

304 不锈钢扩散焊界面的超声非线性成像

叶佳龙^{1,2}, 刚 铁¹

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 厦门市特种设备检验检测院, 厦门 361004)

摘 要: 运用信号处理技术对扩散焊界面的超声非线性行为进行了研究。首先通过控制焊前表面处理和焊接工艺制备了具有典型缺陷的扩散焊接头, 并对其进行了超声检测, 获得了反映界面状态的超声信号数据。在固相连接接头超声非线性的理论分析、界面超声非线性图像、界面显微特征和接头抗剪强度的基础上, 研究了不锈钢扩散焊接头不同界面状态的超声非线性效应。结果表明, 非线性超声检测对弱结合缺陷比较敏感, 可在一定程度上将超声 C 扫描成像和超声非线性成像结合起来实现扩散焊接头的无损检测。

关键词: 扩散焊; 超声非线性; 弱结合

中图分类号: TG 115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2014)05-0095-05

0 序 言

扩散连接技术由于母材不需要熔化的独特优势, 已经成为航空、航天等领域不可或缺的技术^[1]。扩散焊界面缺陷的存在严重影响焊接结构的在役服务性能, 因此有必要对其进行无损检测^[2]。由于扩散焊接头的缺陷多为微米级, 且存在弱结合缺陷, 利用射线探伤和常规超声波探伤进行检测难度相当大。近十几年来由于力学、声学等领域研究的进展, 非线性超声无损检测技术已经在检测固体材料中的微小缺陷等方面得到了广泛应用, 这为扩散焊接头的无损检测提供了一种新的思路。

非线性超声无损检测技术利用的各种超声非线性响应信号的来源可以分为经典声非线性和接触声非线性^[3]。经典声非线性主要由晶格结构引起, 而接触声非线性主要来源于接触界面型缺陷的应力—应变关系的非对称性^[4], 缺陷的存在将导致超声波发生明显的非线性失真, 主要表现为高次谐波的产生, 常用来评价材料的局部特征^[5,6]。文中通过超声 C 扫描成像技术提取超声波检测信号, 并结合信号处理技术获得扩散焊界面的超声非线性图像, 研究采用非线性超声的方法评价扩散焊接头中的弱结合缺陷的可行性。

1 试验方法

1.1 扩散焊试样的制备

文中采用 304 不锈钢制备扩散焊试样, 其规格

如图 1 所示, 焊接面长度 L 为 45 mm, 宽度 B 为 30 mm, 厚度 h 为 2.8 mm。

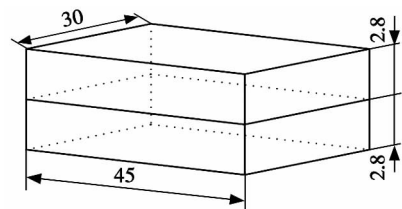


图 1 扩散焊试样示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic of diffusion bonding samples

通过控制焊前表面处理和焊接工艺, 获取不同质量的扩散焊接头, 详细的扩散焊工艺参数见表 1。

表 1 304 不锈钢扩散焊工艺参数

Table 1 Diffusion bonding parameters of 304 stainless steel

试样 编号	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	焊接温度 $T/^\circ\text{C}$	工作压力 p/MPa	扩散时间 t/min
1	0.05	850	10	10
2	0.05	950	10	10
3	0.05	1 050	20	30

1.2 界面的超声 C 扫描

超声检测前将已焊完的扩散焊试样表面铣去 0.1 mm, 使其具有相同的表面状态, 以便防止表面状态的不同对检测结果造成影响。试验采用中心频率为 10 MHz 的水浸聚焦探头对扩散焊界面进行超声 C 扫描成像。通过水程的调整使声束聚焦于试样

扩散焊界面处. 试验过程中以界面处 $\phi 1\text{ mm}$ 的平底孔波达到 80% 时的增益为检测灵敏度. 采样频率为 100 MHz, 扫描和索引步长均为 0.2 mm. 检测过程中采集了界面回波的 A 信号序列, 并最终获得扩散焊界面 C 扫描图像.

由超声 C 扫描结果能够初步地判定扩散焊界面的未焊合缺陷, 而无法确定界面回波反射能量弱的区域是否存在弱结合缺陷, 文中将先从理论的角度研究不同界面状态的超声非线性行为.

2 固相连接界面的超声非线性响应

2.1 粗糙界面的接触声非线性理论

从微观的角度来看, 接触界面是粗糙的, 两表面由许多各种形状的粗糙峰和凹谷组成. 在入射超声波的作用下, 粗糙接触界面将呈现 3 种不同的接触状态: 完全闭合、部分闭合和完全张开. 粗糙界面在部分闭合情况下的应力—应变关系, 以及超声波作用下界面接触状态的转换是产生接触声非线性响应的根源^[7].

当超声波经粗糙界面进行传播时, 由于粗糙界面的法向位移相当微小, 可以将其等效为半无限粗糙接触界面, 反射波的质点位移 $g(x+ct)$ 与粗糙界面间距的变化 $y(t)$ 之间的关系为^[8]

$$g(x+ct) = -\frac{1}{2}y\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (1)$$

式中: x 为传播距离; c 为声速; t 为时间. 由式 (1) 可知, 粗糙界面间距的变化 $y(t)$ 只要经历部分闭合状态, 或者在超声波作用下界面接触状态发生转换, 相应地反映间距变化 $y(t)$ 的反射波必然发生失真, 产生高次谐波成分等超声非线性效应^[7].

2.2 粗糙界面模型下界面的超声非线性响应

在粗糙界面模型下, 固相连接接头 3 种不同界面状态的特征分别为: 焊接良好界面具有完全闭合的初始状态, 而且两固体介质之间具有较强的结合力; 弱结合缺陷具有部分闭合和完全张开初始状态, 在完全张开的初始状态中, 其界面间距很小; 未焊合缺陷具有完全张开的初始状态, 其界面间距比较大.

对于焊接良好界面而言, 两表面之间较强的结合力保证了界面基本不受超声波作用力的影响, 基本上始终保持完全闭合的状态, 因此其超声非线性效应较弱. 对于弱结合缺陷而言, 由于超声波作用力的影响, 界面将发生经历完全张开→部分闭合和部分闭合→完全闭合等状态的变化, 因此超声波将发生较强的失真. 对于未焊合缺陷而言, 由于界面间距较大, 界面将基本保持完全张开的状态, 因此其

超声非线性效应也较弱.

由此可见, 对于固相连接界面而言, 弱结合缺陷的超声非线性响应最强, 而焊接良好界面和未焊合缺陷的超声非线性响应较弱.

3 扩散焊界面的超声非线性成像

3.1 一维非线性波动理论

在经典声非线性中, 当一维平面纵波在非线性连续体中传播时, 其波动方程可以表示为

$$u(x, t) = u_1(x, t) + u_2(x, t) + u_3(x, t) + \cdots \quad (2)$$

式中: x 为传播距离; t 为时间; $u_1(x, t)$, $u_2(x, t)$ 和 $u_3(x, t)$ 分别表示基波、二次谐波和三次谐波. 若方程的初始条件为

$$u(0, t) = A_0 \sin(wt) \quad (3)$$

则波动方程的二阶近似解为^[7]

$$u(x, t) = A_0 \sin(kx - wt) + \frac{1}{8} A_0^2 k^2 \beta x \cos(2(kx - wt)) \quad (4)$$

式中: w 为角频率; k 为波数; β 为超声非线性系数; A_0 为初始波的幅值. 基波幅值 A_1 为

$$A_1 = A_0 \quad (5)$$

二次谐波的幅值 A_2 为

$$A_2 = \frac{1}{8} A_0^2 k^2 \beta x \quad (6)$$

则超声非线性系数为

$$\beta = 8 \left(\frac{A_2}{A_1^2} \right) \frac{1}{k^2 x} \quad (7)$$

为方便描述, 将 r 定义为非线性参数, 其表达式为

$$r = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (8)$$

在试验方面, 可以通过测量固体介质内非线性超声波的基波和二次谐波的幅值 A_1 和 A_2 , 利用 r 来表征超声非线性效应的大小^[9]. 由于目前并没有确切的特征参数来评价接触声非线性, 文中参照经典声非线性, 采用 r 作为接触声非线性的特征参数. 在试验中通过 Matlab 软件实现时域信号的快速傅立叶变换, 进而提取超声信号的基波幅值和二次谐波幅值. 扩散焊界面的超声非线性成像是通过伪彩色图像反映界面处超声非线性参数 r 的分布情况, 可以直观表征不同界面处的超声非线性响应.

3.2 超声 C 扫描数据的读取及预处理

超声 C 扫描成像时, 在扩散焊试样的边缘区域, 超声波束尚未完全入射到试样上, 因此即使试样边缘存在较大的缺陷, 其反射能量也将比较微弱, 因而将导致扩散焊试样边缘区域的数据不可靠. 为了得

到可靠的超声 C 扫描数据并且将其与非线性图像进行较为准确的比较,利用 Matlab 软件将超声 C 扫描数据进行读取,并且将扩散焊试样边缘 2 mm 数据进行剔除,只留下各个扩散焊试样内部区域的 C 扫描数据。图 2 为处理后的扩散焊试样内部区域的界面 C 扫描图像。图 2 中的色标代表界面回波反射能量,表示反射能量等级由 0 升至 1。

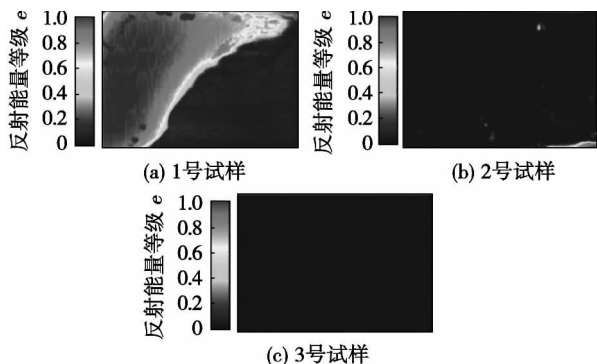


图2 扩散焊界面 C 扫描图像

Fig. 2 C-scan images of diffusion bonding

3.3 界面的超声非线性成像

为了获得较为准确的超声信号的基波幅值和二次谐波幅值,保证扩散焊界面超声非线性图像的准确性,对 10 MHz 聚焦探头的幅频响应特性进行测试。实测可知,探头的中心频率为 10.26 MHz, -6 dB 带宽约为 5 MHz。

利用 Matlab 软件对 1 号~3 号扩散焊试样内部区域的超声 C 扫描数据进行读取,并通过区间搜索法实现 A 信号基波振幅 A_1 和二次谐波振幅 A_2 的提取。具体算法为在探头幅频特性响应 -6 dB 带宽范围内(7.76 ~ 12.76 MHz)取幅度最大值作为 A_1 ,其对应的基频频率为 f_1 ;在 $2f_1$ 的 5% 误差范围内取幅度极大值作为 A_2 ,若无峰值则取该范围内的幅度均值为 A_2 。通过基波振幅 A_1 和二次谐波振幅 A_2 获得 r ,进而得到扩散焊试样内部区域界面的超声非线性图像。

图 3 为扩散焊试样内部区域界面回波的超声非线性图像。图 3 中的色标代表界面回波非线性参数 r 的大小, r 的取值在 0 ~ 1 范围内, r 值由 0 升至 1,则超声非线性效应越强。

通过界面的超声非线性图像与 C 扫描图像的比较可以发现,随着 C 扫描图像中界面回波反射能量越来越强烈,而其对应 r 的数值大致呈现下降的趋势,相应的超声非线性效应逐渐减弱。而且超声 C 扫描图像中反射能量较低的区域其对应 r 的数值是不一样的,说明反射能量较低的区域存在不同程度的超声非线性效应,这可能在一定程度上预示着扩散焊

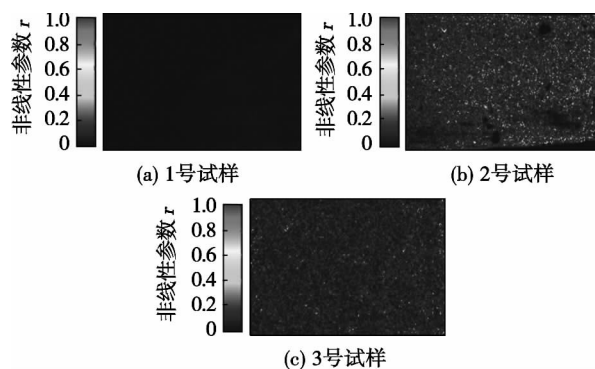


图3 扩散焊界面的非线性图像

Fig. 3 Nonlinear images of diffusion bonding

界面上焊接质量的差异。根据以往的检测经验,一般认为超声 C 扫描图像中的反射能量很高的区域对应的界面状态为未焊合缺陷。因此可以初步地判断未焊合缺陷的非线性效应最弱,而非线性效应较强的区域所对应的界面状态还需通过破坏性试验进行对照。

4 试验验证

4.1 界面显微特征

由超声 C 扫描结果、固相连接接头超声非线性理论和超声非线性图像能够初步判定不同试样中扩散焊界面处未焊合缺陷、弱结合缺陷和焊接良好区域所处的位置,为了对其进行验证,首先主要分析了 3 个不同区域的显微特征,分别为(1)界面回波反射能量高且非线性效应弱的区域;(2)界面回波反射能量低且非线性效应强的区域;(3)界面回波反射能量低且非线性效应较强的区域。图 4 中白线代表显微分析的位置。界面显微照片如图 5 ~ 图 7 所示。

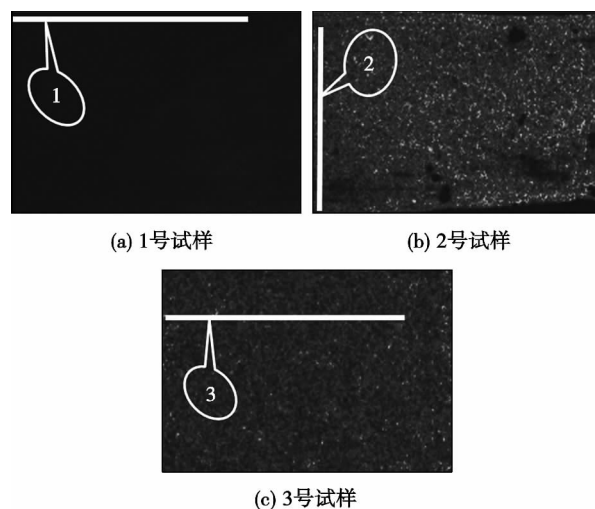


图4 金相分析位置示意图

Fig. 4 Schematic of metallographic analysis positions

4.1.1 区域 1

1 号试样在图 4a 所示的位置 1 处界面的显微组织形貌如图 5 所示,界面上分布着一条狭长的间隙,长度达到毫米级,其宽度在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上,其对应的界面回波反射能量高,而超声非线性效应较弱,根据以往的检测经验,可以判断此处属于未焊合缺陷。

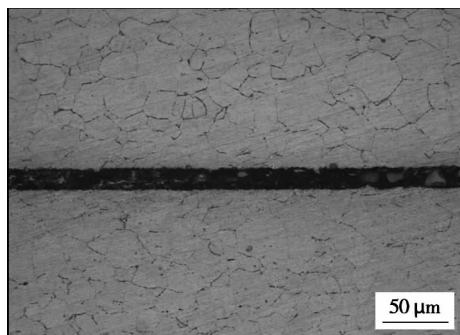


图 5 区域 1 处显微组织

Fig. 5 Microstructure photograph in zone 1

4.1.2 区域 2

2 号试样在图 4b 所示的位置 2 处界面上分布着如图 6 所示的缺陷,从图 6 可以看出,试样的两表面贴合得非常紧密,其间隙的厚度在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下,其对应的界面回波反射能量低,而超声非线性效应强,此处为弱结合缺陷。

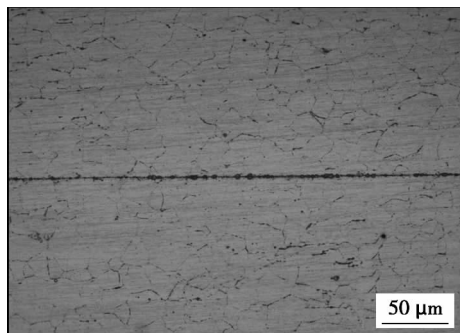


图 6 区域 2 处显微组织

Fig. 6 Microstructure photograph in zone 2

4.1.3 区域 3

3 号试样在图 4c 所示的位置 3 处界面的显微组织形貌如图 7 所示,两种被焊材料原子间充分地扩散,界面达到良好地结合,未发现明显的缺陷,其对应的界面回波反射能量低,而超声非线性效应较强,此处应该具有较高的结合强度。

4.2 扩散焊接头剪切试验

为了整体认知试样的扩散焊质量,分别对 3 个不同的区域进行剪切试验。试验结果表明,区域 1

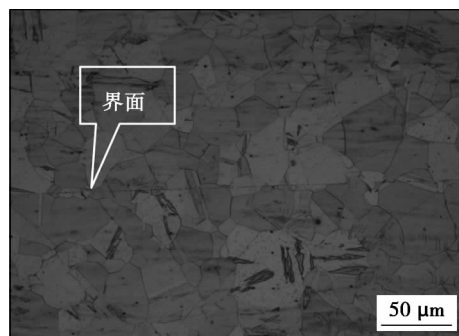


图 7 区域 3 处显微组织

Fig. 7 Microstructure photograph in zone 3

处的抗剪强度均为零,且其回波幅度很高,属于未焊合缺陷。区域 3 处的抗剪强度都在 150 MPa 以上,其抗剪强度的均值高达 251.3 MPa ,并且在其界面处可以看到被焊材料原子充分扩散的显微特征,将其界定为焊接良好界面。而区域 2 处的抗剪强度都较低,其抗剪强度的均值为 103.3 MPa ,且回波幅度很低,而且从金相分析中也可以看到宽度在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下的间隙,属于弱结合缺陷。

通过金相分析和剪切试验的结果,可以确定界面回波反射能量高且非线性效应弱的区域、界面回波反射能量低且非线性效应强的区域和界面回波反射能量低且非线性效应较强的区域所对应的界面状态分别为未焊合缺陷、弱结合缺陷和焊接良好界面。因此从总体上来看,弱结合缺陷的非线性响应比焊接良好界面的强,这在一定程度上可以用来区分弱结合缺陷和焊接良好界面。因此可以在一定程度上将超声 C 扫描成像和非线性超声成像结合起来实现扩散焊接头的无损检测。

5 结 论

(1) 分析了粗糙界面模型下固相连接接头的接触声非线性响应。结果表明,弱结合缺陷的超声非线性响应最强,而焊接良好界面和未焊合缺陷的超声非线性响应较弱。

(2) 在扩散焊界面超声非线性行为分析的基础上,利用区间搜索法分别实现了扩散焊界面的超声非线性成像。

(3) 通过金相分析和剪切试验,研究了扩散焊接头不同界面状态的超声非线性响应。结果表明,弱结合缺陷的超声非线性效应最强,其次是焊接良好界面,未焊合缺陷的超声非线性效应最弱。

(4) 非线性超声检测对弱结合缺陷比较敏感,可在一定程度上将超声 C 扫描成像与其结合起来实

现扩散焊接头的无损检测.

参考文献:

- [1] 刚 铁,高桥康夫. 扩散接头质量评价现状[J]. 无损检测, 2003, 25(8): 410-414.
Gang Tie, Yasuo Takahashi. Review of quality evaluation of diffusion bonded joints [J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(8): 410-414.
- [2] Wang Min, Dai Junwei, Guo Hongzhen, *et al.* Fracture analysis of superplastic diffusion bonding joints between titanium alloy and stainless steel [C] // Proceedings of 6th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, Jeju Island, 2007: 1011-1014.
- [3] Solodov I Y. Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications [J]. Ultrasonics, 1998, 36(1): 383-390.
- [4] Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing [J]. Nondestructive Testing and Evaluation International, 2001, 34(4): 231-238.
- [5] Rothenfusser M, Mayr M, Baumann J. Acoustic nonlinearities in adhesive joints [J]. Ultrasonics, 2000, 38(3): 322-326.
- [6] 陈振华,史耀武,焦标强,等. 薄镀锌钢板点焊超声谐振检测 [J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 101-104.
Chen Zhenhua, Shi Yaowu, Jiao Biaoqiang, *et al.* Ultrasonic low-frequency resonant test of spot welding of zine-coated steel sheet [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 101-104.
- [7] 施克仁. 无损检测新技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [8] Wu Ping. Nonlinear interaction of ultrasound with an unbounded rough interface [C] // Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium, Rotterdam, The Netherlands, 2005: 289-292.
- [9] 税国双,汪越胜,曲建民. 材料力学性能退化的超声无损检测与评价 [J]. 力学进展, 2005, 35(1): 53-54.
Shui Guoshuang, Wang Yuesheng, Qu Jianmin. Advances in non-destructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 53-54.

作者简介: 叶佳龙,男,1986 年出生,硕士. 主要从事特种设备检验. Email: yyjdlm@163.com

通讯作者: 刚 铁,男,教授. Email: gangt@hit.edu.cn

pared using nanostructured zirconia powder by plasma spray process , and then the coatings were treated by laser glazing. The effect of laser glazing process parameters (laser input energy density) on the thermal shock resistance was investigated. It is shown that the thermal shock resistance of coating is significantly changed with the different laser glazing process parameters. Excellent properties of thermal shock resistance can be achieved under optimized process parameters. It is indicated that the microstructures are different while using different process parameters , which results in different thermal shock resistance of zirconia coating. The surface morphology and microstructure of laser-glazed coating are beneficial to the release of thermal stress , and the phase composition is stable during thermal shock. It is believed those are responsible for the improvement of thermal shock resistance of zirconia coatings after laser glazing treatment.

Key words: plasma spraying; zirconia coating; laser glazing , thermal shock resistance

Ultrasonic nonlinear imaging in diffusion bonding of 304 stainless steel YE Jialong^{1,2} , GANG Tie¹ (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China; 2. Xiamen Special Equipment Inspection Institute , Xiamen 361004 , China) . pp 95 – 99

Abstract: Signal processing was adopted in order to study the nonlinear behavior of ultrasound in diffusion bonding. First of all , diffusion bonding samples which contain typical defects were made by controlling the surface treatment before welding and changing the welding process. Ultrasonic testing was performed to obtain the data of ultrasonic signal which correlate with the joint states. Ultrasonic nonlinear effects of different states in diffusion bonding of stainless steel were analyzed from the points of view of the theory of ultrasonic nonlinearity in the joints of solid-phase connection , ultrasonic nonlinear images , microstructures and shear strength. The results showed that nonlinear ultrasonic testing was more sensitive to kissing bonds. It is possible to achieve nondestructive testing in diffusion bonding based both on C-scan images and ultrasonic nonlinear images to some extent.

Key words: diffusion bonding; ultrasonic nonlinearity; kissing bonds

Laser welding characteristics of 2A97 Al-Li alloy

HUANG Min , LI Guoai , ZHANG Kun , WANG Shaohua (Beijing Institute of Aeronautical Materials , Beijing 100095 , China) . pp 100 – 104

Abstract: Butt joints of 2.0 mm thick sheets of 2A97 aluminum-lithium alloy have been produced using laser autogenous welding method. The microstructure and properties of welded joints with different welding parameters (laser power and weld speed) were studied by optical microscope , scanning electron microscopy (SEM) , microhardness tester and tension tester , respectively. The results show that the welded joint efficiency increase with the increasing of input power , the optimal input power is about 0.9 – 0.95 kJ/cm for 2A97 sheet with 2.0 mm thickness and the joint efficiency reach 0.8. The columnar grains zone (CGZ) is the weakness region of welded joint , the distribution of CGZ in fusion zone (FZ) increases with the decreasing of input power and accompanied with welding pore , which results in

the dropping of welded joint efficiency.

Key words: 2A97 Al-Li alloy; laser welding; welded joint efficiency; microstructure

Intergranular corrosion behaviour of friction stir welded joints of 6005A aluminium alloy

DONG Peng , SUN Daqian , LI Hongmei , WANG Bing (School of Materials Science and Engineering , Jilin University , Changchun 130025 , China) . pp 105 – 108

Abstract: The intergranular corrosion (IGC) behaviour of friction stir welded 6005A aluminium alloy was investigated. The results show that the base material (BM) is the most susceptible to IGC and the heat affected zone (HAZ) takes the second place , while the nugget zone (NZ) and thermo-mechanically affected zone (TMAZ) show high resistance to IGC. The corrosion behaviour in different zones could be well explained from microstructural observation by means of field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) . IGC in the BM was caused by two microgalvanic couplings of precipitate free zone (PFZ , anode) / cathodic precipitates (Q and Si phases) and the PFZ (anode) / matrix. The coarsening of the intergranular precipitates as well as the precipitation of the intragranular Q' phases in the HAZ reduced the microgalvanic driving force causing IGC and introduced the pitting corrosion. The relatively homogeneous microstructure both in NZ and TMAZ restrained the occurrence of IGC.

Key words: friction stir welding; aluminium alloy; intergranular corrosion; grain boundary precipitates

Mechanism of solidification cracking of resistance spot welded magnesium alloy

LIU Duo¹ , LANG Bo² , SUN Daqian³ , YUAN Shidong⁴ (1. Shenyang Institute of Special Equipment Inspection and Research , Shenyang 110035 , China; 2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute , Beijing 100024 , China; 3. School of Materials Science and Engineering , Jilin University , Changchun 130025 , China; 4. Morimatsu (China) Group , Shanghai 201323 , China) . pp 109 – 112

Abstract: For achieving joint with high performance , mechanism of cracks in resistance spot welded magnesium alloy joint was investigated by optical microscopy , scanning electron microscope and energy dispersive spectrum , respectively. The formation of solidification cracking is caused by low melting point liquid films between dendrites due to segregation of Al and Mn atoms and tensile stress developed during cooling. Spot welding parameters (heat input) have a significant effect on susceptibility of the weld nugget to solidification cracking. The sensibility of solidification cracking increases with heat input. Because the larger heat input , the larger tensile stress caused by the shrinkage of the nugget is formed , and the lower melting point of liquid films is due to solute atom segregation with greater concentration and prolonging time for tensile stress affecting. It is favorable to select relatively low heat input for reducing sensibility of welded joint to solidification cracking.

Key words: resistance spot welding; magnesium alloy; solidification cracking