



## 平纹编织结构CFRP正交切削切屑形成及表面损伤

周强 陈燕 王晓宇 张川川 陈雪梅 刘元吉 陈清良 勾江洋

### Chip formation and surface damage in orthogonal cutting of plain-woven CFRP

ZHOU Qiang, CHEN Yan, WANG Xiaoyu, ZHANG Chuanchuan, CHEN Xuemei, LIU Yuanji, CHEN Qingliang, GOU Jiangyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221214.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 纤维束波动效应对平纹编织复合材料损伤行为的影响

Damage behavior of plain woven composites considering undulation effect of fiber bundles

复合材料学报. 2020, 37(1): 132–139 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190324.002>

#### 不同冷却润滑方式对切削SiC<sub>p</sub>/Al复合材料刀具磨损的影响

Influence of different cooling and lubrication methodson tool wear in machining SiC<sub>p</sub>/Al composites

复合材料学报. 2019, 36(5): 1244–1253 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180724.001>

#### 平纹编织SiC/SiC复合材料多尺度建模及强度预测

Multi-scale modeling and strength prediction of plain woven SiC/SiC composites

复合材料学报. 2019, 36(10): 2380–2388 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181112.001>

#### 平纹编织碳纤维增强树脂复合材料离散电导率建模方法

Discrete conductivity modeling method for plain weave carbon fiber reinforced resin composites

复合材料学报. 2020, 37(12): 3119–3127 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200327.001>

#### 双顶角钻头钻削CFRP复合材料的刀具磨损机制

Wear mechanism of double point angle drill bit in drilling CFRP composites

复合材料学报. 2017, 34(4): 749–757 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160823.001>

#### 拉伸应变下镍包碳纤维填充导电橡胶取向及电阻响应

Orientation and resistivity response of nickel coated carbon fiber filled conductive rubber at tensile strain

复合材料学报. 2019, 36(12): 2756–2763 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181119.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221214.001

# 平纹编织结构 CFRP 正交切削切屑形成及表面损伤



分享本文

周强<sup>1</sup>, 陈燕<sup>\*1</sup>, 王晓宇<sup>1</sup>, 张川川<sup>1</sup>, 陈雪梅<sup>2</sup>, 刘元吉<sup>2</sup>, 陈清良<sup>2</sup>, 勾江洋<sup>2</sup>

(1.南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016; 2.成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

**摘要:** 平纹编织结构碳纤维增强树脂基复合材料(Plain-woven carbon fiber-reinforced plastic, PW-CFRP)展现出高损伤容限特性, 在航空航天领域应用广泛, 但 PW-CFRP 是一种多尺度复合材料, 传统的微、宏观尺度并不能较好地去研究其切削机制, 因此本文采用介观层面切削仿真手段对其切屑形成机制进行研究。本文根据 PW-CFRP 的几何结构特点建立介观尺度的三维正交切削仿真模型, 同时开展正交切削试验, 对仿真模型进行验证; 研究了不同纤维编织方向 PW-CFRP 在切削加工中的材料去除机制。研究结果表明: 在相同工艺参数条件下, 切削力和表面损伤的仿真与实验结果最大相对误差不超过 15%, 仿真模型的可靠性得以验证; 其中各纤维方向纤维束区域的最大损伤深度依次为  $0^\circ < 45^\circ < 90^\circ < 135^\circ$ ; 经纬编织的平纹编织结构对切削加工损伤起到一定的抑制作用, 相邻纤维束间的支撑约束作用阻碍了损伤扩展, 其最大加工损伤深度不会超出纤维束截面最大宽度; 纤维附近树脂层厚度是加工损伤形成的重要因素, 树脂富集区域对纤维的支撑作用较好, 可以有效抑制损伤, 树脂薄弱区域对纤维支撑较弱, 损伤容易扩展至此处, 使材料表面损伤呈弧形分布。

**关键词:** 平纹编织结构 CFRP; ABAQUS; 正交切削; 纤维方向; 材料去除机制

中图分类号: TB332; V257 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)09-5371-15

## Chip formation and surface damage in orthogonal cutting of plain-woven CFRP

ZHOU Qiang<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>\*1</sup>, WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHANG Chuanchuan<sup>1</sup>, CHEN Xuemei<sup>2</sup>, LIU Yuanji<sup>2</sup>,  
CHEN Qingliang<sup>2</sup>, GOU Jiangyang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Chengdu Aircraft Industrial (Group) CO., LTD., Chengdu 610092, China)

**Abstract:** Plain-woven carbon fiber-reinforced plastic (PW-CFRP) shows high damage tolerance characteristics and is widely used in the aerospace field. However, PW-CFRP is a multi-scale composite material, and the traditional micro and macro scales cannot study its cutting mechanism well. Therefore, this paper uses mesoscopic cutting simulation methods to study its chip formation mechanism. In this paper, a mesoscopic three-dimensional orthogonal cutting simulation model was established according to the geometric structure characteristics of PW-CFRP, and the orthogonal cutting experiment was carried out to verify the simulation model. The material removal mechanism of PW-CFRP with different fiber braiding directions in cutting process was studied. The results show that the maximum relative error between the simulation and experimental results of cutting force and surface damage is less than 15% under the same process parameters, and the reliability of the simulation model is verified. The maximum damage depth of fiber bundles in each fiber orientation is  $0^\circ < 45^\circ < 90^\circ < 135^\circ$ . The plain-woven structure of warp and fill weaving has inhibitory effect on the machining damage. The support constraint between adjacent fiber bundles hinders the damage expansion, and its maximum processing damage depth will not exceed the maximum width of

收稿日期: 2022-10-11; 修回日期: 2022-11-18; 录用日期: 2022-12-02; 网络首发时间: 2022-12-16 06:59:53

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221214.001>

基金项目: 国家自然科学基金(51875284)

National Natural Science Foundation of China (51875284)

通信作者: 陈燕, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为难加工材料的高效精密加工技术 E-mail: [ninaych@nuaa.edu.cn](mailto:ninaych@nuaa.edu.cn)

引用格式: 周强, 陈燕, 王晓宇, 等. 平纹编织结构 CFRP 正交切削切屑形成及表面损伤 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(9): 5371-5385.

ZHOU Qiang, CHEN Yan, WANG Xiaoyu, et al. Chip formation and surface damage in orthogonal cutting of plain-woven CFRP[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(9): 5371-5385(in Chinese).

the fiber bundle section. The thickness of the matrix layer near the fiber is an important factor in the formation of processing damage. The resin-rich area has a good supporting effect on the fiber and can effectively suppress the damage. The resin-starved area has weak support for the fiber, and the damage is easy to expand here, making the surface damage of the material arc-shaped distribution.

**Keywords:** plain woven CFRP; ABAQUS; orthogonal cutting; fiber orientation; material removal mechanism

轻量化及耐久性已成为新一代飞机共同追求的目标，以碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber-reinforced plastic, CFRP) 为代表的高性能复合材料已在大型飞机结构中得到大量应用，在降低机体结构重量的同时，还能有效提高零件的疲劳寿命<sup>[1]</sup>。与单向层合板相比，织物结构 CFRP 复合材料具有更好的耐损伤性、易处理性、可回收性等优点，因此在不同的工业领域得到越来越多的应用<sup>[2-3]</sup>。

平纹编织结构碳纤维增强树脂基复合材料 (Plain-woven carbon fiber-reinforced plastic, PW-CFRP) 作为织物结构复合材料中的重要成员，展现出高损伤容限的特点，在航空航天及民用领域应用广泛<sup>[4]</sup>，目前国内外研究人员在织物结构 CFRP 复合材料的力学性能及切削加工方面开展了相关研究。在 PW-CFRP 的力学性能研究方面，成果颇多。Onal 等<sup>[5]</sup>介绍了 2D 编织复合材料的主要的建模技术和方法，从力学性能以及强度失效分析的数值模型角度进行综述，并指出有限元法对预测编织复合材料的力学性能等分析有很好的发展前景。杨晓文<sup>[6]</sup>基于渐进损伤演化理论进行平纹编织 CFRP 细观尺度仿真，并结合编织 CFRP 的偏轴拉伸试验以及编织角动态变化测量，引入编织角影响参数改进宏观材料模型，进行考虑编织角实时变化的宏观仿真研究，揭示材料的损伤失效机制和编织角变化规律。Zhao 等<sup>[7]</sup>建立了微观-介观-宏观模型的多尺度模型以研究 PW-CFRP 的低速冲击和冲击后的压缩行为，研究结果表明冲击带来的层内损伤容易导致冲击平纹织物复合材料的残余抗压强度降低。其实在材料切削过程中，刀具也会给材料带来冲击效应，从而对材料的加工质量造成影响。Zhang 等<sup>[8]</sup>对单向 CFRP (Unidirectional CFRP, UD-CFRP) 和 PW-CFRP 进行了静态和动态拉伸试验，以研究两种材料在不同应变速率下的拉伸性能，研究发现与 UD-CFRP 相比，PW-CFRP 的拉伸强度和杨氏模量对应变率更敏感，可能是由于纤维在经纱方向上的限制所导致的。张铁纯等<sup>[9]</sup>对 PW-CFRP 进行静态压缩和压-压疲劳性能实验，结果表明试件的条件疲劳极限

为静态压缩强度的 66.3%，与疲劳断口相比，静态压缩断口表现出较大的分层损伤。Siddique 等<sup>[10]</sup>研究了 PW-CFRP 的 I 型层间断裂韧性和断裂机制，研究发现当裂纹在其路径中遇到纤维束时，由于纤维束之间的钳制作用阻碍了裂纹生长，使裂纹扩展变得缓慢。King 等<sup>[11]</sup>提出了一种用于开发平面变形中机织织物力学行为的连续模型，该模型既可以模拟现有织物，又可以根据纱线和织物的特性预测新型织物的行为。Rattan 等<sup>[12-13]</sup>对斜纹、缎纹、平纹组织的碳纤维织物复合材料在微动磨损模式下的机械性能和摩擦性能进行评估，得出平纹复合材料的性能表现最好，该结构能有效抑制碎屑产生。

同时，对 PW-CFRP 的切削加工研究也在不断持续进行。正交切削过程常被用来研究切削理论和作为实验研究或有限元研究的基础模型，王冬晓等<sup>[14]</sup>通过制备 UD-CFRP 和 PW-CFRP 并开展单因素正交切削试验，考虑纤维方向角、切削速度和切削深度对切削力及加工表面损伤的影响，发现纤维方向角对加工影响最为显著，增大切削速度和降低切削深度有利于提高 CFRP 加工质量<sup>[6]</sup>。Liu 等<sup>[15]</sup>通过正交切削试验对平纹编织芳纶纤维增强复合材料 (AFRP) 的材料去除机制进行了相关研究，结果表明纤维切削角对纤维的断裂形式影响显著，较大的切削深度和较低的切削速度会使切削力增大，降低加工表面粗糙度。Feito 等<sup>[3]</sup>使用不同结构钻头对 UD-CFRP 和 PW-CFRP 进行多组钻削试验，织物结构复合材料不仅表现出增强的力学性能，而且在钻孔时表现出更好的表面质量。Su 等<sup>[16]</sup>根据平纹组织的结构特点，基于正交切削模型，推导出平纹组织比力系数，通过转换由正交切削理论模型导出的比切削能来预测铣削 PW-CFRP 的铣削力。Zhang 等<sup>[17]</sup>对 UD-CFRP、PW-CFRP 和斜纹编织 CFRP 进行钻削试验对比，结果表明 UD-CFRP 的轴向力和扭矩最小，但 PW-CFRP 的表面粗糙度最小。Wong 等<sup>[18]</sup>对平纹编织结构玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 进行了一系列力学性能及钻孔实验，研究表明平纹织物在力学

性能和钻孔后的残余强度方面表现更好。周井文等<sup>[19]</sup>对 UD-CFRP 和织物结构 CFRP 进行端铣正交试验，对加工表面质量进行对比分析，结果表明每齿进给量显著影响织物结构 CFRP 的表面质量，并呈现鱼鳞状微观形貌。Hintze 等<sup>[20]</sup>使用聚晶金刚石刀具对 PW-CFRP 进行铣槽试验，以探究 PW-CFRP 的损伤形成的影响因素，试验结果表明纤维束起伏波动带来的树脂基体分布不均匀是分层损伤发生的原因。试样的铺层角度也会导致编织特性的各种差异，进而影响所获得的性能<sup>[21]</sup>。Li 等<sup>[22]</sup>建立了包含纤维-界面-基体的三维多相细观切削仿真模型，对单次和多次切削加工做对比研究，结果表明采用多次切削的策略可以使加工表面完整性提高 40%，降低亚表面损伤程度。李树健等<sup>[23]</sup>考虑了 CFRP 制造过程中的孔隙缺陷，建立了 CFRP 细观切削仿真模型，研究了不同孔隙率条件下的 CFRP 细观切削行为，研究结果表明孔隙会增加刀具的“虚切”现象，从而对切削力和材料去除过程产生影响。编织复合材料明显提升了材料厚度方向的各项性能，而且由于其结构的整体性，可以有效地阻止分层扩展，因此提高了抗分层、抗损伤的能力<sup>[24]</sup>。可以看出增强相纤维结构影响材料切削加工过程，对材料去除机制产生显著影响，需做进一步探究。

综上所述，虽然国内外学者对织物结构复合材料开展了相关研究，但是主要是进行一系列的力学性能试验或仿真，为材料结构性能优化提供理论研究基础，在切削加工方面研究更偏向于单向 CFRP，且仿真多聚焦在微观仿真层面，同时 PW-CFRP 是一种多尺度复合材料，传统的微、宏观尺度并不能较好地去研究其切削机制，需要对织物结构 CFRP 的材料去除机制进行深入研究。因此本文针对 PW-CFRP 建立包含树脂基体相-界面相-纤维增强相的三维几何模型，完整表现 PW-CFRP 几何结构特征，采用 3D Hashin 失效准则和 PUCK 基体失效准则，利用 Fortran 语言编写等效均质纤维束力学本构模型，建立介观尺度的 PW-CFRP 三维正交切削有限元仿真模型，完整地模拟了 PW-CFRP 的材料去除过程；并通过相同加工参数下的试验验证有限元模型的可靠性；通过仿真分析结合实验观测研究了在 PW-CFRP 中，纤维切削角对材料去除机制的影响及纤维束之间的相互作用。

## 1 切削仿真模型的建立

### 1.1 几何建模与接触设置

本文研究的 PW-CFRP，主要以两组纱以一隔一穿的方式规则有序的进行编织，相邻织物层间隔 45°铺层角度层铺制成，丝束宽度、丝束厚度是主要的几何参数<sup>[25]</sup>。PW-CFRP 材料截面的显微图像所获取的一系列几何结构尺寸信息，如图 1 所示，再采用 Matlab 软件将 PW-CFRP 样件截面显微图像进行二值化处理，得到灰度图像的等值线轮廓，并提取轮廓曲线，得到纤维走向函数，如下式所示：

$$y = \frac{H_0}{2} \cos\left(\frac{\pi}{A_0}x\right) \quad (1)$$

其中： $H_0$  为纤维束横截面最大厚度； $A_0$  为纤维束最大宽度。

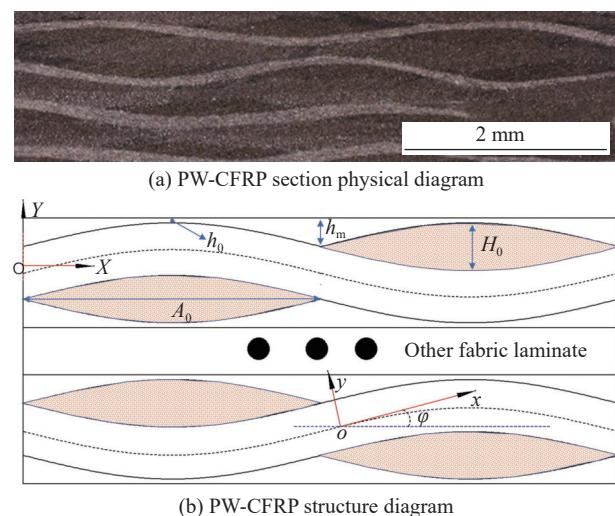


图 1 平纹编织结构碳纤维增强树脂基复合材料 (PW-CFRP) 截面实物图与结构示意图  
Fig. 1 Physical and structural diagram of plain-woven carbon fiber-reinforced plastic (PW-CFRP)

在 Solidworks 建模软件中建立 (0°/90°) 和 (45°/135°) 这 2 种铺层角度 PW-CFRP 三维织物几何模型，如图 2 所示。纤维束的截面为类似凸透镜的近椭圆形状，且经向纤维束和纬向纤维束几何形状尺寸保持一致， $A_0$  是纤维束宽度， $H_0$  是纤维束截面最大厚度， $h_0$  是最薄处树脂厚度，其中最厚处树脂厚度  $h_m=0.5H_0+h_0$ ，模型具体尺寸参数如表 1 所示。根据所建立的纤维束几何模型，构

建相应的树脂基体和界面相几何模型，其中界面相模型是由纤维束模型直接抽壳处理得到的，将所建模型转为 stp 格式文件并导入 ABAQUS 中并装配。

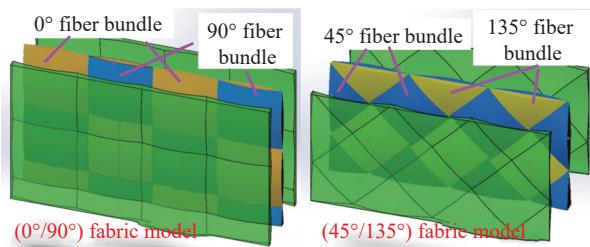


图 2 PW-CFRP 三维几何模型

Fig. 2 Three-dimensional geometric model of PW-CFRP

表 1 仿真模型几何尺寸参数

Table 1 Geometric dimension parameters of simulation model

$A_0/\text{mm}$	$H_0/\text{mm}$	$V_f$	$h_0/\text{mm}$
1.8	0.15	55%	0.05

为便于识别织物层中的经纬向纤维束，本文中规定从切削方向沿顺时针与纤维束夹角  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  为纬向纤维束， $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$  为经向纤维束，并且仍采用纤维切削角<sup>[26]</sup>(按顺时针从纤维指向进给方向，范围  $0^\circ \sim 180^\circ$ ，小于  $90^\circ$  为顺纤维方向，大于  $90^\circ$  为逆纤维方向)表示各纤维束方向来加以区分。

在网格划分前对每束纤维束进行材料方向设置，保证材料主方向即 1 方向随纤维束波动起伏变化，更准确地体现纤维束的材料特性，其中 3 方向为垂直与纤维束外表面轮廓曲面的法向轴方向，2 方向垂直于 1 和 3 方向，如图 3(a) 所示。

为确保能完整研究纤维束之间的相互作用，在控制仿真计算时间的同时，尽可能贴合实际切削过程，仿真模型中切削的同一平面内纤维束不少于 3 束，因此  $(0^\circ/90^\circ)$  织物切削仿真模型的工件长 6 mm，宽 3 mm，厚 0.44 mm， $(45^\circ/135^\circ)$  织物切削仿真模型的工件的工件长 8.49 mm，宽 4.24 mm，厚 0.44 mm。建立的 PW-CFRP 正交切削模型如图 3(b) 和图 3(c) 所示。

网格质量高低直接影响仿真计算效率与精度，为保证网格质量，对基体结构复杂区域进行切分，均匀划分网格，纤维束和基体网格单元类型均采用减缩积分的八节点线性六面体单元 C3D8R，为防止切削过程中网格过度扭曲而发生畸变，开启

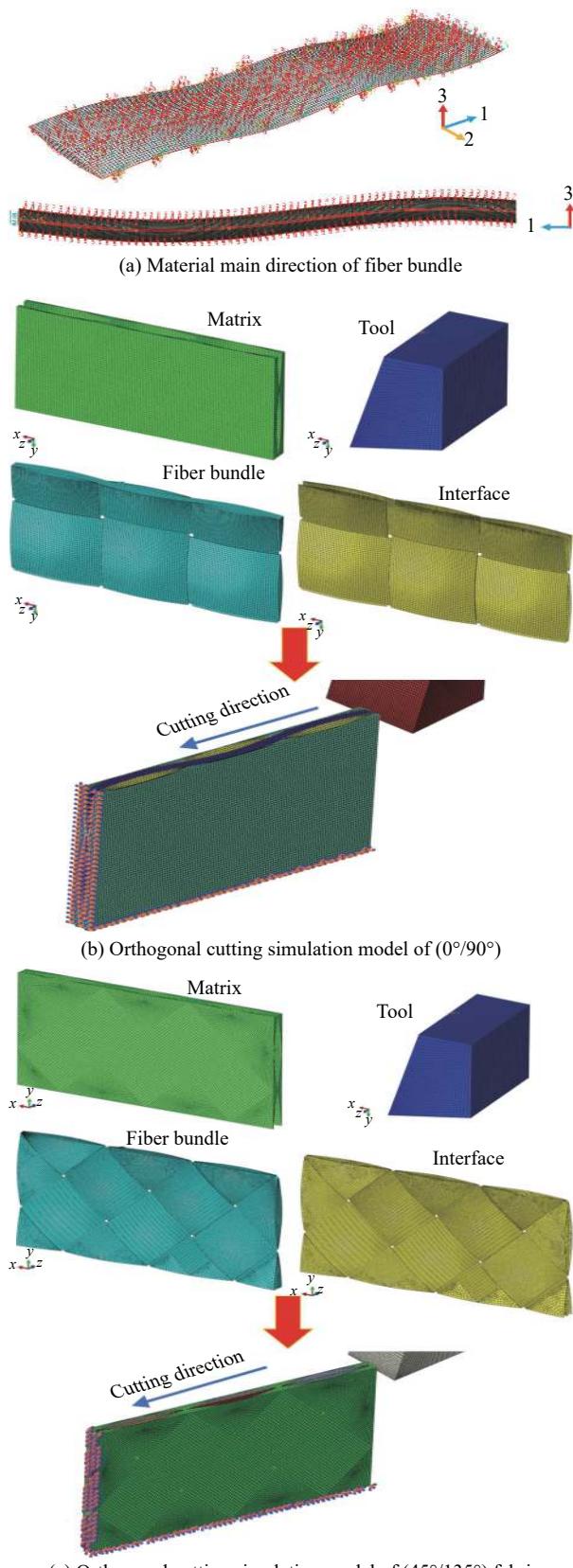


图 3 PW-CFRP 正交切削仿真模型及纤维束材料主方向

Fig. 3 Orthogonal cutting simulation model of PW-CFRP and main material direction of fiber bundle

网格扭曲控制，打开增强沙漏控制来抑制沙漏现象产生。采用全局撒种密度 0.2 mm，对纤维束截面厚度方向及基体复杂结构区域进行局部加密，局部加密区域撒种密度 0.05 mm<sup>[22]</sup>。界面相采用四边形壳单元 S4R，网格密度和纤维束模型保持一致。在切削仿真过程中不考虑刀具磨损，为降低模型整体网格数量，提高仿真效率，将刀具设置成离散刚体后进行抽壳处理，刀具采用四边形网格类型 R3D4，并对切削刃处的前后刀面区域撒种密度进行局部加密。 $(0^\circ/90^\circ)$  织物切削仿真模型的网格总数量为 155 041， $(45^\circ/135^\circ)$  织物切削仿真模型的网格总数量为 161 850。为加快计算速度，开启质量缩放，数值为 400。

在切削仿真过程中，刀具与参考点进行耦合绑定，采用通用接触算法去定义刀具和工件之间存在的多种接触关系，法向接触属性采用硬接触，用罚函数定义切向接触属性。刀具与纤维束间的接触摩擦系数为 0.3<sup>[27]</sup>，刀具与基体及界面相单元之间的接触摩擦系数设置为 0.2<sup>[28]</sup>。所建模型是截取实际加工样件的切削影响区域，除上方和右侧外，都有其余材料支撑，因此对模型的底部和侧面的所有自由度进行约束，采用完全固定约束，使 U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0；将刀具沿 y 方向和 z 方向的移动位移，沿 x 方向、y 方向和 z 方向的转动位移完全约束，即 U2=U3=UR1=UR2=UR3=0，只对刀具施加沿切削方向的进给速度 (U1、U2、U3 为 3 个正交方向的平动自由度，UR1、UR2、UR3 指以 3 个正交方向为轴的转动自由度)。

## 1.2 材料本构模型定义

单束纤维束是由多根碳纤维和树脂组合而成，在垂直于中心轴线的平面内，弹性性能在各个方向上保持一致，呈现正交各向异性特点，对纤维束组分进行等效均质化处理。基于 ABAQUS 的用户自定义子程序接口，使用 Fortran 程序语言编写所适用的材料本构模型，对纤维束中的纤维失效采用 3D Hashin 失效准则，基体失效采用更能准确描述纤维间失效的 PUCK 失效准则，如以下各式所示。此模型假设纤维束内部纤维与基体均匀连续分布，应力-应变关系在损伤起始前呈线弹性变化，不考虑温度对切削过程的影响。

3D Hashin 纤维失效准则：

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{lt}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11}}{S_{13}}\right)^2 = 1, d_{ft} = 1 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{lc}}\right)^2 = 1, d_{fc} = 1 \quad (3)$$

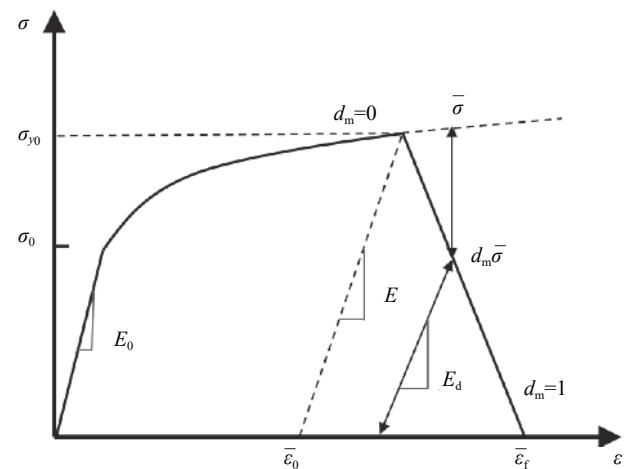
PUCK 基体失效准则：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\sigma_{11}}{2X_{lt}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}^2}{|X_{2t}X_{2c}|}\right) + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \\ & \sigma_{22}\left[\frac{1}{X_{2t}} + \frac{1}{X_{2c}}\right] = 1, \sigma_{22} + \sigma_{33} > 0, d_{mt} = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\sigma_{11}}{2X_{lt}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}^2}{|X_{2t}X_{2c}|}\right) + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \\ & \sigma_{22}\left[\frac{1}{X_{2t}} + \frac{1}{X_{2c}}\right] = 1, \sigma_{22} + \sigma_{33} < 0, d_{mc} = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中： $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{33}$ 、 $\sigma_{12}$ 、 $\sigma_{13}$ 、 $\sigma_{23}$  分别为材料积分点的应力分量； $X_{lt}$ 、 $X_{2t}$  分别为纤维束 1、2 方向上的拉伸强度； $X_{lc}$ 、 $X_{2c}$  分别为纤维束 1、2 方向上的压缩强度； $S_{12}$ 、 $S_{23}$ 、 $S_{13}$  分别为纤维束 1-2、2-3、1-3 面内的剪切强度； $d_{ft}$ 、 $d_{fc}$ 、 $d_{mt}$ 、 $d_{mc}$  分别代表控制纤维的拉伸、压缩损伤变量及基体的拉伸、压缩损伤变量。

考虑损伤演化的树脂基体的本构模型如图 4 所示。在基体材料所受应力小于屈服应力  $\sigma_0$  的起始阶段，其应力-应变曲线呈线弹性变化特点。 $E_0$  为初始弹性模量。当应力超过屈服应力  $\sigma_0$  时，树脂基体从弹性变形开始发生屈服，使用 Mises 屈服准则作为判断材料屈服标准，直到材料所受最大主应力达到强度极限  $\sigma_{y0}$  时，树脂基体进入损



$\sigma_0$ —Resin yield stress;  $\sigma_{y0}$ —Resin yield strength;  $E_0$ —Initial elastic modulus of resin;  $E_d$ —Elastic modulus of resin after degradation;  $d_m$ —Damage state variable;  $\sigma$ —Equivalent plastic stress;  $\varepsilon$ —Equivalent plastic strain;  $\bar{\sigma}$ —Mean yield stress;  $E$ —Modulus of elasticity;  $\bar{\varepsilon}_0$ —Initial plastic strain;  $\bar{\varepsilon}_f$ —Maximum plastic strain

图 4 树脂基体材料本构  
Fig. 4 Constitutive model of matrix material

伤演化阶段。

在损伤演化阶段，树脂基体的弹性模量由初始弹性模量  $E_0$  线性退化为  $E_d$ ， $E_d$  可根据下式计算：

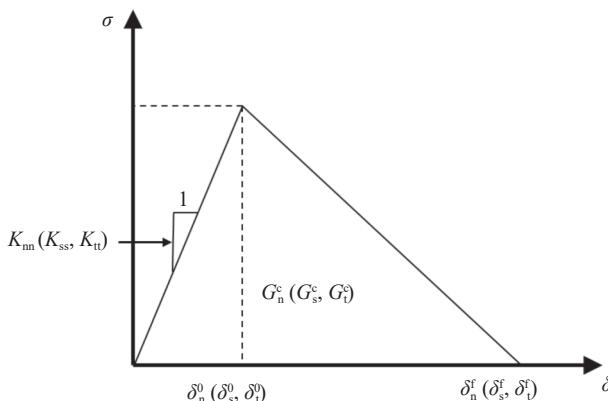
$$E_d = (1 - d_m)E_0 \quad (6)$$

式中： $E_d$  为材料损伤时的弹性模量； $d_m$  作为损伤状态变量用来描述单元的损伤程度。 $d_m$  初始值为 0，随材料损伤不断增大，当  $d_m=1$  时，单元完全损伤。

界面相作为碳纤维增强相和树脂基体相之间的中间层，起着可传递应力与应变的连接作用，一般使用基于拉伸分离准则的内聚力模型模拟界面相的黏性行为，其本构模型如图 5 所示。 $G_n^c$ 、 $G_s^c$  和  $G_t^c$  分别指法向（模式 I）和局部剪切方向（模式 II 和模式 III）的断裂能。基于二次应力准则作为判断 Cohesive 单元损伤起始依据，如下式所示：

$$\left(\frac{\langle\sigma_n\rangle}{N_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\langle\sigma_s\rangle}{S_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\langle\sigma_t\rangle}{T_{\max}}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

其中： $N_{\max}$ 、 $S_{\max}$ 、 $T_{\max}$  分别表示法向强度和两个剪切强度； $\sigma_n$ 、 $\sigma_s$ 、 $\sigma_t$  法向、第一切向及第二切向上的应力分量。



K—Interface separation stiffness;  $\delta_0$ —Equivalent displacement at damage initiation;  $\delta_f$ —Equivalent displacement when completely damaged;  $G_c$ —Interfacial fracture energy

图 5 Cohesive 黏性表面本构

Fig. 5 Constitutive model of Cohesive surface

界面相被认为是各向同性的弹塑性材料，其本构模型与树脂基体基本一致，在力学性能参数上略小于树脂基体。为了既能准确模拟界面行为，又能直观观测分层损伤，本文采用壳单元对界面层单独建模，其材料本构模型与树脂基体相同，界面层几何模型如图 6 所示。对纤维束-界面、界面-树脂基体的接触表面之间使用 Cohesive 黏性表面。

试验中采用 T700 碳纤维织物为增强相，双马

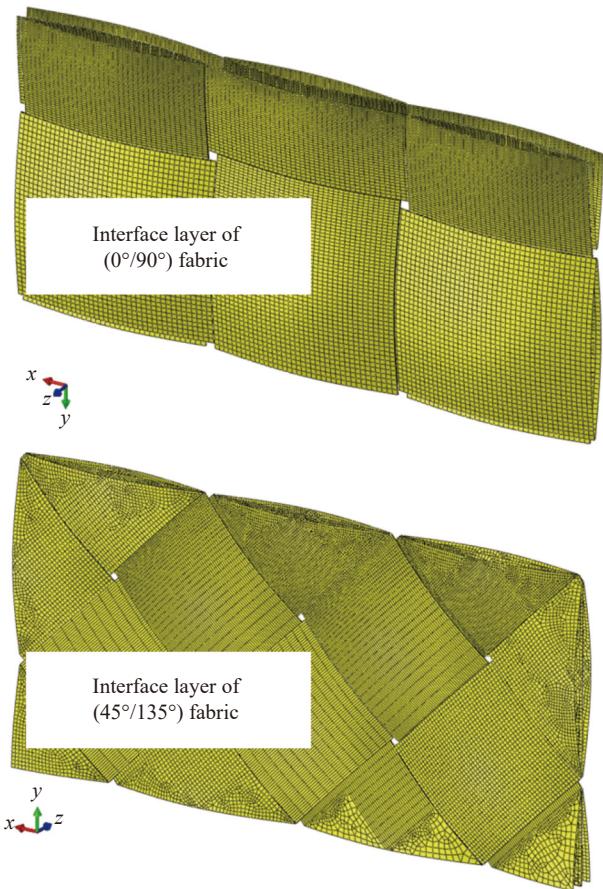


图 6 界面层的壳单元模型

Fig. 6 Shell element model of interface layer

来酰亚胺树脂为基体相，因此，模型中各组分材料力学性能参数如表 2 所示。

## 2 试验及方法

### 2.1 切削试验系统

为了验证仿真模型结果的正确性，开展正交切削试验，切削试验工装如图 7(a) 所示，在 DMG 五轴立式加工中心上进行，机床型号为 DMG Ultrasonic 20 Linear，最高进给速度 40 m/min，刀具选择 PCD 单刃刀具，密度  $3.52 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量为  $1.1 \times 10^6 \text{ MPa}$ ，泊松比为 0.07，如图 7(b) 所示。本试验通过将工作台固定，使用主轴锁死指令限制其旋转运动，以保证安装在主轴上的刀具切削刃始终平行于工件厚度方向，仅保留刀具沿 x 轴方向的进给运动，从而实现正交切削。PW-CFRP 试件由虎钳夹具夹持。使用 Kistler 9272 测力仪和电荷放大器对切削力信号进行采集，采集到的切削力信号通过数据采集卡传输存储至 PC 端， $F_x$  为主切削力， $F_z$  为切深抗力。使用 FASTCAM Mini AX 高速摄像机拍摄刀具切削 PW-

表 2 T700 碳纤维织物材料各组分性能参数<sup>[27-30]</sup>Table 2 Property parameters of each component of T700 carbon fiber fabric<sup>[27-30]</sup>

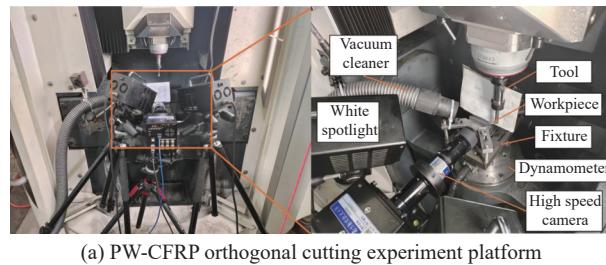
Phase composition	Material parameter	Value
Fiber bundle	$X_{1t}^f/\text{MPa}$	4 900
	$X_{1c}^f/\text{MPa}$	4 500
	$X_{2t}^f/\text{MPa}$	400
	$X_{2c}^f/\text{MPa}$	700
	$X_{3t}^f/\text{MPa}$	400
	$X_{3c}^f/\text{MPa}$	700
	$S_{12}^f/\text{MPa}$	100
	$S_{13}^f/\text{MPa}$	100
	$S_{23}^f/\text{MPa}$	58
Matrix	$\rho_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	980
	$E_m/\text{MPa}$	4 000
	$\nu_m$	0.4
	$\sigma_{y0}^m/\text{MPa}$	270
Interface properties	$N_{\max}/\text{MPa}$	60
	$S_{\max}/\text{MPa}$	90
	$T_{\max}/\text{MPa}$	90
	$G_n^c/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.2
	$G_s^c/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0
	$G_t^c/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0

Notes:  $X_{1t}^f$ —Tensile strength of fiber bundles in 1 direction;  $X_{2t}^f$ —Tensile strength of fiber bundles in 2 direction;  $X_{3t}^f$ —Tensile strength of fiber bundles in 3 direction;  $X_{1c}^f$ —Compressive strength of fiber bundles in the 1 direction;  $X_{2c}^f$ —Compressive strength of fiber bundles in 2 direction;  $X_{3c}^f$ —Compressive strength of fiber bundles in 3 direction;  $S_{12}^f$ —Shear strength of fiber bundles in 1-2 plane;  $S_{23}^f$ —Shear strength of fiber bundles in 2-3 plane;  $S_{13}^f$ —Shear strength of fiber bundles in 1-3 plane.  $\rho_m$ —Matrix density;  $E_m$ —Young's modulus of matrix;  $\nu_m$ —Poisson's ratio of matrix;  $\sigma_{y0}^m$ —Yield strength of the matrix;  $N_{\max}$ —Normal stress intensity of interface;  $S_{\max}$ —First tangential stress intensity of interface;  $T_{\max}$ —Second tangential stress intensity of interface;  $G_n^c$ —Normal critical fracture energy of interface;  $G_s^c$ —First tangential critical fracture energy of interface;  $G_t^c$ —Second tangential critical fracture energy of interface.

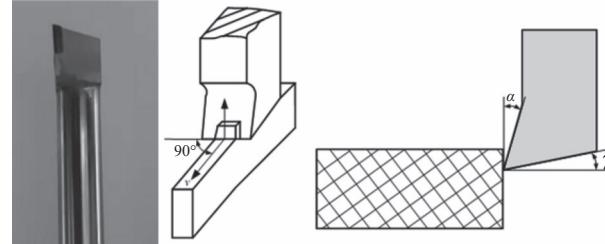
CFRP 试件时的切屑与损伤形成过程。

## 2.2 试验材料与方案

试验工件使用 PW-CFRP 层合板，PW-CFRP 单层预浸料厚 0.2 mm，按 0° 和 45° 铺层角度交叉顺序铺设 20 层。将试验材料用金刚石锯片机切割成尺寸为 70 mm×40 mm×4 mm 的试件，通过不同的切割角度，制备 (0°/90°) 和 (45°/135°) 2 种不同表面织物铺层的试验件。在恒定切深与切削速度下进行试验，为减小试验误差，每组工艺参数在同一试件上开展 3 次重复试验，然后对试验结果取平均值，具体试验参数见表 3。



(a) PW-CFRP orthogonal cutting experiment platform



(b) Tool and working angle diagram

$\gamma$ —Tool rake angle;  $\alpha$ —Tool back angle

图 7 PW-CFRP 正交切削试验平台及刀具示意图

Fig. 7 Orthogonal cutting experiment platform of PW-CFRP and tool diagram

表 3 正交切削试验参数

Table 3 Process parameters of orthogonal cutting experiment

$v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$a_p/\text{mm}$	$\gamma/(\text{°})$	$\alpha/(\text{°})$
2 000	0.1	15	12

Notes:  $v$ —Cutting speed;  $a_p$ —Cutting depth.

## 3 结果与讨论

### 3.1 有限元仿真实验验证

为验证仿真模型的正确性，从而更好地应用仿真结果探究 PW-CFRP 的材料去除机制，下面从切削力和表面损伤深度 2 个角度对比分析仿真与试验结果。

由于纤维束之间是独立且有序间隔开的，切削力随着刀具在完整切削每束纤维束之间存在一定周期性波动。将 (0°/90°)、(45°/135°) 织物层仿真模型切削力进行叠加耦合，得到表面织物为 (0°/90°) 的 PW-CFRP 层合板仿真实切削力，将单位材料去除体积下的仿真实切削力与试验切削力对比，如图 8 所示。其中仿真  $F_x$  为 141.5 N，试验  $F_x$  为 149.8 N，相对误差为 5.5%；仿真  $F_z$  为 27.8 N，试验  $F_z$  为 32.48 N，相对误差为 14.4%。从切削力的角度可以验证仿真模型的可靠性。

CFRP 材料在加工过程中，表面材料受约束较弱导致的撕裂损伤是主要缺陷，故仿真模型中采用在子程序中自定义的树脂拉伸失效损伤输出变

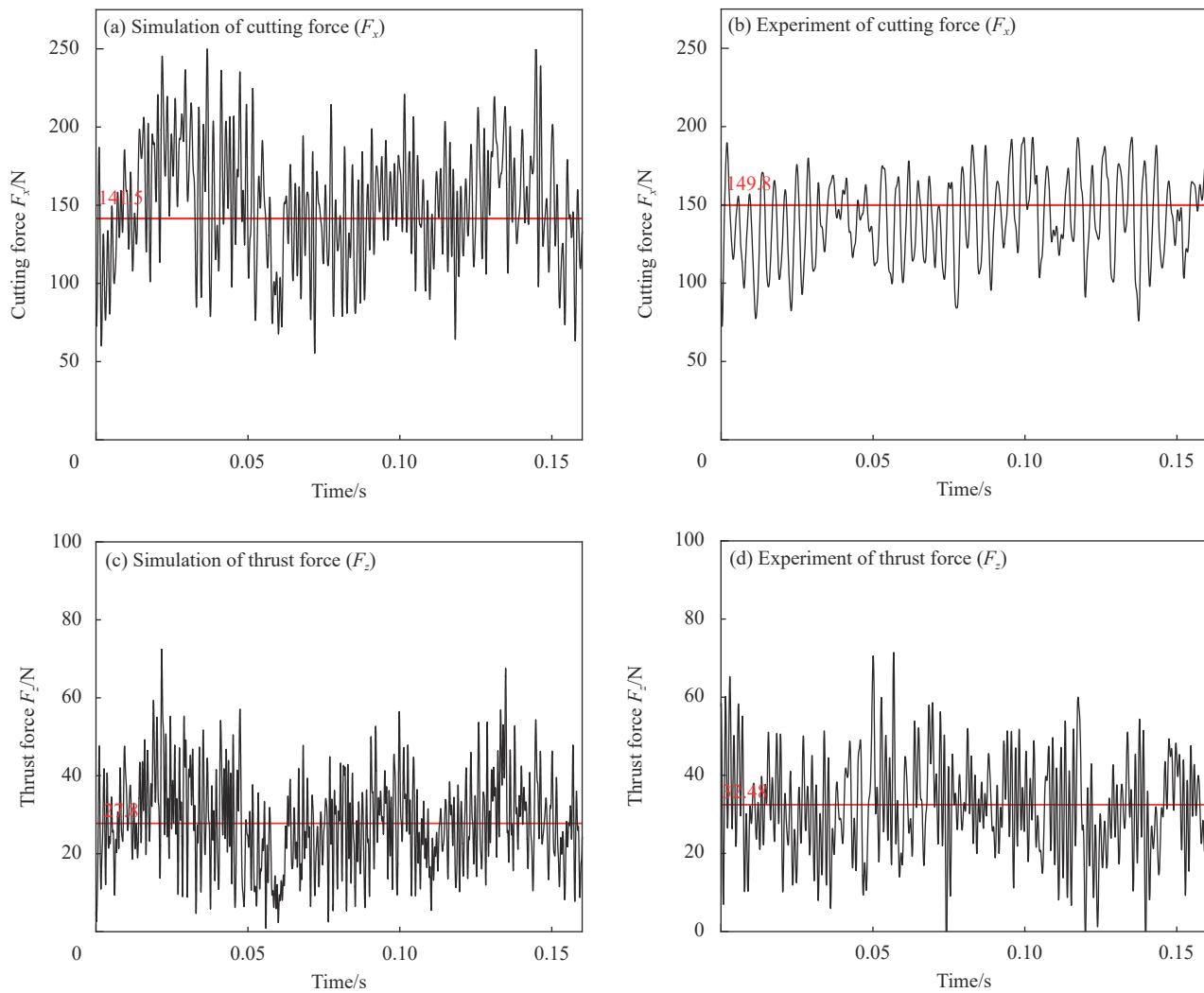


图 8 PW-CFRP 切削力仿真与试验结果对比 (切削速度  $v=2\ 000\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、切削深度  $a_p=0.1\ \text{mm}$ )

Fig. 8 Comparison of simulation force and experiment force results of PW-CFRP ( $v=2\ 000\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $a_p=0.1\ \text{mm}$ )

量 SDV3 作为仿真模型损伤验证指标。其中各纤维角度纤维束最大损伤深度依次为  $0^\circ < 45^\circ < 90^\circ < 135^\circ$ ，并且各纤维角度纤维束损伤均在束宽范围内，未进一步延伸，纤维束间的钳制作用对损伤扩展起到一定的抑制作用。图 9 为  $(0^\circ/90^\circ)$  和  $(45^\circ/135^\circ)$  表面织物铺层试验件的最大损伤深度仿真与试验结果。

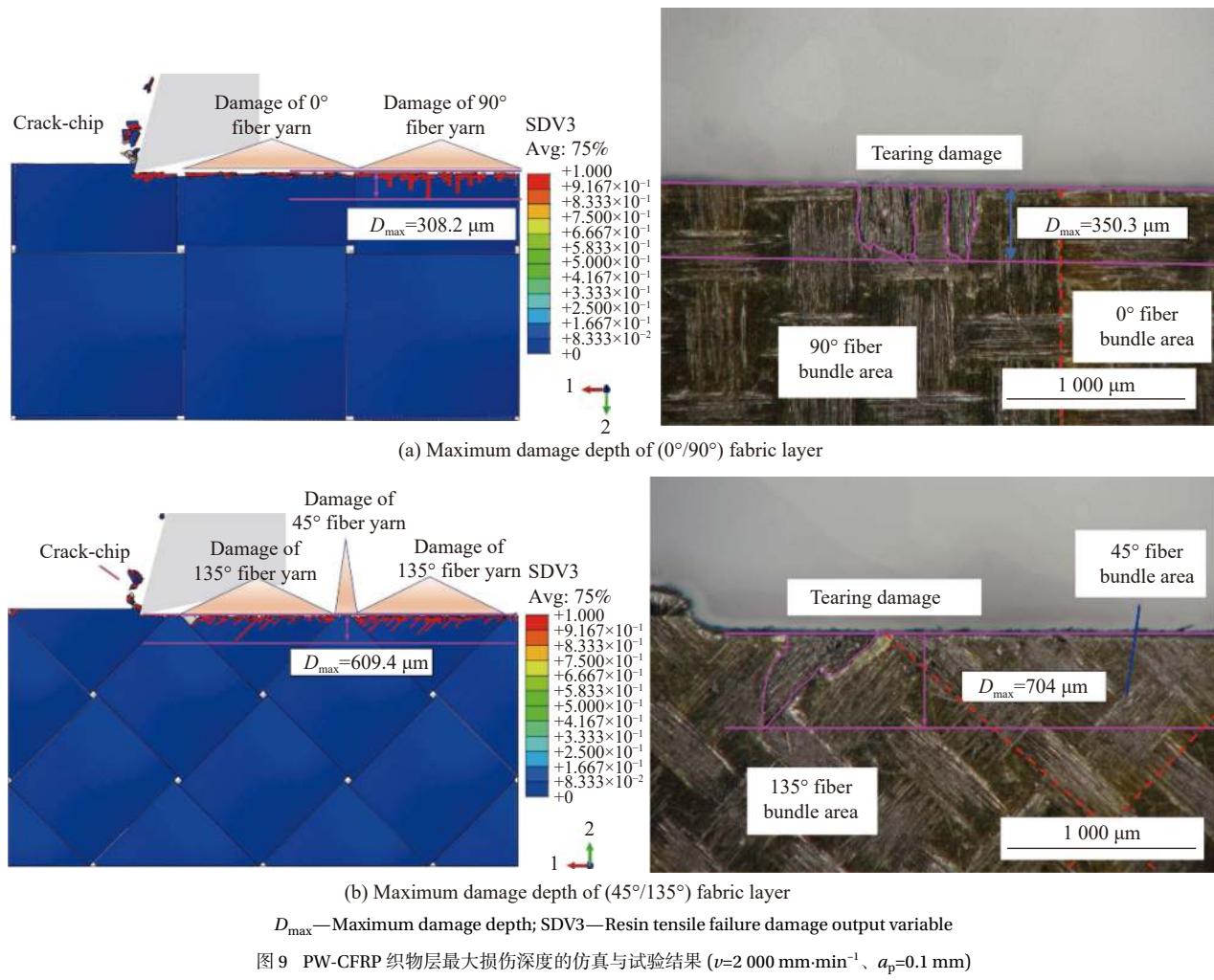
其中  $(0^\circ/90^\circ)$  织物层仿真最大损伤深度为  $308.2\ \mu\text{m}$ ，试验最大损伤深度为  $350.3\ \mu\text{m}$ ，误差为 12%； $(45^\circ/135^\circ)$  织物层仿真最大损伤深度为  $609.4\ \mu\text{m}$ ，试验最大损伤深度为  $704\ \mu\text{m}$ ，误差为 13.4%。

### 3.2 PW-CFRP 纤维方向对切屑形成过程的影响

由于平纹编织结构经纬向纤维束呈现“一上一下”<sup>[13]</sup> (即经纬纱每隔一根纤维纱束就交错一

次) 的相互交织状态，在切削时是同时完成两种纤维角度的纤维束的材料去除，实验中无法观测到表面纤维束下方的互相垂直纤维束的材料去除过程，通过仿真结果进行分析 (采用米塞斯应力  $S$  进行分析，单位 MPa)。

图 10 是  $(0^\circ/90^\circ)$  织物层的仿真与试验切削过程对比。仿真结果如图 10(a) 所示，由于纤维束间的相互钳制作用，引起纤维束交织节点处应力值升高，并阻碍了刀尖处的集中应力未能进一步传递至前方垂直纤维束区域。并展现了同一切削位置处  $0^\circ$  纤维束和  $90^\circ$  纤维束的切削区域情形，由于刀具持续进给带来的前刀面对未切削区域材料的推挤作用， $0^\circ$  纤维束刀尖前方区域纤维受压，后刀面处纤维受拉，刀具和材料之间的摩擦作用会使后刀面下方区域产生拉应力。纤维主要受刀

图 9 PW-CFRP 织物层最大损伤深度的仿真与试验结果 ( $v=2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $a_p=0.1 \text{ mm}$ )Fig. 9 PW-CFRP fabric layer simulation and experiment results of maximum damage depth ( $v=2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $a_p=0.1 \text{ mm}$ )

尖及前刀面挤压, 纤维会顺着起伏波动方向产生弯曲变形, 直到达屈服极限, 刀尖前方纤维失效断裂与基体剥离并沿前刀面形成切屑。 $0^\circ$ 纤维束的最大应力产生于前刀面前方, 因此纤维被掀起后在此处折断形成切屑。由于纤维束波动起伏的原因, 相较于 UD-CFRP 中的  $0^\circ$  方向纤维, 织物结构中纤维自身是弯曲的, 这会导致在切削过程中, 纤维受到刀具挤压时更容易直接沿波峰(谷)产生弯曲断裂, 而避免纤维轴向受力失稳发生屈曲行为而导致断裂, 获得的切削区域切口较整齐, 基本无损伤。 $90^\circ$ 纤维束在刀尖作用下向内弯曲退让, 靠近刀尖一侧纤维受到拉伸作用, 远离切削刃的弯曲内侧纤维受到压缩作用, 并在刀尖下方和纤维弯曲变形处产生应力集中, 整束纤维同时受到与之相互垂直的  $0^\circ$  纤维方向纤维束的制约束, 导致切削区域纤维在刀具的挤压作用下, 除了靠近切削刃处纤维发生压缩失效外, 所受应力

达到纤维最大剪切强度发生断裂, 因此  $90^\circ$  纤维束的最大应力产生于刀尖处, 最终纤维在切削刃的挤压作用和剪切作用下形成切屑。从图 10(a)的俯视图中不难看出,  $0^\circ$  纤维束的加工表面质量要优于  $90^\circ$  纤维束加工表面质量。图 10(b)为试验中高速摄影机拍摄的切削过程, 可以看到, 在切削  $0^\circ$  纤维束时, 纤维在刀尖作用下翘起, 与未切削层材料剥离, 并发生断裂, 将在前刀面的进一步作用下完全断裂形成切屑沿前刀面滑出, 并在  $90^\circ$  纤维束区域产生了撕裂损伤。

( $45^\circ/135^\circ$ ) 织物层的仿真与试验切削过程对比如图 11 所示, 在刀尖下方产生应力集中, 达到最大失效强度发生断裂而产生大量崩碎切屑, 有不稳定的连续性切屑沿前刀面滑出。从图 11(a)可以看出, 在靠近切削区域的相互垂直的 4 根纤维束交叉区域及相邻纤维束弓形接触区域应力值有明显提升, 说明在切削过程中, 纤维束波动效

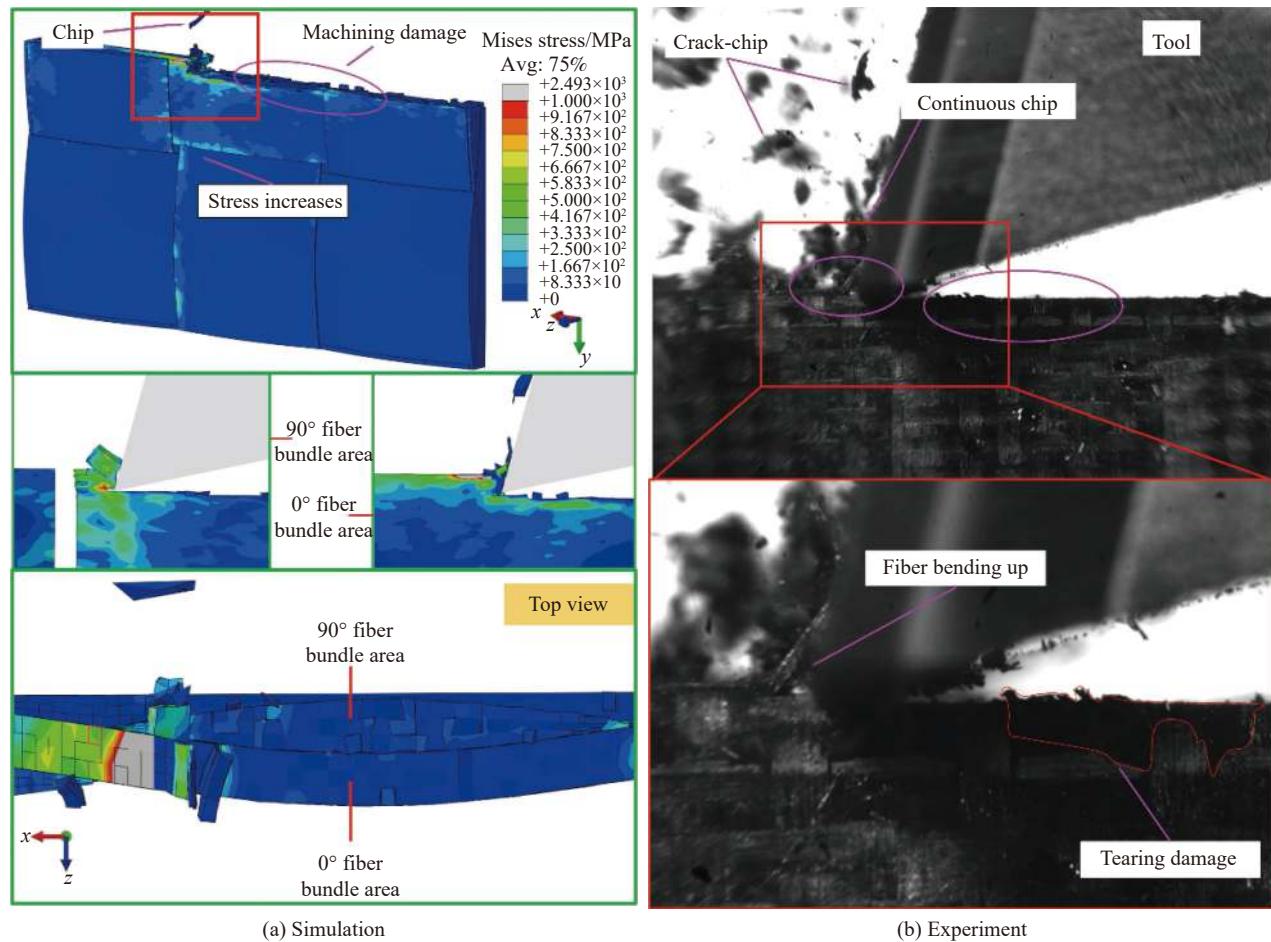


图 10 PW-CFRP (0°/90°) 织物层纤维束的切屑形成过程

Fig. 10 Chip formation process of PW-CFRP (0°/90°) fabric layer

应<sup>[28]</sup>会引起其切削区域附近的应力场变化。杨光猛等<sup>[31]</sup>和 Bendnarcky 等<sup>[32]</sup>研究发现, 纤维束波动效应会引起非线性剪切行为, 进而在纤维束交错区域产生应变集中现象, 这同样会使平纹编织复合材料损伤首先出现在纤维束交错区域。图中展现了同一切削位置处 45° 纤维束和 135° 纤维束的切削区域情形, 45° 纤维束在切削过程中, 在刀尖处纤维受压, 并产生最大压缩应力, 达到纤维的断裂极限形成切屑, 并未对前刀面前方区域形成较大范围的压应力; 后刀面下方纤维受拉伸作用, 是由于刀具材料之间的摩擦作用以及纤维束在刀尖的挤压下向后退让所带来的弯曲变形导致, 45° 纤维束的最大应力产生于刀尖下方, 并沿纤维方向延伸至后刀面下方。纤维自身的弯曲形态使其相较于 UD-CFRP 而言多了材料厚度方向的变形趋势, 而并不仅仅是沿切削方向的变形, 使纤维在切削过程中更易断裂形成切屑。135° 纤维束在切削过程中, 在前刀面前方靠近刀尖区域纤维受拉,

刀尖较远处区域纤维受压, 这是由于前刀面比刀尖先接触纤维, 使得刀尖正前方区域较近处纤维发生弯曲变形, 弯曲纤维的弯曲方向内侧受压, 反方向一侧受拉, 纤维弯曲会使纤维沿某一界面开裂并扩展, 纤维也多在刀刃与工件接触位置下方发生断裂, 即加工表面以下某处, 因此 135° 纤维束的最大应力产生于刀尖前方的纤维弯曲处, 在此处发生弯曲断裂形成切屑。同时可以看出刀尖附近区域应力集中并向周围传递, 但由于纤维束间的钳制作用, 导致应力在下方垂直纤维束交界处停止继续向下传递, 未引起更深区域的应力值增大, 从而有利于抑制撕裂损伤进一步向下扩展而造成更大的加工损伤。从图 11(a) 的俯视图中可以看出, 45° 纤维束的加工表面质量要优于 135° 纤维束加工表面质量。切削 (45°/135°) 织物层时的应力比 (0°/90°) 织物层稍大。图 11(b) 为试验中高速摄影机拍摄的切削过程。可以看到, 在刀具刚刚切入区域, 有产生较严重的撕裂损伤, 并

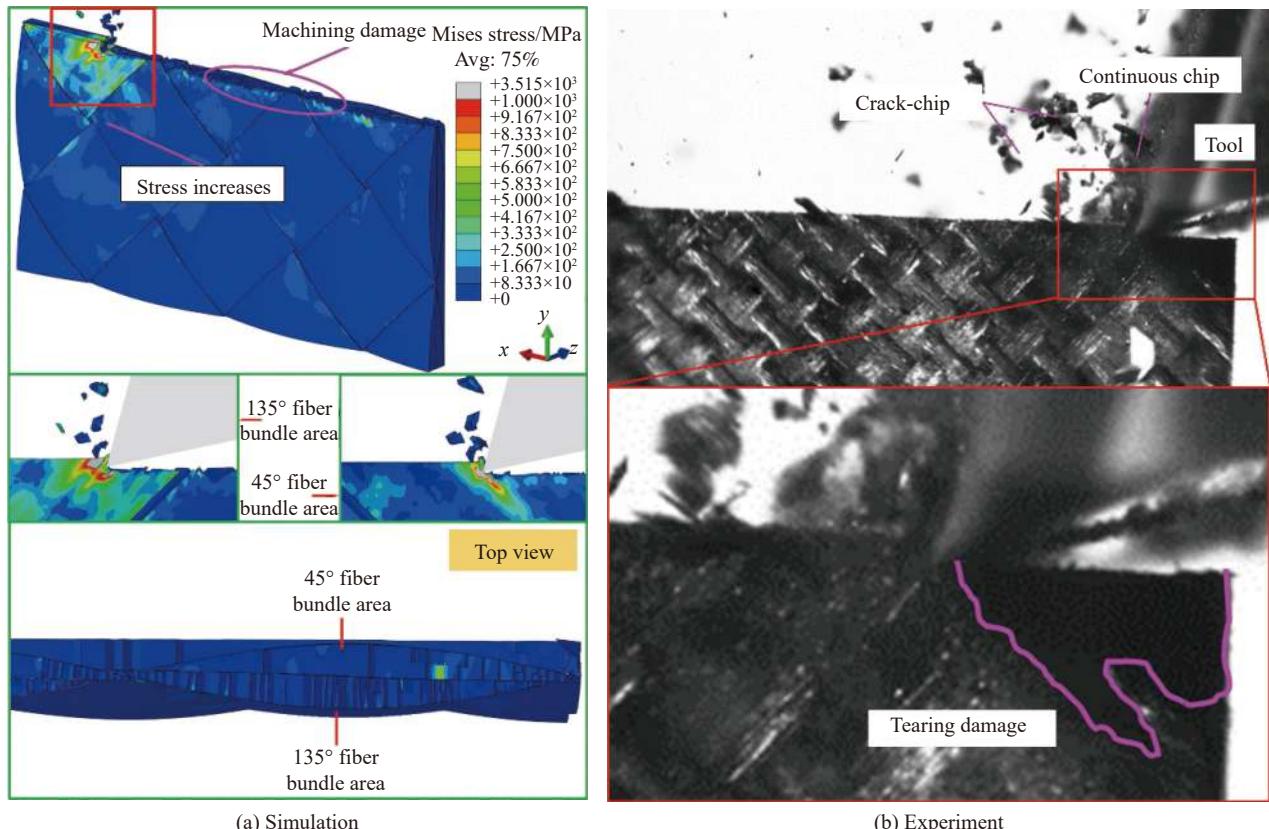


图 11 PW-CFRP (45°/135°) 织物层纤维束的切屑形成过程

Fig. 11 Chip formation process of PW-CFRP (45°/135°) fabric layer

且撕裂损伤处纤维断裂点也出现在纤维束交错区域附近，下方的纤维束阻碍了撕裂的进一步扩展，在前刀面上有连续切屑，多以崩碎切屑为主。

### 3.3 切屑形成及 PW-CFRP 表面损伤成因

图 12 为一个编织单胞的树脂厚度分布示意图。由于纤维束沿纤维轴向波动起伏特性以及具有近椭圆截面，使编织单胞中树脂厚度呈现出沿单胞顶角处往中心区域，厚度逐渐减小，中间区域树脂层最薄，树脂厚度变化会对材料的切削过程产生影响。由于纤维束沿轴向的弯曲起伏结构，在材料厚度方向上波峰与波谷存在高度差，使纤维在切削过程中不易发生屈曲断裂，当纤维一端受

力时，更容易向波峰(谷)方向弯曲，纬向纤维束的受力情形如图 13(a)所示。纤维束的椭圆形截面呈现两边薄中间厚的特点，使纤维束截面两侧区域纤维较少，周围树脂区域厚度增加，对纤维支撑作用增强，能够有效抑制损伤扩展；椭圆中间区域靠近外表面处的纤维附近树脂层很薄，约束较弱，是损伤易发生区域；表面织物内侧是其他铺层织物材料，对其提供可靠的支撑约束，抑制波峰处纤维受力向内侧凹入变形。经向纤维束的受力情形如图 13(b)所示，当经向纤维束受力向切削方向弯曲变形时，右侧纬向纤维束和厚树脂基体可以提供支撑，起到了阻挡作用，阻碍其向切削方向变形。为更好地理解纤维束之间的相互作用，图 13(c)为纤维束受力情形的三维示意图，可以看到纤维束 3 压在了纤维束 1 的上方，对其进行压制约束，抑制纤维束 1 的表面纤维在受到刀具切削载荷作用时被掀起，从而形成撕裂缺陷，纤维束 2 被纤维束 1 压在下方，但在二者交界处，纤维束 2 高于纤维束 1 的边缘位置，从而在纤维束 1 受到刀具切削载荷向左变形时起阻挡作用，阻碍了纤维的过度弯曲变形，使切削区纤

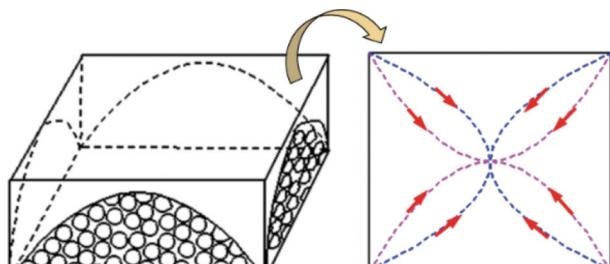


图 12 PW-CFRP 中树脂厚度分布示意图

Fig. 12 Matrix thickness distribution in PW-CFRP

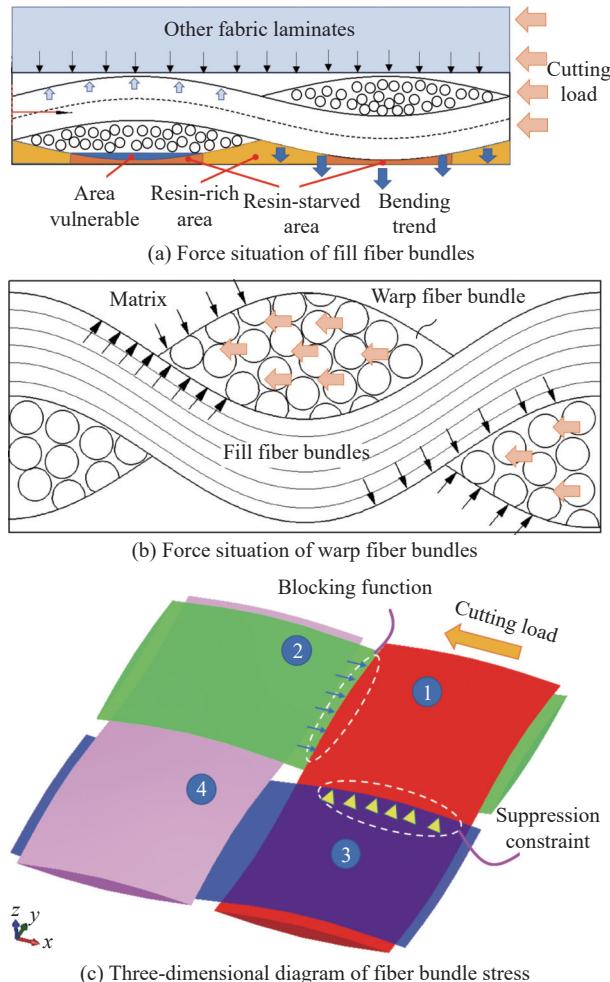


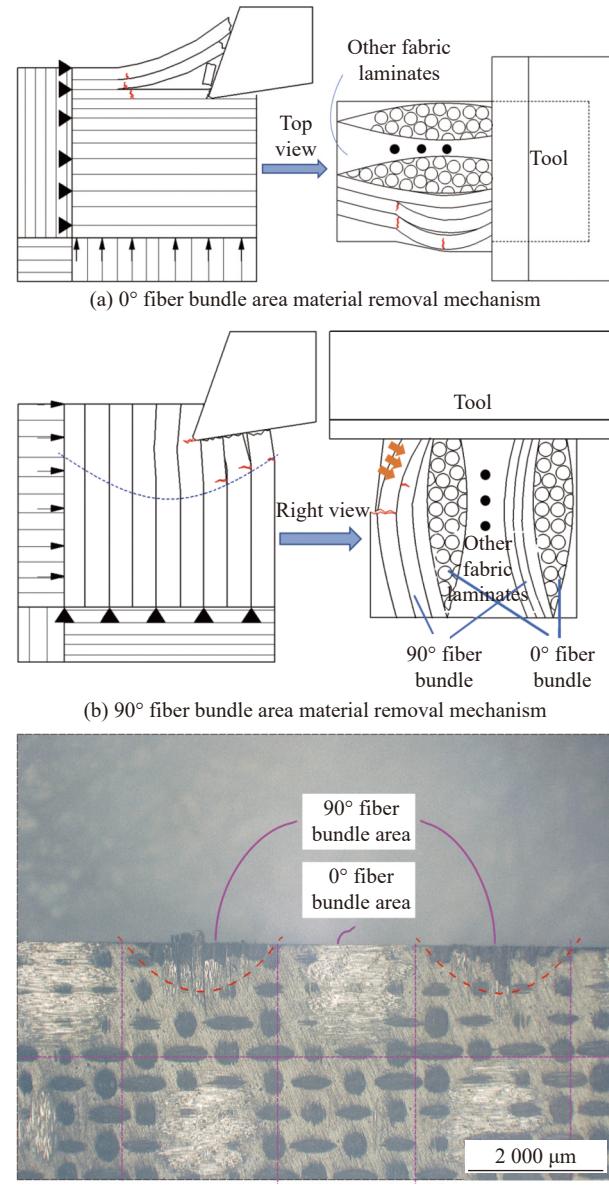
图 13 表面 PW-CFRP 织物在切削载荷下的受力情形示意图

Fig. 13 Force analysis of surface PW-CFRP fabric under cutting load

维能被及时切断，对撕裂和毛刺缺陷的形成起到抑制作用。

仿真与实验研究表明，纤维切削角对 PW-CFRP 的切削过程仍有明显影响，纤维角度是影响切屑及损伤形成的主要因素，但因其纤维自身的弯曲特性，相较于 UD-CFRP 有所不同，以 4 种典型纤维角度为例，依据刀具与纤维所成角度，即平行于纤维方向、顺纤维方向、垂直于纤维方向和逆纤维方向，将 PW-CFRP 材料细观破坏过程归纳如下(其中▲表示相邻垂直纤维束的压制约束作用，→表示相邻垂直纤维束的阻挡约束作用)：

在切削 0° 纤维束区域时，如图 14(a) 所示，弯曲的纤维会在刀尖的推挤作用下沿波峰弯曲变形，切削区材料与下方材料脱粘被掀起，纤维一端沿前刀面滑移，达到弯曲强度极限后断裂形成切屑，纤维的弯曲形态，使其更具韧性，这使材料沿界面开裂并被掀起的长度更长，产生较长的纤维切



(c) (0°/90°) fabric workpiece surface damage

Fig. 14 PW-CFRP (0°/90°) fabric layer material removal mechanism

屑。在切削 90° 纤维束区域时，如图 14(b) 所示，由于纤维附近树脂层厚度的不均匀性，导致切削区域纤维所受支撑情况不同，树脂层较厚区域，对纤维支撑较好，树脂层较薄区域，对纤维支撑较弱，这导致 90° 纤维束区域损伤呈弧形分布；在刀尖推挤作用下，纤维除了向后弯曲退让外，还会受到后刀面的碾压作用向纤维弯曲侧退让，直到达到弯曲强度极限发生断裂，形成碎块状切屑，未能及时断裂的表面纤维会在刀具后刀面的作用下产生裂纹，与树脂基体脱粘，直到在树脂薄弱区发生断裂，形成撕裂损伤；同时，纤维存在切

削回弹的行为, 表面未及时断裂的纤维在发生弯曲退让后回弹, 形成毛刺。试验样件中这两种纤维角度纤维束区域的加工损伤如图 14(c) 所示。

在切削  $45^\circ$  纤维束区域时, 如图 15(a) 所示, 纤维在刀尖的挤压作用下断裂, 前刀面将切断部分材料抬起, 沿纤维方向发生界面开裂, 形成块状切屑, 纤维的弯曲形态对纤维的断裂形式影响较小, 但表面撕裂损伤最深处依然位于在中间树脂层较薄弱区域, 同时未及时切断的纤维在后刀面的碾压过后发生切削回弹, 形成毛刺, 相较于  $90^\circ$  纤维束, 加工损伤明显减小。在切削  $135^\circ$  纤维束区域时, 如图 15(b) 所示, 纤维方向由  $45^\circ$  突变成  $135^\circ$ , 刀尖处受力状态突变, 会导致刀尖刚切入  $135^\circ$  纤维束时有冲击效应, 使入口区域产生较严重的撕裂损伤, 随着刀具持续切入, 材料在前刀面的作用下发生较大弯曲变形, 并沿纤维方向开裂并扩展, 达到弯曲强度极限发生断裂, 纤维断裂位置易发生在靠近中间区域的树脂层较薄弱处, 从而产生切屑。弯曲的纤维形态促使了纤维发生弯曲断裂, 但相较于其他纤维方向纤维束, 损伤更严重, 呈现两段式损伤效果。试验样件中这两种纤维角度纤维束区域的加工损伤如图 15(c) 和图 15(d) 所示。

## 4 结论

(1) 将 3D Hashin 和 Puck 失效准则编写入子程序, 通过 ABAQUS 子程序接口实现纤维束材料属性的赋予, 建立了 PW-CFRP 的三维正交切削仿真模型, 并采用相同工艺参数的正交切削试验对仿真结果进行验证, 主切削力  $F_x$  及切深抗力  $F_z$  仿真结果与试验结果的最大相对误差分别为 5.5% 和 14.4%;  $(0^\circ/90^\circ)$  和  $(45^\circ/135^\circ)$  织物最大加工损伤深度仿真结果与试验结果的最大相对误差分别为 12% 和 13.4%。

(2) 在切削过程中, 纤维束自身的弯曲形态, 使纤维在切削过程中更易发生弯曲断裂, 及时与基体剥离, 在刀具持续推挤切削过程中更易发生断裂形成切屑, 同时相邻纤维束之间的互相交叉支撑产生的钳制作用, 可以抑制损伤进一步扩展, 其最大加工损伤深度不会超出纤维束截面最大宽度。

(3) 对于最外层区域, 切削区纤维附近的树脂层厚度是加工损伤形成的重要因素, 树脂富集区域对纤维的支撑作用较好, 可以有效抑制损伤, 树脂薄弱区域对纤维支撑较弱, 损伤容易扩展至

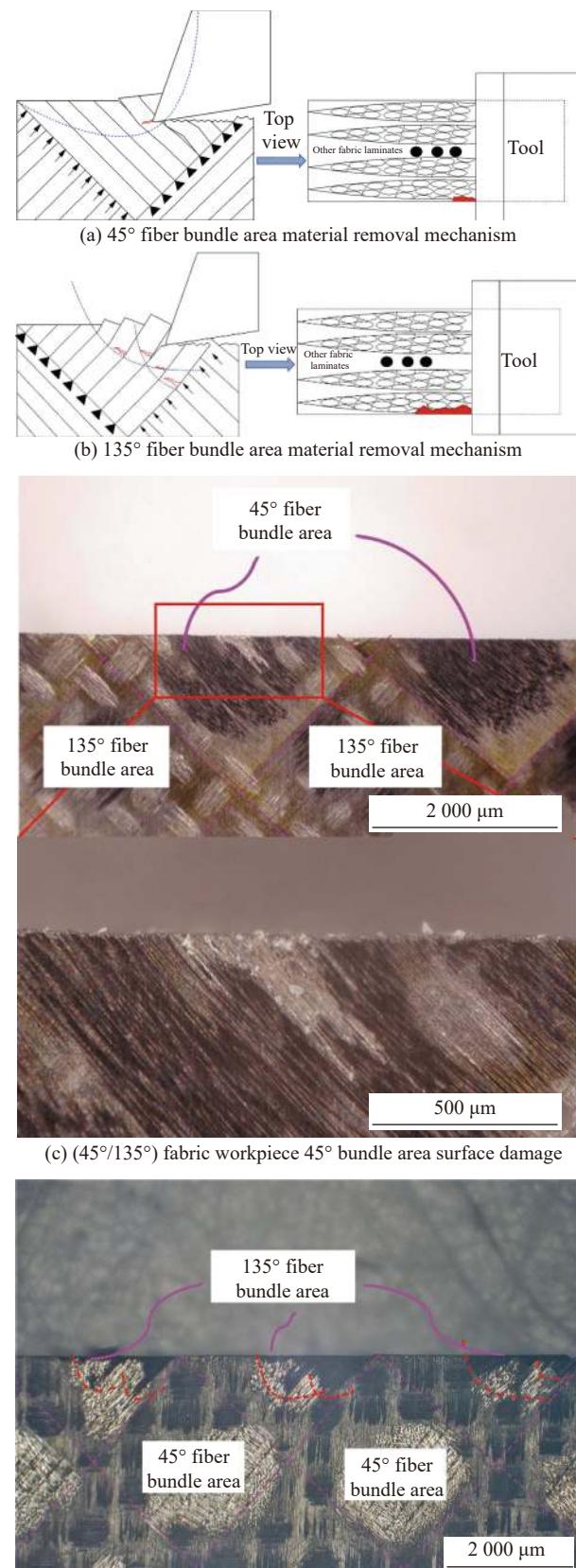


图 15 PW-CFRP ( $45^\circ/135^\circ$ ) 织物层材料表面损伤形成机制

Fig. 15 PW-CFRP ( $45^\circ/135^\circ$ ) fabric layer material removal mechanism

此处，使得损伤呈弧形分布。

(4) 对于 PW-CFRP 材料而言，纤维束的纤维方向角仍对表面材料的损伤有较大影响，加工损伤主要发生于 90° 纤维束及逆纤维方向角的纤维束区域，0° 纤维束区域基本无损伤，顺纤维方向角的纤维束损伤较小。切削 (45°/135°) 织物层时的应力比 (0°/90°) 织物层稍大，0° 纤维束的最大应力产生于前刀面前方，90° 纤维束的最大应力产生于刀尖处，45° 纤维束的最大应力产生于刀尖下方，沿纤维方向延伸至后刀面下方，135° 纤维束的最大应力产生于刀尖前方的纤维弯曲处，容易发生弯曲断裂形成切屑。

## 参考文献：

- [1] 陈燕, 葛恩德, 傅玉灿, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 301-316.  
CHEN Yan, GE Ende, FU Yucan, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(2): 301-316(in Chinese).
- [2] 林刚. 碳纤维产业“聚”变发展: 2020全球碳纤维复合材料市场报告[J]. 纺织科学研究, 2021, 32(5): 27-49.  
LIN Gang. The development of carbon fiber industry-2020 global carbon fiber composite market report[J]. *Textile Science Research*, 2021, 32(5): 27-49(in Chinese).
- [3] FEITO N, DIAZ-ÁLVAREZ A, CANTERO J L, et al. Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 35(1): 33-55.
- [4] GAO Z Y, CHEN L. A review of multi-scale numerical modeling of three-dimensional woven fabric[J]. *Composite Structures*, 2021, 263: 113685.
- [5] ONAL L, ADANUR S. Modeling of elastic, thermal, and strength/failure analysis of two-dimensional woven composites—A review[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2007, 60(1): 37-49.
- [6] 杨晓文. 基于编织角动态变化的2D编织CFRP力学性能仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
YANG Xiaowen. Simulation research on mechanical properties of 2D braided CFRP based on dynamic change of braiding angle[D]. Changchun: Jilin University, 2022(in Chinese).
- [7] ZHAO Q L, WANG W H, LIU Y T, et al. Multiscale modeling framework to predict the low-velocity impact and compression after impact behaviors of plain woven CFRP composites[J]. *Composite Structures*, 2022, 299: 116090.
- [8] ZHANG X J, SHI Y C, LI Z X. Experimental study on the tensile behavior of unidirectional and plain weave CFRP laminates under different strain rates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 524-536.
- [9] 张铁纯, 杨晨晨, 王轩, 等. 平纹编织复合材料层合板静态压缩与压-压疲劳性能[J]. 航空材料学报, 2022, 42(2): 64-72.  
ZHANG Tiechun, YANG Chenchen, WANG Xuan, et al. Static compression and compression-compression fatigue properties of plain woven composite laminates[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42(2): 64-72(in Chinese).
- [10] SIDDIQUE A, SUN B Z, GU B H. Structural influences of two-dimensional and three-dimensional carbon/epoxy composites on mode I fracture toughness behaviors with rate effects on damage evolution[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2020, 50(1): 23-45.
- [11] KING M J, JEARANAISILAWONG P, SOCRATE S. A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(13): 3867-3896.
- [12] RATTAN R, BIJWE J, FAHIM M. Influence of weave of carbon fabric on low amplitude oscillating wear performance of polyetherimide composites[J]. *Wear*, 2007, 262(5-6): 727-735.
- [13] NAIK N K, REDDY K S, MEDURI S, et al. Interlaminar fracture characterization for plain weave fabric composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(14): 2983-2987.
- [14] 王冬晓, 赫晓东, 刘文博, 等. 二维编织复合材料在正交切削中的切削力和加工表面质量研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(12): 77-82.  
WANG Dongyao, HE Xiaodong, LIU Wenbo, et al. Study on machining forces and machined surface quality of plane woven-fabric CFRP in orthogonal cutting experiment[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017(12): 77-82(in Chinese).
- [15] LIU S N, WU D, ZHAO J, et al. The material removal mechanism in orthogonal cutting of woven AFRP[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(34): 16301-16316.
- [16] SU F, YUAN J T, SUN F J, et al. Modeling and simulation of milling forces in milling plain woven carbon fiber-reinforced plastics[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(9): 4141-4152.
- [17] ZHANG D Z, WANG H, BURKS A R, et al. Delamination in rotary ultrasonic machining of CFRP composites: Finite element analysis and experimental implementation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(9-10): 3847-3858.
- [18] WONG I M M, TAN C L, AZMI A I, et al. Evaluations of mechanical properties and residual strength of drilled glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites[J]. *Ap-*

- plied Mechanics and Materials, 2014, 660: 270-274.
- [19] 周井文, 黄久超, 杨叶, 等. 单向铺层与织物结构CFRP端铣加工表面质量对比分析[J]. 工具技术, 2021, 55(8): 49-52.
- ZHOU Jingwen, HUANG Jiuchao, YANG Ye, et al. Analysis of surface integrity during end milling of unidirectional lamination and woven fabric structure CFRP[J]. Tool Engineering, 2021, 55(8): 49-52(in Chinese).
- [20] HINTZE W, CORDES M, KOERKEL G. Influence of weave structure on delamination when milling CFRP[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 199-205.
- [21] MARIATTI M, NASIR M, ISMAIL H. Effect of sample cutting direction on mechanical properties of woven thermoplastic prepreg[J]. Polymer Testing, 2000, 19(6): 617-624.
- [22] LI H N, WANG J P, WU C Q, et al. Damage behaviors of unidirectional CFRP in orthogonal cutting: A comparison between single-and multiple-pass strategies[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 185: 107774.
- [23] 李树健, 周永超, 陈蓉, 等. 考虑孔隙缺陷的CFRP微观切削仿真与实验研究[J]. 复合材料学报, 2023, 40(1): 625-636.
- LI Shujian, ZHOU Yongchao, CHEN Rong, et al. Simulation and experimental study of CFRP micro cutting considering voids defects[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1): 625-636(in Chinese).
- [24] 苏飞. 碳纤维增强复合材料切削加工技术及其应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- SU Fei. The cutting process technology and its application of carbon fiber-reinforced plastic[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015(in Chinese).
- [25] 邵兵. 大丝束碳纤维平纹编织复合材料孔边应力细观分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- SHAO Bing. The mesomechanical analysis of stresses near central hole in big carbon tow plain-woven composite[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018(in Chinese).
- [26] 周井文, 陈燕, 傅玉灿, 等. 纤维切削角对CFRP加工缺陷的影响规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 110-116.
- ZHOU Jingwen, CHEN Yan, FU Yucan, et al. Influence of fiber cutting angle on the machining defects during slotting of CFRP[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(7): 110-116(in Chinese).
- [27] 张勋, 陈燕, 徐九华, 等. 大厚度碳纤维复合材料三维钻削有限元仿真及试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(2): 53-60.
- ZHANG Xun, CHEN Yan, XU Jiuhua, et al. Finite element simulation of and experimental study on three-dimensional drilling of large diameter carbon fiber composites[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(2): 53-60(in Chinese).
- [28] 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.
- [29] 齐振超, 刘书暖, 程晖, 等. 基于三维多相有限元的CFRP细观切削机制研究[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-dimensional multiphase finite element models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 170-176(in Chinese).
- [30] LIU Y, LI Q N, QI Z C, et al. Scale-span modelling of dynamic progressive failure in drilling CFRPs using a tapered drill-reamer[J]. Composite Structures, 2021, 278: 114710.
- [31] 杨光猛, 万小朋, 侯赤. 纤维束波动效应对平纹编织复合材料损伤行为的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 132-139.
- YANG Guangmeng, WAN Xiaopeng, HOU Chi. Damage behavior of plain woven composites considering undulation effect of fiber bundles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 132-139(in Chinese).
- [32] BEDNARCYK B A, STIER B, SIMON J W, et al. Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites[J]. Composite Structures, 2015, 121: 258-270.