DOI: 10.3901/JME.2019.19.138

基于 Hammerstein 模型的 GMAW-P 焊接熔深自适应预测控制*

王万东^{1,2} 王志江^{1,2} 胡绳荪^{1,2} 薛坤喜^{1,2} 赵冠成^{1,2}

(1. 天津大学天津市现代连接技术重点实验室 天津 300350;

2. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300350)

摘要: 针对脉冲熔化极气体保护焊(Pulsed gas metal arc welding, GMAW-P)过程中焊接熔深的实时控制, 使用脉冲峰值期间的电压变化幅值(ΔU)来表征焊接熔深变化, 并且通过测量和控制 ΔU 的大小来间接达到熔深控制的目的。建立了以 ΔU 为输出和脉冲基值电流为输入的单输入单输出熔深控制系统。系统输入输出之间的静态关系模型显示该熔深控制系统具有一定非线性, 因此, 采用加入干扰的 Hammerstein 模型描述该非线性系统。在基于该 Hammerstein 模型的经典预测控制算法基础上, 在控制过程中加入递推最小二乘法在线辨识模型参数, 从而实现焊接熔深自适应控制。控制算法仿真和实时焊接试验表明该熔深控制算法能够较好地实现 GMAW-P 焊接过程中的熔深控制。变散热试验结果验证了该控制算法的有效性和适应性。

关键词: Hammerstein 模型; 自适应预测控制; 仿真; 熔深控制; GMAW-P

中图分类号: TG409

Adaptive Predictive Control of Weld Penetration Depth Based on Hammerstein Model in Pulsed Gas Metal Arc Welding

WANG Wandong^{1,2} WANG Zhijiang^{1,2} HU Shengsun^{1,2} XUE Kunxi^{1,2} ZHAO Guancheng^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350;

2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract: To control weld penetration depth in real time in pulsed gas metal arc welding (GMAW-P) process, the voltage variation amplitude during a peak current period (ΔU) is proposed to characterize the change in weld penetration depth, and ΔU is measured and controlled to control weld penetration depth in GMAW-P process. A single input and single output system is established with ΔU as system output and base current as system input for the weld penetration depth control. The static model between the input and output of the system shows that the weld penetration depth control system has nonlinearity, which can be described by the Hammerstein model with the interference. The recursive least square method is added in classical predictive control algorithm, which is established based on the Hammerstein model, to identify the system model parameters online and to achieve adaptive control of the weld penetration depth. The control algorithm simulation results and the real time welding experiments prove that the adaptive predictive control algorithm can well control the weld penetration depth in GMAW-P process. The effectiveness and adaptability of the control algorithm are verified by variable heat dissipation experiments.

Key words: Hammerstein model; adaptive predictive control; simulation; weld penetration depth control; GMAW-P

0 前言

电弧焊接过程中, 焊接熔深是决定焊缝质量的关键因素之一, 因此, 它的实时控制一直是焊接自

动化中的主要问题^[1]。国内外关于焊接熔深控制的研究已取得较大进展, 但多集中在非熔化极气体保护焊(Gas tungsten arc welding, GTAW), 而对于熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)过程, 由于焊丝作为电极及熔滴过渡的影响, 焊接过程中干扰复杂多变, 导致其过程控制难以实现。近年来, 脉冲熔化极气体保护焊(Pulsed gas metal arc welding, GMAW-P)由于其电流调节范围广、能够有效控制热

* 国家自然科学基金(51505326)、天津市自然科学基金(16JCQNJC04300)和国家海洋经济创新发展区域示范(BHSF2017-10)资助项目。20181013收到初稿, 20190304收到修改稿

输入等优点而被广泛用于工业生产领域,其焊缝成形控制有重要应用价值和现实意义^[2],但是,脉冲的引入使得其熔深控制更加困难。

熔深传感的主要传感对象为熔池。目前,熔池传感的主要方法有红外传感法^[3-5]、超声波传感法^[6-7]、熔池振荡法^[8-12]、电弧声传感法^[13-15]和视觉传感法^[16-22]等。其中,熔池振荡法主要应用在 GTAW 中检测熔池振荡频率反映熔池大小;视觉传感法用于 GTAW 和 GMAW 焊接过程检测的优势在于仅通过非接触测量即可准确反映出焊缝熔池的动态变化过程,但是传感过程易受到强弧光和环境等干扰。因此,选择合适的焊接过程传感方法和能够表征焊接熔深的控制量对 GMAW-P 焊接熔深控制具有重要意义。文中拟采用电弧电压传感方法^[23-24]进行焊接熔深的实时控制,该方法具有设备简单、实时性高和成本低的特点,对推进 GMAW-P 焊接熔深控制的研究和发展具有一定的作用。文献[1, 25]设计了一套 GMAW-P 焊接熔深控制系统,是在保持脉冲峰值电流参数不变的情况下,通过控制脉冲基值时间来控制脉冲峰值电流期间的电压变化幅值(ΔU),从而间接地达到控制焊接熔深的目的。这是由于当焊接熔深增加时,熔池的体积增大,惯性增大,导致熔池振荡幅度减小,而电弧电压的变化幅值能够较好地反映熔池振荡幅度,从而 ΔU 下降;反之亦然。因此, ΔU 可用于表征焊接熔深大

小并且通过控制 ΔU 大小可间接达到控制熔深的目的。文献[25]的熔深控制是基于静态线性模型的控制方法,对于熔深控制系统的动态认知不足并且难以实现精确控制。

文中针对 GMAW-P 焊接熔深控制,拟建立以 ΔU 为系统输出的熔深控制系统模型。考虑焊接熔深控制系统的非线性,建立非线性动态系统模型用于描述该控制系统,加强对熔深控制系统本质的认知并进行更加精确的控制。

1 GMAW-P 焊接熔深控制系统平台

为实现 GMAW-P 焊接过程中焊接熔深实时控制,设计了图 1 所示的焊接熔深控制系统框图,主要包括 Simulink(Matlab 软件中的仿真模块)模型控制系统、数据实时处理系统、信号 I/O 控制系统、电信号采集系统和焊接参数输出控制系统。其中 PCI6221 和 BNC2120 构成的信号 I/O 控制系统及集成了控制算法的 Simulink 模型控制系统是该熔深控制系统的两大核心。根据系统框图选择合适的硬件搭建了 GMAW-P 试验平台,计算机系统采用 HP450 笔记本和联想台式机,焊接电源采用 Miller 350CC/CV,送丝机构为 Miller S-74/D,行走机构采用 HGT-3C 工作台,传感系统采用 Moeller UC-123E。

图 1 GMAW-P 焊接熔深控制系统框图

根据图 1,该焊接熔深控制系统工作原理可以描述为:负责 Simulink 模型控制的主机(host)与负责处理数据的目标机(target)建立通信连接,进行模型和数据间的传输;电信号采集系统实时采集焊接过程中电压电流信号,通过 BNC2120 接线卡和 PCI6221 数据采集卡输送到目标机;目标机根据 Simulink 模型控制算法进行实时计算,得到熔深控制系统输入信号,并通过信号 I/O 控制系统传输到焊接参数输出控制系统;焊接参数输出控制系统根据接收到的系统输入信号,输出相应的焊接电流波形,从而实现 GMAW-P 焊接熔深的实时控制。

2 GMAW-P 焊接熔深控制系统模型

2.1 熔深控制系统的稳态非线性

已有研究^[1-2, 25-26]指出在一定条件下 ΔU 可作为 GMAW-P 焊接熔深表征量,因此,文中变换焊接条件研究其电弧传感适用范围,即固定脉冲频率条件下,以 ΔU 为系统输出,并以脉冲基值电流 I_b 为系统输入,建立单输入单输出焊接熔深控制系统。为建立该系统模型,设计了以 I_b 为变量的单因子多水平试验, I_b 分别设置为 50 A、60 A、70 A、80 A、90 A、100 A。试验中,保护气使用高纯氩气;母材

为 270 mm×50 mm×4 mm 的 Q235 钢板;采用 1 mm 间隙的“Ⅰ”型对接接头形式;焊丝为直径 1 mm 的 ER50-6;其他主要焊接参数见表 1。不同系统输入下稳态输出值如表 2 所示。

表 1 GMAW-P 主要焊接参数

工艺参数	设定值
峰值电流 I_p/A	280
峰值时间 t_p/ms	108
基值时间 t_b/ms	54
送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	4.8
焊接速度 $v_w/(mm \cdot s^{-1})$	3.2
导电嘴到工件距离 $CTWD/mm$	15
保护气流量 $G/(L \cdot min^{-1})$	16

表 2 不同基值电流下的系统稳态输出

基值电流 I_b/A	系统输出 $\Delta U/V$
50	6.785
60	5.692
70	5.356
80	5.101
90	5.038
100	4.840

根据表 2 数据,通过最小二乘法拟合出 I_b 与 ΔU 之间的关系,如式(1)所示。由于 I_b 值普遍偏大,式(1)中二次项系数虽小但不能忽略。该焊接熔深控制系统具有一定非线性,采用线性系统来描述存在较大误差,因此,研究中拟采用非线性系统辨识方法来实现该熔深控制系统模型建立。

$$\Delta U = 0.000\ 76 \times I_b^2 - 0.155 \times I_b + 12.5 \quad (1)$$

2.2 Hammerstein 模型建立

由于焊接过程中存在较大噪声,对系统输出影响较大,因此,文中拟采用加入干扰的 Hammerstein 模型来描述该焊接熔深控制系统,如图 2 所示,该模型由静态非线性系统和动态线性系统组成^[26]。其中,静态非线性系统由多项式组成,其参数与式(1)中参数相差一个系数,该系数是线性动态系统增益的倒数; $u(k)$ 为系统输入 I_b , $y(k)$ 为系统输出 ΔU , $v(k)$ 代表噪声和系统残差等影响,由系统实际输出(y)与模型输出($\hat{y}$)的差来表示,如式(2)所示; $x(k)$ 为系统中间状态量,代表静态非线性系统输出或动态线性系统输入,模型中两系统的表达式如式(3)和式(4)所示。

$$v(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (2)$$

$$x(k) = C_2 \times u^2(k) + C_1 \times u(k) + C_0 \quad (3)$$

$$y(k) = x(k) \cdot G(z^{-1}) + C(z^{-1}) \cdot v(k) =$$

$$x(k) \cdot \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} + C(z^{-1}) \cdot v(k) \quad (4)$$

图 2 加入干扰的 Hammerstein 模型

式(3)为静态非线性系统模型,其中 $C_2=0.000\ 76/g$, $C_1=-0.155/g$, $C_0=12.5/g$, g 为动态线性系统稳态增益。经尝试,发现模型中动态线性系统用三阶系统来描述时比较符合,式(4)为动态线性系统模型,其中 $B(z^{-1})$ 、 $A(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 以及动态线性系统的增益 g 的表达式如式(5)所示。研究中,系统时延设为 $d=3$ 时比较符合实际情况。

$$\begin{cases} B(z^{-1}) = z^{-d} (b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}) \\ A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} \\ C(z^{-1}) = c_1 z^{-1} \\ g = \frac{b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4}{1 + a_1 + a_2 + a_3} \end{cases} \quad (5)$$

2.3 自适应预测控制算法

由于焊接过程中存在非线性、耦合性、对象参数甚至结构的时变性和不确定性,传统的 PID 控制难以满足工程要求,而基于模型的预测控制算法强调的是模型功能而不是模型结构,具有对模型要求低、可在线计算、控制效果好的特点,适用 GMAW-P 焊接熔深控制。其基本特征为预测模型、滚动优化和反馈校正,也是其在实际工程应用中取得成功的关键技术。文中根据熔深控制系统特点选择受控自回归滑动平均(Controlled autoregression moving average, CARMA)模型作为预测模型来描述该 Hammerstein 模型中动态线性系统,如式(6)所示,用于预测未来的系统输出。滚动优化指通过某一性能指标函数的最优来确定使系统在未来时间内性能最佳的控制量,通过循环执行、计算更新控制量来实现预期控制目标。反馈校正的作用是实现系统闭环控制和纠正模型输出预测值与实际输出之间的偏差。

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})x(k) + C(z^{-1})v(k) \quad (6)$$

考虑到 GMAW-P 焊接熔深控制系统是一个参数时变系统,文中将自适应思想用于预测控制中,在焊接过程中实时辨识模型参数,以降低系统输出误差,增加预测控制系统的适应性。试验中采用带遗忘因子的递推增广最小二乘法对系统模型参数进行估计,根据式(3)~(5)可得式(7)中的相关参数。

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + K(k)(y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \\
K(k) &= P(k-1)\phi(k)(\lambda + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k))^{-1} \\
P(k) &= (I - K(k)\phi^T(k))P(k-1) / \lambda \\
\phi(k) &= [-y(k-1); -y(k-2); -y(k-3); \\
&\quad x(k-d); x(k-d-1); x(k-d-2); \\
&\quad x(k-d-3); x(k-d-4); v(k-1)] \\
\theta &= [a_1; a_2; a_3; b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; c_1]
\end{aligned} \quad (7)$$

式中, λ 为遗忘因子, 根据尝试, $\lambda=0.95$ 时模型参数辨识效果较好, 其他参数 $P(k)$ 、 $K(k)$ 和 I 均为算法中的标准定义。

根据式(6)中 CARMA 模型及式(5)中参数可递推出系统将来时刻的最小方差输出预测模型, 如式(8)所示

$$Y^* = Y_m + G \cdot \Delta X \quad (8)$$

式中, 相关参数的表达式如式(9)和式(10)所示, Y^* 为系统期望输出; Y_m 为模型预测输出, 完全由过去的控制输入和输出确定, 可由式(11)得到; ΔX 为系统输入控制增量, G 为控制矩阵, 可由式(12)得到。

$$\begin{cases}
Y^* = [y^*(k+d|k), y^*(k+d+1|k), \dots, y^*(k+N|k)]^T \\
Y_m = [y_m(k+d), y_m(k+d+1), \dots, y_m(k+N)]^T \\
\Delta X = [\Delta x(k), \Delta x(k+1), \dots, \Delta x(k+N-d)]^T \\
\Delta x(k+i) = x(k+i) - x(k-1), i=0, 1, \dots, N-d
\end{cases} \quad (9)$$

式中, d 为系统时延, 试验中 $d=3$; N 为预测长度, 试验中取 $N=8$ 。

$$G = \begin{bmatrix} b_{1,0} & 0 & \dots & 0 \\ b_{2,0} & b_{1,0} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N-d+1,0} & b_{N-d,0} & \dots & b_{1,0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases}
y_m(k+j) = -\sum_{i=1}^{n_a} a_{1,i} y_m(k+j-i) + \sum_{i=0}^{n_b} b_{1,i} x(k+j-d-i|k) + \\
\quad \sum_{i=0}^{n_c} c_{1,i} v(k+j-i|k) \quad j=1, 2, \dots, N \\
x(k+i|k) = \begin{cases} x(k-1), i \geq 0 \\ x(k+i), i < 0 \end{cases} \\
v(k+i|k) = \begin{cases} 0, i > 0 \\ v(k+i), i \leq 0 \end{cases} \\
y_m(k+i) = y(k+i), i \leq 0
\end{cases} \quad (11)$$

式中, n_a 、 n_b 、 n_c 分别是式(6)中多项式阶数, 本试验中 $n_a=3$, $n_b=4$, $n_c=1$ 。

$$b_{j,0} = b_{1,j-1} + \sum_{i=1}^{j_1} a_{1,i} b_{j-i,0} \quad (j=2, 3, \dots, N-d+1) \quad (12)$$

式中, $j_1 = \min(j-1, n_a)$; 当 $j-1 > n_b$ 时, $b_{1,j-1}=0$ 。

根据极小化目标函数(式(13), 式中参数均为标准定义, 这里不再赘述), 可得到预测控制增量量 ΔU 以及下一时刻输出的控制量(式(14)), 该焊接熔深系统控制器设计便是基于此原理进行算法语言实现的。

$$J = E\{(Y - Y_r)^T (Y - Y_r) + \Delta X^T \Gamma \Delta X\} \quad (13)$$

$$\begin{cases}
\Delta X = (G^T G + \Gamma)^{-1} G^T (Y_r - Y_m) \\
x(k) = x(k-1) + \Delta x(k) = x(k-1) + [1, 0, \dots, 0] \Delta X
\end{cases} \quad (14)$$

3 试验结果及讨论

3.1 焊接熔深自适应预测控制仿真

由于焊接过程中系统输出存在高频噪声, 试验中设计了一个低通滤波器, 如式(15)所示, 经尝试 $\alpha=0.8$ 时滤波效果较好。以设定值 $y^*=5$ V 为例, 进行了自适应预测控制算法仿真, 仿真过程的输出是在式(1)基础上外加一最大幅值限定的随机噪声信号, 系统输入则由自适应预测算法给出。仿真结果如图 3a 所示, 系统输出被控制在设定值附近波动, 说明该自适应预测控制器调节效果良好。图 3b 是系统仿真过程中线性模型残差项的系数(简称“残差系数”), 仿真开始时, 模型残差系数变化较大, 经过

(a) 系统输入输出

(b) 模型残差系数辨识结果

图3 $y^*=5$ V 时的算法仿真

一段时间自适应调节后, 该系数在一定范围内小

幅度波动,说明自适应辨识算法在系统输出控制中发挥了较大作用,同时也说明了该控制算法的可用性。

$$y_f(k) = \alpha y_f(k-1) + (1-\alpha)y(k) \quad (15)$$

为观察该自适应预测控制算法的实时性和阶跃试验时调节效果,在仿真过程中设计了改变系统输出设定值的阶跃仿真试验。当脉冲周期数达到 200 时,系统输出设定值从 5.8 V 阶跃到 4.8 V,系统仿真输入输出结果如图 4a 所示,系统输出能够被调节到设定值附近,调节效果良好,但从阶跃输出调节速度看,该控制系统调节速度较慢,调节时间为 3~4 s。图 4b 是仿真过程中模型残差系数辨识结果,仿真开始阶段模型残差系数较大,而随着仿真时间增加,其残差系数在小范围内波动,系统从波动较大状态过渡到较稳定状态的调节时间约为 6 s。图 4 中的系统输入在输出设定值发生阶跃前后较短时间内调节幅度较大,而在其他稳定输出设定值阶段调节幅度小,说明该熔深自适应预测控制系统具有较好的稳定性。

图 4 y^* 从 5.8 V 阶跃到 4.8 V 时的算法仿真

3.2 焊接熔深自适应预测控制试验

根据自适应预测控制算法,通过 GMAW-P 熔深控制系统试验平台(图 1)进行了不同系统输出设定值的熔深实时控制试验。图 5 是 $y^*=5.5$ V 时,

熔深控制系统在焊接过程中的输入输出调节结果和相应的模型残差系数辨识结果。从图 5a 中可以看出,在焊接开始阶段,系统输入 I_b 被控制在高水平 100 A 处,这是由于焊接起始阶段熔深小于预设值,控制系统为快速达到预设值而通过增大电流以增加热输入的方式来达到预设的输出;且在焊接后期,控制系统的输入随着熔深表征量 ΔU 的波动而相应地进行增加或减小;整体上看,该系统输出能够较快地达到相应的设定值并在设定值附近波动,该熔深控制系统调节性和鲁棒性较好。图 5b 说明了该熔深控制系统模型的参数是时变的,残差系数在有限范围内波动,有利于实时准确控制熔深。根据算法仿真和焊接试验结果可知,使用 Hammerstein 模型来描述 GMAW-P 焊接熔深控制系统是合理的。

图 5 $y^*=5.5$ V 时焊接熔深的控制

为研究该系统对不同熔深的控制效果,进行了两组不同输出设定值的自适应预测控制试验,如图 6 所示。系统的实际输出均被控制在设定值附近波动。系统输出设定为 5 V 时焊接熔深为 2.33 mm(图 6c);而系统输出设定为 6 V 时焊接熔深为 1.82 mm(图 6d);系统输出越小,熔深越大,这与焊接熔深越大,特征变量 ΔU 越小的规律是一致的^[2]。两组试验进一步证明了该自适应预测熔深控制系统的适应性和调节性能。

(a) $y^*=5$ V 时系统输入输出与焊缝宏观 (b) $y^*=6$ V 时系统输入输出与焊缝宏观 (c) $y^*=5$ V 时焊缝截面熔深 (d) $y^*=6$ V 时焊缝截面熔深

图 6 不同系统输出设定值下焊接熔深实时控制结果

为观察熔深控制系统的调节性能,进行了一组系统输出设定值 y^* 从 6.5 V 阶跃到 5 V 的试验,如图 7 所示。系统的输出调节在阶跃时调节较慢,试验结果与图 4 仿真结果一致,调节速度为 4 s 左右。

图 7 y^* 从 6.5 V 阶跃到 5 V 时的控制输出

3.3 焊接熔深控制系统变散热试验

为进一步验证基于 Hammerstein 模型的自适应预测控制算法的有效性,设计了变散热试验。试验中,板材采用 270 mm×50 mm×4 mm 的 Q235 钢板;采用 1 mm 间隙的对接接头形式;在对接接头的一块板材上开一个方形槽(图 8),使得焊接母材的散热条件变差;系统输出设定值为 5.5 V。试验结果如图 8 所示,在散热条件变差的情况下,系统输出 ΔU 经过一段时间的自适应控制调节之后,能够达到设定值并在预设输出附近波动,在散热条件变化时实现了熔深的控制。变散热试验结果证明了自适应预测控制算法的有效性。

图 8 $y^*=5.5$ V 时熔深控制系统变散热试验

4 结论

文中以脉冲峰值期间的电压变化幅值(ΔU)为反

映熔深的特征量,建立了以基值电流为输入、 ΔU 为输出的脉冲熔化极气体保护焊(GMAW-P)熔深控制系统,并通过系统建模、控制算法仿真和焊接实时验证来研究该系统的适用性和准确性,得到以下结论。

(1) 采用加入干扰的 Hammerstein 模型来描述 GMAW-P 熔深控制系统,其中静态非线性部分用多项式来表示,动态线性部分用受控自回归滑动平均模型来表示。该模型适应 GMAW-P 熔深控制系统的非线性并能描述系统动态。

(2) 在基于 Hammerstein 模型的经典预测控制算法基础上,采用带遗忘因子的递推增广最小二乘法对系统模型参数进行在线辨识,以增加系统的抗干扰性,实现自适应控制。

(3) 进行了不同 ΔU 设定值的 GMAW-P 熔深控制系统算法仿真和试验,结果显示基于 Hammerstein 模型的自适应预测控制算法具有良好的调节性能和适应性。阶跃试验和变散热试验也验证了该控制算法的有效性和适应性。

参 考 文 献

- [1] WANG Z J, ZHANG Y M, WU L. Measurement and estimation of weld pool surface depth and weld penetration in pulsed gas metal arc welding [J]. Weld. J., 2010, 89(6): 117s-126s.
- [2] 王志江. 脉冲熔化极气体保护焊接熔深自适应区间模型控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG Zhijiang. Adaptive interval model control for depth of weld penetration in pulsed gas metal arc welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [3] NAGARAJAN S, BANERJEE P, CHEN W, et al. Control of the welding process using infrared sensors [J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 1992, 8(1): 86-93.
- [4] BEARDSLEY H E, ZHANG Y M, KOVACEVIC R. Infrared sensing of full penetration state in gas tungsten arc welding [J]. Int. J. Mach. Tool. Manu., 1994, 34(8): 1079-1090.
- [5] 岳建锋, 李亮玉, 王天琪, 等. 基于正面焊接多信息融合的 GMAW 熔透控制[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 283-287.
YUE Jianfeng, LI Liangyu, WANG Tianqi, et al. Penetration control of GMAW based on multi-informational fusion from the front surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 283-287.
- [6] CARLSON N M, JOHNSON J A. Ultrasonic sensing of weld pool penetration [J]. Weld. J., 1988, 67(11): 239s-246s.
- [7] HARDT D E, KATZ J M. Ultrasonic measurement of weld penetration[J]. Weld. J., 1984, 63(9): 273s-281s.
- [8] 何德孚, 李克海. 焊接熔池的振荡和焊缝成形的自适应控制[J]. 焊管, 2000, 23(4): 22-28.
HE Defu, LI Kehai. Weld pool oscillation and adaptive control of weld geometry shape [J]. Welded Pipe and Tube, 2000, 23(4): 22-28.
- [9] RENWICK R J. Experimental investigation of GTA weld pool oscillations [J]. Weld. J., 1983, 62(2): 29s-35s.
- [10] 春兰, 韩永全, 陈芙蓉, 等. 变极性等离子弧焊接熔透信息的检测与分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 114-119.
CHUN Lan, HAN Yongquan, CHEN Furong, et al. Detection and analysis of weld pool oscillation information for variable polarity plasma arc welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 114-119.
- [11] 石玟, 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 Xiaojie, et al. Laser vision based detection and analysis of weld pool oscillation for pulsed GTAW [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 28-32.
- [12] 李春凯, 石玟, 顾玉芬, 等. 连续脉冲 GTAW 不同熔透状态熔池振荡频率特征及分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 44-50.
LI Chunkai, SHI Yu, GU Yufen, et al. Characteristic and analysis of weld pool oscillation frequency in different penetration status for continuous P-GTAW [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 44-50.
- [13] WANG H, KOVACEVIC R. Feasibility study of acoustic sensing for the welding pool mode in variable-polarity plasma arc welding [J]. P. I. Mech. Eng. B-J. Eng., 2002, 216(10): 1355-1366.
- [14] 石玟, 黄健康, 樊丁, 等. 电弧声信号与铝合金 MIG 焊缝塌陷的相关性[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 32-35.
SHI Yu, HUANG Jiankang, FAN Ding, et al. Relationship between arc sound and subsidence of weld bead in aluminum alloy MIG welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 32-35.
- [15] 刘立君, 兰虎, 郑红艳, 等. MIG 焊电弧声信号与熔透状态相关性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 79-84.
LIU Lijun, LAN Hu, ZHENG Hongyan, et al. Relationship between arc sound signal and penetration status in MIG welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 79-84.

- [16] ZHANG Y M , KOVACEVIC R. Neurofuzzy model-based predictive control of weld fusion zone geometry [J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst. , 1997 , 6(3) : 389-401.
- [17] ZHANG W , LIU Y , WANG X , et al. Characterization of three-dimensional weld pool surface in GTAW [J]. Weld. J. , 2012 , 91(7) : 195s-203s.
- [18] ZHANG G , YAN Z , WU L. Reconstructing a three-dimensional P-GMAW weld pool shape from a two-dimensional visual image[J]. Meas. Sci. Technol. , 2006 , 17(7) : 1877-1882.
- [19] 王志江, 张广军, 张裕明, 等. 非熔化极气体保护焊接熔池表面形貌三维传感及其装置设计[J]. 机械工程学报, 2008 , 44(10) : 300-303.
WANG Zhijiang , ZHANG Guangjun , ZHANG Yuming , et al. 3D sensing of gas tungsten arc weld pool surface and sensing device design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2008 , 44(10) : 300-303.
- [20] 张刚, 石玟, 黄健康, 等. 基于激光点阵的 TIG 焊熔池自由表面三维形貌测量方法[J]. 机械工程学报, 2014 , 50(24) : 10-16.
ZHANG Gang , SHI Yu , HUANG Jiankang , et al. Method to measure three dimensional specular surface of TIG weld pool based on dot-matrix laser pattern[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2014 , 50(24) : 10-16.
- [21] 武传松, 刘祖明, 陈姬. 受控脉冲穿孔等离子弧焊接小孔动态行为的检测[J]. 机械工程学报, 2013 , 49(18) : 114-118.
WU Chuansong , LIU Zuming , CHEN Ji. Measurement of dynamic keyhole behaviors in controlled-pulse plasma arc welding[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2013 , 49(18) : 114-118.
- [22] 樊丁, 顿小春, 张刚, 等. 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[J]. 机械工程学报, 2018 , 54(2) : 27-33.
FAN Ding , DUN Xiaochun , ZHANG Gang , et al. Detection and analysis of weld pool dynamic behavior and welder control information in GTAW[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2018 , 54(2) : 27-33.
- [23] 王其隆. 弧焊过程质量实时传感与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
WANG Qilong. Real-time sensing and control of arc welding process quality [M]. Beijing : China Machine Press , 2000.
- [24] XIAO Y H , OUDEN G D. Weld pool oscillation during GTA welding of mild steel[J]. Weld. J. , 1993 , 72(8) : 428s-434s.
- [25] WANG Z J , ZHANG Y M , WU L. Adaptive interval model control of weld pool surface in pulsed gas metal arc welding [J]. Automatica , 2012 , 48(1) : 233-238.
- [26] BAI P , WANG Z , HU S , et al. Sensing of the weld penetration at the beginning of pulsed gas metal arc welding[J]. J. Manuf. Process. , 2017 , 28 : 343-350.
- [27] NA X , ZHANG Y M , LIU Y S , et al. Nonlinear identification of laser welding process[J]. IEEE Trans. Contr. Syst. T. , 2010 , 18(4) : 927-934.

作者简介: 王万东, 男, 1994 年出生。主要研究方向为焊接熔透控制。
E-mail : wangwandong@tju.edu.cn
王志江(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为焊接新方法工艺、焊接过程传感及控制和焊接自动化。
E-mail : wangzj@tju.edu.cn