

润滑理论研究的进展与思考

温诗铸

(清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 全面阐述了润滑理论研究中关于各种润滑状态, 包括流体润滑、边界润滑、弹流润滑、薄膜润滑以及混合润滑等的研究进展和存在的问题; 并进而就今后的润滑理论研究提出了若干建议.

关键词: 流体润滑; 弹流润滑; 边界润滑; 薄膜润滑; 混合润滑; 进展

中图分类号: TH117.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2007)06-0497-07

在机械科学中, 通常认为摩擦学是有关摩擦、磨损与润滑科学的总称. 摩擦引起能量消耗; 磨损导致机械零件表面损伤, 进而使得机械设备失效; 而润滑则是降低摩擦、控制磨损最有效的措施. 因此, 润滑设计对于节约能源和原材料, 延长机械设备使用寿命和提高工作可靠性具有重要意义.

简言之, 润滑技术通过在相互摩擦表面之间施加润滑剂而形成润滑膜, 藉以避免摩擦表面直接接触, 构建具有较高法向承载能力和尽可能低的切向阻力的界面层, 达到减少摩擦磨损的目的. 同时, 润滑膜还具有散热、除锈、减振和降噪等作用.

人类很早以前就学会了在生产实践中利用润滑技术. 我国《诗经》中就有关于润滑的描述, 西汉《淮南子》中最早出现了“润滑”一词. 早期人们采用动植物油脂作为润滑剂. 19世纪中叶以后, 随着油井开发和石油炼制技术的进步, 石油润滑剂得到了广泛的应用, 从而推动了润滑理论和应用技术的发展. 近 30 年来, 种类繁多而性能优越的润滑材料不断涌现, 有力地促进了润滑科学的迅速发展.

本文就润滑理论的各个发展阶段以及作者对今后相关研究工作的若干思考进行阐述.

1 流体润滑

1883年, Tower对火车轮轴的滑动轴承进行试验, 首次发现轴承中的油膜存在流体压力. 1886年, Reynolds针对 Tower发现的现象应用流体力学推导出 Reynolds方程, 解释了流体动压形成机理, 从而

奠定了流体润滑理论研究的基础. 1904年, Sommerfeld求出了无限长圆柱轴承的 Reynolds方程的解析解; 1954年, Ocvirk建立了无限短轴承的解析解, 促使流体润滑理论得以应用于工程近似设计. 随着电子计算机和数值计算技术的发展, 许多作者采用有限差分、变分和有限元等方法求得各种结构和工况条件下的有限长轴承数值解, 得到了更为精确的结果, 使得流体润滑理论日趋成熟^[1].

流体动压润滑形成机理在于, 摩擦表面的相对运动将粘性流体带入楔形间隙, 从而使得润滑膜产生压力以承受载荷, 这就是所谓的动压效应. 润滑膜为粘性流体膜, 其厚度处于 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 量级, 属于厚润滑膜; 其理论基础是粘性流体力学. 流体动压润滑通常应用于面接触摩擦副, 如机床和汽轮发电机组等动力机械中的滑动轴承.

经过长期的实验与理论研究, 总体来说迄今各种结构的滑动轴承的静态润滑设计已达到相当完善的境地. 随着高速大容量动力机械的发展, 以下问题还有待于进一步研究.

1.1 油膜振荡与稳定性

在 20 世纪 70 ~ 80 年代, 由于滑动轴承油膜振荡导致汽轮发电机组的断轴事故时有发生, 这是因为高速轻载轴承的轴心与轴承中心接近而处于不稳定状态所致. 人们针对滑动轴承动态性能进行了大量分析计算和试验研究^[2], 主要涉及油膜刚度特性和阻尼特性等 8 个动态系数的确定, 基于转子动力学耦合的轴承-转子系统稳定性研究, 以及失稳判据

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50730007, 50575123).

收稿日期: 2007-09-25; 修回日期: 2007-11-04 联系人温诗铸, e-mail: dpsz@mails.tsinghua.edu.cn

作者简介: 温诗铸, 男, 1932年生, 教授, 中国科学院院士, 目前主要从事润滑理论、摩擦磨损机理与控制、纳米摩擦学以及微机械学等研究.

的建立等.然而,迄今为止相关研究仍有待于进一步完善,其中对转子动力学计算影响很大的多油楔轴承油膜动态特性系数的计算还比较粗略,多跨度转子系统的动力学计算也存在困难.

1.2 湍流润滑理论

大型水轮机推力轴承的雷诺数很高,在推力瓦边缘的流态极可能达到超层流甚至湍流状态.

相对层流润滑而言,湍流润滑需要考虑流体运动惯性和质点不规则运动产生的湍流附加应力.现有的湍流润滑理论通常忽略了惯性的影响,同时近似地采用湍流润滑系数来表示附加应力,故其在理论上仍很不完备,有待于深入研究.

与层流润滑轴承相比较,湍流润滑轴承相当于增加润滑油黏度,因而随着承载能力的增加,摩擦系数和摩擦功耗增加;而流量略有减小,从而使轴承工作温度高于层流润滑状态下的工作温度^[3].为此,有必要着眼于降低湍流润滑轴承的摩擦功耗和温度开展深入研究.

1.3 动载荷轴承设计

诸如大型船舶多缸柴油机曲轴轴承润滑设计尚需进一步完善,这是由于相应的求解同时包含动压效应和挤压效应,而载荷的大小和方向以及速度的大小均随时间变化的 Reynolds 方程的数学求解难度很大.通常采取将动压效应和挤压效应分别计算而后进行叠加的近似计算方法来求解该类 Reynolds 方程^[4].

2 边界润滑

1919年,Hardy兄弟^[5]提出了边界润滑的概念,即润滑剂中的极性分子与摩擦表面吸附形成分子有序排列的吸附膜,吸附膜由单层或 2~3 层分子组成,膜厚为 0.005~0.010 μm 量级.因此,边界润滑的理论基础是表面物理化学.

边界润滑研究推动了摩擦化学的发展;与此相适应,人们相继开发出种类繁多、功能各异以及具有不同润滑机理的添加剂.我国的摩擦学工作者在新型高效润滑添加剂研制等方面开展了卓有成效的研究,取得了令人瞩目的成果,并提出了许多具有应用前景的研究方向.在这里,仅就如下纳米微粒增强润滑膜、极端苛刻工况下边界润滑膜以及自补偿修复边界润滑膜等几个问题,作者认为值得进一步深入研究.

2.1 纳米微粒增强润滑膜

为提高边界润滑膜的承载能力,或承受高运行

速度,在边界润滑膜中加入纳米微粒作为添加剂以改善其耐磨性能.中国科学院兰州化学物理研究所等研究机构在这方面进行了很多卓有成效的研究工作^[6~8],例如将 Cu、PbO、SiO₂ 等纳米微粒加入润滑剂中,考察其对边界膜的增强性能及耐磨性,并取得较好的效果.但各种微粒的应用条件和作用机理还有待于系统深入的研究.

2.2 极端苛刻工况下的边界润滑膜

就极端苛刻工况下运行的摩擦副而言,通常采用含 S、P、Cl 的有机化合物作为极压添加剂 (EP) 或抗磨添加剂 (AW) 以满足其润滑和抗磨需要,并在高速重载等条件下与摩擦表面元素反应生成化学反应膜以减轻磨损.然而,如果生成的反应膜容易剥落,或添加剂活性太强,则反而造成腐蚀磨损.针对上述问题,在选择添加剂时,尚需研究其生成的边界膜在润滑性、稳定性以及对金属表面的腐蚀性等综合性能.除了上述含 S、P、Cl 等元素的极压添加剂外,还可采用石墨、二硫化钼、聚四氟乙烯等固体材料作为润滑油的极压添加剂,其润滑机理与边界润滑膜相似,在摩擦表面生成固体边界膜^[9,10].

2.3 自补偿修复边界润滑膜

前苏联学者^[11]发现摩擦界面存在选择性转移现象.他们将铜或铜合金与钢在甘油或甘油和酒精的混合溶液中对摩,发现在钢表面形成薄的富铜层 (即转移膜),结果导致摩擦系数和磨损率降低.涂政文等^[12~14]据此开发出多种具有磨损自补偿修复效应的润滑添加剂,此类添加剂在摩擦界面发生物理化学和电化学效应,从而在摩擦表面形成自补偿膜,以补偿摩擦表面所产生的磨损.试验证明,此类添加剂对工业上常用的多种润滑油均具有良好的适应性,其减摩性能、磨合性能和耐磨性能优良.

3 弹性流体动力润滑

19世纪 80 年代,在机械学科领域几乎同时出现了 2 个重要理论:Reynolds 流体润滑理论和 Hertz 弹性接触理论.长期以来,这 2 个理论分别被应用于处理不同接触表面的摩擦学设计问题,其中 Reynolds 理论被应用于面接触摩擦副如滑动轴承的润滑设计;而 Hertz 理论被应用于集中载荷作用的点、线接触摩擦副,如齿轮、滚动轴承的接触疲劳磨损设计.经过长期的探索,直到 20 世纪 50 年代,人们才成功地将这 2 个理论相耦合用于点、线接触的润滑设计,即弹性流体动力润滑理论 (简称弹流润滑理论).

弹流润滑理论的核心是在 Reynolds 方程中考虑

润滑油的粘压效应和表面弹性变形,这就使得相应的求解难度增大. 1949年, Грыбин首次求得线接触弹流润滑问题的近似解^[1]. 1961年和1976年, Dowson分别同 Higginson及 Hamrock合作,以完备数值解为基础,先后提出了线接触和点接触理想模型的弹流润滑理论^[1]. 他们采用的理想模型假设:摩擦副为光滑表面,润滑剂为牛顿流体,在稳态工况条件下的等温润滑过程.

弹流润滑是流体润滑的扩展,其理论基础是连续介质力学,包括流体力学、弹性力学和传热学等. 弹流润滑膜与流体润滑膜同属于粘性流体膜. 然而,弹流润滑膜存在于集中载荷作用下的微小接触区,其厚度小($\sim 0.1\ \mu\text{m}$)、压力大($\sim 1\ \text{GPa}$)、剪切率高($\sim 10^6\ \text{s}^{-1}$)以及润滑剂通过接触区的时间短($\sim 10^{-3}\ \text{s}$). 处于这种状态的润滑问题显然与理想模型的条件相差很大. 其中热效应、润滑剂的非牛顿性、表面粗糙度以及非稳态工况等对弹流润滑的影响成为不可忽略的因素.

上世纪80年代初开始,作者所在单位以工程模型弹流润滑理论研究为目标,先后提出了热弹流、流变弹流、微观弹流以及非稳态弹流润滑的完备数值解,最后在推导出普适性最高的 Reynolds方程和对数值计算方法进行重大改进的基础上,建立了考虑上述各因素综合影响的弹流润滑理论^[15],被 Dowson称为完备的流体润滑理论. 与此同时,我们还开发出了多种弹流油膜性能测试技术,包括采用光干涉测量油膜厚度和形状,红外辐射测量温度场,薄膜传感器测量油膜压力等,用以通过实验验证理论分析结果.

弹流润滑研究发展至今, Hertz接触状态的润滑问题数值分析日趋完善,今后应着重开展弹流润滑的应用及其相关研究.

3.1 流变润滑

如上所述,弹流润滑膜处于极特殊的工况条件下,因而呈现出强烈的非牛顿流体性质. 仅就黏度而言,一方面,由于高剪切率的稀化作用使得黏度降低以及具有粘塑性;而另一方面,因油膜极薄,可发生基于固体表面效应的稠化作用,特别是粘压效应使得因油膜压力升高而引起的固化,导致流体黏度急剧增加. 与此同时,流体以极短的时间穿过接触区,经受剧烈变化的瞬时压力作用而呈现出粘弹性和与之相关的触变性.

通常弹流润滑数值计算采用牛顿流体模型(线性粘性体)^[16]或 Ree-Eyring模型(非线性粘塑性

体)^[15],对于上述问题都尚未能涉及,这就必然影响当今弹流润滑理论的准确性.

此外,关于点、线接触副的流变润滑研究还存在很大的困难. 虽然人们进行了大量研究,但迄今未能得到满意的结果. 其中关键问题是如何准确地揭示弹流润滑条件下流体的流变性能,从而建立流变模型和本构方程. 目前测量流体流变性能的流变仪大都是在常规状态下运行的,这显然与弹流润滑的实际工况差别极大. 而某些专用装置如高压黏度计和高剪切率黏度计也只是针对单一因素进行模拟测定而排除了多因素的综合影响.

迄今提出的各种流变模型的本构方程大都是含有2~3个流变参数的代数方程,将其用于弹流润滑问题的数值计算,往往使得求解难度增大;而且目前尚难以准确确定流变参数值.

作者认为,开展粘弹性流变模型的弹流润滑研究具有重要的应用价值. 人们已经提出多种形式的流体粘弹性流变模型,迄今为止的润滑计算中尚未被采用. 从弹流润滑膜的实际情况分析,一方面,由于粘压效应和表面效应导致油膜相变呈类固体特性;另一方面,流体在极短时间内穿过接触区,在急速加载/卸载过程中流体响应不及而显示出弹性. 流体薄膜的剪切流动分子动力学模拟研究也表明^[17],当润滑膜较薄时,流体为粘弹性体.

显然,粘弹性流体弹流润滑研究的难度较大,不仅其润滑过程的力学行为及变化很不清楚,而且流变参数也无法确定. 这是今后有待探究的领域. 作者预计,在粘弹性弹流润滑状态下,油膜厚度将大幅度增加,相应的弹流润滑膜可望具有巨大的承载潜力.

一般地,将表面涂层视为固体润滑层. 作者进一步设想,在粘弹性体的界面行为研究中,有可能将流体润滑膜的研究和固体表面膜的研究相结合. 粘弹性体同时含有代表粘性和弹性的流变参数,分别表征流体和固体的特征. 如果粘弹性体仅含粘性参数则为流体,反之为固体. 为此,作者曾提出“广义流变润滑”研究的设想^[18],籍此或许可能构建润滑理论与表面工程之间的桥梁.

3.2 水基乳化液(两相流)润滑

20世纪80年代初,高水基乳化液被广泛应用于液压系统以替代液压油,有关该类介质弹流润滑的数值分析和试验研究时有报道^[19]. 通常在数值分析中采用2种流体混合的当量黏度. 由于高水基乳化液通常含90%以上的水,而油剂含量很低,所以计算得出的膜厚极小. 然而,我们采用光干涉方法对水基

乳化液点接触弹流润滑进行的试验研究表明^[20],其弹流膜厚比计算值大得多。与此同时,在试验中还观察到通过接触区的润滑油浓度升高,我们将这种现象称为润滑剂的“富聚现象”,但无法提供相应的理论解释,这方面还有待于进一步考察和研究。

值得注意的事,当今大多数齿轮和滚动轴承均处于乏油润滑状态,即使采用黏度较大的润滑油,实际的弹流润滑膜厚度仍较小,在中、高速工况下尤其如此。而高水基乳化液具有优良的冷却性能,对于我国因推行硬齿面齿轮设计而导致的齿轮箱散热面积降低和热负荷增加的问题可望起到缓解作用;同时高水基介质具有阻燃抗爆的特点,可以提高煤矿等井下作业的安全性。因此,作者认为有必要进一步开展高水基乳化液的弹流润滑研究,包括优质高效水基介质材料的配比和性能的研究,防锈抗蚀技术的研究,以及水基介质对接触疲劳的影响研究等。

3.3 非 Hertz 接触及齿轮润滑设计

弹流润滑理论的建立主要是以齿轮润滑设计为目标。以目前的研究现状而论,要达到这一目标还需要解决许多关键问题。

迄今的弹流润滑计算均是针对 Hertz 接触,即接触区为线、正圆或椭圆,而且运动方向与接触区主平面重合。实际机械零件的接触情况则要复杂得多,统称为非 Hertz 接触。

以齿轮传动为例,只有最简单的渐开线直齿圆柱齿轮传动可视为两圆柱滚子之间的线接触,而渐开线斜齿圆柱齿轮传动接触则为两圆锥滚子之间的接触,圆弧齿轮传动接触为双弧形滚子接触^[1]。显然后两者沿接触线上的卷吸速度和载荷分布都不是均匀的。

另外,空间齿轮和蜗杆传动接触情况更为复杂,其接触区通常呈扁椭圆^[21]或“腰子型”,而运动方向与主平面之间存在夹角,有时还伴有绕接触区法线的旋转运动^[22]。此外,在啮合过程中还存在非稳态效应和重合度问题。近年来, Huang 等^[23,24]针对齿轮传动的接触特点和空间齿轮传动的弹流润滑问题进行了探索性研究。然而,要建立完备的齿轮传动润滑设计理论,还有很长的路要走。

4 薄膜润滑

20 世纪 90 年代初,作者^[25,26]提出,在弹流润滑与边界润滑之间存在以纳米膜厚为特征的润滑状态,称为薄膜润滑。提出这一观点的依据是,弹流润滑理论预示润滑膜具有极大的承载潜力,因为弹流

润滑膜厚与载荷之间弱相关;压粘效应导致黏度剧增,甚至固化;微观弹流润滑数值分析表明,油膜压力对粗糙峰具有压平作用等。而从润滑体系分析,由边界润滑膜吸附分子层厚度到弹流润滑膜亚微米厚度,其间存在间隔,即膜厚变化不连续。另外,边界润滑的理论基础是物理化学,而弹流润滑的理论基础则为连续介质力学,也存在理论上的过渡问题。

我们利用自行研制的纳米级弹流润滑膜厚测量仪^[27]对薄膜润滑进行了系统的试验研究^[28]。结果表明,当膜厚小于 50 nm 时,其变化规律偏离弹流润滑理论,可以认为薄膜润滑膜厚处于 0.01 ~ 0.10 μm 范围。试验还揭示出表面能是影响薄膜润滑膜厚的重要因素,且因表面能的作用使膜厚具有时间效应。

基于试验分析,我们提出薄膜润滑膜是由吸附边界膜、有序液体膜和粘性膜三者组成的分层结构。当油膜较厚时,粘性膜为主体,其润滑行为遵守弹流润滑规律;随着膜厚减小,有序液体膜成为主体,呈现薄膜润滑特征;而膜厚更小时则为边界润滑。

薄膜润滑研究的意义在于完善润滑体系,并揭示不同润滑状态之间的内在联系。但其作为新兴的理论仍有待于进一步的实践检验和补充完善。今后的主要研究目标包括:

(1) 建立薄膜润滑数值分析方法及量化关系

对膜厚在亚微米、纳米量级的薄膜润滑进行数值分析将遇到许多复杂问题,如薄膜分子排列的有序化和分层结构、非牛顿特性、固化与相变、表面效应与形貌效应等的研究迄今尚属空白。

1993 年, Tichy^[29]在清华大学召开的第一届摩擦学国际会议上提出采用方向因子模型得到薄膜润滑的数值解,随后他又提出了表面层模型和多孔表面层模型,但相应的数值分析结果均不理想。Zhang 等^[30]先后采用黏度修正、微极流体、二相流等模型进行了薄膜润滑计算,但计算结果与实验结果的吻合性不佳。

(2) 薄膜润滑应用

当今关于纳米薄膜润滑的研究大多局限于实验室研究。实践表明,超精密机械和微机械、极低速或重载摩擦表面、高温下工作的机械以及水基介质润滑的表面等大多处于薄膜润滑状态;某些添加剂则通过在表面生成极薄的润滑膜而起到减摩抗磨作用。因此,有必要加强薄膜润滑的应用研究,以满足高新技术工业的发展需要。

(3) 润滑失效

迄今润滑理论研究主要集中于润滑膜的形成机

理和润滑膜行为,而除了对于边界润滑中吸附膜失效的临界温度的研究^[1]以及流体润滑中油膜振荡失效^[2]的研究以外,关于润滑失效的研究甚少。

目前广泛使用的润滑油产品因含高分子添加剂而呈现显著的粘塑性,其承受剪应力的能力受到极限剪应力的限制;而根据流体润滑理论,流体产生的动压力直接与流体承受的剪应力有关。为此,Huang等^[31]针对粘塑性流体润滑膜的承载能力和失效进行了研究。相应的计算结果表明,当润滑膜某处的剪应力达到极限值时,该处的流体将发生滑移,随后滑移区逐步扩展,最终导致润滑膜屈服而失效。基于此,Zhang等^[32]针对粘塑性流体的弹流润滑性能和极限剪应力所产生的滑移和屈服失效进行了详细研究。此外,黄平等^[33]还针对流体润滑中的温度影响失效进行了研究,分析了温度导致的膜厚和剪应力变化以及温度对滑移的影响,并提出可以采用热稳定性作为判断温度引起润滑失效的准则。

应当指出,上述研究的学术观点新颖,是对润滑理论研究的扩展;相关研究结果对于重大装置的润滑设计和安全保障具有现实指导意义。但该领域的研究仍有待于在反复的实践验证中不断加以完善。

5 混合润滑

在生产实际中,混合润滑状态普遍存在,因而受到人们关注。但遗憾的是,迄今针对混合润滑的研究明显较为欠缺。工程摩擦副大多是粗糙表面,因制造方法不同,粗糙峰的高度的变化范围较大;但相对于润滑膜厚而言,工程摩擦副的表面粗糙度大体上处于相近的量级,因此其润滑状态极少属于单一的润滑状态,而是多种润滑状态的混合。

显然,由于表面粗糙峰高度起伏变化程度的不同,混合润滑形式存在差异。目前研究最多的是部分薄膜润滑,即弹流润滑膜与峰点接触 2 种状态的混合润滑。Hu等^[34]针对这种混合润滑问题给出了相当完备的计算结果。

作者于 1992 年初针对粗糙表面弹流混合润滑研究提出了以下构想^[35]:

(1) 该混合润滑状态由以不同膜厚为主要特征的边界润滑、薄膜润滑和弹流润滑组成;各种润滑膜的形成机理、润滑特性和失效准则各不相同。

(2) 整体润滑特性是各种润滑膜特性的综合表现;各种润滑膜在接触区所占的比例和分布情况与表面形貌和运行工况有关,而且随时间而变化。因此,混合润滑特性具有时变性。

(3) 相对于全膜润滑而言,混合润滑的膜厚较小,通常伴随表面磨损。

完备的混合润滑理论的建立有赖于长期的研究积累,除了要求进一步完善各种润滑状态的理论之外,还有必须针对某些关键问题,例如对如何确定接触区各种润滑膜的比例和分布等开展前期研究。孔繁荣^[36]采用受抑光全反射技术测量粗糙表面线接触滑动摩擦副润滑膜的厚度,得到混合润滑接触区的膜厚分布图像,并考察了中心膜厚平均值与工况参数之间的关系。

作者设想,如果能够在此基础上实现图像数值化处理,即可望确定接触区全域膜厚分布和各种润滑状态所占比例,从而为混合润滑性能研究创造条件。

根据常规的摩擦学原理,在全膜润滑状态下表面不产生磨损,除非油膜失效而导致表面直接接触。这种认识显然与事实不符。黄平等^[37]和邹茜等^[38]分别利用粘弹性流变模型弹流润滑分析,在考虑固体材料变形响应速度影响的基础上,论证了在全膜润滑下产生磨损的可能性,并就发生磨损的条件进行了分析探讨。

6 结束语

润滑理论与应用技术是摩擦学研究的重要领域,也是发展最为迅速和比较完善的领域。随着现代科技的发展,机械装置的工况参数和集成化趋势日益提高,润滑研究面临新的挑战。本文立足于作者从事润滑理论研究与实践的部分认识、感受和思考,囿于个人知识积累和认识水平所限,文中部分观点难免片面、肤浅,甚至疏漏。拙作若能起抛砖引玉之效,在业内同行中引起注意并推动相关讨论和批评指正,则于愿足矣。

参考文献:

- [1] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社, 1990.
- [2] 虞烈,刘恒. 轴承转子系统动力学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [3] 紊流工况下椭圆轴承性能研究. 西安交通大学研究报告 [D]. 西安:西安交通大学, 1978.
Study of the performances of the elliptic journal bearing under turbulent conditions [D]. Report of Xian Jiaotong University. Xian: Jiaotong University, 1978.
- [4] 王晓力,温诗铸,桂长林. 动载轴承的非稳态热流体动力润滑 [J]. 清华大学学报, 1999, 39 (8): 30-33.
Wang X L, Wen S Z, Gui C L. Thermohydrodynamic analysis of dynamically loaded bearings [J]. Journal of Tsinghua University (Sci-

- ence and Technology), 1999, 39(8): 30-33.
- [5] Hardy W B, Hardy J K. Note on static friction and on the lubricating properties of certain chemical substances[J]. Philosophical Magazine, 1919, 38: 33-48.
- [6] 刘维民. 纳米颗粒及其在润滑油中的应用[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 265-267.
Liu W M. Application of nanoparticles in lubricants[J]. Tribology, 2003, 23(4): 265-267.
- [7] 陈爽, 刘维民, 欧忠文, 等. 油酸表面修饰 PbO 纳米微粒作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(5): 344-347.
Chen S, Liu W M, Ou Z W, *et al*. Tribological behavior of oleic acid coated PbO nanoparticles as additive in liquid paraffin[J]. Tribology, 2001, 21(5): 344-347.
- [8] 曹智, 李小红, 张治军, 等. 表面修饰 SiO₂ 纳米微粒对锂基脂抗磨性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 390-393.
Cao Z, Li X H, Zhang Z J, *et al*. Effect of SiO₂ nanoparticles as additive on antiwear and extreme pressure properties of lithium grease[J]. Tribology, 2005, 25(4): 390-393.
- [9] 董浚修. 润滑原理及润滑油[M]. 北京: 中国石化出版社, 1992.
- [10] 黄海栋, 涂江平, 干路平, 等. 片状纳米石墨的制备及其作为润滑油添加剂的摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 312-316.
Huang H D, Tu J P, Gan L P, *et al*. Preparation and tribological properties of graphite nanosheets as additive in liquid paraffin[J]. Tribology, 2005, 25(4): 312-316.
- [11] Kragelsky I V, Alisin V V. Friction, wear, lubrication-tribology handbook[M]. Moscow: Mir Publishers 1981.
- [12] 涂政文, 李宏, 高万振, 等. 二聚酸 3-氯-2-羟基丙单酯对钢-钢摩擦副的磨损自补偿效应研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(2): 120-123.
Tu Z W, Li H, Gao W Z, *et al*. Wear-Self-Compensation effect of a steel-steel pair by 3-Chloro-2-Hydroxy propyl dimmer acid monoester as an additive in a mineral oil[J]. Tribology, 2003, 23(2): 120-123.
- [13] 游中流, 高万振, 赵源. ESM122 润滑添加剂的磨损自补偿效应研究[J]. 润滑与密封, 2003, 3: 30-35.
You Z L, Gao W Z, Zhao Y. The research of wear-self-compensation effect of ESM122 lubrication additive[J]. Lubrication Engineering, 2003, 3: 30-35.
- [14] 郭志光, 顾卡丽, 徐建生, 等. 有机钼及其复合纳米润滑添加剂的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 25(4): 317-321.
Guo Z G, Gu K L, Xu J S, *et al*. Friction and wear behavior of organic molybdenum and its composite with nona-particle anti-wear additive[J]. Tribology, 2005, 25(4): 317-321.
- [15] 温诗铸. 弹性流体动力润滑[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [16] Dowson D, Higginson G R. Elastohydrodynamic lubrication[M]. London: Pergamon Press, 1977.
- [17] 胡元中, 王慧, 郭炎, 等. 润滑薄膜流变特性的分子动力学模拟[C]. 温诗铸主编. 纳米摩擦学进展论文集. 北京: 清华大学出版社, 1996. 62-80.
- [18] 温诗铸. 清华大学摩擦学国家重点实验室学术讨论会报告[C]. 北京: 清华大学, 1990.
- [19] De Vicente J, Spikes H A, Stokes J R. Viscosity ratio effect in the emulsion lubrication of soft EHL contact[J]. Journal of Tribology Transactions of the ASME, 2006, 128(4): 795-800.
- [20] 莫健华, 张文法, 温诗铸. 水基乳液弹性流体动力润滑的实验研究[J]. 清华大学学报, 1990, 30(增 1): 55-62.
Mou J H, Zhang W F, Wen S Z. Experiment study on elastic hydrodynamic lubrication of emulsion[J]. Journal of Tsinghua University, 1990, 30(Suppl 1): 55-62.
- [21] Huang C H, Wen S Z. Elastohydrodynamic lubrication of long elliptical contacts with rotational contacts under heavy load[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1993, 6(2): 145-152.
- [22] Huang C H, Wen S Z, Huang P, *et al*. Multilevel solution of the elastohydrodynamic lubrication of elliptical contacts with rotational lubricant entrainment[C]. Beijing: Proc of 1st International Symposium on Tribology, 1993, 124-131.
- [23] Huang C H, Wen S Z, Huang P. Multilevel solution of EHL of concentrated contacts in spiral gears[J]. Journal of Tribology, 1993, 115(3): 481-486.
- [24] Huang C H, Wen S Z, Zheng C Q. An advanced design tool CCT-CA for spiral level and hupoid gears[C]. Tokyo: Preprints of JSME/ASME Joint Workshop on Design, 1993, 94-99.
- [25] 温诗铸. 从弹流润滑到薄膜润滑 润滑理论研究的新领域[J]. 润滑与密封, 1993, 6: 48-56.
Wen S Z. From Elastohydrodynamic lubrication to thin film lubrication—the new area in lubrication research[J]. Lubrication Engineering, 1993, 6: 48-56.
- [26] Wen S Z. On thin film lubrication[C]. Beijing: Proc of 1st International Symposium on Tribology, 1993, 30-37.
- [27] 黄平, 雒建斌, 邹茜, 等. NGY-2 型纳米级润滑膜厚度测量仪[J]. 摩擦学学报, 1994, 14(2): 175-179.
Huang P, Luo J B, Zuo Q, *et al*. NGY-2 interferometer for nanometer lubrication film thickness measurement[J]. Tribology, 1994, 14(2): 175-179.
- [28] 温诗铸, 雒建斌. 纳米薄膜润滑研究[J]. 清华大学学报, 2001, 第 41(4/5): 63-68.
Wen S Z, Luo J B. Study on thin film lubrication in the nano scale[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(4/5): 63-68.
- [29] 温诗铸. 纳米摩擦学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998, 298-300.
- [30] Zhang C H, Wen S Z, Luo J B. Characteristics of lubrication at nano-scale in two-phase fluid system[J]. Science in China, Series B, 2002, 45(2): 166-172.
- [31] Huang P, Luo J B, Wen S Z. Theoretical study on the lubrication failure for the lubricants with a limiting shear stress[J]. Tribology International, 1999, 32(10): 421-426.
- [32] Zhang Y B, Wen S Z. An analysis of elastohydrodynamic lubrication with limiting shear stress[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(2): 135-144.

- [33] 黄平,温诗铸. 温度的非牛顿效应及其润滑失效机理分析 [J]. 润滑与密封, 1996, 2: 14-16.
Huang P, Wen S Z. Analysis of temperature dependent non-Newtonian constitutive equation and lubrication failure mechanism [J]. Lubrication Engineering, 1996, 2: 14-16.
- [34] Hu Y Z, Zhu D. A full numerical solution to the mixed lubrication in point contacts [J]. Trans, ASME, Journal of Tribology, 2000, 122 (1): 1-9.
- [35] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002, 246-252.
- [36] 孔繁荣. 混合润滑的实验技术和特性研究 [D]. 北京: 清华大学, 1993.
Kong F R. Experiment and characters research of mixed lubrication [D]. Beijing: Tsinghua University, 1993.
- [37] 黄平, 温诗铸. 粘弹性流体动力润滑与润滑磨损 [J]. 机械工程学报, 1996, 3: 27-34.
Huang P, Wen S Z. Visco-elastohydrodynamic lubrication and lubricated wear [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1996, 3: 27-34.
- [38] Zou Q, Huang P, Wen S Z. Abrasive wear model for lubricated sliding contacts [J]. Wear, 1996, 196: 72-76.

Study on Lubrication Theory-progress and Thinking-over

WEN Shi-zhu

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

Abstract: The main progress in the research on lubrication theories, including fluid lubrication, boundary lubrication, elastohydrodynamic lubrication, thin film lubrication and mixed lubrication was summarized, and some advices was proposed with respect to future research on lubrication theory.

Key words: fluid lubrication, elastohydrodynamic lubrication, boundary lubrication, thin film lubrication, mixed lubrication, progress

Author: WEN Shi-zhu, male, bom in 1932, Professor, e-mail: dpwysz@mail tsinghua edu cn