

基于聚类的埋弧焊 X 射线焊缝图像缺陷 分割算法及缺陷模型

高炜欣¹, 胡玉衡², 穆向阳¹, 王 智³

(1. 西安石油大学 陕西省钻机控制技术重点实验室, 西安 710065;

2. 威斯康星大学麦迪逊分校 电子与计算机工程系, 美国 麦迪逊 53705;

3. 浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 针对埋弧焊 X 射线焊缝图像的噪声强、弱对比度特点和常规图像分割算法成功率低的现状, 提出将缺陷视为噪声, 利用密度聚类方法进行缺陷分割。在进行图像聚类时, 提出图像灰度密度的概念, 方便对焊缝图像的分割。通过对现场 100 张焊缝图像的试验表明, 所提方法大幅度地提高了缺陷分割的成功率, 将分割成功率提高至 95%。在聚类分割算法基础上, 通过试验给出一种新的高维空间缺陷数学模型, 该模型综合考虑了缺陷形式复杂性等特征。通过试验在高维空间对模型予以验证, 并结合所提聚类算法给出了覆盖率曲线。

关键词: 焊接缝缺陷; 缺陷; 分割; 聚类

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2012)04-0037-05



高炜欣

0 序 言

基于 X 射线的焊缝缺陷检测是无损检测领域的重要方法。准确的图像分割是缺陷检测的重要前提。X 射线焊缝图像的分割是一个非常困难的问题, 这一方面是因为图像的对比度不高, 另一方面, 缺陷的面积相对很小。就图像分割问题本身而言, 很多学者提出了各种不同的分割方法。但就 X 射线焊缝图像处理问题而言, 几乎所有的研究都采用了阈值分割的方法, 这主要是因为阈值分割计算时具有简单和快速的特点。当然计算时采用的阈值可以是全局的或者局部的。文献[1]就利用图像熵的概念计算图像阈值。但针对 X 射线焊缝图像这种有着强噪声和弱对比度的图像, 也有学者采用一些新的技术手段如神经网络、模糊逻辑和支持向量机进行分割^[2-4]。但较少有文献给出焊缝缺陷识别算法的混淆矩阵(confusion matrix)。文献[5]介绍了很多分割和识别的方法, 即使是不针对焊缝图像这种缺陷面积小, 且具有强噪声和低对比度的图片, 目前方

法最好的正确识别率为 93%。国内学者在这一领域也进行了很多卓有成效的研究, 文献[6]提出了一种新的基于图像空间特性(空间对比度与空间方差)的模糊识别算法用于 X 射线焊缝缺陷检测。文献[7]利用类间、类内方差比分割法和数学形态学方法进行焊缝图像分割。文献[8]提出了一种改进的分水岭算法以抑制噪声, 从而防止过分割。文献[9]将研究重点放在时间序列图像上, 用帧内分割和帧间跟踪相结合的方法检测缺陷。

文中研究了针对埋弧焊 X 射线焊缝图像的缺陷分割算法和一种新的缺陷模型, 并通过试验对算法和模型进行了分析。

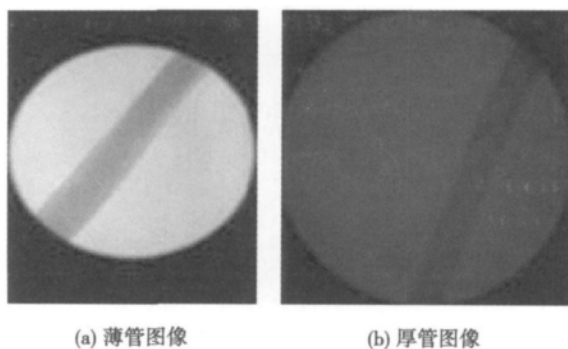
1 图像分析

实际工业生产中, X 射线实时成像检测系统所测得的图像如图 1 所示, 图 1a 为薄管的焊缝图像, 图 1b 为厚管的焊缝图像。可以发现随着钢管厚度的增加, 图像变得越来越模糊。

为了适应 X 射线焊缝图像的这种变化, 成功的将焊缝中的缺陷分割出来, 分割算法应该具有很强的鲁棒性, 尽量避免人工干预参数。分析图 1 可知, 实际的 X 射线焊缝图像具有极强的噪声, 分割算法应该具有较好的降噪功能。

收稿日期: 2011-01-22

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2010JQ8033);
陕西省教育厅专项科研计划资助项目(08jk411); 西安市
科技计划资助项目(YF07033)



(a) 薄管图像

(b) 厚管图像

图 1 X 射线焊缝图像

Fig. 1 X-ray image for welding seam

2 基于聚类的缺陷分割

目前空间聚类已在地理学和生物学等诸多领域中得到应用,它通过将空间目标划分成具有一定意义的若干簇,使每一簇内空间目标具有最大相似度,从而实现对目标的划分.特别是基于密度的聚类,在数据挖掘领域吸引了众多专家的关注.

基于密度的聚类算法以 DBSCAN 算法为代表,它利用类的高密度连通性,可以自动搜索出任意形状的类.因为实际 X 射线焊缝图像的每一个像素点的灰度值都有可能是不同的,而且在 $[0, 255]$ 区间变化.所以基于密度聚类的图像分割处理不同于传统的聚类,可以直接确定任意一个簇的密度.从实际的角度出发,可以认为属于一类的像素点的灰度值可能并不完全相同,但属于一类的像素点的灰度值是近似相等,并且是可以直接连接的.

首先定义灰度密度的概念为

$$D_i = \frac{\sum_{j \in R_i} G_j}{N_i} \quad (1)$$

式中: D_i 为点 i 的灰度密度; R_i 为点 i 的邻域; N_i 为 R_i 中像素点的个数; G_j 为点 j 的灰度值.显然 D_i 的值和 R_i 的形状及大小有关.

对 X 射线焊缝图像聚类分割的目标是将所有空间上邻近且空间局部灰度密度相等的目标聚为一类,从而既能分辨清晰的焊缝图像,也能分辨模糊的焊缝图像.从已有的焊缝图像数据库的数据来看,缺陷面积最小的缺陷仅仅只有 6 个像素点,因此在定义灰度密度时, R_i 的形状如图 2 所示,空心圆为中心点.

传统聚类的思想是只要临近区域的密度超过一定的阈值,就继续聚类.但对于焊缝灰度图像而言,有多少个像素点无需考虑,只需考虑一定灰度值下

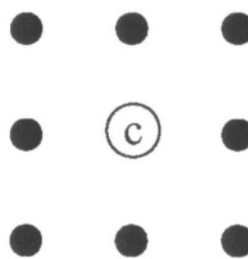


图 2 灰度密度邻域模板

Fig. 2 Neighborhood model of gray density

的像素点的多少,即利用灰度密度近似相等的像素点个数进行聚类.

为了清楚的描述如何利用灰度密度聚类,首先给出空间点的数据结构如下.

type RES = record //空间点数据结构

x, y : Integer; //空间点坐标

Es: Single; //空间点的灰度密度

Cls: Integer; //空间点属于的类型 0 表示噪声
end;

利用灰度密度聚类的过程如下.

(1) 标定每一个点的灰度密度,将所有点的 Cls 取为 0.

(2) 取聚类半径 Eps 为 2,聚类模板如图 3 所示.图 3 中空心圆为中心点.按如下模板对每一个像素点开始聚类(Eps 取 1 和灰度密度计算的形状一致,不易发现缺陷.又由于现场实际焊缝图像具有较强噪声,半径取的过大,使聚类不易成功).

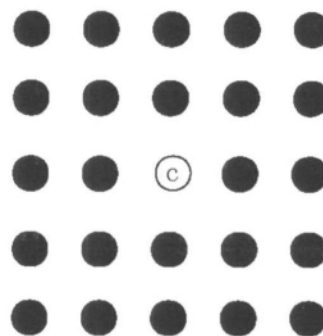


图 3 聚类模板

Fig. 3 Model of clustering

(3) 取聚类的密度值的下限 MinP 为 13(超过半径 Eps 内所含像素点个数的一半).

(4) 从第一个点开始,按模板遍历图像感兴趣区域(region of interest, ROI)中的每一个点,在半径

E_{ps} 范围内(模板内)像素点的灰度密度和中心点的灰度密度差值在3之内的像素点称为“灰度密度近似点”。

(5) 聚类模板内“灰度密度近似点”的个数超过 $MinP$, 则该区域“灰度密度近似点”可以聚为一类。如果“灰度密度近似点”的个数小于 $MinP$, 则将模板中心点定义为“噪声点”, 其 Cl_s 取值为0。

(6) 如果该模板区域的某一“灰度近似点”的 Cl_s 大于0, 则其它“灰度近似点”的 Cl_s 取值则与其相同。如所有“灰度近似点”的 Cl_s 均为0, 则新定义一聚类, 将所有“灰度近似点”的 Cl_s 值取为这一新的聚类编号。

文中利用聚类的方式对用常规方法无法分割处理的焊缝图片进行了聚类操作, 对无法聚类的噪声点以高亮形式标出。图4为现场X射线焊缝图像的聚类处理算例, 不同聚类以不同灰度值标出, 噪声点以高亮形式给出。其中图4a为未经处理的原始图像, 图4b为经聚类处理后图像。可以发现缺陷表现为无法聚类。

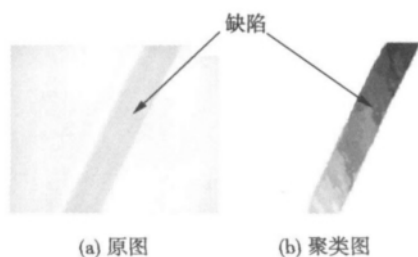


图4 聚类算例1

Fig. 4 Clustering example 1

造成这一现象的原因在于缺陷面积相对较小, 远远小于焊缝的面积, 特别是其宽度较小, 因此在按模板进行聚类时会被认作噪声处理。针对这一特点, 可将聚类结束后的噪声点作为缺陷处理。图5和图6为根据这一思路对现场焊缝图像的计算实

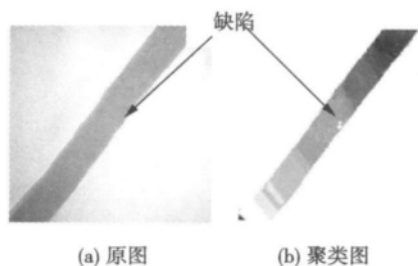


图5 聚类算例2

Fig. 5 Clustering example 2

例, 其中图5a和图6a为未经处理的现场X射线焊缝图像, 图5b和图6b为聚类计算结果。二者均可得到满意的分割效果。

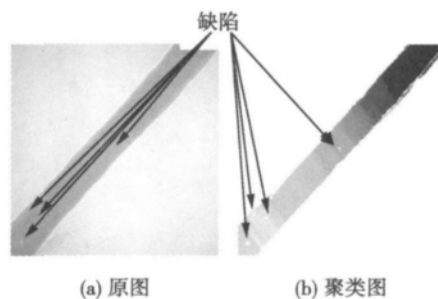


图6 聚类算例3

Fig. 6 Clustering example 3

利用聚类的方法对焊接数据库内100张焊缝图片进行了处理。不预设图片是否含有缺陷, 分割结果直接和现场操作人员判断结果做比对, 聚类方法试验结果的混淆矩阵(confusion matrix)见表1。

表1 聚类分割效果

Table 1 Confusion of clustering algorithm

	分割出缺陷	未分割出缺陷
有缺陷图片	74(真正)	4(假负)
无缺陷图片	2(假正)	19(真负)

为了进一步研究焊缝缺陷分割问题, 使之达到现场应用的目的, 需要对缺陷模型进行研究。

3 缺陷模型

对实际的焊缝缺陷分割而言, 分割出的缺陷可能是真实的缺陷, 也可能是高亮的噪声。仅仅从疑似缺陷的面积来界定分割出的高亮区域是否为缺陷是不准确的。又因为焊缝缺陷有多种形式(裂纹、未焊透、未熔合、条形夹渣、球形夹渣和气孔), 通过分割出来的形状来判断分割的正确与否也是难以实现的。从图像的角度来看, 人眼之所以能够识别焊缝中的缺陷除去灰度差的因素外, 另一个十分重要的原因是缺陷有较为明显的边缘。为了充分利用边缘信息, 可以对分割出来的缺陷局部利用 Sobel 算子进行处理, 然后对该局部区域利用 Otsu 进行分割。为了便于 Sobel 算子的边缘检测, 选取稍大于疑似区域面积的局部区域进行处理, 并称其为“疑似局部区域”。图7所示为疑似局部区域示意图, 其中外切矩形为疑似缺陷外切矩形, 扩展5个像素点后的

区域即为“疑似局部区域”。

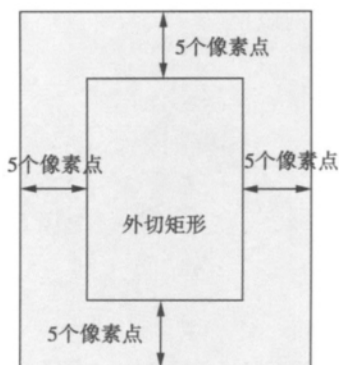


图 7 疑似局部区域定义

Fig. 7 Definition of suspicious local region

图 8 所示为现场图像疑似局部区域的 Sobel 算子处理结合 Otsu 分割算例。图 8a 为真实缺陷的计算结果,图 8b 为噪声的计算结果。可以发现真实缺陷呈现出来的高亮部分比噪声分割出来的高亮部分呈现出较好规律性。

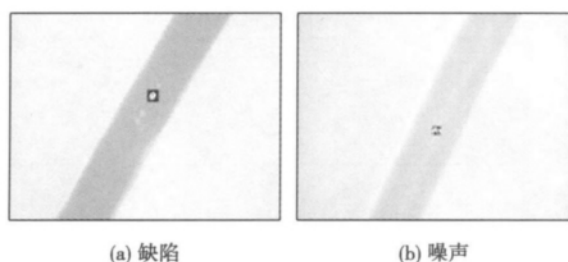


图 8 缺陷及噪声局部分割图

Fig. 8 Local segmentation image of defect and noise

从图形分析的角度来看,这种高亮部分的规律性是有可能用形式复杂性来进行定量描述。图形形式复杂性计算公式为

$$e = \frac{L}{A} \quad (2)$$

式中: e 为图形形式复杂性; L 为图形周长; A 为图形面积。从图 8 来看,真实的缺陷在局部分割后高亮区域集中,而噪声在局部区域分割后高亮区域分散。针对这一特征,对“疑似局部区域”在 Sobel 算子结合 Otsu 分割处理后,将高亮点作为数据点利用最小二乘法进行了直线拟和,在根据拟和出来的直线计算各疑似局部区域的高亮点标准差 S 。同时统计了“疑似局部区域”中高亮区域和全黑区域面积之比(H)。部分疑似局部区域的 e 、 H 及 S 值见表 2 和表 3。

表 2 真实缺陷的疑似局部区域统计数据

Table 2 Statistical data of suspicious local region of true defects

高亮和黑区域面积比 H	图形形式复杂性 e	标准差 S
0.372 549	0.526 315 8	2.175 99
0.305 343 5	0.675	2.376 775
0.330 567 1	0.606 694 6	2.391 617
0.119 493 1	0.792 929 3	5.582 514
0.242 307 7	0.730 158 7	1.942 031
0.421 259 9	0.411 214 9	3.137 32
0.477 272 7	0.682 539 7	2.057 67
0.473 684 2	0.583 333 3	2.058 606

表 3 非真实缺陷的疑似局部区域统计数据

Table 3 Statistical data of suspicious local region of false defects

高亮和黑区域面积比 H	图形形式复杂性 e	标准差 S
0.461 187 2	0.782 178 2	4.892 01
0.230 769 2	0.916 666 7	6.056 705
1.041 667	0.71	3.864 61
0.879 518 1	0.616 438 3	3.609 432

通过表 2 和表 3 可以发现非真实缺陷的疑似局部区域的统计量中至少有一项相对较大。因此 H 、 e 和 S 的组合可能会反映出二者的差别。设 C 为缺陷特征值,令

$$C = k_1 \cdot H + k_2 \cdot e + k_3 \cdot S \quad (3)$$

式中: k_1 、 k_2 和 k_3 为系数。

图 9 为利用 matlab 将表 2 和表 3 所列真实缺陷和噪声的 3 个特征量画在三维空间中的示意图。通过旋转观测角度后可以发现,缺陷在高维空间是可以找到确定范围的。通过图 9 可以确定 k_1 为 5、 k_2 为 2、 k_3 为 1。

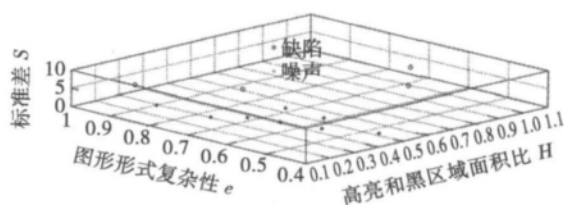


图 9 C 值坐标图

Fig. 9 C coordinate map

从图 9 中可以发现,有无真实缺陷的疑似局部区域的 C 值呈现出明显的差异。因此可以用 C 值作为区分疑似局部区域有无缺陷的标准,即

$$\left. \begin{array}{l} C \leq g \\ C > g \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{真实缺陷} \\ \text{非真实缺陷} \end{array} \quad (4)$$

式中: g 为阈值, 一般可取为 8.

文中对焊接数据库中部分图片的分割结果进行了试验验证, 利用“疑似局部区域”的 C 值来判定“疑似局部区域”是否含有真实缺陷. 计算结果直接和现场操作人员的判断进行比对, 取 g 值分别为 7.5 8.0 8.5 9.0 分别进行试验计算, 计算对象为焊接数据库内超过 900 张实际焊缝图片, 对有缺陷的图片判断成功率分别为 300/323, 303/323, 304/323 和 305/323. 对无缺陷的图片判断成功率分别为 586/638, 586/638, 585/638 和 576/638.

4 结 论

(1) 灰度密度的概念有助于在灰度聚类时提高缺陷的成功分割率. 由于缺陷面积特别是缺陷宽度相对于焊缝宽度较小, 因此文中提出在聚类过程中将缺陷作为聚类噪声处理. 试验表明这种处理方式可以获得极好的分割效果.

(2) 单一缺陷特征有时往往难以反映出真实缺陷的特征, 通过组合不同的缺陷特征值有助于判定疑似缺陷是否为真实缺陷.

参考文献:

- [1] Sankur B, Sezgin M. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 146-165.
- [2] Liao T W. Classification of welding flaw types with fuzzy expert systems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2003, 25(1): 101-111.
- [3] Lim T Y, Ratnam M M, Khalid M A. Automatic classification of weld defects using simulated data and an mlp neural network[J]. *Insight*, 2007, 49(3): 154-159.
- [4] Wang Y, Sun Y, Lü P, et al. Detection of line weld defects based on multiple thresholds and support vector machine[J]. *NDT&E International*, 2008, 41(7): 517-524.
- [5] Margret Anuncia S, Godwin Joseph J. Approaches for automated object recognition and extraction from images-a study[J]. *Journal of Computing and Information Technology*, 2009, 17(4): 359-370.
- [6] 孙 怡, 孙洪雨, 白 鹏, 等. X射线焊缝图像中缺陷的实时检测方法[J]. *焊接学报*, 2004, 25(2): 115-118.
Sun Yi, Sun Hongyu, Bai Peng, et al. Real-time automatic detection of weld defects in X-ray images[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(2): 115-118.
- [7] 陈 明, 马跃洲, 陈 光. X射线阵列实时成像焊缝缺陷检测方法[J]. *焊接学报*, 2007, 28(6): 81-84.
Chen Ming, Ma Yuezhou, Chen Guang. Weld defects detection for X-ray linear array real-time imaging[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(6): 81-84.
- [8] 王明泉, 柴 黎. 改进的分水岭算法在焊接图像中的应用[J]. *焊接学报*, 2007, 28(7): 13-16.
Wang Mingquan, Chai Li. Application of an improved watershed algorithm in welding image segmentation[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(7): 13-16.
- [9] 田 原, 都 东, 侯润石, 等. 基于X射线图像序列的焊缝缺陷自动检测方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(8): 1278-1281.
Tian Yuan, Du Dong, Hou Runshi, et al. Automatic inspection of weld defects using X-ray image sequences[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(8): 1278-1281.

作者简介: 高炜欣,男,1973年出生,博士,副教授. 主要研究方向为图像与信号处理、电气工程及其自动化. 发表论文 40 余篇.
Email: gwxd@tom.com

Study on sub-arc X-ray welding image defect segmentation algorithm and defect model

GAO Weixin¹, HU Yuheng², MU Xiangyang¹, WANG Zhi³ (1. Shanxi Key Laboratory of Oil-Drilling Rigs Controlling Technique, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Department of Electrical & Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison 53705, USA; 3. National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China). pp 37-41

Abstract: Regarding the present problems that the traditional image segmentation algorithm can only achieve a low successful defect segmentation ratio for the strong noise and low contrast of submerged-arc x-ray image, an efficient X-ray radiography image analysis algorithm is developed for the task of segmentation of submerged-arc welding defects. In the new algorithm, the defect is treated as noise and a new concept—"gray density" is put forward for calculation convenience. Tested with 100 X-ray radiography images obtained from a real factory, the proposed algorithm can increase successful segmentation ratio and achieves a successful ration of 95%. Based on the clustering segmentation algorithm, a high dimension space defect mathematical model is presented. The model makes the characteristic of the complexity of the form into consideration. Real examples show that the model is effective and practical. The sensitivity curve of the presented clustering segmentation algorithm is also given.

Key words: welding gap; defect; segmentation; clustering

Spontaneous growth of Sn whiskers on surface of Sn-Zn-Ga-Pr solders

YE Huan^{1,2}, XUE Songbai¹, XUE Peng¹, CHEN Cheng¹ (1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Center for Advanced Life Cycle Engineering, University of Maryland, College Park 20742, USA). pp 42-44

Abstract: In spite of many beneficial effects obtained from the doping of rare earth (RE) to lead-free solders, it is newly found that an exceeded addition of RE would cause a risk of Sn whisker growth in the alloys. The results indicate that with the addition of 0.7% Pr to Sn-9Zn-0.5Ga solder, many Sn whiskers spontaneously grow from the surface of Sn-Pr phases in the bulk solder exposed for 12 hours only. And the whiskers show a continuous growth with the exposure time being increased. The final longest length of the whisker can reach 100 μm , which can lead to a serious reliability problem for electronic assemblies. Finally, the mechanical reason for whisker growth is discussed.

Key words: lead-free solder; rare earth; Sn whisker; driving force

Application of computes-aided ultrasonic phased array in inspection of weld in TKY tubular node

LU Minghui, CHENG Jun, SHAO Hongliang, SUN Minglei (Key Lab of Non-destructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China). pp 45-48

Abstract: Analytic geometry theories and methods were applied to found the mathematical model of welds in TKY tubular node. According to the regulation of the size, welded joints were

drawn after getting weld cross-section in tubular node. The ultrasonic phased array probe profile was designed on the basis of its physical size, and ultrasonic beam was also designed. The computer-aided technology can achieve the beam coverage of welded joints, which can commendably guide the design of ultrasonic phased array inspection and evaluate ultrasonic test blind areas of weld in TKY tubular node. The blindness of setting parameters can be overcome in the course of ultrasonic phased array inspection. Tests of weld in artificial Y tubular node indicated that the combination of ultrasonic phased array imaging technology and computer-aided techniques contributed to rapid detection and evaluation of weld in tubular node.

Key words: TKY tubular joint; ultrasonic phased array; computer-aided; beam coverage

Microstructure of TiAl joints brazed with TiNiB high-temperature filler metal

YANG Zhenwen, ZHANG Lixia, XUE Qing, HE Peng (State Key Lab of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). pp 49-52

Abstract: High-temperature filler metal of TiNiB prepared by arc melting was used as an active filler metal in vacuum brazing of TiAl alloy. The effect of brazing temperature on the microstructure evolution of the joints was studied in this paper. The TiNiB filler metal was mainly comprised of TiNi and TiNi₃ eutectic microstructure, in which some TiB₂ blocks appeared. The melting point of the filler metal was 1 120 °C. The dissolution of TiAl substrate has a strong effect on interfacial structure. The TiAl alloy adjacent to brazed seam was transformed to β layer with the dissolution of TiAl substrate. The microstructure of the brazed seam was comprised of Ti-Al-Ni compounds and a little β phase. TiB₂ was transformed to TiB due to the reaction with Ti.

Key words: TiAl alloy; TiNiB filler; brazing; microstructure

Investigation on wear resistance of Fe-based composite material containing titanium

ZONG Lin^{1,2}, LIU Zhengjun¹, LI Lecheng¹ (1. School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China). pp 53-56

Abstract: A series of Fe-Cr-Ti-C hardfacing alloys with different Cr contents were prepared by PTA in order to develop a Fe-based wear resistant composite material. The microstructure and carbides morphology were investigated by means of scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results show that the matrix transforms from austenite and ferrite to ferrite and martensite, the volume fraction of M_7C_3 and TiC increase with the Cr content being increased. In addition, the effects of Cr content on wear resistance were studied. The wear resistance of cladding layer increases with increase of Cr content. When Cr content is 20.1%, the microstructure characteristic with a high volume fraction of hexagonal M_7C_3 complex carbides and a small amount globular, exploded and agglomerated TiC particles are distributed in the lath martensite matrix with higher strength and toughness, which suggests that the cladding layer has a excellent wear resistance.