

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.02.003

## 滑动方向对编织复合材料摩擦磨损性能的影响

裴晓园<sup>1,2</sup>, 孙晴<sup>1,2</sup>, 贾志坤<sup>3</sup>, 刘思琦<sup>1,2</sup>, 徐志伟<sup>1,2</sup>

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387; 3. 河北华北石油工程建设有限公司, 河北 任丘 062552)

**摘要:** 为了提升三维编织复合材料的抗摩擦磨损性能, 研究了编织复合材料横向和纵向的微观结构对其摩擦磨损性能的影响, 优化了编织复合材料的工艺参数, 并对复合材料在不同方向上的硬度、导热系数、磨损表面形貌进行分析。结果表明: 编织复合材料横向截面中的碳纤维面积占比低于纵向; 其横向的硬度和导热系数高于纵向; 纤维体积分数由0增加至57.5%时, 复合材料横向的平均摩擦因数降低了34.37%, 磨损率降低了99.36%, 纵向的摩擦因数降低了31.29%, 磨损率降低了98.95%; 复合材料横向的摩擦因数稳定性在纤维体积分数为57.5%时最高, 而纵向的摩擦因数稳定性在纤维体积分数为50.5%时最高; 编织复合材料横向和纵向磨损表面的损伤程度随着纤维体积分数的增大而降低, 润滑膜的质量提高。

**关键词:** 三维编织复合材料; 碳纤维; 摩擦滑动方向; 摩擦磨损

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)02-0015-08

### Effect of sliding direction on friction and wear properties of braided composites

PEI Xiaoyuan<sup>1,2</sup>, SUN Qing<sup>1,2</sup>, JIA Zhikun<sup>3</sup>, LIU Siqi<sup>1,2</sup>, XU Zhiwei<sup>1,2</sup>

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites of Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Hebei Huabei Petroleum Engineering Construction Co., Ltd., Renqiu 062552, Hebei Province, China)

**Abstract:** In order to improve the anti-friction and wear performance of three-dimensional braided composites, the effects of the microstructure of the braided composites in the transverse and longitudinal directions on their friction and wear performance were investigated, the process parameters of the braided composites were optimized, and the composites were analyzed for their hardness, thermal conductivity, and wear surface morphology in different directions. The results show that the percentage of carbon fiber area in the transverse section of the braided composites is lower than that in the longitudinal direction, and their hardness and thermal conductivity in the transverse direction are higher than that in the longitudinal direction. When the fiber volume fraction is increased from 0 to 57.5%, the average friction coefficient of the transverse direction of the composites decreases by 34.37% and the wear rate by 99.36%, and the friction coefficient of the longitudinal direction decreases by 31.29% and the wear rate by 98.95%. The stability of the friction coefficient in the transverse direction of the composites is the highest at a fiber volume fraction of 57.5%, while the stability of the friction coefficient in the longitudinal direction is the highest at a fiber volume fraction of 50.5%. The degree of damage on the transverse and longitudinal wear surfaces of the braided composites decrease with increasing fiber volume content and the quality of the lubrication film increases.

**Key words:** three-dimensional braided composites; carbon fiber; friction sliding direction; friction and wear

三维编织碳纤维增强树脂基复合材料因其质量轻、强度高、低摩擦因数、可设计性等优良特性, 作为

密封件、齿轮、轴承等摩擦元件在航空、航天、汽车等工业领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。在服役环境下, 复合材

收稿日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(12102300, 52275190); 天津市科技特派员资助项目(23YDTPJC00480)

第一作者: 裴晓园(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为三维立体织物的结构与设计。E-mail: peixiaoyuan@tiangong.edu.cn

通信作者: 徐志伟(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纤维复合材料制备。E-mail: xuzhiwei@tiangong.edu.cn

料在受到外部摩擦载荷作用时,不仅会改变原有结构的微观尺寸,而且会对材料造成磨损,严重时导致纤维断裂和基体开裂,为后续复合材料部件服役带来隐患,而三维编织复合材料的增强体为整体结构,其摩擦学性能取决于纤维体积分数和编织结构等。Zheng等<sup>[4]</sup>发现经过纤维氧化的三维编织碳纤维/尼龙复合材料的摩擦因数和磨损率均明显降低。经过纤维氧化,碳纤维表面形成—CO官能团,增强了碳纤维与基体的粘合力,从而改善复合材料的摩擦学性能。Qiu等<sup>[5]</sup>研究了不同纤维体积分数的三维编织碳纤维/聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料的摩擦磨损性能,结果发现,碳纤维的加入能够显著提高PEEK的摩擦学性能,且存在最佳的纤维体积分数54%。Zheng等<sup>[6]</sup>探究了纤维体积分数和摩擦条件对碳纤维/尼龙复合材料摩擦学性能和磨损机制的影响,结果发现,当纤维体积分数为35%时,复合材料耐磨性最佳。干滑动条件下,复合材料的磨损机制是粘着磨损和磨粒磨损,而Hank's溶液润滑条件下主要是磨料磨损。Ma等<sup>[7]</sup>发现三维编织碳纤维复合材料的摩擦因数随着转速的增加而降低,其摩擦磨损机理为磨粒磨损和疲劳磨损。Rasheva等<sup>[8]</sup>探究了短碳纤维/聚醚醚酮复合材料在平行于纤维和垂直于纤维的滑动方向上的摩擦磨损性能,研究发现,当滑动方向垂直于纤维方向时,磨损率明显低于平行于纤维方向。但是,在垂直方向上,复合材料磨损表面出现比较严重的形变和损伤,而在平行方向上比较光滑。Man等<sup>[9]</sup>采用3D打印技术制备了连续碳纤维增强聚酰胺基复合材料,并探究了其在不同滑动方向相对于纤维方向(垂直和平行)下的摩擦磨损性能,结果表明,滑动方向相对纤维垂直时,复合材料的磨损表面出现了严重的纤维和树脂之间的脱粘现象。除了滑动方向,摩擦接触表面中复合材料的微观形貌也会对其摩擦磨损性能产生很大的影响。Zhou等<sup>[10]</sup>设计了5种不同纤维取向的短碳纤维增强陶瓷基(CMC)复合材料,分别为随机取向纤维、单向排列纤维且滑动方向与纤维呈0°、45°和90°的夹角以及纤维垂直于滑动方向,并探究了其微观结构和摩擦学行为之间的关系,结果发现,当纤维随机取向时,复合材料微观结构中纤维和陶瓷基体的交织不规则,这种无规则性在一定程度上可以分散摩擦接触面上的应力,减少局部的应力集中,从而使复合材料表现出最佳的摩擦学性能。

综上所述,碳纤维表面氧化、纤维体积分数、摩擦条件和滑动方向均会对三维编织复合材料的摩擦学

性能产生影响。然而,目前关于三维编织复合材料在不同滑动方向上微观结构对摩擦磨损性能的影响研究甚少,摩擦磨损机制还不清晰。因此,本文研究了三维编织碳纤维/环氧树脂复合材料在横向和纵向上微观结构对其摩擦磨损性能的影响,通过优化编织复合材料的工艺参数提升了编织复合材料的抗摩擦磨损性能。同时,对复合材料在不同方向上的硬度、导热系数和磨损表面形貌进行表征,并解释了相应的摩擦磨损机理。本研究为三维编织碳纤维/环氧树脂复合材料在摩擦元件中的设计和应用提供了参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料和设备

实验材料:T700-12K碳纤维,日本东丽公司;JC-02A型环氧树脂、JC-02B改性酸酐固化剂,常熟佳发化学有限公司。

主要设备:QG-3型金相试样切割机,上海金相器械设备有限公司;LX-D型邵氏硬度计,乐清市艾德堡仪器有限公司;TPS3500型热常数分析仪,瑞典HOT-DISK公司;Regulus8100型冷场发射扫描电子显微镜,日本HITACHI公司;Gemini SEM500型热场发射扫描电子显微镜,德国ZEISS公司;Ultim Max100型能谱仪,英国牛津仪器公司;MS-T3001型摩擦磨损试验仪,兰州华汇仪器科技有限公司。

### 1.2 试样制备

采用四步法三维编织工艺制备了表面编织角为38°的三维四向编织碳纤维预成型件,并采用树脂传递模塑(RTM)工艺制备了不同结构参数的三维编织复合材料试件。试件的具体参数如表1所示。

表1 三维编织复合材料试件的参数

Tab.1 Parameters of 3D braided composite specimens

编号	纤维体积分数/%	实际表面编织角/(°)	数量
A1	0	—	3
A2	46.1	37.9	3
A3	50.5	38.1	3
A4	57.5	38.2	3

采用金相切割机沿着垂直于复合材料的编织方向进行切割,此方向称为复合材料的横向,并将经切割得到的样品称为复合材料的横向截面。沿着平行于复合材料的编织方向进行切割,此方向称为复合材料的纵向,并将经切割得到的样品称为复合材料的纵向截面。复合材料的切割示意如图1所示,经切割得到的样品尺寸为10 mm × 10 mm × 3 mm。

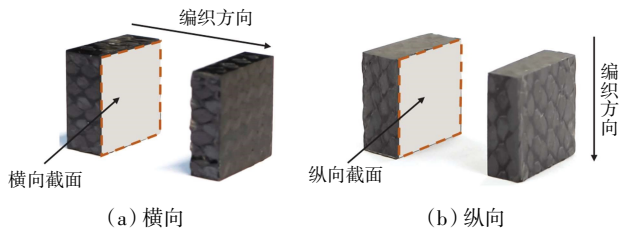


图 1 复合材料的切割示意

Fig.1 Cutting diagram of composites

### 1.3 性能测试

采用 LX-D 型邵氏硬度计测试样品的硬度;使用 TPS3500 型热常数分析仪测试样品的导热系数;采用 Regulus8100 型冷场发射扫描电子显微镜表征样品的微观形貌;采用 Gemini SEM500 型热场发射扫描电子显微镜表征样品摩擦磨损表面的微观形貌;使用 Ultim Max100 型能谱仪表征磨损表面的元素分布。

采用 MS-T3001 型摩擦磨损试验机进行球盘式旋转摩擦磨损试验,对应材料是直径 4 mm 的 GCr15 球。为保证样品和对磨球之间适当的初接触表面,样品分别用 800、1 200、2 000 目的 SiC 砂纸进行打磨。摩擦测试的半径为 3 mm,滑动速率为 300 r/min,施加的载荷为 10 N,持续时间为 30 min,摩擦示意如图 2 所示。

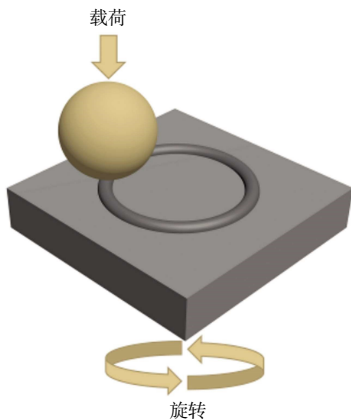


图 2 样品的摩擦接触示意

Fig.2 Friction contact diagram of specimen

复合材料的摩擦因数演变过程由摩擦磨损测试仪记录。为确保摩擦测试结果的准确性,每次摩擦测试至少重复进行 3 次。使用日本 VHX-7000 型超景深数码显微镜测量磨损痕迹的形态和横截面积,且每个样品至少测试 6 个点。通过式(1)计算复合材料的磨损率:

$$W_s = Sd/PL \quad (1)$$

式中: $W_s$  为磨损率( $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ); $S$  为磨痕的横截面积( $\text{mm}^2$ ); $d$  为磨痕的长度( $\text{mm}$ ); $P$  为施加的载荷( $\text{N}$ ); $L$  为滑动距离( $\text{m}$ )。

## 2 结果和讨论

### 2.1 不同纤维体积分数的复合材料的微观结构

通过 SEM 表征得到不同纤维体积分数的三维编织复合材料横向和纵向的截面微观形貌,并使用 PS 软件对截面形貌进行重塑得到如图 3 所示的截面微观形貌图,其中树脂基体和碳纤维分别呈现为灰色和黑色。

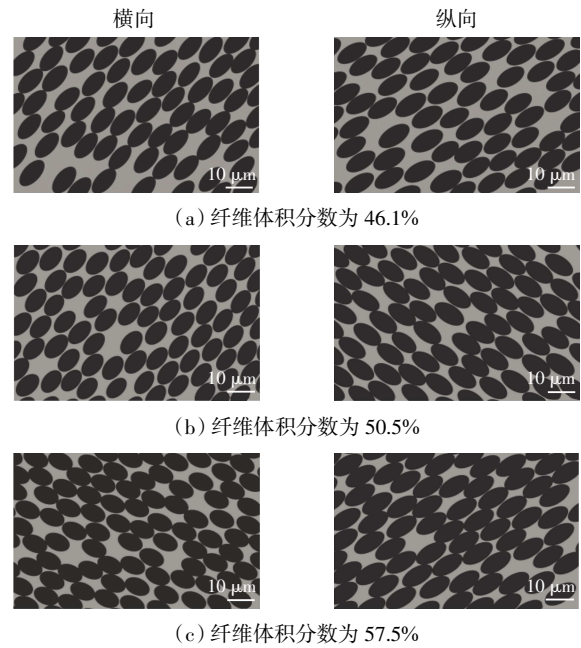


图 3 不同纤维体积分数的复合材料截面的微观形貌

Fig.3 Microscopic morphology of cross sections of composites with various volume fractions of fiber

由图 3 可观察到,随着纤维体积分数的增加,复合材料横向和纵向的截面中碳纤维面积占比增大,同时碳纤维在树脂基体中的排列和交替更紧密且有序。

通过软件分析得到不同纤维体积分数的复合材料横向和纵向截面中的碳纤维面积占比,结果如表 2 所示。

表 2 不同纤维体积分数的复合材料截面的碳纤维面积占比

Tab.2 Area ratios of carbon fiber on composite section with various volume fractions of fiber %

不同方向	A2	A3	A4
横向	64.69	67.19	68.94
纵向	69.92	72.25	76.68

由表 2 可知,纤维体积分数由 46.1%增加到57.5%时,复合材料横向截面的碳纤维面积占比增加了6.57%,纵向截面增加了 9.67%,纵向的增加幅度高于横向。

### 2.2 不同纤维体积分数的复合材料的硬度

表 3 为不同纤维体积分数的三维编织复合材料

的硬度。由表 3 观察到,随着纤维体积分数的增加,复合材料的硬度逐渐增大,且横向的硬度高于纵向。在碳纤维树脂基复合材料中,碳纤维的模量和硬度远高于环氧树脂,当纤维体积分数增大时,碳纤维在树脂基体中的分布更加均匀且紧密(见图 3),这能够有效地传递和分散应力,进而使复合材料的整体硬度增大。另外,三维编织复合材料纵向硬度的增加幅度高于横向。当复合材料硬度增加时,能够更好地抵抗对磨球对其表面的刮擦作用,减少磨粒在材料表面滑动时造成的刮擦损伤,进而提高复合材料的耐磨性。

表 3 不同纤维体积分数复合材料的硬度

Tab.3 Hardness of composites with various volume fractions of fiber

不同方向	HD			
	A1	A2	A3	A4
横向	89.6	93.0	93.7	94.2
纵向	89.6	92.3	93.2	93.6

2.3 不同纤维体积分数复合材料的导热系数

表 4 为不同纤维体积分数的三维编织复合材料的导热系数。

表 4 不同纤维体积分数复合材料的导热系数

Tab.4 Thermal conductivity of composites with various volume fractions of fiber

不同方向	W/(m·K)			
	A1	A2	A3	A4
横向	0.25	1.069	1.153	1.259
纵向	0.25	0.995	1.088	1.225

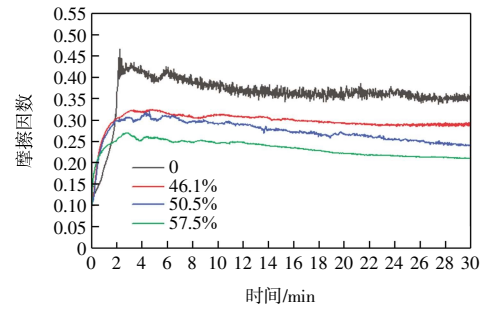
从表 4 中可知,复合材料的导热系数随纤维体积分数的增加而增大。在碳纤维树脂基复合材料中,碳纤维的导热系数远高于环氧树脂<sup>[11]</sup>。随着纤维体积分数的增加,一方面在复合材料的相同面积内碳纤维的热传导路径增多<sup>[12]</sup>,另一方面编织结构交织得更加紧密,这有利于提高复合材料的导热系数。另外,随着纤维体积的增加,复合材料纵向导热系数的增加幅度高于横向。在摩擦过程中,由于接触面间的相对滑动会产生大量的热量,良好的导热性能有助于将热量迅速地从摩擦接触区域传递到整个材料中,从而降低摩擦区域的热量集中,减缓热软化效应。

2.4 纤维体积分数对复合材料摩擦磨损性能的影响

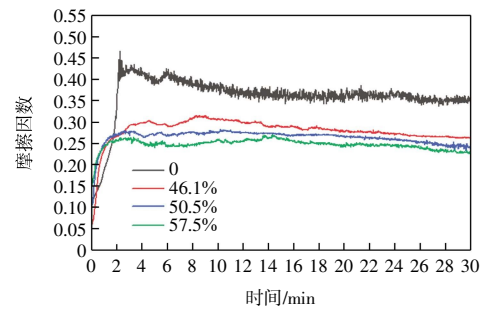
2.4.1 不同纤维体积分数复合材料的摩擦磨损性能

图 4 为不同体积分数的三维编织复合材料的摩擦因数演变过程。

由图 4(a)可知,纯 EP 复合材料的摩擦因数在前 2 min 内出现剧烈上升达到最大值,随后逐渐降低并趋于动态平衡。不同纤维体积分数的三维编织复合材料



(a) 横向



(b) 纵向

图 4 不同纤维体积分数复合材料摩擦因数的演变过程

Fig.4 Evolution process of friction factor of composites with various volume fractions of fiber

横向的摩擦因数在初期阶段出现剧烈上升,在 3~5 min 内达到摩擦因数最大值。随后,进入磨合期,摩擦因数呈现波动式降低,大约在 11 min 左右达到动态稳定,并且随着纤维体积分数的增加磨合期变短。最后,摩擦因数呈现不同程度的下降,且随着纤维体积分数的增加摩擦因数的下降幅度增大。此外,当纤维体积分数为 57.5%时,复合材料横向的摩擦因数稳定性最高。

由图 4(b)可知,在初期阶段,所有复合材料纵向的摩擦因数在 3 min 内均出现剧烈上升。随后,摩擦因数均出现小幅度的降低,然后略有升高,最后呈现逐渐减低的趋势。当纤维体积分数为 50.5%时,复合材料纵向的摩擦因数稳定性最高。

图 5 为不同纤维体积分数的三维编织复合材料横向和纵向的平均摩擦因数和磨损率。

由图 5(a)可知,复合材料横向的平均摩擦因数和磨损率随纤维体积分数的增加而逐渐降低。纯 EP 复合材料的平均摩擦因数和磨损率明显高于添加碳纤维的复合材料。纤维体积分数由 0 增加至 57.5%时,复合材料横向的平均摩擦因数降低了 34.37%,磨损率降低了 99.36%。随纤维体积分数的增加,在复合材料摩擦接触表面有更多的碳纤维和对磨球摩擦直接接触。碳纤维可以有效地承受载荷,而且碳纤维自身具有固体润滑和减摩的作用<sup>[13]</sup>,因此使复合材料的摩擦因数

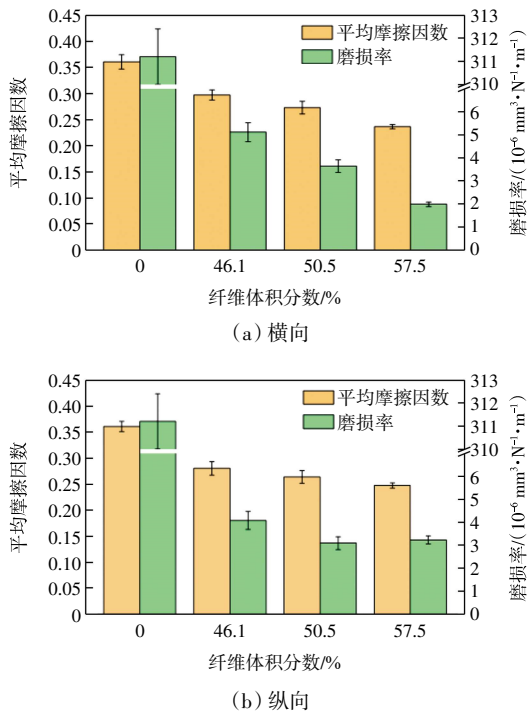


图 5 不同纤维体积分数复合材料的平均摩擦因数和磨损率  
Fig.5 Average friction factor and wear rate of composites with various fiber volume fraction

降低。复合材料表面的硬度也会随纤维体积分数的增大而增加,当硬度增加时,其在受到对磨球的作用时更不容易发生塑性变形,可以减少裂纹的产生和扩展,从而提高复合材料的耐磨性。另外,随着纤维体积分数的增大,复合材料的导热系数增大,这使得在摩擦接触面产生的摩擦热可以更有效的传递到复合材料的其他部位,并通过空气对流实现热量的消散,进而降低复合材料因摩擦热堆积产生的热磨损<sup>[14-15]</sup>。

由图 5(b)可知,随着纤维体积分数的增加,复合材料纵向的平均摩擦因数逐渐降低,而磨损率先降低后增大。纤维体积分数由 0 增加至 57.5%时,纵向的摩擦因数降低了 31.29%,磨损率降低了 98.95%,其变化幅度低于横向。这是由于三维编织复合材料纵向的摩擦接触表面中碳纤维接近饱和状态,增加更多的碳纤维不会显著改变对磨球和复合材料摩擦接触表面的摩擦作用形式。

对比图 5(a)和图 5(b)还可以发现,当纤维体积分数为 46.1%和 50.5%时,三维编织复合材料横向的摩擦因数和磨损率高于纵向。而纤维体积分数为 57.5%时,三维编织复合材料横向的摩擦因数和磨损率略低于纵向。这是由于纤维体积分数为 46.1%和 50.5%时,复合材料的横向截面中的碳纤维面积占比低于纵向截面,而纤维体积分数为 57.5%时,复合材料纵向的摩

擦接触表面中的碳纤维处于饱和状态,这会降低树脂基体的连续性,并削弱了纤维与基体之间的粘附力,这导致样品和对磨球之间的磨料磨损增加<sup>[16]</sup>,进而影响了减摩和耐磨效果。由此可知,纤维体积分数适当增加有助于降低复合材料的摩擦因数和磨损率,但纤维体积分数过高会产生负面作用。

2.4.2 不同纤维体积分数复合材料的磨痕形貌

图 6 为不同纤维体积分数复合材料横向磨痕的形貌和轮廓。

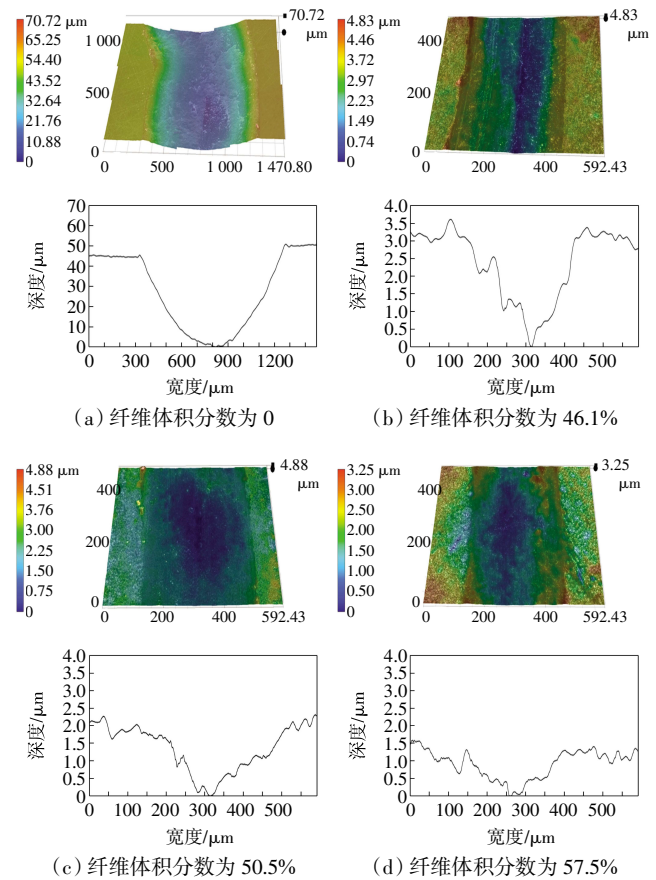


图 6 不同纤维体积分数复合材料横向磨痕的形貌以及轮廓  
Fig.6 Morphology and profile of transverse wear tracks of composites with various volume fractions of fiber

从图 6 中观察到,磨痕的宽度和深度随纤维体积分数的增大而减小。在纯 EP 复合材料的磨痕处存在垂直于摩擦方向的层状磨损结构,这是由于粘着磨损导致环氧树脂经历多次剥落的结果。随着纤维体积分数的增大,复合材料磨损表面的犁耕效应降低。在所有复合材料的磨痕截面轮廓中均可以看到凸起结构,其高度明显高于复合材料的初始平面,此结构是由脱落的纤维和树脂磨屑在对磨球的挤压作用转移到磨痕边缘处形成的<sup>[17]</sup>,并且此结构的高度随纤维体积分数增大而降低。

图 7 为不同纤维体积分数的复合材料纵向磨痕的形貌和截面轮廓。从图 7 中观察到,随着纤维体积分数的增大,磨痕表面的犁耕效应降低;磨痕的宽度和深度以及磨痕边缘的凸起结构高度均呈现先降低后增大的趋势。在纤维体积分数为 50.5% 时,三维编织复合材料纵向磨痕的深度和宽度以及凸起结构高度最低,这与横向的变化趋势不同。

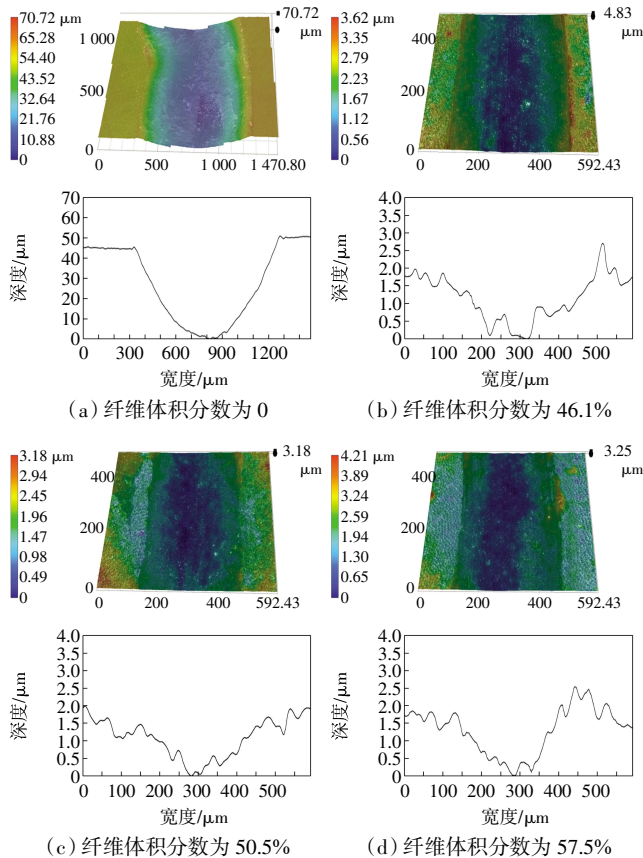


图 7 不同纤维体积分数的复合材料纵向磨痕的形貌以及轮廓  
Fig.7 Morphology and profile in longitudinal direction wear tracks of composites with various volume fractions of fiber

### 2.4.3 不同纤维体积分数的复合材料的摩擦磨损机理

图 8 为不同纤维体积分数的复合材料典型的磨损表面形貌。从图 8 中可以观察到,随着纤维体积分数的增加,复合材料磨损表面的磨损逐渐减少,光滑度提高。纯 EP 复合材料磨损表面经历严重的基体脱落,无法形成润滑膜。在摩擦过程中会产生摩擦热,但是纯 EP 复合材料的导热性和耐热性能都比较差,导致环氧树脂内部的分子链断裂,从而在磨损表面出现大面积的材料损伤和脱落。

当纤维体积分数为 46.1% 时,复合材料横向的磨损表面比较粗糙,出现平行于摩擦方向的犁沟以及纤维和树脂界面区域的撕裂行为,主要的磨损破坏机理

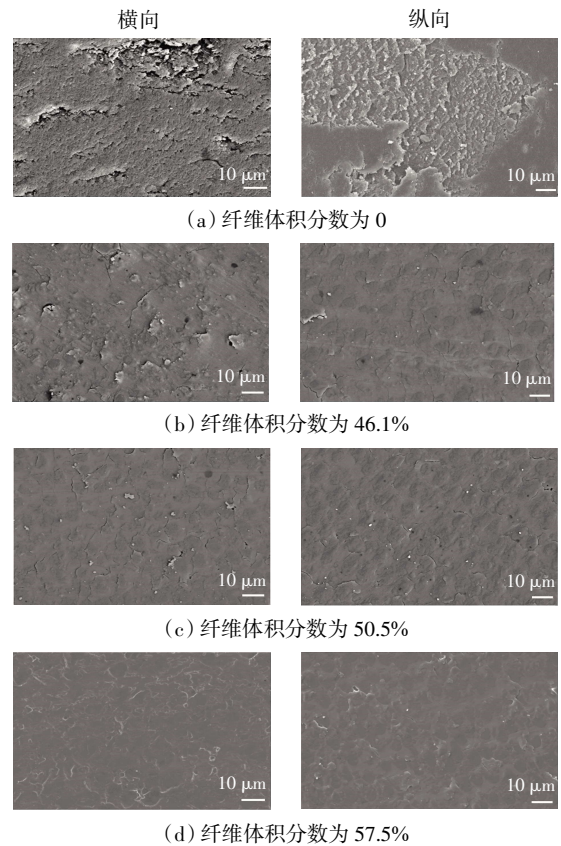


图 8 不同纤维体积分数的复合材料典型的磨损表面形貌  
Fig.8 Typical wear surface morphology of composites with various volume fractions of fiber

是磨粒磨损和粘着磨损,其纵向的磨损表面损伤明显低于横向,同样有犁沟出现,主要的磨损破坏形式是碳纤维和环氧树脂界面区域产生的裂纹。当纤维体积分数增加至 50.5% 时,复合材料横向和纵向的磨损表面平整度明显提高,主要的磨损破坏形式是碳纤维和环氧树脂基体界面处产生大量的微裂纹。当纤维体积分数增加至 57.5% 时,复合材料横向的磨损表面损伤进一步降低,形成了比较稳定的润滑膜,这避免了对磨球与样品的直接接触,从而提高了复合材料的耐磨性<sup>[18]</sup>。在纵向的磨损表面中除了存在纤维和树脂界面区域的微裂纹之外,还产生了明显的粘着磨损。这一现象的原因是摩擦接触表面中碳纤维分数过高,导致与对磨球的粘附力增加,使材料更容易发生粘附脱落。另外,由图 8 还可以观察到,当纤维体积分数为 46.1% 和 50.5% 时,复合材料横向的磨损表面损伤程度高于纵向,而当纤维体积分数为 57.5% 时,复合材料横向的磨损表面损伤程度低于纵向。

为了更深入地分析不同纤维体积分数的复合材料的摩擦磨损机理,对其横向的磨损表面进行了 EDS 分析,其中 C、Fe 和 O 元素的分布结果如图 9 所示,相对

应的 SEM 图为图 8 中不同纤维体积分数复合材料横向的磨损表面形貌图。从图 9 中可以观察到,随着纤维体积分数增大,复合材料磨损表面 C、Fe 和 O 元素的分散均匀性降低。在纯 EP 复合材料及纤维体积分数为 46.1% 的复合材料中,磨损表面的 C、Fe 和 O 元素均匀分布,这表明材料因摩擦作用产生的材料脱落严重。而 57.5% 纤维体积分数复合材料的磨损表面中 C 元素主要出现在碳纤维处, O 和 Fe 元素主要分布在环氧树脂基体处,这说明磨损表面的材料脱落率降低,并且形成了比较稳定的润滑膜。结合图 8(b) 和图 9(b) 可以看出磨损表面的裂纹主要出现在碳纤维和环氧树脂的界面处,这是在磨球的反复作用下在界面处发生局部应力集中产生的。

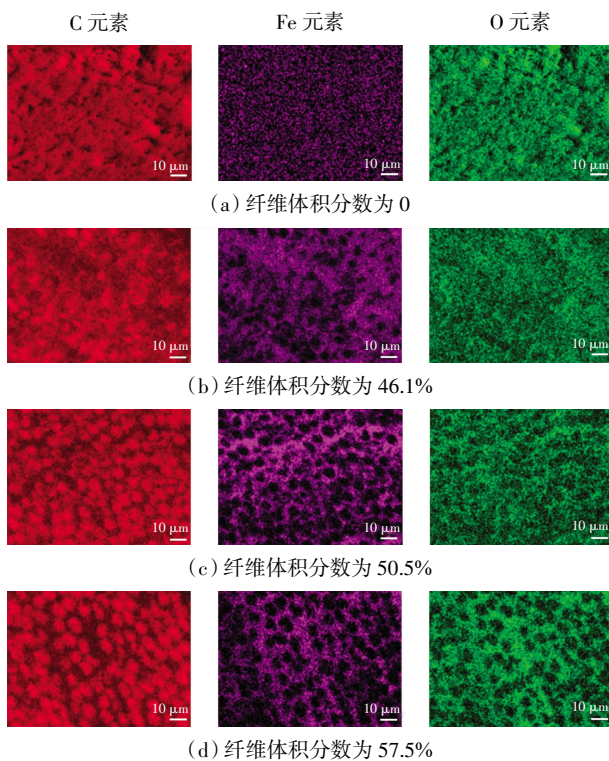


图 9 不同纤维体积分数复合材料横向的磨损表面元素分布  
Fig.9 Element distribution on wear surface of composites with various fiber volume fractions in transverse direction

### 3 结论

本文制备了不同纤维体积分数(0、46.1%、50.5%和 57.5%)的三维编织碳纤维/环氧树脂复合材料,对其横向和纵向的硬度、导热系数、微观结构、摩擦磨损性能和磨损表面形态进行分析,并揭示了摩擦磨损机理,得到以下结论:

(1) 三维编织复合材料横向截面中的碳纤维面积

占比低于纵向,其横向的硬度和导热系数高于纵向。随着纤维体积分数的增大,复合材料横向和纵向的截面中碳纤维的面积占比、硬度值、导热系数均增加,且纵向性能的提升高于横向。

(2) 随着纤维体积分数的增大,三维编织复合材料在不同的滑动方向上的摩擦磨损性能表现出不同的变化趋势,复合材料横向和纵向的平均摩擦因数、磨损率均逐渐降低,而纵向的平均摩擦因数逐渐降低,磨损率先降低后提升。与 0 纤维体积分数复合材料相比,57.5% 纤维体积分数复合材料横向的平均摩擦因数和磨损率分别降低了 34.37% 和 99.36%,纵向的摩擦因数和磨损率分别降低了 31.29% 和 98.95%。

(3) 随着纤维体积分数的增大,横向的摩擦稳定性逐渐升高,在纤维体积分数为 57.5% 时最高,而纵向的摩擦因数稳定性先升高后降低,在纤维体积分数为 50.5% 时最高。

(4) 随着纤维体积分数的增大,三维编织复合材料横向和纵向的磨损表面损伤程度变小,平整度和光滑度提高。纤维体积分数为 46.1% 和 50.5% 时,复合材料横向的磨损表面损伤程度高于纵向,而纤维体积分数为 57.5% 时,复合材料横向的磨损表面损伤程度低于纵向。

### 参考文献:

- [1] ZHU S, SHI R J, QU M C, et al. Simultaneously improved mechanical and electromagnetic interference shielding properties of carbon fiber fabrics/epoxy composites via interface engineering[J]. Composites Science and Technology, 2021, 207: 108696.
- [2] ZHANG J, LIN G, VAIDYA U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 250: 110463.
- [3] ZHU H X, FU K K, HUANG T L, et al. Highly conductive CFRP composite with Ag-coated T-ZnO interlayers for excellent lightning strike protection, EMI shielding and toughness[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 279: 111448.
- [4] ZHENG L Y, ZHAO L X, ZHANG J J. The effect of fiber oxidation on the tribological behavior of 3D-braided carbon fiber/nylon composites[J]. Wear, 2007, 262(7/8): 1026-1030.
- [5] QIU X W, HE F, LI J J, et al. Tribological behavior of three-dimensional braided carbon fiber reinforced polyetheretherketone composites[J]. Polymer Composites, 2015, 36(12): 2174-2183.
- [6] ZHENG L Y, ZHAO L X, ZHANG J J. Tribological study of three-dimensionally braided carbon fiber-nylon 6 composites against 316L stainless steel[J]. Current Applied Physics, 2007,

- 7: e120–e124.
- [7] MA L, HAN M, DU J H, et al. Study on friction and wear properties of 3D braided carbon fiber[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2468(1): 012021.
- [8] RASHEVA Z, ZHANG G, BURKHART T. A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fibers reinforced PEEK materials with different fiber orientations[J]. *Tribology International*, 2010, 43(8): 1430–1437.
- [9] MAN Z Y, WANG H J, HE Q H, et al. Friction and wear behaviour of additively manufactured continuous carbon fibre reinforced PA6 composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 226: 109332.
- [10] ZHOU W, MEISER M, WICH F, et al. Fiber orientation dependence of tribological behavior of short carbon fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, 105(1): 538–552.
- [11] GOU J J, ZHANG H, DAI Y J, et al. Numerical prediction of effective thermal conductivities of 3D four-directional braided composites[J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 499–508.
- [12] ELIMAT Z M, HUSSAIN W T, ZIHLIF A M. PAN-based carbon fibers/PMMA composites: Thermal, dielectric, and DC electrical properties[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2012, 23(12): 2117–2122.
- [13] LUO W, LIU Q, LI Y, et al. Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 91: 579–588.
- [14] SHI Y, BAI Y, LEI Y Z, et al. Simultaneously enhanced heat dissipation and tribological properties of polyphenylene sulfide-based composites via constructing segregated network structure[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 99: 239–250.
- [15] MA S S, ZHU Y, FEI J, et al. Facile fabrication of PEI/BN/PDA hierarchical structure for boosting tribological performances of carbon fiber/resin composites matched with copper dual disk[J]. *Tribology International*, 2022, 172: 107641.
- [16] ZAGHLOUL M M Y, STEEL K, VEIDT M, et al. Mechanical and tribological performances of thermoplastic polymers reinforced with glass fibres at variable fibre volume fractions[J]. *Polymers*, 2023, 15(3): 694.
- [17] HU Y, TAN D Q, XU C, et al. Influence of high temperature on the tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite[J]. *Tribology International*, 2022, 174: 107781.
- [18] TANG H, ZHOU H, CHENG X H. Friction process analysis of carbon fiber-carbon nanotube multiscale hybrid reinforced epoxy with excellent tribological performance[J]. *Tribology International*, 2022, 171: 107559.

#### 本文引文格式:

- 裴晓园, 孙晴, 贾志坤, 等. 滑动方向对编织复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(2): 15–22.
- PEI X Y, SUN Q, JIA Z K, et al. Effect of sliding direction on friction and wear properties of braided composites[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(2): 15–22 (in Chinese).

(上接第 14 页)

- 泡沫夹芯结构工艺设计与控制[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 28–34.
- XIONG M R, DUAN Y X, DONG A Q, et al. Process design and control of the VARI forming foam-core structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 28–34 (in Chinese).
- [23] 李华冠, 丁颖, 章月, 等. 玻璃纤维立体织物增强环氧树脂泡沫夹层复合材料的制备及力学性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 601–612.
- LI H G, DING Y, ZHANG Y, et al. Preparation and mechanical properties of glass fiber reinforced 3D fabric reinforced epoxy foam sandwich composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(1): 601–612 (in Chinese).
- [24] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1456—2005 夹层结构弯曲性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 1456—2005 test method for flexural properties of sandwich constructions[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).

#### 本文引文格式:

- 毛丽贺, 朱佳琦, 陈利, 等. 碳-玻璃纤维夹层泡沫缝合复合材料的弯曲性能[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(2): 8–14, 22.
- MAO L H, ZHU J Q, CHEN L, et al. Bending properties of carbon-glass fiber sandwich foam stitching composites[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(2): 8–14, 22 (in Chinese).