

# X 射线焊缝图像中缺陷的实时检测方法

孙 怡<sup>1</sup>, 孙洪雨<sup>1</sup>, 白 鹏<sup>1</sup>, 王 昱<sup>2</sup>, 田岩平<sup>2</sup>

(1.大连理工大学 电子与信息工程学院,辽宁 大连 116024;

2.中国石油天然气总公司管道局钢管厂,辽宁 辽阳 111000)

摘 要:为了检测 X 射线探伤图像中螺旋钢管焊缝缺陷,提出了一种新的实时自动检测算法。它是一种基于图像空间特性(空间对比度与空间方差)的模糊识别算法,与人眼视觉识别特性相近,与其它传统缺陷检测算法相比,有较低的漏判率和误判率,并能满足生产线上实时检测的要求。

关键词:无损探伤;焊缝缺陷;自动检测;模糊算法

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A 文章编号:0253-360X(2004)02-115-05



孙 怡

## 0 序 言

X 射线无损探伤是工业无损检测的主要方法之一,其检测结果已作为焊缝缺陷分析和质量评定的重要判定依据。随着电子技术的飞速发展,一种新型的 X 射线无损检测方法“X 射线工业电视”已经应用到焊缝质量的无损检测当中。X 射线工业电视取代了原始 X 射线探伤中的胶片,可以在线实时检测,提高了检测效率。但现在的 X 射线工业电视大多还采用人工方式进行在线检测与分析,而人工检测本身主观标准不一致、劳动强度大、检测效率低。如果采用 X 射线无损探伤计算机辅助评判系统进行在线检测与分析,就可以有效地克服人工评定中因为眼睛疲劳、经验差异而引起的漏判与误判,从而使在线检测工作客观化、规范化与智能化。

目前,国内外基于 X 射线探伤图像的缺陷自动检测方法有基于图像差分的方法<sup>[1,2]</sup>,基于边缘检测的方法<sup>[3,4]</sup>,基于模板匹配的相似缺陷检测算法<sup>[5]</sup>等。这些方法在检测面积较小或者空间对比度较低的缺陷时比较困难。因此,提出了一种基于图像空间特性(空间对比度与空间方差)的模糊识别算法<sup>[6,7]</sup>作为缺陷检测算法。以此为核心组成了焊接缺陷的自动检测与识别系统。

## 1 系统结构

X 射线无损探伤缺陷自动检测系统的硬件组成与结构如图 1 所示。系统主要由三个部分组成:信号转换部分、图像处理部分及缺陷位置的获取与传输

部分。信号转换部分由 X 射线源、螺旋钢管、传送车、图像增强器、以及 CCD 摄像机组成。在螺旋钢管内部的 X 射线源发出的 X 射线穿透螺旋钢管及焊缝区域后,被图像增强器接收,图像增强器将不可见的 X 射线转换为可见光,CCD 摄像机再将光信号转换为电信号,完成光电转换,并将电信号送入图像处理部分。如果在焊缝区域中存在气孔、夹渣或未焊透等缺陷时,在监视器上显示的探伤图像上就会形成一个亮点或者一条亮线,图像处理部分也正是利用这个特点来检测每一帧探伤图像中是否存在缺陷的。图像处理部分包括视频采集卡,监视器,计算机,显示器等设备。其功能包括采集、显示、处理并存储采集到的探伤图像数据。在计算机中通过下述基于模糊识别准则的缺陷检测算法来检测每一帧探伤图像中是否存在缺陷并在计算机显示器上实时显示检测结果,同时将检测结果存储到计算机的存储器当中,以备后续查找和验证。缺陷位置的获取与传输部分由单片机、旋转编码器、Max232 芯片、ADAM-4520 模块和传输线等组成,其功能是获取并传输缺陷的位置信息。系统利用旋转编码器将位移信号转换为脉冲信号,通过脉冲信号的个数来记录传送车的位移,再通过串行通信接口将位移信号传送给计算机进行处理,从而获得缺陷的位置信息。

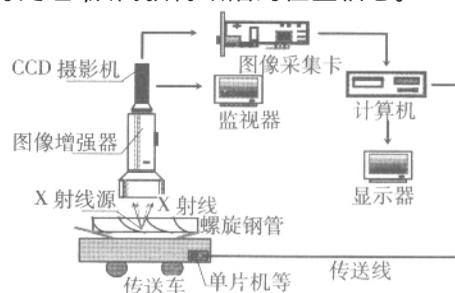


图 1 系统结构图

## 2 螺旋钢管焊缝区域的自动提取

每一幅 X 射线探伤图像中,缺陷所在的焊缝区域占整幅探伤图像中很少的一部分,如图 2 所示。

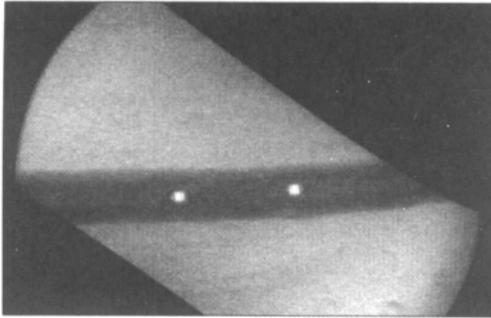


图 2 探伤图像实例图

Fig.2 Sample of defect image

如果将缺陷检测算法应用到整幅探伤图像中,无论是从算法的运算量、运算时间还是算法的检测效率来看,都不经济。所以该文采用一种基于图像灰度特性的快速焊缝区域提取方法,首先将每幅探伤图像中的焊缝区域提取出来,然后在提取出来的焊缝区域中应用缺陷检测算法。这样既减少了需要处理的数据量,缩短了算法的运行时间,又提高了缺陷检测算法的效率。在每一帧探伤图像中,均存在着明显的三个不同的灰度级区域,即图像中央横向条形的焊缝区域、焊缝区域上下的亮背景(钢管壁区域)

以及四周的暗背景(挡板区域)。为了准确地将焊缝区域分割出来,文中利用剔除暗背景后的图像直方图进行自适应阈值分割,选择自适应的阈值进行分割是因为在某一帧探伤图像中分割效果较好的阈值,在其它帧图像中却可能效果很差,所以仅仅用一个固定的阈值来进行图像分割的方法很难将焊缝区域可靠地提取出来。在这种情况下,把灰度阈值取成一个随不同帧探伤图像自动变化的函数是很合适的。这样就可以消除像素灰度值不稳定对焊缝提取的影响,即使焊缝的上下移动也能有效准确地提取出焊缝区域。自适应二值化方法的基本原理是使图像中分割的两类目标的类间方差最大,类内方差最小,即为求解公式

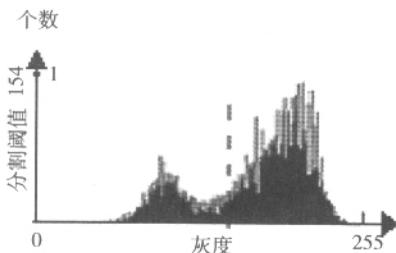
$$\sigma_{\beta}(k) = \frac{[\mu_{\tau}\omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]}$$

式中  $k=0, 1, \dots, 255$  的最大值,并将其所对应的  $k$  值作为最优阈值  $T$ 。

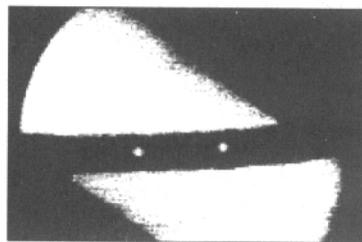
$$\mu_{\tau} = \sum_{i=0}^{255} ih(i), \quad \omega(k) = \sum_{i=0}^k h(i),$$

$$\mu(k) = \sum_{i=0}^k ih(i), \quad k=0, 1, \dots, 255$$

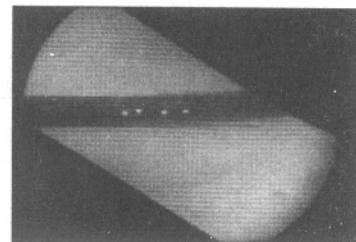
式中  $i$  表示灰度,  $h(i)$  表示灰度分布。试验表明利用此方法提取出焊缝区域非常接近人的视觉区分结果。图 3 显示了某帧图像在剔除暗背景后的图像直方图、分割的阈值、分割后的二值图以及焊缝提取的结果。



(a) 剔除暗背景后的直方图及自适应阈值



(b) 采用(a)中的阈值分割的效果



(c) 焊缝提取效果图

图 3 某帧图像的焊缝区域自动提取

Fig.3 Weld by adaptive threshold selection in some frame of image

## 3 缺陷检测算法原理

前已述及,若在焊缝区域中存在气孔、夹渣以及未焊透等缺陷时,缺陷区域就会形成一个亮点或者一条亮线。这样在视觉上就可以根据探伤图像中,某一个区域是否比其周围背景区域更加明亮来判断该区域是否是缺陷区域,而从图像处理的角度来看,可以根据探伤图像中像素灰度值的大小来判断一个区

域是否是缺陷区域。在这里应该注意一个问题,人类视觉中的“亮度”,或者说是“明亮程度”,不仅仅是指区域中像素的灰度平均值,而且还与区域中像素的空间方差特性(一定区域内像素灰度值变化的剧烈程度)有关。也就是说仅仅有着较高的灰度平均值还不够,或者说还不足以使人确信这个区域就是缺陷区域。举一个特殊的例子,如果一个区域内有几个灰度值极大的点,实际上就是几个恶性的脉冲噪

声) ,它们仍然会使整个区域的灰度平均值较高 ,但这个区域却不是缺陷 ,看起来也不比其周围背景区域 “明亮” ,因为这个区域只是包含了几个恶性脉冲噪声的背景区域 ,并非是缺陷区域。所以人类视觉中的 “亮度” 指的是 ,除了有着较高的空间对比度 ( 即灰度平均值 ) 之外 ,还需要有着较低的空间方差特性 ,也就是说 ,看起来还要 “亮” 得比较 “均匀”。

在 X 射线探伤图像中 ,当缺陷区域和噪声区域呈现相同的空间对比度特性时 ( 区域的平均灰度值相同 ) ,缺陷区域的方差特性显然要比噪声区域的空间方差特性低 ( 区域的灰度值变化程度小 ) ,而当缺陷区域和噪声区域呈现相同的空间方差特性时 ,缺陷区域的空间对比度又必然要比噪声区域的空间对比度高。所以在该文所采用的模糊缺陷检测算法中 ,对于具有相同空间对比度特性的区域来说 ,它的空间方差特性越小 ,就越有理由相信这个区域是缺陷区域 ,其模糊隶属度的值就越高 ,反之就越低 ;而对于具有相同空间方差特性的区域来说 ,它的空间对比度特性越低 ,这个区域是缺陷区域的可能性就越小 ,其模糊隶属度的值就越低 ,反之也就越高 ,这就是模糊缺陷检测算法的基本原理 ,模糊缺陷检测算法中采用的模糊规则就是基于此而形成的。具体模糊缺陷检测算法可以分为如下几个步骤。

### 3.1 灰度均值差与灰度方差的计算

在检测气孔和夹渣等圆形缺陷时 ,检测区域大小选取为  $6 \times 4$  个像素 ,水平比较区域大小取为  $10 \times 3$  个像素 ,水平比较区域分为左右两组 ,每组有两个比较区域 ,与检测区域的距离分别为  $5 \sim 10$  个像素和  $15 \sim 20$  个像素。在分别求取每组比较区域的灰度平均值之后 ,将两组比较区域的均值再相加求平均 ,从而得到水平方向上比较区域的灰度平均值 ,再与检测区域的灰度平均值作差后 ,即得到灰度差值  $A$ 。垂直方向灰度均值比较的方法与水平方向灰度均值比较方法基本相同。然后 ,计算出检测区域的灰度方差  $V$ 。简要示意图如图 4 所示。

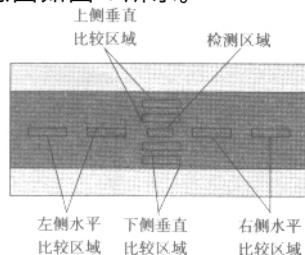


图 4 检测区域与比较区域示意图

Fig.4 Sketch map of detection region and compared region

### 3.2 查隶属度表

将灰度方差与灰度差值结合在一起 ,根据两个

参数的组合取值无论落在表 1 中哪一栏 ,都可得到气孔和夹渣缺陷的隶属度参数  $\mu$  , $\mu$  代表隶属度值 ,值越小 ,则是缺陷的可能性越小。

表 1 气孔和夹渣检测的模糊隶属度参数  
Table 1 Fuzzy membership parameters of holes and slags detection

$V$	$A < 7$	$7 < A < 12$	$12 < A < 17$	$17 < A < 25$	$25 < A < 35$	$A > 35$
$< 360$	0	2	2	3	3	3
$> 360 < 750$	0	1	2	2	2	3
$> 750 < 2\ 500$	0	0	1	1	2	2
$> 2\ 500 < 11\ 600$	0	0	0	1	1	2
$> 11\ 600$	0	0	0	0	0	1

注 :  $V$  代表灰度方差  $A$  代表灰度差值

### 3.3 水平与垂直方向综合判断

将由以上两个步骤得到的水平方向和垂直方向上的隶属度参数综合考虑。得到最终的模糊隶属度参数。若总的模糊隶属度参数值大于某个固定值 (2) ,则将检测区域判断为缺陷 ,并将该区域做上缺陷标记 ;若总的模糊隶属度小于某个固定值 (2) ,则将该区域作为正常背景区域 ,忽略不计。

### 3.4 遍历整个焊缝区域

将检测区域沿水平方向或垂直方向移动一个单位 (像素) ,重复前面步骤 ,直到将整个焊缝区域都遍历一遍 ,这样就可以得到整幅探伤图像的最终检测结果。

而在检测未焊透等线形缺陷时 ,检测区域的大小则取为  $15 \times 2$  个像素 ,水平比较区域大小仍取为  $10 \times 3$  个像素。

### 3.5 缺陷判定的标准

在实际生产中 ,焊缝区域的质量应符合 GB9711-88 和 SY/T5037-92 规定的标准<sup>[8]</sup>。它规定了圆形缺陷在多大的范围内累计尺寸达到多大时定为超标缺陷 ,要报警。如不在这一范围内 ,即使有缺陷 ,是可接受的 ,不会影响质量。

经过上述模糊缺陷检测算法检测之后 ,系统已经得到了每一帧探伤图像中缺陷的位置信息 ,缺陷的个数 ,进而可计算缺陷的尺寸。这时 ,系统就会根据上述缺陷的判别标准对该帧探伤图像中的每一个缺陷进行是否超出标准的判定。但因为未焊透等线形缺陷与气孔、夹渣等圆形缺陷的判定标准不同 ,所以系统应该首先识别缺陷的性质 ,即首先判断缺陷是气孔、夹渣等圆形缺陷还是未焊透等线形缺陷。由于圆形缺陷与线形缺陷在形状上很容易区分 ,所以文中选择了通过缺陷的长宽比来判别该缺陷是气

孔、夹渣等圆形缺陷还是未焊透等线形缺陷。如果是未焊透等线形缺陷,则系统不论该缺陷的尺寸大小,均发送喷标信号,按照缺陷超出标准处理;如果缺陷是气孔、夹渣等圆形缺陷则按照上述缺陷判定标准进行判定。

#### 4 试验结果

在长达一年半的时间里,在工厂的调试和检验过程中,遇到了各种典型缺陷,图5为气孔和夹渣及未焊透的检测结果,检测到的缺陷位置打上黑色的

标记。除了检测实际钢管焊缝零散的缺陷外,为了按标准检测,钢管厂按照前述检测标准做了一根试验样管,其中包含5种典型的缺陷组合。

系统对含有这些缺陷的样管进行实时检测与识别,检测出了全部的5组缺陷,并对每个超出标准的缺陷作上标识,在计算每组缺陷的累积直径之后,给出整根钢管上全部缺陷的累计直径和缺陷的总个数。检测效果如图6所示。同样一组缺陷,用序言中提到的其它算法检测的结果和该方法检测的结果对比如图7所示,从中可以看出该方法检测缺陷的效果最好。

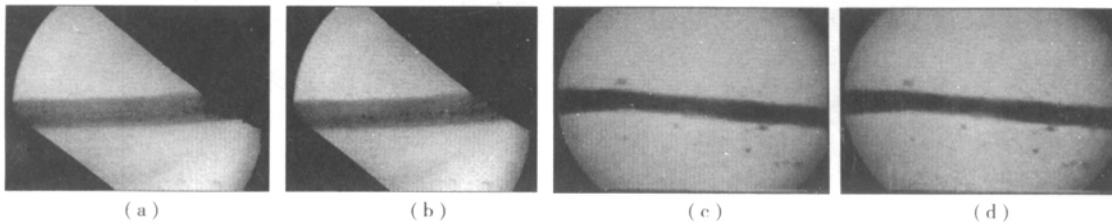
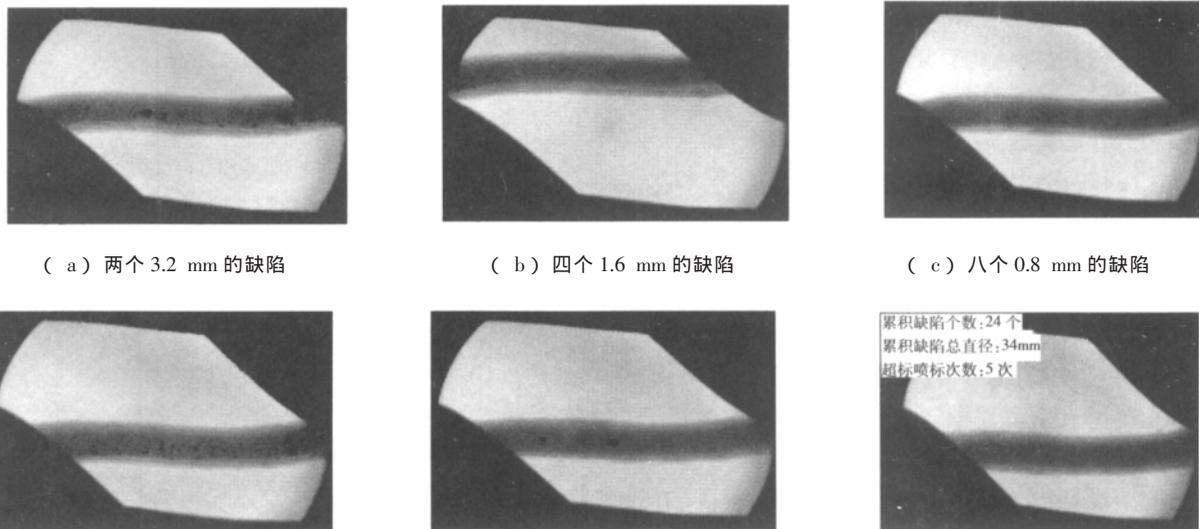


图5 气孔和夹渣及未焊透的检测结果

Fig.5 Detected images of holes and slags and incomplete penetration



( a ) 两个 3.2 mm 的缺陷

( b ) 四个 1.6 mm 的缺陷

( c ) 八个 0.8 mm 的缺陷

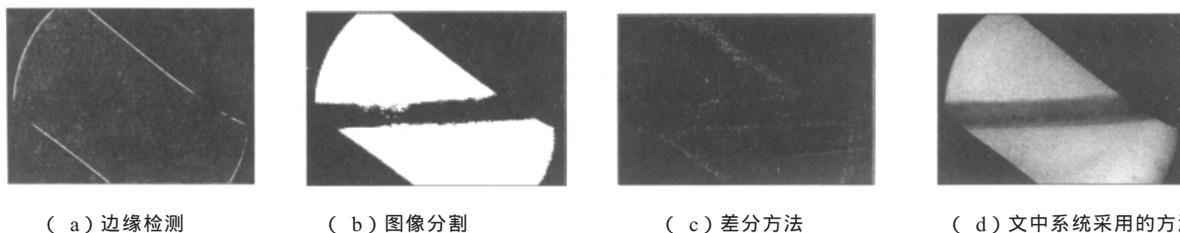
( d ) 两个 1.6 mm 和四个 0.8 mm 的缺陷

( e ) 一个 3.2 mm ,一个 1.6 mm 和两个 0.8 mm 的缺陷

( f ) 每根钢管总的检测结果统计图

图6 检测结果图

Fig.6 Detection results



( a ) 边缘检测

( b ) 图像分割

( c ) 差分方法

( d ) 文中系统采用的方法

图7 各种检测缺陷方法的对比结果

Fig.7 Compared results of different inspecting methods

应存在滞后效应,合成反应的转化率始终小于 1,所以在燃烧合成的陶瓷熔体中必然存在着 FeO 中间组元,使得陶瓷相中形成 FeO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 尖晶石相。

与金属结晶一样,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相的形成也要经历形核、长大的过程。在 Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系中遵循 FeO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系共晶凝固规律。当温度降至 1800℃ 以下时,熔体发生共晶转变,析出 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相和 FeO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 尖晶石相共晶组织,其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相为自蔓延合成物的主相。因此,用电子探针进行微区分析时,可发现合成物的显微组织由 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相和少量的 α 铁素体、FeO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 尖晶石相组成。

### 3 结 论

(1) Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系的自蔓延合成燃烧经历初始燃烧和结构转变两个过程,自蔓延高温合成物的显微组织由 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相和少量的 α 铁素体、FeO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 尖晶石相组成。

(2) 自蔓延合成原料中加入适宜的 Al 利于合成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷及其界面结合区显微组织的致密化。

(3) 在 Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 自蔓延合成体系中,当坯块厚度不小于 2.00 mm 时,Al 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 自蔓延反应放

出的热能不仅能合成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷,而且能使邻近的马氏体不锈钢局部熔化,这时 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷与马氏体不锈钢的结合界面良好。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 林师焱,杨志勇.0Cr13Ni5Mo 高强不锈钢抗磨性能研究及应用 [ J ]. 水机磨蚀, 1996, ( 12 ):58~64.
- [ 2 ] Hlavacer V. Combustion synthesis: a history perspective [ J ]. American Ceramic Bulletin, 1991,70(2): 240~242.
- [ 3 ] Oring T T, Messler R W. High-temperature self-propagating synthesis as a process for joining materials [ J ]. Welding Journal, 1996, 75(3):93s~99s.
- [ 4 ] Messler R W, Zurbuchen M A, Oring T T. Welding with high-temperature self-propagating synthesis [ J ]. Welding Journal 1995, 74(10): 37~41.
- [ 5 ] 段辉平,李树杰,刘登科,等. 自蔓延高温合成焊接 [ J ]. 焊接, 1999,27(9):6~9.
- [ 6 ] Yuhvid V I. Modification of SHS process [ J ]. Pure & Application Chemistry, 1992,64(7): 977~988.

**作者简介:** 余圣甫,男,1962 年 11 月出生,副教授,博士后。主要从事陶瓷与金属的连接新技术,新型焊接材料的开发,提高焊缝金属的强韧化新途径等方面的研究,发表论文 40 余篇。

**Email:** jwk@mail.hust.edu.cn

[ 上接第 118 页 ]

### 5 结 论

(1) 易懂。模糊缺陷检测算法中的模糊识别准则与人类视觉理论相一致,容易理解。

(2) 速度快。一般检测算法是针对整幅探伤图像检测,该文先用自适应阈值将焊缝所在区域提取出来,在此区域进行检测,从而提高了检测速度,实现了在线实时检测。

(3) 灵活与适用。对于空间对比度不同(即亮度不同)的缺陷均有着较好的检测效果,且对于不同的 X 光光源探伤系统,算法几乎无需改变参数。

(4) 稳定。经过试验室检测和工厂实际生产检测,在对包含了气孔、夹渣、未焊透、焊偏等缺陷的钢管检测中,漏判率为 1.53%,误判率为 3.08%,试验结果证明算法的重复性和可靠性较好。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Danm W, Rose P, Heidt H, *et al.* Automatic recognition of weld defects in X-ray inspection [ J ]. British Journal of NDT, 1987, 29( 2 ):79~82.
- [ 2 ] Eckelt B, Meyendorf N, Morgner W, *et al.* Use of automatic image processing for monitoring of welding process and weld inspection [ A ]. Proc. 12<sup>th</sup> world conf. on NDT [ C ], Am-

terdam, 1989. 37~41.

- [ 3 ] Liang D, Zhen W, Zhang G, *et al.* Automatic identification of the defect level of welding seam based on X-ray image [ A ]. Proceedings of international symposium on nondestructive testing and stress-strain measurement [ C ]. Tokyo, 1992. 267~274.
- [ 4 ] 任大海,尤政,孙长库,等. 焊接缺陷实时成像自动检测技术的研究 [ J ]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41, ( 2 ): 25~29.
- [ 5 ] Liao T W, Li D M, Li Y M. Detection of welding flaws from radiographic images with fuzzy clustering methods [ J ]. Fuzzy Set and Systems, 1999, 108( 2 ): 145~158.
- [ 6 ] Lashkia V. Defect detection in X-ray images using fuzzy reasoning [ J ]. Image and Vision Computing, 2001, 19( 5 ): 261~269.
- [ 7 ] Yi Sun, Enliang Wang, Ping Zhou, *et al.* A real-time weld defect inspection system in X-ray image [ J ]. Proceedings of SPIE, 2002, 491( 3 ): 282~287.
- [ 8 ] 李衍. 焊缝质量无损检测评定最新国际标准介绍 [ J ]. 无损检测, 2000, 22(4): 172~177.

**作者简介:** 孙怡,女,1964 年出生,工学博士,教授。主要研究方向为模式识别与人工智能,计算机视觉,图像处理与传输,地理信息系统等。发表论文 20 余篇。

**Email:** lslwf@dlut.edu.cn

Tendon force and traverse shrinkage value, and thermal inputting parameter ( $Q^2/h$ ) were obtained. On the base of learned the principle of the inherent strain the deformation of the aluminum alloy coping of the train adopting FEM of the elastic shell element by simplified welding model was predicted. The results indicate that the FEM based on the inherent strain can predict the deformation of the large welding fabrication.

**Key words:** welding deformation; finite element method; inherent strain; Tendon force; angular distortion

#### **Brazing of a TiAl-based alloy with $Zr_{65}Al_{17.5}Cu_{27.5}$ amorphous ribbon**

Wang Yan-fang<sup>1</sup>, Wang Cun-shan<sup>1</sup>, Gao Qiang<sup>1</sup>, Dong Chuang<sup>1</sup>, HUO Shu-bin<sup>2</sup>, WANG Jia-jie<sup>2</sup> (1.State Key Laboratory for Materials Modification and Department of Materials Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2.Harbin Welding Institute, Harbin 150080, China).p111~114

**Abstract:** In this paper, the melt-spun  $Zr_{65}Al_{17.5}Cu_{27.5}$  amorphous alloy, a typical bulk metallic glass with high glass ability, was used to braze a TiAl-based alloy. The microstructure and elements distribution have been studied. The results show that the  $Zr_{65}Al_{17.5}Cu_{27.5}$  amorphous ribbons can successfully braze the TiAl-based alloy. Layered structures appear in the brazing seam. From the middle region to the interface region of the brazing seam, the microstructures are the  $Zr_2Cu$ -type and ZrCu precipitates, the coarse  $Zr_2Cu$ -type grains, and the  $Ti_2Al$ -type columnar grains. The Al element in the substrate diffuses into the brazing seam, forming a thin reaction layer in the interface region.

**Key words:** brazing; amorphous alloy; TiAl-based alloy

#### **Real-time automatic detection of weld defects in X-ray images**

SUN Yi<sup>1</sup>, SUN Hong-yu<sup>1</sup>, BAI Peng<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, TIAN Yan-ping<sup>2</sup> (1.School of Electronic and Information Engineering, Dalian Univ of Tech, Dalian 116024, China; 2.Steel Tube Factory of China Oil & Gas Pipeline Bureau, Liaoning Liaoyang 111000, China).p115~118,122

**Abstract:** A new real-time automatic detection algorithm is taken up for applying to X-ray images of screw steel tube. As a fuzzy method based on spatial contrast and difference in images, it can achieve lower missing rate and fewer misinterpretations than other inspecting algorithm, and it can satisfy the requirements of real-time detection.

**Key words:** NDT; weld defect; automatic inspection; fuzzy algorithm

#### **$Al_2O_3$ ceramics/stainless steel joining with self-propagating high-temperature in-situ synthesis**

YU Sheng-fu, ZHANG Yuan-qin, XIE Ming-li, LI Zhi-yuan (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China).p119~122

**Abstract:**  $Al_2O_3$  ceramics is in-situ synthesized on the surface of martensitic stainless steel, ignited by strong current. The synthesizing material are analytically pure  $Fe_2O_3$  powder and Al powder which graininess is less than  $10\mu m$ . The microscopic structure of the synthesized  $Al_2O_3$  ceramics and the transition region between  $Al_2O_3$  and martensitic stainless steel is investigated with optical microscope

and scanning electron microscope. The constituent of corresponded parts is taken with electron probe microanalyzer. The results show that the microscopic structure of synthesized  $Al_2O_3$  ceramics layer is mainly composed by ceramic phase  $Al_2O_3$  and a little of  $\alpha$ -ferrite and spinel phase  $Al_2O_3 \cdot FeO$  in  $AlFe_2O_3$  self-propagating high-temperature synthesis system. Excessive Al powder in the material is advantageous to synthesize ceramic phase; the thickness of synthesizing material body is not less than 2.0 mm in order to get well-synthesized  $Al_2O_3$ /martensitic stainless steel composite material.

**Key words:** self-propagating high-temperature synthesis;  $Al_2O_3$  ceramic; martensitic stainless steel

#### **Brazing of milling tool for bituminous road**

Hao Chen-sheng, QI Hai-qun, QI Xiao-jie (Material & Chemistry Engineering Department, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China).p123~124,128

**Abstract:** Brazing technology of the milling tool for bituminous road is investigated. The microstructure and shearing strength of brazed milling tool are tested, and the milling tool passes the practical examination. The results show that domestic material for the milling tool and brazing technology can meet the practical requirement of milling tool for bituminous road.

**Key words:** brazing; hard alloy; microstructure

#### **Influence of heat and force coupling action on micro-hardness and microstructures at weld seam of TAC-1B/TC11 alloy**

YAO Ze-kun, ZHANG Mei-ling, LIANG Xin-min, GUO Hong-zhen (Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China).p125~128

**Abstract:** It has been investigated that the influence of heat and force coupling action for different process specification on changing trend of elements diffusion and microstructures in weld of  $Ti_3Al$ -Ti dual alloy welded by electron beam in vacuum. The results show that the content of element Al and Nb have abruptly been changed in weld in sample welded with rolling bar directly. The average micro-hardness HV0.98 is 3378.1MPa. The content of element Al and Nb continuously reduces. Content of element Mo is hardly the change in welded samples with hot die deformation and different heat treatments. The micro-hardness HV0.98 is up to 4351.2MPa and the average HV0.98 is 3853.4MPa for those samples deformed by 20% and treated by  $680^\circ C \times 12h$ , AC. The rhombohedral grain boundary becomes discontinuous on heat affected zone of  $Ti_3Al$  side, it can be broken up and attenuated due to smaller deformation. On TC11 alloy side near weld, microstructure is comprised of needle or piece  $\alpha$ . For greater deformation, the grain and the phases in grain are finer, separating out finer  $\alpha_2$  and  $\alpha$  on the grain boundaries makes micro-hardness enhance, but rhombohedral grain boundary is barely visible on heat affected zone of  $Ti_3Al$  side. The finer and uniform spherical microstructure is presented at the position away weld.

**Key words:** electron beam welding in vacuum;  $Ti_3Al$ -Ti dual alloy; heat and force coupling action; micro-hardness; elements diffusion; microstructure