DOI 10.11784/tdxb20130912

430 铁素体不锈钢 A-TIG 焊接

胡绳荪[1,2]，王勇慧[1,2]，申俊琦[1,2]，陈昌亮[1,2]，许海刚[3]
(1. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300072；2. 天津市现代连接技术重点实验室，天津 300072；
3. 宝山钢铁股份有限公司研究院，上海 200431)

摘 要：针对铁素体不锈钢，选用常见的氧化物和卤化物进行单组分 A-TIG 实验，结果表明氧化物活性剂增加焊缝熔深的效果更为显著. 以 B_2O_3、Cr_2O_3、SiO_2 分别作为基础组元进行多组分活性剂实验，得到最优配比的活性剂可使焊缝熔深达到传统 TIG 焊的 2.46 倍. 组织和力学性能测试显示：与 TIG 焊缝相比，使用活性剂后焊缝中的铁素体晶粒尺寸略有减小，但硬度和拉伸强度变化不大.

关键词：铁素体不锈钢；A-TIG；焊缝熔深；微观组织；力学性能
中图分类号：TG444 **文献标志码**：A **文章编号**：0493-2137(2013)09-0831-05

A-TIG Welding of 430 Ferritic Stainless Steel

Hu Shengsun[1,2], Wang Yonghui[1,2], Shen Junqi[1,2], Chen Changliang[1,2], Xu Haigang[3]
(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300072, China;
3. Research Institute, Baoshan Iron and Steel Company Limited, Shanghai 200431, China)

Abstract: Study of the effects of common oxides and halides in single component A-TIG experiments indicates that oxide fluxes perform better in increasing weld penetration of ferritic stainless steel. B_2O_3, Cr_2O_3 and SiO_2 are used as the basic elements of the multi-component activating flux. The optimal flux can make weld penetration 2.46 times as much as that with conventional TIG welding. Through the structure analysis and mechanical properties tests, it has been found that A-TIG welding seam has a slight decrease in ferrite grain size with few changes in hardness and tensile strength of A-TIG welding seam compared with conventional TIG welding seam.

Keywords: ferritic stainless steel; A-TIG; weld penetration; microstructure; mechanical property

奥氏体不锈钢以其出色的耐腐蚀、高温、氧化性能，在全世界范围内获得广泛的应用. 但随着国际镍价飙升，以镍作为主要合金元素的奥氏体不锈钢价格居高不下，人们开始转向其他替代钢种的研发推广，其中铁素体不锈钢具有很大发展潜力.

430(1Cr17)是铁素体不锈钢的代表钢种，基体不含镍，价格相对较低，并具有导热系数大、线膨胀系数较小、耐氯化物应力腐蚀性好等优点[1]. 这类钢通常采用手工焊或 TIG 焊工艺进行焊接.

传统的 TIG 焊能获得优良的焊缝，但存在焊缝熔深小的问题，中厚板需要开坡口进行多道焊或者加大焊接热输入，这样焊接效率低，而且焊后组织粗化严重，使用性能急剧下降.

A-TIG 是在待焊工件表面涂覆活性剂后进行 TIG 焊的一种高效的焊接方法，活性剂的使用可以明显增加熔深. 目前国内外碳钢、铝合金、钛合金、奥氏体不锈钢等相关的 A-TIG 研究较多[2-6]，针对铁素体不锈钢的研究鲜见报道.

笔者针对 430 铁素体不锈钢进行了单组份和多组分的 A-TIG 焊实验，分别研究了活性剂对焊缝熔深、微观组织和力学性能的影响规律.

1 实验条件

实验用 430 铁素体不锈钢板规格为：300 mm × 150 mm × 3.2 mm，其化学成分如表 1 所示. 所使用

收稿日期：2012-03-30；**修回日期**：2012-05-23.
作者简介：胡绳荪(1956—)，男，教授，huss@tju.edu.cn.
通讯作者：申俊琦，shenjunqi@tju.edu.cn.

的焊接设备包括 Fronius 公司生产的 Magic Wave 4000 型数字化 TIG 焊机、自动焊接工作台、按压式夹具等. 实验时工件固定在夹具上,焊枪随着小车作匀速直线运动,这样可使焊接过程中弧长和焊接速度保持稳定.

为了减少焊接缺陷,提高焊缝质量,焊前应对焊板进行表面处理,具体方法为用 240#砂纸对钢板表面进行打磨,然后用无水乙醇进行清洗,以去除表面杂质和氧化膜,待其干燥后可以进行活性剂的涂覆.

表 1 430铁素体不锈钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of 430 ferritic stainless steel %

ω_C	ω_{Cr}	ω_{Si}	ω_{Mn}	ω_P	ω_S	ω_{Ni}	ω_{Mo}
≤0.12	16.00 ~ 18.00	≤0.75	≤1.00	≤0.04	≤0.03	≤0.60	2.00 ~ 3.00

2 单组分活性剂对焊缝熔深的影响

研究单一组分活性剂对焊缝熔深的影响规律,是进行多组分活性剂实验的基础. 在查阅文献[2,4-5,7]的基础上,选用了氧化物和卤化物 2 种类型的活性剂,包括 B_2O_3、Cr_2O_3、SiO_2、TiO_2、MnO_2、MgO、CaO、KCl、CaF_2、NaF,经电子天平精确称量后,加入适量无水乙醇调和成糊状,用扁平毛刷均匀涂覆到待焊工件表面,涂覆宽度为 20 ~ 30 mm,厚度为 0.5 mm 左右.

首先测量每种活性剂对应的临界熔透电流值,以初步了解每种组分对于焊接熔深影响的大小及对应的成形状况,焊接规范见表 2. 焊接电流从 90 A 开始,每次增加 5 A,直至找到临界熔透电流值. 每焊完一道后,均要重磨钨极并重新调整钨极高度,以保证焊接条件的一致性.

表 2 A-TIG焊接规范

Tab.2 Welding parameters of A-TIG

弧长/mm	焊接速度/($mm \cdot s^{-1}$)	钨极直径/mm	焊枪倾角/(°)	保护气流量/($L \cdot min^{-1}$)
2	4	2.4	90	10

实验结果如图 1 所示,可见所用活性剂均能使焊接临界熔透电流值减小,即涂覆活性剂后可以在较小的热输入条件下使 3.2 mm 钢板熔透. 氧化物类活性剂对减小焊接临界电流的作用比较明显,B_2O_3、Cr_2O_3、SiO_2、TiO_2、MnO_2、CaO 都能使临界熔透电流降低 80 A 以上,效果最好的 B_2O_3 甚至能将临界熔透电流降为空板焊接时的 42.3%;卤化物 KCl、CaF_2、NaF 效果均不明显.

对于活性剂增加焊缝熔深的作用机理,国内外存在多种理论解释,其中最有代表性的是"电弧收缩理论"及"表面张力温度梯度改变理论"[7-9]. 活性剂中的 F、Cl、O 都具有较强的电子亲和能力,能够引起电弧收缩效应,但同时 O 还能有效改变熔池表面张力梯度,增大焊缝熔深,因而氧化物的综合效果要普遍优于卤化物.

选用氧化物类活性剂用表 2 的规范在 90 A 电流下进行焊接,焊后横向切割焊缝制备金相试样,腐蚀后在低倍光学显微镜下观察焊缝熔深,得到各组分活性剂对焊缝熔深的影响如图 2 所示(D 为不同活性剂对应的熔深,D_0 为无活性剂区的熔深). 从结果来看,所选活性剂均能不同程度增加焊缝熔深. 其中增加效果较为明显的有 B_2O_3、SiO_2、Cr_2O_3、TiO_2.

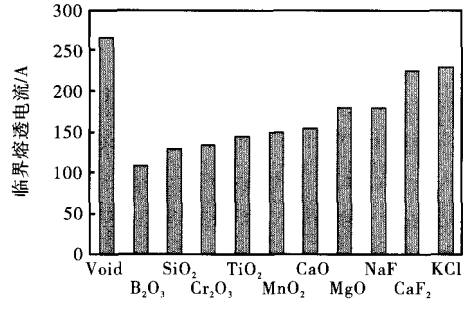


图 1 单组分活性剂临界熔透电流

Fig.1 Penetration currents of single component activating flux

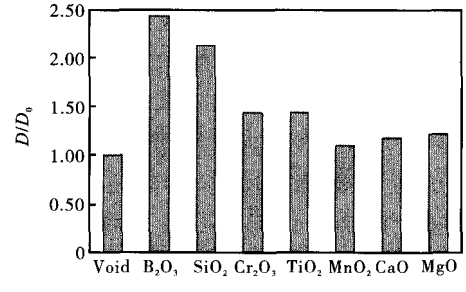


图 2 单组分活性剂对焊接熔深的影响

Fig.2 Effect of single component activating flux on weld penetration

3 多组分活性剂对焊缝熔深的影响

在单组分活性剂实验的基础上,选定 B_2O_3、

Cr_2O_3、SiO_2、TiO_2 进行混合组分活性剂实验.

(1) 进行任意 2 个单组分活性剂等量混合实验，用表 2 所示焊接规范，分别在 110 A、120 A 的电流下进行焊接，观察焊缝熔透情况.

(2) 进行多组分活性剂定量配比实验，用表 2 所示焊接规范，分别在 105 A、110 A 的电流下进行焊接，观察焊缝熔透情况.

等量混合单组分活性剂实验的结果如表 3 所示，从表 3 中 2 ~ 5 组结果可以看出，Cr_2O_3 和 TiO_2 含量较大时，活性剂作用效果变差，因而在混合组分中含量不应太多.

从表 3 中 2、3 和 4、5 两组对比可以看出，Cr_2O_3 的作用优于 TiO_2. 根据胡礼木等[10-11]的研究结果，多组元活性剂中的 Cr_2O_3 或有改善焊接接头“贫铬”，提高腐蚀性能的作用. 结合实验结果，本实验最终确定活性剂配方的主要成分为：B_2O_3(40% ~ 80%)，SiO_2(10% ~ 20%)，Cr_2O_3(10% ~ 20%)，其配比如表 4 所示.

表 3　等量混合单组分活性剂实验结果

Tab.3　Results of the expriment with 1 : 1 single component activating flux

序号	活性剂	焊缝情况
1	$B_2O_3 + SiO_2$	110 A 时有小段熔透 120 A 时完全熔透
2	$B_2O_3 + Cr_2O_3$	110 A 时没有熔透的迹象 120 A 时有小段熔透
3	$B_2O_3 + TiO_2$	110 A 时没有熔透的迹象 120 A 时有局部点状熔透
4	$SiO_2 + Cr_2O_3$	110 A 时没有熔透的迹象 120 A 时有小段熔透
5	$SiO_2 + TiO_2$	110 A 时没有熔透的迹象 120 A 时只有局部点状熔透
6	$Cr_2O_3 + TiO_2$	110 A 时没有熔透的迹象 120 A 时只有局部点状熔透

其中 A 组在 105 A 下全部熔透；B 组仅在 110 A 下有小段熔透；D 组在 110 A 下大半段熔透，在 105 A 下只有局部点状熔透；G 组在 110 A 下大半段熔透，在 105 A 下只有局部点状熔透；H 组在 110 A 下全部熔透，在 105 A 下只有部分熔透；剩下的 C、E、F 3 组在 110 A 电流下均未熔透.

通常认为：SiO_2、Cr_2O_3、CaF_2 等活性剂会在阳极表面形成导电性较差的熔融层，使得电弧导电通道变长而导致电弧等离子体发生收缩；B_2O_3、TiO_2 等活性剂则能强烈改变熔池表面张力，使表面张力温度梯度由负变正，熔池金属流动方向从周边流向中心，从而使焊缝熔深增加. 多组分活性剂综合了电弧收缩作用和表面张力温度梯度改变作用，因而比单组分活性剂的效果更为明显[12-13].

表 4　多组分活性剂配比

Tab.4　Proportioning of multi-component activating flux

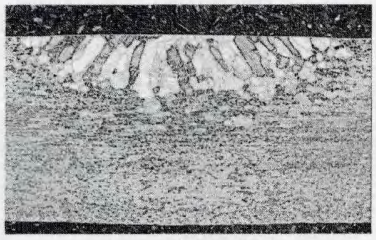
编　号	组　分	百分数/%
A	B_2O_3	80
	SiO_2	10
	Cr_2O_3	10
B	B_2O_3	70
	SiO_2	20
	Cr_2O_3	10
C	B_2O_3	70
	SiO_2	10
	Cr_2O_3	20
D	B_2O_3	60
	SiO_2	30
	Cr_2O_3	10
E	B_2O_3	60
	SiO_2	20
	Cr_2O_3	20
F	B_2O_3	50
	SiO_2	40
	Cr_2O_3	10
G	B_2O_3	50
	SiO_2	30
	Cr_2O_3	20
H	B_2O_3	40
	SiO_2	40
	Cr_2O_3	20

4　活性剂对焊缝组织性能的影响

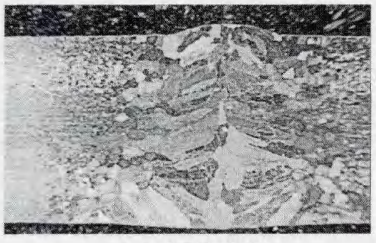
利用表 2 所示焊接规范，在 105 A 电流下对涂覆 A 组活性剂和不适用活性剂的 430 铁素体钢板进行焊接，焊后对焊缝区取样进行观察.

如图 3 所示，在相同焊接条件下，不使用活性剂焊接钢板时，得到的熔深只有 1.3 mm，是宽而浅的碗状熔深；使用活性剂后熔深可达 3.2 mm，是前者的 2.46 倍，同时熔宽明显减少，呈现深而窄的杯状熔深.

不使用活性剂的焊缝组织如图 4(a) 和 4(c) 所示，可见在焊接热循环的作用下铁素体组织较为粗大，并出现少量马氏体和析出相；使用活性剂的焊缝组织如图 4(b) 和 4(d) 所示，从图 4 中可以看出，使用活性剂后焊缝区铁素体的晶粒尺寸有所减小，这与活性剂中 Cr、B、Si 等合金元素引起的晶粒细化作用有关[14].



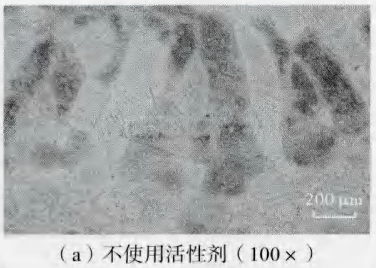
(a) 不使用活性剂



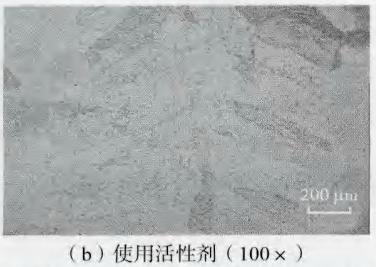
(b) 使用活性剂

图 3 焊缝宏观形貌(25×)

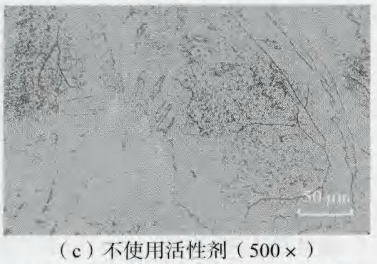
Fig.3 Macroscopic morphology of the welds(25×)



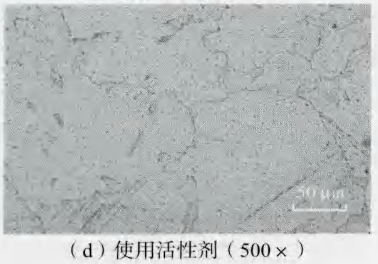
(a) 不使用活性剂(100×)



(b) 使用活性剂(100×)



(c) 不使用活性剂(500×)



(d) 使用活性剂(500×)

图 4 焊缝微观组织

Fig.4 Microstructure of welds

利用表 2 所示焊接规范,在 105 A 电流下对使用 A 组活性剂和不使用活性剂的 430 铁素体钢板进行焊接,焊后进行拉伸实验并测量焊缝中心处显微硬度值,拉伸试样尺寸为 150 mm × 30 mm × 3.2 mm,显微硬度测试中施加载荷为 1.96 N,载荷保持时间为 10 s,实验结果见表 5. 铁素体不锈钢由于焊后出现马氏体和析出相,因而显微硬度值与母材相比有明显提高. 实验结果表明,与传统 TIG 焊相比,使用活性剂后焊缝抗拉强度和硬度变化不大.

表 5 室温下焊缝力学性能测试结果

Tab.5 Results of the mechanical performances of the welds at room tempreture

取样位置	拉伸实验		显微硬度 Hv1.96
	抗拉强度/MPa	断裂位置	
母材	405.4	—	132
TIG 焊缝	411.6	母材	226
A-TIG 焊缝	422.0	母材	223

5 结 论

(1) 在铁素体不锈钢 TIG 焊中,所用活性剂均能降低其临界熔透电流并增加焊缝熔深. 氧化物类活性剂的效果优于卤化物类活性剂,其中效果最好的 B_2O_3 在焊接电流为 90 A 时能使临界熔透电流降低 57.7%,焊缝熔深增加 1.46 倍.

(2) 多组分活性剂的作用比单组分活性剂更佳. 使用 B_2O_3 单组分活性剂需要 110 A 以上的电流才能使 3.2 mm 铁素体不锈钢板完全焊透,而同样条件下使用最佳配比的多组分活性剂时只需要 105 A 的电流就可完全焊透.

(3) 在本实验条件下,活性剂的使用可以大幅增加焊缝熔深,同时焊缝区铁素体的晶粒尺寸略有减小,焊缝力学性能则基本保持不变.

参考文献:

[1] 孟 威. 400 系铁素体不锈钢热轧板材力学性能及焊接性能的研究[D]. 兰州:兰州理工大学材料科学与工程学院,2009.
Meng Wei, The Research of Mechanical and Weld Properties of 400 Series Hot Rolled Ferritic Stainless Steel Plates [D]. Lanzhou: School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, 2009 (in Chinese).

[2] Huang Yong, Fan Ding. Experimental study on activat-

ing welding for aluminum alloy [J]. *China Welding*, 2005, 14(2): 130-134.

[3] Niaqai J. Use of A-TIG method for welding of titanium, nickel, their alloys and austenitic steels[J]. *Welding International*, 2006, 20(7): 516-520.

[4] Leconte S, Paillard P, Chapelle P, et al. Effect of oxide fluxes on activation mechanisms of tungsten inert gas process [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(4): 389-397.

[5] Liu L M, Zhang Z D, Song G, et al. Mechanism and microstructure of oxide fluxes for gas tungsten arc welding of magnesium alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 2007, 38(3): 649-658.

[6] Loureiro A R, Costa B F O, Batista A C, et al. Effect of activating flux and shielding gas on microstructure of TIG welds in austenitic stainless steel [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14(4): 315-320.

[7] Leconte1 S, Paillard P, Saindrenan J. Effect of fluxes containing oxides on tungsten inert gas welding process [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(1): 43-47.

[8] 张兆栋. 镁合金活性焊接研究[D]. 大连：大连理工大学材料科学与工程学院，2007.
Zhang Zhaodong. The Study of Activating Flux Welding for Magnesium Alloy[D]. Dalian: School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, 2007(in Chinese).

[9] Modenesi P J, Apolinario E R, Pereira I M. TIG welding with single component-fluxes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 99(1/2/3): 260-265.

[10] 胡礼木，胡　波，郭从盛，等. 奥氏体不锈钢 TIG 用活性剂的研制[J]. 焊接学报，2006，27(6)：53-55.
Hu Limu, Hu Bo, Guo Congsheng, et al. Active flux for austenitic stainless steel tungsten inert-gas welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(6): 53-55(in Chinese).

[11] 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.
Hu Limu, Hu Bo, Zhang Yonghong, et al. Analysis of corrosion resistance of A-TIG welded joint for austenitic stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(7): 34-36(in Chinese).

[12] 宋天革，张　岸. 多组元活性剂对 TIG 焊焊缝熔深的影响[J]. 兵工学报，2009，30(12)：1718-1721.
Song Tiange, Zhang An. Effect of multi-component active fluxes on penetration in TIG welding[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(12): 1718-1721 (in Chinese).

[13] 孙亚非. 活性剂等离子弧焊接的研究[D]. 大连：大连交通大学材料科学与工程学院，2004.
Sun Yafei. Investigation on A-PAW[D]. Dalian: School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, 2004(in Chinese).

[14] 韩宝军，徐　洲. 钢铁晶粒超细化方法及其研究进展[J]. 材料导报，2010，24(1)：94-103.
Han Baojun, Xu Zhou. Grain ultra-refinement and its development in steels[J]. *Materials Review*, 2010, 24(1): 94-103(in Chinese).