

大直径薄壁球形阀芯加工工艺

赵 飞; 黄红耀

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 球形阀芯是液氧/煤油发动机煤油隔离阀的核心部件, 它具有大直径、薄壁、形状不规则等特点, 给加工带来极大难度, 被列入液氧/煤油发动机研制中的关键工艺技术。通过反复试验摸索, 在充分了解锻铝材质球形零件加工特点的基础上, 总结出一套粗加工、半精加工、精加工的加工工艺流程。通过优化各种参数、安排进行多次冷、热处理并采用恒切削速度进行球面精加工, 生产出了性能可靠、质量上乘的产品。

关键词: 大直径; 薄壁; 球形阀芯; 机加工

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 01-0062-06

Machining technology of thin-walled spherical valve core with large diameter

ZHAO Fei, HUANG Hong-yao

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: As a key part in the kerosene isolation valve of LOX/Kerosene engine, the spherical valve core is featured by large diameter, thin wall and irregular shape, resulting in the difficulty of machining. Thus machining of the spherical valve core is regarded as the key technology in the development of LOX/Kerosene engine. Based on the repeated tests and thorough study on machining characteristics of wrought aluminium spherical part, a rough-semifinish-finish machining process of the spherical valve core was proposed with the optimization of machining parameters. Several cold and heat treatments and spherical finish machining with constant cutting speed make the quality and performance of the final product reliable.

Keywords: large diameter; thin wall; spherical valve core; machining

0 引言

我国新型液体火箭发动机所采用的煤油隔离

阀是一种大型球阀, 入口接贮箱, 出口接发动机系统, 是液氧/煤油发动机的启动阀门, 在箭体加注后、发动机启动前起隔离燃料的作用。球形阀芯是煤油隔离阀的核心部件。

收稿日期: 2011-06-11; 修回日期: 2011-09-26

作者简介: 赵飞 (1973—), 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门加工工艺

球形阀芯的圆度和表面粗糙度对阀芯与阀座之间的密封性能至关重要,设计要求阀芯球面的圆度 0.01,表面粗糙度 $Ra0.2$,面轮廓度 0.015 mm,相对基准 A 的跳动 0.03 mm,精度要求很高,此为加工难点之一;由于煤油隔离阀体积较大,球形阀芯直径 $\Phi 200$ mm 且为中空结构,锻件毛坯,残余应力较大,此为难点之二;另外,阀芯中间通道为锥孔,最大处直径 $\Phi 154$ mm,最小处直径 $\Phi 120$ mm,在球面 $\Phi 164.5$ mm 直径处有两个 7° 的锥平面,最薄处壁厚仅有 5.25 mm,直径与壁厚比为 31.3,属于典型的薄壁零件的断续加工,装夹定位难度很大,加工变形

大,中间锥孔加工后材料应力释放导致的变形,此为难点之三。因此加工存在极大难度,被列入液氧/煤油发动机研制中的关键工艺技术进行集智攻关。

1 球形阀芯的设计状态

1.1 材料

煤油隔离阀的材料为锻铝 6A02-T6 GB/T3191-1998,其化学成分见表 1。室温力学性能见表 2。

表 1 化学成分

Tab. 1 Chemical compositions

牌号	Si	Fe	Cu	Mn 或 Cr	Mg	Zn	Ti	其他
6A02	0.5~2	0.5	0.2~0.6	0.15~0.35	0.45~0.9	0.2	0.15	0.1

表 2 室温力学性能分析

Tab. 2 Mechanical properties at room temperature

牌号	直径	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例伸长应力 σ_p /MPa	伸长率 δ_s /%
6A02	$\Phi 210$	≥ 530	≥ 430	6

1.2 设计技术要求

球形阀芯零件的主要设计要求如下:

1) $S\Phi 200 \pm 0.05$ 球面相对于基准 A 的跳动为 0.03 mm, $\Phi 169$ mm 直径处的平面相对基准 A 的垂直度为 0.05 mm, 转轴处 $\Phi 44$ mm 端面槽底面相对基准 A 的垂直度为 0.03 mm, 花键中径相对基准 A 的跳动为 0.02 mm, 花键的端面相对基准的垂直度 0.03 mm;

2) 14° 锥孔相对于基准 A-B 位置度 0.07 mm;

3) 14° 锥孔直线度 0.05 mm;

4) $S\Phi 200 \pm 0.05$ 球面的圆度 0.01 mm, 面轮廓度 0.015 mm。

内、外形加工时存在很大的装夹和加工难度,锻件存在残余应力,加工后易变形,断续车削产生的较大加工应力也使零件容易产生变形,且易产生积削瘤,这些都对零件加工表面和加工尺寸的控制有很大影响,需要在加工时采取措施予以解决和控制。

2.1 装夹方式

零件加工时首先根据零件的结构确定安装定位孔,这样才能保证零件的合理装夹、准确定位。精加工球面时必须采用一夹一顶的装夹方式。装夹力和尾座顶尖的顶紧力对薄壁零件的变形影响很大,因此控制装夹力和尾座顶尖的顶紧力成为精加工球面的关键。

1) 粗加工时由于煤油隔离阀球形阀芯采用锻造毛坯,毛坯为表面不规则圆柱实体,所以采用可自动定心、装夹力较大的三爪卡盘夹紧。

2 球形阀芯的关键技术及解决途径

煤油隔离阀球形阀芯为薄壁不规则零件,在

2) 半精加工过程中, 铣加工采用 $\Phi 116 \pm 0.2$ 孔定位, 压板压紧; 车加工以 $\Phi 149 + 0.10$ 定位, 采用花盘装夹, 压板压紧。这种装夹方式可以有效避免四爪卡盘装夹时因装夹力较大而产生的变形, 同时使装夹力分散作用在阀芯转轴处, 作用在球面上的装夹力较小, 最大限度地减小球面的变形。

3) 精加工车削内形时以 $\Phi 149_{0}^{+0.1}$ 定位, 花盘装夹; 铣加工时以 $\Phi 120_{0}^{+0.05}$ 孔定位, 组合夹具装夹; 精车球面时采用一夹一顶的装夹方式, 这样装夹可以使装夹力不直接作用在球面上, 减小球面变形。

2.2 加工刀具及程序

因为普通刀具在加工球面时不能实现刀具轨迹的象限转化, 所以不能进行球面加工。为了保证零件加工后的形位尺寸符合设计要求, 在没有专用刀具的情况下设计制造了专用 R 球形车刀, 刀具 $R_{-0.005}^0$, 前角 3° , 主后角 8° , 副后角 4° , 副偏角 2° 。选择加工精度高的精密数控车床进行精加工, 由于普通加工程序不能用于球形车刀的加工, 所以在数控车床上编写了数控车床常用的刀具补偿和恒线速切削指令程序。

2.3 热处理

由于球形阀芯是大直径中空、外形不规则的薄壁零件, 加工中冲击大、产生热量大, 零件应力释放缓慢和人工时效后锻造应力释放不完全, 导致零件在加工、周转和放置过程中产生很大的形变, 无法保证产品最终尺寸。

球形阀芯采用的材料 6A02-T6 是以镁和硅为主要合金元素并以 MgSi 相为强化相的铝合金锻造毛坯, 这种材料的 α 固溶体成分随温度变化而变化, 可用热处理方法强化, 属于热处理能强化的合金, 在高温成型过程急冷后可以达到与固溶处理相同的效果。6A02-T6 铝合金在高温成型中使第二相 θ (CuAl₂) 来不及从 α 固溶体中析出, 在室温下得到过饱和 α 固溶体。虽然固溶处理或高温成型使材料强度提高, 但组织不稳定, 有分解出强化相过渡到稳定状态的倾向, 因此在室温

下放置一定时间后或加工时, 强化和硬度会明显提高。所以 6A02-T6 铝合金在固溶处理或高温成型后需进行人工时效, 否则加工后的零件变形严重, 难以保证最终精度。

铝合金还可以进行冷处理。冷处理时造成内部组织位错网络, 使脱溶相形核更为广泛均匀, 有利于合金的强度性能和塑性, 还可以提高抗蚀性。

基于上述原因, 决定对球形阀芯采用多次热处理的方法来消除应力、稳定零件尺寸。锻造后对零件毛坯进行人工时效, 消除锻造应力; 粗加工后对零件进行人工时效, 消除粗加工时较大的加工应力, 人工时效后对零件进行冷处理, 冷处理的作用是使材料内部组织转化更充分, 组织更加稳定。半精加工后进行人工时效, 消除半精加工产生的加工应力, 冷处理稳定半精加工后零件的内部组织, 使尺寸更稳定。

针对特殊的产品结构和材料, 制定了特殊的工艺方法, 从控制装夹力、顶紧力等方面入手, 并采用多次热处理方法全面控制加工过程中的变形。

3 球形阀芯的加工工艺流程及工艺方法

基于以上分析, 确定零件加工的工艺流程如下:

锻造—人工时效—粗加工—人工时效+冷处理—半精加工—人工时效+冷处理—精加工—研磨+抛光—表面处理—抛光—检验

在确定了工艺流程后, 具体的加工设备和加工方法也有多种选择, 根据实际情况确定最优的方法和参数。

3.1 加工机床的选择

1) 机床选择。根据球形阀芯尺寸大, 圆度、面轮廓度要求高的要求, 选择了精密数控车床尤刚 TNC-300。该机床的有效加工直径 $\Phi 280$ mm, 加工长度 720 mm, 加工精度 0.008 mm, 重复定位精度 0.01 mm。机床具有刀盘直径大、强度高特点, 在加工球形表面时 x 轴和 z 轴的插

补精度高, 能够保证加工时刀具圆弧轨迹的连续性, 提高球面的轮廓度、圆度和表面质量。

2) 方案验证。为了验证机床的实际加工性能, 加工球形阀芯前在该设备上进行了 SR60 球面的试加工, 经三坐标仪检测试件的圆度达到了 0.002 mm, 因此确定该设备可用于煤油隔离阀球形阀芯的加工。

3.2 球面车刀的参数选择和确定

由于球形阀芯加工型面大于 90°, 在数控车床加工中属于跨象限加工, 加工过程中必须连续加工, 以防止在球面最大直径处产生接刀痕迹。普通刀具不能实现刀具轨迹的象限转化, 避免不了此种现象, 因此采取球形车刀加工。

由于没有标准的球形车刀, 设计制造了专用球形车刀。车刀外形见图 1。具体参数见表 3。

1) 刀具材料选择。根据球形阀芯断续切削、对加工中产生热量敏感的特点, 选择抗弯强度与韧性较高、导热性好、适合有色金属精加工的钨钴类硬质合金刀具 YG3。其成分和性能见表 4。

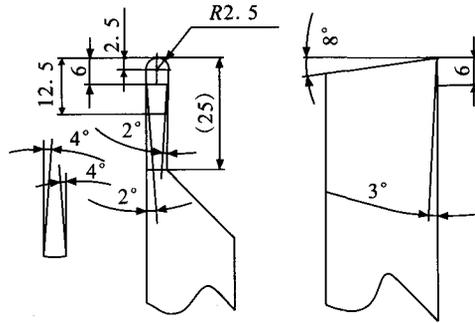


图 1 专用球形车刀图

Fig.1 Diagram of special spherical turning tool

表 3 专用球形车刀参数

Tab. 3 Parameters of special spherical turning tool

刀具 R	前角 γ	主后角 α	副偏角 κ	副后角 α'
$R2.5_{-0.005}^0$	3°	8°	2°	4°

表 4 YG3 硬质合金刀具的成分和性能

Tab. 4 Compositions and performances of YG3 carbide tool

牌号	成分 × 100			物理机械性能			
	WC	TaC	Co	相对密度	导热系数	硬度 HRC	抗弯强度 /GPa
YG3	97	-	3	14.9 ~ 15.3	87.92	78	1.03

表中导热系数单位: $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

2) 刀具 R 的精度直接影响到球形阀芯的圆度和面轮廓度。数控程序计算刀具切削轨迹是以键入刀具库的各项参数为准, 并以标准的刀具 R 进行计算, 拟合出刀具实际加工的轨迹参数。所以刀具在球面上的实际切削点与数控机床计算的理论点随刀具 R 的精度而变化, 并在加工中将刀具 R 的误差成倍放大到加工表面上, 因此 R 的精度越高加工出的球面越理想, 要求刀具 $R=2.5_{-0.005}^0$; 以实测刀具的 R 值, 为准输入程序, 万方数据

来保证球面精度。

3) 刀具前角增大可以有效增加刀具的锋利程度, 减少切削热的产生, 但刀具切削刃的切削部位会随球形车刀在球面的轨迹发生变化。切削刃不能保持在球形阀芯的中心线上加工, 随着刀具前角的增大对球面的圆度和面轮廓度产生的不利影响就越大, 且前角越大刀具切削刃的强度越差。考虑到阀芯的断续切削, 为增加刀具切削刃的强度, 选择的前角为 3°。

4) 刀具的主后角和副后角的作用是减少刀具后面和副后面与加工表面的摩擦, 但后角和副后角偏大会降低刀具强度。考虑到阀芯是断续加工, 选择了 8° 的主后角和 4° 的副后角。

5) 副偏角的作用是减少与零件已加工表面的摩擦。随着副偏角的增大刀具的强度和散热条件都会变差。根据精加工参数的选择方案确定副偏角为 2° 。

6) 根据车刀切削情况, 为避免刀体与已加工表面摩擦, 确定刀头部分长度为 25 mm。

3.3 加工中切削速度的计算和选择

对薄壁零件断续表面的加工, 影响最大的因素是切削力和切削热, 而对这两者影响最大的切削参数分别为切削深度和切削速度, 应对该两项切削参数充分优化。

3.3.1 转速选择

铝合金熔点低, 且其塑性随着温度的升高而迅速增大。在高温高压作用下, 切屑底层与前刀面的摩擦很大, 滞流现象严重, 易生积削瘤, 降低工件的尺寸精度与表面粗糙度。大多数铝合金在低速切削时会形成积削瘤。切削速度较高时, 一般切削速度达到 $60\sim 90\text{m/min}$ 以上, 则可以有效避免。切削速度的计算公式如下:

$$v = \pi D n / 1000$$

式中: v 为切削速度; D 为加工直径; n 为主轴转速。

可以看出, 切削速度与零件直径成正比关系, 所以在计算最小转速时按最小直径计算即可。球形阀芯最小处球面直径为 $\Phi 122\text{ mm}$, 通过计算:

$$v = \pi D n / 1000$$

$$90 = \pi D n / 1000 = 3.14 \times 122 \times n / 1000$$

$$n = 235.9\text{ r/min}$$

得出主轴转速在大于 235.9 r/min 后不会产生积削瘤。考虑到加工效率和高速旋转会给零件带来巨大离心力, 产生振动和变形, 选择主轴转速 $n = 300\text{ r/min}$ 。

3.3.2 切削深度确定

大的切削深度会产生大的切削热和大的变形, 较小的切削深度不能跨越加工硬化层进行切削, 导致尺寸精度不受控制, 较小的切削深度还会导致刀具断续切削时刀具振动, 在已加工表面留下颤纹降低表面粗糙度。通过大量试切削试验确定最佳切削深度为 0.15 mm 。

3.3.3 进给量确定

进给量影响到加工表面微观残余高度, 使表面粗糙度变化。进给量越大, 加工表面微观残余高度越大, 表面质量越差; 进给量太小, 刀具在加工表面作用时间越长, 产生热量越大, 加工硬化层越厚。考虑到球形车刀在加工过程中始终与零件是点接触, 为了获得较好的表面粗糙度和产生较小的切削热, 通过试切削试验确定最佳进给量 $F = 0.03\text{ mm/r}$ 。

3.4 精加工球面程序编制

为了降低球面圆度、面轮廓度和表面粗糙度, 除了设计专用球形车刀进行加工外, 还须运用刀具补偿的数控程序来进行跨象限加工。这样加工不仅可以保障加工过程的流畅, 还能使整个加工过程中数控车床 CNC 系统的数据链完整而不中断, 更好地保证球面的圆度和面轮廓度。

由于加工表面是球面, 加工过程中切削速度始终随刀具加工直径的变化而变化, 切削速度的改变导致加工的表面质量恶化。切削速度在恒转速 $n = 300\text{ r/min}$ 时, 从最大直径 $\Phi 200\text{ mm}$ 到最小直径 $\Phi 122\text{ mm}$ 时其切削速度在 $114.924\sim 188.4\text{ m/min}$ 范围内变化。为保证球面的圆度、轮廓度和表面质量, 必须控制切削速度, 保证切削速度的一致性, 所以在编制数控程序时加入了恒线速切削指令, 使刀具在任一点的切削速度保持一致, 并在程序中对最高主轴转速进行限制, 主轴最高转速限制为 300 r/min 。

3.5 装夹力的调整

薄壁且需断续切削的零件在装夹过程中装夹力要适当, 以零件装夹稳定且不发生变形作为原则。在球形阀芯球面精加工时根据零件结构特点

选择一夹一顶的装夹方式。由于材质为铝合金,加工中产生的切削力小,但零件为空心薄壁零件,受力后变形大,因此确定尾座顶尖仅作为一个支撑点,限制2个自由度,顶紧力以手推动力阻止顶尖运动为准。顶尖的顶紧力通过调整控制机床尾座顶紧力的旋钮来调整。

3.6 加工中冷却液的使用

粗加工中要充分使用冷却液进行冷却,以减少工件温升导致零件变形。冷却液选用90%的水和乳化油均匀混合乳化液,这种比例配制既可以防锈又能对零件和刀具充分润滑。

精加工时,选用渗透能力较强的煤油作为冷却润滑液。煤油通过加工时刀具和零件接触面之间大量分布的微观毛细管,在加工振动形成孔隙的泵吸作用下渗透在切屑、零件和刀面之间形成冷却润滑膜,减小刀具和加工表面的摩擦系数,使表面质量提高。另外煤油对铝合金也有一定的防锈作用。

3.7 球面的研磨和抛光

受加工方式的影响,阀芯球面精车后表面粗糙度仅能达到 $Ra0.4$,精加工后还需要对球面进行研磨和抛光。研磨时选用颗粒度极细的金刚砂,抛光时选用特殊配料熬制的抛光膏。由于零件球形表面是断续的,为减少工具的平面与球面交界处的作用导致球面圆度、面轮廓度损坏,要求涂有研磨剂和抛光膏的专用工装在加工时与球面保持相切状态。

4 结论

本工艺在加工中多次采用了人工时效和冷处

理,基本消除了材料应力释放所产生的应变,有效控制零件的变形。

零件在加工过程中,加工了工艺定位孔,使加工基准保持不变,有利于保持基准统一,保证球形阀芯的相对位置精度。设计了专用球形车刀以实现刀具轨迹的象限转化,避免了在球面最大直径处产生接刀痕迹。采用恒线速切削,使刀具在任一点的切削速度保持一致,更好地保证了球面的圆度、轮廓度和表面粗糙度。

采用本工艺方法加工的球形阀芯装配在煤油隔离阀上后,气密封和性能完全满足设计要求。泄露量远小于设计要求。

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, 1995.
- [2] 沈宇福. 新编金属材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 宋兆泓. 航空发动机可靠性与故障抑制工程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [4] 何雪涛. 金属材料与热处理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [5] 刘战强, 黄传真, 郭培全. 先进切削加工技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 吴树民. 致力刀具创新助力高效生产——伊斯卡刀具在航空工业中的应用 [J]. 金属加工 (冷加工), 2011 (17): 12-14.
- [7] 杨金发. 航空难加工材料典型零件切削技术研究[J]. 金属加工(冷加工), 2011 (17): 6-9.
- [8] 秦旭达, 贾昊, 王琦, 等. 插铣技术的研究现状[J]. 航空制造技术, 2011 (5): 40-42.
- [9] 刘自成, 舒发龙, 张为民. 整体叶盘叶片加工变形控制技术[J]. 航空制造技术, 2011 (9): 88-90.

(编辑: 王建喜)