

金属零件熔积成形过程形状质量的可视化诊断

张海鸥¹, 邱立朋¹, 芮道满¹, 王桂兰², 于洋¹

(1. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 利用单目视觉技术进行熔积成形过程监测; 借助数字图像处理技术对熔积层形貌信息进行处理获得熔积层的宽度信息; 以图像处理获得的熔积层缺陷点像素坐标为源头, 通过文中建立的空间定位数学模型还原其三维空间位置信息, 最后进行熔积层检测试验. 结果表明, 文中提出的单目视觉定位数学模型和数字图像处理算法能够准确的对熔积层宽度进行非接触地实时监测, 并能够对可能出现的缺陷点进行快速的识别与准确的定位. 因此文中方法能够实时调整与优化快速成形过程中的熔积工艺参数, 保证制件形状与尺寸精度.

关键词: 熔积成形; 图像数字化分析; 熔积轮廓识别; 熔宽监测; 缺陷点定位

中图分类号: TG455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)09-0001-04



张海鸥

0 序 言

金属零件熔积成形与普通弧焊相比, 具有多层、多道、三维复杂成形等特征, 在成形过程中对层间冶金质量和组织性能有更加严格的要求^[1, 2]. 但是在金属零件熔积成形过程中, 受熔积电流与电压、行走轨迹与速度、熔积枪高度、送料速度、保护气体流量、工件表面状况、冷却条件等因素影响, 熔积层可能会出现孔洞、驼峰、咬边等缺陷^[3, 4].

为克服以上熔积缺陷, 基于熔积宽度、高度实时跟踪的自适应切片轨迹规划和熔积枪位置动态调控成为金属零件的三维熔积快速制造的核心技术, 其中熔积过程可视化监测是熔积工艺参数优化与实时调整的基础, 是实现熔积成形形状质量、组织性能实时控制的必不可少的基础关键技术. 机器视觉作为一种重要的传感方法, 在扩展机器人系统的感知与应对环境变化能力方面具有重要作用^[5]. 通过机器视觉对熔积层形貌、熔宽及缺陷点进行可视化实时监测, 可保证三维熔积快速成形零件的组织性能、提高零件的形状尺寸精度和成形效率. 由于单目视觉法只采用一个 CCD 摄像机, 所以结构简单, 相应地对 CCD 摄像机的标定也较为简单, 同时避免了双目视觉中立体匹配难的不足^[6]. 但是由于将三维世界映射到二维平面上, 丢失了周围环境的深度信息, 因

此目前多采用预先标定 CCD 摄像机参数和获取焦距的几何光学聚焦法^[7]、特征点图像匹配技术^[8]和光流技术获取深度. 文中则是基于几何光学聚焦法在忽略景深的基础上建立 CCD 摄像机拍摄高度计算和熔积层目标点空间定位的数学模型; 使用 MATLAB 软件开发熔积层测距定位系统软件; 通过试验检验在不同俯仰角下使用该算法进行熔宽检测、缺陷点定位的可行性和精度.

1 视觉定位几何模型

文中使用的可变焦距 CCD 摄像机视场较小、视距较短, 且无广角功能, 因此 CCD 摄像机模型采用忽略畸变的理想摄像机模型.

对可变焦距 CCD 摄像机来说, 对 dx 和 dy 的标定需考虑焦距的影响, 其中 dx 和 dy 分别为每一个像素在 x, y 方向上的物理尺寸. 文中采用的 CCD 摄像机景深经实际测量为 1 mm, 同时考虑到 CCD 摄像机几何模型近似认为像距 v 固定, 故忽略景深影响, 近似认为对于任意焦距 f , 有唯一物距 u (主光轴 OO' 长度) 与其对应, 当且仅当在此物距下可以获得目标的清晰图像. 因此测量不同物距 u 下 dx 和 dy 值, 即可反映其随 f 的变化关系. 通过对主光轴 OO' 不同长度下的 dx 和 dy 值进行拟合, 即可得到 dx, dy 值关于主光轴 OO' 长度 u 的直线方程.

CCD 摄像机固定于工业机器人执行末端, 位于焊枪后方, 可确定用户坐标系 $O_u - x_u y_u z_u$, 其中原

点 O_u 位于 CCD 摄像机光心正下方的熔积层上, z_u 轴垂直于熔积层, 竖直向上, $y_u O_u z_u$ 平面为 CCD 摄像机主光轴所在平面. 缺陷点定位分析几何模型如图 1 所示, 其中 $O_w - x_w y_w z_w$ 为世界坐标系; O' 点为 CCD 摄像机主光轴与 $x_u O_u y_u$ 平面的交点; O_i 点为图像平面原点, 其像素坐标为 (m_0, n_0) , 至 CCD 摄像机光心 O 距为 f , 其中 (m_0, n_0) 为数字图像中心点, f 为 CCD 摄像机标称焦距; T 为熔积层缺陷点, T' 为 T 点在图像平面上的投影点, 其像素坐标为 (m, n) ; H 为 CCD 摄像机距离 $x_u O_u y_u$ 平面的垂直距离; θ 为 z_u 轴与 CCD 摄像机主光轴 OO' 夹角. 点 G 为 T 在 y_u 轴上的投影, 落于 y_i 轴上的 G'' 点为 G 在图像平面上的投影, 线段 GT 在图像平面上的投影 $G''T'$ 为平行于 x_i 轴的线段, 为了便于求得点 G'' 坐标, 在线段 O_k 上取点 G' , 使 $O'G' \perp OO'$.

通过图像处理获得熔积层缺陷点像素坐标 (m, n) , 缺陷点在用户坐标系下的坐标值 (x_u, y_u) 需要利用图 1 的几何模型建立数学模型来计算.

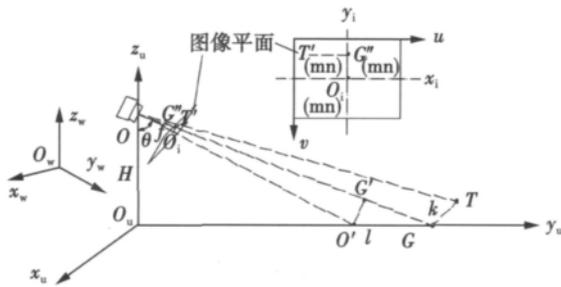


图 1 缺陷点定位数学模型

Fig. 1 Mathematical model of defect position

点 T 在 $x_u O_u y_u$ 中的 y_u 坐标为

$$y_u = H \sin \theta + \frac{H [(n - n_0) dy]}{f \cos^2 \theta - \sin \theta \cos \theta [(n - n_0) dy]} \quad (1)$$

利用 $\triangle OGT$ 和 $\triangle OG''T'$ 的相似关系求得 GT 的长度, 即点 T 在 $x_u O_u y_u$ 中的 x_u 坐标为

$x_u =$

$$\frac{[(m - m_0) dx] \sqrt{f^2 + [(n - n_0) dy]^2}}{\sqrt{\left(H \tan \theta + \frac{H [(n - n_0) dy]}{f \cos^2 \theta - \sin \theta \cos \theta [(n - n_0) dy]} \right)^2 + H^2}} \quad (2)$$

点 T 由于位于 $O_u - x_u y_u$ 平面内, $z_u = 0$. 可得点 T 在用户坐标系 $O_u - x_u y_u z_u$ 中坐标^u T 为

$$\left(\frac{[(m - m_0) dx] \sqrt{f^2 + [(n - n_0) dy]^2}}{\sqrt{\left(H \tan \theta + \frac{H [(n - n_0) dy]}{f \cos^2 \theta - \sin \theta \cos \theta [(n - n_0) dy]} \right)^2 + H^2}}, \right.$$

$$\left. H \sin \theta + \frac{H [(n - n_0) dy]}{f \cos^2 \theta - \sin \theta \cos \theta [(n - n_0) dy]} \right) \rho \quad (3)$$

最终通过坐标变换公式得点 T 在世界坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ 中的坐标^w T 为

$${}^w T = {}^w R {}^u T + {}^w T_{u_0} \quad (4)$$

式中: ${}^w R$ 为旋转矩阵, 表示坐标系 $O_u - x_u y_u z_u$ 相对于坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ 的方位; ${}^w T_{u_0}$ 为位置矢量, 表示坐标系 $O_u - x_u y_u z_u$ 的原点相对于坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ 的位置, 二者都可通过工业机器人位姿获得.

2 熔宽与缺陷点的图像识别方法

文中开发了熔宽与缺陷点的图像识别系统, 其主要功能是通过 CCD 摄像机获取的熔积层表面形貌图像, 在获得 CCD 摄像机主光轴长度的基础上, 首先利用数字图像处理的技术手段识别熔积层宽度信息; 其次通过上述几何模型获得目标点在用户坐标系中的坐标值. 在通过 CCD 摄像机获得熔积层形貌的基础上, 利用图像数字化分析可得到准确的熔积层像素宽度. 通过灰度变换和对比度拉伸, 得到一幅具有高对比度的图像, 有利于后续的二值化及边缘检测. 通过中值滤波滤去数字图像中的噪声, 滤去图像中的一些琐碎细节, 桥接直线或曲线的缝隙. 经过区域生长之后即可进行二值化和边缘检测, 得到熔积层的边缘信息. 这样即可根据熔积层像素宽度求得熔积层的实际宽度. 为获取熔积层缺陷目标点的像素坐标, 首先提取图像中所有的连通分量的重心位置, 通过判断重心点位置是否处于熔积层区域内来确定该点是否是熔积层缺陷目标点, 其处理流程如图 2 所示. 图 3 和图 4 分别为带有缺陷的熔积层形貌图像和该图像经过缺陷点定位算法处理的识别图像, 其中椭圆区域中的两点为经过该算法处理得到的两个缺陷点重心位置.

3 试验结果与分析

文中试验目的是使用 CCD 摄像机扫描熔积层表面, 通过基于上述模型开发的图像识别系统对熔积层宽度和焊道形貌进行监测, 并计算熔积层缺陷的空间坐标. 将计算结果和理论值进行比较, 对上述技术路线进行验证. 首先对 CCD 摄像机的 dx 和 dy 进行标定, 标定结果如表 1 所示. 对不同主光轴 OO' 长度 u 下的 dx 和 dy 值进行拟合, 可得到 dx, dy 值关于 u 的直线方程, 其中 dx 的方程为

$$dx = 1.0 \times 10^{-4} u - 0.003 2 \quad (5)$$

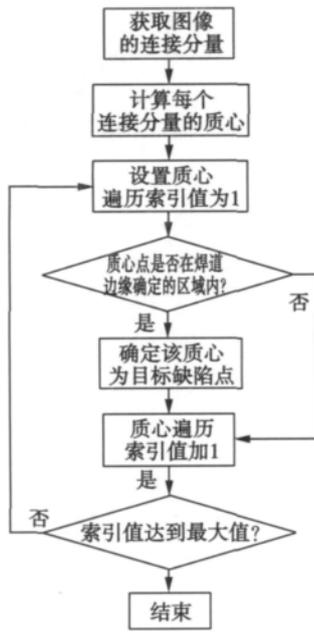


图2 缺陷点像素坐标定位算法流程图

Fig. 2 Location algorithm process of defect pixel coordinate

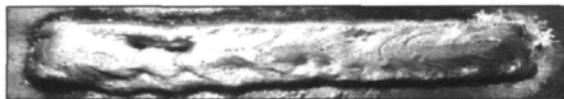


图3 带有缺陷的熔积层

Fig. 3 Deposition with defect

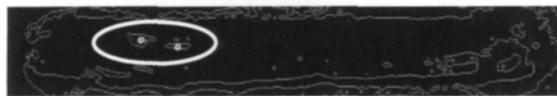


图4 熔积层形貌与缺陷位置的图像识别

Fig. 4 Image recognition of deposition morphology and defect location

表1 CCD 摄像机 dx 和 dy 值标定结果

Table 1 Calibration results of dx and dy for ccd camera

主光轴长度 l/mm	x 方向物理尺寸 dx/(mm·像素 ⁻¹)	y 方向物理尺寸 dy/(mm·像素 ⁻¹)
250	0.030 2	0.030 5
300	0.036 6	0.038 3
350	0.043 2	0.043 8
400	0.049 9	0.049 5
450	0.056 7	0.056 8
500	0.063 3	0.062 4

熔积层原始图像如图5所示,CCD 摄像机拍摄距离 $u = 500$ mm. 由于该熔积层方向与数字图像 y_i

轴平行,可根据式(5)与熔积层像素宽度求得熔积层实际宽度. 分别取熔积层不同位置(图6序号1~5所指位置)的宽度进行检测,其数据如表2所示,经图像处理得到熔积层边缘结果如图6所示.

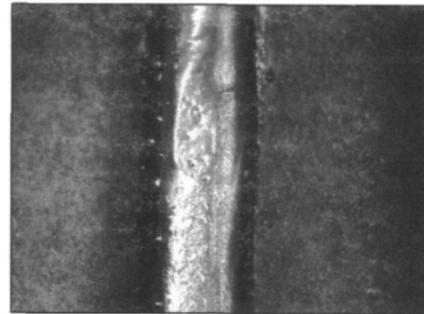


图5 原始熔积层图像

Fig. 5 Original image of deposition

表2 熔积层宽度检测误差分析

Table 2 Error analysis of deposition width detection

位置	像素宽度 W_1 (像素)	测量宽度 W_2 /mm	实际宽度 W_3 /mm	误差 ε (%)
1	133	9.25	8.94	3.3
2	135	9.39	9.10	3.4
3	151	10.50	10.64	1.3
4	141	9.81	10.12	3.1
5	131	9.11	9.52	4.3

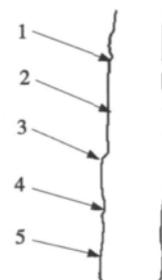
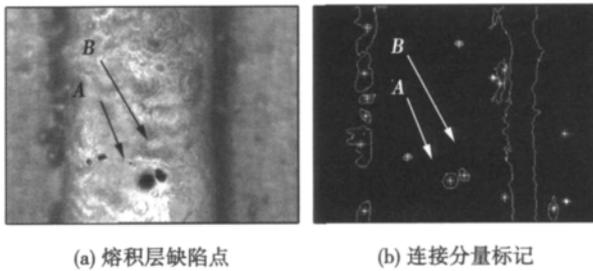


图6 熔积层轮廓的图像处理结果

Fig. 6 Image process result of deposition contour

对如图7a所示熔积层缺陷点进行定位处理,得到的连接分量标记图如图7b所示,其CCD 摄像机拍摄方向与熔积层垂直,拍摄角度为 $\theta = 0^\circ$.

以图7a所示熔积层为目标,拍摄角度分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 进行试验. 由于熔积层包含有两个缺陷点 A、B,因此熔积层缺陷定位误差分析结果如表3所示. 文中系统误差主要来源于如下几个方面. (1) CCD 摄像机几何模型引入误差. 在文中由于 CCD 摄像机视场较小、视距较短,并且得到的标定靶图图像未出现明显畸变,因此文中未考虑镜头

图7 $\theta=0^\circ$ 时的熔积层图像处理结果Fig. 7 Image process result of deposition ($\theta=0^\circ$)

畸变对成像的影响,由此引入了 CCD 摄像机的畸变误差。(2) CCD 摄像机标定误差.文中所使用的 CCD 摄像机景深较浅,在物距、焦距曲线拟合时近似认为对固定焦距 f 有唯一物距 u 与其对应,当且仅当在此物距 u 下可获得目标的清晰图像。(3) 数字图像处理引入误差.实际熔积层边缘灰度往往呈非均匀分布,在计算熔积层宽度时可能会导致较大误差,直接影响测量精度.因此在监测过程中,应尽量构造均匀的光照条件并选择合理的图像处理参数,以保证得到稳定、快速、可靠的图像处理结果.

表3 熔积层缺陷定位误差分析
Table 3 Error analysis of deposition defect location

角度 $\theta/(^\circ)$	拍摄高度 H/mm	缺陷点	像素坐标 $p/($ 像素)	坐标计算值 p_1/mm	实际坐标 p_0/mm	定位误差 $\varepsilon_1(\%)$
0	290	A	(367.34 465.04)	(-0.42, -8.08)	(0, -7.8)	0.19
0	290	B	(403.86 450.96)	(0.87, -7.43)	(0.9, -6.2)	0.75
15	278	A	(375.66 441.66)	(-0.57, -68.78)	(0, -67.26)	0.65
15	278	B	(411.54 431.80)	(1.86, -69.62)	(0.9, -68.86)	0.53
30	252	A	(382.00 424.88)	(-0.23, -138.4)	(0, -137.2)	0.63
30	252	B	(417.18 414.94)	(0.79, -139.6)	(0.9, -138.8)	0.51
45	205	A	(378.70 385.72)	(-0.74, -198.7)	(0, -197.3)	0.90
45	205	B	(412.54 379.60)	(1.21, -201.5)	(0.9, -198.9)	1.36

4 结 论

(1) 文中提出的单目视觉定位数学模型和数字图像处理算法可以非接触实时地监测熔积成形过程中熔积层宽度.

(2) 该模型与算法可便捷地识别可能出现的熔积层缺陷点并计算其空间位置坐标,误差 $< 5\%$;也可引导快速成形过程中熔积工艺参数的实时调整与优化,保证制件形状尺寸精度.

(3) 该模型与算法不仅能用于金属零件快速制造,而且能用于大型高性能关键零件与模具的机器人快速修复.

参考文献:

- [1] 张海鸥,徐继彭. 金属零件和模具的快速制造技术发展动向[J]. 航空制造技术, 2002, 13(4): 22-23.
Zhang Haiou, Xu Jipeng. Development trends of rapid manufacturing technology of metal part and tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 13(4): 22-23.
- [2] Leu Ming C, Zhang Wei. Research and development in rapid prototyping and tooling in united states[C]// Proceedings of the First International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing. Beijing, China, 1998: 707-718.
- [3] 胡志坤,武传松. 高速 MAG 电弧焊驼峰焊道产生过程的实验

研究[J]. 金属学报, 2008, 12: 1445-1449.

- Hu Zhikun, Wu Chuansong. Experimental investigation on forming process of humping bend in high speed MAG arc welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 12: 1445-1449.
- [4] 高明,曾晓雁,胡乾午,等. 激光-电弧复合焊接咬边缺陷分析及抑制方法[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 85-88.
Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu, et al. Mechanism and remedy of undercut formation during laser-arc hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 85-88.
 - [5] 张文增,陈强,都东,等. 基于三维视觉的焊接机器人轨迹跟踪[J]. 清华大学学报, 2007, 47(8): 1270-1273.
Zhang Wenzeng, Chen Qiang, Du Dong, et al. 3-D vision-based trajectory tracking of welding robots[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2007, 47(8): 1270-1273.
 - [6] 张文增,陈念,陈强,等. 基于钨极倒影的 GTAW 三维焊缝位置检测[J]. 焊接学报, 2010, 31(3): 1-4.
Zhang Wenzeng, Chen Nian, Chen Qiang, et al. Detection of 3D seam position for GTA welding based on mirror of tungsten electrode in pool[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 1-4.
 - [7] Xiong Y, Shafer S A. Depth from focusing and defocusing[C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, USA, 1993: 68-73.
 - [8] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

作者简介: 张海鸥,男,1955年出生,博士,教授,博士研究生导师.主要从事特种加工、数字化成形技术与装备方面的科研和教学工作.发表论文100余篇. Email: zholab@mail.hust.edu.cn

MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

Visualized diagnosis for metallic parts deposition shaping quality

ZHANG Haiou¹, QIU Lipeng¹, RUI Daoman¹, WANG Guilan², YU Yang¹ (1. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China). pp 1 - 4

Abstract: Single-camera vision was used to monitor the deposition manufacturing process. By using of image processing technology, the deposition morphology information was processed to get the deposition width. The defect position was calculated by virtue of the spatial orientation mathematical model, which takes the defect pixel coordinate as the source. In the end, the experiment to monitor the deposition was carried out. The experimental results show that the mathematical model and the image processing arithmetic can monitor the deposition width precisely without contact. The method also can recognize and locate the possible defect point fleetly and accurately. Thus the method can adjust and optimize the technological parameter of the deposition to ensure the shape precision and the dimensional precision of the part.

Key words: deposition shaping; image process; deposition contour recognition; deposition width monitoring; defect location

Experimental study on fracture toughness of butt weld of Q460C high-strength structural steel

WANG Yuanqing¹, LIN Yun², ZHANG Yannian², SHI Yongjiu¹ (1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability, China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China). pp 5 - 8

Abstract: Three point bending (TPB) fracture toughness tests of weld zone and heat affected zone of Q460C structural high-strength steel with 14 mm in thickness at distinct low temperature points were carried out, and the fracture toughness values for weld zone and heat affected zone of the specimens were obtained. Then regression analysis with Boltzmann function was used, then the ductile-brittle transition temperature and its variation with temperature were acquired. The TPB fracture appearance was analyzed with the scanning electron microscope. The results showed that low temperature had obvious influence on the fracture toughness of weld zone and heat affected zone of Q460C steel. With the temperature decreasing, there was a downward trend on the fracture toughness. Moreover, the ductile-brittle transition temperature of weld zone is about $-53.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, and that of the heat affected zone was about $-40.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Besides, the fracture appearances of weld zone and heat affected zone fractured at temperature point below $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ showed the brittle characteristics significantly.

Key words: high strength steel; fracture toughness; welded joint; crack tip opening displacement

Interfacial microstructure and bonding strength of diffusion bonded TiAl/Ti/Nb/GH99 alloy joint

LI Haixin, WEI Hongmei, HE Peng, FENG Jicai (State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). pp 9 - 12

Abstract: Diffusion bonding of TiAl-based alloy to Ni-based alloy using Ti/Nb composite interlayer was carried out. The formation phases and the interfacial microstructure of the joints were investigated by scanning electron microscopy, electron probe X-ray analysis and X-ray diffraction. The bonding strength of the joints was evaluated through shear test. The results show that the typical interfacial microstructure of the joint is $\text{GH99}/(\text{Ni}, \text{Cr})_{\text{ss}}/\text{Ni}_3\text{Nb}/\text{Ni}_6\text{Nb}_7/(\text{Ti}, \text{Nb})_{\text{ss}}/\alpha\text{-Ti} + (\text{Ti}, \text{Nb})_{\text{ss}}/\text{Ti}_3\text{Al}/\text{TiAl}$. The maximum shear strength of 273.8 MPa can be achieved under the condition of $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ for $t = 30\text{ min}$ and $p = 20\text{ MPa}$. With the joining temperature T increasing, the interfacial microstructure and thickness of reaction layer changes. When the brazing temperature $T > 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ni_6Nb_7 reaction layer which has bad effect on the bonding strength forms. Based on the experimental results, the formation process of reaction layer was analyzed and interfacial reaction mechanism of the interface of GH99/Nb and Nb/Ti/TiAl was revealed.

Key words: diffusion bonding; interfacial microstructure; shear strength

Gas pool coupled activating TIG welding method

HUANG Yong^{1,2}, LIU Ruilin², FAN Ding^{1,2}, KANG Zaixiang¹, HAO Yanzhao², QU Huaiyu² (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing, the Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). pp 13 - 16

Abstract: A new welding method named gas pool coupled activating TIG welding was proposed, which contains two layers of shielding gas. The inner inert gas can protect the molten pool, and the outer active gas can provide active element into the molten pool to obtain narrow and deep weld. By taking SUS304 stainless steel as based metal, the effect of GPCA-TIG method on welding arc and weld appearances was studied. In addition, the effect of main welding parameters on weld penetration and D/W ratio was also studied. The results indicate that at the same welding conditions with the traditional TIG welding, the 8 mm thickness stainless steel can be fully penetrated with GPCA-TIG welding process without making a groove. This method can avoid the oxidation of tungsten electrode in welding process.

Key words: GPCA-TIG welding; gas pool coupled; outer gas; O element