

# 含氟有机不粘性干膜的制备及其 摩擦学性能研究进展

党鸿辛<sup>1,2</sup>, 谷国团<sup>1,2</sup>, 张治军<sup>2</sup>, 吴志申<sup>2</sup>

(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 河南大学 特种功能材料重点实验室, 河南 开封 475001)

**摘要:** 介绍了含氟有机不粘性干膜润滑剂的种类、使用工况及其摩擦学性能, 综合评述了含氟有机不粘性干膜润滑剂的研究进展及其应用研究现状, 并展望了其应用前景和发展方向

**关键词:** 氟聚合物; 聚四氟乙烯 (PTFE); 复合材料; 干膜润滑剂

**中图分类号:** TH117.3

**文章标识码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2002)06-0490-05

含氟有机高分子材料是一种综合性能优异的高分子材料, 具有卓越的耐化学试剂、耐热、电绝缘性、润滑性和不粘性等特性。利用含氟有机高分子材料优良的润滑性和防粘性等特性制成的各种润滑材料和防腐、润滑、防粘涂层, 已在食品、家电、纺织、汽车和航空航天等工业领域获得了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 取得了良好效果。但是, 其在通常摩擦条件下的耐磨性差、磨损率高, 而且在高负荷条件下易冷流。这极大地限制了其应用。为了改善其难加工性并避免上述缺点, 常常将含氟有机高分子与其他材料复合制成干膜材料, 从而极大地扩展了其应用范围。

干膜的种类繁多, 性能各异, 将含氟有机高分子微粉分散在含少量乳化剂的水和有机溶剂中可制成水分散液和溶剂型分散液。由含氟有机高分子水分散液制作的涂层存在制品易留微孔、耐磨性能差、与底材的结合强度弱等缺点。将含氟有机高分子与具有良好粘附性和耐热性的其他树脂混合使用, 既可克服上述缺点, 又能发挥含氟有机高分子自身的特长; 这样就能利用树脂粘结相解决与底材附着不牢固和涂层多孔的问题, 并提高涂层的耐磨性, 同时还可降低固化温度, 扩大使用范围。常用的树脂有环氧树脂、丙烯酸树脂、聚酰亚胺树脂及聚苯硫醚等。

研究表明, 将各种无机物颗粒作为填料加入复合材料中能够提高干膜润滑材料的抗磨性能。国内外学者就其抗磨减摩机理进行了大量研究。近年来, 纳米

技术的发展在科学技术的各个领域都展示了光明的应用前景。将纳米无机颗粒作为填料用以改善材料摩擦学性能的研究日益受到关注。

本文作者基于多年的工作积累和近年来的研究进展, 对含氟有机不粘性干膜的摩擦学性能研究进展及其前景进行总结和展望。

## 1 国内研究进展

我国科学家从 20 世纪 50 年代起, 对含氟不粘性干膜润滑剂进行了大量的研究工作, 为我国军事工业和航空航天等高科技领域解决了大量难题, 形成了具有自主知识产权的系列产品, 目前, 相关技术和产品在民用工业领域也发挥着日益重要的作用。

### 1.1 PTFE-酚醛环氧树脂型耐高温干膜润滑剂

PTFE 具有独特的螺旋形链结构, 其晶体由平行排列的折叠链形成片晶堆积而成带状多晶聚集体, 结晶部分将粘性的无定型部分相互分隔开, 由外界力作用引起无定型 PTFE 部分变形, 而 C—C 主链完全被由氟原子组成的外壳包围, 构成完整的圆柱体, 这种棒状构型的 PTFE 分子间的吸引力很弱, 分子间容易滑动, 从而易在摩擦偶件表面形成转移膜, 这是 PTFE 被用作粘结涂层主要润滑剂的前提。环氧树脂具有优异的粘结力、良好的介电性能、稳定的耐腐蚀性能、优良的绝缘性和较高的机械强度, 其脆性等缺点可以通过各种改性技术得到克服<sup>[4]</sup>。聚四氟乙

基金项目: 河南省杰出人才创新基金资助项目 (0121001700)。

收稿日期: 2002-05-20; 修回日期: 2002-07-04/联系人党鸿辛, E-mail: danghongxin@henu.edu.cn

作者简介: 党鸿辛, 男, 1929 年生, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事低表面自由能材料及其摩擦学研究

烯-酚醛环氧树脂型<sup>[5]</sup>(FF型)耐高温涂层以酚醛环氧树脂、树脂改性剂及增韧剂为粘结组分,以辐照PTFE和三聚氰胺氰脲络合物(MCA)为固体润滑剂,以金属氧化物为耐磨添加剂,以优化的配比和合适的工艺配制而成。MCA具有面型结构,在外力作用下易于滑动,因而具有低摩擦,但单独使用耐磨性极差。当PTFE和MCA用量比为3:1时涂层的耐磨寿命最长;MCA与PTFE的协同效应有利于提高PTFE的抗磨性能,延长其使用寿命。研究表明,不含改性剂和增韧剂的FF型粘结干膜的耐磨寿命极低,当加入12.5%(质量分数,全文同)的酚醛环氧改性剂和10.0%的液体橡胶增韧剂以后,其耐磨性大幅提高,但仍达不到实际应用要求。为了进一步提高粘结膜的耐磨性能,可引入金属氧化物作为抗磨添加剂,其中抗磨添加剂含量为固体润滑剂含量的23.0%时具有极长的耐磨寿命(13 500 m/ $\mu\text{m}$ )。

FF型耐高温干膜润滑剂的摩擦学性能优良,在Timken(环-块)试验机上测定的摩擦系数为0.16~

0.20,耐磨寿命可达13 500 m/ $\mu\text{m}$ (负荷312 N,速度2.5 m/s)。同时,涂层与底材的粘结强度、抗冲击强度和柔韧性均能达到一般涂层的国家标准。其具有耐磨、防粘、耐高温(长期200℃工作)等性能,在耐磨、防粘和防锈等场合得到应用;作为无油润滑涂层可长期用于低于200℃、中低负荷下的干摩擦机械零件的润滑及防护,如用作印刷机械、纺织机械及家具(如玻璃移门、窗帘导轨)等的润滑涂层,还可用作煤矿矿井液压支柱的防护涂层。

## 1.2 PTFE-改性聚酰亚胺系列干膜润滑剂

PTFE-改性聚酰亚胺(FM)系列干膜润滑剂<sup>[6]</sup>是采用PTFE为固体润滑剂,改性聚酰亚胺及其复合树脂为粘结剂,同时加入不同的耐磨添加剂和颜料配制的外观、颜色、性能不同的干膜润滑剂。由于在聚酰亚胺分子链中引入了酰胺基改性基团,使聚酰亚胺分子的可挠性得到提高,并具有较好的柔韧性和耐磨性。同时,改性聚酰亚胺树脂储存稳定性优良。表1列出了3种不同牌号的FM干膜润滑剂的性能,可见3种

表1 不同牌号的3种FM粘结固体润滑膜的性能

Table 1 Properties of three kinds of FM-based dry film lubricants

No.	Appearance	Film thickness/ $\mu\text{m}$	High limit temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Applications
FM-100	Red, flat, fine and smooth	10~15	250	Anti-sticking, lubricant film under fretting wear
FM-110	Brownish yellow, flat, smooth	13~40	250	Long life antiwear coating under medium or slight load
FM-300	Black, fine and smooth	8~13	150	Antiwear coating under slight load and low velocity

规格的干膜润滑剂性能各有特色。

在Timken试验机上评价FM干膜润滑剂的摩擦学性能(负荷312 N,速度2.5 m/s)。结果表明,FM-110、FM-100、FM-300在室温下的摩擦系数分别为0.14~0.17、0.26~0.32、0.33~0.36,其中FM-110的耐磨性最佳(4 300 m/ $\mu\text{m}$ ),可用作室温下的长寿命干膜。FM-100和FM-300的耐磨性不如FM-110,这可能同其在实际应用中的厚度限制有关;另外,FM-110中PTFE的含量远高于FM-100和FM-300中的含量。表2列出了FM-110的高温抗磨性能(高温三号摩擦磨损试验机,载荷 $2 \times 10^6$  Pa,速度900 r/min)。可见FM-110干膜润滑剂不仅在室温下具有良好的耐磨性,而且在相对较高的温度和负荷条件下仍表现出相当好的耐磨性。同时,其摩擦系数随温度升高呈下降趋势;因此是适用于中、高温环境的良好润滑材料,其性能同英国Whiteford公司的Xylan干膜润滑剂的性能相当。

作为干摩擦条件下防粘和抗微动磨损用涂层,FM-100干膜润滑剂主要用于直升机主、尾减速器膜片式联轴节挠性垫片、垫圈及隔离套等表面的润滑及

表2 FM-110粘结固体润滑膜在较高温度下的摩擦磨损性能( $p = 2 \times 10^6$  Pa,  $v = 900$  r/min)

Table 2 Anti-wear properties of FM-110 dry film lubricant at high temperature ( $p = 2 \times 10^6$  Pa,  $v = 900$  r/min)

T/ $^{\circ}\text{C}$	Wear life (sliding cycle $10^5$ )	Friction coefficient
100	4.96	0.050~0.130
200	1.28	0.038~0.090
250	1.02	0.030~0.065
300	1.35	0.033~0.065

防护。该工况条件要求干膜的厚度均匀(5~15  $\mu\text{m}$ ),表面平整、光滑、无颗粒、防粘、与底材粘结性好、曲挠性和减摩性能好。FM-100干膜润滑剂不仅能够满足这些要求,还达到了法国宇航公司9999/1041规定的

## 指标要求

作为低速、轻负荷下防粘和润滑涂层, FM-300 主要用于引进日本 I 系列仪表 RV 记录仪笔导轨和转轴表面的润滑及防护。I 系列仪表精度为 0.5 级, 属国内先进技术, 用 FM-300 作为干膜润滑剂, 产品合格率高、质量稳定、性能良好。作为干膜润滑材料, FM 系列润滑剂在中低负荷条件下的许多领域具有潜在的应用价值。如平面导轨、滑动轴承、密封件、活塞环表面润滑涂层、打字机、复印机、开关、键盘、定影辊等滑动部位, 纺织机械防污染、耐磨润滑部件, 轻负荷机械螺纹密封, 汽车零部件润滑涂层, 仪表记录仪笔导轨、齿轮及轴承等的润滑。

### 1.3 PTFE-聚苯硫醚耐高温防粘水分散涂料

聚苯硫醚是线性结晶型芳香聚合物, 在空气和氮气中加热至 500 °C 无明显失重, 在空气中于 700 °C 完全降解, 在 200 °C 下仍能保持较高的机械强度, 是一种新型的耐高温工程塑料。以聚苯硫醚为粘结剂, 以 PTFE 为润滑剂, 加入适当的分散剂制备的水-乙醇分散体具有很高的储存稳定性; 将其在不锈钢和普通钢板表面成膜后于 355~380 °C 下固化, 即可制得 PTFE-聚苯硫醚(PFS-1) 涂层<sup>[7,8]</sup>。研究表明, 随体系中 PTFE 含量的增加, 干膜的摩擦系数减小, 耐磨性提高。当 PTFE 含量达 30% 时, 干膜的耐磨性最佳; 随着 PTFE 含量的进一步增大, 摩擦系数趋于稳定 (0.12~0.14)。表 3 列出了经不同温度加热 5 h 并冷

表 3 在不同温度下加热 5 h 后粘结  
固体润滑膜与水的接触角

Table 3 Water contact angles on coating heated  
at different temperatures for 5 h

T/°C	Contact angle/(°)
Ambient	108.0
200	108.0
250	107.0
280	106.0
300	105.4

却后 PFS-1 涂层同水之间的接触角, 表 4 列出了在 280 °C 下经不同时间热处理并冷却后涂层同水的接触角。可见 PFS-1 干膜在较高温度下连续使用时具有很好的稳定性以及防粘性, 可以用作高温润滑剂。PFS-1 干膜在高温下连续使用仍具有较好的防粘性, 加上所用材料无毒以及对油、盐、醋及糖等调料具有化学稳定性, 可用作加工食品的烤盘涂层。工业应用表明, PFS-1 防粘涂层在常温下的使用性能与日本同类产品相当, 高温下的使用性能优于日本同类产品;

表 4 经 280 °C 下不同时间热处理并冷却后  
粘结固体润滑膜与水的接触角

Table 4 Water contact angles on coating heated  
at 280 °C for different durations

T/h	Contact angle/(°)
5	106.7
10	106.6
15	106.1
20	105.5

在医药、食品加工、纺织、航天、航空等工业领域具有广阔的应用前景。

### 1.4 其它含氟干膜润滑剂

最近发展起来的 PTFE-聚氨酯<sup>[9]</sup>、PTFE-有机硅橡胶、PTFE-环氧改性聚氨酯<sup>[10,11]</sup> 等不粘性干膜润滑剂, 作为海上及水下航行体的表面涂层, 除了能够有效降低航行中机体与水之间阻力, 降低航行过程中引起的边界层流噪声以及螺旋桨噪声以外, 还能够有效防止海洋微生物在机体表面的吸附, 并具有在泵油管道中防止蜡沉积的作用, 是新型具有防污、降噪等多种功能的无毒和综合性能优异的干膜润滑剂。

### 1.5 在超薄膜润滑领域研究进展

近年来快速发展的微型电子机械系统(简称为 MEMS) 或微型机械(Micro Machine), 具有体积小、质量轻、能耗低、集成度高和智能化程度高等特点, 在信息技术和生物工程领域具有巨大的应用潜力。随着微型机械结构尺寸的微小化, 其表面积与体积的比例显著增大, 相对于内力和重力而言, 静电作用和摩擦力成为需要优先考虑的对象。在这种体系中, “接触” 和 “分离” 往往交替发生, 这时粘着问题可能成为控制机械性能优劣的重要因素。在这种体系中实现具有超低摩擦的超薄膜润滑是对摩擦学界的一个挑战。全氟聚醚超薄润滑膜<sup>[12]</sup> 及单分子有序膜有可能用于解决 MEMS 系统的润滑问题。在摩擦学领域受到广泛关注的单分子有序膜成膜技术主要包括 LB 成膜和分子自组装成膜(SAM) 技术<sup>[13-16]</sup>, 其中分子组装膜具有更好的稳定性。Hyun 等<sup>[17]</sup> 研究了端基组成为 CH<sub>3</sub>-、CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-、CF<sub>3</sub>- 等的自组装膜及复合分子组装膜的摩擦学性能, 发现在微观摩擦磨损条件下, 端基组成为 CF<sub>3</sub>- 的单分子膜的摩擦系数更低。我们<sup>[18,19]</sup> 合成了全氟辛酰丙基-三甲氧基硅烷和全氟辛酰氧丙基-三甲氧基硅烷, 以载玻片为基片, 制备了具有全氟辛基链的有机硅烷单分子自组装膜, 并对其表面特性和摩擦学性能进行了研究。摩擦学测试结

果表明,这2种单分子组装膜都能够有效降低玻璃基片的摩擦系数,而且在低负荷下具有较长的使用寿命,可望用作低负荷下的超薄膜润滑体系

## 2 国外研究进展

以含氟树脂为固体润滑剂,加入粘结剂和各种添加剂,可以制备含氟不粘性涂层。用这种方法制成的润滑涂料在国外也受到了广泛关注。英国Whiteford公司于1970年开发成功了Xylan润滑涂料,该涂料为以聚酰亚胺为粘结剂,以PTFE和抗磨填料及颜料等为添加剂,在不同温度下固化形成的干膜润滑涂料。可以通过各种沉积技术(包括喷涂成膜)在基体上形成Xylan润滑膜。Xylan可以在相对较低的温度(室温~315℃)下固化,克服了氟涂料高温(400~450℃)固化的缺点,因而可以应用于多种基底材料,如玻璃、钢铁、铝合金、镁合金、锌、铅、塑料以及橡胶等。基底材料的预处理可以采用简单的溶剂清洗,免除了喷砂等复杂工艺。Xylan干膜具有很低的摩擦系数(0.06)、优异的耐磨性和耐腐蚀性,是一种综合性能优良的抗磨减摩干膜材料,在螺栓、螺母、发动机活塞、活塞环和汽缸以及汽车发动机和刹车零部件的润滑等领域得到了广泛应用。

此外,日本东洋干膜公司的PTFE干膜润滑剂于20世纪80年代实现商品化、系列化,主要用于精密仪器、光学部件、汽车和家电产品的润滑防护。其中牌号为S-6100的干膜的耐磨性极佳,800系列用于食品加工和防粘。法国宇航公司9999/1041干膜润滑剂作为干摩擦条件下的防粘和抗微动磨损涂层,主要用于直升机主、尾减速器膜片式联轴节挠性垫片、垫圈和隔离套等表面的润滑及防护。

## 3 展望

含氟有机不粘性干膜虽然具有优异的综合性能,但仍存在涂膜厚、固化周期长以及透明性差等缺陷,由于采用有机物粘结剂,其耐高温性、耐辐射和耐老化等性能需要进一步提高,以适应更苛刻的工况条件。近年来发展起来的纳米技术为规模生产纳米材料提供了技术支持,在越来越多的领域引起人们的关注。将纳米聚合物和无机物颗粒添加到干膜体系中,考察其对干膜物化性能以及减摩抗磨性能的影响正成为研究的焦点之一,并取得了可喜进展。合成蜡粉是一种低熔点低密度的超细粉,具有较低的摩擦系数。将合成蜡粉添加到含PTFE的聚氨酯粘结涂层中,可明显改善复合物的减摩和耐磨性能<sup>[20]</sup>。SiC和

SiO<sub>2</sub>纳米颗粒作为填充剂均能大幅度提高材料的耐磨性<sup>[21~23]</sup>。研究表明,在PTFE中添加体积分数为15%的纳米ZnO,所制备出的复合材料的摩擦系数同PTFE的相当,而耐磨性显著改善<sup>[24]</sup>。可以预期,在不久的将来,基于纳米技术的具有更加优异的综合性能的含氟有机干膜润滑剂材料将研制成功。

## 参考文献:

- [1] Tian Jun (田军), Xu Jin-fen (徐锦芬), Pan Guang-ming (潘光明), *et al.* Polymer containing fluorine and it's potential uses (含氟聚合物及其应用) [J]. Journal of Functional Polymers (功能高分子学报), 1995, 8(4): 504-511.
- [2] Xu Pi-kun (徐丕坤). Application of fluor painting (fluor-carbon painting) on airplanes (氟涂料(氟碳漆)在飞机上的应用) [J]. China Surface Engineering (中国表面工程), 2001, 3: 45-47.
- [3] Yang Sheng-rong (杨生荣), Li Tong-sheng (李同生), Zhou Zhao-fu (周兆福), *et al.* Development of anti-sticking and wear resistant PPS-PTFE coating and its application in baking plate for food (PPS-PTFE 防粘耐磨涂层的研制及其在食品烤盘上的应用) [J]. Plastics (塑料), 1999, 28, 38-41.
- [4] Li Yong-feng (李永峰). Formulation design of epoxide resin adhesives Technology on adhesion and sealing (环氧树脂胶粘剂的配方设计) [J]. Adhesion (粘结), 1984, 5(4): 26-29.
- [5] Zhou Zhao-fu (周兆福), Tian Jun (田军). Abrasion-resistant and corrosion-resistant composite coating of PTFE/novolac epoxy resin (改性酚醛环氧PTFE耐磨防腐涂层) [J]. Materials Protection (材料保护), 1996, 29(4): 2-5.
- [6] Li Ji-sheng (李冀生), Wang Mei-ling (王美玲), Dang Hong-xin (党鸿辛). Study on FM-110 dry film lubricating materials (FM-110干膜润滑材料之研究) [J]. Tribology (摩擦学学报), 1991, 13, 3: 208-217.
- [7] Fang Xue-jing (方学敬), Zhang Yong-hui (张永辉). The preparation of PFS-PTFE film lubricant (聚苯硫醚-聚四氟乙烯粘结膜润滑剂的研制) [J]. Solid Lubrication (固体润滑), 1982, 2(4): 223-229.
- [8] West G H, Senior J M. High temperature plastics bearing compositions [J]. Tribology International, 1973, 6 (6): 269-275.
- [9] Tian Jun (田军), Zhou Zhao-fu (周兆福), Xue Qun-ji (薛群基). The surface structure of PU/PTFE abrasion-resistant and corrosion-resistant composite coating (聚氨酯/PTFE耐磨防腐涂层表面结构的研究) [J]. Corrosion Science and Protection Technology (腐蚀科学与防护技术), 1997, 9 (3): 182-186.
- [10] Zhou Zhao-fu (周兆福), Tian Jun (田军), Xu Jin-fen (徐锦芬). Anti-fouling and abrasion-resistant coating cured at ambient temperature (常温固化耐磨防腐涂层) [J]. Corrosion Science and Protection Technology (腐蚀科学与防护技术), 1994, 6 (4): 370-371.
- [11] Tian Jun (田军). Study of antifouling and flow noise reduction

- of low free energy composite coatings(低表面能复合涂层防污、降噪作用的研究)[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Chemical Physics, 1996
- [12] Wang Jin-qing (王金清), Yang Sheng-rong (杨生荣), Qi Shang-kui (齐尚奎), *et al*. Preparation and friction behavior of perfluoropolyether lubricant film on single crystal silicon (单晶硅表面全氟聚醚润滑膜的制备及其摩擦学特性研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21: 401-404
- [13] Bhushan B, Israelachvili J N, Landman U. Nanotribology: friction, wear and lubrication at the atomic scale[J]. Nature, 1995, 374: 607-616
- [14] Bhushan B. Handbook of Micro/Nanotribology [M]. Boca Raton: CRC Press, 1995
- [15] Srinivasan U, Houston M R, Howe R T. Alkyltrichlorosilane-based self-assembled monolayer films for stiction reduction in silicon micromachines[J]. Journal of Micro-electromechanical Systems, 1998, 2: 252-260
- [16] Zhang Jun-yan (张俊彦), Yang Sheng-rong (杨生荣), Xue Qun-ji (薛群基). XPS analysis and tribological behavior of self-assembly silane/TiO<sub>2</sub> composite film (硅烷自组装膜基硅烷/二氧化钛复合膜的 XPS 表征与摩擦学性能研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2000, 20(4): 214-243
- [17] Hyun I Kim, Michael Graupe, O lugbenga O loba. Molecularly specific studies of the frictional properties of monolayer films: a systematic comparison of CH<sub>3</sub>—, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CH—, and CF<sub>3</sub>— terminated films[J]. Langmuir, 1999, 15: 3 179-3 185.
- [18] Gu Guo-tuan (谷国团), Zhang Zhi-jun (张治军), Dang Hong-xin (党鸿辛). Surface properties and tribological behaviors of perfluorooctanoxylpropyl dimethylsilane SAM (二甲基- $\gamma$ -全氟辛酰氧丙基硅烷自组装膜的制备及其摩擦学性能研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2002, 22(3): 170-174
- [19] Gu Guo-tuan (谷国团), Zhang Zhi-jun (张治军), Dang Hong-xin (党鸿辛). Preparation and tribological behaviors of perfluorooctanoxamidepropyltrimethoxyl silane SAM (氟硅烷自组装单分子膜的制备及其摩擦学性能)[J]. Acta Phys-Chim. Sin (物理化学学报), 2002, 18(7): 669-672
- [20] Ye Yin-ping (冶银平), Chen Jian-min (陈建敏). The tribological behavior of PTFE-based bonded solid lubricating coatings modified with particulate synthetic paraffin wax (合成蜡粉改性聚四氟乙烯基粘结涂层摩擦学性能的研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21: 201-204
- [21] Wang Q, Xu J, Shen W, Xue Q. The effect of nanometer SiC filler on the tribological behavior of PEEK [J]. Wear, 1997, 209: 316-321.
- [22] Wang Q, Xue Q, Shen W. The friction and wear properties of nanometer SiO<sub>2</sub> filled PEEK [J]. Tribol Int 1997, 30 (3): 193-197.
- [23] Wang Q H, Xue Q J, Liu W M, Chen J M. The friction and wear characteristics of nanometer SiC and PTFE filled polyetheretherketome [J]. Wear, 2000, 243: 140-146
- [24] 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

## Progress of Study on Preparation and Tribological Behavior of F-containing Organic Anti-sticking Bonded Solid Lubricant Films

DANG Hong-xin<sup>1,2</sup>, GU Guo-tuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-jun<sup>2</sup>, WU Zhi-shen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Special Functional Materials, Henan University, Kaifeng 475001, China)

**Abstract** Fluorine-containing polymers are useful materials with good comprehensive properties such as chemical-attack-resistance, thermal resistance, insulation, anti-sticking, and lubricity. They are virtually excellent solid lubricants because of their special structures, low shearing strength, and weak inter-molecular attraction. The progress of the study on the preparation and application of F-containing organic bonded solid lubricant film is reviewed, and the prospect of the development and application of the lubricating coatings is presented as well.

**Key words** fluoropolymer; PTFE; composite coating; bonded solid lubricant film

**Author** DANG Hong-xin, male, born in 1929, Professor, Academician, Email: danghongxin@henu.edu.cn