

# 采用单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 方法的“碳钢-不锈钢”堆焊接头微观组织测试与分析

王超<sup>1,2</sup>, 朱明<sup>1</sup>, 王雪宙<sup>1</sup>, 石玕<sup>1</sup>

(1. 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, 甘肃 兰州 730050; 2. 天华化工机械及自动化研究设计院有限公司, 甘肃 兰州 730060)

**摘要:**双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 采用特定的接法, 通过旁路电弧的分流作用可以实现高效、低热输入、低稀释率的焊接过程。采用该方法在 Q235 碳钢表面堆焊了耐磨、耐蚀的 316L 不锈钢材料, 同时检测分析了不同焊接参数下的异种钢堆焊接头微观组织形貌, 分析了旁路电流的变化对接头界面处碳元素迁移与焊缝合金元素稀释的影响。结果表明: 随着旁路电流的增加, 对接头焊接质量影响较大的界面处碳迁移层厚度明显减小, 焊缝中合金元素稀释的过渡区域宽度也显著降低。

**关键词:**双丝; 电弧; 堆焊

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.15.050

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2016)15-0180-03

## Study on Overlay Welding of Dissimilar Steel by Consumable Double Electrode Gas Metal Arc Welding Method with One Power Supply

WANG Chao<sup>1,2</sup>, ZHU Ming<sup>1</sup>, WANG Xuezhou<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Tianhua Institute of Chemical Machinery and Automation, Lanzhou 730060, China)

**Abstract:** Consumable double electrode gas metal arc welding with one power supply is a novel and high effective welding process, which has low heat input and low dilution rate characteristics. In order to study how to improve the quality of dissimilar steel welded joints, the overlay welding experiments of Q235 low carbon steel and 316L stainless steel were carried out by using Consumable DE-GMAW overlay welding method. In addition, influences of different welding parameters on heat input and dilution rate of base metal were analyzed and the microstructure of dissimilar steel welded joints was also studied. The results show that the heat input and dilution rate of base metal is reduced when the bypass current is increased, and the diffuse-on behavior of carbon and the dilution rate of base metal are also reduced.

**Key words:** consumable double electrode; arc; overlay welding

随着各类制造业对材料的性能提出了更高的要求, 例如在硬度、强度、耐磨性、耐蚀性、高温持久性等方面, 为满足不同的使用环境与许用要求, “不锈钢-碳钢”的异种钢复合结构件在电力工业、石油化工、船舶制造及其他的一些领域得到了大量应用<sup>[1-3]</sup>。但是由于不锈钢与碳钢物理、化学性能存在一定差异, 其接头往往存在焊缝合金元素的稀释与马氏体过渡层的形成、焊缝中碳元素的迁移等问题, 直接

影响了接头的焊接质量与服役寿命<sup>[4-5]</sup>。因此, 需要进一步分析焊接工艺与微观组织性能的关系。

现有研究表明, 对于不锈钢与碳钢接头中合金元素 Ni、Cr 的稀释产生脆性马氏体过渡层以及碳元素的迁移引起焊接质量下降的问题, 可以通过降低母材的稀释率、控制合理的熔合比来降低合金元素的稀释, 从而减小脆性马氏体过渡层的厚度, 提高焊接质量<sup>[6-7]</sup>。

为了实现高效、优质、低成本的不锈钢与碳钢间的异种钢表面堆焊, 本文采用双丝旁路耦合电弧 GMAW (Gas Metal Arc Welding) 的方法进行了异种钢堆焊试验, 针对接头界面处焊缝中碳元素迁移等问题, 通过微观组织测试, 分析了脆性马氏体过渡层的厚度与合金元素稀释率随焊接热输入的变化。

收稿日期: 2015-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51165023); 重点实验室开放基金项目(SKLAB02015008)

作者简介: 王超(1983-), 男, 河北藁城人, 工程师, 学士, 主要从事化工焊接装备方面的研究; 电话: 13919836625;

E-mail: w0825c@163.com

# 1 单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 原理

单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 是对常规双丝旁路耦合电弧高效 GMAW<sup>[8-10]</sup>的改进。该方法采用了一台平特性焊接电源与两把 GMAW 焊枪,通过特定的接法,可以稳定实现焊接过程,其原理如图 1 所示,焊机正极与主路送丝机连接,焊机负极分别与旁路送丝机、母材连接;同时将两个 GMAW 焊枪相组合,使得熔化主路焊丝的焊接电流  $I_m$  在电弧弧柱区分为两部分:一部分是熔化旁路焊丝的旁路电流  $I_{bp}$ ,另一部分是加热母材的电流  $I_{bm}$ ,且  $I_{bm}=I_m-I_{bp}$ ,从而使得用于熔化焊丝的电较高,有利于提高焊丝的熔敷率。该方法具有焊接效率高、稀释率低、可以通过旁路电弧的分流作用合理分配流经母材的热输入等优点,同时由于仅采用了一个焊接电源,可以显著降低焊接成本,同时减少了多个焊接设备间的同步与配套问题。

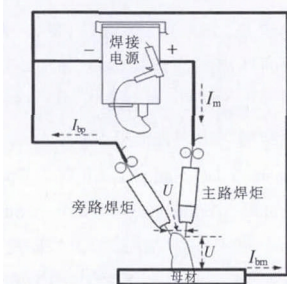


图 1 单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 原理图

Fig.1 Principle of consumable DE-GMAW with one power supply

## 2 不同旁路电流堆焊接头微观组织的测试与分析

### 2.1 焊缝熔合线附近的碳迁移行为的分析

图 2、3 是利用表 1 中焊接参数得到的焊缝熔合线附近的金相组织。其中,图 2 为采用常规 GMAW 方法(旁路电流 0 A)得到的堆焊接头在熔合线附近的显微组织,而图 3 是采用双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 方法(旁路电流 250 A)得到的堆焊接头在熔

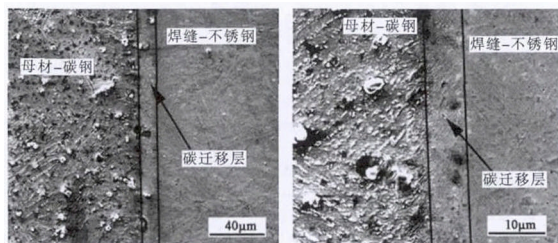


图 2 常规 GMAW 焊缝熔合线附近的金相组织  
Fig.2 The microstructure near the fusion line made by conventional GMAW process

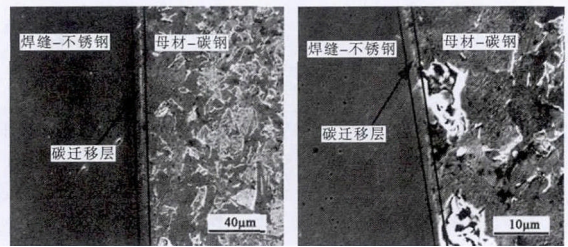


图 3 双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 焊缝熔合线附近金相组织

Fig.3 The microstructure near the fusion line made by consumable DE-GMAW process

表 1 单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 试验参数  
Tab.1 Parameters of the experiment on consumable DE-GMAW

	主、旁路		主路	旁路
焊丝直径	1.6 mm	气流量	10 L/min	8 L/min
焊丝牌号	ER316L	焊接速度	1 m/min	1 m/min
母材材料	Q235	送丝速度	15 m/min	8.5 m/min
母材厚度	6 mm	焊接电压	36 V	36 V
保护气体	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	焊接电流	400 A	0A/150A/250A

合线附近的显微组织;图 2、3 中位于黑线之间的白色区域为碳迁移过程中形成的脱碳层。

分析图 2 与图 3 中的脱碳层厚度可以发现,采用双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 方法获得的异种钢堆焊接头脱碳层厚度较薄,碳元素迁移的问题得到明显缓解。其原因在于双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 具有通过旁路电弧的分流作用,降低了母材的热输入。

### 2.2 焊缝中合金元素的稀释

利用表 1 中的焊接参数,对采用常规 GMAW 方法(旁路电流为 0 A)获得的异种钢堆焊接头进行了线扫描分析,结果如图 4 所示。从图 4 中可以发现,在扫描区域 15 μm 附近,焊缝中开始出现 Cr、Ni 元素,在过渡区域 15 μm 至 32 μm 范围内(约 17 μm 宽),Cr、Ni 元素的含量逐步上升。然而,由于焊缝中金属元素被母材所稀释,在此范围内,组织中 Ni 元素的含量相对较少,这就导致焊缝中出现珠光体、奥氏体、马氏体共存的组织,其中脆性相马氏体成分过多,这就直接影响了接头的质量。

同时,对采用单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 方法(旁路电流 250 A 时)获得的异种钢堆焊接头也进行了线扫描分析,结果如图 5 所示。从图 5 中可以发现,Cr、Ni 合金元素的过渡区域变窄(从 20 μm 至 28 μm),约 8 μm 宽;与图 4 中 17 μm 的宽度相比,合金元素过渡区域有明显的降低。

通过对采用单电源双丝旁路耦合电弧高效

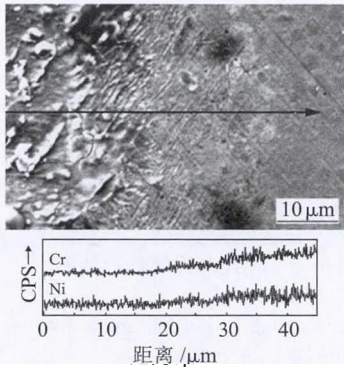


图4 常规 GMAW 焊缝的线扫描分析  
Fig.4 The linear scanning analysis of weld made by conventional GMAW process

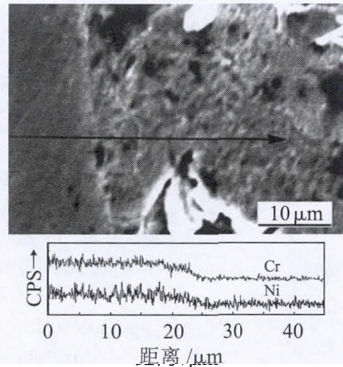


图5 单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 焊缝的线扫描分析  
Fig.5 The linear scanning analysis of weld made in consumable DE-GMAW process with one power

GMAW 方法以及常规 GMAW 方法得到的焊缝显微组织对比分析, 可以得出采用双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 方法进行不锈钢与碳钢等异种钢的堆焊, 可以减少脆性马氏体过渡层的形成与合金元素稀释, 进而提高焊接质量。

### 3 结论

采用单电源的双丝旁路耦合电弧 GMAW 方法进行了 Q235 碳钢与 316L 不锈钢堆焊试验, 通过对异种钢接头微观组织的分析, 发现由于单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 热输入较低, 可以减缓碳元素的扩散行为, 碳迁移层厚度明显降低; 同时, 由于较低的稀释率, 焊缝中的合金元素稀释的问题得到了明显的缓解。

(上接第 179 页)电弧压力, 如表 2 所示。从数据来看, 有效电流相同的情况下, 其它条件一样, 脉冲情况下, 等离子电弧压力相对较小。

表 2 脉冲与直流对比数据

Tab.2 The experimental data of DC and Pulse

脉冲有效电流 /A	95	111	125	138
脉冲电弧压力 /Pa	260	300	360	440
直流电弧压力 /Pa	411	522	644	777

### 4 结论

(1) 在等离子增材再制造中, 不同工艺参数对电弧压力是有影响的, 其中, 电流的影响尤其显著。

(2) 直流条件下, 电流的增大, 喷嘴孔径的减小, 送气流量的增大都会使得电弧压力升高。其中送气流量对电弧压力的影响趋势由快变慢。

(3) 脉冲条件下, 随着占空比的增大, 电弧压力

### 参考文献:

- [1] 黄本生, 黄龙鹏, 李慧. 异种金属焊接研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2011, 25(12): 118-121.
- [2] 李海斌, 黄庆学, 周存龙, 等. 热轧碳钢/不锈钢复合板结合界面碳钢的组织演变 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(4): 57-61.
- [3] Jung Ho Park, To Hoon Kim. Tailored blank welding between low carbon steel sheet and STS 304 stainless steel sheet by CO<sub>2</sub> laser Beam [J]. Metals Mater, 1999, 5(1): 55-62.
- [4] 杜兵, 李彦, 贾玉力. 异种钢接头融合区的脆化与断裂行为[J]. 焊接学报, 1998, 19(1): 24-28.
- [5] 张昌青, 王希靖, 李博强, 等. 大端面铝与钢的摩擦焊焊缝组织及性能 [J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(6): 25-28.
- [6] 赵东升, 刘玉君, 孙敏科, 等. 碳钢与 304 不锈钢焊接残余应力的计算[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 93-95.
- [7] 黄本生, 刘记, 刘阁, 等. Q235 与 316L 异种钢焊接接头的显微结构与力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(9): 35-38.
- [8] Zhang Y M, Jiang M, Lu W. Double electrodes GMAW improve heat input control[J]. Welding Journal, 2004, 83(11): 39-41.
- [9] 石玢, 何伟, 朱明等. 保护气体对双丝旁路耦合电弧 GMAW 熔滴过渡行为影响的检测与分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(5): 19-22.
- [10] Zhu Ming, Shi Yu, Fan Ding. Analysis and improvement of metal transfer behaviors in consumable double-electrode G-MAW process [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(1): 0110101-0110107.
- [11] 朱明, 樊丁, 石玢, 等. 双丝旁路耦合电弧高效熔极气体保护焊“弧长-电流”双路闭环控制模拟与试验分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 71-75.

逐渐升高, 同等情况下, 有效电流相等, 脉冲电弧压力小于直流情况下的电弧压力。

### 参考文献:

- [1] 郭德伦. 国外先进焊接技术在航空领域的应用进展[J]. 航空制造技术, 2014(20): 62-64.
- [2] 徐滨士. 中国特色的再制造产业及其创新发展 [J]. 电焊机, 2012(5): 1-5.
- [3] 王希靖, 柴廷玺, 王江, 等. 镍合金 N6 填丝等离子焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(23): 174-178.
- [4] Pattnaik S, Jha PK, Karunakar DB. A review of rapid prototyping integrated investment casting processes [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design & Applications, 2014, 228(4): 249-277.
- [5] 翟泽, 许四祥, 郭宏晨, 等. 基于 FLUENT 的等离子弧数值模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(3): 199-205.
- [6] Xu Fu-Jia, Xu Bin-Shi, Lv Yao-Hui. Remanufacturing Shaping System based on Pulsed Plasma Arc Welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S1): 152-155.