

氟化物 ATIG 焊接 Ti6Al4V 的焊缝成形和组织

高晓刚¹, 董俊慧¹, 韩旭¹, 侯继军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 150020)

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 Ti6Al4V 进行 ATIG 焊接, 焊后研究了焊缝的成形、熔深和组织。结果表明, 除 MgF₂ 焊道成形稍有曲折外, 其它活性剂 ATIG 焊接接头均成形良好、无缺陷; 氟化物能起到阻止熔池金属氧化的作用; KF 和 MF₂ 型氟盐可显著减小焊缝熔宽; 同阳离子的氟化物相比其氯化物和溴化物可显著增加 Ti6Al4V 焊缝熔深; MF 型氟盐中 KF 活性剂获得的焊缝熔深最大, MF₂ 型氟盐中 MgF₂ 活性剂获得的焊缝熔深最大, 且熔深 MgF₂ > KF; TIG 和 ATIG 的焊缝组织均为粗大的柱状晶, 活性剂 ATIG 焊可细化焊缝晶粒尺寸, 但不会对焊缝的相结构组成造成影响。

关键词: ATIG 焊; Ti6Al4V 钛合金; 成形; 熔深; 组织
中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20161026006

0 序 言

钛及其合金的密度低、强度高, 并具有优良的耐腐蚀和抗疲劳性能, 在航空航天、电力、化工等领域得到了广泛应用^[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]。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 (ATIG) 焊接技术^[3-4], 该工艺方法可显著增大焊缝熔深。

随着 ATIG 焊技术逐步被重视, 国内外学者^[5-8]先后针对镁、铝、钛和不锈钢等进行了 ATIG 焊接技术的研究, 并取得了丰硕成果。但关于熔深增加机理解释, 至今学术界无统一论: Bang 等人^[9]的研究表明, MgF₂ 在 ATIG 焊接钛时, 增加熔深效果明显, 而张兆栋等人^[10]研究镁合金 ATIG 时发现, MgF₂ 会减小焊缝熔深。而 MgF₂ 活性剂增加熔深机理在学术界是倾向于电弧收缩理论的^[9], 也就是说它仅仅影响了焊接电弧行为, 而对焊接的是何种金属关系并不大。这些无法作出进一步解释的现象表明, 对活性剂增加熔深机理的研究还有待深入。因此, 对于单组分氟化物影响 Ti6Al4V 焊缝成形、熔深和组织的基础研究工作很有必要, 不仅能为熔深增加机理的明确奠定试验基础, 也能为优秀钛合金活性剂

配方的设计提供试验指导。
文中参照元素周期表, 针对性的选择了一些离子化合物, 分别对位于 I 主族 MF 型氟盐 (LiF, NaF, KF)、II 主族 MF₂ 型氟盐 (MgF₂, CaF₂, BaF₂) 和 VII 主族 KN 型钾盐 (KF, KCl, KBr) 进行单组分活性剂 ATIG 焊接试验 (M 代表不同的阳离子, N 代表不同的阴离子), 研究了它们对 Ti6Al4V 焊缝成形、熔深、和组织的影响规律。

1 试验方法

焊接试板选用 3 mm 厚 Ti6Al4V 钛合金。试验前, 将单组分活性剂在研钵中充分研磨后与丙酮调制成糊状, 并用扁平毛刷涂覆在待焊工件表面, 以正好遮盖工件本色为宜, 涂覆宽度 40 mm, 涂覆厚度大约在 0.3 ~ 0.4 mm。选用美国米勒 Dynasty 700 型逆变极性氩弧焊机, 电源直流正接, 焊接电流设置为 110 A, 电压属于自适应参数。借助自动焊接小车控制焊接速度为 3 mm/s, 并保持钨极高度为 3 mm, 确保每次焊接过程参数一致。使用纯氩进行焊接保护, 氩气流量为 12 L/min。试验从传统 TIG 焊直接过渡到 ATIG 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。

焊后制备金相试样, 打磨、抛光和腐蚀后在基于体视学的光学显微镜对接头组织进行观察, 并用系统自带软件测量了焊缝熔深、熔宽和接头宽度。
最后采用日本理学 D/MAX-2500 型 X 射线衍射

仪对焊缝组织进行物相分析,测定了 TIG 和 ATIG 焊缝的相结构组成.

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝外观成形

图 1 为 TIG 焊和 ATIG 焊的焊缝外观成形. 总体来看,除 MgF_2 (图 1d) 焊道成形稍曲折外,其它活性剂焊缝在步入 ATIG 焊后均成形良好. 但大多数

ATIG 焊接过程存在活性剂残渣难以清理的弊端,影响焊缝美观. 可知,在 TIG 焊过渡到 ATIG 焊过程中, KF (图 1c), MgF_2 (图 1d), CaF_2 (图 1e)、 BaF_2 (图 1f) 活性剂焊缝的熔宽明显收窄,其中 MgF_2 , BaF_2 焊缝熔宽最窄, KF , CaF_2 次之. 此外,对 ATIG 焊缝和收弧坑表面的光泽度观察后发现,除 LiF (图 1a), KCl (图 1g) 和 KBr (图 1h) 焊缝,其它活性剂 ATIG 焊缝的光泽度要比传统 TIG 焊明亮,这表明活性剂的使用还能起到阻止熔池金属氧化的作用.

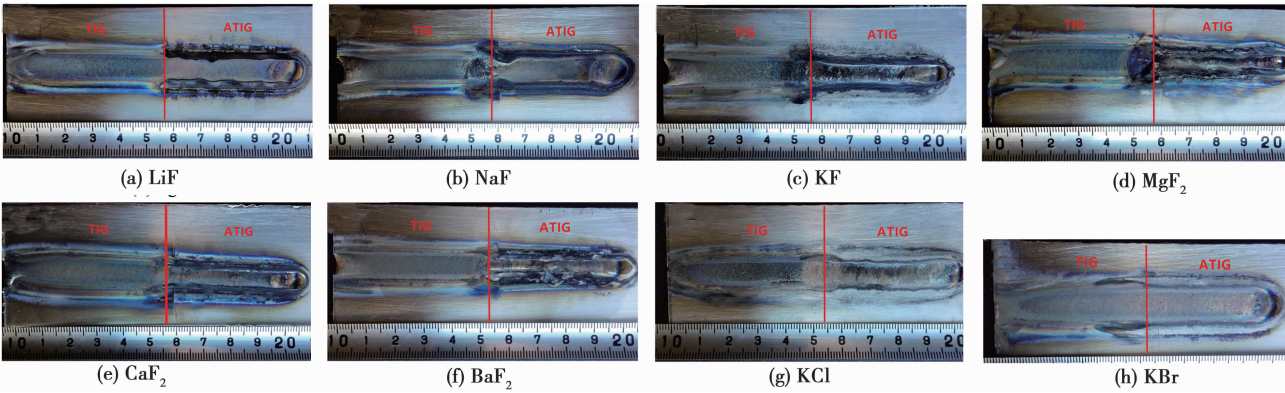


图 1 TIG 焊和 ATIG 焊焊缝外观成形
Fig. 1 Welds appearance of TIG and ATIG

图 2 为单组分活性剂从 TIG 焊过渡到 ATIG 焊焊缝熔宽变化量 ΔW ($W_{ATIG}-W_{TIG}$). 可知, MF_2 型氟盐 (MgF_2 , CaF_2 , BaF_2) 均能使焊缝熔宽减小. 其中 MgF_2 活性剂焊缝的平均熔宽仅为 3.94 mm, 减小幅度高达 47.83%. MF 型氟盐 (LiF , NaF , KF) 和 KN 型钾盐 (KF , KCl , KBr) 中除共同的 KF 外,其余活性剂焊缝的熔宽稍有所增加,但增幅都很小.

组照片的下方是焊接面,可参照图 4.

图 4 是 Ti6Al4V 焊缝熔宽 W 、熔深 D 和接头宽度 W^J 的测量位置示意图,各值可通过显微镜自带软件工具精确测得.

图 5 和图 6 分别是 TIG 和 ATIG 焊焊缝熔深和深宽比大小,其中传统 TIG 焊的熔深为 1.28 mm,深宽比为 0.16. 可知,与传统 TIG 焊相比,除 LiF , BaF_2 和 KBr 活性剂外,其它活性剂均使焊缝熔深不同程度增加. 其中 MF 型氟盐中增加熔深效果最佳的是 KF ,其熔深为 2.57 mm,深宽比为 0.41; MF_2 型氟盐中增加熔深最显著的是 MgF_2 ,其试板背面刚好焊透,熔深为 3 mm,深宽比达到 0.77;对于阳离子相同的 3 种 KN 型钾盐 (KF , KCl , KBr),熔深及深宽比大小排序为 $KF > KCl > KBr$,表明氟化物对 Ti6Al4V 焊缝熔深的影响作用要大于同阳离子的氯化物和溴化物.

图 7 为单组分活性剂从 TIG 焊过渡到 ATIG 焊焊接接头宽度变化量 ΔW^J ($W^J_{ATIG}-W^J_{TIG}$).

由图 7 可知,氟化物均使 W^J 值减小,氯化物 (KCl) 可稍微增加 W^J 值,而溴化物 (KBr) 使 W^J 值显著增大(增加量为 1.38 mm). 焊接接头宽度尺寸可直接反映出热影响区的宽窄,一定程度上也间接反映了 ATIG 焊电弧能量的集中程度,因为活性剂会影响 TIG 焊的电弧形态.

2.2 焊缝熔深

图 3 为 TIG 和 ATIG 焊焊缝宏观组织形貌,每

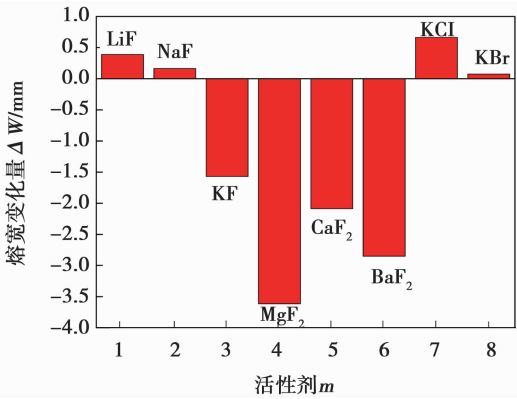


图 2 ATIG 焊焊缝熔宽变化量 ΔW
Fig. 2 Weld bead width variation (ΔW) in ATIG

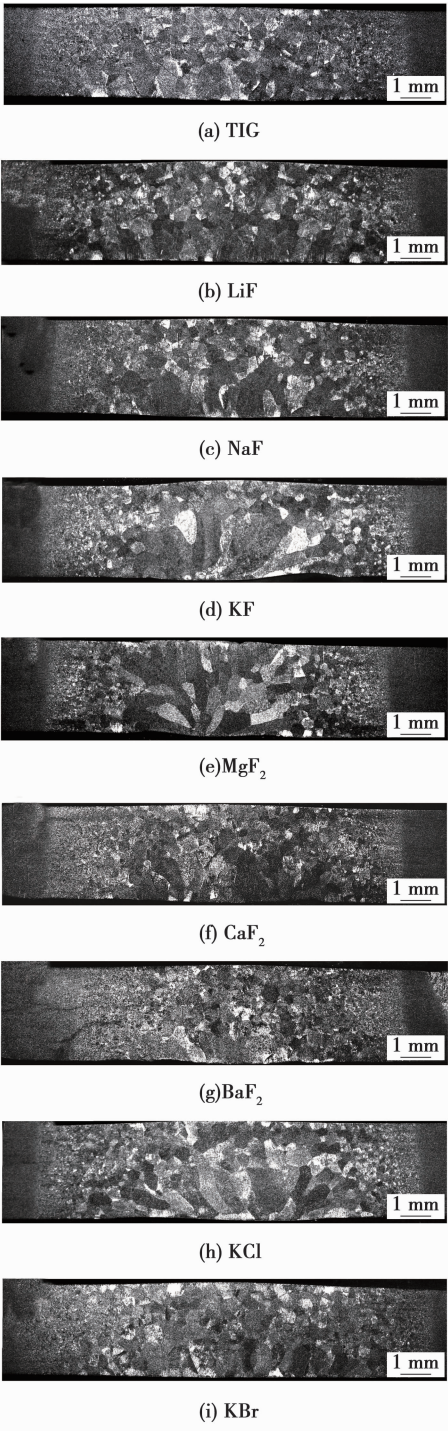


图 3 TIG 和 ATIG 焊焊缝宏观组织形貌

Fig. 3 Macrostructure of weld bead in TIG and ATIG

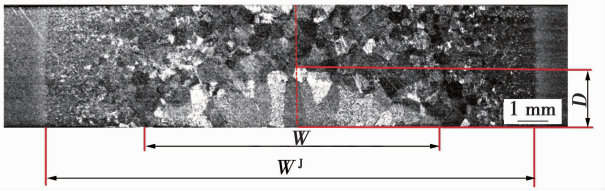


图 4 焊缝 W , D 和 W^l 测量位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of W , D and W^l measurement

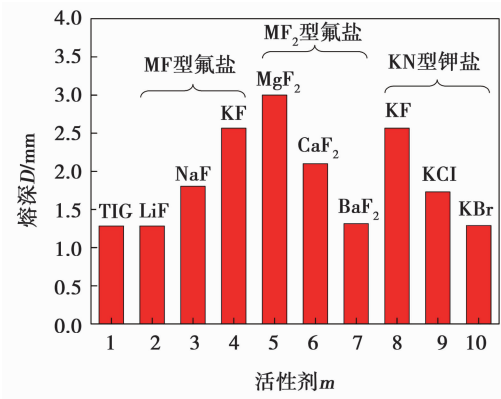


图 5 TIG 焊和 ATIG 焊焊缝熔深

Fig. 5 Penetration depth in TIG and ATIG

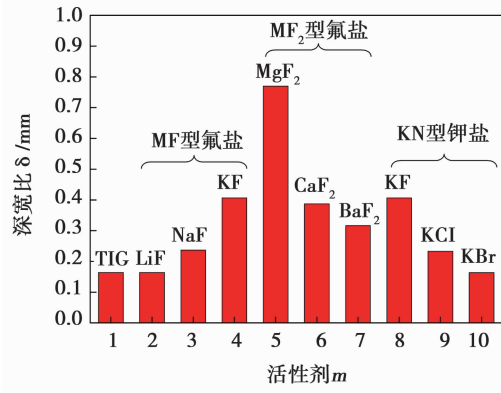


图 6 TIG 焊和 ATIG 焊焊缝深宽比

Fig. 6 Depth-to-width ratio in TIG and ATIG

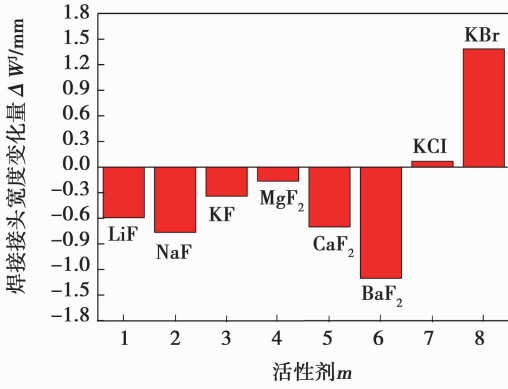


图 7 ATIG 焊焊接接头宽度变化量 ΔW^l

Fig. 7 Joint width variation (ΔW^l) in ATIG

2.3 焊缝组织

图 8 是根据图 5 的焊接接头区晶粒大小和结构特征,绘制的 Ti6Al4V 合金 TIG 和 ATIG 焊焊接接头立体宏观组织形貌示意图,并进一步将焊接接头划分为 4 个区,分别是:焊缝柱状晶区 (WM-CZ)、热影响区粗晶区 (HAZ-CGZ)、热影响区细晶区 (HAZ-FGZ) 和母材区 (BM)。

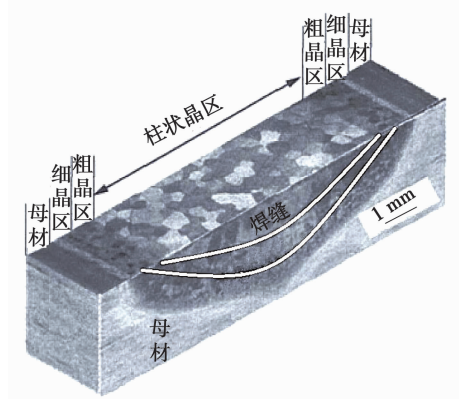


图 8 TIG 焊和 ATIG 焊立体宏观组织形貌示意图

Fig. 8 Stereoscopic macrostructure of weld bead in TIG and ATIG

结合图 3 可知, TIG 焊和 ATIG 焊焊缝组织均为粗大的柱状晶, 且焊缝组织具有联生结晶的特点, 即柱状晶是以热影响区粗晶区 (HAZ-CGZ) 的半熔化晶粒为基底沿着最大散热方向 (垂直于熔合线方向) 向焊缝中心生长。活性剂的加入, 影响了柱状晶的生长方向和尺寸, 且熔深越大, 柱状晶的宽度越小, 长度越长, 生长方向与焊缝中心轴线倾角越大。因此在一定意义上活性剂的使用可以细化焊缝晶粒尺寸 (虽然焊缝晶粒还很粗大)。

2.4 焊缝组织物相分析

图 9 是 TIG 和 ATIG (KF, MgF_2) 焊焊缝组织的 X 射线衍射图谱, 其它活性剂衍射图谱与 MgF_2 , KF 类似 (三强峰位置相同), 不同之处在于衍射峰的强度。图谱物相分析结果表明: TIG 和 ATIG 焊的焊缝组织均只有单一 α' 马氏体相, 并无 α 相和其它中间

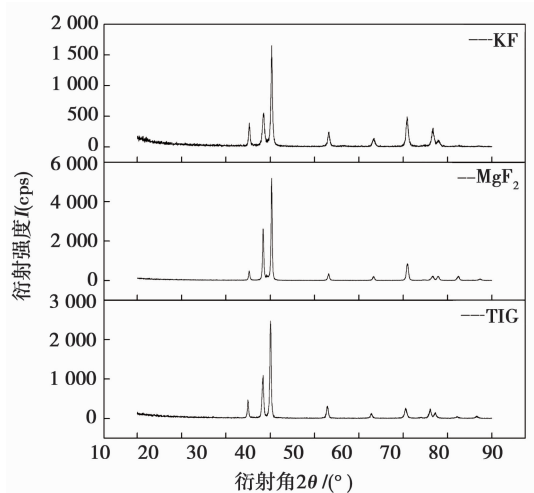


图 9 TIG 焊和 ATIG (KF, MgF_2) 焊的 X 射线衍射图谱

Fig. 9 XRD patterns in TIG and ATIG (with KF, MgF_2 fluxes)

转变相生成, 说明焊缝组织冷却过程中具有较大的过冷度, 导致高温 β 相完全、彻底地转变成了密排六方晶格的 α' 相马氏体。同时也表明活性剂的使用不会改变焊缝组织的相结构组成, 这种单相组织的存在保证了钛合金焊缝金属具有优良的力学性能。

3 结 论

(1) 除 MgF_2 焊道稍有曲折外, TIG 与其它活性剂 ATIG 焊缝均成形良好, 且多数氟化物 (除 LiF) 活性剂还能起到阻止熔池金属氧化的作用。

(2) KF 活性剂和 MF_2 (MgF_2 , CaF_2 , BaF_2) 型氟盐能显著减小焊缝熔宽, 其中 MgF_2 熔宽减小幅度高达 47.83%。

(3) 同阳离子的氟化物相比其氯化物和溴化物可显著增加焊缝熔深, MF_2 型氟盐中 KF 活性剂获得的焊缝熔深最大, MF_2 型氟盐中 MgF_2 活性剂获得的焊缝熔深最大, 且熔深 $\text{MgF}_2 > \text{KF}$ 。

(4) TIG 焊和 ATIG 焊缝组织均为粗大的柱状晶, 活性剂的使用可以细化柱状晶的晶粒尺寸, 但不会改变 Ti6Al4V 焊缝组织的相结构组成。

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: 257-261.
- [3] 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: 137-143.
- [4] 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.
- [5] Tanaka M, Shimizu T, Terasaki T, 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.
- [6] 黄 勇, 樊 丁, 张 涵. 表面活性剂对钛合金 A-TIG 焊熔深的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(10): 1586-1588.
Huang Yong, Fan Ding, Zhang Han. Effect of surface activating flux on weld penetration of A-TIG welding for titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(10): 1586-1588.

- 区韧性和组织的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(8): 69-72.
- Xu Xueli, Xin Xixian, Shi Kai, *et al.* Influence of Welding thermal cycle on toughness and microstructure in grain-coarsening region of X80 pipeline steel[J]. Transactions of the China Welding Institution 2005, 26(8): 69-72.
- [2] 高惠临, 董玉华, Hendricks R W. 超低碳 QT 钢焊接二次热循环的组织转变与局部脆化[J]. 金属学报, 2001, 37(1): 34-38.
- Gao Huilin, Dong Yuhua, Hendricks R W. Microstructure transformation and brittlement of a ultra-low carbon QT steel during double welding thermal cycle[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(1): 34-38.
- [3] Xueda Li, Xiaoping Ma, S V Subramanian *et al.* Influence welding process and parameters of Gleeble simulator thermal cycles on properties of the intercritically reheated heat affected zone of prior austenite grain size on martensite-austenite constituent[J]. Materials and Design, 2011, (32): 869-876.
- [4] Morito S, Tanaka H, Konishi R, *et al.* The morphology and crystallography of lath martensite in Fe-C alloys[J]. Acta Materialia, 2003, (51): 1789-1799.
- [5] Sadeh Moeinifar, Amir Hossein Kokabi, Hamid Reza Madaah Hosseini. Effect of tandem submerged arc and toughness in the heat affected zone of 700 MPa high strength linepipe steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2014(616): 141-147.
- [6] 赵 琳, 张旭东, 陈武柱. 800 MPa 级低合金钢焊接热影响区韧性的研究[J]. 金属学报, 2005, 41(4): 392-396.
- Zha Lin, Zhang Xudong, Chen Wuzhu. Toughness of heat-affected zone of 800 MPa grade low alloy steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(4): 392-396.
- [7] 王爱华, 彭 云, 肖红军, 等. 690 MPa 级 HSLA 钢焊缝金属的显微组织与冲击韧性[J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 6-10.
- Wang Aihua, Peng Yun, Xiao Hongjun, *et al.* Microstructure and impact property of 690 MPa level HSLA steel weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 6-10.
-
- 作者简介:** 崔 冰,女,1987 年出生,博士. 主要从事高强钢焊接材料及焊接性研究. 发表论文 7 篇. Email: m15901301877@163.com
- 通讯作者:** 彭 云,男,教授. Email: pengyun@enrcastr.com
-
- [9] Bang K S, Chirieleison G, Liu S. GTAW of titanium flux-cored wire with magnesium fluoride[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2005, 10(5): 617-623.
- [10] 张兆栋, 刘黎明, 沈 勇, 等. 镁合金的活性电弧焊接[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 912-916.
- Zhang Zhaodong, Liu Liming, Shen Yong, *et al.* Activating flux for arc welding of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 912-916.
-
- 作者简介:** 高晓刚,男,1985 年出生,博士,助理工程师. 主要从事焊接质量与控制研究. Email: nmg1025@126.com
- 通讯作者:** 董俊慧,男,教授,博士研究生导师. Email: jhdong@imut.edu.cn

[上接第 34 页]

- [7] 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.
- [8] 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. 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.