

自润滑纤维织物复合材料摩擦学性能研究

张艳¹, 郭芳², 张招柱²

(1.中国航空工业集团公司 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035;

2.中国科学院 兰州化学物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 目的 研究 MoS₂ 和石墨填充对自润滑纤维织物复合材料摩擦学性能的影响。方法 采用玄武三号栓-盘式摩擦磨损试验机, 研究了石墨和 MoS₂ 填充 PTFE/棉纤维织物在不同载荷条件下的摩擦磨损性能, 并采用扫描电镜观察了纤维织物复合材料的磨损表面和微观结构。结果 在较低载荷下, 填充 5% MoS₂ 可以更有效地降低 PTFE/棉纤维织物复合材料的磨损率; 在较高载荷下, 填充 10% 石墨可以更有效地降低 PTFE/棉纤维织物复合材料的磨损率。载荷为 219.52 N 时, 5% MoS₂ 填充 PTFE/棉纤维织物复合材料的磨损率由未填充的 $1.28 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降低到 $0.61 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 降低了 50%; 10% 石墨填充 PTFE/棉纤维织物复合材料的磨损率由 $1.28 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降低到 $0.91 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 降低了 28%。结论 石墨和 MoS₂ 填充在摩擦过程中减轻了磨粒的嵌入和切削作用, 阻碍了复合材料的磨损, 提高了 PTFE/棉纤维织物复合材料的耐磨性能。

关键词: PTFE/棉纤维织物复合材料; 自润滑纤维织物; MoS₂; 石墨; 摩擦磨损性能; 转移膜; 纤维/树脂界面

中图分类号: TH117 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2017)08-0140-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.023

Tribological Properties of Self-lubricating Fabric Composites

ZHANG Yan¹, GUO Fang², ZHANG Zhao-zhu²

(1.Shenyang Aircraft Design & Research Institute, AVIC, Shenyang 110035, China;

2.Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of MoS₂ and graphite filling on tribological properties on self-lubricating fabric composites. Friction and wear properties of MoS₂ and graphite-filled PTFE/cotton fabric were studied under various loading conditions, and worn surface and microstructure of the fabric composites were observed with scanning electron microscopy (SEM). Under lower loads, filling with 5% MoS₂ could reduce wear rate of PTFE/cotton fabric composites more effectively; whereas under higher loads, filling with 10% graphite could reduce wear rate of the composites more effectively. Provided with wear rate of 219.52 N, wear rate of the PTFE/cotton fabric composites filled with 5% MoS₂ decreased from $1.28 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $0.6 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ by 50%; wear rate of the composites filled with 10% graphite decreased from $1.28 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $0.91 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ by 28%. Filling with graphite and MoS₂ alleviates embedding and cutting effects of abrasive grains, inhibits wear of the composites and improves wear resistance of PTFE/cotton fabric composites.

收稿日期: 2017-03-27; 修订日期: 2017-07-11

Received: 2017-03-27; Revised: 2017-07-11

作者简介: 张艳 (1973—), 女, 高工, 主要从事航空轴承应用和自润滑衬垫材料的研究。

Biography: ZHANG Yan (1973—), Female, Senior engineer, Research focus: aircraft bearing application & self-lubricating fabric composites.

通讯作者: 张招柱 (1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事聚合物表面及摩擦学研究。

Corresponding author: ZHANG Zhao-zhu (1965—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: polymer surface & friction and lubrication.

KEY WORDS: PTFE/cotton fabric composites; self-lubricating fabric; MoS₂; graphite; friction and wear properties; transfer film; fabric/resin interface

自润滑纤维织物复合材料由聚四氟乙烯 (PTFE) 混纺纤维织物、胶粘剂和金属/非金属底材组成, 其结构层次涵盖了纤维单丝、纤维丝束、薄层纤维织物、树脂预浸渍物和复合材料界面结构等, 表现出其他材料无法比拟的工艺性、可设计性和使用性能, 适用于航天航空领域中制作关节轴承、衬套和护环瓦等受力零部件的摩擦面材料。PTFE 在实际应用中不受化学品的影响, 连续耐温范围为-240~260 °C, 具有极低的摩擦系数, 但其强度和耐磨性较差, 限制了其应用^[1-4]。因此, 很多研究都致力于降低 PTFE 的磨损率, 提高其耐磨性^[5-7]。石墨和二硫化钼为层状结构, 是优良的固体润滑剂。国内外学者对石墨和二硫化钼填充聚合物的摩擦学性能进行了广泛研究^[8-12]。

目前, 针对改性纤维织物复合材料摩擦学性能的研究已有报道^[13-16]。但是多数研究仅针对单种纤维织物复合材料, 对混纺纤维织物的研究还较少。棉纤维强度适中, 粘结性好, 将 PTFE 纤维与棉纤维混合编织, 可以大幅度节约成本。PTFE/棉纤维织物以 PTFE 纤维作为润滑面, 棉纤维为粘结面, 既保证了 PTFE 纤维的自润滑性能, 又利用了棉纤维良好的粘结性。据此, 本文研究了 MoS₂ 和石墨填充对 PTFE/棉纤维混纺纤维织物复合材料摩擦学性能的影响, 并对其摩擦磨损机理进行了解释, 为 PTFE/棉纤维混纺纤维织物复合材料在摩擦学中的应用提供理论参考。

1 实验

1.1 原料

PTFE/棉纤维织物由 PTFE 和棉纤维混合编织而成。酚醛-缩醛粘结剂由上海新光化工厂提供。MoS₂ 为上海胶体化工厂生产, 粒度<38 μm。石墨过 400 目筛。

1.2 样品制备

PTFE/棉纤维织物依次经石油醚和乙醇清洗后备用。将 PTFE/棉纤维织物置于含不同质量分数石墨或 MoS₂ 填料的胶粘剂中反复浸渍, 至胶粘剂的质量分数达到(35±5)%。将预浸渍 PTFE/棉纤维织物粘接在 45#钢底材 (表面粗糙度 $Ra=0.45\ \mu\text{m}$) 上, 在 180 °C 条件下固化 2 h, 制得 PTFE/棉纤维织物复合材料 (缩写 PTFE/cotton FC) 样品。

1.3 性能测试及表征方法

采用栓-盘摩擦磨损形式来评价 PTFE/棉纤维

织物复合材料的摩擦学性能。摩擦副对偶采用直径为 2 mm 的 45#钢栓 (表面粗糙度 $Ra=0.15\ \mu\text{m}$, 硬度为 30HRC)。试验条件为: 室温, 干摩擦, 转速 0.26 m/s, 时间 120 min。摩擦系数由栓-盘摩擦磨损试验机直接获得, 磨损率由公式 $w=v/(p\cdot L)$ 计算, 其中 v 为磨损体积, p 为载荷, L 为距离, 摩擦系数和磨损率的数据均为 3 次重复试验的平均值。采用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 对 PTFE/棉纤维织物复合材料的摩擦磨损表面形貌和微观结构形貌进行观察。

2 结果与讨论

图 1 为 MoS₂ 含量对纤维织物复合材料摩擦磨损性能的影响。可以看出, 填充 MoS₂ 极大地降低了纤维织物复合材料的磨损率, 而对摩擦系数的影响不大。随着 MoS₂ 含量的增加, 摩擦系数和磨损率均呈现先减小后增大的趋势。这可能是由于增加 MoS₂ 用量时, MoS₂ 粉体在复合材料中极易发生团聚, 在摩擦过程中, 由团聚点引起的微观缺陷导致复合材料耐磨性能的降低。在 MoS₂ 质量分数为 5% 时, 复合材料的摩擦系数和磨损率达到最小, 为最佳填充含量。

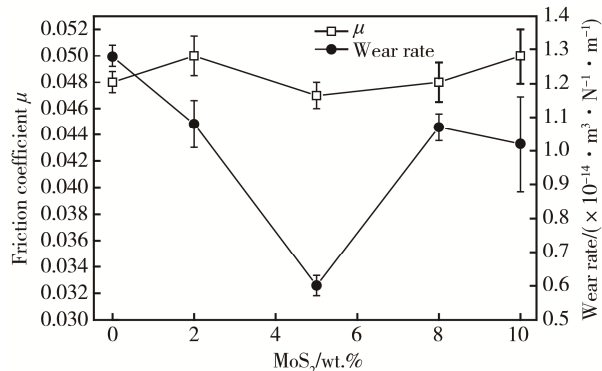


图 1 PTFE/棉纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率随 MoS₂ 含量的变化 (219.52 N, 0.26 m/s)

Fig.1 Variations of tribological coefficient and wear rate with the content of MoS₂ in PTFE/cotton fabric composites (219.52 N, 0.26 m/s)

图 2 为石墨含量对纤维织物复合材料摩擦磨损性能的影响。可以看出, 石墨的填充有效地降低了磨损率, 摩擦系数有所增大。随着石墨填充量的增大, 磨损率不断降低, 当石墨填充量为 10% 时, 磨损率从 $1.17 \times 10^{-14}\ \text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降低至 $0.686 \times 10^{-14}\ \text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 达到最小。继续增大石墨填充量, 磨损率反而增大。总体来说, 填充 10% 的石墨具有较好的摩擦学性能。

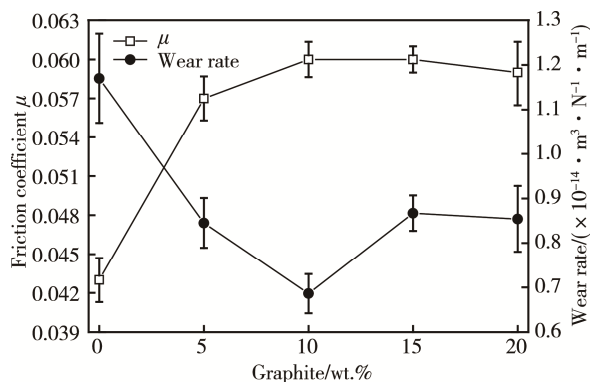
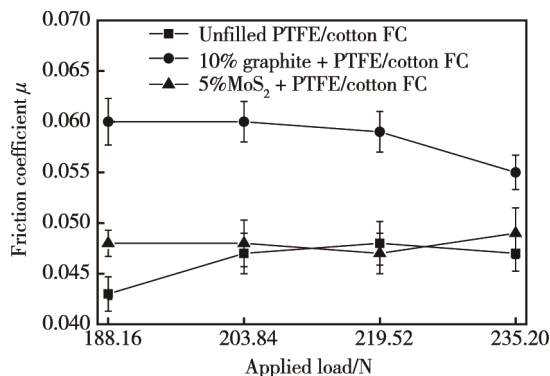


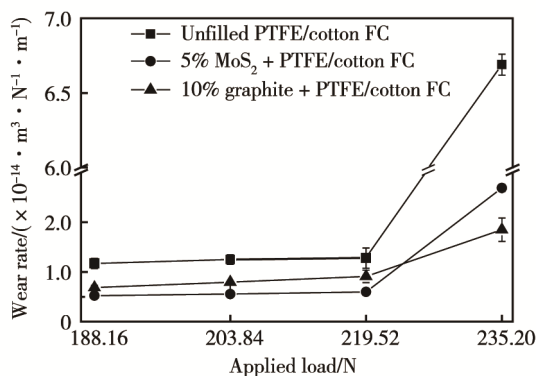
图2 PTFE/棉纤纤维织物复合材料的摩擦系数和磨损率随石墨含量的变化 (219.52 N, 0.26 m/s)

Fig.2 Variations of tribological coefficient and wear rate with the content of graphite in PTFE/cotton fabric composites (219.52 N, 0.26 m/s)

图3为未填充及填充改性PTFE/棉纤纤维织物复合材料摩擦磨损性能与载荷的关系曲线。在188.16~235.20 N载荷条件下,用 MoS_2 和石墨填充改性PTFE/棉纤纤维复合材料,均可以有效地降低复合材料的磨损率。但填充石墨增大了复合材料的摩擦系数,填充 MoS_2 则对复合材料的摩擦系数影响不大。对于未填充的PTFE/棉纤纤维织物复合材料而言,随着载荷的增大,摩擦系数变化不大,而磨损率随载荷的增大逐渐增大。当载荷低于219.52 N时,磨损率



a 摩擦系数与载荷的关系曲线



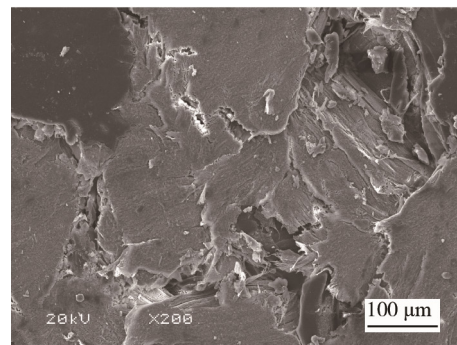
b 磨损率与载荷的关系曲线

图3 未填充及填充改性PTFE/棉纤纤维织物复合材料摩擦系数和磨损率随载荷的变化曲线

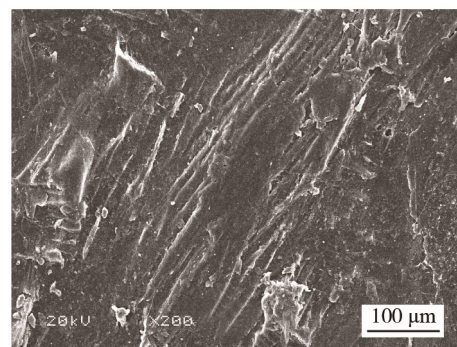
Fig.3 Variation of tribological coefficient and wear rate with load for three PTFE/cotton fabric composites

增大较缓慢;载荷高于219.52 N时,磨损率增大迅速。对于 MoS_2 填充和石墨填充的PTFE/棉纤纤维织物复合材料,其摩擦系数和磨损率随载荷的变化趋势与未填充的相似。当载荷为235.20 N时,3种复合材料的磨损率均很高,这是由于较高的载荷在摩擦过程中会产生大量的摩擦热且不易散去,引起摩擦表面的温度瞬间升高,这对复合材料的整体结构具有极大的分解和破坏力,引起复合材料失效。

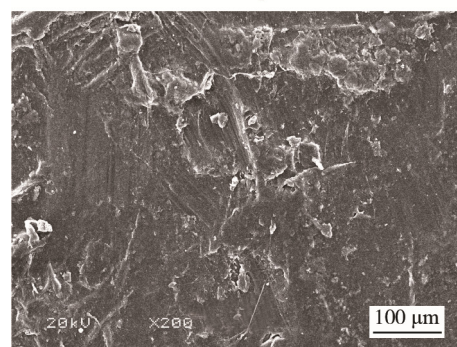
图4是3种PTFE/棉纤纤维织物复合材料在235.2 N载荷下的磨损表面的SEM照片。从图4可以看出,纯PTFE/棉纤纤维复合材料的磨损较严重(图4a),大量的纤维被拔出并露出磨损表面,这与其较差的抗磨性能相对应。而 MoS_2 填充的PTFE/棉纤纤维复合材料则呈现了表面塑性变形,有少量纤维



a 未填充



b 5% MoS_2 填充



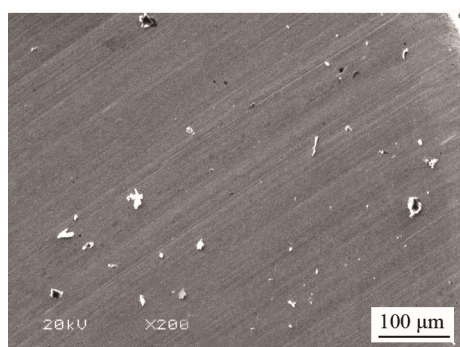
c 10%石墨填充

图4 MoS_2 和石墨填充的PTFE/棉纤纤维织物复合材料磨损表面的SEM照片 (235.2 N, 2 h)

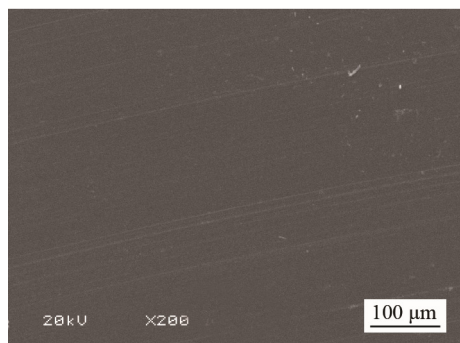
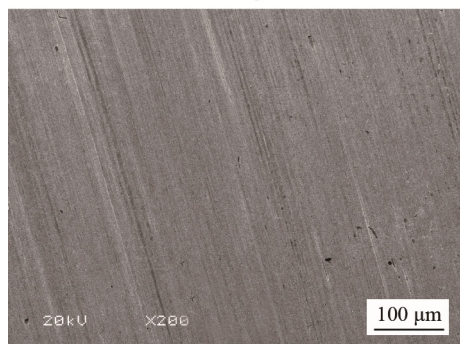
Fig.4 SEM images of the worn surfaces of MoS_2 and graphite filled PTFE/cotton fabric composites (235.2 N, 2 h)

暴露于表面 (图 4b)。石墨填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料的磨损表面较平整, 磨损较前两种纤维织物复合材料轻, 暴露的纤维较少 (图 4c)。可能的原因是: 石墨和 MoS_2 的填充减轻了磨粒的嵌入和切削作用, 阻碍了复合材料的磨损, 从而使 PTFE/棉纤维织物复合材料的耐磨性提高。但在较高载荷下, 石墨的润滑效果较明显。

图 5 是 3 种 PTFE/棉纤维织物复合材料在 235.2 N 载荷下, 对偶件表面转移膜的 SEM 照片。未填充 PTFE/棉纤维织物复合材料在偶件表面形成的转移膜较粗糙且不连续 (图 5a), 这说明未填充 PTFE/棉纤维织物复合材料在对偶面形成的转移膜与对偶表面的结合很弱, 在摩擦过程中, 转移膜容易脱落。



a 未填充

b 5% MoS_2 填充

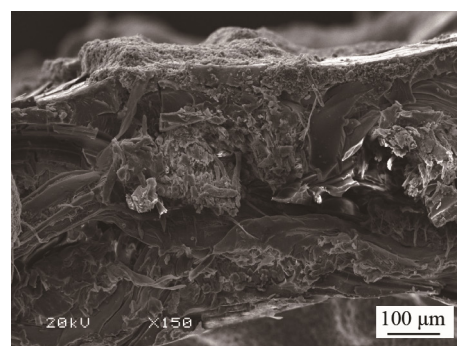
c 10%石墨填充

图 5 未填充和填充 PTFE/棉纤维织物复合材料在偶件表面转移膜的 SEM 照片 (235.2 N, 2 h)

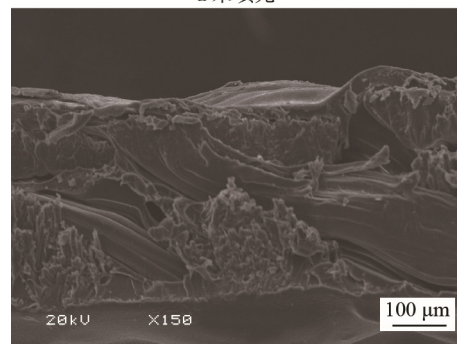
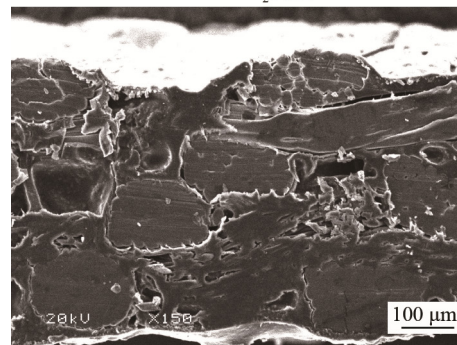
Fig.5 SEM images of transfer films of three pins: a. unfilled PTFE/cotton fabric composites, b. 5% MoS_2 filled, and c. 10% graphite filled (235.2 N, 2 h)

首先, 转移膜脱落后, 金属偶件对复合材料表面的犁削作用增大; 其次, 脱落的转移膜在摩擦副之间以磨屑的形式存在, 增加了复合材料的磨粒磨损。5% MoS_2 填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料在偶件表面形成的转移膜较薄但不是很连续 (图 5b), 而 10% 石墨填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料在偶件表面形成的转移膜薄且连续 (图 5c), 使复合材料与金属对偶件的摩擦转化为复合材料与转移膜之间的摩擦, 从而提高了 PTFE/棉纤维织物复合材料的耐磨性能。

图 6 给出了 MoS_2 和石墨填充 PTFE/棉纤维织物复合材料界面的 SEM 照片。可知未填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料的整体结构较差 (图 6a), 界面存在大量的空洞和裂痕, 树脂和纤维的结合较差,



a 未填充

b 5% MoS_2 填充

c 10%石墨填充

图 6 未填充和填充 PTFE/棉纤维织物复合材料界面的 SEM 照片

Fig.6 SEM images of the cross section of: a unfilled PTFE/cotton fabric composites, b 5% MoS_2 filled, and c 10%graphite filled

这导致未填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料具有较差的抗磨减摩能力。而 5% MoS₂ 填充 PTFE/棉纤维织物复合材料的整体结构有所加强 (图 6b), 空洞和裂痕减少, 树脂和纤维结合得到改善, 这使得 MoS₂ 填充 PTFE/棉纤维织物复合材料的摩擦学性能得到提高。10% 石墨填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料的整体结构较前两种更紧密 (图 6c), 空洞和裂痕明显减少, 树脂和纤维结合也较好, 这保证了石墨填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料在较高载荷下也具有较好的抗磨能力。

3 结论

1) 填充 MoS₂ 和石墨均可改善 PTFE/棉纤维织物复合材料的抗磨损性能。二者的质量分数分别为 5% 和 10% 时, PTFE/棉纤维织物复合材料具有较好的摩擦学性能。

2) 载荷对 MoS₂ 和石墨填充的 PTFE/棉纤维织物复合材料具有不同的影响。填充 MoS₂ 的 PTFE/棉纤维织物复合材料在较低载荷下有较好的抗磨性能, 而填充石墨的 PTFE/棉纤维织物复合材料在较高载荷下具有较好的抗磨性能。

参考文献:

- [1] 陈淑华, 宫秋苓, 张双定. PTFE 固体润滑膜及其应用现状[J]. 表面技术, 1995, 24(3): 1-3.
CHEN Shu-hua, GONG Qiu-ling, ZHANG Shuang-ding. PTFE Solid Lubricating Film and Its Application Status [J]. Surface Technology, 1995, 24(3): 1-3.
- [2] 张招柱, 沈维长, 赵家政. 几种 PTFE 基自润滑复合材料轴承在油润滑条件下的摩擦学特性[J]. 摩擦学学报, 1993, 13(3): 228-237.
ZHANG Zhao-zhu, SHEN Wei-chang, ZHAO Jia-zheng. Tribological Properties of Various PTFE-based Dry Bearing under Oil Lubrication[J]. Tribology, 1993, 13(3): 228-237.
- [3] BRAMHAM R W, KING R B, LANCASTER J K. The Wear of PTFE-containing Dry Bearing Liners Contaminated by Fluids[J]. ASME Trans, 1981, 24: 479-489.
- [4] SINA E. 7-Properties, Characteristics, and Applications of Expanded PTFE (ePTFE) Products[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017: 163-170.
- [5] 冯新, 汪怀远, 王昌松, 等. 钛酸钾晶须增强聚四氟乙烯复合材料性能的研究[J]. 材料科学与工艺, 2006(14): 312-315.
FENG Xin, WANG Huai-yuan, WANG Chang-song, et al. A Study on the Properties of the Potassium Titanate Whiskers-PTFE Composites[J]. Materials Science and Technology, 2006(14): 312-315.
- [6] 蔡立芳, 黄承亚, 易荣. Ekonol/石墨/MoS₂ 填料对 PTFE 力学和摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2006(1): 83-86.
CAI Li-fang, HUANG Cheng-ya, YI Rong. The Influences of Ekonol/Graphite/MoS₂ on Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene[J]. Lubrication Engineering, 2006(1): 83-86.
- [7] LI F, HU K A, LI J L, et al. The Friction and Wear Characteristics of Nanometer ZnO Filled Polytetrafluoroethylene[J]. Wear, 2002, 249: 877-882.
- [8] LI X, GAO Y, XING J, et al. Wear Reduction Mechanism of Graphite and MoS₂ in Epoxy Composites[J]. Wear, 2004, 257: 279-283.
- [9] BASAVARAJAPPA S, ELLANGOVA S, ARUN K V. Studies on Dry Sliding Wear Behavior of Graphite Filled Glass-epoxy Composites[J]. Material Design, 2009, 30: 2670-2675.
- [10] GONG D L, XUE Q J, WANG H L. Study of the Wear of Filled Polytetrafluoroethylene[J]. Wear, 1989, 134: 283-295.
- [11] WANG J, GU M, BAI S, et al. Investigation of the Influence of MoS₂ Filler on the Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced Nylon 1010 Composites[J]. Wear, 2003, 255: 774-779.
- [12] HITONOBU K, KATSUYUKI K, KOSHIRO M, et al. Wear of Hybrid Radial Bearings (PEEK Ring-PTFE Retainer and Alumina Balls) under Dry Rolling Contact[J]. Tribology International, 2015, 90: 77-83.
- [13] 苏峰华, 张招柱, 王坤, 等. MoS₂ 和 PTFE 改性碳纤维织物复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 338-342.
SU Feng-hua, ZHANG Zhao-zhu, WANG Kun, et al. Friction and Wear Properties of Carbon Fabric Composites Filled with PTFE and MoS₂[J]. Tribology, 2005, 25(4): 338-342.
- [14] SU F H, ZHANG Z Z, GUO F, et al. Effects of Solid Lubricants on Friction and Wear Properties of Nomex Fabric Composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 424: 333-339.
- [15] LI W B, HUANG J F, FEI J, et al. Effect of Aramid Pulp on Improving Mechanical and Wet Tribological Properties of Carbon Fabric/Phenolic Composites[J]. Tribology International, 2016, 104: 237-246.
- [16] YUAN J Y, ZHANG Z Z, YANG M M, et al. Surface Modification of Hybrid-fabric Composites with Amino Silane and Polydopamine for Enhanced Mechanical and Tribological Behaviors[J]. Tribology International, 2017, 107: 10-17.