

基于 LabVIEW 的激光-MIG 复合焊接过程 等离子体监测

马尧睿, 蔡创*, 刘致杰, 谢佳, 杨策

西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要 在 LabVIEW 环境下设计了一套焊接过程监测系统, 该系统可以采集激光-MIG 复合焊接等离子体的光学信号以及焊接电流、电压这两种电信号, 并以 TDMS 格式输出。焊接前使用最大类间方差法对焊丝与工件的图像进行二值化处理, 然后对二值化图像使用形态学滤波器进行降噪滤波并细化, 接着采用一种基于路径追踪的分叉去除算法去除细化结果中的分叉, 最后使用 HUBER 线性拟合法确定激光束的入射位置。对焊接时的等离子体高速摄像照片进行图像处理, 获得了激光在等离子体中的传输距离(DLTP)。将 DLTP 的计算值与实测值进行对比, 可知所设计系统的计算准确率为 96.5%。

关键词 激光技术; 激光-MIG 复合焊接; 监测系统; 等离子体高速摄像照片; 形态学滤波器; 图像处理; 激光在等离子体中的传输距离

中图分类号 TG403

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0202014

1 引言

激光是一种高能量密度热源, 将其与电弧相结合作为焊接热源, 能够兼具激光和电弧的优点, 同时又能弥补二者作为单一热源焊接时的缺点^[1-3]。随着我国高铁轻量化发展, 铝合金作为一种低密度、高性能材料被广泛用于高铁车体及重要零部件上。采用激光-MIG 复合焊接替代传统 MIG 焊对铝合金车体进行焊接, 能够提高焊接效率和接头强度, 同时降低残余应力和变形。此外, 激光-MIG 复合焊接方法具有焊接过程稳定性高、间隙适应性强、焊缝成形美观、焊接效率高优点, 已被广泛用于各种金属材料的焊接^[4]。焊接过程是一个高速变化的非稳态过程, 激光-MIG 复合焊接过程中产生的激光致等离子体会对入射激光产生散射、折射以及吸收作用, 降低激光能量输入^[5-8]; 同时, 焊接过程中激光致等离子体的波动十分剧烈^[9], 这会导致激光能量输入波动得十分剧烈, 进而使焊缝发生缺陷^[10-11]。同时, 电弧电流、电压的波动会对

焊缝的成形质量、金相组织、力学性能等产生较大影响。因此, 实现焊接过程中各种信号尤其是等离子体信号的监控, 对于制定焊接工艺参数、减小焊接缺陷、优化复合焊接技术等具有重要的指导意义。

LabVIEW 作为一种基于 G 语言的可视化程序开发环境, 以程序编写方便直观的优势吸引了众多不具有独立开发能力的研究人员的关注, 已被广泛应用于航空航天、通信、汽车、半导体和生物医学等领域。齐艳娜^[12]利用 LabVIEW 开发了一款针对电弧焊电流、电压的参数分析和管理系统; 徐宇鹏^[13]使用 MATLAB 语言实现了 LabVIEW 对工业 USB 相机的控制; 张艳清等^[14]使用 CCD 相机与 LabVIEW 对焊接电弧进行观察, 并使用 LabVIEW 内置的滤波器对电弧图像进行处理。在焊接过程中, 等离子体是一种典型的物理现象, 对等离子体进行直接观察是获取等离子体特征的重要方式之一。聂军等^[15]在 AZ31B 镁合金焊接过程中对比了传统方法与形态学方法处理电弧图像的结果; 刘金合

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-07-15; 录用日期: 2021-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(51805456)、中央高校基本科研业务费专项资金(2682021CX108)、四川省科技计划项目(2021YFG0209)

通信作者: *caichuang@home.swjtu.edu.cn

等^[16]对 CO₂ 激光焊接等离子体高速摄像照片进行图像处理,基于灰度对等离子体的等温面进行描述,分析了激光等离子体的负透镜效应及其对焊接的不利影响;高向东等^[17]通过对大功率盘形激光焊接等离子体图像进行特征分析,提取等离子体的面积和高度,提出了一套能够动态评估焊接过程稳定性的方法;于英飞等^[18]提出了适用于焊接电弧图像检测的方法,同时给出了基于该检测方法的批处理算法,并采用批处理算法对 TIG-MIG 复合电弧边缘进行了识别。在激光-电弧复合焊接等离子体的监测方面:桂豪^[19]在光纤激光 TIG 双电弧焊接过程中使用高速相机对等离子体进行观察,结果发现,增大激光功率后复合等离子体的面积小于单 TIG 电弧焊接过程中等离子体的面积;王利达等^[20-21]使用多重成像镜头与高速相机对光纤激光-电弧复合焊接等离子体进行监测,得到了等离子体的多重成像照片;吴世凯^[22]使用 CCD 光学系统对光纤激光-TIG 电弧复合等离子体进行监测,并对复合等离子体形态的监测结果进行了一系列的图像处理。复合焊接过程较为复杂,同时包含电弧等离子体和激光等离子体,高速摄像照片的噪声较大且图像识别比较困难。目前,在复合焊接等离子体图像处理及信息提取方面,大多数人采用常规的灰度和二值化处理方法来获取等离子体的形貌和面积,而激光作用位置处的等离子体高度,也就是激光在等离子体中的传输距离(DLTP),是影响激光能量传输特性及焊缝成形

的关键参数。对于激光在等离子体中的传输距离这一物理量,常用的测量方法为逐帧测量,但高速相机采集的照片数量极多,通过传统逐帧测量的方式获取激光在等离子体中的传输距离,不仅费时费力,而且误差较大。因此,对复合焊接等离子体监测的研究还有待进一步深入开展。

本文通过在 LabVIEW 中嵌入 MATLAB 脚本进行图像处理,开发了一套基于 LabVIEW 的激光-MIG 复合焊接的过程监测系统,并用其监测焊接过程中的等离子体,然后通过图像处理来提取激光在等离子体中的传输距离。将在试验中计算得到的激光在等离子体中的传输距离与实测值进行对比,验证了焊接过程中等离子体监测数据的准确度。本研究对于铝合金激光-MIG 复合焊接过程中的等离子体行为监测及焊接工艺优化具有一定的指导意义。

2 试验方法及设备

为实现数据的采集、传输以及对激光-MIG 复合焊接过程中等离子体的观察,构建了如图 1 所示的试验装置。试验中采用的是额定功率为 10 kW 的 TRUMPF TruDisk-10002 碟形激光器,其输出激光的波长为 1030 nm,工作模式为连续出光模式。所用焊机为 Fronius TransPuls Synergic 4000,其焊接电流频率为 125 Hz。所使用的高速相机为日本 Photron FASTCAM SA4 model 500K M2,其配备有一片 ND4 减光片、两片 ND8 减光片以及一片

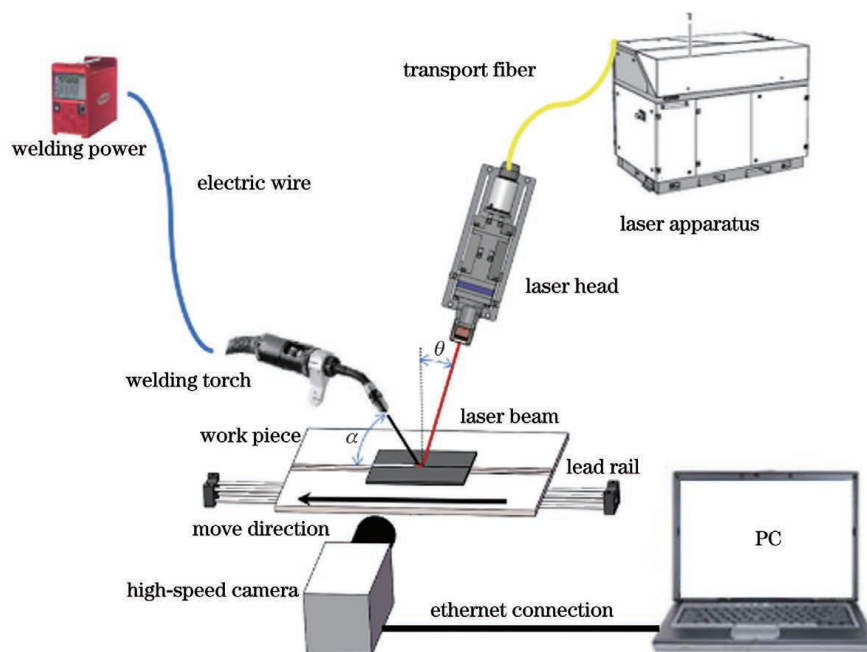


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

808 nm 滤光片。铝合金试板的厚度为 8 mm。开展焊接试验的目的是对监测系统功能测试,为了提高试验效率,采用平板堆焊的焊接方式,所使用的焊丝牌号为 ER5356。试验所用工艺参数如表 1 所示,其中 α 表示焊丝与工件的夹角, β 表示激光束与工件法线的夹角, D_{LA} 为光纤间距。焊接时,激光由光纤传输至固定在 ABB IRB 6640 M2004 六关节机器人上的激光头,与焊枪形成复合热源对工件进行焊接,保护气体采用纯度为 99.99% 的氩气,焊接热源保持静止,工件放置在与导轨连接的可移动平台上,工件相对于热源的位移通过平台的移动实现。高速相机正对工作区,在辅助光源的照射下观察复合等离子体。在焊接过程中,等离子体始终位于相机拍摄区域的同一位置。高速相机采集的等离

表 1 激光电弧复合焊接工艺参数

Table 1 Processes parameter of laser-arc hybrid welding

Parameter	Value
Laser power /kW	4
Current /A	187
Welding speed /($m \cdot min^{-1}$)	1
Feeding speed /($m \cdot min^{-1}$)	8
$\alpha /(^{\circ})$	60
$\beta /(^{\circ})$	10
D_{LA} /mm	2

子体照片为 BMP 格式的 8 位灰度图。

3 分析与讨论

3.1 监测系统功能及设计

监测系统由工艺卡片、实时数据显示、图像曲线显示、数据处理及回放这 4 个模块组成。

工艺卡片模块能够将用户此次焊接的工艺参数储存并生成报表,如图 2(a)所示。界面左侧是项目名称、编号、实验人员、实验日期的设置,运行前需要先选择参数保存路径,焊接监控产生的数据都会保存在预先设置的文件夹中;界面右侧记录焊接过程中的相关参数,包括焊接电流、焊接电压、激光功率、焊接速度、光纤间距等。在焊接开始前,首先输入相关信息及参数,设置保存数据的文件夹,并单击保存,系统将会生成一个 TXT 报表,记录与此次焊接相关的工艺参数。焊接结束后,焊接过程中采集的相关数据也将被记录在预先设置的文件夹中。参数的保存使用事件结构实现,当单击“保存”按钮时,“保存”按钮所控制的事件结构运行一次。程序框图中使用“连接字符串”“写入文本文件”“关闭文档”实现工艺参数报表的生成。图 3 为工艺参数保存模块的程序框图,左侧部分程序框图所实现的功能为新建 TXT 文件并输出路径,右侧部分程序框图将用户输入的参数信息按照顺序写入 TXT 文件,保存后关闭。

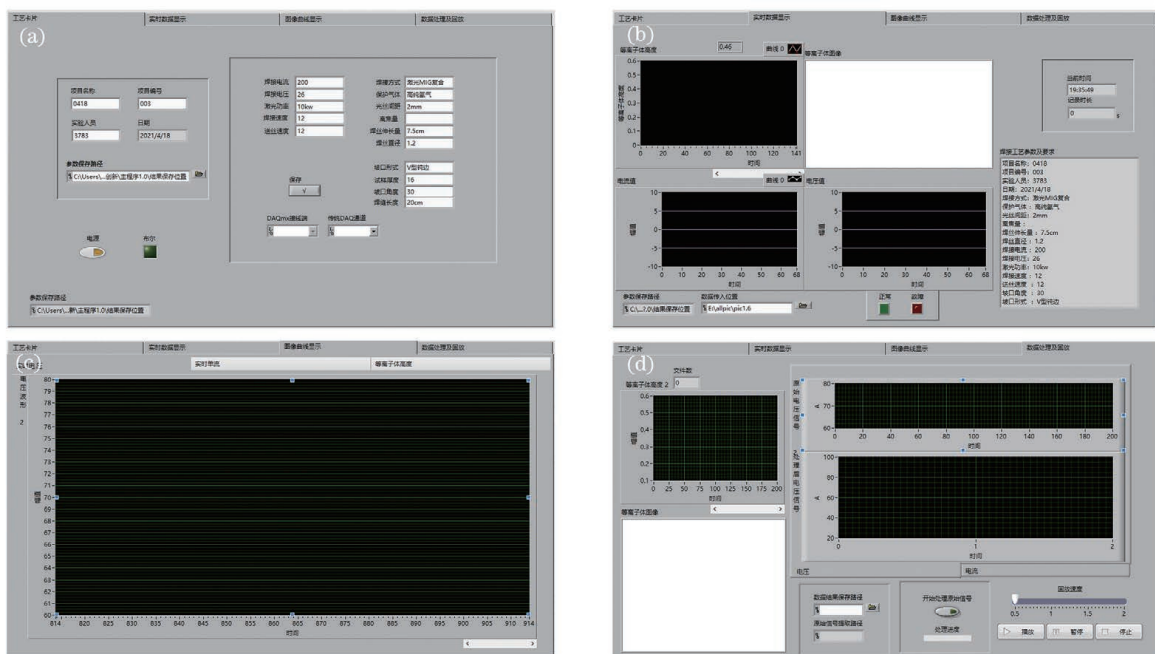


图 2 系统面板设计。(a)工艺卡片模块;(b)数据显示模块;(c)曲线图像显示模块;(d)数据处理及回放模块
Fig. 2 System interface. (a) Operation card module; (b) data display module; (c) signal waveform display module; (d) data processing and playback module

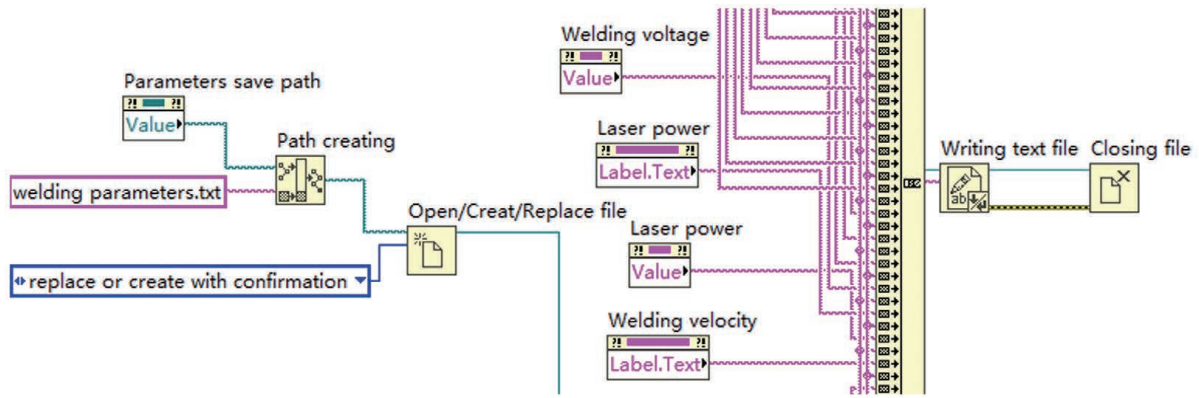


图 3 工艺参数保存模块程序框图

Fig. 3 Program chart of process parameter saving module

实时数据显示模块的功能为:通过与相应的数据采集设备连接,在焊接时对一种光学信号(等离子体图像)、两种电信号(焊接电流、电压)进行采集并显示,并在焊接结束后进行保存,如图 2(b)所示。实时数据显示模块分为数据显示、工艺参数显示、时间显示三部分,其中:数据显示部分由三个波形图和一个二维图像窗口构成,分别显示开始焊接后采集的数据以及相机拍摄的等离子体图像;工艺参数显示部分提取并显示工艺参数模块保存的焊接工艺参数;时间显示部分显示当前时间以及焊接时长。电流和电压这两种电信号采用 NI 公司的 USB-6251(BNC)采集卡进行数据采集,采集卡通过 USB 数据线将采集到的数据实时传入监测系统,并在实时数据显示模块中数据显示部分所对应的波形图中显示。等离子体图像这一光学信号通过高速相机拍摄后经由千兆以太网接口传输到监测系统中,监测系统通过内置的 MATLAB 脚本对图像进行处理,得到激光在等离子体中的传输距离,并将该传输距离值显示到对应的波形图中,同时改变图像尺寸,以适应显示窗口,如图 4 所示。

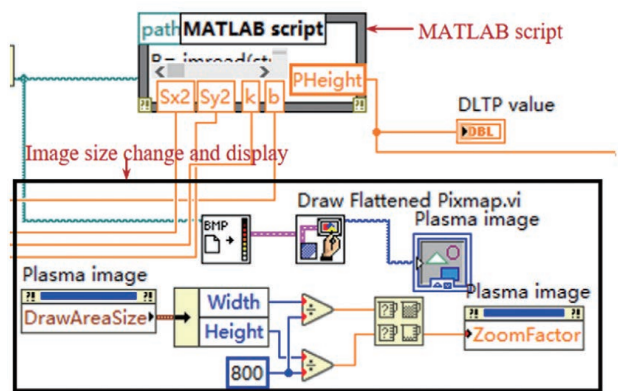


图 4 等离子体图像显示及处理部分的程序框图

Fig. 4 Program chart of plasma image display and processing

焊接结束后,系统自动将数据保存在预先设置的文件夹中,如图 5 所示。对数据显示波形图创建调用节点,导出图像并保存;通过程序框图中的 TDMS(technical data management streaming)文件选板将数据以 TDMS 格式保存在预设的文件夹中。TDMS 格式是 NI 主推的高速测试/测量采集系统中的一种二进制数据存储类型,适合存储海量数据,兼有高速、方便和易存取等多种优点。

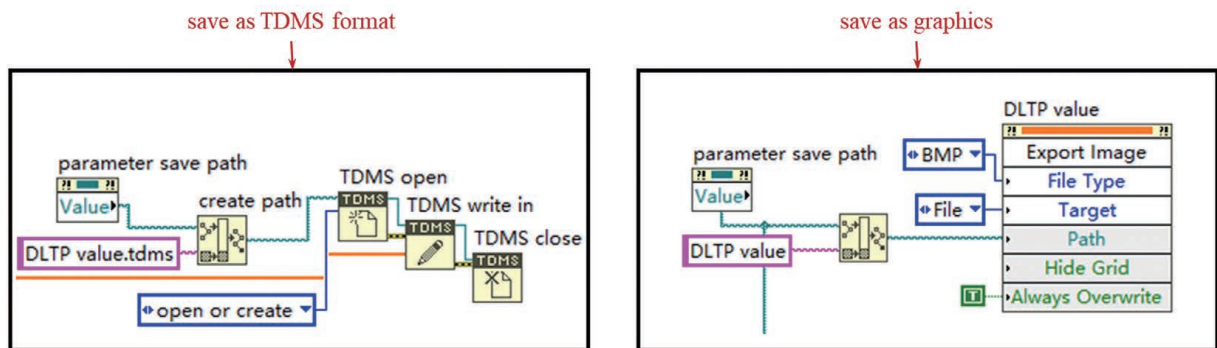


图 5 数据保存部分的程序框图

Fig. 5 Program chart of data saving

图像曲线显示模块的主要功能是在焊接结束后将所储存的数据提取并显示为波形图,如图 2(c)所示,设置水平滚动条,可查阅整个焊接过程的数据波形图。图 6 是实现数据提取功能的程序框图。LabVIEW 内置了大量的信号处理子 VI,所以使用

LabVIEW 进行信号处理更为方便快捷。数据处理及回放模块通过调用内置的信号处理子 VI 对预先存储为 TDMS 格式的信号进行处理,并将处理后的信号与原始信号进行比对显示,如图 2(d)所示。

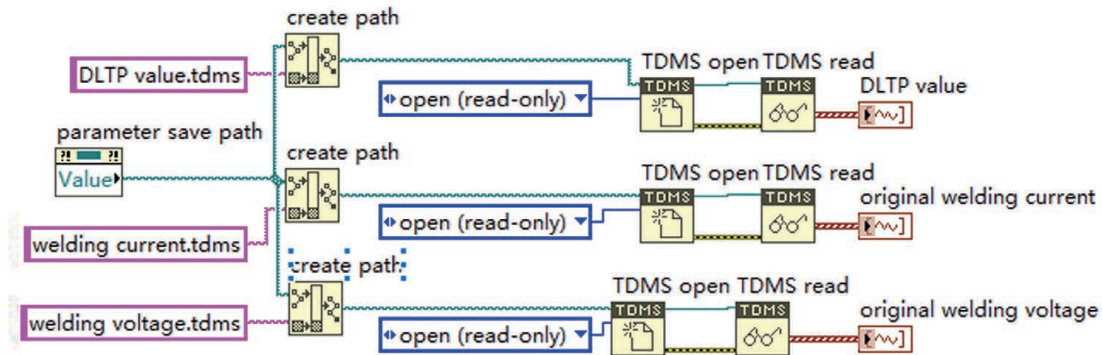


图 6 数据提取部分的程序框图

Fig. 6 Program chart of data extraction

3.2 等离子体图像的处理

复合焊接时的等离子体形态如图 7 所示。等离子体会对激光能量的吸收产生一定影响,其影响程度与激光在复合等离子体中的传输距离有关。激光在复合等离子体中的传输距离这一物理量能够更加精确地描述复合焊接等离子体的形貌特征。为了叙述方便,后文将激光在复合等离子体中的传输距离简称为“DLTP”。在焊接过程中,等离子体始终位于相机拍摄区域的同一位置。在焊接前定位激光入射路径,焊接时等离子体在此路径上的长度即为这张照片的 DLTP 值。在本系统中,等离子体图像的处理通过在 LabVIEW 程序框图中嵌入 MATLAB 脚本实现。LabVIEW 可以创建 MATLAB 脚本节点,将相机拍摄的图片传入 MATLAB 脚本节点,对照片进行处理,就可以提取等离子图像中的 DLTP 值。

在辅助光源的作用下,焊前对焊接工作区进行

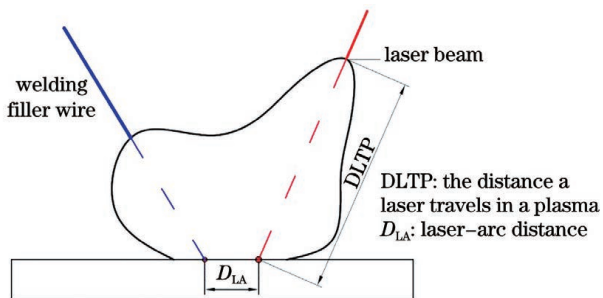


图 7 激光-MIG 复合焊接时的等离子体形态

Fig. 7 Plasma morphology during laser-MIG hybrid welding

拍照,获得只包含焊丝和工件的清晰照片,如图 8(a)所示。对照片进行处理,获得焊丝及工件的位置,进而得到焊丝延长线与工件的交点,提取用户已输入的光丝间距,即可得到激光在工件上的作用点,加上激光倾角即可确定激光在相机图像上的入射路径(该路径在焊接过程保持不变)。焊接开始后,对所传入的等离子体图像进行分析即可得到每张图片对应的 DLTP 值。

焊丝及工件的识别过程由图像预处理和特征识别两部分组成。图像预处理部分可分为图像分割、二值化、去斑点、平滑化(去毛刺)、骨架化(细化)、去分叉这 6 个步骤。首先对接收的图像进行切割,去除边缘部位,以减小图像的大小,提高运算速度。接着采用 Otsu 方法^[23]进行二值化。图片像素分为 L 个灰度级 $(0, 1, 2, \dots, L)$, 每个像素的灰度为 i 的概率为

$$P_i = n_i / N, P_i \geq 0, \sum_{i=1}^L P_i = 1, \quad (1)$$

式中: n_i 表示灰度值为 i 的像素个数; N 为图片中像素的总数, $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$ 。设定一个灰度阈值 k , 将图中的像素按照灰度分为 C_0 和 C_1 两类, 其中 $C_0: i \in [1, k], C_1: i \in [k+1, L]$, 任意像素属于 C_0, C_1 的概率分别为

$$\omega_0 = \Pr(C_0) = \sum_{i=1}^k P_i = \omega(k), \quad (2)$$

$$\omega_1 = \Pr(C_1) = \sum_{i=k+1}^L P_i = 1 - \omega(k), \quad (3)$$

同时,

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k i \Pr(i | C_0) = \sum_{i=1}^k iP_i / \omega_0, \quad (4)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L iP_i / \omega_1, \quad (5)$$

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L iP_i = \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1, \quad (6)$$

式中： μ_0 表示 C_0 类像素的灰度均值； μ_1 表示 C_1 类像素的灰度均值； μ_T 表示全局灰度均值； $\Pr(i | C_0)$ 表示在 C_0 类像素中任意像素灰度为 i 的概率； $\Pr(i | C_1)$ 表示在 C_1 类像素中任意像素灰度为 i 的概率。

根据类间方差的表达式，图像灰度的类间方差可以表示为

$$\sigma^2(k) = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2, \quad (7)$$

式中： $\sigma^2(k)$ 表示阈值为 k 时所对应的类间方差。遍历所有灰度级的阈值 k ， $\sigma^2(k)$ 最大时对应的 k^* 为最大类间方差法确定的二值化阈值，即

$$\sigma^2(k^*) = \max_{1 \leq k \leq L} \sigma^2(k). \quad (8)$$

使用上述方法处理后即可得到二值化图像，如图 8(b)所示。焊接过程中由于金属飞溅，所得到的二值化图片上存在斑点，这些斑点在图像处理领域被称为噪声。这些噪声会对焊丝的识别造成很大影响，需要消除噪声及其对焊丝细化的影响，同时要使图像的失真尽可能小。由开操作后紧跟闭操作组成的形态学滤波器^[24]可以达到这一目的，如图 8(c)所示。焊丝和工件的表面粗糙度及相机成像等原因会导致二值化后的图像边缘粗糙，存在毛刺，这些图像缺陷会对焊丝和工件的细化产生不利影响，需要对去除斑点后的图像进行平滑处理。平滑后的结果如图 8(d)所示。最后，对平滑后的图像进行细化处理，获得骨架，如图 8(e)所示。在某些情况下，工件表面较为粗糙，存在焊瘤等杂质，骨架上也会存在较为明显的分叉[如图 8(e)所示]，这些都会使后续曲线拟合精度较低。为此，本研究团队提出了一种基于路径追踪的分叉去除算法，使用该算法对分叉进行追踪。所提算法的逻辑图如图 9 所示。

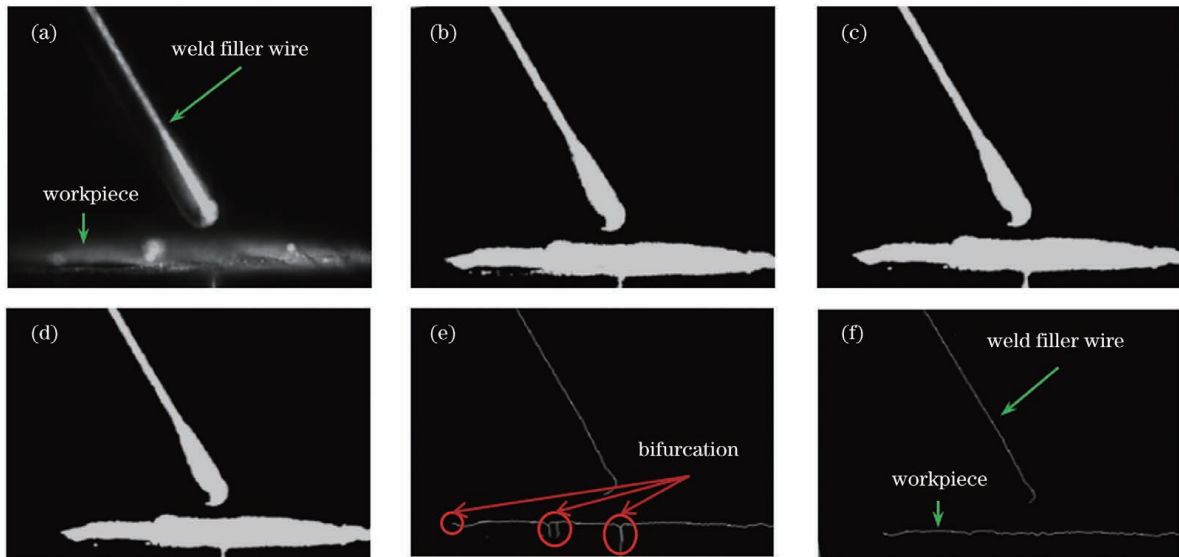


图 8 形态学处理和去分叉处理后的图像。(a)原始图像；(b)Otsu方法；(c)去斑点；(d)平滑化；(e)细化；(f)基于路径追踪的分叉去除算法的结果

Fig. 8 Images after morphological processing and bifurcation removal processing. (a) Original image; (b) Otsu method; (c) spots removing; (d) smoothing; (e) thinning; (f) the result of bifurcation removal algorithm based on path tracing

图 9 中， N 为该路径的长度， J 为根据图像尺寸设定的分叉长度阈值。去除分叉后的结果如图 8(f)所示。图 8(b)~(d)中焊丝与工件的形态与原始焊丝图像中的焊丝形态相吻合。对比图 8(c)与图 8(b)可以很明显地看到去斑点后的图像边缘的斑点已消失，对比图 8(d)与图 8(c)可以看出平滑

处理后的图像中的焊丝及工件轮廓平滑、无毛刺。图 8(e)中的焊丝及和工件均为单像素宽度，骨架从宏观上来看基本为直线，但存在分叉。图 8(f)中去除了位于工件上的分叉，焊丝与工件呈一条直线。可见，所采用的图像预处理方法的可行性较高。

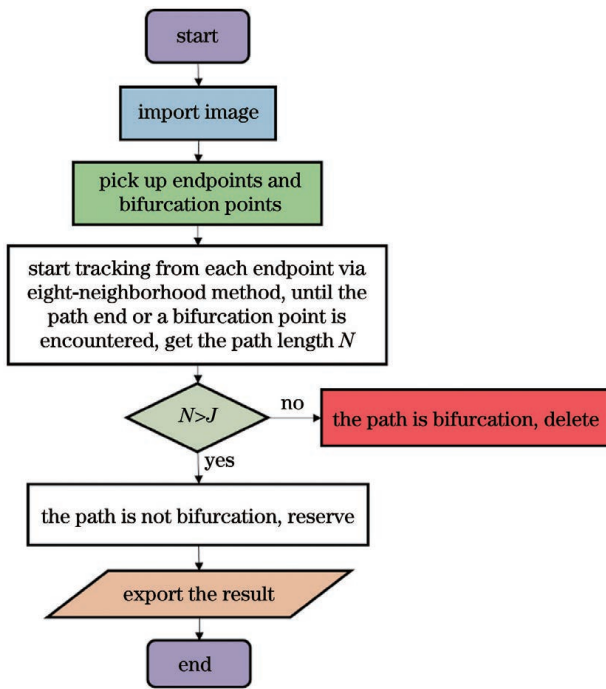


图 9 所提算法的逻辑图

Fig. 9 Logical diagram of proposed algorithm

特征识别的目的是定位焊丝延长线与工件的交点,由于需要精确定位交点坐标,因此特征识别采用

直线拟合来实现。在二维图像中以左上角为原点建立笛卡儿直角坐标系,对焊丝部分的像素坐标进行直线拟合,确定一条直线使 $\sum_{i'=1}^n \rho(r_{i'})$ 最小。其中, $r_{i'}$ 表示第 i' 个点与直线的距离, $\rho(r_{i'})$ 为距离函数,不同的函数形式对应不同的拟合方法。由于预处理结果中焊丝端头位置存在拐角,如图 8(f)所示,会将传统拟合方法得出的直线拉偏。为减小拐角对拟合精度的影响,本文使用 HUBER 方法进行线性拟合。HUBER 方法的表达式为

$$\rho(r) = \begin{cases} r^2/2 & r \leq \delta \\ \delta(r - \delta/2) & r > \delta \end{cases} \quad (9)$$

式中: δ 是人为给定的距离阈值; r 为点到直线的距离。拟合结果如图 10(a)所示。虚线代表工件,实线代表焊丝。可见,实线与焊丝中轴完全重合,焊丝端头的拐角对识别结果没有影响。这说明本文使用的 HUBER 方法的鲁棒性较高。焊接电弧具有挺直性,焊丝与工件两直线的交点实为电弧在工件上的作用点,将两直线方程联立即可求解出该点的坐标。图 10(b)显示了该作用点的位置。

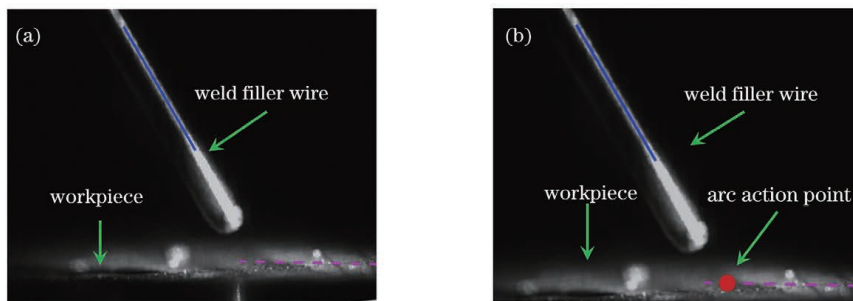


图 10 识别结果。(a)焊丝和工件;(b)电弧作用点

Fig. 10 Results of identification. (a) Weld filler wire and workpiece; (b) action point of arc on the workpiece

在 LabVIEW 中创建光丝间距和激光倾角的属性节点(值),将其以变量的形式输入至 MATLAB 脚本节点中,结合上述结果便可以得到入射激光在

工件上作用点的坐标。同时,在 MATLAB 脚本节点中为激光倾角创建输入,便可以得到激光入射路径在图像坐标系中的解析式。如图 11(a)所示,实

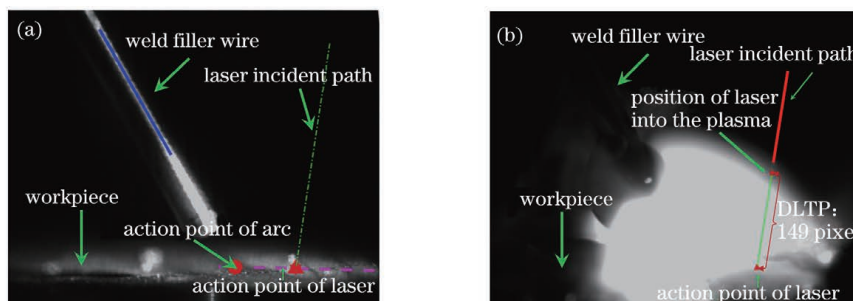


图 11 激光入射路径及其在等离子体中的传输距离。(a)激光入射路径;(b)激光在等离子体中的传输距离

Fig. 11 Laser path and laser transmission distance in plasma. (a) Laser path; (b) laser transmission distance in plasma

线和虚线分别为焊丝与工件的识别结果,圆点为电弧作用位置,三角形为激光作用位置,点划线为激光入射路径。开始焊接后,对接收的等离子体照片进行二值化和去斑点处理,然后结合前面求得的激光入射路径的解析式,即可求得 DLTP 值。如图 11(b) 所示,直线为激光入射路径,实心三角形和正方形分别为激光在工件上的作用位置和激光射入等离子体的位置,这两点之间的距离即为激光在等离子体中的传输距离 DLTP。这里使用像素点表示距离,得到 DLTP 值为 149 个像素点。结合标尺将该值转化为实际距离,约为 3.2 mm。实心三角形位置基本位于等离子体边缘,计算结果较为准确。

3.3 等离子体监测结果

使用表 1 所示的焊接工艺参数进行铝合金激

光-MIG 复合堆焊试验,焊缝表面形貌如图 12 所示。提取每一帧照片中的 DLTP 值,可以得到图 13 所示的连续 200 帧等离子图像的处理结果,DLTP 值为纵坐标,时间为横坐标。在图中可以发现 DLTP 波形呈周期性,且频率与电流脉冲频率一致(均为 125 Hz)。

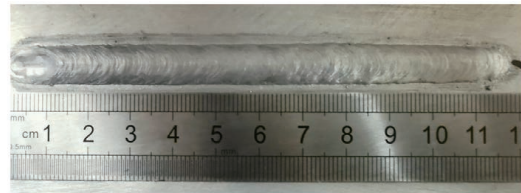


图 12 铝合金激光-MIG 复合焊缝的正面形貌

Fig. 12 Front surface morphology of aluminium alloy weld seam formed with laser-MIG hybrid welding

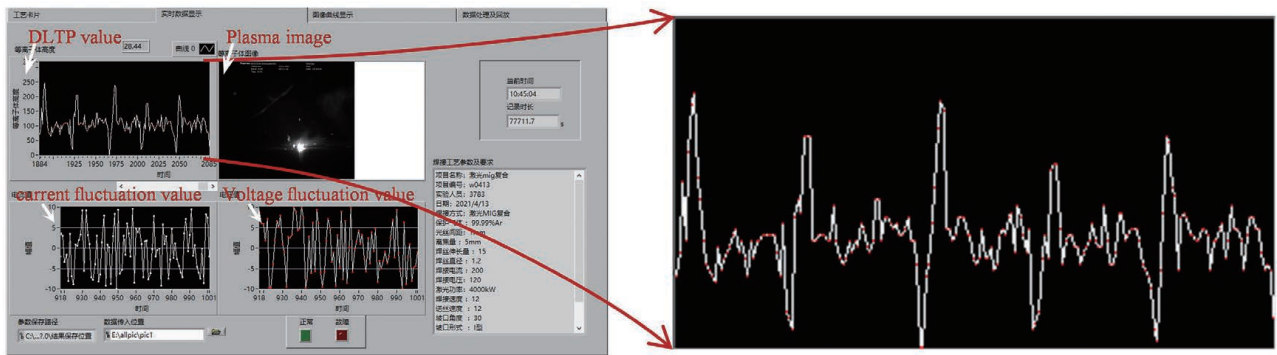


图 13 连续 200 帧等离子图像监测结果

Fig. 13 Monitoring results of continuous 200 frames of plasma images

高速相机在一个电弧脉冲周期内可采集 40 帧照片。在某一周期内,间隔 1.6 ms,顺序抽取 8 帧

等离子体照片进行 DLTP 计算。等离子体照片如图 14 所示,三角形为激光作用点,正方形为激光射

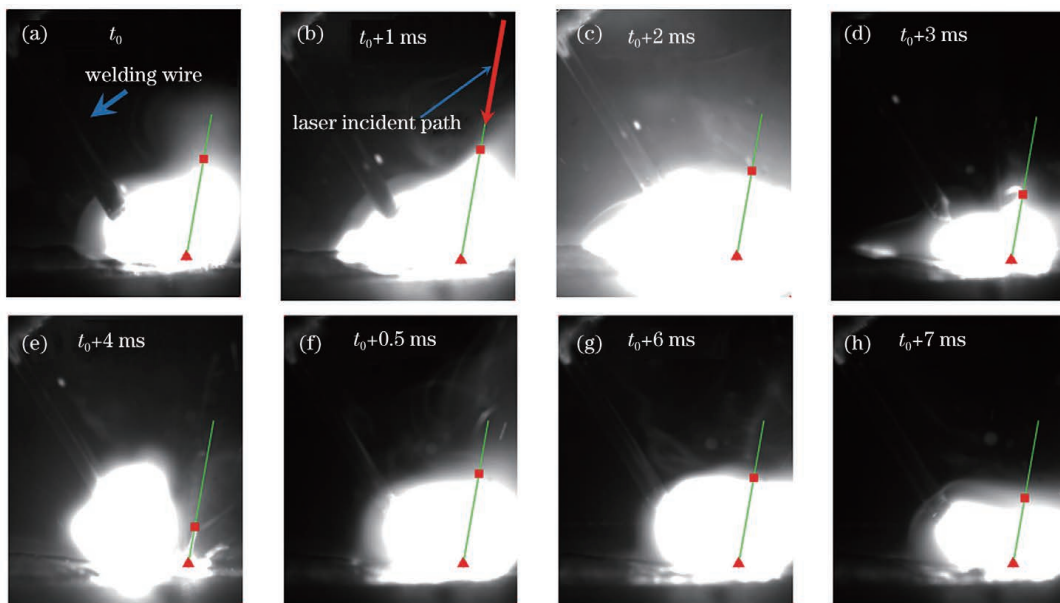


图 14 同一周期内的 8 帧等离子体图像

Fig. 14 Eight frames of plasma images in the same period

入等离子体的位置。使用分析软件对这 8 张照片的 DLTP 值进行测量,测量结果见表 2 及图 15。以实测值为基准,对计算值进行误差分析,得到 8 个样本识别精度的最低值为 90.7%,最高值为 96.5%。这说明基于本文方法获得的 DLTP 值较为精确。从图 14 所示的 8 帧高速照片可以看出:DLTP 值的波动较为明显,激光在等离子体中传输时会吸收

一部分激光的能量,等离子体的密度和体积增大,导致工件对激光能量的吸收率降低;同时,匙孔中蒸发的金属蒸气减少,激光致等离子体减少。这时,激光在等离子体传输过程中的衰减降低,工件对激光的吸收率增大,重新产生大量的金属蒸气,等离子体强度又逐渐增大。如此循环往复,呈周期性变化。

表 2 同一周期内 8 帧等离子体图像的 DLTP 值

Table 2 DLTP value of eight frames of plasma images in the same period

Time	DLTP /mm				Accuracy /%	
	Calculated		Measured			
t_0	5.35	4.91	4.83	4.92	4.89	91.1
t_0+1 ms	6.01	5.81	5.85	5.76	5.80	96.4
t_0+2 ms	4.68	4.48	4.43	4.52	4.48	95.5
t_0+3 ms	3.58	3.34	3.30	3.29	3.31	91.8
t_0+4 ms	2.05	1.84	1.81	1.85	1.83	90.7
t_0+5 ms	4.91	4.71	4.73	4.59	4.68	95.1
t_0+6 ms	4.67	4.51	4.48	4.55	4.51	96.5
t_0+7 ms	3.57	3.29	3.25	3.33	3.29	91.4

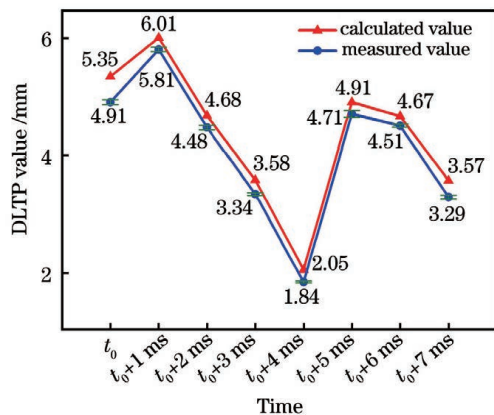


图 15 同一周期内 8 帧等离子体图像的 DLTP 值

Fig. 15 DLTP value of eight frames of plasma images in the same period

4 结 论

在 LabVIEW 环境中设计了激光-MIG 复合焊接监测系统,并通过试验验证了监测系统的识别精度,得出了以下结论:

1) 所设计的监测系统能够实现等离子体信号的监测,并具有保存为 TDMS 格式、保存工艺参数、数据回放三个功能。

2) 使用二值化、形态学滤波器、HUBER 线性拟合、基于路径追踪的分叉去除算法成功对焊丝及

工件进行了识别,准确获得了焊丝及工件的位置,进而得到了激光在等离子体中的传输距离。

3) 在试验中,采用监测系统提取等离子体高速摄像照片中的 DLTP 值并将其输出,同时使用相机分析软件测量激光在等离子体中的传输距离,将二者进行对比,测量值的精度高达 96.5%。本研究对焊接工艺优化以及激光等离子体相关研究具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] Hu L H, Huang J, Wu Y X, et al. Study on coupling mechanism and metal transfer in laser double-wire MIG arc hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0602005.
胡连海, 黄坚, 吴毅雄, 等. 激光-双 MIG 电弧复合焊耦合机制及熔滴过渡研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0602005.
- [2] He S, Chen H, Cai C, et al. Influence of He-Ar mixed shielding gas on laser-MIG hybrid welding characteristic of aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202005.
何双, 陈辉, 蔡创, 等. 氦-氩混合保护气体对铝合金激光-MIG 复合焊接特性的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202005.
- [3] Zhao Y B, Lei Z L, Miao Y G, et al. Welding characteristics of laser-arc double-sided welding for

- aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603007.
- 赵耀邦, 雷正龙, 苗玉刚, 等. 铝合金激光-电弧双面焊接特性[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603007.
- [4] Huang S, Yang X Y, Chen H, et al. Analysis of deformation and stress of scanning laser wire filling welded 5A06 aluminum alloy joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(2): 87-92, 101-102.
- 黄霜, 杨晓益, 陈辉, 等. 5A06 铝合金扫描激光填充丝焊接头变形及应力分析[J]. 焊接学报, 2020, 41(2): 87-92, 101-102.
- [5] Jiang M, Tao W, Chen Y B, et al. Characteristics of bead formation and plasma plume in fiber laser welding under vacuum[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403010.
- 姜梦, 陶汪, 陈彦宾, 等. 真空激光焊接焊缝成形及等离子体特征[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403010.
- [6] Youhei A, Yousuke K, Hiroshi N, et al. Effect of reduced pressure atmosphere on weld geometry in partial penetration laser welding of stainless steel and aluminum alloy with high power and high brightness laser[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(4): 324-332.
- [7] Huber S, Glasschroeder J, Zaeh M F. Analysis of the metal vapor during laser beam welding[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 712-719.
- [8] Greses J, Hilton P A, Barlow C Y, et al. Plume attenuation under high power Nd:yttrium-aluminum-garnet laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(1): 9-15.
- [9] Zou J L, Wang L D, Zhu B Q, et al. Visual observation of plasma morphology during fiber laser-TIG arc-hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202007.
- 邹江林, 王利达, 祝宝琦, 等. 光纤激光-TIG 电弧复合焊接等离子体形态的可视化观察[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202007.
- [10] Liu T, Zhao Y Q, Zhou X D, et al. Effect of energy ratio coefficient on pore during aluminum alloy laser-MIG hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1102004.
- 刘婷, 赵艳秋, 周旭东, 等. 能量配比系数对铝合金激光-MIG 复合焊接气孔的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1102004.
- [11] Zhu Z W, Ma X Q, Mi G Y, et al. Effects of longitudinal magnetic field on microstructures and fatigue cracks propagation in 316L stainless steel joints prepared via narrow-gap multi layer laser-MIG welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0502007.
- 朱政武, 马修泉, 米高阳, 等. 纵向磁场对 316L 不锈钢窄间隙激光-MIG 多层焊接接头微观组织与疲劳裂纹扩展的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502007.
- [12] Qi Y N. Quality monitoring system of arc welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 19-47.
- 齐艳娜. 电弧焊接过程质量监测系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 19-47.
- [13] Xu Y P. Realization of the control and acquisition of USB industrial camera based on LabVIEW & MATLAB [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 24-32.
- 徐宇鹏. LabVIEW 及 MATLAB 对 USB 工业相机控制与采集的实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 24-32.
- [14] Zhang Y Q, Gao H, Sun L Q, et al. Image research on the welding arc based on LabVIEW platform[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2011, 19(4): 35-38.
- 张艳清, 高辉, 孙立强, 等. 基于 LabVIEW 平台的焊接电弧图像研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2011, 19(4): 35-38.
- [15] Nie J, Ma G H, Wang C, et al. Image processing of AZ31B alloys welding arc[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(7): 195-197.
- 聂军, 马国红, 王聪, 等. AZ31B 镁合金焊接电弧图像处理[J]. 热加工工艺, 2015, 44(7): 195-197.
- [16] Liu J H, Zhu S G. Linage processing on high-speed photography of CO₂ laser welding plasma[J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 342-344.
- 刘金合, 朱石刚. CO₂ 激光焊接等离子体高速摄影照片图像处理[J]. 应用激光, 2002, 22(3): 342-344.
- [17] Gao X D, Lü W X, You D Y, et al. Analysis of characteristics of plasma image during high-power disk laser welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 5-8, 113.
- 高向东, 吕威兴, 游德勇, 等. 大功率盘形激光焊接过程等离子体图像特征分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 5-8, 113.
- [18] Yu Y F, Zhu Z M, Sun B W, et al. Edges detection and batch algorithm for welding arc images [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(11): 17-21, 129-130.
- 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, 129-130.
- [19] Gui H. Study on plasma and molten pool dynamic behaviors for low-power scanning laser-TIG hybrid welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong

- University, 2019: 43-50.
- 桂豪. 小功率脉冲激光扫描-TIG 复合焊接等离子体和熔池动态行为[D]. 上海: 上海交通大学, 2019: 43-50.
- [20] Wang L D, Li M, Zou J L, et al. Multiple imaging characteristics of plasma in laser-tungsten inert gas arc hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302008.
- 王利达, 李敏, 邹江林, 等. 激光-钨极稀有气体电弧复合焊接等离子体的多重成像特征 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302008.
- [21] Zou J L, Wang L D, Xiao R S. Correlation analysis among multiple images of plasma induced during fiber laser-arc hybrid welding [J]. AIP Advances, 2020, 10(9): 095311.
- [22] Wu S K. Investigation on laser-arc interaction and novel laser-TIG arc hybrid welding processes [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010: 52-62.
- 吴世凯. 激光-电弧相互作用及激光-TIG 复合焊接新工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010: 52-62.
- [23] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [24] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. 3rd ed. New York: Wiley Inter-Science, 1991.
- [25] Chen Y B. Modern laser welding technology [M]. Beijing: Science Press, 2005: 49-59.
- 陈彦宾. 现代激光焊接技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 49-59.

Plasma Monitoring During Laser-MIG Hybrid Welding Process Based on LabVIEW

Ma Yaorui, Cai Chuang^{*}, Liu Zhijie, Xie Jia, Yang Ce

Institute of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract

Objective With the development of high-speed rail lightweight, aluminum alloys as a low density and high-performance material are widely used in the body and important parts of the train. Compared to traditional welding methods, laser-MIG hybrid welding has the advantages of high welding efficiency and joint strength, strong gap adaptability, small residual stress, and deformation, while welding aluminum alloys. A fast-changing unsteady state can be observed during the laser-MIG hybrid welding process of aluminum alloys. The refraction and absorption of the incident laser by the laser-induced plasma occur during the welding process. The laser-induced plasma in the welding process fluctuates very violently leading to the fluctuation of laser energy input and defects of the weld quality. Therefore, the monitoring of plasma signals during the laser-MIG hybrid welding process of aluminum alloys has critical guiding effects in optimizing welding process parameters, reducing welding defects, and developing hybrid welding technology.

Methods A 10 kW disk laser (TRUMPF TruDisk-10002 disk laser) with a wavelength of 1030 nm and a welding machine (Fronius TransPuls Synergic 4000) with a welding current frequency of 125 Hz were used. The high-speed images of welding plasma were captured via a high-speed camera (Photron FASTCAM SA4 model 500K M2) equipped with several ND4, ND8 attenuators, and an 808 nm filter. The thickness of the aluminum alloy samples is 8 mm. Meanwhile, the ER5356 weld filler wire was used. To improve the test efficiency, the bead-on-plate welding method was used (Fig. 12). The argon with a purity of 99.99% was used as the shielding gas. During the welding process, the laser was transmitted through the optical fiber to the laser head fixed on the ABB IRB 6640 M2004 six-joint robot, which formed a hybrid heat source combined with the welding torch. The high-speed camera was facing the work zone, and the hybrid plasma was observed with the illumination of the auxiliary light source. The plasma was located at the same position in the camera area during the welding process. The process parameters used in the test are shown in Table 1.

Results and Discussions In this study, the monitoring of plasma during laser-MIG hybrid welding was studied. MATLAB scripts was nested into LabVIEW platform for mixed programming, and a set of welding process monitoring systems was designed (Fig. 2). The functions of process parameter saving (Fig. 3), plasma monitoring (Fig. 4), saving monitoring data as TDMS format after welding (Fig. 5), signal waveform diagram drawing, and report

generating were achieved. A method was proposed to calculate the distance of laser travel in the plasma (DLTP value) via high-speed images. Before welding, the high-speed camera was used to take pictures of the welding area with the irradiation of the auxiliary light source [Fig. 9(a)], and the images obtained were binarized using the maximum inter-class variance method (Otsu method). A set of morphological filters composed of multiple open and close operations was used to process the binarization image to remove the noise in the image [Figs. 9(c), (d)]. The thinning algorithm was used to identify the skeleton of the weld filler wire and workpiece [Fig. 9(e)]. Furthermore, HUBER linear fitting method was used to detect the position of the weld filler wire and workpiece [Fig. 9(f)]. Finally, two parameters of the distance between the laser and weld filler wire and laser dip angle were input into the MATLAB script by creating attribute nodes to calculate the incidence position of the laser beam (Figs. 10, 11). During the welding process, 8-bit grayscale images in BMP format taken by a high-speed camera were transmitted into the monitoring system. After a series of digital image processing, the DLTP value could be obtained (Fig. 11). Image analysis software was used to measure the value of DLTP (Fig. 14) of the images of plasma, and the calculated and measured values were presented in Table 2 and Figure 15. Based on the measured value, the accuracy of the calculated value is about 96.5% (Table 2). Overall, the distance of laser travel through the plasma could be calculated accurately and quickly, which had a certain guiding significance for the welding process optimization and the theoretical research of laser-induced plasma.

Conclusions In this study, a laser-MIG hybrid welding monitoring system was designed based on the LabVIEW environment and the accuracy of the monitoring system was verified via experiments. The conclusions are as follows:

1) The designed monitoring system was capable of monitoring plasma signals and had three functions: saving plasma signals in TDMS format, saving process parameters, and playback of data.

2) Binarization processing, morphological filters, HUBER linear fitting, and path-tracing-based bifurcation removal algorithms were used to locate the wire and workpiece successfully. Thus, we calculated the distance of laser transmission through the hybrid plasma.

3) The monitoring system extracted DLTP values from the plasma images and output them. Compared with the DLTP value obtained via the image analysis software, the accuracy of the DLTP value calculated by the system reached about 96.5%.

Key words laser technique; laser-MIG hybrid welding; monitoring system; high-speed photography photos of plasma; morphological filter; image processing; the distance the laser transmits in the plasma