

文章编号: 1000-8055(2005)02-0214-05

动态湿润与动态接触角的实验

王晓东, 彭晓峰, 王补宣

(清华大学热能工程系 相变与界面传递现象实验室, 北京 100084)

摘要: 利用精密步进电机、高速CCD图像采集系统、立体显微镜, 采用液槽法测试硅酮油在玻璃、铝、不锈钢表面上的动态湿润行为。实验结果与前驱膜模型对比表明, 无量纲参数 λ 在玻璃、铝和不锈钢表面上分别取值0.07, 0.16和0.35时, 二者吻合较好, 表明动态接触角不仅是静接触角和毛细数的函数, 也和固体表面性质有关。实验同时发现, 对于低毛细数下成立的Hoffman-Voinov-Tanner定律(Cazabat推荐适用于 $Ca \ll 1$ 或 $\theta < 10^\circ$), 直到动态接触角达到 70° 依然成立, 用前驱膜模型可给出合理解释。

关键词: 航空、航天推进系统; 湿润; 动态接触角; 前驱膜

中图分类号: TK124

文献标识码: A

An Experimental Investigation on Dynamic Wetting and Dynamic Contact Angle

WANG Xiao-dong, PENG Xiao-feng, WANG Bu-xuan

(Laboratory of Phase Change and Interfacial Transport Phenomena,

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An experimental system, composed of a liquid tank, a solid thin plate, a step-motor, a CCD camera connected with stereoscopic microscope, a high-speed image acquisition card, and a computer, was utilized to investigate dynamic wetting behavior of silicone oil on glass, aluminum and stainless steel surfaces and understand the effect of the solid surface properties on the dynamic wetting behavior. It concludes that when the value of the dimensionless parameter, λ , was selected as 0.07, 0.16 and 0.35 for glass, aluminum and stainless steel, respectively, the experimental results are in good accordance with the prediction of the precursor film model presented by Wang and Peng et al. Clearly, the dynamic contact angle is dependent not only on the capillary number and static contact angle but also on λ describing the solid surface properties. Furthermore, it is shown that the Hoffman-Voinov-Tanner law valid at low capillary number ($Ca \ll 1$ or $\theta < 10^\circ$) recommended by Cazabat still keeps true for a wide range of contact angles, up to 70° , which is reasonably explained by the precursor film model.

Key words: aerospace propulsion system; wetting; dynamic contact angle; precursor film

湿润动力学研究固体表面上一种流体取代另一种流体的过程, 在镀膜、石油开采、矿物浮选、非

收稿日期: 2004-05-19; **修订日期:** 2004-11-29

联系人: 彭晓峰 (Email: pxf-dte@mails.tsinghua.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50406001); 中国博士后科学基金资助项目(2003034018);

国家重点基础研究发展规划项目(G2000026301)

作者简介: 王晓东(1973-), 男, 广东湛江人, 清华大学热能工程系相变与界面传递现象实验室, 博士, 主要从事湿润与相变的研究

均相沸腾和冷凝、染色、胶片制造等技术中扮演着关键性角色,同时由于在接触线局部区域流体流动的反常行为,即存在“接触线佯谬”,引起了研究者的广泛关注^[1~3]。按照传统流体贴壁无滑移条件,在接触线附近流体对固体壁面的黏性剪切应力将无穷大,出现应力奇点,导致接触线无法移动,与实际观测明显矛盾。典型的理论处理方法包括^[4]: (1) 在控制方程中(N-S 方程)加入分子间相互作用力,主要为 van der Waals 力; (2) 用滑移边界条件取代无滑移边界条件; (3) 假设固体表面已被预湿润,固体表面存在一层极薄液体膜(几个分子层厚度),即前驱膜; (4) 分子动力学模拟; (5) 分子运动论模型。其中滑移边界条件是最常见的处理方法。迄今,尽管提出了诸多方案解决应力奇点,但接触线移动机制远未完全揭示,还需进一步深入研究和分析。

湿润动力学分析最终集中于揭示接触线移动速度与动态接触角的函数关系。通常认为动态接触角由下列参数决定^[4]:

$$\theta = f(\theta_0, Ca, We, Bo, \frac{\mu_2}{\mu_1}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{L_1}{L}, \epsilon, \xi, \lambda) \quad (1)$$

式中: θ 为动态接触角($^\circ$); θ_0 为静接触角($^\circ$); Ca 为毛细数; We 为韦伯数; Bo 为结合力数; ρ 为密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); L_1/L 为形状对动态接触角的影响; ϵ 为无量纲表面粗糙度; ξ 为无量纲孔隙率; λ 为无量纲表面静电荷。

理论和实验需揭示上述因素中的哪些是关键因素。在方法(1)、(2)和(4)中,通常认为动态接触角是静态接触角和毛细数的函数,即:

$$\theta = f(\theta_0, Ca) \quad (2)$$

式中无量纲参数 $Ca = \mu U / \sigma$ 仅与液体的性质有关。其中: μ 为动力粘度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); U 为接触线移动速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); σ 为表面张力(N/m)。然而 Blake^[5] 的分子运动论模型认为,固体壁面种类、性质、表面状况对动态接触角有影响,这与式(1)相符。Wang 与 Peng^[6~8] 根据前驱膜思想,提出湿润的准微观机制,认为湿润是表现接触线在前驱膜上的滑移,通过引入接触线特征参数去掉了接触线上的应力奇点,导出了动态接触角的速度关系式:

$$\theta = f(\theta_0, Ca, \lambda) \quad (3)$$

式中: λ 为无量纲接触线特征参数。

该模型揭示出,动态接触角除和毛细数、静态接触角相关,还与一无量纲数 λ 相关。初步的分析表明, λ 和湿润液体的种类无关,只取决于固体表面性质。为进一步揭示 λ 的物理意义,本文利用精

密步进电机、高速 CCD 图像采集系统、立体显微镜,采用液槽法研究硅酮油在玻璃、铝、不锈钢表面上的动态湿润行为,毛细数从 10^{-4} 变化到 10 (相应动态接触角从 0 到接近 180°),实验结果表明, λ 在玻璃、铝和不锈钢表面上分别取 0.07、0.16 和 0.35,实验与理论符合较好,验证了前驱膜模型。令人惊异的是,对于低毛细数下成立的 Hoffman-Voinov-Tanner^[4] 定律(Cazabat^[9] 推荐适用于 $Ca \ll 1$ 或 $\theta < 10^\circ$),直到动态接触角达到 70° 依然成立,这和早期 Femigier 与 Jenffer^[10] 的发现非常类似,前驱膜模型能给予合理解释。

1 实验

1.1 实验系统

用液槽法测量动态接触角,实验系统如图 1 所示,包括液槽、固体薄板、CCD、立体显微镜、高速图像采集卡、计算机。选用硅酮油($\sigma = 20.9 \text{ N/m}$, $\mu = 98.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)作为湿润液体,装在高 150 mm 底面积 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的透明玻璃槽中。实验中国体薄板以恒速 U 竖直插入到液体槽中,薄板通过刚性金属丝连接到精密步进电机,可控制其板速在 $0.1 \mu\text{m/s}$ 到 2 mm/s 内连续变化。图像采集系统包括 WAT-505EX CCD 摄像头、Matrox Pulsar 高速图像采集卡、Olympus SZ1145CTV 立体显微镜。CCD 摄像头与立体显微镜相连,将硅酮油-空气弯月面显微放大后的图像通过视频传输到图像采集卡,被计算机自编软件实时显示和采集。图像的放大倍数根据实验要求可在 20~50 倍之间调节。动态接触角采用对弯月面直接量角获得,其精度为 $\pm 2^\circ$ 。

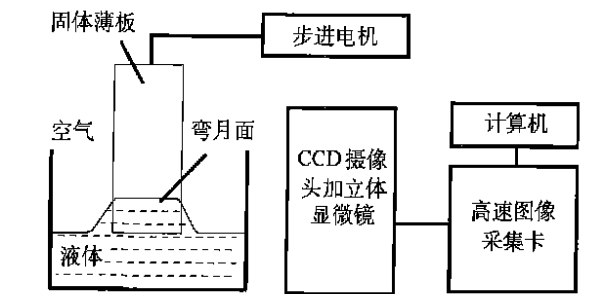


图1 实验系统

Fig 1 Experimental system

实验中分别使用 $100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的玻璃、铝和不锈钢为固体表面,板宽 20 mm,板边界对弯月面的影响可忽略^[10]。铝和不锈钢表面

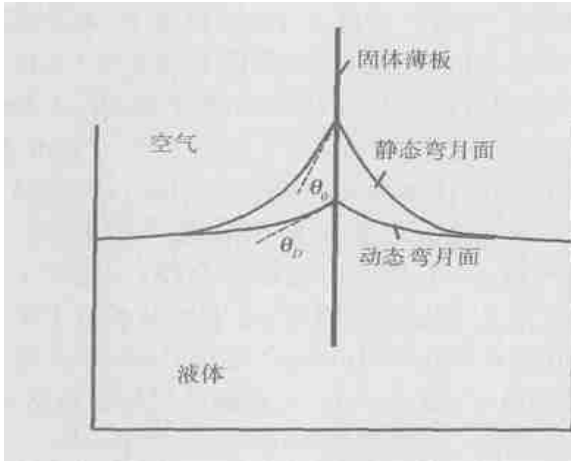


图2 动态、静态弯月面和接触角

Fig. 2 Dynamic and static contact angle

用不同粒度的砂纸研磨(依次为 200#, 300#, 500#, 800#, 1 000#, 1 500#, 2 000#, 2 500#, 3 000#),之后用氧化铝粉末研磨,避免由表面粗糙引起的接触角滞后性影响。测试表明,硅酮油在 3 种表面上的静接触角均为 0°;实验测试在室温 25℃ 进行。

1.2 实验原理

当固体薄板竖立立于液槽中,毛细作用使薄板两侧出现弯月面,相应接触角为静接触角(图2)。当薄板以恒定速度 U 向下插入液槽,弯月面将降低并最终保持稳定形状,相应接触角为动态接触角,其大于静接触角并随着薄板速度 U 的增大而增大。实验的目的是确定动态接触角由哪些因素决定。图3 为实际拍摄的弯月面。本文动态接触角的所有数据均为 5 到 8 次测量的平均值。

2 理论分析与对比

2.1 前驱膜模型

Hardy 提出并由Heslot 等人用实验观测到,表观接触线前缘存在一层薄液体膜,称之为前驱膜^[4](图4)。前驱膜平均厚度 δ 由液相和固壁表面性质决定,在表观接触线附近大约为 $1\ \mu\text{m}$,最前缘减小到几个分子层厚度。在此基础上,Wang 和Peng^[6~8]提出实际湿润是表观接触线在前驱膜上(非“干”表面上)移动的过程。结合对粗糙表面接触角滞后现象的研究结果^[11~13],Wang 和Peng 给出粗糙表面上动态接触角与接触线移动速度的关系为^[6~8]:

$$\cos \theta_e = \cos \theta_0 + \frac{4Ca}{\lambda} \frac{\sin^2 \theta_0}{\sin(2\theta_0) - 2\theta_0} =$$

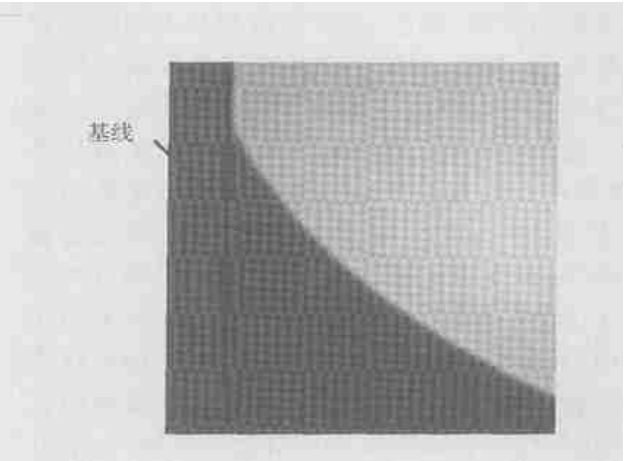


图3 实验中拍摄的弯月面

Fig. 3 Image of meniscus collected by system

式(4)中: θ 为前进接触角(°)。

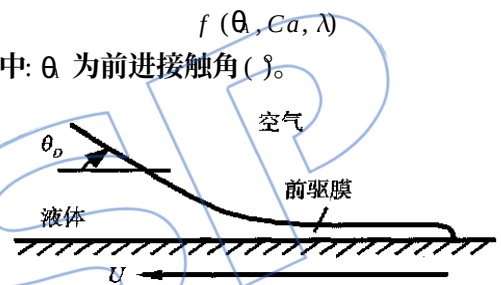


图4 表观接触线与前驱膜

Fig. 4 Precursor film in front of apparent contact line

对光滑表面, $\theta = \theta_0$ 。和滑移模型不同,式(4)中增加了一个接触线特征参数 λ 。初步分析表明, λ 反映了固体材料特性和表面特性对动态湿润过程的影响,该模型是对滑移模型中只考虑静接触角和毛细数对动态湿润影响的补充,应用该模型还解释了Elliott 和Riddiford 等人实验观测到的极低毛细数下动态接触角的反常现象^[6]。

2.2 Hoffman-Voinov-Tanner 定律

在低毛细数下,Hoffman,Voinov 和Tanner 等发现动态接触角和毛细数之间存在三次方关系^[4]:

$$\theta_e^3 - \theta_0^3 = c_T Ca \quad (5)$$

c_T 是一个比例常数,对不同固-液-气系统,其取值不同。Cazabat^[9]推荐该定律适用于 $Ca \ll 1$ 或 $\theta < 10^\circ$ 。然而对于硅酮油在玻璃、铝和不锈钢表面上的动态湿润过程,实验表明,不仅在低毛细数下动态接触角吻合该定律,即使在较大的毛细数下(图5,玻璃表面,毛细数 10^{-2} ,动态接触角 70°)依然满足。这和早期Femigier 与Jenffer^[10]的实验一致,他们认为这种现象令人惊异,但并未给

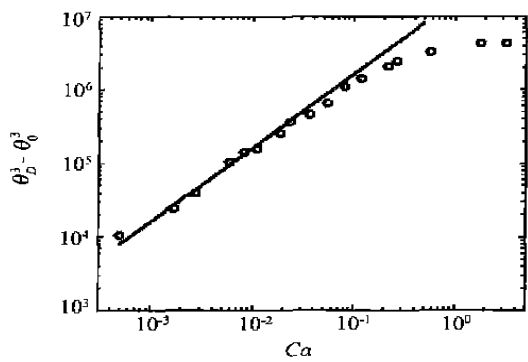


图5 实验Hoffman-Voinov-Tanner 定律对比
Fig 5 Comparison of data with predictions

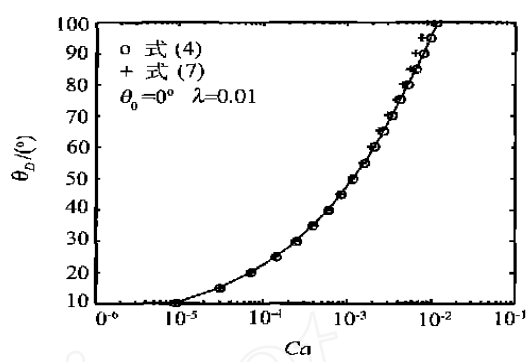


图6 Hoffman-Voinov-Tanner 定律与前驱膜模型对比
Fig 6 Comparison of model with Hoffman-Voinov-Tanner law

出原因。

按照前驱膜模型, 根据式(4), 在较低毛细数时, 可作如下近似:

$$\begin{aligned} \cos \theta - \cos \theta_0 &= \frac{4Ca}{\lambda} \frac{\sin^2 \theta}{\sin(2\theta) - 2\theta} \Rightarrow \\ 1 - \frac{\theta}{2} + O(\theta^3) - 1 &= \frac{4Ca}{\lambda} \frac{\theta - \frac{2\theta^3}{3!} + O(\theta^5)}{2\theta - \frac{(2\theta)^3}{3!} + O[(2\theta)^5] + 2\theta} \end{aligned} \tag{6}$$

式中 $O(\theta)$, $O(\theta^3)$ 和 $O(\theta^5)$ 分别表示的 θ^1 和 θ^3 和 θ^5 的同阶无穷小, 如果取 $\theta \sim 80^{\circ}$, $Ca \sim 10^{-2}$, 上式可进一步化为:

$$\theta = 6Ca/\lambda \tag{7}$$

即为低毛细数下的Hoffman-Voinov-Tanner 定律。图 6 给出式(4)和式(7)的比较, 可见, 根据前驱膜模型, 即使到 $\theta \sim 80^{\circ}$, Hoffman-Voinov-Tanner 定律可依然适用。

2.3 特征参数的物理意义

Hoffman^[14]在1975年通过实验研究动态湿润过程中弯月面形状并测试动态接触角, 提出对于完全浸润表面($\theta_0 = 0^{\circ}$), 可用一通用函数 $\theta = f_{\text{Hoff}}(Ca)$ 描述动态接触角的速度关系, 对于部分浸润表面($\theta_0 > 0^{\circ}$), 只要引入移位因子 $f_{\text{Hoff}}^{-1}(\theta)$ (f_{Hoff}^{-1} 是通用函数 f 的反函数)反映静接触角的影响, 通用函数依然适用, $\theta = f_{\text{Hoff}}[Ca + f_{\text{Hoff}}^{-1}(\theta)]$, 表明非零静接触角曲线相对于零静接触角曲线(通用函数)有一整体移位, 故可用移位因子消除。Hoffman 的研究意味着, 对于部分浸润表面, 动态接触角仅是毛细数和静接触角的函数。事实上, 研究者们早就发现, 很多系统采用 $f_{\text{Hoff}}^{-1}(\theta)$ 作为移位因子, 通用函数仍不适用(个别数据点相差20以上), Burley, Bracke 等提出“伪静接触角 $\theta' > \theta_0$ ”的概念^[4], 相应移位因子变为 $f_{\text{Hoff}}^{-1}(\theta')$, 才能使这些系统的动态接

角- 毛细数曲线整体移位, 符合通用函数曲线, $\theta = f_{\text{Hoff}}[Ca + f_{\text{Hoff}}^{-1}(\theta')]$, 注意到 θ' 不是系统真实的静接触角, 视系统不同取值不同。此法表面上解决了通用函数的不适用性, 但其背后隐含的物理本质被忽略, 事实上用“伪静接触角” θ' 取代真实静接触角 θ_0 意味着可能还有其它因素影响动态湿润行为, 而固体表面性质显然是潜在的影响因素之一。Blake^[5]应用分子运动论分析两互不混容流体动态湿润, 提出动态接触角和固体表面可吸附液体分子的吸附点数密度相关, 显然与表面的材料种类、表面粗糙度、孔隙率、表面电荷密度等有关。

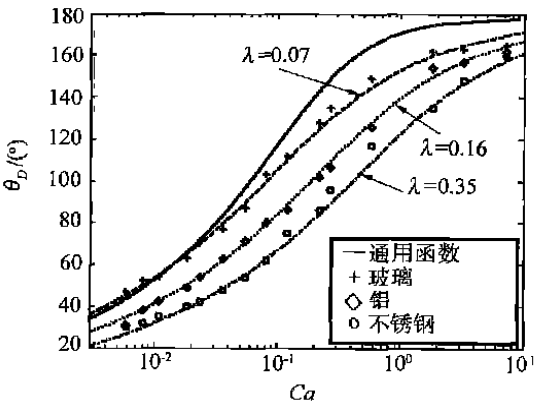


图7 实验与前驱膜模型对比
Fig 7 Contact angles for different cases

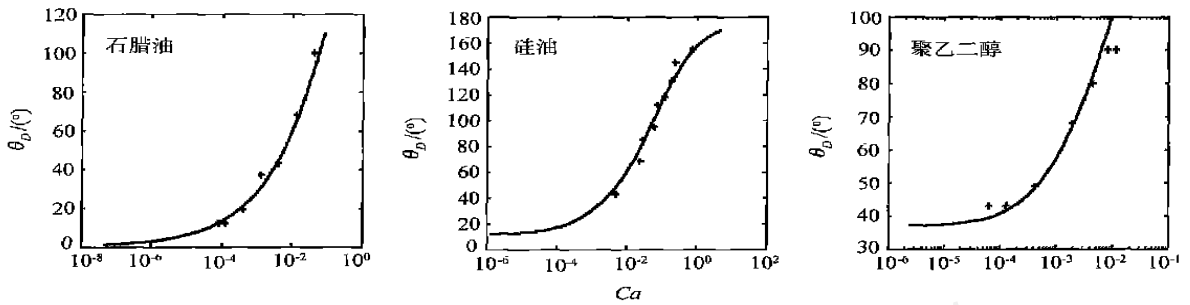


图8 石蜡油、硅油和聚乙二醇在聚四氟乙烯表面上的动态湿润实验与前驱膜模型对比

Fig 8 Comparison of model with experiments for PS surface ($\lambda = 0.05$)

对于玻璃、铝和不锈钢表面的实验结果见图7, 显然, 如果存在通用函数, 硅酮油在3种表面上的动态接触角数据均应分布在通用函数曲线附近(本文选择由Jiang^[15]提出的一种通用函数表达式), 但图7的结果显示, 不同表面上的动态接触角变化曲线不同, 曲线对通用函数有一整体移位, 通用函数并不适用。对玻璃、铝和不锈钢表面, 无量纲参数 λ 分别取0.07、0.16和0.35, 实验和理论曲线可较好吻合, 可见 λ 与固体种类有关。为进一步验证 λ 与湿润液体无关, 本文与Strom^[16]的实验数据进行对比。Strom^[16]的实验同样采用液槽法。测试系统中, 被替换流体为空气, 固体表面为聚四氟乙烯(PS), 替换液体分别为石蜡油、硅酮油、聚乙二醇。图8是 λ 均为0.05时模型和Strom^[16]实验数据的比较, 无论是完全浸润表面还是部分浸润表面, 实验数据基本在理论曲线附近, 吻合较好, 进一步验证特征参数 λ 只与固体表面的材料特性有关。

3 结 论

通过实验揭示固体表面性质对动态湿润过程及相关动态接触角的影响。表明动态接触角不仅是静接触角和毛细数的函数, 同时也和固体表面性质相关, 进一步揭示了前驱膜模型的物理本质。同时发现对于玻璃、铝和不锈钢表面, Hoffman-Voinov-Tanner 定律直到70 依然成立, 并用前驱膜模型给出合理解释。

参考文献

[1] Dussan V E B. On the Shredding of Liquids on Solid Surfaces: Static and Dynamic Contact Lines[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1979, 11: 317~400.
[2] de Gennes P G. Wetting: Statics and Dynamics[J]. *Review of Modern Physics*, 1985, 57(3): 827~863.
[3] Oron A, Davis S H, Bankoff S G. Long-Scale Evolution of

Thin Liquid Films[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1997, 69(3): 931~980.
[4] 王晓东, 彭晓峰, 王补宣. 动态湿润与动态接触角研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(4): 396~404.
Wang X D, Peng X F, Wang B X. A review on Dynamic Wetting and Dynamic Contact Angle[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(4): 396~404.
[5] Blake T D. Dynamic Contact Angles and Wetting Kinetics [A]. In: J C Berg, ed. *Wettability* [C]. New York: Marcel Dekker, 1993: 251~309.
[6] Wang X D, Peng X F, Lee D J. Dynamic Wetting and Stress Singularity on the Contact Line[J]. *Science in China E*, 2003, 46: 407~417.
[7] Wang X D, Peng X F, Lee D J. Description of Dynamic Contact Angle on a Rough Solid Surface[R]. 2003 ASME Summer Heat Transfer Conference, Las Vegas, Nevada, 2003: 283~288.
[8] 王晓东, 彭晓峰, 李笃中. 粗糙表面上的移动接触线和动态接触角[J]. *化工学报*, 2004, 55(3): 402~407.
Wang X D, Peng X F, Lee D J. Moving Contact Line and Dynamic Contact Angle on Rough Solid Surfaces[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 55(3): 402~407.
[9] Cazabat A M. How Does a Droplet Spread[J]. *Contemporary Physics*, 1987, 28: 347~364.
[10] Femigier M, Jenffer P. An Experimental Investigation of the Dynamic Contact Angle in Liquid-Liquid Systems[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1991, 146: 226~241.
[11] Wang X D, Peng X F, Wang B X. Contact Angle Hysteresis and Hysteresis Tension on Rough Solid Surfaces [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2004, 12(5): 615~621.
[12] 王晓东, 彭晓峰, 闵敬春, 等. 接触角滞后现象的理论分析[J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(1): 67~70.
Wang X D, Peng X F, Min J C, et al. Hysteresis of Contact Angle at Liquid-Solid Interface[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23(1): 67~70.
[13] Wang X D, Peng X F, Lu J F, et al. Contact Angle Hysteresis on Rough Solid Surfaces [J]. *Heat Transfer Asian Research*, 2004, 33(4): 201~210.
[14] Hoffman R L. A Study of the Advancing Interface, Part I: Interface Shape in Liquid-Gas Systems [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1975, 50: 288~241.
[15] Jiang T S, Oh S G, Slattery J C. Correlation for Dynamic Contact Angle [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1979, 69: 74~77.
[16] Strom G, Fredriksson M, Stenius P. Kinetics of Steady-State Wetting [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1990, 134: 107~116.