

文章编号 1004-924X(2017)01-0141-07

基于 FRAP 的微间隙润滑油膜流速测量方法

韩素立, 李超, 郭峰*, 邵晶

(青岛理工大学机械工程学院, 山东青岛 266520)

摘要: 薄油膜润滑广泛存在于各类精密机械与微机电系统中。微纳米间隙内的润滑油流动是影响薄膜润滑承载力的重要因素, 但目前薄润滑油膜的流速测量仍然缺少有效手段。本文基于荧光漂白恢复显微技术和漂白区域形状演化过程的成像分析, 建立了油膜流速测量系统, 可以对微米间隙润滑油膜的速度分布进行原位测量。利用建立的系统获得了厚度为 $8\ \mu\text{m}$ 时聚丁烯 PB450 润滑油膜的库埃特流速分布。重建的荧光漂白强度分布曲线和实验测量结果的皮尔森相关系数大于 0.95, 且流速分布符合已有润滑理论, 证明了测量结果的可靠性。

关键词: 荧光漂白恢复; 微间隙; 润滑油膜; 流速; 库埃特流

中图分类号: TH741; O647.5; O644.18 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0141

Velocity profile measurement of oil films in a confined gap based on FRAP

HAN Su-li, LI Chao, GUO Feng*, SHAO Jing

(School of Mechanical Engineering, Qingdao Univ. of Tech., Qingdao 266520, China)

* Corresponding author, E-mail: mefguo@163.com

Abstract: The flow of lubricant oil films in confined gaps of micro-scale is a significant factor to affect load-carrying capacity of lubrication films in precision machines and micro-electro-mechanical systems (MEMS). In order to research the lubricating property of thin lubricant film the paper established through-thickness velocity profile measurement system and carried out a on-line situ measurement on through-thickness velocity profile of thin oil film under confined micro-gaps, based on fluorescence recovery after photobleaching (FRAP) and imaging analysis of shape changes process in the bleached area. The method adopted an assumption that the fluorescence intensity is distributed and layered along the film thickness direction, combined two-dimensional bleaching ability distribution information varying with time to acquire velocity distribution of the film thickness direction and the velocity profile of a $8\ \mu\text{m}$ thickness of PB450 polybutene lubricant film. Pearson correlation coefficient of the experiment result and reconstructed fluorescent agent intensity distribution curve is greater than 0.95 and the velocity profile conforms to existing lubrication theory, which proves the reliability of the measuring results.

Key words: fluorescence recovery after photobleaching (FRAP); micro-gaps; lubricant oil film; flow velocity measurement; Couette flow

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51275252, No. 51605239); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (No. BS2014ZZ004)

1 引言

流体薄膜润滑作为最有效的润滑方法之一,广泛存在于滑动轴承、微机电系统及生物体中^[1]。流体薄膜润滑利用微纳米量级的润滑油膜将相对运动的固体表面分开,从而减少摩擦和磨损。流体润滑薄膜工作在微纳米尺度,经历高剪应变率,由于流变或固\液界面效应的影响,导致沿膜厚方向的流速分布发生改变从而影响润滑性能^[2-3]。因此,开展润滑油膜速度场的测量,对高性能润滑轴承设计和优化微流体 MEMS 核心器件结构意义重大^[4-5]。

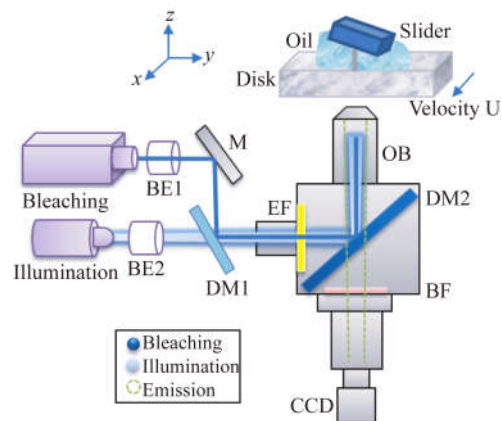
目前对微间隙条件下液体膜界面滑移及流速研究主要集中在理论和间接实验验证方面^[6-7]。直接测量研究较少,主要采用荧光技术等^[8-12]。Leger 最早采用了全反射荧光漂白恢复(TIR-FRAP)方法给出了聚合物熔体界面滑移直接测量结果^[13]。TIR-FRAP 方法通过近场倏逝波观测界面滑移,由于普通荧光探测器难以观测到微弱的倏逝波信号,Leger 等人采用电子倍增管进行测量,只获得了荧光恢复区域的一维强度信息,如果采用光子计数成像探测器进行成像观测^[14],则可以观察到界面处流速分布信息。同时其测量膜厚较高,没有工作在微间隙下。随后,Cuenca 采用光漂白方法测量了纳米间隙内流体平面流速信息及流体动力弥散分布^[15]。2013 年帝国理工大学 Wong 课题组采用基于荧光漂白恢复(FRAP)方法研究了高压点接触弹流润滑中油膜厚度方向流速的分布^[16-17],实现了流速的直接原位测量。然而,常压条件下工作的滑动轴承和微流体 MEMS 器件缺乏有效的液体膜流动信息。本文将荧光漂白恢复显微技术和面接触润滑油膜测量系统相结合,形成一种常压微间隙条件下的润滑油膜流速测量方法,对低副接触下的润滑特性进行研究。

2 实验组成及光干涉标定

2.1 实验装置

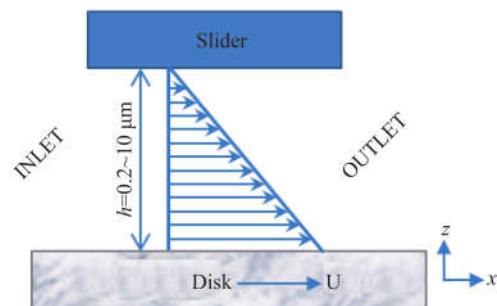
荧光漂白恢复显微系统包括高漂白速率的荧光探针、功率可控的激发及漂白光源和高精度荧光探测设备,测量原理如图 1(a)所示。光路系统

分为漂白光路、激发荧光光路和荧光发射光路。激发光源和漂白光源分别经不同扩束器经激发滤片、与光轴呈 45° 的二向分色镜反射到物镜中,照射到掺杂荧光探针的润滑油膜,分别产生荧光和漂白部分荧光,荧光被同一物镜采集,经分色镜、截止滤片被荧光 CCD 接收。选用全固态蓝色激光器(473 nm,型号 MBL-III-473)作为漂白光,工作在 TEM₀₀ 模式,功率稳定性为 1.61%,横截面的振幅近似为高斯函数分布,产生一个标记的漂白区域。蓝光宽波段 LED 光源作为激发光源照射整个视场产生荧光。



(a) 荧光漂白恢复原理图

(a) Schematic of FRAP setup



(b) 面接触库爱特流示意图

(b) Schematic of Couette flow

图 1 荧光漂白恢复测量系统实验框架

Fig. 1 Framework of FRAP measuring system

滑块处于静止状态,调整方向角,使得沿转盘转动方向间隙的厚度为恒定值,可以得到间隙内油膜的单纯库爱特流。转速为 U 时,由于流体与固体表面的吸附力和流体内部分子间的作用,流体产生剪切变形。经流体层之间黏滞性产生的剪应力,把运动传递到相邻的流体层,形成按照一定

规律的流速分布。在当前的配置下,不考虑边界滑移,当转盘沿 x 方向运动时,润滑油膜产生如图 1(b) 所示的流速分布,漂白区域发生相应变化,检测漂白区域在各时间段的荧光强度及其分布变化可以获得沿膜厚方向流速分布信息。

2.2 润滑油和荧光探针

润滑油采用由韩国大林生产的聚丁烯 PB450, PB450 是一种低聚物,分子量为 450,相对密度为 0.850,具有高的黏度和相对低的分子量,具有较好的剪切稳定性,通常被认为是牛顿流体。采用流变仪测得 PB450 黏度为 $547 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (23°C)。加入荧光探针的 PB450 润滑油黏度稍有降低,约为 $478 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

荧光探针采用纯度大于 98% 的尼罗红 ($\text{C}_{20}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_2$, 分子量为 318.37), 尼罗红通常被认为是光稳定的荧光剂,溶于 PB 油具有相对快的漂白速率。由光漂白引起的加热效应可以忽略。荧光剂加入润滑油 PB450 中,采用磁力搅拌 12 h 后加热 100°C 后继续搅拌 10 min,使其充分溶解,具有 $0.1\sim 1 \text{ mM}$ 的溶解度。在测量过程中玻璃盘为 K9 材料,承载表面镀 Cr 膜加 SiO_2 薄膜,其中, Cr 膜厚度为 20 nm, SiO_2 膜厚 200 nm。滑块采用轴承钢块,尺寸为 $4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,载荷约为 6 N,表面粗糙度为 4 nm。

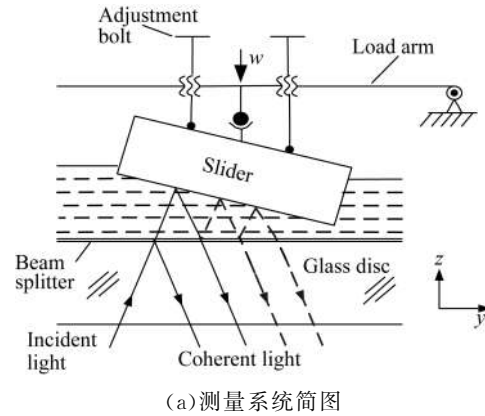
2.3 面接触润滑油膜测量系统膜厚标定

图 2(a) 所示为面接触润滑油膜干涉测量系统的结构简图,主要有微型滑块调节系统和圆盘回转系统。利用调节螺杆对滑块的姿态进行调整,润滑副的载荷由加载杠杆施加。干涉图像是由入射光经玻璃、铬膜、润滑油膜、钢块四层介质形成的多光束干涉图像^[18]。干涉光强会偏离余弦曲线,润滑油膜厚度为:

$$h = \frac{m\lambda}{2n}, \quad (1)$$

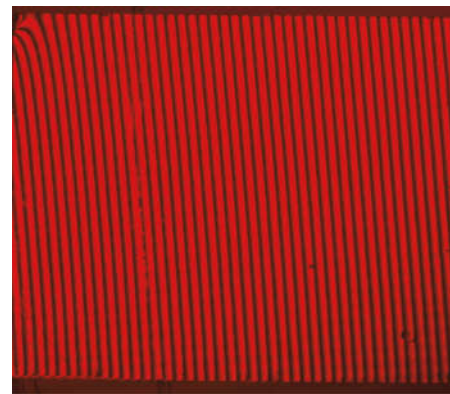
其中: m 为荧光漂白区域处干涉条纹级次, λ 为光源波长,约为 655 nm,功率 5 mW, n 是润滑油膜折射率,采用阿贝折射率仪测得 n 为 1.478。滑块倾角为 $1.9 \times 10^{-3} \text{ rad}$,测量位置润滑油膜厚度为 $8 \mu\text{m}$ 。采用红色激光器标定干涉条纹,此波长大于荧光吸收波长,掺杂荧光探针的润滑剂基本不会产生荧光,避免了荧光带来的干扰,可以同时进行了荧光漂白恢复测量和光干涉测量,获得固定膜厚下的流速分布。采用的固定倾角面接触装置可以观察连续变化的剪应变率流速分布。玻璃平

板转动方向沿干涉条纹方向(如图 2(b) 所示),即 x 坐标轴方向。在转盘运动方向收敛间隙基本恒定,因此由动压效应产生的泊肃叶流可以忽略,润滑油的流动是由剪切产生的库埃特流。



(a) 测量系统简图

(a) Schematic of test rig



(b) 部分干涉条纹

(b) Part of interference fringes

图 2 面接触润滑油膜干涉测量系统

Fig. 2 Test system for interferometry measurement of film thickness in flat-to-flat contact

3 测量原理

观察区域被均一化照射,漂白激光光束在接触区产生一个明显的标记区域,根据激光器光束截面振幅分布信息及光漂白效率和激发光强的关系,初始标记区域近似为高斯分布,采集的荧光漂白恢复图像的一维强度分布为:

$$I_0 = A - B e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

其中: A 为漂白区域外的荧光强度, B 为荧光漂白的最大程度。 x_0 为漂白区域的中心位置。 σ 为漂白光束的半径。假设在稳态情况下,即均匀扩散和不可压缩流体条件下,采用简单的对流-扩散

方程描述漂白区域的流速变化:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - \mathbf{u} \cdot \nabla c, \quad (3)$$

其中: c 为漂白后的荧光时空浓度分布, t 表示时间, ∇ 为梯度函数, \mathbf{u} 为速度场, D 为扩散系数。根据雷诺方程的假设, 忽略由表面曲率引起的速度方向的变化和边界滑移时:

$$u = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} (z^2 - zh) + U \left[1 - \frac{z}{h} \right], \quad (4)$$

其中: η 为润滑油黏度, $\partial p / \partial x$ 为压力梯度, h 为润滑油膜厚度, U 为转盘转速。本实验中接触区膜厚沿转速方向近似为常量, 同时由于 PB450 润滑油黏度较高, 流体模型主要是由剪切流驱动的库埃特流, 即:

$$u(z) \approx U \left[1 - \frac{z}{h} \right]. \quad (5)$$

佩克莱特数 $Pe = vL/\alpha$, 用来描述对流速率和扩散速率的比值。其中, v 为特征速度, L 为特征长度, α 为特征扩散系数。随着 Pe 数的增大, 流速中的扩散输运比例减少, 对流输运的比例增大。对于膜厚方向, 相应特征长度是 h , 此时, $Pe_z = hU/D \gg 100$, 扩散效应可忽略。对流体沿膜厚方向分层, 由于油膜厚度较薄, 每层强度在 x - y 方向满足高斯分布, 在 z 方向近似满足均匀分布。每层以 $u(z)$ 速度独立运动, 层与层之间没有干扰, 式(3)可简化为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (6)$$

得:

$$c(x, z, t) = c_0(x - ut, z). \quad (7)$$

每层运动后的结果可以描述为:

$$c(x, z, t) = A - Be^{-\frac{(x - (u+z_0))}{2\sigma^2}}. \quad (8)$$

对于一个给定的速度剖面 $u(z)$, 图像测量结果是每层之和:

$$I^*(x, t) = \int_0^h c(x, z, t) dz. \quad (9)$$

计算带流速分布参数函数和实际测量图像强度差值:

$$\min_T \sum_{i=1}^m \sum_{q \in \Omega} (I_i(\mathbf{q}) - I^*(x, t))^2. \quad (10)$$

式(10)同时应满足限定条件: $u(i) \geq 0$, $u(i) \geq u(i+1)$ 。采用 Matlab 二次规划函数求解非线性多元函数的最小值, 进而得到流速剖面分布。

荧光漂白恢复测量原理流程如图 3 所示。

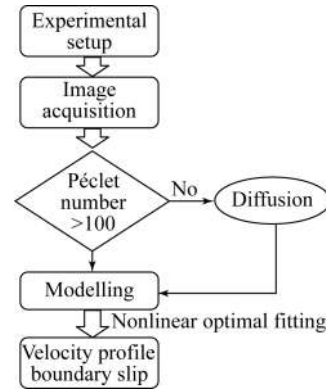


图 3 荧光漂白恢复测量原理流程图

Fig. 3 Flowchart of FRAP

4 测量实验结果及分析

获得漂白光斑的时空强度分布如图 4 所示, 每帧图像曝光时间为 100 ms, 采集时间为 10 s, 转盘转速为 0.75 mm/s, 加减速时间为 100 ms。选取时间间隔 400 ms 的 4 幅匀速时的荧光图像观察漂白区域恢复过程。箭头方向指示流速方向, 可以看出, 荧光强度随 x 坐标增大强度增加, 同干涉法标定倾角结果一致。漂白区域运动方向同干涉条纹方向一致, 因此可忽略由收敛间隙产生的动压效应。

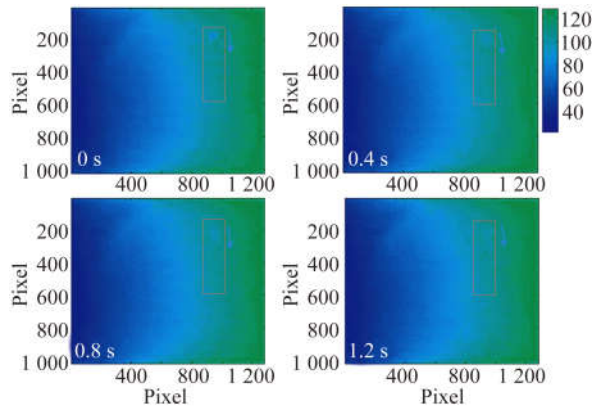


图 4 接触区漂白光斑强度分布

Fig. 4 Experimental spatiotemporal intensity distribution

为了更清楚观察荧光漂白恢复过程, 选取图 4 框中的区域重新放大后如图 5(a)所示, 中心位置处的强度分布曲线如图 5(b)所示, 显示漂白标记区域随时间增加变得更加平坦, 为了更精确计算流速剖面参数, 采用了等波纹 FIR 滤波器对强

度分布曲线进行了低通滤波,减少激光散斑干扰和像素不连续等高频因素对测量结果的影响。

通过图 5(b)的实验数据和分层模型,经过计算获得了 PB450 润滑油膜沿膜厚方向的流速分布,如图 6 所示,润滑油膜共分 25 层,各层流速 U 按直线分布。润滑油膜在钢块界面处没有明显滑移,对于牛顿流体,剪切力和剪切变率的关系是直线,测量结果和预期的库埃特流理论数据一致,证明了实验的有效性。对图 6 中测量的数据进行插值,得到圆盘表面层 $z=0$ 的速度为 0.73 mm/s ,界面处流速略小于盘速,存在微量滑移,滑移长度约为 $0.219 \mu\text{m}$,可能由钢块和转盘具有不同的表面亲和性引起^[19-20]。

分布分层模型进行了模拟,重建强度分布结果如图 7 所示。强度随时间分布重建数据和实验结果高度吻合。

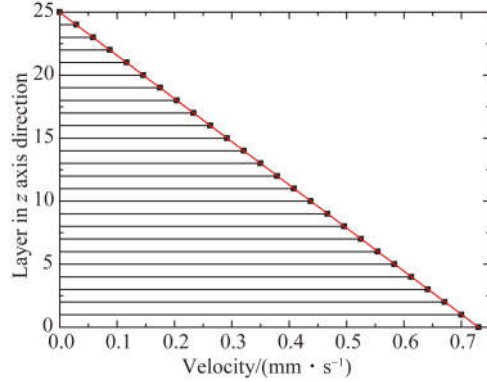
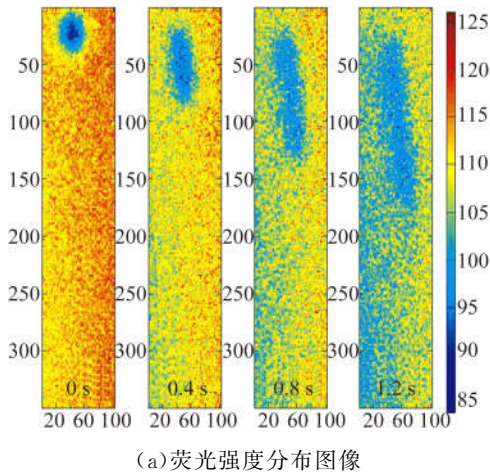


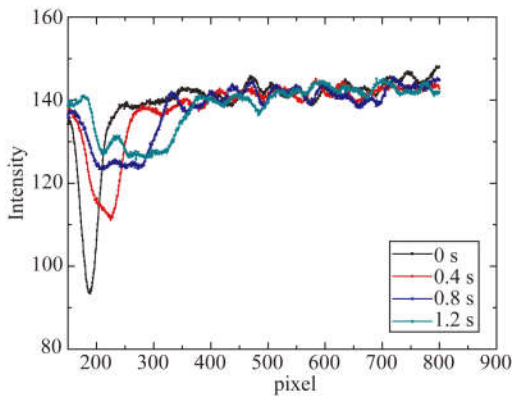
图 6 得到的流速剖面图

Fig. 6 Couette velocity profile



(a) 荧光强度分布图像

(a) Intensity distribution of fluorescence image



(b) 漂白中心荧光强度分布曲线

(b) Intensity distribution curve

图 5 固定位置荧光强度分布

Fig. 5 Experimental intensity distribution

根据计算得到的线性库埃特流曲线(图 6),利用高斯分布函数,选用荧光强度膜厚方向均匀

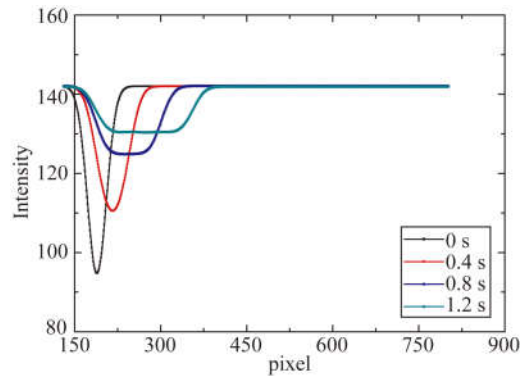


图 7 重建的强度分布图

Fig. 7 Reconstructed intensity distribution

重建后的实验结果是在没有扩散条件下得到的。为定量确定重建强度分布和实验数据之间的关系,采用皮尔森相关系数进行评价:

$$P(x, y) = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \tag{11}$$

根据式(11),0,0.4,0.8和1.2 s时实验曲线和重建结果的相关性系数分别为 0.974,0.967,0.954,0.952。随着时间增加,荧光漂白区域信号变弱,相关性下降。但相关性均大于 0.95,证明了实验准确性。重建结果和实验数据偏离主要由背景噪声、激发光源稳定性等因素引起,通过多次测量平均,可以进一步减少随机误差的影响。

5 结 论

本文采用光干涉法和荧光漂白恢复显微方法测量了面接触条件下固定膜厚的流速剖面分布。光干涉法光源波长大于荧光吸收波长,可在没有荧光干扰的条件下实现高精度膜厚测量。采用沿膜厚方向荧光强度均匀分布分层假设,结合二维随时间变化的漂白强度分布信息获得通过膜厚方

向的流速分布,对 PB450 润滑油膜进行研究分析,结果显示:在剪切条件下,厚度为 $8\ \mu\text{m}$ 的 PB 润滑油膜近似满足线性的速度轮廓分布,在转盘表面存在微量滑移。实验和重建结果皮尔森相关系数大于 0.95,证明了本方法的正确性。测量结果虽然基于大的佩克莱数,不考虑扩散影响,但本方法也适用于扩散较小的黏性流体。对于非牛顿流体及复杂工况下的流速剖面及界面滑移测量同样具有重要应用前景。

参考文献:

- [1] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 第 4 版. 北京:清华大学出版社,2012.
WEN S ZH, HUANG P. *Principles of Tribology* [M]. Fourth edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [2] THOMPSON P A, TROIAN S M. A general boundary condition for liquid flow at solid surfaces [J]. *Nature*, 1997, 389:360-362.
- [3] 王宝,汪家道,陈大融. 基于微空泡效应的疏水性展向微沟槽表面水下减阻研究[J]. *物理学报*, 2014, 64(7):214-220.
WANG B, WANG J D, CHEN D R. Drag reduction on hydrophobic transverse grooved surface by underwater gas formed naturally [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 64(7):214-220. (in Chinese)
- [4] 顾雯雯. 微流控细胞芯片 LED 诱导透射式荧光检测微系统[J]. *光学精密工程*, 2014(8):2159-2165.
GU W. LED induced transmitted fluorescence detector integrated in microfluidic cell chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014(8):2159-2165. (in Chinese)
- [5] 刘勇,钱鸿鹄,朱灵,等. 微流控实时荧光聚合酶链式反应成像非均匀性的校正[J]. *光学精密工程*, 2013(8):2161-2168.
ZHANG Y, QIAN H H, ZHU L, *et al.*. Nonuniformity correction for fluorescence imaging of microfluidic real-time PCR [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013(8):2161-2168. (in Chinese)
- [6] GUO F, YANG S Y, MA C, *et al.*. Experimental study on lubrication film thickness under different interface wettabilities [J]. *Tribology Letters*, 2014, 54(1):81-88.
- [7] SPIKES H A. The half-wetted bearing, Part1: Extended reynolds equation, IMechE [J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2003, 217(1):1-14.
- [8] LUMMA D, BEST A, GANSEN A, *et al.*. Flow profile near a wall measured by double-focus fluorescence cross-correlation [J]. *Physical Review E*, 2003, 67(52):056313.
- [9] VINOGRADOVA O L, KOYNOV K, BEST A, *et al.*. Direct measurement of hydrophobic slippage using double-focus fluorescence cross-correlation [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102:118302.
- [10] KUANG C, WANG G. A novel far-field nanoscopic velocimetry for nanofluidics [J]. *Lab Chip*, 2010, 10:240-245.
- [11] JÖNSSON P, JONSSON M P, TEGENFELDT J O, *et al.*. A method improving the accuracy of fluorescence recovery after photobleaching analysis [J]. *Biophys. J.*, 2008, 95:5334-5348.
- [12] 张运海,杨皓旻,孔晨晖. 激光扫描共聚焦光谱成像系统[J]. *光学精密工程*, 2014(6):1446-1453.
ZHANG Y H, YANG H H, KONG CH H. Spectral imaging system on laser scanning confocal microscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014(6):1446-1453. (in Chinese)
- [13] PIT R, HERVET H, LEGER L. Direct experimental evidence of slip in hexadecane; solid interfaces [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85:980-983.
- [14] 韩素立,陈波,尼启良,等. 光子计数探测器感应位敏阳极的电子云扩散[J]. *光学精密工程*, 2014(7):1732-1736.
HAN S L, CHEN B, NI Q L, *et al.*. Electron cloud diffusion property of photon counting detector based on induction readout [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014(7):1732-1736 (in Chinese)
- [15] CUENCA A, BODIGUEL H. Fluorescence photobleaching to evaluate flow velocity and hydrodynamic dispersion in nanoslits [J]. *Lab Chip*, 2012, 12, 1672-1679.
- [16] PONJAVIC A, CHENNAOUI M, WONG J. Through

- thickness velocity profile measurements in an elasto-hydrodynamic contact [J]. *Tribology Letters*, 2013; 50:261-277.
- [17] PONJAVIC A, MARE L D, WONG J, *et al.*. Effect of pressure on the flow behavior of polybutene [J]. *Journal of Polymer Science, part B: Polymer Physics*, 2014, 52:708-715.
- [18] GUO F, WONG P L, FU Z, *et al.*. Interferometry measurement of lubricating film in slider-on-disc contacts [J]. *Tribology Letters*, 2010, 39 (1):71-79.
- [19] BARRAT J-L, BOCQUET L. Large slip effect at a nonwetting fluid-solid interface [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82:4671-4674.
- [20] HUANG D M, SENDNER C, HORINEK D, *et al.*. Water slippage versus contact angle: a quasi-universal relationship [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101:226101.

作者简介:



韩素立(1986—),女,河北邢台人,博士后,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事流体动压润滑及光子计数成像探测器研究。E-mail: best_hsl@163.com

通讯作者:



郭峰(1968—),男,山东高青人,教授,博士生导师,2003年于香港城市大学获得博士学位。主要从事油膜润滑的光学测量和理论分析工作。E-mail: mefguo@163.com