

# 板翅结构钎焊残余应力与热变形的有限元分析

陈 虎, 巩建鸣, 耿鲁阳, 涂善东

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘 要:** 对微小尺寸的镍基钎焊不锈钢板翅结构在真空钎焊过程中产生的残余应力分布与热变形状况进行研究分析。采用有限元方法对三层结构的钎焊过程进行了热-力分析, 分析考虑真空钎焊的加热特点同时考虑板翅材料和镍基钎料与温度相关的材料特性, 得到了钎焊过程中结构的温度变化规律以及钎焊后的残余应力分布和热变形特征。结果表明, 隔板与翅片具有不同的热变形特征, 板翅钎焊接头转角处应力状况复杂, 易萌生裂纹导致板翅结构的失效, 需要选择合适的钎焊时间以得到较好的钎焊接头。

**关键词:** 钎焊; 板翅结构; 钎焊接头; 热变形; 残余应力; 有限元

**中图分类号:** TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2006)11-029-05

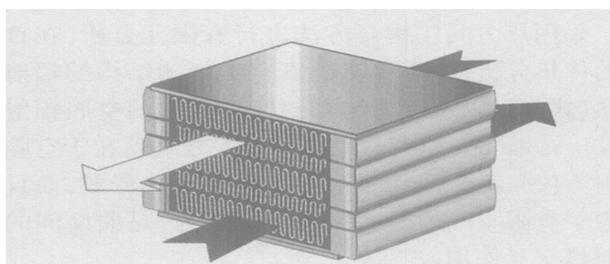


陈 虎

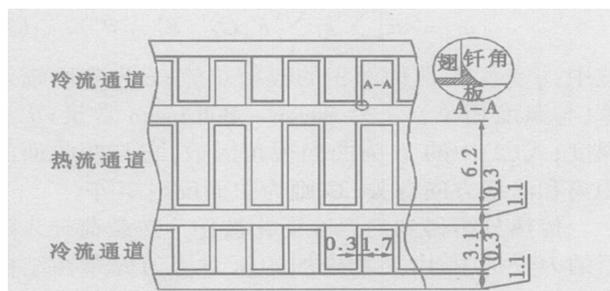
## 0 序 言

多通道的板翅结构是板翅式换热器芯体的基本结构, 其制造质量决定着换热器的质量。由于整体钎焊的板翅结构板与翅间的相互约束以及钎焊过程中夹具施加的压力, 钎焊后的板翅结构尤其是微小结构的质量往往会受到钎焊残余应力和热变形的影响。尤其是不锈钢板翅式换热器, 实际的钎焊工艺<sup>[1]</sup>一般不进行专门的钎后消应力处理, 残余应力尤其是钎焊接头处残余应力的存在势必会影响换热器的运行可靠性。目前为止, 对板翅结构, 其研究主要集中在钎焊接头的力学状态以及结构钎焊后的流体换热情况<sup>[2]</sup>, 而对板翅结构整体钎焊残余应力分布和热变形研究则相对较少<sup>[3]</sup>。另一方面, 由于板翅结构紧凑, 特征尺寸可以达到微米级, 目前常规的试验手段较难完成钎后接头残余应力的测定, 而大多采用计算模拟方法进行分析研究<sup>[3]</sup>。文中使用有限元方法来对小尺寸镍基(AWS BNi-2)钎焊的三层逆流不锈钢(AISI SS304)板翅结构真空钎焊残余应力分布和整体热变形特征进行分析讨论, 以期对微小结构设计和设备的钎焊封装提供必要的指导。

细尺寸见图 1b。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, 具体的钎焊工艺见文献[1]。



(a) 示意图



(b) 尺寸参数 (mm)

图 1 逆流型板翅结构

Fig. 1 Typical countercurrent plate-fin structure

## 1 有限元建模与分析

### 1.1 逆流板翅结构

典型的逆流板翅结构如图 1a 所示, 文中采用的详

### 1.2 有限元模型

使用有限元分析软件 ABAQUS 进行钎焊过程的热力分析, 考虑到模型的结构特点, 分析可简化为二维平面应变问题, 网格划分见图 2。钎焊接头区域

收稿日期: 2006-11-17

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)

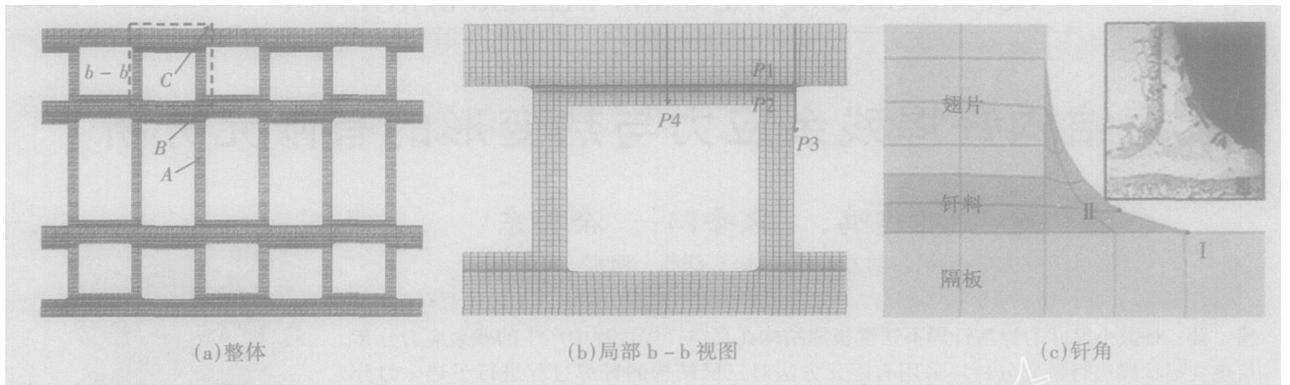


图2 分析模型的网格划分

Fig.2 Mesh plot of model

的网格需要细化,接头钎角轮廓应与实际的相符(图2c)。板与翅片材料为 AISI SS304,钎料为非晶态镍基钎料 BNi - 2,为保证分析的准确性,需要考虑材料性能的温度相关性,其熔化潜热为 424.8 kJ/kg,固、液相线温度分别为 971 和 999。需要特别提出的是,从试验获得 BNi - 2 的材料性能比较困难,分析所用的 BNi - 2 的性能数据来自于金属材料性能计算软件 JMatPro 的计算结果<sup>[4]</sup>。

### 1.3 分析策略

采用热力学间接耦合方法进行有限元分析,在首先的传热分析中,需要考虑真空炉板翅结构的辐射传热(式(1))以及板翅结构封闭通道内的空腔辐射(cavity radiation 式(2)),与辐射不同之处就在于空腔辐射不仅只考虑曲面自身的热吸收或热释放,而且考虑了有限空间内曲面之间的热反射,是曲面间的辐射热交互作用。

$$q = (\epsilon - \epsilon_0) \sigma T^4 \quad (1)$$

$$q_i = \sum_j F_{ij} C_{ij}^{-1} (\epsilon_j - \epsilon_i) \sigma T^4 \quad (2)$$

式中:  $q$  为单位曲面面积的辐射热流;  $\epsilon$  为表面辐射率(与温度相关);  $\sigma$  为 Stefan - Boltzmann 常量;  $T$  为温度;式(2)中的  $F$  为曲面视角因数,它与两曲面的距离和法线方向有关;  $C$  则为曲面反射矩阵。

传热分析得到的温度变化被作为热载荷导入随后的力分析中,由夹具施加的压力均匀分布在结构的上表面,由结构的热弹性响应,则可得到结构残余应力分布及热变形。

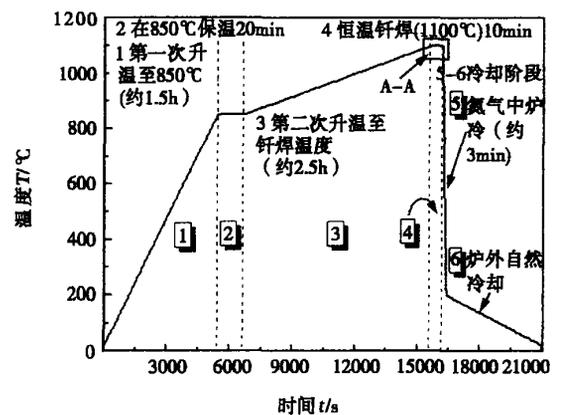
分析中板翅层数的影响暂未考虑,没有考虑钎料在接头中的毛细流动同时也忽略钎料与母材钎焊时的相互扩散对接头热力学性能的影响<sup>[3]</sup>。

## 2 结果与讨论

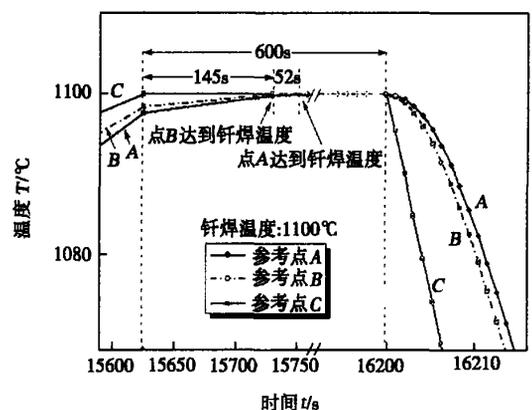
### 2.1 钎焊的热循环

建立如图 2a 中所示的 A, B, C 三个点来考察

钎焊过程中结构内外不同位置的热循环情况。从图 3a 可以看出三点的升降温规律是基本相同的,整个钎焊过程的温变过程主要分为六个步骤:在两次加热过程之间有 20 min,在 850 的保温,经过 10 min 在 1 100 的钎焊扩散形成接头后 3 min 充氮骤冷至



(a) 整体



(b) A - A 视图

图3 A、B、C 三点热循环

Fig.3 Thermal cycle of points A, B and C

200 以下出炉自然冷却。在加热阶段,由于远离受辐射加热的表面,达到相同的温度,C点最早而A点最晚。如图3b所示,A点比B点晚52s达到钎焊温度而C点比B点要早近200s,可以推断,随着板翅结构层数的增加,到达钎焊温度的内外部时间差异就越明显,由于钎焊温度对于钎料与母材的相互扩散和接头微结构有着很大的影响<sup>[5]</sup>,因此要特别注意多层板翅结构钎焊时间的控制,以确保结构内部接头的充分扩散结合。

### 2.2 热变形

图4显示了在钎焊完成后结构的热变形总变形量云图(实线框为未变形前结构形状),可以明显的看出,板翅结构由于受到夹持压力、自身结构约束和热膨胀的共同作用,出现了两种变形:其一为隔板沿水平方向的凸胀变形,这主要是由于隔板相对于翅片而言受到更高的结构自约束,材料的热膨胀此时作用明显;其二则为翅片沿垂直方向的波形扭曲,此时则主要是受到夹持压力的作用产生的变形。

### 2.3 残余应力分布

图5为在图3a中所示局部b-b区域的各应力分量云图,接头钎角出现应力峰值。图中 $\sigma_x$ 与 $\sigma_y$ 分别代表平行和垂直于的应力分量, $\tau_{xy}$ 为面内剪应力。表1列出了接头最大应力值和位置定义如图3b所示的四条分析路径,其中路径P1与P2分别沿接头界面隔板侧和翅片侧,而P3与P4则垂直于界面分别过接头钎角处和接头中部。图6与图7分别描述了沿这四条路径的三个方向残余应力的分布曲线。

从图6可知,在钎焊接头区域的正应力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分布沿界面对称,而剪应力则呈反对称分布,最大值分别在接头两端钎角处,接头钎角区域是高残余应力存在的区域,这与文献[6]对钎焊接头进行蠕变拉伸试验测得的起裂位置相当。图6表明,接头界面的残余应力在远离钎角区域分布是相对均匀的,但在

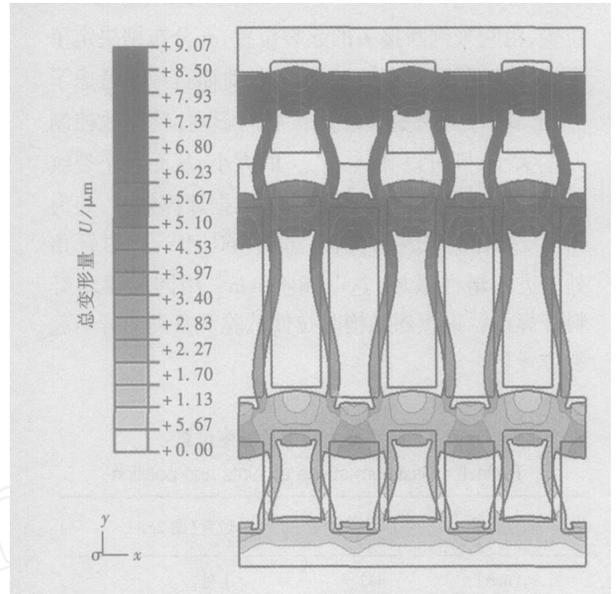


图 4 钎后热变形(显示因子:100)  
Fig.4 Thermal deformation after brazing  
(scale factor: 100)

钎角处则迅速发展成高应力。在隔板侧(P1), $\sigma_x$ 与 $\sigma_y$ 由钎角迅速衰减至中部的均值水平,在翅片侧, $\sigma_x$ 由钎角处的低应力迅速上升至中部的均值水平, $\sigma_y$ 在接头区域有较高的应力梯度,然后迅速降到很低的应力水平。相比较而言,板侧界面区域更具有发生裂纹诱发的倾向。图7表明垂直接头方向的应力变化趋势,由钎焊接头钎角处的高梯度应力接头两侧的低应力水平发展,隔板侧的应力水平相对较高,在远离钎角的接头中部,应力水平较低且变化不大。

Jin<sup>[7]</sup>从断裂力学角度出发,基于变形能理论(Von - Mises 准则)来考虑接头的开裂问题,即

$$\left\{ \begin{matrix} 1 \\ z \end{matrix} \right\} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (3)$$

由式(3),Jin 解释  $\sigma_{1(max)}$  与  $\sigma_{y(max)}$  出现在相同的

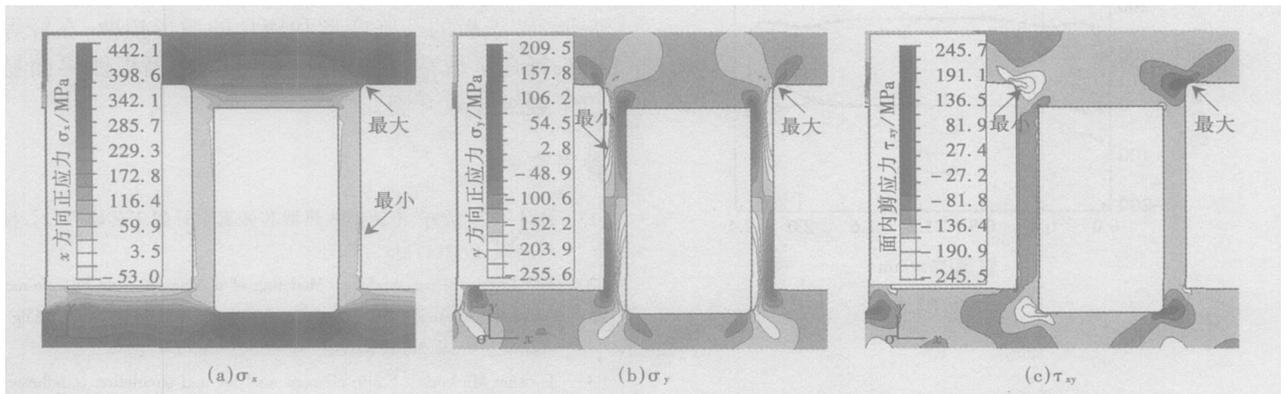


图 5 焊后残余应力分布

Fig.5 Residual stresses distribution after brazing

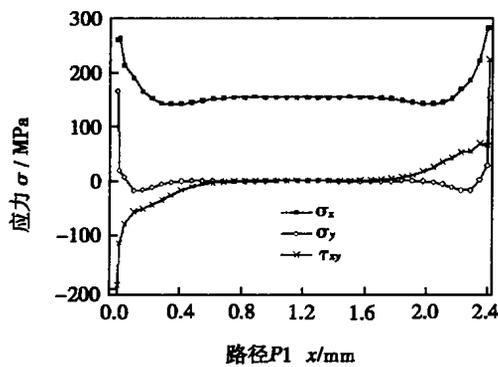
位置,由它来判断接头的起裂位置,  $\sigma_2$  分布则决定了裂纹的扩展情况,所以  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  相对而言综合考虑了  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$  对接头启裂和扩展的影响,较好地控制了  $\sigma_x$  的大小,则可以降低  $\sigma_1(\max)$  的大小,从而防止裂纹的生成甚至最终的扩展。由表 1 数据计算知  $\sigma_1$  处为  $\sigma_1(\max)$  发生的位置,其值已达到 460 MPa,此时钎角处已进入塑性区域,这与 Rabinkin<sup>[8]</sup> 用同类镍基钎料钎焊不锈钢板翅结构时拉伸试验观察到的钎角起裂位置相符。

表 1 接头最大应力及发生位置

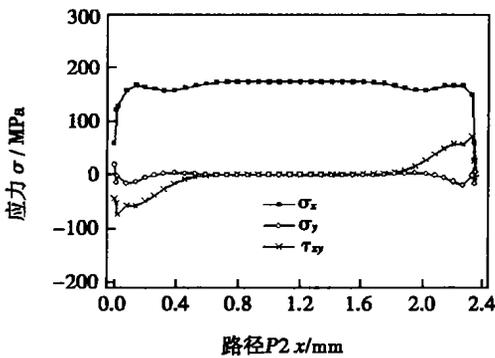
Table 1 Maximum stress of joints and position

应力分量	应力值 /MPa	位置(图 2c)
$\sigma_x(\max)$	442	处
$\sigma_y(\max)$	209.7	处
$\tau_{xy}(\max)$	245.6	处
$\sigma_x^*$	222.4	处

\*: 不考虑接头处应力集中外结构整体正应力的最大值



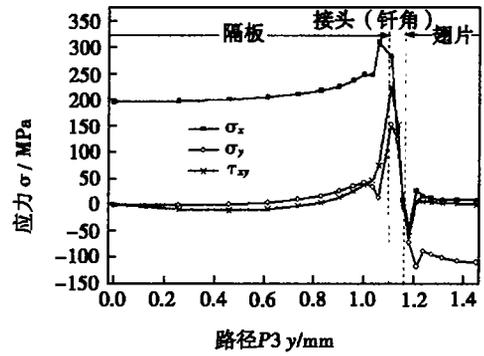
(a)P1



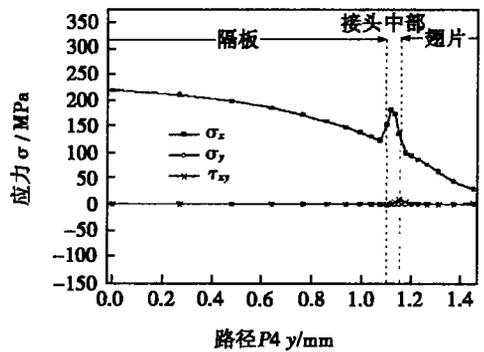
(b)P2

图 6 沿接头界面两条路径的应力分布

Fig. 6 Stress distribution along two paths of interface



(a)P3



(b)P4

图 7 沿两条垂直路径的应力分布

Fig. 7 Stress distribution along two vertical paths

### 3 结 论

(1) 考虑到辐射传热是真空钎焊过程最主要的加热传热方式,有限元分析中需要详细考虑炉内辐射和板翅结构空腔辐射的影响。

(2) 钎焊过程应重视选择合适的钎焊时间,以保证较晚达到钎焊温度的结构内部的接头充分扩散连接。

(3) 板翅结构隔板与翅片在钎焊后呈现两类热变形,即隔板的凸胀变形和翅片的波形扭曲;在钎焊接头钎角区域存在最大的残余应力;隔板侧界面易萌生裂纹导致开裂。

### 参考文献

[1] 孙计生,刘效方. 不锈钢散热器芯体真空钎焊工艺研究[J]. 材料工程,1997(1): 35 - 37.  
 [2] Pan Liwei, Wang shudong. Modeling of a compact plate-fin reformer for methanol steam reforming in fuel cell systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 108(4): 51 - 58.  
 [3] Jaroslav Mackerle. Finite element analysis and simulation of adhesive bonding, soldering and brazing - an addendum: a bibliography [J].

[下转第 36 页]

大小以及操作的精确度影响,很难使冲击压痕恰好位于焊接接头中央。并且由于垂直焊缝方向残余应力上升和下降的趋势非常快,略微偏离中央的位置就会有很大变化,实际测量的数值可能在峰值两侧的位置,如图 6 中的“1”或“2”的位置。

同时通过模拟发现在距离焊缝 5 ~ 10 mm 位置之间会出现压应力的峰值,这一数值在实际的测量当中并没有完全体现出来,这主要是由于出现最大压应力的位置很难准确确定,所以并不能在每一次测量中都使其得以体现。从理论上分析,为了使应力整体平衡,在这样的位置一定会有一个压应力的最大值,从模拟的数据中发现这一最大压应力值约为 100 MPa。

通过分析比较模拟和实际测量可以判断通过模拟得到的残余应力场分布比较准确,能够较好的反应激光—氩弧复合热源焊接镁合金残余应力分布特点。

## 4 结 论

(1) 在沿焊缝方向上,从起弧开始纵向残余应力增大的很快,逐渐趋于稳定,然后数值比较平缓,靠近收弧的位置残余应力开始减小,减小的速度也很大。沿焊缝方向最大残余应力在 200 ~ 300 MPa 之间,最小残余应力一般在 20 MPa 左右。

(2) 在焊接接头的中央得到垂直焊缝方向残余应力的峰值。垂直于焊缝方向上的残余应力从中央向两边降低很快,降低出现一个最小值,然后又略微

增大。在焊缝中间区域获得垂直于焊缝方向上的最大残余应力在 200 ~ 250 MPa 之间;在距焊接接头的中央 5 ~ 10 mm 处获得最大压应力值,一般小于 100 MPa。

(3) 在焊缝的起弧和收弧位置沿焊缝和垂直焊缝方向上都得到了一定的压应力,这些压应力的出现将一定程度上提高镁合金焊缝的强度。

## 参考文献:

- [1] 宋 刚,刘黎明,王继锋,等. 激光—TIG 复合焊接镁合金 AZ31B 焊接工艺[J]. 焊接学报,2004,25(3):31 - 34.
- [2] Liu liming, Shong Gang, Liang Guoli, et al. Pore formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B-mechanism and remedy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005,390:76 - 80.
- [3] 陈亮山,董秀中,潘 兴. 冲击压痕法测量残余应力研究[J]. 金属学报,1997,33(5):21 - 25.
- [4] 于哲夫,赵颖华,陈怀宁,等. 冲击压痕测量残余应力的方法[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学),2003,17(3):200 - 202.
- [5] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat source[J]. Metallurgical Transactions B, 1984,15(2):299 - 305.
- [6] Chong L M. Predicting welding hardness[D]. Ottawa Canada: Caledon University, 1982.

**作者简介:** 王红阳,男,1982年5月出生,硕士研究生。主要从事激光焊接工艺及焊接残余应力测量方面的实验研究。

Email: liulm@dlut.edu.cn

## [上接第 32 页]

- Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. ,2002,(10):637 - 671.
- [4] Saunders N, Guo Z, Li X A P. Miodownik and J - Ph[J]. JOM, 2003,5(12):60 - 65.
  - [5] Paiva O C. Brazing parameters determine the degradation and mechanical behaviour of alumina/titanium brazed joints[J]. Journal of Materials Science, 2000,35:1165 - 1175.
  - [6] 史 进. 不锈钢钎焊接头高温强度的研究[D]. 南京:南京工业大学,2004.
  - [7] Jin Yuzhe. The bonding of ceramic and metal[J]. Transaction of Japan

Welding Institute, 1993,11(3):66 - 71.

- [8] Rabinkin A, Wenski E, Ribaud A. Brazing stainless steel using a new MBF - series of Ni - Cr - B - Si amorphous brazing foils[J]. Welding Journal (Miami, Fla), 1998,77(2):66 - 75.

**作者简介:** 陈 虎,男,1979年出生,博士生。主要从事过程设备先进制造和计算机辅助设计以及微小型过程设备的封装等方面的研究,已发表论文6篇。

Email: chh025@163.com

and low identification rate. Focused on these problems, the ultrasonic echo characteristics of the spot welding defects were analyzed mainly with the qualitative characteristic parameter analysis, which can identify the spot welding defects quickly through collecting the standard ultrasonic curves and using peak value marking algorithm. At last, lots of experiments are conducted to prove that this method is credible and efficient for the spot welding of ordinary steel sheets. The identification rate can reach 95%.

**Key words:** spot welding joints; faulty welding; ultrasonic testing; echo characteristics; fast identification

#### **Design of circuit about new capacitor stored energy spot welding machine**

ZHOU Hao-bin<sup>1,2</sup>, SUN Hui-zhu<sup>1</sup>, MA Xiao-mei<sup>1</sup>  
(1. Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China). p21 - 24

**Abstract:** This paper introduces the design method of a new capacitor stored energy spot welding machine. The new power uses super capacitor to form low voltage capacitor groups instead of high voltage one. The capacitor is charged with direct current chopper circuit, which takes IGBT as the main power machine piece, SKH22AH4 as the drive circuit, SG525 as the control chip for PWM, and current feedback in order to get the constant current. In the discharge circuit, the large current is discharged directly through large power SCR without the welding transformer. For the software, 80C552 is the main control chip of the controlling system, so the welding machine could work automatically. The new machine designed has already been used in production and the fine effect was gained to improve the welding quality.

**Key words:** capacitor stored energy spot welding machine; chopper; super capacitor

#### **Numerical analysis of N<sub>2</sub>-Ar protecting tungsten inert gas welding arc**

LEI Yr-cheng, LI Cai-hui, YU Wen-xia, CHENG Xi-aorong (School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China). p25 - 28

**Abstract:** N<sub>2</sub>-Ar protecting tungsten inert gas (TIG) welding arc was chosen as the studied object. A mathematic model was developed according to the theory of magnetic fluid dynamics. TIG welding arc was numerically analyzed based on this 2D, static and axisymmetric model with ANSYS software and the temperature and velocity profiles of the 50%N<sub>2</sub> + Ar protecting arc have been simulated. And the difference of the temperature, pressure and velocity of the arc between 50%N<sub>2</sub> + Ar protecting arc and Ar protecting arc has been obtained. The results show that the temperature, pressure and velocity of the arc could rise adding N<sub>2</sub> as protecting gas and higher energy density arc can be got.

**Key words:** tungsten inert-gas welding arc; N<sub>2</sub>-Ar protecting; magnetic fluid dynamics; ANSYS

#### **Finite element analysis of residual stresses and thermal deformation for brazing plate-fin structure**

CHEN Hu, GONG Jian

ming, GENG Luyang, TU Shao-dong (College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p29 - 32, 36

**Abstract:** This contribution focuses on the analysis of residual stress and thermal deformation of microminiaturized nickel base brazing stainless steel plate-fin structure after vacuum brazing. A finite element method is utilized to conduct the thermal-mechanical analysis for brazing such three layers structure, and the actual heating history of vacuum brazing and temperature-dependent material properties of plate-fin and filler metal are considered. The thermal cycles during brazing, thermal distortion and residual stress after brazing are reported. The results show that plates and fins have different deformation features, and complex stress state appears in the region of joint fillets which may induce the crack generation and propagation of brazed joint and result in the structure failure in service. It is noteworthy to control appropriate brazing time to get preferable joints.

**Key words:** brazing; plate-fin structure; brazed joint; thermal deformation; residual stresses; finite element method

#### **Analysis on residual stress of hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy**

WANG Hong-yang, CHI Ming-sheng, HUANG Rui-sheng, LIU Li-ming (Materials Modification National Key Laboratory by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China). p33 - 36

**Abstract:** The residual stress of weld, in both parallel and perpendicular direction, was measured by impacted indentation method for hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy. Based on the data measured, residual stress field simulation was established with finite element method, which can provide an effective supplement to the data of actual measurement. Results showed that the maximum tension stress along the parallel direction of the weld existed at the middle area of the weld was 200-300 MPa, while the maximum compressive stress along perpendicular direction that exists at area of 5 mm and 10 mm to the weld fusion zone was no more than 100 MPa. Through the comparison between actual measurement and simulation, the residual stress distribution characteristics of hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B have been well understood.

**Key words:** residual stress; stress field simulation; impacted indentation method; hybrid welding

#### **Real-time interpolation algorithm and simulation of seam of intersection line for automatic welding**

HUO Meng-you, WANG Xin-gang, YIN Ping (School of Mechanical Engineering, Shandong Univ., Jinan 250061, China). p37 - 40

**Abstract:** Welding of cylinder pipes is one of the common pipe connection, but the line of intersection is a complicated space curve. Based on a special welding machine, it introduces a real-time interpolation algorithm with controllable step length for line of intersection in automatic welding. The concrete method is that using linear