

# 采用半圆弧刀具超声插切 Nomex蜂窝芯的新方法\*

康仁科, 韩 坤, 王毅丹, 孟 倩, 董志刚

(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]** Nomex 蜂窝芯材料具有各向异性、弱刚度的特点, 是一种典型的难加工材料。为解决传统插切刀具加工 Nomex 蜂窝芯时存在的排屑困难、切屑侧的压溃面积大等问题, 提出一种采用半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯的加工方法。设计了一种新型半圆弧形插切刀具, 分析了超声作用下半圆弧形插切刀具的运动规律, 揭示了超声振动的引入使切削过程由连续切削变为断续切削的机理。开展了半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯的试验, 分析了振幅与进给速度对切削力与切削质量的影响规律。试验结果表明, 半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯可获得良好的加工效果, 超声振动的引入可有效降低插切切削力, 提高切削表面质量。研究的半圆弧刀具超声插切技术为蜂窝芯零件轮廓边界的高质量加工提供了新的方法。

**关键词:** Nomex 蜂窝芯; 超声插切; 切削力; 切削质量; 超声振幅; 进给速度

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.13.014



康仁科

教授、博士生导师, 主要研究方向为超精密与特种加工技术、难加工材料高效加工技术、计算机辅助设计与制造。主持国家“973 计划”和“863 计划”课题、国家自然科学基金重点项目和其他科研项目 20 多项。获国家技术发明一等奖 1 项、二等奖 2 项、省部级技术发明奖励多项。

Nomex 蜂窝复合材料以其优异的性能如低密度、高比强度、抗冲击、耐腐蚀而被广泛地应用于航空航天领域<sup>[1-3]</sup>。Nomex 蜂窝芯材料是一种典型的难加工材料, 具有各向异性、弱刚度的特点, 其组成成分芳纶纤维强度高, 难以被切断。在蜂窝芯的加工过程中存在蜂窝壁撕裂、树脂层脱落等问题。特别是对于飞机地板、襟翼、壁板和整流罩等具有复杂曲面轮廓边界的典型结构件, 很难保证其轮廓边界的质量, 在其加工过程中, 存在加工精度和效率低、轮廓边界不平齐、加工表面质量差等问题。因此, 如何保证蜂窝芯零件轮廓边界的加工质量是亟待解决的重要问题。

高速铣削是最常用的 Nomex 蜂窝芯加工方法之一<sup>[4-6]</sup>, 该加工方法

采用高速旋转的组合铣刀将蜂窝芯材料切断并把多余的材料粉碎去除, 加工效率高, 是 Nomex 蜂窝芯复杂曲面轮廓边界加工和轮廓边缘修型的传统加工方法。但是此加工方法应用于曲面轮廓边界加工时存在诸多问题: 轮廓加工过程中切削力大, 容易出现蜂窝壁撕裂、树脂孔格变形等缺陷; 此外, 在高速铣削加工过程中, 由于粉碎刃不连续, 作用于蜂窝壁的切削力不均匀, 容易出现切削轮廓不平齐, 纤维拉出, 树脂脱落等问题, 从而影响加工质量。近年来, 超声切削加工方法在很大程度上改善了 Nomex 蜂窝芯加工质量, 且能够有效降低切削力, 具有加工效率和加工精度高、加工环境友好的优势<sup>[7]</sup>。然而采用直刃尖刀加工蜂窝芯轮廓边

\* 基金项目: 装备预研教育部联合基金(6141A02022128); 国家科技重大专项课题(2019ZX04019001); 中央高校基本科研业务费(DUT20ZD102)。

界时,刀具需要一定的刀具倾角<sup>[8]</sup>,切削过程容易发生刀具与材料间的干涉且切削深度受限于刀具长度。

目前采用传统的整圆形截面的插切刀具也可实现蜂窝芯轮廓边界加工。在插切加工过程中,插切刀具在绕轴线转动的同时,首先沿着蜂窝孔格轴向进给切入蜂窝芯材料,并形成圆环形切缝;然后刀具退出材料并移动到下一切削位置进行插切加工,插切刀具依次沿轮廓边界插切出一系列圆环状切缝并形成加工轮廓;最后对切屑侧的多余材料进行去除,从而获得所需的轮廓边界。这种方法存在以下问题:由于插切过程中,刀具及整个前刀面对材料的切削与挤压作用,使得材料的压溃破坏区域大;加工残留的圆环状切缝相互交织,互相间支撑刚性弱,使得后续材料去除变得困难;传统插切刀具旋转插切时,刀具与已加工表面和切屑剧烈摩擦,进而产生大量切削热,影响刀具寿命;在切削过程中,蜂窝芯切屑不能有效排屑,会积聚并压缩于插切刀具腔内,需要暂停并手工去除,进而影响加工效率。

针对现有 Nomex 蜂窝芯轮廓边界插切加工存在的问题,本文提出采用半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯的新方法,设计了一种新型半圆弧超声插切刀具。与现有插切刀具

相比,新型插切刀具采用非封闭式的结构,有利于排屑。非封闭式结构带来的另一方面的的好处是可以减小材料的破坏区域面积,提高切削区域刚度。结合超声切削加工方法,利用超声的冲击作用实现蜂窝芯轮廓边界的高质量加工。

本文针对自主设计的新型半圆弧超声插切刀具进行试验研究,旨在揭示半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯时超声振幅与进给速度对切削力与切削质量的影响规律,探究超声插切蜂窝芯零件轮廓边界的新工艺。

### 试验方法与平台

试验在三轴数控机床上进行,试验中用到的超声插切加工系统由超声电源、超声振动系统和插切刀具组成。插切刀具在超声振动系统的带动下产生大振幅的超声振动,沿蜂窝芯孔格轴向进给完成 Nomex 蜂窝的插切加工过程。自主设计的插切刀结构如图 1 所示,刀具长度  $L=90\text{mm}$ ,刀具外径  $D=19\text{mm}$ ,圆弧角度  $\theta=180^\circ$ ,切削刃的楔角  $\beta=20^\circ$ 。由于半圆弧插切刀具结构的不对称性,刀具末端的超声振动属于纵弯复合振动,可分解为沿刀具轴向的纵振和沿径向的摆振。

Nomex 蜂窝芯的结构如图 2

所示,包括单层孔壁和双层孔壁两种孔壁形态。沿  $l$  方向的蜂窝壁为双层孔壁,其余为单层孔壁。本试验所使用的 Nomex 蜂窝芯材料样件牌号为 NH-1-1.83-29,蜂窝芯密度  $29\text{kg/m}^3$ ,孔格边长  $1.83\text{mm}$ ,试验样件在  $l, t, w$  方向的尺寸为  $50\text{mm} \times 40\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。

考虑到 Nomex 蜂窝芯是一种非连续结构件,每次插切过程很难保证插切蜂窝壁的数量以及插切孔格的位置一致,而插切孔格的数量以及插切孔格的位置会对切削力产生影响。因此为保证试验变量的一致性,每组试验均使用切削刃边缘的一段圆弧沿蜂窝  $w$  方向切削两个蜂窝双层壁,保证了插切孔格的数量以及插切孔格位置的一致性,如图 3 所示。试验过程采用 Kistler-9119AA2 型测力仪对切削力进行测量,使用基恩士 VHX-600E 型超景深显微镜对 Nomex 蜂窝已加工表面进行观测。

为研究超声振动对于插切加工中切削力以及切削质量的影响,进行了不同超声振幅和进给速度下的超声插切试验。为减小干扰因素的影响,每组试验进行 3 次。超声振幅采用日本 KEYENCE 公司生产的 LK-H025 型激光位移传感器进行测量,空载状态下超声纵振振幅  $0\sim 12\mu\text{m}$ ,

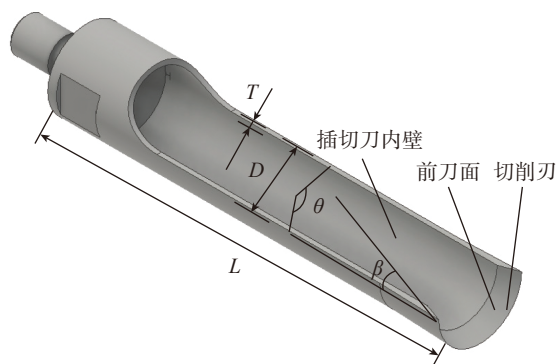


图1 半圆弧插切刀三维模型  
Fig.1 Model of semi-circle arc tool

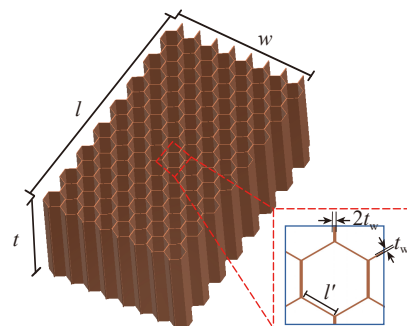


图2 Nomex蜂窝结构示意图  
Fig.2 Diagram of Nomex honeycomb structure

摆振幅  $0\sim 31\mu\text{m}$ , 超声振动频率  $f$  为  $20.03\text{kHz}$ 。插切深度  $h=25\text{mm}$ 。超声插切试验参数列于表 1。

### 结果与讨论

#### 1 半圆弧刀具超声插切运动学分析

超声插切过程中,半圆弧刀具做进给运动与超声往复运动的合成运动。以刀刃上一点为研究对象,  $z$  方向上的位移可表示为:

$$z = v_f t + A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$y$  方向上的位移可表示为:

$$y = kA \sin(2\pi ft + \psi) \quad (2)$$

$z$  方向上的速度可表示为:

$$v_z = z' = v_f + 2\pi Af \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

$y$  方向上的速度可表示为:

$$v_y = y' = 2k\pi Af \cos(2\pi ft + \psi) \quad (4)$$

其中,  $v_f$  为进给速度;  $A$  为纵摆振幅;  $k$  为摆振与纵振的振幅之比;  $\psi$  为摆振与纵振的相位差;  $f$  为振动频率。

将材料的切削过程分为 3 个阶段: 切削阶段、划擦阶段和分离阶段。如图 4 所示,在  $t_1$  时刻切削刃运动到轨迹上一切点  $P_1(y_1, z_1)$ , 到达右极限位置, 随后开始脱离工件。  $P_1$  处刀具轨迹的切线与切削刃右刃面平行。在  $t_2$  时刻切削刃到达左极限位置, 之后进入分离阶段。在  $t_3$  时刻切削刃运动到点  $P_3(y_3, z_3)$ , 与蜂窝壁接触, 进入切削阶段, 蜂窝壁沿进给方向被撕裂。点  $P_1$ 、 $P_3$  的连线与切削刃右刃面平行。  $t_4$  时刻切削刃到达切点  $P_4(y_4, z_4)$ , 之后脱离工件, 再次进入分离阶段。到  $t_5$  时刻, 切削

刃到达  $t_2$  时刻所对应的左极限位置, 与蜂窝壁接触。此时, 由于切削刃  $z$  方向上的速度分量与进给方向相反, 切削刃不进行切削, 仅克服蜂窝壁的弹性力和摩擦力, 对已加工表面进行划擦, 进入划擦阶段。到  $t_6$  时刻切削刃到达切点  $P_6(y_6, z_6)$ , 之后脱离工件。由切削过程分析可得, 在一个切削周期  $t_{6-2}$  内, 时刻  $t_{3-2}$  和  $t_{5-4}$  为分离阶段, 时刻  $t_{4-3}$  为切削阶段, 时刻  $t_{6-5}$  为划擦阶段。

定义切削时间在整个周期内的占比为切削率, 用小写字母  $r$  表示:

$$r = (t_4 - t_3)f \quad (5)$$

直线  $P_1P_3$  为切削轨迹的一条切线, 与点  $P_4$  处的切线平行, 且与  $z$  轴的夹角为  $-\beta$ 。由此可以得到  $t_3$ 、 $t_4$  的关系式:

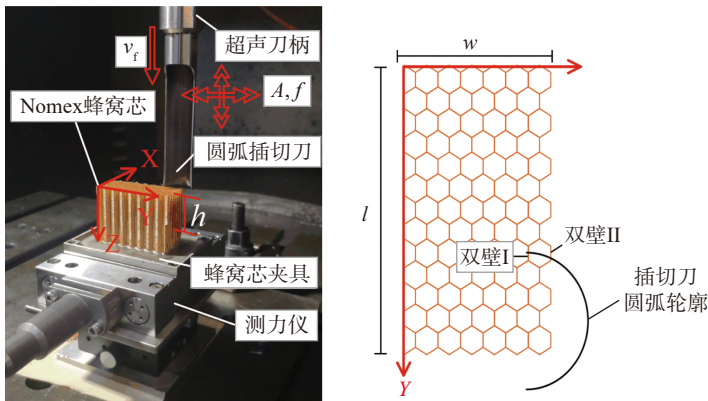


图3 Nomex蜂窝超声插切试验装置及方法示意图

Fig.3 Cutting platform and method for ultrasonic slotting of Nomex honeycomb core

表1 超声插切Nomex蜂窝芯试验参数  
Table 1 Parameters of ultrasonic slotting  
Nomex honeycomb core

组别	超声振幅 (纵振 / 摆振) / $\mu\text{m}$	进给速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
1	0/0	3000
2	4/7	3000
3	8/16	3000
4	12/31	3000
5	4/7	1500
6	4/7	4500
7	4/7	6000

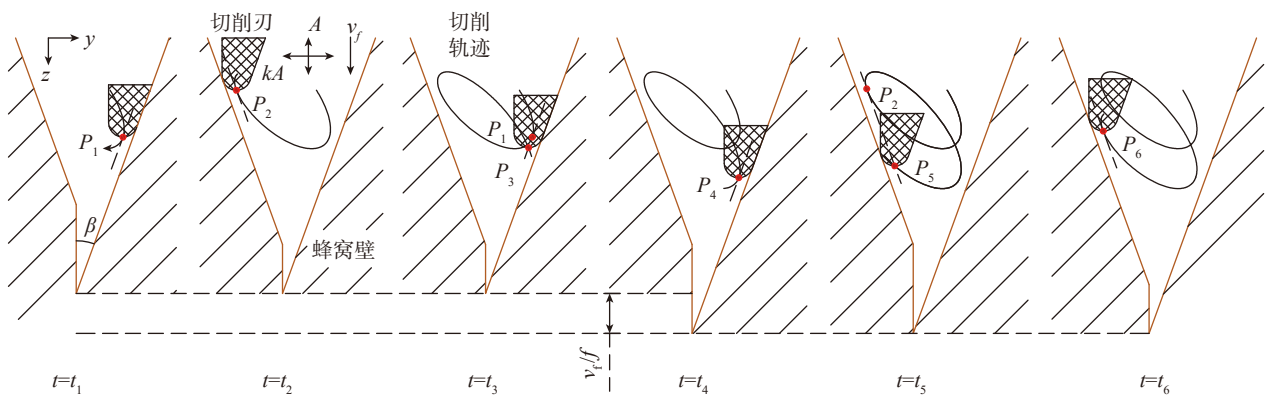


图4 超声插切过程示意图

Fig.4 Diagram of ultrasonic slotting process

$$\left. \frac{v_y}{v_z} \right|_{t=t_1} = -\tan \beta \Rightarrow$$

$$\frac{2k\pi Af \cos(2\pi ft_1 + \psi)}{v_f + 2\pi Af \cos(2\pi ft_1)} = -\tan \beta \quad (t_1 > 0)$$

(6)

$$\frac{y_1 - y_3}{z_1 - z_3} = -\tan \beta \Rightarrow$$

$$\frac{kA(\sin(2\pi ft_1 + \psi) - \sin(2\pi ft_3 + \psi))}{v_f(t_1 - t_3) + A(\sin(2\pi ft_1) - \sin(2\pi ft_3))} = -\tan \beta \quad (t_1 < t_3 < t_1 + f)$$

(7)

$$t_4 = 1/f + t_1 \quad (8)$$

联立式(5)~(8)可求得  $r$  的值。

要体现超声加工断续切削的特点,需要满足  $r < 1$ ,即满足  $\min(v_y/v_z) < -\tan \beta$  且  $\max(v_y/v_z) > -\tan \beta$ 。

定义划擦时间在整个周期内的占比为划擦比,用  $r'$  表示,则  $r'$  的表达式可写为:

$$r' = (t_6 - t_5)f \quad (9)$$

直线  $P_2P_5$  为切削轨迹的一条切线,与点  $P_6$  处的切线平行,且与  $z$  轴的夹角为  $\beta$ 。由此可以对  $t_5$ 、 $t_6$  进行求解:

$$\left. \frac{v_y}{v_z} \right|_{t=t_2} = \tan \beta \Rightarrow$$

$$\frac{2k\pi Af \cos(2\pi ft_2 + \psi)}{v_f + 2\pi Af \cos(2\pi ft_2)} = \tan \beta \quad (t_2 > 0)$$

$$\frac{y_2 - y_5}{z_2 - z_5} = \tan \beta \Rightarrow$$

$$\frac{kA(\sin(2\pi ft_2 + \psi) - \sin(2\pi ft_5 + \psi))}{v_f(t_2 - t_5) + A(\sin(2\pi ft_2) - \sin(2\pi ft_5))} = \tan \beta \quad (t_2 < t_5 < t_2 + f)$$

(10)

$$t_6 = 1/f + t_2 \quad (11)$$

联立式(9)~(12)可求得  $r'$  的值。

由以上分析可以看出,影响  $r$  和  $r'$  的参数有6个:超声振幅、进给速度、振动频率、楔角、摆振与纵振的相位差以及振幅之比,本文主要研究超声振幅与进给速度对切削过程的影响。

## 2 半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯的切削力分析

### 2.1 超声振幅对切削力的影响

在一个切削周期中,切削阶段蜂窝壁在切削力的作用下发生断裂,裂缝沿进给方向扩展,切削刃要克服蜂窝壁的断裂力、与蜂窝壁的摩擦力以及使蜂窝壁变形的弹性力,轴向切削力主要集中在这一阶段。划擦阶段切削刃不进行切削,仅需要克服与蜂窝壁的摩擦力以及使蜂窝壁变形的弹性力。分离阶段切削刃既不进行切削也不进行划擦。

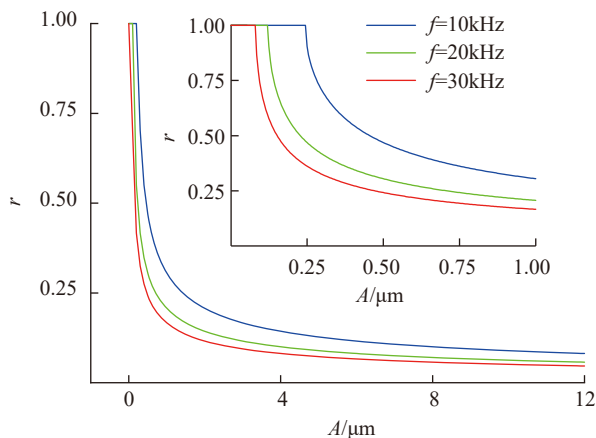
在研究振幅对切削力的影响时,忽略划擦阶段的摩擦力与弹性力,仅

考虑切削阶段的切削力。图5(a)显示了  $v_f=3000\text{mm/min}$ ,  $f=10\text{kHz}$ 、 $20\text{kHz}$ 、 $30\text{kHz}$  条件下切削率与超声振幅之间的关系。可以看出,超声振幅从零增加到临界振幅  $A_c$ ,切削率恒为1;当振幅超过临界振幅之后,切削率随振幅增大而减小。在相同的振幅下,频率越低,切削率越高。如图5(b)所示,在试验参数条件下,纵振振幅为  $0.4\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$  时求得的切削率分别为  $1$ 、 $0.070$ 、 $0.050$ 、 $0.040$ 。

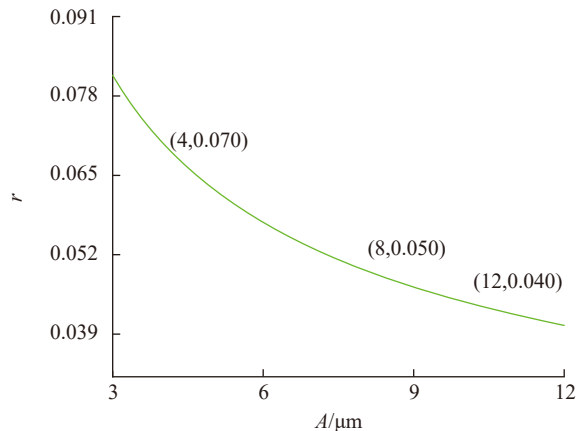
图6为进给速度为  $3000\text{mm/min}$  时不同振幅下的切削力,切削力随超声振幅增加而减小。当纵振振幅为  $12\mu\text{m}$ ,摆振振幅为  $31\mu\text{m}$  时,切削力相对于无超声切削降低  $61\%$ 。超声切削过程中,刀具与工件之间一直处于断续接触状态,如果忽略摩擦力的影响,超声切削过程中的平均切削力应为传统切削过程切削力的  $r$  倍<sup>[9-12]</sup>。因此,超声作用能够降低切削力,切削力随振幅增大而减小。

### 2.2 进给速度对切削力的影响

图7(a)显示了  $A=4\mu\text{m}$ ,  $f=10\text{kHz}$ 、 $20\text{kHz}$ 、 $30\text{kHz}$  条件下切削率与进给速度之间的关系。可知,切削率与进给速度之间近似呈线性关系,随进给速度增大而增大。当进给速度超过临界进给速度  $v_c$  后,切削率恒为1。



(a)  $v_f=3000\text{mm/min}$ ,  $\beta=20^\circ$ ,  $\psi=0$ ,  $k=2$



(b)  $f=20\text{kHz}$  局部放大图

图5 超声振幅与切削率间的关系  
Fig.5 Relationship between amplitude and scratch ratio

图8显示了纵振振幅为 $4\mu\text{m}$ 、摆振振幅为 $7\mu\text{m}$ 时不同进给速度下的切削力。在进给速度 $1500\sim 6000\text{mm}/\text{min}$ 的范围内,切削力随进给速度增加而增加。进给速度从

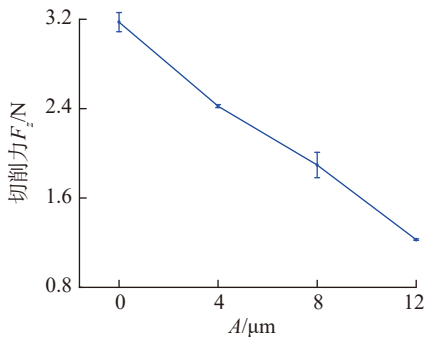


图6 不同振幅下的切削力  
Fig.6 Cutting force under different amplitudes

$1500\text{mm}/\text{min}$ 增大到 $6000\text{mm}/\text{min}$ 时,切削力增大33%。如图7(b)所示,在试验参数条件下,进给速度为 $1500\text{mm}/\text{min}$ 、 $3000\text{mm}/\text{min}$ 、 $4500\text{mm}/\text{min}$ 、 $6000\text{mm}/\text{min}$ 时,切削率分别为 $0.050$ 、 $0.070$ 、 $0.086$ 、 $0.100$ 。根据2.1节超声振幅对切削力影响的讨论,切削率越大,切削力越大。而且进给速度越大,单位时间内的切削量越大。因此切削力随进给速度的增大而增大。

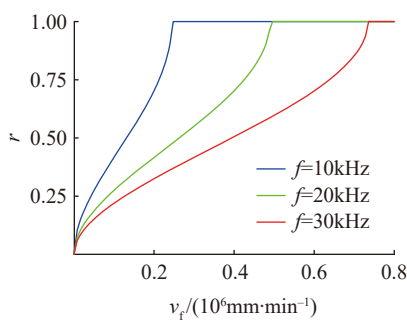
### 3 半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯的切削质量分析

#### 3.1 超声振幅对切削质量的影响

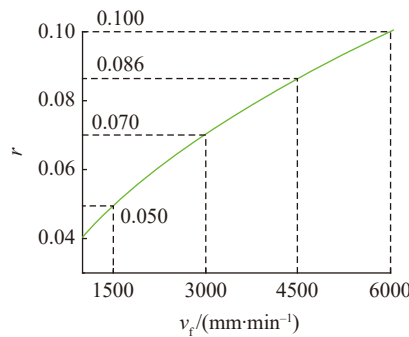
在划擦阶段,切削刃对已加工表面进行划擦,切口形貌受到划擦力的

破坏。图9(a)显示了 $v_f=3000\text{mm}/\text{min}$ 、 $f=10\text{kHz}$ 、 $20\text{kHz}$ 、 $30\text{kHz}$ 条件下划擦比与超声振幅之间的关系。与切削率和超声振幅之间的关系类似,超声振幅从零增加到临界振幅 $A_c'$ ,划擦比恒为1,当超声振幅超过临界振幅之后,划擦比随振幅增大而减小。在相同的振幅下,频率越低,划擦比越大。图9(b)显示了在试验参数条件下,纵振振幅为 $0.4\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 时求得的划擦比分别为 $1$ 、 $0.085$ 、 $0.060$ 、 $0.049$ 。

以树脂脱落面积评价切削质量<sup>[13]</sup>,图10为不同振幅下的切口形貌,可以看出,普通切削的蜂窝壁树脂脱落面积较大,而超声切削的蜂窝



(a)  $A=4\mu\text{m}$ ,  $\beta=20^\circ$ ,  $\psi=0$ ,  $k=2$



(b)  $f=20\text{kHz}$  局部放大图

图7 进给速度与切削率间的关系

Fig.7 Relationship between feeding speed and cutting ratio

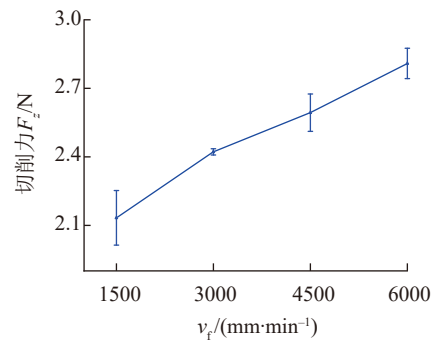
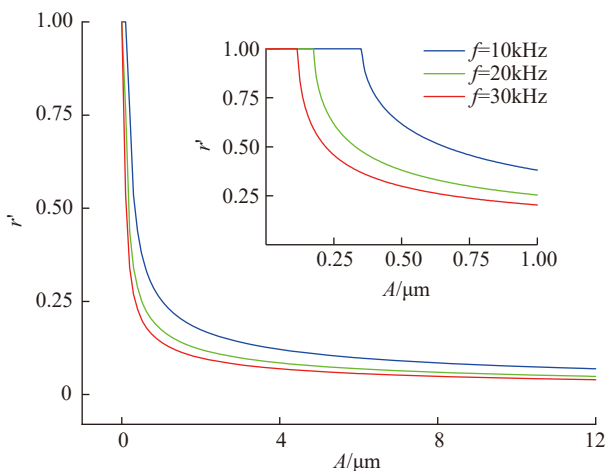
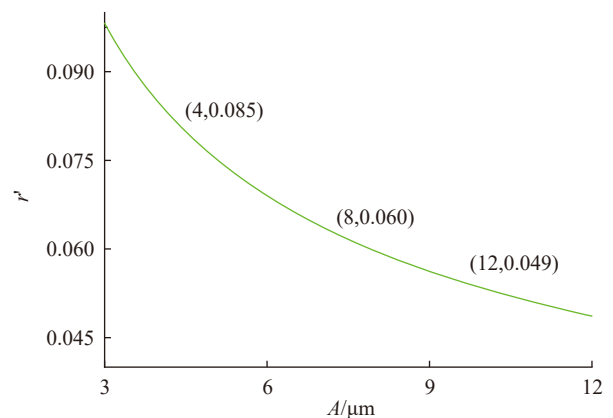


图8 不同进给速度下的切削力  
Fig.8 Cutting force under different feeding speeds



(a)  $v_f=3000\text{mm}/\text{min}$ ,  $\beta=20^\circ$ ,  $\psi=0$ ,  $k=2$



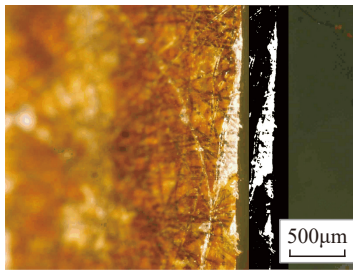
(b)  $f=20\text{kHz}$  局部放大图

图9 超声振幅与划擦比间的关系

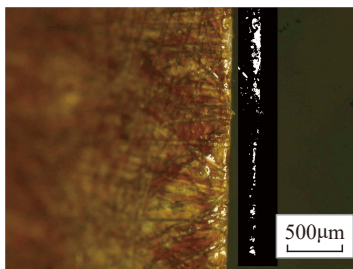
Fig.9 Relationship between amplitude and scratch ratio

壁并无明显缺陷,切口平直无毛刺,树脂脱落面积明显降低。超声振幅对切口形貌有一定影响,形貌随振幅增大而得到改善。

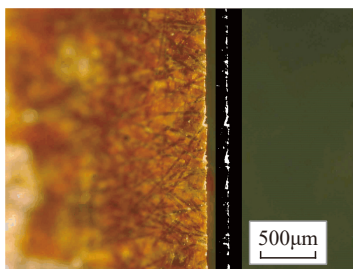
利用图像处理软件 imageJ 对图像数据进行二值化处理,设定一个颜色深度阈值,高于阈值的部分全部处理成黑色,低于阈值的部分全



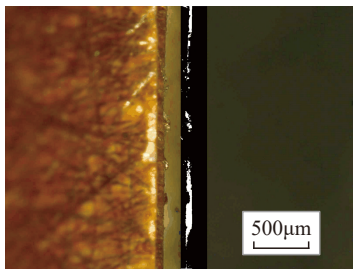
(a)  $A=0$



(b)  $A=4\mu\text{m}$



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



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

图10 不同振幅下切口形貌对比  
Fig.10 Cutting morphology of honeycomb core under different amplitudes

部处理成白色。树脂的颜色较深,经软件处理后全部变成黑色,而树脂脱落后露出的芳纶纸颜色较浅,经软件处理后全部变成白色。对白色区域像素点进行统计,可以计算出树脂脱落面积。

如图 11 所示,切口树脂脱落面积随振幅增大而减小,相较于无超声切削,在纵振振幅  $12\mu\text{m}$ 、摆振振幅  $31\mu\text{m}$  时,切口树脂脱落面积减少 68%。划擦阶段的平均划擦力应为

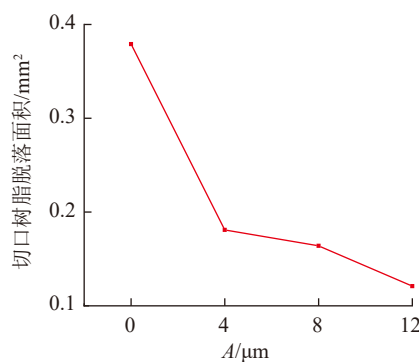


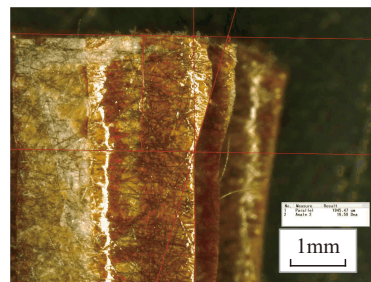
图11 不同振幅下切口处树脂脱落面积  
Fig.11 Area of resin falling off under different amplitudes

传统切削过程平均力的  $r'$  倍,而且超声振动能够降低已加工表面与刀具之间的摩擦力<sup>[14-15]</sup>。因此,超声切削能够提高蜂窝壁已加工表面的切削质量,切削质量随振幅增大而有所提高。

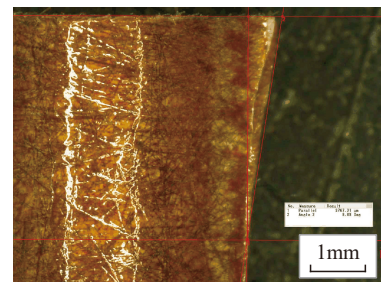
Nomex 蜂窝芯材料刚性较弱,入口处切削力较大,切削刃接触到蜂窝壁后,蜂窝壁发生变形,切口偏离原切削中心,在入口处出现折弯现象,如图 12 所示。对不同振幅下的入口折弯角度进行统计,如图 13 所示。折弯角度受振幅影响较大,随振幅增大而减小,相较于普通切削,在纵振振幅  $12\mu\text{m}$ 、摆振振幅  $31\mu\text{m}$  时,折弯角度降低 70%。

### 3.2 进给速度对切削质量的影响

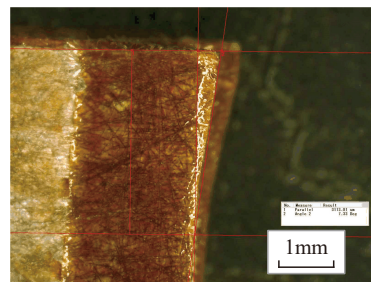
图 14 (a) 显示了  $A=4\mu\text{m}$ ,  $f=10\text{kHz}$ 、 $20\text{kHz}$ 、 $30\text{kHz}$  条件下划擦比与进给速度之间的关系。与切削率和进给速度之间的关系类似,划擦比与进给速度之间近似呈线性关系,随进给速度增大而增大,当进给速度达到临界进给速度  $v_c'$  后,划擦比恒为 1。



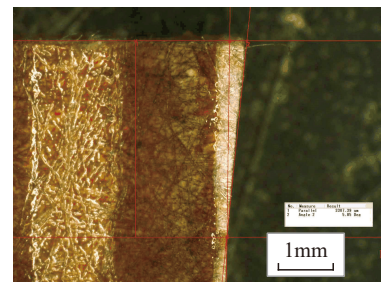
(a)  $A=0$



(b)  $A=4\mu\text{m}$



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



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

图12 不同振幅下入口形貌  
Fig.12 Entrance morphology of honeycomb core under different amplitudes

图 15 显示了不同进给速度下的切口形貌,可以看出,在纵振振幅为  $4\mu\text{m}$ ,摆振振幅为  $7\mu\text{m}$ ,进给速度从  $1500\text{mm}/\text{min}$  增加到  $6000\text{mm}/\text{min}$  时,切口树脂剥落的面积有所增大。进给速度对超声插切 Nomex 蜂窝芯插切质量有一定影响,插切质量随进给速度的增加有所降低。

对不同振幅下的切口树脂剥落面积进行统计,结果如图 16 所示。切口树脂剥落面积随进给速度增大而增大,在纵振振幅为  $4\mu\text{m}$ ,摆振振幅为  $7\mu\text{m}$ ,进给速度从  $1500\text{mm}/\text{min}$  增加到  $6000\text{mm}/\text{min}$  时,切口树脂剥落面积增大 57%。由图 14 (b) 可知,在试验参数条件下,进给速度为  $1500\text{mm}/\text{min}$ 、 $3000\text{mm}/\text{min}$ 、 $4500\text{mm}/\text{min}$ 、 $6000\text{mm}/\text{min}$  时,划擦比分别为  $0.060$ 、 $0.085$ 、 $0.104$ 、 $0.121$ 。根据超声振幅对切削质量影响的讨论,划擦比越大,切削质量越差。而且进给速度的增大会弱化超声的作用,甚至当进给速度大于临界速度时,切削过程将变成连续切削。因此切削质量随进给速度的增大而有所降低。

进给速度对超声插切 Nomex 蜂窝芯入口处折弯角度有一定影响,折弯角度随进给速度的增加有所增大,如图 17 所示。对不同进给速度下的入口折弯角度进行统计,如图 18 所示,在纵振振幅为  $4\mu\text{m}$ ,摆振振幅为  $7\mu\text{m}$ ,进给速度从  $1500\text{mm}/\text{min}$  增大到  $6000\text{mm}/\text{min}$  时,折弯角度增大 18%。

#### 4 实际加工验证

图 19 为超声插切 Nomex 蜂窝芯曲面轮廓边界示意图,半圆弧插切刀具沿设定工作轨迹循环进行超声插切加工。插切出一系列半圆环状切缝,这一系列半圆环状切缝包络形成材料的加工轮廓。

实际加工效果如图 20 所示,结果表明所设计的半圆弧型插切刀在解决刀具发热严重与排屑问题的同时,也可以满足曲面轮廓边界的加工需求。

### 结论

本文提出了采用半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯的加工方法,设计了一种用于加工 Nomex 蜂窝芯曲面轮廓特征的新型半圆弧插切刀具,在分析超声插切过程的基础上,开展了半圆弧插切刀具的试验研究,研究超声振幅与进给速度对切

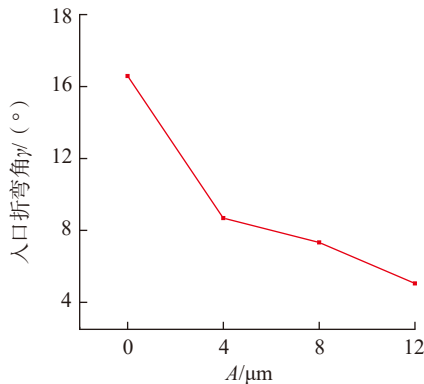
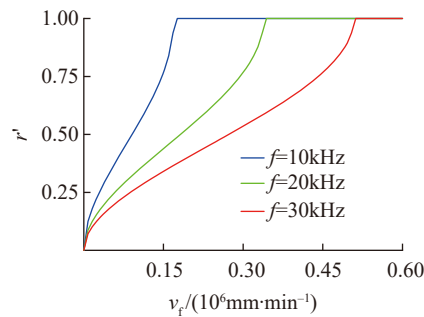
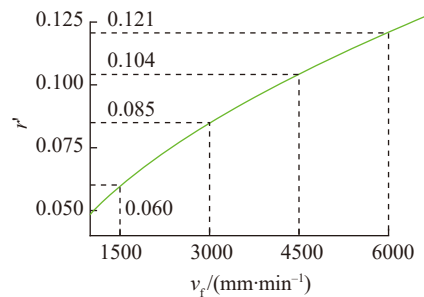


图 13 不同振幅下入口折弯角度  
Fig.13 Bending angle of entrance under different amplitudes

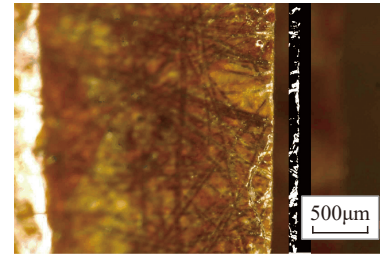


(a)  $A=4\mu\text{m}$ ,  $\beta=20^\circ$ ,  $\psi=0$ ,  $k=2$

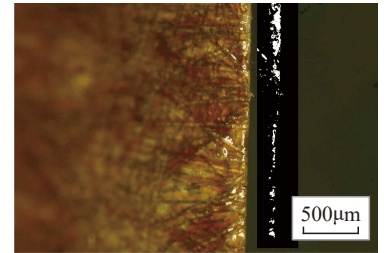


(b)  $f=20\text{kHz}$  局部放大图

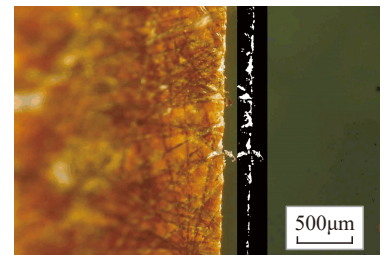
图 14 进给速度与划擦比间的关系  
Fig.14 Relationship between feeding speed and scratch ratio



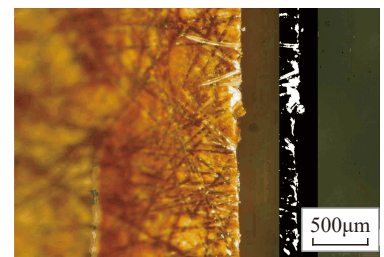
(a)  $v_f=1500\text{mm}/\text{min}$



(b)  $v_f=3000\text{mm}/\text{min}$



(c)  $v_f=4500\text{mm}/\text{min}$



(d)  $v_f=6000\text{mm}/\text{min}$

图 15 不同进给速度下形貌对比  
Fig.15 Cutting morphology of honeycomb core under different feeding speeds

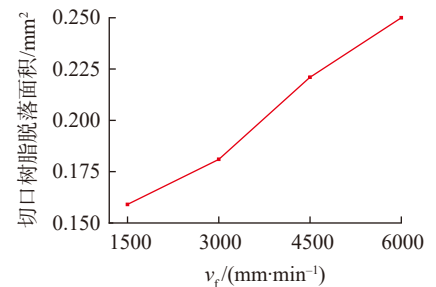
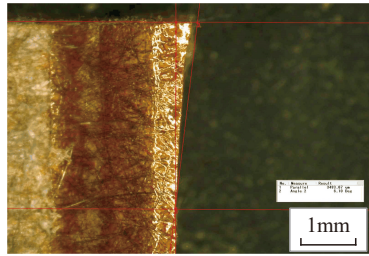
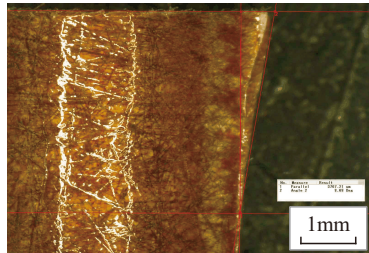


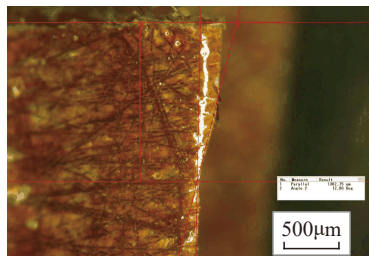
图 16 不同进给速度下切口树脂剥落面积  
Fig.16 Area of resin falling off under different feeding speeds



(a)  $v_f=1500\text{mm/min}$



(b)  $v_f=3000\text{mm/min}$



(c)  $v_f=4500\text{mm/min}$



(d)  $v_f=6000\text{mm/min}$

图17 不同进给速度下入口形貌

Fig.17 Entrance morphology of honeycomb core under different feeding speed

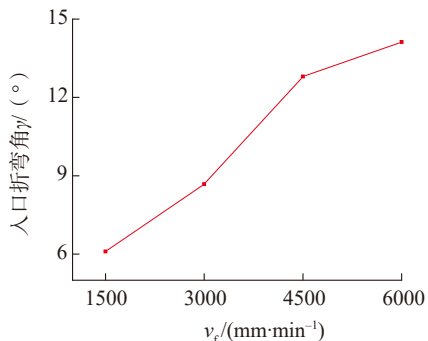


图18 不同进给速度下入口折弯角度

Fig.18 Bending angle of entrance under different feeding speeds

削力与切削质量的影响规律,得到以下结论:

(1) 本文所设计的半圆弧形插切刀具,采用非封闭式结构,插切时破坏区域小,解决了现有插切刀具排屑困难的问题。该刀具可实现20kHz的谐振频率,纵向和侧向分别为12 $\mu\text{m}$ 和31 $\mu\text{m}$ 的复合振动。

(2) 通过对切削过程的分析,本文将切削过程分为切削阶段、划擦阶段和分离阶段。定义了切削率 $r$ 与划擦比 $r'$ ,并讨论了影响切削率 $r$ 与划擦比 $r'$ 的加工参数。分析结果表明,加工过程采用的超声振幅越大,进给速度越低,获得的切削率与划擦比越小,越有利于切削。

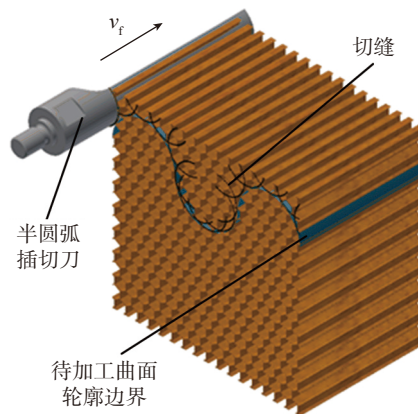


图19 超声插切加工曲面轮廓边界示意图  
Fig.19 Schematic diagram of ultrasonic slotting curve edge



图20 超声插切加工曲面轮廓边界实物  
Fig.20 Practicality of ultrasonic slotting curve edge

(3) 超声插切Nomex蜂窝芯试验结果表明切削力随振幅增大而降低,当纵振振幅为12 $\mu\text{m}$ ,摆振振幅为31 $\mu\text{m}$ 时,切削力相对于无超声插切加工降低61%;切削力随进给速度增大而增大,进给速度从1500mm/min增大到6000mm/min时,切削力增大33%。

(4) 切削质量随振幅增大而改善,相较于无超声切削,在纵振振幅为12 $\mu\text{m}$ ,摆振振幅31 $\mu\text{m}$ 时,切口树脂脱落面积减少68%,蜂窝壁入口折弯角度降低70%;切削质量随进给速度增大而降低,进给速度从1500mm/min增大到6000mm/min时,切口树脂脱落面积增大57%,蜂窝壁入口折弯角度增大18%。

### 参考文献

[1] KARAKOC A, FREUND J. Experimental studies on mechanical properties of cellular structures using Nomex® honeycomb cores[J]. Composite Structures, 2012, 94(6): 2017-2024.

[2] 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.

[3] 刘杰, 郝巍, 孟江燕. 蜂窝夹层结构复合材料应用研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(3): 25-29.

LIU Jie, HAO Wei, MENG Jiangyan. Progress in applied research of honeycomb sandwich composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(3): 25-29.

[4] HIRAYAMA A. Method for cutting honeycomb core: US6740268[P]. 2004-05-25.

[5] 柯映林, 金成柱, 刘刚. NOMEX蜂窝芯高速铣削加工工艺的优化[J]. 中国机械工程, 2006, 17(12): 1299-1302.

KE Yinglin, JIN Chengzhu, LIU Gang. Optimization of high-speed milling process for NOMEX honeycomb[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(12): 1299-1302.

[6] 马成, 刘方军. 蜂窝材料加工工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(3): 48-54.

MA Cheng, LIU Fangjun. Research

progress in processing technology of honeycomb materials[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(3): 48–54.

[7] HU X P, CHEN S Y, ZHANG Z C. Research on curved surface forming of Nomex honeycomb material based on ultrasonic NC cutting[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 538–541: 1377–1381.

[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, 53(19): 73–82.

WANG Yidan, WANG Xuanping, KANG Renke, et al. Analysis of influence on ultrasonic-assisted cutting force of nomex honeycomb core material with straight knife[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 73–82.

[9] NATH C, RAHMAN M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(9): 965–974.

[10] NI C B, ZHU L D, LIU C F, et al.

Analytical modeling of tool-workpiece contact rate and experimental study in ultrasonic vibration-assisted milling of Ti–6Al–4V[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 142–143: 97–111.

[11] LU D, WANG Q, WU Y B, et al. Effect of ultrasonic vibration parameters on machining performance based on tool-workpiece contact ratio[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 797: 332–337.

[12] 雷敬文, 秦娜, 胡智特, 等. 基于刀具–工件接触率的固结磨粒旋转超声加工的工具受力分析[J]. *机械*, 2015, 42(5): 1–5, 15.

LEI Jingwen, QIN Na, HU Zhite, et al. Cutting force analysis of the fixed grain tool in rotary ultrasonic machining based on tool-workpiece contact rate[J]. *Machinery*, 2015, 42(5): 1–5, 15.

[13] 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. Charization of surface microscopic of nomex honeycomb after ultrasonic assisted cutting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 90–99.

[14] LITTMANN W, STORCK H, WALLASCHEK J. Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: Superposition of longitudinal oscillations[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2001, 71(8): 549–554.

[15] STORCK H, LITTMANN W, WALLASCHEK J, et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1–8): 379–383.

通讯作者: 董志刚, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为难加工材料高效加工技术、精密超精密加工技术, E-mail: dongzg@dlut.edu.cn.

## New Method of Ultrasonic Slotting Nomex Honeycomb Core With Semi-Circle Arc Tool

KANG Renke, HAN Kun, WANG Yidan, MENG Qian, DONG Zhigang

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

**[ABSTRACT]** Nomex honeycomb core is a kind of typical difficult-to-cut materials because of the characteristics of anisotropy and weak-stiffness. Aimed at solving the problem of chip removal and serious crushing on the chip side during the processing of Nomex honeycomb core with traditional trepanning tool, a new method of ultrasonic slotting Nomex honeycomb core with semi-circle arc tool was proposed. A new semi-circular arc tool was designed, the kinematic law of the semi-circular arc tool with ultrasonic vibration was analyzed, and the transition mechanism of continuous cutting into intermittent cutting was explained theoretically in ultrasonic cutting. On these basis, ultrasonic slotting tests of Nomex honeycomb core were carried out, and the influences of the amplitude and feed rate on cutting force and cutting quality were studied. The test results showed that satisfied processing results could be obtained by the ultrasonic slotting of Nomex honeycomb core with semi-circle arc tool, and the introduction of ultrasonic could effectively reduce the cutting force and improve the surface quality. The ultrasonic slotting technology of semi-circular arc tool provided a new method for high-quality cutting process of the edge contour of the honeycomb core.

**Keywords:** Nomex honeycomb core; Ultrasonic slotting; Cutting force; Cutting quality; Ultrasonic amplitude; Feed speed

(责编 雷松)