活性化 TIG 焊接技术的研究与应用

贺晓娜，童彦刚，郭彦兵

（重庆大学 材料科学与工程学院，重庆 400030）

摘　要：活性化 TIG(A-TIG)与传统 TIG 相比，可显著增加焊接熔深，改善焊缝成形，降低焊接热输入，从而显著提高焊接接头质量。本文对活性剂提高 TIG 熔深的机理进行了探讨，重点介绍了“电弧收缩理论”和“表面张力温度梯度改变理论”两种熔深增加机理以及在不同焊接方法、焊接材料和活性剂成分等条件下两种机理的各自作用与表现。

关键词：活性剂；A-TIG；熔深

中图分类号：TG444⁺.74　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-3814(2010)17-0155-04

Research and Application of TIG with Active Flux

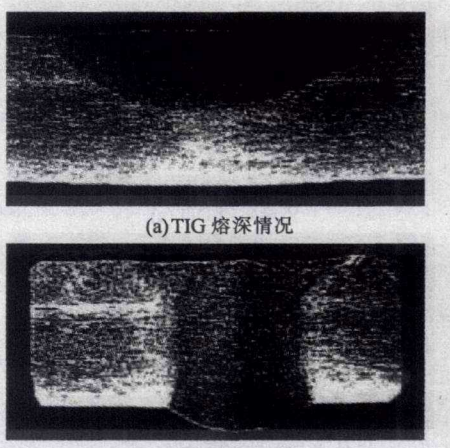
HE Xiaona, TONG Yangang, GUO Yanbing

(*College of Material Science and Technology, Chongqing University, Chongqing* 400030, *China*)

Abstract: Compared with conventional TIG, the TIG with active agent (A-TIG) can significantly improve weld penetration, performance, reduce heat input and improve the quality of welded joints. The mechanism that activate agent can increase A-TIG weld penetration was discussed and two kinds of theories: "the theory of arc contraction" and "the theory of changes in surface tension temperature gradient" were introduced. The respective roles and performance of the two mechanisms in the different conditions, such as different welding methods, welding materials and ingredients of active agents, were introduced.

Key words: active flux; A-TIG; welding penetration

常规 TIG 可用来焊接金属薄板，并且可形成高质量、具有良好背面成形的焊道；可用于焊接有色金属、不锈钢、超高强度钢等金属。但是常规的 TIG 单道熔深浅，成本高，效率低，从而限制了 TIG 的应用范围。20 世纪 60 年代出现的活性化 TIG(A-TIG)可以在保持 TIG 焊各种优点的前提下，进一步增加焊接熔深(如图 1 所示)、减小焊接变形、消除焊缝气孔、节约能源、提高生产效率等[1]。因此 A-TIG 得到了迅速发展和广泛应用。



(a) TIG 熔深情况

(b) A-TIG 熔深情况

图 1　TIG 与 A-TIG 熔深情况对比

Fig.1　The contrast of penetration between TIG and A-TIG

1　A-TIG 焊接技术的发展

1.1　A-TIG 国外研究状况

20 世纪 60 年代中期，前苏联的研究发现，一些卤化物的存在能造成电弧收缩，增加焊接熔深。随后，氧化物和氟化物组成的活性剂被广泛用于焊接不锈钢。在采用直边坡口不加丝的情况下，可获得单道熔深 8～10mm 的焊缝[2]。20 世纪 90 年代，活性剂在焊接碳锰钢、低合金钢方面获得巨大成功，并最终发展成 A-TIG 焊接技术。在进行钢板对接时，利用 A-TIG 技术所形成的单面焊双面成形焊缝独具特点，焊缝上下表面较宽，焊缝中部较窄，其树枝晶方向几乎与双面焊效果等同[3]。

1993 年美国爱迪生焊接研究所(EWI)与海军连接中心(NJC)开始开发不锈钢、碳钢、镍基合金及钛合金的氩弧焊用焊剂[4]。其中不锈钢与碳钢氩弧焊用焊剂分项目的研究分项目已于 1998 年基本完

收稿日期：2010-03-15

作者简介：贺晓娜(1984－)，女，山西临汾人，工学硕士；

电话：13594695254；E-mail：125422730@qq.com

成，所开发的不锈钢与碳钢用的氩弧焊用焊剂已经投入工业应用，不锈钢用氩弧焊用焊剂 SS 系列还实现了商品化，可用于 300 多种奥氏体不锈钢的焊接，在焊接 6～7mm 厚的钢时，一道即完成对接，既保证了焊缝性能不受影响，又减少了焊接变形。该不锈钢活性剂已用于一艘双体船壳体及两艘油轮的建造，与常规焊接工艺相比，可节省工时 75%[5]。该类活性剂也可用于航空航天、化学工业、压力容器、海洋工程等领域。目前镍基合金用活性剂也已经开发出来，而铝合金和轻合金用活性焊剂产品也正在开发之中。

日本近年来也研究出了氩弧焊用活性剂[6]，主要用于不开坡口修复电厂热力管道焊接接头处产生的裂纹。英国焊接研究所(TWI)正在对此类焊剂的作用机理进行深入研究，其与巴顿焊接研究所合作的致力于氩弧焊用焊剂用于工业生产的项目已取得进展。

1.2 A-TIG 国内研究状况

杨春利等人[7-9]研究了 SiO_2 和 TiO_2 活性剂在薄板 SUS304 不锈钢 TIG 中的作用和机理.结果表明：少量的活性剂涂敷即对不锈钢材料焊接熔深的增加有显著效果，SiO_2 活性剂涂敷在焊件表面具有收缩焊接电弧的作用，TiO_2 活性剂对电弧的收缩作用不明显。采用熔池谐振方法测得焊接熔池表面张力及其变化[9]，活性剂 SiO_2、TiO_2 涂敷在焊件表面较大幅度降低了焊接熔池表面张力。

刘凤尧等人[10-11]系统的研究了活性剂对 OCr18Ni9 不锈钢和 TC4 钛合金 TIG 焊缝成形的影响.结果表明：施加活性剂 SiO_2 后，随焊接电流的增加、焊接速度的增加、弧长的增加，焊道深宽比比无活性剂时的焊道深宽比大得多；SiO_2 活性剂增加熔深是电弧等离子体收缩、阳极斑点收缩和表面张力温度梯度由负变正共同作用的结果；TiO_2 活性剂增加熔深只是表面张力温度梯度由负变正的作用。

张瑞华、樊丁等人进行了低碳钢、不锈钢、铝合金等材料的活性焊接研究[12-13]。分析了个单一活性剂对焊接熔深的影响规律，并利用正交(均匀)试验法对多组元配方进行了研究。在铝合金焊接方面，分别研究了直流和交流 A-TIG 中活性剂和焊接参数对焊缝熔深的影响，认为热输入的变化是影响熔深变化的重要因素。采用多组元活性剂进行 A-TIG 时，交流焊时增加熔深的效果好于直流焊。另外，他们还提出了一种活性电子束焊接法，使用活性剂可以使电子束焊的熔深增加。

张连锋等人[14]采用自制的 FT-01 钛合金活性焊剂进行了 A-TIG 研究，发现该活性焊剂对焊接接头的宏观组织形貌有明显影响，但对焊接接头的化学成分没有影响。

其他的一些研究机构探索了活性剂的其他方面，包括氧含量对熔池流动方式影响的数值模拟[15]；不锈钢 A-TIG 焊接接头的抗腐蚀性能分析[16]；表面活性元素对熔池流场的影响等[17]。

A-TIG 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(如表 1 所示)，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。

表 1 A-TIG 常用的活性剂

Tab.1 The active agent commonly used in A-TIG

活性剂种类	特点和作用	化合物分子式
氯化物	含有电子亲和能较大的元素；现常用于镁合金的焊接，其中 $CdCl_2$ 的效果最好；由于毒性较大，不利于推广和应用。	$CdCl_2$, $ZnCl_2$, $CaCl_2$, $MgCl_2$
氧化物	含有表面活性元素和电子亲和能较大的元素；常用于焊接不锈钢、碳钢、铝合金等；某些氧化物(如 Cr_2O_3)焊接钛合金时焊缝正面熔宽没有明显的变化、容易出现咬边现象；而 SiO_2 焊接铝合金时可使熔深达到传统 TIG 熔深的 3.5 倍。	TiO_2, SiO_2, Cr_2O_3, MnO_2, CaO, ZnO
氟化物	含有电子亲和能较大的元素；多用于钛合金的焊接，但某些氟化物(如 CaF_2)焊接不锈钢时焊缝成形较差；焊接镁合金时，AlF_3 效果最佳；CaF_2、NaF 等焊接铝合金时则可以不同程度的增加熔深。	CaF_2, NaF, AlF_3, MgF_2

2 A-TIG 技术熔深增加的机理

自 20 世纪 60 年代中期 Gverevich 发表第一篇关于焊接钛合金时使用活性剂的文章以来[18]，人们对活性剂增加焊缝熔深的机理进行了不懈的探索与研究，先后提出了不少的理论，其中最有代表性的理论是“电弧收缩理论”及“表面张力温度梯度改变理论”。

2.1 电弧收缩理论

该理论[19]认为：活性剂在电弧高温下蒸发后以

原子形态包围在电弧外围区域，由于电弧外围区域温度较低，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。而在电弧的中心部位，由于温度很高，足够使原子电离，而且粒子与电子复合成负离子是一个放热反应，故负离子一般不会在该区域形成。电弧收缩的效果由活性剂蒸气与电子的结合效果来决定。然而至今尚没有确切的测得电弧中是否存在负离子研究报道。

张兆栋等人曾采用高速摄像机对镁合金活性焊接时的电弧进行了详尽的拍摄，结果发现：活性剂涂敷在镁合金表面，与焊接电弧发生交互作用，改变了焊接电弧的形态。活性剂改变焊接电弧的形态主要有两种形式：电弧收缩和电弧拖尾[20]。Howes 等人[6]通过采用激光、TIG、电子束、等离子的焊接方式分别测定了活性剂增加熔深的作用，结果发现焊接电弧的收缩是焊接熔深增加的必要前提。

Wilma[21]通过大量的低碳钢 TIG 实验研究了活性剂对电弧电压的影响，结果发现所选氯化物和碳酸盐对电弧电压的影响较小，氧化物对电弧电压的影响是最大(表 2)。

表 2　活性剂对电弧电压的影响及其机理

Tab.2　The effect of active agents on the arc voltage and its mechanism

活性剂	电弧电压改变量	可能的影响机理
SiO_2	(91.72±0.12) V	负离子的形成
TiO_2	(0.38±0.20) V	负离子的形成
Cr_2O_3	(0.84±0.17) V	负离子的形成
K_2CO_3	(-0.32±0.30) V	低电离能阳离子
Na_2CO_3	(0.16±0.30) V	低电离能阳离子
$CaCO_3$	(0.23±0.21) V	低电离能阳离子
KCl	(-0.33±0.22) V	低电离能阳离子＋负离子的形成
NaCl	(0.03±0.21) V	低电离能阳离子＋负离子的形成
$CaCl_2$	(0.10±0.22) V	低电离能阳离子＋负离子的形成
AlF_3	(0.72±0.18) V	低电离能阳离子＋负离子的形成

2.2 表面张力理论

表面张力驱动液体流动模型是由 Heiple 等人[22]针对 A-TIG 时焊缝熔深增加的现象提出的，该理论认为：普通焊接金属熔化状态下表面张力具有负的张力梯度，熔池表面的金属从中心流向四周，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改变了，熔池金属形成从熔池周边向着熔池中心区的流动，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，从而引起熔池液态金属运动状态的变化，提高了熔池底部的加热效率，熔深增加，熔宽变窄[20-22]。

根据 Perry 的研究[23]，当在焊缝的一侧涂有活性剂时，在活性元素的作用下，熔池内液态金属的流动方向会发生改变。在涂敷活性剂的一侧，活性元素的作用使得表面张力梯度为正，液态金属从边缘流向中心；在未涂敷活性剂的一侧，表面张力梯度为负，液态金属在表面张力的作用下由焊缝中心流向边缘。这样形成的焊缝截面形状将偏向于一侧。为了验证该理论，张兆栋等人[20]进行了如下试验：采用尺寸为 100 mm×50 mm×2.5 mm 的变形镁合金 AZ31B 板材，活性剂涂敷在焊道的一侧，所选活性剂为 TiO_2，经烘干后进行激光焊接。焊后得到的焊缝截面如图 2 所示。

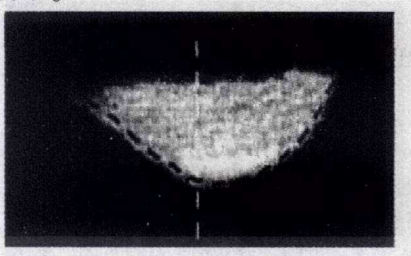


图 2　焊道右侧涂敷 TiO_2 后的焊缝形状

Fig.2　The shape of welding after the right of welding line coated by TiO_2

Terasaki 等[24]用 TiO_2 作为活性剂，对不锈钢焊的电弧等离子体进行了光谱测量，电弧中没有测量到活性剂原子的存在，说明活性剂的蒸发对电弧收缩并无影响；对熔池表面温度进行了测量，发现在涂有活性剂时的温度分布较陡，他们认为，这是焊接电弧与熔池表面相互作用的结果，从而认为活性剂增加熔深的原因是：在活性剂作用下进行焊接时，熔池里液态金属的表面张力温度梯度发生了变化。

在活性剂增加焊接熔深的机理方面张兆栋等人[20]做了深入的研究，通过对 AZ3IB 镁合金进行 A-TIG 后发现：氯化物活性剂和氧化物活性剂的作用机理存在着差异。氯化物增加熔深的机理主要是影响焊接的电弧，氧化物增加熔深的机理主要是影响焊接的熔池。

3　结语

A-TIG 与传统 TIG 相比，可增大焊接熔深，减少缺陷，改善焊缝成形，提高生产效率，已被广泛地应用于碳钢、不锈钢、高温合金、钛合金的焊接。关于活性剂

提高焊缝熔深的机理,目前存在两种比较流行的理论,即电弧收缩理论和表面张力理论。而这两种理论的作用与表现,又与焊接方法、焊接材料和活性剂成分等有关,目前尚难以得出究竟哪一种理论占上风的结论。

参考文献:

[1] Gaughy T M. Two new technologies may increase pipe production and reduce cost[J]. Welding Journal, 2000,(8):65-66.

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

[3] Troy Paskell,etc. GTAW flux increase weld joint penetration [J]. Welding Journal, 1997,(4):57-62.

[4] 中国机械工程协会焊接学会. 焊接手册,第一卷,焊接方法及设备[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[5] Workshop validates success of penetrating flux [J]. Welding Journal,1999,(5):60.

[6] Howes D S, Lueas W. Investigation intoareeon striation by active fluxes for Tangentinert gas welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining,2000,5(3):189-193.

[7] 杨春利,牛尾诚夫,田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(1)- 表面活性剂对不锈钢材料 TIG 焊熔深的影响[J]. 焊接,2000,(4):16-18.

[8] 杨春利,牛尾诚夫,田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(2)- 活性化 TIG 焊接中的电弧现象[J]. 焊接,2000,(5):15-18.

[9] 杨春利,牛尾诚夫,田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(3)- 活性化 TIG 焊接中的熔池表面张力测定[J]. 焊接,2000,(6):11-15.

[10] 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.

[11] 刘凤尧,林三宝,杨春利, 等. 活性化 TIG 焊熔深增加机理的研究[J]. 金属学报,2003,39(6):661-665.

[12] 张瑞华,樊丁,尹燕. 低碳钢高效 TIG 焊的活性剂研制[J]. 甘肃工业大学学报,2001,27(4):8-10.

[13] 樊丁,顾玉石,石牙,等. 低碳钢 A-TIG 焊接方法的研究[J]. 焊接,2002,(2):16-19.

[14] 张连锋,李晓红,杜欲晓. 钛合金活性焊剂氢弧焊接头组织分析[J]. 焊接,2006,(7):16-19.

[15] 马立彩,刘金合,谢耀征,等. 激光焊活性影响等离子体的初步研究[J]. 电焊机,2005,35(7):35-38.

[16] 胡礼木,胡波,张永宏,等. 不锈钢 A-TIG 焊接头的抗腐蚀性能分析[J]. 焊接学报,2006,27(7):34-36.

[17] 孙俊生,宋思利,李宁洋. 表面活性元素对熔池流场的影响[J]. 山东工业大学学报,1999,29(4):311-317.

[18] Gurevich S M,Z V N,Kushmienko N A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten are process[J]. Avtom Svarka,1965,18(9):1-5.

[19] Dunn G J,Allemand C D,Eager T W. Metal vapors in gas tungsten arcs: Part I SPectroscopy and monochromatic Photography [J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17A:1851-1863.

[20] 张兆栋. 镁合金活性焊接研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[21] Wilma Middel. Additives in GTA welding [J]. Netherlands Delft University of Technology. 2000,23-32:84-89.

[22] Heiple C R,Roper J T. Effect of selenium on GTAW fusion zone geometry [J]. Welding Journal, 1981, 60 (8):143-145.

[23] Perry N,Marya S. Study and Development of Flux Enhanced GTA Penetrations In acommercial Grade Titanium [A]. Proceedings of sth International Conference on Trends in Welding Research(ASM/AW)[C]. 520-525.

[24] Shimizu T, Terasaki H. Effects of activating flux on arc gas tungsten arc welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining,2000,5(6):397-402.

(上接第 154 页)后,熔敷金属的晶粒变得粗大,见图 4(b),这可能导致其硬度增高而耐磨性下降。用纳米 SiO_2 全部替代硅微粉后,熔敷金属组织中出现聚集的黑色针状物,使其耐磨性得到提高。

至于纳米 SiO_2 的作用机理还有待进一步研究。

3 结论

(1) 纳米 SiO_2 取代或部分取代硅微粉使焊缝成形和脱渣性得到改善。

(2) 随着纳米 SiO_2 加入比例的增大,焊条的焊接工艺性能变差、熔敷效率下降。

(3) 随着纳米 SiO_2 加入比例的增大,熔敷金属的硬度先增加后减小,耐磨性先降低后增加。100% 纳米 SiO_2 焊条的耐磨性比硅微粉焊条提高约一倍,其微观组织也发生显著变化,产生许多黑色针状物。

参考文献:

[1] 赵秀娟,陈春焕,杨德新. 碳素铬纳米粉末制堆焊焊条[J]. 热加工工艺,2003,(3):27-28.

[2] 李晓峰,陈冰泉,吕奎清,等. 金红石粒度对 D550R 堆焊焊条性能的影响 [J]. 热加工工艺,2010,39(15):164-166.

[3] 万虹、陈冰泉、吕奎清,等. D550R 系列焊条的焊接电参数分析[J]. 焊接技术,2007,36(6):43-44.

[4] 王宝. 焊接电弧物理与焊条工艺性设计[M]. 北京:机械工业出版社,1998. 78-164.

[5] 张子荣,李升鹤. 电焊条[M]. 北京:机械工业出版社,1996.