钛合金腹板梁的加工

赵军，孙国雁，黄炎
航空工业沈飞（集团）有限公司数控加工厂　辽宁沈阳　110034

摘要：对某腹板梁进行结构分析，结合钛合金材料性能，制定合理的加工方案，包括机床夹具、刀具、量具及加工参数等，通过归纳该零件的数字化制造过程，总结出一套适用于相似件的数字化加工方法。

关键词：钛合金；腹板梁；数字化加工；刀具；定位；测量

1　序言

钛合金由于密度小、比强度高及耐蚀性强等特点，近年来已经在国际航空事业中得到了大规模的应用。钛合金材料具有热导率小、弹性模量小及化学活性高等特点，在实际加工中，容易造成切削温度高、回弹严重、刀具寿命短及切削效率低等问题，降低了钛合金的可加工性[1]。分析零件结构，钛合金零件多为薄壁、内外形复杂的零件，毛料去除率一般为80%～90%，去除量较大，因此如何合理安排加工方案，从而优质高效地加工钛合金零件，显得十分重要和必要。

2　零件结构及加工要求

图1所示腹板梁零件的外廓尺寸为1060mm×420mm×64mm，材料为钛合金。

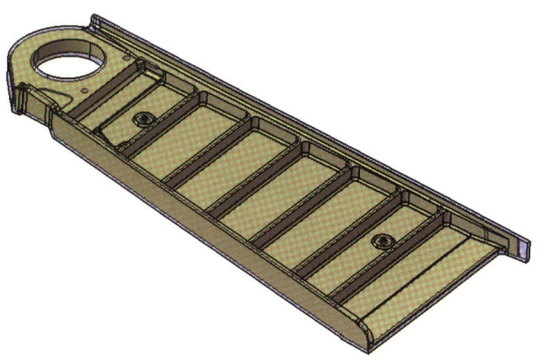

图1　腹板梁零件

腹板梁是某组合腹板的主要焊接承力部件，属于典型腹板梁类结构，单面槽腔、正反端面均为多个平面接合而成，为典型的AB面加工零件。实际加工中，毛料为模锻件，均匀余量3mm。此外，腹板梁部分外形处均需预留焊接余量，薄壁处尺寸精度要求高，数控加工存在难度。

3　工艺分析

在数字化加工过程中，主要需要考虑材料性能、工艺方案，其中工艺方案包括机床夹具、加工方法、刀具及量具等多方面因素，要逐一分析各因素中的具体问题，并制定详细的解决方案，才能保证腹板梁优质高效地加工。

3.1　材料性能

该零件材料属于典型的α钛合金，热处理后硬度和强度都有所增大，属于航空难加工材料。分析材料的机械加工性能，其劣势主要有以下几方面。

1）钛合金导热系数小、散热性能差，加工过程中温度高，切屑易产生粘刀现象。

2）钛合金比热小、热量不易扩散，加工过程中，刀具局部位置持续高温，加快了刀具磨损，增大了发生崩齿现象的概率。

3）TA15 M钛合金在高温环境下，化学稳定性差，400℃以上即可产生致密氧化膜，还与氮、氢等发生反应，增加了加工难度。

结合材料主要特点，在实际数控铣加工过程中，采用大前角、小后角刀具，前/后角分别取6°～8°、6°～12°。刀具材料以硬质合金钢为主，保证切屑可以快速脱落、带走热量，降低了表面烧伤、氧化及粘刀切伤的风险。

3.2 工艺结构

腹板梁在装配过程中充当梁类承力部件，但实际结构更偏向于腹板零件，名称也由此而来。腹板梁主要工艺结构特点如下。

1）单面槽腔结构，另一面为多平面结合的折面区。

2）腹板厚度存在4mm、3.5mm、3mm及5mm等多种规格。

3）缘条厚度存在6mm、8mm、10mm、12mm及2.5mm等多种规格。

4）头部内形结构尺寸较多，精度要求高。

5）多处腹板面夹角≠180°，需摆轴加工。

6）毛料为模锻件，除孔外其余均匀余量3mm，加工容差率低。

通过分析可知，主要加工难点有4处。

1）腹板、缘条末端薄壁处因缺少连接结构，100%让刀，薄壁尺寸难以保证。

2）多处底平面需要接合，接合处需光滑过渡，加工存在难度。

3）头部ϕ140mm孔为装配孔，孔径及孔位精度要求高，存在热处理变形的情况，需要解决。

4）毛料均匀余量3mm，无法预留定位耳片，装夹定位存在难度。

4 方案论证

为解决上述问题，需要从加工刀具、装夹定位和加工流程等方面入手，保证合理且互相协调。

4.1 加工刀具

分析腹板梁结构可知，该零件高度跨度小，来料余量小，没有配合槽口结构，反面均为平面接合，正面存在型腔结构，型腔转角90%为R10mm，底角均为R5mm，确定各工序使用的刀具见表1。

表 1 各工序使用的刀具

加工工序	使用刀具（反面/正面）	下刀深（反面/正面）/（mm/mm）
粗加工	ϕ160$R$3/ϕ40$R$5硬质合金刀具	≈40/50～60
半精加工（0.8mm余量）	无/ϕ30$R$5硬质合金刀具	无/50～60
精加工	ϕ40$R$3/ϕ20$R$5硬质合金刀具	≈40/50～60

4.2 装夹定位

由于腹板梁零件来料为均匀3mm余量的模锻件，无法使用凸台定位，因此确定采用2个ϕ18mm加强孔及筋条上表面/下表面的一面两孔定位方式，具体流程如图2所示。

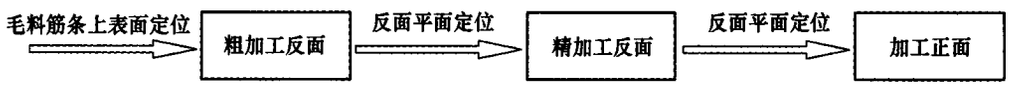

图 2 一面两孔定位具体流程

一面两孔定位可保证定位准确，减小累积定位误差，是保证产品精度的重要一步。

4.3 加工方式

该腹板梁属于典型的双面腹板类零件，因此采用AB面的加工方式即可，即反面粗加工→反面精加工→正面粗精加工，具体如下。

1）反面粗铣1mm余量，半精铣0.5mm余量，精铣到位，保证各平面表面粗糙度合格，阶差尺寸保证到位。

2）正面半精铣0.8mm余量，精铣到位，减少刀路重复次数。由于反面已经加工到位，大平面定位准确性高，所以可直接半精铣、精铣到位。

3）精铣时采用先腹板、后缘条、末筋条的形式，避免了缘条过切、腹板刮伤的现象。

针对3.2中的4处加工难点，制定具体的解决方案如下。

1）针对末端薄壁处尺寸，由于没有连接结构，加工过程中薄壁处受刀具轴向力后会发生变形，从而产生让刀现象，导致薄壁处尺寸无法切削到位，且具体偏离数值无法得到控制，如果增加刀具长度补偿，就会造成腹板切伤，工作量将成倍增加。图3为理论上及实际切削时薄壁处外形，其中虚线部分为理论上切削时薄壁处外形；实线部分为实际切削时薄壁处外形。

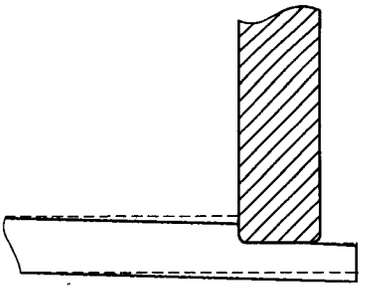

图 3 理论上及实际切削时薄壁处外形

针对此情况，采用预留余量的加工方式，即数控加工预留0.5mm余量，后续常规使用垫块支撑，加工到位。相比于数控加工，常规装夹更加灵活，对于薄壁处可以使用自调千斤顶进行加固，防止了让刀现象的发生。

2）针对反面平面相接处，采用ϕ10$R$5硬质合金铣刀底角行切的方式加工到位，虽然加工周期延长，但保证了相接处的加工精度和表面质量。

3）针对头部ϕ140mm孔热处理变形的情况，采取预留余量的方式，即热处理前加工至ϕ136mm，单边留2mm余量，热处理后对比样板进行校正，后续补加工到位。

4）由于毛料均匀余量3mm，无法预留凸台装夹，因此只能利用外形3mm余量加工压点，正反面加工1/2高度的外形，用于压装压板，最终外形通过正反两面接合加工到位（见图4）。该方法的优点在于，加工时不需要重复替换压板，减少了接刀痕迹的数量，提高了整体表面质量，刀路轨迹清晰、有条理，同时提高了加工效率。

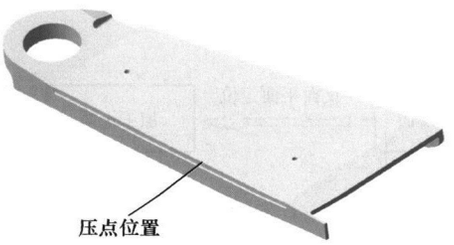

图4　外形通过正反两面接合加工到位

5　加工容差分配及测量方式的选择

在机械加工中，由于机床误差、定位误差及操作误差等不可避免的原因，实物零件会与设计数模在尺寸方面有一定的偏差，选择合理的偏差范围是保证零件能够满足交付及后续使用的条件之一[2]。零件按照设计要求，腹板厚度极限偏差为$^{+0.3}_{-0.2}$mm、缘筋条厚度偏差为±0.2mm，按照通用技术条件要求，外形公差为±0.2mm、孔位公差为±0.1mm。

由于该零件在航空产品中生产数量较多，因此制作了专门用于检查零件位置和部分尺寸的模线样板、反切外样板，通过样板可以准确直观地检查零件内外形及孔位，相对于数字化测量，样板检查提高了交付效率，缩短了腹板梁的整体生产周期。

6　结束语

本文研究探讨了钛合金材料的性能和加工难点，对常用的刀具特点、加工思路进行了分析；探讨了腹板梁局部难加工特点，制定并验证了有针对性的解决方案；对腹板梁及类似件的完整加工流程进行梳理，总结出加工该零件的详细方案。

钛合金零件的数字化加工现已成为航空、航天、汽车和船舶等行业的关键技术之一，如何优质高效地加工钛合金零件已成为目前机械加工行业的主要研究方向。通过对某腹板梁典型零件的加工特征进行分析，制定了详细的工艺方案，包括装夹方案，刀具、量具及容差选择等，为腹板梁按时高效地交付提供了技术支持，同时也为类似零件后期的工艺准备提供了充足的技术储备。

参考文献：

[1] 张伟. 简述钛合金材料的机械加工工艺[J]. 中国科技纵横，2014（5）：63.

[2] 郑文纬，吴克坚，郑星河. 机械原理[M]. 7版. 北京：高等教育出版社，1997.

MW 20210927

专家点评

本文探讨了钛合金材料的切削性能劣势和腹板梁结构的主要加工难点，逐一分析工艺因素中的各种具体问题，并制定详细的解决方案，通过对常用刀具和加工思路进行工艺验证，总结出腹板梁及类似零件的完整加工流程和详细加工方法，具有很好的实用性。

文章的方案论证部分写得较好，论据充分、条例清晰，从加工刀具、装夹定位及加工方法等方面入手，抓住重点，互相协调，实现了腹板梁零件的优质高效加工。