Î¬ÆÖ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

第 23 卷 第 1 期
2 0 0 2 年 2 月

焊 接 学 报
TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION

Vol. 23 No. 1
February 2002

TIG 焊活性剂对焊缝成形的影响

刘凤尧， 林三宝， 杨春利， 吴 林

（哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室，哈尔滨 150001）

摘 要： 活性化焊接（A－TIG 焊）在 90 年代末期受到国外的高度重视，同传统的 TIG 焊（钨极惰性气体保护电弧焊）相比，在相同的规范下活性化焊接能够大幅度地提高生产率，降低生产成本。本文针对不锈钢和钛合金材料，研究了在 A－TIG 焊中单一成分的活性剂和涂敷量对焊缝成形的影响。试验结果表明，与无活性剂的焊缝相比，活性剂 CaF_2、SiO_2、NaF、Cr_2O_3 和 TiO_2 都能够有效地增加不锈钢和钛合金焊缝的熔深，随着涂敷量的增加，焊缝熔深也相应的增加，熔宽减小。但涂敷有 CaF_2 活性剂的不锈钢焊缝成形不好，涂敷有 Cr_2O_3 的钛合金焊缝正面熔宽没有明显的变化。在不锈钢焊接中，活性剂 SiO_2 的作用效果最好；而钛合金的焊接中 CaF_2 的作用效果最好。电弧收缩和熔池表面张力的变化是活性剂增加熔深的主要原因。

关键词： 活性化 TIG 焊；活性剂；焊缝成形；熔深；熔宽

中图分类号： TG444 **文献标识码：** A **文章编号：** 0253－360X(2002)01－01－04

刘凤尧

0 序 言

TIG 焊在生产中已经得到广泛的应用，它可以获得优质焊缝，常用来焊接有色金属、不锈钢、超高强度钢等材料。但是 TIG 焊存在熔深浅（≤3 mm）、焊接效率低等缺点，对于厚板需要开坡口进行多道焊。增大焊接电流虽然能使熔深增加，但熔宽和熔池体积增加的幅度要远大于熔深的增加幅度。

活性化 TIG 焊方法近年来引起了世界范围内的重视。该方法最早是由乌克兰巴顿焊接研究所（PWI）在 60 年代研制[1]，但是直到 90 年代末期欧美国家的研究机构（如爱迪生焊接研究所（EWI）和英国焊接研究所（TWI）等）才开展广泛的研究[2]，其中 EWI 开发的焊剂已经在海军造船业中使用[3]。这种技术是在焊前将焊缝表面涂敷上一层活性焊剂（简称活性剂），在相同的焊接规范下，同常规的 TIG 焊相比，可以大幅度地提高熔深（最大可达 300%）。对于 8 mm 的厚板焊接可以不开坡口一次获得较大的熔深或一次焊透，对于薄板可以在不改变焊接速度的情况下减小焊接热输入[4]。目前 A－TIG 焊可以用于焊接不锈钢、碳钢、镍基合金和钛合金等材料。同传统的 TIG 焊相比，A－TIG 焊，可以大大地提高生产率，降低生产成本，同时还可以减小焊接变形，具有非常重要的应用前景[5]。

A－TIG 焊关键的因素在于活性剂成分的选配。目前常用的活性剂成分主要有氧化物、氯化物和氟化物，不同的材料，其适用的活性剂成分不同。但是由于这种技术的重要性，活性剂的成分和配方在 PWI 和 EWI 都有专利限制，公开出版物上很少报道。目前对 A－TIG 焊的研究主要集中在活性剂作用机理的研究和活性化焊接应用技术的研究两个方面。

本文主要针对不锈钢材料和钛合金材料，试验研究不同活性剂和活性剂涂敷量对焊缝成形的影响，为后续确定这些材料所适用的最佳活性剂奠定基础。

1 试验方法

1.1 活性剂种类的选择

目前国内外开发并使用的活性剂主要有三种类型：氧化物、氟化物和氯化物。早期由 PWI 研制的用于钛合金焊接的活性剂以氧化物和氟化物为主，但是氯化物的毒性大，不利于推广和应用。目前国外焊接不锈钢、碳钢等所使用的活性剂以氧化物为主，而对于钛合金材料的焊接其活性剂中含有一定的氟化物成分。因此本文主要选择了单一成分的氧化物（SiO_2、Cr_2O_3 和 TiO_2）和氟化物（CaF_2 和 NaF）作为活性剂，分别研究活性剂涂敷量对焊缝成形的影响。

收稿日期：2001－08－16

基金项目：黑龙江省留学回国基金资助项目（LC01C14）；现代焊接生产技术国家重点实验室开放基金资助项目

Î¬ÆÖ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

1.2 试验方法

150 mm × 50 mm × 6 mm平板堆焊，材料 0Cr18Ni9 不锈钢和 TC4（Ti6Al4V）钛合金，钛合金试件的厚度为 2 mm。焊接不锈钢的规范参数见表 1，钛合金焊接的规范参数见表 2。为了保证试验结果的准确性与 TIG 和 A－TIG 的可比性，在每条焊缝焊接之前，均重新研磨电极呈标准形状，调整电弧至标准长度，保证每条焊缝均在同一规范条件下焊接。

试验时，分别将A-SiO_2、B-NaF、C-Cr_2O_3、D-TiO_2和E-CaF_2等五种活化剂粉末，用丙酮调和成溶液，然后用扁平毛刷均匀地涂敷在五种各 6 块共 31 块试板上，但涂层厚度各不相同。待丙酮完全挥发后，将长 150 mm 的试板均划分成 90 mm 与 60 mm 两区，其中 60 mm 区域上的活化剂擦拭到滤纸上，通过电子分析天平（精度为 0.01 mg）测量并计算出每块试板单位面积活化剂的涂敷量，列入表 3 和表 4 中。

表 1 焊接不锈钢的规范参数

Table 1 Welding parameters used in welding stainless steel

Welding Current I/A	Welding speed v_w/(mm · min^{-1})	Flow rate of argon q_v/(L · min^{-1})	Arc length L/mm	Electrode diameter D/mm	Electrode tip angle θ(°)
200	200	15	3	3.2	60

表 2 焊接钛合金的规范参数

Table 2 Welding parameters used in welding titanium alloy

Welding current I/A	Welding speed v_w/(mm · min^{-1})	Flow rate of argon q_v/(L · min^{-1})	Arc length L/mm	Electrode diameter D/mm	Electrode tip angle θ/(°)
100	200	15	2	3.2	60

表 3 不锈钢焊接时活性剂的涂敷量

Table 3 The coating quantity of fluxes in welding stainless steel

Flux composition	Coating quantity ρ_A/(mg · cm^{-2})		
	1	2	3
A-SiO_2	0.38	0.51	3.02
B-NaF	0.18	0.46	1.24
C-Cr_2O_3	1.56	1.78	2.72
D-TiO_2	0.93	1.50	3.73
E-CaF_2	1.20	2.91	6.08

表 4 钛合金焊接时活性剂的涂敷量

Table 4 The coating quantity of fluxes in welding titanium alloy

Flux composition	Coating quantity ρ_A/(mg · cm^{-2})
H1-SiO_2	3.61
H2-NaF	3.42
H3-Cr_2O_3	3.50
H4-TiO_2	3.56
H5-CaF_2	3.45

2 试验结果

2.1 单一成分的活性剂对不锈钢焊缝成形的影响

图 1 给出了五种单一成分的活性剂涂敷量对焊缝成形影响的照片。图中的焊接方向从左到右，白线左边没有涂敷活性剂，白线右边涂敷了活性剂。从不同种类活性剂以及活性剂涂敷量不同时，所形成的焊缝成形可以看到下列情况。

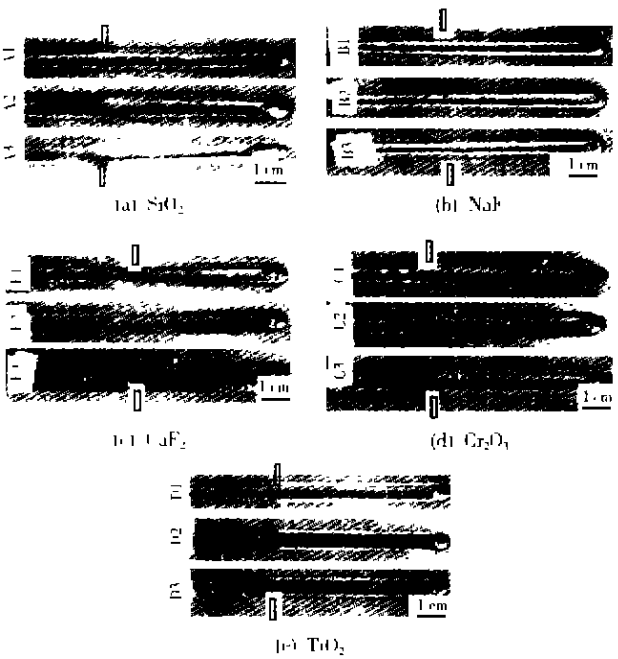

图 1 不同种类活性剂涂敷量对焊缝成形的影响

Fig. 1 Effect of flux coating quantity on weld form

（1）对于涂敷了 SiO_2 活性剂的焊缝，随着 SiO_2 涂敷量的增加，焊道宽度逐渐变窄，弧坑变长变窄变深。焊道后部余高变高，在涂敷活性剂和未涂敷活

Î¬ÆÖ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

性剂的交接处，焊道金属堆积多，在所有活性剂中，SiO_2 对焊缝成形作用效果最大。

（2）活性剂 NaF、Cr_2O_3 对焊道成形的影响不明显。随着涂敷量的增加，焊缝宽度变化并不大，弧坑也没有明显变化。与无活性剂的焊缝相比，焊道宽度也没有明显的变化，但弧坑比无活性剂的要大。

（3）随着 TiO_2 涂敷量的增加，焊道外观变化不大，弧坑没有明显变化，与无活性剂时相似。但所形成的焊缝表面比较平整规则，没有出现咬边现象，比无活性剂的焊道成形要好。

（4）活性剂 CaF_2 对焊道成形影响较大。随着 CaF_2 涂敷量的增加，焊缝成形变差，弧坑变化不大，焊缝宽度变化不大。但随着 CaF_2 量的增加出现咬边等缺陷。

（5）对熔深的影响上，与无活性剂相比，上述五种活性剂都能够增加焊缝的熔深，而且随着涂敷量的增加，熔深也相应的增加。但是当涂敷量达到一定值时，熔深增加达到饱和，再增加涂敷量，熔深反而下降。如图 2 所示。

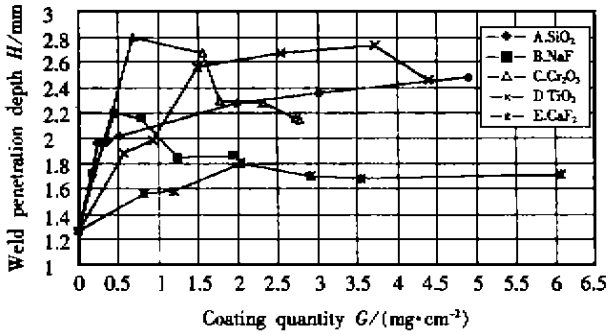

图 2　活性剂涂敷量对焊缝熔深的影响

Fig. 2　Effect of coating quantity of flux on weld penetration depth

2.2　单一成分的活性剂对钛合金焊缝成形的影响

图 3 给出了 2 mm 厚度 TC4 钛合金表面堆焊中使用活性剂的作用效果。为了便于对比，试验中选择各活性剂的涂敷量相近，并且都能对焊缝形成完全熔透。从图 3 中可以看出，在焊接钛板时，活性剂 CaF_2、NaF、SiO_2 和 TiO_2 对熔深和熔宽的影响都比较大。未涂敷活性剂区域中的焊道，只有正面产生了较宽的熔化，背面未见明显熔化；而涂敷活性剂的焊缝，在正面有合适的熔宽的同时，背面亦得到完全熔透，正反面状态良好。焊道的宽度比无活性剂的窄。

涂有表面活性剂 Cr_2O_3 的区域虽然同无活性剂的焊缝相比熔深增加，但是正面宽度几乎没变化，而且焊缝中心区凹陷，容易出现的咬边现象。

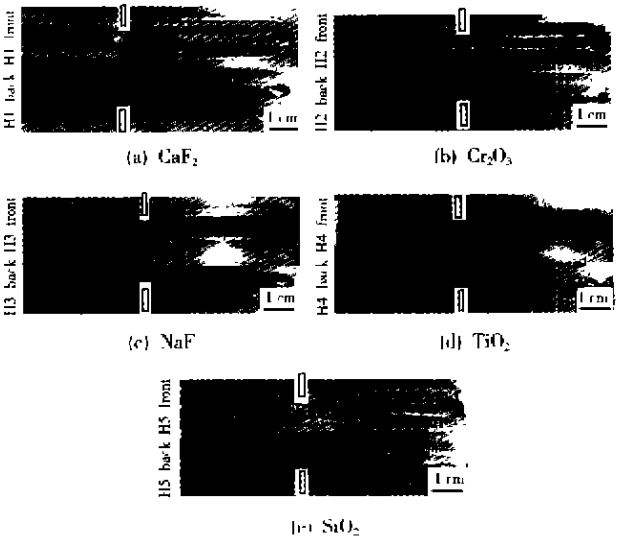

图 3　活性剂涂敷量对钛合金焊缝成形的影响

Fig. 3　Effect of flux coating quantity on titanium weld form

3　讨　　论

到目前为止，人们认为“电弧收缩”和“熔池表面张力变化”是 A－TIG 焊接中导致熔深增加的两个主要原因[6-8]。

3.1　电弧收缩机理

对熔深增加的“电弧收缩”理论认为，活性剂在电弧高温下蒸发后以原子形态包围在电弧周边区域，由于电弧周边区域温度较低，活性剂蒸发原子捕捉该区域中的电子形成负离子并散失到周围空间，使电弧中的电子数呈现减少趋势，电弧导电性能减弱，其最终结果造成电弧自动产生收缩，热量集中、电弧力集中，从而使焊接熔深增加。然而到目前为止，有关电弧中的负离子存在问题尚没有确切的测得。

一项试验观察结果发现，在熔池中添加硫化物、氯化物、氧化物后，熔池上的阳极斑点出现明显收缩，如图 4 所示，同时产生较大的熔深。综合试验现象及分析结果认为，添加活性元素后，熔池产生的金属蒸气受到抑制，由于金属蒸气更容易被电离，在金

图 4　活性元素存在时的电弧阳极斑点区域收缩

Fig. 4　Arc constricting in anode spot when activating flux exists

Î¬ÆÖ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

属蒸气较少的情况下，只能形成较小范围的阳极斑点，电弧导电通道紧缩，在激活了熔池内部电磁对流的同时，熔池表面的等离子对流受到减弱，从而形成较大的焊接熔深。

在电弧中负离子存在没有得到证实的情况下，由于阳极斑点变化已经得到了更多的证实，并且与焊接实际效果符合，应该从"电弧收缩"角度解释熔深增加是正确观点。

3.2 "表面张力变化"影响机理

焊接工作者对熔池表面张力持续进行了广泛而深入的研究，在活性化焊接中，其基本观点认为，熔池金属流动状态对所形成的熔深起到相当大的作用，普通焊接金属熔化状态下其表面张力具有负的温度系数，这种情况下，熔池表面形成从熔池中心区域向熔池周边的表面张力流，所得到的熔深较浅；当熔池金属中存在某种微量元素（含量达到一定数值以上）或接触到活性气氛时，熔池液态金属的表面张力数值降低并且转变为正的温度系数，从而使熔池金属形成从熔池周边向着熔池中心区的表面张力流，熔池中心区的电弧热量通过液态金属的流动直接传向熔池底部，使熔池底部的加热效率提高，从而形成更大的熔深。上述两种情况对焊接熔深的影响如图 5 所示。

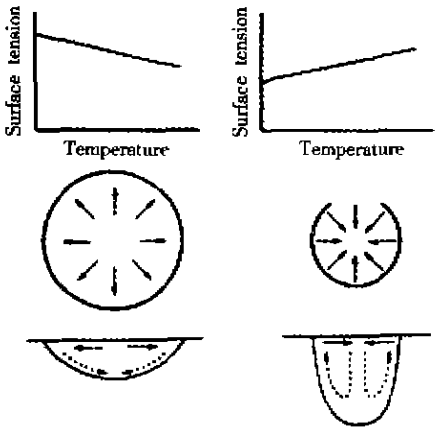

图 5 熔池表面张力分布与熔池液态金属流动的关系

Fig.5 Relation between surface tension distribution and liquid metal flow of molten pool

O、Si 等是很强的表面活性元素，可使熔池具有正的表面张力温度梯度，F、Cr、Si 以及其它金属蒸气可使电弧收缩。上述两个原因的共同作用使焊缝的熔深得到大幅度的增加。活性剂中各元素的含量不同，作用效果不同，所得到最大熔深也不同。

作者所做的研究也证实了电弧收缩和熔池表面张力变化的共同作用是活性剂增加熔深的主要原因[9,10]。

4 结 论

（1）在对 0Cr18Ni9 不锈钢堆焊试验中，所使用的活性剂 CaF_2、SiO_2、NaF、Cr_2O_3 和 TiO_2 都能够增加焊缝的熔深。与无活性剂的焊缝相比，随着活性剂涂敷量的增加，熔深相应增加，熔宽减小。但活性剂 CaF_2 的焊缝成形较差。

（2）焊接钛合金时，与无活性剂的焊缝相比，施加了活性剂 CaF_2、NaF、SiO_2 和 TiO_2 的焊缝正反面成形好，熔深增加较为明显。施加了活性剂 Cr_2O_3 的焊缝虽然熔深有所增加，但是正面宽度没有变化，容易出现咬边现象。

（3）电弧收缩和熔池表面张力的变化是活性剂增加熔深的主要原因。

参考文献：

[1] Gurevich S M, Zamakov V N. Some characteristic features of the welding of titanium with a non-consumable electrode using fluxes [J]. Avt. Svarka, 1966, 8(12): 13 ~ 16.

[2] Lucas W, Howse D. Activating flux – increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes [J]. Welding and Metal Fabrication, 1996, 64(1): 11 ~ 17.

[3] Paskell T, Lundin C. GTAW flux increases weld joint penetration [J]. Welding Journal, 1997, 76(4): 57 ~ 62.

[4] Paton B E. The weldability of steels that have been refined by remelting [J]. Automatic Welding, 1974, 27(6): 1 ~ 4.

[5] Heiple C R, Roper J R. Mechanism for minor element effect on TIG fusion zone geometry [J]. Welding Journal, 1982, 61(4): 97s ~ 102s.

[6] Takeuchi Y, Takagi R, Shinoda T. Effect of bismuth on weld joint penetration in austenitic stainless steel [J]. Welding Journal, 1992, 71(8): 283s ~ 289s.

[7] 黄地尚義，三宅厚司，田村雅貴ら. アーク溶接現象に及ぼす微量元素の影響 [J]. 溶接学会論文集，1990，8(1)：54 ~ 58.

[8] Mechev V S. Mechanism of contraction of the welding arc in the presence of electronegative particles [J]. Welding International, 1993, 7(2): 154 ~ 156.

[9] 杨春利，牛尾诚夫，田中学. 表面活性剂对 TIG 焊电弧现象及焊接熔深的影响 [J]. 机械工程学报，2000，36(12)：43 ~ 46.

[10] 杨春利，牛尾诚夫，田中学. TIG 焊熔池表面张力的测定及表面活性剂的影响 [J]. 机械工程学报，2000，36(10)：59 ~ 63.

作者简介： 刘凤尧，男，1972 年出生，博士研究生。主要从事活性化焊接机理和应用技术的研究。发表论文 4 篇。

Email： liufengyao@0451.com

（编辑：董卫国）