薄壁零件加工技术研究

■ 航空工业空空导弹研究院 （河南洛阳 471009） 高 歌 李 健

扫码了解更多

摘要：介绍一种所有要素均为薄壁的小型零件加工方法，从工步顺序、刀具选择和工装制作几方面入手，通过制定合适的切削参数和装夹方案，解决了此类零件的加工难点问题。



助理工程师、主管工艺师 高 歌

冷屏作为超薄壁壳体结构，外形尺寸ϕ20mm×14mm，壁厚0.2mm左右，零件由多个台阶圆、2个很深的内环槽、锥面和2个凸台组成，内环槽中间的隔板也仅厚0.25mm，结构非常复杂，同时精度要求高，加工难度极大，经过反复分析，找到了独特的解决方法。

1.零件分析

零件材料为NCu30-4-2-1蒙乃尔棒，是一种以金属镍为基体添加铜、硅、铁、锰等其他元素而成的合金，其中硅含量高达4%以上，使得此合金比普通蒙乃尔合金韧性好，强度更高，硬度更高，是一种难加工材料。

图1所示为冷屏零件模型，零件为典型的薄壁结构。由于零件内孔最小处仅有$\phi 6^{+0.10}_{+0.02}$mm，而外圆最大处达到$\phi 20.7^{0}_{-0.21}$mm，没有合适的管材，只能使用ϕ45mm蒙乃尔棒加工，加工余量大，内部完全掏空，材料去除率达99.7%以上。整个零件平均壁厚0.25mm，最薄处壁厚仅为0.15mm，内部存在两个4mm宽的深内环槽，与一个锥面，加工中极易产生变形。

（1）主要加工要素和技术要求。零件的主要结构及尺寸如图2所示。精度要求较高的要素为$0.15^{+0.15}_{-0.05}$mm、$0.25^{0}_{-0.05}$mm、$\phi 12.7^{+0.05}_{0}$mm、$\phi 6^{+0.10}_{+0.02}$mm、$R9^{0}_{-0.09}$mm、$\phi 20^{+0.10}_{+0.05}$mm和$\nearrow$ 0.1 A B。

（2）主要技术难点。①零件为超薄壁壳体结构，最薄壁厚仅0.15mm左右，刚性差，最后精加工时切削力稍大，零件就会弯曲变形甚至折断。加工时易颤振和振刀，影响加工精度和表面质量。②零件刚性极差，受力后易变形，因此加工过程如何有效控制内应力变形、装夹变形、切削力变形和切削热变形是保证零件精度的关键。③零件上深的内环槽排屑困难，零件内孔最小处仅为$\phi 6^{+0.10}_{+0.02}$mm，两个ϕ12.8mm的内腔较深，距离加工端面最远13.2mm，刀具悬伸较长，加工时容易产生振刀。内腔较深，同时材料韧性好，产生的带状切屑断屑性能不好，缠成一团排屑困难，精加工内槽轮廓时，正常刀

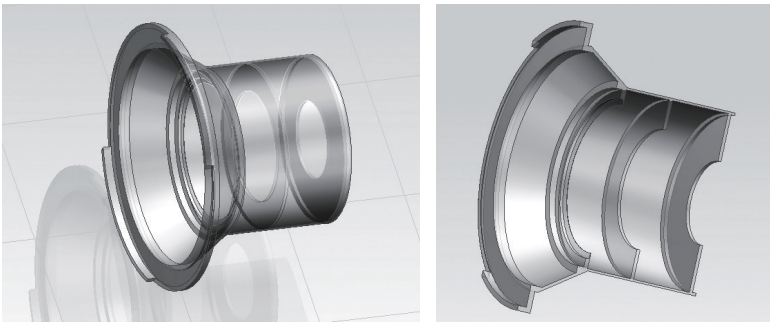


图1 冷屏零件模型

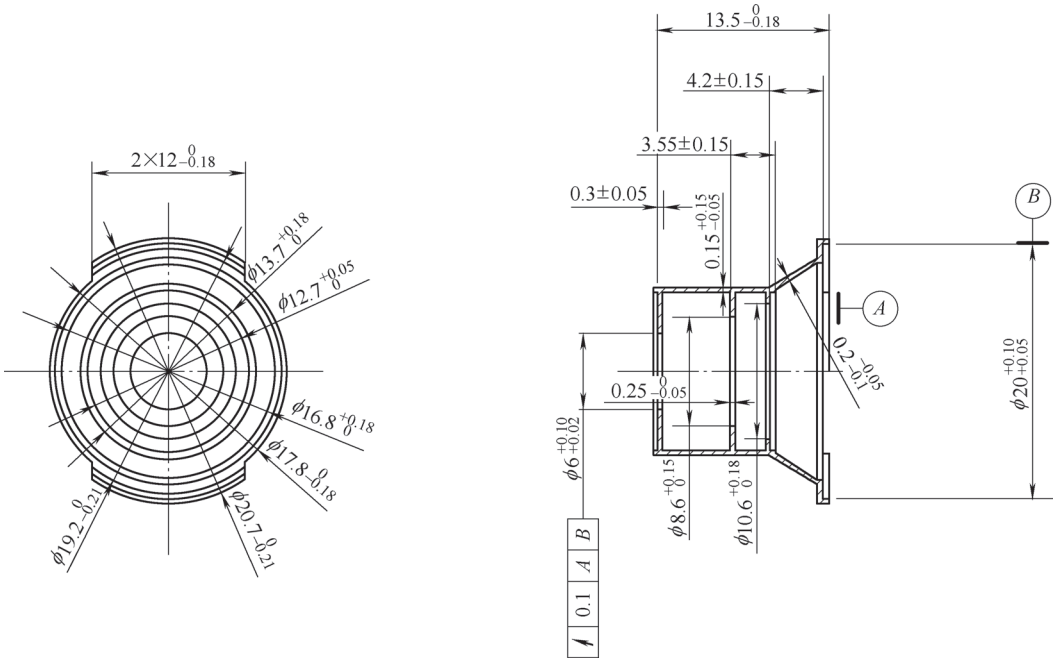


图2　零件主要尺寸

具或者普通磨制刀具使用常规方法无法加工。④ $\phi 6^{+0.10}_{+0.02}$mm的通孔与ϕ12.7mm、深0.3mm孔位于切断面，在首道工序中无法完成，必须分工序加工，而此时零件已基本加工成形，壁厚仅有0.15mm，刚性差，不仅无合适装夹面，而且易装夹变形，因此，合适的装夹设计十分关键。⑤材料难切削。材料为镍基合金，强度高、韧性好，这种金属切削加工时，刀具磨损快，切削振动大，不易切削。

2.工艺设计

零件结构复杂，加工余量大，且零件精度高，正常加工时通常选择粗加工、时效去应力再精加工的流程。但该零件壁薄不易装夹，综合考虑后采用工序尽量集中、减少工序数量、优化刀具几何角度及切削参数以减小零件变形的原则来设计工艺流程。

加工工艺路线为：0下料→5数车→10数车→15线切割→20检验→25喷砂→30发黑。

5工序数车一道工序中尽可能加工多的结构要素，除切断面上ϕ12.7mm、深0.3mm孔台阶及大端面上两处凸台外，其余全部在本工序保证，加工完后从毛坯棒上切下。10工序调头平切断面，加工该面上的ϕ12.7mm、深0.3mm孔台阶，并且由于刀具悬伸过长，故而安排在本工序镗$\phi 6^{+0.10}_{+0.02}$mm孔。15工序线切割加工大端面上两处凸台。最后喷砂和表面发黑处理。

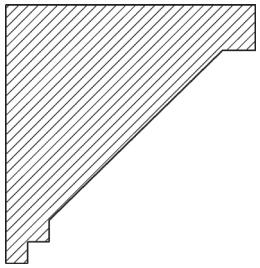
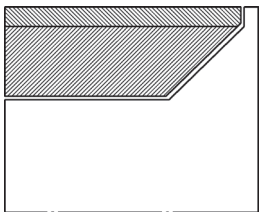
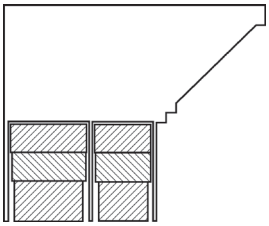
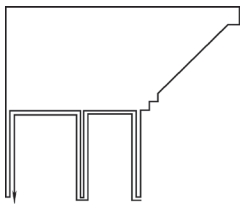
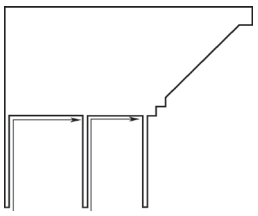
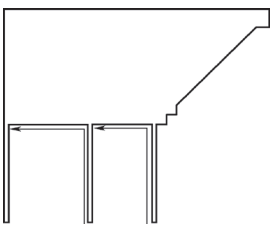
（1）分工步加工深槽薄壁。为减小零件变形、满足精度要求，首道工序需细分工步来完成粗、精加工。内环槽处厚度仅0.15mm，该处增加一次半精加工。

粗加工去除余量时，因内孔结构更为复杂，刀具悬伸过长，故而先加工开口处的喇叭型部分，通过钻中心孔、钻孔和镗孔来去除余量，再去除外部余量加工零件外形。普通加工方式无法完成两个完整90°深槽的切削加工，因此，按照工步细分，先分层去余量，每层比上层多切削一部分，尽量多地去除下部余量。为了不发生挤屑使零件挤压变形，在每层切削过后，都要暂停清屑。再按照内环槽轮廓半精加工一次，保证精加工余量一致。

在精加工时，首先精加工端面外圆，保证长度尺寸，再选择加工相对容易保证的内孔内锥面、外形尺寸。最后，由于内部两个槽深度与宽度已经超过正常切槽刀的加工范围，而且零件壁极薄，如果刀具不够锋利，极其容易产生挤压变形，在90°转角位置也无法将余量去除干净。故而使用两柄不同的自磨刀具，从两头分别去除余量精加工，保证深槽清根。具体加工方法与刀具选用如表1所示。

加工过程中切削液要浇注充分，避免切削热引起零件变形。

表1　冷屏加工首道工序工步过程

程序段号	加工内容	刀具加工路径注释
N5	粗加工端面、外圆	—
N10	中心孔	—
N15	钻孔	—
N20	粗镗孔	
N25	分层粗切外圆	
N30	分层粗切内槽	
N35	半精加工内槽保证精加工余量一致	
N40	精加工端面大外圆	—
N45	精加工内孔、内锥面	—
N50	端槽加工	—
N55	精加工外形	—
N60	精加工内槽（左）	
N65	精加工内槽（右）	
N70	切断	

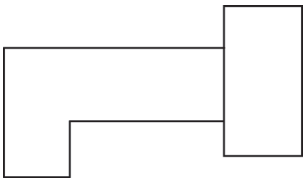
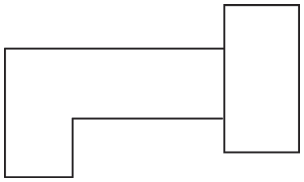
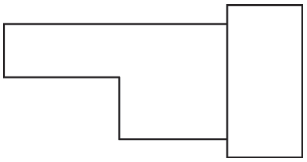
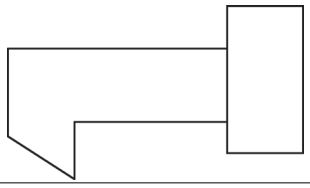
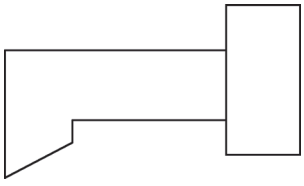
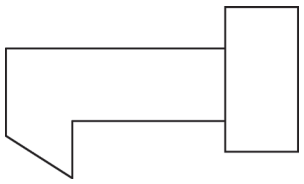
（2）选择合适的刀具。零件大部分结构要素都可以通过车削完成，又由于其材料强度高、韧性好等难切削特性，以及其结构的复杂程度，除钻孔外都选用合金刀具。特别是零件为超薄壁结构，刚性极差，需要选择合适的刀具几何角度，尽量减小零件的切削力并控制切削力的方向。总原则是修磨刀刃增大前角与后角，增加刀具的锋利度。为了保证在切削过程中不发生因挤屑造成的变形，使用啄式切削法，并及时暂停清屑。避免切削挤伤零件和刀具，精加工时将切削刃磨斜，减少刀刃与零件的接触面积，内槽选用两把刀各加工左、右两面。具体刀具选择如表2所示，专用磨制刀具如图3所示。



图3　专用刀具

（3）选择合适的切削参数。零件刚性极差，受力后易变形，如何减小加工过程中切削力引起的变形，刀具与切削参数的选择尤为重要。经过多次试加工，最终确定了切削参数。粗加工外形参数：转速S=700r/min，进给速度v_f=35mm/min；精加工外形参数：转速S=800r/min，进给速度v_f=64mm/min；粗加工锥面参数：转速S=700r/min，进给速度v_f=9mm/min；精加工锥面参数：转速S=700r/min，进给速度v_f=42mm/min；粗加工内环槽参

表2　冷屏加工首道工序刀具选择

程序段号	加工内容	刀具选择	备注
N5	粗加工端面、外圆	80°外圆刀	刀尖圆角*R*0.4mm
N10	中心孔	中心钻	–
N15	钻孔	ϕ5.7mm钻头	–
N20	粗镗孔	ϕ5mm镗刀	刀长15mm
N25	分层粗切外圆		刀宽2.3mm。前角选用6°，后角选用5°，主偏角2°
N30	分层粗切内槽		刀宽1.8mm。前角选用5°，第一层后角选用4°，第二层后角选用15°。由于内孔较小，磨制双层后角。主偏角2°，副偏角2°
N35	半精加工内槽保证精加工余量一致	–	前角选用6°，第一层后角选用4°，第二层后角选用15°。由于内孔较小，磨制双层后角。主偏角2°，副偏角2°
N40	精加工端面大外圆	–	前角选用10°，后角选用8°，主偏角2°，副偏角2°
N45	精加工内孔、内锥面	–	修磨刀尖使圆角小于*R*0.1mm。前角选用10°，第一层后角选用8°，第二层后角选用15°。由于内孔较小，磨制双层后角。由于锥度较大，主偏角选用2°，副偏角选用较大为15°
N50	端槽加工		前角选用10°，后角选用8°，主偏角2°，副偏角2°
N55	精加工外形		刀宽1mm。前角选用10°，第一层后角选用8°，主偏角2°，副偏角2°
N60	精加工内槽（左）		刀宽＜1.5mm。前角选用8°，第一层后角选用6°，第二层后角选用15°。由于内孔较小，磨制双层后角。主偏角2°，副偏角2°
N65	精加工内槽（右）		刀宽＜1.5mm。前角选用8°，第一层后角选用6°，第二层后角选用15°。由于内孔较小，磨制双层后角。主偏角2°，副偏角2°
N70	切断	切断刀	刀宽2.2mm

数：转速S=1 000r/min，进给速度v_f=10mm/min；半精加工内槽参数：转速S=800r/min，进给速度v_f=40mm/min；精加工内槽参数：转速S=700r/min，进给速度v_f=35mm/min。

3.工装设计

（1）数控车工装。由于在首道工序切断后，仍有$\phi 6^{+0.10}_{+0.02}$mm的通孔与ϕ12.7mm、深0.3mm孔结构要素未满足要求，还需调头加工，而零件为典型薄壁结构，内部存在深槽，不能使用常规的堵头、衬套等夹具进行装夹加工防止变形。因此，通过设计专用工装来满足要求。

通过改变夹紧力方向来防止装夹变形，与零件ϕ8.6mm内孔配合，螺母压紧端面加工，保证总长与ϕ12.7mm孔尺寸。通过螺母压紧端面改变夹紧力方向，避免薄壁部分装夹变形。具体装夹如图4所示。

（2）线切割工装。为保证薄壁尽量不受切削力的影响发生变形，经过数控车工序，其余尺寸要素选用线切割保证。15工序线切割主要加工内容是将R9mm圆外部分切除。由于零件材料为蒙乃尔棒，不具有磁性，不能通过吸附定位，同时经过数控车的加工，零件已成薄壁结构，不能使用虎钳等普通装夹方式进行装夹定位。因此，通过设计专用工装满足要求。

通过改变夹紧力方向来防止装夹变形，与零件内锥面配合，使用内锥面对零件进行定位，避免薄壁部分装夹变形。具体工艺内容与装夹如图5所示。

4.结语

通过制定合理的工艺和工步顺序、装夹方案包括自制工装、选择合理的刀具几何角度、切削参数等，最终充分解决了难切削材料薄壁复杂零件的加工难点问题，保证其加工稳定可靠。

参考文献：

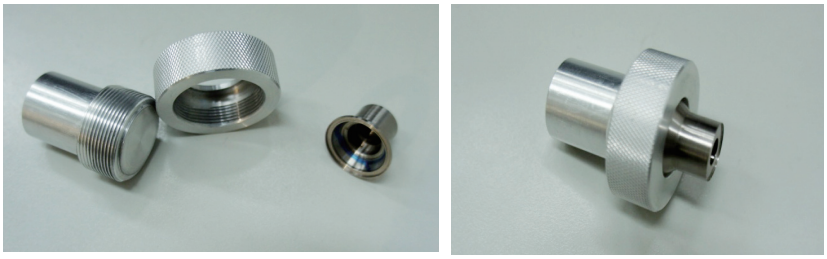
[1] 王启平．机械制造工艺学[M]．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2008.

[2] 任健强．薄壁零件加工装夹方法及车削加工技巧[J]．中国设备工程，2017（13）：124-125.

[3] 吴拓．机床夹具设计[M]．北京：机械工业出版社，2009.

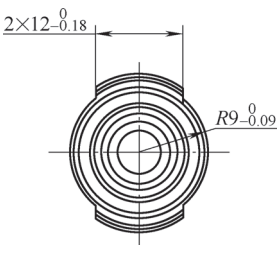
[4] 庄燕．铝合金薄壁套数控车削加工分析[J]．中国西部科技，2011（27）：39.

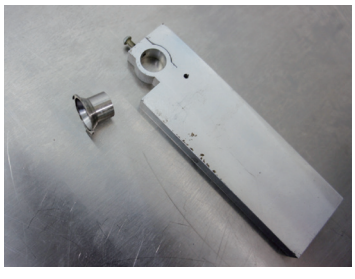
MW（收稿日期：20180726）



(a)　　(b)

图4　10工序工装及装夹示意





(a)　　(b)

图5　15工序工装及装夹示意

专家点评



本例中的零件结构复杂，所有要素均为薄壁并不易装夹，加工难度极大，作者经过反复分析，从工艺和刀具入手，找到了独特的解决方法。

文章的亮点是小孔切槽工艺，除钻孔外都选用硬质合金刀具，并保持刀具的锋利，通过制定合适的切削参数和装夹方案，解决了小孔径薄壁零件的加工难点问题。