

航空先进材料旋转超声椭圆振动加工研究进展*

王健健^{1,2}, 张建富¹, 冯平法^{1,3}

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

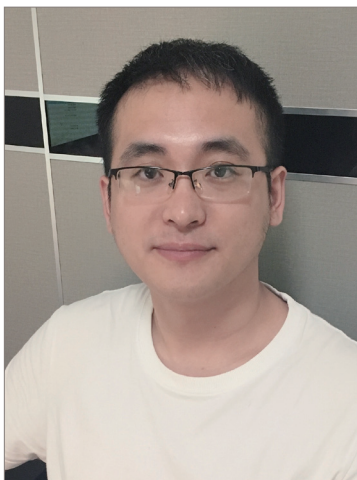
2. 香港中文大学机械与自动化工程学系, 香港 999077;

3. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055)

[摘要] 旋转超声加工是航空先进材料高效精密低损伤加工的有效方法。在传统的旋转超声加工中, 刀具在高速旋转的同时沿着其轴线做超声频率的一维纵向振动。近年来, 出现了旋转超声椭圆振动加工这种新型的旋转超声加工工艺, 它利用刀具的二维椭圆振动代替传统的一维纵向振动, 以进一步提高旋转超声加工的工艺性能。自旋转超声椭圆振动加工技术提出以来, 国内外学者开展了大量的相关研究工作。本研究在简要概述旋转超声椭圆振动加工基本原理的基础上, 从椭圆超声振动装备和工艺两个方面, 总结旋转超声椭圆振动加工的国内外研究进展。在装备研究方面, 阐述纵扭、纵弯和双弯等不同类型的椭圆振动产生方法; 在工艺研究方面, 讨论椭圆超声振动在磨料加工和切削加工等不同加工方法中的应用。基于旋转超声椭圆振动加工的发展现状, 结合航空先进材料的加工需求, 从加工机理研究、新材料工艺研究、椭圆轨迹稳定性、多自由度超声刀具设计等方面对未来发展趋势进行展望。

关键词: 旋转超声加工; 椭圆振动; 航空材料; 纵扭复合振动; 磨料加工

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.030



王健健

博士, 毕业于清华大学, 研究方向包括硬脆材料旋转超声高效精密加工。数控机床及其关键功能部件性能分析与优化、金属玻璃激光辅助超精密切削加工。近5年以第一作者发表SCI/EI收录期刊论文30余篇, 谷歌学术引用200余次。

钛合金、超高温陶瓷、碳纤维复合材料、金属基复合材料、陶瓷基和碳/碳复合材料为代表的先进材料在新一代航空型号的发展中具有极其重要的地位和作用。航空先进材料虽然因为其优异而独特的固有特性而成为航空工业的理想材料, 但大多是公认的难加工材料。航空先进材料的加工难题一直是制约航空工业发展的重要技术瓶颈之一, 吸引着国内外众多学者投入大量精力进行研究。航空先进材料的加工需求也推动了高速切削、激光加工、电加工、高压水射流加工、旋转超声加工等先进加工技术的发展^[1]。

旋转超声加工是振动加工技

术^[2]的一种, 一般特指使用固结磨料刀具的旋转超声冲击加工, 在英文文献中称之为“Rotary Ultrasonic Machining”。旋转超声加工最初从传统的悬浮磨料超声冲击加工(Ultrasonic Machining)发展而来。如图1(a)所示, 在旋转超声加工中, 固结磨料刀具在高速旋转的同时会沿其轴线做超声频率的微米级振动, 通过刀具与材料的相对进给运动实现套料钻孔加工或者铣磨平面加工。从20世纪90年代开始, 堪萨斯州立大学的裴志坚等^[3]在旋转超声加工的理论 and 试验研究方面做了大量工作, 其所建立的材料去除模型至今仍为旋转超声加工领域理论研究的基

* 基金项目: 国家自然科学基金(51875311; 51475260)。

石。目前,旋转超声加工已经成为航空先进硬脆/复合材料加工的有效方法^[4]。国内外众多学者的大量研究表明,与非超声加工相比,旋转超声加工通过刀具磨粒与工件材料超声频率的接触与分离过程(图1(b)),可以显著减小加工抗力和抑制刀具磨损,从而能够减小加工损伤,提高加工效率和精度,特别是在深小孔、交点孔等恶劣工况中具有明显优势和应用价值^[5]。

当把固结磨料刀具更换为钻头或者铣刀时,旋转超声加工则可以用来加工金属等塑性材料。这种加工方法更多时候被称作为超声振动辅助钻/铣(Ultrasonic Vibration Assisted Drilling/Milling),属于超声振动辅助加工的研究范畴^[6]。在超声振动辅助钻/铣中,存在激振刀具和激振工件等两种超声振动的施加方式^[6],学界通常也将激振刀具的工艺方法称之为旋转超声钻/铣。如图2所示,在旋转超声钻/铣中,钻头或铣刀在高速旋转的同时会沿其轴线做超声频率的微米级振动。超声振动改变了刀具切削刃与工件材料之间的作用机理,有利于减小切削力和切削温度,从而延长刀具寿命,改善加工质量。

20世纪90年代,针对硬脆材料的高效精密加工难题,日本名古屋大学社本英二发明了椭圆振动切削技术^[7]。椭圆振动切削的基本原理如图3所示,刀具在切削材料的同时,在切削平面内做椭圆形状的二维振动。该加工技术自诞生以来受到了国内外精密、超精密加工行业专家学者的广泛关注。大量研究表明:与普通切削加工相比,刀具的超声椭圆振动通过减小实际切屑厚度、摩擦力反向效应以及变切削角度/速度特性,可以显著减小切削力、减少加工缺陷、提高脆性材料的塑脆转变深度,并可将加工材料固有特性(硬度、脆性)对加工性能的影响降到最低,

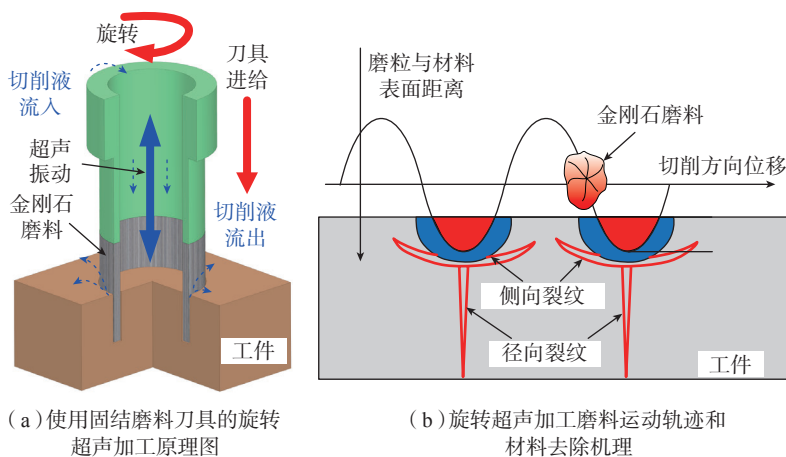


图1 使用固结磨料刀具的旋转超声加工示意图

Fig.1 Illustration of rotary ultrasonic machining

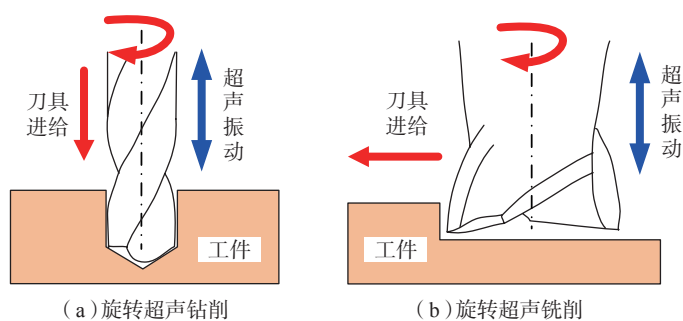


图2 旋转超声钻/铣示意图

Fig.2 Illustration of rotary ultrasonic drilling/milling

从而显著提高加工效率和加工表面完整性,并提高刀具的耐用度和加工系统的稳定性。目前,超声椭圆切削技术已经成功应用于各类难加工材料的精密切削加工中,实现了对硬质合金、单晶硅、淬硬钢等难加工材料表面的超精密镜面加工,并使用具有特殊形状的金钢石刀具实现了铬镍铁合金表面角锥形微织构的加工^[8]。

鉴于二维椭圆超声振动在提高难加工材料可加工性方面的优异性能,不少学者开始探索将椭圆超声振动与其他加工方式进行结合。例如,北京理工大学的梁志强团队^[9],以及南方科技大学的吴勇波团队^[10]等将椭圆超声振动应用到磨削中,发明了超声椭圆振动辅助磨削加工技术,提高了蓝宝石材料的加工效率和加工表面完整性。近年来,越来越多的学者将椭圆振动应用到旋转超声加工中,以进一步提高旋转超声加工技术

在航空先进材料加工中的工艺性能和应用水平。

旋转超声椭圆振动加工装备

旋转超声椭圆振动加工,利用刀具的二维椭圆振动代替一维纵向振动,而椭圆振动通常通过两个方向上的复合振动产生。如图4所示,目前应用在旋转超声加工上的椭圆振动形式包括纵扭、纵弯和双弯3种^[11]。根据椭圆振动形式,旋转超声椭圆振动加工可以分为旋转超声纵扭复合振动加工、纵弯复合振动加工和双弯

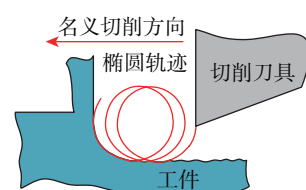


图3 椭圆振动切削加工

Fig.3 Illustration of elliptical vibration cutting

复合振动加工 3 种。

1 纵扭复合振动

纵扭复合振动的产生方法主要包括两种,分别通过特殊结构的换能器和变幅杆来实现。如图 5 所示,纵扭复合换能器采用纵向极化和切向极化压电陶瓷堆叠而成^[12];而纵扭复合变幅杆则是在变幅杆上增加斜槽结构,通过模式转换将部分超声纵向振动转化为扭转振动^[13-14]。

采用纵扭复合换能器来实现纵扭复合振动的方法,如图 5 (a)所示,需要采用两组电信号分别激发换能器的纵振和扭振模态。这种方法的优点在于可以通过控制两组输入电信号的相位差来实现对刀具椭圆振动轨迹形状的控制,其缺点在于纵振和扭振两个模态同频共振设计难度较大。

采用纵扭复合变幅杆来实现纵扭复合振动的方法,如图 5 (b)所示,只需要采用一组电信号对换能器进行单激励。这种方法的优点在于结构简单而容易实现,其缺点在于刀具切削刃的振动轨迹为切削平面内的直线,不能通过电信号的改变来实现对振动轨迹形状的有效调节。目前,学界通常采用有限元仿真技术来对纵扭复合变幅杆进行设计,例如北京航空航天大学的袁松梅团队^[15],以及河南理工大学的赵波团队等基于有限元仿真方法对纵扭复合超声系统进行了频率简并设计^[16],清华大学的冯平法团队等利用有限元仿真技术开发了基于超磁致伸缩换能材料的纵扭复合变幅杆^[17]。

2 纵弯复合振动

纵弯复合振动一般需要通过设计特殊结构的换能器来实现。如图 6 (a)所示,纵弯复合换能器由一个纵向振动单元和一个弯曲振动单元所组成。通过使用两组同频异相电信号分别对振动系统的纵振和弯振模态进行激励,可以实现刀具头部上的超声椭圆振动。与纵扭复合换能器

一样,纵弯复合换能器的设计也要重点解决纵振和弯振两个模态的频率简并问题。哈尔滨工业大学刘英想团队基于图 6 (a)所示的原理,设计了一款旋转超声纵弯复合振动加工系统,用于对石材的钻孔加工^[18]。

3 双弯复合振动

双弯复合振动也需要通过换能

器设计来实现,如图 6 (b)所示,双弯复合换能器包括两个相对转角为 90° 的弯曲振动单元。通过对振动系统在两个正交平面内的弯振模态进行双激励,可以实现刀具头部的超声椭圆振动。北京航空航天大学的张德远团队基于图 6 (b)的思想设计了旋转超声双弯复合振动加工系

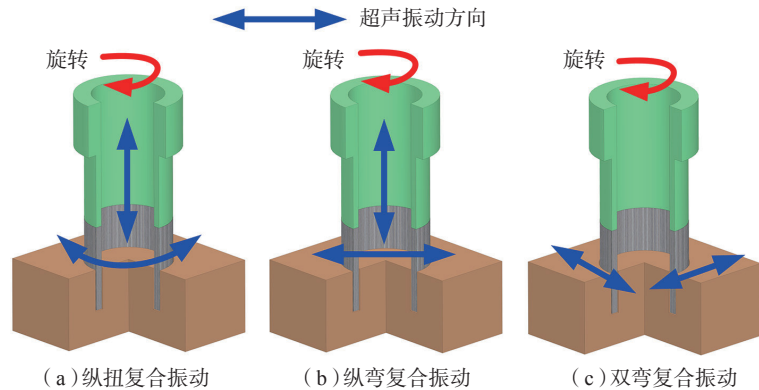


图4 椭圆超声振动形式

Fig.4 Illustration of ultrasonic elliptical vibration

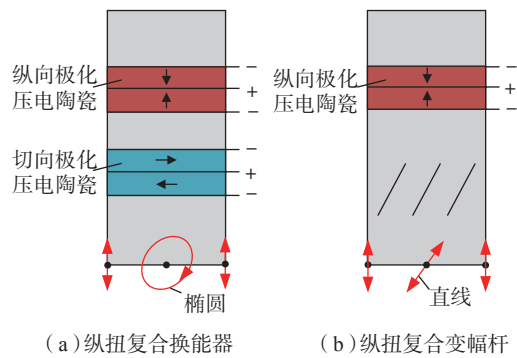


图5 纵扭复合超声振动产生方法

Fig.5 Generation methods for longitudinal-torsional vibration

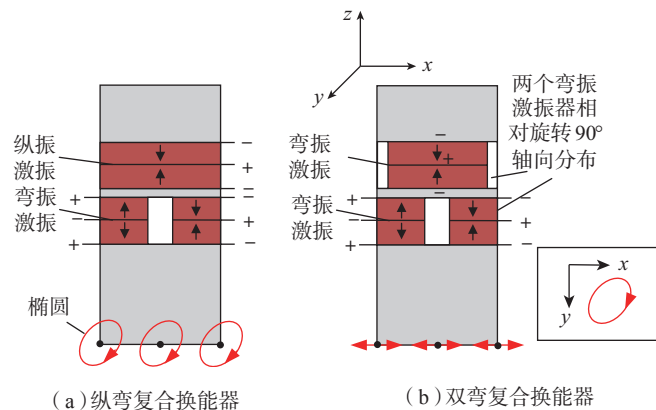


图6 纵弯和双弯复合超声振动产生方法

Fig.6 Generation methods for longitudinal-bending and double bending vibration

统,用于 CFRP 的制孔加工^[19]。

旋转超声椭圆振动加工根据所使用刀具的不同,可以分为磨料加工和切削加工两类,前者使用固结磨料刀具,一般用来加工硬脆/复合材料;后者使用钻头或铣刀,一般用来加工钛合金等难加工的金属材料。

旋转超声椭圆振动磨料加工

根据加工方式的不同,旋转超声椭圆振动磨料加工又可以分为套料钻孔和铣磨平面两种。

1 套料钻孔

在使用套料刀具进行钻孔加工时,刀具端面磨粒与侧面磨粒的作用并不完全相同。如图 7 所示,材料去除主要由端面磨粒完成,因此,切削力特别是轴向切削力主要由端面磨粒的去除材料作用产生,并决定着出孔损伤的形成。孔壁表面的创成则由侧面磨粒和端面磨粒共同完成,但由侧面磨粒最终完成。在旋转超声椭圆振动套料钻孔加工中,不同形式的椭圆振动,会使得刀具端面和侧面磨粒呈现出不同的运动轨迹,进而影响到最终的钻孔加工工艺效果。

目前可见报道的旋转超声椭圆振动套料钻孔工艺研究的振动形式包括纵扭复合、纵弯复合和双弯复合 3 种形式。清华大学的冯平法团队通过有限元仿真技术设计了一种图 8 所示的纵扭复合超声刀具,在 DMG 公司的 Ultrasonic 50 超声机床上实现了旋转超声纵扭复合振动加工光学石英玻璃^[20]和 C/SiC 陶瓷基复合材料^[21]。试验结果表明,与传统纵振加工相比,旋转超声纵扭复合振动套料钻孔加工可以减小 50% 以上的轴向切削力,减小 50% 左右出孔损伤。旋转超声纵扭复合套料钻孔加工的端面磨粒去除材料机理如图 9^[20]所示。在纵扭复合超声振动下,磨粒冲击材料表面可以产生更长的侧向裂纹,而且具有更短的刀具材料有效接触时间,从而有利于实现在材料去除率不

变时切削力的降低。

哈尔滨工业大学的刘英想团队利用旋转超声纵弯复合振动套料钻孔加工石材,在相同静推力下,加工效率是传统纵振加工的 1.34 倍,是普通非超声套料钻孔的 2.34 倍^[18]。

北京航空航天大学的张德远团队开展了旋转超声双弯复合振动套料钻孔加工 CFRP 的试验研究^[22]。试验结果表明,与普通非超声套料钻孔相比,双弯复合振动可以减小切削力 30% 左右,改善孔壁表面完整性,

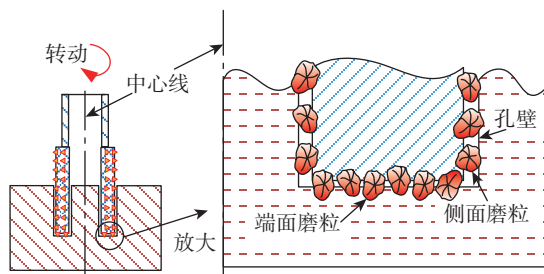
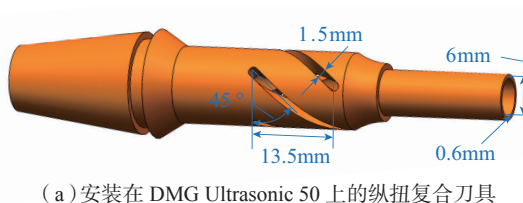
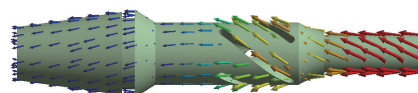


图7 固结磨料刀具端面磨粒和侧面磨粒去除材料示意图

Fig.7 Illustration of material removal by abrasives of tool's end face and side face



(a) 安装在 DMG Ultrasonic 50 上的纵扭复合刀具



(b) 纵扭复合刀具的有限元仿真结果

图8 纵扭复合超声刀具

Fig.8 Ultrasonic tool of longitudinal and torsional vibration

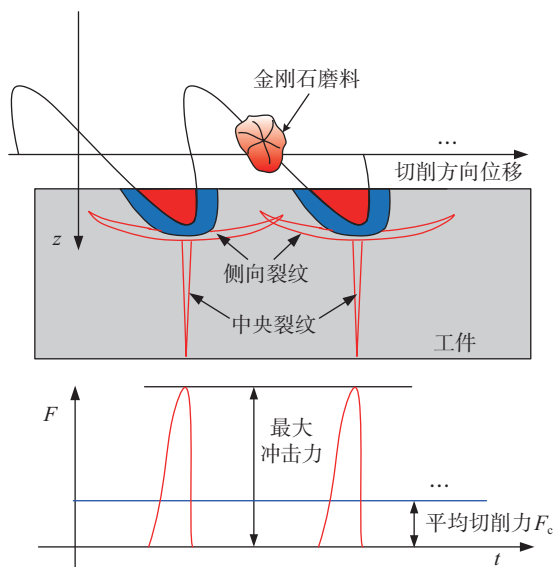


图9 旋转超声纵扭复合振动加工脆性材料机理

Fig.9 Machining mechanism of rotary ultrasonic longitudinal-torsional vibration machining of brittle materials

并能降低加工区域温度、延长刀具寿命^[23]。

2 铣磨平面

旋转超声椭圆振动铣磨平面加工中所采用的振动形式可见报道的目前只有双弯复合振动。北京航空航天大学的张德远团队研究了旋转超声双弯复合振动铣磨加工 CFRP 的可行性^[24-25]。研究表明,与普通非超声铣磨平面相比,双弯复合振动具有优异的排屑能力,可以减小切削力(2%~43%),提高表面完整性,减小毛刺等加工缺陷,并能够将刀具寿命延长两倍^[26]。

3 不同形式椭圆振动磨料加工工艺效果和加工机理比较

如表 1 所示,3 种不同形式的椭圆振动在减小切削力和改善表面完整性方面的工艺效果和作用机理并不相同。就钻孔加工而言,纵弯复合振动和纵扭复合振动在减小钻孔切削力方面比双弯复合振动具有显著优势,从而更加有利于减小硬脆及复合材料加工中的出孔崩边和撕裂损伤;但在提升孔壁表面完整性方面,双弯复合振动则具有更好的工艺效果。以上不同形式椭圆振动在工艺效果上的差异是由于其加工机理不同导致的。

由图 3 的椭圆振动切削基本原理可知,处在磨粒切削平面内的椭圆振动轨迹具有最理想的工艺效果。从图 10 (a) 中可以看出,纵扭复合振动加工中,刀具端面上磨粒的二维振动轨迹全部处在切削平面内,因此可以大幅减小切削力。而从图 6 (a) 可以看出,纵弯复合振动加工中,刀具端面只有一部分磨粒的振动轨迹处在切削平面内,因而导致其在减小切削力、提高加工效率方面的工艺效果略逊于纵扭复合振动加工。从图 10 (b) 中可以看到,双弯复合振动加工中,刀具端面磨粒的椭圆运动轨迹不在其切削平面内,所以其减小切削力的效果与传统纵振加工相比并

无明显优势(传统纵振加工比普通非超声加工可以减小 50% 以上的切削力^[27])。但是,双弯复合振动加工的侧面磨粒的椭圆运动轨迹处在其切削平面内,可以实现对材料的断续分离加工,这使得旋转超声双弯复合振动加工可以极大地改善孔壁表面完整性。

而就平面铣磨加工而言,虽然目前未见纵扭复合振动和纵弯复合振动在平面铣磨加工中的应用,但根据刀具端面和侧面磨粒在不同形式椭圆振动加工中运动轨迹的差异分析,可以对其工艺效果进行推测。当用较小切削深度进行精加工时,只有刀具端面磨粒参与材料的去除,此时纵扭复合振动和纵弯复合振动能够实现端面磨粒对材料的断续分离加工,会比双弯复合振动更有利于切削力的降低;当用较大切削深度进行粗加

工时,刀具侧面磨粒更多地参与到材料的去除中,此时双弯复合振动可以实现侧面磨粒对材料的断续分离加工,从而会更有利于切削力的减小。

旋转超声椭圆振动切削加工

旋转超声椭圆振动切削加工可以分为钻削和铣削两种。目前,旋转超声椭圆振动切削加工的振动形式可见报道的有纵扭复合振动和双弯复合振动两种,其中在钻削中,只有纵扭复合振动获得应用,而在铣削中,两种振动方式都有相关研究报道。

1 钻削

旋转超声纵扭复合振动钻削已经被成功应用于对铝合金的钻孔加工中。伊朗喀山大学 Amini 等^[28]的研究结果表明,与普通非超声钻孔相比,纵扭复合振动钻孔可以产生非连

表1 旋转超声椭圆振动磨料加工研究结果

Table 1 Research results of rotated ultrasonic elliptical vibration abrasive processing

材料	振动加工方式	与普通加工相比	与纵振加工相比
石英 ^[20]	纵扭钻孔	—	切削力减小 47%~69%,崩边减小 23%~77%,表面粗糙度略有降低
C/SiC ^[21]	纵扭钻孔	—	减小切削力 50%
大理石 ^[18]	纵弯钻孔	效率提高至 2.34 倍	效率提高至 1.34 倍
CFRP ^[23]	双弯钻孔	切削力减小 25% 左右,切削温度减小 15% 左右,显著提升孔壁表面质量	—
CFRP ^[26]	双弯铣磨平面	减小切削力 2%~43%, 刀具寿命提高 2 倍	—

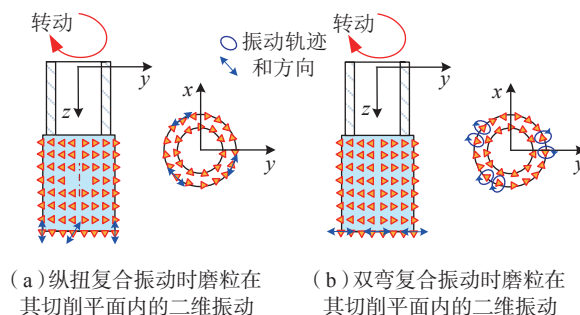


图10 纵扭复合和双弯复合振动加工中刀具端面和侧面磨粒的不同作用

Fig.10 Different role of abrasives of tool's end face and side face in rotary ultrasonic longitudinal-torsional and double bending vibration machining

续的切屑,并能增大刀具实际切削前角,从而最大可以减小35%的切削力,并可以抑制钻头前刀面积屑瘤的产生,提高钻孔质量60%^[29]左右。而且,纵扭复合振动钻孔被证明比传统纵振钻孔有更好的工艺效果。

2 铣削

旋转超声纵扭复合铣削加工比较容易通过纵扭复合变幅杆来实现,目前可见报道资料较为丰富。集美大学的皮钧团队^[30]、河南理工大学的赵波团队^[16]以及哈尔滨工业大学的陈时锦团队^[31-32]等都利用纵扭复合变幅杆技术开发了旋转超声纵扭复合铣削加工系统,并进行了针对玻璃、淬硬钢、不锈钢、钛合金^[33]、CFRP、C/SiC^[16]等多种材料的工艺可行性和加工机理研究。研究结果表明,与传统纵振铣削加工相比,旋转超声纵扭复合铣削加工可以不受工件材料的限制^[34],大幅提高加工效率,减小切削力,并能改善加工表面完整性^[35]。同时,在旋转超声纵扭复合铣削加工过程中,刀具与材料具有完全的周期性接触-分离特性,可以大幅改善切削区域的冷却和润滑条件,从而延长刀具寿命^[30]。与普通非超声铣削加工相比,旋转超声纵扭复合铣削加工除具有以上优点外,还可以提高机床-刀具系统极限切削深度^[16]。另外,河南理工大学的向道辉等将旋转超声纵扭复合振动加工技术应用到蜂窝复合材料的切削加工中,试验结果验证了纵扭复合振动比传统纵振在减小切削力和提高加工表面完整性方面的工艺优势^[36]。

旋转超声双弯复合振动铣削加工目前可见报道较少。北京航空航天大学的张德远团队开发了旋转超声双弯复合振动铣削系统,并成功应用于钛合金薄壁件的高效加工中,与普通非振动铣削加工相比,可以降低切削力50%以上,从而可以显著抑制颤振,减小让刀量,提高加工型面精度^[37-38]。

3 不同形式椭圆振动切削加工工艺效果和加工机理比较

虽然目前旋转超声双弯复合振动钻削加工还未见报道,但从加工机理分析可知,使椭圆振动轨迹处于钻头刃口切削平面内的纵扭复合振动比双弯复合振动更适合于钻削加工。而在铣削加工中,随着所使用铣刀种类以及铣削方式(端铣、侧铣、球头铣等)的不同,纵扭复合振动和双弯复合振动的工艺效果和作用机理也会不同,这方面目前还缺少相关的比较研究。

不同形式的超声椭圆振动对于不同的加工方式有不同的工艺效果。为了能够使用同一超声机床实现多种形式的旋转超声椭圆振动加工,南京航空航天大学的张臣团队研发了多自由度的旋转超声加工系统,刀具可以以20.7kHz进行纵振,或以5.8kHz进行双弯振动,并可以实现三维振动^[39]。目前该多自由度旋转超声加工装备面向的是CFRP钻削,值得进一步推广到磨料加工中。

结论

现有的研究表明,旋转超声椭圆振动加工表现出了比普通非超声加工和传统超声纵振加工更加优异的工艺性能,是提高航空先进材料的高效精密加工水平的重要发展方向。但从目前的研究进展来看,仍有很多问题需要探讨和解决,建议在如下3个方面开展更多研究。

(1)目前旋转超声椭圆振动磨料加工的材料可见报道的仅有石英玻璃、C/SiC、CFRP和大理石等少数几种。采用与传统纵振加工比较研究的方法,开展针对更多种类硬脆材料的工艺可行性研究,并开展系统的材料去除机理、损伤形成机理与抑制方法研究,对于促进旋转超声椭圆振动磨料加工在航空先进硬脆材料加工中的广泛应用具有重要意义。

(2)刀具椭圆振动轨迹的形状和

幅值对旋转超声加工的工艺效果具有决定性的影响,对加工过程中刀具椭圆振动轨迹的监测和控制具有重要应用价值。研究旋转超声加工工艺过程对刀具椭圆振动轨迹稳定性的影响规律,最终通过自适应的有载调谐等技术手段,实现对工艺过程中刀具椭圆振动轨迹的有效控制,以保证旋转超声椭圆加工工艺的有效性具有重要研究意义。

(3)在深入揭示不同形式的椭圆振动在不同加工方式中的工艺效果和作用机理的基础上,研发高可靠性的多自由度旋转超声振动加工系统,能够根据不同的加工需求实现刀具纵弯、纵扭和双弯等不同类型的椭圆振动,从而极大地提高旋转超声椭圆振动加工机床的加工柔性和工艺能力。目前不同形式椭圆振动在不同加工方式中的工艺效果和作用机理的研究还很不充分,多自由度旋转超声振动加工系统的研究和开发也尚处于起步阶段,值得进一步深入研究。

参考文献

- [1] HASHMI S, BATALHA G F, VAN TYNE C J, et al. Comprehensive materials processing[M]. Netherlands: Elsevier, 2014.
- [2] 张德远. 中国的超声加工[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 1-2.
ZHANG Deyuan. The ultrasonic machining in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 1-2.
- [3] PEI Z, PRABHAKAR D, FERREIRA P M, et al. Rotary ultrasonic drilling and milling of ceramics[J]. Urbana, 1994, 51: 61801.
- [4] NING F, CONG W, PEI Z, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: a comparison with grinding[J]. Ultrasonics, 2016, 66: 125-132.
- [5] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 3-21.
FENG Pingfa, WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, et al. Research status and future

prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 3–21.

[6] CHEN W, HUO D, SHI Y, et al. State-of-the-art review on vibration-assisted milling: principle, system design, and application[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(5–8): 2033–2049.

[7] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study on elliptical vibration cutting[J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 1994, 43(1): 35–38.

[8] 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: 109–126.

[9] WANG Q, LIANG Z, WANG X, et al. Investigation on surface formation mechanism in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire based on fractal analysis method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9–12): 2933–2942.

[10] CAO J, WU Y, LU D, et al. Material removal behavior in ultrasonic-assisted scratching of SiC ceramics with a single diamond tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 79: 49–61.

[11] 唐军, 赵波. 超声波椭圆振动加工技术的研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2014(1): 70–78.

TANG Jun, ZHAO Bo. Developments of ultrasonic elliptical vibration machining [J]. *Diamond and Abrasive Engineering*, 2014(1): 70–78.

[12] 殷振, 李华, 李艳, 等. 纵扭复合超声椭圆振动振子的设计与实验研究[J]. *机床与液压*, 2014(15): 92–96, 153.

YIN Zhen, LI Hua, LI Yan, et al. Design and experiment of longitudinal-torsional composite ultrasonic elliptical vibrator[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014(15): 92–96, 153.

[13] ASAMI T, MIURA H. Study of ultrasonic machining using longitudinal and torsional vibration[C]// *Ultrasonics Symposium*.

New York: IEEE, 2015: 1–4.

[14] AL-BUDAIRI H, LUCAS M, HARKNESS P. A design approach for longitudinal-torsional ultrasonic transducers[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013, 198(16): 99–106.

[15] 袁松梅, 刘明. 纵-扭复合超声振动加工系统设计及频率简并研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(5): 8–13.

YUAN Songmei, LIU Ming. Design of a longitudinal-torsional composite ultrasonic vibration machining system and its natural frequencies merging[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(5): 8–13.

[16] 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]. 焦作: 河南理工大学, 2015.

TANG Jun. Study on the longitudinal-torsional composite ultrasonic milling system of carbon/silicon carbide and machining stability[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015.

[17] 张巧丽. 螺旋槽式超声变幅杆纵扭振动特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.

ZHANG Qiaoli. Study on characteristics of longitudinal-torsional vibration of ultrasonic horn with spiral slots[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.

[18] TANG X, LIU Y, SHI S, et al. Development of a novel ultrasonic drill using longitudinal-bending hybrid mode[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 7362–7370.

[19] 李哲, 姜兴刚, 何凤涛, 等. 碳纤维复合材料旋转超声椭圆振动磨制孔技术研究[J]. *电加工与模具*, 2016, 5: 56–59.

LI Zhe, JIANG Xinggang, HE Fengtao, et al. Study on the rotary ultrasonic elliptical vibration machining of CFRP using diamond core drill[J]. *Electromachining & Mould*, 2016, 5: 56–59.

[20] WANG J, ZHANG J, FENG P, et al. Feasibility study of longitudinal-torsional-coupled rotary ultrasonic machining of brittle material[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(5): 51008.

[21] WANG J, FENG P, ZHANG J, et al. Reducing cutting force in rotary ultrasonic drilling of ceramic matrix composites with

longitudinal-torsional coupled vibration[J]. *Manufacturing Letters*, 2018, 18: 1–5.

[22] GENG D, ZHANG D, XU Y, et al. Comparison of drill wear mechanism between rotary ultrasonic elliptical machining and conventional drilling of CFRP[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(9): 797–809.

[23] GENG D, LU Z, YAO G, et al. Cutting temperature and resulting influence on machining performance in rotary ultrasonic elliptical machining of thick CFRP[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 123: 160–170.

[24] GENG D, ZHANG D, XU Y, et al. Effect of speed ratio in edge routing of carbon fiber-reinforced plastics by rotary ultrasonic elliptical machining[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, 34(21): 1779–1790.

[25] LIU J, ZHANG D, QIN L, 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.

[26] GENG D, ZHANG D, XU Y, et al. Rotary ultrasonic elliptical machining for side milling of CFRP: Tool performance and surface integrity[J]. *Ultrasonics*, 2015, 59: 128–137.

[27] FENG P, WANG J, ZHANG J, et al. Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(1): 791–799.

[28] AMINI S, SOLEIMANI M, PAKTINAT H, et al. Effect of longitudinal-torsional vibration in ultrasonic-assisted drilling[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2017, 32(6): 616–622.

[29] PAKTINAT H, AMINI S. Numerical and experimental studies of longitudinal and longitudinal-torsional vibrations in drilling of AISI 1045[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5–8): 2577–2592.

[30] 皮钧, 徐西鹏. 纵扭共振超声铣削研究[J]. *中国机械工程*, 2009(10): 1163–1169.

PI Jun, XU Xipeng. Research on

longitudinal-torsional resonance ultrasonic milling (LTRUM)[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009(10): 1163-1169.

[31] REN W, XU J, LIN J, et al. Research on homogenization and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy by longitudinal-torsional coupled ultrasonic vibration ball-end milling[J]. *Preprints*, 2018: doi:10.20944/preprints201809.0032.v1.

[32] WU C, CHEN S, CHENG K, et al. Innovative design and analysis of a longitudinal-torsional transducer with the shared node plane applied for ultrasonic assisted milling[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018: doi:10.1177/0954406218797962.

[33] NIU Y, JIAO F, ZHAO B, et al. Multiobjective optimization of processing parameters in longitudinal-torsion ultrasonic assisted milling of Ti-6Al-4V[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(9-12): 4345-4356.

[34] 童志强. 纵扭共振旋转超声加工碳纤维复合材料的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2015.

TONG Zhiqiang. Study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic machining of carbon fiber composites[D]. Xiamen: Jimei University, 2015.

[35] 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(3): 425-430.

TONG Zhiqiang, PI Jun. Experimental study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic face milling of CFRP[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2016(3): 425-430.

[36] XIANG D, WU B, YAO Y, et al. Ultrasonic longitudinal-torsional vibration-assisted cutting of Nomex[®] honeycomb-core composites[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: org/10.1007/s00170-018-2810-3.

[37] 辛文龙, 刘佳佳, 姜兴刚, 等. 钛合金薄壁件腹板超声椭圆振动铣削精度研究[C]//第16届全国特种加工学术会议. 厦门,

2015.

XIN Wenlong, LIU Jiajia, JIANG Xinggang, et al. Accuracy investigation of ultrasonic elliptical vibration milling of thin-walled titanium alloy parts[C]//The 16th National Conference on Unconventional Machining. Xiamen, 2015.

[38] 姜兴刚, 梁海彤, 卢慧敏, 等. 钛合金薄壁件超声椭圆振动铣削研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(11): 1891-1897.

JIANG Xinggang, LIANG Haitong, LU Huimin, et al. Investigation of ultrasonic elliptical vibration milling of thin-walled titanium alloy parts[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(11): 1891-1897.

[39] ZHANG C, LU M. A novel variable-dimensional vibration-assisted actuator for drilling CFRP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018: doi.org/10.1007/s00170-018-2680-8.

通讯作者: 冯平法, 博士、教授、博士生导师, 主要研究方向为高效精密制造工艺与装备等, E-mail: fengpf@mail.tsinghua.edu.cn.

Advances in Rotary Ultrasonic Elliptical Machining of Advanced Aviation Materials

WANG Jianjian^{1,2}, ZHANG Jianfu¹, FENG Pingfa^{1,3}

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

3. Division of Advanced Manufacturing, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

[ABSTRACT] The rotary ultrasonic machining (RUM) is a superior method for the high-efficiency, precise and low-damage machining of advanced aviation materials. In the conventional RUM, an ultrasonic-frequency longitudinal vibration is utilized on the high-speed rotational tools. However, in the rotary ultrasonic elliptical machining (RUEM), a 2-D elliptical vibration is utilized instead of the conventional 1-D longitudinal vibration to further improve the performance of RUM. Since the invention of the RUEM, many relevant researches on RUEM have been carried out. The basic principles of RUEM and vibration types including longitudinal-torsional, longitudinal-bending and double bending are briefly summarized. The research advances of RUEM from equipment to process, and including both abrasive machining and cutting are presented. Furthermore, the development trends of RUEM including machining mechanism, applications on new materials, and tools with multiple degree of freedoms are prospected.

Keywords: Rotary ultrasonic machining; Elliptical vibration; Aviation materials; Longitudinal-torsional coupled vibration; Abrasive machining

(责编 海山)