

高强钢风扇轴车削加工方案

周雨

贵州黎阳国际制造有限公司 贵州安顺 561100

摘要：针对风扇轴的材料特性和加工难点，制定合理的车削工艺路线，从材料热处理、零件装夹方式、刀具选择、螺纹加工编程和加工参数等方面进行改善，在保证加工精度的前提下，解决了高硬度材料的车削难题，降低了刀具磨损。通过计算把每次进刀的切削深度和零件旋转的角度匹配起来，在数控车床上采取进退交替的断屑方案，解决了切削过程中的缠屑问题。

关键词：高强钢；风扇轴；装夹方式；车削；螺纹；编程；加工参数

1 序言

在航空发动机零部件中，高强钢风扇轴作为风扇单元的关键件，在高速、高温等恶劣环境下工作，承担着发动机单元体之间转矩的传递工作。因为其表面质量、表面精度、表面状态、圆度、圆跳动、圆柱度、同轴度及位置度等指标都对发动机的工作状态、使用寿命和安全程度有着极大的影响，所以对其尺寸精度要求很高。该轴材料为00Ni18Co8Mo5TiAl，属于高合金高强度钢，最终硬度达48HRC以上，是典型的难加工材料，且导热性差、易磨刀，韧性好、易缠屑，若要在稳定加工质

量的前提下又能拥有较高的加工效率，则需要对风扇轴的车削路线、刀具选择和加工参数进行优化和改进。

2 加工需要解决的问题

图1为高强钢风扇轴剖视图。外表面为多级阶梯结构，所有涉及配合关系的直径尺寸公差为0.015~0.026mm，轴向圆跳动和径向圆跳动均要求为0.015mm，多处公差等级达6~7级。

该轴采用的是00Ni18Co8Mo5TiAl材料，又称C250钢，属于高合金高强度钢，材料的延伸率、断面收缩率和冲击值都偏高，切削加工性能与一般钢

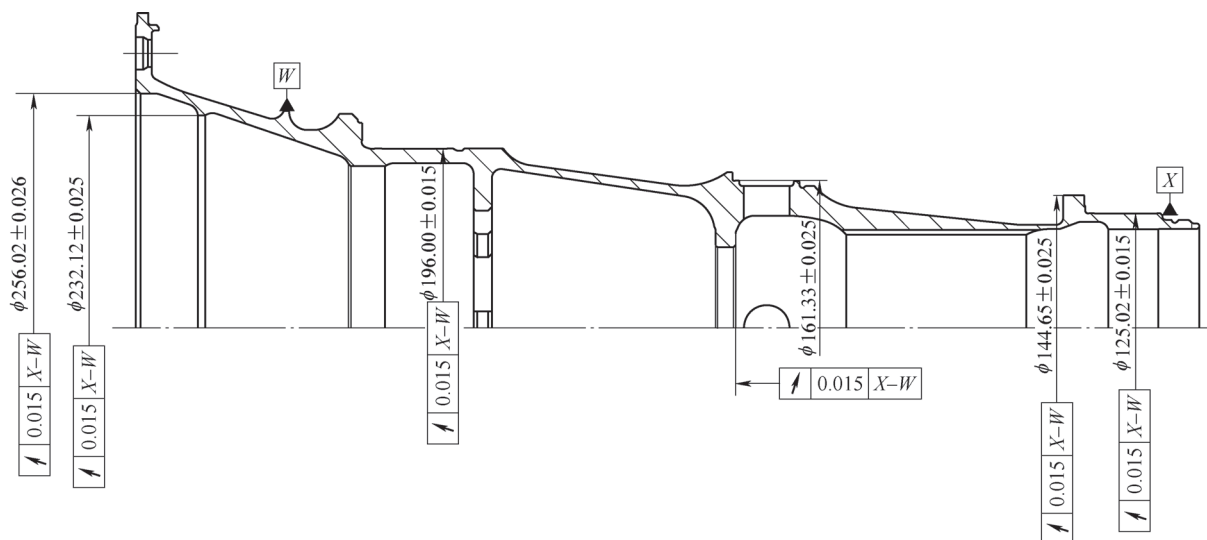


图1 高强钢风扇轴剖视图

材有较大差别，其影响加工最主要的特性如下。

- 1) 材料硬度很高，硬度 $\geq 48\text{HRC}$ ，切削比较困难。
- 2) 材料韧性较好，切屑粘附性强，易缠屑、难断屑。
- 3) 导热率低，切削热不能及时分散，刀具的切削刃容易产生过热现象。而切削速度越快就会导致温度提升越明显，在高温的作用下刀具加速磨损，很快失去切削性能^[1]。

零件的加工有以下几项问题需要解决。

- 1) 需从工艺路线的角度考虑，在保证加工精度的前提下，解决材料硬度高、难车削的问题。
- 2) 需从刀具角度考虑，既要保证高效率加工，又要解决刀具磨损过快的问题。
- 3) 需从断屑角度考虑，解决材料易缠屑的问题。

3 工艺路线

3.1 固溶和时效处理

针对材料硬度高的问题，可以考虑先对毛坯进行一次固溶处理，降低硬度，去除大余量。先将材料加热到 $(820 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温1~2h，确保钢中的合金元素能够充分溶解到铁基体中，形成均匀的固溶体，导致晶粒长大，从而降低材料的硬度^[2]。

固溶处理后，空冷至室温，硬度降低至34HRC以下，再粗车去除余量，粗车效率可以有效提升。

去除大余量后，进行时效处理，将材料加热到

$(480 \pm 6)^\circ\text{C}$ ，保温3~6h，然后空冷至室温。目的是通过控制冷却速度和温度，使过饱和的固溶体发生分解，析出硬化相，提高硬度至 $\geq 48\text{HRC}$ ，满足最终状态。然后再进行小余量精加工，保证精度要求。

3.2 车削基准

由于零件圆度、圆柱度、同轴度及表面粗糙度影响轴的旋转精度和工作状态，所以在加工过程中，车削基准是一道重要的关键工序，零件基准面的平面度直接影响后续相关尺寸的加工精度，以及轴向孔、型面的位置精度。

车削基准时零件的装夹方式如图2所示。加工中先找正W、X基准径向圆跳动0.01mm以内后，对零件外圆各表面进行车削加工，修研小端内孔中心孔，目的是为后面工序提供加工找正基准。

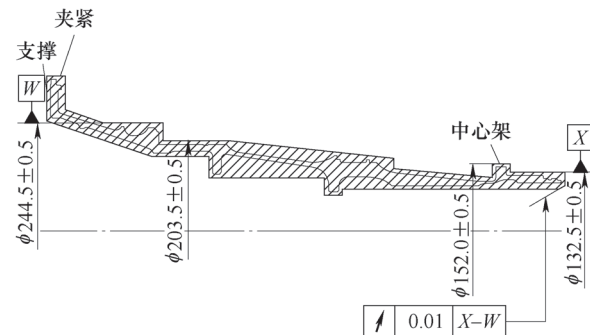


图2 车削基准时零件的装夹方式

3.3 精车大端内外型面

精车大端内外型面时零件的装夹方式如图3所

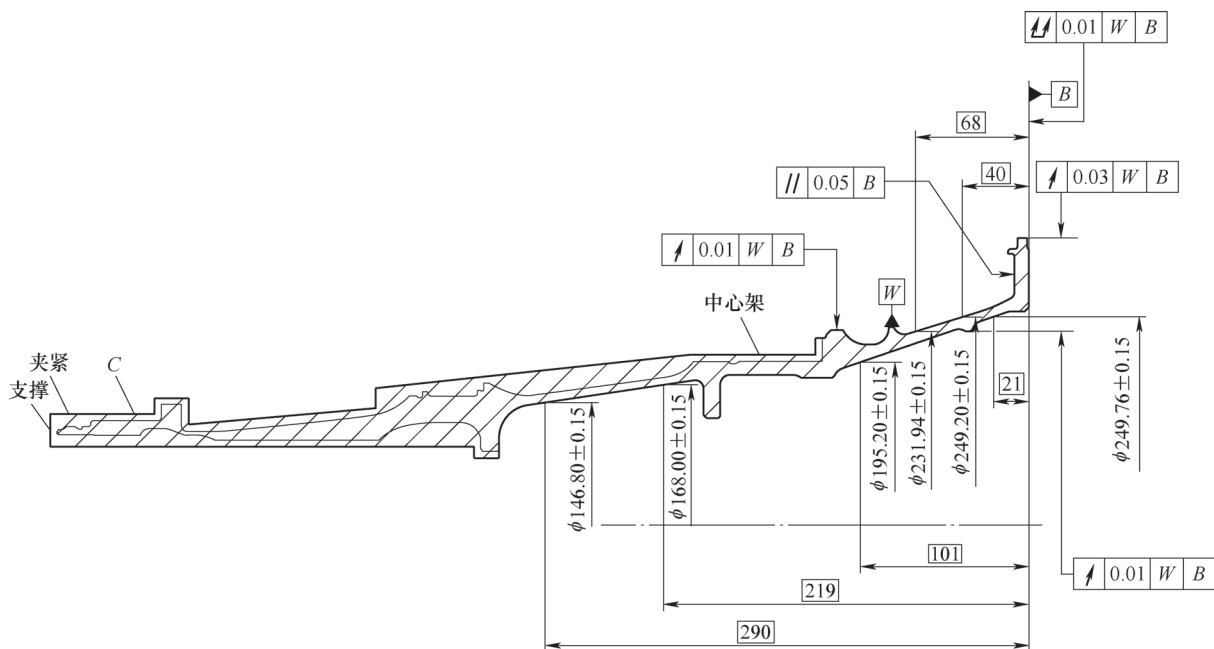


图3 精车大端内外型面时零件的装夹方式

示, 自定心卡盘夹紧上一工序车床加工后的表面, 找正零件两端C、W外径处径向圆跳动0.005mm以内, 用中心架托住零件大端外圆, 建立了零件的轴心线, 保证工件的回转轴同机床的回转轴统一。为了防止工件在切削力及其自身重力作用下产生弯曲变形, 采用液压中心架托住靠零件大端的外圆面; 为防止零件轴向窜动, 在工件台阶处用压板

进行限位, 这样的装夹方式可以承受较大的切削力。对零件加工后, 有效修正了零件的轴心线, 一次装夹完成大端平面的加工, 保证了零件端面对轴心线的垂直度, 保证了零件后面工序装夹的可靠性。

3.4 精车小端内外型面

精车小端内外型面时零件的装夹方式如图4所示。

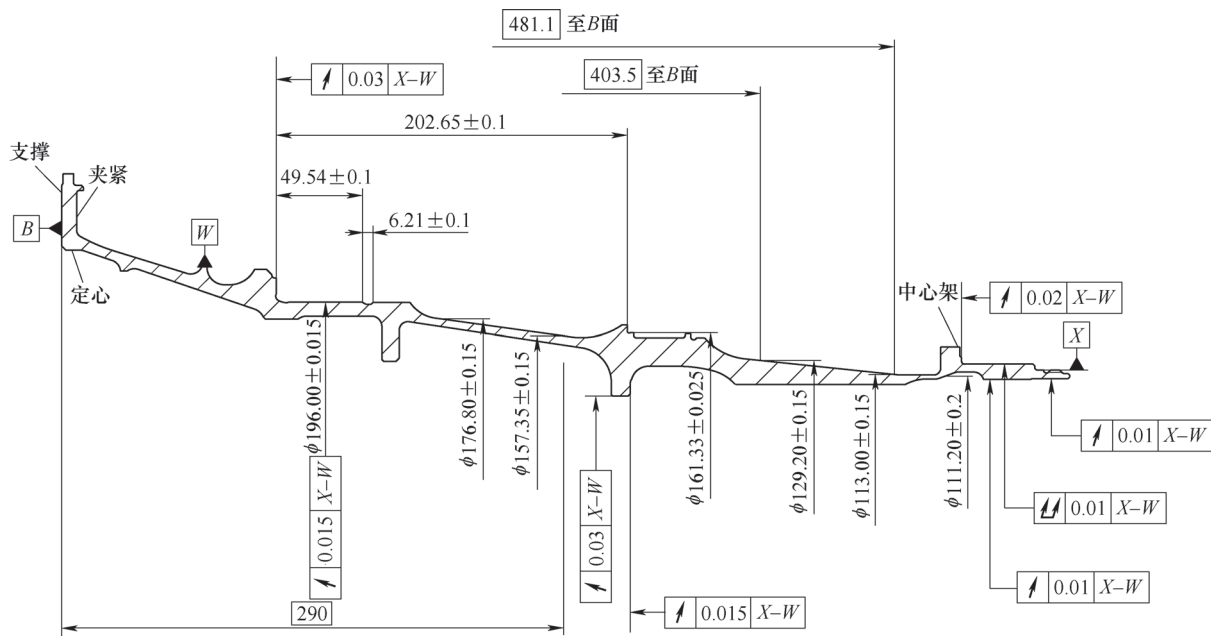


图4 精车小端内外型面时零件的装夹方式

在机床主轴上安装好铸铁花盘后, 对花盘进行车削修整, 目的是保证夹具安装到花盘后同机床的轴心线垂直, 最终保证零件的轴心线同机床的轴心线重合。零件大端安装边支撑, 以零件大端内止口定位, 压紧零件安装边背面, 中心架托住, 找正零件X、W径向圆跳动0.005mm以内, 车削加工零件总长及其内锥, 在中心架不拆卸的前提下, 用顶尖顶住零件内孔, 并检查零件找正面是否同加工前一致, 即采用“一夹一顶”方案, 加工零件外圆。

外圆面加工好后, 先用中心架托住零件靠小端的外圆面后卸掉锥堵, 即采用“一夹一托”方式, 加工零件内腔各特征面。采用该办法很好地保证了零件所有车削加工表面同机床回转轴线的重合。

在加工中, 为了保证加工效率, 在内外圆大余量处, 先采用切刀去除余量, 最后用R刀对零件进行仿形加工。对于零件斜面交点尺寸的保证, 在数控程序编制时, 专门安排校刀程序, 用于确定零件

X、Z方向的精确数值后, 对零件进行光整加工, 可以很好地保证零件的加工精度。

3.5 高精度螺纹的加工

在风扇轴外径处分布有M196×1.5的锯齿左螺纹(见图5)、M155×1的三角形螺纹及M118×1.5的三角形螺纹。在车床上加工螺纹是通过成形刀具来完成的, 螺纹刀片磨削质量的好坏直接影响到螺

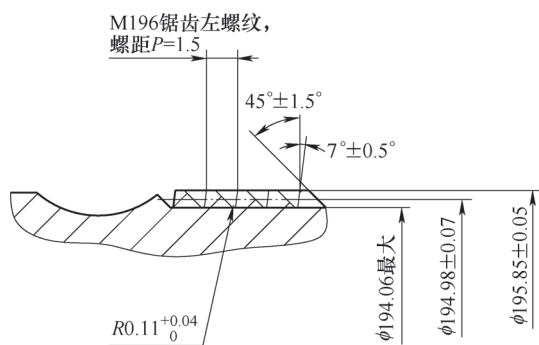


图5 在风扇轴外径处分布的M196×1.5锯齿左螺纹

纹的加工质量，车刀的左右切削刃必须是直线，刀片的刀尖角应该等于螺纹的牙型角，螺纹刀片切削部分应该具有较小的表面粗糙度值。

在编程时采用“径向进刀”的方式来车削加工螺纹，车削过程中，刀片垂直进给，通过几次行程来完成螺纹的加工，切屑垂直于螺纹轴线方向排出或者卷成团状排出。如果用轴向或者斜刀参加切削，那么高速排出的切屑会把另一牙侧拉毛。而用这种办法可以得到比较正确的牙型，牙型精度高。

在数控车床上针对不同类型、尺寸的螺纹，分别选用不同的指令。

对于M196的螺纹，采用“G32螺纹切削”，选择斯特拉姆公司生产的锯齿螺纹刀片对零件进行加工。对于锯齿左螺纹，由于该螺纹的牙型具有自锁性，在测量该螺纹时，如发现螺纹环规有紧度时，则一定要慢慢沿反方向旋出，否则该螺纹会被破坏，导致零件报废。

对于三角形螺纹，在数控车床上选用G76螺纹切削即可。

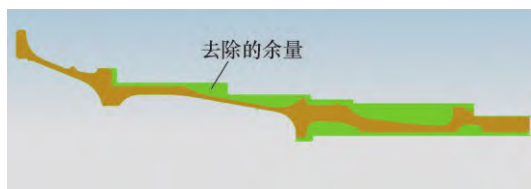
从两种不同规格螺纹编制的程序来看，螺纹牙型角一致，不同处是螺纹起点、终点尺寸及其螺距。在编程时一定要正确填写螺纹牙型角及其螺距，否则会加工出错误的产品。

通过针对三种螺纹编程，可以看出对于螺纹车削，机床的进给率是最关键的因素，机床的进给率必须与螺距相等。这就意味着当使用成形刀片进行螺纹切削时，需要保证具有很高的进给量和切削速度。进给量和螺距之间的协调可以通过CNC机床的固化子程序予以实现。螺纹车削时，可以通过成形刀片来沿着工件部分完成合适的走刀次数以获得所需要的螺纹。通过将螺纹的整个切削深度分成几次小的切削深度，避免使切削刃的螺纹齿廓角过载，并同时保持其敏感度。每次走刀时，便可以切出螺纹整个切削深度的几分之一，当刀片更深入切削时，轴向进给值也会逐渐降低，而切削刃吃刀会越来越深，同时也会生成越来越多的螺纹。

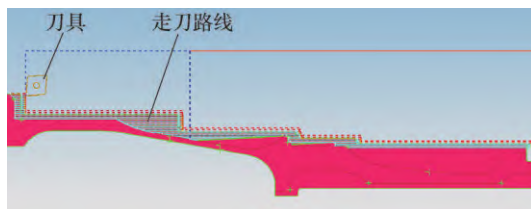
需要使用锯齿螺纹环规判断螺纹合格与否，在实际测量中，由于螺纹上有比较细的切屑、脏物等，会影响螺纹环规的判断，所以在测量时，需要利用金属橡皮擦去除细切屑，用酒精清洗零件后，方可使用螺纹环规。

4 合理选择刀具和加工参数

风扇轴经粗加工、固溶处理后，为了避免热处理变形，部分位置保留的余量较大，达到了3.3mm。按照常规加工思路，最早采用图6所示的传统加工方法，刀具为CNMG120408-PM4225，是一款经典的C型刀具，加工效率很高，切削深度1.2~1.5mm，切削速度120m/min，进给量0.15mm/r，正常完成这一工步大约需要1h，加工完成后切削刃已磨损殆尽。



a) 需要去除的余量



b) 走刀路线

图6 传统加工方法

经分析，由于风扇轴加工外圆时采用“一夹一顶”的定位方式，定位稳固，且零件此时壁厚较厚，刚性很好，因此可以适当增大切削速度、转速或切削深度来提升加工效率，但常规刀具效率提升空间有限。

虽然通常提升加工效率陶瓷刀片是首选，但是刀具受形状的限制，更适合加工形状简单的型面。若加工阶梯状型面，转角处剩下的余量会很大，需要花大量时间进行清根，不适合用在风扇轴加工上。通过筛选，可以尝试使用一款用于高速加工的山特维克可乐满新型合金刀具^[3]，结构如图7所示，介于C型和V型刀具之间，刃长很长，双主偏角强度比V型刀具好，反向车削时主偏角较小，有利于提高刀具强度，侧刃接触面积较大，刀具散热更好。经试验，在切削深度不变的情况下，切削速度可提高至140m/min，进给量可以达到0.9mm/r，完成这一工步只需12min，半精车外圆的加工时间大幅缩短。加工表面如图8所示，虽然表面粗糙度值较大，

$Ra \approx 3.2 \mu m$ ，但表面尚留有0.3mm左右余量，不影响最终质量。刀片价格约为原刀片的3倍，但其寿命也达到了原寿命的3倍。综合评估，完全达到了在保证质量的前提下高效率加工的目的，并且该经验方法可在轴类、盘类刚性较好的零件上推广应用。

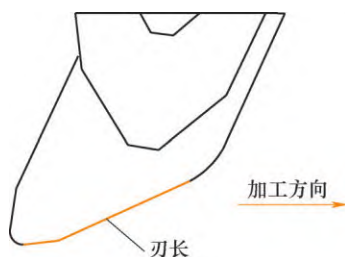


图7 新型合金刀具结构

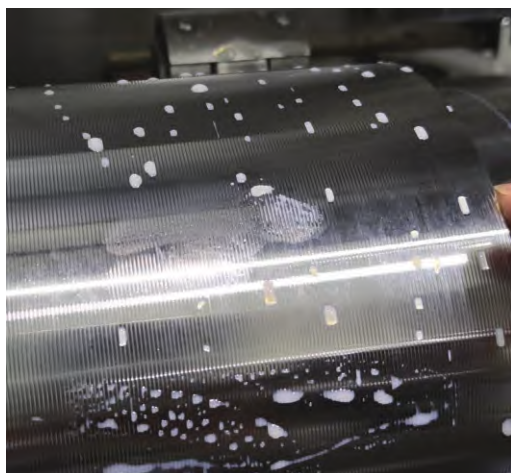


图8 加工表面

5 采取断屑方案解决缠屑问题

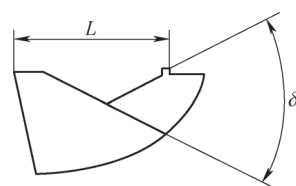
由于风扇轴材质韧性较好，因此半精加工凹槽处总是切屑连续、卷曲，切屑时常会缠绕在工件、中心架上，很容易刮伤已加工表面，严重影响加工质量。有的缠屑会阻挡切削液对切削部位的正常冷却，引发刀具破损；有的缠屑还影响到中心架的定位，造成产品径向圆跳动、轴向圆跳动超差或崩刃。加工过程中只能依靠人工观察、手动清理切屑，有时还需要停机处理，风险很大，效率很低。

通过有效的断屑方法解决缠屑问题尤为重要，常规的断屑方法主要有以下几种。

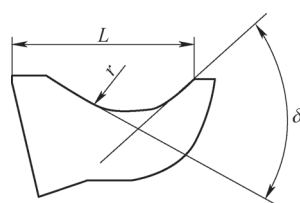
1) 使用断屑器或断屑装置，不经济且安装不方便。

2) 选用不同断屑槽（见图9）的刀具。由于刀具的几何参数与加工部位、加工材料难以很好地匹配，因此几种不同形状的断屑槽刀具在加工风扇轴

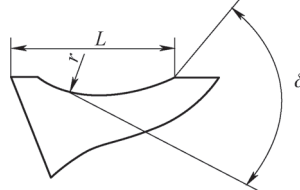
时，并没有取得良好的断屑效果，而且单纯利用增大断屑槽前角反而不耐磨，导致无法完成加工。



a) 直线型



b) 直线圆弧型



c) 全圆弧型

图9 断屑槽

3) 采用啄式加工，频繁周期性改变切削时切削深度的大小，切屑就会断断续续地产生，无法缠绕，可以改善缠屑问题，但是一般的啄式加工，退刀时机设定比较随意，切屑长度不好控制，特别是加工直径较大的零件时，切屑太长依然会缠屑，太短会四处飞溅。但可以在此基础上作进一步改进，解决切屑长度不好控制的问题。

如果能够通过计算把每次进刀的切削深度和零件在加工时旋转的角度匹配起来，将刀具在零件表面每次切入切出产生的相对位移长度，通过零件单位时间旋转的角度计算出来，就可以控制切屑长度。改进后的啄式加工原理如图10所示。

利用这一原理，结合C250材料加工参数重新编写加工程序。

刀具车削工件表面一周所用的时间 t 的计算公式为

$$t = 60 \pi D / (1000 v_c) \quad (1)$$

式中， t 为刀具车削工件表面一周所用的时间（s）； D 为工件加工部位的直径（mm）； v_c 为切削速度（mm/s）。

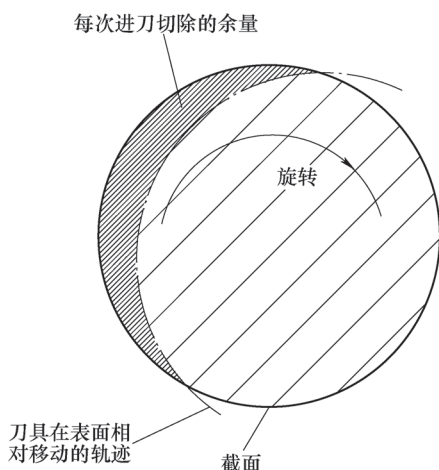


图10 改进后的啄式加工原理

设定切屑长度后每次进刀的背吃刀量 a_p 的计算公式为

$$a_p = L f n t / (60 \pi D) \quad (2)$$

式中， a_p 为设定切屑长度后每次进刀的背吃刀量（mm）； L 为需要的切屑长度（mm）； f 为进给量（mm/r）； n 为主轴转速（r/min）； t 为刀具车削工件表面一周所用的时间（s）； D 为工件加工部位的直径（mm）。

编制刀具轨迹的坐标点，形成进一刀、退一刀、进一刀、退一刀……的加工程序，直至加工至指定深度。每一个进刀的坐标点和前一个进刀的坐标点相差一个背吃刀量 a_p ，每一个退刀的坐标点和前一个退刀的坐标点也相差一个背吃刀量 a_p 。例如，待加工零件表面的坐标点为 X_0 ，则第1个进刀坐标点 $X_1 = X_0 - a_p$ ，第2个坐标点 $X_2 = X_0 + a_p$ ，第3个坐标点 $X_3 = X_2 - a_p$ ，以此类推，直至加工至指定深度。背吃刀量和轴旋转的角度相对应的关系如图11所示。

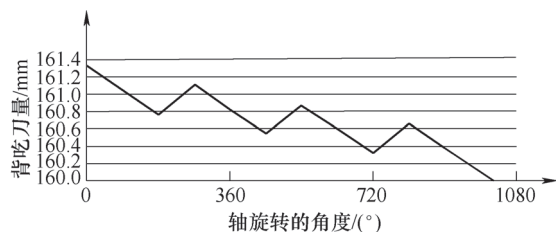


图11 背吃刀量和轴旋转的角度相对应的关系

经验证，切屑规律性地产生，将切屑控制在呈“宝塔形”时，既不会缠屑，也不会四处飞溅，有效地解决了缠屑问题。原切屑和加工程序改进后的切屑对比如图12所示。



a) 原切屑



b) 加工程序改进后的切屑

图12 原切屑和加工程序改进后的切屑对比

6 结束语

文章阐述了高强度钢风扇轴的车削加工方案，在工艺路线、切削刀具和加工参数等方面进行优化和改进，解决了高硬度材料难车削和切屑缠绕的问题，降低了刀具磨损。

经过验证，高强度钢风扇轴的车削工艺方案不仅能够保质保量加工，且车削加工效率高，尺寸精度控制良好，加工缠屑问题得以有效解决。断屑方法和加工刀具在其他类似材料零件的加工中也值得借鉴运用。

参考文献：

- [1] 王亚南. 超高强度钢00Ni18Co8Mo5TiAl的切削加工[J]. 航空工艺技术, 1998 (1): 35-36.
- [2] 高晓婷, 任卫斌, 赵金龙, 等. 固溶温度对18NiC250材料力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018 (6): 198-200.
- [3] 山特维克可乐满. 山特维克可乐满全向车削Prime Turning技术[J]. 工具技术, 2018 (6): 11-12.