

单组分活性剂对铝合金 A-TIG 焊焊缝的影响

严 铿, 高莉华, 杨 刚, 肖海林

(江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 镇江 212003)

摘 要: 针对 6 mm 的 6061 铝合金试板, 选用 SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , CaF_2 , BaCl_2 共 5 种单一成分活性剂进行铝合金交流 A-TIG 焊工艺试验, 研究活性剂对 A-TIG 焊焊缝表面成形及宏观形貌的影响, 并结合焊接过程电弧形态变化, 分析熔深增加机理. 结果表明, 5 种单一成分活性剂均可改善焊缝熔深, 其中 SiO_2 增加焊缝熔深效果最好, CaF_2 效果不明显; 涂覆 SiO_2 时表面成形比涂覆其它活性剂时差, 其中 TiO_2 表面成形最好; 电弧进入活性剂区时无明显收缩, 认为熔深增加是活性剂的引入导致导电通道电阻变化引起的电弧热输入增加的结果.

关键词: 铝合金; A-TIG 焊; 活性剂; 焊缝成形

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)02-0054-04



严 铿

0 序 言

由于铝合金的热导率和比热容都很大, 焊接变形大, 通常采用的都是能量集中的焊接方法, 尤其是以 TIG 焊为最常见. 采用传统的 TIG 焊接铝合金时, 由于单道焊缝熔深浅, 生产效率低, 从而限制了其推广应用^[1]. 近年来国外焊接学者对 A-TIG 焊给予很大重视, A-TIG 焊是在进行传统的 TIG 焊之前在焊道表面涂覆一层能增加焊接熔深的表面活性剂的特殊焊接方法, 活性剂的涂覆量、活性剂成分以及焊接工艺参数都对焊接效果有影响^[2,3].

以往所进行的活性焊研究主要针对的金属多为不锈钢、碳钢和钛合金等材料, 很少有人针对铝合金 A-TIG 焊进行研究. 有法国学者^[4]针对 FBTIG 焊的工艺方法进行了机理研究, 该方法是在 TIG 焊前将活性剂涂覆在待焊铝合金焊道两侧, 中间留出一定间隙, 焊接时电弧在中间裸露的金属上燃烧. 此试验针对 6061 铝合金, 研究了不同单组分活性剂对焊缝成形、熔深及电弧形态的影响.

1 试验方法

试验采用 6 mm 的 6061 铝合金板进行焊接试验, 试验前首先将铝合金板表面用钢丝刷打磨, 目的

是将铝合金表面的氧化膜去除, 然后用丙酮擦拭, 除去其表面的油污与杂质, 在焊前将活性剂用丙酮溶解搅拌均匀地喷涂在试件表面, 以遮盖原有的金属光泽为宜. 此试验选用 5 种单组分活性剂, 分别为 SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , CaF_2 , BaCl_2 .

试验采用交流自动 TIG 焊进行试件的表面熔焊, 均为单道焊, 不添加焊丝. 焊接工艺参数如表 1 所示, 焊接过程中, 保证所有焊接工艺参数精确设定且焊枪沿着规定路线行走, 研究活性剂对焊接熔深 D 、熔宽 W 及焊缝深宽比 D/W 的影响, 同时采用高速摄影系统对电弧进行拍照, 对电弧电压的变化进行记录, 从而分析焊缝熔深显著增加的机理.

表 1 A-TIG 焊接工艺参数
Table 1 A-TIG welding parameters

焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	焊枪倾角 $\theta/(\circ)$	气体流量 $q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	弧长 L/mm
140	100	90	16	4
150	100	90	16	4
160	100	90	16	4

2 试验结果及分析

2.1 活性剂对焊缝成形的影响

活性剂是 A-TIG 焊技术的核心, 不同活性剂焊缝熔深增加效果、焊缝表面成形能力各不相同. 有些活性剂虽能大幅增加焊缝熔深但其焊缝表面成形

收稿日期: 2011-12-22

基金项目: 江苏科技大学本科生创新计划资助项目(2012); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

效果极差,甚至出现裂纹等焊接缺陷. 图1为150 A条件下以 SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , CaF_2 , BaCl_2 5种常见氧化物和卤化物作为单一组元活性剂进行 A-TIG 焊时的焊缝表面形貌.

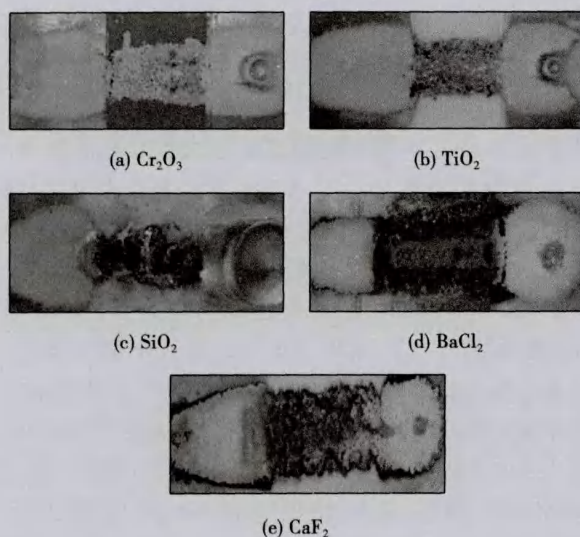


图1 A-TIG 焊焊缝表面形貌 ($I=150\text{ A}$)

Fig. 1 Weld performance of A-TIG ($I=150\text{ A}$)

图1中焊接方向从左到右,中间为涂覆的活性剂区,左右两边不涂活性剂. 通过观察可以很明显看出不同活性剂对焊缝成形的影响不同. 涂覆 Cr_2O_3 活性剂的焊缝成形良好,焊缝表面均匀,与不涂覆活性剂时的焊缝成形相似,表面有少量的黑色点状熔渣,呈现出铝合金交流 TIG 焊时由于阴极雾化作用留下的灰白色金属表面形貌. 焊缝到达涂层区后宽度变窄,焊道收缩. 在活性剂区与无活性剂区的交界处焊缝金属过渡均匀未出现明显的焊缝金属堆积现象. 涂覆 TiO_2 活性剂的焊缝,成形美观,表面无金属疙瘩或凹陷等缺陷,成形均匀细腻. 焊缝表面有黑色点状熔渣,且沿焊道表面均匀分布. 焊缝到达涂层区后,宽度变窄,焊道收缩明显,且焊道宽度很均匀,说明焊接过程电弧稳定,在涂层区与无涂层区的交界处,未出现焊缝金属堆积现象. 涂覆 SiO_2 活性剂的焊缝,表面成形恶劣,焊缝表面凹凸不平,出现明显的凹坑和金属疙瘩,焊缝到达活性剂区后,宽度变窄,焊道收缩较明显,但是焊道宽度明显不均匀,呈蛇形状分布,这表明焊接过程中电弧很不稳定,在涂层区与无涂层区的交界处,焊缝金属明显堆积. 涂覆 BaCl_2 活性剂的焊缝,焊缝成形一般,焊道表面的黑色熔渣较多,焊缝到达活性剂区后,宽度变窄,焊道收缩,在涂层区与无涂层区的交界处,焊缝金属少量堆积. 涂覆 CaF_2 活性剂的焊

缝,焊缝成形较好,焊道表面有黑色熔渣,焊缝到达活性剂区后,宽度变窄,焊道明显收缩,焊道宽度均匀. 在涂层区与无涂层区的交界处,无焊缝金属堆积现象.

图2为不同单一组分活性剂的焊缝横截面形貌,可以看出涂覆 SiO_2 活性剂时,焊缝熔深增加明显,几乎熔透,而熔宽并未明显增加,焊缝成形系数小,是较为理想的焊缝截面成形. 而涂覆 TiO_2 , Cr_2O_3 , BaCl_2 活性剂的焊缝熔深增加也较明显,均呈现典型的盆碗状熔深,焊缝成形系数仍较大,涂覆 CaF_2 时未见明显焊缝熔深增加. 这说明其增加熔深的效果不是很明显.

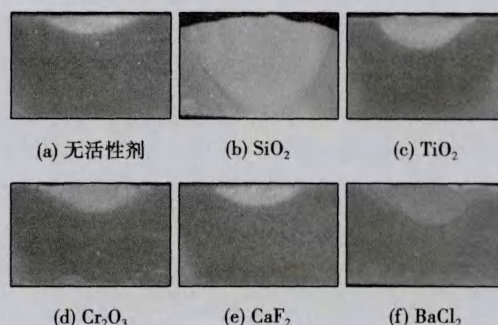


图2 不同活性剂的焊缝横截面形貌

Fig. 2 Weld cross-sections with different activating flux

2.2 活性剂对焊缝熔深与熔宽的影响

图3为焊接电流分别为140,150,160 A时不同活性剂对焊缝熔深的影响,从图3中可以很明显看出 SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , CaF_2 , BaCl_2 这5种活性剂对焊缝熔深的影响不同,均不同程度地改变焊缝熔深.

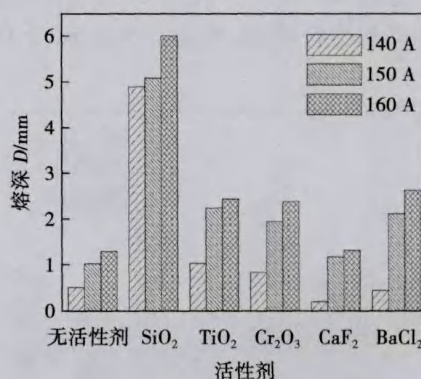


图3 活性剂在不同焊接电流时对焊缝熔深的影响

Fig. 3 Effect of activating flux on weld penetration at different welding current

观察发现,随着焊接电流的增加,每种活性剂都

使焊缝的熔深依次增加,其中 SiO_2 的增加速率最快,效果也最为明显. 在电流为 140 A 时,母材熔深仅为 0.51 mm,而同等条件下涂覆 SiO_2 活性剂时其熔深则达到 4.89 mm,远大于无活性剂时的熔深. 同时还可看出此时涂覆 TiO_2 和 Cr_2O_3 活性剂的熔深分别为 1.03 mm 和 0.83 mm,熔深增加的效果不是特别显著,特别是涂覆 CaF_2 和 BaCl_2 活性剂的熔深分别为 0.2 mm 和 0.44 mm,其熔深甚至低于无活性剂时的熔深. 当电流超过 140 A 时,特别是达到 160 A 时,所有活性剂均较大程度地增加焊缝熔深,此时无活性剂的熔深为 1.29 mm,而此时涂覆 SiO_2 活性剂的焊缝则完全焊透,背面余高近 2 mm. 涂覆 TiO_2 和 Cr_2O_3 活性剂的熔深分别为 2.44 mm 和 2.38 mm,熔深增加比分别为 1.89 和 1.84. 其在焊接电流为 150 A 时的熔深增加比依次为 2.19 和 1.90. 对比分析可知, TiO_2 和 Cr_2O_3 活性剂对焊缝熔深增加效果很明显,其熔深增加的效果随焊接电流的波动变化较小,并且随焊接电流的增加,其熔深增加亦呈现良好趋势. 在焊接电流分别为 150 A 和 160 A 时,涂覆 CaF_2 活性剂的熔深增加比分别为 1.15 和 1.02,基本与无活性剂时熔深相当,涂覆 BaCl_2 活性剂的熔深增加比分别为 2.07 和 2.04. 分析表明 CaF_2 对熔深增加的效果不是很明显,甚至在焊接电流过小时还起到减小熔深的作用. 而 BaCl_2 在较大焊接电流时对焊缝熔深增加的效果很明显,但在焊接电流较小时可能效果不好甚至起反作用.

图 4 为给定焊接工艺参数条件下,不同活性剂对焊缝熔宽的影响. 随焊接电流的增加,每种活性剂都使焊缝熔宽依次增加. 当焊接电流为 140 A 时,5 种活性剂条件下的熔宽均不同程度地减小,当焊接电流超过 140 A 时,可以发现涂覆活性剂时熔宽均有不同程度的增加. 特别是 SiO_2 和 Cr_2O_3 活性

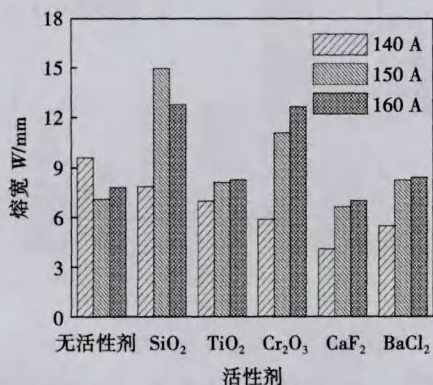


图 4 活性剂在不同焊接电流时对焊缝熔宽的影响

Fig. 4 Effect of activating flux on weld width at different welding current

剂增加最为明显,而 TiO_2 , CaF_2 和 BaCl_2 则基本与无活性剂时相当,增加不明显. 分析认为这是涂覆 SiO_2 和 Cr_2O_3 活性剂时热输入急剧增大导致焊接热输入增加所致.

2.3 活性剂对焊缝深宽比的影响

图 5 为 5 种活性剂在 3 组焊接电流下的焊缝深宽比,深宽比越大,形成窄而深的焊缝. 观察发现,在每种焊接电流的作用下,焊缝的深宽比都不大. 其中涂覆 SiO_2 活性剂的深宽比远大于其它活性剂. 尤其当焊接电流为 140 A 时,其深宽比最大达到 0.62,因而能在获得相同熔深时减小熔宽,并减小焊接热影响区的范围,进而提高焊接接头的力学性能. 对于 TiO_2 和 Cr_2O_3 活性剂,在相同焊接工艺参数下获得的焊缝深宽比都要大于不涂活性剂的深宽比,并且都随焊接电流的增加深宽比也增加,但总体效果不是很明显. 而 CaF_2 和 BaCl_2 活性剂,当焊接电流为 140 A 时深宽比与无活性剂是基本相当,甚至有所下降,而当电流焊接超过 140 A 时,涂覆 BaCl_2 活性剂的焊缝深宽比增加明显. 分析认为要使用除 SiO_2 之外的其它活性剂时需选用更大的焊接电流才有可能得到更大的焊缝深宽比.

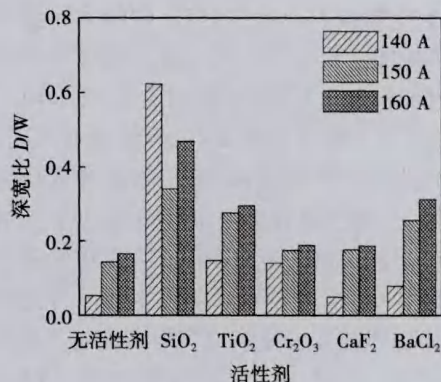


图 5 活性剂对焊缝深宽比的影响

Fig. 5 Effect of activating flux on D/W

3 分析与讨论

表面活性剂对 A-TIG 焊熔深的影响因素很多,既有力的因素,也有热的因素. 在 A-TIG 焊增加熔深的理论中最具代表性的是“电弧收缩理论”和“表面张力梯度改变理论”. 黄勇等人^[5]还提出了导电通道电阻对焊接熔深具有一定的影响,即活性剂通过改变导电通道电阻及其分配而改变热输入、电弧热效率,最终改变焊接熔深.

图 6 为 150 A 条件下,电弧在 A-TIG 焊过程中

的形态变化。可以看出,对于上述5种活性剂,有活性剂时的电弧和无活性剂时的电弧相比,电弧并没有明显收缩,尤其是 SiO_2 和 BaCl_2 这两种活性剂反而出现电弧扩展的迹象,电弧形态由圆锥形变成球状。结合图2焊缝横截面形貌可以发现,熔深增加的同时熔宽并未减小,通过以上现象可以初步认定电弧收缩可能不是熔深增加的主要因素。

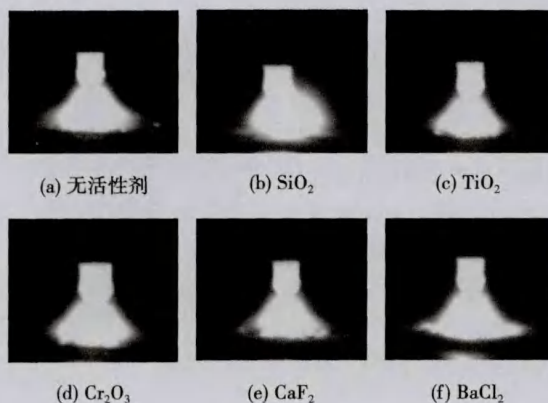


图6 活性剂对电弧形态的影响 ($I=150\text{ A}$)

Fig. 6 Effect of activating flux on arc shape ($I=150\text{ A}$)

图7为焊接电流150 A时电弧进入活性剂前后电弧电压变化过程,可以很明显地看出,每种活性剂的电压都有所上升,整个电压变化呈现出山峰状。尤其涂覆 SiO_2 活性剂时电弧电压变化最为剧烈,其电压最大值几乎达到无活性剂时的1.5倍,其次是涂覆 TiO_2 、 Cr_2O_3 和 BaCl_2 时电压变化相当,电压升高2~3 V,而涂覆 CaF_2 时仅为1~2 V。对比电弧形态可知,焊接过程中的电压升高可能并不是由于电弧收缩造成的,尤其是涂覆 SiO_2 时,电压升高而电弧形态扩展说明电压升高并非由电弧收缩引起的。观察发现,活性剂的电压变化越剧烈,其焊缝熔深也越大。这说明熔深增加的效果与电弧电压变化较为一致。根据黄勇等人^[5]提出的导电通道电阻理论,由于各种活性剂的熔沸点、高温下的电阻、分解温度不同以及活性剂分子或原子的电离电压、电子亲和能等物理性能,对应的导电通道电阻不同。在铝合金交流A-TIG焊中,试验时的焊接电流保持不变,铝合金的电阻率又很小,所以由电弧、活性剂涂层和焊接熔池3部分所组成的导电通道电阻对焊缝熔深的影响很大。试验中就物理性质而言, SiO_2 的熔沸点要高于 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 BaCl_2 和 CaF_2 ,且 SiO_2 是共价化合物,相对其它几种金属氧化物、卤化物更难发射电子形成电弧,因而导电通道电阻更高,对电弧导电通道的阻尼更大,对应的电弧电压也高。而交流TIG

焊电源的外特性为恒流特性,不同活性剂其导电通道电阻不同,从而不同程度地增加电弧热输入,进而增加焊缝熔深且热输入增加使焊缝熔深和熔宽同步增加,与试验观察到的焊缝截面形貌吻合。试验中 SiO_2 电阻最大,对应电压变化最大,说明焊接热输入增加最多,进而使焊缝熔深达到最大。试验认为导电通道电阻变化是焊缝熔深增加的主要原因。相关机理还有待进一步试验验证。

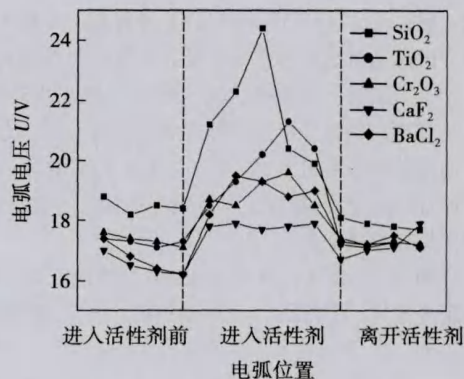


图7 150 A时电弧进入活性剂前后电压的变化过程

Fig. 7 Change tendency of arc voltage with and without activating flux, $I=150\text{ A}$

4 结 论

(1) 活性剂种类对焊缝表面成形影响很大,涂覆 TiO_2 时表面成形最为美观,涂覆 SiO_2 时表面成形恶劣,而 Cr_2O_3 、 CaF_2 、 BaCl_2 这3种活性剂也能得到较好的焊缝表面成形。

(2) 5种活性剂中, SiO_2 对增加焊缝熔深最为明显,获得的深宽比最为理想, CaF_2 对熔深增加效果不明显,而 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 BaCl_2 增加熔深效果也较好,但深宽比不太理想。

(3) 焊接电弧进入活性剂区时,未见电弧明显收缩,焊缝熔深与电弧电压变化较为一致,活性剂的引入导致导电通道电阻变化引起的热输入增加是熔深增加的主要原因。

参考文献:

- [1] 黄 勇, 樊 丁. SiO_2 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深的机理[J]. 焊接学报, 2008, 29(1): 45-49.
Huang Yong, Fan Ding. Mechanism of SiO_2 to increase weld penetration of Aca-TIG welding for aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(1): 45-49.

[下转第62页]

- tution, 1999, 20(4): 258-263.
- [3] 张国栋, 洪敏, 张建强, 等. 基于SPS技术的异种钢焊接[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 141-144.
Zhang Guodong, Hong Min, Zhang Jianqiang, *et al.* Research on dissimilar steel welding via spark plasma sintering[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 141-144.
- [4] Das C R, Bhaduri A K, Srinivasan G, *et al.* Selection of filler wire for and effect of auto tempering on the mechanical properties of dissimilar metal joint between 403 and 304L(N) stainless steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 30(2): 141-144.
- [5] Pan C, Zhang Z. Morphologies of the transition region in dissimilar austenitic-ferritic welds[J]. Materials Characterization, 1996, 36(1): 5-10.
- [6] 全国压力容器标准化技术委员会. 钢制压力容器焊接工艺评定JB4708—2000[S]. 北京: 国家机械工业局, 2000.
- [7] 马启慧, 王少刚, 张亮, 等. 双相不锈钢与碳钢异种金属焊接研究综述[J]. 焊管, 2009, 32(8): 26-30.
Ma Qihui, Wang Shaogang, Zhang Liang, *et al.* Review of dissimilar metal welding between duplex stainless steel and carbon steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2009, 32(8): 26-30.
- [8] 李萌盛. 异质焊接接头加热过程中的碳迁移现象研究[J]. 材料科学与工艺, 1997, 5(3): 17-21.
Li Mengsheng. Carbon migration for dissimilar metal joints in heating process[J]. Material Science Technology, 1997, 5(3): 17-21.
- [9] 潘春旭. 异种金属焊接—显微结构特征及其转变机理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [10] 黄文长, 潘春旭, 付强. 珠光体-奥氏体异种钢焊接接头中碳迁移的跟踪观测[J]. 机械工程材料, 2006, 30(4): 17-19.
Huang Wenchang, Pan Chunxu, Fu Qiang. Observation of carbon distribution in pearlite-austenite dissimilar steel welded joints[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(4): 17-19.
- [11] Lee H Y, Lee S H, Kim J B, *et al.* Creep-fatigue damage for a structure with dissimilar metal welds of modified 9Cr-1Mo steel and 316L stainless steel[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(9/11): 1868-1879.
- [12] Sopoušek J. Carbon and nitrogen redistribution in weld joint of ion nitrided 15CrMoV 2-5-3 and advanced P91 heat-resistant steels[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2006, 27(4): 363-369.

作者简介: 王瑞,男,1970年出生,硕士,副教授.主要从事焊接及其微电子控制技术方面的研究工作.发表论文10余篇. Email: wangrui@tjcu.edu.cn

通讯作者: 王凤会,男,硕士. Email: wangfenghui881013@126.com

[上接第57页]

- [2] 刘凤尧, 林三宝, 杨春利, 等. 活性化TIG中活性剂和焊接参数对焊缝深宽比的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 5-8.
Liu Fengyao, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Effect of activating fluxes and welding parameters on weld depth to width ratio in A-TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(2): 5-8.
- [3] 刘凤尧, 林三宝, 杨春利, 等. TIG焊活性剂对焊缝形成的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 1-4.
Liu Fengyao, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Effect of activating fluxes on weld surface formation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 1-4.
- [4] Sire S, Marsy S. New perspectives in TIG welding of aluminium through flux application FBTIG process[C]// Proceeding of the 7th International Welding Symposium, Kobe, Japan 2001: 113-118.
- [5] 黄勇, 樊丁. 铝合金交流A-TIG焊熔深增加机理的研究——导电通道电阻对焊接熔深的影[J]. 焊接, 2003(4): 9-11.
Huang Yong, Fan Ding. Mechanism of weld penetration increase of Aca-TIG welding for aluminum alloy[J]. Welding & Joining, 2003(4): 9-11.

作者简介: 严铿,男,1961年出生,教授,硕士研究生导师.主要从事焊接新工艺和搅拌摩擦焊工艺研究.发表论文50余篇. Email: yankeng@126.com