

CFRP二次切削加工表面的形成机理及试验研究

李纯杰¹ 苏 飞¹ 刘广涛¹ 陈 冰¹ 郑 雷²

(1 湖南科技大学机电工程学院难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

(2 盐城工学院机械工程学院, 盐城 224051)

文 摘 在实际加工过程中,碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber-Reinforced Plastic, CFRP)的制孔通常采用多工序工艺以优化制孔质量。然而,关于多工序加工中切削表面形成机制的详细解析尚存不足。针对此问题,本文构建了四种典型纤维取向($\theta=0^\circ$ 、 45° 、 90° 、 135°)下的二次切削仿真模型,深入探讨了二次切削过程中切削表面的形成机制及切削损伤的演变模式。研究结果显示,随着主轴转速 n 的增加,二次切削合力呈现显著的下降趋势;而进给速度 V_f 的提高则导致二次切削合力显著上升。进一步分析发现,当纤维取向为 $\theta=0^\circ$ 时,首次切削的切削表面损伤对第二次切削的影响相对较小;而当纤维取向为 $\theta=45^\circ$ 、 90° 或 135° 时,在第二次切削厚度小于首次切削纤维损伤层深度的条件下,第二次切削能够有效去除首次切削产生的损伤层,且不产生新的纤维损伤,从而显著提升切削表面的质量。

关键词 碳纤维增强复合材料(CFRP), 多工序, 损伤演变, 切削力, 有限元仿真

中图分类号:TQ327

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.014

Formation Mechanism and Experimental Study of CFRP Secondary Cutting Surface

LI Chunjie¹ SU Fei¹ LIU Guangtao¹ CHEN Bing¹ ZHENG Lei²

(1 Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051)

Abstract In the actual processing procedure, multi-step processing was commonly used to optimize the hole-making quality of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP). However, there was still a lack of detailed analysis on the formation mechanism of the cutting surface in multi-step processing. To address this issue, this paper constructed a secondary cutting simulation model for four typical fiber orientations ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$), and explored the formation mechanism of the cutting surface and the evolution pattern of cutting damage during the secondary cutting process. The results show that with the increase of the spindle speed n , the secondary cutting force exhibits a significant downward trend; while an increase in the feed rate V_f leads to a significant rise in the secondary cutting force. Further analysis reveals that when the fiber orientation θ is 0° , the influence of the cutting surface damage from the first cutting on the second cutting is relatively small. However, when the fiber orientation θ is 45° , 90° or 135° , under the condition that the second cutting thickness is less than the depth of the fiber damage layer caused by the first cutting, the second cutting can effectively remove the damage layer generated by the first cutting without causing new fiber damage, thus significantly improving the quality of the cutting surface.

Key words CFRP (Carbon fiber reinforced plastic), Multi-process, Damage evolution, Cutting force, Finite element simulation

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber-reinforced

收稿日期:2022-02-25

基金项目:国家自然科学基金(52175400;51805164);湖南省自然科学基金(2021JJ30263);江苏省自然科学基金(BK20201474);湖南省教育厅资助科研项目(18A182)

第一作者简介:李纯杰,1996年出生,硕士研究生,主要从事先进制造工艺与装备研究工作。E-mail: 820997750@qq.com

通信作者:苏飞,1984年出生,博士,副教授,硕士生导师,主要从事先进制造工艺与装备研究工作。E-mail: sfeihe@163.com

plastic, CFRP)以其轻质、高强度、高比模量等优异性能被广泛应用于国防科技、航空航天等高新技术领域,已逐步成为新型飞行器的首选结构材料^[1-4]。由于CFRP的非均质性、各向异性和层间强度低等原因,在制孔加工中易产生撕裂、分层以及毛刺等加工缺陷,进而导致零件加工质量难以保证,使用性能降低等问题^[1-4]。实际加工中,为满足CFRP产品的加工要求和装配精度,常采用钻-扩-铰-镗等多工序制孔工艺逐步去除材料完成连接孔的加工。此外,为了提高加工效率、抑制制孔缺陷,基于以上实践经验,提出了采用钻-铣复合刀具进行螺旋制孔的工艺方法^[5]。实践表明,多工序制孔工艺可以逐层去除材料,显著降低轴向力对制孔缺陷形成的影响,抑制加工缺陷的形成,同时提高切削表面质量。

目前,国内外诸多学者在CFRP制孔的研究方面做了大量研究。LLIESCU等^[6]采用金刚石涂层钻头钻削CFRP,指明制孔出口分层缺陷与轴向力有直接关系;WANG等^[7]通过CFRP单向层合板圆盘切削试验,对纤维取向 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的全纤维切削角范围内切削表面形貌和加工缺陷分布规律等进行了分析;JAEWOO等^[8]基于正交切削力模型构建了CFRP钻削轴向力模型;刘书暖等^[9]对CFRP/Ti叠层构件的钻削制孔过程进行了试验分析,获得了钻孔周期内/间表面粗糙度的演化规律;王东等^[10]建立了钻削轴向力、分层临界轴向力和钻削工艺参数之间的联系,获得并验证了以横刃轴向力为基础的钻孔出口分层临界进给量的计算模型;陈逸佳等^[11]建立了考虑刀具磨损量累积的CFRP钻削轴向力预测模型。

在CFRP切削机理方面,国内外学者采用实验观测、解析建模和有限元分析等方法进行了大量试验和理论研究。其中,有限元仿真方法可以更为直观地观测到材料去除、纤维破坏、基体破损和界面开裂等过程,备受关注。XU等^[12]建立了变摩擦系数的单向CFRP有限元直角切削模型,分析了CFRP材料的切削机理;ALESSANDRO等^[13]建立单向CFRP有限元直角切削模型,分析了材料去除机理、切削力等;MENG等^[14]通过有限元仿真方法,指明了纤维取向对切削表面、切屑形成过程具有密切关系;路冬等^[15]创建了CFRP二维直角切削模型,分析了纤维取向对纤维、基体损伤的影响规律;齐振超等^[16]建立CFRP三维多相有限元切削模型,揭示了基体和纤维的失效形式、切屑形成过程等;高汉卿等^[17]建立了有限元仿真模型,分析了纤维取向对纤维/基体断裂、界面开裂及演化过程的影响规律。

近年来,国内外学者在CFRP有限元切削仿真方面的做了大量研究,通过有限元仿真较为有效地反

映了CFRP材料的切削去除机理,但多数有限元建模分析仅针对CFRP的单工序切削而言,对于CFRP多工序切削的分析鲜有报道。实际上,CFRP在实际切削过程中,不论是单工序切削,还是多工序切削,CFRP内部均包含初始损伤。在切削过程中,这些初始损伤势必影响材料的去除,进而影响制孔缺陷的形成,尤其是在多次切削或多工序切削中,上一刀或上道工序切削残留的切削损伤通常远大于CFRP原有的初始损伤,此时,不得不考虑上一刀或上道工序切削损伤对下一刀或下一工序切削损伤的影响。然而,在多数有限元切削仿真建模过程中,初始损伤的影响往往被忽略,上一刀或上道工序切削损伤对下一刀或下一工序切削损伤影响的研究较为少见。LIU等^[18]建立了CFRP纤维取向为 90° 时二次切削的有限元仿真模型,分析了第一次切削损伤在第二次切削过程中切削表面损伤的演变过程,以及第一次切削损伤对第二次切削损伤的影响机制。对于CFRP不同纤维取向下一刀或上道工序切削损伤的演变规律及其对下一刀或下一道工序切削损伤的影响机制依然需要更进一步地系统、深入研究。

基于此,为深入揭示CFRP多次切削或多工序加工中切削损伤的演变规律,以及上一刀或上道工序切削损伤对下一刀或下一工序切削损伤的影响机制,本文建立4种典型纤维取向(0° 、 45° 、 90° 、 135°)下二次切削的仿真模型,分析二次切削中切削表面的创成机制。

1 CFRP二次切削的有限元切削模型

CFRP由碳纤维和树脂基体复合而成,其中碳纤维在树脂基体中呈随机分布,两者的材料力学性能相差迥异。碳纤维的强度远高于树脂基体,在CFRP切削中,碳纤维的切削成为CFRP材料切削去除的关键,然而两者间的界面和树脂基体在切削过程中的破坏直接决定着CFRP加工缺陷的形成。为尽可能真实和全面地反映不同纤维取向CFRP切削过程中纤维、基体及界面的断裂失效过程,在CFRP二次切削的切削建模过程中,分别针对4种典型纤维取向(即纤维轴线与切削方向的夹角 θ , $\theta=0^{\circ}$ 、 45° 、 90° 、 135°),构建包含纤维、基体和界面三相材料的三维有限元几何模型,如图1所示。CFRP二次切削的切削过程总体上分为两个切削阶段,即第一次切削和第二次切削。在CFRP二次切削建模中,为了便于切削仿真,两次切削分别由两把相同参数的刀具完成。其中,第一次切削过程中忽略CFRP材料原有的初始损伤,而第一次切削的切削损伤作为第二次切削的初始损伤,由此,分析第一次切削损伤在第二次切削过程中的演变,以及对第二次切削损伤的影响规律。

另外,为避免第一把刀与第二把刀产生干涉,两把刀具之间的间距 L_1 应大于工件宽度 L_2 。

实践表明,第一次切削的切削损伤随纤维取向 θ 和切削厚度 a_p 的变化而变化。为了便于对比分析,4种典型纤维取向第一次切削的切削厚度(a_{p1})均取 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。初步试验表明,在纤维取向 $\theta=45^\circ$ 和 90° 时,第一次切削的切削损伤最大深度基本在 $20\sim 23\text{ }\mu\text{m}$,为系统对比第二次切削的切削损伤在第一次切削的最大损伤区域附近的变化规律,在以上两个纤维取向第二次切削的切削厚度(a_{p2})均在 15 和 $30\text{ }\mu\text{m}$ 下分别进行分析;纤维取向 $\theta=135^\circ$ 时,第一次切削的切削损伤最大深度在 $42\text{ }\mu\text{m}$ 左右,此时,第二次切削的切削厚度(a_{p2})在 30 和 $60\text{ }\mu\text{m}$ 下进行仿真分析;在纤维取向 $\theta=0^\circ$ 下,第一次切削的切削损伤最大深度约为 $11\text{ }\mu\text{m}$,基本小于常用刀具材料(硬质合金)的平均刀具钝圆半径,为形成对比,第二次切削的切削厚度亦在 15 和 $30\text{ }\mu\text{m}$ 下进行了仿真分析。

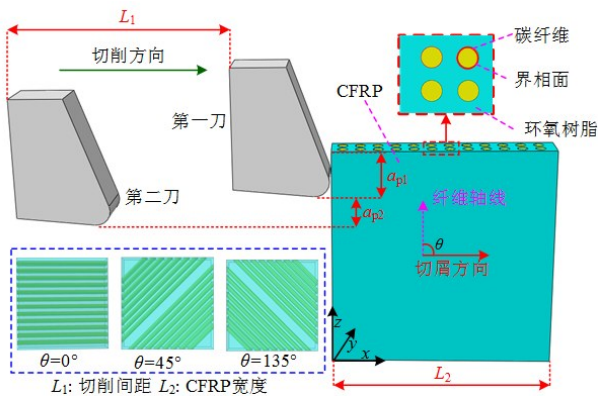


图1 二次切削微观模型

Fig. 1 Micro-model of secondary cutting

为了准确模拟切削过程中材料、层间的失效行为,在切削模型中分别定义碳纤维、树脂基体、界面的材料属性和损伤准则等,如图2所示。其中,碳纤维按横向各向同性材料的本构关系和最大应力失效准则定义,并由VUMAT开发实现;基体材料为各向同性环氧树脂材料,按各向同性弹塑性材料和剪切失效准则定义;界面相采用零厚度单元内聚力模型定义。切削仿真过程中,完全固定工件底面。纤维与基体的接触类型定义为通用接触,摩擦因数设为 0.3 ,刀具与基体、纤维的接触定义为面面接触,摩擦因数分别为 0.3 和 0.8 。刀具定义为刚体,切削过程中不发生变形,网格尺寸划分为 $8.3\text{ }\mu\text{m}$,单元类型为C3D8R。纤维与基体的单元类型均为C3D8R,网格单元尺寸分别设为 1 和 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

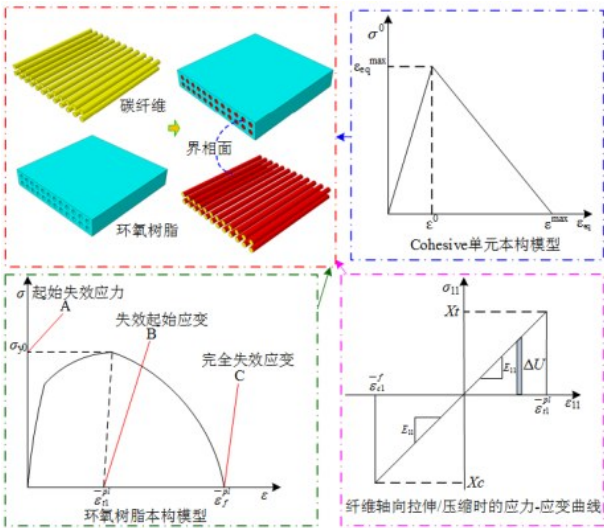


图2 切削仿真模型

Fig. 2 Cutting simulation model

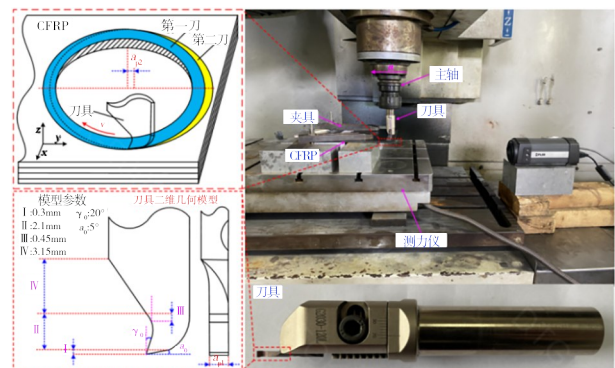
2 试验方案

试验材料为平纹编织碳纤维树脂基复合材料(T300, 环氧树脂基体, Epoxy resin),纤维体积分数约为 60% ,密度为 1.44 g/cm^3 ,单根纤维的直径约为 $7\text{ }\mu\text{m}$,板厚为 5 mm 。CFRP材料性能及切削模型相关参数如表1所示。

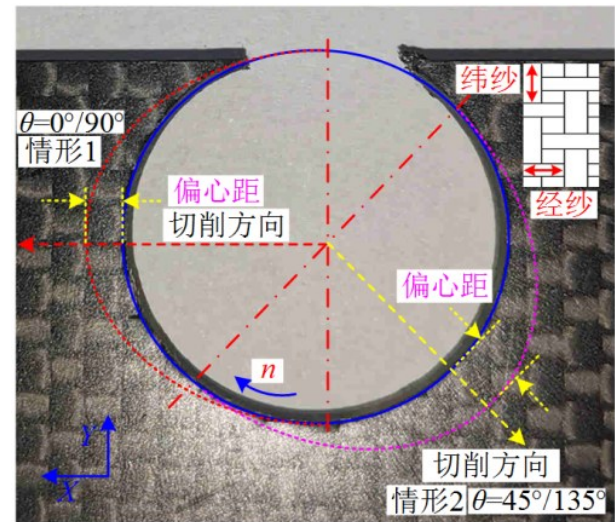
表1 切削模型相关材料力学性能和模型参数
Tab. 1 Material mechanical properties and model parameters for cutting model

Object	Parameter	Value
Carbon fiber	Fiber elastic modulus	$E_1=235\text{ GPa}$, $E_2=E_3=14\text{ GPa}$
	Fiber Poisson ratio	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.2$, $\nu_{23}=0.25$
	Fiber shear modulus	$G_{12}=G_{13}=28\text{ GPa}$, $G_{23}=5.5\text{ GPa}$
	Fiber tensile strength	$X_t=3.59\text{ GPa}$
	Fiber compressive strength	$X_c=3\text{ GPa}$
Matrix	Matrix elastic modulus	$E=2.96\text{ GPa}$
	Matrix Poisson ratio	$\nu=0.4$
	Matrix yield strength	$\sigma_n^0=74.4\text{ Mpa}$
Interface	-	$t_n^0=60\text{ Mpa}$, $t_s^0=t_t^0=110\text{ Mpa}$ $G_n^c=0.33\text{ N/mm}^2$, $G_s^c=G_t^c=1.209\text{ N/mm}^2$ $K_{nn}=4\times 10^6\text{ N/mm}^2$, $K_{ss}=K_{tt}=1\times 10^6\text{ N/mm}^2$
Tool	Cutter rake angle	20°
	Cutter clearance angle	5°
	Cutter blunt round radius	$10\text{ }\mu\text{m}$
Cutting model	Cutter speed /mm/s	$2\text{ }093\text{ mm/s}$
	Model size / μm	$150\times 150\times 26\text{ }\mu\text{m}$

试验刀具的刀柄为 G2030-120L 可调外径环形切槽刀柄,刀片为 SPDR300DM10 端面切槽刀片,刀片厚度为 2.5 mm,孔径可调范围在 18~30 mm。根据刀片结构,刀片可分为 I、II、III 和 IV 等 4 部分。其中, I 为钻尖部分,是参与切削的主要部分,如图 3(a)所示。



(a) 试验平台及刀具



(b) 两种情况切削方向

图 3 试验方案

Fig. 3 Experimental schemes

为尽可能地区分第一次和第二次切削的切削过程和切削表面,在 KVC1050M 立式加工中心上采用无冷却方式进行钻-扩划切制孔试验,如图 3(a)所示。试验中,在 $n=2\ 000\ \text{r/min}$, $V_f=105\ \text{mm/min}$ 工艺参数下,对 CFRP 材料进行第一次划孔切削,即为第一刀切削,孔径为 20 mm。在第一次划出的基孔基础上按一定方向和第二次切削的切削厚度(a_{p2})一次性偏移进行第二次划切,即为第二刀切削。由于试验采用的平纹编织 CFRP 材料及数控加工中心的移动精度为 $1\ \mu\text{m}$,切削方向可通过数控加工中心的移动进行 A、B 两种情形的偏移[如图 3(b)所示],确保最大切削厚度方向与纤维取向一致,即可在最大切削

厚度方向获得 4 种典型纤维取向下的切削表面。初步试验表明,纤维取向 $\theta=135^\circ$ 附近时,CFRP 一次切削后形成的切削表面存在大量凹坑,表面质量最差。为进一步分析第二次切削过程中工艺参数对切削力和切削表面形貌的影响规律,主轴转速 n 在 $2\ 000\sim 5\ 000\ \text{r/min}$ 内取值(即 2 000, 3 000, 4 000, 5 000 r/min),进给量 V_f 在 $105\sim 420\ \text{mm/min}$ 内取值(即 105, 210, 315, 420 mm/min),刀具偏移 $45\ \mu\text{m}$ 进行试验,重点对纤维取向 $\theta=135^\circ$ 的切削状况进行分析。试验过程中,采用 Kistler 9253B23 测力系统对切削力进行检测。

试验后,采用扫描电镜(SEM)及其附带软件分别观测 4 种典型纤维取向(0° 、 45° 、 90° 、 135°)下第一刀切削和第二刀切削的孔内壁的切削表面形貌。

3 试验结果分析

3.1 二次切削的切削力分析

3.1.1 切削力的时变特征

切削力是反映 CFRP 加工过程中切削状态的重要参考量,是影响 CFRP 加工后表面损伤程度的主要因素,故对切削过程中的三向切削力 F_x 、 F_y 、 F_z 分别进行分析。图 4 是纤维取向 $\theta=135^\circ$ 时(即偏移方向为 B 情形),工艺参数主轴转速 $n=3\ 000\ \text{r/min}$ 、进给速度 $V_f=105\ \text{mm/min}$ 、切削厚度 $a_{p2}=45\ \mu\text{m}$ 下所获得第二次切削的切削力和相同切削工艺参数下第一次切削的切削力典型时变曲线。

由图可知,第一次切削过程中,切削力 F_x 和 F_y 均在 $\pm 60\ \text{N}$ 之间波动,轴向力 F_z 在 $50\sim 250\ \text{N}$ 之间变动。第二次切削过程中,切削力 F_x 在 $-40\sim 60\ \text{N}$ 之间变动,切削力 F_y 在 $\pm 20\ \text{N}$ 之间变动,最大轴向力 F_z 不超过 $50\ \text{N}$ 。从单齿切削力的时变特征来看,第一次切削过程中,由于被吃刀量 a_{p1} 与切削刃宽度 a_c 为一定值,切削力 F_x 、 F_y 两者的峰值几乎相当,最大值相对稳定。在单齿切削过程中,随着切削速度方向的改变,切削力 F_x 、 F_y 呈正弦曲线波动, F_x 在 B、D 处分别达到上下峰值, F_y 于 A、C 处分别达到上下峰值。轴向力 F_z 在刀具切入材料时,由于刀尖与材料发生碰撞,产生较小波动,当达到稳定后,呈平稳趋势波动。在孔出口侧,随着刀具切出材料,刀具切除的材料越来越少,出口侧材料的刚度逐渐减小,切削力逐渐递减。

在第二次切削过程中,刀具自 I_0 点切入材料,从 I_4 点切出材料,切削厚度 a_{p2} 呈规律性变化,其中, $I_0\sim I_2$ 段逐渐递增, $I_2\sim I_4$ 段呈递减, a_{p2} 在 I_2 点达到最大值。由于切削厚度的变化,切削力 F_x 、 F_y 均呈周期性波动,每一个周期代表一次划孔切削,单个周期内切削力 F_x 、 F_y 的时变曲线可分为 I_0I_1 、 I_1I_2 、 I_2I_3 、 I_3I_4 等 4 个阶段: I_0I_1 段为刀具切入材料阶段,切削厚度 a_{p2} 不断

增大,切削角度 φ (刀齿瞬时切削方向与 X 方向的夹角)增大,切削合力 F 增大; I_1I_2 段,切削厚度 a_{p2} 继续增大,切削角度 φ 减小,切削合力 F 继续增大,在 I_2 附近 F_y 达到一个峰值; I_2I_3 段,切削厚度 a_{p2} 减小,切削角度 φ 减小,切削合力 F 减小,在 I_3 附近 F_x 达到一个峰值; I_3I_4 段,切削厚度 a_{p2} 继续减小,切削角度 φ 增大,切削合力 F 减小。此外,由于二次切削过程为间断性切削,当刀具切入(I_0 处)和切出(I_4 处)材料时,刀具与材料发生冲击,会产生较小波动。

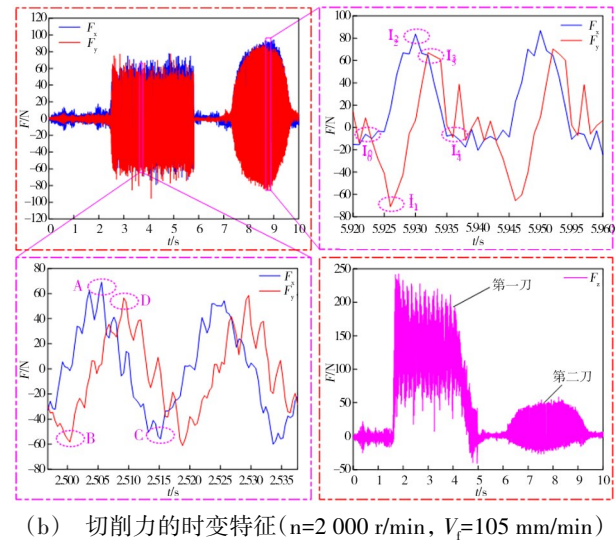
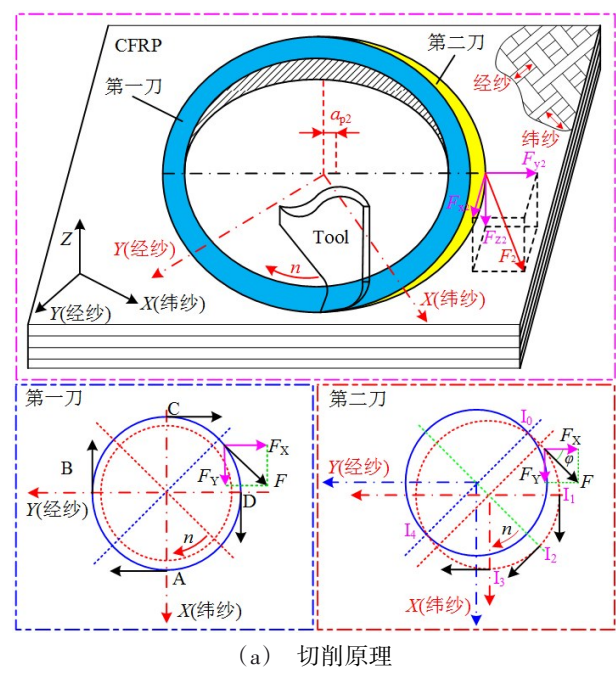


图4 切削原理与切削力的时变特征
Fig. 4 Cutting schematic and time-varying characteristics of cutting forces

3.1.2 工艺参数对切削力的影响规律

研究表明切削力是导致CFRP发生失效损伤的主要因素。平纹编织CFRP二次切削过程中工艺参数对切削合力 F_2 的影响规律如图5所示(纤维取向 $\theta=135^\circ$,切削厚度 $a_{p2}=45\mu\text{m}$)。为了便于分析,将第二次切削中三向切削力 F_x 、 F_y 、 F_z 的合力 F_2 作为衡量切削力大小的指标。由图可见,随着主轴转速 n 的增大,二次切削的切削合力 F_2 明显呈下降趋势,当转速 n 在2000~3000 r/min和4000~5000 r/min范围时,切削合力 F_2 下降幅度稍大,当转速 n 在3000~4000 r/min范围时,切削合力 F_2 下降趋势相对缓慢;随着进给速度 V_f 的增加,单齿轴向进给深度也随之增加,切削合力 F_2 呈明显上升趋势。

主要因素。平纹编织CFRP二次切削过程中工艺参数对切削合力 F_2 的影响规律如图5所示(纤维取向 $\theta=135^\circ$,切削厚度 $a_{p2}=45\mu\text{m}$)。为了便于分析,将第二次切削中三向切削力 F_x 、 F_y 、 F_z 的合力 F_2 作为衡量切削力大小的指标。由图可见,随着主轴转速 n 的增大,二次切削的切削合力 F_2 明显呈下降趋势,当转速 n 在2000~3000 r/min和4000~5000 r/min范围时,切削合力 F_2 下降幅度稍大,当转速 n 在3000~4000 r/min范围时,切削合力 F_2 下降趋势相对缓慢;随着进给速度 V_f 的增加,单齿轴向进给深度也随之增加,切削合力 F_2 呈明显上升趋势。

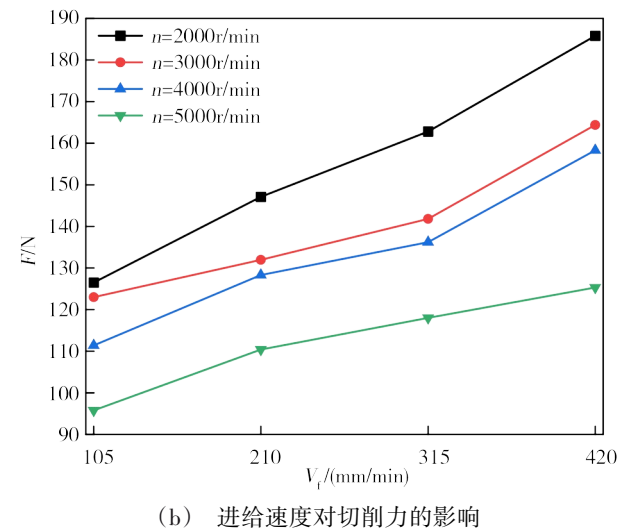
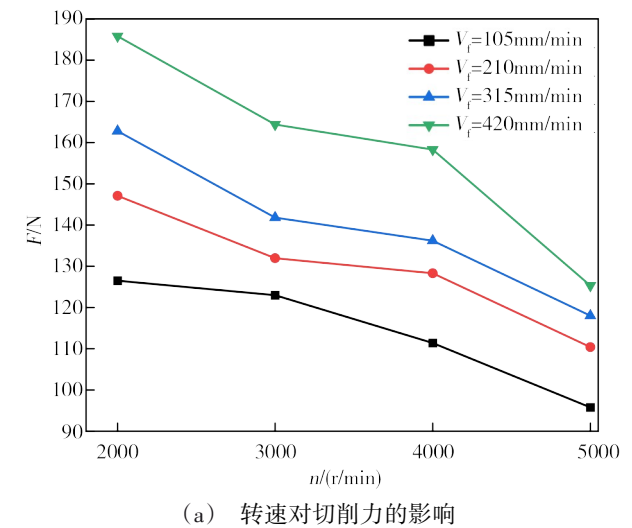


图5 工艺参数与切削力的关系($\theta=135^\circ$, $a_{p2}=45\mu\text{m}$)
Fig. 5 Relationship between process parameters and cutting force

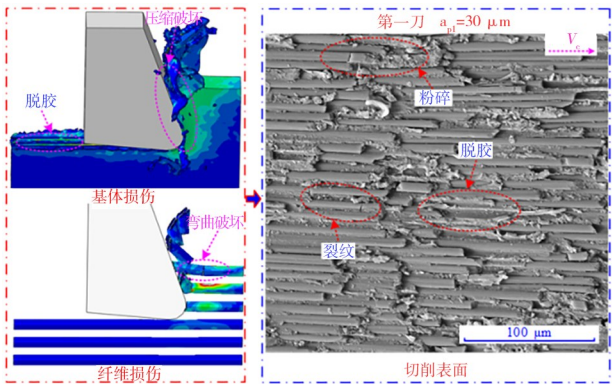
3.2 CFRP二次切削的切削机理分析

当纤维取向 $\theta=0^\circ$ 时,第一次切削和第二次切削的切削过程较为相似。其中,纤维在前刀面上和刀刃底部的切削断裂形式具有一定差异,如图6(a)~

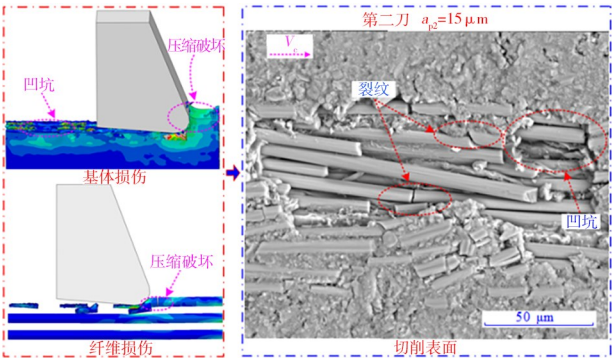
(c)所示。纤维与前刀面接触时,纤维均受到基本平行于纤维轴向的切削力,纤维在发生屈曲变形的同时,由于前角的存在,前刀面有一定倾斜,导致纤维向上弯曲,纤维发生弯曲断裂失效,此时,纤维主要呈现屈曲和弯曲断裂,切屑多出现一段段碎裂纤维。刀刃底部的纤维在刀刃的推挤作用下,整体上纤维沿着刀刃圆弧往后刀面挤压,树脂基体和纤维均出现脆裂,在切削表面上出现大量纤维被剥离、纤维脆断、树脂基体脆裂等现象。此外,刀刃与纤维的接触位置不同,纤维的断裂形式略有不同。当刀尖与纤维的接触位置在纤维-基体界限面附近时[如图6(a)所示],由于界限面破坏强度相对较低,纤维在刀具的推挤作用下纤维发生屈曲变形,当达到界面失效强度后界面发生开裂,纤维在屈曲断裂的同时与基体发生剥离,切削表面上出现纤维脱黏被剥离的现象;当刀尖与纤维的接触位置在纤维中间部位时[如图6(b)和(c)所示],纤维发生屈曲变形,沿着刀刃圆弧往后刀面挤压,同时在接触点处出现明显的接触压缩脆断,纤维、基体均出现明显的碎裂,此时纤维主要呈现挤压脆断。

图6(d)为第一次切削与第二次切削的整体切削过程。由图可知,第一次切削后切削表面的损伤较低,损伤厚度与纤维直径基本相当。在切削厚度 $a_{p2}=15$ 和 $30\text{ }\mu\text{m}$ 下分别进行了第二次切削。当切削厚度 $a_{p2}=15\text{ }\mu\text{m}$ 时,第一次切削的已损伤纤维在第二次切削过程中被完全切除,由于第一次切削中切削表面上出现大量纤维被剥离、纤维脆断、树脂基体脆裂、界面开裂等现象,第二次切削的切削厚度与第一次切削表面损伤深度基本相当,在第二次切削完后,切削表面出现局部区域的微小凹坑和树脂涂覆现象,以及碎裂纤维被“挤入”切削表面,如图6(b)所示;当切削厚度 $a_{p2}=30\text{ }\mu\text{m}$ 时,第二次切削的切削厚度远大于第一次切削的切削表面损伤深度,第二次切削的切削过程与第一次切削基本相同[如图6(a)和(c)所示],第一次切削的切削表面损伤对第二次切削表面的形成影响较小。由此可见,当纤维取向 $\theta=0^\circ$ 时,第一次切削的切削表面损伤对第二次切削的影响较小,尤其是当第二次切削的切削厚度远大于第一次切削表面损伤时影响很小。

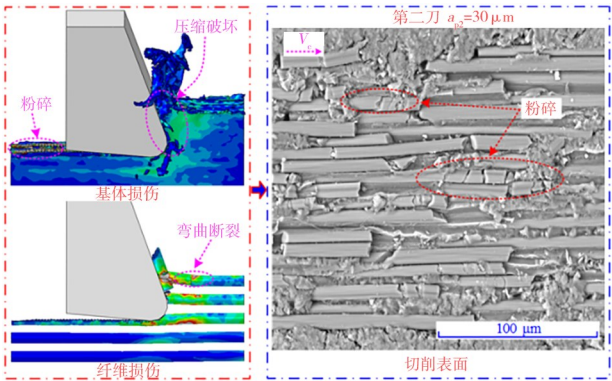
当纤维取向 $\theta=45^\circ$ 时,第一次切削和第二次切削过程中,纤维均在接触处发生脆性断裂,与此同时,刀刃后刀面处纤维发生弯曲折断。在第一次切削过程中切削表面易形成细小凹坑,如图7(a)所示。第一次切削过程中,纤维的最大损伤深度约为 $23\text{ }\mu\text{m}$ 。



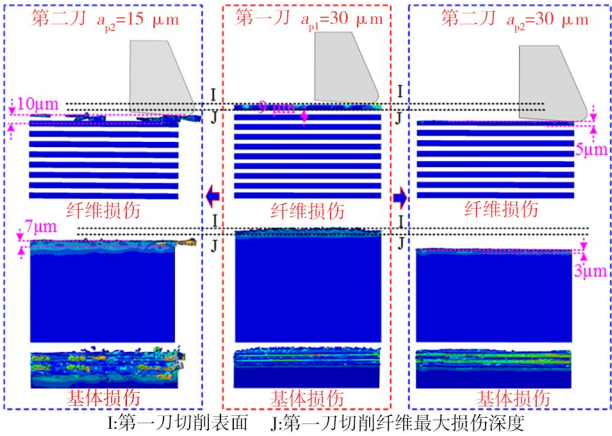
(a) 第一刀切削的微观形貌 ($\theta=0^\circ$, $a_{p1}=30\text{ }\mu\text{m}$)



(b) 第二刀切削的微观形貌 ($\theta=0^\circ$, $a_{p2}=15\text{ }\mu\text{m}$)



(c) 第二刀切削的微观形貌 ($\theta=0^\circ$, $a_{p2}=30\text{ }\mu\text{m}$)



(d) 第一刀切削后的损伤演化过程 ($\theta=0^\circ$)

图6 切削表面形成过程 ($\theta=0^\circ$)

Fig. 6 Cutting surface formation process ($\theta=0^\circ$)

由此,分别在切削厚度小于和大于 $23\ \mu\text{m}$ 进行第二次切削,即第二次切削厚度分别为 15 和 $30\ \mu\text{m}$,切削表面的微观形貌如图 7(b) ~ (c) 所示,第一次切削损伤层在第二次切削过程中的去除过程如图 7(d) 所示。当第二次切削厚度 $a_{p2}=15\ \mu\text{m}$ 时,第一次切削的损伤层能被完全去除,切削表面较为平整,断裂的纤维被剥离去除,第二次切削过程中纤维的最大损伤深度与第一次切削的最大损伤深度基本平齐,纤维的最大损伤深度约为 $15\ \mu\text{m}$;然而,由于树脂基体的破坏损伤,第二次切削表面的整体最大损伤深度与第一次切削的基本相当;当第二次切削厚度 $a_{p2}=30\ \mu\text{m}$ 时,其中有 $23\ \mu\text{m}$ 厚为第一次切削产生的损伤层,其余 $7\ \mu\text{m}$ 为无损伤层,由仿真结果可见,第一次切削的损伤层基本被去除,无损伤层的切削去除过程与第一次切削去除过程基本相似,纤维的断裂基本在刀刃-纤维的接触点处发生,纤维的弯曲断裂深度较小,纤维的最大损伤深度约为 $21\ \mu\text{m}$,切削表面出现大量碎裂纤维段。此外,树脂基体的破坏损伤与第一次切削的基本相似。

由此可见,由于第一次切削和第二次切削过程中树脂基体的破坏方式几乎一致,致使以上两种情形下,第二次切削产生的整体损伤深度基本相等。然而,第二次切削能有效去除第一次切削过程中产生的纤维损伤层,尤其是当第二次切削厚度小于第一次切削损伤层厚度时,第二次切削的纤维损伤与第一次切削的纤维损伤基本相当,即此时第二次切削能在不产生新纤维损伤的基础上,有效去除第一次切削产生的损伤层,而当第二次切削厚度大于第一次损伤深度时,第二次切削纤维损伤深度与第一次基本相当。即当第二次切削厚度小于第一次切削纤维损伤层深度时,第二次切削的切削表面上断裂的纤维段更少。

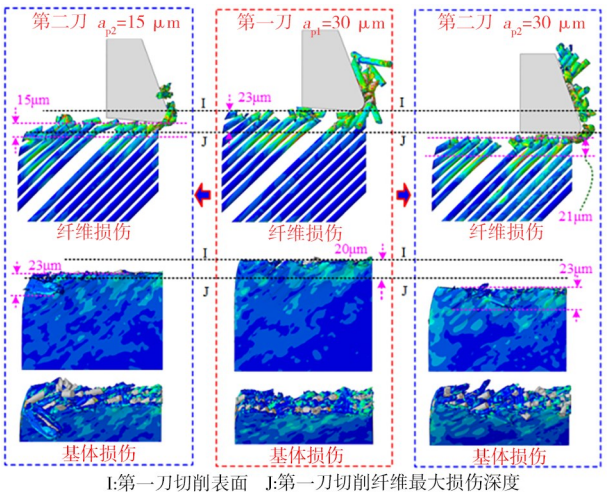
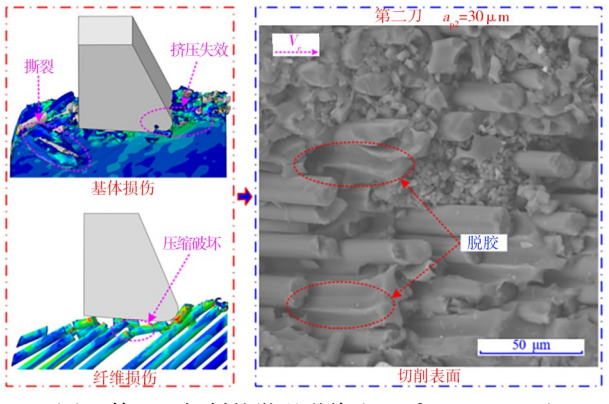
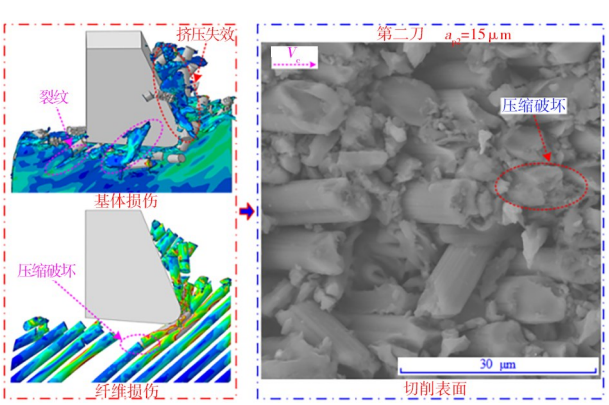
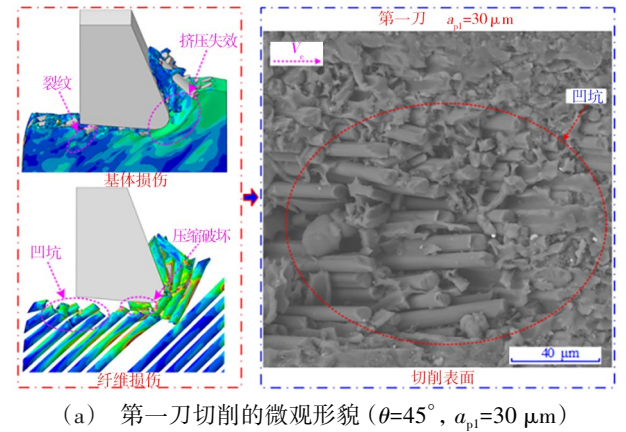


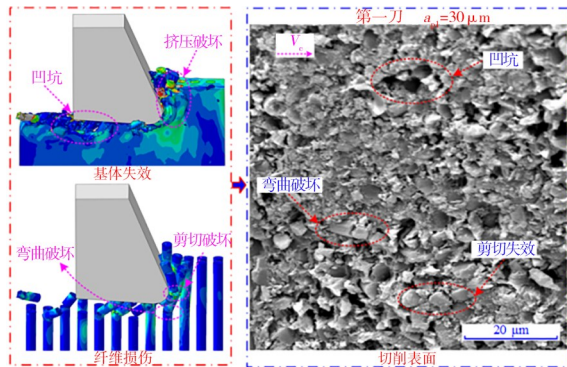
图7 切削表面形成过程($\theta=45^\circ$)

Fig. 7 Cutting surface formation process ($\theta=45^\circ$)

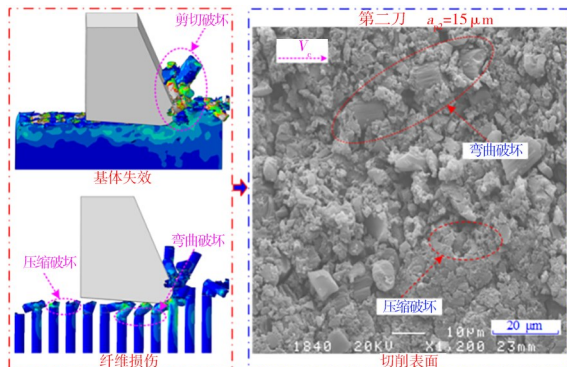
当纤维取向 $\theta=90^\circ$ 时,第一次切削和第二次切削过程中纤维的断裂形式基本相似,在接触点处发生断裂的同时,在刀刃下方均发生了弯曲断裂,如图 8(a) ~ (c) 所示。第一次切削的切削表面出现纤维拔出现象,切削表面整体较为平整,纤维的最大损伤深度约为 $17\ \mu\text{m}$ 。同理,在第二次切削厚度分别小于和大于 $17\ \mu\text{m}$ 进行第二次切削,即 $a_{p2}=15$ 和 $30\ \mu\text{m}$,第一次切削过程中产生的损伤层在第二次切削过程中的演变过程如图 8(d) 所示。当第二次切削厚度 $a_{p2}=15\ \mu\text{m}$ 时,由于在第一次

切削过程中部分纤维低于 $15\ \mu\text{m}$, 而高于 $15\ \mu\text{m}$ 的纤维在第二次切削过程中随着刀具的推挤被弯断, 压向低于 $15\ \mu\text{m}$ 的纤维, 如图 8(d) 中的 A 处纤维, 而略高于 $15\ \mu\text{m}$ 的纤维, 在切削过程中仅单根纤维的部分被压溃, 如图 8(d) 中的 B 处纤维, 因此, 纤维的损伤深度有所减小, 致使切削表面上出现大量碎裂纤维段, 同时, 第一次切削产生的纤维损伤层能被有效去除, 最终产生的纤维损伤深度略小于第一次切削产生的纤维损伤深度, 约为 $12.5\ \mu\text{m}$, 此时, 树脂基体受到的挤压应力较小, 第二次切削的树脂基体整体损伤深度极小, 仅为 $3\ \mu\text{m}$; 当第二次切削厚度 $a_{p2}=30\ \mu\text{m}$ 时, 其中有 $13\ \mu\text{m}$ 为无损伤层, 此时, 第二次切削的切削过程与第一次基本相似, 反而由于第一次切削产生的损伤层在第二次切削过程中处于“松弛”状态, 碎屑纤维易对第二次切削表面形成挤压, 致使第二次切削过程中树脂基体受力不均衡, 出现规律性的压溃现象, 导致第二次切削表面整体较为“凹凸”, 同时, 切削表面出现大量碎断的纤维段, 纤维损伤的最大深度约为 $19.6\ \mu\text{m}$, 树脂基体损伤的整体损伤深度约为 $25\ \mu\text{m}$ 。

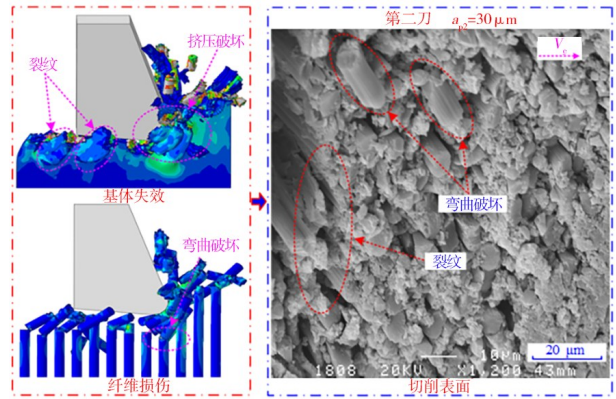
由此可见, 当第二次切削厚度小于第一次切削损伤深度时, 第一次切削纤维损伤层能被有效去除, 且第二次切削的纤维损伤深度有所减小, 由于部分纤维低于切削厚度而未被切到, 树脂基体切削受力小, 其整体损伤深度极小。然而, 当第二次切削厚度大于第一次切削损伤深度时, 由于第一次切削损伤层的影响, 第二次切削纤维损伤和树脂基体整体损伤均有所加剧。



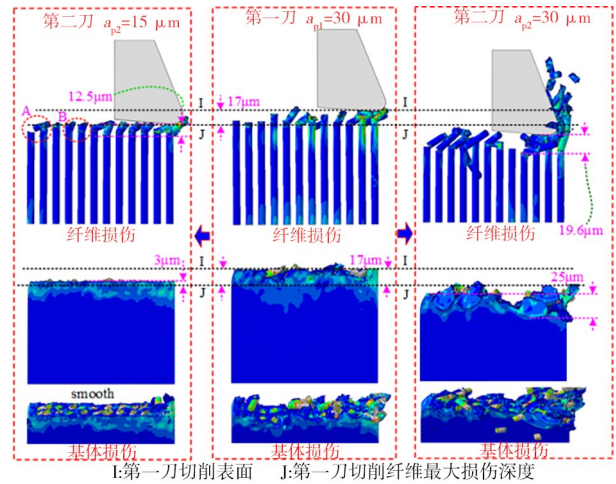
(a) 第一刀切削的微观形貌 ($\theta=90^\circ$, $a_{p1}=30\ \mu\text{m}$)



(b) 第二刀切削的微观形貌 ($\theta=90^\circ$, $a_{p2}=15\ \mu\text{m}$)



(c) 第二刀切削的微观形貌 ($\theta=90^\circ$, $a_{p2}=30\ \mu\text{m}$)



(d) 第一刀切削后的损伤演化过程 ($\theta=90^\circ$)

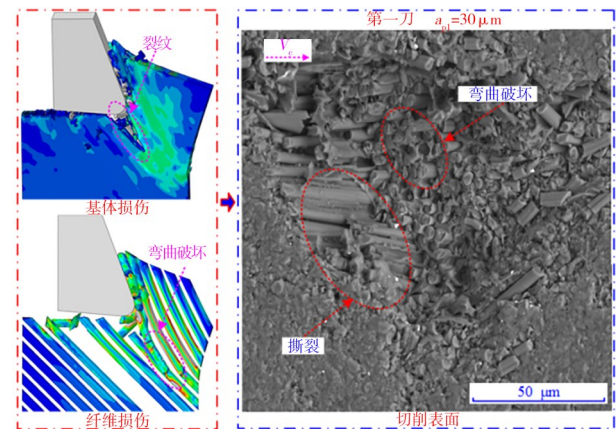
图 8 切削表面形成过程 ($\theta=90^\circ$)

Fig. 8 Cutting surface formation process ($\theta=90^\circ$)

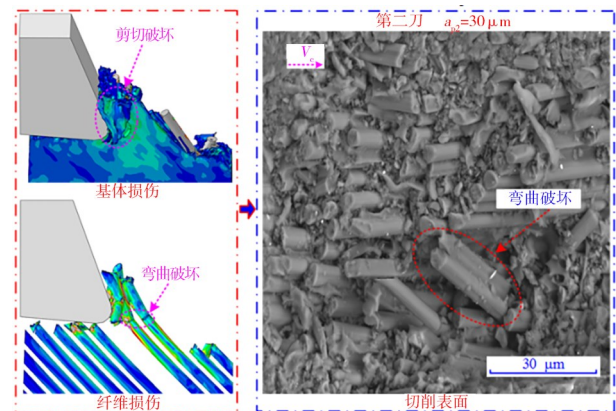
当纤维取向 $\theta=135^\circ$ 时, 纤维的切削断裂方式基本一致, 均呈弯曲断裂, 如图 9(a) ~ (d) 所示。第一次切削过程中刀具前刀面上的纤维出现整体压溃现象, 纤维在刀具推挤作用下发生脆性断裂, 同时, 刀刃下方出现基体开裂和纤维的弯曲断裂, 形成大面积“凹坑”现象, 纤维的最大损伤深度达 $49\ \mu\text{m}$, “凹坑”深度达 $46\ \mu\text{m}$ 。为此, 分别针对小于和大于 $49\ \mu\text{m}$ 进行第二次切削分析, 即 $a_{p2}=30\ \mu\text{m}$ 和 $60\ \mu\text{m}$ 。当第二次切削厚度 $a_{p2}=30\ \mu\text{m}$ 时, 在第二次切削过程中凹坑附近纤维在推挤作用下在凹坑底部发生弯曲折断, 如图 9(d) 中的 C 处, 由此可见, 第二次切削过程中能确保不产生新损伤的基础上, 有效减小第一次切削过程中产生“凹坑”的深度, “凹坑”深度大幅度减小, 降至 $23\ \mu\text{m}$ 左右, 切削表面上出现部分纤维段; 当第二次切削厚度 $a_{p2}=60\ \mu\text{m}$ 时, 其中 $11\ \mu\text{m}$ 为无损伤层, 第二次切削能有效切除第一次切削产生纤维损伤, 而且由于无损伤层厚度的下降, 第二次切削过程中产生的损伤有大幅度降低, 纤维的最大损伤深度约为 $15\ \mu\text{m}$, 切削表面“凹坑”明显减小, 树脂

基体的整体损伤深度约为 13 μm 。

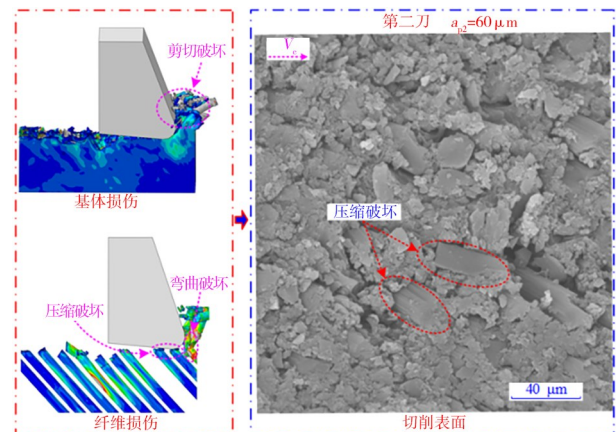
由此可见,当第二切削厚度小于第一次切削损伤深度时,第二次切削过程中,能确保基本不产生新损伤的基础上,去除第一次切削过程中产生的损伤,当第二次切削厚度大于第一次切削损伤深度时,由于第二次切削过程中无损伤层厚度的降低,致使第二次切削纤维的切削损伤大幅度下降。可见,以上两种情形下,第二次切削均能有效地提高切削表面质量。



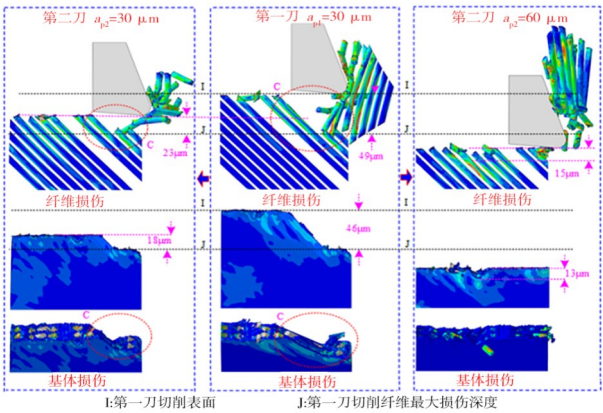
(a) 第一刀切削的微观形貌 ($\theta=135^\circ$, $a_{p1}=30\ \mu\text{m}$)



(b) 第二刀切削的微观形貌 ($\theta=135^\circ$, $a_{p2}=30\ \mu\text{m}$)



(c) 第二刀切削的微观形貌 ($\theta=135^\circ$, $a_{p2}=60\ \mu\text{m}$)



(d) 第一刀切削后的损伤演化过程 ($\theta=135^\circ$)

图9 切削表面形成过程 ($\theta=135^\circ$)

Fig. 9 Cutting surface formation process ($\theta=135^\circ$)

综上所述,当纤维取向 $\theta=0^\circ$ 时,第一次切削的切削表面损伤对第二次切削的影响较小,尤其是当第二次切削的切削厚度远大于第一次切削表面损伤时影响很小;当纤维取向 $\theta=45^\circ$ 时,第二次切削能有效去除第一次切削过程中产生的纤维损伤层,尤其当第二次切削厚度小于第一次切削纤维损伤层深度时,在不产生新纤维损伤的基础上,能有效去除第一次切削产生的损伤层,但由于第一次和第二次切削过程中树脂基体的破坏形式基本相同,致使第二次切削的整体损伤与第一次基本相当,此时,第二次切削的切削表面光洁度有所改善,而第二次切削的切削表面整体损伤程度变化较小;当纤维取向 $\theta=90^\circ$ 时,当第二次切削厚度小于第一次切削损伤深度时,第一次切削纤维损伤层能被有效去除,且第二次切削的纤维损伤深度有所减小,由于部分纤维低于切削厚度而未被切到,树脂基体切削受力小,其整体损伤深度极小,第二次切削的切削表面质量有较大提高;当纤维取向 $\theta=135^\circ$ 时,第二次切削厚度不论小于还是大于第一次切削损伤深度,第二次切削均能有效地提高切削表面质量。

4 结论

通过有限元仿真分析和试验研究,可见第一次切削的切削损伤对第二次切削的切削损伤存在一定的影响关系:

- (1) 当纤维取向 $\theta=0^\circ$ 时,第一次切削的切削表面损伤对第二次切削的影响较小;
- (2) 当纤维取向 $\theta=45^\circ$ 时,第二次切削能有效去除第一次切削过程中产生的纤维损伤层,尤其当第二次切削厚度小于第一次切削纤维损伤层深度时,在不产生新纤维损伤的基础上,能有效去除第一次切削产生的损伤层;
- (3) 当纤维取向 $\theta=90^\circ$ 时,当第二次切削厚度小

于第一次切削损伤深度时,第一次切削纤维损伤层能被有效去除,且第二次切削的纤维损伤深度有所减小;

(4) 当纤维取向 $\theta=135^\circ$ 时,第二次切削厚度不论小于还是大于第一次切削损伤深度,第二次切削均能有效地提高切削表面质量。

参考文献

- [1] 贾振元,何春伶,付饶,等. 基于CFRP层合板钻削轴向力时变曲线的钻头几何形状分析[J]. 复合材料学报, 2016, 33(12):2757-2765.
- JIA Z Y, HE C L, FU R, et al. Analysis of drilling tool geometry based on thrust force during drilling carbon fiber reinforced plastic laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(12):2757-2765.
- [2] 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 Y, GE E D, FU Y C, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2):301-316.
- [3] KISHAN Z, DIN B, SONI K, et al. Recent trends in drilling of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs): A state-of-the-art review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 47 - 68.
- [4] DANIEL I P, NORBERT G, CSONGOR P, et al. A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges [J]. Composites Part B, 2021, 223: 109155
- [5] SU F, LI C J, LI W Y, et al. Cutting forces and correlation with the damages during CFRP drill-milling by using novel drill-milling tool [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108: 2661-2674
- [6] ILIESCU D, GEHIN D, GUTIERREZ M E, et al. Modeling and tool wear in drilling of CFRP [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(2): 204-213.
- [7] WANG C Y, YU G, AN Q L, et al. Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates [J]. Composite Part B: Engineering, 2017, 109: 10-22
- [8] JAEWOO S, NILANJAN B, YEONOH K, et al. Experimental and analytical investigation of the drilling forces of the carbon fiber reinforced plastics including thermal effects [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 1126-1137
- [9] 刘书暖,宋晔,郭东林,等. CFRP/Ti叠层结构钻孔过渡域表面粗糙度演化机理[J]. 机械工程学报, 2021, 57(7): 224-233.
- LIU Shunuan, SONG Ye, GUO Donglin, et al. Study on the surface roughness of transitional field in drilling CFRP / Ti stacks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(7): 224-233.
- [10] 王东,焦锋. 基于横刃轴向力的CFRP钻孔分层临界进给量研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 255-266.
- WANG D, JIAO F. Study on critical feed rate of delamination based on thrust force of chisel edge during CFRP drilling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 255-266.
- [11] 陈逸佳,陈燕,晏超仁,等. 考虑刀具磨损影响的CFRP复合材料钻削轴向力预测[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2207-2217.
- CHEN Y J, CHEN Y, YAN C R, et al. Prediction of thrust force in CFRP composite drilling considering tool wear effect [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(7): 2207-2217.
- [12] XU J, DENG Y, WANG C X, et al. Numerical model of unidirectional CFRP in machining: Development of an amended friction model [J]. Composite Structures, 2021, 256: 113075
- [13] ALESSANDRO A, SEIN L S, KHAMIS E. Modeling the orthogonal cutting of UD-CFRP composites: development of a novel cohesive zone model [J]. Composite Structures, 2017, 168:65-83.
- [14] MENG Q X, CAI J, CHENG H, et al. Investigation of CFRP cutting mechanism variation and the induced effects on cutting response and damage distribution [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2020, 106:2893-2907
- [15] 路冬,李志凯,融亦鸣,等. 基于宏观各向异性碳纤维增强树脂基复合材料的切削仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3):584-590
- LU D, LI Z K, RONG Y M, et al. Cutting simulation of carbon fiber reinforced resin matrix composite material based on macroscopic anisotropy [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3):584-590.
- [16] 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 Z C, LIU S N, CHENG H, 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.
- [17] 高汉卿,贾振元,王福吉,等. 基于细观仿真建模的CFRP细观破坏[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 758-767.
- Gao H Q, Jia Z Y, Wang F J, et al. Mesoscopic failure of CFRP based on mesoscopic simulation modeling [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4): 758-767.
- [18] LIU H, XIE W, SUN Y, et al. Investigations on micro-cutting mechanism and surface quality of carbon fiber-reinforced plastic composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 3655-3664.