

双电层电粘度对薄膜润滑影响的 试验研究与数值分析*

白少先 黄平

(华南理工大学机械工程学院 广州 510640)

摘要: 由于固液界面处存在双电层,理论和试验研究都表明该效应对薄膜润滑有较为明显的影响。首先,利用自行设计的外加电场重构双电层装置进行了组合滑块水润滑试验,结果分析表明:双电层所引起的电粘度效应对流体润滑中摩擦因数有明显影响,另外当摩擦副的材料不同时,摩擦因数的变化规律不同。然后,又对KCl(氯化钾)溶液进行了组合滑块试验,进一步研究了离子浓度对电粘度效应的影响,在不同速度和溶液浓度的工况下,对摩擦因数进行了测量。结果表明:低浓度溶液使摩擦因数明显增加,浓度高时摩擦因数减小;随着速度的增加,双电层效应对摩擦因数的影响减小。最后,对试验工况进行了数值分析。

关键词: 双电层 电粘度 摩擦因数 外电场

中图分类号: TH117

0 前言

近年来,双电层对流体产生的电粘滞效应被引入到流体润滑研究。Prieve^[1]和Zhu^[2]等将双电层的影响引入薄膜润滑中。Zhang^[3]等曾对双电层流体动力润滑的雷诺方程做了推导和计算。黄平^[4]等对双电层对流体动力润滑和弹流润滑状态参数的影响进行了相关的数值分析计算。研究表明,在薄膜润滑状态下,双电层对于摩擦因数、承载能力以及压力分布均有明显影响。根据参考文献[5],在毛细管中双电层产生电粘滞效应,Li^[6]等的研究表明:在微管道中流体的粘度明显增加,并把该现象归结为双电层引起的双电层电粘度。

利用施加外加电场和添加KCl以改变润滑剂中离子浓度两种方法进行组合滑块水润滑试验,对流体润滑中的双电层效应进行了试验研究,并进行了数值分析。

1 试验研究

1.1 试验装置与条件

试验方案如图1所示。以蒸馏水为润滑剂基础液。组合滑块的尺寸分别为 $b_1=5\text{ mm}$, $b_2=10\text{ mm}$, $L=15\text{ mm}$,如图2所示。卷吸速度变化范围为 $v=0.05\sim 0.35\text{ m/s}$ 。采样频率为40 Hz,采样时间为60 s。

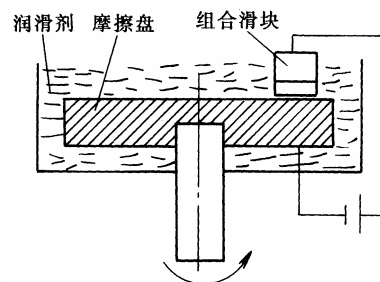


图1 组合滑块试验方案

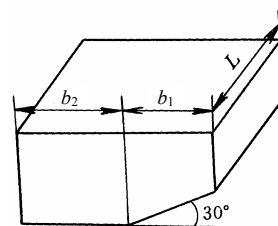


图2 组合滑块尺寸

1.2 结果与分析

1.2.1 外加电场试验

在摩擦副上施加外电场,可在摩擦副与润滑剂的界面处形成两个相反的双电层。试验中为研究不同离子对双电层电粘度的影响,组合滑块的材料分别选用A3钢、黄铜、铝,分别施加290 mN、290 mN、190 mN的载荷。摩擦盘选用A3钢。在滑块和摩擦盘之间,用电池组施加35 V直流电压。在采样时间为15~45 s时,施加外电场。

图3、4是施加外加电场以后摩擦因数的变化曲线。图3对应的卷吸速度是0.135 m/s,图4对应的卷吸速度是0.156 m/s。可以看出,滑块为正极时,

* 国家自然科学基金(50375052)和广东省教育厅“千百十工程”优秀人才培养基金资助项目。20030417收到初稿,20031210收到修改稿

在施加外加电场的区间2内，摩擦因数明显增加，增加幅度达到20%；滑块为负极时，摩擦因数迅速降低，降幅达到20%以上。在停止施加电压以后(区间3)，摩擦因数很快恢复到施加电压以前的摩擦因数数值。

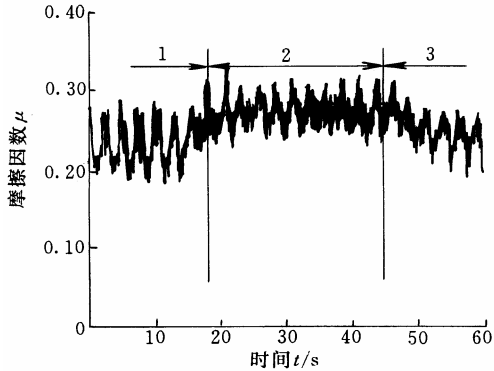


图3 正电压施加于钢滑块时摩擦因数的变化

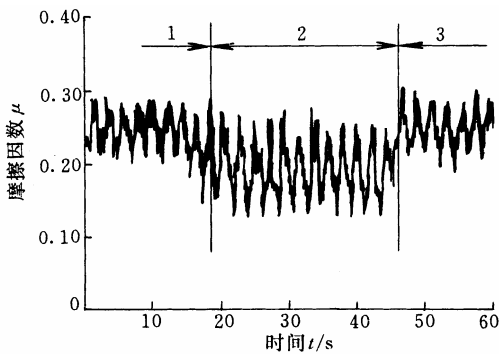


图4 负电压施加于钢滑块时摩擦因数的变化

图5是钢滑块不同速度时，施加外加电场以后摩擦因数的变化曲线。可以看出，当滑块施加正电极时，随着速度的增加，即润滑膜厚度的增加，外加电场对摩擦因数的影响明显减弱；而当滑块施加负电极时，随着速度的增加，外加电场对摩擦因数的影响保持不变，施加电场以后，摩擦因数降低到相对稳定的同一数值。

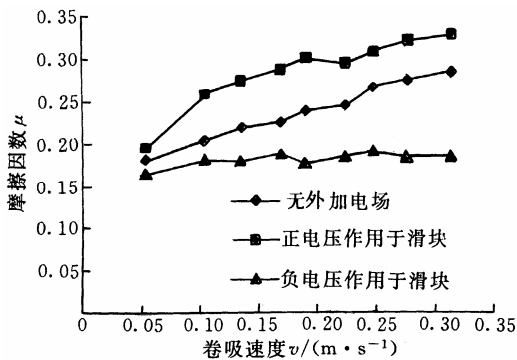


图5 钢滑块时摩擦因数与卷吸速度的关系曲线

图6是铜滑块在不同速度时，施加外加电场以后摩擦因数的变化曲线。可以看出，当滑块施加正、

负电压时，随着速度的增加，即润滑膜厚度的增加，摩擦因数的变化趋势基本一致，外加电场对摩擦因数的影响明显减弱。速度为0.15 m/s时，外加电场对摩擦因数基本没有影响，速度继续增加，摩擦因数有所降低。

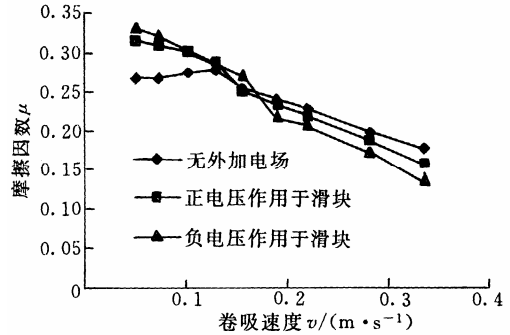


图6 铜滑块时摩擦因数与卷吸速度的关系曲线

图7是铝滑块不同速度时，施加外加电场以后摩擦因数的变化曲线。可以看出，当滑块施加正、负电极时，随着速度的增加，即润滑膜厚度的增加，摩擦因数的变化幅度较小，摩擦因数有所减小。

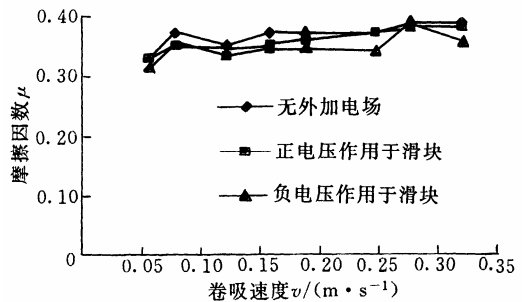


图7 铝滑块时摩擦因数与卷吸速度的关系曲线

对于以上试验结果，是由于在施加外加电场以后，在摩擦副界面处形成两个相反的双电层。在外加电场作用下，金属和水发生化学反应以及水的电解等反应，显著增加了水中离子浓度，双电层电位和流动电势升高，强化了电粘度，摩擦因数增加。

此外，在水中双电层胶体颗粒受到的流动电势产生的电场力作用。根据参考文献[5]，在胶体表面存在双电层，如图8所示，使胶体颗粒表现为电性，形成荷电粒子，在流动电势产生的电场力作用下，阻碍润滑剂的流动，增强了电粘度效应，从而表现为摩擦因数的增加。在试验过程中，可以观察到施加外加电场后有明显的胶体出现，不同材料磨擦副的摩擦因数增幅的差异反映了荷电粒子产生的电粘度效应的强弱。

对于摩擦因数减小的现象，说明外加电场不仅可以强化电粘度效应，也可以使双电层减弱，使电粘度减小，从而摩擦因数降低，这方面有待进一步研究。

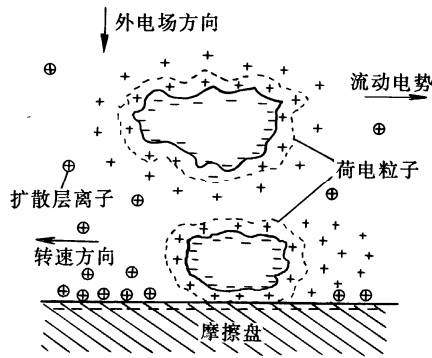
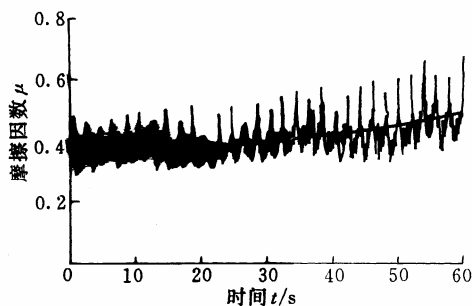


图 8 摩擦盘为负极时界面处双电层

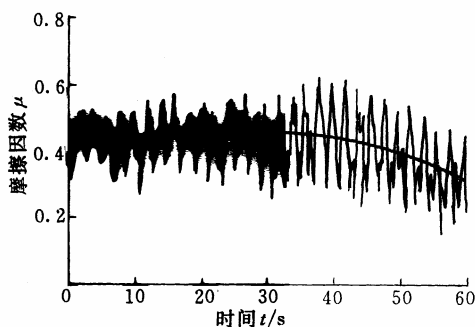
1.2.2 KCl 溶液试验

双电层试验研究^[5,6]表明,离子浓度的变化会引起双电层厚度、Zeta 电势以及流动电势的变化,从而使电粘度效应发生变化。下面的试验中,以 KCl 作添加剂,通过改变水中离子的浓度的方法来研究双电层效应对润滑性能的影响,采用组合滑块/摩擦盘摩擦副进行水润滑试验。组合滑块的材料选用 A3 钢,施加 600 mN 载荷。在 20 s 时添加 KCl,改变水中 KCl 的浓度。

图 9 是卷吸速度为 0.27 m/s 工况下,润滑剂中 KCl 的浓度从 0 分别达到 0.000 5 mol/L 和 0.5 mol/L 时,摩擦因数随时间的变化曲线。可以看出, KCl 浓度增加到 0.000 5 mol/L 以后,摩擦因数增加,而增加到 0.5 mol/L 时摩擦因数减小。同时,摩擦因数的变化比加外电场时的变化平缓,这是由于润滑剂中 KCl 的浓度分散均匀需要一定的时间。试验过程中可以观察到,不同工况下,在采样 60 s 时,摩擦因数基本可以达到稳定值。



(a) KCl 浓度从 0 变为 0.000 5 mol/L 时摩擦因数与时间的关系



(b) KCl 浓度从 0 变为 0.5 mol/L 时摩擦因数与时间的关系

图 9 KCl 浓度变化时摩擦因数随时间的变化曲线

为消除由于润滑剂对摩擦副腐蚀而使摩擦因数增大引起的误差,以试验初始时测得的无添加剂水的摩擦因数为摩擦因数的基值,加上浓度变化后摩擦因数的增量作为不同工况下的摩擦因数,并取 4 次试验结果的平均值。

图 10 是摩擦因数随速度的变化曲线。可以看出:在没有添加剂的水润滑试验中,摩擦因数随速度的变化规律符合 Stribeck 曲线,当速度在 0.2 m/s 时,摩擦因数最低,根据薄膜润滑理论,认为在 0.2 m/s 时处于薄膜润滑状态。当加入添加剂以后,在 0.2 m/s 附近摩擦因数迅速增加并达到最大值,增幅达到 30%。在低速情况下(小于 0.15 m/s 时),添加剂使摩擦因数略有降低;在高速情况下,摩擦因数的增幅逐渐减少,当速度大于 0.25 m/s 以后,添加剂对摩擦因数的影响很小。说明双电层在薄膜润滑状态下的影响较为显著。

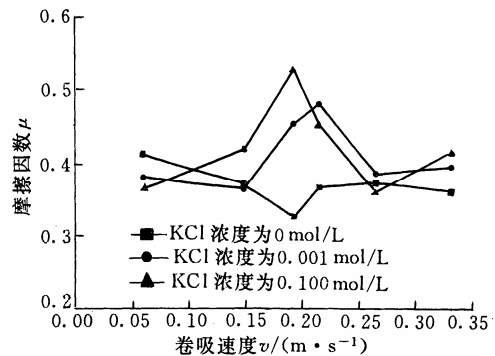


图 10 摩擦因数与卷吸速度的关系曲线

这是由于在低卷吸速度时主要是边界润滑,整个润滑区内无法形成稳定的双电层结构,特别是对电粘度起决定作用的扩散层结构,因此添加剂的影响不大。在卷吸速度较大区,进入厚膜润滑,根据参考文献[4]的理论分析,双电层的影响减弱,因此添加剂的影响也较小。

图 11 是摩擦因数随 KCl 浓度变化的曲线。在速度为 0.06 m/s 时,随着 KCl 浓度的增加,摩擦因数逐渐降低。而在较大速度下(0.19~0.33 m/s),随 KCl 溶液浓度的增加摩擦因数先增加,在 0.01~0.10 mol/L 时,摩擦因数达到最大值,随着 KCl 浓度的继续增加,摩擦因数开始降低。

上述试验结果,可以从双电层理论得到解释。根据双电层理论^[5],随着 KCl 浓度的增加,Zeta 电势降低,在微管道中的试验^[7]也证明 0.01 mol/L KCl 水溶液的 Zeta 电势比水的 Zeta 电势低。这是由于离子强度增加引起的扩散双电层厚度变小,引起 Zeta 电势的降低,使得双电层电粘度变小,从而摩擦因数变小。

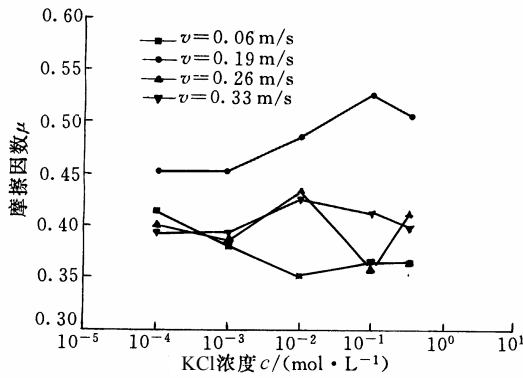


图 11 摩擦因数与 KCl 浓度的关系曲线

2 数值分析

2.1 试验工况的理论分析

在试验中使用浸水润滑, 忽略滑块的端泄、温度等影响因素的条件下, 参考无限长滑块进行理论分析, 根据参考文献[7], 求得试验中组合滑块的摩擦因数为

$$\mu = \frac{u\eta L}{W} \left[\frac{4b_2}{\delta_0} + \frac{4b_1}{\delta_0 K} \ln \frac{\delta_1}{\delta_0} + \frac{3b_1 \bar{\delta}}{\delta_0 K} \left(\frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\delta_0} \right) - \frac{3b_2 \bar{\delta}}{\delta_0^2} \right] \quad (1)$$

式中 W ——滑块上的载荷
 η ——润滑剂动力粘度
 δ_0 ——滑块 b_2 部分的膜厚
 $\delta_1 = \delta_0 + b_1 \tan 30^\circ$
 $K = \frac{\delta_1 - \delta_0}{\delta_0}$

$$\bar{\delta} = \frac{2\delta_0 \delta_1 (b_1 \delta_0 + b_2 \delta_1)}{(h_0 + h_1) [b_1 \delta_0 + 2b_2 \delta_1^2 / (\delta_0 + \delta_1)]}$$

根据参考文献[4], 电粘度计算式为

$$\eta_e = \frac{3\varepsilon^2 V^2}{2\pi^2 \gamma \delta^3} \left(\frac{1 - \cosh k\delta}{k \sinh k\delta} + \frac{\delta}{2} \right) \quad (2)$$

当 $h \gg k^{-1}$ 时, 式(3)简化为

$$\eta_e = \frac{3\varepsilon^2 V^2}{4\pi^2 \gamma \delta^2} \quad (3)$$

式中 ε ——润滑剂的电容率
 V ——双电层 Zeta 电势
 γ ——润滑剂的电导率
 k ——双电层 Debye 长度倒易参数
 δ ——润滑膜厚度

考虑电粘度效应以后, 式(1)改写为

$$\mu = \frac{u(\eta + \eta_e)L}{W} \times \left[\frac{4b_2}{\delta_0} + \frac{4b_1}{\delta_0 K} \ln \frac{\delta_1}{\delta_0} + \frac{3b_1 \bar{\delta}}{\delta_0 K} \left(\frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\delta_0} \right) - \frac{3b_2 \bar{\delta}}{\delta_0^2} \right] \quad (4)$$

2.2 数值分析

下面对水润滑工况进行进行分析, 取水的电容率 $\varepsilon = 7.08 \times 10^{-10}$ F/m, 电导率为 $\gamma = 190 \mu\text{S/m}$, 粘度 $\eta = 0.001$ Pa·s。根据参考文献[6], 取双电层 Zeta 电势 $V = 0.1$ V, 自由扩散状态下, 水的双电层厚度接近 1 000 nm, 0.000 1 mol/L KCl 溶液的双电层厚度大约为 100 nm, 0.01 mol/L 溶液的双电层厚度为几个纳米, 在流体润滑中双电层厚度受到润滑膜厚度限制(即 $0 \leq k^{-1} \leq h/2$), 因此双电层的厚度分别取 0 nm、10 nm、30 nm、50 nm 进行计算, 结果如图 12 所示。

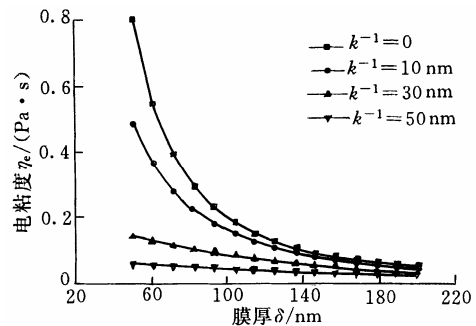


图 12 双电层电粘度与 KCl 浓度的关系曲线

从图 12 中可以看出, 在薄膜润滑状态下, 双电层引起电粘度比水的动力粘度大 50~400 倍, 随着膜厚的增加, 双电层电粘度值迅速减小, 当膜厚超过 200 nm 时, 双电层电粘度值趋近于 0。在薄膜润滑区内, 双电层厚度越大, 双电层电粘度值越小, 润滑膜厚越小, 其差别越大。当双电层厚度大于 50 nm 以后, 在薄膜润滑区的电粘度值趋近于 0。说明双电层电粘度效应在薄膜润滑状态下非常显著并受双电层厚度的显著影响。

在试验中, 水在薄膜润滑时并没有出现的偏离 Stribeck 曲线的现象, 因此根据图 12 可以看出: 在薄膜润滑状态下, 水的电粘度效应很弱, 对摩擦因数没有影响。

从图 10 可以看出, 在 KCl 浓度为 0.01~0.10 mol/L 时, 摩擦因数达到最大值, 而参考文献[6]的试验证明, 在浓度大于 0.001 mol/L 以后, Zeta 电势开始降低。从式(3)可以看出, 电粘度受 Zeta 电势、电容率、电导率以及双电层厚度参数的综合作用。离子浓度增加, Zeta 电势和双电层厚度减小、电容率和电导率增加, 从而出现了摩擦因数峰值的滞后现象。对于卷吸速度 0.06 m/s 时, 摩擦因数随 KCl 浓度的增加而连续减小的现象, 由于在边界润滑条件下, 摩擦副之间充满双电层的扩散层, 对电粘度起主要作用的是 Zeta 电势, Zeta 电势的逐渐下降, 导致摩擦因数的连续减小。

图 13 给出了摩擦因数随卷吸速度变化的理论计算结果。可以看出,在考虑电粘度效应以后,摩擦因数增大。随着卷吸速度的增加,摩擦因数的增量减小,这也说明了在薄膜润滑状态下,电粘度效应较为明显。这与前面的试验结果基本吻合,说明可以利用式(4)对组合滑块试验进行定性的理论分析。

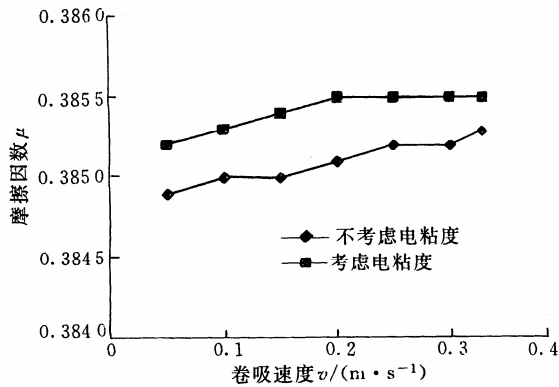


图 13 摩擦因数与卷吸速度的理论关系曲线

3 结论

通过试验研究和数值分析,可以得出以下结论。

(1) 双电层对摩擦因数有明显影响。在薄膜润滑润状态下,使摩擦因数明显增加,试验中的增幅可达 30%。

(2) 双电层引发电粘度。数值分析表明,在水润润滑膜厚小于 100 nm 时,双电层引发电粘度远大于水的动力粘度,并受双电层厚度的影响。

(3) 通过对双电层电粘度进行的数值分析和试验对比表明,双电层电粘度理论对摩擦因数的预测与实际情况相互吻合。

参 考 文 献

- 1 Dennis C P, Stacy G B. Electrokinetic repulsion between two charged bodies undergoing sliding motion. Chem. Eng. Comm., 1987, 55: 149~164
- 2 Zhu Y Y, Kelsall G H, Spikes H A. The influence of electrochemical potentials on the friction and wear of iron and iron oxides in aqueous systems. Tribology Transact, 1994, 37(4,8): 811~819
- 3 Bo Z, Noritsugu U. Hydrodynamic lubrication theory considering electric double layer for very thin water film

lubrication of ceramics. JSME International Journal, Series C, 1998, 41(2): 285~290

- 4 黄平, 黄柏林, 孟永钢. 双电层效应对润滑薄膜厚度和压力的影响研究. 机械工程学报, 2002, 38(8): 9~13
- 5 Ayo Kitahara, Akira Watanabe. 界面电现象. 邓彤, 赵学范译. 北京: 北京大学出版社, 1992
- 6 Li D Q. Electro-viscous effects on pressure-driven liquid flow in microchannels. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2001, 195: 35~57
- 7 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第二版). 北京: 清华大学出版社, 2002

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON INFLUENCE OF ELECTRO-VISCOSITY OF ELECTRIC DOUBLE LAYER IN THIN FILM LUBRICATION

Bai Shaoxian Huang Ping

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Theoretical and experimental researches show that electro-viscosity by electric double layer (EDL) apparently influences on thin film lubrication (TFL). In order to consider the influence of EDL, some tests with a composite sliding block are carried out by the way that external electric field is used to reconstruct EDL with water used as lubricant. Results showed that EDL has apparent effect on friction coefficient. To ensure the results, further tests are done where aqueous KCl solution is used as lubricant. The influence of electro-viscosity on friction coefficient is studied by changing concentration of KCl. Results showed that EDL has apparent effect on friction coefficient in TFL, 30% in increase. Finally, numerical analysis is also carried out to show the effect of EDL electro-viscosity on friction coefficient in TFL.

Key words: Electric double layer Electro-viscosity

Friction coefficient External electric field

作者简介: 白少先, 男, 1976 年出生, 博士研究生。主要从事薄膜润滑理论的研究。

E-mail: bshaoxian@163.net