

引用格式:刘自刚,张建峰,钱雪娇,等.大熔覆速率TIG焊研究现状与展望[J].热加工工艺,2024,53(1):12-16.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212521

http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

# 大熔覆速率 TIG 焊研究现状与展望

刘自刚<sup>1</sup>, 张建峰<sup>2</sup>, 钱雪娇<sup>1</sup>, 叶佳城<sup>1</sup>, 孙仲侃<sup>1</sup>

(1. 诺力智能装备股份有限公司 浙江省智能物流装备工程技术研究中心, 浙江 湖州 313100; 2. 长兴瓊晟环保科技有限公司, 浙江 湖州 313100)

**摘要:** TIG 焊具有焊接电弧稳定, 焊缝成形美观, 焊接过程无飞溅等优点, 但也存在熔覆速率低的缺点。本文总结了热丝 TIG 焊、TOP-TIG 焊、TIP-TIG 焊、双钨极 TIG 焊、窄间隙 TIG 焊等几种提高 TIG 焊熔覆速率的高效 TIG 焊接方法, 归纳了这几种大熔覆速率 TIG 焊接方法存在的问题, 并展望了未来的发展方向。

**关键词:** 热丝 TIG 焊; TOP-TIG 焊; TIP-TIG 焊; 窄间隙 TIG 焊

中图分类号: TG444+.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)01-0012-05

## Research Status and Prospect of High Cladding Rate TIG Welding

LIU Zigang<sup>1</sup>, ZHANG Jianfeng<sup>2</sup>, QIAN Xuejiao<sup>1</sup>, YE Jiacheng<sup>1</sup>, SUN Zhongkan<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Intelligent Logistics Equipment of Zhejiang Province, Noblelift Intelligent Equipment Co., Ltd., Huzhou 313100, China; 2. Changxing Aisheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Huzhou 313100, China)

**Abstract:** TIG welding has the advantages of stable welding arc, beautiful weld forming and no spatter in welding process, but it also has the disadvantages of low cladding rate. Several efficient TIG welding methods to improve the cladding rate of TIG welding were summarized, such as hot wire TIG welding, TOP-TIG welding, TIP-TIG welding, double-tungsten electrode TIG welding and narrow gap TIG welding. The existing problems of the high cladding rate TIG welding methods were summarized, and the development direction in the future was forecasted.

**Key words:** hot wire TIG welding; TOP-TIG welding; TIP-TIG welding; narrow gap TIG welding

传统 TIG 焊具有焊接电弧稳定、接头质量优良、焊接过程无飞溅等优点, 在工业生产中获得了广泛应用。但传统 TIG 焊受限于钨极载流能力低、电弧能量不集中等因素, 存在熔覆速率低、焊接熔深浅、焊接速度慢等缺点。为了解决传统 TIG 焊熔覆速率低的问题, 各国焊接工作者提出了多种改进 TIG 焊熔覆速率的焊接方法。本文针对几种大熔覆速率 TIG 焊接方法的研究进展进行总结和讨论, 归纳了几种焊接方法存在的问题, 展望了大熔覆速率 TIG 焊的发展方向。

## 1 热丝 TIG 焊

热丝 TIG 焊是在常规 TIG 焊的基础上, 通过外加热源的方式对焊丝进行预加热, 从而提高 TIG 焊熔覆速率和焊接速度的一种高效焊接方法。该焊接方法不仅保留了 TIG 焊电弧稳定、焊缝成形美观、

焊接过程无飞溅的优点, 同时还可以将 TIG 焊的熔覆速率提高 3~5 倍<sup>[1]</sup>, 目前已经被广泛应用于石化装备、核电装备、航空航天等领域。

热丝 TIG 焊中对焊丝进行预加热的热源主要有三种: 电阻加热、感应加热和电弧加热<sup>[1]</sup>。目前应用最多的是电阻加热, 该技术的原理是在焊丝的前段通入一定大小的电流, 利用焊丝自身的电阻热, 实现焊丝送入熔池前的预加热, 如图 1 所示。通过电阻加热的方式实现对焊丝的预热, 具有加热方便、结构简便等优点。但由于焊丝和母材之间有电流通过, 该电流产生的磁场会作用于电弧, 引起磁偏吹、焊丝电

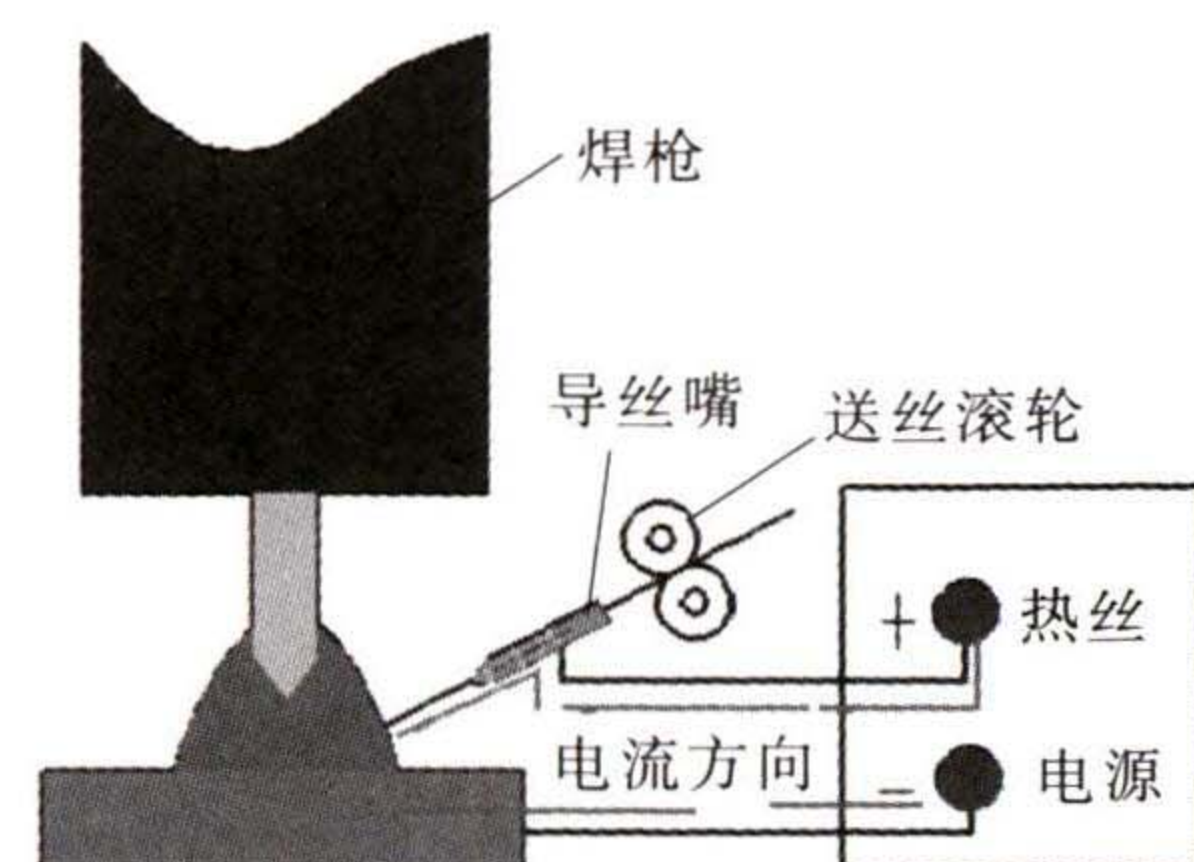


图 1 热丝 TIG 焊原理图

Fig.1 Principle diagram of hot wire TIG welding

收稿日期: 2021-09-17

作者简介: 刘自刚(1985-), 男, 河南夏邑人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 新型高效焊接方法与设备、焊接自动化装备;

E-mail: xuezhiwu125@163.com

弧等问题。为了改善该问题,曹福俊等<sup>[2]</sup>提出了基于热传导的热丝 TIG 焊接技术,其原理是热丝装置通电后发热,并通过热传导的形式间接加热焊丝,如图 2 所示。实验结果表明,该焊接技术相对常规 TIG 焊熔覆速率可以提高 2 倍左右。Tanmay 等人<sup>[3]</sup>在热丝 TIG 焊的基础引入了脉动送丝,通过脉动送丝的方式不仅可以进一步增大熔覆速率,同时在搅拌熔池、细化晶粒、提高焊缝的组织性能方面也具有一定的优势。

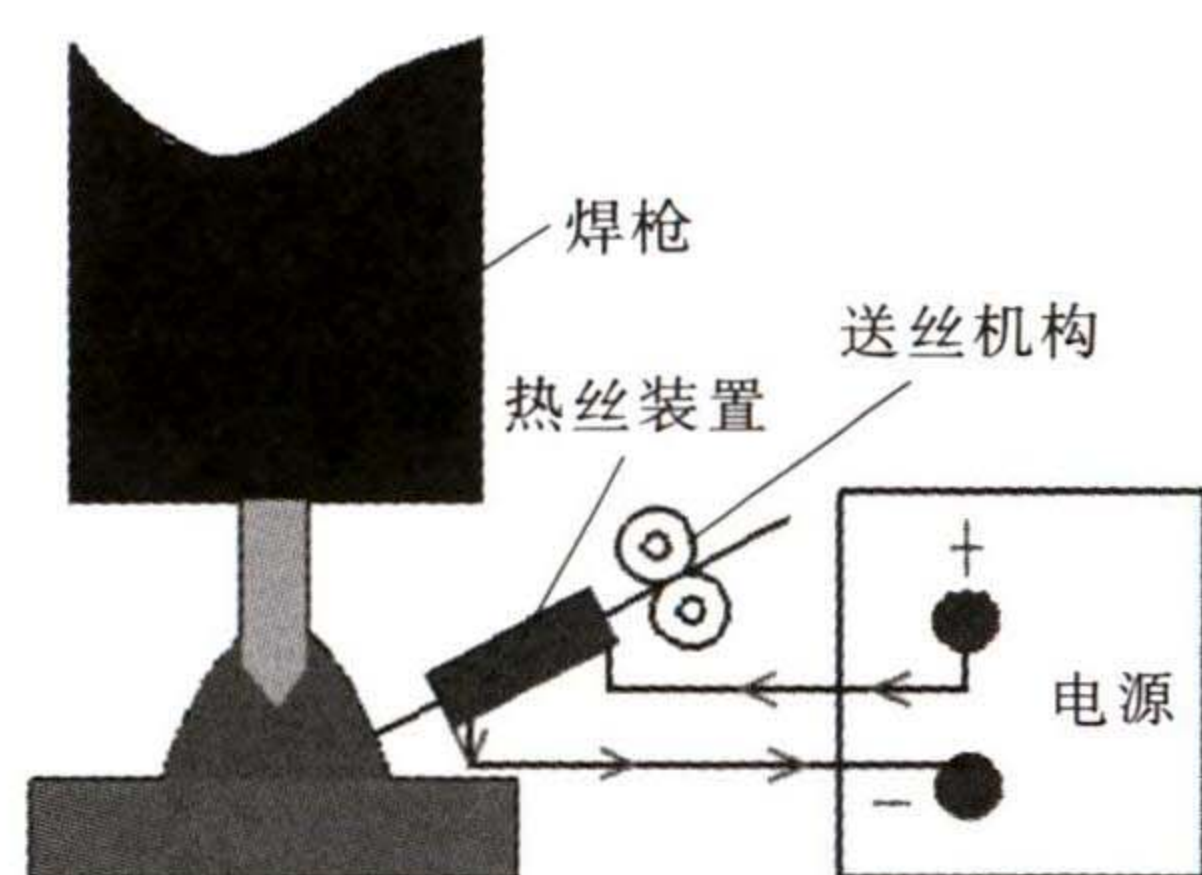


图 2 热传导型热丝 TIG 焊原理图  
Fig.2 Principle diagram of heat conduction type hot wire TIG welding

热丝 TIG 焊目前主要用于堆焊和坡口内填充盖面焊,适用的焊接材料最初以不锈钢为主,经过最近几年的发展也应用于镍基合金、钨铬钴合金、SA213 T91 钢、双相不锈钢 UNSS32101 等特殊材料的焊接<sup>[4-6]</sup>。另外,王纯等<sup>[7]</sup>对 UNSS32707 超特级双相不锈钢进行热丝 TIG 堆焊的工艺研究,结果表明利用热丝 TIG 焊可以实现该焊接材料的良好堆焊,且堆焊层具有较好的耐腐蚀性能。张宏娟<sup>[8]</sup>将热丝 TIG 焊用于 20MnMoNb 钢的窄间隙焊接,通过调整工艺参数实现了 20MnMoNb 钢厚壁缸体的自动窄间隙热丝 TIG 焊。对热丝 TIG 焊的研究,除了通过试验,韩永凯等人<sup>[9]</sup>还采用数值模拟研究了热丝 TIG 焊错边量大对焊缝熔深、熔宽以及背面成形的影响,得出不同错边量和焊缝熔透情况之间的对应关系,并与试验结果吻合较好。

## 2 TOP-TIG 焊

TOP-TIG 焊是将传统 TIG 焊的送丝机构进行改进的一种提高熔覆速率的焊接方法,如图 3 所示。该方法采用特殊设计的焊枪,将焊丝与钨极间夹角调至  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,焊丝在导丝嘴的精确控制下穿过喷嘴送入到电弧的高温区,从而大大提高焊丝的熔覆速率。TOP-TIG 焊枪还大大减小了焊枪的尺寸,增

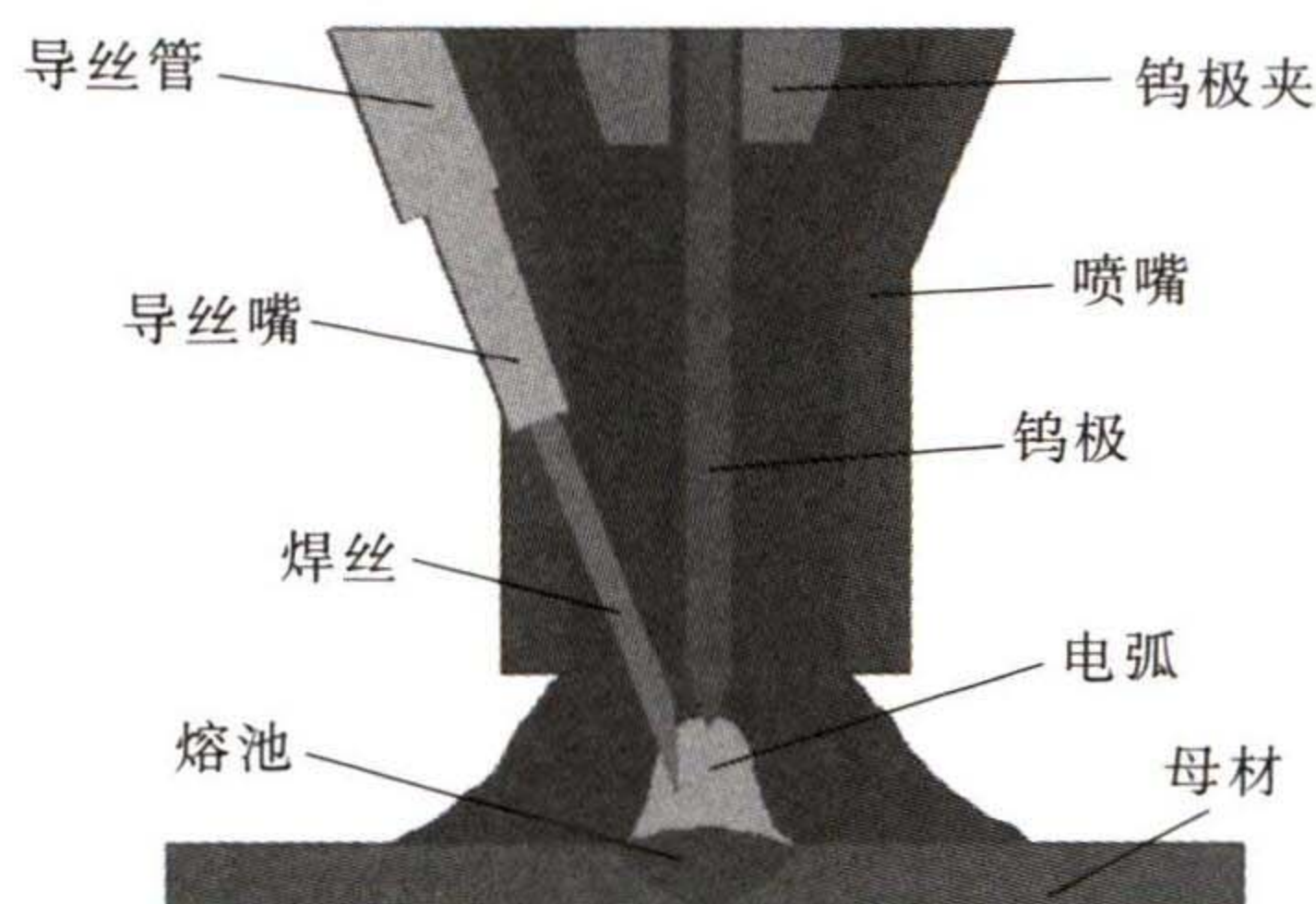


图 3 TOP-TIG 焊枪结构示意图  
Fig.3 Structure diagram of TOP-TIG welding gun

强了焊枪的可达性,有利于实现机器人的自动化焊接生产<sup>[10]</sup>。

对于 TOP-TIG 焊,近几年焊接科技工作者针对不同的材料和工艺进行了研究。Gonçalves 等<sup>[11]</sup>针对 304L 不锈钢管道进行了 TOP-TIG 机器人自动焊,试验结果表明该焊接方法相对常规 TIG 焊,焊接速度和熔覆速率均提高了 2 倍。邓彩艳等<sup>[12]</sup>将 TOP-TIG 焊用于 9Ni 钢低温储罐的焊接,通过对接头的力学性能进行检测,表明接头低温冲击韧性较好,可以很好地满足工业生产的需要。周啸尘等<sup>[13]</sup>还将脉冲电流引入到 TOP-TIG 焊中,研究脉冲电流条件下焊丝的熔滴过渡特性,得出了送丝速度和峰值电流之间的对应关系。

由于 TOP-TIG 焊不仅具有较高的熔覆速率,且比较适于自动化焊接,近几年就有研究人员将该焊接方法与增材制造技术结合起来开发新型增材制造技术。Zhang 等<sup>[14]</sup>利用 TOP-TIG 焊接方法进行增材制造的方式实现了超双相不锈钢腔体结构的制作,这为 TOP-TIG 焊的应用提供了新的方向。Rodriguez 等<sup>[15]</sup>将 TOP-TIG 焊和 CMT 对比,应用于 316L 不锈钢材料的增材制造,分别采用直流电流和脉冲电流两种模式进行试验,初步完成了相关的工艺开发以及工艺参数的优化,这为这两种焊接技术用于其它材料的增材制造提供了一定的研究基础。Cai 等<sup>[16]</sup>在 TOP-TIG 焊的基础上又增加了一根焊丝,开发出双丝 TOP-TIG 焊接系统,并将其用于钛铝合金的增材制造,初步开发出了相应的焊接工艺,制造出满足需要的钛铝合金产品。目前, TOP-TIG 焊在工业生产中的应用还不是特别多,但 TOP-TIG 焊在增材制造方面的研究会进一步扩大 TOP-TIG 焊的应用范围。

## 3 TIP-TIG 焊

TIP-TIG 焊是在传统 TIG 焊的基础上,采用特

殊的高频振动送丝机构,不仅可以实现焊丝的自动进给,同时还可以实现焊丝沿自身方向的高频线性振动。送丝机构带给焊丝的高频振动为焊丝提供了额外的动能,促使熔滴主动脱离焊丝末端过渡到熔池内,因此可以提高 TIG 焊的熔覆速率。另外,焊丝的线性高频振动还可以搅动熔池,改善焊缝的组织,细化焊缝晶粒,同时有利于熔池内气孔、夹渣等缺陷的逸出,降低焊缝出现内部缺陷的概率<sup>[17]</sup>。

当前,对于 TIP-TIG 焊的研究主要集中在镍基低温压力容器的焊接方面,尤其以 9Ni 钢的焊接为主。焊接操作方式有半自动焊、全自动焊。研究结果都表明采用 TIP-TIG 焊,可以提高焊接生产效率,焊缝组织得到改善,焊缝内气孔、夹渣等缺陷出现的概率大大降低,同时焊缝成形比较美观<sup>[18]</sup>。对于 9Ni 钢的焊接,韦宝成等人<sup>[19]</sup>研究了 TIP-TIG 焊用于立缝的焊接,很好地解决了 9Ni 钢窄坡口立焊侧壁未熔合的问题,且焊缝的低温冲击韧性较好。刘永贞等<sup>[20]</sup>还将 TIP-TIG 焊用于 X70/316L 双金属复合管道的焊接,将 TP-TIG 焊的应用范围扩展到石化管道制造行业。另外,苗俊安等<sup>[21-22]</sup>将 TIP-TIG 焊用于双相不锈钢的焊接,研究结果表明:TIP-TIG 焊可以提高焊接生产效率,同时焊缝的耐腐蚀性能和力学性能均能满足要求。

## 4 双钨极 TIG 焊

双钨极 TIG 焊接方法是由两根钨极各自形成电弧,两个电弧在电磁作用下耦合成为一个电弧的新型 TIG 焊接方法。该焊接方法具有电弧压力小、焊接熔深浅、母材稀释率低、熔覆速率高等优点<sup>[23-24]</sup>。近几年对于双钨极 TIG 焊的研究主要集中在不锈钢材料的堆焊方面。方迪生等<sup>[25]</sup>将双钨极 TIG 焊用于在低合金钢上堆焊不锈钢材料,相对常规 TIG 焊,其焊接熔覆速率提高了 2.5 倍,并且堆焊层硬度、化学成分、冲击性能、耐腐蚀性能与常规 TIG 焊的接近。王红海等<sup>[26]</sup>还成功将双钨极 TIG 焊用于超超临界汽轮机转子用 14Cr9Mo1.5Co1.2VNbNB 钢的堆焊上,堆焊材料为 DCMS-IG 和 CM2-IG,且堆焊层的化学成分和力学性能均满足要求。吴统立等<sup>[27-28]</sup>对双钨极 TIG 焊进行了改进,将双钨极 TIG 焊与高频电弧复合起来,开发出高频复合双钨极氩弧焊电源,向双钨极 TIG 焊接系统中引入两路不同波形的电流:一路为高频方波脉冲电流,另一路为变

极性方波脉冲电流,研究了高频复合双钨极氩弧焊的电弧行为规律,获得了具有稳定性强、电弧刚度高,具有尖端效应、非跳弧效应和高频自定位效应等特点的复合电弧,为扩展双钨极 TIG 焊在其它领域的应用提供了理论基础。

## 5 窄间隙 TIG 焊

窄间隙 TIG 焊是针对大厚板焊接开发的一种焊接方法,利用 TIG 电弧作为热源,采用较小的坡口间隙进行多层多道焊,可以极大减少填充金属的用量,间接实现提高熔覆速率的目的。该焊接方法具有焊接生产效率高、合金元素烧损少、焊接过程稳定可控、易于实现自动化、焊缝质量高、残余应力小、能实现全位置焊接等优点,在工业生产中获得了大量应用<sup>[29]</sup>。近几年对窄间隙 TIG 焊的研究主要集中在核电装备、海洋工程装备等方面,涉及的焊接材料以不锈钢和钛合金为主,并且研究重点偏向于工程应用、质量控制及接头性能方面<sup>[30-31]</sup>。为了进一步提高焊接生产效率,李渊博等<sup>[32-33]</sup>在窄间隙 TIG 焊的基础上,进一步缩小坡口间隙(几毫米内),提出超窄间隙 TIG 焊接方法。为了改善超窄间隙 TIG 焊存在的坡口底角熔合不良的问题,采用了片状偏钨极和绝缘固壁联合调控的方式,改善超窄间隙中电弧的物理场,增强电弧对坡口底角的加热作用,取得了较好的效果。Jun 等<sup>[34]</sup>提出了另外一种提高生产效率的窄间隙焊接方法,该方法是将 C 型带材用于窄间隙 TIG 焊,采用高达 600 A 的焊接电流,实现 10 kg/h 的熔覆速率,大大提高了窄间隙 TIG 焊的熔覆速率;且该焊接方法不易出现侧壁熔合不良的问题,具有广阔的应用前景。

窄间隙 TIG 焊最常见的缺陷是侧壁熔合不良。为了解决该问题,Sun 等<sup>[35-36]</sup>提出了一种改进的窄间隙 TIG 焊接方法,该方法是通过励磁线圈在焊接区域内形成双磁极磁场,通过改变励磁电流的方向来改变磁场的方向,进而构造出磁弧震荡系统。该方法能很好地解决窄间隙焊接时侧壁熔合不良的问题。另外,闫强强<sup>[37]</sup>采用电机驱动非轴对称钨极旋转,实现焊接电弧在窄间隙坡口两侧之间来回运动,也可以很好地解决窄间隙焊接中侧壁熔合不良的问题。

由于窄间隙 TIG 焊相对常规 TIG 焊具有不同的电弧状态和熔池流动特性,Cai 等<sup>[38-40]</sup>对窄间隙 TIG 焊的电弧物理和熔池流动行为进行了研究,结果表

明:保护气体在窄间隙内呈纵向模式流动,焊接电弧温度场在保护气体的作用下沿横向收缩、纵向扩展,电弧的高温区域扩展,焊接电弧的热效率得到提高。相对于常规 TIG 焊,窄间隙焊接电弧的能量密度较大,电弧等离子体的流动速度较快,电弧压力和剪切应力较大。这些机理方面的研究成果为工业生产制定合理的焊接工艺和改进窄间隙焊接方法提供了基本的理论依据。

## 6 总结与展望

常规 TIG 焊熔覆速率低的问题严重限制了其在工业生产中的应用,如堆焊、中厚板坡口填充盖面焊方面都对大熔覆速率有很高的应用要求。以上几种大熔覆速率 TIG 焊接方法都可以不同程度地提高 TIG 焊的熔覆速率,但还存在以下几方面的问题:

(1) 对设备要求较高。例如 TOP-TIG 焊对焊枪的制作精度要求较高,必须保证精确的送丝位置;窄间隙 TIG 焊需要结构复杂的窄间隙焊枪,且对焊接过程的控制精度要求较高;双钨极 TIG 焊为了避免磁偏吹需要引入复杂的电弧控制系统。

(2) 这些焊接方法在提高熔覆速率的同时容易引起别的焊接缺陷,如未熔合、夹杂、气孔、钨极被焊丝污染等。

(3) 对于双钨极 TIG,由于两个钨极需要成一定角度布置,使得焊枪体积较大,严重影响了焊枪的可达性。

(4) 较高的熔覆速率会限制 TIG 焊对焊接位置的适应性。大熔覆速率 TIG 焊用于立焊、横焊、仰焊等焊接位置时,具有很高的难度,甚至难以实现。

(5) TIP-TIG 焊和 TOP-TIG 焊还存在工艺可重复性较差的问题。

(6) 以上几种大熔覆速率 TIG 焊在工业生产上的应用研究较多,但对应的基础理论研究比较欠缺。

基于以上问题,大熔覆速率 TIG 焊的研究方向主要集中在以下几个方面:

(1) 加强基础理论方面的研究,包括焊接电弧物理、熔滴过渡、熔池流动模式、缺陷产生机理等,这不仅可以指导制定合适的焊接工艺,同时还可以为开发新型高效焊接方法指明方向。

(2) 将试验研究与计算机数值计算结合起来,利用计算机强大的计算能力,快速进行相关的模型计算,指导研发改进的方向。

(3) 开发新型钨极材料,提高钨极载流能力,进而可以通过提高焊接电流来提高熔覆速率。

(4) 多热源进行复合。例如多钨极复合、热丝与窄间隙复合、TIP-TIG 与热丝复合等方式进一步提高 TIG 焊的熔覆速率。

### 参考文献:

- [1] 鲍亮亮,王勇,韩涛,等. Q345E 热丝 TIG 焊接头微观组织与力学性能研究[J]. 焊接,2019(2):54-58.
- [2] 曹福俊,赵景奇,杜成超. 基于热传导的热丝 TIG 焊接技术[J]. 电焊机,2018,48(6):104-109.
- [3] Tanmay, Chandra M, Sharma S, et al. Study of mechanical and metallurgical properties of cold and hot reciprocating wire TIG welding on AISI 1035 carbon steel [J]. Journal of The Institution of Engineers (India):Series D,2021,102:159-166.
- [4] Sedighi M, Shajari Y, Razavi S H, et al. The effect of post weld heat treatment (PWHT) on the microstructure, microhardness and sulphide stress corrosion cracking (SSCC) of Ni-base superalloy IN625 hot Wire TIG cCladding on AISI 4130 steel [J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces,2021,57(1):113-120.
- [5] Louise V A, Cunha T V, Enrique N C. Conception, implementation and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire GTAW (IHW-GTAW) [J]. Journal of Materials Processing Tech.,2019,281:116615.
- [6] Sharma A, Verma D K, Kumaran S. Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of hot wire GTA welded joints of SA213 T91 steel [J]. Materials Today:Proceedings,2018,5(2):8049-8056.
- [7] 王纯,贾小斌,冯伟,等. 热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢工艺试验研究[J]. 压力容器,2021,38(5):22-25.
- [8] 张宏娟. 20MnMoNb 钢厚壁缸体的窄间隙热丝 TIG 焊[J]. 焊接技术,2020,49(9):30-33.
- [9] 韩永凯,何亚章,唐德渝,等. L360QS-N08825 复合管热丝 TIG 打底焊缝错边熔透数值模拟 [J]. 热加工工艺,2021,50(1):117-119.
- [10] 李凯,何广忠,彭长伟,等. 高速列车天线梁 TOP-TIG 焊接工艺研究[J]. 金属加工(冷加工),2016(S1):598-600.
- [11] Gonçalves S R H, Barancelli S M, Fernandes R. Evaluation of toptig technology applied to robotic orbital welding of 304L pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020,188:104229.
- [12] 邓彩艳,牛亚如,王东坡,等. 9Ni 钢 T&T 焊接工艺低温韧性 [J]. 焊接学报,2018,39(1):111-114.
- [13] 周啸尘,李桓,宋春光,等. 脉冲 TOPTIG 焊熔滴过渡特性分析[J]. 焊接学报,2017,38(7):45-48.
- [14] Zhang X Y, Wang K H, Zhou Q, et al. Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594)[J]. Materials Science & Engineering A,2019,762:138097.

- [15] Rodriguez N, Vázquez L, Huarte I, et al. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel [J]. *Welding in the World*, 2018, 62(5): 1083-1096.
- [16] Cai X Y, Dong B L, Yin X L, et al. Wire arc additive manufacturing of titanium aluminide alloys using two-wire TOP-TIG welding: Processing, microstructures, and mechanical properties [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101344.
- [17] 张欣盟, 刘庆祝. TIP TIG 焊接新技术及其在轨道车辆中的应用展望 [J]. *电焊机*, 2012, 42(9): 1-4.
- [18] 倪学志, 许艳春, 刘富鹏, 等. 半自动 TT 焊在低温储罐中的应用优势 [J]. *石油和化工设备*, 2020, 23(9): 20-21.
- [19] 韦宝成, 杨尚玉, 郭鹰. LNG 储罐 9%Ni 钢立缝全自动焊技术 [J]. *电焊机*, 2020, 50(6): 113-116.
- [20] 刘永贞, 段应新, 信萍, 等. X70/316L 双金属复合管全自动 TIP TIG 焊接接头热影响区宽度 [J]. *电焊机*, 2015, 45(7): 152-156.
- [21] 苗俊安, 于本水, 胡明胜. 超级双相不锈钢 2507 的 TIP TIG 焊接工艺 [J]. *焊接技术*, 2018, 47(12): 52-54.
- [22] Wang L L, Zhao P C, Pan J J, et al. Investigation on microstructure and mechanical properties of double-sided synchronous TIP TIG arc butt welded duplex stainless steel [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 112: 33-312.
- [23] 周彦彬, 史维琴. 双电弧高效焊接技术研究与发展现状 [J]. *电焊机*, 2019, 49(12): 44-51.
- [24] 邹国伟, 马培锋, 王伟波, 等. 双钨极堆焊技术在核反应堆压力容器制造中的应用与研究 [J]. *电焊机*, 2019, 49(4): 168-172.
- [25] 方迪生, 高永光, 刘万存, 等. 双钨极不锈钢与低合金钢异种金属焊缝组织性能 [J]. *电焊机*, 2020, 50(3): 86-91.
- [26] 王红海, 张仁军, 吴海涛. 14Cr9Mo1.5Co1.2VNbNB 双钨极氩弧焊堆焊接头成分和性能 [J]. *电焊机*, 2017, 47(6): 63-68.
- [27] 吴统立, 王克鸿, 冯曰海. 高频复合双钨极氩弧焊电源研制 [J]. *电焊机*, 2019, 49(6): 83-88.
- [28] 吴统立, 王克鸿, 杨嘉佳, 等. 高频复合双钨极氩弧焊方法与数字电源研制 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(9): 117-121.
- [29] 张忠海. 全位置窄间隙 TIG 焊接技术研究 [J]. *大型铸锻件*, 2021(3): 29-31.
- [30] 胡金亮, 曾才有, 余陈, 等. 厚板钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接技术发展现状 [J]. *精密成形工程*, 2020, 12(4): 10-20.
- [31] 李双, 徐望辉, 李锋, 等. 30 mm 厚钛合金 TC4 磁控电弧窄间隙 TIG 焊接接头组织及力学性能研究 [J]. *焊接*, 2018(1): 41-45.
- [32] 李渊博, 杨涛, 郑韶先, 等. 超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧特性的数值模拟 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(2): 69-76.
- [33] 杨涛. 绝缘固壁约束超窄间隙 TIG 焊接电弧特性的数值模拟 [D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- [34] Jun J H, Kim S R, Cho S M. A study on productivity improvement in narrow gap TIG welding [J]. *Journal of Welding and Joining*, 2016, 34(1): 68-74.
- [35] Sun Q J, Wang J F, Cai C W, 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.
- [36] Wang J F, Sun Q J, Feng J C, 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.
- [37] 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.
- [38] Cai X Y, Dong B L, Lin S B, et al. Numerical analysis of arc physical properties in narrow gap TIG welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(11): 5509-5517.
- [39] Dong B L, Cai X Y, Lin S B, et al. Numerical simulation on the nonaxisymmetry arc characteristics in narrow gap TIG welding: responses to welding parameters [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114: 2229-2242.
- [40] Dong B L, Cai X Y, Ni Z D, et al. Numerical simulation of arc characteristics in narrow gap TIG welding [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161-162: 105031. 