高精密细长薄壁件的数控加工

宜宾市普什模具有限公司 （四川 644007） 余正江 陈 宏 唐升刚

摘要：针对高精密细长薄壁件的加工要求进行工艺性分析，设计出工艺流程，给出各环节控制变形的具体措施，保证了加工质量。

1. 薄壁件结构

在航天航空、军事及电子等机械加工领域，涉及各类高精密薄壁件，由于该类零件壁薄、金属切削去除量大以及刚性较低，所以其加工过程中的变形控制是主要难题。如何减小变形，保证零件的高质量是工艺人员追求的目标。近年来，对该类薄壁件的数控加工工艺探讨较多，但绝大多数均以铝合金或钛合金为主，对其他一些合金材料薄壁件的数控加工探讨较少。特别是对于一些具有高耐磨性、高强度材料零件的研究更为有限，可以借鉴的经验和资料极少。

在加工过程中，调质料对刀具磨损较大，易产生较高的切削热，使工件表面形成一定的切削残余应力，造成工件一定的变形，严重影响加工后的尺寸精度，造成加工后零件尺寸超差，质量难以满足其要求。为此，能否控制或减少切削加工残余应力，降低刀具磨损将是提高质量、确保产品精度合格的关键。需要我们不断探索、总结，摸索出一套安全可靠的工艺方法。我公司接到一批典型高精密薄壁件（见图1）的加工任务，该零件长度大、壁厚薄且结构极不对称，形状公差和尺寸精度要求高。

2. 工艺性分析

该导轨采用38CrMoAl渗氮钢，调质硬度220～250HBW，渗氮表面硬度＞850HV，氮化层厚度＞0.50mm，脆性1级。由图1可知，工件长1 100mm、宽135mm、厚15mm，上有凸台、下有槽，*A*基准平面度0.10 mm，上平面平面度0.10 mm，*A*基准平行度0.15mm。加工过程中需要解决的主要工艺技术问题是尽可能减小变形，以控制尺寸精度，确保产品高质量和高的合格率。

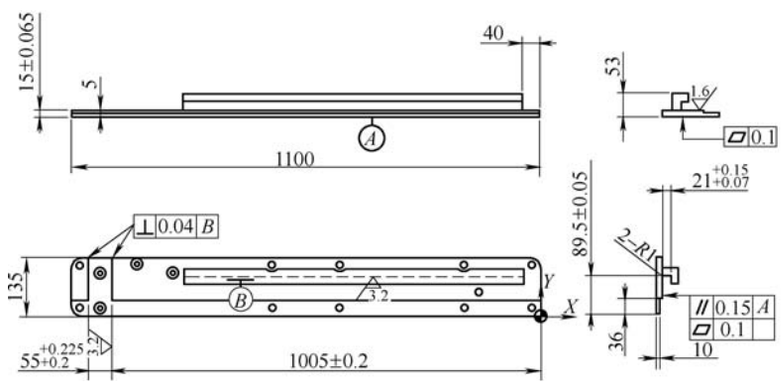


图1 高精密薄壁加工件

通过分析认为，影响和造成工件加工变形的主要因素有如下几个方面：①毛坯内的残余应力。②切削力、切削热。③刀具在切削过程中与工件表面挤压产生的表面残余应力。④工件装夹产生的应力和变形以及渗氮处理引起工件变形。⑤机床精度、刀具磨损等。

毛坯内的残余应力可以通过时效处理解决。氮化处理：由于氮化处理温度较高，时间较长，工件也有0.05～0.08mm的变形，因此，在加工过程中，对工件平面度、平行度及尺寸精度等提出更高的要求，以补偿后续热处理氮化变形的影响，确保工件最终达到高的质量标准。

3. 工艺流程设计

加工工艺流程设计为：下料→时效热处理→粗加工（留余量1.00mm）→调质处理→半精加工

（留余量0.35～0.40mm）→稳定回火→精加工→钳工倒*R*及倒锐边→渗氮处理。

4. 各环节变形控制

（1）毛坯残余应力的去除：在粗加工前，采用去除应力处理，彻底消除毛坯内的残余应力。粗加工完成后进行调质处理；半精加工完成后，再进行一次去应力处理（此次处理不可忽视，其目的主要是去除加工过程产生的二次应力，稳定尺寸）。

（2）切削加工过程表面残余应力的控制：38CrMoAl是一种优质氮化钢，主要用于制造高耐磨性、高疲劳强度和较高强度、处理后尺寸精确的氮化零件。我们发现该零件需调质处理（其硬度在220～250HBW）后进行切削，对刀具磨损特别快，产生较高切削热，致使工件表面形成一定的切削应力，导致工件产生变形。为了有效控制工件加工过程的变形，必须从刀具选用、切削参数以及走刀路径等多方面进行综合考虑和优化。

为了优化选择刀具，采用5种不同直径刀具进行同条件切削加工，其情况对比如表1所示。

由表1可以看出，刀具直径大小和背吃刀量是影响切削力的关键。铣刀直径越大，背吃刀量越大，切削过程中的切削力越大，工件变形量越大。刀具直径太小，背吃刀量太小，其效率又太低。对比切削结果，认为选用ϕ32mm方肩铣进行半、精加工，在质量和效率方面效果比较理想。

表1　不同直径面铣刀铣面变形量对比

刀具直径/mm	100	80	63	32	20
背吃刀量/mm	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
工件变形量/mm	0.35	0.30	0.20	0.05	0.04
背吃刀量/mm	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
工件变形量/mm	0.20	0.12	0.10	0.02	0.015

为了摸索加工技术参数的影响，选择不同切削参数进行比较，试验结果如表2所示。

表2　不同转速、进给对工件变形及刀具磨损情况

转速/（r·min^{-1}）	960	640	320	200
进给速度/（mm·min^{-1}）	250	250	250	250
工件变形量/mm	0.10	0.06	0.015	0.015
刀片磨损量/mm	0.045	0.035	0.025	0.020

由表2可看出，转速是影响切削温度和刀具磨损的关键因素。转速越高，切削热越高，刀具磨损越快，使用寿命越短，且产生的切削残余应力就越大，对工件造成的变形也越大。当转速太低时，刀片容易崩裂。通过试验对比认为，选择主轴转速300r/min、进给速度250mm/min为佳。

刀片优选具有高耐磨性、韧性好的合金涂层刀片（比如加工钛合金所用的合金涂层刀片）。

为了掌握走刀轨迹对工件变形的影响，我们采用不同的刀路轨迹（见图2），测量不同加工刀轨对变形量的影响（见表3）。

由表3可以看出，在效率方面，轨迹1所对应的效率高，但变形量大，不能满足图样的公差

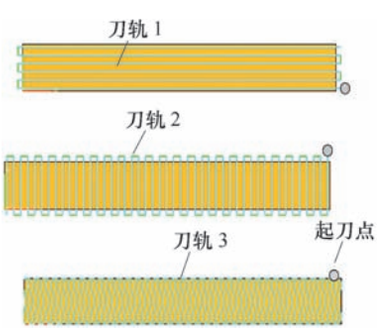


图2　加工走刀路径示意图

表3　不同走刀路径对工件变形的影响

刀轨	刀具	转速/（r·min^{-1}）	进给速度/（mm·min^{-1}）	工件变形量/mm
1	ϕ32mm方肩铣	320	250	0.060
2	ϕ32mm方肩铣	320	250	0.015
3	ϕ32mm方肩铣	320	250	0.005

要求。轨迹2、轨迹3能满足其要求，但轨迹3所对应的工件产生的变形量最小，几乎为0。通过分析认为，对于刀路轨迹1，产生的变形量较大的原因可能是加工过程刀路长，单面表面残余应力累积逐步变大，导致翘曲变形较大。对于刀路轨迹2，刀路较短，表面残余压力难以累积，对工件造成的变形较小。对于第3种交替曲线加工轨迹：①刀具在运动过程中，比直线运动能更好地冷却工件和刀具，从而减少了切削热引起的应力变形。②由于刀具运动方向随时都在发生改变，使得形成的表面应力的方向也在发生改变，这些应力不仅不能聚积形成合力，而且还会相互抵消部分应力。③不仅实现连续加工轨迹，同时还有效缩短了刀路轨迹的长度。实践证明，交替曲线加工轨迹对高精度、高平面度、高平行度要求的薄壁件平面加工效果非常好，值得推广应用。

（3）工件装夹变形控制：工件装夹过程中，防止工件变形是实现薄壁零件加工的关键。实现防变形装夹的关键是要根据工件结构设计出合理、稳定、可靠的工装夹具；选择好定位基准面，定位紧固面，实现零件基准面与工装基准面自然、紧密贴合，定位紧固面多点均匀受力紧固（见图3、图4）。

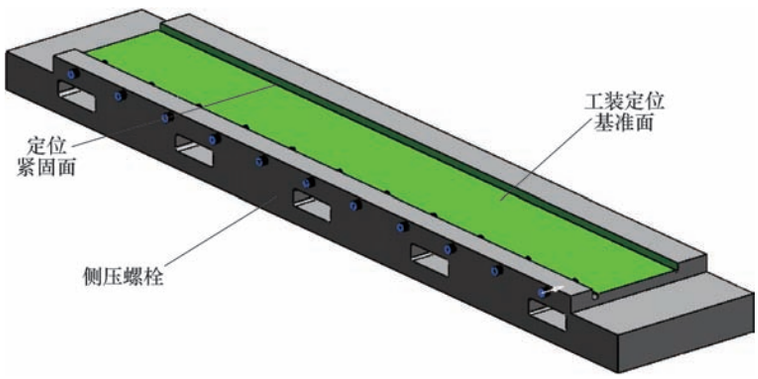


图3　工装示意图

（4）尺寸精度控制：该工件平面度、平行度及尺寸精度要求高，因此必须选择精度高、运行稳定的机床，要求其几何精度、重复定位精度在0.02mm以内。由于该零件材料在加工过程中对刀具磨损较大，如果不控制好刀具磨损对工件精度的影响，加工出来的工件会出现一个端头比另一个端头厚的现象，会影响上、下

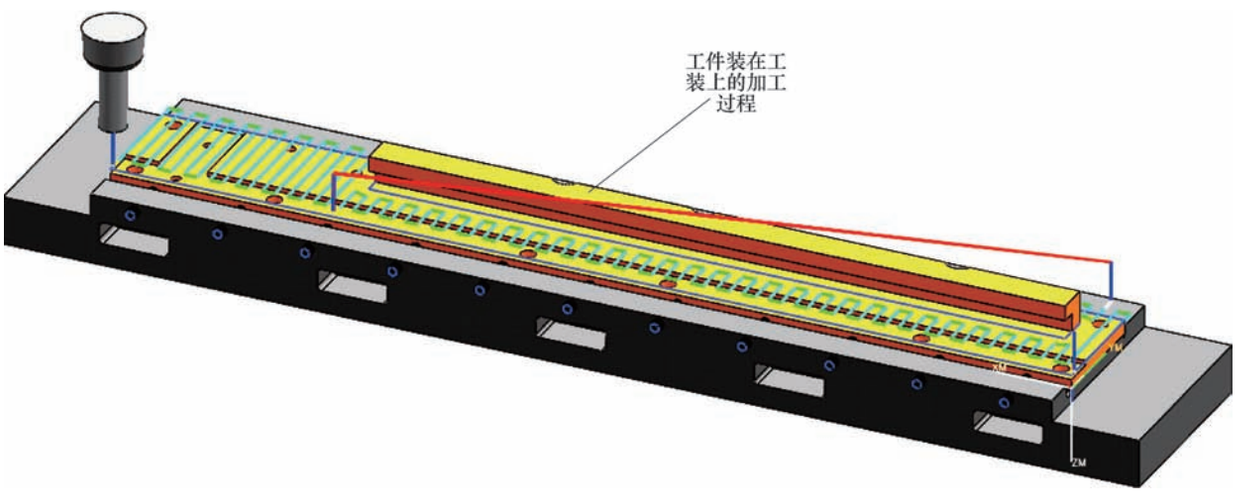


图4　工件装夹方式

面平行度。对刀具在加工过程中产生的正常磨损，即便选择性能好的刀片，待整个面加工完，其磨损量已有约0.02mm，这种因刀具磨损造成零件厚、薄不一的现象，只要通过试验，测量出铣完该面对刀具的磨损量，就可以通过数控技术的程序补偿或三轴联动来弥补。下面是三轴联动的部分程序段：

N7 G1 Z0.0 F250

N8 X1088. Y135. Z-0.00025

N9 X1091.135 Y132.913 Z-0.0005

N10 X1094.022 Y130.492 Z-0.00075

N11 X1096.623 Y127.768 Z-0.001

N12 X1098.23 Y125.719 Z-0.00125

N13 X1099.517 Y123.452 Z-0.0015

N14 X1100.48 Y121.029 Z-0.00175

N15 X1101.101 Y118.498 Z-0.002

N16 X1101.37 Y115.905 Z-0.00225

N17 X1101.25 Y113.304 Z-0.0025

通过此方法加工，可实现该工件整体厚度基本相同，有效确保其平行度。

5. 结语

通过对高精密导轨的加工使我们意识到，加工高精密薄壁件必须认真结合产品形状进行分析，优化选择适宜的刀具、加工参数及正确、合理的加工路径，其主要目的是实现加工过程产生的应力最小。实践证明，采用交替曲线加工轨迹是非常有效的。虽然加工效率有所下降，但是加工的成品率大大提高，质量得到了可靠保证，这是其最大的优势，值得推广应用。**MW**

（收稿日期：20150415）

专家点评

文中有2处比较新颖：①测量不同加工刀轨对产生变形量的影响。②测量出铣完该面对刀具的磨损量，然后用三轴联动来弥补。这2种方法对读者有较强的指导意义。针对第1种方法，文中分析了不同刀具轨迹对工件表面残余应力影响的原因，给人耳目一新的感觉；第2种方法测量出铣完该面对刀具的磨损量，然后用三轴联动来弥补，也可以使用G10可编辑输入的方法，在程序中改变刀具的磨损量，这样编程会更加简洁一些。