

带活性剂的氩弧焊接(A-TIG) 技术工艺研究

刘红斌, 陈少斌, 向彦君
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710061)

摘 要: 对 A-TIG 技术的发展情况、机理进行了阐述, 通过课题研究自主研制出了针对 1Cr18Ni9Ti 和 S-03 两种材料的焊接用活性剂, 用所研制出的活性剂进行了厚度为 6mm、8mm 的 1Cr18Ni9Ti 平板对接试件及 6mm 厚度 S-03 钢材料平板对接试件的自动和手工 A-TIG 焊接, 完全满足 QJ1842-95《结构钢、不锈钢熔焊技术条件》I 级接头要求, 表明所研制的活性剂及工艺技术具有较强的工程适应性。

关键词: 活性剂; A-TIG; 焊接熔深

中图分类号: TG44

文献标识码: B

文章编号: (2005) 06-0035-07

Techniques research of argon arc welding (A-TIG) with active agent

Liu Hongbin, Chen Shaobin, Xiang Yanjun
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710061, China)

Abstract: Argon arc welding (A-TIG) techniques with active agent have the advantage of high welding efficiency, small welding deformation and layer defects for multilayer welding. So the technique is given great attention. This paper reports the developing state and mechanism of A-TIG technique. Active agent for welding is developed for 1Cr18Ni9Ti and S-03 materials. Flat plate samples of 1Cr18Ni9Ti material with 6mm and 8mm thickness and S-03 material with 6mm thickness were welded by A-TIG automatic and manual welding. The welding samples fully meet the requirement of QJ1842-95 Fusion Welding Specification of Structural Steel and Stainless Steel for joints in Class one. The active agent developed and techniques are of wide adaptability for engineering application.

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

收稿日期: 2005-07-10; 修回日期: 2005-09-09

作者简介: 刘红斌(1967—)男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机制造技术。

1 带活性剂的氩弧焊工艺发展概述

1.1 常规氩弧焊工艺所存在的问题

氩弧焊是高质量焊接的代表, 常用来焊接有色金属、不锈钢, 超高强度钢, 特别是在进行单面焊双面成形的焊接时, 可得到高质量的具有良好反面成形的焊缝。但常规的氩弧焊单道焊熔深有限(约3mm), 焊接厚度大于3mm的不锈钢类产品需进行氩弧焊多层焊接, 导致出现以下问题:

- (1) 多层焊接的焊接变形大;
- (2) 多层焊接的层间焊接缺陷;
- (3) 生产效率太低, 操作人员劳动强度大;

为了解决普通氩弧焊的焊接熔深和多层焊接所存在的问题, 60年代乌克兰巴顿焊接研究所(PWI)首创了目的在于提高氩弧焊焊接熔深的氩弧焊用焊剂, 这种焊剂是一种无机物粉末悬浮在挥发性液体中的悬浊液混合物, 焊接前涂敷在焊接接头基本金属上, 挥发性液体挥发后进行焊接, 同常规的试验情况相比可增加熔深多达300%^[1]。

1.2 带活性剂的氩弧焊机理

带活性剂的氩弧焊(A-TIG)增加焊接熔深、提高焊接效率的机理研究很多, 目前主要形成了电弧收缩和熔池表面张力流两种观点。

电弧收缩理论认为, 焊接时涂敷于阳极(工件)的焊剂中卤素化合物在电弧热的作用下挥发出来, 所产生的电负性元素吸附了位于阳极的电弧中外围区域用于电弧导电的电子使阳极电弧收缩, 并导致了阳极压降及电场强度的增强, 同时增加了电弧热量和熔透能力; 目前对于氧化物导致电弧收缩的原因, 初步归结为挥发态的氧化物也具有吸附电子的能力^[2]。

表面张力影响理论认为, 像Fe、Ni、Co这样的材料, 其液态金属的表面张力系数随温度的提高而降低, 焊接熔池中心的温度高而周边温度低, 液态金属形成从熔池中心向熔池周边的表面张力流, 电弧向熔池底部的传热效率低, 所形成的焊缝宽而浅; 当液态金属处于氧化性气氛中或液态金属中含有氧元素、硫元素或其它某种微量元素时, 液态金属表面张力数值降低, 同时表面张力系数随温度的提高而增大, 在焊接熔池情况下, 由于熔池中心区温度最高, 液态金属形成从熔池

周边向熔池中心的表面张力流, 熔池中心区的电弧热量通过液态金属直接传向熔池底部, 对熔池底部的加热效率提高, 从而形成更大的熔深^[3]。

从日前对于氩弧焊用焊剂使焊缝熔深增加的机理研究情况看, 具有一定的复杂性和不肯定性, 但这并不影响A-TIG技术的推广应用。

2 研究目的

焊接在研制生产中是一种主要的工艺方法, 特别是随着液氧/煤油高压补燃发动机的研制, 需大量焊接厚度大于3mm的不锈钢类产品, 但常规的氩弧焊单道焊熔深有限, 厚件大于3mm的不锈钢焊接时需开坡口进行多层多道焊, 焊接过程繁琐, 效率低下, 焊接变形大, 焊接缺陷多, 明显限制了该工艺方法的适应范围, 因此研究一种单层焊接能显著提高氩弧焊熔深的工艺方法是非常必要的。

虽然世界各国针对各种母材研制的活性剂配方均处于严格的技术保密范围内, 但是A-TIG在前苏联90年代已经进入实用阶段, 90年代末, 美国、英国、日本也致力于氩弧焊用焊剂的研究、发展和应用, 展示了氩弧焊用焊剂具有独特的优势, 说明该工艺技术是切实可行的, 并且具有良好的应用前景。为了满足航天型号产品的发展和研制生产需要, 提高工艺技术水平, 同时跟踪世界先进的工艺技术, 经过方案论证, 成立了课题组, 对A-TIG技术进行了院级工艺预先研究。

3 单组分活性剂的选用及试验情况

3.1 单组分活性剂的选用

从活性剂氩弧焊的原理分析, 由于氧化物和卤化物对于焊接电弧的影响及熔化金属表面张力的影响作用, 活性剂的成分选用同时考虑了焊接冶金过程对1Cr18Ni9Ti、S-03化学成分的影响作用。活性剂组分采用了氧化物(如SiO₂)和卤化物(如NaF)的粉末进行试验。

3.2 单组分活性剂的试验

为了考验活性剂各组分对焊接的贡献, 在 $\delta 6\text{mm}$ 1Cr18Ni9Ti、S-03平板上涂敷各单组分活性剂, 在相同焊接参数下进行堆焊试验, 比较电弧

的收缩、焊缝的宽度、焊透情况、焊缝的成型情况等，为活性剂的选择提供工程实践数据。

3.2.1 研究活性剂的配料用溶剂

活性剂的配料采用无水乙醇或者丙酮作分散剂，活性剂以一定的比例分散在分散剂中后涂敷在焊接母材待焊部位，分散剂挥发后进行焊接。

3.2.2 活性剂的涂敷工艺方法

活性剂的涂敷采用了浆料刷涂和喷涂的工艺方法，刷涂和喷涂前要将浆料充分均匀化，采用在试样上涂敷前后测试件的质量变化值进行厚度

控制。

3.2.3 焊接设备

为了排除手工焊接时焊接速度、弧长的控制偏差对焊接线能量和电弧集中的影响，试验中采取了 250PC 自动氩弧焊设备进行焊接，以比较在相同焊接参数下活性剂的厚度、弧长、氩气流量对焊接熔深和焊接质量的影响。

3.2.4 平板堆焊试验

各单组分活性剂在相同焊接参数条件下，在平板上进行了堆焊试验。焊接试件的检测结果见表 1 所示。

表 1 试验件焊接结果
Tab.1 Test results of the welding samples

活性剂组分	焊缝宽度	焊缝成形	表面颜色	焊漏情况
无	9	良好	金黄	无（未焊透）
A	5.5	稍差	较黑	焊漏较均匀
B	4	良好	较好	不均匀滴状焊漏
C	8	良好	黑色	不均匀滴状焊漏
D	8.7	差	黑皮	不均匀滴状焊漏大
E	6.5	好	较好	不均匀焊漏

3.2.5 对单组分活性剂试验结果的分析

从单组分活性剂的试验情况可见，A、B、C、D、E 粉均对于增加焊接熔深有利。其中 A 和 B 对焊接电弧的收缩最明显，B、C、E 粉活性剂的焊缝成形及表面颜色较好，D 活性剂熔池金属的流动性较好，但是焊缝表面成形较差，存在黑色附着物且硬度较高。

对比各单组活性剂所起的作用，要提高焊接熔深，同时保证焊缝的成形及表面状态，必须采用混合活性剂才能满足要求。

的稳定性等方面的初步试验，从而确定对缝焊接的工艺参数。

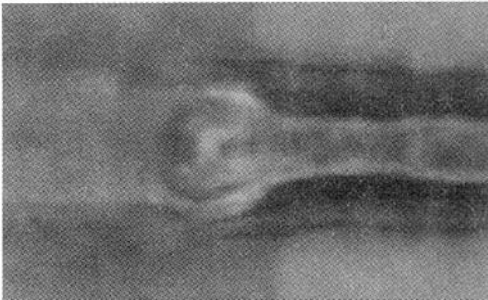


图 1 焊缝从无活性剂区域到有活性剂区域的正面宽度变化情况

Fig.1 Widths change of the welding seam with and without active agents

4 混合活性剂的焊接试验

4.1 混合活性剂的组分

根据各种金属、非金属氧化物及氟化物对焊缝收缩、熔池表面张力的影响情况，确定出以 SiO₂ 粉为主但成分不同的 1[#]和 2[#]两种混合活性剂。

4.2 活性剂的工艺试验情况

4.2.1 平板堆焊试验

平板堆焊试验主要用于两种活性剂配方在不同焊接参数下，焊接熔深、焊缝成型、焊接电弧

焊接试件采用一半涂活性剂、一半不涂活性剂，焊接时从无活性剂的部位向有活性剂的部位焊接。焊接试件在焊接后剖切，可以看出在同一焊接参数下有、无活性剂区域焊缝的成型、焊缝宽度的变化、焊接熔深及熔池的形状等。

通过大量的平板堆焊试验可以看出, 1[#]和 2[#]活性剂均可以使电弧稳定燃烧, 从无活性剂区域到有活性剂区域, 可以看到电弧的强烈收缩作用, 焊缝的宽度收缩明显。

图 1 为使用活性剂在 δ6 试件上有、无活性剂区域焊缝正面宽度的变化情况。

4.2.2 平板对缝焊接试验

4.2.2.1 焊接试件

焊接试件材料分别为 1Cr18Ni9Ti、S-03 钢,

δ6, 长×宽为 300×100 的标准试件对接, 对缝长度为 300mm, 对接间隙为零; 共进行了 1[#]、2[#]活性剂下 1Cr18Ni9Ti、S-03 两种材料共四种状态的试件焊接, 焊接试件起焊位置 30mm 范围不涂活性剂, 用以比较有、无活性剂区域的焊缝成型等情况, 由于该位置无法焊透, 因此在 X 射线检测时不做要求。焊接试件的正、反面成型情况见图 2 所示。

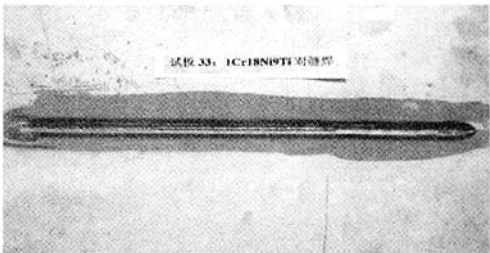
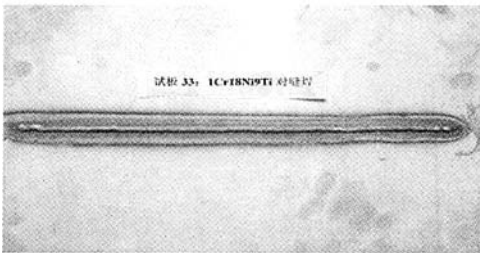


图 2 δ6 对缝焊接试件正、反面

Fig.2 Obverse and reverse sides of δ6 butt welding plate samples

4.2.2.2 焊接试件的焊接参数、外观情况及 X 射线检查情况

用 1[#]、2[#]两种活性剂、1Cr18Ni9Ti 及 S-03 钢

两种 δ6 材料共焊接对缝试件 4 件, 其焊接参数及焊接质量检测情况见表 2 所示。

表 2 焊接参数及焊接质量检测情况

Tab.2 Test results of welding parameters and quality

活性剂号	试件材料	试件编号	焊接参数	外观检查情况	X 射线检测结果
1	1Cr18Ni9Ti	1 #	I=140A V=190	正面宽度 (有/无活性剂区): 4.5 mm /8mm; 正面凹陷: 0.4mm; 反面余高: 1.1mm;	QJ1842-95 I 级合格
	S-03	3 #	I=160A V=190	正面宽度 (有/无活性剂区): 4 mm /9.5mm; 正面凹陷: 0.5mm; 反面余高: 1.5mm;	
2	1Cr18Ni9Ti	2 #	I=160A V=190	正面宽度 (有/无活性剂区): 4.2 mm /9.5mm; 正面凹陷: 0.6mm; 反面余高: 1.3mm;	QJ1842-95 I 级合格
	S-03	4 #	I=170A V=200	正面宽度 (有/无活性剂区): 5.0mm /10.5mm; 正面凹陷: 0.4mm; 反面余高: 1.3mm;	

4.2.3 焊接试件的理化分析

4.2.3.1 拉伸强度试验

4 件焊接试件的拉伸强度值见表 3。

按照 QJ1842-95《结构钢、不锈钢熔焊技术条件》的要求，Ⅰ级对接接头的抗拉强度应不低于材料抗拉强度的 90%，而 1Cr18Ni9Ti 材料的抗拉强度为 530MPa，S-03 材料的抗拉强度值为 910MPa，可以看出 1[#]、2[#]活性剂下 δ61Cr18Ni9Ti、S-03 对缝焊接接头拉伸强度均满足 QJ1842-95 Ⅰ级对接接头的强度要求。

表 3 4 件焊接试件的拉伸强度值

Tab.3 Tensile strength of 4 pieces of welding plate samples

试件号	试 件 状 态	抗拉强度 MPa	
1#	1 [#] 活性剂、1Cr18Ni9Tiδ6 对接	659	598
2#	2 [#] 活性剂、1Cr18Ni9Tiδ6 对接	556	572
3#	1 [#] 活性剂、S-03 δ6 对接	1121	1082
4#	2 [#] 活性剂、S-03 δ6 对接	1091	1060

4.2.3.2 金相组织分析

(1) 焊缝宏观

除涂活性剂焊缝表面存在凹陷外，所有焊缝剖面试样上均未见气孔、裂纹等焊接缺陷，对接焊缝宏观形貌见图 3~4。从同一焊接试件涂活性剂与不涂活性剂区域的焊缝断面形貌看，具有较大差异，1Cr18Ni9Ti A-TIG 熔池呈现出 X 形，S-03 A-TIG 熔池呈现出 I 形；

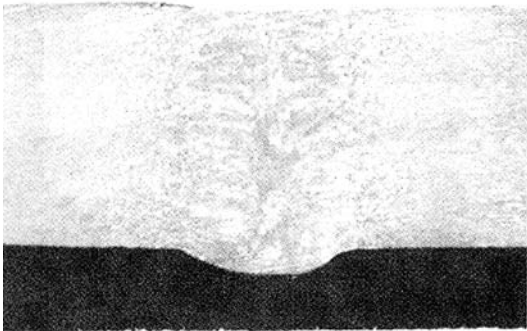


图 3 试板（涂活性剂/1Cr18Ni9Ti）

Fig.3 Welding plate samples with active agent

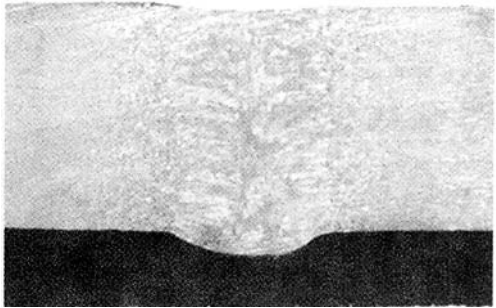


图 4 试板（涂活性剂/S-03）

Fig.4 Welding plate samples with active agent

(2) 焊缝高倍

1Cr18Ni9Ti 对接焊缝焊缝呈铸状枝晶组织，熔合线清晰可见，热影响区小于 2.0mm，该区域为明显的再结晶组织，但保留有原始组织中的变形流线。见图 5。



图 5 试板（涂活性剂/1Cr18Ni9Ti）×40

Fig.5 Welding plate samples with active agent

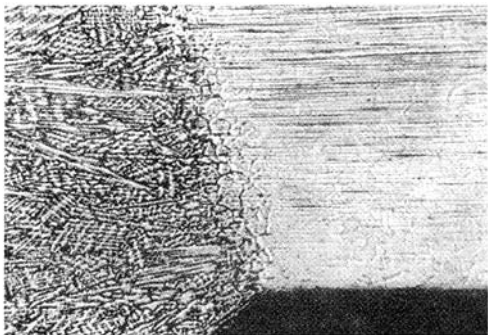


图 6 试板（涂活性剂/S-03）×40

Fig.6 Welding plate samples with active agent

S-03 钢对接焊缝的大部分区域为板条状马氏体组织,焊缝底部可见铸状枝晶组织,熔合线不甚明显,热影响区小于 3.4mm,与基体相比,热影响区组织明显粗大,呈淬火组织特征。见图 6。

4.2.3.3 1Cr18Ni9Ti 焊接试件的晶间腐蚀试验

从 1#、2# 1Cr18Ni9Ti 焊接试件上制取晶间腐蚀试件,按照 GB1223-75 进行 T 法晶间腐蚀试验,结果合格。

4.3 焊接试件的盖面焊接试验

由于活性剂采用的氧化物和卤化物组分在焊接电弧的热作用下熔化附着在焊缝的表面,有点类似于手工电弧焊的药皮残渣,但由于其厚度较薄,无法在冷却过程中自行脱落,但用钢丝刷可以去除;为了考验该层残渣在不去除条件下对焊缝表面凹陷的填丝盖面焊是否会产生夹渣缺陷,对表 2 中焊接合格的 86 1Cr18Ni9Ti、S-03 两件试件进行了手工氩弧焊填丝盖面,焊接后再次进行 X 射线检测,均满足 QJ1842-95 I 级对接接头的要求。

4.4 导管的焊接试验

为了考验活性剂氩弧焊在导管上焊接的适应性,特别是考验环形焊缝起弧部位的焊透性,进行了 1Cr18Ni9Ti 和 S-03 两种材料导管的焊接试验。

经过 $\Phi 28 \times 6$ 1Cr18Ni9Ti 导管、 $\Phi 102 \times 6$ S-03 钢管的活性剂焊接试验,均达到了理想的效果。

4.5 手工氩弧焊的适应性试验

对于带活性剂的焊接接头采用自动氩弧焊工艺方法,可以固定电弧长度来进行焊接,在焊接的熔深和焊漏尺寸等焊缝成形方面比较容易控制。但对于液体火箭发动机,受焊接结构的限制,大量存在必须进行手工焊接的接头,而手工焊接对于电弧长度、焊缝成形的控制相对较难,特别是在活性剂的作用下,需要考验以下两个方面的焊接适应性:

(1) 手工 TIG 焊接时由于操作者要观察熔池的状态,焊枪钨极与焊接试件必须成一定的角度,需要考验在焊枪倾斜状态下,电弧吹力作用下涂敷状态的活性剂能否保持在待焊接部位,熔化状

态的活性剂能否不被电弧吹力推离熔池表面,保证焊接熔深;

(2) 由于在活性剂条件下焊接,电弧收缩明显,因此,对操作者的技能有一定要求,需要考验手工焊接操作者是否能够有效地控制收缩电弧,保证焊接质量。

经过大量的手工 TIG 焊接培训和试验,证明用酒精作为分散剂涂敷的活性剂在手工 TIG 焊枪与待焊接表面成 $120^\circ \sim 130^\circ$ 夹角的状态下(见图 7),活性剂仍附着在焊接母材表面,熔池表面存在的熔化状态活性剂对焊接电弧的收缩作用明显,可以满足焊接的需要。

焊工经过培训,在很短时间就可以掌握这种技术,可以有效地控制收缩电弧,并能保证焊接质量。

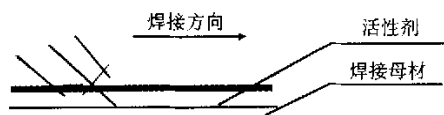


图 7 手工 TIG 焊示意图

Fig.7 Sketch map of the manually TIG welding

对涂敷了活性剂的 6mm 厚度的 1Cr18Ni9Ti 及 S-03 板材、8mm 厚度的 1Cr18Ni9Ti 平板的对缝接头进行手工 TIG 焊接,焊接后试件的正、反面成形情况见图 8 所示,焊接参数及尺寸检测结果见表 4,对试件进行的 X 射线检测表明,焊接质量完全满足 QJ1842-95《结构钢、不锈钢熔焊技术条件》I 级接头要求。

通过以上试验证明,活性剂条件下手工焊接质量可以达到 QJ1842-95 I 级要求。

对于壁厚大于 6mm 的焊接试件的焊接,由于厚度较大,相应的熔池体积及重量较大,手工焊接时焊工可以根据熔池的形状及时调节焊接速度,避免自动 TIG 焊接时的滴状焊漏,表现出较大的优越性。

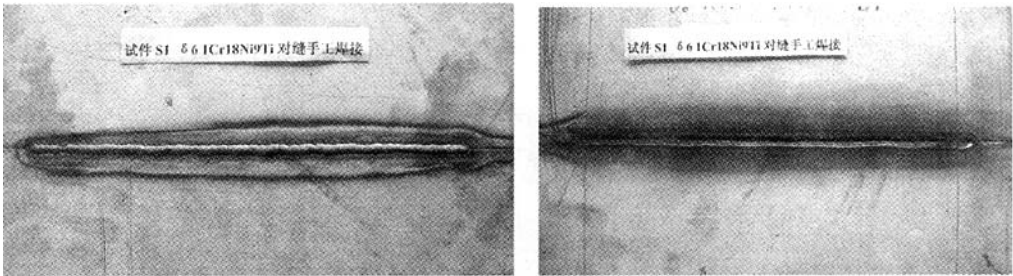


图 8 6mm 厚度平板的对缝手工 TIG 试件正、反面成形情况

Fig.8 Obverse and reverse sides of 66 TIG butt welding plate samples

表 4 焊接参数及尺寸检测结果

Tab.4 Test results of welding parameters and dimensions

活性剂号	试件材料	试件编号	焊接电流	外观检查情况	X 射线检测结果
1	1Cr18Ni9Ti δ6	S1	I=120A	正面宽度：5.0 mm； 正面凹陷：0.5 mm； 反面余高：1.5 mm；	QJ1842-95 I 级 合格
	1Cr18Ni9T δ8	S2	I=160A	正面宽度：11.5 mm； 正面凹陷：1.5 mm； 反面余高：2.1 mm；	
	S-03 δ6	S3	I=140A	正面宽度：7.2 mm； 正面凹陷：0.7 mm； 反面余高：1.5 mm；	

5 结论

(1) 通过课题研究，开发出的适应于 1Cr18Ni9Ti 及 S-03 材料的 TIG 焊活性剂及 TIG 焊接工艺，单层焊接熔深可达到 8mm，焊接质量及接头性能达到 QJ1842-95《结构钢、不锈钢熔焊技术条件》I 级接头要求，达到国内先进水平。

(2) 针对 1Cr18Ni9Ti 及 S-03 材料研制的活性剂及焊接工艺，适用性较强，可以应用于研制型号产品及民品相同材料接头的焊接，且成本较低，具有良好的应用前景及经济效益。

参考文献：

[1] 杨春利，牛尾诚夫，等. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究 I[J]. 焊接 2000（4）：16.

[2] Lucas W. Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes[J]. Welding and Metal Fabrication. Jaunary,1996,11-17.

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

（编辑：王建喜）