DOI: 10.3901/JME.2019.17.035

单电源双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊 智能控制研究*

朱明 颜步云 石珏 樊丁 张刚

(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: 提出单电源双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊方法,采用特定的连接方法独立控制通过焊丝与基材的电流;引用逆向求解算法;搭建用来描述焊接过程中参数变化的数学模型。由于熔化母材的焊接电流易在主路电流和其他焊接条件变化时产生波动,提出利用改变旁路送丝速度调节旁路焊丝的熔化电流,实现控制母材电流的控制方案并进行仿真与试验。试验结果表明:单焊接电源的双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊能够同时兼顾高熔敷率与基材低热输入的焊接;搭建的数学模型能够描述不同焊接参数的变化;利用提出的智能控制方案及算法,有效地解决了母材焊接电流易波动的问题,达到了焊接过程稳定性的控制,同时得到了成形良好的焊缝。

关键词: 智能控制;旁路耦合;单电源;熔化极气体保护焊

中图分类号: TG409

Intelligent Control of Consumable DE-GMAW by Single Power Supply

ZHU Ming YAN Buyun SHI Yu FAN Ding ZHANG Gang

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

Abstract: In order to simplify the equipment, a new type of consumable double-electrode gas metal arc welding (double-electrode gas metal arc welding, DE-GMAW) with single power supply is proposed. The welding current and the base metal current are controlled by a specific connection method independently. A new solving algorithm is put forward and a mathematical model describing the welding process is established. Aiming to the base metal current will be affected by the main current fluctuation or other conditions and cause weld defects, a closed-loop control scheme to adjust the bypass wire feeding speed is put forward. Fuzzy self-adaptive PID is used to simulate the experiment. Based on the simulation results, the intelligent control experiment is carried out based on the built xPC rapid prototyping platform. The experimental results show that high melting efficiency and low heat-input are acquired; arc voltage and welding current could image and directly describe by mathematical model; the base metal current can be controlled stably and a good weld performance is obtained.

Key words: intelligent control; bypass; single power supply; GMAW

0 前言

由于工业制造业的快速发展,机器人被大量地应用于工程机械结构件的制造生产过程中^[1-3]。目前,机器人本体发展已经基本可以满足不同工业生产领域对于精度、效率、无故障工作周期等参数的要求,但是机器人焊接的发展在高效化、自动化、

智能化等方面仍然面临着严峻的挑战^[4-5]。其中,提升高效化的主要措施体现在提高焊接熔敷效率方面,国内外研究人员常采用大电流熔化极气体保护焊,例如多丝、多弧的方法提高效率^[6-7]。但是在提高熔化焊丝电流的同时,也会显著增加流经母材的电流,容易造成焊缝热影响区过大、焊缝强度与韧性下降等问题^[8]。

为了兼顾高效率 and 低的焊接热输入,同时保证较高的焊接质量,双丝旁路耦合电弧焊方法应运而生,利用旁路电弧来分流流经基材金属的电流,可以达到对焊丝和基材热量的独立控制^[9-10]。目前,

* 国家自然科学基金(51805234)、甘肃省高校协同创新团队(2017C-07)和兰州理工大学红柳优秀青年扶持计划资助项目。20180925 收到初稿,20190307 收到修改稿

双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊的相关论文主要集中在多个焊接电源的协同控制、耦合电弧特性、焊接过程稳定性等方面^[11-12]，虽然取得了一定的进展，但也存在多台焊机协同控制复杂、焊接参数匹配窗口较小并且需要多元化调节的问题。

为此，提出了单电源双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊方法，通过特定的接法，利用一台平特性焊接电源达到熔化焊丝与基材电流独立分配的目的，既简化了生产设备又实现了高熔敷率、低热输入的焊接。为了分析耦合电弧的调节特性与电流分配形式，预测参数调节对焊接过程的影响，首先建立能够描述焊接过程的电弧系统模型并进行了焊接过程控制方案，并设计快速原型试验系统进行焊接过程控制试验。

1 原理

如图 1 所示：主焊枪连接到电源正极，旁路焊枪和基材分别连接到电源的负极；主路电弧在主路焊丝与基材之间燃烧；在旁路焊丝和主路电弧弧柱区形成熔化旁路焊丝的旁路电弧，在旁路焊丝熔化的同时分流一部分电流流入基材。以这种方式，令通过焊丝的电流较大，可以提供较大的熔敷率，并且流过基材的电流小，这样就减小了基材的热输入^[6]。

图 1 原理示意图

2 焊接过程建模

2.1 耦合电弧负载方程

为了对焊接过程中电弧的物理行为进行详尽的数学描述，首先将如图 2a 所示的实际耦合电弧形态进行近似简化及坐标化，如图 2b 所示：A 点设为旁路焊枪终端，B 点设为旁路焊丝的终端，从而将 AB 简化为旁路焊丝伸出长度；C 点设为主路焊枪的终端，D 点设为主路焊丝的终端，从而将 CD 简化为

主路焊丝伸出长度。O 点为主、旁路电流分流点，主路电流 I_m 、旁路电流 I_{bp} 和基材电流 I_{bm} 分别流经 DO、OB、OE(等效后的主路电弧、旁路电弧、熔化基材电弧)，其中 A、B、C、D、O、E 点坐标分别设为 $(x_a, y_a)(x_b, y_b)(x_c, y_c)(x_d, y_d)(x_o, y_o)(0,0)$ ，求解主路弧长 DO、旁路弧长 OB 和熔化基材的弧长 OE。

(a) 耦合电弧形态

(b) 等效电流路径简化示意图

图 2 电流分配示意图

如图 2b 所示，在母材上选取一点 E 为参考点，通过联立三段电弧在 O 点电势的方程，搭建了耦合电弧的负载方程。

$$U_o = U_m - U_{CD} - U_D - U_{DO} =$$

$$U_m - R_0 L_{CD} I_m - U_D - (R_a I_m + O_A L_{DO}) \quad (1)$$

式中， U_o 为主路电弧 O 点的电位， U_m 为主路电弧电压， U_{CD} 为主路焊丝伸出长度压降， R_0 为焊丝电阻， L_{CD} 为焊丝长度， I_m 为主路电流， U_D 为 D 点阳极压降， R_a 为阳极区等效电阻， O_A 为弧柱电位梯度， L_{DO} 为主路电弧 DO 的长度。

$$U_o = (R_a I_{bp} + O_a L_{OB}) + U_B + R_0 L_{CD} I_{bp} \quad (2)$$

式中， U_o 为旁路电弧 O 点的电位， $R_a I_{bp} + O_a L_{OB}$ 为 OB 段旁路弧柱区的压降， I_{bp} 为旁路电流， L_{OB} 为 OB 段弧长； U_B 为 B 点阴极压降； $R_0 L_{CD} I_{bp}$ 为主路焊丝 CD 段压降， L_{BA} 为旁路焊丝伸出长度， I_{bp} 为旁路电流。

$$U_o = (R_a I_{bm} + O_a L_{OE}) + U_E \quad (3)$$

式中， U_o 是熔化基材的电弧 O 点的电位 $R_a I_{bm} + O_a L_{OE}$ 是 OE 部分熔化基材的电弧弧柱区域的压降，

I_{bm} 是旁路电流, L_{OE} 是 OE 段弧长; U_E 为 E 点阴极压降。

2.2 焊丝送进与熔化方程

由于采用了特定的接法,导致旁路为直流正接,所以焊丝熔化时阴极产热要高于阳极产热。当计算旁路焊丝熔化速度时,由于直流正接的熔化效率要比直流反接的熔化效率多出 30% 到 40%, 所以熔化因数的值设为 1.35。

$$\begin{cases} V_{mm} = C_1 I_m + C_2 L_m (I_m)^2 \\ V_{mbp} = 1.35 (C_1 I_{bp} + C_2 L_{bp} (I_{bp})^2) \end{cases} \quad (4)$$

式中,主路焊丝熔化速度 V_{mm} , 电弧热和电阻热对熔化速度的体积影响系数为: C_1 、 C_2 , 主路电弧长度 L_m , 主路电流 I_m , 旁路焊丝熔化速度 V_{mbp} , 旁路电弧长度 L_{bp} , 旁路电流 I_{bp} 。

在焊接过程中,有关主、旁路焊丝伸出长度的相应改变量可描述为

$$\begin{cases} \frac{dL_{mw}}{dt} = v_{mf} - v_{mm} \\ \frac{dL_{bpw}}{dt} = v_{bpf} - v_{bpm} \end{cases} \quad (5)$$

式中, L_{mw} 是主路焊丝伸出长度, v_{mf} 是主路焊丝的送丝速度, v_{mm} 是主路焊丝的熔化速度, L_{bpw} 是旁路焊丝的伸出长度, v_{bpf} 是旁路焊丝的送丝速度, v_{bpm} 是旁路焊丝的熔化速度。

2.3 数值计算流程

联立式(1)~(5)建立了焊接过程的物理模型。根据逆向求解法,先利用熔化方程求解第一个初始步长过程中的主、旁路弧长,利用主、旁路的短路电流分别计算弧长,逆向求解符合此弧长条件下的主、旁路电流,同时代入下一步长循环计算。计算流程如图 3 所示。

3 智能控制仿真及试验分析

3.1 焊接过程仿真模拟

根据上面建立的数学模型,将焊接过程的模拟试验放在 Matlab/Simulink 里进行。并对仿真结果进行分析。仿真结果如图 4 所示,该模型可以实时动态反映主、旁路弧长,主路、旁路、母材电流的变化情况,与实际焊接过程基本一致。

3.2 控制方案设计与仿真

在单电源双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊工艺试验中,焊接条件的突然变化会引起主路电流的波动,从而引起母材电流变化,最终带来母材热

图 3 模型的计算流程

(a) 弧长变化仿真结果

(b) 主路电流变化仿真结果

焊接过程控制试验材料选用 Q235 低碳钢板, 工件厚度在中间部分变大, 随后恢复。保护气体为 80%Ar+20%CO₂。气体流量分别为: 主路 8 L/min, 旁路 5 L/min; 两路焊丝都使用牌号为 ER50, 直径为 1.6 mm 的碳钢焊丝, 焊接方式为平板堆焊, 焊速为 1 m/min。

如图 8a 所示, 根据平特性电源的特性, 当不进行闭环控制时, 待焊工件厚度在 2 s 时由 6 mm 增加到 10 mm, 主路电流随之增加; 母材电流也随之增加。在闭环控制之后, 如图 8b 所示, 当母材电流发生变化时, 图 8c 中的旁路送丝速度也相应变化, 利用改变旁路送丝速度来改变旁路电流的方法, 消除了基材电流的变化, 令流经基材的焊接电流保持稳定, 同时如图 8d 所示焊接成形质量明显提升。

(a) 不控时的焊接电流信号

(b) 控制后的焊接电流信号

(c) 旁路送丝速度控制信号

(d) 焊缝成形

图 8 控制试验

4 结论

(1) 提出单电源双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊方法; 基于耦合电弧模型设计了能够描述焊接过程的数学模型。

(2) 提出通过控制旁路送丝速度, 改变旁路焊丝的熔化速度、改变旁路电流, 控制熔化母材电流的控制方案并进行了仿真与焊接试验。试验结果表明此方案能够实现母材电流的稳定控制, 焊缝成形良好。

参 考 文 献

- [1] 陈善本, 吕娜. 焊接智能化与智能化焊接机器人技术研究进展[J]. 电焊机, 2013, 43(5): 28-36.
CHEN Shanben, LÜ Na. Research evolution on intelligentized welding and robotic welding technologies [J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(5): 28-36.
- [2] 吕学勤, 张轲, 吴毅雄. 轮式移动焊接机器人输出反馈线性化控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 48-54.
LÜ Xueqin, ZHANG Wei, WU Yixiong. Output feedback linearization control of wheeled mobile welding robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(6): 48-54.
- [3] 李晓延, 武传松, 李午申. 中国焊接制造领域学科发展研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 19-31.
LI Xiaoyan, WU Chuansong, LI Wushen. Research on disciplinary development in China's welding manufacturing industry[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 19-31.
- [4] 张轲, 吴毅雄, 吕学勤. 差速驱动式移动焊接机器人动力学建模[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 116-120.
ZHANG Wei, WU Yixiong, LÜ Xueqin. Dynamic modeling of differential driven mobile welding robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 116-120.
- [5] 谭谊诚, 薛龙, 黄继强, 等. 轮式水下焊接机器人及其运动学分析[J]. 上海交通大学学报, 2016, 12(50): 1857-1860.

- TAN Yicheng, XUE Long, HUANG Jiqiang, et al. Wheeled underwater welding robot and its kinematics analysis[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 12(50): 1857-1860.
- [6] 林尚杨, 关桥. 我国制造业中焊接生产现状与发展战略研究[J]. 热加工, 2004(5): 10-15.
- LIN Shangyang, GUAN Qiao. Research on current status and development strategy of welding production in China's manufacturing industry[J]. Thermal Processing, 2004(5): 10-15.
- [7] FANG Chenfu, MENG Xiaohui, HU Qingxian. TANDEM and GMAW twin wire welding of Q690 steel used in hydraulic support[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2012, 19(5): 79-85.
- [8] 殷树言. 高效弧焊技术的研究进展[J]. 焊接, 2006(10): 7-14.
- YIN Shuyan. Research progress of high efficiency arc welding technology[J]. Welding, 2006(10): 7-14.
- [9] ZHANG Yuming. Double electrodes improve GMAW heat input control[J]. Welding Journal, 2004, 83(11): 39-41.
- [10] LI Kehai, CHEN Jinsong, ZHANG Yuming. Double-electrode GMAW process and control[J]. Welding Journal, 2007, 86(7): 231-237.
- [11] ZHU Ming, LI Chunkai, ZHANG Gang, et al. Modeling and control of consumable DE-GMAW process[J]. Manufacturing Processes, 2016, 24: 293-297.
- [12] 朱明, 石玕, 黄健康, 等. 双丝旁路耦合电弧高效熔化极气体保护焊过程模拟及控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 45-49.
- ZHU Ming, SHI Yu, HUANG Jiankang, et al. Simulation and control of high-efficiency gas metal arc welding process with double-wire bypass coupled arc[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 45-49.

作者简介: 朱明, 男, 1984 年出生, 博士, 副研究员。主要从事先进焊接方法及自动化方面的科研与教学工作。
E-mail: zhumings@yeah.net