

不同氟化物对钛合金 A-TIG 焊接成形和组织的影响

高晓刚, 董俊慧, 韩旭

(内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 采用 9 种氟化物对 TC4 钛合金进行 A-TIG 焊接实验, 并利用高速摄像机和汉诺威焊接质量分析仪采集焊接过程中的电弧形态和电压信号, 对焊后焊接接头的成形参数和宏观组织进行了对比分析。结果表明: 9 种氟化物中 MgF_2 活性剂增加焊缝熔深效果最显著, 达到无活性剂时的 2 倍, KF 居次, 但 LiF 可降低焊缝熔深; 相比 MgF_2 活性剂, KF 活性剂的熔宽小, 热影响区宽度窄, 接头总宽度小; NaF 活性剂获得了最小的热影响区宽度; NaF、KF、 MgF_2 、 AlF_3 活性剂焊缝的 β 柱晶生长方向与焊缝中心轴线的倾角比其它活性剂大, 柱晶长度由熔深大小决定, 柱晶宽度尺寸排序: $AlF_3 > KF > MgF_2 > NaF$; 热影响区粗晶区晶粒大小排序: $MgF_2 > NaF > AlF_3 > KF$ 。

关键词: 钛合金; A-TIG 焊; 氟化物; 熔深; 晶粒

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)06-1638-06

钛合金因具有高强度、低密度、优良的耐蚀性能和高温抗氧化性能, 在航天航空工业、电力工业、航海、海洋工程、化工、汽车制造等领域中得到了广泛应用^[1]。传统钨极氩弧焊(TIG)焊接 TC4 钛合金过程中, 由于焊接接头的高温停留时间长, 冷却速度快, 再加上钛合金自身的导热系数小, 高温 β 相原子扩散系数大等因素, 当熔池加热温度超过 β 相变点后, 焊缝区和热影响区的晶粒长大倾向甚为显著, 因此钛合金焊接接头晶粒的粗化现象是焊接过程中的突出问题。

活性 TIG 焊简称 A-TIG 焊。活性剂的加入影响了焊接电弧行为和熔池流体的流动方式^[2], 导致焊缝熔深大幅增加。因此在不改变焊接工艺参数条件下可实现小热输入焊接, 从而细化焊接接头的晶粒和组织。此外活性剂还能起到改善接头成形, 减小焊缝熔宽, 降低热影响区宽度的作用, 对焊接接头综合性能的提高有利。目前针对钛合金 A-TIG 焊的研究, 存在氟化物活性剂一次焊接试验选择不全面; 氟化物、氧化物、氯化物混合选用所带来的试验对比结果不统一的问题, 导致从元素阳离子影响角度来解释熔深机理时证据不足。此外, 在熔深分析基础上进一步对接头晶粒变化规律的研究很少。

本研究选用常见的 9 种氟化物 LiF、NaF、KF、 MgF_2 、 CaF_2 、 BaF_2 、 MnF_2 、 ZnF_2 、 AlF_3 对 TC4 钛合金进行对接焊实验。焊接过程中实时采集电弧的形态和电弧电压值, 焊后分析了不同氟化物对 A-TIG 焊接

接头成形参数的影响规律。这对活性剂的优化、明确熔深增加机理以及对 A-TIG 焊接组织控制技术的研究具有现实指导意义。

1 实验

实验材料选用 3 mm 厚 TC4 钛合金板。实验前将 9 种分析纯的氟化物样品用丙酮分别调制成糊状溶液, 并用扁平毛刷均匀地依次涂抹在每组焊接试板上以对接方式焊接。焊机选用美国米勒 Dynasty 700 型逆变变极性氩弧焊机, 电源直流正接, 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, 并保持钨极高度为 3 mm, 每次焊接过程中的参数保持一致。使用纯氩进行保护, 设置流量为 12 L/min。利用美国 IDT 公司生产的 Red Lake Y4 高速摄像机以 3000 f/s 的帧速对焊接过程中的电弧形态进行拍摄。同时采用汉诺威焊接质量分析仪实时采集焊接电参数信号。焊后用基于体视学的光学显微镜对焊接接头的成形参数和宏观组织进行测量和分析。

通过拍摄焊接过程中各活性剂的 A-TIG 焊接电弧, 分析氟化物对电弧形态的影响; 通过记录焊接过程中的电压波形, 得到了不同氟化物 A-TIG 焊下的电弧电压值, 并进一步对电弧形态变化与电压、熔深增加间的关系进行了探讨; 通过对不同氟化物焊接接头成形参数的测量, 获得了焊缝熔深、熔宽、接头宽度、热影响区宽度尺寸, 并计算了各自深/宽比; 最后对 9 种

收稿日期: 2016-05-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51165027)

作者简介: 高晓刚, 男, 1985 年生, 博士生, 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051, 电话: 0471-6576142, E-mail: nmgl025@126.com

氟化物的 A-TIG 焊缝的 β 柱状晶长度、宽度，以及粗晶区晶粒大小进行测量分析，研究了氟化物对组织的影响规律。

2 结果及分析

2.1 不同氟化物对焊接电弧形态的影响

图 1 分别为 TIG 和 A-TIG 焊的侧面电弧形态。从图中观察到，不同氟化物 A-TIG 焊接过程中的电弧燃烧均较稳定，与传统 TIG 焊电弧形态相比，活性剂 LiF、KF、MnF₂ 的电弧收缩显著，且未观察到明显弧焰区，只有弧柱区。NaF、MgF₂、CaF₂ 活性剂电弧也出现了一定程度收缩。关于电弧收缩的机理，目前的主流观点是 A. G. Simonik 提出的电弧收缩理论^[3]。黄勇^[2]等人在此理论基础上，进一步提出，活性剂粒子的电离

(收缩电弧)与复合(膨胀电弧)作为一对矛盾体共同决定着电弧的收缩程度，关键是看哪个过程起到了主导作用。此外，NaF 活性剂电弧拖尾现象明显，MgF₂、CaF₂、BaF₂、ZnF₂ 活性剂电弧的拖尾程度与 TIG 焊基本相当，实验中还发现 MgF₂、ZnF₂、AlF₃ 活性剂电弧较 TIG 焊更加明亮。

2.2 不同氟化物对焊接电弧电压的影响

图 2 是焊接过程中实时采集到的 TIG 和 A-TIG 焊的电弧电压。由图可知，相比 TIG 焊电弧电压(14.6 V)，NaF、ZnF₂ 活性剂电压出现了明显升高，ZnF₂ 达到了最大值 16.7 V，结合其电弧形态，发现此电压下的电弧并没有显著收缩。因此推断电弧电压的变化并不完全是由电弧收缩造成的。MnF₂ 电弧电压最低，电压值为 13.9 V，其它活性剂电压值在 14.3~14.8 V 之间波

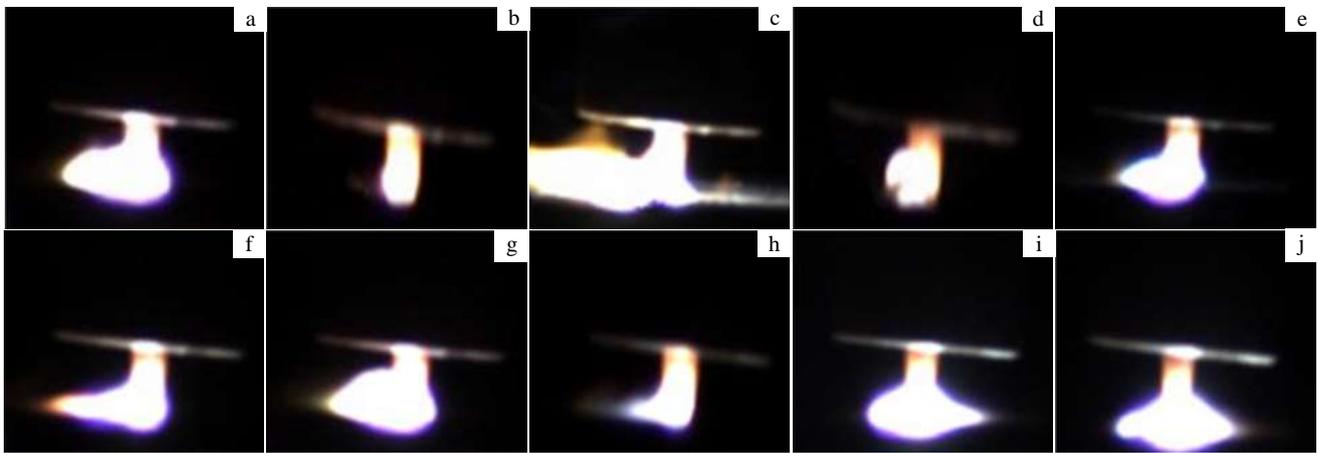


图 1 TIG 和 A-TIG 焊的侧面电弧形态

Fig.1 Arc shape of side of TIG and A-TIG: (a) no flux, (b) LiF, (c) NaF, (d) KF, (e) MgF₂, (f) CaF₂, (g) BaF₂, (h) MnF₂, (i) ZnF₂, and (j) AlF₃

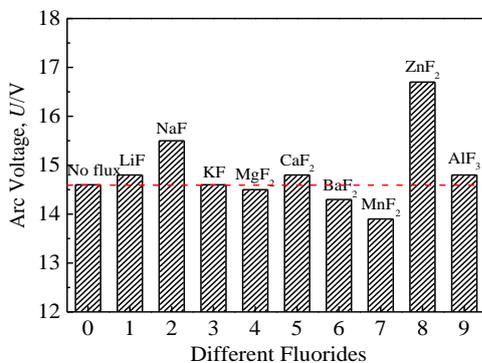


图 2 TIG 和 A-TIG 焊电弧电压

Fig.2 Arc voltage of TIG and A-TIG

动，进一步结合 LiF、KF、CaF₂、MnF₂ 活性剂电弧形态，可知明显收缩的电弧也并不一定会带来电弧电压的显著升高。综上所述：焊接过程中电压升高并不完全是电弧收缩的结果，这与黄勇等人^[4]关于电弧形态与电压变化间影响关系的解释吻合。刘凤尧等^[5]关于电弧电压升高的原因从等离子体收缩、熔池凹坑和电弧拖尾 3 方面给出总结。

2.3 不同氟化物 A-TIG 焊焊接接头外观形貌

图 3 是 TIG 和 A-TIG 焊的焊接接头外观形貌。从图中可见，10 组试板焊缝成形较好，且未发现裂纹、气孔等宏观缺陷。实验在无额外装置进行焊接保护条件下，除 ZnF₂、LiF、AlF₃ 活性剂焊缝和 TIG 焊缝表面出现了轻微氧化外，其它焊缝均为明亮白色，表明多数活性剂的使用还能起到阻止熔池金属氧化的作用。

在相同焊接参数下，MgF₂ 活性剂焊缝的鱼鳞纹明

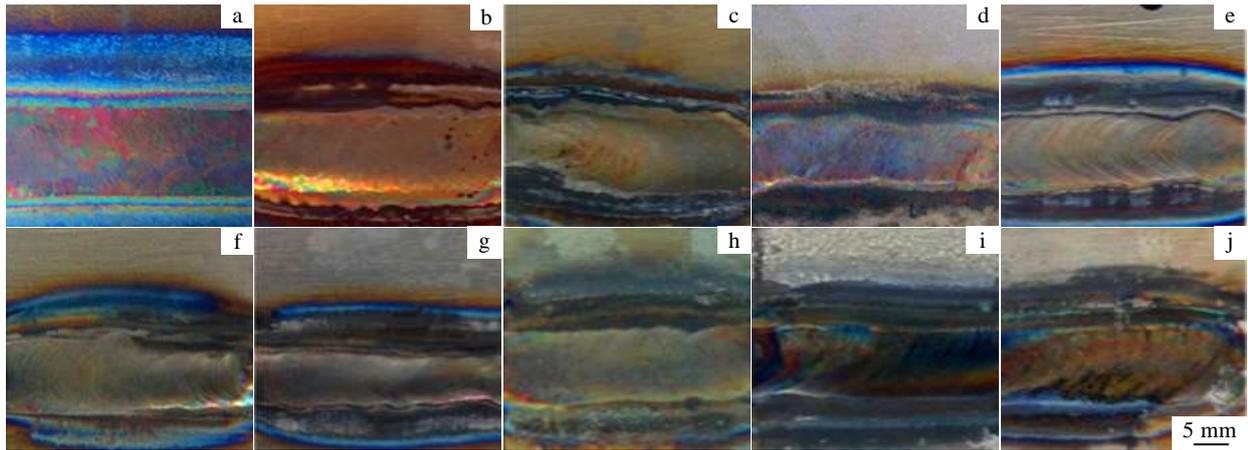


图 3 TIG 和 A-TIG 焊接接头外观形貌

Fig.3 Weld shape of TIG and A-TIG: (a) no flux, (b) LiF, (c) NaF, (d) KF, (e) MgF₂, (f) CaF₂, (g) BaF₂, (h) MnF₂, (i) ZnF₂, and (j) AlF₃

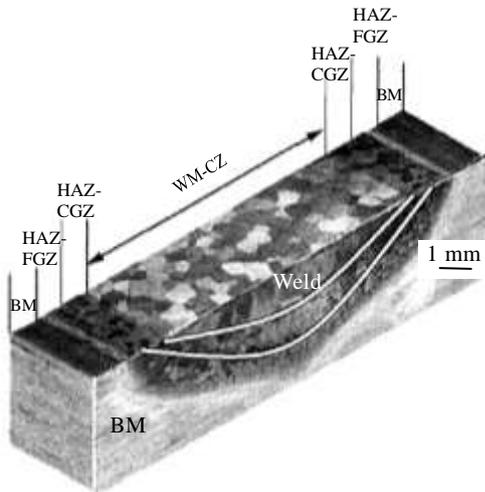


图 4 TIG 和 A-TIG 焊接接头立体宏观形貌示意图

Fig.4 Schematic macrostructure of TIG and A-TIG welded joints

显。为了后续对比焊缝熔深大小，试板均未有焊透。相比 TIG 焊，不同氟化物均不同程度地影响了焊缝熔宽，其熔宽排序为 BaF₂<KF<MgF₂<MnF₂<ZnF₂<CaF₂<NaF<LiF<AlF₃<无活性剂。此外，在未填丝情况下，ZnF₂、CaF₂、BaF₂ 活性剂焊缝出现了轻微的余高，其余均较平整，无明显凹坑。

2.4 不同氟化物对焊接接头成形参数和组织的影响

图 4 是 TC4 钛合金 TIG 和 A-TIG 焊接接头的立体宏观形貌示意图。根据接头区的晶粒大小和结构特征，并结合图 5 所示焊缝横截面形貌，可清晰地焊接接头划分为：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(BM)。

2.4.1 焊缝熔深对比

图 6 为 TIG 和 A-TIG 焊缝熔深大小的对比。从图中可知，相比 TIG 焊(熔深为 1.13 mm)，大多数氟化物均能增加钛合金焊缝熔深，其中 MgF₂ 活性剂增大熔深的效果最佳，达到了无活性剂时的 2 倍。KF 次之，熔深达到无活性剂时的 1.60 倍。NaF 和 AlF₃ 也分别达到了 1.30 倍和 1.32 倍。但 LiF 活性剂的使用可降低焊缝熔深。

进一步结合图 1 中活性剂的电弧形态，发现 LiF 活性剂虽能使焊接电弧发生收缩，但熔深并未增加反而降低。KF、MnF₂ 活性剂的电弧收缩较 MgF₂ 明显，熔深增加效果也不及 MgF₂ (熔深最大) 活性剂。严铿^[6]等人在研究铝合金 A-TIG 焊接过程中也发现这一问题的存在。此外，实验中出现的个别活性剂电弧更加明亮的现象，说明活性剂影响了焊接电弧的温度；A-TIG 焊接电压的波动，也暗示了氟化物对电弧力的影响作用。因此可进一步说明：电弧形态的改变只是增加熔深的一方面原因，另外活性剂对电弧力和电弧温度的影响也是很关键的因素，三者的共同作用决定了熔深的大小。

2.4.2 焊缝熔宽、深宽比、接头宽度和热影响区宽度对比

图 7 是 TIG 和 A-TIG 焊缝熔宽大小对比。由图知，9 种氟化物均减小了焊缝的熔宽。BaF₂ 活性剂焊缝的

熔宽最小, 但因其增加熔深效果一般, 不适合作 A-TIG 焊用活性剂。影响熔深明显的前 4 种活性剂的熔宽排序: $KF < MgF_2 < NaF < AlF_3$ 。

为接头宽度尺寸和热影响区宽度尺寸的对比。除 LiF 外, 其它活性剂焊缝的深/宽比, 较 TIG 焊均有不同程度增加。深/宽比排序靠前的 5 种活性剂为 $MgF_2 > KF$

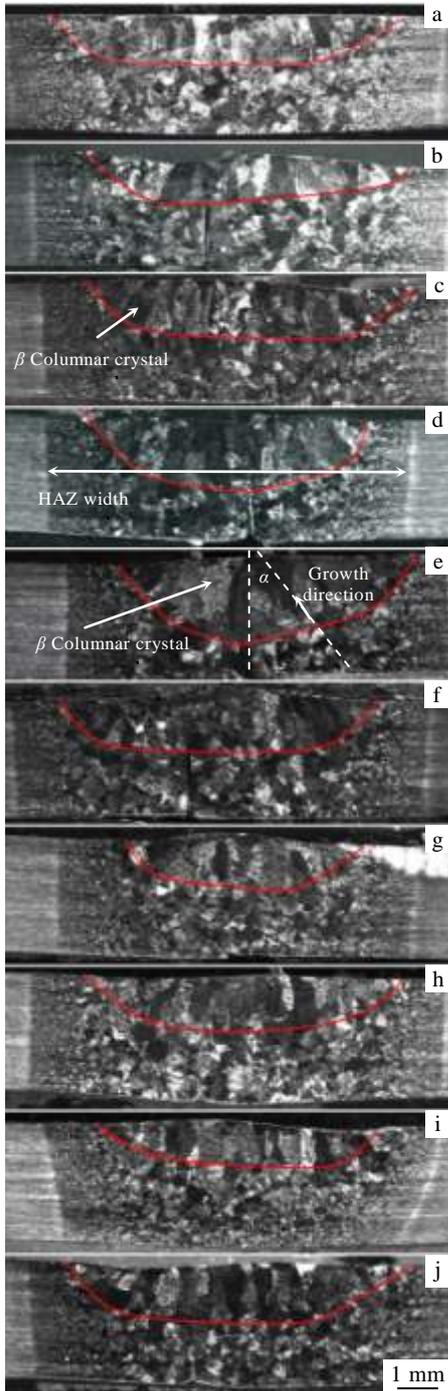


图 5 TIG 和 A-TIG 焊接接头截面宏观形貌

Fig.5 Macrostructures of cross-section of TIG and A-TIG: (a) no flux, (b) LiF , (c) NaF , (d) KF , (e) of MgF_2 , (f) CaF_2 , (g) BaF_2 , (h) MnF_2 , (i) ZnF_2 , and (j) AlF_3

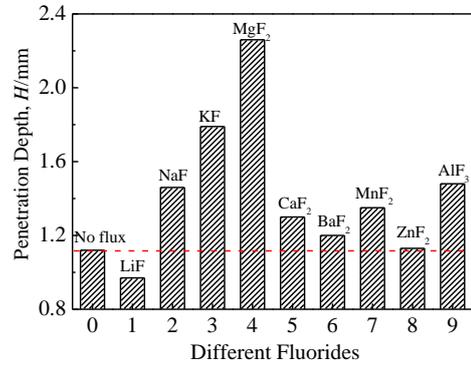


图 6 TIG和A-TIG焊缝熔深大小对比

Fig.6 Comparison of penetration depth of TIG and A-TIG

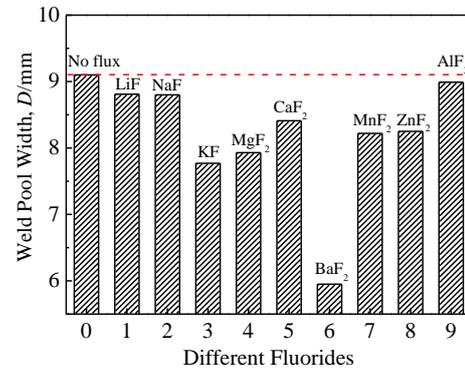


图 7 TIG 和 A-TIG 焊缝熔宽大小对比

Fig.7 Comparison of weld pool width of TIG and A-TIG

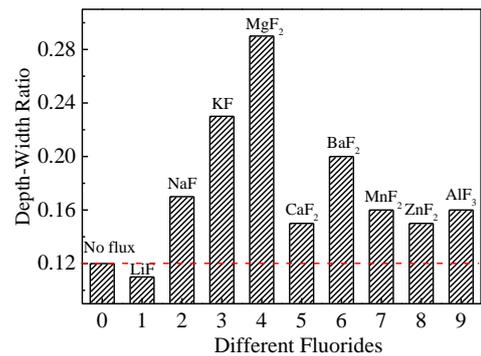


图 8 TIG和A-TIG焊缝的深/宽比

Fig.8 Depth-width ratio of TIG and A-TIG

图 8 是 TIG 和 ATIG 焊缝的深/宽比。图 9、图 10

$> BaF_2 > NaF = AlF_3$ 。其中 MgF_2 获得的深/宽比最大, KF 次之, 但 MgF_2 活性剂的热影响区宽度、接头总宽度稍逊于 KF 。 BaF_2 虽以最小的熔宽获得了不错的深

宽比和接头总宽度，但依旧存在熔深小、热影响区宽等问题，效果不理想。活性剂 NaF 的热影响区最小，AlF₃ 的接头宽度最大。

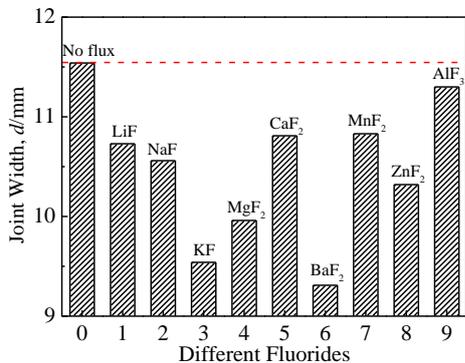


图 9 TIG和A-TIG焊接接头宽度对比

Fig.9 Comparison of joint width of TIG and A-TIG

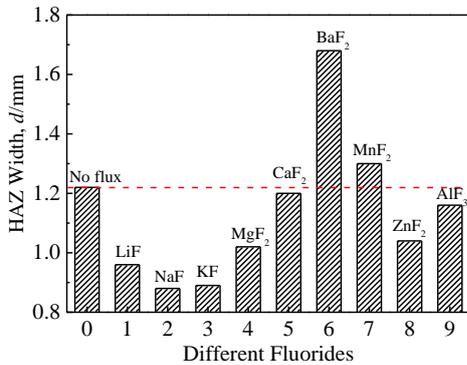


图 10 TIG和A-TIG热影响区宽度对比

Fig.10 Comparison of HAZ width using TIG and A-TIG

2.4.3 焊缝区晶粒尺寸

从图 5 来看，不同氟化物的 A-TIG 焊缝组织均为粗大的 β 柱状晶。但 β 柱晶的生长方向、长度和宽度有所差异，表明活性剂影响了熔池的结晶过程。通常 β 柱晶是以母材的半熔化晶粒为基底通过联生结晶向外生长而成，生长方向沿着最大散热方向进行。由图知，β 柱状晶沿着垂直于熔合线的方向保持着平行生长，其中 LiF、CaF₂、MnF₂、ZnF₂ 活性剂的 β 柱晶生长方向与焊缝中心轴线的倾角小，几乎垂直地向焊缝表面生长，AlF₃、NaF、KF、MgF₂、BaF₂ 活性剂柱晶的生长方向与焊缝中心轴线倾角大，由熔合线向焊缝中心相对生长。柱状晶的长度尺寸由熔深大小决定，宽度可通过截线法测得，各活性剂焊缝柱状晶的宽度排序为：LiF>AlF₃>MnF₂>KF>ZnF₂>MgF₂>BaF₂

>NaF>CaF₂。

2.4.4 热影响区粗晶区晶粒尺寸

钛合金导热系数小，β 相原子扩散系数大，对于加热温度超过相变点的热影响区晶粒长大倾向显著。文献[7]表明，钛合金焊接接头力学性能试验的断裂位置大多在热影响区粗晶区，因此粗晶区晶粒尺寸的大小决定了焊接接头质量的优劣。粗晶区出现的原因归结于焊缝柱状晶形成过程中释放的大量结晶潜热，从而在熔合线附近的热影响区产生一个较大的温度梯度，造成晶粒的粗化。图 5 中粗晶区晶粒大小排序：MnF₂>LiF>MgF₂>BaF₂>CaF₂>ZnF₂>NaF>AlF₃>KF。对熔深排序靠前的 4 种活性剂(KF、NaF、MgF₂、AlF₃)进行晶粒尺寸分析：MgF₂ 虽熔深大，但相比 KF、NaF、AlF₃ 的粗晶区晶粒要粗大，KF 的粗晶区晶粒最小，NaF、AlF₃ 次之。

3 结 论

- 1) 电弧形态的改变只是增加熔深的一方面原因，活性剂对电弧力和电弧温度的影响也是关键因素。
- 2) 除 LiF 外，其余氟化物均可不同程度地增加焊缝熔深，其中 MgF₂ 活性剂增加焊缝熔深效果最显著，达到了无活性剂时的 2 倍，KF 次之。
- 3) 相比 MgF₂ 活性剂，KF 活性剂的熔宽小，热影响区宽度窄，接头总宽度小。氟化物中 NaF 活性剂获得的热影响区宽度最小。
- 4) NaF、KF、MgF₂、AlF₃ 活性剂焊缝的 β 柱晶生长方向与焊缝中心轴线倾角比其它活性剂的大，柱晶长度由熔深决定，宽度尺寸排序：AlF₃>KF>MgF₂>NaF。
- 5) 热影响区粗晶区晶粒大小排序为 MgF₂>NaF>AlF₃>KF，MgF₂ 熔深虽大，但其粗晶区晶粒也较粗大，KF 活性剂的粗晶区晶粒最小，NaF、AlF₃ 次之。

参考文献 References

[1] Meng Longhui(孟龙晖), Yang Yinfei(杨吟飞), He Ning(何宁). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(3): 617

[2] Huang Yong(黄勇), Fan Ding(樊丁), Zhang Han(张涵). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(10): 1587

[3] Zhang Ruihua(张瑞华), Yin Yan(尹燕), Mizitani(水谷正海) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2009, 45(3): 115

[4] Huang Yong(黄勇), Fan Ding(樊丁), Fan Qinghua(樊清华).

- Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2004, 25(5): 62
- [5] Liu Fengyao(刘凤尧), Yang Chunli(杨春利), Lin Sanbao(林三宝) *et al. Acta Metallurgica Sinica* (金属学报)[J], 2003, 39(6): 664
- [6] Yan Keng(严 铿), Gao Lihua(高莉华), Yang Gang(杨 刚) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2013, 34(2): 57
- [7] Wu Wei(吴 巍), Gao Hongming(高洪明), Wu Lin(吴 林). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2008, 29(1): 64

Effect of Different Fluorides on Weld Formation and Microstructure in A-TIG Welding of Titanium Alloy

Gao Xiaogang, Dong Junhui, Han Xu

(Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Nine kinds of fluorides were used for A-TIG welding of titanium alloy. Welding arc shape and electrical signals were collected by the high-speed cameras and Hannover analyser in the process. After welding, macrostructure of the welded joint was analyzed. The results show that MgF_2 has an apparent effect in increasing the weld penetration, which is 2 times the depth of weld without flux. KF is in the second place. But, LiF could decrease the weld penetration. Compared with MgF_2 , KF has a small weld width, narrow HAZ width and total joint width. NaF obtains the minimum HAZ width. The angle of NaF, KF, MgF_2 and AlF_3 between columnar crystal growth direction and weld center axis is bigger than that of other fluorides. The length of the column crystal size is determined by the size of penetration, the width variation law is $AlF_3 > KF > MgF_2 > NaF$ and the grain size of coarse grain area in HAZ is $MgF_2 > NaF > AlF_3 > KF$.

Key words: titanium alloy; A-TIG welding; fluoride; penetration; grain

Corresponding author: Dong Junhui, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China, Tel: 0086-471-6576142, E-mail: jhdong@imut.edu.cn