

文章编号: 1673-5196(2021)04-0022-04

横向交变磁控 DP-TIG 焊电弧熔池特性研究

瞿怀宇^{*1}, 刘芬霞¹, 刘玉兰², 冯晓春¹, 余江瑞¹, 付小月¹

(1. 兰州理工大学 技术工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 外加交变磁场可改善大电流高速焊接时的焊缝成形缺陷, 为获得不同励磁参数对 DP-TIG (deep penetration, TIG) 焊接电弧和熔池特性的影响, 在横向交变磁场作用下, 对 12 mm 的 Q345B 板进行了 DP-TIG 焊接试验. 通过高速摄像系统观察电弧形态, 采用小孔法测量电弧压力, 基于金相腐蚀法分析熔池截面. 结果表明: 与无磁场作用时的 DP-TIG 电弧相比, 在横向交变磁场作用下, DP-TIG 电弧形态发生明显变化, 电弧压力峰值随交变频率的增大先降低后增大, 熔池截面形态由指状向锅底状过渡, 且镍基堆焊时, 焊缝表层铁含量在 5% 以内, 焊材被稀释程度较低.

关键词: DP-TIG; 横向磁场; 电弧形态; 熔池特性

中图分类号: TG403 **文献标志码:** A

Study on arc and pool characteristics of DP-TIG welding with additional transverse alternating magnetic field

QU Huai-yu¹, LIU Fen-xia¹, LIU Wen-lan², FENG Xiao-chun¹

YU Jiang-rui¹, FU Xiao-yue¹

(1. College of Technology and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The defects of weld profiles in large-current and high-speed welding can be improved by adding alternating magnetic field. In order to obtain the influence of different magnetic excitation parameters on the arc and pool characteristics of DP-TIG (deep penetration TIG) welding, the DP-TIG welding experiment of 12 mm Q345B plate was carried out with additional transverse alternating magnetic field. The arc shapes were observed by a high-speed camera system, the arc pressures were measured through the small hole method, and the weld pool section profiles were analyzed based on the metallographic corrosion method. The results show that, compared with DP-TIG welding without magnetic field, the arc shape of DP-TIG welding with additional transverse alternating magnetic field changes obviously, the peak value of arc pressure first decreases and then increases with the increase of alternating frequency, and the weld pool section profile transits from finger-shape to pot-bottom-shape. In addition, the iron content in the weld surface of Ni-based overlay welding is less than 5%, and the dilution degree of welding material is low.

Key words: DP-TIG; transverse magnetic field; arc shape; pool characteristic

钨极氩弧焊(TIG)具有焊缝纯净度高、焊接品质高的优点, 广泛应用于航空航天、压力容器制造等领域, 但 TIG 焊生产效率低, 限制了这种焊接方法的进一步应用. 提高焊接生产效率是推广 TIG

焊应用范围的关键, 而增大焊接电流是提高 TIG 焊接效率的途径之一. 刘自刚等^[1-2]通过提高钨极冷却能力增大焊接电流, 基于此, 提出了一种改进的 TIG 焊接方法——深熔钨极氩弧焊(deep penetration TIG welding, 简称为“DP-TIG 焊”). 该焊接方法通过双层水冷结构的焊枪对钨极高效冷却, 强制压缩焊接电弧, 获得挺度高、能量密度大的焊接电弧, 实现增大单道焊接熔深、提高焊接速度、增大熔

收稿日期: 2021-01-30

基金项目: 甘肃省高等学校创新基金(2020B-283)

通讯作者: 瞿怀宇(1987-), 男, 湖北广水人, 硕士, 工程师.

Email: 475473069@qq.com

敷速率的目的。

但增大焊接电流会使焊缝出现咬边、驼峰等缺陷^[3]。因此,改善大电流条件下的焊缝成形尤为重要。磁场辅助焊接是近年来新兴的技术手段,通过磁场作用影响熔池流动、电弧形态及熔滴过渡行为等可改善焊缝成形及组织、提高焊缝性能及生产效率^[4-8]。目前,研究者主要将不同形式磁场施加到传统 TIG 焊上,研究磁场对传统 TIG 电弧及焊缝成形的影响^[9-12],鲜有关于磁场对 DP-TIG 焊电弧和焊缝成形影响的报道。

本文在横向交变磁场作用下,研究不同励磁参数对 DP-TIG 电弧和熔池特性的影响,对揭示磁控作用下 DP-TIG 焊缝成形机理、提高其焊接效率以及扩大该方法应用范围具有重要意义。

1 试验条件

试验母材为 Q345B,规格为 500 mm×200 mm×12 mm,焊材牌号为 ERNiCrMo-3,焊丝直径为 1.2 mm。焊接电源采用米勒 Dynasty700,焊接电流在 0~700 A 调节。自行研制磁控装置,其可分别调节励磁电流和交变频率,励磁电流在 0~100 A 调节,交变频率在 0~500 Hz 调节。试验系统如图 1 所示,采用的焊接工艺参数见表 1。

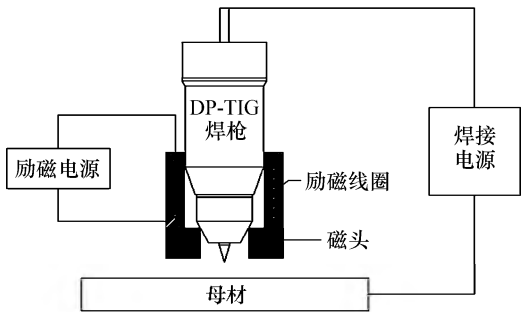


图 1 焊接试验系统示意图
Fig. 1 Diagram of welding test system

表 1 焊接工艺参数

Tab. 1 Welding process parameter

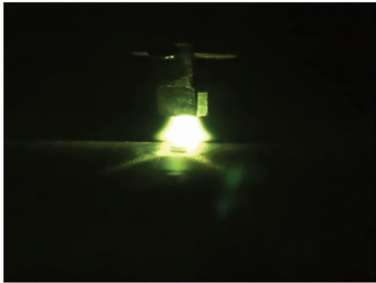
焊接 电流 I/A	焊接 弧长 L/mm	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_1/(m \cdot min^{-1})$	励磁 电流 I_1/A	交变 频率 f/Hz
400	3	300	3	0~100	0~500

2 试验结果与分析

2.1 横向交变磁场下的电弧状态

采用高速摄像系统对电弧状态进行拍摄,在无励磁电流时,电弧状态呈现为传统 TIG 电弧钟罩

状,如图 2a 所示。当励磁电流为 20 A、交变频率为 5 Hz 时,电弧发生明显的偏转现象,如图 2b 所示。随着交变频率的增加,电弧偏摆的幅度降低,逐渐又呈现为钟罩状。如图 2c 所示,励磁电流为 20 A,交变频率为 20 Hz 时,电弧为钟罩状,但电弧阳极表面宽度相比无励磁条件下增大,说明在此条件下,焊接电弧出现了发散现象。



(a) $I_1 = 0 A$



(b) $I_1 = 20 A, f = 5 Hz$



(c) $I_1 = 20 A, f = 20 Hz$

图 2 不同励磁参数下的电弧形态

Fig. 2 Arc shapes under different magnetic excitation parameters

2.2 不同励磁参数对电弧压力的影响规律

在焊接电流 400 A、励磁电流 20 A 的条件下,分别给定励磁交变频率为 0、5、20、100、500 Hz,采用小孔法测量 DP-TIG 电弧阳极表面的压力^[13-14],如图 3 所示。

从图 3 可以看到,当无励磁电流时,电弧压力峰值达到了 950 Pa 以上,在励磁交变频率 5~500 Hz,随励磁交变频率增大,DP-TIG 电弧压力峰值先降低后增大,其中,励磁交变频率为 20 Hz 时,电弧压

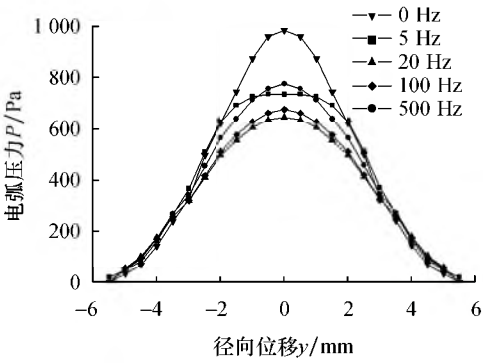


图 3 不同励磁交变频率下电弧压力

Fig. 3 Arc pressures under different magnetic excitation frequencies

力峰值最低,降为 650 Pa,相比无励磁电流时的峰值压力降低了约 1/3. 因此,可通过调整横向交变磁控参数改变 DP-TIG 电弧压力分布情况,从而实现不同的焊接工艺,小孔焊接时采用较高的交变频率,表面堆焊时采用较低的交变频率.

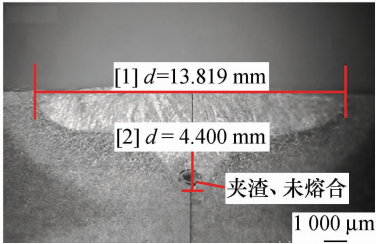
2.3 不同励磁参数下的熔池截面形状

大电流 DP-TIG 焊不填丝焊接,在无励磁电流条件下,当焊接速度达到临界值时,焊缝表面成形出现咬边和驼峰缺陷,采用金相腐蚀法观察熔池截面,焊缝内部存在夹渣和熔合不良现象,且缺陷部位集中在最大熔深处,如图 4a 所示,其中,夹渣由大电流条件下烧损的钨极或焊缝表面氧化物在电弧力作用下被卷入焊缝底部产生. 当采用横向交变磁控焊接时,焊缝表面成形得到改善,截面无夹渣和熔合不良情况,如图 4b 所示为励磁电流 20 A、励磁交变频率 5 Hz 时的熔池截面形状. 通过调节励磁电流和交变频率可改变焊缝熔深,熔池截面形状由指状向锅底状过渡,如图 4c、4d 所示. 横向磁场作用下,熔池截面形状改变主要是由于电弧形态变化导致电弧中心压力峰值降低、温度分布梯度变缓.

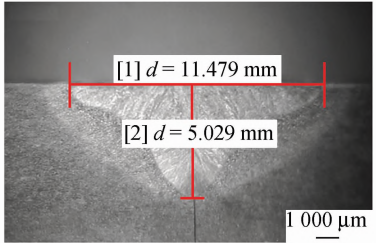
2.4 横向磁控 DP-TIG 焊接工艺验证—镍基堆焊

对于堆焊而言,希望焊材被母材稀释的越少越好,即焊缝熔深应尽可能浅,从而达到更好防护母材的效果,因此,应采用较小的电弧压力进行焊接. 取励磁电流 20 A、交变频率 20 Hz,在 Q345B 板材表面堆焊一层镍基金属,堆焊厚度为 3 mm,堆焊焊缝表面成形如图 5 所示.

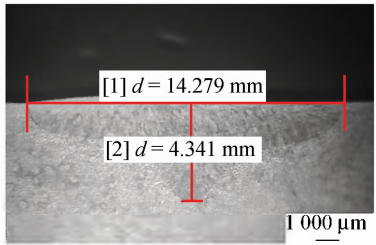
从图 5 可以看到,焊缝过渡光滑,表面成形良好,无咬边. 采用 X 射线对焊缝进行检测,焊缝内部无气孔、熔合不良等缺陷. 采用光谱分析仪对焊缝表面各区域化学成分进行检测,焊缝表面各点铁含量均小于 5%,焊材被稀释程度较低.



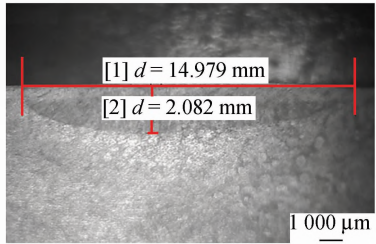
(a) $I_1 = 0$



(b) $I_1 = 20 \text{ A}, f = 5 \text{ Hz}$



(c) $I_1 = 40 \text{ A}, f = 5 \text{ Hz}$



(d) $I_1 = 20 \text{ A}, f = 20 \text{ Hz}$

图 4 不同励磁参数下熔池截面形状

Fig. 4 Weld pool section profiles under different magnetic excitation parameters

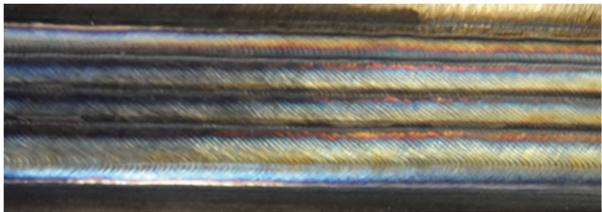


图 5 磁控 DP-TIG 堆焊焊缝成形

Fig. 5 DP-TIG deposition weld profiles with additional magnetic field

3 讨论

当没有外加磁场时,DP-TIG 焊电弧压力呈高斯分布,电弧中心压力较高,当焊接速度升至某一临界值时,在高焊速及大电流条件下,电弧压力使得熔池表面下塌为一个很薄的液态金属层.同时,由于焊接速度较高,熔池被拉长变窄,电弧下方的液态金属被推向熔池尾部并堆积.当电弧继续前移时,熔池前部的凹陷区域和熔池尾部交接的过渡区域因不能获得充足的热焓而提前凝固,从而阻止了熔池液态金属继续向尾部流动,也阻止了熔池尾部液态金属的向前回流.因此,在大电流高速焊接时焊缝表面极易出现咬边和驼峰缺陷.如图 6 所示,电弧作用力 P_a 与熔池静压力 P_c 以及熔池表面张力 P_h 在焊接过程中应达到动态平衡,但当电弧作用力大于熔池静压力和表面张力之和时,焊缝过渡点易出现如图 4a 所示的夹渣和未熔合缺陷.外加周期变化横向交变磁场时,电弧等离子体最大温度、阳极表面电弧压力、阳极表面电流密度在每个周期内呈现一定波动性,电弧峰值压力降低,加之磁场的搅拌作用,熔池后排力降低,流动性增加,减少了焊缝成形咬边和驼峰缺陷.

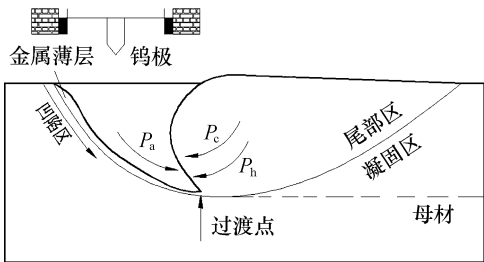


图 6 DP-TIG 电弧力作用下熔池状态

Fig. 6 Welding pool state under DP-TIG arc force

施加横向交变磁场后,熔池液态金属向后流速逐渐降低,横向流速逐渐增加,从而影响熔池表面的温度分布,温度梯度较平缓,熔池内的温度分布更加均匀,改善了熔池冷却条件,因此,熔池截面由指状向锅底状过渡.

对于堆焊而言,较低的电弧压力和平缓的温度分布有利于降低焊接熔深,从而降低母材对焊材的稀释作用.此外,镍基合金熔池金属粘度较大,熔池流动性差.因此,外加交变磁场可改善镍基堆焊时

熔池金属的流动性,从而获得良好的焊缝成形.

4 结论

外加横向交变磁场能够改善 DP-TIG 焊缝成形缺陷,主要结论如下:

1) 在横向交变磁场作用下,随着励磁交变频率的增大,DP-TIG 电弧压力峰值先降低后增大.在交变频率为 20 Hz 时,电弧峰值压力最低,相比无励磁电流时降低约 1/3.

2) 在横向交变磁场作用下,随着励磁交变频率的增大,DP-TIG 熔池截面形状由指状向锅底状过渡,且通过调整交变频率可改变焊缝熔深.在交变频率为 20 Hz 时,焊缝熔深最浅,在此参数下进行镍基堆焊,焊缝表面铁含量可达到 5% 以下.

参考文献:

[1] 刘白刚,瞿怀宇,曹瑞吕,等. DP-TIG 焊接方法工艺研究 [J]. 焊接,2017(3):61-65.

[2] 刘白刚,陈飞,唐海鸿,等. DP-TIG 高速焊接工艺研究 [J]. 兰州理工大学学报,2020,46(6):33-37.

[3] 林三宝,范成磊,杨春利. 高效焊接方法 [M]. 北京:机械工业出版社,2011.

[4] 刘海华,白云龙,卓义民,等. 外加电磁场辅助焊接技术的研究现状 [J]. 焊接,2017(10):12-18.

[5] 贾涵浩,马春伟,韩宁. 外加横向磁场在焊接中的应用及发展 [J]. 热加工工艺,2016,45(5):14-15.

[6] 樊丁,郑发磊,肖磊,等. 交变磁场控制的高效 MAG 焊接试验 [J]. 兰州理工大学学报,2018,44(5):15-18.

[7] 孙志星,路林,包正义,等. 横向磁脉冲 MAG 焊电弧旋转机理研究 [J]. 电焊机,2020,50(10):97-102.

[8] 武小娟,苏允海,张桂清,等. 磁控等离子弧堆焊过程中热力学特点初探 [J]. 焊接学报,2015,36(6):65-68.

[9] 常云龙,杨旭,李大用,等. 外加纵向磁场作用下的 TIG 焊接电弧 [J]. 焊接学报,2010,31(4):49-52.

[10] 肖磊,樊丁,黄健康. 交变磁场作用下的 GTAW 非稳态电弧数值模拟 [J]. 机械工程学报,2018,54(16):79-85.

[11] 刘晓光,关子奇,张洪旭,等. 磁控 TIG 焊接技术的研究现状及展望 [J]. 热加工工艺,2019,48(15):1-5.

[12] 黄勇,刘林,陆肅中,等. 外加纵向磁场对 TIG 电弧特性影响的数值分析 [J]. 兰州理工大学学报,2016,42(3):31-34.

[13] 陈树君,陶东波,白韶军,等. 电弧电流密度和电弧压力测量技术研究现状 [J]. 焊接,2010(4):1-6.

[14] 黄勇,瞿怀宇,王新鑫,等. 基于不锈钢阳极的 TIG 电弧压力特性 [J]. 兰州理工大学学报,2012,38(3):22-25.