

引文格式: 孟倩, 王毅丹, 董志刚, 等. 圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯的切削力和表面质量研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 88-95.

MENG Qian, WANG Yidan, DONG Zhigang, et al. Cutting force and surface quality research on ultrasonic cutting of Nomex honeycomb core with disc cutter[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 88-95.

## 圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯的切削力和表面质量研究\*

孟倩, 王毅丹, 董志刚, 康仁科

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

[摘要] 为了研究圆片刀加工参数对切削力和表面质量的影响, 首先对圆片刀超声切削和普通切削的切削力进行了理论分析, 在此基础上开展了圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯试验, 获得了进给速度、刀具转速和超声振幅对切削力的影响规律。进一步以蜂窝芯孔壁撕裂数量和长度作为加工表面质量的表征参数, 定量研究了加工参数对于蜂窝芯表面质量的影响。试验结果表明: 普通切削条件下, 增大刀具转速和减小进给速度可以有效降低切削力; 随着超声振幅的增大, 切削力显著减小, 相比普通切削, 当超声振幅为 35 $\mu\text{m}$  时, 进给方向的切削力和刀具轴向的切削力分别减小 53.1% 和 33.9%; 切削力试验结果与理论分析结果一致。此外, Nomex 蜂窝芯孔壁撕裂数量随着刀具转速的增大和进给速度的降低而减少, 超声振动作用可以有效减少蜂窝芯孔壁撕裂的数量和长度。研究为圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯的加工参数的选择提供参考。

关键词: Nomex 蜂窝芯; 圆片刀; 超声切削; 切削力; 表面质量

### Cutting Force and Surface Quality Research on Ultrasonic Cutting of Nomex Honeycomb Core With Disc Cutter

MENG Qian, WANG Yidan, DONG Zhigang, KANG Renke

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] In order to study the effect of processing parameters on cutting force and surface quality, the cutting forces in ultrasonic cutting and conventional cutting were theoretically analyzed. On this basis, ultrasonic cutting tests of Nomex honeycomb core with disc cutter were conducted to obtain the influence of the feeding speed, rotating speed and ultrasonic amplitude on cutting force. Further, the number and length of tearing defect were selected as characterization parameters of surface quality and the influence of processing parameters on the surface quality of honeycomb core were quantitatively studied. The test results show that the cutting forces decrease with the increase of rotating speed and the decrease of feeding speed in conventional cutting. As the ultrasonic amplitude increases, the cutting forces decrease significantly. Compared with the conventional cutting, the cutting forces in feeding direction and axis direction of cutter are separately reduced by 53.1% and 33.9% when the ultrasonic amplitude increases to 35 $\mu\text{m}$ . The test results of cutting force are consistent with the theoretical analysis. In addition, the number of tearing defects of Nomex honeycomb core decreases with the increase of rotating speed and the decrease of the feeding speed, and the number and length of tearing defects are simultaneously improved in ultrasonic cutting. The conclusions provide guidance for selection of processing parameters in ultrasonic cutting of Nomex honeycomb core.

Keywords: Nomex honeycomb core; Disc cutter; Ultrasonic cutting; Cutting force; Surface quality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.06.088

\* 基金项目: 装备预研教育部联合基金(6141A02022128); 上海飞机制造有限公司委托课题(COMAC-SFGS-2018-2782)。

随着航空航天领域对飞行器减重要求的提高,复合材料在飞行器中的应用日益增加。Nomex 蜂窝复合材料因具有高比强度和比刚度以及优良的绝缘性能、透波性能和耐热性在雷达罩等飞行器的结构件中得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。Nomex 蜂窝芯作为蜂窝芯夹层结构件的重要组成部分,其加工质量是影响蜂窝芯夹层结构使用性能的关键因素,有研究表明蜂窝芯加工缺陷会降低整体结构的弯曲和疲劳性能<sup>[5-6]</sup>。Nomex 蜂窝芯是由厚度小于 0.1mm 的芳纶纸制成的多孔薄壁材料。由于蜂窝芯内刚度弱,在切削力作用下容易出现孔格变形、撕裂、压塌等加工缺陷<sup>[7-8]</sup>。此外,较大的切削力也会增加蜂窝芯的固持难度,进而影响蜂窝芯的加工质量甚至导致蜂窝芯工件报废<sup>[9]</sup>。

近年来,国内外学者和技术人员开展了 Nomex 蜂窝芯的超声切削技术研究。与传统高速铣削相比,超声切削蜂窝芯具有切削力小、加工质量好、环境友好等明显优势<sup>[10]</sup>。圆片刀超声切削通常用于蜂窝芯材料余量的片切去除和蜂窝芯表面成形加工。因此,圆片刀超声切削工艺的好坏将直接影响蜂窝芯的加工质量。因此,选取合适的圆片刀超声切削工艺参数,以减小切削过程的切削力,提高蜂窝芯的加工质量,是圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯需要解决的关键问题。

现有研究在圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯的切削力和表面质量方面开展了一些工作,大多采用了试验研究和有限元仿真的方法。袁信满等<sup>[11]</sup>采用响应曲面法对切削力试验数据进行拟合,建立了超声复合铣削 Nomex 蜂窝芯的进给力预测模型,研究指出宜采用大切深、小切宽加工工艺以降低切削力;牛景露等<sup>[12]</sup>建立了圆片刀在单纯超声振动条件下的切削力经验公式,研究表明增大超声振幅有助于减小切削力;姚云龙<sup>[13]</sup>通过单因素试验研究,定性对比了不同加工参数下的蜂窝芯加工表面质量,研究表明增大圆片刀转速能够优化表面质量。李秀渊<sup>[14]</sup>在建立 Nomex 蜂窝芯有限元模型的基础上,以优化进给方向切削力为目标,研究了圆片刀超声切削时刀具转速、进给速度、切削深度、切削宽度 4 个切削参数的最优组合。此外,有部分学者采用有限元仿真的研究方法,通过改变刀具结构和刀具参数来提高刀具振动性能、降低加工中的切削力<sup>[15-17]</sup>。这些试验研究的方法很难全面揭示加工参数对于切削力的影响规律,而有限元研究方法受 Nomex 蜂窝芯材料构成和结构的限制,目前建立的有限元模型较为初步,很难模拟 Nomex 蜂窝芯的受力断裂过程。在切削力理论研究方面,吴胜游等<sup>[18]</sup>基于金属切削原理建立了切削力模型,从理论上解释了超声切削加工可以有效减小切削力,分析过程未深入考虑 Nomex 蜂窝芯材料自身的力学特

性。Xiang 等<sup>[19]</sup>通过理论分析对比了纵扭复合加工和纯纵振切削 Nomex 蜂窝芯的切削角度,并通过试验研究了刀具切向振动对切削力和表面质量的影响,但是未具体分析刀具轴向振动对加工质量的作用。目前对于圆片刀超声切削过程切削力的理论分析不够深入,针对 Nomex 蜂窝芯表面质量的研究大都定性地对不同加工参数下的切削形貌,缺少定量评价,此外,超声切削参数对表面质量的影响规律还不清楚。

本文通过对比分析超声切削和普通切削时材料的受力分离过程,研究了影响切削力大小的切削参数和超声参数,获得了各个参数对切削力的影响规律,揭示了超声切削时刀具振动对材料分离的作用。进一步开展了刀具转速、进给速度和超声振幅的单因素试验,研究并总结了圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯的加工形貌特征。在此基础上确定合适的表面质量表征参数,通过试验研究得到切削参数和超声参数对切削力和表面质量的影响规律,为圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯提供工艺参考。

## 1 圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯切削力分析

如图 1 所示,圆片刀超声切削时,超声振动施加于刀具轴向,同时刀具旋转并进给,实现 Nomex 蜂窝芯的切削。考虑到蜂窝芯为多孔薄壁材料,圆片刀切削过程中,刀具周刃对多个蜂窝孔壁进行切削,因此针对圆片刀边缘  $P$  点处的一小段切削刃进行分析。由于蜂窝壁较薄, $P$  点处的较大直径的圆弧切削刃可以简化为一段直刃。

为了研究刀具超声振动对 Nomex 蜂窝芯分离过程的作用,针对超声切削(UC)和普通切削(CC)过程中刀具与材料的作用力进行对比分析。未施加超声振动时,刀具通过旋转和进给运动对蜂窝材料进行切削,刀具前刀面与材料相互挤压和摩擦产生的作用力为切削

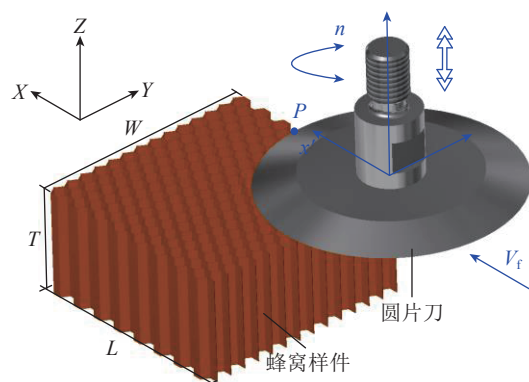


图 1 圆片刀超声切削示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic cutting with disc cutter

力的主要来源,切削过程中蜂窝孔壁经历树脂基体的脆性断裂和芳纶纤维的剪切或拉伸断裂<sup>[20]</sup>。切削过程中刀具局部切削刃受力情况如图2所示。其中,  $F_N$  为切屑对刀具前刀面的压力;  $F_b$  为压力  $F_N$  产生的作用于刀具前刀面的摩擦力合力;  $F_b$  在  $d_y$  方向和  $d_\theta$  方向产生分量  $F_{bh}$  和  $F_{b\theta}$ 。由于圆片刀有后角,忽略已加工表面对于刀具底面的作用力。刀具在进给方向和刀具轴向的作用力  $F_X$  和  $F_Z$  为:

$$\begin{cases} F_X = F_{bv} = F_b \cos \gamma \cos \theta + F_N \cos \gamma \sin \theta = \\ F_N \cos \gamma (\mu_b \cos \theta + \sin \theta) \\ F_Z = F_b \cos \gamma \sin \theta - F_N \cos \gamma \cos \theta = \\ F_N \cos \gamma (\mu_b \sin \theta - \cos \theta) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\theta$  为刀具楔角,角度范围为  $0 \sim 90^\circ$ ;  $\gamma$  为  $F_{b\theta}$  和  $F_b$  在刀具上表面的夹角;  $F_{bv}$  为切屑作用于刀具前刀面的摩擦力合力  $F_b$  在  $d_x$  方向的分力;  $\mu_b$  为切屑与刀具前刀面的摩擦系数。由几何关系可得,  $\gamma$  角的大小与刀具转速和进给速度的关系为:

$$\gamma = \arctan(F_{bh}/F_{b\theta}) = \arctan(V_s/(V_f \cdot \cos \theta)) = \arctan((V_s/V_f)/\cos \theta) \quad (2)$$

其中,刀具切向速度  $V_s = \pi D n / 6000$ ,  $D$  为圆片刀刀具直径;  $V_f$  为进给速度。引入参数  $\xi = V_s/V_f = (\pi D / 6000) \cdot n / V_f$ , 并将式(2)带入式(1)整理可得:

$$\begin{cases} F_X = F_N \cos(\arctan(\xi/\cos \theta))(\mu_b \cos \theta + \sin \theta) \\ F_Z = F_N \cos(\arctan(\xi/\cos \theta))(\mu_b \sin \theta - \cos \theta) \end{cases} \quad (3)$$

其中,由于  $(\xi/\cos \theta) > 0$ , 则  $\arctan(\xi/\cos \theta)$  的取值在  $(0, \pi/2)$  范围内,且随  $(\xi/\cos \theta)$  的增大而增大,因此  $\cos(\arctan(\xi/\cos \theta))$  随着刀具切向速度  $V_s$  与进给速度  $V_f$  比值  $\xi$  的增大而减小。可以得到,增大  $\xi$  值可以使切削力  $F_X$  和  $F_Z$  减小,即在刀具切削过程中,切削力随着刀具转速的增大和刀具进给速度的减小而降低。

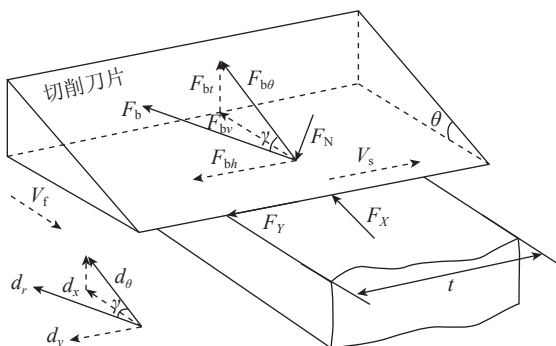


图2 刀具局部受力图  
Fig.2 Local cutting force of disc cutter

在圆片刀轴向施加超声振动时,沿刀具轴线方向的瞬时振动冲击力  $F_U$  可表示为:

$$F_U = m \cdot a(t) = -4(\pi f)^2 m \cdot A \sin(2\pi f t) \quad (4)$$

其中,  $m$  为圆片刀刀具质量;  $a(t)$  表示圆片刀的瞬时加速度值,  $f$  为超声振动频率。

当在圆片刀附加轴向的超声振动后,此时使蜂窝孔壁产生裂纹并扩展的作用力主要为刀具的超声冲击力  $F_U'$ 。图3表示单个振动周期内刀具与蜂窝材料的切削过程。

在一个振动周期  $T$  ( $t_1 - t_5$ ) 内,刀具于  $t_1$  时刻开始与切屑接触并向上运动,在  $t_2$  时刻到达最高切削位置后向下运动。假定在  $t_5$  时刻刀具与切屑分离,切削过程中刀具前刀面与切屑的接触时间为  $t_s'$ 。则单个周期内刀具对于切屑产生的平均冲击作用力  $F_U'$  可表示为:

$$F_U' = \frac{t_s'}{T} F_U = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_5} -4(\pi f)^2 m \cdot A \sin(2\pi f t) \quad (5)$$

由式(5)可知,平均冲击力  $F_U'$  的大小与超声振幅、超声振动频率以及单个周期的有效接触时间  $t_s'$  有关。同时,由于刀具与切屑间歇接触,一个振动周期内,刀具前刀面对切屑产生的平均正压力  $F_{UN}$  为:

$$F_{UN} = \frac{t_s'}{T} F_N \quad (6)$$

即圆片刀附加超声振动后,刀具与蜂窝孔壁材料在进给方向和刀具轴向的作用力为:

$$\begin{cases} F_{UX} = \frac{t_s'}{T} \cdot F_N \cos(\arctan(\xi/\cos \theta))(\mu_b \cos \theta + \sin \theta) \\ F_{UZ} = \frac{t_s'}{T} \cdot F_N \cos(\arctan(\xi/\cos \theta))(\mu_b \sin \theta - \cos \theta) + F_U' \end{cases} \quad (7)$$

沿刀具进给方向的切削力对蜂窝孔壁产生挤压作用,而蜂窝芯材料在刀具进给方向的刚度较弱,此方向的挤压力容易使蜂窝孔壁在切削位置产生弯曲变形,进而影响蜂窝芯的加工质量;沿刀具轴向的切削力在切削过程中对切屑产生向上的挤压作用使切屑分离。由式(7)可知,影响切削力大小的加工参数主要有刀具转速  $n$ 、进给速度  $V_f$  和超声振幅  $A$ , 其中,切削力  $F_{UX}$  和  $F_{UZ}$  随着刀具切向速度  $V_s$  与进给速度  $V_f$  的比值  $\xi$  的增大而

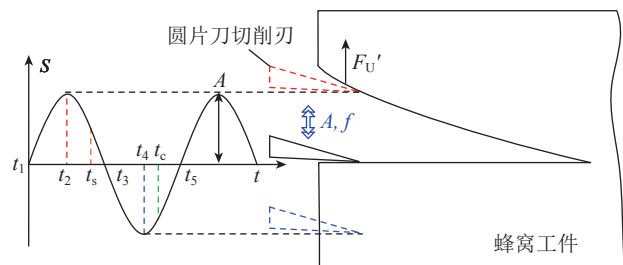


图3 刀具超声振动切削过程  
Fig.3 Ultrasonic vibration cutting process of disc cutter

减小,增大超声振幅使刀具对材料的超声冲击力  $F_U'$  增加。对比式(3)和式(7),由于超声切削时刀具与切屑间歇接触,  $t_s'/T < 1$ ,因此相对于普通切削,超声切削时的切削力明显降低。

## 2 试验材料及方法

Nomex 蜂窝芯超声切削加工试验在三轴数控铣床上进行。圆片刀通过自主研发的超声切削系统与机床主轴相连,超声切削系统振动频率为 20.07kHz。Nomex 蜂窝芯的结构特征如图 4 所示,  $t$  为单层蜂窝纸的厚度,  $W$ 、 $L$ 、 $T$  为蜂窝芯的 3 个方向。试验采用 NH-1.83-29 牌号 Nomex 蜂窝芯材料,蜂窝芯孔格边长  $l$  为 1.83mm,蜂窝芯密度  $\rho$  为  $29\text{kg/m}^3$ 。

采用单因素试验法分别研究刀具转速  $n$ 、进给速度  $V_f$ 、刀具振幅  $A$  3 个参数对 Nomex 蜂窝芯切削力和表面质量的影响规律。Nomex 蜂窝芯超声切削试验平台如图 5 所示,蜂窝芯样件在  $W$ - $L$ - $T$  方向尺寸分别为 20mm、50mm、40mm;圆片刀直径为  $\phi 50.8\text{mm}$ 。切削时刀具沿  $X$  方向进给,切削深度为 2mm。切削过程中刀具中心与工件  $W$  方向的中心线重合,保证刀具从蜂窝芯的中间位置进行切削。

蜂窝芯超声切削加工的试验参数如表 1 所示,每组切削试验重复 3 次。采用 Kistler 9119AA2 型号测力仪采集切削力数据。使用激光位移传感器(LK-H025, Keyence, Japan)对圆片刀切削刃边缘处的超声振幅进行测量。试验后,对切削工件表面选取 2 个中间的切削区域,通过光学显微镜(ISM-DL301, INSIZE)进行表面质量观测。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 切削力试验结果与分析

圆片刀不同切削参数下的切削力试验结果如图 6 所示。图 6(a)为进给速度对切削力的影响,当进给速

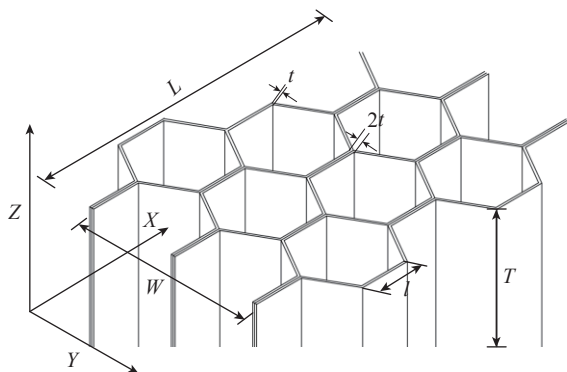


图 4 Nomex 蜂窝芯结构示意图  
Fig.4 Diagram of Nomex honeycomb core

度  $V_f$  从 2000mm/min 增大到 6000mm/min 时,超声切削和普通切削条件下的切削力均逐渐增大。其中,普通切削条件下的进给力  $F_x$  增大 41.76%,轴向力  $F_z$  增大 18.74%;超声振幅为  $25\mu\text{m}$  的超声切削条件下,进给力  $F_x$  增大 37.1%,轴向力  $F_z$  增大 10.8%。图 6(b)为刀具转速对切削力的影响,当主轴转速  $n$  从 500mm/min 增大到 1500mm/min 时,超声切削和普通切削条件下的切削力均呈下降趋势。切削力随刀具转速和进给速度的变化规律与理论分析结果一致。式(7)表明超声切削时进给方向和刀具轴向的切削力减小,由试验结果可知,在相同的刀具转速和进给速度条件下,超声切削力均小于普通切削力;同时,由于超声切削过程中,主运动

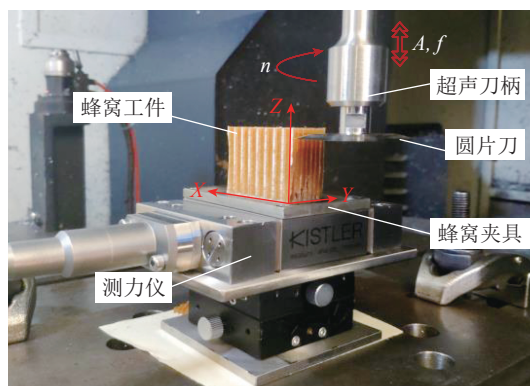


图 5 Nomex 蜂窝芯超声切削试验平台  
Fig.5 Cutting platform for ultrasonic cutting of Nomex honeycomb core

表 1 Nomex 蜂窝芯超声切削试验参数  
Table 1 Parameters of ultrasonic cutting tests

组别	进给速度 $V_f / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	刀具转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	刀具切向速度 $V_c / (10^3 \text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	超声振幅 $A / \mu\text{m}$
1	2000	1000	159.6	无
2	4000	1000	159.6	无
3	6000	500	79.8	无
4	6000	1000	159.6	无
5	6000	1500	239.4	无
6	6000	500	79.8	15
7	6000	500	79.8	25
8	6000	500	79.8	35
9	2000	1000	159.6	25
10	4000	1000	159.6	25
11	6000	1000	159.6	25
12	6000	1500	239.4	25

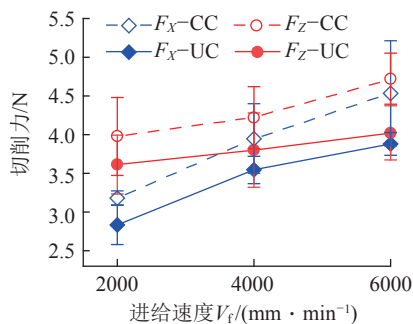
为刀具轴向的超声振动,刀具的高频冲击对材料分离起到主要作用。因此,改变刀具转速和进给速度对切削力的影响程度低于普通切削。

根据式(3)可知,在普通切削条件下,刀具转速和进给速度影响蜂窝材料所受到的挤压力和摩擦力,增大进给速度或减小刀具转速使 $\zeta$ 变小,从而使进给方向切削力 $F_x$ 和刀具轴向切削力 $F_z$ 增大。试验得到刀具切向速度和进给方向速度的比值 $\zeta$ 对切削力的影响规律如图7所示。与理论分析结果一致,在普通切削和超声切削条件下,随着 $\zeta$ 值的增大,材料受到的进给力 and 轴向力均逐渐降低。当刀具切向速度和进给速度的比值 $\zeta$ 增大到79.8时,在普通切削条件下,进给方向的切削力下降57.7%;在超声切削条件下,进给方向的切削力下降33.2%。在不同的 $\zeta$ 下,超声切削力均低于普通切削的切削力。

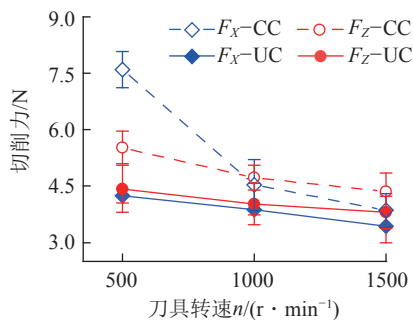
超声振幅对切削力的影响如图8所示。在0~35 $\mu\text{m}$ 的超声振幅范围内,随着超声振幅的增大,进给力 and 轴向力明显降低。当超声振幅增加到35 $\mu\text{m}$ 时,相比于普通切削,进给力 $F_x$ 降幅达53.1%,刀具轴向力 $F_z$ 减小33.9%。切削力试验结果表明,超声切削力受超声振幅影响较大,且随超声振幅的增大而减小。

### 3.2 表面质量观测结果与分析

图9所示为进给速度 $V_f$ 为6000mm/min,刀具转速



(a) 进给速度对切削力的影响



(b) 刀具转速对切削力的影响

图6 切削参数对切削力的影响

Fig.6 Effect of cutting parameters on cutting force

$n$ 为500r/min时,超声切削和普通切削的Nomex蜂窝芯加工表面。通过观测可知,普通切削得到的加工表面存在大量孔壁撕裂以及未切断芳纶纤维形成的毛刺,其中,孔壁撕裂是影响蜂窝芯表面质量的主要加工缺陷,表现为材料从孔壁分离但没有完全去除。蜂窝芯孔壁撕裂长度约占蜂窝孔格边长的25%~80%,且集中分布在蜂窝孔格的节点部位。由于蜂窝芯材料的单壁和双壁力学性能的差异,在节点区域容易产生让刀和过切现象,从而产生孔壁撕裂现象。对比超声和普通切削后的蜂窝芯表面可知,超声切削后的毛刺和孔壁撕裂缺陷减少,加工质量明显提高。

针对孔壁撕裂加工缺陷,本文选取孔壁撕裂的总数量 $N_s$ 和孔壁撕裂的平均长度 $L_s$ 作为表征参数以评价蜂窝芯表面质量。对于每组加工参数下3次重复试验得到的蜂窝芯加工表面进行观测。图10为孔壁撕裂长度 $L_s$ 的测量示意图,孔壁撕裂长度取相同参数下加工表面孔壁撕裂长度的平均值,并统计长度大于300 $\mu\text{m}$ 的孔壁撕裂总数量 $N_s$ 。

图11(a)为进给速度对于孔壁撕裂的影响规律,在超声切削和普通切削条件下,孔壁撕裂的数量 $N_s$ 均随着刀具进给速度的降低而减小,且超声切削条件下

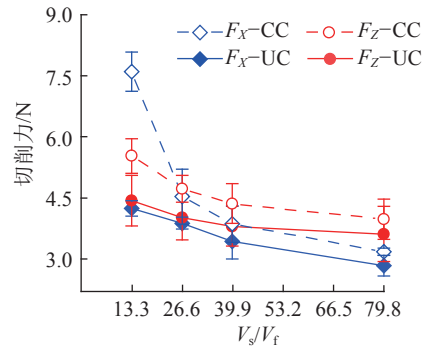


图7  $V_s/V_f$ 对切削力的影响

Fig.7 Effect of  $V_s/V_f$  on cutting force

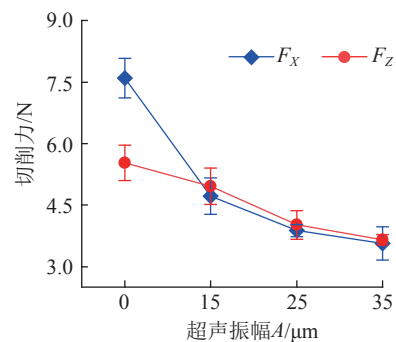
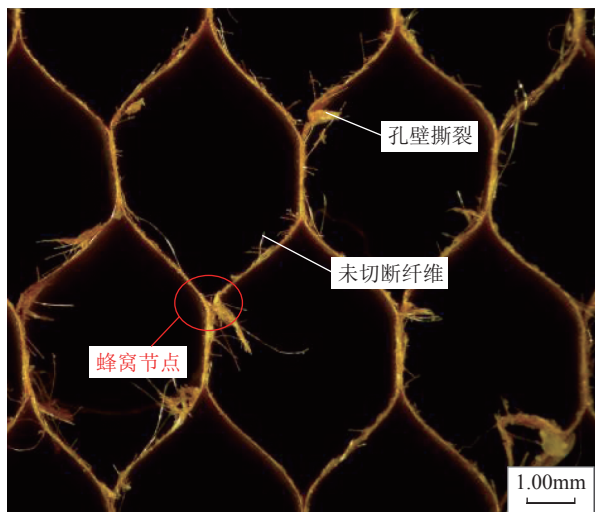
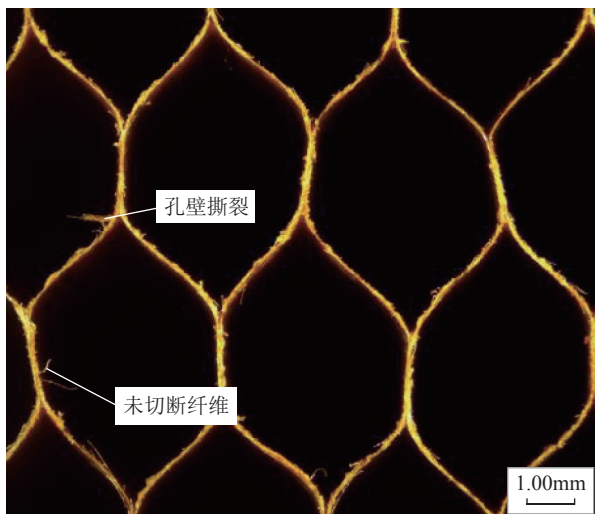


图8 超声振幅对切削力的影响

Fig.8 Relationship between cutting force and ultrasonic amplitude



(a) 无超声



(b) 有超声

图9 Nomex 蜂窝芯切削加工表面

Fig.9 Machining surfaces of Nomex honeycomb core

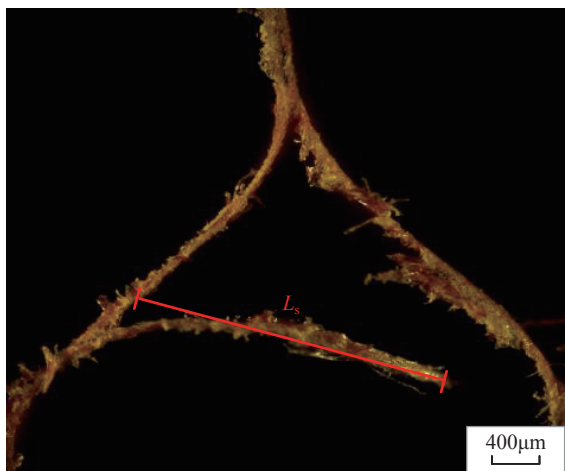
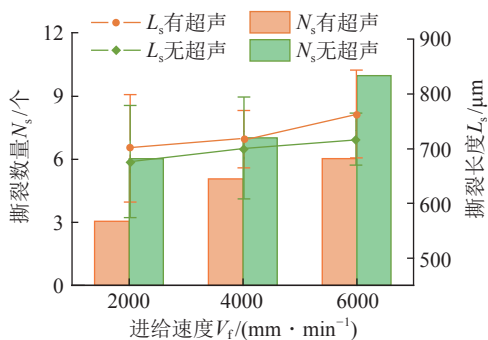


图10 孔壁撕裂长度测量示意图

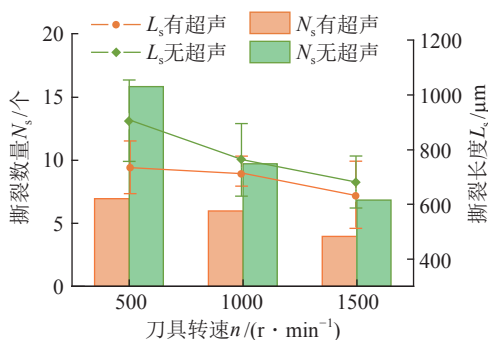
Fig.10 Schematic diagram of measurement method of tearing defect

的孔壁撕裂数量相对于普通切削明显减少,尤其是在6000mm/min的较高进给速度条件下,与普通切削的蜂窝芯表面质量相比,超声切削减少孔壁撕裂的效果显著。此外,在超声切削和普通切削条件下,刀具进给速度对孔壁撕裂长度的影响不大。切削力理论分析结果表明,减小刀具进给速度能够有效减少刀具对于材料在进给方向的挤压力,因此,由孔壁受压变形产生的孔壁撕裂的数量随着进给速度的降低而减少,同时孔壁撕裂长度也随之减小。超声切削条件下,由于刀具与切屑间歇接触,超声切削力相比普通切削力明显降低,超声切削条件下的孔壁撕裂数量显著减少。

刀具转速对于孔壁撕裂的影响如图11(b)所示,在超声切削和普通切削条件下,孔壁撕裂的数量 $N_s$ 和孔壁撕裂平均长度 $L_s$ 均随着刀具转速增大而减小;超声振动的引入,进一步降低了孔壁撕裂的长度和数量。结合切削力的试验结果可知,增大刀具转速能够有效减小切削力,从而使孔壁撕裂缺陷的数量和长度均减少。同样,由于超声切削力低于普通切削力,超声切削条件下的表面质量得到改善。此外,由于超声切削时,刀具高频振动速度大于圆片刀的切向速度,主切削运动为刀具超声振动,此时使蜂窝壁断裂分离的主要作用力是圆片刀振动产生的高频冲击力。因此,有超声



(a) 进给速度对孔壁撕裂的影响



(b) 刀具转速对孔壁撕裂的影响

图11 切削参数对孔壁撕裂的影响

Fig.11 Effect of cutting parameters on tearing defect

作用时,刀具转速变化对切削力的影响程度较低,孔壁撕裂数量变化趋势较小,但是增大刀具转速能够加强刀具对蜂窝孔壁产生的剪切作用,故撕裂长度随刀具转速的增大而减小。

图 12 为超声振幅对孔壁撕裂的影响。在进给速度  $V_f$  为 6000mm/min, 转速  $n$  为 500r/min 的切削条件下, 相比普通切削的加工表面, 超声切削时, 蜂窝芯材料在刀具进给方向的切削力显著减少, 蜂窝孔壁受力变形的程度降低, 从而表现为孔壁撕裂数量  $N_s$  减少。随着超声振幅的增大, 超声切削力减小, 孔壁撕裂数量  $N_s$  随之减少, 当超声振幅增大到 35 $\mu$ m 时, 孔壁撕裂的数量  $N_s$  减少 80%; 与普通切削相比, 超声切削条件下的孔壁撕裂长度有所改善, 但是随着超声振幅增大, 孔壁撕裂的平均长度不会进一步减小。

#### 4 结论

本文建立了圆片刀超声切削的切削力理论公式, 分析了刀具转速、进给速度和超声振幅对进给方向切削力和刀具轴向切削力的影响规律。在此基础上开展了 Nomex 蜂窝芯超声切削试验, 选取蜂窝芯孔壁撕裂的数量  $N_s$  和平均长度  $L_s$  作为蜂窝芯表面质量的表征参数, 对不同加工参数下的表面质量进行评价。主要结论有:

(1) 切削力理论分析结果表明, 圆片刀超声切削过程中, 影响切削力大小的加工参数主要有刀具转速  $n$ 、进给速度  $V_f$  和超声振幅  $A$ 。其中, 增大刀具切向速度  $V_s$  与进给速度  $V_f$  的比值  $\zeta$  能够降低进给方向和刀具轴向的切削力; 增大超声振幅  $A$  能够增大刀具对蜂窝材料的平均冲击力, 进而减小刀具与材料之间的挤压力和摩擦力。

(2) 提高刀具转速与降低进给速度可以有效降低进给方向和刀具轴向的切削力。当刀具转速与进给速度比值  $\zeta$  增大到 79.8 时, 在普通切削条件下, 进给方向切削力  $F_x$  降幅达 57.7%, 在超声振幅为 25 $\mu$ m 的超声

切削条件下, 进给方向切削力  $F_x$  降幅 33.2%; 切削力随超声振幅增大而减小, 当超声振幅增大到 35 $\mu$ m 时, 超声切削力  $F_x$  和  $F_z$  相比普通切削时分别降低 53.1% 和 33.9%。圆片刀的刀具转速、进给速度和超声振幅对切削力的影响规律与理论分析结果一致。

(3) 孔壁撕裂是圆片刀切削加工 Nomex 蜂窝芯的主要加工缺陷, 将孔壁撕裂的总数量  $N_s$  和孔壁撕裂的平均长度  $L_s$  作为表征参数以评价蜂窝芯的加工表面质量。超声切削和普通切削条件下, 与切削力变化规律一致, 孔壁撕裂数量随着进给速度降低和刀具转速增大而减少。孔壁撕裂的平均长度随着刀具转速的增大而减小, 而进给速度对于平均撕裂长度的影响不显著。超声切削条件下的孔壁撕裂数量相对于普通切削时明显减少, 且随着超声振幅的增大, 孔壁撕裂数量  $N_s$  不断减少。在 500r/min 低转速和进给速度为 6000mm/min 的较大进给速度条件下, 超声切削与普通切削相比可以显著提高 Nomex 蜂窝芯表面质量。

#### 参考文献

- [1] ZENKERT D. An introduction to sandwich construction[M]. London: Engineering Materials Advisory Services Ltd., 1997.
- [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.
- [3] CHENG Wenli, YUAN Chao, QIU Qiyan, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(7): 94-98.
- [4] 肖鹏远, 焦晓宁. 绝缘纸的性能及 Nomex 绝缘纸的特性和应用[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(1): 31-36, 40.
- [5] XIAO Pengyuan, JIAO Xiaoning. The insulation paper's properties and the performance and application of Nomex paper[J]. Technical Textiles, 2010, 28(1): 31-36, 40.
- [6] 李兴德, 周春苹, 王敏, 等. 雷达罩变厚度蜂窝展开加工的几何学方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(4): 58-61, 81.
- [7] LI Xingde, ZHOU Chunping, WANG Min, et al. Geometrical method for expanded planar milling of honeycomb core material with changing thickness for radome[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(4): 58-61, 41.
- [8] ABBADI A, TIXIER C, GILGERT J, et al. Experimental study on the fatigue behaviour of honeycomb sandwich panels with artificial defects[J]. Composite Structures, 2015, 120: 394-405.
- [9] MERUANE V, DEL FIERRO V. An inverse parallel genetic algorithm for the identification of skin/core debonding in honeycomb aluminium panels[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(12): 1426-1439.
- [10] LIU L Q, WANG H, GUAN Z W. Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading[J]. Composite Structures, 2015, 121: 304-314.
- [11] ZHOU Z W, WANG Z H, ZHAO L M, et al. Experimental investigation on the yield behavior of Nomex honeycombs under combined shear-compression[J]. Latin American Journal of Solids and

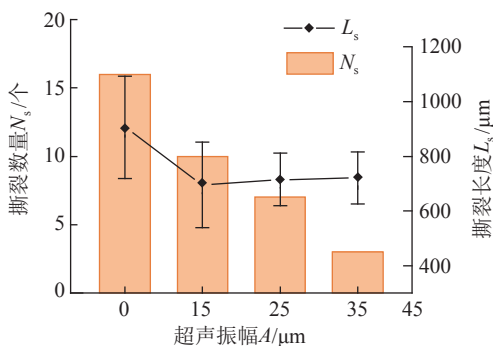


图 12 超声振幅对孔壁撕裂的影响

Fig.12 Relationship between ultrasonic amplitude and tearing defect

Structures, 2012, 9(4): 515–530.

[9] LIU G, KE Y L. Study on clamping method for paper honeycomb based on magnetic field and friction principle[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190(1–3): 65–72.

[10] 张海超, 龚清洪. Nomex 蜂窝芯结构零件超声切割与传统数控加工的对比研究 [C]// 第 17 届全国复合材料学术会议. 北京, 2012.

ZHANG Haichao, GONG Qinghong. Contrast on ultrasonic cutting and traditional NC machining for Nomex honeycomb sandwich component[C]//17th National Conference on Composite Materials. Beijing, 2012.

[11] 袁信满, 郑华林, 忻龙飞, 等. 基于响应曲面法的 NOMEX 蜂窝芯超声复合铣削力预测模型构建 [J]. 制造技术与机床, 2017(1): 103–108.

YUAN Xinman, ZHENG Hualin, XIN Longfei, et al. Prediction model of NOMEX honeycomb composite material force by response surface methodology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(1): 103–108.

[12] 牛景露, 朱祥龙, 康仁科, 等. 圆片刀超声切削蜂窝芯材料试验研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(3): 62–68.

NIU Jinglu, ZHU Xianglong, KANG Renke, et al. Experimental research on ultrasonic cutting honeycomb cores by disc cutter[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2017, 37(3): 62–68.

[13] 姚云龙. Nomex 蜂窝复合材料超声辅助切割理论及试验研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.

YAO Yunlong. Study on ultrasonic assisted cutting theory and experiment of nomex honeycomb composites[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2018.

[14] 李秀渊. 芳纶蜂窝材料超声切削过程仿真和实验研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.

LI Xiuyuan. Research on ultrasonic cutting process simulation and experiment for aramid honeycomb material[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.

[15] 何畏, 黄帅, 袁信满, 等. NOMEX 蜂窝复合材料超声切削锯齿圆盘铣刀动力学分析 [J]. 工具技术, 2017, 51(5): 37–40.

HE Wei, HUANG Shuai, YUAN Xinman, et al. Dynamics analysis of ultrasonic milling serrated disc cutter of NOMEX honeycomb composite material[J]. Tool Engineering, 2017, 51(5): 37–40.

[16] 张生芳, 王际帆, 马付建, 等. 刀具参数对超声切削蜂窝芯切削力及温度影响仿真分析 [J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(1): 57–61.

ZHANG Shengfang, WANG Jifan, MA Fujian, et al. Simulation analysis of tool parameters influence on feeding force and cutting temperature of ultrasonic cutting for honeycomb[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(1): 57–61.

[17] 庞皓文. 基于遗传算法的纸蜂窝超声圆盘切削刀具参数优化 [D]. 大连: 大连交通大学, 2018.

PANG Haowen. Study on parameter optimization of paper honeycomb ultrasonic disc cutting tool based on genetic algorithm[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018.

[18] 吴胜游, 胡小平, 孔倩, 等. 蜂窝复合材料圆盘刀超声切削研究 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2015, 35(5): 44–47.

WU Shengyou, HU Xiaoping, KONG Qian, et al. The research

on ultrasonic cutting of honeycomb composite material with circular cutter[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2015, 35(5): 44–47.

[19] XIANG D H, WU B F, YAO Y L, et al. Ultrasonic longitudinal-torsional vibration-assisted cutting of Nomex® honeycomb core composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5–8): 1521–1530.

[20] 石文天, 刘汉良, 张加波, 等. 芳纶纤维复合材料切削加工缺陷研究 [J]. 中国塑料, 2013, 27(4): 71–74.

SHI Wentian, LIU Hanliang, ZHANG Jiabo, et al. Research on cutting defects of aramid fiber composites[J]. China Plastics, 2013, 27(4): 71–74.

通讯作者: 康仁科, 教授, 博士, 研究方向为超精密加工技术、特种加工技术、难加工材料高效精密加工技术、数字化制造装备, E-mail: kangrk@dlut.edu.cn。

(责编 阳光)

(上接第 87 页)

[34] INOUE A, SEKIGAWA T, OGURI K, et al. Mechanism of fatigue life improvement due to fine particle shot peening in high strength aluminum alloy[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2010, 74(6): 370–377.

[35] AHMED A A, MHAEDE M, WOLLMANN M, et al. Effect of micro shot peening on the mechanical properties and corrosion behavior of two microstructure Ti–6Al–4V alloy[J]. Applied Surface Science, 2016, 363: 50–58.

[36] TAKESUE S, KIKUCHI S, AKEBONO H, et al. Effect of pre-treatment with fine particle peening on surface properties and wear resistance of gas blow induction heating nitrided titanium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 359: 476–484.

[37] ZHANG J W, LI X, YANG B, et al. Effect of micro-shot peening on fatigue properties of precipitate strengthened Cu–Ni–Si alloy in air and in salt atmosphere[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 359: 16–23.

[38] KIKUCHI S, NAKAHARA Y, KOMOTORI J. Fatigue properties of gas nitrided austenitic stainless steel pre-treated with fine particle peening[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(2): 403–410.

[39] TSUJI N, TANAKA S, TAKASUGI T. Effects of combined plasma-carburizing and shot-peening on fatigue and wear properties of Ti–6Al–4V alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(10–11): 1400–1405.

[40] MORIDI A, HASSANI-GANGARAJ S M, GUAGLIANO M, et al. Cold spray coating: Review of material systems and future perspectives[J]. Surface Engineering, 2014, 30(6): 369–395.

[41] ZHOU H X, LI C X, FU S, et al. Local microstructure inhomogeneity and gas temperature effect in in-situ shot-peening assisted cold-sprayed Ti–6Al–4V coating[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2018, 766(10): 694–704.

通讯作者: 周香林, 教授, 博士, 研究方向为冷喷涂、喷丸、3D 打印, E-mail: coldspray@163.com。

(责编 阳光)