

# 2.5D C/SiC 复合材料超声振动辅助铣削数值模拟研究

杨定成 张小冰

(浙江东方职业技术学院, 温州 325000)

**文 摘** 为了揭示 2.5D C/SiC 陶瓷基复合材料在铣削加工过程中的去除机理及表面损伤特性,开展了其传统铣削和超声振动辅助铣削实验,建立了两类铣削工况下的三维数值模型。结果表明,相对于传统铣削,超声振动辅助铣削在其高频的交变载荷下,降低材料的微切削厚度,减小材料的变形挠度从而使径向和切向的切削力分别都降低了 68%、72%;可有效改善 2.5D C/SiC 复合材料加工表面损伤,如倾斜断裂面、粗糙断裂面;其加工表面残余压应力明显大于传统铣削;经过实验验证,所建立的数值模型可以有效地模拟材料去除过程和 0°、90° 纤维的断裂形貌;为 2.5D C/SiC 复合材料的高效低损伤加工提供了理论依据和指导。

**关键词** 2.5D C/SiC, 数值模拟, 超声振动辅助铣削, 材料去除特性

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.004

## Numerical Simulation Study on Ultrasonic Vibration-assisted Milling of 2.5D C/SiC Composites

YANG Dingcheng ZHANG Xiaobing

(Zhejiang Dongfang Polytechnic, Zhejiang 325000)

**Abstract** To elucidate the removal mechanism and surface damage characteristics of 2.5D C/SiC ceramic matrix composites during the milling process, experiments were conducted on both traditional milling and ultrasonic vibration-assisted milling. A three-dimensional numerical model was established for both milling conditions. The results indicate that, compared to traditional milling, ultrasonic vibration-assisted milling, under its high-frequency alternating load, reduces the micro-cutting thickness of the material and decreases the material's deformation deflection, leading to a reduction in radial and tangential cutting forces by 68% and 72% respectively. It can effectively improve the surface damage of 2.5D C/SiC composites, such as inclined and rough fracture surfaces. The residual compressive stress on the processed surface is significantly greater than that of traditional milling. The established numerical model has been experimentally verified to effectively simulate the material removal process and the fracture morphology of 0° and 90° fibers. This work provides theoretical basis and guidance for the efficient and low-damage processing of 2.5D C/SiC composites.

**Key words** 2.5D C/SiC, Numerical simulation, UAM, Material removal properties

### 0 引言

碳纤维增强陶瓷基复合材料(C/SiC)具有高比强度、高硬度、良好的耐腐蚀性及耐高温性能<sup>[1-3]</sup>,被广泛应用于航空航天领域如航天飞机发动机、固体火箭发动机喷嘴及刹车系统<sup>[4]</sup>,属于难加工材料。成型制备的 C/SiC 无法直接满足尺寸精度和表面精度要求,需对制备的材料进行必要的切削加工<sup>[5]</sup>。由于零件的表面质量直接影响其使用寿命和性能,因此许多研究集中于普通加工或超声振动辅助加工 C/SiC

复合材料过程中的表面缺陷和表面粗糙度。

与传统铣削相比,超声振动辅助铣削在处理典型的硬脆材料方面具有明显的优势。目前,超声振动辅助铣削已应用于 C/SiC 复合材料的加工,并取得了许多相关成果。复合材料的材料去除机理与传统均质材料有很大不同,当应用超声波振动时,材料切削机制也发生了变化。超声振动辅助铣削主要是使刀具在进给过程中做高频振动切削,减小刀具和材料的接触时间,刀尖不断的冲击材料,造成材料的微

收稿日期:2023-03-30

基金项目:浙江省产学研合作育人项目(121)

第一作者简介:杨定成,1983年出生,副教授,主要从事智能控制研究。E-mail: 651356749@qq.com

脆性裂纹扩展去除,更易于在硬度高的材料上实现,也就是硬脆材料所具有的特点。

国内外学者对超声振动辅助铣削的基本加工指标切削力、复合材料的去除机制以及纤维相对于刀具进给方向的角度进行研究。钟祥福<sup>[6]</sup>发现超声振动辅助铣削与传统铣削相比可以有效的降低切削力,抑制毛刺、崩边等损伤,从而提高加工表面质量。王明海等<sup>[7]</sup>从超声振动辅助加工的运动轨迹方面分析了抑制复合材料损伤的机理,发现施加超声振动的加工方式的三向切削力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 比传统铣削方式的分别降低了33%、29%、11%。E. BERTSCHE等人<sup>[8]</sup>进行了综合实验,以研究传统加工和超声波辅助加工下的切削力和刀具磨损,结果表明,与常规切削相比,超声振动下的切削力和刀具磨损得到了显著抑制。湛青坡<sup>[9]</sup>将沿进给方向的超声波水平振动及沿轴向的纵向振动施加到传统方式的加工中,结果表明水平振动及纵向振动均能实现刀具与材料的断续加工,均能降低加工过程中的作用力,但纵向振动加工质量更好。Z. P. XIE等人<sup>[10]</sup>对2.5D C/SiC复合材料进行超声振动辅助铣削实验,发现材料在超声波振动下发生了局部碎裂,有效避免了纤维与基体之间的脱粘,并使碳纤维的断裂更平坦。J. CHEN等人<sup>[11]</sup>利用PCD工具对C/SiC复合材料进行了超声振动辅助铣削实验,结果表明,当进给速度较小时,C/SiC复合材料在刀具挤压下发生微脆性断裂。当进给速度较大时,C/SiC复合材料发生宏观脆性断裂;碳纤维的断裂主要由弯曲、压缩和剪切行为引起。S. M. YUAN等人<sup>[12]</sup>根据实验建立了最大穿透深度模型,结果表明,随着主轴转速的增加,最大切削深度减小;最大穿透深度的增加导致从材料延性模式过渡到脆性断裂模式。M. HU等人<sup>[13]</sup>在具有不同角度纤维的复合材料上进行超声振动辅助铣削实验,表明当 $0^\circ$ 纤维时,纤维失效形势主要是沿进给方向的弯曲断裂及纤维脱粘。当 $45^\circ$ 或者 $135^\circ$ 纤维时纤维失效形势主要是压缩及弯曲行为引起。当 $90^\circ$ 纤维时,主要是由剪切断裂造成纤维的失效。Y. LIU等人<sup>[14]</sup>发现,超声振动辅助铣削抑制了加工表面上纤维裂纹的增长,并提高了C/SiC复合材料的表面和亚表面质量。经超声振动辅助铣削处理的样品具有良好的抗疲劳性能。W. X. XU等人<sup>[15]</sup>对单向CFRP进行超声振动辅助切削数值模拟,发现在传统切削中,纤维取向会显著影响纤维的断裂过程,但是超声振动辅助加工很大程度地减少这种影响。J. F. XU等人<sup>[16]</sup>建立芳纶纤维纵扭切削有限元模型,发现纵扭超声振动加工可以有效的改善毛刺和表面损伤,毛

刺的长度比传统切削减少了23%~38%。

本文使用传统端铣刀对2.5D C/SiC复合材料进行了传统及超声振动铣削实验,建立了该材料的三维有限元切削模型,对比了传统铣削及超声振动辅助铣削下的切削力、表面微观形貌及表面残余应力。

## 1 超声振动运动学分析与有限元模型

### 1.1 超声振动运动学分析

超声振动辅助铣削是一种新型复合切削工艺,被广泛地应用于硬脆材料的加工。由于引入了高频超声振动,刀具运动结合了旋转运动、进给运动以及纵向的高频超声运动。这就意味刀具与工件在 $x$ - $z$ 平面上周期性地接触、分离,铣刀与主轴旋转同时在 $x$ 方向上移动,简化刀具在材料中具体运动轨迹见图1。

在笛卡尔坐标系中,刀具侧铣的空间运动轨迹可以描述为:

$$\begin{cases} x(t) = R \cdot \sin(2n\pi t) + v_f \cdot t \\ y(t) = R \cdot \cos(2n\pi t) \\ z(t) = A \cdot \cos(2\pi f t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $R$ 是刀具半径; $n$ 是主轴转速; $t$ 是切削时间; $v_f$ 是进给速率; $A$ 是纵向超声振幅; $f$ 是超声频率。根据式(1),一条切削刃外缘的超声振动运动轨迹见图1。

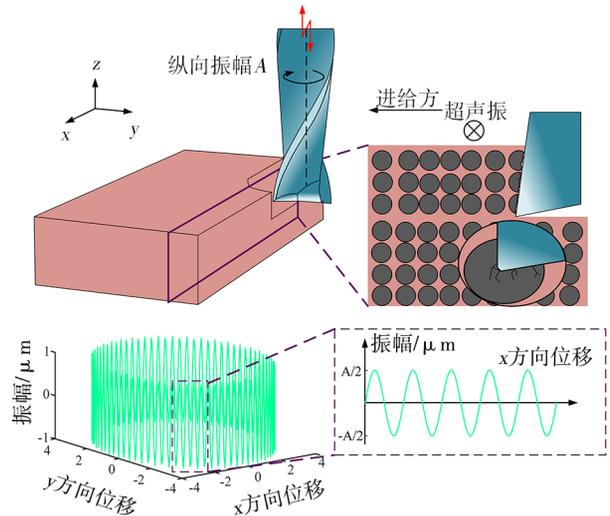


图1 超声振动辅助铣削示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted milling

### 1.2 有限元模型

#### 1.2.1 有限元切削模型

由于单纯的宏观有限元模型无法预测基体、纤维和界面的损伤行为,因此建立包含纤维、基体和界面的三维切削微观有限元模型。这里需要注意,不同于其他纤维增强复合材料,2.5D C/SiC复合材料的短小纤维层分布杂乱无章,目前的三维数值建模很难对其进行准确模拟。本文重点对 $0^\circ$ 纤维与 $90^\circ$ 纤

维进行模拟分析。

建立 C/SiC 复合材料正交切削仿真模型如图 2 所示。根据实验所用的刀具前角、后角和圆角半径对刀具进行建模,由于不考虑刀具的磨损及变形的影响,因此将刀具视为带有 RP 参考点的离散刚体来控制

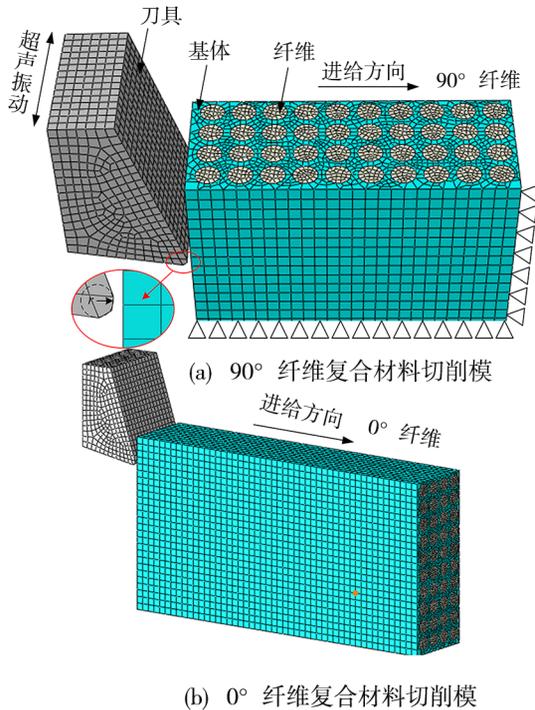


图 2 有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element model

$$\sigma = \sigma_{\text{HEL}} \left( 1 + C \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \left( A \left( \frac{p+T}{p_{\text{HEL}}} \right)^N - D \left( A \left( \frac{p+T}{p_{\text{HEL}}} \right)^N - B \left( \frac{p}{p_{\text{HEL}}} \right)^M \right) \right) \quad (3)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $M$ 、 $N$  为 SiC 材料的 JH2 模型待定参数;  $D$  是材料的损伤因子;  $p$  为真实静水压力 (N);  $p_{\text{HEL}}$  是静水压力;  $\sigma_{\text{HEL}}$  为 Hugoniot 等效应力;  $\dot{\varepsilon}^*$  为标准化应变率;  $T$  为材料所能承受的最大拉(压)静水压力。

## 2 实验

### 2.1 工件材料与刀具

本文以 2.5D C/SiC 复合材料为实验材料,其由  $0^\circ$  和  $90^\circ$  纤维层、SiC 基体、热解碳(PyC)层和短小纤维层组成,2.5D C/SiC 复合材料的单元微观结构见图 3;增强纤维为 T-300™ 碳纤维。 $0^\circ$  和  $90^\circ$  纤维各自在平面内平铺成层状结构,呈二维正交结构。其中  $0^\circ$  和  $90^\circ$  纤维层、短小纤维层首先被制备成针刺预制体,然后在针刺预制体外层沉积热解碳(PyC)层,最后沉积 SiC 基体形成完整材料。

2.5D C/SiC 材料的纤维直径为  $6.8 \mu\text{m}$ ,密度为  $1.7 \text{ g/cm}^3$ ,纤维体积分数为 40%,孔隙率为 17%,弯曲强度为 181 MPa。

实验使用直径 4 mm 的传统端铣刀,结构如图 4

制刀具的切削距离。复合材料代表性体积单元的几何尺寸为  $70 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$  (长×宽×高)。根据真实材料模型中纤维的角度,仿真模型主要分为两种,分别是刀具切削  $0^\circ$  纤维与  $90^\circ$  纤维模型。工件底侧和切出侧的自由度完全约束。复合材料的三维代表性体积单元由纤维(直径是  $7 \mu\text{m}$ )、周围的 SiC 基体(实体单元 C3D8R,沙漏控制)和采用零厚度内聚力单元(COH3D8)建模的纤维-基体界面组成,界面与纤维、基体共享节点。在刀具的 RP 参考点上给刀具赋予进给速度及刀具做振动运动的周期性幅值曲线,使刀具做超声振动辅助切削运动,刀具的速度  $v_t$  表示为:

$$v_t = 2A\pi f \cos(2\pi ft) + f_z z n \quad (2)$$

式中,  $A$  是纵向超声振幅;  $f$  是超声频率。

### 1.2.2 复合材料本构模型及断裂准则

采用微观三维模型分析了复合材料在正交切削中的损伤机理。T300 碳纤维材料具有整体各向异性及横向各向同性的特点,通过编写最大应力准则 VUMAT 定义纤维的损伤破坏。当纤维的各方向强度达到相应的极限强度时,纤维断裂。

SiC 基体被定义成各向同性的脆性材料,直接产生脆性破坏而不是塑性变形。使用专门解决大变形问题的 JH2 本构描述基体的破坏行为。JH2 本构模型公式如下:

所示,前角为  $0^\circ$ ,2 条螺旋槽,  $30^\circ$  螺旋角度,刀具材料为硬质合金。

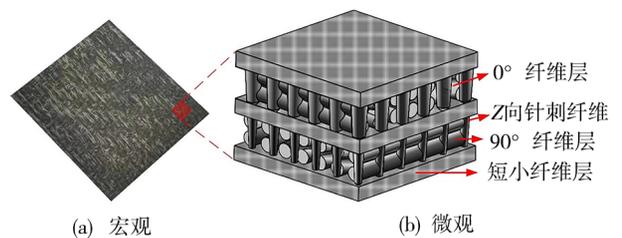


图 3 2.5D C/SiC 复合材料工件示意图

Fig. 3 2.5D C/SiC composite workpiece schematic diagram



图 4 传统端铣刀结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of traditional end milling cutter

## 2.2 实验装置与观察方法

2. 5D C/SiC 复合材料超声振动辅助加工是在三轴数控加工中心上进行的,实验参数如表3所示。超声振动辅助加工系统由运动控制单元、振动单元以及振幅测定单元组成,如图5所示。

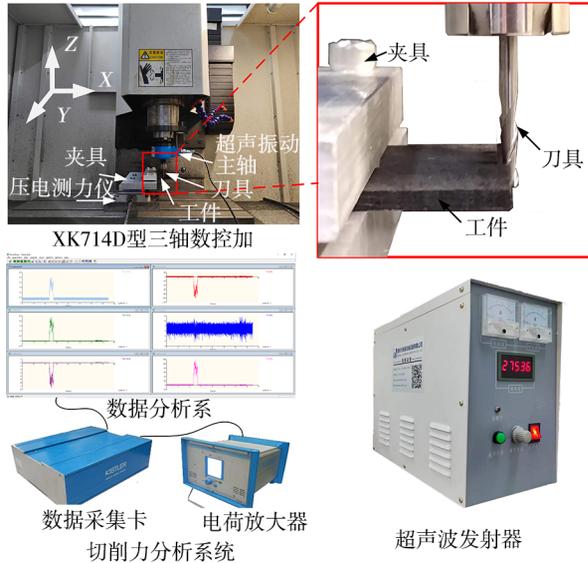


图5 超声振动辅助铣削2.5D C/SiC复合材料的实验装置

Fig. 5 Experimental device for ultrasonic vibration assisted milling 2.5D C/SiC composites

如图5所示,使用专用的夹具固定2.5D C/SiC复合材料试样,该夹具安装在压电测力仪上。该测力仪配备有(Kistler 9257A型)三向压电测力仪、(Kistler 5070型)电荷放大器及相应的数据采集与处理系统,以59 kHz的采样频率采集切削力。

超声波振动系统由超声波发生器、超声波刀柄组成。铣刀固定到刀柄的端部。振动系统由超声波刀架、无线能量传输装置和超声波发生器组成。铣刀通过夹头和夹头螺母固定在刀架的端部。在超声波发生器的激励下,电信号通过固定在主轴外环上的无线装置传输到刀架内的压电换能器。压电换能器将电能转换为机械能,并驱动工具产生纵向高频运动。超声振动参数的选取标准是在实验中所用频率下,超声波振动与固定夹紧后的刀具调至共振,尽可能地减少超声波能量损耗,在一定范围内调整振幅,使加工过程中的超声振幅较大,从而保证加工效果最佳。

表1 铣削实验加工参数

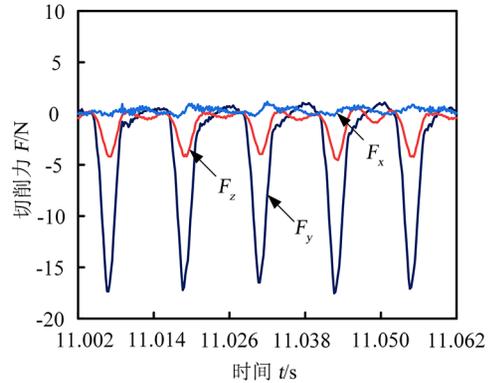
Tab. 1 Milling experimental machining parameters

组次	方法	刀具	切削参数
1	传统铣削	传统端铣刀	切削速度:0.5 m/min 进给速度:0.01 mm/r 径向切深:0.4 mm
2	超声振动辅助铣削	传统端铣刀	振幅:0.3 $\mu$ m 超声波频率:30 kHz

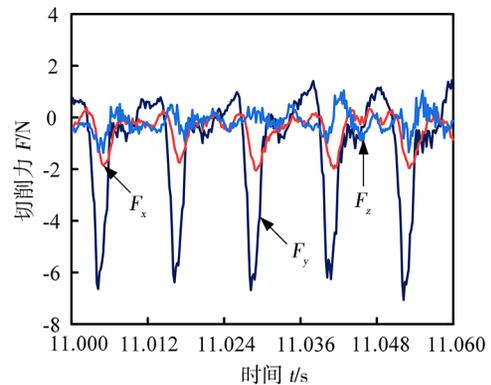
## 3 结果与分析

### 3.1 切削力

传统端铣刀传统铣削及超声振动辅助铣削工况下切削力信号如图6所示。对于切削力信号,我们讨论不同工况下的力信号的数值大小。



(a) 传统铣削



(b) 超声振动辅助铣削

图6 传统铣削与超声振动辅助铣削工况下切削力信号曲线

Fig. 6 Cutting force signal curve under normal milling and ultrasonic vibration assisted milling conditions

实验中,由于铣削过程中径向力 $F_x$ 及切向力 $F_y$ 是对铣削加工影响最大的因素,因此本文只讨论其数值大小。对于切削力信号的数值大小比较,可以明显看出来超声辅助铣削下的切削力低于传统铣削下的切削力。其中传统铣削工况下 $F_x$ 为17.2 N, $F_y$ 为4.9 N,超声振动辅助铣削工况下 $F_x$ 为6.9 N, $F_y$ 为1.9 N。相比之下,超声振动辅助铣削工况下的径向力与切向力分别减小68%、72%。这是因为刀具在纤维上引起交变冲击载荷的高频纵向振动。材料被更有效的去除,切削与刀具之间的摩擦因数降低,从而降低了切削力,另一方面由于超声振动辅助铣削过程中的纵向超声波振动,刀具周期性从工件表面分离,从而降低了切削力。

### 3.2 超声振动辅助铣削及传统铣削材料去除机理分析

根据超声振动周期中刀具位移的分布,提取了超声振动辅助铣削 C/SiC 复合材料的微切削仿真结果,如图 7 所示。超声频率为 30 kHz。模拟过程被分成 200 个相等的间隔(从步骤 0 到步骤 200)。在一个循环中,切削速度方向表现为作用在接触面积上的

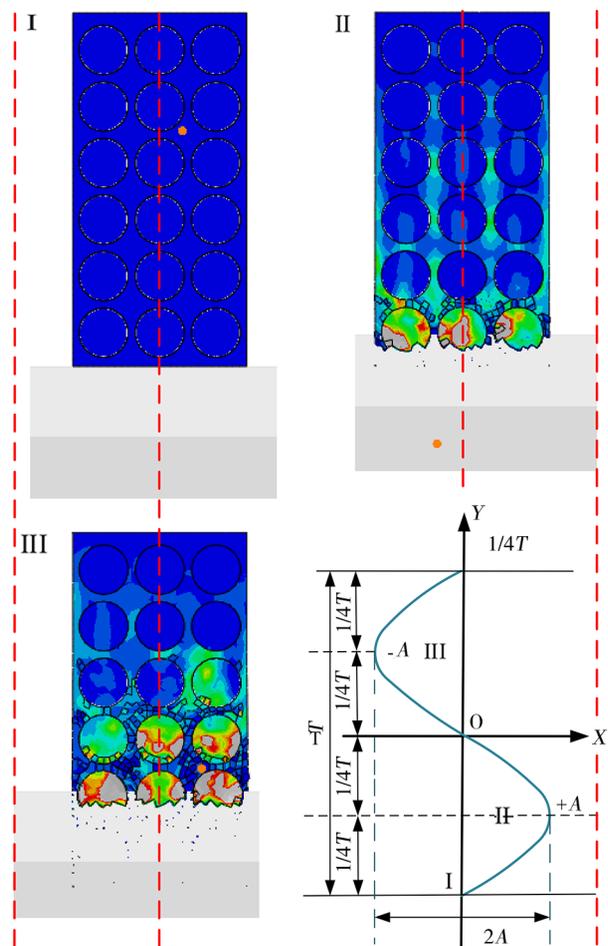


图 7 一个完整振动周期内有限元模型的输出状态示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of output state of finite element model in a complete vibration period

摩擦力和摩擦力矩的周期性变化,直接影响刀具的切削性能。为了分析刀具和纤维在切削过程中的动态特性,将一个完整的振动周期分为 4 个步骤。每  $1/2$  周期得到一个输出状态(图 7)。各输出状态的定义如下:(I)刀具在中线原始位置;(II)上一个周期已经结束,刀具已经到达  $+A$  位置,即将以  $v_t$  的速度移动到  $-A$  位置;(III)刀具已经到达  $-A$  位置,即将以  $v_t$  的速度移动到  $+A$  位置;刀具回到中线位置。

2.5D C/SiC 复合材料的 SiC 基体是硬脆性材料,虽然在材料中加入了纤维进行增韧,但是并不改变 SiC 基体的硬脆性。刀具切入 SiC 基体时, SiC 基体是典型的脆性去除,在应力较大的地方,产生裂纹,裂纹扩散,形成切屑。

由于短小纤维内嵌在 2.5D C/SiC 复合材料内部,在切削过程中,纤维的两端会产生极高的应力集中,在刀具的作用下会产生微观裂纹,随着载荷增加裂纹沿着短纤维界面开裂,直至断裂。同时,2.5D C/SiC 复合材料由于在制备过程中吸收一定的水分和空气而产生孔隙,根据 Griffith 提出的材料微裂纹断裂理论,实际材料内部总是存在微小缺陷或裂纹,在刀具作用下这些缺陷和裂纹将失稳扩展,导致加工表面产生一定的损伤。

### 3.2.1 $0^\circ$ 纤维切削角去除机理分析

图 8 显示了  $0^\circ$  纤维在传统铣削工况下的典型加工形貌。传统铣削工况下纤维断裂和界面脱粘在加工表面分布极其严重。碳纤维的断裂机制为宏观脆性断裂,切削层中的碳纤维在刀具挤压下脱粘。碳纤维沿切割方向发生弯曲变形,沿进给方向发生弯曲断裂。

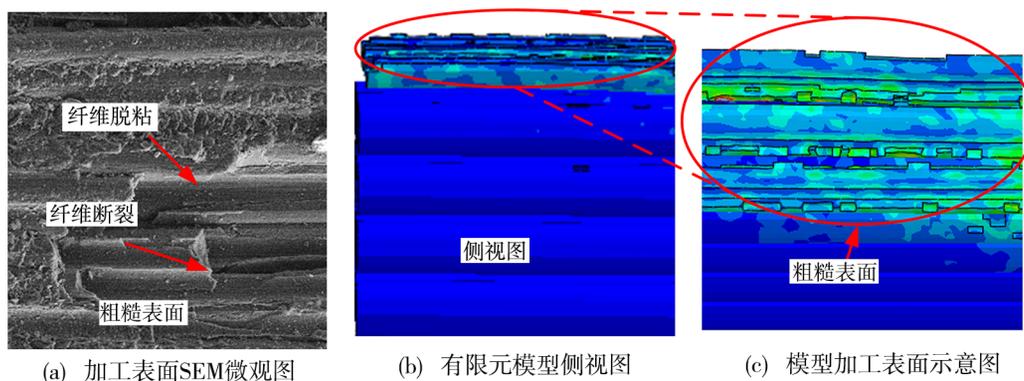


图 8 传统铣削工况下  $0^\circ$  纤维去除机理分析

Fig. 8 Analysis of  $0^\circ$  fiber removal mechanism under normal milling conditions

图 9 显示了  $0^\circ$  纤维在超声振动辅助铣削工况下的典型加工形貌,加工表面平坦。当超声振动辅助铣削时,刀具在进给运动的同时存在上下运动,碳纤

维内部在刀具挤压下产生微裂纹,微裂纹扩展伴随刀具移动,直至材料被去除。由于断续切削,每个脆性断裂的规模都很小,并且在单个纤维中发生了

多个此类微脆性断裂。因此,微脆性断裂加工的表面更光滑平整。传统铣削时,碳纤维的断裂机制转变为宏观脆性断裂。切削层中的碳纤维在刀具挤压

下脱粘。碳纤维沿切割方向发生弯曲变形,沿进给方向发生弯曲断裂。

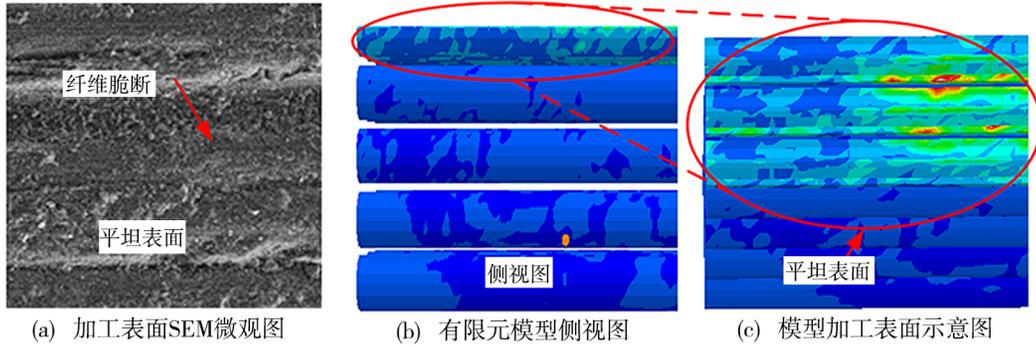


图9 超声振动辅助铣削工况下0°纤维去除机理分析

Fig. 9 Analysis of 0° fiber removal mechanism under ultrasonic vibration assisted milling condition

### 3.2.2 90°纤维切削角去除机理分析

图10显示了90°纤维在传统铣削工况下的典型加工形貌,纤维倾斜的断裂面充斥整个加工面。传统铣削过程中,由于刀具不断挤压纤维,纤维在刀具之前发生弯曲变形,随着刀具的推进,纤维弯曲的挠度增加,直至纤维断裂。显然传统铣削会导致纤维大变形,剪切断裂和压缩断裂占主导地位。

图11显示了90°纤维在超声振动铣削工况下的典型加工形貌,加工表面中都是平坦纤维断裂面。当超声振动辅助切削时,纵向高频的超声振动会导致整个刀具的速度急剧连续变化,从而改变了刀具的运动轨迹,因此刀具沿纤维轴向会产生额外的摩擦力,使纤维更加容易断裂,从而降低纤维弯曲深度,提高了表面质量。

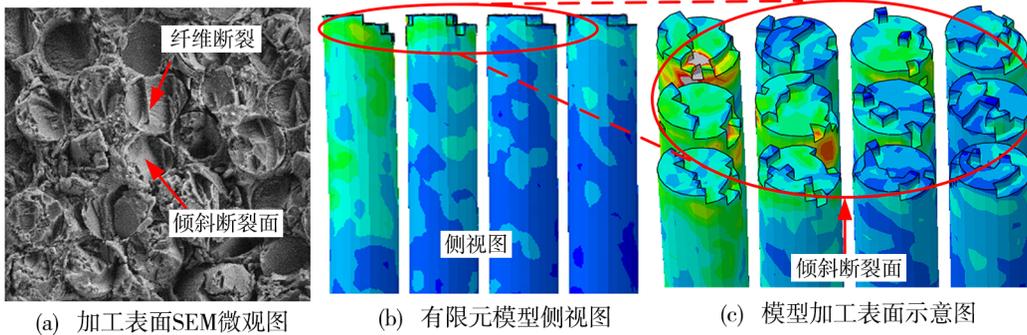


图10 传统铣削工况下90°纤维去除机理分析

Fig. 10 Analysis of 90° fiber removal mechanism under normal milling conditions

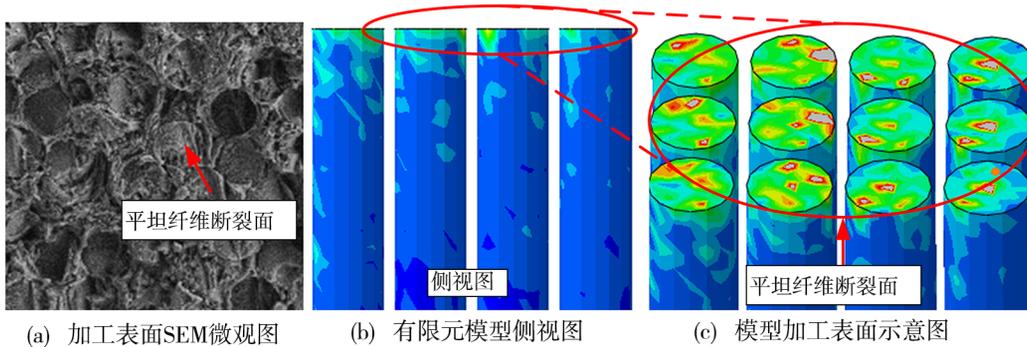


图11 超声振动辅助铣削工况下90°纤维去除机理分析

Fig. 11 Analysis of 90° fiber removal mechanism under ultrasonic vibration assisted milling condition

### 3.3 数值模拟中残余应力分析

残余应力是影响加工表面质量的重要因素,其

中残余压应力更是可以提高加工表面的硬化作用,从而提高表面质量。

在数值模拟中提取各个工况的残余应力曲线,如图12所示。相对于超声振动辅助切削该材料来

说,传统铣削该材料加工表面的残余拉应力占比更多,残余压应力占比比较少。

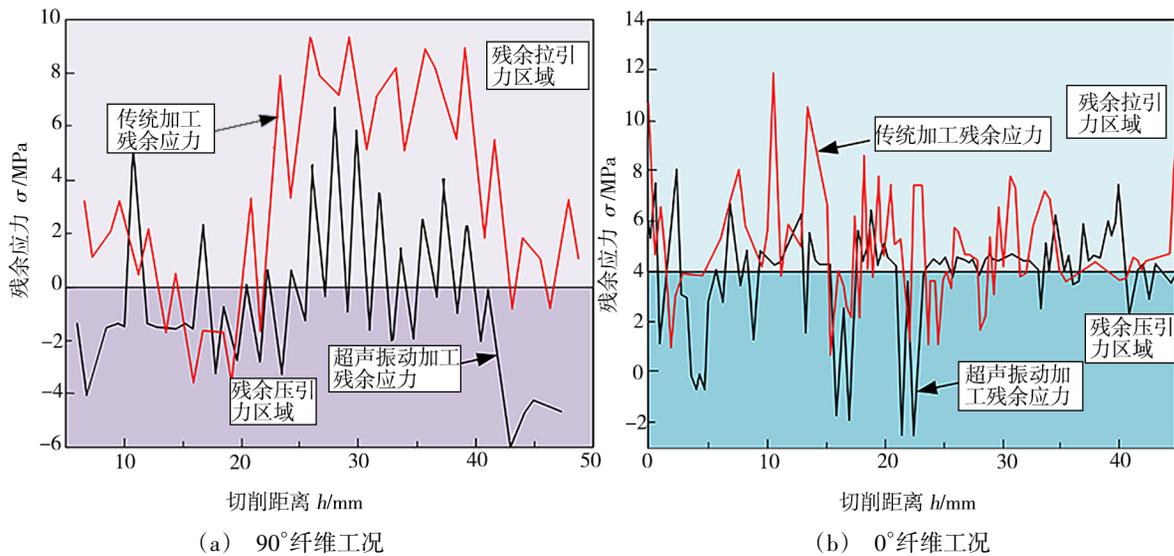


图12 不同工况的残余应力曲线

Fig. 12 Residual stress curves under different working conditions

对于2.5D C/SiC复合材料来说,加工表面的残余应力非常复杂,在数值模拟中主要由材料断裂机理以及超声振动辅助加工引起的冲击作用引起。2.5D C/SiC复合材料在铣削过程中发生脆断,当裂纹扩展到材料去除时,在残余材料中形成残余拉应力。

当进行超声振动辅助铣削时,刀具对材料进行锤击作用,切削刀具在铣削过程中的高频的锤击作用造成了材料加工表面的残余压应力,因此超声振动铣削更加有助于提高加工表面质量。

#### 4 结论

(1)与传统铣削相比,超声振动辅助铣削具有交变的轴向冲击载荷,更易去除材料。超声振动辅助铣削工况下的径向、法向切削力比传统切削工况下的径向、法向切削力分别减小68%、72%,证明超声振动辅助铣削对2.5D C/SiC复合材料作用效果明显。

(2)以30 kHz频率、200个等间隔、4个阶段为模拟过程,振动辅助铣削0°纤维和90°纤维的2.5D C/SiC复合材料进行数值模拟:0°纤维以宏观弯曲、脱粘断裂,碳纤维内部在刀具挤压下产生微裂纹,发生了多个此类微脆性断裂,随刀具移动被去除,断裂面光滑、平整;90°纤维以剪切、压缩模式断裂,而由于超声振动辅助铣削中的振幅改变了刀具轨迹及加工中的摩擦力,因此降低了纤维挠度变形,提高了表面质量。经过实验验证,所建立的数值模型可以有效地模拟0°纤维和90°纤维的去除过程。

(3)从加工表面残余应力分析,当进行超声振动辅助铣削时,刀具对材料进行锤击作用,切削刀具在铣削过程中的高频的锤击作用造成了材料加工表面的残余压应力,因此超声振动铣削更加有助于提高加工表面质量。

#### 参考文献

[1] WANG J, CHEN X, GUAN K, et al. Effects of channel modification on microstructure and mechanical properties of C/SiC composites prepared by LA-CVI process [J]. *Ceramics International*, 2018, 44: 16414-16420.

[2] QI Y C, FANG G D, WANG Z W, et al. An improved analytical method for calculating stiffness of 3D needled composites with different needle-punched processes [J]. *Composite Structures*, 2020, 237: 111398.

[3] ZHANG Y H, LIU Y S, CAO L L, et al. Preparation and analysis of micro-holes in C/SiC composites and ablation with a continuous wave laser [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41: 176-184.

[4] YANG Y Y, QU S S, GONG Y D, et al. Investigating the grinding performance of unidirectional and 2.5D-C/SiCs [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(4): 5123-5132.

[5] 何涛, 傅玉灿, 苏宏华, 等. C/SiC复合材料铣削表面完整性研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(05): 701-706.

HE T, FU Y C, SU H H, et al. Study on milling surface integrity of C/SiC composites [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 46(05): 701-706.

[6] 钟翔福. C/SiC复合材料旋转超声振动辅助铣削实验研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2019.

ZHONG X F. Experimental study on rotary ultrasonic vibration assisted milling of C/SiC Composites [D]. Nanchang Hangkong University, 2019.

[7] 王明海, 姜庆杰, 王奔, 等. C/SiC 复合材料超声扭转振动铣削抑制损伤产生的机理[J]. 现代制造工程, 2016(03):103-109.

WANG M H, JIANG Q J, WANG B, et al. Mechanism of damage suppression in ultrasonic torsional vibration milling of C/SiC composites [J]. Modern manufacturing engineering, 2016(03):103-109.

[8] BERTSCHE E, EHMANN K, MALUKHIN. Ultrasonic slot machining of a silicon carbide matrix composite [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66:1119-1134.

[9] 湛青坡. 超声振动辅助铣磨三维针刺 C/SiC 复合材料加工工艺研究[D]. 济南:山东大学, 2018.

ZHAN Q P. Research on ultrasonic vibration assisted milling of 3D needled C/SiC composites [D]. Shandong University, 2018.

[10] XIE Z P, LIU Z Q, WANG Q Q, et al. Longitudinal amplitude effect on material removal mechanism of ultrasonic vibration-assisted milling 2. 5D C/SiC composites[J]. Ceramics International, 2021.

[11] CHEN J, MING W W, AN Qinglong, et al. Mechanism

and feasibility of ultrasonic-assisted milling to improve the machined surface quality of 2D C<sub>v</sub>/SiC composites[J]. Ceramics International, 2020, 46: 15122-15136

[12] YUAN S M, LI Z, ZHANG C, et al. Research into the transition of material removal mechanism for C/SiC in rotary ultrasonic face machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95:1751-1761.

[13] HU M, MING W W, AN Q L, et al. Experimental study on milling performance of 2D C/SiC composites using polycrystalline diamond tools [J]. Advances in Applied Ceramics, 2019, 45:10581-10588.

[14] LIU Y, LIU Z B, WANG X B, et al. Experimental study on cutting force and surface quality in ultrasonic vibration-assisted milling of C/SiC composites [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 112:2003-2014.

[15] XU W X, ZHANG L C. A finite element analysis of fibre fracture in a polymer composite during vibration-assisted cutting[C]. Proceedings of 8<sup>th</sup> Australasian Congress on Applied Mechanics, Engineers Australia, 2014:s1 - s8.

[16] XU J F, FENG P F, FENG F, et al. Subsurface damage and burr improvements of aramid fiber reinforced plastics by using longitudinal - torsional ultrasonic vibration milling[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2021, 297: 1-15.