

表面质量控制及检测

基于纤维增强复合材料的超声振动 辅助加工技术综述

史振宇¹, 崔鹏¹, 李鑫¹, 万熠¹, 袁杰², 蔡玉奎³

(1.山东大学 a.机械工程学院 b.高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;

2.山东省济南市历城区供电公司, 济南 250100;

3.斯克莱德大学 设计制造与工程管理系, 格拉斯哥 G11XQ, 英国)

摘要: 纤维增强复合材料是一类使用范围不断扩大的具有优良机械性能的工程复合材料, 但由于其具有各向异性及增强体纤维稳定的理化性能, 使得传统金属加工方法很难对纤维增强复合材料进行高质量的加工, 特别是对于以芳纶纤维等断裂伸长率较高的纤维为增强体的复合材料, 存在较为严重的撕裂、毛刺和分层等加工缺陷。超声振动辅助加工是一种将超声振动附加在机械加工过程中的加工方式。超声振动的加入可使刀具与工件周期性接触, 减小切削阻力, 降低切削温度, 可在一定程度上提高纤维增强复合材料加工的表面质量, 减少加工缺陷。在介绍超声振动辅助技术的分类、系统组成和加工机理, 及纤维复合材料表面质量、材料去除、加工机理和加工缺陷的基础上, 从套料制孔、螺旋铣孔和轮廓铣削三类常见加工工艺方面, 论述了针对纤维复合材料的超声振动辅助切削技术的国内外研究进展。基于纤维复合材料超声振动辅助切削技术的发展状况, 从基础理论研究、材料表面改性和新加工工艺探索、超声振动加工系统的开发完善等方面, 总结了现有研究和应用中的成果及普遍存在的问题, 同时对未来研究的发展趋势做出了展望。

关键词: 纤维增强; 复合材料; 超声振动; 切削加工; 材料去除机理; 表面缺陷

中图分类号: TG663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0305-15

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.040

Overview of Ultrasonic Vibration Assisted Machining Technology on Fiber Reinforced Composites

SHI Zhen-yu¹, CUI Peng¹, LI Xin¹, WAN Yi¹, YUAN Jie², CAI Yu-kui³

(1.a.School of Mechanical Engineering, b.Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2.Licheng District Electric Power Supply Company, Jinan 250100, China; 3.Department of Design Manufacture and Engineering Management, University of Strathclyde, Glasgow G11XQ, UK)

ABSTRACT: Fiber reinforced composite materials are a kind of engineering composite materials with wide range of applications and excellent mechanical properties. However, due to the anisotropy and stable physicochemical properties of reinforcing fiber, the fiber reinforced composites are difficult to be processed by traditional metal processing methods, especially the composite materials with fiber as the reinforcing body and high elongation at break, like aramid fiber, because there are serious

收稿日期: 2018-09-18; 修订日期: 2018-11-29

Received: 2018-09-18; Revised: 2018-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51505255); 山东大学青年学者未来计划

Fund: Supported by the National Science Foundation of China (51505255) and the Fundamental Research Funds of Shandong University

作者简介: 史振宇 (1984—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为切削加工制造。邮箱: shizhenyu@sdu.edu.cn

Biography: SHI Zhen-yu (1984—), Female, Doctor, Assistant professor, Research focus: cutting & manufacturing. E-mail: shizhenyu@sdu.edu.cn

processing defects such as tearing, burring and delamination. Ultrasonic vibration assisted machining is a processing method attaching ultrasonic vibrations to the machining process. The addition of ultrasonic vibration can make the tool and the workpiece periodically contact, reduce the cutting resistance and decrease the cutting temperature, which can improve the surface quality of the fiber reinforced composite material and reduce the processing defects to a certain extent. Based on the classification, system composition and processing mechanism of ultrasonic vibration assisting technology and surface quality of fiber composite materials, material removal and processing mechanism and processing defects, the work aims to summarize the domestic and overseas research progress of ultrasonic vibration assisted cutting technology based on fiber composites from three common processing methods from nesting, spiral milling and contour milling. According to the development of ultrasonic vibration-assisted cutting technology for fiber composites, the achievements and problems in current research and application are summarized in terms of basic theory research, material surface modification, new processing technology exploration and the development and perfection of ultrasonic vibration machining system. Meanwhile, the prospects for future research are also presented.

KEY WORDS: fiber reinforced; composite; ultrasonic vibration; material removal mechanism; surface defect

纤维增强复合材料具有比强度高、比模量大、设计柔性优良、抗腐蚀性和耐久性好等特性,作为一种新型结构材料,现已广泛应用于民用和军工领域^[1-2]。但因其材料结构具有各向异性的特点,故其切削机理不同于传统金属的切削加工,已有的金属切削理论不能有效地指导纤维增强复合材料的切削加工^[3-4]。目前,广泛使用的纤维增强型复合材料主要包括玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料和芳纶纤维复合材料三大类。在加工过程中,由于加工方式不当,纤维增强复合材料容易出现诸如撕裂、毛刺、分层、热损伤等加工缺陷^[5-6],这些缺陷对于纤维增强复合材料结构件的加工质量和使用寿命会产生很大的影响^[7-8],且很难满足产品结构件高尺寸精度及高配合精度的设计需求。为提高纤维增强复合材料的可加工性,学者们分别从不同方向出发,对现有的加工方式进行了改进,并提出了新的加工方式。常用方法包括特种加工法、超低温加工法以及超声振动辅助加工法。特种加工法常见的有激光加工和磨料水射流加工。激光加工利用激光束投射到工件表面时产生的热效应来完成加工过程,适用于高精度结构件微小尺寸的加工,但是由于基体材料和增强体材料的熔沸点不同及材料内部不均质的特点,使得激光加工在大去除量的加工中容易产生较严重的表面烧伤^[9],因此多用于金属基复合材料的加工。磨粒水射流加工利用带有磨料的高压水射流对靶材进行冲击来完成加工过程,但是由于纤维的毛细现象,一些使用途径的纤维增强复合材料结构件的加工过程必须进行干切削,因而磨粒水射流加工的应用也被局限^[10]。超低温加工法常见有冷气和液氮冷却两类低温流体降温方法,极低的温度会在一定程度上改变材料的物理特性,从而提高了纤维增强复合材料的可加工性^[11-14]。但是由于冷却系统的搭建需要对加工设备进行一定改造,并且在温度降低到一定程度以下时,继续降温将不再对加工表面质量产生影响,往往只作为机械加工的一种辅助手段^[15-17]。

超声振动辅助切削加工,即将高于 15 kHz 的高

频振动施加在刀具或工件上,从而形成由刀具或工件的高速转动、进给运动和高频振动复合切削运动,是一种典型的复合加工技术。由于刀具或工件上周期性高频振动的引入,使得材料去除机理发生了改变,在切削过程中,通过机械切削作用、高频冲击作用以及超声空化作用对材料进行去除,从而改善了切削工况,降低了刀具与工件之间的摩擦系数,减少了刀具与工件的作用时间,进而减小了平均切削力,降低了切削热,延长了刀具耐用度,同时提高了加工精度和表面质量。在难加工材料的精密加工领域,超声振动铣削技术的应用日趋广泛^[18]。

1 超声振动辅助技术

超声振动辅助切削的研究始于 20 世纪 60 年代,日本是最先深入研究超声振动切削的国家。隈部纯一郎教授的专著《精密加工——振动切削基础及应用》被认为是振动切削领域的经典著作,其从振动切削的提出开始,分析了其切削特性,介绍了振动切削设备的构成,并指出在多种加工方式中施加振动辅助,有利于改善材料的加工性^[19]。

1.1 超声振动辅助加工分类

依照不同的振动方向,超声振动可划分为沿主切削力方向振动和沿进给运动方向振动。超声振动辅助切削的本质即使刀具和工件得以间断性接触,进而利用脉冲波形发生作用来进行切削。故通常情况下振动方向多为沿主切削力方向^[19-20]。在一些特殊情况下,也可以沿进给运动方向振动或两种方向复合振动,复合振动钻削如图 1 所示。例如超声振动钻削制孔时,沿进给方向的振动有助于更好地断屑和排屑,减小刀具与切屑间的摩擦^[21-23]。依照不同的振动来源,可划分为工件振动和刀具振动。在生产及专用设备中,多为刀具振动。工件振动多用于传统加工中心等不具备超声振动系统的非专用设备。

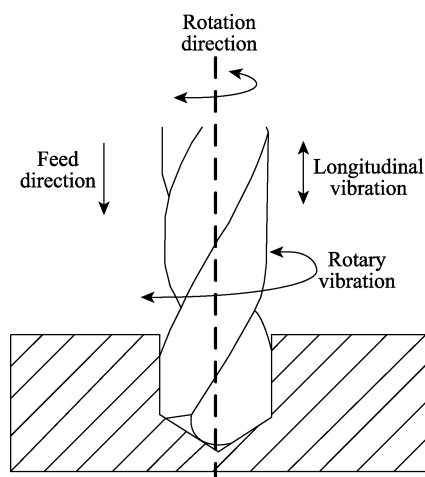


图 1 纵扭振动钻削
Fig.1 Longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic drilling

1.2 超声振动系统

超声振动辅助系统通常包括超声波电源、超声能量传输单元和超声振动单元，如图 2 所示。

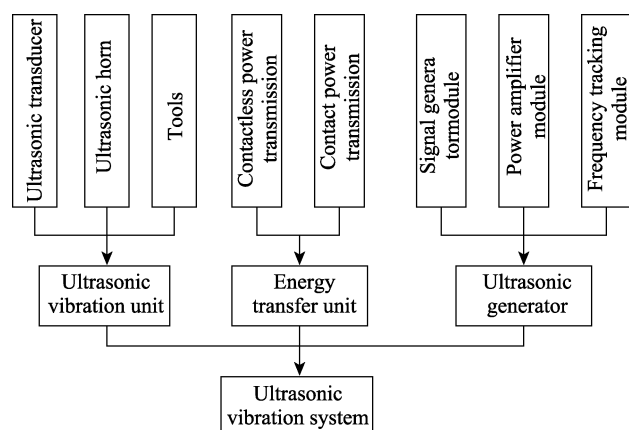


图 2 超声振动辅助系统组成
Fig.2 Composition of ultrasonic vibration assisted system

超声波电源，即超声波发生器，用于产生高频交流电信号，其激励方式有自激式和他激式两种，其中以他激式较为常用。他激式超声波电源一般包括信号发生模块和功率放大模块，有些超声波电源还有频率跟踪模块。能量传输单元用于将高频电信号传递给超声振动单元，通常有接触式和非接触式两类。其中接触式传递可用于大功率能量传输，且传递效率高^[18]。超声振动单元包含超声波换能器、变幅杆和工具三部分。超声波换能器可将高频电信号转化成高频机械振荡^[24]。由于超声波换能器产生的振幅一般不超过 0.005~0.01 mm，必须通过变幅杆将振幅放大。变幅杆可将振幅放大的原理在于通过变幅杆每一截面的能量为定值（传播损耗不计），能量密度与截面面积呈负相关，与振幅的平方呈正相关，因而截面面积逐渐

减小的变幅杆可起到放大振幅的效果^[25]。

1.3 超声振动辅助切削机理

振动切削加工提出自 20 世纪 60 年代，经过几十年的发展，各国学者和研究人员从不同角度，深层次地研究了超声振动辅助切削的机理。目前主要有以下几种观点^[19,26]。

1) 摩擦系数降低理论。静置于斜面上的物体在受到振动后会自行下滑，据此现象，很多学者认为振动能够降低相互接触材料接触面间的摩擦力或摩擦系数。针对摩擦力或摩擦系数减小的原因，目前大致有三种观点：超声振动能够降低相互接触材料间的接触应力；超声振动使得刀具与工件分离，进而切削液可充分发挥润滑作用；刀具在脱离切屑的瞬间，前刀面会形成一层极薄的氧化膜，降低了摩擦系数。

2) 剪切角增大理论。由剪切角理论可知，剪切角的大小决定第一变形区的变形范围和程度，同时影响切削力的大小。在超声振动切削中，刀具的冲击动能所引起的工件材料断裂深度要大于刀具实际切入深度，使得实际剪切角增大。

3) 工件刚性化理论。日本学者隈部纯一郎教授通过建立工艺系统振动模型，计算并分析了施加振动前后工件的稳定性，并指出在超声振动车削中，工件具有更小的动态位移，实现了与增大工艺系统刚度相同的效果。

4) 应力和能量集中理论。日本和前苏联学者认为，超声振动作用可以将切削力和切削热集中在主切削刃周边很小的范围内，可使材料晶格结构变化减小，易于得到与材料原始晶格结构近似的表层金相组织和物理特性。

5) 净切削时间缩短理论。由于超声振动切削过程中刀具与工件间歇性接触，从而实际净切削时间明显缩短。有日本学者认为，在超声振动切削时，每周期间仅有约 1/3 的时间处于切削状态，因而平均切削力以及切削热明显减小。

6) 加工硬化理论。一些专家学者指出，超声振动提高了切削状态下的瞬时切削速度，有助于塑性材料减小塑性变形并向脆性状态趋近；超声振动切削的加工硬化层较浅（应力和能量集中理论），可使切削力和切削热在一定程度上降低；适当的加工硬化可使得材料的可加工性得到改善，超声振动冲击所引发的加工硬化层较浅，通常情况下有益于提高材料的可加工性。

1.4 超声振动辅助加工的应用

超声振动加工技术已广泛应用于航空航天、精密光学仪器和医疗器械等前沿领域。在航空航天领域，振动加工技术主要应用在高温合金、钛合金及复合材料的加工中。如发动机主轴、活塞等的加工采用超声

振动车削, 工件表面质量提升可达 25%~50%, 圆度提高达 40%~50%^[27]。机翼蒙皮等复合材料结构件的制孔、飞行器观察窗口及其他重要定位面加工中采用超声振动钻削或磨削, 如采用 WC 硬质合金对钛合金材料进行超声振动钻削时, 轴向推力可降低约 20%^[28]。在精密光学仪器领域, 光学透镜、棱镜常采用超声振动磨削技术, 在使用金刚石砂轮对玻璃或蓝宝石材料进行超声振动磨削加工时, 表面质量提升可达 30%~50%, 而刀具磨损仅为常规磨削刀具磨损量的 1/15~1/10^[29]。在医疗器械领域, 淬硬钢、合金钢和陶瓷等难加工材料常用到超声振动加工, 陶瓷牙冠和关节球的超声振动磨削技术已相对成熟, 在民用领域逐渐得到应用。

2 纤维复合材料切削机理

2.1 纤维方向角、回弹现象及表面粗糙度产生机理

在纤维复合材料的切削过程中, 纤维方向角是影响切削机理的重要因素^[30-31]。通常将纤维方向角定义为切削方向与纤维方向间的顺时针夹角, 并以 θ 表示。大量研究发现, 实际切削深度和名义切削深度在切削

纤维复合材料时往往是不相同的。在实际切削中, 部分工件材料被压缩并在刀具离开后又在一定程度上发生恢复弹性变形的现象被称为切削回弹。大量测量结果表明, 切削回弹的大小与刀尖圆弧半径相关。当纤维方向 $\theta < 90^\circ$ 时, 回弹高度约等于刀尖圆弧半径; 当 $\theta > 90^\circ$ 时, 回弹高度可达刀尖半径 2 倍以上, 并与 θ 值相关。表面粗糙度除了受到纤维方向角的显著影响外, 刀具前角、切削深度也是重要的影响因素。图 3 给出加工表面粗糙度随纤维方向角 θ 的变化曲线, 可以看出, 存在一个临界角 $\theta = 90^\circ$, 当纤维方向角超过临界角度时, 表面粗糙度发生显著变化。

当切削深度小于纤维直径时, 如 $1\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度在 $\theta > 90^\circ$ 时会急剧增加, 但在 $\theta > 120^\circ$ 时又会下降。在达到临界角 90° 之前, 表面粗糙度的变化量极小, 刀具前角和纤维方向角对粗糙度的影响都非常小, 纤维方向角为 120° 时, 粗糙度变化趋势不正相关于刀具前角变化。当切削深度大于纤维直径时, 切削机理有所不同。如切削深度为 $50\ \mu\text{m}$ 时, 表面粗糙度并没有在 120° 时减小, 并且呈现出与刀具前角显著的正相关增大趋势, 表明越锋利的刀具会产生越粗糙的表面^[32]。

上述现象的产生是由于切削深度和纤维方向角的变化使得切削区域变形机理发生了改变, 如图 4 所

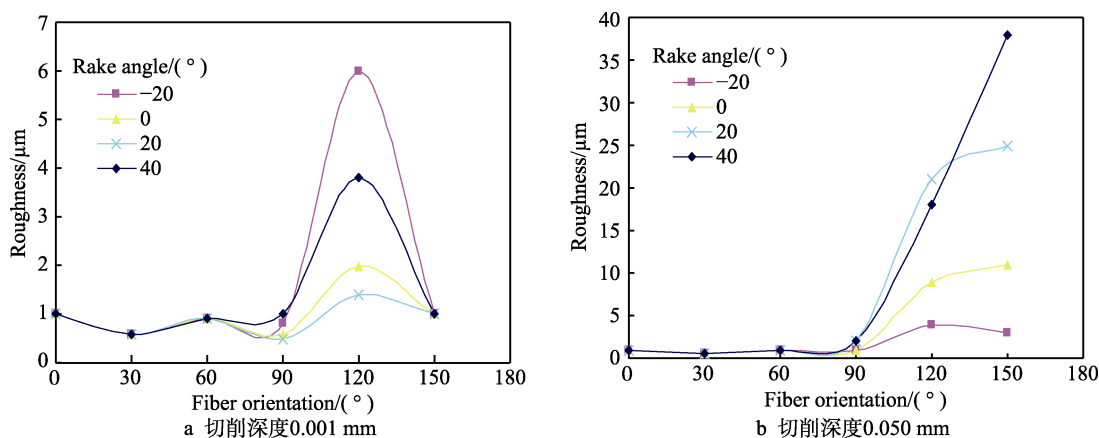


图 3 纤维方向对表面粗糙度的影响^[32]

Fig.3 Effect of fibre orientation on surface roughness: (a) Cutting depth 0.001 mm; (b) Cutting depth 0.050 mm

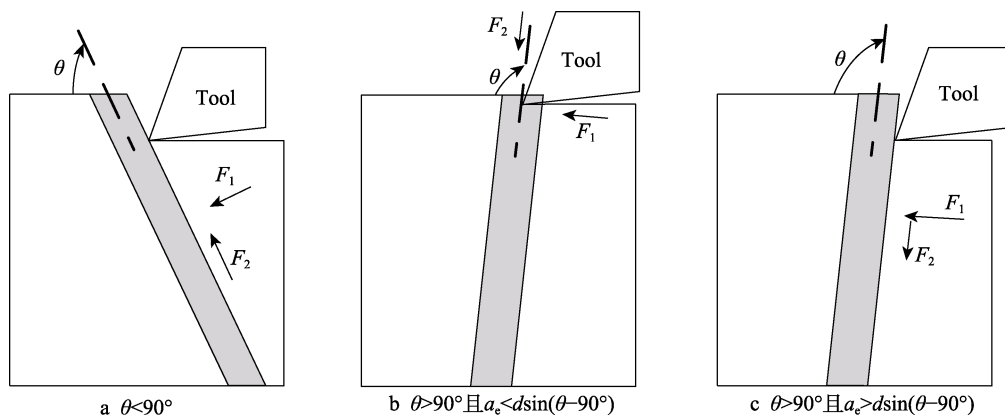


图 4 单根纤维切削模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of single fiber cutting models: (a) $\theta < 90^\circ$; (b) $\theta > 90^\circ$ and $a_c < d \sin(\theta - 90^\circ)$; (c) $\theta > 90^\circ$ and $a_c > d \sin(\theta - 90^\circ)$

示。当 $\theta < 90^\circ$ 时, 无论切削深度大小, 纤维受到刀具在垂直于纤维方向的剪切力 (F_1) 和沿纤维轴向的拉力 (F_2), 此时纤维后侧的基体可起到有效的支撑作用, 纤维易于断裂并在拉力 (F_2) 的作用下与工件分离, 这样得到的加工表面粗糙度和次表层损伤都很小。当 $\theta > 90^\circ$ 时, 切削深度很大程度上改变了切削机理。当切削深度 $a_c < d \sin(\theta - 90^\circ)$ 时, 其中 d 为纤维直径, 刀具位于纤维端面进行切削, 纤维受到刀具沿径向的推力 (F_2) 和轴向的压力 (F_1), 即使支撑纤维的基体发生破损, 纤维也不容易发生断裂, 此时的加工表面往往有许多被抽出的纤维, 致使表面粗糙度变大。当切削深度 $a_c > d \sin(\theta - 90^\circ)$ 时, 纤维受到刀具沿

纤维径向的剪切力 (F_1) 和沿轴向的压力 (F_2)。由于此时纤维获得的基体支撑作用非常有限, 并且剪切力 (F_1) 指向工件外侧, 因而会导致严重的纤维弯曲以及纤维/基体界面分离, 当刀具离开时, 被压弯的纤维发生回弹, 致使表面粗糙度大大增加, 同时伴有较严重的次表层损伤^[33]。

2.2 材料去除机理

依照图 5 所示的断裂力学的三种裂纹形式——张开型裂纹 (I 型)、滑开型裂纹 (II 型) 以及撕开型裂纹 (III 型), 对纤维复合材料切削过程中的材料去除机理进行分析。

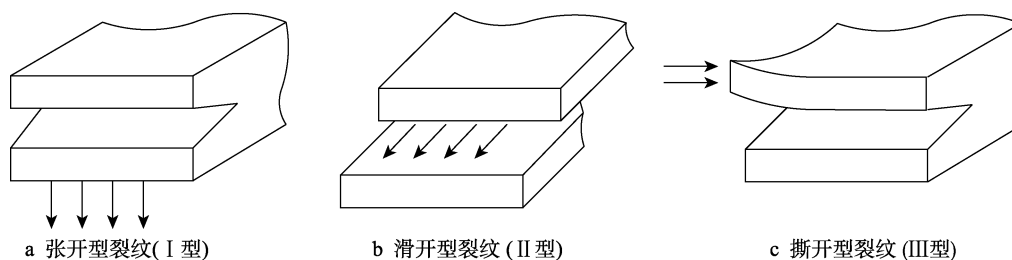


图 5 3 种裂纹产生形式

Fig.5 Production method of three forms of cracks: (a) Opening mode crack (I); (b) Sliding mode of crack (II); (c) Tearing mode crack (III)

假设刀尖锋利, 对于 0° 纤维方向, 如图 6 所示, 切削过程中纤维/基体界面发生 I 型破坏, 纤维在垂直于其轴线方向发生断裂, 切屑分离, 在此种模式下产生的裂纹沿分界面向刀尖前方扩展。对于刀尖锋利度较低的刀具, 刀具对于复合材料的挤压导致纤维成束弯曲, 即 II 型裂纹, 随之伴随有纤维/基体界面的断裂, 切屑产生。

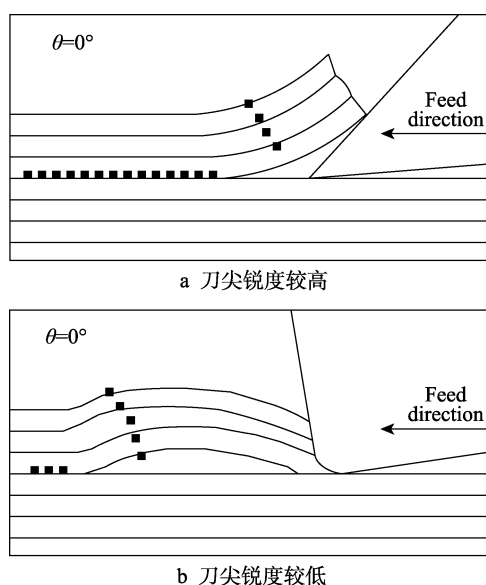


图 6 高低锐度刀具切削 0° 纤维的切屑形成机理

Fig.6 Chip formation mechanism of high and low sharpness cutters in cutting 0° fiber: (a) high sharpness cutters; (b) low sharpness cutters

当纤维方向为 90° 时, 材料首先发生 I 型断裂, 裂纹沿纤维/基体界面扩展, 然后由于纤维剪切而扩展至工件表面, 此时发生二次断裂, 如图 7 所示。同时, 刀具后刀面对于已加工表面的挤压和摩擦作用, 导致复合材料沿深度方向的裂纹加深。

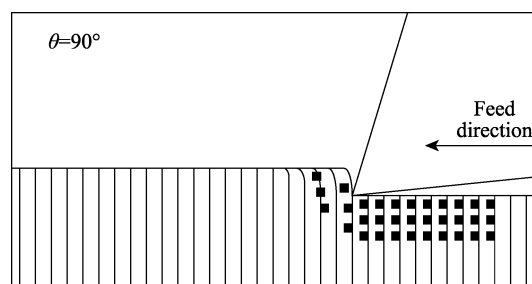


图 7 切削 90° 纤维的切屑形成机理

Fig.7 Chip formation mechanism in cutting 90° fiber

对于纤维方向角为 45° 的情况, 材料切削机理可以看作纤维的拉伸变形和剪切变形的组合, 如图 8 所示。剪切作用使纤维/基体界面先发生 I 型断裂, 剪切平面位置的纤维/基体界面在刀具作用下出现 II 型裂纹, 随之纤维发生剪切、滑移, 形成切屑。被切断的纤维在理论加工平面上发生回弹, 形成实际加工平面。此时, 材料的次表面分层已经形成, 当使用切削刃锋利程度较低的刀具时, 部分纤维会由前刀面因挤压作用运动到后刀面, 使这种次表面分层更加明显。

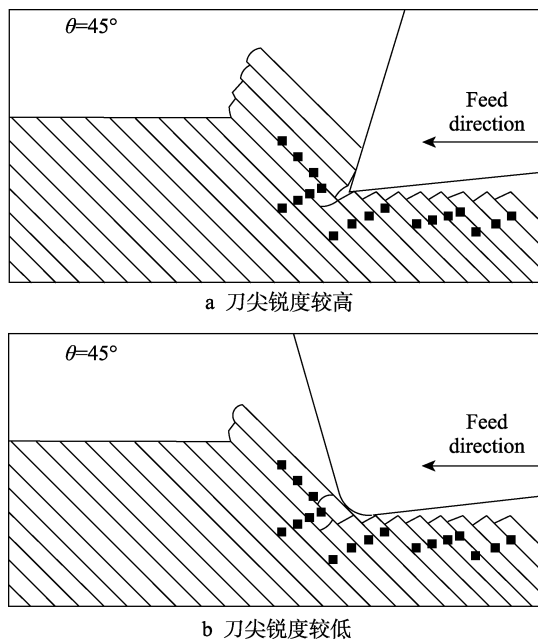


图8 高低锐度刀具切削45°纤维的切屑形成机理
Fig.8 Chip formation mechanism of high and low sharpness cutters in cutting 45° fiber: (a) high sharpness cutters; (b) low sharpness cutters

当纤维方向为135°，即-45°时，纤维在刀具推力和挤压作用下发生弯曲和折断，如图9所示。材料首先发生I型断裂，裂纹沿纤维/基体界面扩展，随着挤压过程的深入，纤维发生剪切变形，形成切屑。在纤维/基体分界面上会出现明显的次表面分层，并有显著地向工件内部扩展的倾向^[31]。

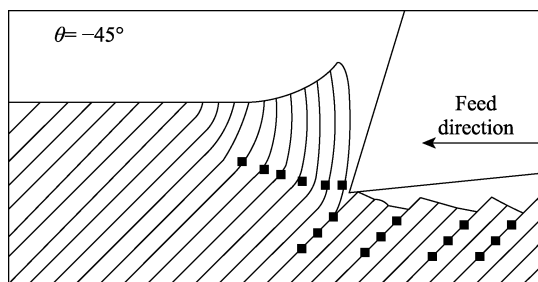
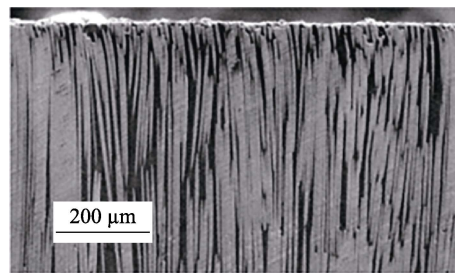


图9 切削135°纤维的切屑形成机理
Fig.9 Chip formation mechanism for cutting 135° fiber

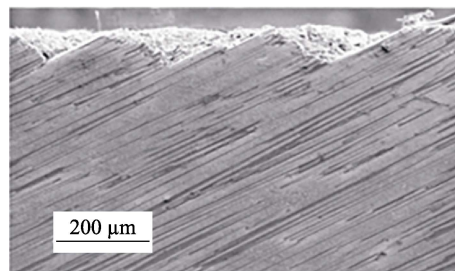
2.3 次表层损伤及加工缺陷

在恰当的切削条件下，可以得到近似无损伤的次表层，但是在另一些加工参数下，极易发生纤维脱粘和撕裂，引起次表层的损伤，如图10所示。纤维方向角和切削深度是影响次表层损伤的关键因素。通常小的切深可以在一定程度上抑制次表层的损伤，当采用大切深且纤维方向角处于120°~150°时，次表层损伤明显加重，表面粗糙度在此时同样很大^[35-36]。

关于纤维复合材料在加工过程中存在的一些加工缺陷，学者们已有了大量的研究成果，大致可归为



a 前角20°，切削深度0.100 mm，纤维方向角90°



b 前角20°，切削深度0.050 mm，纤维方向角150°

图10 次表层损伤微结构示意图^[33]

Fig.10 Schematic diagram of damaged microstructure in the subsurface^[33]: (a) Rake angle=20°, depth of cut=0.100 mm and fibre orientation=90°; (b) Rake angle=20°, depth of cut=0.050 mm and fibre orientation=150°

三大类^[37-41]：（1）机械损伤产生的缺陷，即纤维拔出和脱粘、分层、撕裂以及材料表面及次表面裂纹；（2）热损伤产生的缺陷，即基体或纤维烧伤；（3）化学损伤产生的缺陷，即基体材料缩水和纤维与基体界面的分离。

2.3.1 机械损伤

由于刀尖半径过大或基体对纤维支撑不足而使纤维不能被很好地切断，进而会形成毛刺缺陷。该缺陷在切削芳纶纤维复合材料时尤为明显，如图11所示，当使用不合理的刀具结构和切削参数时，纤维毛刺极其明显^[42-43]。

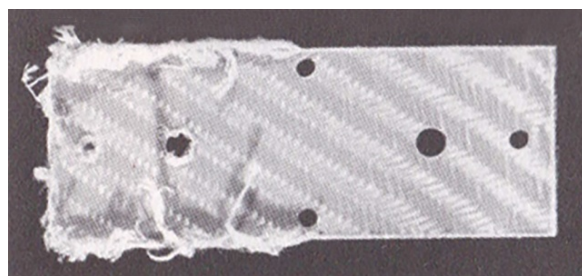


图11 不当切削参数加工芳纶纤维复合材料产生的毛刺^[43]

Fig.11 Burrs of aramid fiber composites processed by improper cutting parameters^[43]

未折断的纤维从基体中分离，从而形成了纤维脱粘缺陷。在切削刃的作用下，纤维在加工表面发生弯曲，并在刀具推力作用下，导致纤维与基体的结合力下降，最终与基体发生相对滑移，从而被抽出脱粘。

纤维拔出多发生在纤维方向角在 $105^{\circ}\sim 165^{\circ}$ 之间的范围, 纤维受力脱出造成加工表面出现凹坑^[44], 如图 12 所示。

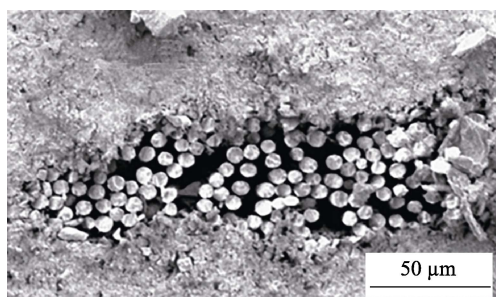


图 12 纤维拔出后表面留下的凹坑^[33]

Fig.12 Pit left on the surface after fibers are pulled out^[33]

分层缺陷主要与复合材料的叠层结构有关, 并以沿复合材料厚度方向层与层之间的分离或微裂纹的形成为主要标志^[45-46], 如图 13 所示。这种损伤形式多发生在钻削加工过程中, 特别是制孔出口的位置。钻削过程中, 分层的发生与刀具的几何结构相关, 使用左右旋铣刀或交错刃铣刀, 可使得作用于复合材料上下表面的轴向切削力指向材料内部, 从而抑制分层缺陷^[32]。

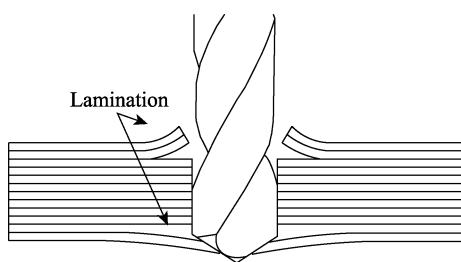


图 13 分层缺陷

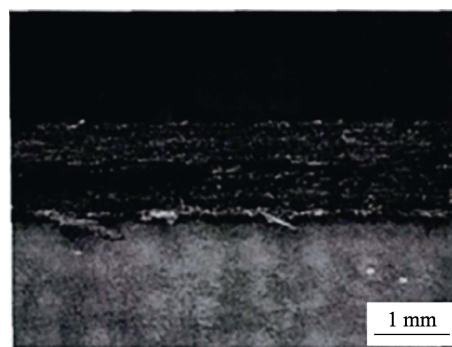
Fig.13 Lamination defect

2.3.2 热损伤

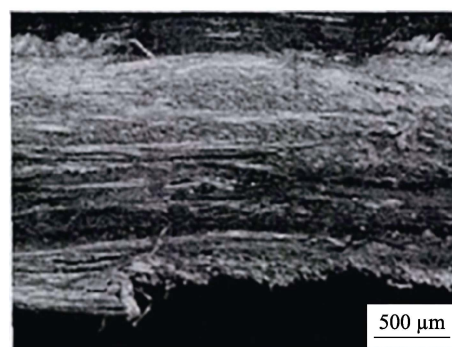
由于占复合材料体积分数半数以上的纤维的导热能力较差, 并且因纤维的毛细作用使得高质量加工过程中切削液的使用量极少, 导致在加工较封闭型腔或制孔加工中的切削热不容易导出, 从而产生局部过热, 导致材料发生热损伤^[47-49]。这种损伤可能会引起热固性基体碳化、热塑性基体熔化及纤维烧伤, 熔化的基体材料也会有部分粘结在刀具表面, 对刀具的耐用度产生极大的影响^[50-51], 如图 14 所示。这种缺陷多因较差的散热环境以及较高的切削速度而产生, 适当调整切削参数即可控制热损伤的发生。

2.3.3 化学损伤

加工过程中, 如果有切削液的使用, 可能发生化学损伤, 这取决于切削液的种类(水基或油性)和酸碱性, 材料与切削液接触的时间可能导致纤维和基体间分子键的破坏, 从而减小纤维与基体的结合力。化



a 铣削烧伤



b 钻削烧伤

图 14 烧伤缺陷^[61]

Fig.14 Burn defect^[61]: (a) Cutting burn; (b) Drilling burn

学损伤常导致纤维和基体脱粘, 这也是裂纹和分层的成因之一。采用干式切削、微量润滑或气体冷却等技术, 可有效避免此类缺陷的发生^[52]。

3 纤维复合材料超声振动技术的研究现状

日本学者 Takeyama 较早将超声振动辅助切削用于复合材料加工^[49], 研究指出, 在加工 GFRP 时, 超声辅助切削在降低切削力、提高加工表面质量等方面效果显著, 验证了超声辅助切削加工纤维复合材料的可行性。随后几十年的时间, 国内外学者围绕着超声辅助切削纤维复合材料, 在切削机理、切削力、抑制缺陷和提高表面质量等方面展开了深入研究^[53-54]。

3.1 套料钻孔

3.1.1 缺陷分析和制孔机理

因复合材料层叠的结构特性以及基体与纤维较大的力学性能差异, 使得切削过程中纤维成为载荷的主要承担者, 其材料去除过程可划分为基体损伤开裂、纤维与基体脱离、纤维断裂三个阶段^[55]。在钻孔入口处, 扭矩作用会使得工件表层材料承受较大的剪切应力, 同时因表层材料与材料整体的结合强度较低, 容易发生撕裂损伤, 引起 II 型裂纹。当钻头锋利度不足以切断成束的纤维时, 在切削力的作用下就会

造成纤维束的剥离,并沿着纤维铺层方向扩展,引起Ⅲ型裂纹,最终形成分层缺陷。当钻削过程接近制孔出口时,剩余的纤维层刚度不足以平衡钻头轴向推力,易产生较大的畸变,引起纤维层间的Ⅰ型裂纹,当轴向载荷超过层间结合强度时,裂纹加剧扩展,导致下表层分层和撕裂。

不同于传统钻削所采用的麻花钻头,为了追求更好的加工精度和表面质量,当前的纤维复合材料超声振动钻削所采用的工具多为金刚石磨粒套料钻头。在此种刀具作用下的材料去除机理基于赫兹接触理论和压入深度理论^[56-57],如图 15 所示。超声加工材料的去除过程:(a)金刚石磨粒挤压工件表面,产生塑性变形;(b)磨粒持续压入,接触表面下层产生中央裂纹;(c)中央裂纹随着磨粒的压入深度而扩

展;(d)磨粒在超声振动作用下周期性脱离工件表面,中央裂纹闭合;(e)中央裂纹周期性加载,产生横向裂纹;(f)横向裂纹扩展至工件表面,切屑脱离。

在制孔过程中,多种加工方式和运动形式参与其中。如图 16 所示,刀具的运动由主轴的回转运动、进给运动和超声轴向振动复合而成,而在材料去除中又体现了超声振动加工中锤击、磨抛、划擦等加工特性^[58-59]。

采用超声振动辅助加工有效地降低了纤维复合材料制孔时的轴向力和切向力,有效地抑制了制孔加工中易出现的分层缺陷,加之其钻磨结合的特性,更易获得较好的表面质量,制孔入口和出口常见的撕裂缺陷也得到明显改善,如图 17 所示。

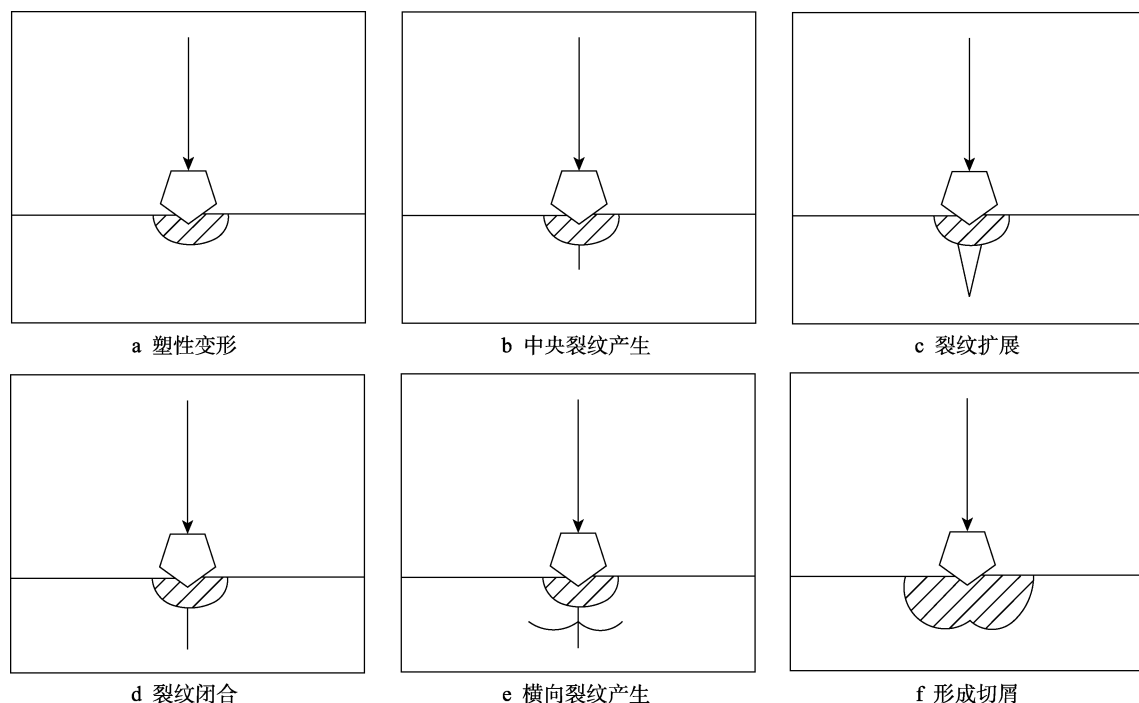


图 15 超声加工材料去除过程

Fig.15 Material removal process by ultrasonic machining: (a) plastic deformation; (b) central cracks appearance; (c) cracks growth; (d) cracks closure; (e) transverse cracks appearance; (f) formation of chip

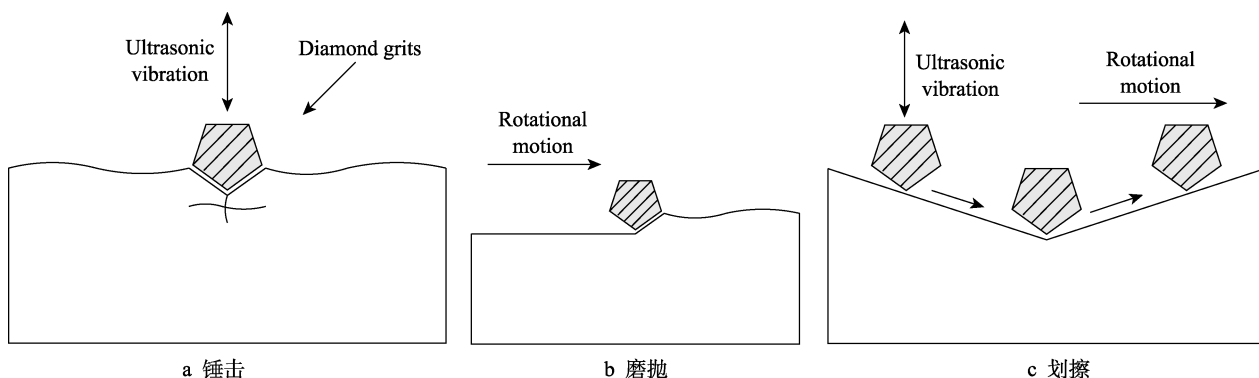


图 16 旋转超声加工材料去除机理

Fig.16 Material removal mechanism of rotary ultrasonic machining: (a) hit; (b) grinding and polishing; (c) scratch

图 17 超声加工和常规加工制孔出口质量对比^[60]

Fig.17 Comparison between the quality of hole port processed by ultrasonic and conventional machining:
(a) normal drilling; (b) ultrasonic drilling

3.1.2 钻削力研究

使用套料钻制孔时,如图 18 所示,钻头端部磨粒所受的切削力可分解为沿轴向的推力和沿线速度方向的切向力,套料钻侧壁磨粒所受的轴向推力及刮擦作用可忽略不计^[60]。

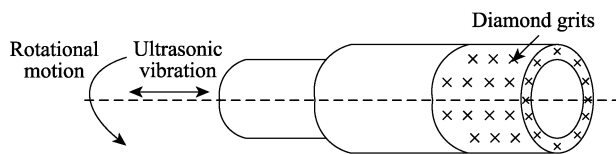


图 18 刀具磨粒受力图

Fig.18 Cutting force of diamond grits

由此推知,切削过程中,切削合力即为沿轴向的推力,总切削扭矩为刀具端面所有磨粒微元所受切向力与该微元距轴心距离乘积之和。依假设可以推知:

$$dM = k \frac{F}{A} x ds \quad (1)$$

式中: M 为切削过程中套料钻所受的总扭矩; F 为轴向总推力; A 为端面总面积; x 为面积微元距中心距离; ds 为面积微元; k 为单位面积上的动摩擦系数。对式 (1) 两边同时积分可得式 (2)。

$$M = \int_D k \frac{F}{A} x ds = \frac{2kF(R^2 + r^2 + rR)}{3(R+r)} \quad (2)$$

式中: r 为套料钻小径直径; R 为套料钻大径直径。

此外,还有学者针对芳纶纤维复合材料的制孔加工中体现出的断裂机理和特点,在套料制孔的基础上对加工工具进行改造,将套料钻的端面改为超薄锯齿,如图 19 所示,提出了切磨复合的新思路,并结合冷气作用进行了相关实验研究。实验发现,采用专用的固结磨料的套料钻孔比普通套料钻制孔,在制孔

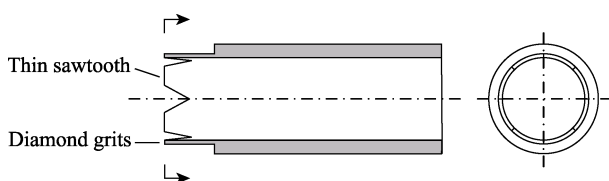


图 19 切磨复合加工制孔刀具

Fig.19 Sawing-grinding drilling tool

入口和出口处所形成的加工表面的毛刺更少,表面粗糙度更低^[61-62]。

3.2 螺旋铣孔

目前,研究普遍认为较为理想的加振方向应与主切削力方向相同,在超声振动铣削中表现为绕机床主轴的扭转振动。在沿主轴方向的纵向加振方式下,切削厚度相同时,低平均切削力可在一定程度上降低,但由于制孔的加工特性,需要较大的振幅才能实现刀具与工件的分离,在实际加工中常会引起刀具或工件的颤振,降低工艺系统稳定性,造成严重的加工缺陷^[25]。在实际的纤维复合材料振动铣削研究中,通常采用轴向扭转振动与纵向振动复合的加振方式,即纵扭共振。为了追求更高的表面质量,目前纤维复合材料螺旋铣孔多为铣磨复合加工,即在刀具后刀面通过电镀或沉积等方式固结一层磨粒,这样不仅提高了表面质量,同时有效地抑制了加工分层、表面撕裂以及次表层损伤等加工缺陷。

在螺旋铣孔工艺中,副切削刃是主要的工作刃,副切削刃与材料的接触表面是主要的工作表面。随着刀具的转动,切削过程中纤维方向角不断发生变化^[60]。据此,有学者在两个特定角度建立铣削模型,以分析其切削机理^[64-65]。

3.2.1 垂直端铣模型

端铣纤维复合材料时,垂直端铣模型如图 20 所示,扭转振动作用于副切削刃,使副切削刃携带极强的冲击动能,在冲击作用下, a、b 纤维束间基体在极短时间内达到剪切强度极限, a、b 纤维束本身并

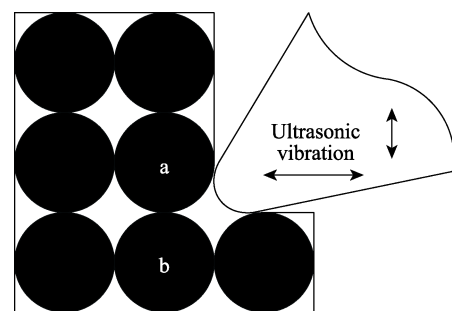


图 20 超声端铣垂直切削模型

Fig.20 Vertical cutting model for ultrasonic face milling

未在切削力作用下发生变形, a 纤维束即在基体材料的裹挟下与基体分离。副切削刃在轴向振动的作用下, 周期性与加工表面分离, 固结于后刀面的磨粒反复锤击、磨抛、划擦已加工表面, 使已加工表面变得更平整, 在一定程度上降低了回弹高度。

3.2.2 平行端铣模型

当副切削刃运动方向平行于纤维方向时, 不同于无加振状态下的切削机理, 平行端铣模型如图 21 所示, 振动冲击会使纤维/基体界面瞬时突破剪切极限而发生撕裂, 产生较大的塑性变形, 在第一切削区形成不规则的突起, 使得加工表面质量恶化。副切削刃后刀面磨粒在轴向振动作用下, 对第一变形区进行二次加工。不规则的基体和纤维凸起在磨粒反复锤击、磨抛、划擦作用下变得平整, 使得表面质量得到改善。

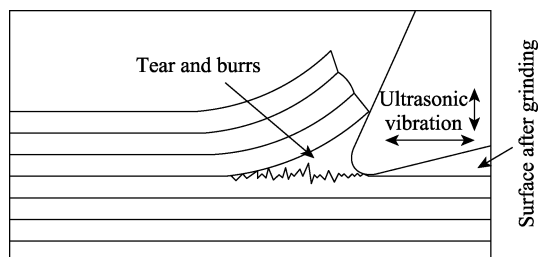


图 21 超声端铣平行切削模型

Fig.21 Parallel cutting model of ultrasonic face milling

3.3 轮廓铣磨

有学者利用电镀等方式在铣刀刀刃及后刀面固结一层磨粒, 以实现铣削加工与磨削加工同时进行^[61]。磨粒加入之后, 相当于大量微小切削刃同时发挥切削作用, 同时减小了后刀面与已加工表面的接触面积, 从而可以有效减小切削力, 而且使得切削力部分分布于后刀面的磨粒上, 进而避免了应力集中的出现^[62,66-67]。超声振动辅助铣磨外轮廓如图 22 所示。

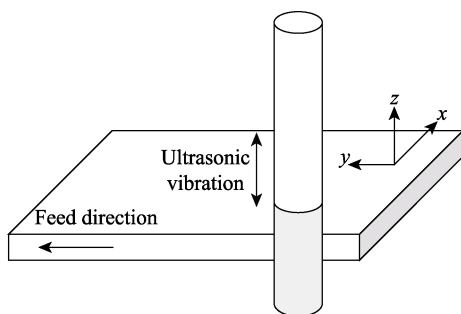


图 22 超声振动辅助铣磨加工示意图

Fig.22 Schematic diagram of ultrasonic vibration-assisted milling and grinding

在图 22 中的坐标系下, 可得刀尖磨粒的运动方程:

$$\begin{cases} x = R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) + v_{\omega} t \\ z = A \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; R 为刀具半径; f 为频率; A 为振幅; v_{ω} 为进给速度。将磨粒的空间运动轨迹投影到平面, 可得到如图 23 所示的运动轨迹。由此可以推知, 纵向紧邻的两磨粒在轴向加振的作用下, 其实际切削轨迹有一定的重叠, 这使得同一加工表面受到多磨粒的反复刮擦和磨抛, 从而得到了质量更佳的加工表面^[68]。

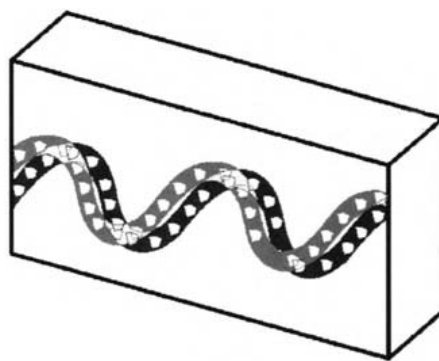
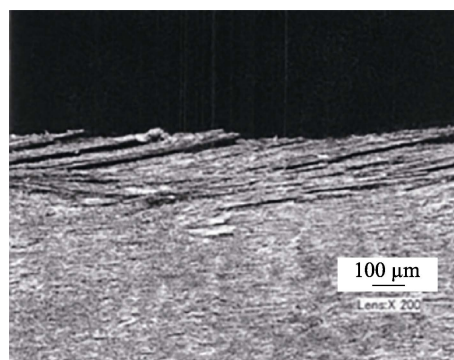


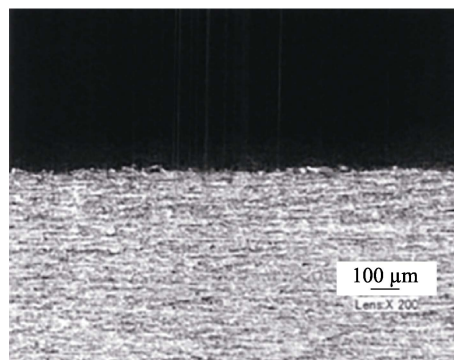
图 23 磨粒运动轨迹示意图

Fig.23 Schematic diagram of abrasive trajectory

此外, 在常规铣削过程中, 存在大量的纤维束没有被及时切断, 特别是在工件边缘等刚度不足的部位, 由于基体无法提供有效的支撑, 相对于被切断, 纤维更易被剥离, 从而在工件表层形成毛刺或撕裂损伤, 如图 24 中单向铺层碳纤维板经铣削加工后边缘



a 常规铣削



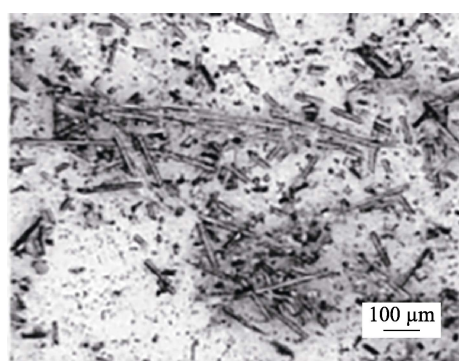
b 超声振动铣削

图 24 工件边缘形貌对比^[69]

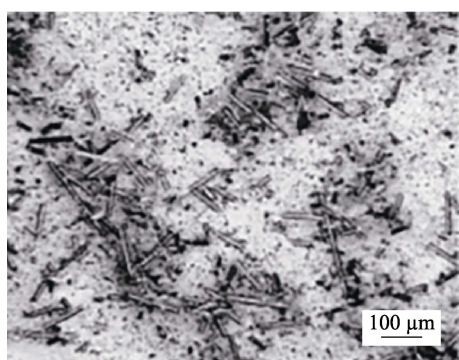
Fig.24 Contrast of the morphology of the workpiece edges^[69]: (a) normal milling; (b) ultrasonic vibration milling

出现的毛刺。而在超声振动辅助铣削加工中,纤维束在刀具的高能冲击作用下,在极短时间内吸收的动能足以破坏纤维轴向的化学键,使其发生断裂。因此,即使在原本基体支撑不足的边缘部位,也不会因纤维难以切断而产生毛刺或撕裂损伤。

图 25 为常规铣削与振动铣削分别形成的切屑中的纤维图像,普通铣削生成的切屑中含有大量的较长纤维,切削过程中,热力学作用会使树脂将纤维粘结在一起,造成切屑生长不利于排屑。加振后,铣削时产生的切屑中,纤维呈较短的状态,因而不易于堆积粘结,由此说明超声振动作用对于切屑的排除可起到积极的作用^[69]。



a 常规铣削切屑



b 超声振动铣削切屑

图 25 碎屑形貌对比^[69]

Fig.25 Contrast of the morphology of the chip:
(a) normal milling; (b) ultrasonic vibration milling

4 总结与展望

随着近些年航空航天、军工、医疗等领域对于高精度加工纤维复合材料结构件的需求不断增加,超声振动辅助切削越来越广泛地应用于纤维复合材料的加工中,这对于超声振动切削和纤维复合材料切削等基础理论研究,及加工设备和超声振动系统的稳定性和精确性,都提出了新要求。目前纤维复合材料的超声振动加工研究中存在如下问题,也包含着诸多的发展趋势:

(1) 基础理论研究仍需完善。理论基础是加工技术和实践生产发展和完善的指导,目前纤维复合材料

切削过程的断裂机理及超声振动作用对纤维切削过程的影响,已经有较为全面的总结,不同纤维方向角及其他加工参数下的加工表面形貌和切削力等指标,均可依据模型进行一定程度上的结果预测,此外还可进行加工参数优化。超声振动的加入使得原本的纤维切削机理发生相应的改变,纤维变得更易切断,因而可以获得更优的表面质量。但是,现阶段的理论模型依旧存在很多问题。大量的简化理论模型可近似地预测和反映出加工过程,但表达精度还有很大的提升空间。有限元仿真作为一种重要的数值分析法,在复合材料加工领域的应用也日趋成熟,针对不同结构复合材料的有限元分析法的研究成为了研究热点^[70-71],这将是未来的发展趋势。此外,在一些微细结构的加工中,对于超声能量的输出提出了精确的要求^[72-74],超声能量的精确控制与超声波电源功率、系统振动状态和加载工况等条件的关系,也将是未来重要的研究方向。

(2) 纤维复合材料的加工工艺仍需探索。传统的切削加工工艺在加工芳纶纤维复合材料这类高延伸率增强体复合材料时,表现出较差的可适应性,工艺参数设置稍有不当,便可能会引起极为严重的加工缺陷。超声振动辅助的加入可在一定范围内有效改善复合材料的可加工性,在制孔、轮廓铣削、磨削、铰削等加工方式下,均能有效提高加工质量。相同工况下,玻璃纤维和碳纤维复合材料比芳纶纤维复合材料更易获得较好的加工质量,加工芳纶纤维复合材料时,需要更谨慎合理地设置加工参数,以避免加工缺陷的产生。寻找表面改性的方式是一种新颖的思路,经改性的芳纶纤维表面化学结构发生变化,可降低芳纶纤维单丝的抗拉强度,同时提高其表面活性,增强纤维与基体的机械互锁性^[75-76]。经微孔发泡的基体材料具有比原始材料更优的理化及力学性能,从基体层面提供了芳纶纤维复合材料表面改性的可能^[77-78]。所以,表面改性将是下一阶段芳纶纤维复合材料切削的研究重点。

(3) 超声振动辅助铣削专用设备及系统仍需进一步开发。目前适用于纤维复合材料等难加工材料的专用超声振动辅助加工设备尚不够成熟,多数在用机床是在原有设备的基础上对主轴或工件装夹平台进行改装,加入模块化的超声振动系统,机床系统的可靠性和长期运行的稳定性还有待验证。此外,目前在用的超声振动加工中心可实现的加振方向普遍比较有限,很多时候并不能满足科研的需求。航空航天等高端制造领域对于功能强大、性能稳定的超声振动辅助加工中心有着较大的需求量。因此,研发专用超声振动辅助加工设备,也是今后高校和企业的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 石文天, 刘玉德, 张永安, 等. 芳纶纤维复合材料切削

- 加工研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 28-35.
- SHI Wen-tian, LIU Yu-de, ZHANG Yong-an, et al. Research progress on the cutting process of aramid fiber composites[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 28-35.
- [2] HOCHENG H, PUW H Y, HUANG Y. Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics[J]. Composites manufacturing, 1993, 4(2): 103-108.
- [3] 刘浩文. 碳纤维增强复合材料成形齿槽铣削试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- LIU Hao-wen. Experimental study of cogging milling on carbon fiber-reinforced plastics[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [4] 鄢国洪. 碳纤维复合材料的特性及其切削加工刀具研究[J]. 制造技术与机床, 2015(8): 93-97.
- YAN Guo-hong. Research on machining features and cutting tools of carbon fiber-reinforced plastics[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2015(8): 93-97.
- [5] 刘平. 芳纶纤维复合材料钻削实验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
- LIU Ping. Experimental study on drilling of aramid fiber composites[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016.
- [6] 胡宝刚, 杨志翔. 复合材料后加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 24-27.
- HU Bao-gang, YANG Zhi-xiang. Present situation and development trend of study on machining processing of composite materials[J]. Aerospace materials & technology, 2000, 30(5): 24-27.
- [7] 李志强, 樊锐, 陈五一, 等. 纤维增强复合材料的机械加工技术[J]. 航空制造技术, 2003(12): 34-37.
- LI Zhi-qiang, FAN Rui, CHEN Wu-yi, et al. Machining technology of fiber reinforced composite[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2003(12): 34-37.
- [8] 赵祖虎. 复合材料机械加工技术简介[J]. 航天返回与遥感, 1997(1): 57-63.
- ZHAO Zu-hu. Briefing for machining of composites[J]. Spacecraft recovery & remote sensing, 1997(1): 57-63.
- [9] 陈玲林, 孙会来. 复合材料加工研究现状及激光在其加工中的应用[J]. 激光杂志, 2014(2): 7-9.
- CHEN Ling-lin, SUN Hui-lai. The status of the composite materials processing research and application of laser in its processing[J]. Laser journal, 2014(2): 7-9.
- [10] WANG J. Abrasive water jet machining of polymer matrix composites-cutting performance, erosive process and predictive models[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 1999, 15(10): 757-768.
- [11] 荣烈润. 现代复合加工技术的发展现状[J]. 机电一体化, 2004, 10(6): 6-9.
- RONG Lie-run. The development situation of modern combined machining technology[J]. Mechatronics, 2004, 10(6): 6-9.
- [12] CONG W L, PEI Z J, DEINES T W, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP using cold air as coolant: Feasible regions[J]. Journal of reinforced plastics & composites, 2011, 30(10): 899-906.
- [13] KHAIRUSSHIMA M K N, HASSAN C H C, JAHARAH A G, et al. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fiber-reinforced plastic[J]. Wear, 2013, 302(1-2): 1113-1123.
- [14] NOR K M K, CHE H C H, JAHARAH A G, et al. Tool wear and surface roughness on milling carbon fiber-reinforced plastic using chilled air[J]. Journal of asian scientific research, 2012, 2: 593-598.
- [15] BHATTACHARYYA D, ALLEN M N, MANDER S J. Cryogenic machining of Kevlar composites[J]. Advanced manufacturing processes, 1993, 8(6): 631-651.
- [16] BHATTACHARYYA D, HORRIGAN D P W. A study of hole drilling in Kevlar composites[J]. Composites science & technology, 1998, 58(2): 267-283.
- [17] 张金豹. 芳纶纤维复合材料超低温铣削试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- ZHANG Jin-bao. Experimental study on cryogenic milling of aramid fiber composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [18] 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 Fu-jian. The development of ultrasonic assisted machining system and its application in machining of composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [19] 隈部纯一郎. 精密加工振动切削(基础与应用)[M]. 韩一坤译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- KUMABE J I. Finishing machining and vibration cutting-fundamentals and application[M]. HAN Yi-kun translated. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [20] GAN J, WANG X, ZHOU M, et al. Ultraprecision diamond turning of glass with ultrasonic vibration[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2003, 21(12): 952-955.
- [21] 高兴军, 邹平. 高温合金振动钻削断屑实验研究及机理分析[J]. 工具技术, 2010, 44(12): 7-9.
- GAO Xing-jun, ZOU Ping. Experiment research and mechanism analysis of breaking chip adopted vibration drilling on high temperature alloy[J]. Chinese tool engineering, 2010, 44(12): 7-9.
- [22] 马利杰, 刘贯军, 王贵成. 轴向振动钻削的断屑机理研究[J]. 机械设计与制造, 2009(2): 228-230.
- MA Li-jie, LIU Guan-jun, WANG Gui-cheng. Study on mechanism of breaking chip of axial vibration drilling[J]. Chinese machinery design and manufacture, 2009(2): 228-230.
- [23] 张平宽, 王慧霖, 王贵成. 轴向振动钻削过程及其切屑长度分析[J]. 应用科学学报, 2003, 21(4): 393-396.
- ZHANG Ping-kuan, WANG Hui-lin, WANG Gui-cheng. An analysis of the process of axial vibration drilling and chip length[J]. Chinese journal of applied sciences, 2003, 21(4): 393-396.
- [24] 张建华. 精密与特种加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

- ZHANG Jian-hua. Precision and special processing technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [25] 沈学会. 超声振动辅助铣削加工技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- SHEN Xue-hui. Ultrasonic vibration assisted milling technology and mechanism research[D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [26] 李祥林. 振动切削及其在机械加工中的应用[M]. 北京: 北京科技出版社, 1985.
- LI Xiang-lin. Vibration cutting and application in machining[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1985.
- [27] PUJANA J, RIVERO A, CELAYA A, et al. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2009, 49(6): 500-508.
- [28] 杨鑫宏, 韩杰才. 脆性光学材料的超声磨削实验研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 65-67.
- YANG Xin-hong, HAN Jie-cai. Experimental study on ultrasonic vibration grinding of brittle optical materials[J]. Optical technique, 2007, 33(1): 65-67.
- [29] YAN Y, BO Z, LIU J. Ultraprecision surface finishing of nano-ZrO₂ ceramics using two-dimensional ultrasonic assisted grinding[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2009, 43(5-6): 462.
- [30] 周井文. 单向铺层 CFRP 铣磨加工缺陷分析与控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- ZHOU Jing-wen. Analysis and control of machining defects during abrasive cutting of unidirectional CFRP laminates[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [31] 周井文, 陈燕, 傅玉灿, 等. 进给速度对不同纤维方向 CFRP 铣削表面形貌的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 370-377.
- ZHOU Jing-wen, CHEN Yan, FU Yu-can, et al. Influence of feed speed on surface morphology of CFRP with different fiber directions during milling[J]. Acta materiae compositae sinica, 2015, 32(2): 370-377.
- [32] DAVIM J P. Machining composite materials[M]. Philadelphia: ISTE, 2010.
- [33] WANG X M, ZHANG L C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2003, 43(10): 1015-1022.
- [34] RAO G V G, MAHAJAN P, BHATNAGAR N. Orthogonal machining of UD-CFRP composites[J]. International journal of materials & product technology, 2008, 32(2-3): 168-187.
- [35] 张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- ZHANG Hou-jiang. Study on the drilling technology of CFRP[D]. Beijing: Beihang University, 1998.
- [36] ZHANG H J, CHEN W Y, CHEN D C, et al. Assessment of the exit defects in carbon fibre-reinforced plastic plates caused by drilling[J]. Key engineering materials, 2001, 196(8): 43-52.
- [37] INOUE H, AOYAMA E, HIROGAKI T, et al. Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP[J]. Composite structures, 1997, 39(39): 55-62.
- [38] DAVIM J P, REIS P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study[J]. Materials & design, 2003, 24(5): 315-324.
- [39] KÖNIG W, GRA P. Quality definition and assessment in drilling of fiber reinforced thermosets[J]. CIRP annals manufacturing technology, 1989, 38(1): 119-124.
- [40] 李志强, 樊锐, 陈五一, 等. 纤维增强复合材料的机械加工技术[J]. 航空制造技术, 2003(12): 34-37.
- LI Zhi-qiang, FAN Rui, CHEN Wu-yi, et al. Machining technology of fiber reinforced composite[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2003(12): 34-37.
- [41] 赵祖虎. 复合材料机械加工技术简介[J]. 航天返回与遥感, 1997(1): 57-63.
- ZHAO Zu-hu. Briefing for machining of composites[J]. Spacecraft recovery & remote sensing, 1997(1): 57-63.
- [42] BUNSELL A R. Tensile and fatigue behavior of Kevlar-49 (PRD-49) fibre[J]. Journal of materials science, 1975, 10(8): 1300-1308.
- [43] DAVIM J P, REIS P. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 160: 160-167.
- [44] 张旖旎. 芳纶纤维复合材料加工过程中的热力行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- ZHANG Yi-ni. Study on thermal and mechanical behavior of aramid fiber composites during machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [45] 石文天, 刘汉良, 张加波, 等. 芳纶纤维复合材料切削加工缺陷研究[J]. 中国塑料, 2013(4): 71-74.
- SHI Wen-tian, LIU Han-liang, ZHANG Jia-bo, et al. Research on cutting defects of aramid fiber composites[J]. China plastics, 2013(4): 71-74.
- [46] WON M S, DHARAN C K H. Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2002, 124: 778-783.
- [47] KIM S C, KIM J S, YOON H J. Experimental and numerical investigations of mode I delamination behaviors of woven fabric composites with carbon, Kevlar and their hybrid fibers[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2011, 12(2): 321-329.
- [48] 邓杰. 芳纶/环氧复合材料性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(2): 6-11.
- DENG Jie. Study on the properties of aramid fibre/epoxy composites[J]. Hi-tech fiber & application, 2008, 33(2): 6-11.
- [49] 袁军堂, 马少杰, 温玉林, 等. 高强有机纤维增强聚烯烃基复合材料加工技术[J]. 机械科学与技术, 1999, 8(2): 283-285.
- YUAN Jun-tang, MA Shao-jie, WEN Yu-lin, et al. Ma-

- chining technology of high strength organic fibers reinforced polyene hydrocarbon composites[J]. Mechanical science and technology, 1999, 8(2): 283-285.
- [50] 袁军堂, 温玉林. 柔性复合材料钻孔技术[J]. 新技术新工艺, 1998(6): 12-14.
YUAN Jun-tang, WEN Yu-lin. Drilling technology for flexible composite materials[J]. New technology & new process, 1998(6): 12-14.
- [51] VENIALI F, ILIO A D, TAGLIAFERRI V. An experimental study of the drilling of aramid composites[J]. Journal of energy resources technology, 1995, 117(4): 271-278.
- [52] TAKEYAMA H, IJIMA N. Machinability of glassfiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining[J]. CIRP annals manufacturing technology, 1988, 37(1): 93-96.
- [53] SKOCZYPIEC S. Research on ultrasonically assisted electrochemical machining process[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2011, 52(5-8): 565-574.
- [54] ABDULLAH A, FARHADI A, PAK A. Ultrasonic-assisted dry creep-feed up-grinding of superalloy inconel738 LC [J]. Experimental mechanics, 2012, 52(7): 843-853.
- [55] 赵冬. C/E 复合材料制孔缺陷分析与评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
ZHAO Dong. Study on drilling damages and evaluation method of carbon/epoxy composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [56] MARSHALL D B, LAWN B R, EVANS A G. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The lateral crack system[J]. Journal of the american ceramic society, 1982, 65(11): 561-566.
- [57] 张翀. 旋转超声振动加工复合材料的切削机理及工艺技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2016.
ZHANG Chong. Rotary ultrasonic machining of composite materials: experimental, numerical, and theoretical investigations[D]. Beijing: Beihang University, 2016.
- [58] 冯冬菊. 超声波铣削加工原理及相关技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
FENG Dong-ju. Study on the principle and relevant technology of ultrasonic milling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [59] PRABHAKAR D, FERREIRA P M, HASELKORN M. An experimental investigation of material removal rates in rotary ultrasonic machining[C]//Transactions of the north American manufacturing research institution of SME 20. Dearborn: Society of manufacturing engineers, 1992: 211-218.
- [60] 袁松梅, 宋衡, 路宜霖. 旋转超声钻削碳纤维复合材料钻削力和扭矩的研究[J]. 航空制造技术, 2017, 535(16): 96-102.
YUAN Song-mei, SONG Heng, LU Yi-lin. Research for cutting force and torque in rotary ultrasonic drilling of carbon fiber reinforced polymers[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2017, 535(16): 96-102.
- [61] 庄原. 芳纶纤维复合材料切磨复合加工技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
ZHUANG Yuan. Study on the combined machining technology of sawing and grinding for aramid composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [62] 黄均亮. 芳纶纤维复合材料加工用金刚石磨粒工具的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
HUANG Jun-liang. Development of diamond abrasive tools used for machining aramid fiber composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [63] MCKINNEY J E, WU W. Relationship between subsurface damage and wear of dental restorative composites[J]. Journal of dental research, 1982, 61(9): 1083-1088.
- [64] 童志强. 纵扭共振旋转超声加工碳纤维复合材料的研 究[D]. 厦门: 集美大学, 2014.
TONG Zhi-qiang. Study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic machining of carbon fiber composites[D]. Xiamen: Jimei University, 2014.
- [65] 童志强, 皮钧. 纵扭共振旋转超声端铣碳纤维复合材料的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(3): 425-430.
TONG Zhi-qiang, PI Jun. Experimental study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic face milling of CFRP[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2016, 35(3): 425-430.
- [66] 孙树峰, 计时鸣, 谭大鹏, 等. 磨粒辅助 EDM 与 ECM 复合加工技术 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 159-164.
SUN Shu-feng, JI Shi-ming, TAN Da-peng, et al. Abrasive assisted EDM& ECM compound machining [J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(17): 159-164.
- [67] 陈日, 刘江文, 郭钟宁. 磨粒辅助电火花加工金属基复合材料实验研究[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(5): 386-391.
CHEN Ri, LIU Jiang-wen, GUO Zhong-ning. Experimental investigation on metal matrix composite of abrasive particles aided electrical discharge machining[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 34(5): 386-391.
- [68] 胡安东, 陈燕, 傅玉灿, 等. 超声振动辅助铣磨加工对 CFRP 切削力和表面质量的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 788-796.
HU An-dong, CHEN Yan, FU Yu-can, et al. Effects of ultrasonic vibration-assisted grinding on cutting force and surface quality of CFRP[J]. Acta materiae compositae sinica, 2016, 33(4): 788-796.
- [69] 任宇江. 碳纤维复合材料的超声辅助磨削加工技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
REN Yu-jiang. Study on the ultrasonic assisted grinding technology of carbon fiber reinforced plastics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [70] DANDEKAR C R, SHIN Y C. Modeling of machining of

- composite materials: A review[J]. *International journal of machine tools & manufacture*, 2012, 57(2): 102-121.
- [71] SHETTY N, SHAHABAZ S M, SHARMA S S, et al. A review on finite element method for machining of composite materials[J]. *Composite Structures*, 2017, 176: 356.
- [72] 赵蕾. 超声辅助微细钻削精密振动装置的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- ZHAO Lei. Design of ultrasonic vibration system in ultrasonic vibration assisted micro machining[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [73] 曹树军. 超声骨科钻孔装置: 中国, CN104323819 A[P]. 2015-02-04.
- CAO Shu-jun. Ultrasonic orthopedic drilling device: China, CN104323819 A[P]. 2015-02-04.
- [74] LI L, MATHIESON A, LUCAS M. A miniature surgical drill using ultrasonic/sonic frequency vibration[J]. *Physics procedia*, 2015, 70: 14-17.
- [75] 刘静, 陈勃翰, 李刚, 等. 激光改性纤维对其增强环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(12): 2708-2714.
- LIU Jing, CHEN Bo-han, LI Gang, et al. Effect of laser modified fiber on mechanical properties of fibers reinforced epoxy resin composites[J]. *Acta materiae compositae sinica*, 2017, 34(12): 2708-2714.
- [76] 戴骏, 熊玉竹, 崔凌峰, 等. 紫外辐照改性芳纶纤维的研究[J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(11): 2705-2710.
- DAI Jun, XIONG Yu-zhu, CUI Ling-feng, et al. Study on modification of aramid fiber by uvirradiation[J]. *Journal of synthetic crystals*, 2016, 45(11): 2705-2710.
- [77] 王传宝. 纤维改性聚丙烯发泡性能研究以及约束力场对泡孔生长的影响[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- WANG Chuan-bao. Investigation of the foaming behavior of PP modified by fiber and the influence of constrained field on cell growth[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [78] 段焕德. 微发泡聚丙烯复合材料力学性能的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- DUAN Huan-de. Study on mechanical preparation of micro-foaming polypropylene[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.