

DOI: 10.3901/JME.2023.09.298

蜂窝芯超声切削技术研究进展*

孙健淞 康仁科 周 平 董志刚 王毅丹
(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: 蜂窝夹层构件因其密度低、比强度和比刚度高等特性, 广泛应用于航空航天等领域。Nomex 蜂窝和铝蜂窝是广泛采用的蜂窝材料, 但由于其薄壁、多孔等结构特征, 在加工中容易出现撕裂和毛刺等问题。超声切削技术具有减小切削力、改善加工表面质量和提高加工效率等特点, 作为解决蜂窝材料难加工问题的关键方法, 近年来受到了国内外广泛关注。围绕刀具运动学和切削力模型、切削仿真、加工表面形貌与面形精度分析、加工轨迹规划方法和超声加工系统研制等方面, 总结了蜂窝材料超声切削机理与工艺、超声切削系统与装备的研究现状, 并对蜂窝材料超声切削技术的发展趋势与未来研究重点进行展望。

关键词: 蜂窝材料; 超声切削; 加工机理; 加工工艺; 技术与装备

中图分类号: V261

Review on Ultrasonic Cutting of Honeycomb Core

SUN Jiansong KANG Renke ZHOU Ping DONG Zhigang WANG Yidan
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Honeycomb sandwich components are widely used in aeronautics and aerospace industries, owing to their low density and high strength and stiffness to weight ratio. Nomex honeycomb and aluminum honeycomb are most widely used honeycomb materials. However, deformations and burrs are easily generated during processing due to the cellular and thin-wall structure of the honeycomb materials. The ultrasonic cutting technology, with the advantages of reduced the cutting force and machining deformation, improved machining quality, and enhanced machining efficiency, has been highlighted at home and abroad in recent years as a key method that could solve problems in machining honeycomb materials. Study status of cutting mechanisms, processing technologies, and design of ultrasonic cutting system and equipment are reviewed in the respects of studies about the models of cutting tool kinematics and cutting force, the cutting simulations, analyses on topography and shape accuracy of machined surface, cutting path planning method, and development of the ultrasonic cutting system, etc. Finally, development trends and future research focuses on the ultrasonic cutting of honeycomb materials are provided.

Key words: honeycomb materials; ultrasonic cutting; machining mechanism; machining process; technology and equipment

0 前言

蜂窝材料是人类仿照自然蜂巢结构发明的一种材料, 其应用可追溯到 20 世纪 30 年代。随着材料制备技术的进步, 已经发展出以铝蜂窝、钛蜂窝等为代表的金属蜂窝和以芳纶蜂窝(Nomex 蜂窝和

Kevlar 蜂窝等)、玻璃纤维蜂窝、碳纤维蜂窝等为代表的非金属蜂窝^[1], 其中如图 1 所示的 Nomex 蜂窝和铝蜂窝应用最为广泛。蜂窝材料通常作为芯材与合金蒙皮或复合材料蒙皮粘接形成蜂窝夹层结构。蜂窝夹层结构的密度低, 比强度和比刚度, 具有良好的抗平面压缩、抗剪切、耐冲击、抗疲劳等性能, 在航空航天、轨道交通、船舶等领域得到广泛应用^[2-5], 用于制备飞机的地板、舱门、尾翼、襟翼、雷达罩以及导弹的天线罩和翼板等关键部件^[6-7]。

蜂窝材料的制备方法主要有拉伸法和成形法

* 国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助项目(U20A20291)。
20220520 收到初稿, 20221107 收到修改稿

(又称辊压法、波纹法)两种^[8-9]。拉伸法一般适用于制造中低密度蜂窝, 方便蜂窝芯使用前的储存和运输。对于密度较高的蜂窝, 一般采用成形法制备。制备芳纶蜂窝时, 在拉伸后还需浸渍树脂和固化, 从而形成“树脂-芳纶纸-树脂”多层蜂窝壁结构。

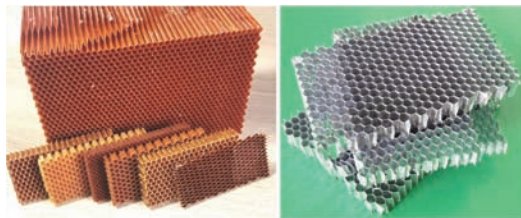


图1 Nomex 蜂窝材料和铝蜂窝材料

在蜂窝夹层构件的制造过程中, 为使蜂窝材料的外形轮廓和尺寸精度与蒙皮相匹配, 需要对蜂窝材料进行加工^[1]。蜂窝材料的加工质量会影响蜂窝夹层构件的性能与寿命, 当 5% 的蜂窝孔格出现缺陷时, 夹层构件的性能会下降 35%^[10]。目前, 蜂窝材料的加工方法主要有高速铣削、超声切削、金刚石砂轮磨削、高压水射流切割及激光切割等。高压水射流切割及激光切割能够得到较好的加工表面, 但加工过程中引入的液体污染或热损伤会影响构件性能, 且这两种方法不适用于加工复杂曲面, 特别是无法加工内部型腔、凹面等结构, 在蜂窝加工中应用有限^[11]。金刚石砂轮磨削适用于加工高密度蜂窝材料, 但难以实现中低密度蜂窝材料的加工^[12-14]。高速铣削加工是目前应用最广泛的蜂窝材料加工方法之一。蜂窝材料为多孔薄壁结构, 其面外刚度低, 属于典型的弱刚度材料, 采用高速铣削方法加工时极易出现变形、毛刺和撕裂等加工缺陷。为了避免蜂窝薄壁结构在加工过程中的蜂窝变形、振动等问题, 美国专利提出了用冰或热固性树脂将蜂窝孔格填充为实体后再进行加工的方法^[15-16], 国内的王永青等^[17-19]提出了冰固持与低温铣削相结合的蜂窝材料加工方法, 一定程度上改善了蜂窝材料的加工质量, 但同时增加了工艺准备的时间和加工成本; 且对于 Nomex 蜂窝材料而言, 填充材料可能会影响其使用性能。此外, 针对蜂窝芯高速铣削技术, 现有学者围绕蜂窝材料的铣削力模型^[20]、铣削损伤特征与抑制^[10, 21-22], 刀具的选择与刀具磨损研究^[23-25]、固持方法^[26-29]、铣削加工工艺^[30-36]等开展了研究。已有研究表明, 由于蜂窝材料的薄壁弱刚度特性以及芳纶纤维较高的强度和韧性, 采用高速铣削方法加工时无法避免毛刺、撕裂和压溃等缺陷的形成, 同时还存在刀具磨损严重、产生大量粉尘和环境污染严重等问题^[37-38]。

超声切削是蜂窝材料的先进加工技术之一, 其原理是采用高频超声振动的超声切削刀具实现对材料的切削加工。超声切削刀具的振幅可达数十微米, 主要依靠超声振动实现材料的切削去除, 常用于碳纤维预浸料和蜂窝材料的加工^[39-42]。蜂窝材料超声切削加工系统的组成如图 2 所示, 超声电源用于输出高频交流电信号, 由超声信号发生模块、高频逆变(信号放大)模块、电路匹配模块以及用于频率自动跟踪的信号反馈模块等组成^[43]。超声电源产生的高频电信号经由超声电能传输单元传输至换能器, 由换能器将超声电能转变为高频机械振动。变幅杆对换能器产生的机械振动进行放大并传递到前端的刀具, 驱动刀具实现超声振动。蜂窝材料的超声切削刀具主要有两类, 分别为直刃尖刀和圆片刀, 如图 2 所示。直刃尖刀与圆片刀配合使用, 可以实现蜂窝芯平面、曲面、边缘轮廓、槽等特征的加工。

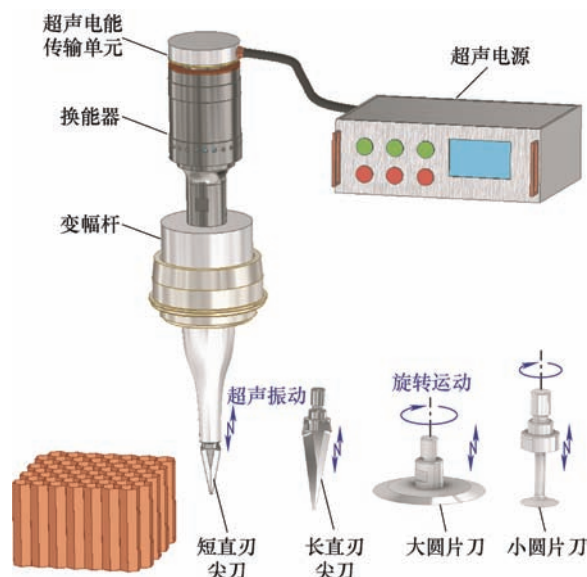


图2 蜂窝材料超声切削加工系统组成

与高速铣削相比, 超声切削具有明显的技术优势。在蜂窝材料超声切削过程中, 刀具的轴向超声振动改变了刀具与工件的接触方式, 使材料的切削方式由连续切削转变为断续切削。同时, 刀具的超声振动对材料产生了高速冲击作用, 能够在避免蜂窝材料发生较大变形的同时实现材料的快速去除^[44]。此外, 与高速铣削中铣刀将材料完全破碎的材料去除方式不同, 在超声切削过程中, 超声刀具仅切断材料, 使材料以条状、块状或片状切屑的形式被去除。从图 3 所示的对比图中可以看出, 无超声振动时, Nomex 蜂窝表面存在较多的毛刺、撕裂以及未切断的纤维, 铝蜂窝存在明显的孔格压溃、扭曲和撕裂; 在超声振动作用下, Nomex 蜂窝表面

仅有少量毛刺出现, 铝蜂窝表面无明显缺陷, 超声作用可以明显改善蜂窝材料的加工质量。综上所述, 超声切削蜂窝芯的优势主要体现在以下几个方面:

① 加工缺陷少、加工质量好、成品率高; ② 切削力小、蜂窝材料变形小、加工精度高; ③ 加工环境友好、无大量粉尘; ④ 材料去除速度快、加工效率高。

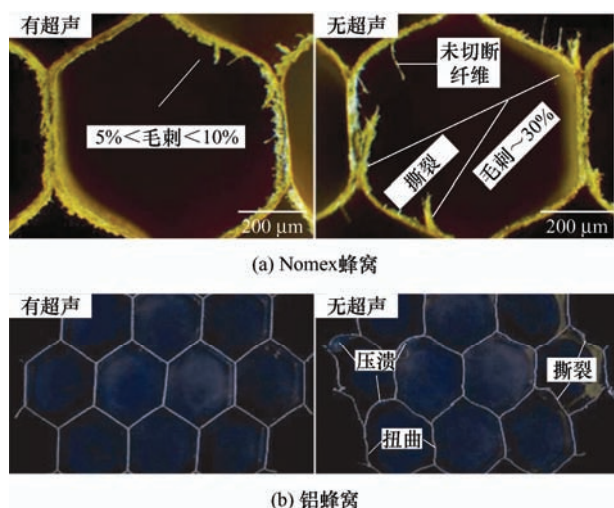


图 3 有无超声条件下蜂窝材料切削效果对比^[45-46]

超声切削技术作为蜂窝材料高质高效加工的重要手段, 近年来受到广泛关注^[38, 47-48]。国内外学者围绕超声切削系统与刀具设计、切削机理和切削工艺等问题开展了大量的研究, 促进了蜂窝材料超声切削技术的发展。但是由于研究时间相对较短, 现有研究结果尚不完善, 尤其在蜂窝材料的超声切削机理研究方面, 学者们从运动学研究、切削力研究和切削仿真研究等多个角度尝试揭示切削机理, 得到了一系列的研究结果和结论, 但相关研究不够深入, 难以为加工工艺研究提供强有力的理论支撑, 制约了蜂窝材料超声切削技术的推广应用。本文在总结蜂窝材料超声切削加工机理和加工工艺、超声切削系统和刀具的研究现状的基础上, 挖掘蜂窝材料超声切削中尚未解决的科学问题和技术难题, 并对蜂窝材料超声切削技术的发展趋势进行展望。

1 蜂窝材料超声切削机理研究

蜂窝材料为多孔薄壁结构, 具有非连续、弱刚度等特点。以 Nomex 蜂窝材料为例, 其蜂窝壁为“树脂-芳纶纸-树脂”结构, 具有多层异质、各向异性的材料特点, 加工中刀具在的挤压、冲击和剪切等复杂作用下材料变形及去除过程复杂, 在揭示其加工机理时传统的金属切削理论不适用。超声切削加工作为一种特种加工技术, 不仅改变了刀具和蜂窝

材料之间的接触关系, 也改变了材料在刀具作用下的失效破坏方式。此外, 蜂窝材料超声切削刀具、超声作用下的切削力、加工表面形成机理等也均与传统高速铣削明显不同。国内外学者在切削运动学分析、切削力建模以及加工过程有限元分析等方面对蜂窝材料超声切削机理进行了探索。

1.1 超声切削几何学和运动学分析

1.1.1 切削运动学分析

在蜂窝材料超声切削中, 由于超声切削刀具结构及切削运动方式特殊, 掌握刀具运动规律是分析刀具切削作用的基础。大连理工大学的王毅丹^[49]和孟倩^[50]、杭州电子科技大学的黄秀秀^[51]、河南理工大学的 XIANG^[52-53]等学者均对直刃尖刀或圆片刀超声切削蜂窝材料时刀具与蜂窝材料的相对运动关系进行了分析。采用直刃尖刀和圆片刀切削蜂窝材料时, 刀具和材料之间的位置关系如图 4 所示。在切削过程中, 刀具姿态会影响刀具的运动轨迹。为了描述刀具的运动轨迹, 王毅丹^[49]将切削平面内刀具轴线与进给方向夹角的余角定义为刀具前倾角 λ_1 , 将切削平面与竖直方向的夹角定义为刀具侧倾角 λ_t 。在沿直线进给切削时, 直刃尖刀不旋转, 只存在沿轴向的超声振动, 刀具上任意一点的运动轨迹可表达式为

$$\begin{cases} S_x = A \sin(2\pi ft) \cdot \sin \lambda_1 + v_f t \\ S_y = A \sin(2\pi ft) \cdot \cos \lambda_1 \cdot \sin \lambda_t \\ S_z = A \sin(2\pi ft) \cdot \cos \lambda_1 \cdot \cos \lambda_t \end{cases} \quad (1)$$

其中, A 为超声振幅, f 为超声频率, t 为时间, v_f 为进给速度, λ_1 为刀具前倾角, λ_t 为刀具侧倾角。直刃尖刀刀刃上一点的运动轨迹如图 5a 所示。将位移表达式对时间求导, 得到直刃尖刀上一点的速度表达式

$$\begin{cases} v_x = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \cdot \sin \lambda_1 + v_f \\ v_y = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \cdot \cos \lambda_1 \cdot \sin \lambda_t \\ v_z = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \cdot \cos \lambda_1 \cdot \cos \lambda_t \end{cases} \quad (2)$$

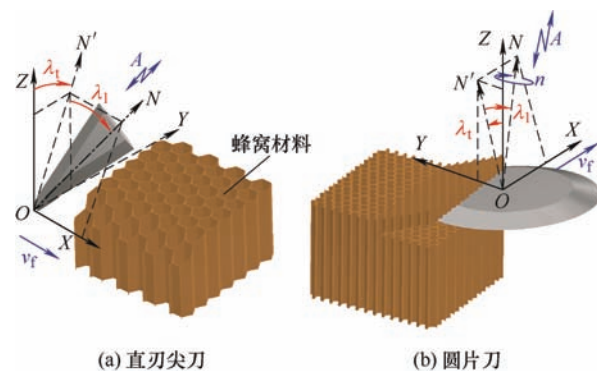


图 4 直刃尖刀和圆片刀超声切削蜂窝材料示意图

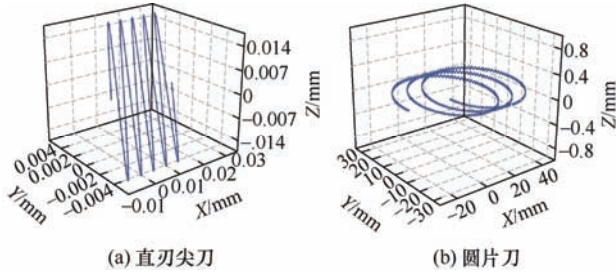


图 5 超声切削刀具的运动轨迹

圆片刀在轴向超声振动时绕轴线旋转，考虑刀具切削姿态角度，建立刀刃上任意一点的运动轨迹表达式^[50, 52]

$$\begin{cases} S_x = v_f t - R_d \sin(2\pi nt) \cos \lambda_1 + A \sin(2\pi ft) \sin \lambda_1 \\ S_y = R_d \cos(2\pi nt) \cos \lambda_1 + R_d \sin(2\pi nt) \sin \lambda_1 \times \\ \quad \sin \lambda_1 + A \sin(2\pi ft) \cos \lambda_1 \sin \lambda_1 \\ S_z = R_d \sin(2\pi nt) \sin \lambda_1 \cos \lambda_1 - R_d \cos(2\pi nt) \times \\ \quad \sin \lambda_1 + A \sin(2\pi ft) \cos \lambda_1 \cos \lambda_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中， R_d 为圆片刀半径； n 为刀具转速。由上式计算圆片刀刀刃上一点的运动轨迹如图 5b 所示。将位移表达式对时间求导，得到圆片刀刀刃上一点的速度表达式

$$\begin{cases} v_x = v_f - 2\pi n R_d \cos(2\pi nt) \cos \lambda_1 + 2\pi f A \times \\ \quad \cos(2\pi ft) \sin \lambda_1 \\ v_y = -2\pi n R_d \sin(2\pi nt) \cos \lambda_1 + 2\pi n R_d \cos(2\pi nt) \times \\ \quad \sin \lambda_1 \sin \lambda_1 + 2\pi f A \cos(2\pi ft) \cos \lambda_1 \sin \lambda_1 \\ v_z = 2\pi n R_d \cos(2\pi nt) \sin \lambda_1 \cos \lambda_1 + 2\pi n R_d \times \\ \quad \sin(2\pi nt) \sin \lambda_1 + 2\pi f A \cos(2\pi ft) \cos \lambda_1 \cos \lambda_1 \end{cases} \quad (4)$$

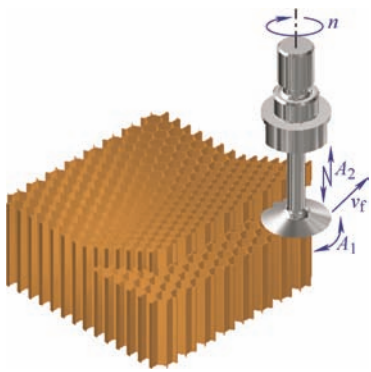


图 6 圆片刀纵扭复合超声振动切削

此外，XIANG 等^[52]在圆片刀轴向超声振动的基础上，复合了绕刀具轴线的扭转超声振动，提出了圆片刀纵扭复合超声振动切削方法，如图 6 所示。在不考虑刀具倾角的情况下，建立了刀刃上任一点的位移轨迹和速度表达式

$$\begin{cases} S_x = R_d \sin(2\pi nt + \frac{A_1}{R_d} \sin(2\pi ft)) + v_f t \\ S_y = R_d \cos(2\pi nt + \frac{A_1}{R_d} \sin(2\pi ft)) \\ S_z = A_2 \sin(2\pi ft + \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_x = (2\pi n R_d + 2\pi f A_1 \cos(2\pi ft)) \times \\ \quad \cos(2\pi nt + \frac{A_1}{R_d} \sin(2\pi ft)) + v_f \\ v_y = -(2\pi n R_d + 2\pi f A_1 \cos(2\pi ft)) \times \\ \quad \sin(2\pi nt + \frac{A_1}{R_d} \sin(2\pi ft)) \\ v_z = 2\pi f A_2 \cos(2\pi ft + \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

其中， A_1 为扭转超声振幅， A_2 为纵向超声振幅， φ 为纵扭超声振动的相位差。由式(6)可知，当 $A_1 f < n R_d$ 时，刀刃上一点沿圆周方向的运动速度始终为正，其运动轨迹如图 7a 所示；而当 $A_1 f > n R_d$ 时，刀刃上一点会在圆周方向上做反向运动，如图 7b 所示。

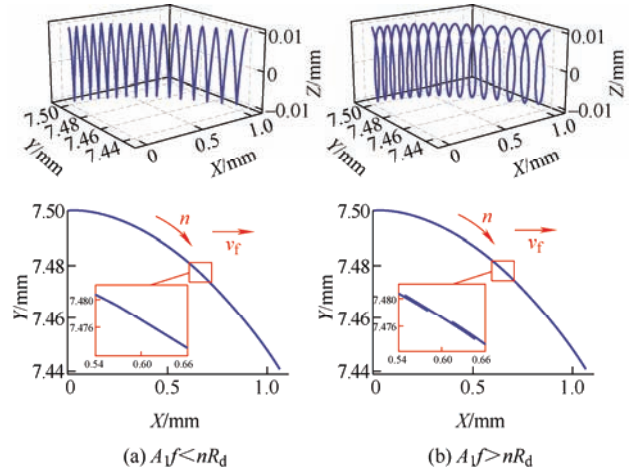


图 7 纵扭振动圆片刀刀刃上一点的运动轨迹

1.1.2 刀具切削角度分析

直刃尖刀切削示意图如图 8 所示，刀具同时做沿 v_f 方向的进给运动和沿轴向的超声振动，刀具与工件之间形成滑动切削关系，即刀具在垂直于刀刃方向做主切削运动、同时在平行于刀刃方向滑动。DEIBEL^[54]、ATKINS^[55]和石川宪一^[56]等在滑动切削的研究中发现刀刃合速度方向与主切削运动方向的夹角会改变刀具的等效楔角和刀面与工件之间摩擦力方向，该夹角越大，切削过程中的切削力越小。为了揭示直刃尖刀超声切削蜂窝材料时切削力减小的原因，HU^[57]、XIANG^[53]与 KANG^[58]等通过几何运动学分析，计算了刀具的瞬时等效楔角。

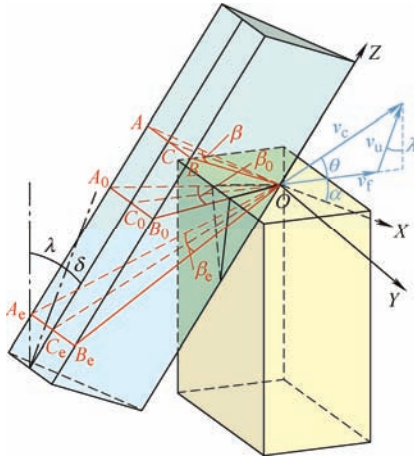


图8 直刃尖刀超声切削的瞬时等效楔角示意图

以刀刃上一点 O 为原点, 刀刃方向为 Z 轴, 切削平面与刀具横截面的交线为 X 轴建立坐标系 $O-XYZ$, 如图8所示。图8中, 点 C 、 C_0 、 C_e 分别为 AB 、 A_0B_0 、 A_eB_e 的中点, λ 为刀具轴线与竖直方向夹角, δ 为刀具轴线与刀刃夹角, β 为刀具原始楔角, β_0 为刀具无超声振动沿水平方向切削时的等效楔角, β_e 为在超声振动下刀具的瞬时等效楔角, α 为水平切削速度 v_f 与 X 轴夹角, v_u 为超声振动速度, 为 v_c 合切削速度, θ 为合切削速度与水平切削速度夹角。将合速度与 X 轴夹角定义为切削角 φ , 则有

$$\varphi = \alpha + \theta = \delta + \lambda + \theta \quad (7)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{2\pi f A \cos(2\pi f t) \cdot \cos \lambda}{2\pi f A \cos(2\pi f t) \cdot \sin \lambda + v_f} \right) \quad (8)$$

由几何关系可知, 无超声振动时, $\theta=0^\circ$, 切削角 $\varphi=\delta+\lambda$, 刀具的等效楔角为

$$\beta_0 = 2 \arctan \frac{\overline{B_0 C_0}}{\overline{C_0 O}} = 2 \arctan \frac{\overline{BC}}{\overline{CO} / \cos \alpha} = 2 \arctan \left[\tan \frac{\beta}{2} \cos(\delta + \lambda) \right] \quad (9)$$

同理, 在超声振动时, 刀具的瞬时等效楔角为

$$\beta_e = 2 \arctan \left[\tan \frac{\beta}{2} \cos(\delta + \lambda + \theta) \right] \quad (10)$$

与之类似, XIANG 等^[52]建立了如图9所示的刀具切削刃模型, 计算了圆片刀扭转振动切削时刀刃最前端一点处的等效楔角, 其中水平切削速度为 v_f , 刀具旋转扭转振动时的合切削速度分别为 v_c 和 v_{c0} 。根据几何关系可知, 无扭转超声振动时, 刀具的等效楔角为

$$\beta_0 = \arctan(\tan \beta \cos \alpha) = \arctan \left(\tan \beta \cdot \frac{v_f}{\sqrt{v_f^2 + v_n^2}} \right) \quad (11)$$

式中, $v_n = 2\pi n R$, R 为圆片刀半径。有扭转超声振

动时, 刀具等效楔角为

$$\beta_0 = \arctan(\tan \beta \cos \theta) =$$

$$\arctan \left(\tan \beta \cdot \frac{v_f}{\sqrt{v_f^2 + (v_n + v_u)^2}} \right) \quad (12)$$

$$v_u = 2\pi f A \cos(2\pi f t) \quad (13)$$

式中, A 为圆片刀刀刃上一点的周向振幅。

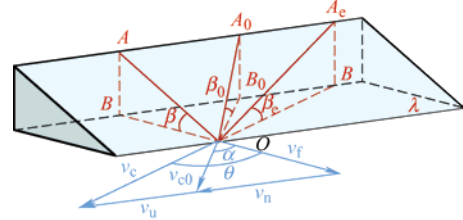


图9 圆片刀超声切削的瞬时等效楔角示意图

1.1.3 切削接触状态分析

断续切削是超声加工技术的重要特征, 即刀具与工件之间的作用关系在一个振动周期内存在接触和分离两个阶段。超声切削接触状态以刀具工件接触率进行表征^[59-62]。研究表明, 超声频率和振幅、刀具切削速度等加工参数会影响刀具工件接触率, 而降低刀具工件接触率, 有助于降低切削力、减小刀具磨损、提升表面加工质量。在超声切削蜂窝材料方面, HU^[57]、XIANG^[53]与黄秀秀^[51]在简化刀具几何形状和忽略材料变形等因素基础上, 建立了直刃尖刀超声切削 Nomex 蜂窝材料简化模型, 通过运动学分析, 提出了理想情况下实现断续切削的基础条件, 即为沿切削方向的超声振动速度分量大于切削速度。KANG^[58]和王毅丹^[63]等考虑材料变形与断裂, 分析了在一个超声振动周期内直刃尖刀与材料的接触切削过程, 指出超声切削中刀具与材料的断续接触切削形成条件与刀具超声振动速度和材料的断裂变形量有关。此外, 冯柏仁^[46]建立了圆片刀超声切削铝蜂窝壁的冲击塑性变形模型, 分析了刀具与工件的接触方式, 结果表明, 在附加超声振动后刀具的上下表面与工件发生周期性断续接触, 刀具的冲击作用是铝蜂窝壁失效破坏的主要因素。

1.2 切削力与刀具超声冲击作用研究

切削力是评价切削过程的重要因素, 对切削区域进行受力分析、建立切削力模型和掌握切削力随加工参数的变化规律对于提高加工质量、控制加工变形和提升加工效率具有重要意义。王毅丹等^[63]在分析刀具与工件断续接触关系基础上, 基于脆性断裂力学理论建立了不同刀具工件接触状态下的进给方向动态切削力和平均切削力模型。结果显示, 影响平均切削力的因素有材料的局部刚度、材料断裂的临界弹性变形量、刀具进给速度、刀具振动频率

以及刀具在进给方向的振幅分量。其中, 在进给方向的振幅分量越大, 平均切削力越小; 刀具进给速度与振动频率的比值越大, 平均切削力越大。HU^[57]和黄秀秀^[64]等考虑材料在刀具作用下的剪切破裂行为和分离抗力, 建立了包括刀具楔角、前倾角、侧倾角、切削深度、进给速度以及振动周期在内的直刃尖刀切削力模型, 发现断续切削缩短了刀具和工件之间的摩擦作用时间, 在振动切削过程中刀具对材料产生了瞬时高速冲击作用, 因而更易于在较小切削力时发生断裂。黄秀秀等^[51]还应用断裂力学理论, 引入动态应力强度因子分析了 Nomex 蜂窝材料的微观断裂过程, 推导了在刀具振动冲击作用下材料在裂纹尖端附近的正应力, 认为引发和促使材料破损的主要因素是刀具对材料的高频冲击作用, 提出冲击产生的微裂纹扩展是直刃尖刀超声切削中切削力减小的原因。KANG 等^[58]将蜂窝材料简化为理想弹塑性材料, 在刀具工件断续接触关系和刀尖受力分析基础上, 结合弹塑性材料特征与刀具等效楔角理论, 建立了 Nomex 蜂窝材料直刃尖刀超声切削力预测模型, 并进行了试验验证。研究结果显示, 超声振幅、前倾角、切削深度和进给速度是影响切削力大小的四个因素, 其中超声振幅和前倾角对切削力的影响最大, 切削深度次之, 进给速度的影响最小。XIANG 等^[53]在刀具运动学和刀具等效楔角分析基础上, 计算了直刃尖刀超声切削时刀具和材料之间的等效接触面积, 建立了考虑刀尖抗力和刀面分离抗力的直刃尖刀超声切削力模型, 结果显示超

声切削力不仅与超声系统的频率和振幅有关, 也受到进给速度、刀具前倾角和侧倾角的影响。牛景露等^[65]开展了无旋转条件下的圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝材料试验研究, 使用回归分析法得到了切削力经验公式, 发现切削力与切削深度和振幅呈指数关系, 随切削深度增加而增大, 随振幅增加而减小。与之类似, 袁信满等^[66]基于响应曲面法建立了包括进给速度、切削深度和切削宽度的 Nomex 蜂窝材料圆片刀超声切削力预测模型, 结果显示切削力随进给速度、切削深度和切削宽度增加而增大, 其中切削宽度对切削力影响最显著, 进给速度次之, 切削深度对切削力影响最小。SUN 等^[67]通过有限元仿真与实验结合的方法分析了圆片刀超声切削铝蜂窝中刀具与蜂窝壁的微观作用机制, 发现刀具的上下冲击作用使材料交替沿着刀具上下表面发生塑性变形进而形成切屑和已加工表面, 并建立了刀具冲击作用下铝蜂窝壁塑性变形模型, 揭示了铝蜂窝在圆片刀超声切削过程中的材料去除机理。

综上所述, 现有的超声切削蜂窝材料切削力模型的研究如表 1 所示。已有模型均将蜂窝简化为实体工件, 在考虑刀具的断续切削作用、角度变化以及对材料冲击作用基础上建立的。由于未考虑蜂窝的材料属性与结构特性, 已有模型在准确预测瞬态切削力、建立切削力与蜂窝结构变形之间的映射关系方面存在不足。此外, 在刀具超声冲击作用的研究中, 应继续针对超声冲击作用促进材料去除的机理开展深入研究。

表 1 超声切削蜂窝材料切削力模型总结

文献编号	切削力模型	描述
[63]	$F_x = \begin{cases} \frac{A_x k_0}{\pi} \left[\sqrt{1 - \left(1 - \frac{h_0}{A_x}\right)^2} - \left(1 - \frac{h_0}{A_x}\right) \arccos\left(1 - \frac{h_0}{A_x}\right) + \frac{v_f \pi}{2A_x f} \right] & (A_x \leq h_0/2) \\ k_0 \left(h_0 - A_x + \frac{v_f}{2f} \right) & (A_x > h_0/2) \end{cases}$	直刃尖刀断续切削与连续切削状态下的进给方向平均切削力
[57]	$\bar{F} = \tau' \cdot v_c \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{a_p \sqrt{1 + \tan^2(\gamma/2) \sin^2 \theta}}{\cos \alpha} \cdot \frac{v_c}{2\pi A f \cos \theta + v_c}$	考虑材料剪切强度、刀具等效楔角和断续接触状态等因素的直刃尖刀平均切削力
[64]	$F'_s = \frac{1}{2} \tau \tan \frac{\gamma}{2} \sin \theta \cdot \frac{2a_p - h \sin \theta \cos \alpha}{\cos \alpha \sin(\theta - \delta/2)} \cdot L_D -$ $M \cdot \frac{2\pi/A \cos(2\pi f t_4) - 2\pi f A \cos(2\pi f t_2)}{t_2 + T - t_4} \cdot \tan \frac{\varphi}{2}$	基于动量定理的考虑剪切破裂分离抗力、刀具等效楔角和断续接触状态等因素的直刃尖刀平均切削力
[51]	$F_p = \frac{1}{2} [-4(\pi f)^2 M \cdot A \sin(2\pi f t)] \cos \theta \cot\left(\frac{1}{2} \varphi\right)$ $F_y = [-4(\pi f)^2 M \cdot A \sin(2\pi f t)] \cos \theta$	基于动量定理的考虑刀具对材料冲击作用和刀具等效楔角的直刃尖刀瞬时切削力
[53]	$F_p = F_f + \tau W \cdot \frac{2a_p - L_1 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\beta - \gamma) \cos \alpha} \cdot \frac{\cos(\theta_2/2)}{\cos(\theta_1/2)} \cdot \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right)$	考虑刀具等效楔角、刀具和工件等效接触面积、刀尖抗力和刀面分离抗力的直刃尖刀瞬时切削力
[65]	$F_y = 5.794 \times 10^{-8} a_p^{0.4813} A^{-2.0739}$ $F_c = 6.852 \times 10^{-4} a_p^{0.4734} A^{-1.1982}$	考虑切削深度和超声振幅的圆片刀切削力经验模型
[66]	$\begin{cases} F_x = 4.18 + 0.14a_p - 0.147a_c - 0.39v_f + 0.1a_c v_f + 0.013a_c^2 \\ F_y = -2.368 + 0.4a_p + 0.28a_c + 0.345v_f - 0.013a_p a_c - 0.043a_p v_f + 0.06a_c v_f \\ F_x = 0.63 - 0.056a_p + 0.0047a_c + 1.66v_f - 0.071a_p v_f + 0.014a_p^2 + 0.014a_c^2 \end{cases}$	考虑切削深度、切削宽度和进给速度交互影响的圆片刀切削力经验模型

1.3 超声切削蜂窝材料的有限元仿真分析

有限元仿真可以模拟蜂窝材料超声切削过程, 得到刀具与蜂窝工件之间的相互作用关系、切削区域的应力分布、蜂窝结构变形以及切削力和切削温度等, 有助于研究与理解切削过程中的蜂窝材料破坏方式、超声振动切削机理、超声切削参数对切削过程的影响规律等, 为切削机理研究提供支撑。蜂窝材料的有限元模型的建立是蜂窝材料超声切削有限元仿真的关键。目前针对蜂窝材料的有限元仿真研究绝大部分聚焦于蜂窝材料及其夹层结构的力学性能研究^[68-76]。由于蜂窝材料具有特殊的六边形孔格结构, 力学性能存在各向异性, 在有限元分析时常采用等效实体模型或实际几何模型进行建模, 如图 10 所示。

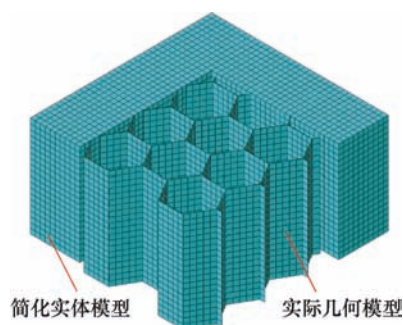


图 10 蜂窝等效实体和实际几何模型^[77]

在不考虑具体的蜂窝六边形孔格结构, 仅考虑蜂窝材料整体的各向异性力学特性时, 可以使用等效实体模型来代替复杂的蜂窝结构。等效实体模型建模简单, 计算速度较快, 通过直接定义实体的各向异性力学参数来模拟真实蜂窝结构的整体各向异性, 多用于蜂窝夹层结构弯折、压缩、抗冲击性能的研究^[78-81]。实际几何模型依据真实的蜂窝材料结构而建立, 利用蜂窝六边形几何结构来实现整体的各向异性。这种建模方法与实际情况相符, 多用于蜂窝结构力学性能、蜂窝结构拉伸压缩变形等方面的研究^[69, 82-87]。根据模型的材料属性和几何结构, 实际几何模型又可以划分为四种类型, 如图 11 所示。第一种为单层各向同性模型, 适用于铝蜂窝以及简化的 Nomex 蜂窝力学性能研究^[73, 88-91]。第二种为单层各向异性模型, 不考虑材料的组成, 仅考虑材料的各向异性, 计算结果比各向同性模型更准确, 可用于 Nomex 材料及蜂窝的仿真研究^[74]。第三种为多层各向异性模型, 同时考虑材料的各向异性和树脂层、芳纶纸以及胶层的多层结构, 这种模型更加符合 Nomex 蜂窝材料的实际结构, 可用于考虑树脂分层、脱胶等方面的仿真研究^[68]。最后一种模型为考虑

Nomex 蜂窝材料角点处树脂堆积的多层各向异性材料, 用于考虑树脂堆积对蜂窝结构力学性能影响的仿真研究, 适用于高密度 Nomex 蜂窝材料^[69]。

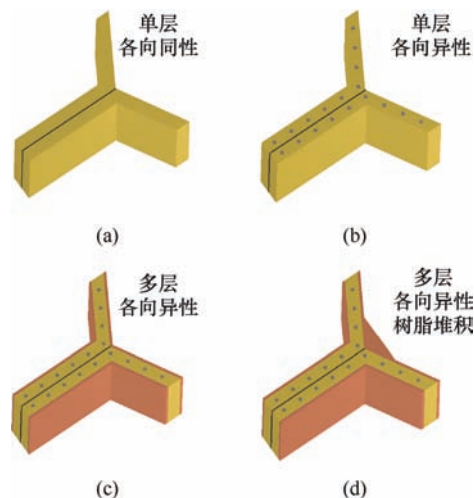


图 11 四种蜂窝结构模型

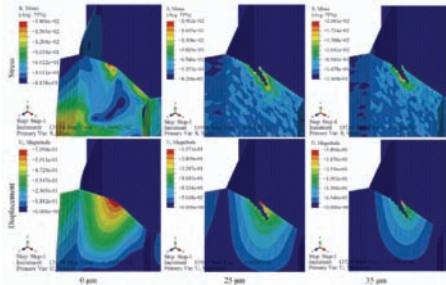
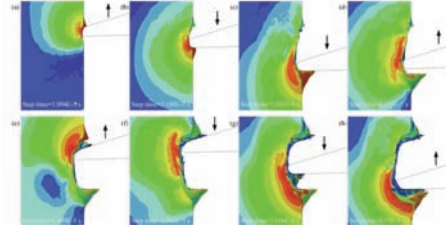
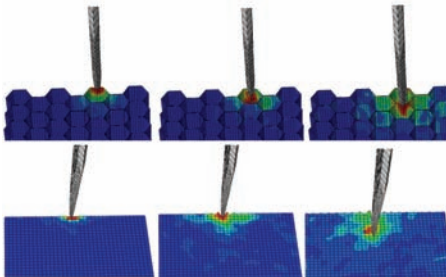
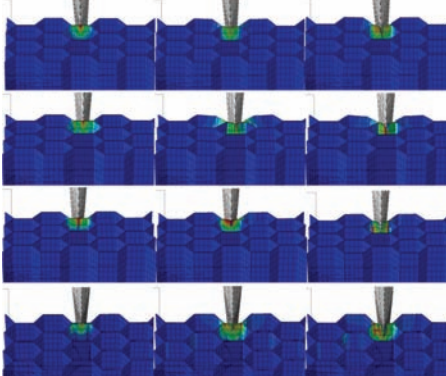
在蜂窝材料超声切削方面, SUN 等^[44]开展了圆片刀超声切削铝蜂窝有限元仿真研究, 发现在刀具的超声振动作用下, 切削区域材料的应力会在更短的时间内达到破坏极限, 从而在未发生较大变形时实现材料去除。SUN 等^[67]还建立了圆片刀超声切削铝蜂窝壁的微观有限元模型, 提出了在刀具的超声振动过程中材料沿刀具上下表面发生塑性变形进而形成已加工表面的切削机理。黄萌^[92]分别使用 Nomex 蜂窝材料等效实体模型和单层各向同性实际几何模型建立了直刃尖刀超声切削有限元模型, 研究发现最大塑性应变出现在刀具与材料接触界面处, 应力及切削变形主要集中在刀刃附近; 等效实体模型的计算时间仅为实际几何模型的约七分之一, 提高了分析效率, 但切削力计算精度较低, 无法模拟切削过程中蜂窝孔格变形、回弹等关键过程, 应用范围具有较大的局限。李秀渊^[93]使用各向同性材料参数和剪切断裂失效准则, 分别建立了单层实体单元模型、单层壳单元模型、考虑双层芳纶纸粘接的双层几何模型和考虑树脂层的多层几何模型, 分析了切削区域材料的位移量和切削力, 并分别与理论公式和试验结果进行了对比, 研究结果表明, 多层几何模型计算结果精度最高, 但耗时较长, 单层壳单元几何模型精度最差, 双层几何模型综合性能最佳。此外, 王际帆^[94]使用各向同性的理想线弹性模型和剪切失效准则建立了直刃尖刀和圆片刀超声切削有限元模型, 研究了圆片刀的前角、后角、直径和直刃尖刀的长度、厚度、刃角对 Nomex 蜂窝材料超声切削过程中切削力、切削温度的影响规律,

提出了较优的刀具设计参数。CAO 等^[95]同样使用各向同性的理想线弹性模型和剪切断裂失效准则建立了圆片刀超声切削蜂窝材料的有限元模型，研究了不同切削深度和切削宽度下的切削力，并与试验结果进行了对比，试验结果与有限元分析吻合较好。

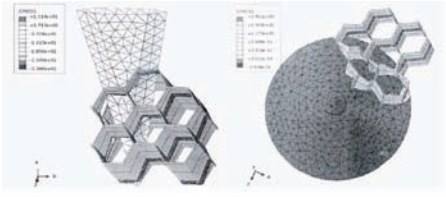
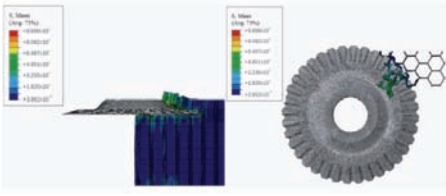
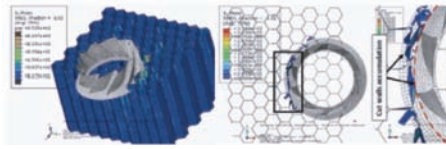
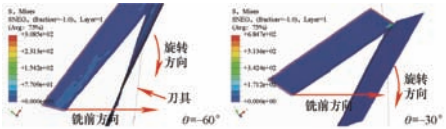
现有的 Nomex 蜂窝材料超声切削仿真研究均采用各向同性的材料属性和剪切失效准则，忽略了芳纶纸复合材料的各向异性和非均质等特点。JAAFAR 等^[96-97]在 Nomex 蜂窝材料高速铣削仿真研究中使用了各向异性的材料属性，并将经典的复合

材料 Hashin 失效准则和 Tsai-Wu 失效准则应用于 Nomex 材料，研究了不同切削参数下的切削力和切削质量，证实了复合材料经典失效准则应用于 Nomex 材料的可行性。JIANG 等^[22]也使用 Hashin 失效准则建立了 Nomex 蜂窝材料高速铣削仿真模型，分析了刀具切入角对蜂窝壁撕裂损伤的影响规律。因此，应用各向异性材料属性和复合材料损伤准则的有限元模型将是 Nomex 蜂窝材料超声切削仿真研究的发展方向。蜂窝材料切削仿真研究总结如表 2 所示。

表 2 蜂窝材料切削仿真研究总结

文献	蜂窝材料	单元类型	材料本构模型	材料失效模型	仿真结果
SUN 等 ^[44]	铝	实体	各向同性 Johnson-Cook 本构方程	Johnson-Cook 损伤准则	
SUN 等 ^[67]	铝	实体	各向同性 Johnson-Cook 本构方程	Johnson-Cook 损伤准则	
黄萌 ^[92]	Nomex	蜂窝结构实体 等效实体	各向同性弹塑性应力应变曲线	剪切失效准则	
李秀渊 ^[93]	Nomex	单层实体 双层实体 单层壳 多层实体	各向同性弹塑性应力应变曲线	剪切失效准则	

(续)

文献	蜂窝材料	单元类型	材料本构模型	材料失效模型	仿真结果
王际帆 ^[94]	Nomex	实体	各向同性线弹性模型	剪切失效准则	
CAO 等 ^[95]	Nomex	壳	各向同性线弹性模型	剪切失效准则	
JAAFAR ^[96]	Nomex	壳	各向异性线弹性模型	Hashin 失效准则	
JAAFAR ^[97]	Nomex	壳	各向异性线弹性模型	Tsai-Wu 失效准则	—
JIANG ^[22]	Nomex	壳	各向异性线弹性模型	Hashin 失效准则	

2 蜂窝材料超声切削加工工艺研究

形成蜂窝材料的高质高效加工工艺是超声切削技术实现大规模工业化应用的前提。国内外学者以提高加工质量和加工精度、降低切削力和加工损伤为目标,针对蜂窝材料加工形貌、加工方法和加工参数选择、加工轨迹规划等问题开展了研究。

2.1 加工表面形貌研究

在 Nomex 蜂窝材料超声切削形貌研究方面,张迅等^[98]将超声切削 Nomex 蜂窝材料形成的典型形貌归纳为树脂层形貌特征、芳纶纸层形貌特征和蜂窝壁整体形貌特征,主要包括树脂脱落、树脂裂纹、纤维拔出和蜂窝壁压溃等,如图 12 所示,并提出了通过树脂剥落面积评价蜂窝材料加工质量的方法。研究发现,在刀具切入和切出部位树脂的剥落比较严重,在 10 μm 到 30 μm 范围内提高超声刀具振幅,在 500 mm/min 到 3 500 mm/min 范围内降低进给速度,会降低树脂剥落面积。孟倩^[50]发现 Nomex 蜂窝材料在圆片刀加工后的主要缺陷为孔壁撕裂和未切断纤维,并选取了孔壁撕裂数量和平均撕裂长度对蜂窝材料的表面质量进行表征;结果表明,超声振动的引入能够改善表面质量,超声振幅在 25 μm 到 35 μm 范围内能够获得较好的表面质量,增大刀具

转速或降低进给速度能够减少孔壁撕裂;此外,文献作者还研究了刀具前倾角对表面质量的影响规律,发现减小倾角可改善孔壁撕裂。

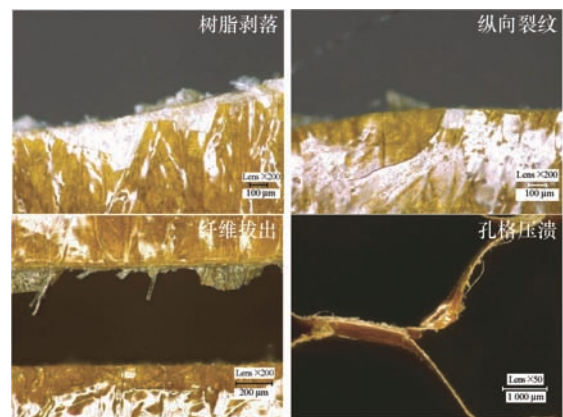


图 12 Nomex 蜂窝材料形貌特征^[98]

此外,学者们也针对 Nomex 蜂窝材料超声切削参数对加工质量和切削力的影响规律开展了研究。结果表明在圆片刀超声切削中,提高超声振幅和主轴转速、降低进给速度和切削宽度可以降低切削力,减少毛刺、撕裂等加工损伤^[45-65]。使用纵扭复合振动也能提高表面加工质量^[52]。在直刃尖刀超声切削中,增大超声振幅和刀具前倾角、降低进给速度可以降低切削力,减少压溃、撕裂等加工损伤^[51, 53, 58, 99]。超声插切蜂窝时,提高超声振幅、降低进给速度能

够降低切削力, 减少加工损伤^[100-101]。WANG 等^[49]发现, 直刃尖刀直接切入材料时, 刀面的负后角切削会挤压加工表面, 造成切缝两侧材料出现压溃, 影响加工质量。据此, 文献作者提出了如图 13 所示新的偏角超声切削方法, 即将刀具绕轴线旋转角度 φ 。虽然偏角 φ 的增大会引起进给方向切削力和蜂窝对刀具总挤压力的增大, 但力的增幅有限。与此同时, 刀具前角变小、后角增大, 减轻了后刀面对已加工表面的挤压, 进而改善了蜂窝材料的加工质量; 如图 14 所示的加工表面观测结果表明, 当刀具后角为 0° 时, 已加工表面不再出现压溃现象, 加工质量得到了明显的改善。

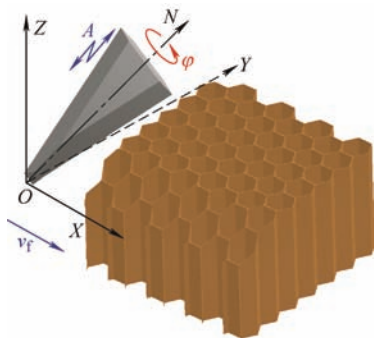


图 13 直刃尖刀偏角切削示意图^[49]

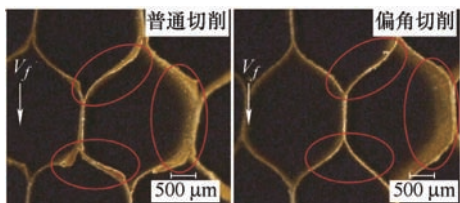


图 14 直刃尖刀超声切削与偏角超声切削加工表面^[49]

孙健淞等^[44, 102]研究了圆片刀超声切削铝蜂窝中加工参数对加工质量和切削力的影响, 发现超声振动能够显著降低切削力和提高加工质量。随着超声振幅提高至 $35\ \mu\text{m}$, 切削力逐渐降低, 蜂窝表面形貌得到改善, 进给速度从 $600\ \text{mm/min}$ 提高至 $6\ 000\ \text{mm/min}$ 时会带来切削力的小幅上升, 但蜂窝表面形貌无明显变化, 进而证明了在较高的振幅条件下能够实现铝蜂窝材料的高质高效加工。该研究同时指出, 当圆片刀与蜂窝壁处于相切的位置关系时, 切削力会突然变大, 进而造成蜂窝壁产生较大的变形。因此在切削中应通过控制切削宽度来尽量避免出现刀刃与蜂窝壁相切的情况出现。冯柏仁^[46]在圆片刀超声切削铝蜂窝试验研究中发现蜂窝壁存在压溃、撕裂、扭曲以及等距毛刺四种特征, 其中压溃和撕裂受进给速度影响较大, 且多发生于单层蜂窝壁, 而扭曲和等距毛刺主要出现在双层蜂窝壁

上, 严重程度随刀具转速提高而降低。

通过上述分析可见, 已有关于蜂窝芯加工表面形貌的研究集中于超声切削形貌特征的评价方法研究、切削参数选择以及新工艺研究等, 通过工艺试验分析了加工质量的影响因素和变化规律, 提出了能够得到较好加工质量的加工参数选择方法。目前对于加工中出现的各种加工损伤和加工缺陷的产生机理研究不够深入, 尚无法为加工损伤和加工缺陷的抑制提供理论依据。

2.2 加工表面形状精度分析

在加工表面形状精度分析方面, SUN 等^[100]计算了插切刀切削内外圆角以及平面时的理论残余高度, 分析了待加工圆角半径、刀具半径和相邻两次插切步长对形状精度的影响。HU 等^[103]结合圆片刀尺寸结构特点, 建立了曲面加工过程中圆片刀几何尺寸和加工表面误差之间的关系。李裕等^[104]分析了直刃尖刀切削中的刀具等效半径误差、轴向过切误差和圆弧逼近误差, 建立了包括刀具几何参数和切削参数在内的误差解析式。孟倩^[50]分析了圆片刀存在前倾角时所形成加工表面的理论残余高度, 发现其与圆片刀半径、走刀步距和前倾角存在联系, 增大刀具半径、减小刀具前倾角和步距可以减小残余高度。俞浩峰^[105]对直刃尖刀粗加工大量去除材料时的 V 字形去除方法和矩形去除方法产生的残余高度进行了计算, 通过对直刃尖刀和圆片刀切削方式的分析, 得到了直刃尖刀与圆片刀加工干涉判断模型和干涉避免方法, 并采用 CAM 软件开发了直刃尖刀加工后处理器。法国学者 VAKILINEJAD 等^[106]研究了基于工业机器人的蜂窝材料直刃尖刀倒角加工几何误差, 发现当切削高密度凯夫拉蜂窝时, 由于切削力较大, 倒角的中间稳定段相比入口侧和出口侧存在较大的几何误差; 在此基础上分析了切削力作用下刀具和工业机器人的退让性位移行为, 提出了倒角几何误差补偿方法, 提高了高密度凯夫拉蜂窝材料的直刃尖刀倒角加工精度。

现有的研究分析了不同刀具轨迹下的加工几何误差, 提出了理论残余高度的控制方法, 提升了刀具蜂窝材料的加工精度与加工效率。在未来的研究中, 需要考虑由于蜂窝材料的弱刚性特性带来的材料受力变形与回弹等问题, 揭示加工参数、刀具轨迹等对加工误差的影响规律, 形成加工误差控制理论体系。

2.3 刀具位姿控制与轨迹规划

在刀具位姿控制与轨迹规划方面, LIU 等^[107]针对具有特殊形状的超声切削刀具无法采用传统编

程软件直接生成加工轨迹的问题,对刀具姿态控制策略开展了研究,提出了生成刀具位置数据的计算方法,并基于商用软件开发了蜂窝材料超声切削路径自动生成系统。韩坤^[108]对圆弧插切加工中刀具加工路径规划开展了研究,提出了基于蚁群算法的轨迹优化方法,可以有效降低刀具快速移动距离,提高插切加工效率。CUI 等^[109]提出了一种直刃尖刀 V 字形切削的刀具轨迹规划方法,并以最高加工效率为目标对轨迹参数进行了优化;提出了适用于六自由度工业机器人的加工程序后处理方法,并在 Nomex 蜂窝材料上进行了试验验证,加工后蜂窝材料的实际轮廓与理论轮廓吻合较好。张永岩^[110]和邱宇^[47]等也对超声切削中的刀具位姿控制、加工轨迹规划和编程以及后处理算法进行了研究,为蜂窝材料超声切削的应用提供了参考。

总的来说,目前在蜂窝芯超声切削刀具位姿控制、轨迹规划方面的工作主要以实现特殊形状特征的加工或提升加工效率为目标,尚未形成用于蜂窝构件超声切削的自动工艺编程方法。兼顾加工质量、加工精度和加工效率的刀具位姿控制方法、切削轨迹规划方法和后处理算法等将是未来的重点研究方向。

3 蜂窝材料超声切削关键单元与装备

研制满足蜂窝材料加工需求的超声切削装备是实现蜂窝材料超声切削工业化应用的基础。蜂窝材料超声切削装备的组成如图 15 所示,主要包括超声切削系统和机床或工业机器人主体两部分。蜂窝材料超声切削机理与加工工艺的研究结果表明,为了保证蜂窝材料的加工质量和效率,切削刀具的振幅需要稳定达到 20 μm 以上。因此,大振幅输出超声变幅杆和高性能刀具、智能化超声电源是蜂窝材料超声切削技术的关键。

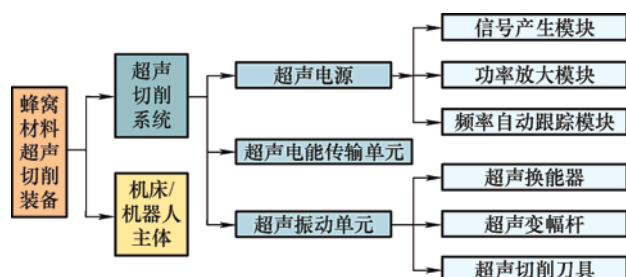


图 15 超声切削装备组成

3.1 蜂窝材料超声切削变幅杆

超声变幅杆是超声切削系统中的关键部件,用于放大换能器产生的微小机械振动并传递至切削刀

具,同时具有机械阻抗转换、换能器与声负载阻抗匹配的功能。解析法和有限元法是超声变幅杆设计的主要方法,稳定的振幅输出和较小的内应力是超声变幅杆设计的关键。另外,由于刀具负载会影响变幅杆声学系统的阻抗特性^[111],变幅杆-刀具一体化设计是保证系统输出稳定可控的重要方法。针对蜂窝材料对大振幅超声变幅杆的需求,牛景露^[112]以频率和振幅放大倍数为主要目标,采用有限元法和遗传算法对变幅杆外形进行了优化设计,研制了一种贝塞尔曲线复合变幅杆,实现圆片刀底部边缘 40 μm 以上的大振幅输出。张云电等^[113]采用四端网格法设计了变幅杆,用有限元法对变幅杆进行了分析,对法兰位置进行了修正,优化后的变幅杆可以实现圆片刀振幅 20 μm 以上。吴欣等^[114]采用变幅杆与刀具耦合设计方法和有限元分析方法,设计了具有大变幅能力的阶梯悬链型复合变幅杆,并通过直刃尖刀超声切削蜂窝材料进行了试验验证。MA 等^[115]为了设计用于直刃尖刀切削的小型超声变幅杆,利用理论计算得到了关键设计参数,通过仿真分析与试验验证了变幅杆的谐振频率、放大倍数和振幅,并进行了切削试验。

3.2 蜂窝材料超声切削刀具

设计制造满足超声振动系统声学特性的超声切削刀具是实现蜂窝材料超声切削的关键,目前主要基于共振原理通过理论计算与有限元仿真的方法对刀具进行设计。超声切削刀具在具有锋利刀刃的同时,还要有良好的振动性能、抗疲劳和耐磨损性能,目前多采用高速钢或硬质合金作为制造材料^[116-117]。常用的超声切削刀具主要有直刃尖刀和圆片刀两大类,学者们围绕不同类型刀具的振动模态分析、结构尺寸设计、振动与切削性能分析以及刀具参数对切削过程的影响等开展了诸多研究^[116, 118-127]。俄罗斯学者 VJUGINOVA 等^[128]以固定的超声频率为约束条件,以刀具振动波长为优化目标,以刀刃长度与刀具总长之比为变量,对一种刀片与圆柱刀座一体制造的直刃尖刀单体进行了理论设计,发现刀刃长度为刀具总长的 40% 时刀具振动性能较好。现有的诸多研究表明,超声切削刀具的结构尺寸等对振动系统的模态、振动性能和加工效果均具有显著的影响,变幅杆-刀具一体化耦合分析是设计超声切削刀具的关键方法。

在新型切削刀具设计方面,针对蜂窝材料圆弧转角特征加工困难的问题,孙丁—^[129]通过细长杆纵振理论分析和有限元仿真,设计出了满足超声振动

声学特性的插切刀，如图 16 所示；韩坤^[108]和刘超亮等^[117]分别设计了圆弧插切刀，如图 17 所示，其中韩坤设计研制的圆弧插切刀还具有纵横复合振动特性。

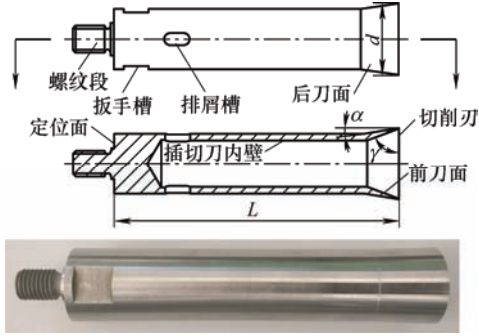


图 16 插切刀示意图^[129]

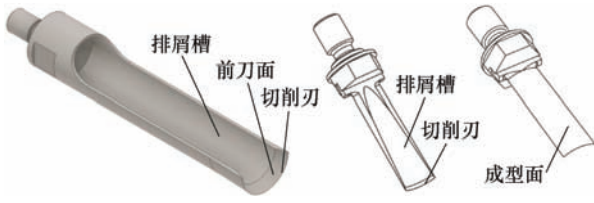


图 17 圆弧插切刀示意图^[108, 117]

插切刀和圆弧插切刀切削蜂窝材料时，刀具轴线始终保持竖直，刀具竖直向下切削，通过循环往复插切运动实现圆弧转角特征的精确切削。插切刀在沿轴向进行超声振动时还存在绕轴线的旋转运动，圆弧插切刀无旋转运动，但存在沿轴向与径向的复合超声振动，如图 18 所示。

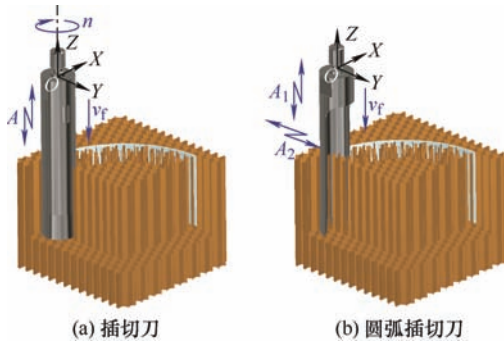


图 18 插切刀加工示意图^[108, 129]

插切刀刀刃上一点的位移曲线表达式^[129]为

$$\begin{cases} S_x = R_l \sin(2\pi n t) \\ S_y = R_l \cos(2\pi n t) \\ S_z = A \sin(2\pi f t) - v_f t \end{cases} \quad (14)$$

其中， R_l 为插切刀半径。插切刀刀刃上一点的运动轨迹如图 19a 所示。其速度方程为

$$\begin{cases} v_x = 2\pi n R_l \cos(2\pi n t) \\ v_y = -2\pi n R_l \sin(2\pi n t) \\ v_z = 2\pi f A \cos(2\pi f t) - v_f \end{cases} \quad (15)$$

圆弧插切刀刀刃上一点的位移曲线表达式^[101]为

$$\begin{cases} S_x = 0 \\ S_y = A'_2 \sin(2\pi f t + \varphi) \\ S_z = A'_1 \sin(2\pi f t) - v_f t \end{cases} \quad (16)$$

其中， A'_1 为轴向超声振幅， A'_2 为径向超声振幅， φ 为超声振动的相位差。圆弧插切刀刀刃上一点的运动轨迹如图 19b 所示。其速度方程为

$$\begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = 2\pi f A'_2 \cos(2\pi f t + \varphi) \\ v_z = 2\pi f A'_1 \cos(2\pi f t) - v_f \end{cases} \quad (17)$$

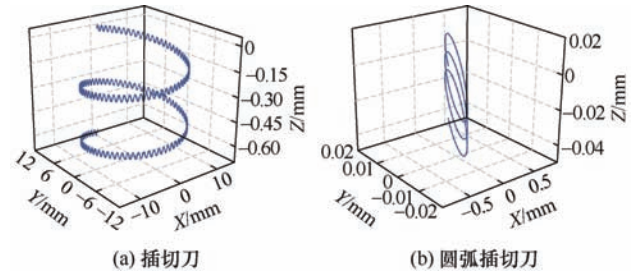


图 19 插切刀运动轨迹曲线

此外，带齿圆片刀是目前受到较多关注的新型刀具，AHMAD^[130]和何畏^[131]分别设计了带有锯齿的圆片刀，意在获得更好的断续切削效果，并增强刀刃对材料的冲击作用，但同时也提高了刀具的制造难度，如图 20 所示。邱宇等^[132]建立了带齿圆片刀超声振动切削动力学模型，推导了圆片刀超声加工系统临界稳定成立的条件，并在理论分析基础上，结合仿真实验，分析了刀具切削齿数对系统稳定性的影响规律，提出了“高转速大齿数，低转速小齿数”的刀具设计原则，并通过切削试验提出在高转速、大切深、大进给加工条件下刀具齿数为 36 时，系统更稳定、加工质量更好。

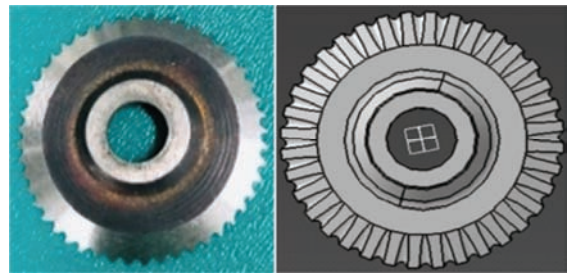


图 20 带齿圆片刀

另外,在刀具磨损研究方面,陈建桥^[133]发现其所用的圆片刀主要存在“刀刃破损”、“刀刃磨损”以及“后刀面磨损”三种形式,采用计算机图像处理的方法,对圆片刀磨损特征进行观测,为刀具的在线检测提供了新思路。王志兵^[134]提出了通过检测加工中的声信号来判断刀具磨损程度的思路。

虽然学者们根据实际加工需求设计出了多种形式的刀具,但适用于更多蜂窝材料构件复杂结构特征加工的新型刀具及其制造方法仍有待进一步研究。此外,在蜂窝材料超声切削中往往存在刀具磨损破损等情况,目前缺乏刀具磨损评价标准,影响了蜂窝材料的加工质量及成品率。因此,超声切削刀具的磨损形成机理、磨损演化规律及刀具质量评价标准也将是今后研究重点。

3.3 蜂窝材料超声切削装备

国外在蜂窝材料超声切削装备方面的发展和应用较早,CRENO^[135]、GFM^[136]、GEISS^[137]、DUKANE^[138]等公司生产的超声切削装备已应用于波音等国外的主要飞机制造企业对铝蜂窝与Nomex蜂窝等材料的加工^[38, 136-137]。

国内的蜂窝材料超声切削装备研究起步较晚。公开文献资料显示,大连理工大学以STM32单片机作为主控芯片研制了面向蜂窝材料超声切削的超声电源,提出一种BP神经网络结合PID调节的频率跟踪算法,实现对超声振动系统谐振频率的快速响应^[108],研制了具有标准刀柄接口的超声切削刀柄^[129],并与秦川机床工具集团股份有限公司合作开发了蜂窝材料超声切削机床^[139],如图21所示。杭州电子科技大学以AT89S52单片机作为主控芯片研制了超声电源,提出一种变步长复合频率跟踪方法,提高了跟踪速度和跟踪精度^[140],研制了具有非标接口的超声切削刀柄、主轴,如图22所示,并联合成飞等单位,将现有高

速数控机床改进成了超声切削机床^[141]。清华大学研制了具有标准刀柄接口的超声切削刀柄^[142],并开发了基于工业机器人的蜂窝材料超声切削装备^[142],如图23所示。

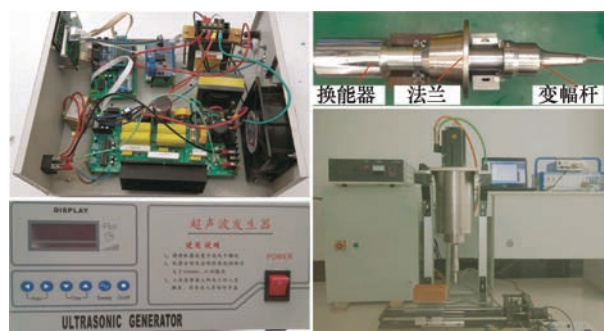


图22 杭州电子科技大学研制的超声切削电源、刀柄与主轴



图23 清华大学开发的蜂窝材料超声切削刀柄与装备



图21 大连理工大学研制的超声切削电源、刀柄与机床

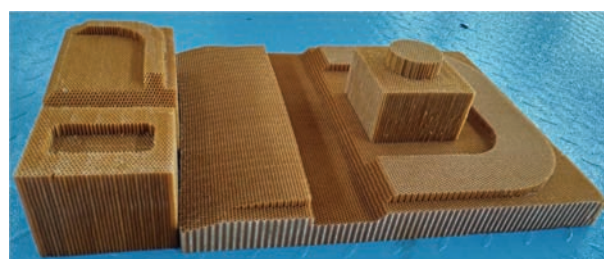


图24 超声切削蜂窝材料典型特征

目前,国内的超声切削机床在不同密度的Nomex蜂窝和铝蜂窝等材料的加工中已获得了较好的效果^[45-46, 50, 99],可以实现具有如图24所示典型特征的蜂窝芯构件的加工。公开资料显示,超声切削机床在成飞、昌飞、西飞、哈飞等国内航空主机厂均有应用,研究人员基于蜂窝材料超声切削的工艺特点,在刀具切削轨迹规划、加工程序编程方法、工件固持方法、

加工误差分析、零件加工质量和加工效率等方面开展了应用研究^[37, 47-48, 104, 110, 139, 143-144]。成飞的现场加工数据显示, 相比普通数控机床, 超声切削机床加工产品的合格率提升了 12%、加工效率提升了 32%, 粉尘污染程度得到了明显的改善^[37, 47]。

4 问题与展望

超声切削技术加工 Nomex 蜂窝、铝蜂窝等弱刚度蜂窝材料时, 可有效控制蜂窝孔壁变形、压溃、撕裂等损伤, 保证加工精度。国内外学者在研究蜂窝材料超声切削的加工机理和加工工艺的基础上, 开发了超声切削专用刀具及装备, 推动了蜂窝芯超声切削技术进步。

为了实现蜂窝材料超声切削技术的大范围工业应用, 在以下方面还需开展深入研究:

(1) 蜂窝材料超声切削机理。蜂窝材料超声切削是采用专用刀具在高频振动切削作用下实现蜂窝材料切削的复杂过程。现有研究在简化超声切削刀具结构、蜂窝材料孔格结构和蜂窝材料属性的基础上, 分别围绕超声切削刀具的运动学分析、超声切削过程的切削力建模和超声切削过程的有限元分析等方面开展研究工作。为深入揭示超声切削机理, 需要建立考虑蜂窝材料特性和蜂窝孔格结构特点的切削力模型, 建立能够准确描述 Nomex 材料力学特性的本构模型和失效准则, 并针对不同种类超声切削刀具研究了蜂窝材料在刀具超声振动作用下的失效和破坏行为。

(2) 蜂窝材料超声切削表面质量控制和面向构件典型特征的加工轨迹规划方法。蜂窝材料因其薄壁弱刚度等特性、在超声切削加工中仍存在结构变形以及毛刺、撕裂等加工损伤, 如何保证超声切削后的蜂窝材料加工质量和加工面形精度是实现蜂窝材料高质量加工的关键。现有研究采用光学显微镜的方法对加工损伤进行了初步的定性观测, 但缺少对于蜂窝材料加工质量和加工精度的定量观测和分析方法, 对加工质量的影响规律研究不够深入。后续需要建立蜂窝材料加工表面质量的观测和评价体系, 研究超声切削参数对加工缺陷的影响规律, 系统开展超声切削参数和加工轨迹等对加工变形和面型精度等影响规律研究; 此外, 为实现蜂窝材料构件的高效加工, 还需根据不同类型的蜂窝材料构件典型特征, 在加工轨迹规划、刀具位姿控制、加工程序编制以及面向机床的加工程序后处理等方面开展深入研究。

(3) 系列化蜂窝超声切削专用刀具。现有超声切削刀具无法满足包括大曲率凹曲面以及深沟槽特征在内的多样化蜂窝材料结构特征的加工需求, 因此需要结合结构特征加工需求和超声振动性能要求, 研制新型超声切削刀具。此外, 超声切削刀具在高频振动状态下长期工作, 还会发生刀具磨破损甚至断裂的情况, 将直接影响工件的加工质量, 降低工件的成品率。因此, 建立超声切削刀具的磨钝判断标准, 揭示超声切削作用下的刀具磨损和破损机理, 研究超声振动作用下的刀具失效规律, 并在此基础上研制新型超声切削刀具是今后研究工作的重点之一。

参 考 文 献

- [1] BITZER T N. Honeycomb technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing[M]. London: Springer Science & Business Media, 1997.
- [2] 张建明, 党晓娟. 芳纶纸蜂窝芯材的制备技术及其应用研究进展[J]. 新材料产业. 2019(12): 52-56.
ZHANG Jianming, DANG Xiaojuan. Research progress on the preparation technology of aramid paper honeycomb core material and its application[J]. New Material Industry. 2019(12): 52-56.
- [3] RION J, LETERRIER Y, MANSON J E. Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra-light sandwich structures[J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing. 2008, 39(9): 1547-1555.
- [4] QIN Y, KANG R, DONG Z, et al. Burr removal from measurement data of honeycomb core surface based on dimensionality reduction and regression analysis[J]. Measurement Science & Technology. 2018, 29(11): 115010.
- [5] QIU K, MING W, SHEN L, et al. Study on the cutting force in machining of aluminum honeycomb core material[J]. Composite Structures. 2017, 164: 58-67.
- [6] CHINA D. DuPont™ Nomex® honeycomb materials manual.2012[2021-3-24]. www.nomex.com.cn.
- [7] PLASCORE I. PN2 aerospace grade aramid fiber honeycomb.2014[2021-3-24]. www.plascore.com.
- [8] HEXWEB. HexWeb™ honeycomb attributes and properties.1999[2021-3-24]. www.hexcel.com.
- [9] 梅明. 高强度蜂窝半格结构件滚压成形技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

- MEI Ming. Research on Roll Forming Technology for High Strength Honeycomb Semi-grid Structural Parts[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [10] AN Q, DANG J, MING W, et al. Experimental and numerical studies on defect characteristics during milling of aluminum honeycomb core[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019, 141(3).
- [11] 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(3): 48-54.
- MA Cheng, LIU Fangjun. Research progress of honeycomb material processing process[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2016(3): 48-54.
- [12] 王毅丹, 康仁科, 白杜娟, 等. 高密度芳纶纸蜂窝的磨削试验[J]. *金刚石与磨料磨具工程*. 2018, 38(6): 48-53.
- WANG Yidan, KANG Renke, BAI Dujian, et al. Experiment on grinding performance of high-density aramid honeycombs[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*. 2018, 38(6): 48-53.
- [13] 马义新. 高密度芳纶纸蜂窝磨削加工试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- MA Yixin. Experimental study on grinding performance of high-density Nomex honeycomb[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [14] MA Y, DONG Z, WANG Y. Experimental study on grinding performance of high-density Nomex honeycomb core[C]// Toronto: The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology. 2018
- [15] INC. H P. Process for machining expanded honeycomb[P]. US3413708A. [1968.12.3].
- [16] HIRAYAMA A, SAITNMA-KEN. Method for cutting honeycomb core: US6740268B2[P]. [20040525].
- [17] WANG Y, GAN Y, LIU H, et al. Surface quality improvement in machining an aluminum honeycomb by ice fixation[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2020, 33(1).
- [18] WANG F, WANG Y. Investigate on milling force of cryogenic cooling processing aluminum honeycomb treated by ice fixation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, 98(5-8): 1253-1265.
- [19] WANG F, WANG Y. Optimization of cryogenic milling parameters for aluminum honeycomb treated by ice fixation method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, 99(9-12): 2271-2281.
- [20] QIU K, MING W, SHEN L, et al. Study on the cutting force in machining of aluminum honeycomb core material[J]. *Composite Structures*. 2017, 164: 58-67.
- [21] 许启灏. Nomex 蜂窝材料切边加工损伤抑制试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- XU Qihao. Experimental study on damage suppression of cutting edge processing of Nomex honeycomb materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [22] JIANG J, LIU Z. Formation mechanism of tearing defects in machining Nomex honeycomb core[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, 112(11-12): 3167-3176.
- [23] GILL D, YIP-HOI D, MEAKER M, et al. Studying the mechanisms of high rates of tool wear in the machining of aramid honeycomb composites[C]. *Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing*. Los Angeles, California, USA.: ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing. 2017
- [24] 李杰. Nomex 纸基蜂窝材料的组合铣刀高速铣削研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- LI Jie. High-speed milling of Nomex paper-based honeycomb materials with combined milling tools[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [25] 唐臣升. 高效纸蜂窝复合材料专用刀具及其加工方法的研究[C]// 第 17 届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 第 17 届全国复合材料学术会议. 2012, 5.
- TANG Chensheng. Research on high efficiency paper honeycomb composite material special tool and its processing method[C]// *Proceeding of the 17th National Conference on Composite Materials*. Beijing: The 17th National Conference on Composite Materials. 2012, 5.
- [26] 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, 30(11): 1811-1815.
- XIE Kun, DONG Huiyue, XUE Hui, et al. Study on new machining process of Nomex paper-based honeycomb parts[J]. *Mechanical Science and Technology*. 2011, 30(11): 1811-1815.
- [27] 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.
- JIN Chengzhu. High-speed machining process and reliability of Nomex honeycomb material[D]. Hangzhou:

- Zhejiang University, 2006.
- [28] JIN C Z. Study on reliability of new fixture method for nomex honeycomb[J]. *Advanced Materials Research*. 2011, 415-417: 3-13.
- [29] 刘元吉, 刘适, 姜振喜. 基于 TRIZ 理论的飞机蜂窝芯零件数控加工固持方法研究[J]. *工具技术*. 2018, 52(12): 93-97.
- LIU Yuanji, LIU Shi, JIANG Zhenxi. Research of aircraft honeycomb core component clamping method for NC machining based on TRIZ theory[J]. *Tool Engineering*. 2018, 52(12): 93-97.
- [30] 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(12): 1299-1302.
- KE Yinglin, JIN Chengzhu, LIU Gang. Optimization of high-speed milling process for Nomex honeycomb cores[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006(12): 1299-1302.
- [31] YIP-HOI D, GILL D, GAHAN J, et al. Material stiffness and cutting parameters for honeycomb aluminum sandwich panel: A comparison with bulk material[J]. *Procedia Manufacturing*. 2019, 34: 385-392.
- [32] 徐龙, 梅颖, 刘元, 等. Nomex 薄壁蜂窝芯型面加工技术[J]. *工具技术*, 2018, 52(12): 116-119.
- XU Long, MEI Ying, LIU Yuan, et al. Nomex thin-walled honeycomb core profile processing technology[J]. *Tool Engineering*, 2018, 52(12): 116-119.
- [33] HAN S, KIM H. Experimental study on shape machining characteristics of composite honeycomb core[J]. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 2014, 13(4).
- [34] 侯小林, 祝益军. 蜂窝结构件的数控加工[J]. *航空制造技术*, 2009(S1): 60-63.
- HOU Xiaolin, ZHU Yijun. CNC machining of honeycomb structural parts[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2009(S1): 60-63.
- [35] XIANG C, YUJIE W, CHAO S, et al. Research on high efficiency and low destructive manufacture process of complex structure honeycomb core[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 538(1): 12017.
- [36] 王鹏程, 高涛, 曹翔. 基于凸台搭接的蜂窝芯零件数控加工工艺技术研究[J]. *制造技术与机床*, 2021(4): 74-78.
- WANG Pengcheng, GAO Tao, CAO Xiang. Research on NC machining process technology of honeycomb core parts based on false boss connection[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2021(4): 74-78.
- [37] 高涛, 骆金威, 林勇, 等. 基于超声波机床的蜂窝芯数控加工技术研究[J]. *机械制造*, 2013, 51(1): 41-43.
- GAO Tao, LUO Jinwei, LIN Yong, et al. Research on CNC machining technology of honeycomb cores based on ultrasonic machine tools[J]. *Machinery*, 2013, 51(1): 41-43.
- [38] 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. Application of ultrasonic cutting technology in the field of composite materials processing[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2008(4): 50-52.
- [39] 康凯. 碳纤维复合材料超声波切割装置设计及系统研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- KANG Kai. Design and System Research of Ultrasonic Cutting Device for Carbon Fiber Composites[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2019.
- [40] 赵波. 超声加工技术的研究现状和发展方向简介[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2020, 40(1): 1-4.
- ZHAO Bo. Research status and development direction of ultrasonic machining technology[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2020, 40(1): 1-4.
- [41] 马付建. 超声辅助加工系统研发及其在复合材料加工中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- MA Fujian. Development of ultrasonic-assisted machining system and its application in composite materials processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [42] 康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. *航空制造技术*, 2012(16): 44-49.
- KANG Renke, MA Fujian, DONG Zhigang, et al. Ultrasonic-assisted cutting technology for difficult-to-machine materials[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2012(16): 44-49.
- [43] 郑伟帅. 基于 STM32 的频率自动跟踪与振幅恒定的超声电源的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- ZHENG Weishuai. Development of an ultrasonic power supply with automatic frequency tracking and constant amplitude based on STM32 [D]. Dalian University of Technology, 2018.
- [44] SUN J, DONG Z, WANG X, et al. Simulation and experimental study of ultrasonic cutting for aluminum honeycomb by disc cutter[J]. *Ultrasonics*, 2020, 103: 106102.

- [45] AHMAD S, ZHANG J, FENG P, et al. Experimental study on rotary ultrasonic machining (RUM) characteristics of Nomex honeycomb composites (NHCs) by circular knife cutting tools[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 58: 524-535.
- [46] 冯柏仁. 圆片刀超声切削铝蜂窝形貌研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- FENG Bairen. Study on the morphology of aluminum honeycomb by ultrasonic cutting with disc cutter[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [47] 邱宇, 赵清泉, 袁信满, 等. Nomex 蜂窝芯超声加工工艺及编程技术研究[J]. *机械研究与应用*, 2019, 32(03): 139-143.
- QIU Yu, ZHAO Qingquan, YUAN Xinman, et al. Study on ultrasonic machining process and programming technology for Nomex honeycomb cores[J]. *Mechanical Research & Application*, 2019, 32(03): 139-143.
- [48] 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(复合材料制造技术与设备分论坛)论文集. 中国北京: 第 17 届全国复合材料学术会议. 2012, 5.
- ZHANG Haichao, GONG Qinghong. Comparative study of ultrasonic cutting and conventional CNC machining of Nomex honeycomb core structure parts[C]// *Proceeding of the 17th National Conference on Composite Materials*. Beijing: 17th National Conference on Composite Materials, 2012, 5.
- [49] WANG Y, KANG R, DONG Z, et al. A novel method of Blade-Inclined ultrasonic cutting Nomex honeycomb core with straight blade[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2021, 143(4).
- [50] 孟倩. 圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯表面质量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- MENG Qian. Ultrasonic cutting of Nomex honeycomb core surface quality with a circular blade[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [51] 黄秀秀, 胡小平, 于保华, 等. 基于断裂力学的 Nomex 蜂窝复合材料超声切割机理研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 205-212.
- HUANG Xiuxiu, HU Xiaoping, YU Baohua, et al. Ultrasonic cutting mechanism of Nomex honeycomb composites based on fracture mechanics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(23): 205-212.
- [52] XIANG D, WU B, YAO Y, 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.
- [53] XIANG D, WU B, YAO Y, et al. Ultrasonic vibration assisted cutting of Nomex honeycomb core materials[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(1): 27-36.
- [54] DEIBEL K, LAEMMLEIN S, WEGENER K. Model of slice-push cutting forces of stacked thin material[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 667-672.
- [55] ATKINS A G, XU X, JERONIMIDIS G. Cutting, by 'pressing and slicing,' of thin floppy slices of materials illustrated by experiments on cheddar cheese and salami[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(8): 2761-2766.
- [56] 石川宪一, 横山恭男, 津和秀夫. 高分子材料のナイフ状工具による切断に関する研究[J]. *精密機械*, 1979, 45(11): 23-28.
- ISHIKAWA K, YOKOYAMA Y, TSUWA H. Study on Cutting of Soft Polymers by a Knife-blade[J]. *Precision Engineering*, 1979, 45(11): 23-28.
- [57] HU X P, YU B H, LI X Y, et al. Research on cutting force model of triangular blade for ultrasonic assisted cutting honeycomb composites[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 66: 159-163.
- [58] KANG D, ZOU P, WU H, et al. Study on ultrasonic vibration-assisted cutting of Nomex honeycomb cores[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(1-4): 979-992.
- [59] YANG Z, ZHU L, ZHANG G, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 156: 103594.
- [60] NI C, ZHU L, LIU C, 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.
- [61] YANG Z, ZHU L, NI C, et al. Investigation of surface topography formation mechanism based on abrasive-workpiece contact rate model in tangential ultrasonic vibration-assisted CBN grinding of ZrO₂ ceramics[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 155: 66-82.
- [62] NATH C, RAHMAN M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting[J]. *International Journal of*

- Machine Tools and Manufacture. 2008, 48(9): 965-974.
- [63] 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 ultrasonic-assisted cutting force for cutting Nomex honeycomb cores with straight-edge sharp knives[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 73-82.
- [64] 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.
- HUANG Xiuxiu, HU Xiaoping, YU Baohua. Study on ultrasonic cutting force modeling and process parameter selection for honeycomb composites[J]. Mechatronics Engineering. 2015, 32(1): 32-36.
- [65] 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 study on ultrasonic cutting of honeycomb core material by circular blade knife[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2017, 37(3): 62-68.
- [66] 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. Construction of Nomex honeycomb core ultrasonic composite milling force prediction model based on response surface method[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2017(1): 103-108.
- [67] SUN J, KANG R, QIN Y, et al. Simulated and experimental study on the ultrasonic cutting mechanism of aluminum honeycomb by disc cutter[J]. Composite Structures, 2021, 275: 114431.
- [68] LIU L, MENG P, WANG H, et al. The flatwise compressive properties of Nomex honeycomb core with debonding imperfections in the double cell wall[J]. Composites Part B-Engineering, 2015, 76: 122-132.
- [69] SEEMANN R, KRAUSE D. Numerical modelling of Nomex honeycomb sandwich cores at meso-scale level[J]. Composite Structures, 2017, 159: 702-718.
- [70] MALEK S, GIBSON L. Effective elastic properties of periodic hexagonal honeycombs[J]. Mechanics of Materials, 2015, 91: 226-240.
- [71] LIU L, WANG H, GUAN Z. Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading[J]. Composite Structures, 2015, 121: 304-314.
- [72] ROY R, PARK S, KWEON J, et al. Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties[J]. Composite Structures, 2014, 117: 255-266.
- [73] GIGLIO M, GILIOLI A, MANES A. Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core[J]. Computational Materials Science, 2012, 56: 69-78.
- [74] HEIMBS S. Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(2): 205-216.
- [75] AKTAY L, JOHNSON A F, KROEPLIN B. Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(9): 2616-2630.
- [76] FOO C C, CHAI G B, SEAH L K. Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure[J]. Composite Structures, 2007, 80(4): 588-594.
- [77] BUITRAGO B L, SANTIUSTE C, SÁNCHEZ-SÁEZ S, et al. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact[J]. Composite Structures, 2010, 92(9): 2090-2096.
- [78] MENNA C, ZINNO A, ASPRONE D, et al. Numerical assessment of the impact behavior of honeycomb sandwich structures[J]. Composite Structures, 2013, 106: 326-339.
- [79] ZINNO A, PROTA A, Di MAIO E, et al. Experimental characterization of phenolic-impregnated honeycomb sandwich structures for transportation vehicles[J]. Composite Structures, 2011, 93(11): 2910-2924.
- [80] AKTAY L, JOHNSON A F, HOLZAPFEL M. Prediction of impact damage on sandwich composite panels[J]. Computational Materials Science, 2005, 32(3-4): 252-260.
- [81] XIE S, ZHOU H. Analysis and optimisation of parameters influencing the out-of-plane energy absorption of an aluminium honeycomb[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 89: 169-177.
- [82] GIGLIO M, MANES A, GILIOLI A. Investigations on sandwich core properties through an experimental-numerical approach[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2): 361-374.
- [83] ROY R, NGUYEN K H, PARK Y B, et al. Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels with bolt insert[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 56:

- 762-769.
- [84] ROY R, KWEON J H, CHOI J H. Meso-scale finite element modeling of NomexTM honeycomb cores[J]. *Advanced Composite Materials: International Conference On Advances in Structural Health Management and Composite Structures - ASHMCS 2012*, 2014, 23(1): 17-29.
- [85] ZHANG Y, LIU T, TIZANI W. Experimental and numerical analysis of dynamic compressive response of Nomex honeycombs[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 148: 27-39.
- [86] RODRIGUEZ-RAMIREZ J D D, CASTANIE B, BOUVET C. Experimental and numerical analysis of the shear nonlinear behaviour of Nomex honeycomb core: Application to insert sizing[J]. *Composite Structures*, 2018, 193: 121-139.
- [87] ASPRONE D, AURICCHIO F, MENNA C, et al. Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb structures[J]. *Composite Structures*, 2013, 105: 240-255.
- [88] TAO Y, DUAN S, WEN W, et al. Enhanced out-of-plane crushing strength and energy absorption of in-plane graded honeycombs[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 118: 33-40.
- [89] LIN T, YANG M, HUANG J. Effects of solid distribution on the out-of-plane elastic properties of hexagonal honeycombs[J]. *Composite Structures*, 2013, 100: 436-442.
- [90] WANG Z, TIAN H, LU Z, et al. High-speed axial impact of aluminum honeycomb-Experiments and simulations[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 1-8.
- [91] NGUYEN M Q, JACOMBS S S, THOMSON R S, et al. Simulation of impact on sandwich structures[J]. *Composite Structures*, 2005, 67(2): 217-227.
- [92] 黄萌. 基于 ABAQUS 的芳纶纸蜂窝直刃刀超声切削过程有限元模拟研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
- HUANG Meng. Finite element simulation study of ultrasonic cutting process of aramid paper honeycomb straight edge knife based on ABAQUS[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2017.
- [93] 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. Simulation and experimental study on ultrasonic cutting process of aramid honeycomb material[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2019.
- [94] 王际帆. 纸蜂窝复合材料超声切削刀具设计及切削性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2016.
- WANG Jifan. Design and cutting performance of ultrasonic cutting tools for paper honeycomb composites[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2016.
- [95] CAO W, ZHA J, CHEN Y. Cutting force prediction and experiment verification of paper honeycomb materials by ultrasonic Vibration-Assisted machining[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4676.
- [96] JAAFAR M, ATLATI S, MAKICH H, et al. A 3D FE modeling of machining process of Nomex[®] honeycomb core: Influence of the cell structure behaviour and specific tool geometry[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 58: 505-510.
- [97] JAAFAR M, MAKICH H, ATLATI S, et al. Experimental and numerical study of machining Nomex honeycomb composite structures[C]. Champs-sur-Marne, France: National Composite Days 2017. 2017
- [98] 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. Microscopic morphological characteristics of ultrasonically cut surfaces of Nomex honeycomb cores with straight-edge sharp knives[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 90-99.
- [99] 朱文秀. Nomex 蜂窝材料直刃尖刀超声切割切削力分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- ZHU Wenxiu. Analysis of ultrasonic cutting forces of straight-edge pointed knives for Nomex honeycomb materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [100] SUN D, KANG R, WANG Y, et al. A novel ultrasonic trepanning method for Nomex honeycomb core[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(1): 354.
- [101] 康仁科, 韩坤, 王毅丹, 等. 采用半圆弧刀具超声插切 Nomex 蜂窝芯的新方法[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(13): 14-22.
- KANG Renke, HAN Kun, WANG Yidan, et al. A new method for ultrasonic interpolation of Nomex honeycomb cores using semicircular arc tools[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2020, 63(13): 14-22.
- [102] 孙健淞, 董志刚, 王毅丹, 等. 超声切割铝蜂窝试验

- 研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 128-135.
- SUN Jiansong, DONG Zhigang, WANG Yidan, et al. Experimental study on ultrasonic cutting of aluminum honeycomb[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 128-135.
- [103] 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.
- [104] 李裕, 骆金威, 高涛, 等. 基于超声波机床加工蜂窝芯的误差分析研究[J]. 制造技术与机床, 2013(9): 102-105.
- LI Yu, LUO Jinwei, GAO Tao, et al. Error analysis study of honeycomb core machining based on ultrasonic machine tools[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2013(9): 102-105.
- [105] 俞浩峰. 蜂窝曲面零件超声辅助加工的六轴数控工艺研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
- YU Haofeng. Six-axis CNC process research for ultrasonic-assisted machining of honeycomb surface parts[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [106] VAKILINEJAD M, OLABI A, GIBARU O, et al. Geometrical error improvement of Aramid honeycomb workpieces in robot-based triangular knife ultrasonic cutting process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(1-2): 523-541.
- [107] LIU E, HU X, YU B. Research and development of ultrasonic CNC cutting path generation system for Nomex composite materials[J]. Advanced Materials Research, 2014, 941-944: 1968-1972.
- [108] 韩坤. Nomex 蜂窝芯纵弯复合振动超声插切刀具及其超声电源的研制与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- HAN Kun. Development and application of Nomex honeycomb core longitudinal bending composite vibration ultrasonic inserting tool and its ultrasonic power source[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [109] CUI R, ZHANG J, FENG P, et al. A path planning method for V-Shaped robotic cutting of Nomex honeycomb by straight blade tool[J]. IEEE Access, 2020, 8: 162763-162774.
- [110] 张永岩, 张超, 李薇. 超声波铣床基于 catia v5 复合材料蜂窝件数控编程方法研究[J]. 航空制造技术, 2012(9): 79-82.
- ZHANG Yongyan, ZHANG Chao, LI Wei. Ultrasonic milling machine based on CATIA V5 composite honeycomb parts CNC programming method research [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(9): 79-82.
- [111] 纪华伟, 虞文泽, 胡小平, 等. 刀具负载对蜂窝复合材料超声切割声学系统阻抗特性的影响[J]. 中国机械工程, 2016, 27(18): 2507-2512.
- JI Huawei, YU Wenzhe, HU Xiaoping, et al. Effect of tool loading on the impedance characteristics of ultrasonic cutting acoustic system for honeycomb composites[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18): 2507-2512.
- [112] 牛景露. 芳纶蜂窝芯的超声切削系统开发及其切削性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- NIU Jinglu. Development of ultrasonic cutting system for aramid honeycomb core and its cutting performance[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [113] 张云电, 肖健雄, 方亮, 等. 蜂窝材料超声波切割声学系统研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23): 3132-3136.
- ZHANG Yundian, XIAO Jianxiong, FANG Liang, et al. Research on ultrasonic cutting acoustic system for honeycomb materials[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(23): 3132-3136.
- [114] 吴欣, 胡小平, 于保华, 等. 蜂窝复合材料超声辅助切割工具设计[J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 809-813.
- WU Xin, HU Xiaoping, YU Baohua, et al. Design of ultrasound-assisted cutting tools for honeycomb composites [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6): 809-813.
- [115] KE M, JIANFU Z, PINGFA F, et al. Design and implementation of a mini ultrasonic cutting system for Nomex honeycomb composites[C]. Islamabad, Pakistan: Proceedings of 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST), 2019, 148-152.
- [116] XIA Y, ZHANG J, WU Z, et al. Study on the design of cutting disc in ultrasonic-assisted machining of honeycomb composites[J]. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 2019, 611(1): 12032.
- [117] 刘超亮, 袁信满, 崔爱杰, 等. Nomex 蜂窝芯超声振动插削刀设计研究[J]. 制造技术与机床, 2020(6): 49-53.

- LIU Chaoliang, YUAN Xinman, CUI Aijie, et al. Research on the design of ultrasonic vibration inserting cutter for Nomex honeycomb cores[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2020(6): 49-53.
- [118] 吴鑫, 董志刚, 康仁科, 等. 直刃尖刀形状对超声辅助切削系统振动性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2016(22): 52-57.
- WU Xin, DONG Zhigang, KANG Renke, et al. Influence of straight-edge tip tool shape on the vibration performance of ultrasonic-assisted cutting system[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2016(22): 52-57.
- [119] MA K, ZHANG J, FENG P, et al. Modeling and fitting of an ultrasonic straight-blade cutting system[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(3-4): 833-843.
- [120] XIA Y, ZHANG J, WU Z, et al. Study on the design of cutting disc in ultrasonic-assisted machining of honeycomb composites[J]. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2019, 611(1): 12032.
- [121] ZHANG Y D, FANG L, LU Z P, et al. The Study on Circular Tool of Ultrasonic Cutting[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 765-767: 92-95.
- [122] 张生芳, 庞皓文, 马付建, 等. 圆盘刀超声切削振动系统的振动频率数值拟合方法研究[J]. *工具技术*, 2018, 52(5): 108-113.
- ZHANG Shengfang, PANG Haowen, MA Fujian, et al. Study on numerical fitting method of vibration frequency for ultrasonic cutting vibration system of circular cutter[J]. *Tool Engineering*, 2018, 52(5): 108-113.
- [123] 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 the effect of tool parameters on ultrasonic cutting performance of Nomex honeycomb cores[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2016, 14(4): 316-322.
- [124] 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.
- [125] 纪华伟, 邢文慧, 胡小平. 蜂窝复合材料构件超声切割圆盘刀对声学系统的影响[J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(2): 41-44.
- JI Huawei, XING Wenhui, HU Xiaoping. Effect of ultrasonic cutting disc knife on acoustic system for honeycomb composite components[J]. *Sensors and Microsystems*, 2019, 38(2): 41-44.
- [126] ZHANG Y D, MA Z Q. The study of resonant frequency of horn and circular tool of ultrasonic milling system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 628: 283-286.
- [127] 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 the effect of tool parameters on ultrasonic cutting honeycomb core cutting force and temperature[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2017, 38(1): 57-61.
- [128] VJUGINOVA A A, DURUKAN Y, VJUGINOV S N, et al. Design and Simulation of Ultrasonic Triangular Blades for Honeycomb Structures Cutting[C]. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). IEEE, 2021: 1293-1296.
- [129] 孙丁一. 超声插切 Nomex 蜂窝芯试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- SUN Dingyi. Experimental study on ultrasonic insertion and cutting of Nomex honeycomb cores[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [130] AHMAD S, ZHANG J, FENG P, et al. Research on design and FE simulations of novel ultrasonic circular saw blade (UCSB) cutting tools for rotary ultrasonic machining of Nomex honeycomb composites[C]. Islamabad, Pakistan: Proceedings of 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST), 2019, 113-119.
- [131] 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 Fei, HUANG Shuai, YUAN Xinman, et al. Dynamics analysis of ultrasonic cutting serrated disc milling cutters for Nomex honeycomb composites[J]. *Tool Engineering*, 2017, 51(5): 37-40.
- [132] 邱宇, 赵清泉, 袁信满, 等. 基于蜂窝芯圆盘刀切削齿的系统稳定性研究[J]. *机电工程技术*, 2019, 48(9): 26-29.
- QIU Yu, ZHAO Qingquan, YUAN Xinman, et al. Research on System Stability Based on Honeycomb Core Disc Cutter[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(9): 26-29.
- [133] 陈建桥. Nomex 蜂窝芯超声精加工圆形铣刀磨破损检

- 测技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- CHEN Jianqiao. Nomex honeycomb core ultrasonic finishing round milling cutter grinding breakage detection technology research[D]. Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2014.
- [134] 王志兵. 超声刀具磨损状态识别与寿命预测技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
- WANG Zhibing. Research on ultrasonic tool wear state identification and life prediction technology[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [135] CRENO. Ultrasonic cutting of Nomex honeycomb [EB/OL]. www.creno-industry.com, 2021-03-24.
- [136] BLOSS R. Automatically building or repairing composite fibre structures[J]. Assembly Automation, 2007, 27(3): 202-206.
- [137] MOREL P G A. Cutting and forming of honeycombs[J]. Jec Composites Magazine, 2011(63): 102-104.
- [138] DUKANE. Ultrasonic cutting systems[EB/OL]. www.dukane.com/plastic-welding-products/ultrasonic-cutting-systems, 2021-3-24.
- [139] 科技部. 国产超声切削装备成功应用于我国航空航天领域[EB/OL]. 2021-03-24. www.most.gov.cn.
- Ministry of Science and Technology. Domestic ultrasonic cutting equipment successfully applied in China's aerospace field[EB/OL]. www.most.gov.cn, 2021-3-24.
- [140] 韩丽轩. 面向Nomex蜂窝芯复合材料超声切割的智能化电源系统研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- HAN Lixuan. Intelligent power supply system for ultrasonic cutting of Nomex honeycomb core composites[D]. Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2014.
- [141] 胡扩. 蜂窝复合材料超声切割主轴关键技术与实验研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
- HU Kuo. Key technology and experimental research on ultrasonic cutting spindle for honeycomb composites[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2018.
- [142] AHMAD S, ZHANG J, FENG P, et al. Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review[J]. Composite Structures, 2020, 250: 112545.
- [143] 何大亮, 赵安安, 薛凯, 等. 一种芳纶纸蜂窝芯超声波数控铣切定位方法: 中国, 202010441332.9[P]. 2020-07-17.
- HE Daliang, ZHAO An'an, XUE Kai, et al. A positioning method of numerical controlling ultrasonic milling and cutting for aramid paper honeycomb core: China. 202010441332.9[P]. 2020-07-17.
- [144] 骆金威, 高涛, 牟文平, 等. 面向超声波机床加工芳纶纸蜂窝芯的新型固持方法[J]. 航空制造技术, 2014(22): 106-108, 115.
- LUO Jinwei, GAO Tao, MU Wenping, et al. Nomex honeycomb core clamping method by ultrasonic machine[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(22): 106-108, 115.

作者简介: 孙健淞, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为复合材料超声加工技术与装备。

E-mail: sjs_06@mail.dlut.edu.cn

王毅丹(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 博士后研究员。主要研究方向为复合材料超声加工技术与装备。

E-mail: ydwang@dlut.edu.cn