使用轴向超声振动滚压装置提高薄壁筒形件加工表面质量

洛阳轴研科技股份有限公司 （河南 471000） 孟鸿超 张 旭 马 磊 钞仲凯

河南机电职业学院 （郑州 451191） 李 琦

摘要：与常规滚压加工相比，超声滚压加工所需滚压力小，工艺系统变形小，对于薄壁零件具有特殊意义，可显著提高工件的表面质量。本文设计一种新型轴向超声振动滚压装置，采用有限元软件MSC.Marc模拟薄壁筒形件的常规滚压和超声滚压加工过程，模拟结果表明：轴向超声振动滚压加工可显著降低工件的表面粗糙度值。试验对比发现：超声滚压后薄壁筒形件的表面粗糙度值比常规滚压的显著降低，得到了细化晶粒组织，获得了较好的表面质量，与模拟结果一致。

高性能、高质量的薄壁筒形结构件是航空、航天、兵器和车辆等技术产业不断追求的目标。尤其是国防军工和新能源领域，对其薄壁筒形构件如新型战斗机的喷管、航天飞行器头罩及核主泵的屏蔽套等的表面质量提出了越来越高的要求。对于这些在高速、高温、高压及强辐射条件下工作的薄壁筒形件，零件的表面质量对其使用性能、寿命和可靠性有很大的影响。

1. 超声滚压工艺的应用

旋压是一种金属塑性成形加工工艺，将毛坯装夹于芯模并随其旋转，使旋压工具（旋轮）绕毛坯旋转，旋压工具与芯模相对进给，使毛坯受压并产生连续逐点变形，能够较容易地制作出各种旋转对称的薄壁回转件，且具有节省原材料、成本低廉等优点，特别是在火箭、导弹和宇航等有关零件的制造方面得到了很好的应用。

经过大变形冷加工后的旋压表面存在旋压纹及旋压波纹，这些波纹的产生不仅影响工件的表面粗糙度，而且还影响工件的直线度，甚至可能使工件报废。因此，提高旋压件表面质量是必要工序，可以降低旋压纹对旋压件表面质量的影响（完全消除旋压纹是很困难的）。

为保证和提高零件的表面质量，消除旋压纹，对旋压后的工件进行滚压加工是十分有效的方法。在常温状态下采用高硬度的滚压工具，对工件表面施加一定的压力，使金属表面产生塑性变形，粗糙度凸峰被压平填入到原始残留的低凹波谷中，而使表面粗糙度值得以降低，如图1所示。而薄壁筒形件属于高柔性构件，在滚压载荷作用下会发生非线性局部屈服，导致变形载荷的大小和方向发生变异，使材料不均匀流变，从而影响薄壁筒形件的表面质量。

通过研究表明，在材料的变形区叠加外场，可降低成形载荷、改善材料的流变特性，从而解决局部流变载荷与构件高柔性之间的矛盾。因此，本文将超声

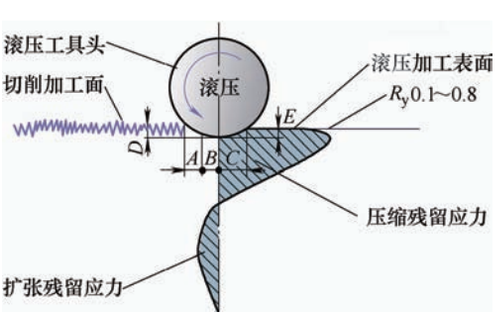


图1 滚压加工原理示意图

技术引入到滚压工艺中，将一定的超声波振动功率附加在滚轮上，使其以一定的频率和振幅沿工件的表面作高频振动，改变加工区域内材料的流动特性，同时有效降低滚轮与工件间的相互作用力，减小局部流变载荷与薄壁筒形构件高柔性之间的矛盾，实现材料的均匀性流动，从而进一步提高薄壁筒形件的表面质量。

表面粗糙度是表征材料表面质量的重要参数，它直接影响零件的耐磨性、疲劳强度、接触刚度、抗腐蚀性、密封性以及导电性能等，是影响零件及产品性能的一项重要指标。为了证明超声滚压工艺对薄壁筒形构件的表面质量有显著的提高效果，对常规滚压和超声滚压后的工件进行表面粗糙度测试和显微组织分析。

2. 轴向振动超声滚压装置的设计

滚压工具分为滚珠和滚轮两种。由于滚珠作为负载较小，目前的超声滚压装置大多是滚珠超声滚压装置。与滚珠相比，滚轮更适宜压光刚性较差的工件。而常规的滚轮滚压装置如图2所示，结构比较复杂，按照此装置设计的径向超声振动滚压系统由于存在较大的空间间隔，未能实现超声能量的良好传递。因此，设计了轴向超声振动滚压装置，超声电源提供超声频的电信号，换能器将高频电能转换为机械振动，通过变幅杆将纵向振动传至滚轮中心并放大振幅，在滚轮中心位置激发滚轮的超声频的弯曲振动，振动在滚轮边缘达到最大。为了验证轴向超声振动滚压装置的可行性，采用阻抗分析仪对滚压装置进行测试，测试结果如图3所示。测试发现：设计的轴向超声振动滚压装置频率为20kHz，阻抗小，具有良好的共振效果，满足设计要求。图4所示为轴向超声振动滚压薄壁筒形件示意图。在变幅杆的节点处安装轴承，通过轴承将变幅杆固定在夹具上，夹具固定在滚压机工作台上，实现对工件的超声滚压加工。试验用的超声滚压系统如图5所示。该装置结构紧凑，各个超声元件

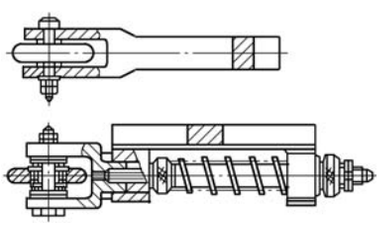


图2　常规滚轮滚压装置

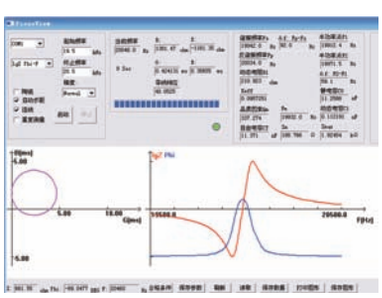


图3　轴向超声振动滚压装置阻抗分析测试图

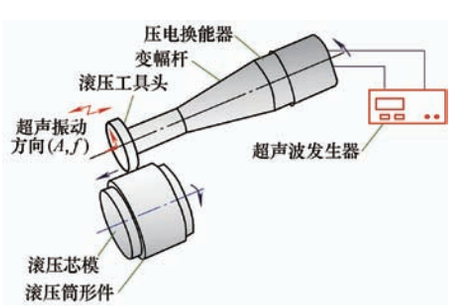


图4　超声振动滚压薄壁筒形件示意图

图5　试验用的轴向超声振动滚压系统

联接紧密，可实现良好的超声振动。

3. 普通滚压和轴向超声振动滚压的数值模拟

本文采用有限元软件MSC.Marc，对滚轮滚压筒形工件的外圆表面的普通滚压和超声滚压加工过程进行数值模拟。定义滚轮、主轴为刚体，选用工件材料为Q235，弹性模量E=70GPa，泊松比μ=0.3，密度ρ=2 700kg/m^3，网格划分方式为八节点六面体单元。滚压加工件为筒形件，其工件长度、壁厚及内径分别为30mm、4mm及50mm；芯模半径为50mm，主轴转速为200r/min，滚压量为0.05mm。根据滚压加工的摩擦工况，设定摩擦系数为0.05。为了便于模拟结果的分析与处理，该模型采用工件和芯模保持静止，而滚轮进行旋转运动的方式来实现工件与滚轮之间的相对运动。为了实现滚轮的公转（绕主轴转动）和自转（绕自身轴转动），滚轮设有主控制节点和辅助控制节点。建立的三维模型如图6所示。在常规滚压的基础上，引入超声场。超声波通过变幅杆在滚轮中心位置处激发高频振动，滚轮上的质点沿着轴向振动。因此，在分析超声滚压的过

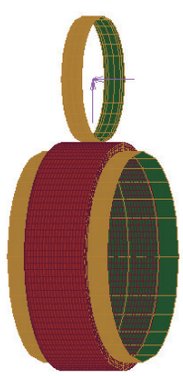


图6　三维有限元模型示意图

程中，需给滚轮的轨迹复合一个超声频的正弦变化的轴向位移。分析常规滚压和超声滚压工艺对薄壁筒形件表面粗糙度的影响，沿滚压后工件的周向路径提取节点的径向位置变化量如图7所示。

通过有限元数值模拟，该滚压仿真模型实现了滚压变形的效果。沿周向提取节点径向位置的变化量，进行方差计算，经软件Origin分析，常规滚压件表面节点位置变化量的方差为0.000 187mm^2，而超声滚压件的方差为0.000 094 6mm^2。方差越大，说明数据的波动性越大,工件表面凹凸不平的变化大，表面粗糙度值较大。因此，由图7可知，超声滚压加工后工件表面节点位置变化量较小，说明形成的工件表面质量好，优于常规滚压加工。

4. 试验验证

将超声滚压装置安装在刀架上，且滚压头和工件中心轴的高度保持一致，滚柱轴向和工件轴向保持平行。工件滚压前应清理干净，不能有切屑、杂质及异物。试验过程中，打开超声波发生器为超声滚压，关闭超声波发生器则为普通滚压。调整超声电源的频率为20kHz，使超声装置满足谐振状态。用超声振幅测量仪测量滚轮输出端的振幅为7μm。选择滚压的试验参数为：主轴转速200r/min，进给速度0.5mm/r，滚压量0.05mm。为避免装夹等其他因素造成误差的影响，在滚压Q235薄壁圆筒的过程中，关闭超声电源时，为常规滚压试验；开启超声电源时，为超声滚压试验。

滚压加工后，Q235薄壁圆筒件如图8所示，其中*a*段为常规滚压效果，*b*段为叠加超声后的滚压效果。通过对比发现，叠加超声后，薄壁圆筒件表面质量明显好于常规滚压。

在相同的滚压工艺条件下，分别对旋压后的筒形件进行常规滚压和超声滚压，对加工后的工件取样，测定试件表面粗糙度值R_a，在WYKO NT9100型光学轮廓仪下进行表面分析。图9所示为常规滚压后薄壁筒形工件表面分析结果，其表面粗糙度值R_a=0.547μm，从图中能明显观察到滚压后滚轮留下的滚轮压痕。图10所示为超声滚压后薄壁筒形工件的表面分析结果，其表面粗糙度值R_a=0.328μm，比常规滚压的表面粗糙度值显著降低。测试结果表明，超声振动能够显著降低薄壁圆筒件的表面粗糙度值。

抛光后表层微观组织的检测：常规滚压件与超声滚压件的表层微观组织形貌通过光学显微镜进行检查。图11a所示为常规滚

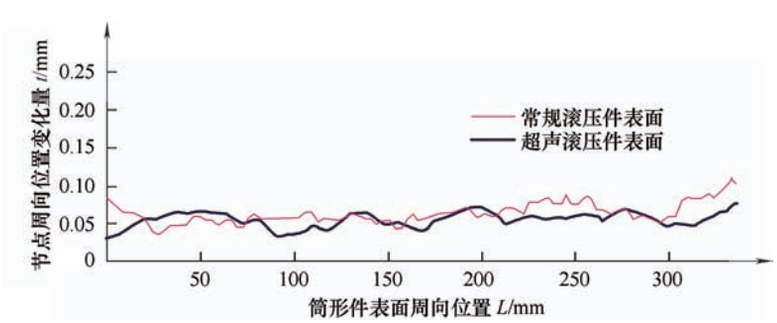


图7　薄壁筒形件表层周向节点径向位置变化图

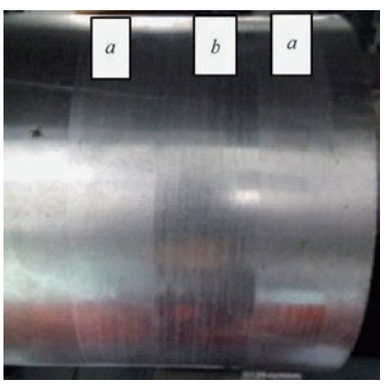
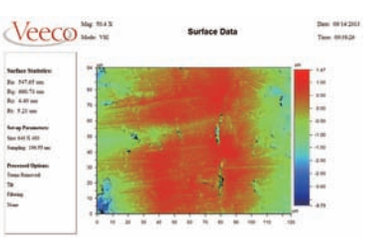
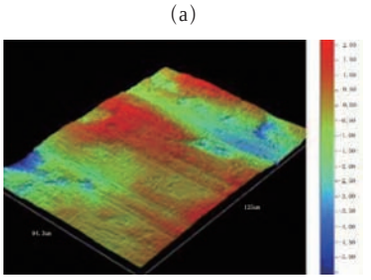


图8　超声滚压与常规滚压工件表面粗糙度对比

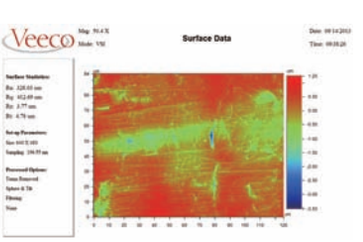


(a)

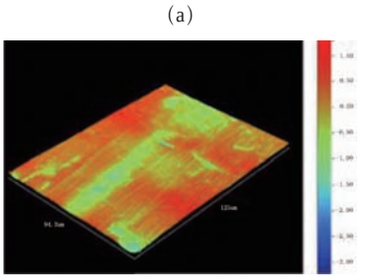


(b)

图9　常规滚压件的表面轮廓



(a)



(b)

图10　超声滚压件的表面轮廓

带中间凸台深内孔孔径的测量

贵州凯星液力传动机械有限公司 （遵义 563003） 陈俊锋

摘要：介绍一种带中间凸台零件的深内孔孔径的测量方法，通过改进常规测量器具，使得该类孔径能够准确、方便、快捷和可靠地测量出来，从而彻底解决了该类零件的测量难题。

孔的测量方法有很多，也有很多种测量工具，如游标卡尺、内径百分表及内径千分尺等。但是如果零件内孔较深且有中间凸台时，零件的孔径按一般方法将无法进行测量。下面结合工作实际介绍一种该类孔径的测量方法。

1. 零件分析

图1所示为我公司开发的一种零部件，其孔的内径为$365^{+0.025}_{0}$ mm、深300mm，内腔有一个有一定高度、直径为100mm的凸台。零件加工后$\phi365^{+0.025}_{0}$ mm内孔用普通量具无法完成测量，

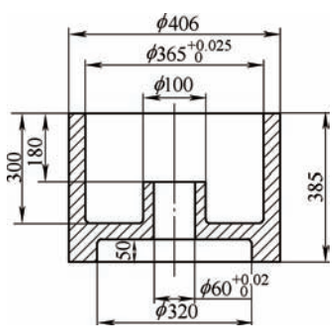
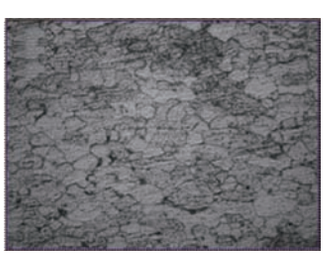
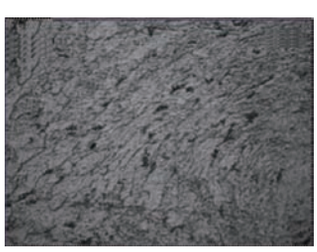


图 1

压工件的金相组织，图11b所示为超声滚压件的金相组织。由图11可知，叠加超声振动后的组织更加细密，晶界变模糊，出现一片纤维状组织，材料流动呈现明显的方向性；而常规滚压并没有出现纤维组织。



(a)



(b)

图11 常规滚压件与超声滚压件金相组织

5. 结语

（1）通过有限元仿真及试验研究表明，使用轴向超声振动滚压装置可明显提高薄壁筒形工件的表面质量，使工件表面粗糙度值降低，细化晶粒。

（2）金属材料的晶格缺陷可吸收超声能量，位错能增加，位错速度增加，降低了金属的变形抗力，使塑性变形量增加，即微观波峰被压平效果显著，大大降低了表面粗糙度值。工艺系统的振动是影响工件表面粗糙度的重要因素，引入超声后，不仅不会引起系统附加振动，而且有利于提高系统的刚度，提高了系统的稳定性，有利于降低表面粗糙度值。同时，引入超声振动后，减少了摩擦系数，使摩擦力降低，从而降低了表面粗糙度值。

（3）由金相组织分析可知，叠加超声振动后，使材料晶粒细化，呈现出纤维状，材料的流动呈现出明显的方向性，材料的流动更加顺畅。

参考文献：

[1] 杨胜强，李文辉，陈红玲，等. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京：国防工业出版社，2011.

MW（收稿日期：20160226）