

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

智慧型微冷卻系統之熱流技術研究(1)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2218-E-032-003-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：淡江大學機械工程研究所

計畫主持人：杜文謙

計畫參與人員：王維德，陳育堂，康尚文

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 24 日

微圓管內空氣流實驗研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 91 - 2218 - E - 032 - 003 -
執行期間： 91年8月1日至 92年7月31日

計畫主持人：杜文謙
共同主持人：康尚文
計畫參與人員：王維德 陳育堂 康尚文

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：
赴國外出差或研習心得報告一份
赴大陸地區出差或研習心得報告一份
出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學

中華民國 92 年 10 月 13 日

摘要

本文主要是以空氣為工作流體，研究探討空氣在微圓管中之流力性質，利用兩種不同尺寸之玻璃微圓管進行實驗分析與討論，其水力直徑分別為 287 μm 和 409 μm 。並利用光學顯微鏡及影像處理技術分析得到玻璃微圓管的真圓度偏差皆在 2% ~ 4%；以表面形貌儀 (KLA-Tencor α step-500) 測得微圓管內部之表面粗糙度皆低於 150 \AA ，得以作為流力分析之重要參考依據。

考量工作流體具壓縮性質，故實驗結果顯示，無論是層流區域或紊流區，皆可以 Fanno-line flow 機制分析，所得之平均摩擦因子 (\bar{f}) 大致皆可與 Poiseuille ($f = 64/\text{Re}$) 和 Blasius equations ($f = 0.316/\text{Re}^{0.25}$) 吻合；並可顯現出研究成果之連貫性與一致性。

關鍵詞：玻璃微圓管、真圓度、粗糙度、壓縮流體、Fanno-line flow 機制、平均摩擦因子

Abstract

Air flow through microtubes with diameters ranging from 0.287 to 0.409 mm was investigated experimentally. By the precisely image-processing analysis, all our glass microtubes had the roundness deviation less than 4%. Using the Alpha-step profiler, the average surface roughness of the microtube inner wall was found below 15nm. Pressure drop and flow rates were measured to analyze the flow characteristics.

The experimental results indicate that friction factor f obtained from Fanno-line flow function agree well with Poiseuille ($f = 64/Re$) and Blasius ($f = 0.316/Re^{0.25}$) equations in laminar and turbulent flow.

Keyword : glass microtubes, roundness, roughness, friction factor, Fanno-line flow function

一、前言

1990年 J.Pfahler & J.Harley et al. [1]的研究中，在矽晶片上蝕刻出不同深度的微流道，其深度為 $0.5\mu\text{m}$ 至 $50\mu\text{m}$ ，並以氮氣和氬氣為工作流體，實驗中氣體的流速皆小於音速。其實驗結果發現，摩擦因子呈現紊亂無規律的趨勢；推測其原因，可能為溫度變化所造成。當氣體在微小管中，溫度的微小變化，就可能對氣體產生劇烈的影響，因黏滯係數隨著溫度的升高而增加，所以摩擦係數也較大；另發現微流道中之工作流體有稀薄效應的產生。

在 1991年 Choi[2]使用氮氣當作工作流體，通過 3 至 $81.2\mu\text{m}$ 的微圓管，並量測其熱傳係數、摩擦因子及管壁表面粗糙度，實驗結果發現 $f \times \text{Re} < 64$ (約 53)，顯示流體流經微流道或微圓管時，其流力及熱傳特性與以往我們在傳統大尺寸流道之研究中所發現的特性並不一致。

Warrington 等人[3]於 1995年以氮氣導入 $19\mu\text{m}$ 、 $52\mu\text{m}$ 、 $102\mu\text{m}$ 等不同管徑之不銹鋼微圓管，實驗之雷諾數範圍為 250 至 20000，發現在層流範圍時 $f \times \text{Re}$ 值介於 49.35~51.56 之間，明顯比理論值 64 略低許多，且摩擦因子 f 也小於理論值；但在過渡區 ($2000 < \text{Re} < 6000$)， $f = 0.302 / \text{Re}^{0.25}$ ，則呈現較緩和的趨勢，尤其是接近紊流區時更是明顯。

Mohiuddin-Mala et al. [4]1999年以水為工作流體進行實驗，分別對不同之水力直徑 ($50\sim 254\mu\text{m}$)的矽石管 (silica) 和不銹鋼圓管進行流力特性的探討。其利用同一水力直徑不同長度之長短兩微管進行實驗，以期扣除進口水頭損失。結果發現流體流經微管所產生的壓力降高於傳統大管路中所應用的理論值，雷諾數與摩擦因子的乘積亦較傳統管路中所得到的值略高，且摩擦因子亦比傳統理論值來的大。其解釋是由於微圓管內壁粗糙度相較於一般傳統大管路容易影響流場，此外管徑微小化迫使工作流體提早從層流區進入過渡區 (transition regime)。

2001年 B. Sobhan [5]等人，整合許多探討微流道中熱流特性之研究並作詳細分析與討論。其中在流力性質方面，工作流體於層流狀態時，雷諾數與摩擦因子的乘積比 64 大或小，甚至不為定值，都有學者提出，眾多學者不相同的定論。B. Sobhan 歸納為這種現象為測試端的進出口影響、微流道內的粗糙度的不同、微流道尺寸之均勻性、熱與流的邊界條件和實驗設備的不確定因素與誤差，以及量測儀器量測擷取位置的不同所造成。

當流道水力直徑微小化後，其內部的流力特性與大尺寸的流道並不相同，這是眾研究先驅的共識，而在 Mohiuddin-Mala et al. [4]1999年所發表的論文中更點出微流道中的粗糙度為一具有決定性的關鍵角色，是不容忽略的，因此本實驗將以粗糙度為出發點，來探討微圓管內部的流力特性，以期能得到更確切理想的定論。

二、理論分析

由於目前對於微小管路之流力行為特性的探討仍然沒有很明確的定論，亦即許多流力之理論分析仍是沿用大管徑流道的定律來描述。

雷諾數 (Re)

$$Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{黏滯力}} = \frac{\rho_f D_h V_f}{\mu_f} \quad (1)$$

ρ_f : 工作流體的密度

V_f : 工作流體的速度

μ_f : 工作流體的黏度

D_h : 水力直徑

完全發展層流大管子理論(Poiseuille equation) :

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

$f_{laminar}$: 層流區摩擦因子理論值

在 $4000 < Re < 100000$ 之紊流區域其摩擦因子之理論 Blasius correlation :

$$f_{Blasius} = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (3)$$

$f_{Blasius}$: 紊流區摩擦因子理論值

當導入微圓管的工作流體為空氣時，因空氣具有壓縮性質，空氣的流體速度馬赫數 M 是隨著圓管軸向長度變化而變化，且因為所有的 Fanno-line flow 都會有傾向 $M=1$ 的時候，則馬赫數 M 與摩擦因子 f 之關係如下：

$$\int_M^1 \frac{(1 - M^2)}{kM^4 \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)} d(M^2) = \int_0^{L_{max}} \frac{f}{D} dx \quad (4)$$

因雷諾數隨著管長方向變化，故摩擦因子 f 亦隨著產生變化，且圓管的進出口端的質流量相等，因此將整個管長的摩擦因子，定義為平均摩擦因子(mean friction factor \bar{f})，如(5)式所示

$$\bar{f} = \frac{1}{L_{max}} \int_0^{L_{max}} f dx \quad (5)$$

整理合併(4)式與(5)式得：

$$\frac{1-M^2}{kM^2} + \frac{k+1}{2k} \ln \left[\frac{(k+1)M^2}{2(1+\frac{k-1}{2}M^2)} \right] = \frac{\bar{f} L_{\max}}{D} \quad (6)$$

\bar{f} : 圓管內部的平均摩擦因子

M : 馬赫數

k : 常數, 值為 1.4

L_{\max} : 到達音速所需之微管長度

D : 是測試端的管徑

三、實驗架設與程序

實驗架設如圖 1 所示, 其中包括空壓機與儲氣槽, 用來提供一穩定壓力的空氣源; 流量計(Aalborg Instruments & Controls)可測得出口端之氣體流量, 乾燥器與 10 μm 過濾器可除去工作流體中之水分和雜質, 調壓閥用來控制微圓管進口端之壓力, 最後於微圓管出口端裝置一溫度擷取器(TES 1310 TYPE-K), 可隨時監控工作流體之溫度, 以確保實驗於定溫下進行。

圖 2 為測試端結構, 利用保利膠(不飽和聚酯)包覆玻璃微圓管, 因不飽和聚酯具有絕熱的特性, 可確保流道內工作流體不受外界熱源影響, 以期工作流體於定溫下測試; 另不飽和聚酯為一熱固性塑膠, 可保護內部玻璃微圓管, 使其不易斷裂, 與防洩之功能。

實驗用之測試微圓管水利直徑分別為 287 μm (管長 124mm, 94mm)與 409 μm (管長 119mm, 75mm), 如表一所示。圖 3 為玻璃微圓管之端面, 利用影像處理與最小平方圓(Least Squares Circle. LSC)分析法求得微圓進出口管端面之真圓度偏差皆在 4%以下; 且圓管內壁粗糙度低於 150 \AA (KLA-Tencor α step-500), 如表三所示。故測試段之粗糙度與進出口尺寸之均勻性得以控制。

實驗於擷取數據前, 先使工作流體通過圓管微流道連續兩個小時, 以確保管內狀態無殘存之水氣與雜質, 保證工作流體固定之品質, 並可使系統可達穩定狀態以免影響到實驗結果的精確度。每次改變壓力值, 皆須待二十分鐘後, 空氣於微流道中達穩態穩流後, 才可擷取壓力降與流量值。

四、實驗結果與討論分析

本文以空氣為工作流體, 故必須要考慮空氣具有壓縮性, 甚至空氣的流速在馬赫數 0.3 以下, 仍可能具被可壓縮性, 因此利用 Eq.(6)來分析實驗結果得知任意進口流速之之最大 $\frac{\bar{f}L}{D}$ 值。

故藉由 Fanno-line flow 機制, 當氣體由進口端流速 (M_1) 變化至出口端流速 (M_2) 時,

如圖 4 所示，相對應於測試長度 L 可知

$$\frac{\bar{f}L}{D} = \left(\frac{\bar{f}L_{\max}}{D}\right)_{M_1} - \left(\frac{\bar{f}L_{\max}}{D}\right)_{M_2} \quad (7)$$

如此可得玻璃微圓管之平均摩擦因子 \bar{f} 。

藉由 Fanno-line flow 機制分析實驗結果顯示 (圖 5-8), $Re < 2300$ 時平均摩擦因子 \bar{f} 與 Re 的乘積與傳統大管完全展開層流之理論相同, 會呈現定值, 約為 79; 當 $4000 < Re < 10000$ 時, 則與傳統大管完全展開紊流之理論 Blasius correlation (Eq.3) 有一相當吻合的趨勢; 甚至 $2300 < Re < 4000$ 的過渡區範圍仍能取得確定之均摩擦因子值。由此結果得知利用 Fanno-line flow 機制分析具壓縮性質之工作流體, 可得一較連貫性、一致性之結果, 不若傳統理論分析需以雷諾數來判斷工作流體為層流或紊流, 在因應不同之理論。

再藉由 1991 年 Choi[2] 與 1995 年 Duli Yu[3] 以氮氣為工作流體之研究結果以 Fanno-line flow 機制分析之數值並與本研究之結果相比較, 如圖 9 所示。 $Re < 2300$ 時, $f \times Re$ 之大小分別為 89, 72, 79, 雖不一致, 但卻皆比 Poiseuille equation 中之常數 64 大, 此現象就如 B. Sobhan 歸納之眾多因素所造成。當 $2300 < Re < 4000$ 時, 三者皆有相同的趨勢, 可滿足 Blasius correlation, 故雖為不同之工作流體, 但同樣具可壓縮性, Fanno-line flow 機制仍能適用之。再者 Choi 與 Duli Yu 所用之不銹鋼微圓管之水力直徑約為 $50\mu\text{m}$, 但工作流體仍於 $Re=2300$ 後才開始由層流區進入過渡區, 即尺寸微小化後, 層流轉變至紊流並無明顯提前的現象產生。

實驗之不確定性分析 (如表三所示), 在微圓管之流體實驗, 壓力降與流量之量測誤差, 皆小於 $\pm 2\%$; 另其它操作之物理量的最大誤差分別為: 微圓管直徑 $\pm 1\%$, 測試端出口溫度 $\pm 2\%$, 雷諾數 $\pm 2.06\%$, 平均摩擦因子則為 $\pm 2.29\%$ 。

五、結論

實驗之玻璃微圓管, 其水力直徑分別為 $287\mu\text{m}$ 及 $409\mu\text{m}$, 每一種水力直徑都有不同長度的兩根微圓管。根據實驗結果做了以下的結論:

本研究以空氣為工作流體, 考量其具有壓縮性質, 並藉由 Fanno-line flow 的機制分析, 其適用範圍較具連貫性與一致性。因其流速可由任意馬赫數到馬赫數為 1 的範圍, 如此, 可不必利用雷諾數來判斷工作流體為層流或紊流, 以因應不同的理論式。

考慮空氣具壓縮性質, 以一維的壓縮流體理論作分析, 顯示實驗結果無論在層流區 ($Re < 2300$) 或紊流區 ($4000 < Re < 10000$) 所得之平均摩擦因子 (\bar{f}) 大致皆可與 Poiseuille ($f = 64/Re$) 和 Blasius equation ($f = 0.316/Re^{0.25}$) 吻合; 並可顯現出研究成果之連貫性與一致性。

層流區、過渡區與紊流區的區分，實驗結果觀察顯示，工作流體並沒有因水力直徑的變小，而層流($Re < 2300$)提早進入紊流，即無小尺寸效應產生，因此層流區與紊流區的分佈亦與傳統理論的趨勢一致相符合。

參考文獻

1. Pfahler, J., Harley, J., Bau, H. H., and Zemel, J., “Liquid Transport in Micron and Submicron Channels”, *J. Sensors Actors*, A21-23, pp. 431-434, 1990
2. Choi, S. B., Barron, R. F. and Warrington, , “Liquid flow and heat transfer in microtubes”, *ASME, Washington*, DC,1991.
3. Warrington, R. O., Duli Yu, M.S., Barron, R. and Ameel, T., “An experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes”, *ASME/ JSME Thermal Engineering Conference, ASME*, 1 (1995) 523-530.
4. Mala, G. M., Li, D., “Flow Characteristics of Water in Microtubes”, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp.142-148, 1999.
5. Sobhan, C. B. and Garimella, S. V. “A comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels ” , *Microscale Thermophysical Engineering*, 5:293-311, 2001

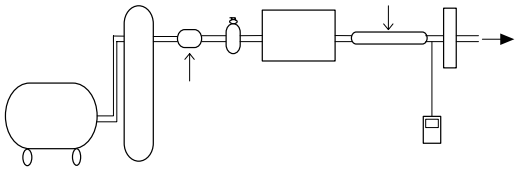


圖 1. 實驗設備示意圖

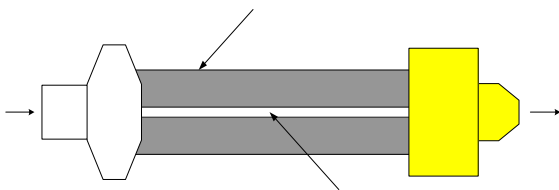


圖 2. 測試端結構示意圖



(a) inlet

(b) outlet

圖 3. 管徑 287 μm 之玻璃微圓管進出口端面相片

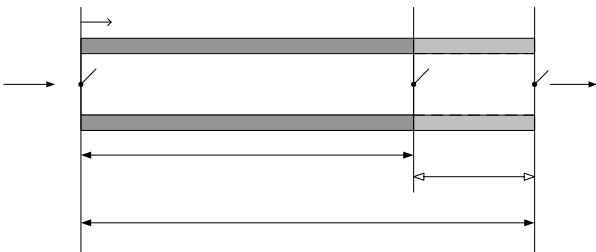


圖 4. Fanno-line flow 分析示意圖

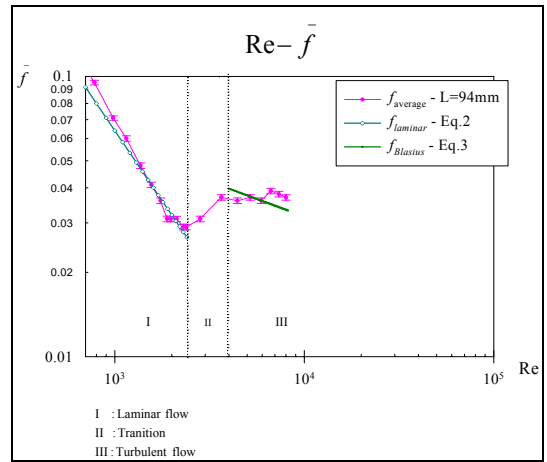


圖 5. Microtube -- $D = 0.287\text{mm}$, $L = 94\text{mm}$

Storage
Cont

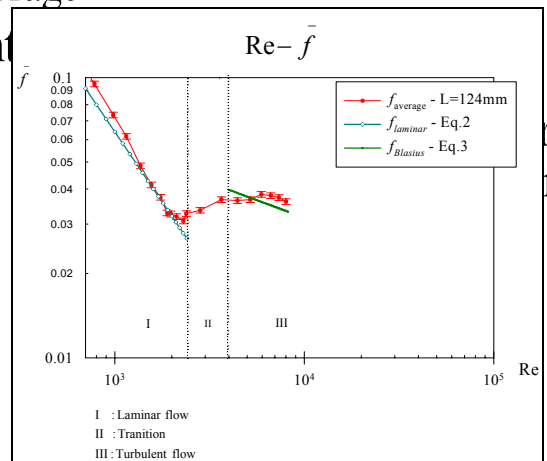


圖 6. Microtube -- $D = 0.287\text{mm}$, $L = 124\text{mm}$

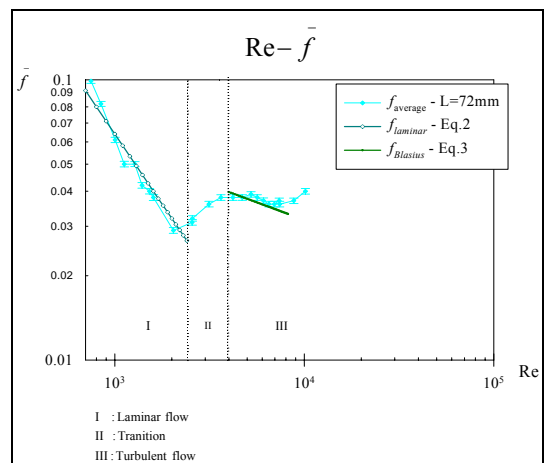


圖 7. Microtube -- $D = 0.409\text{mm}$, $L = 72\text{mm}$

表二 微圓管之粗糙度及真圓度

microtubes				
Diameter	287 μm		409 μm	
surface roughness	140.9 \AA		71.9 \AA	
roundness deviation	inlet	outlet	inlet	outlet
	3.5%	3.8%	2.0%	2.1%

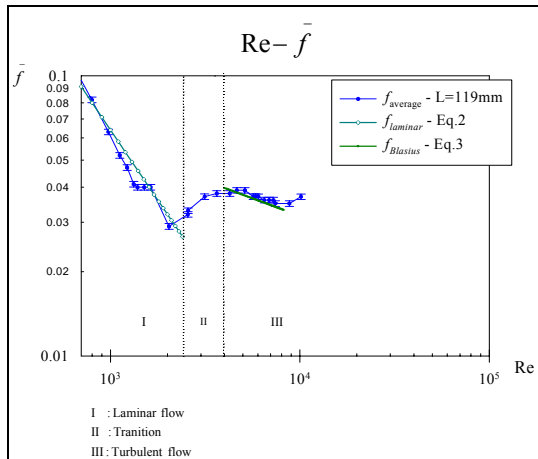


圖 8. Microtube -- D = 0.409mm , L = 119mm

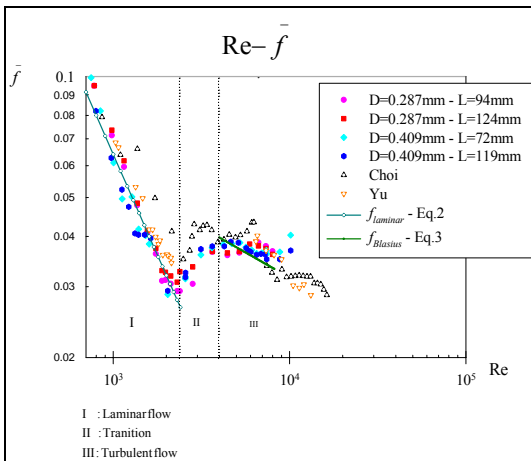


圖 9. 實驗結果與 Choi, Duli Yu 之比較

表三 誤差明細表

Parameters	Uncertainty ($\pm\%$)
Diameter	1.0
Flow rate	2.0
Pressure drop	2.0
Temperature	2.0
Reynolds number	2.06
Mean friction factor \bar{f}	2.29

表一 玻璃微圓管的尺寸規格

內徑	長度
287 μm	124 mm
	94 mm
409 μm	119 mm
	75 mm