

熱毛細管驅動現象研究

廖廷暉

逢甲大學機械與電腦輔助工程學系
台中市，台灣，中華民國
d9041098@knight.fcu.edu.tw

林孟儒

逢甲大學機械與電腦輔助工程學系
台中市，台灣，中華民國
mengjlin@fcu.edu.tw

摘要

微流道是微機電的重要結構之一，微流道的液體驅動在生物晶片上是很重要的課題。本文探討微流道尺寸對熱毛細管驅動現象的影響。當微流道的管道的截面積突然增加，將產生一毛細管壓力阻力停止表面張力的作用，若此時利用溫度梯度產生熱毛細管現象，產生的作用力，則可驅動流體突破閥門。結果發現，尺寸對熱驅動現象的影響甚大，較小的管徑以及較大的漸開度會阻礙氣泡前進，但是較大的溫度梯度以及氣泡體積會幫助氣泡前進，但是效應較不明顯。而當漸開度大於一定值時，會發生驅動液體壓力小於最大毛細管壓力阻力而無法將液體推出。

一、前言

微機電系統為一跨領域整合之技術，但在微小化的過程中有許多巨觀所忽略的現象在此變得相當重要。例如以表面張力在巨觀時常被忽略，但在微觀時，表面張力就具有舉足輕重的影響。當流道尺寸縮小，特別是管徑小於一公厘的微流道，液體的表面張力影響在各個物理量無因次的比較上，便成為主要制御的參數。由於微流道是生物晶片或是微流晶片中的基本結構，因此，表面張力對於微流道的作用備受重視。由於液體-氣體-固體的介面自由能的改變，產生表面張力的效應，為一自發性的運動，再利用管道的設計可以簡單控制微管內的流體動向。改變微管道的幾何形狀，當微管內有一氣泡，將微管置至於一有溫度梯度的環境內，則表面張力會溫度上升而增加，氣泡內的表面張力不均導致氣泡往高溫的方向移動，稱之微熱毛細管現象。若氣泡置於一有溫度梯度的另一不互溶液體中時，液體通常朝熱端移動，這種現象主要是因為氣泡四周介面上的溫度梯度造成表面張力不平均，引起合

力。不為零，使界面流動，而使氣泡移動之現象又稱之為熱毛細管現象。C.J. Kim 等[1]便利用這個物理現象，設計六個部對稱的加熱器餘微管中來控制液體中的水氣泡流動方向。而藉由改變直微管的幾何形狀表面張力影響變成產生一毛細管壓力阻力，停止表面張力的作用，將可作為被動式微型閥門。P.F. Man[2-3]等人運用突然增加管道截面積製作一被動行為閥門。曾繁根等人[4-7]利用表面張力的驅動製作可拋式微流體生醫檢測晶片，以 H 型微流到結構利用表面張力檢測試劑至感測位置。Fan and Gao[8]在模擬液體在毛細管流動時，假設其自由液面的形狀由球面，進行數值模擬分析。由 K.S. Birdi.[9]推出水溫和接觸角的關係式，進而可推出表面張力的改變量。

由於表面張力是影響微流道動量傳遞上最主要的因素之一，近年來在微流系統上，運用了許多方法來控制表面張力，本文是著透過理論分析，探討微流道幾何尺寸的改變，對熱毛細管現象控制液體流動的影響。

二、理論模型

毛細現象主要存在於不同相的物質或是介面之間，不同介面之間的交互作用對兩相之間穩定的影響，將由自由能決定[1][10-12]。當固體-液體、液體-氣體間的介面或是兩個不相容的液體，例如水-油的界面，若兩種物質間有穩定的界面，則界面上的自由能必為正值。若自由能為零或負值，則會造成震盪的表面區域而不斷擴張至一物質融入另一物質中。毛細作用就是因液體表面自由能不平衡造成液體流動的現象，表面張力為單位面積的自由能，有可視為單位長度上的力。因此，若氣泡置於一有溫度梯度的另一不互相溶的溶液的流體中時，液體通常朝熱端移動，這種現象主要是因為氣泡四周介面上的溫度梯度造成表面張力不平均，引起合力不為零，使界面流動，此現象被稱為熱毛細管現象。此外，突然增加直微管的截面積可以產生一毛細管壓力阻力，停止表面張力的作用。利用此兩特性可設計一被動式微流閥門。

如圖一，此圓形直微管道在其出口處管徑增大以改變其截面積，並在其直微管處產生一氣泡，在不同溫度梯度下，氣泡受溫度影響產生表面張力的改變進而產生一驅動液體的力。以 0°C 的水面達出口端後氣泡的位置為起點，對直微管加熱使起產生一溫度梯度，使氣泡兩方的溫度隨著前進而上升。當氣泡的表面張力淨值小於因微流道形狀改變而產生的表面張力阻力，在漸開管區的液面形狀將內凹，直到超過表面阻力時，液面外凸同時氣泡前進，因此將有一臨界值存在。在此溫度梯度假設為一微之熱傳導現象，則 $T(X)=AX$ 。並假設體積不變，且忽略重力效應，氣泡在管內曲面成球狀曲面。所以，在微流道中，整個流道的總界面自由能 U_T 為

$$U_r = U_1^* - 2\pi R_1 L \gamma_{la} \cos \theta_c$$

$$+ 2\pi \left(\frac{R_1}{\sin \alpha} \right)^2 (1 - \cos \alpha) \gamma_{la} \quad (1)$$

其中， R_0 是直微管的半徑， T 是溫度， Θ_c 是液體與固體間表面張力的接觸角， α 是表面張力所形成的弧面角度， L 是流道長度， U_0^* 則是液體固體間及固體氣體間界面接觸角的表面自由能。至於液體體積 V 則是

$$V = \pi R_1^2 L - \pi \left(\frac{R_1}{\sin \alpha} \right)^3 \left(\frac{2}{3} - \cos \alpha + \frac{\cos^3 \alpha}{3} \right) \quad (2)$$

由此可以得到毛細管壓力阻力 ΔP 為

$$\Delta P = - \frac{dU_r}{dV} = \frac{2\gamma_{la} \left[\sin^3 \alpha - (1 - \cos \alpha) \sin 2\alpha \right]}{\sin^4 \alpha - 3 \left(\frac{2}{3} - \cos \alpha + \cos^3 \frac{\alpha}{3} \right) \cos \alpha} \quad (3)$$

而氣泡因溫度梯度所造成表面張力的推力為

$$f = 2\pi \gamma_{la} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (4)$$

當液面變成外凸時， $\alpha = \pi/2 - \Theta_c - \beta$ ， β 是直微管與漸增管中之夾角則

$$U_r = U_1^* - \left[2\pi R_1 L + 2\pi X_1 \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \left(\frac{X}{2} \tan \beta X_1 \right) \right] \times \gamma_{la} \cos \theta_c + 2\pi (R_1 + X_1 \tan \beta)^2 (1 + \cos \alpha) \gamma_{la} \quad (5)$$

其中， X_1 是液體在漸增管中濕潤之距離。而液體體積和毛細管壓力阻力則分別為

$$V = \pi R_1^2 L - \pi \left(\frac{X_1^3}{3} \tan^2 \beta + R_1 \tan \beta X_1^2 + R_1^2 X_1 \right) \times \left(\frac{2}{3} - \cos \alpha + \frac{\cos^3 \alpha}{3} \right) \quad (6)$$

$$\Delta P = \frac{Num}{Den}$$

$$Num = - \left\{ \left[2\pi \sqrt{1 + \tan^2 \beta} (\tan \beta X_1 + R_1) \right] \gamma_{la} \cos \theta_c + 4\pi \tan \beta \gamma_{la} (R_1 + X_1 \tan \beta) (1 + \cos \alpha) \right\}$$

$$Den = \pi \left[(X_1^2 \tan^2 \beta + 2R_1 X_1 \tan \beta + R_1^2) + 3 \left(\frac{X_1}{2} \tan \beta + R_1 \right)^2 \right]$$

$$\times \tan \beta \frac{\left(\frac{2}{3} - \cos \alpha + \frac{\cos^3 \alpha}{3} \right)}{2 \sin^3 \alpha} \quad (7)$$

三、結果與討論

由上面的理論模型可以發現，不同的管徑，不同的漸增管開度，會產生不同的毛細管壓力阻力，而在不同溫度梯度下或是在不同氣泡體積下皆會產生不同的壓力值。

圖二為在管徑為 $200\mu\text{m}$ 下，漸增管開度 30，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度為 $1000\mu\text{m}$ ，水溫為 0 度時毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。圖三則是在管徑為 $300\mu\text{m}$ 下，漸增管開度 30，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度為 $1000\mu\text{m}$ ，水溫為 0 度時毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。圖四為在管徑為 $200\mu\text{m}$ ，漸增管開度 40 度，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度為 $1000\mu\text{m}$ ，水溫為 0 度時毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。圖五為在管徑為 $200\mu\text{m}$ 下，漸增管開度 30，溫度梯度 $A=0.003$ ，氣泡寬度為 $1000\mu\text{m}$ ，水溫為 0 度時毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。圖六為在管徑為 $200\mu\text{m}$ 下，漸增管開度 30，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度為 $1200\mu\text{m}$ ，水溫為 0 度時毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。由圖二和圖三可看出，當管徑越小時，可產生的毛細管壓力阻力越大。由圖二和圖四則可看出，當漸增管開度越大時，可產生的毛細管壓力阻力越大。但當開度大於一定值時，會發生驅動液體壓力小於最大毛細管壓力阻力而無法將液體推出。至於比較圖二和圖五，當溫度梯度越大時，可產生較大的驅動液體壓力，但隨氣泡前進的，驅動液體壓力變化並不大。由圖二和圖六則是發現，當氣泡體積越大時，可產生較大的驅動液體壓力，但驅動液體壓力隨氣泡前進的變化也不大

四、結論

由理論分析，本文探討微流道尺寸對熱毛細管驅動現象的影響。結果發現，尺寸對熱驅動現象的影響甚大，較小的管徑以及較大的漸開度會阻礙氣泡前進，但是較大的溫度梯度以及氣泡體積會幫助氣泡前進，但是效應較不明顯。而當漸開度大於一定值時，會發生驅動液體壓力小於最大毛細管壓力阻力而無法將液體推出。

五、參考文獻

- [1]. Thomas K. Jun and Chang-Jin Kim," Microscale Pumping with Traversing Bubbles in Microchannels," Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, pp.144-147, June 1996
- [2]. P. F. Man, C. H. Mastrangelo, M. A. Burns, and D. T. Burke," Microfabricated Capillarity-Driven Stop Valve and Sample Injector," in International Conference on Micro Electromechanical Systems (MEMS 98), pp.45-50, 1997
- [3]. P. F. Man, C. H. Mastrangelo, C. H. Burns, M. A. Burns, and D. T. Burke," Microfabricated Capillarity-Driven Stop Valve and Sample Injector," 11th Annual International Workshop on Micro Electromechanical Systems, Heidelberg, Germany, January 25-29, 1998
- [4]. S. C. Lin, F. G. Tseng and C. C. Chieng," Numerical Simulation of Surface Tension Driven Spotting Using Micro-Stamping Process through Microchannels," International Journal of Colloid and Interface Science, 2002
- [5]. F. G. Tseng, I. D. Yang, K. H. Lin, K. T. Ma, M. C. Lu, Y. T. Tseng and C. C. Chieng, "Fluid Filling Into Microfabricated Reservoirs," Sensors and

Actuators A,97-98,pp. 131-138, 2002

[6]. S. C. Lin, F. G. Tseng, Y. C. Tsai, H. M. Huang, and C. C. Chieng," Protein Microarray Patterned by a Surface-Tension-Driven Stamping System with Dispensing Channels," μ TAS 2002,Nara, Japan, Nov. 3-7,pp. 591-592,2002

[7]. S. C. Lin, F. G. Tseng, Y. H. Cu, Y. C. Tsai, C. C. Chieng and H. M. Huang," Protein Microarray Prepared by a Capillary-Force-Driven Stamping System with Bac-filling Dispensing Channels," 3A-4,2002,Nanotechnology and MEMS conference,Tainan,Taiwan,ROC,2002

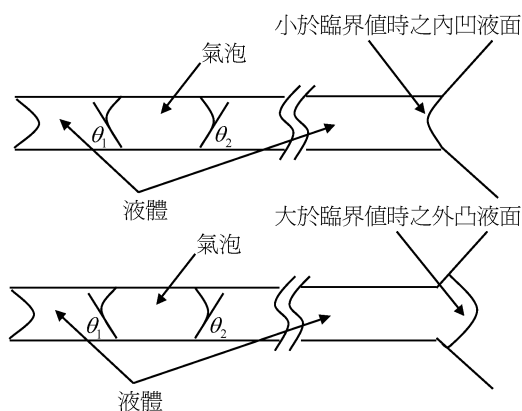
[8]. H.Fan and Y.X.Gao , "Thermodynamics modeling for moving contact line in gas/liquid/solid system:Capillary rise problem revisited", Physics of Fluids , Vol.13 , 1615-1623(2001)

[9]. K. S. Birdi, "Hankbook of Surface and Colloid Chemistry," CRC Press

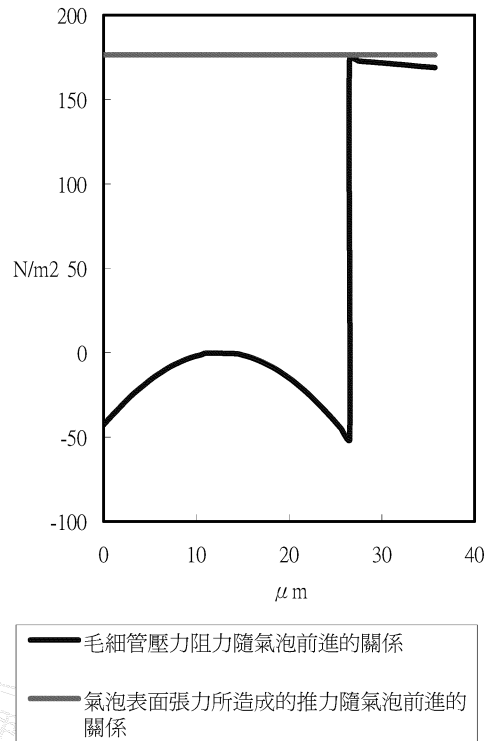
[10]. "Hankbook of Chemistry and Physics,"74thed, CRC Press,1993-1994

[11]. W. Adamson, "Physical Chemistry of Surfaces."6thed, 1997

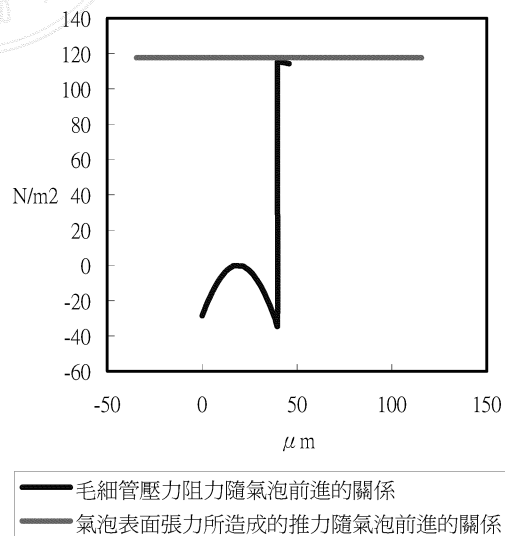
[12] 陶雨台"表面物理化學"民 77



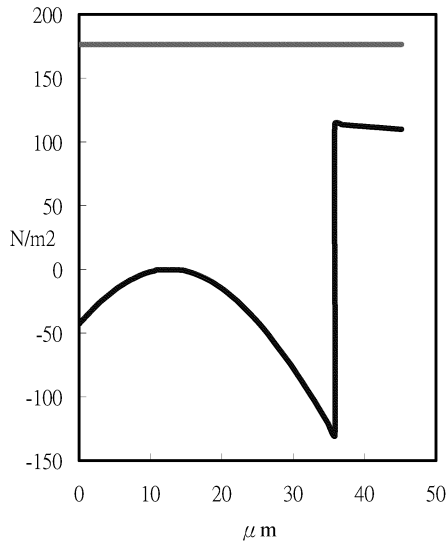
圖一 熱毛細管示意圖



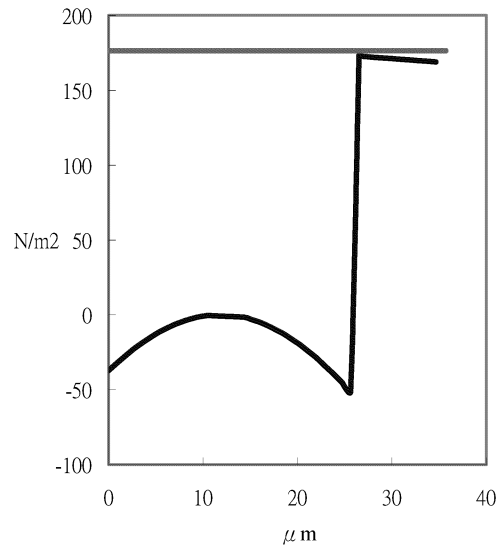
圖二 管徑為 $200\mu\text{m}$ ，漸增管開度 30 ，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度為 $1000\mu\text{m}$ 時毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。



圖三 管徑 $300\mu\text{m}$ ，漸增管開度 30 ，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度為 $1000\mu\text{m}$ 時，毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。



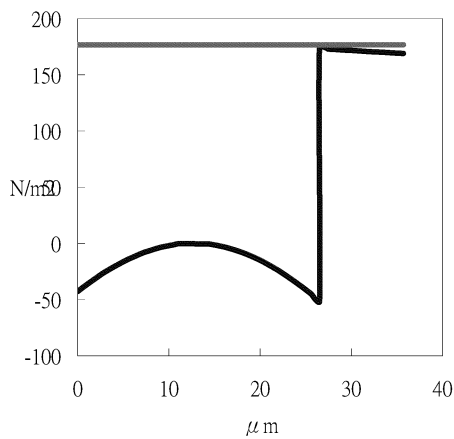
— 毛細管壓力阻力隨氣泡前進的關係
 — 氣泡表面張力所造成的推力隨氣泡前進的關係



— 毛細管壓力阻力隨氣泡前進的關係
 — 氣泡表面張力所造成的推力隨氣泡前進的關係

圖四 管徑 200 μm ，漸增管開度 40 度，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度 1000 μm 時毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。

圖六 管徑 200 μm ，漸增管開度 30，溫度梯度 $A=0.001$ ，氣泡寬度 1200 μm 時，毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。



— 毛細管壓力阻力隨氣泡前進的關係
 — 氣泡表面張力所造成的推力隨氣泡前進的關係

圖五 管徑 200 μm ，漸增管開度 30，溫度梯度 $A=0.003$ ，氣泡寬度 1000 μm 時，毛細管壓力阻力和氣泡驅動壓力隨氣泡位移量的變化。