文章编号:1006-2467(2015)03-0293-04

DOI: 10.16183/j. cnki. jsjtu. 2015.03.001

单电源双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊工艺

石 玗, 周 海, 朱 明, 王桂龙

(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:针对常规双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊(GMAW)的控制过程较复杂、焊接成本较高等问题,提出了采用单电源实现双丝旁路耦合电弧 GMAW 的方法,并设计了采用快速原型技术 的实验系统.同时,进行了大量焊接工艺实验.实验结果表明:采用单电源的双丝旁路耦合电弧 GMAW 可以稳定焊接,但相对于双电源的双丝旁路耦合电弧 GMAW 其稳定工作区间更窄;通过 调节旁路送丝速度快慢的焊接工艺实验,分别找到了在主路电流为 300、350、400、450、500、550A 时旁路送丝速度的稳定工艺区间.

关键词:单电源;双丝;旁路耦合电弧焊;熔滴过渡 中图分类号:TG 409 文献标志码:A

Welding Process of Consumable Double-Electrode GMAW with Single Power Supply

SHI Yu, ZHOU Hai, ZHU Ming, WANG Gui-long

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

Abstract: To decrease the welding costs, an innovation was proposed to realize a stable consumable doubleelectrode gas metal arc welding process with single power supply. Based on the xPC target system with real-time target environment, welding experiments were conducted. The results show that a stable welding process was realized; the stable welding parameter of bypass wire feed speed were also acquired when the main welding current was 300,350,400,450,500 or 550A.

Key words: single power supply; double-electrode; gas metal arc welding; metal transfer

高效、优质、低耗是当前制造业对焊接技术提出 的迫切要求,也是焊接技术发展的方向^[1].企业为了 提高其市场竞争力,都在致力于提高生产效率,降 低产品的生产成本^[2].因此,如何进一步提高生产效 率,成为当前焊接工作者研究的热点问题^[3].国内外 相关的研究人员已提出了多种新型双丝高效 MIG/ MAG(Metal-Inert Gas Welding/Metal Active-Gas Welding)方法,如 Tandem、Twins 焊接方法等,并 在一些产品中得到了成功应用^[4].然而,Tandem、 Twins 等都是焊丝与母材同电流的焊接方法,随着 焊接电流的增大,以上焊接方法的母材热输入也越 来越大,引起焊缝晶粒粗大,造成母材韧性的下降和 残余应力的提高.

针对母材电流增大这一问题,美国肯塔基大学 提出了双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊(Gas

收稿日期:2014-07-03

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)前期研究专项项目(2014CB6608107),国家自然科学基金项目(51305189),陇原青年创新人 才扶持计划项目,甘肃省自然科学基金项目(145RJZA119),兰州理工大学红柳杰出青年项目(J201201)资助

作者简介:石 玗(1973-),男,甘肃省兰州市人,教授,博士生导师,主要从事焊接物理、先进焊接方法、焊接自动化与焊接数值模拟等方面 的研究.电话(Tel.): 0931-2976682;E-mail: shiyu@lut.cn. Metal Arc Welding, GMAW)方法,可以同时实现 高焊丝熔化率和低母材热输入的焊接^[5-7].近年来, 国内外学者就双丝旁路耦合电弧 GMAW 方法展开 了大量的研究,文献[8]中理论分析了该方法适用于 高效焊接,并建立了双丝旁路耦合电弧 GMAW 的 动态数学模型.文献[9]中提出了通过旁路送丝速度 控制旁路弧长从而保证焊接过程稳定性、通过控制 旁路电流调节流经母材电流的双变量解耦控制方案 并进行了模拟与分析,证明可以通过控制旁路送丝 来实现对母材热输入的控制,从而达到高效率、高质 量、低热输入可控的焊接.

以上双丝旁路耦合电弧 GMAW 过程均采用两 个电源供电,分别为主路电源和旁路电源,这样的多 电源供电系统导致其控制过程较复杂、焊接成本较 高.为了简化控制过程、降低焊接成本,本文采用单 电源双丝旁路耦合电弧 GMAW 方法,并对其焊接 工艺进行了研究.

1 实验原理及系统

1.1 实验原理

单电源的双丝旁路耦合电弧 GMAW 原理如图 1 所示. 焊接系统中,主路焊炬与旁路焊炬接在同一 个焊接电源上. 主路焊丝接电源正极,旁路焊丝接电 源负极. 焊接过程中熔化主路焊丝的电流在电弧弧 柱区分为两部分:一部分为流经母材的电流 *I*_{bm};另 一部分为旁路电流 *I*_{bp},主路电流为 *I*_{main},并且 *I*_{bm} = *I*_{main} - *I*_{bp},使得用于熔化焊丝的电流较高,有利于提 高焊丝的熔敷率. 而通过旁路焊炬分流了一部分流 入母材的焊接电流,用来熔化旁路焊丝,这样在保证 了熔敷率的同时,还减小了母材的热输入.



图 1 单电源的双丝旁路耦合电弧 GMAW 原理

- Fig. 1 Schematic diagram of single power supply of consumable DE-GMAW
- 1.2 实验系统

通过单电源实现双丝旁路耦合电弧 GMAW, 需要有电源供电,即需要选用恒压源或恒流源来供 电.选用恒流特性电源时,虽然焊接电流稳定,但是 主、旁路弧长都需要对送丝速度控制来保证焊接过 程的稳定性,控制过程比较复杂;采用恒压源,由于 其电弧自调节特性不需要对其送丝速度进行控制, 简化了控制过程,因此文中选用平特性电源进行双 丝旁路耦合电弧 GMAW 的工艺实验.

同时,采用快速原型技术,开发了如图 2 所示的 单电源下双丝旁路耦合电弧 GMAW 实验系统.整 个系统的硬件主要包括一台数字化恒压焊机、单轴 焊接工作台、西门子变频器控制行走小车,两台工控 机分别用于控制工作台和显示电信号,高速摄像采 集系统采集熔滴过渡行为,研华 ADAM-3014 标准 电压隔离模块以及霍尔电流传感器 CSM500FA/ 100 mA 用于实时采集电流信号.



图 2 单电源双丝旁路耦合电弧 GMAW 实验平台 Fig. 2 Test platform of single power supply of consumable DE-GMAW

2 实验结果及分析

2.1 实验

采用已建立的快速原型实验系统,进行了单电 源双丝旁路耦合电弧 GMAW 的实验.实验材料为 8 mm 厚的 Q235 低碳钢板,主路保护气体为纯氩 气,气体流量 15 L/min;旁路保护气体为 80%Ar+ 20% CO₂ 混合气体,气体流量 15 L/min;使用直径 为 1.6 mm,牌号为 LHER50-6 的碳钢焊丝;旁路送 丝速度为 8.5 m/min,焊接速度为1.0 m/min,焊接 方式为平板堆焊.采集到的焊接电信号结果如图 3(a)所示,从图中可以看出,电流信号相对比较稳 定,焊缝形貌如图 3(b)所示,从图中可以看出焊缝 成形良好,焊接过程比较稳定.因此,采用单电源的 双丝旁路耦合电弧 GMAW 可以实现稳定焊接.

然而,焊接过程中主路电弧燃烧时,旁路电弧不 稳定将导致耦合电弧波动,因此旁路送丝速度的匹 配会对单电源下的双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 过程产生很大的影响.



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 2

(b)焊缝形貌
 图 3 双丝旁路耦合电弧 GMAW 的焊接工艺实验
 Fig. 3 Welding experiments of consumable
 DE-GMAW

2.2 不同送丝速度下的焊接工艺实验

单电源供电时,满足双丝旁路耦合电弧 GMAW稳定条件匹配更为严格,同时满足主路、旁 路熔化速度与送丝速度的稳定工作区间变窄.为了 得到单电源供电时的双丝旁路耦合电弧 GMAW的 稳定焊接区间,设计了在不同的主路电流下逐渐增 加旁路送丝速度的焊接实验.主路电流设定在约 350 A,保证其他焊接参数不变,只改变旁路送丝速 度,通过高速摄像系统采集到的焊接过程图像及快 速原型信号采集系统采集到的电流电压信号可知旁 路送丝速度匹配关系有 3 种.

2.2.1 旁路送丝慢 如图 4 所示,当旁路焊丝由于 无法及时送进,旁路电弧会逐步拉长直至熄灭.从图 4(a)中的耦合电弧照片可以发现旁路电弧有明显的 熄弧状态;图 4(b)中采集到的电流、电压信号也并 不稳定;同时图 4(c)中的焊缝成形较差,而且飞溅 较大.

2.2.2 旁路送丝匹配 如图 5 所示,焊接过程电 弧比较稳定,熔滴过渡方式为射流过渡,比较稳定, 所采集到的电信号也比较稳定,焊缝成形良好.

2.2.3 旁路送丝快 如图 6(a) 所示,焊丝送丝速 度过快,旁路焊丝直接插入熔池中燃烧,对耦合电弧 的稳定性带来较大的影响;同时图 6(b)中的电流信 号波动较大;图 6(c)中的焊缝成形也较差.

2.2.4 工艺匹配范围 在旁路送丝速度与主路电 流匹配的范围内,分别以主路电流为 300、350、400、 450、500、550 A 时,通过改变旁路送丝速度进行了 大量焊接实验,得到不同主路电流下稳定的旁路送







(c) 焊缝形貌图 4 旁路送丝速度慢时的焊接工艺实验Fig. 4 Slower bypass wire feed speed of welding process





(c)焊缝形貌
 图 5 旁路送丝速度匹配时的焊接工艺实验
 Fig. 5 Matching bypass wire feed speed of welding process



(a) 熔滴过渡图像



(b) **电流**



(c) 焊缝形貌

图 6 旁路送丝速度快时的焊接工艺实验

Fig. 6 Faster bypass wire feed speed of welding process

丝速度的匹配范围的实验结果. 对实验结果进行统计分析,得到单电源下的双丝旁路耦合电弧 GMAW的稳定工作区间,如表1所示.

- 表 1 单电源实现双丝旁路耦合电弧 GMAW 的 工艺实验结果
- Tab. 1 Results of DE-GMAW process with single power supply

主路电流/A	旁路电流/A	旁路送丝匹配范围 $/(m \cdot min^{-1})$
300	$135\!\sim\!220$	2.9~4.2
350	$160\!\sim\!240$	4.1~7.0
400	$220\!\sim\!290$	6.8~11.2
450	$230 \sim 300$	7.2~14.0
500	$250 \sim 320$	7.8~14.5
550	$280 \sim 340$	8.5~15.0

3 结 论

(1)针对常规的双丝旁路耦合电弧 GMAW 的 控制系统复杂、设备成本较高等不足,提出了采用单 电源实现双丝旁路耦合电弧 GMAW 的方法并设计 了相应的实验系统.

(2) 实验证明,采用单电源的双丝旁路耦合电 弧 GMAW 可以稳定焊接,但相对于双电源的双丝

旁路耦合电弧 GMAW 其稳定工作区间更窄.

(3)通过大量的焊接工艺实验,分析了不同旁 路送丝速度对单电源双丝旁路耦合电弧 GMAW 过 程稳定性的影响,同时,得到了主路电流为 300、 350、400、450、500、550 A 时稳定焊接的工艺范围.

参考文献:

- [1] 石玗,李妍,黄健康,等. 高效 MIG/MAG 焊的研究与 发展[J]. 电焊机,2008,38(12):6-10.
 SHI Yu,LI Yan, HUANG Jian-kang, *et al.* Research and development of high-effective MIG/MAG welding [J]. Electric Welding Machine,2008,38(12):6-10.
- [2] 冯雷,陈树君,殷树言. 高速焊接时焊缝咬边的形成机 理[J]. 焊接学报,1999,20(1):16-20.
 FENG Lei, CHEN Shu-jun, YIN Shu-yan. Mechanism of undercut phenomenon in high speed welding
 [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999,20(1):16-20.
- [3] Li Ke-hai. Double-electrode gas metal arc welding: the process, sensing, modeling and control[D]. Lexing-ton: University of Kentucky, 2007.
- [4] 殷树言. 高效弧焊技术的研究进展[J]. 焊接,2006 (10): 7-14.
 YIN Shu-yan. Research advance of high effective arc welding technique [J]. Welding & Joining, 2006(10): 7-14.
- [5] Zhang Y M, Jiang M, Lu W. Double electrodes improve GMAW heat input control [J]. Welding Journal, 2004, 83(11): 39-41.
- [6] Li Ke-hai, Wu Chuan-song. Mechanism of metal transfer in DE-GMAW[J]. Journal of Material Science and Technology, 2009, 25(3):415-418.
- [7] 高忠林,胡绳荪,殷凤良,等. GMAW 电弧电流与弧 长的滑模变结构控制仿真[J]. 焊接学报,2007,28
 (6):53-56.

GAO Zhong-lin, HU Sheng-sun, YIN Feng-liang, *et al.* Simulation of feedback linearization and slide mode control in GMAW systems [J]. **Transactions of the China Welding Institution**,2007,28(6):53-56.

- [8] 石玗,朱明,黄健康,等. 双丝旁路耦合电弧 MIG 焊方 法及控制系统[J]. 焊接学报,2012,33(3):17-20.
 SHI Yu,ZHU Ming,HUANG Jian-kang, et al. Study on control system for high efficiency double-electrode MIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution,2012,33(3):17-20.
- [9] 朱明,石玗,樊丁,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, FAN Ding, *et al.* Simulation and control of consumable DE-GMAW process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 45-49.