DOI: 10.3901/JME.2019.07.207

超声振动辅助铣削钛合金铣削力信号 及切屑特征研究*

倪陈兵 朱立达 宁晋生 杨志超 刘长福
(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819)

摘要: 通过对刀具-工件的运动学分析,研究了超声振动辅助铣削过程中断续加工机理,建立了超声辅助铣削过程中刀具净切削时间模型,得到了加工参数和振动参数与刀具净切削时间之间的关系。针对超声加工过程中高频断续加工的特点,进行了超声振动辅助铣削和普通铣削钛合金加工试验,对超声振动铣削和普通铣削钛合金过程中的铣削力信号和切屑特征进行了详细的对比研究。试验结果表明:与普通铣削加工相比,超声振动铣削力信号和切屑形态具有独特特征。施加超声振动之后,超声铣削力信号幅值显著下降,超声铣削力信号由连续信号转变为离散的脉冲式力信号,铣削力信号的频谱特性发生明显变化;超声振动振幅对铣削力幅值具有显著影响。此外,相比普通铣削切屑,超声铣削切屑的尺寸和表面形貌均发生明显改善。

关键词: 超声振动辅助铣削; 断续加工机理; 钛合金; 切削力特征; 切屑特征

中图分类号: V261

Research on the Characteristics of Cutting Force Signal and Chip in Ultrasonic Vibration-assisted Milling of Titanium Alloys

NI Chenbing ZHU Lida NING Jinsheng YANG Zhichao LIU Changfu
(Institute of Advanced Manufacturing and Automation Technology, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract: Based on kinematic analysis of the tool and the workpiece in ultrasonic vibration-assisted milling (UVAM), the intermittent machining mechanism in UVAM method is studied and the tool-workpiece net cutting time model is established. And the relationship between machining parameters and net cutting time is given. For high-frequency intermittent processing characteristics in ultrasonic machining (UM), a series of ultrasonic vibration-assisted milling and ordinary milling of titanium alloys experiments is conducted. A detailed comparative study of milling force signals and chips is carried out between these two machining methods. The experimental results indicate that compared with the conventional milling(CM) of Ti-6Al-4V, the cutting force signal and chip in UVAM had unique characteristics. After the application of ultrasonic vibration, the amplitude of the cutting force signal decreased significantly and the milling force signal is transformed from a continuous signal to a discrete oscillating force signal. Meanwhile, the spectral characteristics of the milling force signal have changed obviously. Vibration amplitude has a significant effect on milling force amplitude. Moreover, compared with chips produced by CM method, the size and surface morphology of chips produced by UVAM method had been improved obviously.

Key words: ultrasonic vibration-assisted milling; intermittent machining mechanism; titanium alloy; cutting force characteristics; chip characteristics

0 前言

在现代制造业中,难加工材料的使用范围和使用数量日益剧增,由于难加工材料具有较差的可加

工性,使用传统加工技术(车削、磨削和铣削等)对难加工材料进行高质量、高效率 and 低成本的加工仍然充满着许多困难和挑战^[1]。超声加工技术^[2]是在刀具和工件相对运动的基础上,沿一定方向给刀具或者工件施加超声频的微米级振动进行加工的特种加工技术。与车削、磨削和铣削等传统切削加工技术相比,超声加工技术具有明显的工艺优势,如切削力小、切削温度低、加工表面质量高、加工精度高、

* 国家自然科学基金(51475087)和中央高校基本科研业务专项资金(N170306005)资助项目。20180419 收到初稿,20180926 收到修改稿

切屑易处理、刀具耐用度高、加工稳定、生产率高等优点^[3-4]。20 世纪 50 年代,日本宇都宫大学的隈部淳一郎教授提出超声波振动切削方法,并于 1979 年出版专著《精密加工、振动切削基础及应用》为超声加工技术的研究、应用和发展奠定了坚实的基础。超声加工技术经过了 60 多年的发展,目前,超声加工技术已经成为机械加工行业的一个重要发展方向^[2],其中,超声振动辅助车削、钻削和磨削是超声加工技术应用的三大主要领域,约占超声加工技术研究的 70%^[5]。

超声振动辅助铣削加工技术的研究起步较晚,其相关的文献报道主要集中于 21 世纪初。目前,超声振动辅助铣削的研究正处于初始阶段。2006 年,中国台湾的 CHERN 和 CHANG 教授^[6]首次研究了低频振动辅助微铣削铝合金的加工性能,研究发现振动铣削有助于改善加工表面质量,提高加工精度和延长刀具使用寿命。这是首次将振动辅助加工技术引入到铣削加工领域。但是,由于施加的振动频率较低,不能够完全发挥出超声振动辅助加工的优势。此外, JIN 等^[7]试验探究了施加低频振动的方向、频率和振幅对微铣削光学玻璃 BK-7 的影响,试验结果发现,振动辅助铣削有助于实现硬脆材料加工过程中的脆塑性转变。DING 等^[8]试验研究了超声振动对微铣削铝合金切屑形成和毛刺抑制的影响。KO^[9]研究了沿刀具轴线方向施加超声振动对中尺度铣削不锈钢加工表面质量的影响,试验发现施加超声振动之后表面粗糙能够改善 20%~65%。上述研究表明,施加振动能够改善微铣削和中尺度铣削的加工性能。

超声加工技术在宏观铣削领域的研究也取得了一定的研究成果。SHEN 等^[10]对超声振动辅助铣削铝合金进行了详细研究,研究发现,超声振动辅助铣削能够将连续的切削过程转变为断续的微分段切削过程,产生类似脉冲式的切削力。同时,超声振动辅助铣削能够有效降低平均切削力。SHEN 等^[11]同时指出,超声加工能够有效改善铣槽两个侧面的粗糙度,但是,施加超声振动对槽底部的粗糙度具有不利的影响。ZARCHI 等^[12]试验研究了超声振动辅助铣削不锈钢 AISI 420 材料的加工特征,研究发现,小进给率逆铣时,超声振动降低切削力的效果更明显;大的进给率顺铣时,超声振动降低切削力的效果更明显。ZHANG 等^[13]对超声振动振幅、频率、进给速度和主轴转速对分离型和不分离型超声振动辅助铣削加工稳定性的影响进行了研究,使用全离散法求解时延微分方程并分别绘制稳定性叶瓣图,理论和试验研究发现,分离型和不分离型超声

振动辅助铣削都不适合高速铣削加工。此外, LI 等^[14]研究发现在施加超声振动的基础上,使用微量润滑 (Micro lubrication, MQL) 技术能够进一步改善刀具的切削性能和延长刀具使用寿命。目前,大多数的研究表明,施加超声振动能够提高材料的加工性能,尤其是能够明显改善难加工材料的加工性能,但是,也有少数研究发现,施加超声振动对于改善材料的加工性能具有不利的影响。如, MAUROTTO 等^[15]试验探究了超声振动频率 (20~60 kHz) 对不锈钢加工表面粗糙度和残余应力的影响,研究发现超声加工对加工表面质量表现出了不利影响,超声加工的表面粗糙度值略高于传统加工表面粗糙度值,此外,超声加工表面的残余应力也大于普通铣削加工。

钛合金因具有优异的综合力学性能,如比强度高、抗腐蚀性能好和耐磨损等,在航空航天、生物医疗和汽车工业等领域中获得了大量的应用^[16]。但钛合金本身具有热导率低、弹性模量小、化学活性高的固有属性,使得钛合金加工过程中存在切削力大、切削温度高、刀具磨损大、切削效率低等难题^[17]。因此,钛合金材料是一种典型的难加工材料。本文对超声振动辅助铣削钛合金铣削力信号及切屑的特征进行研究。首先,从刀具-工件运动学角度,分析了超声振动辅助铣削加工过程中的断续加工机理,然后,进行超声振动辅助铣削和普通铣削钛合金试验,最后,对超声振动辅助铣削和普通铣削钛合金切削力特征和切屑特征进行详细的对比研究,研究发现,与普通铣削过程中的切削力和切屑相比,超声振动铣削过程中的铣削力信号和切屑具有独特的特征。

1 超声振动辅助铣削断续加工机理

1.1 刀具-工件运动学分析

图 1 为沿工件进给方向超声振动辅助铣削加工

图 1 沿工件进给方向超声振动辅助铣削加工示意图

示意图。如图 1 所示, 将工件固定在经优化设计的谐振块上, 工件和谐振块组成的整体需要满足频率和振型要求。为了保证超声加工过程的稳定性, 以及减少变幅杆和换能器在加工过程中所受到力矩的作用, 分别在变幅杆和谐振块的节点处进行固定和支撑, 如图 1 所示。因此, 本试验无需对机床进行改动便可以在通用机床上实现超声加工, 能够保证加工机床的固有精度。

坐标系 $Oxyz$ 定义如图 1 所示。假设超声振动系统沿 x 方向输出简谐振动的位移函数为

$$x(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi_1) \quad (1)$$

则谐振工件沿 x 和 y 方向的振动速度可表示为

$$\begin{cases} v_{wx} = 2\pi f A \cos(2\pi ft + \varphi_1) \\ v_{wy} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x(t)$ 、 A 、 f 和 φ_1 分别为简谐振动的位移、振幅、频率和初相位; v_{wx} 和 v_{wy} 分别为工件沿 x 和 y 方向的振动速度。

在稳定加工阶段, 主轴的回转运动可视为匀速圆周运动。因此, 刀具的切削速度为

$$v_c = \pi d n / 1\,000 \quad (3)$$

式中, d 为刀具直径; n 为主轴转速。

槽铣加工时, 根据铣刀刀齿与工件的相对运动关系, 可以将图 1 所示的超声槽铣加工过程划分为顺铣阶段和逆铣阶段, 如图 2a、2b 所示。将刀具的切削速度分别沿进给方向和垂直进给方向进行分解, 在图 2a 中, 刀尖沿 x 和 y 方向的切削速度可以表示为

$$\begin{cases} v_x = v_c \cos \varphi \\ v_y = v_c \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

同理, 在图 2b 中, 刀尖沿 x 和 y 方向的切削速度可以表示为

$$\begin{cases} v_x = v_c \sin \varphi \\ v_y = v_c \cos \varphi \end{cases} \quad (5)$$

(a) 逆铣阶段

(b) 顺铣阶段

图 2 超声振动辅助铣削过程分析

断续切削是超声加工过程的典型特征之一。根据文献[12], 超声振动辅助铣削过程中刀具和工件发生分离的临界条件: 当工件振动速度的最大值大于沿振动方向的切削速度分量时, 工件和刀具会发生分离现象, 即 $v_{wmax} > v_x$, 否则, 刀具和工件保持接触状态, 加工过程为传统铣削加工。

1.2 净切削时间模型

刀具-工件的分离特性是超声加工过程中断续加工机理的根本原因。根据文献[18]的研究, 考虑到切削厚度和残留高度对刀具-工件分离特性的影响, 本文仅讨论超声振幅和刀具每齿进给量相当的情况。如图 3 所示, 在超声振动辅助铣削过程中, 整个加工过程可以划分为切削阶段(如 $t_1 \sim t_2$ 和 $t_5 \sim t_6$)和分离阶段($t_2 \sim t_3$ 和 $t_6 \sim t_7$)。根据式(4)和式(5), 铣削过程中的切削速度分量随着切削角不断变化。当工件沿进给方向的振动速度大于或等于切削速度沿 x 方向的速度分量时, 即 $v_{wx} \geq v_x$ 时, 工件和刀具会发生分离。如图 3a 所示, 假设点 i 和点 k 分别为超声加工过程中相邻的两个振动周期内的刀具和工件的分离点, 对应的分离时刻分别为 t_2 和 t_4 , 且在 t_4 时刀具的切削角为 φ 。根据刀具-工件分离的临界条件, 在分离时刻 t_2 和 t_4 可以分别得到式(6)和式(7)

$$v_c \sin \varphi + a \omega \cos \omega t_4 = 0 \quad (6)$$

$$v_c \sin[\varphi - \omega_r(t_4 - t_2)] + a \omega \cos \omega t_2 = 0 \quad (7)$$

根据文献[19]研究, 在超声加工过程中刀具和工件的分离阶段, 工件的振荡位移和刀具的运动位移满足

$$\begin{aligned} & a \sin \omega t_3 - a \sin \omega t_2 = \\ & - \int_{t_2}^{t_3} v_c \sin[\varphi - \Delta \varphi + \omega_r(t - t_2)] dt \end{aligned} \quad (8)$$

则在点 k 处的振动周期内, 刀具对工件的净切削时间 t_c 可以表示为

$$t_c = t_4 - t_3 \quad (9)$$

根据式(6)~(9), 可以建立超声振动顺铣过程中刀具净切削时间模型, 其表达式为

$$\begin{aligned} & 2a \cos \pi f(t_4 - t_c + t_2) \sin \pi f(t_4 - t_c - t_2) = \\ & - \int_0^{t_4 - t_c - t_2} v_c \sin(\varphi - \omega_r(t_4 - t_2) + \omega_r t) dt \end{aligned} \quad (10)$$

同理, 在超声加工逆铣过程中, 如图 3b 所示, 刀具在 q 点时, 刀具对工件的净切削时间 t'_c 可以表示为

$$t'_c = t_8 - t_7 \quad (11)$$

因此, 超声振动逆铣过程中刀具净切削时间模

型可以表示为

$$2a \cos \pi f(t_8 - t'_c + t_6) \sin \pi f(t_8 - t'_c - t_6) = - \int_0^{t_8 - t'_c - t_6} v_c \cos(\theta - \omega_r(t_8 - t_6) + \omega_r t) dt \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可知,切削速度,切削角,振动频率和振动振幅对超声振动铣削过程中刀具净切削时间具有直接影响。

图3 超声加工分离式切削过程

2 试验设备和试验条件

本试验所使用的设备可以分为加工中心、超声振动发生系统、切削力测量系统和振动特性检测系统四部分。如图4所示,试验机床为沈阳机床厂生产的TH5650四轴立式加工中心。超声振动发生系统包括超声发生器、换能器、变幅杆和谐振块。切削力测量系统包括Kistler9257B测力仪、数据转换卡、5070电荷放大器和DynoWare软件。使用DynoWare软件可以对切削力数据进行采集和分析。振动特性在线检测系统包括由Virtins Technology生产的激光位移传感器M70LL、100 kHz高速数据采集卡、控制器和Multi-Instrument软件。高速数据采集卡的采样频率为100 kHz $\gg$ 20 kHz,能够满足对超声频率的采样要求。

超声振动系统输出振幅的大小与超声发生器、换能器和变幅杆的类型密切相关。为了确定超声振动系统实际输出振幅的大小,首先,需要在未加工状态下对超声振动系统输出振幅进行标定,如图5所示。通过标定振幅可以确定超声发生器的输出功

率与振动振幅之间的对应关系。然后,在实际加工中,根据标定的功率与振幅的对应关系,通过调节输出功率的大小来调节超声加工振动振幅。

试验所用工件材料为Ti-6Al-4V钛合金,其主要力学性能如表1所示。由于钛合金具有较差的热传导率,切削过程中产生的大量切削热会在切削区不断累积,造成较高的切削温度从而影响刀具使用寿命。因此,本试验选用三菱综合材料生产的TiAlN涂层整体硬质合金立铣刀MS2SS。涂层材料中铝元素能够在高切削温度下形成氧化物,有利于提高刀具的热硬度和磨损性能。刀具的几何尺寸和实物如图6所示,刀具采用两个不同刀齿半径的特殊结构设计。试验条件和主要加工参数如表2所示。

(a) 铣削试验现场

(b) 数据采集系统

图4 试验设备

图5 超声振动系统振幅标定

表 1 Ti-6Al-4V 主要力学性能

密度/ (kg/m ³)	弹性 模量/ GPa	泊松 比	拉伸 强度/ MPa	屈服 强度/ MPa	热传 导率/ W/(m·K)	硬度/ HB
4420	110	0.31	960~1270	820	7.955	195

图 6 刀具结构设计及实物图

表 2 试验条件和加工参数

刀具和工件材料		加工参数	
刀具类型	双刃立铣刀	切削速度/(m/min)	5~23
刀具涂层	TiAlN 涂层	进给速度/(μm/z)	8
刀具直径/mm	4	切深/mm	0.3
刀具品牌	Mitsubishi	振动类型	Feed direction
螺旋角/(°)	30	频率/kHz	20.0
工件材料	Ti-6Al-4V	振幅/μm	0, 8, 10, 12, 14

3 铣削力特征

3.1 铣削力幅值降低

为研究不同的超声振动振幅对切削力的影响，使用测力仪分别对普通铣削和超声振动铣削的切削力信号进行采集。图 7 为施加不同振幅下切削速度为 $v_c=11$ m/min 时采集到的切削力信号。由于刀具特殊的结构设计即不同的刀齿半径，如图 6 所示，两个不同半径的刀齿产生的切削力信号幅值不同，如图 7 所示。由图 7a、7b 可以看出，施加超声振动之后，两个不同半径刀齿切削力峰值均有明显的下降。此外，由图 7 可以看出，普通切削力的曲线为单条连续曲线，而超声切削力由致密的脉冲束构成。由图 7c、7d 可以看出，当振幅从 $12\text{ }\mu\text{m}$ 继续增加到 $14\text{ }\mu\text{m}$ 之后，切削力幅值下降速度变缓。因此，根据以上分析可知，施加超声振动能够明显降低切削力的幅值，切削力的幅值随着振动振幅的增加而减小，当振幅增加到一定程度之后，切削力幅值的下

降速度随着振幅的增加而减小。

(a) $A=0\text{ }\mu\text{m}$

(b) $A=8\text{ }\mu\text{m}$

(c) $A=12\text{ }\mu\text{m}$

(d) $A=14\text{ }\mu\text{m}$

图 7 不同振幅作用下铣削力

3.2 铣削力信号振荡特征

分别选取普通铣削和超声振动铣削单个周期内

的铣削力波形进行分析,如图8a、8b所示,单个周期内的普通铣削力和超声铣削力具有明显的差别。普通铣削力信号为连续正弦波信号;超声振动铣削力信号中,刀具大刀齿产生的铣削力信号保留了正弦力信号轮廓特征,刀具小刀齿产生的铣削力信号正弦轮廓变得模糊。由于超声加工分离式切削特点,超声加工中刀具和工件会发生高频次的重复分离和接触,因此,超声铣削力信号由连续信号转变为脉冲力信号,呈现出明显的振荡特征。在超声铣削力的振荡特征中,能够发现上升沿和下降沿的存在。因此,理想的超声振动铣削力波形如图8c所示。

图8 单个周期内普通铣削和超声振动铣削切削力

3.3 铣削力信号频谱特性

为研究施加超声振动对铣削力信号频谱特性的影响,分别对切削速度 $v_c=11$ m/min 时的普通铣削力信号(图8a)和超声振动铣削力信号(图8b)进行快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)。图9a、9b分别为普通加工和超声加工铣削力信号的频谱图。由图9可以看出,两种加工方式频谱图的低频分量(刀齿切入频率,主轴转动频率及其相应的倍频)略微有一些差别,这种频率的差别是由于引入超声振动之后导致的加工平台以及加工过程的轻微振动,因误差较小可以忽略。如图9所示,两种加工方式频谱图最明显的区别为超声加工频谱中既有低频分量又包含高频分量,且高频分量所占比重较大,如图9b所示。但是,由于受到压电陶瓷响应频率的限制,测力仪 Kistler9257B 的最大采样频率约为 7 000 Hz,而施加的超声振动频率为 20 kHz,所以,测力仪的采样频率远小于超声振动频率,测力仪的采样频率不能够满足超声铣削力信号的采集。因此,采集到的超声铣削力频谱图中的高频分量小于实际超声振动铣削切削力的高频频率。

图9 普通铣削和超声振动铣削切削力频谱特性

利用激光位移传感器记录超声加工中工件的振动数据能够间接的获得超声加工铣削力频谱图中的

高频分量。根据超声振动铣削断续加工机理, 刀具-工件的分离发生在工件振动的每一个振动周期内, 因此, 超声加工过程中工件的谐振频率即为超声加工切削力的高频分量。本文中高速数据卡的采样频率为 $100\text{ kHz} \gg 20\text{ kHz}$, 能够满足对超声频率的采样要求。图 10a、10b 分别为位移传感器记录的普通铣削和超声振动铣削过程中工件的振动数据。对超声加工过程中工件的振动信号进行 FFT 变换, 如图 11 所示。根据超声加工中工件振动信号的频谱图可以看出, 超声加工中工件谐振频率为 19.67 kHz 。

图 10 加工过程中工件动态位移信号

图 11 超声加工振动信号的频谱图

3.4 加工参数和振动参数对铣削力的影响

本文研究了切削速度和振动振幅对大半径刀齿平均切削力 F_x 和 F_y 的影响。如图 12 所示, 超声加工过程中的平均切削力 F_x 和 F_y 明显小于普通加工过程中的切削力。其中, 施加超声振动之后, 切削力 F_x 的降低率在 $20\%\sim 40\%$ 之间, 切削力 F_y 降低率在 $30\%\sim 50\%$ 之间。可以看出, F_y 的降低率略大于 F_x 的降低率。图 13 为施加不同振幅对切削力 F_x 和 F_y 的影响。由图 13 可知, 随着振动振幅的增加,

切削力 F_x 和 F_y 明显下降, 最大降低率可达 60% 。

图 12 切削速度对切削力的影响($A=8\text{ }\mu\text{m}$)

图 13 超声振幅对切削力的影响($v_c=11\text{ m/min}$)

4 切屑特征

4.1 切屑尺寸

为研究超声振动对钛合金切屑尺寸和形貌的影响, 分别收集切削速度 $v_c=12\text{ m/min}$ 时的普通铣削切屑和超声振动铣削切屑, 然后使用基恩士超景深显微镜对切屑形貌进行观察, 同时使用基恩士 VHX 软件中多点测量方法对代表性切屑的尺寸进行测量, 测量结果如图 14 所示。由图 14 可以看出, 与超声振动铣

削切屑相比,普通铣削产生的切屑具有尺寸大、弯曲程度高的特点。由图 14a、14b 可知,当超声振动振幅 $A=10\ \mu\text{m}$ 时,切屑的长度尺寸降低率超过 50%,切屑的宽度尺寸也有明显的降低。切屑宽度尺寸的降低与切屑的塑性变形密切相关。在加工过程中,大尺寸的切屑需要较大的材料去除能量,会产生较大的切削力、较高的切削温度、快速的刀具磨损以及再生颤振。因此,普通加工中产生的较大尺寸切屑不利于提高加工表面质量和延长刀具寿命。此外,由图 14 可以看出,随着超声振动振幅的增加,切屑的尺寸呈减小的趋势。因此,根据以上分析可知,超声加工过程中的断续加工特征具有明显的断屑作用。

(a) 普通铣削

(b) $A=10\ \mu\text{m}$ (c) $A=12\ \mu\text{m}$ (d) $A=14\ \mu\text{m}$

图 14 不同振幅作用下切屑形态

4.2 切屑形貌

图 15a、15b 分别为图 14a、14b 切屑表面形貌的局部放大图。如图 15a 所示,普通铣削切屑的表面纹理非常粗糙,表面上存在大量的连续带状条纹,切屑材料发生严重的塑性变形,这与普通铣削过程中会产生较大切削力相对应。由图 15b 可以看出,超声振动铣削切屑表面分布着均匀的振动纹理。超声加工过程中,刀具和工件在高频振动作用下会发生连续的分离和接触,因此,在加工表面和切屑表面会留下大量的超声振动纹理。综合考虑超声加

(a) 普通铣削切屑表面纹理

(b) 超声振动铣削切屑表面纹理

图 15 普通切屑表面纹理

工过程中的断续加工机理和脉冲式切削力, 这些残留在加工表面和切屑表面的振动纹理可以被认为是超声加工过程中断续加工的有力佐证。此外, 与普通铣削切屑相比, 超声加工产生的切屑表面相对光滑和明亮, 其塑性变形也明显小于普通铣削切屑。

5 结论

(1) 根据超声振动铣削过程中刀具——工件的运动学分析, 研究了超声振动铣削过程中断续加工机理, 建立了超声振动铣削过程中刀具——工件净切削时间模型, 推导出切削速度, 切削角, 振动频率和振动振幅四个参数对刀具净切削时间具有重要影响。

(2) 与普通铣削力相比, 超声振动能够同时降低两个不同刀齿半径产生的铣削力峰值, 超声振动切削力信号由致密的脉冲束构成, 呈现出明显的振荡特征; 随着振动振幅的增加, 切削力呈现减小的趋势, 当振动振幅为 $14\text{ }\mu\text{m}$, 切削速度为 11 m/min 时, 切削力 F_x 和 F_y 可以降低 60%。

(3) 与普通铣削力信号相比, 超声振动铣削力信号的频谱特性发生明显改变。超声铣削力信号频谱图中既包含刀齿切入频率和主轴旋转频率等低频分量, 又包含超声加工高频振动分量。

(4) 超声振动对切屑的尺寸和形貌具有重要影响。普通铣削切屑表面非常粗糙且具有大量的连续带状条纹, 切屑发生严重的塑性变形; 超声铣削切屑的典型特征是切屑的表面分布着均匀的振动纹理, 与普通铣削切屑相比, 超声加工产生的切屑表面相对光滑和明亮, 其塑性变形也明显小于普通铣削切屑。

参 考 文 献

- [1] 康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术 [J]. 航空制造技术, 2012, 412(16): 44-49.
KANG Renke, MA Fujian, DONG Zhigang, et al. Ultrasonic assisted machining of difficult-to-cut material [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 412(16): 44-49.
- [2] 曹凤国. 超声加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
CAO Fengguo. Ultrasonic machining [J]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [3] BREHL D E, DOW T A. Review of vibration-assisted machining [J]. Precis. Eng., 2008, 32(3): 153-172.
- [4] ZHANG J, CUI T, GE C, et al. Review of micro/nano machining by utilizing elliptical vibration cutting [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 106(106): 109-126.
- [5] 张德远, 辛文龙, 姜兴刚, 等. 超声加工技术研究趋势 [J]. 电加工与模具, 2016(1): 11-13.
ZHANG Deyuan, XIN Wenlong, JIANG Xinggang, et al. Research trends of ultrasonic machining technology [J]. Electromachining and Mould, 2016(1): 11-13.
- [6] CHERN G L, CHANG Y C. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(6): 659-66.
- [7] JIN X, XIE B. Experimental study on surface generation in vibration-assisted micro-milling of glass [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 507-12.
- [8] DING H, IBRAHIM R, CHENG K, et al. Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel using two dimensional vibration-assisted micro-end-milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(12): 1115-1128.
- [9] KO J H. Application of ultrasonic vibration assistance into tooling axis direction in meso-scale milling [J]. International Journal of Abrasive Technology, 2012, 5(3): 213-222.
- [10] SHEN X H, ZHANG J H, LI H, et al. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1): 41-9.
- [11] SHEN X H, ZHANG J, XING D X, et al. A study of surface roughness variation in ultrasonic vibration-assisted milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5): 553-561.
- [12] ZARCHI M A, RAZFAR M, ABDULLAH A. Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1-4): 83-89.
- [13] ZHANG Y, ZHAO B, WANG Y, et al. Effect of machining parameters on the stability of separated and unseparated ultrasonic vibration of feed direction assisted milling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(2): 851-858.
- [14] LI K M, WANG S L. Effect of tool wear in ultrasonic vibration-assisted micro-milling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(6): 847-55.
- [15] MAUROTTO A, WICKRAMARACHCHI C. Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: A feasibility study[J]. Ultrasonics, 2016, 65: 113-120.
- [16] 张翔宇, 隋嵩, 张德远, 等. 高速超声振动切削钛合金

- 可行性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 120-127.
- ZHANG Xiangyu, SUI He, ZHANG Deyuan, et al. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 120-127.
- [17] 孙玉晶, 孙杰, 李剑峰. 钛合金铣削加工刀具磨损有限元预测分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 193-201.
- SUN Yujing, SUN Jie, LI Jianfeng. Finite element analysis on prediction of tool wear in milling titanium[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 193-201.
- [18] CHEN W, HUO D, HALE J, et al. Kinematics and tool-workpiece separation analysis of vibration assisted milling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 136: 169-178.
- [19] XIAO M, WANG Q, SATO K, et al. The effect of tool geometry on regenerative instability in ultrasonic vibration cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(5): 492-499.
-
- 作者简介: 倪陈兵, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为难加工材料超声振动辅助加工机理及工艺。
E-mail: nichenbing@126.com
- 朱立达(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为加工稳定性与精密加工技术、超声振动加工技术和智能诊断与信号处理。
E-mail: neulidazhu@163.com

第 8 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

基于双高斯分层表面理论的密封摩擦磨损研究

作 者: 胡松涛

毕业学校: 清华大学

指导教师: 刘向锋

机械密封作为旋转机械的关键部件, 广泛应用于核电源、石油化工、航空航天等领域。作为密封副的“指纹”, 端面形貌在摩擦磨损中形成机理与功能性能的揭示与利用, 是保证长使役周期内密封性能稳定可靠的一个关键问题。学者多以单层表面视角来认识表面, 大大增加了准确表征表面形貌特征并揭示其形成机理与功能性能的难度。论文基于双高斯分层表面理论提出适合于真实磨损表面的表征分析与数值仿真方法, 阐明表面形貌的流体润滑、粗糙峰接触和摩擦磨损性能与机理, 关联表面形貌与密封性能以探索密封性能劣化机制。论文对于改善密封性能乃至促进关键技术国产化具有重大工程借鉴价值; 丰富了流体密封技术及相关学科的基础理论体系, 具有重要科学意义。论文的主要工作与创新点有以下几点。

指出了表面的“指纹”角色, 发展了双高斯分层表面理论: 提出了基于表面混合理论的表面表征方法以解决 ISO 方法的不足, 提出了分量相关长度迭代求解的表面数值仿真方法以突破单层局限性。

证明了新表面理论的优越性, 提供了研究润滑、接触和摩擦磨损机理的新视角: 分层统计学接触模型消除了对于高斯分布假设的依赖, 分层表面参数演化模型解释了跑合与稳定阶段的成因。

实现了新表面理论的工程应用, 融合声发射改进了机械密封健康监测技术: 分层表面参数与密封性能的高度相关性有助于探究密封性能劣化机制, 声发射技术可作为表面的“指纹识别器”。