

精密方形框架加工工艺

白雪坤

成都剑润优能航空设备制造有限公司 四川成都 610213

摘要：针对方形框架的结构特点及关键技术难点，探讨提高铝合金结构件加工精度的方法，整个工艺思路均围绕如何控制和消除工件变形。通过制定合理的工艺方案和制作工装夹具，对原始毛料进行大余量开粗和关键部位精加工，有效解决了加工过程中的变形难题。

关键词：精密结构件；薄壁件；精度；变形；控制



工程师 白雪坤

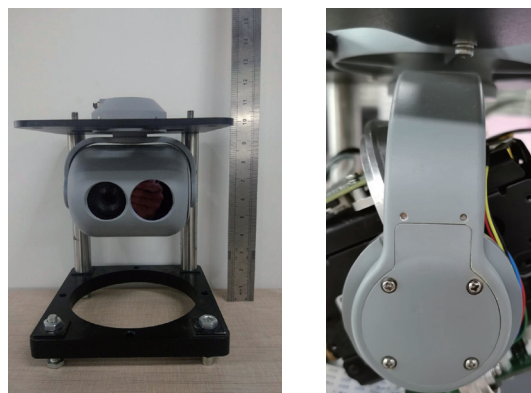
1 序言

铝合金是最广泛应用于航空航天、汽车、军工及化学工业等行业的有色金属结构材料，特别是近几年来，在军工、航空航天业中的应用呈现井喷状态，其中结构件成为机械加工中的主流产品。结构件的外形结构千奇百怪，精度要求也呈现直线上升趋势，其工艺目标一直是控制变形、提高精度。下面以无人机中的结构件方形框架为例，探讨提高铝合金结构件加工精度的方法。

2 隐蔽型无人机精密旋转摄像头结构

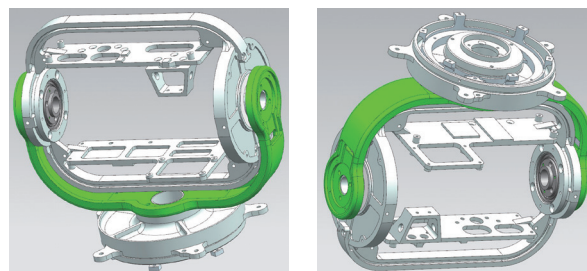
图1为隐蔽型无人机精密旋转摄像头，其内部

结构和组成部分如图2所示，其中绿色结构件为方形框架。



a) 检测台与旋转摄像头成品 b) 摄像头局部细节展示

图1 隐蔽型无人机精密旋转摄像头



a) 平视视角 b) 旋转180° 视角

图2 旋转摄像头内部结构和组成部分

3 方形框架的结构特点及关键技术难点

图3为方形框架结构，其特点为：①从结构组成上看，方形框架为整个结构的载体。②从输出精度

上看，方形框架为关键精密输出结构件。

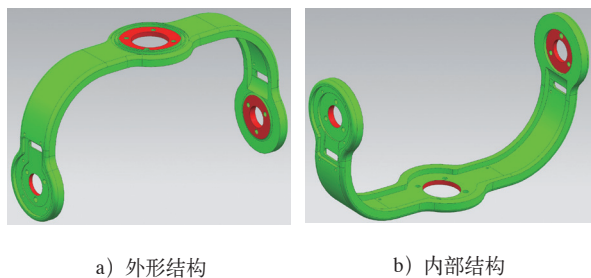


图3 方形框架结构

方形框架加工的关键技术难点分析如下。

1) 图4为方形框架结构尺寸及精度要求，其中两处 $\phi 12^{+0.011}_0$ mm水平通孔及端面、 $\phi 20^{+0.015}_0$ mm竖直通孔及端面的几何公差要求非常高，且表面粗糙度值 $Ra = 1.6 \mu m$ 。

2) 方形框架材料为7075铝合金，作为7系商用最强力合金之一，其强度高，同时具有良好的力学性能。该产品能够研发出来，材料的特性也起到了关键作用。

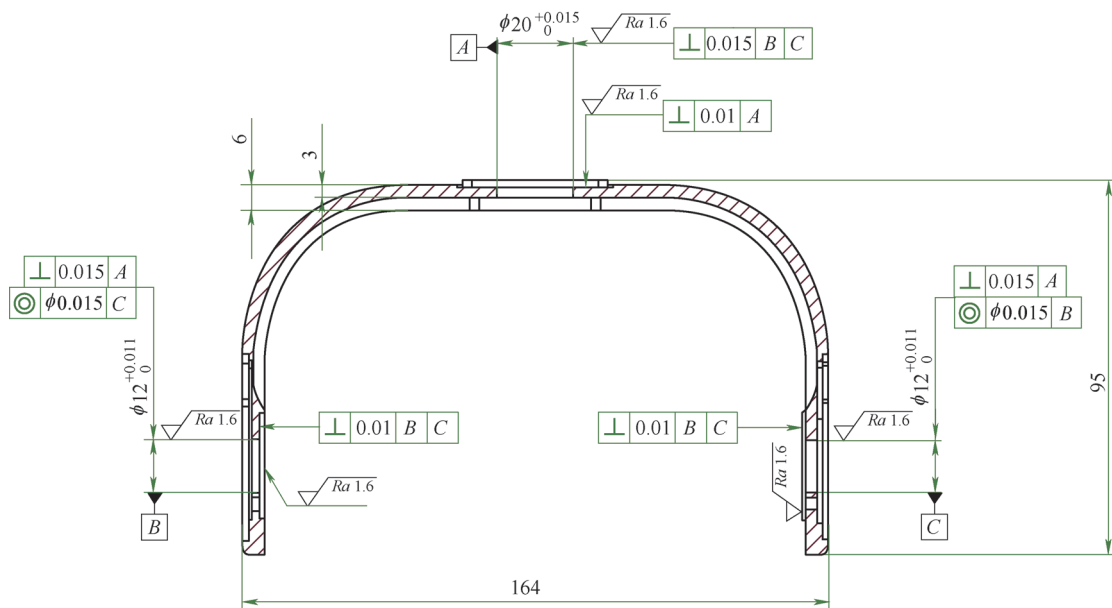


图4 方形框架结构尺寸及精度要求

3) 产品实体联接部分壁厚仅为3mm，符合薄壁件结构特点。

4) 加工时，在保证产品精度的同时，如何控制产品的变形显得尤为重要。

4 方形框架加工工艺方案的制定及分析

4.1 第一次开粗

对原始方形毛料进行大余量开粗，形成开放性毛坯。第一次开粗如图5所示，其中绿色部分为工

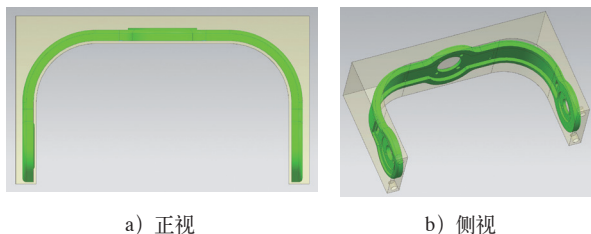


图5 第一次开粗

件，透明外形方块为开粗后的毛坯。U形内腔单边留余量0.5mm。

工艺分析：①去除大余量毛坯，让产品做初次应力释放。②之所以不做成封闭性毛坯，是因为考虑切断后，会因产品局部的应力集中而导致变形。

4.2 第二次开粗

对精度要求低的位置加工到位，对精度要求高的位置做开粗处理。具体实施方案如下。

1) 对开粗后毛坯进行四方及U形内腔的光刀（为提高工件加工表面质量而进行的切削加工，即“再精车一刀”），以消除粗加工变形。光刀后U形内腔单边留余量0.4mm。

2) 对图6所示红色凹槽区域加工到位（即产品本身区域到位，不留余量）。

3) 对图7所示三处红色套孔区域进行开粗，单

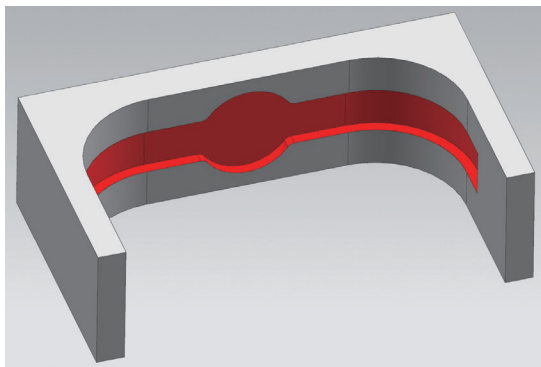
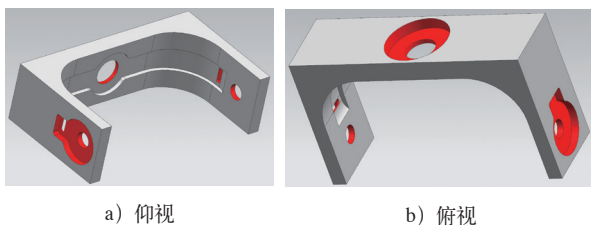


图6 红色凹槽区域加工到位



a) 仰视 b) 俯视

图7 三处红色套孔区域开粗

边留余量0.2mm。

工艺分析：①此时的毛坯刚性满足装夹要求。
②工件基体为开粗后基体，基本稳定，后序加工不会出现因加工余量过多而产生大变形。

4.3 第三次开粗

用线切割方式去除工件外形余量（见图8），线切割去除左右两侧毛坯（见图9），两侧留出可以夹

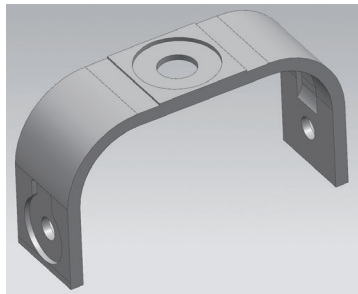


图8 用线切割方式去除工件外形余量

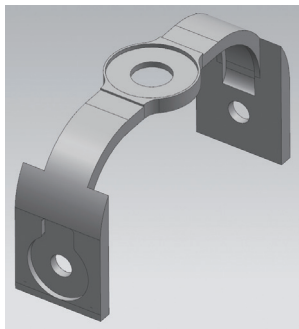


图9 线切割去除左右两侧毛坯

持的工艺料头。

工艺分析：线切割加工本身产生的热量较少，能够有效地减少基体变形。

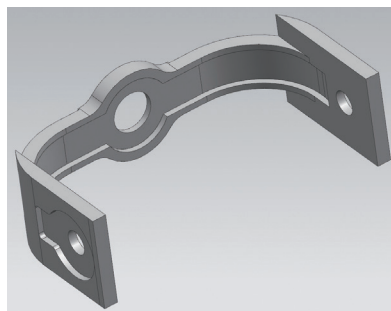
4.4 时效处理

对工件进行时效处理，入炉温度为室温，升温速度为 $127^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，保温温度为 $(185 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 $4 \sim 5\text{h}$ ，降温速度为 $43^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，冷却方式为随炉冷却，出炉温度为室温。

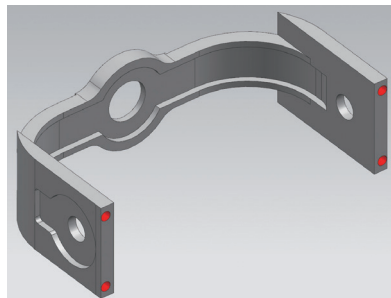
工艺分析：①消除工件加工过程中的内应力。
②稳定工件基体组织。

4.5 基准精加工及方法

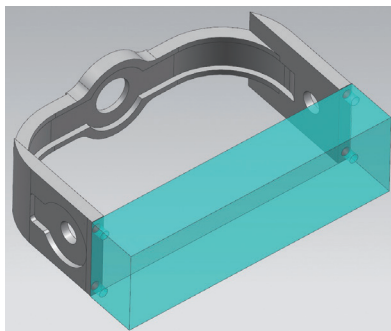
制作封闭性假毛坯（见图10）：①在毛坯前端面加工四处销孔（见图10b）。②在同大小的联接块上加工四处销孔，通过销钉将工件与联接块联接在一起（见图10c），形成封闭性假毛坯。



a) 现有毛坯状态



b) 在毛坯前端面加工四处销孔



c) 通过销钉将工件与联接块联接在一起

图10 制作封闭性假毛坯

具体实施工步方案如下。

1) 压板装夹，精光封闭后毛坯上平面（即工件两侧工艺料头上平面及联接块上平面），去除平面的高度差，形成一个基准平面。

2) 翻面压板装夹，同样方法精光封闭后毛坯另一平面，去除联接后平面的高度差，形成一个平面，同时加工U形内腔，U形内腔单边留余量0.05mm。

3) 拆分封闭性假毛坯，目的就是释放工件的内部加工应力。

4) 虎钳装夹工件两侧工艺料头，见光平面，且在同位置扩大工件端面的四处销孔。

5) 虎钳装夹联接块，见光平面，且在同位置扩大联接块端面的四处销孔。

6) 再次通过销钉联接在一起，压板装夹再次执行工步1)和工步2)，在此基础上精光四方基准，U形内腔精加工到位。图11所示红色端面加工到位。

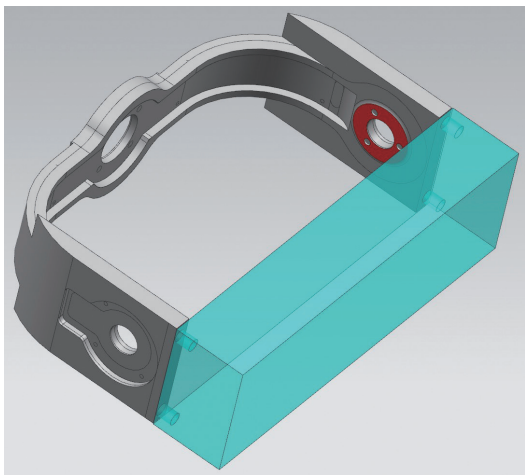


图11 红色端面加工到位

试验结果：第一次取下联接块，变形及收缩量为0.03mm；第二次取下联接块，变形及收缩量仅为0.005mm。

工艺分析：①图10a为现有毛坯状态（即时效后状态，工件基体较稳定），由于要想完成三处关键部位的最终加工，首先就要完成工件的基准加工，但是敞开式毛坯的缺点就暴露出来了，比起封闭式毛坯缺乏有效的刚性，所以需要为工件本身增加刚性，制作封闭性假毛坯。②封闭性假毛坯制作后，必须着手消除两种变形，第一种为联接后的刚性变形；第二种为加工后的应力变形。同时也可感

受到封闭性假毛坯的妙处，即有效地避免了原始封闭性毛坯切断产生的应力集中。

4.6 三处套孔及端面的精加工

在基准加工过程中，图11所示红色端面已经加工到位，找正基准分别加工其余三处套孔及端面。加工方法为：虎钳装夹厚度方向，且钳口夹满（同时夹持联接块与工艺料头），基准找正工件0.005mm以内，分别完成图12所示三处红色套孔及端面的加工。加工中，配合采用图13所示高精度探头表针进行检测。加工顺序为：找正四方基准→粗镗→检测位置→精镗。

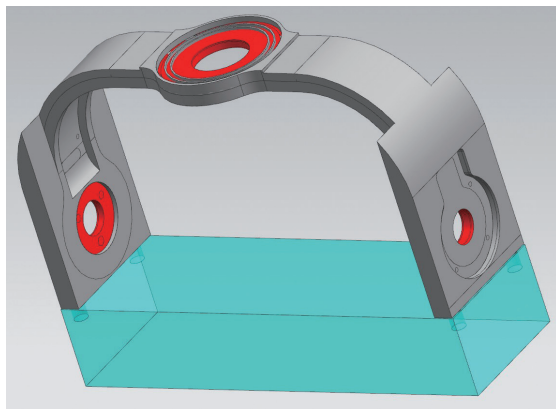


图12 三处红色套孔及端面的加工



图13 高精度探头表针

工艺分析：之所以不在五轴联动数控机床上一次性加工完成，是因为要求五轴联动数控机床的回转精度在0.005~0.01mm，但是在实际加工中，回转精度在0.005~0.01mm的机床并不多见。

4.7 去除两侧工艺料头

线切割去除工件两侧工艺料头（见图14），单边留余量0.2mm。



图14 线切割去除工件两侧工艺料头

工艺分析：线切割加工本身产生的热量较少，能够有效地减少基体变形。

4.8 精铣外形

制作内部填充工装（见图15），精铣工件外形（见图16）至达到尺寸要求。

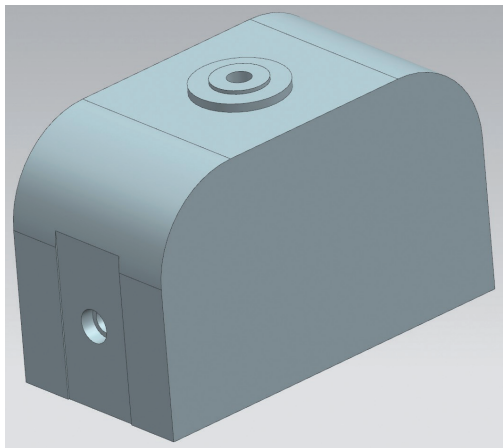


图15 内部填充工装

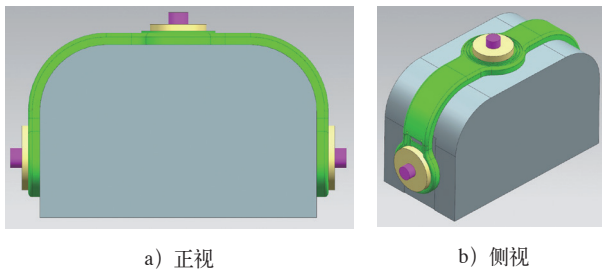


图16 精铣工件外形

工艺分析：①由于7075铝合金强度高，远胜于软钢，因此材料稳定性较好。又由于工件的外部余量较少（单边余量 $\leq 0.3\text{mm}$ ），大部分余量已经在前工序消除，所以单纯地去除少许余量不会造成变形。②工装做内部填充，保证工件在加工过程中的刚性，避免工件产生变形。

5 结束语

上述为铝合金结构件方形框架的整个工艺过程。针对毛料加工的关键技术难点，围绕如何控制工件变形和消除工件变形，制定工艺方案并采取预防措施。该产品的研发成功，材料特性也起到了关键作用。好的工艺思路在于在前进中不断地摸索、在失败中不断地总结经验，深入研究并持续改进。

参考文献：

- [1] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，2009.
- [2] 余光国，马俊. 机床夹具设计[M]. 重庆：重庆大学出版社，2005.
- [3] 曾正明，等. 机械工程材料手册[M]. 北京：机械工业出版社，2003.

MW 20210910

专家点评



本例中方形框架的外形和内部结构都比较复杂，具有开放式U形薄壁件特点，在保证产品加工精度的同时，如何控制和消除变形显得尤为重要。

文章图文并茂，构思巧妙，粗加工阶段去除大部分余量，形成开放性毛坯，让产品做初次应力释放。精加工阶段采用封闭性假毛坯设计，有效避免了原始毛坯切断产生的应力集中变形，从工艺上解决了此类框架零件的变形难题。