

大型对开式薄壁件低应力柔性装夹方法

付帅磊¹, 吴思远¹, 甄慧强¹, 王程霖¹, 解丽静²

1. 北京新风航天装备有限公司 北京 100854

2. 北京理工大学 北京 100081

摘要: 针对大型对开式薄壁件加工变形问题, 提出一种低应力柔性装夹方法, 降低切削力、装夹应力的影响。在加工工序之间, 通过液压和气压控制松开柔性装夹点和支撑点, 使工件释放内应力, 从而降低内应力引起的加工变形。在长度1m以上的工件加工中进行验证, 大端直径尺寸精度可达0.2mm, 满足生产需求。

关键词: 大型薄壁件; 低应力装夹; 柔性装夹; 加工变形控制

1 序言

大型对开式薄壁件是典型的弱刚性航天产品, 加工过程中受切削力、装夹应力、内应力释放等因素影响, 不可避免地出现加工变形, 导致工件尺寸精度难以保证。低应力柔性装夹方法是控制薄壁件加工变形的有效方法, 通过设计柔性夹具, 在工序之间松开夹具使工件释放内应力; 在加工时自适应地夹紧工件, 实现低应力装夹^[1, 2]。该方法在大型航空板类零件加工变形控制中得到广泛应用^[3-5]。然而航天产品中的大型对开式薄壁件具有锥型外形, 装夹难度较平板类零件更大。本文针对大型对开式薄壁件加工, 提出适用于该零件的低应力柔性加工方法, 开发两套专用夹具, 在实际加工中验证了该方法的有效性。

2 大型对开式薄壁件低应力柔性装夹方法

2.1 零件结构及工艺特性

大型对开式薄壁件如图1所示, 为锥型对开式结构, 长度1m以上, 最薄壁厚5mm, 大端直径约 $\phi 500\text{mm}$ 。工件材料为铸造镁合金ZM6。为了保证装夹的稳定性, 铸造毛坯沿两侧均匀留有8个工艺夹头, 夹头在最后精铣工序铣掉。毛坯单边留量5mm, 所有部位均留量, 所有部位均需加工。工件的关键尺寸为: 对接平面的平面度0.15mm, 大端直

径精度 $\pm 0.4\text{mm}$ 、减轻槽壁厚精度 $(5 \pm 0.5)\text{mm}$, 圆周孔角相精度 $\pm 2'$ 。

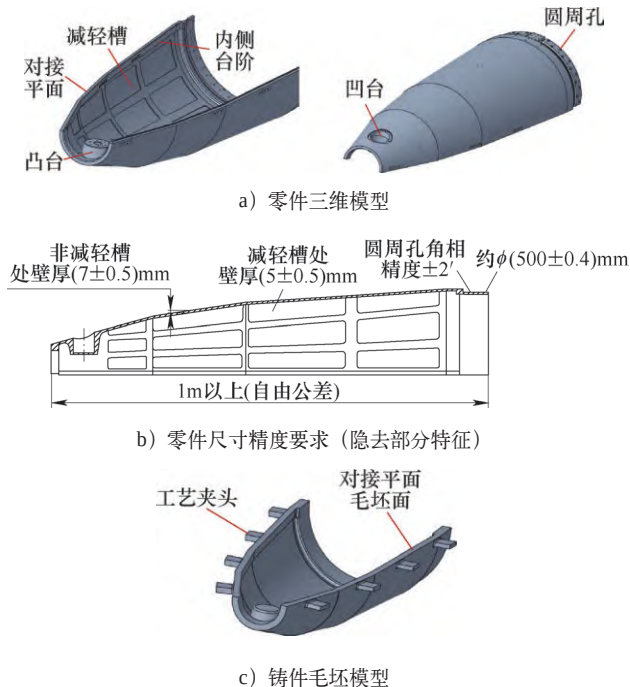


图1 大型对开式薄壁件

大型对开式薄壁件主要的加工工序如下。

- 1) 粗铣内腔、对接平面、内侧台阶、凸台, 留量1.5mm。
- 2) 粗铣外壁、凹台, 留量1.5mm, 铣夹头装夹状态时的上表面。

项目: 国防基础科研计划项目JCKY2022204C008。

3) 半精铣内腔减轻槽、凸台、对接平面、内侧台阶, 留量1mm。

4) 半精铣外壁、凹台, 留量1mm。

5) 精铣内腔减轻槽、凸台、对接平面, 打孔。

6) 去夹头、精铣外壁、凹台, 打圆周孔。

大型对开式薄壁件的加工精度难以满足指标要求, 主要加工问题包括下以两点。

1) 结构刚度差。由于零件尺寸较大, 镁合金弹性模量较低(约为45GPa), 因此整体结构刚度相对较低。加工时, 零件大部分面积悬空、缺乏支撑, 零件装夹过程中较易变形; 铣削时切削力易造成“让刀”变形; 加工后零件内应力释放导致整体翘曲变形。现阶段零件粗、精加工前后大端直径尺寸误差高达0.6mm和0.5mm。

2) 装夹难度高。铸造时在半罩的对接平面侧两个边分别铸有4处工艺夹头, 加工时通过压紧工艺夹头加工零件内外型面, 需反复4次翻面, 保证8个支撑点均压紧的同时, 零件不易调平。目前依赖纯手工进行装夹, 装夹耗时30h左右, 因此需要提高装夹效率。

基于大型对开式薄壁件结构和工艺特性, 需要开发自动化低应力柔性工装, 提升装夹效率, 并抑制切削力、装夹应力和内应力引起的加工变形。

2.2 低应力柔性装夹方法

针对大型对开式薄壁件加工, 提出一种低应力柔性装夹方法, 如图2所示。加工内腔时, 根据毛坯上8个工艺夹头的位置, 设置8个柔性装夹点。每个柔性装夹点由一对液压控制的顶点和压板组成。考虑到零件的整体尺寸较大, 结构具有对称性, 采取四点共面的过定位方法。前后4个柔性装夹点为主动式, 通过液压控制主动调整柔性装夹点顶点的高度。在4个柔性装夹点处设置液压控制的可转位定位点, 定位点经过标定, 高度误差 $<0.02\text{mm}$ 。柔性装夹点的顶点由液压缸推动, 顶起夹头向上移动。此时可转位定位点由液压锁死, 顶点顶起夹头至工件对接平面与可转位定位点接触后停止移动, 然后控制顶点运动的液压缸锁死, 液压控制的压板压紧夹头上表面, 可转位定位点转动, 避开工件对接平面。随后4个被动式柔性装夹点夹紧其他4个夹头。为了避免引入过高的装夹应力, 4个被动式柔性装夹点安装接触式传感器, 柔性装夹点的顶点从下往上

接触夹头下表面, 接触后顶点停止运动, 压板夹紧夹头。再利用机床测头在工件大端和小端取点, 通过转动机床工作台, 找正工件轴线, 从而完成工件找正。需要指出的是, 在第1道工序中, 工件由单边留量5mm加工至单边留量1.5mm, 工件留量较大, 即使此时工件的对接平面为毛坯面、平面度不高, 在四点共面的过定位方法时产生的定位误差可以接受, 然后在此装夹状态下加工对接平面及其他特征。在第3道、第5道工序中, 工件同样处于图2a的装夹状态, 此时工件对接平面已经过铣削, 具备较高的平面度, 采用过定位方法不会产生较大的误差。

加工外壁的工装如图2b所示。该工装没有柔性装夹点, 而是加工出较高平面度的工装平面。加工外壁时, 以上一道工序工件加工后的对接平面为基准, 将工件对接平面放置在工装平面上。工件加工后的对接平面, 以及与工件对接平面接触的工装平面均具有较高的平面度, 因此不需要再找正该平面, 直接进行夹紧。在此装夹状态下, 所有夹头均不夹紧, 用液压控制的压板压紧工件内侧台阶实现夹紧。然后利用机床测头在工件大端和小端取点, 通过转动机床工作台, 找正工件轴线。在加工外壁的装夹状态下, 所有夹头均不夹紧, 并对该装夹状态下的夹头上表面进行加工, 使其具有较高的平面度, 保证工件下一道工序翻面装夹时夹头与柔性装夹点的顶点接触状态更好。

在工件下方布置柔性支撑点, 作为辅助支撑, 通过气压控制支撑点锁紧和松开。柔性支撑点具有多根顶针, 如图3所示; 柔性支撑点内部设有气动锁紧装置。顶针内部装有弹簧, 在无气压输入的情况下, 气动锁紧装置松开, 顶针承受外力时被压缩, 撤去外力时在弹簧作用下回弹; 有气压输入时, 气动锁紧装置锁紧顶针, 顶针位置保持不变。本次选取的柔性支撑点的顶针行程为20mm, 锁紧气压为0.7MPa, 施加该气压后, 每个柔性支撑点可在承受1500N外力下仍保持锁紧。因此, 在工件安装时, 柔性支撑点无气压输入, 各顶针与工件接触被压缩, 实现随形支撑。加工时, 施加气压, 气动锁紧装置锁紧, 此时顶针保持随形支撑的位置, 相当于刚性支撑, 从而提升工艺系统整体刚性, 降低切削力引起的变形。值得注意的是, 为了实现低应力装夹, 柔性支撑点的初始位置按工件轮廓布置, 通

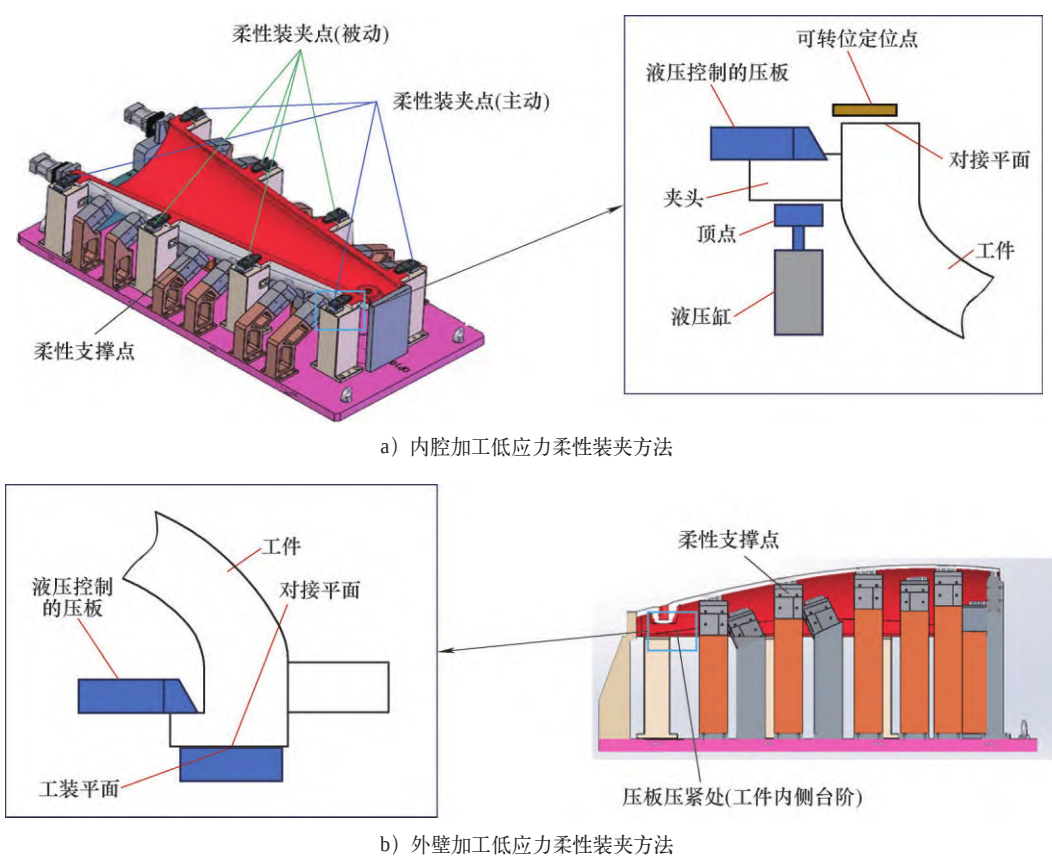
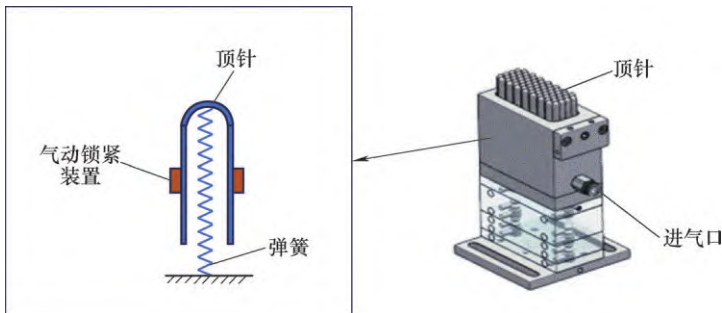


图2 大型对开式薄壁件低应力柔性装夹方法



过调整柔性支撑点整体高度，使顶针稍有压缩量即可，避免顶针内弹簧引入过高的支撑应力。

在两道加工工序之间，将柔性装夹点和柔性支撑点松开，使工件释放内应力充分变形。在下一道工序前重新进行装夹，在下一道工序中切除工件变形部分，从而降低内应力释放引起的加工变形。

3 柔性支撑点布局设计

柔性支撑点的数量和布局影响着工艺系统的静刚度和动态特性^[6, 7]。工艺系统静刚度越高，切削力引起的加工变形越小。动态特性用于表征工艺系统受到动态载荷时的整体振动表现。一般认为，工

艺系统的固有频率越高，其动态特性越好，对切削振动的抑制能力越强，可获得更高的机械加工表面质量。因此，针对柔性支撑点布局进行设计。

使用有限元仿真软件ABAQUS对无支撑时的零件进行模态分析，获得对零件各阶模态及振幅最大的位置，将柔性支撑点布置在振幅最大的位置，从而抑制动态载荷引起的振动。采用ABAQUS线性摄动分析步对无辅助支撑时的加工系统进行模态分析。将8个夹头的下表面约束模拟实际装夹状态，对8个下表面的约束选择的是“位移/旋转”，仅保留夹头在水平方向的两个平动自由度，如图4所示。

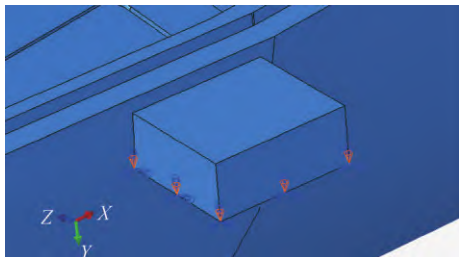
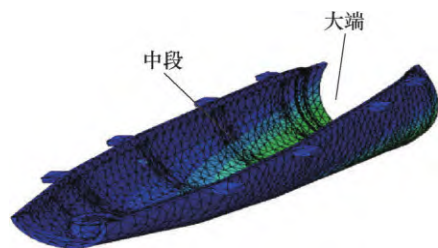
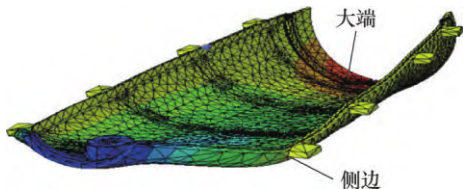


图4 夹头约束设置

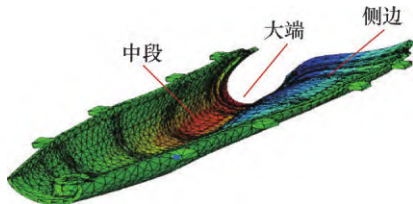
有限元分析获得工件前3阶模态如图5所示，工件振幅较大的位置出现在工件中段、大端及侧边位置。



a) 第1阶模态，频率102.66Hz



b) 第2阶模态，频率231.85Hz



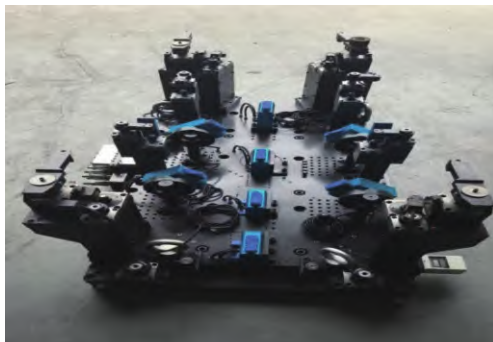
c) 第3阶模态，频率286.62Hz

图5 工件前3阶模态

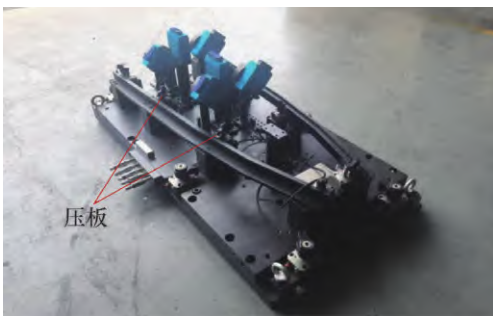
综合考虑柔性支撑点尺寸及有限元分析结果，尽量将支撑点布置在模态分析结果中振幅较大的部位^[8]。通过有限元分析出工艺系统的薄弱环节是工件中段、大端及侧边位置，因此柔性支撑点布置在这几个位置，如图6所示。

4 试验验证

使用所开发的夹具进行加工试验，如图7所示。整个加工过程装夹时间<2h，极大提升了装夹效率。将加工后的零件进行检测，加工后大端直径误差0.2mm。

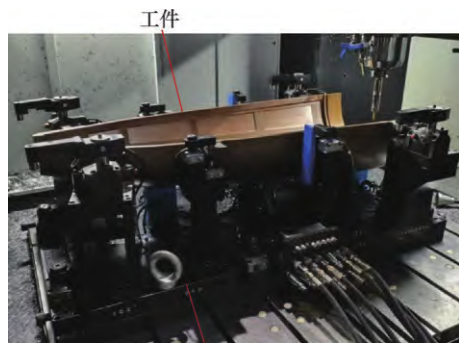


a) 内腔加工工装



b) 外壁加工工装

图6 低应力柔性装夹专用工装



a) 内腔加工



b) 外壁加工

图7 大型对开式薄壁件加工装夹试验

(下转第63页)

同时来回移动。

5 性能测试

根据行业标准中的定义，静刚度是指滚动直线导轨副抵抗变形的能力（单位变形所需要的载

荷）。华中科技大学的方健等也研制了一种滚动直线导轨副静刚度试验台，通过计算机来完成相关测试和控制^[3]。对于交叉交叉导轨副其试验方案大体相似，具体检测数据如图5所示。试验采用本文所述的交叉交叉导轨副及常规的直线导轨副进行静刚度

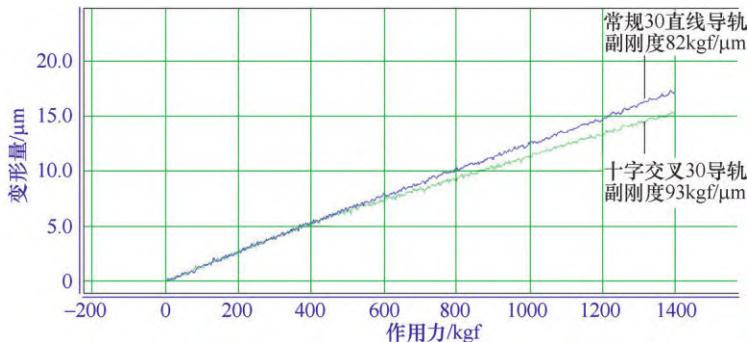


图5 静刚度测试对比

测试对比，通过测试数据可见，在相等规格、相同预紧力及相同的负载条件下，交叉交叉导轨副的静刚度较常规的直线导轨副提升13%左右。

6 结束语

简单介绍了一种交叉交叉滚动直线导轨副的结构、加工工艺试验及改良方法，并通过测试静刚度验证。该导轨副具有精度高、刚度高的特点，具有双向一体化结构，可实现工作台在互相垂直的两个轴向上任意移动。目前该导轨副已推出市场，并且

在个别设备上得到应用验证。

参考文献：

- [1] 杨美英. 直线滚动导轨副及其应用[J]. 科技情报开发与经济, 2004 (7) : 276-277.
- [2] 全国金属切削机床标委会. 滚动直线导轨副 第1部分: 术语和符号: JB/T 7175.1—2011[S]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] 方健. 滚动直线导轨副性能分析及静刚度试验机研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

MW 20250212

(上接第60页)

5 结束语

本文针对大型对开式薄壁件加工变形难以控制的难题，提出一种低应力柔性装夹方法，开发两套专用夹具。使用专用夹具实现低应力装夹、提升工艺系统刚度、在工序之间松开装夹使工件释放内应力，从而有效抑制了装夹应力、切削力和内应力引起的加工变形。加工试验表明，采用低应力柔性装夹方法，有效控制了零件加工变形，长度1m以上的零件加工后大端直径尺寸精度可达0.2mm，满足尺寸精度要求。本方法可供加工航空航天领域其他大型异形薄壁结构件时参考。

参考文献：

- [1] 于金, 王胤棋. 大型曲面薄壁件多点柔性工装装夹布局优化[J]. 工具技术, 2017, 51 (10) : 83-87.
- [2] 高彦梁. 薄壁件柔性装夹加工变形研究[D]. 沈阳: 沈

阳航空航天大学, 2016.

- [3] 张新娟, 段雪峰. 飞机蒙皮零件的柔性装夹及数控铣切技术[J]. 航空制造技术, 2015 (S1) : 42-44.
- [4] 刘述明, 扈博琴, 张春龙, 等. 基于浮动装夹自适应加工工艺的薄壁件加工变形控制技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66 (3) : 70-77.
- [5] 郝小忠, 李迎光. 大型结构件浮动装夹自适应加工方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56 (9) : 35.
- [7] 韩晓光. 空间曲面薄壁件多点夹持定位工装设计与结构优化技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2011.
- [8] 陆俊百, 周凯, 张伯鹏. 飞行器薄壁件柔性工装定位/支承阵列优化自生成研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21 (19) : 2369-2374, 2378.

MW 20250217