

321A 不锈钢-TIG 焊研究

吴其右¹, 王湘江¹, 冯英超², 任丽丽²

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国核工业二三建设有限公司, 北京 101300)

摘要:以 321 不锈钢作为研究对象,进行了 A-TIG 焊的研究。先对单一组元活性剂对焊缝熔深的影响进行研究,然后根据此研究结果进行多组元活性剂摸索试验,得出最佳活性剂焊接配方,并研究其焊接接头的力学性能。试验结果表明,用最佳活性剂焊接的不锈钢 321A-TIG 接头力学性能良好。

关键词:钨极氩弧焊;活性剂;力学性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.07.018

中图分类号: TG444*.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2019)07-0073-04

Study on A-TIG Welding of 321 Stainless Steel

WU Qiyou¹, WANG Xiangjiang¹, FENG Yingchao², REN Lili²

(1. College of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: Taking 321 stainless steel as the research object, and the study of A-TIG welding was carried out. Firstly, the effect of single component active flux on the weld penetration was studied, and then the multi-component active flux was tested according to the results. Then the optimum active flux welding formula was obtained, and the mechanical properties of the welded joint were studied. The test result shows that the A-TIG welded joint of 321 stainless steel with the best active agent has good mechanical properties.

Key words: tungsten electrode argon arc welding; active flux; mechanical properties

钨极氩弧焊(TIG)是现代工业生产中广泛应用的一种焊接方法,能提高焊接质量。但是该方法也存在明显的局限性:一次性焊接的熔深浅,熔敷率低,完成单道焊一次成形的板厚小(一般仅限于3 mm以下板厚),焊接厚板时需要开坡口进行多道焊。同时,TIG焊对施焊材料中的一些微量元素较为敏感。由于这些微量元素的存在可改变熔池中液态金属的表面张力,进而影响熔深,使焊接工艺的再现性差,影响了焊接质量。另外,若采用多道焊,则焊接变形与热影响区增大,影响到焊接接头的质量。因此,长期以来,研究和开发既能充分利用TIG焊的优点,又能有效大幅度提高焊接熔深的新型TIG焊技术一直是世界范围内焊接技术人员追求的目标之一。

近年来,一种新型高效的焊接方法—A-TIG焊正引起世界范围内的广泛关注。A-TIG焊接法是指

在施焊工件的表面涂一层很薄的表面活性剂,从而大大改善焊接熔深的方法。利用这种方法可使焊接熔深达到传统TIG焊的2~3倍,对板厚3~6 mm的板材无需开坡口,可一次性焊接完成。

A-TIG焊自20世纪60年代巴顿焊接研究所^[1]研制出以来,人们利用这种技术成功克服了TIG焊熔深浅,焊接效率低等缺陷。A-TIG焊在核工业中应用广泛。A-TIG焊在很长一段时间内都没有被推向工业市场,直到90年代末才被其他国家的公司和科学机构所注意。国际上包括乌克兰巴顿焊接研究所(PWI)、英国焊接研究所(TWI)、美国爱迪生焊接研究所(EWI)和日本熔接研究所(JWRI)等知名焊接研究机构都开展了相关研究,并取得了很多突破性成果。

我国对于A-TIG焊的研究起步较晚,20世纪90年代末才开始此项研究^[2]。我国的一些大学和研究所都在积极开展此项研究。杨春利^[3]等采用SiO₂和TiO₂两种单一成分活性化焊剂进行了SUS304不锈钢A-TIG焊试验,研究了活性化焊剂成分及涂覆量对焊缝成型的影响。此外,樊丁^[4]也对A-TIG焊进行了研究,试验材料为低碳钢。研究结果表明活性

收稿日期:2018-01-10

作者简介:吴其右(1993-),男,山西朔州人,硕士,主要研究方向为先进制造技术;电话:0734-8282235;E-mail:wuqiyounen@126.com

通讯作者:王湘江,男,教授,博士生导师;

E-mail:wangxiangjiang72@163.com

化焊剂中 SiO_2 对焊缝熔深的增加效果最为明显, TiO_2 次之, 氧化物的影响大于卤化物, 同时焊接工艺参数对焊缝熔深也有影响。

本文采用 12 种单组元活性剂: SiO_2 、 Cr_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 CaO 、 MnO_2 、 Y_2O_3 、 La_2O_3 、 B_2O_3 、 NaF 、 MgF_2 , 分别对 321 不锈钢进行 A-TIG 焊接试验, 研究活性剂对焊缝熔深、熔宽的影响, 选取其中几种效果较好的单组元活性剂进行配方摸索试验, 最终得到几组最佳的复合活性剂配方。

表 1 321 不锈钢的化学成分(质量分数, %)和力学性能

Tab.1 Chemical composition (wt%) and mechanical properties of 321 stainless steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Ti	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)
0.015	0.51	1.07	0.028	0.001	17.14	9.05	0.015	0.154	626	256	46

SiO_2 、 Cr_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 CaO 、 MnO_2 、 Y_2O_3 、 La_2O_3 、 B_2O_3 、 NaF 、 MgF_2 等化合物材料, 活性剂配制采用电子天平进行称量。

1.2 试验方法

1.2.1 焊前准备

材料准备阶段, 在试验前均用角磨机将母材表面的氧化膜打磨除净, 再用无水乙醇将打磨表面清洗干净。进行试验时, 用电子天平称取适量单组元或者多组元活性剂, 用无水乙醇将其调成糊状, 用刷子均匀涂敷在打磨干净的待焊工件表面, 厚度以盖住试样表面刚好不出现试样颜色为宜, 涂敷宽度为 15~20 mm。在摸索试验阶段, 均采用对比焊接方法^[5], 即采用同一焊接规范, 涂覆活性剂后, 待无水乙醇完全挥发后, 将有涂层区和无涂层区一次焊接完成, 活性剂涂敷区域如图 1 所示 (L , W 分别为试

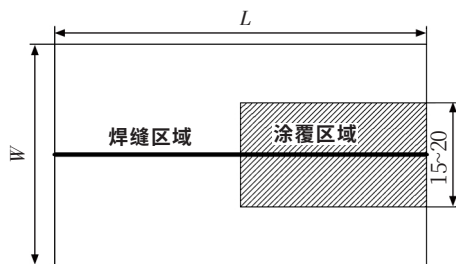


图 1 活性剂涂敷区域(mm)

Fig.1 Coating area of active agent (mm)

采用上述最佳复合活性剂配方在 4、5 及 6 mm 厚 321 不锈钢钢板进行 A-TIG 对接焊, 并研究其对焊缝成型的影响。

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验材料

本试验所采用的母材为 321 不锈钢板, 其化学成分及力学性能分别如表 1 所示。

本试验所用活性剂材料的主要化学成分为

样长度和宽度, 阴影区域为活性剂涂敷区域, 约为试样长度的一半)。本试验采用 WSM-315D 型全数字直流脉冲氩弧焊机, 焊接方法为手工钨极氩弧焊。

1.2.2 焊接过程

分别选择 4、5 及 6 mm 厚的 321 不锈钢板材做摸索试验, 摸索试验的主要目的是筛选出焊缝成型良好的活性剂配方及配套的工艺参数。用摸索试验所得的最佳配方, 深入研究 A-TIG 焊所得焊缝的成形情况以及其力学性能。本文所分析的试验数据均取自 6 mm 厚的 321 不锈钢板材 A-TIG 焊所得焊缝的性能测试结果, 其焊接规范参数见表 2。

表 2 焊接参数

Tab.2 Welding parameters

电流 /A	电压 /V	焊速 /(m·h ⁻¹)	焊枪倾角 /(°)	气流量 /(L·min ⁻¹)
120	10~14	2~5	70~80	15

2 试验结果与分析

2.1 活性剂对焊缝成型的影响

前期的工作主要是做大量的工艺试验来摸索针对 321 不锈钢材料的活性剂配方, 经过对比、分析、总结, 最后得出效果最佳的活性剂配方为 38 和 62 号配方, 这两种活性剂的组分如表 3 所示。因此本部分主要研究这两种活性剂配方对于不锈钢 321 材料

表 3 38 和 62 号活性剂组分(质量分数, %)

Tab.3 The composition of the active agent 38 and 62 (wt%)

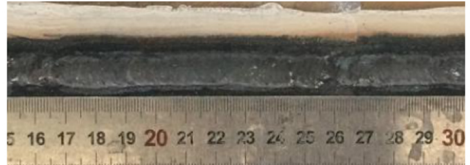
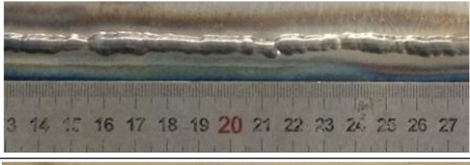
活性剂	SiO_2	Cr_2O_3	MgO	Al_2O_3	TiO_2	CaO	MnO_2	Y_2O_3	La_2O_3	B_2O_3	NaF	MgF_2
38 号	10~30	5~15	5~10	10~20	5~15	5~10	10~15	5~10	5~10	10~20	5~10	5~10
62 号	10~25	8~20	5~8	10~20	5~15	3~8	15~20	3~8	3~8	8~16	5~8	5~8

焊缝成形及理化性能的影响。

由于本试验是在不开坡口不加任何填充材料的情况下对 6 mm 厚的板材直接进行对接焊接, 所以得到的焊缝表面有略微塌陷的现象。为保证外观检验的合格, 在 A-TIG 焊后需对焊缝进行盖面处理。

表 4 为 321 不锈钢板焊接对比试验结果。通过表 4 对比可以发现, 仅以活性剂作为单一变量时, 在其他焊接条件相同的条件下, 对于 6 mm 厚的板材, 涂覆活性剂可一次焊透, 而未涂活性剂显示未焊透。所得焊缝外观证明涂活性剂后, 不锈钢 321 焊缝熔深均显著增加, 而且焊缝表面成形良好。另外, 通过对焊接过程的观察, 发现在焊接过程中, 涂活性剂焊接相对于不涂活性剂焊接, 焊接电弧明显收缩, 证明活性剂有一定的收缩电弧功能, 从而影响焊缝熔深。

表 4 321 不锈钢板焊接对比试验结果
Tab.4 Comparison of test results of welding
of 321 stainless steel plate

涂活性剂 (正面)		未盖面 焊缝表面 塌陷
涂活性剂 (背面)		一次 焊透
不涂活性剂 (正面)		表面 无塌陷
不涂活性剂 (背面)		未焊透

2.2 试验结果

为了保证试验的科学性和严谨性, 本文对同一块 A-TIG 焊接钢板上进行理化试验。

2.2.1 RT 检测结果

通过对活性剂焊接后的钢板进行射线无损探伤 (RT), 检测结果见表 5。对于 6 mm 厚的 321 不锈钢材料, 通过涂覆 38 和 62 号活性剂进行焊接所得焊缝的 RT 检测结果显示良好, 未发现有焊接缺陷存在, 焊接效果良好。

表 5 不锈钢板无损检测结果

Tab.5 Nondestructive testing results of stainless steel plate

活性剂编号	检测标准	缺陷描述	结果
38	RCCM 2007	未见缺陷	合格
62		未见缺陷	合格

2.2.2 化学分析

表 6 为 321 不锈钢板用两种活性剂配方所得焊接接头化学成分测试结果。通过表 6 和表 1 对比发现, 对于 321 不锈钢板材 A-TIG 焊接, 采用 38 号和 62 号活性剂配方所得焊缝的化学成分相比于母材的化学成分, Mn、Cr、Ni 元素含量均有增加, 其中 62 号活性剂配方所得焊缝的化学成分中 Cr、Ni 元素含量增加量更大。

表 6 321 不锈钢 A-TIG 焊所得焊缝化学成分(质量分数, %)

Tab.6 Chemical composition of A-TIG welds
of 321 stainless steel (wt%)

焊缝	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Ti
38 号	0.012	0.48	1.58	0.024	0.001	18.22	10.87	0.034	0.029
62 号	0.011	0.45	1.63	0.023	0.002	18.36	11.35	0.040	0.012

据文献显示, 活性剂涂覆在母材表面, 在焊接热场的影响下, 一部分活性剂成分会蒸发形成离子场, 进而影响电弧收缩; 另外一部分则进入焊接熔池, 影响熔池流动性。因此, 分析得出焊缝中增加的化学元素, 均来自于活性剂化学成分。O、Si 等是很强的表面活性元素, 可使熔池具有正的温度梯度, 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。

2.2.3 弯曲试验

弯曲试验的目的在于检查焊缝接头的完好性和塑性, 考察的区域包含焊缝、熔合区和热影响区。试样编号中“F”表示面弯, “R”表示背弯。表 7 为活性剂配方 38 和 62 号焊接的 321 不锈钢 A-TIG 焊接接头的弯曲试验结果。按照 GB/T2653-2008 标准要求, 进行面弯和背弯两项试验, 压头直径为 4 倍试样厚度, 弯曲 180°后, 均未见裂纹缺陷, 满足规范要求, 同时验证了采用 A-TIG 焊所得焊缝的可靠性满足要求。

2.2.4 拉伸试验

表 8 为用 38 号和 62 号活性剂配方焊接的 321 不锈钢 A-TIG 焊接接头的拉伸试验结果, 结果显示破断位置均在焊缝区。通过 2.2.2 小节对焊缝化学成分

表 7 用 38 和 62 号活性剂焊接的 321 不锈钢
A-TIG 焊接头的弯曲试验结果

Tab.7 Bending test results of A-TIG welded joint
of 321 stainless steel by active agent 38 and 62

试样编号	检测温度 /℃	压头直径 /mm	支辊间距 /mm	弯曲角度 /(°)	检查情况
38-F1	26	18	35.8	面弯 180	未见缺陷
38-F2	26	18	35.8	面弯 180	未见缺陷
38-R1	26	18	35.8	背弯 180	未见缺陷
38-R2	26	18	35.8	背弯 180	未见缺陷
62-F1	26	20	34.3	面弯 180	未见缺陷
62-F2	26	20	34.3	面弯 180	未见缺陷
62-R1	26	20	34.3	背弯 180	未见缺陷
62-R2	26	20	34.3	背弯 180	未见缺陷

表 8 用 38 号和 62 号活性剂焊接的 321 不锈钢
A-TIG 焊接头的拉伸试验结果

Tab.8 Tensile test results of A-TIG welded joint
of stainless steel 321 by active agent 38 and 62

试样编号	抗拉强度 R_m /MPa	破断位置
38-L1	590	焊缝
38-L2	570	焊缝
62-L1	560	焊缝
62-L2	575	焊缝

的分析,对于采用 38 号和 62 号活性剂配方所得的焊缝化学成分中 Mn、Cr、Ni 元素含量均有增加。材料的成分决定组织,组织决定性能。对于 321 奥氏体不锈钢来说,Mn、Cr、Ni 元素含量提高将影响材料组织中奥氏体组织的稳定性,尤其是 Ni 元素含量的提高,将在一定程度上降低材料的强度,提高材料的塑性。

2.2.5 宏观金相

由图 2 焊缝宏观形貌可以看出,焊接接头有明显的分层,这是由于在钢板进行 A-TIG 焊之后又对其进行了盖面处理。所得焊缝均显示熔合良好,未发现焊接缺陷存在。

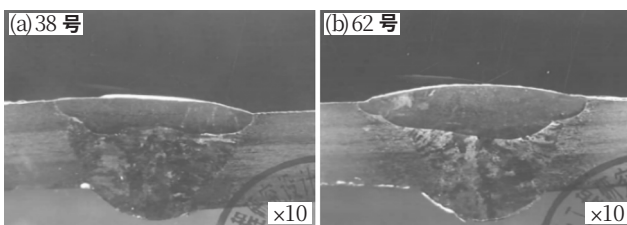


图 2 用 38 号和 62 号活性剂焊接的 321 不锈钢
A-TIG 焊缝宏观形貌

Fig.2 The macroscopic morphology of A-TIG weld seam
of 321 stainless steel by active agent 38 and 62

2.2.6 微观金相

图 3 为用 38 号和 62 号活性剂焊接的 321 不锈钢 A-TIG 焊缝的微观组织。从两组图中可以看出,非连续的骨架 δ 铁素体位于奥氏体中,两种活性剂配方的焊缝组织微观金相图相似,明显差异是 δ 铁素体结构的粗细和密度不同。经过分析得出由于熔池冷却速度较快,铁素体未能及时转变成奥氏体,最终残留在奥氏体基体内。从图 3(a)、(b)可以看出,对于采用 38 号活性剂配方所得焊接接头的焊缝区组织多为晶粒细小的奥氏体组织,熔合线附近由于温度场冷却速度较快,导致 δ 铁素体不完全转变为奥氏体,铁素体晶粒相对较大。从图 3(c)、(d)可以看出,对于采用 62 号活性剂配方所得焊接接头,焊缝区晶粒尺寸相比于 38 号配方更大,这是由于焊缝金属成分中 Mn 含量较高,而 Mn 有促进晶粒长大的作用。粗大的奥氏体晶粒组织也在一定程度上降低了接头强度。后续试验中,可尝试在活性剂成分中添加细化晶粒元素如钼、钒、钛等来克服。

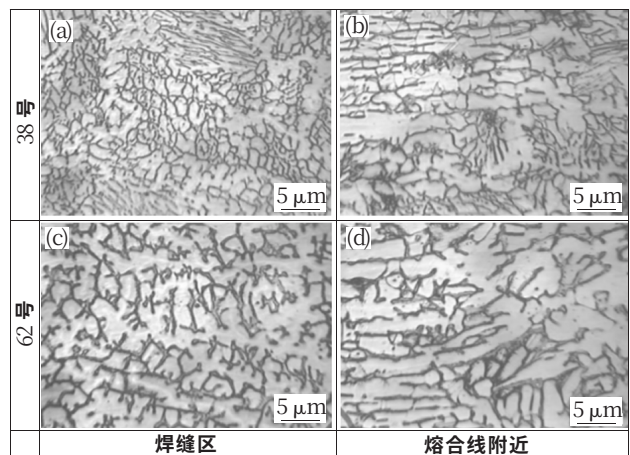


图 3 用 38 号和 62 号活性剂焊接的 321 不锈钢
A-TIG 焊缝的微观组织

Fig.3 Microstructure of A-TIG welding seam of the 321
stainless steel welded by active agent 38 and 62

2.2.7 晶间腐蚀

在金相显微镜和扫描电镜下观察组织,可以明显看到不锈钢的晶界受腐蚀而变宽,多呈网状,严重时还有晶粒脱落现象。这是典型的不锈钢晶间腐蚀现象。由于表面几乎看不出任何变化,但材料的性能已经急剧下降,轻轻敲击即可粉碎,所以晶间腐蚀是一种危险性极大的腐蚀破坏。

表 9 为不锈钢 321 板材 A-TIG 焊接采用 38 号和 62 号活性剂配方所得焊缝晶间腐(下转第 80 页)

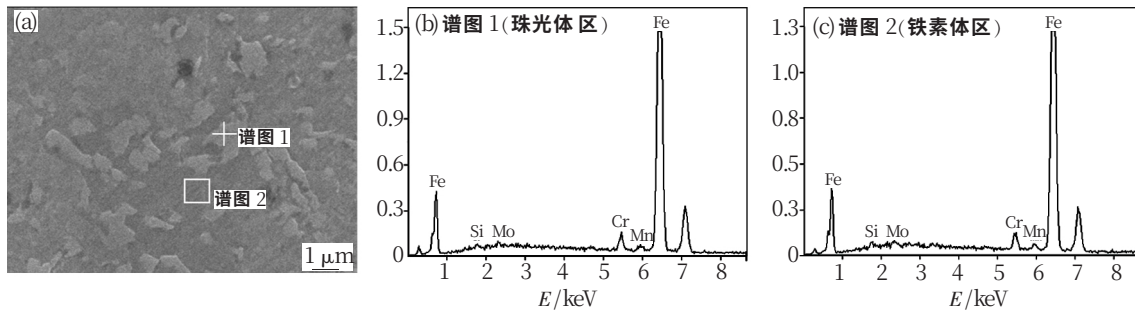


图5 焊缝 SEM 图像及铁素体与珠光体区 EDS 图 Fig.5 SEM image of weld seam and EDS image of ferrite and pearlite zones

由图 6 可以看出,在焊缝区域内有夹杂物生成。黑色圆形斑点区域内部呈方形,由 Al 形核。 SiO_2 、MnS 等化合物在此晶核上生长。由于焊剂及其焊丝内部药粉含有大量脱氧脱氢的 Mn、Si 等元素,随着焊丝熔化进入熔池内部,由于焊接速度较慢,旋转电弧对熔池的内部搅拌不足,导致杂质没有迅速地从熔池内浮出,形成了夹杂物。

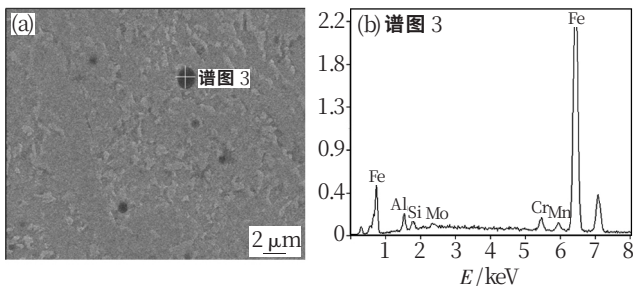


图6 焊缝区夹杂物 SEM 图像及其 EDS 图 Fig.6 SEM and EDS images of inclusions in the weld zone

3 结论

(1) 由缆式焊丝熔化产生的旋转电弧力使熔池

向两边扩散,使得熔宽增加;旋转电弧力无法很好地集中作用于熔池,熔深增加不明显。电流密度大,焊丝熔敷率高,可提高焊接速度,使焊接效率提高。

(2) 焊缝显微组织主要为铁素体和珠光体。铁素体以大量细晶铁素体和少量针状铁素体组成,珠光体主要以粒状形式存在。细晶铁素体和粒状珠光体分布均匀,使焊缝得到良好的强度和韧性,但是较多的粒状珠光体会使焊缝区冲击韧性下降。

(3) 当焊接速度较慢时,旋转电弧搅动熔池能力下降,夹杂物不能完全随焊渣浮出,导致夹杂产生。

参考文献:

- [1] 方臣富,陈志伟,胥国祥,等. 缆式焊丝 CO_2 气体保护焊工艺研究[J]. 金属学报, 2012, 48(11): 1299-1305.
- [2] 王宗杰. 熔焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 杨克,杨可,包晔峰. Q345D 钢埋弧焊接头组织与性能[J]. 电焊机, 2014, 44(1): 87-90. [E]

(上接第 76 页)

表 9 用 38 号和 62 号活性剂焊接的 321 不锈钢 A-TIG 焊缝的晶间腐蚀结果

Tab.9 Intergranular corrosion result of A-TIG welding seam of stainless steel 321 by active agent 38 and 62

试样编号	弯曲角度 / (°)	压头直径 / mm	检测温度 / °C	检查情况	备注
38-C2	180	5	26	未见晶间腐蚀裂纹	-
62-C2	180	5	26	未见晶间腐蚀裂纹	-

蚀的结果。晶间腐蚀结果显示,对该两种活性剂配方所得焊接接头腐蚀后,均未出现晶间腐蚀裂纹。

3 结论

本文通过对 6mm 厚的 321 不锈钢板材进行活性钨极氩弧焊,分别选取了两种活性剂配方,并对所得焊接接头进行 RT 无损检测、弯曲试验、常温拉

伸试验、宏观金相、微观金相和晶间腐蚀等试验项目。试验证明采用这两种活性剂配方进行 A-TIG 焊可以显著提高焊接熔深,并且可以一次成型,性能较好。

参考文献:

- [1] 武丹. A-TIG 焊的研究[D]. 大连:大连铁道学院, 2003.
- [2] 任雪婷. 不锈钢单组份活性剂 A-TIG 规范及活性机理的研究[D]. 大连:大连交通大学, 2004.
- [3] 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, 2004(4): 16-18.
- [4] 攀丁,顾玉芬,林焰,等. 低碳钢 A-TIG 焊接法的试验研究[J]. 甘肃工业大学学报, 2000, 26(3): 16-21.
- [5] 张瑞华. 活性焊接法及熔深增加机理的数值模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2005. [E]