

文章编号: 1673-5196(2020)06-0033-05

DP-TIG 高速焊接工艺研究

刘自刚^{1,2}, 陈 飞², 唐海鸿^{1,2}, 陈 亮¹

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

摘要: 深熔钨极气体保护焊(deep penetration TIG welding, DP-TIG 焊)具有焊接熔深大的优点, 在厚板焊接领域具有极大优势. 为了拓展 DP-TIG 焊在薄板高速焊领域的应用, 分别针对低碳钢和不锈钢板材, 调整焊接电流、焊接速度、钨极锥角、气体成分等工艺参数, 进行了薄板高速焊接工艺研究. 结果表明: 相对常规 TIG 焊, 对于 2 mm 厚的低碳钢板焊接速度提高了 75%, 对于 3 mm 厚的不锈钢板, 焊接速度提高了 2 倍多, 并且随着钨极角度的减小, 焊接速度可以进一步提高, 如果保护气体中引入一定量的 H_2 可以进一步提高不锈钢 DP-TIG 焊的最大焊接速度.

关键词: 不锈钢; 低碳钢; DP-TIG 高速焊; 钨极锥角; 保护气成分

中图分类号: TG403 **文献标志码:** A

Study on high speed welding technology of DP-TIG

LIU Zi-gang^{1,2}, CHEN Fei², TANG Hai-hong^{1,2}, CHEN Liang¹

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

Abstract: Deep Penetration TIG welding (DP-TIG welding) takes the advantage of deep penetration welding and has great advantages in the field of thick plate welding. In order to expand applications of DP-TIG welding in the field of high-speed welding of thin plates, the high-speed welding process of thin plates made of low carbon steel and stainless steel was investigated in this research by adjusting welding current, welding speed, tungsten cone angle, gas composition and other process parameters. The experimental results show that compared with conventional TIG welding, the welding speed of low carbon steel plate with 2 mm thickness is increased by 75%, and for stainless steel plate with 3 mm thickness, the welding speed is increased by more than 2 times. Moreover, with the decrease of tungsten electrode angle, the welding speed can be further improved. If a certain amount of H_2 is introduced into the shielding gas, the maximum welding speed of stainless steel DP-TIG welding may be improved further to a certain extend.

Key words: stainless steel; low carbon steel; DP-TIG high-speed welding; angle of tungsten electrode; component of shielding gas;

钨极惰性气体保护焊(tungsten inert gas welding, TIG 焊)是一种在当前工业生产中广泛应用的焊接方法. 该焊接方法采用惰性气体作为保护气(如氩气、氦气等), 具有焊接电弧稳定、焊接质量优良、容易实现焊接自动化、可以适用所有金属材料的焊接、适于全位置焊接等优点. 但是该焊接方法由于钨极承载电流的能力低, 且电弧能量不集中, 导致该焊接方法的焊接速度较慢、熔敷效率较低、单道焊接熔深浅、焊接生产效率低下, 且该焊接方法使用氩气或

者氦气作为保护气体, 生产成本相对焊条电弧焊、埋弧焊、 CO_2 气体保护焊等焊接方法都较高, 这些缺点都严重限制了该焊接方法在生产中的使用.

20 世纪 60 年代, 乌克兰巴顿焊接研究所针对常规 TIG 焊单道焊接熔深浅的缺点, 开发了 A-TIG 焊(activating flux TIG welding, A-TIG 焊). 该方法可以将普通 TIG 焊的单道焊接熔深从 3 mm 增大到 8 mm 左右. 但是 A-TIG 焊需要事先在待焊焊道表面涂覆一层活性剂, 这就很难保证活性剂的均匀涂覆, 且不利于实现焊接过程自动化^[1-8].

刘自刚等人针对常规 TIG 焊单道焊接熔深浅、焊接速度慢、熔敷效率低等缺点, 提出了一种改进型

收稿日期: 2020-03-04

作者简介: 刘自刚(1985-), 男, 河南夏邑人, 工程师.

的 TIG 焊接方法——深熔钨极氩弧惰性气体保护焊 (deep penetration TIG welding, DP-TIG 焊). 该焊接方法是通过双层水冷结构的焊枪实现对钨极的高效冷却, 完成对焊接电弧的强制压缩, 获得电弧挺度高、能量密度大的焊接电弧. 在该电弧的作用下就可以实现增大单道焊接熔深、提高焊接速度、增大熔敷速率的目的^[9].

本文采用 DP-TIG 焊接方法, 针对不同板厚的低碳钢和不锈钢板材, 通过改变各焊接工艺参数, 进行高速焊试验, 研究各焊接参数对焊接效果的影响, 最终获得 DP-TIG 焊接方法针对不同焊接材料稳定的高速焊接工艺参数.

1 试验材料与方法

试验分别采用 2 mm 厚的 Q235 低碳钢板材、3 mm 厚和 6 mm 厚的 SUS304 不锈钢板材为焊接母材, 进行水平位置的平板对接焊, 焊枪角度竖直向下. 调整焊接电流、焊接速度、钨极锥角、保护气体成分等参数, 在满足单面焊双面成形的条件下, 尽可能提高焊接速度. 试验采用的通用焊接参数见表 1. 焊接完成后, 沿垂直焊缝的方向截取焊缝的横截面, 然后研磨、抛光, 对焊缝的横截面进行宏观形貌观察和微观金相组织观察.

表 1 通用焊接参数

Tab. 1 General welding parameter

送丝速度 $v_1/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	焊丝直径 d/mm	保护气体流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	弧长 l/mm
1 000	1.2	20	2

2 试验结果与分析

2.1 低碳钢高速焊试验

针对 2 mm 厚的 Q235 低碳钢板材, 采用表 2 所列的参数进行高速焊工艺试验, 各组工艺参数得到的试验结果如图 1 所示, 焊接过程仅能实现熔透形式的焊接. 从图 1 所示的结果可以看出, 当焊接速度小于 700 mm/min 时, 可以实现稳定的单面焊双面成形焊接, 焊缝的正面和背面成形均较好. 当焊接速度达到 750 mm/min 时, 不能实现良好焊接, 焊缝正面出现严重咬边, 焊缝背面不能均匀成形. 对于 2 mm 的低碳钢板, 常规 TIG 可以达到的最大焊接速度为 400 mm/min. 因此针对 2 mm 的低碳钢板, 在该试验参数条件下, DP-TIG 焊可以实现的最大焊接速度为 700 mm/min, 相对常规 TIG 焊, 焊接速度提高了 75%.

表 2 低碳钢高速焊参数

Tab. 2 High speed welding parameters of low carbon steel

试验 分组	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	钨极锥角 $\alpha/(^{\circ})$	气体 成分
1-a	285	500	45	纯 Ar 气
1-b	285	600	45	纯 Ar 气
1-c	285	700	45	纯 Ar 气
1-d	285	750	45	纯 Ar 气

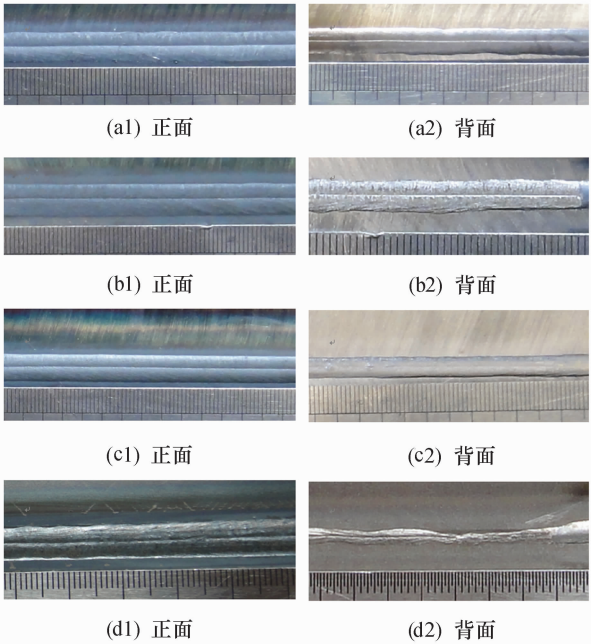


图 1 低碳钢试验结果

Fig. 1 Tested results of low carbon steel

2.2 不锈钢板高速焊试验

针对 3 mm 厚的不锈钢板, 采用表 3 所列的参数进行高速焊试验, 试验结果如图 2 所示. 该组试验焊接时为穿孔形式的焊接, 焊接过程中电弧完全穿透母材. 从图 2 可以看出, 焊接速度低于 1 000 mm/min 时, 可以实现稳定的单面焊双面成形工艺, 当焊接速度达到 1 100 mm/min 时, 焊缝的正面开始出现咬边的缺陷, 焊缝的背面成形不稳定, 个别区域不能完全焊透. 对于 3 mm 厚的不锈钢, 常规 TIG 焊最大焊接速度约为 300 mm/min. 因此, 相对常规 TIG 焊, DP-TIG 焊焊接速度提高了 2 倍多.

表 3 不锈钢高速焊参数

Tab. 3 High speed welding parameters of stainless steel

试验 分组	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	钨极锥角 $\alpha/(^{\circ})$	气体 成分
2-a	350	800	45	纯 Ar 气
2-b	350	900	45	纯 Ar 气
2-c	350	1 000	45	纯 Ar 气
2-d	350	1 100	45	纯 Ar 气

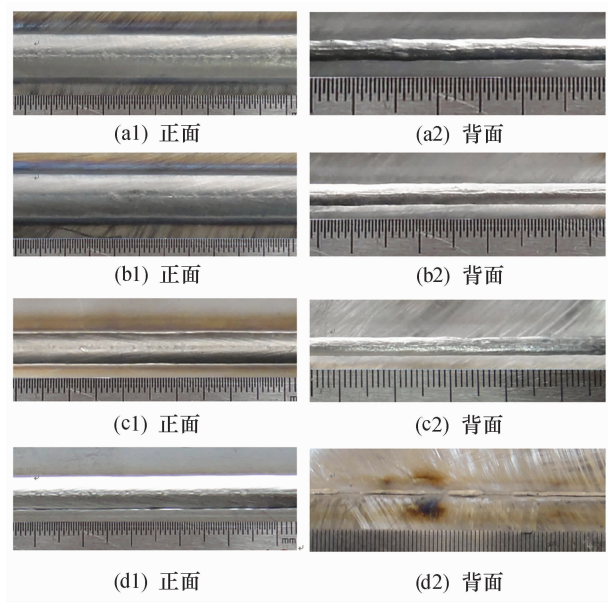


图 2 不锈钢试验结果

Fig. 2 Tested results of stainless steel

2.3 钨极锥角对高速焊工艺的影响

分别采用如表 4,表 5 所示的参数,针对 2 mm 厚的 Q235 低碳钢板、3 mm 厚的不锈钢板,在保持焊接电流不变的条件下,改变钨极锥角进行工艺试验,试验结果分别如图 3、图 4 所示.

表 4 不同钨极锥角试验参数(1)

Tab. 4 Test parameters of different tungsten electrode cone angles(1)

试验 分组	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	钨极锥角 $\alpha/(^{\circ})$	气体 成分
3-a	285	750	30	纯 Ar 气
3-b	285	800	30	纯 Ar 气
3-c	285	600	60	纯 Ar 气
3-d	285	700	60	纯 Ar 气

表 5 不同钨极锥角试验参数(2)

Tab. 5 Test parameters of different tungsten electrode cone angles(2)

试验 分组	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	钨极锥角 $\alpha/(^{\circ})$	气体 成分
4-a	350	1 100	30	纯 Ar 气
4-b	350	1 200	30	纯 Ar 气
4-c	350	900	60	纯 Ar 气
4-d	350	1 000	60	纯 Ar 气

从图 3 所示的结果可以看出,对于 2 mm 厚的低碳钢板,当采用 30°的钨极进行焊接时可以达到的最大焊接速度为 750 mm/min,当焊接速度达到 800 mm/min 时,焊缝正面开始出现咬边的缺陷,焊缝的背面出现断断续续的未焊透现象. 当采用 60°钨极进行焊接时,可以实现的最大焊接速度为 600 mm/min,当焊接速度达到 700 mm/min 时,焊接过

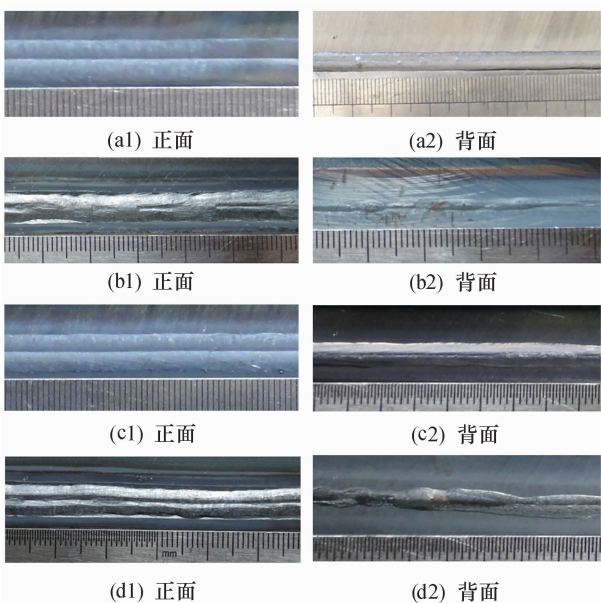


图 3 碳钢不同钨极锥角试验结果

Fig. 3 Test results of different tungsten electrode conical angles of carbon steel

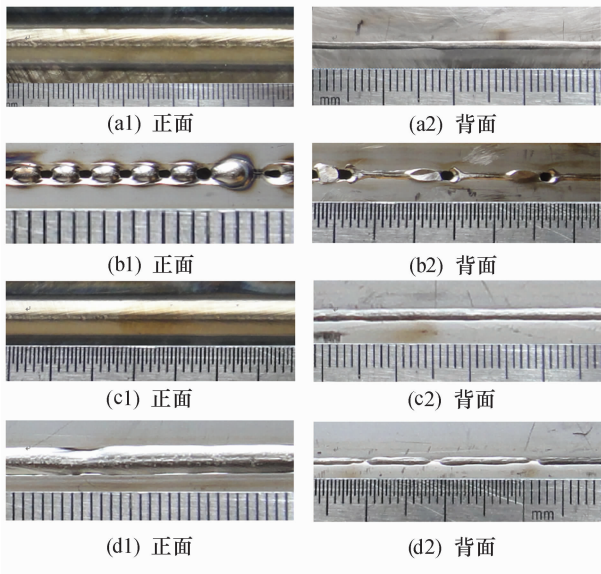


图 4 不锈钢不同钨极锥角试验结果

Fig. 4 Test results of stainless steel with different tungsten cone angles

程不稳定,焊缝正面出现严重的连续咬边的缺陷,焊缝的背面成形不均匀,且局部地方存在未焊透的现象. 与图 1 所示的结果对比分析可以看出,在其余焊接参数一致的情况下,焊接时采用的钨极锥角为 30°时,可以达到的焊接速度最大,且随着钨极锥角的增大,最大焊接速度减小. 从图 4 所示的试验结果可以看出,对于 3 mm 厚的不锈钢板,DP-TIG 焊接时使用 30°角的钨极可以达到的最大焊接速度为 1 100 mm/min. 同样条件下,当焊接速度达到 1 200 mm/min 时,焊接过程不稳定,焊缝正面和背

面均不能稳定成形,出现大量焊穿的缺陷.当采用 60°的钨极进行焊接时,可以实现的最大焊接速度为 900 mm/min.当焊接速度达到 1 000 mm/min 时,焊缝正面出现咬边的缺陷,焊缝背面出现不连续的未焊透现象.与图 2 所示的试验结果对比分析可以看出:保持其他焊接参数不变的条件下,随着钨极锥角的增大,可以达到的最大焊接速度逐渐减小.

综合图 1~图 4 所示的试验结果可以看出:在实现单面焊双面成形焊接工艺并获得成形优良焊缝的前提下,减小钨极锥角可以提高 DP-TIG 焊的最大焊接速度.这主要是由于减小钨极锥角可以减小电弧沿着钨极锥面向上攀升的趋势,从而减小电弧的横截面积,提高电弧的能量密度、电弧挺度和电弧压力,从而更容易形成稳定的穿孔形式的焊接,也有利于提高焊接速度.

2.4 保护气体成分对高速焊工艺的影响

采用表 6 所列的参数分别针对 3 mm 厚和 6 mm 厚的不锈钢板(前两组参数针对 3 mm 板材,后两组参数针对 6 mm 板材),进行保护气体成分为 Ar+5% H_2 的高速焊工艺试验.得到的试验结果如图 5 所示.从图 5 所示的试验结果可以看出,对于 3 mm 厚的不锈钢板焊接速度为 1 200 mm/min 时可以实现良好焊接.当焊接速度达到 1 300 mm/min 时,焊缝背面不能焊透.对于 6 mm 厚的不锈钢板,当焊接速度为 500 mm/min 时仍可以获得良好的焊缝成形,当焊接速度达到 550 mm/min 时,焊接过程不稳定,焊缝正面出现咬边的缺陷,焊缝背面有断续的未焊透现象.

表 6 保护气体成分试验参数

Tab. 6 Test parameters of protective gas composition				
试验 分组	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	钨极锥角 $\alpha/(^\circ)$	气体 成分
5-a	350	1 200	45	Ar+5% H_2
5-b	350	1 300	45	Ar+5% H_2
5-c	420	500	45	Ar+5% H_2
5-d	420	550	45	Ar+5% H_2

将 5-a、5-b 组的试验结果同图 2 所示的试验结果对比分析可以看出:其余焊接参数保持不变的情况下,保护气中引入 5%的 H_2 可以显著提高最大焊接速度.对于 6 mm 厚的不锈钢板,采用纯 Ar 气进行保护时,可以达到的最大焊接为 340 mm/min^[9].对比 5-c、5-d 组试验结果,也可以得出与 3 mm 厚板试验相同的结果,即保护气体中引入 H_2 可以提高最大焊接速度.

对于保护气体中引入 H_2 提高焊接速度的原因

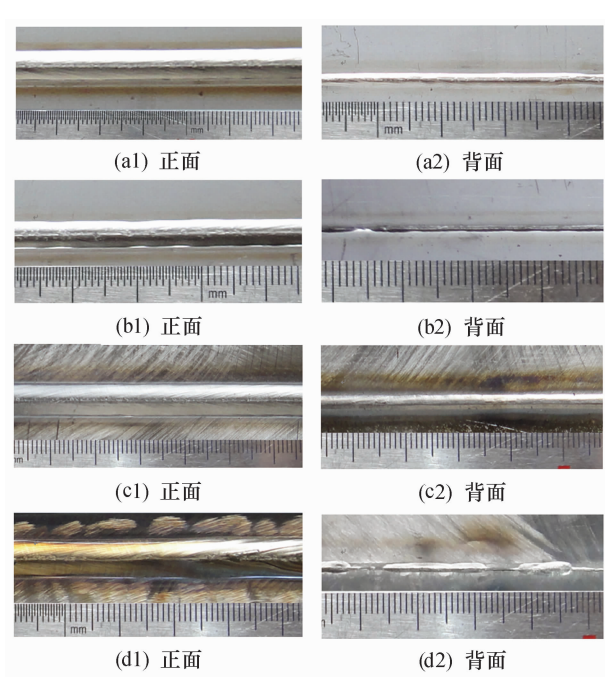


图 5 保护气体成分试验结果

Fig. 5 Test results of protective gas composition

主要有以下 3 个方面^[10-11]:一方面 DP-TIG 焊接保护气中引入的 H_2 与熔池金属反应可以降低熔池的表面张力,从而有利于熔池金属向焊缝边缘的铺展,降低高速焊出现咬边缺陷的概率.另一方面引入的 H_2 在电弧的作用下无论是燃烧还是电离都可以增大熔池的热量,提高熔池的温度.而液态金属的表面张力与温度之间的关系可以用下式进行表示:

$$\sigma\left(\frac{M}{\rho_l}\right)^{-\frac{2}{3}}=K(T_c-T) \tag{1}$$

式中: σ 为液态金属的表面张力; M 为液体的相对分子质量; T_c 为临界温度; T 为熔体的温度; K 为常数,对于液态金属, $K=0.64\times 10^7$ J/K.

从式(1)可以看出,液态金属的表面张力随着温度的升高而逐渐降低,表面张力的降低将有利于提高焊接速度.第三方面,引入的 H_2 可以提高焊接电弧的能量,有利于高速焊时实现单面焊双面成形焊接工艺.

2.5 焊缝截面形貌

如图 6 所示为采用表 6 参数进行 6 mm 不锈钢板 DP-TIG 焊和常规 TIG 焊焊缝的截面宏观形貌对比.从结果可以看出,DP-TIG 高速焊的焊缝截面呈漏斗状,焊缝底部倾斜陡降,焊缝深宽比约为 1:1,焊缝正面和背面均可以良好成形,焊缝内部没有气孔、夹渣、未焊透等焊接缺陷.常规 TIG 焊的焊缝截面呈凹坑状,焊缝底部平直,熔深为 2 mm 左右,深宽比约为 1:3.由此可见相对常规 TIG 焊,DP-TIG 焊焊接熔深更大,深宽比也更大.这主要跟

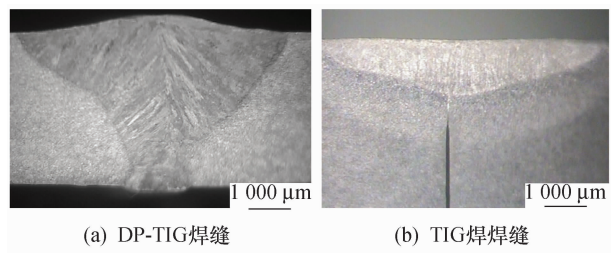


图 6 焊缝截面形貌对比

Fig. 6 Comparison of weld section morphology

DP-TIG 焊的焊接电弧截面小、能量集中有关。

2. 6 焊缝微观组织观察

图 7 为 DP-TIG 高速焊和常规 TIG 焊 6 mm 厚不锈钢板对接焊焊缝的微观组织对比。从所示的结果可以看出两种焊缝的组织相同,在熔合区、熔合线的左侧均为垂直熔合线向焊缝内部生长的粗大的柱状晶。焊缝的中心部位为奥氏体基体上分布着少量的呈枝状晶的 δ 铁素体。对比两组焊缝晶粒度可以看出,相对 TIG 焊,DP-TIG 焊缝晶粒细化。这主要跟 DP-TIG 焊接速度高、热输入量低有关。

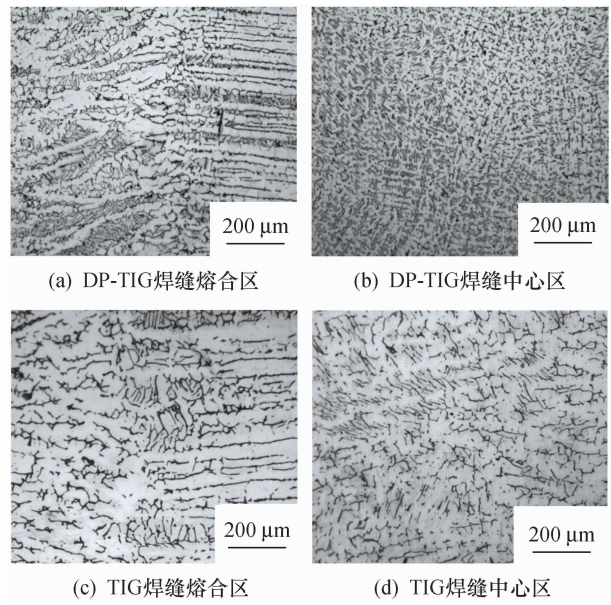


图 7 焊缝微观组织形貌

Fig. 7 Microstructure of weld

3 结论

1) 相对常规 TIG 焊,对于 2 mm 厚低碳钢板,DP-TIG 焊接速度提高 75%,最大焊接速度可达到 700 mm/min。对于 3 mm 厚的不锈钢板,焊接速度

提高了 2 倍多,焊接速度可达到 1 000 mm/min。

2) 钨极锥角对低碳钢和不锈钢 DP-TIG 焊的最大焊接速度有很大影响,在保证钨极不被烧损的前提下,随着钨极锥角的减小,DP-TIG 焊的最大焊接速度可以得到显著提高。

3) 对于不锈钢 DP-TIG 焊,焊接保护气中引入一定量的 H_2 可以显著提高 DP-TIG 焊的最大焊接速度。

4) 不锈钢 DP-TIG 高速焊的焊缝组织与常规 TIG 焊焊缝组织相同,均是奥氏体基体上分布有少量的铁素体。但相对常规 TIG 焊,DP-TIG 焊焊缝组织细化。

参考文献:

[1] 武传松,王 林,陈 姬,等. 电弧焊接工艺高效改性的研发进展 [J]. 焊接,2013(8):1-10.

[2] 刘白鸽,程 伟,张聪华. 表面活性剂对奥氏体不锈钢 TIG 焊熔深的影响 [J]. 化工装备技术,2018,39(2):12-14.

[3] ATUL BABBAR, AKHILESH KUMAR, VIVEK JAIN, *et al.* Enhancement of activated tungsten inert gas (A-TIG) welding using multi-component $TiO_2-SiO_2-Al_2O_3$ hybrid flux [J]. Measurement, 2019(148):1-16.

[4] 张 勇,孙琳琳,唐家成,等. 高硅煤粉灰活性剂对 Q235 钢液态金属表面张力 TIG 焊缝的影响 [J]. 焊接学报,2018,39(5):92-96.

[5] KULKARNI A, DWIVEDI D K, VASUDEVAN M. Effect of oxide fluxes on activated TIG welding of AISI 316L austenitic stainless steel [J]. Materials Today: Proceedings, 2019(274):4695-4702.

[6] PRATISHTHA SHARMA, DHEERENDRA KUMAR DWIVEDI. A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019(44):166-178.

[7] 马 壮,于秀秀,时海芳,等. 煤粉灰 A-TIG 熔池流动行为及焊缝性能分析响 [J]. 焊接学报,2017,38(9):65-69.

[8] 张桂清,任英磊,刘 凯,等. 磁场作用下镁合金 A-TIG 焊工艺参数的优化 [J]. 焊接学报,2016,37(8):105-108.

[9] 刘自刚,瞿怀宇,曹瑞昌,等. DP-TIG 焊接方法工艺研究 [J]. 焊接,2017(3):61-65.

[10] 袁章福,柯家骏,李 晶. 金属及其合金的表面张力 [M]. 北京:科学出版社,2006,5-34.

[11] 郭景杰,傅恒志. 合金熔体及其处理 [M]. 北京:机械工业出版社,2005,8-71.