一种弱刚度锥形零件的精密铣削工艺

王德廷，郭东亮，于晓蕾，李金龙，王元军
天津航天长征火箭制造有限公司　天津　300462

摘要：针对一种弱刚度锥形零件装夹困难、加工基准难协调等问题，通过制定合理的铣削加工工艺方案，采用柔性装夹方案，制定合理的编程策略，实现了锥形零件的可靠装夹，保证了零件的高精度要求。

关键词：锥形薄壁零件；回弹变形；柔性装夹；加工方案

1　序言

随着航天制造技术的发展，航天产品结构日趋复杂，产品尺寸越来越大，精度要求也越来越高。由于锥形零件较球形零件和椭球形零件在空间节省方面更具优势，所以大尺寸锥形零件的应用越来越广泛。某锥形零件属于典型的弱刚度薄壁件，同时对产品上孔位尺寸精度要求较高，在产品加工过程中，存在装夹困难、加工基准难协调的问题。本文通过研究弱刚度锥形零件的精密铣削工艺，优化装夹方案，改进加工流程，制定合理的编程策略，解决了该工件的加工难题。

2　加工现状

（1）产品结构分析　某锥形零件大端长度尺寸为2 300mm，小端长度尺寸为1 000mm，高度约1 700mm，整体壁厚仅有10mm（见图1），属于典型的弱刚度薄壁产品。其上有一处装配孔，孔径为350mm，要求加工后自由状态下孔径公差仅为0.05mm，精度要求较高。

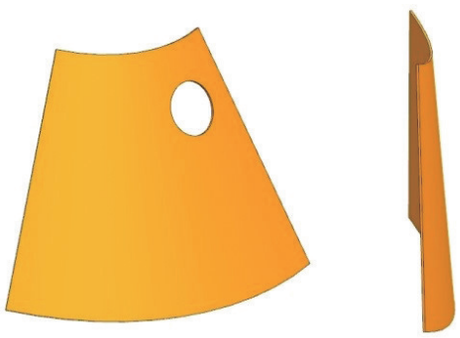


图1　弱刚度锥形零件结构示意

（2）产品加工难点　产品加工中的主要难点如下。

1）装夹困难。零件要求加工后自由状态下孔径公差为0.05mm，对装夹提出了很高的要求。采用常规装夹方式松夹卸荷后会带来较大的回弹变形，无法满足精度要求。

2）孔加工定位基准协调困难。产品加工工艺：首先机械铣加工扇形平板，然后采用钣金滚弯的方式形成锥度，最后采用五轴设备机械铣加工装配孔。由于经过多道工序的周转，所以在最终孔加工环节，会出现孔加工定位基准协调困难的问题。

3）需设计合理的孔铣削加工策略，从而得到较高的铣削效率，减小加工过程中的振动。

3　加工方案

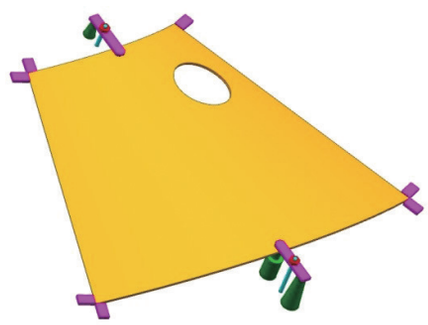
（1）装夹方案　常规的装夹方案是通过制作装夹模胎，将工件装夹固定在模胎上加工。此方式通用性差，专用工装制作成本高、制造周期长，且无法解决松夹卸荷后的回弹变形问题，无法达到产品要求的自由状态下的孔径尺寸精度要求。

针对大尺寸锥形零件弱刚性的结构特点，在借鉴传统装夹工艺的基础上，提出适用于锥形零件加工的柔性装夹工艺。

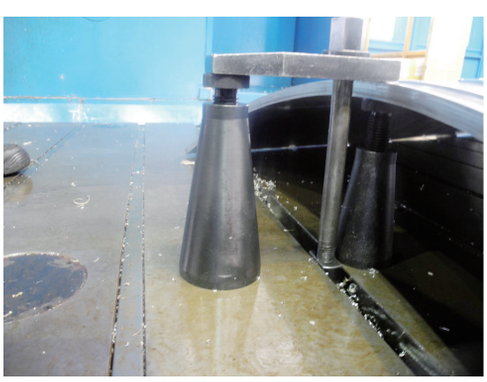
在众多种类的柔性支承方案中，多点阵柔性支承方式是航天产品加工过程中常采用的方法。将传统支承方法替换为多点柔性支承方法，其主要思想是将传统支承工装的整体支承面离散为多个支承点来拟合零件支承站位截面，各个离散支承点各向行程独立

可调。其中每个离散支承点等效于单个柔性支承装置，并将柔性支承装置作为基本单元，将传统支承工装中的支承托板替换为多个柔性支承装置，这样零件各支承站位的多个柔性支承装置就组成了多点柔性支承阵列。

由于该锥形零件属于典型的单件小批量生产零件，为此设计制造的专用柔性工装繁琐复杂，不仅成本高，而且周期长。立足现场加工条件，优先选择现有通用工装，采用“基本装夹，下顶上压”的方式实现零件的柔性装夹（见图2）。具体实施方案如下。



a）装夹示意



b）实际应用

图2　锥形零件柔性装夹

1）将锥形瓜瓣放置于工作台面上，在产品前后两端弓形高度最高处的下侧利用千斤顶顶紧，实现产品的主要装夹。用两组支承点来拟合零件支承站位截面，各个离散支承点为可调千斤顶，其行程独立可调，每个离散支承点等效于单个柔性支承装置，通过调节各支承点的空间位置，使柔性支承装置与零件表面完全贴合，达到支承目的。

2）为限制零件向上的自由度，每个小平面处采用压板从上方压紧零件，实现每一处离散支承点的装夹定位。在施加压力的过程中，尽量使装夹力沿接触点（或面）的法向通过零件传递到支承点上，同时采用千分表顶在小平面下方，监控零件压紧过程中千分表的读数变化量。鉴于零件自由状态下的精度要求，变形量最好控制在0.1mm以内，一旦超出范围则应重新松夹，调整后再次压紧直至满足微量变形指标，保证产品松夹后孔的变形最小。

3）在产品4个角的位置设置限位压板，限制零件水平方向自由度，防止产品在水平方向出现窜动，实现产品的基本装夹。

（2）孔加工定位基准精度保证方案优化　为保证滚弯后锥底零件开孔位置的准确性，优化工艺方案为：平板产品在理论位置刻孔位象限线→产品滚弯→柔性装夹→孔位拟合技术→根据拟合位置开孔→钳工去毛刺→检验。

1）平板产品在理论位置刻位置象限线。由于孔位精度要求较高，为保证滚弯状态下孔位置的准确性，在产品处于平板状态时，刻出孔的理论位置象限线（一条象限线沿锥段母线方向，另一条象限线为锥段环向截面线），作为后续滚弯后开孔的找正基准，如图3所示。

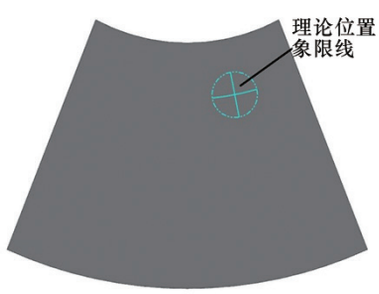


图3　孔的理论位置象限线

2）孔位拟合。产品柔性装夹定位后，机床打表测量4个象限点的坐标，通过仿真拟合出孔的中心线，进而确定孔位尺寸，保证开孔位置为理论位置，如图4所示。

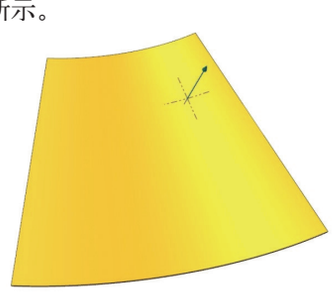


图4　孔位拟合示意

（3）仿形加工　为减小孔加工过程中的振动，需实现材料的均匀去除，最佳方案为通过几个特征点获得产品实际模型，进而采取仿形加工的方式均匀去除材料。

1）机床打表测量产品上预留的5个特征点（4个象限点和1个中心点）的点坐标，利用环向截面上的3个点拟合出锥段圆形截面，进而获得锥段中心轴线，如图5所示。

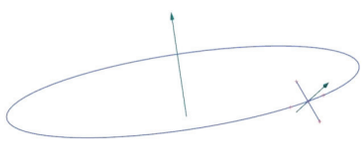


图5　获得环向截面与锥段中心轴线示意

2）利用母线及锥段中心轴线经旋转形成锥段三维模型图，利用孔中心轴线生成的ϕ350mm圆柱与锥段求差获得孔的实际外形，如图6所示。

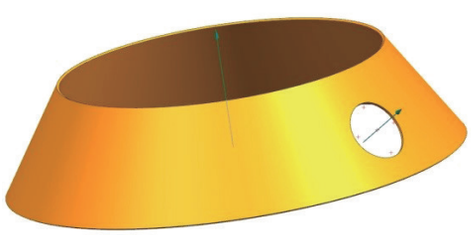


图6　获得锥段及孔实际外形示意

3）利用孔的实际外形生成仿形加工程序，实现材料加工过程中的均匀去除，减小加工中的振动，提高孔加工效率。仿形程序刀具轨迹如图7所示。

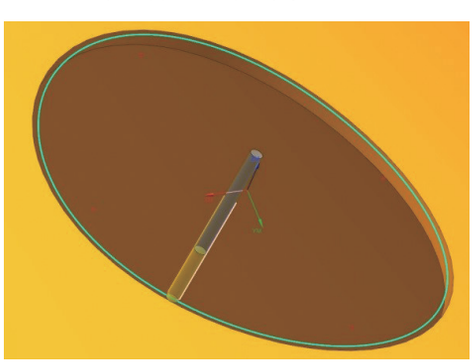


图7　仿形程序刀具轨迹示意

（4）加工效果　通过采用柔性装夹方案、孔加工定位基准精度保证方案和仿形加工方案，实现了弱刚度锥形零件的精密加工，加工后产品如图8所示。加工后，自由状态下孔径尺寸满足公差0.05mm的精度要求。

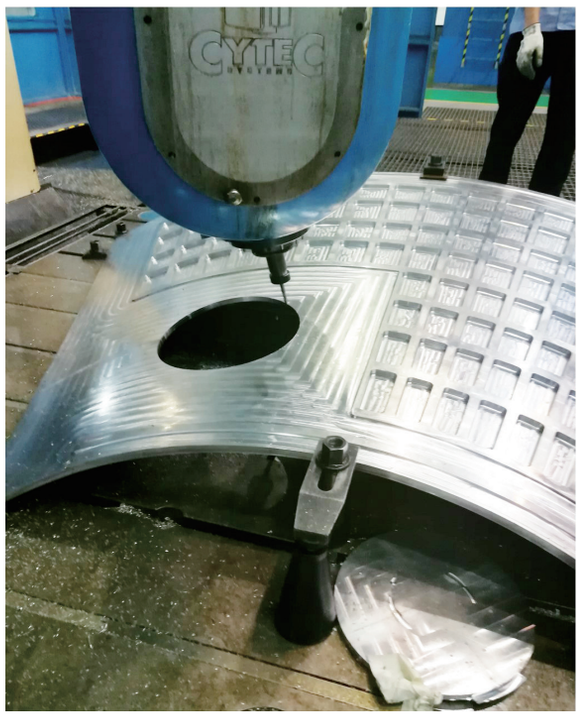


图8　产品实物

4　结束语

本文通过改进加工流程、采用柔性装夹方案，解决了弱刚度锥形零件难装夹、基准不易协调的难题。采用柔性装夹方案避免了常规装夹方案松夹卸荷后带来的装夹变形问题，保证了松夹后孔处于自由状态下的精度。通过基准协调方案及仿形加工方案，进一步提高了产品加工精度及加工效率。弱刚度锥形零件的精密铣削加工方案易于实现，实施效果明显，可推广至各类弱刚度薄壁工件的装夹，解决弱刚度薄壁零件的装夹、基准协调及高效加工的难题。

参考文献：

[1] 崔鑫．一种弱刚度口框的精密加工[J]．制造技术与机床，2016（12）：94．

[2] 务俊杰．柔性装夹系统应用研究[J]．航空制造技术，2009（24）：53．

[3] 朱明华．飞机部件多点柔性支撑系统研究与开发[D]．南京：南京航空航天大学，2010．

MW 20201028