

基于 AFM 胶体探针测量液固界面 DLVO 力及表面电势

田维芳¹, 郑旭^{2,*}, 李战华², 徐征¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:表面电势是微纳流控芯片中流体流动的重要参数。本文介绍了基于 AFM 胶体探针技术测量液固界面 DLVO 力并进一步测量表面电势及表面电荷密度的方法。本文改进了胶体探针制作的技术手段, 并提出用双探针法测量胶体探针的弹性系数。在 0.1~1mM 浓度范围内的 NaCl 溶液中, 测量了硅、二氧化硅和氮化硅液固界面双电层内的 DLVO 力及表面电势。实验结果表明胶体探针技术可以很好地测量液固界面的 DLVO 力, 尤其对静电指数变化段非常敏感。通过 DLVO 力曲线可以间接测量表面电势、表面电荷密度等重要参数, 是微纳流动及界面属性测量的有效手段。此外, 在不同硅基材料表面的测量结果显示了硅烷醇基密度对表面电势起主导作用, 可以通过选用不同硅烷醇基密度的材料来有效调控表面电势, 从而在硅基材料制作的微流控芯片中调控电动流动的强弱。

关键词: AFM; 胶体探针; 液固界面; DLVO 力; 表面电势

中图分类号: O363.2; O363.9 **文献标识码:** A

Measuring DLVO force and surface potential based on AFM colloidal probe technique at liquid-solid interfaces

Tian Weifang¹, Zheng Xu^{2,*}, Li Zhanhua², Xu Zheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Surface potential is an important parameter of the fluid flow in microfluidics. This study develops a method to measure the surface potential and surface charge density based on the DLVO force obtained by colloidal probe technique using atomic force microscope (AFM). A novel procedure of colloidal probe fabrication is proposed, and then a cantilever-to-cantilever calibration method is used to determine the spring constant of the colloidal probe. We thus measure DLVO forces and surface potentials of silicon, silica and silicon nitride substrates, in 0.1 mM to 1 mM NaCl solutions respectively. The results show that our approach could well measure the DLVO forces at the liquid-solid interfaces, which is especially sensitive to the exponential variation of the electrostatic force. The surface potential, the surface charge density and other important parameters can be obtained via fitting the force curves. Additionally, the variation of surface potentials at different silicon-based surfaces indicates that the density of silane groups plays a dominant role on the surface potential. Thus it is possible to effectively control the surface potential by changing the silane density of the silicon-based materials. The findings could be valuable to regulating electro kinetic flow intensity in microfluidic chips.

Keywords: AFM; colloidal probe; liquid-solid interfaces; DLVO force; surface potential

收稿日期: 2016-10-31; 修订日期: 2017-01-09

基金项目: 自然科学基金项目(11202219); 辽宁省教育厅重点实验室基础研究项目(LZ2014005)

* 通信作者 E-mail: zhengxu@lnm.imech.ac.cn

引用格式: Tian W F, Zheng X, Li Z H, et al. Measuring DLVO force and surface potential based on AFM colloidal probe technique at liquid-solid interfaces. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2017, 31(4): 16-21. 田维芳, 郑旭, 李战华, 等. 基于 AFM 胶体探针测量液固界面 DLVO 力及表面电势. *实验流体力学*, 2017, 31(4): 16-21.

0 引言

水和气体、固体间的界面问题无处不在,且在生活及大多数工业领域都十分重要^[1]。近年来随着流动尺度的进一步减小,纳流控应运而生,在生物芯片技术、新能源领域及微纳尺度化学分析等方面都有广阔的应用前景^[2]。溶液中,固体表面会从溶液中选择性地吸附离子或是固体表面的带电基团解离而带电。根据电中性原理,带电表面附近的液体中必有与固体表面电荷数量相等但符号相反的反离子,带电表面和反离子构成双电层。由于电荷分离而造成的液固两相内部电位差称为表面电势。表面电荷/表面电势引起的双电层会对微纳米尺度的流体流动产生重要影响^[1,3]。因此精确测量双电层内表面电势/表面电荷密度,进而有效调控表面电势/表面电荷密度显得尤为重要。

传统测量液固界面表面电势及表面电荷密度的方法有流动电位法及电渗法^[4-5]。Kirby^[4]等人通过流动电位法间接测量了硅基表面的 zeta 电势。在外力驱动下,微通道中液体流动带动带电离子沿流动方向运动,使电荷在下游沉积,产生电位差,即流动电位,从而通过计算得到 zeta 电势。电渗法则是通过测量电渗流速度间接测量 zeta 电势。这 2 种方法都是测量双电层中的扩散层自由电荷相对液固界面的输运,其界面电势是基于剪切滑移面定义的,即 zeta 电势。DLVO 理论^[1]描述了液固界面带电表面相互作用力,包括范德华力和静电力。而由静电排斥定义的表面电势直接基于液固界面,不受滑移面位置的影响,是更能代表液固界面的本征属性^[1,6-7]。基于 DLVO 理论,本文改进了 AFM 胶体探针测量表面电势 ψ 的方法。考虑到近年来硅基材料在 MEMS 传感器上的广泛应用^[8],测量硅基材料液固界面作用力、表面电势以及表面电荷密度对 MEMS 传感器的研究有着重要的实践意义,同时也是实验流体测量技术在微纳尺度的重要发展。

1 实验部分

1.1 实验测量方法

本实验基于原子力显微镜胶体探针技术测量表面电势,仪器采用 Asylum Research 公司的 MFP-3D™ 原子力显微镜。图 1 为 AFM 液下工作原理示意图。胶体探针由胶体球和无针尖悬臂梁粘结,在实验室自行加工而成(详见下文 1.2 节)。胶体探

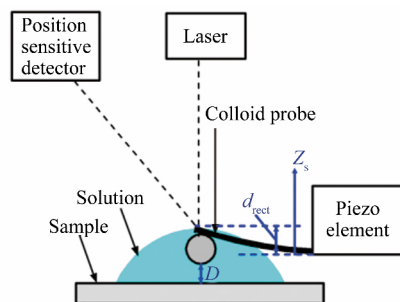


图 1 AFM 液下工作原理示意图
Fig. 1 AFM work principle sketch maps in fluid

针由压电控制器控制以恒定速度接近样品表面,过程中受到静电力、水动力学阻力及范德华力作用,这些力的综合作用使得悬臂梁(Cantilever)产生微小变形。所以当激光(Laser)照射到悬臂梁末端时,其反射光的位置也会发生变化,造成偏移量的产生,悬臂梁的变形可由偏移量在光电位置敏感器件(Position sensitive detector)上的反馈得到。基于胡克定律,通过变形量及悬臂梁弹性系数可测得力。图 1 中, Z_s 为系统基准位置位移,向上为正方向,由 AFM 中压电传感器测量得出; d_{rect} 为胶体探针弹性变形,大小可由前述激光反射位移偏移量决定; D 由 Z_s 和 d_{rect} 计算得到。基于此测试系统,由 Igor Pro 软件可直接得胶体探针表面到基底之间距离 D 与胶体探针所受 DLVO 力和水动力学阻力关系曲线。在无滑移边界条件下的牛顿流体中,球面接近平面过程中所受水动力学阻力可由公式(1)描述^[9]:

$$F = 6\pi\eta r U \frac{r}{h} \quad (1)$$

式中: η 为水动力学粘滞系数; r 为球半径; U 为接近速度; h 为球面与平面距离。所以,液体环境下,当胶体探针(直径为 $20.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$)以极低的速度(10nm/s 量级)接近样品底面时,在距离壁面 10nm 左右位置,水动力学阻力最大只有约 10^{-11}N ,而本实验关注的 DLVO 力量级在 10^{-9}N 量级,相比之下水动力学阻力可忽略不计,本实验只考虑静电力与范德华力。

1.2 AFM 胶体探针制作及其弹性系数测量

实验采用直径为 $20.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 的二氧化硅小球(Duke Scientific,此种微球表面粗糙度最小^[10])。取适量小球颗粒放到烧杯中,加入无水乙醇,超声清洗 5min ,重复此步骤 2 次。清洗完成后用普通标准探针(Asylum Research)扫描小球工作区域形貌,表面 RMS 均方根粗糙度在 1nm 以下(扫描范围 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$),如图 2 所示。

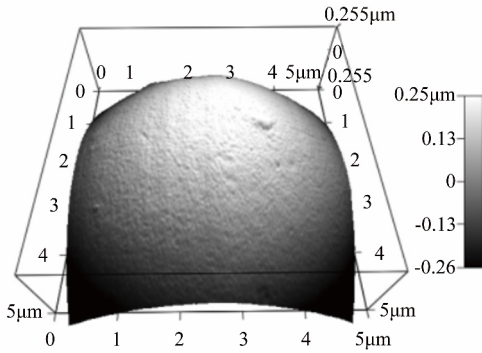


图 2 AFM 扫描小球形貌图
Fig. 2 Sphere surface topography obtained from AFM

超纯水超声清洗盖玻片 30h, 烘干备用。AFM 胶体探针具体制作步骤如图 3 所示: 使用移液器量取 100 μ L 清洗后小球与乙醇混合液滴在干净的盖玻片上, 烘干晾至室温, 如图 3(1)和(2)所示; 然后将混合均匀的环氧树脂 AB 胶粘取针尖大小到盖玻片上。将此盖玻片放到实验平台上, 利用 AFM 测试系统使无针尖悬臂梁 (Nano Sensors, 弹性系数 0.12N/m, 厚 2.0 \pm 1 μ m, 长 450 \pm 10 μ m, 宽 50 \pm 7.5 μ m) 接近胶体表面, 黏着少量胶水, 如图 3(3)和(4)所示; 然后上移无针尖悬臂梁, 左右移动测试系统水平 XY 调节平台, 找到合适的二氧化硅小球。慢慢使无针尖悬臂梁下降, 同时左右移动测试系统 XY 调节平台, 使小球正对悬臂梁下方, 悬臂梁下降至接触到小球为止, 等待 1min 左右, 上移悬臂梁, 等待胶水完全凝结, 此时胶体探针制作完成, 如图 3(5)和(6)所示。

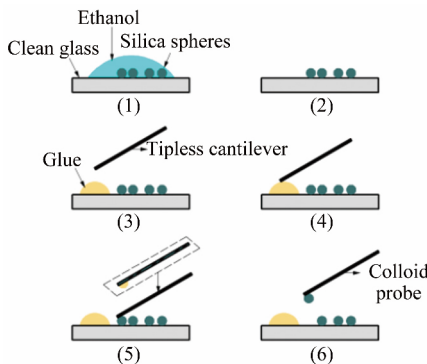


图 3 胶体探针制作步骤
Fig. 3 The fabrication procedure of colloidal probe

探针弹性系数的测量方法有几何法^[11]、热噪声法^[12]、水动力学法^[13-14]和附加质量法^[15]等, 本实验采用系统自带热噪声法标定普通探针弹性系数。实验所用普通探针为 Bruker 公司的探针, 热噪声法测得弹性系数为 $k_{rect} = 0.15\text{N/m}$ (误差在 4% 内)。因胶体探针上小球质量比悬臂梁大得多, 故不能使用热噪声法测胶体探针弹性系数。本实验欲采用双探针法测胶体探针弹性系数, 即用普通探针压迫胶体探针

使其形变, 测量原理如图 4 所示。将胶体探针固定到盖玻片上, 普通探针安装在 AFM 上, 普通探针下压胶体探针过程中, 2 探针产生形变, 设变形量分别为 d_{rect} 、 d_{probe} , 弹性系数分别为 k_{rect} 、 k_{probe} , 弹性力为 F 。2 个探针的受力变形过程可看作是 2 弹性体的串联, 则总弹性系数为 $k = k_{rect} \times k_{probe} / (k_{rect} + k_{probe})$, 总变形量为 $d = d_{rect} + d_{probe}$ 。由 AFM 测试系统可得 F 与 d 关系曲线, 斜率的绝对值即为 k , 此时可得到 $k_{probe} = k_{rect} \times k / (k - k_{rect})$ 。实验测得自行粘接胶体探针弹性系数为 $0.27 \pm 0.05\text{N/m}$ 。本实验用此双探针法实际测量了胶体探针的弹性系数, 比仅仅通过几何法或热噪声法得到的简单估算值更加可靠。由于 2 探针受力过程可相当于一个两弹簧串联模型, 一般认为 2 探针变形量越接近则测得的弹性系数越接近真值, 且不易因探针悬臂梁弯曲过大而受损坏。本实验结果也表明当用来标定的标准探针弹性系数接近胶体探针弹性系数时测量结果的重复性较好。

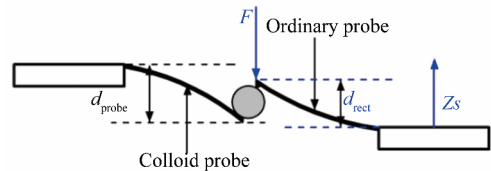


图 4 双探针法测胶体探针弹性系数示意图
Fig. 4 Schematic of measuring colloidal probe spring constant based on cantilever to cantilever device

1.3 表面电势测量方法

AFM 胶体探针是通过测量胶体探针受到带电表面的作用力来测量表面电势及表面电荷密度的。基于 DLVO 理论, 胶体探针与表面之间的相互作用力为范德华力和静电力之和, 其相互作用能表达式为:

$$W_{DLVO}(D) = \frac{\epsilon\kappa}{2\sinh(\kappa D)} [2\psi_1\psi_2 - (\psi_1^2 + \psi_2^2)e^{-\kappa D}] - \frac{A}{12\pi D^2} \quad (2)$$

(2) 式右侧第一项表示静电力的作用能, 第二项表示范德华力作用能。基于 Derjaguin 近似, 相互作用力为^[1,6-7]:

$$F(D) = 2\pi R W_{DLVO}(D) \quad (3)$$

由公式(2)、(3)得:

$$F(D) = \frac{\pi R \epsilon \kappa}{\sinh(\kappa D)} (2\psi_1\psi_2 - (\psi_1^2 + \psi_2^2)e^{-\kappa D}) - \frac{AR}{6D^2} \quad (4)$$

(4) 式中, ϵ 为介电常数, κ^{-1} 为德拜 (Debye) 长度, ψ_1 为探针表面电势, ψ_2 为基底表面电势, D 为探针与壁面接触面距壁面距离, R 为探针球半径, A 为 Hamaker

常数,取 1.2×10^{20} J。此处含有 3 个未知数: κ^{-1} 、 ψ_1 和 ψ_2 ,由公式(4)可知,表面电势 ψ_1 和 ψ_2 由静电力部分决定。一般认为,静电力主导的作用范围在距离壁面 $2\kappa^{-1} \sim 3\kappa^{-1}$ 的范围内,因此,对此范围的力曲线进行线性拟合即可得德拜(Debye)长度 κ^{-1} 的倒数 κ 。理论上,如果确定了 ψ_1 ,就可以通过力曲线拟合唯一确定待测表面电势 ψ_2 。因此,表面电势 ψ_2 的确定需要 2 步:(1) 对称结构测探针表面电势 ψ_1 。选用和探针材质相同的 SiO_2 作基底,即 $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$,此时, $\psi_1 = \psi_2$ 。通过 AFM 测试系统可得 DLVO 力与距离 D 关系,将此实验数据与公式(4)中理论曲线在 $2\kappa^{-1} \sim 3\kappa^{-1}$ 范围内拟合得探针表面电势 ψ_1 ;(2) 非对称结构测基底表面电势,例如选用氮化硅表面做基底,即 $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ 。将第(1)步中得到的探针表面电势 ψ_1 代入公式(4),此时只剩一个未知数 ψ_2 。采用同样的方法,将在氮化硅表面所测实验数据与理论力曲线拟合可得氮化硅表面电势 ψ_2 。

此法也为测量表面电荷密度提供新思路。扩散层中,由 Grahame 方程可得表面电荷密度与表面电势关系,

$$\sigma = \frac{2\epsilon k_B T}{e} \sinh\left(\frac{e\psi}{2k_B T}\right) \quad (5)$$

式中: ϵ 为介电常数; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为温度; e 为电子数。基于电中性原理,液固界面的表面电荷密度应与扩散层中的反电荷中和。因此,一定液体环境下,已知表面电势就可以唯一确定表面电荷密度。

1.4 基底制备

等离子体辅助化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)属于化学气相沉积的一种类型,主要是借助施加一个射频功率产生辉光放电等离子体,使反应气体发生化学反应形成介质薄膜的技术。

本实验采用此技术制备氮化硅和二氧化硅薄膜,步骤如下:(1) 取直径大小为 2inch,厚 $500\mu\text{m} < 100 >$ 的单面抛光硅片若干片,放入体积比为浓 H_2SO_4 : $\text{H}_2\text{O}_2 = 7 : 3$ 的混合溶液中,在 80°C 水浴下加热 30min,然后用去离子水清洗,并用烘箱烘干备用;(2) 采用 OXFORD-NGP80 DEP 薄膜沉积设备,在烘干后的硅片上单面沉积氮化硅薄膜。采用同样的步骤制备二氧化硅薄膜。然后用光谱椭偏仪分别测得沉积氮化硅薄膜厚度为 $53.4 \pm 0.1\text{nm}$,二氧化硅薄膜厚度为 $48.5 \pm 0.1\text{nm}$ 。AFM 扫描清洗后硅片表面形貌得表面 RMS 均方根粗糙度均为 1nm 以下(扫

描范围 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)。氮化硅和二氧化硅薄膜表面 RMS 均方根粗糙度均为 2nm 以下(扫描范围 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)。

2 结果与讨论

首先,对称结构 $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$ 确定探针表面电势。本实验采用超纯水与分析纯氯化钠配制 0.1、0.3、0.8 和 1 mM 4 种不同浓度氯化钠溶液。电导率仪测得溶液 pH 为 5.5 左右,电导率分别为 11.2、35.4、60.0 和 115.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$,通过电导率与浓度关系计算得溶液实际浓度分别为 0.09、0.28、0.48 和 0.93mM。德拜(Debye)长度可由下式近似计算,

$$\kappa^{-1} = \frac{0.304}{\sqrt{c}} \quad (6)$$

式中: c 为溶液浓度(mol/L), κ^{-1} 为德拜(Debye)长度(nm)。表 1 所示为电导率仪(METTLER TOLEDO, SevenMulti S40)测得上述 4 种浓度溶液的电导率、实际浓度、德拜(Debye)长度理论值及德拜(Debye)长度实验值对应关系。

表 1 不同氯化钠浓度下的电导率与德拜长度对照表

Table 1 Conductivity and Debye length in different NaCl solutions

Conductivity ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Concentration /mM	Theoretical κ^{-1}/nm	Experimental κ^{-1}/nm
11.2	0.09	30	28
35.4	0.28	17	19
94.1	0.76	11	12
115.2	0.93	10	9

AFM 接近基底表面过程中主要受静电排斥力和范德华吸引力,将当静电排斥力不足以抵抗范德华吸引力时引起的探针跳变点处作为壁面,也就是距离零点。AFM 测得 DLVO 力曲线如图 5 所示:胶体探针距壁面 $D > 100\text{nm}$ 时 DLVO 力主要为 0.01 ~ 0.1nN 的噪音;逐渐靠近壁面,在 $1.5\kappa^{-1} \sim 3\kappa^{-1}$ 范围内主要是静电力起作用,且以指数衰减;当靠近到距壁面 10nm 时,范德华力开始显现,随着到壁面距离的进一步减小,影响逐渐明显。在 $1\kappa^{-1}$ 范围内,对 0.09mM 浓度的溶液,DLVO 力在 6 ~ 10nN 之间,而 0.93mM 的在 2 ~ 5nN 之间,主要是因为表面电势及表面电荷密度随着溶液浓度的增大而减小,导致静电排斥力减小。表面电势的求解主要由 $1.5\kappa^{-1} \sim 3\kappa^{-1}$ 范围决定,由图可知此范围内实验数据与理论值拟合较好,也与 Ducker^[17] 及 Horn^[18] 等人的实验结果一致性较好。从图中还可明显看出,DLVO 理论拟合曲线在距离壁面 $1.5\kappa^{-1}$ 内与实验曲线相比存在一定偏差,此现象在前人实验中也被发现^[16]。原因主要是公式(3)中

静电力的理论值是基于 Poisson-Boltzmann 方程的线性解,会在距离壁面较近的位置存在一定的偏差;同时,在大表面电势的稀浓度溶液中该偏差也明显更大。

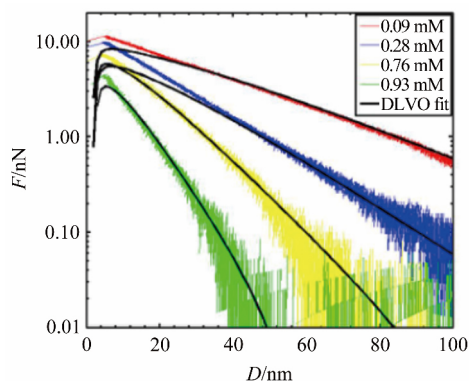


图5 二氧化硅基底上胶体探针在4种不同浓度氯化钠溶液下的对数坐标力曲线,黑线为连续电势假设下的PB方程拟合线
Fig. 5 Force curves between the colloidal probe and silica in different NaCl concentrations. The black curves are fitted based on PB equation under the assumption of constant potential

图6所示为胶体探针表面电势与溶液浓度关系。由图可知,表面电势 ψ 与 pC 呈线性关系 $\psi = -28.98 \times pC + 55.21$,与Kirby^[4]给出的线性理论相近($pC = -\log_{10} C$, C 为浓度)。本实验在与Ducker^[17]及Horn^[18]相似的实验条件下,结果与其也较为接近。二氧化硅表面电荷主要是由硅烷醇基电离产生的负电荷,吸附溶液中的阳离子(氢离子和钠离子),中和部分表面电荷,液相剩余的净电荷与固相形成电位差,即表面电势。体溶液中的电势为零电势点,那么样品表面电势为负值。因此,随着溶液浓度的增加(对应 pC 减小),表面电势绝对值减小。表面电势测量误差通常在 $\pm 5 \sim 10$ mV以内,一般认为是由胶体探针表面及基底表面粗糙度、胶体探针弹性系数标定误差及AFM系统误差及外界噪声干扰等因素造成。

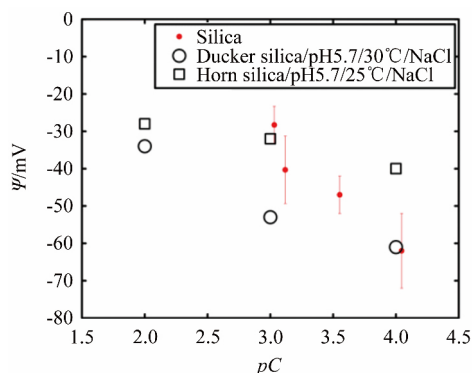


图6 二氧化硅表面电势测量结果(红点)及与Ducker(圆圈)和Horn(矩形)在相似测量环境下的结果比较。 $pC = -\lg C$ (C 为溶液浓度)
Fig. 6 Comparison of the surface potential on silica (red symbols) between Duckers' (circles) and Horns' (squares) under similar experiment conditions. $pC = -\lg C$ (C is concentration)

图7所示为硅、二氧化硅及氮化硅表面电势对比图。一般认为,由于硅表面易被氧化,硅与二氧化硅液固表面都是同样排布的硅烷醇基。因此,实验测得硅和二氧化硅在氯化钠溶液中表面电势及表面电荷密度相同。而氮化硅表面电势绝对值比硅和二氧化硅的小 $10 \sim 20$ mV左右。推测其原因为:硅基样品表面电荷主要是由于硅烷醇基的电离产生。单位面积内氮化硅表面所带硅烷醇基比二氧化硅少^[19],浓度等环境一致的情况下,氮化硅表面比二氧化硅表面剩余净电荷少,因此,表面电势绝对值也较小。

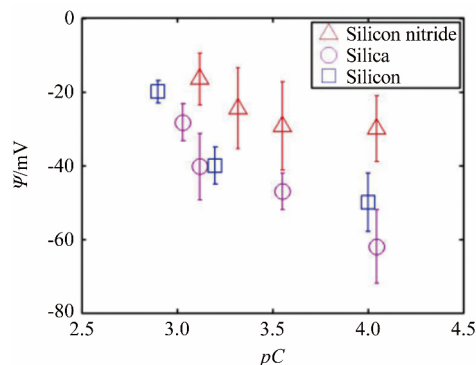


图7 硅、二氧化硅和氮化硅表面电势对比
Fig. 7 Comparison of surface potentials on silicon, silica and silicon nitride

3 结论

本文详细介绍了胶体探针的制作过程及其弹性系数标定方法,通过AFM胶体探针测量系统测量了不同硅基表面液固界面的DLVO力,从而间接测量了表面电势及表面电荷密度,主要结论如下:

(1) AFM胶体探针技术可以很好地测量出静电力的指数衰减段,并可以单独由此段力曲线确定德拜长度,表征静电作用的特征。通过DLVO理论拟合实验曲线可以得到表面电势,表面电荷密度等重要参数。考虑到PB方程的适用性以及静电作用主导的强弱, $0.1 \sim 1$ mM浓度是该技术的最优测量范围。

(2) 硅和二氧化硅在条件相同下表面电势绝对值较为接近,而氮化硅要小 $10 \sim 20$ mV,原因主要是单位面积内氮化硅表面所带硅烷醇基比二氧化硅少,导致在浓度等环境一致的情况下氮化硅表面比二氧化硅表面剩余电荷少,因此,表面电势绝对值也较小。此结果表明,可以通过选取不同硅烷醇基密度的材料来有效调控表面电势,从而在硅基材料的微流控芯片中调控电动流动的强弱。

参考文献:

- [1] Israelachvili J N. Intermolecular and surface forces[M]. Academic Press, 2011.

- [2] 李战华, 吴健康, 胡国庆等. 微流控芯片中的流体流动[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Li Z H, Wu J K, Hu G Q, et al. Fluid flow in microfluidic chips[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [3] 林炳承, 秦建华. 图解微流控芯片实验室[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Lin B C, Qin J H. Graphic laboratory on a microfluidic chip [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] Kirby B J, Hasselbrink E F. Zeta potential of microfluidic substrates: Theory, experimental techniques, and effects on separations[J]. Electrophoresis, 2004, 25(2): 187-202.
- [5] Schoch R, Han J, Renaud P. Transport phenomena in nanofluidics[J]. Review of Modern Physics, 2008, 80(3): 839-883.
- [6] Butt H J, Cappella B, Kappl M. Force measurements with the atomic force microscope: technique, interpretation and applications[J]. Surface Science Reports, 2005, 59(1-6): 1-152.
- [7] Audry M C, Piednoir A, Joseph P, et al. Amplification of electro-osmotic flows by wall slippage: direct measurements on OTS surfaces[J]. Faraday Discussions, 2010, 146(146): 113-124.
- [8] 郝旭欢, 常博, 郝旭丽. MEMS 传感器的发展现状及应用综述[J]. 无线互联科技, 2016, 3: 95-96.
Hao X H, Chang B, Hao X L. Current development and application of MEMS sensors[J]. Wireless Internet Technology, 2016, 3: 95-96.
- [9] Horn R G, Vinogradova O I, Mackay M E, et al. Hydrodynamic slippage inferred from thin film drainage measurements in a solution of nonadsorbing polymer[J]. Journal of Chemical Physics, 2000, 112(14): 6424-6433.
- [10] Van Zwol P J, Palasantzas G, Van de Schootbrugge M, et al. Roughness of microspheres for force measurements[J]. Langmuir, 2008, 24(14): 7528-7531.
- [11] Sader J E, Larson I, Mulvaney P, et al. Method for the calibration of atomic force microscope cantilevers[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(7): 3789-3798.
- [12] Butt H J, Jaschke M. Calculation of thermal noise in atomic force microscopy[J]. Nanotechnology, 1995, 6(1): 1-7.
- [13] Sader J E. Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(1): 64-76.
- [14] Sader J E, Chon J W M, Mulvaney P. Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(10): 3967-3969.
- [15] Cleveland J P, Manne S, Bocek S, et al. A nondestructive method for determining the spring constant of cantilevers for scanning force microscopy [J]. Review of Scientific Instruments, 1993, 64(2): 403-405.
- [16] Kuznetsov V, Papastavrou G. Ion adsorption on modified electrodes as determined by direct force measurements under potentiostatic control[J]. The Journal of Chemical Physics C, 2014, 118 (5): 2673-2685.
- [17] Ducker W A, Senden T J, Pashley R M. Direct measurement of colloidal forces using an atomic force microscope[J]. Nature, 1991, 353(353): 239-241.
- [18] Horn R G, Smith D T. Measuring surface forces to explore surface chemistry: Mica, sapphire and silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1990, 120(1-3): 72-81.
- [19] Legrand P A. The surface properties of silicas[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(4): 966-973.

作者简介:



田维芳(1993-),女,河南新乡人,硕士研究生。研究方向:液固界面双电层内表面电势测量及调制研究。通信地址:辽宁省大连市甘井子区凌工路2号大连理工大学机械东楼(116024)。E-mail: tianweifang1993@163.com

(编辑:杨娟)