

粉末熔池耦合活性 TIG 焊接方法

黄 勇, 赵文强, 张利尧

(兰州理工大学材料科学与工程学院, 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)

摘要 提出了一种新型活性焊接方法——粉末熔池耦合活性 TIG 焊(Powder pool coupled activating TIG welding, PPCA-TIG)。该方法采用双层气体进行焊接, 内层利用惰性气体保护钨极, 外层通过自动送粉装置将活性剂粉末随保护气体送入电弧-熔池区域, 增加熔深, 提高焊接效率, 实现机械化自动化焊接。针对 SUS304 不锈钢进行了直流正接 PPCA-TIG 表面熔深, 通过与传统 TIG 焊对比, 研究了 SiO_2 活性剂对电弧形态、焊缝成形、组织和力学性能的影响。结果表明: SiO_2 能使电弧等离子体收缩、熔池金属流态改变, 并且焊缝熔深能达到传统 TIG 焊的 3 倍以上, 焊接效率明显提高。焊缝组织主要为奥氏体和铁素体, 铁素体形态以骨架状为主。焊缝抗拉强度略低于母材, 但相比传统 TIG 焊, 焊缝屈服强度略有提高, 其焊缝低温冲击韧性达到了传统 TIG 焊的 96.8%, 表现出了良好的力学性能。同时, 采用该方法可有效避免活性剂粉末对钨极的污染。

关键词 SiO_2 粉末熔池耦合活性 TIG 焊 电弧 焊缝成形 微观组织 力学性能

中图分类号: TG444 **文献标识码**: A **DOI**: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.022.014

Powder Pool Coupled Activating TIG Welding Method

HUANG Yong, ZHAO Wenqiang, ZHANG Liyao

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract The present work aims to develop and display a novel activating welding method, i. e. powder pool coupled activating TIG (PPCA-TIG) welding. Amongst the PPCA-TIG welding, tungsten was protected by inner layer argon or other inert gas, meanwhile the activated flux powder mixing protective gas was transported into the outer layer of arc-molten pool area by the automatic powder feeding device to realize the aim of increasing the depth of penetration, improving the welding efficiency and welding mechanization and automatization. Based on the SUS304 stainless steel, the conventional DC TIG welding and SiO_2 activated flux of DC PPCA-TIG welding were performed, and then the effect of SiO_2 flux on the arc morphology, weld appearance of welding process, microstructure and the mechanical properties were studied. The results show that SiO_2 can constrict the arc plasma, change the weld pool fluid flow mode and augment the depth of weld penetration to 3 times more than that of the conventional TIG welding, and the welding efficiency is obviously improved. The microstructure of the weld is mainly consist of austenite and ferrite, the ferrite morphology is mainly skeleton. Weld tensile strength is slightly lower than that of the base metal, while compared with the conventional TIG welding, it improves the yield strength slightly, and the lower temperature impact toughness of the weld is 96.8% of TIG weld, which shows favorable mechanical properties. At the same time, the PPCA-TIG method can effectively avoid the pollution on the tungsten electrode from the activated flux powder.

Key words SiO_2 , powder pool coupled activating TIG welding, arc, appearance of weld, microstructure, mechanical property

0 引言

20 世纪 60 年代中期巴顿焊接研究所基于 TIG 焊提出了一种新型高效焊接方法——活性 TIG 焊^[1], 该方法在传统 TIG 焊前, 通过在施焊板材表面上涂敷一层很薄的活性剂, 使其熔深显著增加, 在不开坡口、不使用填充材料的情况下, 采用 A-TIG 焊可以一次性焊透 12 mm 厚的碳锰钢板材^[2]。A-TIG 焊焊接方法虽然可以得到熔深较大的焊缝, 但是焊前表面活性剂的涂敷通常采用手工涂刷, 受人为因素影响, 难以保证涂敷质量, 不易实现焊接过程的自动化, 降低生产效率, 难以大范围应用。

针对上述现象, 近几年兰州理工大学在 A-TIG 焊研究的基础上提出了两种新型的活性焊接方法, 即气体熔池耦合

活性 TIG 焊 (Gas pool coupled activating TIG welding, GPCA-TIG)^[3-5] 和气体输送活性钨极氩弧焊 (Gas transfer flux activating TIG welding, GTFA-TIG)^[6-8]。GPCA-TIG 焊是采用内外两个喷嘴将含有 N_2 及 O_2 的气体与惰性保护气体分开, 内层为惰性 (如氩气或氦气) 保护气体, 产生电弧, 保护熔池和钨电极; 外层通过电弧的作用分解出 O 元素和 N 元素, 改变熔池金属流动模式, 增加熔深, 可一次焊透 8 mm 厚不锈钢板材, 实现了高效率高质量焊接, 但同时也存在不能实现铝镁合金焊接的局限性。而 GTFA-TIG 焊是通过自动送粉装置将活性剂粉末经电弧直接输送到熔池进行施焊, 可使电弧收缩, 熔池金属流态改变, 熔深增加, 同时省去了涂敷活性剂工序, 实现了焊接过程自动化。铝合金焊缝熔深增加可达 TIG 焊的 2.5~3 倍以上, 8 mm 厚不锈钢板材可一次

性焊透,采用了 MnCl_2 、 AlF_3 和 V_2O_5 活性剂的铝合金焊缝最大抗拉强度分别达到母材的 85.0%、81.0%和94.3%,兼顾了焊缝熔深增幅和力学性能。该方法适用范围广,可焊接不锈钢、钛合金,又可采用交流实现铝镁合金的连续焊接,但活性剂粉末输送易对电弧稳定性产生不利影响,且会造成钨极污染。

结合 GPCA-TIG 焊和 GTFA-TIG 焊,本工作提出了一种新型活性焊接方法,即粉末熔池耦合活性 TIG 焊(PPCA-TIG welding)。该方法内层通氩气或其他惰性气体保护熔池和钨极,外层通过自动送粉装置将活性剂粉末送入保护气体中,由保护气体将其引入电弧-熔池外层区域,然后与熔池的边缘低温区域耦合,可使得电弧收缩,熔池表面张力温度系数改变,显著增加熔深。PPCA-TIG 焊接方法可通过选择合适的活性剂,实现不锈钢、铝镁等各种金属合金的焊接,又可避免活性剂粉末对钨极的污染。

本工作将 PPCA-TIG 焊方法应用于 SUS304 不锈钢焊接,分析 SiO_2 活性剂对 PPCA-TIG 焊焊接过程中的电弧形态、焊缝成形以及焊缝微观组织、力学性能和钨极形貌的影响,并与传统 TIG 焊进行对比,验证该新型活性焊接方法的可行性。

1 实验

实验母材为 SUS304 不锈钢,试样尺寸为 $200\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,分别采用直流 TIG 焊和直流 PPCA-TIG 焊在相同工艺参数下进行表面熔焊,工艺参数如表 1 所示,PPCA-TIG 焊方法如图 1 所示。送粉器为螺旋式送粉器,通过电机转动可以自动输送定量的活性剂粉末,并选用 SiO_2 作为 PPCA-TIG 焊用活性剂,活性剂粒度 $200 \sim 300$ 目。

PPCA-TIG 焊前先加热活性剂,以脱去活性剂吸附的水分和本身的结晶水,然后研磨筛分。试样先用酒精擦拭去除表面油污,然后用砂纸打磨,直到露出金属光泽。焊接开始的同时输送活性剂粉末,熄弧后停止送粉。在焊接过程中采集电弧形态、电弧电压,焊后采集钨极及活性剂形貌。待焊件冷却至室温后,采用线切割的方法截取焊缝的横截面试样,然后对试样打磨、抛光和腐蚀,并利用金相光学显微镜及能谱仪对其微观组织进行分析,同时依据 GB/T228.1-2010《金属材料室温拉伸试验方法》和 GB/T229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》对母材、传统 TIG 焊与 PPCA-TIG 焊焊缝进行拉伸试验及低温冲击试验($-40\text{ }^\circ\text{C}$, V 型缺口),低温冲击试样尺寸为 $55\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,最后用扫描电镜观察其冲击断面形貌,通过对比研究该新型活性焊接方法的焊接性。

表 1 直流 PPCA-TIG 焊工艺参数
Table 1 PPCA-TIG welding specifications

焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	弧长 L/mm
180	80	3
内层氩气流量 $Q_1/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	外层氩气流量 $Q_2/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	电机转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
10	6	30

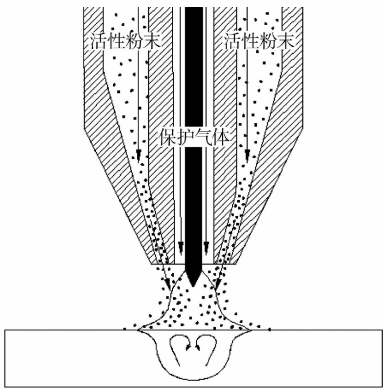


图 1 PPCA-TIG 焊方法示意图
Fig. 1 Schematic diagram of PPCA-TIG welding method

2 结果与分析

2.1 电弧形态及活性剂形貌

图 2 为传统 TIG 焊与采用 SiO_2 活性剂的 PPCA-TIG 焊的电弧形态。PPCA-TIG 焊的电弧形态呈现典型的钟罩形,电弧稳定性良好。通过滤光片观察,采用 SiO_2 活性剂的 PPCA-TIG 焊电弧中心明亮区直径(等离子体)相对传统 TIG 焊电弧有一定程度的收缩,并且变得更亮,经试验测得传统 TIG 焊与 PPCA-TIG 焊的电弧电压分别是 14.6 V、15.6 V。

焊前活性剂形貌如图 3(a)所示,经电弧处理后的活性剂形貌如图 3(b)所示。从图 3 可以看出焊前 SiO_2 活性剂粒径大约为 $50\text{ }\mu\text{m}$,棱角分明,呈现典型的不规则形貌。当活性剂粉末进入电弧外围区域时,在电弧高温作用下,活性剂颗粒发生了熔化蒸发的过程,粒径有所减小,从而变得更加圆润,形貌趋向于球形。

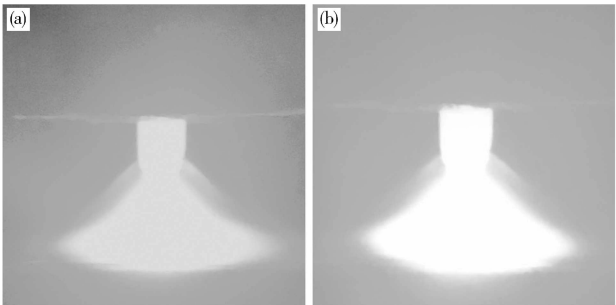


图 2 (a)传统 TIG 焊及(b)PPCA-TIG 焊的电弧形态
Fig. 2 Arc morphologies of (a) conventional TIG welding and (b) PPCA-TIG welding

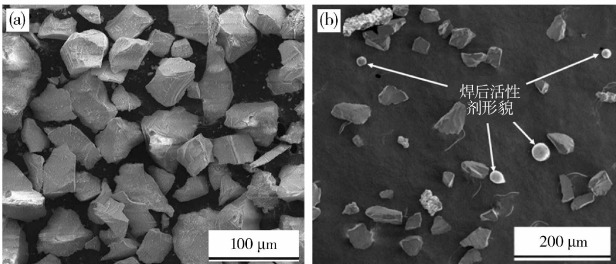


图 3 (a)焊前及(b)焊后 SiO_2 活性剂形貌
Fig. 3 The morphology of silicon dioxide activated flux (a) before welding and (b) after welding

2.2 焊缝成形

直流 TIG 焊和直流 PPCA-TIG 焊焊缝表面及横截面形貌如图 4 所示。传统 TIG 焊焊缝宽而浅,PPCA-TIG 焊焊缝窄而深,并且其焊缝表面成形良好,有鱼鳞纹出现,与 TIG 焊相比,PPCA-TIG 焊焊缝表面存在一层较薄的氧化层。传统 TIG 焊焊缝熔深约为 2.06 mm,深宽比为 0.17, SiO_2 活性剂的 PPCA-TIG 焊焊缝熔深为 7.02 mm,深宽比为 0.83,并且其焊缝没有气孔和氧化物夹杂等缺陷。由此可以看出,PPCA-TIG 焊增加熔深效果明显,在保证焊接质量的同时极大地提高了焊接效率。

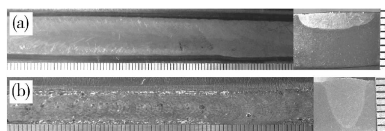


图 4 (a)TIG 焊及(b)PPCA-TIG 焊焊缝成形
Fig. 4 Weld appearances of (a) TIG welding and (b) PPCA-TIG welding

2.3 焊缝微观组织

传统 TIG 焊和 SiO_2 活性剂 PPCA-TIG 焊焊缝微观组织如图 5 所示。从图 5 可以看出 TIG 焊与 PPCA-TIG 焊焊缝中心区和熔合区的组织都是由奥氏体和铁素体组成的,并且传统 TIG 焊及 SiO_2 活性剂焊缝中心区 δ 铁素体均以骨架状呈现。传统 TIG 焊与 PPCA-TIG 焊焊缝熔合区组织主要为胞状树枝晶,沿垂直焊缝熔合线的方向生长,指向焊缝的中心部位,这是由于焊接过程中,熔池金属被冷金属包围,同时熔池金属体积较小,使得熔池金属冷却速率很大,促进了柱状晶的形成,因而熔池金属凝固后的组织以柱状晶为主,且柱状晶沿散热速度最快的方向生长。不同的是 PPCA-TIG

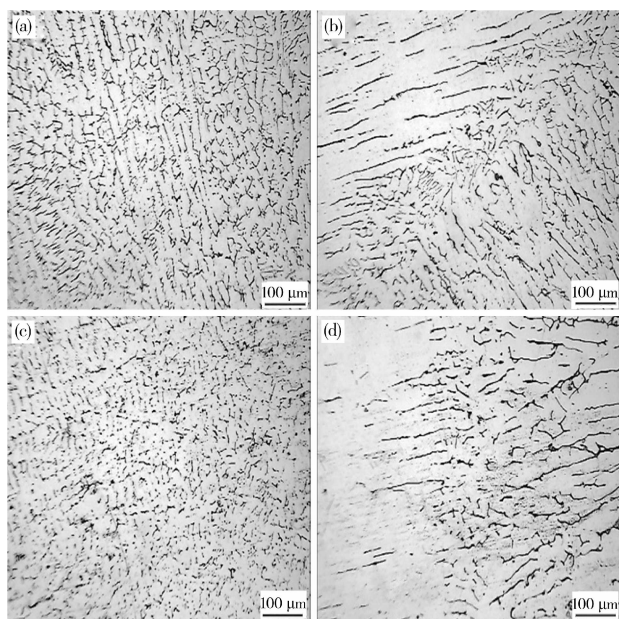


图 5 TIG 焊(a)焊缝中心区及(b)焊缝熔合区,PPCA-TIG 焊(c)焊缝中心区及(d)焊缝熔合区的微观组织
Fig. 5 Weld microstructure of (a, b) TIG welding and (c, d) PPCA-TIG welding, among which (a) and (c) correspond to the center of weld, (b) and (d) correspond to the heating area of weld

焊焊缝晶粒相对传统 TIG 焊有一定的细化。对 SiO_2 活性剂的 PPCA-TIG 焊焊缝中心区铁素体及奥氏体基体进行 EDS 成分分析,如图 6 及表 2 所示,结果显示焊缝中存在 Si 单质和 O 元素,表明 SiO_2 在电弧高温作用下发生了热解离,从而在焊缝中引入了 Si 单质和 O 元素。同时,铁素体中的 Cr 含量高于奥氏体基体, Ni 含量低于奥氏体基体,这是因为 PPCA-TIG 焊焊接 SUS304 不锈钢时焊缝凝固模式是 FA 模式,奥氏体是依靠不断消耗铁素体形成的。奥氏体不锈钢在焊接过程中容易产生凝固裂纹,而当焊缝以 FA 模式凝固时,在凝固终了阶段裂纹沿铁素体-奥氏体凹凸不平的边界扩展困难,并且凝固过程中生成的初始析出相 δ 铁素体对杂质元素有较高的溶解度,降低了凝固时杂质元素的偏聚程度,从而提高了焊缝的抗凝固裂纹能力,改善了焊缝质量。

表 2 图 6 中 A、B、C 位置能谱成分分析
Table 2 Elemental compositions obtained by EDS analysis for positions A, B, C in Fig. 6

位置	元素	Fe	Cr	Ni	C	O	Si
A	wt%	65.8	23.1	3.8	6.5	0.4	0.4
	at%	51.9	19.6	2.9	23.8	1.1	0.7
B	wt%	65.7	23.4	3.7	6.8	0.0	0.4
	at%	51.8	19.8	2.8	24.9	0.0	0.7
C	wt%	65.9	17.4	8.3	7.6	0.4	0.4
	at%	50.7	14.4	6.1	27.1	1.1	0.6

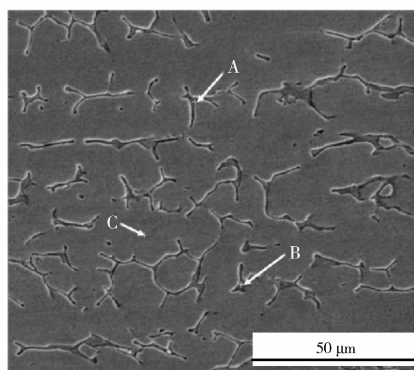


图 6 PPCA-TIG 焊焊缝 SEM 形貌
Fig. 6 SEM morphology of the welded surface by PPCA-TIG welding

2.4 力学性能

母材、传统 TIG 焊与 PPCA-TIG 焊焊缝拉伸试样尺寸如图 7 所示,试验结果如表 3 所示。可以看出 PPCA-TIG 焊与传统 TIG 焊焊缝抗拉强度均略低于母材,两者试样均断裂于焊缝处,前者抗拉强度略低于后者。而 PPCA-TIG 焊焊缝屈服强度与母材基本相同,并且与 TIG 焊焊缝相比提高了约 12 MPa。PPCA-TIG 焊焊缝呈现出较好的塑性变形能力。

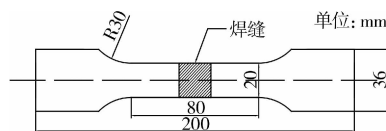


图 7 拉伸试样尺寸
Fig. 7 Schematic of the tensile specimen

表 3 焊缝拉伸试验结果
Table 3 Results of weld tensile test

样品名称	活性剂	屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断裂位置
母材	—	475	775	母材
TIG 焊	—	463	760	焊缝
PPCA-TIG 焊	SiO_2	475	723	焊缝

表 4 为母材、TIG 焊及 PPCA-TIG 焊焊缝低温冲击试验结果。与母材相比,传统 TIG 焊与 PPCA-TIG 焊的焊缝低温冲击韧性都有所下降,但下降幅度不明显,PPCA-TIG 焊焊缝低温冲击韧性达到了传统 TIG 焊的 96.8%。图 8 为母材、传统 TIG 焊与 PPCA-TIG 焊焊缝低温冲击试样的断口形貌,可以看出试验钢的断口形貌都为剪切韧窝,断裂方式为韧性断裂,一些较大的韧窝上分布着一些较小的韧窝,母材的韧窝直径较大、相对较深。与传统 TIG 焊相比,PPCA-TIG 焊试样的韧窝尺寸基本相同,且分布比较均匀,可以看出 PPCA-TIG 焊对 SUS304 不锈钢的低温冲击性能产生的影响比较小,其焊缝在低温环境下表现出了较好的韧性。

表 4 焊缝冲击试验结果
Table 4 The results of weld impact test

样品名称	温度 $T/^\circ\text{C}$	冲击功 kV^2/J	试样尺寸 D/mm
母材	-40	90.4	$55\times 10\times 5$
TIG 焊	-40	85.1	$55\times 10\times 5$
PPCA-TIG 焊	-40	82.4	$55\times 10\times 5$

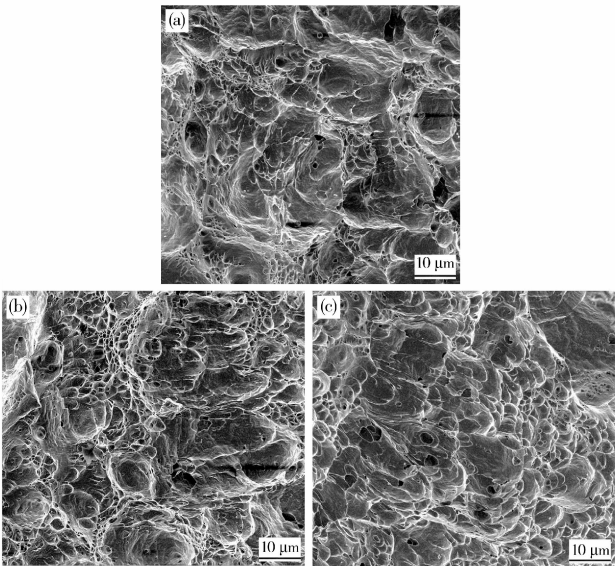


图 8 (a)母材、(b)传统 TIG 焊和(c)PPCA-TIG 焊的低温冲击断口形貌
Fig.8 Morphology of the fractured surfaces after low-temperature impact test of (a) base metal, (b) conventional TIG welding and (c) PPCA-TIG welding

2.5 焊后钨极形貌

图 9 给出了传统 TIG 焊、GTFA-TIG 焊及 PPCA-TIG 焊三种焊接方法焊后钨极的形貌。由图 9 可以看出,采用单层气体并混合活性剂粉末保护钨极的 GTFA-TIG 焊时,钨极表面氧化烧损比较严重,且有活性剂粉末烧结于钨极尖端

表面。而采用 PPCA-TIG 焊时,由于内层保护气体对外层活性剂粉末起到了隔绝作用,钨极尖端并没有活性剂粉末的污染,同时与常规 TIG 焊类似,钨极表面几乎没有氧化烧损。

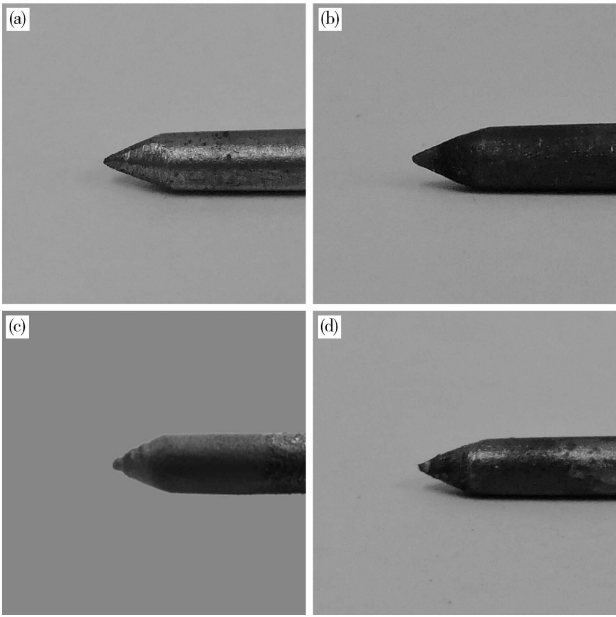


图 9 (a)焊前、(b)传统 TIG 焊焊后的、(c)GTFA-TIG 焊焊后的及(d)PPCA-TIG 焊焊后的钨极形貌
Fig.9 Morphology of tungsten electrode (a) before welding, (b) after conventional TIG welding, (c) after GTFA-TIG welding and (d) after PPCA-TIG welding

3 讨论

根据目前的研究现状,焊缝熔深的增加是电弧收缩^[9]和熔池表面张力温度系数改变造成的^[10],而这两种作用会受到电磁力、表面张力梯度、浮力以及电弧等离子体冲击力的影响。越来越多的研究结果表明,对于铁系合金而言,表面张力梯度的改变是熔深增加的主要原因^[11-14]。当采用传统 TIG 焊焊接此类合金时,熔池边缘的表面张力大于熔池中心处的表面张力,因此熔化的金属将流向熔池外围,形成浅而宽的焊缝。相反,向焊缝熔池引入活性元素,将会对温度与表面张力的关系产生剧烈的影响。PPCA-TIG 焊时, SiO_2 在电弧高温作用下解离出了 O 元素,之后活性元素 O 会沿着电弧外围进入熔池的边缘低温区域,而焊缝中心区域并没有引入 O 元素,这样可以更加剧烈地降低熔池边缘的表面张力,使得熔池中心区域的表面张力远远大于熔池边缘,从而引起熔池金属流向内部,形成窄而深的焊缝。同时由于 SiO_2 具有较高的解离能(离子键能可达 799 kJ/mol),在电弧高温作用下会发生熔化、蒸发和解离,从而吸收大量的热,根据最小电压原理,电弧会自行收缩,从而引起电弧电压的升高、电弧热输入增加,焊缝熔深也会有一定程度的增加。但采用 SiO_2 活性剂的电弧电压增加值大约只相当于 TIG 焊电弧的 6.8%,热解离吸热造成的电弧收缩程度并不明显,电弧收缩对焊缝熔深增加的贡献比较小。

当采用 SiO_2 活性剂进行 PPCA-TIG 焊时,焊缝熔池中会引入 Si 和 O 元素。但一般认为引入的 O 元素将对焊缝的性能带来不利影响,随着焊缝含氧量的增加,其塑性、韧性都

会下降,尤其是低温冲击韧性急剧下降^[15]。含量在 1% 以下的 Si 能改善熔融钢液的流动性,使形成的焊缝组织更加均匀,同时 Si 作为一种脱氧剂,与氧结合生成 Si 的氧化物,可以减轻焊缝中的偏析现象。引入的 Si 单质及 Si 脱氧所形成的氧化物非常细小,弥散分布在熔池中,促使非自发形核的固态质点增多,造成结晶时的晶核数目大大增加,从而提高了形核率,细化了晶粒。同时采用 SiO₂ 活性剂的 PPCA-TIG 焊较高的热输入以及较低的冷却速率促进了相转变,有助于奥氏体与铁素体相的平衡,改善了焊缝组织性能。这几种作用共同抵消了一部分氧引入对焊缝塑性及低温冲击性能的不利影响,使得焊缝强度、韧性并未明显下降。

4 结论

(1) SiO₂ 能使电弧等离子体收缩、熔池金属流态改变,并且焊缝熔深能达到传统 TIG 焊的 3 倍以上,采用 SiO₂ 活性剂的 PPCA-TIG 焊与传统 TIG 焊相比,焊缝成形良好、焊接效率明显提高。

(2) PPCA-TIG 焊焊缝组织主要为奥氏体和铁素体,铁素体形态以骨架状为主,焊缝凝固模式是 FA 模式。

(3) PPCA-TIG 焊焊缝抗拉强度相比母材略有降低,而屈服强度相比传统 TIG 焊略有提高,低温冲击韧性达到了传统 TIG 焊的 96.8%,表现出了良好的塑性变形能力及低温冲击韧性。

(4) 采用双层气体进行焊接的 PPCA-TIG 焊可以有效避免活性剂粉末污染钨极的问题。

参考文献

- Gurevich S M, Zamokov V N, Kushirenko N A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by tungsten arc process[J]. Automatic Weld, 1965, 18(9): 1.
- Liu Fengyao, Yang Chunli, Lin Sanbao, et al. Effect of weld microstructure on weld properties in A-TIG welding of titanium alloy[J]. Trans Nonferr Met Soc China, 2013, 13(4): 876.
- Huang Yong, Wang Yanlei, Zhang Zhiguo. Impact of introduction of O₂ on the welding arc of gas pool coupled activating TIG[J]. Spectrosc Spectral Anal, 2014, 34(5): 1168(in Chinese).
黄勇,王艳磊,张治国. 氧引入对气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1168.
- Huang Yong, Zhang Zhiguo, Wang Yanlei. Nitrogen distribution in molten pool of gas pool coupled activating TIG welding with rapid cooling method[J]. Trans China Weld Inst, 2015, 2(8): 31(in Chinese).
黄勇,张治国,王艳磊. 气体熔池耦合活性 TIG 焊熔池 N 元素分布骤冷分析[J]. 焊接学报, 2015, 2(8): 31.
- Huang Yong, Guo Wei, Wang Yanlei. Effects of oxygen outer gas on the weld properties of gas pool coupled activating TIG welding[J]. Trans China Weld Inst, 2016, 37(9): 5(in Chinese).
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, 2016, 37(9): 5.
- Huang Yong, Li Tao, Wang Yanlei. Gas transfer flux activating TIG welding process for aluminum alloy[J]. Trans China Weld Inst, 2014, 35(1): 101(in Chinese).
黄勇,李涛,王艳磊. 铝合金气体输送活性钨极氩弧焊方法[J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 101.
- Huang Yong, Yao Yuhang, Zhang Jianxiao, et al. Gas transfer flux active welding for various metallic materials[J]. J Lanzhou University of Technology, 2015, 41(5): 11(in Chinese).
黄勇,姚宇航,张建晓,等. 适用于不同金属材料的气体输送活性焊接方法[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(5): 11.
- Huang Bensheng, Yang Jiang, Yin Wenfeng, et al. Research progress and prospect of A-TIG welding[J]. Mater Rev: Rev, 2016, 30(2): 77(in Chinese).
黄本生,杨江,尹文锋,等. A-TIG 焊研究进展及前景展望[J]. 材料导报: 综述篇, 2016, 30(2): 77.
- Simonik A G. The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of the eletro-negative elements[J]. Weld Prod, 1976, 23(3): 49.
- Heiple C R, Roper J R, Stagner R T, et al. Surface active element effects on the shape of GTA, laser and electron beam welds[J]. Weld Res Supp, 1983, 62(3): 72.
- Huang Yong, Fan Ding, Lin Tao, et al. Arc assisted activation TIG welding process for stainless steels[J]. Trans China Weld Inst, 2009, 30(10): 1(in Chinese).
黄勇,樊丁,林涛,等. 不锈钢电弧辅助活性 TIG 焊[J]. 焊接学报, 2009, 30(10): 1.
- Fujii H, Sato T, Lu S P, et al. Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of marangoni convection[J]. Mater Sci Eng A, 2008, 495(1-2): 296.
- Fan Ding, Lin Tao, Huang Yong, et al. Arc assisted activating TIG welding process[J]. Trans China Weld Inst, 2008, 29(12): 1(in Chinese).
樊丁,林涛,黄勇,等. 电弧辅助活性 TIG 焊接法[J]. 焊接学报, 2008, 29(12): 1.
- Lu Shanping, Li Dongjie, Li Dianzhong, et al. Double shielded TIG welding method[J]. Trans China Weld Inst, 2010, 31(2): 21(in Chinese).
陆善平,李冬杰,李殿中,等. 双层气流保护 TIG 焊接方法[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 21.
- Terashima S, Bhadeshia A H K D H. Changes in toughness at low oxygen concentrations in steel weld metal[J]. Sci Technol Weld Join, 2006, 11(5): 509.

(责任编辑 房 威)