

微圓管之熱流分析

陳育堂 林柳絮 廖顯大 張添財 李勝華

德霖技術學院 機械工程學系

摘要

微冷卻技術的開發主要是希望用來解決目前高緻密性的電子元件的散熱問題，包括微冷凍機(micro miniature refrigerators)、微熱管均熱片(micro heat pipe heat spreader)、微型熱交換器(micro heat exchanger)等。

本文以實際測試及理論分析的方式來探討不銹鋼微圓管流道的相變化熱傳性能，特別是針對微管流道強制對流中的汽泡成核機制。

本文實驗以去離子水為工作流體，在水力直徑為 153-508 μm 的不同尺寸下進行測試，探討在不同圓管水力直徑與不同加熱功率下之壁溫與擷取時間變化機制。

關鍵詞：微流道、微圓管、微熱流分析、微圓管內沸騰

Experimental Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microtube

Yu-Tang Chen, Liu-Xu Lin, Shand-Dad Liaw,
Tien-Tsai Chang, and Sheng-Hua Lee

Department of Mechanical Engineering, De Lin Institute of Technology

Abstract

Regarding the analysis of thermal conduction, in the past by using trapezoid, triangle, rectangular micro-channel to study phase change, exclude circular one. Experimental tests and theoretical analysis were conducted to investigate the characteristics of fluid flow for stainless pipe and heat transfer of phase change in micro-channels in this thesis, especially in the mechanism of bubble nucleation.

Distilled water was used as the working fluid and flowed through micro-channels with different hydraulic diameters ranging from 153-508 μm in the experiments. Initial experimental results of thermal conduction got that at the different heat power, the wall temperature and acquired-time relations were obtained in different micro-channels with different hydraulic diameters. During the working fluid to be heated in the inlet until boiling, it is more natural that there are some bubbles to be generated and found at that time to note that the working fluid flowed through micro-channels and accompanied with wall temperature curve decreased rapidly. It would be assumed that bubbles flowed through micro-channel to block heat transmission of the fluid and accompanied with wall temperature curve decreased rapidly, and the frequency of wall temperature curve increased with the heat power. It would be assumed that the bubble numbers were increased with the heat power. If the working fluid to be heated until drying fully out, the wall temperature will slowly close to the maximum value. The wall temperature no longer significantly varied.

Keywords: *microchannels ; microtube ; boiling in microtube ; heat transfer*

壹、前言

Peng & Wang[1]、[2]於 1998 年以實驗和理論分析來探討微流道中的沸騰特性和熱傳現象。試著找出微流道尺寸與幾何形狀對於流體沸騰的影響，特別是微流道中汽泡的形成和成長現象。他們進一步的以熱力學的觀點來分析相的轉換，分析中指出核沸騰在微流道中是近乎不可能發生的。Peng & Wang 以兩個假設的概念”蒸發空間 (evaporating space)”及”虛擬沸騰 (fictitious boiling)”來描述與解釋此物理過程與基本現象。

Mohiuddin-Mala et al.[3]1999 年以實驗方式，分別對水力直徑為 50 至 254 μm 的矽石管 (silica) 和不銹鋼圓管進行流力特性的探討。實驗結果發現流體流經微管和微流道所產生的壓力降高於傳統大管路中所應用的理論值，而形狀因子 (shape factor, C) 亦比傳統管路中所使用的 $f * \text{Re} = 64$ 更高。

Linan Jiang et al. [4] 1999 年現地量測 (in-situ measurement) 的方式，探討氮氣及水通過水力直徑為 40 及 80 μm 之矽質微流道的二相流特性。實驗結果發現當到達臨界熱通量 (critical heat flux) 時，流道壁溫將急遽上升，沒有像大管中有遲滯現象的情形發生，推斷原因為流道水力直徑過小，抑制了汽泡產生，使得流體無法產生核沸騰而汽化，因此導致了壁溫陡升的情形。

蕭聰鑫[5] 2000 年以實驗方式探討矽質微流道的基礎熱流現象，微流道水力直徑 57-267 μm ，幾何形狀為梯形和三角形，工作流體為甲醇。實驗得到流力特性中的摩擦因子大於大管的理論值。 $f_{\text{exp}} / f_{\text{thy}}$ 的分佈近於 0.9-1.6 之間。熱傳實驗中發現，當加熱功率到達臨界成核熱通量時，流體將轉變成完全發展核沸騰，此時將伴隨著流道壁溫急速下降且進出口壓力降陡升的現象，由於微流道水力直徑非常小，並沒有部分核沸騰的情況發生。實驗結果更發現，甲醇的臨界汽泡成核尺寸介於 57-83 μm 之間。

Linan Jiang et al. [6] 2001 年發現三個不同於之前研究的現象：第一，在小到 26 μm 的流力直徑的微流道，給予一很小的電壓，可以觀察到局部的核沸騰；第二，電壓稍大就可以觀察到環狀流；第三，有觀察到汽泡。

貳、熱流分析

本文中，為了方便分析，對於圓管內的流力性質探討作了以下假設：

- a. 穩流 (Steady Flow)
- b. 完全展開層流 (Fully Developed Laminar Flow)
- c. 不可壓縮流 (Incompressible Flow)
- d. 牛頓流體 (Newtonian Flow)
- e. 連續流體 (Continuum Flow)

其中完全展開層流所需要的進口區長度 (Entrance Length) 公式 $\text{Le} = 0.06 \text{Re} D_h$ ，進口區長度約佔流道總長的 30%，避免因過長影響其熱流特性。

一、流力分析

對於研究管內的流力行爲，由於目前對於微小管路的探討仍然沒有很確定的結論，亦即許多計算上的公式仍是沿用大管徑流道的公式再加以修正。

從傳統理論中，壓力降與體積流率相關性採用 Poiseuille flow 公式：

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \Delta P \quad (1)$$

Q ：流體體積流率

ΔP ：壓力降

μ ：工作流體的黏度

從上式(1)是理想狀態下進出口壓降無損失所推導之公式。但在實驗中進出口損失是存在的，而此進出口損失在微管流中不易直接測量的。本實驗採用之方法在每一種管徑，取兩段不同長度它們進出口損失是相同的，一端裝配在相同入口另外一端開口接觸大氣。

對於較短的管長， $l = l_1$ ， $\Delta P = \Delta P_1$ ；

較長的管長， $l = l_2$ ， $\Delta P = \Delta P_2$ ，兩個管子是同樣材質和直徑，在同樣體積流率下，在長度差 $\Delta l = l_2 - l_1$ 下，可得到壓差 $\Delta P = (\Delta P_2 - \Delta P_1)$ ，如此可消除進出口的損失。

$$Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{黏滯力}} = \frac{\rho_f D_h V_f}{\mu_f} \quad (2)$$

ρ_f ：工作流體的密度 (Kg/m³)

V_f ：工作流體的速度 (m/s)

μ_f ：工作流體的黏度 (Kg/m-s)

再來可推得體積流率和雷諾數的關係式：

$$Re = \frac{4 Q}{\pi D v} \quad (3)$$

v ：動能黏滯係數

D ：水力直徑

Q ：體積流率

二、熱傳分析

探討流道中熱流性能的文獻中，不論是大尺寸流道或是微流道，都會討論雷諾數與扭賽數之間的關係，因為能看出流道中工作流體的流況變化：是層流、過渡流、或是紊流。在大尺寸流道時，這個無因次量之間的關係皆已經固定且受肯定，但在微流道中，它們之間的關係卻仍是眾說紛紜沒有確切的定論。

傳統大尺寸流道在計算扭賽數時，通常依循下式：

(一) 在完全展開層流之情況下：

$$\text{Nu} = 1.86(\text{Re Pr})^{1/3} \left(\frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\text{Re}_{D_h} \text{Pr} D_h / L \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} > 2$$

$$0.004 < \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right) < 10, 0.5 < \text{Pr} < 16000$$

(二) 在完全展開紊流情況下：

$$\text{Nu} = 0.027 \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$$6000 < \text{Re}_{D_h} < 10^7$$

$$0.7 < \text{Pr} < 10000, L / D_h > 60$$

三、相變化分析

熱傳分析中工作流體的沸騰相變化對於熱傳性能而言，有大大提高熱通量，並維持系統於穩定溫度中操作的優點。於傳統大尺寸流道中，核沸騰時所產生的汽泡能夠使工作流體造成擾動而提高其熱對流係數，進而提高熱傳性能，但須注意的是沸騰所造成的汽泡容易使流道阻塞而提高壓力降。

熱力學的觀點進行分析，說明物質相穩定的條件之一為 $(\partial P / \partial V)_T < 0$ ，即定溫狀態下壓力與比容呈反比。因此要造成汽泡生成，則必須使 $(\partial P / \partial V)_T \geq 0$ ，進而推導出一個無因次量 N_{mb} 來說明汽泡成核的條件。如下式：

$$N_{mb} = \frac{h_{lv} a_v}{\pi(v'' - v') q'' D_h} > 1 \quad \text{相穩定條件}$$

$N_{mb} > 1$ 時，液體成核條件

h_{lv} ：工作流體潛熱 (KJ/Kg)

a_v ：工作流體汽相熱擴散度 (m^2/s)

v'' ：工作流體飽和汽相比容 (m^3/Kg)

v' ：工作流體飽和液相比容 (m^3/Kg)

q'' ：熱通量 (W/m^2)

D_h ：水力直徑 (m)

公式中說明了成核的相關條件包括有加熱量、工作流體性質、微流道水力直徑等。無因次量 N_{mb} 可以用來描述微流道中液體沸騰的成核特性，使我們易於了解流體的沸騰相變化及熱傳過程。

參、實驗量測方法及步驟

本文主要探討 304W-不銹鋼管中熱傳特性，特別著重於相變化的熱量變化，實驗方式以針筒幫浦(KDS 200P)施加壓力使工作流體通過不銹鋼圓管，施加功率在不銹鋼管入口區使熱傳至工作流體，通過不銹鋼圓管，量測工作流體的溫度、流道壁溫、壓力、流量等。觀察量測數值變化，以判斷微圓管在高熱通量下，其工作流體是否有因沸騰相變化而能帶走熱量。

我們採用去離子水當作工作流體來進行實驗。由於液體的平均自由路徑遠小於氣體，因此流體不連續的影響將不考慮；邊界層假設為無滑動。本實驗所用之不銹鋼管的水力直徑在 $153\mu\text{m} \sim 508\mu\text{m}$ 。詳細尺寸明細如表一所示。

實驗裝置如圖 1 所示，其中包括精密的針筒幫浦 60ml 針筒、流量計、壓力擷取器、壓力感測器、直流電源供應器、六組 thermocouples 量測工作流體進出口溫度、流道壁溫的感測器。針筒幫浦特性列於表二。圖 2 為 thermocouples 位置圖。壓力感測器放置在針筒幫浦前觀測流體流經管子所受的壓力，利用壓力擷取器擷取壓力數值。在測試設備後，針筒幫浦穩定的開始保持所需要的流量且開始量取所需要的壓力。流量可由針筒幫浦直接設定表三為所實驗所設定的體積流率。開始紀錄測試數據前，應先讓工作流體運轉約 10 分鐘，以確保實驗裝置及工作流體皆處於穩定狀態 (Steady State)。當一切就緒後，便可採用已設定之工作流體流量、溫度及加熱量等進行測試，並記錄所有測試結果。

肆、結果討論

本實驗將加熱源裝置於各種不同管徑 $153 \sim 508\mu\text{m}$ 流道進口區前端 4 公分處加熱，在不同功率下量取進出口端流體溫度和流道壁溫的溫度，發現流體溫度和壁溫都隨之上升，之後當工作液體快接近沸騰時溫度有陡升現象，之後完全汽化時呈現平穩狀態，由圖 3 至圖 14 中可以得

知。當工作流體在進口前端處加熱至沸騰時發現汽泡時，這時從溫度擷取器中擷取溫度-時間關係圖，如圖 15 至圖 18、圖 20 至圖 28 可觀察出壁溫有驟降的情形。當提高功率時，汽泡產生速度隨著加熱功率提高變的更快，由圖 16、17、圖 21 至 23、圖 25 至 27 中可看出壁溫呈驟降情形更為頻繁。圖 18、24、27 在加熱功率提高快接近完全汽化時，壁溫呈現出非常不規則的變化，此時擾動情形非常嚴重。加熱至更高功率時，當液體達到完全汽化的階段，此時壁溫呈現非常平穩的趨勢，不會有先前驟降的情形，由圖 19 可觀察出。

另外，由於本實驗在進口區前端加熱，在前端加熱區經沸騰產生汽泡，汽泡會阻礙帶有熱量之工作流體進入管內，因而使管壁獲得之溫度比之前沒有汽泡產生時來的低。

參考文獻

1. Peng, X. F., Hu, H. Y., Wang, B. X., "Boiling Nucleation during Liquid Flow in Microchannels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No.1, 101-106, 1998
2. X Peng, F., Wang, B.X., "Boiling Characteristics in Microchannels/Microstructures", *The 11th Int. Symposium on Transport Phenomena, ISTP-11*, No. 78, pp. 485-491, 1998
3. Mala, Gh. Mohiuddin, Li, Dongqing, "Flow Characteristics of Water in Microtubes", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 142-148, 1999.
4. Jiang, Linan, Wong, Man, Zohar, Yitshak, "Phase Change in Microchannel Heat Sinks with Integrated Temperature Sensors", *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 8, No. 4, pp. 358-365, 1999
5. 蕭聰鑫，"微流道之熱流實驗分析"，碩士論文，淡江大學機械工程研究所，指導教授康尙文博士，民國 89 年七月
6. Jiang, Linan, Wong, Man, Zohar, Yitshak, "Forced Convection Boiling in a Microchannel Heat Sink", *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 10, No. 1, pp. 80-87, MARCH 2001

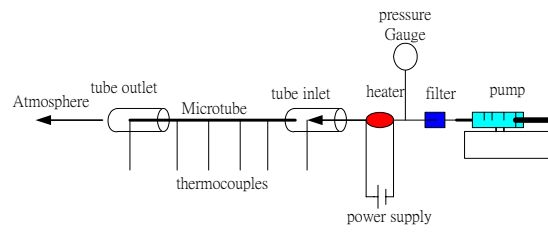


圖 1 實驗裝置圖

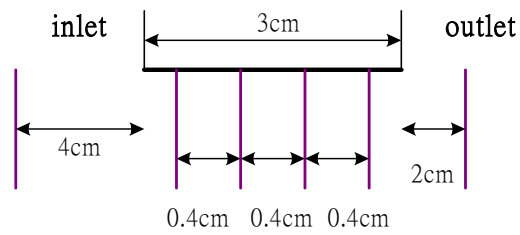


圖 2 thermocouples 位置圖

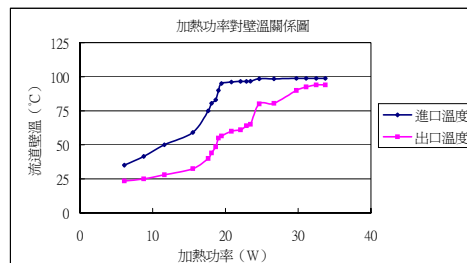


圖 3 加熱功率對進出口溫度關係圖
(水力直徑 $508 \mu m$)

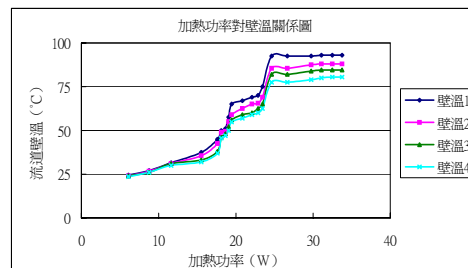


圖 4 加熱功率對壁溫關係圖
(水力直徑 $508 \mu m$)

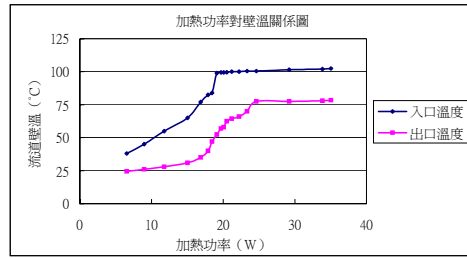


圖 5 加熱功率對進出口溫度關係圖
(水力直徑 303 μm)

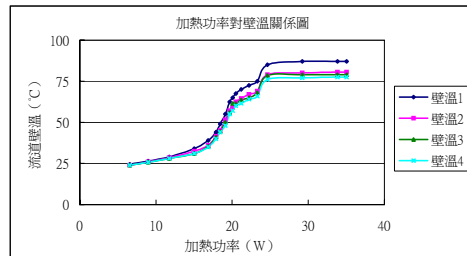


圖 6 加熱功率對壁溫關係圖
(水力直徑 303 μm)

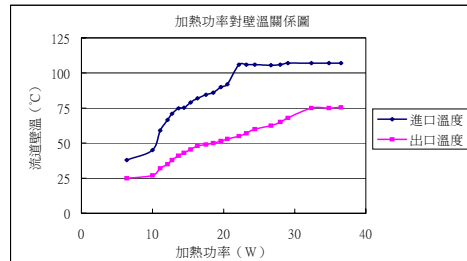


圖 7 加熱功率對進出口溫度關係圖
(水力直徑 254 μm)

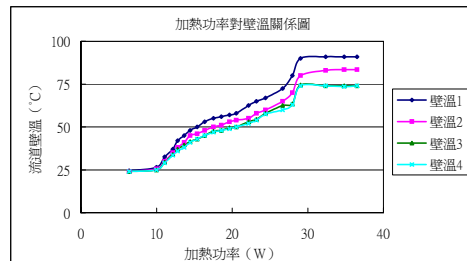


圖 8 加熱功率對壁溫關係圖
(水力直徑 254 μm)

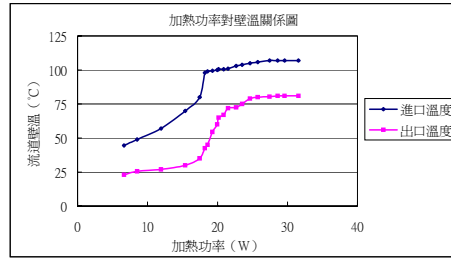


圖 9 加熱功率對進出口溫度關係圖
(水力直徑 $203 \mu m$)

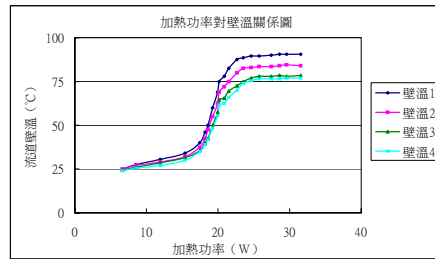


圖 10 加熱功率對壁溫關係圖
(水力直徑 $203 \mu m$)

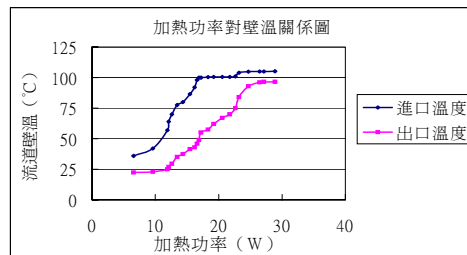


圖 11 加熱功率對進出口溫度關係圖
(水力直徑 $177 \mu m$)

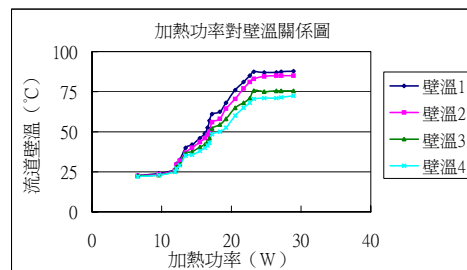


圖 12 加熱功率對壁溫關係圖
(水力直徑 $177 \mu m$)

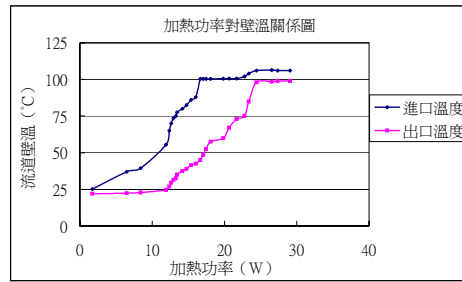


圖 13 加熱功率對進出口溫度關係圖
(水力直徑 $153 \mu\text{m}$)

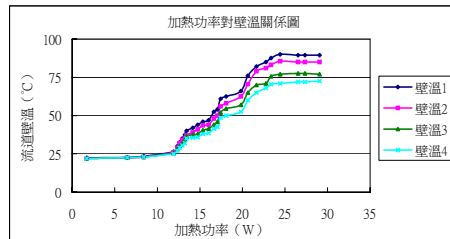


圖 14 加熱功率對壁溫關係圖
(水力直徑 $153 \mu\text{m}$)

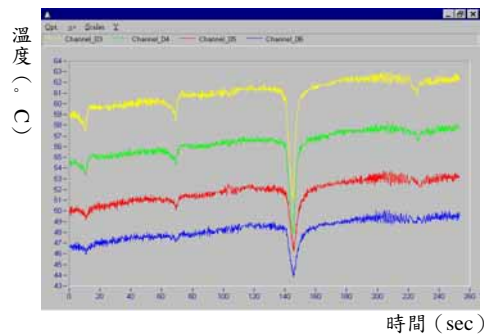


圖 15 $153 \mu\text{m}$ -17.44W 發現
汽泡壁溫變化圖

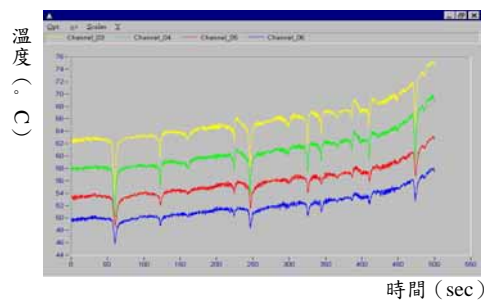


圖 16 $153 \mu\text{m}$ -19.83W 發現
汽泡壁溫變化圖

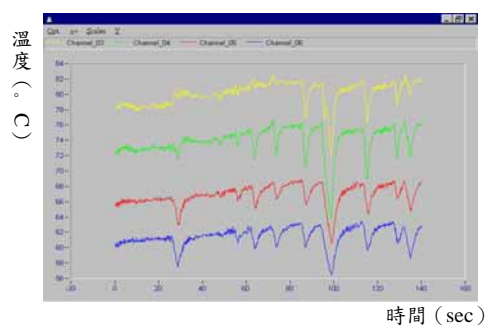


圖 17 153 μ m-22.77W
壁溫變化圖

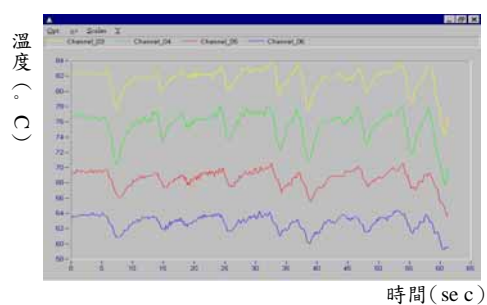


圖 18 153 μ m-26.54W 發生
擾動壁溫變化圖

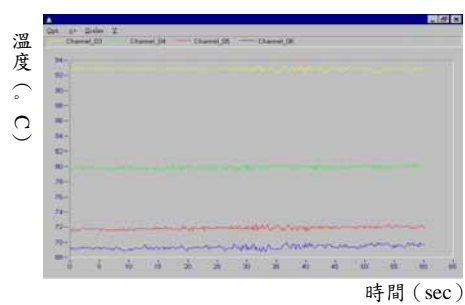


圖 19 153 μ m-29.07W 汽化時
壁溫發生變化圖

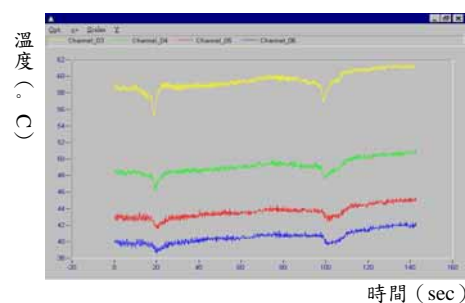


圖 20 203 μ m-17.92W 發現
氣泡壁溫變化圖

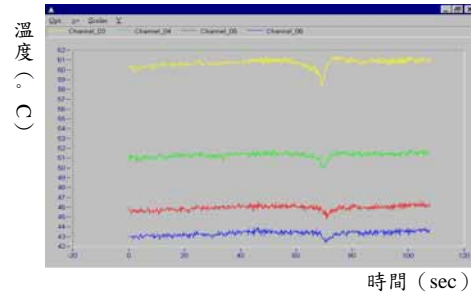


圖 21 203 μ m-18.66W 發現
汽泡壁溫變化圖

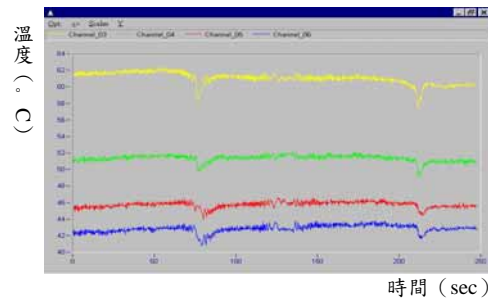


圖 22 203 μ m-20.16W 發現
汽泡壁溫變化圖

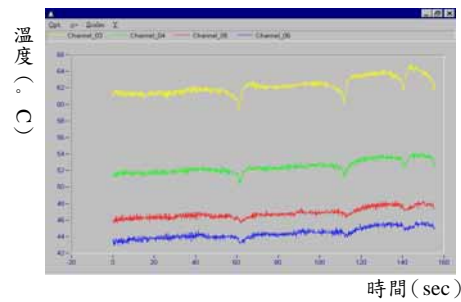


圖 23 203 μ m-21.51W 發現
汽泡壁溫變化圖

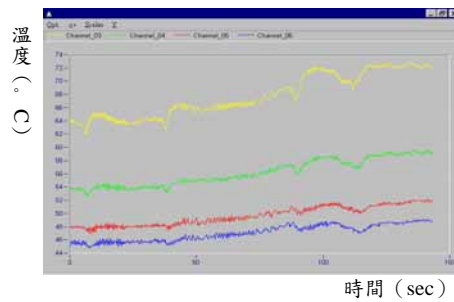


圖 24 203 μ m-27.43W 發生
擾動壁溫變化圖

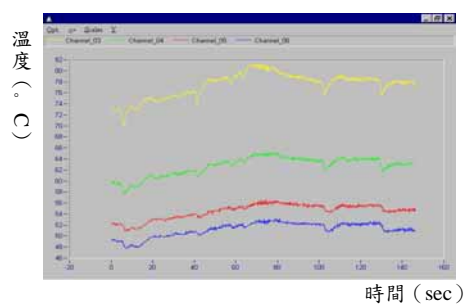


圖 25 508 μ m-17.61W 發現
汽泡壁溫變化圖

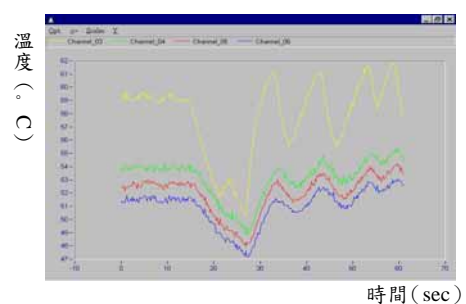


圖 26 508 μ m-18.11W 發現
汽泡壁溫變化圖

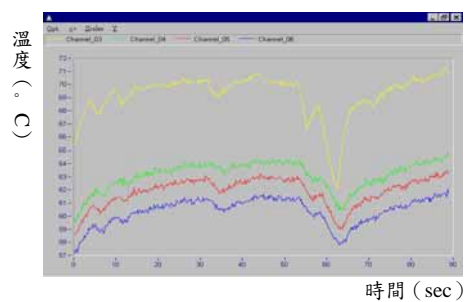


圖 27 508 μ m-18.66W 發現
汽泡壁溫變化圖

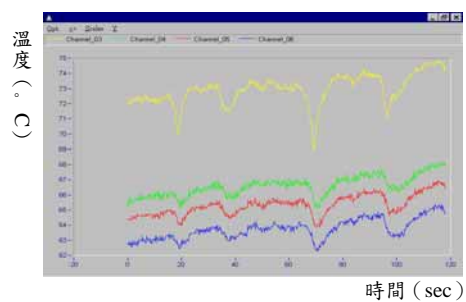


圖 28 508 μ m-19.44W 發生
擾動壁溫變化圖

表 1 各種不同圓管尺寸規格

長度 (μm)	內徑 ID (μm)	外徑 OD (μm)
6	153	305
6	177	330
6	203	406
6	254	508
6	303	635
6	508	813

表 2 針筒幫浦規格表

10 μl 注射空針	最小流速 0.001 $\mu\text{l/hr}$
10ml 注射空針 60ml 注射空針 140ml 注射空針	最大流速 21 ml/min 71 ml/min 147 ml/min
每一微步前進的 距離	0.165micron (1/16 step)
最大步率	1600
最小步率	1 st ep/30sec
精確度	$\pm <1\%$

表 3 不同管徑所採用的體積流率

管徑 (μm)	體積流率(ml/min)
508	1.85
303	1.65
254	1.5
203	1.2
177	1.15
153	1