

文章编号: 1000-8055(2022)03-0600-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210454

时变因素作用下薄壁筒工件车削 振动特性与实验

刘一沛, 吕凯波, 张志浩, 田美霞, 王 鑫
(太原理工大学 机械与运载工程学院, 太原 030024)

摘 要: 针对薄壁筒类工件的切削颤振问题, 采用理论建模、数值仿真和实验测试相结合的方法, 研究切削过程中时变工件厚度和切削位置对薄壁筒振动特性的影响规律。利用有限元法建立主轴-卡盘-工件工艺系统模型, 分析不同壁厚、切削力位置对薄壁筒切削系统的固有模态、频率响应函数的影响。结合模态实验与切削振动实验表明: 薄壁筒周向壳体模态对于壁厚的变化更为敏感, 且沿工件轴向不同切削位置处工艺系统的振动响应及其主振模态有所不同; 切削加工表面出现的沟槽、鱼鳞状等颤振纹理分别与工艺系统的低阶轴向梁振型、周向壳振型相关。研究结果对薄壁筒切削颤振的预测与抑制具有理论指导意义。

关 键 词: 薄壁筒; 车削; 颤振; 时变因素; 振动特性

中图分类号: V214.4⁺2; TH113.1

文献标志码: A

Vibration characteristics and experiments of thin-walled cylinders in turning process with time-varying factors

LIU Yipei, LÜ Kaibo, ZHANG Zhihao, TIAN Meixia, WANG Xin

(College of Mechanical and Vehicle Engineering,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In view of the cutting chatter problem of thin-walled cylindrical workpieces, a combination of theoretical modeling, numerical simulation and experimental testing was adopted to study the influence of time-varying workpiece thickness and cutting position on the vibration characteristics of thin-walled cylindrical workpieces during the cutting process. The finite element method was used to establish the spindle-chuck-workpiece process system model. The influences of different wall thicknesses and cutting positions on the vibration mode and frequency response function of the thin-walled cylinder cutting system were analyzed. Through the modal experiment and the cutting vibration test, it showed that the shell mode of the thin-walled cylinder was more sensitive to the change of wall thickness, and the vibration response and main vibration mode of the process system at different cutting positions along the workpiece axis were different. It also verified that chatter textures of fish scales and grooves left on the surface were related to the low-order axial beam mode and circumferential shell mode of the thin-walled cylinder. The research results have a

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(52175108, 51805352); 山西省“1331”工程

作者简介: 刘一沛(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为机械系统动力学。

通信作者: 吕凯波(1984—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要研究方向为机械系统动力学、机械状态监测与故障诊断。

E-mail: lvkaibo@tyut.edu.cn

引用格式: 刘一沛, 吕凯波, 张志浩, 等. 时变因素作用下薄壁筒工件车削振动特性与实验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 600-606.

LIU Yipei, LÜ Kaibo, ZHANG Zhihao, et al. Vibration characteristics and experiments of thin-walled cylinders in turning process with time-varying factors[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 600-606.

guiding effect on the prediction and suppression of chatter in machining of thin-walled workpieces.

Key words: thin-walled cylinder; turning; chatter; time-varying factors; vibration characteristics

薄壁筒类零件具有质量轻、结构紧凑等优点,广泛用于航天航空、船舶、石油化工等领域,如航天发动机中的风扇机匣、鼓筒、风扇轴、涡轮盘等。此类零件存在刚度低、加工工艺性差等特点,在切削加工中极易发生颤振,不仅降低刀具的使用寿命,而且严重影响工件的加工质量和效率^[1-3]。在车削过程中,工件表面不断有金属被切下来,且伴有刀具进给运动的作用,致使工件的尺寸、所受切削力位置均实时发生变化。因此,研究切削过程中时变因素作用下薄壁筒工件的振动特性,对于预测、抑制颤振的发生从而保证加工稳定性具有重要的意义。

Li和Lam^[4]采用广义差分法研究旋转薄壁圆柱壳的固有频率特性,分析了转速、几何参数和边界条件对薄壁圆柱壳固有频率的影响。Sun等^[5]基于Sanders壳体理论,采用傅里叶级数展开法,研究了转动薄壁圆柱壳的振动特性。刘彦琦和诸福磊^[6]基于Love壳体理论和Galerkin方法获得不同边界条件下旋转薄壁圆柱壳的固有频率特性以及几何参数对旋转薄壁圆柱壳振动特性的影响。也有学者探讨了不同材料与结构对薄壁圆柱壳振动特性的影响^[7-8]。以上研究主要针对的是薄壁类零件在工作运行时的振动特性问题,此时零件的结构尺寸、模态参数等通常均不发生变化,该振动系统为时不变系统。

在薄壁类工件切削振动研究方面,李顺才等^[9]通过数值仿真得出车削过程中工件的模态频率及振型具有时变特性。Mehdi等^[10]分析了不同的材料、几何形状和加工方法对工件振动响应特性的影响,并在切削实验中发现,不同切削位置处薄壁筒工件表面振纹的形貌不同,颤振频率与工件的前五阶模态频率相关。Gerasimenko等^[11]利用解析法预测了薄壁筒车削颤振的稳定性,并通过强振动变参数的薄壁钢管车削实验验证了材料去除对系统的特征频率的影响。林滨等^[12]建立圆柱壳工件的单自由度颤振模型,采用理论结合实验方法,获得在某固定切削点时系统的稳定性极限图。Wang等^[13]对薄壁工件铣削过程中出现的时变颤振频率现象进行了研究,指出薄壁铣削过程中,随着工件材料的去除,模态参数会发生变

化,从而导致颤振频率的连续变化。Li等^[14]等研究薄壁零件的动力学随刀具的切削与进给的变化情况,采用一种基于自由度缩减薄壁模型的时变动力学修正方法来预测切削颤振频率。Chanda等^[15]将薄壁筒件作为主振体,考虑不同切削位置的影响,采用半离散化法研究切削系统的稳定性极限。

综上,目前对于薄壁筒时不变系统的振动特性已取得了诸多研究成果,但对时变薄壁筒切削振动系统的文献相对较少,且鲜有文献定量研究时变工件尺寸和切削位置等因素下薄壁筒的振动特性。因此,本文从动力学建模角度出发,通过数值仿真得到薄壁筒切削过程中不同切削位置和工件厚度对其振动特性的影响规律,随后开展薄壁筒工件车削振动实验,验证仿真结果的正确性。研究结果将对薄壁筒切削颤振的稳定性预测与抑制具有指导作用。

1 薄壁筒振动系统建模

1.1 振动微分方程

考虑到薄壁筒的刚度通常远小于机床和刀具结构的刚度,故将工件作为整个工艺系统的主振动体。建立如图1所示的柱坐标系 $Ox\theta z$, 旋转时薄壁筒工件以角速度 N 随着机床主轴旋转,其动力学方程会引入科氏力项和离心力项。其中 L 、 H 和 R 分别为薄壁筒的长度、壁厚和中面半径。 u 、 v 和 w 分别为中面上任意一点在轴向、周向和径向3个方向上的振动位移。

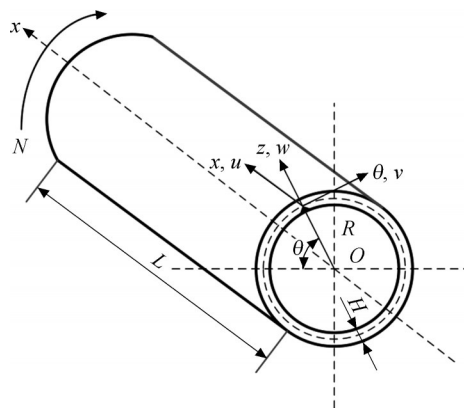


图1 旋转态薄壁圆柱筒模型

Fig.1 Model of rotating thin-walled cylinder

基于 Kirchhoff-Love 假设,利用 Hamilton 功能原理建立旋转态薄壁筒的振动微分方程^[16]

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial \theta} + N_\theta^0 \left(\frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right) &= \rho H \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial x} + \frac{Q_\theta}{R} + \frac{N_\theta^0}{R} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} &= \rho H \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + 2\rho H N \frac{\partial w}{\partial t} - \rho H N^2 v \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_\theta}{R \partial \theta} - \frac{N_\theta}{R} + \frac{N_\theta^0}{R^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) &= \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - 2\rho H N \frac{\partial v}{\partial t} - \rho H N^2 w \end{aligned} \quad (1)$$

式中由于旋转引起的离心力产生的初始切向应力为 N_θ^0 , $N_\theta^0 = \rho H N^2 R^2$; $\rho H \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ 、 $\rho H \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$ 和 $\rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ 为惯性力; $2\rho H N \frac{\partial w}{\partial t}$ 和 $2\rho H N \frac{\partial v}{\partial t}$ 为科氏力; $\rho H N^2 v$ 和 $\rho H N^2 w$ 为离心力; Q_x 、 Q_θ 沿 x 和 θ 方向中面上单位长度的横向剪力。

基于 Love 壳体理论可得旋转态薄壁筒用轴向、周向、径向振动位移表示的振动微分方程

$$\begin{cases} L_{11}u + L_{12}v + L_{13}w = 0 \\ L_{21}u + L_{22}v + L_{23}w = 0 \\ L_{31}u + L_{32}v + L_{33}w = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) 为偏微分算子,具体表达式可参考文献[6]。

1.2 薄壁筒固有特性分析

对于薄壁圆柱壳,它的模态振型由两部分组成,即轴向梁振型和周向壳体振型。根据分离变量法知,其振型函数可以用轴向梁函数和周向三角函数的组合形式来近似表示。利用振型叠加原理,薄壁筒位移解可表示为^[17]

$$\begin{cases} u(x, \theta, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U \phi_n^u(x) \cos(m\theta + \omega_{nm}t) \\ v(x, \theta, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} V \phi_n^v(x) \sin(m\theta + \omega_{nm}t) \\ w(x, \theta, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W \phi_n^w(x) \cos(m\theta + \omega_{nm}t) \end{cases} \quad (3)$$

式中 U 、 V 和 W 为位移幅值, $\phi_n^k(x)$ ($k=u, v, w$) 为圆柱壳轴向振型函数,其表达式形式为轴向梁函数。 ω_{nm} 表示为壳体 (n, m) 振型所对应的固有频率。 (n, m) 振型就表示 n 个轴向半波、 m 个周向波的振型。将位移函数表达式代入式(2),可得到旋转壳体的固有频率的特征方程为

$$\omega_{nm}^6 + \omega_{nm}^4 \beta_1 + \omega_{nm}^3 \beta_2 + \omega_{nm}^2 \beta_3 + \omega_{nm} \beta_4 + \beta_5 = 0 \quad (4)$$

式中 β_i ($i=1, 2, \dots, 5$) 为待定系数,与工件的边界条件有关。

2 薄壁筒工件振动特性分析

2.1 装夹方式对系统模态的影响

机床主轴、卡盘部件对于柔性工件振动特性的影响不可被忽略^[18-19]。基于 CA6140 机床,建立主轴-卡盘-工件工艺系统有限元模型。工件长度为 195 mm,内径为 111 mm,壁厚为 1.5 mm,材料为 40 钢。主轴左端面约束轴向自由度,释放径向自由度,薄壁筒右端面以有无顶尖两种支撑约束条件,分别求得系统的前两阶模态振型和不同切削点位置的刚度曲线,如图 2、图 3 所示。

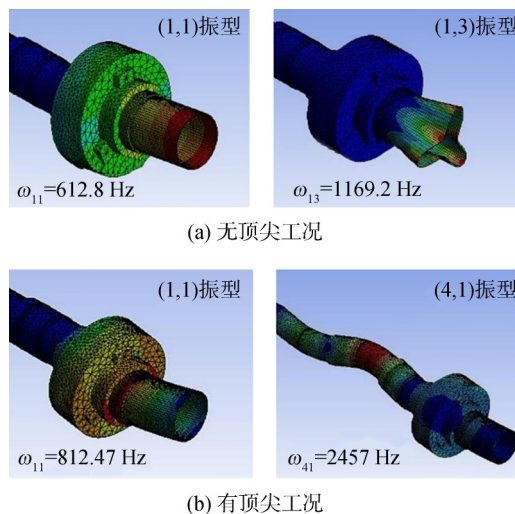


图2 两种工况下切削系统的前两阶模态
Fig.2 The first two mode shapes of cutting system under two working conditions

由图 2、图 3 可见,当薄壁筒有顶尖辅助支撑时,其固有频率和刚度均大于无顶尖情况下的固有频率和刚度,尤其对薄壁筒的自由端的刚度会有很大的改善。有顶尖工况时,工艺系统的低阶模态呈现以轴向梁振型为主。因此,在切削加工中增加顶尖,不仅可以有效改善结构的振动特性,而且可以抑制壳体模态的作用,从而提高加工稳定性。

2.2 时变厚度对薄壁筒固有特性的影响

在切削过程中薄壁筒表面不断有金属被切下

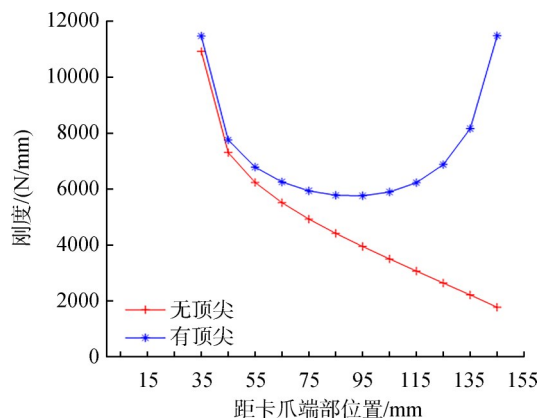


图3 两种工况下工件的刚度曲线

Fig.3 Stiffness curve of workpiece under two working conditions

来,致使工件的厚度与受力点位置实时发生变化,切削系统具有时变性。工件因结构参数的改变,其固有特性必然也随之改变。鉴于实际机械振动系统通常仅有少数的低阶模态起主导作用,现以无顶尖情况为例,分析时变厚度对薄壁筒前5阶模态的影响。

由图4可知,随着车削的进行,工件壁厚不断减小,在分析频段内,除1阶弯曲振动模态频率未发生显著改变外,其余各阶固有频率均随之降低;相应地各阶模态振型也会发生变化。进一步比较工件前三阶固有频率的模态振型,可以发现壳体的周向波数在1~4之间转换,而轴向半波数恒为1,这意味着周向壳体模态对工件壁厚的变化更为敏感。同时可以看出,随着壁厚的减小,其圆周方向上的壳体振型会变得更为复杂。

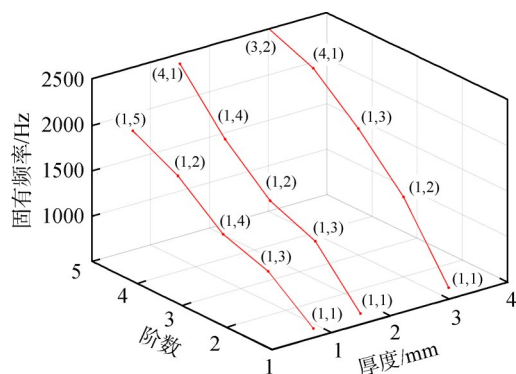


图4 不同壁厚薄壁筒的前5阶固有频率

Fig.4 The first five nature frequencies of the thin-walled cylinder with different thicknesses

2.3 时变位置对薄壁筒振动特性的影响

在切削加工中,刀具沿工件轴向上切削位置

实时发生变化,切削振动系统为时变系统。以无顶尖薄壁筒工件为研究对象,假定工件所受的切削力为径向简谐力,利用有限元软件谐响应求解模块,研究切削路径上系统振动响应的变化规律。参考模态分析结果,选取分析频段为500~2 000 Hz,径向激振力幅值取1 N。图5给出距卡盘端 $l=35, 75, 115$ mm位置处工件幅频曲线对比。

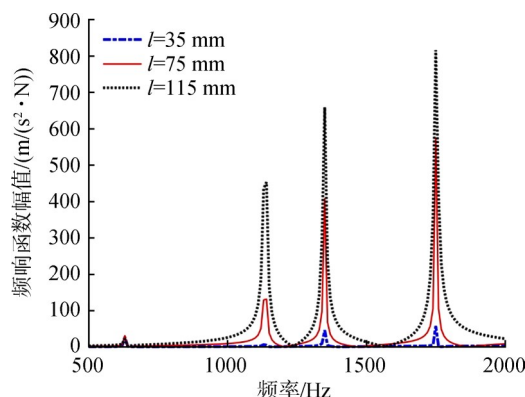


图5 不同位置处工件幅频曲线

Fig.5 Amplitude-frequency curve of the workpiece at different positions

由图5可见,在求解频率范围内出现若干波峰,在切削路径上工件的振动响应明显不同,距离卡盘端越远,由于刚度的减弱其振动响应增大。并且在不同的切削位置处,工件的主振模态有所不同。当靠近卡盘端时,工件振动以轴向梁弯曲振型为主,可以推测此时影响加工质量的主要因素是薄壁筒的轴向模态;而在靠近工件自由端时,工件的振动以其周向壳体振型为主,此时影响加工质量的主要因素是薄壁筒的周向模态。

3 实验验证

3.1 实验台设计与搭建

为验证时变因素下薄壁筒的切削振动特性,分别开展模态实验和切削振动实验研究。工件材料为40钢,内径为111 mm、 $H=5$ mm、 $L=195$ mm、悬伸长为155 mm,实际切削长度为130 mm。所用机床为CA6140型普通车床,刀杆型号为SDNCN25×25M11,刀具型号为DCMT11T304。图6为薄壁筒车削实验布置图,采用两种传感器采集车削加工过程的振动信息,加速度传感器型号为PCB 352C34,贴附在刀具背面;声压传感器型号为PC B130F20,由支架夹持放置在距工件约20 cm位置处。工件切削参数如表1所示。

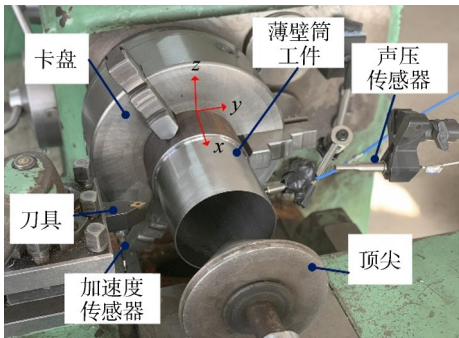


图6 车削实验台布置图
Fig.6 Turning test bench diagram

表 1 切削参数
Table 1 Cutting parameters

参数	工件 A	工件 B
H/mm	1.5	1.3
L/mm	195	195
转速/(r/min)	583	583
切深/mm	0.8	0.8
进给量/(mm/r)	0.1	0.1

3.2 锤击实验分析

在两种装夹方式下,分别对 1.5 mm 壁厚的薄壁筒进行锤击实验获取其频响函数,如图 7 所示。敲击点在距离工件卡盘端 75 mm 处,采用加速度传感器拾取敲击点处加速度响应信号。可见,有顶尖工况下工件低阶响应明显小于无顶尖工况,证明使用顶尖可以提高工件系统的固有特性,也可以有效抑制切削系统的低阶频率的振动响应,这与仿真结果相符;而在 1 500~2 000 Hz 频段内,有顶尖工况下工件的固有频率与仿真(见图 2)不一致,这可能是由于实验中尾座顶尖悬伸过

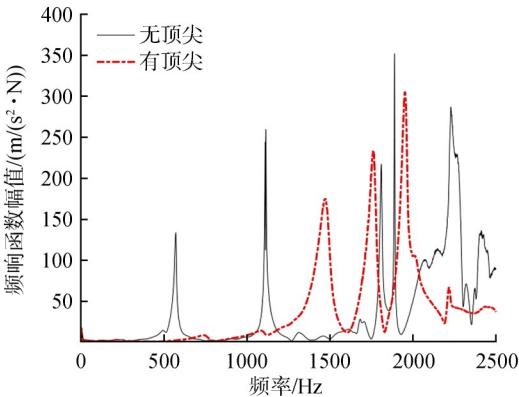


图7 两种工况下工件的频响函数
Fig.7 Frequency response functions of the workpiece under two working conditions

长而引起的结构固有成分。

随着材料不断地被去除,薄壁筒的壁厚逐渐减小,图 8 为不同壁厚 $H=3, 1.5, 0.7$ mm 的工件频响函数曲线对比图。可见,随着壁厚的减小,薄壁筒工件的振动响应在增大;固有频率在不断减小,且高阶壳体模态频率变化较为明显,但工件 (1,1) 振型的频率变化不大,这与仿真结果一致。这意味着随着切削加工的进行,工件的壳体模态振型更容易被激发,这将成为影响薄壁筒加工质量的主要因素。

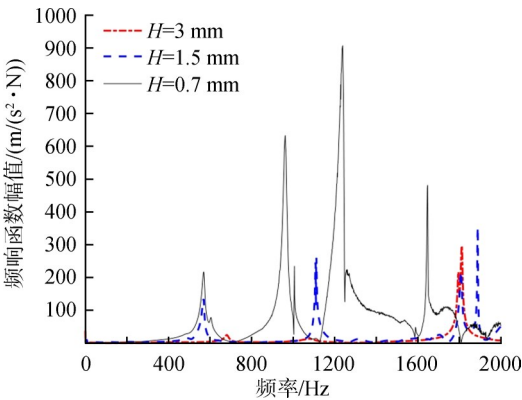


图8 不同壁厚下工件的频响函数
Fig.8 Frequency response function of workpiece with different thicknesses

在一次走刀过程中,刀具与工件的相对位置不断变化,图 9 给出壁厚为 1.5 mm 的工件沿其轴向 3 个不同位置处频响函数。随着切削位置的不断远离卡盘端,薄壁筒工件的振动响应总体在增大;在同一位置点处,各阶模态对应的幅频特性幅值不同,表示不同模态对系统振动的贡献量有所不同。靠近卡盘端时,工件系统的 (1,1) 模态振型

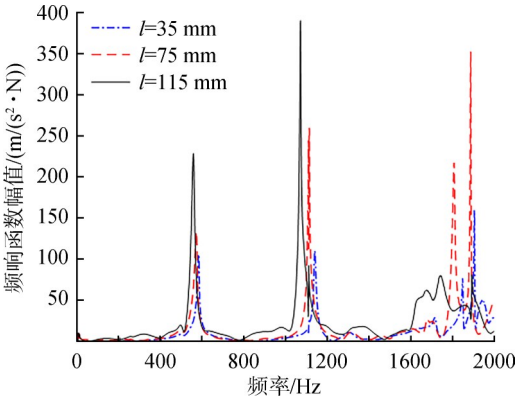


图9 不同切削位置处工件的频响函数
Fig.9 Frequency response function with different cutting positions

占主导,而靠近自由端时,(1,3)等壳体模态振型将占主导,这与仿真结果相符。

3.3 切削振动信号分析

切削实验中,薄壁筒工件采用一端卡盘装夹另一端自由的方式,刀具沿工件轴向 $+x$ 方向进给。开始阶段,切削过程稳定;当切削到工件某特定位置,颤振开始发生,现场伴随着刺耳的噪声,且噪声逐步呈现周期性的变化规律,声压强度重复经历增强到衰弱再增强再衰弱,直至加工结束。图 10 给出两种不同壁厚的工件在相同切削用量作用下的声压信号。可见,薄壁筒工件壁厚越小,其切削振动幅值越大,并且颤振更早发生。

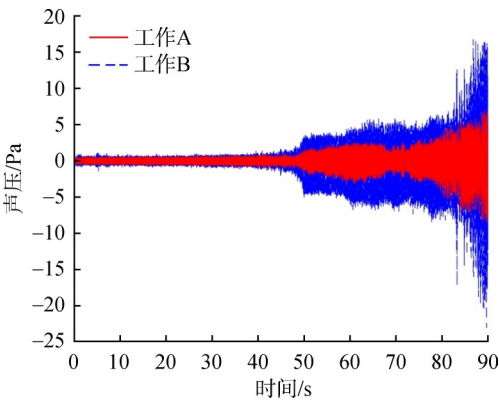


图 10 工件 A、B 一次车削声压信号图
Fig.10 Acoustic pressure signal diagram of workpieces A and B once turning

图 11 为薄壁筒工件 A 加工后的表面形貌,根据其形貌特征将其分为 4 个区域。区域 1 为平稳加工阶段,表面光洁平整;区域 2 为轻微颤振阶段,表面出现细微的斜向沟槽状振纹;区域 3 振纹复杂且没有规律性;区域 4 为严重颤振阶段,表面呈现出规律的鱼鳞状振纹。

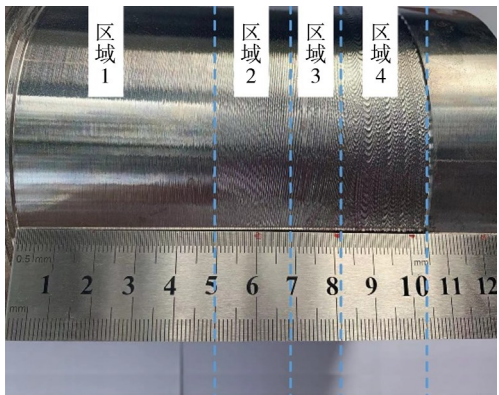


图 11 工件 A 表面形貌图
Fig.11 Surface morphology of workpiece A

将采集到的声压信号做短时傅里叶变换得到时频谱图,如图 12 所示。与工件表面形貌图 11 对应,也能清晰地将加工过程分为 4 个区域:轴向 0~50 mm 区域属于平稳切削区;50~70 mm 区域是轻微颤振区域,相应的颤振频率为 617.5 Hz,略大于 1 阶(1,1)梁模态振型所对应的固有频率 570 Hz;70~80 mm 是过渡区域,颤振频率为 617.5 Hz 和 1 119 Hz 的混叠;80~100 mm 是严重颤振区域,颤振频率为 1 119 Hz 及其倍频成分,略大于 2 阶(1,3)壳体模态振型所对应的固有频率 1 112.5 Hz,并且该区域颤振频率呈下降趋势,这再次证实了薄壁筒周向波数对壁厚变化更为敏感。

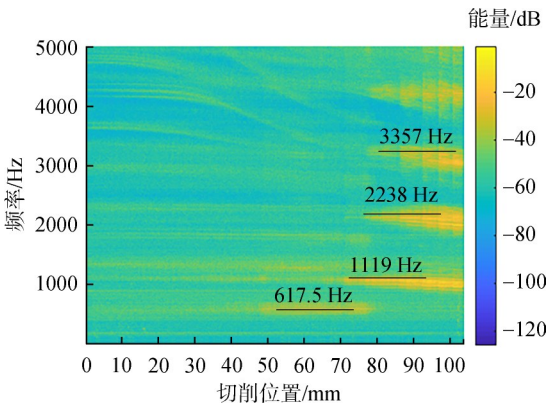


图 12 工件 A 一次切削声压信号时频谱图
Fig.12 Time-frequency spectrum of the acoustic pressure signal of workpiece A once turning

4 结 论

- 1) 薄壁筒模态振型由轴向梁振型和周向花瓣振型组成,周向壳体模态对于工件壁厚的变化更为敏感。随着壁厚的减小,工件的壳体模态振型更容易被激发,主轴-卡盘-薄壁筒工件工艺系统的振动响应不断增大。
- 2) 切削过程中,沿工件轴向不同的切削位置处,工艺系统的主振模态有所不同。各阶模态对系统振动响应的贡献量不同,靠近卡盘端时,工件系统的振动以梁振型模态占主导,而靠近自由端时,工件以壳体模态为主导。
- 3) 切削实验发现,薄壁筒切削振动声压信号、加工表面形貌均具有时变性。当颤振发生后,工件表面呈现出沟槽、鱼鳞状形貌特征,这些形貌结构分别与工艺系统的低阶轴向梁振型、周向壳振型相关。

参考文献:

- [1] SIDDHUPRA M, PAUROBALLY R. A review of chatter vibration research in turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 61:27-47.
- [2] 王跃辉, 王民. 金属切削过程颤振控制技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7):166-174.
WANG Yuehui, WANG Min. Advances on machining chatter suppression research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7):166-174. (in Chinese)
- [3] MANIKANDAN H, BERA T C. Modelling of dimensional and geometric error prediction in turning of thin-walled components[J]. Precision Engineering, 2021, 72:382-396.
- [4] LI Hua, LAM K Y. Frequency characteristics of a thin rotating cylindrical shell using the generalized differential quadrature method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1998, 40(5):443-459.
- [5] SUN Shupeng, CHU Shiming, CAO Dengqing. Vibration characteristics of thin rotating cylindrical shells with various boundary conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(18):4170-4186.
- [6] 刘彦琦, 褚福磊. 几何参数对旋转薄壁圆柱壳振动特性的影响[J]. 振动与冲击, 2012, 31(13):22-25.
LIU Yanqi, ZHU Fulei. Effects of geometric parameters on vibration characteristics of rotating thin circular cylindrical shell[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(13):22-25. (in Chinese)
- [7] 王宇. 薄壁圆柱壳的振动特性及其箍齿结构影响研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
WANG Yu. Research on vibration characteristics of thin cylindrical shell and effects of sealing teeth[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. (in Chinese)
- [8] 王宇, 夏鑫, 杨志宏, 等. 高转速硬涂层阻尼薄壁圆柱壳的行波共振特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13):73-81.
WANG Yu, XIA Xin, YANG Zhihong, et al. Traveling wave resonance characteristics of thin-walled cylindrical shells with high rotating speed and hard coating damping[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13):73-81. (in Chinese)
- [9] 李顺才, 卓士创, 蒋红旗, 等. 车削过程中工件模态时变特性的数值模拟[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(4):60-62, 72.
LI Shunca, ZHUO Shichuang, JIANG Hongqi, et al. Numerical simulation of time-dependent model of workpiece during turning[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(4):60-62, 72. (in Chinese)
- [10] MEHDI K, RIGAL J F, PLAY D. Dynamic behavior of a thin-walled cylindrical workpiece during the turning-cutting process: Part 2 experimental approach and validation[J]. Journal of Manufacturing Science Engineering, 2002, 124(3):569-580.
- [11] GERASIMENKO A, GUSKOV M, GOUSKOV A, et al. Analytical modeling of a thin-walled cylindrical workpiece during the turning process. Stability analysis of a cutting process[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(8):5825-5841.
- [12] 林滨, 陈东, 韩植林, 等. 铝合金薄壁圆柱壳切削稳定性研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(7):847-851.
LIN Bin, CHEN Dong, HAN Zhilin, et al. Research on the cutting stability of thin cylindrical shell of aluminum alloy[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2012, 33(7):847-851. (in Chinese)
- [13] WANG Chenxi, ZHANG Xingwu, CHEN Xuefeng, et al. Time-varying chatter frequency characteristics in thin-walled workpiece milling with B-spline wavelet on interval finite element method[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(5):051008.1-051008.8.
- [14] LI Weitao, WANG Liping, YU Guang, et al. Time-varying dynamics updating method for chatter prediction in thin-walled part milling process[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 159:107840.1-107840.24.
- [15] CHANDA A, FISCHER A, EBERHARD P, et al. Stability analysis of a thin-walled cylinder in turning operation using the semi-discretization method[J]. Acta Mechanica Sinica, 2014, 30(2):214-222.
- [16] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [17] 王能茂, 王延荣. 转动薄壁圆柱筒振动特性: 有限元法与解析解的对比[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3):689-696.
WANG Nengmao, WANG Yanrong. Vibration characteristics of rotating thin-walled cylindrical shell: comparison of finite element method with analytical solution[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3):689-696. (in Chinese)
- [18] LU Kaibo, WANG Yongqiang, GU Fengshou, et al. Dynamic modeling and chatter analysis of a spindle-workpiece-tailstock system for the turning of flexible parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5/6/7/8):3007-3015.
- [19] STEPAN G, KISS A K, GHALAMCHI B, et al. Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1):377-380.

(编辑: 王碧琚)