

# 直刃尖刀形状对超声辅助切削系统振动性能的影响\*

吴鑫,董志刚,康仁科,朱祥龙,王毅丹,刘津廷

(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] 基于超声振动设计理论并结合超声振动变幅杆,设计了一种用于弱刚度材料超声辅助切割的直刃尖刀。建立了直刃尖刀和超声振动系统一体的有限元模型,系统分析了直刃尖刀刀体长度、厚度参数对超声振动系统谐振频率、振幅放大倍数和刀具纵向振幅的影响,探讨了刀具横向和侧向振幅沿刀具轴线方向的分布规律。针对特定的超声振动系统,确定了综合性能最优的刀具参数。研制了具有不同形状参数的去刃模拟刀具,并安装于同一超声振动系统进行测试,对仿真分析结论进行验证,理论分析与试验结果相一致。根据理论分析确定的最佳参数研制了直刃尖刀并测试了其振动性能。研究结论对超声辅助切削加工的直刃刀尖的研制提供了理论指导。

关键词: 超声刀具; 仿真分析; 刀具形状; 振动性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.22.052



吴鑫

大连理工大学机械工程学院硕士研究生,主要研究方向为超声切割刀具设计与仿真优化。

Nomex 蜂窝芯材料是以聚芳酰胺纸,经过印胶、叠合、压制、拉伸、浸渍、晾置、固化等一系列的复杂工艺制成的新型结构材料<sup>[1]</sup>。由于具有高比强度、低密度、耐高温、良好的自熄和电绝缘性等优异性能, Nomex 蜂窝广泛用于制备蜂窝夹层构件,在航空航天、汽车等领域得到广泛应用。在不同型号的军用和民用飞机制造中,如襟翼、副翼、机身壁板、驾驶舱、水平尾翼、机翼前缘、直升机旋翼、尾梁等部件均大量采用蜂窝夹层结构,取得了良好的技术与经济效益<sup>[2-3]</sup>。

制备蜂窝夹层构件时,需将蜂窝材料表面加工成具有特定形状的表面。蜂窝材料的独特结构以及特殊的力学性能,使得其加工方法不同于传统材料。目前,常用的加工方法是采用组合式铣刀高速铣削,通过铣刀的刀片切断蜂窝材料,刀具上部的锯

齿粉碎蜂窝芯成为切屑<sup>[4-5]</sup>。高速铣削方法加工蜂窝表面容易形成毛刺,较大的铣削力还会导致蜂窝壁变形,进而影响形状加工精度。同时加工过程中会产生大量的芳纶纸纤维碎屑和粉尘,工作环境恶劣。超声辅助加工技术因其具有加工质量好、加工速度快、精度高、无粉尘污染、刀具磨损小等特点,在弱刚度材料加工中具有优势<sup>[6-7]</sup>。近年来, Nomex 蜂窝超声切削加工技术和装备的研究受到了越来越广泛的关注<sup>[8-10]</sup>。目前,超声辅助切削加工蜂窝材料主要采用直刃尖刀和圆片刀。直刃尖刀在加工中起到切割下料、加工斜槽等结构的作用。由于在切削的同时还要传递超声振动,因此直刃尖刀的形状尺寸需要特殊设计。

在超声加工系统的研究方面,冯冬菊等<sup>[11]</sup>研究讨论了超声波加工工具对复合变幅杆谐振性能的影响,发

\*基金项目: 国家“863”计划课题(2015AA043402); 国家自然科学基金(51575085)资助。

现随着工具长度和直径的增加,超声振动系统的谐振频率下降。为保证稳定的谐振状态,应根据不同加工工具的尺寸相应调整复合变幅杆末端长度。张可昕等<sup>[12]</sup>运用有限元法,分析了工具头的长度和直径对于整个变幅杆谐振长度、放大倍数的影响,为设计复杂形式的变幅杆提出了一种新思路。刘井权等<sup>[13]</sup>采用有限元方法分析了超声切割刀片与变幅杆的匹配规律,探讨了切割刀片几何尺寸的变化对变幅杆与切割刀片组合体固有频率的影响。周胜利等<sup>[14]</sup>定性分析了一种超声切割刀的结构对其纵振模态的影响规律,并优化了切割刀的结构设计,其优化结果良好。针对蜂窝材料的超声切削加工,Zhang等<sup>[15]</sup>设计了一种尖形刀具,并通过有限元方法研究了刀具几何尺寸对固有频率的影响。上述研究为超声加工刀具的设计与优化提供了很好的参考与指导。

由以上分析可见,加工工具的尺寸和形状对超声振动系统的谐振状态影响显著。在Nomex蜂窝材料超声切削加工过程中,刀具的振动形式属于复合振动,包括沿刀具轴线方向的纵向振动、沿刀面法线方向的横向振动和沿刀面方向的侧向振动。一般来说,设计超声振动系统时,要保证刀具的沿轴向的纵向振动振幅远大于横向振动和侧向振动。纵向振动被认为是提供切削运动、实现材料去除的主要方式。但也有研究认为,在弱刚度材料超声切削加工中,尽管横向振动和侧向振动的振幅远小于纵向振动,但其对材料去除也有贡献,有时甚至起主要作用。然而,已有研究中通常主要关注其轴向振动,而忽视横向振动和侧向振动对刀具性能的影响,对刀具振动性能的研究不够全面。直刃尖刀的纵向、横向和侧向振动特征及其受刀具参数的影响规律方面也尚不明确。

本文在前人研究成果的基础上,

将刀具与超声振动系统相结合,通过有限元方法系统分析超声系统装配刀具后整体纵振时谐振频率、刀具纵向振幅及刀具横向和侧面振幅随刀具参数变化的规律。在理论分析的基础上开展了不同尺寸参数下刀具的振动性能测试和真实刀具的超声振动性能试验,对理论分析结果进行试验验证。

## 超声振动系统设计原理

根据超声切割加工对超声振动系统的要求,基于变幅杆设计理论,将超声切割直刃尖刀作为变幅杆的一部分进行分析设计。超声振动变幅杆和直刃尖刀组合的简化模型如图1所示,图中I、II、III、IV 4部分为变幅杆,V部分为切割刀具。

由变幅杆变截面纵向振动的波动方程结合边界条件和连续性条件,即可求解上述模型中各个参数。

根据波动理论,变幅杆变截面纵向振动的波动方程为<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \xi = 0, (1)$$

式中: $k$ 为圆波数, $k=\omega/c$ ;  $c$ 为纵波在变幅杆中的传播速度; $\omega$ 为圆频率; $S$ 为变幅杆杆横截面积函数, $S=S(x)$ ; $\xi$ 为位移函数, $\xi=\xi(x)$ 。

变幅杆应力函数表示为:

其中, $E$ 为弹性模量

$$\sigma(x) = E \frac{\partial \xi}{\partial x}, (2)$$

结合边界条件和连续性条件可求出刀具形状参数的确定解。由于分析模型整体结构比较复杂,推导出

确定的数学表达式比较困难。因此本文采用有限元仿真分析与试验相结合的方法,在超声系统确定的前提下,通过改变直刃尖刀长度与厚度参数,分析刀具几何参数对超声振动系统性能的影响规律,确定与超声系统装配后综合性能最佳的超声切割直刃尖刀的参数。

## 直刃尖刀振动状态仿真分析

将刀具和变幅杆集成在一起,建立其动力学分析有限元模型,运用模态分析理论分析整个超声振动系统的振动特性。

对于自由状态的振动系统,在忽略阻尼作用的前提下,其动力方程为:

$$M\ddot{u} + Ku = 0. (3)$$

按照自由振动理论,若假设全部节点具有 $N$ 个自由度,则 $N$ 阶自由度系统的自由振动方程的 $N$ 个固有频率 $\omega_i(i=1,2,\dots,N)$ 可由式(4)确定:

$$[-\omega_i^2 M + K] = 0. (4)$$

超声切割加工刀具是超声波切割声学系统的重要组成部分,为便于研究尖形刀具振动性能,在对刀具进行有限元建模时,可将某些对计算结果影响较小的几何特征忽略。本文中刀具进行去刃处理,建立有限元分析模型,即分析不带切削刃的刀具,以简化模型方便计算。这样做的目的还在于,在下文试验验证中采用激光微位移传感器测量振动时,真实刀具的切削刃较为锋利,导致切削刃上的振动不易被测出。去刃处理后

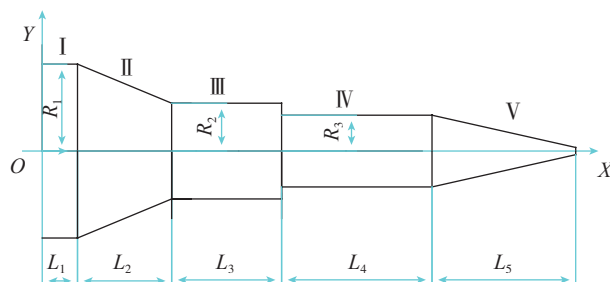


图1 超声切割系统的简化模型

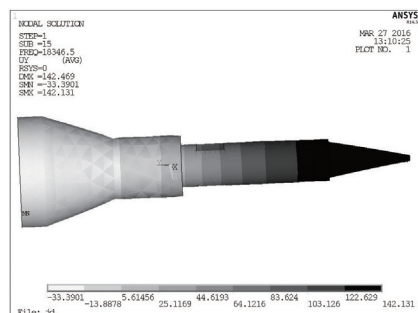
Fig.1 Simplified model of ultrasonic cutting system

留下的侧平面则可用于测量刀具的侧向振动。

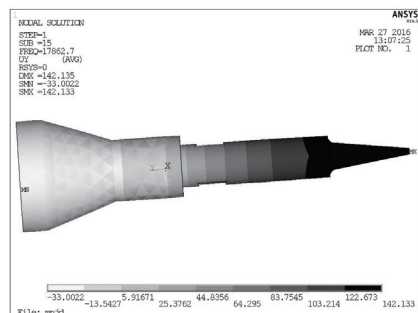
为了验证刀具去刃处理方法的合理性,首先分别分析材料为45#钢、长度55mm、厚度2mm的直刃尖刀与去刃处理的直刃尖刀装配变幅杆后的模态。去刃处理前后的系统整体的振动模态分析结果如图2所示,整个振动系统主要表现为纵向振动;系统整体纵振时振幅放大倍数基本相同,谐振频率稍有不同,分别为18.347kHz和17.863kHz,误差小于3%。因此,在设计直刃尖刀时,采用去刃简化分析的方法是可行的。

为了分析直刃尖刀长度和厚度对超声振动系统的影响,分别选取了长度为25mm、35mm、45mm、55mm、65mm、75mm、85mm,厚度为1mm、1.5mm、2mm的模拟刀具,通过所建立的有限元模型对振动系统整体进行模态分析,得出刀具长度和厚度变化对系统整体纵振谐振频率及振幅放大倍数的影响规律。

刀具长度和厚度对超声振动系统谐振频率的影响规律如图3所示,



(a) 直刃尖刀



(b) 模拟刀具

图2 模态分析结果比较

Fig.2 Comparison of modal analysis

系统整体谐振频率随着刀具长度的增加而减小,随着刀具厚度的增加而减小。对于厚度分别为1mm、1.5mm和2mm的刀具,当刀具长度为25mm,超声振动系统的谐振频率分别为18.782kHz、18.675kHz和18.569kHz,相差0.6%。当刀具长度增加至85mm时,厚度从小到大3种刀具的超声振动系统的谐振频率分别减小至17.084kHz、16.532kHz和16.066kHz,刀具长度增加导致谐振频率分别降低了1.698kHz、2.143kHz和2.503kHz,降低幅度分别为9%、11.5%和13.5%。刀具厚度越大,长度增加对系统谐振频率的影响越大,同时,刀具越长,厚度变化对系统谐振频率的影响也越大。此外,选择不同刀具长度与厚度的组合可以实现系统整体谐振频率一致,因此在刀具设计过程中,可根据超声系统设计频率初步确定刀具长度范围,并结合具

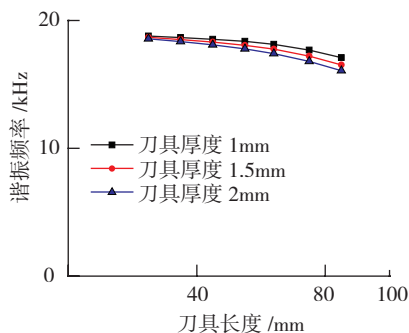


图3 刀具长度与厚度对系统整体谐振频率的影响

Fig.3 Effect of tool length and thickness on overall system resonance frequency

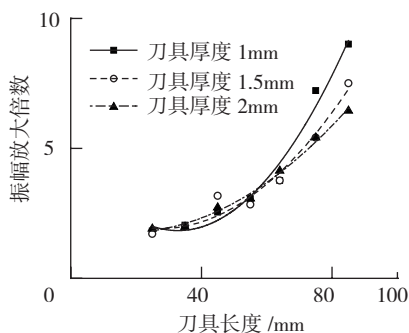


图4 刀具长度与厚度对纵向放大倍数的影响  
Fig.4 Effect of tool length and thickness on longitudinal amplitude magnification

体加工需求,进一步确定刀具参数。

刀具长度和厚度对超声振动系统纵向放大倍数的影响如图4所示,可以看出,刀具长度对放大倍数具有显著影响。随着刀具长度增加,振幅放大倍数增加。对于厚度分别为1mm、1.5mm和2mm的3种刀具,当其长度为25mm时,超声振动系统的振幅放大倍数分别为1.82、1.71和1.91,相差小于10%。当长度增加至85mm时,对应3种厚度刀具的振幅放大倍数分别增加至9、7.51和6.44,增加幅度分别为395%、339%和238%。系统整体振幅放大倍数随着刀具长度的增加而增大,且刀具厚度越小,增大的幅度越大,最大幅度可提高近4倍。系统整体振幅放大倍数随着刀具厚度的增加而减小,尤其是当刀具长度较大(75mm、85mm)时,减小的幅度较大,最大幅度可减小30%;但当刀具长度较小(25~65mm)时,刀具厚度对系统整体振幅放大倍数的影响较小。考虑到实际刀具制造过程中,刀具长度越长、刀具厚度越小、刀具成品率越低等不利因素,因此在刀具设计过程中,在系统整体振幅放大倍数满足加工需求的前提下,应优先选择适当的刀具长度,同时保证一定的刀具厚度。

## 试验验证

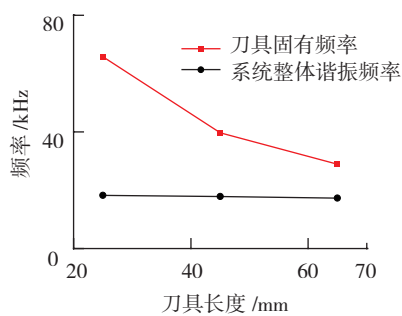
### 1 刀具参数对刀具性能的影响

为了验证有限元分析结果的准确性,进一步分析刀具长度和厚度对刀具轴向振幅与横向振幅的影响规律,选取了两组与有限元分析中形状、尺寸相同的去刃刀具(厚度为2mm,长度为25mm、45mm、65mm和长度45mm,厚度为1mm、1.5mm、2mm的刀具)进行试验分析。

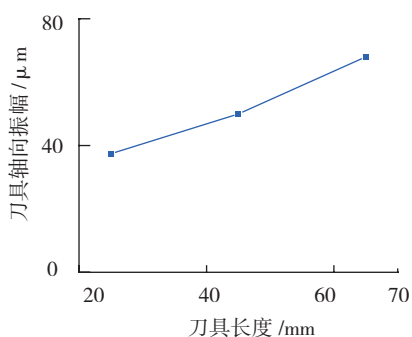
通过对两组参数的去刃刀具试验测量可知,刀具长度与厚度对刀具固有频率、系统整体谐振频率与轴向振幅的影响如图5~图6所示,从中

可以看出,刀具长度对频率与轴向振幅影响明显,而刀具厚度影响很小。刀具固有频率随着刀具长度增大而减小(39.6%~56%),随着刀具厚度增大而略有增大(0.4%~1.1%);系统整体谐振频率远小于刀具本身固有频率;厚度2mm的刀具,当刀具长度由25mm增至65mm时,系统整体谐振频率减小2%~5%,刀具轴向振幅可增大80%;长度45mm的刀具,当刀具厚度由1mm增至2mm时,系统整体谐振频率减小0.6%~1.7%,刀具轴向振幅增大13%,可见刀具长度对刀具轴向振幅的影响大于刀具厚度的影响,与模态分析得到的结论一致。

在仿真分析与试验测量过程中,系统整体纵向振动时均存在一定程度的横向和侧向振动。为研究刀具横向和侧向振动的变化规律,在试验过程中对其进行了测量,激光微位移传感器按照图中箭头所示方向进行布置,横向和侧向振幅分别是沿图7中刀面与刀具侧面所在平面的中心



(a) 刀具长度对刀具固有频率、系统整体谐振频率的影响



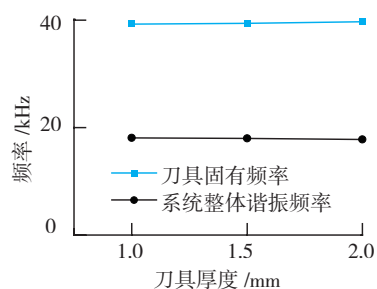
(b) 刀具长度对刀具纵向振幅的影响

图5 刀具长度对刀具性能的影响

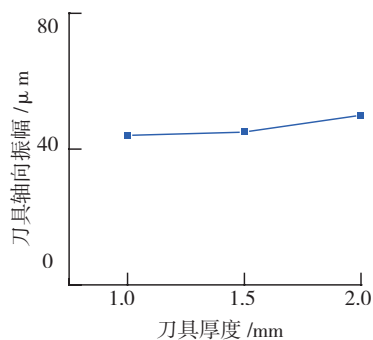
Fig.5 Effect of tool length on tool performance

线  $M_1N_1$  与  $M_2N_2$  等间距测量。

刀具长度对刀具横向和侧向振幅的影响如图8所示,从中可以看出,不同长度刀具与超声系统安装后,刀具长度对其横向和侧向振幅影响明显,尤其是当刀具长度较小时影响显著。厚度2mm的刀具,随着测量点的距离增大,刀面和刀刃振幅均呈现出逐渐增大的趋势,长度25mm的刀具刀尖处的横向和侧向振幅可达  $9\mu\text{m}$  以上,但长度65mm的刀具刀面与刀刃振幅增大趋势并不明显,振幅均在  $5\mu\text{m}$  以下。对于相同厚



(a) 刀具厚度对刀具固有频率、系统整体谐振频率的影响



(b) 刀具厚度对刀具纵向振幅的影响

图6 刀具厚度对刀具性能的影响

Fig.6 Effect of tool thickness on tool performance

度的刀具,刀具长度越小刀具横向和侧向振幅越大。在实际蜂窝芯材料切割加工过程中,为了有效利用刀具超声振动,选取刀具横向振幅小而侧向振幅较大的直刃尖刀更有利于切割加工,从试验测量结果可以看出,试验用超声系统的合适刀具长度为45mm。

刀具厚度对刀具横向和侧向振幅的影响如图9所示,从图中可以看出,不同厚度刀具与超声系统安装后,刀具厚度对刀体处的刀具横向和侧向振幅影响较小,对刀尖处刀具横向和侧向振幅影响明显。长度45mm的刀具,随着测量点距离的增大,刀面横向振幅呈现平稳增大趋势,尤其是刀尖处振幅增幅较大;刀具侧向振幅呈现增大-减小-再增大的趋势,特别是刀尖处振幅明显增大;刀具横向和侧向振幅随着刀具厚度的减小而增大,尤其在刀尖处增幅明显,当刀具厚度由2mm减小至1mm时,刀尖处刀具横向振幅由  $5\mu\text{m}$  增至  $11\mu\text{m}$ ,刀具侧向振幅由  $12.45\mu\text{m}$  增至  $21\mu\text{m}$ ;此外,刀具侧向振幅均明显大于刀具横向振幅,可见刀具厚度对刀具刀尖处的刀具横向和侧向振幅影响较大。在超声切割加工过程中为避免较大横向振幅引起刀具断裂而失效,应选取刀具横截面振幅小而刀具侧向振幅较大的刀具参数。因此,在本试验中宜选取长度45mm,厚度2mm的刀具。

## 2 直刃尖刀振动性能验证

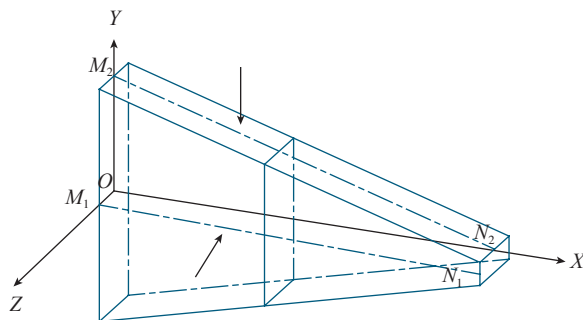


图7 测量位置示意

Fig.7 Diagrammatic drawing of measuring point position

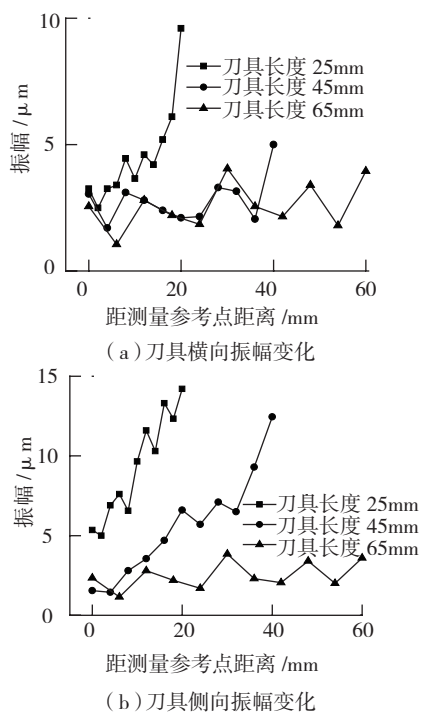


图8 不同长度刀具振幅沿刀具轴线方向变化情况

Fig.8 Amplitude of different length cutter changes along tool length direction

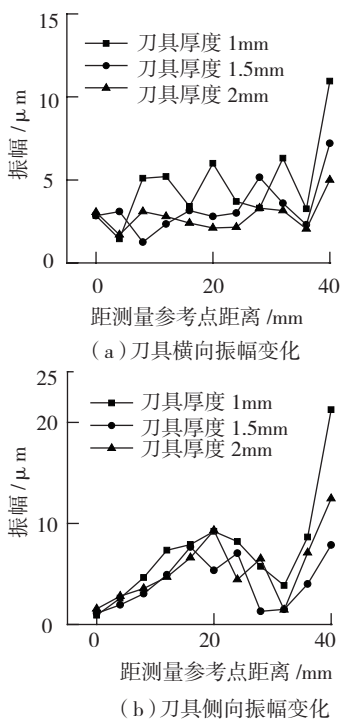


图9 不同厚度刀具振幅沿刀具轴线方向变化情况

Fig.9 Amplitude of different thickness cutter changes along tool axis direction

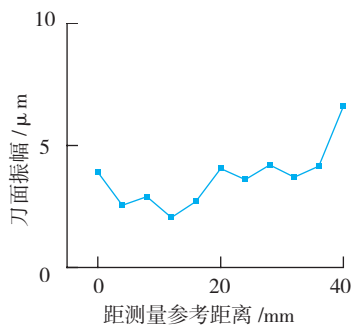


图10 刀具横向振幅变化趋势

Fig.10 Change trend of blade surface amplitude

在上述分析的基础上,对长度45mm,厚度2mm的直刃尖刀与超声系统集成后的性能进行验证。由于直刃尖刀切削刃圆半径较小,垂直于切削刃方向的振动不易被测出,因此仅对其刀具纵向振幅与刀具横向振幅进行测量。

通过实际测量可知,直刃尖刀刀尖处纵向振幅可达到 $56\mu\text{m}$ ,且刀具横向振幅变化趋势与去刃处理的直刃尖刀相同(见图10)。进一步验证了有限元分析结果和切削刀具简化模型的正确性,本文设计的具有合理形状和几何参数的超声辅助切割刀具超声振动系统,其振幅可以达到 $40\mu\text{m}$ 以上,达到超声辅助切割刀具振动性能的设计要求。

### 结论

在本文所选刀具参数范围内,通过仿真分析与试验验证,研究了直刃尖刀的振动性能,分析了刀具形状参数对其振动性能的影响规律。对比仿真分析与试验结果可知:

(1)直刃尖刀的长度和厚度对于刀具的纵向、横向和侧向振幅的大小和分布及谐振频率会产生影响。

(2)随着直刃尖刀长度增加,刀具的纵向振幅明显增大,同时刀具的横向和侧向振幅整体减小。系统的谐振频率降低,纵向振幅放大倍数增大。

(3)随着直刃尖刀厚度减小,刀具的横向和侧向振幅在刀尖处明显增大。厚度对刀具纵向振幅和谐振

频率影响不大。

(4)直刃尖刀的横向和侧向振幅分布呈现:刀具尖部最大,依次向刀体降低趋势。理论分析与试验结果相一致。

(5)选取刀具参数时,在轴向振幅满足需求的条件下,同时考虑到刀具的制造工艺和零件的加工需求,避免选择横向振幅过大的刀具,以免其加速刀具疲劳断裂,影响刀具使用寿命。

结合蜂窝材料切割试验可知:试验用超声系统合适的尖形刀刀具长度在30~70mm,厚度1.5~2mm范围内选取可获得优良的综合性能。经过以上理论分析和试验验证,进而确定超声系统的最佳刀具参数为长度45mm,厚度2mm且其实际性能得到了验证。

### 参考文献

[1] 许潮华,张小珍,宋桂枝. “NOMEX”蜂窝芯材的研制及应用[J]. 玻璃钢/复合材料,1986(2):22-24.  
 XU Chao-hua, ZHANG Xiao-zhen, SONG Guizhi. NOMEX honeycomb core material development and application[J]. FRP/Composite Materials, 1986(2):22-24.  
 [2] 李勇. Nomex蜂窝在俄罗斯航空领域的发展及应用[J]. 材料工程,1995(4):3-5.  
 LI Yong. The development and application of the Nomex honeycomb in Russia aerospace area[J]. Materials Engineering,1995(4):3-5.  
 [3] 李勇. 直九机用Nomex蜂窝研究[J]. 航空材料学报,1996(1):47-54.  
 LI Yong. Study on Nomex honeycomb applied to Z9 helicopter[J]. Journal of Aeronautical Materials,1996(1):47-54.  
 [4] 李焱,何勇. NOMEX蜂窝芯零件的数控加工[C]//中国航空学会. 第二届中国航空学会青年科技论坛文集. 北京:中国航空学会,2006:7.  
 LI Yan, HE Yong. NC Machining for the Nomex-honeycomb Part[C]//CSAA. The second youth science and technology of China aviation society BBS corpus. Beijing:CSAA, 2006:7.  
 [5] 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. A new machining technique for cutting nomex honeycomb core[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011(11):1811-1815.
- [6] 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]// 中国航空学会. 第 17 届全国复合材料学术会议(复合材料制造技术与设备分论坛)论文集. 北京: 中国航空学会, 2012:5.
- ZHANG Haichao, GONG Qinghong. Contrast on ultrasonic cutting and traditional NC machining for Nomex honeycomb sandwich component[C]// CSAA. The 17th national conference on composite materials(composites manufacturing technology and equipment sub-forum) proceedings. Beijing: CSAA, 2012:5.
- [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, 2008(4):50-52.
- GAO Jun, CUI Wei. Ultrasonic cutting technology applied in the field of composites processing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(4):50-52.
- [8] 富历新, 樊滨温, 李瑞丰, 等. 超声波切割机床的数控系统[J]. 制造技术与机床, 2000,454(5):15-16.
- FU Lixin, FAN Binwen, LI Ruifeng, et al. Ultrasonic cutting machine tool NC system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2000, 454(5):15-16.
- [9] 文立伟, 严飙, 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(17):49-52.
- WEN Liwei, YAN Biao, XIAO Jun, et al. Research on ultrasonic cutter system and stability of composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(17):49-52.
- [10] 金成柱, 刘刚, 柯映林. 基于铣削力模型的 NOMEX 蜂窝固持工艺优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007,41(4):547-550.
- JIN Chengzhu, LIU Gang, KE Yinglin. Clamping technology optimization of high speed machining of NOMEX honeycomb core based on milling force model[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007,41(4):547-550.
- [11] 冯冬菊, 赵福令, 徐占国, 等. 超声波加工工具对复合变幅杆谐振性能影响[J]. 大连理工大学学报, 2004,44(5):685-688.
- FENG Dongju, ZHAO Fuling, XU Zhanguo, et al. Influence of ultrasonic tools on resonance performance of composite horn[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(5):685-688.
- [12] 张可昕, 张向慧, 高炬. 带有加工工具的超声复合变幅杆的优化设计[J]. 机械设计与制造, 2011(11):33-35.
- ZHANG Kexin, ZHANG Xianghui, GAO Ju. Ptimum design of acoustic horns with tool for ultrasonic machining using finite-element analysis[J]. Machinery Design & Manufacture, 2001(11):33-35.
- [13] 刘井权, 闫久春, 杨士勤. 超声刀切割系统的模态分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001,33(4):435-438.
- LIU Jingquan, YAN Jiuchun, YANG Shiqin. Modal analysis of ultrasonic knife cutting system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001,33(4):435-438.
- [14] 周胜利, 姚志远, 沙金. 超声切割刀动力学分析和结构优化设计[J]. 中国机械工程, 2013,24(12):1631-1635.
- ZHOU Shengli, YAO Zhiyuan, SHA Jin. Dynamics analysis and structural optimixation design of an ultrasonic cutter[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(12):1631-1635.
- [15] ZHANG Y D, SHEN Y B, LU Z P. Design of an ultrasonic pointed cutter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 494-495:569-572.
- [16] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- LIN Zhongmao. The principle of ultrasonic horns stem and design[M]. Beijing: Science Publishing Company, 1987.

## Effect of Shape Parameters of Straight Blade Cutter on Performance of Ultrasonic Assisted Cutting System

WU Xin, DONG Zhigang, KANG Renke, ZHU Xianglong, WANG Yidan, LIU Jinting

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

**[ABSTRACT]** Based on the theory of ultrasonic vibration design and ultrasonic vibration horn, a straight blade cutter for ultrasonic assisted cutting of weak stiffness material was designed. The influence of length, thickness parameters of the blade on the resonant frequency, amplitude magnification and longitudinal amplitude of the tool was analyzed. The effects of the tool width and transverse direction and the distribution of lateral amplitude along the tool axis direction were discussed. For the particular ultrasonic vibration system, the tool parameters with the best overall performance were determined. The cutting edge simulation tool with different shape parameters was developed and tested on the same ultrasonic vibration system. The conclusion of the simulation analysis was verified. The theoretical analysis was in accordance with the experimental results. According to the optimum parameters determined by the theoretical analysis, the straight blade cutter was developed and its vibration performance was tested. The conclusion of the study provided theoretical guidance for the development of straight blade cutter for ultrasonic assisted machining.

**Keywords:** Ultrasonic cutter; Simulation analysis; Tool shape; Vibration performance

(责编 玲犀)