单颗金刚石磨粒微纳刻划CFRP界面行为研究

张立峰[1*] 黄子轩[1] 张旺通[1] 孔德创[1] 王 勇[2]
1.中国民航大学航空工程学院,天津,300300
2.天津商业大学机械工程学院,天津,300134

摘要:采用单颗金刚石磨粒对单向碳纤维增强复合材料(CFRP)进行微纳刻划试验,以揭示CFRP材料去除机理及界面力学行为,系统研究了刻划方向与速度对摩擦特性及损伤演化的影响。研究结果表明,CFRP表现出显著各向异性,法向摩擦因数约为轴向的3倍,刻划深度与裂纹宽度均遵循法向、轴向、径向依次递增的规律,径向刻划深度约为法向的1.6倍;材料去除以脆性断裂为主,未出现明显脆塑转变。基于能量分析建立了考虑纤维弯曲与界面脱黏的力学模型,揭示了切削载荷与界面损伤的耦合关系。理论预测与实验结果吻合良好,为理解CFRP的微观去除机理及其精密加工性能提供了理论参考。

关键词:碳纤维增强复合材料;微纳刻划;摩擦因数;界面;材料去除机理
中图分类号:TB332
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.006 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Study on Interfacial Behavior of CFRP under Micro-nano Scratching by Single Diamond Abrasive Grain

ZHANG Lifeng[1*] HUANG Zixuan[1] ZHANG Wangtong[1] KONG Dechuang[1] WANG Yong[2]
1.School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300
2.School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134

Abstract: Micro-nano scratching experiments were conducted on unidirectional CFRP using a single diamond abrasive grain to investigate the material removal mechanism and interfacial mechanical behavior. The effects of scratching direction and velocity on the frictional characteristics and damage evolution were systematically studied. The results show that CFRP exhibits pronounced anisotropy. The normal friction coefficient is approximately three times that in the axial direction, and both the scratching depth and crack width follow the order of normal<axial<radial, with the radial scratching depth being about 1.6 times that in the normal direction. Material removal is dominated by brittle fracture without an evident brittle-to-ductile transition. A mechanical model considering fiber bending and interfacial debonding was established based on energy analysis, which reveals the coupling relationship between cutting load and interfacial damage. The theoretical predictions agree well with the experimental results, providing a theoretical framework for understanding the microscopic material removal mechanism and precision machinability of CFRP.

Key words: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); micro-nano scratching; friction coefficient; interface; material removal mechanism

0 引言

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)在工业领域有着非常广泛的应用,主要是因为它具有高比强度、高耐腐蚀性、低热膨胀、低导热性及良好的尺寸稳定性[1-2]。CFRP是将碳纤维增强材料集成到树脂基体中形成界面层,从而产生单个成分无法比拟的卓越性能。CFRP需要通过机械加工得到具有高平整度、低表面粗糙度的高加工表面质量,属于典型的难加工材料[3]。它在机械加工过程中容易出现分层、纤维拉出和基体开裂等缺陷。

关于CFRP磨削工艺的材料去除机理研究,陈冰等[4]对CFRP磨削制孔技术的研究进行了综述,指出磨削过程中纤维方向、磨粒特性等因素对加工性能有重要影响,为理解CFRP磨削过程中的复杂现象提供了基础理论支持。LIANG等[5]研究了超声振动辅助磨削CFRP的可行性,发现超声振动可以有效降低磨削力和温度,减少加工损伤。GARCIA LUNA等[6]研究了磨粒几何形状和纤维方向对C/SiC陶瓷基复合材料磨削去除机理的影响。SHI等[7]基于运动学分析,对不同纤维取向下刻划深度恒定的超声振动辅助刻划(UVAS)与常规刻划(CS)材料去除过程进行了

收稿日期:2025-10-24
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(3122025086)

对比，并首次揭示了超声振动条件下实际切削角度的动态变化特征。GAO等[8]提出了一种基于可调多角度二维超声振动的CFRP磨削新方法，并结合微量润滑(MQL)实现了CFRP的低损伤加工。

在磨削机理研究中，单颗磨粒实验通过人为排除多磨粒相互作用的干扰，简化了磨削过程分析，为揭示不同材料的磨削机理提供了有效手段。ZHANG等[9]基于单颗磨粒刻划研究了二维斜纹CFRP的材料去除与表面演化机制。GENG等[10]分析了厚CFRP旋转超声椭圆磨削过程中的切削温度特性，指出合理参数可有效抑制热损伤。SHI等[11]总结了CFRP与芳纶纤维增强复合材料的加工研究进展，强调磨削参数优化对加工质量的重要性。上述研究为工程应用中磨削参数的选取提供了理论依据。

纳米刻划技术为揭示复合材料的材料去除机理及微尺度损伤与失效行为提供了重要手段。YAN等[12]建立了碳纤维增强聚醚醚酮在不同纤维取向下的材料去除模型。TIWARI等[13]利用纳米刻划技术探索了无机物质对涂层机械和摩擦性能的影响。

尽管已有研究系统探讨了不同编织结构CFRP的磨削性能与加工方法，但对其在微纳尺度下的力学响应及材料去除机理仍缺乏深入认识。本文从微纳尺度视角，利用单点刻划模拟单颗金刚石磨粒的磨削过程，揭示了局域接触条件下磨粒-材料相互作用及其微观演化规律。针对单向CFRP，在三个典型方向上进行了微纳刻划试验，系统分析了低速单点刻划过程中界面破坏与材料去除特征。进一步基于能量分析建立了单颗磨粒材料去除模型，阐明了微纳刻划过程中的材料去除机理。

1　试验与方法

1.1　主要原料

本文所选用的工件材料为单向碳纤维增强复合材料板，其中增强相为日本东丽公司生产的T700-3K级碳纤维，基体材料为双马来酰亚胺树脂，力学性能如表1所示。

1.2　主要设备及仪器

本试验采用Agilent Nano Indenter G200纳米压痕仪开展微纳刻划试验，实验室环境温度控制在25 ℃左右。该设备可实现纳米压痕与微纳刻划测试，并在低载荷条件下对加载与位移进行精确控制。该设备具有较高的载荷与位移分辨率，可连续获取加载与卸载过程中的刻划深度及位移变化规律。试验过程中，刻划前、刻划中及刻划后的压痕深度与表面形貌被连续记录，用于分析刻划过程中材料的弹塑性变形行为及位移演化特征。

表1　碳纤维与基体的力学性能

Tab.1　Mechanical properties of carbon fibers and their matrix

参数	T700	树脂
纤维直径/μm	7	
抗拉强度/GPa	4.9	85
断裂韧性/(MPa·m$^{1/2}$)	2.50	1.74
轴向泊松比	0.25	0.12
横向弹性模量/GPa	18	10
轴向弹性模量/GPa	230.0	3.5
轴向剪切模量/GPa	27	5
横向剪切模量/GPa	7.0	1.5

1.3　试验方案

单颗磨粒与工件材料的相互作用是磨削机理研究的核心。为排除多颗磨粒干扰，本文采用纳米压痕仪模拟单颗金刚石磨粒对CFRP进行单点刻划试验，系统考察纤维取向及刻划速度对材料去除特性的影响。试验使用立方角压头(侧面与中心线夹角35.26°)对抛光试样表面进行刻划，并记录刻划前、刻划中及刻划后的压痕深度与表面形貌，试验完成后利用扫描电子显微镜(Quanta 250 FEG)对刻划区域的微观形貌进行表征。

图1所示为单颗磨粒切削过程。为保证单点刻划试验参数设置的合理性，本文基于经典磨削几何关系对刻划过程中最大未变形切屑厚度进行了理论估算。根据已有磨削理论[14]，最大未变形切削厚度可写为

$$h_{\max}=\left(\frac{3}{n\tan\alpha}\right)^{1/2}\left(\frac{v_w}{v_s}\right)^{1/2}\left(\frac{a_e}{d_s}\right)^{1/4} \tag{1}$$

式中：n为单位体积砂轮的磨粒数；α为未变形切屑截面的半夹角；v_w为工件进给速度；v_s为砂轮转速；d_s为砂轮直径；a_e为砂轮切深。

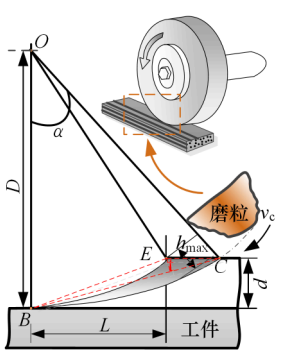


图1　单颗磨粒加工过程中未变形切屑

Fig.1　Undeformed chips in single-grain machining

沿接触弧的任意位置，未变形切削厚度可通过线性插值近似为

$$h(x)=h_{\max}x/L \qquad 0\leqslant x\leqslant L \tag{2}$$

式中：L为磨粒的刻划长度。

大量研究表明，该厚度通常小于3 μm。结合前期研究中所采用的加工参数[15]，本文理论推导结果显示最大未变形切屑厚度约为2.6 μm。据此，本文将刻划深度设计在该尺度范围内，以确保试验能够有效反映单颗磨粒作用下的真实切削行为，并为揭示复合材料磨削中的材料去除机制提供参考。

图2所示为纳米刻划测试原理。试验过程包括三个连续阶段：首先进行预扫描，压针施加20 μN正压力，样品台以10 μm/s移动700 μm，用于测量表面粗糙度（约20 nm）；随后进入刻划阶段，法向力由20 μN线性增加至200 mN（对应500 μm位移），水平力同步按比例增大形成划痕；最后进行后扫描，压针正压力恢复至20 μN，通过700 μm扫描测量残余刻划深度，以评估材料弹性恢复性能。初步分析表明，在所设定载荷范围内，金刚石压头形成的刻划深度与磨粒最大未变形切削厚度基本一致。每组试验条件重复三次，以保证结果的可重复性和可靠性，具体参数见表2。

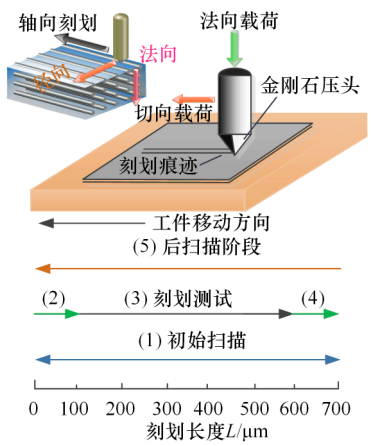


图2 纳米刻划测试原理

Fig.2 The principle of nano-scratch testing

表2 刻划试验参数

Tab.2 The parameters of the scratch test

类型	参数
压入仪器	Nano Indenter G200
加载方式	刻划
刻划长度	700 μm
最大载荷	200 mN
压头种类	立方角金刚石压头
刻划方向	轴向、径向、法向
刻划速度	v=1，10，50 μm/s

1.4 单颗磨粒刻划材料去除模型

为揭示单颗磨粒作用下单向CFRP的微观材料去除力学机理，本文建立了单颗磨粒刻划的理论建模框架，将微纳尺度磨削过程等效为刚性金刚石磨粒与纤维-基体复合体系之间的局域接触问题。通过将磨粒载荷分解为法向压入与切向滑移，分析不同纤维取向下的载荷传递特征及其对材料去除与损伤模式的影响，并进一步构建了法向、轴向及径向刻划的材料去除机理模型，为后续力学分析提供了理论依据。

图3展示了沿三个典型纤维方向的CFRP材料去除模型。图3a为法向刻划，纤维首先发生压缩变形，并在载荷作用下出现撕裂剥离；界面因强度低于纤维和基体而率先产生裂纹并沿纤维方向扩展，随着载荷的增大，纤维与基体界面分层失效，使沿该方向的材料去除较为困难。图3b为轴向刻划，此时纤维主要承受由压头引起的剪切应力，界面裂纹沿纤维方向扩展；纤维剥离表现为层状剥落、横向断裂和整体界面分离，界面失效以剪切破坏为主。图3c为径向刻划，界面主要承受压头施加的法向应力，由于界面剥离强度较低，纤维易发生界面脱离，引起块状剥落和纤维脱落，材料去除效率达到最高。

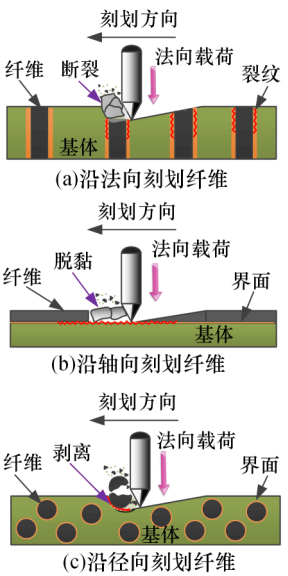


图3 三个典型方向的刻划示意图

Fig.3 Grinding schematic diagram in the three typical directions

1.5 虑及纤维弯曲与界面脱黏的刻划模型

在单颗磨粒法向刻划过程中，纤维弯曲变形及纤维-基体界面脱黏对材料去除行为起关键作用。本文将单根碳纤维等效为嵌入弹性基体中的细长梁，如图4所示，基体约束以等效弹性地基表征；在磨粒载荷作用下，纤维产生横向弯曲，界面

承受拉-剪耦合载荷，其力学响应由纤维微元的力与力矩平衡确定。结合界面能量释放率与混合模断裂准则，建立了纤维变形、界面脱黏与磨粒反力之间的耦合关系。

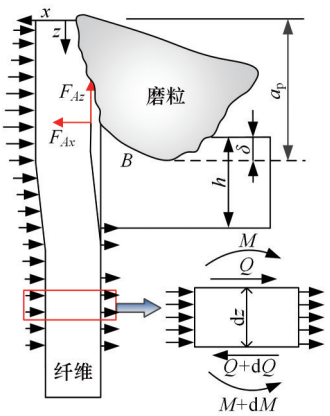


图4　法向刻划过程中纤维的变形

Fig.4　The deformation of fibers during the normal scratching process

单根纤维微元长度dz的截面力学平衡和弯矩平衡方程分别为

$$\frac{\mathrm{d}Q(z)}{\mathrm{d}z}+p_{\mathrm{m}}(z)+p_{\mathrm{b}}(z)+f_{\mathrm{c}}(z)=0 \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}M(z)}{\mathrm{d}z}-Q(z)+m_{\mathrm{c}}(z)=0 \tag{4}$$

式中：$Q(z)$为纤维弯曲产生的截面剪力；p_{m}、p_{b}分别为基体Winkler反力与截面黏结反力；$f_{\mathrm{c}}(z)$为接触压力在该微元上的等效投影；$M(z)$为截面弯矩；$m_{\mathrm{c}}(z)$为由接触压力/切向牵引在该截面产生的外加力矩密度，若将接触产生的矩完全写入右端，则m_{c}是接触产生的集中力矩。

纤维受力可基于Winkler-Pasternak地基模型描述：

$$E_{\mathrm{f}}I_{\mathrm{f}}\frac{\mathrm{d}^4w}{\mathrm{d}z^4}-G_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}^2w}{\mathrm{d}z^2}+k_{\mathrm{e}}(z)w(z)=q(z) \tag{5}$$

式中：E_{f}为纤维弹性模量；I_{f}为截面惯性矩；G_{p}为Pasternak剪切层参数；$q(z)$为刀具等效载荷；$k_{\mathrm{e}}(z)$为分区等效刚度；$w(z)$为纤维沿z方向不同位置处的横向挠曲位移。

界面牵引满足：

$$\left.\begin{aligned}t_{\mathrm{n}}&=(1-d)K_{\mathrm{n}}\Delta_{\mathrm{n}}\\t_{\mathrm{s}}&=(1-d)K_{\mathrm{s}}\Delta_{\mathrm{s}}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中：t_{n}、t_{s}分别为界面法向牵引应力和切向牵引应力；d为界面损伤变量，取值范围为0～1，$d=0$表示界面完好，$d=1$表示界面完全失效；K_{n}、K_{s}分别为界面法向刚度和切向刚度；Δ_{n}、Δ_{s}分别为界面法向开裂位移和切向滑移位移。

此过程中，界面处等效局部能量释放率即界面断裂能为

$$G=\int_{\Gamma_{\mathrm{cx}}}(t_{\mathrm{n}}\mathrm{d}\Delta_{\mathrm{n}}+t_{\mathrm{s}}\mathrm{d}\Delta_{\mathrm{s}}) \tag{7}$$

式中：Γ_{cx}为纤维/基体界面裂纹扩展区域。

并遵循Benzeggagh-Kenane混合模断裂准则：

$$G_{\mathrm{c}}=G_{\mathrm{IC}}+(G_{\mathrm{IIC}}-G_{\mathrm{IC}})\left(\frac{G_{\mathrm{II}}}{G_{\mathrm{I}}+G_{\mathrm{II}}}\right)^{\eta} \tag{8}$$

式中：G_{c}为混合模界面断裂临界能量释放率；G_{IC}为Ⅰ型开裂，即法向张开模式下的临界断裂能；G_{IIC}为Ⅱ型开裂，即切向滑移模式下的临界断裂能；G_{I}、G_{II}分别为当前界面裂纹扩展过程中的Ⅰ型和Ⅱ型能量释放率；η为B-K准则中的材料经验参数，用于表征Ⅰ/Ⅱ混合模比例对界面断裂韧性的影响。

分区特征方程与纤维挠度解可表示为指数衰减形式，连续性条件用于连接各分区解。纤维对单颗磨粒的总反力为

$$F_x=\int_0^{\infty}k_{\mathrm{m}}w(z)\mathrm{d}z+\int_{\Gamma_{\mathrm{b}}}k_{\mathrm{b}}w(z)\mathrm{d}z+\int_{\Gamma_{\mathrm{cx}}}t_{\mathrm{n}}\mathrm{d}z+\int_0^{\infty}G_{\mathrm{p}}w''(z)\mathrm{d}z \tag{9}$$

式中：k_{m}为基体对纤维横向变形的等效弹性支撑刚度，用于表征基体对纤维弯曲变形的约束作用；k_{b}为纤维/基体界面未脱黏区域的等效黏结刚度；Γ_{b}为界面保持黏结状态的区域。

当接触载荷满足Hertz分布时，外载荷为

$$q(z)=\int_{-a_{\mathrm{c}}}^{a_{\mathrm{c}}}p_{\mathrm{c}}(\xi)\chi_{[z_{\mathrm{t}}-a_{\mathrm{c}},z_{\mathrm{t}}+a_{\mathrm{c}}]}(z)\mathrm{d}\xi \tag{10}$$

式中：$p_{\mathrm{c}}(\xi)$为磨粒与纤维接触区域内的Hertz接触压力分布；$\chi_{[z_{\mathrm{t}}-a_{\mathrm{c}},z_{\mathrm{t}}+a_{\mathrm{c}}]}(z)$为示性函数，当$z$位于接触区间$[z_{\mathrm{t}}-a_{\mathrm{c}},z_{\mathrm{t}}+a_{\mathrm{c}}]$内时取值为1，否则取值为0；$z_{\mathrm{t}}$为磨粒与纤维接触区域中心在$z$方向上的位置；$a_{\mathrm{c}}$为Hertz接触半宽度。

能量平衡关系为

$$\int qw\mathrm{d}z=\int\left(\frac{1}{2}E_{\mathrm{f}}I_{\mathrm{f}}k^2+\frac{1}{2}G_{\mathrm{p}}(w')^2+\frac{1}{2}k_{\mathrm{m}}w^2\right)\mathrm{d}z+\int_{\Gamma_{\mathrm{b}}}\frac{1}{2}k_{\mathrm{b}}w^2\mathrm{d}z+\int_{\Gamma_{\mathrm{cx}}}G\mathrm{d}z \tag{11}$$

其中，k为纤维弯曲曲率，用于表征纤维弯曲变形程度，在小变形条件下通常可近似表示为$k=w''(z)$。

脱黏长度由极值条件确定：

$$\left.\begin{aligned}&\partial\Pi/\partial a=0\\&\Pi(a)=U_{\mathrm{int}}(a)+U_{\mathrm{intf}}(a)+\Gamma(a)-W_{\mathrm{ext}}(a)\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中：a为界面脱黏长度或界面裂纹扩展长度；Π为体系总势能；$U_{\mathrm{int}}(a)$为纤维弯曲变形、基体弹性支撑及剪切层变形所储存的内部应变能；$U_{\mathrm{intf}}(a)$为纤维/基体界面黏结区储存的界面弹性能；$\Gamma(a)$为界面裂纹扩展过程中消耗的断裂能；$W_{\mathrm{ext}}(a)$为磨粒外载荷所做的外功。

基于上述假设与推导，所建立的刻划力学模型可在给定界面参数与外载条件下，定量表征单颗磨粒刻划过程中纤维弯曲、界面脱黏演化及二者耦合作用对刻划力的影响。该模型在能量平衡框架内统一了刻划载荷、界面断裂特性与脱黏尺度之间的关系，适用于以界面失效为主导的微纳尺度刻划行为。

2 结果与讨论

2.1 单向CFRP的摩擦因数

图5所示为单向CFRP材料在干燥和润滑两种工况下沿典型纤维方向的摩擦因数测试结果。结果表明，单向CFRP摩擦因数呈明显各向异性，大小依次为轴向摩擦因数＜径向摩擦因数＜法向摩擦因数，法向摩擦因数约为轴向的3倍。这一差异主要源于CFRP在法向上具有更高的强度和刚度。此外，在使用体积分数为5%的乳化液润滑剂后，各方向摩擦因数均下降。该类乳化液作为磨削过程的冷却液，不仅能够有效降低摩擦因数，还可在材料去除过程中改善基体韧性，而碳纤维则在增强基体强度的同时，亦发挥着微切削刀具的作用。

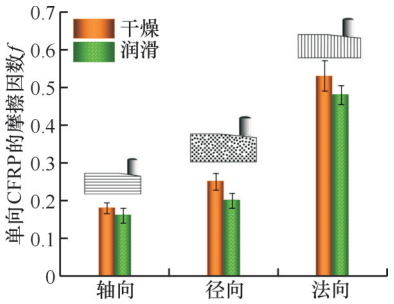


图5 单向CFRP三个典型方向的摩擦因数

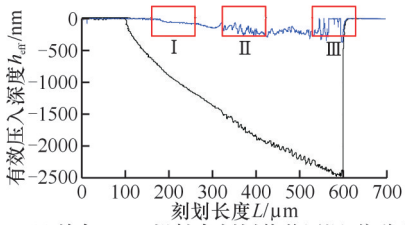
Fig.5 The friction coefficients in three typical directions

相关砂轮磨削研究表明[16]，润滑条件下磨削力的降低主要源于磨粒-工件界面摩擦行为的改善。本试验在润滑工况下观测到的摩擦因数降低现象，从微观尺度上为前述宏观磨削规律提供了对应的试验佐证，表明润滑介质通过调控界面摩擦特性影响CFRP的磨削力学响应。

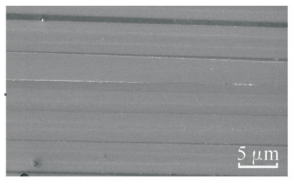
2.2 载荷-位移曲线和刻划形貌分析

在CFRP磨削过程中，双马来酰亚胺树脂基体表现出塑性特征，而T700碳纤维近似脆性。依据断裂力学，裂纹在裂尖应力场超过临界应力强度因子时扩展；纤维的引入虽可增强整体断裂韧性，但纤维-基体界面决定了裂纹是沿界面偏转还是穿透界面。本文试验普遍观测到裂纹倾向沿界面偏转，因而需考察刻划方向对裂纹路径与剥离机理的影响。

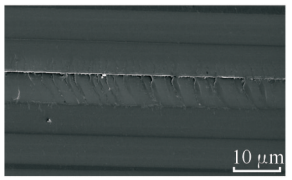
图6所示为轴向刻划试验结果。在轴向刻划CFRP的试验中，加载-位移曲线近似线性，刻划深度随载荷平稳增大，表明材料异质性对刻划过程影响有限。扫描结果显示初始刻划区域残余痕迹极浅，说明在低载荷下材料主要表现为弹性响应，未发生显著塑性变形或损伤。



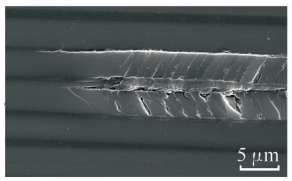
(a)单向CFRP沿轴向刻划载荷压深-位移曲线



(b)刻划阶段Ⅰ显微形貌



(c)刻划阶段Ⅱ显微形貌



(d)刻划阶段Ⅲ显微形貌

图6 轴向刻划试验结果(v=10 μm/s)

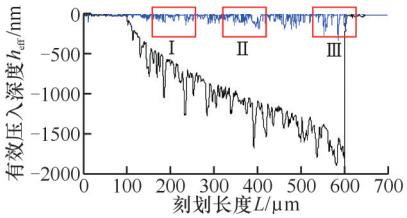
Fig.6 Axial scratch test results (v=10 μm/s)

随着载荷的增大，纤维内部裂纹萌生并扩展，界面出现横向断裂与逐层剥离，同时伴随表面片状剥落与局部压碎。这一失效模式源于碳纤维石墨微晶层沿轴向堆叠紧密、而径向结合较弱的特征[17]，因此径向开裂成为主导破坏机制，典型损伤表现为界面剥离和沟槽状破坏。

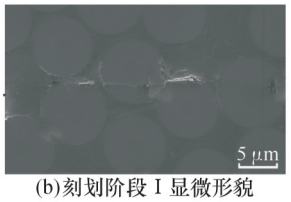
在300～400 μm刻划区间，扫描结果显示更明显的残余痕迹，反映出局部区域存在强化损伤。然而，随着载荷的继续增大，该现象并不稳定，复合材料表现出显著的微观异质性，即次表层纤维与基体的随机分布导致局部响应差异，使裂纹萌生与扩展主要集中于纵向路径，对其他区域影响有限。

图7所示为沿法向刻划的测试结果。试验表明，尽管载荷-深度曲线存在波动，但随着金刚石压头载荷的增大，压痕深度总体上升。刻划初始阶段未出现明显残余痕迹，材料主要表现为弹性恢复，扫描电镜下未观察到纤维损伤，说明初始失效主要发生在界面或基体区域。施加载荷过程中，纤维/基体脱黏和裂纹偏转等失效模式会消耗一定能量。

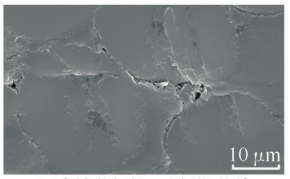
随着载荷的进一步增大，界面裂纹沿纤维扩展，同时在基体中形成径向裂纹。由于树脂基体



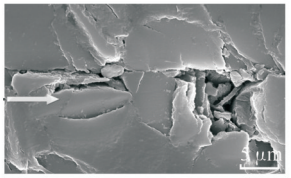
(a)单向CFRP沿法向刻划载荷压深-位移曲线



(b)刻划阶段Ⅰ显微形貌



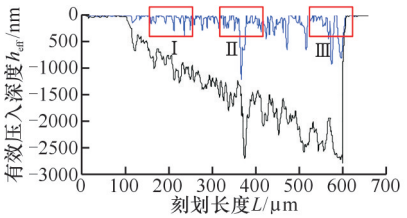
(c)刻划阶段Ⅱ显微形貌



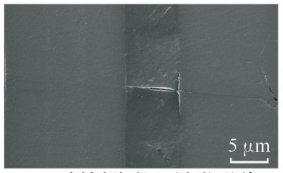
(d)刻划阶段Ⅲ显微形貌

图7　法向刻划试验结果(v=10 μm/s)

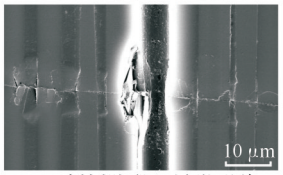
Fig.7　Normal scratch test results (v=10 μm/s)



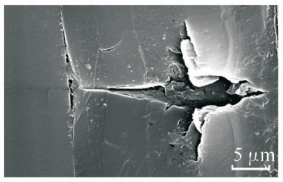
(a)单向CFRP沿径向刻划载荷压深-位移曲线



(b)刻划阶段Ⅰ显微形貌



(c)刻划阶段Ⅱ显微形貌



(d)刻划阶段Ⅲ显微形貌

图8　径向刻划试验结果(v=10 μm/s)

Fig.8　Transverse scratch test results (v=10 μm/s)

的断裂韧性低于碳纤维的断裂韧性，其裂纹更易扩展并导致局部剥落，而纤维则提供支撑并限制裂纹范围。大载荷下，裂纹在纤维/基体体系中迅速扩展，局部区域出现脆性碎裂，但整体裂纹仍呈局部分布。

与法向刻划相比，轴向和径向刻划中裂纹更易沿纤维-基体界面扩展，界面处主要表现为Ⅱ型破坏[18]。这是由于界面结合强度较低，而纤维沿轴向具有较高刚度与强度，从而阻碍裂纹向纤维内部扩展。基体中的局部微裂纹能够释放应力集中，使裂纹演化呈局部化和分散化特征，避免大面积失效扩展，同时维持纤维-基体体系的整体承载能力。

沿径向刻划时的载荷-位移曲线见图8，其波动特征更为明显。当压头跨越纤维与基体界面时，曲线出现突变。刻划初期材料以弹性变形为主；随着载荷的增大，界面失效削弱了对纤维的约束，诱发应力集中并导致径向裂纹萌生；随后，裂纹扩展引发纤维分层剥离，基体则呈脆性碎裂脱落，且碎屑尺度小于纤维直径；随着压头的进一步深入，纤维/基体体系发生整体失效，表现为大范围的分层与压缩断裂。

对比三种方向，径向刻划的剥离程度最为严重，表明该方向为失效薄弱项。值得注意的是，载荷曲线在某一临界位移处出现明显突变，对应纤维剥离的发生。由于残余纤维厚度分布不均，局部支撑刚度降低，导致部分纤维直接发生界面剥离。这说明材料表面的异质结构和局部支撑条件对刻划行为具有显著影响，使去除机制偏向界面黏结失效主导。无论轴向、法向还是径向，在最大未变形切屑厚度(0～3 μm)范围内，残余刻划都相对较小，验证了微纳尺度下去除CFRP材料的困难性。

综合不同纤维取向的结果可知，纤维方向对CFRP的材料去除机理与损伤模式具有决定性影响。法向刻划中纤维增强效应显著，裂纹扩展受到有效抑制；轴向刻划下裂纹倾向沿纤维方向传播，以纤维拔出和界面剥离为主；径向刻划则更易诱发界面开裂与纤维剥落，局部承载能力显著降低。从断裂力学角度看，刻划诱发的应力传递与裂纹扩展路径受纤维取向控制。需要指出的是，不同刻划方向下单颗磨粒的作用状态可视为磨削过程中磨粒-纤维相对运动的局部近似，其力学响应在一定程度上反映了宏观磨削的方向性差异。

2.3　刻划速度对单点刻划的影响

宏观磨削过程中法向磨削力在不同纤维方向

上表现出显著差异，其本质来源于单颗磨粒与材料相互作用方式的各向异性。在多磨粒磨削条件下，宏观磨削力实质上是大量单颗磨粒微观刻划行为的力学响应叠加，因此有必要从单颗磨粒尺度分析其形成机理。

单颗金刚石磨粒微纳刻划试验结果如图9所示，在相同刻划速度条件下，沿三个典型纤维方向刻划时，呈现出法向最大裂纹宽度＜轴向最大裂纹宽度＜径向最大裂纹宽度的分布规律，其中径向刻划对应的最大裂纹宽度约为法向的2.8倍。

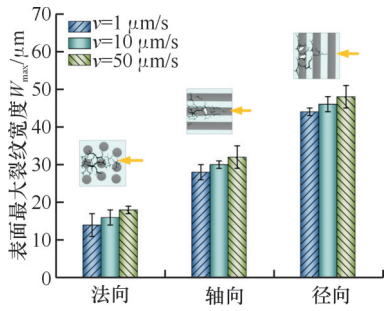


图9 刻划时最大裂纹宽度

Fig.9 The maximum crack width of the scratch

裂纹主要起源于纤维/基体界面并沿界面扩展，说明界面失效在材料破坏过程中起主导作用。沿径向刻划时，磨粒载荷更易在界面区域诱发滑移与开裂，界面快速失效为裂纹扩展和材料剥离提供了有利条件，而在法向刻划条件下，载荷主要由纤维本体承担，界面开裂受到抑制，裂纹扩展范围明显受限。

这一界面失效程度的差异直接反映在材料去除能力上。如图10所示，最大刻划深度同样表现出按法向、轴向、径向依次递增的规律，其中径向刻划深度约为法向的1.6倍。较小的刻划深度表明，在法向刻划过程中，磨粒切入材料所需克服的阻力更大，材料局部破坏和剥离更为困难。

类似的刻划速度效应在已有微纳刻划研究中亦有报道，如在单晶硅和SiC等材料的纳米刻划

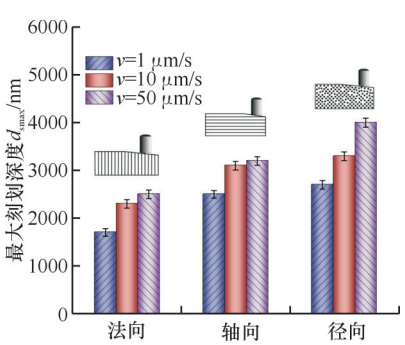


图10 刻划速度对最大刻划深度的影响

Fig.10 Effect of scratching speed on maximum scratch depth

试验中，随着刻划速度的提高，刻划力、摩擦响应及材料去除行为均发生显著变化，表明刻划速度对磨粒-材料界面力学响应具有普遍影响[19]。

在宏观磨削试验中，通过改变磨削深度对三个典型纤维方向下的法向磨削力进行了对比分析[20]。结果表明，在相同磨削深度条件下，法向磨削力显著高于轴向与径向磨削力，其中法向磨削力约为径向的5倍，表明沿法向加工时材料对磨粒切入和滑移的整体阻抗最大。

砂轮磨削本质上是大量单颗磨粒微观刻划行为的综合作用。为深入解析不同纤维取向对磨削力的影响，需借助单颗磨粒刻划模型开展定量分析。通过代入界面力学参数求解微观受力状态，可为理解宏观磨削力的演化机制提供具体的理论依据。当法向载荷为200 mN、界面断裂能 G_c＝0.1 J/m^2、界面剪切强度 τ_c＝50 MPa时，模型计算得到的界面实际脱黏长度约为10～100 μm，对应的总刻划力范围为100～120 mN。该结果与试验中观测到的刻划力变化水平及界面损伤尺度具有一致的变化趋势，表明在微纳刻划条件下，纤维弯曲与界面脱黏的耦合作用能够有效表征单颗磨粒刻划过程中载荷传递与材料去除行为。由此可见，界面主导型损伤机制在刻划力形成过程中起关键作用。

因此，砂轮沿纤维法向磨削时，磨削力显著增大并非孤立的工艺现象，而是源于单颗磨粒尺度下界面失效受限、裂纹扩展受阻以及刻划深度减小等微观行为的综合结果。

3 结论

1）单向CFRP的摩擦因数表现出显著方向性：轴向摩擦因数＜径向摩擦因数＜法向摩擦因数，其中法向摩擦因数约为轴向值的3倍。这种差异源于纤维取向、基体性能及外部润滑条件的综合作用。

2）单点刻划试验表明材料存在明显各向异性，刻划深度和表面裂纹宽度均遵循法向、轴向、径向依次递增的规律，其中径向刻划深度约为法向的1.6倍，裂纹宽度约为法向的2.8倍。

3）提高刻划速度（1～50 μm/s）会增大各方向的最大裂纹宽度和材料去除率，这主要归因于材料断裂能的降低。不同刻划速度下的去除模式保持一致，与宏观磨削结果相符。微纳尺度刻划试验中最大未变形切削厚度的研究为复合材料的微纳力学性能和磨削机理提供了量化参考。

4）在刻划过程中，纤维、界面与基体损伤呈异

步演化，材料去除以脆性断裂为主，表现为基体开裂、界面失效与纤维断裂的多模式破坏。建立的力学模型表明，纤维在切削载荷作用下发生横向弯曲，基体与界面提供约束并逐步脱黏，从而揭示了纤维弯曲、界面损伤演化与切削载荷之间的耦合机制。

参考文献：

[1] 鄢威，王欣怡，张华，等. 考虑切削能耗和表面质量的碳纤维增强树脂基复合材料加工工艺参数优化决策[J]. 中国机械工程，2024，35(10)：1834-1844.
YAN Wei，WANG Xinyi，ZHANG Hua，et al. Optimization Decision of CFRP Processing Parameters Considering Cutting Energy Consumption and Surface Quality[J]. China Mechanical Engineering，2024，35(10)：1834-1844.

[2] 郑志龙，赵玉刚，刘谦，等. 碳纤维增强复合材料水导激光加工实验研究[J]. 中国机械工程，2023，34(3)：344-351.
ZHENG Zhilong，ZHAO Yugang，LIU Qian，et al. Experimental Study on Water Jet Guided Laser Processing of CFRPS[J]. China Mechanical Engineering，2023，34(3)：344-351.

[3] HAN L，ZHANG J，LIU Y，et al. Effect of Fiber Orientation on Depth Sensing Intra-laminar Failure of Unidirectional CFRP under Nano-scratching[J]. Composites Part B：Engineering，2021，224：109211.

[4] 陈冰，徐虎，王健，等. 纤维增强复合材料磨削制孔加工技术研究进展[J]. 复合材料学报，2023，40(1)：13-37.
CHEN Bing，XU Hu，WANG Jian，et al. Research Progress of Fiber Reinforced Composites by Grinding Technology for Hole Making[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2023，40(1)：13-37.

[5] LIANG Y，CHEN Y，CHEN B，et al. Feasibility of Ultrasonic Vibration Assisted Grinding for Carbon Fiber Reinforced Polymer with Monolayer Brazed Grinding Tools[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing，2019，20(7)：1083-1094.

[6] GARCIA LUNA G，AXINTE D，NOVOVIC D. Influence of Grit Geometry and Fibre Orientation on the Abrasive Material Removal Mechanisms of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites (CMCS)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2020，157：103580.

[7] SHI H，ZHANG Z，YUAN S，et al. Investigation on the Surface Formation Mechanism in Scratching of CFRP Composites with Different Fiber Orientations[J]. Journal of Materials Processing Technology，2022，307：117694.

[8] GAO T，XU P，WANG W，et al. Force Model of Ultrasonic Empowered Minimum Quantity Lubrication Grinding CFRP[J]. International Journal of Mechanical Sciences，2024，280：109522.

[9] ZHANG Y，ZHANG S，MA S，et al. Surface Damage Mechanism and Modes in Single Abrasive Grinding Twill Carbon Fiber-reinforced-polymer Laminates Basing on Stress Field Analysis[J]. Materials Today Communications，2025，42：111220.

[10] GENG D，LU Z，YAO G，et al. Cutting Temperature and Resulting Influence on Machining Performance in Rotary Ultrasonic Elliptical Machining of Thick CFRP[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2017，123：160-170.

[11] SHI Z Y，CUI P，LI X. A Review on Research Progress of Machining Technologies of Carbon Fiber-reinforced Polymer and Aramid Fiber-reinforced Polymer[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part C：Journal of Mechanical Engineering Science，2019，233(13)：4508-4520.

[12] YAN X，ZHAO H，SHEN Y，et al. Material Removal Mechanism and Penetration Depth Modeling of CF/PEEK Composites under Nano-scratching[J]. Composites Science and Technology，2022，227：109566.

[13] TIWARI A，HIHARA L H. Effect of Inorganic Constituent on Nanomechanical and Tribological Properties of Polymer，Quasi-ceramic and Hybrid Coatings[J]. Surface and Coatings Technology，2012，206(22)：4606-4618.

[14] ZHANG Y，FANG C，HUANG G，et al. Modeling and Simulation of the Distribution of Undeformed Chip Thicknesses in Surface Grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2018，127：14-27.

[15] ZHANG L，REN C，JI C，et al. Effect of Fiber Orientations on Surface Grinding Process of Unidirectional C/SiC Composites[J]. Applied Surface Science，2016，366：424-431.

[16] GAO T，LI C，JIA D，et al. Surface Morphology Assessment of CFRP Transverse Grinding Using CNT Nanofluid Minimum Quantity Lubrication[J]. Journal of Cleaner Production，2020，277：123328.

[17] KRISHNAPPA S，GURURAJA S. Compressive Failure Mechanisms in Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Composites with Embedded Wrinkles[J]. Composites Part B：Engineering，2024，284：111688.

[18] ZHANG L，ZHANG W，WANG Z，et al. Interfacial Strength and Fracture Toughness of Unidirectional C/SiC Composites under Mode Ⅰ and Ⅱ Loading[J]. Journal of the European Ceramic Society，2026，46(5)：117995.

[19] FENG M，ZHAO Z，LI G，et al. Mechanistic Study of 4H-SiC Removal under Various Scratching Speeds Using Nano-scratching Experiments and Molecular Dynamics Simulations [J]. Tribology International，2026，214：111230.

[20] 张立峰，王盛，王宁，等. 单向碳纤维增强塑料磨削加工性能[J]. 塑料，2020，49(1)：97-100.
ZHANG Lifeng，WANG Sheng，WANG Ning，et al. The Grinding Properties of the Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastics[J]. Plastics，2020，49(1)：97-100.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：张立峰*（通信作者），男，1983年生，讲师。研究方向为航空材料精密加工技术、复合材料力学。发表论文30余篇。E-mail：zhanglifeng@tju.edu.com。

本文引用格式：

张立峰，黄子轩，张旺通，等. 单颗金刚石磨粒微纳刻划CFRP界面行为研究[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2438-2445.

ZHANG Lifeng，HUANG Zixuan，ZHANG Wangtong，et al. Study on Interfacial Behavior of CFRP under Micro-nano Scratching by Single Diamond Abrasive Grain[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(10)：2438-2445.