

微平面接触分离中弯月面力的计算*

刘思思[†] 张朝辉 刘俊铭

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

(2009 年 11 月 30 日收到; 2010 年 1 月 7 日收到修改稿)

微平面间黏着力对微机电系统 (MEMS) 非常重要, 常是决定其能量损耗乃至寿命长短的最主要因素. MEMS 中的黏着力主要来源之一就是介于两互相接触平面间的弯月面力. 弯月面力主要取决于相互接触的两平面间形成的弯月面形状. 本文通过分析两微小平面在分离过程中弯月面形状的变化, 得到在不同表面亲水/疏水性能、初始液面高度、分离距离等条件下的弯月面形状, 计算得出在不同初始条件下断裂高度和弯月面力的数值以及随之变化的规律, 为 MEMS 的性能分析和寿命计算提供依据.

关键词: 微机电系统, 黏着力, 表面能, 弯月面力

PACC: 0710C, 4630P, 6810C

1. 引 言

自 20 世纪 80 年代末, 伯克利加州大学的研究者们展示了量度为微米量级的微机电系统 (micro-electro mechanical system, 简记为 MEMS) 产品以来, 它在各个方面都得到了巨大的发展^[1], 已经并将继续给我们的生活带来极大的改变, 就如同集成电路技术的出现曾经给信息技术带来的冲击一样, 因而也成为纳米摩擦学研究的重要领域^[2,3].

由于随着尺寸的减小, 表面对体积的比值不断增大, 使得与材料的表面相关的量 (如黏着力、摩擦力、弯月面力、黏性牵引力和表面张力等) 对其性质起到决定性的作用. 此外, 由于这些设备的许可公差很小, 物理接触几乎不可避免, 这就使得它们易受到相邻部件之间的黏着力作用^[4]. 一般认为, 黏附的起源是介入接触面间的液体的黏着力或者从环境中的水蒸汽中冷凝形成的毛细冷凝^[5-11]. 一些研究指出^[6-8], 材料表面的亲疏水性及环境湿度对黏着力有很大的影响. Hiratsuka 等^[9]测得疏水表面介入水珠后的平均摩擦系数可低至 8.3×10^{-4} .

为了在 MEMS 中降低黏附, 有必要使材料表面处于抗湿 (de-wetting) 或者超疏水状态^[10]. 降低润

湿性对减小弯月面的形成也很有利, 并可因此减小黏附、摩擦与磨损. 超疏水表面具有大接触角 (大于 150°) 而接触角滞后小 (小于 10°). 提高材料疏水性性能的一个途径是降低材料的表面能以减小材料表面和水之间的相互作用^[12-14], 另一方法是增加材料的表面粗糙度, 构成微/纳米尺度上的多层粗糙结构, 特别是形成复合表面^[15,16]. 然而, 表面粗糙度的存在对表面能的计算存在一定影响^[17]. 因此研究指出, 这种粗糙度分布的多层结构并非必须^[18]. 另外, 在 MEMS 中也有需要增加黏着的场合, 这时形成壁虎刚毛上“压舌板”形状的微/纳米级粗糙度是个合适的选择^[19,20].

在 MEMS 的微/纳器件中, 法向载荷一般都很小, 相互接触的表面也常常相对光滑. 此时由弯月面力和黏滞力引起的黏着力就可能相当大, 并成为影响设备能否可靠工作的主要原因. 黏着力依赖于所形成的弯月面面积、分离距离、表面张力和液体的黏度. 分离过程中弯月面力随着距离增加而减小, 黏滞阻力则相反^[21,22].

本文首先分析微平面接触时弯月面在分离过程中的形状变化, 进而计算了微间隙接触时的弯月面力, 为 MEMS 系统的性能分析与寿命预测提供依据.

* 国家自然科学基金 (批准号: 50705006) 和北京市自然科学基金 (批准号: 3082015) 资助的课题.

[†] E-mail: liuss_bjtu@yahoo.cn

2. 分析模型

2.1. 亲水表面弯月面几何形状分析

由于表面能的作用,当一薄层水膜介入两光滑表面之间时,将形成弯月面. 材料的润湿能力与接触角 θ 有关,当固体与液体表面间的接触角 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时,液体能够浸润固体,此时称固体表面为亲水表面;当固体与液体表面间的接触角 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时,液体不能够浸润固体,此时称固体表面为疏水表面. 一般来说,亲水表面将导致弯月面形成内凹表面而疏水表面将形成外凸表面. 假定在表面分离过程中忽略热效应并假定弯月面处于平衡状态,则以水为介质的两平行表面接触情况如图 1 所示.

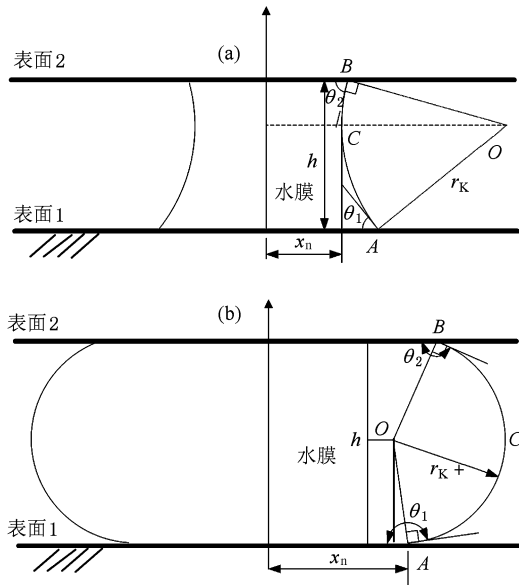


图 1 弯月面示意图 (a)亲水表面接触,(b)疏水表面接触

在分离过程中弯月面力与实时的弯月面形状密切相关,所以有必要确定分离过程中的弯月面实际形状. 弯月面的实际形状可以通过解 Laplace-Young 方程求得, Orr 等^[23]将其化为了椭圆积分问题. 为了简化计算^[21],在大多数文献中都将弯月面在对称截面内简化为弧形. 这样,确定了图 1 中的 A, B, C 三点的位置就可以唯一地确定弯月面的位置和形状了.

如图 1(a) 所示,弯月面高度关系式由下式确定:

$$h = r_K (\cos\theta_1 + \cos\theta_2), \quad (1)$$

其中, h 为弯月面高度, r_K 为 Kelvin 半径, θ_1, θ_2 为表面接触角.

于是由几何分析可以得出各点坐标如下: $A(x_n + r_K - r_K \sin\theta_1, 0)$, $B(x_n + r_K - r_K \sin\theta_2, h)$, $C(x_n, r_K \cos\theta_1)$, $O(x_n + r_K, r_K \cos\theta_1)$.

A, B, C 三点在以 O 点为圆心, r_K 为半径的圆上. 即有

$$(x - x_n - r_K)^2 + (y - r_K \cos\theta_1)^2 = r_K^2. \quad (2)$$

在分离中,忽略蒸发并假定液体不可压缩,则其由上下两表面和弧 ACB 回转所确定空间的体积不变.

由几何分析可得体积计算式为

$$V = V_1 + V_2 + V_3, \quad (3)$$

$$V_1 = \pi x_n^2 h, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= \int_{x_n}^{x_n+r_K-r_K \sin\theta_1} 2\pi xy dx \\ &= \int_{x_n}^{x_n+r_K-r_K \sin\theta_1} 2\pi x (r_K \cos\theta_1 \\ &\quad - \sqrt{r_K^2 - (x - x_n - r_K)^2}) dx, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_3 &= \int_{x_n}^{x_n+r_K-r_K \sin\theta_2} 2\pi xy dx \\ &= \int_{x_n}^{x_n+r_K-r_K \sin\theta_2} 2\pi x (r_K \cos\theta_2 \\ &\quad - \sqrt{r_K^2 - (x - x_n - r_K)^2}) dx, \end{aligned} \quad (6)$$

由 $x_n = 0$ 时的 h 值确定断裂高度 h_K .

可见,对给定初始条件 (x_n 和 h) 的液体,可以由(1)式得出 Kelvin 半径,从而得到弯月面确定的几何形状,并由(2)–(6)式计算出其体积. 由于在分离过程中液体体积不变并且不可压缩,所以随着 h 的变化,可以利用(2)–(6)式,得到即时的 x_n 值,从而可以得到相应的弯月面几何形状.

2.2. 疏水表面弯月面几何形状分析

如图 1(b) 所示,弯月面高度关系式由下式确定:

$$h = -r_K (\cos\theta_1 + \cos\theta_2). \quad (7)$$

由几何分析可以得出如下各点坐标 (假定 $\frac{\pi}{2} < \theta_2 \leq \theta_1 \leq \pi$): $A(x_n, 0)$, $B(x_n + r_K (\sin\theta_2 - \sin\theta_1), h)$, $C(x_n + r_K - r_K \sin\theta_1, -r_K \cos\theta_1)$, $O(x_n - r_K \sin\theta_1, -r_K \cos\theta_1)$.

A, B, C 三点在以 O 点为圆心, r_K 为半径的圆

上. 即

$$(x - x_n + r_k \sin \theta_1)^2 + (y + r_k \cos \theta_1)^2 = r_k^2, \quad (8)$$

同样, 在分离中, 忽略蒸发并假定液体不可压缩, 则其由两表面和弧 ACB 回转所确定空间的体积维持不变.

由几何分析可得体积计算式如下:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4, \quad (9)$$

$$V_1 = -\pi x_n^2 r_k \cos \theta_1, \quad (10)$$

$$V_2 = -\pi x_{n2}^2 r_k \cos \theta_2, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_3 &= \int_{x_n}^{x_n + r_k(1 - \sin \theta_1)} 2\pi xy dx \\ &= \int_{x_n}^{x_n + r_k(1 - \sin \theta_1)} 2\pi x \sqrt{r_k^2 - (x - x_n + r_k \sin \theta_1)^2} dx, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_4 &= \int_{x_{n2}}^{x_{n2} + r_k(1 - \sin \theta_2)} 2\pi xy dx \\ &= \int_{x_{n2}}^{x_{n2} + r_k(1 - \sin \theta_2)} 2\pi x \sqrt{r_k^2 - (x - x_{n2} + r_k \sin \theta_2)^2} dx, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $x_{n2} = x_n + r_k(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$.

$x_n = 0$ 时的 h 值确定断裂高度 h_k .

2.3. 弯月面力的计算

在弯月面内形成的 Laplace 压力作用于界面上产生附加吸引力为弯月面力的主要原因. 由于疏水表面形成的弯月面力是斥力, 因而对表面间吸附作用较小, 因此只计算亲水表面的弯月面力.

由于表面张力 γ 作用形成的压力差 (即 Laplace 压力) 由下式给出^[10]:

$$\Delta p = \frac{\gamma}{r_k}. \quad (14)$$

弯月面力由下式计算:

$$F_m = \iint_{\Omega} \frac{\gamma}{r_k} d\Omega + 2\pi\gamma x_n \sin \theta_{1,2}, \quad (15)$$

(15) 式中, Ω 是弯月面面积, $\theta_{1,2}$ 是分离中被拖动表面的接触角.

考虑到弯月面高度的几何关系, 即 (1) 式, 可得到弯月面力的计算公式 (计算中假定分离过程中平面 2 被拖动)^[24]:

$$F_m = \frac{\pi x_n^2 \gamma (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{h} + 2\pi\gamma x_n \sin \theta_2. \quad (16)$$

3. 计算结果

3.1. 断裂高度

微平面接触分离时液体断裂高度的计算数值列于表 1—4, 其中表 1 所列为相同接触角的亲水表面上液体断裂高度随液体体积的变化情况, 表 2 所列为亲水表面上不同接触角时的断裂高度. 其中表 3 所列为相同接触角的疏水表面上液体断裂高度随液体体积的变化情况, 表 4 所列为疏水表面上不同接触角时的断裂高度. 可以看出, 无论对亲水表面还是疏水表面, 在相同接触角下体积增加时液体的断裂高度也增加. 而对亲水界面, 表面的亲水性越强 (接触角越小), 断裂高度越低 (越容易断裂). 对疏水表面, 疏水性越大 (接触角越大), 液面越容易断裂. 另外, 两表面亲水/疏水能力不同时, 液面容易断裂 (断裂高度值较小).

表 1 亲水表面不同体积液体的断裂高度 ($\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$)

x_{n0}/nm	h_0/nm	h_k/nm
100	4	226.7323
100	6	259.6939
80	4	195.4485

表 2 亲水表面在不同接触角下液体的断裂高度

($x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$)

$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	h_k/nm
60	60	226.7323
0	0	118.9565
0	60	111.7354

表 3 疏水表面不同体积液体的断裂高度 ($\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$)

x_{n0}/nm	h_0/nm	h_k/nm
100	4	160.38
100	6	183.81
80	4	138.29

表 4 疏水表面在不同接触角下液体的断裂高度

($x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$)

$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	h_k/nm
120	120	160.38
180	180	62.79
180	120	50.06

3.2. 分离时的弯月面形状

图2为亲水表面接触时弯月面在分离过程中液面的形状. 计算初始条件为(a) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$; (b) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$; (c) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$. 对给定体积的液体(由初始条件确定), 在逐渐分离的过程中, 液体不断收缩最终导致从中部断裂成两部分, 分别黏附着在两表面上.

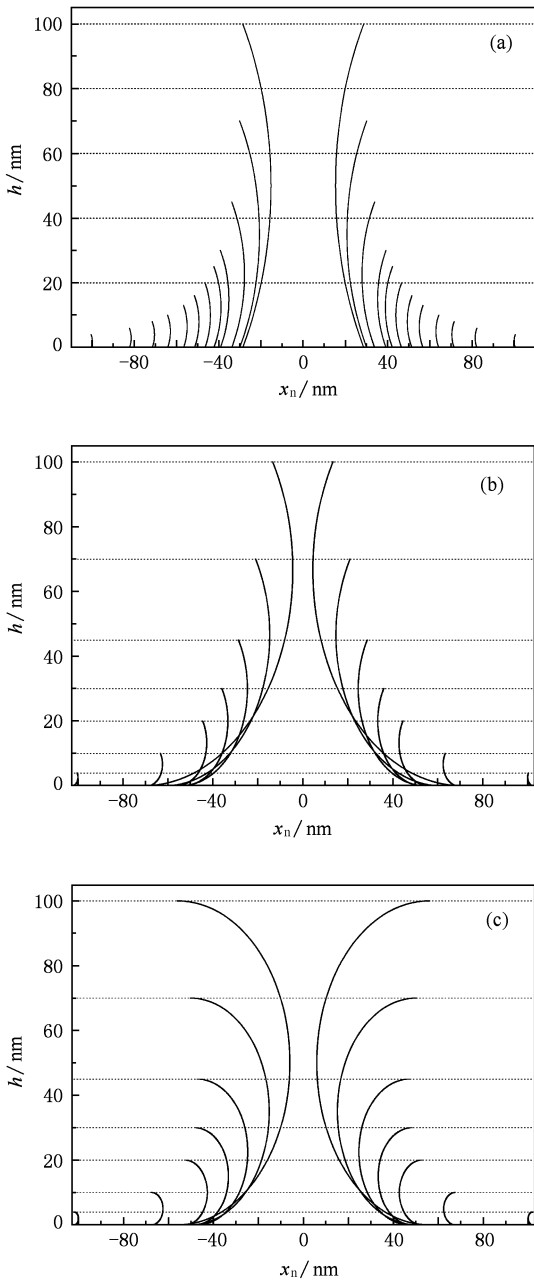


图2 亲水表面分离时弯月面的几何形状 初始条件分别为 (a) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$; (b) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$; (c) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$

图3为疏水表面接触时弯月面在分离过程中液面的形状. 计算初始条件为 $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$. 对由初始条件给定体积的液体, 在逐渐分离的过程中, 液体不断收缩最终导致从端部断裂.

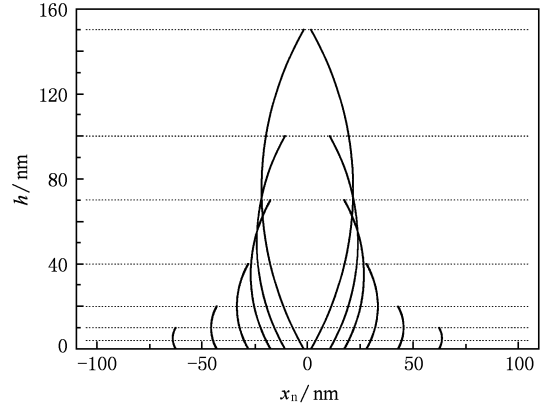


图3 疏水表面分离时弯月面的几何形状变化

3.3. 分离中的弯月面力的变化

在两平面分离过程中, 弯月面力的大小与微平面分离距离、初始液面高度、接触角、分离时间等因素相关.

3.3.1. 弯月面力随平面分离距离的变化

根据(16)式计算的弯月面力在分离时的变化如图4所示. 计算的初始条件为亲水表面(a) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$; 疏水表面(b) $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$. 可见在分离过程中, 弯月面力的大小都是随着距离的增加而迅速衰减的. 另外, 亲水表面间弯月面力为吸引力而疏水表面间弯月面力为斥力. 这表明: 弯月面力只在纳米间隙下起作用, 设计适当的表面特性和配对可能形成功能特异的结构表面(典型的例子如荷叶表面的疏水结构^[14]和壁虎刚毛的压舌板结构^[19]).

3.3.2. 弯月面力随液面初始高度的变化

弯月面力随液面初始高度的变化规律如图5所示, 可以发现, 无论是疏水表面还是亲水表面, 较小的液面初始高度导致了较大的弯月面力, 是因为在固定的弯月面面积下, 初始高度减小使得 r_k 减小, 而压力差 Δp 增大.

3.3.3. 接触角对弯月面力的影响

从图6可以看出, 在亲水表面, 当一个接触角固定, 另一个接触角角度增大时(亲水性减弱), 弯月面力减小. 在疏水表面, 当一个接触角固定, 另一个接触角增大时(疏水性增强), 弯月面力增大.

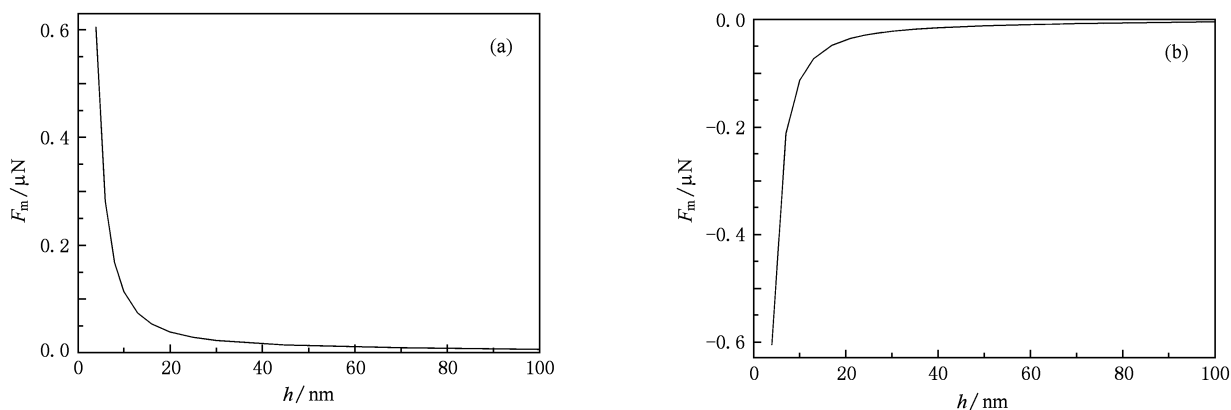


图4 分离过程中的弯月面力 (a) 亲水表面: $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$; (b) 疏水表面: $x_n = 100 \text{ nm}$, $h_0 = 4 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$

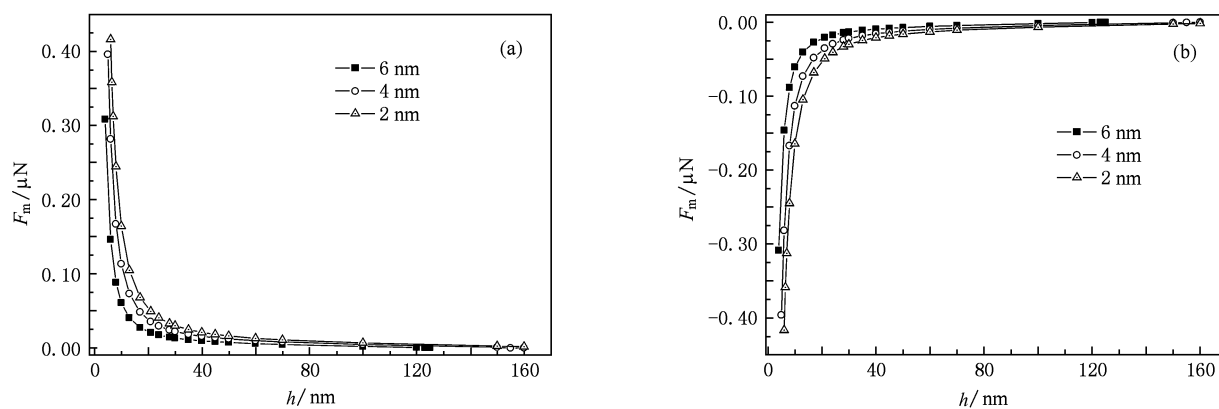


图5 弯月面力随初始高度的变化 (a) 亲水表面, $x_n = 100 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$; (b) 疏水表面, $x_n = 100 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$

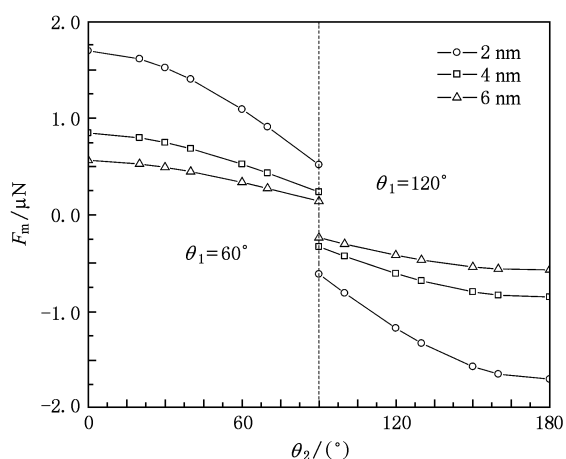


图6 弯月面力随接触角的变化

3.3.4. 分离时间对弯月面力的影响

两微小平面分离速度小即分离时间长时,弯月

面面积会因为环境中水蒸气的冷凝而增大. 在到达平衡时间之前,弯月面力会随弯月面面积的增大而增大^[25].

4. 结 论

当充有液体的两个相互接近的平面之间的间隙处于纳米量级时,它们之间的相互作用力常表现为黏着力,它受到很多因素的影响,其中最重要的因素之一就是弯月面力. 弯月面力的大小受固液界面的特性(疏水/亲水)、初始液面高度、液面形状、分离时间等因素的影响. 本文给出了不同表面特性情况下液体断裂高度关系、弯月面的变化形状和分离过程中弯月面力大小的变化情况. 这为研究微纳间隙的黏着力关系提供了依据并可用于设计具有特定功能的微接触表面.

- [1] Kim S H, Asy D B, Dugger M T 2007 *Nanotoday* **2** 22
- [2] Braun O M, Naumovets A G 2006 *Surf. Sci. Rep.* **60** 79
- [3] Zhang C H 2005 *Tribol. Int.* **38** 443
- [4] Zhao Y P 2003 *Acta Mech. Sin.* **19** 1
- [5] Bhushan B 2007 *Microelectron. Engng.* **84** 387
- [6] Qian L M, Luo J B, Wen S Z 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2247 (in Chinese) [钱林茂、雒建斌、温诗铸 2000 物理学报 **49** 2247]
- [7] Cao X P, Jiang Y M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2202 (in Chinese) [曹晓平、蒋亦民 2005 物理学报 **54** 2202]
- [8] Zhang X H, Zhang X J, Liu Y H, Schaefer J A, Wen S Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4722 (in Chinese) [张晓昊、张向军、刘永和、Schaefer J A、温诗铸 2007 物理学报 **56** 4722]
- [9] Hiratsuka K, Bohno A, Kurosawa M 2001 *NATO Sci. Series II: Math. Phys. Chem.* **10** 345
- [10] Liu S S, Zhang C H 2009 *J. Phys. Conference Series* **188** 012026
- [11] Zhang X J, Dong Y K, Liu Y H, Schaefer J A 2009 *Chin. Phys. B* **18** 0231
- [12] Wang S T, Song Y L, Jiang L 2007 *J. Photochem. Photobiol. C* **8** 18
- [13] Guo Z G, Fang J, Wang L, Liu W M 2007 *Thin Solid Films* **515** 7190
- [14] Sun M H, Luo C X, Xu L P, Ji H, Ouyang Q, Yu D P, Chen Y 2005 *Langmuir* **21** 8978
- [15] Nosonovsky M, Bhushan B 2005 *Microsyst. Technol.* **11** 535
- [16] Nosonovsky M, Bhushan B 2007 *Ultramicroscopy* **107** 969
- [17] Xue W, Zheng B R, Zhang M, Xie G X, Wang Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2518 (in Chinese) [薛伟、郑蓓蓉、张森、解国新、王权 2009 物理学报 **58** 2518]
- [18] Guo Z G, Liu W M 2007 *Plant Sci.* **172** 1103
- [19] Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, Zesch W, Chan W P, Kenny T W, Fearing R, Full R J 2000 *Nature* **405** 681
- [20] Davies J, Haq S, Hanke T, Sargent J P 2009 *Int. J. Adhes. Adhes.* **29** 380
- [21] Cai S B, Bhushan B 2007 *Nanotechnology* **18** 465704
- [22] Cai S B, Bhushan B 2008 *Mater. Sci. Engng. R* **61** 78
- [23] Orr F M, Scriven L E, Rivas A P 1975 *J. Fluid Mech.* **67** 723
- [24] Fortes M A 1982 *J. Colloid Interface Sci.* **88** 338
- [25] Wei Z, Zhao Y P 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 4368

Calculation of meniscus force during separation of microspheres *

Liu Si-Si[†] Zhang Chao-Hui Liu Jun-Ming

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 30 November 2009; revised manuscript received 7 January 2010)

Abstract

The adhesive force between microspheres is very important to microelectric mechanical system (MEMS), being always a key factor that determines the energy dissipation and even the life span. In MEMS, the meniscus force mainly depends on the meniscus shape formed between the contact surfaces. This paper analyzes the meniscus shape changes during the separation of two microspheres. Different meniscus shapes were obtained as a result of different hydrophilic/hydrophobic properties, initial liquid heights and separate distances and so on. The fracture height, the meniscus force value and their change rules in different initial conditions are obtained by numerical simulation, which provides a basis of the MEMS performance analysis and life span calculation.

Keywords: micro-electric mechanical system, adhesive force, surface energy, meniscus force

PACC: 0710C, 4630P, 6810C

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50705006) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 3082015).

† E-mail: liuss_bjtu@yahoo.cn