

引用格式: 谢忠奇, 丁超, 吴涛, 等. 基于被动视觉的窄间隙管道焊熔池特征分析[J]. 热加工工艺, 2024, 53(9): 18-22.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220652
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

基于被动视觉的窄间隙管道焊熔池特征分析

谢忠奇¹, 丁超², 吴涛¹, 张旺¹, 郭彦兵¹

(1. 上海电机学院 机械学院, 上海 201306; 2. 中国核工业第五建设有限公司, 上海 201512)

摘要:在窄间隙管道焊接过程中,传统主动视觉激光受限于窄间隙坡口的几何特征无法投射到工件坡口处,且焊缝易被焊丝遮挡无法获取焊缝特征,无法进行焊接质量在线判定。本文通过被动视觉直接获取熔池图像,采用中值滤波降噪、Canny边缘检测、面积滤波筛选、圆拟合手段还原窄间隙焊接熔池的完整轮廓,提取了用来表征熔池轮廓的曲率半径和前进角两个特征参数。管道焊接实验结果表明,焊接电流越大,熔池轮廓曲率半径和前进角越大。分析了熔透状态下的特征参数范围,为后续参数调整提供依据。

关键词:窄间隙焊接;被动视觉;图像处理;熔池特征

中图分类号: TG409

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)09-0018-05

Analysis on Weld Pool Characteristics of Narrow Gap Pipe Welding Pool Based on Passive Vision

XIE Zhongqi¹, DING Chao², WU Tao¹, ZHANG Wang¹, GUO Yanbing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 2. China Nuclear Industry Fifth Construction Co., Ltd., Shanghai 201512, China)

Abstract: During the narrow gap pipeline welding process, the traditional active vision laser cannot be projected into the workpiece groove due to the geometric characteristics of narrow gap, and the welding seam is easily blocked by welding wire, therefore the welding seam characteristics cannot be obtained and the welding quality cannot be judged online. The molten pool image was directly obtained through passive vision. The complete profile of welding pool in narrow gap welding was recovered by using median filter noise reduction, Canny edge detection, area filter screening and circle fitting. Two characteristic parameters including the radius of curvature and the advancing angle of the weld pool profile were extracted. The results of pipeline welding experiments show that the larger the welding current is, the larger two characteristic parameters are. The range of the characteristic parameters in penetration state was analyzed to provide a basis for subsequent parameter adjustment.

Key words: narrow gap welding; passive vision; image processing; molten pool characteristics

窄间隙焊接中,焊缝质量控制主要依靠焊工对焊接信息的视觉主观判断来进行,施工环境、焊工状态等容易导致焊接缺陷产生^[1]。采用搭载有视觉传感器的自动化焊接设备,可在焊接时观察正面熔池形态,实现焊接参数实时调整,提高焊接质量。焊接过程中视觉图像包含许多焊缝、熔池及周边等有用的信息,若能准确快速检测出熔池轮廓边缘信息并建立起与焊接工艺参数之间的关系,对熔透控制和焊

接质量具有重要意义。有源视觉传感器具有高精度、高可靠性,被广泛应用于各种焊接场所,大大提高了焊接的自动化和精度^[2]。这种方法虽然具有很好的抗噪能力,但存在价格高昂、无法跟踪复杂的接缝以及预检错误的缺点。被动视觉直接收集焊接区域的图像,可获得更直观的信息,由于没有位置误差和时间滞后,可以实时监控熔池。Lee等人^[3]提出了一种无辅助光源的脉冲激光边缘焊接自动接缝跟踪方法,通过视觉传感器直接观察焊缝和熔池等区域信息,但是只有当焊接光较弱时才能获得较清晰的图像且提取的特征不够明显。同样,Xu等人^[4]也尝试用被动视觉系统解决金属片对接电弧焊焊缝跟踪问题,研究了一种改进的边缘检测算法,但只有当焊接电流较小和弧光较弱才能获取清晰图像。高向东等^[5]通过中值滤波与图像灰度变换处理图像,得到

收稿日期:2022-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51975346)

作者简介:谢忠奇(1998-),男,四川广安人,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉技术;E-mail:xiezqcn@outlook.com

通讯作者:丁超(1990-),男,江西上饶人,工程师,主要研究方向:焊接设备及工艺;E-mail:jsdc@qq.com

了比较清晰而且更加平滑的 TIG 焊熔池图像。张丽玲^[6]提出了一种基于形态学和小波的图像检测算法,用于 TIG 焊熔池图像模糊处理。小波检测图像虽然可以很好地抑制噪声,但检测到的边缘可能会出现不连续的情况。

在窄间隙焊接研究中,只有少部分人员关注熔池等有效信息的提取。对于窄间隙管道焊接(图 1),无法像主动视觉系统那样利用激光投射在工件表面提取信息,所以采用被动视觉直接获取焊接区域信息。且因为焊丝在焊枪对侧,焊缝易被焊丝遮挡无法对其做进一步研究,所以对熔池的研究显得尤其重要。本文设计图像处理算法提取熔池特征,并重新定义了熔池参数,研究焊接电流与其之间的关系,并对各参数进行优化匹配,进而获得良好的焊缝成形。

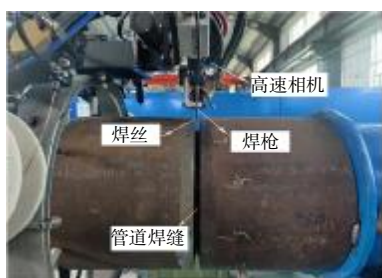


图 1 窄间隙管道焊
Fig.1 Narrow gap pipe welding

1 熔池参数定义

被动视觉传感的目的是为了采集焊接过程中熔池的图像。对熔池图像进行处理之后得到熔池的几何形状等参数信息,以建立其与焊接工艺参数之间的关系。

由于工件安装位置固定,熔池最大宽度为固定的工件距离,因此定义熔池参数:熔池轮廓曲率半径、前进角。如图 2 所示,熔池轮廓边缘为圆弧,前进角为管道壁与其和轮廓交点切线的夹角,提取两段熔池轮廓利用圆拟合还原完整熔池形状;用 K 来表示拟合后圆弧的曲率半径,表征熔池的大小。

2 熔池图像处理

被动视觉传感器不需要特殊的辅助光源,通常是在自然光照或者焊接强光条件下获取焊接图像。虽然被动视觉传感器对于窄间隙的焊缝识别更具优势,但电弧飞溅和烟雾等噪声会对信息采集造成很大的困扰^[7-9]。对其进行降噪、形态学等操作抑制图像

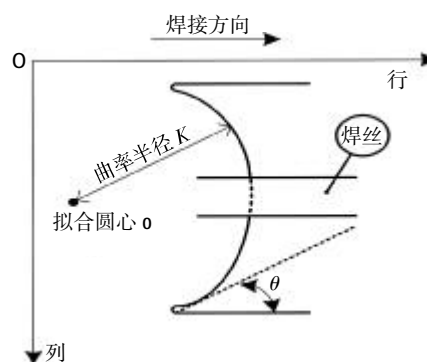


图 2 熔池截面示意图

Fig.2 Schematic of cross section of molten pool

中的干扰信息,然后进行边缘检测以便后续提取特征参数。算法流程如图 3 所示。

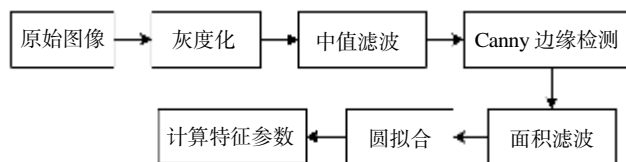


图 3 算法流程

Fig.3 Algorithm flow

对图像灰度处理后,采用中值滤波抑制强烈弧光的干扰,通过 Canny 边缘检测提取熔池轮廓,无关的线条利用面积大小和轮廓曲线坐标特性筛选出,最后使用圆拟合手段还原熔池完整轮廓,并进行参数计算。

2.1 图像预处理

中值滤波是一种常用的非线性滤波方法,在像素点和其圆形或正方形邻域内,按升序对范围中的所有灰度值进行排序,然后选择灰度值的中值代替该像素点的灰度值。此滤波方法对脉冲噪声具有较好的滤除作用,多被用于消除孤立的噪声点,并能使信号的边缘不被模糊。使用中值滤波对熔池进行灰度化图像处理的结果如图 4(a)所示。图 4(b)为处理后的灰度直方图。

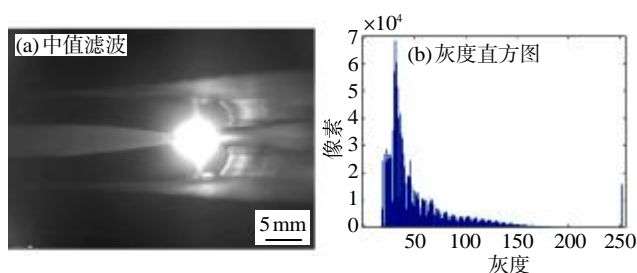


图 4 中值滤波处理结果及灰度直方图

Fig.4 Median filter results and grey level histogram

对于二维图像,中值滤波的输出为:

$$g_{\text{median}}(x, y) = \text{median}_{(s,t) \in N(x,y)} [f(s,t)] \quad (1)$$

式中: median 表示邻域的像素中值; $f(s,t)$, $g(x,y)$ 分别为原始图像和处理后的图像; N 为二维模板, 通常为 3×3 、 5×5 区域, 也可以是不同的形状, 如线状、圆形等。

2.2 处理算法

在图像处理中, 将物体的轮廓提取出来的方法叫做边缘提取。其原理为图像中物体轮廓附近像素点的灰度值变化较大, 通过算法将这些点找出来组成的线作为轮廓, 常用的算法有 Sobel、Canny 等^[10]。

Sobel 算子是一离散性差分算子, 用来运算图像灰度的梯度近似值, 梯度值越大则越可能为边缘。图像中的任何像素点使用此算子, 则会计算出对应的梯度向量或是其法向量。若 A 表示原始图像, G_x 和 G_y 分别表示横向和纵向检测的灰度值, 公式如下:

$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times A \quad (2)$$

$$G_y = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \times A \quad (3)$$

图像中每个像素横向和纵向的灰度值通过公式(4)计算梯度的大小:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4)$$

Canny 算子本质上是在 Sobel 算子前增加了高斯滤波器, 高斯滤波器是一个二维的高斯函数, 并且 Canny 算子利用非极大值抑制法来抑制梯度幅度不是极大值的像素。进行此操作后得到初步的边缘, 再根据双阈值法可以排除不是边界点的像素, 从而得到真正的边缘。对图 4 采用 Canny 算法进行处理, 得到的图像如图 5 所示。

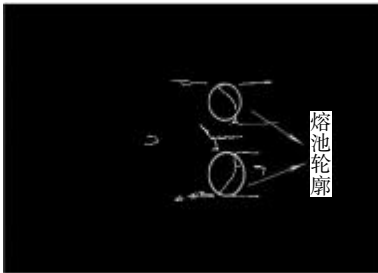


图 5 Canny 检测结果
Fig.5 Canny edge detection results

检测后的图像会出现其他的无关的伪边缘轮

廓, 如钨极、弧光、焊丝等。从图中可以看出, 一些面积较小的边缘轮廓可通过面积滤波来除掉一些短线。由于熔池轮廓位置的特殊性, 其边缘轮廓线条的列坐标的最大值与最小值的差值远大于其他横向轮廓线条的差值。利用此特性和面积滤波可将其余无关线条筛选出, 处理结果如图 6 所示。



图 6 面积滤波后的结果
Fig.6 Results after area filtering

2.3 熔池图像特征提取

经过上述图像处理得到了清晰的熔池轮廓边缘, 可熔池完整轮廓被焊丝破坏。为了能够有效提取到熔池的形状参数, 须获取熔池完整轮廓边缘。首先对图像采取传统连接算子、曲线拟合^[11]以及圆拟合三种方法进行处理, 效果如图 7 所示。传统的连接算子是将所输入的轮廓端点相连。若输入的轮廓相隔较短, 该算子可结合连接端点处的弯曲度和参考轮廓的回归线计算出合适的连接曲线。但缺点在于如果输入轮廓相隔较远, 其连接端点到参考轮廓回归线的投影距离超出了距离上限控制参数, 那么两条轮廓连接端点处将由直线连接。图 7(b)、(c)分别是将轮廓曲线的行坐标和列坐标提取出, 利用多项式曲线拟合和最小二乘法圆拟合的结果。从图中可见曲线拟合误差较大, 圆拟合的结果更贴近于真实熔池轮廓。因此选择效果最好的圆拟合方法以获得更加平滑的熔池轮廓, 并进行后续参数的提取与分析。

得到完整的熔池轮廓后, 根据轮廓坐标得到拟合圆的半径计算出其曲率半径 K , 由管道壁左侧坐标求出与圆弧切线, 并计算前进角 θ 。

3 试验验证

为了分析不同工艺参数下的熔池特征, 在打底焊基础上进行试验。焊管材质为 304L 不锈钢, 管子直径为 355 mm, 厚度为 40 mm, 组对间隙为 2 mm, 采用 GTAW 焊接方法。试验平台如图 8 所示。焊接相机随焊枪绕管道施焊一周实时拍摄焊接熔池的状

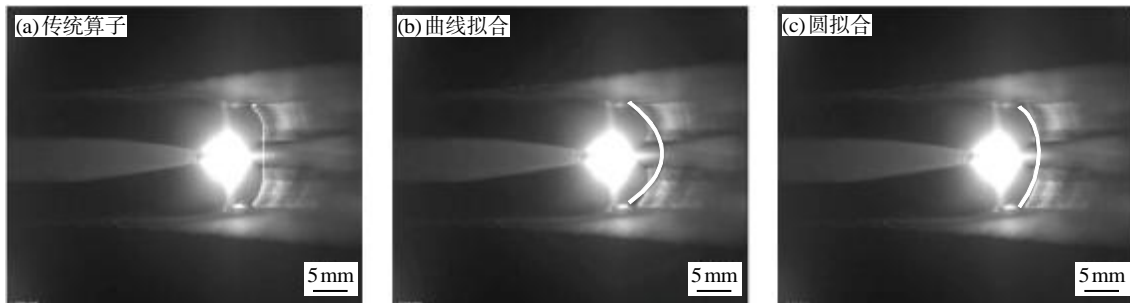


图 7 不同方法的拟合结果
Fig.7 Fitting results by different methods



图 8 管道焊接试验平台
Fig.8 Test platform for pipe welding

况, 分别获取不同焊接电流下各 20 张焊接熔池图像, 将熔池轮廓曲率半径和前进角作为熔池特征参数, 分析得到特征参数的变化规律。

设置焊接峰值电流为 100、160 和 200 A, 其余参数相同, 见表 1。各试验组试验步骤相同, 图 9 为各试验方案下的熔池图像。

将曲率半径 K 和前进角 θ 作为表征熔池的特征参数, 分别计算出 3 组试验组共 60 张待处理图像的特征参数, 然后取平均值, 见表 2。

表 1 焊接工艺参数
Tab.1 Welding process parameters

组别	峰值电流 /A	基值电流 /A	电压 /V	送丝速度 / $(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	行走速度 / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
1	100	50	9.2	60	80
2	160	50	9.2	60	80
3	200	50	9.2	60	80

结合熔池参数定义和表 2 可知, 不同焊接电流下熔池特征参数各异, 焊接电流越大, 熔池轮廓曲率

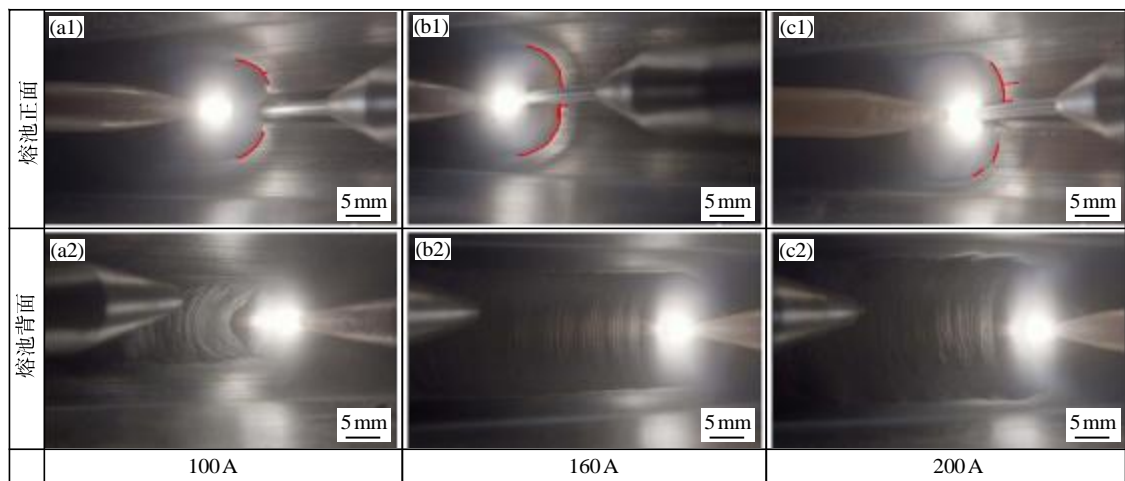


图 9 不同试验组的熔池图像
Fig.9 Weld pool images of different test groups

表 2 熔池的特征参数
Tab.2 Characteristic parameters of weld pool

组别	K 平均值 / 像素	K 最小值 / 像素	K 最大值 / 像素	θ 平均值 / (°)	θ 最小值 / (°)	θ 最大值 / (°)
1	184.7941	172.5231	197.0905	14.4522	10.6549	19.1778
2	223.1858	213.2255	234.4098	43.2313	40.8423	48.1597
3	257.7672	245.3860	271.1496	74.4607	72.6643	76.5837

半径和前进角越大,因此选择合适的焊接电流对焊缝成形质量有着重要作用。经测试,当峰值电流为 100 A 时,容易产生未熔透现象;当峰值电流为 200 A 时,焊接电流过大,易产生过熔透现象。试验组 2 的 160 A 峰值电流是相对较理想的参数,此时曲率半径在 213~234 像素,前进角在 40°~48°,焊缝成形良好,无其它不良缺陷产生。

4 结论

(1) 搭建了基于被动视觉的传感系统,直接获取窄间隙焊接过程中的熔池图像。针对弧光和电磁干扰等因素造成熔池特征难提取的问题,采用中值滤波降噪、Canny 边缘检测、面积滤波筛选,提取了焊接过程中的熔池轮廓边缘。

(2) 针对窄间隙焊接中熔池轮廓被破坏无法完整显示的问题,采用圆拟合手段计算还原出完整轮廓,并定义了轮廓曲率半径和前进角作为表征熔池特征的参数。

(3) 经试验分析,定义的熔池特征参数能够体现出熔池形态特点。通过管道焊接实验研究了焊接电流对熔池形态的影响程度。分析了熔透状态下特征参数的范围,可为窄间隙管道焊接熔透控制的参数调整提供依据。

参考文献:

[1] 王海东,任伟,裴月梅,等. 压水堆核电站主回路管道窄间隙

自动焊工艺研究[J]. 电焊机,2010,40(8):21-27.

[2] Katayama S. Handbook of laser welding technologies [M]. Woodhead,2013.

[3] Lee S K, Na S J. A study on automatic seam tracking in pulsed laser edge welding by using a vision sensor without an auxiliary light source [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2002,21(4):302-315.

[4] Xu Y L, Fang G, Lv N, et al. Computer vision technology for seam tracking in robotic GTAW and GMAW[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2015,32:25-36.

[5] 高向东,丁度坤,赵传敏. 用于焊缝位置识别的视觉模型设计与试验[J]. 机械工程学报,2009,45(4):136-141.


[6] 张丽玲. 基于形态学和小波的视觉图像模糊检测弧焊质量控制研究[J]. 机械设计与制造,2012(1):139-141.

[7] Andani M T, Dehghani R, Karamooz-Ravari M R, et al. Spatter formation in selective laser melting process using multi-laser technology[J]. Materials & Design,2017,131:460-469.

[8] Ye D, Hong G S, Zhang Y, et al. Defect detection in selective laser melting technology by acoustic signals with deep belief networks [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,96(5):2791-2801.

[9] Gunenthiram V, Peyre P, Schneider M, et al. Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process[J]. Journal of Materials Processing Technology,2017,251:376-386.

[10] Ding L J, Goshtasby A. On the Canny edge detector[J]. Pattern Recognition,2001,34(3):721-725.

[11] 夏良杰,刘源洞,刘海生,等. 基于视觉传感的摆焊管道立焊熔池特征分析[J]. 机床与液压,2020,48(19):39-43. 

欢迎点击本刊网页

<http://www.rjggy.com>

<http://www.rjggy.net>