

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.005

超薄板脉冲微束等离子弧焊熔池振荡频率特征

陶旭阳, 何建萍*, 徐磊

(上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

摘要:脉冲微束等离子弧焊熔池振荡特征频率与焊件成形质量具有重要联系。传统的检测方法用于超薄板 P-MPAW 焊接熔池振荡频率实时检测时存在较大误差,因此课题组应用了一种基于激光反射的熔池振荡特征频率检测方法。课题组搭建的熔池振荡实时检测平台实现了超薄板 P-MPAW 熔池振荡特征信息的采集,并成功提取出熔池振荡特征频率,探讨了脉冲参数对于熔池振荡的影响机制。结果表明:熔池振荡频率随脉冲频率增大呈对数增长,随基值电流和峰值电流差异减小而减小,使用对数增长模型可对熔池振荡特征频率进行合理预测。

关键词:脉冲微束等离子弧焊;超薄板;激光反射;熔池振荡;特征频率

中图分类号: TG409; TH140.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2020)03-0024-05

Characteristics of Molten Pool Oscillation Frequency in Ultra-Thin Sheets by Pulsed Microplasma Arc Welding

TAO Xuyang, HE Jianping*, XU Lei

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The molten pool oscillation frequency by pulsed microplasma arc welding has an important relationship with the quality of weldments. A new method based on laser reflection was applied by the research group, due to the large deviation of traditional method in real-time detection of molten pool oscillation frequency of ultra-thin sheets by P-MPAW. The real-time detecting platform of molten pool oscillation was built to collect the characteristic information of molten pool oscillation of ultra-thin sheets by P-MPAW and the characteristic frequency of molten pool oscillation was extracted successfully. Furthermore, the influence mechanism of pulse parameters on the molten pool oscillation was discussed. The results show that the oscillation frequency of molten pool increases logarithmically with the increase of pulse frequency, and decreases with the decrease of the difference between base current and peak current. Logarithmic growth model can be used to predict the characteristic frequency of molten pool oscillation.

Keywords: P-MPAW (pulsed microplasma arc welding); ultra-thin sheets; laser reflection; molten pool oscillation; characteristic frequency

脉冲微束等离子弧焊(P-MPAW)以其极细的电弧形貌、极小的热输入范围以及熔入型的焊接特征,在对100 μm 及以下厚度的超薄板“对接”焊时,具有很大优势。在P-MPAW焊接过程中熔池振荡行为(包括焊接熔池的形态、熔池内液态金属的流动状态等)与焊件的成型质量具有直接关系^[1-3]。因此,对焊接熔池振

荡特征进行检测研究,建立起熔池振荡特征信息和焊件成型质量的关系,对提高焊接质量,实现焊接智能化、自动化具有重要意义^[4-7]。

熔池振荡根据检测途径的不同可以分为2类:脉冲激振法和熔池谐振法^[8]。脉冲激振法是通过施加短时脉冲电流激振熔池使得熔池产生衰减振荡;熔池

收稿日期:2019-10-25;修回日期:2020-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775327);上海市科委基础研究重点资助项目(14JC1402700)。

第一作者简介:陶旭阳(1995),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事超薄板微束等离子弧焊接研究。通信作者:何建萍(1964),女,上海人,博士,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为超薄微束弧焊电弧熔池系统物理信息检测和信息处理。

E-mail: janejp@163.com

谐振法是通过在恒定焊接电流上附加一定频率的变动电流,通过弧压或弧光检测熔池固有振荡频率。传统的弧压或弧光检测虽能够实现熔池振荡信息检测,但受到焊接过程中强烈弧光干扰和电磁干扰使得检测到的信息存在较大误差。

课题组利用熔池内液体金属自由表面的镜面反射特性,将激光照射至熔池表面,基于熔池的反射光实现超薄板脉冲微束等离子弧焊熔池振荡特征频率的提取;并分析脉冲参数对于熔池振荡频率的影响机制。该方法对超薄板 P-MPAW 焊接过程中烧穿和变形缺陷抑制具有重要意义。

1 基于激光反射熔池振荡检测原理

将中心波长为 808 nm 的激光以一定角度投射在熔池表面上,当熔池表面受到脉冲电流激振产生振荡时,照射在其表面上的激光产生的反射光亮度也将发生同步变化。利用光电传感器将动态变化的光信号转化为电信号进行采集,之后通过对所采集的电信号进行数据处理便可以得到熔池振荡特征频率。该方法有效利用了激光反射光对熔池微弱振荡的光学放大作用,可实现超薄板 P-MPAW 熔池振荡特征频率实时检测。

2 基于激光反射熔池振荡检测系统及工艺试验

2.1 试验系统组成

为完成对熔池振荡特征的检测,课题组搭建了试验所需平台进行试验,试验平台示意图如图 1 所示。试验平台硬件设备主要包括:激光波长为 808 nm 的激光发生器、光电传感器(由 808 nm 滤光片和 FU-G010 型号硅光电池组成)、SAF 焊机、PSMDU-3841 采集卡以及计算机。

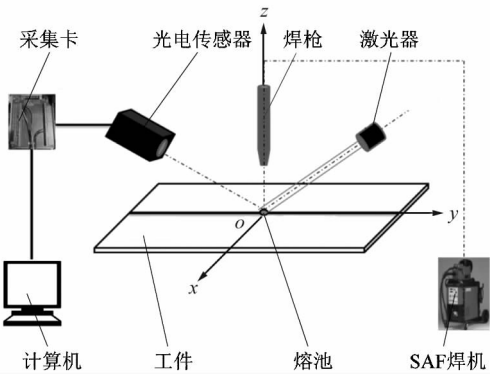


图 1 试验平台示意图

Figure 1 Schematic diagram of experiment system

根据图 1 所示的示意图,搭建基于激光反射的熔池振荡实时检测系统,其中激光器、焊枪与光电传感器

处于 oyz 平面内,激光器与工件平面的夹角为 45° ,其与熔池之间的距离是 60 mm,光电传感器与激光器的位置关于 z 轴对称。

304 不锈钢超薄板 P-MPAW 焊接过程中会产生强烈的电弧光,且弧光的谱线范围^[9](如图 2 所示)十分广,既有可见光也有不可见的紫外线和红外线,因此,在激光反射光采集过程中需要考虑到弧光干扰问题。本试验中抑制弧光干扰的方法:①在弧光响应最弱的谱线范围内,选择合适的激光光源,课题组选用了中心波长为 808 nm 的激光光源;②加装 808 nm 滤光片,当多种波长混合光通过不同折射率的滤光片时,会产生不同的光学效果。由于折射率不同而产生干涉效应,导致只有 808 nm 波长的光才有非常高的透过率而其他波长光则被反射和吸收。

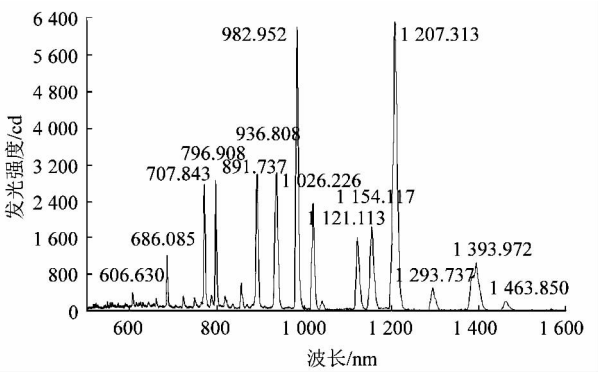


图 2 微束等离子弧焊电弧光谱图

Figure 2 Micro-plasma arc welding argon ion spectrum

2.2 工艺试验

在已搭建好的试验平台进行 0.1 mm 厚 304 不锈钢超薄板 P-MPAW 连续焊试验,并采集焊接过程中光电传感器实时输出的电信号,其中焊接速度为 4.2 mm/s,焊接参数如表 1 所示。焊接过程中为了保证信号采集质量,将采样频率设置为 20 kHz。

表 1 焊接脉冲电流参数

Table 1 Welding pulse current parameter

组号	占空比 Δ	峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	基脉比
1	0.3	0.8	4.12	0.19
2	0.3	1.2	3.20	0.38
3	0.3	1.5	2.50	0.60
4	0.5	0.8	2.80	0.29
5	0.5	1.2	2.40	0.50
6	0.5	1.5	2.10	0.71
7	0.7	0.8	2.22	0.36
8	0.7	1.2	2.06	0.58
9	0.7	1.5	1.92	0.78

表1中各组参数均保证在平均电流1.8 A前提下设置。9组参数分别在脉冲频率为1, 5, 25, 100和500 Hz时进行试验,共进行45组304不锈钢超薄板P-MPAW连续焊试验。

2.3 基于激光反射的熔池振荡检测特征频率提取

基于激光反射熔池振荡检测原理可知:在光电传感器输出的电压信号中包含了熔池振荡的特征信息,只需要对电压信号进行处理分析,便可以从中提取特征信息。方法为:选择一个稳定周期,将该周期内基值电流作用阶段光电传感器输出的电压信号波形分离出来;由于熔池受到激发后每波动一次在电压信号波形图上的信号也上下波动一次,因此,只需要根据电压信号波动次数便可以确定熔池的振荡频率 f ,其计算公式为

$$f = \frac{n}{T \times (1 - \Delta)} \quad (1)$$

式中: n 为基值阶段波峰的数量; T 为周期; Δ 为占空比。

在占空比为30%,基值电流 I_b /峰值电流 I_p 为0.80 A/4.12 A,频率为5 Hz下进行0.1 mm板厚304不锈钢板P-MPAW焊接试验,采集到基值电流作用阶段光电传感器输出电压信号波形,如图3所示。可以看到,在基值电流作用时间内电压信号波形呈“波浪形”分布,这说明在基值电流作用时间内,激光照射在熔池的自由表面受到其动态过程的影响,使得激光经熔池自由表面反射至光电传感器上的光辐射强度发生同步实时变化。根据激光反射熔池振荡检测原理,从图中读出在基值电流作用时间内,光电传感器输出的电压信号共波动了36次,根据公式(1)计算得到该脉冲参数下熔池的振荡频率为257.1 Hz,成功实现熔池振荡特征频率的提取。

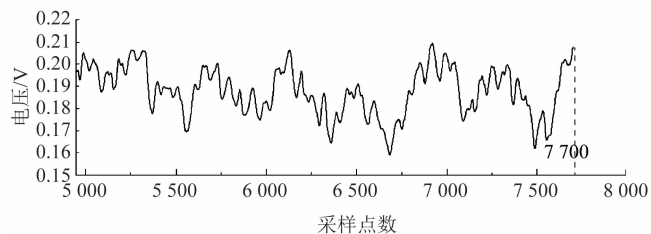


图3 基值电流作用时间内电压信号

Figure 3 Voltage signal during base current period

3 脉冲参数对熔池振荡特征频率的影响机制

对于0.1 mm厚超薄板,在进行P-MPAW焊接时熔池尺寸仅有1~2 mm,因此,受到熔池体积的限制熔

池固有振荡过于微弱以致难以检测。在本研究中,通过施加脉冲电流诱发熔池产生振荡,增加了熔池振荡的可检测性,因此,熔池振荡频率与外加脉冲有密切关联,在此将讨论脉冲参数对于熔池振荡频率的影响机制。根据表1中的脉冲参数,进行45组焊接试验,对试验中采集到的电压信号进行处理分析并提取出各组焊接参数下的熔池振荡频率,如图4所示。

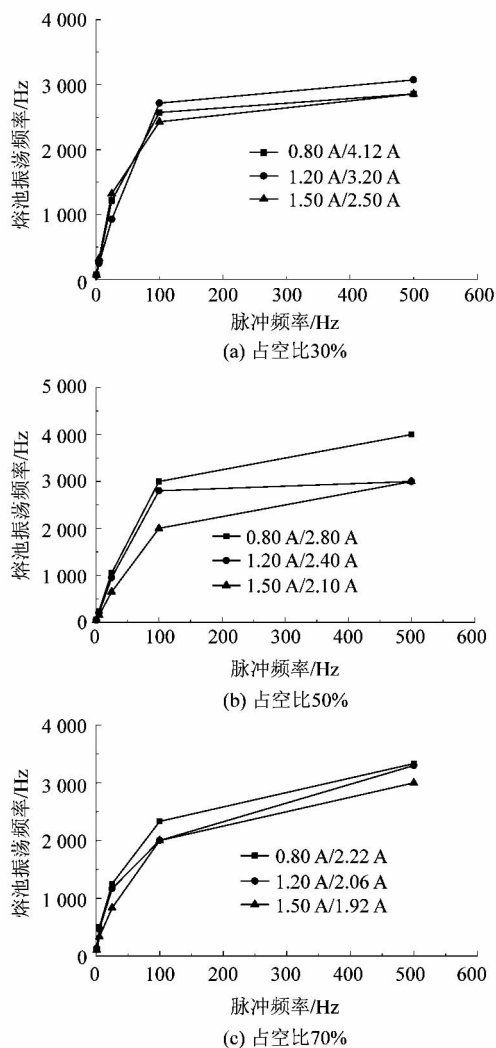


图4 不同脉冲参数下熔池振荡频率

Figure 4 Molten pool oscillation frequency under different pulse parameters

观察不同脉冲参数下的熔池振荡频率的变化曲线图可以发现:

1) 当占空比和基值电流/峰值电流不变,在较低频率(1~100 Hz),熔池振荡频率随着脉冲频率增加几乎呈线性增加,且具有较大的增长速度;而在较高脉冲频率(100~500 Hz),熔池振荡频率也随脉冲频率的增加而增加,但明显比低频条件下的熔池振荡频率

增长缓慢,且熔池最高振荡频率都不会超过 4 000 Hz。

2) 当占空比 30% 和频率 5 Hz 时,不同基值电流/峰值电流(0.8 A/4.12 A,1.20 A/3.20 A 和 1.50 A/2.50 A)下的熔池振荡频率分别为 257.1,235.7 和 217.5 Hz,可以看出随着基值电流和峰值电流的差异减小,熔池振荡频率也随之减小,但减小幅度并不大,这种规律在其他脉冲下仍然存在。这是因为随着基值电流和峰值电流之间的差异减小,母材在基值电流作用下也会熔化,熔池的体积相对于基值电流和峰值电流之间的差异较大时的熔池体积更大,即熔池内部具有更多的液态金属量;而熔池振荡频率与熔池体积具有良好的反比关系^[10],使得熔池产生振荡更加困难,因此随着基值电流和峰值电流差异减小,熔池振荡频率也会随之减小。

$$F_{\text{arc}} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 r_j^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_j^2}\right) \quad (2)$$

式中: I 为焊接电流; r 为热源某点至电弧加热斑点中心距离; r_j 为有效热源半径; μ_0 为磁导率。

3) 综合观察,在相同占空比和基值电流/峰值电流条件下,熔池振荡频率随脉冲频率的增加而增加。这是因为在超薄板 P-MPAW 焊接过程焊接电流 I 是在基值电流和峰值电流之间不断切换,根据电弧压力 F_{arc} 的计算公式(2)^{[1]29-54},脉冲电弧力也是不断变化的。当脉冲频率增加时,即焊接电流 I 在基值电流和峰值电流之间变化加快,脉冲电弧力变化也随之加快,这种变化对熔池起到了强烈的“搅拌”作用,使得熔池振荡加剧。并且熔池振荡频率随脉冲频率的增长趋势符合对数增长规律,即前期增长迅速,后期增长缓慢,因此可以通过建立对数增长模型对熔池振荡频率变化曲线进行拟合分析,从而预测不同脉冲参数下熔池振荡频率。

如图 5 所示,通过 MATLAB 对占空比 30%,不同基值电流/峰值电流下(0.80 A/4.12 A,1.20 A/3.20 A 和 1.50 A/2.50 A)的 5 组脉冲频率的熔池振荡频率进行非线性的对数拟合,其确定系数 R^2 依次分别为 0.934 4,0.911 9 和 0.956 7。 R^2 是衡量拟合方程的拟合度的指标,用于表达因变量和自变量之间总体关系, R^2 的值越接近 1 说明拟合曲线与测量值之间的拟合程度越好,因此,用对数方程拟合熔池振荡特征频率和脉冲频率之间的关系是科学合理的。

在占空比 30%,基值电流/峰值电 1.20 A/3.20 A,脉冲频率 10 Hz 下进行超薄板 P-MPAW 焊接试验并采集基值电流作用阶段光电传感器输出电压信号波

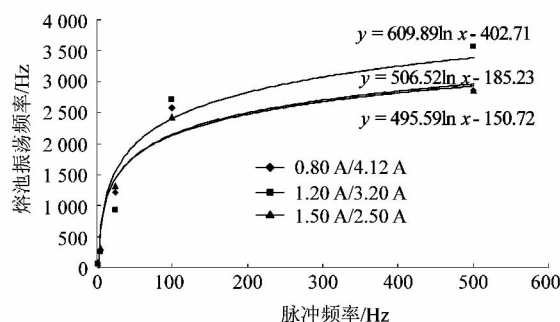


图 5 熔池振荡频率拟合曲线

Figure 5 Fitting curve of molten pool oscillation frequency

形,如图 6 所示。从图中读出在基值电流作用时间内该信号共波动了 68 次,根据公式(1)提取出熔池的振荡频率为 971.4 Hz,而通过回归方程计算所得到的振荡频率为 990.4 Hz,误差合理,说明该模型正确。

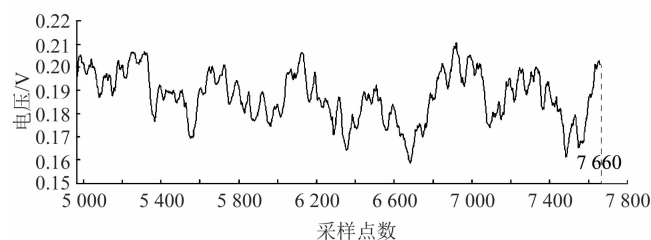


图 6 基值电流作用时间内电压信号

Figure 6 Voltage signal during base current period

4 结论

1) 基于激光反射熔池振荡检测原理搭建试验平台实现 304 不锈钢超薄板 P-MPAW 连续焊熔池振荡特征频率实时检测,对抑制超薄板 P-MPAW 焊接过程中的缺陷具有重要意义。

2) 分析得到焊接电流脉冲参数对于熔池振荡特征频率的影响机制:在相同占空比和基值电流/峰值电流条件下,熔池振荡频率随脉冲频率的增加而增加,整体符合对数增长规律;在相同占空比和脉冲频率条件下,随着基值电流和峰值电流差异减小,熔池振荡频率随之小幅减小。

3) 使用对数增长模型对熔池振荡频率变化规律进行拟合分析从而合理预测各脉冲参数下熔池振荡频率,经验证,该模型合理有效。

参考文献:

- [1] 吉永丰. 微束等离子弧超薄板焊接熔池动态过程的研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2014:29-54.

(下转第 32 页)