

基于电信号监测的可控自触发电弧图像采集系统

吕小青¹, 郝福旺¹, 王壮壮¹, 徐连勇¹, 荆洪阳¹

(1. 天津大学, 天津, 300350; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津, 300350)

摘要: 基于高速摄像机触发模式的特点, 提出了一种基于电信号监测的可控自触发电弧图像采集系统。介绍了系统硬件平台组成和软件总体框架, 论述了以电信号有效值为监测条件的相关控制触发算法, 叙述了电信号和电弧图像同步采集的具体实现方法, 并以表面涂有油污的试样进行了电弧图像采集系统的试验验证。结果表明, 该系统能够有效基于电信号可靠自动触发高速摄像机拍摄, 抓捕涂有油污表面的过渡过程信息。相比于正常焊接过程, 试样表面存在油污时, 过渡周期明显增加, 电弧形态呈现出较大的发散性。

创新点: (1) 通过分析高速摄像机触发模式的特点, 利用其循环摄录的优势, 开发了一套基于电信号监测的可控自触发电弧图像采集系统。

(2) 编写了以电信号有效值作为监测对象的拍摄触发算法, 试验证明该系统能够准确控制高速摄像机记录下试样表面存在油污时的电弧图像。

关键词: 电弧图像采集; 电信号监测; 触发算法

中图分类号: TG 403 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20211108002

0 序言

电弧焊接是一个时变、非线性的物理过程, 对该过程进行实时监测有助于增加对其物理机理的认识, 提升焊接质量^[1]。目前, 焊接过程中的监测对象有电信号, 电弧、熔池或熔滴过渡图像^[2]、声信号^[3-4]、光谱信号^[5-6]等。其中, 因视觉图像是直观反映电弧的燃烧过程, 在实际的电弧机理研究中, 应用最为广泛^[7-10]。但由于高速摄像设备的内存有限, 在实际应用中, 常常用于短时的规律性过渡过程观察。而在探索电弧机理时, 往往需要拍摄某些随机的、不稳定的电弧行为或熔滴过渡形态, 如产生焊接缺陷时电弧出现重燃或跳弧等现象。

文中提出了一种基于电信号监测的可控自触发电弧图像采集系统来解决以上问题。基于前期电信号参数计算分析, 按需设定拍摄的触发条件, 使拍摄过程具有高度的灵活性, 从而实现对某些“突变”电弧行为的抓获, 为促进焊接机理的深入认识提供铺垫。

收稿日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075372)

1 硬件系统组成

硬件系统是由高速摄像机、数据采集卡、霍尔电流传感器、电压传感器、焊接电源、伺服移动工作台以及计算机组成, 其结构如图1所示。

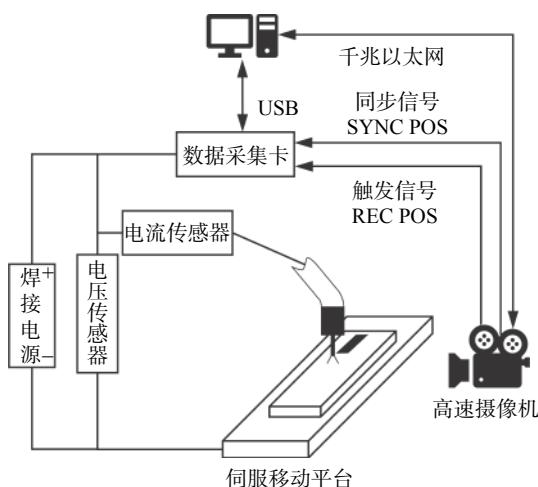


图1 硬件系统结构图
Fig. 1 Structure of hardware system

高速摄像机型号为 Photron FASTCAM Mini UX100, 内存为 16 GB, 最高拍摄频率为 204 800 帧/s, 支持软件和外部电平触发, 背部配备有两个输出端口, 可以通过编程分别配置输出信号为 SYNC POS

(高速摄像机拍摄频率的倍频同步信号, 倍频因子 P 可调) 和 REC POS(高速摄像机状态识别信号, 拍摄中 REC POS 为高电平, 非拍摄状态为低电平). 数据采集卡型号为 NI 6361, 最高采样频率 2 MHz, 焊接电源型号为福尼斯 Fronius 的 CMT Advanced 4000R.

高速摄像机的拍摄触发模式包括开始模式、中心点模式及终止模式等. 开始模式下高速摄像机在收到触发信号后开始拍摄, 直到内存装满后拍摄停止, 目前实际应用中大部分采用该种模式. 中心点模式的特点是高速摄像机一直处于循环摄录状态(高速摄像机无止拍摄, 当其内存装满后, 新的图像会覆盖旧的图像), 直至其收到触发信号后, 高速摄像机继续拍摄内存一半的时长, 之后停止拍摄, 最终内存中保存着触发点前后相等时长的内容. 终止触发模式与中心点模式类似, 高速摄像机同样处于循环拍摄状态, 区别是在此模式下高速摄像机收到触发信号时即停止拍摄, 内存保存触发信号之前的内容. 显然, 高速摄像机中心点模式和终止模式是实施基于电信号可自控拍摄的根本保证, 文中试验选择了中心点触发模式.

2 软件系统设计

2.1 软件总体框架

软件主要功能是监测焊接过程中的电信号数据, 当其满足设定条件时, 自动触发高速摄像机完成拍摄记录. 为了满足实际需要, 软件还应能够配置高速摄像机的拍摄参数、触发模式、输出端子信号和数据采集卡的采集参数等设备参数, 以及实现同步采集、保存和回放图像与电信号数据. 软件总体框架如图 2 所示, 分为 4 个模块: 人机界面模块、数据采集模块、数据处理与监测模块和相机控制模块. 因为 LabVIEW 能够实现代码自动多线程, 所以各模块并行执行.

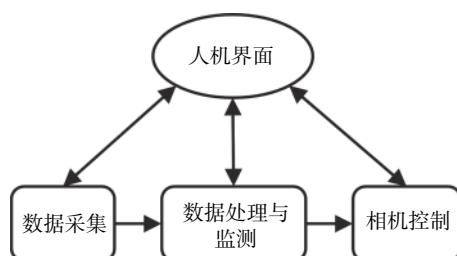


图 2 软件总体框架图

Fig. 2 Overall software framework

人机界面模块主要负责人机交互, 包括硬件参数的设定、电信号数据监测条件的设定、显示图像与电信号波形等. 数据采集模块负责按照设定的参数完成数据采集卡的配置, 以及电信号数据的读取. 数据监测模块负责对采集到的电信号数据进行循环保存和实时分析, 包括当发现满足所设定监测条件的数据时向高速摄像机控制模块发送触发消息, 以及采集完成后的数据处理. 高速摄像机控制模块主要负责高速摄像机的参数配置, 拍摄和触发指令的发送, 高速摄像机内存图像的读取以及将图像保存至计算机硬盘.

2.2 拍摄触发算法

电信号监测是实现触发高速摄影拍摄的关键, 但是不同的缺陷在不同角度(如时域、频域、统计学、非线性动力学等)所表现的显著性并不完全一致, 故暂以电信号 RMS(root mean square 均方根)值作为触发监测条件. 另外, 不同工艺条件下, 其电信号相差较大, 因此触发条件的阈值需要结合实际焊接过程来设定. 监测算法流程如图 3 所示.

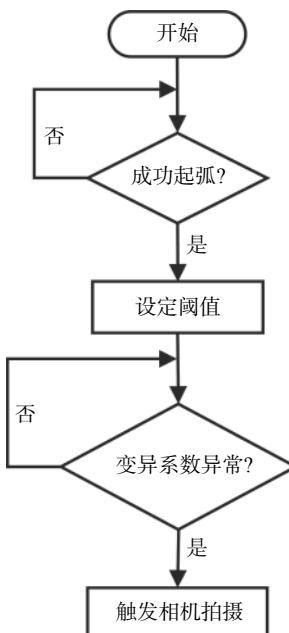


图 3 稳定性监测算法流程图

Fig. 3 Flow chart of stability monitoring algorithm

监测焊机是否成功起弧, 每个数据读取周期计算电流信号的 RMS 值, 当连续 N 个 RMS 值大于起弧阈值时认为焊机起弧成功. 程序监测到成功起弧后, 转入阈值设定状态, 选择电压信号作为监测对象, 每个数据读取周期计算电压信号的 RMS 值, 以连续 J 个 RMS 值的变异系数作为阈值设定基准, 考虑到焊接过程中电信号本身的波动性以及噪

声干扰引起的伪触发,将求得值乘以触发阈值系数 K 作为触发阈值。完成触发阈值设定后,程序转入焊接监测状态,以连续 L 个读取周期为一个监测周期,每个监测周期计算 RMS 值的变异系数,当连续 M 个监测周期计算的变异系数值均大于触发阈值时程序向高速摄像机发送触发信号,监测程序结束。

人机界面相关监测条件设定界面如图 4 所示,在实际应用中相关参数可以灵活设定。



图 4 监测条件设定界面

Fig. 4 Monitoring condition setting interface

2.3 电弧图像和焊接电信号的同步循环采集

本质上电信号和图像信号可以各自独立存储,但是为了便于后续电弧物理过程的分析,以及提升计算机应用效率,文中设计了两者信号的同步采集系统,而对监测过程中的前期电信号并不在计算机内进行最终保存。

与高速摄像机在循环拍摄模式下存储图像的方式类似,电信号数据也采用循环保存模式。方法是在计算机内存中以有限长度队列的形式存储采集到的电信号数据,队列长度与高速摄像机内存可存储图像帧数相适应。当队列满后,新的电信号数据继续从队尾入队,同时旧的数据从队头出队,队列长度保持不变,直至高速摄像机拍摄完成。在这种模式下,软件可以实时分析采集到的电信号,而且使得最终计算机内存中保存的电信号数据与高速摄像机内存中的图像相对应。

为了详细说明如何实现电弧图像和焊接电信号的同步循环采集,举例如下:高速摄像机的倍频因子 P 设为 2,数据采集卡以 SYNC POS 为采样时钟信号,以 REC POS 的上升沿作为采集开始信号,下降沿作为采集停止信号。高速摄像机与数据采集

卡工作时序如图 5 所示。 t_0 时刻高速摄像机与数据采集卡均处于预备状态,等待用户下达开始指令; t_1 时刻用户按下开始按钮,高速摄像机开始无止摄影,内存循环记录拍摄到的图像;由于设备自身限制,一个拍摄脉冲延迟后, t_2 时刻 REC POS 由低电平转换为高电平,同时数据采集卡检测到 REC POS 上升沿;一个采样时钟周期延迟后, t_3 时刻采集卡开始电信号采集; $t_3 \sim t_4$ 时段高速摄像机和数据采集卡同步循环拍摄与采集,电信号数据在计算机内存中循环存储,另外系统不断对采集到的电信号进行监测; t_5 时刻高速摄像机收到触发信号,高速摄像机内存保留以触发点为中心前后等时长的图像,即 $t_4 \sim t_6$ 时刻时段拍摄的图像; t_6 时刻高速摄像机停止拍摄; t_7 时刻 REC POS 由高电平转换为低电平;数据采集卡检测到 REC POS 下降沿后再采集两个样本点, t_8 时刻数据采集卡停止采集。

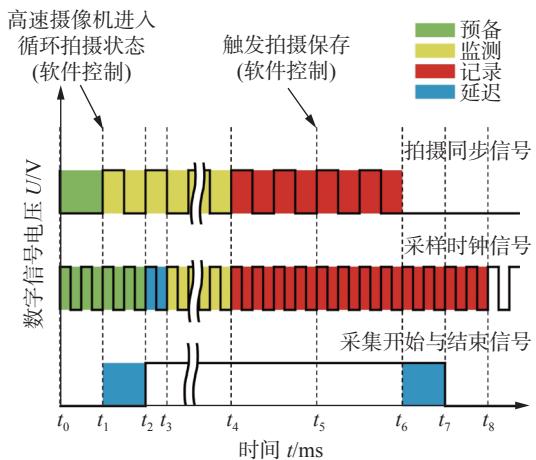


图 5 高速摄像机与数据采集卡工作时序图

Fig. 5 Operating sequence diagram of high-speed camera and data acquisition card

3 试验验证与讨论

3.1 试验设计

以试样表面存在油污为例进行试验验证。选取直径为 1.2 mm 的 ER5356 铝焊丝,在 6061 铝合金上进行平板堆焊,试样尺寸为 150 mm × 50 mm × 2 mm,如图 6 所示。在试样沿焊接方向 2/3 位置涂抹少许二硫化钼润滑脂来模拟油污,宽度为 4 mm 左右。保护气体采用 99.999% 的高纯氩气,气体流量为 15 L/min。焊接工艺为冷金属过渡(cold metal transfer, CMT) 工艺,送丝速度为 4 m/min,焊接速度为 40 cm/min,导电嘴到试样距离为 15 mm。



图 6 表面带有油污的试样
Fig. 6 Specimen with greasy surface

高速摄像机的拍摄频率为 5000 帧/s, 分辨率为 640×480 Pixel, 最大拍摄记录时长为 7.453 s, 倍频因子 P 为 2. 数据采集卡的采样频率为 10 kHz. 监测参数设定如图 4 所示, 电信号读取周期设为 33 ms, 起弧电流阈值设为 20 A, 由于起弧后的短暂停时间内焊接电流与电弧电压均不稳定, 适当加大起弧监测时长以减少对阈值设定的干扰, N 取 70 (起弧延迟约为 2.3 s), J 取 30 (计算 30 个电压 RMS 值的变异系数作为阈值设定基准), 触发阈值系数 K 取 2, 监测周期设为 10 个读取周期, M 取 2 (连续 2 个监测周期的变异系数大于触发阈值时触发高速摄像机拍摄).

3.2 试验结果分析

以 3.1 节设定的参数计算采集到电压信号的 RMS 值的变异系数, 结果如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 3~4 s 时电压 RMS 值的变异系数明显高于其它时刻, 高速摄像机在这一区间内被触发, 成功拍摄到以油污处为中心的一系列电弧图像, 试验证明了所提出算法的有效性.

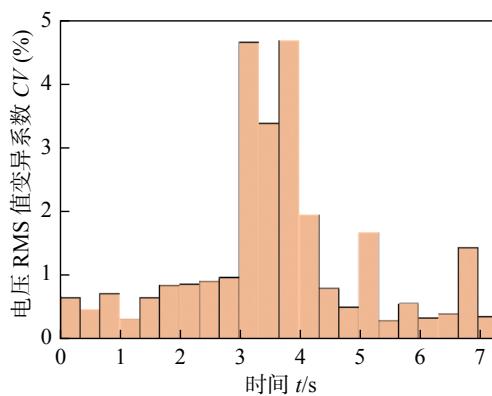


图 7 电压 RMS 值的变异系数
Fig. 7 Variation coefficient of voltage RMS

如图 7 所示, 0~2 s 时间内为正常焊接过程, 3~4 s 时间内为试样表面存在油污时的焊接过程. 为了对比这两种情况下电弧形态与电信号的变化,

分别在这两种不同焊接情况下任选一个监测周期时长的电信号, 如图 8 和图 9 所示. 这两种情况下电信号均呈现一定的周期性, 但试样表面存在油污时电信号周期明显大于正常焊接时电信号周期, 而且信号周期的平稳性较差.

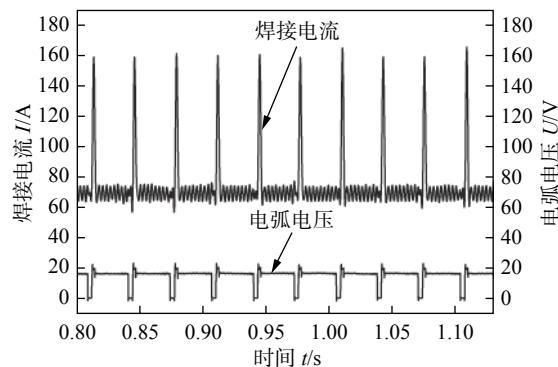


图 8 正常焊接电流和电弧电压波形
Fig. 8 Normal welding current and arc voltage waveform

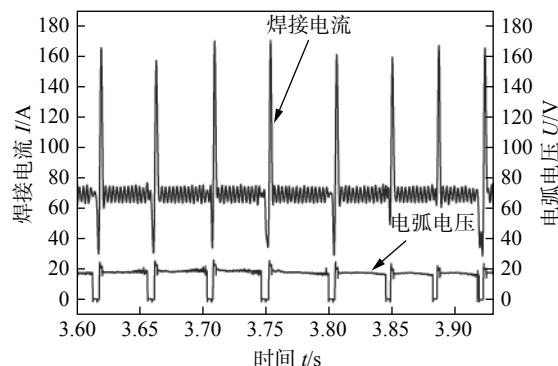


图 9 试样表面存有油污时焊接电流和电弧电压波形
Fig. 9 Welding current and arc voltage waveform with greasy specimen surface

从拍摄到的图像中分别挑选一组在图 8 和图 9 所示电信号时间轴范围内的能够反映完整熔滴过渡周期的电弧图像, 如图 10 和图 11 所示, 图像下标注的时间通过图像编号乘以拍摄周期 (0.2 ms) 得到. 其中, 图 10a、图 11a 为熔滴过渡到熔池, 电弧刚好熄灭, 对应电信号短路阶段; 图 10b~图 10d 和图 11b~图 11d 为起弧阶段, 电弧亮度和体积快速增加, 对应焊接电流快速上升阶段; 图 10e~图 10h 和图 11e~图 11h 的电弧亮度和体积达到最大, 对应峰值电流阶段; 图 10i~图 10o 和图 11i~图 11o 的电弧明显变暗, 体积减小, 对应基值电流阶段; 图 10p 和图 11p 的电弧熄灭, 一个短路过渡周期完成.

正常焊接时熔滴过渡周期大约为 32.5 ms, 试样表面存在油污时熔滴过渡周期达到了 53.6 ms. 后者增加的时长主要体现在两个阶段:一是短路阶

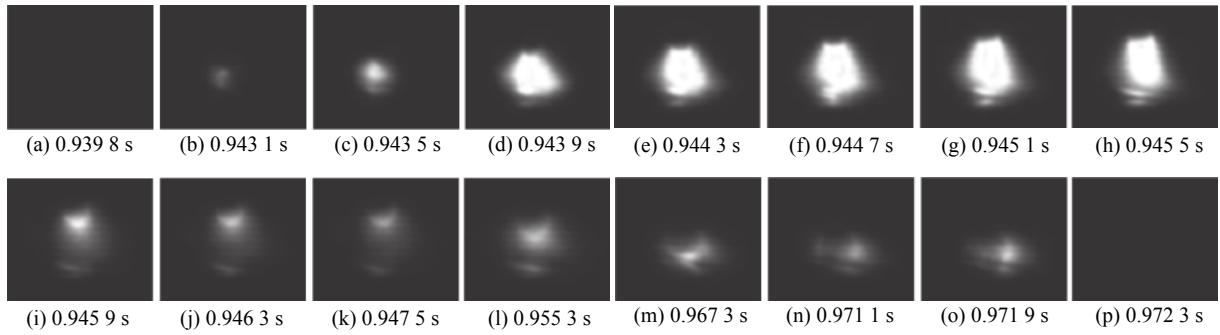


图 10 正常焊接过程中的电弧图像

Fig. 10 Arc image during normal welding process. (a) 0.939 8 s; (b) 0.943 1 s; (c) 0.943 5 s; (d) 0.943 9 s; (e) 0.944 3 s; (f) 0.944 7 s; (g) 0.945 1 s; (h) 0.945 5 s; (i) 0.945 9 s; (j) 0.946 3 s; (k) 0.947 5 s; (l) 0.955 3 s; (m) 0.967 3 s; (n) 0.971 1 s; (o) 0.971 9 s; (p) 0.972 3 s

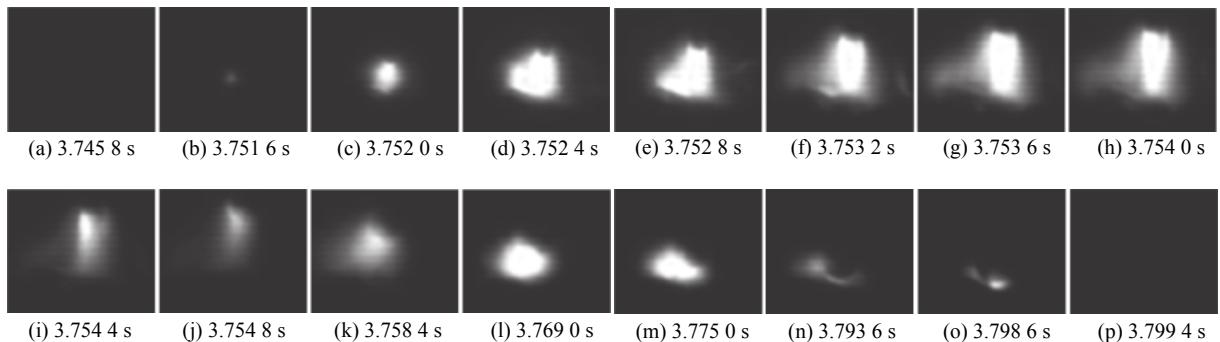


图 11 试样表面存在油污时的电弧图像

Fig. 11 Arc image with greasy specimen surface. (a) 3.745 8 s; (b) 3.751 6 s; (c) 3.752 0 s; (d) 3.752 4 s; (e) 3.752 8 s; (f) 3.753 2 s; (g) 3.753 6 s; (h) 3.754 0 s; (i) 3.754 4 s; (j) 3.754 8 s; (k) 3.758 4 s; (l) 3.769 0 s; (m) 3.775 0 s; (n) 3.793 6 s; (o) 3.798 6 s; (p) 3.799 4 s

段,其电弧的燃弧时刻迟于正常电弧,二是基值电流阶段,其持续时间较长。从电弧形态上看,试样表面存在油污时电弧比正常焊接时更为发散,在熔滴长大阶段,电弧有明显由暗转亮的过程,如图 11k~图 11m 所示,这可能是油污参与了电弧的燃烧造成的。从图 8~图 11 可以看出,电信号与电弧图像具有良好的同步性。

3.3 应用展望

不同的焊接缺陷对应的电信号特征不尽相同,采用不同的焊接工艺时电信号特征也发生变化。为了更加快速有效获得最佳的拍摄阈值条件,可先进行电信号监测,对采集到的电信号进行预先处理分析,再进行相应拍摄触发算法与阈值的设定。另外,在成功判定起弧后,进行阈值设定时需要一段稳定的焊接过程,虽然该过程时间长短可通过软件进行设置,但在实际应用中需要留意。

4 结论

(1) 在 LabVIEW 平台进行了可控自触发电弧

图像采集软件系统的开发,给出了系统总体框架以及拍摄触发算法。基于高速摄像机 SYNC POS 和 REC POS 两路输出信号,实现了电信号和图像信号同步采集。

(2) 通过对试样表面涂油污进行了依据电信号 RMS 值作为触发条件的可控自触发图像采集系统的验证。并由电压 RMS 值的变异系数验证了触发条件的有效性,且由焊接电流、电弧电压时域信号和高速摄影的图像信号验证了整个系统同步采集的准确性。

(3) 基于自触发电弧图像的采集系统对焊接过程进行监测试验。结果表明,试样表面存在油污时相比于正常过渡过程,具有较长的过渡周期,电弧形态具有较大的发散性等特点。

参考文献

- [1] 蒋凡,李元锋,陈树君.焊接电弧监测技术研究现状及展望[J].
机械工程学报,2018,54(2): 16~26.

- Jiang Fan, Li Yuanfeng, Chen Shujun. Review of welding arc monitoring technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 16 – 26.
- [2] 于英飞, 朱志明, 孙博文, 等. 焊接电弧图像的边缘检测及其批处理算法 [J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 17 – 21.
Yu Yingfei, Zhu Zhiming, Sun Bowen, et al. Edges detection and batch algorithm for welding arc images[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(11): 17 – 21.
- [3] Lv Na, Chen Shaojie, Chen Qiheng, et al. Dynamic welding process monitoring based on microphone array technology[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64(1): 481 – 492.
- [4] Zhao Sipei, Qiu Xiaojun, Burnett Ian, et al. A lumped-parameter model for sound generation in gas metal arc welding[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107085.
- [5] 李桓, 王俊红, 艾丹凤, 等. 弧焊过程中多信息同步采集系统 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2012, 45(2): 184 – 189.
Li Huan, Wang Junhong, Ai Danfeng, et al. Synchro-nous multi-information acquisition system for arc welding process[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2012, 45(2): 184 – 189.
- [6] 蒋元宁, 陈茂爱, 武传松. CO₂ 焊电参数与熔滴过渡图像同步采集分析系统 [J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 63 – 66.
Jiang Yuanning, Chen Maoai, Wu Chuansong. Synchro-nous acquisition and analysis of metal transfer images and electrical parameters in CO₂ arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 63 – 66.
- [7] Tinku K, Degala V K, Jason C, et al. Probing the influence of cold wire gas tungsten arc welding current waveforms on the aluminum-steel joining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 378 – 388.
- [8] Zhang H T, Feng J C, He P, et al. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel[J]. Materials Science and Engineering:A, 2009, 499(1-2): 111 – 113.
- [9] Lu J, He H, Shi Y, et al. Quantitative prediction for weld reinforcement in arc welding additive manufacturing based on molten pool image and deep residual network[J]. Additive Manufacturing, 2021, 41: 101980.
- [10] Ikram A, Chung H. Numerical simulation of arc metal transfer and its impingement on weld pool in variable polarity gas metal arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1529 – 1543.

第一作者: 吕小青, 博士, 副教授; 主要从事弧焊工艺、焊接逆变电源及自动化、弧焊混沌理论等方面的研究; Email: xiaoqinglv@tju.edu.cn.

(编辑: 戴红)