

# 二氧化硅及其硅烷自组装膜微观摩擦力与 粘着力的研究(Ⅱ)\* 粘着力的实验与分析

钱林茂 雒建斌 温诗铸

(清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

萧旭东

(香港科技大学物理系,香港)

(2000年6月8日收到)

使用原子力/摩擦力显微镜,在 5%—99% 相对湿度范围,研究了二氧化硅和二氧化硅基体上十八烷基三甲氧基硅烷自组装膜(简称 OTE SAM/SiO<sub>2</sub>)表面粘着力随湿度的变化规律。实验表明,二氧化硅表面的粘着力随湿度的增大先逐渐增大,然后急剧减小。相反,OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 由于其良好的斥水性,表面的粘着力随湿度的增大基本不变。着重从基本界面力,即表面张力、范德瓦耳斯力和基本键合力的形成与变化,分析了二氧化硅表面粘着力随湿度的增大先增后减的原因,探讨了粘着力的产生机理。

关键词: 固体表面的物理性能, 分子膜, 纳米摩擦学

PACC: 6860, 6817

## 1 引言

由于尺寸效应的作用,在微摩擦条件下,表面力对微型机械性能的影响比体积力(如重力)大很多,因此,为了解决微型机械或磁存贮系统的润滑问题,就需要从材料的表面处理、薄膜润滑机理的探讨以及薄膜润滑材料的研制等不同角度展开研究<sup>[1,2]</sup>。但是,在解决这些问题之前,关于表面的基本问题——粘着机理与定量描述必须解决。研究微摩擦条件下粘着力随湿度的变化规律,不仅有助于理解微观条件下特殊的物理现象和规律,而且可望通过控制和利用粘着力为纳米设计服务。尽管已有学者对亲水二氧化硅和斥水有机膜表面摩擦力和粘着力的湿度效应进行了实验探讨<sup>[3—5]</sup>,但他们实验涉及的湿度范围较窄,且缺乏实验结果的理论分析。另外,迄今尚未见到有关二氧化硅和十八烷基三甲氧基硅烷(化学式为  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ ,简称 OTE)自组装膜(简称 OTE SAM/SiO<sub>2</sub>)表面粘着力的湿度效应的研究报道。

本文使用原子力/摩擦力显微镜(AFM/FFM)

在较宽的相对湿度范围(5%—99%)内,研究了 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面粘着力随湿度的变化规律,并对其作了系统的理论分析。

## 2 材料与方法

实验用仪器是 Beetle 型摩擦力显微镜,其工作原理如文献[6]所述。实验样品为 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 和清洁二氧化硅,新鲜解理的云母作为实验的参考样品。样品的制备和表征见文献[6]。接触角测量表明所制亲水二氧化硅表面的接触角为 4°,而斥水 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面的接触角为 108°。实验在一个封闭的有机玻璃盒子里进行,湿度可以通过调节干燥的流动空气和水蒸汽的量来控制。实验中温度保持为 21℃。

## 3 结果与讨论

### 3.1 粘着力的测量

关闭压电晶体的反馈电路,控制针尖微悬臂在

\* 国家自然科学基金(批准号 59735110)资助的课题。

竖直方向上下运动,即可得到针尖所受正压力随针尖在竖直方向上位移的变化曲线(力-位移曲线)。图1示出一条典型的力-位移曲线。由于针尖微悬臂弯曲刚度远小于样品的弯曲刚度,因此针尖微悬臂的位移基本上等于压电晶体在竖直方向上的位移。这样,粘着力正比于针尖脱离样品时压电晶体在竖直

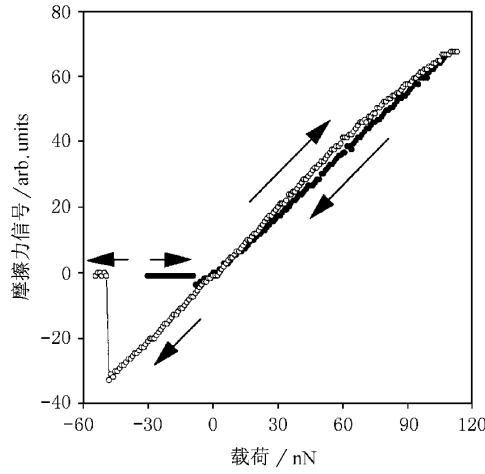


图1 力-位移曲线 ●为加载过程 ○为卸载过程

方向上的位移,其大小可由以下公式计算:

$$F_{ad} = k_c \times Z_p, \quad (1)$$

其中  $k_c$  为针尖微悬臂的刚度,  $Z_p$  为针尖脱离样品时压电晶体在竖直方向上的距离。由于加载速度会影响所测粘着力的大小,实验中采用相同的加载速度  $10 \text{ nN/s}$ 。为了测量粘着力的大小,在每一个湿度条件下,随机选择 80 个位置重复力-位移曲线的测定,得到 80 个粘着力实验值。

如图 2 所示,数据处理以测量所得粘着力的最大值和最小值为范围,以  $1 \text{ nN}$  为区间进行划分,计算落在区间内的实验值次数,作为对应该粘着力的实验次数。例如,落在  $26.5\text{--}27.5 \text{ nN}$  的实验值有 10 次,则对应  $27 \text{ nN}$  的实验次数为 10。将各个粘着力所对应的实验次数求出以后,以粘着力为横坐标轴,实验次数为纵坐标轴,作出 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面粘着力分布的实验曲线,然后对实验分布点作高斯曲线拟合,得到粘着力实验点分布的高斯曲线。由图 2 所示的高斯分布曲线可知所测粘着力为  $28.5 \pm 2 \text{ nN}$ 。

采用上述数据处理方法得出二氧化硅和 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面粘着力随湿度的变化曲线,如图 3 所示。在亲水的二氧化硅表面,粘着力在相对湿度  $5\text{--}25\%$  之间基本不变;当相对湿度从  $25\%$  增大

至  $67\%$  时,粘着力随相对湿度的增大逐渐增大;当相对湿度从  $67\%$  增大至  $95\%$  时,粘着力随相对湿度的增大急剧减小。在斥水的 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面,粘着力随湿度的增加基本没变化。

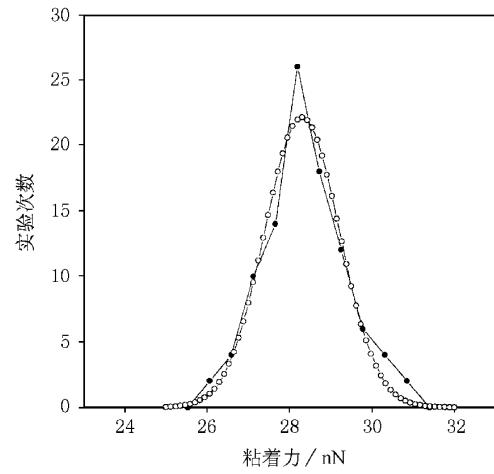


图2 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面粘着力分布曲线 相对湿度为  $37\%$ , 温度为  $21^\circ\text{C}$ , ●为实验曲线, ○为高斯曲线

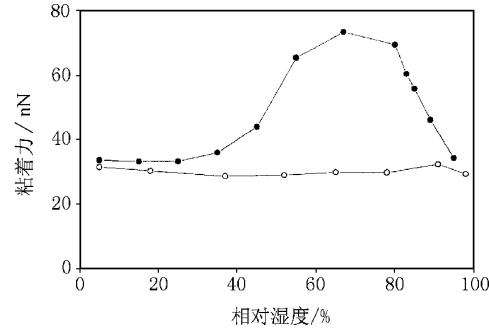


图3 粘着力随湿度的变化曲线 温度为  $21^\circ\text{C}$ , ●为 SiO<sub>2</sub>, ○为 OTE/SiO<sub>2</sub>

### 3.2 粘着力的理论分析

根据表面物理和化学的分析,AFM/FFM 针尖和样品表面之间的粘着力主要由以下几部分组成:表面张力( $F_{Lap}$ )、范德瓦耳斯力( $F_{vdW}$ )和基本键合力( $F_B$ )<sup>[7]</sup>。由于以上各力都是独立作用的,因此粘着力可计算如下:

$$F_{Ad} = F_{Lap} + F_{vdW} + F_B. \quad (2)$$

以下分别对粘着力的各组分进行讨论。

#### 3.2.1 表面张力的计算

针尖和样品的接触界面如图 4 所示,界面间隙由  $\gamma(x)$  描述,在  $x=0$  处接触界面的最小间隙为晶

格间隙  $\delta$  (针尖和样品表面的原子间距)。在接触区水膜处形成负的 Laplace 压力,作用于上下壁面的

Laplace 压力  $P_{\text{Lap}}$  可计算如下<sup>[8]</sup>:

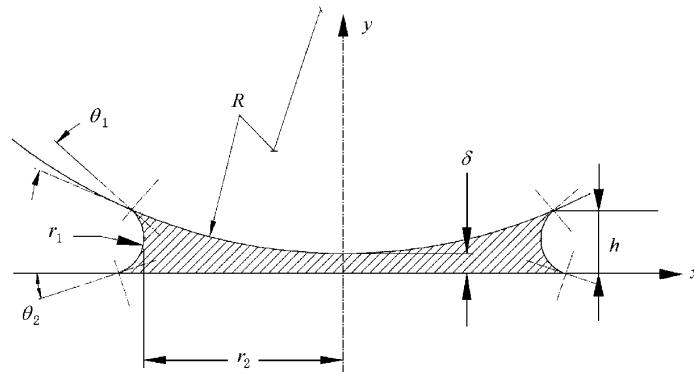


图 4 氮化硅针尖和样品表面接触区示意图  $R$  为氮化硅针尖半径,  $r_1$  为 Kelvin 半径,  $r_2$  为水膜半径,  $\theta_1$  为针尖接触角,  $\theta_2$  为样品接触角,  $\delta$  为针尖和样品表面的原子间隙

$$P_{\text{Lap}} = -\gamma_{LV} \times \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (3)$$

其中  $\gamma_{LV}$  为水的蒸汽压, 为  $72 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于  $r_2 \gg r_1$  (3) 式可写成

$$P_{\text{Lap}} = -\frac{\gamma_{LV}}{r_1}, \quad (4)$$

半径  $r_1$  由以下 Kelvin 方程<sup>[5]</sup>给出:

$$r_1 = \frac{\gamma_{LV} v_m}{k T \ln(1/R_H)}, \quad (5)$$

其中水分子的体积  $v_m = 0.030 \text{ nm}^3$ , Boltzmann 常数  $k = 1.3709 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $T$  为绝对温度,  $R_H$  为相对湿度。

另外, 由于  $r_1 \ll r_2 \ll R$ , 从图 4 中可得到以下的几何关系式:

$$h = \delta + r_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2), \quad (6)$$

$$r_2^2 = 2Rh. \quad (7)$$

同理, 当  $0 < x < r_2$ , 有

$$x^2 = 2Ry. \quad (8)$$

对上式微分可得

$$xdx = Rdy. \quad (9)$$

将 Laplace 压力  $P_{\text{Lap}}$  沿壁面积分可得表面张力  $F_{\text{Lap}}$ :

$$F_{\text{Lap}} = \int_0^{r_2} P_{\text{Lap}} \cdot 2\pi dx. \quad (10)$$

将(6)和(9)式代入上式, 可得

$$\begin{aligned} F_{\text{Lap}} &= \int_{\delta}^h 2\pi R \cdot P_{\text{Lap}} dy \\ &= 2\pi R P_{\text{Lap}} \cdot r_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2). \end{aligned} \quad (11)$$

将(4)式代入上式, 可得

$$F_{\text{Lap}} = -2\pi R \gamma_{LV}(\cos\theta_1 + \cos\theta_2), \quad (12)$$

其中  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为 AFM/FFM 针尖和样品表面与水的接触角。未清洁 AFM/FFM 针尖半径  $R$  为  $60 \text{ nm}$ , 接触角  $\theta_1$  约为  $60^\circ$ <sup>[9]</sup>。

由(12)式可知表面张力的大小与相对湿度的变化无关。但(12)式是连续介质理论推导的结果, 因此只有当相对湿度足够大, 使得接触区膜厚足够厚, 满足连续介质理论的适用条件时, 表面张力  $F_{\text{Lap}}$  才可以用(12)式的形式描述, 而且  $F_{\text{Lap}}$  随相对湿度的继续增大将保持不变。当相对湿度足够小, 样品表面无水膜形成时, 该式将不再成立, 而且表面张力  $F_{\text{Lap}}$  在低于此湿度以下均为零。由此可见, 当相对湿度从零逐渐增大到  $100\%$  的过程中, 表面张力先是为零, 然后逐渐增大到由(12)式描述的最大值, 最后保持不变。但表面张力从何时开始增大? 怎样增大? 何时达到最大值?

尽管没有直接的证据得到表面张力开始增大的第一临界湿度值和达到最大值的第二临界湿度值, 但可以根据相关实验结果得到它们的近似值。Hu 和 Xiao 等人<sup>[10]</sup>使用改进的 AFM 研究新鲜解理的云母表面水膜的生长过程时发现, 当相对湿度低于  $22\%$  左右时, 云母表面没有明显的水膜出现, 当增大到  $22\%$  时, 云母表面的局部区域开始出现小块单分子层水膜, 而当其继续增大到  $42\%$  时, 一层完整的单分子水膜形成在云母表面。既然二氧化硅表面具有和云母表面相同的亲水性能, 可以推测二氧化硅

表面水膜的生长过程和云母表面类似,即出现水膜的相对湿度在 20% 左右,此相对湿度也是表面张力得以形成的第一临界湿度。当相对湿度从 20% 增大到 42% 时,由于水膜逐渐扩展到整个二氧化硅样品表面,表面张力也随之缓慢增大,但不会达到最大值,因为即使在相对湿度为 42% 时,二氧化硅表面仅形成 0.2 nm 厚的一层单分子水膜,其表面张力尚不能用连续介质理论来计算。只有当相对湿度增大到第二临界湿度值,水膜足够厚可以用连续介质理论来分析其受力状况时,表面张力才达到其最大值。

根据 Hu 等人<sup>[11,12]</sup>分子动力学的计算结果,两个滑移面间润滑介质有 15 层左右的分子厚时,远离壁面的分子层具有宏观流体的特征,可以运用连续介质的理论对其运动和受力进行描述。由于单层水分子膜厚度约为 0.2 nm,可见当水膜厚度达到约 3 nm 时,可以使用连续介质理论研究其表面张力。图 5 示出由(5)和(6)式计算出的 Kelvin 半径  $r_1$  以及样品表面水膜厚度  $h$  随相对湿度变化的理论曲线。由图 5 可以看出,当相对湿度达到约 70% 时,二氧化硅表面的水膜厚度为 3 nm,此时的表面张力可用连续介质理论来计算,即为(12)式描述的最大值,此相对湿度也是表面张力达到最大值的第二临界湿度。

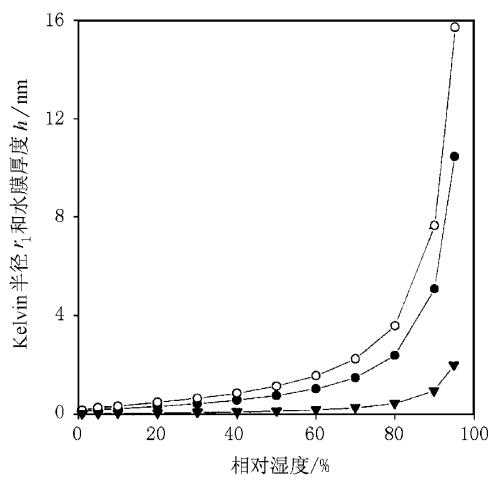


图 5 接触区水膜厚度的理论计算曲线 ●为 Kelvin 半径 ○为  $\text{SiO}_2$  表面接触区水膜厚度 ▼为 OTE/SiO<sub>2</sub> 表面接触区水膜厚度

另外,如图 3 的实验曲线所示,表面张力在相对湿度 20% 至 70% 之间是一个逐渐增大的过程。当相对湿度从 20% 增大至 42% 时,在二氧化硅表面逐渐形成和铺展开一层单分子水膜,这时的表面张力增

加缓慢。当相对湿度继续增大至 70% 的过程中,水膜急剧增厚,表面张力随水膜的增厚急剧增大。可见在水膜较薄时,表面张力对水膜厚度很敏感。

图 6 示出  $\text{SiO}_2$  表面张力的理论计算曲线和粘着力实验曲线。由于表面张力从零增大到最大值的规律尚不清楚,这段曲线用虚线表示。从实验曲线和理论曲线的对比来看,在相对湿度为 5%—70% 的区域,两者的变化规律较一致,即在低于 20% 的湿度区域,粘着力和表面张力均保持不变,当湿度从 20% 增大至 70% 的过程中,粘着力和表面张力逐渐增大了近 40 nN。这个结果表明,在 5%—70% 相对湿度区域,粘着力的变化主要由表面张力的变化引起的。但是,在相对湿度大于 70% 以后,表面张力保持不变而粘着力却急剧下降,说明粘着力不仅与表面张力有关,而且与其他表面力也有关,这将在后面继续讨论。

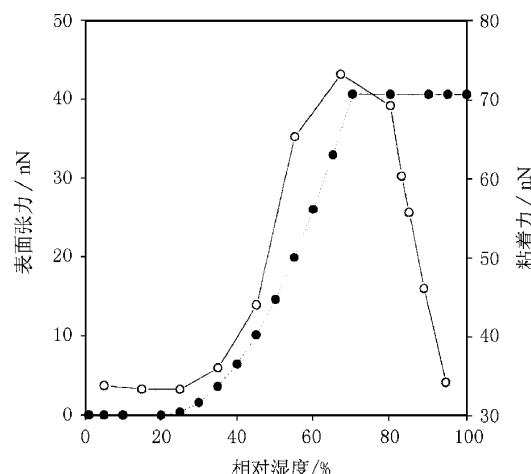


图 6  $\text{SiO}_2$  表面张力理论曲线(●)和粘着力实验曲线(○)的对比

同理,图 7 示出 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面张力的理论计算曲线和粘着力实验曲线。在湿度为 5%—95% 的区域,两者均在 5 nN 的范围内变化,表明湿度对表面张力和粘着力的影响不大。这一点从图 5 也可以看出,由于 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面强的斥水性,在低于 90% 的相对湿度区域,水膜厚度低于 1 nm,远小于二氧化硅表面的 3 nm,表明水分子难以在 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面形成水膜。

### 3.2.2 范德瓦耳斯力

界面上单位面积的范德瓦耳斯力-距离关系可由下式<sup>[13]</sup>描述:

$$P_{vdW}(y) = \frac{H}{6\pi y^3}, \quad (13)$$

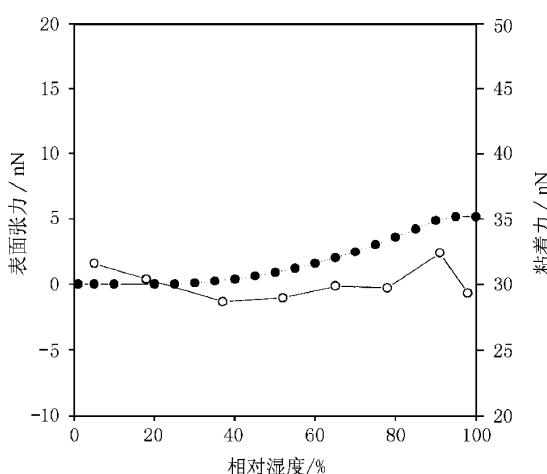


图 7 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面张力理论曲线(●)和粘着力实验曲线(○)的对比

其中  $H$  为 Hamaker 常数, 其大小取决于所在位置的  $x$  坐标是在水膜中( $H_{SLS}$ , 固体-液体-固体)还是在水膜外( $H_{SVS}$ , 固体-气体-固体)。和表面张力  $F_{Lap}$  的计算类似, 范德瓦耳斯力可计算如下:

$$F_{vdW} = \int_{y=\delta}^{y=\infty} P_{vdW}(y) \cdot 2\pi x dx. \quad (14)$$

将(9)式代入上式, 可得

$$F_{vdW} = \int_{y=\delta}^{y=\infty} 2\pi R \cdot P_{vdW}(y) dy. \quad (15)$$

将(13)式代入上式, 可得

$$F_{vdW} = \int_{\delta}^h \frac{R \cdot H_{SLS}}{3y^3} dy + \int_h^{\infty} \frac{R \cdot H_{SVS}}{3y^3} dy \quad (16)$$

其中当相对湿度和 Kelvin 半径均趋于零时( $R_H \rightarrow 0, r_1 \rightarrow 0$ ), 范德瓦耳斯力  $F_{vdW}^0 = R \cdot H_{SVS} / 6\delta^2$ ; 当相对湿度趋于 1 而 Kelvin 半径趋于无穷大( $R_H \rightarrow 1, r_1 \rightarrow \infty$ ), 范德瓦耳斯力  $F_{vdW}^1 = R \cdot H_{SLS} / 6\delta^2$ 。由上式可得

$$F_{vdW} = F_{vdW}^1 \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + r_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)\gamma\delta]^2} \right\} + F_{vdW}^0 \left\{ \frac{1}{[1 + r_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)\gamma\delta]^2} \right\}. \quad (17)$$

由于氮化硅-空气-二氧化硅界面间的 Hamaker 常数  $H_{SVS}$  为  $10.38 \times 10^{-20} \text{ J}$ , 约为氮化硅-水-二氧化硅界面间 Hamaker 常数  $H_{SLS}$   $1.9 \times 10^{-20} \text{ J}$  的 5 倍<sup>[14]</sup>。二氧化硅的原子间距  $\delta$  为 0.41 nm。这样, 由(17)式可以估算出极限状态下的范德瓦耳斯力,  $F_{vdW}^0 \approx 6.2 \text{ nN}$  以及  $F_{vdW}^1 \approx 1.1 \text{ nN}$ 。由此可见, 当相

对湿度从零增大到 100% 时, 范德瓦耳斯力仅减小 5 nN, 对粘着力的影响较小。

### 3.2.3 基本键合力

在低表面势下, 两平行界面上单位面积的基本键合力-距离的关系可以描述为<sup>[13]</sup>

$$\rho_B = \frac{2\sigma^2}{\epsilon\epsilon_0} \exp(-\kappa y), \quad (18)$$

其中  $\epsilon$  为界面间介质的相对介电常数,  $\epsilon_0$  为真空中介电常数,  $\sigma$  为表面的键合密度,  $\kappa$  为倒 Debye 长度。相对介电常数  $\epsilon$  的大小取决于所在位置的  $x$  坐标是在水膜中( $\epsilon = \epsilon_L$ , 液体), 还是在水膜外( $\epsilon = \epsilon_V$ , 气体)。同理, 主要的键合力可以计算如下:

$$F_B = \int_{y=\delta}^{y=\infty} \rho_B(y) \cdot 2\pi x dx = \int_{\delta}^{\infty} 2\pi R \cdot \rho_B(y) dy. \quad (19)$$

将(18)式代入上式, 可得

$$F_B = \frac{4\pi R\sigma^2}{\epsilon_L\epsilon_0} \int_{\delta}^h \exp(-\kappa y) dy + \frac{4\pi R\sigma^2}{\epsilon_V\epsilon_0} \int_h^{\infty} \exp(-\kappa y) dy, \quad (20)$$

$$F_B = \frac{4\pi R\sigma^2}{\kappa\epsilon_0} \exp(-\kappa\delta) \times \left\{ \frac{1}{\epsilon_L} + \left( \frac{1}{\epsilon_V} - \frac{1}{\epsilon_L} \right) \exp[-\kappa r_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)] \right\}, \quad (21)$$

其中当相对湿度趋于零时( $R_H \rightarrow 0, r_1 \rightarrow 0$ ), 主要键合力为

$$F_B^0 = (4\pi R\sigma^2 / \kappa\epsilon_0\epsilon_L) \exp(-\kappa\delta), \quad (22)$$

而当相对湿度趋于 1 时( $R_H \rightarrow 1, r_1 \rightarrow \infty$ ), 主要键合力为

$$F_B^1 = (4\pi R\sigma^2 / \kappa\epsilon_0\epsilon_V) \exp(-\kappa\delta). \quad (23)$$

(21)式可简化为

$$F_B = F_B^1 + (F_B^0 - F_B^1) \exp[-\kappa r_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)]. \quad (24)$$

体相水的相对介电常数为 78, 这样,  $F_B^0/F_B^1 = \epsilon_L/\epsilon_V = 78$ , 表明基本键合力被界面间的水膜大幅度地削弱。由图 5 可知, 湿度低于 70% 时, Kelvin 半径  $r_1$  和水膜半径  $r_2$  随温度的增大变化不大, 基本键合力随湿度的增大略有减小; 当湿度大于 70% 时, Kelvin 半径  $r_1$  和水膜半径  $r_2$  随湿度的增大急剧增大, 基本键合力随湿度增大急剧减小。

综上所述, 在亲水的二氧化硅表面, 在 5%—70% 相对湿度范围内, 随湿度的增大, Kelvin 半径  $r_1$  和水膜半径  $r_2$  缓慢增大(图 5)。范德瓦耳斯力和基本键合力略有减小, 因而粘着力的变化主要由表面张力的变化引起(图 6), 即在相对湿度 20% 以下基本不变, 其后逐渐增大到 40 nN 左右。而在

70%—95% 的高湿度范围, 随湿度的增大, 表面张力已达到其最大值而不再变化; 然而, 由于 Kelvin 半径  $r_1$  和水膜半径  $r_2$  急剧增大(图 5), 范德瓦耳斯力和主要键合力随水膜面积的增大急剧减弱, 从而使得粘着力急剧减小。

在斥水的 OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面, 当湿度从 5% 增大至 95% 时, 水膜厚度仅从 0.1 nm 增大至 2.0 nm, 表面张力从 0.5 nN 增大至 5 nN。同时, 由于接触区域水膜的面积变化不大, 范德瓦耳斯力和主要键合力随湿度的变化也很小。因此, 随湿度的增大, OTE/SiO<sub>2</sub> 表面的粘着力基本没有变化。可见 OTE SAM 膜可以减弱亲水二氧化硅表面的表面张力效应, OTE SAM/SiO<sub>2</sub> 表面的粘着力随着环境条件相对湿度的变化基本保持稳定。

## 4 结 论

随湿度的增大, 二氧化硅表面由于其强的亲水性, 会形成较大的水膜, 从而产生较大的表面张力。当湿度由零增大到 100% 的过程中, 由于水膜的形成、扩展和增厚, 使得二氧化硅表面的粘着力表现出先增大后减小的马鞍形的变化趋势。在低于 20% 的湿度范围, 由于无水膜形成, 表面张力和粘着力基本不变; 当湿度从 20% 逐渐增大至 42% 时, 由于单层水分子膜的形成和铺展, 表面张力和粘着力逐渐增大; 当湿度继续增大至 70% 时, 由于水膜从一层急剧增厚至 15 层, 表面张力和粘着力急剧增大至其最

大值; 当湿度从 70% 增大至 95% 时, 水膜增厚的速度越来越快, 由于表面张力不变而范德瓦耳斯力和基本键合力急剧减小, 使得粘着力急剧减小。与此相反, 在斥水的 OTE 表面, 水膜表面张力的影响被大大减弱, 粘着力随湿度的增大基本不变。

- [1] J. B. Luo, P. Huang, S. L. Wen, L. Lawrence, *J. Tribology*, **121** (1999) 872.
- [2] J. B. Luo, S. Z. Wen, L. Lawrence, *Chinese Science Bulletin*, **A3** (1998) 369.
- [3] F. Masamichi, A. Daisuke, Y. Okabe *et al.*, *Chem. Lett.*, **7** (1996) 499.
- [4] M. Binggeli, C. M. Mate, *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) A15.
- [5] M. Binggeli, C. M. Mate, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B13** (1995), 1312.
- [6] L. M. Qian *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **49** (2000), 2247 (in Chinese) [钱林茂等, *物理学报*, **A9** (2000), 2247].
- [7] K. T. Wan, T. Smith, B. R. Lawn, *J. Am. Ceramic Soc.*, **75** (1992) 667.
- [8] A. W. Adamson, *Physical Chemistry of Surfaces*, sixth ed. (John Wiley & Sons Inc., New York, 1997), pp. 4—8, 48—90.
- [9] K. T. Wan, B. R. Lawn, *Acta Metall.*, **38** (1990), 2073.
- [10] J. Hu, X. D. Xiao, D. F. Ogletree *et al.*, *Science*, **268** (1995), 267.
- [11] Y. Z. Hu, H. Wang, Y. Guo *et al.*, *Wear*, **196** (1996) 243.
- [12] Y. Z. Hu, H. Wang, Y. Guo *et al.*, *Wear*, **196** (1996) 249.
- [13] J. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd ed. (United States edition, Academic Press Inc., San Diego, CA 92101, 1992).
- [14] T. J. Senden *et al.*, *Eng. Aspects*, **94** (1995) 29.

# STUDY ON MICRO FRICTION AND ADHESION FORCE OF OTS SELF-ASSEMBLED FILM(Ⅱ)\* EXPERIMENT AND ANALYSIS OF ADHESION FORCE

QIAN LIN-MAO LUO JIAN-BIN WEN SHI-ZHU

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

XIAO XU-DONG

(Department of Physics, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

(Received 8 June 2000)

## ABSTRACT

The adhesion characteristic of surfaces of  $\text{SiO}_2$  and the self-assembled film of octadecyltrime-thoxysilane (OTE SAM) on the surface of  $\text{SiO}_2$  under the relative humidity of 5%—99% were studied using atomic force microscopy/friction force microscopy. Experimental results indicate that the adhesion force of  $\text{SiO}_2$  increases first with the relative humidity and then decreases sharply. However, the adhesion force of OTE SAM surface hardly changes with the relative humidity due to its strong hydrophobe property. The mechanism of the adhesion force changing with the relative humidity has been analyzed from the viewpoint of surface tension, van der Walls force, and basic bond forces.

**Keywords**: mechanical properties of solid surface, monolayers, nano-tribology

**PACC**: 6860, 6817

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 59735110).