

文章编号:1003-1545(2024)04-0076-08

# 钛合金零件残余应力消除及形状精度保持性研究

杨三强<sup>1, 2</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 李茂伟<sup>1</sup>, 高战蛟<sup>1</sup>, 韩建超<sup>1</sup>, 祁俊峰<sup>1</sup>

(1. 北京卫星制造厂有限公司,北京 100094; 2. 北京大学工学院,北京 100871)

**摘要:**将真空去应力退火、深冷处理和高低温循环热处理进行组合,对航天器结构产品中常用的 TC4 R 态钛合金典型样件开展残余应力消除试验,并采用 X 射线衍射法对样件进行残余应力测量,计算处理后样件内部和表面残余应力的平均消除率,最后对处理后样件进行形状精度检测,验证各种热处理方法对形状精度保持性的效果。结果表明,真空去应力退火最为有效,深冷处理次之,高低温循环热处理效果最差,残余应力平均消除率的大小和形状精度保持性的好坏呈强正相关性。相对于未经处理的样件,经真空去应力退火+深冷处理+高低温循环热处理样件的内部/表面残余应力平均消除率和形状精度保持性最高,经真空去应力退火+高低温循环热处理样件的次之,经深冷处理+高低温循环热处理样件的再次之,只经高低温循环热处理样件的最低。

**关键词:**钛合金;残余应力;形状精度保持性;热处理;X 射线衍射法

中图分类号: TG166.5 文献标识码:A

## Study on Residual Stress Relief and Shape Accuracy Retention of Titanium Alloy Parts

YANG Sanqiang<sup>1, 2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, LI Maowei<sup>1</sup>, GAO Zhanjiao<sup>1</sup>,  
HAN Jianchao<sup>1</sup>, QI Junfeng<sup>1</sup>

(1. Beijing Spacecrafts, Beijing 10094, China; 2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Residual stress relief tests are carried out on typical TC4 R state titanium alloy commonly used in spacecraft structural products by vacuum stress relief annealing, cryogenic treatment, and high and low temperature cyclic heat treatment. X-ray diffraction method is used to measure residual stress in the specimens, and the average residual stress relief rates inside and in the surface of the treated specimens are calculated. Finally, the shape accuracies of the treated specimens are tested, and the effectiveness of various heat treatment methods in maintaining shape accuracy is verified. The results show that the vacuum stress relief annealing is the most effective, followed by cryogenic treatment, and that the effectiveness of high and low temperature cyclic heat treatment is the lowest. The average residual stress relief rate is strongly positively correlated with the shape accuracy retention. Of all the specimens treated by different methods, the average residual stress relief rates in the internal/surface of specimens treated with the combination of vacuum stress relief annealing, cryogenic treatment, and high and low temperature cycle heat treatment in queue are the highest, and their shape accuracy retention the best, those of the specimens treated with

收稿日期:2023-09-02

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB4605600);民用航天预研项目(D020302)

作者简介:杨三强,男,1984 年生,硕士,高级工程师,主要研究方向为航天器机构结构制造及增材制造。E-mail: 253812912@qq.com

通讯作者:祁俊峰,男,1979 年生,博士,研究员,研究方向为航天器先进连接与增材制造技术。E-mail: qjfeng@163.com

引用格式:杨三强,王磊,李茂伟,等. 钛合金零件残余应力消除及形状精度保持性研究[J]. 材料开发与应用, 2024, 39(4): 76-82.

YANG S Q, WANG L, LI M W, et al. Study on residual stress relief and shape accuracy retention of titanium alloy parts[J]. Development and Application of Materials, 2024, 39(4): 76-82.

cryogenic treatment and high and low temperature cycle heat treatment come in second, and those of the specimens only treated with high and low temperature cyclic heat treatment rank last.

**Keywords:** titanium alloy; residual stress; shape accuracy retention; heat treatment; x-ray diffraction method

钛合金因具有质量轻、比强度高、耐热性和力学性能好等特点在航天领域有着极为广泛的应用,如我国火星探测器遥感相机支撑结构中的桁架杆座、主镜柔节、次镜柔节、三镜柔节、调焦镜柔节等均使用了TC4钛合金<sup>[1]</sup>,各类卫星、飞船等航天器多分支次承力结构也采用了TC4钛合金粉末激光选区熔化成形技术<sup>[2]</sup>。近年来空间站、深空探测、高精高稳卫星研制任务持续增加,对各关键分系统的形位精度和可靠性要求也快速提高<sup>[3]</sup>,这需要各分系统中发挥承载、定位、机动等关键功能的构件具备较高的形位精度和形位稳定性<sup>[4]</sup>。由于钛合金构件在锻造、铸造、增材制造成形和机械加工过程中会不可避免地产生残余应力,较大的残余应力会直接影响构件的形位精度和形位稳定性,进而严重制约整星整器的服役精度和稳定性<sup>[5]</sup>。因此,通过适当的残余应力消除方法对航天器TC4钛合金精密构件的内部残余应力进行控制,对实现构件精密加工、形状精度保持以及最终在轨服役具有重要意义。

目前残余应力消除方法较多,包括振动时效、机械预拉伸、真空去应力退火、深冷处理、高低温循环热处理和自然时效等,根据坯料制备情况、制件结构和工艺特点,所选择的残余应力消除方法也各有不同。采用与温度相关的热处理方法消除残余应力最为普遍,该类方法受产品结构和尺寸大小、成形工艺方式的影响最小。但现有研究都是对真空去应力热处理、深冷处理和高

低温循环热处理等方法独立进行研究,且偏向于残余应力的消除效果,未有结合各类热处理方法对形状精度保持性开展联合研究的文献报道。

本研究将真空去应力退火、深冷处理和高低温循环热处理进行组合,对TC4 R态钛合金典型样件残余应力的消除效果开展量化研究,并通过高低温循环热处理前后样件平面度和圆柱度的变化来评价各种热处理组合方式对形状精度保持性的影响,得出不同热处理方法消除残余应力效果与形状精度保持效果的关系,为优选钛合金零件残余应力消除方法提供数据支撑。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

TC4钛合金是一种双相钛合金,其基本相由密排六方α相和体心立方β相构成,是两相钛合金中使用最为普遍的一种<sup>[6]</sup>。本试验中的样件材料采用TC4 R态钛棒,其化学成分按GB/T 3620.1—2007《钛及钛合金牌号和化学成分》要求进行检测,结果如表1所示。表2为根据GB/T 2965—2007《钛及钛合金棒材》对TC4 R态钛棒的力学性能进行检测的结果。

从表1、表2可以看出,所采用的TC4 R态钛棒满足标准要求。

表1 TC4 R态钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 R titanium alloy (w)

项目	Ti	Al	V	Fe	C	N	O	H	%
规定值	余量	5.50~6.75	3.50~4.50	≤0.30	≤0.08	≤0.05	≤0.20	0.015	
实测值	余量	6.02	3.81	0.01	0.03	0.02	0.01	0.001	

表2 TC4 R态钛合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TC4 R titanium alloy

项目	抗拉强度/MPa	规定非比例延伸强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
规定值	≥895	≥825	≥10	≥25
实测值	1 022	956	16	49

为便于进行残余应力和形状精度保持性分析,样件设计成如图 1 所示的盖形结构,所有样件由同一根坯料截断,以保证各样件毛坯初始残余应力尽量一致,通过精密车削完成加工后的实物图如图 2 所示,其表面粗糙度  $R_a$  小于  $0.8 \mu\text{m}$ 。

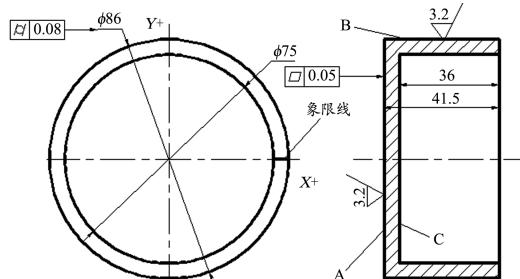


图 1 样件尺寸图

Fig. 1 Size image of sample

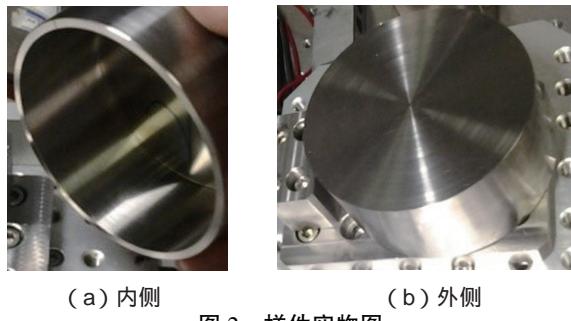


图 2 样件实物图

Fig. 2 Physical image of sample

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 热处理方法

#### (1) 真空去应力退火

真空去应力退火作为可有效消除钛合金中残余应力的热处理方法被广泛应用,此方法去除残余应力的机理是在高温作用下使零件产生局部塑性变形和蠕变,从而引起应力松弛,在减少残余应力的同时又不引起再结晶。根据 GB/T 37584—2019《钛及钛合金制件热处理》,本试验中去应力退火温度为  $650^\circ\text{C}$ ,保温时间为 2 h。

#### (2) 深冷处理

深冷处理即超低温处理,方法是将材料放置在  $-130^\circ\text{C}$  以下,改变材料的内部组织和结构,从而改变材料的基本力学性能和物理特性,以降低残余应力<sup>[7]</sup>。超低温处理一般使用液氮冷却零件。本研究中采用的方法是将样件放入  $-190^\circ\text{C}$  的液氮中深冷处理 1.5 h。

#### (3) 高低温循环热处理

高低温循环热处理是保持预先成形制件的

形状和几何参数的有效手段,也被用来消除残余应力。这种方法多用于形状复杂且变形量较小或者变形量较大但刚性较小的零件。这类零件在冷态下通过强压处理可以得到需要的外形尺寸而不会造成开裂。本研究中,高低温循环热处理既用于考核残余应力消除效果,也用于模拟空间环境考核热处理方法对样件形状精度的保持性效果。采用的试验温度为  $-70 \sim 100^\circ\text{C}$ ,先高温再低温,循环 12.5 次,温度平均升降速率为  $(3 \sim 5)^\circ\text{C}/\text{min}$ ,每个循环中高温和低温的保温时间为 1.5 h。

根据上述各类残余应力消除方法的特点,将真空去应力退火、深冷处理、高低温循环热处理进行不同的组合,分别为真空去应力退火+深冷处理+高低温循环热处理、真空去应力退火+高低温循环热处理、深冷处理+高低温循环热处理和只进行高低温循环热处理,样件的试验条件如表 3 所示。

表 3 样件试验条件

Table 3 Test conditions of samples

编号	真空去 应力退火	深冷处理	高低温循 环热处理
A0	×	×	×
A1	√	√	√
A2	√	×	√
A3	×	√	√
A4	×	×	√

注:√表示实施,×表示不实施。

### 1.2.2 残余应力及形状精度测量方法

残余应力的测量方法主要有激光干涉、云纹分析、X 射线衍射和中子散射、钻孔法等<sup>[8]</sup>。本试验采用 X 射线残余应力测试仪(Proto-iXRD)对样件中的残余应力进行检测,测试参数为:管电压为 20 kV,管电流为 4 mA,Cu 靶 Ka 特征辐射(XRD 线型分析选用(213)晶面衍射峰),准直器直径为 2 mm,曝光时间为 1 s,曝光次数为 10 次, $\beta$  角个数为 11 个, $\beta$  角摆动范围为  $\pm 20^\circ$ 。形状精度采用三坐标测量仪(海克斯康 Leitzpmm-c 12107)进行检测。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 残余应力检测结果和分析

利用 X 射线衍射法对 A0~A4 样件进行残余

应力检测,其中,A0样件未进行任何去应力热处理,是A1~A4样件的对比基准。各样件的测量点如图3所示。其中,测点1、2、3、4位于端面的4条象限线附近,电解抛光深度为0.5~1.0 mm,用来检测样件的内部残余应力;测点5、6、7、8位于圆柱面的4条象限线附近,未进行电解抛光,用来检测样件的表面残余应力,测试结果如表4所示。从表中可以看出,样件的内部残余应力中既有拉应力也有压应力,样件的表面残余应力均为拉应力且大小较为均匀。内部残余应力主要跟材料本身自带的残余应力有关,而表面残余应力主要跟零件外表面机械加工有关。加工过程中零件与加工器械的接触会使零件产生塑性变形,这种塑性变形的程度由加工条件和零件材料

共同决定。除此之外,切削产生的巨大热量也会使材料产生塑性变形。故在材料表面往往存在着较大的残余应力。

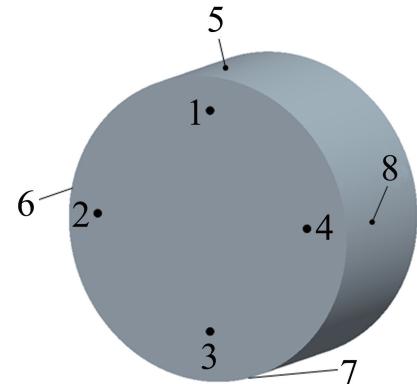


图3 残余应力测量点分布图

Fig. 3 Distribution of residual stress measurement points

表4 残余应力实测数据

Table 4 Measured residual stress data

MPa

测点	A0		A1		A2		A3		A4	
	径向	切向	径向	切向	径向	切向	径向	切向	径向	切向
1	87.21	85.34	12.61	12.23	27.47	22.61	57.67	56.31	78.91	77.54
2	-23.43	-23.01	-1.74	-1.56	-10.57	-10.54	-37.67	-35.77	-57.54	-55.33
3	87.56	85.41	-4.73	-4.20	22.36	21.71	49.31	45.61	79.21	78.74
4	-54.32	-51.66	9.96	9.81	20.21	18.81	10.81	17.71	-46.73	-44.51
5	122.71	122.00	37.21	36.31	67.56	66.57	97.31	96.31	116.31	114.64
6	118.67	116.54	46.54	44.57	77.13	76.31	102.33	102.1	104.32	102.43
7	116.43	119.77	33.71	30.29	76.21	75.31	91.74	91.51	117.56	115.42
8	103.42	103.31	40.11	37.31	69.11	68.67	107.57	105.58	106.44	105.31

### 2.1.1 基于X射线衍射法的内部残余应力分析

为分析残余应力的消除效果,将各残余应力取绝对值,以判断各残余应力消除方法对钛合金

中残余应力的影响规律。样件内部残余应力的变化规律如图4所示。

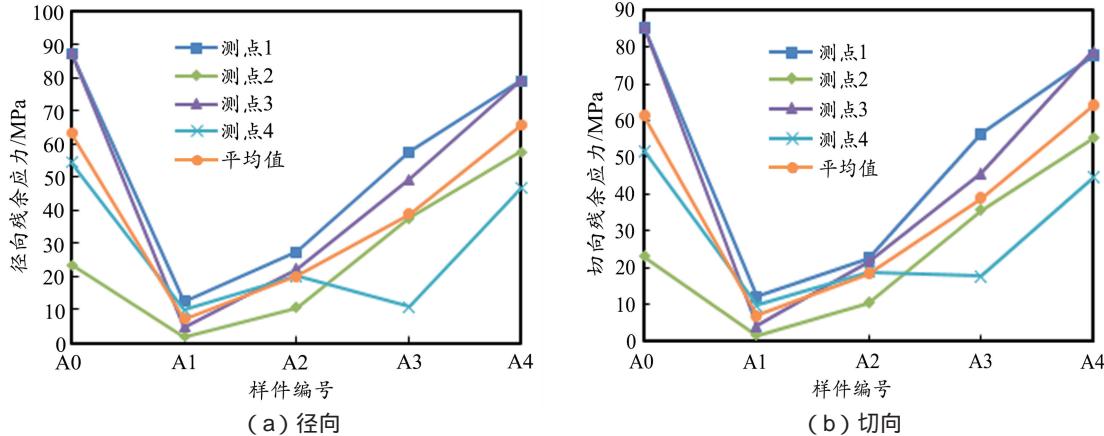


图4 各样件内部残余应力

Fig. 4 Internal residual stress of samples

通过内部残余应力平均消除率来分析不同热处理方法组合对零件的内部残余应力消除效果。

$$\eta_{i\text{内部}} = \left[ 1 - \sum_{i=1}^4 \text{abs}(\sigma_{ij\text{径向}} + \sigma_{ij\text{切向}}) / \sum_{i=1}^4 \text{abs}(\sigma_{0j\text{径向}} + \sigma_{0j\text{切向}}) \right] \cdot 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta_{i\text{内部}}$  为试样  $A_i$  对应的内部残余应力平均消除率 ( $i=1, 2, 3, 4$ ),  $\sigma_{ij}$  为试样  $A_i$  在测点  $j$  处对应的内部残余应力的绝对值 ( $j=1, 2, 3, 4$ ),  $\sigma_{0j}$  为试样  $A_0$  在测点  $j$  处对应的内部残余应力的绝对值。

图 5 为通过式(1)得出的不同热处理条件下各样件内部残余应力平均消除率趋势图。

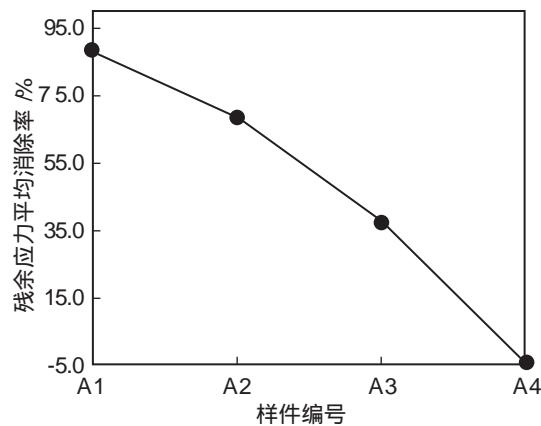


图 5 各样件内部残余应力平均消除率

Fig. 5 Average removal rate of internal residual stress of samples

由图 4 和图 5 可知, 经不同残余应力消除方法处理的样件呈现出不同内部残余应力消除率,

果。式(1)是用于定义内部残余应力平均消除率的计算公式。

相对于不进行任何残余应力消除的样件  $A_0, A_1$  的内部残余应力平均消除率为 88.6%,  $A_2$  的为 69.0%,  $A_3$  的为 37.6%、 $A_4$  的为 -4.1%, 即  $A_1$ (真空去应力退火+深冷处理+高低温循环热处理) >  $A_2$ (真空去应力退火+高低温循环热处理) >  $A_3$ (深冷处理+高低温循环热处理) >  $A_0$ (不进行任何热处理) >  $A_4$ (高低温循环热处理)。由于真空去应力退火时, 其温度比较高, 材料屈服强度降低, 同时吸收的热能与残余拉应力叠加, 超过弹性形变的阈值, 产生塑性形变, 使样件内部残余应力得以松弛; 而在深冷热处理过程中, 在零件内部连续产生剧烈压应力, 与内部的残余拉应力抵消, 残余应力得以降低; 高低温循环热处理过程中, 对样件进行连续性的冷热输入, 样件内部材料受拉压应力刺激, 使其内部残余应力得以松弛, 但是在此过程中可能会产生新的应力, 导致残余应力反而有所增加。三种方法中, 真空去应力退火使零件内部达到的残余应力松弛激活能最高, 深冷处理的次之, 高低热循环热处理的最小。

## 2.1.2 基于 X 射线衍射法的表面残余应力分析

图 6 为各残余应力消除方法对钛合金表面残余应力的影响规律。

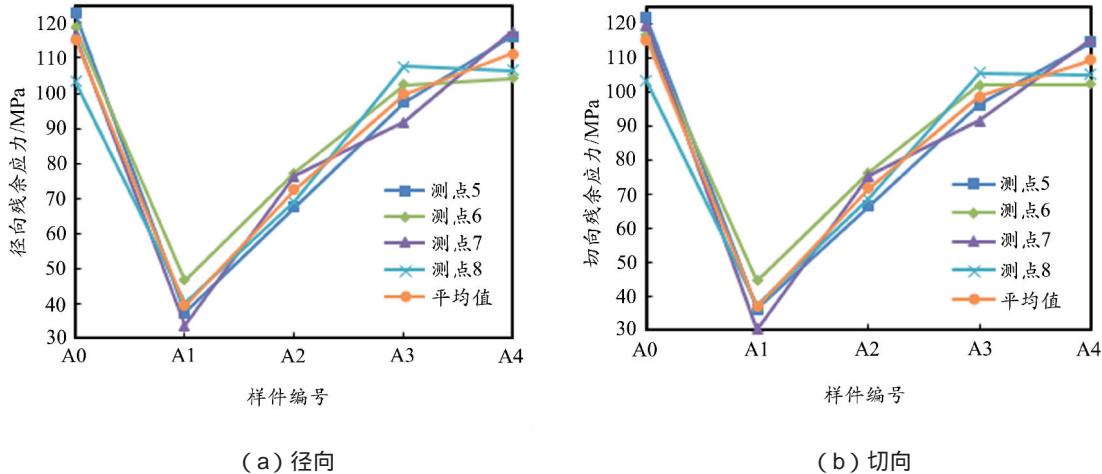


图 6 各样件表面残余应力

Fig. 6 Surface residual stress of samples

与内部残余应力平均消除率公式相似,式(2)是用于定义表面残余应力平均消除率的计算

$$\eta_{\text{表面}} = \left[ 1 - \sum_{i=1}^4 \text{abs}(\sigma_{ij}^{\text{径向}} + \sigma_{ij}^{\text{切向}}) / \sum_{i=1}^4 \text{abs}(\sigma_{0j}^{\text{径向}} + \sigma_{0j}^{\text{切向}}) \right] \cdot 100\% \quad (2)$$

式中,  $\eta_{\text{表面}}$  为试样  $A_i$  对应表面残余应力平均消除率 ( $i=1, 2, 3, 4$ ),  $\sigma_{ij}$  为试样  $A_i$  在测点  $j$  处对应的表面残余应力的绝对值 ( $j=5, 6, 7, 8$ ),  $\sigma_{0j}$  为试样  $A_0$  在测点  $j$  处对应的表面残余应力的绝对值。

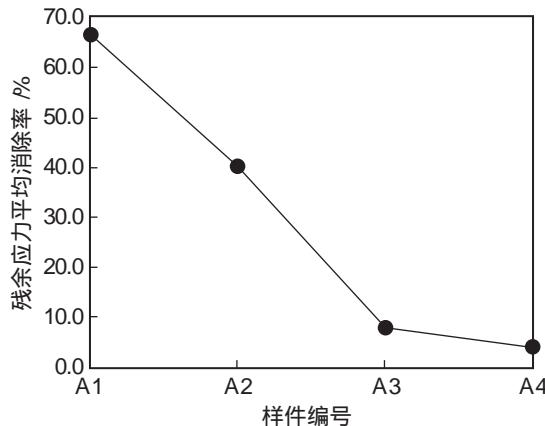


图 7 各样件表面残余应力平均消除率

Fig.7 Average removal rate of surface residual stress of samples

从图 6 和图 7 可知, 经不同残余应力消除方

公式

法处理的样件呈现不同表面残余应力消除率, 相对于不进行任何残余应力消除的样件  $A_0, A_1$  的表面残余应力平均消除率为 66.4%,  $A_2$  的为 40.3%,  $A_3$  的为 7.6%,  $A_4$  的为 4.0%, 即  $A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > A_0$ 。与三种热处理方式对内部残余应力的作用相似, 由于真空去应力退火使零件表面达到的残余应力松弛激活能最高, 深冷处理次之, 高低温循环处理最小, 故有上述结果。

综上所述, 可以得出以下结论:(1)在 TC4 R 态钛合金零件的内部/表面残余应力去除效果方面, 真空去应力退火>深冷处理>高低温循环热处理, 可选择真空去应力退火作为 TC4 钛合金零件内部/表面残余应力的主要消除方法;(2)高低温循环热处理对零件内部/表面的残余应力影响均很小;

## 2.2 形状精度检测结果和分析

$A_1 \sim A_4$  经高低温循环热处理前后的端面平面度和柱面圆柱度检测结果如表 5 所示(由于  $A_0$  未进行任何残余应力消除处理, 故未检测)。

表 5 形状精度检测结果

Table 5 Shape accuracy test results

mm

编号	高低温循环热处理前		高低温循环热处理后		高低温循环热处理前后变化量	
	平面度	圆柱度	平面度	圆柱度	平面度	圆柱度
A1	0.009 1	0.225 2	0.008 0	0.224 8	-0.001 1	-0.000 4
A2	0.014 9	0.175 1	0.013 9	0.177 7	-0.001 0	0.002 6
A3	0.016 2	0.185 6	0.017 8	0.195 7	0.001 6	0.010 1
A4	0.014 0	0.018 4	0.016 6	0.211 3	0.002 6	0.192 9

由表 5 可知,  $A_1 \sim A_4$  对应的平面度和圆柱度值变化量呈现逐渐增大的趋势。从平面度和圆柱度变化规律可知: 经过真空去应力退火+深冷处理+高低温循环热处理的  $A_1$  的变化量最小; 经真空去应力退火+高低温循环热处理的  $A_2$

的变化量次之; 经深冷处理+高低温循环热处理的  $A_3$  的变化量较大; 仅做高低温循环热处理的  $A_4$  的变化量最大。因此, 对于形状精度保持性,  $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ 。结合残余应力的检测结果分析, 样件的平面度和圆柱度产生变化的主要原因

是经过各类热处理方法组合的作用,残余应力得到了不同程度的消除,样件内部塑性变形得到释放。残余应力的平均消除率越高,样件中剩余的残余应力水平越低,模拟太空高低温循环过程中发生塑性形变的趋势越小,样件的形状精度保持性越好。残余应力平均消除率的大小和形状精度保持性的好坏呈强正相关性。

### 3 结论

(1) 在钛合金零件的内部和表面残余应力去除效果方面,真空去应力退火使零件内部达到的残余应力松弛激活能最高,深冷处理的次之,高低温循环处理的最小,三者对内部和表面残余应力消除效果趋势一致:真空去应力退火>深冷处理>高低温循环热处理。

(2) 相对于未经处理的样件,经过真空去应力退火+深冷处理+高低温循环热处理样件的内部/表面残余应力平均消除率分别为 88.6% 和 66.4%,其残余应力消除率最高;经过真空去应力退火+高低温循环热处理样件的内部/表面平均消除率分别为 69.0% 和 40.3%,其残余应力消除率次之;经过深冷处理+高低温循环热处理样件的内部/表面平均消除率分别为 37.6% 和 7.6%,其残余应力消除率再次之;只进行高低温循环热处理样件的内部/表面平均消除率分别为 -4.1% 和 4.0%,其残余应力消除率最低。

(上接第 58 页)

抗拉强度和较高冲击韧性的 20 mm 厚钛合金板材。采用 900 ℃ 以上近  $T_{\beta}$  热处理温度后,钛合金板材的横向冲击吸收能量平均值达到 128 J。

(3) 与传统 VAR 熔炼锻造制坯相比,采用一次 EB 熔炼扁锭铸坯直轧制备钛合金板材的生产效率和成本得到大幅改善,经济效益显著,未来在船舶与海洋工程等领域应用前景广阔。

#### 参考文献:

- [1] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况 [J]. 航空科学技术, 2005, 16(4): 3-6.
- [2] 孟祥军, 陈春和, 余巍, 等. 几种海洋工程用钛合金及其应用 [J]. 中国造船, 2004, 45(Z): 38-43.
- [3] 于宇, 李嘉琪. 国内外钛合金在海洋工程中的应用

(3) 在形状精度保持性方面,残余应力消除率越高,残余应力水平越低,其形状精度保持性越好。经去应力退火+深冷处理+高低温循环热处理的样件形状精度保持性最好,经去应力退火+高低温循环热处理样件的次之,经深冷处理+高低温循环热处理样件的再次之,只经高低温循环热处理样件的最低。形状精度保持性与残余应力消除效果呈强正相关。

#### 参考文献:

- [1] 马聪. 火星探测遥感相机支撑结构设计 [D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- [2] 郝俊峰, 季禹瞳, 张天驰, 等. 面向航天器多分支钛合金支承结构的 SLM 成型工艺 [J]. 新技术新工艺, 2018(6): 1-5.
- [3] 吴宏宇, 王春洁, 丁宗茂, 等. 着陆姿态不确定下的着陆器缓冲机构优化设计 [J]. 宇航学报, 2018, 39(12): 1323-1331.
- [4] 姜建堂, 孟金奎, 董亚波, 等. 大型复杂构件制造过程残余应力演化与调控 [J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 676-685.
- [5] 米谷茂. 残余应力的产生和对策 [M]. 朱荆璞, 邵会孟, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [6] 何伟, 杜小平, 马红征, 等. TC4 钛合金相变温度的测定与分析 [J]. 理化检验(物理分册), 2014, 50(7): 461-464.
- [7] 黎文献, 龚浩然, 柏振海, 等. 金属材料的深冷处理 [J]. 材料导报, 2000, 14(3): 16-18.
- [8] 康超, 曾卫东, 张尧武, 等. 真空去应力退火对 TC21 钛合金残余应力的影响 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(16): 154-156.

现状与展望 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33(3): 111-116.

- [4] 冯秋元, 佟学文, 王俭, 等. 低成本钛合金研究现状与发展趋势 [J]. 材料导报, 2017, 31(9): 128-134.
- [5] 李渤渤, 张强, 裴腾, 等. TC4 钛合金 EB 铸坯板材轧制组织及性能研究 [J]. 材料开发与应用, 2020, 35(1): 5-9.
- [6] 郝晓博, 张强, 李渤渤, 等.  $\alpha+\beta$  相区高温退火对 Ti80 合金板材组织与性能的影响 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33(1): 49-53.
- [7] 李渤渤, 郝晓博, 刘茵琪, 等. 提高 Ti70 中厚板塑韧性热加工工艺研究 [J]. 材料开发与应用, 2020, 35(2): 33-38.