

# 高效热丝 GMAW 焊接工艺熔敷速率试验分析

马宗标<sup>1</sup>, 黄鹏飞<sup>1</sup>, 张轩宁<sup>1</sup>, 王亚纯<sup>1</sup>, 代宏博<sup>1</sup>, 王光辉<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学, 现代焊接设备研究与开发中心, 北京, 100124; 2. 杭州凯尔达电焊机有限公司, 杭州, 310018)

**摘要:** 交流热丝 GMAW 工艺是一种高效焊接工艺, 其主弧为传统 GMAW 电弧. 填充焊丝和熔池及母材构成闭合回路, 交流脉冲预热电流流经该回路, 产生电阻热并预热填充焊丝. 当被预热到高温的填充焊丝进入熔池后, 在液态金属作用下迅速熔化. 进行了高效热丝 GMAW 工艺的试验研究, 找到填充焊丝预热电流、填充焊丝伸出长度、焊丝间距、主弧焊接规范等参数之间的匹配规律, 实现了 20 kg/h 以上的熔敷速率. 分析了前述影响因子对熔敷效率的影响规律. 结果表明, 热丝 GMAW 在提高熔敷速率和熔敷系数方面相对传统焊接工艺有明显优势, 可以实现高熔敷率低热输入的工艺效果. 该工艺在高强钢大厚板焊接等领域具有广阔的应用前景.

**创新点:** (1) 基于 GMAW 焊工艺方法, 填充焊丝直插熔池并通过交流脉冲电流, 在电阻热与主弧热能协同作用下熔化填充焊丝.

(2) 针对影响熔敷速率变化趋势的关键因素做出分析, 得到最佳工艺参数区间.

**关键词:** 热丝; 工艺窗口; 熔敷速率; 熔敷系数

**中图分类号:** TG 444

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20200605004

## 0 序言

随着工业界对高效焊接工艺的不断追求, 热丝气体保护电弧焊工艺受到广泛的关注. 传统热丝焊工艺主要是针对非熔化极气体保护焊 GTAW 的. 填充焊丝经过一对电极后进入熔池, 在电极之间施加电压, 则会有电流流过填充焊丝, 产生的电阻热可以预热填充焊丝, 从而有效提高熔敷效率. 也可以把高频感应线圈套在填充焊丝外部, 既消除旁路预热电路带来的磁偏吹影响, 还可以适用于低电阻率的焊丝, 填充送丝速度可以达到冷丝焊工艺的 3 倍左右<sup>[1-2]</sup>. 可以扩大焊接电流的合理范围<sup>[3]</sup>, 并且热丝 GTAW 焊具有更高的焊缝沉积速率和优良的焊缝形状<sup>[4]</sup>. 通过控制高频输出电流, 还可以调整焊接热输入. 热丝 TIG 焊工艺有多种不同方案, 但由于主弧是 TIG 电弧, 单纯依靠填充焊丝提高效率有限. 可以采用双钨极耦合的方案<sup>[5]</sup>, 或者采用 TIG 与等离子弧耦合及 TIG 与激光耦合等具备高密度能量热源的方案<sup>[6-9]</sup>.

北京工业大学的李泳格开发了一种交流热丝 GMAW 焊接<sup>[10]</sup>, 采用交流电流预热填充焊丝, 很好的抑制了热丝电流对主弧的干扰. 在大电流主弧作用下熔池中有足够多高温液态金属, 可以保证预热后的填充金属迅速熔化, 极大地改善熔敷效率, 并获得均匀的焊缝. 该工艺中, 填充焊丝与母材之间不会形成电弧, 附加热输入很小. 填充焊丝的加入可以有效降低熔池温度, 减小热影响区的范围, 抑制凝固过程中晶粒的长大, 提高焊缝质量.

热丝 GMAW 焊工艺可以对焊接热输入和熔敷效率独立调节, 实现两者解耦, 这对控制和改善焊接过程中熔池凝固和结晶过程有重要意义. 此外, 在常规电弧焊工艺中, 高温电弧可能造成大量合金元素的烧损, 不利于焊缝金属的合金化. 而采用热丝焊接工艺可以把合金成分添加到填充焊丝中去, 其加热温度略高于金属的熔点, 但是远低于电弧中心的温度, 所以合金元素可以在熔池中很好的保留, 这对改善焊缝的合金成分非常重要. 交流热丝 GMAW 工艺具有高熔敷速率和低热输入的特点, 又增加了冶金工艺的灵活性, 应用前景非常广阔.

热丝 GMAW 工艺虽然具有明显的优势, 但有关其熔敷速率影响因素及规律的研究相对较少. 文

中进行了工艺试验研究, 探索了不同焊接工艺参数对焊丝熔化速度的影响规律, 得到了不同预热电流、填充焊丝伸出长度、填充焊丝与主焊丝间距, 以及主弧电流电压等条件下填充送丝速度的工艺窗口。

## 1 试验方法

试验平台主要由 GMAW 电源、交流脉冲热丝电源、送丝机及高速摄像机等部件组成。主弧电源使用常规直流 GMAW 电源, 用来熔化主焊丝、加热母材并形成熔池; 交流脉冲热丝电源可以输出优化后的脉冲电流, 其频率为 200 Hz, 电流幅值可以在 100 ~ 300 A 之间调节。在热丝 GMAW 焊接工艺中, 填充焊丝被直接送入熔池, 预热电源输出交流脉冲电流经由热丝、熔池和母材构成的回路, 产生电阻热可以预热填充焊丝。这里主焊枪垂直于母材, 填充焊丝在电弧正前方以 45°角进入熔池。填充焊丝被预热到较高温度后进入熔池, 在高温液态金属的作用下熔化, 可以极大的提高熔敷速率。中频脉冲电流可以有效防止电磁力引起的主电弧扰动, 保持焊接过程稳定。图 1 所示为焊接试验平台组成。

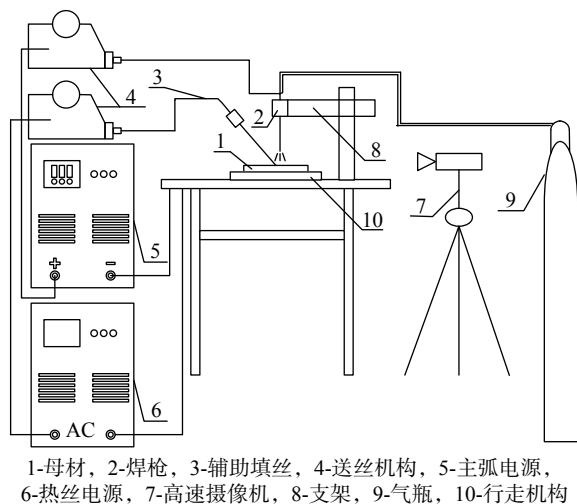


图 1 焊接操作平台  
Fig. 1 Welding operator

在试验过程中, 采用同步数据采集和高速摄像技术实现对焊接过程的准确记录。利用高速摄像技术可以研究焊接过程中电弧的位置、形态和熔池波动状态, 也可以观察填充焊丝的熔化状态。高速摄像仪型号为 MV-D1024E, 拍摄频率 625 帧/秒, 系统分辨率为 512 × 512 点阵。

热丝 GMAW 工艺的基本试验条件为: 焊丝型

号: JM-56; 焊丝直径  $\phi 1.2$  mm; 保护气体成分: 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>; 气体流量: 15 L/min; 主弧焊丝伸出长度: 18 mm; 焊接速度: 0.4 m/min; 母材型号: Q235; 母材厚度: 10 mm。

填充焊丝和主焊丝的相对位置如图 2 所示。主要研究如下几个因素对熔敷速率的影响规律: ①填充焊丝预热电流; ②填充焊丝伸出长度; ③填充焊丝与主焊丝间距; ④主弧电流和电压。

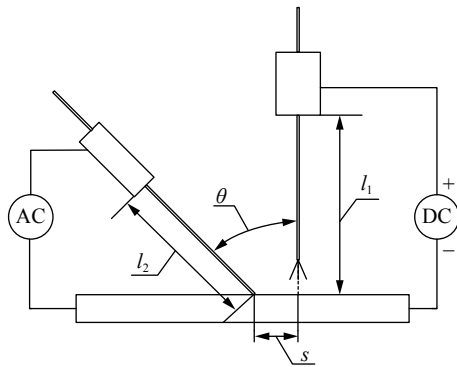


图 2 几何尺寸  
Fig. 2 Geometric dimensions

在其它参数不变的条件下, 分别独立调节交流热丝预热电流、填充焊丝伸出长度、填充焊丝与主焊丝间距, 以及主弧电流电压, 找到与该条件相匹配的最佳填充焊丝速度范围, 并研究其影响规律。通过高速摄像观察填充焊丝, 可以找到填充焊丝送入 GMAW 熔池中, 刚好既不起弧也不触到熔池底部的状态。也可以同时监测送丝电机的电枢电流作为辅助判据, 当电枢电流有较明显的增大趋势时, 可以认为填充焊丝已经抵到熔池底部。

## 2 工艺参数对熔敷速率的影响规律

### 2.1 热丝电流对熔敷速率的影响规律

在热丝 GMAW 工艺过程中, 交流预热电流产生电阻热对填充焊丝加热, 电流的大小直接影响焊丝的温度分布。文中试验主要研究热丝预热电流对填充焊丝送丝速度范围的影响规律。

进行工艺试验时, 填充焊丝的伸出长度为 18 mm, 主弧焊丝和填充焊丝间距为 12 mm, 交流热丝电流从 100 A 调节到 300 A。

图 3 中上部曲线表示在设定的热丝电流条件下, 填充焊丝可以使用的最大速度。当填充速度大于该曲线数值时, 填充焊丝端部将触及熔池底部, 造成熔池不稳。而下部曲线表示该预热电流下, 填

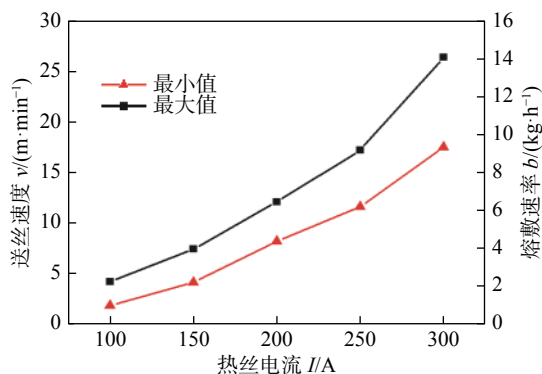


图 3 热丝电流对填充焊丝送丝速度区间影响

Fig. 3 Effect of hot wire current on the wire feeding speed range of filled welding wire

充焊丝可以使用的最小速度。当速度过小时, 由于焊丝熔化较快, 可能会使焊丝端头离开熔池表面, 产生电弧和飞溅, 造成焊接过程失稳。下文中试验的曲线都代表相同的含义, 不再赘述。

由图 3 可知, 随着预热电流的增加, 填充焊丝送丝速度相应增加, 熔敷速率提高。填充焊丝的加热能量主要源于两个部分: 预热电流电阻热和熔池储热。这里熔池储热不变, 但是预热能量和预热电流的平方成正比, 所以该曲线呈指数形式增长。且预热电流越大, 可以使用的送丝速度范围也相应扩大。

当热丝电流最大达到 300 A 时, 辅助焊丝送丝速度可以达到 25 m/min, 附加熔敷速率约 14 kg/h。此时主弧的送丝速度约 16 m/min, 综合熔敷速率已经可以达到 20 kg/h 以上, 相对常规的 GMAW 工艺效率提高一倍。

## 2.2 焊丝伸出长度对熔敷速率影响规律

在焊丝预热过程中, 焊丝伸出长度大小决定了预热电流产生电阻热的时间, 进而影响到焊丝温度分布, 伸出长度越长则预热效果越明显。文中试验研究伸出长度对填充焊丝送丝速度的影响规律。试验设定预热电流为 200 A, 主弧焊丝和填充焊丝间距为 12 mm; 焊接速度为 0.40 m/min, 改变填充焊丝伸出长度, 测量相应条件下填充送丝速度的最小值及最大值。结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 随着填充焊丝伸出长度的增加, 其送丝速度也相应增加, 而且基本呈线性关系。最小和最大送丝速度的差值变化不太明显。这是由于在预热电流不变的条件下, 预热能量与焊丝伸出长度呈正比, 所以该曲线呈线性状态。由于焊丝的电阻率随着温度的上升略有增加, 所以整体曲线呈略上翘的形态。由图可知, 填充焊丝伸出长度和熔敷

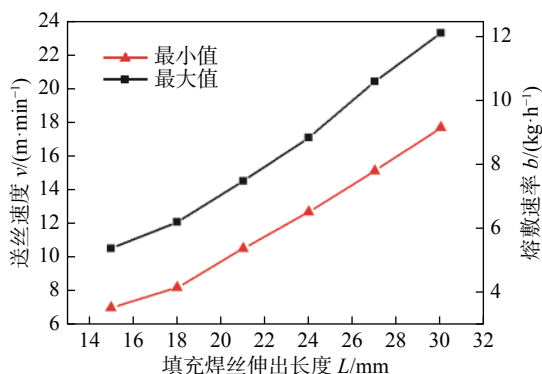


图 4 填充焊丝伸出长度对填充焊丝送丝速度区间影响

Fig. 4 Effect of dry extension of filler wire on the wire feeding speed range of filler wire

速率之间有明显的关系, 其送丝速度的调节范围在 10 ~ 20 m/min 之间, 附加熔敷速率最大可达 10 kg/h 左右。

## 2.3 填充焊丝与主丝间距对熔敷速率的影响规律

填充焊丝进入熔池的位置直接影响了电弧对焊丝的加热效果。该位置如果靠近电弧中心, 则电弧对填充焊丝的加热将会从间接加热渐变为直接加热。从提高熔敷效率的角度考虑, 直接加热的效率最高, 但是从保证合金化的角度考虑, 直接加热会增加填充焊丝中合金元素的烧损。

文中试验主要研究焊丝间距对熔敷速率的影响规律。填充焊丝伸出长度为 18 mm, 预热电流设定为 100 A; 改变填充焊丝与主弧焊丝之间的距离, 并找到填充焊丝的合理送丝速度区间。结果如图 5 所示。

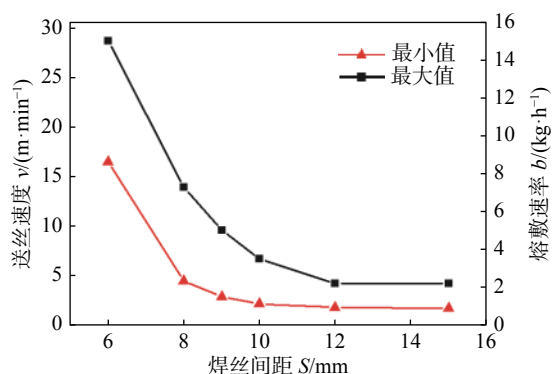


图 5 焊丝间距对填充焊丝送丝速度区间影响

Fig. 5 Effect of welding wire spacing on the wire feeding speed range of filled welding wire

由图 5 可知, 当焊丝间距约为 6 mm 时, 最大填充送丝速度可以达到 30 m/min, 对应熔敷速率提高约 15 kg/h。但此时填充焊丝已经进入主弧的中心区, 所以加热功率很大, 氧化烧损比较严重, 不利于填充金属的合金化过程。随着焊丝间距的增大,



最佳送丝速度范围不断降低, 当焊丝间距大于 11 mm 时, 焊丝预热所受电弧热减小, 其熔化速度减小, 填充焊丝速度也相应减小, 熔敷速率随之降低. 速度区间减小, 并最终趋于稳定. 此时电弧对焊丝的热影响已经很小, 熔敷速率主要受电阻热和熔池热的影响.

## 2.4 主弧规范对填充焊丝熔化速度影响规律

在热丝 GMAW 工艺中, 主弧能量用于熔化母材形成熔池, 熔池的热量又用于熔化经过预热的填充焊丝. 熔池的形状和温度对填充焊丝的熔化有直接的影响. 文中试验研究主弧电流电压参数对填充焊丝送丝速度规范区间的影响规律. 试验时主弧焊丝和填充焊丝间距为 12 mm; 热丝电流 200 A, 焊接速度 0.4 m/min. 主弧电流电压从 210 A/29 V 上升到 360 A/35 V 时, 最佳填充焊丝送丝区间如图 6 所示.

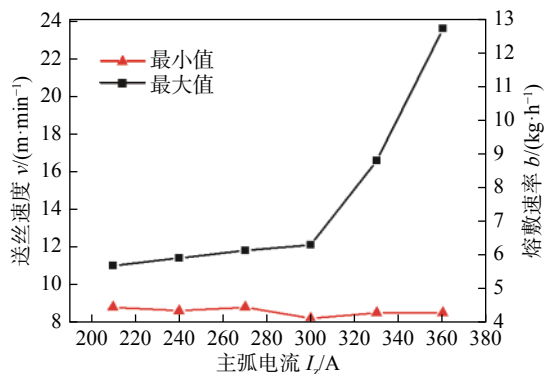


图 6 主弧电流对填充焊丝送丝速度区间影响

Fig. 6 Effect of main arc current and voltage on the wire feeding speed range of filled welding wire

由图 6 可知, 随着主弧电流的增加, 填充焊丝最小送丝速度基本保持不变, 最大送丝速度随主弧规范的增加也迅速上升. 当主弧电流超过 300 A 后, 最大送丝速度增速明显.

熔敷速率主要受两方面因素影响. 一是电弧功率, 主弧电流增加的同时, 其匹配电压也在相应增加, 所以电弧功率的变化速度越来越快, 熔敷速率的增加也随之变快; 二是熔池深度, 熔池深度影响到熔池加热填充焊丝的时间, 当主弧电流大于 300 A 时, 电弧挖掘作用明显增加, 从而熔池深度增加, 其对填充焊丝的加热时间也在延长, 所以熔敷速率增加明显. 从焊缝效果来看, 随着主弧电流电压的增加, 焊缝的余高和成形饱满度也相应增加.

## 3 热丝 GMAW 工艺熔敷系数分析

在热丝 GMAW 焊接工艺中, 填充焊丝的存在

可以使熔池的温度降低, 熔池和热影响区金属的过热程度也相应减小, 所以接头性能会有很大改善, 这对很多热输入敏感的高强钢有重要的意义. 另外, 从熔敷系数的角度分析, 为了产生相同数量的熔敷金属, 热丝 GMAW 所需要的能量也比较少. 熔敷系数可以由下面公式计算, 即

$$a = \frac{M}{It} \quad (1)$$

式中:  $a$  是熔敷系数 ( $g/A \cdot s$ );  $M$  是熔敷金属量 ( $g$ );  $I$  是焊接电流 ( $A$ );  $t$  是焊接时间 ( $s$ ).

在热丝 GMAW 焊接工艺中, 一般电弧稳定飞溅很少, 所以可用熔化金属量近似替代熔敷金属量. 热丝预热功率和电弧功率相比, 在焊接电流较小时, 占比不足 20%, 在焊接电流较大时, 占比只有不足 10%, 所以计算时以主弧能量为主. 熔化总金属量可以由主弧送丝速度和填充焊丝送丝速度之和经过计算得到. 这里以前面 2.4 节的试验数据为基础, 可以获得焊接电流和熔敷系数的关系如图 7 所示.

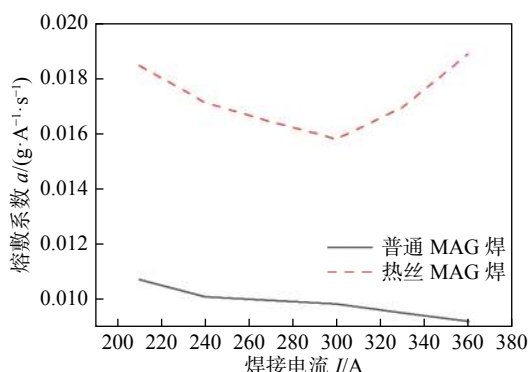


图 7 焊接电流和熔敷系数之间关系

Fig. 7 Relationship between deposition rate and welding current

图 7 中虚线代表常规 GMAW 工艺熔敷系数和焊接电流的关系, 也就是单独主弧的熔敷系数同电流关系. 由曲线可知, 随着电流的增大, 熔敷系数略有减小. 这是由于焊接电流越大, 则熔滴的过热程度越高, 所以单位电流熔化焊丝的质量反而有所下降. 图中实线所示为热丝 GMAW 工艺整体熔敷系数, 该曲线前段略有下降, 但后段又有提高. 其中熔敷系数下降的原因和常规 GMAW 相同, 后段由于电弧功率增大后, 电弧加热的范围也有所增大, 填充焊丝也吸收了部分电弧热量的原故, 所以熔敷系数有所提高.

综合比较可知, 热丝 GMAW 可以提高熔敷系

数约一倍左右,从节能减排的角度比较,热丝 GMAW 也有明显的优势。

## 4 结论

(1) 研究了热丝 GMAW 焊接工艺中,多种工艺参数对填充焊丝送丝速度工艺窗口的影响规律。结果表明,该工艺可以达到 20 kg/h 以上的熔敷速率,相比传统 GMAW 工艺提高效率一倍以上。

(2) 对比了热丝 GMAW 工艺和常规 GMAW 焊接工艺的熔敷系数和电流关系曲线,结果表明热丝 GMAW 可以提高熔敷系数一倍左右。

## 参考文献

- [1] 范成磊,梁迎春,杨春利,等. 铝合金高频感应热丝 TIG 焊接方法[J]. 焊接学报, 2006, 27(7): 49 – 52.  
Fan Chenglei, Liang Yingchun, Yang Chunli, *et al.* TIG welding method of aluminum alloy high-frequency induction hot wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(7): 49 – 52.
- [2] 吕世雄,孙清洁,范阳阳,等. 电弧热丝 TIG 焊工艺特点分析[J]. 焊接, 2007(10): 41 – 43.  
Lü Shixiong, Sun Qingjie, Fan Yangyang, *et al.* Analysis of the characteristics of arc hot wire TIG welding process[J]. Welding & Joining, 2007(10): 41 – 43.
- [3] Aravinda P, Irappa S, Basavarajappa, *et al.* Assessment of impact strength of welds produced by cold wire and hot wire gas tungsten arc welding (GTAW) processes[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24(Pt 2): 983 – 994.
- [4] He H, Wu C, Lin S, *et al.* Pulsed TIG welding-brazing of aluminum-stainless steel with an Al-Cu twin hot wire[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2019, 28(3): 1180 – 1189.
- [5] Liu W, Ma J, Liu S, *et al.* Experimental and numerical investigation of laser hot wire welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9–12): 1485 – 1499.
- [6] 苗玉刚,马照伟,赵慧慧,等. 高强度旁路热丝等离子弧打底焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 99 – 103.  
Miao Yugang, Ma Zhaowei, Zhao Huihui, *et al.* Microstructure and performance of backing welding joint of high strength steel by bypass-current wire-heating PAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(1): 99 – 103.
- [7] 余淑荣,程能第,黄健康,等. 旁路耦合电弧增材制造热过程与组织关系[J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 1 – 6.  
Yu Shurong, Cheng Nengdi, Huang Jiankang, *et al.* Relationship between thermal process and microstructure during additive manufacturing of double-electrode gas metal arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(8): 1 – 6.
- [8] Shah P, Agrawal C. A review on twin tungsten inert gas welding process accompanied by hot wire pulsed power source[J]. Journal of Welding and Joining, 2019, 37(2): 41 – 51.
- [9] Kim K, Bang H, Bang H, *et al.* Hot wire laser welding of multilayer for narrow gap-analysis of wire melting/transfer and arc formation phenomenon by high speed imaging[J]. Journal of Welding and Joining, 2016, 34(5): 26 – 32.
- [10] 李泳格. 一种新型热丝 TIG 复合焊接装置的研制[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.  
Li Yongge. Development of a new hot wire TIG composite welding device[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.

第一作者: 马宗标, 硕士; 主要从事热丝 GMAW 工艺的焊接电源研发及其工艺过程研究; Email: mazongbiao@126.com.  
通信作者: 黄鹏飞, 副教授; Email: huangpf@bjut.edu.cn.

(编辑: 杨婉春)