

纤维取向对碳纤维织物复合材料扭动微动摩擦学性能的影响

Effect of Fibers Orientation on Torsional
Fretting Wear Behaviors of Carbon
Fiber Fabric Composites

左孔成,蔡振兵,宋 川,彭金方,莫继良,沈火明,朱旻昊
(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所,成都 610031)
ZUO Kong-cheng,CAI Zhen-bing,SONG Chuan,PENG Jin-fang,
MO Ji-liang,SHEN Huo-ming,ZHU Min-hao
(Tribology Research Institute,State Key Laboratory of Traction Power,
Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China)

摘要:以球/平面接触方式,进行碳纤维织物复合材料与 GCr15 钢球之间的扭动微动磨损实验研究,讨论纤维取向对微动磨损性能的影响。结果表明:该材料与金属材料类似,均存在 3 个微动运行区域,即部分滑移区、混合区以及滑移区,微动磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。碳纤维复合材料微动摩擦磨损性能表现出明显各向异性特征,即纤维平行且垂直于接触表面的纤维混合排布(N 取向)复合材料的摩擦耗散能和磨损量均小于纤维平行于接触表面的 P 取向。在混合区域,磨损区半径随循环周次的增加而逐渐增大,且 N 取向小于 P 取向。

关键词:碳纤维织物复合材料;微动磨损;扭动微动;纤维取向;各向异性

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.04.014

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)04-0079-06

Abstract: Under the contact configuration of ball-on-flat, the torsional fretting wear experimental research between carbon fiber fabric composites and GCr15 steel ball was carried out. The influence of fiber orientation on fretting wear properties was discussed. The results show that, similar to the metal materials, the carbon fiber fabric composites is still existed in three fretting running regimens, *i. e.* partial slip regime (PSR), mixed regime (MR) and slip regime (SR). The torsional fretting wear mechanisms of carbon fiber fabric composites are abrasive and oxidative wear. The friction and wear properties of fretting of carbon fiber fabric composites presented obvious anisotropy. The friction dissipated energy and wear volume of the N orientation where the fibers are vertical and parallel to the contact surface are all less than that of the P orientation where the fibers are parallel to the contact surface. In MR, the damage circle radius is increased with increasing number of cycles and the damage circle radius of N orientation is smaller than that of P orientation.

Key words: carbon fiber fabric composite; fretting wear; torsional fretting; fiber orientation; anisotropy

微动是指当存在振动源或承受交变载荷时,发生在名义上静止的配合界面上振幅极小的相对运动^[1,2]。扭动微动是微动运行的 4 种基本模式之一,常见于回转部件中。如列车转向架心盘随列车的蛇行运动,其相对运动是幅值仅几度的往复扭转微动。纤维增强树脂基复合材料(Fibers Reinforced Polymer Composites, FRPs)具有优良的摩擦性能、高比模量、噪声辐射小等特点,在航空方面已被广泛应用^[3]。FRP 常加入玻璃纤维,芳纶纤维以及碳纤维作为增强

材料^[4-6]。玻璃纤维因成本低以及性能较好而得到广泛应用,但因比模量比刚度低,纤维与基体结合力弱,故而在耐磨材料方面的应用受到限制;芳纶纤维虽然比模量比刚度大,但高温摩擦性能不足,吸水性高,导致材料性能下降;碳纤维具有高温摩擦性能优异,噪声辐射小等特点,因此碳纤维增强塑料(Carbon Fibers Reinforcement Plastic, CFRP)成为摩擦部件的理想材料^[7,8]。在军民两用飞机上,国内外已经大量采用碳纤维复合材料作为结构部件^[9,10]。但由于大量扭

动微动磨损现象的存在,例如铆钉与飞机体连接处^[11],故研究碳纤维复合材料在飞机上的摩擦磨损尤为重要。同时,纤维具有各向异性特点,纤维取向对扭动微动磨损有重要影响^[12-15]。为此,本工作着重研究纤维取向对扭动微动磨损的影响,这不仅对 CFRP 在飞机上的应用以及研究中具有重要的理论价值,也有重要的实际意义。

1 实验材料与参数

碳纤维织物复合材料为 T700 碳纤维增强环氧树脂

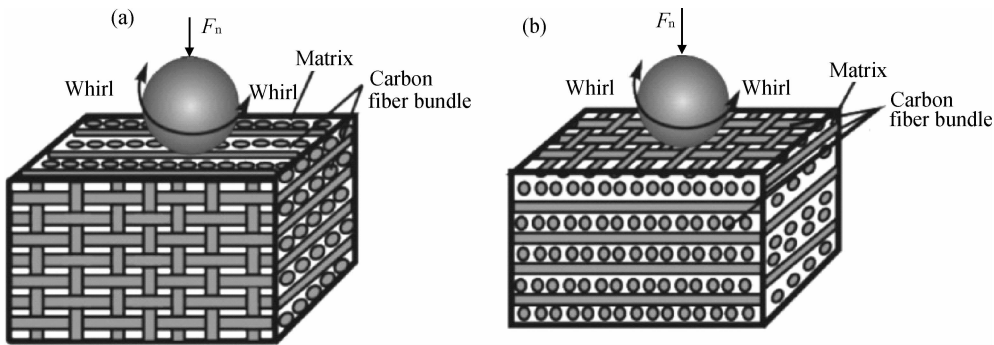


图 1 纤维取向示意图 (a)纤维平行且垂直于摩擦表面(N);(b)编织纤维平行于摩擦表面(P)

Fig. 1 The schematic diagrams of fibers orientation (a)fibers both parallel and vertical to the surface(N);(b)weave fibers parallel to the surface(P)

实验参数:角位移幅值 $\theta=0.25, 5^\circ$ 和 25° , 法向载荷 $F_n=200\text{N}$, 环境为室温 $(23\pm3)^\circ\text{C}$, 干态。扭动微动磨损实验后,通过光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)进行磨斑形貌观察;通过电子能谱(EDS)来分析磨斑微区的化学成分。

2 结果与讨论

大量扭动微动磨损的研究表明,其动力学行为须借助于摩擦扭矩 T -角位移幅值 θ 曲线来分析^[16]。图 2 为 $\theta=0.25, F_n=200\text{N}$ 时部分滑移区 T - θ 动力学曲线图。可以看出,不管是 N 取向还是 P 取向,碳纤维织物复合材料动力学曲线均随循环周次增加呈线性关系,且摩擦扭矩增长幅度不大,说明此时接触表面的扭转变形由弹性变形来协调。其摩擦表面中心黏着,边缘产生微滑而出现轻微的磨损(图 3)。表明接触表面的微动均处于部分滑移状态,即微动运行于部分滑移区。

图 4 为法向载荷不变、 $\theta=5^\circ$ 时,混合区的 T - θ 动力学曲线图。可以看出,曲线形状发生了明显改变,从初始循环到 1000 次循环曲线均呈平行四边形状;前 100 次循环(图 5(a)),摩擦扭矩变化不大,随循环周次

脂,由江苏恒神纤维材料股份有限公司提供,形状为六面体,尺寸为 $20\text{mm}\times10\text{mm}\times8\text{mm}$,纤维取向呈现不同的排布形式,即纤维垂直且平行于摩擦面(N 取向)以及编织状纤维平行于摩擦面(P 取向)。

对磨幅选用工业用轴承用钢球 GCr15, 直径 $\phi=40\text{mm}$, 表面粗糙度 $R_a=0.04\mu\text{m}$ 。实验前,先对复合材料样品进行打磨抛光,然后用水和丙酮混合液清洗表面,并置于真空烘箱 40°C 下烘干 48h。采用复合材料固定不动、GCr15 钢球按一定角度做往复旋转运动的球/平面接触方式对碳纤维织物复合材料进行研究,其纤维取向示意图如图 1 所示。

增加摩擦扭矩逐渐增大,到 700 次循环后摩擦扭矩达到稳定状态。说明在扭动微动过程中,随循环周次增加,微动表面间扭动变形变得更加困难;摩擦耗散能均呈现逐渐增大的趋势(图 5(b))。从 $\theta=0.25^\circ$ 到 $\theta=5^\circ$,摩擦耗散能增长幅度不大。当在滑移区时,摩擦耗散能增长较快,是因为在扭动微动过程中耗散了较多能量的缘故。

图 6 给出了随循环周次的增加磨痕的形貌演变图。可见,不管是 N 取向(图 6(a-1), (b-1), (c-1))还是 P 取向(图 6(a-2), (c-2), (c-2)),随着循环周次的增加,磨痕均呈现黏着区逐渐减小的规律,其中 P 取向黏着区几乎消失,说明 P 取向更有利于界面的相对滑动,微动更容易进入完全滑移状态;根据扭动微动运行区域特性,结合 T - θ 曲线和磨痕形貌的演变,可以判断此时微动处于混合区。

图 7 为法向载荷不变、 $\theta=25^\circ$ 时滑移区的 T - θ 动力学曲线图。可知,在整个循环周期内曲线形状呈现平行四边形状,其摩擦扭矩值变化规律与 $\theta=5^\circ$ 时类似,均随循环周次的增加而增大。然而对于 P 取向,碳纤维织物复合材料在 800 次循环时扭矩值开始减小,到 1000 循环周次时达到稳定,这可能是纤维与复

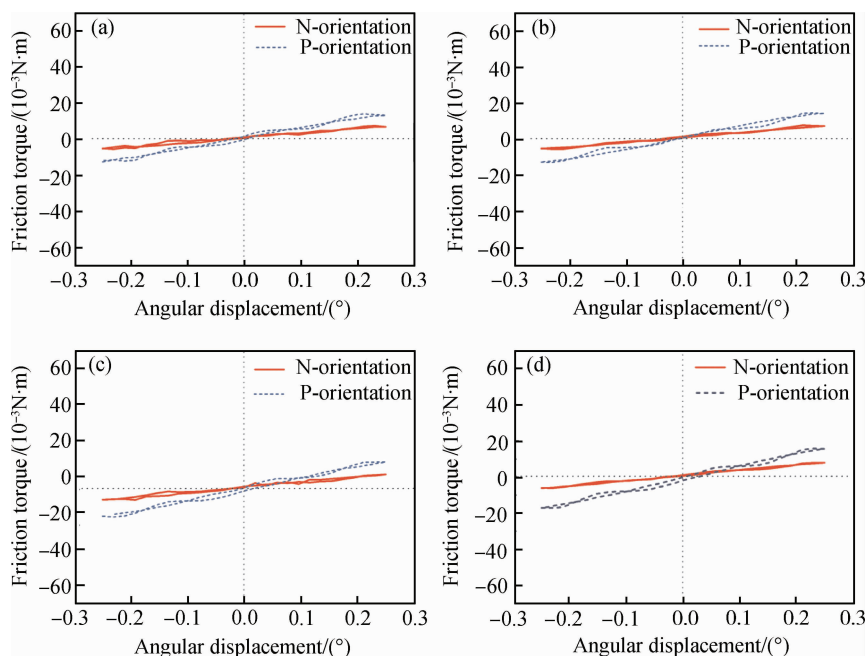


图2 部分滑移区 $T-\theta$ 动力学曲线 ($\theta=0.25^\circ$, $F_n=200\text{N}$) (a)1 cycle; (b)10 cycle; (c)100 cycle; (d)1000 cycle

Fig. 2 $T-\theta$ kinetics curves at partial slip regime region ($\theta=0.25^\circ$, $F_n=200\text{N}$) (a)1 cycle; (b)10 cycle; (c)100 cycle; (d)1000 cycle

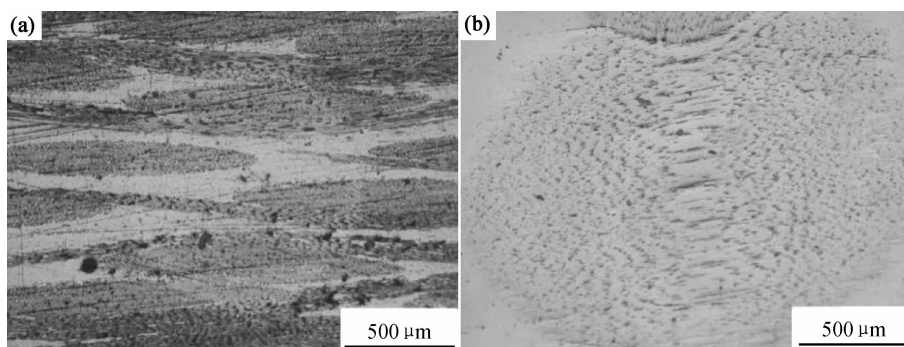


图3 部分滑移区微观形貌光学图 ($F_n=200\text{N}$, $\theta=2^\circ$, $N=10^3$ cycle) (a)N取向; (b)P取向

Fig. 3 The OM micrographs of partial slip regime region

($F_n=200\text{N}$, $\theta=2^\circ$, $N=10^3$ cycle) (a)N-orientation; (b)P-orientation

合材料基体破裂致使转矩值出现了波动(图5(a)),说明纤维取向对损伤的抵抗作用存在差异。总之,扭动微动在两个纤维取向排布中均运行于完全滑移状态。

在相同循环周次与角位移幅值下(图2和图4),N取向的接触刚度均小于P取向,这可能是因为摩擦表面在扭动微动过程中主要承受扭转应力与剪切应力。在N取向发生扭动微动时,因大量碳纤维垂直于扭动微动表面(纵向力学性能优异),能承受较大的扭动与弯曲变形而不折断(纤维受聚合物基体保护),使摩擦表面弹性变形大以协调微动相对运动。而在P取向时,纤维取向均平行与摩擦表面,当发生扭动微动时,因为纤维与基体的结合面成为薄弱环节,使得纤维更容易产生磨损而破坏,图8滑移区的结果($\theta=25^\circ$)证实了这一点。整个循环周期内,可以观察到在 $T-\theta$ 曲线滑移部分出现一定的波动,这可能与碳纤维发生破

碎与断裂而产生的摩擦振动有关。

从图3形貌中可看出,在部分滑移区,不管是N取向还是P取向,微滑仅发生在接触边缘,且损伤极轻微。在混合区(图6),N取向和P取向的微动损伤区宽度随循环周次逐渐增大,损伤明显强于部分滑移区。而在滑移区(图8),两取向的接触区全部发生了较为严重的磨损,且形成了大量磨屑。但与金属材料对比来看^[16],碳纤维织物复合材料具有较好的抗扭动微动磨损性能。

通过比较P取向和N取向对微动摩擦性能的影响,可以发现,在混合区随着循环周次的增加,微动磨损区半径逐渐增大,且P取向显著大于N取向(图9微动损伤区半径 $R_d=a-b$, a 和 b 分别为圆形磨损区域的外边缘与内边缘的半径),这可能是因P取向纤维排布方向的纤维取向均平行于摩擦面,发生扭

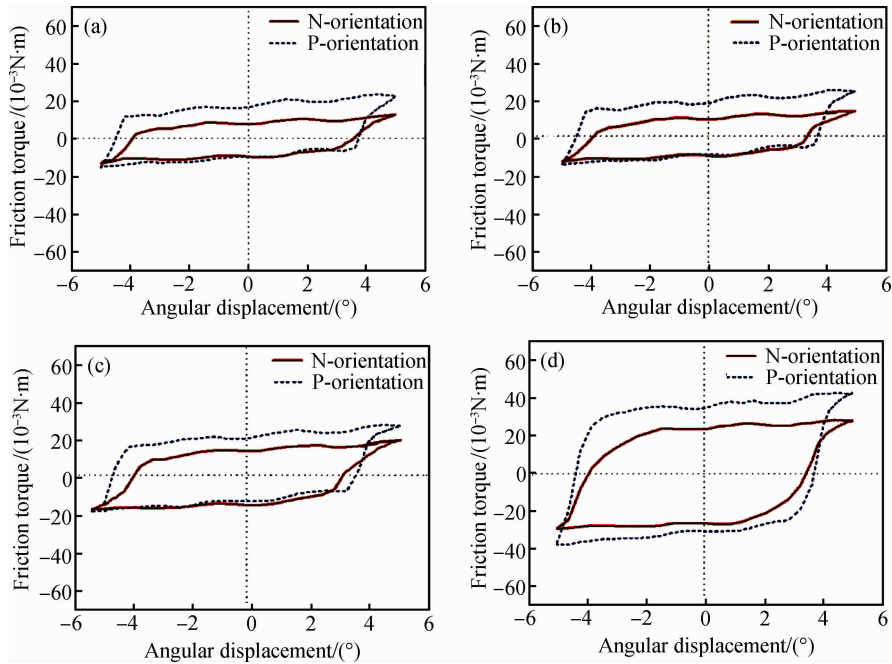


图 4 混合区 $T-\theta$ 动力学曲线($\theta=5^\circ, F_n=200\text{N}$) (a)1 cycle;(b)10 cycle;(c)100 cycle;(d)1000 cycle

Fig. 4 $T-\theta$ kinetics curves at mixed regime region($\theta=5^\circ, F_n=200\text{N}$) (a)1 cycle;(b)10 cycle;(c)100 cycle;(d)1000 cycle

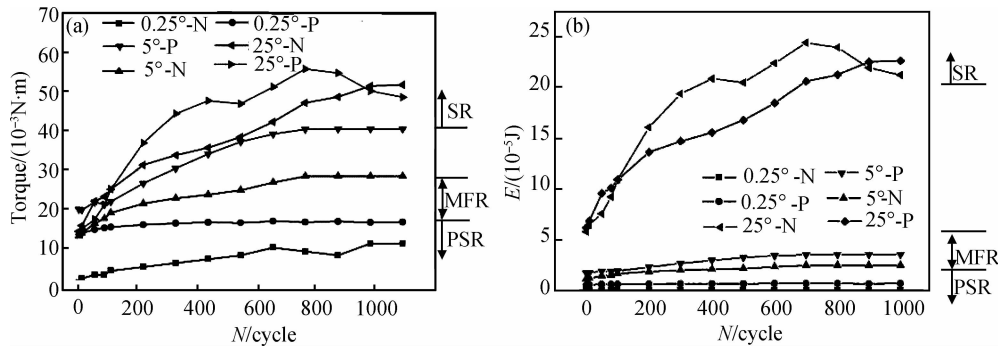


图 5 扭动微动摩擦扭矩(a)和摩擦耗散能曲线(b) ($F_n=200\text{N}, N=10^3\text{ cycle}$)

Fig. 5 Friction torque of torsional fretting(a)and friction dissipated energy curves(b) ($F_n=200\text{N}, N=10^3\text{ cycle}$)

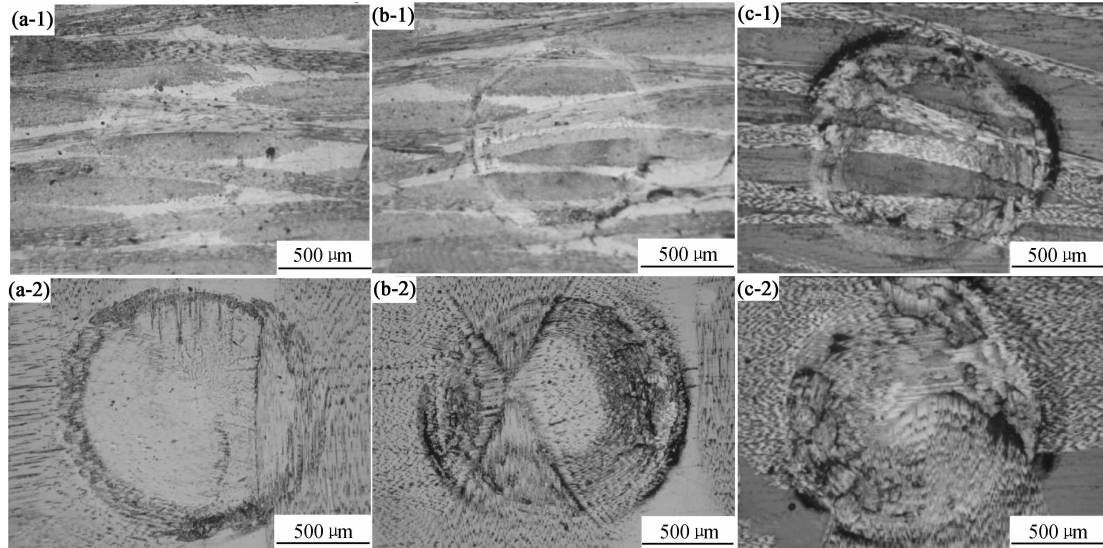


图 6 混合区 N 取向(1)和 P 取向(2)纤维微观形貌随循环周次演变图($F_n=200\text{N}, \theta=5^\circ$) (a)100 cycle;(b)500 cycle;(c)1000 cycle

Fig. 6 The evolution micrographs for N-orientation(1) and P-orientation(2) fibers at mixed regime region with increasing cycles($F_n=200\text{N}, \theta=5^\circ$)

(a)100 cycle;(b)500 cycle;(c)1000 cycle

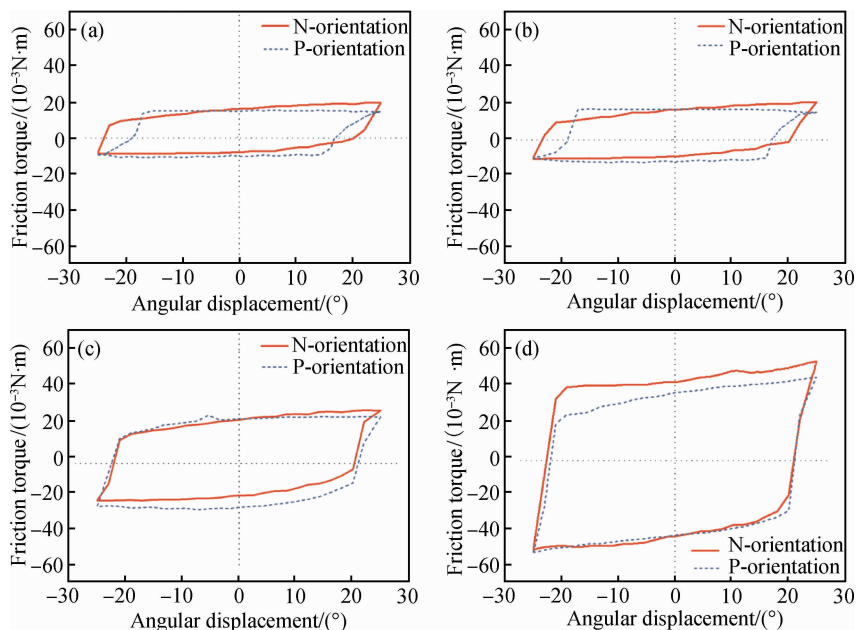


图 7 滑移区 $T-\theta$ 动力学曲线 ($F_n=200\text{N}$, $\theta=25^\circ$) (a) 1 cycle; (b) 10 cycle; (c) 100 cycle; (d) 1000 cycle

Fig. 7 $T-\theta$ kinetics curves at slip regime region ($F_n=200\text{N}$, $\theta=25^\circ$) (a) 1 cycle; (b) 10 cycle; (c) 100 cycle; (d) 1000 cycle

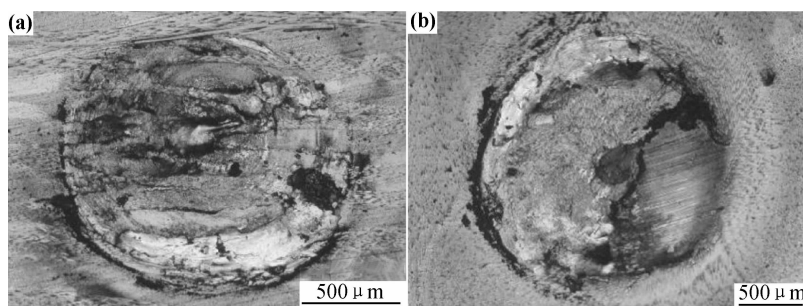


图 8 滑移区不同取向纤维微观形貌光镜图 ($F_n=200\text{N}$, $\theta=25^\circ$, $N=10^3$ cycle) (a) N 取向; (b) P 取向

Fig. 8 The OM micrographs of different orientation fibers at slip regime region ($F_n=200\text{N}$, $\theta=25^\circ$, $N=10^3$ cycle)

(a) N-orientation; (b) P-orientation

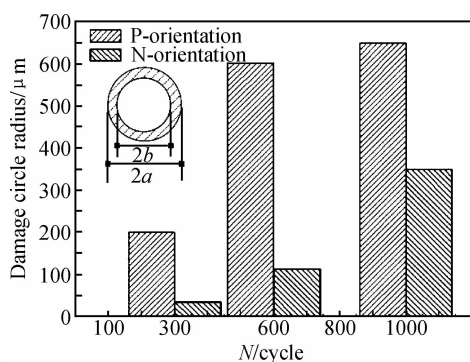


图 9 混合区不同循环周次下

R_d 柱状图 ($F_n=200\text{N}$, $\theta=5^\circ$)

Fig. 9 The bar graph of damage circle radius with different number of cycles at mixed regime region ($F_n=200\text{N}$, $\theta=5^\circ$)

域较大。而在 N 取向, 因纤维被基体包裹, 损伤明显降低, 显著减少了磨损。在微动磨痕边缘观察到黑色磨屑(图 6(c-1)), EDX 分析表明, 除 C 元素外还含大量铁元素以及 O 元素, 这主要是对磨副 GCr15 球形成了磨屑并发生氧化所致。从磨痕形貌可以看出, 磨粒磨损是磨损的主要机制。图 10 为混合区 N 纤维取向与 P 纤维取向的 SEM 形貌图。可知, 碳纤维织物复合材料的扭动微动磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。

3 结论

(1) 碳纤维织物复合材料与金属材料一样, 同样存在 3 个微动运行区域, 即部分滑移区、混合区以及滑移区。

转时, 扭转力主要施加在横向纤维上, 纤维容易被拨出和断裂(图 10(a)), 而且层间易滑移, 致使磨损区

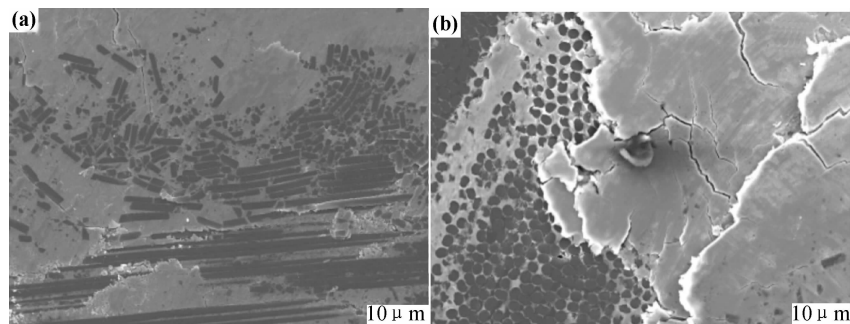


图 10 混合区不同取向纤维扫描电镜微观形貌图 ($F_n=200\text{N}, \theta=5^\circ$) (a)P 取向;(b)N 取向
Fig. 10 SEM micrographs of different orientation fibers at mixed regime region ($F_n=200\text{N}, \theta=5^\circ$)
(a)P-orientation;(b)N-orientation

(2)碳纤维织物复合材料的扭动微动磨损较轻微, 有较好的抗扭动微动性能,其磨损机制主要为磨粒磨损和氧化磨损。

(3)碳纤维织物复合材料的扭动微动磨损具有显著的各向异性,N 取向接触面的摩擦耗散能低于 P 取向;N 取向的磨损量明显低于 P 取向,这是因为 P 取向时纤维易折断和拔出,损伤相对容易,而 N 取向纤维受基体保护,有效减轻其磨损程度。

参考文献

- [1] WATERHOUSE R B. Fretting Corrosion[M]. England: Pergamon press, 1972.
- [2] HILLS D A. Mechanics of fretting fatigue[J]. Wear, 1994, 175 (1): 107—13.
- [3] BERTHIER Y, VINCENT L, GODET M. Fretting fatigue and fretting wear[J]. Tribology International, 1989, 22 (4): 235—242.
- [4] MANJUNATHA C M, BOJJA R, JAGANNATHAN N, et al. Enhanced fatigue behavior of a glass fiber reinforced hybrid particles modified epoxy nanocomposite under WISPERX spectrum load sequence[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 54: 25—31.
- [5] ISA M T, AHMED A S, ADEREMI B O, et al. Effect of fiber type and combinations on the mechanical, physical and thermal stability properties of polyester hybrid composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 52: 217—23.
- [6] TSUCHIKURA N, FAUDREE M C, NISHI Y. Charpy impact value of sandwich structural (CFRP/ABS/CFRP) composites constructed with carbon fiber reinforced epoxy polymer (CFRP) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) sheets separately irradiated by electron beam prior to lamination[J]. Materials Transactions, 2013, 54(3): 371—379.
- [7] TIAN Nong, XUE Zhong-min, ZHANG Zuo-guang. Research progress of fiber reinforced polymer-based frictional materials[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(2): 98—101.
- [8] GUO Qing-bing, XING Dong-ming, CHEN Jiang-hua, et al. Recent progress of sliding wear properties of polymer based micro

composites[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2011, 24(1): 61—66.

- [9] ZHAO Quan, HUANG Hao-jie. The study of design and optimization for composite wing structure of commercial aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013, (11): 68—74.
- [10] ARTERO-GUERRERO J A, PERNAS-SÁNCHEZ J, LÓPEZ-PUENTE J, et al. On the influence of filling level in CFRP aircraft fuel tank subjected to high velocity impacts[J]. Composite Structures, 2014, 107: 570—577.
- [11] WU K T, SUN Z, JEN C K, et al. A multi-point ultrasonic detection approach to fretting crack detection in an aircraft component[A]. Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security[C]. San Diego, California: SPIE, 2012. 834710—834715.
- [12] LEE K J, CHENG H Z, JOU W S, et al. The influence of carbon fiber orientation on the mechanical and tribological behavior of carbon fiber/LCP composites[J]. Mater Chem Phys, 2007, 102(2—3): 187—94.
- [13] CIRINO M, FRIEDRICH K, PIPES R. The effect of fiber orientation on the abrasive wear behavior of polymer composite materials[J]. Wear, 1988, 121(2): 127—141.
- [14] SUNG N H, SUH N P. Friction and wear of fiber reinforced polymeric composites-effect of fiber orientation on wear[A]. 35th Annual Technical Conference[C]. Montreal, Canada: Society of Plastics Engineers, 1977. 311—314.
- [15] NAK-HO S, SUH N P. Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composites[J]. Wear, 1979, 53(1): 129—41.

收稿日期: 2013-06-28; 修订日期: 2014-01-22

作者简介: 左孔成(1982—), 男, 博士, 从事机械设计及理论方面研究工作, 联系地址: 四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学摩擦学研究所 310-2 房间(610031), E-mail: zuokongcheng@163.com

通讯作者: 朱旻昊(1968—), 男, 教授, 从事专业: 摩擦学表面工程材料学, 联系地址: 四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学摩擦学研究所 311 房间(610031), E-mail: zhuminhao@139.com