

# 航空发动机燃气发生器零件 加工工艺研究

■ 西安航空发动机（集团）有限公司 （陕西 710021） 伏建锋 宋晓庆

**摘要：**针对航空发动机燃烧发生器零件的加工特征，从加工工艺安排、装夹方式和切削工艺等方面进行探索，以实现经济、高效加工，保证加工精度和表面质量。

目前，我国航空产品已经逐渐步入高密度发展期，各类航空产品的需求量逐年增加，迫使航空制造业产能必须大幅提升。由于航空产品具有结构复杂、材料去除量大以及薄壁易变形等特点，且对零件加工精度、质量及加工效率等具有较高的要求，所以高效加工是复杂整体结构件加工的关键技术。关于航空发动机燃烧发生器零件的加工，目前没有可供借鉴的加工经验。

## 1. 零件结构特点及材料特性

首先从零件结构特点、精度要求及材料性能等方面进行分析，依据分析结果科学合理地设计工艺方案，突破关键技术，确定装夹定位方式和设计专用刀具。

(1) 零件结构特点：该零件是一种大型薄壁结构件。零件最大直径约480mm，高125 mm，内孔直径 $431.76^{+0.08}_{-0}$ mm，所有直径同轴度要求0.12mm，壁厚最薄处

只有1.27mm，外型面由8个直面和4个扇形段组成，其中在直面与扇形相交处有8个圆弧凹槽，2个直面上有6个螺纹孔、1个 $\phi 25.35$ mm的孔和2个圆弧凹槽，其余6个直面上有2个圆形深沉孔和1个U形深凹槽，以及在内孔侧面有2处倒角。燃气发生器零件实体如图1所示。



图1 零件实体图

(2) 精度要求：该燃气发生器结构件精度要求高，内孔直径公差0.08mm，壁厚公差0.2mm，所有直径同轴度0.12mm，表面粗糙度值 $R_a = 1.6 \mu m$ ，孔和槽的位置度最大0.12mm，加工难度高。

(3) 材料特性：AMS5612材料属于耐热耐腐蚀12Cr钢，进行了退火处理，硬度为39~44HRC或等效值。此类零件在高

室温时抗拉，又能在538℃下抗氧化。

## 2. 工艺分析

该燃气发生器结构件毛坯为圆桶形锻件，材质为AMS5612，属于钢件，加工成的零件直径大、外型面复杂、槽和孔较多且壁薄，导致零件刚性差；在加工过程中余量去除大且不均匀，会产生很大的切削力和残余应力，导致零件变形，影响加工尺寸，因此，增强零件的刚性和提高加工效率十分重要。

## 3. 工艺流程

根据零件的特点，变形要控制在一定范围内，才可以保证壁厚尺寸和孔槽的位置度要求，因此，按照工序集中、减少装夹次数、先简单后复杂以及先车后铣等原则，制定科学、合理的工艺路线。为了增强此零件的刚性，减少变形量，尽可能一次装夹进行加工，以达到技术要求。制定了如下工艺路线：毛料→粗车短端及内孔→精车长端及内孔→精

铣外型及凹槽→精车短端→精铣键槽和孔→反镗倒角→铣圆弧槽→攻螺纹→检验。

#### 4. 装夹定位

为了降低零件变形对加工的影响，设计制造了专用夹具，解决了这一难题。夹具原理如图2所示。该夹具结构利用零件内孔和基准端面进行定位配合，有6个可以灵活滑动的滑块、1个锥形螺母，当螺母松开时，滑块向夹具中心收缩，此时装上零件，带紧锥形螺母，滑块自动与零件内孔接触并胀紧，直至满足加工的圆度要求，就可以放心地进行加工，壁厚也就可以得到保证了。此夹具极大地减小了变形对后续工序加工的影响，应用在精车和铣加工上，实用性很强。

#### 5. 刀具的选用及设计

(1) 外型加工：该零件外型及凹槽加工余量大，最大处20mm，整个外型面及凹槽全部需要进行铣加工，表面粗糙度值 $R_a = 1.6 \mu m$ ，向心平面距中

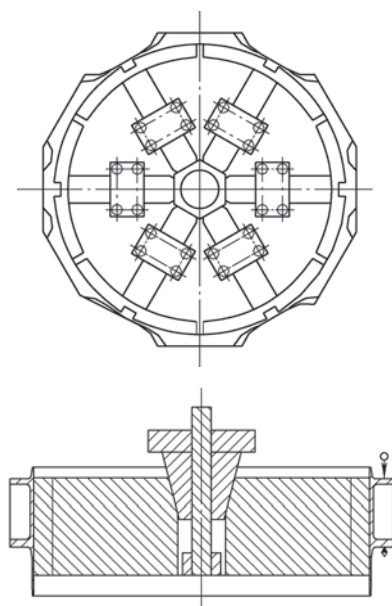


图2 夹具原理图

心尺寸公差0.2mm，壁厚公差0.2mm。通过对零件外型加工工艺进行研究，制定了粗铣外型（形成外型轮廓）→粗铣凹槽→精铣外型→精铣凹槽的加工顺序。

为降低加工成本，减少对数控设备的占用和零件的变形，提高生产效率，粗铣外型采用目前非常先进的“插铣”加工方式，不考虑加工精度和表面质量，最大限度地高效去除金属材料，缩短加工时间。选用是肯纳公司 $\phi 63mm$ 镶片式铣刀（见图3），刀杆为KF2 $\times 63Z05S22W103$ （6刃），具有高压内冷功能，刚性好，经济性高；为减少刀具与零件之间的摩擦，提高刀具寿命，选择 $7^\circ$ 的双倒棱后角刀片，刀片为WOEJ130713SRGD KCPK30，



(a)



(b)

图3 插铣刀图

最大切削深度可达7mm，1把刀就可完成外型粗加工。为提高加工效率，走刀时几乎采用满切宽进行切削，进给量 $f = 0.15mm/z$ ，进给速度为900mm/min，转速达到1000r/min。

如图4所示，“插铣”时刀具只承受轴向力，主轴的功率完全作用在工件上，刀具的进给量一致，加工时切削稳定性好，同时高速切削零件受力小，变形量相对传统加工方式减小20%以上，加工效率与以往传统加工方式相比提高了3~5倍（见表1）。

粗铣给精铣留1mm的加工余量。为保证最终表面质量，精铣要求采用镶合金条刀具（见图5），使用顺铣加工方式，以降低切削力。镶齿合金铣刀的加工质量比普通刀具好很多（见表2）。



图4 外形加工图



图5 镶齿合金铣刀

表1 粗铣时的加工效率对比

| 刀具                | 加工参数                      |               |                              | 纯加工时间/h |
|-------------------|---------------------------|---------------|------------------------------|---------|
|                   | 转速 $v/(r \cdot min^{-1})$ | 背吃刀量 $a_p/mm$ | 进给速度 $f/(mm \cdot min^{-1})$ |         |
| $\phi 50mm$ 高速钢铣刀 | 90                        | 10            | 60                           | 2.5     |
| $\phi 63mm$ 插铣刀   | 1 000                     | 20            | 900                          | 0.6     |

表2 精铣时的加工效率对比

| 工艺方法 | 刀具                | 加工参数                       |               |                             | 加工效果    |                   |
|------|-------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------|-------------------|
|      |                   | 转速 $v/(r \cdot \min^{-1})$ | 背吃刀量 $a_p/mm$ | 进给速度 $(mm \cdot \min^{-1})$ | 纯加工时间/h | 表面粗糙度 $R_a/\mu m$ |
| 传统工艺 | $\phi 50mm$ 高速钢铣刀 | 90                         | 1             | 60                          | 2.0     | 3.2               |
|      | $\phi 54mm$ 高速钢铣刀 | 75                         | 1             | 15                          | 1.5     | 3.2               |
| 新技术  | $\phi 63mm$ 合金铣刀  | 170                        | 1             | 100                         | 0.5     | 1.6               |
|      | $\phi 56mm$ 合金铣刀  | 200                        | 1             | 25                          | 0.8     | 1.6               |

(2) 径向孔和槽加工：在燃气发生器零件外型上分布有 $\phi 25.4mm$ 、 $\phi 23.6mm$ 、 $\phi 4.2mm$ 及 $\phi 5.5mm$ 的孔和键槽，公差大多为 $0.1mm$ 左右，向心平面距中心尺寸公差 $0.1mm$ ，表面粗糙度值 $R_a=1.6\mu m$ ，只能安排在卧式加工中心上进行加工（见图6）。

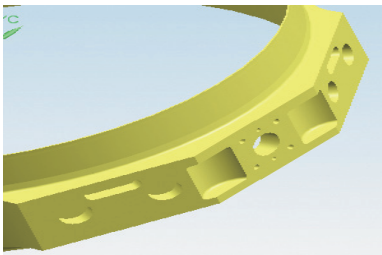
对于平面，使用先进的带有修光刃的盘铣刀进行加工，修光刃的刀尖在允许的最大范围内做成接近椭圆形，刀尖加长，负偏角减小，实现长刃切削。刀尖在刀盘侧面上凸出，用刀尖切削，而修光刃镶嵌在刀盘侧面，用线切削，并且在圆周方向（径

向）相对其他刀片略收缩 $0.02\sim 0.03mm$ ，以在粗加工时不参与切削；在端面（侧面）上高于其他刀片 $0.10\sim 0.20mm$ ，以实现修光。选择伊斯卡刀具SOF45 8/16-D080-07-27R，刀片S845 SNMU 1305ANR-MM（IC808）和S845 SNHU 1305AN-N-W（IC808），并与强力刀柄配合，提供可靠的高速加工性能（见图7）。

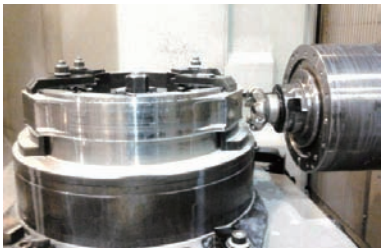
$\phi 23.6mm \times 12mm$ 的沉孔共12个，加工时余量大，使用传统的加工方法效率低、成本高。粗加工采用先进加工方法使用的浅孔U钻代替，使用可转位刀片，

加工尺寸比较稳定，能提高工效6~7倍。根据加工机床功率以及零件材质，选用伊斯卡U 钻刀杆DR220-044-25-07-2D-N，刀片SOMX 070305-DT（IC908），如图8所示。

沉孔精铣和键槽采用螺旋铣加工方式，使用立方氮化硼涂层铣刀（见图9）进行高速加工，涂层的化学惰性可以降低摩擦损耗；其低热扩散性可降低基体热负荷，其高强度可降低摩擦损耗、降低黏结磨损；去除余量大，加工成本低，并且加工后的尺寸稳定，表面质量良好，为今后孔和槽的加工积累了丰富的经



(a)



(b)

图6 径向孔和槽的加工

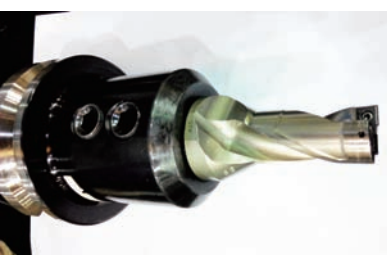


(a)



(b)

图7 盘铣刀实体图



(a)



(b)

图8 U钻

验。

径向孔和槽的加工由于采用了新技术、新工艺，且加工参数得到了优化，加工效率提高了2~3倍（见表3）。

（3）反锏倒角加工：在零件内孔侧面有两处径向孔的倒角，刀具无法直接进入进行加工，采用其他方式加工成本高。因此专门设计制造了刀头与刀杆分体式刀具，使用时先将刀杆通过孔由外向里伸入零件一定距离，在内孔伸出的部分装上刀头，顺时针旋转刀头，刀杆头部凸起将挡住刀头，不会脱落，当机床主轴旋转起来时，受刀具切削力的影响，刀头与刀杆会牢牢地锁在一起，进行正常切削，加工后取下刀头，再取出刀杆，操作简单，



图9 涂层铣刀

易于掌握。加工示意图如图10所示。

## 6. 结语

通过对航空发动机燃气发生器结构件加工工艺的研究，合理安排工艺流程，采取有效的工艺措施，使用专用夹具，采用高效加工方法，优化数控加工程序，控制了变形对零件加工的影响，提高了零件的加工效率，降低了加工成本。该研究项目为今后同类零件和其他零件的工艺研发提供了技术储备，实用价值很大。

## 参考文献：

- [1] 航空制造工程手册总编委会.发动机机械加工[M].北京：航空工业出版社，1997.
- [2] 武文革，辛志杰.金属切削原

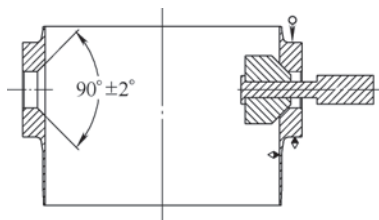
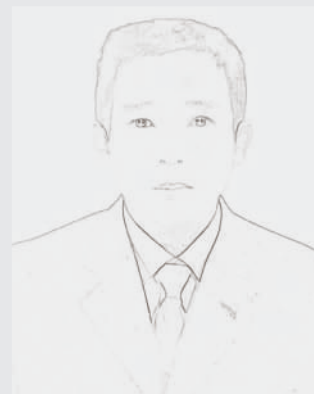


图10 反锏倒角加工示意图

理及刀具[M].北京：国防工业出版社，2009.

## 专家点评



作者通过对航空发动机燃气发生器零件的工艺研究，采取有效的技术措施，控制零件的刚性，提高了加工效率。其中的刀具选择和使用都比较合理，为类似零件的加工积累了经验。插铣外型和反锏倒角的加工方法也做到从工厂实际出发，具有一定的实用价值。

表3 刀具优化前后加工效率对比

| 工艺方法 | 刀具                    | 加工参数                       |               |                             | 加工效果    |                   |
|------|-----------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------|-------------------|
|      |                       | 转速 $v/(r \cdot \min^{-1})$ | 背吃刀量 $a_p/mm$ | 进给速度 $(mm \cdot \min^{-1})$ | 纯加工时间/h | 表面粗糙度 $R_a/\mu m$ |
| 传统工艺 | $\phi 10mm$ 高速钢钻头     | 400                        | 5             | 15                          | 0.78    | 6.3               |
|      | $\phi 20mm$ 铣刀（普硬）    | 200                        | 5             | 9                           | 0.35    | 6.3               |
|      | $\phi 20mm$ 铣刀（普硬）    | 200                        | 2.5           | 20                          | 0.23    | 3.2               |
|      | $\phi 10mm$ 铣刀（普硬）    | 500                        | 6             | 15                          | 1.74    | 3.2               |
|      | $\phi 12mm$ 铣刀（普硬）    | 600                        | 0.2           | 20                          | 1.5     | 3.2               |
| 新技术  | $\phi 22mm$ 锏钻（IC908） | 1 600                      | 11            | 140                         | 0.024   | 1.6               |
|      | $\phi 25mm$ 锏钻（IC908） | 1 350                      | 12.5          | 84                          | 0.042 5 | 1.6               |
|      | $\phi 12mm$ 铣刀（IC900） | 2 500                      | 6             | 216                         | 0.25    | 1.6               |

MW（收稿日期：20151218）