

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

微型模穴填充過程之輸送現象研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-009-015-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程學系

計畫主持人：林振德

共同主持人：陳志堅

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 1 日

計畫名稱：微型模穴填充過程之輸送現象研究

計畫編號：NSC92-2212-E-009-015

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人：林振德 國立交通大學機械系

中文摘要

本計畫針對微型模穴填充過程中流動現象進行探討，研究中以半導體製程技術在矽晶片上蝕刻微小模穴，並利用光學方式觀測流體流經微小模穴時流體前緣移動及填充模穴的過程，設計觀察不同模穴尺寸、工作流體與流動條件下之流動現象，以歸納表面張力、黏滯力、附著力與慣性力對於填充過程的影響；研究中並配合 CFD-ACE(U) Modules 軟體模擬分析，在分析中加入表面張力的效應模擬流體填充過程的運動方式，經由理論與實驗分析的比較進一步歸納出會影響流動現象之主要參數，並探討理論模式中模擬有關表面張力、黏滯力與附著力對填充影響的適用性。

英文摘要

This research project purposes to investigate the transport processes during the micro injection mold-filling. MEMS fabricated injection molding is performed with cavities at various values of geometrical parameters. A microscope associated with a high-speed CCD camera is utilized for observing the advanced front and the mold-filling processes as well. The effects of various physical properties of fluids are studied and the competition of the capillary force, viscous force, inertia force and geometric parameters be examined. In addition to the experimentals, CFD-ACE(U) Modules Software for simulating analysis on the transport processes is also performed.

前言

微機電系統技術主要是以矽、玻璃或其他所需之材料作為晶片基材，並運用既有的微結

構細微加工及蝕刻技術於基材使其微小化，並廣泛運用於資訊、電子、無線通訊、生化等產業。就微流體系統(Micro-Fluidics system)而言，是將小至幾個微升(microliter)甚至奈升(nanoliter)體積的液體，導入佈滿微流道的晶片中，以某種驅動裝置或機械式幫浦(pump)，讓液體在微流道中執行混合[1, 2]、分離[3]、加熱[4]、或聚合酶鏈反應(polymerase chain reaction, PCR)[5]等實驗室所用的反應，且廣泛地應用在化學分析、生物科技、製藥或流場觀測等方面。然而，液體在微流道中流動之現象會因流體種類及速度、外力作用、流道之表面粗糙度，幾何形狀及尺寸的改變而不同，對於微流體系統運作之效果有決定性的影響。因此，分析液體在微流道中流動之現象便成為一項相當重要的課題。

迄今，有關毛細作用之流動現象的研究方面，絕大多數係針對表面張力、附著力或表面潤濕性，從固、液、氣間界面作用力(Surface Force)產生之表面能(Surface Energy)所導致的壓力差(Laplace Pressure)為理論基礎，來探討單種流體在毛細管中之新月形波前(Meniscus Front)的變化或不同種類流體在其接觸壁面因毛細作用之影響所產生的流動現象[6, 7]。然而在慣性力作用極低的情況下，附著力、表面張力、黏滯力的作用變得格外重要，尤以附著力較為複雜且需深入探討[8]。在描述附著力方面，當流體界面與壁面接觸時，因為流體分子與壁面分子的引力不同，所以流體界面與壁面會呈現特定夾角，即所謂接觸角(Contact Angle)；而且，接觸角是表面潤濕性(Wettability)的一個重要指標，若接觸角大於 90° 屬疏水性(Hydrophobicity)，小於 90° 屬親

水性(Hydrophilicity)，而親水性對低流速的流動流體而言，可降低流體推動的驅動壓力，所代表的意義好比是驅動力(Driving Force)，疏水性則是代表一個阻力的意義[9]。此外，在研究量測接觸角的文獻方面，可分為靜態(Statics)及動態(Dynamics)兩種，靜態接觸角的研究方面，是將單種液滴置於基材表面，液滴與基材表面間之界面能達熱平衡(thermodynamic equilibrium)後，再根據楊氏方程式(Young Equation)為理論基礎，利用固體-氣體、固體-液體及氣體-液體之界面能之關係來求得接觸角[10]，而動態接觸角指的是單種流體或液滴在毛細管道中以不同驅動力使其穩定流動，而流動之液體或液滴與毛細管壁間，因液體黏滯力與異類分子間相互作用力達平衡後，液-氣界面與管壁間所形成之角度即動態接觸角。根據文獻[11]記載，當慣性力與重力之效應可忽略的前提下，流體在毛細管中流動可分作兩種情形：預先潤濕作用之毛細管(Wetted Tube)與乾燥之毛細管(Dry Tube)，由於兩者在流動過程中，分子間作用力情況並不相同，所得的動態接觸角有所不同。無論是預先潤濕或乾燥之毛細管，動態接觸角與毛細係數(Capillary Number)都有著重要的關係。在模擬過程中，接觸角亦決定了流體流動時其流體界面之正確形狀；因此，對於慣性力、附着力、表面張力以及黏滯力的影響，會間接反應到動態接觸角，因而觀察動態接觸角的變化，便成為毛細流動現象之研究不可或缺的一環。除了上述各種力對流動會產生影響外，毛細管截面幾何形狀的改變[12, 13]以及壁面粗糙度[14]的影響，皆會造成流動現象產生改變。然而，從論文結果[15]，發現波前新月型流動現象的改變與慣性力、附着力、液-氣間界面作用力、截面積的改變都有密切的關係，但沒加入更多的工作流體及設計條件加以比較出影響流動之主要參數，因此有其必要性再詳加探討。

實驗設計與方法

微流道設計

影響流體流動有四種力扮演重要的角色，分別是黏滯力、慣性力、液-氣間之界面張力及固-液-氣接合面之作用力，以上四種力與流道設計及流率都有密切的關係。對於有關毛細現象的概念在書籍[16, 17]有相關敘述。為了探討黏滯力、慣性力及液-氣間之界面張力等對微流道流動現象的影響，重要的物理及設計或操作相關之無因次參數有下列二式：

1. 韋伯數(Weber Number, $We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$)，其

物理意義為慣性力與表面張力之比值，其中 L 是系統之特徵長度，而本研究中將藉由此無因次參數值的改變來分析流體之流動現象。

2. 毛細壓力(Capillary Pressure)

$$P_c = \sigma \frac{p \cos \theta}{A} = \sigma \cos \theta \frac{4}{D_h} \quad (1)$$

由式(1)中可看出毛細壓力與液體之表面張力、潤濕壁面之接觸角以及流體在微流管道橫截面之接觸周長與截面積比值(perimeter / cross-section area)有關，換句話說在矩形流道中，改變水力直徑(D_h)大小對毛細壓力將帶來影響；因而研究中我們設計不同的幾何條件來加以比較幾何尺寸因素所帶來之影響。

為了要從實驗中觀察並探討慣性力、毛細力與表面張力作用之情形，我們設計一微流體裝置如圖 1 所示。設計之模穴包含兩個區域：1. 波前變化及流動現象觀測區，其目的在於瞭解流體在不同設計條件下，從流道流入此觀測區時之波前變化及流動現象。2. 漸闊(縮)區，其目的在於瞭解截面積漸縮(漸闊)時對於流動現象之影響。而就入口流道寬度部分，根據文獻[15]顯示，入口韋伯數 We_1 影響實驗操作中之慣性力大小，而在幾何尺寸效應影響方面，模穴深度的改變對填充過程有較大的影響。至於入口寬度尺寸之變化並無太大的影響，因此，在設計入口寬度方面，我們採用固定的入

口寬度尺寸。又，根據 [15]，在固定韋伯數 We_1 和流道的寬度與深度，用不同圓盤孔穴直徑的微流體裝置進行的實驗結果發現，波前會隨著不同截面積下，而有所改變，但在截面積不斷的改變所造成速度也跟著不斷的變化，難以斷定波前是受到幾何尺寸效應之影響或慣性力的改變所致，為了系統化分析各參數之影響，本研究中我們運用波前觀測區與漸闊(縮)區之二區段式設計來分開討論尺寸效應所帶來的影響，相關設計尺寸如表 1 所示。

此外，為討論在相同水力直徑下，不同深寬比所帶來的影響，我們選擇特定的幾何尺寸所算出的水力直徑，設計數種不同深寬比之幾何尺寸，如表 2 所示，期藉由固定水力直徑下，觀測不同深寬比下填充過程的影響。

微流道製程

本實驗所使用的微流體裝置之製作如圖 2 所示，是以半導體製程技術為基礎，在矽晶圓表面施以微加工而成。

觀測系統

本實驗系統如圖 3 所示，液體經由注射幫浦加壓注入微流道中，利用高速攝影機將影像藉由與個人電腦中的影像擷取卡(VCD- Gear TV Plus)的連結呈現於螢幕上，再利用高速攝影機的控制器上之面板設定適當的擷取模式，將影像以圖檔的方式擷取、並儲存於電腦硬碟中，爾後即可經由畫面撥放軟體(ACD See)將之撥放。

實驗項目與觀測步驟

首先，為了瞭解液體與流道間潤濕之關係，我們必須先實驗出各工作流體與流道表面間之接觸角關係，因此藉由接觸角儀器量測靜態接觸角。為分析各參數對於微流模穴填充過程的影響，我們先列出填充過程中可能影響的參數，如：入口流道暨波前觀測區之寬度與深度，以及注入液體之種類、流率與對應之韋伯數(We)，經由固定其中某幾項參數，改變其餘項的量來達到分析之目的。為了要清楚慣性

力對流動現象之關係，我們採用兩個不同位置所代表的韋伯數來分別探討： We_1 為入口流道之韋伯數， We_2 為波前觀測區之韋伯數。兩者之特徵長度我們選用等效水力直徑(Hydraulic diameter, $Dh=4A/P$)，而計算韋伯數之速度 V_1 和 V_2 ，為體積流率除以其所在位置之截面積 A_1 和 A_2 。本研究中之實驗暨觀測步驟作說明如下：

1. 固定入口之韋伯數 We_1 及分別固定深度 ($d=40, 80 \mu m$)，計算出水和標準黏度液與其所對應之流率，依此流率分別將液體注入寬度不同之微模穴中，觀察不同寬度所產生的尺寸效應下之填充現象，以分析慣性力、毛細作用力與黏滯力對填充過程之影響。
2. 固定波前觀測區之韋伯數 We_2 及水力直徑 Dh_2 ，計算出不同深寬比與其所對應之流率，觀察波前觀測區相同水力直徑 Dh_2 與韋伯數 We_2 下，不同深寬比所產生的尺寸效應對填充過程之影響。
3. 固定寬度和深度相同幾何尺寸之微模穴，使用不同流率來具體呈現毛細作用之填充過程。
4. 延伸波前觀測區之長度，固定相同之波前觀測區水力直徑 Dh_2 、入口流率，使用深寬比互為倒數之幾何尺寸，如深寬比為 $0.25(d=180 \mu m, w=45 \mu m)$ 與 $4(d=45 \mu m, w=180 \mu m)$ 兩者間，驗證流率、深寬比與毛細力間之作用關係。

數值方法簡介與步驟

數值分析方面，本論文採用 CFD-ACE(U) Free Surface Module 軟體模擬[18]，此法模擬流體前緣的方法採用 Volume of Fluid (VOF) 方法，此方法主要在探討液、氣界面表面能與表面張力的關係。此模式可適用於任何不可壓縮之流體且局部的滑移可以忽略不計，空氣與水即是很好的例子。數值模擬的操作步驟分下列三階段說明如下：

1. 軟體前處理器 CFD-GEOM：繪製微模穴之形狀及構造，接著將內部體積以網格切細，然後定義邊界性質，如出入口、邊壁等，完成後匯出檔案給予 CFD-ACE-GUI 處理器讀取。
2. CFD-ACE-GUI 處理器：設定介質界面模擬方法中，我們設定模擬方法為 Flow + Free Surfaces (VOF)，接著給定流體性質如：密度、黏滯係數、表面張力；邊界條件我們給定的有二：入口流速與接觸角，入口流速是以體積流率除以截面積所得之平均速度，接觸角則輸入實驗所量測出之靜態接觸角值；最後再將起始條件、疊代次數及其他參數設定完成後即開始進行模擬。
3. CFD-VIEW 後處理器：將模擬結果比如填充過程、壓力場等呈現。

結果與討論

實驗結果

首先，我們討論靜態接觸角量測結果，大致上可分作兩種基材與四種工作流體；基材方面，我們選用 Pyrex7740 玻璃與經過 ICP-RIE 處理過後的矽基材表面；測定之工作流體有：DI water 以及三種標準黏度液，其靜態接觸角量測結果分別如表 3 所示。根據靜態接觸角結果顯示，在潤濕表面能力方面， $S-3 > N-35 \geq S-60 > DI \text{ water}$ 。由靜態接觸角的實驗量測結果只能提供前述條件下工作流體與流道上下表面接觸性質。在實驗探討不同流動條件的填充過程中，工作流體在微模穴流動時，波前在與上下及兩側壁面接觸時會因設計之物理條件的不同而呈現不同之動態接觸角，我們藉由觀察波前狀況以及與兩側壁面之動態接觸角情形來輔助判斷填充過程中慣性力或毛細作用力之影響程度。

在固定入口之韋伯數 $We_1 = 10$ 及固定深度 ($d = 80 \mu\text{m}$) 下，我們分別對水和標準黏度液計算其對應之入口流率，再運用不同寬度之微模

穴進行實驗。由圖 4、5、6 可看出，在固定入口韋伯數及深度的情況下，雖然隨著波前觀測區之寬度變寬，相對應波前觀測區的韋伯數也隨著下降，波前與兩側壁面之動態接觸角皆保持大於 90° 的狀態，所代表的意義是在這樣的條件下，毛細作用力扮演著阻力的角色，但慣性力不因寬度增加而造成下降而被毛細作用力所抵銷，因此慣性力仍為主導波前狀態之作用力；在漸闊區的部分，由圖 7(a-f)、8(a-f) 可得知，因截面積擴張進而造成波前曲率變化的更為尖銳，從圖 7(c)(f)、8(c)(f) 比較得知，波前在相同之韋伯數情況下進入漸闊區時，漸闊角 60° 比 30° 對波前曲率影響更大，此顯示前者條件下流體受到較大之毛細壓力阻力所致；在漸縮區部分，在截面積驟減所對應之水力直徑減縮的情況下，毛細作用力影響加大，使得波前觀測區之波前在進入此區後，從凸形轉變為凹形，如圖 7(g-i)、8(g-i) 所示。接著觀察水在深度 ($d = 40 \mu\text{m}$)、入口之韋伯數 = 10，注入不同寬度之微模穴的情況，由圖 (4 至 6) 與圖 (9 至 11) 相互比較，於波前觀測區，寬度尺寸 $800 \mu\text{m}$ 下之波前與壁面動態接觸角仍大於 90° 狀態，因此仍屬慣性力主導狀態；寬度尺寸 $100 \mu\text{m}$ 與 $400 \mu\text{m}$ 下之波前結果出現重要的變化，波前與壁面之動態接觸角呈現小於 90° 狀態，波前也由凸形變為凹形，代表毛細作用力抵銷慣性力而逐漸成為主導力；至於漸闊區部分，如圖 12(a-f)、13(a-f) 所示，以及漸縮區部分，如圖 12(g-i)、13(g-i) 所示，流體流動情況與深度 $80 \mu\text{m}$ 的案例相似，漸闊角 60° 仍比 30° 波前曲率影響更大，我們可以看出水力直徑的變化對慣性力與毛細力之間的主導關係將有所影響。據此我們推論：以圓盤孔穴之幾何形狀所做的流動現象 [15]，在流動過程中，波前形狀的變化可說是受幾何變化的影響成分居多。我們藉由表 1 與式 (1) 亦可說明上述結果，從式 (1) 我們可以看出毛細壓力與水力直徑 D_h 有著反比的關係，而當動態接觸角小於 90°

時，毛細作用力方向與流動方向同向，如驅動力一般；若動態接觸角大於 90° 時，毛細作用力則屬阻力，因此表 1 與圖 4、5、6、9、10、11 對照來看，隨著水力直徑越小，毛細作用力的影響也逐漸加大，直到深度 $40\ \mu\text{m}$ 、寬度 $400\ \mu\text{m}$ 所對應之水力直徑 $D_h=73.73$ 時，毛細力開始成為主導波前之作用力，在固定的水力直徑下，對於不同深寬比的組合，其影響將在底下進行討論。

在我們前面探討水力直徑所帶來的影響，當水力直徑 D_h 減縮至 73.73 時，發現毛細力高於慣性力作用，因而本研究中我們先針對水力直徑 $D_h=73.73$ 設計了不同深寬比之幾何尺寸，如表 2 所示。我們分別考慮深寬比大於、等於及小於 1 的情況，至波前觀測區之韋伯數，我們也保持固定值。首先，當深寬比為 1 時，波前與壁面之動態接觸角呈現大於 90° 的狀態（如圖 14 示），代表慣性力未被毛細作用力所抵銷，屬慣性力主導。接著觀察深寬比小於 1 的情形，當深寬比為 0.835 時（如圖 15 示），波前與兩側壁面之動態接觸角呈接近 90° 的狀態；而當深寬比為 0.435 時（如圖 16 示），明顯的可看出波前呈凹形且與兩側壁面之動態接觸角呈現小於 90° ，此現象表示毛細力作用高於慣性力之作用，成為以毛細力主導之狀態，同時我們再觀察深寬比為 0.253 之波前狀態（如圖 17 所示），發現波前亦為凹形。因此，由深寬比小於 1 的比較可發現，當深寬比越小，毛細力的作用也就越大。接著觀察深寬比大於 1 的情況，首先就深寬比為 10 的結果（如圖 10 所示），波前呈現微凹狀態，雖然毛細力之作用大於慣性力的作用，但波前並未完全受到毛細力所牽引，因而波前與兩側壁面之動態接觸角也僅略小於 90° ；深寬比為 21 時結果（如圖 18 示），雖然計算出之波前觀測區韋伯數與其他深寬比案例相同，但由圖 18(b) 我們發現，因入口韋伯數較大，中央波前受入口處較大的流率所擠壓，使得波前變得較為尖銳，而從圖 18(c) 所

示，沿著壁面之波前受附著力的影響，使得靠兩側壁面之波前追趕上中央波前，因而波前曲率變得較為平緩，但慣性力作用太強，使得毛細力未能將慣性力抵銷；深寬比為 43 時結果（如圖 19 示），填充過程與深寬比為 21 時的結果相近，填充過程亦由慣性力所主導，但我們發現，由於深度較淺，兩側沿壁面之波前追趕上中央波前的速度相對的也快了許多，代表波前受兩側壁面附著力的影響也越大。

以上我們觀察深寬比影響的結果，發現雖然在相同水力直徑和波前觀測區之韋伯數下，理論上雖然波前觀測區的慣性力相同，但波前卻呈現不一樣的結果，表示改變深寬比確會對毛細力大小帶來影響。實驗中我們對毛細管壁與液體之接觸性質，只瞭解上蓋玻璃與底面受過 ICP-RIE 製程過後之接觸特性，但在兩側壁面之性質對我們來說一直是無法瞭解的部分。在相同截面積與水力直徑下，液體與兩側壁面接觸長度的多寡是否會對流動造成影響，為了印證，因而設計了兩種可對比之流道，其入口流道之截面積相同，因此在同樣的流率下入口流速相同；其次進入波前觀測區時的幾何尺寸，一種設計為深度 $d=180\ \mu\text{m}$ 、寬度 $w=45\ \mu\text{m}$ 、深寬比為 0.25，其接觸兩側壁面長度佔總接觸周長比例為 0.8，另一種設計為深度 $d=45\ \mu\text{m}$ 、寬度 $w=180\ \mu\text{m}$ 、深寬比為 4，其接觸兩側壁面長度佔總接觸周長比例為 0.2，如此一來，在進入波前觀測區時韋伯數兩者亦相同，另外我們加長波前觀測區之長度，觀察在不同位置下波前型態的變化趨勢，進而比較出兩者之差異。首先觀察深寬比為 4 的結果，由圖 20 至圖 22 所示，(a)~(g) 代表由入口流道進入波前觀測區為起始點，自上游到下游每 $5000\ \mu\text{m}$ 的位置進行拍攝，(a)~(c) 分別對應 5000 、 10000 、 $15000\ \mu\text{m}$ 的位置，依此類推。此外，受到壁面粗糙度之影響，在我們的拍攝區域內其波形雖穩定，但動態接觸角會有微量的變化，因此我們以統計出之平均動態接觸角度/

位置表示波前在不同區域下的結果。由圖中可看出，隨著流動的距離越長，波前曲率與動態接觸角也隨之下降，代表毛細力主導的程度逐漸提高，接著我們將各流率在不同位置與量測出之動態接觸角作個統計圖比較，結果如圖 23 所示。我們可以瞭解到，當流率越大時，受慣性力作用變大，因此毛細力抵銷慣性力所需之距離也越長，但流率較大者其動態接觸角下降的幅度比流率較小時來的大，代表慣性力越大時受到毛細阻力越大，因而抵銷慣性力的作用也越強，最後當毛細力主導波前的流動時，動態接觸角會趨近於 50° ~ 60° 之間。當深寬比為 0.25 時，不同流率下之波前在各位置的情形如圖 24 至圖 26 所示。我們同樣將各流率與不同位置下所量測之動態接觸角作統計比較，結果如圖 27 所示，我們發現在不同流率下動態接觸角的下降趨勢與圖 23 所顯示結果相近，流率越大其動態接觸角下降幅度越大且毛細力抵銷慣性力所需的距離也越長，最後當動態接觸角降至 50° ~ 60° 之間，角度便趨於平緩而有所跳動。接著我們將兩深寬比在相同流率下的變化情形作比較，結果如圖 28 至圖 30 所示，我們發現深寬比 0.25 的結果，在同一位置下其動態接觸角皆比深寬比 4 的結果來的小；其次隨著流率下降，兩深寬比其相同位置下之動態接觸角相差也越大，對於這樣的情形我們歸納出可能有兩方面導致這樣的結果，即壁面性質方面與流率方面。在壁面方面，欲製作出完美的平整壁面是不太可能達成的任務，在黃光製程中，曝光能量與顯影時間都會影響顯影出來之圖形壁面的粗糙度，因而造成 ICP-RIE 製程過後，兩側壁面平整度不佳，倘若流道寬度越窄，相對地影響程度也就越大。在我們研究中，兩種深寬比應都受到兩側壁面粗糙度的影響；根據文獻[14]，固體表面粗糙度對流動中之液體會產生自由能障礙(Free energy barriers)，因此對深寬比 0.25 而言，影響的程度要比深寬比 4 來的大；而在流率方面，由圖 28 至圖 30

可看出，流率越大，因粗糙度所造成的自由能障礙其效應影響越小。因此對於尺寸微小之流動現象研究，若有壁面粗糙度的影響，我們可藉由深寬比加大，或提高流率來減少粗糙度對結果帶來的影響，然而流率提高，毛細力欲抵銷慣性力所需之距離相對地也會增加。

對於不同黏度之比較方面，由靜態接觸角量測出的結果，我們發現使用的三種黏度液無論與玻璃或矽基材表面之附著性均相當好，尤其以 S-3 黏度液為最強，其次為 N-35 及 S-60。此外，N-35 及 S-60 兩種黏度液的黏度相當強，因此在實驗過程中，慣性力的作用幾乎在波前觀測區的前段即被抵銷。整體而言，此三種黏度液所呈現的結果，填充過程皆由毛細力所主導。對於此三種黏度液之曲率與壁面接觸角，幾乎不受幾何尺寸的改變影響而有所影響，與水比較起來差異性很大，我們探索其原因，發現在我們使用黏度液進行實驗時，兩側波前與壁面接觸點前方會出現預先潤濕層(precursor film)的情況，使得液體並非真正與壁面接觸，根據文獻[8]的記載，其推測此一現象極有可能與使用的液體是否為純物質(purity)有很大的關係，對於非純物質(impurity)之液滴在固體表面進行擴散實驗時，便會產生預先潤濕層，更進一步研究顯示，此預先潤濕層使得液體與壁面接觸關係變的相當複雜，同時造成表面張力梯度的產生。在我們研究中所使用的黏度液成分為礦物油(Mineral Oil)，屬非純物質，亦產生了預先潤濕層，也對實驗結果帶來極大的影響。若要是能確實比較出黏度所帶來的影響，則必須找到液體特性相同，僅有黏度等級不同之純物質，可說是相當困難，因此，在我們的研究中，對於不同之幾何尺寸或慣性力條件下，我們難以藉由動態接觸角來具體呈現黏滯力所帶來的影響。但我們也觀察到有趣的現象，那就是隨著黏度等級越大時，其預先潤濕層會越短窄，換句話說，我們選用的三種黏度液其產生的預先潤濕層厚度與長度分別為 S-3

>N-35>S-60。因而在微尺度下，假使有預先潤濕層的產生，對於流動中波前形狀之研究，其理論與實驗現象之探討將變得更加複雜，因此需要透過更多的實驗來驗證探討。又，在微尺度下，在黏度液的清理方面較為困難，丙酮雖可清除模穴中殘餘黏度液，但長期吸入對人體有害，另外加上製程昂貴且耗時等因素，尋求其他製程以提供簡易快速、便宜且流道性質穩定之微模穴製程方法對於更進一步之研究是有絕對重要的幫助。

數值模擬結果

因欲與實驗結果作比對，模擬中我們先選定幾何尺寸 $w=400\ \mu\text{m}$ 、 $d=40\ \mu\text{m}$ 、漸闊角 60° ，而入口條件由於軟體的限制，我們必須將實驗設定之體積流率除以截面積來換算成入口流速。接觸角參數方面，我們以實驗出之接觸角結果來給定，而模擬維度也以三維的方式來進行模擬，模擬結果我們以正示圖與側示圖觀察填充過程，以三維的模擬結果來比對二維的實驗結果。一開始我們設定的入口條件與實驗結果如圖 10 一樣的入口流率換算而成的入口流速，模擬過程如圖 31 與 32 所示。首先我們討論波前觀測區的流動現象：中央波前受到慣性力之影響，快速的向前填充，而沿其壁面之流體因附著力亦快速沿壁面向兩旁移動，而中央波前向兩旁擴散直到與壁面接觸後，後方氣體來不及排出而被包圍，因而產生氣泡，過程如圖 31(a-c) 所示。再由圖 31(a)(b) 之側示圖可以看出流體沿頂面之流動速度要比底面來的快，接著液體由頂面填充下來，如圖 31(c) 所示，此現象是由於我們給定頂面壁面接觸角值較底面與側面壁面小，頂面潤濕性較底面與側面好，因此潤濕性較佳液體會有較快擴散速度；又由圖 31(d) 我們可看出波前仍在慣性力的影響下形狀屬凸形，必須等到中後段，毛細力才逐漸抵銷慣性力，波前形狀也由凸形轉變較為平緩，如圖 31(e)(f) 所示。我們就壓力分佈(如圖 33 所示)，可瞭解波前在波前觀測區之填充

過程，中央波前受入口高壓的影響區域，波前位置必須超過波前觀測區的中段後才可脫離高壓的影響，因此在前半段受到入口高壓影響，波前屬凸形狀態，直到中後段脫離高壓區的影響後，毛細作用會逐漸將慣性力所抵銷，新月型波前也由凸形轉變為微凹的狀態。另外流體進入漸闊區時，受到幾何尺寸的變化，波前明顯的由平緩的狀態變成凸形，如圖 32 所示。根據白努力方程式(Bernoulli equation)：

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{const.} \quad (2)$$

可忽略

當進入漸闊區時，由於截面積逐漸變大而速度下降，使得下游的壓力會逐漸加大，毛細阻力也會跟著加大。由圖 33 之壓力分佈我們也可看出，漸闊區之壓力分佈越往下游其負壓值越大，因而波前形狀會越凸，而實驗結果如圖 12(a-c) 與模擬結果如圖 32(a-c) 兩者比較，其波前與壁面接觸角以及波前曲率形狀都相當符合。然而，前面之案例，在我們的實驗結果並未如模擬過程中產生了氣泡，是否因入口流速較高導致這樣的結果，因此我們試著將模擬之入口流速降低，並同時在實驗中加大流率，兩方面進行比較，試圖瞭解氣泡產生的原因。首先我們從降低入口流速後之模擬結果如圖 34 與圖 35 所示，由於慣性力降低，液體與壁面產生之附著力對流動現象影響加大，由圖 34(b-d) 觀察，液體由中央入口處流入後，中央波前很快地被沿兩側壁面之波前超越，之後便成為毛細力主導；而由壓力分佈，如圖 36 所示，中央波前受入口壓力影響的區域縮減至僅約波前觀測區前段三分之一的距離，因此在脫離入口壓力影響的區域後，沿著兩側壁面之波前很快的就超越中央波前成為毛細力主導波前，如圖 34(c-f) 所示，因而在此模擬過程中便無產生氣泡。我們在寬度 $w=400\ \mu\text{m}$ 的實驗中嘗試加大入口流率，結果發現雖有氣泡產生但較不明顯，因此改於寬度 $w=800\ \mu\text{m}$ 之實驗中加以突顯氣泡產生過程。由圖 37(a-c) 所示，我們發現液

體高速從流道流出後，波前如子彈形般向前快速推進，而向壁面擴散的速度遠小於向前推進的速度，因此液體受壁面附著力之效應來不及發生，接著在前方波前與壁面接觸時，形成後方氣體來不及排出的現象發生，如圖 37(d~f) 所示，此雖呈現出氣泡的產生，但模擬與實驗結果不盡相符的是氣泡形成的過程與位置。

黏度液的模擬方面，實驗中發現對於不同等級黏度之黏度液會產生不同厚度與長度之預先潤濕層，黏度越大時，預先潤濕層會越短窄，受到預先潤濕層影響的區域也越小，因此就黏度等級最高的 S-60 黏度液進行模擬，結果如圖 38 與圖 39 所示，我們將模擬結果與實驗結果作比較，明顯可看出模擬軟體無法將附著效應與預先潤濕層的現象正確地呈現出來。而軟體中僅靠調配接觸角的大小並未能真正地表示出液體與壁面之接觸關係，若要正確模擬有預先潤濕層之波前流動情形，則理論中必須加入凡得瓦力(Van der Waals forces)的效應於其中，有關這方面研究，目前已發現動態接觸角與毛細係數(Capillary number)有很大的關連，而相關理論的部分目前尚在建構中[11]。

結論

由模擬結果得知，當波前脫離入口中央高壓區域的影響後，毛細作用力便抵銷慣性力而開始主導波前，當流率越大，中央高壓影響的區域越長，而在進入漸闊區時，截面積擴張進而造成毛細阻力變大，使得波前由凹形變為凸形；因而從模擬當中我們歸納出影響波前的三個主要參數，即流率、接觸角值與幾何尺寸的變化。另外，由模擬軟體之物理模式即可發現，此軟體僅可做出不可滑移邊界條件之結果，對於黏度液模擬我們難以具體呈現出與實驗相符的結果。

再由實驗歸納得知，影響波前流動最大因素仍在於液體與壁面之接觸性質，由靜態接觸角的結果發現，我們可藉由物理或化學方式來改變液體對壁面的附著力，然而附著力越強，

其毛細作用也就越顯著；在幾何尺寸方面，我們可藉由減縮水力直徑來提升毛細力作用程度，而當水力直徑相同情況下，深寬比不同所造成的流動情形也會有所差異；最後在加長流道來驗證流率、深寬比與毛細力三者間的關係時，另外一個因素我們發現也必須考量進去，那就是壁面粗糙度對流動中液體會產生自由能障礙(Free energy barriers)，當深寬比越小，代表液體與兩側粗糙面接觸的周長比例越高，其影響就越顯著；在實驗中我們發現：流率加大可減少粗糙度影響的程度，相對地流率越大其所對應之韋伯數也越大，因此毛細力欲抵銷慣性力所需之距離越長。

而在黏滯力的部分，我們所選用的黏度液在流動過程中，波前與壁面接觸點之前端會產生預先潤濕層(precursor film)，此現象的確使得毛細作用更為顯著，藉由幾何尺寸與流率的改變都難以影響液體與壁面接觸關係。數值模擬結果與實驗結果作比較，明顯可看出模擬軟體無法將附著效應與預先潤濕層的現象正確地呈現出來。而軟體中僅靠調配接觸角的大小並未能真正地表示出液體與壁面之接觸關係。

參考文獻

- [1] N. Schwesinger, T. Frank, H. Wurmus, *J. Micromech. Microengr.*, Vol.6, 99-102, 1996.
- [2] W. Ehrfeld, K. Gebauer, V. Hessel, H. Lowe, T. Richter, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 38, 1075-1082, 1999.
- [3] J. T. Groves, N. Ulman, S. G. Boxer, *Science*, Vol. 275, 651-653, 1997.
- [4] J. K. Jun and K. C. Jin, *J. Applied Physics*, Vol. 83, No. 11, 5658-5664, 1998.
- [5] M.A. Northrup, M.T. Ching, R.M. White, and R.T. Lawton, "DNA Amplification with Microfabricated Reaction Chamber," *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 93)*,

924-926, Yokohama, Japan, June 7-10, 1993.

[6] J.N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, London: Academic, 1992.

[7] V.D. Sobolev, *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 222, 51-54, 2000.

[8] P.G. de Gennes, *Rev. Modern Phys.*, Vol. 57, 827-861, 1985.

[9] Y. Lee, J.K. Kim, S. Chung, C. Chung, J.K. Chang, J.Y. Yoo, "Flow Characteristics of Hydrophilic/Hydrophobic Capillaries Considering Surface Tension," *Microtechnologies in Medicine & Biology 2nd Annual International IEEE-EMB Special Topic Conference*, 560-564, 2002.

[10] D.Y. Kwow, A.W. Neumann, *Advanced in Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 81, 167-249, 1999.

[11] Rachid Chebbi, *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 265, 166-173, 2003.

[12] Marcelo Lago, Mariela Araujo, *J. of Colloid and Interface Sci.*, Vol. 243, 219-226, 2001.

[13] P.F. Man, C.H. Mastrangelo, M.A. Burns, D.T. Burke, "Microfabricated Capillarity-Driven Stop Valve and Sample Injector," Presented at the MEMS Conference, Heidelberg, Germany, Jan. 25-29, 1998.

[14] Jaroslaw Drelich, Jan D. Miller, Robert J. Good, *J. of Colloid and Interface Sci.*, Vol. 179, 37-50, 1996.

[15] 劉文忠, "微型圓盤孔穴內之微流體流動現象分析," 機械工程研究所(交大)-碩士論文, 2002.

[16] 王亞偉等, *物理*, 五南出版社, 台北市, 2001.

[17] 謝曉星, *基本流體力學*, 東華出版社, 台

北市, 1991.

[18] *CFD - ACE(U)TM Modules Version 2002*, CFD Research Corporation, Cummings Research Park, 2002.

表

表 1 微模穴尺寸對照表(長度單位:μm)

寬度 w	深度 d	漸開角度 α	漸開角度 β	深寬比 w/d	水力直徑 Dh
100	40	30.60	30	2.5	57.14
400	40	30.60	30	10	72.73
800	40	30.60	30	20	76.19
100	80	30.60	30	1.25	88.88
400	80	30.60	30	5	133.3
800	80	30.60	30	10	145.5

表 2 不同深寬比尺寸對照表

寬度 w	深度 d	深寬比 w/d
45.6	180	0.253
52.2	120	0.435
66.7	80	0.835
72.73	72.73	1
400	40	10
800	38	21
1600	37.3	43

表 3 流體種類與性質

	S-3	N-35	S-60	DI water
Dynamic viscosity μ (N · s/m ²)	3.493x10 ⁻³	56.43x10 ⁻³	108.3x10 ⁻³	1x10 ⁻³
Density ρ (kg/m ³)	858	863	872	998
Contact angle	12.14(Pyrex)	28.97	30.34	28.02
Surface tension σ	29.91	31.37	29.64	43.96

圖

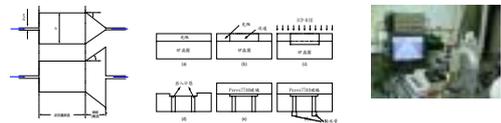


圖 1 微型模穴之外形 圖 2 微流體裝置之製程 圖 3 實驗系統之示意圖

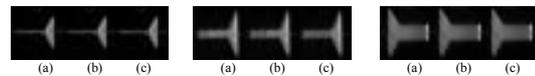


圖 4 w=100 μm、d=80 μm、We₁=10.007、We₂=1.1111、Q=0.456 ml/min 水在波前觀測區之波前流動現象

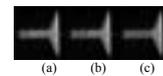


圖 5 w=400 μm、d=80 μm、We₁=10.007、We₂=0.1042、Q=0.456 ml/min 水在波前觀測區之波前流動現象

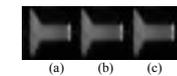


圖 6 w=800 μm、d=80 μm、We₁=10.007、We₂=0.0284、Q=0.456 ml/min 水在波前觀測區之波前流動現象

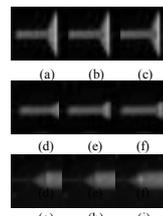


圖 7 w=400 μm、d=80 μm、We₁=10.007、We₂=0.1042、Q=0.456 ml/min 水在漸闊(縮)區之波前變化比較

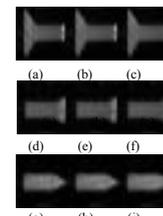


圖 8 w=800 μm、d=80 μm、We₁=10.007、We₂=0.0284、Q=0.456 ml/min 水在漸闊(縮)區之波前變化比較

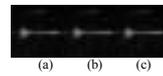


圖 9 w=100 μm、d=40 μm、We₁=10.026、We₂=0.857、Q=0.25 ml/min 水在波前觀測區之波前流動現象

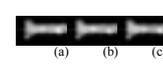


圖 10 w=400 μm、d=40 μm、We₁=10.026、We₂=0.0682、Q=0.25 ml/min 水在波前觀測區之波前流動現象

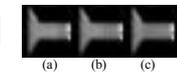


圖 11 w=800 μm、d=40 μm、We₁=10.026、We₂=0.0178、Q=0.25 ml/min 水在波前觀測區之波前流動現象

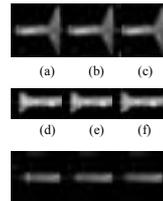


圖 12 w=400 μm、d=40 μm、We₁=10.026、We₂=0.0682、Q=0.25 ml/min 水在漸闊(縮)區之波前變化比較

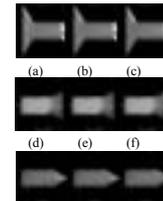


圖 13 w=800 μm、d=40 μm、We₁=10.026、We₂=0.0178、Q=0.25 ml/min 水在漸闊(縮)區之波前變化比較

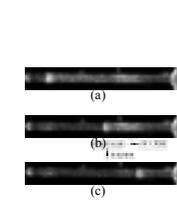
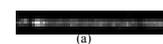
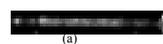


圖 14 w=73.73 μm、d=73.73 μm、We₁=0.4、We₂=0.0682、aspect ratio=1、Q=0.085 ml/min、水在波前觀測區之波前流動現象:(a)前段(b)中段(c)後段



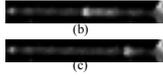


圖 15 $w=66.7 \mu\text{m}$ 、 $d=80 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.333$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $\text{aspect ratio}=0.835$ 、 $Q=0.083 \text{ ml/min}$ 水在波前觀測區之波前流動現象：(a)前段 (b)中段 (c)後段

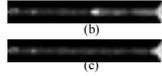


圖 16 $w=52.2 \mu\text{m}$ 、 $d=120 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.219$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $\text{aspect ratio}=0.435$ 、 $Q=0.098 \text{ ml/min}$ 水在波前觀測區之波前流動現象：(a)前段 (b)中段 (c)後段

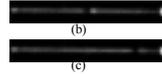


圖 17 $w=45.6 \mu\text{m}$ 、 $d=180 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.175$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $\text{aspect ratio}=0.253$ 、 $Q=0.128 \text{ ml/min}$ 水在波前觀測區之波前流動現象：(a)前段 (b)中段 (c)後段

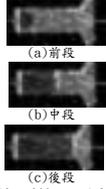


圖 18 $w=800 \mu\text{m}$ 、 $d=38 \mu\text{m}$ 、 $We_1=39.3$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $\text{aspect ratio}=21$ 、 $Q=0.474 \text{ ml/min}$ 水在波前觀測區之波前流動現象

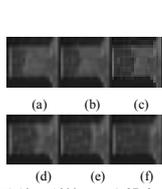


圖 19 $w=1600 \mu\text{m}$ 、 $d=37.3 \mu\text{m}$ 、 $We_1=156.146$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $\text{aspect ratio}=43$ 、 $Q=0.931 \text{ ml/min}$ 水在波前觀測區之波前流動現象

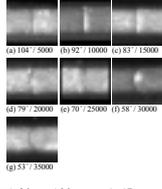


圖 20 $w=180 \mu\text{m}$ 、 $d=45 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.095$ 、 $\text{aspect ratio}=4$ 、 $Q=0.127 \text{ ml/min}$ 水在加長之波前觀測區於不同位置拍攝的波前現象

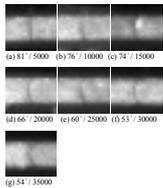


圖 21 $w=180 \mu\text{m}$ 、 $d=45 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.0682$ 、 $\text{aspect ratio}=4$ 、 $Q=0.127 \text{ ml/min}$ 水在加長之波前觀測區於不同位置拍攝的波前現象

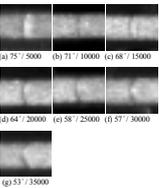


圖 22 $w=180 \mu\text{m}$ 、 $d=45 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.04225$ 、 $\text{aspect ratio}=4$ 、 $Q=0.1 \text{ ml/min}$ 水在加長之波前觀測區於不同位置拍攝的波前現象

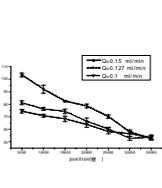


圖 23 $w=180 \mu\text{m}$ 、 $d=45 \mu\text{m}$ 、 $\text{aspect ratio}=4$ 水在不同流速下，動態接觸角於不同位置下之變化關係圖

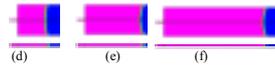


圖 34 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=1.47$ 、 $We_2=0.01$ 、 $V=2 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.096 \text{ ml/min}$ 模擬水在波前觀測區之波前流動變化

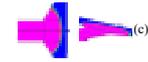


圖 35 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=1.47$ 、 $We_2=0.01$ 、 $V=2 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.096 \text{ ml/min}$ 模擬水在漸開區之波前變化

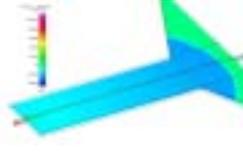


圖 36 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=1.47$ 、 $We_2=0.01$ 、 $V=2 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.096 \text{ ml/min}$ 模擬水的壓力分佈圖

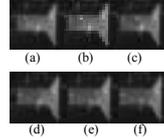


圖 37 $w=800 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=19.99$ 、 $We_2=0.0357$ 、 $Q=0.353 \text{ ml/min}$ 水在波前觀測區之波前流動現象

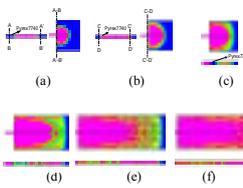


圖 38 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=10.051$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $V=3.76 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.181 \text{ ml/min}$ 模擬 S-60 黏度液在波前觀測區之波前流動變化

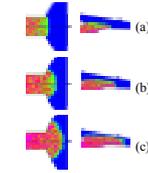


圖 39 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=10.051$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $V=3.76 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.181 \text{ ml/min}$ 模擬 S-60 黏度液在漸開區之波前變化

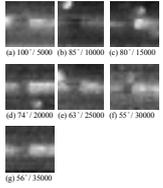


圖 24 $w=45 \mu\text{m}$ 、 $d=180 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.095$ 、 $\text{aspect ratio}=0.25$ 、 $Q=0.15 \text{ ml/min}$ 水在加長之波前觀測區於不同位置拍攝的波前現象

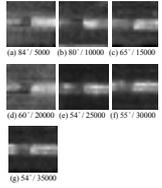


圖 25 $w=45 \mu\text{m}$ 、 $d=180 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.0682$ 、 $\text{aspect ratio}=0.25$ 、 $Q=0.15 \text{ ml/min}$ 水在加長之波前觀測區於不同位置拍攝的波前現象

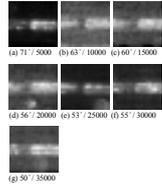


圖 26 $w=45 \mu\text{m}$ 、 $d=180 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.0422$ 、 $\text{aspect ratio}=0.25$ 、 $Q=0.1 \text{ ml/min}$ 水在加長之波前觀測區於不同位置拍攝的波前現象

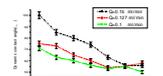


圖 27 $w=45 \mu\text{m}$ 、 $d=180 \mu\text{m}$ 、 $\text{aspect ratio}=0.25$ 水在不同流速下，動態接觸角於不同位置下之變化關係圖

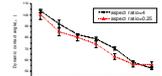


圖 28 $Q=0.15 \text{ ml/min}$ 水在深寬比 4 與 0.25 下之比較關係圖

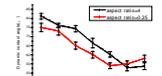


圖 29 $Q=0.127 \text{ ml/min}$ 水在深寬比 4 與 0.25 下之比較關係圖

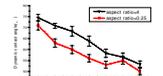


圖 30 $Q=0.1 \text{ ml/min}$ 水在深寬比 4 與 0.25 下之比較關係圖

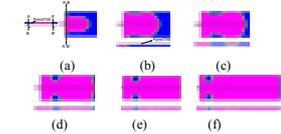


圖 31 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=10.026$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $V=5.2 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.25 \text{ ml/min}$ 模擬水在波前觀測區之波前流動變化

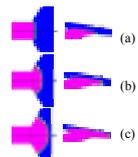


圖 32 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=10.026$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $V=5.2 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.25 \text{ ml/min}$ 模擬水在漸開區之波前變化

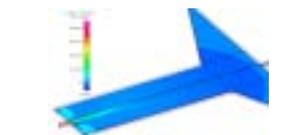


圖 33 $w=400 \mu\text{m}$ 、 $d=40 \mu\text{m}$ 、 $We_1=10.026$ 、 $We_2=0.0682$ 、 $V=5.2 \text{ m/s}$ 、 $Q=0.25 \text{ ml/min}$ 模擬水的壓力分佈圖

