

微结构阵列对近壁面层液体运动规律的影响

乔小溪 张向军 田煜 孟永钢

Effect of micro-structure array on the liquid flow behaviors of near-surface layer

Qiao Xiao-Xi Zhang Xiang-Jun Tian Yu Meng Yong-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 044703 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.044703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低温光滑壁面上水滴撞击结冰行为

Freezing behavior of droplet impacting on cold surfaces

物理学报.2016, 65(10): 104703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104703>

爆炸气泡与自由水面相互作用动力学研究

Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface

物理学报.2014, 63(19): 194703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194703>

加热球体入水空泡实验研究

Water-entry cavity of heated spheres

物理学报.2016, 65(20): 204703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204703>

微结构阵列对近壁面层液体运动规律的影响*

乔小溪^{1)2)†} 张向军²⁾ 田煜²⁾ 孟永钢²⁾

1)(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

2)(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(2016年8月26日收到; 2016年11月14日收到修改稿)

表面微结构阵列可用于调控微间隙中液体的流动行为、运动阻力和混合特性等. 本文采用石英晶体微天平实验研究了微凹坑和微圆柱阵列以及微结构表面形貌对近壁面层液体运动行为的影响. 石英晶体微天平的系统频移和半带宽变化与近壁面层液体的运动行为密切相关, 研究显示, 表面微凹坑倾向于受限液体的运动, 因此微凹坑表面引起的频移绝对值明显大于与其具有相同特征尺寸的微圆柱表面, 且均大于光滑表面. 粗糙表面结构会明显地增加近壁面区域液体运动的紊乱程度, 因此具有粗糙顶部的二级微圆柱表面引起的半带宽变化明显大于与其具有相同特征尺寸的微圆柱表面, 且均大于光滑表面. 该研究为微流道表面阵列微结构形式的选择提供了实验依据.

关键词: 石英晶体微天平, 微结构阵列, 近壁面层, 流动行为

PACS: 47.55.dr, 47.54.De

DOI: 10.7498/aps.66.044703

1 引言

受到自然界生物的启发, 研究者和工业界通常会采用表面加工微/纳米结构的方法来改变固体材料的界面特性, 例如黏附、润湿、滑移、光学、电学和热传导特性等, 进而改进和完善器件的执行能力. 仿生荷叶和鲨鱼皮表面的应用就是最为典型例子. 随着微加工技术的不断发展, 规则微纳米结构阵列的应用也引起了足够的重视, 且其具有尺寸参数可控的优点. 目前最常见的微纳米结构加工的方法有: 光刻、聚焦离子束、激光加工、纳米压印技术、微细电火花加工、塑料模压技术和模铸技术等.

当固体表面加工有规则的微结构阵列时, 将不可避免地影响近壁面层液体的流动行为^[1-3], 而液体流动行为的调控对于微流道或微间隙中液体的流动阻力、流动速度及其混合特性的控制非常关键. 研究表明, 通过在微流道壁面加工特定的微纳米结

构阵列可以实现降低液体流动的阻力^[4-7]; Lee和Kim^[8]通过在锂离子电池电极表面加工条状和方形阵列的二氧化锡纳米线阵列来有效扩散液相电解质进而提高其存储性能; Goulet等^[9]研究发现表面微结构的出现可以更好的促进流道中液体的混合. 表面微纳米结构阵列对近壁面层液体流动行为的影响与其阵列方式, 形状、取向和尺寸等密切相关^[2,6,10]. Woolford等^[6]的实验显示, 只有当微沟槽的取向与流动方向相同时才具有减阻特性, 而当流动与微沟槽方向垂直时液体的流动阻力增加. 同时Suh等^[11]提出运动副的摩擦润滑特性与表面微结构的阵列方向和运动副的运动方向之间的夹角密切相关. 因此研究微结构对近壁面区域液体流动行为的影响规律对于表面微结构的应用非常关键, 尤其是针对微纳米尺度下的液体流动.

对于离散点阵的微纳米结构而言, 根据微结构层固相是否连续可以将其分凸柱和凹坑两类. 两种形式的微结构阵列对近壁面层液体运动规律的影

* 中央高校基本业务费 (批准号: FRF-TP-15-084A1)、中国博士后科学基金 (批准号: 2016M591067)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB934101) 和国家自然科学基金 (批准号: 51375254) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qxx41051134@126.com

响明显不同, 对于凸柱表面而言, 液体在微结构层内可以实现连续流动; 而对于凹坑表面而言, 液体的运动通常被受限在凹槽内. 文献中也通常将微圆柱阵列视为多孔介质, 并采用渗透系数来对其中液体流动的阻力进行表征. 同时阵列单元的表面形貌也会明显影响液体的浸润和流动特性. 本文采用石英晶体微天平 (quartz crystal microbalance (QCM)) 作为研究手段, 实验分析了微圆柱和微凹坑阵列, 以及阵列单元表面形貌对近壁面层液体流动行为影响的规律. QCM 作为研究固/液界面层性质的有效手段, 已经被广泛应用在生物、化学、环境、医学和摩擦等学科领域中. QCM 不仅可用来研究光滑表面近壁面区域液体的界面行为, 也可用来研究微结构、表面粗糙度、多孔介质等对液体界面行为的影响规律 [12–14].

2 实验部分

2.1 实验装置

石英晶体微天平实验装置示意图见图 1, 其核心部件为石英晶体芯片和阻抗分析仪. QCM 芯片是由 AT 型石英和镀在晶体上下表面的金膜电极组成 (图 1 (b)). QCM 主要用于研究近壁面层一定厚度内液体的性质, 可测量的厚度与液体的衰减长度 δ 有关. 衰减长度 $\delta = (2\eta/\omega\rho_l)^{1/2}$, 其中 η 和 ρ_l 分别为液体的黏度和密度, ω 为基底的振动频率. QCM 具有较高的检测精度和灵敏度, 其工作原理是基于石英晶体的压电效应, 当 QCM 芯片表面施

加有一介质负载时, 系统的共振频率、半带宽和耗散等就会发生改变, 其改变量与被测介质的黏弹性、膜厚和质量等物理性质密切相关, 通常采用表面机械阻抗 Z_s 来表征. 表面机械阻抗定义为 QCM 芯片上表面处 ($z = 0$) 的剪切应力 T_{xy} 与速度的比值, 即

$$Z_s = \frac{T_{xy}}{v_q} \Big|_{z=0}, \quad (1)$$

v_q 为芯片的运动速度. 进一步被测介质引起的系统频移 Δf_N 、半带宽变化 $\Delta\Gamma_N$ 和耗散变化 ΔD_N 与表面机械阻抗 Z_s 的关系为:

$$\Delta f_N = \frac{-f_0}{\pi(\mu_q\rho_q)^{1/2}} \text{Im}(Z_s), \quad (2)$$

$$\Delta\Gamma_N = \frac{f_0}{\pi(\mu_q\rho_q)^{1/2}} \text{Re}(Z_s), \quad (3)$$

$$\Delta D_N = \frac{2}{\pi(\mu_q\rho_q)^{1/2}} \text{Re}(Z_s), \quad (4)$$

其中 Z_s 为负载的表面机械阻抗, μ_q 和 ρ_q 为石英晶体的剪切弹性模量和密度, f_0 为晶片振动的基础频率. $N = 1, 3, 5, 7, 9, 11$ 为系统振动的阶数.

系统频移与振动过程中移动的质量和存储的能量相关, 系统半带宽变化和能量耗散与振动过程中产生的黏性损耗相关. 当被测介质为刚性膜时, 可认为膜跟随基底做无耗散振动, 因此刚性膜只引起系统共振频率的变化, 而不改变系统的半带宽, 即 $\Delta f = C \cdot \Delta m, \Delta\Gamma = 0$, 其中 Δm 为刚性膜单位面积的质量, C 为常数. 同时对于光滑表面而言, 黏性液体引起的频移和半带宽变化为

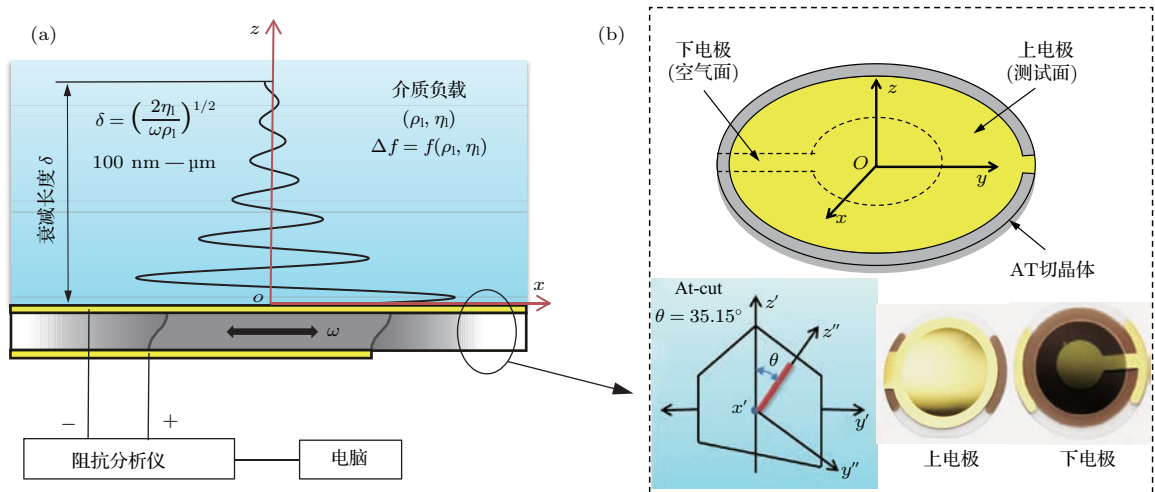


图 1 (网刊彩色) 石英晶体微天平装置示意图 (a) 及石英晶体芯片 (b).

Fig. 1. (color online) Diagram of the QCM device (a) and the QCM chip (b).

$$\begin{aligned} \Delta f_N &= -\Delta\Gamma_N \\ &= -N^{1/2}f_0^{3/2}\left(\left(\frac{\rho\eta}{\pi\rho_q\mu_q}\right)^{1/2}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

由(5)式可以看出,对于光滑表面而言,系统的频移和半带宽变化相等,且与共振阶数的平方根 $N^{1/2}$ 或被测介质的密度-黏度积平方根 $\sqrt{\rho\eta}$ 成正比.当微结构引入到QCM芯片的表面时,其势必会影响QCM芯片近壁面层液体的流动行为,出现非层流以及液体由水平向垂直运动时产生的压力波.同时微结构的受限作用会使得部分液体受限在微结构内随着基底无耗散的运动.总之,微结构阵列表面引起的频移和半带宽变化与近壁面区域液体非线性运动的耗散,固、液间摩擦作用以及微结构层内受限跟随基底刚性运动液体膜的质量等密切相关,因此可通过测量微结构对系统频移和半带宽变化的影响规律来分析研究微结构对近壁面层液体运动行为的影响规律.

2.2 样品制备与表征

2.2.1 液体样品的制备及表征

采用化学纯蔗糖和去离子水制备得到的不同质量浓度的蔗糖-水溶液作为测试对象,通过密度计和流变仪测试得到的密度和黏度,如表1所列.

表1 不同浓度水-蔗糖溶液的密度和黏度

Table 1. Densities and viscosities of the aqueous sucrose solutions with different mass concentrations.

质量浓度/%	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	黏度 $\eta/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\rho\eta/\text{kg}^2\cdot\text{m}^{-4}\cdot\text{s}^{-1}$
0	1	1.03	1.03
9.6	1.038	1.34	1.39
18.3	1.074	1.85	1.99
27	1.1145	2.72	3.03
34.6	1.148	4.2	4.82

2.2.2 微结构阵列的制备

表面微结构阵列采用湿法刻蚀的方法加工而成.微结构在QCM芯片表面的阵列方式如图2所示,其中黑色圆代表凹坑或凸柱.微结构的阵列方向与晶体振动的方向水平(或认为垂直),其中 L 为相邻圆中心距, D 为圆的直径.本文中采用的QCM芯片为裸金晶片,即芯片上表面材料为金;同时镀膜采用的材料为铬,即微圆柱的材料为铬.

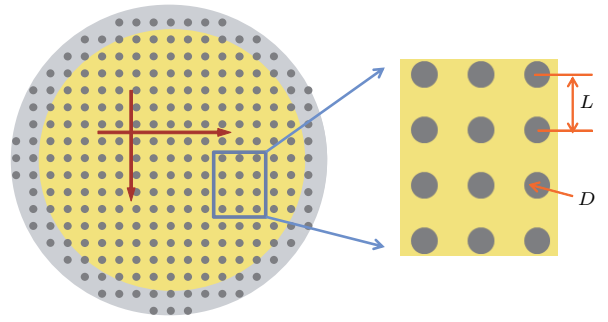


图2 (网刊彩色) 芯片表面微结构阵列的示意图
Fig. 2. (color online) The distribution diagram of micro-structure array on the QCM chip surface.

3 结果与讨论

QCM测试结果中给出的频移和半带宽变化均采用相应阶数下的响应与阶数均方根的比值进行表征,即 $\Delta f = \Delta f_N/N^{1/2}$ 和 $\Delta\Gamma = \Delta\Gamma_N/N^{1/2}$.研究显示,微结构对近壁面区域液体流动行为的影响与阵列单元的尺寸、形状、形式等密切相关.本文的主要目的是研究微结构的形式对近壁面层液体流动行为的影响规律,包括凸柱、凹坑和阵列单元的表面形貌等,因此实验研究中均采用了具有相同特征尺寸的微结构进行测试,如图3和图5所示,而没有关注微结构尺寸变化的影响.微圆柱或微凹坑阵列,以及光滑或粗糙的顶部形貌对近壁面层液体运动影响的不同,必然导致QCM响应具有不同的变化规律.

3.1 凹坑和凸柱影响的对比

首先实验研究了具有相同特征尺寸的微圆柱和微凹坑阵列对近壁面层液体运动规律影响的不同.实验制备的微结构阵列如图3所示,即直径 $D = 20\ \mu\text{m} \pm 3\ \mu\text{m}$ 和圆心距 $L = 60\ \mu\text{m}$,高度或深度均约为280 nm的方形阵列微圆柱和微凹坑.采用两种微结构表面,分别测试了不同浓度蔗糖溶液引起的系统频移和半带宽变化,如图4所示.

图4结果显示,不同浓度的蔗糖溶液时,光滑表面、微圆柱和微凹坑三种表面引起的频移和半带宽变化的趋势基本一致.微圆柱和微凹坑阵列表面引起的频移绝对值和半带宽变化均大于光滑表面,且微圆柱表面引起的频移绝对值小于微凹坑阵列表面,同时微圆柱和微凹坑阵列表面引起的半带宽变化基本一致.

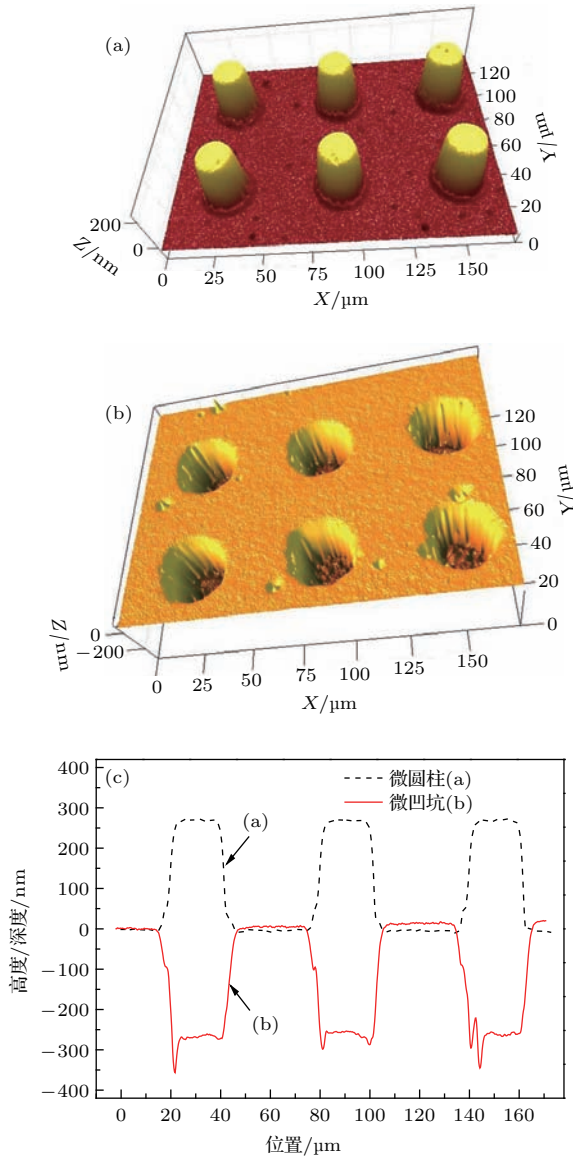


图3 (网刊彩色) 微圆柱(a)和微凹坑(b)阵列表面的白光三维图和二维轮廓图(c)
 Fig. 3. (color online) The 3D figures of micro-pillar (a) and micro-hole surfaces (b), and the corresponding 2D profiles (c) measured by white-light interferometer.

QCM理论显示, 系统发生的频移和半带宽变化与近壁面层液体的流变和流动性质密切相关, 对于相同的被测液体, 系统响应的差异主要与近壁面层液体的流动行为有关. 表面微凹坑的存在使得液体的运动受限在凹坑内, 部分受限液体会类似刚性膜一样随基底运动. 我们知道对于刚性膜而言, 其只引起系统的频移发生变化, 而基本不改变系统的半带宽变化或者能量耗散, 因此微凹坑阵列表面引起频移较大. 同时结果显示, 微凹坑表面引起的半带宽变化也大于光滑表面, 这表明微凹坑内的液体并不完全跟随基底运动, 而是具有一定的相

对运动进而引起系统耗散的增加^[15], 因为系统的半带宽变化(或能量耗散)与近壁面被测区域液体的运动形式和速度等密切相关. Daikhin和Urbakh等^[16]的理论显示微结构层和体相层引起的耗散变化分别为

$$Q^s = -\eta \int_0^H dz \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial z} v_x(z,t) \right)^2 + \xi_H^{-2} [V_0 \exp(i\omega t) - v_x(z,t)]^2 \right\}, \quad (6)$$

$$Q^b = -\eta \int_H^\infty dz \left(\frac{\partial}{\partial z} v_x(z,t) \right)^2. \quad (7)$$

由(6)和(7)式也可以看出, 系统的能量耗散或半带宽变化与液体的运动密切相关. 同时基于刚性膜随基底无耗散运动的原则, 许多研究在处理表面粗糙度的影响时也会将受限在粗糙峰内的液体层视为刚性膜进行处理, 并采用叠加方法求解频移, 即

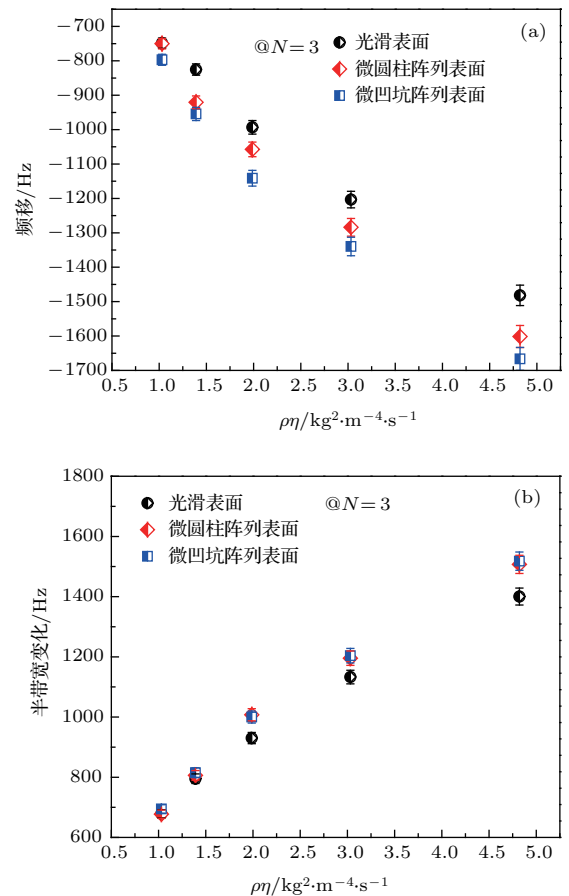


图4 (网刊彩色) 光滑表面、微圆柱和微凹坑阵列引起的频移(a)和半带宽变化(b)
 Fig. 4. (color online) Frequency shift (a) and half-bandwidth variation (b) for smooth, micro-pillar and micro-hole surfaces.

$$\Delta f_N = -f_N^{3/2} N \left(\frac{\rho\eta}{\pi\rho_q\mu_q} \right)^{1/2} - \frac{f_N^2}{N(\pi\rho_q\mu_q)^{1/2}} \rho_s, \quad (8)$$

其中 ρ_s 是与表面粗糙度密切相关的液体膜质量密度. 对于微圆柱阵列表面而言, 其引起的频移绝对值和半带宽变化均大于光滑表面, 且频移绝对值小于微凹坑表面, 这是因为表面微结构的出现扰乱了界面层液体的运动, 进而引起频移和半带宽变化的绝对值增加. 但对于微圆柱表面而言, 微圆柱间连续的空隙使得液体可在其内进行绕流, 相较于具有相同特征尺寸的微凹坑表面而言, 其对液体运动的受限作用明显较小, 因此其引起的频移的绝对值小于微凹坑表面.

3.2 微结构表面形貌的影响

进一步实验研究了微结构的表面形貌对 QCM 响应以及近壁面区域液体运动行为的影响. 实验制备了两种不同微圆柱阵列表面, 如图 5 所示, 分别为具有光滑顶部的微圆柱阵列和顶部具有粗糙边缘的微圆柱阵列 (二级微结构). 两种微圆柱具有相同的直径 $D = 20 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$, 圆心距 $L = 60 \mu\text{m}$, 以及相同的表观高度约为 280 nm , 如图 5 (c) 所示. 采用上述两种微结构表面分别测试了不同浓度蔗糖溶液对系统的频移和半带宽变化的影响, 结果如图 6 所示.

图 6 结果显示, 不同浓度蔗糖溶液时, 光滑表面、微圆柱和二级微圆柱三种表面引起的频移和半带宽变化的趋势基本一致. 二级微圆柱阵列引起的系统频移与光滑表面基本相同, 且均小于具有光滑顶部的微圆柱阵列表面; 但二级微圆柱阵列引起的半带宽变化明显大于微圆柱阵列表面, 且均大于光滑表面.

由图 5 可知, 实验中采用的微圆柱和二级微圆柱表面两者具有相同的表观高度 h_a . 对于二级微圆柱阵列表面而言, 其表观高度包括主体微圆柱高度 h 和顶部表面粗糙结构的平均高度 h_r . 对于光滑顶部的微圆柱而言, 其表观高度 h_a 与主体微圆柱高度 h 相等, 且表面粗糙结构的高度 h_r 为零, 即 $h_a = h, h_r = 0$. 由于上层二级微结构的存在会明显地扰动该层液体的运动, 进而影响与之接触上下层液体的运动行为, 致使近壁面层液体的运动非线性或紊乱程度加剧, 同时导致微圆柱结构对液体的

受限作用减弱. 而对于光滑顶部的微圆柱而言, 其较大的主体高度 h 会有效限制和受限液体的运动, 研究显示, 微圆柱的高度越大, 微结构内受限液体运动的速度梯度越小 [16]. 由此可以看出二级粗糙结构的存在会明显扰乱近壁面层液体的运动, 并致使微圆柱结构对液体的受限作用减弱, 因此相对光滑顶部的微圆柱表面而言, 二级微结构表面具有较大的半带宽变化和较小的频移绝对值.

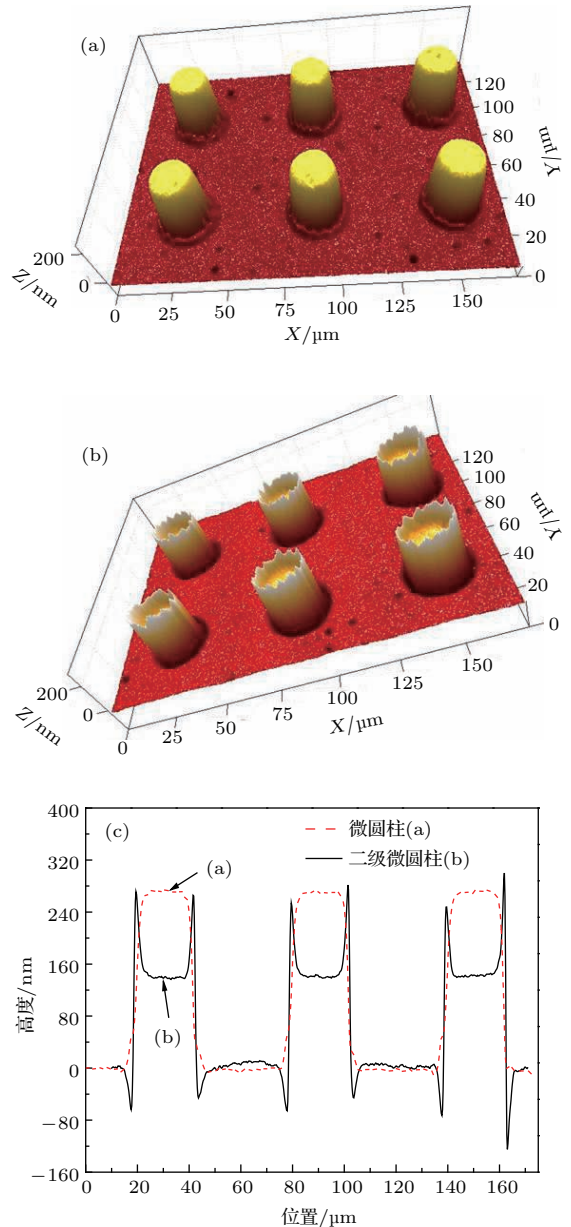


图 5 (网刊彩色) 微圆柱阵列 (a)、二级微圆柱阵列 (b) 表面的白光三维图和二维轮廓图 (c)

Fig. 5. (color online) The 3D figures of micro-pillar (a), dual-scale micro-pillar surface (b), and the corresponding 2D profiles (c) measured by white-light interferometer.

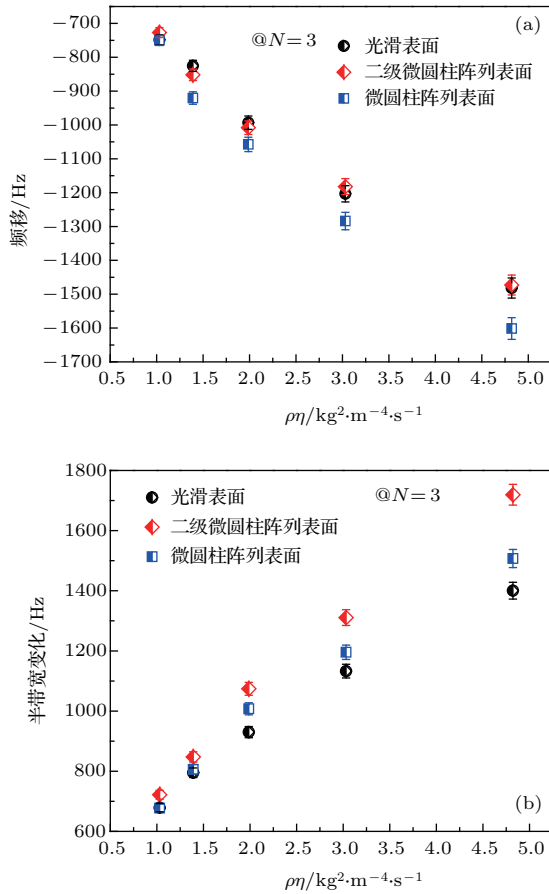


图6 (网刊彩色)光滑、微圆柱和二级微圆柱阵列表面引起的频移(a)和半带宽变化(b)

Fig. 6. (color online) Frequency shift (a) and half-bandwidth variation (b) for smooth, micro-pillar and dual-scale micro-pillar surfaces.

4 结 论

石英晶体微天平作为研究近壁面层液体性质的有效手段, 可用来研究表面微结构、粗糙度等对近壁面层液体流动行为的影响规律. 本文采用石英晶体微天平研究了微圆柱、微凹坑以及微结构表面形貌对近壁面层液体运行行为影响的不同. 研究显示, 微凹坑表面更易于受限液体的运动, 因此对于具有相同特征尺寸的微凹坑和微圆柱表面而言, 微

凹坑表面引起的频移绝对值明显大于微圆柱表面, 且均大于光滑表面. 微圆柱和二级微圆柱阵列会对液体的运动产生较大的扰动, 尤其二级微结构的存在会明显加剧近壁面层液体运动的非线性和紊乱程度, 因此对于具有相同特征尺寸的微圆柱和二级微圆柱表面而言, 二级微圆柱表面倾向于引起较大的半带宽变化, 且均大于光滑表面. 该研究为微流道表面微结构形式的选择提供了实验依据, 进而为更好地实现生物微流控芯片中复杂样品的流动控制、混合等奠定了基础.

参考文献

- [1] Darbois Texier B, Laurent P, Stoukatch S, Dorbolo S 2016 *Microfluid. Nanofluid* **20** 53
- [2] Yamada T, Hong C, Gregory O J, Faghri M 2011 *Microfluid. Nanofluid.* **11** 45
- [3] Gu Y, Zhao G, Zheng J, Li Z, Liu W, Muhammad F K 2014 *Ocean Eng.* **81** 50
- [4] Lyu S, Nguyen D C, Kim D, Hwang W, Yoon B 2013 *Appl. Surf. Sci.* **286** 206
- [5] Jung Y C, Bhushan B 2010 *J. Phys. Condens. Matter: Instit. Phys. J.* **22** 35104
- [6] Woolford B, Prince J, Maynes D, Webb B W 2009 *Phys. Fluids* **21** 85106
- [7] Ou J, Perot B, Rothstein J P 2004 *Phys. Fluids* **16** 4635
- [8] Lee S H, Kim W B 2016 *J. Power Sources* **307** 38
- [9] Goulet A, Glasgow I, Aubry N 2006 *Mech. Res. Commun.* **33** 739
- [10] Priezjev N V 2011 *J. Chem. Phys.* **135** 204704
- [11] Suh M, Chae Y, Kim S, Hinoki T, Kohyama A 2010 *Tribol. Int.* **43** 1508
- [12] Mills A, Burns L, Rourke C O, Madsen H 2016 *Sol. Energy. Mat. Sol. C* **144** 78
- [13] Rechendorff K, Hovgaard M B, Foss M, Besenbacher F 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 114502
- [14] Daikhin L, Gileadi E, Katz G, Tsionsky V, Urbakh M, Zagidulin D 2002 *Anal. Chem.* **74** 554
- [15] Levi M D, Daikhin L, Aurbach D, Presser V 2016 *Electrochem. Commun.* **67** 16
- [16] Daikhin L, Urbakh M 1996 *Langmuir* **12** 6354

Effect of micro-structure array on the liquid flow behaviors of near-surface layer*

Qiao Xiao-Xi^{1)2)†} Zhang Xiang-Jun²⁾ Tian Yu²⁾ Meng Yong-Gang²⁾

1) (School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

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

(Received 26 August 2016; revised manuscript received 14 November 2016)

Abstract

Study of the liquid flowing behavior through the micro-structure array has aroused the significant interest due to its key roles in the fields of microfluidics, micro-mixers, micro-heat exchangers, tribology, etc. Micro-structure array can significantly affect the liquid flowing characteristics of the near-surface layer and the solid-liquid interfacial properties, like adhesion, surface wetting, shear viscous resistance, interfacial slip, etc. The researches indicate that the stripe- and square-patterned electrodes can improve the storage properties of the lithium-ion battery due to its ability to promote the diffusion of the liquid electrolyte. Micro-structure array patterned micro-channel can reduce the friction drag of liquid flowing through it. And the surface fabricated with lotus-leaf-like dual-scale structure array can achieve the super-hydrophobicity.

For a micro-structure array, its influences on the liquid flowing behaviors greatly depend on the shape and size of the micro-structure, and the porosity, arrangement and size of the array. Here, we mainly focus on the influences of the micro-structure shape and surface topography on the liquid flowing behaviors, by adopting the same array porosity, arrangement and size, and the same feature size of the micro-structure. In the present paper, we prepare three different surfaces, which are the micro-pillar array surfaces, micro-hole array surface, and dual-scale micro-pillar array surface (i.e., micro-pillar with rough top surface), respectively. Their influences on the liquid flowing characteristics of the near-surface layer are investigated by quartz crystal microbalance (QCM). The QCM is a powerful and promising technique in studying the solid/liquid interfacial behaviors. Its main output parameters are frequency shift and half-bandwidth variation, which are closely related to the rheological properties and flow characteristics of the near-surface liquid layer. When the QCM chip is patterned with micro-structure array, it will inevitably influence the liquid motion and makes it more complicated, like the generation of non-laminar motion, the trapping of liquid in the gap, and the conversion of the in-plane surface motion into the surface-normal liquid motion. The experimental results show that for the same tested liquid, the frequency shift caused by the micro-hole array is higher than that by the micro-pillar array with the same feature size. And the dual-scale micro-pillar array surface results in a higher half-bandwidth variation than the micro-pillar array surface with the same feature size. It demonstrates that micro-hole tends to confine the liquid motion and make the trapped liquid oscillate with the substrate like a rigid film, thus resulting in a higher frequency shift. The dual-scale micro-structure will render the flow behavior of the near-surface layer more chaotic, thus showing a larger half-bandwidth variation. This study provides an experimental basis for selecting the type of micro-structure used in the microfluidic chip to better control the liquid flowing and mixing.

Keywords: quartz crystal microbalance, micro-structure array, near-surface layer, flow behavior

PACS: 47.55.dr, 47.54.De

DOI: 10.7498/aps.66.044703

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. FRF-TP-15-084A1), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2016M591067), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB934101), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51375254).

† Corresponding author. E-mail: qxx41051134@126.com