

微流道流場之數值及實驗研究(II)

The Numerical and Experimental Studies of Microchannel Flows(II)

計畫編號: NSC90-2212-E-032-017

執行時間: 90年08月01日至91年07月31日

計畫主持人: 陳慶祥 副教授

私立淡江大學 航空太空工程學系 台北縣淡水鎮英專路151號

一、中文摘要

在微機電系統裏流體與熱傳扮演了一個相當重要的角色, 比如微速度感測器可用來研究紊流(turbulent flow), 微熱交換器、微熱管可在很小的體積內帶走大量熱量, 可用來冷卻各種電子系統如中央處理器、超高容量硬碟機、衛星系統等, 再如生物晶片內, 微流道扮演一個重要的角色等等。在設計這類系統時, 我們必須先研究流體在微小的系統內流動時其物理特性。在目前已公開發表的許多有關微流道的實驗數據顯示, 流體在微流道內的流體與熱傳特性與在一般我們習慣的大流道內有相當程度的差異, 可見我們對微流道內的流體及熱傳特性尚未充分瞭解, 然而這方面的物理知識是我們設計牽涉到流體的微機電元件或系統所不可或缺的。

本研究的第一個目的在以物理現象的解析及數值模擬配合已發表的實驗數據, 來預測及解釋在微流道內紊流流場的流體及熱傳現象。另外, 微流道內流體的物理量量測也有實驗上的困難, 本研究的第二個目的在提出以一套新的微流道內物理量的實驗量測技術, 並將實驗量測結果與數值預測做一比較及提出說明。

關鍵詞: 微機電系統、微流道

Abstract

Fluid mechanics and heat transfer plays an important role in micro-electro-mechanical systems (MEMS). For example, micro-velocity sensors can be used in the study of turbulent flows. Micro heat exchangers and micro heat pipes have high heat removing capability in small space and are suitable candidates for the cooling of electronic components and systems such as electronic chips, ultra high capacity hard disk drives, satellites, etc. Micro-channels are an important ingredient in bio-chips.

The knowledge and understanding of the physical behavior of flow in these systems is essential in designing these systems. If the fluid mechanics and heat transfer characteristics of micro-channel flows are similar to that in traditional (larger sized) channel flows, then the

knowledge and empirical formulae accumulated for the traditional channel flows can be applied directly to micro-channel flows. According to quite a few published experimental data on micro-channel flows, the fluid mechanics and heat transfer characteristics of such flows differ considerably from that of traditional channel flows. We still lack the knowledge and understanding of the reasons of these discrepancies. But these are essential in designing micro systems that involve fluid mechanics and heat transfer.

The first objective of this project is the attempt to understand the physical behavior of micro-channel flows and the explanations of the discrepancies between micro and larger channel flows by using numerical simulations with the aid of published experimental data.

Currently, most micro-channels use silicon as the base material and fabricate the channel by the bulk micro-machining process. This manufacturing process makes the inner wall rougher and it is not easy to fabricate axis-symmetric components by this process. Also, the pressure measurement is more difficult and its accuracy is lower. The second objective of this project is to propose a new manufacturing process that makes fabricating micro axis-symmetric components much easier. The inner wall of the components is smoother. We will also propose a new pressure measurement technique for microchannel flows. This new technique will give better accuracy than the methods proposed by the other researchers.

Keywords: Micro-electro-mechanical system, micro-channel flow

二、前言

有鑑於實驗上的困難度和準確性的問題, 利用數值分析來研究在微流道紊流流場中流體流動的現象是另一個比較好的方法。

Choi[1]量測在微圓管中流場為層流和紊流時的摩擦因子, 實驗的微圓管直徑範圍介於3到81 μm 。他發現在層流時 $f \cdot Re = 53$ 而非64; 在紊流場中所得到的摩擦因子也比普通大圓管所預測的值來的低。在1994年 Yu[2]量測微圓管在層流及紊流流場下的摩擦及熱傳

效果，層流所使用的微圓管管徑為 19.6 與 52.1 μm ，實驗結果 $f \cdot \text{Re} = 50.13$ 。而紊流所使用的微圓管管徑為 52.1 與 102 μm ，實驗結果 $f \cdot \text{Re}^{1/4} = 0.302$ 。實驗結果摩擦因子都比傳統大管的經驗值還要低。而熱傳的實驗結果顯示，微小圓管的熱傳效果比一般大管的熱傳效果要來的好。

Mala *et al.*[3]，利用長短管相減之方法，可扣除水頭損失，求得 ΔL 段之 $f \cdot \text{Re}$ 值。Tai [4] 利用微機電製程，直接在矽晶片微流道上蝕刻出更微小的流道，將流體引導到壓力感測器，直接量取流道內的壓力值。

Xu[5] 等人使用有限體積的數值計算方法來求解在微圓管流中完全發展的液體紊流流場。利用 one-equation 紊流模式並加以修正來求流道內速度和紊流動能能量分佈，數值計算跟實驗結果相當吻合。

本計畫的實驗主要分成二部分，第一部分測試不可壓縮流體：水，在不同管徑之微小圓管內的流場分析。另一部份本實驗設計一套方法，使其可量測到流道各段之管壁壓力，而我們將使用高分子薄膜壓電材料 (PVDF)，利用其受外力時，會將機械能轉為電能之特性，量測微流道內部之流場壓力分布狀況。

在本計畫數值計算方面，我們利用邊界層方程式，並分別利用 Cebeci-Smith 以及 Baldwin-Lomax 兩種紊流模式，在不針對紊流模式做任何修正的情況下，計算可壓縮流在微流道中紊流流場的流力跟熱傳效果，並與傳統大管比較其差異。

三、實驗方法

第一部分，微小圓管流道取 BLAUBRAND 玻璃毛細管，內徑分別為 647 μm 、289 μm ，長 127mm 做測試 (accuracy $\leq \pm 0.3\%$ ， $\text{Ra}=0.0051 \mu\text{m}$ ，再現性 reproducibility $\leq \pm 0.3\%$)，以寶麗膠 (不飽和聚酯) 封裝流道，避免流道外壁因測試流體壓力過大而導致破裂。將封裝好之待測流道架設於測試設備上，其測試設備如圖一所示，利用調壓閥控制高壓氮氣瓶之出口壓力，氮氣進入鋼瓶中緩衝並施壓於鋼瓶中之流體 (水)，使其進入待測微小圓管流道，於流道進口處量測其入口壓力 (psi)，出口量測其質流量 (g/s)，分別記錄各組不同入口壓力與質流量後，將測試流道長度截短，重複上述步驟，再將長、短管數據相減，得出之長、短管進口壓力值差 (Δp) 與長度差 (ΔL)，可推導出不同管徑流道之 $f \cdot \text{Re}$ 值，藉此探討流場在不同管徑之變化。

第二部分，使用厚度 100 μm 之高分子壓電薄膜 PVDF (聚偏二氟乙烯)，上下金屬鍍層

為 Cr 與 Al 做導電層，利用壓電材料受外力變形，產生電荷之原理可量測流道各段之壓力。實驗方法為，以微機電製程於矽晶片上製作凸起之矩形微流道結構，用熱壓印技術將矽晶片上之微流道轉印至壓克力 (PMMA) 上，將 PVDF 壓電材料封於流道上，以另一片 PMMA 加以封裝成形後架於測試系統上，測試流體為空氣。利用調壓閥控制空氣壓縮機之出口壓力，使流道中空氣壓力施加於 PVDF 壓電材料，於固定進口壓力下，可量取一電壓值，對應各點壓電材料之 V (電壓) - P (壓力) 校正曲線，可得到一壓力值為流道量測段內部之參考壓力。

四、數值方法

本研究中利用兩種不同紊流模式在微圓管流場，計算結果將與傳統大管的經驗公式作比較。工作流體為氮氣。出口壓力為一大氣壓 100.8kPa。進口壓力隨著不同的雷諾數而有所不同。

1、統禦方程式

因為在模擬微圓管中，其長度和直徑比值相當的大，因此整個流場假設為一個穩態、軸對稱的可壓縮邊界層方程式。此邊界層方程式無法準確的來模擬入口處的流場，但是此範圍很小，大部分來說一般都小於管長的百分之五。無因次化的統禦方程式描述如下：

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tilde{r}} \frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (\tilde{r} \tilde{\rho} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} (\tilde{\rho} \tilde{u}) = 0 \\ & \tilde{\rho} \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{\rho} \tilde{v} \frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \\ & = -\frac{d\tilde{p}}{d\tilde{x}} + \left(\frac{1}{\text{Re}} + \frac{\mu_T}{\rho_{in} a_{in} D} \right) \left[\frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{\tilde{r}} \frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_{in} a_{in} D} \left(\frac{1}{\tilde{r}_\eta} \right)^2 \frac{\partial \mu_T}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \right. \\ & \quad \left. \tilde{\rho} (\tilde{u} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \eta}) \right] \\ & = (\gamma - 1) \tilde{u} \frac{d\tilde{p}}{d\tilde{x}} + \left(\frac{1}{\text{Re}} + \frac{\nu_T}{a_{in} D} \right) (\gamma - 1) \left(\frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \right)^2 \\ & \quad + \left(\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} + \frac{\nu_T}{a_{in} D} \cdot \frac{1}{\text{Pr}_T} \right) \left[\frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \eta} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{\tilde{r}} \frac{1}{\tilde{r}_\eta} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \eta} \right] + \frac{1}{\text{Pr}_T \rho_{in} a_{in} D (\tilde{r}_\eta)^2} \frac{\partial \mu_T}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \eta} \\ & \tilde{p} = \tilde{\rho} \tilde{T} \end{aligned}$$

2、紊流模式

本文的研究中，採用兩種常用的

Mixing-Length 紊流模式，Cebeci-Smith 和 Baldwin-Lomax 紊流模式，這兩種紊流模式除了適合用來解邊界層問題外，另外就是這兩種模式原理比較簡單，而且準確度也高，運算速度也比較快，也因此常被使用來解紊流流場問題。以下就是我們所使用的兩種紊流模式公式：

(1) Cebeci-Smith 紊流模式

Inner Layer:

$$v_{T_i} = l_{\text{mix}}^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$l_{\text{mix}} = \kappa y [1 - e^{-y^+ / A^+}]$$

Outer Layer:

$$v_{T_o} = \alpha U_e \delta^+ F_{Kleb}(y; \delta)$$

$$F_{Kleb}(y; \delta) = [1 + 5.5 \left(\frac{y}{\delta} \right)]^{-1}$$

Closure Coefficients:

$$\kappa = 0.4, \quad \alpha = 0.0168, \quad A^+ = 26$$

式中 δ 為邊界層厚度。

(2) Baldwin-Lomax 紊流模式

Inner Layer:

$$v_{T_i} = l_{\text{mix}}^2 |\omega|$$

$$l_{\text{mix}} = \kappa y [1 - e^{-y^+ / A_o^+}]$$

Outer Layer:

$$v_{T_o} = \alpha C_{cp} F_{wake} F_{Kleb}(y; y_{\text{max}} / C_{Kleb})$$

$$F_{wake} = \min[y_{\text{max}} F_{\text{max}}; C_{wk} y_{\text{max}} U_{\text{dif}}^2 / F_{\text{max}}]$$

$$F_{\text{max}} = \frac{1}{\kappa} \left[\max_y (l_{\text{mix}} |\omega|) \right]$$

Closure Coefficients:

$$\kappa = 0.04, \quad \alpha = 0.0168, \quad A_o^+ = 26$$

$$C_{cp} = 1.6, \quad C_{Kleb} = 0.3, \quad C_{wk} = 1$$

ω 在本式中為渦漩向量的大小， $\omega = |\partial U / \partial y|$ 。而 U_{dif} 為速度在邊界層之最大值

3、數值程序

本文計算程序如下所描述，第一，我們觀察到通過微圓管的每一個垂直切面上的質流率為一個定值。進口的壓力、溫度為已知，並且假設一個質流率當作起始條件。求解過程會沿著圓管軸向方向前進，在前進的每一個計算點上壓力梯度將會一直的被重複疊代修正直到滿足總體的質量限制。這過程將會利用 Newton-Raphson 方法(Tannehill *et al.* [9])來處理

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_{n+1} = \left(\frac{dp}{dx} \right)_n - \frac{\dot{m}_n}{\dot{m}_n - \dot{m}_{n-1}} \left[\left(\frac{dp}{dx} \right)_n - \left(\frac{dp}{dx} \right)_{n-1} \right]$$

上式方程式顯示出質流率 \dot{m} 為壓力梯度的一個函數。通常經過三至四次的疊代運算之後就能達到誤差 $|\dot{m}_{n+1} - \dot{m}_n| / \dot{m}_n \leq 10^{-5}$ 的條件，計算出正確的壓力梯度值。

第二，出口壓力為已知的大氣壓力，而一開始我們假設一個進口的質流率，當我們從進口處計算至出口處時，如果出口處的壓力值比大氣壓來的低，顯示出我們當初猜入口處的質流率過大；反之，如果計算出出口處的壓力值比大氣壓來的高，則顯示出我們當初猜的質流率過小。而這時候便可以利用 Newton-Raphson 法來求得正確的質流率，使得出口的壓力跟大氣壓力吻合。

本文採用完全隱性的方法來離散動量及能量方程式，它的優點是可以無條件的收斂 [9]。差分方程式中非線性的項可以用遞延係數的方式來線性化。電腦計算所產生的誤差為 $O(\Delta x) + O(\Delta r)^2$ ，使用更小的網格點可以改善誤差值。本文採用均勻網格點，徑向 41 個網格點，軸向 20001 個網格點。

五、結果與討論

第一部分測試管徑為 $647 \mu\text{m}$ 、 $289 \mu\text{m}$ 之微圓管流動，實驗結果如圖二及圖三所示，大管徑 $647 \mu\text{m}$ 之平均 $f \cdot \text{Re} = 59$ 較接近理論值 64，小管徑流動 $289 \mu\text{m}$ 之平均 $f \cdot \text{Re} = 58$ 略小於管徑 $647 \mu\text{m}$ 之 $f \cdot \text{Re}$ 值。第二部分，製作 $270 \mu\text{m} \times 270 \mu\text{m}$ ，長 100mm 之方形流動，於進口距 66.6mm 處置一 PVDF 壓電材料，其校正曲線如圖四所示，流動進口壓力與對應電壓之流動內壓力曲線如圖五所示。

數值模擬利用兩種不同的紊流模式求解氮氣分別在 500mm、50mm、5mm、0.5mm 以及 0.05mm 不同的管徑下，而且微圓管長度為直徑的一千倍的微流動之流力與熱傳現象。從圖六摩擦因子的計算結果與經驗公式的比較可以發現，當管徑在 500 和 50mm 的時候，模擬計算的結果和 Blasius 在平滑圓管中紊流流場所得到的經驗公式 $f \cdot \text{Re}^{0.25} = 0.3164$ 相當的接近。而隨著微圓管直徑的縮小， $f \cdot \text{Re}^{0.25}$ 的計算結果與經驗公式的誤差也就愈來愈大。

圖七所示為 Nu 值的模擬計算結果與 Dittus-Boelter 經驗公式比較。由圖七中發現圓管管徑在 500 和 50mm 時模擬計算出的 Nu 值跟經驗公式很接近，而圓管管徑縮小計算所得到的 Nu 值越低，而且與經驗公式比較誤差更大。

從模擬計算得到的結果顯示，如果利用計算傳統大管的紊流模式，圓管管徑從大尺寸縮

小到微圓管尺寸的時候，我們可以發現在微圓管流道中所得到的結果遠比傳統大管的經驗公式相差甚遠。可見用在傳統大管的紊流模式應用到微圓管流道時候，原本的紊流模式勢必要做某種程度的修正，才可以應用在微圓管流道紊流流場的數值模擬計算上。

六、結論

實驗方面，首先我們藉由相同管徑，不同圓管長度的量測方法來計算出微圓管流道的 $f \cdot Re$ 值，也證實了在微圓管流道中 $f \cdot Re$ 比一般傳統大管的 $f \cdot Re = 64$ 要來的低。另外我們也已經可以成功的利用 PVDF 壓電薄膜材料來量測微流道內壁所承受的壓力值。

數值計算方面，不論在流力或是熱傳的計算上，我們都可以發現，適合傳統大管的紊流模式應用到微圓管流道時候，紊流模式必須要做某程度的修正，才能比較符合微小圓管紊流流場的實際狀況。

誌謝

本研究蒙行政院國家科學委員會經費支援（計畫編號：NSC90-2212-E-032-017），謹致謝忱。

參考文獻

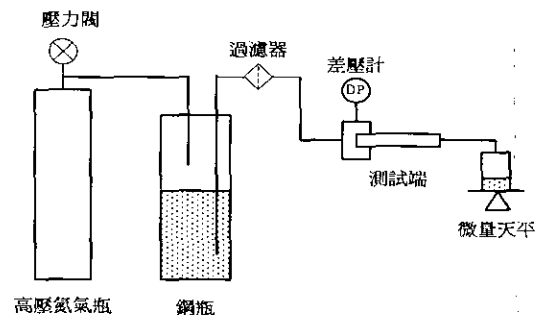
- [1] Choi, S.B., Friction factors and heat transfer in microtube, PhD thesis, Louisiana Tech University, Louisiana, 1991.
- [2] Duli Yu, M. S., The Effects of The Prandtl Number in Micro Heat Transfer, PhD thesis, Louisiana Tech University, Louisiana, 1994.
- [3] Gh. Mohiuddin Mala, Dongqing Li, Flow characteristics of water in microtubes, International Journal of Heat and Fluid Flow 20 (1999) 142-148.
- [4] Jianqiang Liu & Yu-Chong Tai, MENS for Pressure distribution studies of gaseous in microchannels, IEEE 1995.
- [5] D. Xu, T. Y. Ng, L. S. Pan, K. Y. Lam and Hua Li, "Numerical simulations of fully developed turbulent liquid flows in micro tubes", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 11, pp175-180, 2001

[6] David C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd ed. DCW Industries, Inc., 1998

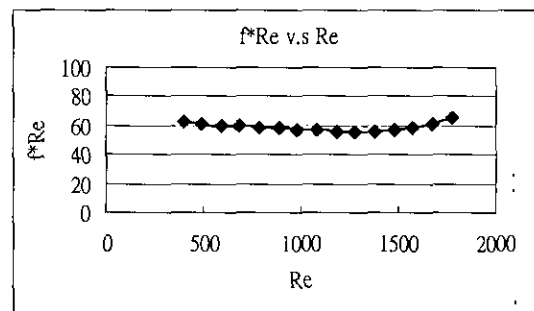
[7] Robert W. Fox and Alan T. McDonald, *Introduction to Fluid Mechanics*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 1994

[8] Frank Kreith and Mark S. Bohn, *PRINCIPLES OF HEAT TRANSFER*, 5th ed., West Publishing Company., 1993

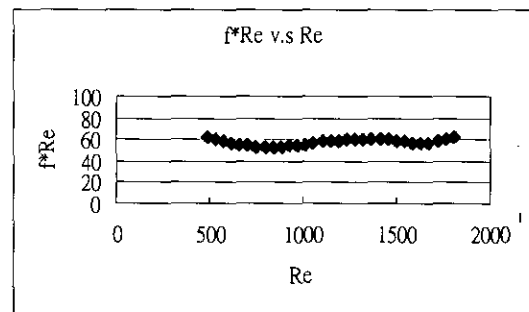
[9] Tannehill, J.C., Anderson, D.A., and Pletcher, R.H., *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 2nd Edition, Taylor & Francis, Washington, DC, pp. 441-508 (1997).



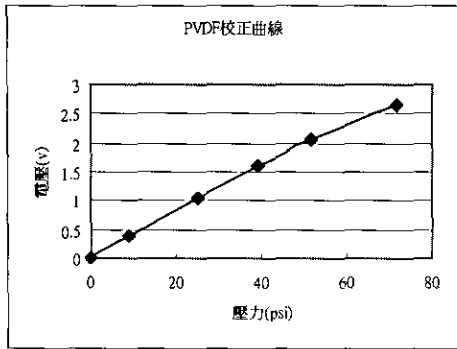
圖一：實驗設備示意圖



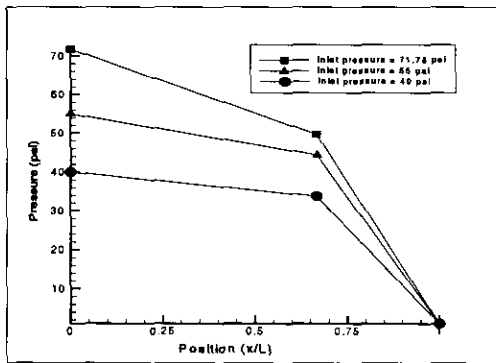
圖二：直徑 647 μm 微圓管 $f \cdot Re$ 實驗值



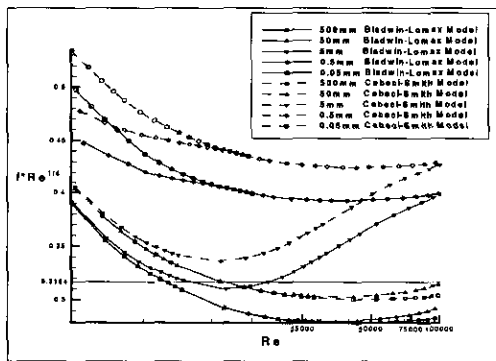
圖三：直徑 289 μm 微圓管 $f \cdot Re$ 實驗值



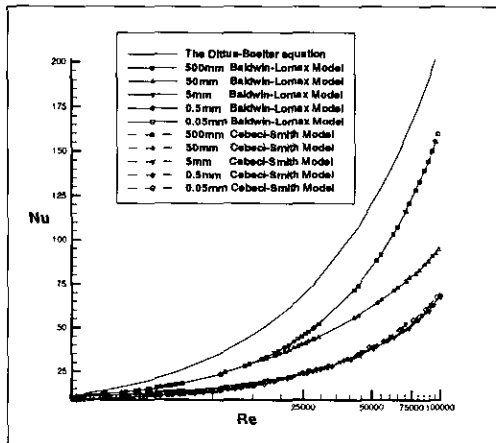
圖四：壓電薄膜材料 PVDF 校正曲線



圖五：入口壓力對應流道量測壓力圖



圖六：兩種紊流模式、五種不同管徑數值模擬計算 $f \cdot Re^{0.25}$ 結果與經驗公式之比較



圖七：兩種紊流模式、五種不同管徑數值模擬計算 Nu 值與經驗公式之比較