

实战案例：彻底搞定钛合金内型腔加工，够专业，够实用！

本文来源：《金属加工（冷加工）》2014 年第 24 期，转载请注明出处。

目前航天产品加工精度要求不断提高，航天领域中整体结构件不断增加，高精度、薄壁腔体类零件在航天产品行业的应用越来越广泛。特别是伺服系统中零部件的加工精度控制的好坏，直接关系到武器系统中的多项性能指标要求，该类零件一般由钛合金坯料整体加工而成，材料去除率最高达 85% 以上。同时，该类零件的一个显著生产特点是品种多、批量小，甚至是单件生产，这种结构特点和生产模式决定了其制造技术一直处于不稳定状态，加工制造一直存在加工周期长、加工成本高和加工精度不易控制等难点。

随着武器系统的更新换代以及性能的不断提升，当前弹上伺服系统产品零件更趋向于小体积、高精度发展，对加工工艺技术提出更高要求。同时为了追求小体积、高精度的结构，有时也无法兼顾产品的加工工艺性。因此，在伺服产品中出现了一种高精度（尺寸精度要求在 0.01mm 以上）的内腔圆柱面结构零件，该结构机械加工工艺性差，运用传统的铸造、机械加工方法难以满足零件精度要求。

1. 零件工艺性分析以及工艺方案的制定

（ 1 ） 零件结构及工艺性分析。

某球环框架（见图 1）材料为钛合金 TC4-M，属于单件小批量生产，零件为精密机械加工件，零件外形尺寸 $S\phi 108\text{mm}$ ，壁厚 4mm，属于薄壁难加工材料类零件，各形位精度和尺寸精度要求高。由于是整料切削成形，在加工过程中易变形，材料切削性能较差，同时零件结构的工艺性也较差，这为加工带来了极大难度。因此，选用合理的加工方式及正确的刀具成为加工质量保证的关键所在。

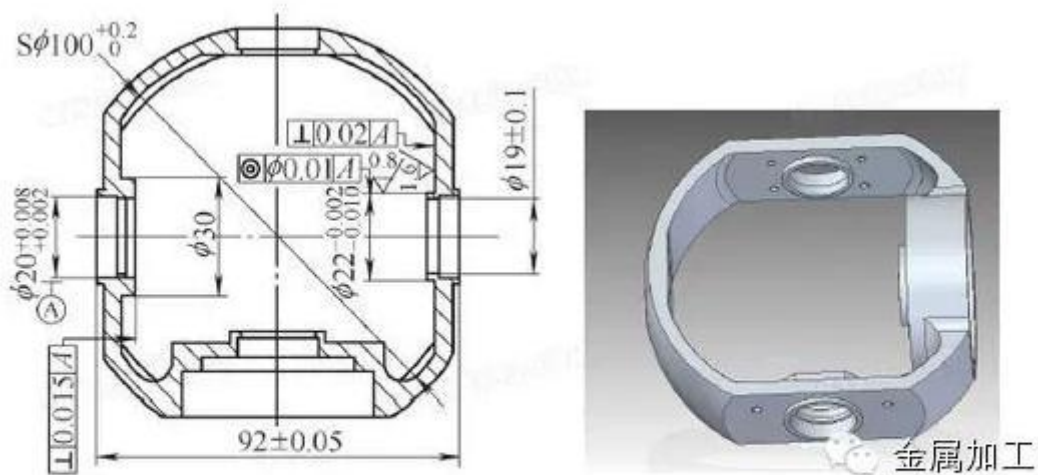


图1 球环框架二维、三维示意图

图 1 球环框架二维、三维示意图

（2）加工工艺方案的制定。

通过对球环框架零件结构进行分析，制定如下工艺流程：坯料→粗加工（采用线切去除余量后再进行机械加工）→热处理时效→精加工→交验，加工难点为内腔圆柱面 $\phi 22-0.002-0.010\text{mm}$ 的加工以及形位公

差的保证，其结构以及材料加工工艺性差，标准的刀具无法对其进行机械加工。

通过对球环框架零件结构的分析，针对球环框架 $\phi 22-0.002-0.010\text{mm}$ 圆柱面和 $\phi 20+0.008+0.002\text{mm}$ 孔采用如下加工方案：粗加工时通过正反两面两次装夹采用三维切削加工出内腔圆柱面，单边留 1mm 余量，精加工时在五轴加工中心采用专用镗刀加工 $\phi 22-0.002-0.010\text{mm}$ 内腔圆柱面，专用镗刀能进行高精度微调，从而保证了 $\phi 22-0.002-0.010\text{mm}$ 圆柱面的尺寸精度，同时采用五轴加工中心一次装夹完成 $\phi 22-0.002-0.010\text{mm}$ 圆柱面和 $\phi 20+0.008+0.002\text{mm}$ 孔的加工，保证了零件同轴度、垂直度公差要求。

2. 专用镗刀的设计

（1）零件材料特性分析。

球环框架零件材料为钛合金 TC4-M，其具体特性如下：

①钛合金的导热性差，是不良导热体金属材料，切削加工时，切屑与前刀面的接触面积很小，特别容易引起薄壁件的热变形。

②钛合金弹性模量低，弹性变形大，钛合金弹性模量为 1078MPa（约是钢的 1/2），切削时接近后刀面处工件的回弹量大，导致已加工表面与后刀面的接触面积特别大。造成加工件几何形状和精度差，表面粗糙度值增大，刀具磨损增加。

③钛合金的亲合性大、切削温度高。切削时，钛屑及被切表层与刀具材料咬合，产生严重的粘刀现象，容易引起刀具强烈的粘结磨损。钛合金的高温化学活性强，在 600℃以上时，与氧、氮产生间隙固溶，吸收气体后钛合金表面的硬度明显上升，对刀具具有强烈的磨损作用。因此，要求加工钛合金的刀具具有高强度、高韧性的同时，还要有高的红硬性。

（2）专用镗刀的设计原理。

通过对零件材料性能的分析，结合零件结构特点，设计了专用于 $\phi 22-0.002-0.010\text{mm}$ 圆柱面加工的镗刀，镗刀结构如图 2 所示，它包括标准可调镗头 1、刀杆 2、紧固螺钉 4、刀片 3，刀片安装在刀杆一端的方孔内，紧固螺钉将刀片紧固在刀杆上，将标准可调镗头与机床主轴连接。被加工零件紧固在数控加工中心辅具上，使加工部位与主轴垂直，通过以上所述镗刀对零件内腔圆柱面进行镗削加工，加工过程中可以根据实际测量尺寸，通过调节标准可调镗头对刀片进行微调，从而保证零件加工精度。标准可调镗头调节范围在 0.06mm 以内，直径微调精度在 0.002 mm 以上，其加工时的状态如图 3 所示。

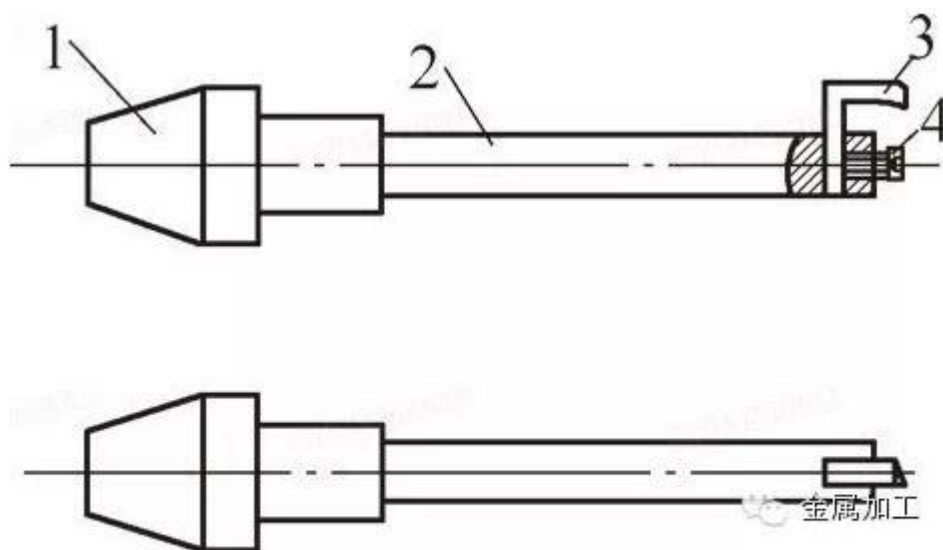


图2 专用镗刀示意图

1.标准可调镗头 2.刀杆 3.刀片 4.紧固螺钉

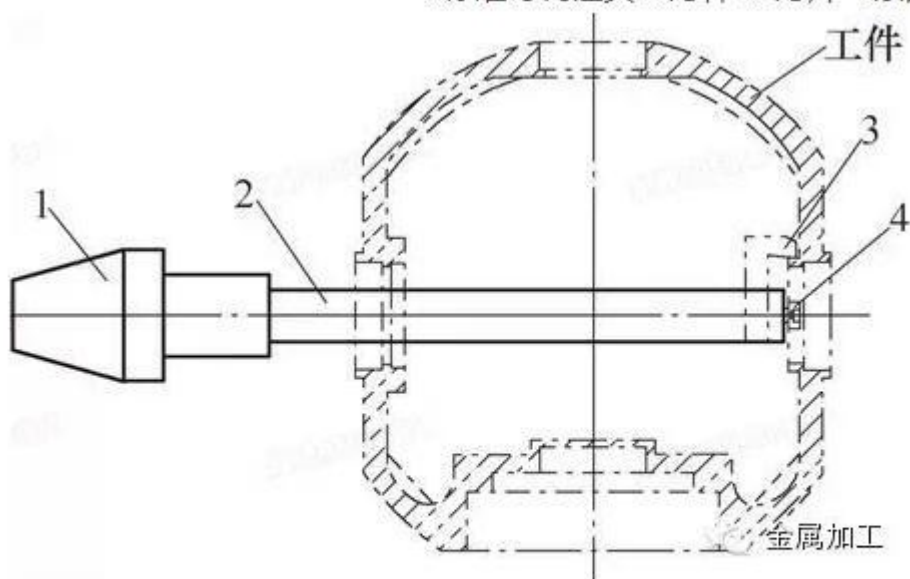


图3 专用镗刀加工状态示意图

1.标准可调镗头 2.刀杆 3.刀片 4.紧固螺钉

(3) 镗刀刀杆的设计原理。

根据球环框架零件材料特性，刀杆应具有较高的强度以及良好的韧性，因此，刀杆材料选用合金工具钢 CrWMn 调质料（32~35HRC），受

球环框架零件内孔尺寸限制，刀杆直径应小于 19mm，同时结合标准可调镗头接口进行配作，配合间隙控制在 0.01mm 以内。

（4）镗刀刀片的设计原理。

针对钛合金材料的加工，刀片材料选用 YL10.2 细晶粒硬质合金报废刀具作为原材料，采用线切割加工成形后，在工具磨床上加工出前后角。此类材料导热性好，有利于热量的散发和降低切削温度，同时具有良好的韧性和高的红硬性。

切削钛合金时，刀具后角 α_0 是所有刀具参数中最敏感的，因为切削层下的金属弹性恢复大和加工硬度大，一般采用大后角可使刃口易于切入金属层，减小后刀面的磨损，但后角过小（小于 15° ）会出现金属的粘附现象；而后角过大，刀具将被削弱，刀刃容易崩碎。因此，大多数切削钛合金的刀具采用 15° 后角。从刀具耐用度来看， α_0 小于或大于 15° ，都会降低车刀的耐用度。此外， α_0 为 15° 的刀具刀刃比较锋利，并可降低切削温度。

由于钛合金在切削过程中，会与空气中的氧、氢、氮等形成硬脆化合物，造成刀具磨损（主要发生在刀具前刀面上），因此应采用小值前角；此外，钛合金的塑性低，切屑与前刀面的接触面积小，为此也应选

用小值前角，这样做可增加切屑与前刀面的接触面积，使切削热和切削压力不至于过分集中于刃口附近，既有利于散热，又加强刃口，避免因切削力集中而产生崩刃。因此，用硬质合金刀具加工钛合金时，取前角 $\gamma_0=5^\circ$ 左右并磨出倒棱 f （宽度为 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ ）， $\gamma_f=0^\circ\sim 10^\circ$ ，刀尖磨成 $r=0.5\text{mm}$ 小值圆弧，刃倾角 $\lambda=+3^\circ$ 。

3. 结语

钛合金零件加工在机械制造业中占有很重要地位，钛合金材料的切削加工一直是当前加工工艺技术的难点。为了满足航空航天对于钛合金工件日益增长的需求，我国的钛合金切削加工必须有长足的进步。在基于国内的材料、机床和管理等条件基础上，进一步加强钛合金材料加工工艺路线的优化、加工参数的优选，提高加工效率和产品质量，是推动国内钛合金产业和航空航天工业发展的重要因素。文中设计的内腔圆柱面精加工镗刀，结构简单，制造使用都很方便，解决了球环框架零件加工工艺难题。