

# 超高强度钢条带设计与制造技术

康士朋<sup>1</sup> 唐杰<sup>1</sup> 宋林郁<sup>1</sup> 王业伟<sup>2</sup> 李新宽<sup>1</sup>

(1 上海宇航系统工程研究所,上海 201109)

(2 上海航天精密机械研究所,上海 201109)

**文 摘** 为了满足重型卫星发射要求,需要研制具有高承载能力的条带。以  $\Phi 937$  mm 接口包带装置为例,采用 18Ni 马氏体时效钢开展条带设计,条带制造过程中对热处理工艺、表面抛光工艺进行研究;条带的屈服强度达到 1 723 MPa,使包带装置承载能力提高了一倍;条带表面粗糙度达到 0.4,满足包带装置使用要求。通过静力试验及分离试验对产品进行了考核,结果表明 18Ni 马氏体时效钢条带满足设计要求。

**关键词** 超高强度钢,18Ni,马氏体,条带

中图分类号: TG3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.03.015

## Design and Manufacturing Technology of Ultra High Strength Steel Band

KANG Shipeng<sup>1</sup> TANG Jie<sup>1</sup> SONG Linyu<sup>1</sup> WANG Yewei<sup>2</sup> LI Xinkuan<sup>1</sup>

(1 Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109)

(2 Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201109)

**Abstract** In order to satisfy the requirement of the heavy satellite launch, it is necessary to develop high load bearing steel band. Using  $\Phi 937$  clamp band device as an example, we utilize ultra high strength steel of 18Ni maraging steel to carry out band design and manufacturing. With process of heat treatment, the yield strength of the band reaches 1 723 MPa, making the bag belt device carrying capacity doubled. With process of surface polishing, the surface roughness can reach 0.4, 18Ni maraging steel band is examined by the static test and separation test.

**Key words** Ultra-high-strength steel, 18Ni, Maraging, Band

### 0 引言

包带装置是国内外常用的卫星与运载火箭连接装置,由条带、夹块、爆炸螺栓、拉簧等零组件构成,通过在条带施加预紧力使卫星与运载火箭可靠连接。条带是包带装置关键零件,其材料的力学性能决定包带装置承载能力。重型卫星技术的发展,对包带装置承载能力提出了更高的要求。条带现用的钛合金材料,其屈服强度在 1 000 MPa 左右,已不能满足使用要求。超高强度钢具有很高的强度和足够的韧性,在航空、航天及兵器领域应用广泛,并不断扩大到建筑、机械制造、车辆等其他民用设备上<sup>[1]</sup>。

本文研究了 18Ni 马氏体时效钢条带的设计与制造,并通过静力及分离试验对所研制产品进行了考核。

### 1 超高强度钢条带设计

#### 1.1 材料选用

在超高强度钢中,马氏体时效钢强度最高,是现有材料中强韧性最高的钢种<sup>[2]</sup>,并具有良好的工艺、抗疲劳、焊接及耐腐蚀性能<sup>[3]</sup>。本文选择在马氏体时效钢中应用最为广泛的 18Ni<sup>[4]</sup>,作为包带装置条带零件的材料。

#### 1.2 条带设计

包带装置产品结构如图 1 所示,通过在条带上施加预紧力,使夹块在周向收紧,保证卫星下裙与运载适配器可靠连接。

以 GJB2499A—2006《包带弹簧式火箭连接分离装置通用规范》中  $\Phi 937$  mm 接口包带装置为例,开展超高强度钢条带设计。设计载荷为 60 kN,是  $\Phi 937$  mm 接口包带装置最大载荷。根据  $\Phi 937$  mm 接口包带装置结构形式,整个圆周方向上,共有 2 根

条带,单根条带厚度 1.5 mm。条带外形如图 2 所示。

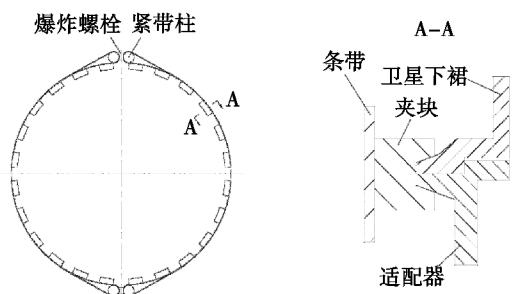


图 1 包带装置结构示意图

Fig.1 Structure of the Clamp Band Device

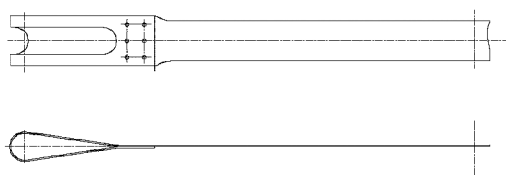


图 2 18Ni 马氏体时效钢条带外形示意图

Fig.2 Structure of the 18Ni band

为了满足包带装置承载需求,要求条带材料屈服强度 $\geq 1\ 350\ \text{MPa}$ ;条带表面粗糙度是包带装置预紧力加载均匀性的重要影响因素,因此要求条带表面粗糙度为 0.4。

## 2 条带制造

### 2.1 加工工艺

条带加工工艺流程如图 3 所示。

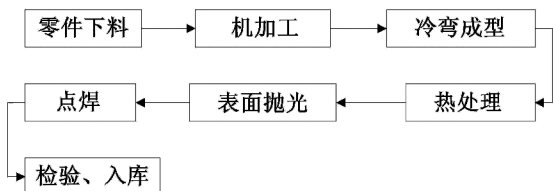


图 3 条带加工工艺流程图

Fig.3 Flow chart of band processing

条带材料屈服强度与表面粗糙度两项技术指标对应热处理与表面抛光工艺。

### 2.2 热处理工艺

马氏体时效钢在  $500^\circ\text{C}$  左右进行时效即可达到最高强度<sup>[5]</sup>。按 GJB6480—2008《航天用冷轧钢带规范》对条带进行时效处理。时效温度对材料力学性能有较大影响,推荐的时效温度为  $450\sim 510^\circ\text{C}$ <sup>[6-8]</sup>。

分别采用空气循环炉、真空炉在  $510^\circ\text{C}$  下,保温 3 h,进行试验。结果表明:采用空气循环炉进行热处理的试件材料屈服强度为  $1\ 720\ \text{MPa}$ 、延伸率为 6.3%;采用真空炉进行热处理的试件材料屈服强度为  $1\ 842\ \text{MPa}$ 、延伸率为 5.0%。试验结果与李成魁<sup>[9]</sup>给出的数据相一致。由以上两种设备进行热处理得到的试件屈服强度都可以满足设计要求,但由于采用空气循环炉热处理试件延伸率高,因此本文选用空气循环炉宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 3 期

作为热处理设备。

通过试验来确定时效条件。时效温度从  $460\sim 520^\circ\text{C}$ ,每隔  $10^\circ\text{C}$  进行一组工艺试验,通过对试片进行拉伸试验,得到其力学性能随时效温度变化的情况(图 4)。

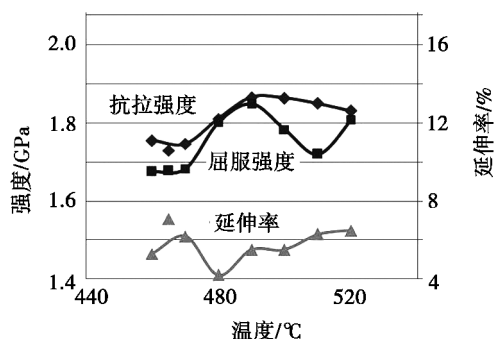


图 4 试片材料性能随时效温度变化曲线

Fig.4 Curves of material properties with aging temperature

试验数据表明:在  $490^\circ\text{C}$  进行时效处理,可获得材料强度最大值;在  $465^\circ\text{C}$  进行时效处理,获得材料延伸率最大值。故确定  $465^\circ\text{C}$  为时效温度,并在此温度下再进行一组试验,得到试件材料屈服强度为  $1\ 723\ \text{MPa}$ 、延伸率为 7.5%。

18Ni 马氏体钢在时效处理中其收缩率仅为  $0.06\%\sim 0.07\%$ <sup>[7]</sup>,但由于条带两端存在折弯,且精度要求较高。必须解决条带在热处理过程中变形以及回弹问题。经过工艺试验,提出采用成型模具装夹后,共同进行热处理的方法,来保证条带时效后成型精度。成型模具采用 05Cr17Ni4Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢制造,成型工装及时效成型图如图 5 所示。

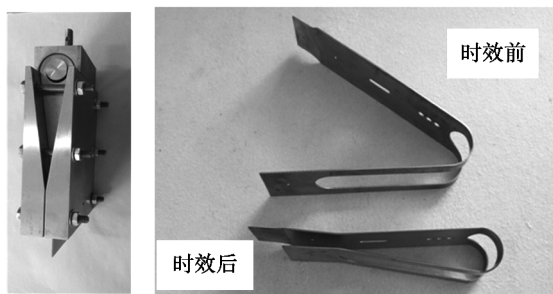


图 5 成型工装及时效效果图

Fig.5 Effect of molding tool

### 2.3 表面抛光工艺

目前国内对超高强度钢表面抛光工艺研究资料较少,李迎<sup>[10]</sup>对 300M 钢的磨削工艺进行了研究,但未查见 18Ni 马氏体时效钢表面抛光相关文献。18Ni 马氏体时效钢其抛光特性类似于不锈钢,容易粘刀,而且,抛光时随着刃口钝化,会产生大量的切削热,对零件表面产生烧伤现象,因此需要选择合适的抛光工具。

本文采用锆刚玉磨料砂纸,磨削时不会发生粘刀

现象。粗抛可以到达 6.3 的表面粗糙度。为了达到表面粗糙度 0.4 的技术指标,需要对试件进行精抛。在精抛操作时,发生了粘刀现象,致使条带表面出现划伤、烧伤。

王玥<sup>[11]</sup>在不锈钢表面抛光技术研究中,提出采用抛光液对不锈钢进行抛光,可以获得光亮的表面。本文采用在试件精抛时加注自制水基磨削液的方法。由于选用的砂纸具有防水能力,砂纸颗粒不会脱落;同时,切削液以水基,具有很好的冷却效果,抛光时可以带走大部分热量,因此可以解决在精抛时产生的粘刀、划伤、烧伤问题。条带精抛以后,可以到达 0.8 的表面粗糙度要求。

最后,对条带进行研磨。采用立方碳化硅磨料磨削条带,通过研磨工艺试验,采用 W28 或 W20 牌号的立方碳化硅磨料制成的研磨膏,可以有效去除抛光切削痕迹。条带研磨以后,表面抛光效果可以达到粗糙度 0.4 的要求。

至此,完成了条带产品的研制(图 6)。



图 6 条带产品外形图

Fig.6 18Ni maraging steel band product

### 3 试验验证

#### 3.1 静力试验

为考核条带承载能力,开展了静力试验(图 7)。

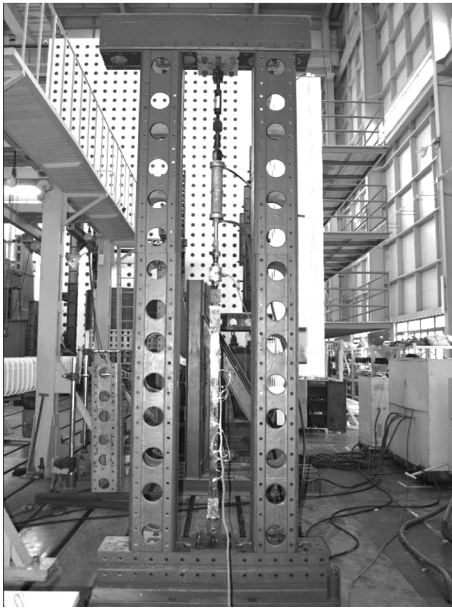
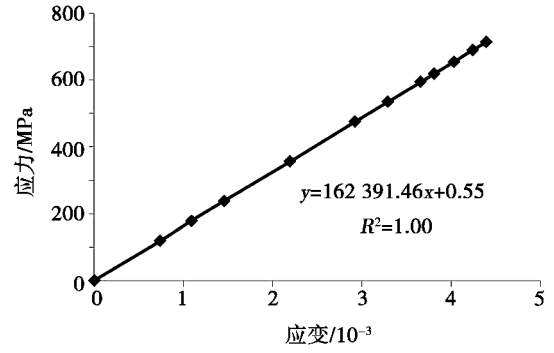


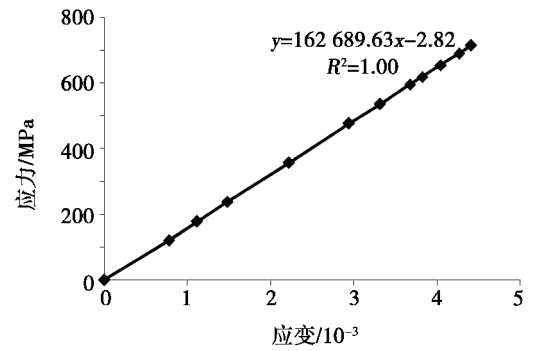
图 7 条带静力试验方案

Fig.7 Static test of 18Ni maraging steel band

静力试验中最大加载载荷 60 kN,分 12 级加载,在条带表面粘贴应变片,对加载过程中条带的应变进行测试,并由试验得到应力—应变曲线见图 8。由图 8 可得知,试验数据呈一致的线性关系,条带弹性模量 162 GPa,设计载荷下条带未进入塑性变形区。



(a) 第一根条带



(b) 第二根条带

图 8 第一、二根条带应力应变曲线

Fig.8 Stress and strain curves of the first and second band

#### 3.2 分离试验

完成静力试验后,对 18Ni 马氏体时效钢条带进行了分离试验考核。分离试验根据 GJB 2205A—2011《航天器分离试验方法》进行,将星箭组合体吊起,整个试验情况如图 9 所示。

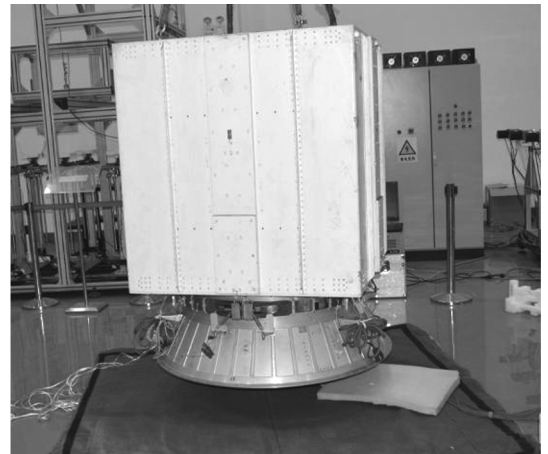


图 9 18Ni 马氏体时效钢条带分离试验图

Fig.9 Separation test of 18Ni band

爆炸螺栓起爆后,适配器与航天器分离后自由落下,18Ni 马氏体时效钢条带通过连接、解锁功能考核。

#### 4 结论

(1)以  $\Phi 937$  mm 接口包带装置为例,完成了 18Ni 马氏体时效钢条带设计与制造,条带的屈服强度达到 1 723 MPa,使包带装置承载能力提高了一倍,并通过静力试验及分离试验对产品进行了考核。

(2)对 18Ni 马氏体时效钢的热处理工艺进行了研究:在 460~520℃,采用空气循环炉进行时效处理,材料屈服强度在 1 650~1 850 MPa、延伸率在 4%~7.5%。

(3)提出了 18Ni 马氏体时效钢条带的表面处理方法:采用锆刚玉磨料砂纸进行抛光,产品表面粗糙度可以达到 0.8;采用立方碳化硅研磨膏进行研磨,产品表面粗糙度可以达到 0.4。

#### 参考文献

[1] 李杰,李志,颜鸣皋.高合金超高强度钢的发展[J].材料工程,2007,4:61-65.

[2] 尹航,李金许,宿彦京,等.马氏体时效钢的强韧化设计[J].材料导报,2014,28(7):86-88.

[3] 尹航,李金许,宿彦京,等.马氏体时效钢的研究现状与发展[J].钢铁研究学报,2014,26(3):1-9.

[4] 梁冬梅,朱远志,刘光辉.马氏体时效钢的研究进展[J].金属热处理,2010,35(12):34-39.

[5] 姜越,尹钟大,朱景川,等.超高强度马氏体时效钢的发展[J].特殊钢,2004,25(2):1-5.

[6] 刑梅香,任卫斌.时效时间对 18Ni(250)力学性能的影响[J].热加工工艺,2013,42(4):191-195.

[7] 范蜀晋,戴涛.18Ni 马氏体时效钢的性能和用途[J].国外金属热处理,1994,16(3):41-47.

[8] 孙学银,姜建堂,甄良.金属材料在航天领域的应用及其热处理工艺[J].金属热处理,2010,35(12):14-19.

[9] 李承魁,殷俊林,严彪.马氏体时效钢的热处理工艺及应用[J].热处理,2010,25(5):15-19.

[10] 李迎,徐鸿钧,王珉.砂带磨削 300M 钢的试验研究[J].航空精密制造技术,1996,32(2):12-15.

[11] 王玥,满瑞林,梁永煌,等.不锈钢表面抛光技术的研究进展[J].电镀与保护,2012,32(2):1-4.