大型周向环槽的高效加工技术

方振红，周德民，张伟，彭华武，李凌霄，何顺
中国兵器工业集团江山重工研究院　湖北襄阳　441005

摘要：针对大型周向环槽材料去除量大、加工后易变形的特点，提出了一种高效加工技术，通过优化工艺流程和优选走刀模式，采用插铣开粗，在校正和精修基准面后，再用可变轴轮廓铣精加工周向环槽轮廓，解决了零件变形的难题，提高了加工效率和产品质量，降低了加工成本。

关键词：周向环槽；层切；插铣；高效加工

1　序言

大型周向环槽的材料去除量大，加工后工件易变形，其高效加工一直是当前数控加工行业探索研究的对象之一[1, 2]。加工方法在很大程度上影响着零件的加工效率与质量。本文结合生产实际，探索中大型周向环槽的高效加工方法。

2　大型周向环槽加工中存在的问题

如图1所示，某筒环零件外径为1200mm，内径为1000mm，其端面和外圆上分布着多处台阶，其中部的圆环凹槽柱面上分布着一处包心角为188°的周向环状通槽，槽宽$100^{+0.22}_{0}$mm，拐角圆角为10mm，槽深80mm，并且环槽侧面与基准面的平行度要求为0.2mm。

这种周向环槽，机械加工时材料去除量大，并且以铣削为主，通常安排在带有回转工作台的卧式加工中心上进行加工。层铣是目前加工型腔最常用的方法[3]，但用于加工图1中的大型周向环槽，会存在以下问题。

（1）工件加工变形大　由于该周向环槽所在的圆柱面超过一半的实体材料被切除，周向矩形通槽的槽窗面积较大，加工后两端面向周向环槽内收缩，收缩量达1.2mm，远远超出技术要求的精度等级，难以保证环槽宽度、几何公差要求。

（2）加工效率低　采用型腔铣的方式挖槽加工，槽窗内的材料全部被切除，加工时间太长。采用沿周向环槽轮廓层切的方式加工，虽然可分离中心残料，时间有所缩短，但是排屑困难，残料整体掉落时易损伤刀具和窗口轮廓。

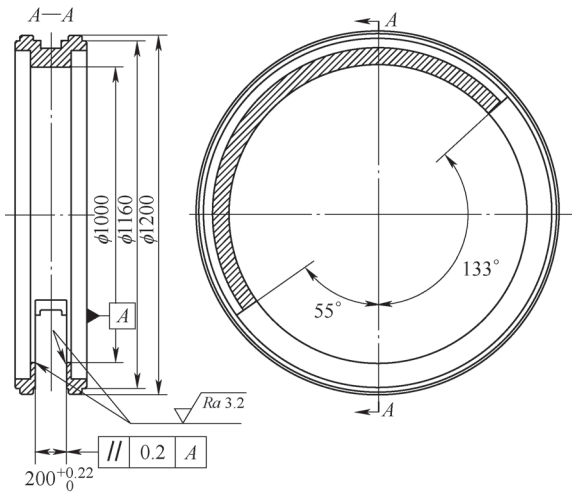


图1　筒环的周向矩形环槽

（3）加工成本高　该周向环槽为大型深腔，材料去除量大，在环槽拐角处极易引起工艺系统振动，刀片非正常损耗现象严重。

3　应对措施

3.1　工艺流程优化

调整车削工序的端面尺寸，增加基准*A*端面的余量，将车削工序的环高总尺寸放大1mm。将镗铣工序拆分为粗、精加工，粗加工后，安排时效和人工校正，然后精修基准*A*端面，最后进行周向环槽的轮廓精加工。

3.2　走刀模式优化

粗加工时，用插铣取代联动层切。层切时刀具

的主切削刃为侧刃，刀具承受径向推力。层切加工模式的特点是“大进给、小切深”，这种策略在高速加工（HSM）中能提高加工效率。然而，高速加工是多种综合技术的应用，普通卧式加工中心并不能满足高速加工的条件。型腔越深，所需刀具越长，圆角尺寸越小，刀杆直径越细；而刀具越长、刀杆越细，刚性就越差，越易引起振动，层切时的切削用量就越小，导致加工时间大幅增加。

如图2所示，CAM软件生成的圆环可变轴层切刀路，仅粗加工可变轴轮廓铣工序，单件纯走刀时间超过10h，实际加工时间超过11h。这是因为加工中进给速度受到限制。层切环槽时，刀具从环槽的一端运动到另一端，*X*轴的移动距离等于刀具直径，当*F*取值过大时，为了保证刀具同步到达程序中指定的*X*轴和*B*轴终点，*B*轴必然会以机床允许的最大进给速度转动，极有可能使切削抗力超出刀具的承受能力，导致刀具损坏。

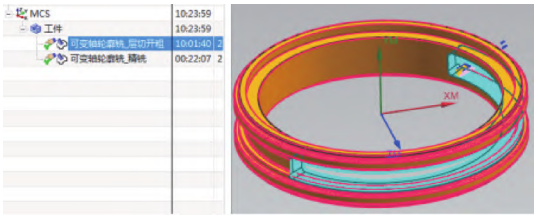


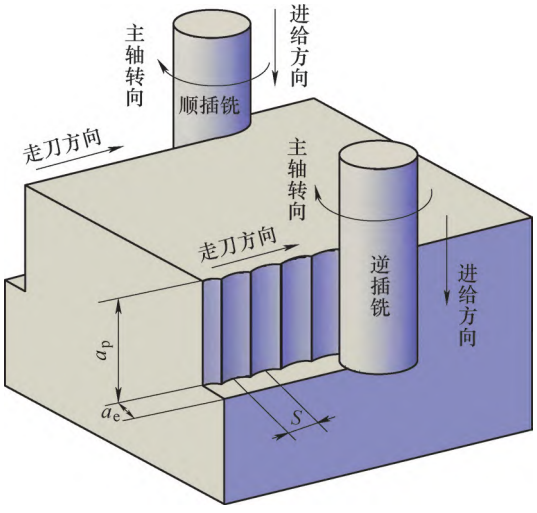
图2　可变轴轮廓铣联动层切

插铣是以刀具的端面刃为主切削刃，钻、铣组合切削，能够快速大量地去除材料[4]。相较于传统的层切加工，插铣的径向力很小，工件不易变形。根据插铣过程中刀轴矢量是否变化，又分为定轴插铣和变轴插铣。定轴插铣的刀轴矢量固定不变，变轴插铣则是刀轴矢量先发生变化，再进行插铣。根据插铣刀具的切削位置及进刀路径，又分为壁面插铣和开槽插铣，如图3所示。

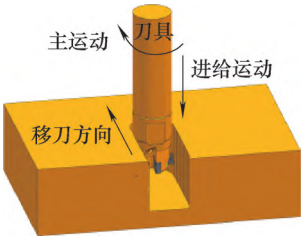
壁面插铣时，工件材料对刀具的包角＜180°；开槽插铣属于满刀切削，工件材料对刀具的包角＞180°，其效率远高于壁面插铣。

现有的CAM软件虽然可以规划插铣刀具路径，但在退刀时，会让刀具从插铣壁面后退一个安全距离，并不适用。因此，加工周向环槽需要根据其结构特点和加工要求，合理地规划高效插铣路径[5]。插铣方案如下。

首先用镗刀进行变轴开槽插铣。开槽插铣时刀具位于环槽中分线上，工作台每旋转一定的角度，



a）壁面插铣



b）开槽插铣

图3　壁面插铣与开槽插铣

进行一次插铣。

开槽插铣完成后，周向环槽的4个拐角处余量仍然较大，因此接着采用较小规格的插铣刀，以定轴壁面插铣的形式清角去残量。变轴开槽插铣与定轴壁面插铣相结合，能保持较高的综合加工效率。插铣开槽的具体细节如下。

（1）工件的装夹　为简化编程，工件应安放在工作台正中心，工作台的回转中心就是工件原点。在卧式加工中心上插铣工件，工件受到平行于工作台面的轴向推力。因此，工件必须装夹牢固，压点分布适当。由于柱面周向环槽的包角较大，因此加工中需要换压，防止环槽受压变形、加工中工件发生窜动。为方便换压，开槽插铣程序被分成3个组段，每个组段结束设置M00暂停指令。

（2）开槽插铣的刀具　柱面周向环槽宽度为$100^{+0.22}_{0}$ mm，若用ϕ100mm的插铣刀进行加工，无法给环槽侧壁留余量，而且封闭型腔属于受限空间，插铣刀的刀齿多，排屑空间小，排屑困难。相较而言，双刃粗镗刀的排屑空间比多刃插铣刀的排屑空间大，而且粗镗刀的径向尺寸可以调整，能够给环槽侧壁留下精加工余量。因此，可选ϕ98.5mm的双

刃粗镗刀作为开槽插铣刀具。

（3）开槽插铣的起始点　对于封闭的环槽，需要先加工出一个适当的下刀孔，当作插铣的起始点。下刀孔的位置（起始角度θ）需要通过计算得到。如图4所示，水平点划线代表卧式加工中心的Z轴，工件筒环的内径为R，点P为环槽起始角的径向侧壁与镗刀刀尖回转圆柱的交点，在直角三角形ODP中，短直角边DP=50mm，斜边OP=R=500mm，则$\angle\theta$=$\angle DOP$=Asin（50/500）≈5.74°。

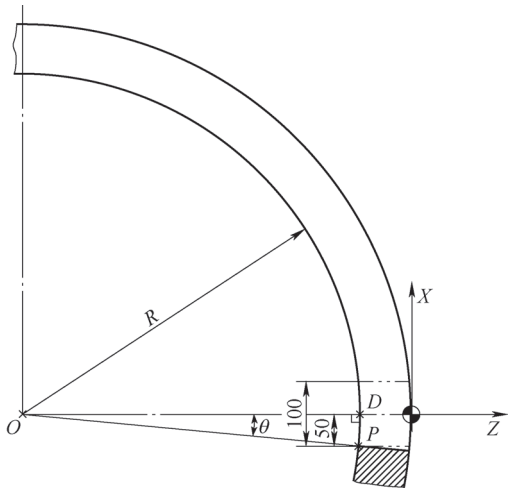


图4　插铣起始角计算

（4）开槽插铣的步距　插铣的时间由插铣循环的次数决定，而插铣循环的次数取决于插铣行距和步距。行距、步距加大，走刀次数减小，插铣残留高度加大；插铣行距、步距减小，走刀次数增多，插铣残留高度有所减小，但加工时间延长，会丧失插铣的优势。

开槽插铣的步距角：ϕ98.5mm的镗刀在镗孔加工时，切削宽度可达6～8mm。当步距角α较小时，步距角对应的弧长、弦长几乎相等。因此，步距S=$\pi D\alpha$/360。经计算开槽插铣步距角α可取0.7°，使插铣侧向步距S为6.11～7.33mm，以保证较高的加工效率。

（5）开槽插铣的程序　西门子数控系统卧式加工中心的开槽插铣程序如下。

```
;01--KAI CAO CHA XI 98.5
T1 M6;CTD D98.5
G90 G54 G0 G64 G40 B=DC(5.74)
W0 Z800
X0 Y0 M03 S350
R2=5.74;AP-S
R3=0.7;AP-I
R4=63;AP-E
AA5: B=R2
F120
CYCLE81(610,580,3,,82)
R2=R2+R3
IF R2<=R4 GOTOB AA5
M00
;HUAN YA

G0 G90 B=DC(63)
M03 S350
R2=63;(AP-S)
R3=0.7;(AP-I)
R4=126;(AP-E)
AA7: B=R2
F120
CYCLE81(610,580,3,,82)
R2=R2+R3
IF R2<R4 GOTOB AA7
M00
;HUAN YA

G0 G90 B=DC(126)
M03 S350
R2=126;(AP-S)
R3=0.7;(AP-I)
R4=188-5.74;(AP-E)
AA9: B=R2
F120
CYCLE81(610,580,3,,82)
R2=R2+R3
IF R2<=R4 GOTOB AA9
G90 G00 Z800  M09
M30
;MT: 320Min
```

（6）壁面清角插铣　开槽插铣后，周向环槽4个拐角处的余量较大，最大余量接近22mm，可以采用ϕ32mm的可转位刀具，以定轴壁面插铣的形式

进行顺铣清角，并对侧壁留0.5mm余量，以保证精加工时环槽内壁余量均匀。壁面插铣侧向步距*S*可取4mm，以保持较高的加工效率。壁面插铣的下刀点为粗镗刀形成的刀具圆角的切点，每处拐角的壁面插铣路径呈*L*形。其数控程序如下，刀具模拟轨迹如图5所示。

```
;02--QCL QJ R16
T3 M06;TOOL: D32KZW
G90 G40 G54 G00 B0
W0 Z800 M03 S1620
R10=32/2;XD D32
R11=R10+0.5;X
R12=99/2-R11;Y
R13=4;STEP
R14=7;NUM
Y=R12 F900
MCALL CYCLE81(610,580,3,,82)
HOLES1(R11+R13*R14,R12,180,R13,R13,R14)
HOLES1(R11,R12,-90,R13,R13,R14-1)
HOLES1(R11,-R12+R13*R14,-90,R13,R13,R14)
HOLES1(R11,-R12,0,R13,R13,R14-1)
MCALL
G0 Z800
M00

G90 G40 G54 G00 B188
Y=-R12 F900
MCALL CYCLE81(610,580,3,,82)
HOLES1(-R11-R13*R14,-R12,0,R13,R13,R14)
HOLES1(-R11,-R12,90,R13,R13,R14-1)
HOLES1(-R11,R12-R13*R14,90,R13,R13,R14)
HOLES1(-R11,R12,180,R13,R13,R14-1)
MCALL
G0 Z800 M5
M30
;MT:14Min
```



图5　壁面插铣清角程序刀具模拟轨迹

3.3　轮廓精加工方法优化

在经过时效和校正、精铣基准*A*端面之后，可采用加长立铣刀对周向环槽轮廓进行四轴联动的单刀路精加工。圆柱立铣刀与工件的侧壁是线接触，切削平稳，效率高。但由于刀具太长，让刀严重，环槽易呈喇叭口状，而且环槽的拐角处工件材料对刀具的包角变大，易出现振纹，因此，需要采取如下措施。

（1）清角处理　用加长铣刀插铣环槽拐角，减少拐角处的加工余量，防止精加工过程发生振颤。

（2）径向分层　径向分层加工，以减小工件与刀具的接触面积，降低切削抗力。

清角和轮廓联动精加工程序仍采用R参数宏编程，刀具直径为变量，修改刀具直径可以进行分层精加工。其数控程序如下，刀具模拟轨迹如图6所示。

```
;03--QJ R10
T20;TOOL: D20 JXCD
G90 G40 G54 G00 B188
Z800 W0
M03 S320
R11=20/2;D20
R12=100/2-R11;Y40
G00 X=-R11 Y=R12
F100
MCALL CYCLE81(610,580,3,,81)
X=-R11 Y=R12;X-10 Y40
Y=-R12
MCALL
G90 G00 Z800.
M00

G00 B=DC(0)
G00 X=R11 Y=R12
F100
MCALL CYCLE81(610,580,3,,81)
X=R11 Y=R12;X10 Y40
Y=-R12
MCALL
G90 G00 Z800. M09
M05
```

```
M00

;04--JIN XI CAO 100X188DU
T5 M06;TOOL:D20 JCLXD
G90 G40 G54 G0 B=DC(5)
Z800 W0
M03 S180
R11=20;XD20
R1=(100.12-R11)/2;Y
G0 X=R11/2 Y0
G01 Z499 F3000
X=R11/2 B0 F60;X10
Y=-R1 F100
X=-R11/2 B188;X-10
Y=R1
X=R11/2 B0;X10
Y0
G90 G00 Z800. M09
M30
;MT: 45Min
```

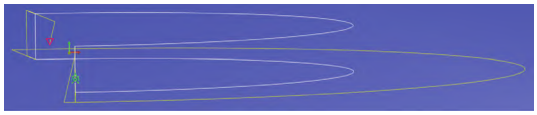


图6　清角和轮廓精加工刀具模拟轨迹

（3）将加长圆柱立铣刀改制为倒锥状　使立铣刀底刃处周齿直径为20mm，靠近柄部的周齿直径为19.92mm。

4　改进效果

改进后，该周向环槽加工用时比层切减少2/5，刀具消耗降低，加工质量得到了保证。

ϕ98.5mm的粗镗刀开槽插铣时，步距角为0.7°，需要插铣（188－5.74×2）/0.7≈252（刀）。粗镗刀转速n=350r/min，进给速度v_f=100mm/min，实际用时320min。壁面插铣清角时，侧向步距为4mm，插铣开粗比层切开粗节约设备台时近5.5h。

开槽插铣，平均每个工件消耗3个镗刀片。壁面插铣，刀片消耗极小，而且可以选用旧刀具。与层切相比，插铣至少可节约10个刀片。

在环槽拐角处插铣减量后，精铣环槽轮廓时，拐角处主轴负载无明显的增加，槽宽尺寸控制在公差允许的范围之内。加工完的成品如图7所示。

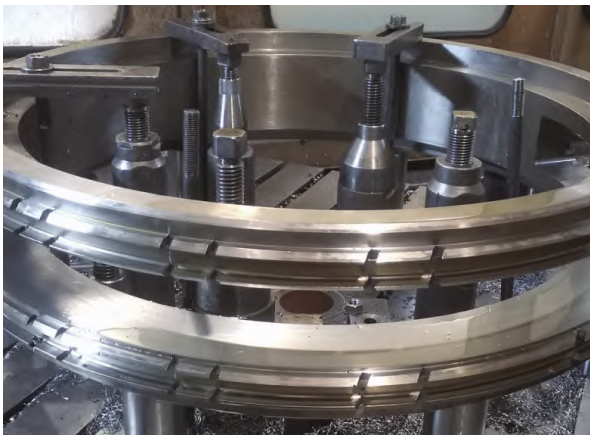


图7　周向环槽成品

实践证明，用插铣取代层切开粗，增加校正工序，提高安装基准面的精度，改制精加工刀具等措施，不仅提高了大型周向环槽的加工效率[6]，而且保证了周向环槽的加工质量。

5　结束语

本文针对大型周向环槽的加工特点进行了工艺改进，加工过程中实行粗、精加工分开，在粗加工之后安排时效和校正，减少应力变形；在精修基准面之后才进行环槽的精加工，保证加工精度。为提高加工效率，粗加工宜采用插铣，精加工应进行径向分层切削。插铣开粗与侧铣精加工相结合的工艺路线与加工经验，为同类零件的高效加工提供了借鉴。

参考文献：

[1] 王宇，王宝涛，许成阳，等. 数控加工中插铣技术的研究现状[J]. 航空制造技术，2014（8）：12-15.
[2] 詹华西. 周向槽形铣削刀路设计与探索[J]. 制造技术与机床，2007（11）：62-63.
[3] 何少林. 二维型腔插铣加工技术研究[D]. 大连：大连理工大学，2019.
[4] 杨双. 插铣加工技术的研究与应用[J]. 金属加工（冷加工），2014（20）：24-27.
[5] 秦旭达，贾昊，王琦，等. 插铣技术的研究现状[J]. 航空制造技术，2011（5）：40-42.
[6] 唐联耀，李鹏南，刘洋，等. 异形深腔类零件切削加工试验[J]. 机械设计与研究，2016（12）：94-97.

MW 20250208