

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.005

# 蜂窝复合材料超声切割力建模 及工艺参数选择研究\*

黄秀秀, 胡小平\*, 于保华

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对 Nomex 蜂窝复合材料超声切割加工因缺乏系统化的理论指导以及工艺参数选择的盲目性而导致导致工件加工质量差的问题,对蜂窝复合材料直刃刀超声切割力以及工艺参数的选择进行了研究,基于刀具运动学特性分析建立了超声切割力与工艺参数的关系理论模型。基于该模型,研究了施加超声波振动能量后引起切割力变化情况,基于该模型,通过运用 Matlab 软件仿真分析,研究了工艺参数对超声切割力的影响规律。研究结果表明,与普通加工相比,采用超声复合切割蜂窝复合材料可以有效地降低切割力。刀尖角、刀刃面夹角对切割力的影响较为显著,其次是前倾角,刀具摆角对切割力的影响最小,该结果为工艺合理选择及进一步优化奠定了较好的理论基础。

**关键词:**蜂窝复合材料;直刃刀;超声复合切割;运动学;切割力

中图分类号:TH162

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0032-06

## Ultrasonic cutting force model of honeycomb composites and selection of the processing parameters

HUANG Xiu-xiu, HU Xiao-ping, YU Bao-hua

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the poor machining quality of workpiece caused by lack of systematic theory and blind selection of processing parameters of ultrasonic cutting honeycomb composites, study on ultrasonic cutting force and selection of processing parameters of ultrasonic cutting honeycomb composites on straight blade cutter were carried out. The theory model between ultrasonic cutting force and process parameters was established base on analysis of tool's kinematics characteristic. Based on model, the change of cutting force caused by ultrasonic vibration energy was investigated. The influence rules of processing parameters on ultrasonic cutting force were investigated through simulation analysis on the Matlab software. The results indicate that ultrasonic cutting can effectively reduce cutting force compared with traditional machining, nose angle and blade surface angle has the most significant influence on cutting force, the next is top angle, however swinging angle has minimal influence on cutting force, and lays the good theory foundation for reasonable selection and further optimization of processing parameters.

**Key words:** honeycomb composites; straight blade cutter; ultrasonic cutting; kinematics; cutting force

## 0 引 言

Nomex 蜂窝复合材料具有高比强度、高比刚度、低密度、耐腐蚀、良好的绝缘性能以及吸振性能好等优异特性,目前已广泛应用于航空航天结构件以及具有特

殊要求的其他领域中<sup>[1-3]</sup>。其组分为芳纶纤维细短,韧性极强,其轴向正交平面受力容易变形,切削性差,是典型的难加工材料。传统的数控高速铣削加工时,蜂窝复合材料表面容易出现纤维断裂、基体开裂、毛刺、外形缺陷等现象,这些加工缺陷及损伤大大降低了蜂

收稿日期:2014-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475130);国防基础科研计划资助项目(A3920133001)

作者简介:黄秀秀(1989-),女,广西南宁人,主要从事蜂窝复合材料超声切割机理方面的研究. E-mail:huangxiuxiu\_1989@sina.com

通信联系人:胡小平,女,博士,教授,硕士生导师. E-mail:xiaoping.hu@hdu.edu.cn

窝芯结构件的性能,从而影响了产品的安全性能和使用寿命<sup>[4-5]</sup>。

针对传统加工存在的这些问题,近年来国内开始引进超声复合切割技术应用于纤维复合材料的加工,在一定程度上解决了传统铣削加工存在的问题,目前国内对超声复合切割技术的研究还处于初级阶段。高军等<sup>[6]</sup>对照现有的铣削加工分析了超声复合切割技术在复合材料中的加工特点和优点。高涛等<sup>[7]</sup>对直刃刀及圆盘刀两种刀具的在超声切割蜂窝复合材料的走刀路径、加工刀具控制等加工工艺进行了研究。宋清华等<sup>[8]</sup>进行了碳纤维预浸料厚坯超声复合切割试验研究,得到切割温度、切割速度以及切割能量等参数对加工质量的影响规律。从目前国内对超声复合切割复合材料的研究成果可知,大部分研究还集中于超声复合切割技术特点和成型原理的分析上,还没有学者对超声复合模式下刀具运动学和刀具受力情况进行研究,缺乏系统化的超声复合切割机理研究,以至于工艺参数的合理选择缺乏理论指导。

本研究以蜂窝复合材料粗加工直刃刀为例,基于直刃刀超声复合切割蜂窝材料加工工艺及运动学分析,推导建立超声切割力理论模型,依据理论模型,进行有超声和无超声切割蜂窝复合材料的切割力对比分析,论证超声加工可有效地降低切割力,并通过仿真分析工艺参数对切割力的影响规律。

## 1 蜂窝复合材料超声复合切割的直刃刀加工特点

蜂窝芯材料是一种芳纶短纤维组成的多孔薄壁结构,几何示意图如图1所示。图1中,正六边形的孔格边长为2 mm~5 mm,单层壁厚在0.05 mm~0.15 mm之间,习惯上将X-Y平面内的性能称为蜂窝的面内性能。对于正六边形蜂窝芯,垂直于轴向方向的面内等效弹性模量和泊松比分别相等<sup>[9]</sup>,因此可以将正六边形蜂窝材料看作横观各向同性材料即正交各向异性材料。

蜂窝复合材料特殊的材料组分和空间结构,使得切割过程中刀具与工件的接触作用复杂,为了简化分析计算,笔者在本研究中把蜂窝复合材料模型简化看作均质实体的正交各向异性材料模型<sup>[10-11]</sup>。

直刃刀的结构如图2所示。蜂窝芯结构件直刃刀超声切割加工示意图如图3所示。Z轴确定切割深度,X轴和Y轴的联动决定走刀方向。为了保证加工过程的稳定性,一般情况下直刃刀的刀轴在走刀平面

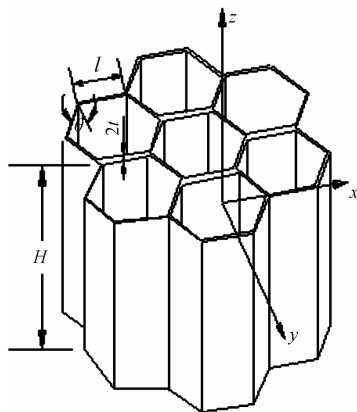


图1 蜂窝芯几何结构示意图

$H, l, t, \theta$ —蜂窝胞壁单元的高度,孔格边长,单层壁厚和单元六边形的棱角

内要倾斜一个角度,形成刀倾角 $\theta$ ,为了提高材料去除效率,走刀过程中刀平面 $y'oz'$ 还将摆转一定角度,与走刀平面形成刀偏角 $\alpha$ ,沿着加工目标表面上的加工轨迹线进行一次走刀后,刀具以走刀平面为对称面,摆转 $2\alpha$ 角度,再沿着同一条加工轨迹进行第二次切割,两次加工完成后,去除的材料形成“V”型切屑。结构件加工表面呈“V”形凹槽。

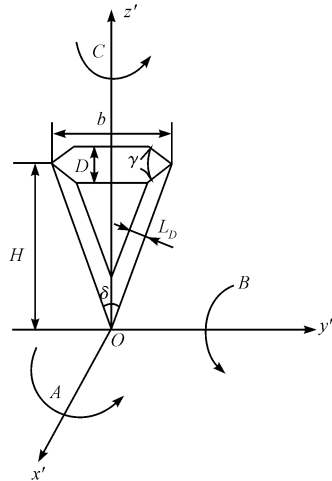


图2 直刃刀的结构示意图

$H, D, b, \delta, \gamma, L_D$ —刀具的高度,厚度,最大宽度,刀尖角,刃面夹角,切割刃宽度

## 2 蜂窝复合材料超声复合切割刀具的运动学特性分析

直刃刀超声复合切割蜂窝复合材料过程中,刀具相对工件的合运动由两个分运动合成:一个是刀具沿其轴线方向( $Z'$ )振动;一个是刀具沿其加工轨迹的进给运动。本研究在讨论中假设刀具沿Y坐标正向切

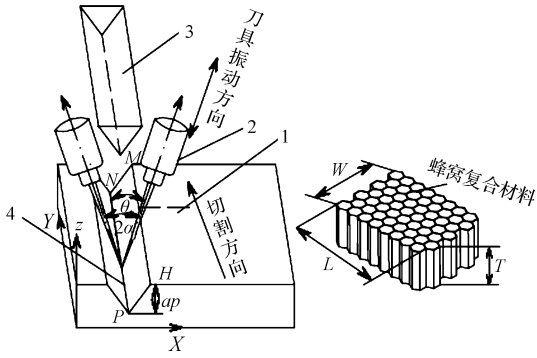


图3 直刃刀超声复合切割蜂窝芯结构的加工示意图  
1—蜂窝芯结构件;2—直刃刀;3—切屑;4—加工轨迹

割,且假设  $Y$  方向为速度的正方向。当超声波以振幅为  $A$ 、频率为  $f$  作用于刀具上,并且刀具沿  $Y$  正向以速度为  $v_e$  进行切割时,刀具轴向振动位移  $s_i$ 、振动速度  $v_i$  和刀具振动速度在  $Y$  方向上的速度分量  $v_{wi}$  分别表示为:

$$s_i = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$v_i = \frac{ds_i}{dt} = 2\pi fA \cdot \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

$$v_{wi} = v_i \cos\theta = 2\pi fA \cos(2\pi ft) \cdot \cos\theta \quad (3)$$

在  $Y$  方向刀具相对工件的合位移和合速度分别为:

$$s = 2\pi fA \sin(2\pi ft) \cdot \cos\theta + v_e t \quad (4)$$

$$\vec{v} = \vec{v}_{wi} + \vec{v}_e = 2\pi fA \cos 2\pi ft_2 \cdot \cos\theta + v_e \quad (5)$$

在超声切割过程中,由于刀具的周期振动,刀具与工件并没有始终保持接触,而是“切割—空切—切割”的周期性变化过程。刀具在  $Y$  方向上运动位移和速度的变化曲线如图4所示。

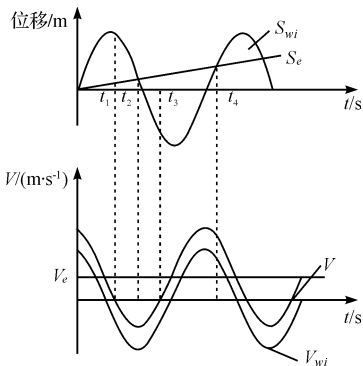


图4 刀具在  $Y$  方向上运动位移和速度的变化曲线

由图4可知,在  $t_1$  时刻,刀具在  $Y$  方向的合速度  $v$  为零,此时是刀具切入材料最深的时刻;由  $t_1 \sim t_2$ ,合速度  $v < 0$  且  $s_{wi} > s_e$ ,表示刀具向背离切割方向运动,刀具和材料仍然保持接触,但不再进行切割运动,直到  $t_2$  时刻, $s_{wi} = s_e$  且合速度  $v < 0$ ,此时是刀具与工件将要

发生分离时刻;由  $t_2 \sim t_3$ ,合速度  $v < 0$ ,刀具继续向背离切割方向运动,刀具与工件之间的距离逐渐增大,直到  $t_3$  时刻,刀具合速度  $v = 0$ ,刀具与工件的距离不再增大,此时是刀具与工件的相距最远时刻;由  $t_3 \sim t_4$  时刻,刀具合速度变为正值,刀具与工件又开始接近,直到  $t_4$  时刻,刀具振动位移在  $Y$  方向的分量位移  $s_i$  和进给运动的位移  $s_e$  相等,此时刀具与工件又重新发生接触进入切割状态。

由上述分析可知,在  $t_2$  时刻,则有:

$$2\pi fA \sin(2\pi ft_2) \cdot \cos\theta = v_e t_2 \quad (6)$$

到  $t_4$  时刻刀具与工件又重新接触,则有:

$$(A \sin 2\pi ft_4 - A \sin 2\pi ft_2) \cos\theta = v_e (t_4 - t_2) \quad (7)$$

由以上分析可知,从  $t_2 \sim t_4$  期间,刀具与工件始终处于分离状态,则有一个振动周期内刀具的有效切割时间为:

$$t_s = T - (t_4 - t_2) = t_2 + T - t_4 \quad (8)$$

### 3 蜂窝复合材料超声切割力建模

#### 3.1 无超声作用蜂窝复合材料剪切破裂所需切割力

直刃刀切割蜂窝复合材料是一个刀刃对材料的剪切过程。当切割力达到引起蜂窝复合材料剪切破裂的分离抗力时,材料发生剪切破裂。当切割速度恒定时,认为刀具切割稳定,此时切割力保持不变。当被切割材料受到的因切割力而引起的剪切应力达到材料的等效抗破强度  $\tau$  时,材料沿着直刃刀切割的方向一点一点地被剪切破裂。刀具与材料切割分析图如图5所示。

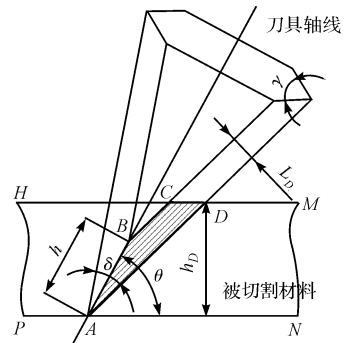


图5 刀具与材料切割分析图

假设  $F_L$  为蜂窝复合材料剪切破裂的分离抗力,  $F_s$  为无超声作用下刀具作用在材料上的切割力。在蜂窝复合材料简化模型的条件下,蜂窝复合材料剪切破裂的分离抗力  $F_L$  为:

$$F_L(t) = \tau \cdot S_{ABCD} \quad (9)$$

式中:  $S_{ABCD}$ —图5所示的在切割过程中刀刃面与蜂窝

复合材料的有效接触面积,即图中阴影部分。

在被切削平面  $PHMN$  上,由几何关系推导得:

$$S_{ABCD} = \frac{(AD + BC) \cdot L_D}{2} = \left( \frac{a_p}{\cos\alpha \cdot \sin\left(\theta - \frac{1}{2}\delta\right)} + \frac{h_D - h \cdot \sin\theta}{\sin\theta} \right) \cdot L_D \quad (10)$$

式中: $h_D$ —工件被切削平面  $PHMN$  的高度,  $h_D = a_p / \cos\alpha$ ;  $a_p$ ,  $\alpha$ —刀具的切割深度,摆角。

蜂窝复合材料剪切破裂所需的切割力  $F_s$  与分离抗力  $F_L$  之间存在如下关系<sup>[12]</sup>:

$$F_s = F_L \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \quad (11)$$

式中:  $\tan\varphi/2 = \tan\gamma/2 \cdot \sin\theta$ 。

由式(9,11)得知,在无超声条件下蜂窝材料剪切破裂所需的切割力  $F_s$  为:

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot \tan \frac{\gamma}{2} \cdot \sin\theta \cdot \frac{2a_p - h \cdot \sin\theta \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha \cdot \sin\left(\theta - \frac{1}{2}\delta\right)} \cdot L_D \quad (12)$$

### 3.2 蜂窝复合材料超声切割力

超声复合切割实际上就是在普通切割的基础上给刀具沿其轴向施加超声波振动。此时材料上所受到的力包括刀具做切割运动时产生的作用力和刀具在超声波振动作用下产生的冲击力。

超声复合切割过程中超声波振动使刀具产生瞬时高速冲击力。假设在超声振动切割过程中工件受力均匀。由动量定理知,一个振动周期内刀具对工件的平均冲击力可以表示为:

$$\bar{F} = M \cdot \frac{v_4 - v_2}{t_s} \quad (13)$$

式中: $M$ —刀具的等效质量; $v_2, v_4$ —刀具与工件开始分离和接触时刻的速度。

将超声复合切割过程中刀具做切削运动时作用在材料上的力,称为超声切割力,记为  $F'_s$ 。超声复合切割过程中,蜂窝复合材料被切断时,超声切割力  $F'_s$  和振动平均冲击力  $\bar{F}$  的合力作用于材料而引起的剪切应力必须要达到蜂窝复合材料剪切破裂的分离抗力  $F_L$ ,即:

$$F_L = \frac{F'_s}{\tan \frac{\varphi}{2}} + \bar{F} \quad (14)$$

将式(6~8)求解得到的  $t_2, t_4$  代入可知,  $2\pi f A \cos(2\pi f t_4) - 2\pi f A \cos(2\pi f t_2) > 0$ ,  $t_2 + T - t_4 > 0$ , 由式(12~14)得超声切割力  $F'_s$  为:

$$F'_s = F_L \tan \frac{\varphi}{2} - \bar{F} \tan \frac{\varphi}{2} =$$

$$F_s - \bar{F} \tan \frac{\varphi}{2} =$$

$$\frac{1}{2} \cdot \tau \cdot \tan \frac{\gamma}{2} \cdot \sin\theta \cdot \frac{2a_p - h \cdot \sin\theta \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha \cdot \sin\left(\theta - \frac{1}{2}\delta\right)} \cdot L_D - M \cdot \frac{2\pi f A \cos(2\pi f t_4) - 2\pi f A \cos(2\pi f t_2)}{t_2 + T - t_4} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} < F_s \quad (15)$$

由上式比较分析可知,有超声条件下刀具切割作用力即超声切割力  $F'_s$  明显小于无超声条件下刀具切割作用力即普通切割力  $F_s$ ,从而说明与普通切割相比,采用超声复合切割蜂窝复合材料可以有效地减小切割力。这主要是由于施加超声波振动能量后,刀具与工件形成一个周期性的时切时离断续切割过程,分离特性改变了刀具与工件的接触条件,缩短了刀具和工件之间的摩擦时间,同时在振动切割过程中刀具对加工材料产生瞬时高速冲击力作用,改变了材料的性能,使得蜂窝复合材料更易于断裂,从而减小切断材料所需的切割力。

## 4 工艺参数对超声切割力的影响规律分析

### 4.1 刀具结构参数对超声切割力的影响规律

基于已建立的切割力理论模型,笔者以如表1所示的超声复合切割蜂窝复合材料加工参数为例,研究刀尖角及刀刃面夹角对超声切割力的影响。采用 Matlab 软件仿真分析得到的结果如图6所示。

表1 超声复合切割蜂窝复合材料加工参数

参数名称	频率/kHz	振幅/ $\mu\text{m}$	切割速度/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	刀具摆角/( $^\circ$ )	刀具倾角/( $^\circ$ )	切割深度/mm
大小	20	30~50	8	20	20	15

由图6(a)、6(b)可知,切割力随着超声波振幅的增大而减小,而随着刀尖角及刀刃面夹角的增大而增大。从图中可看出切割力与刀尖角近似呈非线性关系,切割力与刀刃面夹角呈非线性关系。对比图6(a)、6(b),可以看出刀刃面夹角对超声平均切割力的影响比较显著,其次是刀尖角,振幅对切割力的影响较小。综合以上分析得出,在满足加工需求的条件下应尽可能地选择较小的刀尖角和刀刃面夹角,减小切割力,以达到提高加工质量的目的。

### 4.2 切割参数对超声切割力的影响规律

本研究以如表2所示的超声复合切割蜂窝复合材

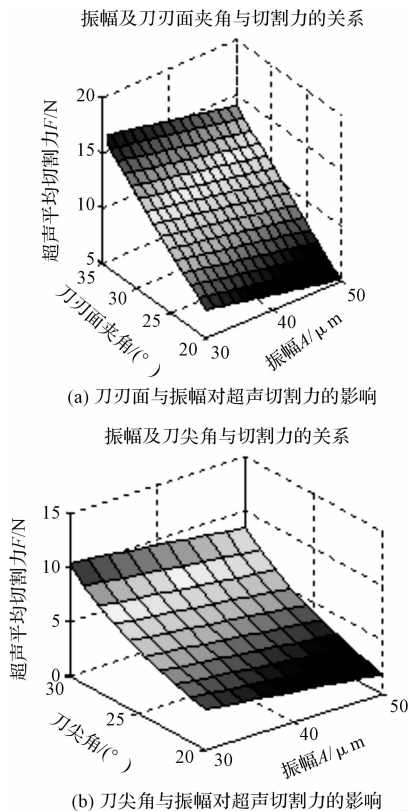


图 6 刀具结构参数对切割力的影响

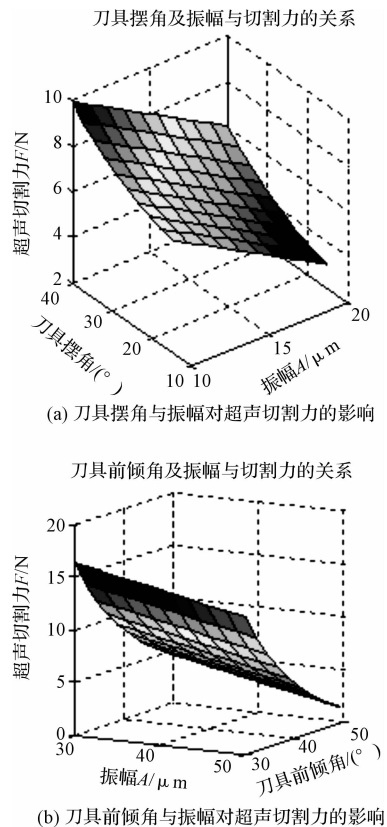


图 7 切割参数对超声切割力的影响

料加工参数为例,研究切割参数刀具摆角、刀具前倾角对超声切割力的影响,采用 Matlab 软件仿真分析得到的结果如图 7 所示。

表 2 超声复合切割蜂窝复合材料加工参数

参数名称	频率/ kHz	振幅/ μm	刀尖角/ (°)	刀刃面 夹角/(°)	切割深 度/mm
大小	20	30 ~ 50	20	30	15

本研究采用 Matlab 软件仿真分析得到的图形如图 7 所示。由图 7(a)、7(b)可知,切割力随着刀具摆角的增大而增大,随着前倾角的增大而减小,切割力与刀具摆角和前倾角呈非线性关系。从图 7 中可以看出,刀具前倾角对切割力的影响比较显著,刀具摆角相对较小。综合上述分析可知,在满足加工需求的条件下,尽可能地减小刀具摆角,增大前倾角,以提高工件的加工质量。

### 5 结束语

本研究得到如下结论:

(1) 基于刀具运动学特性分析建立了包含刀具结

构参数和切削参数的超声切割力理论模型。

(2) 与普通切割加工相比,采用超声复合切割蜂窝复合材料可以有效地减小切割力。这主要是由于超声切割加工是断续切割过程,分离特性改变了刀具与工件的接触条件,缩短了刀具和工件之间的摩擦时间,在振动切割过程中刀具对工件产生瞬时高速冲击力作用,改变了材料性能,使得蜂窝复合材料易于切割,从而减小材料被切断时的所需切割力。

(3) 切割力随着刀尖角、刃面夹角、刀具摆角的增大而增大,随着前倾角的增大而减小。刀尖角、刀刃面夹角对切割力的影响较为显著,其次是前倾角,刀具摆角对切割力的影响最小,为以后工艺参数的合理选择及优化提供了重要的参考依据。

### 参考文献 (References):

[1] 吴福忠,柯映林. 纸基蜂窝零件固持系统中填料及填充区域优化方法[J]. 机械工程学报,2005(5):165-170.

(下转第 95 页)

### 本文引用格式:

黄秀秀,胡小平,于保华. 蜂窝复合材料超声切割力建模及工艺参数选择研究[J]. 机电工程,2015,32(1):32-36,95.

HUANG Xiu-xiu, HU Xiao-ping, YU Bao-hua. Ultrasonic cutting force model of honeycomb composites and selection of the processing parameters[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(1):32-36,95. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>