

# 薄膜润滑研究的回顾与展望

雒建斌, 张朝辉, 温诗铸

(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

**[摘要]** 薄膜润滑是20世纪90年代以来广泛研究的新型润滑状态。它是介于弹流润滑和边界润滑之间的一种过渡润滑状态, 有着自己独特的润滑规律。文章回顾了薄膜润滑的研究历史, 包括薄膜润滑概念的提出、测试技术的发展、薄膜润滑的膜厚特性、润滑机理探索以及计算理论等方面的研究成果与主要进展。

**[关键词]** 薄膜润滑; 有序膜; 膜厚测量; 微结构

**[中图分类号]** TH117.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)07-0084-06

## 1 前言

纳米摩擦学是摩擦学领域的前沿, 也是现代超精密机械与微型机械发展的基础<sup>[1~4]</sup>。20世纪90年代以来, 薄膜润滑作为纳米摩擦学的一个重要分支, 得到广泛的研究。薄膜润滑理论和物理模型的建立<sup>[5~7]</sup>, 使其可以作为一种独立的润滑状态填补弹流润滑与边界润滑之间的空白<sup>[7,8]</sup>, 完善了润滑理论体系。如今, 薄膜润滑已经成为摩擦学研究的一大热点<sup>[7,9~11]</sup>。

通常认为, 弹流润滑以粘性流体膜为特征, 因而符合普通连续介质力学规律; 边界润滑以吸附膜为特征, 常以表面物理化学特性为研究基础<sup>[12,13]</sup>。然而, 无论从膜厚还是摩擦特性来看, 在弹流润滑和边界润滑之间存在一个过渡区尚未被人们了解。随着润滑油膜厚度的逐步减薄, 润滑状态可以经历以下过程<sup>[14]</sup>: 流体润滑→弹流润滑→?→边界润滑→干摩擦。

这一过程的未知领域就是薄膜润滑区, 它既广泛存在于超精密制造的机械系统与微机械系统中, 也存在于生物基体的组织中<sup>[15]</sup>, 其润滑特性和作

用机理在过去几年得到系统的研究。笔者就其研究过程作一简单回顾和展望。

## 2 薄膜润滑的提出

Granick<sup>[16,17]</sup>等对受限于极薄固体表面间的液体特性进行系统研究后指出: 由于壁面作用, 等效粘度将较体相粘度有几个数量级的增加, 而且有粘-滑现象。对于非常光滑的表面, 小于综合粗糙度的油膜厚度也能维持良好的润滑<sup>[18]</sup>。对于这种亚微米和纳米级薄膜的润滑, 开始时有人称为超薄膜润滑或部分薄膜润滑<sup>[19]</sup>和分子薄膜润滑<sup>[20]</sup>。但更多人称之为薄膜润滑, 如Wen<sup>[21]</sup>, Tichy<sup>[22]</sup>。

国际上, 关于薄膜润滑的概念也有不同观点, 以英国帝国理工学院Spikes小组为代表, 认为薄膜润滑是边界润滑的延伸, 有时认为是弹流润滑的发展<sup>[23,24]</sup>。然而, 就机理而言, 薄膜润滑是介于弹流润滑与边界润滑之间的一种独立的润滑形态, 它具有特殊的润滑规律和润滑本质<sup>[14]</sup>。胡元中等人的分子动力模拟结果也证明了这一特点<sup>[25,26]</sup>。因此, 关于润滑状态的划分应如图1所示<sup>[27]</sup>。图中 $h$ 为润滑膜厚度,  $R_a$ 为摩擦副对偶面的综合粗

**[收稿日期]** 2003-01-27; **修回日期** 2003-04-22

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(59735110), 杰出青年基金资助项目(50025515)

**[作者简介]** 雒建斌(1961-), 男, 陕西户县人, 清华大学教授, 博士生导师

糙度,  $R_{ef}$ 为润滑分子的有效半径。

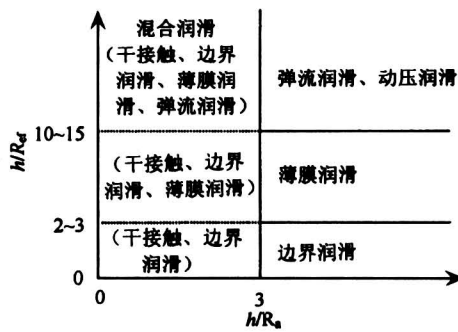


图1 润滑状态划分图

Fig.1 Lubrication map

### 3 纳米级润滑薄膜测试技术

研究纳米级油膜流动特性的关键问题之一是实现润滑状态的膜厚测量。油膜厚度测量广泛使用光干涉法。常规光干涉法存在两个限制：首先，它不太容易精确测量 $<1/4$ 的可见光波长，即 $<100$  nm的油膜厚度；其次，它只能分辨间隔至少为50 nm的膜厚。只有克服这两个限制，才能实现薄膜润滑的测量。

1991年，Johnston等采用垫层法和反射光的谱分析手段扩展了光干涉技术<sup>[28]</sup>，可实现纳米量级的膜厚测量。1994年，雒建斌、黄平等利用相对光强原理实现了垂直方向上分辨率达到0.5 nm膜厚的测量<sup>[7,14,29]</sup>。1999年，Hartl与其合作者<sup>[30-32]</sup>使用彩色干涉技术（colorimetric interferometry）测量了5 nm的厚度，并处理为直观的油膜分布图形。最近，基于光强的多束干涉技术也得到了1 nm左右的测量结果<sup>[33]</sup>。

以上方法将传统光干涉测量技术进行了拓展，实现了薄膜润滑的膜厚测量，为进一步研究薄膜润滑的特性和规律打下了基础。对薄膜润滑规律的探索主要集中在两个方面：一是从工程应用的角度，研究其润滑规律和不同润滑剂的性能，二是设计不同的实验以探求其机理。

## 4 薄膜润滑的膜厚特性

### 4.1 薄膜润滑的工程应用

Spikes领导的小组从工程应用角度出发，系统地研究了脂润滑问题、乏油问题、溶胶问题和聚合物的润滑问题，得到的最小膜厚如表1所示。他们还研究了减速情况下的成膜能力<sup>[34,35]</sup>。测量表明，

润滑油膜可以维持到很小的膜厚值。

表1 工程中的薄膜润滑膜厚<sup>[36,37]</sup>

Table 1 TFL thickness in engineering

工程问题	测量到的最小膜厚/nm
脂润滑	40
乏油	20
溶胶	21
聚合物	2

### 4.2 薄膜润滑机理探索

温诗铸、雒建斌领导的研究小组在考察了薄膜润滑膜厚与速度、润滑剂粘度、压力、滚滑比等工况因子的关系后<sup>[38,39]</sup>，考察了不同的表面能对成膜能力的影响<sup>[40,41]</sup>。这就清楚地表明薄膜润滑与弹流润滑有不同的作用机理。表面吸附可以改变近表面液体分子的排列。进一步，研究了电场作用和加入纳米颗粒对薄膜润滑特性的影响<sup>[42-45]</sup>。

薄膜润滑的时间效应也在实验中被发现并得到研究<sup>[38,46]</sup>，提出了薄厚增加的“滚雪球”机理。关于薄膜润滑与边界润滑的转化，则主要是通过薄膜润滑失效问题的研究建立流体膜的失效条件<sup>[47,48]</sup>。

### 4.3 薄膜润滑基本特征

综合上述实验研究成果，可以得到薄膜润滑的基本特征是介于弹流润滑与边界润滑的一种状态，它具有自己的润滑本质和变化规律。它区别于弹流润滑之处，在于其润滑分子在剪切诱导和固体表面吸附势等作用下处于取向有序状态，因而表现出不同的润滑特性如尺寸效应等；它区别于边界润滑之处，在于具有相当的膜厚值，润滑剂具有流动性，因而粘度等对润滑性能具有重要影响<sup>[49]</sup>。

## 5 薄膜润滑机理

为了从机理上解释薄膜润滑的特性，人们先后提出了富集分子模型和有序分子模型。

### 5.1 富集分子模型

1996年Smeeth等人提出了富集分子物理模型<sup>[37]</sup>。他们认为：在固体表面附近形成了一层富集的高粘度的高分子吸附膜。当油膜非常薄时，粘性大的高分子富集于入口处，由于粘度大，润滑似乎处于较体相粘度大得多的流体之中。该模型的局限性是没有考虑到润滑油分子在固体表面附近形成静态吸附膜和极薄油膜的物理性能是随着时间而变化的。

### 5.2 有序分子模型

1994年雒建斌等建立了薄膜润滑动态物理模型,即有序液体模型(见图2)<sup>[50]</sup>,认为在薄膜润滑状态下,油膜除了吸附膜和动压膜外,还存在兼有流体膜和吸附膜二者性质的有序液体膜(ordered liquid film)。润滑膜被约束在摩擦表面之间狭窄的区域中,由于载荷和表面能作用,在摩擦剪切过程中润滑膜分子结构将发生向有序排列的变化。随着运行时间的延长,有序排列的分子越来越多,因而靠近表面的分子层有序度增加,当达到表面力有效作用范围时,有序膜的厚度趋于稳定。这种有序排列的分子膜是有序液体膜,它比体相液体的分子有序度高,故不易流动,但它又兼有液体的性质,在流体动力效应作用下,既能够支承载荷,又能减少端泄。在此基础上,沈明武等提出了含固体颗粒的薄膜润滑物理模型<sup>[51]</sup>。

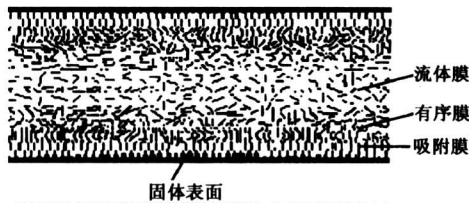


图2 薄膜的有序模型

Fig.2 The ordered model for TFL

### 5.3 有序分子模型的验证

薄膜润滑在本质上是有序膜起主要作用的一种润滑形式。液体分子的这种有序排列得到越来越广泛的研究, Ehara 等通过实验证实了分子吸附在有合适表面结构的固体上时排列取向有一致性<sup>[52]</sup>。对原来没有取向一致性的表面,受剪切后分子的排列也具有取向一致性。这种分子取向的有序性在溶致液晶中间相中也有类似的情形<sup>[53]</sup>,这在一定程度上证实了有序分子模型的合理性。

## 6 薄膜润滑计算理论研究

尽管在实验技术和实验手段上的突破使得薄膜润滑研究取得了上述丰硕成果,但在理论方面尚缺乏完整的研究。

### 6.1 连续理论的局限与修正

人们原来普遍认为,基于连续介质力学理论的分析方法对于处在纳米量级的薄膜润滑不再适应。然而,前述大量实验表明,薄膜润滑中润滑特性对弹流润滑的偏离是随着膜厚的减小而逐步明显的。速度、粘度、载荷等工况参数仍然起作用,润滑薄

膜具有流动性。从工程应用的角度讲,理论的基本功能之一是预测。对此, Tichy 提出了基于系综平均(ensemble averaging)的概念<sup>[9,54]</sup>,在此基础上修正并应用连续理论。一个位置物理量  $\rho$  的系综平均值(见图3)定义为

$$\rho_{en}(x) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \rho_i(x), \quad (1)$$

式中  $\rho_{en}$  为变量  $\rho$  的系综平均值,  $T$  为周期。

图3中  $L_m$  为分子尺寸,  $L_{pb}$  为所研究问题的特征长度。Tichy 先后运用方向因子模型、表面层模型和孔性介质模型等解释了薄膜润滑的性能<sup>[54-56]</sup>, Sham 则给出了一个综合分子动力模拟和有限元分析的研究模型<sup>[57]</sup>。

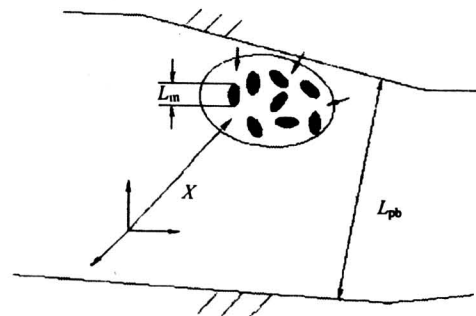


图3 系综平均概念

Fig.3 Schematic for ensemble averaging

### 6.2 表面力因素

在薄膜润滑中,表面能起着重要的作用。Jang 和 Matsuoka 计算了表面力<sup>[58,59]</sup>,即范德华力和溶解力(结构力)的作用(未计及静电力),认为压力  $P$  可表示为

$$P = P_{visc} + P_{solv} + P_{vdw}, \quad (2)$$

式中  $P_{visc}$ ,  $P_{solv}$ ,  $P_{vdw}$  分别为粘性力、溶解力和范德华力。

### 6.3 粘度修正

张朝辉等采用粘度修正函数来描述粘度的变化,并进行了数值模拟计算<sup>[60]</sup>,所采用的修正关系为

$$\eta_{ef} = \eta' \varphi(\bar{z}), \quad (3)$$

式中  $\eta_{ef}$  为有效粘度,  $\eta'$  表示相应体相粘度,  $\bar{z}$  是高度参数。粘度修正函数  $\varphi(\bar{z})$  可表示为

$$\varphi(\bar{z}) = 1 + \frac{b}{1 + \bar{z}^a}, \quad (4)$$

式中  $a$  为主要由润滑剂分子结构和性质决定的参数,它反映润滑分子排列的有序度、组成、结构及

其与固体壁面的作用程度等;  $b$  为与固体表面和润滑分子特性相关的常数, 可以粗略地理解为润滑油变为固态时的粘度。

曲庆文、朱均等也提出了考虑吸附层与膜厚关系的粘度修正式和粘度分层润滑模型, 并推导了薄膜润滑的能量方程<sup>[61~63]</sup>。

#### 6.4 具有微结构的连续理论

当外部特征长度尺寸接近于真实材料粒子(如颗粒或者分子)的线性尺度, 粒子的尺度与内在流动性的关系则必须加以考虑。即使在固体力学中, 也开始考虑其微结构的影响<sup>[64]</sup>。薄膜润滑是有序分子起主要作用的一种润滑形态, 剪切运动不破坏分子的有序排列, 相反, 在吸附势和诱导力等的作用下, 它可促进有序分子的形成; 而挤压运动则改变分子的有序排列, 或者说通过引起有序排列的分子姿态的改变而降低了分子的有序度。可见在薄膜润滑状态下, 应当考虑介质分子运动的动量和角动量守恒。利用具有微结构的连续体力学, 张朝辉等分别用微极流体理论和应力偶关系模拟了薄膜润滑的性能, 取得了一些成果<sup>[65~67]</sup>。

### 7 薄膜润滑研究展望

薄膜润滑是一个迅速发展的新领域, 在理论研究上已经取得了一定的进展, 但是, 如何针对具体的应用工况开展研究, 已成为目前的迫切问题。计算机硬盘制造技术的飞速发展, 为纳米薄膜润滑, 特别是分子膜润滑提供了广阔的应用前景。润滑分子的甩离、逃逸和迁移回流将对降低磁头/磁盘摩擦、避免磁头/磁盘划伤, 吸收磁头/磁盘撞击能量和保持磁头运动的稳定性等有重要影响。因而关于纳米级液体润滑薄膜在固体表面的迁移、物理化学特性和润滑机理的研究, 对于理解液体分子在固体表面的扩散和运动规律, 以及在高分子和表面科学等领域都有着重大的科学意义。

正如 Krim 所说, 现在广泛存在的制造小体积机器部件的竞赛, 将使得当今在纳米尺度上进行的基础研究所得到的东西可能为明天的直接应用开路<sup>[68]</sup>。无论如何, 对薄膜润滑这一全新的状态进行更多的研究, 必将会产生丰厚的回报。

#### 参考文献

[1] Belak J F. Nanotribology [J]. MRS Bulletin, 1993, (May): 15~17

- [2] Bhushan B, Israelachvili J N, Landman U. Nanotribology-friction, wear and lubrication at the atomic-scale [J]. Nature, 1995, 374: 607~616
- [3] 温诗铸. 纳米摩擦学进展 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [4] 温诗铸. 纳米摩擦学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [5] 雒建斌, 温诗铸, 黄平. 膜润滑机理研究 [J]. 清华大学学报, 1994, 34(s3): 1~9
- [6] 雒建斌, 温诗铸. 润滑理论的新进展——薄膜润滑 [J]. 润滑与密封, 1994, (6): 2~10
- [7] Luo J B, Wen S Z, Huang P. Thin film lubrication, part I: the transition between EHL and thin film lubrication [J]. Wear, 1996, 194: 107~115
- [8] 雒建斌, 严崇年. 润滑理论中的模糊观 [J]. 润滑与密封, 1989, (4): 1~4
- [9] Tichy J A. Ultra thin film structured tribology [A]. Proc of 1st Inter Symp on Trib [C]. Beijing Oct 19~23, 1993. 48~57
- [10] Luo J B, Wen S Z. Study on the mechanism and characteristics of thin film lubrication at nano scale [J]. Science in China (Series A), 1996, 35(12): 1312~1322
- [11] Spikes H A. Molecular scale liquid lubricating films [A]. 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology [C]. Leeds, Sept 1999
- [12] 雒建斌, 路新春, 温诗铸. 薄膜润滑研究的进展与问题 [J]. 自然科学进展, 2000, 10(12): 1057~1065
- [13] Zhang Y B, Wen S Z, EHL film thickness limitation theory under a limiting shear stress [J]. Tribol Trans, 2002, 45 (4): 531~539
- [14] 雒建斌, 薄膜润滑理论和实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 1994
- [15] Johnston G J, Wayte R, Spikes H A. The measurement and study of very thin lubricant films in concentrate contact [J]. Tribol Trans, 1991, 34(2): 187~194
- [16] Granick S. Motions and relaxation of confined liquids [J]. Science, 1991, 253: 1374~1379
- [17] Reiter G, Demirel A L, Granick S. From static to kinetic friction in confined liquid films [J]. Science, 1994, 263: 1741~1743
- [18] Jacobson B. Thin film lubrication of real surfaces [J]. Tribol Intern, 2000, 33: 205~210
- [19] Tadmor R, Chen N H, Israelachvili J N. Thin film rheology and lubricity of hyaluronic acid solutions at a normal physiological concentration [J]. J Biomedical Materials Research, 2002, 61(4): 514~523

- [20] Homola A M, Israelachvili J N, Gee M L, et al. Measurements of and relation between the adhesion and friction of two surfaces separated by molecularly thin liquid films [J]. *Trans of the ASME*, 1989, 111(3): 675~682
- [21] Wen S Z. On thin film lubrication [A]. *Proc 1st Intern Symp on Tribol [C]*. Beijing: Tsinghua University Press, 1993. 30~37
- [22] Tichy J A. Thin film lubrication [A]. *Proc 1st Intern Symp on Tribol [C]*. Beijing: Tsinghua University Press, 1993. 48~57
- [23] Guangteng G, Spikes H A. Boundary film formation by lubricant base fluids [J]. *Tribol Trans*, 1996, 39(2): 448~454
- [24] Smeeth M, Spikes H A, Gungel S. Boundary film formation by viscosity index improvers [J]. *Tribol Trans*, 1996, 39(3): 726~734
- [25] Hu Y Z, Wang H, Guo Y, et al. Simulation of lubricant rheology in thin film lubrication, part I: simulation of Poiseuille flow [J]. *Wear*, 1996, 196: 243~248
- [26] Hu Y Z, Wang H, Guo Y, et al. Simulation of lubricant rheology in thin film lubrication, part II: simulation of Couette flow [J]. *Wear*, 1996, 196: 249~253
- [27] 雒建斌, 沈明武, 史兵, 等. 薄膜润滑与润滑状态图 [J]. *机械工程学报*, 2000, 36(7): 15~21
- [28] Johnston G J, Wayte R, Spikes H A. The measurement and study of very thin lubricant films in concentrated contacts [J]. *Tribol Trans*, 1991, 34(2): 187~194
- [29] 黄平, 雒建斌, 邹茜, 等. NGY-2型纳米级膜厚测量仪 [J]. *摩擦学学报*, 1994, 14(2): 175~179
- [30] Hartl M, Krupka I, Poliscuk R, et al. An automatic system for real-time evaluation of EHD film thickness and shape based on the colorimetric interferometry [J]. *Tribol Trans*, 1999, 42(2): 303~309
- [31] Krupka I, Hartl M, Poliscuk R, et al. Experimental study of central and minimum elastohydrodynamic film thickness by colorimetric interferometry technique [J]. *Tribol Trans*, 2000, 43(4): 611~618
- [32] Hartl M, Krupka I, Poliscuk R, et al. Thin film colorimetric interferometry [J]. *Tribol Trans*, 2001, 44(2): 270~276
- [33] Guo F, Wong P L. A multi-beam intensity-based approach for lubricant film measurements in non-conformal contacts [J]. *Engineering Tribol*, 2002, 216(J5): 281~291
- [34] Glovnea R P, Spikes H A. Elastohydrodynamic film collapse during rapid deceleration, part I: experimental results [J]. *J Tribol*, 2001, 123: 254~261
- [35] Glovnea R P, Spikes H A. Elastohydrodynamic film collapse during rapid deceleration, part II: theoretical analysis and comparison of theory and experiment [J]. *J Tribol*, 2001, 123: 261~267
- [36] Spikes H A, Cann P M. The development and application of the spacer layer imaging method for measuring lubricant film thickness [J]. *Proc Instn Mech Engrs*, 2001, 215(J): 261~277
- [37] Smeeth M, Spikes H A, Gungel S. The formation of viscous surface films by polymer solutions: boundary or elastohydrodynamic lubrication [J]. *Trib Trans*, 1996, 39(3): 720~725
- [38] Luo J B, Huang P, Wen S Z, et al. Characteristics of fluid lubricant films at the nano-scale [J]. *Trans of the ASME*, 1999, 121(4): 872~878
- [39] Luo J B, Wen S Z, Sheng X Y, et al. Substrate surface energy effects on liquid lubricant film at nanometer scale [J]. *Lubrication Science*, 1998, 10(11): 23~26
- [40] 沈明武, 雒建斌, 温诗铸. 摩擦副表面物化特性对纳米级润滑膜厚度的影响 [J]. *清华大学学报*, 2000, 40(4): 103~106
- [41] Shen M W, Luo J B, Wen S Z. Effects of surface physicochemical properties on the tribological properties of liquid paraffin film in the nanoscale [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2001, 32: 286~288
- [42] Shen M W, Luo J B, Wen S Z, et al. Investigation of the liquid crystal additive's influence on film formation in nano scale [J]. *Lubrication Engineering*, 2002, 58(3): 18~23
- [43] 沈明武, 雒建斌, 温诗铸, 等. 液晶添加剂的纳米级润滑性能与机理 [J]. *科学通报*, 2001, 46(7): 603~608
- [44] Shen M W, Luo J B, Wen S Z. The tribological properties of oils added with diamond nano-particles [J]. *STLE Tribol Trans*, 2001, 44(3): 494~498
- [45] 沈明武, 雒建斌, 温诗铸. 金刚石纳米颗粒对薄膜润滑性能的影响 [J]. *机械工程学报*, 2001, 37(1): 14~18
- [46] 雒建斌, 温诗铸, 黄平, 等. 薄膜润滑的时效特性 [J]. *清华大学学报*, 1999, 39(2): 1~5
- [47] Luo J B, Qian L M, Wen S Z, et al. The failure of fluid film at nano-scale [J]. *Tribol Trans*, 1999, 42(4): 962~967



- [48] Huang P, Luo J B, Wen S Z. The study on lubrication failure for lubricants with a limiting shear stress [J]. Tribol Intern, 1999, 32(7): 421~426
- [49] 张朝辉. 纳米级薄膜润滑性能数值计算的研究 [D]. 北京:清华大学精密仪器与机械学系, 2002
- [50] Luo J B, Wen S Z. Mechanism and characteristics of thin film lubrication at nanometer scale [J]. Science in China (A), 1996, 39(12): 1312~1322
- [51] 沈明武. 纳米级油膜成膜机理及特性研究 [D]. 北京:清华大学精密仪器与机械学系, 2001
- [52] Ehara T, Hirose H, Kobayashi H, et al. Molecular alignment in organic thin films [J]. Synthetic Metals, 2000, 109: 43~46
- [53] Nesrullajev A, Tepe M, Kazanci N, et al. Surface-induced textures in lyotropic liquid crystalline mesophases [J]. Materials Chemistry and Physics, 2000, 65: 125~129
- [54] Tichy J A. Modeling of thin film lubrication [J]. Tribol Trans, 1995, 38(1): 108~118
- [55] Tichy J A. A surface layer model for thin film lubrication [J]. Tribol Trans, 1995, 38(3): 577~582
- [56] Tichy J A. A porous media model for thin film lubrication [J]. Trans of the ASME, 1995, 117(1): 16~21
- [57] Sham T L, Tichy J. A scheme for hybrid molecular dynamics/finite element analysis of thin film lubrication [J]. Wear, 1997, 207: 100~106
- [58] Jang S, Tichy J A. Rheological models for thin film EHL contacts [J]. Trans of the ASME, 1995, 117(1): 22~28
- [59] Matsuoka H, Kato T. An ultrathin liquid film lubrication theory-calculation method of solvation pressure and its application to the EHL problem [J]. ASME J of Tribol, 1997, 119: 217~226
- [60] Zhang C H, Wen S Z, Luo J B. A new postulation of viscosity and its application in computation of film thickness in TFL [J]. ASME Journ of Tribol, 2002, 124(4): 811~814
- [61] 曲庆文, 朱均. 薄膜润滑状态下流体的流动特性分析 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17(2): 203~214
- [62] Qu Q W, Wang M, Chai S, et al. Velocity analysis for layered viscosity model under thin film lubrication [J]. Tribol Intern, 2001, 34: 517~521
- [63] 曲庆文, 朱均. 薄膜润滑状态下的能量方程推导 [J]. 机械科学与技术, 1999, 18(3): 355~356
- [64] 虞吉林. 考虑微结构的固体力学的进展和若干应用 [J]. 力学进展, 1985, 15(1): 82~89
- [65] 张朝辉, 温诗铸, 雒建斌. 薄膜润滑的微极流体模拟 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(9): 4~8
- [66] Zhang C H, Wen S Z, Luo J B. On characteristics of lubrication at nano-scale in two-phase fluid system [J]. Science in China (Series B), 2002, 45(2): 166~172
- [67] 张朝辉, 温诗铸, 雒建斌. 薄膜润滑中的应力偶效应 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 486~489
- [68] Krim J. Friction at the atomic scale [J]. Lubrication Engineering, 1997, 275(4): 8~13

## Retrospect and Prospect of Study on Thin Film Lubrication

Luo Jianbin, Zhang Chaohui, Wen Shizhu

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**[Abstract]** Thin film lubrication (TFL) has been well studied as a new lubrication regime since the 90s of last century. TFL is a transition lubrication regime between elastohydrodynamic lubrication (EHL) and boundary lubrication (BL), which has specific lubrication features. The present paper reviewed the advancement of researches of TFL, which involves the origin of the TFL concept, advancement of measuring technique, TFL's film-forming features, investigation on its mechanism, and computation theories.

**[Key words]** thin film lubrication; ordered film; film thickness measurement; microstructure