

聚四氟蜡和二硫化钼填充凯夫拉纤维织物 复合材料的摩擦磨损性能研究

郭 芳^{1,2}, 张招柱¹, 苏峰华^{1,2}, 王 坤¹, 姜 葳¹

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用玄武三号栓 盘式摩擦磨损试验机研究凯夫拉 (Kevlar) 纤维织物材料及聚四氟蜡 (PFW) 和 MoS_2 填充 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦磨损性能, 采用扫描电子显微镜观察其磨损表面形貌. 结果表明, PFW 和 MoS_2 均可以改善 Kevlar 纤维织物材料的摩擦磨损性能, 其中 PFW 的改善效果尤为显著. 当 PFW 质量分数为 20% 时, Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数减小 75%、磨损率降低 82%, Kevlar 纤维织物复合材料的减摩抗磨性能最佳.

关键词: Kevlar 纤维织物复合材料; PFW 和 MoS_2 填充; 摩擦磨损性能

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595 (2007) 02-0137-05

随着现代工程技术的发展, 传统的聚合物和涂层复合材料很难满足高载荷条件下的工程材料要求. 纤维织物复合材料是以纤维织物作为表面层, 金属或非金属为底材, 通过粘结形成的复合材料, 具有高比强度、高比模量以及优良的化学稳定性和耐磨性等性能. 目前, 人们已对 PTFE 纤维、玻璃纤维及芳纶纤维织物复合材料的摩擦磨损性能进行了初步研究^[1~5].

凯夫拉 (Kevlar) 纤维具有高比强度、高比模量及优异耐磨性等性能, 作为增强材料已在航空、航天、建筑及汽车等领域得到广泛应用^[6,7], 但对改善 Kevlar 纤维织物复合材料摩擦磨损性能的研究尚少见报导. 因此, 本文作者对聚四氟蜡 (PFW) 和 MoS_2 改性 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦磨损性能进行初步研究, 并对其作用机理进行探讨, 以期 Kevlar 纤维织物在摩擦学领域的应用提供科学依据和参考.

1 实验部分

1.1 原料

Kevlar 纤维织物由进口 Kevlar 纤维编织而成; 酚醛 缩醛粘结剂由上海新光化工厂提供; 聚四氟蜡 (POLYFLUO-150 WAX, 简称为 PFW) 由 Micro Pow-

ders 公司提供, 粒度 $< 15 \mu\text{m}$; MoS_2 为上海胶体化工厂生产, 粒度 $< 38 \mu\text{m}$.

1.2 样品制备

Kevlar 纤维织物 (缩写为 KF) 经石油醚和丙酮等清洗处理、烘干. PFW 和 MoS_2 填充剂均按一定质量分数添加到粘结剂中, 在磁力搅拌器上搅拌均匀, 再用超声波混合, 将 Kevlar 纤维织物置于其中浸渍 (KF 质量分数为 60%~70%), 烘干后采用酚醛 缩醛粘结剂粘结在 45[#] 钢材表面 (表面粗糙度 $R_a = 0.45 \mu\text{m}$), 然后在 180 °C 左右固化 2 h 制得 Kevlar 纤维织物复合材料 (简称 KFC) 样品.

1.3 性能测试及表征方法

采用玄武三号栓 盘式摩擦磨损试验机评价摩擦磨损性能. 偶件为直径 2 mm 的 45[#] 钢栓 (表面粗糙度 $R_a = 0.15 \mu\text{m}$, 硬度 30HRC), 每次试验前先用丙酮棉球擦净. 试验在室温、干摩擦条件下进行, 转速为 0.26 m/s, 试验时间 120 min. 摩擦系数由试验机获得, 磨损率由公式 $w = v/p \cdot L$ 算出 (v 为磨损体积损失, p 为载荷, L 为距离). 试验中摩擦磨损试验数据均为 3 次重复试验结果的平均值.

采用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察 Kevlar 纤维织物复合材料的磨损表面形貌, 并分析其磨损机理.

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目 (50421502).

收稿日期: 2006-04-28; 修回日期: 2006-07-18 联系人张招柱, e-mail: zzzhang@lzb.ac.cn

作者简介: 张招柱, 男, 1965 年生, 研究员, 博士生导师, 目前主要从事聚合物及纤维织物材料摩擦学研究.

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损性能

图 1所示为在载荷为 65 MPa时, PFW 填充改性

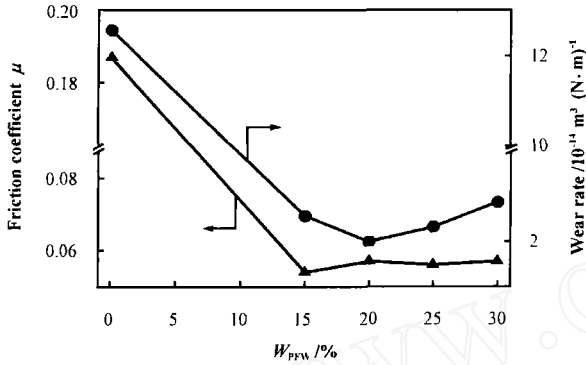


Fig 1 Variations of friction coefficient and wear rate with the content of PFW in Kevlar fabric composites

图 1 PFW 改性 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率随 PFW 含量变化的关系曲线

Kevlar 纤维织物复合材料摩擦系数和磨损率随 PFW 添加量变化的关系曲线. 可见, PFW 可以明显降低 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率. 当 PFW 含量超过 15% 后, 随着 PFW 含量增加, 摩擦系数变化不大, 磨损率略有降低; 当 PFW 含量为 20% 时, 磨损率降至 $2.11 \times 10^{-14} \text{ m}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, 继续增大 PFW 含量, 其磨损率有所增加. 这是由于 PFW 含量增加时, PFW 在体系中分散不均匀, 导致复合材料缺陷增多, 耐磨性降低, 磨损率增大. 所以, Kevlar 纤维织物复合材料具有最佳抗磨性的 PFW 含量为 20%.

图 2所示为在载荷为 60 MPa 时 MoS_2 含量对

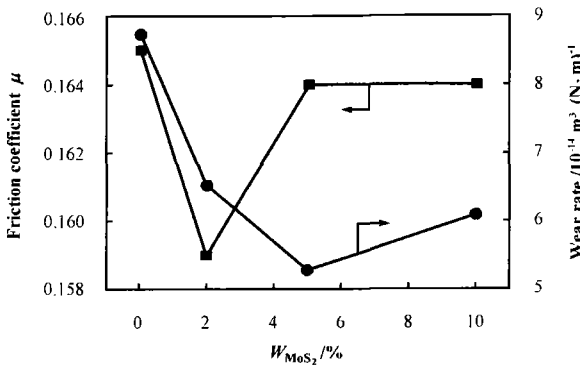


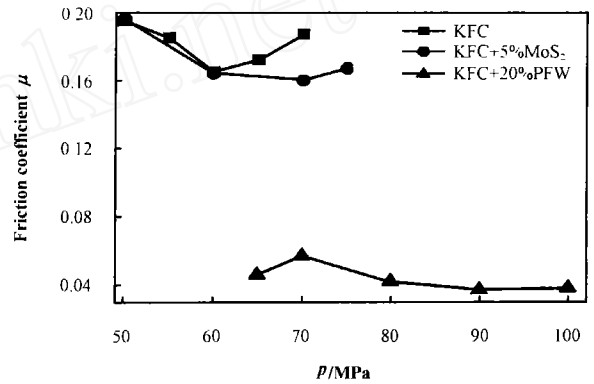
Fig 2 Variations of friction coefficient and wear rate with the content of MoS_2 in Kevlar fabric composites

图 2 MoS_2 改性 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率随 MoS_2 含量变化的关系曲线

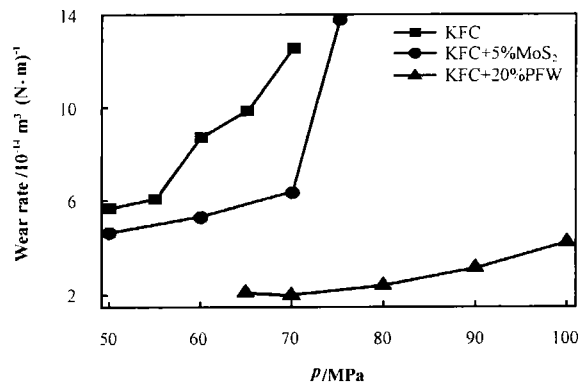
Kevlar 纤维织物复合材料摩擦系数和磨损率的影

响. 可见, 添加 MoS_2 可以降低 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率. 当 MoS_2 质量分数为 2% 时, 摩擦系数降至 0.159, 继续增加 MoS_2 含量, 其摩擦系数反而增大而后趋于稳定; 而其磨损率则随着 MoS_2 含量增加不断减小, 当 MoS_2 含量超过 5% 后, 磨损率有所增加. 所以, 当 MoS_2 质量分数为 5% 时, Kevlar 纤维织物复合材料的耐磨性能最佳.

图 3所示为 3 种 Kevlar 纤维织物复合材料的摩



(a) μ vs p curves



(b) Wear rate vs p curves

Fig 3 Variation of friction coefficient and wear rate with load for the unfilled and 5% MoS_2 , 20% PFW-filled Kevlar fabric composites

图 3 MoS_2 和 PFW 填充 Kevlar 纤维织物的摩擦系数和磨损率随载荷变化的关系曲线

擦系数和磨损率随载荷变化的关系曲线. 可以看出, 在不同载荷条件下, 采用 PFW 和 MoS_2 填充改性 Kevlar 纤维织物均可以明显改善 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦磨损性能, 但 PFW 填充改性 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦磨损性能明显优于 MoS_2 填充改性的 Kevlar 纤维织物复合材料. 对于未填充的 Kevlar 纤维织物复合材料而言, 随着载荷的增加, 摩擦系数先减小而后增大, 磨损率逐渐增大, 当载荷为 70 MPa 时复合材料达到最大承载能力; 对 MoS_2 填

充改性 Kevlar 纤维织物复合材料而言,当载荷小于 70 MPa 时,随着载荷增加,摩擦系数先减小而后趋于稳定,而其磨损率则缓慢增大;当载荷大于 70 MPa 后,摩擦系数缓慢增大,磨损率急剧上升,其原因在于在载荷为 75 MPa 时 MoS₂ 填充 Kevlar 纤维织物复合材料已达最大承载能力. 对 PFW 填充改性 Kevlar 纤维织物复合材料而言, PFW 不仅可以明显降低 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率,还

可以大幅度提高其承载能力. 随着载荷增加, PFW 填充改性 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数先增大而后减小,到一定载荷后趋于稳定;而其磨损率随载荷增加而缓慢增大. 这是由于随着载荷增加,复合材料摩擦表面的温度升高,材料粘附转移倾向增强,而在摩擦过程中粘附的材料不断被磨掉并发生向偶件表面的转移,从而导致复合材料的磨损增大^[8].

表 1 给出了 PFW 和 MoS₂ 填充 Kevlar 纤维织物

表 1 PFW 和 MoS₂ 填充改性 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率 (70 MPa)
Table 1 Friction coefficient and wear rate of Kevlar fabric composites filled by MoS₂ and PFW (70 MPa)

Sample	Friction coefficient μ	Wear rate/ $10^{-14} \text{ m}^3 (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$
KFC	0.187	12.60
KFC + 5%MoS ₂	0.160	6.35
KFC + 20% PFW	0.046	2.11

复合材料在载荷为 70 MPa 时摩擦系数和磨损率的对比试验结果. 可以看出,添加 MoS₂ 和 PFW 均可以提高 Kevlar 纤维织物复合材料的减摩抗磨性能. 其中, PFW 的填充效果尤为显著,可使 Kevlar 纤维织

物复合材料的摩擦系数减小 75%,磨损率降低 82%.

2.2 磨损表面分析

图 4 给出了在 70 MPa 下 3 种 Kevlar 纤维织物

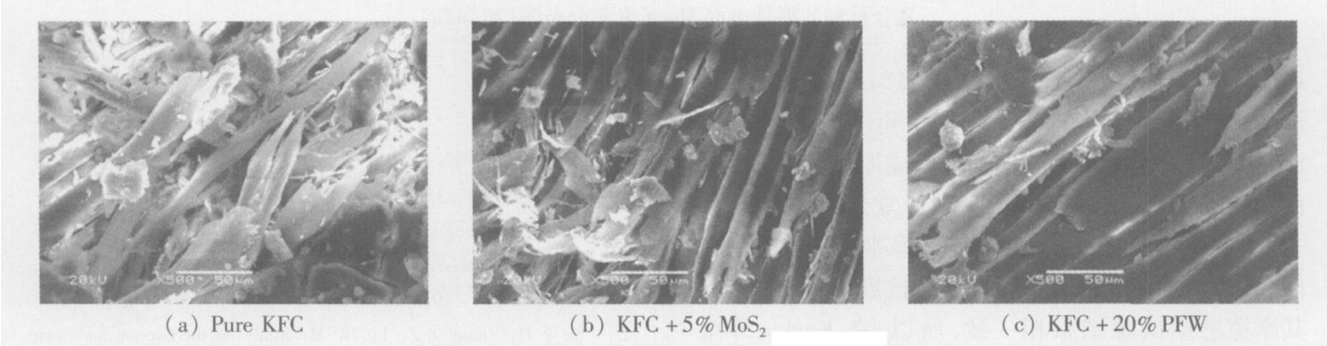


Fig 4 SEM images of the worn surfaces of the Kevlar fabric composites filled by PFW and MoS₂ (500 ×)

图 4 MoS₂ 和 PFW 填充 Kevlar 纤维织物磨损表面形貌的 SEM 照片 (×500)

复合材料磨损表面形貌的 SEM 照片. 可以看出,未填充改性 Kevlar 纤维织物复合材料的磨损表面存在大量断裂纤维,且其纤维与树脂的粘结性很差,纤维织物的整体结构松散混乱,复合材料表面受到严重破坏[见 4(a)],其耐磨性较差. 当 MoS₂ 填充改性 Kevlar 纤维织物复合材料时,其磨损表面的纤维断裂情况及整体结构均有所改善[见图 4(b)],耐磨性有所提高. 当 PFW 填充改性 Kevlar 纤维织物复合材料时, Kevlar 纤维织物复合材料的磨损表面只有少量纤维断裂,且其纤维与粘结树脂间的结合比较完整[见图 4(c)],其耐磨性和承载能力明显提高. 分析认为, PFW 和 MoS₂ 的填充改性在不同程度上提高了 Kevlar 纤维与粘结树脂间的浸润性,改善了复合材料界面的结合状况,使 Kevlar 纤维织物复

合材料的结构更加完整,在摩擦过程中能够更好地传递和分散载荷,从而提高了 Kevlar 纤维织物复合材料的耐磨性和承载能力,但 PFW 的填充效果明显优于 MoS₂. 这与其摩擦磨损试验结果相一致.

图 5 给出了与 3 种 Kevlar 纤维织物复合材料对摩的偶件磨损表面形貌 SEM 照片及与 MoS₂ 填充 Kevlar 纤维织物复合材料对摩的偶件磨损表面 Mo 元素的面分布图. 可见,未填充 Kevlar 纤维织物的偶件表面十分粗糙且其转移膜很薄[见图 5(a)],转移膜与偶件表面的结合力很弱,转移膜容易脱落形成磨屑,而磨屑又会形成磨粒夹在复合材料和偶件之间,使得复合材料的磨损加重. 当 MoS₂ 填充 Kevlar 纤维织物时,偶件表面形成较厚的转移膜,但转移膜的均匀性和连续性较差[见图 5(b)],偶件

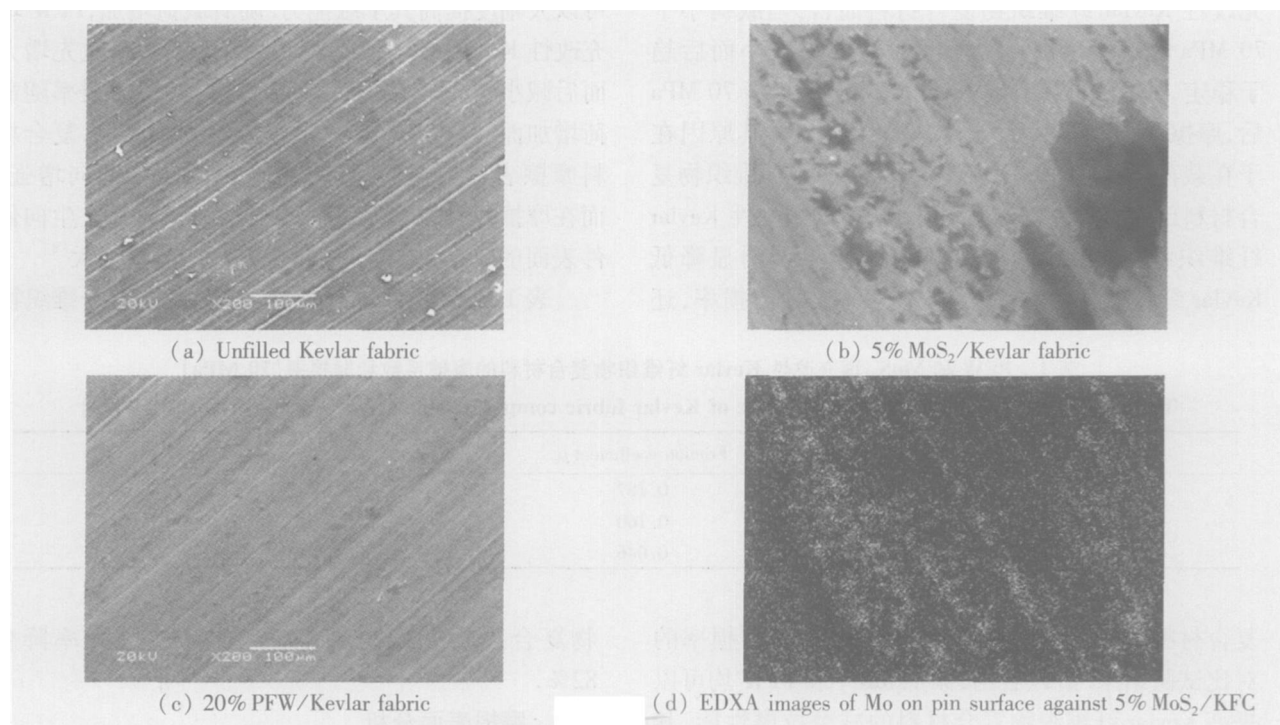


Fig 5 SEM images of the transfer films formed on the surfaces of the pin against (70 MPa)

图 5 MoS_2 和 PFW 填充 Kevlar 纤维织物复合材料在偶件表面形成的转移膜形貌 SEM 照片及 MoS_2 填充 Kevlar 纤维织物复合材料的偶件表面 Mo 元素面分布图 (70 MPa)

表面有 Mo 元素存在, Mo 元素分布与对应转移膜的深色部分证明生成了不连续转移膜 [见图 5 (d)]. 而当 PFW 填充时, 其偶件表面形成厚度适中、连续而致密的转移膜 [见图 5 (c)], 使复合材料与偶件表面的摩擦转化为复合材料与转移膜间的摩擦, 从而有效地提高了复合材料的减摩抗磨性能. 这些与其摩擦磨损试验结果相一致. 所以, 在 Kevlar 纤维织物中填充 PFW 可以有效促进偶件表面转移膜的形成、增强转移膜与偶件表面的结合力, 在偶件表面形成厚度适中、连续而致密的转移膜, 从而降低了 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率.

3 结论

a 填加 PFW 和 MoS_2 均可以改善 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦磨损性能, 其中 PFW 的改善效果尤为显著, 可使其摩擦系数减小 75%, 磨损率降低 82%. 当 PFW 的质量分数为 20% 时, Kevlar 纤维织物复合材料的减摩抗磨性能最佳.

b 在不同载荷下, PFW 均可以明显降低 Kevlar 纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率, 同时也大幅度提高其承载能力; 而填加 MoS_2 的 Kevlar 纤维织物复合材料在载荷为 75 MPa 时已达到最大承载能力.

参考文献:

- [1] 任忠海, 王庆华, 武中德. 聚四氟乙烯纤维织物耐磨材料的摩擦学性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22 (3): 193-196.
Ren Z H, Wang Q H, Wu Z D. Research on tribological properties of wear-resistant polytetrafluoroethylene fabric [J]. Tribology, 2002, 22 (3): 193-196.
- [2] Su F H, Zhang Z Z, Liu W M. Study on the friction and wear properties of glass fabric composites filled with nano- and micro-particles under different condition [J]. Materials Science and Engineering A, 392 (2005): 359-365.
- [3] 刘旭军, 李同生, 杨生荣. 芳纶纤维织物摩擦磨损性能的研究 [J]. 摩擦学学报, 1999, 19 (1): 23-27.
Liu X J, Li T S, Yang S R. Study of the tribological properties of Kevlar fabric [J]. Tribology, 1999, 19 (1): 23-27.
- [4] 李同起, 王成扬. 影响芳纶纤维及其复合材料性能的因素和改善方法 [J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19 (5): 5-9.
Li T Q, Wang C Y. Effect factors and improving methods of the properties of aramid fiber and its composite [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2003, 19 (5): 5-9.
- [5] 刘丽, 黄玉东, 张志谦. 超声波对 F-12 环氧复合材料力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 1999, 16 (1): 67-71.
Liu L, Huang Y D, Zhang Z Q. Effect of ultrasonic on the mechanical performance of F-12/epoxy composites [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 1999, 16 (1): 67-71.
- [6] 张爱波, 雷渭媛, 张守阳. 短芳纶纤维增强聚苯硫醚复合材料的性能 [J]. 塑料工业, 1999, 27 (4): 32-34.

Zhang A B, Lei W Y, Zhang S Y. Mechanical properties of PPS composite reinforced by short Kevlar fiber[J]. China Plastics Industry, 1999, 27(4): 32-34.

[7] 马保吉,朱均. 芳纶纤维增强酚醛树脂摩擦材料的磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(3): 205-209.

Ma B J, Zhu J. Wear mechanisms of Kevlar pulp reinforced phenolic resin friction materials[J]. Tribology, 2001, 21(3): 205-209.

[8] 王承鹤. 塑料摩擦学——塑料的摩擦、磨损、润滑理论与实践[M]. 北京:机械工业出版社, 1994. 11.

Study on Tribological Properties of Kevlar Fabric Composites Filled with PFW and MoS_2

GUO Fang^{1,2}, ZHANG Zhao-zhu¹, SU Feng-hua^{1,2}, WANG Kun¹, JIANG Wei¹

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Friction and wear behaviors of Polyfluoro-150 wax (PFW) and MoS_2 modified Kevlar fabric composites were studied by using a Xuanwu-III high temperature friction and wear tester, and then the worn surfaces and the transfer films formed on the surfaces of the counterpart pin were analyzed by using a JSM-5600LV scanning electron microscopy (SEM). It was found that the friction-reducing and anti-wear properties of Kevlar fabric composites can be greatly improved by filling PFW or MoS_2 , but the friction-reducing and anti-wear properties of PFW filled Kevlar fabric composite are much better than those of the MoS_2 filled Kevlar fabric composite. When the content of PFW in Kevlar fabric composite is 20%, the Kevlar fabric composites can obtain the best friction-reducing and anti-wear properties.

Key words: Kevlar fabric composites, filled with MoS_2 and PFW, friction and wear behavior

Author: ZHANG Zhao-zhu, male, born in 1965, Ph.D., Professor, e-mail: zzzhang@lzb.ac.cn