

氟化物 A-TIG 焊接 Ti6Al4V 的电弧行为

高晓刚¹, 董俊慧¹, 韩旭¹, 徐得伟²

(1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 国家电网黑龙江省送变电工程公司, 哈尔滨 150000)

摘 要: 试验选用 MF 型氟盐 (LiF, NaF, KF)、MF₂ 型氟盐 (MgF₂, CaF₂, BaF₂) 和 KN 型钾盐 (KF, KCl, KBr) 对氟化物 A-TIG 焊接 Ti6Al4V 的电弧行为进行了研究. 结果表明, LiF 和 KBr 活性剂不会影响 A-TIG 焊电弧行为; KF 和 CaF₂ 活性剂会显著收缩电弧, 增加电弧温度, 但不会影响电弧力; MgF₂ 活性剂能显著收缩电弧, 增加电弧温度, 并能增大电弧力; BaF₂ 活性剂不会影响电弧形态, 但能增加电弧温度, 减小电弧力; NaF 和 KCl 活性剂可以不同程度地收缩电弧, 增加电弧温度, 但不会影响电弧力. 此外, A-TIG 焊接 Ti6Al4V 应优先选用氟化物作为活性剂, 在 MF 型氟盐中应优先选用 KF, 在 MF₂ 型氟盐中应优先选用 MgF₂.

关键词: A-TIG 焊; Ti6Al4V 钛合金; 电弧行为

中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20161026007

0 序 言

钛及其合金的比强度高, 具有优良的耐腐蚀和抗疲劳性能, 在航空航天、电力、化工等领域得到广泛应用^[1]. 钨极氩弧焊 (TIG) 具有焊缝成形好、焊接成本低等优点, 常被用来焊接此类金属^[2-3].

传统 TIG 焊存在熔深浅、熔宽大、生产效率低等问题. 为了改善这些不足, 1960 年巴顿焊接研究所提出了活性 TIG (A-TIG) 焊接技术^[4-5]. A-TIG 焊是预先在工件表面涂覆一层薄的活性剂粉末再进行传统 TIG 焊接的一种成形工艺, 可以显著增加熔深并减小熔宽^[6-7]. A-TIG 焊常用活性剂有卤化物、氧化物和单质, 其中卤化物增加熔深的机理在学术界倾向于电弧收缩理论^[8-9], 高温下离解的卤化物与电弧中的电子具有很大亲和力, 从而导致电弧收紧. 虽然电弧形态上的改变是熔深增加的主导因素, 但同时也应考虑到活性剂对电弧力和电弧温度的影响, 才能对“收缩程度大的电弧反而没有收缩程度小的电弧增加熔深效果好”和“收缩程度相同的电弧熔深增加存在差异”现象给出合理解释.

文中选用 MF 型氟盐 (LiF, NaF, KF)、MF₂ 型氟盐 (MgF₂, CaF₂, BaF₂) 和 KN 型钾盐 (KF, KCl, KBr) 进行单组分活性剂 A-TIG 焊接试验 (M 代表不同的阳离子, N 代表不同的阴离子), 重点研究了氟化物 A-TIG 焊接过程中的正面电弧形态、侧面电弧形态、

电弧力变化和电弧温度的影响规律, 以期氟化物 A-TIG 焊接 Ti6Al4V 电弧行为规律的明确提供理论和试验支持.

1 试验方法

焊接试板选用 3 mm 厚 Ti6Al4V. 试验前, 将单组分氟化物在研钵中充分研磨后与丙酮调制成糊状, 用扁平毛刷涂覆在待焊工件上, 以遮盖工件本色为宜, 涂覆宽度 40 mm, 涂覆厚度大约为 0.3 ~ 0.4 mm. 焊机选用美国米勒 Dynasty 700 型逆变变极性氩弧焊机, 直流正接, 焊接电流设置为 110 A. 借助自动焊接小车控制焊接速度为 3 mm/s, 保持钨极高度为 3 mm, 确保每次焊接过程中参数一致. 使用纯氩气进行保护, 设置流量为 12 L/min. 图 1 为试验设备的布置示意图.

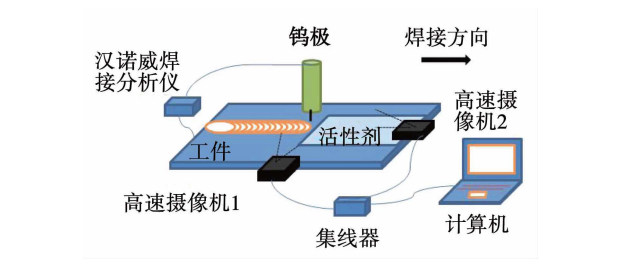


图 1 试验设备布置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of complete welding arrangement

样频率对进入稳定弧焊后的 A-TIG 焊侧面电弧和单侧 A-TIG 焊正面电弧形态进行定位置拍摄,并利用汉诺威质量分析仪实时采集电弧电压信号,同时记录焊接过程中电弧颜色和亮度变化. 试验从传统 TIG 焊直接过渡到 A-TIG 焊,实现无间断焊接,以尽量减小焊接条件的微弱变化所带来的数据偏差.

2 结果与讨论

2.1 A-TIG 焊侧面电弧形态

TIG 焊和 A-TIG 焊的侧面电弧形态见图 2. 图 2a 为 TIG 焊电弧,电弧呈钟罩型,且前端根部电弧(与试板接触位置)向外扩散,因未涂覆活性剂,母材上可观察到一个弧形反光亮区(而非电弧). 图 2b ~ 图 2i 为 A-TIG 焊电弧形态,电弧行进方向从右到左. 图中看到,NaF(图 2c),KF(图 2d),MgF₂(图 2e),CaF₂(图 2f),KCl(图 2h)电弧的前端(富活性剂区)因活性剂的蒸发分解电离作用,其电弧根部位置与工件平面呈现一定的弧度,其中 KF(图 2d),MgF₂(图 2e),CaF₂(图 2f)电弧根部与工件平面的倾角最大,NaF(图 2c)和 KCl(图 2h)稍有倾角;而电弧的后端因活性剂已蒸发分解成为贫活性剂区,其电弧形态与 TIG 焊基本相同,仍为扩散态. 此外看出, KF(图 2d),KCl(图 2h)的富活性剂侧电弧体积相比 TIG 焊减小明显. 富活性剂侧电弧体积的变小和根部电弧的收缩,减小了阳极斑点直径,而阳极斑点区域大小决定了导电通道的面积,相比传统 TIG 焊,可使该处的热流密度增加. 如果活性剂对导电通道面积的影响近似相同,对比不同活性剂 A-TIG 焊的电弧行为时就需把活性剂对电弧力和电弧温度的影响纳入其中. 此外从图 2 中看到,LiF(图 2b)前端根部电弧向外扩张明显,BaF₂(图 2g)和 KBr(图 2i)的电弧根部也未见有收缩现象.

进一步分析电弧整体轮廓,从图 2 看出,与传统 TIG 焊相比,活性剂 KF(图 2d),MgF₂(图 2e)电弧的扩散角要稍大,即对电弧整体的收缩效果并不明显,出现了电弧膨胀现象,电弧的去电离作用是其主要原因. 电子与阳离子会因复合成为中性粒子而扩散到弧柱外,使电弧发生膨胀. 其作用与热电离的作用正好相反. 在稳定电弧放电中,电离现象与去电离过程同时发生且速率相同,并形成电离平衡.

图 3 为 TIG 和 A-TIG 焊焊缝外观成形,观察后发现,除 MgF₂(图 3d)焊道稍有曲折外,其它活性剂 A-TIG 焊缝均成形良好,焊缝成形的优劣可以反映出电弧燃烧过程中的稳定性. 其中 NaF(图 3b),KF(图 3c),MgF₂(图 3d),CaF₂(图 3e),KCl(图 3g)焊

缝的熔宽最窄,是因为它们的电弧产生了收缩,因此电弧收缩是决定熔宽大小的重要因素之一. BaF₂活性剂电弧(图 2g)虽未见收缩,但图 3f(BaF₂)焊缝也获得了较窄的熔宽,这是因为 BaF₂活性剂会导致焊接电弧产生高达 2.21 V 的电压降(见后文),使熔宽变窄.

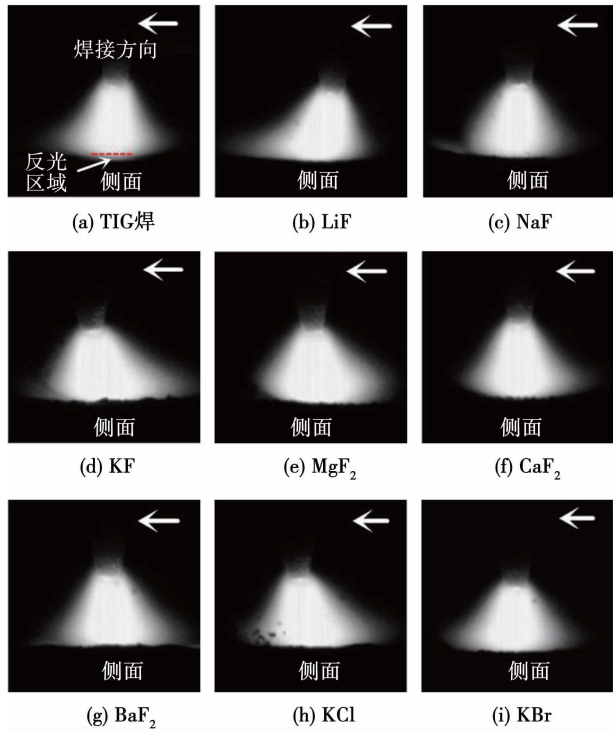


图 2 TIG 焊和 A-TIG 焊的侧面电弧形态
Fig. 2 Arc shapes of side view in TIG and A-TIG

2.2 单侧 A-TIG 正面电弧形态

图 4 为 TIG 焊和单侧 A-TIG 焊焊缝外观成形,在单侧 A-TIG 焊过程中,沿 TIG 焊缝中心线一侧涂有活性剂,另一侧未涂活性剂. 根据图 4 单侧 A-TIG 焊缝外观成形特征,8 组单组分活性剂的 A-TIG 焊缝可分为三类:第一类,焊缝未发生偏移,熔宽也未变窄,诸如 LiF(图 4a),KBr(图 4h);第二类,焊缝未发生偏移,但单侧 A-TIG 焊的活性剂侧焊缝收窄,诸如 CaF₂(图 4e),BaF₂(图 4f);第三类,焊缝发生严重的偏移,诸如 NaF(图 4b),KF(图 4c),MgF₂(图 4d),KCl(图 4g).

图 5a 为传统 TIG 焊正面电弧形态,其关于弧柱中心线左右对称. 图 5b ~ 图 5i 为单侧 A-TIG 焊的正面电弧形态,A-TIG 焊的弧柱中心线的一侧试板涂有活性剂,另一侧试板未涂活性剂,通过对比两侧的电弧形态,可以进一步明确活性剂对电弧行为的影响规律. 现结合上述划分的三类焊缝外观成形特征对单侧 A-TIG 焊正面电弧形态进行如下分析.

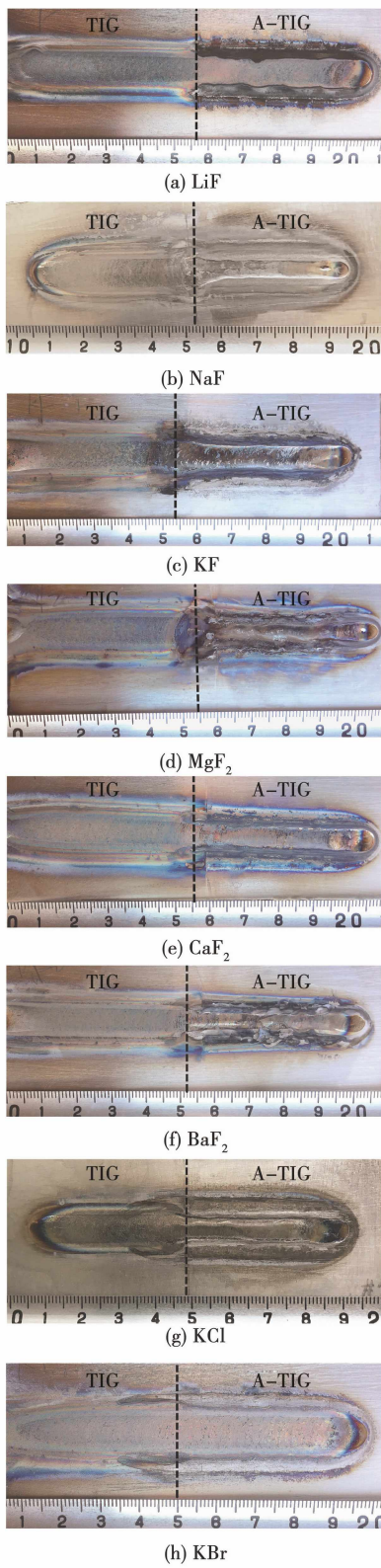


图 3 TIG 焊和 A-TIG 焊焊缝外观成形
Fig. 3 Weld appearance of TIG and A-TIG

第一类焊缝的电弧形态见图 5b (LiF), 图 5i (KBr), 活性剂侧的电弧和无活性剂侧的电弧相对弧柱中心线左右对称, 表明这类活性剂基本不会影

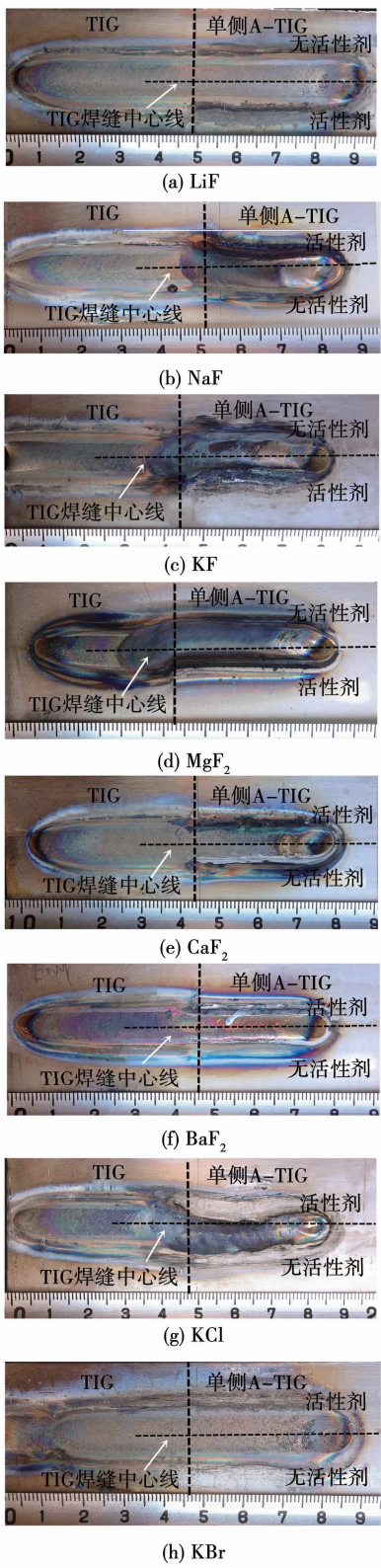


图 4 TIG 焊和单侧 A-TIG 焊焊缝外观成形
Fig. 4 Weld appearance of TIG and A-TIG with activated fluxes applied on one side

响 A-TIG 焊电弧行为, 进而也不会影响焊缝成形。
第二类焊缝的电弧形态见图 5f (CaF₂), 5g (BaF₂), 相比无活性剂侧电弧, 活性剂侧电弧体积

更小,从而使该侧的阳极斑点区域面积减小,导致活性剂侧的熔宽变窄.而无活性剂侧的电弧因没有受到活性剂的影响,其熔宽边界与 TIG 焊同侧的熔宽边界基本处在同一条直线上.

第三类焊缝的电弧形态分别见图 5c (NaF),图 5d(KF),图 5e(MgF₂),图 5h(KCl). 其中图 5c (NaF)电弧左右基本对称,但是焊缝发生了较大偏移,这是由于活性剂侧氟化物的分解和电离作用影响到了无活性剂侧的电弧,更具体来说是对电弧温度场的影响,而对电弧形态的影响有限. NaF 使无活性剂侧的电弧温度增加,使该侧母材的熔化面积增大,从而导致该侧熔宽边界超出 TIG 焊同侧熔宽边界的偏移现象产生,而活性剂侧的电弧温度虽有升高,但由于活性剂的导电能力不及母材,促使导电通道优先在无活性剂侧形成,再加上活性剂分解和电离过程对电弧能量的消耗,导致用来熔化母材自身的热量减少,从而使活性剂侧的熔宽显著变小.

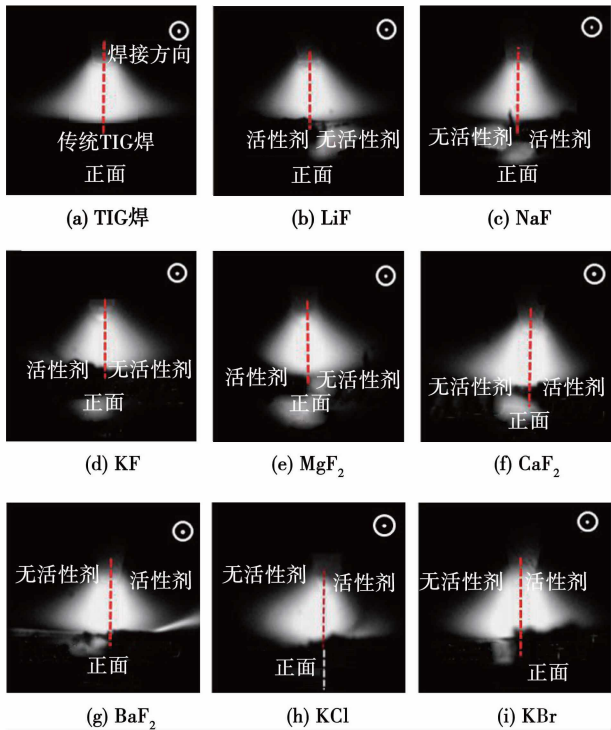


图 5 TIG 和单侧 A-TIG 焊的正面电弧形态
Fig. 5 Arc shapes of front view in TIG and A-TIG with activated fluxes applied on one side

图 5d(KF),图 5e(MgF₂)电弧稍偏向于未涂活性剂一侧,而图 4c(KF)、图 4d(MgF₂)焊缝却发生了显著偏移. 基于上述解释,这是电弧温度场和电弧形态同时受到影响而导致的结果. 图 5h(KCl)电弧显著偏向于无活性剂一侧且活性剂侧电弧体积更小,因受到电弧影响,图 5h(KCl)焊缝发生了显著偏移,这表

明 KCl 活性剂对电弧形态的影响是非常显著的.

2.3 电弧电压

电弧电压在某种程度上反映了电弧力的大小.图 6 为各试板未涂覆活性剂 TIG 焊段(图 3)的电弧平均电压值. 虽然焊接条件相同,但每块试板 TIG 焊段的平均电压值也存在着微小波动,波动范围介于 0.01 ~ 0.08 V. 说明此量级范围内的波动属于 TIG 焊的正常电压波动范围. 也就是说,添加活性剂后如果电压变化(增大或减小),在此量级范围内,可以认为该活性剂对电弧电压的影响不显著.

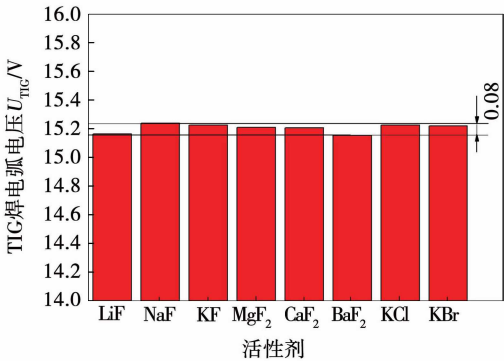


图 6 各试板未涂覆活性剂 TIG 焊段的平均电压值
Fig. 6 Arc voltage in TIG segment of each workpiece

图 7 是各单组分活性剂由 TIG 过渡到 A-TIG 焊(同一块试板)的电弧电压变化值,正值代表电压增加,负值代表电压降低. MgF₂活性剂使电压增加了 0.3 V. 电压升高有两方面的原因,一是电弧中自由电子数量的增加;二是导电通道面积的减小. MgF₂腹部电弧的膨胀和根部电弧的收缩恰好同时反映了电弧中自由电子数量的增加和导电通道面积的减小. 因此 MgF₂活性剂导致的电压升高是上述两方面原因共同作用的结果. KF, CaF₂活性剂电弧形态虽与 MgF₂类似,但 MgF₂属于二价化合物(可热电离

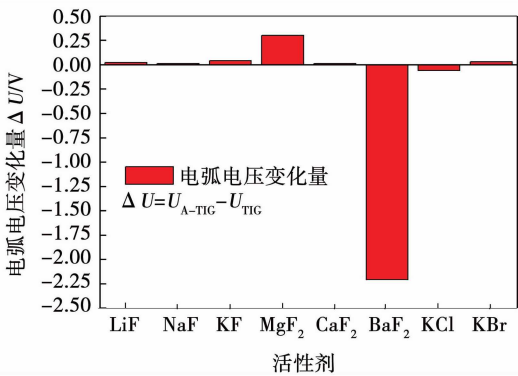


图 7 由传统 TIG 焊过渡到 A-TIG 焊时的电弧电压变化
Fig. 7 Arc voltage change from traditional TIG to A-TIG

出 2 个自由电子),因此 KF 电压升高没有 MgF_2 明显. 而 CaF_2 属于非金属化合物(金属原子比非金属原子容易电离),其电压的升高也不如 MgF_2 活性剂明显.

BaF_2 活性剂电压降低了 2.21 V,原因是根部电弧的扩张使导电通道面积增大(图 2g),电压降低. 其它活性剂电压在 +0.01 ~ +0.04 V 之间变化,结合图 6 得到的结论,可以认为这些活性剂对电弧电压的影响不显著,甚至不会影响电弧电压. 因此,这类活性剂的添加并不会改变电弧力的大小.

综上所述可知: MgF_2 活性剂能增大 A-TIG 焊电弧力,而 BaF_2 活性剂可显著降低电弧力,其它活性剂对电弧力的影响不显著.

2.4 电弧温度

试验中观察到, LiF 电弧呈现微红色, NaF 电弧为亮黄色,KF 电弧为亮白色, MgF_2 电弧为亮蓝色, CaF_2 电弧为砖红色, BaF_2 电弧为微红色,KCl 电弧为蓝色,KBr 电弧为白色. 不同活性剂能发出不同颜色的弧光,是因为活性剂金属离子在电弧高温下产生了焰色反应缘故. 其中 NaF ,KF, MgF_2 , CaF_2 , BaF_2 ,KCl 活性剂的电弧的亮度相比传统 TIG 焊更加明亮. 电弧亮度与电弧温度密切相关. 说明这些活性剂的加入,可以不同程度影响到电弧温度,进而影响到传导到熔池的热量多少.

3 结 论

(1) LiF ,KBr 活性剂不会影响 A-TIG 焊的电弧行为;KF 和 CaF_2 活性剂会显著收缩电弧,增加电弧温度,但不会影响电弧力; MgF_2 活性剂能显著收缩电弧,增加电弧温度,并能增大电弧力; BaF_2 活性剂不会影响电弧形态,但能增加电弧温度,减小电弧力; NaF ,KCl 活性剂可以不同程度地收缩电弧(但相比 KF, CaF_2 , MgF_2 收缩程度较小),并能增加电弧温度,但不会影响电弧力大小.

(2) KN 型钾盐(KF,KCl,KBr) A-TIG 焊电弧行为研究表明,氟化物对电弧行为的影响作用要大于氯化物和溴化物,A-TIG 焊接 Ti6Al4V 应优先选用氟化物作为活性剂. 对 MF 型氟盐和 MF_2 型氟盐电弧行为的研究结果表明,MF 型氟盐(LiF , NaF ,

KF)中应优先选用 KF 活性剂, MF_2 型氟盐(MgF_2 , CaF_2 , BaF_2)中应选 MgF_2 活性剂.

参考文献:

- [1] 高福祥,廖志谦,熊进辉,等. 船用钛合金焊接接头精细组织表征[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 124-128.
Gao Fuyang, Liao Zhiqian, Xiong Jinhui, *et al.* Microstructure of TIG welded joint of marine titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 124-128.
- [2] Niagaj J. The use of activating fluxes for the welding of high-alloy steels by A-TIG method[J]. Welding International, 2003, 17(4): 257-261.
- [3] Dey H C, Albert S K, Bhaduri A K, *et al.* Activated flux TIG welding of titanium[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 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] 刘凤尧,林三宝,杨春利,等. TIG 焊活性剂对焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 1-4.
Liu Fengyao, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Effect of activating fluxes on weld form in TIG welding of stainless steel and titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 1-4.
- [7] 黄 勇,樊 丁,樊清华,等. 表面活性剂对铝合金直流正接 A-TIG 焊熔深的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 60-66.
Huang Yong, Fan Ding, Fan Qinghua, *et al.* Effect of surface activating flux on welding penetration of A-TIG welding with DCSP mode of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(5): 60-66.
- [8] Lowke J J, Tanaka M, Ushio M. Mechanisms giving increased weld depth due to a flux[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(18): 3438-3445.
- [9] Leconte S, Paillard P, Chapelle P, *et al.* Effects of flux containing fluorides on TIG welding process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(2): 120-126.

作者简介: 高晓刚,男,1985 年出生,博士研究生,助理工程师. 主要从事焊接质量与控制研究. Email: nmgl025@126.com

通讯作者: 董俊慧,男,教授,博士研究生导师. Email: jhdong@imut.edu.cn