

高压涡轮转子封严盘加工工艺改进

秦阳, 许万军

中国航发西安航空发动机有限公司 陕西西安 710021

摘要: 针对封严盘零件加工中出现的问题, 通过简化车床工序、合并夹具的方法减少切削变形, 并按照工序集中、钻铣组合的原则提高异形孔加工效率, 缩短了生产周期。

关键词: 高压涡轮; 转子; 封严盘; 异形孔; 工艺改进

1 序言

封严盘是发动机高压涡轮转子部件中的关键零件, 工作时处于高温、高压和高速旋转的状态, 对高温下的力学性能具有很高的要求。封严盘材料为高温镍基合金, 硬度 $\geq 39\text{HRC}$, 加工难度很大。

2 零件结构

图1所示封严盘形状复杂, 是我公司承接美国GE公司项目所生产的CFM56-5/-6发动机高压涡轮转子部件中的关键零件。其最大外径为592.17mm,

中空部分最小内径为184.4mm, 总高62.88mm, 最小壁厚1.52mm, 零件腹板前后各有1个定位止口, 辐板中央部位有均布的48个异形孔, 用于连接高压涡轮转子前轴和高压涡轮盘。零件外圆处有3个依次增高的封严篦齿, 其下方有1个单独的斜形较长的封严篦齿, 它们共同组成4层空气封严。上下两组封严齿之间有一组均布的72个异形孔供螺栓通过, 用于联接外封严隔圈。80个异形斜槽均布于零件上端凹槽部位, 其作用为叶片保持。其他型面多为各种斜面、锥面和圆弧, 导致零件结构比较复杂。

3 零件精度分析

由于封严盘与多个零件组装, 配合尺寸多, 因此精度要求很高。封严盘零件几何尺寸如图2所示, 左右两个定位止口的直径公差均为 $\pm 0.025\text{mm}$,



a) 零件前端



b) 零件后端

图1 封严盘

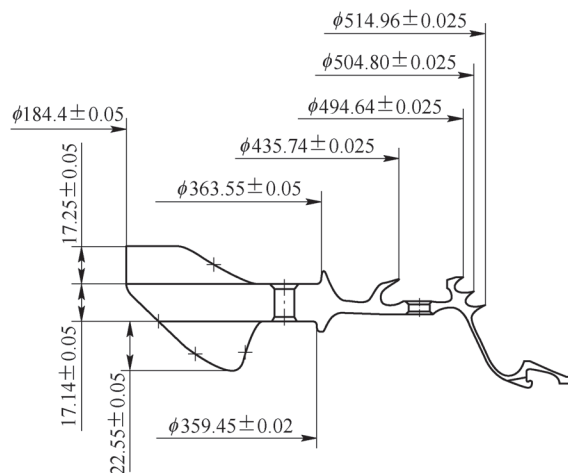


图2 封严盘零件几何尺寸

端→孔加工→半精车内锥面→铣削加工→精车前端锥面→精车封严齿→喷丸等→精车后端止口→精车前端止口。共12道车削加工，2道钻铣加工，期间穿插其他辅助工序，如标记、钳工、荧光检测、喷丸及喷涂等。

5 调整加工工艺路线

在试制过程中，发现粗车后端、半精车前端以及精车后端和前端工序后，零件定位圆有0.10~0.17mm的变化（与机床上测量对比），轴向圆跳动<0.03mm。经过原因分析，做出以下调整。

1) 取消“粗车后端”，将该工序余量合并到“半精车前端及封严齿”工序，一并去除，节省了粗车保尺寸的工步，合并了半精车去余量工步，免

除了一次装夹工作，使用陶瓷刀加工后，加工时间减半。

2) 将半精车内锥面、精车后端锥面和精车前端锥面3道工序合并为精车内外锥面，将分散在3道工序的余量合并到一起加工，翼型部分和型面部分的壁厚在一道工序保证，可以保证较好的壁厚均匀度，一般变化量≤0.05mm。同时保证叶片保持环部分的尺寸和形状特性，加工难度明显降低。原3道工序分别加工的部位如图5所示，工序合并后的加工部位如图6所示。

3) 在实际铣削加工中，由于一组异形孔较厚，要求刀具具有较高的强度，安装长度应尽量短，但是由于零件结构问题，两组孔不能在一道工序中一

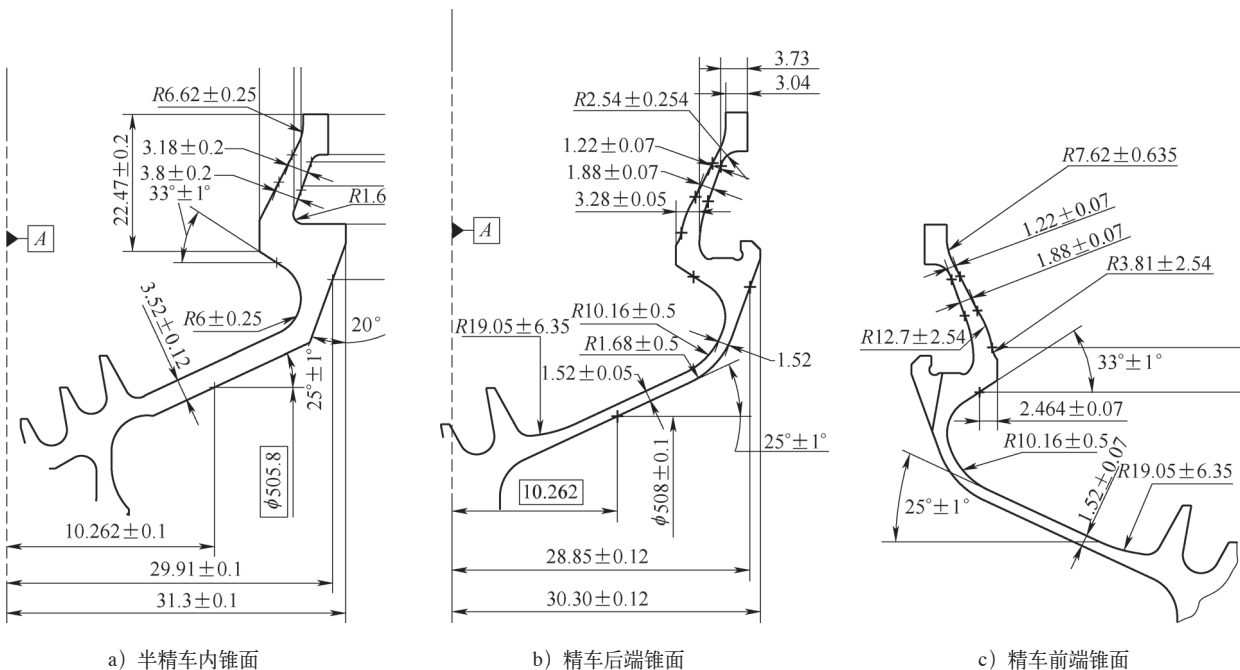


图5 原3道工序分别加工的部位

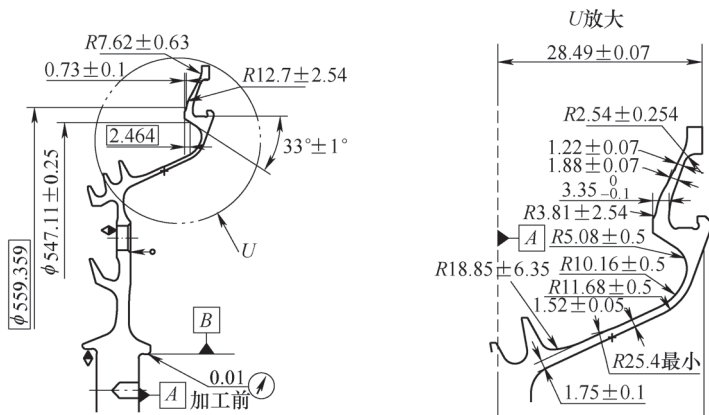


图6 工序合并后的加工部位

起加工，因此分成两道精铣孔加工程序。同时考虑各工序加工时间的匹配问题，将较厚异形孔的加工分开，将钻孔安排在一道工序中进行，精铣成形与另一组孔的倒角在一道工序中进行。改进后的工艺路线为：半精车后端→半精车前端及封严齿→精车前端→精车后端→钻、扩、铣72个孔→精车内外锥面→钻孔和铣凸台→铣前端孔、倒角→铣80个槽、48个孔倒角→精车封严齿→中检→荧光检验→喷丸→精车前端止口→精车后端止口→喷涂→成品检验

→叠加投影→入库。

6 夹具的调整与合并

在试制加工中发现，由于选择了合理的加工参数和刀具型号，所以零件变形较小，在正常变形范围以内。过定位在加工中作用极小，调整工艺后将半精车后端、半精车前端及封严齿及精车前端工序夹具合并成一个夹具，夹具通用性强，减少了夹具的种类，易于管理和使用。夹具的调整如图7所示。

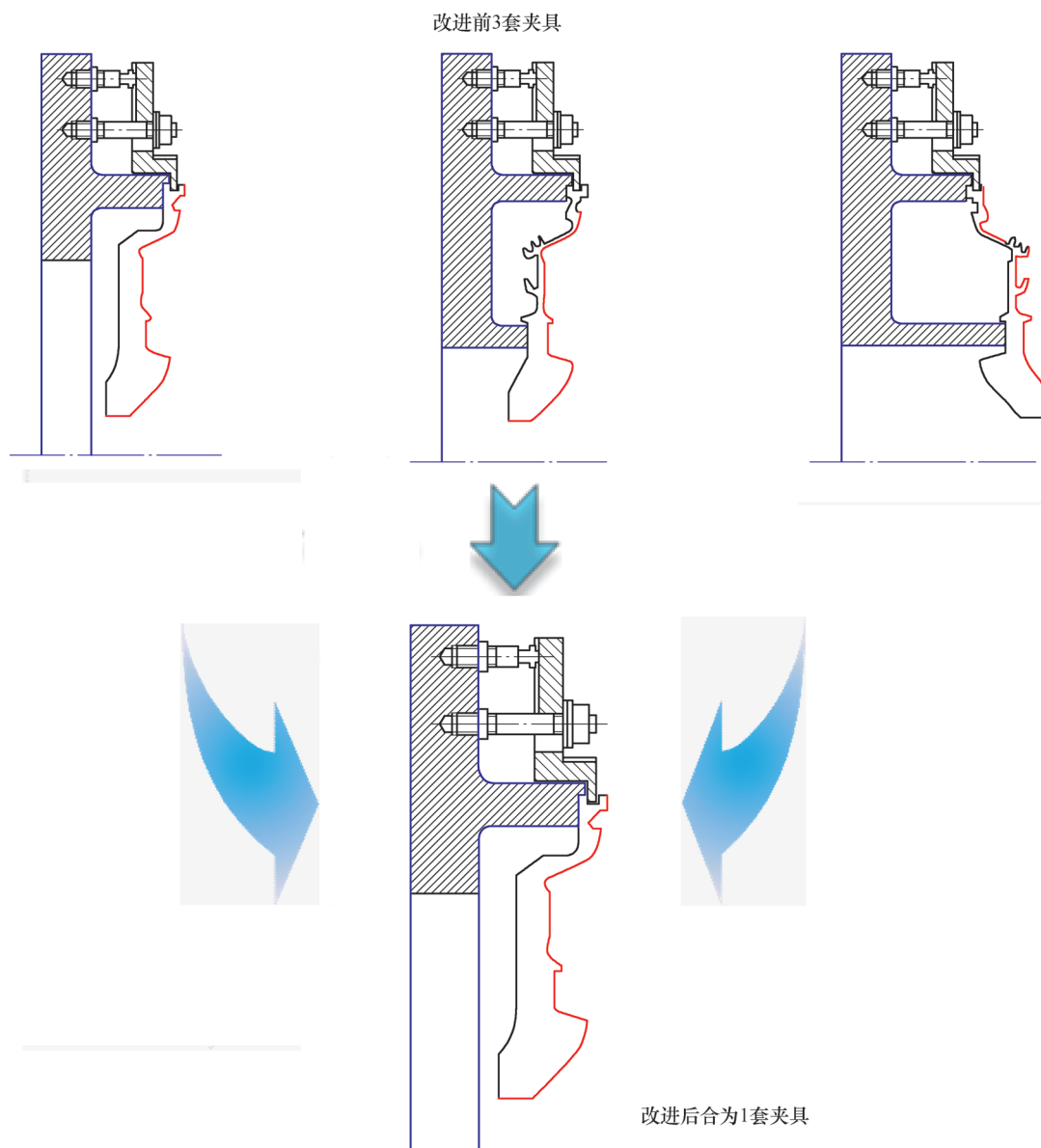


图7 夹具的调整

7 车削加工工艺改进

7.1 刀具的改进

合并工序后，半精车工序给精车留1mm余量。

加工中使用RCGX120700 WG300型陶瓷刀去除大部分余量，采用 $\phi 9.52\text{mm}$ 的RCGX090700E WG300陶瓷刀片替代原方案所使用的硬质合金刀片，加工效

率明显提高，加工时间减少3~4h。

7.2 加工程序的改进

为最大限度地利用陶瓷刀具的切削刃，采用双向往复的切削方法进行加工，进给路线如图8所示。这样可以充分利用刀片两侧切削刃，减少局部磨损。

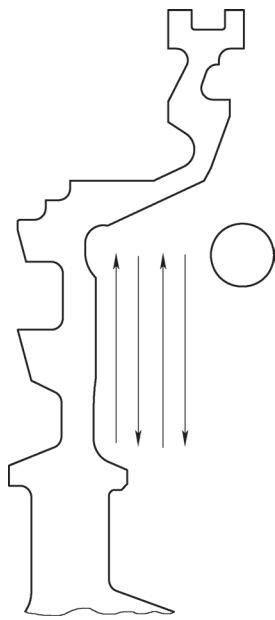


图8 进给路线

8 铣削加工工艺改进

高压涡轮转子封严盘零件上有2组异形孔，1组由72个P11TF12-B级异形孔组成，另1组由48个P11TF12-C级异形孔组成。另外，在后端还有1组80个异形斜槽，这些结构需铣削加工完成。铣削部位加工要求如图9所示。

8.1 工艺难点分析

根据零件的结构特点以及加工尺寸要求，经分析有以下几个技术难点。

(1) 48个P11TF12-C级异形孔 根据GE公司要求，C级孔必须采用工艺监控方法控制孔的粗、精机械加工参数。主要存在两个问题：①对C级异形孔的加工控制经验严重不足。②该零件为镍基高温耐热合金INCO718，材料黏性大、硬度较高，加工中不易断屑，导热性能较差，在切削加工过程中会产生很大的切削抗力和大量的切削热，刀具磨损严重。

(2) 72个P11TF12-B级异形孔 GE公司要求控制B级孔的粗、精机械加工参数。主要存在两个

问题：①72个异形孔端面两侧形状狭小陡峭，与刀柄干涉，刀具伸长量长。又由于受异形孔形状圆弧的限制，所以精铣仅允许使用 $\phi 6\text{mm}$ 铣刀，刚性差，很容易产生让刀、振刀及刀具断裂等现象。②零件材料硬，孔数较多，异形孔狭长，材料去除量大，导致加工成本高、加工效率低。

(3) 80个异形斜槽 主要存在两个问题：①受限于零件设计图样要求，按传统制造工艺加工，该端面斜槽必须在五坐标加工中心上将主轴倾斜 10° 才能铣削加工。②由于受零件设计结构影响，80个异形斜槽位于细长的薄壁面上，刚性极差，铣削时极易产生振动，表面粗糙度和尺寸均难以保证。

8.2 工艺改进措施及成效

针对以上技术难点，采取如下改进措施。

(1) 48个异形孔的加工 在现有三坐标加工中心上加装扭力监控装置（见图10），以满足对P11TF12-C级孔的加工进行控制的要求。在夹持刀具的主轴上安装扭力感应器，通过特殊转换装置，将扭力值转换为电压值，并传送到监控器中。监控器通过数据分析并和设定值对比，来决定继续加工监控或停止加工报警。对监控装置进行多次试验，证明其电压值和扭力值的换算关系满足要求。

48个异形孔原先的加工工艺为：钻→粗铣→精铣。使用Y330硬质合金钻头，加工参数为每次6mm进行啄钻，转速为600r/min，进给量为0.06mm/r。但是由于零件材质太硬，钻头材料晶粒太细，所以每钻12~16个孔就必须换刀。后经大量试验，将钻头材质改为K35硬质合金，将加工参数优化为每次4mm进行啄钻，转速为450r/min，进给量为0.06mm/r，可满足钻26~30个孔换刀。

另外，经过分析和试验，将钻孔后的粗铣工艺更改为扩孔，每个零件的加工时间至少减少了30min。

同样，对于精铣，由于受异形孔圆弧 R 影响，只能使用 $\phi 7.4\text{mm}$ 铣刀进行加工。孔深为18mm，转速为400r/min，进给量为0.15mm/r，深度方向一次铣削让刀严重。后经大量试验，将加工参数优化为转速为500r/min，进给量为0.10mm/r，深度方向可一次铣削到位，且无让刀问题。每个零件的加工时间至少减少了45min。

48个异形孔属于C级孔，在实际加工过程中常

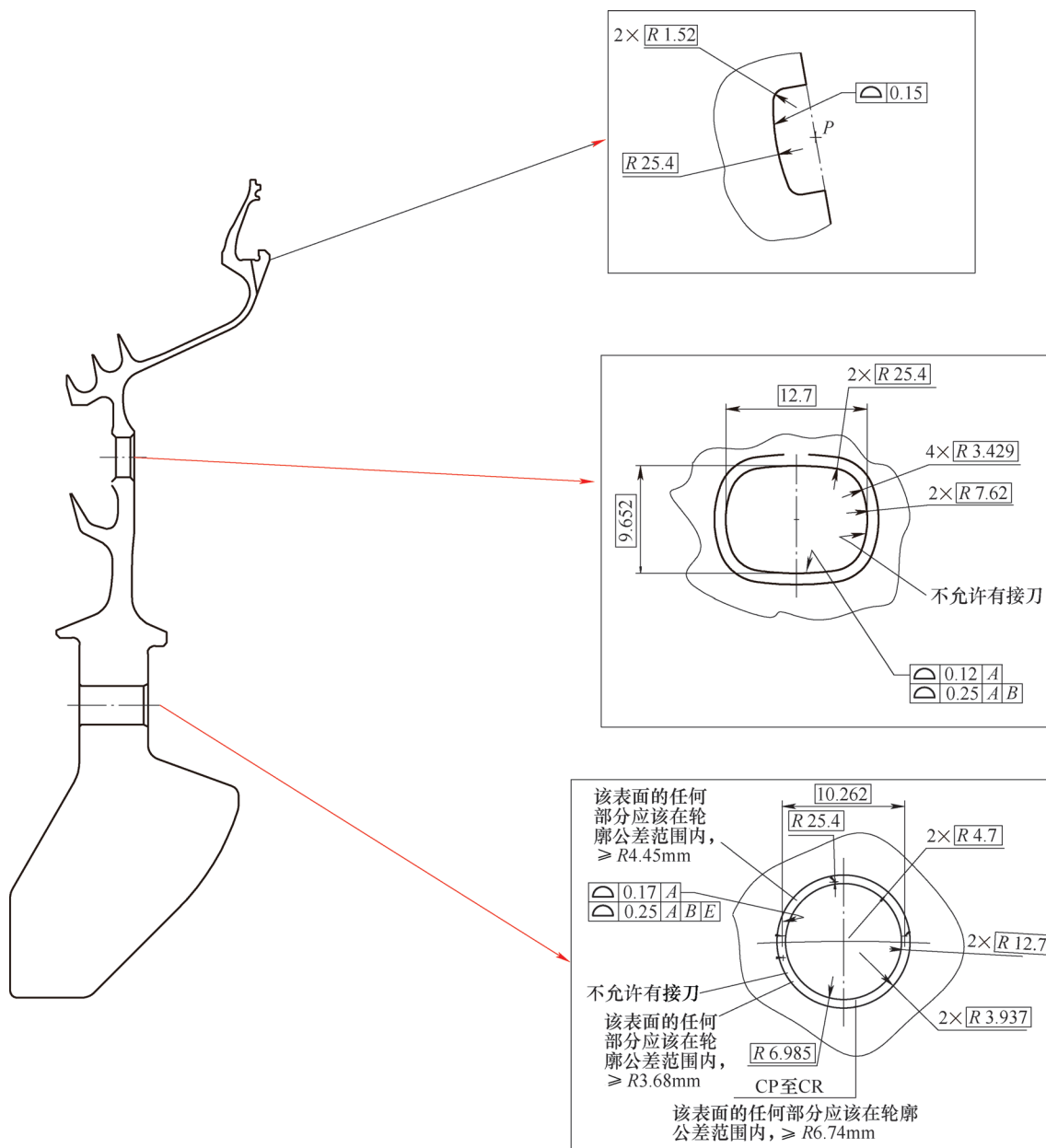


图9 铣削部位加工要求



图10 加装扭力监控装置

产生积屑瘤,严重影响零件质量。积屑瘤一般是由于材料粘连造成的,是工件材料受压后焊在了切削

刃上。当材料有化学亲和性,压力和温度足够高时,积屑瘤会发生在切削区域。最终积屑瘤会脱落并同时带走一些刀片材料,导致刀片崩刃和后刀面快速磨损。图11为异形孔断面,对于本零件来说,一方面由于异形孔深度较深,排屑不畅,所以使孔壁受到挤压;另一方面因考虑成本因素,多使用修磨刀具进行加工,由于刀具刃口不锋利,所以异形孔壁表面加工质量较差,易产生积屑瘤。

最初考虑从以下几个方面解决积屑瘤问题:①使用涂层刀具。②提高切削速度或增加进给量。③正确使用切削液,增加切削液浓度。④改进加工程

序。但是考虑到成本因素，使用涂层刀具会增加生产成本，同时该48个孔有C级孔加工要求，因此程序参数不能更改，只能从改进加工程序上考虑改变加工路线。

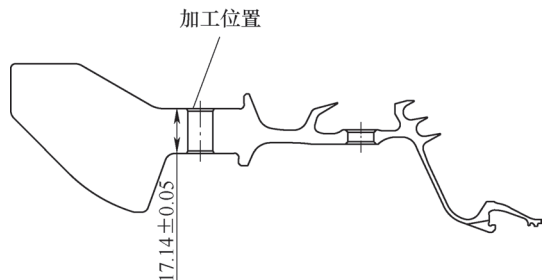


图11 异形孔断面

改进前程序采用逆铣加工，如果用修磨刀具进行加工，孔壁表面质量不好，易产生积屑瘤，而采用新刀具则加工成本较高。分析零件结构和加工特点，选择采用顺铣加工，解决了积屑瘤问题。

通过以上改进，提高了异形孔加工质量，孔壁表面质量大幅提高，没有积屑瘤产生；且修磨后的旧刀即可完成加工，降低了生产成本，保证了零件质量和正常交付。

(2) 72个P11TF12-B级异形孔的加工 图12所示为72个P11TF12-B级异形孔的形状。加工时，替换掉原来使用的 $\phi 6\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ 整体硬质合金铣刀，改为使用某公司的氮铝化钛涂层刀具，将加工参数提高到原来的2倍。换刀点由原来的12孔增加到现在的36孔，通过加长切削刃长，1把刀具可完成72个孔的加工，提高了刀具寿命，降低了综合成本。



图12 72个P11TF12-B级异形孔的形状

改进加工方法，加工步骤由原来的粗钻孔→粗铣型孔轮廓→精铣型孔轮廓，改为粗钻孔→左右镗孔→粗铣型孔轮廓→精铣型孔轮廓。同时在加工中采用顺铣方法，减少抗力，提高表面加工质量，虽然增加了加工步骤，但由于使用涂层刀具，故提高了切削参数，总体时间约8h，减少45%。

考虑到零件异形孔比较深，抗力大，最初使用ER32刀柄，但刀具悬伸量大，刚性不足，让刀严

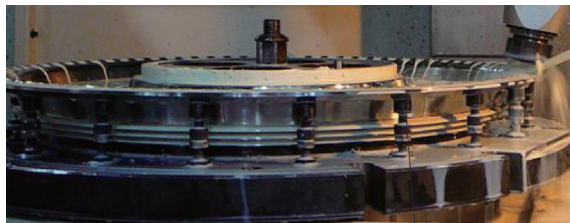
重。改用ER25规格的刀柄，刀柄直径只有28mm，夹持刀具的悬伸量大大减少，减小了刀具的振动，提高了铣削系统（机床主轴、夹持刀柄及铣削刀具）整体刚性，这也是可以增加刃长的原因之一。

(3) 80个异形斜槽的加工 经过多次精密计算和现场试验，最后通过采用普通三坐标加工中心加转头，再利用万能角度头的组合，实现了加工端面异形斜槽的功能。图13所示为弯头加工。



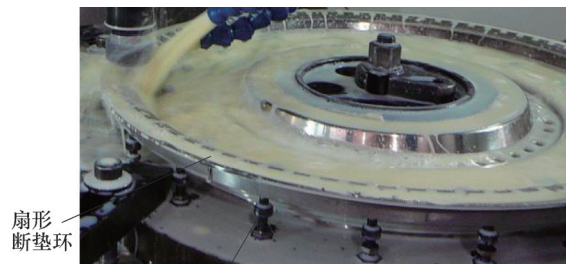
图13 弯头加工

由于80个异形斜槽位于细长的薄壁面上，因而刚性极差。最开始的夹具支撑为点式支撑（见图14），改进后的夹具支撑为面支撑（见图15），极大地改善了零件在此处的加工刚性，基本解决了加工振刀问题。



支撑杆

图14 点式支撑



扇形
断垫环

支撑杆

图15 面支撑

另外，为了加强刚性，提高零件加工效率，将铣刀总长从80mm减少到50mm，将粗铣从弯头加工改进

为三坐标主轴加工。三坐标主轴粗铣如图16所示。



图16 三坐标主轴粗铣

通过优化加工参数，既提高了材料去除率，又使该工序的加工时间从16h降低到10h。

9 端面槽加工改进

端面槽如图17所示，在每次加工完成后，都会因R0.11mm和R0.25mm圆弧的加工难度大而造成返工率高。于是研制新的成形刀具，实现凹槽和R0.11mm、R0.25mm圆弧共同加工。新的端面槽成形刀如图18所示。

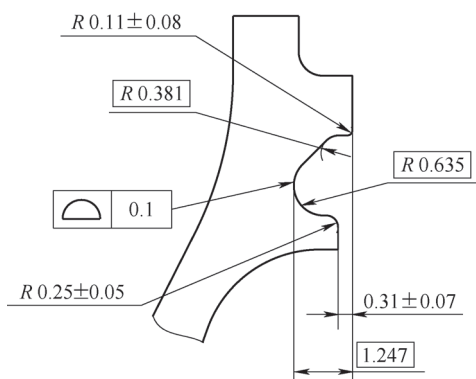


图17 端面槽

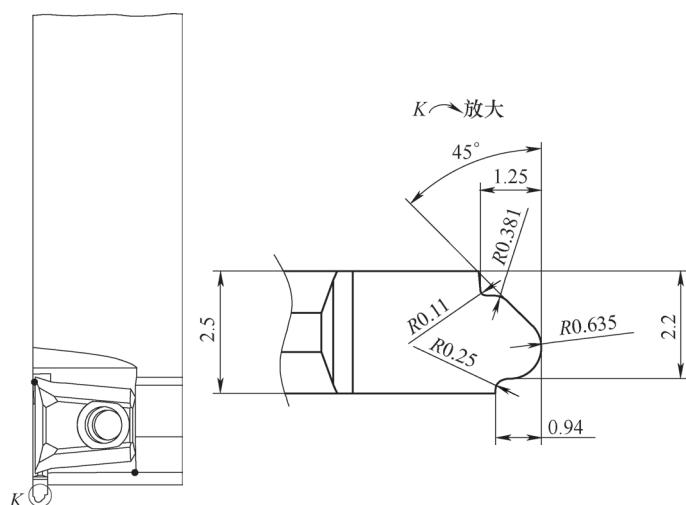


图18 端面槽成形刀

10 结束语

通过优化数控车削加工程序，大量使用陶瓷刀具对零件进行高速的材料去除，提高了加工效率；通过对异形孔端面槽的铣削加工进行工艺改进，有效提高了加工效率及表面质量。

通过对高压涡轮转子封严盘的工艺研究，掌握了高压涡轮前旋转气封和叶片保持环新结构零件的加工技术，特别是薄壁易变形零件的加工变形控制方法。

参考文献：

- [1] 孟少农. 机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，1996.
- [2] 《机械加工技术手册》编写组. 机械加工技术手册[M]. 北京：北京出版社，1989.
- [3] 蒲林祥. 金属切削机床夹具设计手册[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，1995.
- [4] 陈晓英，徐诚. UG软件在数控加工中的应用[J]. 机床与液压，2006（1）：64-66.

MW 20210609

专家点评

本例中的封严盘属于翼型薄壁盘类零件，加工余量较大，壁厚由内而外逐渐变薄，如何控制零件变形并提高加工效率是工艺改进的重点。作者针对加工中遇到的问题进行原因分析并制定相应的解决措施，通过简化车床工序、合并夹具的方法减少切削变形，并按照工序集中、钻铣组合的原则提高异形孔加工效率，为此类零件的工艺研究积累了经验。

文章内容完整，方法实用，具有很好的工艺思路和分析能力，在持续改进过程中有效地将加工难点和实际工况结合起来，逐个突破，具有很强的应用价值。