

DOI: 10.3901/JME.2016.18.031

TIG 焊熔池表面流动行为的研究*

黄健康 孙天亮 樊 丁 石 珂

(兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室 兰州 730050)

摘要: 针对钨极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊熔池表面流动行为,在确定 TIG 焊熔池表面可采用粒子示踪的方法来进行其表面流动行为示踪的基础上,在以激光为试验背光光源,通过激光在 TIG 焊熔池表面镜面反射后,使得熔池及示踪粒子清晰成像于成像屏上。在此基础上,开展对 304 不锈钢和 Q235 普通碳钢的熔池表面流动行为的试验研究,对所获得这两种材料的 TIG 焊熔池试验数据进行处理与对比分析,探究熔池表面流动规律。研究结果表明:在 TIG 焊过程中,其焊接熔池存在两种运动模式,在 304 不锈钢焊接过程中熔池表面的液态金属由边缘向熔池中心流动;在 Q235 碳钢焊接过程中熔池表面的液态金属不定向、不规则地由熔池中心向熔池边缘流动,并测量 304 不锈钢 TIG 焊过程中熔池表面的液态金属流动速率为 12 mm/s 左右, Q235 碳钢的熔池表面的流动速率为 15 mm/s 左右。

关键词: TIG 焊; 表面示踪; 熔池镜面反射; 熔池流动行为

中图分类号: TG401

Study on the Surface Flow Behavior of TIG Weld Pool

HUANG Jiankang SUN Tianliang FAN Ding SHI Yu

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: In view of flow behavior about the Tungsten inert gas weld pool surface, the method of use tracer particles to track flow behavior of the weld pool surface is proposed. The new experiment system which contains a laser, a screen, a camera and a welding equipment is established. The screen capture the images about the weld pool surface and the tracer particles which are surface-swimming in the weld pool by mirror reflection of a laser on the surface of weld pool during tungsten inert gas(TIG) welding, at the same time, this changing images on the screen are recorded by charge coupled device(CCD) camera. Further, the flow behavior of weld pool surface between 304 stainless steel and Q235 carbon steel are researched during the TIG welding. The experiment data is analyzed to explore the surface flow law of weld pool during the TIG welding, and the speed algorithm of tracer particles is proposed. The results show that the two different flow behaviors of TIG weld pool exist in the TIG welding process. The liquid metal on the surface flows from the edge to the center of weld pool during the welding of stainless steel, while the surface flow is from the center to the edge of weld pool during the welding of carbon steel, and to determine the flow of liquid metal in the process of stainless steel TIG welding speed is about 12 mm/s, the liquid metal in the process of carbon steel TIG welding flow rate is about 15 mm/s.

Key words: TIG welding; tracer method; pool surface mirror reflection; weld pool flow behavior

0 前言

最近,人们对活性剂气体保护电弧焊进行了广泛而深入的研究,尽管钨极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊技术已经得到了广泛的应用,但人们对其熔池表面流动行为的研究仍停留在母材为不锈钢有无活性剂时熔池的流动行为及其对熔深影响的研究,且存在较大的争议^[1-3],活性剂对焊接过程

的影响机理主要分为表面张力梯度理论^[4-5]和电弧收缩理论^[6-8]。因此,对于熔池内流体流动及传热过程,国内外学者做了大量的试验研究和数值模拟。

在试验研究方面,张瑞华等^[9]利用高速数字摄像机对涂敷活性剂与不涂活性剂条件下的熔池表面流动形态进行观察,研究了 TIG 与活性剂钨极氩弧焊(Activating flux tungsten inert gas welding, A-TIG)焊熔池流动的差别,认为有无活性剂时的熔池表面流体流动方向相反;活性剂的加入改变了熔池流动方向,并且使焊接熔池产生了强烈的对流现象;并进一步利用 X 射线实时焊缝数字观察系统,用钨粒子示踪法测试了熔池流体流动的规律,表明了有无

* 国家自然科学基金(51205179)、973 计划前期研究专项(2014CB660810)和兰州理工大学红柳青年人才培养计划(Q201202)资助项目。20151214 收到初稿,20160705 收到修改稿

活性剂的熔池内部流体流动方向相反,在有活性剂时熔池内部流体流动开始时向下流动,在熔池底部返回,形成逆时针的涡流,在无活性剂时,从中心流向边缘,再从边缘流向熔池底部,形成顺时针的涡流。路浩等^[10]同样用钨粒子示踪的方法研究了熔化极活性气体保护电弧焊(Metal active gas arc welding, MAG)与活性 MAG 焊熔池流动的差异,结果显示:活性 MAG 焊接方法熔池内液态金属的流动方向为从熔池周边向中心流动,熔池后部存在向熔池中心的下行流动,表明对于钢的活性 MAG 焊接方法,熔池流动行为改变是增加焊接熔深的主要因素。ZHAO 等^[11, 19]用特定摄影系统清晰地拍摄到了 316L 不锈钢激光焊时的熔池表面流动行为,表明在 316L 不锈钢在激光焊时熔池表面的液态金属是由熔池边缘向熔池中心流动的。

在数值模拟研究方面,大量的学者主要从熔池的受力来研究金属流动行为^[12-15]。其中, TSAI 等^[16]讨论了电磁力对熔池的影响,结果发现电磁力导致了熔池表面中心处略微隆起,而熔池边缘处略微下陷。CHOO 等^[17]讨论了切应力对熔池内液体金属流动及熔池成形的影响,发现气体切应力对于熔池自由表面的作用是复杂的,但气体的黏性相对于液体金属是一个很小的值,是可以忽略的。KIM 等^[18]就弧焊过程中各种的驱动力对热和质传递的影响做了分析和研究,发现熔池中的热传递和流体流动会影响熔池的几何形状、温度梯度、局部冷却速度和凝固组织。

虽然,学者们已从试验和数值模拟的角度来研究熔池的流动行为,但由于电弧的强弧光、熔池区域过小等因素,使得关于焊接熔池行为研究还相对比较少,相关的机理还不是很明确。针对以上研究的不足,本文采用示踪的方法,以激光为反射光,通过熔池镜面反射,对 304 不锈钢和 Q235 普通碳钢的熔池表面流动行为进行观察,对观察的结果进行处理与分析,探究熔池表面流动规律,计算了熔池表面的流动速度,并进行了对比分析。

1 试验方法

为了研究 304 不锈钢和 Q235 普通碳钢 TIG 焊时熔池表面的流动行为,设计并搭建了以激光光源的熔池镜面反射观测系统,如图 1 所示。

系统由 650 nm 红色激光发射器、TIG 焊机、成像屏和(Charge coupled device, CCD)工业相机组成。相机主要包括位置、角度等光学参数,并可以简单地获得 TIG 焊熔池镜面反射模型,如式(1)所示

$$I(x, y) = gl \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \gamma + b \quad (1)$$

式中, d 为 CCD 镜头直径; f 是镜头焦距; l 为 CCD 到屏幕的距离; γ 是偏轴角; g 和 b 分别是 CCD 工业相机的增益系数和常数。

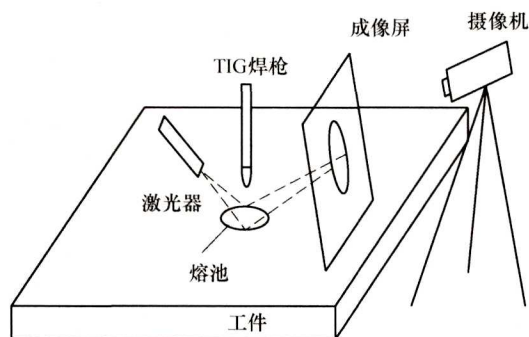


图 1 激光反射熔池观测系统示意图

对所建立的激光熔池镜面反射成像系统开展了成像可行性验证研究,在 TIG 焊枪下放置一个表面为凸面且镜面反射较好的金属薄片,如图 2 所示,激光经过凸面反射,在成像屏上面形成清晰的像,如图 3 所示。当进行 TIG 焊接时,所建立的系统在成像屏上所获得像可以很好地反映焊接时的熔池表面的液态金属的情况。



图 2 激光凸面反射



图 3 激光熔池镜面反射成像系统

在可行性研究的基础上,分别对 3 mm 厚的 304 不锈钢板和 Q235 碳钢板进行施焊与观测,为清晰观测到熔池表面流动的行为,选用了合适的粉体材料作为示踪粒子,该材料的密度接近于钢的密度,并将所选示踪粒子粉体与丙酮调和后均匀的涂覆于焊道上,试验采用表 1 的焊接参数进行施焊,利用

CCD 记录熔池镜面反射成像, 帧率为 35 帧/s。

图 4 为典型的一脉冲周期所获得的熔池表面状态过程, 图 4a 为所对应的脉冲电流示意图, t_1 时间段为峰值与基值电流的过渡, t_2 时间段为稳定的基值电流时, 图 4b 为从峰值电流过渡到稳定基值电流时刻所对应的熔池表面状态。峰值时脉冲电流对熔池的冲击作用强烈, 此时熔池表面变形大, 熔池轮廓模糊, 而当过渡到基值电流初始时刻时, 从图 4b

可以看出脉冲对熔池表面依然存在较大的作用, 当过渡到稳定基值电流时, 熔池形貌清晰, 已基本无弧光干扰, 电流对熔池表面的作用已很小。从图 4 中观测到的视频可以看出在脉冲交替阶段, 脉冲对熔池的冲击作用导致熔池轮廓模糊, 变形较大, 而在稳定基值电流时刻脉冲对熔池的冲击作用很小, 熔池几乎没有变形, 适合对熔池表面液态金属的流动行为进行观测分析。

表 1 焊接参数

板厚 δ/mm	基值电流 I_b/A	峰值电流 I_p/A	占空比 I_δ	电压 U/V	焊速 $v/(\text{m}/\text{min})$	弧长 L/mm	焊枪倾角 $\theta/^\circ$	气流 $Q/(\text{L}/\text{min})$
3	40	90	1:9	10	0.20	3	90	1.5

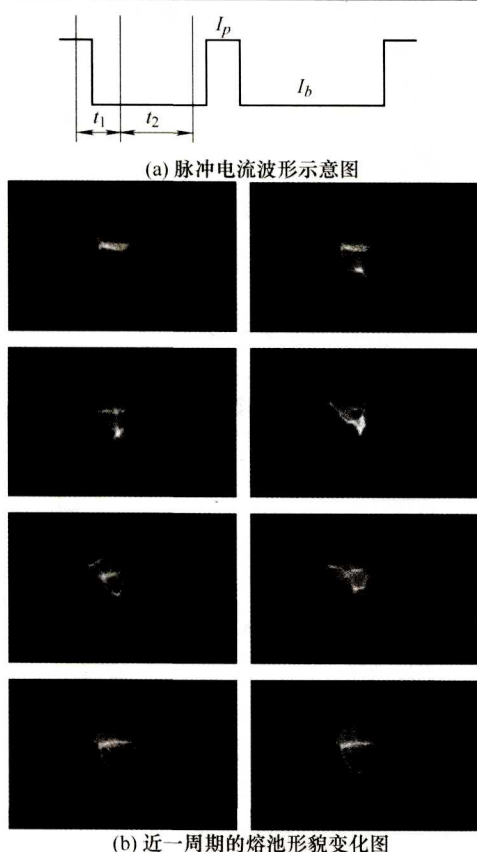


图 4 峰值、基值电流熔池形貌过渡

图 5 为典型的稳定基值电流时所获得的含示踪粒子的图像数据, 其中图 5a、图 5b 为连续两帧的熔池图像, 可以明显地观察到示踪粒子的存在与移动。为表明示踪粒子的运动情况, 将图 5a 与图 5b 叠加, 获得图 5c, 得到示踪粒子在连续时刻在熔池表面的位置变化。可以看出示踪粒子由位置 1 移动到位置 2, 这一过程较好地反映了熔池表面的运动情况, 通过连续的观察可以进一步获得 TIG 焊熔池表面的流场运动规律。

2 示踪粒子运动轨迹分析

在相同的焊接规范下分别对涂覆有示踪粒子

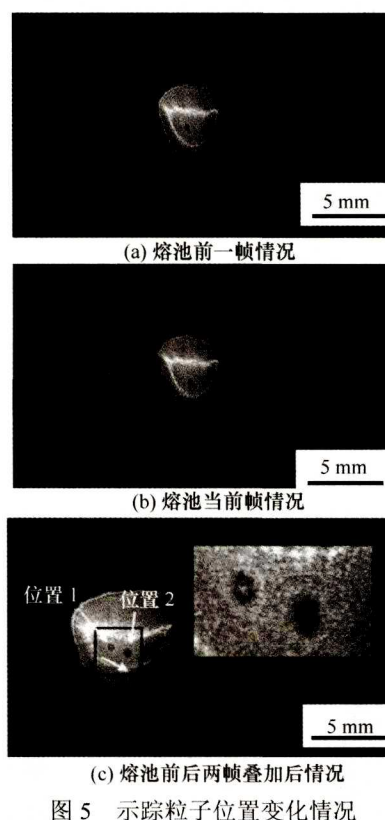


图 5 示踪粒子位置变化情况

的 304 不锈钢和 Q235 低碳钢进行施焊, 记录其熔池表面示踪粒子的运动行为。

2.1 304 不锈钢熔池表面流动行为

图 6 为所记录的示踪粒子在不锈钢熔池表面 0.25 s 内的运动情况, 为了方便表示, 图中的示踪粒子用白点标出, 如图 7a 中箭头所指示的。图 7 系统地反映了一个示踪粒子从产生到消失的过程中粒子在熔池表面的运动情况。

为追踪同一示踪粒子在熔池表面位置的变化, 将分帧后 0.25 s 内的连续时间段的 10 张熔池图片叠加于一起, 可得到示踪粒子的运动轨迹, 如图 7a 所示, 其中白色区域为熔池, 为表示方便, 采用示踪粒子起始时刻为开始帧图片, 示踪粒子消亡为结束帧图片, 并使开始帧、中间帧、结束帧叠加并形

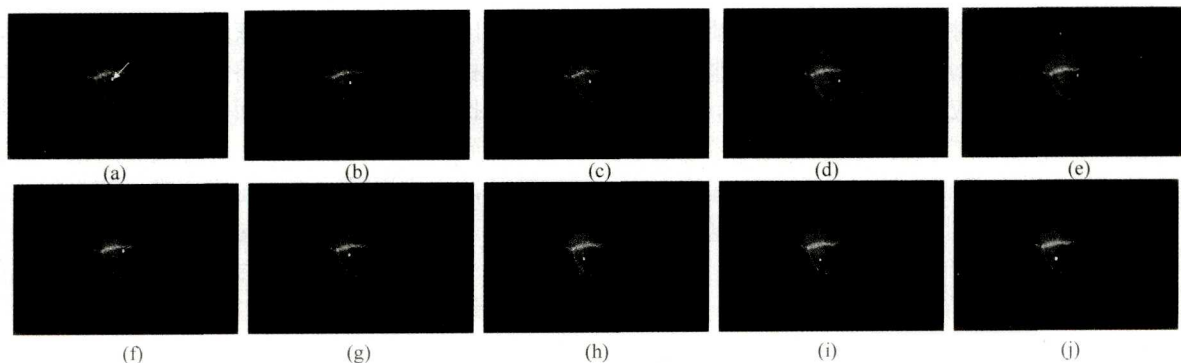
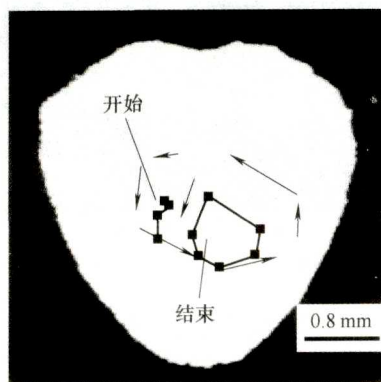


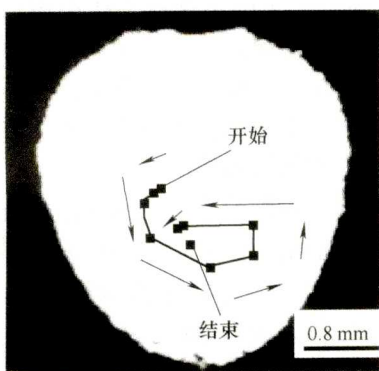
图 6 0.25 s 内 304 不锈钢 TIG 焊时示踪粒子在熔池表面的运动情况

成一张新的图片,可以发现图 7a 中的示踪粒子从熔池边缘逆时针方向旋转运动到熔池中心。

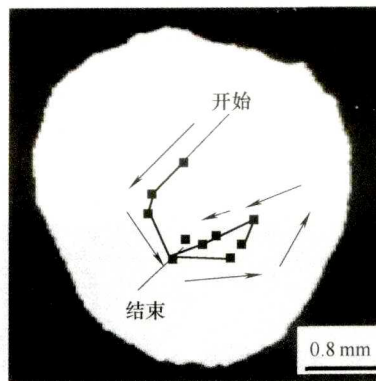
为进一步研究熔池表面的流动行为,对试验中一典型的焊接过程中不同时间段的示踪粒子从开始产生到消失结束的运动轨迹进行研究,图 7b、7c、7d 分别是在 304 不锈钢 TIG 焊过程中典型的示踪粒子运动轨迹,通过分析可清晰地反映出示踪粒子在熔池表面的运动情况。从图 7 可发现在 304 不锈钢 TIG 焊过程中示踪粒子都是从熔池边缘逆时针方向运动到熔池中心并消失,由此可以获得如图 8 所示的示踪粒子的运动模型,从图 8 可以看出在不锈钢在 TIG 焊时,示踪粒子由熔池边缘逆时针运动到熔池中心。这表明熔池表面的液态金属是由熔池周边以逆时针旋转的方式进入到熔池中心的,其运动轨迹与行为可由图 8 示意图清晰地表达出来。



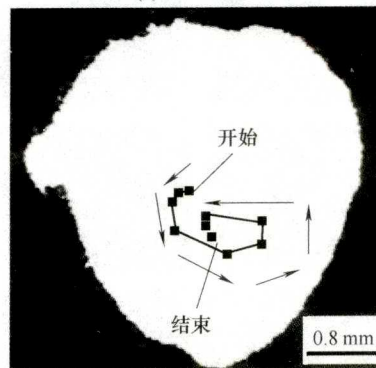
(a) 0.40~0.65 s



(b) 1.30~1.55 s



(c) 4.35~4.60 s



(d) 7.15~7.40 s

图 7 304 不锈钢 TIG 焊示踪粒子运动轨迹

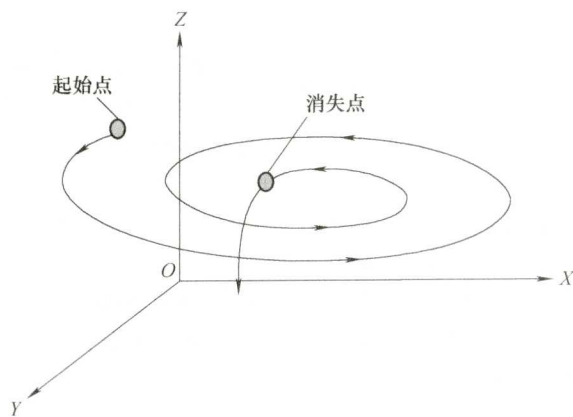


图 8 304 不锈钢 TIG 焊示踪粒子运动轨迹空间示意图

2.2 Q235 低碳钢熔池表面流动行为

图 9 是示踪粒子在 Q235 低碳钢熔池表面 0.13 s

内的运动情况,其中白色区域为熔池,为方便表示,采用示踪粒子起始时刻的熔池边缘来表示,示踪粒子被标记为箭头所指示的白点。追踪图 9 示踪粒子不同时刻在熔池表面位置的变化,将分帧后 0.13 s 时间段内的连续五张熔池图片叠加,得到粒子的运动轨迹,如图 10a 所示,发现在 Q235 低碳钢 TIG 焊时,示踪粒子的运动轨迹一直在熔池边缘,并不能运动到熔池的中心区域。

为进一步研究 Q235 低碳钢熔池表面的流动行

为,研究了典型的一焊接过程中不同时间区间内的示踪粒子在熔池表面生成、消失以及其运动轨迹,如图 10b、10c、10d 所示,可以发现在 Q235 碳钢 TIG 焊时,这些示踪粒子的运动过程基本没有方向性并一直在熔池边缘运动,或者从熔池中心向熔池边缘运动。由图 10 可以看出 Q235 碳钢在 TIG 焊时,熔池表面的液态金属是以不定向、不规则的轨迹最终流向熔池边缘。

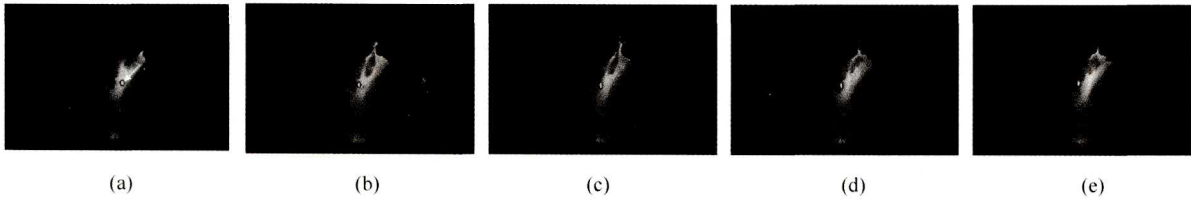
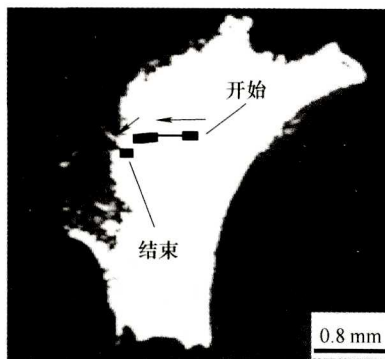
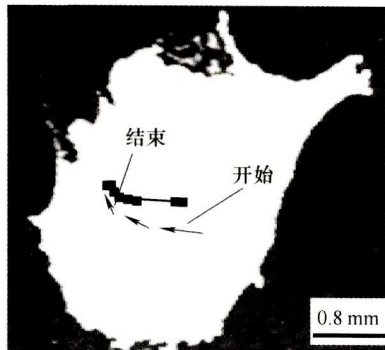


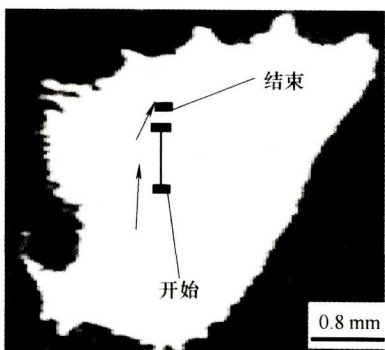
图 9 0.13 s 时间内 Q235 低碳钢 TIG 焊时示踪粒子在熔池表面的运动情况



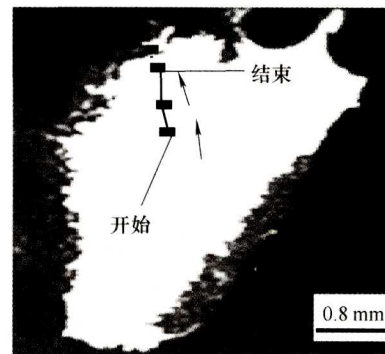
(a) 0.15~0.28 s



(b) 1.80~1.93 s



(c) 2.40~2.53 s



(d) 4.10~4.23 s

图 10 Q235 TIG 焊示踪粒子运动轨迹

通过对比 304 不锈钢和 Q235 碳钢 TIG 焊熔池表面的流动行为发现,对于相同的焊接方法及焊接参数,不同焊接材料的熔池行为有着很大的不同,其中 304 不锈钢熔池表面的流动行为主要由熔池边缘流向熔池中心,而 Q235 碳钢,熔池表面流动主要由中心向边缘流动,这表明熔池表面的流动行为主要由被焊材质液态金属的物理性质所决定。对于当前 TIG 焊熔池流动行为的研究主流理论认为是表面张力温度梯度系数的改变,导致熔池表面的表面张力的改变,使得熔池流动行为发生变化,相关研究^[6, 9-10, 14]主要认为当表面张力温度系数由正变成负的情况下,熔池的流动变成由中间向四周的流动模式变成由熔池四周向中间的流动,即熔池由向外流动变成向内流动。

3 熔池表面流速分析

为进一步研究熔池表面的流动速度,对焊接时的熔池宽度 w 进行了测量,与视频所获得的像素宽

进行映射关系的标定,获得像素与长度的对应关系,并进一步对分析了示踪粒子的运动轨迹,计算出示踪粒子的运动速度,并以此反映出熔池表面的流速大小。图 11 为粒子运动轨迹坐标图,图 12 为熔池表面液态金属的流速计算流程图,其中 ΔS 为单元像素所代表的实际距离, Z_W 为熔池像素宽,将轨迹图中示踪粒子出现的位置依次进行二维平面上的定位,统计出每个示踪点在照片上的像素位置 (x_i, y_i) , 分别求出相邻位置之间的像素距离 S_i , 其中, i 表示统计的照片数,由图 11 获得示踪点的运动像素点总和 S , 视频时长为 T , 分帧后得到照片数为 I , 通过试验测得 T 、 I 、 W 。

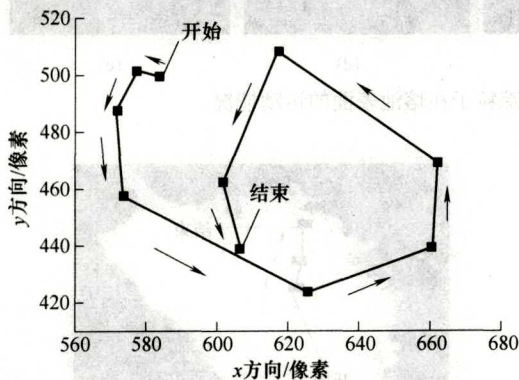


图 11 运动轨迹坐标图

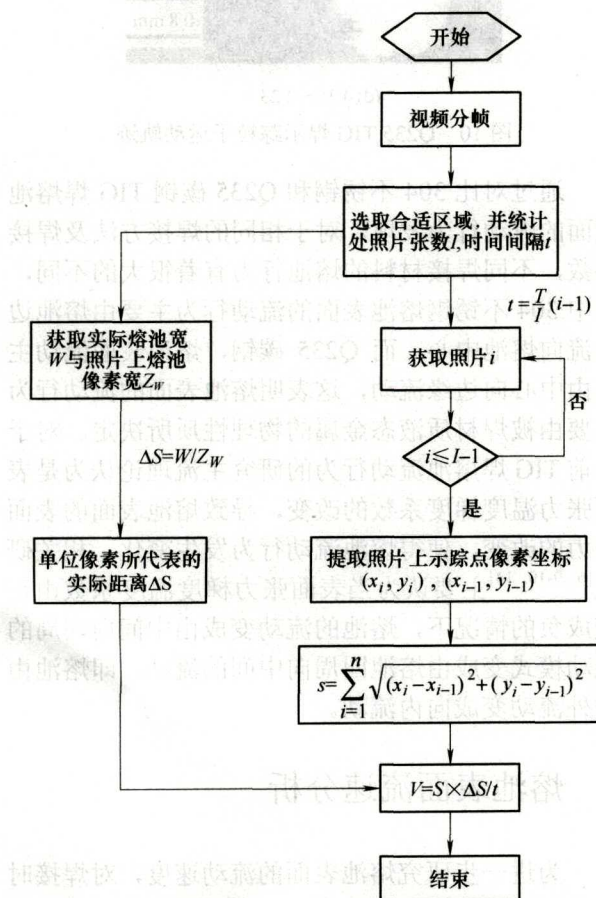


图 12 计算流程图

采用图 12 的计算方法及流程,分别计算了图 7 与图 10 不同时间区间内不同示踪粒子的运动速度情况,其结果如表 2、表 3 所示,其中表 2 为图 7 中 304 不锈钢 4 组表面流动速率,表 3 为图 10 中 Q235 碳钢 4 组表面流动速率,分别对表 2 和表 3 所求出的四组流动速度求平均值,得到 304 不锈钢在 TIG 焊时熔池表面液态金属的流速约为 12.1 mm/s, Q235 碳钢在 TIG 焊时熔池表面液态金属的流速约为 15.2 mm/s。

表 2 304 不锈钢运动点数及速度统计表

序号 n	运动点数 S	流动速率 $v/(mm/s)$
1	315.130	15.1
2	210.090	10.0
3	231.101	11.3
4	252.108	12.1

表 3 Q235 碳钢运动点数及速度统计表

序号 n	运动点数 S	流动速率 $v/(mm/s)$
1	68.018	16.1
2	58.646	14.2
3	79.591	19.4
4	83.781	20.2

当前,一些学者从试验观测与数值分析等方面来研究焊接过程中的流动速度和行为,如 ZHAO 等^[19]用特定摄影系统清晰地拍摄到的 316 不锈钢在激光焊时熔池表面的流动行为,并试验测量出了熔池液态金属的流速为 10~15 mm/s; PIEKARSKA 等^[20]数值研究的熔池表面液态金属的流速为 10~16 mm/s。对比文献[19-20]和本文试验所测量到的熔池表面流动速度,综合这些研究,可初步确定在 TIG 焊焊接过程中熔池表面液态金属的流速约为 10 mm/s 数量级。

4 结论

(1) 在 TIG 焊过程中存在两种熔池的流动行为,从示踪粒子的运动轨迹可以判断出 Q235 碳钢和 304 不锈钢在 TIG 焊时熔池表面液态金属的流动行为,不同的熔池流动性为取决于被焊材质的物理性质。

(2) 304 不锈钢在 TIG 焊接时熔池表面液态金属是从熔池边缘逆时针旋转进入到熔池中心,在这个过程中熔池表面液态金属的平均流动速度约为 12 mm/s。

(3) Q235 碳钢在 TIG 焊接时熔池表面液态金属是从熔池中心以不定向、不规则的运动轨迹流向熔池边缘,其平均流动速度约为 15 mm/s。

参 考 文 献

- [1] HOWSE D S, LUCAS W. Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(3): 189-193.
- [2] TANAKA M, SHIMIZU T, TERASAKI T, et al. Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding[J]. Science and Journal of Mechanical Engineering, 2000, 5(6): 397-402.
- [3] AIDUN D K, MARTIN S A. Effect of sulfur and oxygen on weld penetration of high-purity austenitic stainless steels[J]. Journal Materials Engineering and Performance, 1997, 6(4): 496-507.
- [4] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. TIG 焊电弧-熔池传热与流动数值模拟[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 69-78.
WANG Xinxin, FAN Ding, HUANG Jiankang, et al. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow for arc-weld pool in TIG welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 69-78.
- [5] 陆善平, 董文超, 李殿中, 等. 电弧特性及其对熔池形貌影响的数值模拟[J]. 物理学报, 2009, 58(Special 1): S94-S103.
LU Shanping, DONG Wenchao, LI Dianzhong, et al. Numerical simulation of arc properties and their effects on the weld shape .Acta Physica Sinica, 2009, 58(Special 1): S94-S103.
- [6] 杨春利, 牛尾诚夫, 田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(2): 活性化 TIG 焊接中的电弧现象[J]. 焊接, 2000(5): 15-18.
YANG Chunli, USHIO M, TANAKA M. Phenomenon and mechanism of activated arc in TIG welding(2)-The arc phenomenon in A-TIG welding[J]. Welding, 2000(5): 15-18.
- [7] 石玟, 郭朝博, 黄健康, 等. 脉冲电流作用下 TIG 电弧的数值分析[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 731-737.
SHI Yu, GUO Chaobo, HUANG Jiankang, et al. Numerical analysis of pulse TIG arc current[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 731-737.
- [8] 雷永平, 顾向华, 史耀武, 等. GTA 焊接电弧与熔池系统的双向耦合数值模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(5): 537-542.
LEI Yongping, GU Xianghua, SHI Yaowu, et al. Numerical analysis of the two-way interaction between a mutually coupled weld-pool and weld-arc for GTA welding process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(5): 537-542.
- [9] 张瑞华, 尹燕, 水谷正海, 等. 活性剂钨极惰性气体保护电弧焊接熔池行为的观察[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 115-123.
ZHANG Ruihua, YIN Yan, MIZITANI, et al. Observation of molten pool behavior during A-TIG welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 115-123.
- [10] 路浩, 邢敬伟, 邢立伟, 等. 活性 MAG 焊电弧特征及熔池流动分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 41-44.
LU Hao, XING Jingwei, XING Liwei, et al. Characteristic of A-MAG welding arc and pool flow analysis[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2014, 35(10): 41-44.
- [11] ZHAO C X, RICHARDSON I M, KENJERES S, et al. A stereo vision method for tracking particle flow on the weld pool surface[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(12): 123104.
- [12] WU C S, USHIO M, TANAKA M. Analysis of the TIG welding arc behavior[J]. Computational Materials Science, 1997, 7(3): 308-314.
- [13] BINI R, MONNO M, BOULOS M I. Effect of cathode nozzle geometry and process parameters on the energy distribution for an argon transferred arc[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2007, 27(4): 359-380.
- [14] 柴国明, 张慧. 活性剂等离子弧焊接电弧与电弧力[J]. 航空学报, 2008, 29(1): 192-196.
CHAI Guoming, ZHANG Hui. Activated flux plasma arc and arc force[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(1): 192-196.
- [15] 芦凤桂, 姚舜, 钱伟方. 基于 TIG 焊电弧-熔池统一模型分析焊接电弧[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 145-149.
LU Fenggui, YAO Shun, QIAN Weifang. Simulation on TIG welding arc basing on arc-weld pool uniform model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 145-149.
- [16] TSAI M C, KOU S. Heat transfer and fluid flow in welding arcs produced by sharpened and flat electrodes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(10): 2089-2098.
- [17] CHOO R T C, SZEKELY J, WESTHOFF R C. Modeling of high-current arcs with emphasis on free surface phenomena in the weld pool[J]. Welding Journal, 1990, 69(9): 346-361.
- [18] KIM W H, FAN H G, NA S J. A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface of the weld pool[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28(4): 679-686.
- [19] ZHAO C X, RICHARDSON I M, PAN Y. Liquid metal flow behaviour during conduction laser spot welding [J]. Weld World, 2009, 53: 271-275.
- [20] PIEKARSKA W, KUBIAK M. Modeling of temperature field and fluid flow in hybrid welding process[J]. Archives of Foundry Engineering, 2009, 9(4): 199-202.