

铝合金薄壁框体零件加工工艺优化

王向明, 王晓燕, 周屹明, 刘步山, 张田军

西安航天新能源装备科技有限公司 陕西西安 710025

摘要: 针对铝合金薄壁框体零件在加工过程中容易出现装夹变形、热变形和较大残余应力等问题, 从机械加工工艺角度出发, 剖析了导致变形的主要原因, 优化了工艺路线和工艺参数, 有效解决了变形问题, 同时提高了加工效率, 降低了加工成本。

关键词: 铝合金; 薄壁框体零件; 变形; 控制; 刀具; 切削参数

1 序言

铝合金材料具有质量轻、强度高和加工性好等特点, 被广泛用于航空航天的基础零件。主伞舱盖是新一代载人飞船返回舱模拟舱的关键零件, 其作用是将主伞包封闭在伞舱内, 主伞舱盖安装位置如图1所示。模拟舱工作时, 主伞包拉出吊带, 通过转接座与主伞舱盖相连, 减速伞分离时逐渐从隔热层下拉出主伞包吊带, 并拉动主伞舱盖。主伞舱盖运动到一定距离后, 主伞包拖带受力拉直, 并将主伞包从伞舱中拉出; 主伞包拖带穿过主伞舱盖下部的限位环后连接在转接座上, 在拉出的过程中对主伞舱盖的姿态起稳定作用, 限制主伞舱盖的翻转^[1]。



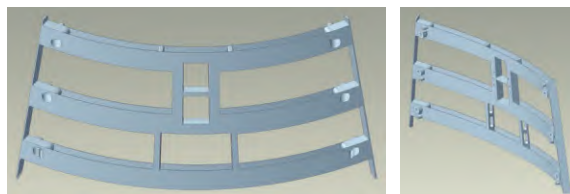
图1 主伞舱盖安装位置

2 主伞舱盖的结构特点及加工难点

2.1 结构特点

图2所示主伞舱盖材料为5A06-H112铝合金(锻件), 最大外形尺寸1925mm×1230mm×200mm, 最小壁厚5mm, 质量约44kg。整体呈圆锥扇

形, 内外型面均为曲面, 有凸台, 加强筋内有减轻槽, 属于薄壁框体类结构。毛坯尺寸为2025mm×1330mm×235mm(带复验及探伤), 质量约1735kg。由此可知, 主伞舱盖的结构特点为: 体积大、刚度低、结构复杂、材料去除率大以及装夹难。



a) 主视

b) 侧视

图2 主伞舱盖三维图

2.2 加工难点

根据主伞舱盖的结构特点分析可知, 其加工难点如下: 随着铣削加工过程中铣削量逐渐增大, 壁不断变薄, 在切削力作用下容易出现振动和变形, 加工稳定性和质量控制难度随之增大; 内外型面均为圆锥弧面, 且有台阶和减轻槽, 内外两面均需加工, 选择合适的装夹方式、定位方法、加工顺序、刀具型号和切削参数等难度大; 材料去除余量大, 加工耗时长, 加工效率低^[2, 3]。

3 优化主伞舱盖加工工艺

针对主伞舱盖的加工难点, 综合考虑残余应力、精度和效率, 从装夹方式、工艺路线、刀具选

择、刀具路径及切削参数等方面进行工艺参数优化。

3.1 装夹方式

装夹工艺是影响薄壁框体零件加工的重要因素，装夹方式、位置和方向等都是引起零件变形和出现误差的因素。

目前，随着MBD（基于模型的设计）全数字化设计制造技术在工程化应用方面的深入推广，以三维模型为载体的协同设计、仿真、虚拟加工和虚拟验证等新技术广泛应用于航空、航天等高端装备制造领域^[4]。在Creo三维环境中对主伞舱盖设计模型的特征曲面进行分类收集，并根据结构特点，采取在外围增加工艺台阶压板的方式，使得压紧力垂直作用于工艺台阶压板上，以解决主伞舱盖内外两面均为圆锥曲面而无定位基准面的难题，有效地减少了零件的装夹变形^[5]。主伞舱盖工艺台阶如图3所示。

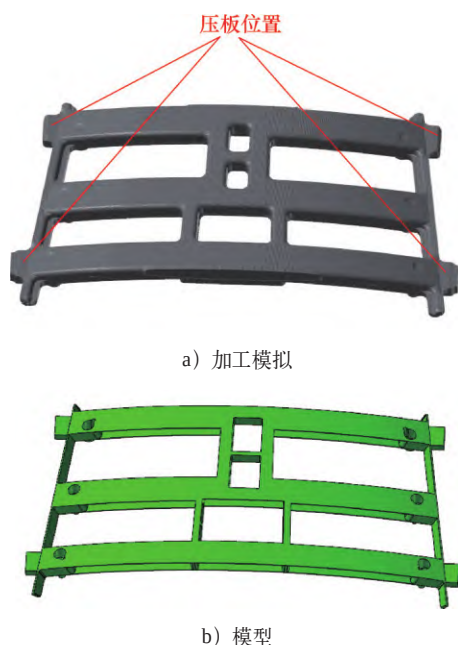


图3 主伞舱盖工艺台阶

在此基础上，对模型进行有限元分析，分别创建边界条件和载荷，边界条件为4个工艺台阶压板和内侧锥形面作为固定约束，载荷为125.6N，模拟内侧锥形面有、无支撑时的应力与变形情况。图4a、图4b分别为内侧锥形面无、有支撑时的应力云图，最大应力均出现在外侧锥形面底部中间位置，最大应力值分别为108.819MPa、150.202MPa。图5a、图5b分别为内侧锥形面无、有支撑时的变形量云图，

最大变形均出现在外侧锥形面底部中间位置，最大变形量分别为1.513mm、1.001mm。由图5可以看出，增加支撑后变形量减少30%以上，变形区域同样明显减小；增加支撑前后最大应力都远小于材料的许用应力（ $\sigma_{0.2} \geq 160\text{MPa}$ ）。由此可知，加工过

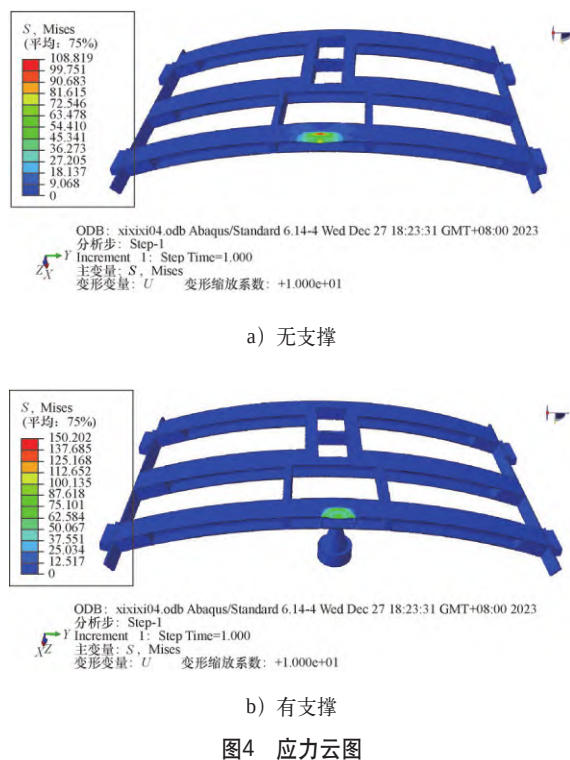


图4 应力云图

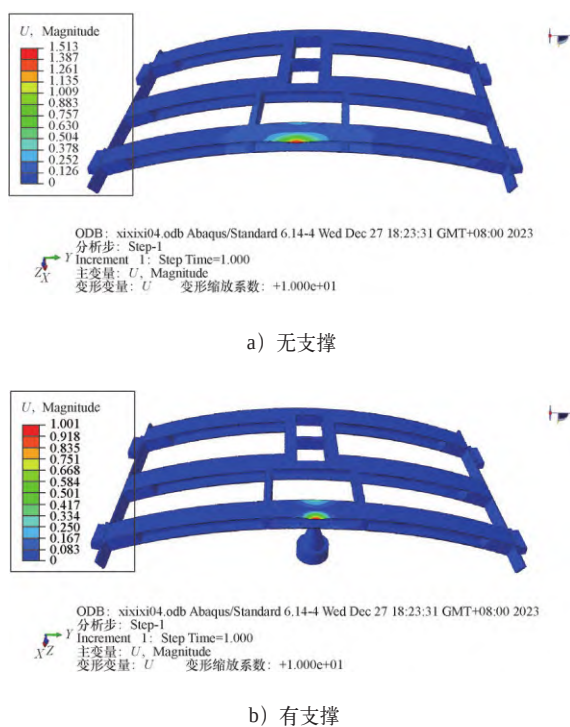


图5 变形量云图

程中强度满足要求，变形控制措施有效，装夹方式适宜采用。

3.2 工艺路线

工艺路线是决定能否高效地加工出满足精度要求零件的关键因素，一般要遵循先主后次、基准面先行的原则。考虑到主伞舱盖的外形特殊、技术要求高等特点，同时为了有效地控制变形^[6]，采用小吃刀量，多次反复铣削，其中穿插多次时效处理的工艺路线。

(1) 传统加工工艺 主伞舱盖的传统加工工艺路线见表1，粗铣加工需在五轴数控龙门铣床上完成，由于去除量大，占用设备时间较长，因此加工效率低、成本高。

表1 传统加工工艺路线

工序号	工序名称	工序内容	设备
0	备料	5A06-H112铝合金锻件	—
5	探伤	超声波探伤	—
10	复验	复验化学成分、力学性能	—
15	粗铣	铣削外形及减轻槽，减轻槽留20mm不加工	五轴数控龙门铣床
20	人工时效	140℃保温12h	—
25	半精铣	铣削外形及减轻槽，减轻槽留6mm不加工	五轴数控龙门铣床
30	半精铣	铣削内嵌减轻槽，留4mm不加工	卧式数控铣床
35	人工时效	140℃保温12h	—
40	精铣	粗、精铣，中间松紧压板	五轴数控龙门铣床
45	精铣	铣削内嵌减轻槽	卧式数控铣床
50	电火花加工	清根（内嵌减轻槽两端角落处）	—
55	铣削	铣削工艺台阶压板	卧式铣床
60	钳工	清理	—
65	检测	三坐标检测	—
70	调整	转装配	—

(2) 优化后的加工工艺 为了解决传统加工工艺效率低、成本高的问题，通过挖掘数控龙门铣床的加工能力，将以往在五轴数控龙门铣床上完成的粗铣、半精铣加工和在卧式数控铣床上完成的内嵌

减轻槽加工，调整在数控龙门铣床上进行^[7]，优化后的加工工艺路线见表2。

表2 优化后的加工工艺路线

工序号	工序名称	工序内容	设备
0	备料	5A06-H112铝合金锻件	—
5	探伤	超声波探伤	—
10	复验	复验化学成分、力学性能	—
15	粗铣	铣削外形及减轻槽，减轻槽留20mm不加工	数控龙门铣床
20	人工时效	140℃保温12h	—
25	半精铣	铣削外形及减轻槽，减轻槽留6mm、内嵌减轻槽留4mm不加工	数控龙门铣床
30	人工时效	140℃保温12h	—
35	精铣	粗、精铣，中间松紧压板	数控龙门铣床
40	电火花加工	自制磨头加清根（内嵌减轻槽两端角落处）	—
45	铣削	铣削工艺台阶压板	卧式铣床
50	钳工	清理	—
55	检测	三坐标检测	—
60	调整	转装配	—

通过表1、表2对比可以看出，与传统加工工艺比较，优化后的加工工艺具有以下优点：①将粗铣、半精铣加工从五轴数控龙门铣床剥离出来，改为使用数控龙门铣床加工。数控龙门铣床不仅使用成本远低于五轴数控龙门铣床，且功率大，适合去除量大的粗加工。②减少传统卧式数控铣床使用次数，消除了二次装夹、基准转换、对刀误差和变形对加工精度的影响。③一次装夹加工过程中对称粗开，整体开腔（不加工完，周边留量0.1mm，留底0.15mm左右）不通，将所有腔体加工完成后，最后去底，使得结构变形最小。④使用自制磨头专用工装及电火花组合清根，消除使用盘铣刀加工减轻槽的内槽后无法清根的现象，达到降低成本的目标。

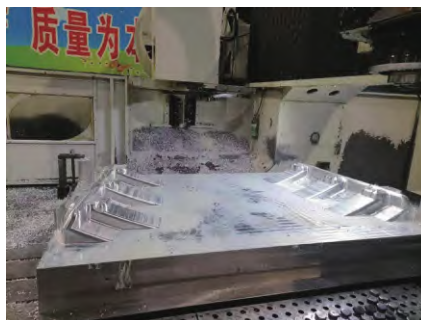
(3) 优化后加工工艺路线的优点 优化后的加工工艺路线总结如下：首先加工装夹定位基准面，再加工内侧锥形面及工艺台阶，然后翻面加工工艺台阶及外侧锥形面，经过充分的人工时效，最后精加工。

优化后的加工工艺路线具有以下优点：①粗加工安装面大，压紧固定牢靠。②强度大，定位准确。③能够去除更多的加工余量。④下一工序可以使用工艺台阶压紧，中间局部振颤位置增加辅助支

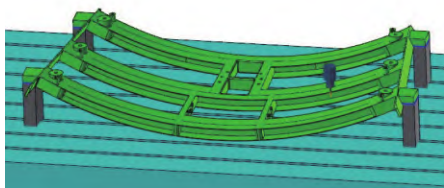
撑，提高强度。⑤粗加工、半精加工和精加工工序间增加人工时效，可消除切削应力，有效控制变形。⑥提高了加工效率。优化后的实际加工情况如图6所示。



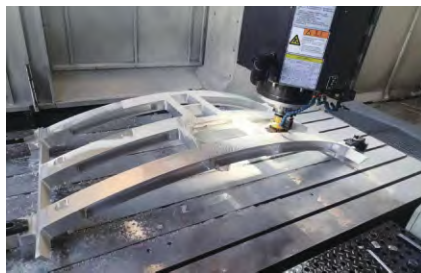
a) 粗铣三维图



b) 粗铣实物



c) 半精铣三维图



d) 半精铣实物



e) 精铣



f) 电火花加工

图6 优化后的实际加工情况

3.3 刀具选择

加工过程中，由于刀具和零件之间进行高速摩擦，产生切削热，在切削力和切削热的共同作用下，易造成材料的回弹变形、塑性变形和振颤，因此选取刀具时，需根据加工表面的形状特点、精度要求及经济因素来考虑。此外，应根据粗、精加工余量不同而采用不同的刀具，保证切削力小、效率高，可减少零件振动和变形。

综合考虑以上因素，粗铣选用 $\phi 63\text{mm}$ 合金铣刀，半精铣选用 $\phi 63\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$ 合金铣刀，精铣选用 $\phi 25\text{mm}$ 合金铣刀、 $\phi 14\text{mm} R7\text{mm}$ 棒棒糖球头铣刀、 $\phi 16\text{mm}$ 合金铣刀和 $\phi 12\text{mm} R6\text{mm}$ 钨钢球形铣刀。

3.4 刀具路径及切削参数

根据零件特点及加工经验可知，在加工中心铣削时，由外向内环切式走刀得到的表面残余应力分布更加均匀，应力值相对较小。此外，由外向内环

切式走刀轨迹产生的硬化程度相对较小，表面粗糙度值小，表面形貌也更加光滑，残留高度更小。在精加工时，采用数控高速加工工艺，原则是小切削

深度、快走刀，合理计算精加工余量，选择合适的刀具，减少零件大余量的切除，减少应力变形^[8, 9]。优化后的切削参数见表3。

表3 优化后的切削参数

工序名称	刀具	主轴转速/ (r/min)	切削速度/ (mm/min)	切削深度/mm
粗铣	φ63mmR5mm合金铣刀	4000	5000	2
半精铣	φ63mmR5mm合金铣刀	4000	5000	2
	φ25mm合金铣刀	3000	3000	0.5
	φ12mm钨钢铣刀	4500	3000	0.5
精铣	φ12mm钨钢铣刀	4500	3000	0.5
	φ12mmR6mm钨钢球形铣刀	3500	3000	0.3
	φ14mmR7mm棒棒糖球头铣刀	2500	1500	0.5
	φ16mm合金铣刀	3500	1200	0.5
	φ8mmR2mm圆鼻铣刀	4000	1500	0.2
	φ12mm×90° 倒角刀	4000	1000	—
	φ25mm合金铣刀	3000	3000	0.5
	φ16mm合金铣刀	3200	2500	0.4
	φ3mmR1.5mm合金铣刀	5000	800	0.25

4 优化点总结

经过对比，工艺优化后的加工效率提升15%以上，成本降低30%。具体优化点如下。

1) 采用MBD技术进行工艺分析，充分了解主伞舱盖的结构，选择曲面类零件基于数控加工用途的CAD/CAM方法，达到提高生产效率、高质量完成任务的目的。

2) 定位装夹方案的优化。对于不易装夹的曲面类薄壁零件在合适位置增加工艺台阶，使工序间的定位基准统一，并与设计基准统一，降低了工序间找正产生的误差，减少了变形。

3) 刀具路径的选择及切削参数优化，保证精度，控制变形。

5 结束语

主伞舱盖的加工过程中，根据零件和材料的特点，充分考虑应力及变形量大小，进行了工艺路线、刀具选型和加工参数的优化。实践证明，采用优化后的工艺方法，可实现以主伞舱盖为典型零件的铝合金薄壁框体零件的高效加工，有效地控制了变形，满足精度要求。

后续的加工中，针对材料利用率较低的特点，考虑采用3D打印技术，在满足强度和精度要求的前提下，显著地提高了材料利用率，有效地降低了成本。

参考文献：

[1] 雷江利, 牟金岗, 赵广秀, 等. 新一代载人飞船试验船回收着陆系统任务特点分析[J]. 国际太空, 2020 (9) : 8-12.

[2] 岳彩旭, 张俊涛, 刘献礼, 等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43 (4) : 99-124.

[3] 王志刚, 何宁, 武凯, 等. 薄壁零件加工变形分析及控制方案[J]. 中国机械工程, 2002, 12 (2) : 30-33.

[4] 戴世然, 韩伟, 李燕. 航空制造工程手册: 计算机辅助制造工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.

[5] 于金, 高彦梁. 多点柔性工装装夹布局优化研究[J]. 制造技术与机床, 2016 (2) : 124-129.

[6] 王启平, 王振龙, 狄士春. 机械制造工艺学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.

[7] 张本升, 李晓星. 机械制造工艺与装备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[8] 黄泽华, 李建勇, 樊文刚, 等. 复杂曲面薄壁叶片点铣加工弹性变形预测[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46 (5) : 67-72.

[9] 杨吟飞, 张崢, 李亮, 等. 7085铝合金残余应力及加工变形的数值仿真与试验[J]. 航空学报, 2014, 35 (2) : 574-581.