复合材料学报 第26卷 第1期 2月 2009年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 26 No. 1 February 2009

文章编号：1000-3851(2009)01-0054-05

三维编织超高分子量聚乙烯纤维-碳纤维混杂增强环氧树脂复合材料摩擦磨损性能

何 芳*，王玉林，万怡灶，黄 远
（天津大学 材料科学与工程学院 天津市材料复合与功能化重点实验室，天津 300072）

摘 要： 以超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)-碳纤维(CF)三维混杂编织体为增强体，环氧树脂(ER)为基体，通过树脂传递模塑(RTM)工艺制备了三维编织混杂复合材料，研究了其摩擦磨损性能，并采用混合正压力模型对摩擦系数进行了预测。结果表明，在纤维总体积含量一定的情况下，随着CF体积含量的增加，复合材料的摩擦系数增大，而其比磨损率降低。UH_{3D}/ER复合材料的磨损机制以粘着磨损为主，CF_{3D}/ER复合材料则以磨粒磨损为主，混杂复合材料的磨损机制主要取决于CF与UHMWPE纤维的相对含量，通过调节UHMWPE纤维和CF的体积比例可实现对复合材料摩擦磨损性能的有效调控。采用的计算模型可较好地预测UH_{3D}/ER的摩擦系数。

关键词： 三维编织技术；混杂复合材料；超高分子量聚乙烯纤维；碳纤维；摩擦磨损；摩擦系数预测
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Friction and wear properties of 3D braided UHMWPE fiber - carbon fiber hybrid reinforced epoxy composites

HE Fang*, WANG Yulin, WAN Yizao, HUANG Yuan
(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University,
Tianjin Key Laboratory of Composite and Functional Materials, Tianjin 300072, China)

Abstract: 3D UHMWPE fiber and carbon fiber (CF) reinforced epoxy resin(ER)hybrid composites were prepared using resin transfer molding (RTM) process. The friction and wear properties were analyzed, and the friction coefficient was predicted by a hybrid positive pressure model. The results show that with the increase of the carbon fiber volume fraction of the hybrid composites with a fixed total fiber fraction of 36%, the friction coefficient of the hybrid composites increases, and their specific wear rate decreases. The wear mechanisms of the UH_{3D}/ER and CF_{3D}/ER composites are mainly adhesive wear and abrasive wear, respectively. The wear mechanism of the hybrid composites is mainly determined by the relative volume ratio of CF to UHMWPE fiber. The hybrid positive pressure model can be used to predict the friction coefficient of UH_{3D}/ER composites.

Keywords: 3D braided technique; hybrid composites; UHMWPE fiber; carbon fiber; friction and wear property; friction coefficient prediction

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维是当今三大高科技纤维(碳纤维、芳纶纤维、聚乙烯纤维)之一，具有比强度、比模量高，抗冲击性和抗腐蚀性好[1-2]，抗疲劳性和耐磨性佳的特点[3]，广泛用于安全防护、航空航天、航海、电子、兵器、造船、建材、体育、医疗等诸多领域。但UHMWPE纤维的抗压缩、耐高温及抗蠕变性能差，且其表面呈化学惰性，与树脂基体结合性较差[4]，在一定程度上限制了其在高性能复合材料中的应用。将UHMWPE纤维与其它高强纤维进行混杂是提高其力学性能的有效方法之一。碳纤维(CF)具有低密度、高强度、高模量、耐高温、抗化学腐蚀等突出优点，广泛用于航空航天、交通运输、运动器材等领域，是与UHMWPE纤维进行混杂的理想纤维。三维编织复合材料具有卓越的整体性和可设计性，可从根本上克服传统层合板易分层、面内剪切和层间剪

收稿日期： 2008-09-18；**收修改稿日期：** 2008-12-08
基金项目： 天津市科技计划项目(07ZCKFSF01100)
通讯作者： 何 芳，博士，讲师，主要从事三维编织复合材料研究 E-mail：fanghe@tju.edu.cn

切强度低的缺点[5]。因此，将三维编织技术与混杂思想相结合，充分发挥三维编织技术及混杂复合材料的优势，有望获得可设计性更强、综合性能更佳的复合材料。目前已有关于三维编织超高分子量聚乙烯纤维-碳纤维混杂复合材料力学性能的报道[6]，但对其摩擦磨损性能方面的研究还不充分。鉴于此，本文作者系统地探讨了三维编织超高分子量聚乙烯纤维-碳纤维混杂复合材料的摩擦磨损性能及磨损机制，并对复合材料的摩擦系数进行了预测。

1　实验部分

UHMWPE 纤维，ρ=0.97 g/cm^3，σ=3000 MPa，E=95 GPa，湖南升鑫高新材料股份有限公司。12 K高强型聚丙烯腈(PAN)基碳纤维(CF)，σ=2800 MPa，E=200 GPa，ρ=1.75 g/cm^3，d=6～8 μm，吉林炭素厂。四步法 1×1 三维编织体编织角均为 15°，天津工业大学提供。618 环氧树脂由天津合成材料研究所提供。通过改变纱线中 UHMWPE 纤维和 CF 的体积比例调节复合材料的混杂比，研究了在纤维总体积含量为 36%的情况下，三维编织 UH－CF/ER 复合材料中碳纤维含量的增加对摩擦磨损性能的影响。为了验证摩擦系数预测模型，也对不同纤维含量三维编织 UHMWPE 纤维/ER 复合材料(UH_{3D}/ER)的摩擦系数进行了测定。

1.1　纤维表面处理及复合材料制备

UHMWPE 纤维编织体采用铬酸溶液[7]处理 10 min，蒸馏水冲洗、干燥备用。混杂纤维编织体采用复合处理的方法。首先以石墨电极作为阴极，采用 5wt%$(NH_4)_2HPO_4$溶液对碳纤维进行阳极氧化处理，电流密度 1 mA/cm^2，处理时间 1 min，后用蒸馏水反复冲洗，干燥；再将阳极氧化处理后的混杂编织体用铬酸溶液处理 10 min，后用蒸馏水冲洗多次后干燥，备用。采用与文献[8]类似的 RTM 工艺制备复合材料，固化条件 90℃/4 h。

1.2　性能测试

摩擦磨损实验参照 GB 3960－83 进行，所用设备为 MM－200 型摩擦磨损实验机。偶件为直径为 40 mm 的 45# 钢环，表面经精磨而成，并用丙酮清洗，试样尺寸为 30 mm×7 mm×6 mm。实验过程中试样固定不动，钢环旋转，摩擦副接触模式同文献[9]。在室温(23℃)及 60%±6%的相对湿度下进行。滑动速率为 0.42 m/s，名义载荷为 100 N。同组试验重复 5 次。摩擦系数 μ 与比磨损率 K 采用与文献[9]相同的方法计算获得。粗糙度参照 GB 131－83 和 GB 1031－83，采用光切法进行测量，所用设备为 CARLZEISS 型双管显微镜。采用 XL30 ESEM 和 KYKY－EM3200 型扫描电子显微镜(SEM)观察磨损面。

2　结果与讨论

2.1　混杂比对混杂复合材料摩擦磨损性能的影响

混杂比是影响混杂复合材料性能的一个重要参数。图 1 反映了三维编织 UH－CF/ER 混杂复合材料中碳纤维含量对其摩擦磨损性能的影响。由图 1 可以看出，随着 CF 含量的增加，三维编织 UH－CF/ER 混杂复合材料的摩擦系数增大，但比磨损率降低。这是因为 UHMWPE 纤维为热塑性材料，其摩擦系数很低，仅为 0.045[10]；而 CF 虽然是很好的减摩材料，但其摩擦系数较 UHMWPE 纤维略高[11]，因此随着 CF 含量的增大，复合材料摩擦系数增大。然而，UH_{3D}/ER 复合材料的强度及硬度显著低于三维编织 CF/环氧树脂复合材料(CF_{3D}/ER)，因此，随着碳纤维含量的增大，混杂复合材料的比磨损率降低。总之，UHMWPE 纤维有利于降低混杂复合材料的整体摩擦系数；而 CF 强度及刚度较大，可对环氧树脂基体起到很好的支撑作用，因此碳纤维的加入可显著提高复合材料的硬度和强度，使混杂复合材料获得较好的耐磨性。

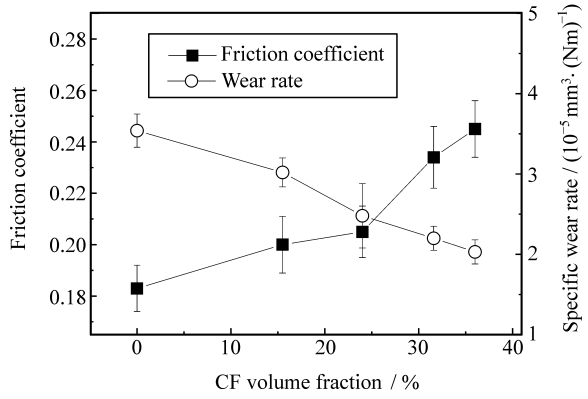
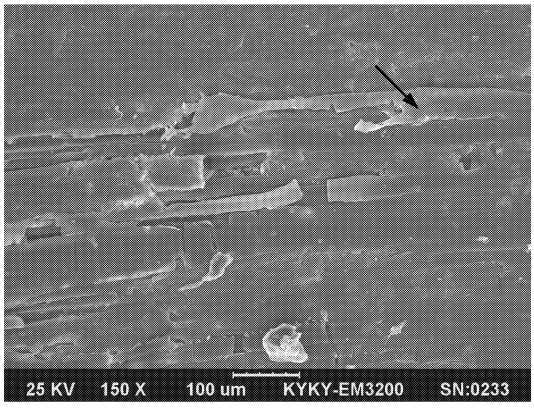


图 1　碳纤维含量对三维编织 UH－CF/ER 混杂复合材料(V_f=36%)摩擦磨损性能的影响

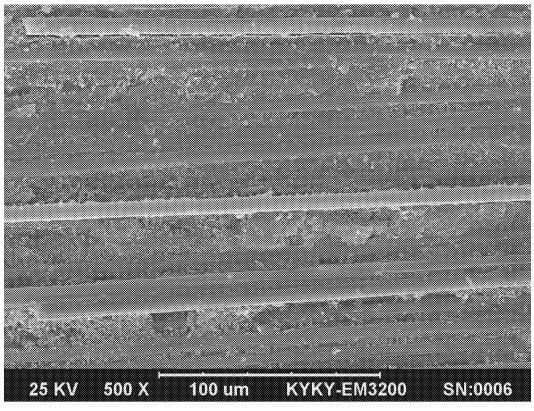
Fig. 1　Effect of volume fraction of carbon fiber on the friction and wear characteristics of the 3D UH－CF/ER composites (V_f=36%)

2.2　混杂复合材料的磨损机制

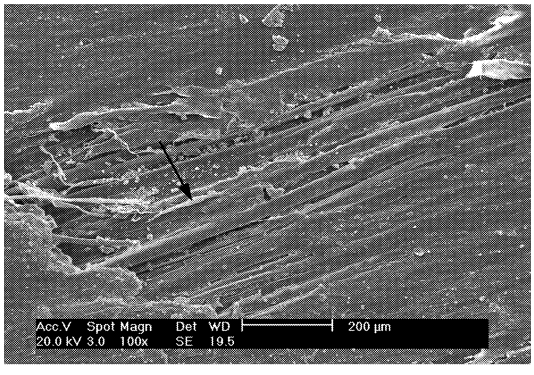
图 2 为纤维总体积含量为 36%的 UH_{3D}/ER、CF_{3D}/ER 及三维编织 UH－CF/ER 混杂复合材料



(a) UH_{3D}/ER



(b) CF_{3D}/ER

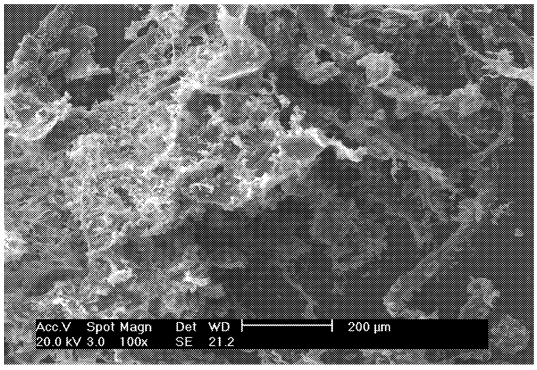


(c) UH-CF/ER

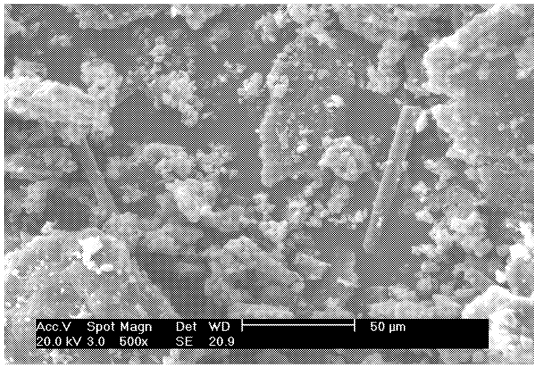
图 2　UH_{3D}/ER、CF_{3D}/ER 及 UH－CF/ER 复合材料（V_f＝36％）的磨损面形貌

Fig. 2　SEM photos of worn surfaces of the UH_{3D}/ER, CF_{3D}/ER and UH－CF/ER composites (V_f＝36％)

(CF∶UH＝3∶4)在 100 N 载荷及 0.42 m/s 滑动速率条件下的磨损面形貌。由图 2(a)可以看出，UH_{3D}/ER 复合材料磨损面的 UHMWPE 纤维发生了明显的变形(如箭头所示)，并有被钢环粘连断裂的痕迹，磨屑成絮状(如图 3(a))，主要发生粘着磨损；CF_{3D}/ER 复合材料在偶件表面微凸体的摩擦及犁削作用下，主要发生表面环氧树脂的剥落及碳纤维的断裂(如图 2(b)和图 3(b))，因此 CF_{3D}/ER 复合材料主要发生磨粒磨损。采用光切法测得 UH_{3D}/ER 复合材料磨损面的粗糙度为 0.13 μm±0.1 μm，CF_{3D}/ER 复合材料磨损面的粗糙度略大，为 0.19 μm±0.1 μm。混杂复合材料的磨损机制较为复杂，往往多种磨损形式并存，而以何种磨损机制为主则取决于接触面上纤维的种类和数量。如图 2(c)所示，混杂复合材料磨损面上的 UHMWPE 纤维发生了明显的塑性变形(如箭头所示)，同时树脂基体也明显剥落，并伴有碳纤维的断裂，表现出两种单一纤维复合材料各自的特征。因此，混杂复合材料与单一纤维复合材料相比具有更高的可设计性，可根据应用场合的不同选择不同的纤维和混杂比，以获得满意的摩擦磨损性能。



(a) UH_{3D}/ER



(b) CF_{3D}/ER

图 3　UH_{3D}/ER 及 CF_{3D}/ER 复合材料的磨屑形貌

Fig. 3　SEM photos of worn debris of the UH_{3D}/ER and CF_{3D}/ER composites

2.3　三维编织复合材料摩擦系数预测

目前，对于复合材料的摩擦性能的试验研究已经非常普遍，但是建立一种通用的模型或算法来预测复合材料的摩擦性能的报道还非常少，尤其是纤维增强的复合材料。Axén 等人[12-15]已经就颗粒增强及层板复合材料摩擦系数的预测建立了相应的模型，但这些模型往往需要已知参数非常多，如各相

的断裂韧性、硬度以及增强相的形状因子等，因此计算过程相对复杂。另外，现有的大多数模型都是基于颗粒增强复合材料建立起来的，因此用其预测纤维增强复合材料的摩擦磨损性能时存在较多疑点。本文作者在前人研究结果的基础上，拟建立适用于三维编织纤维增强复合材料的摩擦系数预测方法。

2.3.1　基本理论

根据 Amonton－Coulomb 定律，固-固界面的最大静摩擦力 F 随着垂直于界面的正压力 L 线性增加，即 $F=\mu L$。摩擦过程中，假定复合材料内各相对摩擦副而言都是刚性的，因此摩擦面上每一相 i 在与摩擦副接触时表现出自己的摩擦系数 μ_i，它们承受的正压力为 L_i，因此每一相受到的摩擦力为 F_i，即 $F_i=\mu_i L_i$，则复合材料受到的总摩擦力 F 为每一相摩擦力的和，设复合材料共有 N 种不同的相，则 $F=\sum_{i=1}^{N}\mu_i L_i$。由此可以看出，为了求得复合材料的摩擦系数，必须先获得各相的摩擦系数及承受的载荷。各相的摩擦系数可以通过试验获得，而在摩擦过程中承受的载荷分布情况则相对复杂。Axén 等人[12]提出两种载荷分布模型，即等正压力模式(EP)和等线性磨损率模式(EW)。这两个模型是基于 Archard 方程(即材料体磨损率正比于外加载荷的假设)建立起来的，并假设在摩擦过程中，各相的摩擦系数及比磨损率不会相互影响。

若复合材料中 i 相在摩擦面上的面积分数为 α_i，对于 EP 模式(即单位名义接触面积上的正压力相等)，i 相承受的正压力为 $L_i=L\alpha_i$，因此，复合材料的整体摩擦系数 μ 满足如下关系：

$$\mu=\sum_{i=1}^{N}\mu_i\alpha_i \tag{1}$$

其中，μ_i 表示 i 相材料的摩擦系数。

对于 EW 模式，各相具有相等的线性比磨损率 k_i(即单位滑程内的磨损深度)，设 i 相的名义接触面积为 A_i，体积比磨损率为 K_i，则复合材料的整体比磨损率 K 可表示为 $K=\sum_{i=1}^{N}K_iA_i$。

设 K 的倒数为 Ω_i，表示 i 相的耐磨性大小，则 i 相承受的正压力为

$$L_i=L\left(\frac{\Omega}{\sum_{i=1}^{N}\alpha_i\Omega_i}\right)\alpha_i \tag{2}$$

则复合材料整体的摩擦系数和比磨损率则满足如下关系：

$$\mu=\sum_{i=1}^{N}\mu_i\frac{\Omega_i}{\sum_{n=1}^{N}\alpha_n\Omega_n}\alpha_i \tag{3}$$

EP 模式和 EW 模式是摩擦过程中载荷分布比较理想的状态，在复合材料实际使用过程中是无法达到的上下限。对于不同类型的复合材料，摩擦过程中接触面的相互作用方式不尽相同，因此接触面上的载荷分布状态应介于 EP 模式和 EW 模式之间，因此可定义一种介于 EP 模式和 EW 模式之间的一种混合载荷分布模式。用 θ 表示混合模式中 EW 压力分布模式所占的比例，则 EP 模式所占的比例即为$(1-\theta)$，此时 i 相的正压力为

$$L_i=L\left(\theta\frac{\Omega_i}{\sum_{i=1}^{N}\alpha_i\Omega_i}+(1-\theta)\right)\alpha_i \tag{4}$$

则多相复合材料的摩擦系数可表示如下：

$$\mu=\sum_{i=1}^{N}\mu_i\left(\theta\frac{\Omega_i}{\sum_{n=1}^{N}\alpha_n\Omega_n}+(1-\theta)\right)\alpha_i \tag{5}$$

当复合材料中各相材料的摩擦系数及耐磨性已知时，可通过上述 EP 模式、EW 模式及混合模式对复合材料的摩擦系数进行预测。除了 EP 载荷分布模式以外，复合材料内部各相的耐磨性也会对相应的摩擦系数产生一定的影响。

2.3.2　UH_{3D}/ER 复合材料摩擦系数预测

在 100 N 载荷和 0.42 m/s 滑动速度下，ER 摩擦系数为 0.4425，比磨损率 21.8×10^{-5} mm^3/Nm，UHMWPE 的摩擦系数为 0.045，体积比磨损率为 9.9×10^{-6} mm^3/Nm[10]，碳纤维摩擦系数约 0.1[16]，体积比磨损率约为 1.3×10^{-6} mm^3/Nm[11]。采用式(5)预测 UH_{3D}/ER 和三维编织 UH－CF/ER 复合材料的摩擦系数，结果如图 4 所示。由图 4 可以看出，混合模式的计算值位于 EP 模式和 EW 模式之间。当 EW 模式所占的比例 θ 增大时，混合模式的摩擦系数计算值逐渐趋近 EW 模式。通过计算发现，当 $\theta=0.74$ 时，采用混合正压力分布模式计算的 UH_{3D}/ER 摩擦系数与试验值符合较好($p<0.05$)，如图 4(a)所示。而对三维编织 UH－CF/ER 复合材料而言，由 EW 模式和 EP 模式以及二者混合模式获得的摩擦系数随着 UH/CF 混杂比的降低变化不明显。混合正压力分布模式获得的计算值明显偏离实验值。因此 EW 模式、EP 模式以及二者的混合模式虽然适用于三维编织单一纤维复合材料的摩擦系数预测，但并不适于混杂纤维复合材料。

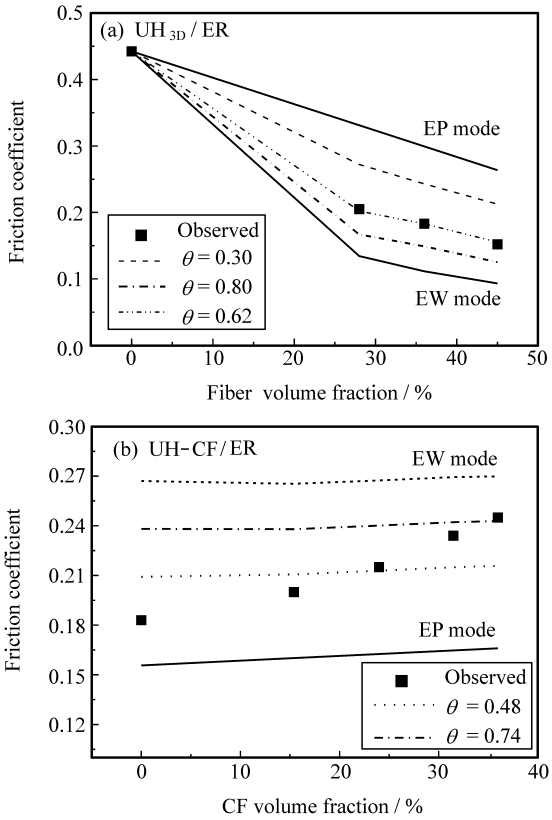


图 4　UH_{3D}/ER 与三维编织 UH－CF/ER 混杂复合材料的摩擦系数预测值与实验值比较

Fig. 4　Model predictions and experimentally measured friction coefficient of the UH_{3D}/ER and UH－CE/ER composites

3　结　论

（1）在纤维总体积含量一定的情况下，随着碳纤维含量的增加，三维编织 UH－CF/ER 混杂复合材料的摩擦系数增大，比磨损率下降。

（2）UH_{3D}/ER 复合材料的磨损机制以粘着磨损为主，CF_{3D}/ER 复合材料则以磨粒磨损为主，而三维编织 UH－CF/ER 混杂复合材料的磨损机制取决于两种纤维的相对含量。

（3）混杂正压力模型能够很好地预测不同纤维含量的 UH_{3D}/ER 复合材料的摩擦系数，但并不适用于混杂复合材料。

参考文献：

[1] Jacobs O, Kazanici M, Cohn D. Creep and wear behaviour of ethylene-butene copolymers reinforced by ultra-high molecular weight polyethylene fibres [J]. Wear, 2002, 253(5/6): 618-625.

[2] 吴　越，骆玉祥. 液态氧化法处理超高分子量聚乙烯纤维[J]. 功能高分子学报，1999，12(4)：426-430.
Wu Yue, Luo Yuxiang. UHMWPE fiber treaded by chemical oxidation method [J]. Journal of Functional Polymers, 1999, 12(4): 426-430.

[3] 吴　越，胡福增，骆玉祥，余爱萍. 等离子法处理超高分子量聚乙烯纤维 [J]. 功能高分子学报，2001，14(2)：190-194.
Wu Yue, Hu Fuzeng, Luo Yuxiang, Yu Aiping. Air plasma treatment of UHMWPE fibers [J]. Journal of Functional Polymers, 2001, 14(2): 190-194.

[4] Andreia L S A, Lucio F C N, Joao C M S. Influence of weathering and gamma irradiation on the mechanical and ballistic behavior of UHMWPE composite armor [J]. Polymer Testing, 2005, 24(1): 104-113.

[5] Suresha B, Chandramohan G, Siddaramaich, Shivakumay Kuningal N, Ismail Mohmmed. Mechanical and three-body abrasive wear behaviour of three-dimensional glass fabric reinforced vinyl ester composite [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480, 25(6): 573-579.

[6] 何　芳，王玉林，万怡灶，黄　远. 三维编织超高分子量聚乙烯纤维/碳纤维/环氧树脂混杂复合材料力学行为及混杂效应研究 [J]. 复合材料学报，2008，25(6)：52-58.
He Fang, Wang Yulin, Wan Yizao, Huang Yuan. Mechanical properties and hybrid effect of 3D braided UHMWPE fiber/carbon fiber/epoxy resin hybrid composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(6): 52-58..

[7] 郑　震，施楣梧，周国泰. 超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料及防弹性能的研究进展[J]. 合成纤维，2002，31(4)：20-26.
Zheng Zhen, Shi Meiwu, Zhou Guotai. Advancement of UHMWPE fiber reinforced composites and their ballistic performance [J]. Synthetic Fiber in China, 2002, 31(4): 20-26.

[8] Wang Y L, Wan Y Z, He B M, et al. Comparison of MC nylon-based composites reinforced with two different three-dimensionally braided fabrics [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(4): 1491-1494.

[9] Wan Y Z, Chen G C, Raman S, Xin J Y, Li Q Y, Huang Y, Wang Y L, Luo H L. Friction and wear behavior of three-dimensional braided carbon fiber/epoxy composites under dry sliding conditions [J]. Wear, 2006, 260(9/10): 933-941.

[10] 葛毅成，易茂中，黄伯云，C/C 复合材料与石墨材料干态摩擦磨损行为[J]. 复合材料学报，2004，21(6)：93-97.
Ge Yicheng, Yi Mozhong, Huang Baiyun. Tribology properties of C/C composites and graphite at non-lubrication wear environment [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 93-97.

[11] 罗　民，冯正昕，唐广志，马洪顺. 骨折内固定接骨板破坏原因分析与实验研究[J]. 生物医学工程学杂志，2001，18(3)：428-431.
Luo Min, Feng Zhengxin. Tang Guangzhi, Ma Hongshun. Analysis and experimental study of reasons for breakage in the bone fracture plate during internal fixation [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2001, 18(3): 428-431.

[12] Axén N, Hutchings I M, Jacobson S. A model for the friction of multiphase materials in abrasion [J]. Tribology International, 1996, 29(6): 467-475.

[13] Bowden F P, Tabor D. The friction and lubrication of solids (Vols Ⅰ/Ⅱ) [M]. Oxford: Oxford University Press, 1964.

[14] Zhang Z F, Zhang L C, Mai Y W. Modelling friction and wear of scratching ceramic particle-reinforced metal composites [J]. Wear, 1994, 176(2): 231-237.

[15] Tong J, Ma Y H, Jiang M. Effects of the wollastonite fiber modification on the sliding wear behavior of the UHMWPE composites [J]. Wear, 2003, 255(1/6): 734-741.

[16] Friedrich K, Lu Z, Hager A M. Recent advances in polymer composites' tribology [J]. Wear, 1995, 190(2): 139-144.