

航空梁体零件工艺方案的优化与改进

石鑫, 黎明, 汪金华, 敖晓晖, 苏校峰, 万鑫, 郑铠东, 何金龙

南昌新宝路航空科技有限公司 江西南昌 330096

摘要: 以航空梁体零件为例, 对初始工艺方案中存在的不足进行分析和论证, 通过改变加工方法和装夹方式、合并工序内容以及自制工装夹具等工艺改进措施, 重点解决生产中的瓶颈和难点问题, 提高零件表面质量和加工效率。

关键词: 航空; 梁体零件; 工艺方案; 装夹方式; 加工效率; 表面质量

1 序言

对于某些制造周期长、攻关难度大及价值量高的航空零件, 为了保障科研生产任务及交付节点, 通常会提前做好工艺准备与试造投产, 并对实际试造加工中遇到的问题(如工艺安排不合理, 设计尺寸、几何公差超差等)进行汇总、梳理与分析, 找出问题症结所在, 并逐个优化解决^[1, 2]。

以车间某航空梁体零件的工艺优化与改进为例, 该零件属于典型的深腔悬臂梁结构件, 其6个方位面均需加工, 腔深且型面较多, 实际用刀长径比高达12, 几何尺寸和公差要求多。毛坯来料尺寸大, 厚度150mm, 整体切削去除量大, 切削应力变形严重。悬出端最外侧端面距离底部平面较远, 加工过程极易扭曲变形。该梁体零件的初始工艺方案主要采用“3轴立式铣床+5轴高速加工中心+4轴数控机床”的加工模式, 加工内容按7:2:1的比例进行分配, 小批试造跟进生产发现, 3轴立式铣床加工中的排屑并不顺畅, 铣刀过切及让刀现象严重, 超差风险大, 其带来的不确定性给后续5轴精加工造成了困扰, 按照初始工艺方案完成的零件尺寸及几何公差超差严重, 报废风险高, 整个工艺方案不稳定, 不能满足后续批量生产要求, 严重拖累节点交付, 无法满足装备要求^[3]。亟待对整个工艺方案进行优化与改进, 寻求一种成熟度更高、更稳定且更适合公司车间批量生产加工的工艺方案。

2 零件结构

图1所示为梁体零件结构。零件来料为7050-T7451- δ 150mm, 属于中高强度硬铝拉伸板材。从设计结构上看, 该零件属于典型的深腔悬臂梁结构件, 其尾端悬出, 最长悬出158mm, 加工过程中极易扭曲变形。零件前、后、左、右、上和下6个方位面(分别记为d面、c面、e面、b面、a面和

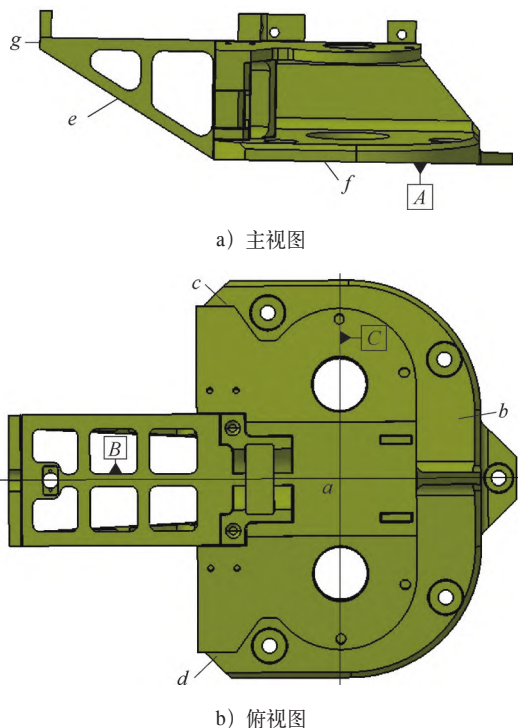


图1 梁体零件结构

f面)均需加工,存在多个深腔区域,最深处深度214mm,单件毛坯来料尺寸455mm×440mm×150mm,材料去除量大,经计算去除率高达91.6%,加工应力变形大,实际加工中需要对每个工位反复校准,以保证设计尺寸及几何公差要求。

3 加工难点分析

初始工艺方案(记为A方案)中,零件加工总体安排13个工位,重复定位误差大,每个工位加工均需校准找正,难度较高,稍有不慎便有校错加工原点、铣伤零件的风险。另外,设计要求几何公差9处,设计尺寸44处,仅悬出端面2个 $\phi 12H8$ 孔关于B基准面0.1mm的对称度这一形位要求,在实际加工过程中就极难保证。分析原因,一是由于零件自身悬出端较长,约158mm,悬出梁体中间空心无实体

支撑,因此加工后的扭曲变形存在不确定性,且小批试造的各零件间的状态又不一致;二是由于B基准面无法直接校准找正,因此需要通过一定的辅助手段间接校准与测量;三是由于单件来料毛坯尺寸大,毛坯去除量高,去除率高达91.6%,因此势必会带来高的切削应力,其引起的零件变形势必也会增大^[4, 5]。

4 初始工艺方案的缺点

在科研试造阶段,采用A方案共投产2件进行试切验证(分别记为1#件与2#件),为了更好地了解实际状况,在充分讨论加工工艺方案的基础上,在投产前对可能出现的部分关键风险点进行预设置,跟进生产后的1#件与2#件风险点检测与统计结果见表1。

表1 风险点检测与统计结果

关键风险点	理论值	1#件	2#件	结果	风控判定
8H9槽关于C基准对称度/mm	0.1	0.086	0.074	合格	一般稳定
2个 $\phi 12H8$ 孔关于B基准面对称度/mm	0.1	0.32	0.24	超差	严重超差
$59.2^{+0.15}_0$ mm关于B基准面对称度/mm	0.08	0.06	0.045	合格	一般稳定
阶梯孔轴线夹角	$10^\circ \pm 5'$	$10^\circ \pm 2'$	$10^\circ \pm 2'$	合格	稳定
阶梯孔同轴度/mm	$\phi 0.08$	$\phi 0.06$	$\phi 0.04$	合格	稳定

对试验结果进行分析如下。

1) 由于8H9槽两侧平面较小,其区域范围仅为0.8mm×10mm,即计量面宽仅为0.8mm,而实际上三坐标探头最小 $\phi 1$ mm,因此造成测量误差较大。虽然对称度0.1mm均合格,但超差风险仍存在,需要在实际加工中给予关注。

2) 1#件与2#件故障主要集中在2个 $\phi 12H8$ 孔关于B基准面的对称度0.1mm上。由于零件本身属于深腔悬臂梁结构,且2个 $\phi 12H8$ 孔所处尾端平面距离底部伸出距离158mm,中间悬空无实体,存在弯扭变形,且各工件变形状态不一,采用一次加工到位无法保证对称度要求,因此此处需要重新考虑加工方法,优化工艺安排。

3) 两精密阶梯孔同轴度 $\phi 0.08$ mm以及轴线空间夹角 $10^\circ \pm 5'$ 均检测合格,这是由于实际加工一次成形,从而有效保证了设计要求,这也为后续优化提供了思路。

4) 槽宽 $59.2^{+0.15}_0$ mm关于B基准面对称度0.08mm

得到保证,是由于实际加工中先将B基准面精确制出,后通过校B基准面微调加工原点来保证对称度要求。

综上,从风险点的故障统计情况来看,梁体零件后续工艺方案的优化与改进,应着重把控2个 $\phi 12H8$ 孔关于B基准面的对称度0.1mm这一要素。

5 工艺方案的优化与改进

对于梁体零件的加工,前后共设计与优化完成了5个工艺方案(依次以A~E表示),其中A~C方案属于零件科研试造阶段的“做到”阶段,主要用于1#件与2#件的试制,满足紧急试验任务需求,整体工艺方案并无大的更改,而是通过局部优化(如程序的切削参数调整与优化等)完成。D方案属于“做实”阶段,在1#件与2#件的试制结果(超差或是合格)基础上,不仅重新考虑和优化了超差故障区域的加工方法,还充分考虑到深腔排屑困难、几何公差应尽量统一基准以及一次加工成形等实际问

题与原则，将原工艺方案中的加工机床由立式3轴调整为卧式4轴，将涉及几何公差的3轴加工内容统一调至5轴数控一次加工成形，最大限度地将尽可能多的相关联的设计尺寸与几何公差由同一工位保证。E方案属于最终的“批量生产稳定方案”，是在D方案的基础上，增加了部分关键风控点的实操说明，更有利于提高整个工艺方案的实操性与确定性。初始工艺A方案与稳产工艺E方案的主要工艺流程见表2。

表2 A方案与E方案的工艺流程

工艺方案 (机械加工工序)	A	E
0	3轴粗加工f面	3轴粗加工f面
5	3轴粗加工a面	3轴粗加工a面
10	3轴粗加工b面	3轴粗加工b面
15	时效处理	时效处理
20	自由基准	自由基准
25	3轴精加工f面	3轴精加工f面
30	3轴精加工a面	3轴精加工a面
35	3轴精加工b面	4轴精加工b面
40	3轴精加工e面	4轴精加工e面
45	3轴精加工c面	4轴精加工c面
50	3轴精加工d面	4轴精加工d面
55	5轴精加工a面	5轴精加工f面
60	5轴精加工f面	5轴精加工a面
65	4轴精加工g面孔	计量外形轮廓
70	4轴精加工c面孔	4轴精加工g面孔
75	4轴精加工d面孔	计量孔位
80	计量外形轮廓及孔位	4轴精加工c面孔
85	5轴铣薄a面连接块	4轴精加工d面孔
90	切断	5轴铣薄a面连接块
95	钻保险孔	切断
100	—	钻保险孔

6 典型工装的应用

在梁体零件的整个加工过程中，为了减少工位转换以及重复定位所带来的误差，确保几何公差等技术要求，共设计与使用自制工装4种。为了整合4轴卧式加工中心工序内容，确保基准统一，缩减辅助装夹时间，设计了4轴卧式加工中心多工位通用工装（见图2），将卧式加工中心4个工位共计4套装夹与定位孔统一到1个工装上，且各孔之间不冲突、不重叠，设计难度较高。为保证悬出端面2个 $\phi 12H8$ 精

密孔关于B基准面的对称度0.1mm（前述风险点）要求，设计了端面精密孔加工辅助工装（见图3），将4轴卧式加工中心要加工的2个 $\phi 12H8$ 孔的共计2套装夹与定位孔统一到1个工装上，并充分利用零件自身4处螺栓孔位，同时工装上额外增加了3处B基准面定位孔，起到对称度校验的作用。

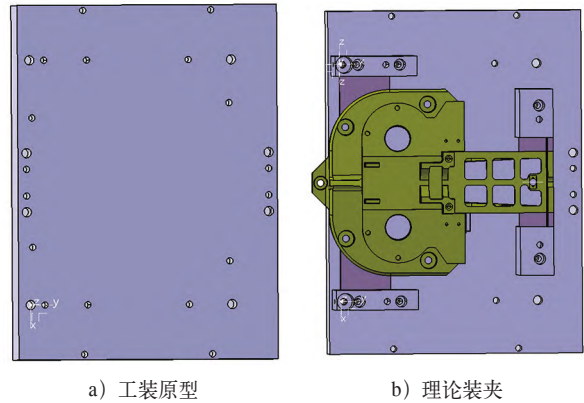


图2 4轴卧式加工中心多工位通用工装

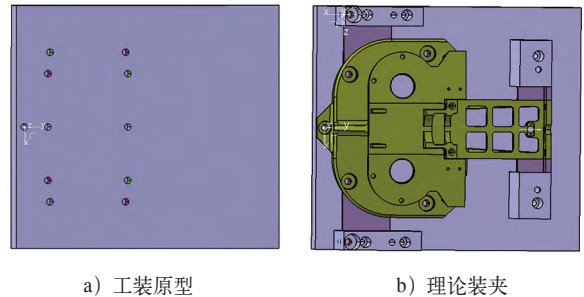


图3 端面精密孔加工辅助工装

在采用4轴卧式加工中心加工梁体时，图2和图3所示2种自制工装的应用极为典型，前者有效解决了卧式加工中心4个工位的装夹与定位问题，极大地提高了装夹效率；后者在加工悬出端面精密孔时，通过3处B基准面定位孔定位，再利用零件自身4处螺栓孔进行装夹，有效保证了2个 $\phi 12H8$ 孔关于B基准面的对称度0.1mm，解决了初始A方案的对称度超差问题。2种工装的实际应用分别如图4、图5所示。



图4 4轴卧式加工中心多工位通用工装的实际应用



图5 端面精密孔加工辅助工装的实际应用

7 新旧工艺方案对比

(1) 合格率对比 根据实际生产零件的检测结果，对初始旧工艺A方案与稳产新工艺E方案的典型加工数据进行汇总与对比，零件一次交验合格率及关键风控点合格情况对比见表3。

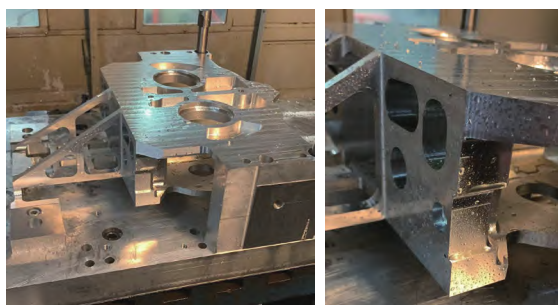
(2) 数控加工时间对比 以旧工艺A方案1#件

和2#件机械加工均时(天/件)与新工艺E方案小批量6件(3#件~8#件)机械加工均时(天/件)进行数据对比可知，采用A方案单件机械加工均时13天/件，采用E方案单件机械加工时间可控制在9天/件左右，加工效率提高25%。

(3) 表面质量对比 通过查看1#件和2#件，发现零件表面质量问题主要集中在深腔转角的处理上，其余部位表面质量尚可，由此看来深腔转角的处理应是控制整体表面质量的关键。实际深腔加工中，主要采用“由短到长、由浅入深”的用刀方式进行粗加工，中间穿插半精加工，在深腔转角处预留0.1~0.2mm的切削余量，最后再精铣一刀，即可较好地提高深腔转角的表面质量，从而提升零件整体的表面质量。梁体零件整体与局部表面加工效果如图6所示。

表3 新旧工艺方案检测结果对比

项目	A方案		E方案					
	1#件	2#件	3#件	4#件	5#件	6#件	7#件	8#件
2个 $\phi 12H8$ 孔关于B基准面的对称度/mm (设计要求0.1mm)	0.32	0.24	0.097	0.035	0.028	0.018	0.027	0.075
一次交验合格率	0		100%					
方案综合判定	不稳定，成熟度低		稳定，批量生产成熟度高					



a) 整体表面质量

b) 局部表面质量

图6 整体与局部表面加工效果

8 结束语

对于某航空梁体零件的加工，前后共提出5种工艺方案。对旧工艺A方案与新工艺E方案进行对比分析，将最佳优化方案E投入到实际零件的批量生产中，大幅提高了梁体零件的加工效率，几何公差等关键风控点得到保证，表面质量也得到一定的提升，一次交验合格率达到100%，节点交付周期明显缩减，很好地满足了科研试验任务与装备需求，达

到了本次优化与改进的目的。同时，梁体工艺方案的优化与改进对相同类型零件的工艺编排也具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 欧阳阿宁, 石鑫, 熊洪源, 等. 接头零件工艺方案的优化与改进[J]. 金属加工(冷加工), 2023(3): 39-41.
- [2] 薛祥友, 辛浩, 孙捷夫, 等. 航空铝合金薄壁件加工变形的分析与工艺方案设计[J]. 工具技术, 2023(7): 125-128.
- [3] 石鑫, 彭贞城, 黄声鹏, 等. 某肋框零件的外观工艺质量提升实践[J]. 金属加工(冷加工), 2022(7): 84-86.
- [4] 祝博, 李华龙, 卞伟宇. 垂尾隔板的数控加工工艺设计[J]. 工具技术, 2022(10): 121-124.
- [5] 邱述龙, 李国平, 李镜悬. 薄壁类金属零件数控加工工艺分析[J]. 世界有色金属, 2021(23): 19-21.

MW 20240307