

单枪耦合电弧 AA-TIG 焊

张建晓^{1,2}, 樊 丁¹, 黄 勇¹

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;
2. 兰州兰石重型装备股份有限公司, 兰州 730314)

摘 要:采用优化后的单枪耦合电弧 AA-TIG 焊枪,以 SUS304 不锈钢板材作为试验材料进行了焊接试验,对比了单枪耦合电弧 AA-TIG 焊与 TIG 焊电弧和焊缝成形的不同,研究了主要工艺参数对单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝的影响,并分析了单枪耦合电弧 AA-TIG 焊对接接头性能. 结果表明,氧气流量、钨极间距、电弧长度对单枪耦合电弧 AA-TIG 焊熔深有重要影响. 与普通 TIG 焊相比,在相同的总电流下,单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝变窄,熔深增加,焊缝性能良好. 12 mm 厚 SUS304 不锈钢板,单道焊缝熔深可超过 11 mm,深宽比达到 1.3,显著提高了生产效率.

关键词: AA-TIG 焊; 单枪耦合电弧; 焊枪; 焊缝成形; 焊缝性能

中图分类号: TG 403 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20161208001

0 序 言

钨极氩弧焊(TIG)是一种应用非常广泛的高质量焊接方法,该方法具有焊接过程稳定、焊缝性能好等优点,但熔深浅、熔敷效率低等不足也限制了它的工程应用. 上世纪六十年代中期巴顿焊接研究所提出了焊前在工件表面涂覆活性剂的方法^[1],后来发展成为活性 TIG 焊(A-TIG welding),相比于普通 TIG 焊熔深可增加 2~3 倍,提高了 TIG 焊的焊接效率. 但该方法需要焊前在工件表面涂覆活性剂,由于一般采用手工刷涂和喷涂方式进行,不易保证涂敷质量,不易实现自动化焊接.

关于不锈钢活性焊熔深增加的机理,越来越多的人认为是表面活性元素的引入使得熔池表面张力温度系数由负值变为正值,导致熔池内液态金属流态改变,电弧热量更有效地向熔池底部传输,最终熔深增加^[2-3]. 基于这一理论,兰州理工大学提出电弧辅助活性 TIG 焊^[4],即 AA-TIG 焊(arc assisted activating TIG welding),采用小电流活性气体保护辅助电弧引入活性元素,避免了活性剂的研发与涂覆,容易实现自动化焊接. 该方法有两种实现方式,分别为分离电弧 AA-TIG 焊和耦合电弧 AA-TIG 焊,其中耦合电弧 AA-TIG 焊又可用双枪耦合和单枪耦合来实现. 对于单枪耦合电弧 AA-TIG 焊,焊接时采用一把焊枪将辅助电弧和 TIG 主电弧耦合在一起,由于

焊接装置结构紧凑可靠,电弧能量利用率更高,该方法具有更强的加工能力和适用性.

文中设计并优化了 AA-TIG 焊枪结构,解决了以往焊枪钨极有效长度较小、焊枪体积较大而使用不便以及水冷效果差等问题,并进行了焊接试验,研究了主要工艺参数对焊缝成形的影响规律以及焊接接头的性能,对促进 AA-TIG 的研究和工业应用推广具有重要意义.

1 试验方法

从钨极的有效使用长度、焊枪体积、水冷效果和使用便捷性等几个方面设计和优化焊枪.

采用直流正接 TIG 焊和单枪耦合电弧 AA-TIG 焊在 200 mm×80 mm×8 mm 的 SUS304 不锈钢母材表面进行熔焊. 单枪耦合电弧 AA-TIG 焊中辅助电弧采用 Ar+O₂保护气体,主电弧采用纯氩气作为保护气体,基础工艺参数如表 1 所示. 分别改变氧气流量、钨极间距和弧长研究工艺参数对单枪耦合电弧 AA-TIG 焊的影响. 然后进行对接试验,并分别按照 GB/T228.1—2010《金属材料 拉伸试验》、GB/T229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》、GB/T4334—2008《金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法》E 法和 GB/T2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》分析拉伸性能、低温冲击性能、晶间腐蚀和焊缝面弯等焊接接头性能. 最后,针对 12 mm 厚 SUS304 不锈钢进行了表面熔焊,验证单枪耦合电弧 AA-TIG 焊的加工能力.

表 1 基础工艺参数
Table 1 Basic process parameters

焊接方法	钨极间距 d/mm	主弧电流 I_1/A	辅弧电流 I_2/A	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	主弧气体流量 $Q_1/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	辅弧气体流量 $\text{O}_2 + \text{Ar}$ $(Q_2 + Q_3)/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	弧长 L/mm
普通 TIG 焊	—	210	—	80	10	—	3
AA-TIG 焊	3	150	60	80	10	0.5 + 9.5	3

2 试验结果

2.1 焊枪结构及优化

耦合电弧 AA-TIG 焊将活性气体保护的小电流辅助电弧前置引入活性元素,普通 TIG 主电弧后置进行正常焊接. 由此要求焊枪结构上满足主辅钨极间距可调,枪体水冷,主、辅电弧的保护气氛和焊接电流相互独立,连续可调. 优化后的焊枪结构如图 1 所示. 钨极长度增加至 40 mm;喷嘴直径减小至 12 mm;冷却腔设计为半圆形式,增加了水冷面积;减小主、辅电弧之间的绝缘隔板厚度至 4 mm.

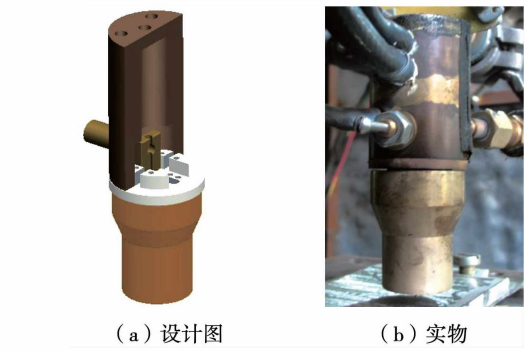


图 1 焊枪优化设计图和实物

Fig. 1 Drawing and real object of welding torch

2.2 8 mm 厚 SUS304 不锈钢焊接试验

2.2.1 电弧形貌对比

单枪耦合电弧 AA-TIG 焊和普通 TIG 焊的电弧形貌如图 2 所示. 图 2a 中主、辅电弧在洛伦兹力的作用下,在两钨极和工件之间形成耦合电弧^[5].

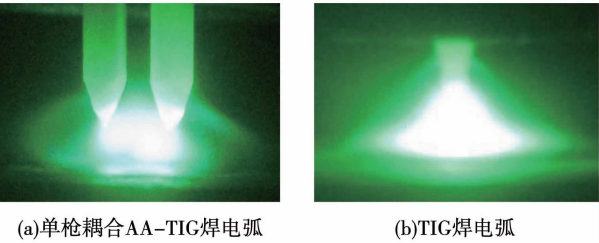


图 2 电弧形态对比

Fig. 2 Comparison of Welding arc shape

2.2.2 单枪耦合电弧 AA-TIG 焊与 TIG 焊的焊缝成形

如图 3 所示,单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝表面均匀一致,宽度明显变窄,背面熔透良好,成形良好. 由于引入少量活性气体 O_2 ,在焊缝表面有少量的氧化渣. 单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝窄而深,在熄弧位置出现一个小孔,而普通 TIG 焊焊缝宽而浅,没有小孔的出现.

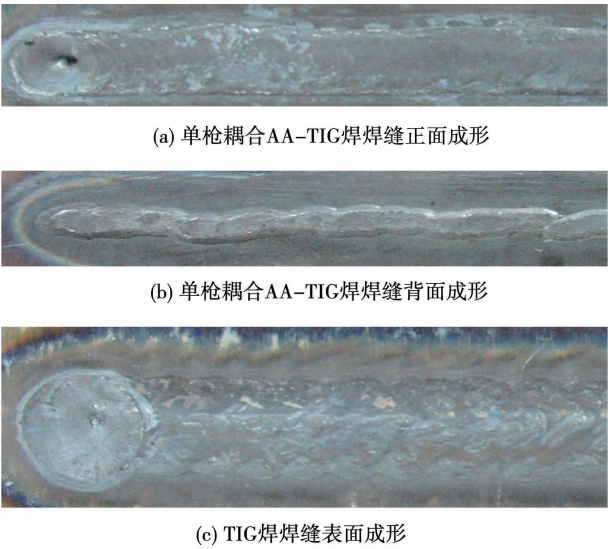


图 3 焊缝表面成形对比

Fig. 3 Comparison of welding surface appearance

2.2.3 氧气流量对单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝熔深熔宽的影响

如图 4 所示,随氧气流量增加,焊缝熔深呈现先增加后减小、熔宽先减小后增加的趋势. 0.5 L/min 时效果最佳,熔宽明显变窄,只有 6.6 mm,而 8 mm 板厚被焊透.

2.2.4 钨极间距对单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝熔深熔宽的影响

如图 5 所示,随着钨极间距逐渐增加,焊缝熔宽先减小后增大,熔深先增大后减小. 3 mm 钨极间距时,熔深最大,熔宽最小.

2.2.6 电弧长度对单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝熔深熔宽的影响

如图 6 所示,焊缝熔深随弧长先增大后减小,熔

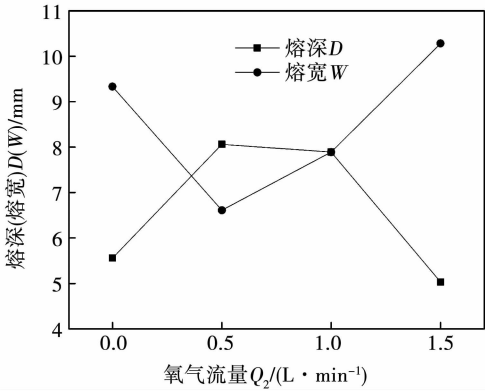


图 4 氧气流量对焊缝的影响

Fig. 4 Influence of oxygen flowrate on weld appearance

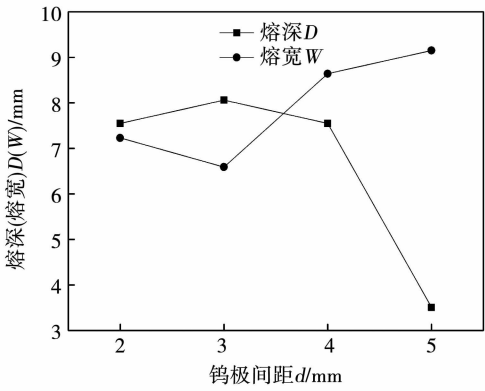


图 5 钨极间距对焊缝的影响

Fig. 5 Influence of tungsten electrode spacing on weld appearance

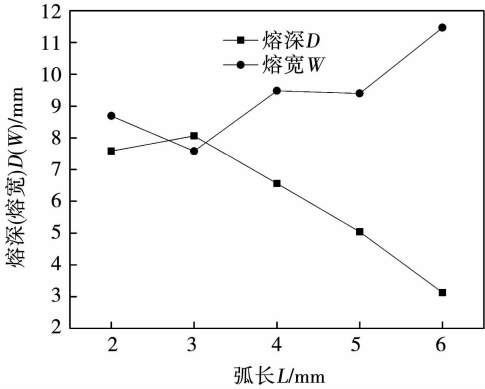


图 6 弧长对焊缝的影响

Fig. 6 Influence of arc length on weld appearance

宽呈现出随弧长先减小后变大的趋势。3 mm 弧长时深宽比达到最大,且焊缝熔深最深。

2.3 焊接接头性能分析

2.3.1 拉伸性能

单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊接接头试样负荷-变形曲线和母材类似,接头屈服强度和抗拉强度分

别为 297 和 550 MPa,而母材的屈服强度和抗拉强度分别为 301 和 552 MPa。

2.3.2 低温冲击性能

单枪耦合电弧 AA-TIG 焊中引入活性元素氧对焊接接头的低温冲击性能有一定影响。在 -40 ℃ 时对接接头的冲击吸收功为 72 J,是母材的 73.5%,但远大于 GB150.4—2011《压力容器》标准约定值的 31 J。如图 7 所示,试件断口形貌表现出韧性断裂特征,以韧窝为主,韧窝底部出现的是以氧化物为主的第二相粒子。

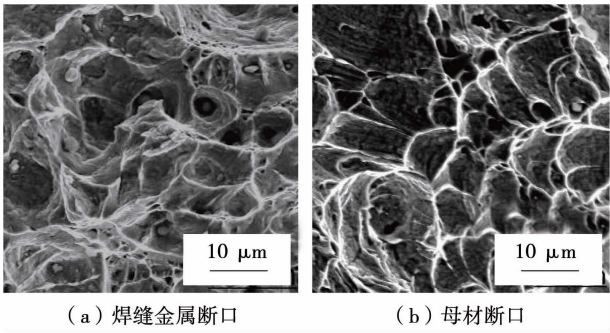


图 7 接头拉伸断口扫描形貌

Fig. 7 Morphologies of tensile fracture of welded joint

2.3.3 晶间腐蚀性能

单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝接头和母材晶间腐蚀试验后均未出现腐蚀裂纹,通过 GB/T4334—2008E 法(硫酸—硫酸铜腐蚀液)的检测。

2.3.4 弯曲性能

如图 8 所示,表明单枪耦合电弧 AA-TIG 焊试样弯曲面上未出现裂纹,接头面弯试验合格,符合 GB/T2653—2008 标准。



图 8 面弯试验试样

Fig. 8 Specimen of face bending testing

2.4 12 mm 厚 SUS304 不锈钢焊接试验

如图 9 所示,主电流 180 A,辅助电流 60 A 时焊缝熔深 11.1 mm,熔宽 8.3 mm,焊缝深宽比 1.3。

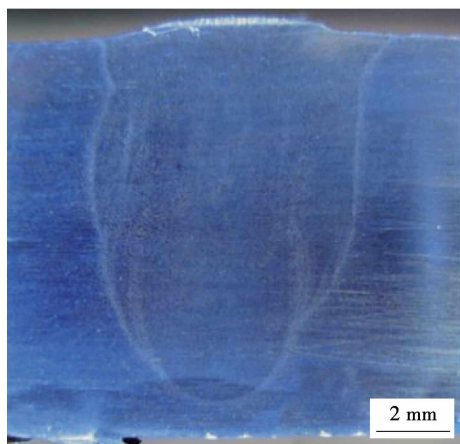


图 9 12 mm 厚试板焊缝熔深

Fig. 9 Weld penetration tested on 12 mm thickness plate

3 分析与讨论

基于“表面张力温度系数改变理论”提出耦合电弧 AA-TIG 焊,设计并优化了焊枪结构,显著增加了熔深,且焊接接头性能良好。

单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝成形是浮力、电磁力、等离子流拉力和 Marangoni 切应力共同作用的结果,其中在不锈钢焊接过程中 Marangoni 切应力起主要作用。辅助电弧引入氧气后,熔池表面张力降低,表面张力温度梯度由负值变为正值,熔池液态金属向内流动导致电弧热量向熔池底部传输,增加焊缝熔深^[6]。

焊接过程中,氧气流量、钨极间距、弧长对熔深有重要影响。双钨极产生的电弧等离子体在洛伦兹力的作用下相互吸引,耦合形成不同于普通 TIG 焊的耦合电弧^[5]。双钨极间距越小,产生的电弧等离子体间由于电磁感应而产生的洛伦兹力越大,在一定范围内完全耦合为一个电弧,同时减小弧长可以减小电弧底部在焊件所占区域。因此,使用较小的钨极间距和弧长可以增大阳极表面的热量密度,增加熔深。控制氧气流量可以使焊缝熔深增加、熔宽减小,当氧气流量为 0.5 L/min 时熔深最大、熔宽最小,并可以避免焊缝氧含量过高而影响低温冲击韧性。

单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝拉伸性能接近母材。但当氧气流量超过 3 L/min 时,低温冲击韧性显著下降,其可能原因^[7]有:O 元素引入使合金元素烧损,焊缝晶粒粗大,并通过改变焊接温度场和焊缝成分改变了铁素体含量和形态;另外,O 原子在晶界偏聚降低晶界结合力,降低了低温冲击韧性。

采用改进后的焊枪进行耦合电弧 AA-TIG 焊,增加了焊接过程的稳定性和可靠性,实现了焊接过

程的机械化自动化。焊接熔深可超过 11 mm,深宽比达到 1.3,显著提高 TIG 焊的焊接效率,焊缝成形和性能良好,使得 AA-TIG 在机械化工、航空航天、交通能源等领域都具有广阔的应用前景。

4 结 论

(1) 优化改进了单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊枪结构,使焊枪枪体体积减小,水冷面积增大,利于长时间工作,更适用于自动化焊接。

(2) 氧气流量、钨极间距、电弧长度对单枪耦合电弧 AA-TIG 焊熔深有重要影响。

(3) 单枪耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝成形良好,焊缝性能良好。

(4) 改进后的焊枪提高了焊接效率,12 mm 厚的 SUS304 不锈钢板熔深达到 11.1 mm,深宽比达到 1.3,显著提高了生产效率。

参考文献:

- [1] Gurevich S M, Zamkov V N, Kushmi N A. Increase in the efficiency of penetration of titanium alloys in argon-arc welding[J]. *Avtom Svarka*, 1965(9): 1-4.
- [2] Zhao Y Z, Lei Y P, Shi Y W. Effects of surface-active elements sulfur on flow patterns of welding pool[J]. *Journal of Material Science and Technology*, 2005, 21(3): 408-414.
- [3] Fujii H, Sato T, Lu S, *et al.* Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 495(1): 296-303.
- [4] 樊 丁, 刘自刚, 黄 勇, 等. 电弧辅助活性 TIG 焊焊缝组织及性能分析[J]. *焊接学报*, 2014, 35(4): 1-5.
Fan Ding, Liu Zigang, Huang Yong, *et al.* Structure and properties of arc assisted activating TIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(4): 1-5.
- [5] Wang X X, Fan D, Huang J K, *et al.* A unified model of coupled arc plasma and weld pool for double electrodes TIG welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(27): 1-14.
- [6] 樊 丁, 黄自成, 黄健康, 等. 活性元素氧对 AA-TIG 焊熔池传输行为影响的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2016, 37(3): 62-66.
Fan Ding, Huang Zicheng, Huang Jiankang, *et al.* Numerical simulation of the effect of reactive oxygen species on the transmission behavior of AA-TIG welding pool[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(3): 62-66.
- [7] 黄 勇, 郭 卫, 王艳磊. 外层氧气引入对 GPCA-TIG 焊焊缝性能的影响[J]. *焊接学报*, 2006, 37(9): 5-8.
Huang Yong, Guo Wei, Wang Yanlei. Effects of oxygen outer gas on weld properties of gas pool coupled activating TIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 37(9): 5-8.

作者简介: 张建晓,男,1971 年出生,博士研究生,高级工程师。主要从事压力容器制造方面工作。发表论文 20 余篇。Email: 13893429228@126.com

通讯作者: 樊 丁,男,教授,博士研究生导师。Email: fand@lut.cn