

直流 TIG 焊熔透状态激光光电法实时检测

顾玉芬, 袁 鹏, 杜雷明, 李春凯, 石 玓

(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)

摘 要: 针对目前熔透检测方法存在的信噪比低、实时性差等缺点, 提出了一种激光光电法可通过提取熔池表面特征参数实现直流 TIG 焊定点及连续焊接条件下熔透状态实时检测. 介绍了该方法的原理, 构建了直流 TIG 焊光电法电压信号检测及背面熔透同步摄像采集试验平台. 采集了定点及连续焊接条件下电压信号与同步摄像图像, 对比分析了电压信号与熔透状态的对应关系及电压信号的变化规律. 结果表明: 激光光电法采集的电压信号可以较好反映直流 TIG 焊熔透状态; 利用熔透状态从未熔透转变为临界熔透时熔池表面由凸面突变为凹面, 激光反射条纹快速聚焦, 从而引起光电法电压信号迅速变化的现象, 可以实现直流 TIG 焊熔透特征信号的精确识别与提取.

关键词: 激光光电法; 直流 TIG 焊; 熔透实时检测; 全熔透控制

中图分类号: P 755.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)06-0809-05

doi: 10.11936/bjntxb2016090065

Real-time Detection for DC-TIG Weld Penetration State Through Laser Photoelectric Conversion Method

GU Yufen, YUAN Peng, DU Leiming, LI Chunkai, SHI Yu

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

Abstract: According to the disadvantages of the present detection methods of penetration, such as the low signal-to-noise ratio, the poor real-timeliness and the like, this paper proposes a laser photoelectric conversion method that the real-time detection for the DC-TIG weld penetration state under the condition of stationary and traveling weld can be realized by extracting characteristic parameters of the weld pool surface. The principle of the method was introduced and an experimental platform for the voltage signal detection was established using the DC-TIG laser photoelectric conversion method as well as the synchronous video collection of the penetration at the back, collecting the voltage signals and synchronous video images under the condition of stationary and traveling weld and analyzing the corresponding relationship between the voltage signals and the penetration state as well as the change rule of the voltage signals. Result shows that the voltages signals collected by using the laser photoelectric conversion method can reflect the DC-TIG weld penetration state well. When the weld penetration state changes from partial penetration to full penetration, the surface of the weld pool will change from convexity to concavity and the reflected laser stripes will focus quickly, causing the phenomenon of the rapid change of the voltage signals to realize the accurate recognition and extraction of the characteristic signals of the DC-TIG weld penetration.

收稿日期: 2016-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305189); 甘肃省自然科学基金资助项目(145RJZA119); 国家“973”计划前期研究专项(2014CB660810)

作者简介: 顾玉芬(1975—), 女, 副教授, 主要从事焊接过程检测与智能控制方面的研究, E-mail: guyf@lut.cn

Key words: laser photoelectric conversion method; DC-TIG weld; real-time detection of penetration; full penetration control

TIG 焊是一种广泛应用于各种工业结构金属的重要焊接方法,主要用于薄板对接和重要焊接结构的打底焊,TIG 焊的全熔透控制对保证接头力学性能至关重要.在实际生产中主要通过严格执行工艺文件来保证熔透,但无法克服焊接参数波动、变形等外界干扰因素对熔池熔透状态的影响.因此实时检测并控制焊缝全熔透状态对实现自动化 TIG 焊接和保证焊接质量具有重要的工程意义.

在焊接过程中对焊缝熔透状态进行实时传感与控制所面临的最主要难点是熔透信息的表征与测量.目前主要有以下几种测量方法:机器视觉传感法、电弧声测量法、熔池振荡法等^[1-5].其中机器视觉传感法因传感信息量大而得到广泛关注^[1-2],但大多数通过电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)采集熔池正面图像,提取熔宽、长度等熔池二维几何信息,因提取的二维物理量与熔透缺乏直接对应关系,不能很好地反映熔透信息.电弧声测量法中焊接电弧声与焊接稳定性、熔滴过渡、焊接熔透有一定的相关性,但由于声音在空间中的传播速度较慢,信号处理复杂,导致该方法实时性较差.熔池振荡法中由于熔池的体积与熔池振荡频率之间具有较为直接的物理对应关系,且检测手段简单,如果能够可靠检测熔池特征振荡频率则可取得较好的控制效果;但由于熔池振荡时电弧轴向位移变化很小(0.2~0.4 mm)^[3-5],且在连续焊接时由于电弧作用中心点发生偏移,熔池激振困难,弧压、弧光信号信噪比低,目前用于连续焊接熔透信息检测仍有较大困难.

针对以上熔透测量方法存在的信噪比低、实时性差等缺点,提出了一种激光光电转换法.分别进行了直流 TIG 焊定点和连续焊接条件下的熔透检测,分析了从未熔透到全熔透过程中光电法电压信号的特征与变化规律,并提取了熔透特征信号;根据熔池表面形貌变化规律对不同焊接条件下熔透实时信号变化趋势进行了标定和分析.

1 激光光电法检测原理

焊缝熔透状态与熔池自由表面动态变化具有较强的相关性,具体体现为熔池表面凹凸特性及曲率随熔透状态改变会发生明显的变化^[6].根据熔体质量守恒定律和热胀冷缩原理可知,熔池中

熔融金属的体积大于其熔化前等质量固态金属的体积,因此,在未熔透时由于表面张力及母材“硬壳”的共同作用下,熔池表面呈凸面,同时其曲率在熔透状态从未熔透发展至临界熔透的过程中逐渐增大;当达到临界熔透时,熔池由硬壳支撑转变为薄膜支撑,在重力及表面张力的作用下熔池产生下塌量,同时熔池表面由凸面突变为凹面;熔透状态从临界熔透发展为全熔透的过程中,熔池自由表面保持为凹面状态,其曲率随下塌量增加而逐渐增大^[7-8],如图 1 所示.

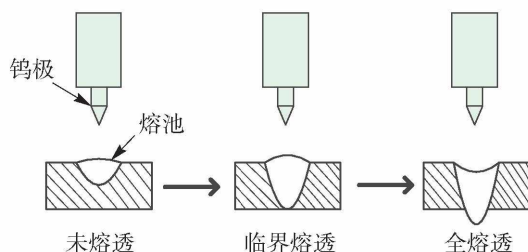


图 1 熔池表面凹凸特性及曲率变化

Fig. 1 Schematic diagram of weld pool surface concave and convex curvature change

为了检测熔池表面形态的变化,将五线结构光以一定角度投射于熔池表面,利用熔池表面的镜面反射特性,使经熔池表面反射的激光条纹进入暗室,不同熔透下光电采集系统示意图如图 2(a)所示.该暗室由窄带滤光片、硅光电池板构成,其结构如图 2(b)所示;窄带滤光片波长与结构光波长一致,用于滤除焊接电弧光及其他外界光源的干扰;硅光电池板用于接收进入暗室的反射激光条纹,并将激光条纹的光信号转换为电信号.

当熔池表面凹凸特性及曲率发生改变时将引起激光反射条纹的形态变化,从而导致进入暗室的光信号大小发生变化,通过光电转换最终引起暗室输出电压信号发生改变.而激光反射条纹形态与熔池表面凸凹度及变形情况具有严格的光学对应关系^[4],暗室输出的电信号可作为反映直流 TIG 焊熔池熔透状态的特征信号.

2 实验系统及参数

2.1 实验系统

为了分析激光光电法电压信号与直流 TIG 焊熔透的相关性,搭建了如图 3 所示的实验平台.平台

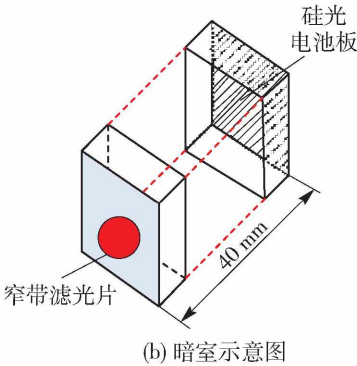
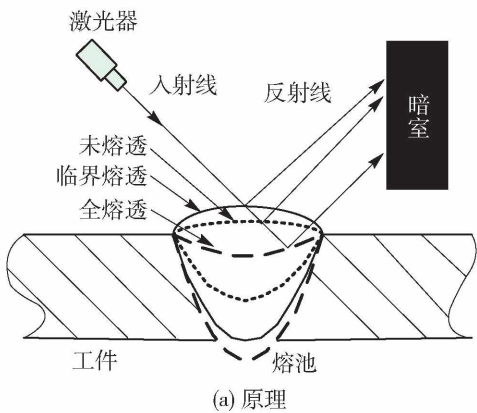


图 2 激光光电转换法原理及暗室示意图
Fig.2 Schematic of laser photoelectric method and darkroom

由 Nanoline 公司生产的结构光激光器、暗室、数据采集卡、摄像机组成,其中接收激光反射条纹的暗室由半径为 50 mm、中心波长为 670 nm、半带宽为 10 nm 的窄带滤光片和硅光电池板组成. 激光器的中心波长及半带宽与滤光片一致. 激光器的光学参数如表 1 所示. 激光器位于 yOz 平面内,距离焊枪 85 mm,激光器与水平面的夹角为 30° ;暗室位于 xOz 平面内,与焊枪和工件的距离分别为 50 mm 和 10 mm,且与水平面垂直,在该几何参数下激光反射条纹能够全部进入滤光片内,使得熔池信息准确反映;摄像机置于工件背面,用于拍摄和分析熔池背面熔透情况,摄像机与水平面夹角为 40° .

表 1 激光器光学参数
Table 1 Laser optical parameters

功率 P/mW	中心波长 λ/nm	半带宽/ nm	光束间夹角 $\theta/(\text{^\circ})$	输出 形式
500	669.7	10	0.77	五平行线

2.2 工艺试验参数

在直流正接焊接条件下,对 120 mm × 50 mm × 3 mm 规格的 304 不锈钢板分别进行了多组定点及连

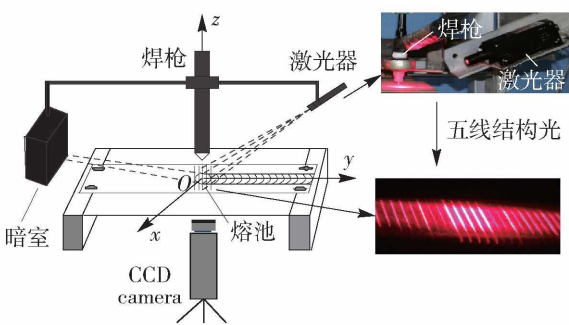


图 3 试验系统示意图
Fig.3 Schematic diagram of experimental system

续焊接试验,试验参数如表 2 所示.

表 2 工艺试验焊接参数
Table 2 Welding parameters of process experiment

焊接条件	焊接电流 I/A	弧长 L/mm	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	信号采样率 f/Hz
定点焊	90	3	0	30
连续焊	120	3	2	30

3 试验结果及分析

为了研究焊缝从未熔透到全熔透过程中光电法电压信号的变化规律,在已构建的试验平台上进行了定点及连续焊接条件下电压信息的检测与提取. 同时,对摄像机同步采集的视频信号经分帧、高斯滤波、Canny 算法边缘提取图像处理、边缘细化后得到了背面熔透实时图像,其图像处理过程如图 4 所示. 最后,对比分析了电压信号与同步采集背面熔透图像的对应关系,并提取了不同焊接条件下的熔透特征信号.

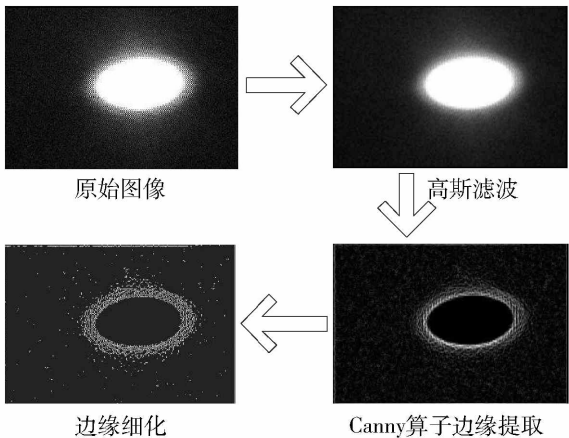


图 4 图像处理流程
Fig.4 Flow chart of image processing

3.1 定点焊接条件下熔透信息特征及分析

采用表2中的焊接工艺参数进行了定点焊接试验,光电采集系统与摄像机采样率同步为30 Hz,信号提取过程从焊接开始一直持续至全熔透。在该焊接参数下得到的激光光电实时熔透信号,如图5所示。

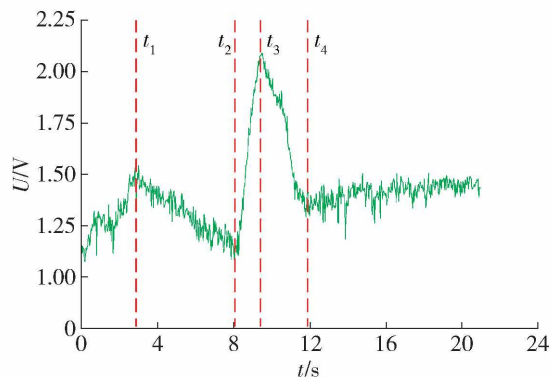


图5 定点焊实时熔透信息

Fig. 5 Penetration graph of stationary weld pool in real time

从图5可以看出,当 $0 < t \leq t_2$ 时信号电压幅值变化趋势为先增大后减小;当电压达到某一幅值 U_2 时信号发生突变,具体表现为当 $t > t_2$ 时,电压信号迅速增大,并于1~2 s内达到整个焊接过程中的峰值特征信号 U_3 ,之后电压幅值发生陡降,持续时间为2~3 s;当 $t \geq t_4$ 时,电压信号变化趋势为缓慢增加。

3.1.1 未熔透时电压幅值变化特征分析

$0 < t \leq t_1$ 阶段为焊接过程的起始阶段,熔池动态发展过程为熔池形成、熔池长大。在该阶段初始时熔池直径小于五线激光条纹的总宽度,五线激光从开始只有一条条纹照射到熔池表面逐渐过渡为覆盖整个熔池表面,这导致反射激光光强变化趋势为逐渐增大,因此对应的熔透电压信号随之逐步增强。

在 $t_1 \sim t_2$ 阶段,激光条纹覆盖整个熔池表面,此时检测到的电压信号完整地反映了熔池表面的三维信息。熔透状态从未熔透发展到临界熔透阶段熔池表面为凸面,其曲率随熔深增加而增大,并在达到临界熔透(t_2 时刻)时曲率达到最大值,其熔透图像如图6所示,可以看到此时熔池刚刚产生较小下塌量。根据光学反射原理,随凸形熔池表面曲率增加,反射在暗室光电板上的五线激光条纹行曲率随之增加,线条行间距增大且线条虚化;对于光电转换法来讲即激光反射条纹强度减弱,因此导致该阶段光电转换信号幅值呈降低趋势。

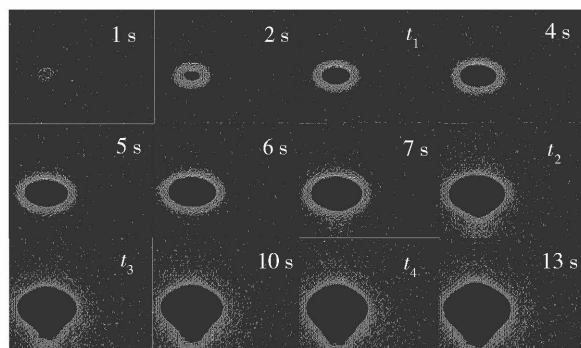


图6 背面熔透同步实时图像

Fig. 6 Synchronous penetration images of back-side of weld pool in real time

3.1.2 熔透时电压幅值变化特征分析

当 $t = t_2$ 时熔池临界熔透,由于熔池缺乏固态母材“硬壳”的支撑,在电弧压力、重力、表面张力的共同作用下背面熔宽及熔深迅速增加,由于熔融金属是不可压缩的,根据熔体质量守恒定律,熔池表面将随熔深及熔宽增加由凸面迅速转变为凹面,突变后熔池表面曲率继续迅速增加。当五线激光条纹照射在凹形熔池时,由光学反射原理可知其反射条纹必然会产生焦点,本试验平台正是利用这一光学现象和该现象引起光电信号迅速增大的特性,从而实现对接熔透特征信号的精确提取。

在 $t_2 \sim t_3$ 阶段,熔池刚刚熔透,结合文献[4]可知当产生较小塌陷量时熔池表面形态由凸面突变为凹面,同时熔池表面曲率将随塌陷量增加而快速增大,从而使得激光反射条纹由发散迅速变为收敛并逼近于聚焦;从光电转换角度讲,反射激光条纹收敛会导致光通量的增加,从而引起进入光电转化器的光强度增加,因此在该阶段光电转换电信号随熔透增加呈现为快速增大的趋势。同理, $t_3 \sim t_4$ 阶段随熔深继续增加激光反射条纹由聚焦迅速变为发散,因此电压幅值发生陡降。当 $t = t_3$ 时熔池刚好达到全熔透状态,同时反射激光条纹发生聚焦,此时反射激光条纹 U_3 信号为焊接过程中的峰值信号,把熔透信号拟合为光滑曲线时该点左右两边斜率均远大于其他信号点,因此 U_3 作为熔透特征信号时信噪比高、易于识别、方便提取。

由图6可以看出 $t > 11$ s时熔深没有显著增加,背面熔宽缓慢增大,熔池曲率随之缓慢减小,因此电压幅值与之对应略微增加。

3.2 连续焊接条件下熔透信息特征及分析

与定点焊时熔透信息特征信号提取原理一致,在连续焊接条件下使用表2中的焊接参数,得到如

图7的熔透实时信息以及该参数下与熔透信息对应的焊缝正、背面形貌实图。

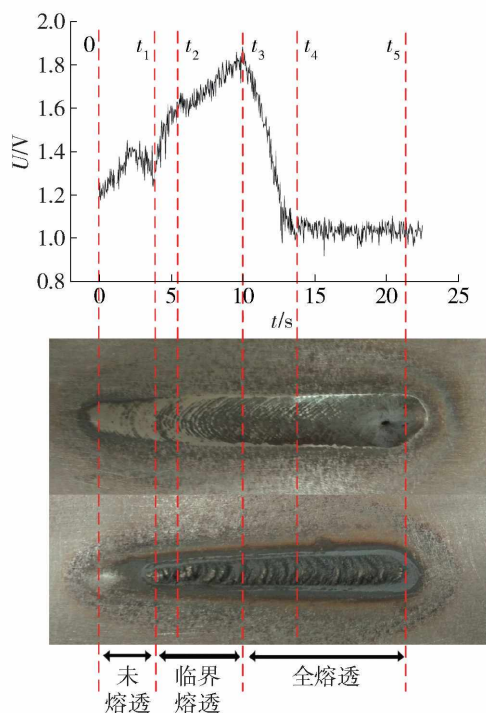


图7 连续焊熔透实时信息及对应焊缝形貌

Fig.7 Real-time information of continuous welding penetration and weld bead appearance

在 $0 \sim t_1$ 阶段内,与定点焊时情况类似,熔透信号先增大后减小,熔池表面形貌为凸面;当时间达到 t_1 时,由图7可以看出熔池表面刚由凸面突变为凹面;激光反射条纹呈迅速收敛趋势,电压幅值发生突变。当时间达到 t_2 时,相比于定点焊,连续焊接条件下由于母材热扩散条件不同导致熔池表面曲率变化速率有所降低,但依然较为明显; $t_1 \sim t_3$ 阶段为熔池由临界熔透发展为全熔透的阶段,该阶段与定点焊 $t_2 \sim t_3$ 阶段是相对应且相吻合的。当电压信号达到 U_δ 时,熔池刚好达到全熔透,此时的电压信号为连续焊接条件下的熔透特征信号。 $t_3 \sim t_4$ 阶段焊接过程达到宏观准稳态,熔池表面三维形貌与对应熔深及熔宽基本保持稳定,熔透信号保持平稳。

通过试验可以验证在直流 TIG 焊定点及连续焊接条件下均可利用由未熔透转变为临界熔透时光电法电压信号突变的现象,从而实现熔透特征信号的精确识别与提取。

4 结论

1) 基于激光光电法可以实现熔池熔透状态的

实时检测,试验采集的定点及连续焊接条件下实时电压信号变化趋势与熔透变化趋势相吻合。

2) 针对定点及连续焊接过程,利用熔透状态从未熔透转变为临界熔透时熔池表面由凸面突变为凹面,激光反射条纹快速聚焦,从而引起光电法电压信号迅速变化的现象,可以实现直流 TIG 焊熔透特征信号的精确识别与提取,为 TIG 焊熔透控制奠定了基础。

参考文献:

- [1] ZHANG Y M, KOVACEVIC R, WU L. Dynamic analysis and identification of gas tungsten arc welding process for weld penetration control [J]. Journal of Engineering for Industry, 2008, 118(1): 123-126.
- [2] LIU Y K, ZHANG Y M. Model-based predictive control of weld penetration in gas tungsten arc welding [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 955-966.
- [3] TERUHIKO H, KATSUHIKO Y. Study on penetration form using stationary TIG arc [J]. Japan Welding Society, 1993, 24(2): 8-14.
- [4] YAMAOTA T, SHIMADA W. Characteristics of high frequency pulsed DC TIG welding process [J]. Welding Research Abroad, 1979, 25: 16-22.
- [5] XIAO Y H, OUDEN G D. A study of GTA weld pool oscillation [J]. Welding Journal, 1990, 31(8): 289-293.
- [6] 张刚, 石珏, 李春凯, 等. 熔池三维自由表面状态与 TIG 焊熔透的相关性研究 [J]. 金属学报, 2014, 50(8): 995-1102.
- ZHANG G, SHI Y, LI C K, et al. Research on the correlation between the status of three-dimensional weld pool surface and weld penetration in TIG welding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(8): 995-1102. (in Chinese)
- [7] 武传松, 赵朋程. 熔透熔池表面下塌变形的动态演变过程分析[J]. 金属学报, 2006, 42(8): 865-869.
- WU C S, ZHAO P C. Analysis on dynamic development of surface depression of full penetration weld pool [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(8): 865-869. (in Chinese)
- [8] 张裕明, 吴林, 李林, 等. TIG 焊熔透正面检测量的确定 [J]. 焊接学报, 1991, 12(1): 39-45.
- ZHANG Y M, WU L, LI L, et al. Determination of top supervision on parameters for state of full penetration in TIG welding [J]. Transitions of the China Welding Institution, 1991, 12(1): 39-45. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)