

# TC4 钛合金贮箱半球超塑成形模具型面设计

## Superplastic Forming Mold Surface Design of TC4 Titanium Alloy Hemisphere Tank

北京航空制造工程研究所 雷海龙 张荣霞  
空军驻北京地区军事代表室 张 军

**[摘要]** 合理布置成形后半球毛坯的壁厚加工余量,并计算超塑成形模具型面的名义加工尺寸。通过分析半球在超塑成形过程中材料变形机理,设计反向预成形模具型面,达到均匀半球毛坯壁厚的目的,使其满足后续加工尺寸的要求。

**关键词:** 钛合金 贮箱半球 超塑成形 型面设计

**[ABSTRACT]** The machining allowance of the wall thickness of the formed blank hemisphere is decorated reasonably, and the dimensions of the superplastic forming mold surface is calculated. Through the analysis of material deformation mechanism in the process hemisphere superplastic-forming, the reverse direction preforming mold type surface is designed to achieve the purpose of uniform blank wall thickness and to make it satisfy the requirements of subsequent processing size.

**Keywords:** Titanium alloy Hemisphere tank Superplastic forming Surface design

在航空航天领域,随着高超音速飞行器、空天飞行器飞行速度及功能性的不断提升,对飞行器材料和结构提出了越来越高的要求,既要求材料轻质、高强,又要尽量保证零部件外形结构的整体性和均匀性。因钛合金具有密度低、比强度高、耐高温、抗腐蚀等优点<sup>[1]</sup>,在航空航天领域的关键部件中得到广泛应用,尤其在恶劣环境工作部件(如叶片、口盖、燃料储箱等)的应用中起到了不可替代的作用,同时由于钛合金具有良好的超塑性,能够整体成形复杂形状钛合金薄壁件及大拉伸比罩型件,减少零件的焊接、铆接等工序,大大提高了零件外形结构的整体性及可成形性,在航空航天领域发挥了巨大作用。

但复杂形状钛合金薄壁件及大拉伸比罩型件超塑成形过程的面积增量,完全依靠板料未压住部件的材料变薄来实现,各区域应变不同,易造成零件厚度分布不均匀,产生缺陷,降低零件性能。随着超塑成形技术的应用越来越广泛,对其在精确性方面有了

更高的要求,对于精度要求高的零件,这直接关系到零件能否满足设计要求,因此如何改善背板料厚度分布,提高超塑成形质量,在钛合金超塑成形工艺中要求显得无比重要。

现以某型卫星燃料储箱半球毛坯的超塑成形为例,根据材料变形机理,通过优化设计模具型面,改善超塑成形后半球毛坯的壁厚均匀度,使半球毛坯壁厚包络最终零件,满足加工要求。

### 1 型面设计原则

模具型面设计过程首先需要对零件进行尺寸和结构分析,设计加工余量,从而得到成形后毛坯的外型尺寸和壁厚分布状态。根据成形后毛坯的外型尺寸、成形模具材料的热膨胀系数及成形温度等参数,通过公式计算可以获得冷状态下模具的最终型面尺寸。同时,为使成形后毛坯的壁厚分布尽量均匀且达到设计状态,需要在模具结构中设计反向预成形型面。对设计的成形模具型面使用计算机模拟的手段,分析成形后半球毛坯零件的壁厚分布,验证型面设计的可靠性。型面设计的主要流程如图1所示。

#### 1.1 毛坯加工余量设计

超塑成形后的半球毛坯需经内外型面等部位的精加工方能达到最终尺寸状态。因此,需要根据最终产品图纸,逆向设计加工前半球毛坯的型面尺寸和壁厚尺寸。毛坯的内外型面应包络最终零件外形,另外根据TC4 板材超塑成形后贴模面相对内型面尺寸精确的特点,确定加工余量的设计原则:在毛坯包络最终零件外型的前提下,将主要的加工余量设计在内型面。

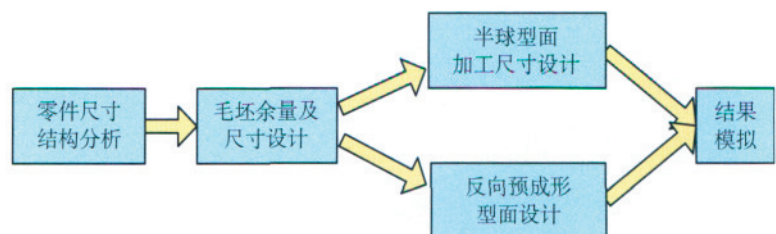


图1 型面设计流程

Fig.1 Design flow of surface

### 1.2 半球型面加工尺寸设计

贮箱半球成形毛坯尺寸确定后,可通过计算推导出半球型面的加工尺寸。半球零件要求的尺寸精度较高,且该零件的外形尺寸较大,设计过程中必须考虑加热对钛合金材料及成形模具材料几何尺寸的影响。钛合金和成形模具材料的热膨胀系数不同,热胀冷缩后会使得零件和模具尺寸产生差异<sup>[2]</sup>。

确定热状态使用的模具型面尺寸的原则是零件成形后在常温下符合图纸尺寸要求的基本保证。最终模具型面的名义加工尺寸的确定是根据零件图纸、钛材料牌号、模具材料牌号和成形温度来完成的。

### 1.3 反向预成形型面设计

超塑成形是材料延展变形的过程。根据体积不变原理,径向和切向的伸长变形必然引起材料厚度的减薄变形。材料与模具型面贴合后,摩擦力的作用限制了贴合部分材料的继续变形,而其他部分材料则继续减薄变形,最后贴膜的材料是零件壁厚最薄的部位,零件因此会出现壁厚不均匀的情况。在超塑成形模具结构中设计合理的反向预成形型面,使材料先反向预成形再正向成形,能够有效提高半球毛坯壁厚均匀度<sup>[3]</sup>。通过分析材料在反向预成形过程中的变形机理,可以获得反向预成形型面的设计原则。

将半球成形过程划分为3个阶段:反向预成形阶段、正向预成形阶段、最终成形阶段。另外,把参与变形的材料按照变形量的不同,划分为4部分,单独分析其壁厚减薄情况。

第一阶段:反向预成形阶段。

材料开始反向变形时,边缘平直段及中心平直段已贴合模具型面,该部分材料基本不发生减薄变形;曲面部分材料自下至上逐渐贴膜,曲面顶部最后贴膜,壁厚分布自下至上逐渐减薄,曲面顶部最薄,如图2所示。

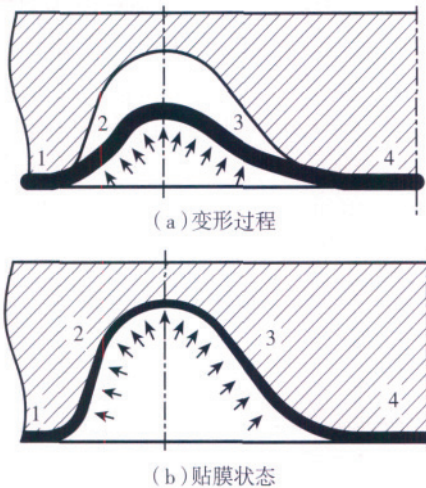


图2 反向预成形过程

Fig.2 Process of reverse direction preforming

根据体积不变原则,材料变形量的计算,可通过曲面顶端两侧面积和相应原始材料投影面积计算获得,并可得到各段平均壁厚分布。

第二阶段:正向预成形阶段。

该过程是材料被正向吹塑改变形状,面积不增大,因此基本不发生减薄变形,形状变化为近椭球面。通过面积计算,可获得上述各段材料在椭球面上的位置,如图3(a)所示。

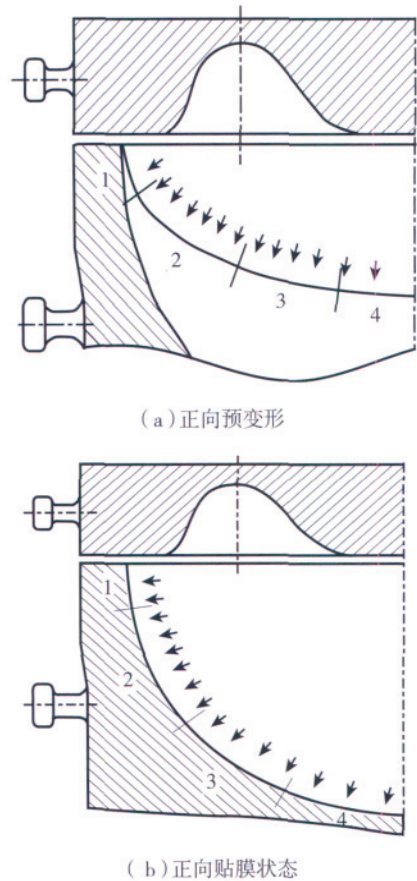


图3 正向预成形过程

Fig.3 Process of forward direction preforming

第三阶段:最终成形阶段。

材料被正向吹塑至贴膜,各部分材料延伸变形,壁厚发生减薄。将材料整体剩余变形量平均分配到各段材料变形量,可以大致获得最终成形状态零件的壁厚分布,如图3(b)所示。

按上述分析的半球成形过程中材料的变形规律,根据半球毛坯壁厚分布,可逆向计算出材料在不同变形阶段的变形量及壁厚。另外,通过调整型面内侧与外侧仰角的大小、弧顶的高度,可改变材料不同部位的变形量。设计后的反向预成形型面过渡圆角应足够大,防止正向成形时零件表面产生皱折。反向预成形型面设计完成

后,还应将其面积总和与半球最终型面面积进行对比,应保证反向预成形型面面积小于最终半球面积,通常应小于 80% 最终半球面积<sup>[3]</sup>。

半球模具正向、反向型面设计后,可以使用有限元分析软件模具仿真零件的超塑成形过程,预测半球零件的壁厚分布状态,验证型面设计的可靠性。

## 2 结果分析

使用文中提出的型面设计方法,对具体的贮箱半球超塑成形模具型面进行设计,零件结构尺寸如图 4 所示。根据零件型面尺寸,可得到成形后毛坯的结构尺寸,如图 5 所示。通过毛坯的外型面尺寸可根据模具和材料的热膨胀系数,推导计算最终半球成形模型面的名义加工尺寸。根据设计毛坯的壁厚分布,设计反向预成形型面的各部位结构尺寸,如图 6 所示。

使用 MARC2005 软件分析半球成形过程,计算得到成形后半球毛坯的壁厚分布,模拟结果显示成形后毛坯的壁厚尺寸满足后续加工的尺寸要求,如图 7 和图 8 所示。

根据模具图纸加工制造了成形模具,并形成得到半

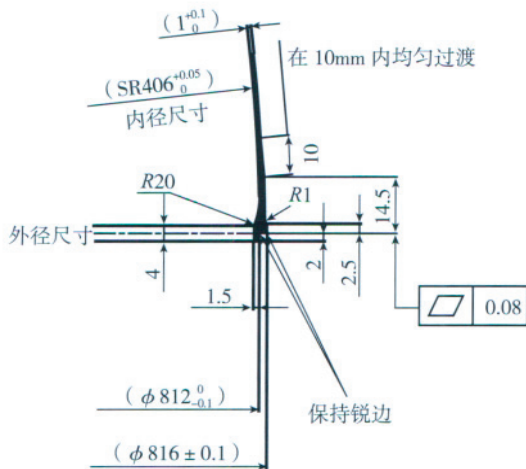


图4 贮箱半球图纸  
Fig.4 Part drawing

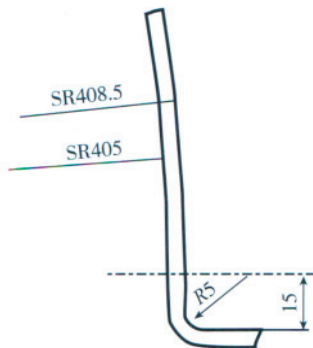


图5 贮箱半球毛坯图  
Fig.5 Rough part diagram

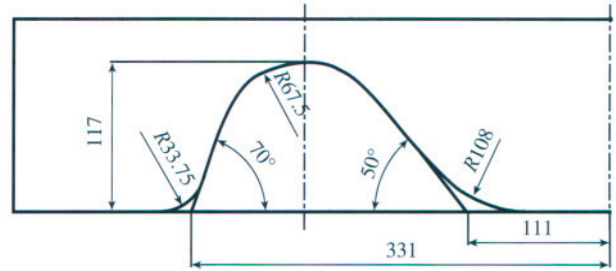


图6 半球反向预成形模具截面图  
Fig.6 Section of preforming mold

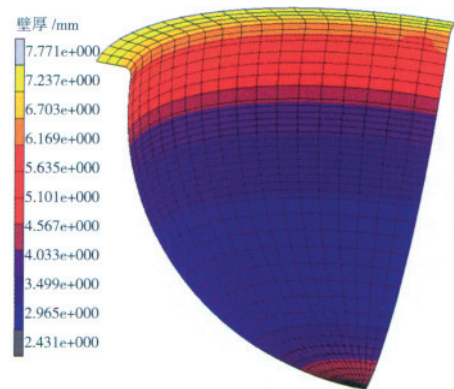


图7 半球毛坯壁厚分布云图  
Fig.7 Wall thickness distribution nephogram of rough part

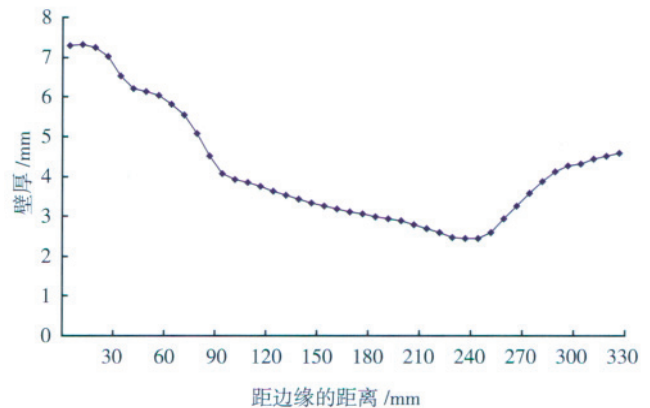


图8 半球毛坯壁厚分布曲线  
Fig.8 Wall thickness distribution curve of rough part

球毛坯零件。使用超声测厚仪对成形后半球毛坯壁厚进行测量,其分布曲线与采用本文预估计算的分布曲线存在一定差异,但基本符合材料的变形趋势,如图 9 所示。

## 3 结论

(1) 按本文超塑成形半球模具的型面设计方法,能够获得满足加工尺寸要求的半球毛坯;

(2) 半球模具的型面设计方法能够为其他同类零件的型面设计提供参考。

(下转第 59 页)

起皱。在接近折弯的  $B_2$  部位,由于压边圈的  $R_2 >$  凸模  $R$  实际,所以开始处于没有约束状态,在成形过程中,材料会在压应力的作用下起皱,在翻边处的压应力最大,向底边逐渐减小,因此会产生图 6 中所示的皱曲。

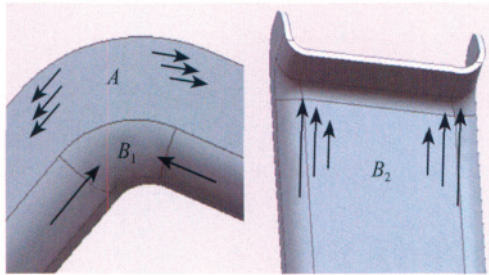


图6 材料内部受力示意图  
Fig.6 Internal force diagram of material

### 3.2 中心顶出的热成形工艺

中心顶出的热成形工艺试验结果见表 2。

表2 试验的工艺参数及结果

序号	试验温度/°C	零件状态	最小厚度/mm
1	650~700	开裂	—
2	710~750	无开裂,底面平整,弯曲侧壁减薄不明显	1.75
3	750~800	无开裂,底面平整,弯曲侧壁减薄不明显,但表面氧化较严重	1.80

这种成形工艺方案能够弥补沿型面压边成形方案的不足,成形出的零件底面平整,见图 7。

采用中心顶出方案成形的零件,最大拉伸处未出现开裂,零件底面和侧面的有效部位没有起皱。各项尺寸和表面质量符合设计要求。总体上说,采用中心顶出的设计方案优于沿型面压边的设计方案。

但采用中心顶出的设计方案也存在不足。首先,因为没有压边力,材料在凸凹模逐渐的合模过程中,由于对材料拉伸,材料内部产生拉应力。同时在拉伸的边缘产生压应力,材料易失稳起皱。另外,由于底面折弯处



图7 中心顶出成形方案成形后的零件  
Fig.7 Part after forming by using central push-out method

圆角很小,在翻边过程中折弯的翻边边缘的材料减薄的趋势最大,如果材料毛坯不合适(翻边处余量大)或是在较高的合模速度下,在零件弯曲侧壁边缘会出现断裂。同时,由于没有压边力,在成形出一定高度后,材料盒形的转角边缘处(图 7 标识 1、2 的位置),会起皱。因此,此方案适合翻边高度较小的情况下采用(对于 1.0~2.0mm 的 TC2 钛板,翻边高度应小于 20mm)。

## 4 结论

通过采用不同的温度以及不同的成形方式对 TC2 钛合金异形件进行工艺试验。通过试验结果可以得出以下 2 点结论:

(1) TC2 钛合金异形零件的成形温度在 710~750°C 之间;

(2) 中心顶出的成形方案能够保证翻边不开裂,型面尺寸精度符合设计要求。

## 参考文献

- [1] 中国材料工程大典编委会. 中国材料工程大典第七篇·钛及钛合金. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 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.
- [3] 于连仲, 王志恒. 锻压手册第二卷·冲压. 北京: 机械工业出版社, 2001. 17-21, 243-251.

(责编 小城)

(上接第 56 页)

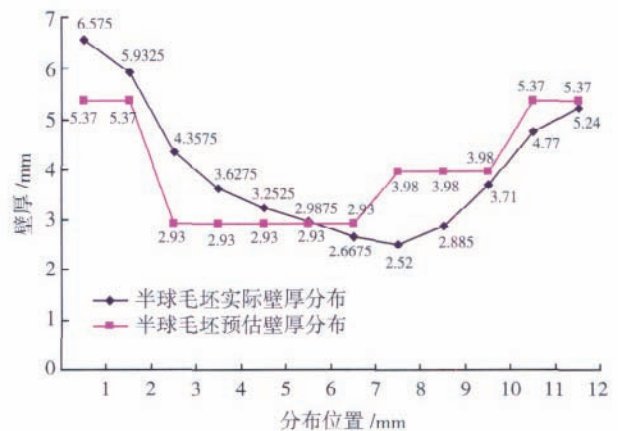


图9 半球预估与实际壁厚分布折线图  
Fig.9 Line graph of estimated and actual wall thickness

## 参考文献

- [1] 林兆荣. 金属超塑性成形原理及应用. 北京: 航空工业出版社, 1990.
- [2] 吴诗焯. 金属超塑性变形理论. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [3] 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.

(责编 小城)