

全氟聚醚润滑油的摩擦学研究进展

冯大鹏, 翁立军, 刘维民

(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)

摘要: 对全氟聚醚(PFPE)作为润滑油的研究和应用进行了综述, 介绍了 PFPE 的基本性能, 分析了其在大气及真空环境中的摩擦磨损性能, 评述了 PFPE 在大气及空间条件下的润滑和失效破坏机理, 指出了发展新型空间润滑剂的必要性

关键词: 全氟聚醚; 润滑机理; 失效机理

中图分类号: O 623 627; TH 117. 3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2005)06-0597-06

全氟聚醚(Perfluoropolyether, 简称 PFPE)是一类新型含氟油, 其结构与烃类相似, 但其中以非常强的 C—F 键代替了烃类中的 H—C 键。由于 C—O 的存在使得 PFPE 具有较高的热稳定性和氧化稳定性、良好的化学惰性及绝缘性能, 同时还具有低挥发性、较宽的液体温度范围以及优异的粘温特性, 其使用温度范围比氯氟烃类润滑剂更宽, 粘度和蒸发率与氟硅润滑油相当, 但润滑效果及化学稳定性均优于氟硅类润滑剂。由于 PFPE 具有十分突出的化学惰性、良好

的润滑性能及很低的表面能^[1, 2], 因此自 20 世纪 70 年代年以来许多科学家对其进行了广泛研究, 由于其价格昂贵, 目前主要应用于军事、航天、核工业以及计算机磁记录系统等高技术工业领域。

1 PFPE 的基本性能

PFPE 与矿物油相比具有优异的物理性能, 不同分子量的化合物具有不同的物理性能, 以杜邦 Krytox143 系列全氟聚醚油为例^[3], 表 1 列出了几种

表 1 Krytox143 系列润滑油的基本物理性能

Table 1 Physical performance of Krytox143 series lubricants

Lubricant	Average molecular weight	Viscosity/mm ² · s ⁻¹		Viscosity index	Pour point/°C	38 °C Vapor pressure/mmHg	Estimated useful range/°C
		40	100				
143A Z	1850	16.7	3.2	29	-55	4×10^{-4}	-57~149
143A A	2450	32.0	5.2	89	-50	1×10^{-4}	-51~177
143A B	3700	77.0	10.2	113	-40	5×10^{-6}	-40~232
143A C	6250	243.0	25.4	134	-35	8×10^{-8}	-34~288
143A D	8250	448.0	42.5	144	-30	6×10^{-9}	-29~316

Krytox143 PFPE 润滑油的基本物理性能。可以看出, 该润滑油的粘度、倾点、粘度指数以及使用温度均随分子量增加而增大, 而饱和蒸汽压则随之降低。

2 PFPE 的摩擦学研究现状

目前 PFPE 作为润滑剂应用于微机电系统(MEMS)和磁介质存储系统中主要以薄膜形式为主, 在军事工业中主要应用于高温以及高真空条件工况中。

2.1 PFPE 的摩擦磨损性能

2.1.1 大气环境中的摩擦磨损性能

PFPE 在大气环境中主要应用于陶瓷材料以及金属材料的润滑。Cosmacini 等^[4]曾系统地考察了在大气、室温条件下 PFPE 对钢/钢摩擦副润滑性能的影响, 并将其与极压齿轮油和普通烃基润滑油进行对比, 发现在相同试验条件下, PFPE 的摩擦系数均高于普通润滑油, 其磨损率低于普通润滑油, 承载能力高于普通润滑油。同时还发现, PFPE 的润滑性能与

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: 2005-04-20; 修回日期: 2005-09-10/联系人冯大鹏, e-mail: dpfeng@lzb.ac.cn

作者简介: 冯大鹏, 男, 1970 年生, 博士, 副研究员, 目前主要从事空间润滑剂的研究。

其分子量相关, 摩擦系数及磨损率均随分子量增加而增大, 其主要原因是当分子量较小时 PFPE 的粘度较小, 因此摩擦过程中易被转移到摩擦表面而使其摩擦

系数降低 此外, 在 SRV 型摩擦磨损试验机上评价 PFPE 的润滑性能表明, PFPE 的摩擦系数较低, 磨损量远高于普通润滑油 表 2 列出了 SRV 型摩擦磨损

表 2 PFPE 在 SRV 摩擦磨损试验机上的测试结果

Table 2 Results of SRV tests of PFPE oil

Sample	Average molecular weight	Friction coefficient μ	Wear of under sample/ μm
Y04	1500	0.14	2.8
Y25	3000	0.14	2.0
Y45	4100	0.15	1.2
YR	6500	0.15	1.4
Hydrocarbon oil	-	0.13	0.0

Note: Friction pair is AISI52100, frequency: 50 Hz, load: 100 N, time: 2 h, room temperature, total distance: 360 m.

注: 偶件为 GCr15 钢, 频率 50 Hz, 载荷 100 N, 时间 2 h, 室温, 总行程 360 m.

试验机上的部分试验结果^[5].

另外, PFPE 还能够用于陶瓷材料的润滑 NASA 路易斯研究中心的 Morales 等^[6,7]将 PFPE 油用于 SiC、SiN₄ 和 ZrO₂ 陶瓷材料的润滑, 同时将其与角鲨烯润滑油进行对比 结果发现, 当 PFPE 作为润滑油用于上述 3 种陶瓷材料时, 其抗磨损性能并不理想, 相反角鲨烯却具有良好的抗磨损性能 Jones 等^[7]采用 SiN₄ 陶瓷摩擦副考察 PFPE 润滑油添加剂时也得到类似结论 叶承峰等^[5,8]研制了新型含氟磷嗪化合物(X-1P)和含氟离子液体, 并将 PFPE 与其进行对照试验, 考察了几类润滑油在氮化硅陶瓷摩擦副上的摩擦磨损特性, 发现在所测试的载荷范围内, PFPE 的磨损率随载荷的增加而迅速增大, 而其与 X-1P 及含氟离子液体的润滑性能相当, 且在三者中 PFPE 的摩擦系数最大 此外, PFPE 的分子结构与其润滑性能也有很大关系, 其中直链结构相对于支链结构的 PFPE 具有较好的润滑性能^[9].

2.1.2 真空环境中的摩擦磨损性能

由于 PFPE 具有良好的热稳定性和低的饱和蒸汽压, 因此广泛应用于各种真空运动部件中 NASA 研究中心进行大量研究工作^[10~14], 他们研究了在真空(10^{-4} Pa)条件下采用 PFPE 作为润滑油用于钢及陶瓷材料(SiN₄)的润滑, 润滑形式包括油润滑和边界润滑 2 种 结果发现, 在真空环境中 PFPE 的摩擦系数(0.15)和磨损率均略高于相同条件下大气环境中的摩擦系数(0.12)和磨损率, 但与高档烃基润滑油相比其磨损性能较差 此外还发现, 当 PFPE 润滑油作为摆动机构的润滑时, 其摩擦系数无明显变化, 磨损量则成倍增大, 即摆动机构处于低摩擦高磨损状态, 这与 Cosmacini 等^[4]的研究结果相似

为了提高 PFPE 的耐磨性能, NASA 研究中心研制了几类适用于 PFPE 的添加剂^[15,16], 主要包括全氟聚醚修饰的苯基膦、磷嗪、羧酸、磷酸酯及硫代磷酸酯, α 、 β 二酮、间氮硫茛、酰胺类以及硫酸酯等 研究表明, 上述几类化合物与 PFPE 具有良好的相容性, 除全氟聚醚修饰的间氮硫茛以外, 其它几类添加剂均能够使 PFPE 的磨损率降低 50% 以上, 其中以全氟聚醚修饰的酰胺及硫酸酯效果最为明显(可降低约 85%) 此外, 全氟聚醚修饰的苯基膦、磷嗪以及羧酸也能够有效降低 PFPE 的磨损率 同时, Street 等^[17]将碳纳米颗粒作为添加剂用于 PFPE 中, 结果发现, 碳纳米颗粒在大气环境中能够降低 PFPE 的摩擦系数(约 50%), 同时延长其使用寿命, 而在真空环境中的使用寿命比无纳米粒子时要短, 而摩擦系数与纯 PFPE 相当

2.2 PFPE 在磁记录及微机电系统中的应用

目前, PFPE 作为薄膜用于磁介质存储系统及微机电系统的研究主要集中于薄膜制备及其测量、微观摩擦过程和失效机理方面^[18].

PFPE 在磁介质存储系统中采用双层膜形式而起到润滑作用^[19~21], 第一层为键合层, 由含活性端基(羟基、氨基及羧基等)的 PFPE 与底材表面键合, 形成一层牢固的 PFPE 薄膜而起到保护底材的作用; 第二层为移动层, 由具有非活性端基的 PFPE 吸附于键合层上形成, 其总厚度约为 1~4 nm. 这样既能够保证 PFPE 牢固吸附于摩擦表面, 又能保证 PFPE 具有良好流动性 Sinha 等^[22]的研究发现, 双层膜的摩擦系数随第二层膜厚度增加而降低, 并且与湿度及温度相关, 当温度高于 10 °C 时摩擦系数随湿度增加而降低, 但当温度低于 5 °C 时则随湿度增加而增大, 之后

又随之降低;而耐磨寿命与底层的键合度有关,当键合度在80%以上时具有较长寿命 Choi等^[23]将含烷基的硅烷通过自组装技术形成键合层,再将PFPE吸附于键合层上,同时采用原子力显微镜(AFM)进行研究,结果发现其摩擦系数随硅烷层厚度增加而降低,他们认为,这是由于厚度增加使得薄膜的弹性变大所致。

由于PFPE存在电荷诱导的降解作用,从而导致其润滑失效。为此,近年来开展了将磷嗪及其衍生物作为磁记录系统润滑剂的研究 Walman等^[24]研制了一端为羟基另一端为环三磷嗪的全氟聚醚,并成功地制备出厚度为1.3 nm的超薄膜。研究结果表明,这种薄膜的承载能力高于PFPE Perettie等^[25, 26]将X-1P引入磁盘表面并考察了其润滑性能。结果发现,X-1P能够有效增加薄膜的承载能力,但当X-1P薄膜厚度较大时其寿命较低,而当厚度较小时不仅能够起到良好的润滑性能,还可以抑制氧化铝与PFPE之间的反应。

3 PFPE的润滑机理

在大气环境、较大载荷、较高速度及钢/钢摩擦副条件下,PFPE的主要润滑机理为:PFPE在摩擦时由于摩擦作用发生断链并产生F原子,F原子与摩擦表面的Fe元素形成氟化铁而起到耐磨作用;同时由于在大气环境中摩擦表面存在一定的氧化铁,且氟化铁夹杂于其中,使得氟化铁/氧化铁保护层非常致密,因此摩擦过程表现为低摩擦和低磨损状态。

在真空、往复运动条件下,由于摩擦表面不存在氧化铁保护膜而只有氟化铁,氟化铁为1种脆性化合物,在摩擦过程中氟化铁不断被清除而又不间断生成,在这种往复摩擦过程中表现为低摩擦和高磨损状态。这就是摆动机构中摩擦系数小而磨损大的主要原因。而当摩擦过程为同一方向时氟化铁较难被清除,因此摩擦过程表现为低摩擦和低磨损状态^[27~29]。在低载、低速的条件下,上述机理似乎并不适用。王金清等^[30]将PFPE涂敷于单晶硅表面并将其与钢在低速、低载荷下对磨,发现摩擦初期表现为低摩擦,随后摩擦系数则呈上升趋势,而在摩擦表面并未检测到氟化铁。分析其原因主要是由于摩擦初期PFPE分子在摩擦表面产生吸附,使摩擦表面存在PFPE的保护层,从而降低了摩擦系数,但随着摩擦的进一步进行,摩擦表面的吸附层遭到破坏而导致摩擦系数升高。

4 PFPE的失效机理

PFPE的失效机理可分为热分解、交联聚合和降

解3种。促使其降解的主要因素包括氧化、电解、辐射及气氛等。

Hong等^[31]在TiO₂纳米粒子光催化降解硝基苯酚的研究中采用了含胺基PFPE。结果发现TiO₂纳米粒子对PFPE具有很强的降解作用。由于降解属于氧化还原过程,因此Greve等^[32]在研究磁盘润滑失效机理时,采用氧化还原电池的方法使PFPE与Fe、Co、Ni、Al、Cr及Ti等金属接触并研究了其氧化还原电势。结果发现当PFPE与Fe、Co及Ni金属表面接触时,由于金属表面形成不连续的氧化物薄膜,且其氧化价态为金属的最高价态;而当与Al、Cr及Ti金属接触时,其表面为连续的氧化物薄膜,同时在Al表面检测到氟离子,证明氧化铝的确对PFPE具有降解作用。而Dickinson等^[33]的研究则发现,当PFPE作为润滑剂用于Fe、Ni、Al及Ti等金属摩擦副时,在摩擦过程中发现了瞬时电流,其中以Al/Al摩擦副的电流最为明显。据此认为PFPE在摩擦过程中出现的瞬时电流是其失效的主要原因。Nakayama等^[34, 35]在研究金刚石薄膜在氢气气氛中PFPE润滑条件下的摩擦磨损行为时也检测到由C和F及C和O组成的正负粒子,并在摩擦副之间存在一定的电压,同时将这种现象定义为摩擦微等离子体。Morales等^[36~38]认为PFPE的降解机理分为2种,一种是在路易斯酸(如Al₂O₃)的催化条件下发生降解,另一种则为摩擦过程中的热分解。此外,由于摩擦过程中摩擦表面存在大量电荷,对PFPE的分解具有非常大的诱导作用。Pradeep等^[39~41]发现,PFPE在电子诱导下形成CF₃⁺及C₂F₇⁺等离子,从而导致PFPE对金属的腐蚀。Gielbert等^[42]则通过飞行质谱验证了PFPE表面正离子的存在。Wasem等^[43]认为PFPE对摩擦过程中的游离电子非常敏感,由于电子的激发造成了PFPE的分解。Fukuchi等^[44]则发现二价阳离子对PFPE也具有降解作用,其主要原因是由于PFPE结构中的氧元素与二价阳离子发生配位作用的结果,其降解能力由大到小排列顺序依次为:Cu²⁺ > Ni²⁺ > Co²⁺ > Fe²⁺ > Mn²⁺ > Mg²⁺。

近来Faucitano等^[45]考察了杜邦公司生产的Krytox1525等全氟聚醚油的抗辐照性能,采用伽马射线对全氟聚醚油进行辐照,并采用前线分子轨道理论进行了计算。结果表明,经辐照后全氟聚醚油发生了分解,其中C—O键及C—C键在辐照过程中产生了电子激发,使该键均裂为自由基,进而导致PFPE分子重排,并伴随大量小分子产生。而C—F键在辐照过程中未出现明显变化,但由于分子重排后出现酰

氟端基并导致金属腐蚀 Marchionni 等^[46]在对含氢氟代烃的辐照试验中也发现了类似结果 Pan 等^[47]在对 PFPE 进行 XPS 分析时发现 OCF₃、CO₂ 和 C₂F₆ 气体产生, 认为这是由于样品在测试时受到 X 射线照射而产生降解的结果 Matsunuma 等^[48]在研究磁盘中无定形碳与氧化铝-氧化钛陶瓷的摩擦性能时发现, 在摩擦过程以及经紫外光照射后, PFPE 的结构中均出现了部分羰基, 经过分子轨道理论分析认为, 形成羰基的原因是由于摩擦过程和紫外光照射后的 PFPE 出现了负离子, 并与体系中另外 1 个 PFPE 分子结合的结果 Zhao 等^[49]认为 PFPE 经紫外光照射后加速了其降解过程, 这是由于紫外光照射 PFPE 后产生了低能量电子的作用 Vurens 等^[50]发现采用 14 eV 的电子就可以促使 PFPE 交联 NASA 的 Herrera-Fierro 等^[51]通过分析认为, PFPE 的失效是由于在摩擦过程中润滑油的摩擦聚合, 并生成了难溶的高分子化合物

综上所述, PFPE 的润滑失效机理可以分为热分解、交联和降解 而降解机理又存在电荷降解和光催化降解 2 种形式 在光催化降解中, 紫外光、X 射线以及伽马射线均能够引起 PFPE 的降解, 同时摩擦作用、紫外光以及 X 射线也能够引起 PFPE 的交联; 摩擦表面的电荷则能够引起 PFPE 的诱导降解

5 结束语

全氟聚醚(PFPE)在航空、航天以及磁记录系统中得到了广泛应用 由于 PFPE 存在复杂的失效机理, 尤其在空间环境中存在辐照降解、交联作用和催化降解, 因此尽快研究开发新型耐环境侵蚀、低摩擦、长寿命和适用于空间环境的润滑油已成为空间技术研究的关键 在磁记录系统和微机电系统中, 由于 PFPE 易于电荷诱导降解, 因此改善和提高其稳定性仍是一项具有挑战性的研究课题

参考文献:

- [1] Sianesi D, Zamboni V, Fontanelli R, *et al* Perfluoropolyethers: Their physical properties and behavior at high and low temperature[J]. *Wear*, 1971, 18: 85-100
- [2] Anderson J C, Flabbi L, Caporiccio G. The lubrication of plastics by perfluoropolyether fluids[J]. *J Synthetic Lubricants*, 1998, 5(3): 199-214
- [3] [http://www.dupont.com/lubricants/en/literature/pdf_files/H-58519-2.pdf\[DB/OL\]](http://www.dupont.com/lubricants/en/literature/pdf_files/H-58519-2.pdf[DB/OL])
- [4] Cosmacini E, Veronesi V. A study of the tribological behav-

ior of perfluoro-polyethers[J]. *Wear*, 1986, 108(3): 269-283

- [5] Chengfeng Ye, Wein L iu, Yunxia Chen, *et al* Tribological behavior of Dy-sialon ceramics sliding against SiN₄ under lubrication of fluorine-containing oils[J]. *Wear*, 2002, 253: 579-584
- [6] Morales W, Donald H Buckley. Concentrated contact sliding friction and wear behaviour of several ceramics lubricated with a perfluoropolyalkylether at 25 [J]. *Wear*, 1988, 123(3): 345-354
- [7] Jones J W R, Ajayi O O, Wedeven L D. Enhancement of perfluoropolyether boundary lubrication performance[J]. *Lubrication Engineering*, 1997, 53(6): 24-31
- [8] 刘维民, 叶承峰, 张泽抚. 芳氧基环三磷腈化合物的合成方法[P]. CN 1121406C, 2003
- [9] Sadeghi F, Trope E J, Schnell T J. Performance characteristics of perfluoroalkylpolyether synthetic lubricants[J]. *Tribology Transactions*, 1996, 39(4): 849-854
- [10] Jones J W R, Poslowski A K, Shogrin B A, *et al* Evaluation of several space lubricants using a vacuum four-ball tribometer[M]. NASA TM, 1998: 208654
- [11] Loomis W R, Fusaro R L. Liquid lubricants for advanced aircraft engines[M]. NASA TM, 1992: 104531
- [12] Fusaro R L, Khonsari M M. Liquid lubricants for space application[M]. NASA TM, 1992: 105198
- [13] Jones J W R, Jansen M J. Space tribology[M]. NASA TM, 2000: 209924
- [14] Fusaro R L. Lubrication of space systems[M]. NASA TM, 1994: 106392
- [15] Jones J W R, Ajayi O O, Goodell A J, *et al* Enhancement of perfluoropolyether boundary lubrication performance[M]. NASA TM, 1994: 106937
- [16] Shogrin B A, Jones J W R, Herrera-Fierro P, *et al* Evaluation of boundary-enhancement additives for perfluoropolyethers[M]. NASA TM, 1997: 107393
- [17] Street K W, Marchetti M, VanderWal R L, *et al* Evaluation of the tribological behavior of Krytox 143AB with nano-onions[M]. NASA TM, 2003: 212301
- [18] 张会臣, 雒建斌. 硬盘润滑剂性能及其对磁记录系统动力学特性的影响研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2004, (24)5: 476-482
- [19] Zhang H C, Luo J B. Performances of lubricants in hard disk and their influences on dynamic characteristics of magnetic recording system[J]. *Tribology*, 2004, 24(5): 476-482
- [19] Kato K, Masahiro K, Mayeed M S, *et al* Friction and durability characteristics of ultrathin perfluoropolyether lubricant film composed of bonded and mobile molecular layers on diamond-like carbon surfaces[J]. *Wear*, 2004, 257(9-10): 909-915
- [20] Choi J, Morishita H, Kato T. Frictional properties of bilayered mixed lubricant films on an amorphous carbon surface: effect of alkyl chain length and SAM/PFPE portion[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 228: 191-200
- [21] Xu J, Kato K, Nishida T. The effect of temperature and hu-

- midity on the friction and wear of magnetic tape[J]. *Wear*, 1997, 203-204: 642-647.
- [22] Sinha S K, Kawaguchi M, Kato T, *et al* Wear durability studies of ultra-thin perfluoropolyether lubricant on magnetic hard disks[J]. *Tribology International*, 2003, 36: 217-225
- [23] Choi J, Ishida T, Kato T, *et al* Self-assembled monolayer on diamond-like carbon surface: formation and friction measurements[J]. *Tribology International*, 2003, 36: 285-290
- [24] Walman R J, Pocker D J, Deng H, *et al* Investigation of a new cyclotriphosphazene-terminated perfluoropolyether lubricant, properties and interactions with a carbon surface[J]. *Chemistry of Materials*, 2003, 15(12): 2362-2375
- [25] Perette D J. The effect of phosphazene additives to passivate and stabilize lubricants at the head/disk interface[J]. *Tribology International*, 2003, 36: 489-491.
- [26] Luo J, Yang M, Zhang C, *et al* Study on the cyclotriphosphazene film on magnetic head surface[J]. *Tribology International*, 2004, 37: 585-590
- [27] Carre D J, Makowitz J A. The reaction of perfluoropolyether oil with FeF_3 , AlF_3 and AlCl_3 at elevated temperature[J]. *ASLE Transactions*, 1985, 28: 40-46
- [28] Carre D J. Perfluoropolyether oil degradation: influence of FeF_3 formation on steel surfaces under boundary condition[J]. *ASLE Transactions*, 1986, 29(1): 121-125
- [29] Mori S, Morales W. Decomposition of perfluoroalkylpolyethers in ultra-high vacuum under sliding conditions[J]. *Tribology Transaction*, 1990, 33: 325-332
- [30] 王金清, 杨生荣, 齐尚奎, 等. 单晶硅表面全氟聚醚润滑膜的制备及摩擦特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2001, 21(6): 401-404
- Wang J Q, Yang S R, Qi S Q, *et al* Preparation and friction behavior of perfluoropolyether lubricant film on single crystal silicon[J]. *Tribology*, 2001, 21(6): 401-404
- [31] Hong S S, Lee M S, Ju C S, *et al* Photocatalytic decomposition of p-nitrophenol over titanium dioxides prepared in water-in-carbon dioxide microemulsion[J]. *Catalysis Today*, 2004, 93-95: 871-876
- [32] Greve R J, Langford S C, Dickinson J T. Oxidation and reduction reactions responsible for galvanic corrosion of ferrous and reactive metals in the presence of a perfluoropolyether lubricant: Fomblin Z-DOL[J]. *Wear*, 2001, 249: 727-732
- [33] Dickinson J T, Langford S C, Faulter sack W, *et al* Application of transient current measurements: evidence for galvanic corrosive wear of aluminum by a polyperfluoroether lubricant[J]. *Wear*, 1998, 215: 211-222
- [34] Nakayama Keiji, Nguyen Stephanie. Triboelectromagnetic phenomena in a diamond/hydrogenated-carbon-film tribosystem under perfluoropolyether fluid lubrication[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 158: 229-235
- [35] Nakayama Keiji. Triboemission of electrons, ions, and photons from diamondlike carbon films and generation of triboelectric plasma[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 188-189: 599-604
- [36] Morales, Wilfredo. Decomposition of a commercial perfluoropolyalkylether on alpha and gamma catalytic alumina[J]. *Tribology Transactions*, 1996, 39(1): 148-156
- [37] Bhatia C S, Fong W, Chen C, *et al* Tribochemistry at the head and disk interface[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, 35 (2): 910-915
- [38] Liu Jianwei, Stimman Michael J, Gui Jing. Catalytic decomposition of perfluoropolyether lubricants[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, 39: 749-753
- [39] Pradeep T, Miller S A, Cooks R G. Surface-induced dissociation from a liquid surface[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 1993, 10(4): 769-773
- [40] Satoshi Matsunuma, Yuzuru Hosoe. Molecular orbital simulations on electron-induced degradation of perfluoropolyethers with several types of segments[J]. *Tribology International*, 1997, 30(2): 121-128
- [41] Matsunuma Satoshi, Miura Toshinasa. Theoretical simulations of electron-induced degradation of perfluoropolyether[J]. *Tribology Transactions*, 1996, 39(2): 380-385
- [42] Janine deMaaijer-Gielbert, Beijersbergen H M, Piet G Kistemaker, *et al* Surface-induced dissociation of benzene on a PFPE liquid insulator in a time-of-flight mass spectrometer[J]. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 1996, 153(2-3): 119-128
- [43] Wasen J V, Lamarque B L, Langford S C, *et al* Triboelectric charging of a perfluoropolyether lubricant[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(4): 2202-2207
- [44] Fukuchi, Takashi. Degradation of perfluoropolyether fluids with metal ions[J]. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*, 1999, 121(2): 348-351
- [45] Faucitano A, Buttafava A, Karolczak S, *et al* The chemical effects of ionizing radiations on fluorinated ethers[J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2004, 125: 221-241
- [46] Marchionni G, Guarda P A, Buttafava A, *et al* The radiation chemistry of acyclic hydrofluoro and perhalogenated ether and hydrocarbon compounds[J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2003, 121: 153-162
- [47] Pan F M, Lin Y L, Horng S R. Decomposition of perfluoropolyethers during XPS measurements[J]. *Applied Surface Science*, 1991, 47(1): 9-16
- [48] Matsunuma, Satoshi. The initial step of tribochemical reactions of perfluoropolyether on amorphous carbon[J]. *Wear*, 1997, 213(1-2): 112-115
- [49] Zhao X, Bhushan B. Studies on degradation mechanisms of lubricants for magnetic thin-film rigid disks[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2001, 215(2): 173-188
- [50] Vurens G H, Gudeman C S, Lin L J, *et al* Mechanism of electron curing of perfluoropolyethers[J]. *Polymer Preprints, Division of Polymer Chemistry, American Chemical Society*, 1990, 31(2): 700-706
- [51] Herrera-Fierro P, Shogrin B A, Jones J W R. Spectroscopic

analysis of perfluoropolyether lubricant degradation during
boundary lubrication[M]. NASA TM, 1997. 107299

Progress of Tribology of Perfluoropolyether Oil

FENG Da-peng, WENG Li-jun, LIU Weimin

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

Abstract: Perfluoropolyether (PFPE) oil has been used as lubricant for aerospace, magnetic recording system and so on for decades. A review was given on synthetic method, physical and tribological properties, lubrication and degradation mechanism of PFPE, especially in aerospace and magnetic recording system. Compared to hydrocarbon lubricant, PFPE has wider temperature range, lower vapor pressure, but usually much more wear, and it is easily degraded by catalysis, electron and ion beam. It is proposed that more chemical stability, better antiwear ability lubricant for aerospace should be developed.

Key words: perfluoropolyether (PFPE), tribological behaviors, invalidation mechanism

Author: FENG Da-peng, male, born in 1970, Ph.D., Associate Professor, e-mail: dpfeng@lsl.ac.cn

第 3 届世界摩擦学会议简讯

由美国机械工程学会 (ASME) 和摩擦润滑工程学会 (STLE) 主办的第 3 届世界摩擦学会议于 2005 年 9 月 12~16 日在美国首都华盛顿举行, 美国总统布什给大会发了贺信, 来自 60 多个国家近 1 000 名代表以及 35 个学术团体参加了会议, 其中我国机械工程学会摩擦学分会理事长张嗣伟教授, 清华大学雒建斌教授、金元生教授、孟永钢教授, 中国科学院兰州化学物理研究所白明武教授, 中国矿业大学葛世荣教授, 河南科技大学张永振教授等 15 人出席了本次摩擦学盛会。会议按照材料磨损与疲劳、接触行为与摩擦、表面工程与涂层、添加剂与摩擦化学、轴承设计与应用和微米与纳米摩擦学等 16 个分支学科进行, 部分专家学者作了大会口头发言。会前出版了会议论文集 (光盘版), 共收录论文 966 篇, 比较全面地反映出了近年来全球摩擦学领域的最新研究成果 (河南科技大学邱明报道)。