

难加工材料纵扭超声振动辅助铣削加工研究进展

牛秋林 戴福朋 荆露 王星华 刘俐鹏

(湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

摘 要 纵扭复合超声振动辅助铣削(LTUVAM)是在刀具轴向与扭转方向上施加高频微幅振动的一种辅助铣削技术,具有降低切削力与切削热、提高工件表面质量、提高表面残余压应力、减少刀具磨损等诸多优点。本文围绕难加工材料的铣削加工进行了系统综述。在设备制造方面,阐述了纵扭复合超声振动系统的结构设计方法与工作原理;在工艺开发方面,从LTUVAM的切削刃运动轨迹及切削特性入手,分析各类材料的切削加工性能,并总结了LTUVAM的优势及应用。最后,本文对LTUVAM的未来发展趋势进行展望。

关键词 纵扭复合超声振动辅助铣削, 难加工材料, 超声振动系统, 切削刃运动轨迹, 切削加工特性

中图分类号: TG506.5

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.001

A Review of Research on Longitudinal Torsional Ultrasonic Vibration-assisted Milling of Difficult to Machine Materials

NIU Qiulin DAI Fupeng JING Lu WANG Xinghua LIU Lipeng

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract Longitudinal torsional ultrasonic vibration-assisted milling (LTUVAM) is an auxiliary milling technology that applies high-frequency micro amplitude vibration in the axial and torsional directions of the tool. It has many advantages, such as reducing cutting force and cutting heat, improving the surface quality of the workpiece, increasing residual compressive stress on the surface, and reducing tool wear. This paper presents a systematic review on the milling of difficult to machine materials. In terms of equipment manufacturing, the structural design method and working principle of longitudinal torsional ultrasonic vibration system were described; In terms of process development, the cutting performance of various materials was analyzed from the cutting edge motion track and the cutting characteristics of LTUVAM. The advantages and applications of LTUVAM are summarized. Finally, this paper provides an outlook on the future development trends of LTUVAM.

Key words Longitudinal torsional ultrasonic vibration-assisted milling, Difficult to machine materials, Ultrasonic vibration system, Cutting edge motion track, Cutting characteristics

0 引言

随着现代制造业对材料及零部件性能要求的不断提高,许多均质合金材料(如铝合金、钛合金)和复合材料(如硅铝合金、铝基碳化硅、碳纤维增强复合材料)等难加工材料,因具有高硬度、高强度、高耐磨性、耐腐蚀性和抗疲劳性而被大量投入应用。然而,其拥有优异物理力学性能的同时也具有难切削加工性,传统加工中极易出现表面质量差、加工精度低、

刀具磨损严重等问题。同时,许多比强度高、结构刚度低的薄壁件、曲面件等难加工结构件在传统加工过程中极易出现零件变形较大,加工稳定性不高,颤振严重等现象,造成工件表面质量急剧下降。上述加工缺陷使得所生产零部件的精度和疲劳抗性降低,废品率升高,并大大增加了生产成本,严重限制了这些材料的发展与应用。因此,对制造技术进行革新,选择合适的加工方法以提高难加工材料的切

收稿日期: 2022-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(52075168); 湖南省研究生科研创新项目(CX20221051)

第一作者简介: 牛秋林, 1983年出生, 教授, 主要从事难加工材料高速切削与超声振动辅助加工方面的研究。E-mail: qlniu2009@163.com

削加工性具有重要意义。

此前,有学者采用非常规加工方法,如电解加工^[1]、电子束加工^[2]、电火花加工^[3]、离子束加工^[4]、激光加工^[5]等方法以实现上述难加工材料的精密高质加工,然而这些方法存在加工效率低、加工成本高等问题。美国学者最早采用超声振动进行玻璃的雕刻加工,第一次完成了超声辅助加工试验^[6],此后经过国内外学者长期研究,取得了较大进展。超声振动辅助切削是指通过超声振动系统将高频超声振动以一定方向施加到刀具或工件上。这种加工方法既保持了传统加工的灵活性与简便性,又因其不同的材料去除机制,从而具有独特的加工优势。超声振动根据振动模态不同,可分为单一超声振动(纵振、扭振、弯振)和复合超声振动(纵扭、纵弯、双弯、弯扭)。其中,纵扭复合超声振动辅助切削应用最为广泛,与常规超声辅助切削相比,其具有更高的加工效率,更高的加工精度及更高的加工质量^[7]。

同时,铣削加工因能保证较高的精度要求和加工效率,且适应性较广,已被广泛应用于航空航天制造业、汽车制造等高端领域^[8]。目前,国内外并未对纵扭复合超声振动辅助铣削(Longitudinal torsional ultrasonic vibration-assisted milling, LTUVAM)研究进展进行针对性讨论和系统性综述。因此本文首先从纵扭复合超声振动系统出发,阐述其工作原理;其次,对LTUVAM的运动轨迹、切削特性及其对难加工材料铣削加工性能进行了讨论;最后,对LTUVAM进行了总结与展望。

1 纵扭复合超声振动系统

纵扭复合超声振动系统是LTUVAM加工技术的核心,其功能结构的设计将直接影响超声加工质量与加工成本,主要由超声电源、超声电能传输装置、超声换能器及变幅杆、加工刀具组成。图1为纵扭复合超声振动系统示意图^[9]。

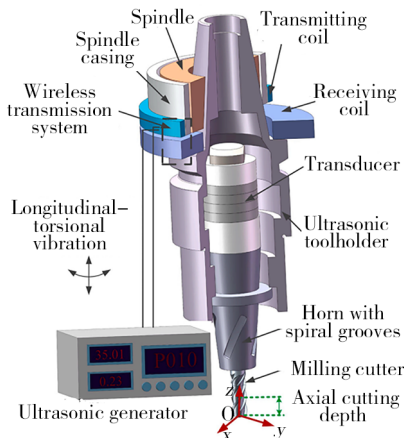


图1 纵扭超声振动系统示意图^[9]

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal torsional ultrasonic vibration system^[9]

1.1 超声电源

超声电源将电信号转换为与超声振子相匹配的高频交流电信号,从而为LTUVAM提供能量,主要由超声信号产生模块、功率放大模块、频率跟踪模块及外围电路组成。振幅控制和频率自动跟踪是超声电源的关键。随着载荷和刀具磨损量的变化以及超声系统热量的积累,系统的谐振频率发生漂移,进而导致超声振动幅值大大降低,加工稳定性变差。因此,Y. KUANG^[10]等开发了一种新型超声电源与测量系统,采用补偿电感的方法弥补了换能器的机械共振、零相位频率和最大导纳频率的差异。通过锁相环实现谐振跟踪,保持电路电流恒定以稳定换能器的振动速度。从而实现了超声系统的共振跟踪和振动稳定,确保了LTUVAM加工过程稳定高效且加工质量良好。王佳奇^[11]对超声电源进行了硬件结构设计与电路仿真分析,保证了超声电源输出功率可调与换能器恒幅控制,实现了高频输出特性及高精度频率追踪控制,确保了LTUVAM在难加工材料及薄壁件等弱刚度机械结构加工上的优越性能。

1.2 超声电能传输装置

超声电能传输装置可跟随铣床主轴高速旋转,并将超声电源产生的高频交流电信号传递给超声换能器。传统超声加工通常采用导电滑环方式,但由于在LTUVAM中主轴高速旋转,导电滑环磨损剧烈,目前已逐渐被非接触能量传输方式所取代。然而,非接触式能量传输系统传输效率较低。为此,X. M. ZHU^[12]等研究了超声辅助切削中切削力对能量传输系统传递效率、输出功率及功率因数的影响,研制出高效率、高功率因数和适应切削力变化的自适应输出功率非接触式能量传输系统。许磊等^[13]建立了共振式无线电能传输系统模型,通过试验研究表明该系统在径向可接收到稳定的超声电信号,与感应式无线供电方式相比,共振式无线供电方式传输效率和传输功率更大、传输距离更远、安装更加灵活,且加设磁芯和中继线圈可进一步改善系统传输性能。

1.3 超声换能器及变幅杆

超声换能器及变幅杆是纵扭复合超声振动系统中的关键部分,换能器可以将高频电能转化为机械振动。变幅杆主要有两个作用:一是放大机械振动质点的位移或速度,使超声波能量集中在一个小的区域,因此它也被称为超声波发射极或超声波集中器;二是用作机械阻抗转换器,即对换能器和声负载之间的阻抗进行匹配,使超声波能量更有效地从换能器传输到负载^[14]。为实现纵扭超声复合振动,超声换能器的研究主要集中于3种形式:贴片式、压电式及电磁换能器。

唐军^[15]提出一种基于 d_{31} 效应的贴片式纵扭复合

超声换能器,将4个压电陶瓷片与轴线夹角成20°均布在换能器外圆上,当施加简谐激励时,压电陶瓷片的变形可沿轴向与切向进行分解并在输出端产生纵

扭复合振动。图2为该超声换能器的振动模态。然而,为实现纵扭同频化,其变幅杆设计较为复杂,且机电效率较低。

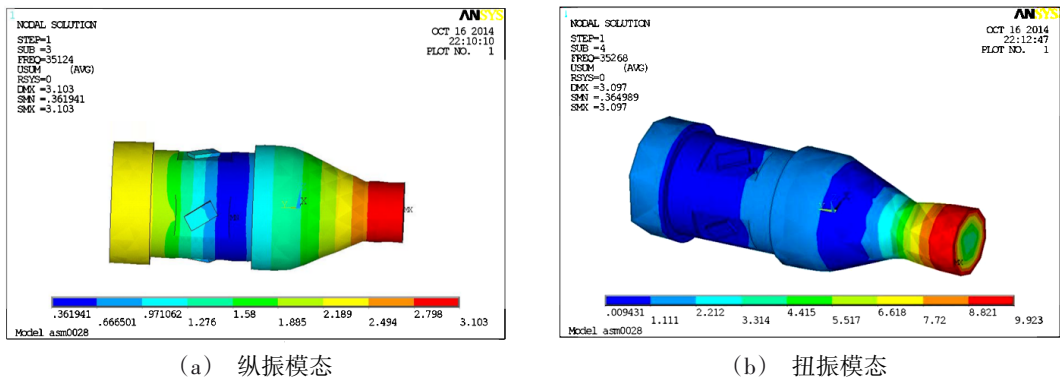


图2 贴片式纵扭复合超声换能器振动模态^[15]

Fig. 2 Vibration mode of patch-type longitudinal torsion composite ultrasonic transducer^[15]

M. R. KARAFI等^[16]进行了磁致伸缩共振扭转换能器的结构设计。将两个磁致伸缩贴片接合在换能器上,由线圈产生轴向磁场,两个永磁体产生周向磁场,在韦德曼效应与焦耳效应的作用下产生纵扭复合振动,图3为该扭转变换器的示意图。但这种换能器输出功率有限,且工作过程中产生大量热量,不适用于大功率铣削加工。

处激发整个换能器结构,从而实现纵扭复合振动,称为模态耦合式(图4方法1);另一种是通过斜槽(图4方法2)、螺旋槽(图4方法3)等特殊结构将压电陶瓷产生的纵向振动转变为纵扭复合振动,称为模态退化式^[18-19]。S. Y. LIN等^[20]利用轴向和切向极化压电陶瓷组合产生纵扭复合振动,并设计出一种指数型变幅杆以放大纵扭超声换能器的振幅。T. ASAMI等^[21]采用轴向和切向极化压电陶瓷双激励的方法单独制定了纵振与扭振的放大系数,提出一种带有空心部分的阶梯变幅杆,并计算出空心部分变幅杆的放大因子。但由于造价昂贵,此方法并未得到广泛应用。目前,应用最广泛的为单激励换能器及开槽式变幅杆。T. CHEN等^[22]设计了一种斜槽纵扭超声振动系统,研究了斜槽结构参数对纵扭振动共振频率和幅值的影响。H. B. LI等^[23]提出了一种带螺旋槽的超声换能器设计模型,并研究了螺旋槽结构参数对共振频率与纵扭幅值的影响。该换能器与带斜槽的换能器相比,具有更高的扭转分量,但螺旋槽加工更为困难。为改善基于斜槽结构和螺旋槽结构的模态退化式纵扭复合超声振动系统存在的扭转分量

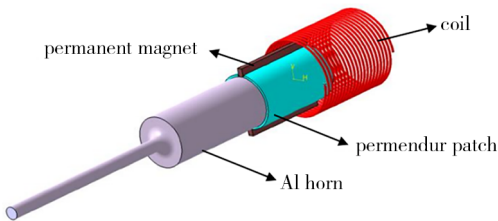


图3 磁致伸缩换能器装配图^[16]

Fig. 3 Magnetic expansion transducer assembly diagram^[16]

夹心式压电换能器最早于1917年由法国人保罗·朗之万提出^[17],他利用两块钢板将压电陶瓷材料夹在中心,并应用于水下探测。纵扭复合振动压电换能器主要有两种研究方向,一种是通过一组纵向振动压电陶瓷和一组扭转振动压电陶瓷在同一频率

Method 1	Method 2	Method 3

图4 用压电换能器产生纵扭复合超声振动的不同方法^[19]

Fig. 4 Different methods of generating longitudinal torsional composite ultrasonic vibration with piezoelectric transducer^[19]

较小、结构复杂等问题,林基艳^[24]等对斜槽式变幅杆进行了改进,通过在变幅杆的圆锥部分,加工6个半径为 r_z 、高度为 h_z 的空气圆柱孔,以及5个围绕中心圆柱体的高度为 h_y 、扇形角为 θ 的周期性分布的扇形孔,提出了基于新型柱孔式复合变幅杆的模式退化

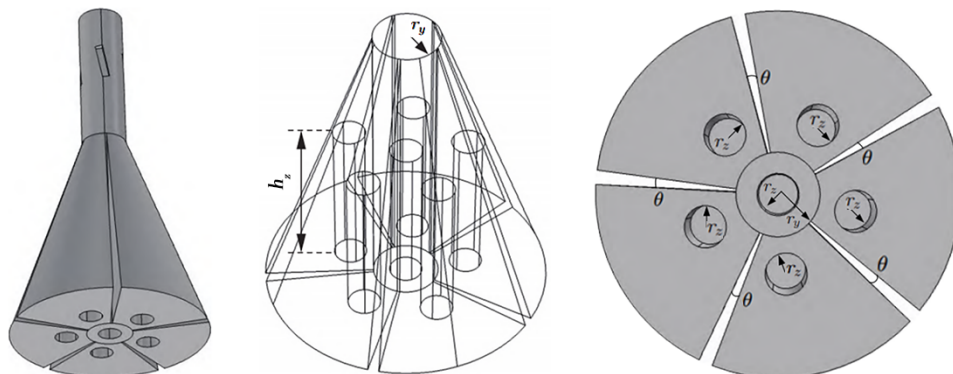


图5 新型柱孔式纵扭转换复合变幅杆的结构^[24]

Fig. 5 Structural diagram of a new cylindrical holes longitudinal torsional conversion composite horn^[24]

综上可知,目前针对纵扭复合超声振动系统,研究者主要对其中个别部件独立研究,涉及振动系统中各部件的相关理论缺乏系统性,且振动系统相关参数之间的耦合机制仍不清楚,缺乏整体性研究。同时,应用最广泛的模态退化式压电换能器及变幅杆研究均是通过有限元分析或试验方法进行,以探究斜槽或螺旋槽的结构参数对纵扭共振的影响,并未提出根本原理。

2 纵扭复合超声振动辅助铣削切削特性

$$\begin{cases} x(t) = v_f \cdot t/60 + r \cdot \sin(2\pi nt/60 + B \cdot \cos(2\pi ft + \theta_2)/r) \\ y(t) = r \cdot \cos(2\pi nt/60 + B \cdot \cos(2\pi ft + \theta_2)/r) \\ z(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \theta_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_f 为进给速度, r 为铣刀半径, n 为主轴速度, f 为超声振动频率, A 为超声纵向振动振幅, B 为超声扭转振动振幅, θ_1 为超声纵向振动初始相位, θ_2 为超声扭转振动初始相位。该轨迹方程充分考虑了不同超声振动方向的初始相位,以扭转振幅与半径之比来表示超声扭转振动所引起的旋转角变化,能够准确反映切削刃的运动轨迹,被许多研究者采用^[26-30]。图7显示了CM和LTUVAM的切削刃运动轨迹。

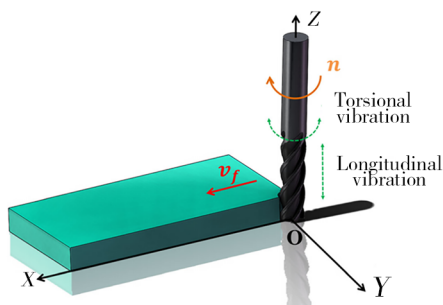


图6 LTUVAM切削刃模型^[25]

Fig. 6 LTUVAM cutting blade model^[25]

式纵扭复合超声振动系统,其复合变幅杆各部分的结构如图5所示。结果表明,引入新型柱孔式复合变幅杆的输出端面的剪切应力、旋转角度得到了大幅提升,能够有效地提高纵扭振动的转换效率。

由于在刀具上施加了高频微幅振动,与常规铣削(Conventional milling, CM)相比,LTUVAM具有不同的运动方式,从而导致了不同的切削特性,直接影响材料的切削加工性能。因此,研究LTUVAM的切削特性,对于其在工业中的应用有着重大意义。

2.1 纵扭复合超声振动辅助铣削切削刃运动轨迹

J. L. TONG等^[25]建立了如图6的切削模型,并推导出LTUVAM的切削刃轨迹方程如下:

$$r=3 \text{ mm}, n=1500 \text{ r/min}, v_f=300 \text{ mm/s}, \\ A=4 \text{ } \mu\text{m}, B=3 \text{ } \mu\text{m}, f=33 \text{ kHz}, \theta_1=0^\circ, \theta_2=0^\circ$$

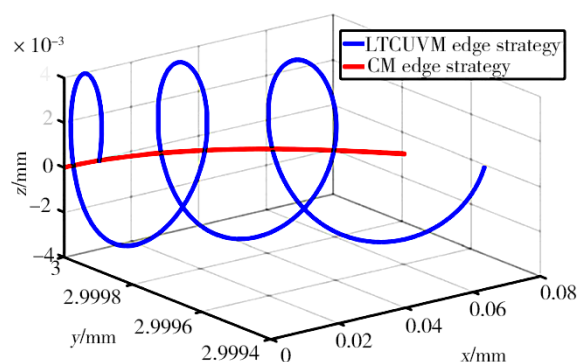


图7 CM和LTUVAM切削刃轨迹^[25]

Fig. 7 CM and LTUVAM cutting blade tracks^[25]

根据式(1)可知,XY平面内刀具的振动位移为:

$$S = B \cos(2\pi ft + \theta_2) \quad (2)$$

对式(2)进行求导,可得刀具振动速度 v_v 及加速度 a_v 为:

$$v_v = -2\pi f B \sin(2\pi ft + \theta_2) \quad (3)$$

$$a_v = -4(\pi f)^2 B \sin(2\pi ft + \theta_2) \quad (4)$$

2.2 纵扭复合超声振动辅助铣削运动特性

LTUVAM具有4点运动特性:周期性接触分离特性、冲击特性、变速特性以及熨压特性。

周期性接触分离特性是指刀-屑、刀-工之间产生周期性的分离,有利于降低切削区域温度,保证刀具锋利性,促进切屑排出,抑制积屑瘤形成。未切削时间(即分离时间)是降低切削力与切削热的重要影响因素,受超声波频率 f 、超声波振幅 A 和 B 、刀具螺旋角 β 和主轴转速 n 的影响,当主轴转速超过临界转速时,刀具与工件将不再发生分离过程^[31]。

LTUVAM中,切削刃将具有加速度 a_v ,使得刀具具有冲击特性。童志强等^[32]指出,采用纵扭共振旋转超声端铣碳纤维复合材料时,刀具的瞬时冲击使纤维与基体瞬时分离,减少了表面基体脱落,纤维以剪切断裂为主,提高了表面质量。Z. L. SHI等^[29]进行高体积分数SiC_p/Al复合材料LTUVAM研究,发现在超声振动高频冲击下,SiC颗粒的破碎细化程度更高,破碎深度较小且结构相对完整。这有利于SiC颗粒塑性去除,从而提高表面质量。扭转振动的冲击机制将改变切屑的自然形成,促进切屑折断,营造更好的断屑条件^[33]。

综上可知,刀具振动速度及加速度的大小和方向时刻改变,具有变速特性,从而使得刀具实际工作角发生改变,提高实际切削速度,在主轴转速较低的情况下仍能获得高速切削效果。卫宫^[34]指出,超声纵扭振动能使刀具在切削区域内的工作角度增大,并均大于刀具的标注角度,整体来看切削刃更为锋利,有助于切削性能的改善和提升;当刀具处于非切削状态时,刀具实际工作角度相继减小,相当于切削刃变为滞钝,与切屑接触时能够保护刀具,延长刀具寿命。

从LTUVAM的运动轨迹可知,刀具在周期性往复运动的同时将对已加工表面进行往复熨压。张存鹰^[35]等开展了纵扭复合超声端铣TC4钛合金的试验研究,结果表明,随着扭纵幅值比增加,切削刃在加工表面的熨压效果增强,纵振形成的凹坑边界逐渐弱化,网状凹坑向片状纹理、条状形貌转变。童志强^[32]等在纵扭共振旋转超声端铣碳纤维复合材料的试验研究中指出,后刀面会对已加工表面产生熨压作用,有利于填平基体凹坑,熨压基体凸起,促进纤维束和基体结合,使加工表面更加平整。

然而,针对LTUVAM切削特性,学者们只考虑了刀具铣削运动及超声振动的共同作用,而忽略了机床振动与刀具跳动等外界因素对运动轨迹及性能的影响,仍需要进一步修正。并且,目前缺少在实际

LTUVAM加工中观测到的刀具运动特性,多数研究是通过理论及仿真进行理想刀具运动轨迹模型的建立,关于超声振动在实际铣削中的微观作用机制仍需深入观测与验证。

3 纵扭复合超声振动辅助铣削技术的应用

LTUVAM已被应用于各类合金材料及复合材料等难加工材料的铣削加工,并表现出了独特的加工优势,包括提高表面质量、提高残余压应力、降低亚表层损伤、减少刀具磨损等。

3.1 表面与亚表面质量

钛合金由于弹性模量低、切削温度高,易在加工表面产生残余拉应力,是一种典型的难加工材料。G. F. GAO等^[9]在扭纵比一定的情况下,研究了不同超声纵振幅值 A_1 与扭振幅值 A_2 对TC4钛合金铣削加工的表面质量的影响,如图8所示。LTUVAM独特的运动轨迹,使得钛合金表面产生了鱼鳞状微纹理结构。且随着振幅增大,残差高度减弱,纹理均匀性提高。但是随着超声振幅的进一步增大,材料剪切逐渐转变为挤压,降低了加工表面平整度,并破坏了纹理均匀性。Y. PANG等^[36]认为LTUVAM在TC4钛合金表面所形成的表面织构具有较高的周期性和完整性,可有效调整表面摩擦学性能。S. Q. QIN等^[28]发现与CM相比,LTUVAM能有效提高TC4钛合金表面显微硬度,降低交变载荷引起的变形量,提高部件的抗疲劳性能和耐磨性。Y. NIU等^[37-38]采用了LTUVAM加工工艺,以实现TC4钛合金的压应力和抗疲劳制造。研究建立了三维铣削仿真模型与加工诱导残余应力的理论预测模型,并将残余应力模拟过程分为切削阶段、卸载阶段、约束过渡阶段和冷却阶段。试验结果表明,在LTUVAM过程中,机械应力绝对值大于CM,热应力绝对值小于CM,使得材料表面残余压应力与压应力层深度显著提高,且所建立的模型具有较高的预测精度。W. B. XIE等^[39]采用LTUVAM工艺对TC18钛合金进行端面铣削,研究了超声振幅、切削速度和进给速度对TC18表面残余压应力的影响,并与CM进行了比较。试验结果表明,残余压应力随着超声振幅的增大而增大,随着切削速度和进给速度的增大而减小,在任何情况下,LTUVAM产生的残余压应力始终远大于CM。综上所述,采用LTUVAM可有效调整TC4钛合金表面摩擦磨损性能,并提高表面显微硬度与残余压应力。

钛合金薄壁件由于其壁厚较薄、结构刚度低,在铣削过程中变形严重,加工质量差。J. L. TONG等^[40-41]采用有限元分析法揭示了CM和LTUVAM在加工TC4钛合金薄壁件过程中的显著差异,证明了LTUVAM可有效提高加工稳定性,降低平均铣削力、

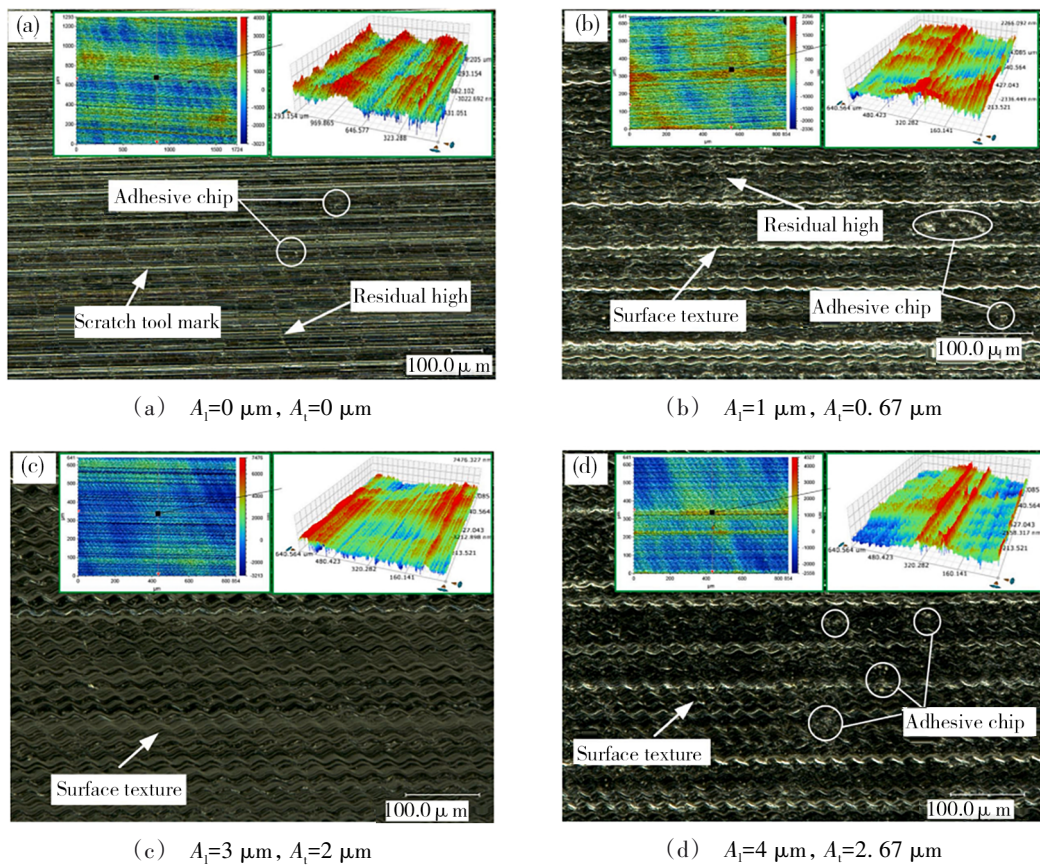


图8 不同振幅下Ti-6Al-4V的表面形貌^[9]

Fig. 8 Surface topography of Ti-6Al-4V at different amplitudes^[9]

表面粗糙度及颤振高度,并通过试验研究了铣削参数和超声参数对表面形貌的影响。姚成霖^[26]采用球头铣刀对TC4钛合金曲面进行了LTUVAM试验研究,发现在一定纵扭振幅内,振动作用可以显著提高工件表面质量,降低表面粗糙度。Z. M. ZHANG等^[42]对TC4钛合金弯曲薄壁件进行了CM与LTUVAM的对比分析,研究了不同工艺参数对TC4钛合金薄壁件残余应力的影响。试验结果表明LTUVAM是加工钛合金曲面薄壁零件的有效方法,与CM相比可以获得更大的残余压应力,并提高加工表面完整性。由此可见,采用LTUVAM加工TC4钛合金薄壁件时能有效提高加工稳定性,获得更好的表面质量。

铝合金黏度高且在切削过程中塑性变形严重,加工表面质量差。H. T. WANG等^[43]对2195铝锂合金进行了CM和LTUVAM对比研究,得出LTUVAM可有效降低切削力,减少表面切屑积累和刀具划痕,形成规则表面轮廓的结论。C. Y. ZHAO等^[44]研究了LTUVAM中不同加工参数对7075铝合金表面微观结构和性能的影响,发现超声振幅对表面粗糙度、干摩擦系数和润滑摩擦系数的影响最大;在纵扭转化比恒为0.25, $v=40$ m/min, $f=4$ $\mu\text{m}/z$ 的情况下,随着超声纵向振幅 A 的增加,表面耐磨性提高,表面水接触角

先增大后减小,但仍大于CM的水接触角(图9)。该试验证明了采用LTUVAM可在不改变化学性能的前提下,使用亲水材料制备出疏水零部件的可行性。

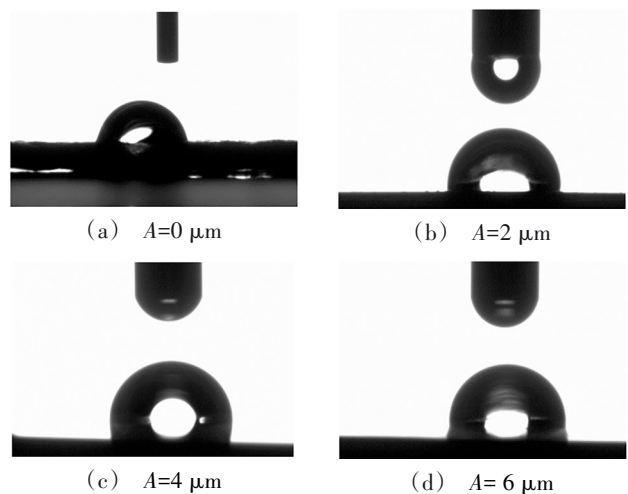


图9 不同振幅下的水接触角^[44]

Fig. 9 Water contact angles at different amplitudes^[44]

SiC_p/Al复合材料具有高脆性和低韧性,采用传统加工方法时加工效率低,表面质量差。P. C. PENG等^[45]研究了SiC_p/Al复合材料在LTUVAM和CM过程中边缘缺陷的形成机理和缺陷特征。结果表明,边缘缺陷形式包括基体撕裂、边缘断裂、毛刺、凸起、裂

纹,主要出现在工件进口和出口位置,且在一定超声振幅范围内,LTUVAM可有效降低表面颗粒破碎率和铣削力,减缓裂纹扩展,抑制毛刺产生,增加材料的塑性流动,获得更好的表面形貌与边缘质量。Y. Q. LI等^[46]在纵扭比相同的情况下,进行了不同超声振幅对SiC_p/Al复合材料表面铣削性能的影响研究,认为具有适当振幅的LTUVAM方法不仅具有滑擦和犁削作用,而且在轴向和周向上的高频往复旋转振动还赋予了刀具二次加工特性,可有效提高表面质量。Z. L. SHI等^[29]指出LTUVAM可以软化SiC_p/Al复合材料,在适当的超声振幅下可以更好的保持碳化硅颗粒的结构完整性,降低破碎率和表面粗糙度值,提高表面质量。岳广喜^[47]研究了LTUVAM对高体分SiC_p/Al复合材料亚表面损伤的影响,试验结果见图10。由图10(a)可知LTUVAM亚表面凹坑数量较少,颗粒以剪断为主,表面平整性好。而图10(b)中CM亚表

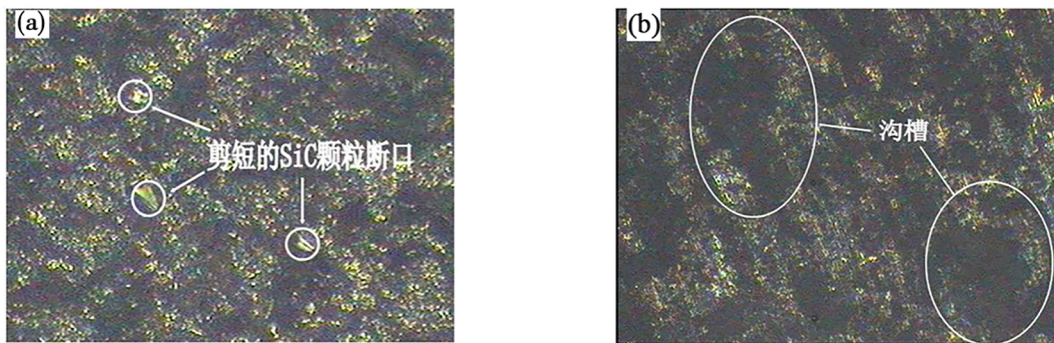


图10 高体分SiC_p/Al材料亚表面损伤^[47]

Fig. 10 Subsurface damage of high body SiC_p / Al material^[47]

J. XU等^[49]建立了一种数值模型,以评估刀具在振动和无振动情况下芳纶纤维增强材料的亚表层损伤行为。结果表明:CM后,亚表层纤维发生严重弯曲变形(张力诱导);LTUVAM后,亚表层纤维发生轻微压缩变形,产生了压应力。压应力可抑制裂纹扩展,且刀具的振动释放了集中应力,使得LTUVAM中的亚表层损伤深度减少了25%。

综上所述,LTUVAM能有效提高材料表面质量,但这种优越性并不是在所有条件下都能体现,超声振幅过大,会使得刀具切削刃与后刀面过度冲击材料表面,恶化材料表面质量。且LTUVAM可以有效降低材料的残余拉应力,提高残余压应力,并降低材料的亚表层损伤。然而,关于LTUVAM碳/碳化硅、芳纶纤维增强材料等复合材料的研究并未引起重视,目前尚未开展广泛研究,LTUVAM对这些复合材料表面及亚表面质量的影响规律尚不明确,有待学者们继续深入研究。

3.2 刀具磨损

钛合金具有高摩擦因数及高切削热,切削过程

面有大量凹坑,颗粒以破碎为主,铣刀对加工表面的挤压摩擦作用剧烈。因此,LTUVAM可提高SiC_p/Al复合材料表面质量,降低亚表面损伤。

采用常规方法加工碳/碳化硅时加工效率偏低,表面质量较差,已无法满足现代制造业的加工要求。唐军^[15]进行LTUVAM与CM碳/碳化硅的对比试验,结果表明LTUVAM可以显著降低工件表面粗糙度,提高工件表面质量。J. CHEN等^[48]采用PCD刀具对碳/碳化硅复合材料进行了LTUVAM研究,发现碳/碳化硅复合材料的断裂机制、热应力和刀具锤击效应都会影响其加工表面的残余应力。材料的脆性断裂和铣削过程中的热应力会产生残余拉应力,然而LTUVAM中刀具的冲击特性可有效降低残余拉应力。在纵扭比一定的情况下,随着超声振幅的增大,材料表面的残余拉应力逐渐消失,超声振幅进一步增大,残余压应力产生并逐渐增大。

易造成严重的刀具磨损。P. M. RINCK^[50]等针对TC4钛合金开展了CM、纵向超声振动辅助铣削(Longitudinal ultrasonic vibration-assisted milling, LUVAM)以及LTUVAM的对比试验。发现进行侧铣时,LTUVAM由于较低的切削力和切削温度,以及刀具和工件之间较低的摩擦系数,刀具磨损量最小,而CM刀具磨损量最大;进行槽铣时,与CM相比,LUVAM和LTUVAM均显示出较高的后刀面磨损,这是由于超声振动中的纵振部分会在铣刀后刀面上产生犁削力,使得后刀面磨损加剧,但LTUVAM的刀具磨损量仍小于LUVAM,且CM中切屑黏结面积最大。G. F. GAO等^[9]对TC4钛合金开展了CM与LTUVAM的对比试验。在纵扭比一定的情况下,随着超声振动幅值增加,刀具后刀面磨损量先降后升,但LTUVAM后刀面磨损量皆小于CM。P. CHEN等^[51]进行了TC4钛合金的LTUVAM试验。刀具磨损分析表明:与CM相比,LTUVAM中刀具独特的间歇切削特性使刀具和工件循环分离和接触,使切削面积相同时,LTUVAM的刀具磨损值明显小于CM(图11)。

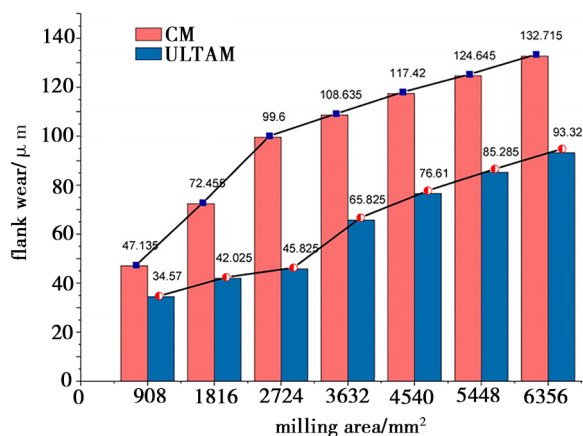


图 11 不同铣削面积时 CM 与 LTUVAM 刀具磨损对比^[51]

Fig. 11 Comparison of CM and LTUVAM tool wear at different milling areas^[51]

碳/碳化硅材料的高脆性和高硬度是造成铣削过程中刀具磨损的主要原因。唐军^[15]采用 CM 与 LTUVAM 对碳/碳化硅材料进行切削加工,结果表明在 LTUVAM 下,刀具对工件的高频断续切削使得切削热快速散出,降低刀尖与切削刃的磨损程度。且周期性接触分离特性促进了切屑的排出,降低了前刀面的点蚀作用,并削弱了碳纤维束对刀具后刀面的挤压摩擦,使得铣刀后刀面上沟槽的深浅、宽窄以及分布情况都更加均匀。

碳纤维复合材料(CFRP)具有各向异性,硬度大且导热性差,铣削过程中刀具磨损严重。童志强^[52]开展了 CFRP 的 LTUVAM 试验研究。与 CM 相比,LTUVAM 使得刀具后刀面对已加工表面有效熨压,减少了纤维束的裸露,降低了刀具直接与纤维束的接触和摩擦,从而减少了刀具磨损。超声周期性振动能够使得高强度高硬度的碳纤维碎状颗粒脱离刀面,减少刀具磨粒磨损。且 LTUVAM 降低了刀具与切屑之间的作用力及摩擦,减少了刀尖附近区域的磨损。

因此,LTUVAM 能有效减少刀具磨损。然而,文献^[50]中 LTUVAM 钛合金时反而后刀面磨损更大,这是因为其在研究刀具磨损时采用了较大的超声纵振振幅(达 12 μm),加剧了后刀面对已加工表面的冲击。可见,合理选用加工参数不仅可以提高表面质量,也能减少刀具磨损,进一步说明了开发高扭转比超声加工系统在工业应用中的重要性。同时,开展更多难加工材料的 LTUVAM 试验并研究其刀具磨损状态,对于 LTUVAM 的广泛应用具有重要意义。

4 结语

现有研究表明,采用 LTUVAM 铣削难加工材料具有明显优势,可显著提高零件加工质量和刀具使用寿命,是高质高效加工难加工材料的有效方法。但是目前仍存在许多问题需要进一步深入研究,主

要包括以下几个方面。

(1)在高速与超高速铣削中采用 LTUVAM 工艺的刀具-工件接触分离特性不再显著。开发具有更高振动频率、更高机电转化效率(如开发新型材料的压电陶瓷)和更高扭转比(如设计变幅杆新结构)的超声纵扭振动系统是解决这一问题的有效途径,可以进一步提高 LTUVAM 的切削工艺性能。

(2)LTUVAM 运动轨迹对其切削效果具有决定性影响,但目前在 LTUVAM 轨迹分析时忽略了机床振动与刀具跳动,使得未切削时间的计算产生一定偏差。建立更加准确的 LTUVAM 运动轨迹模型,并能适时调整 LTUVAM 的运动轨迹,对有效提升 LTUVAM 加工工艺的高质高效切削性能具有重要意义。

(3)将 LTUVAM 应用于更多难加工材料的切削加工,并对这些材料进行系统性研究,对促进 LTUVAM 的广泛应用具有重要意义。同时,针对复杂曲面零件和薄壁件的铣削加工,可以将 LTUVAM 技术与五轴机床相结合,进一步提升复杂曲面零件和薄壁件的加工质量与加工效率。

参考文献

- [1] SARKAR B R, DOLOI B, BHATTACHARYYA B. Electrochemical discharge micro-machining of engineering materials [M]. Non-traditional Micromachining Processes. Springer, Cham, 2017: 367-392.
- [2] MANJIAH M, NARENDRANATH S, BASAVARAJAPPA S. Review on non-conventional machining of shape memory alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(1): 12-21.
- [3] AGARWAL N, SHUKLA S, AGARWAL V. Investigation of material removal method in EDM for non-conductive materials [J]. Eur J Adv Eng Technol, 2015, 2(4): 11-13.
- [4] GUENOLE J, PRAKASH A, BITZEK E. Atomistic simulations of focused ion beam machining of strained silicon [J]. Applied Surface Science, 2017, 416: 86-95.
- [5] PARANDOUSH P, HOSSAIN A. A review of modeling and simulation of laser beam machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 85: 135-145.
- [6] THOE T B, ASPINWALL D K, WISE M L H. Review on ultrasonic machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(4): 239-255.
- [7] 闫晓东. 纵扭复合型超声换能器的设计研究 [D]. 北方工业大学, 2015.
- [8] YAN X D. The design and research of the longitudinal-torsional composite ultrasonic transducer [D]. North China University of Technology, 2015.
- [9] 苏永生. 铣削 Cr12 的动态铣削力试验研究 [D]. 天津理工大学, 2011.
- [10] SU Y S. Experimental study on milling force of milling Cr12 [D]. Tianjin University of Technology, 2011.

- [9] GAO G F, XIA Z W, SU T T, et al. Cutting force model of longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling Ti-6Al-4V based on tool flank wear [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291: 117042.
- [10] KUANG Y, JIN Y, COCHRAN S, et al. Resonance tracking and vibration stabilization for high power ultrasonic transducers [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 187-194.
- [11] 王佳奇. 纵扭共振超声波发生器设计及辅助铣削工艺过程仿真研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG J Q. Longitudinal-torsional resonance ultrasonic generator design and simulation research on auxiliary milling process [D]. Harbin Institute of Technology, 2020.
- [12] ZHU X M, LIN B, LIU L P, et al. Power transfer performance and cutting force effects of contactless energy transfer system for rotary ultrasonic grinding [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 2785-2795.
- [13] 许磊. 超声辅助加工共振式无线电能传输系统的研究与开发[D]. 湖南科技大学, 2017.
- XU L. Research and development of ultrasonic assisted machining wireless power transmission system based on magnetically-coupled resonant [D]. Hunan University of Science and Technology, 2017.
- [14] LIU J, ZHANG D Y, QIN L G, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 53(1): 141-150.
- [15] 唐军. 碳/碳化硅材料纵扭复合超声铣削系统及加工稳定性的研究[D]. 河南理工大学, 2015.
- TANG J. Study on the longitudinal-torsional composite ultrasonic milling system of carbon/silicon carbide and machining stability [D]. Henan Polytechnic University, 2015.
- [16] KARAFI M R, GHODSI M, HOJJAT Y. Development of magnetostrictive resonant torsional vibrator [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(9): 1-8.
- [17] 贾宝贤, 边文凤, 赵万生, 等. 压电超声换能器的应用与发展[J]. *压电与声光*, 2005(02): 131-135.
- JIA B X, BIAN W F, ZHAO W S, et al. Application and development of piezoelectric ultrasonic transducers [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005(02): 131-135.
- [18] 吴陈军. 纵扭共振超声铣削系统研制及其加工实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- WU C J. Design and experimental study of longitudinal-torsional vibration assisted milling system [D]. Harbin Institute of Technology, 2018.
- [19] RINCK P M, SITZBERGER S, ZAEH M F. Actuator design for vibration assisted machining of high performance materials with ultrasonically modulated cutting speed [C]. *Fourth European Seminar on Precision Optics Manufacturing*. SPIE, 2017, 10326: 68-75.
- [20] LIN S Y, GUO H, XX J. Actively adjustable step-type ultrasonic horns in longitudinal vibration [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 419: 367-379.
- [21] ASAMI T, MIURA H. Design and experimental investigation of stepped horn with a hollow part to allow individual design of amplitude amplification factors for longitudinal-torsional vibration source [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022.
- [22] CHEN T, LIU S L, LIU W, et al. Study on a longitudinal-torsional ultrasonic vibration system with diagonal slits [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(7): 1305-1310.
- [23] LI H B, CHEN T, SONG H, et al. Design and experimental study of longitudinal-torsional ultrasonic transducer with helical slots considering the stiffness variation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(9): 3093-3107.
- [24] 林基艳, 林书玉. 新型柱孔式模式转换型纵-扭复合模态超声振动系统[J]. *应用声学*, [2023-01-13]: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2121.04.20220829.1848.004.html>.
- LIN J Y, LIN S Y. Design of a new cylindrical holes mode conversion longitudinal torsional composite mode ultrasonic vibration system [J]. *Journal of Applied Acoustics*: 1-8 [2023-01-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2121.04.20220829.1848.004.html>.
- [25] TONG J L, ZAI P H, CHEN P, et al. Stiffness enhancement analysis of ultrasonic-assisted milling titanium alloy curved thin-walled parts [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(1): 267-277.
- [26] 姚成霖. 超声波辅助铣削钛合金曲面加工特性研究[D]. 河南理工大学, 2018.
- YAO C L. Research on characteristic of ultrasonic assisted milling on titanium alloy sculptured surfaces [D]. Henan Polytechnic University, 2018.
- [27] 许东辉. 变螺旋铣刀超声纵扭复合振动铣削铝合金 Al7050-T7451 表面质量研究[D]. 河南理工大学, 2020.
- XU D H. Study on surface quality of Al7050-T7451 milled by ultrasonic longitudinal torsional coupled vibration with variable helix milling cutter [D]. Henan Polytechnic University, 2020.
- [28] QIN S Q, ZHU L D, WIERCIGROCH M, et al. Material removal and surface generation in longitudinal-torsional ultrasonic assisted milling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 227: 107375.
- [29] SHI Z L, XIANG D H, FENG H R, et al. Finite element and experimental analysis of ultrasonic vibration milling of high-volume fraction SiC_p/Al composites [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22(10): 1777-1789.
- [30] XIANG D H, LI B, PENG P C, et al. Study on formation mechanism of edge defects of high-volume fraction SiC_p/Al composites by longitudinal-torsional ultrasonic vibration-assisted milling [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*,

2022,236(11):6219-6231.

[31] WU C J, CHEN S J, XIAO C W, et al. Longitudinal-torsional ultrasonic vibration-assisted side milling process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233 (10): 3356-3363.

[32] 童志强,皮钧. 纵扭共振旋转超声端铣碳纤维复合材料的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35 (03): 425-430.

TONG Z Q, PI J. Experimental study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic face milling of CFRP [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(03):425-430.

[33] REN W F, XU J K, LIN J Q, et al. Research on homogenization and surface morphology of Ti-6Al-4V alloy by longitudinal-torsional coupled ultrasonic vibration ball-end milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1): 301-313.

[34] 卫官. 超声振动铣削钛合金曲面薄壁件切削力特性研究[D]. 河南理工大学, 2019.

WEI G. Research on cutting force characteristics in ultrasonic vibration milling of titanium alloy curved thin-walled parts[D]. Henan Polytechnic University, 2019.

[35] 张存鹰,赵波,王晓博. 纵扭复合超声端面铣削表面微结构建模与试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 52-63, 79.

ZHANG C Y, ZHAO B, WANG X B. Modeling and experiment of surface microstructure by longitudinal-torsional compound ultrasonic end milling [J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 52-63, 79.

[36] PANG Y, FENG P F, WANG J J, et al. Performance analysis of the longitudinal-torsional ultrasonic milling of Ti-6Al-4V [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(5): 1255-1266.

[37] NIU Y, JIAO F, ZHAO B. A novel 3D finite element simulation method for longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(1): 385-400.

[38] NIU Y, JIAO F, ZHAO B, et al. Theoretical investigation of machining-induced residual stresses in longitudinal torsional ultrasonic-assisted milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(11): 3689-3705.

[39] XIE W B, WANG X K, ZHAO B, et al. Surface and subsurface analysis of TC18 titanium alloy subject to longitudinal-torsional ultrasonic vibration-assisted end milling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 929: 167259.

[40] TONG J L, WEI G, ZHAO L, et al. Surface microstructure of titanium alloy thin-walled parts at ultrasonic vibration-assisted milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(1):1007-1021.

[41] TONG J L, ZHANG Z P, CHEN P, et al. Study on

surface morphology of titanium alloy curved thin-walled parts by longitudinal-torsional composite ultrasonic assisted milling [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 316-326.

[42] ZHANG Z M, TONG J L, ZHAO J S, et al. Experimental study on surface residual stress of titanium alloy curved thin-walled parts by ultrasonic longitudinal-torsional composite milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(4):1021-1035.

[43] WANG H T, ZHANG S L, LI G X. Experimental study on ultrasonic-assisted end milling forces in 2195 aluminum-lithium alloy[J]. Materials, 2022, 15(7): 2508.

[44] ZHAO C Y, WANG X B, ZHAO B, et al. Microstructure of high-performance aluminum alloy surface processed by the single-excitation same-frequency longitudinal-torsional coupled ultrasonic vibration milling [J]. Materials, 2018, 11(10): 1975.

[45] PENG P C, XIANG D H, LEI X F, et al. Study on the edge defects of high volume fraction 70% SiC_p/Al composites in ultrasonic-assisted milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022: 1-14.

[46] LI Y Q, XIANG D H, FENG H R, et al. Surface characteristics investigation of ultrasonic longitudinal-torsional milling of high-volume fraction SiC_p/Al [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7): 2119-2130.

[47] 岳广喜. 超声纵一扭振动高速铣削高体分 SiC_p/Al 复合材料的试验研究[D]. 河南理工大学, 2012.

YUE G X. Experimental research on high volume fraction SiC_p/Al composite with ultrasonic longitudinal-torsional vibration high-speed milling[D]. Henan Polytechnic University, 2012.

[48] CHEN J, MING W W, AN Q L, et al. Mechanism and feasibility of ultrasonic-assisted milling to improve the machined surface quality of 2D C_f/SiC composites[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 15122-15136.

[49] XU J, FENG P F, FENG F, et al. Subsurface damage and burr improvements of aramid fiber reinforced plastics by using longitudinal-torsional ultrasonic vibration milling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117265.

[50] RINCK P M, GUERAY A, KLEINWORT R, et al. Experimental investigations on longitudinal-torsional vibration-assisted milling of Ti-6Al-4V [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(11):3607-3618.

[51] CHEN P, TONG J L, ZHAO J S, et al. A study of the surface microstructure and tool wear of titanium alloys after ultrasonic longitudinal-torsional milling [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 1-11.

[52] 童志强. 纵扭共振旋转超声加工碳纤维复合材料的试验研究[D]. 集美大学, 2014.

TONG Z Q. Study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic machining of carbon fiber composites [D]. Jimei University, 2014.