基于数字化制造的某肋缘条高效加工技术研究

■ 海军驻沈阳地区航空军事代表室 （辽宁 110034） 王 伟

■ 中航工业沈阳飞机工业集团有限公司 （辽宁 110850） 张 殊 王金海 孙国雁

摘要：针对某项目肋部缘条的结构特点进行工艺性分析，确定了该产品的数字化加工方案。对走刀路径及切削参数进行优化分析与设计，深入挖掘机床与刀具潜能，并运用国内外先进的整体化加工思路及高效加工思想，使该类零件的加工效率大幅度提高。

某项目肋部缘条类零件属于某传动机构，缘条连接着两侧接头与中间腹板，它们经焊接处理后共同组成了盒体机构。此机构连接着墙和大壁板，为主要的承力结构件。缘条上的理论形面直接与蒙皮贴合，缘条外形面的加工精度直接影响理论气动外形的精度；缘条耳片则是整个盒体机构的主要承力单元，缘条耳片孔锁紧后，通过剪切应力的受力方式承受着几乎所有传递来的载荷。所以，缘条类零件的加工质量关乎整架飞机的飞行安全性。而该类缘条在每架份飞机上有16～20个，数量大、生产周期长，如何在保证加工质量的前提下实现高效率的生产，成为该系列机型急需攻关的重点项目。

1. 零件结构与加工工艺性分析

该缘条零件是某项目肋组件的重要受力构件之一，具有安全传递载荷和实现各部位连接之功用。其零件形状较为复杂，带有理论外形面，耳片间距小，耳片孔同轴度要求高。缘条类零件结构为大尺寸多型面结构，毛料状态为B类状态模锻件，其典型结构如图1所示。

（1）零件毛料分析。毛料为B类状态钛合金模锻件，单边均匀余量4mm，材料为高强度钛合金，退火状态。毛料外廓尺寸为900mm×300mm×65mm，毛料质量为23.2kg。

（2）钛合金材料特性分析。

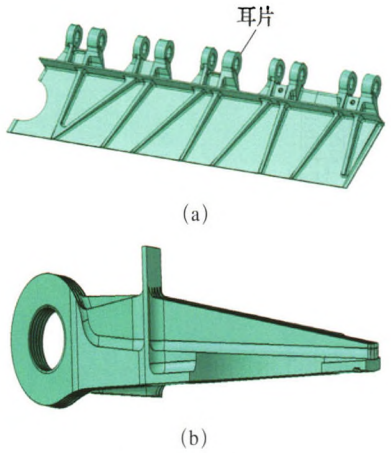


图1 缘条结构

在航空领域广泛应用的钛合金可分为3种：α钛合金、β钛合金和$\alpha+\beta$钛合金。$\alpha+\beta$钛合金由α和β双相组成，这类合金组织稳定，有较好的高温变形性能、韧性和塑性，可以通过淬火、时效处理等使其组织结构得以强化。

钛合金有如下特点：①高强度（σ_b=62～148kg/mm^2），低密度（ρ=4.5×10^{3}kg/m^3）。②热强度高，温度在400℃左右时，强度是铝合金的9～11倍。③工艺性差。钛合金材料硬度大，导热系数低，加工时容易产生很大的热量，使其工艺性大大降低。④耐腐蚀性好。

（3）零件结构特点。零件外廓尺寸为800mm×261mm×108mm，按三维数模制造。零件一侧为翼面理论外形面，开有下陷槽腔。另一面为开敞槽腔结构，筋条高度由5.6～19.0mm渐变。耳片直径为24mm，耳片间距为32mm，耳片厚度及耳片槽

口尺寸为关键尺寸，公差范围为0.2mm。腹板厚度为3.8mm，底角为R4mm，最小转角为R4mm。

（4）加工难点分析。①产量要求高，加工效率难以满足当前产量要求。②理论形面各处曲率难以保证。③后续零件需进行焊接，焊接状态不可控，破坏机加形位尺寸。④耳片孔边距以及耳片孔同轴度难以保证。

2. 加工方案分析及技术关键点突破

结合以上加工难点，若想实现缘条类零件的数字化高效加工，则必须突破以下关键点：钛合金高速铣削技术、转角处理技术、工艺装备辅助定位、预留机加余量以及进刀宏指令控制方法。

钛合金缘条类零件数字化高效加工技术旨在通过合理高效的数控加工编程方法，融合钛合金高效加工思想，选择合理的加工参数和高效刀具，设计出一套工艺方法合理、机床利用率高且产品质量稳定的高效加工方案，并进行实际的生产来验证。在此基础上构建了钛合金缘条类零件加工流程，该方案由以下4个方面组成。

（1）钛合金高效铣削技术。利用先进的编程技术，综合考虑机床利用率、刀具磨损情况等因素，力争实现最高效的钛合金铣削方案。衡量铣削是否高效的重要指标就是金属去除率，即单位时间内去除金属的体积，用Q表示，可按下式计算

$$Q=a_e a_p v_f \qquad (1)$$

式中，Q为金属去除率（mm^3/min）；a_e为径向切削深度（mm）；a_p为轴向切削深度（mm）；v_f为进给速度（mm/min）。

切削加工中，金属去除率与切削用量三要素a_e、a_p和v_f均保持线性关系，其中任一参数增大一倍，都可使金属去除率提高一倍。然而由于刀具寿命的制约，当任一参数增大时，其他二参数必须减小。为达到高效铣削的目的，选择切削用量时需遵循一定的原则：①粗加工时，选用较小的进给速度以及较大的轴向切削深度和径向切削深度。②精加工时，选用较大的进给速度、较大的轴向切削深度和较小的径向切削深度（一般为0.5～2.0mm）。③加工外形时采用径向分层，即取较大的轴向切削深度，铣内形时采用轴向分层。

通过大量零件的切削加工及刀具加工试验，获得了较理想的切削用量，数据如表1～表3所示。

（2）转角处理技术。在铣削槽腔结构或带有筋条侧壁结构时，由于粗加工使用的刀具直径较大，而精加工时根据转角半径选用较小直径的刀具，这样就势必会造成转角处切削量大的情况，使精加工余量不均匀，造成折刀、崩刃现象，严重影响产品质量。目前解决此问题的方案主要有：①转角减速处理。②插铣后轮廓切削。③轴向分层轮廓切削。

应用转角减速方法时应注意：①使用转角减速需要考虑粗加工刀具的直径以及精加工刀具直径的大小及底R，这些涉及到在转接R处需要采用哪种方式进行精加工，或进行几次加工去处余量。如果前一把刀具的直径较大，后一把刀具的直径较小，可能需要多次加工才能去除转角处余量；或者转角的角度较小，也需要进行多次加工。②转角减速时需计算减速前后的距离，准确

表1　ϕ40mm和ϕ50mm立铣刀的切削参数

切削速度v/（m·min^{-1}）	每齿进给量a_z/（mm·z^{-1}）	进给速度v_f/（mm·min^{-1}）	切削深度a_p/mm	径向进给量a_e/mm	工作齿数z	备注
12～18	0.05～0.12	20～70	5～25	10～40	5	粗铣
15～80	0.03～0.07	50～160	5～35	0.5～2.0	5	精铣

表2　ϕ19R3立铣刀的切削参数

切削速度v/（m·min^{-1}）	每齿进给量a_z/（mm·z^{-1}）	进给速度v_f/（mm·min^{-1}）	切削深度a_p/mm	径向进给量a_e/mm	工作齿数z	备注
15～30	0.02～0.05	30～120	10～30	0.5～1.5	4	国产刀
18～100	0.02～0.05	50～500	10～30	0.5～1.5	4	进口刀

表3　ϕ30R15立铣刀的行切切削参数

切削速度v/（m·min^{-1}）	每齿进给量a_z/（mm·z^{-1}）	进给速度v_f/（mm·min-1）	切削深度a_p/mm	径向进给量a_e/mm	工作齿数z	备注
50～100	0.1 0 ～0.25	400～800	1～2	0.5～2	4	

的计算既可以节省不必要的加工时间、提高加工效率，又可以避免因减速距离过短而带来的刀具磨损所导致的加工质量不好。转角减速距离计算示意图如图2所示，公式总结如下

$$L=\frac{R+m-r}{\sqrt{\frac{1}{(\cos\frac{\alpha}{2})^2}-1}}+\sqrt{r^2-(r-m)^2} \quad (2)$$

式中，L为转角减速距离（mm）；α为转角两侧侧壁之间的角度（°）；r为精加工使用的刀具半径（mm）；R为粗加工使用的刀具半径（mm）；m为粗加工预留余量（mm）。

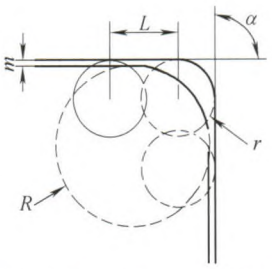


图2　转角减速距离计算示意图

某缘条类零件的转角采用插铣方式，该方法不同于前两种转角处理的方式，它是通过机床沿着刀具的轴向切入零件毛坯，类似于钻削的一种加工方法，插铣转角刀路如图3所示。常规的侧刃铣加工方法，刀杆部分受力主要是径向力，随着刀具长度的增加，刀杆部分受到的弯曲力矩越来越大，对刀杆材料的要求也越来越高，即使采用硬质合金材料、超长的刀杆，也易使螺旋铣刀发生振颤。由于插铣加工时径向切削力较低，由传统加工方法的径向切削，变为刀具的轴向切削，刀杆承受轴向载荷的能力要远强于径向。由于插铣切削面积小于侧刃铣，加工过程中的切削力也明显地减小，所以转角采用插铣方式一般不会出现刀具折断或掉刀现象。

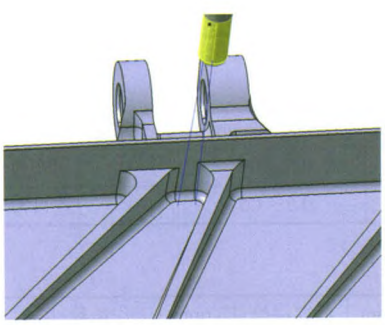


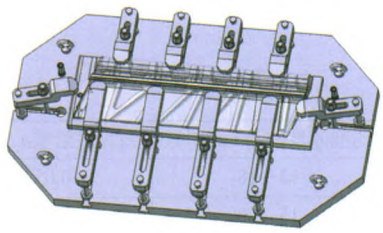
图3　插铣转角

转角插铣加工的技术优势为：①提高加工效率。插铣1个转角的时间不到1min，20处转角，总计可以节省时间约1h，加工效率提高2倍以上。②节省刀具成本。一架份缘条类零件可以节约16～20把刀具，约合8万～10万元。③降低质量风险。插铣在切削时，刀杆主要承受轴向力，径向切削力小，另外刀杆承受轴向载荷的能力强于径向，所以转角采用插铣方式基本上不会出现刀具折断或掉刀现象。

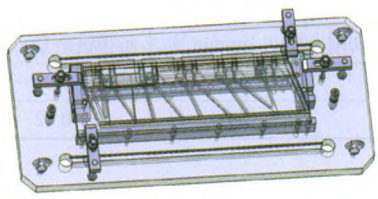
（3）定位方式及状态协调。由于缘条类零件正反两面为双曲面形状，其中一面是理论外形面，所以零件本身并无合适的定位基准以及加工基准。现应用工艺凸台辅助定位技术，在零件两侧预留出工艺凸台，以“一面两孔”的定位方式（将定位销孔预留在两侧凸台上），实现缘条类零件翼面一侧的加工定位。而对于非翼面一侧的加工，则申请了专用工装作为辅助定位装置，这样加工非翼面一侧时可以保证侧翼面与工装的贴合程度好，工艺系统刚度高，有利于提高切削参数和保证加工质量。定位方式如图4所示。

由于缘条类零件在机加工序完成后，需要进行热处理和焊接工序，故变形量和变形状态比较难以控制，所以就涉及到与其他专业协调状态的问题。比如，缘条与接头对合处的焊条厚度预留0.3mm余量，保证后续焊接对合精度。耳片外圆翼面一侧预留0.75mm余量，非翼面一侧预留0.5mm余量，这样可以保证变形后耳片孔边距仍然符合要求。而预留余量的去除方式，现采用数控加工，替代了钳工打磨，单件缘条即可缩短加工时间3～5h，加工效率显著提升。

（4）进刀宏指令控制。缘条类零件耳片外圆全部采用行切方式加工，B类状态锻件单边余量为4mm，考虑焊接变形因素，为焊接专业留有0.50～0.75mm加工预留量，实际切削量大致为3.25～3.50mm。行切时径向排刀较密，故行切的切削量很小，可以实现高转速、高进给来提高加工效率。但是进刀时的第一层切削深度很大，可达3.5mm，严重影响和制约了整个行切过程的进给



（a）非理论形面加工



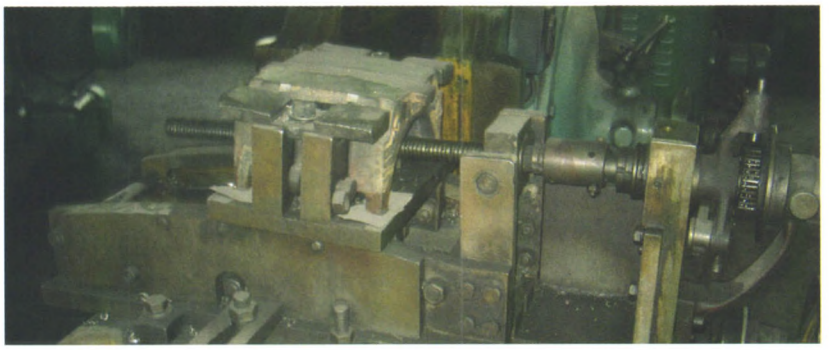
（b）理论形面加工

图4　工装定位方式

铁道车辆用承载鞍超大圆弧面加工

■ 太原机车车辆配件厂 （山西 030003） 田建忠

摘要：针对铁道车辆用承载鞍顶部超大圆弧面的加工问题，通过在普通设备的牛头刨床中设计专用靠模式工装，并与机床自动进给链相连接，实现了工件沿设定轨迹运动并自动进给的功能，较好地解决了加工工艺难题，为类似技术问题提供了经济、有效的解决途径。



铁道车辆用承载鞍是车辆轮对轴承组件的支承件，用以传递来自车体的载荷，在车辆转向架中具有十分重要的作用。根据使用要求，其顶部设计有*R*1 520mm的超大圆弧面，并且要求切削加工。当采用加工中心加工不适宜、企业又不具备其他大型加工设备的情况下，就给加工带来了一定的难度。如何利用企业的现有设备，通过配置工艺装备来扩大其加工功能，从而经济、有效地解决这一技术难题，就显得尤为关键。

速度，使整体行切的加工速度大打折扣。为解决此问题，使用了进刀宏指令控制第一层的进给速度，而其余部分按正常行切速度来加工，即可有效避免此问题，刀路如图5所示。图中黄色刀路（行切第一层）设置为进刀宏，进给速度为80mm/min，绿色刀路为正常行切轨迹，进给速度为350mm/min。

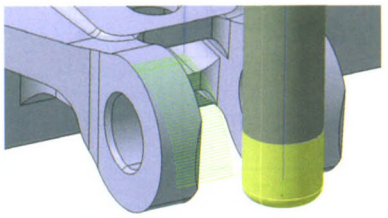


图5 进刀宏指令应用于行切加工

3. 结语

本文给出了缘条类零件高效数字化加工的工艺方法，运用钛合金高速铣削技术、转角处理技术、工艺装备辅助定位、预留机加余量控制变形以及进刀宏指令控制等方法，解决了该类零件加工效率低、制约公司某机型生产进度的问题。该工艺方法已在公司多个缘条类零件制造中得到应用验证，运行稳定、高效，加工质量高，取得了显著效果。同时为以后缘条类零件的加工提供了宝贵经验。

参考文献：

[1] 陈五一，袁岳峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术，2010（15）：15-18.

MW（收稿日期：20161001）

专家点评

文章以缘条类钛合金零件的数字化加工方案和整体加工思路为主线，运用高效的工艺方法和高速铣削技术，优化走刀路径及切削参数，提高了加工效率，为类似零件的加工提供了宝贵经验。