

WS₂ 薄膜/空间液体润滑剂复合润滑体系 的摩擦学性能研究

权 鑫^{1,2}, 孙嘉奕^{1*}, 翁立军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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 采用射频溅射技术制备了 WS₂ 薄膜, 考察了 WS₂/全氟聚醚(815Z)和 WS₂/聚烯烃取代环戊烷(P201)两种固/液复合润滑体系的真空摩擦学性能. 通过扫描电子显微镜(SEM)、三维表面轮廓仪对磨损表面的微观形貌进行了分析, 采用 X 射线能量色散谱(EDS)和 X 射线光电子能谱(XPS)分析了磨损表面元素的组成和化学状态. 探讨了两种固/液复合润滑体系的摩擦磨损特性和失效机理. 结果表明: WS₂/815Z 复合润滑体系中, 二者相容性较差, 摩擦系数较高、波动较大, 且表现出较高的磨损率; WS₂ 薄膜与 P201 的相容性较好, 组成的复合润滑体系表现出较低且平稳的摩擦系数和较低的磨损率, 具有良好的协同效应.

关键词: WS₂ 薄膜; 全氟聚醚; 聚烯烃取代环戊烷; 固/液复合润滑体系; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2014)06-0665-08

Tribological Properties of WS₂ Film /Liquid Lubricants Composite Lubrication System

QUAN Xin^{1,2}, SUN Jia - yi^{1*}, WENG Li - jun¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The tribological properties of WS₂ film/ perfluoropolyether (815Z) and WS₂/ poly - α - olefin substituted cyclopentane (P201) composite lubrication systems were investigated by a vacuum ball - on - disk tribometer. The morphology, element composition and chemical state of the worn surfaces were examined by scanning electron microscopy, Micro - XAM 3D profilometer, energy dispersive spectrometry and X - ray photoelectron spectroscopy. The friction and wear mechanisms of the composite systems were also studied. It can be found that P201 showed the synergistic effect with the WS₂ film, comparing with the poor compatibility of 815Z with the WS₂ film. As a result, WS₂/815Z lubrication system exhibited fluctuant friction coefficient and high wear rate, while WS₂/P201 lubrication system had steady and low friction coefficient, and long lubrication life.

Key words: WS₂ film, perfluoropolyether, poly - α - olefin substituted cyclopentane, composite lubrication system, friction and wear

Received 6 January 2014, revised 27 May 2014, accepted 1 July 2014, available online 28 November 2014.

* Corresponding author. E - mail: sunjy@lzb.ac.cn, Tel: +86 - 931 - 4968092.

The project was supported by the National Key Basic Research Program of China (973) (2013CB632302).

国家重点基础研究发展规划项目(973) (2013CB632302)资助.

航天事业的快速发展对空间润滑技术提出了更高的要求^[1-4]. 近年来, 一种新型润滑方法——固体/液体复合润滑方法引起了国内外学者的关注. 初步研究表明, 相对于传统的固体润滑或液体润滑方法, 某些固体/液体复合润滑体系表现出更好的润滑稳定性和更长的耐磨寿命. Erdemir A 等考察了多种固体/液体复合润滑体系的摩擦学性能, 发现 Ag/聚酯合成油复合润滑体系对两种不同的摩擦副均具有明显的减摩作用^[5-7]. 有研究表明, DLC、MoS₂、TiC/a-C:H 等薄膜和某些液体润滑剂、润滑脂所组成的复合润滑体系中, 部分复合润滑体系的摩擦学性能相对于单纯的固体或液体润滑剂有明显改善, 产生了很好的协同效应^[8-10]. 如 DLC 薄膜与 KK-4、KK-5、KK-P(201) 和 601EF 等润滑脂组成的复合润滑体系与 DLC 薄膜相比, 其减摩性能得到不同程度的改善, 摩擦系数降低 2~6 倍, 耐磨寿命提高了 10 多倍, 起到了明显的延寿作用; MoS₂ 和氟丙基氯苯基硅油组成的复合体系的摩擦系数低而平稳, 其耐磨损寿命与单独 MoS₂ 薄膜相比提高了 8 倍以上; TiC/a-C:H 薄膜和多烷基环戊烷组成的固体/液体复合润滑体系也表现出了很好的摩擦学性能. 此外, 也有关于固/液复合润滑技术在空间技术领域成功应用的报道. 如美国国家航空航天局(NASA)报道的 MoS₂-TiC/PFPE 固体涂层/液体润滑剂复合润滑体系、黏结固体润滑涂层与润滑脂复合体系等具有良好的摩擦学性能, 已在空间运动部件上获得了成功的应用^[11-12]. 综上所述可见, 此领域的研究工作已引起了人们的广泛关注, 但相关研究工作较分散, 并且对其润滑机理尚缺乏深入的认识. 特别是针对空间环境条件下, 空间润滑材料组成的固体/液体复合润滑体系的摩擦学特性及其润滑机理的研究报道更少.

本文作者采用在真空环境条件下具有低摩擦特性的 WS₂ 薄膜与空间用全氟聚醚和聚烯烃取代环戊烷分别组成复合润滑体系, 对其真空摩擦学性能和协同效应进行了研究, 并探讨了复合润滑体系的润滑机理.

1 实验部分

1.1 WS₂ 薄膜的制备

采用射频溅射方法制备 WS₂ 薄膜, 靶材选用 $\phi 81$ mm 的圆柱形 WS₂ 靶(WS₂ 的质量百分数不小于 99.9%). 基底选用 25 mm $\times$ 25 mm 的 9Cr18 钢(硬度约为 HRC60, 抛光至表面粗糙度 R_a 约为

0.03 μ m). 试验前基底在丙酮中超声清洗 3 次(每次 15 min), 干燥后放入镀膜装置内. 采用 JS-450 射频溅射仪制备 WS₂ 薄膜, 镀膜前真空室抽至本底真空优于 5.0×10^{-3} Pa, 最后充入 Ar 气对基底表面进行 Ar 离子清洗, 清洗时间为 10 min, 然后调节工艺参数进行薄膜沉积, 沉积时间为 12 min. 薄膜沉积工艺参数为偏压 -30 V, 射频功率 400 W, 沉积气压 3.0 Pa. 制备的 WS₂ 薄膜表面粗糙度 R_a 约为 0.04 μ m, 厚度约 3.0 μ m.

1.2 固体/液体复合润滑体系的制备

试验选用两种空间润滑油: 全氟聚醚(815Z)和聚烯烃取代环戊烷(P201), 分别取适量旋涂于 WS₂ 薄膜表面以及 9Cr18 钢基材表面, 待润滑油在 WS₂ 薄膜表面和 9Cr18 钢表面均匀铺展, 形成一层厚度不超过 0.5 mm 的油膜, 得到试验用 WS₂/815Z 和 WS₂/P201 样品. 钢基体试样用于液体润滑剂性能评价对照. 两种润滑剂的结构及理化性能如表 1 所示. 其中, 815Z 产自美国 Castrol 公司, P201 为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制备.

表 1 两种润滑剂的理化性能和组成

Table 1 Typical properties and components of two lubricants		
Lubricant	815Z	P201
Average molecular weight	—	1 748
Molecular structure	$\text{CF}_3\text{O}(\text{CF}_2\text{CF}_2\text{O})_m\cdot$ $(\text{CF}_2\text{O})_n\text{CF}_3$	
Viscosity at 40 $^{\circ}\text{C}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	148	147
Viscosity at 100 $^{\circ}\text{C}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	45.0	18.4
Viscosity index	350	140
Density at 20 $^{\circ}\text{C}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1848.0	852.0
Vapor pressure at 20 $^{\circ}\text{C}/\text{Pa}$	5.3×10^{-11}	7.5×10^{-7}

1.3 固体/液体复合润滑体系的浸润性评价

采用 DS100 型接触角测量仪测量 815Z、P201 在 WS₂ 薄膜表面的接触角, 评价两种液体润滑剂对 WS₂ 薄膜的的浸润性. 测量时用微量进样器(1.0 mL) 将润滑剂在距 WS₂ 薄膜表面约 3 mm 处垂直、小心地滴加在薄膜表面, 形成座滴, 液滴体积为 3~5 μ L, 直径为 1~2 mm, 测量时间不超过 1 min, 取 10 次(每次间隔 2 s)接触角的平均值作为该座滴的接触角, 取 5 个座滴的接触角平均值作为该液体在该薄膜表面的接触角. 所有测量均在室温(约 20 $^{\circ}\text{C}$)下进行.

1.4 摩擦学性能测试及表面分析

采用 CZM - 1A 真空球盘摩擦试验机分别考察了 WS₂ 薄膜在干摩擦条件下、steel/steel 摩擦副在油润滑条件下以及两种复合润滑体系的真空摩擦学性能. 摩擦试验中, 对偶球为 $\phi 8\text{ mm}$ G10 级 9Cr18 钢球, 试验温度为室温, 真空度优于 $3.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$, 法向载荷为 3 N. 试验中钢球保持固定, 下试样以 1 000 r/min 匀速转动, 转动半径为 4 mm, 评价试样的摩擦系数和耐磨寿命. 每个试验均重复 3 次, 取其平均值作为试验结果. 摩擦试验结束后, 采用 JSM - 5600LV 扫描电子显微镜 (SEM, 附带 EDS 组件) 观察薄膜磨痕和钢球磨斑表面的微观形貌并进行了组分分析. 通过 PHI - 5702 多功能电子能谱仪分析了磨损表面元素的化学状态, 用非接触三维表面轮廓仪 (MicroXAM 3D) 对薄膜磨痕形貌、深度以及磨损

量进行表征, 复合润滑体系的磨损率 (W) 计算公式如下:

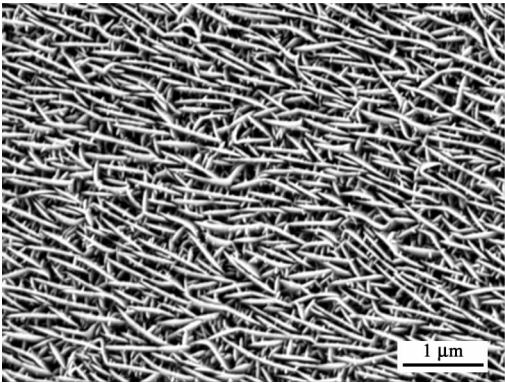
$$W = \frac{V}{F \cdot L}$$

式中: V 表示磨痕的磨损体积, 单位为 mm^3 , F 表示摩擦试验的法向载荷, 单位为 N, L 表示摩擦全长行程, 单位为 m.

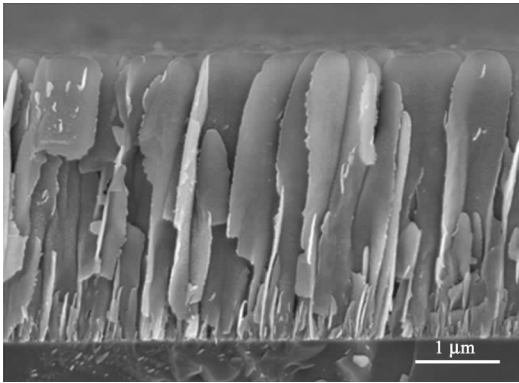
2 结果与讨论

2.1 WS₂ 薄膜的表面形貌

采用场发射扫描电子显微镜表征了 WS₂ 薄膜的表面和断面形貌. 图 1 给出了 WS₂ 薄膜典型的表面和断面的 SEM 照片. 可以看出, 所制备的薄膜呈现出典型的溅射 WS₂ 薄膜特征, 表面为“枝状”形貌, 断面主要为柱状形貌, 靠近基底的部分为致密结构.



(a) Surface



(b) Cross - section

Fig. 1 Typical surface and cross - section SEM micrographs of RF - sputtered WS₂ film

图 1 射频溅射 WS₂ 薄膜表面和断面 SEM 照片

2.2 WS₂ 薄膜在干摩擦条件下的摩擦学性能

图 2 为真空干摩擦条件下 WS₂ 薄膜的摩擦系数随转动圈数的变化曲线, 可以看出 WS₂ 薄膜表现

出一定程度的摩擦噪声, 平均摩擦系数为 0.10, 薄膜经 330 min 的摩擦试验后摩擦系数出现快速增加趋势, 运行 340 min 后超过了 0.20.

试验后对 WS₂ 薄膜的磨痕和对偶钢球表面的微观形貌进行了表征, 结果如图 3 所示. 可以看出, WS₂ 薄膜的磨痕表面较为粗糙且有片状和颗粒状磨屑, 对偶钢球表面可观察到磨屑堆积及较为明显的转移膜. 这表明在摩擦过程中, WS₂ 表现出良好的材料转移特性, 使摩擦副具有较低的摩擦系数.

2.3 固体/液体复合润滑体系的浸润性

图 4 为两种润滑剂在 WS₂ 薄膜表面的接触角测量照片, 815Z 和 P201 在 WS₂ 薄膜表面的接触角分别为 25° 和 33°. 根据杨氏方程 $\cos\theta =$

$$\frac{\sigma_{s-g} - \sigma_{s-l}}{\sigma_{s-l}} (\sigma_{s-g}, \sigma_{s-l} \text{ 和 } \sigma_{l-g} \text{ 分别表示固相与气$$

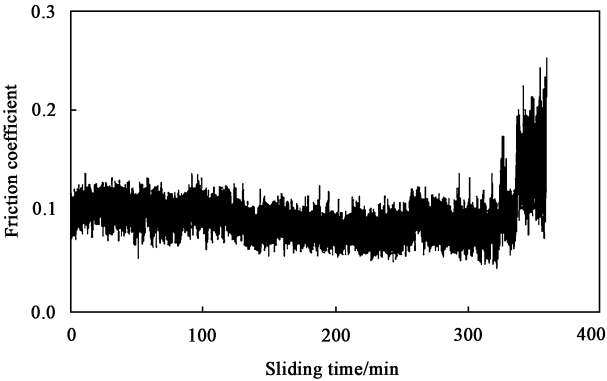


Fig. 2 Typical frictional trace of WS₂ film in vacuum

图 2 WS₂ 薄膜在真空条件下的典型摩擦曲线

相、固相与液相和液相与气相的界面张力),接触角 的大小是判定润湿性能好坏的依据^[13]. 结果表明,2 种液体润滑剂在 WS₂ 薄膜表面均表现出了较好的浸润性. 但 815Z 的接触角小于 P201,说明 815Z 比 P201 更易于在 WS₂ 薄膜表面润湿. 因此, WS₂/815Z 复合润滑体系的浸润性优于 WS₂/P201 复合润滑体系.

2.3 WS₂/815Z、WS₂/P201 复合润滑体系的摩擦学性能

图 5 给出了由 WS₂ 薄膜与两种润滑油组成的固/液复合润滑体系 WS₂/815Z、WS₂/P201 的摩擦曲线. WS₂/815Z 复合体系摩擦噪声较大,且平均摩擦系数随着转动圈数的增加呈较快速递增趋势,并在滑动摩擦进行至 18 min 后摩擦系数突然急剧增大

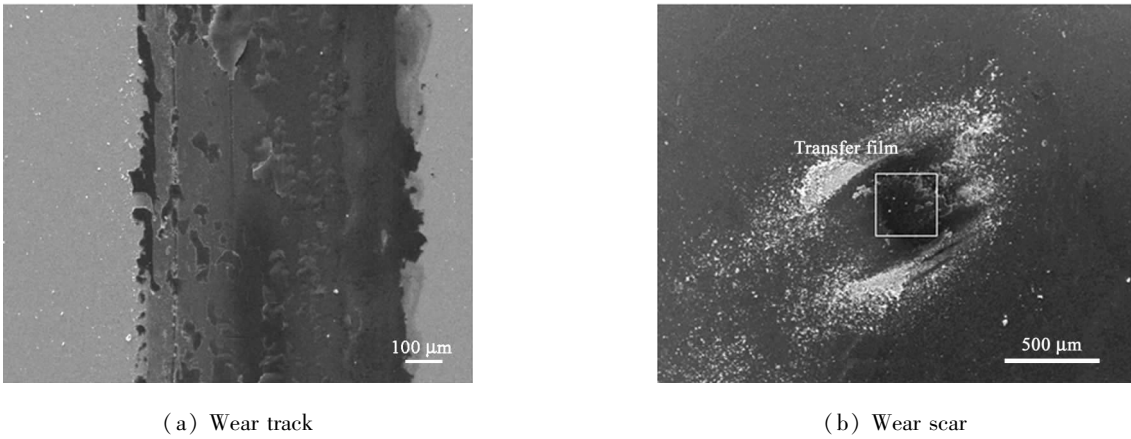


Fig. 3 Typical SEM micrographs of worn surfaces
图 3 磨痕和对偶磨斑的典型 SEM 照片



Fig. 4 Images of lubricant droplets sitting on the surface of WS₂ film
图 4 润滑剂在 WS₂ 薄膜表面的接触角照片

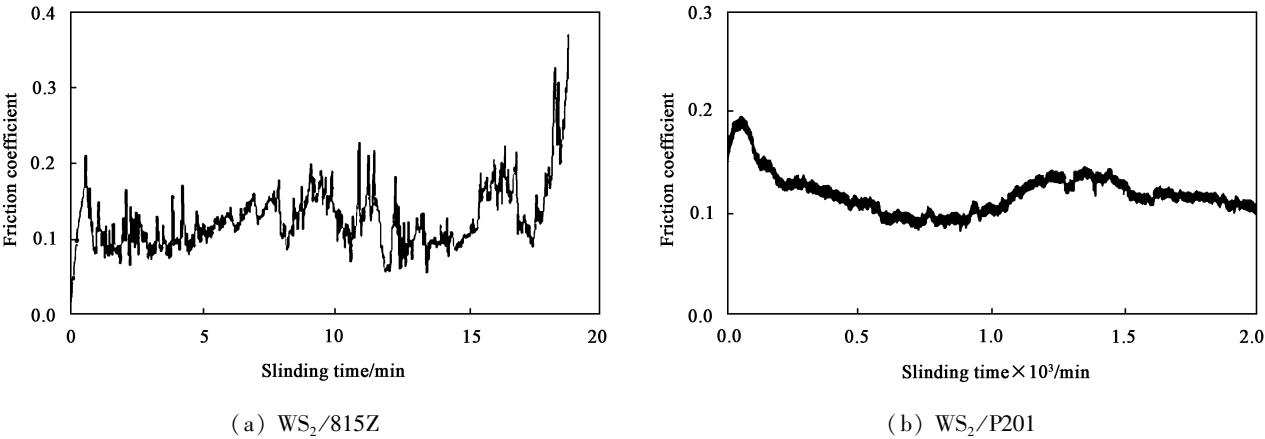


Fig. 5 Frictional traces of the solid/liquid composite lubrication systems in vacuum
图 5 2 种固/液复合润滑体系的真空摩擦系数曲线

并超过了 0.30,整个试验周期的平均摩擦系数为 0.13. WS₂/P201 复合润滑体系在整个摩擦试验过程中,摩擦噪声很小,即使滑动摩擦持续 2 000 min 时摩擦系数也未表现出增大的趋势,整个试验中的平均摩擦系数为 0.12.

同时,还考察了 steel/steel 摩擦副在 815Z、P201 润滑条件下的摩擦学性能. 从图 6 中可以看出:在 815Z 润滑条件下的摩擦曲线波动较大,平均摩擦系

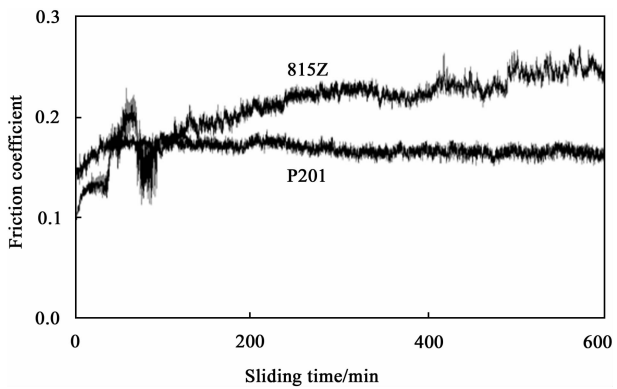


Fig. 6 Frictional traces of the liquid lubricants under steel/steel friction pairs in vacuum
图 6 两种液体润滑剂在钢/钢摩擦副条件下的真空摩擦曲线

数为 0.21,而在 P201 润滑条件下的摩擦曲线相对较平稳,且平均摩擦系数为 0.17.

对比以上两组试验结果,可以看出 steel/steel 摩擦副在固/液复合润滑条件下的平均摩擦系数均低于相应单一润滑油润滑条件的平均摩擦系数. 此外,与 WS₂ 薄膜干摩擦结果相比,两种复合润滑体系的平均摩擦系数稍高于 WS₂ 薄膜,WS₂/815Z 复合润滑体系耐磨寿命约为 WS₂ 薄膜干摩擦寿命的

4%,而 WS₂/P201 复合润滑体系的耐磨寿命较 WS₂ 薄膜干摩擦相比提高 5 倍以上.

磨损率的计算结果如图 7 所示. WS₂/815Z 复合润滑体系、WS₂ 薄膜干摩擦和 WS₂/P201 复合润滑

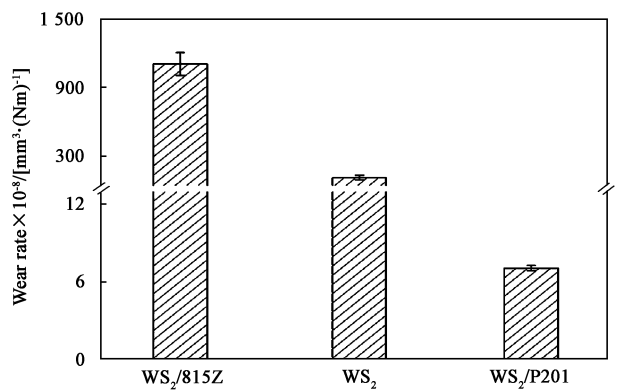
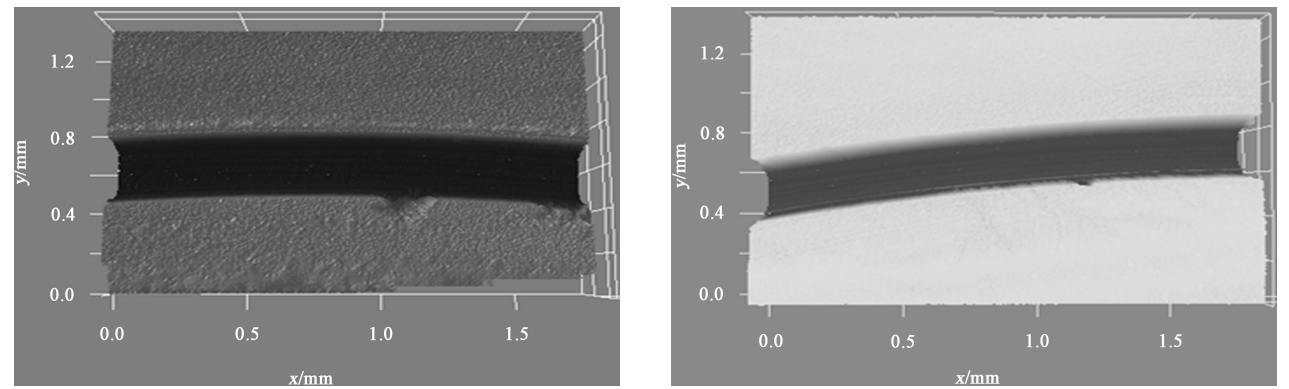


Fig. 7 Wear rate of the solid/liquid composite lubrication systems and WS₂ film
图 7 两种固/液复合润滑体系和 WS₂ 薄膜的磨损率

体系的磨损率分别为 $1\,100 \times 10^{-8}$ 、 120×10^{-8} 和 $7 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 / (\text{Nm})$. 与干摩擦相比,WS₂/815Z 复合润滑体系表现出更大的磨损率,WS₂/P201 复合润滑体系表现出更小的磨损率. 两种复合润滑体系相比,WS₂/P201 复合润滑体系磨损率较 WS₂/815Z 复合润滑体系低 2 个数量级,说明 WS₂/P201 复合润滑体系表现出了很好的协同效应,具有良好的润滑性能.

2.4 磨损表面分析

为了研究复合润滑体系的摩擦磨损机理,对磨损表面的微观形貌进行了分析,图 8 给出了两种复合润滑体系 WS₂ 薄膜磨痕的三维轮廓照片,可以观察到 WS₂/P201 复合润滑体系的磨痕宽度明显小于



(a) Wear track, WS₂/815Z (b) Wear track, WS₂/P201

Fig. 8 3D micrographs of worn surfaces of the solid/liquid composite lubrication systems

图 8 两种固/液复合润滑体系磨痕表面的三维轮廓照片

WS₂/815Z 复合润滑体系,同时 WS₂/P201 复合润滑体系的磨痕两侧磨屑堆积较少。

图 9 给出了 WS₂/815Z 和 WS₂/P201 复合润滑体系的磨痕和对偶钢球磨斑的 SEM 照片。WS₂/P201 复合润滑体系的磨痕表面十分光滑、平整,没有明显的黏着磨损迹象和犁沟。从对偶钢球磨斑表面照片中可以看出 WS₂/P201 复合润滑体系的钢球磨斑表面有明显且连续的转移膜,而 WS₂/815Z 复合润滑体系的钢球磨斑表面未观察到明显的转移膜。同时,WS₂/815Z 复合润滑体系的磨痕表面较为粗糙,且有明显的基体磨损现象,磨痕表面还存在类

似点蚀状磨损痕迹。

为进一步深入研究 WS₂/815Z 复合润滑体系的磨损状况,对磨痕表面进行了 EDS 分析,图 10 为选定区域的 SEM 照片和 EDS 结果。从 EDS 结果可以看出:磨痕表面 Fe 和 Cr 的原子百分数为 84%,说明磨痕表面 WS₂ 薄膜已磨损殆尽,露出了钢基底,WS₂/815Z 复合润滑体系润滑失效。

为了进一步研究机理,对 WS₂/815Z 复合润滑体系磨痕表面典型元素进行了 XPS 分析。图 11 给出了磨痕表面 F1s 的 XPS 谱图。可见磨痕表面 F1s 峰结合能出现在 685.2 eV,归属于金属氟化物(M-F)^[14]。

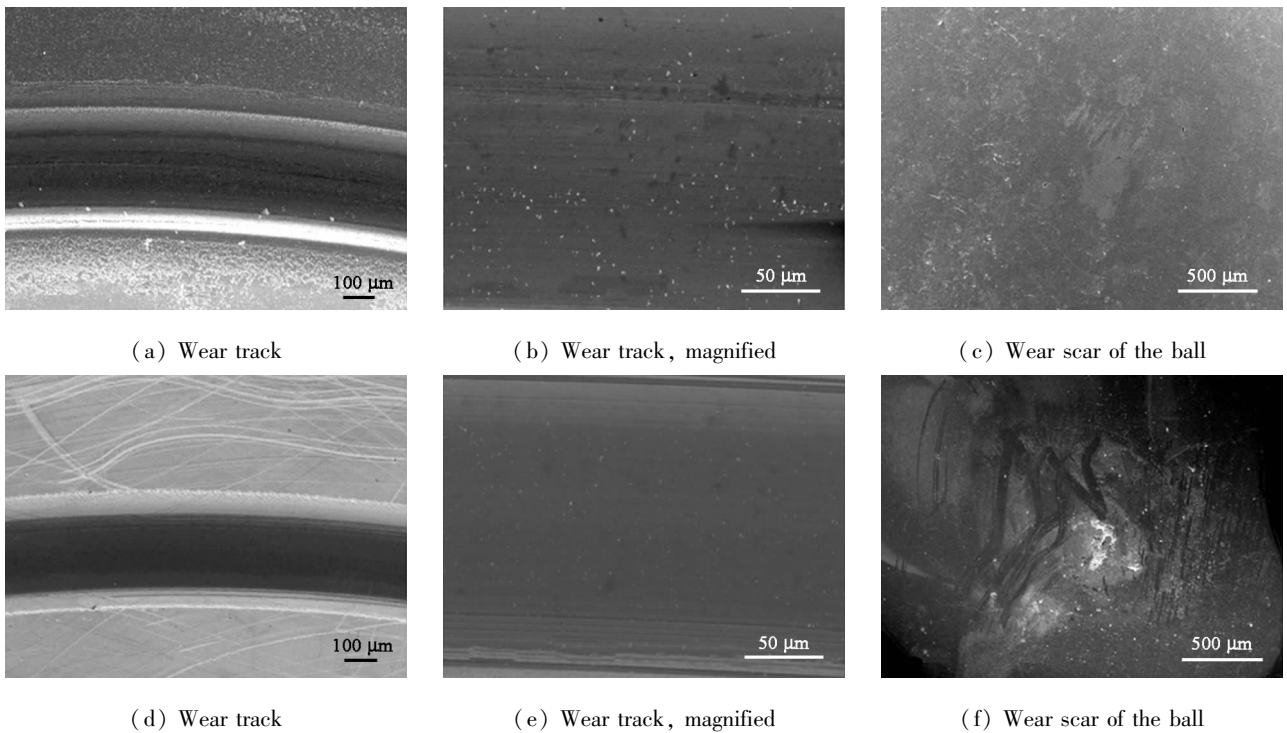


Fig. 9 SEM micrographs of worn surfaces for the solid/liquid composite lubrication systems, (a ~ c) WS₂/815Z, (d ~ f) WS₂/P201

图 9 两种固/液复合润滑体系的磨损表面 SEM 照片, (a ~ c) WS₂/815Z, (d ~ f) WS₂/P201

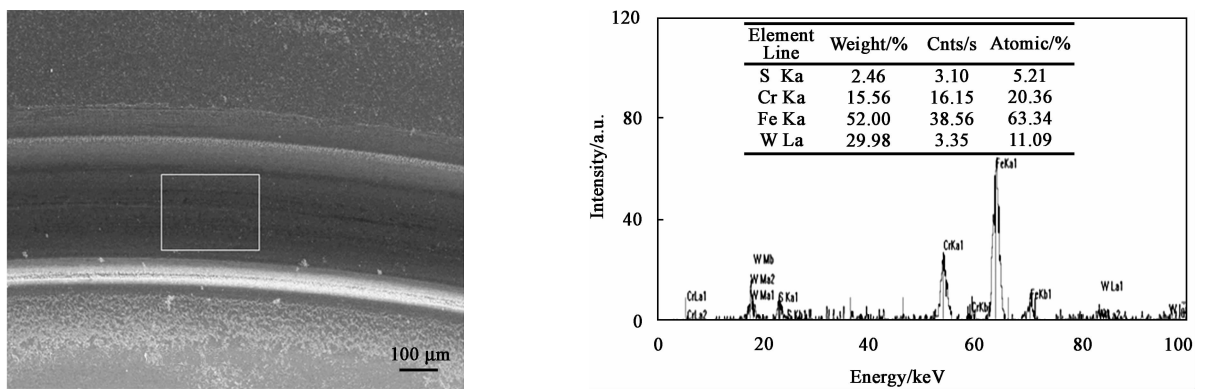


Fig. 10 SEM micrograph and EDS spectrum of the wear track for WS₂/815Z lubrication system

图 10 WS₂/815Z 复合润滑体系磨痕表面 SEM 照片和 EDS 谱图

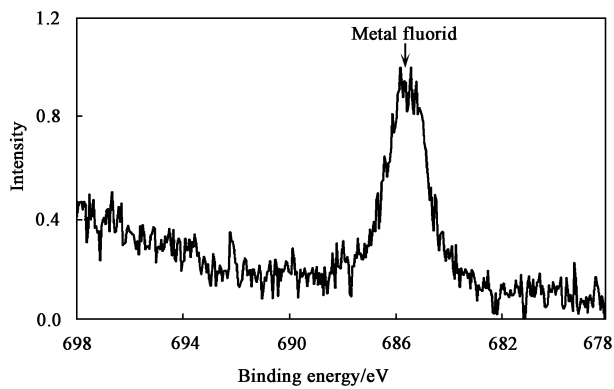


Fig. 11 XPS F1s spectrum of the wear track of WS₂/815Z lubrication system

图 11 WS₂/815Z 复合润滑体系磨痕表面 F1s 的 XPS 谱图

2.5 摩擦磨损机理

WS₂ 与 MoS₂ 均具有层状六方晶体结构,在摩擦中易于发生层间滑移而表现出良好的摩擦学性能^[15]. 在 WS₂ 薄膜中,主要存在两种典型的晶体生长取向分布,type I :c 轴平行于基底的取向,type II :

c 轴垂直于基底的取向^[16]. 由于 WS₂ 薄膜柱状晶区(主要为 type I 型)晶体间存在较多的位错密度和较高的残余应力,在薄膜摩擦过程中这种结构很容易发生快速断裂,在 WS₂ 薄膜中主要起润滑作用的为厚度很小的等轴晶区(主要为 type II 型,约 0.2 μm)^[17]. 因此,两种固/液复合润滑体系的摩擦磨损主要发生在润滑剂和薄膜的等轴晶界面区域[如图 12(a)所示].

虽然 WS₂/815Z 复合润滑体系的浸润性稍优于 WS₂/P201 复合润滑体系,但 WS₂/815Z 复合润滑体系并未表现出更好的摩擦学性能,说明这两种复合润滑体系间的浸润性不是导致其摩擦学性能差异的主要原因. 两种润滑剂分子结构和组成的差别,以及与 WS₂ 薄膜间的相容性优劣可能是造成两种复合润滑体系摩擦学性能差异的主要原因.

WS₂/P201 复合润滑体系的摩擦学性能明显优于 WS₂/815Z 复合润滑体系. 综合以上实验结果,作者认为在 WS₂/815Z 复合润滑体系中,815Z 分子含有大量的活性元素 F,摩擦作用使 815Z 分子发生分

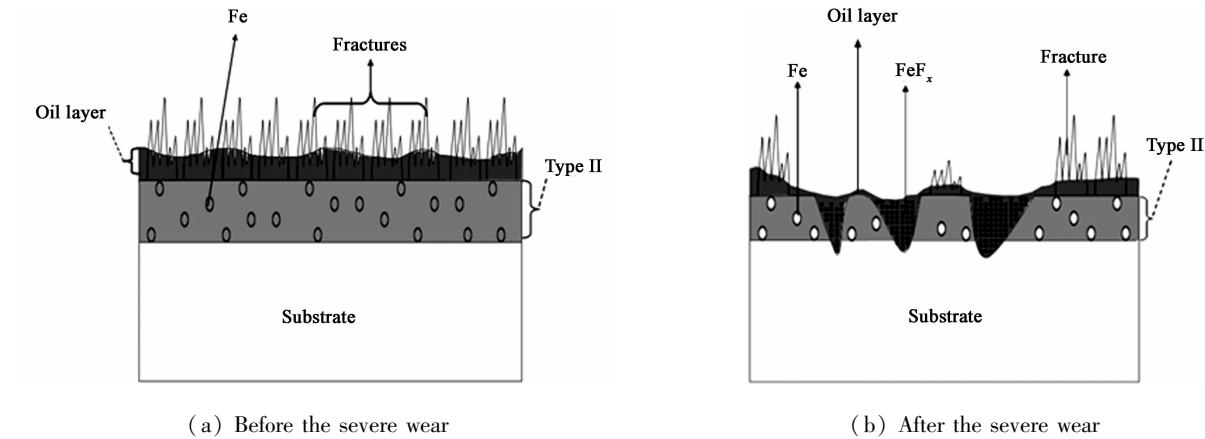


Fig. 12 Schematic model of worn surface of WS₂/815Z lubrication system

图 12 WS₂/815Z 复合润滑体系摩擦磨损机理示意图

子断链并产生大量 F 原子. 同时,由于薄膜制备过程中存在基底原子和薄膜原子间的扩散现象^[18],因此,815Z 产生的 F 原子和由基底扩散的 Fe 原子在等轴晶区发生摩擦化学反应生成了金属氟化物: $Fe + xF \longrightarrow FeF_x$ ($x = 2$ 或 3). 而 FeF_x 是一种脆性化合物,在摩擦过程中很容易被清除又不断形成^[19],从而破坏了 WS₂ 薄膜与基底的结合,造成 WS₂ 薄膜点蚀状磨损脱落,导致薄膜在较短的时间内即被磨穿[如图 12(b)所示]. 同时, FeF_x 被清除又不断形成这一过程也破坏了对偶钢球表面与 WS₂ 转移膜间的结合,因而这也是导致 WS₂/815Z 复合

润滑体系中对偶钢球表面没有形成完整的转移膜的一个重要原因;另一方面,由于磨痕上 WS₂ 薄膜的磨损脱落加剧了 WS₂ 薄膜的消耗,减少了向对偶形成转移膜的 WS₂ 薄膜的数量,因而影响了对偶钢球表面转移膜的形成. 因此,WS₂/815Z 复合润滑体系表现出较短的润滑寿命和较差的相容性.

在 WS₂/P201 复合润滑体系中,P201 分子中不含任何活性元素,并不会破坏 WS₂ 薄膜与基底的结合力,二者表现出良好的协同效应;且 P201 并未影响 WS₂ 薄膜本身的材料转移特性,因此钢球磨损表面能够形成完整而连续的转移膜,有效减少了黏附

及犁沟效应,薄膜的磨损表面十分光滑平整,WS₂/P201 复合润滑体系表现出数倍于干摩擦的润滑寿命。

3 结论

a. 与单纯油润滑条件下的 steel/steel 摩擦副体系相比,WS₂/815Z 和 WS₂/P201 两种固/液复合润滑体系具有更低的平均摩擦系数。

b. 与 WS₂ 薄膜相比,WS₂/815Z 复合润滑体系摩擦系数更高,磨损率更大,润滑寿命更短,未表现出协同效应。

c. WS₂ 薄膜/P201 表现出良好的相容性和协同效应,WS₂/P201 复合润滑体系的磨损率较 WS₂ 薄膜干摩擦和 WS₂/815Z 复合润滑体系分别降低了 2 个和 3 个数量级。

参考文献:

- [1] Roberts E W. Space tribology handbook[M]. European Space Tribology Laboratory,2007.
- [2] Weng L J, Liu W M, Sun J Y, *et al.* Opportunities and challenges to space tribology[J]. Tribology, 2005, 25 (1): 92 - 95 (in Chinese) [翁立军, 刘维民, 孙嘉奕, 等. 空间摩擦学的机遇和挑战[J]. 摩擦学学报, 2005, 25 (1): 92 - 95].
- [3] Ji F Z. Research Progress of lubricants and liquid lubrication system in space[J]. Lubrication Engineering, 2010 (9): 122 - 126 (in Chinese) [姬芬竹. 空间润滑剂和液体润滑系统的研究进展[J]. 润滑与密封, 2010 (9): 122 - 126].
- [4] Ma G Z, Xu B S, Wang H D, *et al.* State of research on space solid lubrication materials[J]. Materials Review, 2010 (1): 68 - 71 (in Chinese) [马国政, 徐滨士, 王海斗, 等. 空间固体润滑材料的研究现状[J]. 材料导报. 2010 (1): 68 - 71].
- [5] Ajayi O, Erdemir A, Hsieh J, *et al.* Combined solid and liquid lubrication of silicon nitride under boundary conditions [A]. Argonne National Lab. IL (USA), 1991.
- [6] Erdemir A, Ajayi O, Fenske G, *et al.* The synergistic effects of solid and liquid lubrication on the tribological behavior of transformation - toughened ZrO₂ ceramics [J]. Tribology transactions, 1992, 35: 287 - 297.
- [7] Erdemir A, Erck R, Fenske G, *et al.* Solid/liquid lubrication of ceramics at elevated temperatures [J]. Wear, 1997, 203: 588 - 595.
- [8] Liu X, Wang L, Xue Q. A novel carbon - based solid - liquid duplex lubricating coating with super - high tribological performance for space applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205: 2 738 - 2 746.
- [9] Hao J Y, Wang P, Liu X Q, *et al.* Solid lubricating film /oil or grease complex system I: tribological properties of MoS₂ film at dry sliding and coated with trifluorinated - butyl with methylterminated silicon oil or the related grease formulated with powder of PTFE [J]. Tribology, 2010, 30 (2): 105 - 110 (in Chinese) [郝俊英, 王鹏, 刘小强, 等. 固体 - 油脂复合润滑 II: 类金刚石 (DLC) 薄膜在几种空间用油脂润滑下的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30 (2): 105 - 110].
- [10] Hao J Y, Weng L J, Sun J Y, *et al.* Solid lubricating film/oil or grease complex system II: tribological properties of DLC film coated with space oils and the related greases [J] Tribology, 2010, 30 (3): 217 - 222 (in Chinese) [郝俊英, 翁立军, 孙嘉奕, 等. 固体 - 油脂复合润滑 I: 二硫化钼膜在干摩擦及空间用油脂润滑下的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30 (3): 217 - 222].
- [11] R W, Jr J, Jansen M J. Handbook of space tribology: NASA, 2000.
- [12] Liu W M, Weng L J, Sun J Y. Handbook of space lubricating materials and technology [M]. Beijing Science Press, 2009 (in Chinese) [刘维民, 翁立军, 孙嘉奕. 空间润滑材料与技术手册[M]. 科学出版社, 2009].
- [13] Jiang L, Feng L. Bionic intelligent nano interface materials [M]. Chemical Industry Press, 2007 (in Chinese) [江雷, 冯琳. 仿生智能纳米界面材料[M]. 化学工业出版社, 2007].
- [14] Wagner C, Naumkin A, Kraut - Vass A, *et al.* NIST X - ray Photoelectron Spectroscopy Database, Version 3. 5 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2003).
- [15] Scharf T, Prasad S, Dugger M, *et al.* Growth, structure, and tribological behavior of atomic layer - deposited tungsten disulphide solid lubricant coatings with applications to MEMS [J]. Acta Materialia, 2006, 54: 4 731 - 4 743.
- [16] Ennaoui A, Diesner K, Fiechter J H, *et al.* Structural analysis of 2H - WS₂ thin films by X - ray and TEM investigation [J]. Thin Solid Films, 1997, 311: 146 - 150.
- [17] Lewis Research Center. National Aeronautics and Space Administration, Cleveland OH 44135 (U. S. A.) Frictional and morphological properties of Au - MoS₂ sputtered from a compact target [J]. Thin Solid Films, 1984, 118: 375 - 384.
- [18] Tian M B, Liu D L. Handbook of film science and technology [M]. Machinery Industry Press, 1991 (in Chinese) [田民波, 刘德令. 薄膜科学与技术手册[M]. 机械工业出版社, 1991].
- [19] Zhang S W, Hu L T, Wang H Z, *et al.* Tribological behaviors of two kinds of fluorine - containing space lubrication oil in vacuum [J]. Tribology, 2012, 32: 619 - 25 (in Chinese) [张松伟, 胡丽天, 王海忠, 等. 两种含氟空间润滑油的真空摩擦磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32: 619 - 625].