

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.02.013

用于焊缝跟踪的 TIG 焊磁控电弧装置

岳建锋^{1,2}, 邢恩成^{1,2}, 刘海华^{1,2}, 郝迎斌³

(1. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387; 3. 河北岳泓智机科技开发有限公司, 河北 衡水 053000)

摘要: 针对钨极惰性气体保护(TIG)焊弧压跟踪中采用传统机械摆动装置容易发生钨针与坡口的干涉碰撞问题, 设计开发了一套磁控装置, 利用外加横向磁场作用于焊接电弧实现柔性电弧往复摆动, 通过提取弧压特征信号, 获取焊枪焊接过程中的偏差量, 用于焊缝跟踪。基于 COMSOL 软件建立了磁控装置的有限元模型, 研究了励磁回路、电流对磁场强度及分布的影响规律, 并将此装置应用到 TIG 摆动焊接试验。结果表明: 形成励磁回路能有效增强装置磁场强度; 增大励磁电流, 是最方便有效的增强磁感应强度的方法, 对应的电弧摆动幅度也有明显提升; 在保证磁感应强度不会大幅下降的前提下, 焊缝跟踪时励磁频率选取范围应在 4 Hz 以内; 在开展的对中、左偏和右偏 2 mm 的磁控电弧摆动焊缝偏差实验中, 获得了规律性明显的弧压变化特征, 为下一步磁控电弧偏差提取和焊缝跟踪打下了基础。

关键词: 磁控电弧; 焊缝跟踪; COMSOL 模拟; 磁感应强度

中图分类号: TG409

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)02-0092-05

TIG welding magnetron arc device for weld tracking

YUE Jianfeng^{1,2}, XING Encheng^{1,2}, LIU Haihua^{1,2}, XI Yingbin³

(1. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Hebei Yuehong Zhiji Technology Development Co., Ltd., Hengshui 053000, Hebei Province, China)

Abstract: Aiming at the problem that TIG welding arc voltage tracking in the traditional mechanical oscillating devices are prone to interference of tungsten needle and bevel collision, a magnetic control device is designed and developed. The transverse magnetic field acts on the welding arc to achieve flexible arc reciprocating swing. By extracting characteristic signal of arc voltage, the deviation value in the process of welding torch welding is obtained, which is used for seam tracking. The finite element model of the magnetic control device was established based on COMSOL software, and the influence rules of the excitation circuit and current on the magnetic field strength and distribution were studied. The device was applied to the swing welding test of TIG. The results show that the magnetic field intensity of the device can be enhanced effectively by forming the excitation circuit. Increasing the excitation current is the most convenient and effective way to enhance the magnetic induction intensity, and the corresponding arc swing amplitude is also significantly improved. On the premise that the magnetic induction intensity will not decrease significantly, the range of excitation frequency should be within 4 Hz during welding seam tracking; In the experiments of welding seam deviation of magnetic arc swing with centering, left and right bias of 2 mm, the characteristics of arc pressure variation were obtained regularly, which laid a foundation for the next step of magnetic arc deviation extraction and welding seam tracking.

Key words: magnetically controlled arc; weld tracking; COMSOL simulation; magnetic induction intensity

钨极惰性气体保护(TIG)焊具有可靠性高、热输入稳定和焊接质量好等优点, 广泛地应用于航天系统等

高精度工件及有色金属、合金的焊接过程中^[1-2]。为了提升焊接质量, TIG 焊智能化已成为现代焊接发展的

收稿日期: 2021-12-10

基金项目: 天津市自然科学基金面上项目(18JCYBJC19100); 天津市技术创新引导专项(20YDTPJC01060)

通信作者: 岳建锋(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为焊接自动化。E-mail: billyue@163.com

趋势,焊缝跟踪技术则是要解决的关键技术之一^[3]。

当前,焊缝跟踪器在原理上有基于接触寻位技术、激光视觉技术、弧压信号检测技术等多种形式。其中电弧传感器是利用焊接电弧特性提取跟踪信号的传感器,具有非接触、成本低等优势^[4-5]。目前国内外对应用在熔化极气体保护焊(GMAW)中的电弧传感器研究^[6-10]较多,为了提升特征信号采样速度,韩国学者 Kim 等^[11-14]提出了一种依靠导电嘴的偏心来实现焊丝高速旋转的电弧传感器;Yapp 等^[15]设计了一款凸轮式高速摆动器,应用于管道焊缝跟踪。这些传感器存在噪声大、易磨损、结构复杂等问题,在 TIG 焊缝跟踪时,由于钨针高度距工件通常较低,一般为 3~5 mm,摆动过程中容易与坡口发生干涉碰撞,制约 TIG 电弧跟踪技术广泛应用。

哈工大王建峰等^[16]已经把磁控电弧应用到改善熔深、提高焊缝成型等领域。针对当前电弧跟踪的问题所在,基于磁控电弧技术的研究,本文设计开发了一款 TIG 焊磁控装置,通过施加励磁交变电流产生横向磁场,在洛伦兹力的作用下使电弧周期性摆动。利用摆动电弧扫描焊缝坡口,采集弧压的信号变化,进而获取摆动中心偏差实现焊缝跟踪^[17]。设计的磁控装置与传统机械装置不同,是通过调节交变磁场而非机械移动来控制电弧的摆动,可有效提升电弧摆动频率,且避免了钨针与工件的碰撞干涉,具有多重优势,是一种未来有广泛应用前景的弧压跟踪技术。

为了获得励磁装置的磁场强度及其分布规律,本文对设计的励磁结构进行有限元模拟,研究励磁回路上端闭合与不闭合以及励磁电流大小对磁场强度的影响;利用励磁装置试验不同励磁电流和励磁频率对 TIG 焊接电弧摆动的影响,获得最佳的励磁参数范围;开展弧压摆动偏差信号提取,获得左偏、对中和右偏不同条件下弧压信号变化,以期对偏差特征提取和 TIG 焊弧压跟踪研究奠定基础。

1 磁控装置的结构设计

焊接电弧由导电等离子体构成,外加横向磁场在电磁力作用下会使电弧偏转,利用该特性设计了磁控装置的结构,主要由框架、导磁杆、固定块、铁芯、线圈组成,图 1 所示为装置在 V 型坡口的相对位置。交变电流施加在线圈上产生交变的磁场,考虑到交变磁场易产生磁滞,铁芯和导磁杆材质选用牌号为 DT4C 的电磁纯铁,有较高的导磁性能,剩磁和矫顽力均很小。励磁线圈内部增加铁芯,起到了增强磁场强度作用。磁场通过固定块和导磁杆传递到下部钨针电弧附近,

从而在焊接过程中对电弧实施控制。

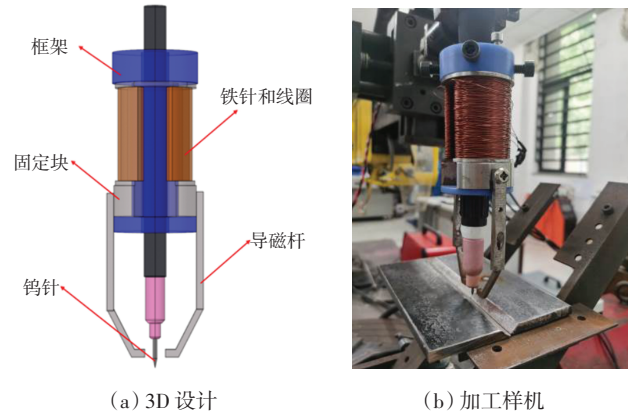


图 1 磁控电弧装置

Fig.1 Magnetically controlled arc device

励磁绕组线圈对称分布,在整体结构方面呈现了对称特性,保证了磁场的对称分布;铁芯在上部的互通使整个结构除在电弧附近形成气隙外,基本是一个完整的封闭磁路,能最大程度增大电弧附近的磁场强度;设计的励磁线圈和铁芯可拆卸,方便线圈匝数的调整;此外导磁杆上开有通孔,可穿过焊丝,送丝角度可以微调,保证在固定的最佳位置填丝,有效提升熔丝效率。

2 励磁装置横向磁场的有限元模拟

2.1 物理模型的建立

为了掌握励磁装置磁场强度影响因素及其分布规律,对磁控装置进行有限元建模仿真。利用 COMSOL 有限元软件建立了励磁装置的三维模型。外部的圆柱体充当空气域,铁芯、固定块、导磁杆材料选择有损耗的软铁;线圈通过输入输出面的定义,确保导磁杆底部一端为 N 极,一端为 S 极,对模型进行自由四面体的常规网格划分,模型网格划分结果如图 2 所示。

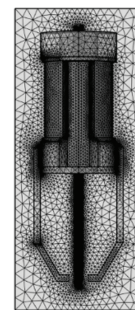


图 2 网格划分物理模型

Fig.2 Physical model of meshing of grid partitioning

2.2 励磁回路对磁场的影响

在结构设计之初,研究了装置上部回路不闭合和闭合 2 种结构对下部电弧区域磁场的影响,如图 3 所

示。图 3 的 2 个模型进行磁场模拟,磁感应强度分布如图 4 所示。由图 4 可以看出,当磁回路闭合时,模型在电弧附近区域的磁感应强度要远远强于磁路不闭合情况。随后又对 2 种不同模型的空间点 A 处磁感应强度进行计算,电流为 5 A、频率为 1 Hz 的情况下,磁回路闭合的模型磁感应强度大约为 5.16 mT,不闭合磁感应强度大小为 1.405 mT,得出形成磁回路能有效提高磁场强度这一结论,也证明了本装置设计的合理性。

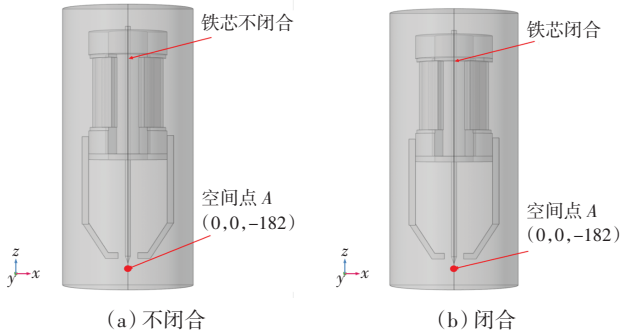


图 3 磁回路不闭合与闭合模型

Fig.3 Closed and unclosed model of magnetic loop

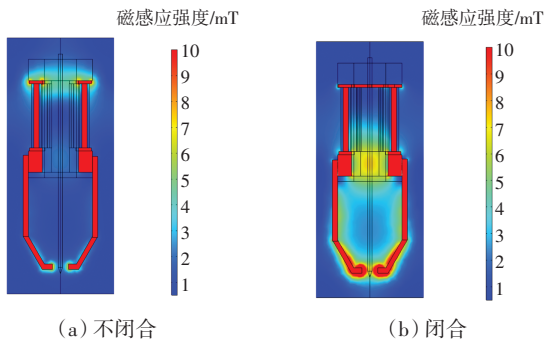


图 4 磁回路不闭合与闭合的磁感应强度

Fig.4 Magnetic induction intensity of closed and unclosed magnetic loop

2.3 励磁电流对磁场的影响

为了进一步获得励磁电流对励磁装置磁场的影响规律,对励磁线圈分别施加 1 Hz 以及 1、3、5 和 8 A 不同电流值,仿真结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着励磁电流强度的变化,磁路走向及磁场分布并没有发生改变,只是随着励磁电流的增加,磁场强度发生了显著增强。

2.4 实验验证

为了验证有限元模型的有效性,针对设计加工的励磁装置,绕制线圈 140 匝,下部磁极间隙 15 mm,采用美国 F.W.BELL 6010 型霍尔效应高斯计,从 1 A 到 10 A 施加不同励磁电流,测量固定位置的磁感应强度,与有限元仿真计算的数值进行对比,结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,有限元磁场强度仿真的结果与实际测量的数据都是随着电流的增大而增大,上升的

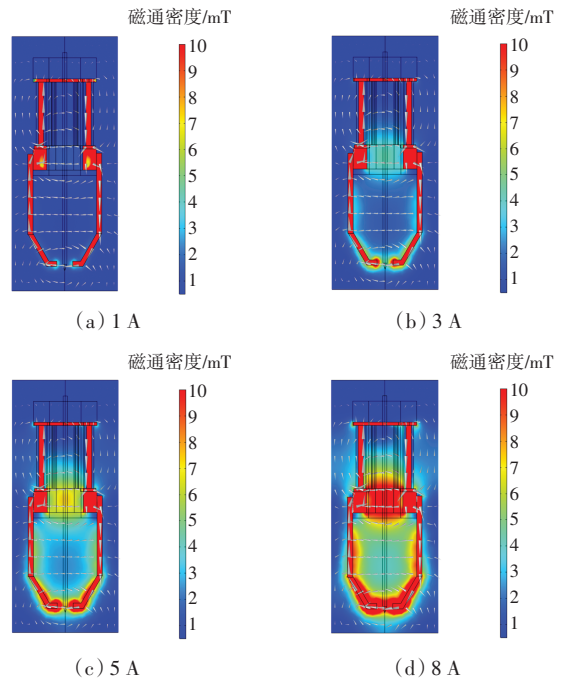


图 5 不同电流下的磁场分布

Fig.5 Magnetic field distribution under different currents

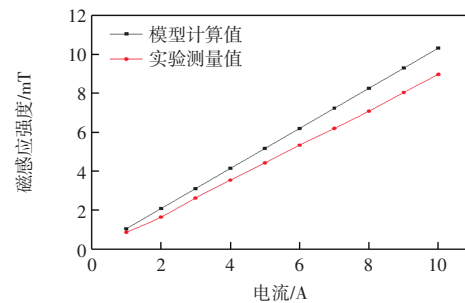


图 6 不同电流下测量值与模拟值对比

Fig.6 Comparison of measured values and simulated values under different current currents

趋势一致,实际测量值略小于模拟计算结果。这可能与实际测量位置的选取存在偏差有关。

3 磁控电弧的摆动实验及弧压信号采集

3.1 不同励磁条件下电弧的摆动形态

用 CMOS 高速工业相机及计算机配套软件记录下不同励磁电流及不同励磁电流频率下电弧摆动幅度的图像。图 7 为 2、4、6 和 8 A 励磁电流环境下电弧的摆动情况。由图 7 可以明显看到,随着电流的增大,电弧摆动幅度也随之增加。当励磁电流为 8 A 时,摆动幅度达到约 4 mm。

为了研究电流频率对电弧摆动的影响规律,开展了励磁电流为 6 A 条件下,励磁电流频率分别为 1、4、7 和 10 Hz 的试验,结果如图 8 所示。

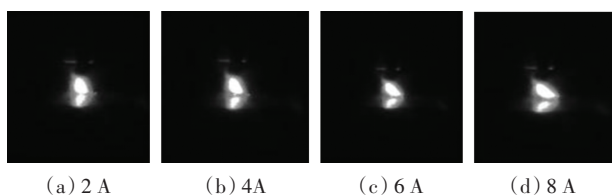


图 7 不同电流下电弧的摆动

Fig.7 Arc oscillations at different current currents

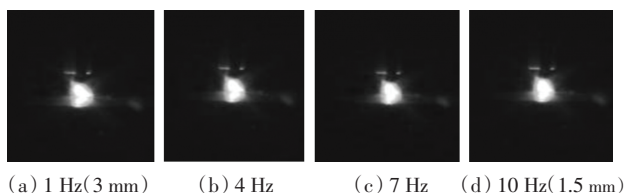


图 8 不同频率下电弧的摆动

Fig.8 Arc oscillations at different frequencies

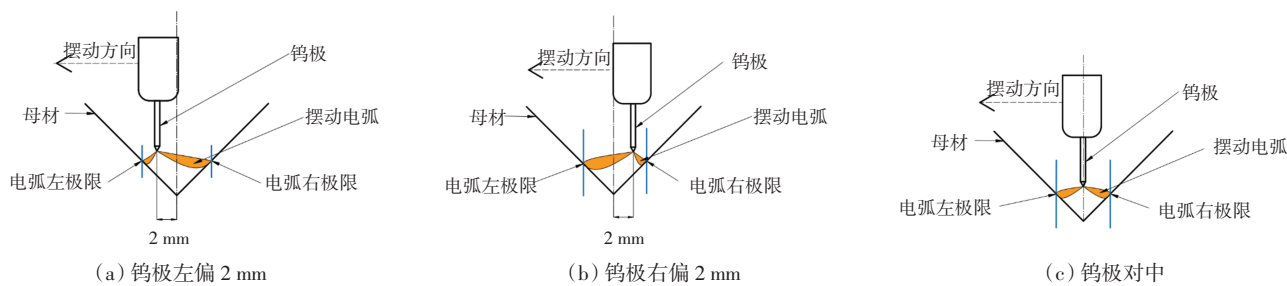


图 9 钨极在坡口中偏差示意

Fig.9 Schematic diagram of tungsten electrode deviation in groove

由图 9 可以看出,焊枪相对焊缝有偏差时,电弧摆动到左右极限弧长存在明显差异。随后对这 3 种情况下的弧压信号进行分析,结果如图 10 所示。图 10 中,红色为采集到的弧压信号,蓝色为施加的励磁电流交变信号。由图 10 可以看出,弧压信号曲线周期性

从图 8 中可以看出,4 Hz 时电弧摆幅无明显变化,10 Hz 时电弧摆幅已明显减小,从 1 Hz 的 3 mm 变为 1.5 mm。原因分析为电弧作为等离子体,具有柔性和惯性的特点,高频摆动时会被压缩。应用在焊缝跟踪并不需要过高摆动频率,所以在保证摆幅不大幅减小的前提下,励磁频率应选取在 1~7 Hz 以内,实现电弧摆动的有效控制。

3.2 弧压信号的提取

焊接电源为北京时代集团的 TDW 4000M 脉冲 TIG 焊,焊接方式选择为恒流输出模式,弧压与电弧长度之间满足线性关系^[18-19]。采用霍尔电压传感器采集焊接时的弧压信号,开展了焊枪左偏 2 mm,对中和右偏 2 mm 条件下的信号采集,结果如图 9 所示。

明显,B、C 处为电弧摆动到左右极限位置时的弧压值,A-B-A-C-A 为一个完整的摆动周期,钨极相对焊缝有偏差时,弧压信号的峰值要比对中时候大得多,且左偏与右偏可以对照励磁信号,通过判断弧压曲线波峰波谷出现的先后次序进行区分。

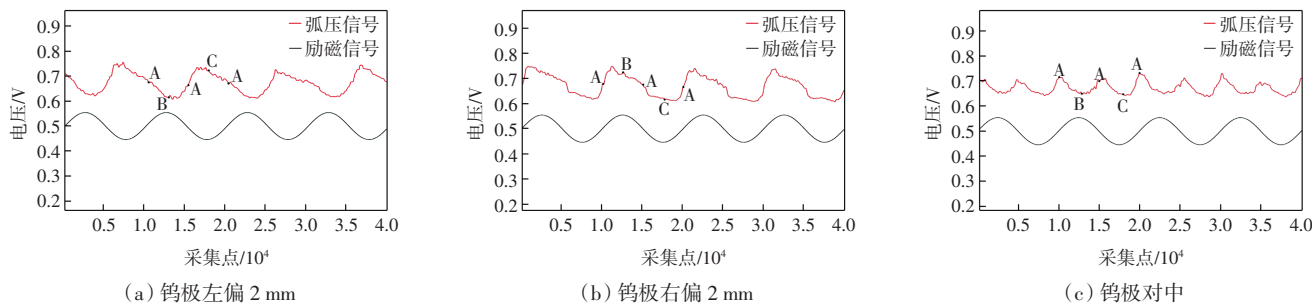


图 10 电信号曲线

Fig.10 Electrical signal curves

4 结 论

(1) 开发的磁控电弧装置,具有结构合理,操作简单,方便调节等优势,适用于 V 型坡口条件下的电弧焊缝跟踪。

(2) 通过励磁装置磁场强度有限元仿真,获得了

磁路上端闭合以及励磁电流对磁场强度大小和分布的影响规律,验证了结构设计的有效合理性。

(3) 励磁装置作用于 TIG 焊电弧,发现励磁电流对于电弧摆动幅度的提升具有显著影响,励磁频率在 4 Hz 以内效果较好。通过 V 型坡口磁控电弧摆动试验,获得弧压信号,为下一步利用弧压信号构建摆动

中心偏差特征提取和焊缝跟踪奠定了基础。

参考文献:

- [1] 杨萍, 李芳昕, 赵凯, 等. 机器人型 TIG 焊化工作站的设计与研究[J]. 电焊机, 2018, 48(8): 53-60.
YANG P, LI F X, ZHAO K, et al. Design and research of automatic TIG welding robot workstation[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(8): 53-60(in Chinese).
- [2] 李远. 自动 TIG 焊在核电设备稳压器防热冲击套管焊接中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2018(8): 36-38.
LI Y. Application of automatic TIG welding in the welding of nuclear power equipment voltage stabilizer thermal shock sleeve[J]. MW Metal Forming, 2018(8): 36-38(in Chinese).
- [3] 刘念. 弧焊机器人焊缝跟踪系统的研究和实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
LIU N. Research and implementation of seam tracking system for arc welding robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [4] 贾剑平, 张华, 徐健宁. 电弧传感器的研究现状与展望[J]. 焊接, 2005(11): 14-18.
JIA J P, ZHANG H, XU J N. Research status and prospect of the arc sensor[J]. Welding & Joining, 2005(11): 14-18(in Chinese).
- [5] 王加友, 朱征宇, 任彦胜, 等. 窄间隙焊缝跟踪电弧传感方法及特性研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2007, 21(6): 17-20.
WANG J Y, ZHU Z Y, REN Y S, et al. Arc sensing approach and its characteristics for narrow gap welding seam tracking[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 21(6): 17-20(in Chinese).
- [6] 熊震宇, 张华, 潘际銮. 电弧传感器的发展状况及应用前景[J]. 焊接技术, 2001, 30(5): 2-6.
XIONG Z Y, ZHANG H, PAN J L. Developing status and application prospect of the arc sensor[J]. Welding Technology, 2001, 30(5): 2-6(in Chinese).
- [7] 曾松盛, 石永华, 王国荣. 基于电弧传感器的焊缝跟踪技术现状与展望[J]. 焊接技术, 2008, 37(2): 1-6.
ZENG S S, SHI Y H, WANG G R. Research status and prospect of seam tracking technology based on sensor[J]. Welding Technology, 2008, 37(2): 1-6(in Chinese).
- [8] 徐健宁, 陈焕明, 熊震宇. 电弧传感器的研究及应用现状与面临的问题[J]. 金属加工(热加工), 2002(5): 19-21.
XU J N, CHEN H M, XIONG Z Y. Research and application status and problems of arc sensor[J]. MW Metal Forming, 2002(5): 19-21(in Chinese).
- [9] LE J, ZHANG H, XIAO Y. Circular fillet weld tracking in GMAW by robots based on rotating arc sensors[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9): 2705-2715.
- [10] 尹力. 旋转电弧脉冲 GMAW 焊焊缝跟踪系统的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2007.
YIN L. Research on seam tracking system of rotating arc pulse GMAW welding[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2007(in Chinese).
- [11] KIM G H, NA S J. A study of an arc sensor model for gas metal arc welding with rotating arc Part 1: Dynamic simulation of wire melting[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(9): 1271-1279.
- [12] KIM G H, NA S J. A study of an arc sensor model for gas metal arc welding with rotating arc Part 2: Simulation of an arc sensor in mechanically rotating gas metal arc welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(9): 1281-1288.
- [13] JEONG S K, LEE G Y, LEE W K, et al. Development of high speed rotating arc sensor and seam tracking controller for welding robots[C]//International Symposium on Industrial Electronics Proceedings. Pusan, South Korea: IEEE, 2001: 845-850.
- [14] KIM C H, YOO W S, NA S J. Development of an arc sensor with mechanized rotation of electrode[J]. Materials Science Forum, 2003, 426/427/428/429/430/431/432: 4135-4140.
- [15] YAPP D, BLACKMAN S A. Recent developments in high productivity pipeline welding[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004, 26(1): 89-97.
- [16] 洪波, 魏复理, 来鑫, 等. 一种用于焊缝跟踪的磁控电弧传感器[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 1-4, 8.
HONG B, WEI F L, LAI X, et al. A magnetic-control arc sensor for seam-tracking[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 1-4, 8(in Chinese).
- [17] 来鑫, 洪波, 洪宇翔, 等. 基于磁控电弧传感的焊缝偏差信息检测与实时跟踪系统[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(S1): 50-52, 56.
LAI X, HONG B, HONG Y X, et al. Welding seam deviation information detection and real-time tracking system based on magnetron arc sensing[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(S1): 50-52, 56(in Chinese).
- [18] KARAFI M R, NARIMANI R, HOJJAT Y, et al. Study on automatic control of arc gap in robotic TIG welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(9): 953-960.
- [19] COOK G E. Robotic arc welding: Research in sensory feedback control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1983, 30(3): 252-268.

本文引文格式:

岳建锋, 邢恩成, 刘海华, 等. 用于焊缝跟踪的 TIG 焊磁控电弧装置[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(2): 92-96.
YUE J F, XING E C, LIU H H, et al. TIG welding magnetron arc device for weld tracking[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(2): 92-96(in Chinese).