第 16 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 4
1999 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1999

金属硫化物及石墨填充 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能研究

张招柱 薛群基 刘维民 沈维长
(中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑开放研究实验室, 兰州 730000)

摘 要 利用MHK-500 型环-块磨损试验机, 对MoS_2、CuS、PbS 及石墨(添加量均为 30 vol%)填充的聚四氟乙烯(PTFE)复合材料在干摩擦条件下与 GCr15 轴承钢对摩时的摩擦磨损性能进行了较为系统的研究, 并利用扫描电子显微镜(SEM)和光学显微镜对 PTFE 复合材料的磨屑和摩擦磨损表面进行了观察。结果表明, 添加石墨降低了 PTFE 的摩擦系数, 而添加MoS_2、CuS 及 PbS 则增大了 PTFE 的摩擦系数; 同时, 添加MoS_2、CuS、PbS 及石墨均可将 PTFE 的磨损量降低 2 个数量级, 其中以 PbS 的减磨效果为最好, 而MoS_2 的减磨效果则最差。

关键词 PTFE 复合材料, 金属硫化物及石墨, 摩擦磨损, 摩擦表面
中图分类号 TB332

众所周知, PTFE 摩擦系数低、化学及热稳定性良好, 是一种特别适合于滑动部件应用的聚合物材料。然而, PTFE 磨损率高, 机械强度低, 在外力作用下有较大的粘弹性变形, 这些缺点限制了 PTFE 在实际中的应用。人们发现, 添加填料可大幅度降低 PTFE 的磨损, 提高 PTFE 复合材料的耐磨性[1~5]。石墨及金属硫化物MoS_2、CuS、PbS 等是一类重要的固体润滑剂和聚合物填料。但是, 有关金属硫化物及石墨填充 PTFE 复合材料摩擦磨损性能及其减磨机理的研究目前还不够系统深入。本文作者利用MHK-500 型环-块磨损试验机, 对金属硫化物及石墨填充 PTFE 复合材料在干摩擦条件下的摩擦磨损性能进行了较为系统的研究, 并利用 SEM 和光学显微镜对 PTFE 复合材料的磨屑及其摩擦磨损表面进行了观察, 进而对 PTFE 复合材料的摩擦磨损机理进行了探讨。

1 实 验

1.1 原料及样品制备

制备 PTFE 复合材料的原料有: PTFE 粉(粒度为 30 μm)、石墨(GR)、MoS_2、CuS 和 PbS(粒度小于 76 μm)。本实验制备了 PTFE, PTFE + 30 vol% 石墨(GR), PTFE + 30 vol% MoS_2, PTFE + 30 vol% CuS 和 PTFE + 30 vol% PbS 五种 PTFE 复合材料(样品尺寸均为 12.3 mm × 12.3 mm × 18.9 mm), 其表面用 800 号水砂纸抛光打磨(R_a = 0.2~0.4 μm)。对偶环为 GCr15 轴承钢(外径 49.2 mm, 宽度 13.0 mm), 其表面用 900 号水砂纸抛光打磨(R_a = 0.15 μm)。

收修改稿、初稿日期: 1998-08-24, 1998-05-29

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2　性能测试及评价方法

摩擦磨损性能评价在MHK-500 型环-块磨损试验机 (Timken 试验机) 上进行。每次试验前, 将样品及对偶环表面用丙酮棉球擦洗干净, 并置于空气中晾干。每个摩擦磨损试验的时间均为 30 min。在室温干摩擦的条件下, 分别考察了负荷及滑动速度对金属硫化物及石墨填充PTFE 复合材料摩擦磨损性能的影响。磨损量以试验前后样品的重量差计。通过测量摩擦力矩, 进而计算出摩擦系数。摩擦系数取稳定摩擦阶段(后 10 min) 内的平均值。最后, 利用JEM-1200EX/S 分析电子显微镜及光学显微镜, 对 PTFE 复合材料的磨屑、磨损表面及其在 GCr15 轴承钢表面的转移膜进行了考察。

2　结果及讨论

2.1 摩擦磨损性能

表 1 给出了摩擦磨损的试验结果。由表 1 可见, 添加石墨降低了 PTFE 的摩擦系数, 而添加MoS_2、CuS 和 PbS 则不同程度地增大了 PTFE 的摩擦系数。在MoS_2、CuS 和 PbS 填充的 PTFE 复合材料中, PTFE+ 30 vol% MoS_2 复合材料的摩擦性能最好, PTFE+ 30 vol%CuS 复合材料的摩擦性能则最差。表 1 的结果也表明, 添加石墨、MoS_2、CuS 和 PbS 均可将 PTFE 的磨损量降低 2 个数量级, 其中以 PbS 的减磨效果为最好, 而MoS_2 的减磨效果则最差。

表 1　PTFE 复合材料的摩擦磨损试验结果 (速度, 1.5 m/s; 负荷, 100 N)

Table 1　The tested results of the friction and wear of PTFE composites (speed, 1.5 m/s; load, 100 N)

Material (con./vol%)	Friction coefficient	Wear/mg
PTFE	0.257	385.4
PTFE+ 30 GR	0.245	5.8
PTFE+ 30 MoS_2	0.284	8.8
PTFE+ 30 PbS	0.395	3.3
PTFE+ 30 CuS	0.454	4.4

图 1 给出了摩擦系数随负荷的变化曲线。由图 1 可见, 复合材料的摩擦系数基本上随负荷的增大而减小。但是, 当负荷高于 300 N 后, CuS 填充 PTFE 复合材料的摩擦系数却随负荷的增大而增大。在 100～400 N 的负荷范围内, PTFE+ 30 vol% 石墨复合材料的摩擦性能最好, 而 PTFE+ 30 vol% CuS 复合材料的摩擦性能则最差。

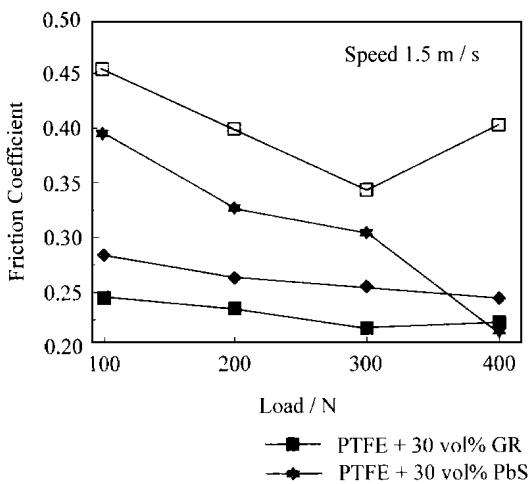


图 1　金属硫化物及石墨填充PTFE 复合材料的摩擦系数随负荷的变化曲线

Fig. 1　Variations of friction coefficients with load for metal sulfides and graphite filled PTFE composites

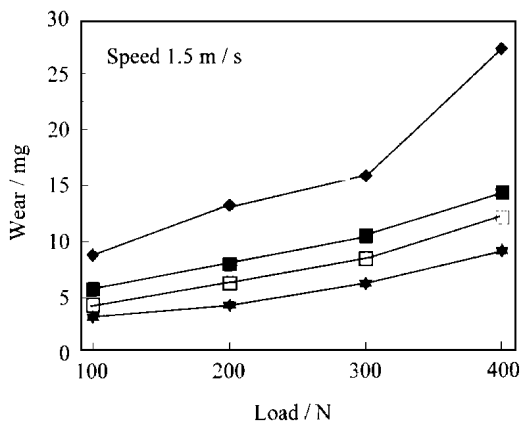


图 2　金属硫化物及石墨填充PTFE 复合材料的磨损量随负荷的变化曲线

Fig. 2　Variation of wear with load for metal sulfides and graphite filled PTFE composites

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 2 给出了磨损量随负荷的变化曲线。可以看出, PTFE 复合材料的磨损量均随负荷的增大而增大。在不同的负荷条件下, PTFE+ 30 vol% PbS 复合材料的耐磨性最好, 而 PTFE+ 30 vol% MoS_2 复合材料的耐磨性则最差。

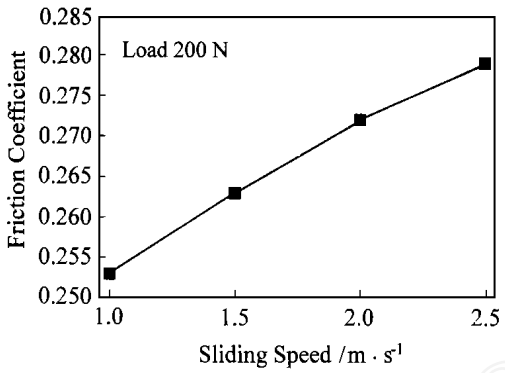


图 3 PTFE+ 30 vol%MoS_2 复合材料的摩擦系数随滑动速度的变化曲线

Fig. 3 Variation of friction coefficient with sliding speed for the PTFE+ 30 vol% MoS_2 composite

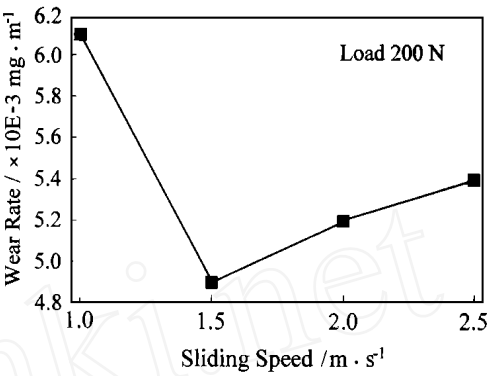
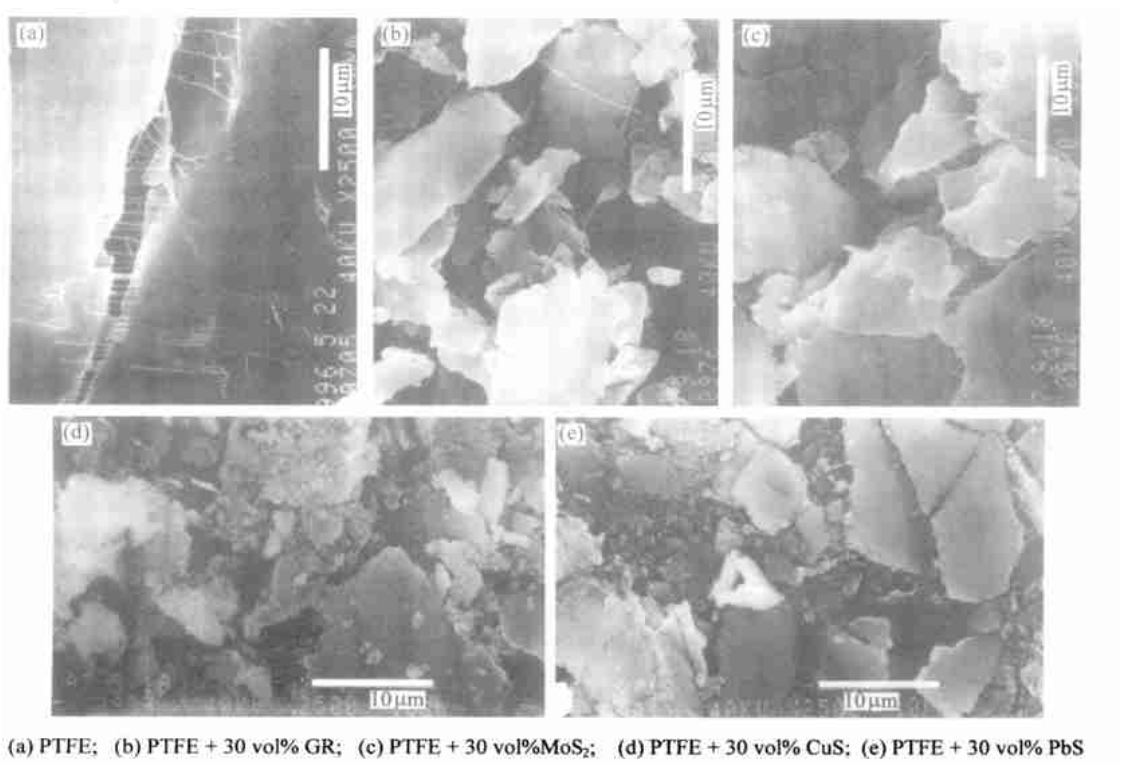


图 4 PTFE+ 30 vol%MoS_2 复合材料的磨损率随滑动速度的变化曲线

Fig. 4 Variation of wear rate with sliding speed for the PTFE+ 30 vol%MoS_2 composite



(a) PTFE; (b) PTFE + 30 vol% GR; (c) PTFE + 30 vol%MoS_2; (d) PTFE + 30 vol% CuS; (e) PTFE + 30 vol% PbS

图 5 PTFE 复合材料磨屑的 SEM 照片 (速度 1.5 m/s, 负荷 100 N)

Fig. 5 SEM micrographs of the wear debris of the PTFE composites (speed 1.5 m/s, load 100 N)

图 3 和图 4 分别给出了 PTFE+ 30 vol% MoS_2 复合材料的摩擦系数及磨损率随滑动速度的变化曲线。可以看出, 该体系的摩擦系数随滑动速度的增大而增大; 但其磨损率却先随滑动速度的增大而减小, 然后又随滑动速度的增大而增大。所以, PTFE+ 30 vol% MoS_2 复合材

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

料不宜在高速高负荷的条件下应用。

2.2　磨屑的 SEM 分析

图 5 是各试样磨屑的 SEM 照片。可以看出, 纯 PTFE 的磨屑为大片状, 而且发生了比较明显的 PTFE 拉丝现象; 而MoS_2、CuS、PbS 及石墨填充 PTFE 复合材料的磨屑虽然也都呈片状, 但其磨屑的尺寸都比较小。结合磨损试验的结果分析认为,MoS_2、CuS、PbS 及石墨阻止了 PTFE 带状结构的大面积破坏, 使其由纯 PTFE 的大片状磨屑变为复合材料的小磨屑, 从而大大降低了 PTFE 复合材料的磨损[5, 6]。在这 4 种填充 PTFE 复合材料的磨屑中, CuS 和 PbS 填充 PTFE 复合材料的磨屑要比MoS_2 及石墨填充 PTFE 复合材料的小, 这说明 CuS 和 PbS 的减磨效果优于MoS_2 和石墨。

2.3　磨损表面的 SEM 分析

摩擦磨损试验中发现, 在给定的条件下, 填充 PTFE 复合材料磨损表面磨痕的宽度和深度均远小于纯 PTFE。图 6 给出的是MoS_2、CuS、PbS 及石墨填充 PTFE 复合材料磨损表面的 SEM 照片。可以看出, 在纯 PTFE 磨损表面的大磨痕内仍然有明显的小磨痕, 而填充 PTFE 复合材料磨损表面磨痕的宽度均小于 PTFE。同时, CuS 及 PbS 填充 PTFE 复合材料磨损表面磨痕的宽度要比MoS_2 及石墨填充 PTFE 复合材料的小。这说明MoS_2、CuS、PbS 及石墨均可大幅度降低 PTFE 的磨损, 提高 PTFE 复合材料的耐磨性; 且 CuS 和 PbS 的减磨效果优于MoS_2 和石墨。

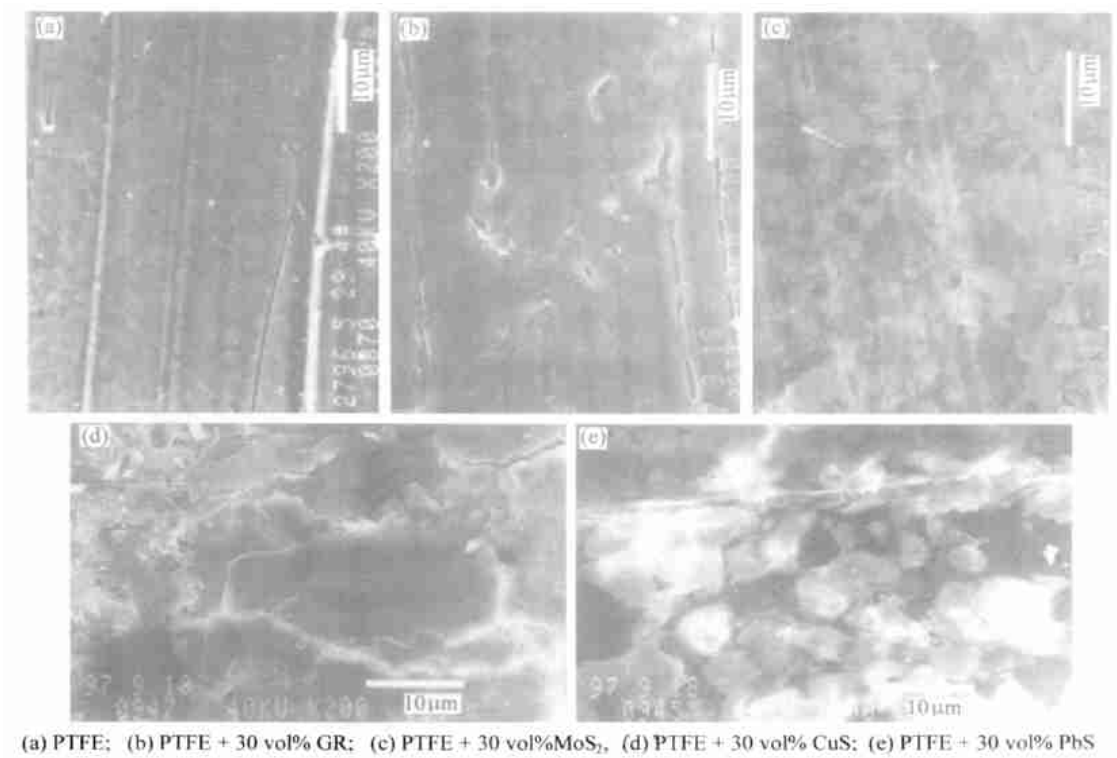


图 6　PTFE 复合材料磨损表面的 SEM 照片 (速度 1.5 m/s, 负荷 100 N)

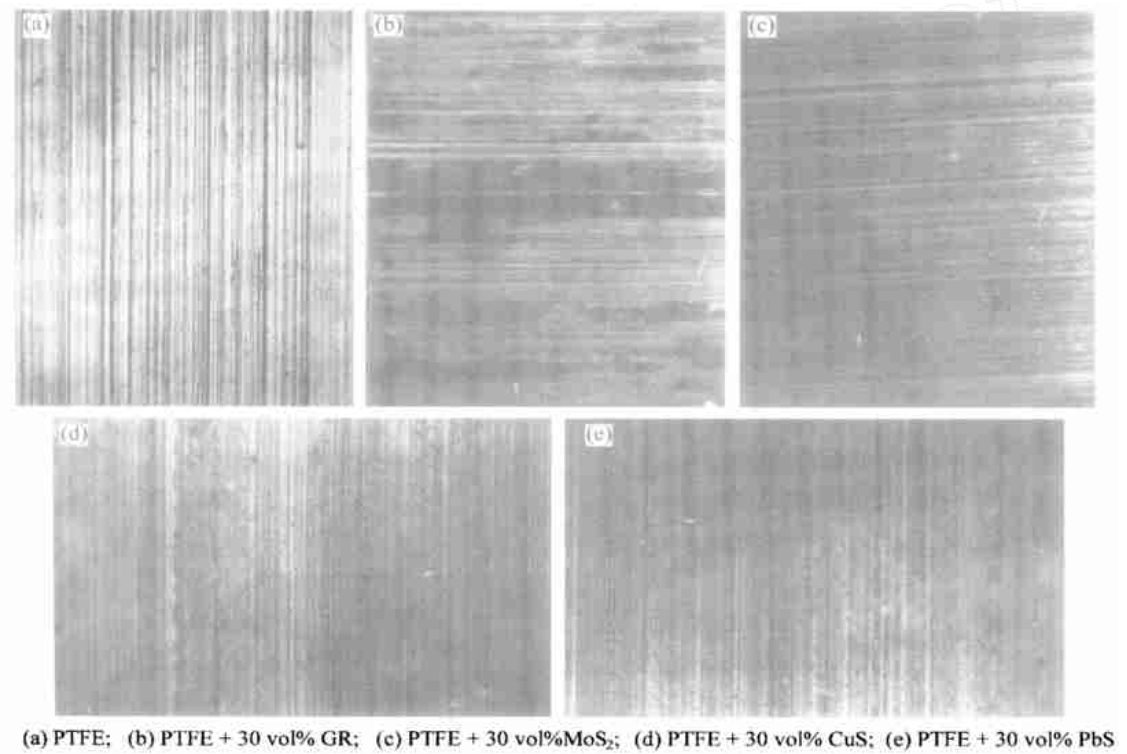
Fig. 6　SEM micrographs of the worn surfaces of the PTFE composites (speed 1.5 m/s, load 100 N)

2.4　转移膜的光学显微镜分析

图 7 给出的是 PTFE 复合材料在 GCr15 轴承钢表面转移膜的光学显微照片。可以看出, 纯 PTFE 在 GCr15 轴承钢表面没有形成明显的转移膜, 而填充的 PTFE 复合材料则均在

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

GCr15 轴承钢表面形成了明显的转移膜。结合磨损试验的结果分析认为,MoS_2, CuS, PbS 及石墨填充增强了转移膜与对偶表面间的结合力, 促进了复合材料向对偶表面的转移, 从而大幅度地降低了 PTFE 复合材料的磨损[7,8]。从图 7 的结果也可以看出, 石墨填充 PTFE 复合材料在 GCr15 轴承钢表面的转移膜最厚, 这说明石墨填充 PTFE 复合材料更易于在 GCr15 轴承钢表面形成转移膜, 从而将 PTFE 复合材料与 GCr15 轴承钢间的摩擦转化为与其在 GCr15 轴承钢表面转移膜间的摩擦。所以, 石墨填充 PTFE 复合材料的摩擦性能优于其它三种复合材料的摩擦性能。对 MoS_2, CuS 和 PbS 填充的 PTFE 复合材料而言,MoS_2 填充 PTFE 复合材料在 GCr15 轴承钢表面转移膜的均匀性要比 CuS 和 PbS 填充 PTFE 复合材料的好, 因而 MoS_2 填充 PTFE 复合材料的摩擦性能优于 CuS 和 PbS 填充 PTFE 复合材料的摩擦性能。



(a) PTFE; (b) PTFE + 30 vol% GR; (c) PTFE + 30 vol%MoS_2; (d) PTFE + 30 vol% CuS; (e) PTFE + 30 vol% PbS

图 7 PTFE 复合材料在 GCr15 轴承钢表面转移膜的光学显微照片 (128×) (速度 1.5 m/s, 负荷, 100 N)

Fig. 7 Optical micrographs of the transfer films of the PTFE composites formed on the surface of GCr15-bearing steel (128×) (speed 1.5 m/s, load 100 N)

3 结 论

(1) 添加石墨降低了 PTFE 的摩擦系数, 而添加 MoS_2、CuS 和 PbS 则增大了 PTFE 的摩擦系数。但是, 添加石墨、MoS_2、CuS 和 PbS 均可将 PTFE 的磨损量降低 2 个数量级, 其中以 PbS 的减磨效果为最好, 而 MoS_2 的减磨效果则最差。

(2) 在本试验给定的条件下, 石墨、MoS_2、CuS 和 PbS 填充 PTFE 复合材料的摩擦系数基本上随负荷的增大而减小, 但其磨损量却均随负荷的增大而增大。同时, PTFE + 30 vol% MoS_2 复合材料的摩擦系数随滑动速度的增大而增大; 但其磨损率却先随滑动速度的增大而减小, 然后又随滑动速度的增大而增大。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3) MoS_2、CuS、PbS 和石墨不仅阻止了 PTFE 带状结构的大面积破坏, 改变了磨屑的形成机理, 而且增强了转移膜与对偶表面间的结合力, 促进了复合材料向对偶表面的转移, 从而大幅度地降低了 PTFE 复合材料的磨损。

参 考 文 献

1 Bahadur S, Gong D. The action of fillers in the modification of the tribological behavior of polymers. *Wear*, 1992, 158: 41～59

2 Gong D, Xue Q, Wang H. Study of the wear of filled PTFE. *Wear*, 1989, 134: 283～295

3 Gong D, Zhang B, Xue Q, Wang H. Investigation of adhesion wear of filled PTFE by ESCA, AES and XRD. *Wear*, 1990, 137: 25～29

4 Lancaster J K. Composites for increased wear resistance: current achievements and future prospects. In: William R L ed. New Directions in Lubrication, Materials, Wear and Surface Interactions. New Jersey: Noys Publications, 1985. 320～353

5 Tanaka K, Kawakami S. Effects of various fillers on the friction and wear of PTFE-based composites. *Wear*, 1982, 79: 221～234

6 Tanaka K. Transfer of semicrystalline polymers sliding against a smooth steel surface. *Wear*, 1982, 75: 183～199

7 Bahadur S, Tabor D. The wear of filled PTFE. *Wear*, 1984, 98: 1～13

8 Briscoe B J, Tabor D. The sliding wear of polymers. In: Suh N P, Saka N, eds. Fundamental of Tribology. Cambridge: MIT Press, 1980. 733～758

STUDY ON FRICTION AND WEAR PROPERTIES OF METAL SULFIDES AND GRAPHITE FILLED PTFE COMPOSITES

Zhang Zhaozhu　　Xue Qunji　　Liu Weimin　　Shen Weichang

(Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract　The friction and wear properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites filled with MoS_2, CuS, PbS, and graphite (addition quantity is 30 vol% in volume fraction) sliding against GCr15 bearing steel under dry friction conditions were studied by using an MHK-500 ring-block wear tester (Timken wear tester), then the wear debris and the frictional surfaces of these PTFE composites were examined by using a scanning electron microscope (SEM) and an optical microscope. Experimental results show that graphite reduces the friction coefficient of the PTFE, but MoS_2, CuS and PbS increase the friction coefficient of the PTFE. Meanwhile, filling PTFE with MoS_2, CuS, PbS, or graphite can reduce the wear of PTFE by 2 orders of magnitude, but the wear-reducing action of PbS is the most effective, while that of MoS_2 is the worst. SEM and optical microscope investigations show that the MoS_2, CuS, PbS, and graphite not only prevent the banded structure of PTFE from destruction, but also enhance the adhesion of the transfer films to the counterfaces, so they greatly reduce the wear of the PTFE.

Key words　PTFE composites, metal sulfides and graphite, friction and wear, frictional surfaces

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net