

# 钕合金零件的强力旋压加工

曾向东

(西安航天发动机厂, 西安 710100)

**摘要:** **目的** 归纳总结常见类型钕合金零件进行强力旋压加工的可行性及加工方法和要点。**方法** 通过分析、分类、举例、实验、对比等多种方式方法,从材料的可旋性、零件特征、工艺分析、加工工艺、加工要点、工艺实施、措施应对等方面进行归纳总结和论述。**结果** 验证了钕合金材料进行强力旋压加工的可行性及特点。**结论** 钕合金零件的强力旋压加工是可行的,不同类型的零件所需的加工手段、方法各异。技术上有一定的难度,随着产品多样性的发展,还需要进行更深入的探索和研究。

**关键词:** 钕合金; 强力旋压; 类型与方法; 加工方案

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.02.005

**中图分类号:** TG376

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2014)02-0024-08

## Spinning Processing of Niobium Alloy Parts

ZENG Xiang-dong

(Xi'an Aerospace Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**ABSTRACT: Objective** To summary the feasibility of spinning processing for common-type niobium alloy parts and its processing methods and key points. **Methods** The methods were summarized and discussed by using the experiment analysis, classification, illustration, contrast, etc. from many different points, such as the rotatability, parts characteristics, process analysis, process key points, technology, process materials and measures. **Results** The feasibility and characteristics of powerful spinning of niobium alloy were verified. **Conclusion** The spinning processing of niobium alloy parts is feasible. Processing of different types of parts need to be done in different ways. There is a certain degree of difficulty in technology, with the development of the diversity of products more in-depth exploration and research are required.

**KEY WORDS:** niobium alloy; powerful spinning; types and methods; processing proposal

钕合金是广泛应用于航天航空生产的一种抗熔融碱金属,具有优良的耐蚀性能、恒弹性能好、原子的热中子吸收截面小,有优异的抗氧化性和高温强度,是一种新型的高温、高比强度合金。例如 Nb521 合金,其使用温度高(1600 °C 下,  $\sigma_b \geq 70$  MPa),比

WC-103 合金的使用温度高 200 °C 以上,它的密度较低( $\leq 9.0$  g/cm<sup>3</sup>),可提高载荷能力,增加射程,提高飞行速度;另外拥有良好的焊接性能和加涂抗氧化涂层性能,在 1600 °C 下的高温强度是 C103 合金的 3 倍左右。其满足姿态控制发动机技术设计的要

收稿日期: 2013-11-06

作者简介: 曾向东(1972—),男,四川泸县人,高级技师,主要从事金属塑性加工成形方面的工作,擅长不锈钢、钛合金、钕合金等材料的强力旋压加工。

求,可用于加工火箭喷管、喷管尾裙等类别的零件,可以大幅度提高发动机的性能,目前大多采用旋压加工方式。

强力旋压是一种综合了锻造、挤压、拉伸、弯曲、环轧和滚压等工艺特点,用于成形薄壁空心回转体零件的一种少余量的金属压力加工方法,其实质是利用旋轮作用高压于坯料,并作进给运动,连续地依次对随芯模沿同一轴线旋转的坯料施加压力,使其产生不断的局部塑性变形,逐渐成形为所需空心回转体零件,是喷管制造首选的重要加工方法,是直接影响喷管制造成败的关键工艺过程。

钛合金作为难熔贵重金属,价格昂贵,其喷管旋压成形技术在国内尚处于起步阶段,文中暂以 Nb521 为例,探讨该类金属零件的强力旋压加工。

## 1 钛合金材料强力旋压的可行性研究

测得材料厂家所提供的 Nb521 材料的室温机械性能指标为:抗拉强度  $\sigma_b \geq 424$  MPa,屈服强度  $\sigma_{0.2} \geq 250$  MPa,断后伸长率  $A \geq 31.4\%$ ,断面收缩率  $\psi = 70\%$ ,测试结果见表 1。

表 1 钛合金 Nb521 原材料性能测试结果

Table 1 The performance test results of niobium alloy Nb521

试样编号	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	断后伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $\Psi/\%$
1	436	261	28.8	70.7
2	403	239	31.1	69.6
3	433	250	33.3	69.6
平均值	424	250	31.4	70.0

按照强力剪切旋压成形材料一次旋压极限变薄率计算经验公式,计算出钛合金材料 Nb521 的一次旋压极限变薄率:

$$\Psi_{\max} = \frac{\psi'}{0.17 + \psi'} \times 100\% = 80.46\%$$

由  $\Psi_{\max} = 1 - \sin \alpha_{\min}$ , 得到最小成形角度  $\alpha \approx 11^\circ 17'$ 。

由此可知, Nb521 材料旋压加工时,当零件的变薄率大于极限变薄率 80.46% 时将无法加工,其成形极限角度为  $11^\circ$  左右。实际加工时,考虑到机床条件、零件特征、加工参数等的影响,为提高成功率,

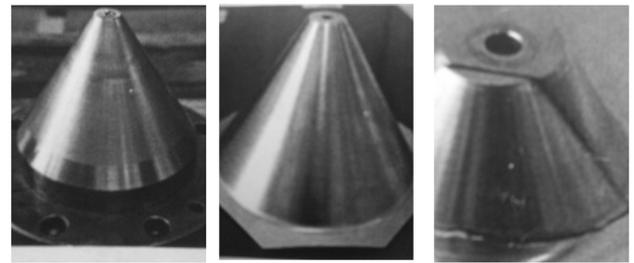
降低加工难度,安全裕度通常取得要小些,据经验对此材料选取 50% ~ 70% 左右的减薄率做为基准。为验证此数据的正确性,选用厚度为 3.0 mm 的 Nb521 钛合金板材,以某锥形模作为标准,进行旋压工艺试验,结果见表 2。旋压工艺参数:旋轮圆角半径  $R_p = 10$  mm, 主轴转速  $n = 120$  r/min, 进给  $f = 0.3$  mm/r, 润滑 MoS<sub>2</sub> + 机油, 试验件及工艺装备如图 1 所示。

表 2 厚度为 3.0 mm 的 Nb521 锥形件旋压工艺试验情况

Table 2 Test results of spinning process with Nb521

(3.0 mm) niobium alloy parts

试件编号	旋压壁厚 $t$ /mm	旋压结果	减薄率 $\psi$ /%
1	1.35	壁厚均匀、表面光洁	55
2	1.05	壁厚均匀、表面平整	65
3	0.85	成形失败,零件开裂	72



a 试验工装

b 试验零件

c 破损零件

图 1 实验样品

Fig. 1 Test part

总结上述工艺试验情况可以看出,将钛合金 Nb521 的一次旋压极限减薄率控制在 70% 以内是比较合理的。

## 2 钛合金零件强力旋压加工的主要类型与方法

### 2.1 普通锥类零件

对零件成形角度大于其材料最小成形角度的零件,可采用一次旋压成形方案加工;对零件成形角度接近或小于其最小成形角度的零件,通常采用两次或多次成形方案进行旋压加工,以避免发生开裂、起褶等缺陷,保证零件的质量。例如图 2 所示的零件。

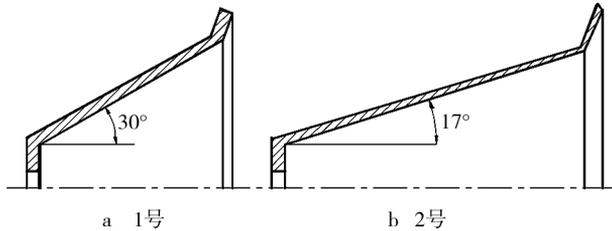


图2 普通锥类零件

Fig. 2 Common cone type parts

图2a中所示1号件,材料变薄率较小,采用厚度为3.0 mm的Nb521 铝合金板材一次旋压即可加工出壁厚为1.45 mm、半锥角为30°的零件。

图2b中示2号件要求采用厚度为3.0 mm的Nb521 铝合金板材,最终加工出壁厚为小端1.0 mm、大端0.65 mm厚、半锥角为17°的零件,材料的变薄率为78.3%,超出了其实际成形极限。为确保成功,先将板坯通过一次旋压加工成1号件对应状态,经热处理后再进行二次旋压加工,至所要求零件尺寸,加工效果较好,所得零件满足技术要求。

## 2.2 小角度的均变壁厚抛物线型零件

此类零件的加工也是采用两次或多道次旋压加工制造,所不同的是因为材料变形趋势更加剧烈些,材料易粘连,容易造成零件表面粗糙甚至龟裂,或由于变形抗力大,零件贴模困难,程序编制时需要先计算出其壁厚在拐点处至终点的变化率。例如图3所示(5号件)均匀减薄类零件。

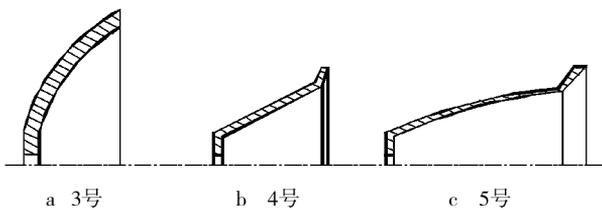


图3 小角度的均变壁厚抛物线型零件

Fig. 3 Small-angle and parabolic shape part with uniform wall thickness

实验针对图3中5号零件进行加工,拟将厚度3.0 mm的Nb521 铝合金板材加工成抛物线形零件,壁厚从小端至大端均匀地由1.25 mm过渡到0.6 mm,成形角度为17°。由于变形程度比较复杂,材料在加工时其纵向、横向均发生变形。为消除零

件表面龟裂,保证大端壁厚和零件的贴模,除采用两次旋压成形的工艺外,还要事先对加工的板坯给予相应的预成形和热处理,以增加材料的可旋性,消除成形干扰。即先将板坯液压成形为图3中3号件样式后,首旋为大角度的锥形件或抛物线形半成品(4号件样式),再二次旋压加工为最终所需5号件。实际加工时采用图4所示方案:在预成形后,先旋压加工为一个35°的抛物线型半成品,其大小端厚度由1.5 mm均匀过渡到1.3 mm,经热处理后,再旋压成图中5号件样式。

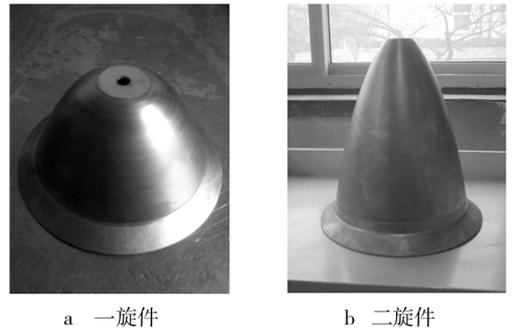


图4 加工方案

Fig. 4 Processing program

具体工艺路线:下料—液压预成形—热处理—首次旋压—热处理—二次旋压。需要注意的是,二次旋压加工时需要计算出相关变形减薄率后再编程进行加工。假设其壁厚沿轴线300 mm长度上由1.25 mm减至0.6 mm,则其每毫米减薄0.002 mm,即以每10 mm变化0.02 mm的速率,在轴线上截取相关的点位来编制加工程序。

旋压工艺参数:旋轮圆角半径 $R_p = 8$  mm,润滑方式为 $\text{MoS}_2$ +机油,首旋时主轴转速 $n = 120$  r/min,进给 $f = 0.35$  mm/r,二旋时主轴转速 $n = 140$  r/min,进给 $f = 0.3$  mm/r。

加工间隙应根据机床的退让量,结合实测零件壁厚进行调整,避免出现断裂、龟裂等缺陷。此方案在实际生产中运用效果较好,完全能够满足技术要求。

## 2.3 多截面变壁厚抛物线型薄壁零件

此类零件尺寸不易控制,变壁厚减薄,径深比高,成形难,具有多个变化曲率需要解决,诸如龟裂、材料堆积、失稳隆起、反旋、开裂、贴模、脱模、程序点

确认等系列难题,由于零件大小端壁厚差值较大,尤其是零件成形后的直径较毛坯直径会增大,最多时可扩大 80~90 mm,状态极为不稳定,和传统的强力旋压时坯料内径尺寸基本不变理论相差太远,具有相当的加工难度。此类零件的旋压加工大多需要对坯料进行预成形或者机械加工后,经过二次或更多次旋压加工才可完成。其加工参数、工艺路线的确定,都较前两类零件繁琐得多,而且加工操作难度也很大。

### 3 多截面变壁厚抛物线型薄壁零件的具体加工实例

下面介绍一例比较典型的多截面变壁厚抛物线型薄壁零件的加工,如图 5 所示,零件 a 的旋压加工就属于此种。

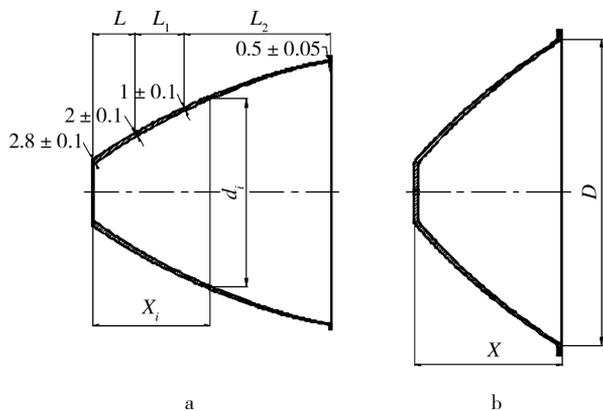


图 5 多截面变壁厚抛物线型薄壁零件

Fig. 5 Parabolic thin wall parts with multiple cross sections and variable wall thickness

#### 3.1 工艺分析、方案预定

图 5a 所示零件较为典型,此零件是由厚度为 4.3 mm 的板坯加工成的零件,小端直径  $\phi = 113$  mm,大端直径  $\phi = 850$  mm,长 980 mm,壁厚从小端的 2.3 mm 沿轴向划分出 56 个截面尺寸,呈多段曲率逐步过渡到大端的 0.5 mm,具体见表 3 (零件壁厚要求);且在大端处有翻边 5 mm 的技术要求,长度控制上要准。整体上厚度变化大,截面尺寸呈三段不同的减薄率分布,目前在国内同类规格零件中属最大、最薄的。由于大小端直径尺寸和厚度尺寸差异大,贴模不易解决;又因零件大、薄,成形后脱模困难,稍不注意就会将零件大端拱起撬伤,甚至将型

面、开口尺寸拽拉变形。

其中小端母线半锥角  $\alpha = 32.22^\circ$ ,大端母线半锥角  $\alpha = 10.35^\circ$ ,材料减薄率大,冷作硬化现象严重,无论是在零件成形、尺寸控制还是表面质量、轮廓度要求上,都存在非常大的加工难度,尤其是大端根部加工时极易发生失稳、断裂;仅坯料成本费用就高达 40 多万元,加工时加工者面临很大的挑战,根据前期加工经验制定了 3 个步骤进行试验加工。

第 1 阶段(验证方案是否可行)。选用平板毛坯先预成形,通过一次或两次强力旋压成形到过渡形状尺寸,然后采取冲压胀形工艺成形到设计图样形状尺寸,最后采取外表面车切加工达到设计图样壁厚尺寸。即将旋压的成形壁厚尺寸定为:首次旋压时小端  $\delta_{小} = 3.10$  mm,大端  $\delta_{大} = 1.98$  mm;二次旋压时小端  $\delta_{小} = 2.1$  mm,大端  $\delta_{大} = 1$  mm,然后采取冲压胀形工艺成形到设计图样形状尺寸后,再采取数控车削达到设计尺寸。

第 2 阶段(验证零件的旋压极限)。采用平板毛坯通过两次旋压直接成形到设计图样尺寸。

第 3 阶段(最终方案)。采用机械加工将毛坯加工为变厚度,通过两次旋压直接成形到设计图样尺寸方案。

#### 3.2 前期工作

##### 3.2.1 毛坯方案的确定

据图纸尺寸套入公式  $\delta = \delta_0 \sin \alpha$ ,计算出该零件大小端的毛坯厚度。实施阶段 1 的方案步骤时,其小端毛坯理论厚度  $\delta_{0小} = 3.94$  mm。其大端毛坯理论厚度  $\delta_{0大} = \delta_{大} / \sin \alpha = 5.56$  mm。

可见,其毛坯大端理论厚度大于小端理论厚度,通常只有当旋压毛坯大端理论厚度大于小端理论厚度时,方可采用预成形毛坯,所以对于方案 1 材料旋压加工前先预成形。即将所选用厚  $\delta_0 = 4.2$  mm,  $\phi 850$  mm 大小的平板毛坯,在其外围 2/5 处液压预成形  $20^\circ$  (代入预成形角度计算公式  $t \sin \beta = t_0 \sin \alpha$  即  $\sin \beta = 4 \sin 10^\circ$ ,可求出预成形角度为  $20^\circ$ )。阶段 2 方案与阶段 3 方案优先采用厚  $\delta_0 = 4.0$  mm,  $\phi 850$  mm 的平板毛坯;考虑到适当的负偏离时,可提高材料的极限减薄率,对旋压加工有利,实供厚度为  $\delta_0 = 4.1$  mm。

##### 3.2.2 热处理方案的选择

由于该零件不仅需要二次旋压加工,而且在后

续加工中还要对零件大端凸缘进行翻边,材料在工序进行中冷作硬化现象严重,零件内部也会有很大的残余应力影响加工,所以在每道成形工艺实施前,都需要采用热处理手段使材料保持比较良好的塑性状况,保证后续工作的实施。

在 Nb521 合金化学分配比条件下, Nb-W, Nb-Mo, Nb-Zr 间均形成完全互溶的单一固溶体相,冷变形后恢复塑性热处理为单一的回复和再结晶过程,不存在类似于奥氏体不锈钢的由形变马氏体向奥氏体转变的相变过程。相关文献介绍了: 铌合金在 900 °C 开始发生回复, 约在 1100 °C 开始结晶, 在 1400 ~ 1500 °C 完成再结晶过程。铌合金退火温度的力学性能见表 3。

表 3 Nb521 铌合金不同退火温度的力学性能对比

Table 3 Mechanical property of niobium alloy Nb521 at different annealing temperatures

退火温度	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%
硬态	531.35	480.75	16.6
960 °C/h	526.0	451.5	18.2
1150 °C/h	488.2	385.2	17.3
1320 °C/h	442.85	339.9	19.2
1450 °C/h	436	355.9	19.2

可见  $\sigma_b$  和  $\sigma_{0.2}$  随温度的提高而下降,  $\delta$  随退火温度的提高而提高。根据上述情况选用的热处理温度为 1220 °C。旋压前、旋压后均实施一次, 以便于下道工序的进行。

### 3.2.3 旋压力的估算

据卡尔巴克赛格路的纯剪切变形计算方法可得到旋压力的计算方法。

1) 切向分力的计算。

切向分力  $P_t$  的计算式为:

$$P_t = f t_0 C \left( \frac{1}{\sqrt{3}} \cot \alpha \right)^{N_0+1} \sin \alpha \quad (1)$$

式中:  $f=0.325 \text{ mm/r}$ ; 坯料厚度  $t_0$  取 4.0 mm;  $\alpha$  取芯模半锥角最大值 32°; 泊松比  $C$  和硬化指数  $N_0$  取性能接近材料 20F 的值 (624.26 N/mm<sup>2</sup>; 0.18)。可计算出切向分力  $P_t=399.6727 \text{ N} \approx 0.04 \text{ t}$ 。

2) 径向分力计算。

径向分力  $P_r$  计算公式为:

$$P_r = P_t \frac{(1 - \sin \alpha) R_0 \theta_0}{f \cos^2 \alpha} \quad (2)$$

需先据式(3)求出  $\theta_0$  值:

$$\theta_0 = \arccos \frac{\frac{b^2}{a^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{b}{R_0}\right)^2 \left(\frac{b^2}{a^2} - 1\right)}}{\frac{b^2}{a^2} - 1} \quad (3)$$

式中:  $a = r_\rho^2 - r_1^2$ ;  $r_1 = r_\rho - f \cos \alpha$ ;  $b^2 = (D_\rho - 2r_\rho) \cdot (\sqrt{r_\rho^2 - (r_1 \cos \beta)^2} - r_1 \sin \beta) + r_\rho^2 - r_1^2$ 。

根据零件情况,  $\alpha$  取芯模半锥角最大值 32°, 当攻角为 85° 时可求得旋轮的安装角  $\beta = 27^\circ$ , 见图 6。选取旋轮工作圆角半径  $r_\rho = 10 \text{ mm}$ , 旋轮直径  $D_\rho = 360 \text{ mm}$ , 工件轴线到变形区开始点的半径  $R_0$  取 61.5 mm, 可得  $r_1 = 9.72438$ ;  $a^2 = 5.43643$ ;  $b^2 = 201.8884$ ,  $b = 14.2087$ 。则由式(3)可得  $\theta_0 = 11.4^\circ$ 。

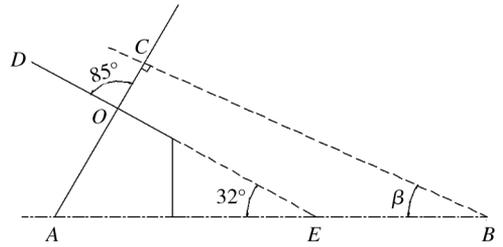


图 6 旋轮安装角计算示意图

Fig. 6 The calculation diagram of the installation angle of the spinning wheel

化为弧长时为  $\theta_0 = 0.198967$ , 代入式(2)可求得径向分力  $P_r = 9835.7198 \text{ N} \approx 1.0036 \text{ t}$ 。

3) 轴向分力  $P_z$  的计算。

$$P_z = P_t \frac{R_0 \theta_0}{f \cos \alpha} = 17744.17583 \text{ N} \approx 1.8106 \text{ t}$$

4) 旋压力  $P$  的计算。

$$P = \sqrt{P_t^2 + P_z^2 + P_r^2} = 2.07 \text{ t}$$

由于机床设计功能限制, 以及旋轮的攻角通常都无法满足最佳状态等原因, 实际工作压力值较计算值都大些, 经验上将其再增加 3 ~ 4 个系数。即  $P = 2.07 \times (3 \sim 4) = 6.21 \sim 8.28 \text{ t}$ 。

### 3.2.4 设备选用

鉴于压力与零件尺寸(径深比、半锥角的变化、尺寸精度等)的要求, 结合机床加工范围和机床相关功能的应用, 为便于得到理想的攻角和较少的加

工干涉, 选用 CNC650 数控旋压机旋压加工成形该零件。

### 3.3 实施方案的验证

为增加方案的操作性, 事先选取了与 Nb521 铝合金材料性能接近的 A3 钢先行进行试验, 成功后再对铝板进行加工。从实际加工现象来看, Nb521 在旋压加工时容易发生粘连性氧化, 其表面光洁度和零件的贴模性没有 A3 钢的好。也就是说它的变形抗力比碳钢要大的多, 对压力加工参数的要求较苛刻, 贴模也会更困难。同常规零件的加工相比较而言, 工作量要大得多, 下面介绍具体的工作记录。

#### 3.3.1 阶段 1 的试验与结果

工艺路线: 毛坯预成形 20°—热处理—首次旋压 40°—热处理—二次旋压—热处理—胀形—翻边—车切外表面及上下端面。

状态: 旋压成形较顺利, 零件贴模紧, 脱模困难; 形状、尺寸较稳定, 但冲压胀形后外表面车切加工困难, 质量超差最大为 1.9 kg, 零件小端形面与样板间隙局部较大, 另外工序多、效率低、生产周期长, 合格率低。

#### 3.3.2 阶段 2 的试验与结果

工艺路线: 毛坯热处理—首次旋压 40°—热处理—二次旋压—热处理—胀形—翻边—车切外表面及上下端面。

状态: 工序少、效率高、生产周期短, 旋压加工困难。一旋较为顺利, 二旋时因大端的减薄量过大发生失稳、开裂, 无法达到设计尺寸要求, 旋压初期部位壁厚变化符合正弦律, 以后各部位壁厚变化均为负偏离状态, 多数偏离率达 -15% 左右, 旋压成形技术难度很大, A3 钢 15 个试验件也仅有 2 件成形, 但尺寸不合格, 可行性不大。原因是零件中部及大端的材料下压量太大, 壁厚减薄变形负偏离过大, 远超出了理论值, 在沿轴向给定的 56 个截面中, 仅一旋阶段从 1 至 22 点过程中, 其偏离率已接近 -20%, 进行到二旋阶段时, 由于材料堆积过大, 超出正常旋压可控范围, 导致反旋、隆起、失稳甚至断裂, 需要在这方面进行改进。

#### 3.3.3 阶段 3 的试验与结果

工艺路线: 车切变厚度毛坯—热处理—首次旋压 40°—热处理—二次旋压—热处理—胀形—翻边—车切外表面及上下端面。

状态为工序较少、效率较高、生产周期较短, 存在问题为: 变厚度毛坯车切加工困难; 一旋加工时零件表面存在局部龟裂缺陷; 二次旋压加工时, 操作难度很大, 零件易发生断裂、贴模不好、壁厚超差、脱模困难等缺陷。通过加工过程观察, 成功的可能性还是较高的。

#### 3.3.4 措施应对

1) 对变厚度毛坯的车加工, 由于原材料板材不平整, 板材本身厚度公差等因素影响, 精确控制毛坯各部位厚度尺寸较难, 为此在车加工之前先对板材进行校平, 使其平面度控制在 0.08 mm 以内; 其后设计制造平板毛坯车切专用夹具, 以保证毛坯车加工质量。

2) 关于零件表面存在局部龟裂缺陷。此缺陷在一旋工序中时有时无不稳定, 其深度约 0.01 ~ 0.02 mm。分析主要原因为: 机床攻角调整干涉限制, 加上零件壁厚变化的负偏离量小, 进给速度过快及原材料本身在压力与温度的双重作用下易产生氧化性所致。经过实际摸索和试验, 采取下述方法得以解决: 对毛坯增加打磨抛光工序; 对毛坯采取阳极氧化处理, 使其表面产生一层薄的致密氧化膜; 使用氯化石蜡与二硫化钼的混合物进行润滑; 在不受干涉的前提下, 使机床攻角尽可能呈 85°, 并适当调整进给速度。

3) 关于二次旋压加工工序试验过程中, 出现的断裂、不贴模、壁厚超差、脱模困难等问题。经过详细对比各工序、各零件采用的加工参数及测量数据, 结合实际加工中与加工后的现象发现: 在二次旋压加工中, 旋轮前面若没有材料堆积则零件成形时缺料、贴胎不好, 表面易产生龟裂缺陷; 旋轮前面材料堆积量过大, 造成反挤现象零件贴胎也不好, 特别是在最后阶段会导致零件大端材料失稳和叠加, 严重时导致零件开裂。究其原因, 还是旋压成形过程中壁厚变化的偏离状态影响所致。最后重新进行工艺调整: 调整平板毛坯各部位的车切厚度、车切范围及首次旋压时各截面的厚度尺寸, 使其在二次旋压加工时减薄量都统一到 25% 左右; 同时对旋压间隙、进给速度等旋压工艺参数进行优化, 操作者加工时严格控制旋轮前面材料的堆积量。

#### 3.3.5 其他改进方案

1) 根据实测问题零件的尺寸, 结合图纸要求的理论值进行分析计算, 重新均衡毛坯上对应相关截

面要求的各点的车切厚度。

2) 调整一旋、二旋时各相关截面的厚度尺寸。机床调试时,根据所要求厚度及高度,在模具上找出相对应多个点位,根据加工中实际退让量酌情确定出加工间隙。操作者实际测量出相关点位坐标记录后,再编制出加工程序,先进行试加工。对加工出的试验件测量后,再对加工程序进行微量的调整和更改,直到加工出的零件满足工艺文件要求为止。

3) 其他旋压参数的优化与选择。(1) 旋轮圆角半径选择不当时,工件表面粗糙、凸缘失稳甚至出现起毛、起皱等现象。先后选用了  $R10$  和  $R8$  两种方案进行了试验,结果表明采用  $R8$  时效果较好。(2) 不同的攻角会导致材料加工时受力情况不同,也是出现反挤、不贴模等异常现象的因素之一,经过多次的实验,确定其控制在  $85^\circ$  时有最好的加工效果。(3) 主轴转速选取范围为  $70 \sim 53 \text{ r/min}$ ,从小端至大端逐渐下降,主要是为了克服加工时产生的机床共振给零件表面造成的波纹缺陷。此零件进行二次旋压加工时,由于壁薄、收口量大、母线长等原因,极易发生共振,加工过程中要及时采取措施进行预防。进给量除直接影响旋压件的外表面光洁度、尺寸精度及贴模状态,还对旋压力的大小有影响。从实际加工状态来看:进给过慢或过快都易导致材料加工时破裂,经过多次的试验,最终确定  $26 \text{ mm/min}$  为最优的进给速度。(4) 润滑方式。零件外表面采用氯化石蜡加二硫化钼润滑,内表面采用机油润滑;(5) 当贴胎问题解决后,加工完后的零件的拆卸也就是脱模又成了一个难题,零件大端很薄不能受力,硬砸会造成损伤,尝试过撬杠、拽钩、楔铁都不理想,最终采用火焰加热法得以解决:用 2 把加长氧气乙炔烤枪,对零件整体均匀加热  $5 \sim 7 \text{ min}$  左右,零件借助一点外力就很容易卸掉。(6) 注意要点。一旋时除保证各点位厚度外,更要控制零件成形高度,若过长则二旋时将无法在要求位置给出翻边,若过短则二旋时将会因缺料导致断裂;转速过高容易引发共振,过低不利于材料成形,影响贴模,需要根据加工情况实时调整,但是注意幅度不易过大;零件的前后  $1/3$  段加工时,尽量使其保持一定量的负偏离率,中间段加工时尽量使其偏离率为 0,以减少材料拉伸变形过量隆起,最终拽裂或因缺料而导致断裂,根据零件加工时贴模的状态和旋轮前材料的堆积量来判断和掌握,及时调整对应操作。

另外成形后的零件由于大、长、薄,其刚性较小,搬运和热处理时最好使用专用工装,避免不当的受力使其产生变形。

### 3.4 加工效果

经过多次工艺试验不断优化参数,最终加工出了合格的产品。之后通过多种此类零件的小批量生产,验证了此方案可行,且工序少、效率高、生产周期短,能够达到技术要求,但旋压加工时对操作者技能水平要求较高。

## 4 结论

1) 钛合金零件的强力旋压工艺是可行的,适用于航天、航空零件的加工。

2) 钛合金零件旋压加工时要根据零件及材料的具体特征有针对性的实施加工策略。

3) 钛合金零件旋压时强度、韧性都较性能与其接近的 A3 钢明显要高,变形抗力也要大得多,不易贴模,加工时技术有一定难度,值得探索研究。

### 参考文献:

- [1] 旋压技术[M]. 北京:机械工业出版社,1986.  
Spinning Technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986.
- [2] 冶金部有色金属研究院. 大口径弹体强力旋压工艺研究[J]. 金属旋压工艺, 1977. (余不详)  
Large Caliber Projectile Power Spinning Process Research Puit Non-ferrous Metal Research Institute [J]. Metal Spinning Process, 1977.
- [3] 陈适先. 强力旋压及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1966.  
CHEN Shi-xian. Power Spinning and Its Application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1966.
- [4] 徐文臣, 单德彬, 吕炎, 等. 小锥角零件多次道剪旋成形试验研究[J]. 材料科学与工艺, 2004, 21(1): 33—36.  
XU Wen-chen, SHAN De-bin, LYU Yan, et al. Small Cone Angle Parts Multichannel Shear Spinning Forming Experiments [J]. Materials Science and Technology, 2004, 21(1): 33—36.

- [5] 王铁福,石连捷. 旋压药型罩的旋转补偿效应与旋压参数关系的研究[J]. 爆炸与冲击, 1996(4): 361—366.  
WANG Tie-fu, SHI Lian-jie. The Rotation of the Spinning Type Medicine Cover Compensation Effect and the Spinning Parameters Relationship Research[J]. Explosion and Shock, 1996(4): 361—366.
- [6] 陈辉. 复杂曲面、薄壁件精密旋压成形技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.  
CHEN Hui. Complex Curved Surface, Thin-walled Precision Spinning Forming Technology Research[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
- [7] 徐银丽. 异型薄壁壳体强力旋压成形机理及规律的三维有限元分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
XU Yin-li. Special Shape Thin-walled Shell Power Spinning Forming Mechanism and Rule of Three-dimensional Finite Analysis[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [8] 魏志强. 薄壁镍基合金管材的变薄旋压研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2000.  
WEI Zhi-qiang. Thin Nickel Base Alloy Pipes Become Boxuan Pressure Research[D]. Beijing: Beijing Nonferrous Metal Research Institute, 2000.
- [9] 江舒勇, 徐克敏. 影响旋压变形的薄壁管状件纵向内肋[J]. 有色金属, 2004, 14(4): 702—707.  
JIANG Shu-yong, XUE Ke-min. Process Factors Influencing Spinning Deformation of Thin-walled Tubular Part with Longitudinal Innerribs[J]. Tans Nonferrous Met Soc China, 2004, 14(4): 702—707.
- [10] 李玉强. 多道次拉深旋压成形规律的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.  
LI Yu-qiang. Multi-channel Time Deep Drawing Spinning Forming Law Research[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [11] WINNING B A. Prediction of Cold Rolling Texture of Steels Using an Artificial Neural Network [J]. Computational Materials Science, 2009, 46(4): 800—804.
- [12] LIU J H, YANG H, LI Y Q. A Study of Stress and Strain Distribution of First-pass Conventional Spinning under Different Roller Traces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 326—329.
- [13] MOHEBBI M S, AKABAZADCH A. Experimental Study and FEM Analysis of Redundant Strains in Flow Forming of Tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 389—395.
- [14] ROY M J, KLASSEN R J, WOOD J T. Evolution of Plastic Strain during a Flow Forming Process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 1018—1025.
- [15] 日本塑性加工学会. 旋压成形技术[M]. 陈敬之, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988: 1—70.  
Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity. The Spinning Forming Technology [M]. Translated by CHEN Jing-zhi. Beijing: China Machine Press, 1988: 1—70.
- [16] 陈适先. 强力旋压工艺与设备[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 1—50.  
CHEN Shi-xian. Power Spinning Technology and Equipment [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986: 1—50.
- [17] WONG C C, DEAN T A, LIN J. A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003(43): 1419—1435.
- [18] WONG C C, DANNO A, TONG K K. Cold Rotary Forming of Thin-wall Component Form Flat-disc Blank [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208: 53—62.
- [19] 张猛, 胡亚民. 回转塑性成形工艺与模具[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1994.  
ZHANG Meng, HU Ya-min. Rotary Plastic Forming Technology and Die [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1994.
- [20] CHANG S C, HUANG C A, YU S Y. Tube Spinnability of AA 2024 and 7075 Aluminum alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, (80-81): 676—682.
- [21] 徐恒秋, 樊桂森. 旋压设备及工艺技术的应用与发展 [J]. 新技术新工艺, 2007(2): 6—8.  
XU Heng-qiu, FAN Gui-seng. Spinning Equipment and Technology Application and Development [J]. New Technology & New Process, 2007(2): 6—8.