三元叶轮在五轴联动加工中心3+2轴铣削工艺研究

沈阳鼓风机集团有限公司 （辽宁 110869） 刘 磊

三元叶轮作为透平机械的核心转动部件，是一种具有代表性且造型比较规范的、典型的通道类复杂零件（见图1），其特征形状明显，叶片的吸力面和压力面形状涉及到空气动力学、流体力学等多个学科，其加工难点主要表现在：①叶轮的叶片形状复杂，其叶片多为非可展扭曲直纹面，只能五轴数控铣制或者电解加工。②由于叶轮叶片的厚度较薄，在加工过程中会产生弹塑性变形而很容易发生过切现象。③叶轮大多工作在腐蚀性较强的介质和高速旋转做功的情况下，叶轮旋转时具有很高的线速度，因此多选择不锈钢、高温镍基合金或钛合金等难加工材料。

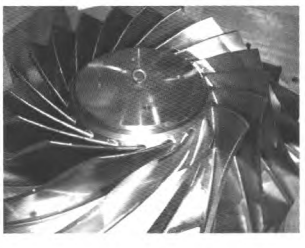


图1 具有较多叶片个数的三元叶轮示意图

新使用的高进给铣削方法主要是使用进口硬质合金刀具和五轴机床定轴加工来实现，解决了传统的三元叶轮加工使用国产高速钢刀具五轴联动侧刃铣削时所产生的难题：零件加工周期长且机床切削力大，容易造成机床主轴头损毁，同时由于高速钢刀具的韧性好，刀具振动很容易造成叶片过切。

针对离心压缩机大直径的三元叶轮，使用新的高进给铣削方法通过五轴联动的数控机床3+2轴固定刀轴空间矢量的方法，大幅度提高了五轴数控机床的刚性，从而减少了在切削过程中产生的振动；再结合使用带有CVD化学涂层和PVD物理涂层的硬质合金铣刀，通过刀具商在大进给铣刀上切削力和切削角度的优化设计，通过“小切深，大进给”的铣削方法，可以大幅度提高加工零件的金属去除率，从而提高了叶轮的加工效率。由于切削过程中产生的振动极小，从而降低了数控机床主轴头的故障率，

3. 锆合金的磨削

磨削时砂轮采用绿碳化硅材质，粒度60#，硬度等级为J，组织号为7，结合剂为陶瓷。根据我们提供的材料特性，供应商专门配置了急速降温冷却液，其效果较好。工件转速为35 r/min，进给量一定要足够小（<0.01 mm/r）。轴类零件中心孔必须及时研磨，才能够保证磨削质量。

4. 锆合金的铣削

根据我公司产品特点，锆合金铣削主要是轴类零件键槽的铣削，我们选用YG8硬质合金键槽铣刀。考虑到锆合金的燃点比较低，转速大容易着火。经过多次试验，对于轴类零件键槽，先用一个比实际宽度小2 mm的键槽铣刀粗铣，采用低转速180 r/min。同时考虑对刀精确性，装夹好刀具和工件锁定不再调整，只是更换刀头。粗铣完，换上与实际宽度等宽的铣刀，采用280 r/min转速。一次铣成效果比较好。

5. 锆合金加工的其他注意事项

根据我们的加工经验，锆合金燃点低，易自燃，锆屑必须储存于盛水容器中。

锆合金在加工过程中容易受铁的污染产生电偶腐蚀，在加工中必须避免污染，采用专用量具，最好在机加完成以后进行化学钝化处理或者阳极化处理，消除铁污染。采用邻菲罗啉溶液检测铁离子。

MW （收稿日期：20140224）

并大大延长了五轴数控加工中心的正常使用寿命。

1. 五轴联动数控机床 3 +2 轴粗加工铣削关键点

三元叶轮是由直纹面和自由曲面两种类型叶轮构成的。传统的三元叶轮加工方法是由 HSS 高速钢铣刀采取流道分层侧铣叶轮通道的方法，由轮盖到轮盘逐层铣削加工。由于高速钢的刀具线速度较低，其耐热性和寿命也较低，同时铣削过程中会产生很大的切削力，在五轴联动数控机床上用高速钢铣刀铣削加工时无法体现五轴联动的高效性。当五轴联动的数控机床处于 3 +2 轴的工作状态时，机床的两个旋转轴处于锁死的状态，只有 X、Y、Z 3 个直线轴电动机进行铣削移动，这时五轴机床处于最佳的机床刚性状态，在切削过程中会大幅度降低产生的振动（见图 2）。



图 2　五轴数控加工中心 3 +2 轴铣削三元叶轮示意图

我公司是国内专业生产离心压缩机的公司，目前加工过的最大直径的三元叶轮是 1 480 mm 三元叶轮，叶轮材料为 17 - 4PH 不锈钢锻件，三元叶片为 11 组长短叶片，其中叶片进口处最深达 320 mm，出口深度达 120 mm。毛坯料重达 6 t，铣削加工后只有 2.5 t。对于如此大的三元叶轮，采取高速钢分层侧刃铣削流道的方法，需要 3 个月的加工周期，而采用新的 3 + 2 轴定轴铣削的方法，则仅需要加工 1 个月。

2. 使用硬质合金大进给铣刀提高金属去除率的关键点

大直径三元叶轮粗加工铣制时采用硬质合金刀头和减振刀杆，叶轮材料为不锈钢锻件，其相应使用的硬质合金刀片的线速度最大可达到 140 m/min。加工时将五坐标加工中心的两个旋转轴锁定，利用 X、Y、Z 直线轴中的两个或三个联动切削（见图 3）。该方法为大进给、小切深的高速型腔铣。加工时刀具的刚性最大，机床的扭矩最小，减少了加工时机床产生的振动。对于五轴联动数控中心 A、B 轴的角度合理选取，主要取决于叶轮的扭曲程度，以及编程员的技术水平。

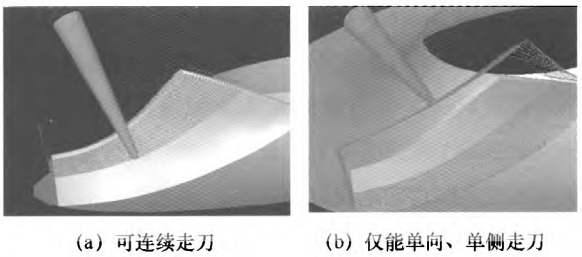


图 3

对于此种大直径的三元叶轮，铣削的重点和难点在于要克服铣刀的长径比极限，当铣削刀具的长度过长时，刀具的刚性大幅度下降，容易产生切削振动。对于普通的铣削刀具，L/D = 6 时是刀杆轴向长度的极限。在加工大直径叶轮时，我们采用了专业的防振减振刀杆，其内部的接口结构为三角轴和三角孔的 capto 专利结构，Capto 刀柄的联接机构特征是采用端面与多边形锥面定位夹紧，能够确保在高速加工条件下保持接触面积，从而获得优良的高刚性。在刀杆使用上，也做到因地制宜，加工叶片顶部时，采用短刀杆，提高切削效率；加工叶片根部时，采用的长刀杆为重金属防振刀杆，以解决因刀具长径比大而引起的刀具刚性不足问题。

3. 叶片精加工的关键点

叶片精加工的关键点如图 4 所示。



(a) 可连续走刀　　(b) 仅能单向、单侧走刀

图 4

对于表面粗糙度要求较高的三元叶片，可以采用硬质合金刀具，进行分层铣削加工。对于表面粗糙度要求不高的叶片，也可以使用 HSS 铣刀进行侧刃成形铣削。

4. 结语

使用此种加工方法可以提高数控机床的刚性和降低切削时产生的振动，大幅度提高机床的切削进给率，提高生产效率，降低企业生产成本，带来显著的经济效益。此法同样适用于航空航天领域难加工的钛合金和高温镍基合金材料。**MW**

（收稿日期：20140211）