

气流再压缩等离子弧焊接工艺初步探究

李天庆, 杨喜牟, 雷玉成, 陈璐

(江苏大学, 镇江 212013)

摘 要: 等离子弧焊接在中厚板焊接领域具有重要的应用前景. 自主设计搭建了气流再压缩等离子弧焊接系统, 开展了气流再压缩等离子弧焊接新工艺试验研究. 通过焊接过程监测系统分析焊缝成形, 温感扫描图可以比较准确的反映实际焊缝成形. 针对 8 mm 厚的 304 不锈钢, 焊接电流为 150 A 时, 常规等离子弧焊接熔深为 6.53 mm; 气流再压缩等离子弧焊接可以完全熔透工件, 且正面焊缝和背面焊缝成形良好. 结果表明, 相同电流条件下, 与常规等离子弧焊接相比, 气流再压缩等离子弧焊接电弧电压升高; 气流再压缩等离子弧焊接可以提高焊接熔透能力.

关键词: 等离子弧焊接; 聚焦气; 熔透; 焊缝成形

中图分类号: TG 456.2

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400283

0 序 言

等离子弧焊接 (plasma arc welding, PAW) 作为三大高能束焊接技术之一^[1-3], 具有能量密度高、电弧挺度大、一次穿透深度大、焊接变形小、焊缝成形美观及焊接质量好等一系列优点, 有望广泛应用于工业制造领域^[4-8]. 但是常规等离子弧焊接可焊的母材厚度一般在 5~8 mm 范围内, 当母材厚度更大时, 受限于常规等离子弧焊接电弧的穿透能力, 穿孔过程稳定性不足^[9], 而且焊接速度较低^[10], 制约了其在某些工程领域的应用. 通过增大钨极内缩量及喷嘴孔道压缩比可以增大电弧热流密度和电弧压力^[11], 可以有效增大等离子弧焊接的最大焊接厚度并提高焊接速度. 然而随着钨极内缩量和喷嘴孔道压缩比的增大, 会导致双弧甚至烧损喷嘴^[12-13]. Vredeveltdt^[14] 提出了气流再压缩等离子弧焊接 (GF-PAW) 工艺, 通过聚焦气拘束电弧弧柱的发散, 实现对电弧的“二次压缩”, 初步研究了气流再压缩等离子弧焊接, 但气流再压缩等离子弧焊枪在试验过程中易烧损. 目前, 针对气流再压缩等离子弧焊接新工艺的研究较少.

基于以上分析, 文中拟自主设计和搭建气流再

压缩等离子弧焊接试验平台, 针对 304 不锈钢开展焊接试验, 研究气流再压缩等离子弧焊接新工艺及焊缝成形.

1 气流再压缩等离子弧焊接试验平台

文中设计和搭建了气流再压缩等离子弧焊接试验平台, 该平台包括等离子弧焊机和焊枪系统、机械运动机构、视觉检测系统、焊接过程监测系统、计算机控制系统等. 图 1 是气流再压缩等离子弧焊接系统示意图.

等离子弧焊机系统是 Fronius 等离子弧焊接电源及其配套系统. 视觉检测系统主要由工业摄像机 Xiris XVC-1000 及其配套软件等组成, 用来实时检测电弧形态, 检测焊接过程. 焊接过程监测系统由德国 HKS 公司生产的 HKS 焊接分析仪, 焊缝成形温感扫描仪 (thermo profile scanner, TPS) 及其配套产品组成; 该系统可以对焊接过程中所有焊接动态、静态特性值进行精确的测定、分析. 计算机控制系统通过 PCI 数据采集卡将等离子弧焊机、机械运动机构、视觉检测系统、焊接过程监测系统等的控制端连接到计算机上, 并通过计算机实现等离子弧焊接工艺的自动化焊接和焊接过程信号的实时采集.

焊枪是自主设计的气流再压缩等离子弧焊枪. 图 2 是气流再压缩等离子弧焊枪原理示意图. 气流再压缩等离子弧焊枪是在常规等离子弧焊枪

收稿日期: 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51605201); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金 (AWJ-16-M07); 江苏大学高层次人才基金资助项目 (15JDG071); 江苏省博士后科研资助计划 (1601048C)

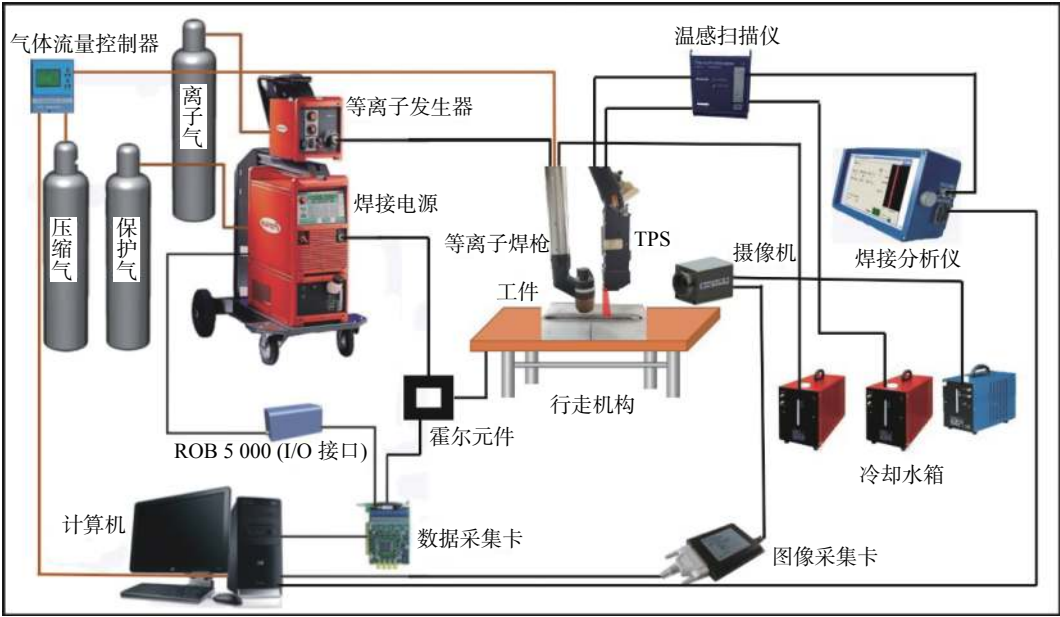


图 1 气流再压缩等离子弧焊接试验平台
Fig. 1 Diagram of gas focusing plasma arc welding system

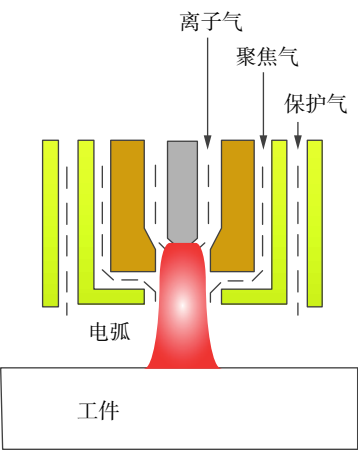


图 2 气流再压缩等离子弧焊接焊枪设计原理示意图
Fig. 2 Schematic of gas focusing plasma arc welding torch

的离子气通道与压缩气通道之间增加了一路聚焦气体, 如图 2 所示, 使本来就受到机械压缩、热压缩和电磁压缩三重压缩效果^[14] 的等离子弧再次受到压缩气流的“二次压缩”, 进而达到拘束电弧弧柱的目的. 设计的气流再压缩等离子弧焊枪所用钨极最大直径为 4 mm, 允许最大焊接电流为 350 A.

2 试验方案

采用 304 不锈钢作为被焊母材, 工件尺寸为 200 mm × 140 mm × 8 mm. 焊接前, 待焊工件均进行打磨去除氧化膜, 保证工件表面平整干净, 避免油污、氧化膜等对焊接过程的影响. 分别采用常规等离子弧焊接和气流再压缩等离子弧焊接进行焊接. 焊枪喷嘴距工件表面高度保持 5 mm, 喷嘴直径 3.0 mm, 钨极内缩量为 3 mm, 离子气、聚焦气、保护气成分均为纯度为 99.99% 的氩气.

随机选取两块工件试板, 分别采用常规等离子弧焊接和气流再压缩等离子弧焊接进行焊接. 主要焊接工艺参数如表 1 所示. 文中两种焊接工艺参数的主要区别是与常规等离子弧焊接相比, 气流再压缩等离子弧焊接加入流量为 1.5 L/min 的聚焦气.

焊接过程中通过霍尔元件配合数据采集卡实时采集焊接参数, 利用焊接过程分析仪检测焊缝热能分布情况. 焊后在焊接工件的焊缝中段, 沿垂直于焊缝轴线方向截取试样, 经切割、镶嵌、预磨、抛

表 1 主要焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

焊接工艺	焊接电流 <i>I</i> /A	焊接速度 <i>v</i> /(mm·min ⁻¹)	离子气流量 <i>Q</i> ₁ /(L·min ⁻¹)	聚焦气流量 <i>Q</i> ₂ /(L·min ⁻¹)	保护气流量 <i>Q</i> ₃ /(L·min ⁻¹)
PAW	150	120	2.2	0	20
GF-PAW	150	120	2.2	1.5	20

光后,用腐蚀剂进行腐蚀并在金相显微镜下观察焊缝横截面形貌.

3 试验结果分析

3.1 焊缝成形

图 3 是焊缝宏观形貌,图 3a 是常规等离子弧焊接正面焊缝成形和背面焊缝成形,图 3b 是气流

再压缩等离子弧焊接焊缝正面成形和背面成形.从图中可以看出,常规等离子弧焊接正面焊缝表面有一定的鱼鳞纹,工件背面未熔透;气流再压缩等离子弧焊接正面焊缝表面光滑平整,工件背面熔透且成形良好.试验结果表明,在相同电流条件下,常规等离子弧焊接不能焊透的工件,气流再压缩等离子弧焊接可以焊透且成形良好.与常规等离子弧焊接相比,气流再压缩等离子弧焊接电弧穿透能力更强.

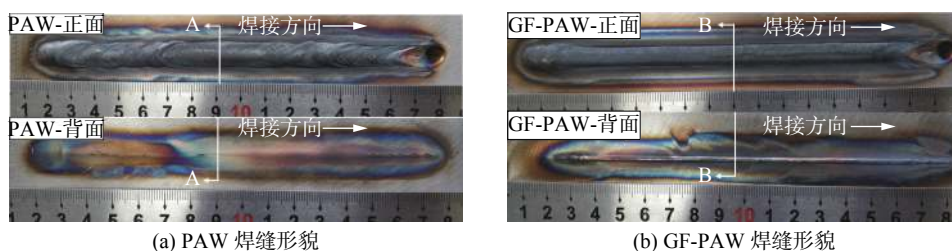


图 3 焊缝宏观形貌

Fig. 3 Weld appearances

在图 3 所示 A-A 和 B-B 位置分别进行取样,常规等离子弧焊接和气流再压缩等离子弧焊接的焊缝横截面形貌如图 4 所示.试验结果显示,两种焊接工艺的焊缝皆呈倒喇叭状.常规等离子弧焊接焊缝熔宽为 9.94 mm,熔深为 6.53 mm,余高为 1.51 mm;母材未被熔透,并且出现贯穿整个焊缝的气孔.气流再压缩等离子弧焊接焊缝熔

宽为 8.98 mm,熔深为 7.78 mm,余高为 0.64 mm;母材被完全熔透,未出现气孔等缺陷.与常规等离子弧焊接焊缝相比,气流再压缩等离子弧焊接焊缝熔宽减小 0.96 mm,熔深增加 1.25 mm.试验结果表明,与常规等离子弧焊接相比,气流再压缩等离子弧焊接熔透能力更强,热源能量更集中.

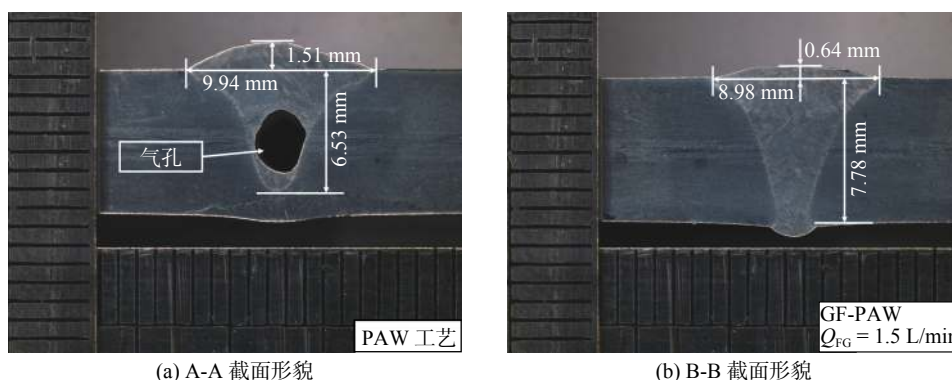


图 4 焊缝横断面

Fig. 4 Cross section of weld

3.2 焊缝温感扫描分析

图 5 是实时检测的常规等离子弧焊接焊缝温感扫描.温感扫描图显示 c, d, e 处异常,实际焊缝中的 C, D, E 处焊缝成形确实存在异常.实时的温感扫描图能够比较准确的反映焊缝成形.图 6 是常规等离子弧焊缝红外温度分布,可以比较明显地反映焊缝成形非均匀性,与实际焊缝成形相符.

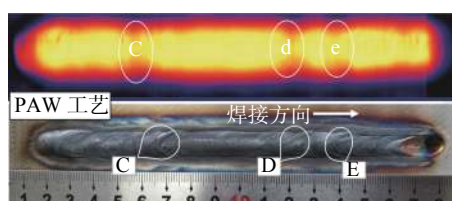


图 5 PAW 焊缝温感扫描图

Fig. 5 Thermal scanning of PAW weld

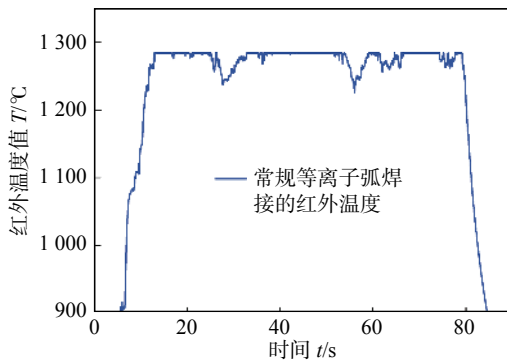


图 6 PAW 焊缝红外温度分布

Fig. 6 Thermal scanning temperature distribution of PAW weld

图 7 是实时检测的气流再压缩等离子弧焊接焊缝温感扫描。从图中可以看出,焊缝温感扫描图像比较稳定均匀。图 8 是气流再压缩等离子弧焊接红外温度分布曲线,曲线较平滑,说明焊缝成形均匀。

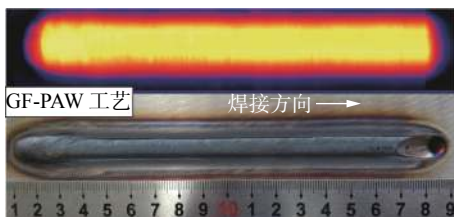


图 7 GF-PAW 焊缝温感扫描

Fig. 7 Thermal scanning of GF-PAW weld

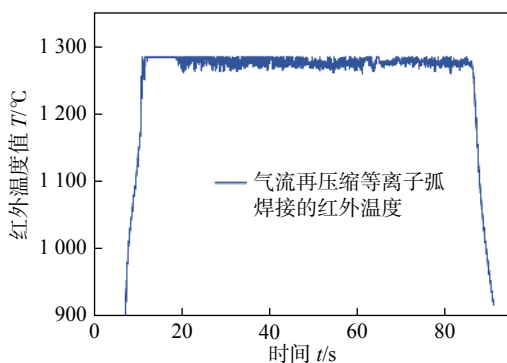


图 8 GF-PAW 焊缝红外温度分布

Fig. 8 Thermal scanning temperature distribution of GF-PAW weld

通过对常规等离子弧焊接和气流再压缩等离子弧焊接焊缝温感扫描图像的分析,发现焊缝温感扫描图可以比较准确的反映实际焊缝成形。

3.3 聚焦气对电弧电压的影响

图 9 是采集常规等离子弧焊接和气流再压缩等离子弧焊接电弧电压变化曲线。从图中可以看出常规等离子弧焊接电弧电压波动较大,电弧电压平均值为 24.4 V;气流再压缩等离子弧焊接电弧电压

曲线相对平滑,电压平均值为 26.0 V。与常规等离子弧焊接相比,气流再压缩等离子弧焊接电弧电压时升高了 1.6 V,焊接功率增加了 240 W。结果表明,气流再压缩等离子弧焊接热输入有所增加,热输入增加,焊缝熔深增大,在一定程度上,从能量层面解释了气流再压缩等离子弧焊接焊缝熔深更大这种现象。

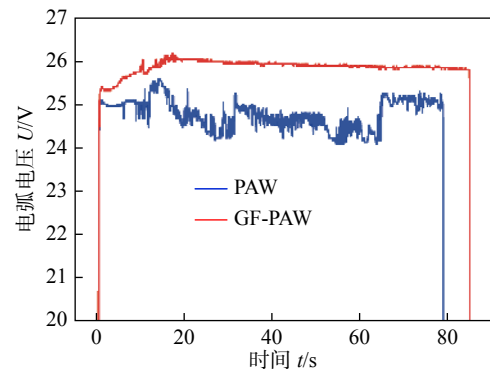


图 9 电弧电压变化曲线

Fig. 9 Variation curve of arc voltage

气流再压缩等离子弧焊接电弧电压升高的本质原因还有待进一步研究。

4 结 论

(1) 与常规等离子弧焊接相比,相同电流条件下,气流再压缩等离子弧焊接可以提高焊接熔透能力。

(2) 在焊接电流为 150 A,聚焦气流量为 1.5 L/min 条件下,气流再压缩等离子弧焊接可以焊透 8 mm 厚的 304 不锈钢板,且正面焊缝和背面焊缝成形良好。

(3) 焊缝温感扫描图可以比较准确的反映实际焊缝成形,有望用于焊缝质量实时在线检测。

(4) 与常规等离子弧焊接相比,相同电流条件下,气流再压缩等离子弧焊接电弧电压升高;但电弧电压升高的原因尚需研究。

参考文献:

- [1] 蒋 凡,盛 珊,陈树君,等. 低压环境对等离子弧穿透能力的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 51 - 55.
Jiang Fan, Sheng Shan, Chen Shujun, *et al.* Effects of low pressure environment on plasma arc penetration[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 51 - 55.

- [2] 陈树君, 蒋 凡, 张俊林, 等. 铝合金变极性等离子弧穿孔横焊焊缝成形规律分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 1 – 6.
Chen Shujun, Jiang Fan, Zhang Junlin, *et al.* Analysis of forming law of transverse welding weld of aluminum alloy variable polar plasma arc perforation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 1 – 6.
- [3] 胡庆贤, 徐 斌, 王晓丽, 等. 穿孔型等离子弧焊接热-力耦合模型优化 [J]. 焊接学报, 2017, 38(1): 13 – 16.
Hu Qingxian, Xu Bin, Wang Xiaoli, *et al.* Optimization of thermal-force coupling model for perforated plasma arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(1): 13 – 16.
- [4] Gupta M R, Reddy M R, Mukherjee M M. Key-hole plasma arc welding of 8mm thick maraging steel-a comparison with multi-pass GTAW[J]. Welding in the World, 2012, 56(9–10): 69 – 75.
- [5] 蒋 凡. 穿孔等离子弧焊接电弧状态及熔池稳定性研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [6] Li X R, Heusman J, Kvidahl L, *et al.* Manual keyhole plasma arc welding with application[J]. Welding Journal, 2011, 90(12): 258 – 264.
- [7] Teker T, Ozdemir N. Weldability and joining characteristics of AISI 430/AISI 1040 steels using keyhole plasma arc welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1–4): 117 – 128.
- [8] Wu C S, Wang L, Ren W J, *et al.* Plasma arc welding: process, sensing, control and modeling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(1): 74 – 85.
- [9] Metcalfe J C, Quigley M B C. Keyhole stability in plasma arc welding[J]. Welding Journal, 1975, 54(11): 401 – 404.
- [10] Liu Z M, Cui S L, Luo Z, *et al.* Plasma arc welding: process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23(4): 315 – 327.
- [11] 雷玉成, 郑惠锦. 工艺参数对焊接等离子弧的影响 [J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 73 – 76.
Lei Yucheng, Zheng Huijin. Effect of process parameters on welding plasma arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(6): 73 – 76.
- [12] O'brien A. Welding handbook[M]. Miami: American Welding Society, 2004.
- [13] 周文瑛, 尹 松. 聚焦气流对大功率等离子弧焊炬工作稳定性的影响 [J]. 焊接学报, 1985, 6(2): 99 – 104.
Zhou Wenying, Yin Song. Effect of focused airflow on the working stability of high power plasma arc torch[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1985, 6(2): 99 – 104.
- [14] Vredeveltdt H L. Increased power density plasma arc welding[D]. Delft: Delft University of Technology, 2014.

第一作者简介: 李天庆, 男, 1987 年出生, 博士, 副教授. 主要从事焊接过程检测, 焊接过程数值模拟. Email: litq@ujs.edu.cn