基于细观仿真建模的 CFRP 纵-扭超声铣削材料去除机理研究

张 超[1] 任莹晖[1,2*] 于晓琳[1] 李茂君[2] 余承阳[2] 杜新亮[1]
1.沈阳理工大学机械工程学院,沈阳,110159
2.湖南大学机械与运载工程学院,长沙,410082

摘要:为揭示碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)纵-扭超声振动铣削材料去除机理,展开了 CFRP 细观切削仿真研究。分析了纵-扭超声振动铣削运动学特性,建立了 CFRP 材料三维细观切削模型。仿真对比了传统切削与纵-扭超声振动切削在不同纤维方向角下的纤维去除机制、基体损伤、切屑形态及切削力。结果表明,0°纤维方向角时,纵-扭超声振动冲击特性加速了纤维弯断进程,刃口去除纤维机制由传统碾压转变为划擦;45°和 90°纤维方向角时,冲击作用增强了切削刃对纤维的剪切效果,90°纤维方向角时剪切效果更显著;135°纤维方向角时,纤维去除机制由大面积弯断转变为局部断裂。纵-扭超声振动铣削有利于抑制基体损伤,改善切屑形态,减少切削区域热量积累,减小平均切削力。最后通过实验验证了仿真分析的准确性。

关键词:碳纤维增强树脂基复合材料;纵-扭超声振动;细观仿真;材料去除机理;纤维方向角
中图分类号:TH162;V258
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.013 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Material Removal Mechanism of CFRP in Longitudinal-torsional Ultrasonic Milling Based on Mesoscopic Simulation Model

ZHANG Chao[1] REN Yinghui[1,2*] YU Xiaolin[1] LI Maojun[2] YU Chengyang[2] DU Xinliang[1]
1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159
2.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: In order to reveal the material removal mechanism of CFRPs in longitudinal-torsional ultrasonic vibration milling, a simulation study of CFRP mesoscopic-cutting was carried out. The kinematic characteristics of longitudinal-torsional ultrasonic vibration milling were analyzed, and a 3D mesoscopic-cutting model of CFRPs was established. The fiber removal mechanism, matrix damage, chip morphology and cutting force of conventional cutting and longitudinal-torsional ultrasonic vibration cutting were compared under different fiber orientation angles. The results show that when the fiber orientation angle is 0°, the longitudinal-torsional ultrasonic vibration cutting impact characteristics accelerate the fiber bending processes, and the fiber removal mechanism at the cutting-edge changes from conventional rolling to scratching. When the fiber orientation angle is 45° and 90°, the impact characteristics enhance the shear effects of the cutting-edge on the fiber, especially when the fiber orientation angle is 90°. When the fiber orientation angle is 135°, the fiber removal mechanism changes from large area bending to local fracture. Longitudinal-torsional ultrasonic vibration milling is beneficial to restrain matrix damage, improve chip morphology and reduce heat accumulation in the cutting areas and decrease the average cutting forces. The experiments verify the accuracy of the simulation analysis.

Key words: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); longitudinal-torsional ultrasonic vibration; mesoscopic simulation; material removal mechanism; fiber orientation angle

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)因强度高、质量小、耐腐蚀和抗疲劳性好等优势,在航空航天、汽车制造及医疗等领域得到了广泛应用[1]。为满足特定应用需求,CFRP 构件常采用赋形、固化等一体化工艺制造。为保证零件的尺寸精度和装配要求,常需要对其进行铣削、钻削等二次加工[2-3]。CFRP 材料宏观上表现非均质、各向异性及叠层结构等

收稿日期:2024-05-07
基金项目:国家自然科学基金(52075161, 52275422)

复杂特性，细观上由纤维、树脂及界面多相组成，导致切削过程中极易出现毛刺、分层和撕裂等加工损伤，影响其服役性能[4]。现有研究表明，纵-扭超声振动铣削能有效降低切削力，显著提高工件加工质量并减小刀具磨损[5-6]。纵-扭超声加工已成为 CFRP 构件铣边和钻孔切削研究领域热点[7-8]，切削机理研究可为其工艺优化提供理论支撑。

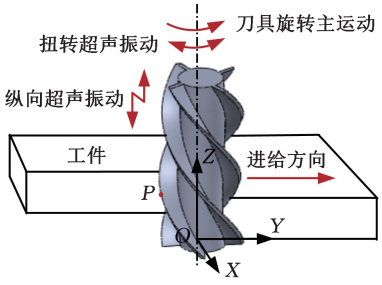
与各向同性、均质材料不同，CFRP 的切削机理研究需要特别关注纤维方向角对纤维破坏、基体损伤及切屑形成的影响。齐振超等[9]构建了三维多相 CFRP 直角切削模型，分析了不同纤维方向角下 CFRP 基体和纤维的失效形式、切屑形成过程等。YAN 等[10]建立了单向 CFRP 三维微观正交切削模型，分别对纤维、基体和界面进行建模，模拟了纤维断裂、基体开裂和纤维与基体脱黏相关的失效机制。ABENA 等[11]采用不同的界面模拟方法对不同纤维方向角下切屑形成机制与界面损伤进行了模拟。WU 等[12]基于 ABAQUS 建立了 CFRP 二维细观切削模型，分析了不同刃口半径下切削力、材料去除过程和面下损伤的变化规律。上述研究主要集中于传统切削方式，CFRP 材料纵-扭超声振动切削过程中材料去除机理与损伤形成机制仍待进一步明晰。

国内外学者对难加工材料的纵-扭超声振动切削机理展开了大量研究。LI 等[13]对高体分 SiCp/Al 复合材料进行纵-扭超声振动铣削，并对切削刃轨迹进行了分析，结果表明，纵-扭超声振动铣削独特的冲击与分离特性在提高工件表面质量方面具有明显的优势。闫艳燕等[14]对 TC4 钛合金纵-扭超声振动单颗磨粒去除过程进行有限元仿真，探究了磨削过程中的力热耦合机理。MA 等[15]应用纵-扭超声振动辅助钻削 CFRP 材料，发现切削刃变向剪切作用有助于纤维的剪切断裂，从而减少毛刺和分层。因为纵-扭超声振动的时空特性使得切削刃与工件之间产生周期性切削-分离状态，故 CFRP 材料去除机理不仅与材料本身特性有关，也与切削运动特性有关。

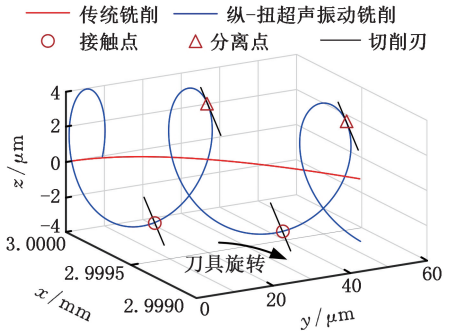
本文在分析纵-扭超声振动铣削运动学特性基础上，考虑 CFRP 非均质、各向异性等特点，建立 CFRP 三维多相细观切削仿真模型，模拟仿真研究不同纤维方向角下传统切削与纵-扭超声振动切削对 CFRP 材料去除机理和切削力的影响。

1　纵-扭超声振动铣削运动学特性

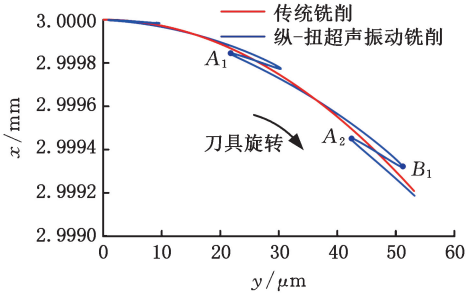
纵-扭超声振动铣削运动学特性如图 1 所示。刀具与工件间的接触运动如图 1a 所示，加工过程中，刀具除了进行自身的旋转和进给运动外，同时要进行沿刀具轴向的纵向超声振动和绕刀具周向的扭转超声振动。本文将图 1a 中坐标系 $OXYZ$ 固定在工件上，定义垂直于加工表面方向为 X 方向，刀具进给方向为 Y 方向，刀具轴线方向为 Z 方向。对立铣刀切削刃上 P 点进行运动学分析，可将纵-扭超声振动铣削切削刃运动轨迹描述为



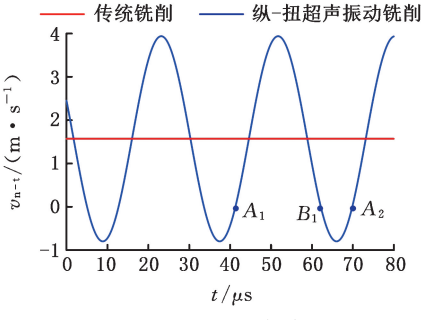
(a) 纵-扭超声振动铣削示意图



(b) 纵-扭超声振动铣削切削刃轨迹



(c) 扭振方向轨迹特征



(d) 扭振方向速度特征

图 1　纵-扭超声振动铣削运动学特性

Fig.1　Kinematic characteristics of longitudinal-torsional ultrasonic vibration milling

$$\left.\begin{aligned} x(t) &= R\cos\left(\frac{2\pi nt}{60}+\frac{\lambda A}{R}\cos(2\pi ft+\varphi_t)\right)\\ y(t) &= v_f t+R\sin\left(\frac{2\pi nt}{60}+\frac{\lambda A}{R}\cos(2\pi ft+\varphi_t)\right)\\ z(t) &= A\sin(2\pi ft+\varphi_l)\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中：t 为时间，s；R 为铣刀半径，mm；n 为主轴转速，r/min；λ 为扭纵比；A 为纵振振幅，mm；f 为超声频率，Hz；v_f 为进给速度，mm/s；φ_t、φ_l 分别为扭振和纵振相位角。

纵-扭超声振动铣削过程中，纵振周期性增大刀具轴向切削刃与工件间的接触压力，强化切削刃切削作用；扭振使得切削刃绕刀具周向高频扭转，增加切削刃与工件间的相对速度变化，实现变速切削[16]。扭振方向切削刃角速度为主轴旋转速度与扭振速度的叠加，故扭振方向切削刃速度 $v_{n\text{-}t}$ 可表示为

$$v_{n\text{-}t}=R\left(\frac{2\pi n}{60}-\frac{2\lambda A\pi f}{R}\sin(2\pi ft)\right) \tag{2}$$

当 $n>60\lambda Af/R$ 时，切削刃与工件在扭振方向的相对切削速度始终为正，不会出现刀具与工件分离，但是切削刃相对于工件仍存在变速切削特性。当 $n<60\lambda Af/R$ 时，切削刃周期性高频“分离-接触”式切削工件，图 1b 所示为该条件下 P 点运动轨迹。图 1c 与图 1d 分别展示了 P 点扭振方向上的运动轨迹及其速度特征。切削刃从 A_1 到 B_1 过程中，切削刃高速冲击工件，切削刃与工件相对速度先增大后减小。到达 B_1 位置时，两者相对速度降为零，此时，刀具转速与扭振速度平衡。随着切削过程的继续，切削刃与工件分离，两者的相对速度变为负值。当切削刃到达 A_2 位置时，一个完整的切削周期结束。而传统切削过程中，刀具以恒定切削速度持续切削工件。基于上述纵-扭超声振动铣削运动学分析，建立 CFRP 纵-扭超声振动细观切削仿真模型，深入研究“分离-接触”切削方式下，纵-扭超声振动切削冲击与分离特性对材料去除机理的影响。

2 切削过程细观建模

2.1 几何建模及边界条件

由于细观切削尺度远小于实际，故将铣削过程简化为正交切削。CFRP 纵-扭超声振动细观切削模型见图 2。工件模型主要由纤维、基体和界面三部分组成，模型中假设单根纤维直径为 7 μm，相邻纤维层间距为 10 μm。纤维与基体网格单元类型为 C3D8R，网格尺寸为 1 μm。通过定义纤维与基体之间的接触来实现界面相。纤维方向角 θ 为刀具切削方向逆时针转至纤维延伸方向所形成的夹角。本文分别构建 0°、45°、90°和 135°四种典型纤维方向角下的 CFRP 细观模型，探究 CFRP 纵-扭超声振动切削材料去除机制。假设刀具材料为硬质合金，切削过程中不考虑刀具的变形与磨损，将其设置为刚体，并且在刀具上设置参考点 RP。网格单元类型设为 C3D8R，刀具与 CFRP 的接触类型设为库仑摩擦，摩擦因数设为 0.3。

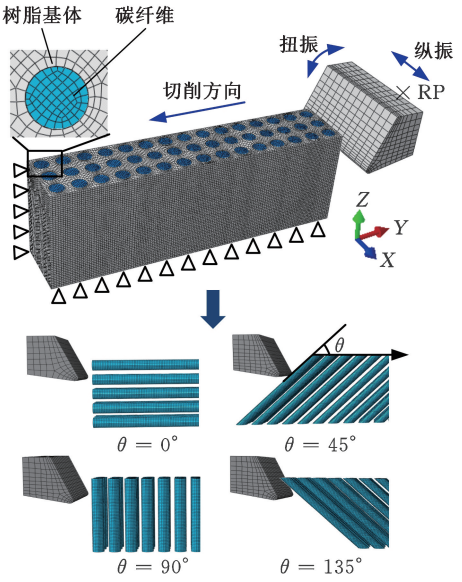


图 2 CFRP 纵-扭超声振动细观切削模型

Fig.2 Mesoscopic model of CFRP longitudinal-torsional ultrasonic vibration cutting

为保证切削过程中工件稳定，将工件模型的底部与远离切削的区域完全约束（U1＝U2＝U3＝UR1＝UR2＝UR3＝0）。通过在刀具参考点 RP 上添加速度函数控制刀具移动来实现纵-扭超声振动切削。此外，在不影响计算精度的情况下加入了质量缩放。

2.2 材料本构模型及其失效准则

碳纤维被定义为脆性材料，纤维轴向（1 方向）与纤维径向（2 方向）力学性质存在明显差异，故将碳纤维按照正交各向异性材料处理[17]。碳纤维的本构模型不含塑性变形阶段，满足失效准则后发生断裂，不涉及损伤演化过程。采用最大应力准则来判断纤维损伤起始[10]。

纤维纵向拉伸破坏（$\sigma_1\geqslant 0$）的失效判据可表示为

$$|\sigma_1/X_t|\geqslant 1 \tag{3}$$

纤维纵向压缩失效（$\sigma_1<0$）的失效判据可表示为

$$|\sigma_1/X_c|<1 \tag{4}$$

纤维横向拉伸破坏（$\sigma_2\geqslant 0$）的失效判据可表示为

$$|\sigma_2/Y_t| \geqslant 1 \tag{5}$$

纤维横向压缩失效($\sigma_2 < 0$)的失效判据可表示为

$$|\sigma_2/Y_c| < 1 \tag{6}$$

其中，X_t、X_c 分别为沿纤维纵向拉伸和压缩强度；Y_t、Y_c 分别为纤维横向的拉伸和压缩强度；下标 t 表示拉伸，c 表示压缩；σ_i($i=1,2$) 为纤维的法向应力分量。在 ABAQUS 中通过 VUMAT 子程序来定义最大应力失效准则。

基体材料为环氧树脂，被定义为一种各向同性的弹塑性材料。本文采用米塞斯屈服准则判断材料屈服[10]。当树脂内部产生损伤后，进入损伤演化阶段，由断裂能来控制此阶段的损伤演化。采用 d_m 来表示材料损伤程度：

$$E = (1-d_m)E_0 \tag{7}$$

其中，E 为树脂退化后的刚度；E_0 为材料未发生损伤时的刚度。材料刚度在 d_m 的控制下折减，初始值为 0。随着基体损伤程度的增加，d_m 不断增大。当 d_m 达到 1 时，刚度退化为 0，树脂完全断裂失效。

界面相位于纤维与基体之间，起到连接纤维与基体相、传递应力的作用。本文采用基于界面接触的内聚力行为方法，将 Cohesive 内聚力模型作为一种接触特性来描述纤维与基体之间的黏性行为。界面损伤采用最大应力准则进行模拟，当最大接触应力比达到一致时，损伤萌发：

$$\max(t_n/t_n^0, t_s/t_s^0, t_t/t_t^0) = 1 \tag{8}$$

其中，t_n^0、t_s^0、t_t^0 分别为产生损伤时的法向强度和平面内的剪切强度；下标 n 表示界面法向，s 和 t 表示界面内相互垂直的两个切向；上标 0 表示位移初始。损伤萌发后，采用线性损伤模型来模拟 Cohesive 黏聚相互作用损伤演化过程：

$$D = \frac{\delta_m^f(\delta_m^{max}-\delta_m^0)}{\delta_m^{max}(\delta_m^f-\delta_m^0)} \tag{9}$$

式中：δ_m^0、δ_m^f、δ_m^{max} 分别为损伤起始时的位移、完全失效时的位移以及分析计算过程中的最大位移[18]；上标 f 表示纤维。

表 1 所示为 CFRP 切削仿真材料参数[10,18-19]。

3　实验方案

为验证有限元模型的准确性，设计 CFRP 纵-扭超声振动铣削实验。选用 T300 型 5 mm 厚 CFRP 层合板为实验材料。该层合板样品共 23 层，纤维按照$[(45°/90°/90°/-45°/0°)_2/45°/0°]_s$铺层。采用直径 6 mm 的多刃微齿铣刀(株洲钻石切削刀具股份有限公司，CP-RM-0600-B2C2D1)

表 1　CFRP 切削仿真材料参数[10, 18-19]

Tab.1　CFRP cutting simulation material parameters

材料	属性	数值
碳纤维	密度 ρ/(kg·m^{-3})	1.81×10^3
	弹性模量 E_1/GPa	231
	弹性模量 E_2/GPa	15
	泊松比 ν_{12}	0.2
	纵向强度 X_t/MPa	4620
	纵向强度 X_c/MPa	3960
	横向强度 Y_t/MPa	1500
	横向强度 Y_c/MPa	3340
	剪切强度 G_{12}/GPa	1.5
树脂	密度 ρ/(kg·m^{-3})	1.2×10^3
	弹性模量 E/GPa	3.35
	泊松比 ν_m	0.35
	屈服强度 S/MPa	74.7
	断裂能 G_m/(N·mm^{-1})	0.1
界面	法向应力 t_n/MPa	50
	切向应力 t_s/MPa	75
	切向应力 t_t/MPa	75
	弹性刚度 K/(N·mm^{-3})	1.0×10^5
	断裂能 G/(N·mm^{-1})	0.005

对 CFRP 层合板进行侧铣。铣削实验在立式精密加工中心(沈阳机床股份有限公司，VMC580B)上进行。实验平台由超声电源、自开发超声刀柄、铣刀、压板和测力仪(Kistler，9119AA2)组成，如图 3 所示。加工过程中，CFRP 层合板通过压板固定在测力仪上。铣刀几何参数与实验工艺参数见表 2。铣削完成后采用扫描电子显微镜(国仪量子，SEM5000)观察加工表面形貌。

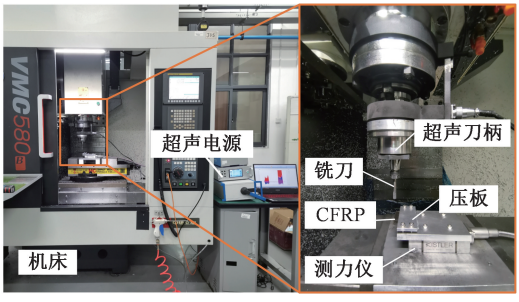


图 3　CFRP 铣削加工实验平台

Fig.3　CFRP milling experiment platform

表 2　刀具几何参数及工艺参数

Tab.2　Tool geometry and process parameters

类型	参数	取值
刀具几何参数	刀具半径 R/mm	3
	刃口圆弧半径 r/μm	2
	前角 α/(°)	25
	后角 β/(°)	10
工艺参数	切削深度 a_p/mm	1.5
	主轴转速 n/(r·min^{-1})	3000
	进给速度 v_f/(mm·min^{-1})	1000
	超声频率 f/kHz	27
	超声振幅 A/μm	4
	扭纵比 λ	0.5

4 结果分析与讨论

相较于传统切削，冲击与分离特性是纵-扭超声振动切削最显著的特点。为了更清晰地表述两种切削方式材料去除机理上的差异，将一个超声振动周期内切削刃与工件间的接触状态划分为三个阶段：①接触阶段（第Ⅰ阶段），切削刃与工件接触去除材料的初始阶段；②冲击阶段（第Ⅱ阶段），切削刃在超声振动作用下产生冲击切削去除材料的阶段；③分离阶段（第Ⅲ阶段），在超声振动作用下切削刃与工件分离完成切削，为下一个周期做准备。相应地，将传统切削划分为接触、稳定切削和成屑三个阶段。

4.1 纤维去除机制

图 4 所示为不同切削方式下 0°纤维方向角纤维断裂仿真结果。纤维方向角为 0°时，纤维的细观切削过程包含前刀面接触切削和刃口接触切削两种情形[20]。传统切削方式下（图 4a），前刀面接触切削时接触部分发生局部断裂；稳定切削阶段，纤维在刀具前刀面的推挤下逐渐弯曲，局部区域应力集中；当应力超过纤维弯曲极限时，纤维脆性断裂，形成长约 37 μm 纤维碎屑。刃口接触切削时，纤维受到刃口的碾压；稳定切削阶段，纤维在刃口的推挤下向下弯曲，纤维表面被压溃。纵-扭超声振动切削时（图 4b），前刀面接触切削时接触区域纤维断裂失效，这与传统切削类似；冲击阶段，刀具加速冲击纤维，纤维迅速弯曲致使局部应力迅速增大并出现裂纹；切削完成后，刀具与工件分离，形成长约 26 μm 的纤维碎屑。刃口接触切削时，纤维受刃口的划擦作用；刀具与工件分离后，形成较平整的加工表面。

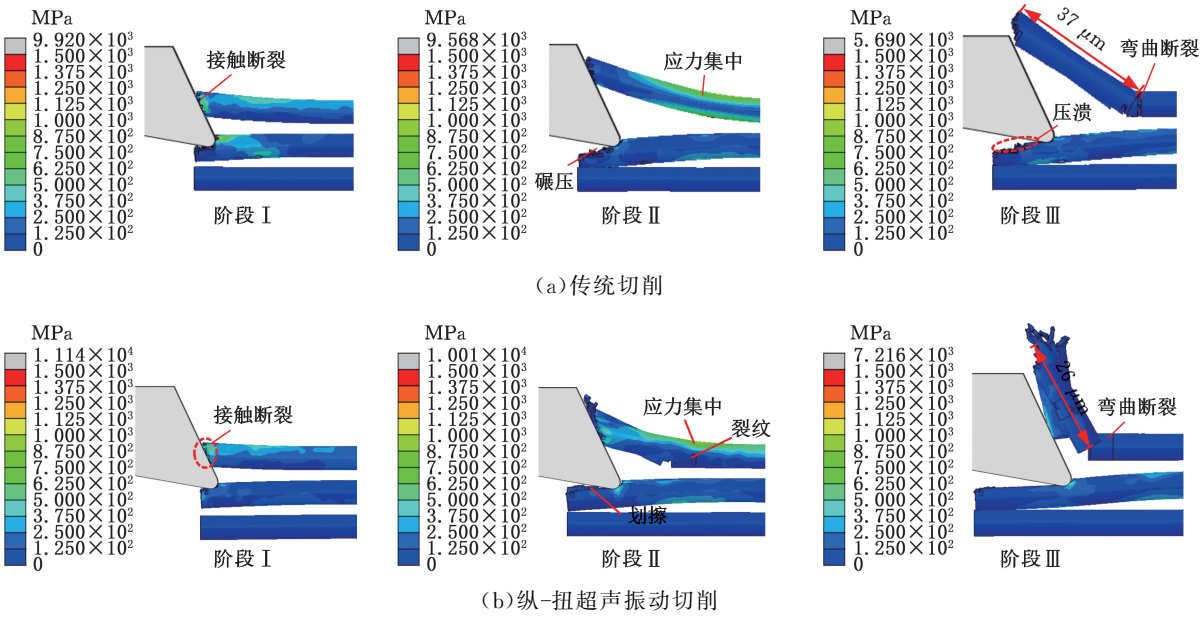


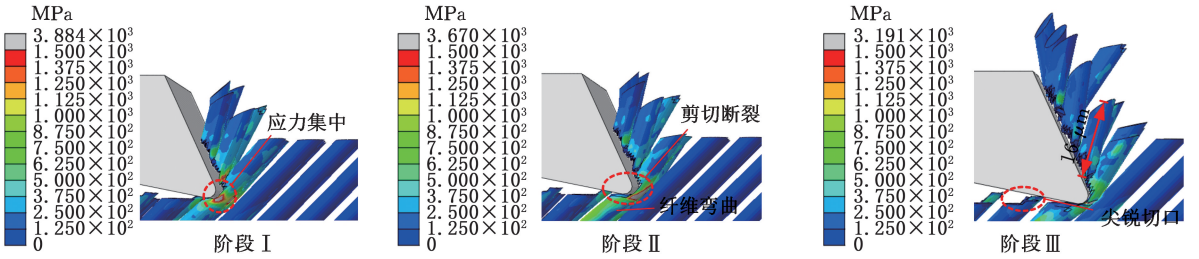
图 4 不同切削方式下 0°纤维方向角的纤维断裂方式

Fig.4 Fiber fracture mode at 0° fiber orientation angle under different cutting methods

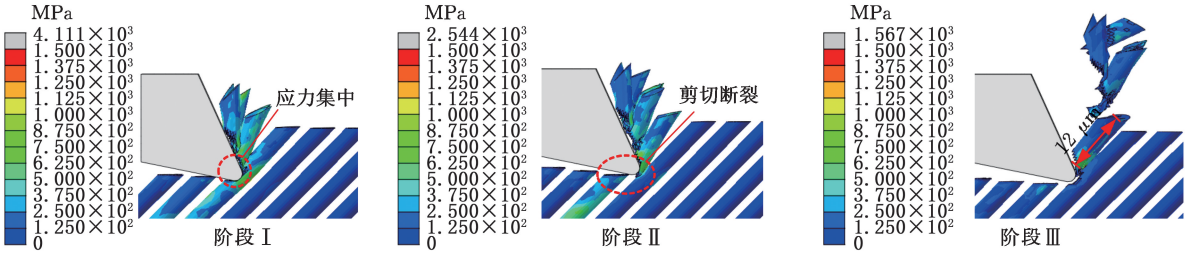
图 5 所示为不同切削方式下 45°纤维方向角纤维断裂仿真结果。传统切削方式下（图 5a），刀具刃口首先与纤维接触，接触点附近出现应力集中；稳定切削阶段，刃口推挤使纤维轻微向前弯曲；最终在刃口的剪切作用下断裂，形成长约 16 μm 的纤维碎屑；加工表面纤维切口尖锐。纵-扭超声振动切削时（图 5b），接触阶段纤维特征与传统切削类似；冲击阶段，纤维并没有出现明显的弯曲趋势，而是直接在刀具刃口的冲击作用下被剪断；这一过程形成的纤维碎屑较短，约 12 μm；加工表面纤维切口齐整。

图 6 所示为不同切削方式下 90°纤维方向角纤维断裂仿真结果。传统切削过程中（图 6a），纤维首先在刃口接触区域发生接触断裂；随着刀具推挤，纤维向前弯曲；稳定切削阶段，刀具进一步推挤纤维，纤维在刃口的剪切下断裂，形成长约 11 μm 的纤维碎屑。纵-扭超声振动切削时（图 6b），纤维与刃口接触区域先发生接触断裂；与传统切削不同的是，刀具刃口的推挤下纤维弯曲程度较轻，冲击作用直接将纤维剪断；刀具与工件分离后，形成长约 9 μm 的纤维碎屑；与传统切削相比，纵-扭超声振动切削纤维切口较平整。

图 7 所示为不同切削方式下 135°纤维方向角纤维断裂仿真结果。传统切削时（图 7a），刀具前刀面推挤纤维使其向前弯曲，应力沿纤维轴向传递；稳定切削阶段，纤维在刃口的挤压作用下弯断



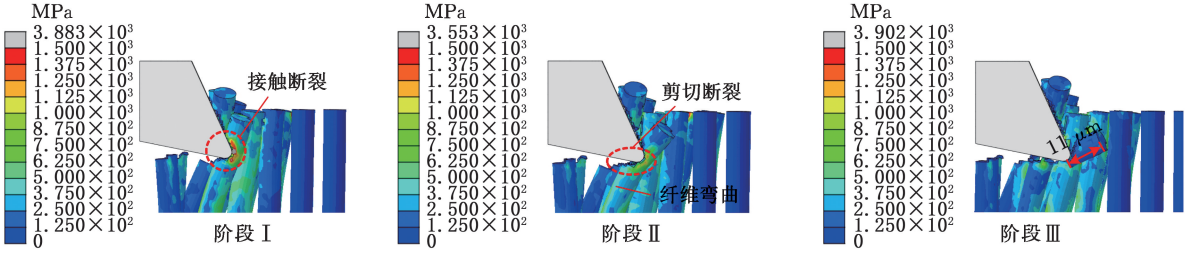
(a)传统切削



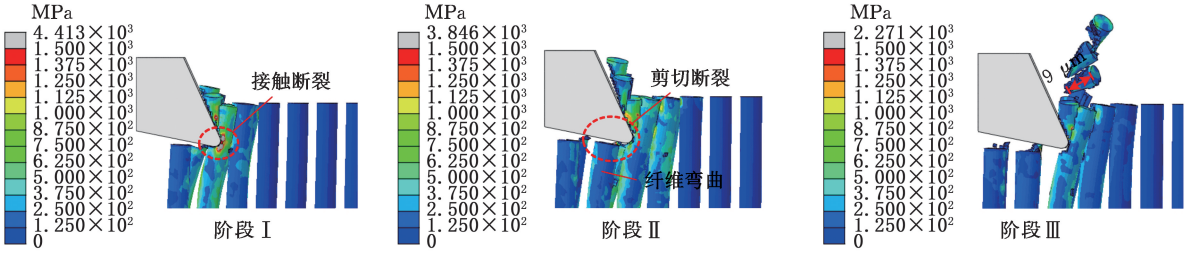
(b)纵-扭超声振动切削

图 5　不同切削方式下 45°纤维方向角的纤维断裂方式

Fig.5　Fiber fracture mode at 45° fiber orientation angle under different cutting methods



(a)传统切削



(b)纵-扭超声振动切削

图 6　不同切削方式下 90°纤维方向角的纤维断裂方式

Fig.6　Fiber fracture mode at 90° fiber orientation angle under different cutting methods

形成长约 25 μm 的切屑；纤维的相互推挤使得切削区域前方纤维出现大面积弯断，同时，加工表面下方纤维发生断裂，留下约 20 μm 深的凹坑。纵-扭超声振动切削时(图 7b)，由于超声能量的引入，纤维在初始接触阶段就被弯断；进入冲击阶段后，刀具冲击作用下切削区域纤维局部弯断去除，形成长约 13 μm 的切屑；加工表面下方约 7 μm 处纤维出现了裂纹；相较于传统切削，损伤明显得到了抑制；此外，切削刃对纤维有一定剪切作用，纵-扭超声振动切削方式下，纤维切口更加平整。

4.2　基体损伤与切屑形态

在 CFRP 切削过程中，基体损伤和切屑形态与纤维去除机制密切相关。不同纤维方向角下，CFRP 传统切削与纵-扭超声振动切削基体损伤与切屑形貌仿真结果如图 8 所示。由于基体强度低于碳纤维，0°纤维方向角时，传统切削方式下(图 8a)，纤维的弯曲导致树脂基体在碳纤维断裂前先达到强度极限，因此，沿纤维方向基体出现开裂现象，裂纹长度约 20 μm，同时，树脂黏附在纤维碎屑表面，形成片状切屑。纵-扭超声振动切削时(图 8b)，在达到传统切削方式纤维弯曲程度之前，纤维在刀具冲击作用下被迅速弯断，有效地抑制了基体开裂，同时，由于超声能量的引入，纤维和基体碎屑从切削区域飞出，较为分散。

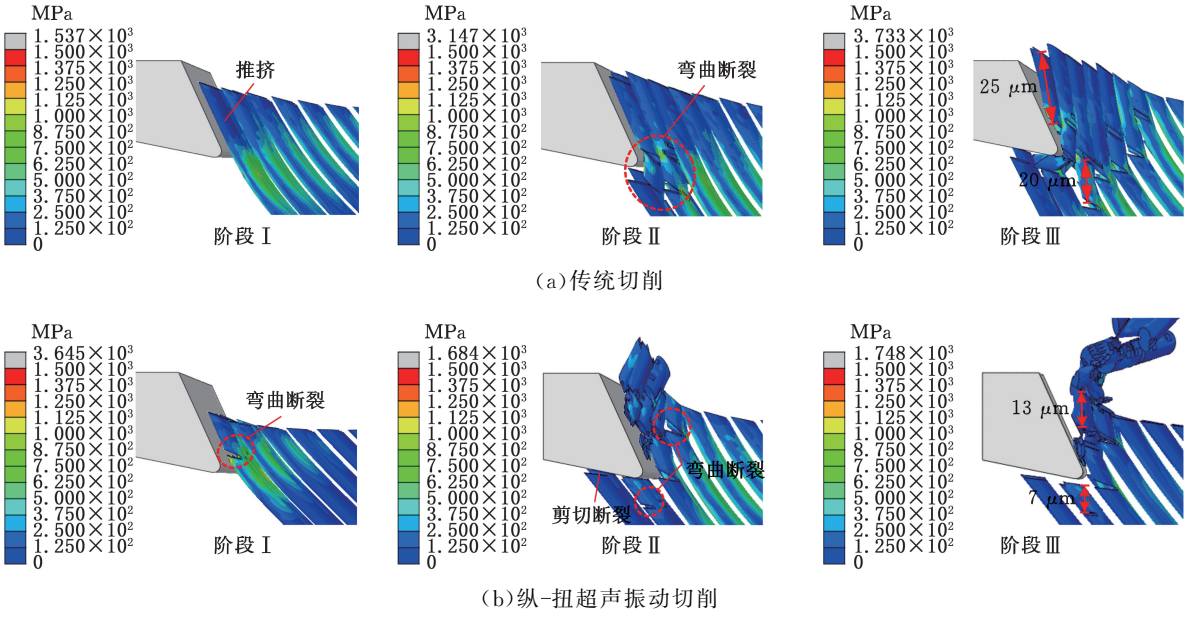


图 7　不同切削方式下 135°纤维方向角的纤维断裂方式

Fig.7　Fiber fracture mode at 135° fiber orientation angle under different cutting methods

45°纤维方向角时，传统切削方式下(图 8c)，纤维在刀具的推挤下向前弯曲。纤维的弯曲使得基体沿纤维方向出现开裂，损伤深度约 3.5 μm。切屑在切削区域堆积并沿前刀面滑移，呈现细碎块状。纵-扭超声振动切削时(图 8d)，超声能量增强了刃口对纤维的剪切作用，从而减轻了纤维对基体的挤压，有效抑制了裂纹的产生。切屑能够从切削区域飞出，这有助于降低切削区域热量积累，改善切削环境。

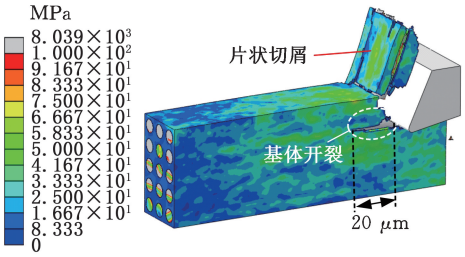
90°纤维方向角时，传统切削方式下(图 8e)，纤维在刃口的推挤下弯曲幅度较大，致使周围基体在纤维的挤压下发生开裂，损伤深度约 32 μm。破碎的纤维与基体在刀具前刀面堆积，致使切削区域前方纤维在挤压作用下与基体脱黏，引发界面开裂，增加了材料失效风险。纵-扭超声振动切削时(图 8f)，切削刃对纤维的剪切作用增强使得基体损伤程度减轻，最大损伤深度约为 28 μm。同时，切屑从切削区域飞出，减小了前刀面的摩擦和切屑对未加工材料的挤压，界面开裂得到抑制。

135°纤维方向角时，传统切削方式下(图 8g)，刀具的推挤使得纤维向前弯曲，因此，基体沿纤维方向开裂，加工表面下方形成约 26 μm 的裂纹。切屑在刀具前刀面堆积，使得未加工材料界面开裂较严重。纵-扭超声振动切削时(图 8h)，超声能量加速了纤维弯断，减小了周围基体的拉伸应力，基体损伤深度约 19 μm。纤维与基体碎屑的快速飞出降低了切屑与前刀面的摩擦和未加工材料界面开裂程度，切削表面凹坑明显得到改善。

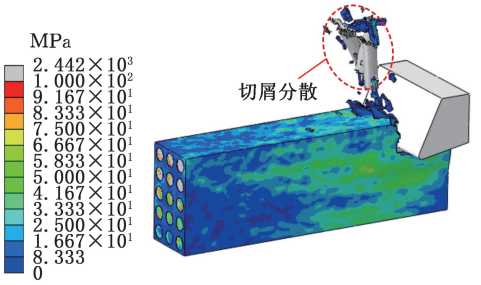
图 9 所示为 SEM 下传统铣削与纵-扭超声振动铣削 CFRP 后不同纤维铺层加工表面形貌。0°纤维方向角时，传统铣削纤维表面出现明显碾压断裂特征，而纵-扭超声振动铣削后，纤维表面较平整。此外，可以清楚观察到加工表面纤维切口呈现出弯曲断裂特征。45°和 90°纤维方向角时，传统铣削后纤维切口较尖锐，纵-扭超声振动铣削后，纤维切口更为平整，这反映出切削刃对纤维的剪切作用明显得到增强。135°纤维方向角时，传统铣削后纤维切口尖锐，展现出明显弯曲断裂特点，由于界面开裂的影响，可以清楚地观察到纤维被树脂包裹裸露于加工表面，纵-扭超声振动铣削后，纤维切口较平整。此外，与传统铣削相比，加工表面凹坑现象明显得到改善。综上，观测结果与仿真结果高度吻合，验证了仿真分析的准确性。

4.3　切削力

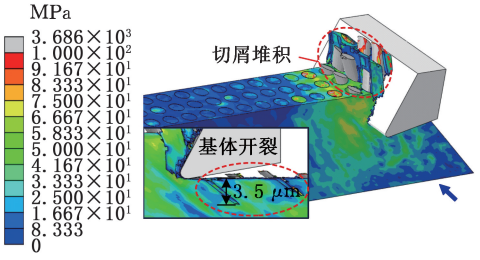
图 10 所示为不同纤维方向角下传统切削与纵-扭超声振动切削时切削力的仿真值，可以发现，两种切削方式切削力特征存在明显的差异。传统切削时，刀具与工件持续接触，切削力始终为正。0°纤维方向角时，纤维被间歇弯断去除，切削力存在较大变化。45°、90°和 135°纤维方向角下切削力较为稳定。纵-扭超声振动切削时，切削力呈现明显的周期性变化特征。由第 1 节分析可知，冲击阶段开始，刀具迅速切入工件，切削深度增大导致切削力瞬间增大。随后，刀具切削刃与工件相对速度逐渐降为 0，切削力也随之减小。分离阶段，刀具与工件相对运动方向相反，刀具前



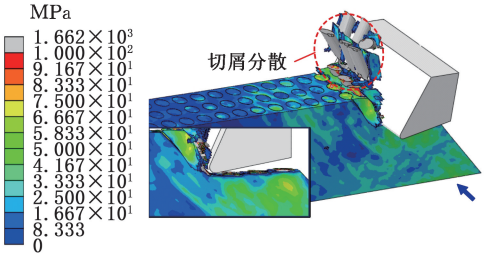
(a)传统切削 0°纤维方向角



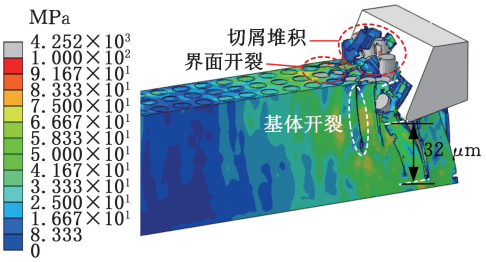
(b)纵-扭超声振动切削 0°纤维方向角



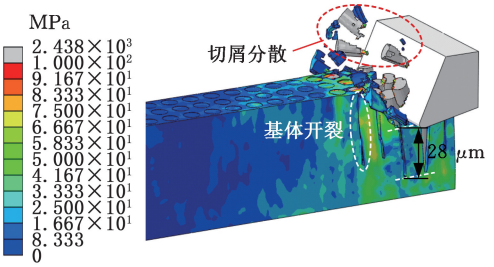
(c)传统切削 45°纤维方向角



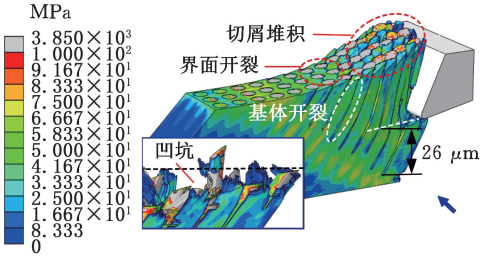
(d)纵-扭超声振动切削 45°纤维方向角



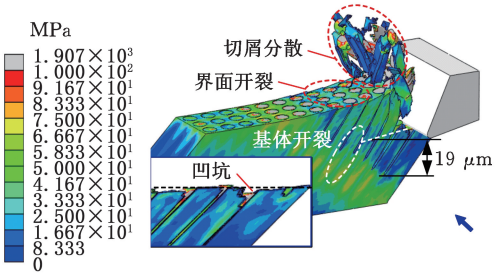
(e)传统切削 90°纤维方向角



(f)纵-扭超声振动切削 90°纤维方向角



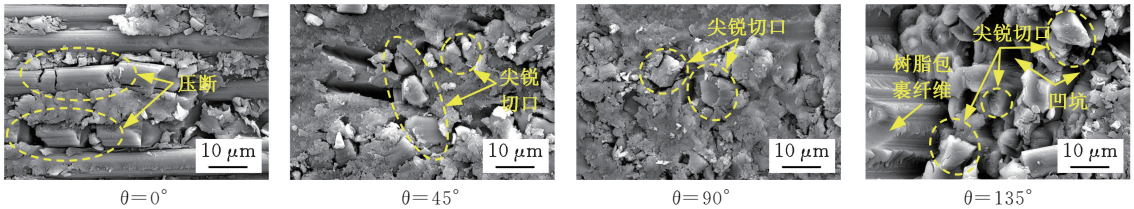
(g)传统切削 135°纤维切削角



(h)纵-扭超声振动切削 135°纤维方向角

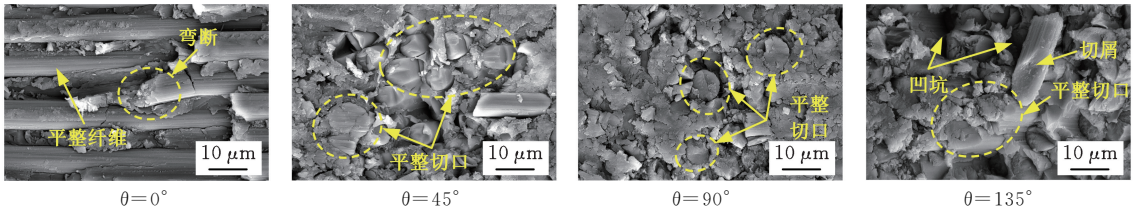
图 8　不同切削方式下基体损伤与切屑形貌

Fig.8　Matrix damage and chip morphology of different cutting methods with different fiber orientation angle



θ=0°　θ=45°　θ=90°　θ=135°

(a)传统铣削



θ=0°　θ=45°　θ=90°　θ=135°

(b)纵-扭超声振动铣削

图 9　不同纤维方向角不同铣削方式加工表面形貌

Fig.9　Surface morphology of different milling methods with different fiber orientation angles

刀面与工件接触摩擦，切削力变为负值。纵-扭超声振动切削时，由于切削刃高频振动产生较大的冲击力，切削力瞬时值大于传统切削时的切削力。从平均切削力来看，传统切削方式下，0°、45°、90°和135°纤维方向角时的平均切削力分别为 0.021 N、0.029 N、0.040 N 和 0.022 N。纵-扭超声振动切削时，不同纤维方向角下，平均切削力分别为 0.020 N、0.019 N、0.025 N 和 0.013 N，均小于传统切削。

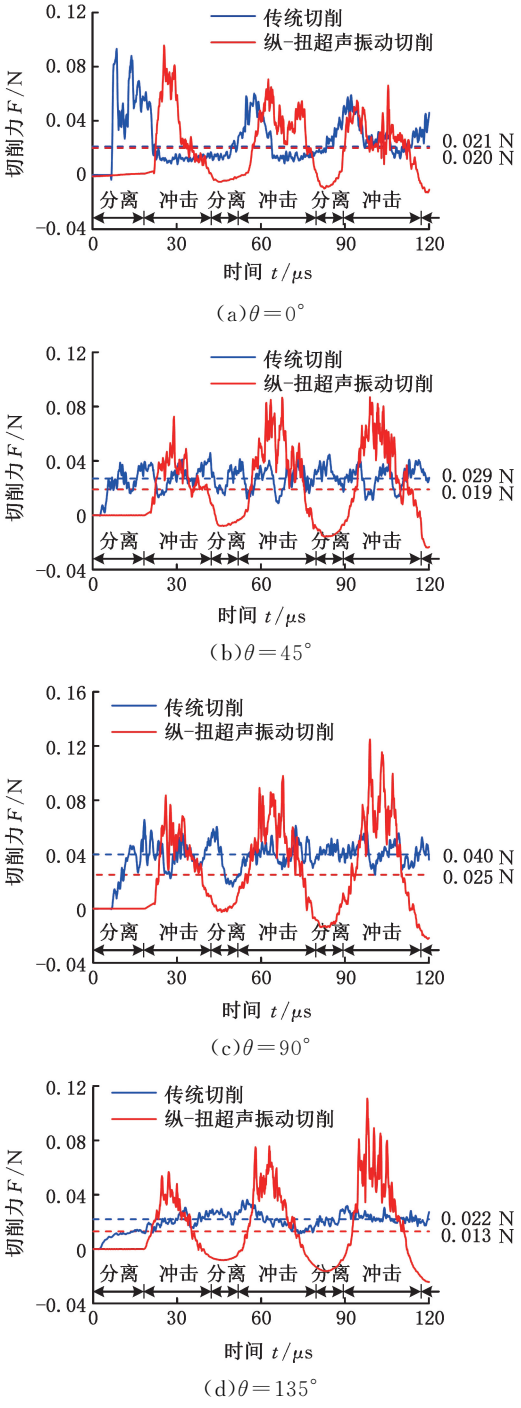


图 10　不同纤维方向角不同切削方式切削力仿真值

Fig.10　Simulation of cutting force of different cutting methods with different fiber orientation angles

图 11 所示为传统铣削与纵-扭超声振动铣削 CFRP 时，刀具进给方向（F_x）与垂直于加工表面方向（F_y）的切削力实验值。传统铣削时，切削力 F_x 与 F_y 分别为 260.13 N 和 180.88 N。而纵-扭超声振动铣削时，切削力 F_x 与 F_y 分别降为 249.25 N 和 166.77 N。两种铣削方式下，切削力 F_y 均小于 F_x。纵-扭超声振动铣削时，切削力 F_x 与 F_y 均小于传统铣削时切削力。纵-扭超声振动铣削时切削刃周期性高频“分离-接触”式切削工件，缩短了刀具与工件的持续接触时间，从而减小了切削过程中的摩擦。综上所述，纵-扭超声振动铣削在减小切削力方面具有明显优势。

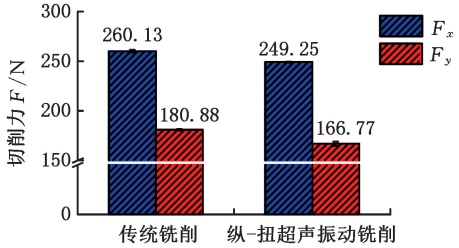


图 11　不同铣削方式下的切削力

Fig.11　Cutting force under different milling methods

5　结论

1）0°纤维方向角时，纵-扭超声振动切削加速了刀具前刀面对纤维的弯断进程，刃口去除纤维机制由传统的碾压断裂转变为划擦；45°纤维方向角时，纵-扭超声振动冲击特性增强了切削刃对纤维的剪切作用；90°纤维方向角时，纵-扭超声振动切削对纤维的剪切效果更为显著；135°纤维方向角时，纵-扭超声振动切削使得纤维断裂模式从传统的大面积弯断转变为局部区域断裂，且切削损伤被抑制。

2）0°纤维方向角时，纵-扭超声振动切削促使纤维更早断裂，减小纤维弯曲对基体的拉伸作用，抑制基体开裂；45°纤维方向角时，纵-扭超声振动切削增强切削刃对纤维的剪切作用，降低了基体开裂风险；90°纤维方向角时，纵-扭超声振动切削对纤维剪切效果更为显著，切屑快速排出，减少了切削区域热量积累，减轻未切削区域界面开裂程度；135°纤维方向角时，纵-扭超声振动切削减少了切屑在前刀面的积累，从而降低了对未切削区域的挤压，降低了界面开裂的风险，加工表面下方凹坑明显减少。

3）实验结果表明，传统铣削方式下，纤维损伤较明显，纤维切口较尖锐，而纵-扭超声振动铣削纤维切口更为平整，表面损伤程度较轻。实验观测验证了有限元仿真分析结果的正确性。纵-扭

超声振动铣削平均切削力小于传统铣削平均切削力，有效减小加工过程中平均切削力。

4)研究结果表明，不同纤维方向角下，纵-扭超声振动铣削均表现出更优异的加工性能。为优化 CFRP 纵-扭超声振动铣削加工工艺，未来工作中可进一步探讨不同纤维方向角下，“分离-接触”式切削过程中切削力的脉冲作用规律和机理。

参考文献：

[1] 贾振元，付饶，王福吉. 碳纤维复合材料构件加工技术进展[J]. 机械工程学报，2023，59(19)：348-374.
JIA Zhenyuan，FU Rao，WANG Fuji. Research Advance Review of Machining Technology for Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Components[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(19)：348-374.

[2] GAO Teng，ZHANG Yanbin，LI Changhe，et al. Fiber-reinforced Composites in Milling and Grinding：Machining Bottlenecks and Advanced Strategies [J]. Frontiers of Mechanical Engineering，2022，17(2)：7-41.

[3] ZHANG Bi，LU Shouxiang，RABIEY M，et al. Grinding of Composite Materials[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology，2023，72(2)：645-671.

[4] WANG Fuji，CHEN Peizhe，FU Rao，et al. Effects of Cutting Speed and Fiber Orientation on Tool Wear and Machining Quality in Milling CFRP with PCD Cutter[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，2023，237(9)：1364-1375.

[5] SUN Lianjun，LIAO Wenhe，ZHENG Kan，et al. Stability Analysis of Robotic Longitudinal-torsional Composite Ultrasonic Milling[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2022，35(8)：249-264.

[6] LIU Jian，CHEN Guang，REN Chengzu，et al. Effects of Axial and Longitudinal-torsional Vibration on Fiber Removal in Ultrasonic Vibration Helical Milling of CFRP Composites[J]. Journal of Manufacturing Processes，2020，58：868-883.

[7] 彭振龙，张翔宇，张德远. 航空航天难加工材料高速超声波动式切削方法[J]. 航空学报，2022，43(4)：67-85.
PENG Zhenlong，ZHANG Xiangyu，ZHANG Deyuan. High-speed Ultrasonic Vibration Cutting for Difficult-to-machine Materials in Aerospace Filed[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2022，43(4)：67-85.

[8] 康仁科，陆冰伟，陈凯良，等. 超声振动辅助磨削 CFRP 复合材料薄管撕裂损伤研究[J]. 中国机械工程，2024，35(3)：524-533.
KANG Renke，LU Bingwei，CHEN Kailiang，et al. Study on Tearing of CFRP Thin Circular Tubes Machined by Ultrasonic Vibration Assisted Grinding [J]. China Mechanical Engineering，2024，35(3)：524-533.

[9] 齐振超，刘书暖，程晖，等. 基于三维多相有限元的 CFRP 细观切削机理研究[J]. 机械工程学报，2016，52(15)：170-176.
QI Zhenchao，LIU Shunuan，CHENG Hui，et al. Research on the Mesoscopic Cutting Mechanism of CFRP Based on Three-demiensional Multiphase Finite Element Models[J]. Journal of Mechanical Engineering，2016，52(15)：170-176 .

[10] YAN Xiaoye，REINER J，BACCA M，et al. A Study of Energy Dissipating Mechanisms in Orthogonal Cutting of UD-CFRP Composites[J]. Composite Structures，2019，220：460-472.

[11] ABENA A，SOO S L，ESSA K. Modelling the Orthogonal Cutting of UD-CFRP Composites：Development of a Novel Cohesive Zone Model[J]. Composite Structures，2017，168：65-83.

[12] WU Weizhou，LI Shipeng，QIN Xuda，et al. Effects of Fiber Orientation on Tool Wear Evolution and Wear Mechanism When Cutting Carbon Fiber Reinforced Plastics[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2023，36(5)：549-565.

[13] LI Yanqin，XIANG Daohui，FENG Haoren，et al. Surface Characteristics Investigation of Ultrasonic Longitudinal-torsional Milling of High-volume Fraction SiCp/Al[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2020，110(7)：2119-2130.

[14] 闫艳燕，闫浩哲，刘俊利，等. TC4 钛合金纵扭超声磨削力热耦合模型及其试验研究[J]. 中国机械工程，2023，34(1)：65-74.
YAN Yanyan，YAN Haozhe，LIU Junli，et al. Thermo-mechanics Coupling Model and Experimental Research of Longitudinal Torsional Ultrasonic Grinding of TC4 Titaniun Alloys[J]. China Mechanical Engineering，2023，34(1)：65-74.

[15] MA Guofeng，KANG Renke，YIN Sen，et al. Effect of Amplitude Ratios on Hole Quality in Longitudinal-torsional Coupled Ultrasonic-assisted Drilling of CFRP Composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2022，122：2911-2926.

[16] WANG Dong，LI Zheng，TIAN Shuai，et al. Study on Dynamic Drilling Forces of CFRP/Ti Stacks during Longitudinal-torsional Ultrasonic Vibration Drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2023，126：2989-3004.

（下转第 779 页）