

航空封严二级盘孔加工工艺研究

黄强

中国航发西安航空发动机有限公司 陕西西安 710021

摘要：通过对二级盘零件结构及定位尺寸进行分析，选择稳定、可靠的定位装夹方式，设计适用于零件孔加工的辅助支撑夹具，改进刀具设计方案，优化孔加工策略，提出航空封严二级盘孔加工方案，并进行了试验验证。

关键词：封严二级盘；孔加工；定位装夹；刀具方案

1 序言

航空封严二级盘刚性差，在装夹过程中因受到夹紧力、支撑力、切削力和残余应力的影响，极易产生变形，导致零件加工后出现变形，孔加工后精度较差。通过对二级盘零件结构及定位尺寸进行分析，选择稳定、可靠的定位装夹方式，设计适用于零件孔加工辅助支撑夹具，保证被加工零件在夹具上获得最佳的定位位置，在加工过程中，防止由于切削力改变导致零件位置改变使零件产生变形。通过对刀具设计方案进行改进、优化孔加工策略，提出航空封严二级盘孔加工工艺方法，并进行了试验验证。

2 零件材料及结构特征

2.1 材料分析

航空封严二级盘零件材料为GH4720Li合金，该合金是一种高性能且以钼、钨、铬、钴固溶强化的高强度和耐腐蚀的新型镍基变形高温合金，其合金化程度非常高。该合金中的Ti和Al元素含量之和高达7.5%，合金中的主要强化相 γ' 体积分数超过40%，因此具有优异的高温力学性能和较高的使用温度，其主要用于在650~750℃使用的航空发动机封严二级盘（见图1）和涡轮盘，以及在短时间内用于在900℃使用的涡轮盘零件中。

GH4720Li合金是在GH4720的基础上改良设计的，GH4720Li合金通过降低高温合金中Co、C和

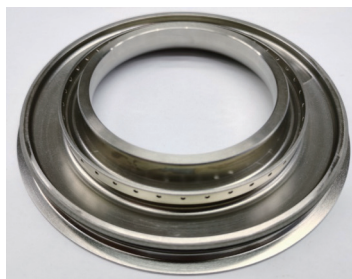


图1 航空封严二级盘

B的含量而发展起来的。Co含量的降低使合金析出拓扑密堆相的倾向性下降，降低间隙元素C和B含量，使晶界上链状碳化物和硼化物的数量逐渐减少，使合金的组织稳定性及综合力学性能得到提高。GH4720Li合金作为航空封严二级盘常用材料，其高温下的抗氧化性能强，是设计制造发动机的优良材料，其合金化学成分见表1。

表1 GH4720Li合金化学成分（质量分数）（%）

C	Cr	Ti	Al	W	Zr	Co	Mo	B	Fe	Ni
0.019	15.90	5.30	2.50	1.28	0.049	14.47	3.03	0.014	0.10	其余

GH4720Li是一种高强度、高硬度镍基变形高温合金，在650~750℃高温环境下性能稳定。经过试切试验，分析GH4720Li在切削时有以下特点。

（1）材料弹性变形大 零件在加工时，切屑在刀具前刀面上的滑动摩擦大，加工后零件表面回弹量大，刀具后刀面与零件摩擦严重，加工后零件表面质量较差。

(2) 材料黏性大 切削过程中不易断屑, 切屑缠绕使切削热不能及时散去, 且易划伤零件已加工表面。

(3) 材料的导热性差 切削区域温度高, 加工后材料易产生塑性变形。

2.2 零件结构分析

航空封严二级盘零件为旋转体结构, 零件最大外径尺寸 $\phi 144.4\text{mm}$, 内孔尺寸 $\phi 75.75\text{mm}$, 总高度 19.2mm , 壁厚尺寸 $1.0\sim 1.5\text{mm}$, 零件前端中部腹板上沿径向均布40个孔, 孔径 $1.7^{+0.1}_{-0}\text{mm}$, 孔位置度 0.1mm (见图2)。二级盘的前端有两处不规则的端面槽, 端面槽沿着与径向成不同角度的轴线分别向内、外延伸形成上、下凹槽, 二级盘后端由端面槽与圆弧面组成。在孔加工时, 零件定位面及支撑面较小, 定位面与压紧面可靠性差, 定位装夹稳定性差, 使用夹具装夹时, 零件受压板的压紧力与零件内部支撑力相互作用, 使零件内部产生内应力, 加工后零件变形, 孔加工精度较差。

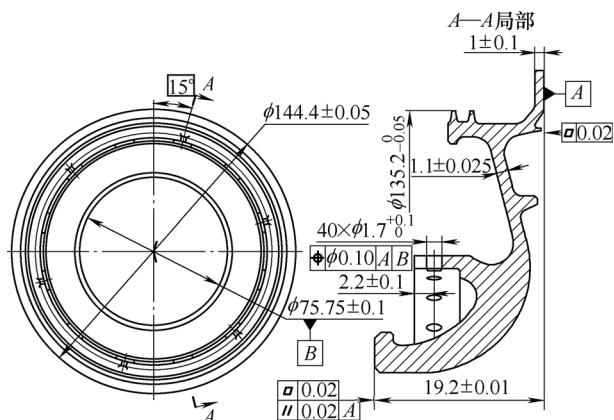


图2 孔及圆弧槽示意

封严二级盘径向孔所在外圆距离封严齿顶距离 20mm , 使用标准钻头及扩孔刀加工时, 小直径刀具悬伸较长, 刀具在切削过程中由于跳动较大, 导致加工后孔表面质量较差、孔径公差及位置精度较难保证。刀具切削时跳动过大, 会加速钻尖磨损, 缩短刀具使用寿命, 甚至导致断刀, 严重影响零件孔加工合格率及稳定性。

2.3 零件特征说明

(1) 精度高 孔径公差严, 位置精度要求较高。

(2) 定位结构差 定位面及压紧面较小, 定位

可靠性差, 定位装夹稳定性差。

(3) 加工工艺性差 孔加工刀具悬伸长, 加工后孔精度差, 易断刀。

3 零件定位装夹

3.1 夹具与夹紧力

控制定位装夹变形是保证封严二级盘零件孔加工质量的关键。通过对二级盘零件结构尺寸及变形进行分析, 在众多的孔加工工艺方案中, 如钻床钻孔、电火花加工孔和加工中心钻孔等, 装夹方案均是影响孔加工质量的重要因素。夹具与零件定位面及压紧面的选择对零件加工质量有很大影响, 目前在夹具设计时普遍存在的问题是: 设计随意性大、规范性和可替换性差; 夹具设计资源没有得到有效管理, 不同夹具之间通用性较差; 夹具设计质量取决于个人的经验技术, 夹具设计后优化较少。因此, 二级盘零件夹具的设计质量是影响孔加工工艺的关键因素。

封严二级盘在定位时, 在不同的夹具定位结构、压紧点布局、夹紧力的情况下进行定位装夹, 产生的装夹变形完全不同, 压紧时在零件表面产生的残余应力也不相同, 不同的残余应力会使零件产生不规则的变形。夹具压板在零件外围的分布情况构成了夹具的压紧力布局; 夹紧压板对零件施加用于压紧零件、使零件在切削时保持稳定的作用力; 夹具布局 and 夹紧力相互影响, 共同作用于被加工的零件, 制约并影响零件的加工质量。

对于结构相似的零件, 加工工艺方法相同时, 若夹具设计不同, 其所需的夹紧力大小也不相同。在不同的夹具设计和夹紧力作用下, 零件压紧时所受外力不同, 导致零件的定位刚性也不相同, 加工后零件的变形量则不同, 导致产生不同的加工误差。选择合理的夹具布局和适当的夹紧力, 使零件加工变形小, 可提高加工质量; 相反则会增大加工变形。所以, 夹具结构的合理性和夹紧力的大小是夹具设计的重要方面。

3.2 夹具设计及结构

封严二级盘零件是航空发动机的重要组成部分, 其结构特点是尺寸小、型面复杂、壁薄且零件定位装夹繁琐。对于涉及孔加工的零件, 其定位方法很多, 但对于型面复杂、零件定位面刚性差及定

位面与夹具很难形成有效接触的零件，常规定位夹具无法对零件进行定位，由于缺乏稳定可靠的定位夹紧面，零件在加工时悬空，受力不均衡，零件薄壁部分在加工后会发生翘曲变形，零件孔在加工后位置精度差，这种常规夹具定位可靠性差，夹具对零件无法进行有效夹紧，零件在加工后变形无法修复。因此，为提高导流封严盘零件小孔加工的可靠性，消除零件定位时的不稳定因素，设计了用于二级盘孔加工的辅助支撑夹具，确定合理的定位面及支撑面，从而达到改善定位状态、提高零件定位精度和零件孔加工合格率的目的。

通过对封严二级盘零件结构及尺寸进行分析，设计了一种用于封严二级盘零件孔加工的辅助支撑夹具，在零件圆弧定位部分设置了浮动环，有效地提高了零件的整体刚性。通过设置“弓”形压板，既保证了零件夹紧的可靠性，又缩小了夹具外部结构尺寸，避免钻头在钻孔加工时与夹具干涉，“弓”形压板较普通的平压板节省空间，加工小孔时，刀具可最大程度地接近被加工工件，刀柄距离零件越近，可设计的刀具刚性越好，如图3所示。

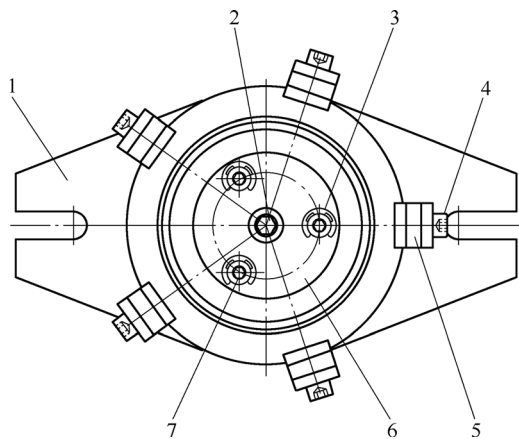


图3 封严二级盘零件孔加工辅助支撑夹具

1—底座 2、4、7—内六角圆柱头螺钉 3—开口垫圈
5—“弓”形压板 6—压盖

封严二级盘小孔加工的定位支撑夹具设有夹具底座，底座两端分别设置“U”形槽；夹具底座中心设置圆柱形套筒，套筒上端沿圆周方向设置环形槽，环形槽中沿底座的中心均匀设置联接孔，圆柱形套筒沿径向均匀设置螺纹底孔；夹具底座上端中心位置设计通孔，且上端沿周向均匀分布螺纹底孔。

定位支撑夹具底座上端环形槽中设置浮动环，浮动环的下端设置支撑销，支撑销穿设在联接孔中，支撑销的下端与支撑板联接，浮动环上放置零件。所述夹具底座上端面设置压盖，压盖上穿设有内六角圆柱头螺钉，所述螺钉与压盖中间穿设开口垫圈，如图4所示。

夹具底座沿径向设置压板，压板中间穿设有内六角圆柱头螺钉，所述压盖中心穿设内六角圆柱头螺钉，内六角圆柱头螺钉的另一端与支撑板联接，内六角圆柱头螺钉的下端设置球面垫圈和六角薄螺母。

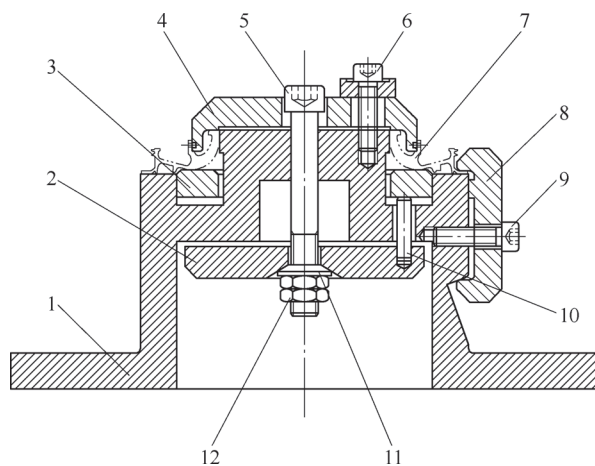


图4 定位支撑夹具

1—底座 2—支撑板 3—浮动环 4—压盖
5、6、9—内六角圆柱头螺钉 7—零件 8—“弓”形压板
10—支撑销 11—球面垫圈 12—六角薄螺母

夹具底座与圆柱形套筒为一体化设计，螺纹底孔和联接孔设置于同心的圆周上，其特征在于：螺纹底孔设置3处，联接孔设置3处。所述的开口垫圈设置3个，螺钉设置3个。支撑销设置3个，压板设置5个，内六角圆柱头螺钉设置5个，六角薄螺母设置2个。内六角圆柱头螺钉穿设于支撑板的中心孔，其末端与球面垫圈及六角薄螺母联接。

3.3 “弓”形压板及辅助支撑

(1) 工作原理介绍 通过设置“弓”形压板，缩小了夹具整体外部结构的尺寸，压紧“弓”形压板前，拧紧螺钉，螺钉受力 F_1 带动“弓”形压板沿 S_1 方向向夹具中心位置移动，压板下方与夹具接触处为角度斜面，压板沿 S_1 方向移动的同时沿 S_2 方向斜向下滑动，进一步带动“弓”形压板沿 S_3 方向向下移动，压板与零件接触面受力向下沿 S_4 压紧零

件，如图5所示。

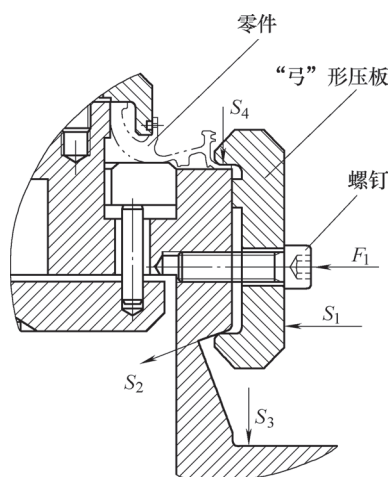


图5 “弓”形压板工作原理

“弓”形压板用压紧螺钉压紧时，在夹具本体上设置与“弓”形压板配合的凹槽，“弓”形压板的宽度略窄于凹槽的宽度，压紧螺钉时，“弓”形压板的下端被限制在凹槽中，可以防止压板绕凸起转动导致脱离工件，提高“弓”形压板压紧的稳定性，如图6所示。

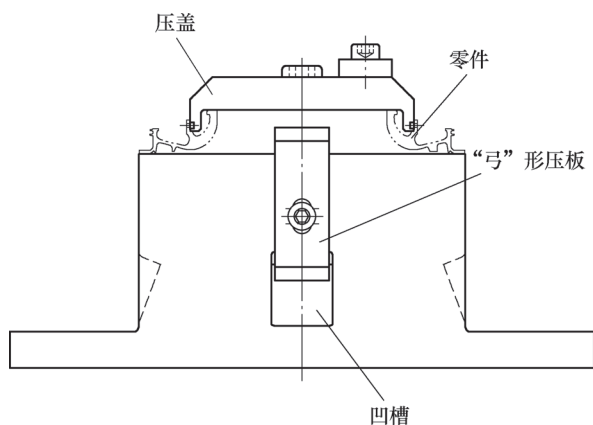


图6 “弓”形压板定位

通过设置辅助支撑，拧紧内六角圆柱头螺钉（见图7），螺钉沿 T_1 方向向上拉紧螺杆，螺钉下方通过设置球面垫圈和六角薄螺母并与支撑板联接，螺杆拉动支撑板沿 T_2 方向向上移动，支撑板上设置了3处支撑销，支撑销受力顶起浮动环，使浮动环沿 T_3 方向支撑零件下端，对零件形成辅助支撑作用。辅助支撑使用时，螺钉末端的两个六角薄螺母相互锁紧，球面垫圈为活动垫圈，垫圈与支撑板的配合面做研磨处理并涂覆润滑油，支撑销沿周向设置3

处，可以防止螺钉转动时支撑板整体转动，提高零件定位精度及稳定性。

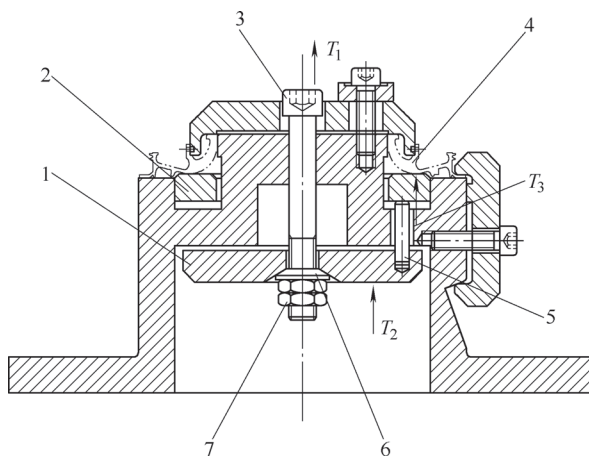


图7 辅助支撑工作原理

1—支撑板 2—浮动环 3—内六角圆柱头螺钉 4—零件
5—支撑销 6—球面垫圈 7—六角薄螺母

(2) 夹具使用方法 ①将夹具底座放在数控加工中心工作台上，用螺钉穿过夹具底座两端设置的开口“U”形槽，将夹具底座固定在工作台上。②安装航空封严二级盘零件时，将零件放置在浮动环上，转动内六角圆柱头螺钉，拉动支撑板向上移动，支撑板带动3个支撑销向上移动，支撑销将浮动环顶起，使浮动环的上端定位面与零件的下端定位面贴合。③依次安装“弓”形压板，安装时，将压板的上端定位面压在零件的端面上，压板的下端与圆柱形套筒的“V”形槽贴合，拧紧内六角圆柱头螺钉，压板受力压紧零件。④安装压盖，压盖的下端定位面与封严二级盘上端面贴合，分别安装3处开口垫圈及3处内六角圆柱头螺钉，拧紧内六角圆柱头螺钉，使压盖固定。⑤安装刀具，加工零件的径向小孔。

(3) 夹具使用注意事项 “弓”形压板压紧时，首先应以较小压紧力将压板依次固定，再使用合适的压紧力将压板压紧，避免直接压紧压板导致零件受力不均而产生压紧变形。

使用扳手拧紧螺钉时，可使用扭矩扳手，扳手预紧力选择 $5\text{N}\cdot\text{m}$ ，5处“弓”形压板的压紧力应保持一致。

使用辅助支撑时，施加在内六角圆柱头螺钉上的拉紧力应适当，以浮动环接触零件下端圆弧面为宜，实际操作时，可在零件小端面处压上杠杆百分

表, 调整辅助支撑时, 应控制零件小端面受力后变化量 $\leq 0.005\text{mm}$ 。

3.4 定位夹具的优点

与常规定位夹具相比, 封严二级盘小孔加工的定位支撑夹具具有以下优点。

1) 夹具通过设置可调整的浮动环, 通过转动内六角圆柱头螺钉, 使浮动环的位置上、下调整, 以适应不同导流封严盘零件的定位要求。调整浮动环后, 二级盘零件下端面与浮动环上端面贴合, 以此提高零件自身刚性, 消除或减弱零件在压紧状态下因刚性不足产生的压紧变形, 提高浮动环与零件的配合精度。

2) 夹具通过设置“弓”形压板, 缩小了夹具整体外部结构的尺寸, 使压板向下压紧零件, 保证了零件夹紧的可靠性, 避免钻头在钻孔加工时与夹具干涉, 夹具节约的空间, 为刀具结构优化奠定了基础。

3) 夹具通过设置压盖, 压盖外圆与二级盘零件的孔壁内侧贴合, 提高了零件孔壁的刚性, 盖板外圆处设置有空刀槽, 避免钻头加工时与压盖干涉, 利于孔加工排屑。

4 孔加工工艺方法

4.1 钻孔加工

按通常的概念, 深孔是指长径比 $L/D > 5 \sim 20$ 的孔, 对于封严二级盘零件, 孔的有效深度只有 2mm , 但由于零件结构限制, 加工刀具需伸长至 20mm , 否则刀柄会与零件外圆处封严齿顶干涉。零件孔加工采用麻花钻, 在普通钻床或加工中心上进行加工。零件孔加工属于半封闭式切削, 在加工孔时主要存在断屑难、排屑不畅、散热差和导向不稳定等问题, 在使用较长的刀具加工二级盘零件的孔时表现得更为明显, 主要表现在以下几个方面: 刀具直径小, 钻孔时不能目视观察刀具的切削情况, 钻孔过程中只能通过听声音、观察切屑排出情况、观察仪表负载的变化及刀具振动等情况, 来判断钻孔加工过程是否正常; 钻头的长径比较大, 刀杆细而长, 刀具刚性差, 高速旋转后跳动大, 刀具振动较大, 钻孔时会偏斜, 加工后, 孔的尺寸精度和表面粗糙度较差; 切屑排出困难, 刀具伸入二级盘零件端面槽内, 切削液无法直接浇注到切削部

位, 加工时产生的切屑不易排出, 导致切削力增大, 刀具磨损较快, 缩短刀具寿命; 切削时散热较差, 刀具切削环境差; 为了使切削断屑, 刀具设计有分屑、断屑槽, 刀具设计制造成本高。

4.2 刀具方案

封严二级盘零件孔径尺寸 $1.7^{+0.1}_{-0.1}\text{mm}$, 钻孔选用 $\phi 1.73\text{mm}$ 直柄麻花钻头, 刀具长度 20mm (见图8a)。由于刀柄较细, 刀具安装在机床上跳动 $0.03 \sim 0.05\text{mm}$, 钻孔加工时, 由于刀具跳动较大, 导致钻尖快速磨损, 钻头实际使用寿命短于设计使用寿命, 个别钻头在加工时出现断刀现象, 影响零件孔加工合格率, 断刀后重新装刀、校刀使孔加工效率降低。

分析封严二级盘零件结构尺寸认为, 在零件使用专用定位支撑夹具后, 零件定位刚性较好, 零件定位后变形较小, 可充分利用零件结构, 设计刚性较好的变径加工刀具。变径刀具 (见图8b) 前端切削刃部分直径为 1.73mm , 有效切削长度 5mm , 刀具后端直径为 2.4mm , 与前端带切削刃部分圆滑过渡, 避免刀具制造及加工时产生的应力集中使刀具断裂。为最大程度缩短刀具悬伸部分的长度, 装夹选择锥形刀柄, 锥形前端刀柄与零件封严齿顶保持最小 0.5mm 间隙, 变径刀具后端 2.4mm 直径与二级盘端面间隙 0.1mm 。变径刀具由于直径较大, 刀具悬伸部分较短, 刀具制造及安装精度提高, 刀具安装在机床上跳动可控制在 0.01mm 以内。钻头加工时, 刀具切削稳定, 刀具寿命满足设计使用寿命, 孔加工后尺寸满足要求。

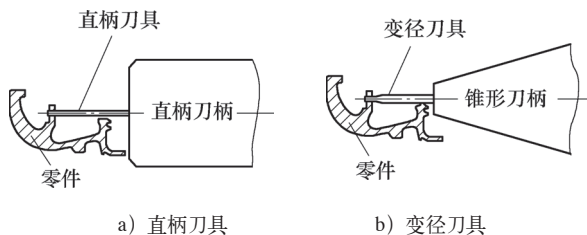


图8 刀具加工示意

4.3 参数试验

根据封严二级盘孔加工工艺和刀具方案, 选用株洲钻石生产的 $\phi 1.73\text{mm}$ 硬质合金涂层变径钻头, 进行钻孔加工试验, 钻孔加工表面粗糙度值应满足 $Ra = 1.6\mu\text{m}$ 。

机床选用菲迪亚HS664带转台五轴加工中

心，最高额定转速为20000r/min，最高进给速度为8000mm/min，主轴功率为65kW，刀具夹持使用锥形刀柄。钻孔加工参数试验结果见表2。

表2 $\phi 1.73\text{mm}$ 钻头切削试验

因素			试验结果	
主轴转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	每分钟进给量 f_z/mm	线速度 $v/(\text{m}/\text{min})$	40孔加工时间 t/min	表面质量
2000	10	11	28	✓
3000	10	16	28	✓
4000	10	22	28	✓
5000	10	27	28	✓
6000	10	33	28	×
7000	10	38	28	×
8000	10	43	28	×
2000	15	11	19	✓
3000	15	16	19	✓
4000	15	22	19	✓
5000	15	27	19	✓
6000	15	33	19	×
7000	15	38	19	×
8000	15	43	19	×
2000	20	11	14	部分×
3000	20	16	14	部分×
4000	20	22	14	×
5000	20	27	14	×
6000	20	33	14	×
7000	20	38	14	×
8000	20	43	14	×

注：✓为表面粗糙度满足图样要求，×为表面粗糙度不满足图样要求。

现场对同批次二级盘零件按照每7件为一组进行钻孔试验，通过对不同加工参数、方法加工后的零件端面变形及孔表面粗糙度进行统计，对比钻孔加工前后的零件端面的变形量及加工后的合格率，在使用专用定位支撑夹具后，零件加工前、后变形均满足要求，钻孔切削速度较低时，加工后孔表面质量较好，切削进给速度越高，孔加工效率越高，但加工后孔表面质量不稳定。

通过试验得出满足孔加工表面粗糙度要求，加工时间最短的切削加工参数为：主轴转速 $n=5000\text{ r}/\text{min}$ ，每分钟进给量 $f_z=15\text{ mm}$ ，线速度 $v=27\text{ m}/\text{min}$ 。

5 结束语

通过对航空封严二级盘零件材料及结构特点进行分析，选择稳定、可靠的定位面与压紧面，阐述了定位夹具与压紧力的关系，设计了适用于零件孔加工的辅助支撑夹具，优化了刀具方案及孔加工工艺方法，并对钻孔加工参数进行了试验，提出了适用于航空封严二级盘孔的加工工艺方法，确定了满足孔加工要求的加工参数。

参考文献：

- [1] 赵敬安. 基于复杂薄壁件综合误差控制的装夹优化方法研究[D]. 上海：东华大学，2010.
- [2] 周孝伦，张卫红，秦国华，等. 基于遗传算法的夹具布局与夹紧力同步优化[J]. 西安：机械科学与技术，2003（3）：339-342.
- [3] 孔令飞. 铜冷却壁深孔加工技术的研究[D]. 西安：西安理工大学，2005.

MW 20210327

欢迎关注微信公众号：机工机床世界

“机工机床世界”主要为广大制造企业和相关技术及操作人员介绍机床产品、机床技术、机床应用、机床使用技巧和数控机床等内容。

扫描二维码即可关注！

