

# TC4 钛合金筒形件分瓣热胀形工艺研究

## Research on Hot Bulge Forming Process of TC4 Titanium Alloy Cylindrical Part

无锡职业技术学院机械技术学院 曹秀中  
中航工业北京航空制造工程研究所 韩秀全 张涛 付明杰 马岩 黄春

**[摘要]** 研究了分瓣热胀形模具结构、模具材料及其工艺参数等对钛合金筒形件胀形精度的影响。结果表明,分瓣热胀形是高精度钛合金筒形件的一种有效成形方法,分瓣热胀形 TC4 钛合金  $\phi 200\text{mm} \times 700\text{mm}$  筒形件的径向尺寸精度和母线直线度分别达到  $\pm 0.03\text{mm}$  和  $0.11\sim 0.17\text{mm}$ 。

**关键词:** TC4 钛合金 筒形件 热胀形 尺寸精度

**[ABSTRACT]** The cylindrical parts forming technology of TC4 titanium alloy is studied by hot bulging process. The experiments focus on analyzing the effects of dies structure, bulging dies materials and processing parameters on the precision of specimen size. The results indicate that the hot bulge forming process is a very effective method for forming the TC4 titanium alloy cylindrical parts. The accuracy of radial dimension and linear of  $\phi 200\text{mm} \times 700\text{mm}$  cylindrical part are  $\pm 0.03\text{mm}$ ,  $0.11\sim 0.17\text{mm}$ , respectively.

**Keywords:** TC4 alloy Cylindrical part Hot bulge forming Size precision

TC4 钛合金筒形件是航空发动机、导弹和飞船等航空航天器的一类重要结构件。热胀形工艺是 TC4 筒形件一种有效的成形方法<sup>[1-3]</sup>。随着航空航天器零部件精度的不断提高,目前的内高压和轴向加载成形等胀形工艺不能完全满足此类零件的精度要求。本文针对 TC4 钛合金筒形件,结合 TC4 材料特点,采用高温条件下轴向可调、径向可变的分瓣胀形工装,运用热胀形工艺,对高精度的 TC4 筒形件成形工艺进行研究,并通过试验分析模具结构、模具材料以及工艺参数对试件尺寸精度的影响。

## 1 试验材料及设备

试验用 TC4 钛合金板材厚度为  $1.0\text{mm}$ ,由宝鸡钛业有限公司提供。显微组织为等轴的  $(\alpha + \beta)$  两相组织,同时含有不超过  $15\%$  的长条  $\alpha$  晶粒。

加热设备为井式炉,该设备为圆形埋地式,采用周向分布的电阻丝加热,循环风扇均温, K 型热电偶测温,测温精度为  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

## 2 试验方法

### 2.1 成形方案及原理

本文研究的 TC4 筒形件直径尺寸为  $\phi 200 \pm 0.05\text{mm}$ ,高度为  $700\text{mm}$ ,直线度不大于  $0.25\text{mm}$ ,轮廓度不大于  $0.2\text{mm}$ 。根据零件的特点采用分瓣模具热胀形。这种热胀形的工艺特点主要体现在两个方面:一是利用材料在高温作用下应力释放使筒体定型;二是利用筒体材料和模具的高低温下的缩放差使筒体直径达到较高的精度,其成形原理见图 1。

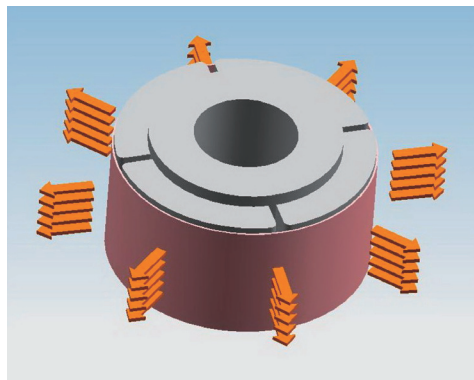


图1 筒体胀形原理图

Fig.1 Principle diagram of cylinder bulging

为分析不同模具材料对成形后圆筒精度的影响,筒体胀形试验采用相同工装结构、不同工装材料。选用的 2 种模具材料的主要物理参数见表 1。

表1 模具材料的物理参数<sup>[4]</sup>

模具材料	常温抗拉强度 $\delta/\text{MPa}$	布氏硬度 (HB)	700℃时线膨胀系数 $/ (10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
1Cr18Ni9Ti	520	187	18.2
中硅钼球墨铸铁	450	260	11

### 2.2 胀形工艺的理论依据及工装结构

热成形的零件外形尺寸依据以下公式计算<sup>[5]</sup>:

$$L_{cj} = L_{cm} \{1 + (\alpha_m - \alpha_j) \Delta t\} \quad (1)$$

其中,  $L_{cm}$  为常温时模具的名义尺寸;  $L_{cj}$  为常温时零件

的名义尺寸； $\alpha_m$  为成形温度时模具的线膨胀系数； $\alpha_j$  为成形温度时零件的线膨胀系数；

将式(1)转化成圆筒胀形后的直径为：

$$\Delta \phi = L / \pi \times (\alpha_m - \alpha_j) \Delta t + \Delta h \times 2 \operatorname{tg} \theta \quad (2)$$

$$\phi = \Delta \phi + \phi_0 \quad (3)$$

其中， $\phi$  为试件内圆直径； $L$  为沿材料厚度中性面展开长度； $\Delta h$  为胀芯压下量； $\theta$  为胀芯和胀瓣的配合角； $\Delta \phi$  为圆筒的回弹量； $\Delta t$  为胀形温度与室温差值； $\phi_0$  为装模尺寸。可以通过调整胀芯的压下量  $\Delta h$  来控制直径  $\phi$  的尺寸。为使两种材料成形后的零件尺寸一致，1Cr18Ni9Ti 的模具的外径较中硅钼球墨铸铁模具的外径小。模具的具体尺寸由式(1)、(2)、(3)确定。

### 2.3 胀形步骤及工艺参数

(1) 将 TC4 板材按计算后的展开长度下料，然后滚弯焊接成圆筒。圆筒内外表面涂覆防氧化涂料。干燥后将毛坯装入胀瓣，中心放入胀芯。

(2) 对胀芯施加预紧压力，胀芯下移，胀芯下移到预定位置后停止加载，将模具与试件一起装入井式炉。

(3) 升温至预设温度，保温一定时间，取出试件，使用最小刻度为 0.01mm 的  $\pi$  尺测量圆筒外径。成形温度及保温时间见表 2。

表2 TC4筒体胀形工艺参数

模具材料	热胀形工艺参数		模具材料
1Cr18Ni9Ti 不锈钢	成形温度 /°C	保温时间 /min	中硅钼球墨铸铁
试件号			试件号
1#	600	90	7#
2#		120	8#
3#		90	9#
4#	650	120	10#
5#		90	11#
6#	700	120	12#

## 3 结果与分析

### 3.1 模具结构对胀形精度的影响

胀瓣间隙是影响轮廓度精度的一个重要因素。成形的圆筒普遍存在的问题是轮廓度尺寸存在一致的趋势，这是由于胀形模具在胀芯施加预紧力后胀瓣之间形成一条空隙。外侧的试件在此位置的受力条件与其他部位不同，有分瓣模具约束的位置，材料既受径向离心方向分瓣模的压应力，同时周向受拉应力。而在分瓣膜缝隙处，材料仅仅受周向拉应力。因此成形后的试件在分瓣膜的缝隙处，型面略显平直，型面精度较其他位置差。在保证零件毛坯能够顺利装模的情况下，装模后分瓣膜间隙越小，成形后的零件轮廓度精度越高。

另外，通过重复校形也可以提高此位置的轮廓度精度。具体方法是在第一次成形后，将筒体沿轴向旋转，使缺陷位置对正胀瓣的有效型面，与胀瓣缝隙错开。然后施加预紧力重复胀形一次。重复成形后的型面精度较首次成形有显著提高。

### 3.2 模具材料对胀形精度的影响

图 2 (a) 为模具材料对筒形件直径的影响曲线，可见，在其他条件相同的情况下，中硅钼球磨铸铁模具成形的直径均小于 1Cr18Ni9Ti 模具成形的直径；而且，中硅钼球磨铸铁模具成形后的直径尺寸波动较小，在 0.03mm 左右，而 1Cr18Ni9Ti 成形的试件直径波动大于 0.05mm。1Cr18Ni9Ti 模具胀形后的试件直线度在 0.15mm~0.30mm 之间，中硅钼球磨铸铁成形后的直线度在 0.11mm~0.17mm 之间，如图 2 (b) 所示。1Cr18Ni9Ti 模具成形后的试件轮廓度在 0.15mm~0.2mm 之间，中硅钼球磨铸铁模具成形后的试件轮廓度在 0.08mm~0.12mm 之间，如图 2 (c) 所示。这是由胀瓣缝隙的大小引起的，胀瓣缝隙越小越有利于成形精度提高。1Cr18Ni9Ti 模具装模后胀瓣缝隙为 8~10mm，而中硅钼球磨铸铁模具装模后胀瓣缝隙在 5mm 以下。通过以上的结果可知，模具材料对筒形件的成形精度影响较为明显，采用中硅钼球磨铸铁模具胀形较 1Cr18Ni9Ti 模具的精度高。

### 3.3 成形温度及保温时间对胀形精度的影响

由图 2 (a) 可知，在 600℃ ~700℃ 范围内，筒形件直径随着成形温度的升高呈增大的趋势。而成形温度对直线度的影响规律则与模具材料有关。模具材料为 1Cr18Ni9Ti 时，直线度随着成形温度的升高呈“凹”形变化，而模具材料为中硅钼球磨铸铁时，直线度随着成形温度的升高呈“凸”形变化，如图 2 (b) 所示。轮廓度随成形温度的升高总体上呈下降趋势，见图 2 (c)。当模具材料为中硅钼球磨铸铁时保温时间对筒形件直径的影响不明显，而模具材料为 1Cr18Ni9Ti 时，保温时间对筒形件直径的影响明显，600℃ 时最大，为 0.15mm。直线度随着保温时间的增加而减小，如图 2 (b) 所示。与筒形件直径的变化规律相近，当模具材料为中硅钼球磨铸铁时保温时间对筒形件直径的影响不明显，而模具材料为 1Cr18Ni9Ti 时，保温时间对筒形件直径的影响明显。轮廓度受保温时间的影响较小，如图 2 (c) 所示。相同条件下，在 650℃ 时的变化略为明显，模具材料为 1Cr18Ni9Ti 时保温 120min 时的轮廓度更高，比保温 90min 时高 0.02mm；模具材料为中硅钼球磨铸铁时，相差 0.03mm，保温 120min 时的轮廓度更低，比保温 90min 时低 0.03mm。

由于装模时的预紧力作用，材料内部应力较大，成

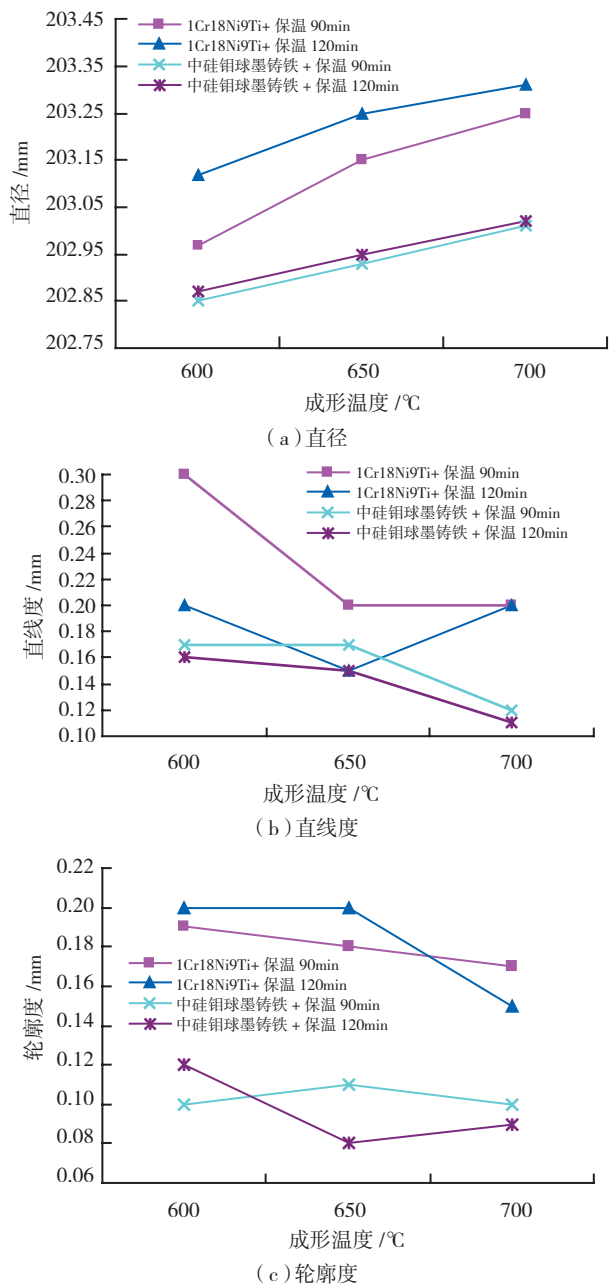


图2 参数对零件精度的影响

Fig.2 Effects of parameters on precision

形温度下(600℃~700℃)TC4合金应力释放的程度与温度强正相关,与保温时间弱正相关。根据文献[6],材料温度升高时,应力松弛速度加快。胀形温度与保温时间在某种程度上存在一定的交互作用,通过不同参数的匹配,可以成形出相同尺寸的试件。图2(a)中,1Cr18Ni9Ti的模具材料,当成形温度700℃、保温时间90min的试件与成形温度650℃、保温时间120min的试件直径相同。这说明成形温度与保温时间有一定的交互作用,可以通过调整这两个参数达到相同的直径尺寸。

## 4 结论

(1)分瓣热胀形是高精度钛合金筒形件的一种有效成形方法,分瓣热胀形 $\phi 200\text{mm} \times 700\text{mm}$  TC4钛合金筒形件直径精度可以达到 $\pm 0.03\text{mm}$ ,直线度精度可以达到0.11~0.17mm。

(2)分瓣热胀形筒体在分瓣处的轮廓度较其他位置精度差,通过调整工装结构以及重复错位胀形的方式能有效地提高轮廓度精度。

(3)分瓣热胀形时,模具材料与TC4钛合金的膨胀系数正差越小,TC4钛合金筒体成形后的尺寸波动越小精度越高。

(4)在600℃~700℃范围内,不同的分瓣热胀形温度与保温时间组合,可以获得相同直径及精度的TC4钛合金筒体。

## 参考文献

- [1] 罗皎,李森泉,李宏,等. TC4高温变形行为及其流动应力模型. 中国有色金属学报,2008,8(18):1395-1396.
- [2] 王明伟,张立文,戚林,等. 钛合金筒形件真空热胀形数值模拟. 大连理工大学学报,2008,1(48):58-59.
- [3] 肖军杰,李东升,李小强,等. 刚模热胀形TC1半球零件试验与数值模拟研究. 锻压技术,2011,6:28-29.
- [4] 沈宁福,张东捷,李仲达,等. 新编金属材料手册·不锈钢铸铁. 北京:科学出版社,2003:165-197.
- [5] 理有亲,林兆荣,陈春奎,等. 钛板冲压成形技术. 北京:国防工业出版社,1986:169-170.
- [6] 刘勇,尹钟大,朱景川. 温度、应力及晶粒度对TC4合金应力松弛性能的影响. 稀有金属材料与工程,2003,32(8):643-645.

(责编 良辰)

(上接第88页)

艺中的粗磨改为线切割,留0.15左右的精磨量,精磨时每次以小磨削量0.05左右为宜。或者在线切割后就进行荧光检验,是可以100%发现缺陷的。否则只能在后续工序或试车后发现缺陷。

通过对高低涡叶片的各种切削工艺对缺陷显示影响的验证分析可以得出以下结论:(1)高涡叶片的缺陷为铸造显微疏松缺陷,对于三级灵敏度得后乳化荧光检验方法而言,该缺陷检测受磨削量工艺影响。(2)通过调整高涡叶片加工工艺,即将粗磨改为线切割,并留0.15左右的余量,精磨时采用0.05左右的小磨削量,精磨后或在线切割后采用三级灵敏度得荧光检测,完全可以检测出铸造显微疏松缺陷。(3)对于磨削余量较大的零件表面,要检测出零件缺陷,需要经过多次的热循环后,才有可能最终检测出表面缺陷。若工艺中无热循环的工艺,零件的表层缺陷又可能漏检,需要用户及无损检测人员特别关注这种现象。

(责编 亦非)