

國立交通大學
機械工程研究所
碩士論文

黏彈性流體在扁平矩形管道之層流熱傳研究

Laminar Flow and Heat Transfer of Viscoelastic Fluid through a
Rectangular Channel



研究生：褚偉建

指導教授：盧定昶 博士

中華民國九十三年七月

黏彈性流體在扁平矩形管道之層流熱傳研究

Laminar Flow and Heat Transfer of Viscoelastic Fluid through a
Rectangular Channel

研 究 生：褚偉建

Student : Wei-Cheng Chu

指導教授：盧定昶

Advisor : Ding-Chong Lu

國 立 交 通 大 學

機械工程研究所



A Thesis

Submitted to Institute of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

July 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年七月

國立交通大學
機械工程研究所
碩士論文

黏彈性流體在扁平矩形管道之層流熱傳研究

**Laminar Flow and Heat Transfer of
Viscoelastic Fluid through a Rectangular
Channel**



研究生：褚偉建

指導教授：盧定昶 博士

致謝

感謝指導教授盧定昶博士在這兩年時間內對學生的諄諄教誨，不僅讓個人在學業上收穫良多，對於生活上、待人處事方面等問題也提供給良好的建議。另外要感謝中央大學教授楊建裕博士以及系主任傅武雄博士在論文上給予指導與建議，使論文內容更加完整。

感謝余致廣學長與宋炳彥學長在實驗上給與許多建議與規劃，並在我遇到困難時給予莫大的幫助，使得我能順利進行實驗。感謝實驗室中的同窗家棟、家宏、妤綺的相互切磋勉勵，也感謝學弟們聖良、智敏、岳章、中彥在我實驗期間給予的幫忙與鼓勵。

感謝交大網球隊的伍啟萌教練與官振鵬學長，在球技上與做人處事給予我很大的指導，還有球隊的所有同伴們，在交大的日子裡，有了你們讓我的生活更豐富。

感謝我的家人讓我沒有煩惱地求學，感謝所有曾經關心我幫助我鼓勵我的人，僅以此論文獻給你們。

褚偉建 謹誌於新竹交大

黏彈性流體在扁平矩形管道之層流熱傳研究

研究生：褚偉建

指導教授：盧定昶

國立交通大學機械工程研究所

摘要

黏彈性流體(非牛頓流體)在扁平矩形管道中流動時,會因為第二正向力差的原因而使流體產生二次流的現象,此現象增加了流場的混合,因此使熱傳係數提升,但也因為黏彈性流體的黏性現象與壁面產生較大的剪切力,使得壓力降也比純水(牛頓流體)高。本論文是以實驗方法探討純水,以及濃度為 500ppm、1000ppm、1500ppm 和 2000ppm 的聚丙醯胺水溶液,在矩形管道中廣義雷諾數 80~300 的層流範圍內,三種不同的邊界條件:上板加熱,下板加熱,與上下板同時加熱的情況下的熱傳與壓降關係。實驗結果顯示隨著質量流率的增加,聚丙醯胺高分子溶液的紐塞數會增高,與純水比較,上板加熱有較好的熱傳增加效果。而當濃度大於 1000ppm 時,所產生的壓力差降增加幅度遠高於熱傳增強效果。在此廣義雷諾數範圍內,同時考慮熱傳增加與壓力差增加的情況下,以邊界條件為上板加熱,水溶液濃度為 500ppm 和 1000ppm 時,在相同質量流率的情況時比較純水,熱傳增強效益比,可分別達到 1.22 與 1.19 倍。

Laminar Flow and Heat Transfer of Viscoelastic Fluid through a Rectangular Channel

Student : Wei-Cheng Chu

Advisor : Ding-Chong Lu

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Secondary flows exist due to second normal stress difference when a viscoelastic fluid flows in a rectangular channel. Therefore, the heat transfer coefficient is enhanced as a result of fluid mixing. However, viscoelastic fluids will have higher pressure drops than pure water because of viscosity effects. In this research, experimental studies on the laminar heat transfer and pressure drop of pure water, 500ppm, 1000ppm, 1500ppm and 2000ppm aqueous polyacrylamide solutions have been conducted. The range of values of general Reynolds number lies between 80~300. There are three different boundary conditions including upper heated wall, lower heated wall and upper-lower heated walls. Present results showed that values of local Nusselt number were enhanced with increasing mass flow rates with higher heat transfer enhancement for upper heated wall. On the contrary, when the concentrations of aqueous polyacrylamide solutions were higher than 1000ppm, the magnitudes of pressure drop increment were much larger than those of heat transfer increment at the same mass flow rates. In addition, when we considered both heat transfer and pressure drop increments with upper heated wall at the same mass flow rates, the maximum heat transfer enhancement indexes of 500ppm and 1000ppm aqueous polyacrylamide solutions were 1.22 and 1.19 respectively.

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
表目錄	V
圖目錄	VI
符號說明.....	VIII
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 牛頓與非牛頓流體簡介	2
1.3 黏彈性流體簡介	3
1.4 文獻回顧.....	4
1.4.1 數值方法	4
1.4.2 實驗分析	6
1.4.3 黏彈性流體流動行為	8
1.4.4 高分子濃度與黏度的關係	9
1.4.5 黏彈性流體矩形管內二次流對熱傳的效應	10
第二章 實驗設備與步驟	17
2.1 工作流體	17
2.2 實驗設備	17
2.3 實驗量測儀器	19

2.4	實驗步驟	20
2.5	摩擦因子與熱傳係數之計算	21
第三章 實驗結果與討論		29
3.1	實驗條件	29
3.2	流變性質	29
3.3	壓力差降結果與摩擦因子	29
3.4	熱傳結果	31
3.5	熱傳增強效益比	37
第四章 結論		65
附錄 A 實驗不準度分析		67
參考文獻		71



表 目 錄

表 1-1	公式 1.11 中的 a,b 值.....	10
表 3-1	水的物理性質表.....	39
表 3-2	聚丙醯胺酸水溶液在不同濃度下的相關 power law index(n) 與 consistency index(K)值.....	40
表 3-3	壓力差值(Δp)與質量通率(G)的線性回歸方程式.....	40
表 3-4	已發展區邊界條件為上板加熱的熱傳與壓降值.....	41
表 3-5	已發展區邊界條件為下板加熱的熱傳與壓降值.....	42
表 3-6	已發展區邊界條件為上下板同時加熱的熱傳與壓降質.....	43



圖 目 錄

圖 1-1 牛頓與非牛頓流體的差異圖	11
圖 1-2 正向力的關係	12
圖 1-3 Weissenberg 效應	12
圖 1-4 聚丙醯胺水溶液在邊界條件為上層加熱的速度場	13
圖 1-5 聚丙醯胺水溶液在邊界條件為上層加熱的溫度分佈	14
圖 1-6 TDCF 流體在邊界條件為下層加熱的速度場	15
圖 1-7 聚丙醯胺水溶液在邊界條件為上層加熱的速度場	15
圖 1-8 牛頓流體與黏彈性流體的旋轉流場差異圖	16
圖 2-1 聚丙醯胺的結構式	25
圖 2-2 實驗設備示意圖	25
圖 2-3 整流區示意圖	26
圖 2-4 測試段示意圖	27
圖 2-5 混合區示意圖	28
圖 3-1(a) 聚丙醯胺水溶液黏度與剪切率關係圖(30°C)	44
圖 3-1(b) 聚丙醯胺水溶液黏度與剪切率關係圖(35°C)	44
圖 3-2 工作流體在層流狀態下矩形管道內的質通量與壓力差關係圖(不加熱)	45
圖 3-3 層流狀態下廣義雷諾數與摩擦因子的關係圖(不加熱)	46
圖 3-4 層流狀態下矩形管道內廣義雷諾數與摩擦因子的關係圖(加熱)	47
圖 3-5 在層流狀態下質量流率與廣義雷諾數的關係圖	48
圖 3-6 純水在層流狀態上板加熱的壁面溫度分布圖	49
圖 3-7 純水在層流狀態下板加熱的壁面溫度分布圖	49
圖 3-8 純水在層流狀態上下板同時加熱的壁面溫度分布圖	50
圖 3-9 純水在層流狀態下的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W)	51

圖 3-10 500ppm 在層流狀態上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	52
圖 3-11 1000ppm 層流狀態上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	53
圖 3-12 1500ppm 在層流狀態 上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	54
圖 3-13 2000ppm 在層流狀態 上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	55
圖 3-14 層流狀態下工作流體在質量流率相似的比較圖.....	56
圖 3-15 500ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	57
圖 3-16 1000ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	58
圖 3-17 1500ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	59
圖 3-18 2000ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖(Q=185W).....	60
圖 3-19 500ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖.....	61
圖 3-20 1000ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖.....	62
圖 3-21 1500ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖.....	63
圖 3-22 2000ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖.....	64

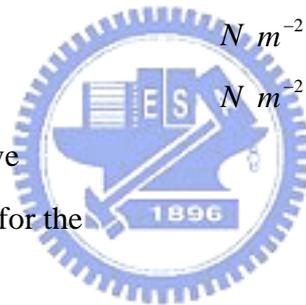
NOMENCLATURE

a	constant value in equation (2.5)	
b	constant value in equation (2.5)	
E	voltage drop	V
C_p	specific heat	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
f	Darcy friction factor	
f_F	Fanning friction factor	
D_h	hydraulic diameter	m
G	shear modulus	
G^*	storage shear modulus	
Gz	Greatz number ($\dot{m} C_p / k \cdot x$)	
Pr	Prandtl number($C_p \mu / k$)	
Ra	Rayleigh number($g \beta \Delta T L^3 \rho^2 C_p / \mu k$)	
h_x	local heat transfer coefficient	$W m^{-2} K^{-1}$
k	thermal conductivity	$W m^{-1} K^{-1}$
L	length of test section	m
n	power law index	
K	consistency index	
V	average velocity	$m \cdot s^{-1}$
Q	total heat generation	W
Q_{loss}	heat loss	W
$Q_{sensible}$	sensible heat	W
T_x	test fluid temperature in x direction	$^{\circ}C$
$T_{b,in}$	inlet temperature of test fluids	$^{\circ}C$
$T_{b,out}$	outlet temperature of test fluids	$^{\circ}C$
T_{wx}	wall temperature of local section	$^{\circ}C$
V	Velocity	$m \cdot s^{-1}$
I	Current	A

W	wide of heated wall	m
Nu_x	local Nusselt number ($h_x x \cdot k^{-1}$)	
$\overline{Nu_x}$	Mean value of local Nusselt number	
TDCF	Temperature-Dependent Carreau Fluid	
ppm	parts per million	
Re^*	Generalized Reynolds number	
EI	Enhancement index	

Greek symbols

γ	shear strain	
$\dot{\gamma}$	shear rate	s^{-1}
μ	shear viscosity	$cp(10^{-2} g \cdot cm \cdot s^{-1})$
μ^*	dynamic viscosity	$cp(10^{-2} g \cdot cm \cdot s^{-1})$
η	apparent viscosity	$cp(10^{-2} g \cdot cm \cdot s^{-1})$
τ	shear stress	$N m^{-2}$
σ	normal stress	$N m^{-2}$
ζ	slope of μ_0 vs. T curve	
ξ	A constant accounting for the dependence of the time constant λ temperature	
λ	characteristic time constant	s
ρ	fluid density	$kg m^{-3}$
α_2	second normal stress difference coefficient	$N s^{-2} m^{-2}$
$\overline{\alpha_2}$	dimensionless second normal stress difference coefficient	



第一章 緒 論

1.1 研究動機

近年來由於電子元件生產技術突飛猛進，積體電路內元件密度越來越高，相對的單位面積內的發熱量也是直線上升。由於傳統的元件散熱設計效率不彰，因此很多研究團隊投入相關的提升熱傳性能研究，例如當前常用的高密度肋、表面加散熱片、或是衝擊噴流等，都不失為可能的解決方法。本實驗室目前也投入相當多的時間進行利用特殊工作流體的散熱技術研究，例如利用介電液的池沸騰研究，及在微小管道對流蒸發之研究，皆有不錯的結果，但皆遇到一些難以克服的問題，如池沸騰的臨界熱通量的限制...等。另外有一些研究發現加入某特定的高分子的水溶液中，會產生熱傳增加的效果，據 Xie(1992)【1】所提出使用高分子 Carbopol 934 水溶液的熱對流效果，可以提升原本使用純水時的 300% 之多。

改變流體的熱物理與熱傳特性是增加熱傳性能的一種方式，故研究者近年來不遺餘力的進行開發新工作流體的研究。本文將以高分子非牛頓流體在扁平矩形管道中以上板加熱、下板加熱或上下板同時加熱的情況做熱傳分析，工作流體為聚丙烯酰胺高分子水溶液，找出其中高分子濃度對熱傳的性能與壓力降的影響，進而獲得最佳的濃度配置。

本論文研究的高分子非牛頓流體與一般牛頓流體的最大不同在於它的黏彈性特質。由於這種黏彈性的性質，會導致此類非牛頓流體在層流 (laminar flow) 中因剪切應力 (shear stress) 作用產生正向力的不同 (normal stress difference)，促使第二次層流 (secondary flow) 的生成，形成與牛頓流體不一樣的流場，同時，因流場的不同使溫度場的變化也大相逕庭，進而造成了不同的熱傳效果。另外，因加入的高分子具有黏彈性性質，使得原本水溶液經混合後其黏度增加，若此種高分子溶液在流動狀態下，所產生的阻力必定會增加，造成壓力差降遠高於原本的純水，但是若高分子水溶液的濃度越稀薄，黏性性質就下降，而壓力差降就可能接近原本純水的狀態。

1.2 牛頓與非牛頓流體簡介

一般常使用的流體大都是屬於牛頓流體，其基本定義 流體作用的剪應力 (τ) 與剪切率 ($\frac{du}{dy}$) 成線性關係：【2】

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1.1)$$

若剪應力與剪切率兩者間呈非線性關係時，稱 非牛頓流體，常以冪次法則 (power law) 來表示[2]

$$\tau = K \left[\frac{du}{dy} \right]^n = K \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1.2)$$

其中 n 冪次方程式的指數

K 是冪次方程式的常數(consistency index)

另外定義視黏度 (apparent viscosity) η 為

$$\eta = K \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \quad (1.3)$$

公式 (1.1) 和公式 (1.2) 的差別可由圖 1-1 得知。其中非牛頓流體包括：

1. 膨脹 (重剪力) 流體 (dilatant, shear-thickening)：

視黏度 (apparent viscosity) 隨著剪應力增加而增加。

2. 擬塑性 (輕剪力) 流體 (pseudoplastic, shear-thinning)：

視黏度 (apparent viscosity) 隨著剪應力增加而漸減。

3. 賓漢塑性 (Bingham plastic) 流體:

需要超過一定的降伏應力值 (yield stress) 時，剪應力和速度梯度之間的關係才會呈現線性關係。

1.3 黏彈性流體簡介

本論文所探討的非牛頓流體是將純水中加入一種高分子聚合物聚丙烯酰胺 polyacrylamide，屬於輕剪力（shear-thinning）流體。它具有黏彈性的特質，可分別用彈性與黏性的性質加以描述【2】：

彈性性質（linear elastic）

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (1.4)$$

其中 G 為剪切模數（shear modulus）

γ 為剪切應變（shear strain）

黏性性質（linear elastic）

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.5)$$

其中 μ 為黏度

$\dot{\gamma}$ 為剪切率（shear rate）

黏彈性性質（viscoelastic material）為上述兩者的結合如下式所示

$$\tau = G^* \cdot \gamma + \mu^* \cdot \dot{\gamma} \quad (1.6)$$

其中 G^* 為動態剪切模數(storage shear modulus)

μ^* 為動態黏度(dynamic viscosity)

但因剪切模數(shear modulus)在實驗上難以分別測得，故往往簡化為公式（1.2）的冪次法則以表示其特性。

另外，這種輕剪力流體最大的不同處在於它的黏彈性特質會造成正向力的不同。如圖 1-2 所示，當有剪應力（ τ_{13} ）在側向作用時，此時在第一方向(1)會生正值的正向力（ σ_{11} ），而在第二方向(2)生負值的正向力（ σ_{22} ），造成所謂的第一正向力差（first normal stress difference, $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ ），而高分子的支鏈也因正向力差的作用而造成變形，形成不一樣的流變性質。明顯的例子如 Weissenberg 效應，如圖 1-3 所示。當棒子在燒杯中轉動時，此時轉動的棒子會對燒杯中的液體生慣性力，若

燒杯中液體 牛頓流體時，此時因慣性力作用而使液體遠離棒子，這時狀況如圖 1-3 中右圖所示，但若燒杯中液體 黏彈性頓流體時，此時因黏彈性關係而 生正向力差，使流體會依附棒子而有上升情況，如圖 1-3 中左圖所示。

1.4 文獻回顧

在歷年的文獻可知做高分子溶液在矩形管道中的熱傳研究中，其高分子的選擇 Lin【3】將其分成四類：聚丙醯胺 (Separan)，聚丙烯酸(Carbopol)，聚乙烯(Polyox)，經乙基纖維素(Natrosol)。管徑水力直徑的範圍為 10mm~37.5mm。而其分析熱傳的方法有二，數值模擬與實驗分析，其中分析熱傳增加的現象又可分為兩方面進行研究，一是非牛頓黏彈性流體的黏度對於溫度的變化，令一方面是第二正向力差所產生的二次流。



1.4.1 數值分析

Carreau 【4】 對輕剪力 (shear-thinning) 流體在不同剪切率和不同溫度下對黏度影響，經由實驗得到的數值而提出下列經驗式：

$$\frac{\mu(\dot{\gamma}, T) - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (1.7)$$

其中 μ_0 ：剪切率為零時的黏度

μ_{∞} ：剪切率無限大時的黏度

λ ：特質時間(characteristic time)

Reiner-Rivlin 【5】 對於黏彈性流體受剪應力而造成的正向力差，提出本質程計算：

$$\tau_{12} = \mu \dot{\gamma}_{12} + \alpha_2 \dot{\gamma}_{13} \dot{\gamma}_{31} \quad (1.8)$$

$$\dot{\gamma}_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \quad (1.9)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{\text{Re}}{D_h \cdot \rho} \right) \overline{\alpha_2} \quad (1.10)$$

其中 α_2 : 第二正向力差係數(second normal stress difference coefficient)

$\overline{\alpha_2}$: 無因次第二正向差係數(dimensionless second normal stress difference coefficient)

Shin 【6】 以連續方程式、動量方程式、能量方程式與冪次方程式(power law) 對圓管作熱傳的數值分析, 結果發現聚丙醯胺水溶液經週圍加熱的圓管時, 只有增加 5~7% 的紐塞數(Nusselt number), 說明了黏彈性流體在圓管中並無太大的熱增強效果。

Chang 等人【7】 對於聚丙醯胺水溶液進行層流數值模擬; 認為它造成熱增強效果可分為兩部分: 在進口位置 (developing region) 主要是因黏性受溫度影響使得速度場改變而造成熱傳增加的效果。在完全發展部分 (fully-developed region), 由於正向力差而形成的第二次層流 (secondary flow), 才使得有熱傳增加效果。

Shin 等人【8】 以連續方程式、動量方程式、能量方程式 基礎, 加上 Carreau model 及 Rivener-Rivlin 方程式, 在上層加熱及其它三面 絕熱的邊界條件下, 對寬高比 2:1 的矩形管道流體在層流狀態下進行數值分析。結果發現聚丙醯胺水溶液 (separan AP-273) 的流場會隨著進口位置的不同而有所變化。如圖 1-4 所示, 在剛開始時會 生兩個漩渦流, 且它們會隨著進口位置的增加而漸漸混合成一個大的漩渦流, 如此造成溫度場的變化, 使得流體的溫度混和較均勻, 形成熱傳增加。這可從圖 1-5 中看出, 如圖 1-5(a) CPF 流體 (Constant Property Fluid), 它的溫度分佈從加熱表面呈漸減方式到底部; 而圖 1-5(b) 聚丙醯胺水溶液, 因有漩渦流的 生使得溫度梯度低於圖 1-5(b), 形成不同的熱傳效果。

Sohn 等人【9】同樣已連續方程式、動量方程式、能量方程式以及 Carreau model、Rivener-Rivlin 方程式，對寬高比 2:1 的矩形管道，在下層加熱的邊界條件下對聚丙醯胺水溶液 (separan AP-273) 作層流數值分析。其結果如圖 1-6、1-7 所示。圖 1-6 為 TDCF (temperature-dependent Carreau fluid) 流體，由於是在下面加熱而且忽略正向力差的情況下，所以只有浮力效應產生的漩渦流，且其影響範圍隨著進口位置增加而擴大。圖 1-7 為聚丙醯胺水溶液，由於同時存有浮力效應與正向力差，使得會有兩個漩渦流產生，並隨著進口位置增加而合併成爲更大的漩渦流。這也使的聚丙醯胺水溶液的熱傳效果比 TDCF 水溶液來的更好。

1.4.2 實驗分析

非牛頓流體在不同剪切率情況下與其相對的剪應力並非成線性關係 (可從圖 1-1 中可看出)，所以黏度值並非定值。而傳統雷諾數 $Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$ 中因包括了黏度 μ 項，造成雷諾數無法正確的估算，這也使得原先定義的雷諾數無法適用於非牛頓流體計算。於是 **Kozicki**【10】對牛頓與非牛頓流體在不同比例的矩形管道中提出新的計算廣義雷諾數方法：

$$Re^* = \frac{\rho V^{2-n} D_h^n}{8^{n-1} \left(\frac{a+bn}{n} \right)^n K} \quad (1.11)$$

其中 n 爲方程式(1.2)的冪次指數。 $n = 1$ 時爲牛頓流體； $n \neq 1$ 時爲非牛頓流體。另外 a, b 值會隨著矩形管高寬的比例而定，其值可參考表 1-1。另外在層流狀態時，可求得廣義的摩擦因子 (Fanning friction factor) f_f 與廣義雷諾數關係爲：

$$f_F = \frac{16}{\text{Re}^*} \quad (1.12)$$

與牛頓流體情況相同。

Lin & Hartnett 【11】以礦物油（mineral oil）為工作流體，在 1.8 cm×0.9 cm 的矩形管道中，邊界條件為上層加熱的情況下，進行熱傳測試。結果發現礦物油的局部 Nusselt 數只比一般純水高約 30~40%。基本上礦物油屬於黏性流體，並非為黏彈性流體，而且它的黏度受到溫度因素的影響很大。在上層加熱的邊界條件下，因上層為加熱狀態，使得接近加熱表面流體的黏度較低，而下面流體的黏度較高。也因黏度的不同，造成速度場的變化，造成熱傳增加的效果。

Xie & Hartnett 【1】以 1000ppm 的 Sepapran AP-273，1000ppm 的 Carbopol 934 與水當作測試流體，在水力直徑為 1.2 公分的寬高比為二比一矩形管道中，雷諾數範圍 1~600 下進行不同邊界條件加熱的實驗測試，包括上層加熱，下層加熱，上下層一起加熱，發現黏彈性流體產生的二次流使 Carbopol934 熱傳係數最好，Separan AP-273 次之，純水最差。在層流的時候，黏彈性導致的二次流效應較自然對流強。在相同流率的情況下，黏彈性流體的管路壓力降比純水大。隨著迴路流動的過程會造成高分子溶液鍵結的拉扯破壞使黏度會下降。

Lin & Ko 【3】以羧甲基纖維素（carboxymethyl cellulose, CMC）當作實驗的溶質，水當作溶液，在水力直徑 0.4 cm 的正方形管道，濃度有 4000 ppm 及 8000 ppm 兩種，雷諾數範圍 1~500 下進行上層加熱的實驗測試。首先兩種不同濃度的羧甲基纖維素水溶液經流變儀測其黏度，發現 8000ppm 的黏度高於 4000 ppm。接著在壓降測試中發現不管濃度的高或低，其摩擦因子（friction factor, f_F ）都與文獻【10】所提出的方程式(1.12)結果接近（ $f_F = 16/\text{Re}$ ）。最後進行熱傳測試，

其所得到的局部 Nusselt 數不管是在 4000 ppm 或 8000 ppm 都有所提升，特別是 8000 ppm 的水溶液在雷諾數 (Re) = 40，

$15 \leq Gz \leq 250$ ($Gz = \rho C_p / kx$) 時，與純水比較，其上升幅度有 72.9~241%。

Etemad&Sadeghi [12] 找出非牛頓流體流經矩形管後，黏度對臨界雷諾數的改變，和壓力降的關係，運用染料注射法來求臨界雷諾數，並且進一步的運用廣義雷諾數和高寬比的修正函數推導出更準確的紊流的 fanning friction factor。此論文中有設備架設圖，實驗結果，當黏度增高，其臨界雷諾數也會隨之增加。論文中有提到可視化，也就是將染料沿著流動方向注入，可以觀察流線情況。

1.4.3 黏彈性流體流動行爲【13】

黏彈性流體不同於一般流體的流動行爲，主要來自於：

(A) 正向應力的效應

如圖 1-2 所示，第一正向應力差 ($\sigma_{11} - \sigma_{22}$) 來自於流線縮短產生的橫向力；除了第一正向應力差，尚有第二正向應力差 ($\sigma_{22} - \sigma_{33}$) 由於正向應力差存在，使得流體流動時產生如 Wessenberg 效應。如圖 1-8 所示，將流體置於容器內，以一攪拌器攪拌時，牛頓流體隨著攪拌所產生的離心力，液面呈現下凹的形狀以平衡應力如圖 1-8(a) 所示。而黏彈性流體則不然，由於正向應力差存在，使得液面形狀向上發展如圖 1-8(b) 所示，其高度與攪拌速度及流體彈性成正比。另一方面，由分子結構上亦可了解，當長鏈的高分子受一離心力往外移動，由於分子鏈本身的拘束，使得長鏈分子反而往中間方向集中，因此 Wessenberg 效應為離心力與正向應力差平衡的結果。

(B) 次級流動

所謂次級流動就是流體中在次要流動方向的流動行爲，對牛頓流體而言，產生次級流動的行爲往往自於離心力，而黏彈性流體的次級流動，往往與牛頓流體恰為相反方向，如圖 1-8 所示，不僅因正向應力差造成液面成上凸的形狀，其次級流動係由

外側向內側旋轉流動，牛頓流體則相反，由內側向外側旋轉流動。

1.4.4 高分子濃度與黏度的關係

一般大約可使用比例原則估計溶液之黏度，如下式所示：

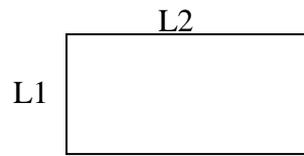
$$\log \eta = \phi_p \log \eta_p + \phi_s \log \eta_s \quad (1.13)$$

式(1.13) 中 ϕ 為體積分率，下標 p 和 s 分別代表高分子及溶劑。但是高分子對溶劑黏度的影響並沒有理想的理論可以解釋，主要原因即在溶劑與高分子之間的作用力關係，因溶劑不同而變化，難以預測其影響。此時唯有使用流變儀實際測量黏度值，再以合理的流變模式去描述【13】。

1.4.5 黏彈性流體矩形管內二次流對熱傳的效應【14】

在矩形管內的二次流有兩個主要的型態：一是由於浮力效應引起的二次流、一是因黏彈性流體在矩形管內流動時，正向力差所造成的二次流。由浮力效應引起的二次流主要是受到雷利數(Ra)與蒲朗特數(Pr)的控制。雷利數越大、二次流越強。由流體黏彈性所引起的二次流，根據 Sohn【9】結果可知，此二次流的效應非常顯著。

在本論文中，是探討高分子溶液的濃度對於熱傳的增加與壓力降的關係，和高分子黏彈性流體因黏彈性所產生之二次流，與浮力所產生之二次流所增加熱傳效應是否有加成的效應，或是相抵銷的關係。本論文設計了一個實驗，第一項工作為配置不同濃度的聚丙烯酰胺高分子溶液作為工作流體，用流變儀量測黏度，取得黏彈性流體的 n ， K 值，第二項工作為設計一矩形管道，上下板可均勻加熱，改變加熱邊界：上板加熱，下板加熱，或是上下板一起加熱，分析在不同邊界條件下矩形管道的熱傳情況。在此實驗中固定變因有矩形管道的幾何尺寸，進口溫度；操縱變因有高分子溶液的溶度，流量，上下板不同加熱量；結果數據有矩形管道間工作流體的溫度分布，管道的差壓值，出口的溫度等。



aspect ratio (L1/L2)	0	0.25	0.5	0.75	1.0
<i>a</i>	0.5000	0.3212	0.2440	0.2178	0.2121
<i>b</i>	1.0000	0.8182	0.7276	0.6866	0.6766

表 1-1 公式 (1.11) 中的 a, b 值 【10】



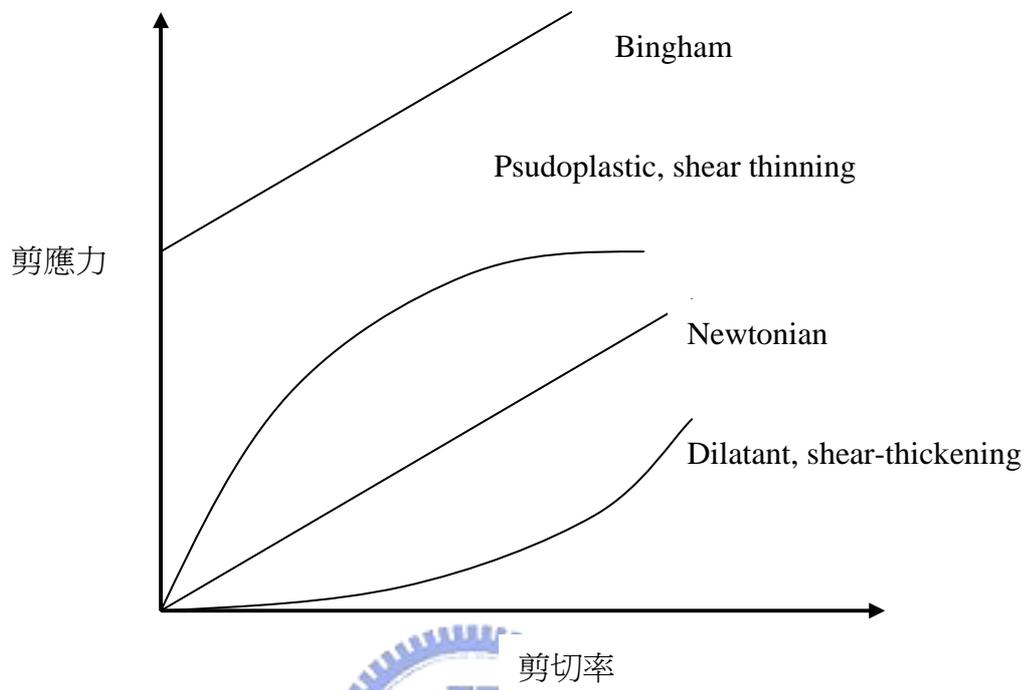


圖 1-1 牛頓流體與非牛頓流體的差異圖【2】



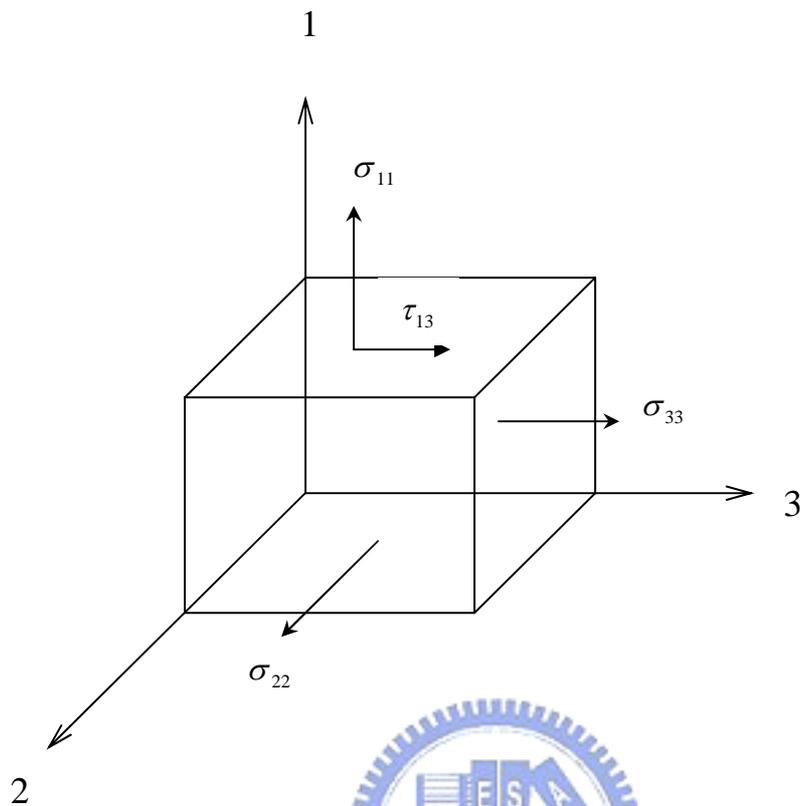


圖 1-2 正向力的關係【2】

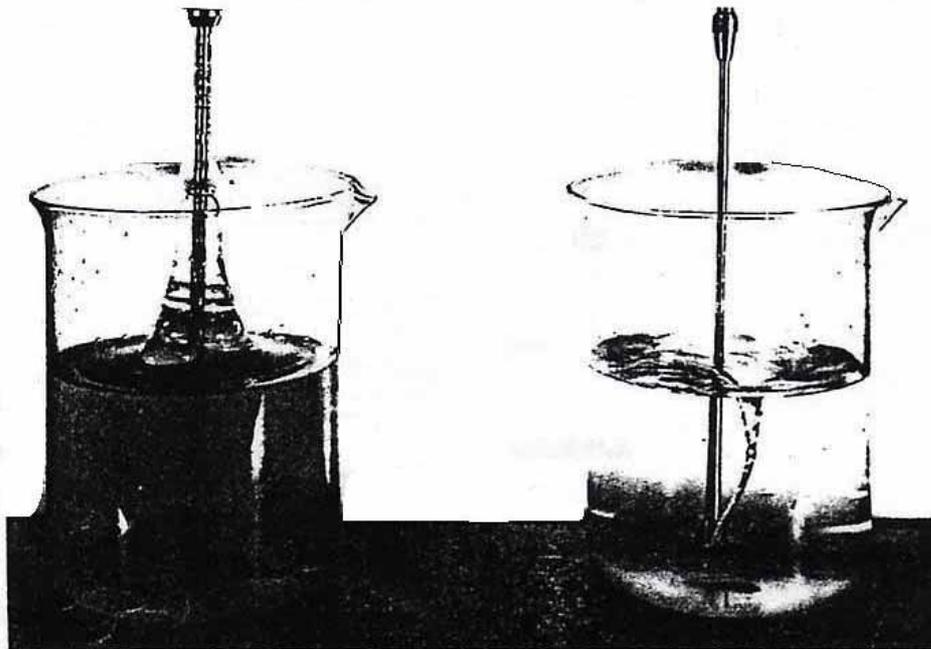


圖 1-3 Weissenberg 效應【2】

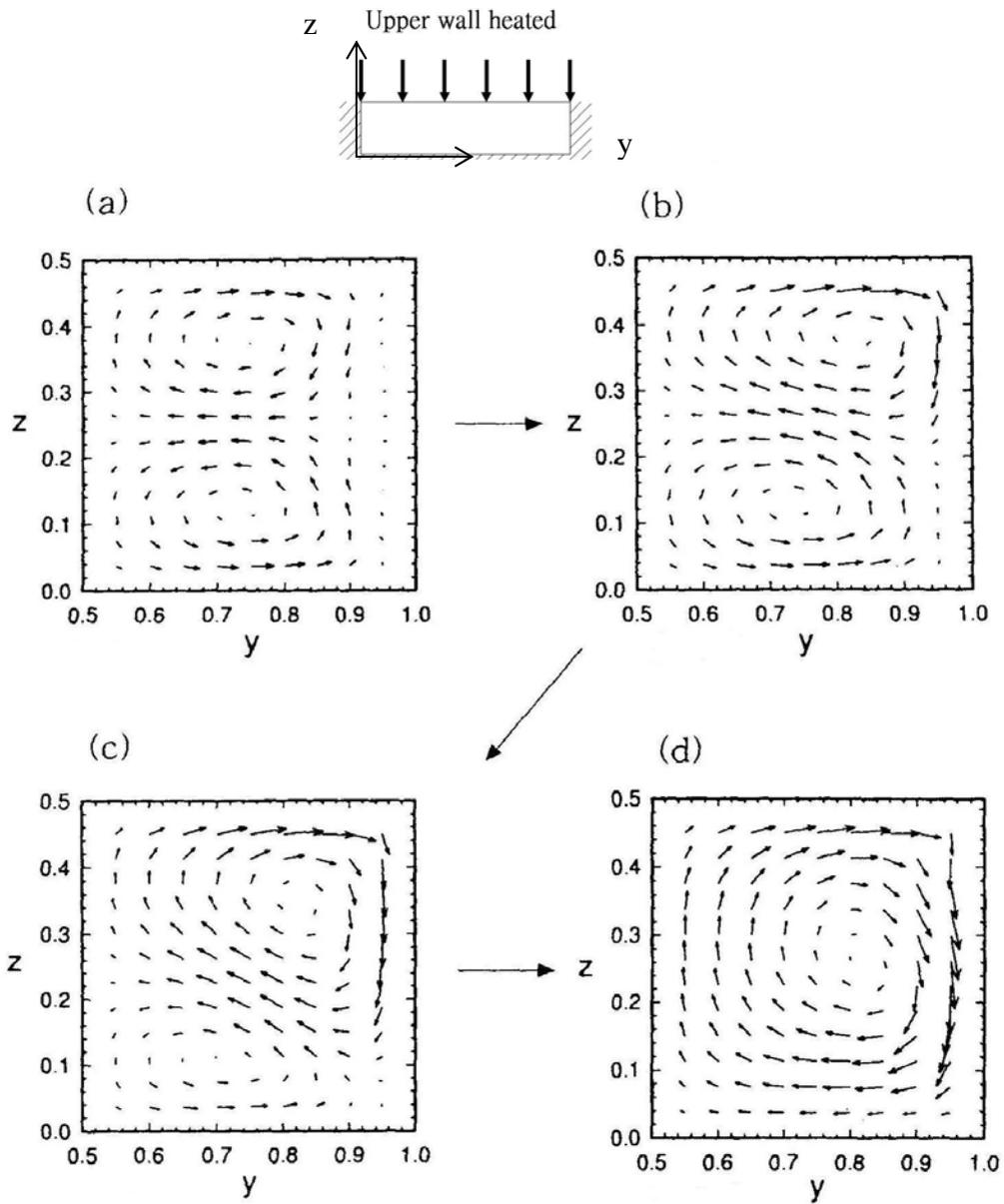


圖 1-4 聚丙醯胺(AP-273)在邊界條件為上層加熱的速度場，進口位置
 (a) $x=0$ (b) $x=0.005$ (c) $x=0.02$ (d) $x=0.05$ 【8】.

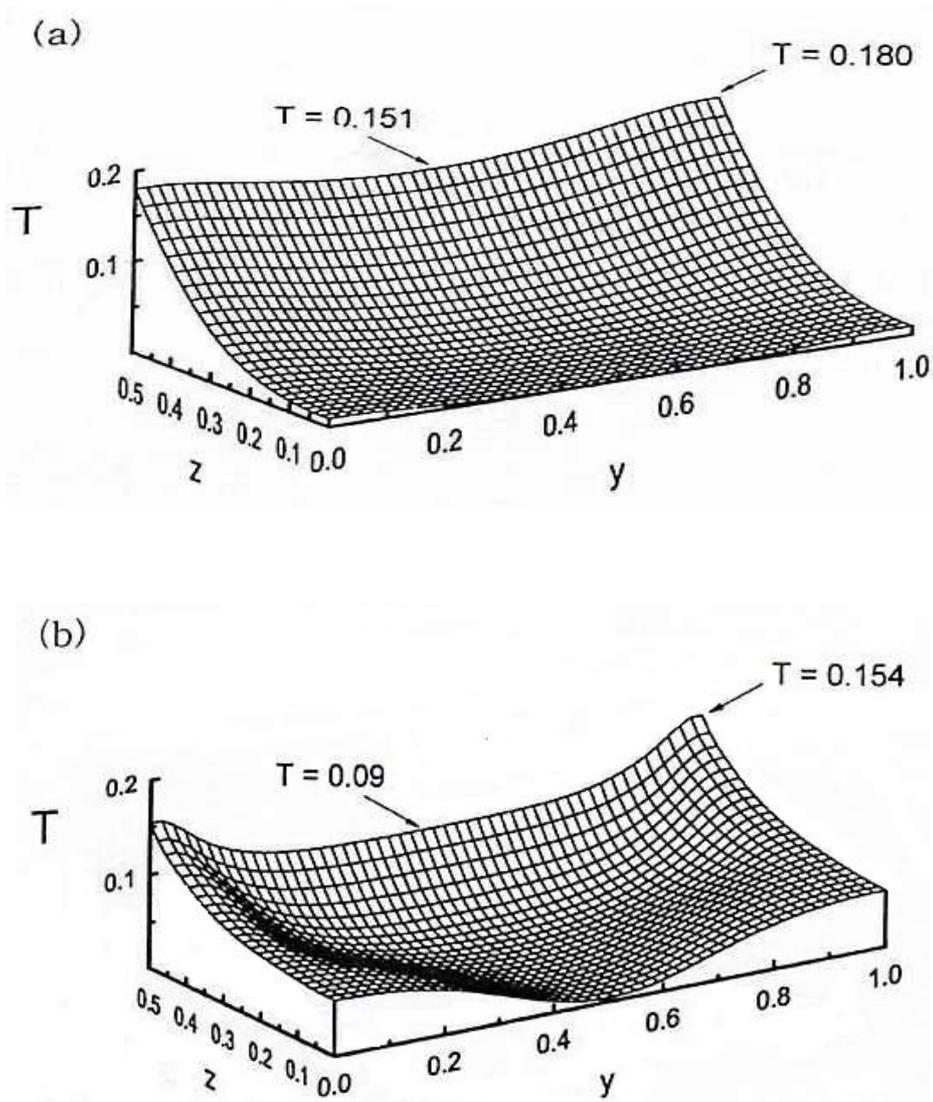


圖 1-5 聚丙醯胺(AP-273)在邊界條件為上層加熱的溫度分佈【8】

(a) 同一性質流體(Constant Property Fluid) (b) 聚丙醯胺酸水溶液

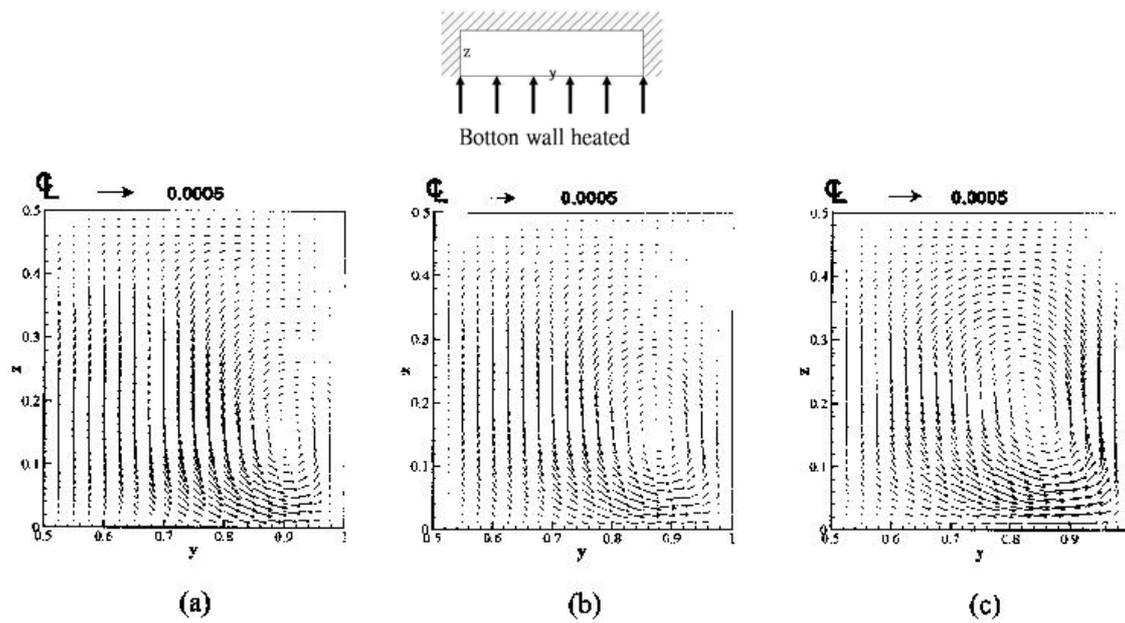


圖 1-6 TDCF 流體在邊界條件為下層加熱的速度場

(a) $x=0.005$ (b) $x=0.01$ (c) $x=0.02$ 【9】

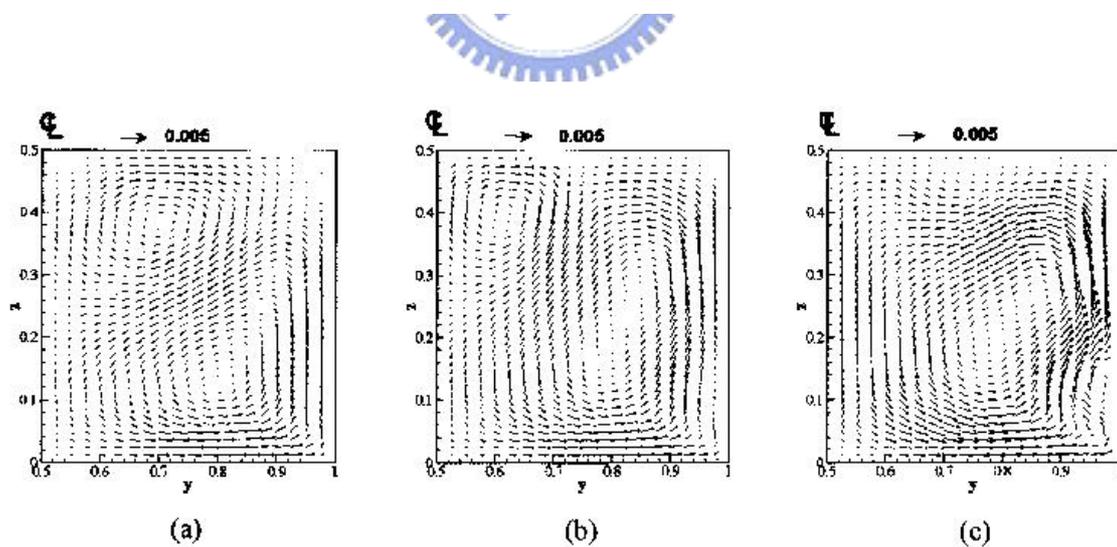
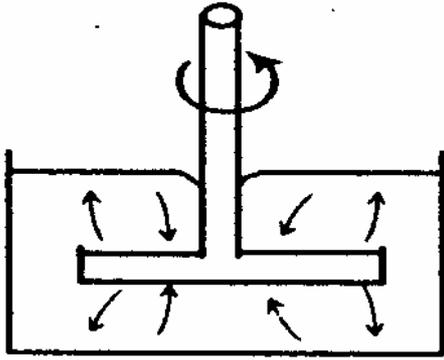
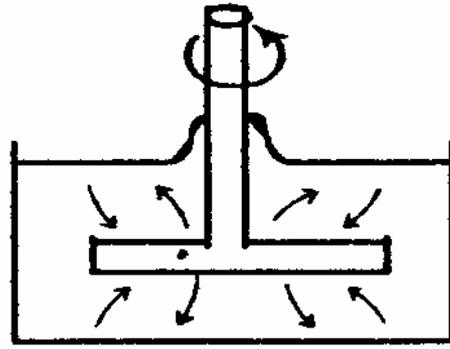


圖 1-7 聚丙醯胺水溶液在邊界條件為下層加熱的速度場

(a) $x=0.005$ (b) $x=0.01$ (c) $x=0.02$ 【9】



(a) 牛頓流體



(b) 黏彈性流體 【13】

圖 1-8 牛頓流體與黏彈性流體的旋轉流場差異圖



第二章 實驗設備與步驟

2.1 工作流體

本次實驗所選用的高分子聚合物 聚丙醯胺 (polyacrylamide)，它是由美國 Polyscience 公司所生產的，為白色粉末，其分子式為 $(C_3H_5NO)_n$ ，分子量範圍約 $5 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$ g/mol。結構式如圖 2-1 所示，圖中可發現它具有醯胺(amide)的官能基 (NH_2)，表示與水是互溶的，而配置高分子水溶液時選用的溶液 純水，配置濃度 500ppm，1000ppm，1500 ppm 及 2000ppm。濃度對黏性的影響，將由流變儀量測，找出適合的流變模式。對於其他物理特性方面，由於參考文獻【15】曾經以密度儀 (pycnometer) 量測聚丙醯胺水溶液的密度，發現其密度值與純水相同，於是假設本次實驗所配置的聚丙醯胺水溶液的密度值皆與純水相同。另外在此實驗條件下，比熱與熱傳導係數由文獻可知和純水的性質相似【16】，故本論文假設與純水相同。



2.2 實驗設備

實驗系統如圖 2-2 所示，其中實驗設備可包括 (1) 熱交換器 (2) 蠕動式幫浦 (3) 上儲存桶 (4) 下儲存桶 (5) 整流區 (6) 測試段 (7) 混合區 (8) 針閥 (9) 資料擷取系統 (10) 電源供應器 (11) 取樣區。

(1) 熱交換器 (Heat Exchanger)：

本實驗系統有兩個地方有此裝置，一個位於測試段出口處，提供出口端經加熱過後的工作流體與熱交換器中的冷流體有熱交換的作用；另一個位於測試段入口處，使得工作流體流入測試段進口時的溫度能保持一定值。

(2) 蠕動式幫浦 (Peristaltic pump)：

由英國 Watson-Marlow 公司生產，控制轉速範圍在 0.5~55 rpm；流量範圍在 0.02~500 ml/min。主要是把工作流體輸送到上方的儲存筒。

(3) 上儲存桶 (upper tank) :

收集工作流體，上方的儲存筒內的流體經由重力的作用下，往下運送到整流區，以達到穩定層流(低雷諾數)的要求。

(4) 下儲存筒 (bottom tank)

收集工作流體，並且接上恆溫水槽以控制工作流體溫度。

(5) 整流區 (Calming section) :

如圖 2-3 所示。長度為 23 公分。外觀類似噴嘴 (nozzle)，其材質壓克力。主要目的是使工作流體能以均勻的速度場進入測試段，並於與測試端連接處的位置放置一熱電偶，以量測水溶液進口溫度 $T_{b,in}$ 。

(6) 測試端 (Test section) :

如圖 2-4 所示。長度 300 公分，可分三部分：左右兩側的壓克力材質當作絕熱材料。在中間流道的上下面各放置不銹鋼板，不銹鋼板上面附著上電加熱片並且在外層覆蓋上絕熱材料，加熱段長度為 300 公分，此時電加熱片透過電源供應器所產生的熱量會先傳到不銹鋼板，如此造成均勻的熱源分佈後，最後傳到在通道中流動的流體。形成上下兩面加熱，其他兩面絕熱狀態。圖中間空白處工作流體流過的區域，其截面尺寸 $10\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，寬高比 2:1，水力直徑 (D_h) 6.7 mm 的矩形管道。而一個 T-型熱電偶放在截面上下兩邊不銹鋼板間的中心點位置，在軸向位置，第一個量測截面為距離入口處 7.5 公分的位置，第二測截面為距離入口處 15 公分處，之後每隔 30 公分取一量測截面，上下共 22 個量測點以量測加熱面溫度。另外在測試段進口下游 150cm 處開口、與出口處左方配置接頭，連接一差壓計，測得後 1.5 公尺的矩形管道的壓力差值。

(7) 混合區 (Mixing section) :

如圖 2-5 所示，長度 12 公分。並在通道內相距 2 cm 地方放置小方塊，以達到溫度混合之均勻。最後在出口位置放置一熱電偶，以求流體出口的平均溫度 $T_{b,out}$ 。

(8) 針閥 (valve)

用手動方式旋轉針閥的位置，藉以控制流量多寡，以達到層流狀態的雷諾數。

(9) 資料擷取系統 (Data acquisition) :

以 Agilent 34970A 資料搜集/切換器，配合 Agilent 34901A 20 個頻道的介面卡，外加 60 個頻道的一般介面卡，經由 RS-232 的接頭連接至電腦，最後由 BenchLink Data Logger 的軟體擷取數據。

(10) 電源供應器 (Power supply) :

由台灣的 GW 公司所生產的直流電源供應器，最高可提供 315W，主要是藉由調整電流、電壓，造成上下兩片電加熱片加熱的效果，以供實驗所需之加熱邊界條件。

(11) 取樣區

設計是依實驗條件需求取樣，並利用黏度計量測高分子水溶液黏度的變化。

2.3 實驗量測儀器

(1) 流量量測：

量杯配合碼錶方式量測其單位時間內的流量，可量測其質量流率。

(2) 溫度量測

以 T-type 的熱電偶當作量測儀器，其誤差值在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 之間，

放置於整流區末端與測試端接合處矩形截面的中心位置、與混合區末端矩形截面的中心位置，如圖 2-3 即圖 2-5 所示，此兩點用來量測工作流體在進出口的流體溫度 $T_{b,in}$ 與 $T_{b,out}$ 。另在測試端 $x=7.5, 15, 45, 75, 105, 135, 165, 195, 225, 255, 285(\text{cm})$ 位置的截面，每截面的上下兩邊的中點，用來量測壁面溫度，總共 22 個溫度量測點。

(3) 差壓量測

差壓計採用 Foxboro 公司產品，其輸出訊號為 4~20 mA，誤差值為 $\pm 0.1\%$ 。用來量測工作流體的壓力差降。

2.4 實驗步驟

(a) 未加熱的狀態，量測壓力降

1. 把所有儀器的電源打開
2. 將工作流體到入下方儲存桶，設定恆溫水槽的溫度，使工作流體的溫度保持一定值。
3. 開啓蠕動式幫浦，把工作流體傳送到上方的儲存筒，讓工作流體因重力關係往下傳送到整流端
4. 調整入口處的針閥轉動位置，控制流量
5. 在針閥旋轉位置固定下，記錄下當時差壓計的讀數跟質量流率
6. 改變工作流體流率，重複步驟 4 和步驟 5，得到不同流量下的差壓值
7. 改變工作流體重複 4.5.6 步驟

(b) 加熱狀態，量測壓降與流體溫度

1. 把所有儀器的電源打開
2. 將工作流體到入下方儲存桶中，設定恆溫水槽的溫度，使工作流體的溫

度保持一定值

3. 開啓蠕動式幫浦，把工作流體傳送到上方的儲存筒，讓工作流體因重力關係往下傳送到整流端
4. 調整出口處的針閥轉動位置，控制流量
5. 量測此時的壓力差值，並紀錄下來，
6. 在針閥旋轉位置固定下，開啓電源供應器，調整到適當的加熱量
7. 在流量、加熱量固定的情況下，等到溫度趨於穩定時，擷取壓降值與熱電偶的溫度值，並紀錄下來。
8. 重複步驟 4、5、6、7，以擷取加熱量相同（I、V 固定），流量不同時的穩態溫度
9. 改變加熱邊界條件，上方加熱，重複 4.5.6.7.8 步驟
10. 改變加熱邊界條件，下方加熱，重複 4.5.6.7.8 步驟
11. 改變加熱邊界條件，上下一起同時加熱，重複 4.5.6.7.8 步驟
12. 改變工作流體，重複 4.5.6.7.8.9.10.11 步驟

2.5 摩擦因子與熱傳係數之計算

(a) 摩擦因子

在固定質量流率的情況下，可計算出當時的速度與雷諾數。另外由差壓計讀取到的差壓 Δp ，代入下列公式

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.1)$$

得到達西摩擦因子（Darcy friction factor, f ），又芬寧摩擦因子（Fanning friction factor, f_F ）與達西摩擦因子（ f ）相差四倍，所以

$$f_F = \frac{f}{4} \quad (2.2)$$

同樣的改變流體的質量流率，得到不同的雷諾數，並計算當時的摩擦因

子 f_F ，觀察是否符合方程式(1.12) $f_F = \frac{16}{\text{Re}^*}$ 。

其中的雷諾數為廣義雷諾數，其定義如方程式(1.11)所示

(b) 熱傳係數

在計算熱傳係數之前，先有下列的假設如下：

1. 熱源所產生的熱通量經由不銹鋼板傳導而形成均勻分佈
2. 流體在軸向的熱傳可忽略
3. 不銹鋼的軸向熱傳可忽略
4. 假設流體在測試段流動方向的溫度呈線性分佈

所以在得知流體的進口溫度($T_{b,in}$)及出口溫度($T_{b,out}$)情況下，其在軸向位

置 x 的流體溫度

$$T_x = T_{b,in} + (T_{b,out} - T_{b,in}) \left(\frac{x}{L} \right) \quad (2.3)$$

其中 x 為離測試段進口的距離

L 為測試段長度

由電熱片所產生的熱量(Q_{total})可分為兩部分，一部份被工作流體($Q_{sensible}$)吸收，另一部份則經由壓克力板傳出到外面，即為熱損(Q_{loss})

$$Q_{total} = I \cdot E = Q_{sensible} + Q_{loss} \quad (2.4)$$

工作流體吸收電熱片的熱量

$$Q_{sensible} = m C_p (T_{b,out} - T_{b,in}) \quad (2.5)$$

Q_{loss} 的量測方法，先以純水當工作流體，依上二式計算水的 $Q_{sensible}$ 和加入熱量 $Q_{total} = I \cdot E$ ，二者差為 Q_{loss} 。

故在測試端的熱通量為

$$q_x = \frac{Q_{sensible}}{LW} \quad (2.6)$$

其中 W 為測試段寬度

L 為測試段長度

所以局部熱傳係數為

$$h_x = \frac{q_x}{T_{wx} - T_x} \quad (2.7)$$

其中 T_{wx} 為上加熱板或下加熱板表面溫度， T_x 從公式 (2.3) 得到。

而局部紐塞數為

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot D_h}{k} \quad (2.8)$$

當邊界條件為上下板同時加熱時，此時的局部熱傳係數分成上下板兩部分

$$h_{x,u} = \frac{q_{x,u}}{T_{wx,u} - T_x} \quad (2.9)$$

$$h_{x,l} = \frac{q_{x,l}}{T_{wx,l} - T_x} \quad (2.10)$$

其中下標 u 及 l ，分別代表上板及下板。

而上下板局部紐塞數分別為：

$$Nu_{ux} = \frac{h_{x,u} \cdot D_h}{k} \quad (2.11)$$

$$Nu_{lx} = \frac{h_{x,l} \cdot D_h}{k} \quad (2.12)$$

並定義平均的局部 Nusselt 數為

$$\overline{Nu}_x = 2 \left(\frac{1}{Nu_{ux}} + \frac{1}{Nu_{lx}} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

(c) Gz

發展區的紐塞數與距離相關，流體隨著距離增加進入完全發展狀態，此時局部紐塞數會趨近一定值而與距離無關。為了解在完全發展狀態時的 Nusselt 數的變化情

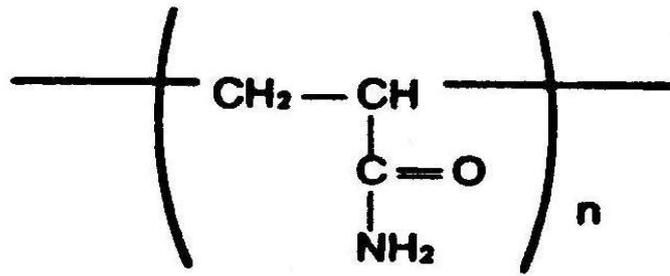
形，定義一與距離相關的無次化參數 Gz (Graetz number)，即

$$Gz = \frac{m\dot{C}_p}{kx} \quad (2.14)$$

為顯熱與軸向熱傳導的比值，此參數與距離成反比。

此實驗結果不準度分析與計算於附錄 A 中有詳細討論。





Polyacrylamide

圖 2-1 聚丙烯醯胺的結構式 【1】

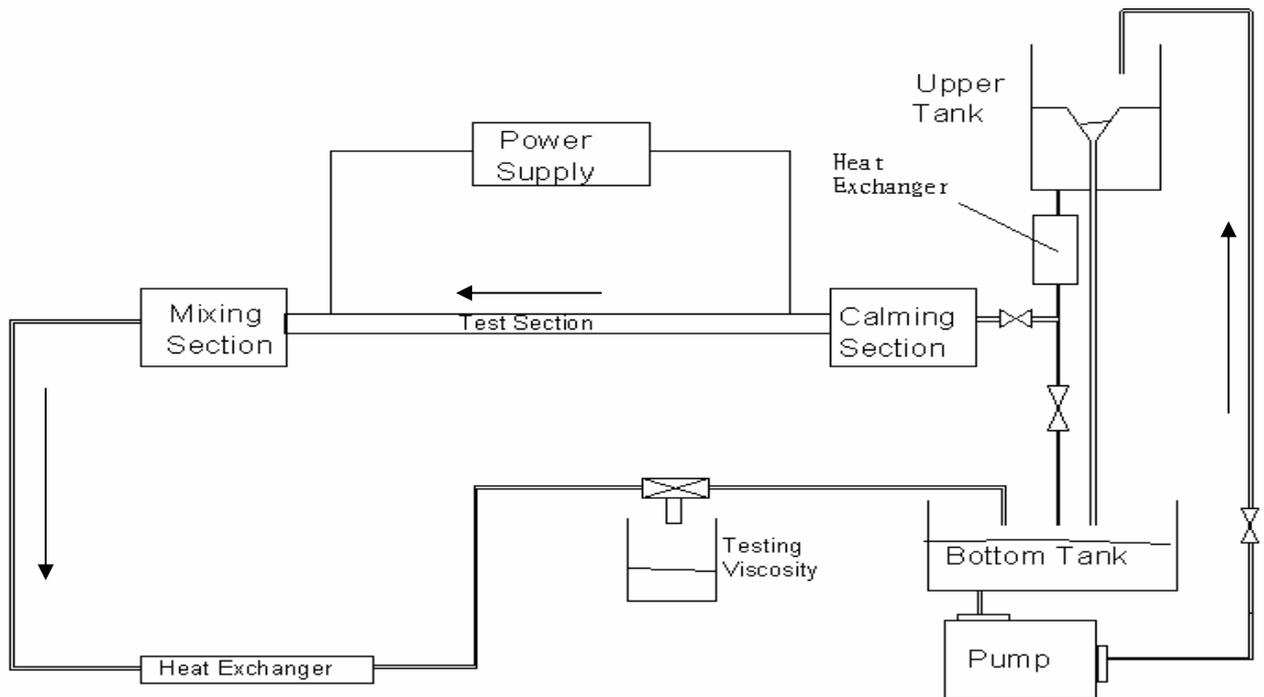
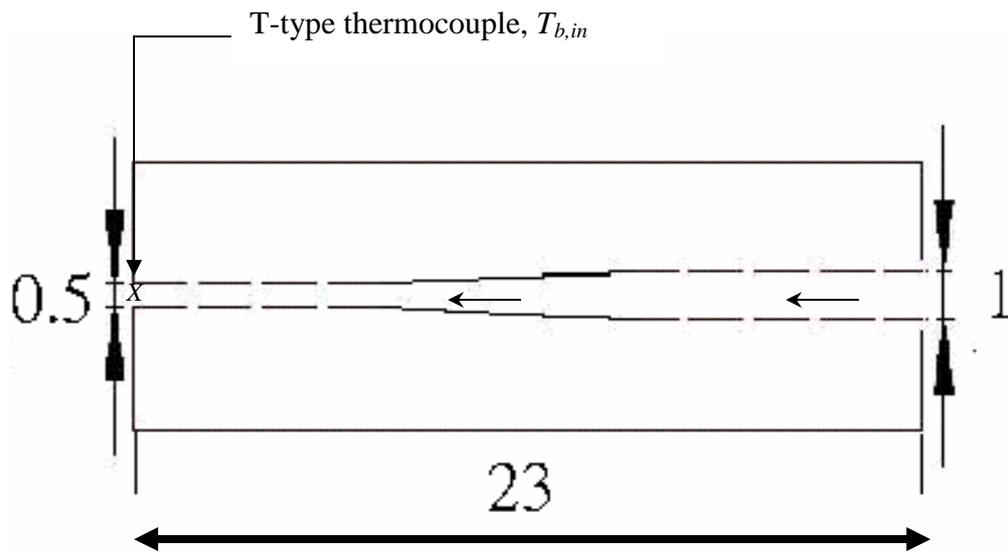
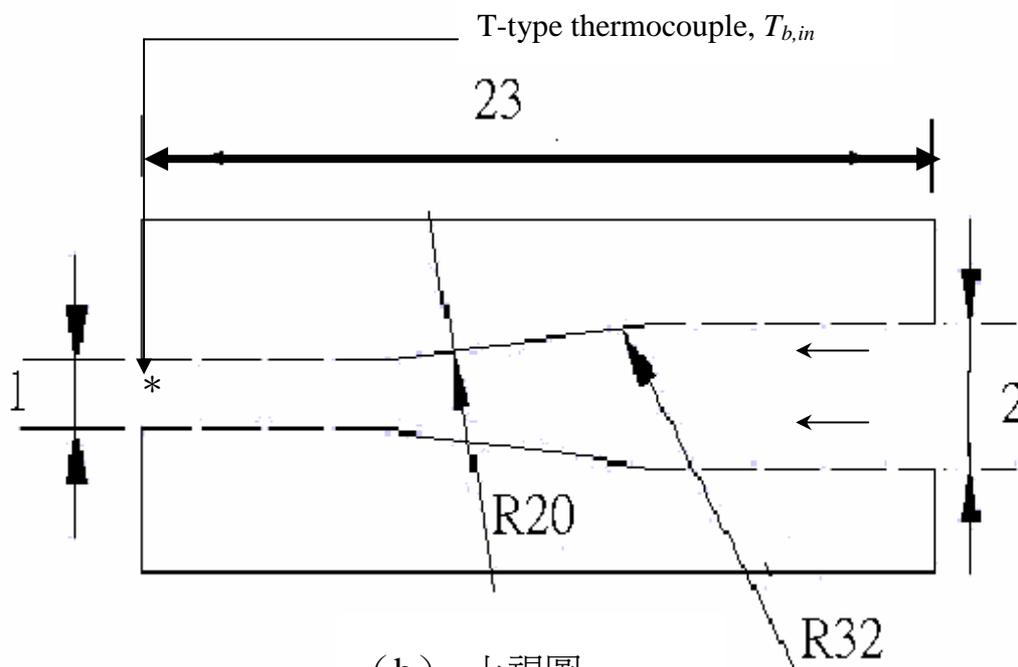


圖 2-2 實驗設備示意圖



單位 [cm]

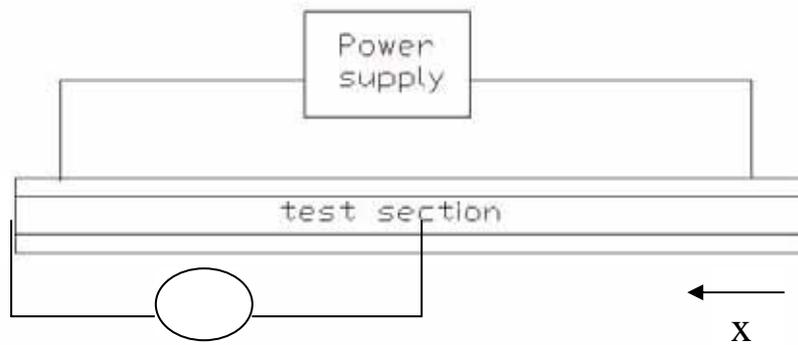
(a) 側視圖



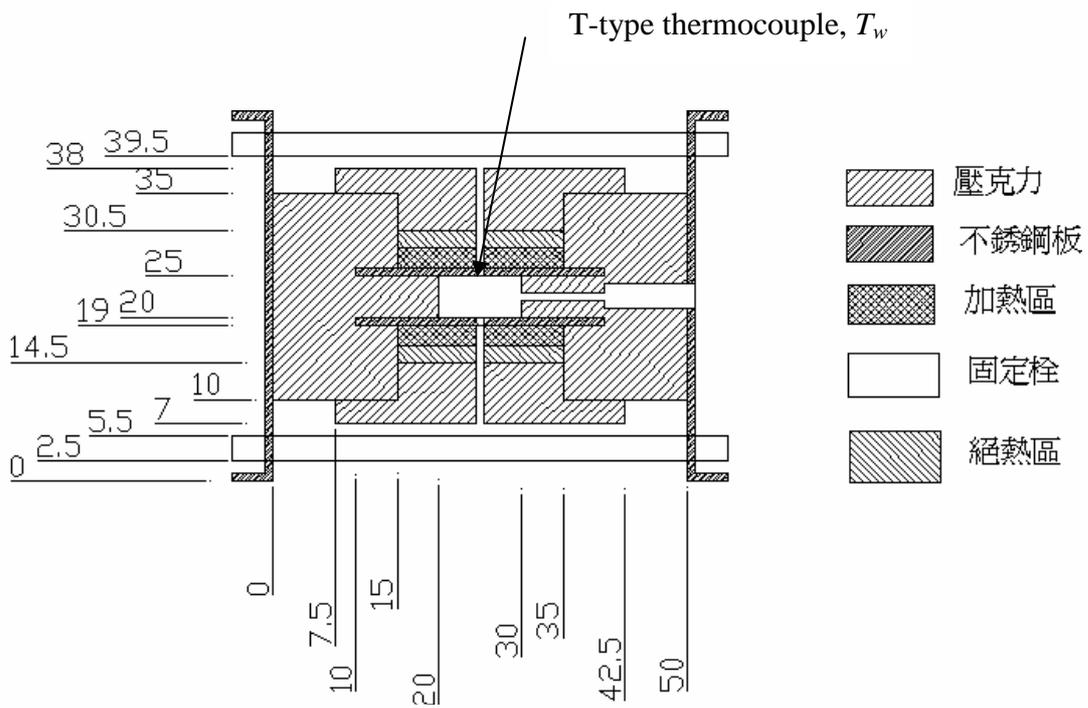
(b) 上視圖

單位 [cm]

圖 2-3 整流區示意圖



(a) 側視圖 (總長 300cm)



單位[mm]

(b)剖面圖

圖 2-4 測試端示意圖

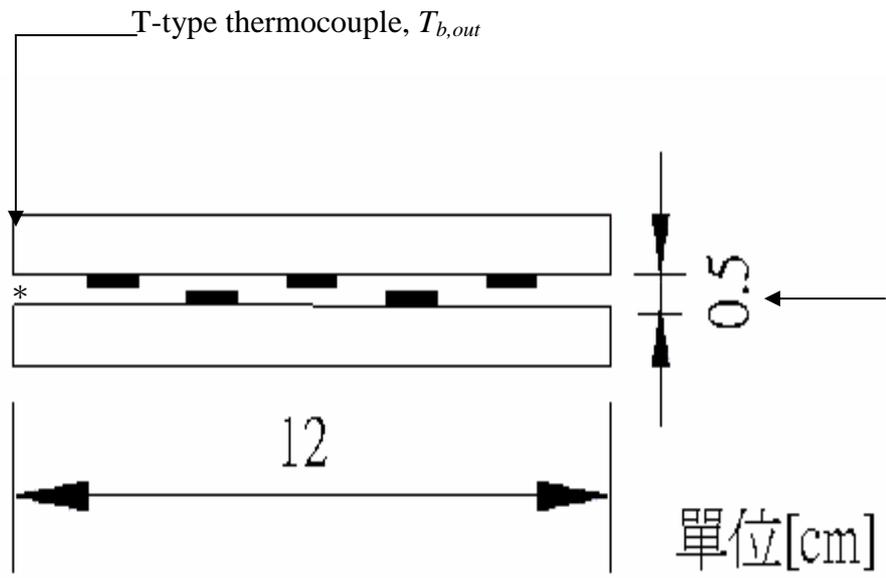


圖 2-5 混合區的側視圖



第三章實驗結果與討論

3.1 實驗條件

本次實驗的工作流體包括純水、聚丙醯胺水溶液，其中水溶液中高分子聚丙醯胺濃度包括 500 ppm、1000 ppm、1500 ppm 和 2000 ppm 四種。實驗條件如下：

- a. 藉由恆溫水槽調整工作流體的測試段進口溫度在 $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 之間。
- b. 在電加熱方面，分為三個部份，上板加熱時，把電源供應器的電流調為 1.3 安培，電壓為 142.3 伏特，形成上層加熱，其它三面絕熱的邊界條件。下板加熱時，把電源供應器的電流調為 1.3 安培，電壓為 142.3 伏特，形成下層加熱，其它三面絕熱的邊界條件。上下板同時加熱時，把電源供應器的電流調為 1.1 安培，電壓為 286 伏特，形成上下層相等熱通量加熱，其它兩面絕熱的邊界條件。
- c. 在加熱的情況，純水的質量流率範圍為 $0.0025\text{kg/s} \sim 0.0075\text{kg/s}$ ，即雷諾數 380~1000，聚丙醯胺水溶液質量流率範圍 $0.0018\text{kg/s} \sim 0.005\text{kg/s}$ ，即廣義雷諾數 80~300。

3.2 流變性質 (Rheology Property)

判斷流體屬於牛頓或者非牛頓流體時，常用方式是以流變儀量測流體的剪切率與其相對應的剪應力，再將兩者值帶入幂次公式 1.2，以決定流變性質。本實驗對於純水的相關物理性質將以文獻[17]所附的表作為依據如表 3-1 所示，圖 3-1(a)與(b)為聚丙醯胺水溶液在溫度為 30°C 與 35°C ，不同濃度時，黏度和剪切率的關係，使用儀器為共軸圓柱的流變儀(Brookfield laboratory Viscometer)，經由線性回歸即可得到幂次公式 1.2 中的參數 n 、 K 值，如表 3-2 所示。

3.3 壓力差降結果與摩擦因子

圖 3-2 為工作流體在不加熱情況時通過測試段(矩形管)，壓力差與質量流率的關係圖，由圖中可發現：

- (a) 在相同質量流率時，混合濃度愈高其相對的壓力差降值愈大
- (b) 壓力差降隨著質量流率增加而增大

因加入的高分子粉末具有黏彈性特性，使得它的黏性性質會使混和溶液的黏度增加，而且會隨加入比例增高，黏性隨著增大。當它的在流動狀態中，隨之而來的阻力必定增加，造成它的壓差值比純水還高，故趨勢 (a) 是合理的。

計算壓力差時，往往會考慮的因素會有加速度、摩擦和重力所造成的差壓。而在實驗過程中保持著測試端水平放置及流量的固定，所以由加速度與重力因素造成的壓力降便可忽略不計，只剩下摩擦所產生得壓力差，即是公式 (2-1) 的結果。以公式(2-1)來看，壓力差應該與速度平方成正比，但是公式中含有摩擦因子 (f_f)，而在層流中，摩擦因子與雷諾數關係為 $f_f = 16/\text{Re}$ ，把雷諾數中的速度項代回公式 (2-1) 相互抵銷後，便可得壓力差值與速度成正比，所以趨勢 (b) 也相當符合，而所得到的質量流率與差壓值變化呈線性關係，故再將兩者的關係作一次線性回歸，得工作流體在不加熱下的回歸方程式，並記錄於表 3-3 中。

將差壓值與質量流率關係轉換為廣義雷諾數 (Re^*) 和摩擦因子 (f_f)，並繪出兩者的關係圖。本次實驗的測試段尺寸大小 $10\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，比例值為 0.5，參考表 1-1，得 $a = 0.244$ ； $b = 0.7276$ 。所以新的雷諾數定義 (公式 1.11) 可以寫為：

$$\text{Re}^* = \frac{\rho V^{2-n} D_h^n}{8^{n-1} \left(\frac{0.244 + 0.7276 \cdot n}{n} \right)^n K} \quad (3.1)$$

， f_f 可由實驗時量測的壓力降值，經由公式(2.1)(2.2)計算得到，在圖 3-3 中不管濃度為 500 ppm、1000 ppm、1500ppm 或 2000ppm，都與關係式(1.12)相吻合。圖 3-4 為加熱後 f_f 與 Re^* 所繪出的圖形，由於進口溫度為 30°C ，並取出口溫度約為 40°C 之實驗數據，因此以平均溫度 35°C 當參考溫度，查表得到此溫度下的水溶液密度，用流變儀量測在 35°C 下的流變性質圖 3-1(b)，得到此溫度下的 n, K ，如表 3-2，並計算其 Re^* ，由圖可知也與關係式(1.12)相吻合。另外可發現由於加熱後工作流體的黏度，隨著溫度的上升而變稀薄，所以量測到的壓力值隨著加熱的過程，有變小的

趨勢。在純水方面，參考表 3-1 的物理性質表而算出的雷諾數及摩擦因子，發現兩者都符合 $f=16/Re$ 的關係式。

值得注意的是，雖然工作流體不同，但是在相等雷諾數時，摩擦因子也一樣，但這並不表示壓力差值相等。因公式 (3.1) 的雷諾數定義具有次方項；對輕剪力流體而言 ($n < 1$)，需要更大的質量流率才能達到與水 ($n = 1$) 相同的雷諾數，如圖 3-5 所示，配合圖 3-2 的結論，可得知在相同的雷諾數時，聚丙烯醯胺水溶液的壓力差值必定高於水的差壓值。縱使質量流率相同時，聚丙烯醯胺溶液的壓力差值還是高於水的差壓值。而濃度的增加所產生的黏度上升，更是造成壓力差增加的主要原因。

3.4 熱傳結果

圖 3-6 為上板加熱，工作流體為純水加熱面溫度與純水溫度分布，質量流率為 0.0025kg/s 即 $Re=382$ 的實驗結果。由圖中可知純水平均溫度將沿著管子呈線性變化，而壁面溫度與純水溫度的局部溫差(T_w-T_b)隨著距離而變，此一溫差值剛開始很小，隨著邊界層發展致使溫差隨著 x 的增加而遞增，慢慢到達一定值，此時可知已達完全發展狀態。

圖 3-7 為下板加熱，工作流體為純水加熱面溫度及水溫度分布，質量流率為 0.0025kg/s 即 $Re=382$ 的實驗結果。由圖中可知純水平均溫度將沿著管子呈線性變化，而壁面溫度與純水溫度的局部溫差(T_w-T_b)隨著距離而變，此一溫差值剛開始很小，隨著邊界層發展致使溫差隨著 x 的增加而遞增，中段部份溫差開始遞增轉為遞減，之後慢慢達一定值，此時可知已達完全發展狀態。

圖 3-8 為上下板同時加熱，工作流體為純水，加熱面溫度及水溫度分布，質量流率為 0.0025kg/s 即 $Re=382$ 的實驗結果。由圖中可知純水平均溫度將沿著管子呈線性變化，而壁面溫度與純水溫度的局部溫差(T_w-T_b)隨著距離而變，此一溫差值剛開始很小，隨著邊界層發展致使溫差隨著 x 的增加而遞增，中段部份上下板的溫度開始有不同的趨勢，下板上升的幅度變的比較小，之後上板與下板的局部溫差皆趨向一定值。

圖 3-9 為純水上板加熱，純水下板加熱與純水上下板同時加熱的邊界條件下，在不同質量流率的情況下的紐塞數分布情況。可發現紐塞數會隨著進口的距離增加而趨向一定值，由此可知流體在此測試段由發展中流動(developing flow)達到完全發展流(fully-developed flow)，由於前段流場與溫度場皆是發展狀態，所以得到的紐塞數對於 $1/Gz$ 的關係有些混亂，但是隨著 $1/Gz$ 增加慢慢趨向一定值，此時的紐塞數不再隨著距離與質量流率而變，可知此時已達完全發展狀態，上板加熱狀態紐塞數最終趨向 4.5，下板加熱紐塞數最終趨向 7.4，上下板加熱的平均紐塞數最終趨向 6.0，由文獻[16]中可知，純水在寬高比 2:1 矩形管上板加熱，實驗值上板加熱約為 4.2，上下板同時加熱約為 6 左右，本實驗設備的實驗結果與實驗值相近。

至於聚丙醯胺水溶液的熱傳分析分別在下列不同情況敘述：

(a) 上板等熱通量加熱

在此情況下，因浮力的效應而產生的自然對流因素應可以忽略不計【17】，使熱傳增強的因素有兩部份，一部份是黏度受溫度影響而下降，使得邊界層變薄而造成熱傳增加效果，另一部份由於正向力差而形成的二次流，使得熱傳係數增加。

圖 3-10 為 500ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖，由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而下降，然後趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已完全發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0024kg/s~0.0047kg/s 範圍內，紐塞數最低為 5.7，最高可達 10.3。

圖 3-11 為 1000ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖，由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而下降，然後趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已完全發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0023kg/s~0.0044kg/s 範圍內，紐塞數最低為 6.3，

最高可達 11.9。

圖 3-12 為 1500ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而下降，然後趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已完全發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0020kg/s~0.0040kg/s 範圍內，紐塞數最低為 5.2，最高可達 7.3。

圖 3-13 為 2000ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而下降，然後趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已完全發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0018kg/s~0.0037kg/s 範圍內，紐塞數最低為 5.3，最高可達 8.5。

由各圖中可知在固定熱通量的情況下，隨著質量流率的增加，已完全發展區的紐塞數皆會上升，由此可知正向力差所造成的二次流，也會因質量流率的增加有增強的效果。

圖 3-14 為工作流體在層流狀態，相近質量流率情況時的熱傳比較圖，在質量流率為 0.0023~0.0029kg/s 的範圍內，比較其紐塞數，在已完全發展區，以 2000ppm 的聚丙醯胺水溶液的紐塞值最高，紐塞值可達 7.0，依濃度的下降紐塞數遞減，而純水最差，紐塞值僅為 4.5，由此可知在此低質量流率的情況下，隨著高分子的濃度上升，其紐塞值也隨之上升。

將已完全發展區的紐塞數整理於表 3-4 中，並以純水在寬高比 2:1 矩行管中邊界條件為上板加熱的實驗值 4.5 作為參考值 Nu_o ，計算兩者熱傳紐塞數的比值 (Nu_x / Nu_o) 代表熱傳係數增加比值，由表中可發現，聚丙醯胺水溶液的熱傳紐塞數比值皆大於 1，且隨著質量流率的增加有上升的趨勢，最高為 1000ppm 的聚丙醯胺水溶液在廣義雷諾數 250 時有最大值為 2.64。由文獻【1】可知 1000ppm 的聚丙醯胺

水溶液在質量流率較低的範圍時，隨著廣義雷諾數的增加，以完全發展區的紐塞數也會隨之增加，但廣義雷諾數到 500 左右時，紐塞數會有一最大值 15 左右，隨後廣義雷諾數再增加，紐塞數反而會有下降的趨勢，故在本實驗廣義雷諾數範圍 80~300，紐塞數最高只有 11.9，尙處於前段紐塞數上升的階段，故熱傳增加比值還有增加的空間。而由表 3-4 中亦可發現，濃度的增加並沒有造成熱傳增加比值明顯的上升，熱傳增加比值以 1000ppm 在質流率為 0.0044kg/s 為最高，紐塞數可達 11.9，是水的 2.64 倍，可能的原因由於質量流率的增加導致慣性力的增加，因此濃度較高的聚丙醯胺水溶液，分子間的鍵結受到慣性力的破壞的程度比較高，所以黏彈性流體的彈性性質會下降，故正向力差隨著慣性力增加而上升的程度也趨緩慢。

(b) 下板等熱通量加熱

在此情況下要考慮三種作用的影響：因浮力的效應而產生的自然對流因素，黏度受溫度影響使得速度場改變，以及由於正向力差而形成的二次流。

圖 3-15 為 500ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中左側為發展狀態，隨著 $1/Gz$ 增加，紐塞數隨之下降，在固定一質量流率的情況下，中段部分可發現紐塞數有反轉上升的現象，至後段部分趨向一定值，達已完全發展狀態，在質量流率 0.0024kg/s~0.0046kg/s 範圍內，隨著質量流率的增加，以發展區的紐塞數會隨之上升，紐塞數最低為 6.2，最高為 8.6。

圖 3-16 為 1000ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中左側為發展狀態，隨著 $1/Gz$ 增加，紐塞數隨之下降，在固定一質量流率的情況下，中段部分可發現紐塞數有反轉上升的現象，但此趨勢比 500ppm 較不明顯，至後段部分趨向一定值，達已完全發展狀態，在質量流率 0.0023kg/s ~ 0.0044 kg/s 範圍內，隨著質量流率的增加，以發展區的紐塞數會隨之上升，紐塞數最低為 9.2，最高為 10.4。

圖 3-17 為 1500ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尙處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數

會隨著 $1/Gz$ 的增加而趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已完全發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 $0.0021\text{kg/s}\sim 0.0037\text{kg/s}$ 範圍內，紐塞數最低為 7.4，最高可達 9。

圖 3-18 為 2000ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已完全發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 $0.0019\text{kg/s}\sim 0.0039\text{kg/s}$ 範圍內，紐塞數最低為 5.9，最高可達 9.2。

由各圖中可知質量流率的增加，增強了正向力差而形成的二次流效應，因此也增強其熱傳係數。

將其已完全發展區的紐塞數整理於表 3-5 中，並以純水在寬高比 2:1 矩行管中邊界條件為下板加熱的實驗值 7.4 為參考值 Nu_o ，計算其熱傳的增加比值 (Nu_x / Nu_o)，由表 3-5 可知，在此界條件下，聚丙醯胺水溶液的熱傳紐塞數比值範圍為 0.8~1.4。隨著質量流率的增加，有上升的趨勢，在質流率較小的情況，聚丙醯胺水溶液的紐塞數比純水還低，而且在相同質量流率的情況下，濃度的增加對於已發展區的紐塞數，也沒有明顯的提升。由此可知雖然在同樣質量流率的情況下，濃度的增加會使分子鏈結較密，彈性力增加，因此正向力差增強而使二次流增強，但是濃度的提升也使得黏度上升，雷利數變小，所以因浮力產生的二次流也相對減弱了，另外浮力產生的二次流與正向力差的二次流方向相反，有互相抵銷的情況。

(c) 上下板等熱通量加熱兩面絕熱

在此情況下要考慮三種作用的影響，因浮力的效應而產生的自然對流，黏度受溫度影響使速度場改變，與由於正向力差而形成的二次流。

圖 3-19 為 500ppm 聚丙醯胺水溶液在層流狀態，上下板同時加熱的平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完

全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0025kg/s~0.0047kg/s 範圍內，紐塞數最低為 6.1，最高可達 8.7。

圖 3-20 為 1000ppm 聚丙烯酰胺水溶液在層流狀態，上下板同時加熱的平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0023kg/s~0.0045kg/s 範圍內，紐塞數最低為 6.6，最高可達 9.5。

圖 3-21 為 1500ppm 聚丙烯酰胺水溶液在層流狀態，上下板同時加熱的平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0021kg/s~0.0037kg/s 範圍內，紐塞數最低為 7.3，最高可達 10.1。

圖 3-22 為 2000ppm 聚丙烯酰胺水溶液在層流狀態，上下板同時加熱的平均紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖。由圖中可知，前段尚處於發展狀態，在固定質量流率的情況下，紐塞數會隨著 $1/Gz$ 的增加而趨向一定值，此時的紐塞數不隨著距離而變，故已達完全發展狀態。另外從圖中也可發現，隨著質量流率的增加，已發展狀態的紐塞數也隨之上升，在質量流率 0.0019kg/s~0.0039kg/s 範圍內，紐塞數最低為 5.6，最高可達 8.7。

由各圖中可知質量流率的增加，增強了正向力差而形成的二次流效應，因此也增強其熱傳效果，將其已完全發展區的平均紐塞數整理於表 3-6 中，並以純水在寬高比 2:1 矩行管中，邊界條件為上下板加熱的實驗值 6.0 為參考值 Nu_o ，計算其熱傳紐塞數的比值(\overline{Nu}_x / Nu_o)，由表 3-6 可知，在不同濃度的聚丙烯酰胺水溶液，隨著質

量流率的上升，其比值皆有上升的趨勢，其中以 1500ppm 水溶液，在 $Re^*=220$ 時有其最高的紐塞數比值 1.68。

3.5 熱傳增強效益比

由於聚丙醯胺水溶液的黏度遠高於純水，導致聚丙醯胺水溶液在相同的質量流率時，其壓力差降比純水高很多。今在相同質量流率的情況下，定義一壓力參考值 Δp_0 ，為純水的廣義芬寧摩擦因子符合 $f_F = 16/Re$ 的關係式，並定義 $\Delta p / \Delta p_0$ 為水溶液與純水的壓力差比值，將結果分別整理於表 3-4，表 3-5，表 3-6 中。例如在表 3-4 中可發現，其壓力差比值隨著濃度的增加呈倍數上升，在濃度為 2000ppm 的最高可達 4.04，且在濃度為 1500ppm 與 2000ppm 時，隨著質量流率的增加，壓力差比值有下降趨勢，由此可知隨著質量流率的增加，慣性力變大，壁面的剪切力也隨之變大，導致聚丙醯胺水溶液在壁面的黏度變的比較稀薄，故壓力差降比值有下降的趨勢，此現象說明了聚丙醯胺水溶液為輕剪力流體。

今定義其熱傳增強效益比(Enhancement index)為

$$EI = \frac{Nu_x / Nu_0}{\Delta P / \Delta P_0} \quad (3.2)$$

當熱傳增強效益比為 1 時，代表在同時考慮紐塞數的增加與壓力降的增加下，此工作流體的效益和純水相同，大於 1 則比較有利。

表 3-4 中可知上板加熱時，在質量流率 0.0023~0.0047kg/s 範圍下，各濃度的聚丙醯胺水溶液，隨著質量流率的增加，效益比皆隨之上升，其中 500ppm，1000ppm 的聚丙醯胺水溶液，效益比分別可達 1.22 與 1.19，但 1500ppm 與 2000ppm 的聚丙醯胺水溶液，其效益比最高只有 0.5。

下板加熱時，由表 3-5 可知，各濃度的聚丙醯胺水溶液，隨著質量流率的上升，其效益比皆隨之上升，但上升的幅度比上板加熱時緩和而且都低於 1，其中以濃度為 1000ppm 的效益比 0.63 為最高。由於比值小於 1，表示聚丙醯胺水溶液的壓降差比值比熱傳紐塞數比值還大，因此若同時考慮壓降和紐塞數，在此邊界條件下並不

利使用聚丙烯醯胺水溶液當作工作流體。

上下板同時加熱的情況下，在質量流率 0.0019~0.0046kg/s 的範圍內，如表 3-6 所示，可知各濃度的聚丙烯醯胺水溶液，隨著質量流率的增加，效益比也隨之上升，其中以 500ppm 的效益比 0.78 時為最高，但也都小於 1，故聚丙烯醯胺水溶液的壓降差比值比熱傳紐塞數比值還大，若同時考慮壓降和紐塞數，在此邊界條件下並不利使用聚丙烯醯胺水溶液當作工作流體。

由於效益比皆隨著質量流率的增加都有上升的趨勢，上板加熱的效益比可超過 1，所以預估濃度 500ppm 與 1000ppm 聚丙烯醯胺水溶液在質量流率繼續增加的情況下，即使在下板加熱或上下板同時加熱的邊界條件下，熱傳增強效益比皆有上升的空間，且在本實驗範圍內最高的效益比已達純水的百分之七十，因此預測還有提升的空間。



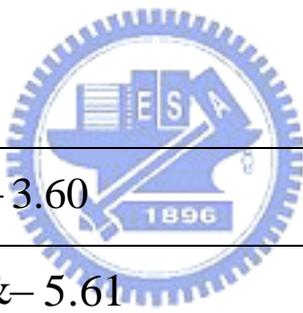
TABLE A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water^a

Temperature, T (K)	Pressure, P (bars) ^b	Specific Volume (m ³ /kg)		Heat of Vaporization, h_{fg} (kJ/kg)	Specific Heat (kJ/kg · K)		Viscosity (N · s/m ²)		Thermal Conductivity (W/m · K)		Prandtl Number		Surface Tension, $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Expansion Coefficient, $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperature, T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

表 3-1 水的物理性質表【17】

濃度 \ 溫度	Power law index (n)		Consistency index (K)	
	30°C	35°C	30°C	35°C
500 ppm	0.998	0.998	0.0022	0.0018
1000 ppm	0.992	0.992	0.0025	0.0021
1500 ppm	0.970	0.988	0.0029	0.0024
2000 ppm	0.964	0.986	0.0035	0.0029

表 3-2 聚丙醯胺酸水溶液在不同濃度下的相關 power law index(n) 與 consistency index(K)值



去離子水	$\Delta p = 16706m\& + 3.60$
500ppm	$\Delta p = 34420m\& - 5.61$
1000ppm	$\Delta p = 40184m\& - 3.15$
1500ppm	$\Delta p = 53522m\& + 15.84$
2000ppm	$\Delta p = 62592m\& + 16.66$

表 3-3 壓力差值(Δp)與質量流率($m\&$)的線性回歸方程式

工作流體	邊界條件	質量流率(g/s)	Re*	已發展區的 Nux	Nux/Nuxo	壓降 ΔP	ΔP_o	$\Delta P/\Delta P_o$	enhancement index
純水	上加熱 185W	2.50	382.00	4.50	1.00	45.36	44.42	1.02	0.98
500ppm	上加熱 185W	2.40	149.00	5.70	1.27	77.00	42.64	1.81	0.70
500ppm	上加熱 185W	3.40	214.00	7.10	1.58	111.42	60.41	1.84	0.86
500ppm	上加熱 185W	4.70	294.00	10.30	2.29	156.17	83.50	1.87	1.22
1000ppm	上加熱 185W	2.30	127.00	6.30	1.40	89.27	40.86	2.18	0.64
1000ppm	上加熱 185W	3.30	185.00	9.20	2.04	129.46	58.63	2.21	0.93
1000ppm	上加熱 185W	4.40	250.00	11.90	2.64	173.66	78.17	2.22	1.19
1500ppm	上加熱 185W	2.00	120.00	5.20	1.16	122.88	35.53	3.46	0.33
1500ppm	上加熱 185W	2.90	173.00	6.20	1.38	171.05	51.52	3.32	0.42
1500ppm	上加熱 185W	4.00	240.00	7.30	1.62	229.93	71.07	3.24	0.50
2000ppm	上加熱 185W	1.80	80.00	5.30	1.18	129.32	31.98	4.04	0.29
2000ppm	上加熱 185W	2.70	125.00	7.00	1.56	185.65	47.97	3.87	0.40
2000ppm	上加熱 185W	3.70	171.00	8.50	1.89	248.25	65.74	3.78	0.50

表 3-4 已發展區邊界條件為上板加熱的熱傳與壓降值

工作流體	邊界條件	質量流率(g/s)	Re*	已發展區的 Nux	Nux/Nuxo	壓降 ΔP	ΔP_o	$\Delta P/\Delta P_o$	enhancement index
純水	下加熱 185W	2.50	382.00	7.40	1.00	45.36	44.42	1.02	0.98
500ppm	下加熱 185W	2.40	151.00	6.20	0.84	77.00	42.64	1.81	0.46
500ppm	下加熱 185W	3.40	214.00	7.60	1.03	111.42	60.41	1.84	0.56
500ppm	下加熱 185W	4.60	289.00	8.60	1.16	152.72	81.73	1.87	0.62
1000ppm	下加熱 185W	2.30	131.00	9.20	1.24	89.27	40.86	2.18	0.57
1000ppm	下加熱 185W	3.10	172.00	9.70	1.31	121.42	55.08	2.20	0.59
1000ppm	下加熱 185W	4.40	248.00	10.40	1.41	173.66	78.17	2.22	0.63
1500ppm	下加熱 185W	2.10	125.00	7.40	1.00	128.23	37.31	3.44	0.29
1500ppm	下加熱 185W	2.80	166.00	8.50	1.15	165.70	49.75	3.33	0.34
1500ppm	下加熱 185W	3.70	220.00	9.00	1.22	213.87	65.74	3.25	0.37
2000ppm	下加熱 185W	1.90	82.00	5.90	0.80	135.58	33.76	4.02	0.20
2000ppm	下加熱 185W	2.90	130.00	8.00	1.08	198.17	51.52	3.85	0.28
2000ppm	下加熱 185W	3.90	176.00	9.20	1.24	260.76	69.29	3.76	0.33

表 3-5 已發展區邊界條件為下板加熱的熱傳與壓降值

工作流體	邊界條件	質量流率(g/s)	Re*	已發展區的 Nux	Nux/Nuxo	壓降 ΔP	ΔP_o	$\Delta P / \Delta P_o$	enhancement index
純水	上下各加熱 156W	2.70	418.00	6.00	1.00	48.70	47.97	1.02	0.98
500ppm	上下各加熱 156W	2.50	156.00	6.10	1.02	80.44	44.42	1.81	0.56
500ppm	上下各加熱 156W	3.40	214.00	7.30	1.22	111.42	60.41	1.84	0.66
500ppm	上下各加熱 156W	4.60	290.00	8.70	1.45	152.72	81.73	1.87	0.78
1000ppm	上下各加熱 156W	2.30	131.00	6.60	1.10	89.27	40.86	2.18	0.50
1000ppm	上下各加熱 156W	3.30	187.00	8.00	1.33	129.46	58.63	2.21	0.60
1000ppm	上下各加熱 156W	4.50	255.00	9.50	1.58	177.68	79.95	2.22	0.71
1500ppm	上下各加熱 156W	2.10	125.00	7.30	1.22	128.23	37.31	3.44	0.35
1500ppm	上下各加熱 156W	2.80	166.00	8.90	1.48	165.70	49.75	3.33	0.45
1500ppm	上下各加熱 156W	3.70	220.00	10.10	1.68	213.87	65.74	3.25	0.52
2000ppm	上下各加熱 156W	1.90	85.00	5.60	0.93	135.58	33.76	4.02	0.23
2000ppm	上下各加熱 156W	2.80	126.00	6.60	1.10	191.91	49.75	3.86	0.29
2000ppm	上下各加熱 156W	3.90	178.00	8.70	1.45	260.76	69.29	3.76	0.39

表 3-6 已發展區邊界條件為上下板加熱的熱傳與壓降

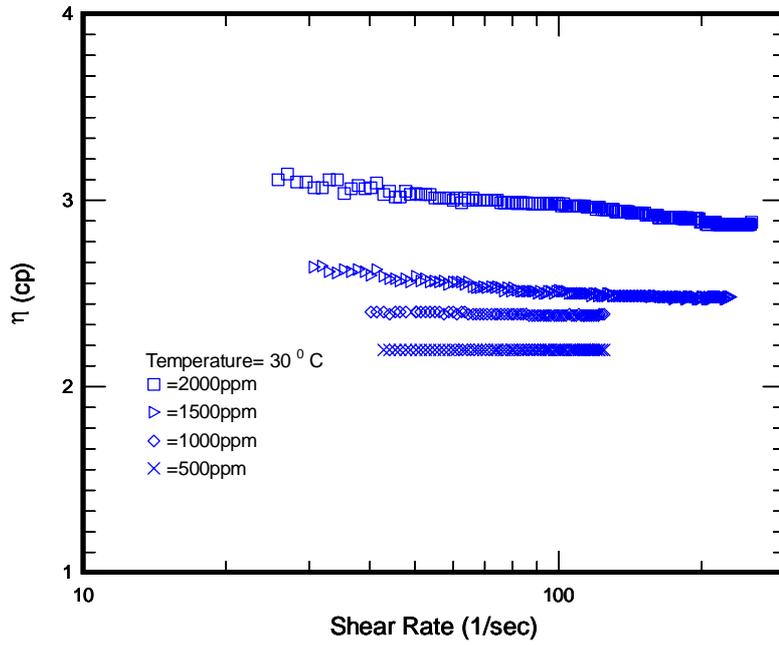


圖 3-1(a) 聚丙醯胺水溶液黏度與剪切率關係圖(30°C)

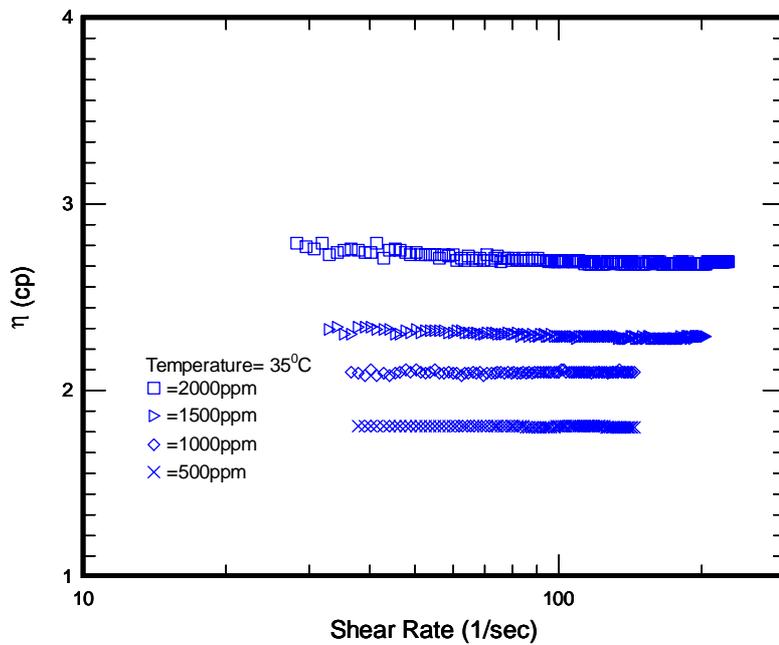


圖 3-1(b) 聚丙醯胺水溶液黏度與剪切率關係圖(35°C)

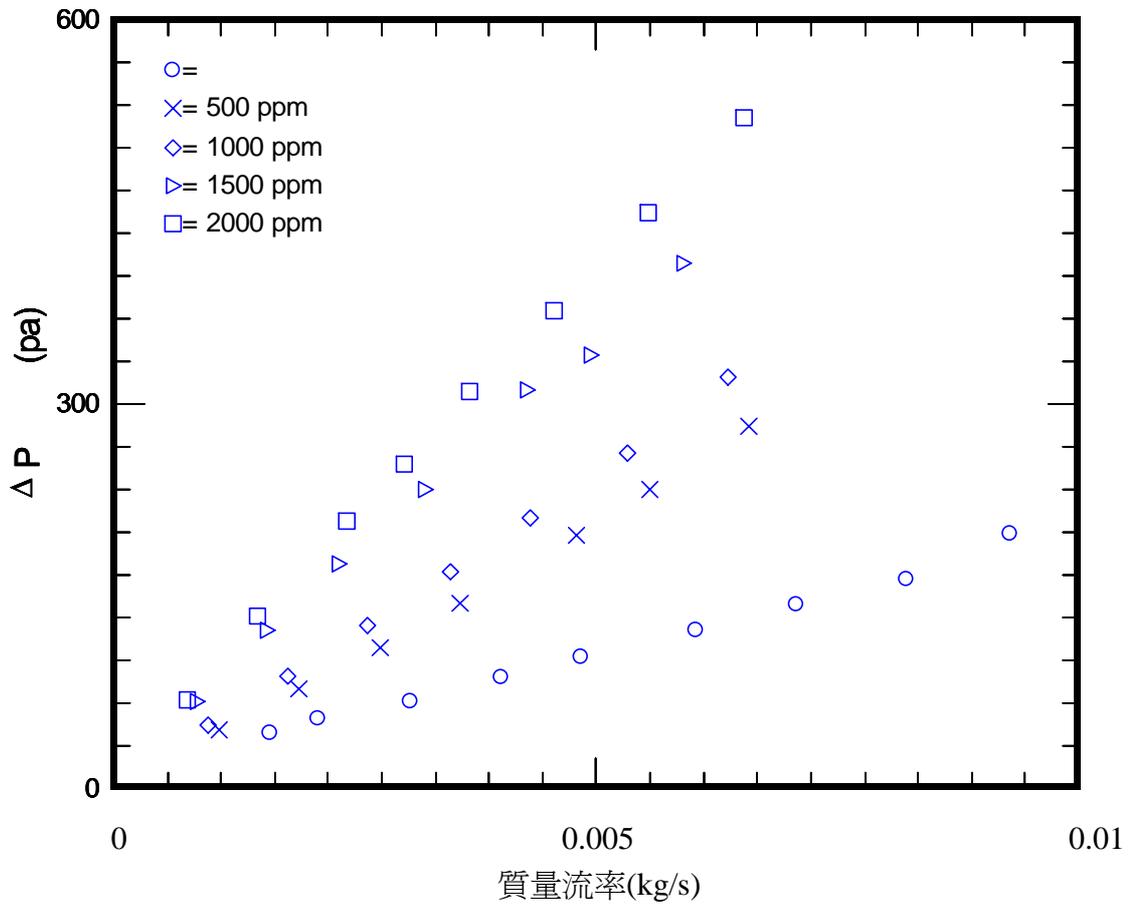


圖 3-2 工作流體在層流狀態下矩形管道內的質量流率與壓力差關係圖（不加熱）

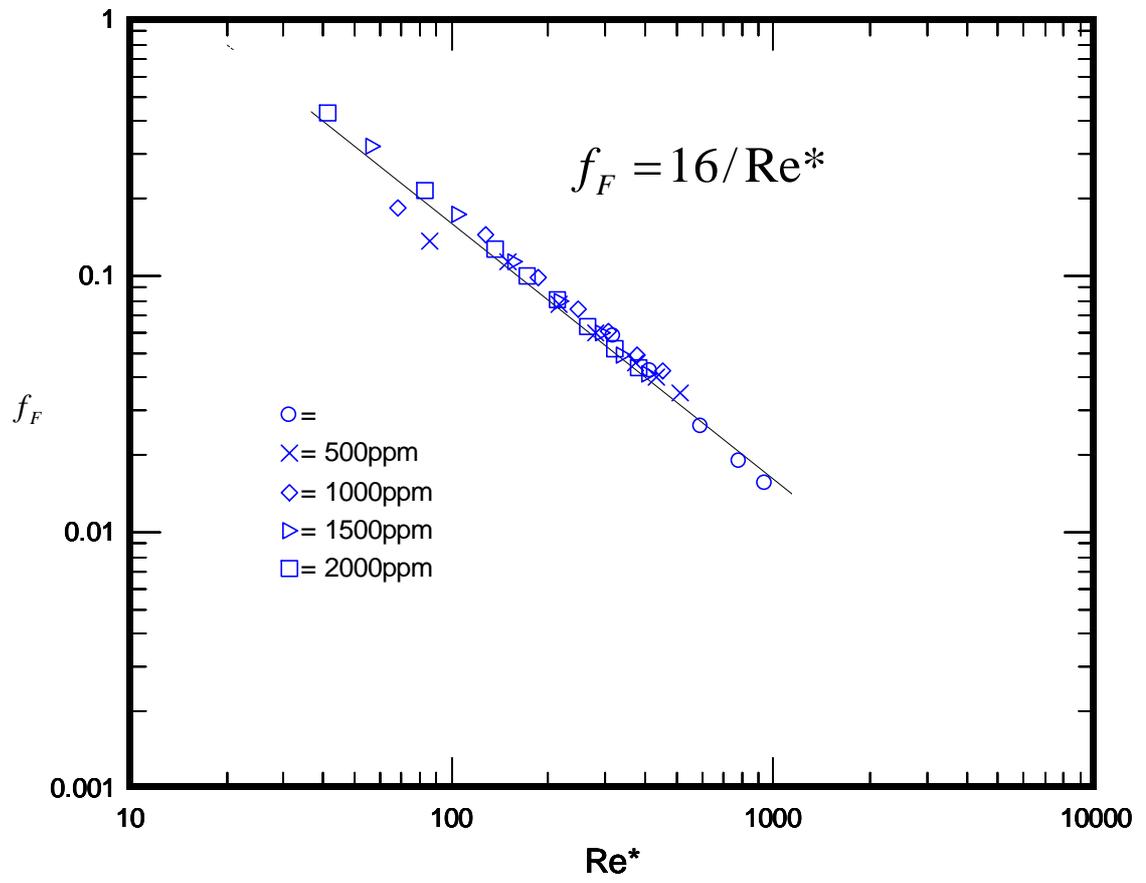


圖 3-3 層流狀態下廣義雷諾數與摩擦因子的關係圖(不加熱)

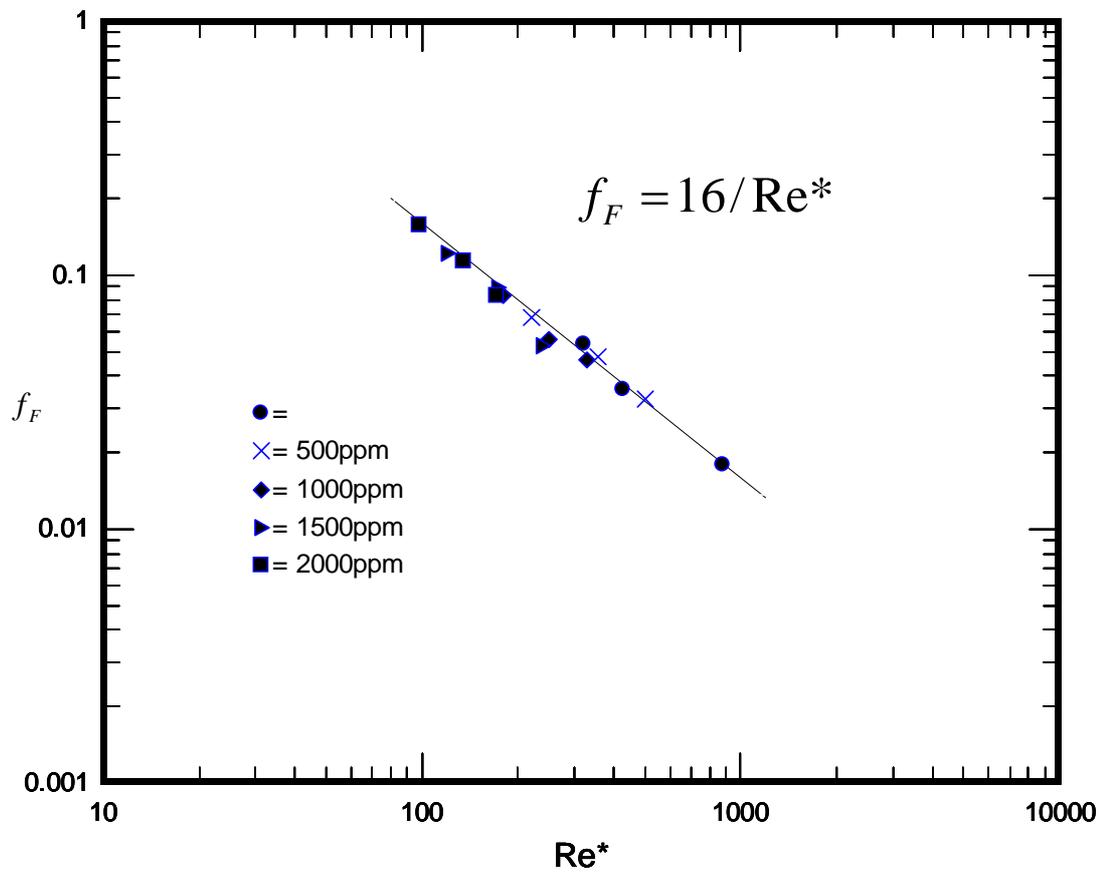


圖 3-4 層流狀態下矩形管道內廣義雷諾數與摩擦因子的關係圖(加熱)

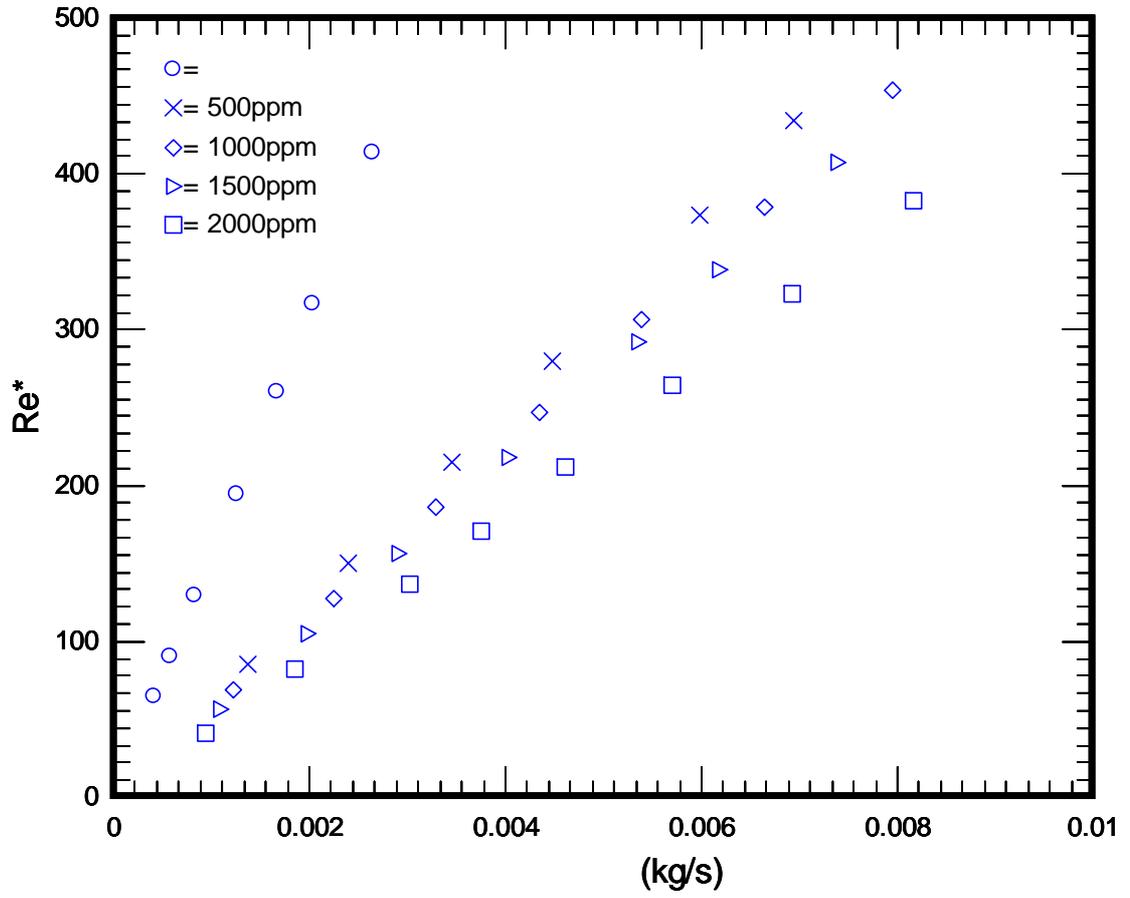


圖 3-5 在層流狀態下質量流率與廣義雷諾數的關係圖

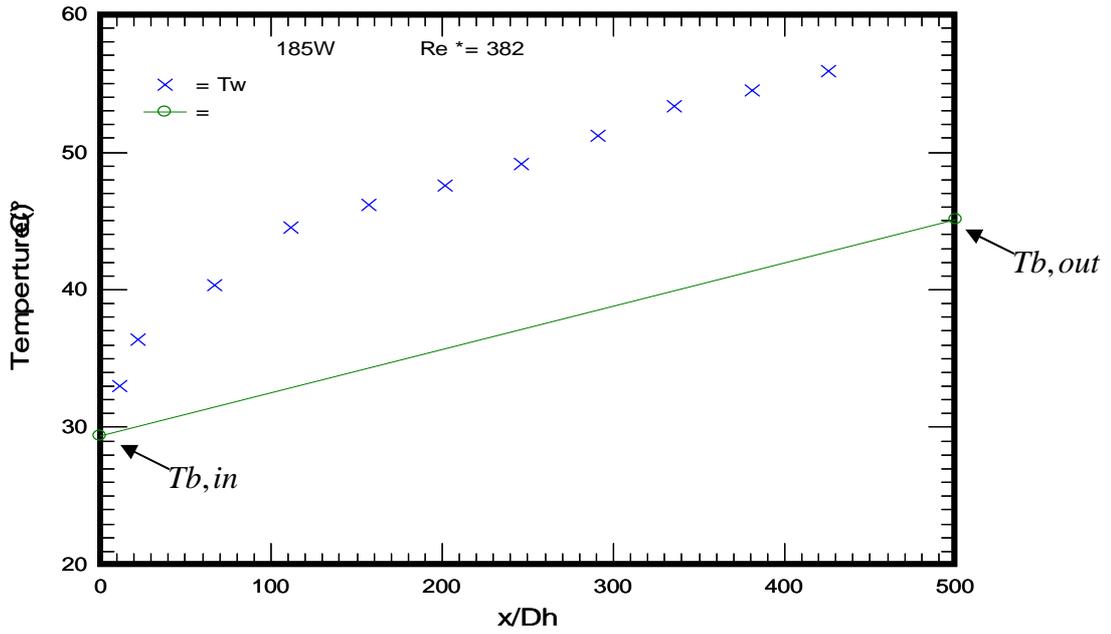


圖 3-6 純水在層流狀態上板加熱的壁面溫度分布圖

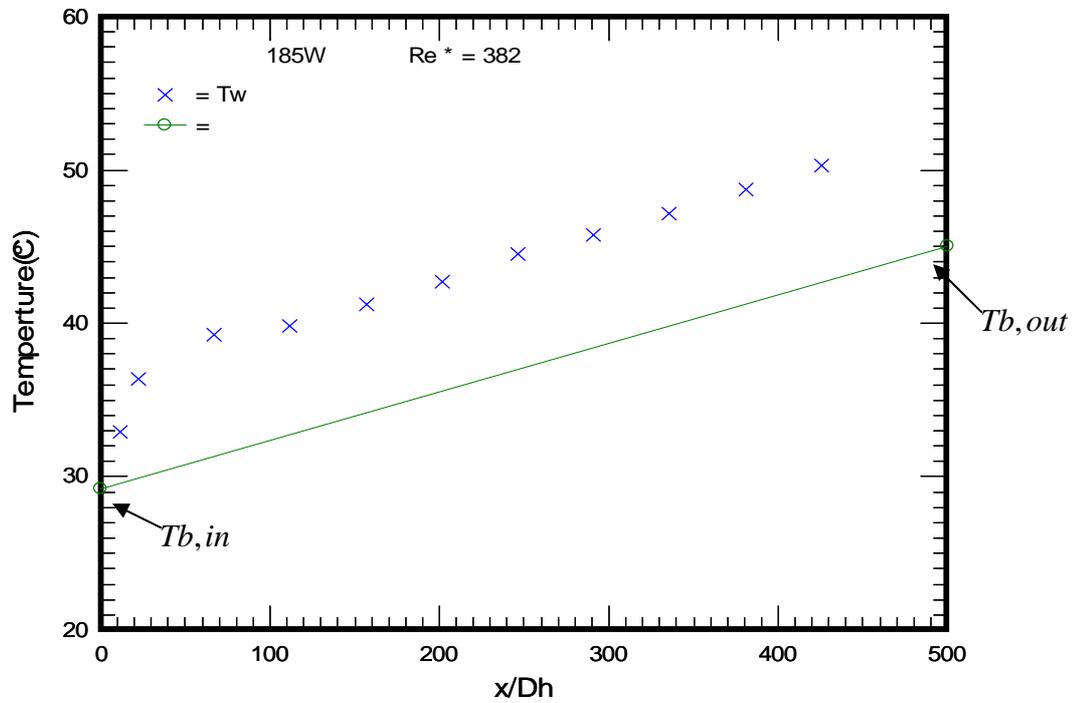


圖 3-7 純水在層流狀態下板加熱的壁面溫度分布圖

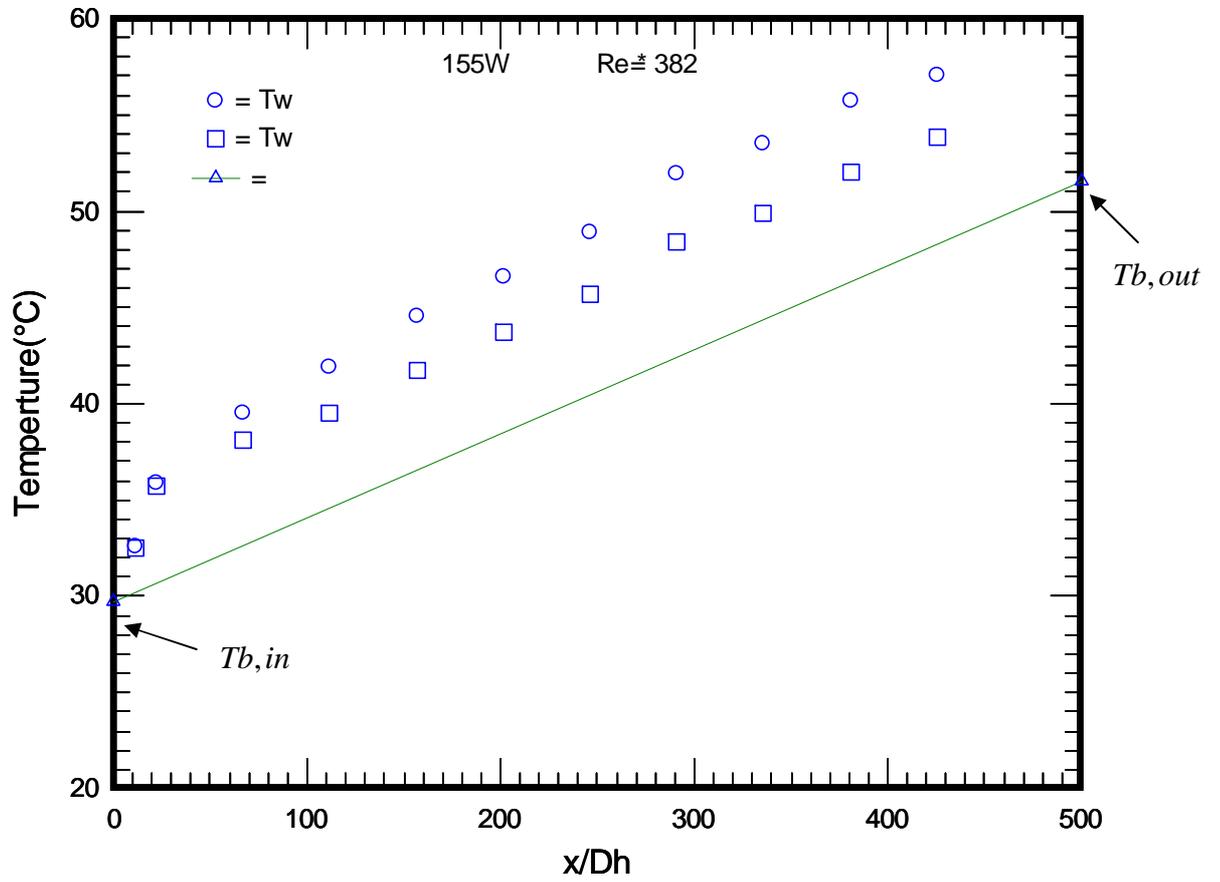


圖 3-8 純水在層流狀態上下板同時加熱的壁面溫度分布圖

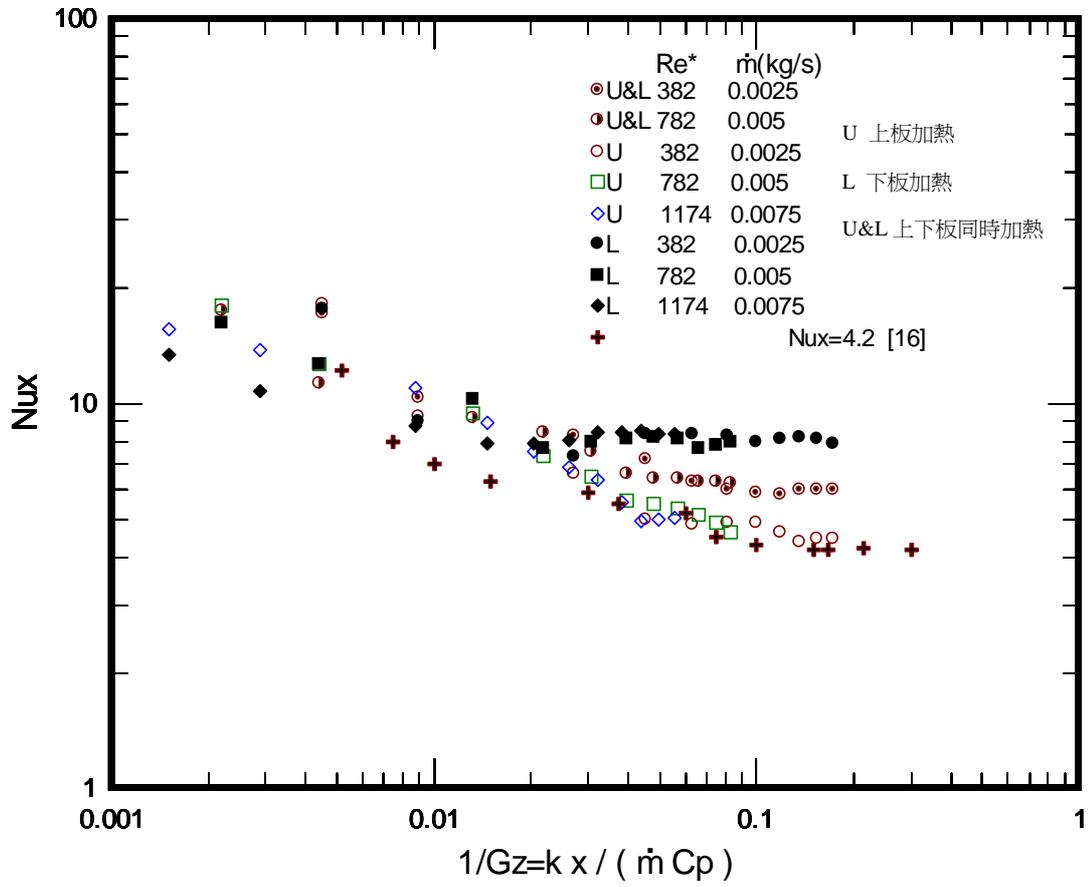


圖 3-9 純水在層流狀態下的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖($Q=185W$)

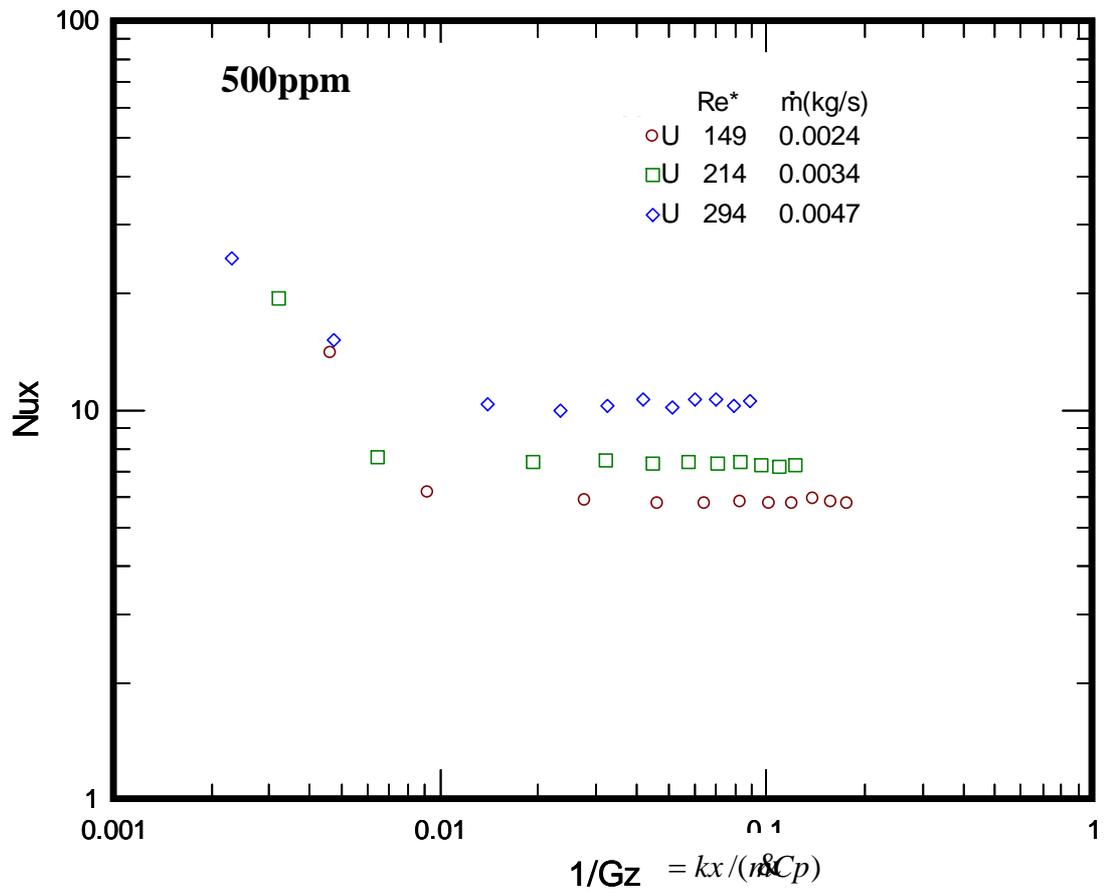


圖 3-10 500ppm 在層流狀態上板加熱的局部紐賽數與 $1/Gz$ 的關係圖
($Q=185W$)

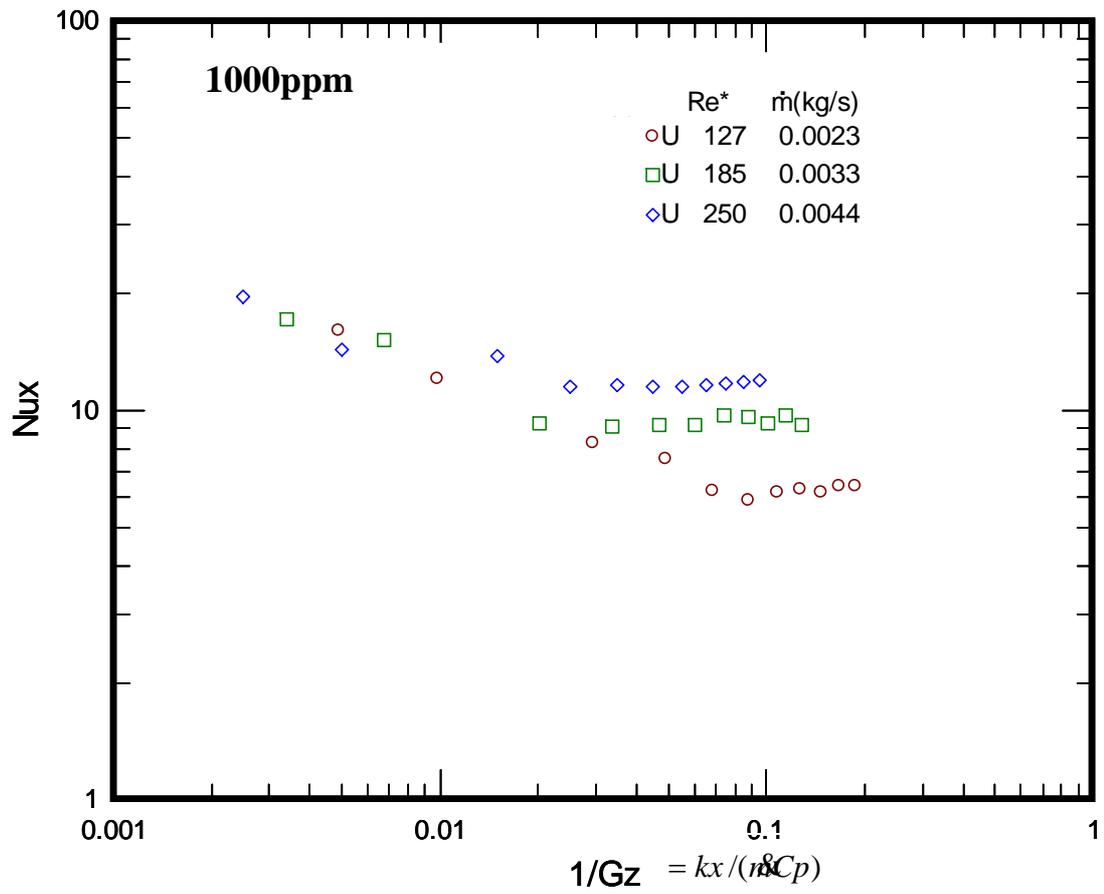


圖 3-11 1000ppm 層流狀態上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖

($Q=185W$)

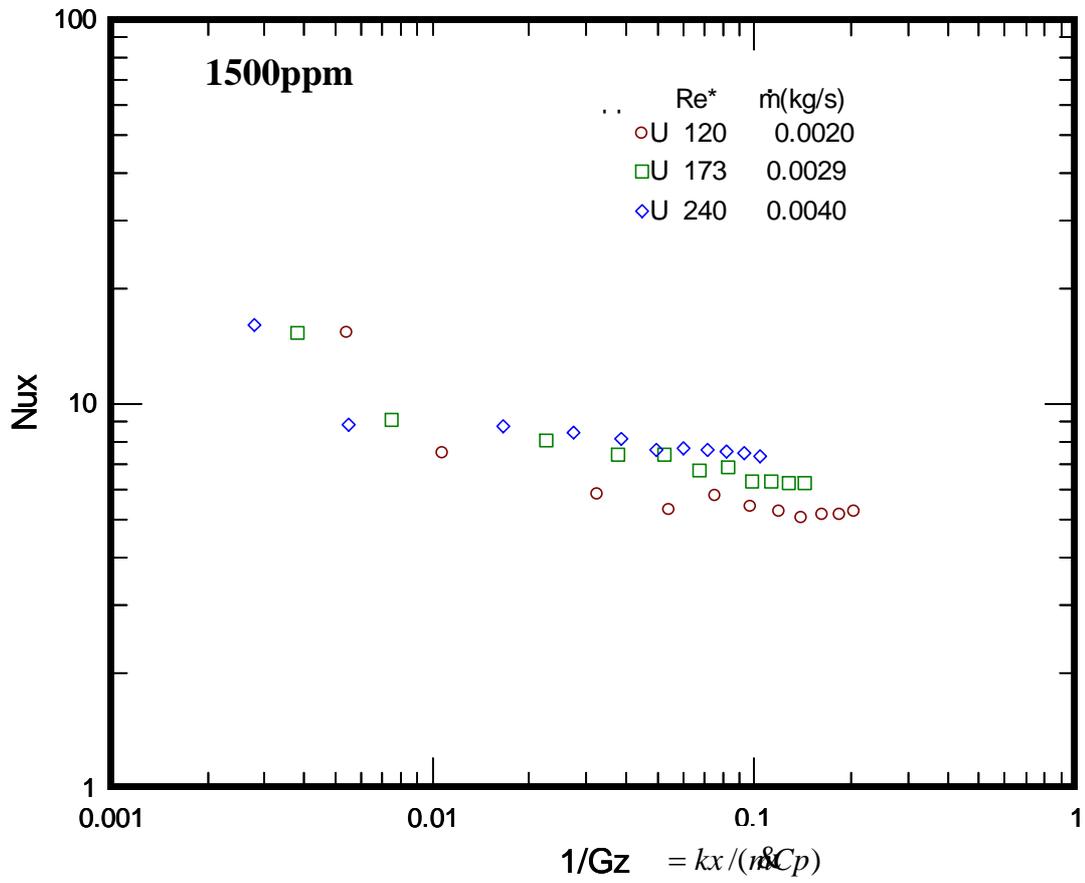


圖 3-12 1500ppm 在層流狀態 上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖

($Q=185W$)

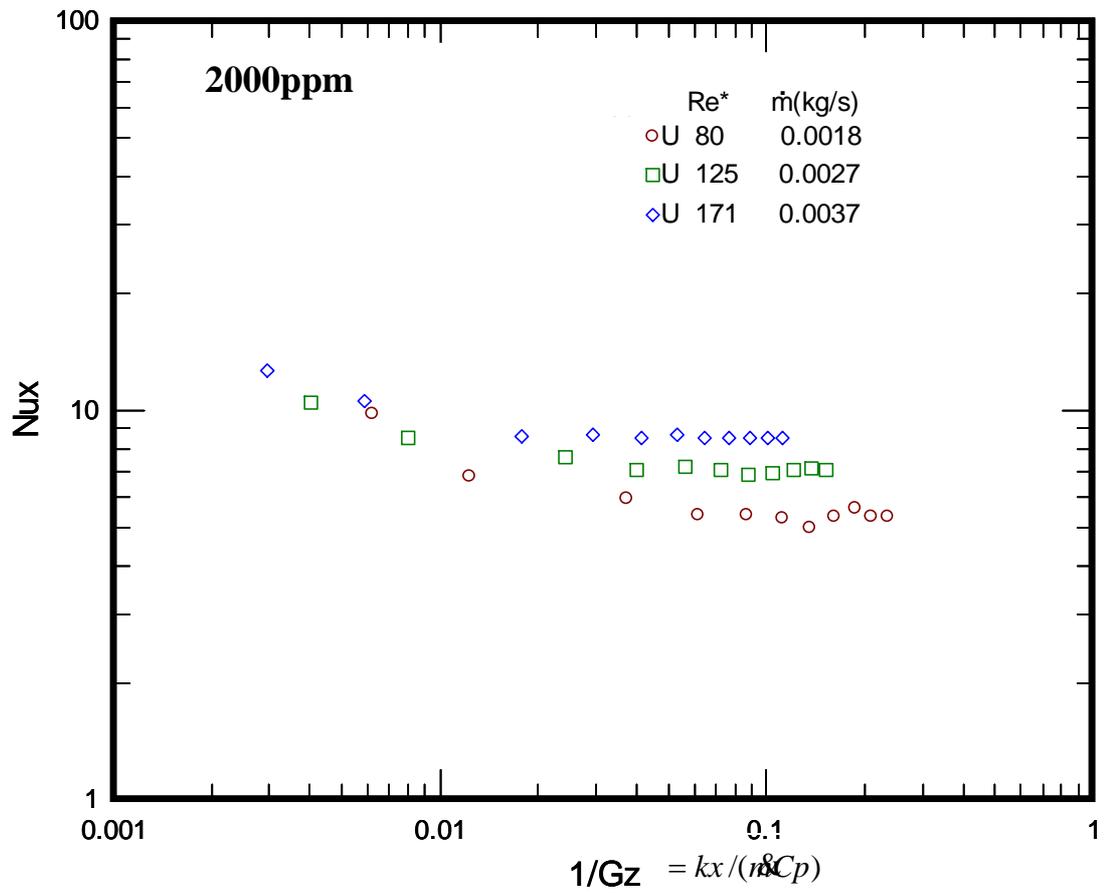


圖 3-13 2000ppm 在層流狀態 上板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖

($Q=185W$)

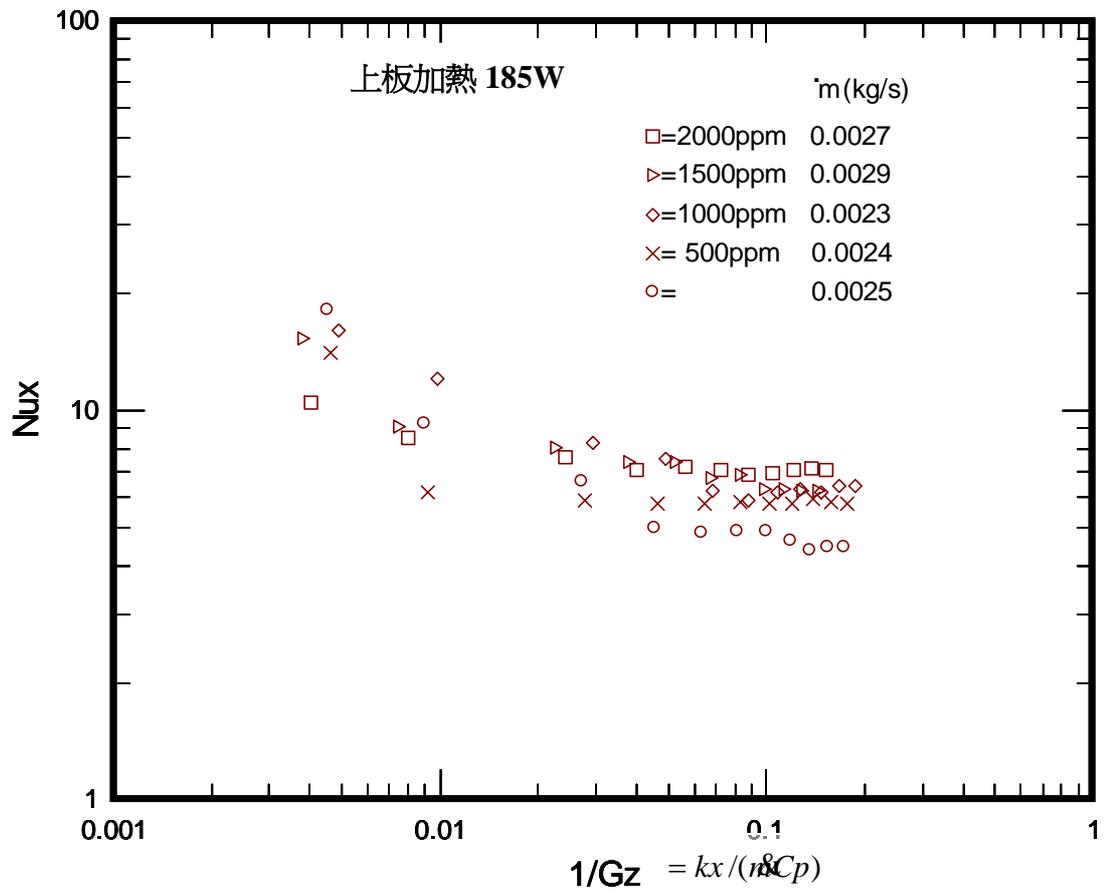


圖 3-14 層流狀態下工作流體在質量流率相似的比較圖

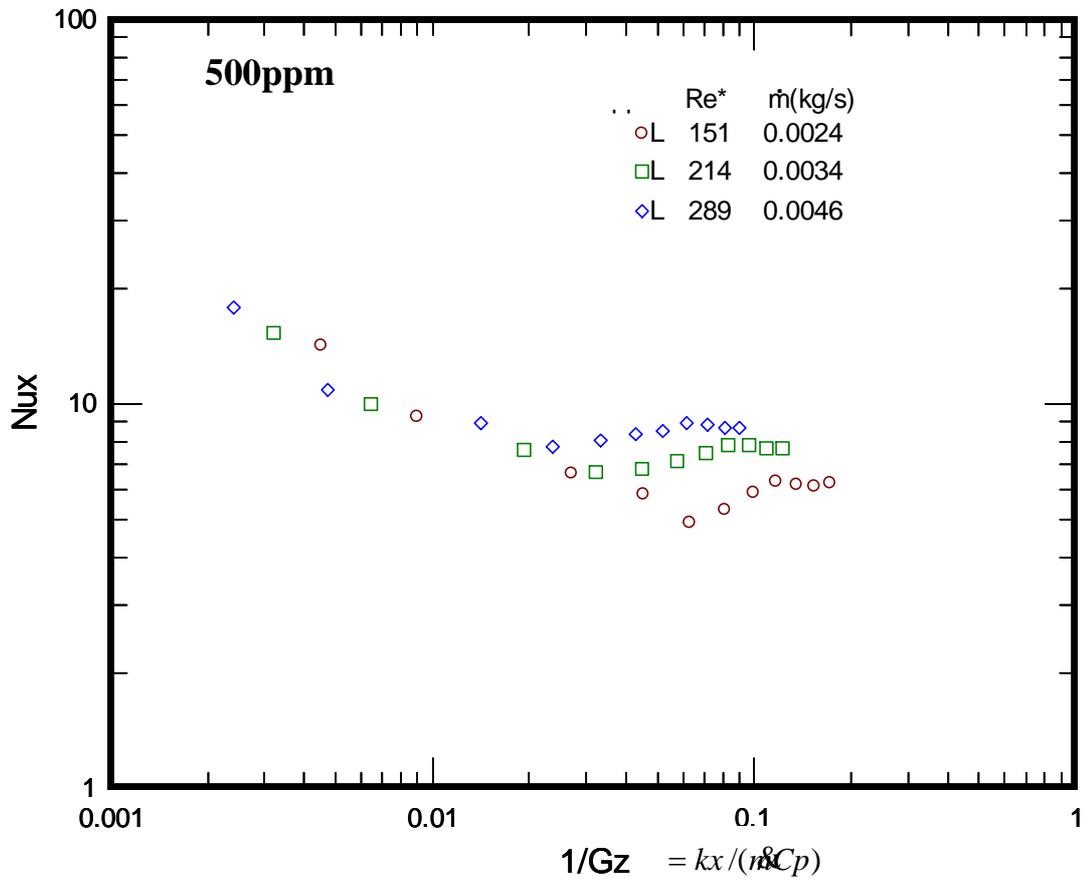


圖 3-15 500ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐賽數與 $1/Gz$ 的關係圖
($Q=185W$)

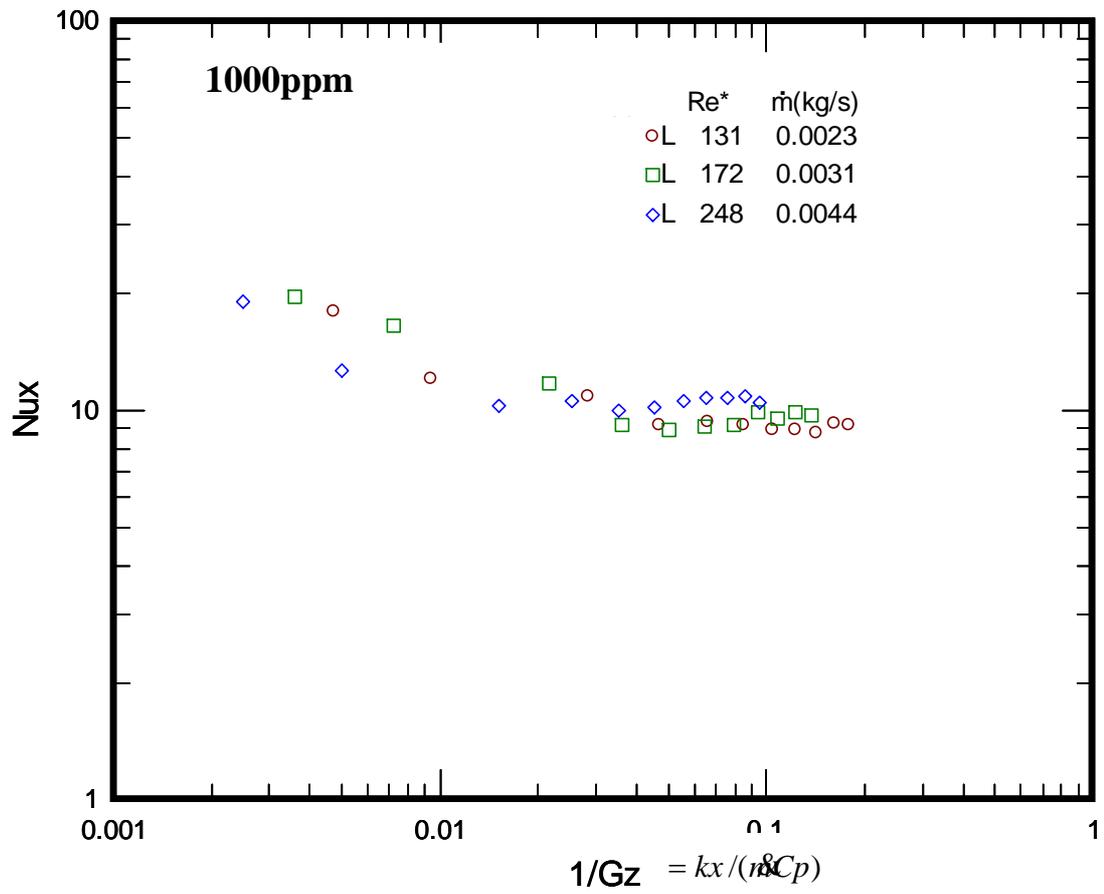


圖 3-16 1000ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖
($Q=185W$)

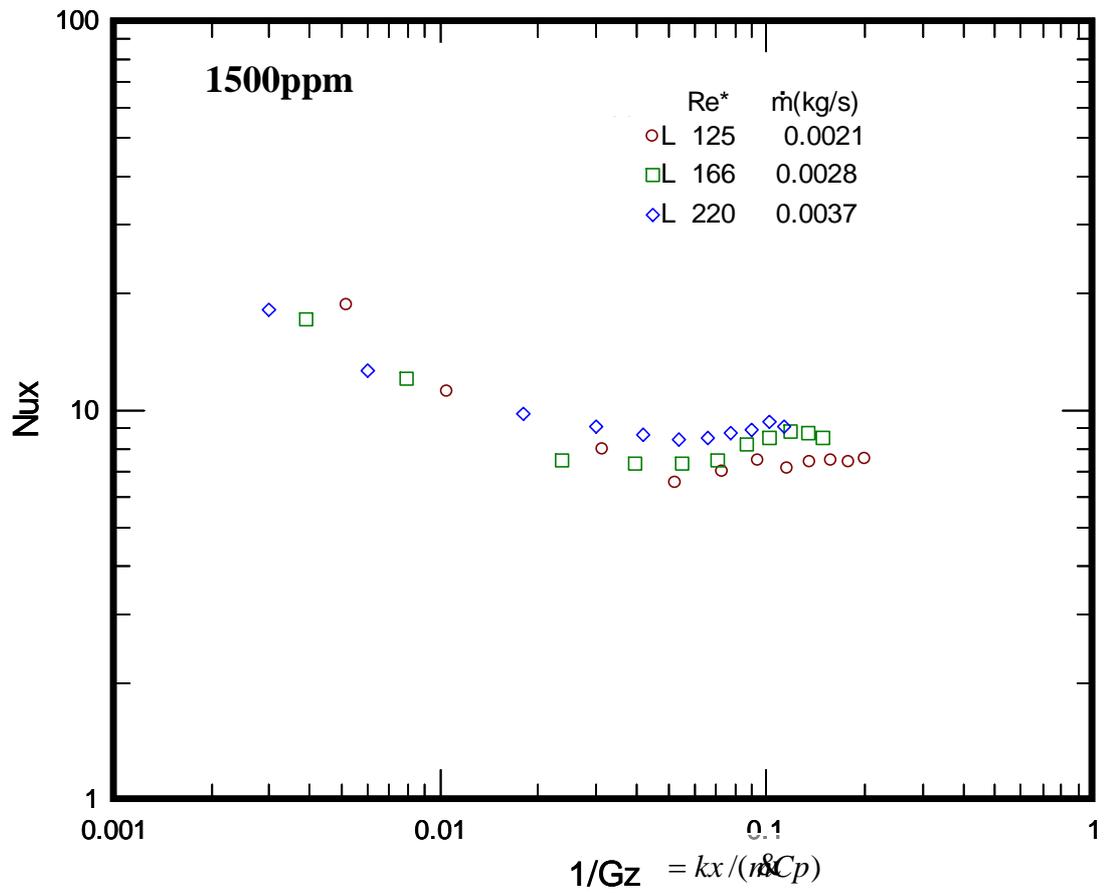


圖 3-17 1500ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖

($Q=185W$)

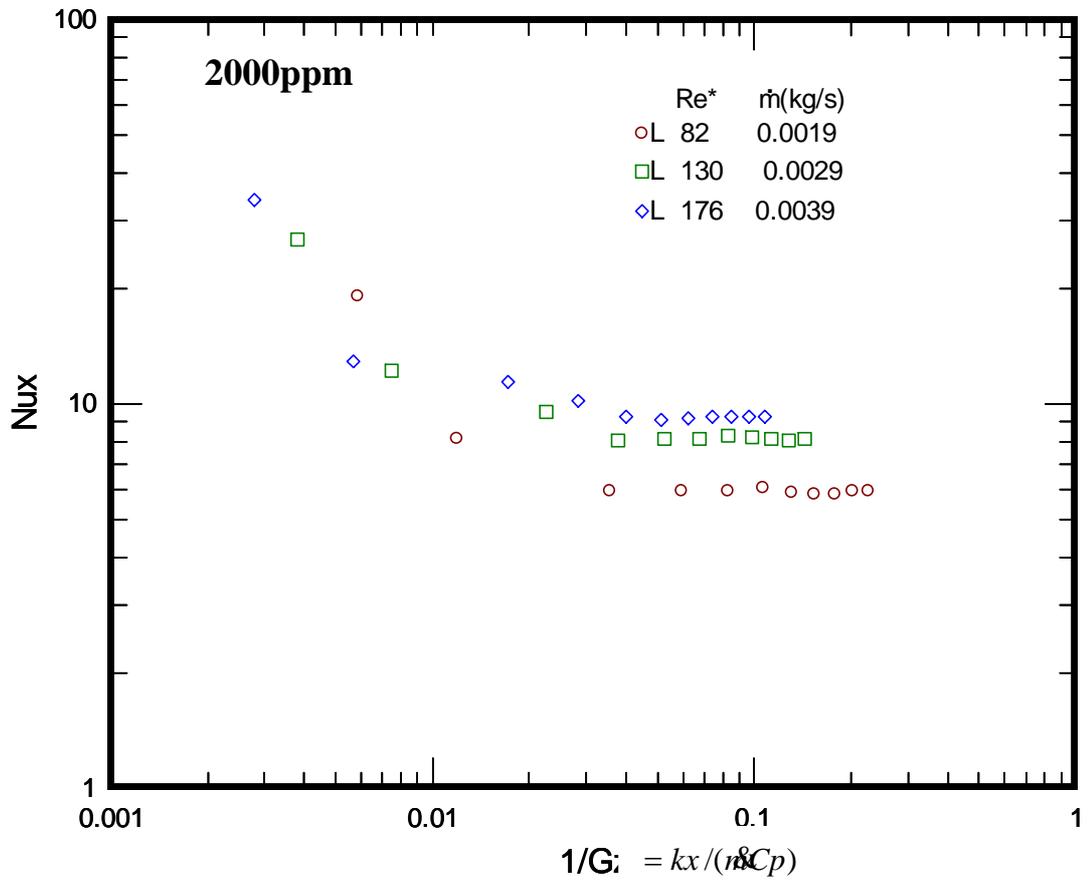


圖 3-18 2000ppm 在層流狀態下板加熱的局部紐塞數與 $1/Gz$ 的關係圖

($Q=185W$)

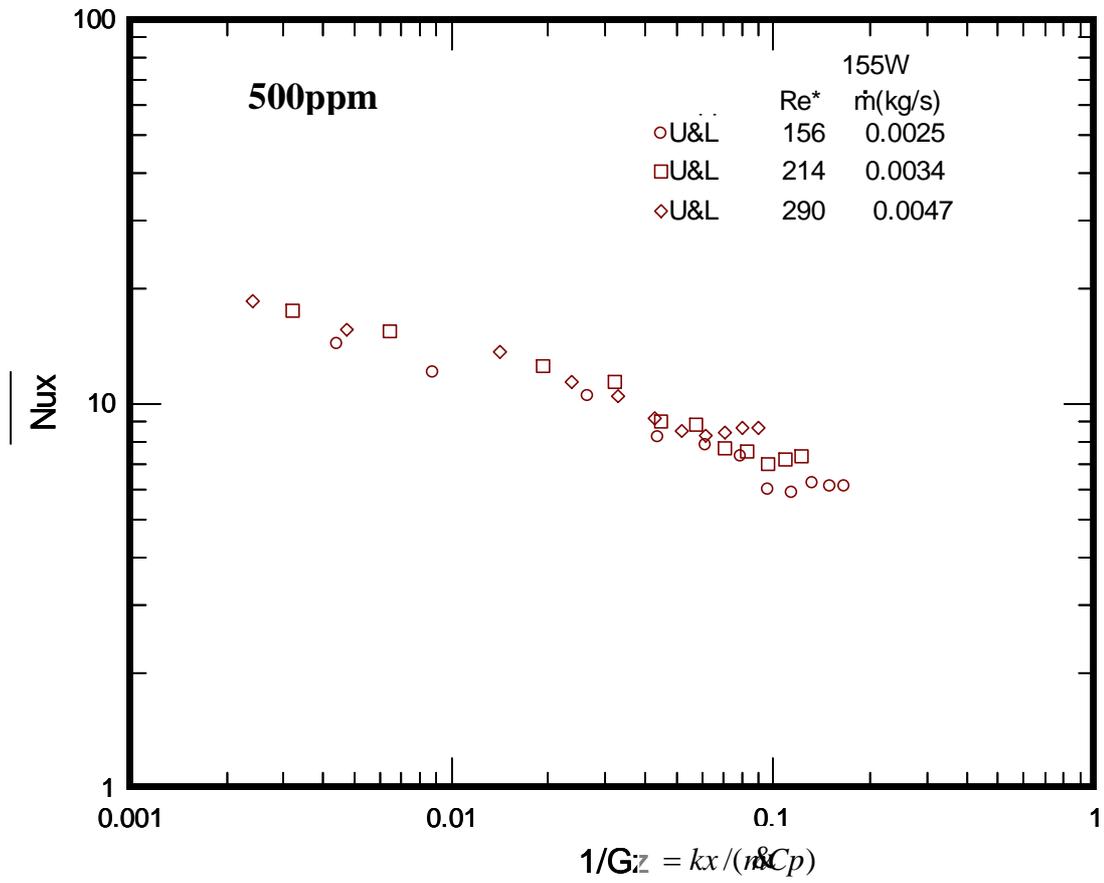


圖 3-19 500ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐賽數與 $1/Gz$ 的關係圖

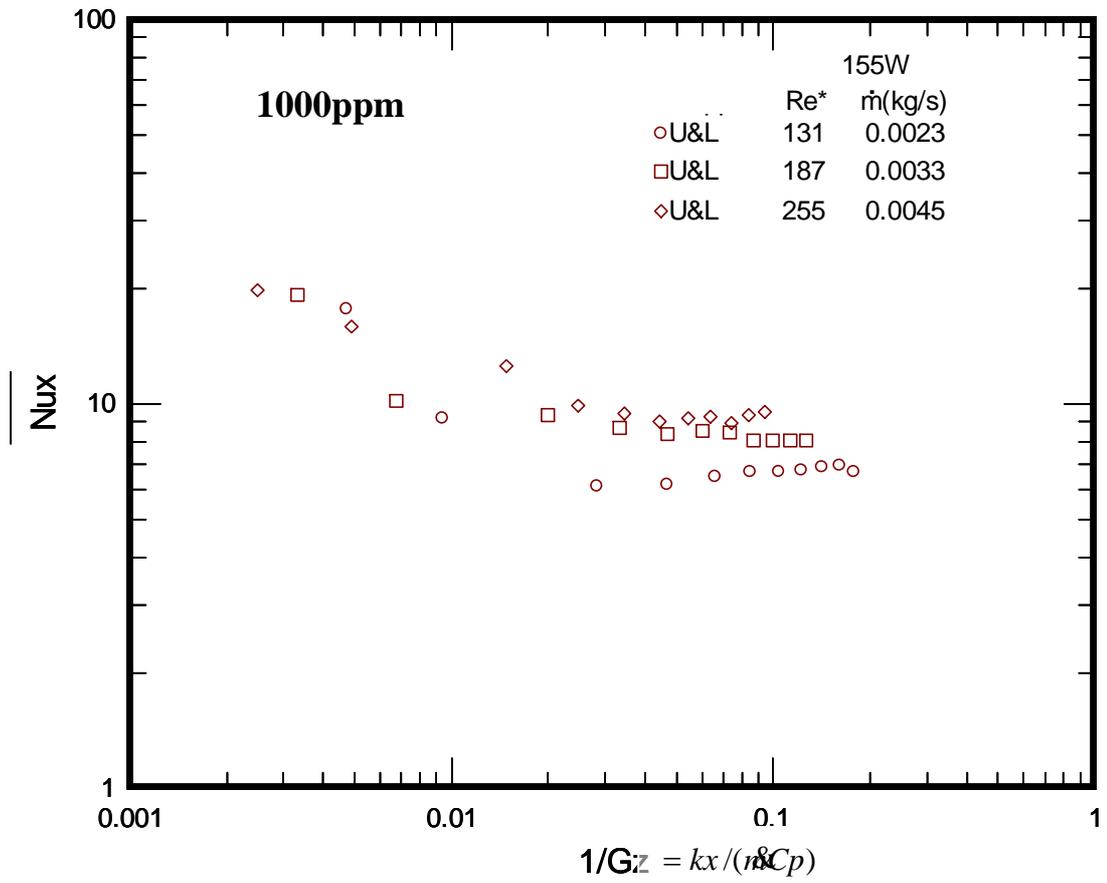


圖 3-20 1000ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐賽數與 $1/Gz$ 的關係圖

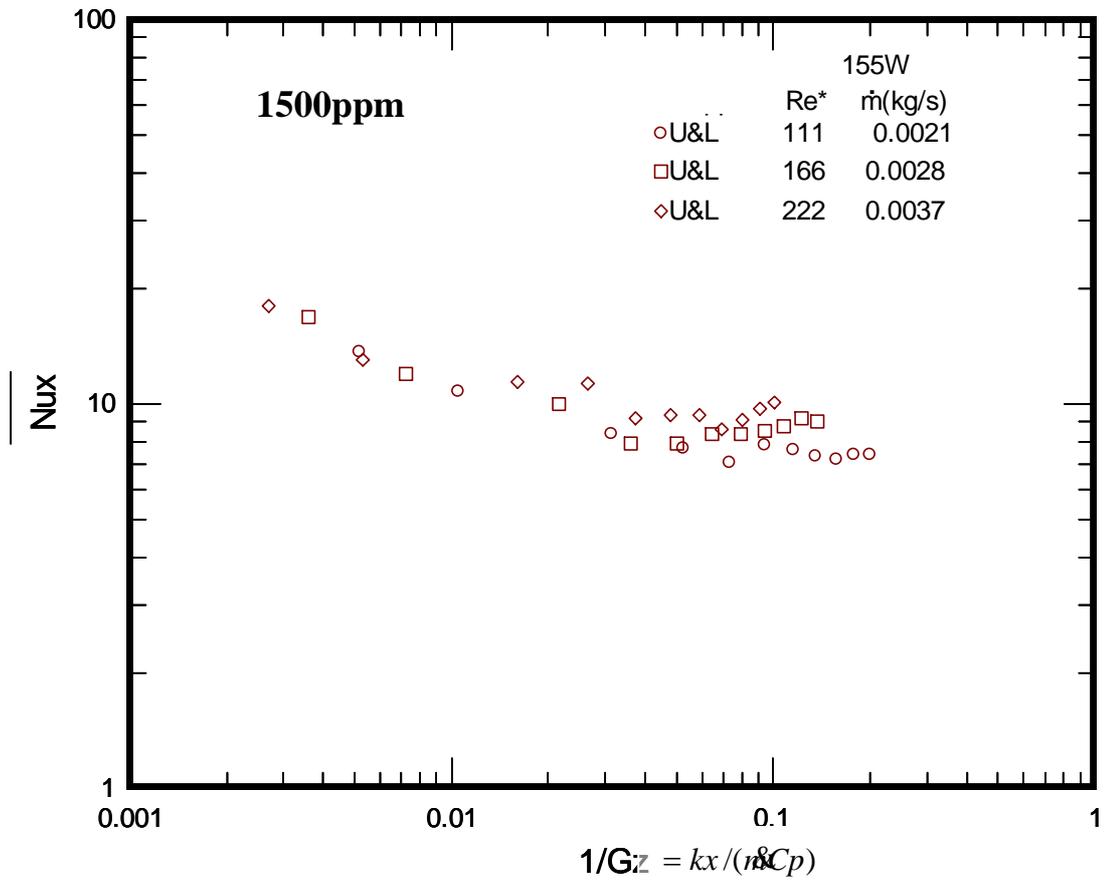


圖 3-21 1500ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐賽數與 $1/Gz$ 的關係圖

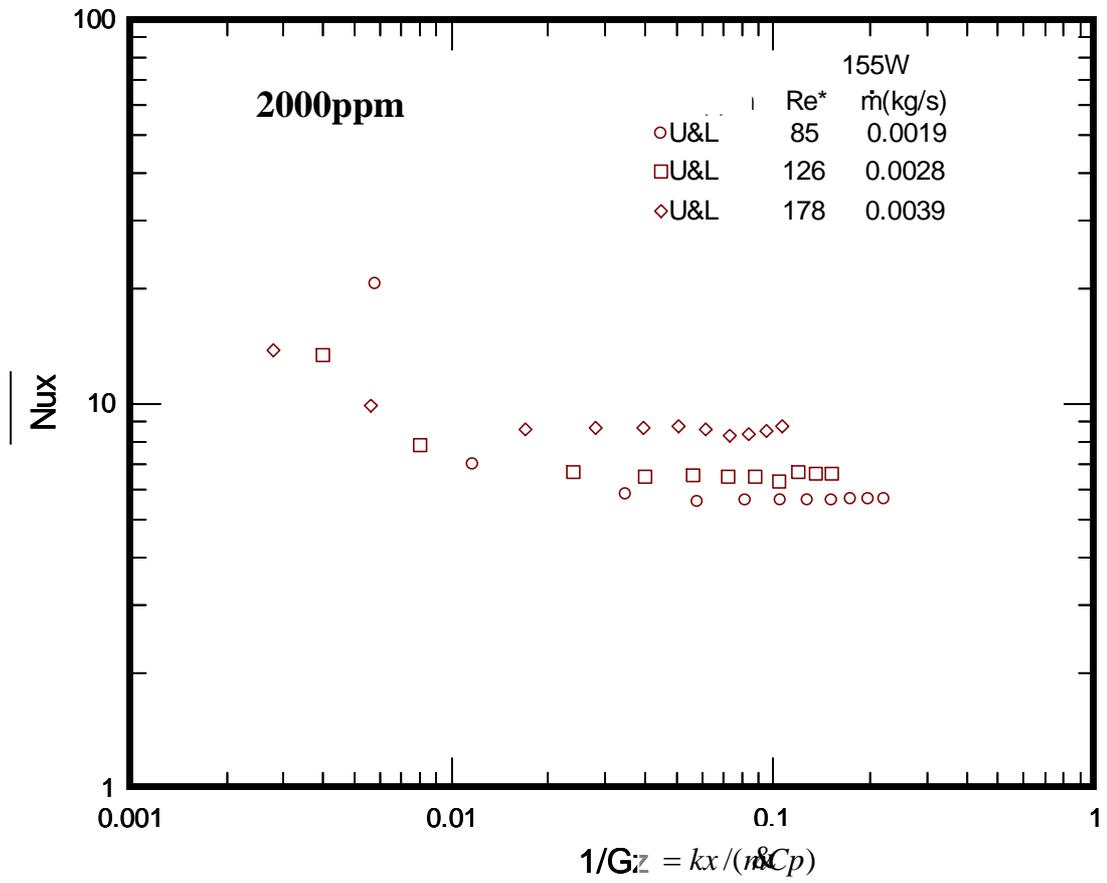


圖 3-22 2000ppm 在層流狀態上版與下板同時加熱的局部平均紐賽數與 $1/Gz$ 的關係圖

第四章 結論

本文的目的是探討黏彈性流體與牛頓流體之間的熱傳差異。經由實驗方式測試並比較聚丙醯胺水溶液（黏彈性流體）與純水（牛頓流體）在矩形管道中，層流狀態下，不同濃度與不同加熱邊界的熱傳與壓力降。茲將具體結果說明如下：

- (1) 壓力降：壓力降值會隨著速度增加而增高。另外在相同質量通率下，隨著濃度的增加，聚丙醯胺水溶液的壓力差值也跟著增高，即

$$\Delta p_{2000\text{ ppm}} > \Delta p_{1500\text{ ppm}} > \Delta p_{1000\text{ ppm}} > \Delta p_{500\text{ ppm}} > \Delta p_{H_2O} \quad (\text{相同質量通率下})$$

若把有加熱與沒加熱的壓力差值作比較，因受黏度影響，使得加熱時的壓力差值會略小於不加熱的壓力差值。

- (2) 紐塞數：在廣義雷諾數 80 至 300 範圍，入口溫度 $30 \pm 1^\circ C$ 的條件下，在完全發展區範圍內：

(a) 邊界條件在上板加熱，下板加熱，與上下板加熱的情況下，隨著雷諾數的上升，黏彈性流體的熱傳係數皆有增加的趨勢。其中以上板加熱，工作流體為 1000ppm 聚丙醯胺水溶液時，增加的趨勢最顯著，紐塞數比值最高可達 2.64。

(b) 下板加熱的情況下，在此廣義雷諾數的範圍內，聚丙醯胺水溶液的熱傳增強以正向力差所產生的二次流效應為主，浮力所產生的二次流效應為輔，與相同質量流率的純水比較發現紐塞數比值範圍為 0.80 ~ 1.41，與純水浮力造成的二次流效應相近，由此可知雖然在同樣質量流率的情況下，濃度的增加會使分子鍵結較密，彈性力增加，因此正向力差增強而使二次流增強，但是濃度的提升也使得黏度上升，雷利數變小，所以因浮力產生的二次流也相對減弱了，且浮力產生的二次流與正向力差的二次流方向相反，有相抵銷的情況。

- (3) 熱傳增強效益比：在廣義雷諾數 80~300 的範圍下與純水作比較，上板加熱的情況，聚丙醯胺水溶液 500ppm，1000ppm 的效益比皆高於 1，1500ppm，2000ppm 低於 1，在下板加熱以及上下板加熱的情況，聚丙

醯胺水溶液的效益比皆低於 1。

在本次實驗中，發現廣義雷諾數 80~300，邊界條件為上板加熱時，最能突顯出聚丙醯胺水溶液(黏彈性流體)與純水(牛頓流體)的熱傳效果的差異，此時聚丙醯胺水溶液具有良好的熱傳增加效果，但濃度過高反而造成過大的壓降產生。在實驗中顯示，低濃度的聚丙醯胺水溶液在 500ppm 與 1000ppm 時，皆有相當良好的熱傳係數，也不會造成過大的壓降增降量，故熱傳增強效益比最佳，皆高於 1。

由於本實驗由於實驗設計與設備的限制，在加熱的情況下，質量流率最大為 0.005kg/s，即廣義雷諾數的最大值只到 300，若能再提升質量流率，效益比隨著廣義雷諾數的增加應還有提升的空間。



附錄 A 實驗不準度分析【17】

根據文獻[17]所整理出來的方法來分析實驗的不準度。實驗結果是經由一系列實驗量測而得到的，因此實驗結果 R 為各個實驗量測參數 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 的函數。

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

而在 x_i 時產生有 δx_i 的變化，使得 R 值有的 δR_i 變化量

$$\begin{aligned}\delta R_i &= \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \\ \frac{\delta R_i}{R} &= \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i}\end{aligned}\quad (\text{A.1})$$

所以 x_i 由所造成的不準度， u_{R_i} ：

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad (\text{A.2})$$

假設 u_R 為實驗結果的不準度，而 $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ 為各個實驗量測參數的不準度。則實驗結果的不準度與各個實驗量測參數的不準度的關係為：

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

不準度分析：

A-1 質量流率不準度分析

本實驗是以燒杯配合碼錶量測工作流體在兩分鐘時間內的質量流率：

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (\Delta m = m_f - m_e)$$

而誤差參數

$$\text{燒杯裝滿水, } u_{m_f} = \pm \frac{2g}{1060g} = \pm 0.0018$$

$$\text{燒杯未裝水, } u_{m_e} = \pm \frac{2g}{78g} = \pm 0.0256$$

$$\begin{aligned}
u_{\Delta m} &= \pm \left[\left(\frac{m_f}{\Delta m} \frac{\partial \Delta m}{\partial m_f} u_{m_f} \right)^2 + \left(\frac{m_e}{\Delta m} \frac{\partial \Delta m}{\partial m_e} u_{m_e} \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= \{ [(1.079)(1)(\pm 0.0018)]^2 + [(0.0079)(1)(0.0256)]^2 \}^{1/2} \\
&= \pm 0.00195 \\
u_{\Delta t} &= \pm \frac{0.2s}{120s} = \pm 0.0017
\end{aligned}$$

由於 $m = m(\Delta m, \Delta t)$

$$\begin{aligned}
u_m &= \pm \left[\left(\frac{\Delta m}{m} \frac{\partial m}{\partial \Delta m} u_{\Delta m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{m} \frac{\partial m}{\partial \Delta t} u_{\Delta t} \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= \pm \left[(1)(\pm 0.00195)^2 + (1)(0.0017)^2 \right]^{1/2} \\
&= \pm 0.0026 \text{ or } \pm 0.26\%
\end{aligned}$$

A-2 面積不準度

實驗測試端的面積為 $10 \times 5 \text{ mm}$ ，假設基本誤差為 0.1 mm ，

$$A = a \times b$$

$$u_a = \pm \frac{0.1}{10} = \pm 0.01$$

$$u_b = \pm \frac{0.1}{5} = \pm 0.02$$

$$\begin{aligned}
u_A &= \pm \left[\left(\frac{a}{A} \frac{\partial A}{\partial a} u_a \right)^2 + \left(\frac{b}{A} \frac{\partial A}{\partial b} u_b \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= \pm (u_a^2 + u_b^2)^{1/2} \\
&= \pm 0.022 \text{ or } \pm 2.2\%
\end{aligned}$$

A-3 周長不準度

$$P = 2(a + b)$$

$$\begin{aligned}
u_P &= \pm \left[\left(\frac{a}{P} \frac{\partial P}{\partial a} u_a \right)^2 + \left(\frac{b}{P} \frac{\partial P}{\partial b} u_b \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= \pm \left[\left(\frac{a}{a+b} u_a \right)^2 + \left(\frac{b}{a+b} u_b \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= \pm 0.014 \text{ or } \pm 1.4\%
\end{aligned}$$

A-4 水力直徑不準度

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

$$u_{D_h} = \pm \left[\left(\frac{A}{D_h} \frac{\partial D_h}{\partial A} u_A \right)^2 + \left(\frac{P}{D_h} \frac{\partial D_h}{\partial P} u_P \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \pm (u_A^2 + u_P^2)^{1/2}$$

$$= \pm 0.02607 \quad \text{or} \quad \pm 2.6\%$$

A-5 量測溫度局部壁溫，進出口溫度最大不準度

數據擷取機的最小精準度為 0.1°C ，最低量測溫度為 30°C

$$u_{T_w} = 0.33\%$$

A-6 進出口溫度差最大不準度

在實驗中，進出口溫差最低為 10°C ，且出口溫度最低為 40°C

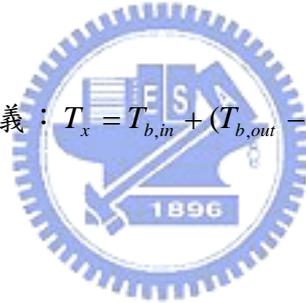
$$\Delta T_b = T_{b,out} - T_{b,in} ,$$

$$u_{\Delta T_b} = 1.19\%$$

A-7 局部流體溫度

局部流體溫度的定義： $T_x = T_{b,in} + (T_{b,out} - T_{b,in}) \left(\frac{x}{L} \right)$

$$u_{T_x} = 1.24\%$$



A-8 熱通量不準度

加熱量為 $Q_{sensible} = m C_p (T_{b,out} - T_{b,in})$ ，進出口溫差 C_p 是流體比熱，由查表得到，所以誤差在 1% 以下，故計算可得

$$u_Q = 1.58\%$$

故在測試端的每單位面積熱傳量為

$$q_x = \frac{Q_{sensible}}{LW}$$

其中 W 為測試段寬度， L 為測試段長度

$$\text{則 } u_{q_x} = 2.71\%$$

A-9 局部熱傳係數不準度

局部熱傳係數的定義為： $h_x = \frac{q_x}{T_{wx} - T_x}$

$$u_{hx} = 3.00\%$$

A-10 局部紐塞數不準度

紐塞數定義為： $Nu_x = \frac{h_x \cdot D_h}{k}$ ，其中 k 由表查得，所以誤差在 1% 以下，因

此計算可得

$$u_{Nu_x} = 4.09\%$$

A-11 Gz 數的不準度

Gz 的定義： $Gz = \frac{m \cdot C_p}{kx}$ ，其中 C_p 與 k 由表查得，所以誤差在 1% 以下，因此

計算可得

$$u_{Gz} = 1.44\%$$

A-12 壓力差降的不準度

差壓計採用 Foxboro 公司產品，其輸出訊號為 4-20mA，誤差值可達 $\pm 0.1\%$

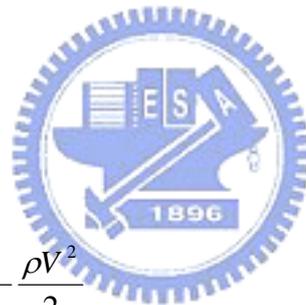
所以

$$u_{\Delta p} = 0.1\%$$

A-13 摩擦因子的不準度

摩擦因子的定義如下

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2}$$



得到達西摩擦因子 (Darcy friction factor, f)，其中 ρ 由表查得，所以誤差在

1% 以下，計算可得

$$u_f = 4.19\%$$

A-14 不加熱的情況下雷諾數的不準度

雷諾數定義為

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi \mu \cdot D_h} = Re(\dot{m}, \mu, D_h)$$

$$u_{Re} = \pm 2.8\%$$

參考文獻

- 【1】 Xie, C. and Hartnett, J. P. ,1992, “Influence of Rheology on Laminar Heat Transfer to Viscoelastic Fluids in a Rectangular Duct” ,Ind. Eng. Chem. Res. ,Vol.31, pp727-732.
- 【2】 Jamieson, A., 2002,” Rheology and Nano-rheology” , National Chung Hsing University.
- 【3】 Lin, C.X. and Ko, S.Y., 1996, “Laminar Heat Transfer in Square Duct Flow of Aqueous CMC Solutions” , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.39, No.3 ,pp.503-510.
- 【4】 Carreau, P.J., 1972, “Rheological Equations from Molecular Network Theories” , Trans. Soc. Rheol, Vol.16, pp.99-109.
- 【5】 Gao, S.X. and Hartnett, J.P., 1996,” Heat Transfer Behavior of Reiner-Rivlin Fluids in Rectangular Duct” , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.39, pp1317-1324.
- 【6】 Shin, S., 1996, “The Effect of The Shear Rate-Dependent Thermal Conductivity of Non-Newtonian Fluids on The Heat Transfer in A Pipe Flow” , Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp665-677.
- 【7】 Chang, P.Y. Chou,F.C. Tung, C.W., 1998, “Heat Transfer Mechanism for Newtonian and Non-Newtonian Fluids in 2:1 Rectangular Ducts” , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.41, pp3841-3856.
- 【8】 Shin, S.S. Ahn, H.H. Cho, Y.I. and Sohn, C.C. , 1999, “Heat Transfer Behavior of a Temperature-Dependent Non-Newtonian Fluid with Reiner-Rivlin Model in a 2:1 Rectangular Duct” , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.42, pp2935-2942.
- 【9】 Sohn, C.H. Ahn, S.T. and Shin, S. ,2000, “Heat Transfer Behavior of Temperature-Dependent Viscoelastic Non-Newtonian Fluid with Buoyancy Effect in 2:1 Rectangular Duct” , Int. Comm. Heat Transfer, Vol.27, pp159-168.
- 【10】 Kozicki,W. Chou, C.H. and Tiu, C. ,1966, “Non-Newtonian Flow in Ducts of Arbitrary Cross-Sectional Shape” , Chem. Eng. Sci., Vol.21, pp665-679.
- 【11】 Xie, C. and Hartnett, J. P. ,1992, “Influence of Variable Viscosity of Mineral Oil on Laminar Heat Transfer in a 2:1 Rectangular Duct” , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.35,

pp641-648.

【12】 Etemad, S.Gh and Sadeghi, M,2001 , “ Non-Newtonian Pressure Drop and Critical Reynolds Number Through Rectangular Duct” , Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 28 No.4, pp555-563

【13】 劉大傑, 1997, “高分子加工原理與應用” ,揚智文化事業出版, pp68~132

【14】 Boger, D.V. Halmos, A. L.,1981, “Non-Newtonian Flow II- Fully Developed Tube Flow” , American Institute of Chemical Engineers, pp.8~15

【15】 Tiu, C. Zhou, J. Nicolae, G. Fang, T. N. and Chhabra, P., 1997, “Flow of Viscoelastic Polymer Solutions in Mixed Beds of Particles” , Can. J. of Chem. Eng., Vol. 75, pp843-850.

【16】 Hartnett, J. P. and Kostic, M., 1985, “ Heat Transfer to A Viscoelastic Fluid in Laminar Flow Through A Rectangular Channel” , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.28, pp1147-1155

【17】Young, H.D., 1962 , “Statistical Treatment of Experimental Data” . New York: McGraw Hill.

