

高温合金精锻涡轮叶片加工方案

初永春

中车大连机车研究所有限公司 辽宁大连 116041

摘要：介绍了四轴加工中心加工复杂曲面的涡轮叶片加工工装设计及加工程序的编制方法，对加工工装的设计原理及编制程序时容易出现的问题以及解决办法进行了分析和研究。

关键词：涡轮叶片；锻造飞边；四轴加工中心；工装；编程

1 序言

涡轮叶片是增压器的核心部件，叶片的性能直接影响增压器的性能。传统的叶片成型方式有两种——精密铸造成型和锻造成型。精密铸造成型的叶片叶身不用加工，仅磨削加工榫齿即可。但是铸造成型的叶片性能低，适用于膨胀比低（压比低）的增压器。随着柴油机涡轮增压技术的发展，柴油机输出功率越来越高，要求的增压器膨胀比也越来越高。新研发的一款增压器最高膨胀比达到6.0，要求叶片采用锻造成型才能满足增压器的性能要求。锻造成型的叶片中有一种加工方法是叶片留4mm以上的加工余量，采用五轴加工中心铣削加工叶片叶身型面。这种方法加工的叶片精度较高，但加工效率低，高温合金材料属于难加工材料，大量的加工余量造成加工刀具成本大幅增加，而且五轴机床的加工成本也偏高。

随着高温合金材料精锻技术的发展，目前叶片叶身型面已经能精密锻造成型（见图1），但在叶片的进出气边位置会留有锻造飞边，需要去除。叶片主要加工工序是先铣削加工叶片进出气边的锻造飞边，然后用加工后的叶片片身曲面定位夹持，通过缓进磨床工序完成叶片根部榫齿加工，再以榫齿定位夹持，通过线切割机床切割去除叶片端部的工艺定位点。其中除了铣削加工叶片进出气边工序为锻造叶片独有的新加工工序，其他工序都为传统的叶片加工工序或相对简单的工序。

本文主要针对加工难度及成本较高的铣削加工

叶片进出气边新工序进行研究分析，由于叶片的进出气边需要圆角过渡，对过渡形线精度要求严格，增加了加工难度。为降低加工成本，采用四轴加工中心完成叶片锻造飞边加工（常规四轴加工中心的加工费是五轴加工中心的1/5）。四轴加工中心加工精密锻造叶片飞边的主要核心技术有两个：叶片加工工装和四轴叶片进出气边曲面加工程序编制。本文通过应用UG软件的三维建模、装配验证和程序编制功能，分析产品和机床的特性，设计了一款定位准确、夹持可靠的四轴加工中心的旋转工装，编制了四轴加工中心的叶片加工程序，解决了工装设计和编程中出现的问题，使程序编制更精准合理，加工效率和稳定性更高。

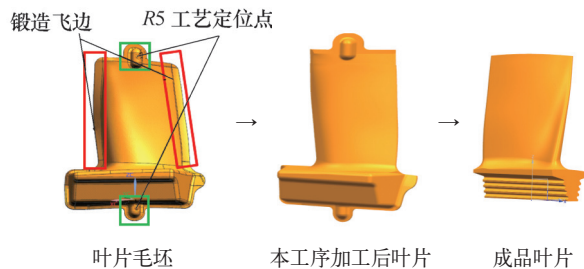


图1 精锻叶片毛坯及成品叶片

2 毛坯、机床、刀具和软件

(1) 毛坯 叶片曲面位置已经精密锻造成型，留有4mm飞边需要加工去除，留有R5mm、长5mm的工艺定位点（见图1）。

(2) 机床 对DMG MORI的DMC63V立式加工中心更新改造，加装第四轴（旋转轴A轴），改造

后的四轴加工中心如图2所示，数控系统采用FANUC 0i MD。

(3) 刀具 因叶片进出气边为圆形曲面加工，并考虑到工装干涉问题，采用8mm球头铣刀，通过刀具试加工对比，采用两支蓝帜LC630T 45A球头铣刀完成粗、精加工。

(4) 软件 使用UG软件完成工装的三维建模、装配模拟验证、二维加工图样生成、叶片加工程序编制及加工刀具路线模拟验证等工作。



图2 改造后的四轴加工中心

3 叶片加工工装设计

3.1 加工状态分析

1) 叶片的进出气边加工是叶片加工的第一道工序，叶片所有位置都由锻造完成，叶片全部由曲面和斜面组成，重复定位精度会存在偏差。

2) 叶片两端需留有工艺定位点，叶片上端定位点在中心线向左下10°方向平行偏移3.5mm，定位点为R5mm、长5mm，因工艺定位点过小，可用于辅助定位校准，不能用于主定位装夹使用。

3) 叶片片身曲面比较薄，精密锻造开模后会出现不规则应力回弹变形，造成锻造毛坯与设计三维模型出现偏差，加工编程需要按设计模型编制程序加工刀具轨迹，使叶片进出气边加工曲面与叶片片身曲面因误差造成欠切或过切。

4) 叶片片身比较薄，其材料为高温合金，存在加工刚性不足的问题。

5) 叶片进出气边曲面为空间曲面，需要采用四轴联动插补加工，保证工装可以旋转，并保证工装旋转轴线与叶片模型中心轴线完全重合。

6) 叶片采用四轴加工中心通过四轴联动加工，在保证加工刚性的同时，保证加工刀具无干涉。

7) 叶片采用四轴加工中心通过四轴联动加工，工装需要具有旋转轴心和角度位置校正基准。

8) 叶片工装为旋转式工装，存在悬伸过长的问題，需保证工装的刚性和工装与机床旋转轴的连接刚性。

3.2 工装夹具设计方案

1) 工装采用圆形主体（见图3），保证可旋转加工并具备旋转轴心和角度位置校正基准，工装与机床旋转轴连接，利用机床旋转轴的卡盘和顶尖，采用一夹一顶的方式，保证换模简单高效，并保证加工刚性。

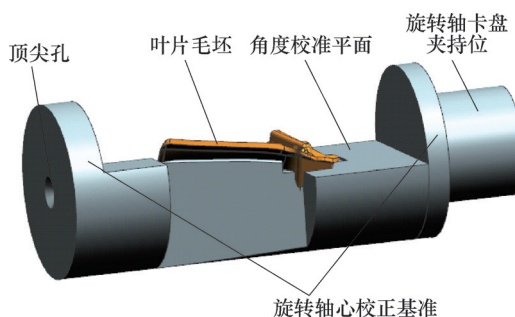


图3 工装主体

2) 工装两端按叶片工艺定位点位置加工两处V形定位槽（见图4），对叶片与工装进行旋转轴线定位，保证叶片与工装旋转轴线定位准确，定位槽采用补铜后加工，保证工装不出现过定位情况。

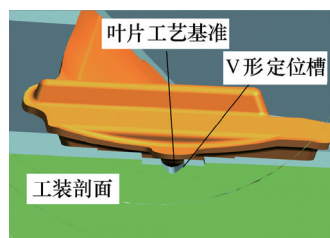


图4 工装V形定位槽

3) 经过多次三维扫描对比和测量分析，叶片毛坯误差最小位置为叶片大端槽槽两侧锥面，将此位置作为工装主定位夹持部位。工装按毛坯形状加工相符合的凹槽，作为工装主定位基准，两端锥面可保证叶片径向定位，在凹槽前段加两个定位凸台保证叶片轴向定位（见图5）。

4) 工装设计一个连接上模，并在上模板上攻螺纹。根据叶片曲面角度，采用螺栓压紧方式解决工

件夹紧问题，并根据刀具轨迹的加工程序去除工装加工干涉位置（见图6）。

5) 叶片片身比较薄，其材料为高温合金，存在加工刚性不足，并且精密锻造开模后会出现不规则应力，产生回弹变形，造成锻造毛坯与设计三维模型出现偏差。经多批次检验论证，其回弹变形量在0.15mm以内，可以达到设计及使用要求，但在加工中，其不规则变形直接影响叶片的加工部位与叶片的不加工部位无法准确衔接，造成表面质量下降，无法达到技术要求。在叶片曲面位置按叶片设计模型加工出辅助支撑曲面（见图7），辅助支撑曲面形状按叶片叶背三维模型加工完成，保证可与叶片叶背曲面完全贴合（见图8），并无干涉存在。如叶片出现回弹变形情况，可通过上模板的多点位螺栓压紧，校正叶片变形，保证叶片叶背曲面完全贴合工

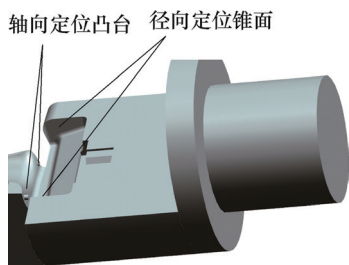


图5 工装轴向定位

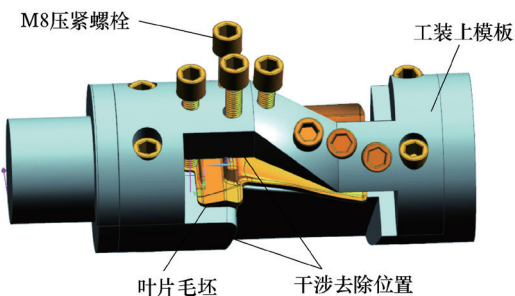


图6 工装上模

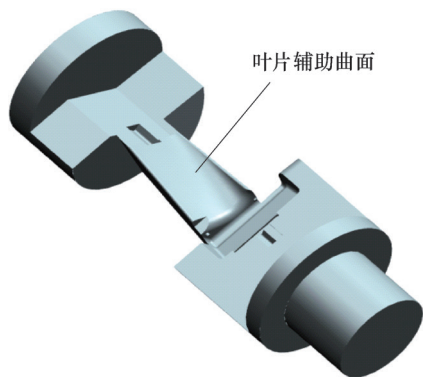


图7 工装辅助支撑曲面

装辅助支撑曲面，保证叶片加工刚性，同时稳定夹持叶片，保证加工生产。

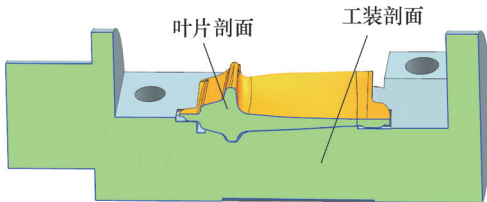


图8 叶片工装剖面

4 叶片加工程序编制

4.1 设置加工坐标系MCS

启动UG软件，打开叶片毛坯模型，进入加工模块，首先将坐标系设置到工件榫齿下面中心位置（见图9），然后再回转工作台（A轴）回转中心，并将X轴零点位置偏移到工装后端面（方便加工中坐标系建立）。

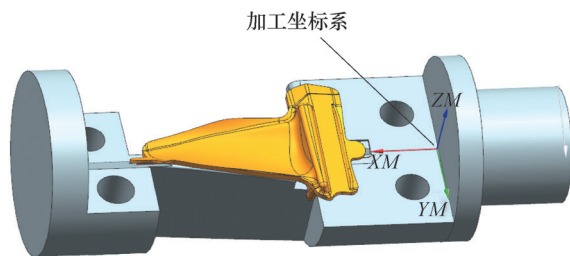


图9 加工坐标系

4.2 创建加工驱动曲面

为保证刀具轨迹的编程准确，减少加工中的空刀路，提高加工效率至最高，采用多轴加工模块（mill_multi-axis）中的曲面区域驱动加工方式编制程序。因为只加工叶片进出气边曲面，而不是叶片片身的全部曲面，驱动曲面不能使用叶片模型的片身曲面，所以需创建两个曲面片体用来驱动加工，编程辅助曲面（见图10）保证与叶片模型进出气边曲率等参数相同，并结合叶片模型飞边位置，保证其大于需加工区域。

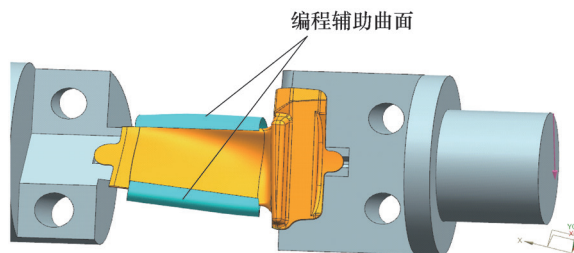


图10 编程辅助曲面

4.3 刀具参数设置

选择创建刀具（也可在刀具库中调用），按实际加工刀具规格设置参数（见图11），创建编程刀具，刀具将直接影响程序刀具轨迹，必须保证参数正确。

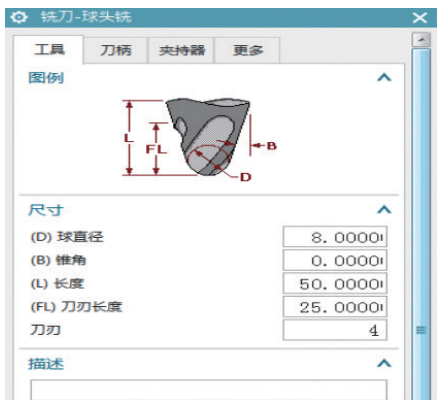


图11 刀具参数设置

4.4 编程主要参数设置

加工部件体选择叶片模型（不能使用叶片毛坯模型），驱动曲面选择创建的辅助编程曲面，切削区域不选，投影矢量选择垂直于驱动体。因刀具中心位置切削性能较差，为提高刀具使用寿命，刀具选择相对于驱动体，并调整侧倾角度和旋转角度，保证在不与工装发生干涉的情况下避开刀具中心切削，侧倾角度设置为 20° ，旋转角度 -10° ，前倾角度 0° （四轴加工不能有前倾角度），旋转轴选择X轴。

4.5 程序模拟验证

生成刀具轨迹后，选择确认，进行刀具轨迹模拟，可采用刀轨播放确定刀轨各位置状态（见图12），用3D模拟加工后部件状态，然后用过切检测功能确认程序刀轨过切状态。

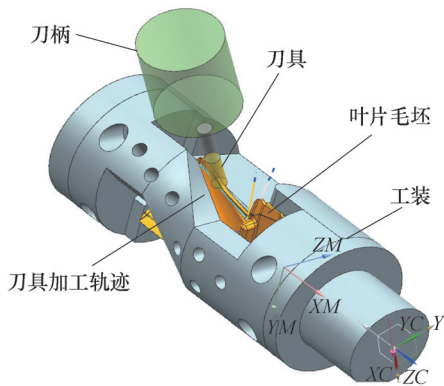


图12 加工程序模拟验证

5 结束语

通过分析产品和机床特性，运用UG软件，设计一款定位准确、夹持可靠的四轴加工中心旋转工装，以及编制四轴加工中心的叶片加工程序，解决叶片加工中出现的问题，以使工装定位准确、夹持可靠，程序编制更精准合理，加工效率和稳定性更高。试制叶片经扫描确认，叶片各项技术参数符合技术设计要求，一致性良好，现已批量生产使用。经统计，叶片加工成本比五轴加工叶片降低了78%以上，效率提高约2.5倍，保证了生产周期，降低了产品的加工成本，也为日后相关产品的加工生产积累了宝贵经验。

参考文献：

- [1] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京：化学工业出版社，2003.

MW 20210702

《金属加工（冷加工）》 “机床/附件/工装”栏目征稿

《金属加工（冷加工）》杂志设有多个常规栏目，现“机床/附件/工装”栏目面向广大制造业的业内人士征集稿件，欢迎各位踊跃投稿。

征稿内容：机床/加工中心的整体设计及制造关键附件的设计制造，如电主轴、大型轴承、大重型滚动功能部件；冷加工中使用的工装/夹具的设计制造。

要求：技术实用、先进，能推动加工制造自动化、高效化、精密化等。

具体投稿规范请扫码查看。



投稿规范