

分子沉积膜摩擦学研究进展*

肖宇琦¹, 张嗣伟¹, 王德国¹, 高芒来²

(1. 中国石油大学(北京) 机电工程学院, 北京昌平, 102249; 2. 中国石油大学(北京) 化学科学与工程学院, 北京昌平, 102249)

摘 要:概述了近十年来分子沉积膜在摩擦学领域的研究进展, 包括分子沉积膜的纳米摩擦性能、粘附特性、磨损性能和力学特性, 以及采用分子动力学模拟对摩擦产生机制、粘滑现象的理论分析, 肯定了分子沉积膜的减摩润滑性能, 在此基础上提出了今后的主要研究方向。

关键词:分子沉积(MD)膜; 纳米摩擦性能; 粘附特性; 磨损特性; 力学特性

中图分类号:TB43; 0848.4

文献标识码:A

文章编号:1007-9289(2006)06-0013-07

Advances in Studies on Tribology of Molecular Deposition Films

XIAO Yu-qi¹, ZHANG Si-wei¹, WANG De-guo¹, GAO Mang-lai²

(1.School of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249 China; 2. Faculty of Chemical Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249 China)

Abstract: An overview of the advances in studies on tribology of molecular deposition (MD) films was presented to summarize the advances in nanofrictional, adhesive, wear and mechanical behaviors, as well as the molecular dynamics simulation on nanotribological properties of the film in the past decade. Some key research topics to be investigated further were indicated.

Key words: molecular deposition (MD) film; tribological behavior; adhesive property; wear character; mechanical behavior

0 引 言

静电相互作用形成的分子沉积膜(molecular deposition film, 简称MD膜), 作为一种有序分子膜, 具有制备方法简易, 有序性好和膜厚可控等优点^[1,2]。MD膜的构筑单元一般为(聚)电解质, 在水溶液中电离后, 阴(阳)离子在静电作用驱动下逐层沉积而成膜, 其膜厚可通过调节溶液pH值或离子强度加以控制^[3,4], 少数在非水介质中成膜^[5]。性质不同的成膜单体所构筑的分子沉积膜可相应表现出光电^[6]、生物催化^[7]、电化学^[8,9]等特性。研究表明^[10]: MD膜具有一定的减摩、润滑特性。选择具有良好润滑性能的成膜单体分子以制得具有减摩和润滑作用的MD膜, 有望实现超低摩擦、近零磨损和纳米膜润滑, 以满足计算机大容量高密度磁存储系统、微型机械和微机电系统(MEMS)

等的摩擦学性能要求。2005年张嗣伟曾应邀在《中国表面工程》上简要介绍了MD膜的研究概况及其发展前景^[11], 在此基础上, 文中综述了近十年来MD膜的摩擦学研究进展。

1 MD膜的摩擦与润滑特性

近十年来对MD膜的摩擦与润滑特性进行了广泛的研究, 研究表明^[10,12]: 经MD膜修饰的衬底都具有一定的润滑作用, 而且这种作用受到多方面因素的影响。

1.1 膜自身性质

1.1.1 成膜单体分子性质

选择具有特定力学或摩擦学性能的成膜单体对MD膜的摩擦性能有实质性的影响。在MD膜中分别引入具有润滑性能的石墨氧化物^[13,14]和耐磨性好的二氧化钛^[15,16], 可降低被修饰表面的摩擦因数, 但如何防止二氧化钛等纳米粒子的聚集有待于进一步研究。

杨岭等^[17]考察了包裹Pt纳米颗粒的聚酰胺-胺

收稿日期: 2006-10-12; 修回日期: 2006-10-20

基金项目: *国家自然科学基金资助项目(50575151)

作者简介: 肖宇琦(1975-), 女(汉), 江西信丰人, 博士生。

型分子与重氮树脂形成的多层自组装膜,发现其经光照处理后具有减摩,不易变形,排列有序,表面平滑等特性。并认为其原因在于:光照后膜间分子以共价键的结合,增强了膜的稳定性;Pt 纳米粒子在膜中相当于轴承支架,使膜的承载能力增强;而树枝状分子的多个支链的柔性和粘弹性则使得膜具有减摩功能。

稀土元素形成的自组装膜^[18]不仅能大大降低摩擦因数,还表现出很好的耐磨性能(图1)。

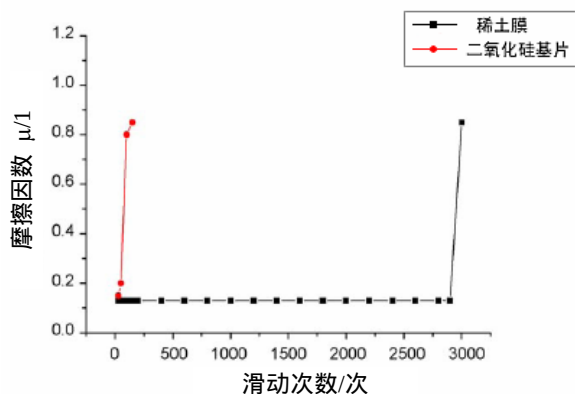


图1 磨损与摩擦因数关系曲线^[18]

Fig.1 Wear dependence of the friction coefficients^[18]

通常,MD膜中刚性基团的有序排列可提高MD膜的规整性,增强其承载能力,但会造成膜表面的堆砌缺陷,而引入柔性链段则可弥补堆砌缺陷。因此,刚性基团与柔性链段的优化组合可望使MD膜表现出良好的摩擦学性能。黄兰等^[19~21]在研究含C₆₀的三元共聚物和重氮树脂自组装膜和含C₆₀的聚电解质和重氮树脂自组装膜中发现,C₆₀分子提高了自组装膜的承载能力,却降低了膜的摩擦性能;柔性链虽然承载能力差,但在降低膜的摩擦力和减小膜组装缺陷方面有一定的作用。Cao等^[22]比较富勒酸/重氮树脂((C₆₃-(COOH)₆)/DR)MD膜和富勒酸/重氮树脂/聚丙烯酸(C₆₃-(COOH)₆/DR/PAA)MD膜的摩擦性能发现,刚性C₆₀分子和PAA分子柔性长链在膜中的组装不仅增强了膜的刚性和承载能力,也提高了其润滑性能。王海军等^[23]发现,液晶聚芳酰胺自组装膜具有良好的摩擦学性能,原因在于:液晶聚芳酰胺分子可与基底形成较强的氢键,使膜与基底结合紧密;其次,液晶分子特别是经热处理的分子,其规整排列可增强膜的

有序性和刚性;液晶分子在基底的有序排列使得剪切发生在柔性烷基链段。Ahn等^[24]的研究表明:长链烷基单层自组装膜比短链烷基单层自组装膜表现出更大的摩擦力。推测其原因为,长链烷基分子间的横向作用力大于短链间的横向作用力,以致在剪切作用下不同链长的分子表现出不同的柔顺性,造成摩擦力的差异。

1.1.2 修饰端基及表面电荷

中国石油大学(北京)MD膜研究组较早地进行了这方面的研究。发现具有修饰端基的MD膜可以明显改善摩擦特性^[25],其原因在于:MD膜与衬底材料结合紧密,在材料表面形成致密层,使得摩擦过程中的能量耗散只能通过端基的振动和转动来完成;根据JKR理论,粘附力与针尖的半径的平方根成正比。由试验测定MD膜修饰的金表面粘附力很小可以推断,在试验过程中针尖与样品表面实现原子级接触;因而试样的摩擦特性仅由针尖和试样表面的分子端基决定。研究还表明:烷基修饰的MD膜的摩擦因数比层数相同但无端基修饰的MD膜的摩擦因数小^[26]。MD膜的活性端基会导致膜的纳米摩擦性能不稳定,而非活性端基不仅能够使摩擦性能稳定,并且还可以降低表面的摩擦力^[27]。表面电荷会造成摩擦过程中膜对探针的粘附,从而增大表面的摩擦力。对Si₃N₄针尖而言,表面正电荷对膜的摩擦力和摩擦因数的影响比负电荷的影响大一个数量级(图2)^[28]。而加热可以消除聚丙烯胺(PAH)/石墨氧化物(GO)MD膜表面的电荷,降低其表面粘附力,从而降低表面的摩擦力^[14]。

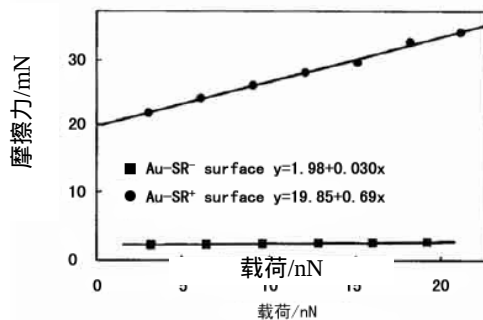


Fig.2 Frictional force vs. loading force on ionized Au surface^[28]

MD膜表面修饰端基的性质可直接影响膜的

表面能和表面形貌,进而影响膜的摩擦性能。Ahn等^[24]认为,与分子链长对膜的摩擦性能的影响相比,修饰端基是主要影响因素。他们比较了金衬底上甲基、羟基、羧基3种端基修饰的单层自组装膜的动摩擦因数,发现表面能大的膜其摩擦力也大;羧基修饰的单层膜,由于分子间存在氢键,其摩擦力最大。然而,尽管羧基修饰的膜的表面能与羟基修饰的膜的表面能相近,但羧基修饰的膜表现出的摩擦力远大于羟基修饰的膜的摩擦力,对此目前还没有作出合理的解释。

1.1.3 膜的层间作用力、表面硬度和表面形貌

MD膜经加热^[14,15]或紫外光照射^[19~22]处理,膜中的官能团间发生反应,其层间作用力由离子键转变为共价键,可增大薄膜自身的结合强度,增强膜稳定性,提高膜的摩擦学性能。

冯大鹏等^[14,15]发现,加热后,MD膜中纳米粒子长大,导致薄膜表面粗糙度降低和表面硬度提高,从而降低薄膜的摩擦力。研究表明^[29]:PAH/GO MD膜的摩擦力变化滞后于表面形貌和硬度的变化,但表面硬度的细微变化却会引起摩擦力的较大变化。这可能是由于:原子力显微镜探针的粘附力导致摩擦力变化的滞后性;另一方面,膜表面弹性的不均一使摩擦力受表面硬度的影响较为显著(图3)。

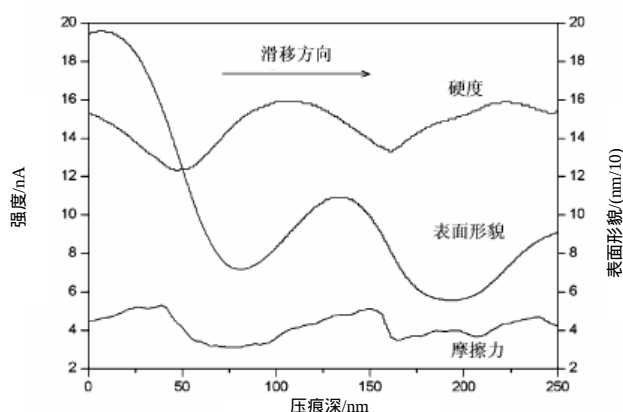


图3 七层PAH/GO MD膜的表面形貌、硬度、摩擦力随压痕深度的变化^[29]

Fig.3 Variations of topography, hardness, and friction force of the seven-layer PAH/GO MD film with the AFM indentation depth^[29]

此外,同一种MD膜与不同对偶材料组成的摩

擦副,如3-氨基丙基-三甲氧基硅烷(APS)MD膜与铜膜,APS MD膜与镍膜,由于界面间的作用力不同,也会导致同种MD膜表现出不同的摩擦性能^[30]。

1.2 外部因素

1.2.1 载荷

冯大鹏等^[13]的研究表明,石墨氧化物MD膜表面的摩擦因数随载荷的增大呈下降趋势,当载荷超过一定限度,摩擦因数下降幅度明显减小并趋于稳定。

高芒来等^[31]在不同修饰的硅表面上考察了载荷对纳米摩擦性能的影响。结果表明,不同MD膜修饰的硅表面在较低的载荷下,摩擦力均随着载荷成线性增加,而单层磺化酞菁铜MD膜修饰的硅表面因非活性端基的存在而没有表现出减摩特性。

1.2.2 扫描速率

王强斌等^[10,32]在载荷固定、扫描速率变化的条件下,对用5种不同类型的MD膜修饰的金表面进行了纳米摩擦特性研究,发现摩擦力均下降,原因可能是由于非活性端基烷基链的分子刷效应;其中以沉积3层MD膜金表面的润滑效果更好。研究还表明,修饰非活性端基的阴离子化金表面的润滑效果最好。

高芒来等^[33]研究了不同类型MD膜修饰的硅表面的摩擦力随扫描速率变化的规律。硅表面、羟基化硅表面硬度大,在摩擦过程中表面在很大程度上发生弹塑性变形,摩擦力随扫描速率的增大而增大;氯丙基硅烷化硅表面的摩擦力随着扫描速率的增大先减小后增大,表现出较好的二次函数关系,原因是在扫描速率增大的过程中,扫描探针和摩擦热的作用使膜的结构从无定形态转变为晶态。磺化酞菁铜单层MD膜修饰的硅表面在摩擦过程由于其热导性不好和表面易塑性变形而造成表面的塑性流动,其摩擦力随扫描速率的增大而减小。

1.2.3 相对湿度和气氛

相对湿度对MD膜的摩擦特性有显著影响。相对湿度增大时,冷凝水增多,形成的水膜铺满整个表面,使得界面间的剪切强度减小,摩擦力显著减小^[32,34]。高芒来等^[31]发现,水可以降低针尖与样品之间的粘附力,因此得出,相对湿度越大,摩擦力和摩擦因数越低;气氛为高纯氮时,阴离子修饰的金表面体系的摩擦学特性明显不同于大气环境下

该体系的摩擦学性能。杨广彬等^[35]发现相对湿度对含疏水性端基的MD膜的摩擦性能影响很小。

钱林茂等^[36]在 5 %~98 %湿度范围内研究了相对湿度对自组装单层膜摩擦性能的影响。由于自组装膜端基的疏水性,相对湿度只在一定的湿度范围对界面间的摩擦力产生影响。目前还没有文献报道在如此大范围内相对湿度对MD膜摩擦性能的影响。

2 MD 膜的粘附特性

摩擦与粘附有着十分密切的关系。分子动力学模拟的结果表明:界面间摩擦现象是MD膜分子与对磨表面分子之间的粘附作用的结果^[37~39]。王德国等^[40]对石英岩MD膜的表面力-位移曲线、表面形貌像、调制力像和摩擦力像的分析证明:其摩擦力降低的重要原因是由于表面粘附力的降低。还推导出了根据实测的力位移曲线计算粘附力的公式,并发现MD膜既可降低石英岩表面的粘附力,也能降低粘附力的离散程度^[41]。研究表明,在摩擦过程中,粘附现象的存在,不仅会改变表面的性质,造成摩擦因数等摩擦特性的变化,而且还会因增大法向力(有时达到 10^2 nN 数量级),导致摩擦力增加^[42]。

3 MD 膜的磨损特性

MD膜在一定程度上能够保护被修饰基底。Pavoor等^[43]通过销-盘试验发现,无膜修饰的玻璃表面在对磨几次后就出现磨屑转移至玻璃表面,而沉积了 70 nm厚的PAH/PAA膜在循环 2000 次后却没有发现磨屑的转移,而且表面干净,磨屑很少(图4),说明基底得到保护。

MD膜的磨损性能与其构筑单元分子性质、膜间结合力、膜层数以及对偶材料性质等因素密切相关。

高水英等^[44]发现单晶硅表面分子沉积聚合物纳米复合膜有减摩作用;沉积层数较多的超薄膜的耐磨性更好,而且适宜的加热处理可提高超薄膜的耐磨寿命,但其原因有待于进一步研究。他们还发现,聚乙烯亚胺/聚对苯乙炔磺酸钠分子沉积超薄膜在低载荷下具有良好的减摩、耐磨性能,并认为复合沉积膜的磨损机理主要为粘着磨损^[34]。他们研制的酸性红 18 (AR18) 复合沉积膜具有良好的减摩和抗磨性能,认为这是由于AR18 中的刚性介晶基

团在成膜后与聚合物形成液晶态的层状结构,提高了膜的有序性和规整性^[45]。

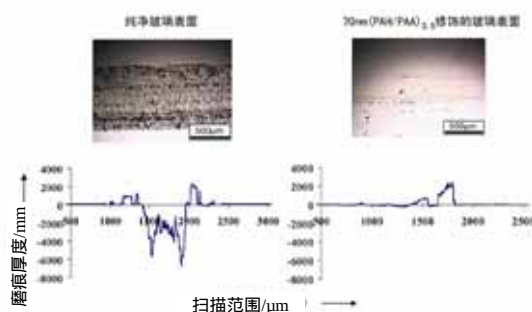


图4 循环 2000 次后磨痕的光学图片和横断面的表面形态图^[43]

Fig.4 Optical micrographs and cross-sectional morphologies of wear tracks after pin-on-disk tests (2000 cycles)^[43]

杨广彬等^[35]发现,聚二烯丙基二甲基胺盐酸盐(PDDA)/聚对苯乙炔磺酸钠(PSS)MD膜与基底的结合力、端基所带电荷性质及其亲水性、膜层数都影响其耐磨性能。MD膜与基底以较弱的静电作用相结合时,膜层数的增加会削弱二者结合力,因而层数少的MD膜耐磨寿命长;当MD膜与基底结合力为强共价键时,膜的稳定性增强,层数多的MD膜耐磨性更好。带负电荷的端基,因其亲水性好,在相对湿度较大时可在膜表面形成水膜,降低了界面间的剪切强度,因此增加相对湿度可延长膜的耐磨寿命。而对于含疏水性端基的MD膜,相对湿度对其耐磨寿命的影响很小,膜层数是影响其耐磨性能的关键因素。他们研究了掺杂氢氧化铜 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 纳米微粒的PDDA/PSS多层膜的摩擦磨损行为,发现 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 纳米微粒可提高膜的承载力,减轻膜的塑性变形和粘着磨损^[46]。他们还考察了不同硬度的偶件材料对PDDA/PSS分子沉积膜摩擦学行为的影响及其磨损机制,认为同一种MD膜在与不同偶件材料对磨时,不同硬度的材料会产生不同的磨损机制,致使膜的耐磨寿命也不同^[47]。

王海军等^[48]认为,溶致液晶聚芳酰胺(PPTA)分子沉积膜与陶瓷偶件对磨过程,是MD膜的转移、转移膜在对偶面的形成以及转移膜的脱落所构成的平衡过程。PPTA MD膜的规整性、转移膜的致密性及其与对偶面之间的结合力等都直接影响膜的耐磨性。

值得注意的是Pavoor等^[49]通过研究PAA/PAH膜修饰矫形用的支撑表面的耐磨性,第一次从临床医学角度证实了聚电解质多层膜亦即MD膜的减磨性能,并指出其在整形外科的应用前景。

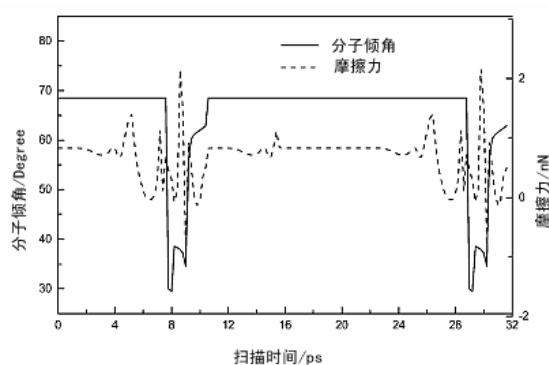
到目前为止,尽管在提高MD膜的耐磨性方面取得一些进展,但要达到实际应用还有相当一段距离。

4 纳米摩擦性能的分子动力学模拟

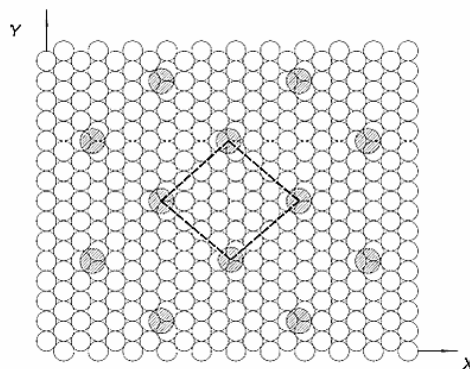
分子动力学模拟是研究有序分子膜纳米摩擦学特性的主要理论分析方法,尤其是对于研究摩擦的起源和原子或分子之间的相互作用以及能量耗

散的关系有重要作用。

兰惠清等^[37]等对金探针作用下的金表面十六烷基硫醇的分子动力学模拟,为探针与膜之间发生的粘滑现象作出了理论解释。此外,在考虑静电作用力的影响下,研究了金探针作用下分子沉积膜的纳米压痕过程^[38],为金探针和分子沉积膜间的粘着力作出了理论分析,可为新探针的设计提供参考。通过对金衬底MD膜在金探针扫描过程中纳米摩擦性能的分子动力学模拟,发现连续滑移和周期性的粘滑现象(图5a),并且与图5b中的分子取向一致。粘滑周期8.64 ps等于MD膜端基分子所形成的三角形晶格中最邻近原子间的距离^[39]。



(a)分子倾角、摩擦力随扫描时间的变化



(b)基底金原子与MD膜中硫原子的分布(○金原子●硫原子---MD膜分子取向)

图5 分子动力学模拟结果^[39]

Fig.5 Results of molecular dynamics simulation: (a) The variation of tilt angle θ and friction force with the scan time (b) Distribution of Au atoms on the substrate and sulfur atoms of the molecular deposition film (empty circles are Au atoms, shadow circles are sulfur atoms, dash lines are the lattice directions of molecular deposition film)^[39]

5 MD膜的力学性能研究

MD膜的摩擦学性能与其力学特性有密切关系。兰惠清等^[50]用纳米压痕仪研究了金衬底表面上的分子沉积膜的力学特性。发现分子沉积膜减小了洁净金衬底的弹性模量、硬度,其承载能力也减小。MD膜修饰的金衬底的纳米压痕曲线(图6)表明,沉积一层分子沉积膜确实能改善金衬底的材料特性。

6 结 语

国内外对MD膜的研究,尤其是对其纳米摩擦特性的研究已充分肯定了它在摩擦学应用上

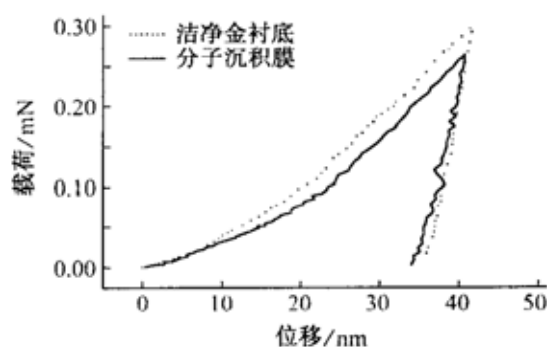


图6 纳米压痕曲线^[50]

Fig.6 Nano-indentation curves of both the pure Au substrate and MD film deposited on the Au substrate^[50]

的良好前景。由于它与LB膜以及其它自组装膜相

比,有鲜明的特点和一定的优点,因而近年来对它的研究越来越广泛。但就总体而言,目前国内对 MD 膜的研究基本上仍处在应用基础研究阶段,距实际应用还有相当一段距离。因此,今后应在优化成膜条件,提高 MD 膜耐磨性的基础上,合成并筛选出摩擦学性能优异的成膜体系,深入研究其成膜机制和影响因素,制备出多种摩擦学性能优良并具有实用价值的 MD 膜,以推动 MD 膜在摩擦学领域中的应用。

参考文献:

- [1] Janos H. Fendler. Self-assembled nanostructured materials [J]. Chem. Mater., 1996, (8): 1616-1624.
- [2] 王德国, 冯大鹏, 兰惠清, 等. 分子沉积膜的制备与应用 [J]. 机械工程材料, 2003, 27(3): 1-3, 7.
- [3] Dubas Stephan T, Schlenoff Joseph B. Factors controlling the growth of polyelectrolyte multilayers [J]. Macromolecules, 1999, 32(24): 8153-8160.
- [4] Ozzy Mermut, Barrett Christopher J. Effects of charge density and counterions on the assembly of polyelectrolyte multilayers [J]. J. Phys. Chem. B, 2003, 107(11): 2525-2530.
- [5] 虞新林, 王晓工. 在非水介质中制备聚电解质静电吸附自组装膜 [J]. 高分子学报, 2006, (1): 156-159.
- [6] Toshiki Fushimi, Akimichi Oda, Hideo Ohkita, Shinzaburo Ito. Photocurrent generation in heterostructured ultrathin films fabricated by layer-by-layer deposition of polyelectrolytes bearing Tris(2,2'-bipyridine)ruthenium(II) and ferrocene moieties [J]. Langmuir, 2005, 21(4): 1584-1589.
- [7] Aimin Yu, Zhijian Liang, Frank Caruso. Enzyme multilayer-modified porous membranes as biocatalysts [J]. Chem. Mater., 2005, 17(1): 171-175.
- [8] Yan Shen, Jianyun Liu, Aiguo Wu, et al. Preparation of multilayer films containing Pt nanoparticles on a glassy carbon electrode and application as an Electrocatalyst for Dioxygen Reduction [J]. Langmuir, 2003, 19(13): 5397-5401.
- [9] Li Xiaofang, Zhao Shuang, Yang Min, Sun Changqing, Guo Liping. Covalently attached multilayer assemblies of diazo-resins and binuclear cobalt phthalocyanines [J]. Thin Solid Films, 2005, 478(1~2): 310-317.
- [10] Wang Qiangbin, Gao Manglai, Zhang Siwei. Study on nanofriction properties of molecular deposition (MD) films on the Au substrate by atomic force microscopy [J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(10): 938-941.
- [11] 张嗣伟. 张嗣伟教授谈分子沉积膜的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2005, 18(1): 50-51.
- [12] 王强斌, 张嗣伟, 高芒来. 分子沉积 MD 膜对金衬底表面改性的研究 [J]. 中国表面工程, 1998, 11(4): 37-40.
- [13] 冯大鹏, 王德国, 张嗣伟. 石墨氧化物分子沉积膜的制备及其摩擦学行为研究 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 1-4.
- [14] 冯大鹏, 王德国, 张嗣伟. PAH 复合石墨氧化物分子沉积薄膜的制备及纳米摩擦学行为研究 [J]. 中国科学 (E 辑), 2004, 34(7): 730-736.
- [15] 冯大鹏, 王德国, 张嗣伟. PAH/PAA(TiO₂) 分子沉积膜及其纳米摩擦学行为的研究 [J]. 机械工程材料, 2003, 27(11): 13-14, 38.
- [16] 张晟卯, 张治军, 党鸿辛, 等. 磺化聚苯乙烯/二氧化钛有序交替纳米复合多层膜的制备、结构表征及其微观摩擦学行为 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 38-40.
- [17] 杨岭, 罗宇飞, 贾欣茹, 等. PAMAM 树枝状高分子自组装膜的微摩擦性能研究 [J]. 高分子学报, 2004, (5): 780-784.
- [18] Cheng Xianhua, Bai Tao, Wu Ju, Wang Liang. Characterization and tribological investigation of self-assembled lanthanum-based thin films on glass substrates [J]. Wear, 2006, 260(7~8): 745-750.
- [19] 黄兰, 黄飞, 何元康, 等. 水溶性含 C60 聚电解质的制备及其与重氮树脂自组装 AFMPFFM 的初步研究 [J]. 高分子学报, 2002, (2): 192-197.
- [20] 黄兰, 顾倩颐, 何元康, 等. 含 C60 的聚电解质自组装膜微摩擦性能的研究 [J]. 高等学校化学学报, 2002, 23(6): 1193-1197.
- [21] Lan Huang, Xiaorong Hou, Yuankang He, et al. Fabrication and AFM/FFM studies of C60-containing polyelectrolyte self-assembled films [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2002, 20(3): 197-203.
- [22] Tingbing Cao, Fang Wei, Yanlian Yang, et al. Microtribologic Properties of a Covalently Attached Nanostructured Self-Assembly Film Fabricated from Fullerene Carboxylic Acid and Diazo-resin [J]. Langmuir, 2002, 18(13): 5186-5189.
- [23] 王海军, 王齐华, 裴先强. 液晶聚芳酰胺自组装膜的

- 摩擦学性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(6): 111-114.
- [24] Hyo-Sok Ahn, Pham Duc Cuong, Sangkwon Park, et al. Effect of molecular structure of self-assembled monolayers on their tribological behaviors in nano- and microscales [J]. Wear, 2003, 255(7~12): 819-825.
- [25] Qiangbin Wang, Manglai Gao, Siwei Zhang. Tribological application of molecular deposition (MD) films [J]. Materials Science and Engineering C, 1999, 10(1~2): 127-129.
- [26] Wang Deguo, Zhang Siwei, Gao Manglai. Nano-scratch study of molecular deposition films on silicon wafers using nano-indentation [J]. Tribotest, 2003, 9(3): 231-237.
- [27] S W Zhang, Q B Wang, M L Gao. Characterisation and nano-friction behavior of molecular deposition films [J]. Lubrication Science, 2005, 17(2): 164-171.
- [28] 高芒来, 聂时春, 张嗣伟. 影响分子沉积膜纳米摩擦特性的几个因素 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(6): 472-476.
- [29] Si-wei Zhang, Dapeng Feng, Deguo Wang. Tribological behaviors of composite molecular deposition films [J]. Tribology International, 2005, 38(11~12): 959-965.
- [30] 张会臣, 高玉周, 李亚斌, 等. 界面接触特性对两种自组装分子膜摩擦特性的影响 [J]. 摩擦学学报, 2004, 24(1): 6-10.
- [31] 高芒来, 聂时春, 张嗣伟. 载荷相对湿度和气氛对硅表面及金表面纳米摩擦特性的影响 [J]. 机械科学与技术, 2004, 23(1): 87-89.
- [32] Wang Qiangbin, Gao Manglai, Zhang Siwei. Nanofriction properties of molecular deposition films [J]. Science in China (Series B), 2000, 43(2): 138-142.
- [33] 高芒来, 聂时春, 张嗣伟. 扫描速率对硅表面分子沉积膜纳米摩擦特性的影响 [J]. 化学研究与应用, 2003, 15(5): 734-736.
- [34] 高水英, 张平余. 聚乙烯亚胺和聚对磺酸钠苯乙烯分子沉积超薄膜的制备及其摩擦学性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 419-423.
- [35] 杨广彬, 麻洪霞, 吴志申, 等. PDDA /PSS 分子沉积膜的摩擦学行为研究 [J]. 润滑与密封, 2006(2): 27-30.
- [36] Qian Linmao, Tian Fang, Xiao Xudong. Tribological properties of self-assembled monolayers and their substrates under various humid environments [J]. Tribology Letters, 2003, 15(3): 169-176.
- [37] 兰惠清, 张嗣伟, 王德国. 探针作用下自组装膜的分子动力学模拟 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(6): 652-654.
- [38] 兰惠清, 张嗣伟, 王德国. 分子沉积膜纳米压痕过程的分子动力学模拟 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(5): 398-401.
- [39] Huiqing Lan, Siwei Zhang. Molecular dynamics simulation on nanotribological properties of molecular deposition film during the scan process [J]. Tribology International, 2004, 37(8): 661-665.
- [40] 王德国, 高芒来, 张嗣伟. 石英岩表面分子沉积膜的微观摩擦性能的试验研究 [J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 28-32.
- [41] 王德国, 高芒来, 张嗣伟. 利用原子力显微镜测量石英岩表面分子沉积膜的粘附力 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1999, 23(4): 53-55.
- [42] 高芒来, 聂时春, 张嗣伟. 粘附对分子沉积膜纳米摩擦特性的影响 [J]. 中国表面工程, 2003, 16(4): 12-14.
- [43] P V Pavor, B P Gearing, A. Bellare, et al. Tribological characteristics of polyelectrolyte multilayers [J]. Wear, 2004, 256(11~12): 1196-1207.
- [44] 高水英, 余来贵. 分子沉积聚合物膜的制备及其摩擦学性能研究 [J]. 化学物理学报, 2002, 15(2): 132-136.
- [45] 高水英, 余来贵. 有机小分子染料和聚阳离子分子超薄膜的制备及其摩擦学性能研究 [J]. 高分子学报, 2003(1): 18-22.
- [46] 杨广彬, 赵喆, 吴志申, 等. 掺杂 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 纳米微粒聚电解质多层膜的摩擦磨损行为研究 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 300-305.
- [47] 杨广彬, 麻洪霞, 吴志申, 等. 摩擦偶件对 PDDA/PSS 分子沉积膜摩擦磨损行为的影响 [J]. 润滑与密封, 2006(7): 61-63.
- [48] 王海军, 王齐华, 裴先强, 等. 溶致液晶聚芳酰胺自组装单分子膜的摩擦学性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(5): 125-128.
- [49] Prem V. Pavor, Brian P. Gearing, Orhun Muratoglu, et al. Cohen, Anuj Bellare. Wear reduction of orthopaedic bearing surfaces using polyelectrolyte multilayer nanocoatings [J]. Biomaterials, 2006, 27(8): 1527-1533.
- [50] 兰惠清, 张嗣伟, 李德才, 等. 分子沉积膜的纳米压痕试验 [J]. 机械工程材料, 2003, 27(9): 40-42.