

# 多内槽与异形面的钛合金产品加工方法分析

高峰 廉博 董建博

(西安航天发动机有限公司 陕西 西安 710100)

**摘要:** 本文经过对钛合金多内槽、异形面产品数控加工分析, 独创了加工工艺路线, 制作了防变形和振动的加工工装。利用编程软件编制了椭圆曲面方程程序, 以及多段内沟槽加工套嵌程序, 确定了刀具刃磨几何参数及合理的加工路线, 采用新颖的超声波壁厚测量仪来控制产品壁厚。攻克了钛合金材料薄壁、大直径、形状位置公差精度要求高的数控加工难题。

**关键词:** 钛合金; 多内槽; 异形面; 数控加工

## 0 引言

本文涉及航天、航空产品加工领域, 某钛合金产品“活塞”是液体火箭发动机“插动贮箱”的重要零件, 它的小外圆表面及大外圆密封槽与橡胶圈配合在贮箱中起密封作用。钛合金具有密度低、强度高和耐蚀性好等特性, 是理想的航天工程结构材料, 被广泛应用于航天、航空领域。本文在加工此类钛合金产品时面临以下加工难点:

- (1) 薄壁件(壁厚为2mm, 公差为0.04mm)加工易变形;
- (2) 椭圆曲面轮廓精度与壁厚难掌控, 手工编程复杂、费时、易出错;
- (3) 最大直径 $\phi 190\text{mm}$ , 公差为0.046mm, 尺寸精度高, 难控制;
- (4) 外圆表面粗糙度要求高为 $Ra0.4$ , 难保证;
- (5)  $\phi 190\text{mm}$  外型面上的两个 $\phi 183.4\text{mm}$ 、宽5mm的沟槽, 公差为0.05mm, 难测量;
- (6) 刀具几何角度及刃磨难度高, 刃磨内沟槽轮廓刀片时角度小于 $30^\circ$ 。

操作者结合长期实际操作中积累的加工经验, 针对零件的结构特点、钛合金切削加工性能、切削参数、零件装夹等特点, 优化了刀具选择, 优选合理刀具的几何参数, 确定了合理的切削参数, 编制了简单快捷的加工程序, 制定了适合产品特点的加工工装, 选择了正确的

加工路线及冷却液, 从而解决了此产品的加工难题。

## 1 产品结构特点及加工难点分析

### 1.1 产品结构图

此钛合金产品是由一部分多内沟槽圆筒段和一部分内外形为椭圆曲面的形状构成, 其加工需经粗车—热处理—半精加工—精车成型等工艺流程。图纸要求最大直径 $\phi 190\text{mm}$ , 公差0.046mm, 曲面方程为标准椭圆方程(数控车一般在X轴和Z轴坐标点数据赋值), 产品椭圆处壁厚仅为2mm, 属于薄壁大直径类产品(图1)。

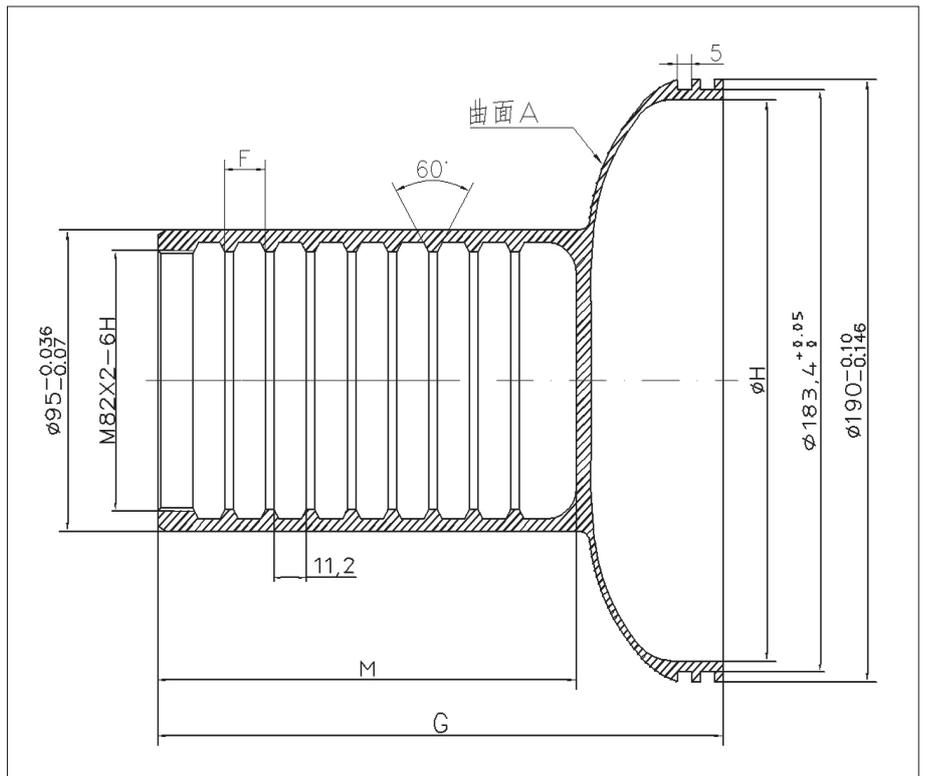


图1 产品结构图

### 1.2 钛合金材料性能及加工特点分析

钛合金 TC4 是 ( $\alpha + \beta$ ) 相耐热合金钢, 其强度高、热强性好、抗蚀性好、导热性差、弹性模量小, 且具有高强度韧性好而密度又小, 加工过程易产生积屑瘤。这些都给加工操作带来很大的难度。

### 1.3 钛合金的切削特点

钛合金材料的化学、物理、力学性能对其切削加工性也有一定的影响: 变形系数小、切削温度高, 刀具易磨损; 导热系数小, 切削时产生的热量不易传出, 集中在切削刃附近的小范围内; 单位面积上的切削力大; 冷硬现象严重, 易产生表面变质层, 加剧刀具磨损。

### 1.4 产品曲面形状及多个内沟槽导致常规编程较困难

如图 1 所示, 该产品有 8 处内沟槽, 且每处沟槽都带角度。在编程过程中要计算每个沟槽所在位置的坐标点, 工作量比较大, 传统方式手工编辑程序需要 2h。

### 1.5 产品粗糙度要求高

外圆表面粗糙度要求  $Ra0.4$ , 产品总长度为 198mm, 加工内腔时刀具伸出过长导致刚性差, 易产生让刀现象, 且由于钛合金的弹性模量小, 加工时在径向力作用下零件容易产生弯曲变形, 引起振动, 加大刀具磨损并影响零件的加工精度, 对粗糙度有很大的影响。

## 2 问题解决

### 2.1 产品精车工序加工路线的设定

如图 1 所示, 先加工左端内形和内沟槽, 再借用工装“两边顶”的方式加工外形及外部椭圆轮廓, 最后加工右端内椭圆。将关键曲线尺寸的加工放在最后一步, 有利于精度的保证, 同时能解决加工变形问题。

### 2.2 编程问题的解决

图 1 中曲面 A 为标准椭圆结构, 因所处位置比较特殊, 手工编程难度大。因此操作者借用电脑软件 CAXA 进行绘图及编程。用圆心坐标法编辑圆弧, 计算机模拟一系列小段圆弧查补成一个椭圆轮廓, 其中 I、K 分别为圆心相对于圆弧起点坐标在 X、Z 方向上的增量值, 用圆心坐标法标注时, 不用标注圆弧半径 R。

```
01234 ;
N10 T0101M08 ;
N14 M03 S150 ;
N18 G00 X200 Z260 ;
N24 G00 X90.73 Z-0.1 ;
```

```
N28 G01 X94.196 Z-3.100 F0.1 ;
N30 G03 X94.250 Z-3.200 I-0.173 K-0.1 ;
N32 G01 Z-150.153 ;
N34 G02 X98.721 Z-152.896 I2.8 K-0.0 F0.04 ;
N36 G03 X119.781 Z-155.401 I-35.564 K-172.852 ;
N38 G03 X140.410 Z-158.702 I-31.094 K-114.913 ;
N40 G03 X153.491 Z-161.405 I-33.647 K-90.69 ;
...
N70 M30 ;
```

内沟槽加工时采用主、子程序套嵌方法, 用主程序调用 8 次子程序, 来完成加工, 避免了编程占用太多的数控字节与耗时较多的问题。

### 2.3 大直径 $\phi 190\text{mm}$ 公差为 $0.046\text{mm}$ 尺寸精度的控制

采用同一把刀不转换刀架的方式, 先将外圆留  $0.05\text{mm}$  余量半精加工一刀, 将刀具退回安全点后测量产品外圆, 然后根据测量值与最终值的差值输入刀补值进行精加工, 这样能避免刀架转换过程中对产品精度的影响。

### 2.4 外圆表面粗糙度 $Ra0.4$ 的保证

(1) 芯轴的应用: 如图 2 所示加工外形前制作芯轴 D 和芯轴 E 与产品间隙配合公差为  $0.007\text{mm}$ 。芯轴材料选择黄铜材料, 易加工且具有一定的耐磨性可重复使用。首先将芯轴 E 的右端部分装夹到三爪卡盘上找正芯轴圆跳动为  $\phi 0.005\text{mm}$ , 然后将产品右端与芯轴 E 配合, 接着将芯轴 D 装入产品左端, 最后用尾座将活动顶尖顶入芯轴 D 的中心孔内, 采用这种方式避免了产品自身的振动及变形。

(2) 外圆切削用量的选择: 加工产品左端外圆时采用小吃刀量、慢进给的方式。将吃刀量选择为  $0.03\text{mm}$ , 进给量设置为  $0.04\text{mm}$ , 转速设置为  $600\text{mm/r}$ 。

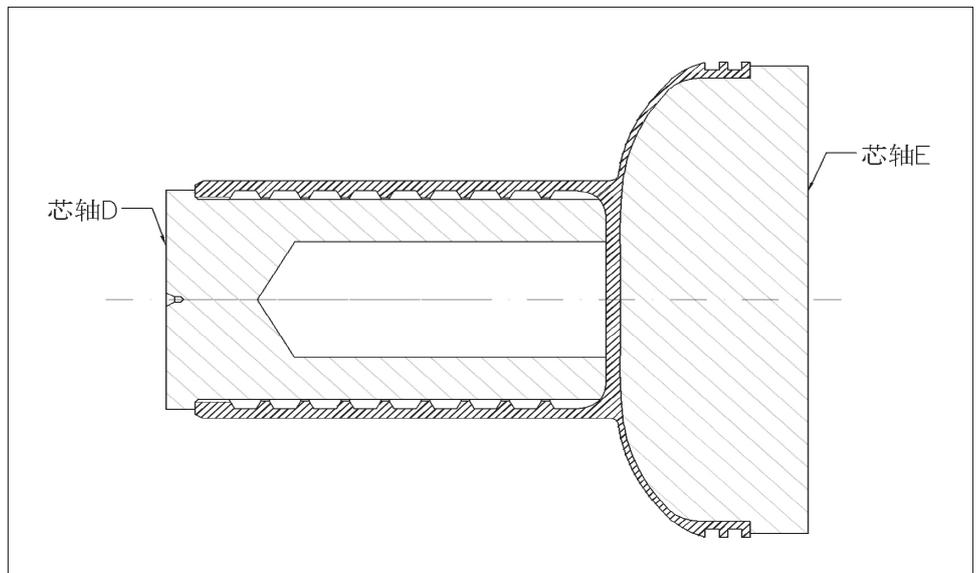


图 2 芯轴剖面图

## 2.5 加工时的刀具改善

(1) 刀具材料选择。切削加工钛合金应从降低切削温度和减少粘结两方面出发, 选用红硬性好、抗弯强度高、导热性能好、与钛合金亲和性差的刀具材料, YG类硬质合金比较合适。YT类硬质合金会与钛合金产生剧烈的亲和作用, 加剧刀具的粘结磨损, 不宜用来切削钛合金。

(2) 刀尖圆弧半径 $r$ 及刀具角度刃磨。切削钛合金时刀尖是最薄弱的部分容易崩掉和磨损, 需磨出刀尖圆弧, 一般采用 $r=0.1 \sim 0.4\text{mm}$ 。硬质合金刀具宜用金刚石砂轮刃磨, 切削时刃口必须锋利, 前后刀面的表面粗糙度 $Ra$ 值应小于 $0.4\mu\text{m}$ , 刃口部分不允许有微小的缺口。刀具刃磨后进行研磨, 其耐用度可提高30%。

刀具角度刃磨: 试加工中零件壁厚不均匀、变形大, 造成零件加工超差, 加工内槽时最初使用的是2.5mm宽的内槽刀, 加工后内沟槽槽底有震纹, 不能用大的切削参数。最后改进为用内尖刀, 对刀片角度进行了修磨后角与副后角之间的夹角小于 $30^\circ$ , 改进后可使用大的切削参数并且槽底的表面质量也大大提高。

## 2.6 大径处外环形槽测量问题的解决

由于零件是两顶加工, 且环形槽尺寸 $\phi 183.4\text{mm}$ 精度要求0.05mm较高, 用卡尺不能保证精度, 在机床上没有合适的精密级量具进行测量。所以只能用压千分表间接的在机床上进行测量, 千分表测头压到 $\phi 190\text{mm}$ 外圆清零, 再压到槽尺 $\phi 183.4\text{mm}$ 处得到数值 $A$ , 卸下零件后再去计量其环形槽尺寸得到数值 $B$ 。经过多次的验证比对 $A$ 值与 $B$ 值, 得出两次测量出来的尺寸数值误差在 $0.002 \sim 0.004\text{mm}$ 。此种在机床上间接测量的方法, 能够保证环形槽的尺寸精度, 进而解决在线检测问题。

## 2.7 大端内型曲面加工时震刀问题的解决

在加工大端内型曲面时, 要夹持小端 $\phi 95\text{mm}$ 外圆柱面。由于零件直径大且总长尺寸较长, 起初在三爪卡盘上采用普通软爪夹持进行试切。因为普通软爪的夹持尺寸有限, 导致车削大端曲面时震刀严重, 且不能选用大的切削参数, 生产效率低。经过改善装夹方式, 采用焊接式加长扇形软爪(长度值略小于图1中 $M$ 尺寸)来代替普通软爪, 它夹持零件尺寸和与零件的接触面积大大增加, 使得零件装夹后的刚性也随之提高, 进而解决了车削曲面的震刀问题, 提高了生产效率。

## 2.8 壁厚尺寸易超差问题的解决

编辑三段内轮廓车削程序(分为两段半精车、一段精车), 在前两段半精车过程中采用超声波测厚仪测量。超声波测厚仪是根据超声波脉冲反射原理来进行厚度测量的, 当探头发射的超声波脉冲通过被测物体到达材料分界面时, 脉冲被反射回探头通过精确测量超声波在材料中传播的时间来确定被测材料的厚度, 使用时一般需要将配套的耦合剂涂在被测材料的表面。

测量时从椭圆外形面或内形面取多点测量, 当测量值不稳定时, 以一个测定点为中心, 在直径约为30mm的圆内进行多次测量, 取最小值为被测工件厚度值, 从而精确测量产品壁厚值。最后用第三段程序精车, 精车后的离散点经过计量均符合椭圆曲线轮廓值, 且壁厚公差0.04mm能够得到保证。

## 2.9 冷却液的选择

切削钛合金零件时, 为了降低切削温度, 应当向切削区域浇注大量的以冷却作用为主的冷却液。一般情况下水比油的导热系数大, 故用水溶性冷却液较为合适。因此, 车削钛合金零件时, 常采用乳化液或采用有添加剂的水溶性冷却液。

## 3 结语

本文独创了一种多内槽、异形面航空产品的加工工艺路线, 制作了防变形和振动的加工工装。在编程方面应用了软件编程与子程序套嵌两种方法, 采用新颖的超声波壁厚测量仪来控制产品壁厚。此方法可有效控制产品质量, 缩短了生产辅助时间, 达到了节约研制经费的目的, 该方法已在单位其他大口径、薄壁件产品上得以推广。

## 参考文献:

- [1] GB/T 5193-2020, 钛及钛合金加工产品超声检验方法[S].
- [2] 刘中海. 钛合金薄壁件精密切削加工研究[J]. 工业设计, 2012(2): 72.
- [3] 曹永乐. 某零件内沟槽加工方法的改进[J]. 机械制造, 2011, 49(12): 41-42.
- [4] 高颖颖, 凌志浩. 宏程序嵌套在凹椭圆车削加工中的应用[J]. 湖南农机, 2013, 40(1): 64-65.

作者简介: 高峰(1991.11-), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 航天产品机械加工。