

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.012

振幅变化下超声振动对钻削CFRP损伤抑制的影响

朱振宇, 张旭, 张立强

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 碳纤维复合材料(CFRP)在常规的钻削加工方法中因具有较大的扭矩和轴向力,容易产生毛刺、分层等加工缺陷。超声振动辅助钻削能有效降低扭矩和轴向力,抑制分层、清除毛刺,从而提高加工表面质量。本文基于Hashin准则判定纤维损伤,Puck准则预测基体损伤,建立并通过实验验证了超声振动钻削CFRP模型。随后探究了在钻削过程中发生的损伤类型和原因,并分析了加工参数对钻削CFRP轴向力的影响。通过对麻花钻在超声振动下的运动路径进行分析,研究不同振幅下超声振动产生的间歇切削效应对钻削CFRP扭矩、轴向力和分层因子的影响。结果表明,随着主轴转速的增大和麻花钻进给速度的降低,轴向力逐渐减小。在振幅为0~12 μm 下,扭矩和轴向力随着振幅的增大而逐渐降低,但随着振幅的增加分层因子先减小后增大,在振幅为10 μm 时最小。因此当振幅为10 μm 时,超声振动同时对扭矩、轴向力和分层因子起到良好的减小效果,扭矩和轴向力分别从振幅为0 μm 时的20.06 N·mm和30.47 N下降到12.49 N·mm和18.96 N,分层因子从2.07下降到1.23,这对孔内壁缺陷起到改善作用,提高了加工表面质量。

关键词: 碳纤维复合材料; 钻削; 超声振动; 有限元分析; 分层损伤; 振幅

中图分类号: TQ320.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0099-10

Influences of ultrasonic vibration under amplitude variation on damage suppression in drilling of CFRP

ZHU Zhenyu, ZHANG Xu, ZHANG Liqiang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract : During conventional drilling processes, due to significant torque and axial forces, carbon fiber reinforced polymer composite (CFRP) is prone to machining defects such as burrs and delamination. Ultrasonic vibration-assisted drilling can effectively reduce torque and axial forces, suppress delamination, remove burrs, and improve the quality of the machined surface. In this paper, based on the Hashin criterion for determining fiber damage and the Puck criterion for predicting matrix damage, a CFRP model for ultrasonic vibration-assisted drilling was established and validated by experiment. Subsequently, the types and causes of damage occurring during the drilling process were investigated, and the influences of machining parameters on the axial forces of drilling CFRP were analyzed. By analyzing the motion path of the twist drill under ultrasonic vibration, the influences of the intermittent cutting effect generated by ultrasonic vibration on the torque, axial force and delamination factor of drilling CFRP at different amplitudes were studied. The results indicate that the axial force gradually decreases with the increase of spindle speed and the decrease of feed speed of twist drill. Within an amplitude range of 0–12 μm , both torque and axial force gradually decrease with the increase of amplitude. However, the delamination factor first decreases and then increases with rising amplitude, which is the minimum gained at an amplitude of 10 μm . Therefore, when an amplitude is 10 μm , favorable reducing effects on torque, axial force, and delamination factor are achieved simultaneously, and the torque and axial force decrease from 20.06 N·mm and 30.47 N at an amplitude of 0 μm to 12.49 N·mm and 18.96 N, respectively, while the delamination factor is reduced from 2.07 to 1.23. This ameliorates hole inner wall defects and improves the machined surface quality.

Keywords : carbon fiber reinforced polymer composite ; drilling ; ultrasonic vibration ; finite element analysis ; delamination damage ; amplitude

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375503)

通信作者: 张旭, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料加工制造等

收稿日期: 2026-02-27

引用格式: 朱振宇, 张旭, 张立强. 振幅变化下超声振动对钻削CFRP损伤抑制的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(5): 99–108.

ZHU Zhenyu, ZHANG Xu, ZHANG Liqiang. Influences of ultrasonic vibration under amplitude variation on damage suppression in drilling of CFRP[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 99–108.

碳纤维复合材料(CFRP)具有优异的力学性能,如高比强度、高比刚度、低密度、良好的耐腐蚀性等,因此,在汽车、航空航天等高科技行业得到广泛应用^[1-6]。然而,CFRP固有的非均质、各向异性、层间结合强度低、导热性差以及纤维高强度高硬度等特性,导致其在钻削加工中易产生分层、撕裂和毛刺等加工缺陷。分层是钻削过程中最常见的加工缺陷之一,分层的发生会严重影响加工后构件的承载能力^[7-8],导致其使用寿命大幅度下降。毛刺和孔内壁损伤会对其尺寸精度和装配精度构成不利影响,尤其是在航空航天等精度要求严格的应用领域^[9-10]。因此抑制CFRP钻削加工损伤来提高加工表面质量是一个挑战。

国内外研究人员以降低钻削加工损伤为目的,采用辅助加工工艺、优化工艺参数等方法来降低CFRP的钻削轴向力。在CFRP钻削过程中,加工参数是影响钻削CFRP轴向力、扭矩和加工损伤的重要因素。Romoli等^[11]研究发现,随进给量的增加,直接导致分层效应的轴向力增加。针对玻璃纤维复合材料/铝合金叠层结构制孔中易出现的毛刺、分层及撕裂等缺陷,刘东平等^[12]开展了钻孔实验研究。通过正交实验法,系统分析了主轴转速、进给量及刀具顶角等参数对制孔质量的影响规律。研究表明,合理选取工艺参数可有效抑制制孔损伤。李春奇等^[13]探讨了钻削工艺参数对CFRP/Al叠层材料制孔质量的影响规律。研究发现,降低每转进给量或提高主轴转速可有效减小钻削轴向力,而工艺参数的调整对最终制孔质量具有显著影响。因此选择合适的加工参数可以有效改善钻削性能和提高加工表面。

Ma等^[14]和Wang等^[15]研究了超声振动对麻花钻钻削CFRP复合材料的影响,发现超声振动可以减少CFRP孔的分层和毛刺,提高孔的表面质量。Shao等^[16]对振幅为10 μm 的超声振动辅助麻花钻钻削CFRP/Ti材料进行了研究,发现在孔径精度和孔表面质量方面有显著提高。Xu等^[17]在钻削CFRP/Ti叠层中施加振幅为5.16 μm 的超声振动,研究表明,当达到分离条件时,超声振动显著降低轴向力和扭矩,并改善了内孔和外孔表面形貌。目前,大多数研究人员采用实验的方法评估CFRP材料的钻削性能^[18]。然而,实验方法在充分阐明CFRP材料钻削过程中材料去除的微观机制、损伤形成过程和应力分布方面往往面临困难。为了更好地了解CFRP材

料钻削加工机理,许多研究人员采用仿真和建模技术来研究CFRP钻孔的微观机理^[19-20],而且针对CFRP制孔研究,传统实验方法存在成本高、耗时长等问题,相较之下,有限元仿真是一种高效率、低成本的研究方法^[21]。上述学者大多采用单一固定振幅来研究超声振动对钻削CFRP的影响,对不同振幅下轴向力、扭矩和分层因子的演变规律的系统探讨有待进一步研究。因此本文利用ABAQUS建立钻削CFRP模型,并在模型上施加不同振幅的超声振动来研究其对钻削CFRP轴向力、扭矩和分层因子的影响。

本文基于Hashin准则判定纤维损伤,Puck准则预测基体损伤,建立超声振动钻削CFRP模型,结合实验验证仿真的准确性。探究了不同进给速度、主轴转速等参数下扭矩和轴向力的变化,并结合超声振动运动路径选取合适的参数来实现间歇切削以进行超声振动仿真。在不同振幅下探究超声振动对扭矩、轴向力和分层因子的影响,从而选取最优的振幅用于超声振动钻削CFRP工艺中。

1 有限元分析模型

利用ABAQUS建立三维微观CFRP钻削有限元仿真模型,将工件、材料和麻花钻分别建模。麻花钻直径为3 mm,长度为5 mm,顶角为118°,螺旋角为21°,麻花钻钻头模型如图1所示。在有限元分析中,由于硬质合金麻花钻的弹性模量在500~700 GPa范围内,而CFRP层合板在主纤维方向上的弹性模量为127 GPa,故可将麻花钻视为刚体,减少了在仿真运算中的计算成本。使用SolidWorks软件创建麻花钻模型,并将CAE模型导入ABAQUS软件。

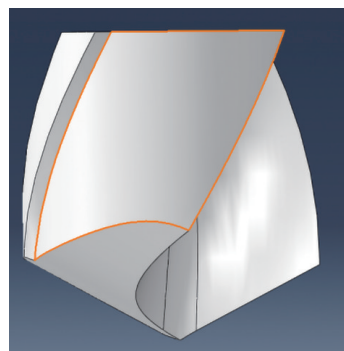


图1 麻花钻钻头模型

Fig. 1 Twist drill bit model

CFRP材料由纤维、树脂及两者形成的界面组成,有限元仿真分析所用CFRP材料属性见表1。层内和层间损伤均取自文献[22],表1所列参数包括弹性刚度、断裂能和强度。损伤演化在混合状态下基

于 Benzeggagh-Kenane 断裂能定律,对层间界面的损伤起始与演化过程进行模拟分析,以预测分层损伤的萌生与扩展行为。

表1 CFRP材料参数^[22]Tab. 1 CFRP material parameters^[22]

Parameters	Value	Parameters	Value
E_1/GPa	163	X_{1c}/MPa	1 571
E_2/GPa	9.1	X_{2t}/MPa	69
E_3/GPa	9.1	X_{2c}/MPa	203
G_{12}/GPa	4.8	S_{12}/MPa	92
G_{13}/GPa	4.8	S_{13}/MPa	92
G_{23}/GPa	3.12	S_{23}/MPa	84
ν_{12}	0.32	$G_c^{\text{ft}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	178
ν_{13}	0.46	$G_c^{\text{fc}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	178
ν_{23}	0.46	$G_c^{\text{mc}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.56
X_{1t}/MPa	2 721	$G_c^{\text{mt}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.56

Notes: E_1, E_2, E_3 are elastic moduli; G_{12}, G_{13}, G_{23} are shear moduli; $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ are Poisson's ratios; X_{1t}, X_{1c} are longitudinal tensile and compressive strengths; X_{2t}, X_{2c} are transverse tensile and compressive strengths; S_{12}, S_{13}, S_{23} are shear strengths; $G_c^{\text{ft}}, G_c^{\text{fc}}, G_c^{\text{mc}}, G_c^{\text{mt}}$ are fracture energies for fiber/matrix failure modes.

图2为麻花钻钻削CFRP层合板示意图。模型层合板厚度为5 mm,由16层单层厚度为0.312 5 mm的材料组成,铺层顺序为 $[0^\circ]_4/[90^\circ]_4/[0^\circ]_4$,利用局部坐标系的方法分别定义各单层铺层方向,准确模拟层合板的材料行为^[23]。

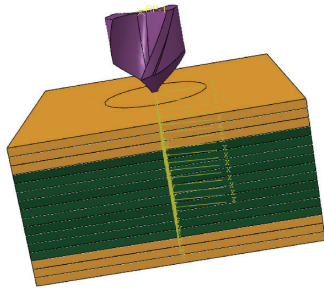


图2 钻削CFRP层合板

Fig. 2 Drilling of CFRP Laminate

1.1 网格划分和载荷施加

对于麻花钻头,为避免网格划分使单元网格出现畸形,每个铺层采用8节点线性六面体单元(C3D8R)表示,针对在钻孔区域附近的C3D8R单元,采用细化网格的方法得到更精确的结果。为了减少计算的时间,在有限元模型的不同区域使用不同的网格尺寸。在钻孔区域附近使用 $0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ mm}$ 的平面网格,在远离钻孔区域使用 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的粗网格。图3为麻花钻与层合板网格划分示意图。

与普通钻削相比,超声振动钻削的刀具钻削速度发生了变化,载荷的施加可以借助ABAQUS模块

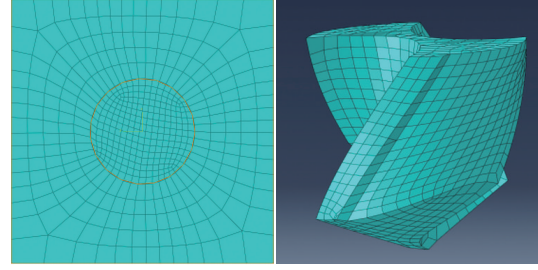


图3 层合板和麻花钻网格划分图

Fig. 3 Mesh generation diagram of laminate and twist drill

中的周期性幅值曲线进行定义。首先,对麻花钻刀具编辑边界条件,在分析步 Step-1 中选取类型为速度/角速度,释放 VR3 并输入麻花钻的刀具转向速度,接着再在分析步 Step-1 中选取类型为速度/角速度,释放速度 V3 值设定为1,振幅选用自定义幅值,自定义为周期性幅值。圆周频率的值为 $2\pi F$, F 为振频,如振动频率为30 kHz的值应该为188 400。初始幅值对应普通钻削的进给速度,幅值系数 A 的值通过 $2\pi\omega_m A_m$ 进行求解,其中 ω_m 为麻花钻角速度, A_m 为超声振动的振幅。

1.2 损伤失效判定

采用宏观均值化方法建立CFRP有限元模型,用VUMAT子程序定义材料本构关系,模型结合Hashin和Puck失效准则的优势:采用Hashin准则判定纤维损伤,Puck准则预测基体损伤。同时考虑纤维和基体拉伸及压缩失效模式,采用的判定公式见式(1)和式(2)。这种混合失效准则更能准确地模拟CFRP钻削过程中的复杂损伤行为。

碳纤维 Hashin 失效准则^[23]见式(1)。

$$\begin{cases} \left(\frac{\sigma_{11}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11}}{S_{23}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11}}{S_{13}} \right)^2 = 1, d_{\text{ft}} = 1, \sigma_{11} \geq 0 \\ \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1c}} \right)^2 = 1, d_{\text{fc}} = 1, \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

树脂基体 Puck 失效准则^[23]见式(2)。

$$\begin{cases} \left(\frac{\sigma_{11}}{2X_{1t}} \right)^2 + \frac{\sigma_{22}^2}{X_{2t}X_{2c}} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{23}} \right)^2 + \sigma_{22} \left(\frac{1}{X_{2t}} + \frac{1}{X_{2c}} \right) = 1, \\ d_{\text{mt}} = 1, \sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0 \\ \left(\frac{\sigma_{11}}{2X_{1t}} \right)^2 + \frac{\sigma_{22}^2}{X_{2t}X_{2c}} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{23}} \right)^2 + \sigma_{22} \left(\frac{1}{X_{2t}} + \frac{1}{X_{2c}} \right) = 1, \\ d_{\text{mc}} = 1, \sigma_{22} + \sigma_{33} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ 和 σ_{12} 是单元积分点处应力在不同方向上的分量; $d_{\text{ft}}, d_{\text{fc}}, d_{\text{mt}}$ 和 d_{mc} 分别是与纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸和基体压缩破坏模式相关的损伤变量; X_{1t} 和 X_{1c} 为沿纤维方向上的纵向拉伸

和压缩破坏应力; X_{21} 和 X_{2c} 为垂直于纤维方向上的横向拉伸和压缩破坏应力; S_{11} 、 S_{12} 和 S_{13} 分别对应CFRP单层板面内不同方向的剪切破坏应力。

模型中的层间损伤通过cohesive单元模拟,损伤初始条件判定见式(3),即当界面应力状态满足式(3)的条件时,即判定层间损伤开始发生。

$$\left(\frac{t_n}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

式中: t_n 、 t_s 和 t_t 分别表示cohesive单元法向和两个切向的应力分量; t_n^0 、 t_s^0 和 t_t^0 则为相应方向的极限强度。

该准则综合考量法向拉伸、面内剪切和横向剪切三种失效模式及其耦合效应,可精确预测分层损伤的起始与扩展,为CFRP钻削分层损伤模拟提供可靠方法。

1.3 有限元模型验证

为验证有限元模型的准确性,实验采用东丽T800SC级碳纤维板进行钻削,与上文仿真中采用的CFRP材料参数同属于T800级碳纤维复合材料,具有良好的材料一致性。CFRP板尺寸为100 mm×50 mm×5 mm。实验平台为高精度超声铣磨复合加工机床,该机床型号为GJJG-XM30,最大磨削直径为50 mm,最大磨削孔深为50 mm。实验时将直径为3 mm的麻花钻安装在三爪万能卡盘上。实验设备与钻头如图4所示。将测力仪放置在夹具下方,测力仪与计算机连接,采用双通道采集轴向力与扭矩,将采集的信息传送到计算机上。

实验钻削参数与仿真钻削参数保持一致,分别在进给速度为200、350、500 mm/min,主轴转速为

6 000 r/min时进行实验,并记录实验中的轴向力与扭矩数据。

图5为在进给速度为200、350、500 mm/min时的实验和有限元仿真的轴向力与扭矩的平均值,仿真值与实验随进给速度变化规律一致,即轴向力与扭矩随着进给速度的增大而增大。进给速度为500 mm/min时,仿真与实验的轴向力误差最大,但仅为14.2%,进给速度为350 mm/min时,仿真与实验的扭矩误差最大,但仅为13.09%,即该模型可以较为准确地预测CFRP的轴向力与扭矩。

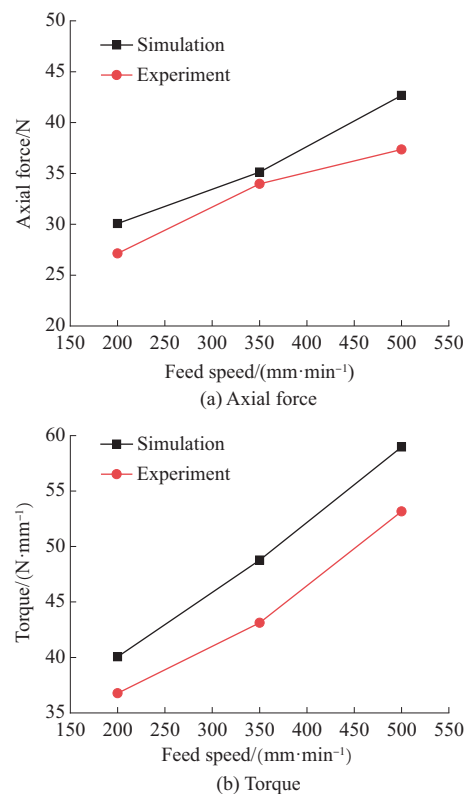


图5 仿真与实验轴向力扭矩对比图

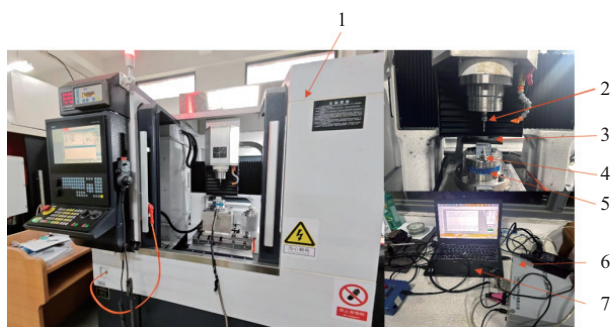
Fig. 5 Comparison of simulated and experimental axial force and torque

2 结果与讨论

2.1 钻削过程及分析

为了探究钻削过程中发生的损伤类型和原因,在2.1节对钻削CFRP过程中轴向力的变化进行分析,钻削过程中的轴向力变化图如图6所示。

轴向力的研究是了解CFRP复合材料麻花钻钻削性能的基本方法。在钻削CFRP过程中,轴向力、扭矩是造成表面缺陷的主要原因。由图6看出,在进给速度为200 mm/min和主轴转速为6 000 r/min时,麻花钻钻削过程分为三个阶段。在ab阶段时,麻花钻刚接触CFRP材料,轴向力迅速增大达到最大值,直到钻头完全进入材料。此阶段主要是横刃



1—High-precision ultrasonic milling and grinding composite machine tool; 2—Three-jaw universal chuck; 3—CFRP laminate; 4—Specialized fixture; 5—Dynamometer; 6—Charge amplifier; 7—Dedicated computer

图4 高精度超声铣磨复合加工机床

Fig. 4 High-precision ultrasonic milling and grinding composite machine tool

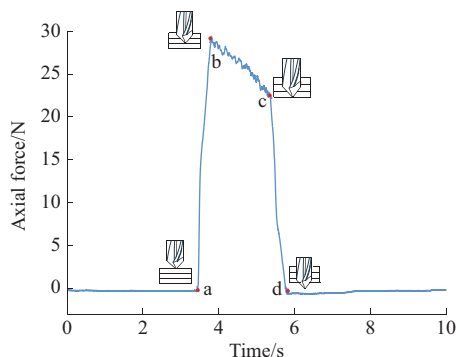


图6 在进给速度为200 mm/min和主轴转速为6 000 r/min时轴向力变化图

Fig. 6 Axial force variation diagram at a feed speed of 200 mm/min and spindle speed of 6 000 r/min

在钻削过程中参与加工,钻头中心的横刃因其较大的负前角和较低的切削速度,几乎不具备切削能力,它的主要作用是对CFRP材料进行挤压。在横刃的高应力挤压下,此阶段发生入口的分层损伤,入口的损伤主要是推出式分层,相对柔软的树脂基体首先发生压溃和微裂纹,下方的碳纤维在轴向压力下发生弯曲和弹性变形,直到其应力超过强度极限后被剪断或撕裂。随着钻头下行,主切削刃开始接触材料。主切削刃的切削作用远高于横刃,可有效地切割纤维。此时,轴向力的构成开始从纯粹的横刃挤压,转变为“横刃挤压+主切削刃轴向分力”的复合状态。在bc阶段时,轴向力缓慢下降,直到钻头接触材料底部。在此阶段是横刃与切削刃同时参与加工,横刃持续产生向下的挤压力,主切削刃在切削时,其受力可以分解为沿切削方向的力和轴向力。主切削刃以剪切的方式切断碳纤维和树脂。在cd阶段时,钻头钻出材料,轴向力迅速减小,由于下降速度很快,会对出口产生冲击。出口的分层发生在麻花钻钻穿阶段,此时被切削材料的剩余刚度降低到一定水平,轴向载荷超过层间结合强度,导致剥离式分层发生。如此可见轴向力是影响出口分层的关键因素。

2.2 加工参数对钻削CFRP轴向力的影响

在钻削过程中,刀具结构和加工参数是影响CFRP轴向力、扭矩和加工损伤的重要因素,其中加工参数是影响最大的因素。针对这一观点,实验研究了不同参数下钻削CFRP时轴向力的变化规律。

在振幅为3 μm 、振频为30 kHz的实验条件下分别研究主轴转速和进给速度对轴向力的影响。在钻削CFRP过程中,过低的主轴转速无法有效地

切断坚硬的碳纤维,会使加工质量变差。CFRP中的树脂基体对温度非常敏感,过高的主轴转速会导致切削区产生大量的摩擦热,而CFRP的导热性差,热量无法迅速散出,会积聚在加工区域。进给速度也是决定钻削效率的关键因素。过高的进给速度会使钻头每转的进给量变大,发生分层损伤,也会使得钻头来不及有效切断纤维,使得加工质量变差。过低的进给速度意味着钻孔时间成倍增加,完全不符合工业化生产对效率的要求。因此选择在主轴转速为2 000~10 000 r/min和进给速度为200~600 mm/min时进行实验。

以进给速度为500 mm/min为例,改变主轴转速来观察轴向力的变化,结果如图7所示。

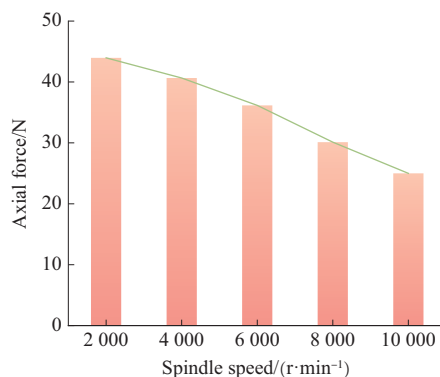


图7 不同主轴转速的轴向力变化图

Fig. 7 Variation of axial force with different spindle speeds

当振频、振幅和进给速度一定时,轴向力随着主轴转速的增大而减少,两者为反比关系。当主轴转速为2 000 r/min时,轴向力为43.96 N,当主轴转速为4 000、6 000、8 000、10 000 r/min时,轴向力分别为40.66、36.16、30.12、25 N,相比主轴转速为2 000 r/min时分别下降7.5%、17.7%、31.5%和43.1%。这是由于随着主轴转速的增加,麻花钻对被切削材料的应变率效应与材料的去除方式改变,当麻花钻的主轴转速较低时,钻头前进的速度相对缓慢,对碳纤维的挤压和撕裂作用更明显,纤维会发生较大的弯曲和分层,对其损伤更大。而随着主轴转速的提高,钻头切削刃以极高的速度冲击纤维,纤维来不及发生较大的弯曲就被快速切断,所需的力相对较小,材料的损伤较小。

以主轴转速6 000 r/min为例时,改变进给速度来观察轴向力的变化,结果如图8所示。

当振频、振幅和主轴转速一定时,轴向力随着进给速度的增大而增大,两者为正比关系。当进给

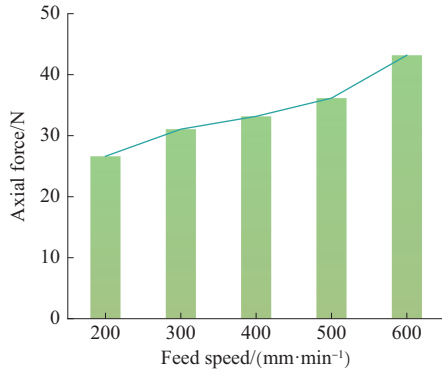


图8 不同进给速度的轴向力变化图

Fig. 8 Variation of axial force with different feed speeds

速度为 200 mm/min 时,轴向力为 26.62 N,进给速度为 600 mm/min 时,轴向力为 43.19 N,增加 62.2%。进给速度是钻头每分钟在轴向运动的距离,进给速度越大,意味着单位时间内钻头需要切除的材料体积越大。而切除更多的材料必然需要做更多的功,也就是说需要更大的轴向力和扭矩。并且随着进给速度的增加,切削厚度急剧增大。这与切削几何中的进给量 f 有关,具体见式(4)。

$$f = \frac{v_n}{n_n} \quad (4)$$

式中: v_n 为麻花钻的进给速度; n_n 为麻花钻的主轴转速。

在主轴转速 n_n 保持不变的前提下,提高进给速度 v_n 会导致每转的进给量 f 成比例增大,进给量 f 为麻花钻每个切削刃在每一转中切除材料层的厚度,进给量增大,切削刃在每一转切除材料层的厚度增大,这就需要更大的轴向力来完成。综上所述,后续将用进给速度为 200 mm/min、主轴转速为 10 000 r/min 的加工参数进行仿真研究。

2.3 麻花钻超声振动钻削行为分析

研究超声振动中麻花钻的运动路径,钻孔过程如图 9a 所示。在超声振动中麻花钻的运动路径由进给运动、主轴转动和 Z 轴方向的超声振动组成。因此,麻花钻在坐标系上对于 CFRP 层合板的瞬时位置表示为式(5)。

$$\begin{aligned} x_0(t) &= \frac{d}{2} \cos\left[\theta_m - \frac{2\pi(i-1)}{N}\right] \\ y_0(t) &= \frac{d}{2} \sin\left[\theta_m - \frac{2\pi(i-1)}{N}\right] \\ z_0(t) &= -v_n \frac{\theta_m}{\omega_m} + A \cos\left(\frac{F\theta_m}{n_n}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ω_m 为麻花钻角速度; N 为齿数; θ_m 为角位移; d 为钻头直径; i 为刀尖数; A 为超声振动振幅; F

为超声振动振频; n_n 为主轴转速; $x_0(t)$ 、 $y_0(t)$ 、 $z_0(t)$ 分别表示为坐标系上麻花钻对于层合板的瞬时位移。

图 9b 为麻花钻宏观运动路径,图 9c 和图 9d 分别为超声振动钻削(UAD)、常规钻削(CD)中麻花钻路径放大图。

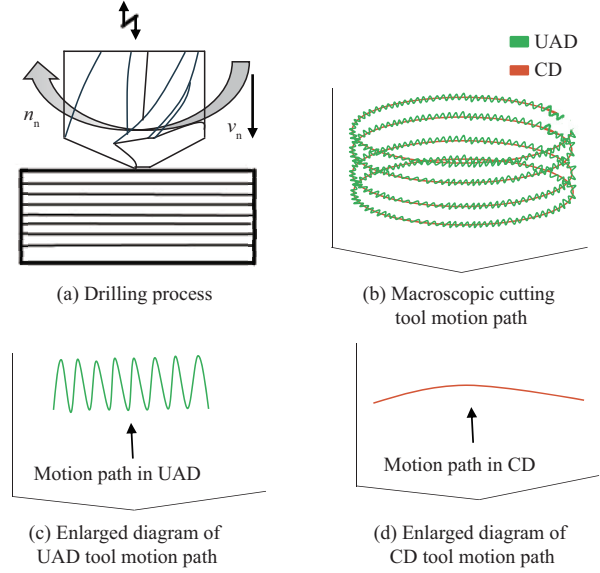


图9 超声振动中麻花钻的运动路径

Fig. 9 Motion path of twist drill in ultrasonic vibration

如图 9b 所示,在宏观上 UAD 和 CD 并无明显差异,但在放大图(图 9c 和图 9d)中可以看出,UAD 的麻花钻运动路径呈周期性正弦曲线,而 CD 中麻花钻运动路径为圆弧曲线。这一现象说明当切削刃与被切削材料交替接触和分离时,可以实现间歇切削,这会使轴向力和扭矩大幅度降低。由于加入了超声振动辅助,对毛刺的产生会有一定的改善作用,使加工表面更加光滑,提高表面质量。

但是,并不是任意的钻削条件都可以满足间歇切削模式。为分析相邻切削刃之间的相对运动关系,将圆周运动沿切削速度方向展开为切向坐标 x ,则切削刃的轴向位移 $z_n(x)$ 表示为式(6)。

$$z_n(x) = A \sin\left[\frac{2\pi Fx}{v_c} + \varphi(N-1)\right] + \frac{N-1}{2} f \quad (6)$$

式中: $v_c = \frac{\pi d n_n}{60}$ 表示为切削速度, f 为每转进给量, φ 为相邻两条运动路径之间的相位差。

对于麻花钻的齿数 $N=2$,定义相邻两条运动路径之间的相位差为 φ ,则计算公式见式(7)。

$$\varphi = 2\pi \left[\frac{30F}{n_n} - \text{INT}\left(\frac{30F}{n_n}\right) \right] \quad (7)$$

式中:INT为取整函数,直接截取整数部分。

在超声振动中切削厚度 Δh 可表示为式(8)。

$$\Delta h = \begin{cases} 0, & Z_n(d, t) > Z_{n-1}(d, t) \\ Z_{n-1}(d, t) - Z_n(d, t), & Z_n(d, t) \leq Z_{n-1}(d, t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z_n 和 Z_{n-1} 表示相邻两条切削刃的轴向位移。

从式(8)中看出切削厚度不是一个常数,当 Δh 为0时,麻花钻与被切削材料产生分离效果,可实现间歇切削。单个齿的进给量 f_r 见式(9)。

$$f_r = \frac{f}{N} \quad (9)$$

当齿的进给量 f_r 大于4倍的振幅时,相邻两条运动路径之间不相交。麻花钻的齿数 N 为2,因此当每个齿进给速度小于等于振幅的两倍时可实现间歇切削[式(10)]。

$$\frac{f}{2} \leq 2A \quad (10)$$

将相邻的两条运动路径作为临界状态,通过改变主轴转速来改变相位差,而相位差不合适不会产生间歇切削模式。设第 n 条运动路径与第 $n-1$ 条运动路径相切,切点为 x_i ,可得式(11)。

$$\begin{cases} Z'_n(x_i) = Z'_{n-1}(x_i) \\ Z_n(x_i) = Z_{n-1}(x_i) \end{cases} \quad (11)$$

式中: Z' 表示切削刃沿展开方向的轴向瞬时速度。

将式(11)代入式(6)中得到式(12)。

$$\begin{cases} \sin\left[\frac{2\pi F}{v_c} x_i + (N-1)\varphi\right] - \sin\left[\frac{2\pi F}{v_c} x_i + (N-2)\varphi\right] = \frac{f}{2A} \\ \cos\left[\frac{2\pi F}{v_c} x_i + (N-1)\varphi\right] - \cos\left[\frac{2\pi F}{v_c} x_i + (N-2)\varphi\right] = 0 \end{cases} \quad (12)$$

对式(12)求解得到式(13)。

$$\varphi = \pm \arccos \sqrt{1 - \left(\frac{f}{4A}\right)^2} \quad (13)$$

综上所述,实现间歇切削模式的条件见式(14)。

$$\begin{cases} \frac{f}{2} \leq 2A \\ \pi - 2\arccos \frac{f}{4A} \leq \varphi \leq \pi + 2\arccos \frac{f}{4A} \end{cases} \quad (14)$$

当施加的超声振动中的振幅、振频满足公式(14)时,即施加的超声振动符合实现间歇切削的条件,则会产生间歇切削。麻花钻和CFRP材料产生交替的接触和分离,这使UAD中的一个振动周期可以分为持续切削时间和持续非切削时间。由于切削时间的减少,UAD的平均轴向力和平均扭矩小于

CD,这显著降低了轴向力和扭矩,改善了钻削产生的损伤。所以选用超声振动辅助加工来研究钻削CFRP的损伤抑制效果。

2.4 不同振幅下钻削CFRP仿真结果分析

通过上文对钻削CFRP过程的分析可得,分层损伤分为入口损伤和出口损伤,钻削CFRP时出口剥离损伤相比于入口损伤来说更加严重,所以降低出口损伤对钻削加工CFRP有很大的作用。分层损伤的程度用分层因子来表示,计算方法见式(15)。分层损伤示意图如图10所示。

$$F_d = \frac{d_{\max}}{d} \quad (15)$$

式中: F_d 为分层因子; d 为麻花钻钻头直径; $d_{\max}$ 为分层缺陷区域内,位于孔圆心最外处对应点的直径,其值为该点与圆心距离的2倍。

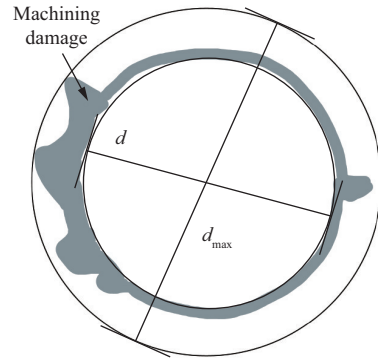


图10 分层损伤示意图

Fig. 10 Schematic diagram of delamination damage

测量轴向力和扭矩是了解CFRP钻削性能的基本方法。较大的扭矩意味着切削过程不顺畅,导致碳纤维被撕裂、剥离,这会使孔壁粗糙,严重影响孔的加工质量。扭矩对出口损伤也有较大的影响,高扭矩会通过加剧刀具磨损和使刀具产生扭动,从而使分层损伤加剧。因此研究钻削时的轴向力、扭矩和分层损伤对加工CFRP有较为积极的影响。由上述实验分析可知,提高主轴转速和降低进给速度对钻削CFRP有显著影响,故选取振频为30 kHz、进给速度为200 mm/min、主轴转速为10 000 r/min,针对0~12 μm 不同的振幅来探究超声振动对轴向力、扭矩和分层损伤的影响。将进给速度为200 mm/min,主轴转速为10 000 r/min,振频为30 kHz和不同振幅(0~12 μm)分别代入式(14)得到满足产生间歇切削条件,从而实现间歇切削。

图11为不同振幅下扭矩和轴向力变化规律图。根据图11仿真结果可知,扭矩随着振幅的提高而逐

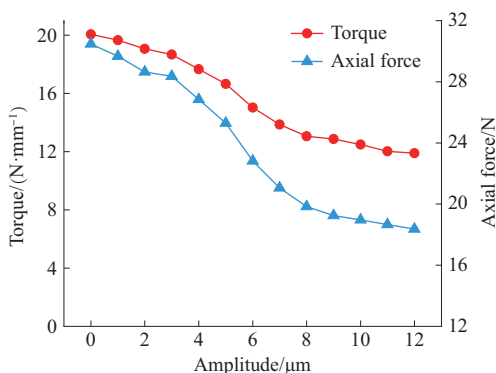


图11 扭矩和轴向力随振幅变化图

Fig. 11 Variation of torque and axial force with amplitude

渐降低。在不施加UAD时(即振幅为0时),钻削CFRP扭矩为20.06 N·mm,当振幅为12 μm时,扭矩为11.9 N·mm,减小效果最明显,大约下降了40.67%。这是由于超声波的高频振动,UAD具有瞬时切削速度高和能量大等切削特性,这会提高麻花钻的锋利程度,有利于对碳纤维的高效切削^[24],麻花钻与被切削材料之间的摩擦力减小,从而使材料扭转的幅度减小,有利于减小扭矩,减小麻花钻的磨损。随着振幅的增大,间歇切削效应逐渐增强,麻花钻与被切削材料产生周期性接触和分离,而钻削时扭矩的一部分是由麻花钻与孔壁之间摩擦产生的力矩构成的,分离瞬间,麻花钻与被切削材料之间的摩擦力为零,从而会使平均扭矩降低。

轴向力同样也随着振幅的增加而逐渐降低,当不施加超声振动时,轴向力的大小为30.47 N,当振幅为12 μm时,轴向力降低为18.37 N,大约下降了39.71%。这是由于超声振动的引入,产生了间歇切削,麻花钻和被切削材料实现接触和分离,这使得钻削过程中持续切削时间变短,从而降低了平均轴向力。随着振幅的增加,间歇切削效应逐渐增强,平均轴向力逐渐降低。

图12为不同振幅下分层因子变化规律图。在不引进超声振动时,出口处的分层因子为2.07,但引入超声振动后,在振幅为1~10 μm时,出口处的分层因子随着振幅的增加而逐渐减小,在振幅为10 μm时,分层因子最小为1.23,大约降低了40.58%。超声振动的间歇切削特性有助于平均轴向力的降低,但由于超声振动的引进会使轴向力的变化很大,当振动方向与钻削方向一致时,轴向力会瞬间增大,在瞬时的基础上,超声振动会使瞬时最大轴向力增加,随着振幅的增大,瞬时最大轴向力也会增大,更容易诱发分层,所以在振幅为10~12 μm时,分层因

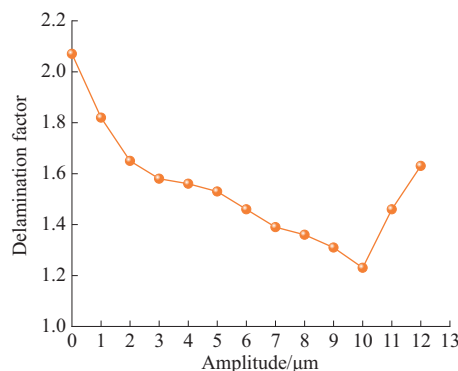


图12 分层因子随振幅变化图

Fig. 12 Variation of delamination factor with amplitude

子逐渐增大。因此为了防止瞬时最大轴向力的增加,建议不要显著提高振幅值。研究发现,在超声振动振幅为10 μm时,超声振动同时对轴向力、扭矩和分层因子起到较好的减小效果,其中轴向力和扭矩分别下降到18.96 N和12.49 N·mm。

2.5 超声振动对孔内壁的影响

在不同加工工艺(CD和UAD)下孔侧面的加工质量也有不同。上文分析了在振幅为10 μm下超声振动同时对扭矩、轴向力和分层因子产生了良好的减小效果,因此本节在振幅为10 μm下研究超声振动对孔内壁的影响。在不施加超声振动时,高速钻削CFRP时,麻花钻与材料之间的切削力过大,碎屑不能有效排除,导致了孔内壁出现明显的缺陷。当施加了超声振动时,孔内壁的加工质量得到改善。这是由于超声振动的施加,产生了间歇切削效应,降低了麻花钻与CFRP之间的切削力,促进了切屑的排出,减少了摩擦。

图13是CD和UAD条件下不同时间间隔的内壁应力分布图。在CD过程中,钻削CFRP时,产生的应力分布比较集中,主要集中在麻花钻附近。内壁的加工质量缺陷主要是由这种应力集中产生的。而在振幅为10 μm的超声振动下,孔内壁的应力分布均匀性得到改善。有效降低了麻花钻在加工CFRP时产生的局部应力集中,抑制了孔内壁缺陷的产生。

3 结论

(1)加工参数是影响钻削CFRP的重要因素,轴向力随着麻花钻进给速度的增大而增大,随着主轴转速的增大而减小,采用低进给高转速有利于减小轴向力,改善钻削产生的损伤,提高加工质量。

(2)通过分析麻花钻在超声振动的运动路径,在主轴转速为10 000 r/min、进给速度为200 mm/min

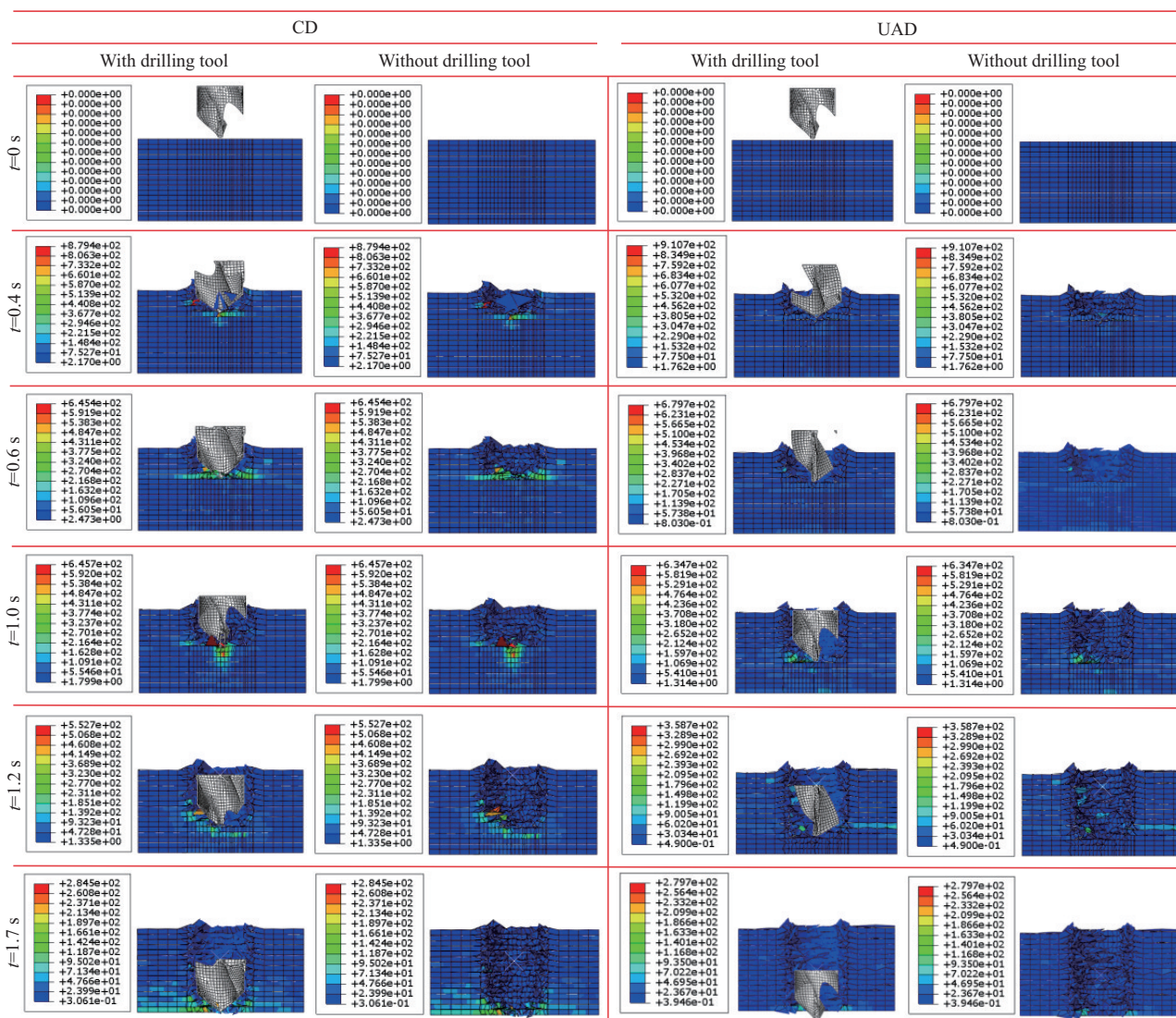


图13 不同时间间隔的CD和UAD下内孔壁剖面图应力模拟结果(单位:MPa)

Fig. 13 Cross-sectional stress simulation results of inner hole wall under CD and UAD at different time intervals (unit: MPa)

时,施加振幅为0~12 μm 的超声振动,对钻削产生的扭矩、轴向力和分层因子进行深入分析。研究发现,扭矩和轴向力都随着振幅的提高而逐渐降低,而随着振幅的增加出口处的分层因子先减小后增加,在振幅为10 μm 时,分层因子最小,为1.23,而在振幅为10~12 μm 时,分层因子又逐渐增大。因此,在超声振动振幅为10 μm 时,超声振动同时对扭矩、轴向力和分层因子起到较好的减小效果。与振幅为0 μm 时相比,分层因子大约降低了40.58%,扭矩和轴向力分别从20.06 $\text{N}\cdot\text{mm}$ 和30.47 N 下降到12.49 $\text{N}\cdot\text{mm}$ 和18.96 N ,减小效果显著。

(3)通过分析钻削过程中孔内壁的应力分布情况,发现施加振幅为10 μm 的超声振动,内壁应力集中得以改善,从而提高了孔内壁的加工质量。

参考文献

- [1] 余海燕,贺宏伟,邢萍.考虑不同刚度退化模式的碳纤维增强复合材料失效模型开发[J].机械工程学报,2024,60(2):197-208.
YU Haiyan, HE Hongwei, XING Ping. Development of carbon fiber reinforced plastic failure models considering different stiffness degradation modes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024,60(2):197-208.
- [2] 郑欣,刘荣海,初德胜,等.高导热环氧树脂及碳纤维增强复合材料的制备与性能研究[J].当代化工研究,2022(24):73-75.
ZHENG Xin, LIU Ronghai, CHU Desheng, et al. Preparation and properties study of high thermal conductive epoxy resin and its carbon fiber reinforced composites[J]. Modern Chemical Research, 2022(24):73-75.
- [3] YASHIRO T, OGAWA T, SASAHARA H. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 70:63-69.

- [4] SANTIUSTE C, SOLDANI X, MIGUÉLEZ M H. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(3):691–698.
- [5] MAHDI M, ZHANG L C. A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113(1-3):373–377.
- [6] GE J, CATALANOTTI G, FALZON B G, et al. Towards understanding the hole making performance and chip formation mechanism of thermoplastic carbon fibre/polyetherketoneketone composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 234. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109752.
- [7] MISHRA R, MALIK J, SINGH I, et al. Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in unidirectional glass fiber reinforced plastic laminates[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(6):2 790–2 795.
- [8] GAITONDE V N, KARNIK S R, RUBIO J C, et al. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 203(1-3):431–438.
- [9] ASMAEL M, SAFAEI B, ZEESHAN Q, et al. Ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: A review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113:3 079–3 120.
- [10] 徐锦尧. 碳纤维增强树脂基复合材料钻削缺陷研究进展[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(22):24–33.
- XU Jinyang. Research advances in drilling-induced defects of carbon fiber reinforced polymers[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(22):24–33.
- [11] ROMOLI L, LUTLEY A H A. Quality monitoring and control for drilling of CFRP laminates[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 40:16–26.
- [12] 刘东平, 申林远, 朱亚蓉, 等. 玻璃纤维复合材料与铝合金叠层低损伤制孔工艺参数研究[J]. *航空精密制造技术*, 2017, 53(6): 5–8.
- LIU Dongping, SHEN Linyuan, ZHU Yarong, et al. Research on low damage drilling process parameters of glass-fiber composite and aluminum alloy stacks[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2017, 53(6):5–8.
- [13] 李春奇, 康晓峰, 杨浩骏, 等. 加工参数对 CFRP/Al 叠层材料制孔质量的影响[J]. *机械制造与自动化*, 2016, 45(3):42–46.
- LI Chunqi, KANG Xiaofeng, YANG Haojun, et al. The influence of cutting parameters on the hole quality in CFRP and Al stacked material[J]. *Machine Building & Automation*, 2016, 45(3):42–46.
- [14] MA G F, KANG R K, DONG Z G, et al. Hole quality in longitudinal-torsional coupled ultrasonic vibration assisted drilling of carbon fiber reinforced plastics[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2020, 15(4):538–546.
- [15] WANG C H, LI P N, LI S J, et al. Influence of longitudinal-torsional ultrasonic vibration on drilling carbon fiber-reinforced polymer composite[J]. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(9):6 849–6 862.
- [16] SHAO Z Y, JIANG X G, LI Z, et al. Feasibility study on ultrasonic-assisted drilling of CFRP/Ti stacks by single-shot under dry condition[J]. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(1):1 259–1 273.
- [17] XU M R, CAO L C, LI J X, et al. Experimental, modeling, and numerical simulation of ultrasonic assisted drilling of CFRP/Ti stacks[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 133:97–117.
- [18] YAZMAN Ş, GEMI L, MORKAVUK S, et al. Investigation of the effect of symmetrical hybrid stacking on drilling machinability of unidirectional CFRP, GFRP and hybrid composites: Drilling tests and damage analysis[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 187. DOI:10.1016/j.composites-a.2024.108486.
- [19] HE Y L, LI L, WAN M, et al. Three-dimensional finite element simulations of milling carbon/epoxy composites[J]. *Composite Structures*, 2022, 282. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.115037.
- [20] JAMES S, NARKHEDE M. Analytical modeling and experimental study on machining of CFRP/Ti stacks with submerged abrasive waterjet machining[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 34: 328–334.
- [21] XI Y, BERMINGHAM M, WANG G, et al. Finite element modeling of cutting force and chip formation during thermally assisted machining of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(6). DOI:10.1115/1.4025740.
- [22] DIVSE V, MARLA D, JOSHI S S. 3D progressive damage modeling of fiber reinforced plastics laminates including drilling-induced damage[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 163. DOI:10.1016/j.compositesa.2022.107230.
- [23] PHADNIS V A, MAKHDUM F, ROY A, et al. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 47:41–51.
- [24] HO-CHENG H, DHARAN C K H. Delamination during drilling in composite laminates[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1990, 112(3):236–239.