

氟化物活性 TIG 焊电弧特征的光谱分析

李春凯, 席保龙, 石玢, 顾玉芬

(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: 氟化物作为最为常见的 A-TIG 焊活性剂配方之一, 在实际焊接生产中已得到了广泛的应用, 然而其对电弧行为的影响机制目前仍存在争议. 为此, 利用光谱诊断方法对涂覆氟化物活性剂的 A-TIG 焊电弧空域光谱分布进行了研究, 分析了活性剂粒子、氩、铁粒子在电弧空域中的分布特征, 并结合 Boltzmann 图法计算了电弧电子温度. 结果表明, 氟化物活性剂粒子主要分布于弧柱中心区域; 氟化物的引入能够使电弧中 Ar II 谱线辐射强度降低同时增强 Fe II 谱线辐射强度; 氟化物对不同电弧空间区域的电子温度作用并不一致, 其中使阳极区附近电弧温度大幅提升但对其它区域电弧温度的影响很小.

创新点: (1) 采用电弧诊断方法从电弧空域维度上研究了 A-TIG 焊过程中氟化物活性剂粒子、Ar 和 Fe 等带电粒子分布规律及特征.

(2) 采用 Boltzmann 图法计算了活性剂引入后电弧电子温度的空域分布特征, 并分析了氟化物活性剂对电弧电子温度场的影响机制.

关键词: 活性 TIG 焊; 氟化物; 光谱诊断; 电弧温度

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20210201002

0 序言

钨极惰性气体保护焊 (TIG 焊) 相比于 MIG、MAG 等熔化极焊接方法具有电弧稳定性高、热输入精确可控等优点, 在异种金属连接、结构件打底焊及机器人自动化焊接等方面具有非常广泛的应用^[1-2]. 然而该方法也存在熔深浅、焊接效率低等固有缺陷. 为进一步提升 TIG 焊熔深及焊接效率, 乌克兰巴顿焊接研究所首次提出了活性 TIG 焊方法 (A-TIG)^[3-5], 即通过在母材表面预先涂覆活性剂然后再进行焊接. 相比于传统 TIG 焊, A-TIG 焊能够大幅增加焊缝熔深至 2~3 倍.

由于 A-TIG 焊熔深的增加效果与活性剂配方有关, 因而从 80 年代开始国内外学者就针对不同焊接材料体系的活性剂配方展开了广泛而持久的研究工作^[6]. 氟化物作为最为常见的 A-TIG 焊活性

剂配方之一^[7], 对于其增加熔深的机理学术界普遍认为是“电弧收缩理论”, 即氟化物能够促使电弧收缩进而引起电弧能量密度和焊缝熔深增加. 然而, 由于现有的研究主要通过电弧形态^[8-9]和数值模拟^[10]来分析电弧行为, 研究结果受试验设备 (如高速摄影帧率、曝光率及滤光片波长等) 和模型假设条件影响较大, 目前为止尚未形成统一认识.

电弧光谱中包含丰富的能够反映电弧内部状态的信息, 例如电弧电子温度、带电粒子的分布状态等^[11-12]. 为此, 采用电弧诊断方法对 3 种典型氟化物活性剂作用下的 A-TIG 焊电弧空域光谱分布特征进行了研究; 从空域维度上分析了活性剂粒子、Ar II 和 Fe II 在电弧空间中的分布特征及规律, 并采用 Boltzmann 图法计算了不同空间位置的电弧电子温度; 在此基础上分析了电弧温度与氟化物晶格能的相关性.

1 工艺试验与测量系统

1.1 工艺试验

焊接方法采用定点、直流正接、不添加焊丝的

收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005237); 浙江省自然科学基金 (LQ21E050023); 甘肃省自然科学基金 (20JR10RA164); 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).

钨极氩弧焊 (TIG 焊). 活性剂选用 3 种常用的典型氟化物, 分别为 Na_3AlF_6 , MgF_2 , CaF_2 . 母材选用规格为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的 304 不锈钢. 焊前将活性剂与丙酮混合并均匀涂覆于母材表面. 试验中选用的焊接工艺参数如表 1 所示.

表 1 焊接参数
Table 1 Experimental weld parameters

焊接电流 I_t/A	电弧弧长 L/mm	焊接速度 $v_t/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	保护气流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
100	3	0	10

1.2 空域光谱测量系统

光谱仪选用 AvaSpec-3648-USB2-RM 型 8 通道光纤式光谱仪, 测量波长范围为 $200 \sim 1\,100\text{ nm}$ 、分辨率为 0.08 nm . 将光纤探头固定于高精度二维移动滑动台, 通过该平台移动光纤探头可实现对 TIG 电弧的空间定点扫描. 光纤探头与钨极轴线间距离为 3 mm , 试验系统结构图如图 1 所示.

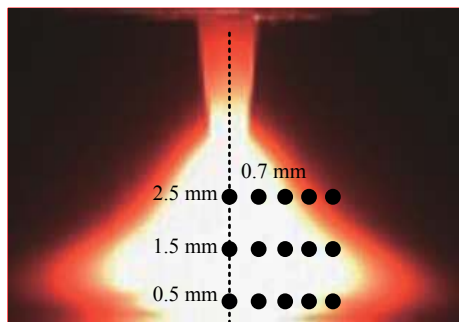
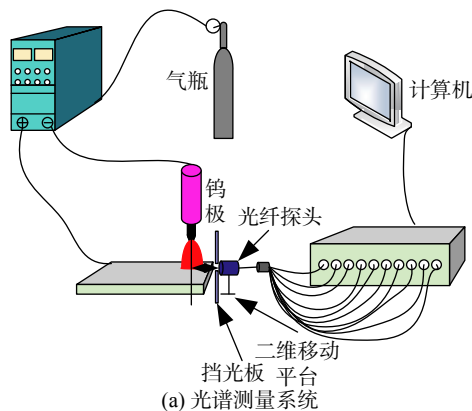


图 1 测量系统及空域扫描示意图

Fig. 1 Sensing system and diagram of spectral scanning. (a) sensing system; (b) scanning diagram of spatial domain

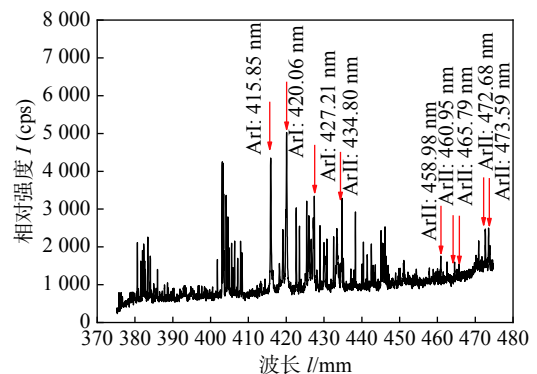
考虑到定点电弧的对称性, 在进行空域谱线测量时以钨极轴线为边界取电弧右半部分, 并按钨极轴向方向将电弧分为三层, 每层与母材表面的距离分别为 0.5 mm (第一层), 1.5 mm (第二层), 2.5 mm

(第三层); 每层从左至右扫描 5 个点, 每个点间距为 0.7 mm , 光谱积分时间为 4 ms , 电弧空域分层扫描如图 1b 所示.

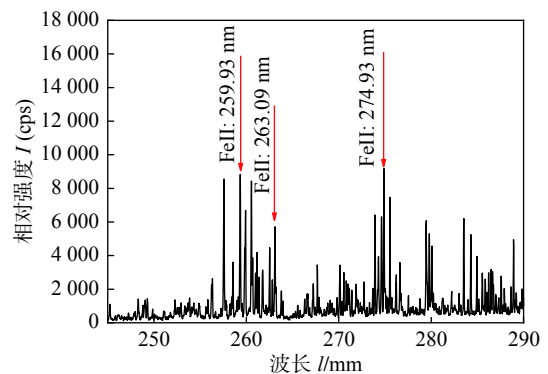
1.3 特征谱线的标定

为研究活性剂粒子在电弧空域中的分布特征及对电弧中氩、铁等主要带电粒子的影响规律, 需对活性剂粒子和氩、铁离子的特征谱线进行标定. 考虑到 Al , Mg , Ca 元素为试验所选用活性剂中特有的元素以及 F 元素原子过轻很难检测到其光谱特征谱线, 因此将 Al I (309.27 nm), Mg II (279.55 nm), Ca II (393.36 nm) 分别作为 Na_3AlF_6 , MgF_2 , CaF_2 活性剂粒子的追踪元素.

由于 Ar II 和 Fe II 主要集中于 $370 \sim 480\text{ nm}$ 和 $220 \sim 290\text{ nm}$ 波段之间 (图 2) 且选择特征谱线的原则为上述波段中辐射强度最强的谱线, 因此分别将 434.80 nm 的 Ar II 和 274.93 nm 的 Fe II 作为电弧空间中氩、铁离子特征谱线.



(a) Ar II 特征谱线



(b) Fe II 特征谱线

图 2 Ar 和 Fe 离子特征谱线

Fig. 2 Characteristic spectral line of Ar and Fe . (a) characteristic spectral line of Ar II ; (b) characteristic spectral line of Fe II

1.4 电弧温度计算

TIG 电弧作为低温等离子体同时满足“光学薄”和“局部热平衡”条件. 对于上述条件的低温等

离子体而言,电弧电子温度与谱线强度之间存在如下关系,即

$$I_{ij} = \frac{h\nu}{4\pi} L d\Omega g_i A_{ij} \frac{N_0}{U(T)} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数; ν 为频率; L 为等离子体层厚度; $d\Omega$ 为单位立体角; T 为电子激发温度。

对式 (1) 两边取对数可得

$$\ln\left(\frac{I_{ij}\lambda}{A_{ij}g_i}\right) = -\frac{E_i}{kT} + D \quad (2)$$

通过选取同种粒子的两条或多条特征谱线并利用 Boltzmann 图法以 E_i 为横坐标、 $\ln\left(\frac{I_{ij}\lambda}{A_{ij}g_i}\right)$ 为纵坐标绘制玻尔兹曼曲线,随后对该曲线进行线性拟合得到直线斜率 $-1/kT$,进而求出电弧电子温度。

由于活性剂的涂覆量很少同时活性元素在光谱中的谱线相对强度较 Ar, Fe 元素不明显,因此试验中选用 Ar II 的 5 条特征谱线 (458.98, 460.95, 465.79, 472.68, 473.59 nm) 并利用 Boltzmann 图法求解电弧电子温度,所用的 Ar II 五条特征谱线光学参数如表 2 所示。

表 2 谱线特征参数

Table 2 characteristic parameter of spectral line

波长 λ/nm	特征强度 I	跃迁几率 $A(10^7)$	统计权重 g	激发态能量 E/eV
458.98	2810	6.64	6	21.127
460.95	3232	7.89	8	21.143
465.79	3030	8.92	2	19.801
472.68	4278	5.80	4	19.762
473.59	4929	5.80	4	19.2611

2 试验结果

2.1 活性元素光谱的空域分布特征

图 3 为涂覆不同活性剂后 Al I (309.27 nm), Mg II (279.55 nm), Ca II (393.36 nm) 3 种追踪元素的电弧空域分布图。从图中可以看出选取的 3 种追踪元素分布于整个电弧空间且在电弧横向上随距电弧轴线距离的增加而减小;而在电弧轴向,随距母材距离的增加谱线强度呈现出先增加后减小的趋势,即第二层的辐射强度要远高于第一层和第三层的辐射光谱强度;这表明 3 种活性剂在焊接过程中都能够进入到电弧空间,同时进入到电弧空间中的活性剂粒子主要分布于电弧中心区域。

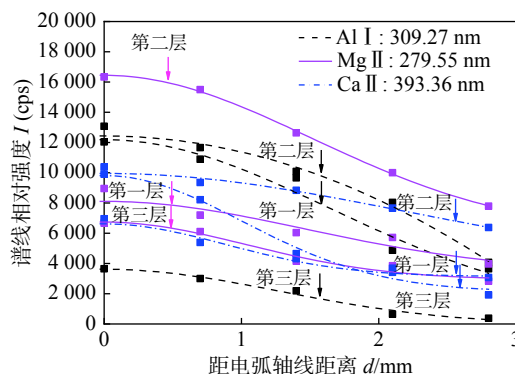
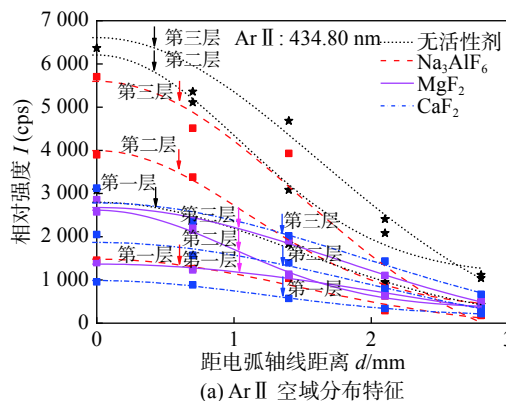


图 3 活性剂粒子空域分布特征

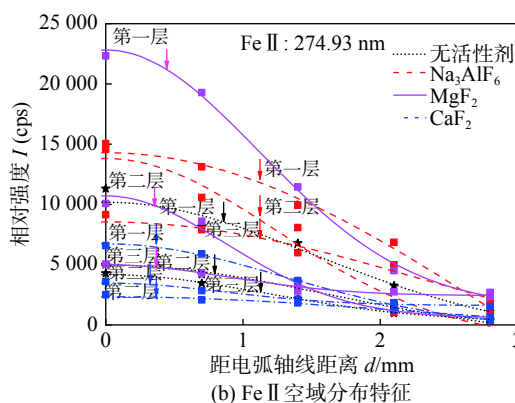
Fig. 3 Spatial characteristics of flux particle

2.2 氩、铁粒子 (Ar, Fe) 光谱的空域分布特征

图 4 为未涂覆和涂覆三类活性剂后 Ar II 和 Fe II 的空域分布图。对于 Ar II 而言,在电弧轴向上随距母材距离的增加,Ar II 谱线辐射强度都逐渐增强 (即第一层到第三层逐渐增强),这是由于越靠近钨极,电弧能量密度越大,越有利于促进 Ar 原子的电离;对比未涂覆和涂覆活性剂的谱线特征可以发现,活性剂的引入导致电弧中 Ar II 谱线辐射强度明显降低,这是由于活性剂中包含的 Al, Na, Mg,



(a) Ar II 空域分布特征



(b) Fe II 空域分布特征

图 4 Ar II 和 Fe II 空域分布特征

Fig. 4 Spatial characteristics of Ar II and Fe II. (a) spatial characteristics of Ar II; (b) spatial characteristics of Fe II

Ca 等金属元素电离能相比 Ar 元素更低,因此上述金属元素要优先被电离从而导致 Ar II 谱线辐射强度降低。

对于 Fe II 而言,在电弧轴线方向上其强度分布规律与 Ar II 正好相反,即随距母材距离的增加辐射强度都逐渐减弱(即第一层到第三层逐渐减弱),这是由于 Fe II 主要来源于熔池表面金属蒸气的电离,越靠近熔池,金属蒸气浓度越高,电离的 Fe II 谱线强度越强;此外,对于涂覆和未涂覆活性剂的 Fe II 谱线特征可以发现,活性剂引入使电弧空间中的 Fe II 谱线辐射强度明显增强,这说明氟化物能够使熔池表面金属浓度增加并促进 Fe 蒸气的电离。

2.3 电弧温度场空域分布特征

图 5 为采用 Boltzmann 图法计算得到的电弧电子温度空域分布图。从图中可以看出,在电弧轴线方向上随距钨极距离的增加(从第三层到第一层),电弧电子温度逐渐降低;活性剂的引入使钨极附近(第三层)和电弧中心区域(第二层)的电弧电子温度略微上升;然而对阳极区附近电弧电子温度产生了非常明显的影响,使该区域的电弧电子温度大幅提升,其中 Na_3AlF_6 电弧电子温度提升最大, MgF_2 次之,最后为 CaF_2 。上述现象表明氟化物活性剂能够大幅提高阳极区附近电弧电子温度且不同种类活性剂对电弧电子温度的提升不尽相同,但对其它区域的电子温度影响很小。

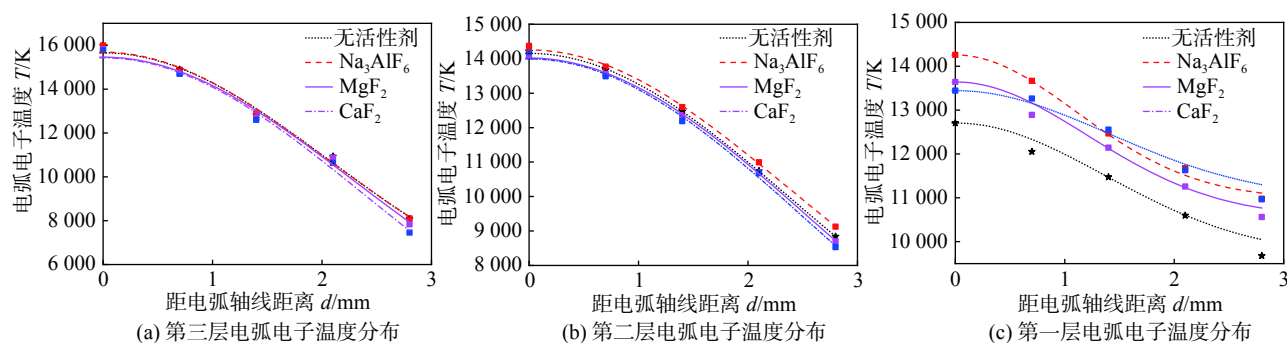


图 5 电弧电子温度空域分布特征

Fig. 5 Spatial characteristics of arc electronic temperature. (a) arc electronic temperature in third layer; (b) arc electronic temperature in second layer; (c) arc electronic temperature in first layer

3 分析与讨论

通过第二部分 2.1 节中对于活性剂中追踪元素 (Al I, Mg II, Ca II) 空域分布特征的试验结果可以看出,氟化物在焊接过程中能够进入到电弧中且活性剂粒子主要分布于弧柱中心区域,这与活性剂粒子在电弧中的运动轨迹有关^[13]。活性剂在电弧热源的作用下首先蒸发并到达钨极附近,而后在等离子流力的冲击下卷入电弧中心区域,整个活性剂粒子的运动轨迹如图 6 所示。

对于氟化物 A-TIG 焊而言,已有的大量研究普遍认为氟化物活性剂影响电弧行为的机理为“负离子理论”,即氟化物在焊接过程中蒸发形成的高亲和能粒子(例如氟化物分子、F 原子等)吸附电弧外围自由电子并形成负离子引起弧柱区电弧收缩,使得焊接电弧温度和电弧能量密度整体上升或增大。然而,从第二部分 2.4 节中电弧温度空域分布特征试验结果来,氟化物活性剂主要引起阳极区附近电

弧温度大幅上升,而对于阴极区附近和弧柱中心区域并未造成明显的影响,这表明氟化物在焊接过程中形成的负离子对电弧收缩作用很小。

对于氟化物作用下阳极区附近温度大幅上升的现象则与氟化物在熔池表面的热解离有关。实际焊接过程中,氟化物在电弧热源的作用下首先发生热解离,即 $\text{MF}_n = \text{M}^{n+} + n\text{F}^-$;由于热解离为吸热反应同时主要发生在阳极区附近,因此根据最小电压原

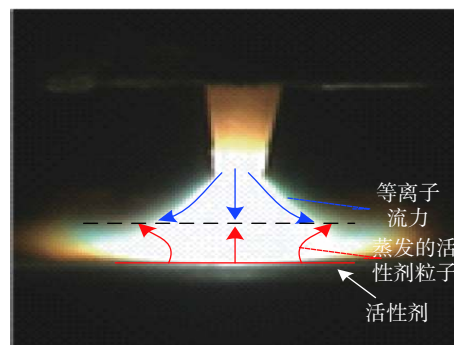


图 6 活性剂粒子在电弧空间中的运动路径

Fig. 6 Movement of flux particle in the arc

理, 阳极区附近的电弧温度必然会上升且解离能越大, 温度上升越明显; 相关研究表明^[14], 氟化物的解离能与晶格能正相关, 即晶格能越大, 解离能越大; 文中选用的 3 种氟化物晶格能由大到小依次为: Na_3AlF_6 (4 126 kJ/mol), MgF_2 (2 978 kJ/mol), CaF_2 (2 651 kJ/mol), 对比图 5c 中阳极区附近电弧温度(第一层)可以发现, 该电弧温度变化趋势与上述 3 种氟化物晶格能大小变化一致。

4 结论

(1) 氟化物活性剂粒子主要分布于电弧弧柱中心区域附近; 氟化物活性剂的引入使电弧中 Ar II 谱线辐射强度降低, Fe II 谱线辐射强度增强。

(2) 氟化物活性剂能够增加电弧靠近阳极区附件的电弧电子温度, 且温度增加幅度与氟化物晶格能之间存在正比关系。

参考文献

- [1] Graczyk H, Lewinski N, Zhao J, *et al.* Increase in oxidative stress levels following welding fume inhalation: a controlled human exposure study[J]. *Particle & Fibre Toxicology*, 2015, 13(1): 31.
- [2] Pandya D, Badgujar A, Ghetiya N. A novel perception toward welding of stainless steel by activated TIG welding: a review[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020(3): 1 – 27.
- [3] Dey H C, Albert S K, Bhaduri A K, *et al.* Activated flux TIG welding of titanium[J]. *Welding in the World*, 2013, 57(6): 903 – 912.
- [4] Nayee S G, Badheka V J. Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of dissimilar activating flux assisted-tungsten inert gas welds[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(1): 137 – 143.
- [5] Li D, Lu S, Li D, *et al.* Principles giving high penetration under the double shielded TIG process[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2014, 30(2): 172 – 178.
- [6] 杜贤昌, 王毅, 郭淑兰, 等. AZ31B 镁合金 A-TIG 焊活性剂成分的均匀设计与优化 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(4): 67 – 70.
- [7] Du Xianchang, Wang Yi, Guo Shulan, *et al.* Uniform design and optimization of active flux for A-TIG welding of AZ31B magnesium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(4): 67 – 70.
- [8] 高晓刚, 董俊慧, 韩旭, 等. 氟化物 A-TIG 焊接 Ti6Al4V 的电弧行为 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(10): 6 – 10.
- [9] Gao Xiaogang, Dong Junhui, Han Xu, *et al.* Arc behavior of fluoride effects in the A-TIG welding of Ti6Al4V[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(10): 6 – 10.
- [10] Wang L, Qiao J, Chen J. The mechanism of effect of flux bands on the arc behavior in flux bands constricting arc welding process[J]. *Materials*, 2020, 13(7): 1635 – 1652.
- [11] Ding X, Li H, Yang L, *et al.* Numerical analysis of arc characteristics in two-electrode GTAW[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 70(9): 1867 – 1874.
- [12] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 焊接电弧与活性组元对 TIG 焊熔池形貌影响的数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2009, 30(11): 49 – 52.
- [13] 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.
- [14] Xiao X, Hua X, Li F, *et al.* A modified fowler–milne method for monochromatic image analysis in multi-element arc plasma welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2770 – 2776.
- [15] 刘莹, 杨立军, 何天玺, 等. 药芯焊丝 TIG 焊电弧特性的光谱分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(7): 2171 – 2176.
- [16] Liu Ying, Yang Lijun, He Tianxi, *et al.* The spectral analysis of tig welding filled with flux-cored wire[J]. *Spectroscopy and Spectroscopy Analysis*, 2017, 37(7): 2171 – 2176.
- [17] 刘凤尧, 杨春利, 林三宝, 等. 活性化 TIG 电弧光谱分布的特征 [J]. *金属学报*, 2003, 39(8): 875 – 878.
- [18] Liu Fengyao, Yang Chunli, Lin Sanbao, *et al.* Spectral distribution characteristics of A-TIG welding arc[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(8): 875 – 878.
- [19] Howse D S, Lucas W. Nvestigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding[J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2000, 5(3): 189 – 193.

第一作者: 李春凯, 讲师; 主要从事焊接过程传感及智能控制、焊接方法等方面研究; Email: 15339316249@163.com.

(编辑: 张基隆)

effect of radiation on the microstructure and properties of 316L welds and the mechanism of action. The changes of surface morphology, microstructure, microhardness and electrochemical corrosion performance of 316L steel welds irradiated by helium ions were systematically studied. The results show that after 150 keV helium ion irradiation, a large number of small holes are formed on the surface of the sample, which leads to a decrease in the corrosion resistance of the sample. The corrosion current density of base metal and weld metal increased by 5.42×10^{-5} and 5.91×10^{-5} A/cm², respectively. Irradiation leads to defects such as helium bubbles and dislocations inside the sample. These defects cause the sample to produce radiation swelling and radiation hardening. The swelling rate of the base metal and the weld are 0.103% and 0.181%, respectively, and the microhardness has been increased by 2.33 and 2.55 GPa, respectively. The EBSD test method confirms that the weld metal has a larger grain size, which makes its radiation resistance slightly worse than that of 316L steel.

Highlights: (1) The experiment used electrochemical corrosion test to study the influence of helium ion irradiation on the corrosion resistance of weld metal and base metal.

(2) Explore the influence of grain size on the radiation resistance of weld and base metal.

Key words: helium ion irradiation; 316L stainless steel; weld metal; microhardness; electrochemical corrosion

Spectral analysis of A-TIG welding arc with fluorides activating flux LI Chunkai, XI Baolong, SHI Yu, GU Yufen (State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China). pp 54-58

Abstract: As one of the most common A-TIG welding activating fluxes, fluorides have been widely used in actual welding production, but its influence mechanism on arc behavior is still controversial. To this end, the spectral diagnosis method was used to study the spatial spectral distribution of the A-TIG welding arc coated with fluoride flux, the distribution characteristics of flux particles, argon and iron particles in the arc space were analyzed, and the Boltzmann diagram method was used to calculate arc electron temperature. The experimental results shown that the flux particles are mainly distributed in the central area of the arc column; fluoride can reduce the intensity of the Ar II spectrum in the arc and increase the intensity of the Fe II spectrum; the

effect of fluoride on the temperature of different arc regions is not consistent. Among them, the arc temperature near the anode area is greatly increased, but the effect on the arc temperature in other areas is small.

Highlights: (1) The distribution and characteristics of fluoride activator particles, AR, Fe and other charged particles during A-TIG welding were studied from the spatial dimension of arc by arc diagnosis method.

(2) The spatial distribution characteristics of arc electron temperature after the introduction of active agent are calculated by Boltzmann diagram method, and the influence mechanism of fluoride active agent on arc electron temperature field is analyzed

Key words: A-TIG; fluorides; spectrum diagnosis; arc temperature

Influence of bevel angle and wire offset on the microstructure and mechanical properties of Ti/Al joint by cold arc MIG welding WEI Shouzheng¹, WANG Zhiying¹, REN Xiaopeng², WANG Jianguo³ (1. Welding Research Center, North University of China, Taiyuan, 030051, China; 2. Jiangyang Chemical Limited Company of China Jinxi Weapon Industrial Group, Taiyuan, 030051, China; 3. The Laboratory Center, Taiyuan Heavy Industry Transit Equipment Co., Ltd., Taiyuan, 030051, China). pp 59-66

Abstract: Cold arc MIG welding of TA2 titanium and 5A05 aluminum alloy was conducted with SA1 5183 wire. The influence of bevel angle in titanium and wire offset on joint forming and the Ti/Al interfacial microstructure was studied. Partial melting of top titanium and poor bonding of the root appeared in the same joint when the bevel angle is too small. However, Weld sag was observed with too large bevel angles. With the bevel angle is in the range of 30° ~ 45°, good joint forming and sound interfacial combination along the thickness direction were observed. Partial melting of top titanium and poor bonding of the root appeared in the same joint when the welding wire was point to titanium side. Weld sag was observed with too large wire offset towards aluminum. Good joint forming and sound interfacial combination were observed with the wire offset towards aluminum was in the range of 0 ~ 1 mm. The optimal parameters obtained were that the bevel angle was 35° in titanium and the wire offset was 0.5 mm towards aluminum, the average tensile strength reached up to 198 MPa. The titanium and the weld metal were brazed by the formation of a Ti₃Al layer and a TiAl₃ layer in the upper