

# 焊接及热处理对 T250 马氏体时效钢 薄壁旋压圆筒性能的影响

张黎旭 吴 军 胡春海 温树斌 邵 芬

(西安航天动力机械厂,西安 710025)

**文 摘** 采用脉冲 TIG 焊对 T250 马氏体时效钢薄壁旋压圆筒进行焊接,通过优化焊接工艺参数,得到了外观成形良好,内部缺陷达到 QJ175—93 0 级标准要求的焊缝。在焊前和焊后对 T250 马氏体时效钢薄壁旋压圆筒进行了热处理,研究了热处理对焊接接头金相组织、显微硬度、角变形和力学性能的影响。结果表明:时效处理后,焊缝金属枝晶晶界中存在逆转变奥氏体组织,显微硬度低于母材;熔合线附近焊接热影响区晶粒长大,最大处晶粒约为基材的 6 倍;焊前时效处理大幅度减小了焊接接头角变形;在焊后对试样进行 500℃ 时效处理的情况下,焊前时效处理使焊接接头抗拉强度和弯曲角都有所提高;焊前对旋压圆筒进行 500℃ 时效处理,焊后进行 500℃ 时效处理,得到了最佳焊缝强韧性匹配。

**关键词** T250 马氏体时效钢, 时效处理, 金相组织, 力学性能

中图分类号: TG407

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2014.03.023

## Infulence of Welding and Heat Treatment on T250 Maraging Steel Thin-Walled Spinning Cylinder

ZHANG Lixu WU Jun HU Chunhai WEN Shubin SHAO Fen

(Xi'an Aerospace Power Machine Factory, Xi'an 710025)

**Abstract** This paper adopts pulse TIG welding to weld the T250 maraging steel thin-walled spinning cylinder. By optimizing process parameters, weld joints with weld formation and internal defects meet the requirement of QJ175-93 0 grade was obtained. Heat treatment was carried out to T250 maraging steel thin-walled spinning cylinder prior to weld and post weld. The influence of heat treatment on microstructure, microhardness, angular distortion and mechanical properties of weld joints was studied. The results showed that after aging treatment, reverted austenite exist in dendritic grain boundary in weld metal, microhardness is lower than basic metal. The grain near the fusion lion of welding heat affected zone grow and the largist grain size was 6 times of base metal. Heat treatment prior to weld decreased the angular distortion greatly. On the premise of 500℃ aging treatment post weld, aging treatment prior to weld improve the tensile strength and the bending angle. The best strength and toughness properties was obtained by 500℃ aging treatment prior to weld and 500℃ aging treatment post weld.

**Key words** T250 maraging steel, Aging treatment, Microstructure, Mechanical properties

### 0 引言

马氏体时效钢是超高强度钢,具有良好的成形性、时效处理变形小、时效处理后有高强韧性等优点,是要求高强度、高精度的新一代固体火箭发动机壳体的理想选材。

马氏体时效钢通常采用钨极氩弧焊和真空电子

束焊焊接,为了提高焊接接头的强韧性,目前国内外主要通过焊后热处理改善焊接接头组织和性能,在焊后时效处理前对焊接接头进行高温均质化处理或固溶处理,可以得到良好的焊缝强韧性匹配,但由于温度高,热处理过程中变形严重,难以满足固体火箭发动机等形状精度高的产品的要求。此外, T250 马氏

收稿日期: 2014-03-21

作者简介: 张黎旭, 1984 年出生, 硕士, 主要从事超高强度钢焊接技术研究。E-mail: xuxu353@sina.com

体时效钢薄壁旋压圆筒焊接后焊接接头角变形较大,这降低了接头的承载能力,也增加了产品生产过程时因打磨背面焊缝而导致基材被打伤的风险。因此,如何在焊后只进行时效热处理的条件下,得到强韧性良好和角变形较小的焊接接头是 T250 马氏体时效钢薄壁旋压圆筒在固体火箭发动机金属壳体工程化应用

中需要研究解决的重要内容。

## 1 试验

### 1.1 材料

Φ130 mm×100 mm×1.5 mm 的 T250 马氏体时效钢旋压圆筒,材料化学成分见表 1。

表 1 T250 马氏体时效钢的化学成分  
Tab. 1 Chemical composition of T250 maraging steel

C	Ni	Mo	Ti	Al	S	P	Fe
≤0.01	18~20	2.75~3.25	1.2~1.6	0.05~0.15	≤0.005	≤0.008	余量

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 焊接试验

采用两组工艺参数(表 2)对 T250 马氏体时效钢薄壁旋压圆筒进行了脉冲钨极氩弧焊对接焊,接头坡口型式为钝边 1,坡口角度 35°。第一组采用两道次

焊接,第一道次空熔,保证焊透,第二道次填丝。第二组采用一道次填丝焊,焊接电流和焊接速度相对较大。焊前清理待焊表面至露出金属光泽。装配时错边量小于 0.15 mm,装配间隙小于 0.5 mm。

表 2 T250 马氏体时效钢薄壁旋压圆筒焊接工艺参数  
Tab. 2 Welding parameters of T250 maraging steel thin-walled spinning cylinder

序号	焊丝规格	基值电流 /A	峰值电流 /A	占空比 /%	脉冲频率 /Hz	焊接电压 /V	焊接速度 /m·h <sup>-1</sup>	送丝速度 /m·h <sup>-1</sup>	气体流量 /L·min <sup>-1</sup>	焊接层次
第一组	空熔	40	70~80	35~38	3	8~10	8~11	-	12~20	1
	Φ1.2	40	70~80	35~38	3	8~12	8~11	24~36	12~20	2
第二组	Φ1.2	40	95~110	40	3	10~12	9~12	24~36	12~20	1

#### 1.2.2 热处理

焊前对试板进行热处理,第一组焊前为旋压态,第二组为旋压态+500℃时效处理,第三组为旋压态+550℃时效处理;焊后分别对试板进行 480℃时效处理和 500℃时效处理。

#### 1.2.3 检测

试验用 X 射线探伤设备为布鲁克 D8AUANCE X 射线探伤仪。焊接拉伸试样和弯曲试样均沿垂直于焊缝的方向截取,试验机型号为 SANS-CMT5305 电子万能试验机,拉伸强度和弯曲角数值取三组同种状态试样的平均值。金相试样沿垂直于焊缝方向截取,在观察试样以前对试样进行腐蚀,腐蚀液为 15 gFeCl<sub>3</sub>+45 mLHCl+240 mLH<sub>2</sub>O,在 LEICA DMI3000M 金相显微镜上观察。显微硬度在上海联尔 HV10 数显维氏硬度仪上测量,测试条件为载荷 9.8 N,保荷时间 10 s。

图 1 所示为焊接接头宏观形貌,采用两组参数均可得到焊透、无咬边、焊瘤、烧穿等缺陷的焊缝。第一组由于焊接速度和送丝速度与焊接电流不匹配,造成焊缝宽窄不均匀,第二组焊缝成形较美观。X 射线探伤结果表明,两组焊缝均无超 QJ175—93 0 级标准要求的缺陷。由于第二组参数只进行一道次焊接,焊接效率相对第一组提高了一倍,因此,第二组参数更适合在生产中应用。



(a) 第一组

## 2 结果和讨论

### 2.1 焊接工艺参数对焊缝成形和内部缺陷的影响



(b) 第二组

图1 焊接接头宏观形貌

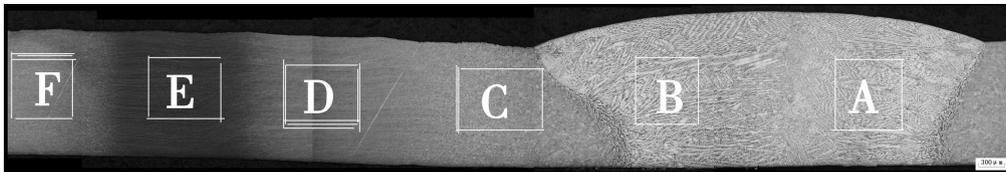
Fig.1 Macroscopic feature of weld joints

## 2.2 热处理对焊接接头性能的影响

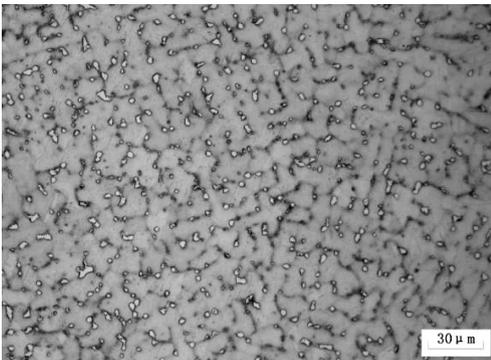
### 2.2.1 焊接接头金相组织特征

图2所示为在焊前焊后对T250马氏体时效钢旋压圆筒时效处理后的焊接接头金相组织。图2(a)为焊接接头全貌示意图,焊接接头可分为焊缝区(A和B)、过热区(C)、相变重结晶区(D)、深色浸蚀区(E)和基材(F)5个区域。图2(g)所示为基材组织,可以看出,经旋压后晶粒为纤维组织,沿纤维方向晶粒长

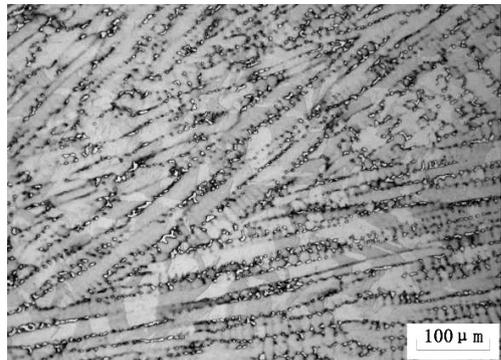
度约 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ ,焊前经时效处理后晶内可以看到一些细小弥散的析出相。从图2(b)(c)可以看出,焊缝中心区凝固组织为等轴晶,熔合线附近焊缝凝固组织为树枝状晶粒,晶界处有“白色小区域”,这“白色小区域”是由于焊缝凝固结晶时,Mo、Ti、Ni等元素在晶界偏析,使奥氏体转变温度降低,经时效热处理后生成的逆转变奥氏体组织<sup>[1]</sup>。图2(d)为过热区组织,晶粒明显长大,与熔合线距离越远,晶粒长大越小,焊缝边缘晶粒约 $50 \sim 80 \mu\text{m}$ ,是基材晶粒的6倍。这是由于焊接过程中,大热输入使此处温度很高,即使时间很短,晶粒也迅速长大,而离焊缝越远,温度越低,晶粒长大的趋势减小。图2(e)为相变重结晶区,该区域母材金属焊接时被加热到 $A_3 \sim 1\ 000^\circ\text{C}$ <sup>[2]</sup>,晶粒发生再结晶,晶粒尺寸约 $3 \mu\text{m}$ 。图2(f)为“深色浸蚀区”,该区域在焊接热循环中经历的峰值温度为 $590 \sim 730^\circ\text{C}$ <sup>[3]</sup>,部分基体马氏体组织通过相变转化为奥氏体组织并保留至室温,在晶界和亚晶界有大量颗粒状奥氏体存在,在相同的腐蚀条件下,该区域被腐蚀后颜色较深。



(a) 焊缝接头全貌



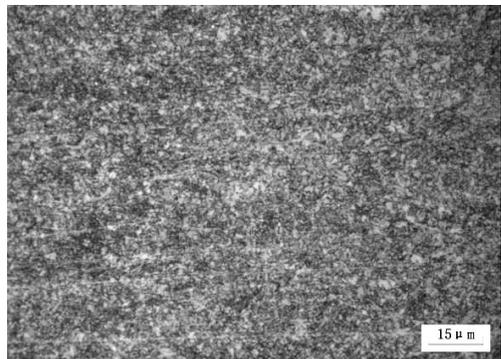
(b) 对应A区



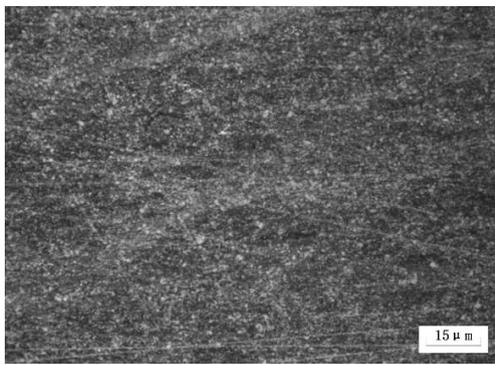
(c) 对应B区



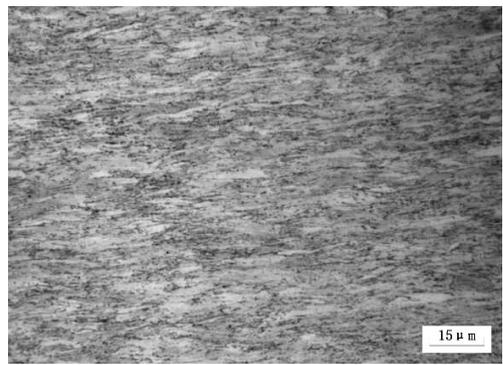
(d) 对应C区



(e) 对应D区



(f) 对应 E 区



(g) 对应 F 区

图 2 焊接接头金相组织

Fig. 2 Microstructure of weld joints

### 2.2.2 显微硬度

焊接接头横截面的显微硬度如图 3 所示。焊接后,焊缝区硬度严重下降,最低处位于焊缝中心,硬度 285 HV。过热区在较高的焊接热循环作用下析出的第二相质点溶解入基体,硬度也大幅下降,约 300 HV。在过热区以外,离熔合线越远,硬度值越高,这主要是由于离熔合线越远,焊接热循环峰值温度越低,第二相质点溶入基体的量越少,硬度也越高。时效后,焊缝区由于第二相析出,硬度大幅提高,但仍然比热影响区 (HAZ) 和母材低,这是由于焊后时效过程中形成逆转变奥氏体,而晶内 Mo、Ti 元素含量减少,使该处作为强化元素的 Mo、Ti 元素量减小,因而使整个焊缝的显微硬度降低,强度也降低<sup>[4]</sup>。相变重结晶区和深色浸蚀区硬度与基材相比略有下降,过热区硬度与基材相当。

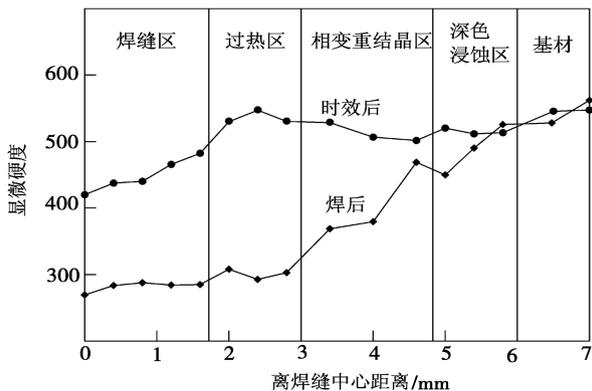


图 3 焊接接头显微硬度分布

Fig. 3 Distribution of microhardness in weld joints

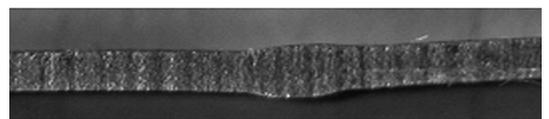
### 2.2.3 焊前热处理对焊接接头角变形的影响

焊前不同热处理状态试板的焊接接头角变形如图 4 所示(焊缝正面朝上),角变形值如表 3 所示。可以看出,基材时效热处理后,焊接角变形明显减小。这一方面是由于圆筒在旋压后存在残余应力<sup>[5]</sup>。焊前未经时效处理时,焊接过程中旋压圆筒端部在高温

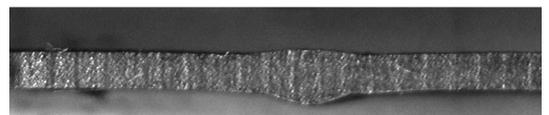
作用下残余应力释放,使圆筒截面上外侧的长度大于内侧长度,焊后形成角变形。若焊接前对旋压圆筒进行时效处理,旋压圆筒的残余应力得到充分释放,焊接过程中由旋压圆筒残余应力重新分布引起的角变形就得到大幅度的减小,使焊接接头角变形减小。另一方面焊前时效处理使旋压圆筒的强度和刚度提高,也减小了焊接接头角变形。



(a) 旋压态



(b) 旋压态+500°C 时效处理



(c) 旋压态+550°C 时效处理

图 4 焊前不同状态下的焊接角变形

Fig. 4 Angular distortion on different heat treatment prior to weld

表 3 焊前不同状态下的焊接角变形

Tab. 3 Angular distortion on different heat treatment prior to weld

序号	焊前热处理	左侧角变形/(°)	右侧角变形/(°)
第一组	旋压态	7.8	9.5
第二组	旋压态+500°C 时效处理	1.2	1.2
第三组	旋压态+550°C 时效处理	1.2	1.1

## 2.2.4 热处理对焊接接头力学性能的影响

不同热处理状态焊接接头力学性能如表4所示,可以看出,试样在焊后进行500℃/3 h时效处理比480℃/3 h时效处理的弯曲角大。这是由于焊后对T250马氏体时效钢进行时效处理,会使焊缝中生成逆转变奥氏体组织,随着时效温度的提高,逆转变奥氏体组织的尺寸和体积分数都会逐渐增加,由于逆转变奥氏体的存在能降低裂纹扩展速率,提高塑性<sup>[6]</sup>,因此,时效温度提高后,焊接接头的弯曲角增大。焊后对试样进行500℃/3 h热处理情况下,焊前时效处理使焊接接头抗拉强度和弯曲角都有所提高。这主要是由于焊前对旋压圆筒进行时效处理后,基材马氏体组织中析出Ni<sub>3</sub>Mo、Ni<sub>3</sub>Ti、Fe<sub>2</sub>Mo等金属间化合物相,这些弥散的第二相质点会阻碍晶界移动,从而抑制了过热区晶粒的长大<sup>[7]</sup>,有利于提高机械性能;马氏体基体中的金属间化合物在相变重结晶区为晶核的形成提供了可以依附的现成表面,增加了相变重结晶区的形核数量,从而使相变重结晶区晶粒细化,得到较好强韧性匹配的组织。另外,焊前对旋压圆筒时效处理后焊接接头角变形减小,接头的应力集中减小,也会提高试板的强度和韧性。采用焊前对旋压圆筒进行500℃时效处理,焊后进行500℃/3 h时效处理,得到了最佳的焊缝强韧性匹配。

表4 不同热处理状态焊接接头力学性能

Tab.4 Mechanical properties of weld joints on different heat treatment prior to weld

焊前 热处理	焊后 时效温度	$\sigma_{bHL}$ /MPa	弯曲角 /(°)
旋压态	480℃/3h	1834	45
	500℃/3h	1726	46
旋压态+500℃时效	480℃/3 h	1856	49
	500℃/3 h	1840	56
旋压态+550℃时效	480℃/3 h	1775	47
	500℃/3 h	1800	57

## 3 结论

(1) 采用脉冲钨极氩弧焊一道次填丝焊接T250马氏体时效钢薄壁旋压圆筒,通过合理的焊接工艺参数匹配,可以得到成形良好,内部缺陷符合标准要求的焊缝。

(2) 在焊前焊后对T250马氏体时效钢旋压圆筒进行时效处理的焊接接头,焊缝区组织为树枝晶,晶界存在逆转变奥氏体,使显微硬度降低。过热区晶粒发生了再结晶,离熔合线越近,晶粒长大越明显,最大处晶粒约为基材的6倍。

(3) 焊前对T250马氏体时效钢薄壁旋压圆筒进行时效热处理,可以抑制过热区晶粒长大,提高焊接接头强韧性,大幅度降低焊接接头角变形。

(4) 焊前对T250马氏体时效钢薄壁旋压圆筒进行500℃时效热处理,焊后进行500℃时效热处理,可以得到最佳的焊缝强韧性匹配。

## 参考文献

- [1] 黄孝瑛,陈炜,潘天喜. 18Ni(250级)马氏体时效钢焊接形成的逆转变奥氏体[J]. 钢铁, 1981(2): 60-61
- [2] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社, 1999: 185
- [3] Shamantha C R, Narayanan R, Iyer K J L. Microstructural changes during welding and subsequent heat treatment of 18Ni (250-grade) maraging steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287: 43-51
- [4] 吴军,张立武,王常建. 时效处理对T-250钢电子束焊接接头组织及性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(4): 57-61
- [5] 李克智,吕炎. 筒形件正旋时工艺参数对残余应力分布的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 1997, 20(4): 44-47
- [6] Tsay L W, Chen C, Aho J N. Effect of ageing treatment on fatigue and mechanical properties of T250 maraging steel[J]. Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers, 1994, 15: 23
- [7] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 1996: 211

(编辑 任涛)