

液体在单根纳米管表面上的运输*

俞敏峰[†]

Kyungsuk Yum

(伊利诺伊大学香槟分校机械与工业工程系 伊利诺伊州 61801 美国)

摘要 文章研究了在单根纳米管表面上形成的分子级液膜的传输现象. 实验发现, 厚度在 $\sim 10 \text{ \AA}$ 量级的表面流体在表面力的驱动下沿纳米管以恒定的速度 ($\sim 10 \mu\text{m/s}$) 和容量流速 ($\sim 10 \text{ al/s}$) 流动. 容量流速 Q 与纳米管直径 d 之间成幂函数关系 $Q \sim d^{2.4}$. 此结果对实现用纳米管作为液体运输器件具有指导意义.

关键词 流体运输, 纳米管, 扩展和润湿

Surface-mediated liquid transport through molecularly thin liquid films on nanotubes

YU Min-Feng[†]

Kyungsuk Yum

(Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana - Champaign, Urbana, IL 61801, USA)

Abstract The surface-mediated liquid transport through molecularly thin films on individual nanotubes was studied in ambient conditions. The surface fluid with molecular thickness ($\sim 10 \text{ \AA}$) flowed at a constant speed ($\sim 10 \mu\text{m/s}$) and volume flow rate ($\sim 10 \text{ al/s}$) along the nanotubes. The volume flow rate Q follows the power law dependence on nanotube diameter d , which is explained with a generic microscopic model.

Keywords liquid transport, nanotube, spreading and wetting

纳米尺度下的物质传输一直是当今实验和理论研究的焦点之一. 尤其是纳米管的独特的小尺寸结构, 对研究在纳米尺寸下的材料运输和填充以及对新型纳米流体器件的研究和开发都起了非常重要的作用. 单根纳米管在结构上通常具有非常大的长宽比 ($\gg 1000$), 而它的直径可以小到将近 1 nm . 由于纳米管是由石墨单层或者类似于石墨单层的材料形成, 纳米管的内外表面通常具有原子量级的平整度. 如何利用这样一个新型材料, 也就是说, 利用它的理想的内外管道, 来实现非常精细的可控的物质传输因而成为一个具有实际意义的研究课题. 这样的研究不但会对现有的纳米尺度下的流体运输性质的理解产生重大影响, 而且能够为新型纳米流体器件的开发提供直接有用的参数.

在纳米尺度下, 材料的表面积/体积比非常高, 因而材料的表面性质 (如润湿性、扩展性等) 会对物质的传输起决定性作用. 已有的理论和实验研究表明, 非挥发性液滴在固体平面上的扩展会在宏

观液体的前端产生分子级厚 (一层或几层分子厚度) 的液膜, 即所谓的前导膜. 运用椭圆偏振技术进行的大量研究表明, 此先导膜随时间呈“扩散性地”展开, $R(t) = \sqrt{D_{\text{app}} t}$, 其中 R 是扩展半径, D_{app} 是前导膜的扩散系数. 然而, 对液体在高曲率和小尺寸的表面上的扩展动力学的实验研究却仍然非常缺乏. 最近的一个实验是用高分辨率电子显微镜观察到了飞克级 (10^{-15} g) 金属熔滴在单根纳米管的外表面的可控传输^[1]. 本文报道了我们在实验上用单根纳米管来实现对纳米管表面液体薄膜的传输性质的研究, 也就是实现了对高曲率表面上的扩展动力学问题的研究^[2]. 单根纳米管为在合理的时间尺度下研

* 美国国家自然科学基金 (批准号: ECS-0501495), 美国国家自然科学基金纳米化学-电子-机械制造系统中心 (批准号: DMI-0328162) 资助项目

2006-02-20 收到初稿, 2006-05-11 修回

[†] 通讯联系人. Email: mfyu@uiuc.edu

究光滑表面上的液体扩展动力学提供了独特的实验条件。

实验是在单根高质量的氮化硼纳米管上进行的。通过纳米操纵技术,单根纳米管,通过利用范德瓦尔斯力,被固定在了—根孔径为 $2\ \mu\text{m}$ 的微滴管端部内壁上。此微滴管安装在具有微量液体进样泵的光学显微镜的操作台上。实验中所使用的液体为非挥发性的硅树脂流体,一种小分子量的聚二甲基硅氧烷 (PDMS),其分子量 $M_w = 1500\ \text{g/mol}$,粘度 $\mu = 20\ \text{cS}$,表面张力 $\gamma = 20.6\ \text{mN/m}$ 。PDMS 单体的横向尺寸大约为 $7\ \text{\AA}$ 。通过对固定纳米管的充满 PDMS 的微滴管施加压力,可以引发沿纳米管流动的薄膜流,并可在纳米管端部形成微米尺寸的 PDMS 液滴(图 1 右上角)。为了研究液体在纳米管表面的传输特性,我们将微米级的 PDMS 液滴(图 1 右上角)转移到另一根纳米管的端部(图 1 左侧)。在液滴被转移后,显微镜上的高灵敏度 CCD 摄像头记录下液滴尺寸随时间变化的全过程(图 1 左侧)。通过对球状液滴尺寸随时间变化的测量可以确定表面流体的容量流速 Q 。

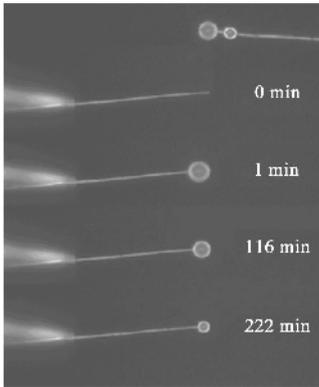


图 1 PDMS 液滴在纳米管($d = 90\ \text{nm}$, $L_0 = 25\ \mu\text{m}$)上随时间变化的图像

图 2(a)内的插图是初始直径为 $3.2\ \mu\text{m}$ 的 PDMS 液滴在纳米管($d = 80\ \text{nm}$, $L_0 = 26\ \mu\text{m}$)上直径随时间变化的曲线。图 2(a)为相应的液滴体积随时间变化的曲线。其中的实线为线性拟合。实验结果表明,液滴的容量流速 Q 为常数。当纳米管的直径 d 从 $70\ \text{nm}$ 变化到 $240\ \text{nm}$,长度 L_0 从 $19\ \mu\text{m}$ 变化到 $26\ \mu\text{m}$ 时,容量流速 Q 的变化范围是 1 到 $40\ \text{al/s}$ (图 2)。图 2(b)和(c)描述容量流速 Q 随纳米管直径和有效长度变化的关系。通过对数坐标中的线性拟合发现,两组数据遵循相同的幂函数关系： $Q = Q_0 d^{2.4}$ 。

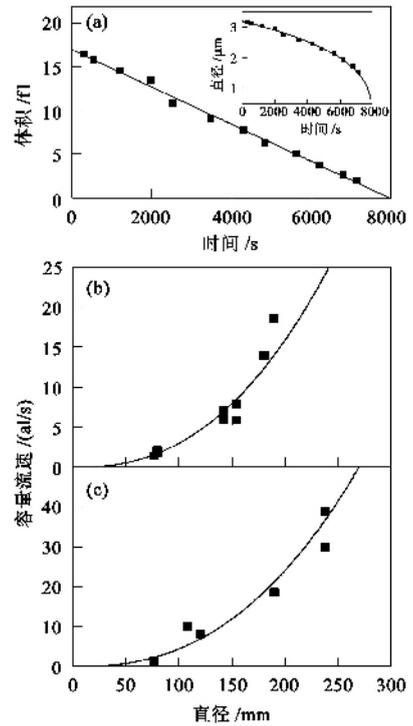


图 2 (a)PDMS 液滴体积和直径随时间变化的曲线 (b)和(c)为容量流速 Q 随纳米管直径 d 和有效长度的变化关系。纳米管的有效长度在(b)中为 $22 \pm 3\ \mu\text{m}$,在(c)中为 $17 \pm 2\ \mu\text{m}$

此结论可从以下的一个微观模型的分析得到。从能量的角度分析,分子级厚的液膜在表面的扩展可以被认为是在液/固之间的表面作用,与液体分子在液/固界面的粘滞摩擦之间的竞争。分子与圆柱表面之间的作用能 $U(z) \sim d^2/z^5$,其中 z 是分子与圆柱面之间的距离。因而其间的的作用力(或驱动力)为 $F_d \sim d^2$ 。理论及实验^[4-5]表明,液体分子在固体表面运动时的粘滞摩擦力与表面流体的速度成正比, $F_f \sim \pi d L v$ 。表面流体的速度因而可通过力平衡得到： $v \sim F_d / \pi d L \sim d / \pi L$ 。纳米管柱面上表面流体的容量流速因而可综合为： $Q \sim \pi d e v \sim e d^2 / L \sim d^{2+n} / L$ 其中 e 和 v 分别为表面流体的厚度和速度。膜厚 e 是由热力学平衡所决定的一个常数^[3]。 $e = a^{1-n} (d/2)^n$,其中 a 是与有效 Hamaker 常数有关的特征分子尺寸。在平衡条件下,指数 n 为 $1/3$ 。此模型能很好地解释我们的实验结果。实验中 Q 遵循幂函数关系 $Q \sim d^{2.4}$,对应于公式中的 $n = 0.4$ 。对于一个直径为 $100\ \text{nm}$ 的纳米管,用实验中相应的 Q 值可计算出 e 大约为 $10\ \text{\AA}$, v 大约为 $10\ \mu\text{m/s}$ 。

我们预计在碳纳米管上液体应具有相似的扩展行为。尽管量值可能会略有不同。此结果也可为液体在纳米管内管的扩展传输的研究提供直接的实验依据。

参 考 文 献

- [1] Regan B C , Aloni S , Ritchie R O *et al.* Nature (London) , 2004 , 428 : 924
- [2] Yum K , Yu M F. Phys. Rev. Lett. , 2005 , 95 : 186102
- [3] Quéré D , Meglio J - M Di , Brochard F. Science , 1990 , 249 : 1256
- [4] Cieplak M , Smith E D , Robbins M O , Science , 1994 , 265 : 1209
- [5] Cazabat A M , Valignat M P , Villette S *et al.* Langmuir , 1997 , 13 : 4754.

· 信息服务 ·

欢迎订阅 2007 年《人工晶体学报》

《人工晶体学报》是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料专业委员会和中材人工晶体研究院主办、国内专门刊登人工晶体材料这一高新技术领域研究成果的学术刊物。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料、半导体材料、光电子材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备以及应用技术和器件加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流会议及会议信息。刊户覆盖以上各行业的大专院校、科研院所、生产经营单位和(省、市)图书馆、政府相关部门。本刊已在美、日、英、俄、德等国家和地区发行。

《人工晶体学报》为中文科技核心期刊,国内各主要科技文献数据库及 EI、CA、INSPEC、AJ 收录源期刊。全文在“万方数据数字化期刊群”及“中国期刊网”上网。

《人工晶体学报》为双月刊,大十六开,每期约 30 万字。2007 年全年定价 300 元,可直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

收款单位 北京中材人工晶体有限公司

开户银行 北京工商行管庄分理处

帐号 0200006809006830924

电话 010-65491290

传真 010-65493320

邮局汇款方式:

邮编 100018

北京 733 信箱《人工晶体学报》编辑部

网址 www.jtcb.cn

Email :jtcbjb@126.com

· 物理新闻和动态 ·

压缩的光线和引力波

一种在高精度光学测量中降低噪声的方法将很快用于引力波的探测。探测引力波的最有希望的途径是观测引力波在探测器中(如激光干涉仪引力波观测站)悬挂着的镜子上的细微的效应。

在激光干涉仪引力波观测站,激光被分成两束,光在悬挂于相互成 90 度放置的两根长管子末端放置的镜子之间多次反射,再使这两束激光相会,产生干涉图形。对这一步骤进行调节,使得一个光探测器处于图形的零点位置,这里在正常情况下看不到光子。传播过来的引力波将轻微地使悬挂的镜子相对移动(如无引力波作用时,镜子不会受普通振动的影响),这样就会反过来扰乱干涉图形,光探测器将会立即记录光子,从而传达关于引力波经过的信息。

这种方案的一个问题是所谓的“射击噪声”,即量子效应引起的每一时刻激光束中光子数的不确定性。光子数的涨落会触发假的读数。

在德国汉诺威的 Max Planck 引力物理研究所和汉诺威大学的物理学家,希望通过压缩光线的方法来降低干涉法引力波探测中固有的量子噪声。让光线通过一系列特殊的光学晶体,使描述一束光中的两个互补的参量(如相位和幅度)中的一个参量中的量子噪声以另一个为代价而大大降低,这样便产生压缩的光线。

使用压缩光线可降低许多光电子学应用中的量子噪声。通常压缩光线方法用于兆赫的频率,但是汉诺威的研究人员首次使用这种方法能用于激光干涉仪引力波观测站相关的所有探测频率,包括低于 100Hz 的频率,预计这是来自宇宙中一些遥远的结合在一起的黑洞的引力波的频率范围。压缩光线控制方法将有助于降低引力波探测器的噪声并提高其灵敏度。有关论文见 Physical Review Letters , 2006 97 011101.

(树华 编译自 Physics News Update Number 784 #2 , July 7 , 2006)