

基于频谱分布分析及神经网络的点焊超声检测

陈振华¹, 史耀武¹, 赵海燕²

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124;
2. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)



陈振华

摘 要: 分析了检测信号的频谱分布, 采用小波分析的方法提取了能够描述点焊超声波频谱分布特征及功率特征的超声检测特征值。由这些检测特征值构成超声特征矢量, 结合 BP 神经网络的模式识别功能对点焊直径进行精确分类与识别。与传统时域分析方法相比较, 具备更高识别能力、更高的识别效率、更少的识别特征以及更小的外部干扰因素。

关键词: 电阻点焊; 超声检测; 神经网络; 特征矢量

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2009)10-0076-05

0 序 言

传统的点焊超声检测方法通过分辨超声在基板和焊核上的反射序列波来评价焊核的大小, 其检测效果依赖于检测者的经验且仅能根据探头的直径检测一定范围直径的焊核^[1]。超声成像方法可以测量焊核直径及识别虚焊^[2,3], 但检测速度慢、成本高, 不适于在线检测。赵欣等人^[4]采用峰值标记识别算法对虚焊接头进行快速识别, 该方法能够快速准确的识别虚焊缺陷, 但不能对焊核尺寸作更精确的分类。Oscar 等人^[5]依据焊核多次反射波在时域中的衰减及峰值间隔结合神经网络对焊核进行分类, 该方法所需特征值较多、网络较复杂且识别能力有限。此外, Rokhlin 等人^[6]分析了点焊信号的频域特征并且得到了一些有用的结论。

文中针对焊核超声信号的时域分析方法不够精细、时域信号特征值较多、容易混淆、不易判别的不足, 提出了一种基于超声信号频谱分布特征的分析方法。针对高强度镀锌钢板的超声检测, 得出了能够描述超声检测信号频谱分布以及超声衰减的特征矢量。采用该特征矢量对 BP 神经网络进行训练, 能够有效的对点焊焊核直径进行识别, 提高了焊核的超声检测精度和效率。

1 试验方法

检测试样如图 1 所示。材料为高强度汽车涂层

钢板 DP600。通过改变焊接电流制备不同焊核直径的检测试样。

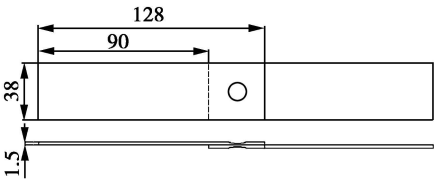


图 1 试样的形状及尺寸 (mm)
Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

检测探头为 G20MNX 点焊检测专用探头: 探头直径为 5 mm, 中心频率为 20 MHz。试样水平放置, 以机油为耦合剂。将探头下部水膜的突出部位置于焊核中心处, 采集点焊结合面的超声波信号序列。设定采样频率为 100 MHz, 信号时间宽度为 10.24 μ s, 记录 A 扫描信号。采用手动方式调整探头位置, 对同一焊核进行多次采样获得同一焊核的 10 个 A 扫描信号。提取超声 A 信号后, 对试样进行剥离试验, 测量焊核的直径。

2 点焊超声信号分析

高强度镀锌钢板的组织结构有其自身的特点, 高强度镀锌钢板 DP600 由铁素体和马氏体组成, 焊核融合区主要是由粗大的柱状马氏体组织构成。由于受高强钢镀锌钢板的高强度以及镀锌层的影响, 点焊过程中需要较高的电极力和电流强度, 因此钢

板在点焊过程中容易产生飞溅造成熔合区组织金属不足、凹痕过深、焊核形状变坏, 并导致力学性能的降低^[7]。良好的高强钢点焊质量具备的组织结构特征包括: 粗大的柱状晶组织、规则的焊核形状、较大的凹痕深度(小于板厚的 25%)^[8]。超声波在入射到焊核时发生多次反射及衰减。超声衰减随焊核内部柱状晶的增大而增大, 波速随柱状晶的增大而减小, 焊核厚度还影响超声波传播时间及频谱共振峰的间隔。焊点的组织结构特征对超声信号的相互作用可以用于评价焊核的质量。

检测信号的时域分析能够对焊核质量粗略分级, 但是它忽略了超声检测中的其它重要信息且易受外界噪声及检测人员主观判断的影响, 容易发生误检。作者分析了焊核超声信号频谱分布, 获取能够反映焊核特征的多个超声特征值。这些特征值能够反映超声信号的频谱分布, 并且与超声的衰减、超声在焊核中的声速以及焊核形状相联系。将这些特征值组成特征矢量空间并结合 BP 神经网络可以用于焊核直径的自动识别中。

3 检测信号的频谱分析及其分布特征

3.1 超声反射信号频谱形状特征

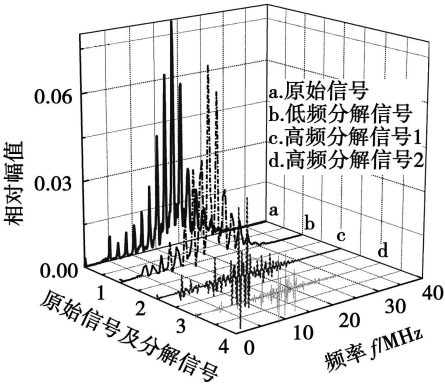
图 2 为直径不足焊核和完好焊核的频谱分布。焊核检测超声序列波的频谱由一系列共振峰组成, 这些共振峰是声波在板中多次叠加引起的半波谐振信号。薄板中多次反射叠加引起的谐振信号满足关系式^[9]

$$f_n = \frac{nc}{2d} \tag{1}$$

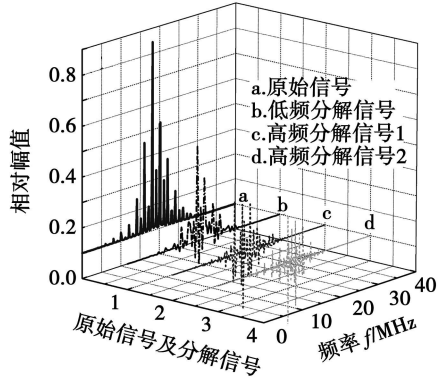
式中: f_n 为基板中第 n 次半波谐振频率; c 为板中声速; d 为板厚; n 为整数。式(1)显示: 谐振峰的峰值、峰值宽度和峰值间隔包含了大量的焊核信息, 能够反映焊核的厚度、超声声速。此外由于焊核中声

速与焊核中晶粒尺寸有关, 检测信号的频谱分布也与焊核的晶粒大小相联系。

若采用检测信号频谱分布中的峰值和峰值间隔作为特征值将导致特征值过多、特征值不稳定、识别网络复杂等弊端。因此应找出能够反映信号频谱分布特征的特征值。小波变换能同时反映信号的突变和缓变特征, 采用二层小波分解的方法可以将信号的频谱分布分解为一个低频分布和两个高频分布(图 3)。



(a) 完好焊核



(b) 直径不足焊核

图 3 完好焊核和直径不足焊核(小于探头直径)频谱分布的小波分解

Fig 3 Wavelet decomposition of ultrasonic spectrum for good nugget and undersize nugget

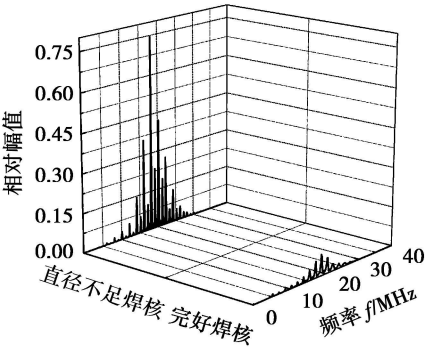


图 2 完好焊核及直径不足焊核的频谱分布
Fig. 2 Ultrasonic spectrum of nugget

计算频谱分布经小波分解后的高频分布和低频分布的总功率为

$$P_i = \sum_{j=1}^n (S_{ij} S'_{ij}) \tag{2}$$

式中: P_i 为分解信号 i 的总功率; S_{ij} 为第 i 个分解信号; S'_{ij} 为 S_{ij} 的共轭; j 为信号长度。计算两个高频分布部分总功率与低频分布部分总功率的比值作为点频谱分布识别的特征值, 记为 $[R_{p1}, R_{p2}]$, $R_{p1} < 1$ 且 $R_{p2} < 1$ 。

3.2 超声反射信号能量特征值

原始检测信号总功率能够反映焊核晶粒对超声的衰减,可作为判断焊核直径的特征值. 超声多次反射波信号的高频部分和低频部分易受干扰且会产生较大的波动,信号波动对于神经网络的认识是不利的,因此应采用一定频段信号稳定的总功率作为特征值. 对检测信号进行 4 层小波分解得到 5 个分解信号,按式(2)计算各分解信号的总功率,分析各频段分解信号的稳定性. 对焊核进行 8 次采样得到 8 个 A 扫描信号样本,计算各次采样的分解信号总功率并作归一化处理. 由图 4 可见,四层小波分解中的第二层高频信号较为稳定(图 4b),该分解信号处于 12.5~25 MHz 的频域范围内,是信号的主体部分且反映了焊核的衰减特征,可作为特征值,记为 P . 为了便于神经网络的识别,对 P 作归一化处理使 $0 < P < 1$. 图 4a 中 B, C, D, E 表示其它各次分解信号,这些分解信号波动较大,易受采样因素和检测环境的影响,不能构成稳定的识别模式.

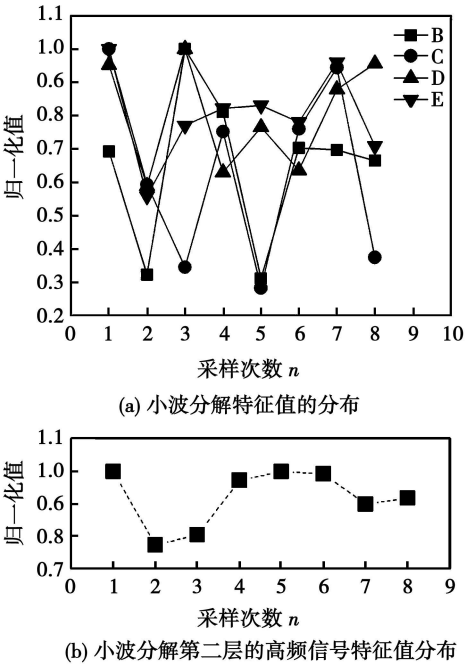


图 4 信号功率特征值稳定性分析

Fig 4 Stability analysis of signal power characteristic values

3.3 超声反射信号的模式特征

将以上特征值构成特征值矢量空间 $[P, R_{p1}, R_{p2}]$. 将点焊试样按尺寸分为 4 个级别(表 1).

各级别的特征矢量 $[P, R_{p1}, R_{p2}]$ 都聚集在各自对应的模式附近(图 5). 峰值间隔越大,频谱分布的低频部分越高、高频部分越低,即 R_{p1}, R_{p2} 越小. 由式(1)可知,频谱分布峰间隔与超声波声速成正

表 1 点焊焊核直径的分级表

Table 1 Nugget diameter classification of spot weld

级别	直径范围 d/mm
级别 1	7.4~8.0
级别 2	7.0~7.3
级别 3	6.4~6.9
级别 4	4.0~6.2

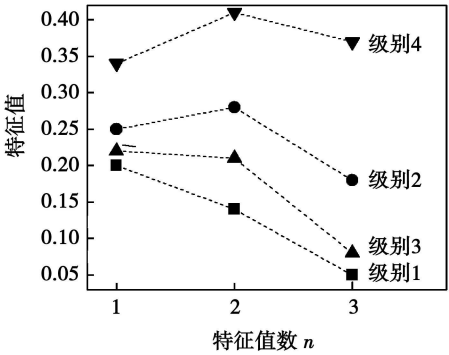


图 5 各级别焊核超声特征值分布

Fig. 5 Distribution of characteristic values

比,与焊核厚度成反比(此处“焊核厚度”为焊核上下表面的距离). 由于超声波声速随焊核晶粒增大而减小,峰值间隔与焊核内部晶粒尺寸成反比. 此外,晶粒尺寸和焊核厚度的乘积决定声波衰减. 焊核直径范围为 4~6.2 mm 时,焊核为虚焊或直径极小,晶粒较基板略有增大,声速及焊核厚度最大,频谱峰间隔及声波衰减最小, $[P, R_{p1}, R_{p2}]$ 最大,形成模式级别 4. 焊核直径为 6.4~6.9 时,晶粒尺寸增大并形成柱状晶,声速降低,焊核厚度降低;焊核厚度的降低较晶粒尺寸变化更为显著,因此频谱峰值间隔增大、高频分布部分降低,同时柱状晶使得超声衰减增大,即 $[P, R_{p1}, R_{p2}]$ 减小,对应于模式级别 3. 焊接直径范围为 7~7.3 时,凹痕深度略有降低,但柱状晶尺寸明显增大,晶粒尺寸的明显增大导致声速显著降低,频谱峰间隔减小,使得高频分布增大,即 $[R_{p1}, R_{p2}]$ 较之级别 3 增大;尽管柱状晶尺寸明显增大,但由于焊核厚度的减小导致超声衰减略有降低,即 P 略有增大,对应于模式级别 2. 焊核直径为 7.4~8.0 时,焊核的柱状晶粒尺寸略有增大、凹痕深度显著加深,焊核厚度的减小使峰值间隔的增大,频谱分布的高频部分最小,超声衰减较之级别 3 略有增大,即 $[P, R_{p1}, R_{p2}]$ 最小,对应于模式级别 1.

从特征值幅值分布来看,级别 1, 级别 2, 级别 4 很容易区分,而级别 1 和级别 3 有交叉区域,这种交叉区域对 BP 网络的模式识别是不利的,容易产生误识. 通过进一步观察,级别 1 和级别 3 的特征值

分布的变化趋势有着显著的差异(图 6), 因此可以基于不同的特征值变化趋势, 采用第二级 BP 网络对级别 1 和级别 3 作重新的分类. 图 6 中 B, C, D, E, F, G 表示各级别内多个试样的特征值分布.

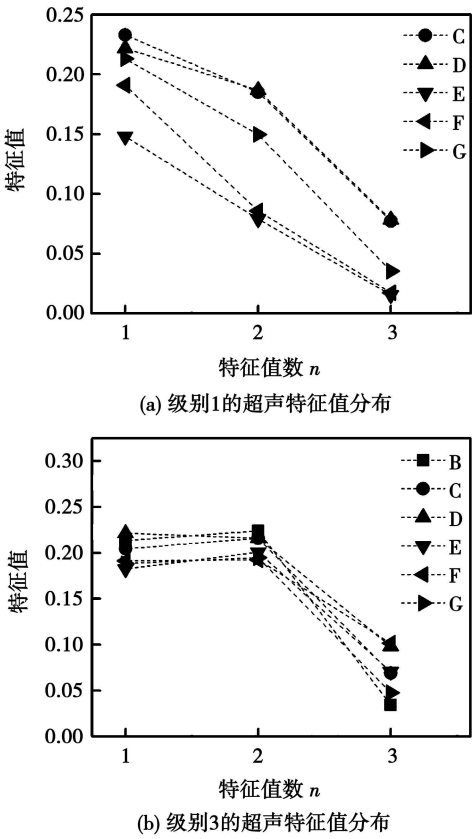


图 6 级别 1 和级别 3 的特征值分布
Fig. 6 Characteristics distribution of class 1 and class 3

4 BP 神经网络的模式识别

鉴于模式级别的分布特点, 采用二级 BP 神经网络对特征矢量进行分类. 先将级别 1 和级别 3 作为类别 1, 级别 2 和级别 4 对应类别 2 和类别 3, 采用 BP 神经网络基于特征模式的幅值对这三类信号进行分类. 然后基于特征矢量的变化趋势对级别 1 和级别 3 进行分类(图 7).

采用特征矢量训练两级神经网络, 神经网络包含 10 个隐含层, 试验中参与训练的试样数为 40 个. 每个试样的采样 10 次, 共采集 400 个信号作为训练样本. 一级 BP 网络的训练步数为 65 步, 二级 BP 网络的训练步数为 118 步, 训练误差均能达到 10^{-7} (图 8). 网络验证中采用的验证样本数为 43 个. 两级神经网络的验证结果(表 2, 表 3)表明, 该神经网络对虚焊和焊核直径不足的识别率达到 100%(级别 4), 级别 1 和级别 3 的特征值由于存在交叉区域

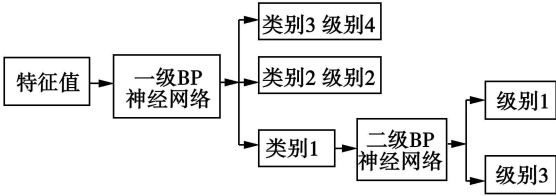


图 7 神经网络的结构图
Fig. 7 Schematic of neural network

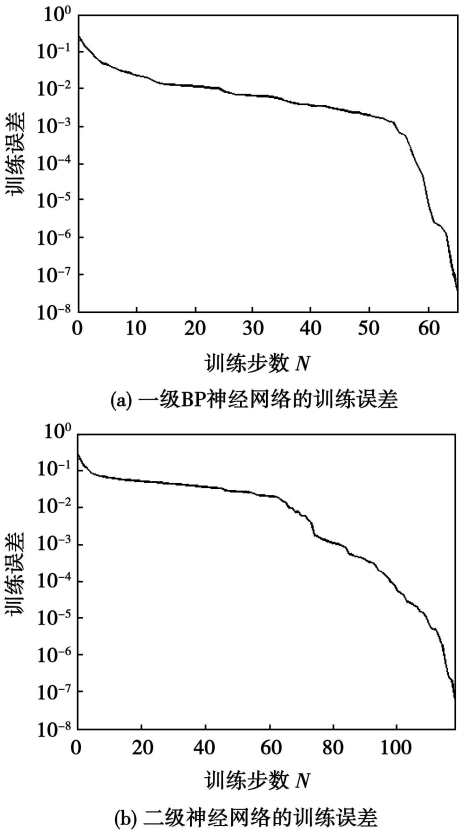


图 8 神经网络的训练误差
Fig. 8 Training error curves of ANN

表 2 一级神经网络的识别结果

Table 2 Recognition results of primary ANN

直径级别	验证样本数	分类正确数	正确率(%)
类别 1(级别 1 和级别 3)	22	21	95
类别 2(级别 2)	12	11	92
类别 3(级别 4)	9	9	100

表 3 二级神经网络的识别结果

Table 3 Recognition results of secondary ANN

直径级别	验证样本数	分类正确数	正确率(%)
级别 1	12	11	92
级别 3	10	10	100

导致识别正确率较低,但也能达到 90%左右,可以用于点焊的直径分类中.

5 结 论

(1) 通过小波分析的方法提取了检测信号频谱分布的特征值及稳定的超声总功率特征值. 这些特征值对焊核的晶粒尺寸及焊核厚度非常敏感,因此对点焊的虚焊及过小的焊核尺寸、特别是小于探头直径的焊点检出率非常高.

(2) 当焊核直径大于探头晶片直径时,通过检测信号的频谱分布特征和特定频域范围内的稳定功率值构成了能够反映焊核直径类别的特征矢量. 结合神经网络的自动分类功能,能够对合格焊核进行快速、精确的识别.

(3) 较少的特征值能够简化网络、节省计算所需的资源且能够避免维数灾难及提高网络的通用性. 此外采用两个 BP 网络相互耦合的方式针对不同的矢量特征进行识别,简化了单个网络结构并且提高了网络识别的精确度.

参考文献:

[1] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册: 超声卷, 下册[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1996.

[2] 赵新玉, 钢铁, 袁媛. 薄钢板点焊接头超声信号分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 101—105.

Zhao Xinyu, Gang Tie, Yuan Yuan. Ultrasonic signal analyses of spot welds in thin steel sheet[J]. Transactions of the China Welding Insti-

tution, 2005, 26(11): 101—105.

[3] 史立丰, 郑祥明, 史耀武. 超声 C 扫描检测铝合金电阻点焊的焊核直径[J]. 无损检测, 2004, 26(1): 34—36.

Shi Lifeng, Zheng Xiangming, Shi Yaowu. Ultrasonic C-scan testing for determining the spot size of the resistance spot welding aluminum in aluminum alloy[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(1): 34—36.

[4] 赵欣, 钱昌明, 陈关龙. 车身点焊接头虚焊缺陷的超声快速识别[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 17—20.

Zhao Xin, Qian Changming, Chen Guanlong. Ultrasonic fast identification for faulty welded joint defects of auto-body spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(11): 17—20.

[5] Qcar M, Manuel L, Fernando M. Artificial neural net works for quality control by ultrasonic testing in resistance spot welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183(2—3): 226—233.

[6] Rokhlin S I, Adler L. Ultrasonic evaluation of spots weld quality[J]. Welding Journal, Research Supplement, 1985, 64(7): 191—200.

[7] Ma C, Chen D L, Bhole S D, et al. Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 485(1—2): 334—346.

[8] Marya M, Wang K, Gayden X H. Tensile-shear forces and fracture modes in single and multiple weld specimens in dual-phase steels[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(1): 287—298.

[9] 毛捷, 王小明, 廉国选. 板底薄层超声谐振检测分析[J]. 声学学报, 2005, 30(2): 149—151.

Mao Jie, Wang Xiaoming, Lian Guoxuan. Analysis of the ultrasonic resonance test for a plate with a thin layer[J]. Acta Acustica, 2005, 30(2): 149—151.

作者简介: 陈振华, 男, 1982 年出生, 博士研究生. 研究方向为超声数字无损检测技术及系统. 发表论文 8 篇.

Email: zhchen2@emails.bjut.edu.cn

and the weld metal is macroscopically separated into one Fe-rich part and one Cu-rich part. Fe-rich phase is filled in the welding line. At the same time, tensile strength of the welded joint is up to 520 MPa, impact toughness is 32.1 J/cm², and surface hardness is also close to HB360, which indicates this technology can meet the need of repair of metal parts in field.

Key words: manual self-propagating high-temperature synthesis welding; material; structure; property

Ultrasonic testing of spot weld based on spectrum analysis and artificial neural network

CHEN Zhenhua¹, SHI Yaowu¹, ZHAO Haiyan² (1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Department of Mechanical Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China). p 76—80

Abstract: The spectrum of testing signal for the spot weld test is analyzed and the characteristic vector which can indicate the characteristics of the signal spectrum of ultrasonic signals for spot weld is obtained. Through using the vector as input data, an artificial neural network is proposed to classify the resistance spot welds in the different diameter level. The testing method proposed in the paper has the advantages of higher recognition ability, higher efficiency and smaller interference factors compared to the traditional methods.

Key words: resistance spot weld; ultrasonic testing; artificial neural network; characteristic vector

Effect of arc atmosphere on interaction of CO₂ laser beam and TIG arc

WU Shikai, XIAO Rongshi, ZHANG Huanzhen (Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p 81—85

Abstract: Laser-arc hybrid welding process is closely related to the arc atmosphere. By using a laser power meter, a beam quality diagnosis instrument and a high speed camera, the beam and arc characteristics were investigated during the vertical interaction between a CO₂ laser beam and a TIG arc in argon and helium atmosphere comparatively. The experimental results demonstrate that the laser power attenuates dramatically, the beam defocuses and the beam quality is seriously worsened while the arc voltage drops, the arc column expands and even combustion wave supported by a laser generates in argon atmosphere. However, the beam and arc characteristics seldom change during the laser-arc interaction in helium atmosphere. The difference of the laser-arc interaction results from the great difference of the electrons number density due to the difference of the gas ionization energy. The electrons number density in the helium arc is 10 times less than that in the argon arc and thus the inverse bremsstrahlung absorption coefficient of the helium arc is two orders of magnitude lower than that of the argon arc. Meanwhile, there is less difference of the refractive index between the helium arc and the air, so there is no obvious refraction of the helium arc to the laser beam.

Key words: CO₂ laser; TIG arc; arc atmosphere; inverse

bremsstrahlung absorption; refraction

Microstructure of cementite beside interface in 321/Qd370QD explosive welding

WANG Yufei¹, ZHANG Jirmin², YUE Zonghong², ZHOU Hao², HAN Shunchang², SONG Lin³ (1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China; 3. Scivic Engineering Corporation, Luoyang 471039, China). p 86—88

Abstract: Cementite near the interface in 321/Qd370QD explosive welding is analyzed by transmission electron microscopy. The results show that there is a lot of cementite in austenitic side of the interface and a lot of sub-lamellae exist in the cementite beside the interface. These sub-lamellae are about several nanometers and parallel each other. Some sub-lamella groups cross approximately 70.5° and accord with definite crystal tropism relation, which coincide each other when they circumrotate 180° with [110]_a as axis or with [002]_a as axis. Thus, a new sub-lamella group can easily grow beside another sub-lamella group. The crystal tropism relation of adjacent sub-lamellae may be applied to adjacent pearlite groups that maybe exist the above relation.

Key words: explosive welding; cementite; transmission electron microscopy; pearlite

Corrosion resistance of X80 pipeline steel heat-affected zone in S²⁻ medium

BI Zongyue^{1,2}, Lei Ali¹, WANG Na¹, FENG Lajun¹ (1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd. Shan'xi, Baoji 721008, China). p 89—92

Abstract: A three-electrode electrochemistry method is adopted to research the corrosion resistance of heat-affected zone for X80 pipeline steel welding joint prepared by two welding wires (H06H1 and H05MnNiMo) in the Na₂S solution. The results show that the metallurgical structure of the weld heat-affected zone is needle-like ferrite and granular bainite, and the crystal grain is petty. The corrosion rate of the heat-affected zone increases as the raise of Na₂S concentration and temperature, which the corrosion speed is 0.24—0.81 mm/a when the temperature is 20—60 °C and the concentration of Na₂S is 1.0%—2.0%, and the corrosion procedure is the anodic polarization of corrosion system; the corrosion procedure is anodic diffusion when the temperature is above 40 °C.

Key words: pipeline steel; X80 steel grade; welding heat-affected zone; S²⁻ corrosion

Effects of welding conditions on weld geometry parameters for triple-electrode high-speed CO₂ fillet welding on double sides

MA Xiaoli¹, HUA Xueming¹, LIN Hang¹, WU Yixiong¹, Yasuhiko ONIKI², Shigen KAMIFUJI², SHI Jiangang² (1. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Tsuneshi Holdings Corporation, Hiroshima 7200393, Japan). p 93—96