

引文格式: 尚文军, 冯平法, 查慧婷, 等. Nomex 蜂窝材料超声辅助加工圆盘刀的设计和工艺特性研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(23/24): 68-74.

SHANG Wenjun, FENG Pingfa, ZHA Huiting, et al. Research on design and processing characteristics of disc cutter in ultrasonic vibration cutting Nomex honeycomb composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 68-74.

Nomex 蜂窝材料超声辅助加工圆盘刀的设计和工艺特性研究*

尚文军¹, 冯平法^{1,2}, 查慧婷¹, 徐捷^{1,3}, 颜键辉¹, 刘世杰¹, 冯峰¹

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055;

2. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

3. 湖南工程学院, 湘潭 411100)

[摘要] 通过有限元仿真技术研究了圆盘刀的外径、楔角和厚度3个因素对超声辅助加工系统的模态和谐振频率的影响规律; 搭建了Nomex蜂窝材料工艺试验平台, 开展了普通加工和超声辅助加工的对比试验, 以切削力和表面质量为评价指标, 分析了不同加工参数下超声振动作用对Nomex蜂窝材料加工效果的改善程度。结果表明, 系统的谐振频率随圆盘刀的外径增大而减小, 随厚度增加而增大, 随楔角增大而减小, 其中刀具外径和厚度的影响程度较大, 可通过调整刀具外径和厚度进行系统频率的设计; 楔角的大小影响刀具锋利度和刀具强度, 应选择合适的楔角。超声辅助加工中的平均切削力比普通加工的平均切削力在刀具切宽方向和进给方向上分别降低了34.9%和50.5%, 超声辅助加工的材料表面更加平整, 毛刺更少, 毛刺长度更短。

关键词: Nomex 蜂窝材料; 超声辅助加工; 圆盘刀; 刀具设计; 工艺特性

Research on Design and Processing Characteristics of Disc Cutter in Ultrasonic Vibration Cutting Nomex Honeycomb Composites

SHANG Wenjun¹, FENG Pingfa^{1,2}, ZHA Huiting¹, XU Jie^{1,3}, YAN Jianhui¹, LIU Shijie¹, FENG Feng¹

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;

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

3. Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411100, China)

[ABSTRACT] The influence of the outside diameter, wedge angle and thickness of disc cutter on the mode and resonant frequency of ultrasonic machining system was studied by finite element simulation technology. The Nomex honeycomb composites experimental platform was built. A comparative experiment between conventional machining and ultrasonic assisted machining was carried out. Taking cutting force and surface quality as evaluation indexes, the improvement effect of ultrasonic vibration on Nomex honeycomb composites under different processing parameters was analyzed. The research results show that the resonant frequency of the system decreases with the increase of disc cutter diameter, increases with the increase of thickness, and decreases with the increase of wedge angle. The influence of the cutter diameter and thickness is more remarkable. The system frequency can be designed by adjusting the outside diameter and thickness of the tool. The size of wedge angle affect the sharpness and intensity of tools, the proper wedge angle should be choosed. The average cutting force in ultrasonic machining is 34.9% and 50.5% lower than that in conventional machining in cutting width direction and feed direction, respectively. The machined surface of composites in ultrasonic assisted machining is smoother, with fewer and shorter burrs.

Keywords: Nomex honeycomb composites; Ultrasonic assisted machining; Disc cutter; Tool design; Processing characteristics

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.068

* 基金项目: 深圳市科技计划基础研究项目(JCYJ20180508152128308, JCYJ20190813173607172)。

随着高端制造业对轻量化、高强度产品需求的日益增加,高性能复合材料得到了飞速的发展^[1]。芳纶纸蜂窝复合材料(Nomex 蜂窝材料),是一种由酚醛树脂和芳纶纤维复合而成的仿生结构复合材料,具有质量轻、化学惰性好、抗冲击性强以及比强度、比刚度高等优点,因而在航空、建筑、轨道交通等领域有着广泛的应用^[2]。

Nomex 蜂窝材料沿芯格的轴向具有很高的抗拉、压强度,而横向的拉、压强度较低,这种特殊的外形结构和力学行为导致该材料在机械加工中的装夹工艺变得十分困难^[3],加工后的芯格变形严重,极大地降低了工业生产效率^[4];另一方面,芳纶纤维是一种韧性较强,断裂伸长率较高的难加工材料,传统铣削加工方法会使得蜂窝材料出现芯格压塌、撕裂、毛刺、粉尘污染等问题^[5]。因此,Nomex 蜂窝材料的难加工特性严重制约了这种材料更为广泛的应用。为了解决这一问题,国内外的研究团队在蜂窝材料传统加工的基础上,引入了超声辅助加工技术。大量研究结果表明,超声辅助加工技术在降低切削力、改善刀具磨损以及提高加工效率等方面有着显著的优势^[6-7]。作为一种新兴的加工技术,超声辅助加工的原理是在刀具上叠加高频的超声振动,在微观上产生周期性的刀屑分离特性^[8],从而在宏观上可以显著降低切削力^[9]。针对 Nomex 蜂窝材料超声辅助加工在工程上的应用,奥地利 GFM 公司率先针对蜂窝材料研制了专用的超声辅助切削加工机床,法国 CRENO 也生产出了龙门式超声机床,并研发了机械臂式机床,能够完成复杂形状的蜂窝材料的加工^[10]。关于 Nomex 蜂窝材料超声辅助加工在高校的研究,国内张迅等^[11]研发的超声装备可在刀具上实现 56 μm 的纵向振幅,并发现在 10~30 μm 范围,振幅越大,材料已加工表面质量越好。方亮^[12]和黄秀秀^[13]从断裂机理的角度,揭示了相同切削参数和刀具结构的情况下超声辅助加工切削力明显小于普通加工切削力,并提出了随着刀具刃倾角增大,蜂窝材料的超声切削比普通切削更容易发生,并且刃倾角增大会导致切削温度升高^[14]。在 Nomex 蜂窝材料超声辅助加工过程中,圆盘刀主要通过其刀刃的高速旋转运动和纵向超声振动作用将蜂窝材料切割分离。目前,国内 Nomex 蜂窝材料超声辅助加工装备及刀具的研制仍存在很多问题,性能也有待进一步提高,现有文献资料中,圆盘刀具设计理论研究不足,且商用圆盘刀多依赖进口,该产品的自主优化有待提升。

为研究超声振动作用对 Nomex 蜂窝材料加工的改善效果,进一步提高圆盘刀的超声振动性能,本研究通过有限元仿真技术,研究了圆盘刀的结构对超声辅助加工系统的模态和谐振频率的影响规律,分析了圆盘刀在超声辅助加工中的运动特性,开展了普通加工和超声辅

助加工的对比试验,以切削力和表面质量为评价指标,分析了不同加工参数下 Nomex 蜂窝材料加工的效果。

1 圆盘刀设计

1.1 圆盘刀几何尺寸与运动分析

圆盘刀超声辅助加工系统常用于 Nomex 蜂窝材料表面的精加工,该系统的主要部件包括超声波换能器、变幅杆和圆盘刀等。圆盘刀的关键几何参数对加工系统的谐振频率、输出振幅以及加工精度和工作效率等会产生很大影响。Nomex 蜂窝材料的加工特性要求圆盘刀底部平整、厚度较小、刀刃锋利。圆盘刀整体结构如图 1 所示,刀具的关键几何参数包括外径 d 、楔角 θ 和厚度 h 。

根据超声辅助加工原理,刀具受到轴向的高频超声振动,因此刀具应具有高韧性。目前常用材料有高速钢、硬质合金和工具钢等,高速钢由于具有高韧性、抗冲击性和耐磨性等优异性能,因此常被选为圆盘刀的制作材料。

在切削过程中,圆盘刀的运动可分为沿 Z 轴的超声振动,绕主轴的旋转运动以及进给方向 Y 的平行移动,故在 XYZ 坐标系下的位移方程为:

$$\begin{cases} S_x = r \cos \frac{2\pi n}{60} t \\ S_y = r \sin \frac{2\pi n}{60} t + v_f t \\ S_z = A \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_x 、 S_y 、 S_z 分别为圆盘刀沿 X 、 Y 、 Z 轴方向的位移; r 为刀具半径; n 为主轴转速; t 为时间; v_f 为进给速度; A 为振幅; f 为谐振频率。以 $r=15\text{mm}$ 、 $n=4000\text{r/min}$ 、 $v_f=30\text{mm/min}$ 、 $A=6\mu\text{m}$ 、 $f=22500\text{Hz}$ 为例,刀具外缘一点的运动轨迹如图 2 所示,可以看出刀具除自身旋转运

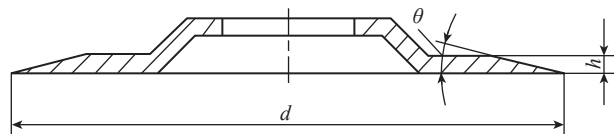


图1 圆盘刀主要几何参数结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of main geometrical parameters of disc cutter

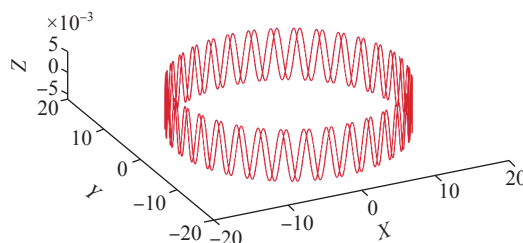


图2 圆盘刀加工过程中运动轨迹示意图 (mm)

Fig.2 Schematic diagram of motion trajectory of disc cutter (mm)

动和进给运动,还在轴向上进行高频的振动。

1.2 圆盘刀振动模态分析

本研究通过模态分析,从刀具设计阶段入手,选取刀具结构的最佳参数。圆盘刀与变幅杆结构模型如图3所示,圆盘刀通过螺钉安装在变幅杆底部,通过改变圆盘刀的结构尺寸来分析圆盘刀的几何参数对系统谐振频率的影响规律。

通过 Solidworks 软件对圆盘刀和变幅杆结构进行建模,将变幅杆与刀具通过特制螺钉进行连接。结合蜂窝加工特点,本研究中刀具材料选用高速钢 SKH51,变幅杆和连接螺钉采用 45 号钢 S45C,表 1 为 SKH51、S45C 两种材料的主要力学性能参数。将模型导入 ANSYS Workbench 中,网格大小为 1mm,连接处采用固结形式,进行模态分析得到各阶模态振型以及谐振频率。以参数组合刀具外径 $d=30\text{mm}$,楔角 $\theta=11^\circ$,厚度 $h=0.8\text{mm}$ 模型为例,选取具有代表性的若干阶振型变形云图,如图 4 所示,分别为 18 阶、19 阶、21 阶和 24 阶,其中 18 阶、19 阶振型为波动型,21 阶振型为纵振型,24 阶振型为扭振型。使用的超声装备设计的谐振频率为 20kHz,从仿真结果可以看出,本模型纵振型为 21 阶,谐振频率为 19508Hz,与设计的谐振频率相近。

针对小型工件的尺寸与效率加工需求,本研究刀具外径 d 取值范围为 25~35mm,为了保证整体谐振频率在 20kHz 左右的设计需求,根据模态分析,楔角 θ 取 $11^\circ\sim 15^\circ$,厚度 h 取 0.8~1.2mm,探究刀具的模态谐振频率随刀具外径 d 、楔角 θ 、厚度 h 3 个因素的变化规律。

如图 5 (a) 所示,纵振谐振频率 f 随刀具厚度 h 增加而增加,增加幅度呈上升趋势,当刀具厚度 $h<1\text{mm}$ 时,厚度 h 平均每增加 1mm,谐振频率增加 1.7kHz,当刀具厚度 $h>1\text{mm}$,对应数值增加 2.2kHz,且楔角 θ 越小,该现象越明显。

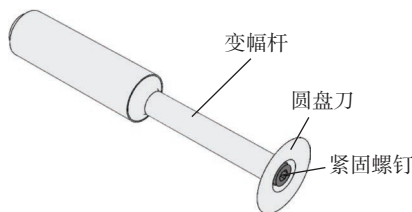


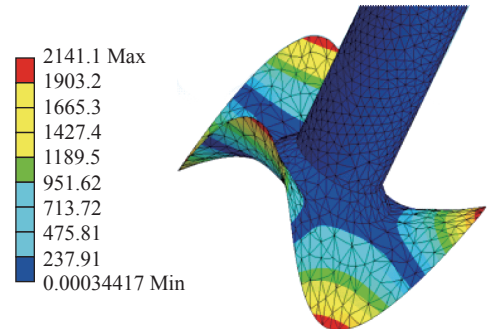
图3 圆盘刀与变幅杆模型图
Fig.3 Model of disc cutter and stepped lug

表 1 SKH51 和 S45C 的主要力学性能

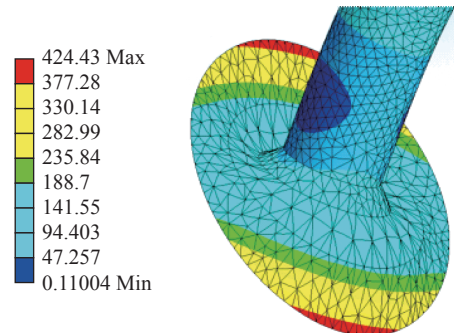
Table 1 Main mechanical properties of SKH51 and S45C

材料型号	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E/\times 10^5\text{MPa}$	泊松比 λ
SKH51	8.16	2.18	0.30
S45C	7.85	2.05	0.29

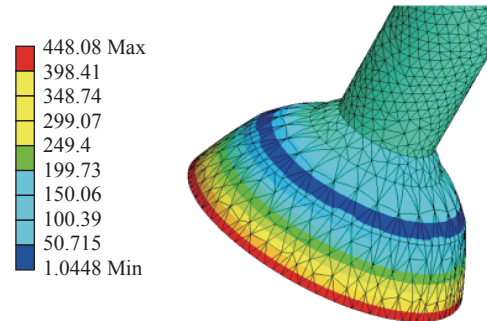
如图 5 (b) 所示,纵振谐振频率 f 随刀具外径 d 增加而减小,下降幅度呈减缓趋势。当刀具外径 $d<30\text{mm}$ 时,外径 d 平均每增加 1mm,谐振频率 f 平均降低 3.2kHz;当刀具外径 $d>30\text{mm}$ 时,对应数值平均减少 0.37kHz。可知,当刀具外径 d 处于 25~30mm 时,对谐振频率 f 影响程度较大。



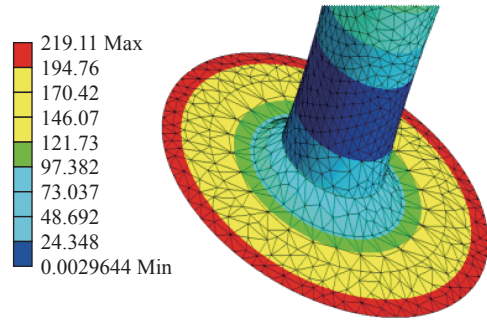
(a) 18阶-波动型



(b) 19阶-波动型



(c) 21阶-纵振型



(d) 24阶-扭振型

图4 第 18、19、21、24 阶振型变形云图

Fig.4 Cloud chart of the 18th, 19th, 21st and 24th vibration modes

如图 5 (c) 所示,纵振谐振频率 f 随刀具楔角 θ 增加而减小,且减小的幅度基本不变。当刀具直径 d 分别为 25mm、30mm、35mm 时,楔角 θ 平均每增加 1° ,谐振频率 f 分别降低 78Hz、33Hz、11Hz。故当刀具直径越小时,刀具楔角 θ 的改变对谐振频率的变化越敏感。

由以上试验结果可知,当刀具实际谐振频率偏大时,可以通过减小刀具厚度、增加刀具外径和增加刀具楔角来进行调整,特别是外径较小时,增加刀具外径是比较有效的方法,而外径较大时,应通过减小刀具厚度来实现;反之亦然。结合装备设计需求及现有经验,刀具厚度过高时能量密度降低,导致谐振振幅减小,刀具厚度过小的刀具制作困难,易造成精度难以保证,故刀具厚度取 0.9~1.0mm 较为合适;刀具外径过大会导致结构刚度降低,过小则导致结构刚度强,抑制了振动的效果,刀具外径取 27~30mm 较为合适;刀具楔角对谐振频率影响较小,同时刀具楔角过小可能导致刀具制作过程中容易蜷曲、外缘缺口等问题,刀具楔角取值 $13^\circ\sim 15^\circ$ 可以保证刀具制作过程与加工过程中圆盘刀具刀刃完整性。故本研究选择刀具外径 $d=27\text{mm}$,刀具厚度 $h=0.9\text{mm}$,刀具楔角 $\theta=14^\circ$ 的刀具进行试验研究。

2 试验方案

2.1 试验平台

超声辅助加工系统框架如图 6 (a) 所示。试验平台主体包括 THU Ultrasonic 850 三轴立式机床(图 6 (b))、高速双极性超声电源 BP4610、高频补偿电容、BT40 刀柄(图 6 (c)),清华大学课题组研制的大功率超磁致伸缩超声辅助加工系统)、Kistler 9119A 三向测力仪。将 Nomex 蜂窝材料工件采用双面胶粘接在 $80\text{mm}\times 80\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ 规格的铁板上,并使用夹具装夹在载物台上,载物台与 Kistler 9119A 三向测力仪一同安装在试验机床工作台上(图 6 (d))。

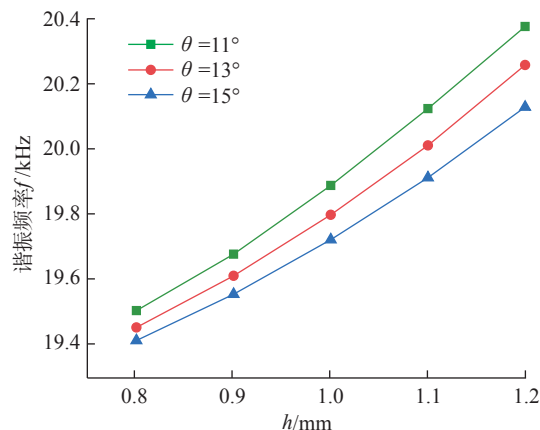
2.2 工件材料参数

Nomex 蜂窝材料工件尺寸为 $80\text{mm}\times 32\text{mm}\times 30\text{mm}$,分别为材料的长度 L 、宽度 W 和高度 H ,其中长度 L 方向与双层孔格边平行。材料参数如表 2 所示^[15]。

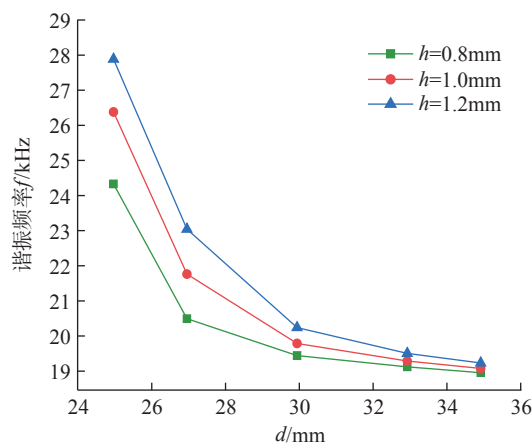
2.3 试验设计

本研究通过单因素试验,进行进给速度、主轴转速对切削力的影响规律研究,图 7 为部分工艺参数示意图,其中,控制切削深度 $h=3\text{mm}$,考虑到刀具半径为 13.5mm,为保证进给方向上切屑能够顺利去除,取切削宽度 $b=5\text{mm}$ 。超声电源频率设置为 20829Hz,进给方向为平行于单层芳纶纸。考虑到工件尺寸与机床性能,进给速度 v_f 取 500~2000mm/min,主轴转速 n 取 1000~4000r/min。工艺参数设计如表 3 所示,

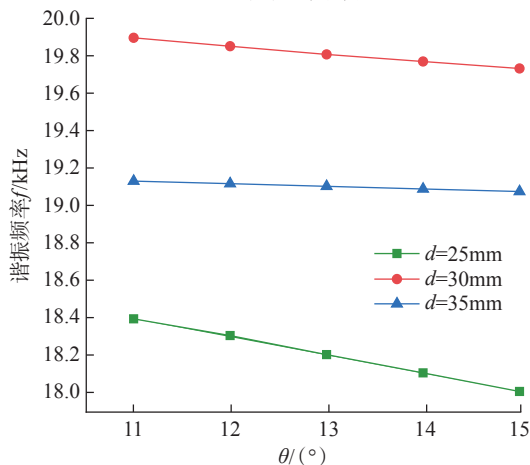
其中第 1 组~第 4 组为主轴转速单因素试验,第 1 组、第 5 组、第 9 组、第 13 组为进给速度单因素试验。同一块工件固定进给速度,在长边两侧各采用两种主轴转速切削,同一边两次切削相差高度差为 3mm,采用此切削方案便于分析,且减少工件装夹次数以减少不必要的误差。



(a) 刀具厚度

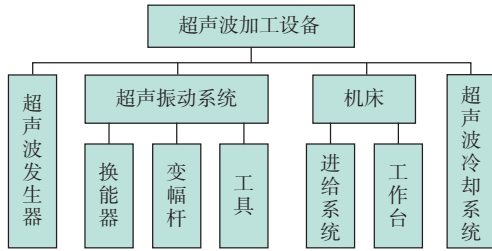


(b) 刀具外径

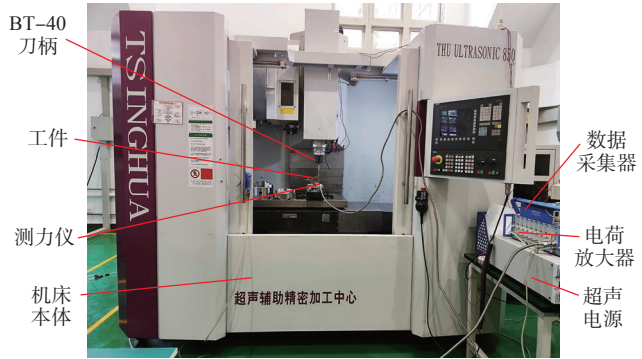


(c) 刀具楔角

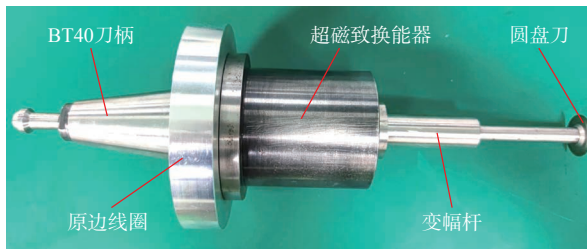
图 5 纵振谐振频率与刀具厚度、外径和楔角的关系曲线
Fig.5 Relation curve of longitudinal vibration frequency and tool thickness, tool outside diameter and cutter wedge angle



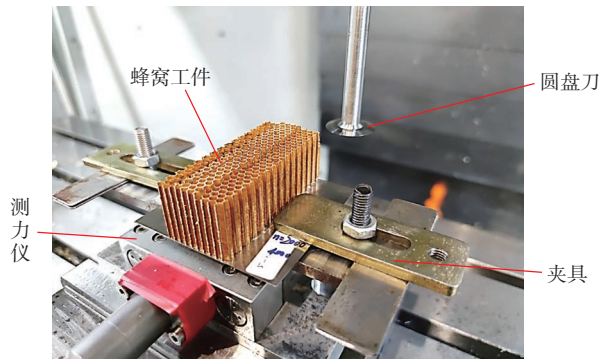
(a) 超声辅助加工系统基本组成框架图



(b) THU Ultrasonic 850超声辅助加工机床



(c) 超声辅助加工刀柄系统



(d) 蜂窝材料工件固定方式

图 6 超声辅助加工系统与工件装夹示意图

Fig.6 Schematic diagram of ultrasonic assisted machining system and workpiece clamping

表 2 试验蜂窝材料试件材料性能

Table 2 Material properties of tested honeycomb specimen

材料性能	强度 /MPa	弹性模量 /MPa
抗压强度	2.15	131
剪切强度 (LT-方向)	1.28	36
剪切强度 (WT-方向)	0.6	20
拉伸强度	2.45	148

表 3 加工工艺参数设计

Table 3 Design of processing parameters

序号	进给速度 v_f / (mm · min ⁻¹)	主轴转速 n / (r · min ⁻¹)	切削深度 h / mm	切削宽度 b / mm
1	500	1000	3	5
2	500	2000	3	5
3	500	3000	3	5
4	500	4000	3	5
5	1000	1000	3	5
6	1000	2000	3	5
7	1000	3000	3	5
8	1000	4000	3	5
9	1500	1000	3	5
10	1500	2000	3	5
11	1500	3000	3	5
12	1500	4000	3	5
13	2000	1000	3	5
14	2000	2000	3	5
15	2000	3000	3	5
16	2000	4000	3	5

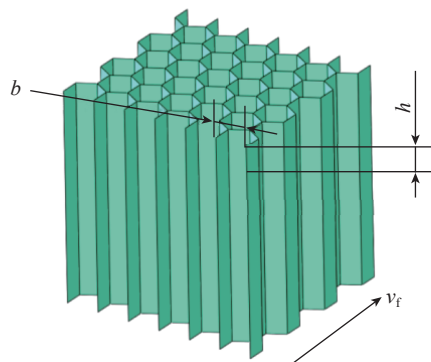


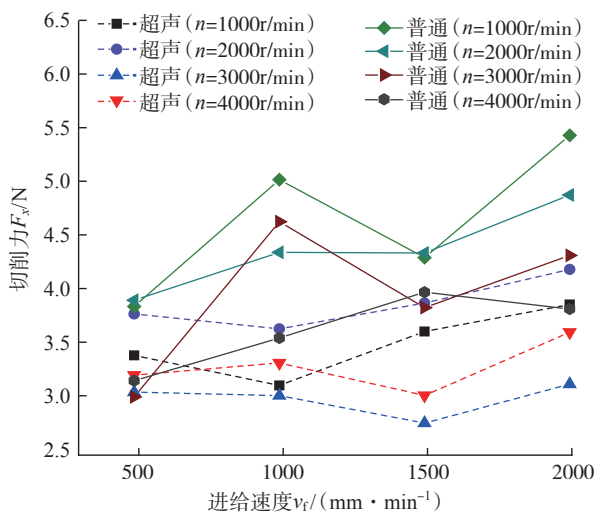
图 7 各工艺参数示意图

Fig.7 Schematic diagram of processing parameters

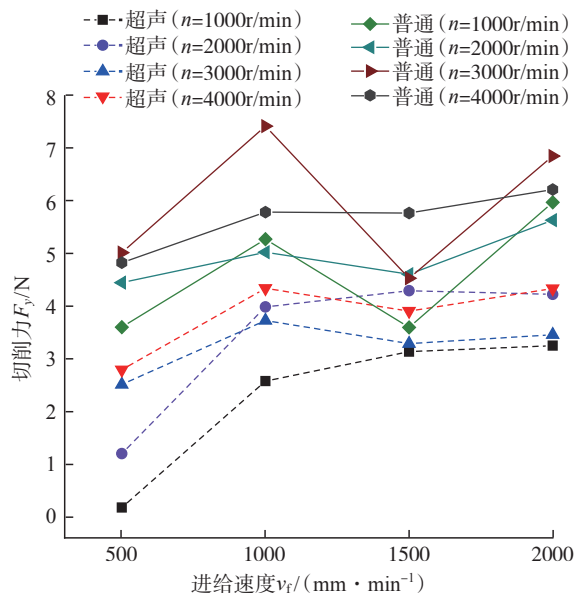
3 结果与讨论

3.1 平均切削力

从图 8 (a) 可以看出,随着进给速度的增加,普通加工中平均切削力 F_{x1} 递增趋势明显,以主轴转速 $n=1000\text{r/min}$ 为例,进给速度 $v_f=2000\text{mm/min}$ 时,比进给速度为 500mm/min 时切削力增加了 1.6N ,增加了 41.3% ,超声辅助加工中平均切削力 F_{x2} 递增趋势相对比较平缓,以 $n=1000\text{r/min}$ 为例,切削力只增加 0.5N (13.9%)。超声辅助加工改善切削力趋势明显,在主轴



(a) 刀具切宽方向的平均切削力 F_x



(b) 刀具进给方向的平均切削力 F_y

图 8 在不同主轴转速下进给速度对超声辅助加工与普通加工切削力 F_x 、 F_y 的影响

Fig.8 Influence of feed velocity on cutting force F_x 、 F_y under ultrasonic assisted machining and conventional machining at different spindle speeds

转速 $n=3000\text{r/min}$ 时,当进给速度 $v_f=500\text{mm/min}$ 时,两者切削力基本持平,而当进给速度 v_f 达到 1000mm/min 、 1500mm/min 、 2000mm/min 时,超声辅助加工中平均切削力 F_x 分别比普通加工降低了 34.9% 、 28.0% 和 27.7% 。

如图 8 (b) 所示,随着进给速度增加,普通加工与超声辅助加工在进给方向上的平均切削力 F_{y1} 、 F_{y2} 的趋势与图 8 (a) 中 F_x 类似,且超声加工在该方向上切削力的减小程度更高,以主轴转速 $n=3000\text{r/min}$ 为例,当进给速度 v_f 达到 500mm/min 、 1000mm/min 和 1500mm/min 、 2000mm/min 时,超声加工切削力 F_y 分别比普通加工降低了 50.5% 、 50.1% 、 27.7% 和 49.9% 。

3.2 加工表面质量

使用 AOSVI T2-M100 光学显微镜对 $n=3000\text{r/min}$ 工艺条件下的试件切削表面进行观察,放大倍数为 20 倍。如图 9 所示,普通加工条件下的蜂窝孔格单边和多边均易被撕裂,切口处的毛刺多且较长,毛刺出现位置不一,切口表面凹凸不平;而超声辅助加工的工件在孔格单边与切口处毛刺率较低,表面平整,毛刺长度缩短。其中超声加工在 $v_f=1000\text{mm/min}$ 时,毛刺率最低,毛刺长度较短,而在 $v_f=500\text{mm/min}$ 与 $v_f=2000\text{mm/min}$ 时毛刺较多较长,该现象可为探究加工表面质量与进给速度之间的规律提供参考。

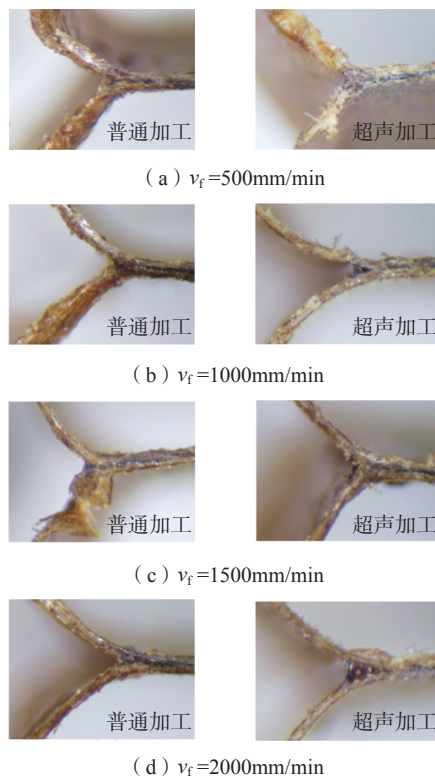


图 9 圆盘刀在不同加工方式下加工的蜂窝材料的表面形貌
Fig.9 Surface morphologies of honeycomb materials cut with disk cutter under different processing modes

超声振动作用会使得圆盘刀刃口处的切屑与未切削基体之间更容易分离,该分离运动产生高速高频的拉力,使得材料断裂口产生裂纹并发生扩展,刀具在进一步切削时削力会更小,相应地加工表面孔格变形也较小。

4 结论

(1)通过圆盘刀模态仿真分析结果可知,系统的谐振频率随圆盘刀具外径增大而减小,随刀具厚度增加而增大,随刀具楔角增大而减小。

(2)刀具外径和厚度对系统的谐振频率影响程度较大,可通过调整刀具外径和厚度进行系统频率的设计,刀具楔角的大小影响刀具锋利度和刀具强度,因此应选择合适的楔角。

(3)通过 Nomex 蜂窝材料普通加工与超声辅助加工对比试验可知,超声辅助加工可以有效降低 Nomex 蜂窝材料加工过程中的平均切削力。结果表明,超声辅助加工中的平均切削力比普通加工的平均切削力在刀具切宽方向和进给方向上分别降低了 34.9% 和 50.5%。

(4)Nomex 蜂窝材料加工工艺试验结果表明,超声辅助加工在提高 Nomex 蜂窝材料加工质量上具有较大优势,超声辅助加工相较普通加工的材料表面更加平整,毛刺更少,毛刺长度更短。

参考文献

[1] XU J, DENG Y, WANG C X, et al. Numerical model of unidirectional CFRP in machining: Development of an amended friction model[J]. Composite Structures, 2021, 256: 113075.

[2] 程文礼,袁超,邱启艳,等.航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J].航空制造技术,2015,58(7):94-98.

CHENG Wenli, YUAN Chao, QIU Qiyang, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(7): 94-98.

[3] 董辉跃,薛辉,刘刚.纸基蜂窝模块化固持方法研究[J].航空学报,2010,31(6):1250-1256.

DONG Huiyue, XUE Hui, LIU Gang. Study on method of modularization fixation for paper honeycomb core[J]. Acta Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1250-1256.

[4] 谢坤,董辉跃,薛辉,等. Nomex 纸基蜂窝零件新加工工艺研究[J].机械科学与技术,2011(11):1811-1815.

XIE Kun, DONG Huiyue, XUE Hui, et al. Research on new processing technology of Nomex paper-based honeycomb parts[J]. Mechanical Science and Technology, 2011(11): 1811-1815.

[5] 金成柱. Nomex 蜂窝材料高速加工工艺及固持可靠性研究[D].杭州:浙江大学,2006.

JING Chengzhu. Research on Nomex honeycomb material high-speed processing technology and its holding reliability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[6] 文立伟,严斌,肖军,等.复合材料超声切割系统及稳定性研究[J].航空制造技术,2010,53(17):49-52.

WEN Liwei, YAN Biao, XIAO Jun, et al. Research on ultrasonic cutting system and stability of composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 49-52.

[7] 高军,崔巍.超声切割技术在复合材料加工领域的应用[J].航空制造技术,2006,49(6):108-109.

GAO Jun, CUI Wei. Application of ultrasonic cutting technology in the field of composite material processing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(6): 108-109.

[8] 王毅丹,王宣平,康仁科,等.直刃尖刀超声辅助切割 Nomex 蜂窝芯切削力分析[J].机械工程学报,2017(19):73-82.

WANG Yidan, WANG Xuanping, KANG Renke, et al. Analysis of cutting force of Nomex honeycomb core for ultrasonic assisted cutting with straight edge and sharp knife[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(19): 73-82.

[9] 王健健,张建富,冯平法.航空先进材料旋转超声椭圆振动加工研究进展[J].航空制造技术,2018,61(21):30-37.

WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, FENG Pingfa. Research progress of rotating ultrasonic elliptical vibration machining of advanced aeronautical materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(21): 30-37.

[10] 马付建,王际帆,张生芳,等.刀具参数对 Nomex 蜂窝芯超声切削性能影响分析[J].中国工程机械学报,2016,14(4):316-322.

MA Fujian, WANG Jifan, ZHANG Shengfang, et al. Analysis of influence of tool parameters on ultrasonic cutting performance of Nomex honeycomb core[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2016, 14(4): 316-322.

[11] 张迅,董志刚,王毅丹,等. Nomex 蜂窝芯直刃尖刀超声切割表面微观形貌特征[J].机械工程学报,2017,53(19):90-99.

ZHANG Xun, DONG Zhigang, WANG Yidan, et al. Micro-morphological characteristics of ultrasonic cutting surface of Nomex honeycomb core with straight edge and sharp knife[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 90-99.

[12] 方亮. Nomex 蜂窝材料超声铣削圆形刀研制[D].杭州:杭州电子科技大学,2013.

FANG Liang. Development of Nomex honeycomb material ultrasonic milling circular cutter[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013.

[13] 黄秀秀. Nomex 蜂窝复合材料直刃刀超声复合切割机理研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2015.

HUANG Xiuxiu. Research on ultrasonic composite cutting mechanism of Nomex honeycomb composite with straight blade[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015.

[14] 吴胜游. Nomex 蜂窝复合材料超声切割断裂机理研究[D].杭州电子科技大学,2016.

WU Shengyou. Research on fracture mechanism of ultrasonic cutting of Nomex honeycomb composite[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2016.

[15] AKTAY L, JOHNSON A F, KROPLIN B H. Numerical modelling of honeycomb core crush behavior[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(9): 2616-2630.

通讯作者:查慧婷,博士,研究方向为超声辅助加工工艺与装备。

(责编 七七)