

# 钛合金飞轮的精密车削

杨 进 升

## 一、任务及要求

地球资源卫星姿态控制反作用飞轮是选用 Tc-4 钛合金材料制成的，飞轮是一种高精度、高光洁度的零件，要求在高温下使用能保持足够的强度、精度及寿命。

Tc-4 钛合金在轻合金中抗拉强度最大，并具有良好的综合性能和十分稳定的状态，它还具有优异的抗腐蚀性能，对于各种氧化性酸、海水、碱盐及许多化学剂都能耐腐蚀。要将 Tc-4 钛合金这种材料在普通车床上加工成如图 1 所要求的各项技术指标的飞轮是一个很大的难题。

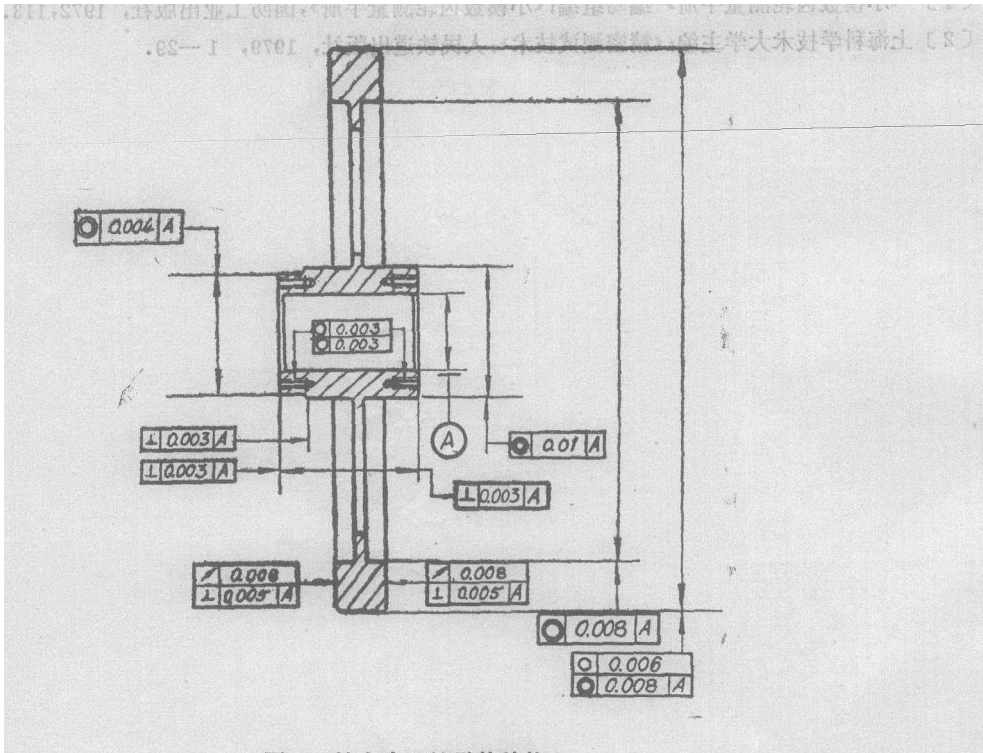
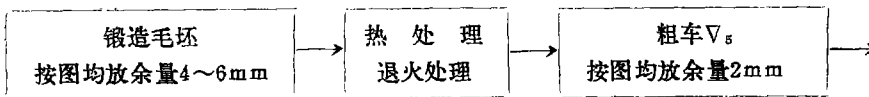
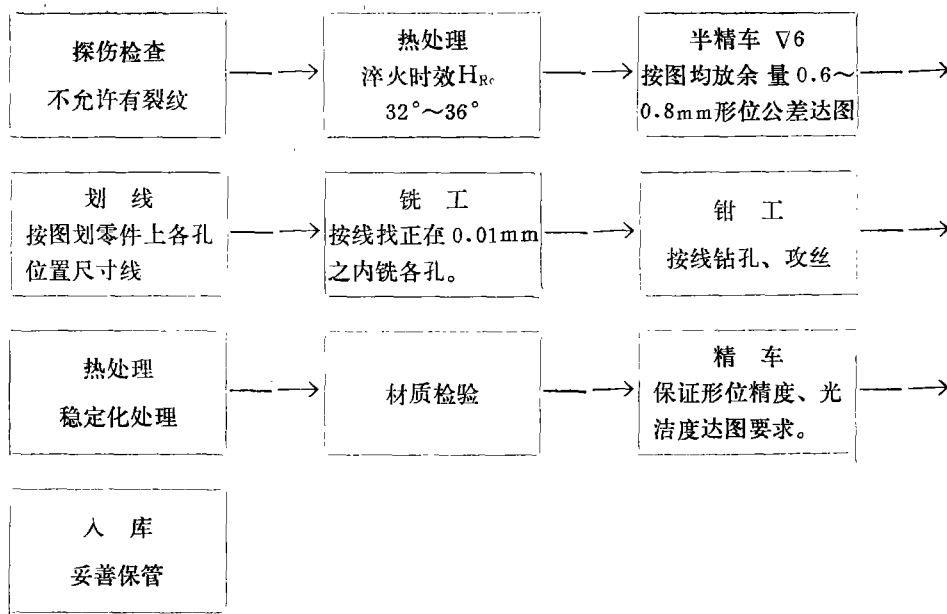


图 1 钛合金飞轮零件结构

## 二、工艺路线





### 三、工艺分析

飞轮的材料选用Tc-4钛合金，它的比重小、强度高、弹性模数小、导热系数低，切屑的卷曲造成很高的切削压力。由于加工表面回弹变形大，导致后刀面与已加工表面的间隙变小，形成剧烈的摩擦。另外，加工塑性变形区的高温，使钛合金与空气中的氮、氢、氧等生成极硬的化合物，材料的塑性明显下降，脆性增加，加工硬化倾向严重。在刀尖处产生高温和形成刀瘤将严重地影响刀具的耐用度。

#### (一) 零件的材料和切削性能

Tc-4钛合金是一种含有强稳定 $\beta$ 相的 $\alpha + \beta$ 合金。其成份为：Ti-6Al-4V，它具有良好的综合性能，直至400℃时还能保持较好的强度。Tc-4钛合金的物理性能见表1，机械性能见表2。

表 1 Tc4合金的物理性能

测试温度℃	性能项目	单 位	值 数
20	密 度	g/cm <sup>3</sup>	4.424
20	导热系数	cal/g·cm <sup>2</sup> ·s·°C	0.012
0~100	平均热膨胀系数	×10 <sup>-6</sup> mm/°C	8.8
20	比 热	cal/g·°C	0.135
20	电阻率	μΩ-cm	171

表 2 Tc4合金的机械性能 (退火状态)

性能项目 测试温度℃	σ <sub>b</sub>	σ <sub>s</sub>	δ%	ψ%	E
	kg/mm <sup>2</sup>	kg/mm <sup>2</sup>			kg/mm <sup>2</sup>
20	91.0~112.0	84.0~98.0	8~10	25~30	11.6×10 <sup>2</sup>

把Tc-4钛合金的物理性质与钢和铝相比较见表3，可以看出就密度和比热而言，钛介于钢和铝之间。钛的熔点比钢高100℃，钛的导热系数低，约为钢的1/5，为铝的1/15。钛是化学活性金属，但抗腐蚀性相当高，远远超过了耐腐钢。

表3 铝、钛、铁的物理性质比较

参 数	铝	钛	铁
密度, g/cm <sup>3</sup>	2.7	4.424	7.8
熔点, ℃	660	1668	1535
线膨胀系数, 1/℃	22.9 × 10 <sup>-6</sup>	8.2 × 10 <sup>-6</sup>	11.7 × 10 <sup>-6</sup>
导热系数, cal/g·cm <sup>2</sup> ·s℃	0.52	0.036	0.19
比热, cal/g℃	0.214	0.135	0.107

Tc-4钛合金在切削过程中所居有的特点为：

- 1). Tc-4钛合金在切削时产生的塑性变形抗力大，结果使切削加工时的切削力增大。它所需要的切削力和单位功率比钢略低一些，但比铝要大得多见图2。
- 2). 由前可知，切削Tc-4钛合金时，塑性变形功消耗很大，使切削热增加。Tc-4钛合金的导热系数低，传热困难，致使很高的切削热集中于切削区，不易迅速扩散，使切削温度增高，所以在车削Tc-4钛合金时刀尖上的温度比钢要高得多见图3。

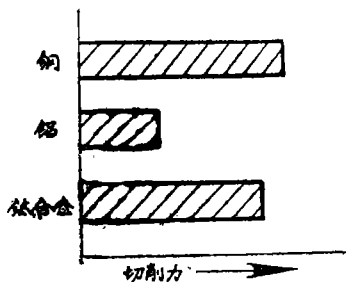


图2：钢( $\delta b = 105 \text{ kg/mm}^2$ )、铝和钛合金切削力的比较。

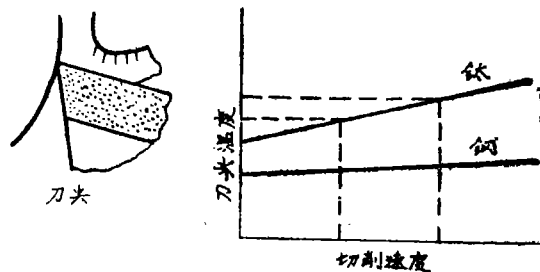


图3 刀尖温度比较

- 3). 在同样的条件下Tc-4钛合金所得的表面光洁度比钢高，在工艺实验中，使用普通车床车削Tc-4钛合金表面光洁度可达到▽9上限，圆度0.8μm。
- 4). Tc-4钛合金在切削加工中对含钛元素的刀具材料具有很强的化学亲和作用。

(二) 零件结构特点与加工工艺的关系

由图1可知，飞轮的几何形状较为复杂，结构刚性差，形位精度和表面光洁度要求较高，图中所有的尺寸均有公差要求，公差链封闭，车削时装夹困难。

主要加工难度大的部位：

- 1). 零件的最大外径 $\phi 220 \text{ mm}$ 最小的孔径 $\phi 30 \text{ mm}$ ，其连接壁厚只有4mm，由于结构刚性差在加工中容易产生振动和变形，影响形位精度和表面光洁度。
- 2).  $\phi 220 \text{ mm}$ 外圆壁厚为 $20^{+0.01} \text{ mm}$ ，两端面对 $\phi 30 \text{ mm}$ 孔的同轴度为0.008mm，圆度为0.006mm，端面跳动为0.008mm，对 $\phi 30 \text{ mm}$ 孔的垂直度为0.005mm。
- 3).  $\phi 30 \text{ mm}$ 孔与轴承配合间隙为0.001~0.002mm，圆度为0.003mm。
- 4). 各外圆和端面的表面光洁度为▽7， $\phi 30 \text{ mm}$ 孔的表面光洁度为▽8。

5). 在 $\phi 180\text{mm}$ 的孔壁厚 $4\text{mm}$ 上铣 $6-\phi 48^{+0.01}\text{mm}$ 孔, 车削时变成断续切削, 直接影响形位精度和表面光洁度。

## 四、切削条件的选择

### (一) 对刀具材料的要求

必须在高温高压的切削条件下具有良好的抗磨、抗热性和有足够的硬度、强度及导热系数大的细晶粒硬质合金刀具。

粗加工时: 采用耐冲击、强度高的YG8、YG10H牌号的硬质合金刀具。

精加工时: 采用YG6x、YG8W、YA6牌号的硬质合金刀具和W18Cr4V高速钢刀具。

切削Tc-4钛合金时必须注意到: YT类含钛元素的硬质合金刀具不能用于加工钛合金, 因为在高温切削过程中这两种含钛元素材料能发生化学亲和作用, 使刀具磨损特别严重, 容易破坏刀具的表面光洁度和粘掉刀尖, 使加工表面质量下降。

### (二) 刀具的几何角度选择

车削钛合金最重要的是前角和后角。钛合金导热性差, 加工表面回弹变形大, 应选较大的后角和较小的前角。

前角 $r = 5^\circ \sim 7^\circ$ , 在主切削刃上用油石磨有很窄的棱边 ( $f = 0.05 \sim 0.1\text{mm}$ ,  $rf = 0^\circ \sim -2^\circ$ ) 以增加刀刃强度和散热面积, 改善传热条件。同时因前角较小, 增加了刀具与切屑的接触长度, 降低刀刃上的温度梯度。

后角 $\alpha = 14^\circ \sim 16^\circ$ , 比加工普通钢的车刀后角大 $10^\circ$ 左右。以保证加工表面回弹变形后具有足够的实际后角, 以减少后刀面与工件加工表面的摩擦。

主偏角 $\phi$ , 可根据粗、精车外圆或端面分别为 $45^\circ$ 或 $90^\circ$ , 副偏角 $\phi_1 = 12^\circ \sim 16^\circ$ 。

刀尖形状的选择: 应采用圆弧刀尖或过渡刃形式, 不宜采用尖角。因为锐角散热条件差, 容易烧刀, 较理想的刀尖为圆弧型, 它能增加刀尖强度, 加大刀尖散热面积。刀尖R一般选用 $0.2\text{mm}$ 左右, 粗车或无振动的条件下, R可增大到 $1.5\text{mm}$ 左右如图4所示。此外, 在刃磨车刀时, 前角不磨出负倒棱, 车刀刃磨要锋利, 刀刃不允许有微小的锯齿形缺陷, 各切削刃面的光洁度要达到 $\nabla 10$ 以上。以便减小切削力、切削热、摩擦阻力和热粘结性, 延长刀具的使用寿命。

### (三) 切削用量的选择

切削Tc-4钛合金时, 刀具磨损剧烈的主要原因是由于切削温度过高。而影响切削温度的主要因素是切削速度 $V$ , 对一定材料牌号的刀具, 只允许使用一定的切削速度, 如超过这一数值, 引起过热就会降低刀具的使用寿命, 切削速度一般不宜超过 $50\text{m/min}$  (如能充分使用冷却液可适当提高切削速度)。切削速度与刀具、切削温度之间的关系见图5。

走刀量 $S$ 的选择, 一般取 $S = 0.05 \sim 0.3\text{mm/n}$ , 如走刀量过大, 就会使切削温度升高, 影响刀具的耐用度; 走刀量过小产生摩擦, 会使切屑变薄极易氧化燃烧起火。

吃刀深度 $t$ 的影响较小, 粗车时 $t \geq 6\text{mm}$ 。但 $t$ 较大时, 因切削面积增加, 会使切削温度有所提高, 刀具耐用度下降, 应根据加工中的具体情况选择适宜的吃刀深度。

车削Tc-4钛合金时, 首先应考虑切削速度, 在不同的切削速度下, 刀具的磨损情况是不同的。与刀具最小磨损值相对应的温度区间为最佳切削温度, 与最佳切削温度相对应的切削速度为最佳切削速度。经过切削对比实验结果:

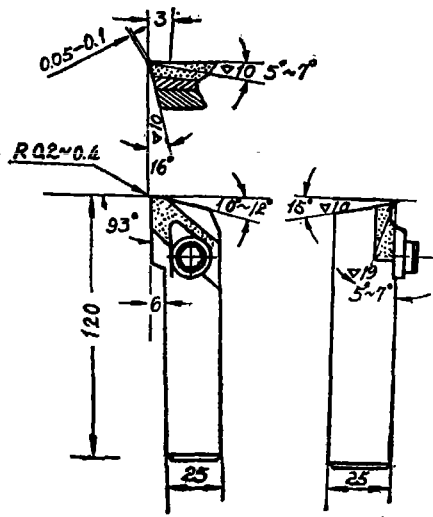


图4 机夹钛合金精车刀

粗车采用机夹车刀，刀头牌号为YG8，刀具几何角度和切削用量分别为：

$$r = 5^\circ \quad \alpha = 14^\circ \quad V = 25\text{m/min}$$

$$t = 4\text{mm} \quad S = 0.11\text{mm/n}$$

车削结果，表面光洁度 $\nabla 5$ ，切削呈带状屑，刀具磨损正常。

精车采用机夹车刀，刀头牌号为YG6x，刀具的几何角度和切削用量分别为：

$$r = 7^\circ \quad \alpha = 16^\circ \quad V = 45\text{m/min}$$

$$t = 0.02 \sim 0.05\text{mm} \quad S = 0.05 \sim 0.1\text{mm/n}$$

车削结果，表面光洁度 $\nabla 7 \sim \nabla 9$ ，切削呈带状屑，刀具磨损正常。

如果在同样的切削条件下，切削速度提高 $V = 96\text{m/min}$ 则刀具迅速磨损，甚至无法继续切削。当钛合金材料在高速切削时，而冷却液又不足，钛的细小切屑在一定的条件下很容易引起燃烧。

#### (四) 切削液的选择

- 1). 钛合金粗加工时采用5%的亚硝酸钠水溶液。
- 2). 精加工采用硫化油。切削时注意防止着火，要保持切削区有充分稳定的切削液。

## 五、检测结果

检测项目：应包括形位精度和表面光洁度两项内容，分述如下。

### (一) 形位精度

#### 1). 同轴度

尺寸位置	图纸要求	实测	使用仪器
$\phi 220$ 对 $\phi 30$	$8\mu\text{m}$	$6\mu\text{m}$	电感仪
$\phi 180$ 对 $\phi 30$	$8\mu\text{m}$	$7\mu\text{m}$	电感仪
$\phi 50$ 对 $\phi 30$	$10\mu\text{m}$	$4\mu\text{m}$	电感仪
$\phi 48^{-0.017}$ 对 $\phi 30$	$4\mu\text{m}$	$2\mu\text{m}$	电感仪

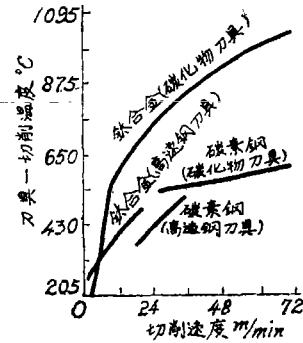


图5 不同材料的切削速度对刀具的切屑温度的影响

## 2). 垂直度

尺寸位置	图纸要求	实测	使用仪器
$20^{\pm 0.01}$ 两端面对轴线	$5\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$	电感仪
$54^{\pm 0.05}$ 两端面对轴线	$3\mu\text{m}$	$2\mu\text{m}$	电感仪
$10^{-0.01}$ 端面对轴线	$3\mu\text{m}$	$2\mu\text{m}$	电感仪

## 3). 端面跳动

尺寸位置	图纸要求	实测	使用仪器
$20^{\pm 0.01}$ 端面跳动	$8\mu\text{m}$	$6\mu\text{m}$	电感仪

## 4). 圆度

尺寸位置	图纸要求	实测	使用仪器
$\phi 30$	$3\mu\text{m}$	$0.8\mu\text{m}$	圆度仪
$\phi 220$	$6\mu\text{m}$	$1.2\mu\text{m}$	圆度仪

## (二) 表面光洁度

图中所要求 $\nabla 7$ 处	实测均达到 $\nabla 7$ 上限
图中所要求 $\triangle 8$ 处	实测均达到 $\nabla 8$ 中限

## 六、结 束 语

通过Tc-4钛合金材料的工艺实验和飞轮的精密车削, 使我们对Tc-4钛合金的切削性能初步有所了解。

(一) 应用强硬锐利的刀具, 使其磨损和工件变形减至最小的程度, 刀具的刃磨质量是加工的重要条件。刀具的切削部分应选用能够抗擦伤、抗粘结和耐磨损材料制造, 根据具体的加工条件可选用YG8、YG10H、YG6x、YA6等硬质合金刀具和W18Cr4V高速钢刀具。

(二) 正确地进刀和采用低的切削速度

钛合金的导热性很差, 切屑卷曲造成很高的切削压力, 其结果产生过高的刀尖温度和形成刀瘤, 严重影响刀具的使用寿命。所以在切削钛合金时必须采用较低的切削速度和较浅的吃刀深度, 粗车时的切削速度 $V$ 以 $25\text{m}/\text{min}$ 为佳, 精车以 $45\text{m}/\text{min}$ 为佳。走刀量 $S$ 比钢稍大, 吃刀深度 $t$ 比钢稍小。

(三) 切削液的合理选择

防止切削时产生刀瘤, 延长刀具的使用寿命, 在钛合金的切削过程中, 刀具的耐用度取决于刀尖温度和磨损情况。因此切削时正确地选用切削液也是非常重要的。化学活性切削液不仅能带走切削中产生大量的热量, 而且还能减小切削力, 延长刀具的使用寿命。选用水基切削液或水溶性油切削液是切削钛合金最佳而有效的切削液。

## 参 考 文 献

- [1] 《美国钛合金手册》, 中国科学院冶金研究所, 1975.5.  
 [2] 《先进刀具的分析和选择》, 机械工业出版社, 1981.8.