

飞机发动机叶片机匣的高效加工

High-Performance Machining of Blade Cartridge Receiver in Aeroengine

沈阳黎明航发(集团)公司技术中心工艺所 赵秀芬 李冬梅 赵 明



赵秀芬

高级工程师,现主要从事航空发动机难加工材料的匹配刀具选择、高效加工、切削参数优化、刀具国产化等方面的研究。

现代发动机要求具有足够的推力和推重比,需要发动机零部件在高温、高压、高转速和高负荷的条件下长期工作,难加工材料尤其是新型高温合金在航空发动机中应用广泛,发动机的热端部件采用镍基或钴基高温合金、粉末冶金高温合金等难切削材料,这些难切削材料刀具消耗量很

航空难加工材料的高效加工是一个系统问题,由夹具、刀柄、工艺等组成的大系统和包括刀具材料和切削参数的子系统等因素都影响着零件的质量、刀具成本及加工效率。高效加工包含高效切削和其他的非切削时间减少。高效切削是以高效率切削金属材料为目标,提高单位时间金属去除率。而非切削时间减少则要通过使夹具可靠定位、编程优化、减少空行程时间来实现。

大。同时,航空发动机中零件形状复杂、薄壁件多、表面完整性要求高,这也给加工带来了很大的困难,致使加工效率较低。

航空难加工材料的高效加工是一个系统问题,由夹具、刀柄、工艺等组成的大系统和包括刀具材料和切削参数的子系统等因素都影响着零件的质量、刀具成本及加工效率。高效加工包含高效切削和其他的非切削时间减少。高效切削是以高效率切削金属材料为目标,提高单位时间金属去除率。而非切削时间减少则要通过使夹具可靠定位、编程优化、减少空行程时间来实现。

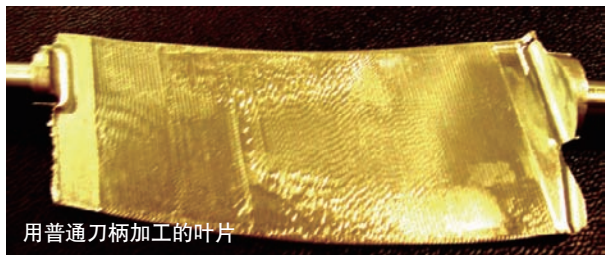
本课题就夹具定位、采用回转精度高的刀柄、选择与加工零件材料相匹配的刀具、优化工艺、优化走刀路线、切削试验优化参数等方面,针对航空发动机典型的叶片和机匣零件,进行了难加工材料零件的高效加工试验和应用研究。

叶片的高效加工

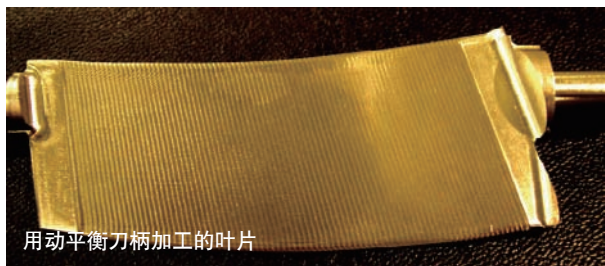
叶片是扭曲变截面的复杂曲面薄壁零件,在五轴数控加工中心上加工时易产生变形和切削颤振,造成叶身产生振纹。振纹的产生是由于叶片本身是薄壁件,刚性差,对刀具系统-夹具-工件组成系统的整体刚

性影响更加敏感。在叶片毛坯几何形状不能改变的情况下,就要从夹具和刀具系统方面着手改进。

静子叶片两端是轴颈,中间为薄的叶身。以前加工叶片采用顶尖夹紧定位,其装夹刚性不好,轴颈及叶



用普通刀柄加工的叶片



用动平衡刀柄加工的叶片

身加工过程中变形较大。装夹系统存在夹具与设备盘无定位销、重复装夹后叶片初始角度发生变化的问题,这会降低装夹刚性,造成叶盆、叶背余量不均匀。针对这种情况,取消了顶尖夹紧方式,在机床尾座处增加1个夹头,采用抱紧轴颈的方式提高刚性。采取此定位方式后,大大降低了叶片在加工过程中产生的弯曲变形,叶盆、叶背余量的均匀性大大提高,检测透光间隙均在0.03~0.07mm,同时降低了表面粗糙度。由于定位刚性好,间接减少了刀具磨损。

在刀具系统中,刀柄本身的加工精度和动平衡对切削颤振影响显著。高性能刀柄在高速切削中具有重要作用,切削速度提高后,刀柄的微小不平衡量的影响会被放大。以前用普通刀柄铣叶身型面时,转速调高后容易产生振纹且伴有硬化层,而采用动平衡刀柄后,可很好地解决这个问题。在机床、刀具、切削参数不变的情况下,用动平衡刀柄加工叶片可消除振纹,使叶片表面大为改观。

在提高系统刚性后,用工艺优化来提高切削效率。采用“宽行加工”的程序,对切削轨迹进行了优化。真正的宽行加工是复杂曲面五坐标线接触加工。原来的三坐标加工通常使用球形刀,窄行点接触加工,刀具表面和工件曲面仅在一小点及其小邻域内接触,刀位计算简单,生产效率低,加工表面粗糙。而五坐标机床的出现使宽行线接触加工成为可能。宽行线接触加工提高了刀具与工件曲面的曲率吻合程度,加工行较宽,刀具往复次数少,质量好,加工效率高。并且使用最优化的环形刀具或带有刀尖圆角的端铣刀,使其做

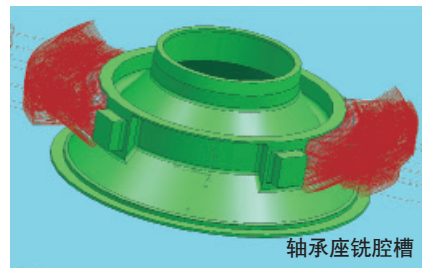
最优化的五坐标相对运动,这就要求编程优化。受宽行加工理论的启发,采用 $\phi 10$ 带刀尖圆角的铣刀,在计算了步距间的残留高度,保证表面粗糙度要求后,采用“宽行加工”加大了步距(是原来的3倍以上),最大限度发挥了刀具的切削面积,加工效率大大提高。同时进行了数控加工程序的优化,通过减少空行程、减少抬刀高度、提高空程速度提高了效率。

切削用量的选择也十分重要,在叶片的高效加工中,依据刀具的有效直径科学地给出切削深度、主轴转速、每齿进给量。在试验中根据被加工零件的材料(高温合金)和加工条件(高速铣机床、复杂型面的叶片),选择在物理、化学和机械性能匹配的刀具,再根据刀具样本给定的线速度和工艺给定的加工余量计算出主轴转速。依据每齿进给量和主轴转速计算进给速度。然后根据正交试验法试验多组数据,从而进行优化。优化结果表明加工效率提高了。以 $\phi 8$ 球刀粗铣大缘板为

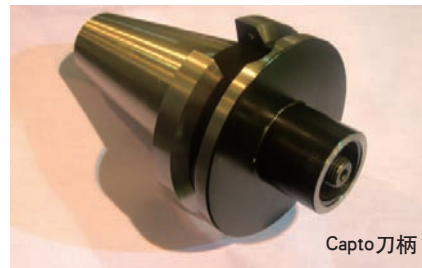
例,原来切削参数: $n=5000\text{r}/\text{min}$, $V_f=500\text{mm}/\text{min}$, $a_p=0.3\text{mm}$,优化后参数: $n=4200\text{r}/\text{min}$, $V_f=672\text{mm}/\text{min}$, $a_p=0.3\text{mm}$ 。经过参数优化,加工整个叶片的时间大大减少,加工效率提高30%,刀具寿命也提高了,与原来相比每把刀可多加工2片叶片。

机匣的高效加工

在机匣轴承件高效加工试验中,分别采用普通刀柄和Capto刀柄夹持 $\phi 32\text{R}3$ 铣刀铣腔槽,其加工效果差别很大。切削余量为15mm,分3层加工。开始时采用一般刀柄,切削参数 $n=600\text{r}/\text{min}$, $V_f=30\text{mm}/\text{min}$,切削速度再高刀具开始发颤。而改用Capto刀柄,在同样参数下,就没有颤动发生。且进一步提高参数 $n=700\text{r}/\text{min}$, $V_f=145\text{mm}/\text{min}$,切削非常平稳。这是因为Capto刀柄是一种两面定位夹紧模块式刀柄,采用端面与多边形锥面定位夹紧,在高的转速条件下端面和锥面的接触



轴承座铣腔槽



Capto刀柄

面积仍然较好,从而获得优良的高刚性。轴承座的这2次切削加工,所用刀具一样,但采用不同的刀柄,得到的结果大不相同,可见刀柄的优劣对切削加工尤其是高速加工的影响非常大。

在机匣的高效加工中,走刀路线

的优化非常重要,好的走刀路线不仅能保证高效加工,还能避免刀具的异常损坏。有一转包加工的发动机部件——中介机匣,工件材料是镍基高温合金,属于典型的难加工材料。工件形状十分复杂,中间有很多“岛区”。开始采用硬质合金刀具进行铣削加工,但刀具磨损、破损严重,加工效率很低。为了提高加工效率,我们尝试采用陶瓷刀具替代硬质合金刀具,进行镍基高温合金的粗铣加工。



中介机匣的切槽加工是加工中介机匣的难点,加工余量很大,在“岛区”中间进行切削,需频繁换向,因此走刀路线的确定和程序的优化则显得极为重要。在开始编程时,走刀路线采用的是“拐直角”的方式,切削试验的结果表明,该方式在切削换向时切削力很大,表现为工件温度高,机床振动大,陶瓷刀片出现了大面积剥落与崩刃。出现这种状况的主要原因是:陶瓷刀具虽然硬度高,但其强度和韧性比硬质合金相对较低,切削过程中,刀具频繁换向受到交变的应力作用。在这种交变应力的作用下,陶瓷刀具很容易沿晶界产生微裂纹,并逐渐扩展,最后导致刀片碎裂。针对这种情况我们对加

工程进行了优化,在拐角处采用“走圆角”的方式,避免突然换向。试验结果表明该方式基本解决了上述问题,机床振动减小,工件温度降低,刀片的磨损情况为正常磨损,保证了高效加工。

另外,刀具与工件材料之间的正确匹配也是实现高效加工的关键。另有一转包机匣件,材料是含高钴的镍基高温合金,在采用硬质合金刀具加工时加工效率极低,刀具磨损严重,且不能保证尺寸精度和表面质量。根据现场刀片的磨损形态,发现所采用的刀具和被加工材料不匹配。高钴镍基高温合金比一般的镍基高温合金难加工得多,切削抗力更大,切削温度更高。必须要选择与被加工材料在物理、化学和机械性能都匹配的刀具才能保证顺利加工。根据用陶瓷刀具切削中介机匣的经验,采用了美国肯纳的赛阿龙陶瓷刀具 RNGN120700K Y2100 和山特维克陶瓷刀片 RNGN120700 6065,其加工加工效果很好,尺寸精度和效率都很高,表面粗糙度也降低。采用陶瓷刀片进行高速切削时,陶瓷刀具高温下的红硬性和化学稳定性使刀具寿命延长。同时切屑形态也发生了变化:由带状屑转变为单元切屑。切屑与前刀面的摩擦将不再是切削力和切削热的主要来源;后刀面处工件材料的弹性变形也将由于变形速度逐渐跟不上切削速度而减小,使后刀面的摩擦也随之减小,从而对降低切削力和切削热产生有利影响。硬质合金刀具和陶瓷刀具的切削性能比

较如表 1 所示。从表 1 中可以看出,用陶瓷刀片加工高钴的镍基高温合金和硬质合金刀片相比,效率大幅度提高(是原来刀具的 10 倍以上),且尺寸精度、表面质量良好,没有让刀。而用原来刀具磨损严重,质量难以保证。从表 1 中还可看出,赛阿龙陶瓷刀具更适合加工高钴的镍基高温合金。

在轴承座 $\phi 40$ 铣刀开槽试验中,余量共 20mm(分 3 层切削),原参数 $n=480\text{r}/\text{min}$, $V_f=180\text{mm}/\text{min}$, $a_p=7\text{mm}$ 。试验中发现刀片有粘屑,说明排屑不好,检查刀具发现刀片前刀面有月牙洼磨损,后刀面有粘结磨损。经分析应提高线速度,采用新参数 $n=550\text{r}/\text{min}$, $V_f=200\text{mm}/\text{min}$, $a_p=7\text{mm}$ 后,切屑能流畅排出,减少了粘结磨损,切屑也成单元碎屑。由此可见:切削参数要合理,转速高不一定效率高,在一定条件下,提高切削参数,反而对刀具寿命有利。

结论

航空难加工材料零件的高效加工是一个系统工程,夹具、刀具系统、工艺、刀具材料和切削参数都对高效加工有很大影响。

(1) 保证夹具夹紧可靠,提高系统刚性,提高效率的同时保证被加工零件的质量;

(2) 高性能的刀具系统,特别是刀柄是高效加工的可靠保证;

(3) 选择与工件材料相匹配的刀具可大幅度提高加工效率;

(4) 合理的切削参数不仅能提高切削效率,也能提高刀具寿命;

(5) “宽行加工”即采用有刀尖圆角端铣刀加大步距,在叶片加工中是提高效率的有效方法。

(责编 岩石)

表1 硬质合金刀具和陶瓷刀具的性能比较

刀具种类	主轴转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	切削速度 / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	每转进给 / ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	进给速度 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	切深 / mm	效率倍数	表面质量
硬质合金刀具	8	25	0.1	0.8	1	1	不好
山特陶瓷刀具	70	229	0.12	8.4	1	10.5	良好
肯纳陶瓷刀具	80	260	0.16	12.8	1	16	良好