

● 综述 ●

窄间隙 TIG 焊接电弧特性研究方法概述

杨涛¹, 李霄¹, 李渊博², 李光¹

(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 兰州交通大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:窄间隙 TIG 焊接方法作为一种高效焊接技术,在工业生产中有着广泛的应用前景。本文综述了近年来针对窄间隙 TIG 焊接电弧特性所采用的研究方法,包含数值模拟研究及试验测量两大类,主要研究了不同焊接工艺参数对窄间隙 TIG 焊接电弧特性的影响规律。结合两种方法的各自优势,通过试验测量辅助数值模拟来研究电弧特性能够获得较为全面的研究结果。

关键词:窄间隙 TIG 焊接;电弧特性;研究进展

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.19.001

中图分类号: TG444⁺.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2019)19-0001-05

Overview of Research Methods for Narrow Gap TIG Welding Arc Characteristics

YANG Tao¹, LI Xiao¹, LI Yuanbo², LI Guang¹

(1. School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. School of Material Science and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: As a high-efficiency welding technology, the narrow gap TIG welding method has wide application range in industrial production processes. The research methods used in the narrow gap TIG welding arc characteristics were reviewed, including numerical simulation research and experimental measurement. The influence of different welding process parameters on the arc characteristics of narrow gap TIG welding was studied. Combining the respective advantages of the two methods, more comprehensive research results can be obtained by experimental measurement and numerical simulation.

Key words: narrow gap TIG welding; arc characteristic; research progress

近年来,随着我国高端产业的不断发展与完善,具备高强度、轻量化特点的新材料被广泛应用于核电、航空航天、压力容器等大型装备制造业,焊接器件、仪器、设备的精密化也对焊接过程控制提出了更高的要求^[1]。先进的焊接技术要求在提高焊接效率、保证焊接质量的同时,最大程度地节约能源,提高材料的利用率,在经济快速发展的今天已经开始逐步取代传统焊接方法^[2]。

窄间隙 TIG 焊接方法具有焊接过程稳定、焊接效率高等优点,能够精确调控焊接线能量,控制冶金损伤,在许多重要构件及高强度结构材料的焊接中

被广泛应用。然而,窄间隙 TIG 焊接过程中,电弧需要同时加热坡口侧壁和底部,调控难度较大^[3],因此有必要对窄间隙 TIG 焊接过程中的电弧特性进行系统的认识和研究。

本文对近年来国内外关于窄间隙 TIG 焊接电弧特性的研究方法及其进展进行综述,分析了各类研究方法的特点及优势,为窄间隙 TIG 焊接电弧调控技术的进一步优化提供试验支撑和理论依据。

1 窄间隙 TIG 焊接电弧特性主要研究方法

焊接电弧作为焊接过程中能量传输的载体,有着超高温、大量电磁辐射干扰以及电弧热物理性耦合变化的复杂特性,其自身反应过程复杂,所受的影响因素众多^[4]。窄间隙 TIG 焊接过程中,因受坡口侧壁影响,电弧形态发生改变,导致获取电弧信息的难度大大增加。

针对上述问题,国内外众多学者纷纷采取不同方法对窄间隙 TIG 焊接电弧特性展开研究,主要包

收稿日期:2018-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605384);材料成型与模具技术国家重点实验室开放课题研究基金项目(P2018-17)

作者简介:杨涛(1992-),男,陕西渭南人,硕士,主要研究方向:先进连接方法及焊接电弧物理;电话:15109241273;
E-mail:15109241273@163.com

通讯作者:李渊博(1984-),男,甘肃兰州人,博士,主要研究方向:先进连接方法及焊接电弧物理;电话:13289291027;
E-mail:liyuan-bo1027@163.com

括试验测量和数值模拟两大类。试验测量方法主要有高速摄像技术^[5]、分裂阳极法^[6]、小孔静态法^[7]、钨探针测量法、静电探针法等^[8],能够对窄间隙 TIG 焊接电弧特性进行实时监测和采集分析。数值模拟方法能够直观地展示电弧传热传质机理,在应用过程中能够同试验方法互相验证,有助于更全面地研究电弧特性。

2 试验测量方法研究窄间隙 TIG 焊接电弧特性

2.1 高速摄像技术监测电弧

良好的空间分辨率使得电弧视觉信息具有独特的优势,此外,视觉图像传感器不与焊接回路接触,从而在电弧信息传感过程中免受多种因素干扰,能够在复杂的工作环境下高效提取电弧信息。近年来利用高速摄像技术帮助焊接研究者采集到大量关于窄间隙 TIG 焊接电弧形态的瞬态信息,为研究窄间隙 TIG 焊接电弧特性提供了可视化依据^[9]。

乌克兰巴顿焊接研究所 Akhonin^[10]等采用高速摄像技术获取了纵向磁场控制下的窄间隙 TIG 焊接电弧形态,结合母材熔化形貌分析了不同磁场强度和磁场频率下的电弧加热特性。Wang^[11]等通过电磁力调节电弧,并采用高速摄像机拍摄电磁力作用下的窄间隙 TIG 焊接电弧形态。试验发现磁场作用能够引起电弧产生偏转,使电弧在焊接过程中呈向上运动的趋势,这是由于电弧受侧壁约束及附加洛伦兹力的共同作用。另外,电弧摆动宽度会随磁感应强度的增加而增大,且不同的磁感应强度会不同程度地将电弧约束在侧壁或底部位置。闫强强^[12]利用窄间隙 TIG 旋转电弧焊接工艺,周期性地将电弧引导至窄间隙两侧壁。用高速摄像机采集到焊接过程中电弧旋转形态对侧壁周期性加热情况,验证了该焊接工艺的可行性。

尽管视觉图像传感技术能够满足上述电弧信息的采集,但要定量测定电弧发光区域及边界仍有一定难度。尤其针对间隙更小的超窄间隙焊接,侧壁之间高能量的焊接弧光甚至能够照亮整个焊缝区域,使得电弧界限更难以分辨,这成为利用高速摄像技术研究窄间隙焊接电弧的关键难点问题。

2.2 分裂阳极法

分裂阳极法,即采用绝缘层将阳极隔开,再结合差动分析法对阳极表面电流密度进行测量^[13]。分裂

阳极差动分析法原理在于,当电弧相对于阳极表面移动一定距离时,会导致两块阳极板之间产生电流差,通过求偏导等一系列数值运算可获得阳极平面一维或二维电流密度分布。

德国德累斯顿科技大学 Häßler^[14]等利用分裂阳极法原理,将阳极分裂开来,用机械摆动钨极测定了两块水冷铜板之间阳极表面电弧电流及热流的分配特征,得到窄间隙 TIG 焊钨极摆动不同位置及不同氛围气体保护下的电流和热量信息。吴启东^[15]为了研究横向磁场对窄间隙 TIG 焊弧柱电场分布的影响规律,自制分裂阳极测量装置,阳极由相互绝缘的水冷铜块组成,并由云母薄层隔开。测量过程中,首先调节磁场强度,使焊接坡口侧壁和底部电流相等,电弧被偏置在一个固定位置。接着用分裂阳极差动法测量电流对各坐标的一阶偏导数值,分析测量结果显示,调节磁场强度能够改变坡口底角处电流密度,满足不同焊接工艺需求。

2.3 小孔静态法

小孔静态法测电弧原理为阳极表面开小孔,在小孔下端利用气压计或压力传感器等方法实际测定电弧压力分布,如图 1 所示。目前,该方法多用于非轴对称电弧电压的测量,鉴于窄间隙条件下电弧也呈非轴对称性,因此利用小孔静态法测量窄间隙 TIG 焊接电弧同样具有可行性。

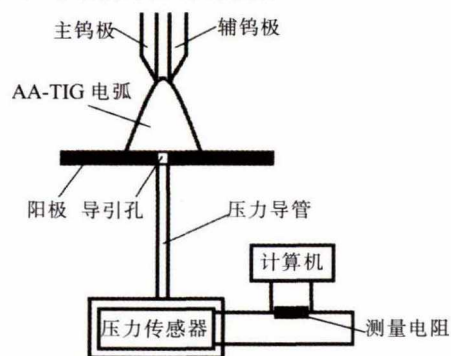


图 1 AA-TIG 焊电弧压力测量系统^[16]

Fig.1 AA-TIG welding arc pressure measurement system^[16]

冷雪松^[17]等利用静态小孔法测量出稳定燃烧的直流双钨极氩弧焊电弧压力分布,对比单钨极电弧,研究了焊接电流、电弧弧长、钨极间距及钨极形状对耦合电弧压力分布的影响规律,指出双钨极耦合电弧在物理特性上同传统单钨极 TIG 焊接电弧的区别所在。黄勇^[16]等利用静态小孔法对耦合电弧 AA-TIG 焊 (arc assisted activating TIG welding) 不锈钢作阳极时的电弧压力进行测量,研究了电弧弧长、

焊接电流、钨极间距等工艺参数对耦合电弧 AA-TIG 焊电弧压力分布的影响规律,同常规 TIG 焊接电弧对比发现相同条件下耦合电弧 AA-TIG 焊电弧压力峰值明显降低。

2.4 钨探针测量法

贾昌申^[18]等设计了图 2 所示钨探针测量装置,利用直径较小且与水冷铜阳极板之间设有绝缘层的钨钨极作探针,穿过阳极中间小孔对电弧电流进行测定,再将测得的电流值换算为电流密度。该装置每次测量的电流均为某点上的电流数值,很容易将其换算成为电流密度,测量精度高、计算简单,所得结果能够真实反映实际焊接电弧特性,并且该方法同样可借鉴窄间隙焊接中非轴对称电弧电流密度的测量。

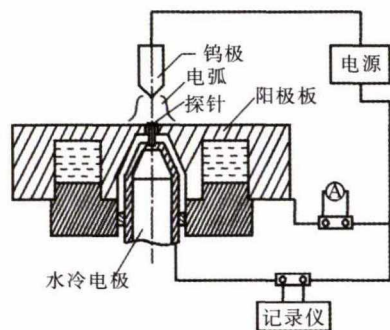


图 2 自制探针测量法装置示意图^[18]
Fig.2 Schematic diagram of self-made probe measuring device^[18]

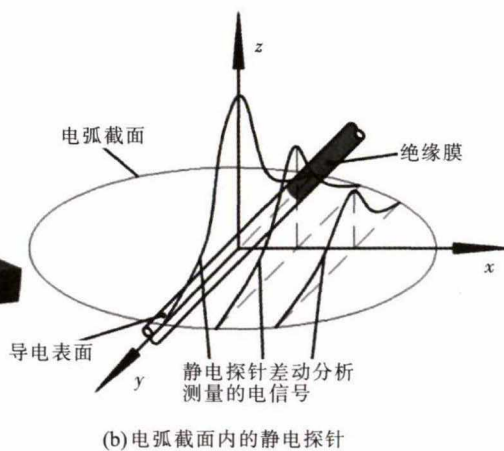
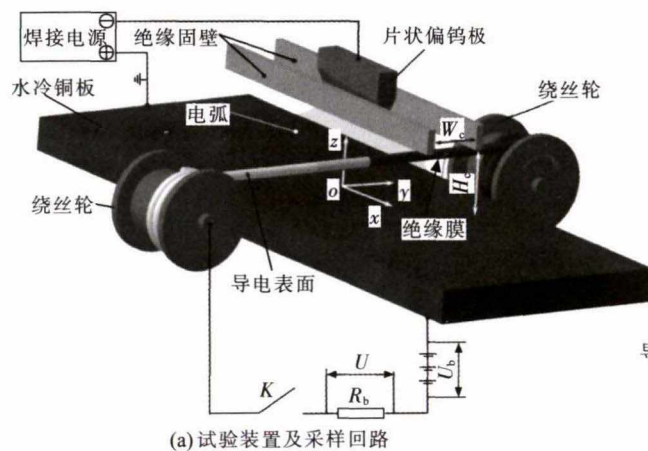


图 3 静电探针差动试验装置
Fig.3 Electrostatic probe differential test device

的位置,探针测量的电信号由数字示波器记录。差动分析原理在于相邻采样时刻导电表面积的差值对应测定的饱和离子电流的差值,仅通过减小相邻采样时间间隔可达到减小导电表面积的作用,最终实现饱和离子电流的局域微量测量。试验测量了不同约束程度下载流区温度的分布特征,明确了绝缘固壁

然而,在测量过程中,探针与阳极板之间的绝缘要求较高,绝缘层厚度要尽可能小,以减小测量误差。另外,测量过程中探针烧损应尽量缓慢,且要保持尖端几何形状及尺寸不变,同时探针的直径应尽可能小,以提高测量精度。实践表明,现有条件很难同时满足上述条件,因此,目前只能对较小电弧电流进行准确测量。

2.5 静电探针法

使用静电探针电弧进行诊断时,通过作为探针的金属丝导电表面与弧柱空间静电场之间的作用,采集描述带电粒子温度的电信号。因此,探针导电表面积越小,越有利于对弧柱带电粒子温度进行局域微量测量。但是,传统的静电探针主要通过金属丝覆套陶瓷管调节导电表面,很难获得足够小的导电表面积。

针对上述问题,李渊博等^[8]采用静电探针差动分析方法,对用于超窄间隙焊接的绝缘固壁约束片状偏钨极电弧载流区饱和离子电流进行局域微量测量。测量装置如图 3 所示,用水冷铜板作阳极,将绝缘固壁对称放置于片状钨极两侧,通过调节绝缘固壁位置可以改变其对片状钨极电弧的约束程度。静电探针表面经瓷质阳极氧化处理,局部形成绝缘膜,在绕丝轮的驱动下高速穿过电弧进行测量。与此同时,还可沿 x 和 z 方向调节静电探针在电弧弧柱中

对片状偏钨极电弧温度的影响规律和调控机理,为超窄间隙 TIG 焊接过程控制和工艺优化提供了必要的理论基础及试验依据。

3 数值模拟研究窄间隙 TIG 焊接电弧

数值模拟可用来近似描述电弧焊过程引发的物

理现象,分析焊接时的电磁和传热过程以及温度、电流密度等物理量分布,帮助人们更深层次理解焊接过程的实质,已成为研究焊接电弧不可或缺的理论方法^[19]。

早期对于电弧的数学研究仅局限于解析法。吴启东^[20]利用解析法推导了三维直角坐标系中窄间隙 TIG 焊接电弧弧柱的电场方程式,得到窄间隙 TIG 焊接电弧弧柱区电位分布及沿底板和侧壁的电场分布曲线。结果表明底板和侧壁交角处电流密度为零,且不随电弧电压和焊接电流而改变,指出这是导致窄间隙侧壁底角熔合不良的根本原因。

近年来,借助各类仿真模拟软件,一些国内外学者对窄间隙焊接电弧建立了完整体系的数值研究和模拟。法国阿海珐集团核工业技术中心工程师 Traidia 等^[21]采用二维简化热源模型,模拟了横焊位置窄间隙 TIG 焊接摆动电弧下的熔池流场与温度场,与焊缝截面形貌进行对比分析,研究了窄间隙

TIG 焊接电弧作用下熔池内部受力情况对焊缝形态的影响机理。Sun^[22]等利用有限元软件 Ansoft Maxwell 分别对单磁极和双磁极磁力线及磁通量密度分布进行了模拟分析,同时采用高速摄像技术对磁力控制下的窄间隙 TIG 焊接电弧进行监测。对比分析了磁场频率和磁通密度对电弧形态的影响规律,发现磁弧振荡会造成通过侧壁的焊接电流以及电弧电压发生变化,从而引起电弧热量的重新分布。李渊博等^[23]采用 Fluent 软件及其 UDF 二次开发,建立绝缘固壁约束片状钨极超窄间隙 TIG 焊接电弧三维数学模型,对电弧温度场、流场和电场等物理场进行数值模拟,得到了电弧温度、电流密度等物理量的空间分布,如图 4 所示。在此基础上,利用有限差分原理进一步得到不同焊接工艺参数下超窄间隙绝缘固壁约束片状钨极电弧物理场变化特征,揭示了超窄间隙绝缘固壁约束片状钨极电弧特性的调控机理,提出绝缘固壁联合片状钨极调控方法是改善超窄间隙

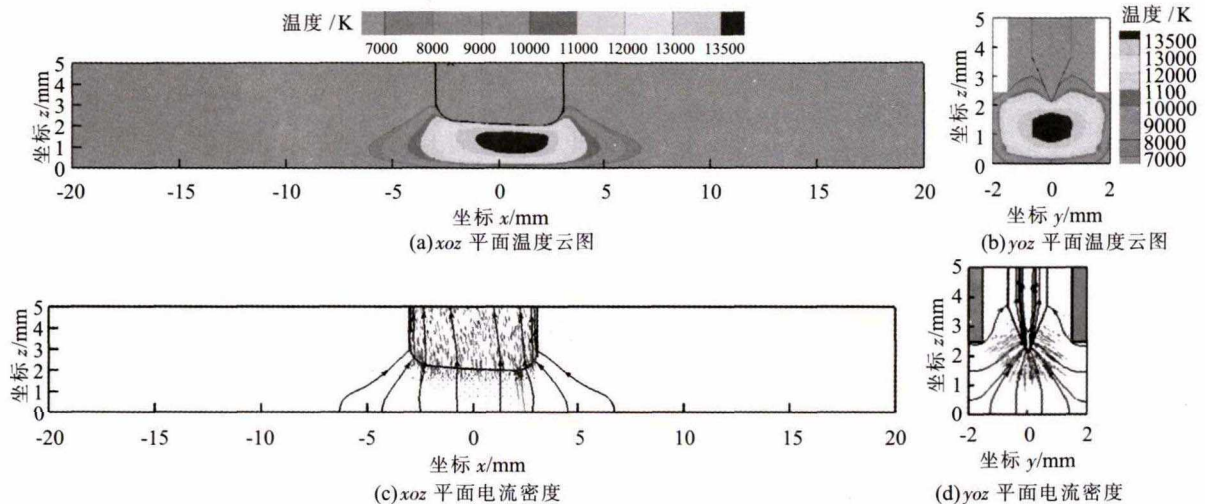


图 4 绝缘固壁约束超窄间隙 TIG 焊接电弧物理场分布

Fig.4 Physical field distribution of insulating fixed wall constraint ultra-narrow gap TIG welding arc

TIG 焊接电弧特性的重要因素。

4 结论

窄间隙焊接较小的坡口空间尺寸增加了认识窄间隙 TIG 焊接电弧特性的难度。电弧是集电、磁、热、流等现象共存并相互作用的复杂的气体放电现象,利用现有试验方法全面测量电弧燃烧过程中的电流密度分布、温度分布、速度分布等电弧特性难度较大。而数值模拟方法虽然能够直观地展示电弧传热传质机理,但在研究过程中也需要一定试验结果进行验证。因此,通过试验测量来验证数值模拟可提

高研究效率,并能够多方面展示电弧实质,势必成为未来研究焊接电弧的主要发展方向。

参考文献:

- [1] 何旌,黄健康,余淑荣,等. 窄间隙电弧摆动焊接方法研究现状[J]. 热加工工艺,2017,46(23):5-8.
- [2] Wampler C W. Forward displacement analysis of general six-in-parallel SPS (Stewart) platform manipulators using SOMA coordinates [J]. Mechanism and Machine Theory,1996,31(3): 331-337.
- [3] Matsunawa A,Nishicuchi K. Arc behavior plate melting and pressure balance of the molten pool in narrow grooves [C]// International Conference Proceeding. London,1979:301-310.

- [4] 蒋凡,李元峰,陈树君. 焊接电弧监测技术研究现状及展望[J]. 机械工程学报,2018,54(2):16-26.
- [5] 郭珍珍. 宽动态焊接过程监控系统研制[D]. 北京:北京工业大学,2016.
- [6] Shih K T. Anode current density in high-current pulsed arcs[J]. Journal of Applied Physics,1972,43(12):5002-5005.
- [7] Oh D S, Kim Y S, Cho S M. Derivation of current density distribution by arc pressure measurement in GTA welding[J]. Science and technology of welding and joining,2005,4(10):442-446.
- [8] 李渊博,朱亮. 绝缘片约束 TIG 电弧载流区的静电探针分析[J]. 焊接学报,2014,35(7):55-58.
- [9] Zhang Y M, Wu L, Chen D H, et al. Determining joint penetration in GTAW with vision sensing of weld face geometry [J]. Welding Journal,1993,72(10):S463-S469.
- [10] Akhonin S V, Belous V Y, Romanyuk V S, et al. Narrow-Gap Welding of up to 110 mm thick high-strength titanium alloys[J]. The Paton Welding Journal,2010,5:34-37.
- [11] Wang Jianfeng, Sun Qingjie, Feng Jicai, et al. Characteristics of welding and arc pressure in TIG narrow gap welding using novel magnetic arc oscillation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017,90(1-4):413-420.
- [12] 闫强强. 基于窄间隙 TIG 旋转电弧的 9%Ni 钢自动立焊技术研究[D]. 济南:山东大学,2018.
- [13] 赵彭生,王耀文. 等离子焊接电弧电流密度分布模型[J]. 焊接学报,1991,12(3):182-187.
- [14] Haßler M, Rose S, Füssel U, et al. TIG narrow gap welding-new approaches to evaluate and improve the shielding gas coverage and the energy input [J]. Welding in the World,2015,59(1):71-76.
- [15] 吴启东. 窄间隙钨极焊接电弧的磁场控制 [J]. 焊接学报,1983(4):171-176.
- [16] 黄勇,瞿怀宇,樊丁,等. 耦合电弧 AA-TIG 焊电弧压力测量与分析[J]. 焊接学报,2013,34(3):33-36.
- [17] 冷雪松,张广军,吴林. 双钨极氩弧焊耦合电弧压力分析[J]焊接学报,2006,27(9):13-16.
- [18] 贾昌申,肖克民,刘海侠,等. 直流 TIG 电弧的电流密度研究[J]. 西安交通大学学报,1994,28(4):33-38.
- [19] 汪建华. 焊接数值模拟技术及应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.
- [20] 吴启东. 钨极焊接电弧在窄间隙中的电场分布[J]. 焊接学报,1983,4(1):39-54.
- [21] Traidia A, Roger F, Schroeder J, et al. On the effects of gravity and sulfur content on the weld shape in horizontal narrow gap GTAW of stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology,2013,213:1128-1138.
- [22] Sun Qingjie, Wang Jianfeng, Cai Chunwei, et al. Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,86(1-4):761-767.
- [23] 李渊博,李霄,王世清,等. 片状偏钨极电弧特性的数值模拟[J]. 焊接学报,2017,38(4):7-12. 

本刊开设特约稿件、名师荐稿、综述专栏

为了尽快反映科技动态,宣传科研、学科带头人,本刊决定开设特约稿件、名师荐稿专栏,尽可能每期发表一篇特约论文或者名师推荐论文,作为每期的开端。

对特约稿件、名师荐稿的要求:出自著名高校、著名教授、基金项目;出自科研机构学科带头人、专家、国家重大科研项目;专业方向为金属材料、金属基复合材料的研究及其成形,包括金属材料的铸造、锻压、焊接、热处理等。

特约稿件的第一作者应为科研、学科带头人;名师荐稿者应为科研、学科带头人。名师荐稿的第一作者非科研、学科带头人,但其应在后续作者中。

为了综合、系统、深入地论述国内外某一学术、科研领域兴起、发展的理论成果、学术水平与技术成就,指出存在的问题,展望未来的发展方向,为该领域的科研、技术人员提供科学理论指导,本刊决定开设综述稿件专栏。

综述稿件的内容应符合本刊的专业方向,主要涉及金属材料、金属基复合材料的研究及其成形,包括金属材料的铸造、锻压、焊接、热处理等。

本刊特别欢迎承担国家、部委或其他机构基金项目的科研人员,为了科学研究而对某一领域进行综合、系统、深入的归纳分析后而撰写的综述论文。