

三元流不锈钢叶轮高效粗加工

■ 江苏金通灵流体机械科技股份有限公司（南通 226000） 周小康 韩 栋 施健兵 刘云云

摘要：本文针对开式离心整体不锈钢叶轮，提出了一种基于五轴联动分区的高效粗加工方法。首先通过分析叶轮几何结构，提出加工总策略；然后选择合适的整体硬质合金刀具，对叶轮采用分区加工；最后利用VERICUT软件进行模拟仿真。加工结果表明，该方法的效率是普通方法的3倍左右。

三元流不锈钢叶轮相对铝合金叶轮，其加工周期较长，而风机客户要求的交货期却很短。三元流叶轮整体铣制的效率很大程度上依赖于粗加工的效率，通常粗加工跟精加工的时间比例为4:1，若粗加工时间节省一半左右，则整体效率将提高40%，这对于生产企业来说，效益是巨大的：生产率得到提高，同时单个产品内刀具损耗、机床折旧和切削液消耗都得到降低。

对于不锈钢叶轮，传统加工方式是采用刀片式球头刀具、不分区域粗加工，由于是点接触式铣削，通过增加切深和进给来提高效率是有限的。虽然不分区域铣削避免了刀具干涉和撞击，但同时也减少了大直径刀具所能加工到的区域。目前国内外同行都在进行三元流叶轮加工效率的研究，特别是对粗加工的效率进行了许多探索。经过我公司技术人员较长时间的实践，摸索出了一套以带圆角的平底立铣刀、五轴联动分区域粗加工的方法。

下面以我公司的一个实例简述该方案的流程及其关键技术。

1. 叶轮结构分析和总策略

图1所示是我公司某型号压缩机的一级叶轮，其材料为17-4PH，这种材料强度大，易粘屑。叶轮直径386mm，叶片数达19片之多，进口叶片高78mm，叶片间距最窄处为6mm左右，深宽比达到13。且叶片扭角很大，约为90°，叶片与轮毂间的倾角也比较严重，夹角最小为60°左右，形成了一个凹窝，叶片根部采用变圆角设计，这都给加工带来了很大困难。

采用五轴联动分区域粗加工，其关键技术涉及程序中刀轴的角度、干涉性检查、加工参数、刀具的选型、伸出长度和刚性及冷却方式等。

程序中刀轴的拖刀角度要

尽可能为正，这对于减少刀具磨损、延长刀具寿命有很大的好处。特别对于平底刀具，无论是无中心切削刃的刀片式刀具，还是带中心切削刃的整体硬质合金刀具，其中心切削速度都为0，采用拖刀切削方式就显得很重要。

由于是分区域粗加工，在加工一部分区域时，另一部分区域有可能是实体毛坯，在上机床加工前必须进行干涉性检查。在干涉性检查方面，采用独立于CAD/CAM的第三方模拟软件来检验加工代码较贴合实际，而不能采用CAM加工软件自带的APT模拟功能。

加工参数一般可查刀具样本，但当伸出刀长大于5倍刀具直径时，其转速和进给应做减小处理。

对于17-4PH这种粘性材料，若冷却不到位、不流畅、压力不大，加工时很容易造成排屑不畅、烧刀。所以在加工前，就应将切削液调整到位。

五轴联动分区域粗加工总的加工原则跟不分区域粗加工一样，仍然是大直径刀具加工较宽

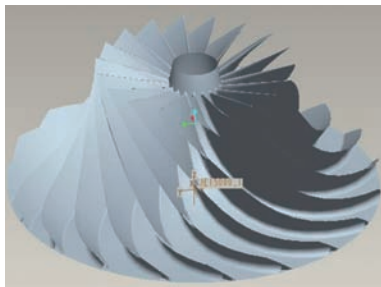


图1 压缩机一级叶轮模型

的区域，小直径刀具加工较窄的区域。并且通过划分，大直径刀具所能加工的区域越大，则效率越高。本例叶轮由于没有分流叶片，故在叶片长度方向分为进口和出口两个部分。

2. 具体工艺实施步骤

第一步，粗加工出口，根据本叶轮结构特点，选择使用直径16mm带R角的平底刀铣削出口段，轮毂和叶片都留有一定的余量，程序设置导动面为轮盖曲面或轮毂曲面，注意摆角为拖刀加工方式。由于该程序是分区域粗加工的第一个程序，叶轮进口位置仍是实体毛坯，如果发生碰撞，刀具、机床都会受到很大损失。程序完成后即进行干涉性模拟检查，不断调试程序，直到不干涉为止。程序加工完，切削模型如图2所示，毛坯外的部分为模拟干涉用的刀柄和刀具。因车削形成的实际毛坯料存在一定的加工误差，所以模拟采用的毛坯模型应比理论模型稍大一些，这样模拟出来的结果才具有实际参考价值。

叶轮进口叶片间距变窄，靠近轮毂处间距更窄，采用1把刀具粗加工到底不可能也不合理，本例采用3把刀具粗加工到位。第二步粗加工，铣削进口上层部分，

宽度变窄，程序使用直径12mm带R角的平底刀，将该刀具能铣削到的区域都铣削完，注意刀轴角度和下刀位置，调整程序使刀具下刀处在实体毛坯外，确保不扎刀，加工完如图3所示。

接着程序使用直径10mm的平底刀，继续粗加工进口部分，这时由于刀具直径变小，刀具伸出刀柄的长度又加长，当刀具的长径比大于5时，其转速和进给量都要做相应的减小，同时保证刀具在刀柄内的装夹长度足够长，当长度不够时，可定制加长刀具。加工效果如图4所示。

接下来的程序是整个粗加工过程中的关键部分，也是整体效率能否提升的关键点。该程序使用直径6mm的刀具，若此时再选择平底刀，则刀杆太细，而伸出刀柄长度需85mm左右，刚性较差，故选用半锥角4°的整体硬质合金锥度铣刀。采用中间开槽方式，分若干层逐渐铣削到轮毂

侧，而非将每一层完全切除后再铣削下一层。这一程序跟下一程序结合，可以节省很多时间。虽然采用了锥度刀具来增加刚性，但仍需要控制刀具伸出刀柄的长度。在进行模拟干涉检查时，可使用模拟软件帮助计算刀具最小伸出长度，以增加刚性，刀具伸出长度越短，则刚性越好。由于是中间开槽加工，切削液必须流畅、到位且压力足够大，有助于排屑和冷却。模拟加工效果如图5所示，此时实际加工出来的叶轮（见图6）中第一个流道。

这一步完成后，下一步程序仍然使用这把直径6mm的锥度刀，从中间开槽位置往两侧粗铣流道，同时去除中间开槽位置两侧残余，清除叶片根部平底刀残留的毛坯料（也就是清角），这一步程序起到了上述三种作用。在保证刀轴拖刀加工方式的前提下，可采用螺旋形走刀方式，中途不抬刀、不退刀，减少空行

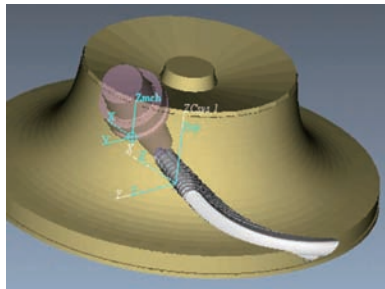


图2 粗加工出口区域模拟效果图

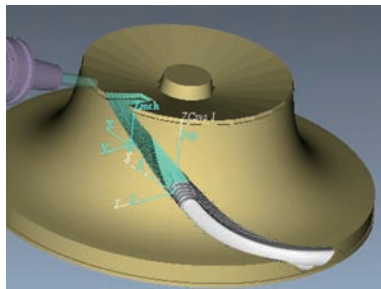


图3 粗加工进口上层区域模拟效果图

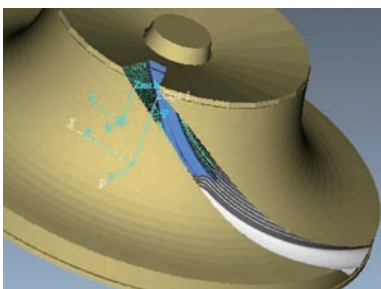


图4 粗加工进口中部区域模拟效果图

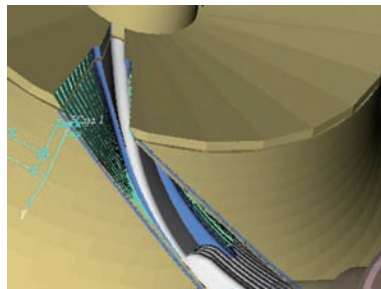


图5 进口底部区域中间开槽模拟效果图

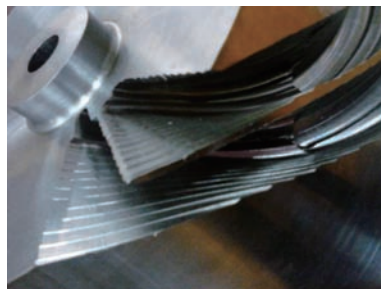


图6 进口底部区域中间开槽实际效果图

程的时间。实践证明这种走刀方式比单一方向切削方式 (single direction) 又能节省一半的时间。加工效果如图7所示。比较图5和图7, 中间开槽两侧的残留毛坯已被清除很多。

由于叶轮出口处叶片倾幅最大, 虽然经过了粗铣流道时的清角, 粗加工第一步直径16mm的平底刀在该凹窝处的残留仍然很多 (见图8), 故接下来的两个程序使用直径12mm和10mm的平底刀继续对出口进行清角, 加工效果如图9、图10所示。

经过了上述加工步骤, 通过模拟软件比较已加工形成的切

削毛坯和理论模型, 设置比较方式为残留 (见图11), 发现中间开槽程序在叶片进口处中部狭长带仍残留有2.5mm的余量 (见图12)。为防止后续叶片半精加工、精加工切削量过大, 应在此时插入粗铣叶片程序, 使用球头锥度精加工铣刀消除粗加工造成的叶片余量不均匀现象, 加工效果如图13、图14所示。

以上程序在加工时, 都将叶片进口的椭圆头让开了, 因为粗加工刀具在椭圆头处会发生扭拐, 刀轴角度很难调整为拖刀方式。避开椭圆头加工, 在最后进行椭圆头插铣, 经过我们的实践

是可行的, 效率上也不会有太大影响。

粗加工完成后的叶轮实物如图15所示, 经过了这些粗加工步骤, 后续叶轮轮毂、叶片的半精加工和精加工不会受到任何影响, 而且粗加工时间大大缩短, 叶轮整体加工效率得到很大提高。

3. 结语

本文论述了影响叶轮五轴联动加工效率的因素, 提出了采用带R角平底刀五轴联动分区域粗加工来提高叶轮的加工效率, 通过实例阐述了一般加工流程和刀具的选择。

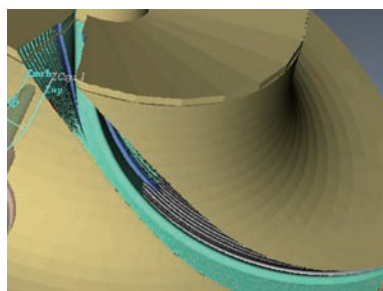


图7 进口底部区域两侧加工模拟效果图

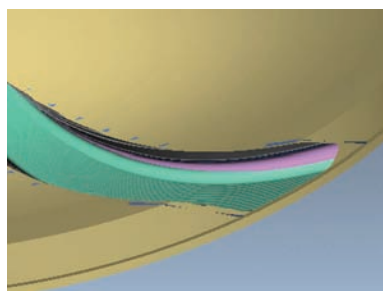


图10 $\phi 10\text{mm}$ 刀具清角效果图

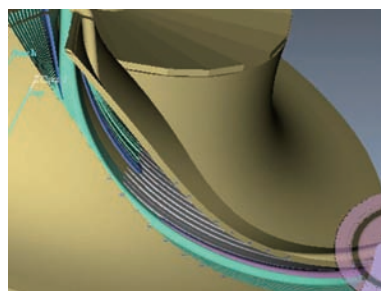


图13 叶片表面第一次加工

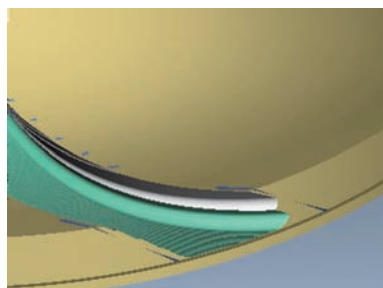


图8 出口残留



图11 Vericut残留比较设置

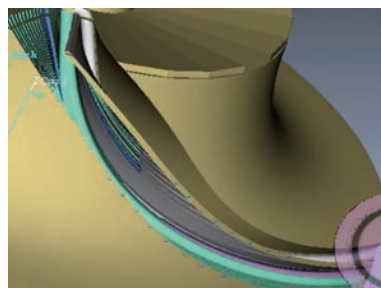


图14 叶片表面第二次加工

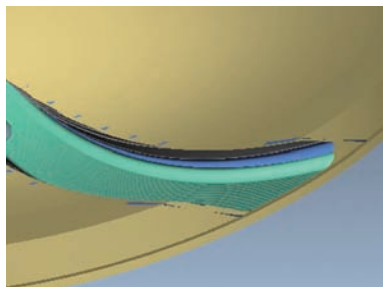


图9 $\phi 12\text{mm}$ 刀具清角效果图

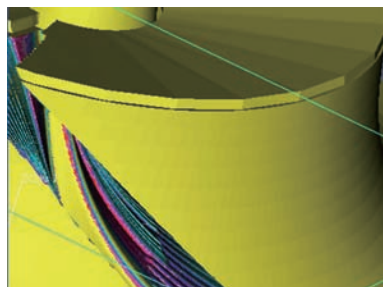


图12 Vericut残留比较效果图



图15 粗加工实际效果图

轴流模型叶片的数控加工

■ 哈尔滨电机厂有限责任公司（黑龙江 150040） 陈良平

摘要：本文主要介绍轴流模型叶片的工艺路线和数控加工方法。使用NX UG软件，通过不断优化，制作出无跳刀、无干涉的刀具轨迹，安全快捷。

轴流模型叶片是按一定比例缩小的真机叶片，用于仿真试验，获得试验数据，如果数据指标不够理想，再对模型叶片进行优化。所以，轴流模型叶片的产品精度要求更高，质量要求更好，才能得到更真实的试验数据。

1. 工艺路线

模型转轮叶片材料为铜，采用长方体锻件加工，其工艺路线为：①在立式加工中心上进行粗铣加工，留3mm余量。②将轴流叶片两端的轴进行精车加工，不留余量。③在卧式加工中心上进行精铣加工，留0.08mm。④钳工进行打磨处理，用样板进行检查。

2. 数控加工方法

工艺路线已经确定，下面就

要进行具体数控加工的实施。通过使用NX UG软件进行数控编程，NX/Manufacturing提供了一个完整NC编程系统所需的一切组件，包括钻、车、3轴与多轴铣、线切割、基于特征加工的刀具路径处理器、后处理构造和全面的机床仿真。NX/Manufacturing为机床数控加工编程提供了一套经过验证的完整解决方案，它可以改善NC编程和加工过程，充分发挥机床的先进性能，从而极大地减少浪费和提高生产力。

（1）粗铣加工。粗铣加工在立式加工中心上完成，将长方体毛坯固定在工作台上，加工完成正面后，翻面加工另一面，如图1所示。NX中加工策略选择型腔铣，刀具为 $\phi 20\text{mm}$ 球头刀，每刀切深1mm，余量3mm。由于加工区域为封闭区域，刀路方向

选择由内向外，更能降低刀具的损伤，同时，由于球头铣刀刀尖部分线速度为零，所以不能选择插铣的进刀方式，而要选择沿形状斜进刀或螺旋进刀方式更为理想。生成刀具轨迹，如图2所示。

正面加工完成后，翻面，背面加工方式与正面相同，两面都加工完成后（见图3），钳工将连接位置锯开，进行下序加工。

（2）车削加工。在车床上将叶片两端轴精车完成，作为下序找正定位基准。上端轴和夹块是用于辅助装夹，防止加工时叶片受力变形；下端轴是轴流叶片

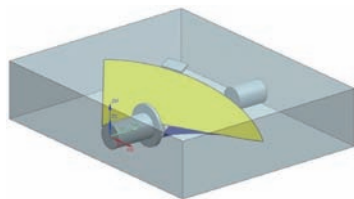


图 1

结果表明，对于本实例中的叶轮，整个粗加工的时间是22h。对比使用球头刀具不分区粗加工，其粗加工的时间是本例的3倍左右。本例推荐的加工方法效率可见一斑。相信以后与同行一起

交流，不断总结加工方式，确定加工参数，三元流叶轮粗加工的效率一定会取得更大的进步。

参考文献：

[1] 朱华，周小康. 三元流叶轮整体铣制工艺方法及常见问题解析

[J]. 风机技术，2011（6）：41-43.

[2] 刘随建，江剑，高见. 叶片切削加工技术发展浅析[J]. 金属加工，2017（7）：1-3.

MW（收稿日期：20170528）