

## ARJ21 钛合金滑轨的机械加工

西安飞机国际航空制造股份有限公司 (陕西 710089) 王佰成

通常国内的飞机滑轨采用高强度合金钢,例如40CrNiMoA,其结构截面形状呈“工”字形,滑轨导动面的公差为0.3~0.4mm。ARJ21飞机上首次使用了钛合金材料的滑轨,且结构与通常的滑轨有较大的区别,同时由于装配需要,在滑轨导动面上公差为0.15mm,机加公差为0.1mm。

ARJ21 飞机滑轨作为机翼上的重要承力结构件,首次采用钛合金 (Ti6Al4V) 材料,并且其单机数量大,结构形式多样,零件复杂程度高。

ARJ21 钛合金滑轨分为襟翼滑轨和缝翼滑轨两大类:襟翼滑轨单机两根,截面呈双“工”字形,毛坯为精铸件;缝翼滑轨单机 18 根,基本结构是由头部的连接部分与滑轨导动部分及两者中间过渡部分组成。头部的连接部分是双耳片结构形式,滑轨导动部分的截面形状呈“π”字形、“工”字形两种,毛坯采用自由锻件。图 1 是 1 号滑轨的主要结构。

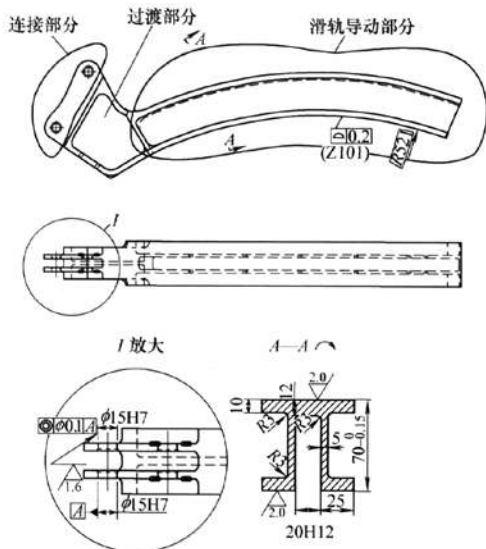


图1 缝翼滑轨主要结构

图2为缝翼滑轨的毛坯锻件。

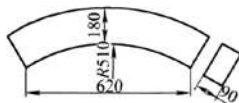


图2 缝翼滑轨毛坯锻件

### 1. 钛合金滑轨加工难点分析

钛合金滑轨材料 Ti6Al4V, 是一种加工性能极差的有色金属, 属于典型的难加工材料, 主要原因有以下几点:

(1) 材料硬度高、强度高、合金成分多,合金元素与碳构成各种复杂的碳化物,这些碳化物既不溶于合金,又不聚集长大,而以极细颗粒形式弥散分布在晶界处,强化晶界,阻止在外力作用下晶界滑移,使得合金显示超强超硬性质,加工过程中,必须做更大的功,因而必然产生更多的热。另外,在切削时,其切屑非常容易粘接、熔接在刀尖、切削刃附近,或形成积屑瘤,使刀具极易破损且切削时易产生波动,从而影响加工质量并使刀具使用寿命缩短。

(2) 由于钛合金的弹性模量小 (约为钢的  $1/2$ )、弹性变形大, 切削过程由于切削力的作用使工件产生变形, 降低了加工精度, 而且切削时, 较强的弹性回复特性使得背向力增大, 工件容易产生挠曲、让刀等现象。同时, 钛合金导热系数低, 仅是钢的  $1/4$ , 铝的  $1/13$ , 铜的  $1/25$ 。因切削区散热慢, 不利于热平衡, 在切削加工过程中, 散热和冷却效果很差, 易于在切削区形成高温, 加工后零件变形回弹大, 造成切削刀具扭矩增大、刃口磨损快, 寿命降低。并且, 钛合金化学活性高, 在高温下加工易与刀具材料起反应, 形成熔敷、扩散, 造成粘刀、烧刀及断刀等现象。所以, 加工钛合金时, 一定要选用刚性好的机床设备, 尽量选用直径较粗或长径比较小的刀具, 以增强其刚性, 减小刀具让刀量, 并且

切削加工时切削液要保证充足,循环速度要快,流量和压力要大。

## 2. 加工方案确定

对于钛合金滑轨零件材料难加工、易变形的加工难点,以及结构的特殊性和尺寸高精度及低表面粗糙度值、单机数量大等特点,我们通过刀具及加工参数的试验和研究,根据上述情况分析,结合工件的重点解决方案,经过反复论证,确定该工件如下加工方案:①粗加工、半精加工、精加工三阶段清晰的加工思路。②从精益制造思路出发,并结合分厂设备资源,根据每项零件的结构特点及加工难点,严格控制各个生产环节,实现节约制造成本的目的。

具体对于工件表面粗糙度值  $R_a=2.0\mu\text{m}$  的高精度要求及工件槽口变形的控制,我们采取微量、快进给和合理的加工参数,并根据试验件的试验效果,结合单位现有设备和生产能力,决定钛合金滑轨的所有粗加工去大余量,由普通铣床加工;所有的内外圆弧滑动面、耳片

槽口及内腔由三坐标数控铣床(VMC3000)加工;所有圆弧槽腔由摆头  $90^\circ$  的五坐标数控铣床(250G)加工;喷丸表面处理;火焰喷涂碳化物表面处理;最终进行盖板、止动块、衬套安装及交付。根据钛合金滑轨零件“π”字形、“工”字形、双“工”字形三种结构形式具体细化的加工方案如图3所示(以典型“π”字形结构加工方案为例)。

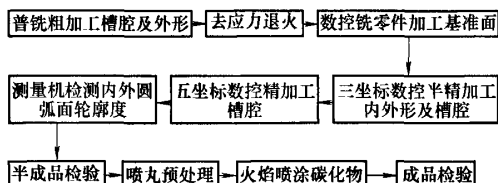


图3 钛合金滑轨加工流程

依据零件加工精度的要求,同时考虑到钛合金滑轨材料Ti6Al4V对刀具强度的特殊要求,我们对钛合金滑轨所需的刀具做如下准备,如表1所示。

表1 刀具选择总体方案统计表

| 加工部位 |         | 所选刀具/mm                                     | 使用机床                    | 选择原因及依据                                 | 加工时间/h |
|------|---------|---------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|--------|
| 粗加工  | 内外圆弧导动面 | 硬质合金立铣刀 $\phi 40 \times 75R0$ （国产）          | 普铣 X53K                 | 粗加工余量较大，<br>国产刀具价格较便宜                   | 24     |
|      | 两面内槽腔   | 硬质合金立铣刀 $\phi 20 \times 40R3$ （国产）          |                         |                                         |        |
| 半精加工 | 内外圆弧导动面 | 直柄镶齿铣刀 $\phi 25 \times 75R0$ （进口）           | 三坐标数控铣<br><br>床 VMC3000 | 由于加工部位较多，<br>同时为了控制零件变形，<br>适合小余量、快进给要求 | 63     |
|      | 两面内槽腔   | 直柄镶齿铣刀 $\phi 25 \times 45R5$ （进口）           |                         |                                         |        |
|      | 耳片槽     | 直柄镶齿铣刀 T 形三面刃铣刀 $\phi 200 \times 15R5$ （进口） |                         |                                         |        |
| 精加工  | 内外圆弧导动面 | 直柄整体硬质合金铣刀 $\phi 25 \times 75R0$ （进口）       | 三坐标数控铣<br><br>床 VMC3000 | 为了控制零件变形，<br>同时保证零件高精度<br>和低表面粗糙度值的要求   | 14     |
|      | 两面内槽腔   | 直柄整体硬质合金铣刀 $\phi 16 \times 45R3$ （进口）       |                         |                                         |        |
|      |         | 直柄整体硬质合金铣刀 $\phi 20 \times 45R3$ （进口）       |                         |                                         |        |
|      | 圆弧槽     | 直柄镶齿铣刀 $\phi 18 \times 60R3$ （进口）           | 五坐标数控铣                  |                                         |        |
|      |         | 直柄整体硬质合金铣刀 $\phi 16 \times 60R3$ （进口）       | 床 250G                  |                                         |        |

我们根据厂家技术人员提供的加工参数及公司加工其他钛合金的经验,选择了切削线速度  $v_c=50\text{m/min}$ ,每齿进给量  $f_z=0.12\text{mm/z}$  (山特维克可乐满刀具),切削线速度  $v_c=30\text{m/min}$ ,每齿进给量  $f_z=0.12\text{mm/z}$  (TI-TEX 厂家刀具),并对选定的刀具的理论加工参数依据换算公式

$$n = 1000v_c / (\pi D)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n$$

式中  $n$ ——机床转速;

$v_c$ ——切削线速度;

$D$ ——刀具直径;

$v_f$ ——进给速度;

$f_z$ ——每齿进给量;

$z$ ——刀具齿数。

对于主要加工的进口刀具,依据以上公式对理论转速和进给进行计算,如表2所示。

表 2 转速和进给速度统计表

| 刀具类型/mm                             | 转速 $n/$<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 进给速度 $v_f/$<br>( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ ) | 刀具寿<br>命/min |
|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------|
| $\phi 25$ 直柄镶齿铣刀<br>(2 齿)           | 637                                | 153                                            | 150          |
| $\phi 18$ 直柄镶齿铣刀<br>(2 齿)           | 995                                | 239                                            | 150          |
| $\phi 200$ 直柄 T 形三面<br>刃镶齿铣刀 (12 齿) | 90                                 | 49                                             | 300          |
| $\phi 25$ 直柄整体硬质<br>合金铣刀 (5 齿)      | 382                                | 162                                            | 120          |
| $\phi 20$ 直柄整体硬质<br>合金铣刀 (5 齿)      | 477                                | 221                                            | 120          |
| $\phi 16$ 直柄整体硬质<br>合金铣刀 (5 齿)      | 597                                | 236                                            | 120          |
| $\phi 8$ 直柄整体硬质合<br>金铣刀 (4 齿)       | 1 164                              | 406                                            | 150          |

3. 工件的加工

对于零件关键部位的加工，采用以下的加工方式：

(1) 对于内外圆弧面关键尺寸  $70_{-0.15}^{+0}$ mm 的加工：粗加工采用普铣 + 国产铣刀粗加工，留 3mm 余量；半精加工采用三坐标数控铣床 + 进口镶齿铣刀半精加工，留 0.3mm 余量；精加工采用三坐标数控铣床 + 进口整体铣刀分两层（每层 0.15mm）精加工到位，保证图样最终尺寸要求。

(2) 对于侧面圆弧槽腔，由于槽口较深，五坐标数控镶齿铣刀  $\phi 18\text{mm} \times 65R3\text{mm}$  加工圆弧槽腔时，由于机床摆头  $90^\circ$ ，机床床头限制，刀具伸出量较大，程序采用来回加工方式，易造成槽口超差并呈台阶状。在试验加工圆弧槽腔时，由于对五坐标数控铣床摆头  $90^\circ$  时刚性较差无法预料，按照理论每层切深 4mm 进行试验时，刀具断刀。对于这个问题通过更改程序，采用单方向加工，同时根据实际需求尽量缩短刀具伸出量，粗加工采用镶齿铣刀每层切深 3mm，并单边留 0.5mm 余量，精加工采用整体刀具径向靠刀加工，从而满足了加工要求。

(3) 对于端头耳片槽口，由于该槽口是通槽，槽深 50mm 左右，我们采用了三坐标数控铣床 + 三面刃“T”形盘铣刀一刀开槽的加工思路，经过多次试验，不断调整加工参数，最终选择转速 200r/min，进给 60mm/min，

实现了该耳片槽口的加工。

(4) 对于耳片槽口内的  $1\text{mm} \times 45^\circ$  倒角的封闭区域加工，我们主要设计了一把专用铤钻（刀具结构及加工工位如图 4 所示），经过加工验证，在钻床上使用该铤钻，只需把铤钻压下，铤钻前端引导刚好顶到垫块，所有尺寸便可一次全部保证，既快又可以防差错。

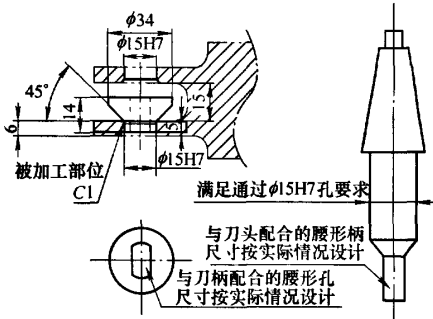


图 4 专用铤钻

4. 加工后效果验证

数控加工后的效果（以下为最大典型零件 1 号滑轨实测值）：粗加工后平面度为 0.05mm，退火后平面度为 0.1mm，三坐标半精加工、精加工后平面度为 0.05mm，五坐标开圆弧槽后平面度为 0.12mm，首件加工后的表面质量如图 5、表 3 所示。

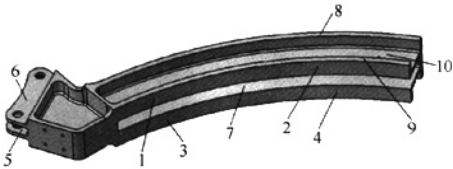


图 5

表 3 1 号滑轨经测光仪测量点位及数据统计表

| 点位 | 零件部位                  | 表面粗糙度实测值 $R_a/\mu\text{m}$ |
|----|-----------------------|----------------------------|
| 1  | $R520\text{mm}$ 圆弧内表面 | 0.27                       |
| 2  |                       | 0.41                       |
| 3  |                       | 0.38                       |
| 4  |                       | 0.31                       |
| 5  | 头部槽口内表面               | 0.59                       |
| 6  | 头部槽口外表面               | 0.57                       |
| 7  | 圆弧槽口内表面               | 0.26                       |
| 8  | 内外缘板顶面                | 0.92                       |
| 9  |                       | 1.00                       |
| 10 | 槽腔腹板面                 | 0.29                       |

# 微细切削加工技术(下)

中国航空精密机械研究所 (北京 100076) 荣烈润

## 3. 微细切削加工的主要方法及应用

(1) 微细车削 在微细车削加工时, 由于卧式车床无法达到高精度要求, 所以常针对微细车削研制微细车削机床。常采用金刚石车刀, 它既能保证得到极小的表面粗糙度值和极高的加工精度, 又有很高的寿命(可达数十万米)。微细切削时, 切削速度不受刀具寿命的制约, 常根据所用机床的动态特性及切削系统的动态特性选取, 即选择振动最小的转速(切削速度)。在加工时都采用很小的进给量, 并且刀具带修光刃。对有修光刃金刚石车刀, 加工时要用显微镜精确对刀, 使修光刃与进给方向一致。

1996年, 日本通产省工业技术院开发了世界上第一台微型化机床——微型车床: 长32mm、宽25mm、高30.5mm, 重量约100g, 主轴电动机额定功率1.5W, 转速10 000r/min。切削试验中的功率消耗仅为卧式车床的1/500, 该机床用于切削黄铜。

1999年, 日本金泽大学研制了一套长约200mm的微细切削系统。它由微细车床、控制单元、光学显微装置及监视器组成, 如图1所示。机床的主要性能参数如下: 主轴功率0.5W; 转速3 000~15 000r/min, 连续变

速; 径向圆跳动1 $\mu$ m以内; 装夹工件直径0.3mm; X、Y、Z轴的进给分辨率为4nm。

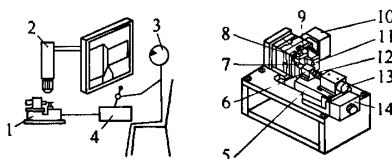


图1 长约200mm的微细车削系统

1. 微细车床 2. 光学显微系统 3. 操作者 4. 控制单元
5. 进给工作台 6. 主轴轴承 7. 微型夹头 8. 金刚石车刀
9. 刀架 10. X-Y轴步进电动机 11. 刀具测力器
12. 联轴器 13. 直流电动机 14. Z轴步进电动机

借用STM(扫描隧道显微镜)的金刚石探针头作为微细车削的刀具头, 三角棱锥形金刚石颗粒的刀头装在直径为0.25mm的刀杆上。该机床可加工不同形状的回转体零件(0.3mm直径的黄铜丝毛坯, 用单晶金刚石刀具加工), 可加工微细轴、微细丝杠、阶梯轮廓面, 还可车削端面、切槽、镗孔等。

微细切削加工机床并非因机床的尺寸越小, 可加工的工件尺寸就越小, 精度就越高。微细车床的发展趋势一方面是微型化及智能化, 另一方面是提高系统的刚度

加工后关键尺寸滑轨内圆弧轮廓度0.12mm及滑动槽宽20H8的测量情况: 经过测量机取点测量后, 滑轨内圆弧面实际尺寸与理论尺寸偏差跳动量 $\pm 0.06$ mm以内, 基本符合要求。滑动槽宽实际尺寸20~20.10mm, 收口量0.10mm, 符合零件公差。加工完之后再到后续的喷丸和火焰喷涂碳化物处理, 完成产品生产。

## 5. 结语

截至2009年5月底, ARJ21钛滑轨已完成了13架份的加工。在研制批加工过程中出现了一些问题, 例如

圆弧槽腔端头槽口收口问题, 尺寸 $70_{-0.15}^{+0}$ mm加工难控制问题等, 从第一架份到第六架份, 产品的超差数量逐渐递减, 目前达到10%, 同时我们正在实施进一步的过程中的细节研究, 并寻求钛合金的高效加工方法, 相信经过我们钛合金滑轨团队的共同努力, 钛合金滑轨的制造技术会更加成熟、可靠、高效。也希望通过ARJ21钛滑轨的研制为今后飞机钛合金滑轨的应用奠定坚实的基础。**MW**

(收稿日期: 20101024)