

# 搅拌摩擦连接区域表面弧纹图像处理与间距特征提取\*

## Processing and Characteristic Parameter Procurement of Surface Arc Grain Image of Joint Area of Friction Stir Joining

南京航空航天大学机电学院 辛铖浩 黎向锋 左敦稳 邓永芳  
北京赛福斯特技术有限公司 董春林

**[摘要]** 弧纹是搅拌摩擦连接区域表面的重要的特征形貌之一,而间距是弧纹的主要几何参数。本文使用图像识别的方法对弧纹间距进行检测,提出了针对弧纹特点的图像获取方法,并通过对此方法下获得的原始图像进行灰度化、二值化、二值图像后续优化等处理方法得到可识别的二值图像。对于所得到的二值图像进行特征区域截取,在此特征区域内进行弧纹间距参数的检测并最终得到所要检测的弧纹间距参数。本文所使用的方法具有较高的识别成功率且算法可靠,可计算性能好。

**关键字:** 搅拌摩擦连接 弧纹 图像识别 特征提取

**[ABSTRACT]** The arc grain is a main characteristic in the surface of the joint area of friction stir joining, and the spacing is an important parameter of arc grain. A method of measuring arc grain spacing which based on image recognition is proposed, and a method for taking arc grain image according to its appearance characteristic is put forward. Then through the processing of gray processing, binaryzation, binary image optimization, this original image can be converted into a processable binary image. And after extracted the processable area in the binary image, the spacing of arc grain can be calculated out by using the proposed algorithm. This arc grain spacing measuring method proposed in this paper has a high success identify rate and reliability, and the algorithm of this method is easy to implement.

**Keywords:** Friction stir joining Arc grain Image recognition Characteristic parameter procurement

搅拌摩擦焊(FSW)<sup>[1-6]</sup>于20世纪90年代初发源于英国,原理是通过圆柱形搅拌头压入工件的接缝处,通过高速旋转产生的摩擦热使接缝处材料升温软化,同时

在圆柱搅拌头旋转的搅拌作用使两侧材料相互粘结,搅拌头沿着接缝移动最终达到焊接的效果<sup>[7-10]</sup>。搅拌摩擦焊相对于其他经典焊接方法有较多鲜明的特点,其焊接过程不需要其他焊接材料而是焊件直接相连,而在其焊缝表面则会形成一系列沿着焊缝方向平行的曲线形纹路称之为弧纹。对于弧纹而言,弧度和间距是其两个重要的特征参数。其中弧纹弧度主要与搅拌头轴肩半径有关,而间距则受到较多参数的影响,如:焊速和转速等。由此可见,弧纹间距反映着搅拌摩擦焊过程中主要的参数变化,而对于弧纹参数的检测目前尚未有学者对其进行研究,本文中作者基于图像的弧纹间距识别作了初步的研究。

### 1 弧纹间距的图像识别系统概述

弧纹间距图像识别系统的处理流程图,如图1所示,整个系统主要由图像获取、图像二值化、二值图像后处理和间距识别4部分组成。

通过显微镜采集图像,采集的图像经二值化处理得到二值图像,再对二值图像后处理得到能够用于弧纹间距识别的二值图像,最后经间距识别后得到所要求的数据输出以待进行分析处理。

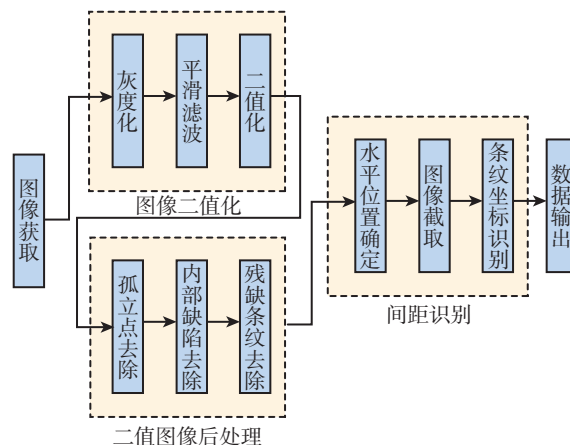


图1 弧纹间距识别系统流程图

Fig.1 Flow chart of arc grain spacing measuring system

\* 国家自然科学基金项目(51175255)资助。

## 2 弧纹图像的获取

在拍摄图片时,光源的角度直接影响着最终获得图片的质量,针对弧纹的形貌特征选取光源斜射的方法。由于弧纹弧峰与弧谷互相间隔的特点,采用斜射的光源能够有效地形成明暗间隔的区域,其原理如图 2、图 3 所示。

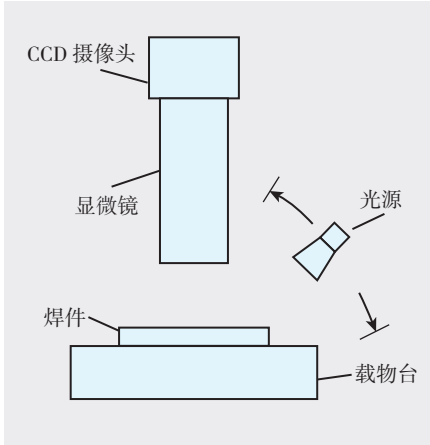


图2 图像获取装置示意图  
Fig.2 Image acquisition device

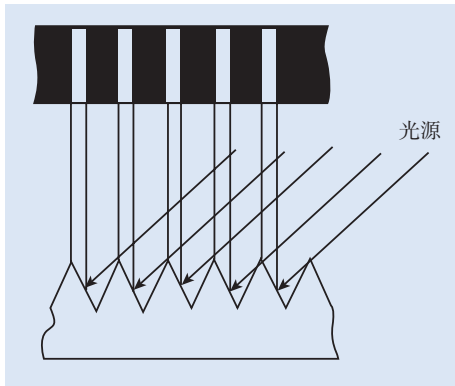


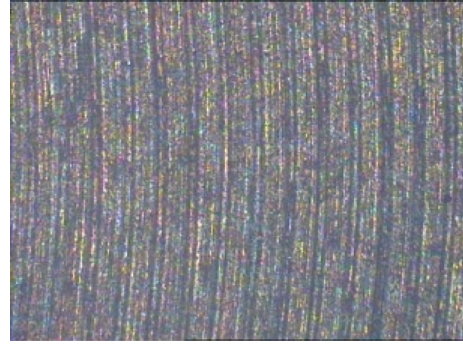
图3 斜入射光源效果示意图  
Fig.3 Oblique light effect

可以看出,虽然随着斜入射光线的角度不同所得图像的亮纹和暗纹的宽度会发生变化,但相邻两条明暗条纹宽度和不变,而所得弧纹的间距等于亮纹与暗纹宽度之和,所以采用斜射光源的方法不影响最终处理结果。

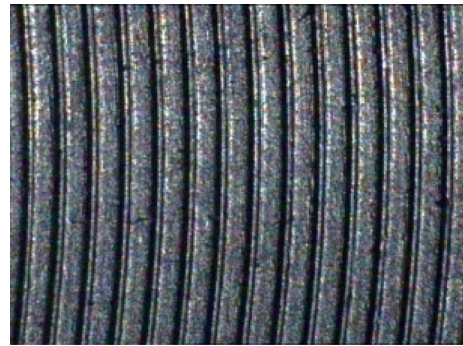
使用 7022 铝合金的搅拌摩擦焊成品样件,分别使用直射光源与斜射光源其获得图像如图 4 所示,可以看出,采用斜射光源所采集到的图片图像可识别度明显高于采用直射光源所采集的图片。

## 3 图像二值化

对显微镜所采集到的彩色图像,首先要进行灰度化



(a) 直射光源



(b) 斜射光源

图4 两种光源所采集到的图像对比  
Fig.4 Images obtained by normal light and oblique light

处理,灰度化按如下权重公式进行变换<sup>[11]</sup>:

$$0.2989 \times R + 0.5870 \times G + 0.1140 \times B \quad (1)$$

图像中条纹所在亮区域有比较明显的噪点,所以需要对其转换的灰度图像进行中值滤波处理<sup>[12]</sup>。针对弧纹的图像特点,其纵向具有较大的一致性,绝大部分的边缘交替只发生在横向,所以采取  $3 \times 15$  沿着条纹方向的长矩形滤波窗口,采用该形式的滤波窗口能获得有效的平滑图像同时对图像纵向边缘的破坏很小。

中值滤波后灰度图像的直方图如图 5 所示,可以看出其具有双峰性,其中左侧 A 峰区域为暗纹部分像素,

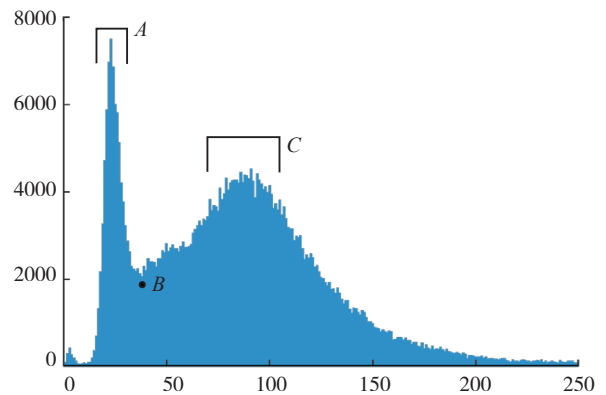


图5 中值滤波图像直方图  
Fig.5 Histogram of gray image after median filtering

右侧  $C$  峰区域为亮纹部分像素。 $B$  点为双峰间的谷点,对于具有双峰特点的灰度图像,一般选择其峰间谷点处即  $B$  点作为二值化阈值<sup>[13]</sup>。

$B$  点的寻找,作者采用区间极值搜索的方法:

(1) 左侧峰值  $A$  点搜索。

从区间左侧开始按照一定的长度向右拓展,每拓展一次,寻找一次区间内的最大值,并与上一次区间的最大值进行比较,当两值比较结果相等时,则认为此最大值是直方图左侧峰值。由于在灰度值为 0 处直方图会有不规则的波动,所以左边界点需要选择在  $A$  区域峰值左侧的上升区域。在此用直方图的平均值,即图片像素数除以 256 (灰阶值) 作为比较值,选择直方图左侧起第一个大于此比较值的点,以此为起点则能避免 0 点处的干扰。

(2) 阈值峰谷  $B$  点搜索。

当完成对左侧峰值搜索之后,便可以搜索峰值区右侧的谷值,即所需要的阈值。以左侧峰值点为左边界点向右拓展区域并依次求区域的最小值,当两次的最小值相等时认为找到谷值  $B$  点,此点对应的灰度值即为所求阈值。

在得到的二值图像中,一些缺陷对检测间距会有较大影响,这些缺陷可以归纳为以下 3 种:孤立点、条纹内部缺陷和残缺条纹,其形式分别如图 6 所示。为确保最终结果的正确性和精度,在进行弧纹间距计算前,需要对此 3 类缺陷进行处理。

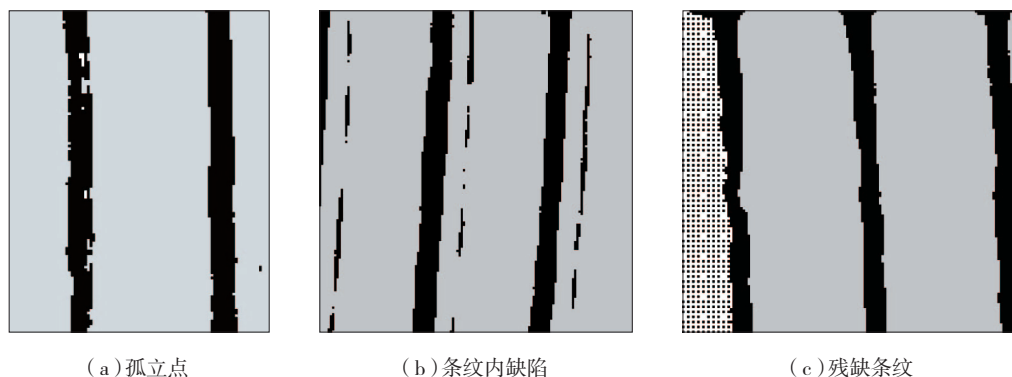


图6 二值图像缺陷  
Fig.6 Defects of binary image

## 4 二值图像后处理

### 4.1 孤立点的去除

在图像二值化过程中,由于灰度图像中噪声的存在,使二值化后的黑白图像中会有与条纹分离的孤立点的存在(图 6 (a)),在计算间距时程序可能将孤立点误认为是条纹,从而得到错误结果。鉴于孤立点的面积与

条纹面积有着非常大的差距,所以采用连通域面积检测的方法<sup>[14-16]</sup>。首先,确定连通域的“阈值”,即确定某一固定数值当连通域像素数小于或等于此值时,删除此连通域,而大于此值的连通域则予以保留。根据本系统中所处理的图片分辨率为  $768 \times 576$  当条纹宽度为一个像素时属于条纹的连通域的像素数已达到 576,所以将连通域检测“阈值”设定为所处理图像的高度方向上的像素数。通过依次对黑白图像中八连通域像素数的检测,删除像素数小于此“阈值”的连通域,最终便能完整的剔除黑白图像中的孤立点,并且不影响到条纹。

### 4.2 条纹内部缺陷去除

由于拍摄图片时采用斜入射的光照方法以及弧纹表面的不规则形貌,光线在弧纹的坡面产生反射,最终使所获取的图像在条纹内部可能产生与条纹边缘平行的暗区域。在图像二值化过程中,亮纹区域没有被全部转化为“1”值,使得二值化图像的条纹内部有许多条形缺陷(图 6 (b))。

通过对比分析,暗纹区域与缺陷区域最显著的特点在长度上,暗纹区域的长度等于图像的高度,即像素数为 576,而缺陷区域的长度则远小于此值,因此选取一个接近于暗纹区域长度的比较值(此处选取图像宽度的八分之七,即 504 像素)。首先对原二值图像取反,使需要进行处理的“0”值点转化为“1”值;然后,运用连通域检测的方法对图像中所有连通域进行检测,删除长度小于比较值的连通域;删除完成后对图像进行取反操

作。如此能完全的删除条纹中的缺陷区域,其算法流程图如图 7 所示。

### 4.3 边缘残缺条纹去除

残缺条纹是由于图像的局限性在图像左右两侧的边缘产生的不完整条纹,如图 6 (c) 左侧阴影部分,在计算弧纹间距时,若所计算的图像数据中包含了这些残缺条纹则会对计算结果有影响。这些残缺条纹的共同

特点是与图像的左右两侧边缘相接触,针对此特点采用连通域的方法,通过检测在图像左侧边缘(即第一列像素)以及右侧边缘(即最后一列像素)中出现的连通域,这些连通域即为有残缺的条纹,其算法流程图如图8所示。

为了防止在前续图像处理过程中有可能出现的条纹与图像边缘产生剥离,在检测图像边缘连通域时选择三列像素的宽度,这样既不影响内部完整条纹也能有效降低残缺条纹去除的失误率。

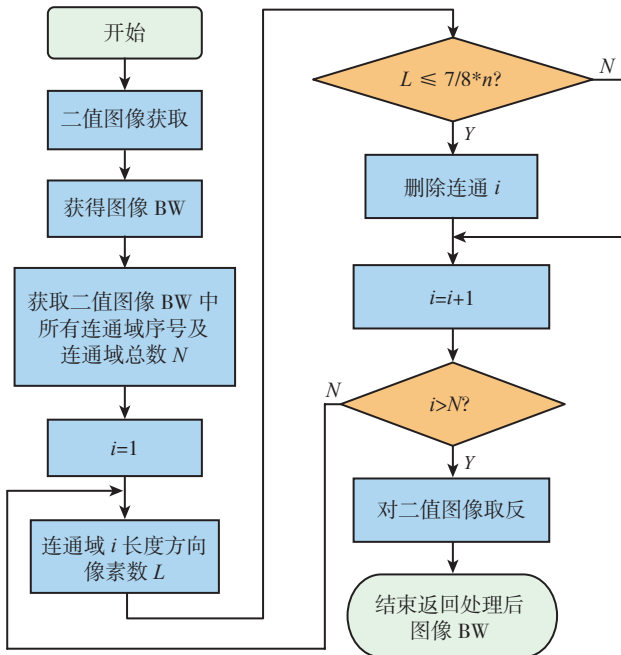


图7 条纹内部缺陷剔除算法

Fig.7 Algorithm of removing stripe internal defects

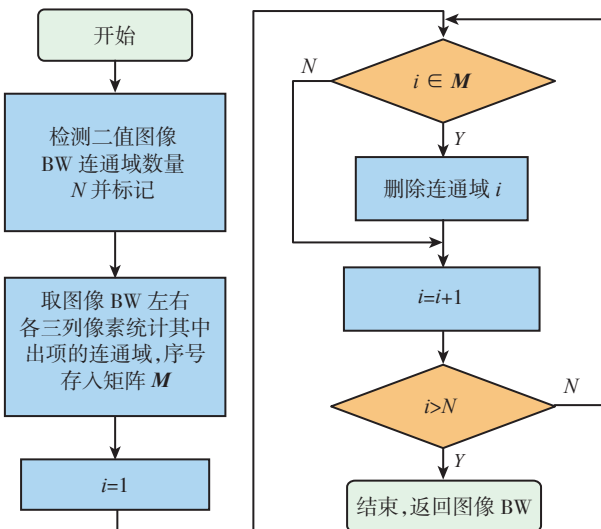


图8 残缺条纹去除算法

Fig.8 Algorithm of removing incomplete stripe

## 5 条纹间距检测

### 5.1 间距计算范围确定

对于处理后的二值图像,由于弧纹的弧度所在图像中弧纹上不同点的半径与图像的水平方向夹角不同。为了便于计算需要找到半径与水平方向平行的点(即切线垂直的点),位于此点水平线上的条纹由于半径与水平方向垂直,所以图像中亮纹中心的水平间距即为弧纹的间距。

对此位置的寻找,采用图像矩阵列向量搜索的方法。因为此点的切线与图像的垂直方向平行,所以从左向右对图像的每一列像素即二值图像矩阵的列向量进行搜索。当出现非全零的列向量时,说明此列向量的坐标为左侧第一条条纹的垂直切线的位置。由于默认采用从左向右搜索的次序适用于左凸的条纹,所以对右凸的条纹则需要将图像水平翻转再进行检测。

通过对列像素搜索获得垂直切线位置后,在此基础上来确定水平半径的位置,由于图像中垂直切线的位置上往往有多个条纹上的像素点,所以采用加权平均值的方法来计算水平半径的位置,其计算方法如下:

设  $i$  为第  $n$  列列向量中的元素的序号,  $m$  为图像矩阵行数,  $q(n, i)$  为  $n$  列  $i$  行的值(1 或 0),则加权平均值  $Q$  等于:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^m (q(n, i) \cdot i)}{\sum_{i=1}^m q(n, i)} \quad (2)$$

计算位置时一般选取垂直切线列以及其后 3 列共计 4 列元素进行计算,因为这些列元素相对于水平半径的对称性,所以适当的多选取元素能够提高最终计算精度。对于所获取的矩阵,首先进行列相加得到单列向量,然后运用上述公式进行计算,所得到的加权平均值  $Q$  取整后所得到的值即为水平半径的坐标。

当获得水平半径的坐标后,以水平半径为中心,在上下两侧各 20 个像素的范围内截图,所截取获得的图像如图9所示。



图9 截取图像

Fig.9 Captured image

### 5.2 条纹间距计算

获得截取图像后进行条纹间距的计算。如图9所示的图像,由于截取的条纹距离远远小于整个弧纹的周长,所以所截取的这段纹路可以近似的认为是直线,而行行求和,最终得到一个行向量。在计算条纹间距时,首先通过加权平均值的方法求得每条条纹中心线的坐

标,再存入结果矩阵中,算法流程如图 10 所示。

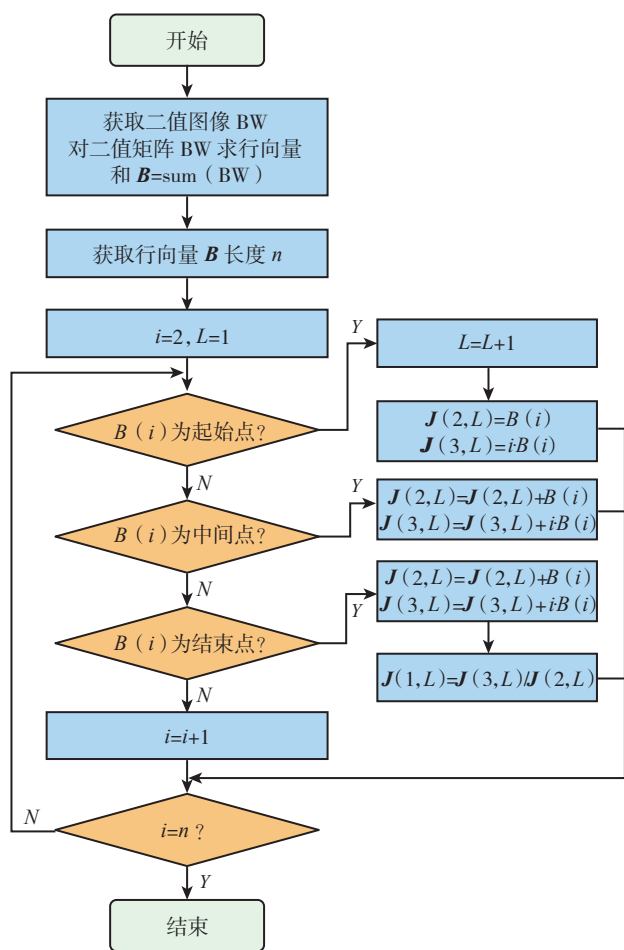


图10 条纹中心位置计算算法

Fig.10 Algorithm of stripe center line coordinate calculation

图 10 中 BW 为所截取得到的二值图像,矩阵  $J$  为结果矩阵其第一列为条纹中心线的位置,起始点、内部点、结束点表示行向量中对应每一条条纹最左侧一列、内部列、最右侧一列,其判断方法为:

起始点:  $B(i-1)=0, B(i)>0, B(i+1)>0$ , 则  $i$  为起始点。

内部点:  $B(i-1)>0, B(i)>0, B(i+1)>0$ , 则  $i$  为内部点。

结束点:  $B(i-1)>0, B(i)>0, B(i+1)=0$ , 则  $i$  为结束点。

运用上述算法对图 9 条纹中心线位置计算所得结果如图 11 所示,其中红色线条表示条纹位置,表 1 为其条纹位置的具体数值,坐标原点位置为图像左上角。



图11 条纹中心位置

Fig.11 Stripes' center line coordinate

### 5.3 数据基本处理

对于条纹间距的计算,为充分利用图像处理所得到的条纹位置数据,采用间隔求差的方法求条纹平均间距。

对于  $n$  为偶数个数的数据,平均值为:

$$\Delta = \frac{(xn + \dots + x(\frac{n}{2} + 1)) - (x_1 + \dots + x(\frac{n}{2}))}{(\frac{n}{2} + 1)^2} \quad (3)$$

对于  $n$  为奇数个数的数据,平均值为:

$$\Delta = \frac{(xn + \dots + x(\frac{n+3}{2})) - (x_1 + \dots + x(\frac{n-1}{2}))}{(\frac{n-1}{2})^2} \quad (4)$$

对于表 1 中的数据,最终条纹的平均间距计算结果为 54.62 (像素)。

表1 条纹中心位置坐标数据

条纹序号	1	2	3	4	5	6	7
条纹位置	62	116	169	224	277	333	389
条纹序号	8	9	10	11	12	13	
条纹位置	442	497	551	607	661	715	

## 6 图片处理示例

针对所获取到的图像,根据以上算法对图像进行处理,处理得到结果如图 12~19 所示。

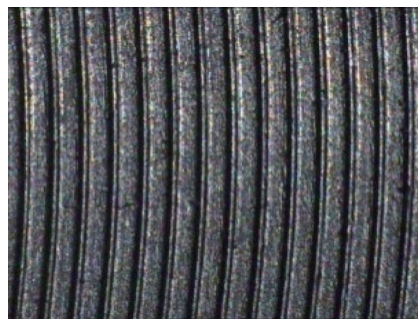


图12 原始图像

Fig.12 Original image



图13 图像灰度化

Fig.13 Gray image

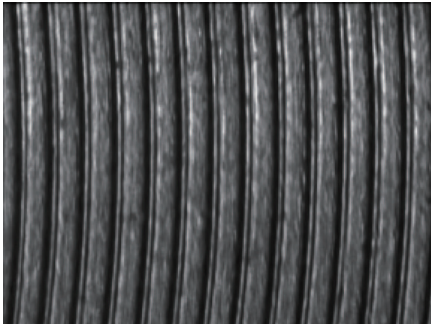


图14 图像中值滤波  
Fig.14 Image median filtering

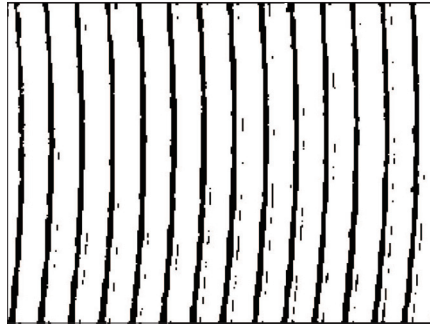


图15 图像二值化  
Fig.15 Binary image

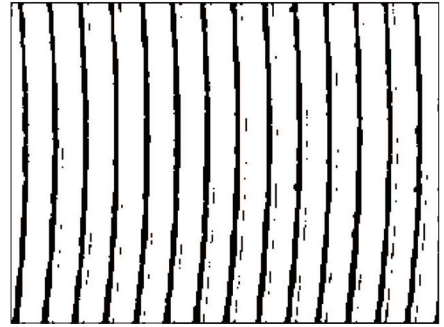


图16 孤立点去除  
Fig.16 Removing isolated point

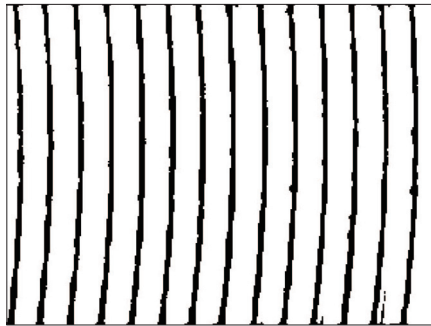


图17 条纹内缺陷去除  
Fig.17 Removing stripe internal defects

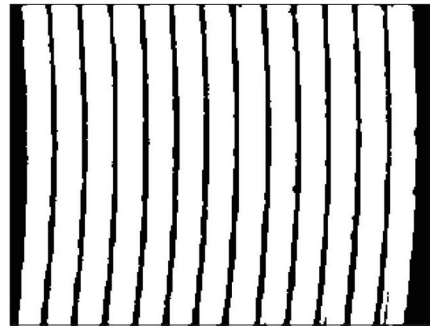


图18 残缺条纹去除  
Fig.18 Removing incomplete stripe

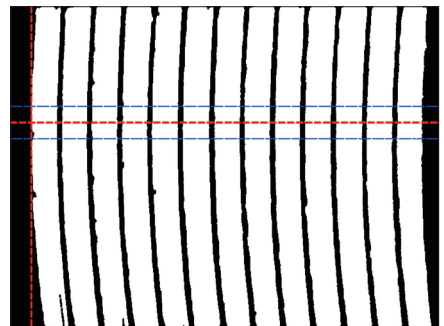


图19 截取区域确定  
Fig.19 Extraction area of image

## 7 结束语

弧度和间距是弧纹的2个重要特征参数,而弧纹间距反映着搅拌摩擦焊过程中主要的参数变化。本文采用图像识别的方法对搅拌摩擦焊弧纹间距进行测量,通过光源斜射拍摄获取了可处理的图片。对灰度化图像有针对性地采用长矩形窗口进行中值滤波处理,对二值化的图像采用多种处理手段,最终能够有效地计算出图像中弧纹间距。

在计算过程中,对图像的处理完全由程序自主完成,不需要人为地对图像进行分析,自动化程度高,因而具有较高的运行效率,对大量图片的集中处理具有较高优势。

## 参考文献

[1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction Stir Butt Welding. International Patent Application PCT, GB92, 02203, GB Patent Application 9125978.8, 6 Dec.1991 and US Patent5, 460, 317.  
[2] Dawes C J. An introduction to friction stir welding and its development. *Welding&Metal Fabrication*,1995(1): 12-16.  
[3] Thomas M W, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction Stir Welding.GB Patent Application. 9125978. 1991, 12, 08.  
[4] Rhodes C G, Mahoney M W. Effect of friction stir welding on

micro structure of 7075 aluminum. *ScriptaMaterialia*, 1997, 36(1): 69-75.

[5] Dawes C J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloys. *Welding journal (Mia mi, Pal)*, 1996,75(3): 41-45.  
[6] 曹丽杰. 铝合金搅拌摩擦焊接技术的研究进展. *电子工艺技术*, 2009(2):99-103.  
[7] 张田仓,郭德伦,陈沁刚,等. 铝合金搅拌摩擦焊技术研究. *机械工程学报*, 2002(2):127-130.  
[8] 张昭,刘亚丽,陈金涛,等. 搅拌摩擦焊接过程中材料流动形式. *焊接学报*, 2007(11): 17-21, 113-114.  
[9] 王希靖,李晶,达朝炳,等. LY12 搅拌摩擦焊接过程中搅拌针摩擦行为的研究. *热加工工艺*, 2006(1):18-21.  
[10] 张洪武,张昭,陈金涛. 搅拌摩擦焊接过程中搅拌头转速对材料流动的影响. *金属学报*, 2008(8):853-859.  
[11] 周金和,彭福堂. 一种有选择的图像灰度化方法. *计算机工程*, 2006(20):198-200.  
[12] 刘晓乐,王素华. 灰度图像基本处理及实现. *吉林化工学院学报*, 2005(2):50-52.  
[13] 郑飞. 二值图像的实现过程. *信息技术*, 2008(4):99-101.  
[14] 傅景广,许刚,王裕国. 基于模式化方法的二值图像降噪. *计算机工程与应用*, 2003(24):88-90.  
[15] 徐正光,鲍东来,张利欣. 基于递归的二值图像连通域像素标记算法. *计算机工程*, 2006(24): 186-188, 225.  
[16] 李仪芳,刘景琳. 基于连通域算法的区域测量. *科学与技术工程*, 2008(9): 2492-2494.

(责编 三丰)