

基于动态力学模型分析的钛合金切削 过程进给量对表面质量的影响规律

王晨羽, 李金泉

(沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110159)

摘要: **目的** 建立单自由度工件-刀具振动系统动力学模型, 定量研究进给量对钛合金 Ti-6Al-4V 切削力和振动加速度的影响规律。**方法** 采用改变进给量的单因素试验, 选用涂层硬质合金刀具车削钛合金 Ti-6Al-4V, 通过 DYTRAN 加速度传感器、YDCB-III05 三向压电测力系统对试验过程中切削振动和切削力进行检测, 运用 MATLAB、Origin 软件对采集的振动加速度和切削力信号进行处理和分析, 采用 120 mm 位相光栅干涉粗糙度轮廓仪 (Talysurf PGI840) 测量其表面粗糙度。**结果** 当进给量分别为 0.1、0.15、0.2、0.24、0.3 mm/r 时, 振动加速度的均方根分别为 0.2413g、0.3299g、0.3945g、0.4468g、0.5737g; 算术平均高度 R_a 分别为 0.5383、0.9391、1.4781、1.9849、3.0117 μm ; 平均谷深度 R_z 分别为 3.1846、4.6445、6.3059、8.3383、11.6506 μm , 随进给量的增大, 切削力、振动加速度和表面粗糙度均增大。**结论** 当刀具进给量增大时, 刀具与工件之间的接触面积增大, 摩擦力增大, 从而引起切削力稳态分量的增大, 根据单自由度工件-刀具振动系统动力学模型可知, 切削力稳态分量增大, 切削振动加速度随之增大, 会使刀尖位移增大, 造成表面粗糙度值随着进给量的增大而增大。

关键词: 进给量; 表面质量; 切削力; 切削振动; 动力学模型

中图分类号: TG501; TH161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)06-0370-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.045

Influence of Feed on Surface Quality in Titanium Alloy Cutting Process Based on Dynamic Mechanical Model Analysis

WANG Chen-yu, LI Jin-quan

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

ABSTRACT: The work aims to establish the dynamic model of single-degree-of-freedom in workpiece-tool vibration system so as to quantitatively study the influence of feed on cutting force and vibration acceleration of titanium alloy Ti-6Al-4V. The single factor test of changing the feed rate was adopted. Ti-6Al-4V titanium alloy was turned by coated hard alloy tool. The cutting vibration and cutting force in the cutting process were tested by DYTRAN acceleration sensor and YDCB-II105 three-dimensional piezoelectric force measuring system. The collected vibration acceleration and cutting force signals were

收稿日期: 2019-02-01; 修订日期: 2019-05-21

Received: 2019-02-01; **Revised:** 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51775357); 辽宁省自然科学基金 (20170540785)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775357), Liaoning Natural Science Foundation (20170540785)

作者简介: 王晨羽 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为切削理论与先进制造技术。

Biography: WANG Chen-yu (1994—), Female, Master, Research focus: cutting theory and advanced manufacturing technology.

通讯作者: 李金泉 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为切削理论与先进制造技术。邮箱: Li_jinquan@163.com

Corresponding author: LI Jin-quan (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: cutting theory and advanced manufacturing technology. E-mail: li_jinquan@163.com

processed and analyzed by MATLAB and Origin software. The surface roughness was measured by 120 mm Talysurf PGI840 roughness tester. When the feed rates was 0.1, 0.15, 0.2, 0.24 and 0.3 mm/r, respectively, the mean square roots of the vibration acceleration were 0.2413g, 0.3299g, 0.3945g, 0.4468g and 0.5737g, respectively, the average arithmetic heights of R_a was 0.538, 0.9391, 1.4778, 1.984 and 3.0117 μm , respectively and the average valley depth R_z was 3.1846, 4.64445, 6.3059, 8.338 and 11.6506 μm , respectively. With the increase of the feed, all of the cutting force, vibration acceleration and the surface roughness increased. The contact area between the tool and the workpiece increases with the increase of feed rate, which leads to the increase of the friction force and the steady-state component of the cutting force. From the dynamic model of the workpiece-tool vibration system, the vibration acceleration increases with the increase of the steady-state component of the cutting force, thus causing bigger tip displacement and resulting in that the surface roughness increases with increase of the feed rate.

KEY WORDS: feed rate; surface quality; cutting force; cutting vibration; dynamical model

钛合金由于其良好的物理化学性能，如低密度、耐高温、耐腐蚀等，被广泛应用于医疗器械、航空航天、核电设备等关键精密零件的加工和制造^[1-2]。然而，由于钛合金的高硬度和高脆性使其加工性能极差，是一种难加工材料。因此，在切削钛合金的过程中，大的切削力极易导致发生刀具的切削振动，对表面形貌和加工精度都会产生严重的影响，由此可见，研究切削用量对切削振动的影响并分析切削振动产生的原因，对改善钛合金表面质量有重要意义^[3]。

近年来，国内外学者针对切削表面质量的研究主要集中在刀具和切削参数的选择方面^[4-6]。学者们发现刀具的副后刀面磨损宽度对被加工材料的表面质量有明显影响^[7]；进给量的增大会使积屑瘤的高度增大，造成理论残留面积高度的增大，从而造成表面粗糙度值增大^[8]。然而仅考虑刀具和切削参数本身的优化，难以满足精度高且加工稳定的工艺要求，尤其随着精密加工及检测设备的广泛应用和对动力学研究的深入，在提高切削表面质量的过程中，控制切削力和切削振动^[9-12]，考虑切削动力学的约束^[13]十分有必要。A. DEVILLEZ 等^[14]通过试验研究发现，由于进给速度和切削深度的影响，切削力、切削振动将会导致刀具与工件之间产生位移，这对表面质量有很大的影响。YUE 等^[15]认为刀具偏心将极大地影响到切削刀具的实际切削半径，因此会导致切削刃上的切削力分布不均匀，使得切削力、振动信号的频率从刀齿通过频率转变为主轴旋转频率，进而影响加工过程稳定性；此外，学者们还发现，运用切削力建模的方法可以揭示切削机理和预测表面精度。张洁等^[16]通过建立切削力模型，对工件的动态特性进行分析及仿真，得出刀尖半径的大小对强迫振动响应有很大的影响。LI 等^[17]利用软件 Matlab 与 Visual Basic 混合编程建立了动力学仿真模块，提出在不同切削条件下预测切

削力、振动、表面光洁度及稳定性的算法。H. Paris 等^[18]在利用软件预测表面形貌时，发现加工振动系统的动力学特性会影响加工表面质量，这一发现从仿真的角度证明了加工过程中的振动会对表面质量产生影响。

纵观钛合金切削表面质量的研究历程，研究者们从各个角度对切削加工过程中影响表面质量的因素进行了研究，取得了大量的成果。由于在线监测切削表面质量难度较大，目前还缺乏较成熟的理论进行系统论证。为此，本文在前人研究的基础上，以车削钛合金 Ti-6Al-4V 为研究对象，建立工件-刀具振动系统动力学模型，结合刀具振动响应测试和切削力试验，分析切削过程中，进给量对切削振动和切削表面质量的影响规律。

1 试验方案

切削试验采用 CA6140 车床，试验材料为钛合金 Ti-6Al-4V（退火态），材料的化学成分见表 1。试样长度和直径为 300 mm×90 mm，采用单因素试验，切削速度和切深不变，只考虑进给量对切削过程的影响，沿试样长度方向分成若干段，每段对应不同的切削参数，切削参数如表 2 所示。采用涂层硬质合金刀具，刀片的主偏角看 $k_r=90^\circ$ ，刃倾角 $\lambda_s=0^\circ$ ，前角 $\gamma_0=0^\circ$ ，后角 $\alpha_0=7^\circ$ ，刀尖圆弧半径 $r=0.8\text{ mm}$ 。车削过程中，振动加速度由 DYTRAN 加速度传感器进行测量，采样频率为 10 240 Hz。测量切削力采用 YDCB-III05 三向压电测力系统。车削完毕后，采用 120 mm 位相光栅干涉粗糙度轮廓仪（Talysurf PGI840）对 Ti-6Al-4V 工件的圆弧加工表面进行表面粗糙度的测量，振动加速度均方根及表面粗糙度值如表 2 所示，表 3 为振动加速度振幅及不同进给量下的稳态切削力值。

表 1 Ti-6Al-4V 的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ti-6Al-4V

Material	wt. %							
	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Ti-6Al-4V	Bal.	5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.08	0.05	0.015	0.20

表 2 切削参数、振动加速度均方根及表面粗糙度值
Tab.2 Cutting parameters, mean square root of vibration acceleration and roughness value

Numbered list	Cutting speed (V)/(m·min ⁻¹)	Feed rate (f)/(mm·r ⁻¹)	Cutting depth (a _p)/mm	Vibration acceleration/g	Arithmetic mean deviation/μm	Mean profile valley depth/μm
1	97	0.10	0.2	0.2413	0.5383	3.1846
2	97	0.15	0.2	0.3299	0.9391	4.6445
3	97	0.20	0.2	0.3945	1.4781	6.3059
4	97	0.24	0.2	0.4468	1.9849	8.3383
5	97	0.30	0.2	0.5737	3.0117	11.6506

表 3 随进给量变化的稳态切削力分量 (V_c=97 m/min, a_p=0.2 mm)
Tab.3 Stable cutting force F_f with different feed rates (V_c=97 m/min, a_p=0.2 mm)

Feed rate f/(mm·r ⁻¹)	0.1	0.15	0.2	0.24	0.3
F _f /N	78.217	86.568	90.829	109.739	119.326

2 结果与讨论

2.1 表面粗糙度随进给量的变化特性

图 1 为钛合金 Ti-6Al-4V 在不同进给量影响下,

其表面粗糙度的测量结果。X 坐标反映测量长度, Y 坐标表示粗糙度曲线中峰谷的高度。由表 2 可知, 随进给量的增大, 反映表面质量的算术平均高度及平均谷深度值均与之同向变化。

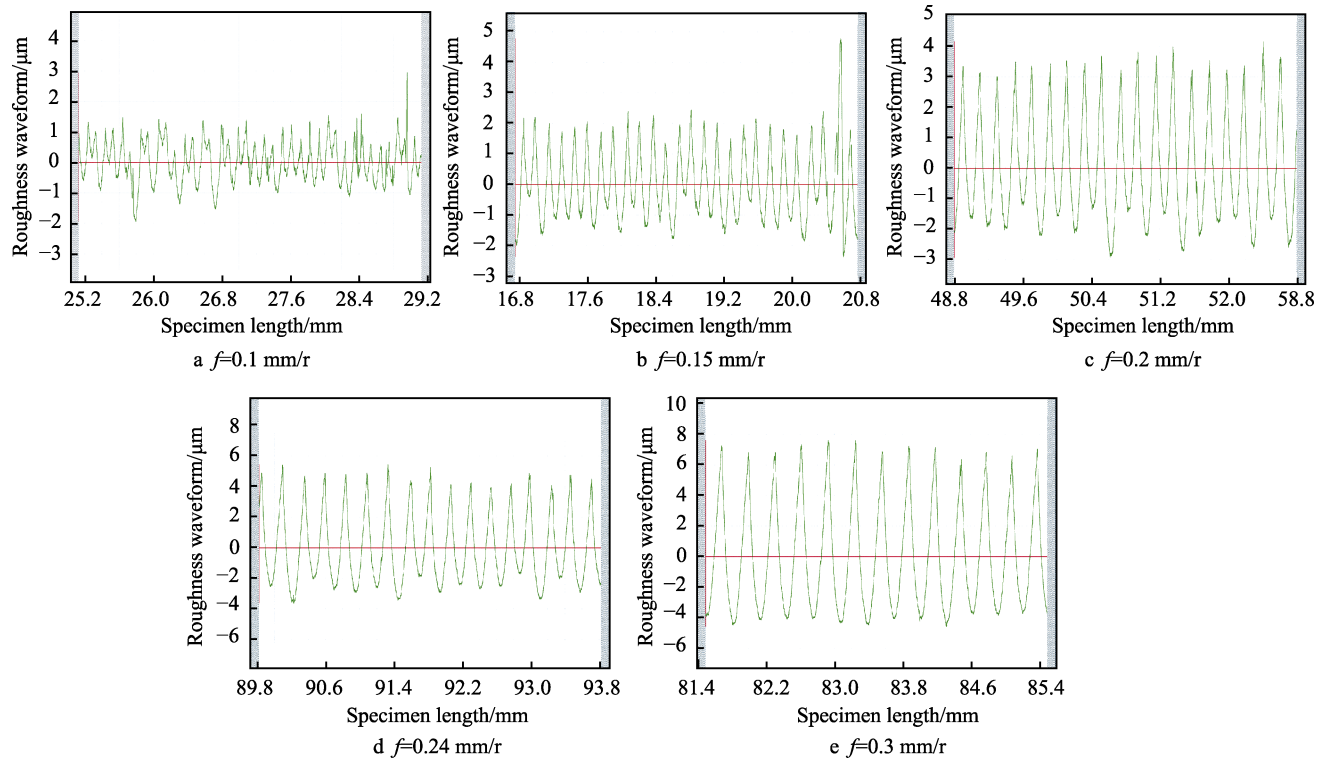


图 1 不同进给量下 Ti-6Al-4V 表面粗糙度波形图
Fig.1 Surface roughness waveform of Ti-6Al-4V at different feed rates

2.2 振动加速度随进给量的变化特性

利用 Origin 软件对采集的随进给量变化的振动加速度信号经去空转、平滑处理后, 进行快速傅里叶变换, 得到随进给量变化的振动加速度频谱图。切削

振动加速度在频率为 4~5 kHz 范围内振动最为明显, 三个坐标分别表示频率、进给量和振动加速度值, 如图 2 所示。随着进给量的增大, 振动加速度也随之增大, 如图 3 所示。

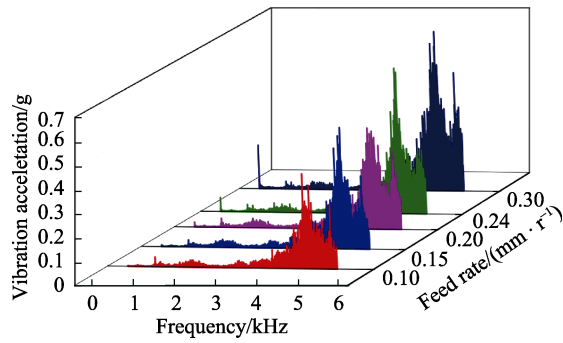


图 2 Ti-6Al-4V 振动加速度随进给量变化频谱图
Fig.2 Spectrum of vibration acceleration of Ti-6Al-4V with feed

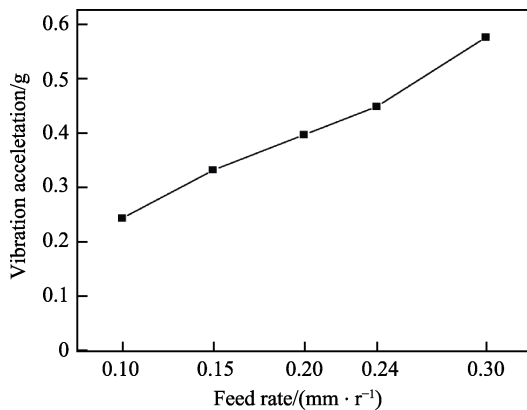


图 3 Ti-6Al-4V 振动加速度均方根随进给量的变化
Fig.3 Variation of RMS of Ti-6Al-4V vibration acceleration with feed

2.3 进给量对切削过程动态系统的影响规律

在切削过程中,刀尖与工件表面接触会产生切削力,切削力会使刀杆产生弹性变形,当切屑断裂后,刀杆的弹性变形得以恢复。因此刀杆的弹性变形与切削力成正比,切削力呈周期性变化,如果切削力的变化频率等于或接近刀具系统的固有弹性变形频率,则产生切削振动。由于刀杆的弹性变形与切削力成正比,因此切削振动符合简谐运动规律,切削力呈正弦波动,切削振动的物理模型如图 4 所示。将刀具系统看做是一个无质量的弹簧 S 和无弹性的质量块 m 的结合体, m 通过 S 悬挂在梁上并位于静止点 A 。在刀具切削工件的过程中,切削力 F 作用在质量块 m 上,使其围绕平衡点 A ,在 B 、 C 之间呈简谐波动。由于在实际过程中有重力和空气阻力的作用,质量块 m 的运动过程是一个衰减振动过程。如果切削力作用在质量块 m 的频率等于或接近于结合体的固有频率,则系统会产生切削振动。

根据以上分析建立工件-刀具振动系统的动力学模型,如图 5 所示,单自由度刀具振动方程如公式(1)所示:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -F(t) \quad (1)$$

其中, m 为刀具系统质量 (1.036 kg), c 为阻尼

(345 N/(m/s)), k 为刀具被压紧在工件上的刚度 (281 333 529 N/m) [19]。

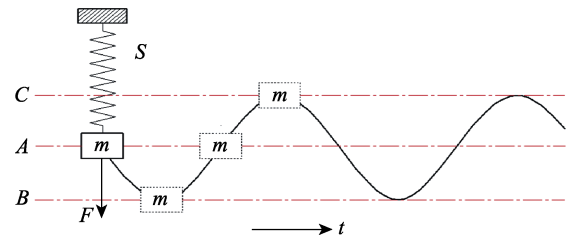


图 4 切削振动的物理模型
Fig.4 Physical model of cutting vibration

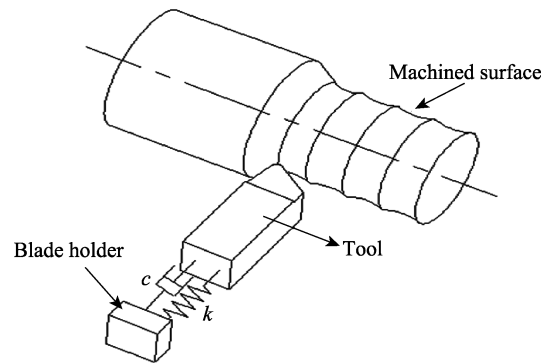


图 5 工件-刀具振动系统动力学模型
Fig.5 Dynamics model of workpiece-tool vibration system

切削过程中时域信号下切削力由两部分组成:一是稳态切削力分量,其数值接近于切削力实测平均值;二是动态切削力分量,该分量是以稳态切削力为中心上下波动的正弦函数[20],如式(2)。

$$F(t) = F_f + F \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中, F_f 为稳态切削力分量, $F \sin(\omega t + \varphi)$ 为动态切削力分量。受进给量影响的切削力的指数经验公式为:

$$F_f = C_f \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (3)$$

式中, C_f 为受材料硬度影响的切削力经验系数, y_{Fc} 为进给量 f 的指数, x_{Fc} 为切削深度 a_p 的指数,则:

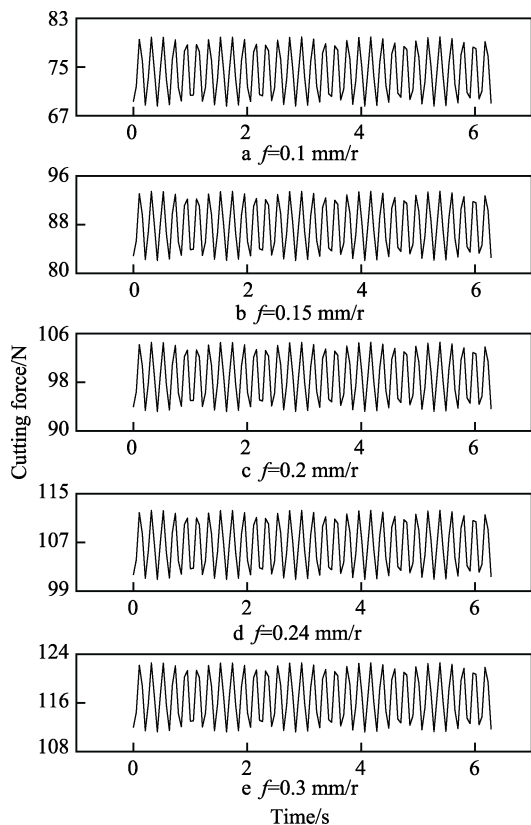
$$F(t) = C_f \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} + F \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

根据式(1)、(2)对试验获得的随时间变化的切削力数据及表 3 中切削力随进给量变化的数据进行拟合,可得各参数为: $C_f=961$, $x_{Fc}=1$, $y_{Fc}=0.413$, $F=5.695$, $\omega=15319.98$, $\varphi=-1.055$ 。

由于在 $F(t)$ 中,相对于稳态切削力分量,动态切削力分量的变化很小,所以 F 、 ω 和 φ 近似为定值,本试验条件下 $a_p=0.2$ mm,则:

$$F(t) = 192.2 \cdot f^{0.413} + 5.695 \sin(15319.98t - 1.055) \quad (5)$$

利用 Origin 软件根据式(5)可得图 6 所示的函数图像,从图中可以看出切削力的时间函数随进给量的增大而增大。

图6 $F(t)$ 函数图像Fig.6 Function image of $F(t)$

由上述分析可知式(1)为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -[F_f + F \sin(\omega t + \varphi)] = -[192.2 \cdot f^{0.413} + 5.695 \sin(15319.98t - 1.055)] \quad (6)$$

采用 MATLAB 软件中的四阶龙格库塔方程对式(6)的 $x(t)$ 求解二阶导数, 可得振动加速度在不同进给量下随时间变化的瞬时响应, 如图7所示, 从图中可知, 随着进给量的增大, 振动加速度也增大, 但由于存在阻尼, 振动加速度均逐渐衰减至零。当刀具进给量增大时, 刀具与工件之间的接触面积增加, 并且摩擦力增大, 使切削力增加, 由式(6)可知, 由于切削力稳态分量随进给量增大而增大, 导致切削振动加速度 $x(t)$ 随之增大, 而且在切削过程中, 切削力不同的自激频率和激振频率的叠加也将引起刀具的自激振动。

切削力和振动加速度的改变会引起刀尖位移的变化, 造成实际进给量沿径向和进给方向产生偏差, 进而影响表面质量。由于切削力和振动加速度随着进给量的增大而增大, 会使刀具尖端位移增大, 因此, 造成表面粗糙度随着进给量的增大而增大。此外, 在车削过程中, 刀具沿轴线方向做进给运动, 同时工件旋转, 车刀刀刃必然会在加工表面留下类似螺旋线形状的沟痕, 出现犁垄现象, 轴向进给量相当于螺距^[21]。因此, 在不考虑振动的理想情况下, 沿进给运动方向的两个相邻波峰和波谷之间的间距近似等于进给量, 进给量越大, 表面越不平整。

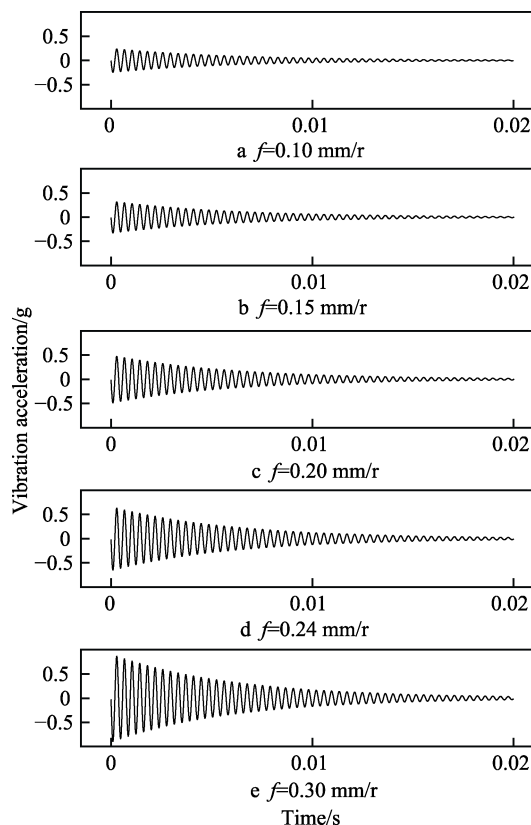


图7 振动加速度瞬时响应

Fig.7 Transient response of vibration acceleration

3 结论

1) 当刀具进给量增大时, 刀具与工件之间的接触面积增大, 导致摩擦力增大, 从而引起切削力稳态分量增大, 切削力的波动符合简谐运动规律。

2) 根据单自由度系统刀具动力学模型, 切削力稳态分量增大, 刀具振动加速度也随之增大, 这会加大刀尖位移偏差, 造成表面粗糙度值随着进给量的增大而增大, 使表面质量恶化。

参考文献

- [1] STEFAN C, CONSTANTINOS F, ANDREAS A, et al. Influence of work material microstructure on vibrations when machining cast Ti-6Al-4V[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 84: 2277-2291.
- [2] 张喜燕, 赵永庆, 王晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, WANG Chen-guang. Titanium alloy and applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [4] EZUGWU E O, BONNEY J Y Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys[J]. Journal of materials processing technology, 2003, 134: 233-253.
- [4] 袁森, 何林, 占刚, 等. 硬质合金微坑车刀切削 304 不锈钢时的表面粗糙度研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 232-240.

- YUAN Sen, HE Lin, ZHAN Gang, et al. Research on surface roughness of 304 stainless steel cut by cemented carbide micro pit tool[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(15): 232-240.
- [5] 张慧萍, 张校雷, 张洪霞, 等. 300M 超高强钢车削加工表面质量[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 181-187.
ZHANG Hui-ping, ZHANG Xiao-lei, ZHANG Hong-xia, et al. Surface quality of high-speed turning 300M ultrahigh strength steel[J]. Surface technology, 2016, 45(2): 181-87.
- [6] ZHU Li-da, LI Hao-nan, WANG Wan-shan. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 69: 2279-2292.
- [7] 巩亚东, 梁彩霞, 李强, 等. 硬质合金刀具铣削镍基单晶高温合金 DD5 磨损试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(9): 1283-1287.
GONG Ya-dong, LIANG Cai-xia, LI Qiang, et al. Wear experiment of carbide tool for milling nickel-based single crystal super alloy DD5[J]. Journal of northeastern university (natural science), 2018, 39(9): 1283-1287.
- [8] 杨昊. 高强高硬钢硬态切削的切削性能实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
YANG Hao. The experimental research on the cutting performance of high strength and hardness steel hard cutting[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [9] BASHIR B M, WAN Min, YANG Liu, et al. Active damping of milling vibration using operational amplifier circuit[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2018, 31(5): 58-65.
- [10] LIU Chang-fu, ZHU Li-da, NI Chen-bing. Chatter detection in milling process based on VMD and energy entropy[J]. Mechanical systems and signal processing, 2018, 105: 169-182.
- [11] PENG C, WANG L, LIAO T W. A new method for the prediction of chatter stability lobes based on dynamic cutting force simulation model and support vector machine[J]. Journal of sound and vibration, 2015, 354(10): 118-131.
- [12] TURKES E, ORAK S, NESELI S, et al. Linear analysis of chatter vibration and stability for orthogonal cutting in turning[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2011, 29(2): 163-169.
- [13] 黄华, 张树有, 刘晓健, 等. 基于动力学不确定性的重型切削工艺参数优化[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 907-914.
- 907-914.
- HUANG Hua, ZHANG Shu-you, LIU Xiao-jian, et al. Optimization of process parameters for heavy-duty milling based on the uncertainty of cutting dynamics[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2016, 36(5): 907-914.
- [14] DEVILLEZ A, DUDZINSKI D. Tool vibration detection with eddy current sensors in machining process and computation of stability lobes using fuzzy classifiers[J]. Mechanical systems & signal processing, 2007, 21(1): 441-456.
- [15] YUE Cai-xu, GAO Hai-ning, LIU Xian-li, et al. A review of chatter vibration research in milling[J]. Chinese journal of aeronautics, 2019, 32(2): 1-28.
- [16] 张洁, 刘成颖. 薄壁工件铣削过程中强迫振动响应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(11): 961-965.
ZHANG Jie, LIU Cheng-ying. Forced vibration response during the milling of thin-walled workpieces[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2018, 58(11): 961-965.
- [17] LI Zhong-qun, LIU Qiang, YUAN Song-mei, et al. Prediction of dynamic cutting force and regenerative chatter stability in inserted cutters milling[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2013, 26(3): 555-563.
- [18] PARIS H, PEIGNE G, MAYER R. Surface shape prediction in high speed milling[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2004, 44(15): 1567-1576.
- [19] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 5-11.
XU Ben-wen, JIAO Qun-ying. Mechanical vibration and modal analysis[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998: 5-11.
- [20] 仇健. 基于动态切削过程仿真的外圆车削稳定性判定[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 208-218.
QIU Jian. Research on cylindrical turning process stability judgment based on dynamic cutting process[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(3): 208-218.
- [21] 王晨羽, 徐碧聪, 颜世晶, 等. 工业纯钛切削过程表面三维形貌研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(4): 57-61.
WANG Chen-yu, XU Bi-cong, YAN Shi-jing, et al. Study on the surface 3D morphology of industrial pure titanium in cutting process[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2018, 37(4): 57-61.