

# 薄钢板点焊接头超声信号分析

赵新玉, 刚 铁, 袁 媛

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用水浸超声聚焦直入射法对镀锌薄钢板点焊接头进行了质量评价。详细分析了点焊接头的 A 扫描信号、B 扫描及 C 扫描图像特征, 探讨了沿焊核直径 B 扫描评价焊点质量方法的可行性。研究表明, 采用这种方法不但可以定性评价虚焊接头与完好接头, 还可以定量计算出上下表面压痕深度及熔核直径。对比沿焊核直径 B 扫描图像与横截面的金相图像, 两者吻合较好, 证实了检测结果的准确性。

关键词: 超声检测; 水浸聚焦; 电阻点焊

中图分类号: TG 115.28+5 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)11-101-05



赵新玉

## 0 序 言

电阻点焊作为一种高效、廉价且机械化和自动化程度较高的连接技术, 在工业中得到了广泛的应用。点焊的无损检测技术可以有效地提高和稳定焊点的质量, 节约生产成本, 因而成为无损检测领域的研究热点问题<sup>[1]</sup>。虽然电导性检测、热导性检测、红外线检测、X 射线检测和涡流检测等方法可对点焊接头进行检测, 但是难以可靠地检测出缺陷及焊核尺寸等信息。超声脉冲回波法是最常用的点焊无损检测方法。这种方法通过分析 A 扫描回波信号, 可以定性地评价完好接头与虚焊接头, 回波信号易于自动分类识别。但是单一的 A 扫描回波信号无法定量检测熔核尺寸及压痕深度等信息<sup>[2~4]</sup>。采用聚焦探头多次回波法进行 C 扫描可以检测出焊核尺寸及缺陷大小<sup>[5,6]</sup>, 但扫描时间较长, 且目前对检测结果的处理与评价方法还有待于进一步完善。作者采用水浸聚焦探头直入射法分析了镀锌薄钢板点焊接头缺陷信号的特征, 探讨了沿焊核直径 B 扫描评价焊点质量方法的可行性。

## 1 试件的制备及试验方法

试验材料为镀锌钢板, 板厚为 0.7 mm。通过控制焊接工艺参数(通过增加焊接电流或焊接时间来增大焊接热输入量), 制备出虚焊与完好形核的点焊试件。研究所使用的超声检测系统具有参数预置, 数据采集与波形存储等功能, 试验采用 20 MHz

聚焦探头对点焊试件进行水浸扫描, 具体方法及回波信号示意图见图 1。检测时, 试样水平放置, 通过计算设定合适水程, 使焦点聚在搭接接头的结合面上, 聚焦探头在工件中焦柱长度为 2.4 mm, 焦点直径为 0.42 mm。

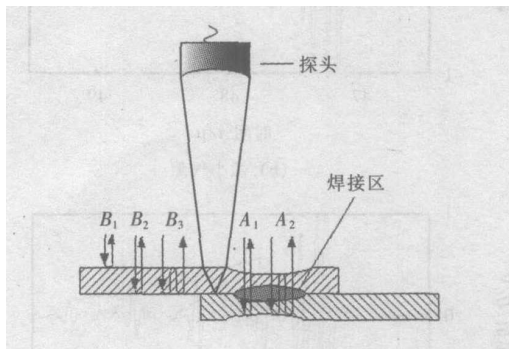


图 1 原理示意图

Fig. 1 Schematic of experimental method

## 2 点焊主要缺陷及其信号特征

点焊接头的主要质量问题是虚焊。由于焊接工艺参数不合理或分流引起电流密度降低等原因使得工件获得的热输入量不足, 两板间金属只有少部分熔化, 结晶时表面镀层不能充分扩散到周围区域而在熔合线附近析出, 两板并非完全冶金结合, 抗剪强度低。这时在点焊连接区域, 上、下两板主要表现为三种结合状态: 冶金结合区域; 在某些区域出现微小气隙薄层; 焊核某些区域为弱结合状态, 两板紧密接触无气隙, 但并非冶金结合。这三种不同结合状态的典型超声回波信号见图 2。在冶金结合区域,

声波完全透过结合面,在下板底面被反射。两次底面反射波间的距离即为焊核区厚度的 2 倍。如果贴合面处存在气隙薄层,由于空气与钢的声阻抗相差很大,在各次底面回波之间将会出现明显的回波信号。理论上,在钢中的一个  $1\text{ }\mu\text{m}$  宽的裂纹里充满油时,若超声波的频率为  $1\text{ MHz}$  时,可以获得 6% 的反射,用超声反射法探测裂纹灵敏度较高的原因就在于此。一般来说频率越高越容易发现小裂纹。

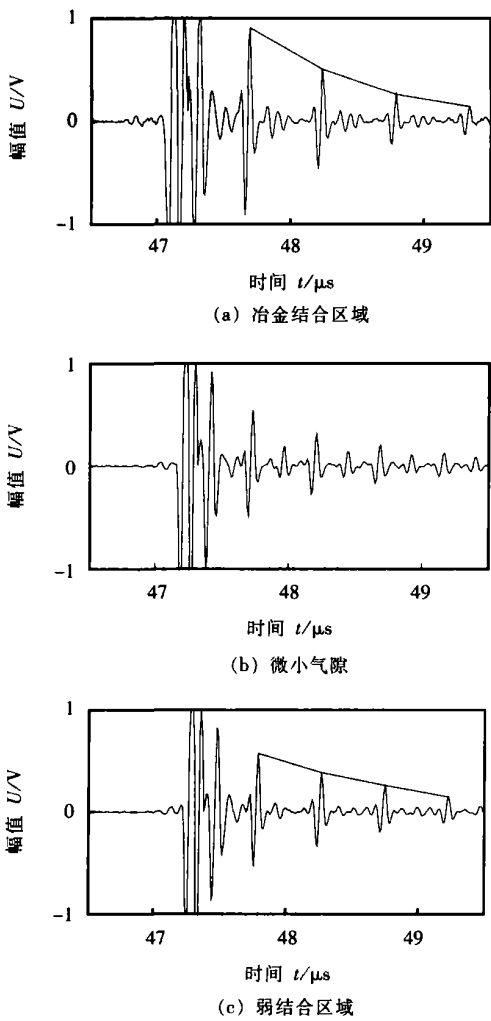


图 2 焊点不同结合状态区域 A 扫描信号  
Fig 2 A scan signals of three typical spot weld zones

对于弱结合层,声波可以完全透过,很难从声速的角度将其与冶金结合区域区分开,有效的方法是利用各次底面回波的幅值衰减。材料晶粒越粗大,对声波的散射作用越强,回波幅值的衰减越快。与弱结合区域相比,冶金结合区域热输入量相对充分,因而冶金结合区域接头组织较弱结合区域组织粗大,其超声波衰减大于轻微粘连弱结合区域的超声波衰减。图 2a、c 分别是电极压力 (3 300 N) 与焊

接电流 (10 kA) 相同,焊接时间分别为 10 周波与 6 周波两组试件中抽取的典型回波信号。图 2a、c 各次底面回波峰值比较如见表 1,为便于比较,对回波峰值归一化,以  $A_i, i=1, 2, 3, \dots$  表示焊核区底面各次回波,表中数值为各次底面回波幅值与其一次底面回波幅值之比,从中可以明显看出由于热输入量不同造成的回波衰减差异。

表 1 不同区域底面回波比较  
Table 1 Comparison of echo from bottom in different zones

归一化幅值	$A_1/A_1$	$A_2/A_1$	$A_3/A_1$	$A_4/A_1$
冶金结合	1	0.56	0.28	0.15
弱结合	1	0.67	0.45	0.26

3 C 扫描图像及 B 扫描图像特征

垂直焊点表面进行二维扫描获得的 C 扫描图像见图 3。图像灰度值对应选通闸门内信号幅值,通过设定电子闸门的延迟时间,可以探测到物体在某一深度横断面的像,但 C 扫描图像难以反映整体深度信息。对于点焊而言,整体深度信息十分重要,因为其包含与结合状态密切相关的幅值衰减信息。另外,由于需要二维扫描,扫描时间较长,扫描效率较低。

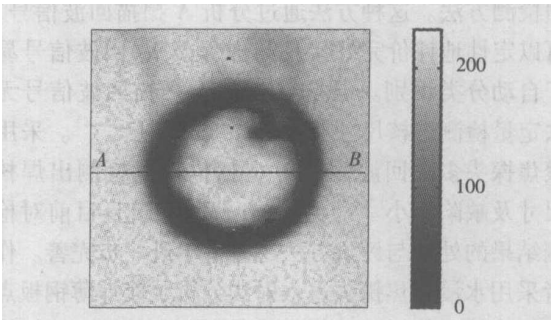


图 3 C 扫描图像  
Fig. 3 C scan image

B 扫描图像是由一组 A 扫描信号构成,所显示的是与声速传播方向平行且与试件测量表面垂直的剖面信息。完好形核试件沿焊核直径 AB 的 B 扫描图像及对应点的 A 扫描信号见图 4。信号 a、b 分别是对应于母材与焊核区的典型回波信号。

采用等厚板连接时,由于表面压痕的影响,焊核区厚度略小于母材板厚的 2 倍,因而完好形核的焊核区 A 扫描各次回波时间间隔约为母材 A 扫描信号回波间隔的 2 倍。据此,在 B 扫描图像中易于区

分焊核区与母材。参考图 1 中反射模式回波示意图, 母材中平行直线分别对应上板表面回波  $B_1$  及上板底面各次回波  $B_2$ 、 $B_3$  等; 焊核区各平行直线分别对应表面波  $B_1$  及下板底面各次回波  $A_1$ 、 $A_2$  等。

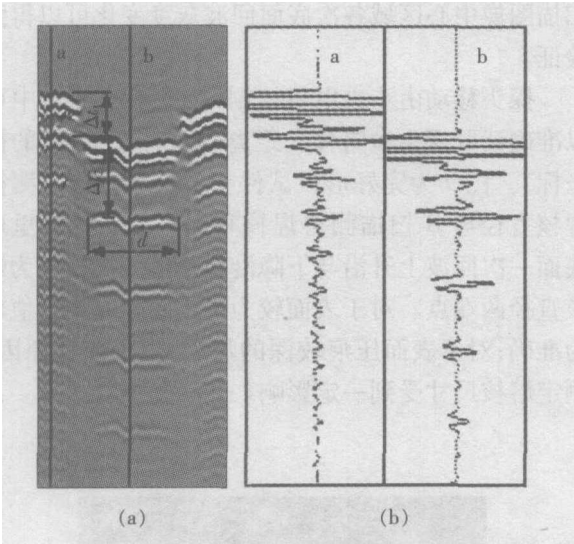


图 4 完好形核试件 B 扫描图像及 A 扫描信号  
Fig 4 B-scan image and A-scan signal of good spot weld

在焊核边缘, 由母材向焊核扫描时, 上板底面各次回波逐渐降低, 下板底面各次回波逐渐升起, 存在一个过渡带。图 5 为电子闸门监视底面一次回波时, 闸门内信号峰值随扫描轴变化情况。左右区域为母材区上板底面二次回波峰值, 中部为焊核区底面一次回波峰值。在过渡区域回波幅值相对较低, C 扫描图像中表现为焊核周围出现暗环。焊核区底面一次回波的变化情况与熔核尺寸大小具有相关性, 可以通过设定合适阈值计算焊核直径  $d$  见图 5。

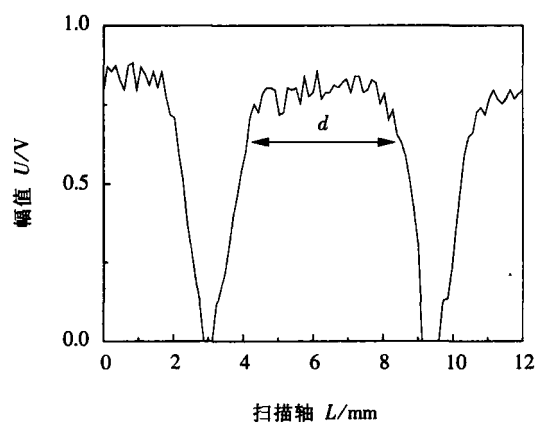


图 5 回波峰值沿扫描轴变化图

Fig 5 Variation of echo peak with scan axis

影响过渡带区域大小的主要因素为: (1) 由于压痕边缘处表面状态突变, 在突变处入射声波反射到其它方向, 换能器只能接收到部分反射回波, 造成回波幅值衰减。(2) 超声扫描时, 横向分辨率由聚焦换能器焦点直径大小决定。因而峰值上升与下降的斜率受换能器焦点直径大小影响。

由于表面压痕深度的影响, 焊核区表面回波在时间上滞后于母材表面回波信号, 由母材与焊核区表面波间的延迟时间  $\Delta t_1$  及焊核区表面回波与底面一次回波间的时间延迟  $\Delta t_2$  可计算上、下表面压痕深度  $h_1$ 、 $h_2$

$$h_1 = \frac{1}{2} c_1 \Delta t_1 \tag{1}$$

$$h_2 = 2 \delta - \frac{1}{2} c_2 \Delta t_2 - h_1 \tag{2}$$

式中:  $\delta$  为板厚;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为耦合介质与材料的声速。

图 6 为不同焊接工艺参数下 (从左至右, 热输入量由高到低) 的点焊试件的 B 扫描图像。表面回波声压与底面一次回波声压比值约为 7.5%, 表面回波幅值较高, 衰减慢, 有可能掩盖缺陷回波, 因此在表面波与底面一次回波之间的缺陷信号不明显; 相比之下, 底面各次回波之间的缺陷信号较为明显。图 6 中三个试件由左到右依次为焊接时间 12 周波、8 周波、4 周波。由图中可以看出当焊接热输入量相对充足时相邻两次回波之间没有明显的缺陷回波信号, 随着热输入量降低, 贴合面处上下板金属出现未熔合区域, 因而在各次底面回波间出现明显缺陷回波信号, 当热输入量降低到不足以形核时, 整个上下板界面都出现明显的回波信号。

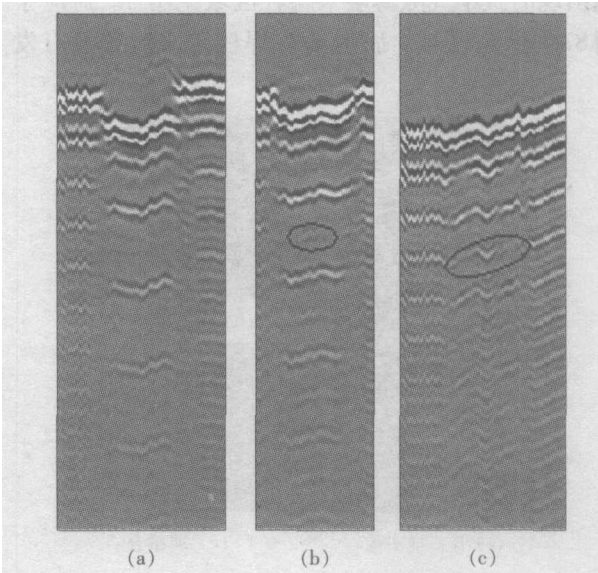


图 6 B 扫描图像对比分析

Fig 6 Comparison of B-scan images

含有分层缺陷焊点的 B 扫描图像及 A 扫描信号见图 7。a 为焊核中结合良好区域的 A 扫描信号, b 为微小气隙分层区域的 A 扫描信号。在分层区, 一部分声波在贴合面处反射, 另一部分声波透过贴合面, 在下板底面反射。因而分层区域在下板底面各次回波之间出现明显的回波信号。

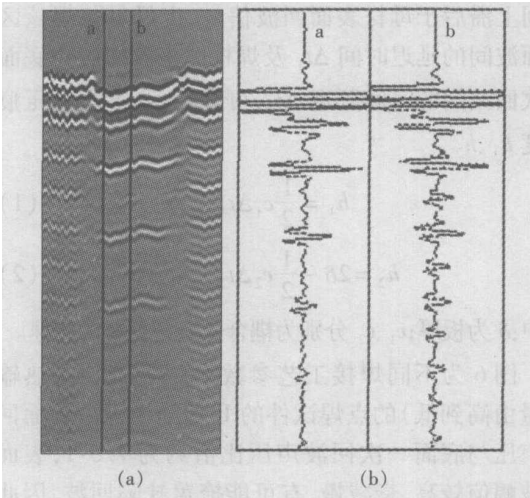


图 7 分层缺陷试件 B 扫描图像及 A 扫描信号  
Fig 7 B scan image and A scan signal of delaminating defect

4 破坏检测对比分析

热输入量不足时的典型试件 B 扫描图像与金相照片对照见图 8。将焊件沿 B 扫描断面线切割, 金相砂纸打磨并抛光, 腐蚀前观察到的位于焊核两端出现的微小气隙薄层未融合区域见图 8b, 对应于图 8a 中所示区域。腐蚀前在焊核中心区域没有发

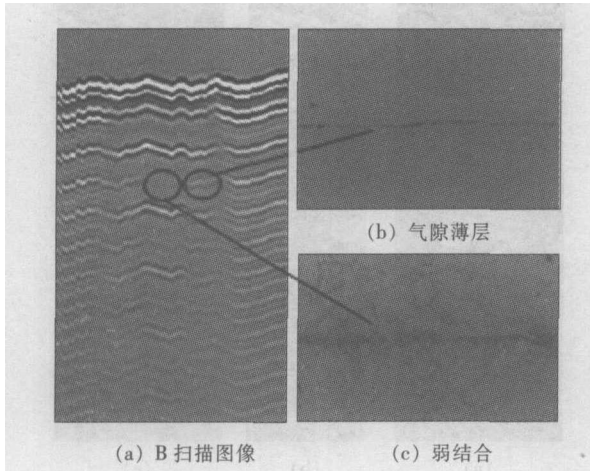


图 8 B 扫描图像与金相图像对比  
Fig 8 Comparison of microscopic image and B scan image

现气隙薄层未熔合区域, 再用 5% 的硝酸酒精溶液腐蚀。图 8c 为腐蚀后焊核中心区域的金相照片。由于热输入量的不足, 镀层中的锌未得到充分扩散, 锌的抗腐蚀能力较弱, 在腐蚀后的金相照片中可以明显地观察到沿贴合面存在富锌区弱结合。由于没有形成完好熔核, 因而回波幅值衰减较为缓慢, 从 B 扫描图像中心区域各次底面回波灰度变化可以得到验证。

探头移动由步进电机控制, 在 B 扫描图像中可以准确读取探头横向移动距离 (B 扫描图像中的横坐标)。图 9 为完好形核试件在工具显微镜下测得焊核直径与 B 扫描测得焊核直径的比较。这里取底面一次回波上升沿与下降沿斜率最大值处作为熔核直径两 endpoints。对于表面较为平整的焊点测定值较为准确; 对于表面压痕较深的焊点, 由于前述原因, 测定熔核尺寸受到一定影响。

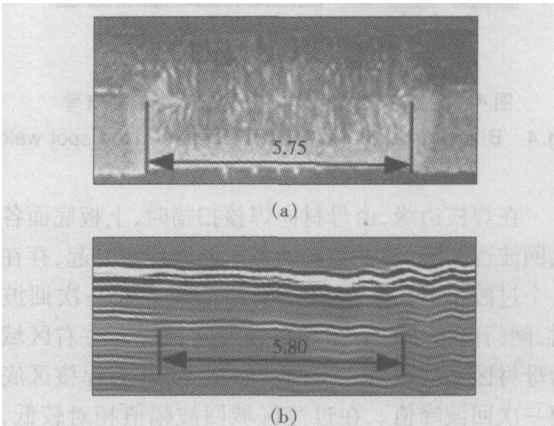


图 9 B 扫描与金相图像熔核尺寸比较  
Fig 9 Comparison of nugget diameter in B scan image and microscopic image

5 结 论

- (1) 沿焊核直径 B 扫描图像能够有效检测出不同结合状态点焊接头 (完好焊点、含有气隙薄层及弱结合接头), 与金相照片相比较, 具有较好的一致性。
- (2) 沿焊核直径 B 扫描评价焊点质量方法具有一定可行性, 这种方法不但可以定性评价虚焊接头与完好接头, 还可以定量计算出上下表面压痕深度及熔核直径。
- (3) B 扫描与脉冲回波法获得的 A 扫描信号相比信息量更丰富, 与 C 扫描相比执行效率更高。如

采用局部液浸或喷水装置, 有望在工业中得到广泛的应用。

参考文献:

[ 1 ] Donald J Spinelka, John R Brockenbrough, Joseph M Fridy. Trends in aluminum resistance spot welding for the auto industry [ J ]. Welding Journal, 2005, 84( 1 ): 34 - 40.

[ 2 ] Mansour T. Ultrasonic inspection of spot welds in thin gage steel [ J ]. Materials Evaluation, 1988, 46( 5 ): 650 - 658.

[ 3 ] Ayte Ercil Yagnur Denizhan, Ahmet Okcular, *et al*. Classification trees prove useful in nondestructive testing of spot weld quality [ J ]. Welding Journal, 1993, 72( 9 ): 59 - 67.

[ 4 ] Tusek J, Blahnik T. Ultrasonic detection of lack of fusion in spot welds [ J ]. Non destructive Testing and Condition Monitoring, 2002, 44( 11 ): 684 - 688.

[ 5 ] Marty Jones. NDT of resistance spot welds: Trends and spikes [ J ]. Material Evaluation, 1999, 57( 9 ): 1243 - 1248.

[ 6 ] Shinobu Satonak, Kiri-ichi Matsuyama. Review on inspection techniques for spot welds [ J ]. Welding Research Abroad, 2001, 47( 2 ): 4 - 10.

**作者简介:** 赵新玉, 男, 1979 年 1 月出生, 博士研究生。主要从事超声无损检测与评价技术的研究。

**Email** xyz88@hit.edu.cn

status of joint were evidently affected by changing of  $h$ , (i. e. beam offset on steel side), a small quantity of metal QCr0.8 melted down into weld as value of  $h$  was less, a large difference of microstructures and chemical composition existed in comparison of weld with base metal QCr0.8. With increasing of  $h$ , the microstructure distribution of joint becomes homogeneous gradually, but the bad fusion's status happened to QCr0.8 side in weld due to unbalanced heat input and rapid heat conduction of QCr0.8. Even if  $h$  increased in little range, base metal QCr0.8 may not be fusion, which resulted in forming joint of local fusion or lack of fusion.

**Key words:** electron beam welding; microstructure; phase composition

**Hydrogen behavior in titanium alloy EBW joints** WANG Ya-jun<sup>1,2</sup>, TANG Xiao-qing<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>2</sup>, GUAN Qiao<sup>2</sup> (1. Beijing hangkong university, Beijing 100083, China; 2. Beijing aeronautical manufacture technology research institute. Beijing 100024, China). p93 – 96

**Abstract:** The electrolytic hydrogen charging with constant current and X – ray diffraction were used to investigate the hydrogen content threshold of the hydrogen induced cracking for Ti1023 titanium alloy EBM joints and the effect of the microstructure phase on sensitivity of hydrogen induced cracking. The scanning electronic microscopy was employed to observe the fracture appearance on different hydrogen charging condition. By means of the artificial aging and ion probe analysis, the dynamic behavior of hydrogen in Ti1023 titanium alloy EBM joints was also studied in this paper.

**Key words:** Ti1023 titanium alloy; EBM; hydrogen induced cracking

**Application of fuzzy-PID control on seam tracking for welding-robot**

YE Jian-xiong, ZHANG Hua (school of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China). p97 – 100

**Abstract:** A convenient and effective close loop control scheme, had been proposed to satisfy the aim of seam tracking based on the analysis of the welding-robot modeling and its control link in this paper. With the introduction of fuzzy controller and PID controller and with the adoption of the simulation on the differentiated modeling, the characteristics of the hybrid manipulator were illuminated. In the end, some conclusions were drawn on the base of analysis of the different response curves.

**Key words:** fuzzy; PID; hybrid-manipulator; self-adaptation; simulation

**Ultrasonic signal analyses of spot welds in thin steel sheet** ZHAO

Xin-yu, GANG Tie, YUAN Yuan (State key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p101 – 105

**Abstract:** The quality of spot welds in galvanized sheet metal was evaluated by using ultrasonic water immersion focusing method. The A-scan signal, B- and C-scan image features of spot welds were analyzed. The feasibility of evaluating the quality of spot welds by using the B-scan image was provided. By using the method, not only the kiss bonding and the perfect joint could be evaluated qualitatively, but also the pressure mark depth of the upper-bottom surface and the spot weld diameter could be calculated quantitatively. The accuracy of testing result was verified by contrasting the metallographs of actual spot welds cross section.

**Key words:** ultrasonic test; water immersion focusing; resistance spot weld

**Comparison of fatigue property for TIG welding of TC4 and TA15**

**titanium alloy** WANG Xiang-ming (Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China). p106 – 108

**Abstract:** As the researched objects, TIG welded test specimens of titanium TC4 and TA15 were selected, and their fatigue tests were done under different constant amplitude spectrums with four stress levels, respectively. According to the contrast analysis for the fatigue test results by use of three-parameter-model of fatigue life founded in this paper, the fatigue property of TA15 TIG weld was better than TC4 TIG weld appreciably in  $10^4 \sim 10^6$  region. The possible affected factors were discussed.

**Key words:** Titanium; weld; fatigue

**Experimenteal research on high Temperature CTOD of electron**

**beam welded joints of GH4169 alloy** WU Bing<sup>1</sup>, ZUO Cong-jin<sup>1</sup>, LI Jin-wei<sup>1</sup>, ZHANG Yan-hua<sup>2</sup>, XIONG Lin-yu<sup>2</sup> (1. BAMTRI, Key laboratory for high energy density beam processing technology, Beijing 100024, China; 2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China). p109 – 112

**Abstract:** In accordance with GB/T 2358-94, CTOD (crack-tip opening displacement) tests were conducted at 650 °C for electron beam welded joints of GH4169 alloy. According to the requirements of the standard, the specimen was a standard SE(B) (three point bending), the results were calculated using the P-V curves of parent material and weld metal. Finally, the test results were summarized and analysed.

**Key words:** electron beam welding; GH4169; high temperature; CTOD