

# 钛合金 TA10 焊接技术 在燃料储罐上的应用

郭会民

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为了摸索 TA10 钛合金的焊接工艺技术, 通过大量的焊接工艺试验及分析, 拟定合理的焊接工艺参数, 同时根据 TA10 钛合金的焊接特点, 设计了大量的气体保护装置, 将焊缝与热影响区在焊接及焊后冷却过程中温度高于 300℃ 的区域置于氩气的良好保护之下, 经过焊接工艺评定试验验证, 最终确定了钛合金 TA10 焊接最佳的焊接工艺规范参数, 焊缝表面的保护效果、氧化程度、焊缝 X 射线检测结果、熔敷金属化学成分及焊缝力学性能等各项技术指标均达到了设计要求, 保证了产品的焊接质量。

**关键词:** 钛合金; 焊接; 保护装置

**中图分类号:** V261.3

**文献标识码:** B

**文章编号:** (2008) 04-0037-06

## Titanium alloy TA10 welding technology for fuel tank application

Guo Huimin

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Welding technology is one of the most critical issues for manufacturing titanium pressure vessels. For the purpose of developing TA10 Ti alloy welding technology, appropriate process parameters were drafted on the basis of extensive tests and analysis of welding technology. Meanwhile, according to welding characteristics of TA10 Ti alloy, a number of gas protection devices were designed to put the welding and heat-affected zone with the temperature above 300℃ under the protection of argon atmosphere during welding and after work cooling process. After the welding technology verification tests, the optimum standard parameters were finally determined for TA10 Ti

收稿日期: 2008-03-26; 修回日期: 2008-06-30。

作者简介: 郭会民 (1966—), 男, 高级工程师, 研究领域为焊接工艺。

alloy welding. All technology design requirement specifications, such as protective effects of weld surface, oxidation degree, X-ray weld inspection results, chemical composition of deposited metal, and mechanical properties of welds are satisfied. The welding of products and the welding quality of TA10 Ti alloy welded joints are assured.

**Key words:** titanium alloy, welding, protection device

1 引言

以钛合金 TA10 为主体材料的燃料储罐属第二类储存压力容器,其技术关键在于确定合适的焊接工艺保证钛合金 TA10 焊接接头的焊接质量及各项力学性能指标,以适应常温下 UDMH、DT-3 介质的应力腐蚀,为了摸索钛合金焊接的特点及操作要领,进行了一系列焊接工艺试验分析,设计自制了大量气体保护装置,通过试验及分析确定出最佳的焊接工艺规范参数,最后完成试件及产品的焊接,各项技术指标均达到了设计要求。

2 设计参数

燃料储罐设计参数主要有:设计压力 1.0 MPa;

设计温度为常温;工作介质为 UDMH、DT-3;主体材料为 TA10。所有 A、B 类焊缝要求 100%X 光检测,按 JB/T4730.2-2005《承压设备无损检测》-RT-II 级标准要求。

3 设备主体材料化学成分及力学性能

主体材料为 TA10, 86, 技术条件为 JB/T4745-2002《钛制焊接容器》,供货状态为退火状态,板材的化学成分见表 1,室温力学性能见表 2。

焊丝的牌号为 STA10R, Φ2.4, 标准为 JB/T4745-2002,焊丝的化学成分见表 3。

表 1 板材的化学成分

Tab.1 Chemical composition of sheets

元素	Mo	Ni	Fe	C	N	H	O	其他元素	
标准值/(%)	0.2~0.4	0.6~0.9	≤0.30	≤0.08	≤0.3	≤0.015	≤0.25	单个≤0.1	总和≤0.4
供货值/(%)	0.34	0.69	0.08	0.030	0.015	0.001	0.15	单个<0.05	总和<0.20

表 2 板材的室温力学性能

Tab.2 Mechanical properties of sheets at room temperature

性能指标	$\sigma_t$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /(%)
标准值	≥485	≥345	≥15
供货值	485	345	15

表 3 焊丝的化学成分

Tab.3 Chemical composition of welding wires

元素	Mo	Ni	Fe	C	N	H	O	其他元素	
标准值/(%)	0.2~0.4	0.6~0.9	≤0.30	≤0.03	≤0.02	≤0.008	≤0.12	单个≤0.05	总和≤0.20
供货值/(%)	0.29	0.80	0.18	0.020	0.015	0.008	0.10	单个<0.05	总和<0.20

## 4 TA10 的焊接性分析

TA10 属耐蚀低合金钛, 所含合金元素不多, 因而同工业纯钛一样, 影响其力学性能和焊接性能的因素主要是杂质元素的含量。

### 4.1 钛元素的化学性质

钛是非常活泼的金属, 高温下与许多气体有很强的亲和力, 钛加热至 300℃ 时开始吸收氢, 400℃ 时开始明显氧化, 500℃ 时开始明显氮化, 600℃ 时氧化、氮化均很剧烈, 1000℃ 时碳可与钛反应, 由于氢、氧、氮、碳均系间隙元素, 溶于钛形成间隙固溶体, 使晶格产生较大的扭曲和畸变, 变形抗力增加。上述元素因温度降低而溶解度下降, 会析出氢化钛、氧化钛、氮化钛及碳化钛等脆性化合物, 使钛焊缝的强度和硬度增加, 塑性、韧性严重下降, 引起焊缝脆化。因此钛的焊接必须在惰性气体保护下进行, 不但熔池处要保护 (利用枪体保护), 而且在焊后刚开始冷却时的焊缝和热影响区都应保护 (后拖装置保护), 即 300℃ 以上区域均应处于惰性气体保护下。

### 4.2 存在裂纹的可能性

钛中硫、磷、碳等能在晶界与钛形成低熔点共晶的杂质含量很少, 有效结晶温度区间窄, 焊缝凝固时收缩量小, 因而不会产生焊缝的热裂纹。

钛焊缝的裂纹属于冷裂纹, 属氢致裂纹, 是由于熔池中氢含量过高, 含有过饱和氢的  $\alpha$  相发生共析反应, 析出氢化钛, 氢化钛本身强度低, 共析反应中产生的体积膨胀会引起很大的晶间内应力, 可能产生晶间微裂纹, 并扩展成裂纹。焊缝金属本身如含杂质过高而使塑性下降太多, 产生裂纹的可能性也增大。对于容器用钛而言, 只要控制好焊丝的杂质含量不过高, 焊前清除焊丝和焊件表面的水分、氧化膜、油污、有机杂质等, 即控制住氢源, 焊缝一般不会产生冷裂纹。

钛合金焊接时, 热影响区可能出现延迟裂纹, 这与氢有关。焊接时由于熔池和低温区母材中的氢向热影响区扩散, 引起热影响区氢含量增加, 加上此处不利的应力状态, 结果会引起裂纹。

### 4.3 易产生气孔

气孔是钛合金焊缝中常见的缺陷。钛焊接中产生的气孔主要是氢气孔, 也有 CO 气体形成的气孔。如果气泡在熔池中上逸时, 熔池表面先固化结晶, 气泡不能逸出焊缝时, 则会形成皮下针孔。

### 4.4 焊接相变对组织和性能的影响

钛有两种同素异构的晶体结构, 882℃ 以上到熔点为体心立方晶格, 叫  $\beta$  相, 882℃ 以下为密排六方晶格, 叫  $\alpha$  相。钛合金在焊接高温下, 焊缝及部分热影响区为  $\beta$  晶格, 有晶粒急剧长大的倾向。钛又具有熔点高、比热容大、热导率低等特性, 因此焊接时高温停留时间较长, 约为钢的 3~4 倍, 高温热影响区较宽, 使焊缝和高温热影响区的  $\beta$  晶粒长大明显。在焊接冷却时, 焊缝和高温热影响区金属由  $\beta$  相向  $\alpha$  相转变, 正常的焊接冷却属快速冷却,  $\beta$  相容易转变为针状  $\alpha$  组织, 会使焊接接头的塑性下降较多, 因而钛焊接时, 通常应采用较小的焊接线能量和较快的冷却速度, 以减少高温停留时间, 减少晶粒长大的程度和缩小高温热影响区, 减少塑性下降的影响。

## 5 焊接工艺方案

### 5.1 焊接方法的选择

根据 JB/T4745-2002《钛制焊接容器》的规定, 对于钛容器焊接推荐使用熔化极氩弧焊及钨极氩弧焊, 因为采用手工钨极氩弧焊时, 只要采取有效的保护措施, 控制好焊接电流, 焊缝内部很少出现焊接缺陷, X 光透视合格率在 95% 以上。根据以上分析, 决定采用手工钨极氩弧焊。

### 5.2 焊接坡口设计

钛材在焊接时液态的熔池流动性较好, 所以在设计焊接坡口时, 选择 V 型坡口, 坡口角度选 80°, 钝边取 0.5, 焊接间隙取 2.0~2.5。

### 5.3 钛焊丝的选择

所用焊丝在正常焊接工艺下, 使焊缝的抗拉强度达到母材退火状态的抗拉强度标准值下限, 同时焊缝的塑性不低于退火状态下的母材或与母材相当, 所用焊丝的耐蚀性也应与母材相当。

焊丝中的氮、氧、碳、氢、铁等杂质元素的

含量上限值应大大低于母材中杂质元素的标准含量上限值。一般不允许从所焊母材上裁条充当焊丝。

根据以上分析决定采用 JB/T4745-2002 附录 D《压力容器用钛及钛合金焊丝》中的 STA10R 焊丝  $\Phi 2.4$ 。

5.4 氩气保护效果的考虑

焊接用氩气纯度不应低于 99.99%，露点不应高于  $-50^{\circ}\text{C}$ ，且符合 GB/T4842 的规定，当瓶装氩气的压力低于 0.5MPa 时不宜使用。

采用手工钨极氩弧焊时，氩气保护的效果直接影响焊缝的质量，必须将焊缝与热影响区在焊接及焊后冷却过程中温度高于  $300^{\circ}\text{C}$  的区域置于氩气的良好保护之下。所有焊接接头的正面及 A 类焊接接头的背面应进行惰性气体保护，B、C、D 类焊接接头背面一般也应进行惰性气体保护。焊后应对所有钛焊缝与热影响区表面颜色进行检查，X 光检测结果也间接反映出保护效果是否良好。

5.5 焊接保护装置的设计

纵焊缝底层封底、填充及盖面层焊接时，除焊枪通氩气保护外，还要采取后拖保护装置，见图 1；背面用自制工装通氩气进行保护，见图 2；外环缝焊接时背面保护装置，见图 3；内环缝焊接时背面保护装置，见图 4；管-管对接采用保护气室，见图 5；管-板角焊缝、接管与封头角焊缝均按照相同的原理设计了相应的保护装置，为了防止铁离子污染，所有气体保护装置均采用不锈钢加工。

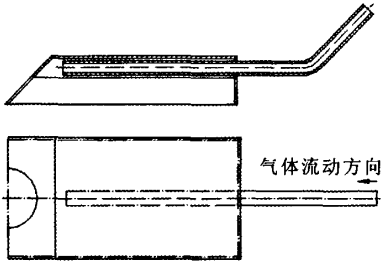


图 1 平板对接及纵缝后拖保护装置  
Fig.1 Rear-attached protection device for plate welding and longitudinal welding seams

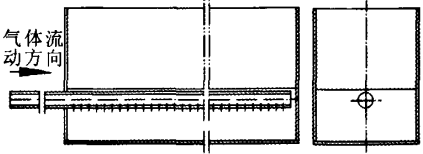


图 2 平板对接及纵缝背面保护装置  
Fig.2 Protection device for plate welding and the back of longitudinal welding seams

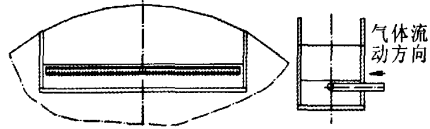


图 3 外环缝焊接时背面保护装置  
Fig.3 Protection device for the back of outer circle welding seams

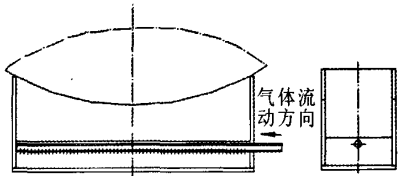


图 4 内环缝焊接时背面保护装置  
Fig.4 Protection device for the back of inner circle welding seams

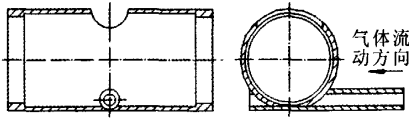


图 5 管-管对接保护气室  
Fig.5 Gas protection chamber for pipe-pipe welding

5.6 焊接工艺参数及设计

经过反复调试，采用了以下焊接工艺参数进行焊接，见表 4。

5.7 其他

试板及产品焊接坡口及其两侧各 25mm 范围内用机械方法彻底清除表面氧化膜。施焊前用丙酮或乙醇清洗脱脂。如清洗后 4 小时未焊，焊前应重新清洗，表面需要擦拭时，须用绸布。

对于厚板对接多层焊或焊接厚板与接管全焊透角焊缝时，必须等前道焊道适当冷却后再焊下

一道焊道，避免焊缝过热、晶粒粗大引起焊缝脆化。在焊接过程中发现焊接缺陷需要清除时，不

能用电动砂轮，而应该用电铣刀清除。

表 4 焊接工艺评定规范参数

Tab.4 Standard parameters determined by welding technology evaluation tests

层面	参 数					氩气流量/(L/min)		
	焊道数	焊丝直径	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度 (mm/min)	焊枪保护气	后拖保护气	背面保护气
正面一层	单道	Φ2.4	110	12	105	16	18	35
正面二层	单道	Φ2.4	120	12	110	16	18	35
反面一层	单道	Φ2.4	120	12	160	16	18	35
反面二层	单道	Φ2.4	120	12	110	16	18	35

6 焊接工艺评定

6.1 试板的焊接

材料牌号：TA10；状态：退火态；规格：δ6×110×450/2 件及 δ24×110×450/2 件。

平板对接时后拖保护装置见图 1，背面保护装置见图 2。

电源及极性：直流正接。

采用焊丝 STA10R（JB/T4745-2002 附录 D）Φ2.4。

6.2 检测结果

6.2.1 外观检查

焊缝与热影响区正、反面颜色为银白色或金黄色，说明保护效果良好。

6.2.2 无损检测

焊缝探伤结果 100%符合 JB/T4730.2-2005-RT-II 级标准要求。

6.2.3 力学性能检查

焊接接头抗拉强度为 532/535MPa，在热影响区内断裂，高出母材标准值下限 50MP 满足要求。

弯曲试验：在支座距离为 73.2mm，弯轴直径为 60mm，弯曲角度为 180°的条件下进行两个面弯，两个背弯，均无缺陷。

6.2.4 金相试验检查

焊缝及热影响区组织正常，未见焊接缺陷和冶金缺陷。

6.2.5 焊缝熔敷金属化学成分光谱试验

焊缝熔敷金属化学成分光谱试验结果见表 5，符合 JB/T4745-2002 的要求。

表 5 熔敷金属化学成分

Tab.5 Chemical composition of deposited metal

元素	Ti	C	Mo	Ni	Fe	Si	N	H	O
分析值/(%)	其余	0.029	0.25	0.76	0.069	0.053	0.020	0.0055	0.12

6.2.6 维氏硬度检测

焊接接头氧化程度可通过测定维氏硬度来评定。焊接接头表面的氧化越严重，表面硬度越高，焊缝和热影响区的维氏硬度值比母材的维氏硬度值超出的量以不超过 30 为良好。经过实际

硬度检查，焊缝区、熔合线、热影响区、母材的平均维氏硬度分别为 227、221、215、197.7，实际焊缝区、熔合线和热影响区的维氏硬度值比母材的维氏硬度值分别超出 29.3、23.3 和 17.3，符合要求，说明焊接接头表面的氧化程度在技术要

求范围以内。

通过对焊接试板的检测及分析,表明各项技术指标均符合标准要求,证明焊接工艺方案正确,焊接工艺评定符合 JB/T4745-2002 的规定。

## 7 产品的焊接

### 7.1 产品焊接

焊接方法采用手工钨极氩弧焊,焊接规范参数同 5.6 节,电源极性同 6.1 节,保护气体为 99.99% 的纯氩气,焊丝采用 STA10R,  $\Phi 2.4$ 。焊接时,将焊缝与热影响区在焊接及焊后冷却过程中温度高于 300℃ 的区域置于氩气的良好保护之下,具体保护措施有枪保护、后拖保护及背面保护,同 5.5 节,且在筒体纵焊缝的延长线上组对定位产品焊接试板,与筒体同时同规范焊接。

### 7.2 检测结果

#### 7.2.1 外观检查

焊后焊缝正、反面颜色为银白色或金黄色(致密),说明保护效果良好。

#### 7.2.2 无损检测

根据焊接工艺评定确定的焊接参数进行纵、环焊缝的定位和焊接,X 光透视合格率在 95% 以上。

#### 7.2.3 产品焊接试板力学性能检测

对产品焊接试板进行力学性能试验,试验结果为:焊接接头的抗拉强度为 503MPa,在热影响区内断裂;弯曲试验:在支座距离为 73.2mm,

弯轴直径为 60mm,弯曲角度为 180° 的条件下进行一个面弯、一个背弯,均无缺陷。产品的力学性能指标符合 JB/T4745-2002 要求。

## 8 结束语

通过焊接工艺试验及分析,钛合金 TA10 焊接时,除了要确定合理的焊接工艺,包括焊接方法选择、坡口设计、焊丝选择及焊接工艺规范参数的调试外,很关键的一点就是要对焊缝和热影响区正反面在焊接和冷却过程中温度高于 300℃ 的区域置于氩气的良好保护之下,设计自制大量气体保护装置。

### 参考文献:

- [1] 王平,胡爱萍.影响焊缝超声波探伤的因素分析[J].航天制造技术,2007,11(2): 43-45.
- [2] 王向明,刘文.TA15 钛合金薄板氩弧焊对接焊缝疲劳特性研究[J].飞机设计,2007,27(6): 24-27.
- [3] 封锡凯,常艳,李建华.电连接器接点焊接工艺研究[J].火箭推进,2007,33(6): 54-56.
- [4] 辛湘杰.钛的腐蚀、防护及工程应用[M].合肥:安徽科学技术出版社,1988,18.
- [5] 罗国珍.中国钛的研究和发展[J].稀有金属材料与工程.1997,26(5): 2-5.
- [6] 黄嘉琥.压力容器材料实用手册[M].北京:化学工业出版社,1994.

(编辑:马 杰)