DOI: 10.3901/JME.2018.02.027

钨极氩弧焊熔池动态行为和焊工调控特征 信息检测与分析*

樊 丁¹ 顿小春² 张 刚¹ 石 玟¹

(1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 兰州 730050;

2. 重庆铁马工业集团有限公司 重庆 400050)

摘要: 深入理解熟练焊工经验和操作技能对实现复杂环境下的机器人智能化及高精度焊接具有重要理论意义和工程应用价值。然而, 如何检测传感焊工与熔池交互过程中熔池动态变化特征信息是一个难题。针对该问题基于激光视觉传感原理建立动态熔池和焊工实时调控特征信息同步采集试验系统, 研究熔透连续变化时焊工对熔池形态及流态的调控行为, 并获得了相应的调控参数(焊接速度、焊接电流、焊接弧长)和焊枪姿态与熔池特征参数之间的关系。通过对比分析焊接规范参数与焊枪姿态调整时的熔池形态和流态变化发现: 焊接速度、焊接电流和焊接弧长的调整主要是基于熔池输入能量的调控, 表现出熔池形态变化剧烈, 易出现焊塌缺陷, 焊工调控过程呈现出单一、盲目性。焊枪姿态的调整表现出焊工对熔池形态和液态金属流动状态的多元化和指向性调控, 可避免焊接缺陷的产生。

关键词: 钨极氩弧焊; 焊工经验; 熔池检测; 激光视觉

中图分类号: TG409

Detection and Analysis of Weld Pool Dynamic Behavior and Welder Control Information in GTAW

FAN Ding¹ DUN Xiaochun² ZHANG Gang¹ SHI Yu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metal,

Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050;

2. Chongqing TieMa Industries Group Company, Ltd., Chongqing 400050)

Abstract: To understand welding experience and operation skills of skilled human welders which has theoretical and practical significance for realization intelligence and the high-precision of robot welding in complex situation. There is a big problem that to detect the weld pool dynamic change and characteristic information reflecting the welding experience and operation skills. Aiming at this problem, a synchronous experiment system is setup with laser vision and a dynamic tilt sensor to precisely obtain real-time controlling characteristic information. The correlation between control parameters in welding speed, welding current, arc length and characteristic information of weld pool is obtained. It is found that the energy input in weld pool determines the change of shape of weld pool and flow pattern by adjusting welding speed, welding current, arc length. As a result, the regulation of welder is blindly and simply, the weld pool is unsteady and welding defect occurs. The adjustment of welding torch posture shows the diversity and directional control of welding pool shape and liquid metal flow pattern, overcoming the welding defect.

Key words: GTAW; welder experience; weld pool measurement; laser vision

0 前言

钨极氩弧焊由于其焊接过程稳定, 易于实时监测与控制, 进而在机器人自动化焊接生产中得到了

广泛的使用^[1], 但是在实际焊接生产中难免会出现散热条件、焊接接头、焊接结构变化等因素的干扰, 很难保证稳定的全熔透状态而出现未熔透、过熔透等缺陷, 严重影响焊接质量。然而, 熟练焊工在观察熔池表面状态时, 能够通过正确调节焊接规范来保持熔池处于某一特定的稳定状态, 从而尽可能得到全熔透均匀的焊缝, 控制焊接缺陷等^[2]。但熟练焊工对不断变化的熔池状态所表现出的对焊接规范

* 国家自然科学基金(61365011)和甘肃省基础研究创新群体计划(17JR5RA107)资助项目。20170620 收到初稿, 20170925 收到修改稿

的调节这一经验和技能是长期训练后形成的一种感觉,从而焊工的经验具有极大的复杂性并很难通过物理解析转化成机器人的控制策略^[3-4]。这方面的研究多年来缺乏重大的进展,严重制约了焊接机器人的智能化进程。因此,通过学习熟练焊工技能和焊接经验实现可变环境下的机器人稳定控制,保证高质量焊接成为可能,解析焊工的这种复杂焊接行为成为实现上述目标的首要任务^[5]。焊工的焊接经验就是人与熔池的交互行为,即焊工通过观察熔池表面状态的变化调节焊接参数,保证焊接质量。目前,国内外学者对焊工与熔池的交互行为进行了相关研究。美国肯塔基大学张裕明教授团队通过建立焊工经验采集系统,分析了焊工对不同熔透状态时对焊接电流的调节,采用模糊-神经网络建模方法,建立了自适应模糊-神经网络控制模型,成功地将焊工对熔池变化的电流调节经验应用到了焊接过程的控制中^[6-8],并成功在管道上进行了焊接,获得了成形良好的焊缝^[9]。日本青山学院利用四个摄像机来记录TIG填丝焊接过程中钨极尖端的位置、焊丝的位置以及焊丝的送进速度研究焊工行为^[10]。英国的ERDEN等^[11]通过分析三维运动捕捉系统获得的钨极端点位置数据识别熟练和非熟练焊工之间的差异,得到一个熟练的焊工能够更好地控制焊枪尖端及焊枪在空间三个方向上的速度变化范围,还对专业焊工和初级焊工与KUKA机器人手臂交互操作钨极尖端阻抗进行了测量^[12]。分析发现,上述研究多集中于熔池能量输入的控制上,而能量调节一方面容易使温度梯度变化大进而使熔池失稳塌陷,另一方面容易造成焊接接头组织性能发生大幅度变化,影响焊件的后续服役。

本文从热力耦合层面着手调控熔池的形态,建立了五线型模式结构激光视觉试验系统,同步采集了焊接电参数和焊枪姿态,并对熔池动态变化过程的影响进行了分析。

1 检测原理及同步采集试验系统

1.1 检测原理

基于液态金属表面类镜面反射及母材对光束的漫反射差异原理,以一定几何参数将小功率结构光激光器产生的激光条纹投射并覆盖于熔池表面,采用工业电荷耦合元件(Charge-coupled device, CCD)摄像机拍摄放置于同一水平位置光屏上经熔池表面反射的激光条纹图像。由于反射激光条纹形态变化与液态熔池金属流动行为状态的变化具有密切的联系,从反射激光条纹图像中提取选定窗口内激光条

纹亮度这一特征参数反映焊工行为,采用高精度的陀螺加速度计 MPU6050 采集焊枪姿态角,原理如图1所示。

图1 检测原理

1.2 同步采集试验系统

试验中采用功率50 mW、中心波长658 nm的直流结构激光器产生五线型条纹激光束,激光器与工件平面的夹角约为30°,距离Oxyz坐标系原点约为90 mm。距离Oxyz坐标系原点约50 mm处垂直工件平面放置一规格200 mm×200 mm×3 mm的成像屏,截取成像屏上畸变的反射激光条纹。采用高速CCD摄像机记录反射激光条纹图像,为降低弧光对采集图像质量的影响,在CCD摄像机镜头前配备660 nm±10 nm的带通滤光片。采用逆变交直流脉冲方波氩弧焊机TIG315AC/DC作为焊接电源。在单一调节焊接能量过程中,为了避免其他参数影响试验结果,焊枪采用夹具固定,步进电动机结合变速器来调节焊接小车移动方向和速度,同步采集试验装置如图2所示。

图2 同步采集试验装置

2 熔池动态行为检测与焊工响应分析

2.1 熔池动态行为检测

同步采集了经熔池表面反射的激光条纹图像视频、焊接电参数和焊枪姿态角。利用Matlab软件编写了处理激光条纹图像的程序,由于受电弧、信号

传输、拍摄周围环境以及摄像场景变化等因素影响, 所采集的反射激光条纹图像中存在着噪声信号。为了尽可能降低或消除噪声干扰, 对原始图像进行了裁剪、中值滤波, 二值化处理。观察发现经熔池表面反射的激光条纹在成像屏某一确定区域内亮度有明显的差别。因此, 在图像上选取某一固定区域, 通过计算此区域内的信号亮度变化来表征熔池熔透状态的变化, 图像亮度幅值为区域内像素之和。图 3 是对激光条纹图像处理的程序流程图。

图 3 图像处理程序设计流程

所选窗口大小的不同, 窗口包含的像素点数也不同, 较大窗口内有较多的像素但运算时间增长, 较小窗口有较少的图像像素又会丢失部分有用信息, 因此应选择合适的窗口大小对获得准确信息至

关重要^[13]。图像窗口标定如图 4 所示。图像信号亮度幅值可用式(1)进行计算

$$B = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n |x_{ij}(k)| \quad (1)$$

式中, $x_{ij}(k)$ 为第 k 个采样点处图像中第 i 行、第 j 列的像素值, 其中 $k=1, 2, \dots, 800$, m 和 n 均取 255。

图 4 矩形窗口标定

2.2 不同焊接参数下焊工响应及调控过程分析

2.2.1 基于焊接速度变化的熔池动态行为与焊工调控信息分析

图 5a 表示设定采样频率 200 Hz 的高速摄像机拍摄视频中每隔 3.1 s 所获取的直流电流下表征焊工对焊接速度调控过程中经熔池表面反射的激光条

(a) 熔池表面反射激光条纹图像 (相邻图片时间间隔为 3.1s)

(b) 选定窗口亮度

(c) 焊接速度变化曲线

图 5 焊接速度变化过程中熔池动态行为与焊工调控信息

纹图像。焊接电流 60 A, 电弧弧长 3 mm, 焊接开始时, 图 5a 可以看到, 0~8 s 这一过程中, 焊接速度小, 因此电弧线能量大, 焊缝过熔透, 熔池表面大量塌陷, 成像屏上的 5 条激光条纹聚集在一起, 从图 5b 中可以看到, 选定窗口内的亮度幅值很大。为了防止因热积累过多而出现焊接缺陷, 焊工对焊接速度进行了调节, 在 8~19 s, 焊接速度增大, 热输入减少, 熔池表面塌陷量减少, 图 5a 中激光条纹缓慢膨胀, 逐渐分散开来, 由 3 条逐渐增加至 4 条, 焊缝熔透程度在逐渐减小, 对应图 5b 中成像屏窗口内亮度幅值明显减小。20~44 s 焊接速度再次增大, 热输入进一步减小, 这一过程中, 从图 5a 可以看到 5 条激光条纹, 随着时间的变化激光条纹间距依次增大, 因此图 5b 中亮度幅值相比于前一段时间再次减小, 5 条激光条纹清晰可见, 条纹间距从下向上依次增大。这一结果表明焊缝熔透状态不同, 反射到成像屏上的激光条纹形态不同, 聚集程度也不同, 表现在固定窗口内的亮度幅值亦不同。

2.2.2 基于焊接电流变化的熔池动态行为与焊工调控信息分析

图 6a 表示设定采样频率 200 Hz 的高速摄像机拍摄视频中每隔 1 s 所获取的直流电流下表征焊工对焊接电流调控过程中经熔池表面反射的激光条纹图像。焊接速度 60 mm/min, 电弧弧长 3 mm, 焊接开始时, 从图 6c 可以看到焊接电流大, 因此电弧线能量很大, 热输入大, 焊缝过度熔透, 熔池下塌量大, 图 6a 中激光条纹显得很杂乱, 只有部分激光条纹反射, 图 6b 中亮度幅值较小。由于热积累在不断增加, 为了不产生焊接缺陷, 焊工在 10 s 时, 对焊接电流进行了必要的调节, 随着热输入减小, 熔池表面塌陷量减少, 焊缝处于全熔透状态, 图 6a 中, 激光条纹聚集, 图 6b 固定窗口内亮度最大。由于调节电流后, 电弧线能量减小, 导致热输入减小, 在热输入小的情况下, 焊缝熔透程度减小, 15 s 后, 熔池处于半熔透状态, 图 6a 激光条纹逐渐膨胀并分散, 表现为图 6b 中选定窗口内亮度减小后基本保持不变。

图 6 焊接电流变化过程中熔池动态行为与焊工调控信息

2.2.3 基于电弧弧长变化的熔池动态行为与焊工调控信息分析

图 7a 表示设定采样频率 200 Hz 的高速摄像机

拍摄视频中每隔 1 s 所获取的直流电流下表征焊工对电弧弧长调控过程中经熔池表面反射的激光条纹图像。焊接电流 60 A, 焊接速度 60 mm/min, 焊接

开始时, 电弧长度为 3 mm, 图 7a 可以看出激光条纹比较紊乱, 5 条激光条纹基本交错为两条重叠的激光条纹, 熔池塌陷量很大, 图 7b 中窗口内亮度幅值增大, 为了防止热积累继续增大而产生焊接缺陷, 获得良好的焊缝成形, 保证焊接质量, 在 10 s 时, 电弧弧长由 3 mm 调节到 5 mm, 随电弧被拉长, 电

弧电压增大, 电弧功率增加, 但电弧热源半径增大, 电弧散热增加, 使输入工件的能量减小, 进而焊缝处于临界熔透状态, 图 7b 中, 选定窗口内亮度迅速增大后随着热输入的降低, 熔池下塌量减小, 熔池表面凸起, 而使反射的激光条纹在成像屏上逐渐分散, 图 7b 中选定窗口内亮度幅值减小。

图 7 电弧弧长变化过程中熔池动态行为与焊工调控信息

2.2.4 基于焊枪姿态变化的熔池动态行为与焊工调控信息分析

图 8a 为每隔 2.7 s 所截取的直流电流下表征焊工对焊枪调控过程中经熔池表面反射的激光条纹图像(采样频率 200 Hz, 焊接速度 42 mm/min, 电弧弧长 3 mm, 焊接电流 76 A)。从图 8a 可知, 在整个焊接过程中 5 条激光条纹清晰可见, 从图 8b 可以看出, 选定窗口内激光条纹亮度在小范围内变化, 没有发生较大波动。焊缝始终处于熔透状态, 而从图 8c 可以看到, 焊枪角度在时刻发生变化, 而且焊枪在 3 个方向的角度调控幅度亦不同, 这一结果反映了焊工为控制焊缝处于特定的熔透状态, 对焊枪在空间 3 个方向的角度时刻进行着调控, 说明焊工能够通过焊枪角度的调控保证焊

缝成形。

3 结论

(1) 建立的五线型模式结构激光同步采集试验系统能够检测焊枪姿态和焊接参数调控变化引起的熔池动态变化过程的特征信息。

(2) 通过对比焊接参数与焊枪姿态调控时选定窗口内激光条纹亮度幅值的变化可知, 焊枪姿态的调控比焊接参数调控更容易使熔池达到稳定形态, 说明获得良好焊缝成形更需要较高的焊接技能和丰富的焊接经验。

(3) 采用焊枪运动姿态变化来描述焊接过程中焊工操作的技能和经验是可行的。

(a) 熔池表面反射激光条纹变化图像 (相邻图片时间间隔为 2.7 s)

(b) 选定窗口亮度

(c) 焊枪姿态角变化曲线

图 8 焊枪姿态角变化过程中熔池动态行为与焊工调控信息

参 考 文 献

- [1] 张宗郁, 高洪明, 韩庆璘, 等. 飞机导管机器人焊接手眼关系标定[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(3): 392-401.
ZHANG Zongyu, GAO Hongming, HAN Qinglin, et al. Hand-eye calibration in robot welding of aero tube[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(3): 392-401.
- [2] LIU Y K, ZHANG W J, ZHANG Y M. Dynamic neuro-fuzzy based human intelligence modeling and control in GTAW[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(1): 324-335.
- [3] LIU Y K, ZHANG Y M. Control of human arm movement in machine-human cooperative welding process[J]. Control Engineering Practice, 2014, 32: 161-171.
- [4] LIU Y K, ZHANG Y M. Iterative local ANFIS based human welder intelligence modeling and control in pipe GTAW process: a data-driven approach[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1079-1088.
- [5] ZHANG G, SHI Y, GU Y F. Welding torch attitude based study of human welder interactive behavior with weld pool in GTAW[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 145-156.
- [6] ZHANG W J. Modeling of human welder behavior in gas tungsten arc welding of stainless steel tubes[J]. Welding in the World, 2014, 58: 601-617.
- [7] LIU Y K, ZHANG Y M, KVIDAHL L. Skilled human welder intelligence modeling and control: Part II—Analysis and control applications[J]. Welding Journal, 2014, 93: 162-170.
- [8] LIU Y K, ZHANG Y M, KVIDAHL L. Skilled human welder intelligence modeling and control: Part I—Modeling[J]. Welding Journal, 2014, 93: 46-52.
- [9] LIU Y K, SHAO Z, ZHANG Y M. Learning human welder movement in pipe GTAW: A virtualized welding approach[J]. Welding Journal, 2014, 93: 388-398.
- [10] HASHIMOTO N, NAKAMURA A, OISHI S. Training system for manual arc welding using artificial reality measurement of manual welding motion for skill evaluation[C]//JSPE Semestrial Meeting, 2010, 93: 388-398.
- [11] ERDEN M S, TOMIYAMA T. Identifying welding skills for training and assistance with robot[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(6): 523-532.

- [12] ERDEN M S, TOMIYAMA T. Human-intent detection and physically interactive control of a robot without force sensors[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(2): 370-382.
- [13] 石玦, 张刚, 马晓骥, 等. 基于激光视觉的脉冲 GTAW 熔池振荡检测与分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 28-32.

SHI Yu, ZHANG Gang, MA Xiaoji. Laser vision based detection and analysis of weld pool oscillation for pulsed GTAW[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 28-32.

作者简介: 樊丁(通信作者), 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接物理及其自动化。

E-mail: fand@lut.cn