

本刊特稿

文章编号:2095-1248(2025)05-0001-11

Nomex 蜂窝材料超声切削刀具设计及其切削性能的研究进展

王 奔,尹宏刚,宋 畅,宋 搏,王丹菲
(沈阳航空航天大学 机电工程学院,沈阳 110136)

摘要: Nomex 蜂窝材料因其低密度、高比强度和高比刚度等特点,广泛应用于船舶、高铁、航空航天等领域,但蜂窝结构的非均质、薄壁、脆性等特征使其在加工过程易产生撕裂、压溃等问题。国内外学者利用超声加工技术切削力小、加工表面质量高等优势来解决 Nomex 蜂窝材料加工的难题,并开展了广泛且深入的研究。然而,相较于普通加工,高质高效的超声加工过程中产生的高频振动、周期性冲击对刀具性能与寿命提出了更高的要求。因此,围绕 Nomex 蜂窝材料加工过程中刀具材料选择、刀具设计、运动学分析、切削力和切削热模型建立、加工表面形貌分析等方面,总结了超声切削 Nomex 蜂窝材料的加工机理、切削特性及超声刀具设计的研究现状,提出了超声切削 Nomex 蜂窝材料的未来研究重点与发展趋势,为进一步研究超声刀具在切削加工的使役性能与加工质量提供参考。

关键词: 超声切削刀具;Nomex 蜂窝材料;运动学分析;切削性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2095-1248.2025.05.001

Research progress on ultrasonic cutting tool design and cutting performance of Nomex honeycomb materials

WANG Ben, YIN Honggang, SONG Chang, SONG Bo, WANG Danfei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Nomex honeycomb materials are widely used in marine, high-speed rail, aerospace and other fields because of the material's low density, high specific strength and high specific stiffness. However, the non-homogeneous, thin-walled and brittle characteristics of honeycomb structures make them prone to tearing, crushing and other defects during processing. Therefore, scholars both in China and abroad have used ultrasonic machining technology to solve the problem of Nomex honeycomb material processing with the advantages of small cutting force and high surface quality, which have carried out extensive and in-depth research. However, compared with ordinary machining, high-frequency vibration and periodic impact generated in high-quality and efficient ultrasonic machining process put forward higher requirements for tool performance and life. Therefore, focused on tool

收稿日期:2024-12-16 修回日期:2025-04-30 接受日期:2025-05-07

基金项目:辽宁省应用基础研究计划项目(项目编号:2023JH2,1013002427);辽宁省国际合作项目(项目编号:2024JH2,101900028)。

作者简介:王奔(1984—),男,山东济宁人,教授,博士,主要研究方向为复合材料、钛合金、高温合金等航空难加工材料的先进制造工艺关键技术,E-mail:wangben@sau.edu.cn。

material selection, tool design, kinematic analysis, cutting force and cutting heat modeling, and surface topography analysis during machining of Nomex honeycomb materials. The research status of machining mechanism, cutting characteristics and ultrasonic tool design for ultrasonic cutting of Nomex honeycomb materials were summarized. The future research and development trend of ultrasonic cutting Nomex honeycomb materials were put forward, which provided a reference for further research on the service performance and processing quality of ultrasonic cutting tools in cutting.

Key words: ultrasonic cutting tool; Nomex honeycomb materials; kinematics analysis; cutting performance

随着航空航天科学技术的迅速发展,研发高强度、低成本且绿色环保的新型航空材料已成为该领域的热点之一。复合材料因其优越的综合性能备受瞩目,其中Nomex蜂窝材料作为轻量化复合材料在高铁、航空航天等领域应用广泛。与金属、泡沫等材料相比,Nomex蜂窝材料具有优异的化学惰性、抗冲击性、阻燃性与耐高温性,此外还具有良好的电绝缘性、透电磁波性和隔音性能,同时因其低密度、高比强度和高比刚度的特点被广泛应用于飞机的机舱内壁板、襟翼、整流罩、发动机短仓及雷达罩等结构件上^[1]。此外,Nomex蜂窝材料还被运用在卫星、船舶、飞船返回舱等装备领域。

由于Nomex蜂窝材料的力学性能和空间结构的独特性,虽具有良好的面内耐磨和耐撕裂性能,但横向刚度较弱,且径向与轴向力学性能差距很大,给切削加工带来了极大的难度。此外,Nomex蜂窝材料含有的酚醛树脂和芳纶短纤维使其具有各向异性和脆性,且导热性较差,加工时极易出现刀具磨损、毛刺、蜂窝塌陷等问题,装夹难度也大幅提高^[2]。

超声波是振动的一种基本形式,其应用相当普遍。由于超声波与介质的相互作用,其在介质中传播时会发生化学或物理变化,从而产生超声效应。超声加工是在刀具或工件上施加高频振动和然后利用振动产生的冲击力和刀具-工件间的断续接触来增强刀具的切削能力,提高切削质量^[3]。但超声加工产生的高频振动和周期性冲击加快了刀具的磨损,严重影

响了刀具的切削性能和服役寿命,进而影响被加工材料的表面质量。如何提高超声刀具的使役性能,是现阶段待解决的加工难题之一。

因此,本文围绕超声切削Nomex蜂窝材料,以现有超声直刃刀具和圆盘刀具为研究对象,总结了目前的成就、局限性及应用领域,为未来的超声刀具研制工作提供依据。其中,涵盖了超声刀具材料选择、超声刀具设计、超声切削特性分析。此外,还分析了超声切削Nomex蜂窝材料的加工机理和性能。

1 超声刀具材料

超声刀具在超声振动作用下高频冲击加工材料,随着振动时间的延长,刀具材料逐渐产生疲劳。当疲劳超过极限时,刀具会发生断裂、崩刃等状况。Nomex蜂窝材料本身硬度不高,但其所含的硬质成分会引发严重的磨料磨损,这是超声刀具失效的主要原因之一。当超声刀具完全没入加工材料时,材料表面与刀刃表面接触会产生较大的摩擦力。由于长时间的加工,刀具温度将会持续上升。因此,材料的选择直接影响超声刀具的切削性能、使用寿命及蜂窝的加工质量。为了满足超声切削加工工艺的需求,超声切削刀具的材料应具备良好的抗振性、抗磨损性、耐高温性及足够的强度^[4]。常用刀具材料力学、物理性能如表1所示。

从耐磨性角度考虑,由表1可知,高速钢的硬度为63~70 HRC,虽低于硬质合金材料的硬

度,但是足够满足 Nomex 蜂窝材料的加工需要。而超声切削刀具实质是一种高频高速瞬时冲击复合加工方法,所以对于刀具材料的冲击韧性具有较高的要求,而高速钢的冲击韧性可达 $100 \sim 600 \text{ KJ/m}^2$,相对于硬质合金优势较为突出^[5]。另外超声直刃和圆盘刀具属于薄片刃刀具,而超声振动系统产生利于加工的纵

振,同时也会产生相对小的横向振颤,这就需要刀具材料不仅要有足够的韧性,而且还要有足够的抗弯性能,而高速钢的抗弯强度为 $2\,000 \sim 4\,000 \text{ MPa}$ 。综合考虑超声加工环境的特殊性 & 刀具的可加工性,高速钢具有优异的抗弯强度、耐磨性及良好的韧性,选择高速钢作为超声刀具材料较为合适。

表1 常用刀具材料力学、物理性能

类别	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	硬度/HRC	抗弯强度/MPa	冲击韧性/($\text{KJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	耐热性/ $^{\circ}\text{C}$
高速钢	8~8.8	63~70	2 000~4 000	100~600	600~650
硬质合金	8~15	89~93.5	1 100~2 600	25~60	800~1 000

2 超声刀具设计

研制符合超声振动系统声学特性的刀具是实现高质高效超声切削的重要一环,目前主要通过理论计算和有限元法实现对超声刀具的设计。刀具可分为直刃刀具和圆盘刀具两类,如图1—2所示。针对 Nomex 蜂窝在沿孔格横向切削时的加工难题,学者对各类刀具的振动模态分析、振动与切削性能分析及超声刀设计开展了大量研究。

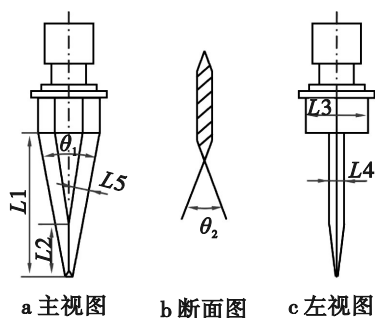


图1 直刃刀具

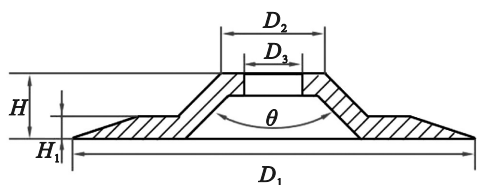


图2 圆盘刀具

在切削过程中,直刃刀具常用于切削下料、斜槽等粗加工工艺,传递超声振动的同时还承担了切削任务,故对直刃刀具的材料选择和形状设计提出了更高的要求。同时,直刃刀具的结构尺寸直接影响刀刃处的输出振动,进而影响整个超声切削过程的加工质量。因此,国内外学者对直刃刀具与超声加工系统匹配性进行了研究,为超声直刃刀具的设计和优化提供了参考。Richards等^[6]研制出用于切割人骨的超声刀具,能在减少人体组织损伤的基础上对人体的脆硬组织进行切削,并且能减少手术中的出血现象。贾瑞修等^[7]设计了 30 kHz 的超声振动变幅杆和9组不同尺寸的直刃尖刀,利用有限元法分析了刀具结构尺寸对振动系统的影响规律,包括振幅放大系数、共振频率及刀尖温度等。吴鑫^[8]采用仿真与分析相结合的方式分析了直刃尖刀结构参数厚度、长度对纵向振幅、谐振频率及振幅放大倍数的影响,并且确定了最佳的刀具参数。

在圆盘刀具设计方面,圆盘刀具在铣削时通过刀刃的高速旋转和纵扭复合振动来实现 Nomex 蜂窝的分离,故刀具几何参数对振动系统的振幅、频率、加工精度和效率等都会产生极大影响^[9]。根据 Nomex 蜂窝的超声加工特性,国内外学者结合圆盘刀具结构尺寸与超声

切削系统和工件加工质量的相关性进行了大量的仿真与试验研究。方亮^[10]采用ANSYS软件对圆盘刀具在切削力作用下的变形及应力分布变化规律进行分析,对圆盘刀具进行模态分析并探讨其动态性能,最终结合圆盘刀具静力学及模态分析,完成圆盘刀具的结构设计。Cardoni等^[11]设计了一种应用于超声加工中的多刀片铣削装置。

目前,国内针对Nomex蜂窝材料的超声刀具的研制还处于起步,直刃尖刀具和圆盘刀具缺少理论设计基础,其性能也参差不齐。此外,刀具研制大多依赖进口,自主优化程度低。

3 超声振动切削特性分析

3.1 超声直刃刀具

超声直刃刀具加工的核心是在刀具上施加一个振动,并协助刀具打开蜂窝壁内部的分子结构,使其易被刀具切削,其加工效率明显优于传统加工方式。为深入研究直刃刀具的加工特性,基于直刃刀具运动方式和结构的特殊性,掌握直刃刀具的运动规律是分析该刀切削特性的关键。Xiang等^[12]考虑了工作角度对刀具运动轨迹的影响。直刃刀具上任意一点的运动轨迹的表达式为

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

式中: β 为刀具前倾角; α 为刀具侧倾角; f 为频率; v_f 为进给速度; A 为振幅; t 为时间。其运动轨迹如图3所示。公式(1)对时间求导,得到的速度表达式为

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

超声加工的一个显著特点是刀具与材料之间的间歇接触,刀具-工件接触率模型作为表征超声辅助切削状态的重要参数,已被广泛

研究。Du等^[13]发现超声振动的间歇切削特性可降低切削力和粗糙度。Sun等^[14]和Niu等^[15]发现超声振动的间歇切削特性可以降低切削力,提高冷却效果,从而降低切削温度。超声直刃切削与常规超声加工有显著不同,需要结合刀具结构和切削方法来分析刀具-工件接触特性。基于超声振动特性,刀具和工件之间的间歇性接触归因于刀具合成速度的周期性变化。假设在超声振动周期 T 内,刀具在时间 t_1 与工件接触,在时间 t_2 与工件分离,则净切削时间为 t_0 ,刀具-工件接触率 r 表示为

$$r = \frac{t_0}{T} = \frac{t_2 - t_1}{T} \quad (3)$$

此外,Guo等^[16]在超声加工的刀具-工件接触率模型中考虑刀具结构、切削方向、超声振动参数等因素,表达式为

$$\frac{v_f(1-r)}{J} = 2A \sin(\pi r) \cos \left[\cos^{-1} \left(-\frac{v_f}{2\pi A f J} \right) - \pi r \right], \quad 2\pi A f J \geq v_f \quad (4)$$

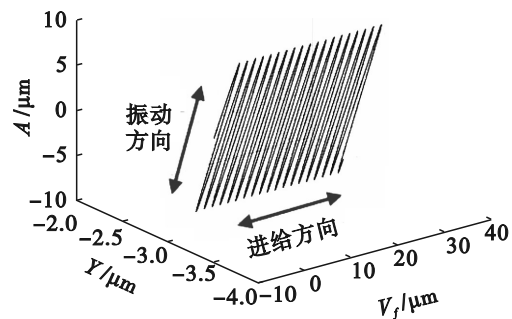


图3 超声直刃刀具运动轨迹

3.2 超声圆盘刀具

圆盘刀具超声振动铣削加工是芳纶蜂窝材料半精加工和精加工中的重要组成部分,此种工艺中圆盘刀具的主要作用是进行蜂窝材料的大余量切除和型面精修。为深入了解超声辅助圆盘刀具的铣削特性,基于圆盘刀具结构及运动方式的独特性,掌握其运动轨迹是分析圆盘刀具切削特性的关键。圆盘刀具在轴向超声振动的同时绕轴线旋转,建立了考虑圆盘刀具铣削姿态角度的运动轨迹表达式^[17],如

式(5)所示。

$$\begin{cases} S_x = v_f t - R_d \sin(2\pi n t) \cos \lambda_1 + A \sin(2\pi f t) \sin \lambda_1 \\ S_y = R_d \cos(2\pi n t) \cos \lambda_1 + R_d \sin(2\pi f t) \sin \lambda_1 \sin \lambda_t + \\ \quad A \sin(2\pi f t) \cos \lambda_1 \sin \lambda_t \\ S_z = R_d \sin(2\pi n t) \sin \lambda_1 \cos \lambda_t - R_d \cos(2\pi n t) \sin \lambda_t + \\ \quad A \sin(2\pi f t) \cos \lambda_1 \cos \lambda_t \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为圆盘刀具的转速, R_d 为圆盘刀具的半径。由式(5)得到圆盘刀具刃上一点的运动轨迹, 如图 4a 所示。将式(5)对时间求导, 得到圆盘刀具刃上一点的速度表达式, 如式(6)所示。

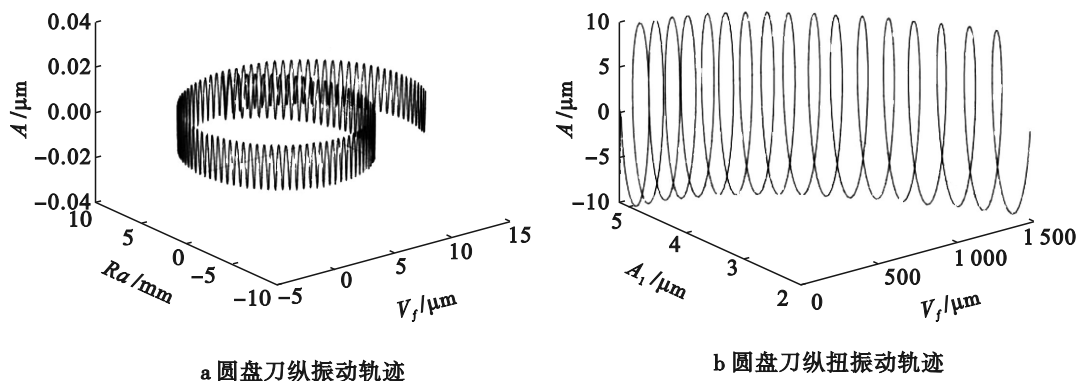


图 4 圆盘刀具振动轨迹及切削示意图

$$\begin{cases} v_x = v_f - 2\pi R_d \cos(2\pi n t) \cos \lambda_1 + 2\pi f A \cos(2\pi f t) \sin \lambda_1 \\ v_y = -2\pi n R_d \sin(2\pi n t) \cos \lambda_1 + 2\pi n R_d \cos(2\pi n t) \sin \lambda_1 \cos \lambda_t + \\ \quad 2\pi f A \cos(2\pi f t) \cos \lambda_1 \sin \lambda_t \\ v_z = 2\pi n R_d \cos(2\pi n t) \sin \lambda_1 \cos \lambda_t + 2\pi n R_d \sin(2\pi n t) \sin \lambda_t + \\ \quad 2\pi f A \cos(2\pi f t) \cos \lambda_1 \sin \lambda_t \end{cases} \quad (6)$$

此外, Xiang 等^[18]提出在不考虑刀具倾角的情况下, 圆盘刀具刃上任一点的位移轨迹和速度表达式如式(7)~(8)所示。

$$\begin{cases} S_x = R_d \sin[2\pi n t + A_1/R_d \sin(2\pi f t)] + v_f t \\ S_y = R_d \cos[2\pi n t + A_1/R_d \sin(2\pi f t)] \\ S_z = A_2 \sin(2\pi f t + \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_x = [2\pi n R_d + 2\pi f A_1 \cos(2\pi f t)] \cos[2\pi n t + A_1/R_d \sin(2\pi f t)] + v_f \\ v_y = -[2\pi n R_d + 2\pi f A_1 \cos(2\pi f t)] \sin[2\pi n t + A_1/R_d \sin(2\pi f t)] \\ v_z = 2\pi f A_2 \cos(2\pi f t + \varphi) \end{cases} \quad (8)$$

式中: A_1 为扭转振幅; φ 为扭转相位差; A_2 为纵向振幅, 其运动轨迹如图 4b 所示。由图 4 可知, 圆盘刀具纵扭复合超声振动是由圆盘刀具刃的纵向正弦轨迹的纵振和周向往复的扭振组合而成, 它是一种周期性的交叉螺旋运动, 由于纵振和扭振都是超声高频振动, 其振动速度远大于旋转速度和进给速度, 因此, 此时的主切削速度为超声纵振和超声扭振的合速度。

综上所述, 本节分析了超声切削 Nomex 蜂窝材料刀具运动轨迹现有的一些研究。在直刃刀具方面, 已有轨迹模型均考虑了在纵向振动条件下刀具的断续切削作用、角度变化及刀具-工件接触率对刀具运动状态的影响。由于忽略直刃刀具超声振动条件下产生的横向振动, 现存模型在建立切削力与工件加工变形之间的相互作用关系、准确预测瞬态切削力等方面研究不足。此外, 在后续超声振动圆盘刀具

作用机理的研究中,应将刀具-工件接触率对圆盘刀具运动状态的影响考虑其中。

4 超声切削 Nomex 蜂窝材料的性能

4.1 超声直刃刀具切削 Nomex 蜂窝加工机理

振幅和谐振频率是直刃刀具系统的两个关键输出变量。在超声直刃刀具系统的设计过程中,应充分考虑变量对振幅和谐振频率的影响,选择和优化设计参数。Kang 等^[19]建立了超声直刃刀具的切削力理论模型,并通过实验

验证了理论模型、加工参数、刀具设计参数对切削力和表面质量的影响,超声直刃刀具的加工机理如图 5a 所示。切削力、切削热及加工损伤的分析有助于验证和优化超声直刃刀具的设计参数和相关的加工变量。分析这些参数的常用方法主要有解析建模、有限元仿真和试验,表 2 为使用超声直刃刀具切削 Nomex 蜂窝材料的相关研究。目前,国内外关于超声直刃刀具的加工机理主要集中在切削力模型建立、加工损伤等方面^[20],以下分别对各个模型进行简述。

表 2 使用超声直刃刀具切削 Nomex 蜂窝材料的相关研究

作者	研究内容	结论
Hu 等 ^[21]	超声和常规切削 Nomex 蜂窝材料的实验研究。	振幅对切削力和表面质量有很大影响。
王毅丹等 ^[22]	建立了基于脆性断裂理论的超声直刃刀具动态切削力模型。通过理论和实验研究加工参数对切削力的影响。	振幅和刀具倾角对切削力和表面质量有主要影响。当刀具前角从 15° 增加到 45° 时,切削力降低了 70%~80%。
马付建等 ^[23]	建立了超声刀具-工件摩擦的切削热模型。	刀具直径和刃角越大,切削摩擦力越大,切削温度越高。
张讯等 ^[24]	采用 3 种(纵切,斜切,横切)方式切削 Nomex 蜂窝,并分析了蜂窝的加工形貌。	优化振幅和切削速度可降低酚醛清漆层剥落的概率。
Qin 等 ^[25]	采用降维模型识别蜂窝芯已加工表面的毛刺情况,并通过回归模型进行异常数据剔除。	改进后的 GVF 算法在去除各种形状表面毛刺数据方面都有更高的精度。
Guo 等 ^[16]	首次建立了考虑刀具结构、切削方向、超声振动参数等因素的超声加工的刀具-工件接触率模型,还分别建立了直刃边缘断裂力和直刃表面摩擦力模型,并进行了验证。	当振幅增加到 10 μm 时,刀具-工件接触率显著降低;断裂力是切削力的主要组成部分,约占 80%。振幅和超前角的增大是导致断裂力和摩擦力减小的主要原因。

在切削力模型方面,面向 Nomex 蜂窝材料及结构特性,Yu 等^[26]基于弹性薄板小挠度理论,建立了横向切削载荷作用下的薄壁挠度和应力方程,采用解析模型和有限元模型相结合的方法,分析了蜂窝单元壁的变形和断裂特性。结果表明,刀具的超声振动大大提高了蜂窝壁的强化效果,薄壁的断裂是由于在横向切削载荷作用下产生的挠度超过了局部强化后的最大允许变形。此外,仅在纵向切削载荷下,很难打破导致胞壁断裂的临界屈曲状态。Sun 等^[27]在分析芳纶纸多层结构力学行为的基础上,提出了适用于等效单层模型的分段材料

力学模型。在此基础上,从理论上提出了多层结构等效力学参数的计算方法。

在加工损伤方面,针对 Nomex 蜂窝材料加工过程中易压溃的问题,Wang 等^[28]为了避免蜂窝芯体的破碎,提出了一种新型的直刃刀具倾斜超声切削方法,以减小刀具与蜂窝芯体之间的几何干涉。从加工质量、切削力、主后刀面与材料的几何干涉等方面揭示了蜂窝芯加工过程中发生破碎的原因。通过对破碎力和切削力的定量分析,验证了直刃刀倾斜超声切削方法能够通过控制切削角来避免破碎。针对 Nomex 蜂窝材料加工过程中易撕裂的问题,

Xu等^[29]着重讨论了细观尺度上横向裂纹和纵向裂纹的形成机制和演化,并建立了一个细观数值模型来分析超声振动加工中的断裂诱导机理,得出横向裂纹是由刀具振动产生的纵向拉应力诱发的,纵向裂纹是由刀具进给产生的横向拉应力诱发的。细观尺度裂纹的发现不仅增强了固化诱导的微裂纹和孔洞的重要性,而且为机械加工后宏观缺陷的演化提供了理论指导。

4.2 超声圆盘刀具切削 Nomex 蜂窝加工机理

关于 Nomex 蜂窝材料超声圆盘刀具切削机理的研究,为加工系统传递效率分析、超声振动系统、圆盘刀具、加工参数的设计和优化

提供了基础支撑。在圆盘刀具的设计过程中,应充分了解超声圆盘刀具的切削机理,如图 5b 所示。目前关于超声圆盘刀具切削机理的研究主要聚焦于切削力、切削热和切削损伤理论模型的建立^[30-31],表 3 中为超声圆盘刀具切削 Nomex 蜂窝材料的相关研究。

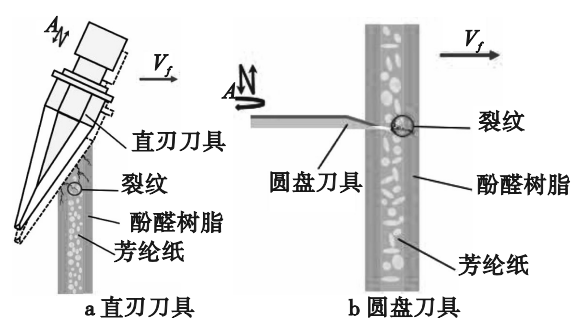


图5 直刃刀具与圆盘刀具超声切削示意图

表3 超声圆盘刀具切削 Nomex 蜂窝材料的相关研究

作者	研究内容	结论
Guo等 ^[32]	根据刀具与吸波蜂窝材料的相对位置关系及刀具的运动特性,建立了切削系统的多自由度数学模型。	通过试验验证了超声切削系统多自由度稳定性数学模型的正确性。圆盘刀具通过优化工艺参数可以延长刀具寿命。
Cao等 ^[33]	建立了超声振动辅助圆盘刀具对蜂窝芯材切削力的有限元仿真模型。	得出在相同条件下,试验与仿真的结果最大误差为13.2%,验证了模型的准确性。
Wang等 ^[34]	在定量分析 Nomex 蜂窝芯加工表面质量的基础上,研究了盘形刀具的前倾角和倾角对加工质量的影响。	超声振动能有效地减少胞壁撕裂,提高加工质量。倾角的变化对胞壁撕裂的影响小于导程角的变化。
Ahmad等 ^[35]	通过单因素和正交试验,研究了工艺参数对超声铣削加工特性的影响。对比了圆盘和锯齿圆盘刀具在有超声振动条件下 Nomex 蜂窝的加工效果。	切削力随切深和进给量的变大而增大,与转速、振幅成反比。圆盘刀具切削产生的毛刺少且长,存在撕裂,而锯齿圆盘切削产生的毛刺多且短,无撕裂。
Zarrouk ^[36]	模拟了超声圆盘齿刀铣削 Nomex 蜂窝材料的过程。重点研究了切削力的组成、加工质量及切屑的堆积情况。	通过优化切削力的分量,提高加工质量,减少切屑堆积是可能的。仿真与试验结果基本一致,验证了模型及计算方法的准确性。
Zha等 ^[37]	为研究超声圆盘刀具的磨损情况,提出一种定量评价刀具磨损的径向差计算方法。	小撕裂是加工过程开始时刀具磨损的典型形态。随着切削长度的增加,出现边缘崩刃和卷曲。
袁信满等 ^[38]	建立圆盘锯齿刀切削 Nomex 蜂窝材料有限元模型,并与试验相结合。研究了主轴转速、进给速度、切削宽度与深度对切削力、切削热的影响。	验证了模型与实际误差为11.2%,满足切削力与切削热的预测需求;切削力与主轴转速成反比,与切宽、切深、进给速度成正比;进给速度和转速对切削热的影响最大。

在切削力、切削热模型方面,Xiang等^[18]基于滑动效应,研究了圆盘刀具的扭转振动特性,并研究了加工参数对切削力的影响,发现在相同的参数条件下,无论主轴转速和进给速度如何,超声纵扭振动辅助切削所需的切削力

都小于超声纵向振动辅助切削。吴胜游等^[39]对超声圆盘刀具进行了研究,并建立了切削力数理模型,表明圆盘刀具对材料产生的断续切削作用是切削力减小的主要原因,并给出了实现断续切削的临界切削速度。Nomex 蜂窝材

料的表面质量与刀具加工时的切削力有关,切削力越大,表面质量越低,反之亦然。为此,应优化工艺参数,以降低切削力。张生芳等^[40]建立了圆盘刀具热耦合模型,探究了刀具结构对切削热的影响规律,发现切削温度随着刀具前角和直径的增大而上升,随刀具后角的增加而下降。

在加工损伤方面,Xu等^[41]在对Nomex蜂窝材料的切削加工研究中,揭示了高韧性是提高圆盘刀具耐磨性的主要因素。从刀具磨损和表面质量两个方面评价了韧性和硬度的重要性。结果表明,增韧刀具可以加工出更锋利的切削刃,更适合于超声振动加工中的高周期冲击载荷。针对圆盘刀的表征方法及刀具磨损规律的问题。Li等^[42]进行了圆盘刀具超声切削Nomex蜂窝芯的磨损实验,提出用切削刃钝圆、后刀面磨损、直径减小量和切削刃破损宽度等属性来定量表征刀具磨损和破损形式。此外,对盘形滚刀的刀具磨损和破损形式进行了分类,并分析了盘形滚刀磨损和破损的变化规律。Springer-Verlag 伦敦有限公司 Mughal等^[43]开发一个三维有限元模型,分析超声和传统加工过程中使用圆盘刀具的Nomex蜂窝材料的切削力、切削形成和加工质量。数值模型研究了切削深度、进给速度、超声振幅和主轴转速等加工参数对切削力的显著影响,并进行了实验验证。

相关文献表明,在超声振动下直刃刀具和圆盘刀具切削Nomex蜂窝材料时,其在刀具性能、加工质量和应用范围等方面表现出了显著的差异。直刃刀具用于直线切削操作,主要通过减少所需的切削力和刀具磨损来提高切削质量。该技术适合大余量且较为精确的材料去除,特别是对于平面部分和直线轮廓,但不太适合复杂或弯曲的切削,因为它只能针对线性运动进行优化。相比之下,当用于超声振动辅助铣削Nomex蜂窝材料时,圆盘刀表现出明显优势。圆盘刀特别适用于精确且光洁的复

杂曲面铣削,可以在较宽和较厚的材料上进行切削。施加到圆盘刀具上的超声振动有助于减少热量的产生,这对于避免Nomex等热敏材料的翘曲至关重要。同时,圆盘刀具还有助于在刀具的整个圆周上保持均匀的切削质量,减少切削缺陷并提高表面光洁度,但振动可能会导致圆盘刀具的加速磨损。

5 结论与展望

5.1 结论

本文围绕用于超声切削Nomex蜂窝材料的两种刀具——直刃刀具和圆盘刀具,从刀具材料、结构设计、振动特性与切削性能等方面进行了论述,综合考虑这些因素的相互作用关系设计超声刀具,可以显著增强刀具的服役寿命和切削性能。通过综述研究可以得出以下结论:

1)在刀具材料选择方面,从冲击韧性的角度考虑,高速钢更适合超声刀具;从成本的角度考虑,高速钢刀具比硬质合金刀具的成本低,易于广泛应用;从刀具性能的角度考虑,硬质合金刀具性能优于高速钢刀具,但硬质合金较脆,由于刃角较小,硬质合金刀具极易出现崩刃,进而影响刀具切削性能和使用寿命;从振动传输效率的角度考虑,材料不同,振动传输效率也有所不同,需要根据连接变幅杆的材质决定,尽量选同种材料。

2)在振动特性方面,超声加工是通过高频振动和周期性冲击来实现材料的切削,这给较薄的切削刃带来极大的挑战。由于薄刃口具有较高的导热效率,再加上高频和周期性的摩擦导致切削刃局部温度快速升高和降低,进而出现应力集中,刃口极易产生热裂纹。

3)在切削性能方面,通过对切削力、切削热及加工质量进行的研究发现,刃角越小,切削力越小,加工质量越好,但对刀具寿命影响较大。对于圆盘刀具,转速越大,加工质量越

好,但切削热也会相对升高。将切削刃改为锯齿状可显著加快散热,同时还提高了切削效率。

4)在刀具设计方面,通过探究刀具结构参数对振幅、频率及切削性能的影响,发现超声刀具的设计不仅要满足加工需求,还要考虑超声振动的传输效率、振幅放大倍数及谐振频率等。刀具越厚,振幅放大倍数越小;刃角越小,振幅放大倍数越大;三角形的刀具要比长方形的刀具放大倍数更高。因此,在保证刀具足够强度的同时应尽量选择刃角小、厚度较薄、刀尖为三角形且材料与变幅杆一致的刀具。

5.2 展望

针对 Nomex 蜂窝结构件加工难题,国内外学者以 Nomex 蜂窝材料为研究对象,对其加工工艺、超声加工机理及刀具研制进行了充分且广泛的研究,取得了一系列显著的科研成果,推动了超声切削 Nomex 蜂窝材料技术的进步。为了实现超声切削 Nomex 蜂窝材料技术应用更广,在以下方面还需开展更深入的研究:

1)在超声刀具加工机理方面,现有研究在简化 Nomex 蜂窝结构和材料属性、超声切削刀具结构及振动方向的基础上,分别围绕超声切削过程的有限元分析、运动学分析、切削力与切削热建模等开展研究。因此,为深入了解各类刀具的超声切削作用机理,还需建立考虑包括 Nomex 蜂窝材料制备特性和刀具结构特点在内的切削力、热模型,建立能精确描述超声切削蜂窝材料的失效准则。

2)在超声刀具研制方面,目前仍大多依赖国外进口,使用时存在效率低、刀具-设备-工艺匹配性较差、切削热及刀具磨损严重等问题。同时,现有超声刀具的类型较为单一且无法满足多样化结构件的加工需求。为此,建立超声振动刀具的磨钝工艺标准,揭示超声切削作用下的刀具损伤机理是未来科研工作

3)在 Nomex 蜂窝材料超声加工表面质量控制及路径规划方面,当前 Nomex 蜂窝的加工仍产生毛刺、加工变形及撕裂等问题,确保加工精度与质量是实现高质高效加工的关键。当前研究对 Nomex 蜂窝加工质量进行了大量的定性观测,缺少定量观测和分析方法。此外,为实现大型复杂结构件高质高效加工,在加工路径规划、刀具姿态控制及加工程序编制等方面仍需开展深入的研究。

参考文献(References):

- [1] 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报,2007,24(1):1-12.
- [2] 罗玉清,宋欢,陆志远,等.芳纶蜂窝复合材料的制备及性能研究[J].高科技纤维与应用,2018,43(4):5-11.
- [3] 许超,袁信满,关艳英,等.超声加工技术的应用及发展趋势[J].金属加工(冷加工),2022,62(9):1-6.
- [4] 王文杰.超声切割Nomex蜂窝芯材料切割力建模与刀具设计研究[D].沈阳:东北大学,2018.
- [5] 冯平法,王健健,张建富,等.硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J].机械工程学报,2017,53(19):3-21.
- [6] Richards D S, Lucas M. Ultrasonically assisted cutting blades for large bone surgeries [J]. Proceedings of Meetings on Acoustics, 2018, 32(1): 030020.
- [7] 贾瑞修,刘冲,李经民,等.刀具尺寸对超声切割系统振动性能影响的研究[J].机电技术,2020(4):20-23.
- [8] 吴鑫.Nomex蜂窝材料超声切割直刃刀具设计与性能研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [9] Yuan X M, Zhang K X, Zha H T, et al. Enabling thin-edged part machining of Nomex honeycomb composites via optimizing variable angle of disc cutters[J]. Materials, 2023, 16(16): 5611.
- [10] 方亮.Nomex蜂窝材料超声铣削圆形刀研制[D].杭州:杭州电子科技大学,2013.
- [11] Cardoni A, Lucas M, Cartmell M, et al. A novel

- multiple blade ultrasonic cutting device [J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1/9): 69–74.
- [12] Xiang D H, Wu B F, Yao Y L, et al. Ultrasonic vibration assisted cutting of Nomex honeycomb core materials [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(1): 27–36.
- [13] Du Y S, Lu M M, Lin J Q, et al. Experimental and simulation study of ultrasonic elliptical vibration cutting SiCp/Al composites: chip formation and surface integrity study [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22(12): 1595–1609.
- [14] Sun Y J, Gong H, Gui S Y, et al. Towards understanding the cutting temperature in ultrasonic vibration-assisted drilling based on the dynamic contact characteristics between the cutting edge and workpiece [J]. *Ultrasonics*, 2023, 135: 107131.
- [15] Niu Q L, Rong J, Jing L, et al. Study on force-thermal characteristics and cutting performance of titanium alloy milled by ultrasonic vibration and minimum quantity lubrication [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 95: 115–130.
- [16] Guo J L, Sun J S, Du H H, et al. Cutting force reduction mechanism in ultrasonic cutting of aramid honeycomb [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 273: 109317.
- [17] 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.
- [18] Xiang D H, Wu B F, Yao Y L, et al. Ultrasonic longitudinal-torsional vibration-assisted cutting of Nomex honeycomb-core composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(5): 1521–1530.
- [19] 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): 979–992.
- [20] Ji H W, Yang F, Wang Z B, et al. Research on wear state identification and Life prediction technology of ultrasonic straight-edge knife [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(9): 4225–4235.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Qin Y, Kang R K, Dong Z G, et al. Burr removal from measurement data of honeycomb core surface based on dimensionality reduction and regression analysis [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(11): 115010.
- [26] Yu B H, Yao S F, Wu X, et al. Cell wall fracture mechanism in ultrasonic-assisted cutting of honeycomb materials [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(7): 5067–5078.
- [27] Sun J S, Wang Y D, Zhou P, et al. Equivalent mechanical model of resin-coated aramid paper of Nomex honeycomb [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 240: 107935.
- [28] Wang Y D, Kang R K, Dong Z G, 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): 041012.
- [29] Xu J, Wang C X, Feng P F, et al. Meso-scale cracks initiation of Nomex honeycomb composites in orthogonal cutting with a straight blade cutter [J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 233: 109914.
- [30] Jiang J M, Liu Z Q. Formation mechanism of tearing defects in machining Nomex honeycomb core [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(11): 3167–3176.

- [31] Zarrouk T, Nouari M, Salhi J E, et al. Numerical simulation of rotary ultrasonic machining of the Nomex honeycomb composite structure [J]. *Machines*, 2024, 12(2): 137.
- [32] Guo Z F, Liu X, Yao S F, et al. Stability analysis and experimental research on ultrasonic cutting of wave-absorbing honeycomb material with disc cutter [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(1): 1373–1383.
- [33] Cao W J, Zha J, Chen Y L. Cutting force prediction and experiment verification of paper honeycomb materials by ultrasonic vibration-assisted machining [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4676.
- [34] Wang Y D, Kang R K, Qin Y, et al. Effects of inclination angles of disc cutter on machining quality of Nomex honeycomb core in ultrasonic cutting [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2021, 16(2): 285–297.
- [35] Ahmad S, Zhang J F, Feng P F, et al. Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): a critical review [J]. *Composite Structures*, 2020, 250: 112545.
- [36] Zarrouk T, Nouari M, Salhi J E. Numerical study on rotary ultrasonic machining (RUM) characteristics of Nomex honeycomb composites (NHCs) by UCSB cutting tool [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(11): 5351–5366.
- [37] Zha H T, Shang W J, Xu J, et al. Tool wear characteristics and strengthening method of the disc cutter for Nomex honeycomb composites machining with ultrasonic assistance [J]. *Technologies*, 2022, 10(6): 132.
- [38] 袁信满, 赵清泉, 鄢旭东, 等. 圆盘锯齿刀超声切削 Nomex 蜂窝芯力热分析 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021, (8): 27–30, 35.
- [39] 吴胜游, 胡小平, 孔倩, 等. 蜂窝复合材料圆盘刀超声切削研究 [J]. *杭州电子科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(5): 44–47.
- [40] 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.
- [41] Xu J, Yue Q Z, Zha H T, et al. Wear reduction by toughness enhancement of disc tool in Nomex honeycomb composites machining [J]. *Tribology International*, 2023, 185: 108475.
- [42] Li L L, Qin Y, Kang R K, et al. Study on characteristics of tool wear and breakage of ultrasonic cutting Nomex honeycomb core with the disc cutter [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(14): 8168.
- [43] Mughal K H, Jamil M F, Qureshi M A M, et al. Investigation of rotary ultrasonic vibration assisted machining of Nomex honeycomb composite structures [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(11): 5541–5560.

(责任编辑:陈素清 英文审校:侯宁)