

# 基于视觉传感的电子束深熔焊焊缝表面成形的预测

张秉刚<sup>1</sup>, 石铭霄<sup>2</sup>, 陈国庆<sup>1</sup>, 冯吉才<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 基于视觉传感的方法, 获得了钛合金电子束焊熔池图像。采用二值形态学图像处理算法对熔池图像进行了处理, 得到了熔池的边缘, 并在此基础上利用自己开发的一套熔宽提取程序实现了熔宽的准确提取。找到了熔宽的波动性与焊缝表面成形之间的对应关系, 当熔宽波动较大时, 表面成形较差, 而当熔宽波动较小时, 表面成形较好。经过分析, 提出用变异系数  $C_v$  作为表征量对焊缝表面成形进行描述。结果表明, 所开发的图像处理算法的熔宽检测误差均在 0.1 mm 以内, 完成整个熔宽提取过程所需时间大约为 30 ms, 可以满足实时检测的需要。变异系数可以反应焊缝表面成形的好坏, 为焊缝表面成形的控制创造了条件。

**关键词:** 视觉传感; 电子束焊; 二值形态学; 表面成形; 表征量

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2011)12-0001-04



张秉刚

## 0 序言

焊缝表面成形是影响焊接质量的主要因素, 因此, 如果能够找到合适的表征量对焊缝表面成形情况进行预测无疑具有重要的工程应用价值<sup>[1]</sup>。由于凝固后的熔池即是焊缝, 所以熔池的形状就决定了焊缝的形状。而熔池的形状是由熔池的几何特征参数所决定, 这就提示了可以通过熔池的几何特征参数来反映焊缝表面成形。但是目前对于电子束焊接焊缝表面成形预测的研究鲜见报道, 所以开展这方面的研究工作就具有重要的理论及实际意义。

文中利用建立的一套彩色视觉传感系统对熔池的动态过程进行了实时传感, 应用二值形态学图像处理方法对熔池图像进行了处理, 提取出了熔宽, 找到了熔宽的波动性与焊缝表面成形之间的对应关系, 从而确定出合适的表征量对焊缝表面成形进行描述, 为准确的预测焊缝表面成形提供了理论依据。

## 1 试验系统

所建立的焊接熔池视觉传感系统如图 1 所示, 主要包括法国 TECHMETA 公司生产的 MEDARD45 型真空电子束焊机, CCD 工业摄像机, 工业变倍缩

放镜头, 普通台式计算机, 由防护片和窄带滤光片组成的复合滤光系统, 摄像机防护罩等。

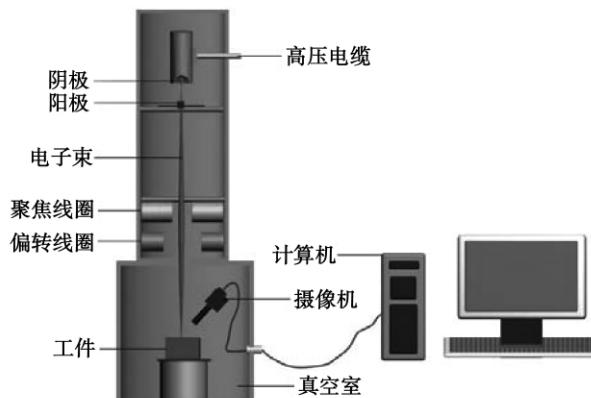


图 1 熔池视觉传感系统

Fig. 1 Visual sensing system of molten pool

复合滤光系统主要由防护片和窄带滤光片组成。电弧光谱的分布特征是在连续的背景谱上叠加一些离散的特征谱<sup>[2]</sup>, 而滤光的关键就是选取一个合适的滤光窗口, 在该窗口内弧光的特征谱线较少, 基本为强度较弱的连续谱, 以避开电弧强谱线的干扰, 将弧光对摄像机成像质量的影响减到最小。利用熔池金属自身的发光和剩余弧光的照明作用, 实现熔池在 CCD 传感器上的成像。通过试验研究, 选择中心波长为 660 nm, 半宽为  $\pm 10$  nm, 峰值透射率为

50%的窄带滤光片配合防护片作为滤光系统可以实现较好的滤光效果。

试验所用材料为近 $\alpha$ 型TA15钛合金,TA15化学成分如表1所示。

表1 TA15钛合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of TA15

Al	Zr	Mo	V	杂质	Ti
5.5~7.0	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	$\leq 0.7$	余量

试验前将钛合金切割为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的平板,然后用水砂纸打磨试件,再用丙酮和酒精进行清洗,采用自制夹具将TA15钛合金平板夹紧固定进行焊接。在电子束焊接中,电子束流、焊接速度、焦点位置是决定焊接质量的三个最主要工艺参数,因此通过改变这三个参数进行电子束焊接试验。定义焦点在工件表面以上时为正,在工件表面上时为零,在工件表面以下时为负。

试验中定义了表征熔池形状的特征参数熔池宽度( $w$ ),并且定义较好的焊缝表面成形为焊缝鱼鳞纹大小均匀,无表面缺陷,焊缝宽度一致;较差的焊缝表面成形为焊缝鱼鳞纹不均匀,有表面缺陷,焊缝宽度不一致。具体试验条件如表2所示。

表2 试验条件

Table 2 Experimental conditions

编号	工作距离	加速电压	电子束流	焊接速度	焦点位置
	$d/\text{mm}$	$U/\text{kV}$	$I/\text{mA}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$f/\text{mm}$
1	175	55	20	6	0
2	175	55	30	6	0
3	175	55	40	6	0
4	175	55	50	6	0
5	175	55	55	6	0
6	175	55	60	6	0
7	175	55	65	6	0
8	175	55	55	9	-4
9	175	55	50	5	2
10	175	55	55	5	0
11	175	55	55	4	0
12	175	55	40	6	-4

## 2 熔池图像处理和熔宽提取

### 2.1 熔池图像处理

对熔池图像进行处理的目的是检测熔池的边缘,进而获得熔池宽度、熔池半长和熔池后拖角等与焊接质量有关的表面特征参数。传统的熔池图像处理方法是基于空间运算并借助空域微分算子进行边

缘检测,通过将其模板与图像卷积完成,一般要经过灰度变换、滤波、图像增强,选用合适的边缘检测算子进行边缘检测等步骤,但是这些空域边缘检测算子对噪声都比较敏感,并且常常会在检测边缘的同时加强噪声。图2为经过灰度变换、滤波和图像增强后利用各种常用边缘检测算子对熔池图像进行边缘检测后的结果。可见所有算子都不能完全消除噪声的影响,在熔池内部和边缘附近有很多点噪声和细小的线段,并且熔池边缘不连续,不利于熔池特征信息的提取。相对而言,Canny算子的检测结果较好。针对传统图像处理方法的缺点,采用了数学形态学图像处理方法处理熔池图像。

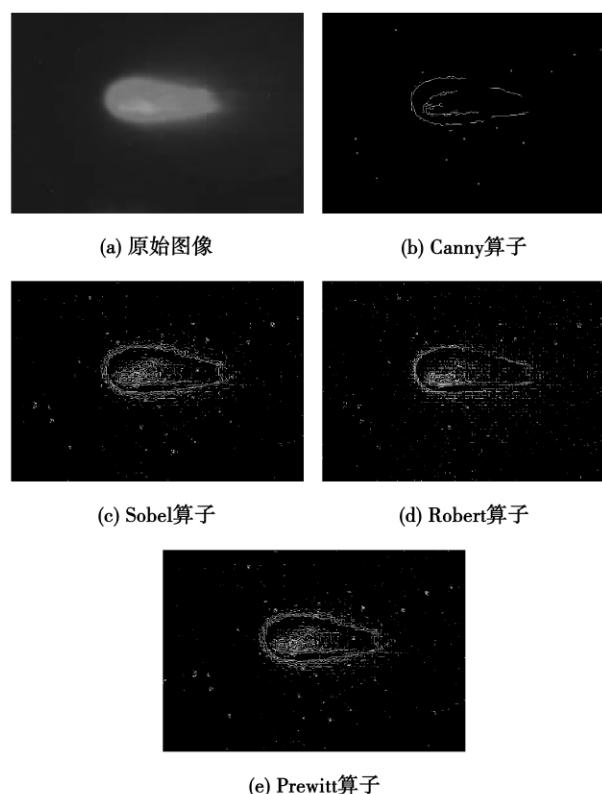


图2 不同边缘检测算子的熔池边缘检测结果

Fig. 2 Molten pool edge detection results of different edge detection operators

数学形态学中二值图像的形态变换是一种针对集合的处理过程,其基本思想是利用一个被称作结构元素的“探针”收集二值图像信息。当探针在二值图像中不断移动时,便可考察图像各个部分之间的相互关系,从而了解图像各个部分的结构特征<sup>[3,4]</sup>。

基本的形态运算是腐蚀和膨胀<sup>[5]</sup>。把结构元素 $B$ 平移 $a$ 后得到 $B_a$ ,若 $B_a$ 包含于 $X$ ,记为 $a$ 点,所有满足上述条件的 $a$ 点组成的集合称作 $X$ 被 $B$ 腐蚀的结果,其数学表达式如式(1)所示。膨胀可以看作是腐蚀的对偶运算,其定义是把结构元素 $B$ 平移 $a$

后得到  $B_a$ , 若  $B_a$  击中  $X$ , 记下这个  $a'$  点, 所有满足上述条件的  $a'$  点组成的集合称作  $X$  被  $B$  膨胀的结果, 其数学表达式如式(2)所示。先腐蚀后膨胀的过程称为开运算, 它具有消除细小物体, 在纤细处分离物体和平滑较大物体边界的作用。先膨胀后腐蚀的过程称为闭运算, 它具有填充物体内细小空洞, 连接邻近物体和平滑边界的作用。

$$\text{腐蚀: } E(X) = \{a' / B_a \subset X\} = X \ominus B \quad (1)$$

$$\text{膨胀: } D(X) = \{a' / B_a \cap X\} = X \oplus B \quad (2)$$

在形态学中, 结构元素是最重要最基本的概念。其在形态变换中的作用相当于信号处理中的“滤波窗口”。结构元素的形状和尺寸大小都会影响图像检测效果。小尺寸结构元素去噪能力弱, 但所检测的边缘较细, 与实际边缘较为接近; 大尺寸结构元素去噪能力强, 但所检测的边缘较粗, 与实际边缘有很大差异。因此对于熔池的边缘检测来说, 就不能选取较大的结构元素, 而应选取较小的结构元素<sup>[6]</sup>。经过试验, 结构元素选取半径为两个像素的圆可获得较理想的边缘检测效果。

应用二值形态学提取熔池边缘的基本过程为: 二值化、腐蚀、膨胀和边缘检测。整个处理过程如图 3 所示。由处理结果可知, 提取的熔池边缘完全消除了噪声的影响, 边缘连续光滑。

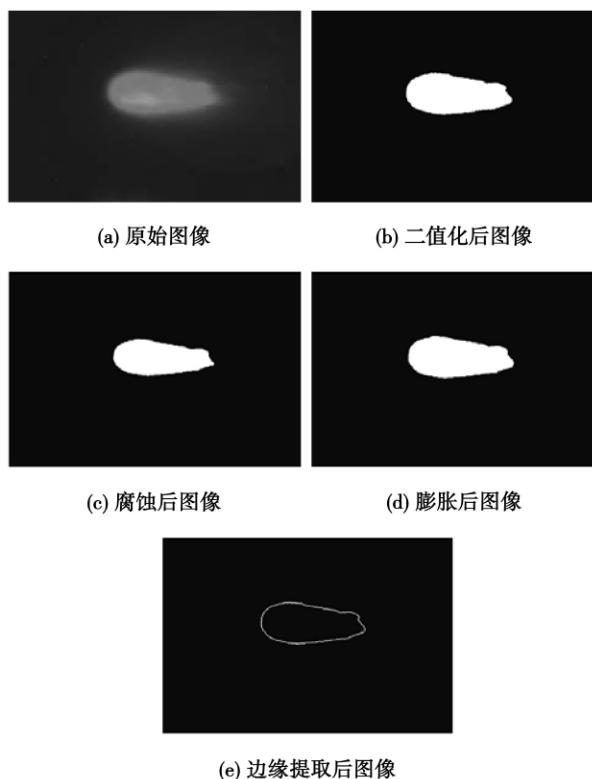


图 3 熔池边缘提取过程

Fig. 3 Extraction process of molten pool edge

## 2.2 熔宽提取

在提取出熔池边缘后, 由于 CCD 传感器在安装时进行了严格标定, 因此可以按照图 4 所示的方法进行熔宽参数的提取。

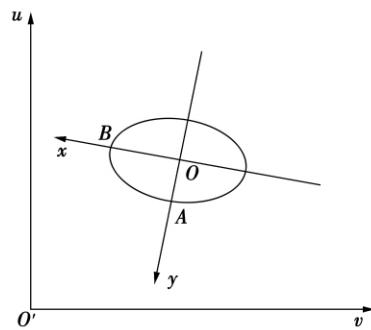


图 4 熔宽提取示意图

Fig. 4 Schematic of molten pool width extraction

在图 4 中有两套坐标系, 一套是工件坐标系  $Oxy$ , 另一套是图像坐标系  $O'uv$ , 在图像坐标系  $O'uv$  中以熔池中心点  $O(v_0, u_0)$  为起点沿  $Oy$  方向搜索边缘点, 当遇到边缘点  $A$  时停止搜索, 记下  $A$  点的坐标值  $A(v_A, u_A)$ , 则熔池最大宽度  $w$  的计算公式为

$$w = 2\sqrt{(v_0 - v_A)^2 + (u_0 - u_A)^2} \quad (3)$$

式(3)计算出的熔宽单位为像素, 通过系统标定后得到的图像像素与实际尺寸的对应关系即可得到熔宽的实际尺寸。

大量试验研究表明, 该算法的熔宽检测误差均在 0.1 mm 以内, 完成整个熔宽提取过程所需时间大约为 30 ms, 可以满足实时检测的需要。

## 3 表征量的确定

对采集到的熔池图像进行分析可知, 当熔宽变化缓时, 焊缝表面成形一般较好; 而当熔宽变化剧烈时, 焊缝表面成形一般较差, 这说明熔宽的波动与焊缝表面成形存在一定的联系, 其波动性(离散程度)可以从一定程度上反映焊缝表面成形。

图 5 为钛合金电子束焊接过程中熔宽的分布曲线, 其对应的焊缝表面成形如图 6 所示。结合图 5, 图 6 可知, 当熔宽波动相对较大时, 表面成形较差, 而当熔宽波动相对较小时, 表面成形较好。这表明可以通过熔宽波动性的大小对焊缝表面成形进行预测。

理论分析中一般采用标准差描述数据的波动性, 标准差越大, 数据的离散程度就越大; 反之则越小。一组数据的波动性完全可以利用标准差来描

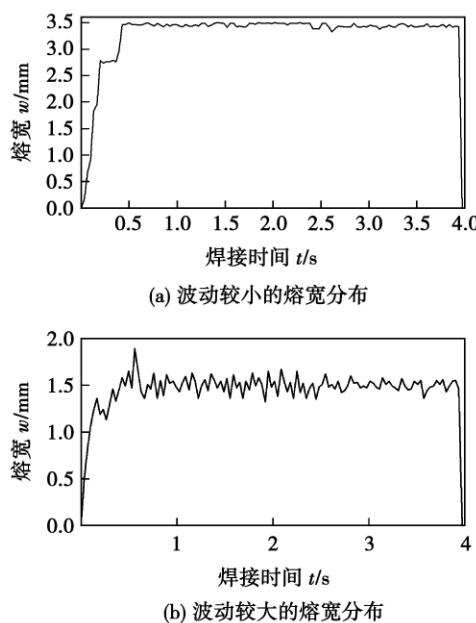


图5 焊接过程中熔宽的分布

Fig. 5 Distribution of molten pool width in welding process

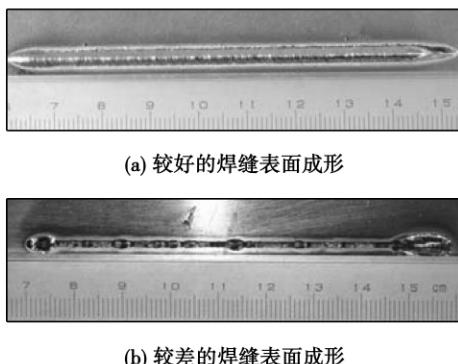


图6 焊缝表面成形

Fig. 6 Weld appearance

述。然而在对几组数据的波动性进行比较时,如果各组数据的平均值或单位不同,比较各组数据的波动性就不能采用标准差<sup>[7]</sup>。由于各组试验熔宽的均值互不相同,因此对各组试验熔宽波动性进行比较时就不能采用标准差,为此引入了变异系数的概念<sup>[8,9]</sup>。利用变异系数对各组试验熔宽波动性的大小进行比较,进而对焊缝表面成形进行预测。

标准差与平均值的比值称为变异系数,记为  $C_V$ 。其计算公式为

$$C_V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $S$  是标准差;  $\bar{x}$  是数据平均值,由式(4)可以看出变异系数无量纲,不受数据均值的影响。能够消除单位和数据均值的不同对多组数据的波动性进行比较时的影响。变异系数小,数据波动性就小;变异

系数大,数据波动性就大。因此,当焊缝表面成形较差时,熔宽波动大,则变异系数大。而当焊缝表面成形较好时,熔宽波动小,则变异系数小。

对各组试验的的变异系数和焊缝表面成形之间的关系进行了研究,其关系如图7所示,其中横坐标是试验编号。由图7可知,在各种焊接工艺下,焊缝表面成形较好时对应的变异系数值基本都在10%以下,焊缝表面成形较差时对应的变异系数值基本都在16%以上。从这一结果可以看出,焊缝表面成形的好坏与变异系数的对应关系比较明确,对应不同的焊缝表面成形,变异系数的值有各自的取值范围。随着焊接参数的改变,变异系数的值只会在各自的区间范围内变化,因此通过变异系数可以定量的判断焊缝表面成形。但是变异系数作为一个统计参数,在焊接过程的实时检测中必须采取分段检测的方法,例如每隔1 s计算1次变异系数,将计算值和设定值(可设为15%)进行比较,根据比较结果对焊缝表面成形的好坏作出判断,当计算值大于设定值时,焊缝表面成形差,而当计算值小于设定值时,焊缝表面成形好。

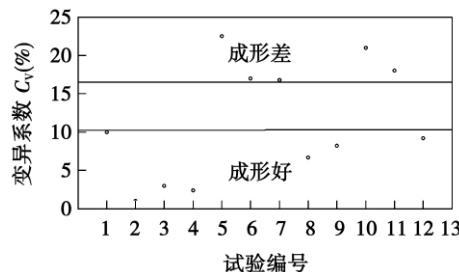


图7 焊缝表面成形与变异系数的对应关系

Fig. 7 Correspondence relationship between weld appearance and  $C_V$ 

## 4 结 论

(1) 采用二值形态学图像处理算法对熔池图像进行了处理,得到了熔池的边缘,并在此基础上提取出了熔宽的大小。

(2) 找到了熔宽的波动性与焊缝表面成形之间的对应关系,当熔宽波动相对较大时,表面成形较差。而当熔宽波动相对较小时,表面成形较好。

(3) 确定了一个能够反应熔宽波动性大小的表征量,利用该表征量可以对焊缝表面成形进行预测。

## 参考文献:

- [1] 吴庆生,何景山,冯吉才.电子束焊接铝合金焊缝表面成形  
[下转第36页]

性能高于晶态钎料的原因之一。

钎焊温度为800℃时,由于温度较低,液态钎料和母材的相互作用还不够充分,因此形成的界面区与扩散区均较窄,接头强度也较低。当钎焊温度为850℃时,界面区与扩散区增大,合金元素P、Sn向母材扩散加剧,降低了界面区中磷、锡含量,使界面区结构主要由连续致密的 $\alpha$ -Cu固溶体组成,避免出现脆性的磷、锡化合物相。但钎焊温度进一步升高,界面区与扩散区继续增大,钎缝中心合金元素P、Sn向界面区与扩散区的扩散加剧,使界面区中磷、锡含量反而升高,甚至超过其固溶度,出现脆性相,使接头性能降低。当然,过高的钎焊温度使钎缝和母材组织晶粒粗化亦使接头力学性能降低。

### 3 结 论

(1) CuP7.7Sn5.4Ni14Si0.2Zr0.04非晶钎料钎焊接头由界面区、扩散区及钎缝中心区组成,扩散区和界面区主要是 $\alpha$ -Cu固溶体组成,钎缝中心区主要由 $\alpha$ -Cu固溶体和磷化物脆性相及各种共晶组成。

(2) 随钎焊温度提高或保温时间增加,晶态钎料和非晶钎料钎焊接头界面区和扩散区不断增大,母材热影响区和钎缝中心组织也不断粗化。但过高的钎焊温度或过长的保温时间,均会使界面区出现脆性相,但非晶钎料这种影响要小得多。在相同条件下,非晶钎料和母材的相互作用明显比相应的晶态钎料剧烈,其钎缝界面区较为均匀、连续,钎缝中心组织要明显均匀、细小。

### [上接第4页]

表征量[J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 1-4.

Wu Qingsheng, He Jingshan, Feng Jicai. Characterization parameter of aluminum alloy weld appearance of electron beam welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(3): 1-4.

[2] Li Yunfeng, Zhao Xihua, Li Yongqiang. Vision-based detection of weld pool width in TIG welding of copper-clad aluminum cable [J]. China Welding, 2007, 16(3): 27-31.

[3] Rafer C Gonzalez, Richard E Woods. digital image processing second edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.

[4] 戴青云,余英林. 数学形态学在图象处理中的应用进展[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 478-482.

Dai Qingyun, Yu Yinglin. The advances of mathematical morphology in image processing [J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(4): 478-482.

[5] 贺兴华. MATLAB7. X 图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.

[6] 刘明涛,高向东,陈建辉,等. 基于数学形态学的熔池图像处

### 参考文献:

- [1] 李宝锦,李英龙. 磷铜钎料的研究与应用[J]. 黄金学报, 1999, 1(2): 151-153.  
Li Baojin, Li Yinglong. Phosphor copper brazing filler metals research and application [J]. Journal of Gold, 1999, 1(2): 151-153.
- [2] 韩逸生,邹家生,陈 铮,等. Ag-P-Cu钎料中Ag的作用分析[J]. 焊接技术, 2000, 29(3): 23-24.  
Han Yisheng, Zou Jiasheng, Chen Zheng, et al. Ag-P-Cu behavior in the Ag brazing filler metals [J]. Welding Technique, 2000, 29(3): 23-24.
- [3] 李 刚,路文江,俞伟元,等. 非晶新型带银钎料的制备及性能研究[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(5): 9-12.  
Li Gang, Lu Wenjiang, Yu Weiyuan, et al. Amorphous new take the synthesis and properties of silver brazing filler metals [J]. Journal of Lanzhou University, 2004, 30(5): 9-12.
- [4] Zou Jiasheng, Xu Zhirong, Jiang Zhiguo. Study on Ti-based amorphous brazing alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(2): 171-174.
- [5] 蒋志国,邹家生. Ti-Zr-Ni-Cu非晶钎料钎焊 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷的连接强度[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(11): 1955-1959.  
Jiang Zhiguo, Zou Jiasheng. Ti-Zr-Ni-Cu amorphous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics analyzed brazing [J]. Connection Strength of China Nonferrous Metals, 2006, 16(11): 1955-1959.

**作者简介:** 邹家生 男,1965年出生,教授,博士。主要研究方向为新材料及其连接技术。发表论文90余篇。Email: zjzoujs@126.com

理[J]. 焊接, 2008(5): 29-32.

Liu Mingtao, Gao Xiangdong, Chen Jianhui, et al. Processing on molten pool image based on morphology [J]. Welding & Joining, 2008(5): 29-32.

[7] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998.

[8] 蔡 艳,杨海澜,徐 忻,等. 基于偏最小二乘回归方法的 $\text{CO}_2$ 焊飞溅模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 125-128.  
Cai Yan, Yang Hailan, Xu Xin, et al. Spatter model of  $\text{CO}_2$  welding based on partial least squares regression method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(5): 125-128.

[9] 滕素珍,姜炳蔚,任玉杰,等. 数理统计[M]. 2版. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.

**作者简介:** 张秉刚 男,1971年出生,博士,副教授。研究方向为新材料及异种材料电子束焊接。已发表论文40余篇。Email: zhangbg@hit.edu.cn

**通讯作者:** 石铭霄 男,1982年出生,博士。Email: hero-4587@163.com

## MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

**Prediction of weld appearance of electron beam deep penetration welding based on visual sensing** ZHANG Bing-gang<sup>1</sup>, SHI Mingxiao<sup>2</sup>, CHEN Guoqing<sup>1</sup>, FENG Jicai<sup>1</sup>( 1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China; 2. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China) . p 1 – 4 , 36

**Abstract:** Basing on visual sensing method , the electron beam welding molten pool image of titanium alloy was obtained. The binary morphological image processing algorithm was used to process the molten pool image for getting the molten pool edge , moreover , the molten pool width was obtained by using a suite of processing programs for molten pool extraction. The correspondence relationship between the fluctuation of molten pool width and weld appearance is found , i. e. the weld appearance is poor when the fluctuation of molten pool width is relatively large , but the weld appearance is good when the fluctuation of molten pool width is relatively small. Based on analysis , the coefficient of variation CV was proposed as characterization to describe the weld appearance. The results show that the developed image processing algorithms are reliable , and the detected errors are less than 0. 1 mm , at the same time the whole extraction process of molten pool width only needs approximately 30 milliseconds , which could meet the needs of real time detection. The coefficient of variation can reflect the quality of weld appearance and it can be used as a parameter to control the weld appearance.

**Key words:** visual sensing; electron beam welding; binary morphology; weld appearance; characterization

**Analysis of characteristics of plasma image during high-power disk laser welding** GAO Xiangdong<sup>1</sup>, LV Weixing<sup>1</sup>, YOU Deyong<sup>1</sup>, KATAYAMA Seiji<sup>2</sup>( 1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Guangdong University of Technology , Guangzhou 510006 , China; 2. Joining and Welding Research Institute , Osaka University , Osaka 567-0047 , Japan) . p 5 – 8

**Abstract:** A new approach for detecting and analyzing the deep welding quality in high-power disk laser welding based upon the plasma plume images is presented. During the laser butt-joint welding of 304 austenitic stainless steel plate with a high power 10 kW disk laser , an ultraviolet and visual sensitive high-speed video camera was used to capture the dynamic images of the plasma plume. The area and height of a plasma image were calculated as the characteristic parameters of plasma image using the image processing techniques. The weld bead width was defined as the parameter reflecting the stability of welding process. Moreover , the variation in the weld bead width and the plasma images in the welding process were monitored to research the correlation between the characteristics of the plasma image and the welding stability. To obtain the statistics of the characteristic parameters of plasma images that reflect the welding stability , the average and the percentage with different threshold values about the fluctu-

tuation of consecutive frames images for the plasma area and height at different parts of weld bead were studied. The actual laser welding experimental results showed that the stability of a high power disk laser welding process could be monitored and estimated by the defined characteristic parameters of the plasma images.

**Key words:** high-power disk laser; plasma plume image; welding process stability; 304 austenitic stainless steel

**A method to measure welding deformation of plate by three dimensional laser scanner** HE Hongwen , ZHAO Haiyan , NIU Wenchong , WANG Peng ( Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology , Department of Mechanical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China) . p 9 – 12

**Abstract:** A new method was proposed to measure the welding deformation of the butt-welding joints by using the non-contact three-dimensional laser scanner. The steel balls were placed onto the drilled holes for the purpose of accurate positioning. Before and after welding experiment , the butt-welding joints and steel ball were scanned by the laser scanner to gain the corresponding point cloud files. After being analyzed by the imageware software , the final three dimensional coordinates of the steel balls on surface of the plate would be obtained. Results indicated that this method could solve the difficult positioning problem because of high temperature , which might calculate the angular distortion and deflection deformation during welding process. It also contributed to understand the mechanism of welding deformation and realize the accurate positioning.

**Key words:** welding deformation; butt-welding sample; three dimensional laser scan; angular deformation; bending deformation

**Mechanism of cold welding cracks in 30CrMnSi steel joints welded by TIG method** YANG Jianguo , HUANG Luyong , ZHANG Yong , FANG Hongyuan ( State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . p 13 – 16

**Abstract:** As a kind of the medium-carbon quenching and tempering steel ( MCQTT ) , 30CrMoSi has been used widely in some industrial fields. However , just like some MCQTT , this steel faces such problems as cold cracking in the welded joints. In this research , the fracture and microstructure of the joints of 30CrMoSi steel welded by TIG method were studied by scanning electron microscopy ( SEM ) and optical microscopy ( OM ) , respectively. More attention has been paid to the mechanism of the cold welding crack in 30CrMoSi steel. The results show that the hot welding cracks formed at high temperature are prone to inducing cold welding cracks. The potential method to control the cold welding crack in 30CrMoSi steel was discussed as well.

**Key words:** 30CrMoSi steel; TIG; cold welding crack; hot welding crack

**Fuzzy-PI algorithm of load system of friction welding ma-**