

活性剂增加铝合金交流 A-TIG 焊 熔深机理研究*

黄 勇 樊 丁 樊清华

(兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室 兰州 730050)

摘要:采用多组元活性剂 AF305 进行铝合金交流 A-TIG 焊时,熔深达到传统 TIG 焊的 3 倍以上。进行了交流、直流正接和直流反接 A-TIG 焊,发现极性不同时活性剂对熔深的影响也不同。研究了强制电弧收缩对交流焊熔深的影响,发现弧根整体收缩并不是 AF305 增加交流 A-TIG 焊熔深的主要机理,熔深显著增加主要与焊渣成片分布有关。对焊渣进行了 SEM 形貌观察和 EDS 成分分析,并采用氩弧焊证实了焊接过程中焊渣在熔池表面成片分布,电弧斑点极大收缩。向 AF305 活性剂中添加铝粉改变焊渣分布,研究焊渣分布与熔深的关系,证实了焊渣成片分布能增加焊接熔深。认为焊渣成片分布使得电弧斑点极大收缩,斑点压力以及电弧和熔池内的 Lorentz 力增强,最终焊接熔深显著增加。

关键词:活性剂 铝合金 交流 A-TIG 焊 熔深

中图分类号:TG444

0 前言

铝合金具有密度小、比强度高和耐腐蚀等优点,在现代工业生产中得到了广泛应用。最常用的铝合金焊接方法是交流 TIG 焊,但由于焊接熔深浅,熔敷率低,生产效率低,从而限制了它的进一步推广应用。近年来,一种新型焊接方法—A-TIG (Activating flux TIG)焊^[1]日益受到人们的重视,它通过传统 TIG 焊前将很薄的一层表面活性剂(简称 A-TIG 焊活性剂)涂敷在施焊板材表面可使得焊接熔深显著增加。A-TIG 焊起源于乌克兰巴顿焊接研究所(PWI)20 世纪 60 年代研究的焊剂层上氩弧焊,到 20 世纪 90 年代逐渐发展成为一种全新的焊接方法,国际上包括 TWI、JWRI 和 EWI 等知名焊接研究机构都开展了相关研究。其研究热点主要集中在以下两方面:一是适用于各种金属材料的活性剂的研制;一是活性剂增加焊接熔深机理的研究。目前,适用于不锈钢、碳钢、镍基合金、钴基合金和钛合金的表面活性剂已经被开发出来,并得到生产应用。关于活性剂增加熔深机理,已经逐渐形成了三种理论,即电弧收缩理论^[2]、表面张力梯度改变理论^[3]和热输入增加理论^[4],但究竟是哪种机理起主要作用,还没有形成统一认识^[5-6]。迄今为止,还

很少有人专门针对铝合金进行 A-TIG 焊活性剂研制和熔深增加机理研究,法国学者 SIRE 和 MARYA^[7]针对一种他们称之为 FBTIG 焊的工艺方法进行了研究。

采用自行研制的铝合金 A-TIG 焊多组元活性剂 AF305(由 TiO_2 、 SiO_2 、 V_2O_5 所组成的粉状混合物)进行交流 A-TIG 焊时,熔深能达到传统 TIG 焊的 3 倍以上。研究 AF305 增加熔深的机理对于加深对焊接电弧-熔池耦合系统的认识,指导活性剂研制和应用研究,具有重要的理论意义。

1 试验方法

由于交流 A-TIG 焊可分为正极性(DCEP)和反极性(DCEN)两个半周,所以首先进行了不同极性氩弧焊接试验,分析了极性对熔深的影响。然后研究了强制电弧收缩对熔深的影响。由于试验发现 AF305 并不是在任何情况下都能强烈增加熔深,而当 AF305 强烈增加熔深时都发现在焊缝表面成片分布着黑色焊渣,并且熔深随焊渣的分布不同而不同。据此对焊渣进行了专门研究,采用 SEM 观察了焊渣形貌,EDS 分析了化学成分,氩弧焊研究了焊接时焊渣在熔池表面的分布,向 AF305 中添加铝粉改变焊渣分布分析了焊渣分布与熔深的关系。通过以上试验揭示了 AF305 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深的机理。

试验采用的铝合金材料为 3003,活性剂材料为 AF305,焊接方法为 A-TIG 焊进行工件的表面熔焊。

* 有色金属新材料国家重点实验室开放基金(SKL04002)和教育部博士学科点专项基金(20040731001)资助项目。20050512 收到初稿,20051025 收到修改稿

焊接前先用丙酮擦拭工件表面以除去表面油污，然后用细钢丝刷刷净表面，直到露出金属光泽为止。将活性剂用丙酮溶解，搅拌成糊状后用毛刷均匀地涂敷在工件表面，以遮盖原有金属光泽为宜。

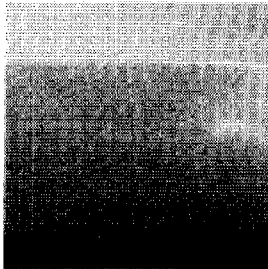
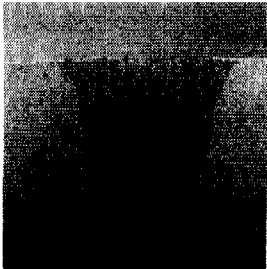
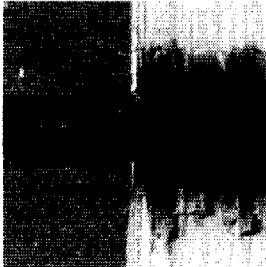
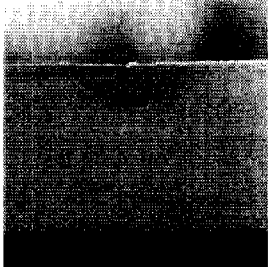
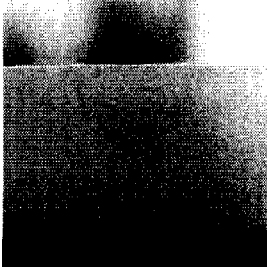
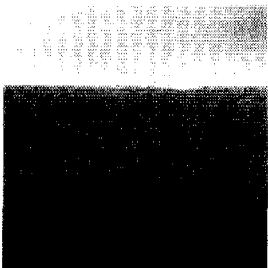
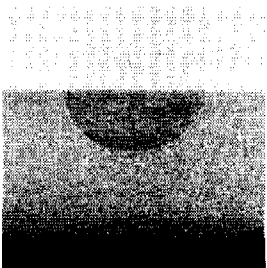
2 试验结果与分析

2.1 极性对熔深的影响

表 1 分别为进行交流、直流正接和直流反接无活性剂(传统 TIG 焊)和有活性剂(A-TIG 焊)焊接时的典型焊缝。焊缝表面的左侧为无活性剂区，右侧

为有活性剂区。
交流焊时，无活性剂区焊缝表面由于 DCEP 半周的阴极雾化作用使氧化膜被除去而露出了金属光泽，有活性剂区焊缝表面凹凸不平，成片分布着黑色焊渣。直流正接焊时，无活性剂区由于没有阴极雾化作用，氧化膜存在于焊缝表面，而对于有活性剂区，活性剂铺满整个焊缝表面，其颜色在电弧的高温作用下呈现为黑色。直流反接焊时，无活性剂区呈现出金属光泽，而对于有活性剂区，黑色焊渣零星地分布于焊缝表面。

表 1 极性对 A-TIG 焊焊缝形成的影响

焊接方法	焊缝表面	焊缝横断面	
		无活性剂	有活性剂
交流 TIG 焊 (焊接电流 $I=160\text{ A}$, 焊接速度 $v=125\text{ mm/min}$, 氩气流量 $q_f=12\text{ L/min}$, 弧长 $L=3\text{ mm}$)			
直流正接 TIG 焊 (焊接电流 $I=140\text{ A}$, 焊接速度 $v=125\text{ mm/min}$, 氩气流量 $q_f=12\text{ L/min}$, 弧长 $L=3\text{ mm}$)			
直流反接 TIG 焊 (焊接电流 $I=39\text{ A}$, 焊接速度 $v=30\text{ mm/min}$, 氩气流量 $q_f=12\text{ L/min}$, 弧长 $L=1\text{ mm}$)			

极性不同时，AF305 对熔深的影响也不同。交流焊时，AF305 能强烈增加熔深，最多达到传统 TIG 焊时的 3 倍以上。直流正接焊时，AF305 活性剂对熔深的影响随焊接规范不同变化很大^[8]，有时减小熔深，有时增加熔深，在试验条件下最大熔深约为传统 TIG 焊的 2 倍。直流反接焊时，AF305 对熔深几乎没有影响。
由表 1 可以看出，极性对焊缝成形影响很大，交流焊时活性剂增加熔深的效果明显好于直流焊时

的效果。直流正接焊时，由于表面氧化膜的存在，活性剂成分不能进入焊接熔池中，只能对焊接电弧产生影响，即熔深增加是由于活性剂影响焊接电弧，主要是影响阳极斑点引起的。直流反接焊时，由于阴极雾化作用，表面氧化膜被破碎，活性剂成分可能对焊接熔池产生影响，所以熔深变化可能是活性剂影响电弧和熔池表面张力共同作用的结果。但从结果来看，活性剂影响阴极斑点和熔池表面张力并不能起到增加熔深的作用。而交流焊时，焊接过程

分为正极性和反极性两个半周，活性剂对阳极斑点、阴极斑点和熔池表面张力的影响都可能存在，但从直流焊接结果来看，主要以影响电弧斑点为主。交流焊时发现焊渣成片分布于焊缝表面，认为交流焊接时活性剂强烈增加熔深可能与这种焊渣分布方式有关。

2.2 强制电弧收缩对熔深的影响

为了研究电弧收缩对熔深的影响程度，可将活性剂涂敷在待焊焊道两侧，中间留出一定间隙 x ，如图 1 所示。将 SiO_2 作为活性剂，利用其高电阻率和高熔沸点特性使得电弧强制收缩，并与 AF305 作为活性剂时的结果对比，研究电弧收缩增加熔深的程度。

图 1 为间隙 $x=4\text{ mm}$ 时的试验结果。 SiO_2 使得电弧强烈收缩导致焊缝熔宽显著减小，余高明显增加。焊缝中央呈铝合金本色，没有黑色焊渣存在，其边缘与活性剂涂敷边缘基本一致。而对于 AF305，因其含有电阻率和熔沸点都较低的组元，并不能使得电弧强制收缩到预留间隙中，熔宽几乎没有减小，但 AF305 增加熔深的效果明显强于 SiO_2 。由此可以认为，除了预留间隙强制收缩电弧使得熔深增加外，还有别的因素导致熔深显著增加。观察焊缝表面，仍然发现了成片分布的黑色焊渣，从而认为正是焊渣的这种成片分布导致了熔深的显著增加。

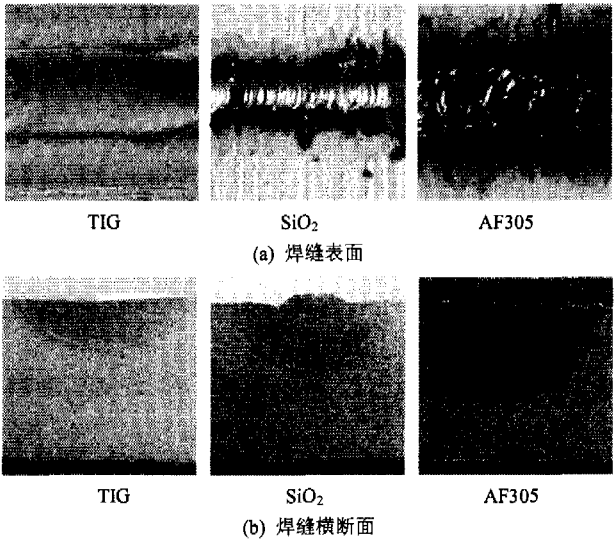


图 1 强制电弧收缩试验结果

焊接电流 $I=160\text{ A}$ ，焊接速度 $v=125\text{ mm/min}$ ，氩气流量 $q_f=12\text{ L/min}$ ，弧长 $L=3\text{ mm}$ ，间隙 $x=4\text{ mm}$

2.3 焊渣分析

2.3.1 焊渣成分分析

图 2 为焊渣表面形貌，选择 A 、 B 和 C 三个典型区域分别进行了分析，在其边缘都发现存在着熔化痕迹。 A 区面积大，分布广，代表了焊渣分布的主要形式。图 3a 为 A 区的 EDS 分析结果，焊渣的主要化学成分为 Ti 、 Al 、 V 、 Si 、 Fe 和 Cu ，其中

Al 、 Fe 和 Cu 完全来自母材， Si 的质量分数远远小于 Ti 和 V ， Ti 的质量分数非常高，甚至高于 Al 的质量分数。 B 区的 EDS 分析结果见图 3b，在该区域内发现 Si 质量分数非常高。 C 区呈圆锥形，图 3c、3d、3e 和 3f 显示了 C 区内由圆锥形外围逐渐过渡到圆锥形中心 D 、 E 、 F 、 G 四点的 EDS 分析结果，这是一个由 Al 过渡到以 Ti 为主要成分的过程。在以上三个区域中，显然 A 区为成分均匀区，为母材和活性剂中所含元素共同组成，而 B 区和 C 区都为以高熔点物质为中心的夹杂物聚集区。

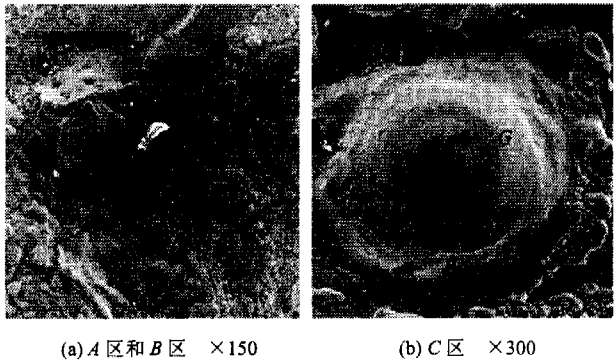


图 2 焊缝表面黑色颗粒的形貌(SEM)

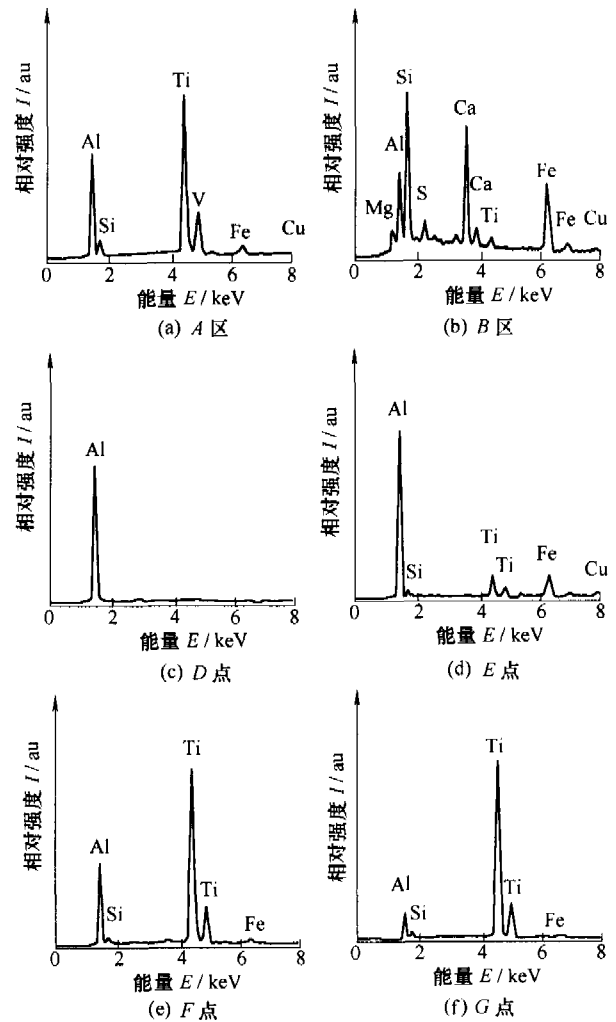
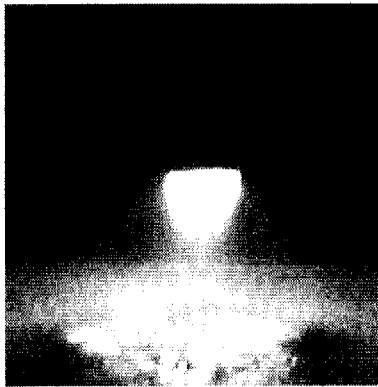


图 3 黑色颗粒成分分析(EDS)

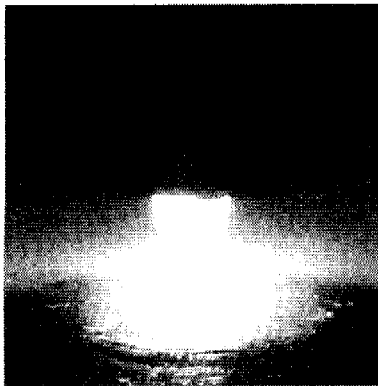
2.3.2 熔池表面焊渣分布

氦弧 TIG 焊时焊接电弧比较明亮, 可以采用数码相机记录焊接过程中焊渣在熔池表面的分布。采用的焊接方法为交流氦弧焊, 焊接规范为焊接速度 125 mm/min, 氦气流量 15 L/min, 弧长 4 mm, 钨极直径 3.2 mm, 焊接电流分别为 80 A 和 130 A。

图 4a 为焊接电流为 80 A 时的熔池表面, 可以看到焊渣在熔池表面成片分布, 将熔池表面分隔成许多小区域, 区域内有蒸气喷出。图 4b 为焊接电流为 130 A 时的熔池表面, 在熔池内有分离的面积很小的电弧斑点在漂移。



(a) 80 A



(b) 130 A

图 4 氦弧焊的熔池表面

2.3.3 焊渣分布与熔深的关系

以 AF305 为基体添加铝粉, 通过改变铝粉质量分数可以控制焊接时焊渣在熔池表面的分布。当添加的铝粉质量分数较低时, 熔池表面被焊渣分隔的小区域数量较多, 面积较小, 并且相互之间被焊渣隔离; 而铝粉质量分数较高时, 小区域数量较少, 面积较大, 而且可能连接成片。研究添加的铝粉质量分数与熔深的关系, 就可以搞清楚焊渣成片分布, 即分离小区域与熔深的关系, 从而确定焊渣成片分布是否可以增加熔深。采用的试验方法为交流氦弧 A-TIG 焊, 选用的 6 种活性剂中 AF305 活性剂质量都是 10 g, 而铝粉的质量在 0~10 g 范围内均匀

变化。

图 5 为试验结果, 其中 D 为有活性剂时的熔深, D_0 为无活性剂时的熔深。可以看出熔深随着铝粉质量分数的增加而逐渐减小。当铝粉质量分数较大时 ($\geq 60\%$), 熔深几乎等于无活性剂时的熔深。这说明焊接时焊渣在熔池表面的成片分布的确可以增加熔深。

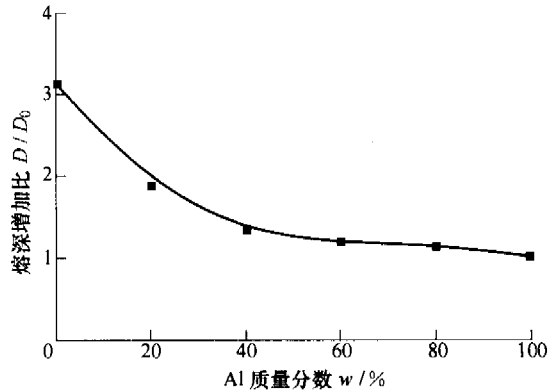


图 5 Al 质量分数与熔深的关系

焊接电流 $I=160$ A, 焊接速度 $v=125$ mm/min,
氦气流量 $q_v=12$ L/min, 弧长 $L=3$ mm

3 讨论

采用 AF305 进行铝合金交流 A-TIG 焊时, 熔深能达到传统 TIG 焊的 3 倍以上, 但同时熔宽略微减小, 为传统 TIG 焊的 0.93 倍, 电弧电压上升仅 1~2 V。热输入增加理论要求熔深增加的同时熔宽增加, 电弧电压明显升高, 显然该理论并不能解释所观察的试验现象。直流正接 A-TIG 焊时, 活性剂不能进入焊接熔池改变熔池表面张力, AF305 仍能强烈增加熔深, 而在直流反接 A-TIG 焊时活性剂可能影响熔池表面张力的情况下, 熔深并没有增加, 这说明表面张力梯度改变可能也不是 AF305 增加熔深的主要机理。强制电弧收缩试验中, 当 AF305 收缩电弧的作用不如 SiO_2 时, 熔深仍比 SiO_2 增加明显, 说明以往的电弧收缩理论, 即电弧弧根整体收缩也不是 AF305 增加熔深的主要机理。

交流 A-TIG 焊和强制电弧收缩试验结果显示 AF305 增加熔深与焊缝表面焊渣成片分布有关。氦弧焊接试验证明焊接时焊渣确实在熔池表面成片分布, 形成了许多分离的面积很小的电弧斑点。焊缝表面形貌和成分分析显示, 焊渣主要是母材和活性剂被电弧熔炼后的产物, 其间零星地分布着未被电弧熔化的高熔点物质。焊渣的这种分布可能与两方面的因素有关: 一是活性剂由熔沸点不同的组元混合而成, 由于铝合金的熔沸点较低, 焊接熔池和电

弧的温度也较低, 焊接时活性剂中的低熔沸点组元容易被熔化蒸发, 高熔点组元难于熔化蒸发, 从而在熔池表面形成很多分离的小区域; 一是电弧斑点的择优取向, 阳极斑点容易在金属母材上形成, 阴极斑点趋向于在由氧化物组成的活性剂上产生。从向 AF305 中添加铝粉的试验可以看出, 这种焊渣成片方式的确能增加熔深。当熔池表面被焊渣分隔成许多分离的小区域时, 在焊接过程的 DCEN 和 DCEP 半周内, 阳极斑点和阴极斑点分别优先在金属母材和氧化物活性剂上产生, 从而使得电弧斑点面积极大收缩, 斑点压力显著增加, 同时斑点内的电流密度显著增大, 电弧和熔池内的 Lorentz 力增强, 最终使得熔深显著增加。

4 结论

(1) 采用 AF305 进行 A-TIG 焊时, 极性不同时活性剂对熔深的影响也不同, 交流焊时增加熔深的效果明显好于直流焊。

(2) 弧根整体收缩并不是 AF305 增加交流 A-TIG 焊熔深的主要机理。

(3) 采用 AF305 进行交流 A-TIG 焊时, 焊渣在熔池表面成片分布, 电弧斑点极大收缩。

(4) AF305 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深与焊接时焊渣在熔池表面的成片分布有关。

参 考 文 献

- [1] 张京海, 鲁晓声, 余巍. 304 不锈钢氩弧焊焊剂的研制[J]. 材料开发与应用, 2000, 15(6): 1-4.
- [2] HOWSE D S, LUCAS W. Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(3): 18-193.
- [3] TANAKA M, SHIMIZU T, TERASAKI H, et al. Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(6): 397-402.
- [4] MARYA M, EDWARDS G R. Chloride contributions in Flux-assisted GTA welding of magnesium alloys[J]. Welding Research, 2002(11): 291-298.
- [5] 樊丁, 顾玉芬, 林焰, 等. 低碳钢 A-TIG 焊接法的试验研究[J]. 甘肃工业大学学报, 2000, 26(3): 16-19.
- [6] 张瑞华, 樊丁. 低碳钢 A-TIG 活性剂的焊接性[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 85-87.
- [7] SIRE S, MARYA S. New perspectives in TIG welding of

aluminium through flux application FBTIG process[C]//Proceeding of the 7th International Welding Symposium, Kobe (Japan). 2001, 11: 113-118.

- [8] 黄勇, 樊丁, 樊清华. 表面活性剂对铝合金直流正接 A-TIG 焊焊接熔深的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 60-62.

STUDY OF MECHANISM OF ACTIVATING FLUX INCREASING WELD PENETRATION OF AC A-TIG WELDING FOR ALUMINUM ALLOY

HUANG Yong FAN Ding FAN Qinghua

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: Weld penetration of A-TIG welding reaches above 3 times that of conventional TIG welding for aluminum alloy when multi-component flux AF305 is used as surface activating flux. A-TIG welding with AC, DCEN and DCEP mode are carried out. It is found that, flux has different effects on weld penetration when arc polarity is different. Effect of compelled arc constriction on weld penetration of alternative current welding is studied. It is believed that, constriction of whole arc root is not the main mechanism of AF305 dramatically improving weld penetration, it has relation with separate distribution of slag on weld surface. Then SEM observation and EDS analysis of slag are carried out respectively. Separate distribution of slag on welding pool during welding and great constriction of arc spots are confirmed by TIG welding with helium shielding gas. Relation between slag contribution and weld penetration is studied by adding aluminum powder into AF305 to change this distribution. It is believed that, during welding, separate distribution of slag on welding pool results in great constriction of arc spots, increases of arc spot force and Lorentz force within the arc and welding pool, in the end, increase of weld penetration.

Key words: Activating flux

Aluminum alloy

AC A-TIG welding

Weld penetration

作者简介: 黄勇, 男, 1972 年出生, 博士研究生。主要从事焊接电弧物理研究。

E-mail: hyorhot@lut.cn