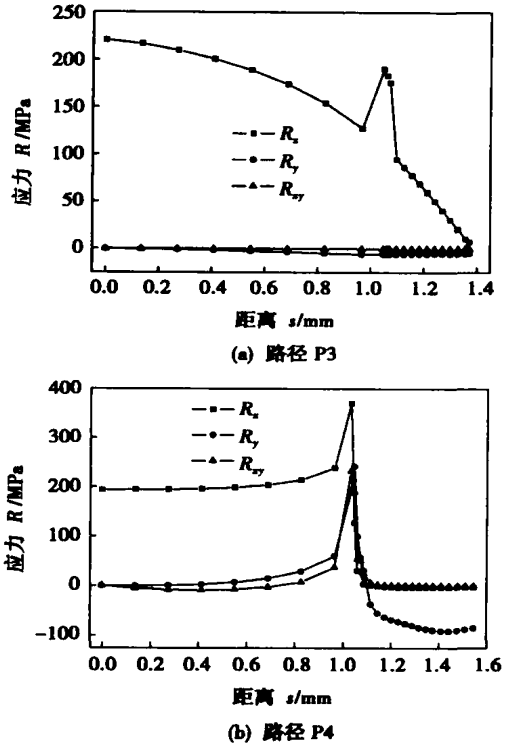

图 5　沿两条垂直路径的应力分布

Fig. 5　Stress distribution along two vertical paths

图 6 给出了考虑钎焊残余应力下局部区域蠕变应变分布云图。各方向拉、压应变的最大值见表 1。从图 6 和表 1 可知，蠕变应变比仅有内压作用下的蠕变应变值大很多。说明由于钎焊残余应力的存在，对板翅结构在高温下的完整性产生很大影响。在板翅结构的高温强度设计中，仅考虑内压对蠕变的影响是不够的，必须考虑钎焊残余应力的影响。且蠕变应变的最大值位于钎角，裂纹有可能从钎角处萌生，成为最薄弱环节。

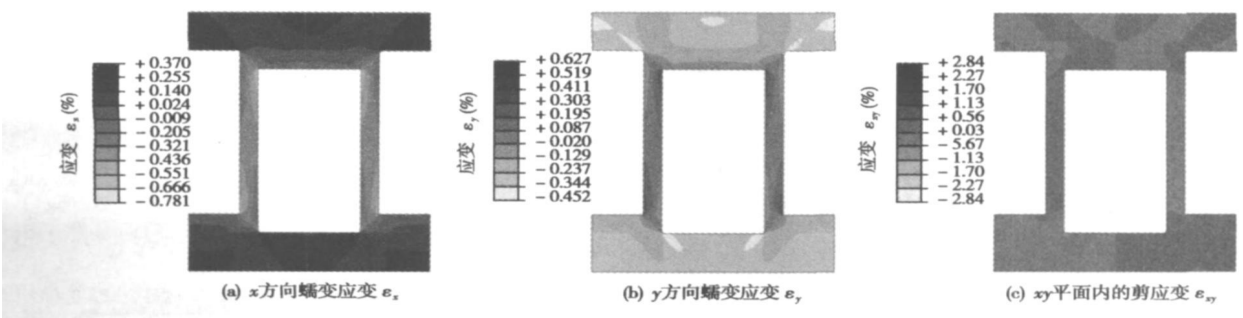

图 6　蠕变应变分布云图

Fig. 6　Contour of creep strain

从图 7 可知，在隔板侧路径 P1 处，蠕变应变的峰值都位于钎角。ε_{xy} 呈反对称分布，拉压应变峰值达 2.84%，对钎角蠕变断裂的影响很大；ε_x 关于界面对称分布，拉应变峰值为 0.37%，压应变峰值为 0.781%；蠕变应变 ε_y 的值很小。在翅片侧路径 P2 处，蠕变应变呈对称分布，ε_x 和 ε_y 均从钎角的峰值迅速降低到中部的平均水平，ε_{xy} 的值比较小，这和初始应力的分布规律是一致的。

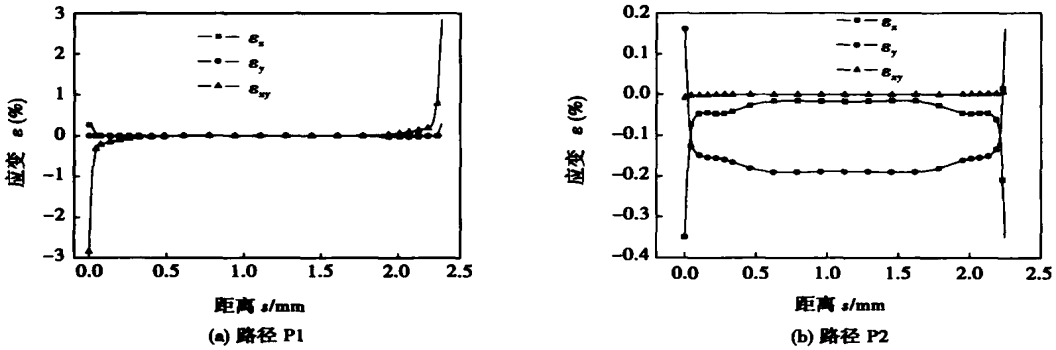

图 7 沿接头界面两条路径的蠕变应变分布

Fig. 7 Creep strain along two paths of joint interface

从图 8 垂直接头方向的路径 P3 和路径 P4 的应变变化趋势可以看出，在钎角处的应变值最大，隔板侧的应变比翅片大，诱发裂纹的可能性较大。这和初始应力的分布规律也具有一致性。

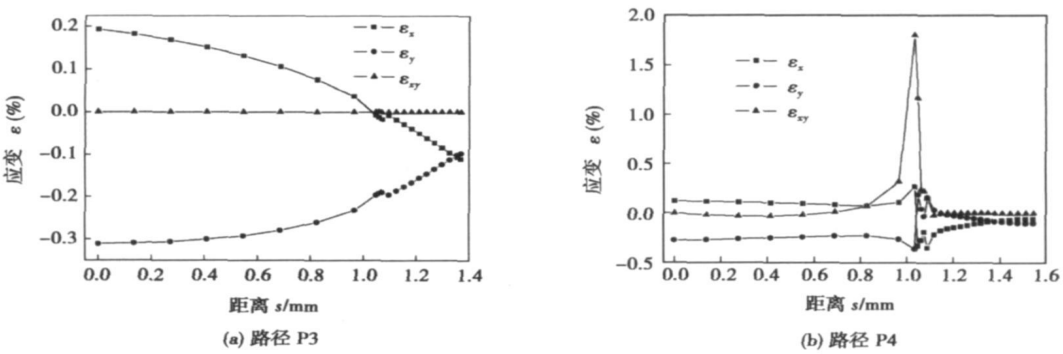

图 8 沿两条垂直路径的蠕变应变

Fig. 8 Creep strain along two vertical paths

3 结 论

（1）利用有限元软件 ABAQUS，实现了考虑钎焊残余应力对蠕变变形影响的有限元分析方法，对不锈钢板翅结构进行了蠕变有限元分析，得到了蠕变变形的分布规律。钎焊残余应力对蠕变变形的影响较大，在板翅结构的蠕变分析中不能忽略。

（2）隔板和翅片具有不同的应力应变分布特征，隔板侧的蠕变开裂的倾向比翅片大。钎角处蠕变应力和应变集中，易萌生蠕变裂纹。

（3）在钎焊过程中，要注意控制残余应力，降低蠕变变形，防止蠕变断裂失效。

参考文献：

[1] Tv S T, Yoon K B. The influences of material mismatch of weld on the evaluation of time-dependent fracture mechanics parameters [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 64(6): 765—780.

[2] Hyde T H, Sun Wei. Creep failure behaviour of a 9CrMoNbV weld metal with anisotropy under a biaxial loading state [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2006, 41(5): 369—380.

[3] 涂善东，巩建鸣，凌 祥. 焊缝界面对蠕变断裂力学参量的影响[J]. 焊接学报，2000，21(2)：1—5.

[4] 史春元，杨德新，陈字刚，等. 异种钢闪光对焊接头蠕变断裂力学行为[J]. 焊接学报，2000，21(1)：45—48.

[5] 巩建鸣，涂善东，凌 祥，等. 基于蠕变损伤力学理论的 HK40

[下转第 12 页]

焊接变形进一步加大。

（2）电极位移曲线较好地反映了板管间接点焊的焊接变形过程，且最大变形量随着电极力的增大和焊接热输入的增多而线性增加。为了降低焊接变形对焊接质量的影响，可在焊接阶段或保持阶段，利用伺服焊枪的可变电极力特性控制电极力，减少焊接变形。

（3）电极力较小或焊接热输入较大时容易喷溅。发生喷溅时，电极位移曲线出现阶梯状畸变，可用电极位移曲线斜率的变化评判板管间接点焊过程中的喷溅缺陷。

参考文献：

[1] Dohmann F, Hartl Ch. Tube hydroforming-research and practical application [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71(1): 174—186.

[2] Michael G P, Joseph M L. Closed tubular automobile parts demand innovative welding methods [J]. Welding Journal, 1997, 76(10): 55—58.

[3] Slavick S A. Using servoguns for automated resistance welding [J]. Welding Journal, 1999, 78(7): 29—33.

[4] 中国机械工程学会焊接学会电阻焊专业委员会. 电阻焊理论与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[5] 曹 彪, 姜以宏, 王建一. 点焊过程热膨胀变形分析 [J]. 焊接学报, 1995, 16(2): 94—99.

[6] 胡德安, 郑如忠, 冀殿英. 电阻点焊电极位移监测系统的研究 [J]. 南昌航空工业学院学报, 1995(1): 16—22.

[7] 常云龙, 黄石生, 余文松, 等. 热膨胀电极位移法用于机器人点焊过程的研究[J]. 机器人, 1999, 21(2): 135—138.

[8] Tsai C L, Dai W L, Dickinson D W, *et al*. Analysis and development of a real-time control methodology in resistance spot welding [J]. Welding Journal, 1991, 70(12): 339—351.

[9] Ji C T, Zhou Y. Dynamic electrode force and displacement in resistance spot welding of aluminum [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3): 605—610.

[10] 罗贤星, 邓黎鹏, 张晨曙, 等. 铝合金点焊过程中影响因素的特征判识与熔核尺寸的评估 [J]. 焊接学报, 2005, 26(7): 37—43.

作者简介：杨洪刚，男，1979 年出生，博士研究生。研究方向为电阻点焊焊接质量在线监测与控制方法研究。

Email：hgyang@sjtu.edu.cn

[上接第 8 页]

炉管焊接接头的蠕变损伤研究[J]. 压力容器, 2000, 17(4): 11—15.

[6] 涂善东. 高温结构完整性原理[M]. 北京: 科学技术出版社, 2003.

[7] Jiang Wenchun, Gong Jianming, Chen Hu, *et al*. Finite element creep analysis of brazed stainless steel plate-fin structure[C] // International Conference of Facture Mechanics 2006. Nanjing, China, 2006: 27—33.

[8] 史 进, 涂善东, 巩建鸣, 等. 铸态镍基钎料高温蠕变特性的试验研究[J]. 机械工程材料, 2005, 29(7): 20—24.

作者简介：蒋文春，男，1980 年出生，博士研究生。主要从事微小型过程设备的蠕变与断裂，高温设备寿命评价技术和石油化工装置先进再制造技术的研究。发表论文 10 篇。

Email：jiangwenchun@126.com

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Simulation of Al-MIG weld pool width control by nine-point controller FAN Ding[1,2], LI Jianjun[1], SHI Yu[1], GAO Yuan[2] (1. Key Laboratory of Advanced Processing Technology for Non-ferrous Materials, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Gansu Advanced New Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p1—4

Abstract: Considering the characteristics of aluminum alloy MIG welding process, nine-point controller was developed to control weld pool width. The structure and the principle of nine-point controller were analyzed. Based on the mathematic model of step response between pulse current and weld pool width, the simulations on three controlles of PID, fuzzy and nine-point controller used to control aluminum alloy MIG weld pool width were studied. The simulation results show that nine-point controller not only has the best stability and robust than PID and fuzzy controller, but also assure the control accuracy and provides the theoretical basis to realize the intelligent control for aluminum alloy pulsed MIG welding process.

Key words: aluminum alloy; metal inert gas welding; nine-point controller; intelligent control; simulation

Effect of brazing residual stress on creep for stainless steel plate-fin structure JIANG Wenchun, GONG Jianming, TU Shandong, CHEN Hu (College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p5—8, 12

Abstract: The effect of residual stress on creep for microminiaturized nickel base brazed stainless steel plate-fin structure was analyzed by finite element method with ABAQUS code. The results show that because of mismatch of mechanical properties between filler metal and base metal, the welding residual stress was generated inevitably, which has great influence on the creep deformation and life. The residual stress can not be ignored in the strength design and should be controlled during the manufacture of plate-fin structure. The stress and strain is concentrated in the fillet where the creep crack will initiate, propagate and result in the failure. The strain and stress in plate is larger than that in fin, so the cracking susceptibility of plate is lager than that of fin. The present work provides a reference for strength design at high temperature for plate-fin structure.

Key words: stainless steel plate-fin structure; brazing residual stress; creep; finite element

Effect of processinig parameters on sheet-tube indirect spot welding process YANG Honggang, ZHANG Yansong, CHEN Guanlong (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p9—12

Abstract: In sheet-tube indirect spot welding, it is difficult to assure welding quality because the welding deformation is too large. The expansion and welding deformation were investigated and the influence of different welding parameters (welding current, electrode force and welding time) on indirect spot welding process was analyzed through electrode displacement. The experiment result shows that the course of the expansion and welding deformation are coupled to each other in the welding stage; in the holding stage, welding deformation gets larger under the ailion of applied electrode force. Maximum welding deformation of sheet-tube indirect spot welding process is almost linear with electrode force and input welding energy. Ladder-type occurs in the electrode displacement curve when the expulsion happens, so the expulsion can be judged according to the slope coefficient of electrode displacement. The result provides a theoretical guidance for on-line monitoning and control of welding quality in sheet-tube indirect spot welding process.

Key words: indirect spot welding; electrode displacement; welding deformation

Pure copper coating deposited by automatic plasma welding with melting strip electrode technology WANG Kehong, LI Jianyong, JI Dayuan, ZHANG Deku (Department of Material Science and Engineering, Nanjing University Science and Technology, Nanjing 210094, China). p13—16

Abstract: For tubular workpiece surface deposited by Cu, the process of deposition by automatic plasma welding with melting strip electrode was designed and researched. The Cu strip electrode enters the welding region with the passive automatic feed-in manner. The plasma arc burns between the tungsten, and copper strip and the protective agent is blown into the welding region. The plasma arc makes the copper strip melt, and the Cu deposited layer was formed on the base metal surface of steel. The welding process is stable and the weld appearance is excellent. The detected results show that the deposited layer of of pure copper with 1—6 mm thickness can be gotten. The pure copper and the base metal can be welded together without the base metal being molten. The shear strength exceeds 150 MPa, which is greater than the strength of Cu layer. The bonding quality is excellent and there is no welding defects such as gas pore, incomplete fusion and slag inclusion. The SEM and EDAX results show that metallurgical bonding by diffusion is formed between the deposited pure copper layer and the base metal. And within the distance of 10—30 μm from the side of the deposited copper layer interface, the content of Fe decreases to less than 1%.

Key words: deposited welding; melting strip electrode; plasma arc; copper strip; automatic welding

Numerical simulation on temperature field in laser welding of thin aluminum alloy plate with different thickness YU Shurong[1,2], XIONG Jinhui[1], FAN Ding[1,2], CHEN Jianhong[1,2] (1. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys, The Ministry of