

整体盘轴零件优质高效加工技术

Effective and Excellent Manufacturing Technology of Entire Disc-Shaft Component

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 姜雪梅 潘玉良 陈亚莉



姜雪梅

研究员级高级工程师,从事航空发动机盘轴制造技术研究。在国家级刊物发表的主要论文有:《高速拉削工艺的研究与应用》、《粉末高温合金涡轮盘机械加工技术研究》、《空心长轴深孔加工工艺研究》等。

整体盘轴零件结构及加工工艺性分析

整体盘轴零件是典型的盘轴一体结构的零件,具有结构复杂、尺寸精度高、薄壁刚性差、材料难加工等特性。其主要结构:大端是轮盘结构,具有轮缘、辐板、轮毂、盘心孔,在轮缘上具有安装叶片的燕尾型榫槽,辐板处有48个精密螺栓联接孔,位置度要求0.05mm,零件轴颈端外型面为薄壁斜锥壁结构,壁厚仅为2.7~3.1mm,轴身上带有螺纹、萆

在整体盘轴零件加工中引入车铣复合加工技术,替代传统的加工工艺,实现在一台设备上通过二次装夹,完成全部的车、铣、钻、扩、镗、铰加工,大幅度地提高零件加工质量和加工效率,有效地解决盘轴零件加工中断屑、打刀、振动等工艺难题,整体是亟待攻克解决的技术关键问题。

齿、外花键、径向斜孔等,轴身内型面有球头凹槽、锁片槽等。零件 ϕA 、 ϕB 、 ϕC 等直径配合表面尺寸公差为0.013~0.05mm,跳动、平行度、垂直度等形位公差为0.01~0.013mm,整体盘轴零件最突出的特点是轴颈锥壁与轮盘的辐板形成半封闭深型腔结构,轴向开口宽度小,径向深度大,敞开性差,而且为多圆弧转接,加工过程中刀具进退困难,容易与零件产生碰撞、干涉,加工难度极大(图1)。特别是深型腔粗加工时,零件完全是实心结构,加工余量更大,这对加工非常不利。按传统的加工工艺整体盘轴零件加工不仅需要在数控车床、坐标镗床、五坐标加工中心等多种设备上完成,加工周期长、效率低,而且采用普通的机夹刀具进行深腔加工,易造成切屑缠绕、难以断屑、打刀等问题,加工质量不稳定。

在整体盘轴零件加工中引入车

铣复合加工技术,替代传统的加工工艺,实现在一台设备上通过二次装夹,完成全部的车、铣、钻、扩、镗、铰加工,大幅度地提高零件加工质量和加工效率,有效地解决盘轴零件加工中断屑、打刀、振动等工艺难题,是亟待攻克解决的技术关键问题。

车铣复合加工工艺方案设计

复合加工技术主要有2种不同的类型,一种是以能量或运动方式为基础的不同加工方法的复合,另一种是以工序集中原则为基础的、以机械加工工艺为主的复合,这类复合加工技术是指在一台设备上、一次装夹后,能够完成车、铣、钻、镗、铰、攻丝等多种加工要求。车铣复合加工就是近年来快速发展的高效复合加工方式之一,其最突出的特点是零件加工工序集中、一次装夹实现多工序复合加工,大幅度地缩短零件的加工周

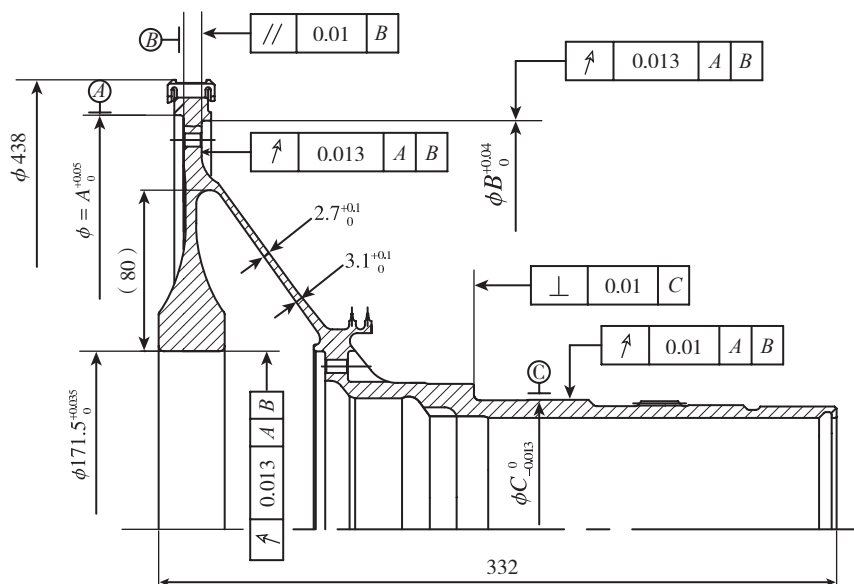


图1 整体盘轴零件简图

期,提高零件的加工精度。因此科学合理的优化设计车铣复合加工工艺路线、工艺方案是提高效率和加工精度的关键。

整体盘轴零件材料为TC17,毛坯采用模锻件,热处理状态:固溶+时效,HB≥388。通过对零件进行结构和工艺性分析,考虑到零件的特殊结构及材料的加工特点等因素,设计了全新的车铣复合加工工艺技术,使其加工过程高度集成化。为减少零件加工变形,采用专用夹具,轴向定位、压紧的方式,完成零件定位装夹,根据零件的装夹位置和切削时的受力情况,可增加辅助支撑,以提高零件刚性。为保证 ϕA 、 ϕB 两

侧配合内孔和端面的跳动、平行度要求(图1),工艺方案是采用一次装夹找正,同时完成零件两侧配合内孔和端面的加工。在零件半封闭狭窄深型腔加工中,采用了高压内冷刀具、摆动车削技术及分层切削的加工方式,有效地解决了整体盘轴零件加工中断屑、打刀、振动等工艺难题。

优化改进后新的工艺方案用4道工序完成了传统工艺24道工序的加工内容,通过二次装夹,完成全部车、

铣、钻、扩、镗、铰精加工。采用新工艺优化后的工艺路线与原工艺对比情况见表1。

刀具结构及刀具材料的优化设计

1 刀具结构优化设计

整体盘轴零件由于其特殊的深腔结构,且从超声波探伤到成品有较大的加工余量,为解决半封闭深腔加工中由于深腔敞开性差,加工中盲视下操作、难以断屑、易打刀等瓶颈问题,刀具结构设计成为加工中的关键。经充分的研究论证,高压内冷结构刀具属于首选方案。以加工零件大端为例,确定的刀具方案见图2。

图2中刀具“T2”是最为关键

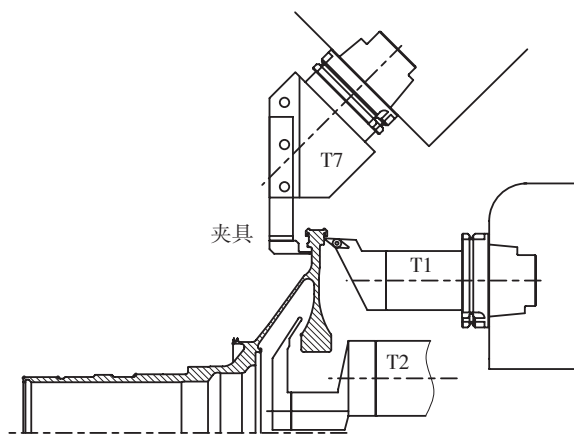


图2 零件大端加工刀具示意图

的一种,带有“拐脖”结构,用于加工零件的半封闭深型腔,为攻克解决深腔加工中的断屑问题,T2设计为20MPa的高压内冷刀具,刀具由刀座、转接柄和刀板3部分组成,各部分都带有高压冷却孔。刀具冷却液喷口是经过特殊设计和精密制造,通过机床自带的高压冷却泵由刀具接口中心供应冷却液。切削时当切屑沿前刀面进行卷屑的瞬间,强力高压水将切削产生的热量迅速带走,切屑由于极速冷却产生脆裂,同时高压冷却水在刀具前刀面和切屑之间形成楔状水柱,通过20MPa高压压力形成强大的冲击力,从而实现了高压靶

表1 采用新工艺与原工艺工序前后对比

原工序	优化合并内容	合并后工序
No.20粗车大端、No.30粗车内腔、No.35半精车外圆、No.45半精车内腔(共4道工序)	将原4道车加工工序合并为1道工序	No.20细车大端
No.25粗车小端、No.40半精车小端和内孔(共2道工序)	将原2道车加工工序合并为1道工序	No.25细车小端
No.70~No.100精车加工、No.120钻铰孔、No.125~No.130孔边倒圆去毛刺、No.170~No.175钻铰端面孔、No.205铣4处球头凹槽、No.215孔边倒圆(共12道工序)	将原车、铣、钻等共12道工序合并为1道工序	No.55精加工大端
No.90~No.95精车外圆型面、No.105~No.110精车内孔及螺纹、No.180钻铰油孔、No.200扩6-φ15凹槽(共6道工序)	将原精车、钻铰孔、扩凹槽孔等共6道工序合并为1道工序	No.65精加工小端

式内冷断屑效果,有效地解决了半封闭深腔加工中的技术关键。

2 刀具材料

粗加工时首先在国产刀具材料中进行选择,根据以往加工经验,在粗加工时选用了 YD15 硬质合金材料刀具。

精车加工中综合考虑到加工质量、加工效率和经济性,选用进口刀具进行了切削试验。先后选择了涂层硬质合金及非涂层硬质合金等材料的刀具进行了试验,试验结果表明涂层硬质合金刀具加工效果最好,性价比高。

典型结构的加工方法及加工参数

1 半精车内腔

半精车内腔是零件加工中的难点和关键,此前零件由于需要进行超声波探伤,超声波探伤要求单边 3.5mm 左右的盲区余量,并且要求零件形状尽量简单,这样就造成零件的外轮廓直径方向有 7mm 左右的加工余量,一些特殊部位如:典型的深腔部位,完全是实心结构,加工余量更大,增大了加工难度。

半精车内腔采用 3 种刀片,应用高压内冷提高冷却效果,使切削线速度达到 50~60m/min,为精加工提供了均匀的余量分布。具体如下:

(1)粗开深腔:采用 T2 高压内冷刀具,安装 6mm 宽切刀,垂直进退刀方式顺次切入,将深腔单边切入 36mm,使深腔逐步开阔,由于切削力较大,粗开深腔采用 55m/min 的恒线速度切削,即保证了切削效率,又保证了切削的顺畅。

(2)深扎内腔:深扎内腔时安装 4mm 宽切刀垂直进退刀方式切削,由于内腔较深,刀具悬臂很长,刚性较差,切削时不易进行观察,切削参数不宜设置过高,经多次切削试验,每层切深确定为 1.8mm,线速度为 50m/min,进给率为 0.07~0.12mm/r。

(3)车内腔辐板:如前所述车内腔辐板采用了高压内冷结构的刀具 T2,安装圆头刀片,为了提高加工质量,避免刀具在转接处切削时包络过大引起刀具振动,辐板车削采用了轴向分层切削方式,每层切削深度控制在 0.5mm 以内,刀具冷却方式为 20MPa 高压内冷,线速度 55~60m/min,加工示意图见图 3。

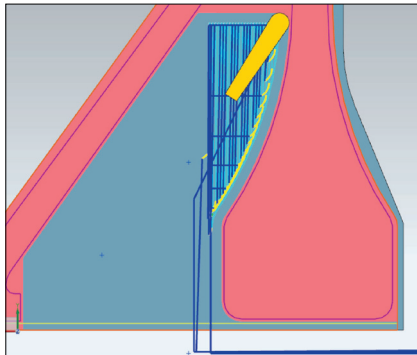


图3 内腔辐板轴向分层切削

(4)车深腔根部:深腔圆弧根部加工与辐板加工刀具相同,但走刀轨迹和切削方式为径向分层切削,同时增加了多个退刀以利于排屑,程序设计中在圆弧最高处进行接刀,保证了切削的可达性,其加工示意图见图 4。

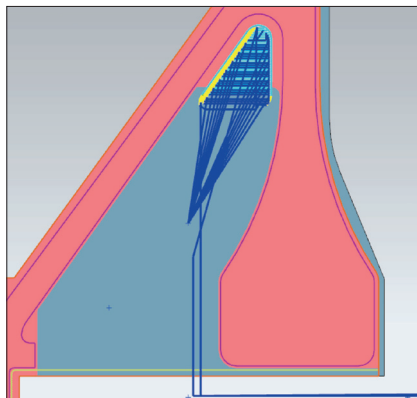
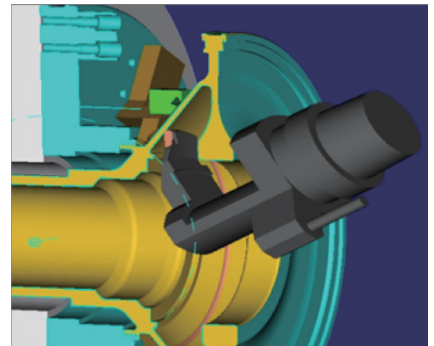


图4 径向分层切削加工深腔根部

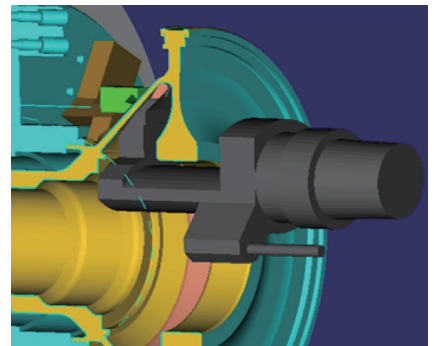
2 精车内腔

精车内腔同样采用 T2 高压内冷刀具,安装 $\phi 6$ 圆头刀片,辐板和深腔根部分别采用了轴向分层切削、径向分层切削的加工方式,有效避免了刀具振动。程序设计中应用了 B 轴摆动车削加工技术和恒定线速度

切削,实现了 X、Z、B 轴 3 轴联动车削,满足了复杂内腔型面精加工需要,使精车加工用同一把刀具加工更多的型面,减少了换刀、接刀次数、避免接刀痕迹,保证了零件加工质量。刀具摆动车削见图 5。



(a) 刀具摆以 $B=60^\circ$ 切入



(b) 刀具摆动加工到 $B=90^\circ$

图5 B轴摆动车削加工示意图

3 加工参数的优化确定

(1) 切削速度。

采用涂层硬质合金刀具,切削钛合金的参考线速度可达 70m/min,在实际加工过程中,充分考虑到零件的特殊结构、数控程序、切削方式和刀具使用寿命等综合因素的影响,采用 55~65m/min 的线速度为宜。

(2) 切削深度。

切削深度对刀具的寿命和加工效率影响较大。在半精车加工时,切削深度选择为 0.5~1.2mm,在精车加工时,切削深度选择为 0.1~0.3mm,加工结果满足设计图纸要求。

(3) 进给量。

进给量对零件表面粗糙度影响较大,半精车和精车要求的表面粗糙度

表2 刀尖圆角半径与进给量参考值对照

刀尖圆角 /mm	R0.4	R0.8	R1.5	R2	R3	R4
进给量 / (mm·r ⁻¹)	0.1	0.1~0.15	0.1~0.2	0.15~0.2	0.25	0.25

值均为 $R_a 1.60 \mu\text{m}$, 采用不同的刀尖圆角半径, 进给量也不同, 表 2 是不同刀尖圆角半径时进给量的参考值。

4 孔系结构钻、铣加工

零件中 $48-\phi 6.3^{+0.05}_0$ 、位置度 0.05 的配合孔; $6-\phi 5.9^{+0.05}_0$ 、位置度 0.05 等多处精密配合孔, 以及 $6-\phi 15^{+0.2}_0$ 、位置度 0.15 的凹槽孔, 都是采用与精车加工一次装夹、在一道工序中完成的。通过打中心孔、钻孔、扩孔、镗孔、铰孔的工艺加工方案, 保证了精密孔尺寸精度及位置公差要求。 $6-\phi 15$ 凹槽孔应用了 3 种规格大长径比的端铣刀, 采用铣削方式消除了加工表面的振纹, 保证了设计要求。铣削 4 个 $\phi 13.5$ 球头凹槽时, 如采用满侧刃切削, 会使零件和刀具产生振动, 经试验加工调整为分层铣削方式, 设计圆弧轨迹的走刀路线, 每层切削 0.2~0.25mm, 进给 20~25mm/min, 主轴转速 1800~2100r/min, 满足了零件的设计要求。

加工中出现的问题及改进措施

1 深腔型面加工

(1) 冷却和排屑。

零件深腔加工时冷却和排屑非常困难, 冷却不充分导致刀片快速磨损, 引起切削失效。排屑困难导致切屑缠绕刀柄, 容易使零件表面形成严重缺陷和打刀, 所以深腔加工的关键就是冷却和排屑。为了解决这一难题, 主要在两个方面进行了加工试验, 第一是使用高压内冷刀具, 20MPa 的冷却压力使切削液顺利的喷射到刀具前刀面上, 完成冷却和高压断屑; 第二是试验切削参数, 在切削深度和进给量上进行调整和优化, 当切削深度为 0.25~0.3mm、进给量

为 0.1~0.15mm/r 时, 形成的切屑呈碎鳞片状, 这使切削能够顺利进行, 刀片的磨损也大大降低。

(2) 深腔型面车加工容易产生碰撞和打刀。

深腔型面加工其刀具结构、走刀路线、切削用量的选择对保证加工质量非常重要, 必须确定合理的走刀轨迹、优化进刀方式。在加工深腔型面时, 为避免刀具与辐板处尺寸 $R76$ 发生刮碰, 采用圆弧进刀, 保证了接刀处的圆滑转接。

切削用量选择不恰当, 也容易造成打刀现象, 在试验件深腔加工中, 深腔根部排屑困难, 由于加工时进刀量大, 根部切削时刀片包络面积大, 导致切削力超过刀具所能承受的范围, 从而引起刀具重大变形, 使刀板与待切削表面发生干涉, 引起打刀, 将每次循环加工中的进刀深度调整为 0.5mm, 并优化了数控走刀轨迹, 杜绝了问题的再次发生。

2 基准面加工

整体盘轴零件前后两侧配合内孔 ϕA 、 ϕB 和端面是零件重要的基准面, 前后端面的平面度和平行度均为 0.01mm, 前后配合内孔和端面的跳动要求为 0.013mm (图 1), 为了保证加工质量, 工艺方案是将前后基准安排在一次装夹中完成加工, 安装夹具时, 先将夹具基准端面和机床花盘端面修整平滑, 利用盘上连接孔安装压紧螺栓时先进行预拧紧, 拧紧力适中, 当夹具找正后, 进行两两对点渐进压紧, 同时检查外圆的跳动, 避免由于一点用力过大导致已找正的平面出现异常。零件安装时, 同样采用渐进压紧方式, 避免产生压痕和零件压紧变形。

3 部分尺寸产生偏离

(1) 深腔斜面点尺寸: 在摆动精车加工深腔过程中, 切削时产生让刀, 导致斜面点尺寸产生 0.02mm 的偏离。通过更换刀片材料并调整刀尖圆角半径, 提高了刀片的切削性能; 同时将程序进行分段处理, 并进行多次光整车削加工, 降低了让刀的影响, 消除了尺寸偏离。

(2) $6-\phi 15$ 凹槽孔位置度公差偏离: 在进行试验件加工中, 由于采用了直径 $\phi 15$ 、底端圆角为 R_1 的加长刀具直接加工 $\phi 15$ 凹槽孔, 导致加工中产生让刀, 引起位置度的偏差, 调整工艺方案后, 增加了 $\phi 10$ 铣刀扩孔、 $\phi 15$ 直角铣刀粗加工 2 个工步, 使每个工步切削量适当降低, 缩短了刀具和加长杆的长度, 提高了切削系统刚性, 从而减小切削振刀和刀具侧滑, 保证了零件加工质量和位置度要求。

应用效果和结论

航空产品零件加工工艺过程复杂、精度要求高, 加工周期长。为了提高航空发动机零件的加工效率和加工质量, 工程技术人员一直在寻求更为高效精密的加工工艺方法。车铣复合加工技术为提高航空发动机零件的加工精度和加工效率提供了一种有效解决方案。

通过将车铣复合加工技术在整体盘轴零件上的有效应用, 验证了该项技术在复杂结构发动机典型零件加工中具有的优势和特点, 实现了在一台设备上完成多工序的高效集成化加工。通过对工艺方案、数控程序、切削参数和切削方式的优化和固化, 已形成典型加工工艺, 并推广到同类零件生产应用中, 实现了产品合格交付, 加工效率提高了 2.5 倍以上。解决了长期以来加工周期长、呈报率高, 质量不稳定的瓶颈问题, 为复杂零件的优质高效加工提供了切实可行的技术方法, 在制造技术领域具有广阔的应用前景。 (责编 良辰)