

双 TIG 活性电弧焊接工艺

张佳^{1,2}, 郭超^{1,2}, 邵沛泽^{1,2}, 王新鑫^{1,2}, 樊丁³

(1. 重庆理工大学, 重庆 400054; 2. 重庆市特种焊接材料与技术高校工程研究中心, 重庆 400054; 3. 兰州理工大学, 兰州 730050)

摘要: 提出双 TIG 活性电弧焊接方法, 采用 2 支 TIG 焊枪前后排布, 前置焊枪的焊接电流小于后置焊枪, 且在前置焊枪保护气中混入少量 O_2 , 使电弧具有活性。对 5 mm 厚 SUS304 奥氏体不锈钢板进行焊接工艺试验。结果表明, 与相同条件下的 TIG 焊接相比, 双 TIG 活性电弧焊接焊缝熔深明显增加, 焊缝表面成形良好; 随着 O_2 流量的增加, 焊缝熔深先增加后减小, 焊缝熔宽先减小后增加; 在保持总电流不变的情形下, 随着后置焊枪电流增加(前置焊枪电流减小), 焊缝熔深先增加后减小, 焊缝熔宽持续增加; 随着弧长的增加, 焊缝熔深先增加后减小, 焊缝熔宽逐渐增加; 当钨极间距从 3 mm 开始增加时, 焊缝熔深逐渐减小, 熔宽逐渐增加; 而随着焊接速度的增加, 焊缝熔深和熔宽都减小。 O 的混入对焊缝组织无明显影响。相比母材而言, 焊缝冲击韧性有所下降。该方法能在高于普通 TIG 焊接速度的条件下实现深熔焊接。

创新点: 提出双 TIG 活性电弧焊接, 2 支独立的焊枪在焊接方向的平面内前后排布, 前置焊枪焊接电流小于后置焊枪, 前置焊枪采用 $Ar + O_2$ 作为保护气体, 后置焊枪采用纯 Ar 作为保护气体, 从而使电弧具有活性; 在高于传统 TIG 的焊接速度下, 焊缝熔深明显增加, 可实现 5 mm 厚的不锈钢板完全焊透。高速焊接时能消除驼峰和咬边等缺陷, 明显提高焊接生产率。

关键词: 双 TIG; 活性电弧; 焊接工艺; 焊缝成形

中图分类号: TG444 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220127008

Two-TIG activating arc welding process

Zhang Jia^{1,2}, Guo Chao^{1,2}, Shao Peize^{1,2}, Wang Xinxin^{1,2}, Fan Ding³

(1. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Municipal Engineering Research Center of Higher Education Institutions for Special Welding Materials and Technology, Chongqing 400054, China; 3. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Two-TIG activating arc welding process was proposed. Two TIG welding guns were used in a front-to-back arrangement, current of the front welding gun was less than that of the back welding gun and the front welding gun made the arc activating by being mixed with minor O_2 . Welding procedure test of 5 mm thick SUS304 austenitic stainless steel plate was carried out. The results showed that compared to traditional TIG welding under the same conditions, penetration of two-TIG activating arc welding significantly increased, and surface of the weld was well formed. With the increase of O_2 flow, penetration first increased and then decreased, while weld width first decreased and then increased. At the same welding current, as the back welding gun's current increased and the front welding gun's current decreased, penetration first increased and then decreased, and weld width continued to increase. With the increase of arc length, penetration first increased and then decreased, and weld width gradually increased. When the tungsten electrode spacing increased from 3 mm, penetration gradually decreased, while weld width increased. However, with the increase of welding speed, both penetration and weld width decreased. The mixing of O_2 had no significant effect on microstructure of the weld. Compared to the parent, impact toughness of the weld slightly decreased. This method could realize deep penetration welding at higher welding speed than the common TIG welding.

Highlights: Two-TIG activating arc welding was put forward, two independent welding guns were arranged front to back in the plane of welding

收稿日期: 2022-01-27 修改日期: 2022-02-23 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705054); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202101135)。

direction, and welding current of the front welding gun was less than that of the back welding gun. Ar + O₂ protective gas was used for the front welding gun, while pure Ar protective gas was used for the back gun, which made the arc activating. At the welding speed higher than that of traditional TIG, penetration significantly increased and 5 mm thick stainless steel plate could be fully welded. Defects such as humping and edge cutting could be eliminated by high speed welding and welding productivity was significantly increased.

Key words: two-TIG, activating arc, welding process, formation of weld

0 前言

钨极惰性气体保护焊(Tungsten inert gas arc welding, TIG welding)是一种高质量的焊接方法,因具有焊缝成形优良、焊接过程稳定及焊接质量高等诸多优点,在工业中得到广泛应用。然而,由于钨极的载流能力有限,电弧不集中,导致单道焊缝熔深浅,焊接生产率低,且当速度超过临界值后会出现咬边和驼峰等焊接缺陷^[1]。

为了解决这一问题,研究人员提出了多种高效焊接方法^[2-5],最具带代表性的是 A-TIG (Activating flux TIG)^[5]。随着 A-TIG 焊研究的深入,研究人员认为,对于铁系合金而言,表面张力温度系数的改变是引起焊缝熔深增加的最主要原因^[6]。Lu 等人^[7]提出 AA-TIG (Advanced activating TIG welding),该方法采用双层气体引入活性 O 元素,可以明显增加熔深。樊丁等人^[8-9]提出了电弧辅助活性 TIG (Arc assisted activating TIG),不但能增加焊缝熔深,而且还可以在高速焊接时克服咬边和驼峰等缺陷^[10-11]。

文中提出双 TIG 活性电弧焊接法,采用 2 支 TIG 焊枪前后排布进行焊接,焊枪在垂直于母材平面内成 60° 夹角,前置焊枪的焊接电流小于后置焊枪,采用 2

台相互独立的焊接电源分别对 2 支焊枪供电。后置焊枪采用 Ar 作为保护气体,前置焊枪采用 O₂ + Ar 的混合气体保护,从而使电弧具有活性。其中,钨极间距定义为 2 个钨极尖端的水平距离,弧长定义为钨极尖端到母材的垂直距离。该方法简便易行,可以在高于普通 TIG 焊接速度的条件下实现深熔焊接。研究了 O₂ 流量、焊接电流、弧长、钨极间距和焊接速度等工艺参数对焊缝成形的影响,并考察了焊缝组织及力学性能。

1 试验材料及方法

试验中选用 SUS304 不锈钢进行平板表面熔焊试验,板材尺寸为 200 mm × 100 mm × 5 mm。焊接前打磨母材表面,直至露出金属光泽,然后用丙酮擦拭,去除母材表面的油污等杂质。选用 3.2 mm 钨极,钨极尖端角度为 60°。在焊接时,焊枪固定不动,起弧后母材随着焊接平台移动完成焊接。待试板冷却后拍照记录焊缝表面成形,取样、打磨、腐蚀并观察焊缝形貌和焊缝组织。按照 GB/T 228—2002《金属材料室温冲击试验方法》制备焊接接头冲击试样,试样加工成尺寸为 55 mm × 10 mm × 2.5 mm,进行 V 形缺口夏比冲击试验。焊接工艺参数见表 1。

表 1 焊接工艺参数

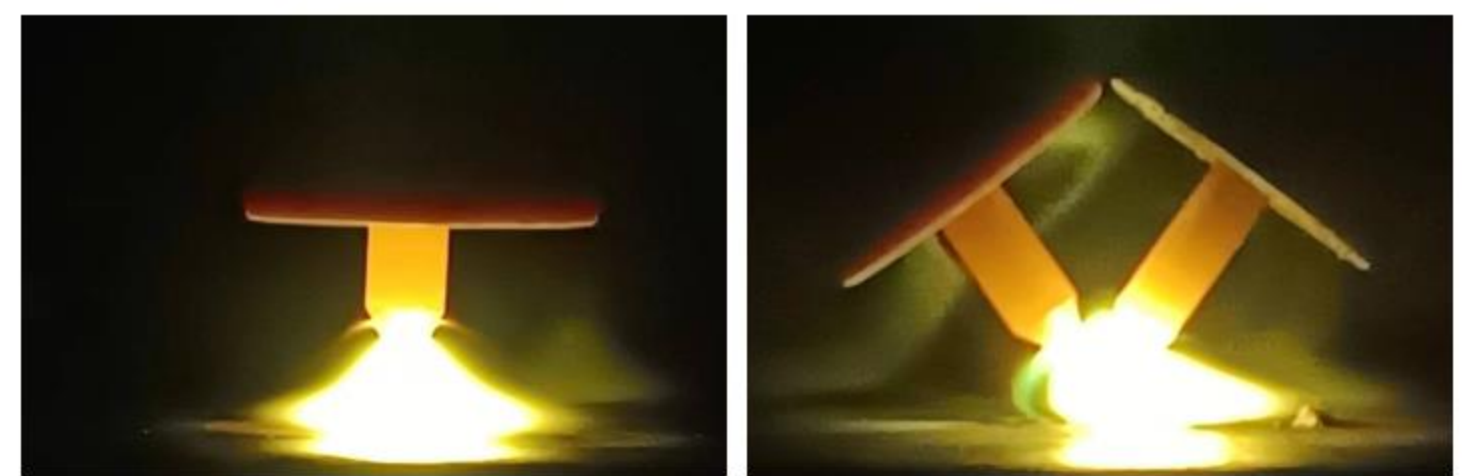
焊接电流 <i>I/A</i>	后置焊枪 Ar 流量 <i>Q₁/(L · min⁻¹)</i>	前置焊枪 Ar 流量 <i>Q₂/(L · min⁻¹)</i>	前置焊枪 O ₂ 流量 <i>Q/(L · min⁻¹)</i>	焊接速度 <i>v/(mm · s⁻¹)</i>	弧长 <i>L/mm</i>	钨极间距 <i>d/mm</i>
200 + 100	15	10	0.6	4	3	3

2 试验结果及讨论

2.1 双 TIG 活性电弧形态

图 1 为总电流 300 A,弧长 3 mm,保护气流量 15 L/min 时,传统 TIG 电弧焊和双 TIG 活性电弧焊的电弧形貌。可以看出,传统 TIG 电弧形貌为典型的钟罩型,而双 TIG 活性电弧由于 2 个电弧之间的相互吸引作用,形成耦合电弧。由于后置焊枪钨极电流大,前置焊枪钨极电流小,大电流钨极产生的阴极射流更强,在其

作用下电弧整体上向小电流一侧偏移。



(a) 传统 TIG 电弧

(b) 双 TIG 活性电弧

图 1 电弧形貌对比

2.2 焊缝形貌比较

图2为基本工艺参数下普通TIG、引入O₂的TIG、双TIG和双TIG活性电弧的焊缝成形对比。可以看到,传统TIG焊缝熔深为3.0 mm,焊缝熔宽为14.4 mm。引入O₂的普通TIG焊缝熔深达到5 mm,熔宽达到13.6 mm,但焊缝表面氧化严重,成形较差,且伴有轻微咬边。双TIG电弧焊缝熔深为2.1 mm,焊缝熔宽为13.4 mm。与之相比,双TIG活性电弧焊缝完全熔透,熔宽仅8.7 mm,焊缝表面有轻微的氧化,焊缝成形良好。可见,在保持工艺参数相同时,双TIG活性电弧焊的焊缝成形良好,焊缝熔深最大,且熔宽较小。

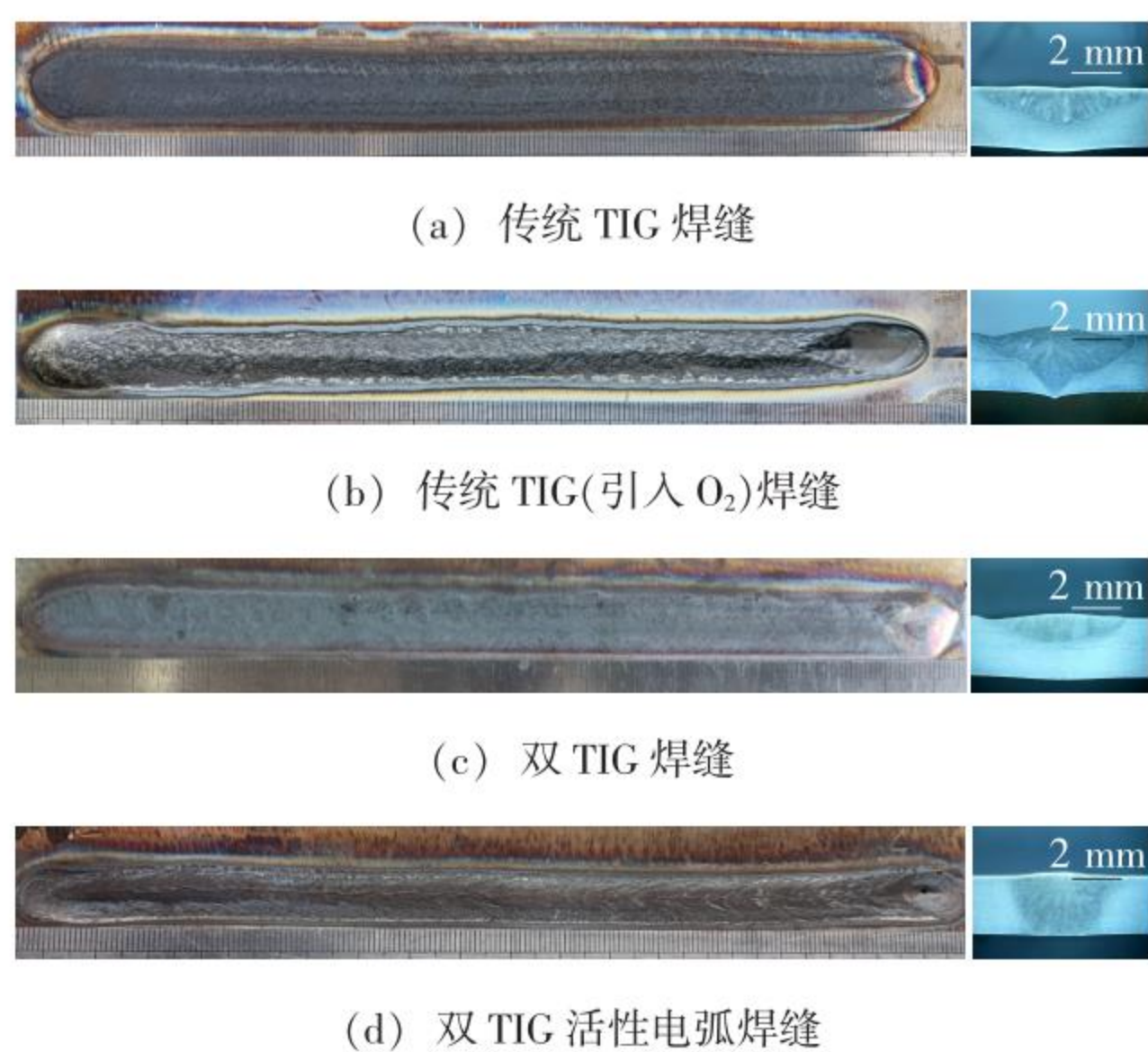


图2 焊缝成形对比

2.3 钨极尖端形貌对比

图3为焊接后钨极尖端烧损程度比较。普通TIG



图3 钨极尖端烧损比较

时,当保护气体为纯Ar,气体流量为15 L/min时,钨极氧化不明显,如图3a所示;当保护气体中添加0.6 L/min的O₂时,钨极氧化十分严重,如图3b所示;采用双TIG活性电弧焊接时,后置焊枪采用Ar保护,气体流量为15 L/min,前置焊枪采用Ar+O₂保护,气体流量为(10+0.6) L/min。可以完全避免钨极尖端烧损,如图3c所示。可见双TIG活性电弧焊接方法可以有效避免钨极烧损,延长使用寿命。

2.4 焊接工艺参数对焊缝成形的影响

2.4.1 O₂流量

图4为基本焊接工艺参数下,前置焊枪保护气体中O₂流量对焊缝成形的影响。由图4可见,随着保护气中O₂流量的增加,焊缝熔深先增加后减小,在0.6 L/min和1.0 L/min的O₂流量下完全熔透,且在0.6 L/min时熔宽最小,达到8.7 mm。

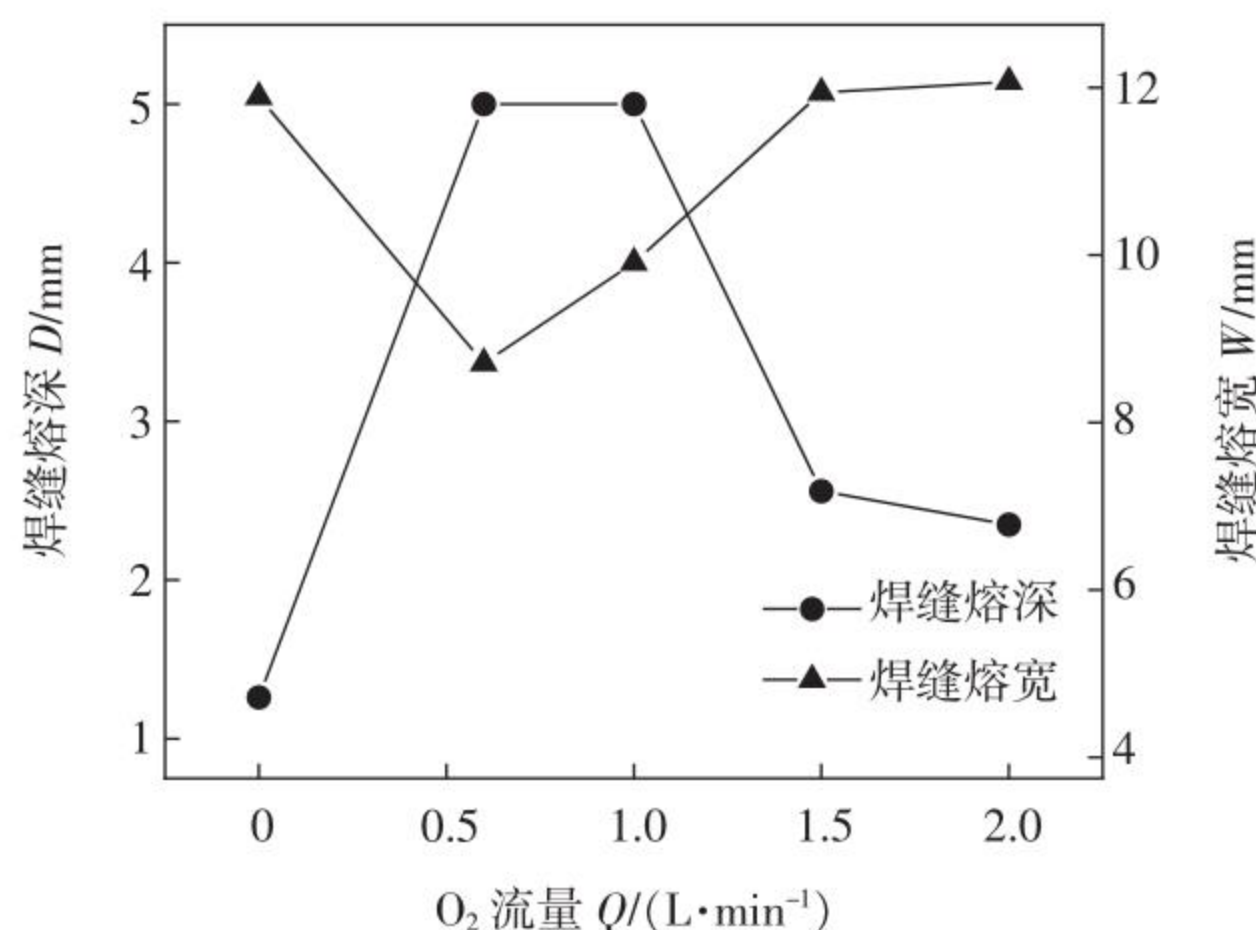


图4 O₂流量的影响

目前,对于活性元素增加熔深机理的研究结果表明^[11-12]:对于铁合金而言,活性元素的引入使熔池表面张力温度系数由负变正,从而改变了熔池中液态金属的流动方向,由传统的由内向外流动转变为由外向内的流动,最终导致焊缝熔深增加。

根据Sahoo等人^[13]的研究,随着熔池中O元素含量的增加,表面张力温度系数先增加后减小。在该试验中,随着保护气中O₂流量的增加,通过双TIG电弧进入到熔池的O元素含量增多,表面张力温度系数由负变正,熔池中Marangoni对流方向逆转,变成由外向内的对流,焊缝熔深增加;随着O₂流量的进一步增加,表面张力温度系数反而减小,导致Marangoni对流的驱动力减小,热对流强度减弱,熔深减小。至于熔宽的变化,焊接过程中热输入保持不变,当熔池金属向内流动时,热量向中心传递,而对熔池边缘的熔化减弱,向内对流越强,熔化的越少,导致熔宽越小,因此,熔宽表现

出与熔深变化相反的规律。

2.4.2 焊接电流

图5为基本焊接工艺参数下,焊接电流对焊缝成形的影响。由图可知,在保持总电流不变时,随着后置焊枪电流的增加(前置焊枪电流的减小),焊缝熔深先增加后减小,熔宽逐渐增加。

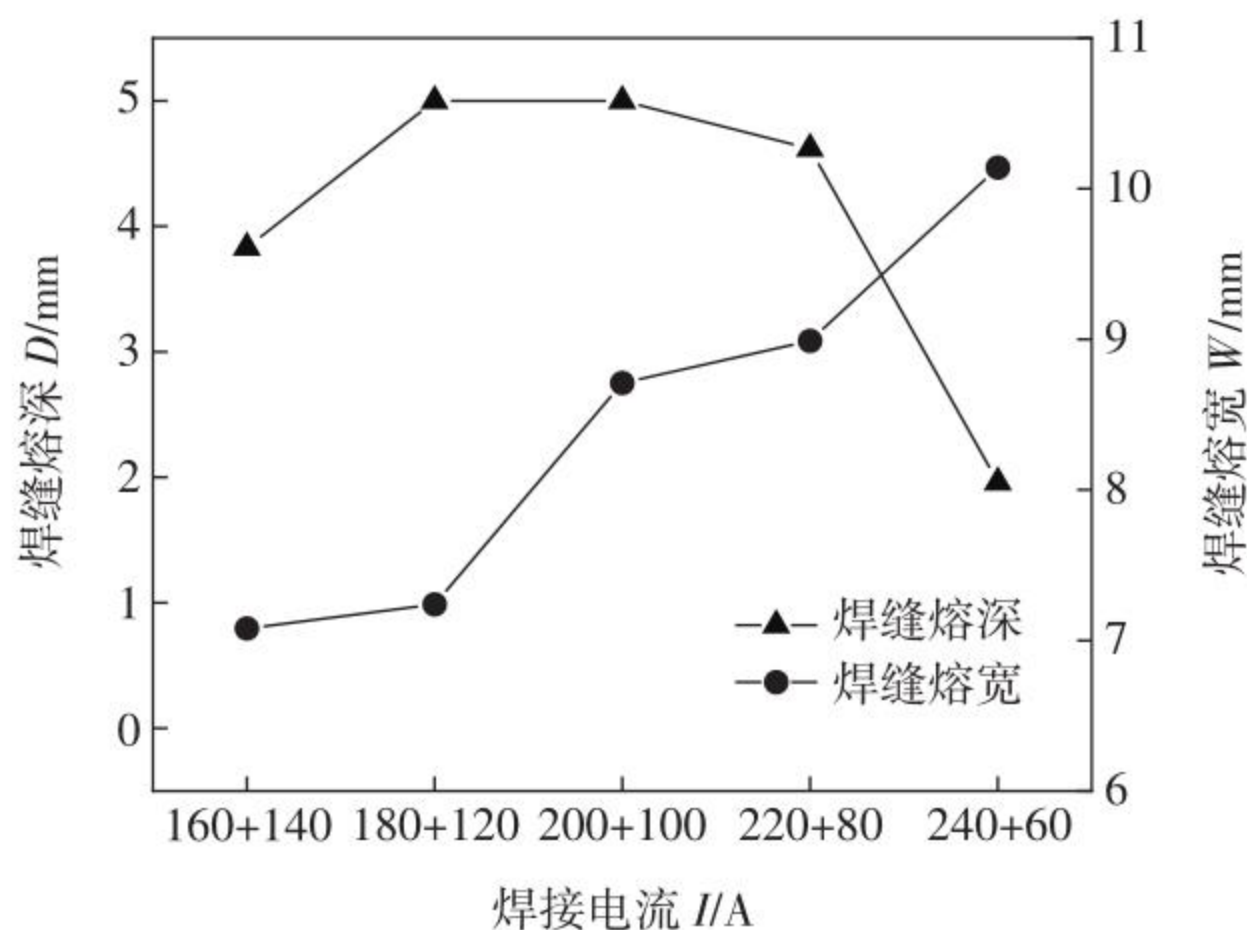


图5 焊接电流的影响

随着后置焊枪电流的增加,大电流钨极产生的等离子流更加强烈,此时小电流侧(即前置焊枪)混入 O_2 在等离子流的作用下更多的被传递到电弧外围^[14],从而使熔池表面附近的 O 元素减少。因此,随后置焊枪电流的增加,进入熔池的 O 元素亦随之降低。当后置焊枪电流增大时,进入熔池的 O 元素减少,如 2.4.1 章节分析所述,在电流为 160 A + 140 A 时进入过多,熔深反而变浅。而当 180 A + 120 A, 200 A + 100 A 时,进入熔池的 O 元素对增加熔深最为有利。随着电流进一步增加,进入熔池的 O 元素过少,熔深变浅。而熔宽增加是由于后置焊枪电流的增加,电弧覆盖区域扩展,同时向内流动减弱,使得熔池边缘的熔化被加强。

2.4.3 钨极间距

图6为基本焊接工艺参数下,钨极间距对焊缝成形的影响。由图可知,当钨极间距从 3 mm 增加时,焊缝熔深逐渐减小,焊缝熔宽逐渐增加。当钨极间距为 3 mm 时焊缝完全熔透,熔宽最小。

随着钨极间距的增大,两阴极射流之间的吸引力减小, O 元素向电弧中心区域的扩散距离增加,到达熔池表面的 O 元素减少,进入到熔池中的 O 元素也减少,从而导致熔池表面的 Marangoni 对流减弱,焊缝熔深减小。此外,随着钨极间距变大,两电弧之间的吸引力减弱,电弧要比钨极间距为 3 mm 时的电弧更加扩展,电弧覆盖的区域增加,同时向内流动减弱,对熔池边缘的熔化作用加强,导致熔宽增加。

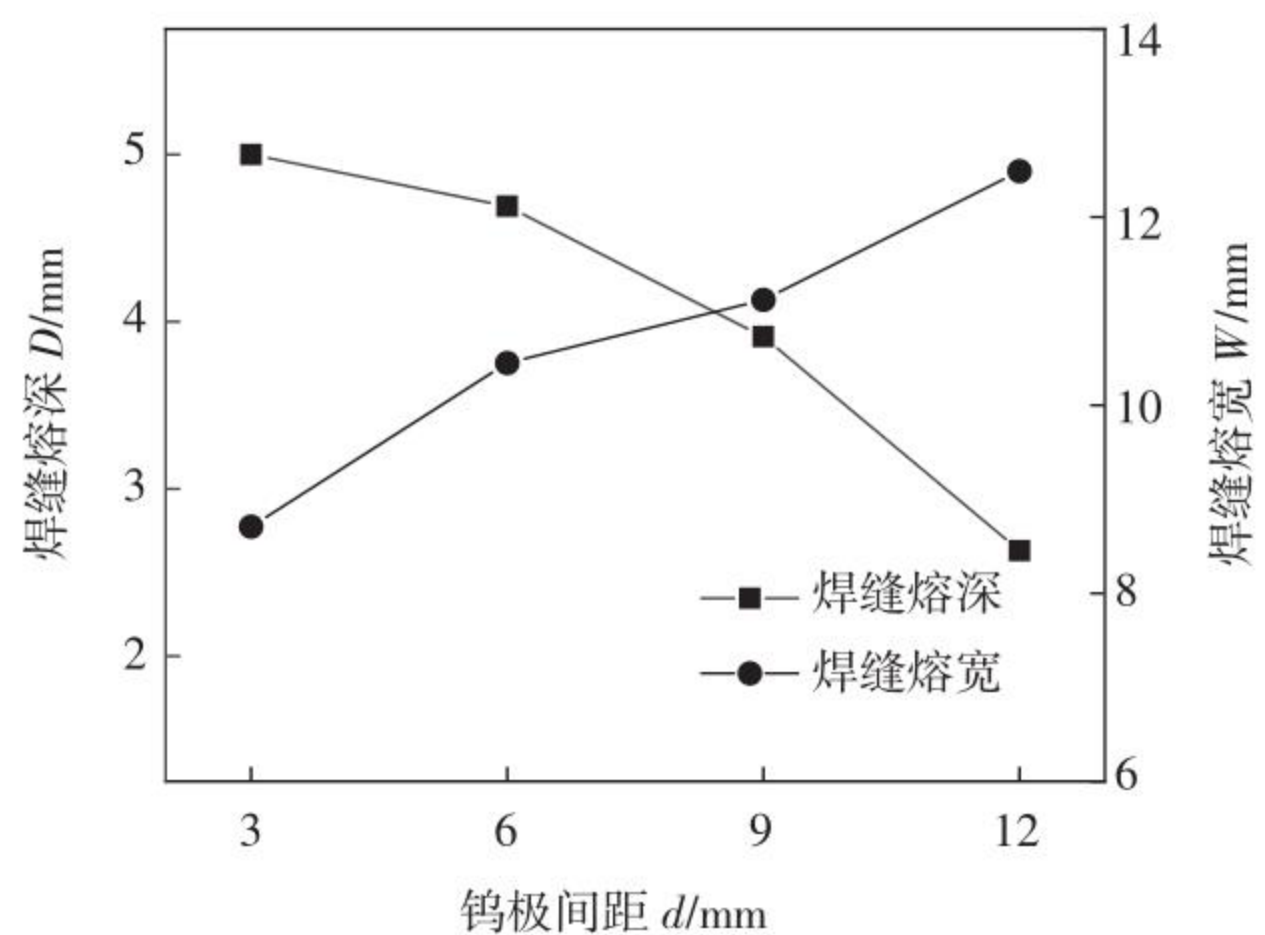


图6 钨极间距的影响

2.4.4 弧长

图7为基本焊接工艺参数下,弧长对焊缝成形的影响。由图可知,随着弧长的增加,焊缝熔深呈现先增加后减小的趋势,焊缝熔宽逐渐增加。弧长为 3 mm 时,焊缝熔深最大,熔宽较小。

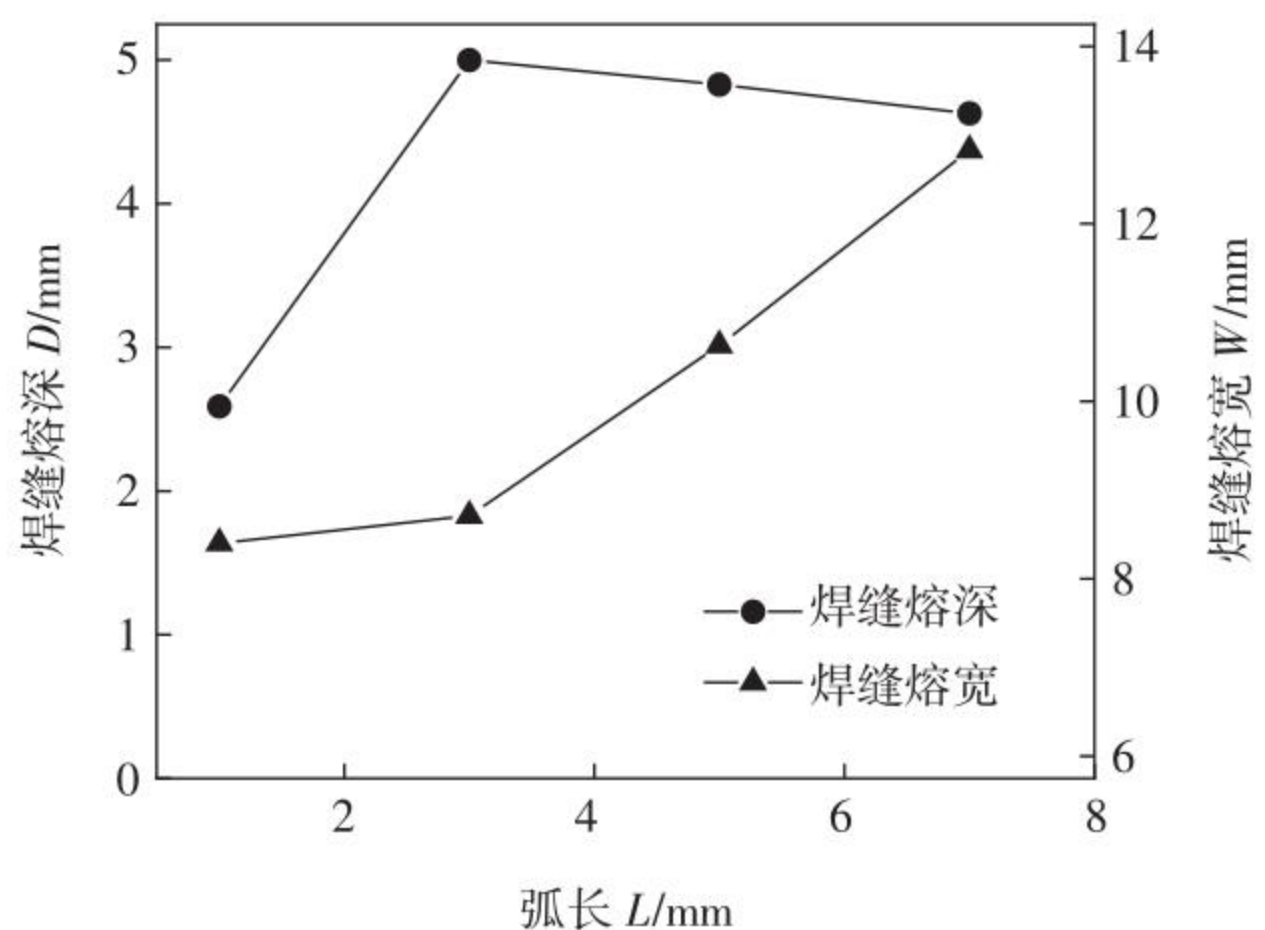


图7 弧长的影响

随着弧长的增加,后置焊枪的等离子流沿着钨极轴线方向的流动更加显著, O 元素在等离子流的作用下更多的被传递到电弧外围区域,导致进入熔池中的 O 元素减小,焊缝熔深下降。至于熔宽的增加,主要是因为随着弧长增加,电弧覆盖熔池区域增加及向内流动减弱,对熔池边缘的熔化作用增强。

2.4.5 焊接速度

图8为基本焊接工艺参数下,焊接速度对焊缝成形的影响。由图可知,随着焊接速度的增加,焊缝熔深和熔宽均减小。当焊接速度超过 16 mm/s 时, O 元素对熔深增加的作用不明显。

随着焊接速度的提高,熔池在液态条件下停留的时间变短,扩散到熔池中的 O 元素没有充足的时间发挥作用,使得活性元素 O 元素对焊缝熔深增加的作用

逐渐下降,以至在超过一定的速度后几乎无影响。

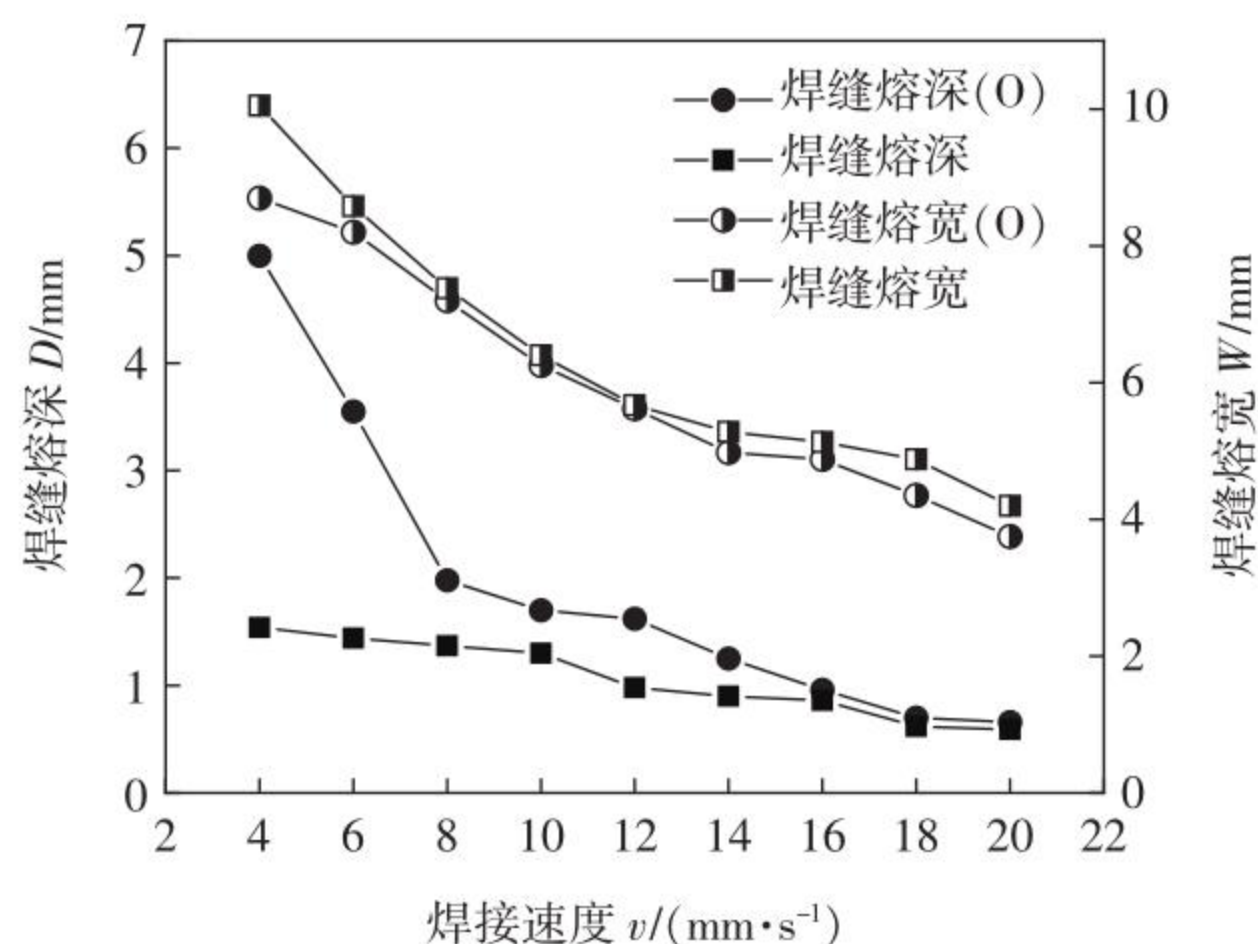
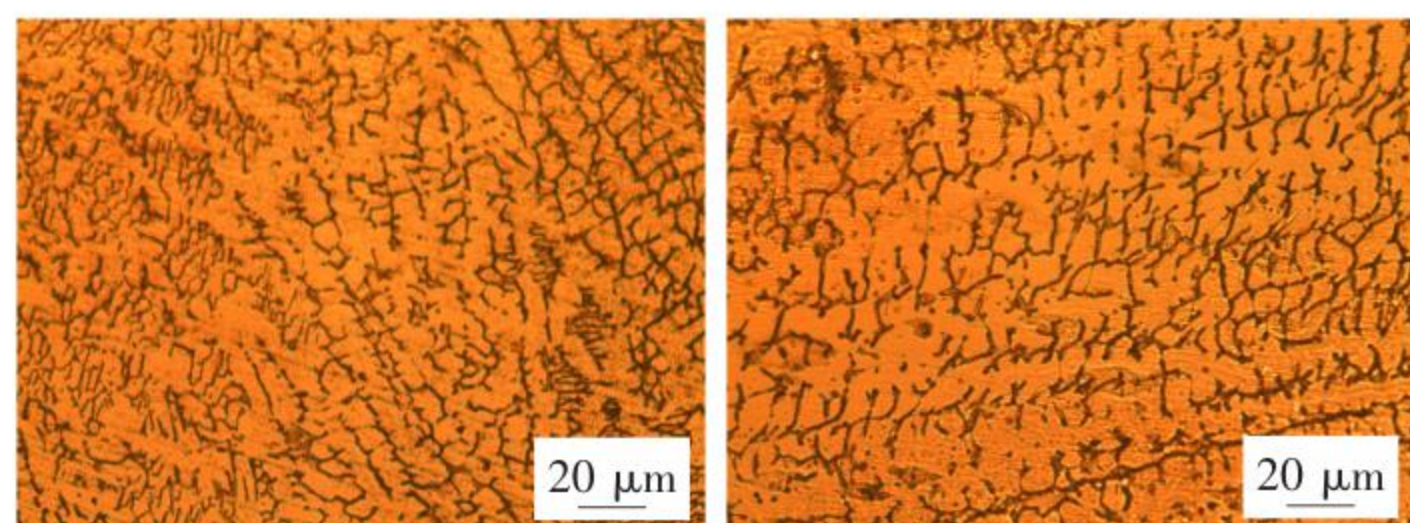


图8 焊接速度的影响

由上述结果可知,以上各焊接工艺参数都会影响O元素在电弧中的传质行为,进而影响O元素在熔池中的量,最终影响焊缝形貌。然而,只有当控制其在一个适中的范围时,熔深的增加才最明显。

3 焊缝的显微组织

图9为基本焊接工艺参数下, O_2 流量分别为0 L/min和0.6 L/min时的焊缝显微组织。可见,焊缝组织均由大量奥氏体和少量铁素体组成,铁素体表现为骨架状和板条状的混合形态。总体而言,O元素对焊缝显微组织无明显影响。



(a) 0 L/min

(b) 0.6 L/min

图9 不同 O_2 流量下的焊缝显微组织

4 焊缝的力学性能

图10为常温下的冲击试验结果。由图可知, O_2 的引入会造成焊缝冲击吸收能量下降,且随着 O_2 比例的增加,冲击吸收能量呈下降趋势。母材的冲击吸收能量为35 J,基本焊接工艺参数下,焊缝冲击吸收能量为32.3 J,当 O_2 流量增加到1.5 L/min时,焊缝冲击吸收能量降低到25.3 J。樊丁等人^[15]的研究也表现出类似的规律,出现这种变化的原因可能有以下几个方面:①

引入的 O_2 会在焊接过程中生成氧化物并滞留在焊缝中,造成氧化物夹渣;②焊缝中形成硬而脆的第二相粒子;③焊缝中铁素体含量的增多,这些因素都会使焊缝韧性下降。

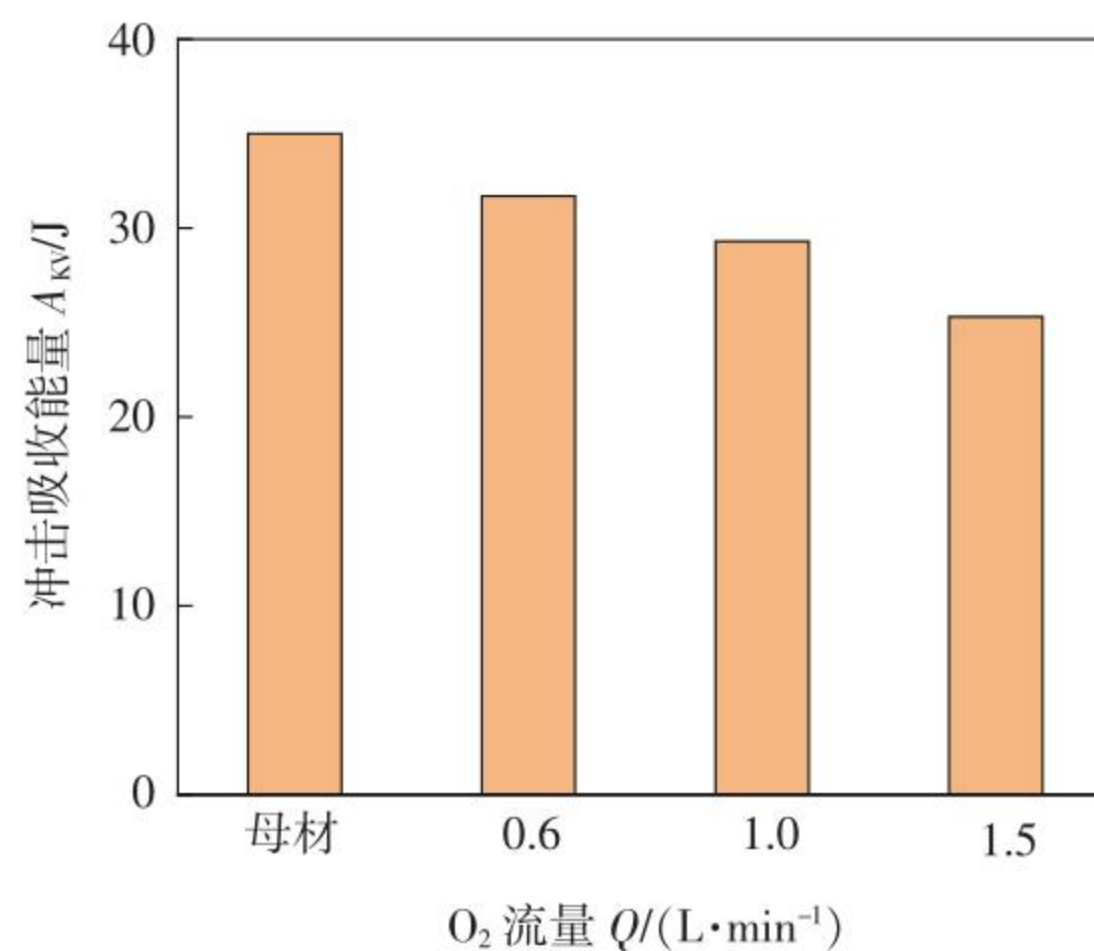


图10 焊缝冲击试验结果

由上述结果可知,在焊接过程中需要精确控制保护气中 O_2 的流量,才能在实现焊缝熔深显著增加的基础上,保证焊缝具有较好的力学性能。在文中的试验条件下,当 O_2 流量为0.6 L/min,即前置焊枪保护气中 O_2 体积分数为5.66%时,就可以保证焊缝熔透,且冲击韧性只有轻微下降。

5 结论

(1) 双TIG活性电弧焊能在高于普通TIG焊接速度的条件下实现深熔焊接。

(2) 进入到熔池中的O元素含量对焊缝形貌有很大影响。各焊接工艺参数都会影响O元素在电弧中的传递行为,进而影响其在熔池中的含量,最后对焊缝成形产生影响。

(3) 与不加O元素时相比,O元素的引入对焊缝显微组织无明显影响。冲击韧性随O元素引入量的增加而下降,但是,较低的 O_2 混合比可以在保证熔深的同时,获得良好的力学性能。

参考文献

- [1] Mendez P F, Eagar T W. Penetration and defect formation in high-current arc welding[J]. Welding Journal, 2003, 82(10): 296-306.
- [2] 孙兆荣,冯超,秦国梁,等. 304L奥氏体薄壁不锈钢管列置双TIG高效焊接工艺[J]. 焊接, 2019(7): 40-43.
- [3] 孙清洁,林三宝,杨春利,等. 超声-TIG复合焊接装置 [下转第27页]

(3)分别以拍摄角度、拍摄高度为自变量,研究了两者与双目测距程序测距精度之间的关系。试验结果表明,当拍摄角度在左偏 30° 至右偏 30° 或正拍高度在 $150\sim 190\text{ mm}$ 内变化时,测距偏差控制在 2 mm 内,满足焊接要求、鲁棒性较好。

参考文献

- [1] 郭亮,张华. 狭小空间直角角焊缝识别跟踪焊接系统[J]. 焊接学报, 2017, 38(11): 21-26.
- [2] 郭亮,张华,高延峰. 船舱流水孔自动识别跟踪焊接系统[J]. 焊接学报, 2015, 36(6): 14-18.
- [3] Zeng Jinle, Chang Baohua, Du Dong, et al. A visual weld edge recognition method based on light and shadow feature construction using directional lighting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24: 19-30.
- [4] Chen Lu, Li Xiaohan, Zhou Xiang. A 3D seam extraction and tracking method based on binocular structured light sensor [C]//Osaka, Japan: 12th International Conference on Digital Image Processing, 2020.
- [5] Wang Tao, Wang Zhijinag, Cao Yue, et al. A multi-BRIEF-descriptor stereo matching algorithm for binocular visual sensing of fillet welds with indistinct features [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66(3): 636-650.
- [6] Jia Tong, Fu Yujie, Peng Bo, et al. Depth information ex-

traction of seam structure based on visual method [C]//Hawaii, USA: 7th IEEE Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2017: 179-182.

- [7] 杨斌,李艳艳,李洪英. 基于双目视觉的待涂装焊缝的识别[J]. 现代信息科技, 2020, 4(17): 149-151,154.
- [8] 何银水,孔萌,陈华斌,等. 基于视觉注意机制的机器人厚板焊接焊缝轮廓的识别[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 51-55.
- [9] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] 岳晓峰,祁欢. 基于张正友平面模板法的双目立体视觉系统标定[J]. 机械工程师, 2014(2): 1-3.
- [11] 荆泽成. 基于多目视觉的核退役机器人三维感知与防碰撞技术研究[D]. 江苏 无锡:江南大学硕士学位论文, 2021.

第一作者: 张勇,硕士;主要从事基于双目视觉的移动焊接机器人结构设计与控制研究;1638085136@qq.com。

通信作者: 张华,博士,教授,博士研究生导师;主要从事移动机器人、焊接自动化、激光智能制造的研究;已发表论文100余篇;hzhang@sues.edu.cn。

(编辑:王龙权)

[上接第5页]

- 的研制与应用[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 79-82.
- [4] 王树保,张海宽,冷雪松,等. 双钨极氩弧焊工艺及焊缝成形机理分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 21-24.
- [5] Heiple C R, Roper J R. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry[J]. Welding Journal, 1982, 61(4): 97s-102s.
- [6] Zhang R H, Fan D. Numerical simulation of effects of activating flux on flow patterns and weld penetration in ATIG welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(1): 15-23.
- [7] Lu S P, Fujii H, Nogi K. Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ shielded GTA welding [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 380(1-2): 290-297.
- [8] 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): 1-4.
- [9] 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): 1-4.
- [10] 张建晓,赵金龙,王纯,等. 低合金钢与不锈钢 AA-TIG 自

熔焊接头组织及力学性能[J]. 焊接, 2020(4): 1-5, 15.

- [11] 张建晓,樊丁,黄勇. 单枪耦合电弧 AA-TIG 焊[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 47-50.
- [12] Wang X X, Huang J K, Huang Y, et al. Investigation of heat transfer and fluid flow in activating TIG welding by numerical modeling[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 27-35.
- [13] Sahoo P, Debroy T, Manallan M J. Surface tension of binary metal—surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. Metallurgical Transactions, 1988, 19(3): 483-491.
- [14] 王新鑫,迟露鑫,许惠斌,等. 双 TIG 电弧中氧传质行为的数值分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 53-62.
- [15] 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.

第一作者: 张佳,硕士研究生;主要从事高效焊接方法方向的研究;17794432149@163.com。

通信作者: 王新鑫,博士,副教授;主要从事焊接物理、高效焊接方法及数值模拟的研究;wang@cqut.edu.cn。

(编辑:王龙权)