

不同组元活性剂对不锈钢脉冲 TIG 焊 熔池表面张力的影响

顾玉芬, 边春红, 李春凯, 石玟

(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)

摘要: 准确获取焊接条件下熔池金属表面张力的基础数据对深入理解焊接过程中熔池金属流动及传热机制、焊缝缺陷形成等具有重要意义, 但实时测量十分困难. 采用激光视觉法测量了单一组元 (TiO_2 , CaF_2) 及二组元 ($30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$, $70\%\text{TiO}_2 + 30\%\text{CaF}_2$) 活性剂下 304 不锈钢脉冲钨极氩弧焊熔池振荡频率, 并根据特定模式下熔池特征频率与表面张力的解析模型计算了熔池金属表面张力, 分析了不同组元活性剂对熔池金属平均表面张力的影响规律, 在此基础上研究了不同组元活性剂对焊缝熔深的影响和增加熔深的机理. 结果表明, TiO_2 能够改变熔池金属表面张力温度梯度, 使熔池金属流动方向发生变化, CaF_2 能够降低熔池金属表面张力绝对值, 使熔池金属流速增加; 二组元活性剂增加熔深是熔池金属流速增加和表面张力温度梯度改变共同作用的结果.

关键词: 钨极氩弧焊; 多组元活性剂; 表面张力; 熔深; 流速

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20190911001

0 序言

表面张力作为高温金属熔体重要的物性参数之一, 对材料铸造、冶金、焊接等金属热加工过程有着重要的影响. 目前工业上常用的高温熔体表面张力测量方法主要有泡压法、电磁悬浮法、静滴法等^[1]. 由于实际焊接过程的复杂性, 例如熔池体积过小、强烈电弧光干扰、热源的非平衡特性等, 使得以上方法很难用于焊接热源作用下熔池金属表面张力的测量. 由于焊接条件下熔池表面张力基础数据的缺失及动态变化规律的认识不足, 制约了许多基础焊接物理科学问题和机理等认识深度以及相关理论的进步. 活性钨极氩弧焊 (A-TIG) 作为一种新型的焊接方法, 通过在母材表面预先涂覆活性剂引起熔池表面张力梯度或电弧行为发生变化, 从而大幅增加焊缝熔深^[2]. 近年来, 国内外学者通过大量的试验和数值模拟对活性剂增加 A-TIG 熔深的机理进行了广泛的研究^[3-6], 目前比较认可的机理主要有

电弧收缩理论和表面张力温度梯度改变理论. 由于对于不同活性剂作用下的熔池金属表面张力变化规律认识不清, 多组元活性剂配方的大多优化通过正交试验, 存在一定的盲目性.

采用激光视觉法测量不同组元活性剂下 (TiO_2 , CaF_2 , $30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$, $70\%\text{TiO}_2 + 30\%\text{CaF}_2$) 304 不锈钢 GTAW 熔池金属的振荡频率, 根据熔池振荡频率与表面张力的物理关系计算了熔池金属表面张力, 并对熔池几何尺寸进行测量, 研究了不同组元活性剂对熔池金属平均表面张力的影响, 在此基础上分析了不同组元活性剂对 304 不锈钢 TIG 焊熔深的影响, 为 A-TIG 焊熔深增加机理及活性剂配方研究提供理论支撑.

1 测量方法

1.1 熔池振荡原理

在 GTAW 定点焊未熔透条件下, 熔池受激后自由表面振荡模式与液体自由表面波类似, 假定熔池液态金属是非粘性的、不可压缩的牛顿流体, 熔池振荡频率、熔宽与熔池液态金属表面张力的物理关系可采用公式 (1) 表示^[7], 即

$$f = 5.84 \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} W^{-\frac{3}{2}} \quad (1)$$

收稿日期: 2019-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51765037); 甘肃省引导科技创新发展专项基金项目 (2019ZX-08); 甘肃省基础研究创新群体 (17JR5RA107); 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室开放课题 (SKLAB02019009).

式中: f 为振荡频率; W 为熔池宽度; γ 为表面张力; ρ 为密度. 由公式 (1) 可知, 通过测量熔池振荡频率 f 和焊缝宽度 W 就可以计算熔池金属表面张力.

1.2 激光视觉法原理

在实际 GTAW 焊接时, 熔池表面的振荡幅度非常微弱, 很难准确获取信噪比高的熔池振荡频率信号. 文献 [8] 提出了激光视觉法测量熔池振荡频率, 传感系统如图 1 所示. 用波长为 669.5 nm 结构光激光器将五线谱激光投射到熔池表面, 利用熔池

表面的类镜面特性将入射激光反射, 在适当位置放置成像屏 (光学玻璃) 拦截反射激光条纹, 通过高速摄像实时记录成像屏上的反射激光条纹. 图 2 为母材表面涂覆 CaF_2 活性剂时典型的反射激光条纹图像, 从图中可以看出基值阶段激光条纹的变化表现出明显的周期性, 利用亮度值图像处理算法^[9] 对拍摄的激光条纹进行处理, 即可得到熔池振荡频率, 图 3a 为熔池振荡的时域信号, 图 3b 为熔池振荡的频域信号.

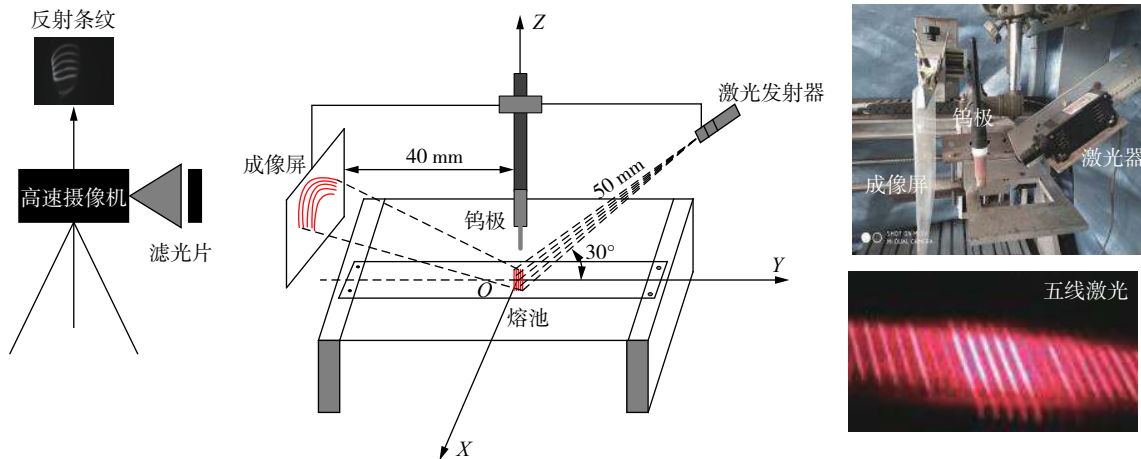


图 1 传感系统

Fig. 1 Sensing system

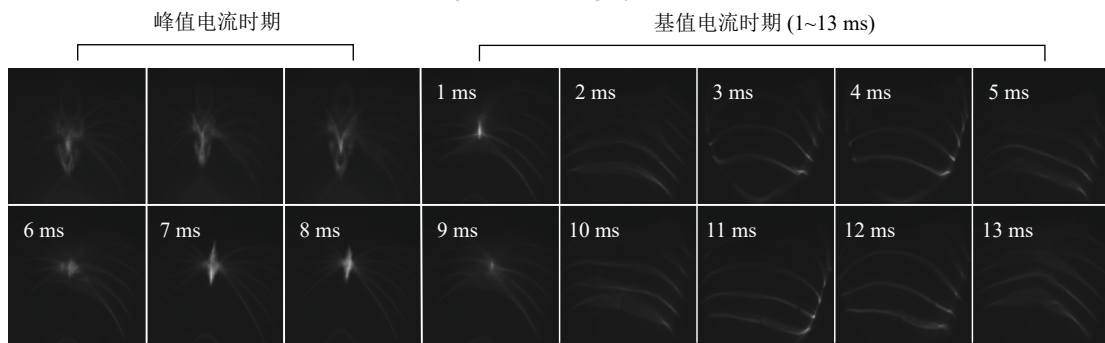


图 2 母材表面涂覆 CaF_2 时典型的反射激光条纹

Fig. 2 Typical reflected laser pattern image with CaF_2 activating flux

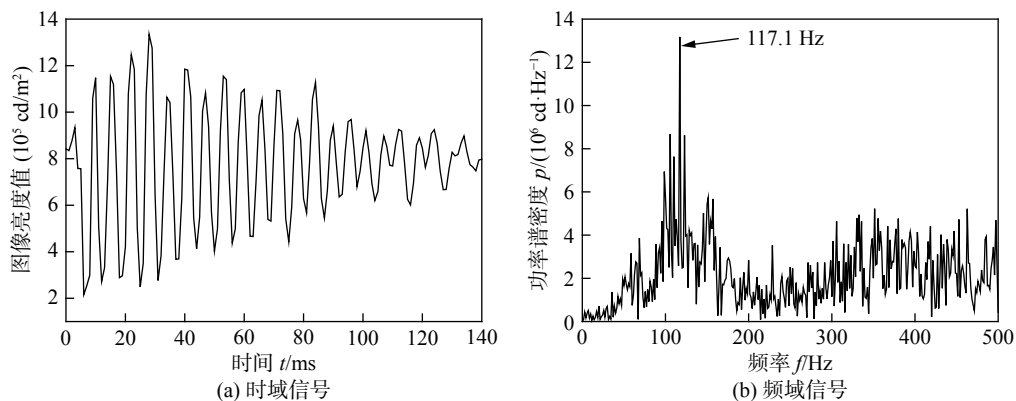


图 3 母材表面涂覆 CaF_2 时熔池的振荡信号

Fig. 3 Oscillation signal of weld pool with CaF_2 activating flux. (a) time domain; (b) frequency domain

1.3 工艺试验

试验材料选用 100 mm × 100 mm × 8 mm 的 304 不锈钢, 材料成分见表 1. 为了使熔池表面产生周期性振荡, 焊接方法选用直流正接脉冲钨极氩弧焊定点焊接, 脉冲峰值阶段熔池受到等离子流力的冲击发生振荡, 脉冲基值阶段拍摄熔池振荡时的反

射激光条纹, 焊接参数如表 2 所示. 选用单组元活性剂 (TiO₂, CaF₂) 和二组元活性剂 (30%TiO₂ + 70%CaF₂, 70%TiO₂ + 30%CaF₂) 进行工艺试验. 通过改变焊接时间控制母材热输入, 改变熔池温度. 焊后沿熔池直径方向把焊缝切开, 打磨、抛光、腐蚀熔池截面, 用光学显微镜观察并测量焊缝熔宽和熔深.

表 1 304 不锈钢化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel

C	Mn	P	Si	Cr	Ni	Cu	N	Mo	Fe
0.001 5	1.59	0.028	0.048	18.17	8.01	0.057 9	0.053 1	0.037 4	余量

表 2 试验焊接参数
Table 2 Experimental weld parameters

峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	占空比 $\sigma(\%)$	脉冲频率 f_1/Hz	焊接时间 t/s	高速摄像采样频率 f_2/fps
170	60	40	3.5	5 ~ 25	1 000

2 试验结果

2.1 不同组元活性剂对焊缝几何尺寸的影响

在脉冲 TIG 焊接过程中, 试验参数保持一致, 不同组元活性剂涂覆量相同, 活性剂涂覆量为 1.68 mg/cm², 电弧作用时间从 5 s 到 25 s 变化.

图 4 为焊接时间为 10 和 15 s 时有无活性剂作用下的焊缝横截面图, 与无活性剂相比, 当母材表面涂覆 TiO₂, 70%TiO₂ + 30%CaF₂ 活性剂时, 焊缝熔深明显增加, 熔宽减小, 形成深而窄的熔池, 当母材表面涂覆 CaF₂, 30%TiO₂ + 70%CaF₂ 活性剂时, 焊缝熔深稍有增加, 形成宽而浅的熔池.

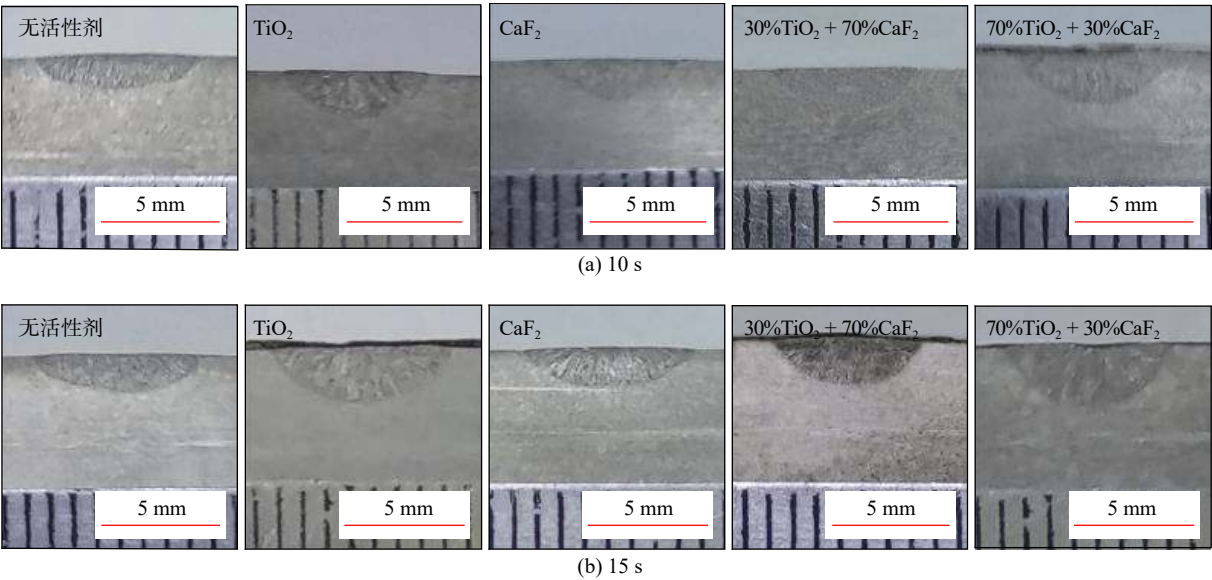


图 4 不同组元活性剂下焊缝截面形貌
Fig. 4 Cross-section of weld beads with different component activating fluxes. (a)10 s; (b)15 s

根据图 4 的结果, 对焊缝的熔深和熔宽进行测量, 图 5 是不同组元活性剂下焊缝几何尺寸随焊接时间的变化, 发现焊缝熔宽和熔深随着焊接时间线性变化. 从图 5a 可以发现加入活性剂后, 焊缝熔宽减小, 活性剂中 TiO₂ 含量越多, 熔宽减小越明显, 不

同组元活性剂下焊缝熔宽随焊接时间的变化率 (斜率 K_w) 基本一致; 从图 5b 中可以发现母材表面涂覆的活性剂为 70%TiO₂ + 30%CaF₂ 时, 熔深增加最明显, 母材表面涂覆的活性剂为 CaF₂ 时, 熔深增加效果最差, 不同组元活性剂下熔深由大到小增加效果

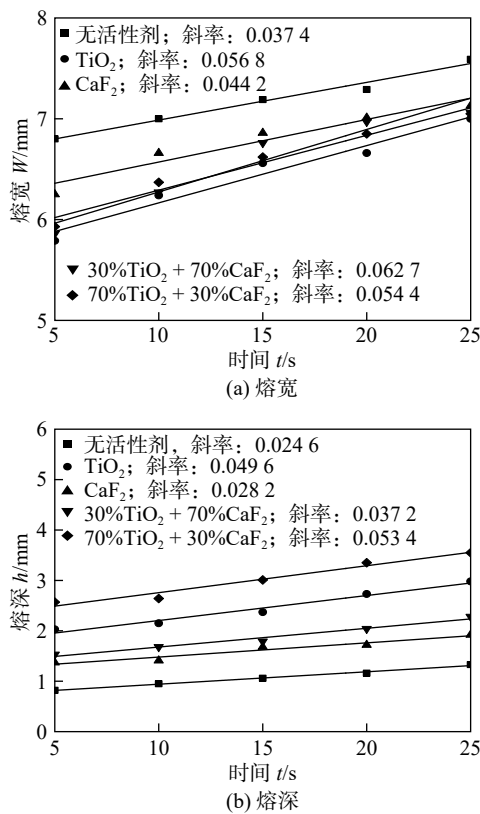


图 5 不同组元活性剂下焊缝几何尺寸随焊接时间的变化
Fig. 5 Change of weld geometry with welding time under different component activating fluxes. (a) weld width; (b) penetration depth

依次为 70% TiO_2 + 30% CaF_2 , TiO_2 , 30% TiO_2 + 70% CaF_2 , CaF_2 , 无活性剂. 不同活性剂下熔深增加率 (斜率 K_p) 不同, 母材表面涂覆的活性剂为 70% TiO_2 + 30% CaF_2 和 TiO_2 时, 熔深增加率 (K_p) 远远大于无活性剂和母材表面涂覆 30% TiO_2 + 70% CaF_2 和 CaF_2 .

2.2 不同组元活性剂对熔池金属表面张力的影响

通过亮度值图像处理算法对不同组元活性剂下的熔池反射条纹进行处理, 得到熔池振荡频率如图 6 所示. 根据得到的焊缝熔宽数据和熔池振荡频率, 利用式 (1) 计算熔池金属表面张力, 不同组元活性剂下熔池表面张力随焊接时间的变化如图 7 所示.

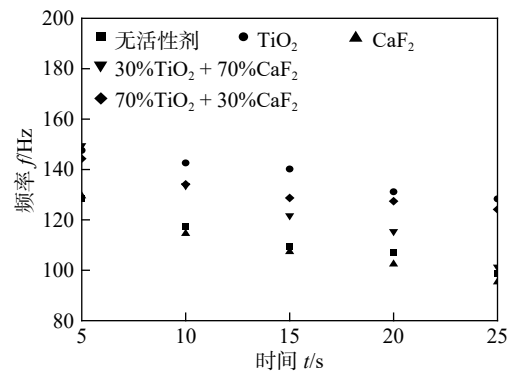


图 6 不同组元活性剂下熔池的振荡频率
Fig. 6 Oscillation frequency with different component fluxes

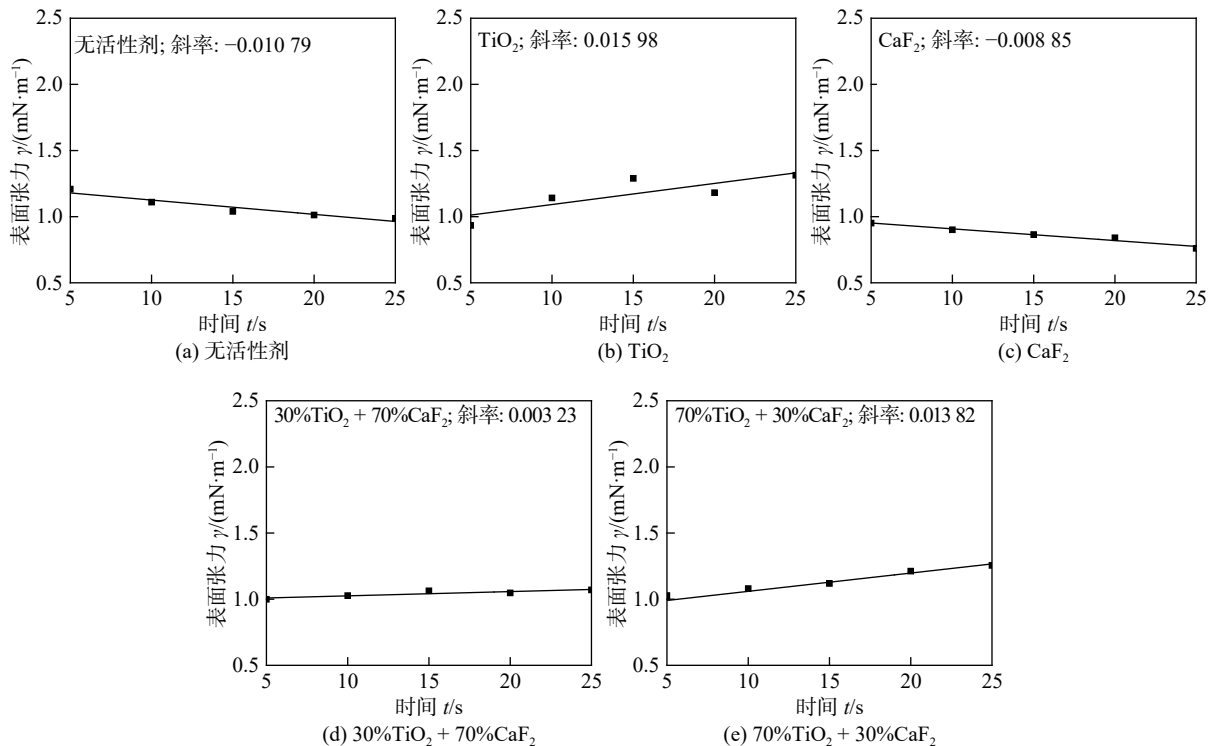


图 7 不同组元活性剂下熔池平均表面张力随焊接时间的变化

Fig. 7 Change of average surface tension of weld pool with average current under different component activating fluxes. (a) no flux; (b) TiO_2 ; (c) CaF_2 ; (d) 30% TiO_2 + 70% CaF_2 ; (e) 70% TiO_2 + 30% CaF_2

从图 7 可以发现平均表面张力随焊接时间的变化存在两种不同的模式, 模式 1: 平均表面张力与焊接时间成反比例, $K < 0$; 模式 2: 平均表面张力与焊接时间成正比例, $K > 0$; 无活性剂以及母材表面涂覆 CaF_2 时, $K < 0$, 但母材表面涂覆 CaF_2 时熔池平均表面张力绝对值明显减小; 当母材表面涂覆 TiO_2 , $70\%\text{TiO}_2 + 30\%\text{CaF}_2$ 和 $30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$ 时, $K > 0$. 结合图 5b 熔池熔深随焊接时间的变化可以发现, 除 $30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$ 之外, $K > 0$ (TiO_2 和 $70\%\text{TiO}_2 + 30\%\text{CaF}_2$) 时焊缝熔深增加率 (K_p) 明显大于 $K < 0$ ($30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$ 和 CaF_2) 时, 说明不同活性剂下焊缝熔深的增加率 (K_p) 与 K 的符号之间存在一定的关系.

3 分析与讨论

表面张力梯度 ($d\gamma/dT$) 在 TIG 焊中对焊缝几何尺寸有很大的影响, 熔池液态金属表面张力与熔池温度密切相关, 实际焊接过程中由于电弧等离子体以及电弧光的影响很难精确测量熔池温度. 为了获得熔池温度的变化规律, 国内外学者采用数值模拟的方法对其进行了研究, 文献 [10] 对脉冲钨极惰性气体保护焊 (P-GTAW) 热过程进行数值模拟, 发现 GTAW 熔池温度与焊接时间成正比, 焊接时间越长, 熔池温度越高, 因此平均表面张力随焊接时间变化的斜率 (K) 可以近似代表平均表面张力温度梯度 ($d\gamma/dT$). 这表明无活性剂以及母材表面涂覆 CaF_2 时, 熔池表面张力梯度为负, $d\gamma/dT < 0$; 当母材表面涂覆 TiO_2 , $70\%\text{TiO}_2 + 30\%\text{CaF}_2$, $30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$ 时, 熔池表面张力梯度由负变正, $d\gamma/dT > 0$.

无活性剂及母材表面涂覆 CaF_2 时, 熔池表面张力梯度为负, 熔池金属从熔池中心流到边缘, 同时将大量热量带到熔池边缘, 形成的熔池宽而浅, 但从图 7c 发现 CaF_2 作用下熔池表面张力绝对值明显降低, 文献 [11-12] 对氟化物作用下 GTAW 熔池温度场进行研究发现 CaF_2 能够使电弧温度升高, 熔池温度增加, 使熔池表面张力绝对值降低, 熔池金属流速增加, 引起焊缝熔深增加.

文献 [13] 研究表明, 氧元素进入熔池会使熔池表面张力梯度由负变正, 并且影响熔池金属的流动. 当母材表面涂覆 TiO_2 , $70\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$ 和 $30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$ 时, 在电弧热作用下 TiO_2 分解, 氧元素进入熔池使熔池表面张力梯度由负变

正, 熔池金属从熔池边缘流到底部, 同时将大量热量传递到熔池底部, 使焊缝熔深增加, 但不同活性剂中 TiO_2 含量不同, 进入熔池金属中的氧含量不同导致熔池表面张力梯度大小不同, 熔深增加率 (K_p) 不同. 当涂覆 TiO_2 , $70\%\text{TiO}_2 + 30\%\text{CaF}_2$ 时, 活性剂中 TiO_2 含量多, 进入到熔池中的氧元素较多使熔池表面张力梯度较大, 导致对流明显, 但 $70\%\text{TiO}_2 + 30\%\text{CaF}_2$ 活性剂作用下熔深最大是因为少量 CaF_2 的存在使熔池流速增加, 热量传递更快; 当涂覆 $30\%\text{TiO}_2 + 70\%\text{CaF}_2$ 时, TiO_2 含量较少, 进入到熔池中的氧较少使熔池表面张力梯度较小, 导致对流较弱, 熔深增加效果不明显.

4 结论

(1) TiO_2 使熔池表面张力梯度由负变正, 熔池对流方向发生变化, 导致熔深增加; CaF_2 对熔池表面张力梯度没有影响, 使表面张力绝对值降低, 使熔池金属流速增加, 导致熔深增加.

(2) 二组元活性剂增加熔深是熔池金属流速增加和流动方式改变共同作用的结果.

参考文献

- [1] Benedetto F E, Zolotuch H, Prado M O. Critical assessment of the surface tension determined by the maximum pressure bubble method[J]. Materials Research, 2015, 18(1): 9-14.
- [2] Gurevich S M, Zamokov V N, Kushirenko N A. Improving the pene-tration of titanium alloys when they are welded by tungsten arc process[J]. Automatic Welding, 1965, 18(9): 1-5.
- [3] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 焊接电弧与活性组元对 TIG 熔池形貌影响的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 49-52.
Dong Wenchao, Lu Shanping, Li Dianzhong, et al. Numerical simulation of the influence of welding arc and active component on the morphology of TIG welding pool[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 49-52.
- [4] 马壮, 于秀秀, 时海芳, 等. 粉煤灰 A-TIG 熔池流动行为及焊缝性能分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(9): 65-69.
Ma Zhuang, Yu Xiuxiu, Shi Haifang, et al. Analysis of flow behavior and weld performance fly ash A-TIG molten pool[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(9): 65-69.
- [5] Hung Yong, Ren Cao, Ren Qinglong. The element transfer behavior of gas pool coupled activating TIG welding[J]. China Welding, 2018, 27(4): 1-9.

- [6] Li Chunkai, Shi Yu, Gu Yufen, *et al.* Effect of oxide on surface tension of molten metal[J]. *Rsc Advances*, 2017, 7(85): 53941 – 53950.
- [7] Xiao Y, Den Ouden G. Weld pool oscillation during GTA welding of mild steel[J]. *Weld Journal*, 1993, 72: 428s – 434s.
- [8] Shi Y, Li C K, Du Leim, *et al.* Frequency characteristics of weld pool oscillation in pulsed gas tungsten arc welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24: 145 – 151.
- [9] 石玓, 李春凯, 顾玉芬, 等. 脉冲钨极气体保护焊熔池振荡频率激光视觉测量 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(12): 1910 – 1914.
- Shi Yu, Li Chunkai, Gu Yufen, *et al.* Laser vision measurement of oscillation frequency of pulsed tungsten gas shielded welding pool[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(12): 1910 – 1914.
- [10] Traidia A, Roger F. Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2011, 54(9): 2163 – 2179.
- [11] Li Chunkai, Shi Yu, Gu Yufen, *et al.* Effects of different activating fluxes on the surface tension of molten metal in gas tungsten arc welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 32: 395 – 402.
- [12] Leconte S, Paillard P, Chapelle P, *et al.* Effects of flux containing fluorides on TIG welding process[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2013, 12(2): 120 – 126.
- [13] Lu Shanping, Fujii H, Sugiyama H, *et al.* Mechanism and optimization of oxide fluxes for deep penetration in gas tungsten arc welding[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2003, 34(9): 1901 – 1907.

第一作者简介: 顾玉芬, 1975 年出生, 硕士, 副教授; 主要从事新材料制备、异种金属连接及接头性能的研究; E-mail: guyf@lut.cn.

(编辑: 孙焕焕)

[上接第 47 页]

- [6] Wang X L, Tsai Y T, Yang J R, *et al.* Effect of interpass temperature on the microstructure and mechanical properties of multi-pass weld metal in a 550-MPa-grade offshore engineering steel[J]. *Weld World*, 2017, 61: 1155 – 1168.
- [7] 娄宇航, 肖红军, 田志凌, 等. 热输入对 E40 钢双丝埋弧焊焊缝组织及性能的影响 [J]. *材料科学与工艺*, 2013, 21(1): 6 – 12.
- Lou Yuhang, Xiao Hongjun, Tian Zhiling, *et al.* Effect of large heat input on micro-structure and properties of welds in E40 steel[J]. *Materials Science & Technology*, 2013, 21(1): 6 – 12.
- [8] De L N, Fu R X, Peng T, *et al.* Effects of welding wire composition and welding process on the weld metal toughness of submerged arc welded pipeline steel[J]. *Metrials*, 2009, 16: 65 – 70.
- [9] 黄安国, 余圣甫, 谢明立, 等. 低合金钢焊缝的针状铁素体微观组织 [J]. *焊接学报*, 2008, 29(3): 45 – 48.
- Huang Anguo, Yu Shengfu Xie Liming, *et al.* Acicular ferrite microstructure of weld metal for low-alloy steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(3): 45 – 48.
- [10] Seok G L, Bohee K, Woo G K, *et al.* Effects of Mo addition on crack tip opening displacement (CTOD) in heat affected zones (HAZs) of high strength low-alloy (HSLA) steels[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 299.

第一作者简介: 巴凌志, 1994 年出生, 博士; 主要从事焊接材料与工艺的研究; Email: balingzhi@tju.edu.cn.

通信作者简介: 张智, 副教授; Email: zhangzhisy@163.com.

(编辑: 崔炜)