

國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

黏彈性流體在寬高比 2:1 之水平矩形管道內的  
熱傳增強實驗

The Study of Heat Transfer Enhancement to a Viscoelastic Fluid in  
Laminar Flow Through a aspect-ratio 2:1 Rectangular Duct



研究生：郭聖良

指導教授：盧定昶 博士

中華民國九十四年七月

黏彈性流體在寬高比 2:1 之水平矩形管道內的  
熱傳增強實驗

**The Study of Heat Transfer Enhancement to a Viscoelastic Fluid in Laminar  
Flow Through a Aspect-ratio 2:1 Horizontal Rectangular Duct**

研究生：郭聖良

Student : Sheng-Liang Guo

指導教授：盧定昶

Advisor : Ding-Chong Lu

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

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 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月

## 致謝

在交大能順利完成論文，首先必須感謝指導教授盧定昶博士在我研究所三年的時間對我的諄諄教誨，不論是解答課業的專業問題以及引導我思考解決論文研究過程所遇到的問題或是如何做到做人處事上的圓融，都對我產生的極大的影響力，讓我日後在思考每一件事情的時候都能有更多的思維。另外感謝工研院能資所副所長徐瑞鐘博士以及楊文美教授給予本論文的指導與建議，使本論文內容更加完整。

感謝余致廣學長與褚偉建學長在實驗上的規劃給予建議，並且對於實驗中遇到的問題能陪我共同想辦法解決，使得論文能夠順利完成。感謝許家棟學長、顏家宏學長以及張好綺學姐在實驗期間給予精神上的鼓勵。感謝實驗室同窗中彥、智敏以及岳璋於在學期間的相互扶持，支持我度過每一個難關，另外亦感謝學弟克敏為實驗室大小事情克盡心力。

感謝我的家人讓我能夠無後顧之憂的求學，將心力全放在學業上，且在我沮喪之時，伸出溫暖的雙手鼓勵我。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。

郭聖良 謹誌於新竹交大

# 黏彈性流體在寬高比 2:1 之水平矩形管道內的 熱傳增強實驗

研究生：郭聖良

指導教授：盧定昶

國立交通大學機械工程研究所

## 摘要

黏彈性流體屬於非牛頓流體，在扁平的矩形管道內流動時，由於正向力差效應而產生二次流，此效應增加流場混合，提高熱傳係數，但是黏彈性流體的黏度比水大，流動時增加流體與壁面的剪切力，亦即增加管內的壓力差降。本論文則是以實驗的方式探討純水以及濃度 1000wppm 的聚丙醯胺水溶液，在寬高比為 2:1 的水平矩形管道中，廣義雷諾數 60~540 的層流範圍內，三種不同熱邊界條件：上板加熱、下板加熱以及上下板同時加熱情況下的壓力差降與熱傳係數。實驗結果顯示，聚丙醯胺水溶液與純水的摩擦因子與雷諾數的關係，皆符合  $f \cdot Re^* = 16$  關係式。聚丙醯胺水溶液具有比純水高的熱傳係數，原因為上板加熱時，因為正向力差效應以及輕剪力效應與軸向速度扭曲，使熱傳係數提高；下板加熱時，除了正向力差效應以及輕剪力效應與軸向速度扭曲外，尚有自然對流效應的加成；上下板同時加熱時，因為速度梯度具有對稱性，因此軸向速度不向任何一加熱面扭曲，所以主要熱傳增強機制為正向力差效應與自然對流效應。

**The Study of Heat Transfer Enhancement to a Viscoelastic Fluid in Laminar  
Flow Through a Aspect-ratio 2:1 Horizontal Rectangular Duct**

Student : Sheng-Liang Guo

Advisor : Ding-Chong Lu

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

**ABSTRACT**

The viscoelastic fluid has non-newtonian fluid behavior in which secondary flows exist in a rectangular duct due to the normal stress difference. Because of the secondary flows, the flow field results in more mixing and the heat transfer coefficient is therefore enhanced. However, the viscoelastic fluid has the higher pressure drop than that of the pure water as a result of its higher viscosity. Experimental studies of the laminar pressure drop and heat transfer behavior of the pure water and 1000wppm separan solutions were carried out in a aspect ratio of 2:1 rectangular duct. The range of the value of generalized Reynolds number lies between 60~540. Three different thermal boundary conditions were studied, including the heated upper wall, heated lower wall and heated upper-and-lower walls. The experimental friction factors of the pure water and the separan solutions agreed with the value predicted from the correlation:  $f \cdot Re^* = 16$ . The measured Nusselt numbers of the separan solutions were considerably higher than the values of the pure water. It was due to the normal stress difference, shear-thinning effect and axial velocity distortion for heated upper wall. For heated lower wall, the heat transfer coefficient enhancement was the same as the heated upper wall, as well as the influence of natural convection effect was also included. In the heated upper-and-lower walls case, the axial velocity distortion vanished because the symmetry of the velocity profile. The mechanisms of heat transfer enhancement were normal stress difference and natural convection effects.

# 目 錄

摘要 .....	I
目錄 .....	II
表目錄 .....	III
圖目錄 .....	IV
符號說明 .....	X

## 第一章 序論 .....

1

1.1 研究背景與目的 .....	1
-------------------	---

1.2 牛頓與非牛頓流體介 .....	2
---------------------	---

1.3 黏彈性流體簡介 .....	4
-------------------	---

1.4 文獻回顧 .....	6
----------------	---

1.4.1 流變特性 .....	6
------------------	---

1.4.2 實驗分析 .....	8
------------------	---

1.4.3 數值分析 .....	10
------------------	----

## 第二章 實驗設備與步驟 .....

25

2.1 工作流體介紹 .....	25
------------------	----

2.2 實驗設備 .....	25
----------------	----

2.3 實驗量測儀器 .....	29
------------------	----

2.4 實驗儀器校正 .....	30
2.5 實驗原理.....	31
2.6 實驗測試範圍.....	36
2.7 實驗步驟.....	37
<b>第三章 實驗結果與討論.....</b>	<b>51</b>
3.1 實驗條件.....	51
3.2 流變性質.....	52
3.3 壓力差降與摩擦因子.....	53
3.4 熱傳結果分析.....	55
3.4.1 純水熱傳實驗結果.....	55
3.4.2 聚丙醯胺水溶液熱傳實驗結果.....	58
3.5 實驗結果與文獻討論比較.....	66
<b>第四章 結論.....</b>	<b>100</b>
<b>參考文獻 .....</b>	<b>102</b>
<b>附錄 A 實驗不準度分析 .....</b>	<b>107</b>

## 表 目 錄

表 1-1	公式 (1.11) 中的 a、b 值	16
表 3-1	實驗不準度	69
表 3-2	純水物理性質表	70
表 3-3	聚丙醯胺水溶液在不同溫度時的 power law index(n)與 consistency index(K)值	71





## 圖目錄

圖 1-1	牛頓流體與非牛頓流體的差異圖	16
圖 1-2	(a) 虎克彈簧；(b) 阻尼延遲器	17
圖 1-3	各正向力間的關係圖	17
圖 1-4	黏彈性與非黏彈性流體在庫第流與扭轉流的情形	18
圖 1-5	牛頓流體與黏彈性流體的旋轉流場差異圖	18
圖 1-6	聚丙醯胺水溶液在上板加熱的軸向速度場分布圖	19
圖 1-7	聚丙醯胺水溶液在上板加熱的速度場向量圖	20
圖 1-8	CPF 與 Separan 在上板加熱的溫度場分布圖	21
圖 1-9	TDCF 與 Separan 在下板加熱的速度場向量圖	22
圖 1-10	軸向位置的等溫線圖與二次流流場向量圖	23
圖 2-1	聚丙醯胺結構式	39
圖 2-2	實驗設備示意圖	39
圖 2-3	整流段示意圖	40
圖 2-4	模擬整流段入口端速度場與速度分佈圖	42
圖 2-5	模擬整流段出口端速度場與速度分佈圖	44
圖 2-6	模擬測試段入口端速度場與速度分佈圖	46
圖 2-7	測試段截面示意圖	48
圖 2-8	混合段示意圖	49

圖 2-9	流量計校正曲線	50
圖 3-1	不同溫度聚丙醯胺水溶液視黏度對剪切率的關係圖	72
圖 3-2	層流狀態下工作流體之壓降與質量流率關係圖	73
圖 3-3	層流狀態下工作流體之廣義雷諾數與摩擦因子關係圖	74
圖 3-4	純水在上板加熱之上壁面溫度與流體溫度軸向分佈圖	75
圖 3-5	純水在下板加熱之下壁面溫度與流體溫度軸向分佈圖	76
圖 3-6	純水在上下板同時加熱之上壁面、下壁面與流體溫度軸向 分佈圖	77
圖 3-7	純水在上板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖	78
圖 3-8	純水在下板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖	79
圖 3-9	純水在上下板同時加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖	80
圖 3-10	聚丙醯胺水溶液在上板加熱之上壁面溫度與流體溫度軸向 分佈圖	81
圖 3-11	聚丙醯胺水溶液在下板加熱之下壁面溫度與流體溫度軸向 分佈圖	82
圖 3-12	聚丙醯胺水溶液在上下板同時加熱之上壁面、下壁面與流體 溫度軸向分佈圖	83
圖 3-13	聚丙醯胺水溶液在上板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (200W)	84

圖 3-14 聚丙醯胺水溶液在上板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (150W).....	85
圖 3-15 聚丙醯胺水溶液在上板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (100W).....	86
圖 3-16 相近質量流率之工作流體於不同上板加熱瓦數比較圖.....	87
圖 3-17 聚丙醯胺水溶液在下板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (200W).....	88
圖 3-18 聚丙醯胺水溶液在下板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (150W).....	89
圖 3-19 聚丙醯胺水溶液在下板加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (100W).....	90
圖 3-20 相近質量流率之工作流體於不同下板加熱瓦數比較圖.....	91
圖 3-21 聚丙醯胺水溶液在上下板同時加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (各 100W) .....	92
圖 3-22 聚丙醯胺水溶液在上下板同時加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (各 75W).....	93
圖 3-23 聚丙醯胺水溶液在上下板同時加熱之局部紐賽數與 $1/Gz$ 關係圖 (各 50W).....	94
圖 3-24 相近質量流率之工作流體於不同上下板加熱瓦數比較圖.....	95

圖 3-25 本實驗與文獻【12】之廣義雷諾數與摩擦因子關係圖……96

圖 3-26 本實驗與文獻【12】上板加熱之局部紐賽數與  $1/Gz$   
關係圖 ……………97

圖 3-27 本實驗與文獻【12】下板加熱之局部紐賽數與  $1/Gz$   
關係圖 ……………98

圖 3-28 本實驗與文獻【12】上下板加熱之紐賽數與  $1/Gz$   
關係圖 ……………99



## NOMENCLATURE

$a$	constant value in eq.(1.11)	
$b$	constant value in eq.(1.11)	
$C_p$	specific heat	$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
$D_h$	hydraulic diameter	(m)
$f$	Darcy friction factor	
$f_F$	Fanning friction factor	
$G$	shear modulus	
$G^{\bullet}$	storage shear modulus	
$k$	thermal conductivity	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
$L$	length of test section	(m)
$W$	wide of heated wall	(m)
$n$	power law index	
$K$	consistency index	
$Q$	total heat generation	(W)
$Q_{loss}$	heat loss	(W)
$Q_{loss}$	sensible heat	(W)
$h_x$	local heat transfer coefficient	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
$T_x$	local fluid temperature	(°C)
$T_{b,in}$	inlet temperature of fluid	(°C)
$T_{b,out}$	outlet temperature of fluid	(°C)
$Tw_x$	local wall temperature	(°C)

$Re^*$  Generalized Reynolds number (in eq. 1.11)

$Gz$  Graetz number =  $\dot{m}C_p/kx$

$Pr$  Prantl number =  $\eta C_p/k$

$Ra_q$  Rayleigh number =  $g\beta q'' D_h^4 \rho^2 C_p/k^2 \eta$

$Nu_x$  local nusselt number =  $h_x x/k$

$\overline{Nu_x}$  mean value of local nusselt number (in eq. 2.14)

## Greek symbols

$\dot{\gamma}$  shear rate (s<sup>-1</sup>)

$\mu$  shear viscosity cp(10<sup>-2</sup>g · cm · s<sup>-1</sup>)

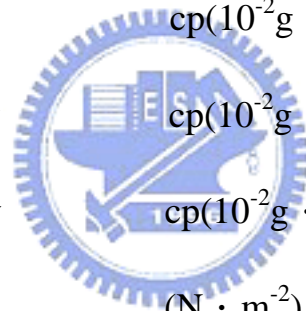
$\mu^*$  dynamic viscosity cp(10<sup>-2</sup>g · cm · s<sup>-1</sup>)

$\eta$  apparent viscosity cp(10<sup>-2</sup>g · cm · s<sup>-1</sup>)

$\tau$  shear stress (N · m<sup>-2</sup>)

$\sigma$  normal stress (N · m<sup>-2</sup>)

$\rho$  fluid density (kg · m<sup>-3</sup>)



# 第一章 序論

## 1.1 研究背景與目的

隨著科技的日新月異，對於一項產品的研發不只提升其效能，更要求其整體所佔的體積能縮小，在有限空間下達到最佳效率。散熱技術一直是電子構裝、IC 製程等必須注意的問題，如果散熱不良，元件就會損壞。這些製程的元件都是屬於微小元件，因此整體體積也很小，所需熱交換器體積也相對變小，元件密度的提高造成單位面積內的發熱量急速上升，因此必須設計體積小而散熱效果可以達到高效率散熱需求的熱交換器，以符合特殊設計的需要。

高效率而小體積的熱交換器熱傳方法有兩種方式：主動式與被動式兩種。主動式如外加一個擾動的機制，例如使管路中的流體受到擾動而增加流場的混合進而增加熱傳；被動式如在管路上加上鰭片、或在流體中加入固體物質，或是直接使用高分子聚合物溶液為工作流體等方式。

聚丙醯胺高分子水溶液為非牛頓流體，與一般牛頓流體最大的不同就在於它的黏彈性特質。因為它的黏彈特性，導致此非牛頓流體在層流 (laminar flow) 中因為剪切應力 (shear stress) 作用產生正向力差 (normal stress difference)，促使二次流動 (second flow) 的產生，形成與牛頓流體不同的流場，進而導致不同的溫度場分布，

最後產生提升熱傳效果。另外，此非牛頓流體包含的黏性特質使得水溶液的黏度增加，在流動時必定會產生較大的阻力，壓力差降必定會比純水高，但是如果高分子在溶液的濃度越稀薄，其壓力差降就可以越接近純水。

綜合以上分析，本論文則是使用純水與濃度 1000wppm 的聚丙醯胺高分子水溶液為實驗工作流體，研究分析在不同熱通量於扁平矩形管內的層流熱傳行為，熱邊界條件為上板加熱、下板加熱與上下板同時加熱三種，以期獲得較完整雷諾數範圍下的熱傳數據，利用聚丙醯胺高分子水溶液的特性，以期運用於小體積的高效能熱交換器中。

## 1.2 牛頓與非牛頓流體簡介

### 一、牛頓流體：

對一流體而言，如果剪應力（ $\tau$ ）和剪切率（ $\frac{du}{dy}$ ）成正比且為線性關係，稱為牛頓流體，其中的比例常數稱為絕對（或動力）黏滯係數 $\mu$ ：

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

大部分的流體諸如水、空氣和汽油等都是牛頓流體。

### 二、非牛頓流體：

倘若流體剪應力和剪切率不成線性關係時，稱為非牛頓流體，常以冪次法則（power law）來表示之：



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

其中  $n$  為冪次方程式的指數 (power law index),  $K$  為冪次方程式的黏度指數 (consistency index)。

另外定義視黏度 (apparent viscosity)  $\eta$  :

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

與牛頓流體中的絕對黏滯係數  $\mu$  作對照。

式 (1.1) 和式 (1.2) 的差別可由圖 1-1 得知。常見的非牛頓流體包括：

1、重剪力 (shear-thickening) 流體 ( $n > 1$ ):

又稱膨脹性 (dilatant) 流體, 其視黏度 (apparent viscosity)

隨剪切率增加而增高, 常見於高分子摻合其他添加劑之混合物。

2、輕剪力 (shear-thinning) 流體 ( $n < 1$ ):

又稱擬塑性 (pseudo-plastic) 流體, 其視黏度隨剪切率增加而下降, 一般高分子熔融液及溶液, 均具有此項特性。

3、賓漢 (Bingham) 流體:

屬於黏塑性 (viscoplastic) 流體, 當流體受到應力時並不立即變形, 即剪切率為零, 而力必須大於一特定值時, 流體才有形變產生, 此特定值即為降服應力 (yield stress), 降服應力即為使流體流動

之最小應力。

### 1.3 黏彈性流體簡介

黏彈性流體流動行為不同於一般流體，而且在高分子的加工中，幾乎所有的流體均屬於黏彈性流體。從能量的觀點而言，黏性流動為一能量消耗且不可逆的過程，而彈性變形則是一能量轉換儲存且為可逆過程。牛頓定律的黏性流動以及依據虎克定律的彈性變形，即是黏彈性流體的研究範圍。我們稱流體的彈性較大，即是其行為較偏向彈性變形。描述流體變形與應力間之關係，進而以數學模式表示，為流變學主要的研究範圍，而其數學模式即為本質方程式 (constitutive equation)。但是有關黏彈性流體的數學模式，尚無法對所有現象有詳細的解釋，並且數學處理極為困難，因此通常以簡單的模式作模擬。

在本論文中所探討的非牛頓流體，是將純水加入一種高分子聚合物聚丙醯胺 (polyacrylamide)，屬於輕剪力流體。它具有黏彈性的特質，可分別用彈性與黏性的特質加以描述。現在考慮一簡單模型，來類比黏彈性流體的流動行為，以阻尼延遲器 (dashpot) 表示能量完全消耗的黏性流動；以虎克彈簧代表能量完全儲存之彈性變形，如圖 1-2 所示，任何黏彈性流體可為阻尼延遲器與虎克彈簧的結合，可能為串聯、可能為並聯、可能為一組或多組彼此串聯或並聯共存。現在考慮為一維，虎克彈簧與阻尼延遲器並聯組合【1】。

一、 $\tau_e$  代表彈性變形所產生的應力（彈性性質）：

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

其中  $G$  為剪切模數 (shear modulus)； $\gamma$  為剪切應變 (shear strain)

二、 $\tau_v$  代表黏性流動產生的應力（黏性性質）：

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

其中  $\mu$  為黏度 (viscosity)； $\dot{\gamma}$  為剪切率 (shear rate)

三、 $\tau$  代表上述兩者結合的應力（黏彈性性質）：

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

其中  $G'$  為動態剪切模數 (storage shear modulus)； $\mu'$  為動態黏度 (dynamic viscosity)

但是因為剪切模數在實驗上難以分別測得，故往往將之簡化為公式 (1.2)，以冪次法則來表示其特性。

此種輕剪力流體的黏彈特性流動時具有正向力的不平衡特性，如圖 1-3，當流體流動朝  $x$  方向移動時  $C$  面受到剪切力  $\tau_{21}$ ，在  $y$  方向產生正值的正向力  $\tau_{22}$ ，在  $z$  方向產生負值的正向力  $\tau_{33}$ ，由於此二力的不平衡，造成所謂的第一正向力差 (first normal stress difference  $\tau_{22} - \tau_{33}$ )，高分子的支鏈也因為正向力差的作用而變形，造成不同的流變性質，如 Weissenberg 效應或是爬杆 (rod-climbing) 現象的產生。如圖 1-4 所示，(a)、(b) 分別為非黏彈性流體在庫第 (Couette)

流以及扭轉 (torsional) 流中的情形，可以看到流體因為慣性作用力所以遠離中心；(c)、(d) 分別代表黏彈性流體在庫第流以及扭轉流中的情形，發現黏彈性流體因為黏彈性特質所以產生正向力差，造成流體反而會向中間集中，有爬杆現象的產生【1】。

## 1.4 文獻回顧

### 1.4.1 流變特性

劉大倭【2】提到黏彈性流體不同於一般流體的流動行為，主要來自於正向力效應以及次級流動。由分子結構來分析，黏彈性流體中長鍵的高分子受一離心力往外移動，但由於分子間具有鍵結，反而使長鍵分子往中間方向集中而存在正向力差，使得流體流動時如圖 1-5 (右) 所示會有 Weissenberg 效應 (爬杆現象)，此為離心力與正向力差平衡的結果；次級流動的產生往往來自離心力，而黏彈性流體的次級流動與一般牛頓流體如圖 1-5(左) 方向相反，黏彈性流體由外側向內側旋轉流動。

Reiner-Rivlin【3】對於黏彈性流體受剪應力而造成的正向力差而提出本質方程式：

$$\tau_{12} = \mu \dot{\gamma}_{12} + \alpha_2 \dot{\gamma}_{13} \dot{\gamma}_{31} \quad (1.7)$$

$$\dot{\gamma}_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \quad (1.8)$$

$$\alpha_2 = \left( \frac{\text{Re}}{D_h \cdot \rho} \right) \alpha_2 \quad (1.9)$$

其中  $\alpha_2$  為第二正向力差係數； $\overline{\alpha_2}$  為無因次第二正向力差係數。

Carreau【4】對於輕剪力流體在不同剪切率和不同溫度下對黏度的影響，經由實驗得到數據而提出下列經驗式：

$$\frac{\mu(\dot{\gamma}, T) - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (1.10)$$

其中  $\mu_0$  為剪切率為零時的黏度； $\mu_\infty$  為剪切率為無限大時的黏度； $\lambda$  為特徵時間 (characteristic time)，即是輕剪力特性開始發生時的剪切率的倒數。

Shin & Cho【5】實驗發現了濃度 1000wppm 的聚丙醯胺水溶液，在低剪切率時其黏度與溫度有很大的關係，而在高剪切率時，黏度幾乎不受溫度變化的影響。

非牛頓流體在其剪應力與剪切率不是呈線性的關係，主要是因為非牛頓流體的黏度非定值，因此在傳統雷諾數 ( $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$ ) 的計算不再適用於非牛頓流體，於是 Kozicki【6】利用計算方式提出兩個適用於非牛頓流體在任意流道截面形狀的的廣義方程式：(一) 廣義雷諾數  $Re^*$ ，可以用來預測流體流速；(二) 廣義摩擦因子  $f_F$ ，可以用來預測當流速與壓力差降的關係。分別定義如下：

(一) 廣義雷諾數  $Re^*$

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

其中  $n$  為式 (1.2) 冪次方程式的指數，當  $n=1$  時為牛頓流體， $n \neq 1$  時為非牛頓流體； $K$  為冪次方程式的黏度指數； $a$ 、 $b$  為形狀因子，隨著管道截面形狀的不同而有不同，詳見表 1-1。

## (二) 廣義摩擦因子

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

其中  $f_F$  稱為曼寧摩擦因子 (Fanning friction factor)。此關係式與牛頓流體情況相同。

對於壓力差降與熱傳分析方面有兩種方法，一為以實驗的方法，對於實際發生的現象，配合流體的物性去做討論分析；二為以數值模擬的方式，以理論分析去模擬流體在流道中的行為，以驗證實驗結果。

### 1.4.2 實驗分析

Cho & Hartnett 【7】以高分子水溶液為工作流體，在圓管內進行層流熱傳以及壓降實驗，發現實驗結果與用一般牛頓流體在圓管內的經驗式預測吻合，因此證明高分子的黏彈特性在圓管中不具有熱傳增強的效果。

Lin & Ko 【8】研究 4000wppm 與 8000wppm 的羧甲基纖維素 (CMC, carboxymethylcellulose) 在水力直徑 4mm 的方管的壓降與熱傳，雷諾數範圍在 1-500 的範圍，邊界條件為上板加熱。在壓降方面，黏度與壓降皆是濃度 8000wppm 大於 4000wppm，但摩擦因子與雷諾數的

關係, 不管濃度的高低, 都與  $f_F = 16/Re^*$  的關係式有很小的誤差,  $Re^*$  為 Kozicki 廣義雷諾數。在熱傳方面, 濃度為 4000 wppm 與 8000 wppm 皆有比純水高的熱傳效果, 而濃度為 8000wppm 效果尤佳, 可提升至比純水高 72.9%—241%。Mena et al. 【9】研究聚丙醯胺水溶液在方管內的層流熱傳行為, 亦有熱傳增強的效果。

Oliver【10】發現聚丙醯胺與聚乙烯高分子水溶液在矩形管內流動, 具有比純水高 40% 的熱傳效果。Hartnett & Kostic【11】在寬高比為 2:1 以及水力直徑 12mm 的矩形管道內, 以純水以及濃度 1000wppm 的聚丙醯胺水溶液 (Separan AP-273) 為工作流體, 邊界條件為上板加熱及上下板同時加熱, 所做的壓降與熱傳分析實驗。在壓降方面, 實驗結果顯示聚丙醯胺水溶液的摩擦因子與雷諾數的關係為  $f_F = 16/Re^*$ 。在熱傳方面, 聚丙醯胺水溶液的紐賽數比純水高。

Xie & Hartnett【12】、Hartnett【13】則是比較純水、濃度 1000wppm 的 Carbopol 934 水溶液與濃度 1000wppm 的聚丙醯胺水溶液 (Separan AP-273), 在寬高比為 2:1 以及水力直徑為 12mm 的矩形管道的壓降與熱傳, 其熱邊界條件為上板加熱、下板加熱以及上下板同時加熱。在壓降方面, 實驗結果顯示 Carbopol 934 與聚丙醯胺此兩種高分子水溶液的摩擦因子與雷諾數的關係與  $f_F = 16/Re^*$  關係式相近。在熱傳方面, 實驗結果顯示 Carbopol 934 的熱傳效果最好, 聚丙醯胺水溶

液次之，但兩者的熱傳效果皆比純水好，歸因於高分子流體的黏彈特性使流體在管道流動時具有正向力差，而導致二次流的產生，使流場混合。此外，黏度測試結果發現聚丙醯胺水溶液在迴路流動的過程，隨著流動時間的增加，會使得高分子鏈結受到破壞，降低流體的黏彈特性，熱傳增強效果降低。

**褚偉建【14】**研究純水與不同濃度的聚丙醯胺水溶液在寬高比 2:1 其水力直徑為 6.6mm 的矩形管道內的壓降與熱傳，聚丙醯胺水溶液濃度為 500wppm、1000wppm、1500wppm、2000wppm。實驗雷諾數範圍在 80~300，邊界條件為上板加熱、下板加熱以及上下板同時加熱。在壓降方面，實驗結果顯示不同濃度的聚丙醯胺水溶液，摩擦因子與雷諾數的關係皆與  $f_F = 16/Re^*$  關係式的誤差很小。濃度增加造成黏度增加，使壓力差降變大。在熱傳方面，不管上板加熱、下板加熱或是上下板同時加熱，聚丙醯胺水溶液的熱傳效果皆比純水好，而且熱傳係數皆隨著雷諾數的增加而增加，濃度 1000wppm 增加的情形最為顯著。

### 1.4.3 數值分析

#### a. 壓力差降研究

**Gao & Hartnett【15】**以連續方程式以及動量方程式為基礎，配合 Reiner-Rivlin 本質方程式以及流線方程式 (stream function)，



以數值模擬的方式去分析非牛頓流體在方管以及矩形管內的行為，發現由正向力差造成的二次流不會明顯增加管內的壓降。

## b. 熱傳研究

對於研究黏彈性流體的熱傳增強行為，主因可以分為兩種，一種是著重在流體的黏度隨溫度變化明顯改變，而使熱傳增強；另一種則是認為黏彈性流體中存在正向力差，因而產生二次流動，增加熱傳效果。後來的研究者則是整合這兩種的說法，再以數值方法計算，發現不論是在層流範圍下熱發展區或是已發展區皆與實驗結果很吻合。

Shin & Cho 【16】考慮流體特性為輕剪力流體以及黏度為溫度的函數而使用 Carreau mode，計算分析黏度隨溫度變化的輕剪力流體在寬高比 2：1 的矩形管道內的熱傳行為，熱邊界條件為上板加熱固定熱通量，其他三面為絕熱狀態。針對聚丙醯胺高分子水溶液，熱傳效果比一般物性不隨溫度改變的流體 (Constant Property Fluid) CPF 增加了 70—300%，與 Xie 實驗結果部份吻合。

Gao & Hartnett 【17】則是考慮正向力差因素而使用 Rivener-Rivlin 方程式，計算完全發展區的熱傳係數，計算結果正向力差造成的二次流在矩形管道中有熱傳增強的效果，尤其是寬高比 2：1 以及 1：1 的管道。

Chang & Chou 【18】考慮流體特性為輕剪力流體以及黏度為溫度

的函數，使用 Carreau model，而不考慮正向力差的因素，熱邊界條件設定為上板加熱以及上下板同時加熱，認為熱傳增強的部分分為兩個區域：在發展區計算結果與 Xie 的實驗吻合，認為熱傳增強的主要原因是因為黏度受溫度的影響，使得軸向速度扭曲造成速度場的改變而增加熱傳；但是在完全發展區熱傳係數計算結果則是比實驗結果都低，認為除了黏度受溫度改變的影響外，必須將正向力差的因素考慮進去，也相對證實了 Gao 所提，在完全發展區中必須考慮正向力差的因素。

Shin et al. 【19】將黏度隨溫度變化以及正向力差的因素皆考慮進去，以 Carreau model 及 Rivener-Rivlin 方程式來代表聚丙醯胺水溶液 (separan AP-273) 流體特性代入連續方程式、動量方程式以及能量方程式，在上板加熱及其它三面為絕熱的邊界條件下，對於寬高比 2:1 的矩形管道流體在層流狀態下進行數值分析，計算結果與 Xie 的實驗吻合，熱傳效果比 CPF 增加了 200—300%。其中模擬聚丙醯胺水溶液的流場，隨著進口位置的不同而有所變化。圖 1-6 (a) 表示入口處 ( $x=0$ ) 的流場情況，其中  $y$  為流道截面寬度， $z$  為流道截面高度；(b) 為  $x=0.05$  時的流場情況。在靠近上板的地方 (接近  $z=0.5$  處)，因為黏度受溫度的影響而改變流場，加上正向力差所引起的二次流，所以使得接近上板的流場有較大的速度梯度。圖

1-7 表示 (a)  $x=0$ 、(b)  $x=0.005$ 、(c)  $x=0.02$ 、(d)  $x=0.05$  流道截面右半部的流場圖，在  $x=0$  時有上下兩個對稱的漩渦，是正向力差所產生的二次流。隨著  $x$  增加，接近上板的流體因為受熱使得黏度受溫度的影響而改變流場，上面的漩渦會慢慢變大終至與下面的漩渦結合為一個大漩渦，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。圖 1-8 表示在  $x=0.05$  時 (a) CPF (Constant Property Fluid) 與 (b) 聚丙醯胺水溶液 (separan AP-273) 的溫度分布圖，CPF 顯示溫度由上板至下板的分布是呈現慢慢遞減；而聚丙醯胺水溶液的溫度分布則是呈現較複雜的情況，在接近上板中心的地方溫度比 CPF 低，而在接近下板角落的地方溫度比 CPF 高，此溫度分布的現象可由圖 1-7 (d) 漩渦流動的情況來解釋，靠近上板的較高溫流體會被二次流帶至靠近下板處，使靠進下板的流體溫度升高。

Sohn et al. 【20】繼續研究單下板加熱的情況，同樣以 Carreau model 及 Rivener-Rivlin 方程式來代表聚丙醯胺水溶液流體特性代入連續方程式、動量方程式以及能量方程式。由於是下板加熱，因此浮力效應必須考慮在其中。在下板加熱及其它三面為絕熱的邊界條件下，對於寬高比 2:1 的矩形管道流體在層流狀態下進行數值分析，計算結果與 Xie 的實驗吻合，聚丙醯胺水溶液在下板加熱的情況下，比一般物性不隨溫度改變的流體 (Constant Property Fluid) 增加了

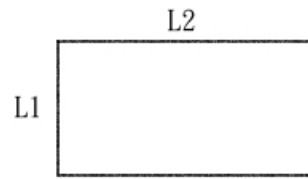
250%左右。其中模擬 TDCF(Temperature-Dependent Carreau Fluid) 與聚丙醯胺水溶液 (separan AP-273) 的流場，圖 1-9 為  $x=0.005$ 、 $0.01$ 、 $0.02$  時，(a) TDCF；(b) 聚丙醯胺水溶液，在流道截面右半部的流場圖。如圖 (a) TDCF 是考慮忽略正向力差的情形，且熱邊界條件為下板加熱，所以只有浮力效應引起的二次流，且隨著進口位置增加而增加其影響範圍；圖 (b) 聚丙醯胺水溶液因為同時具有浮力效應與正向力差所產生的二次流，隨著進口位置增加兩個二次流會結合成一個大漩渦，使得流體的溫度混和較均勻，造成熱傳增強。

Payvar【21】以數值模擬的方式分析黏彈性在矩形管道，考慮黏度變化以及正向力差因素皆以冪次法則 (power law) 表示，熱邊界條件為上下板同時加熱，以 Kostic 實驗數據為依據，可以得到正向力差係數以冪次法則表示時的常數項與指數項。模擬流場以及溫度場如圖 1-10 所示，代表流體矩形管道的左半部的流動行為，設定條件為  $Re^*$  (Kozicki generalized Reynolds number) = 1368、 $Pr = 48.1$ 、黏度冪次方程式的指數 (power law index)  $n = 0.595$ ，左邊為不同軸向位置 ( $Z^*$ ) 的等溫線圖，右邊為不同軸向位置的流場向量圖，由  $Z^* = 2$  (發展區) 至  $Z^* = 4000$  (已發展區)。由  $Z^* = 2$  到  $Z^* = 25$  的時候，開始有由正向力差造成的二次流產生，但是對熱傳並沒有增強的效果，二次流隨著  $Z^*$  增加而增加，開始產生上下各一個渦流，下面

的渦流強度較大(由箭號的長度可知),主要是因為浮力效應的關係,增強了下面的渦流。當  $Z^*=180$  二次流達到水力完全發展,  $Z^*=500$  達到熱完全發展,此後溫度場受二次流的影響產生混亂的現象,進而增強了熱傳。



表 1-1 式 (1.11) 中的 a、b 值【6】



aspect ratio (L2/L1)	$\infty$	4.0	2.0	1.3	1.0
a	0.5000	0.3212	0.2440	0.2178	0.2121
b	1.0000	0.8182	0.7276	0.6866	0.6766

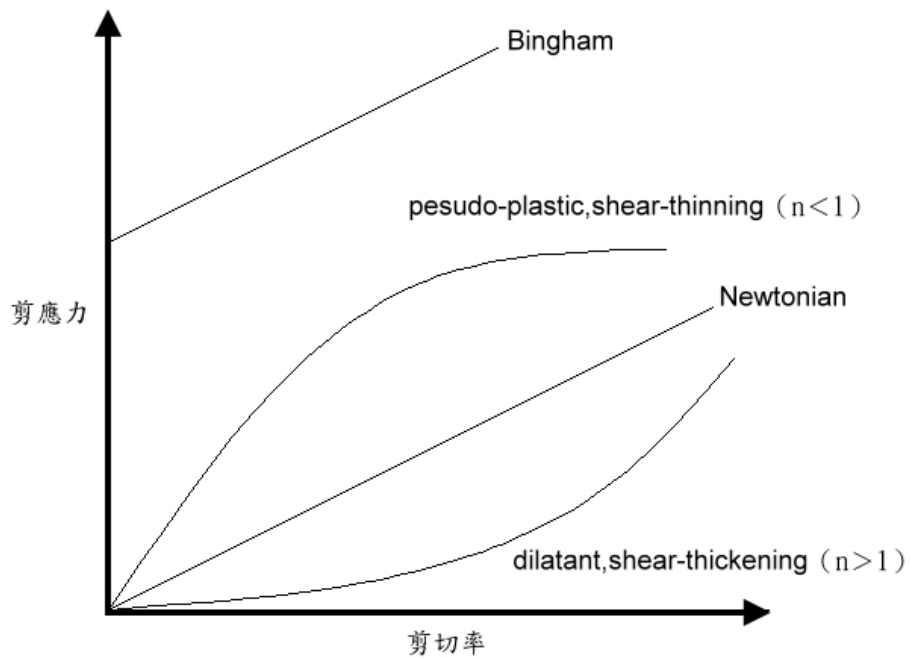


圖 1-1 牛頓流體與非牛頓流體的差異圖

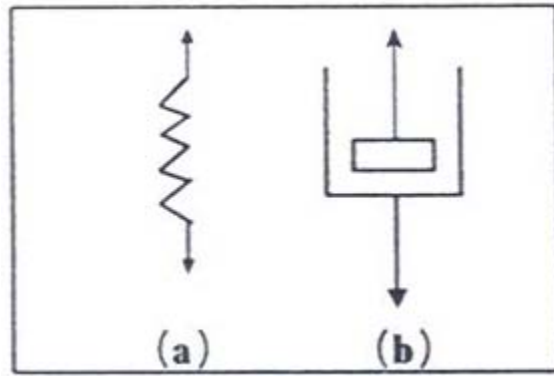


圖 1-2 (a) 為虎克彈簧；(b) 為阻尼延遲器

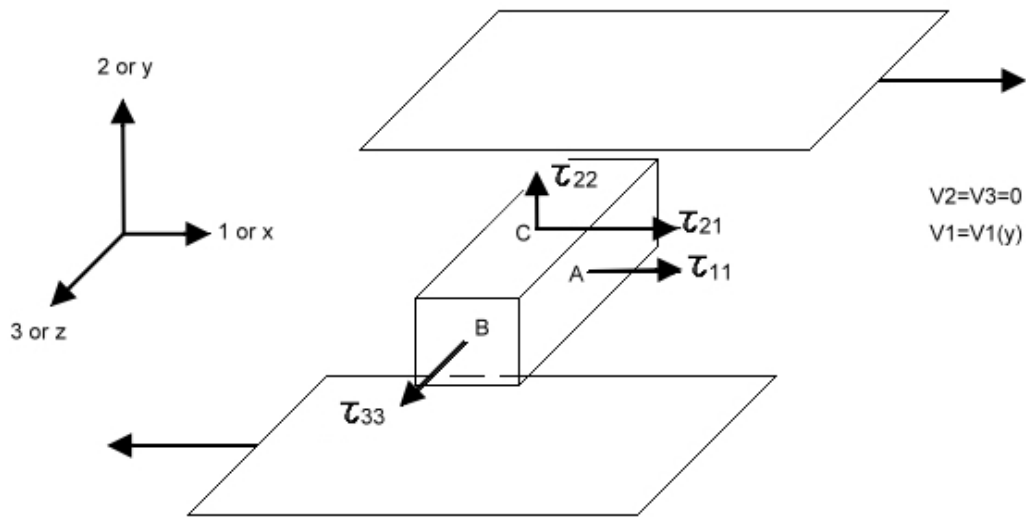


圖 1-3 各正向力間的關係圖【1】

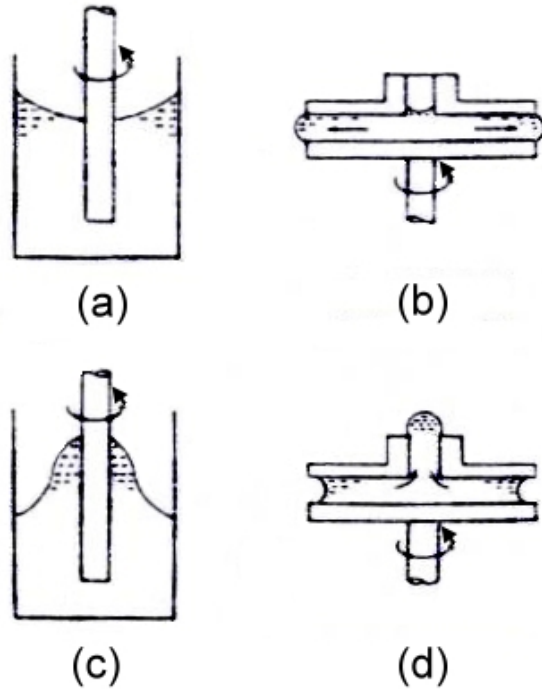


圖 1-4 (a)、(b) 分別為非黏彈性流體在庫第流與扭轉流的情形；

(c)、(d) 分別為黏彈性流體在庫第流與扭轉流的情形【1】

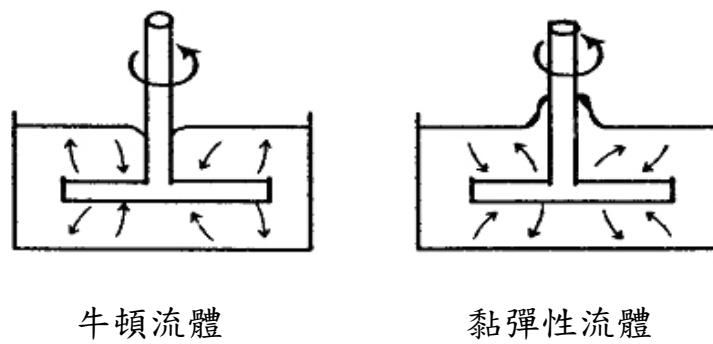


圖 1-5 牛頓流體與黏彈性流體的旋轉流場差異圖【2】



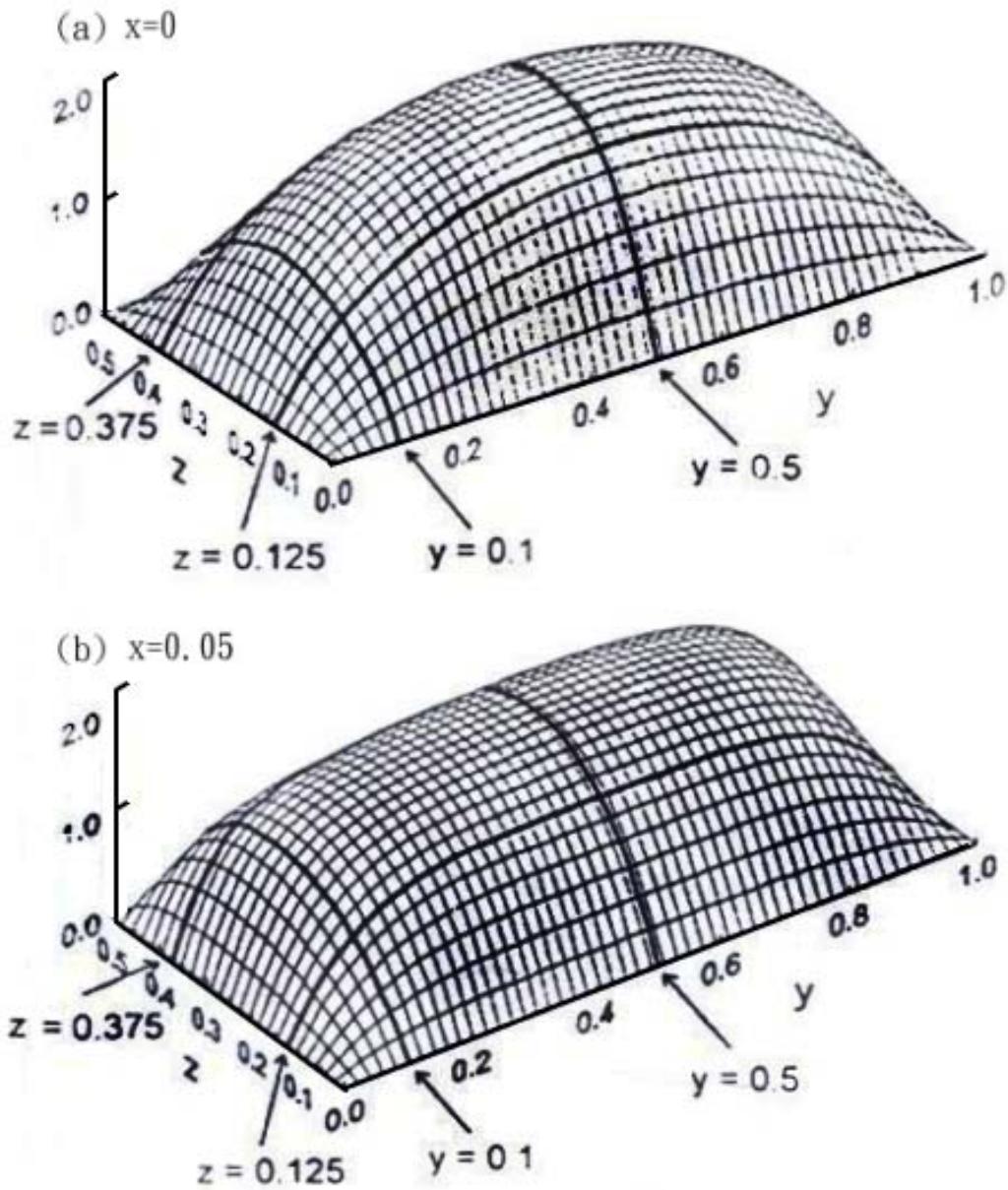


圖 1-6 聚丙醯胺水溶液在邊界條件為上板加熱的軸向速度場分布

圖，軸向位置為 (a)  $x=0$  與 (b)  $x=0.05$

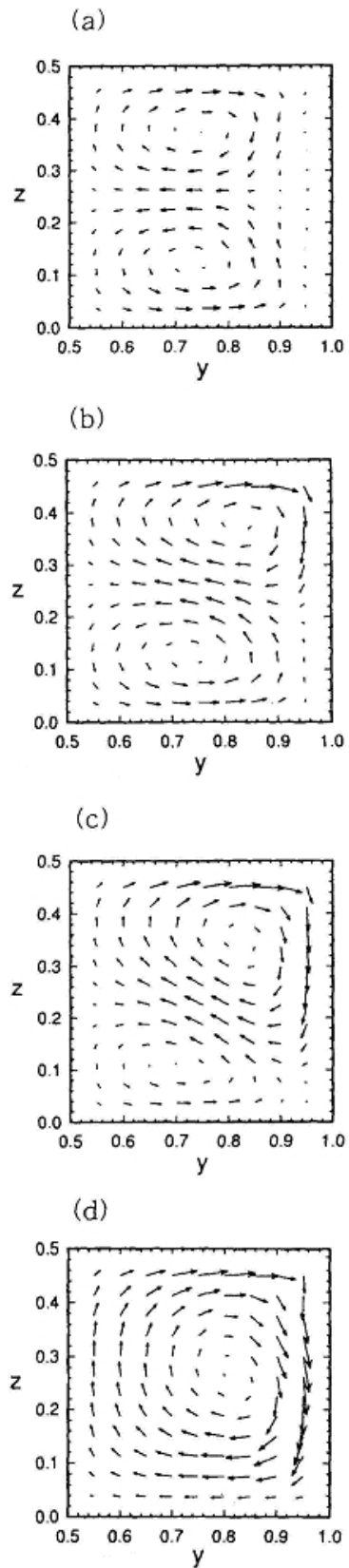


圖 1-7 聚丙醯胺水溶液在邊界條件為上板加熱的速度場向量圖，軸向位置為 (a)  $x=0$  (b)  $x=0.005$  (c)  $x=0.02$  (d)  $x=0.05$

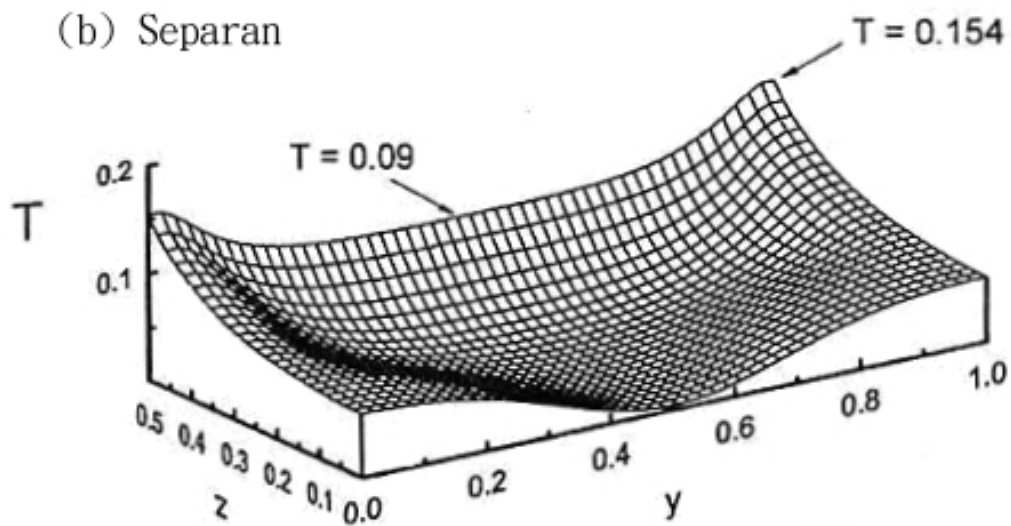
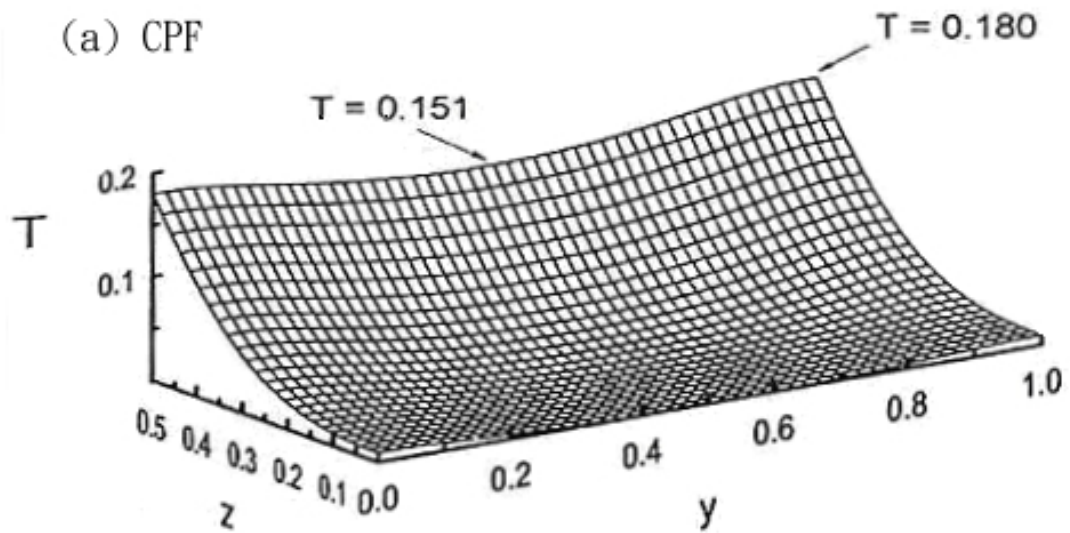
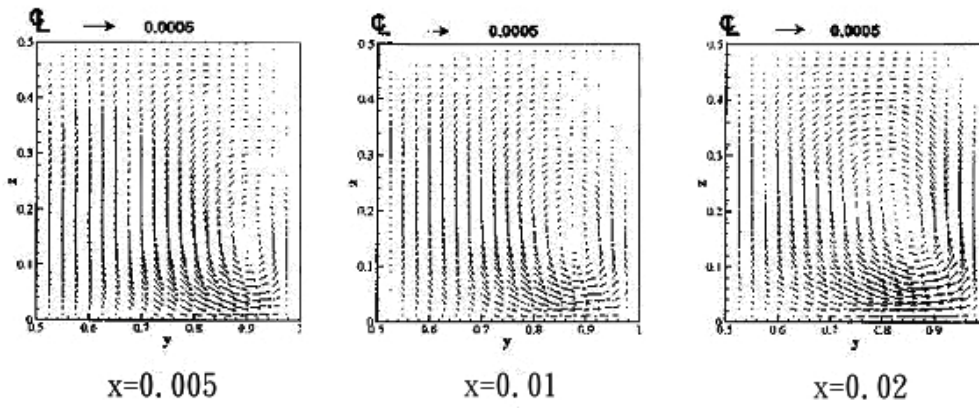


圖 1-8 (a) CPF 與 (b) Separan 在邊界條件為上板加熱的溫度場分布圖，軸向位置為  $x=0.05$  【19】

(a) TDCF



(b) Separan

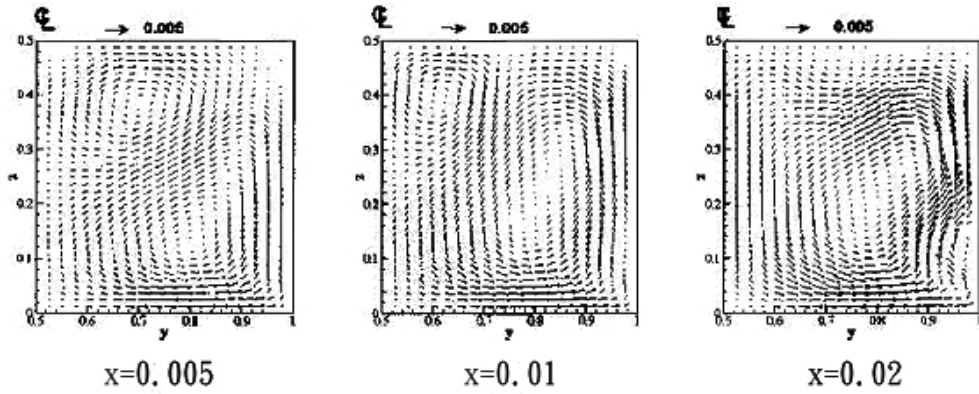


圖 1-9 (a) TDCF 與 (b) Separan 在邊界條件為下板加熱的速度場

向量圖，軸向位置為  $x=0.005$ 、 $x=0.01$ 、 $x=0.02$  【20】

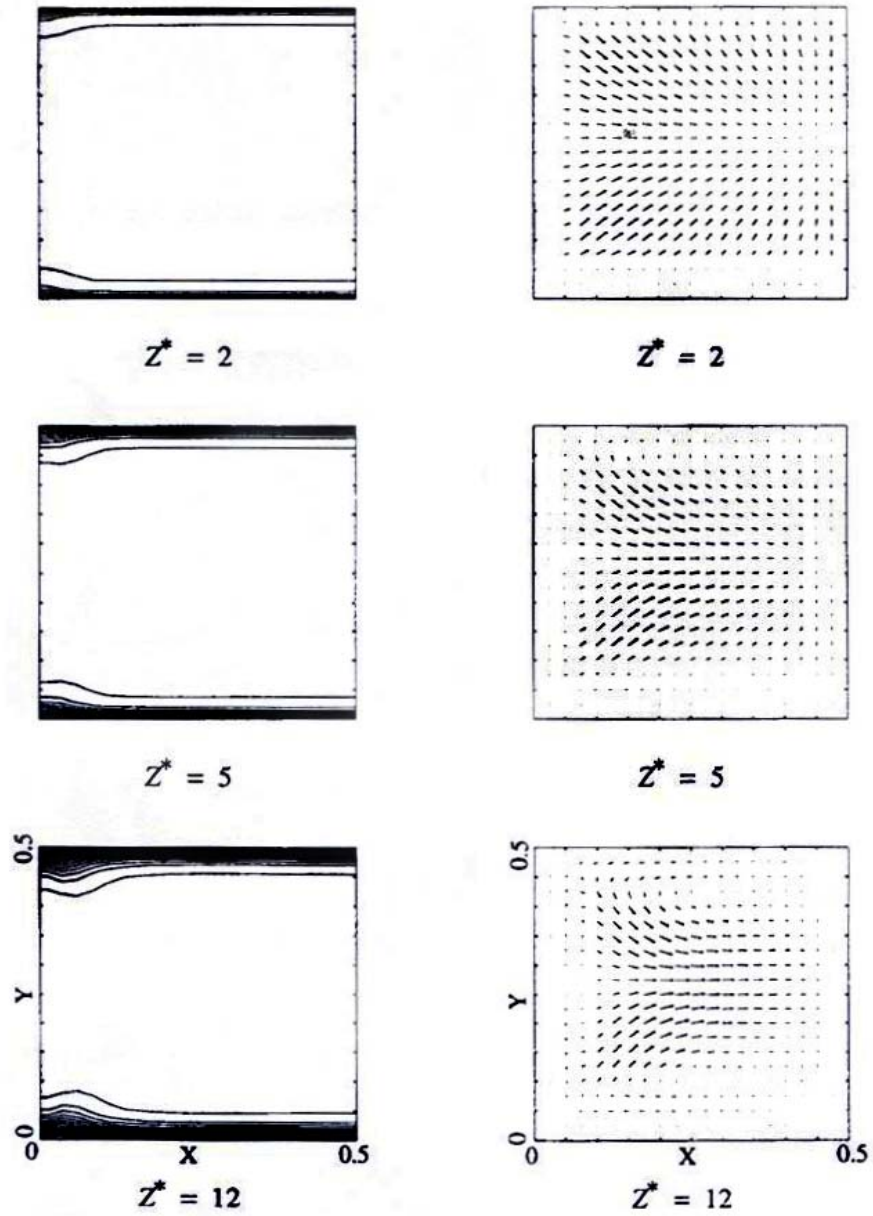


圖 1-10 當  $Re^*=1368$ ,  $Pr^*=48.1$ ,  $n=0.595$  時，不同軸向位置( $Z^*$ )  
的等溫線圖 (左) 與二次流流場向量圖 (右)

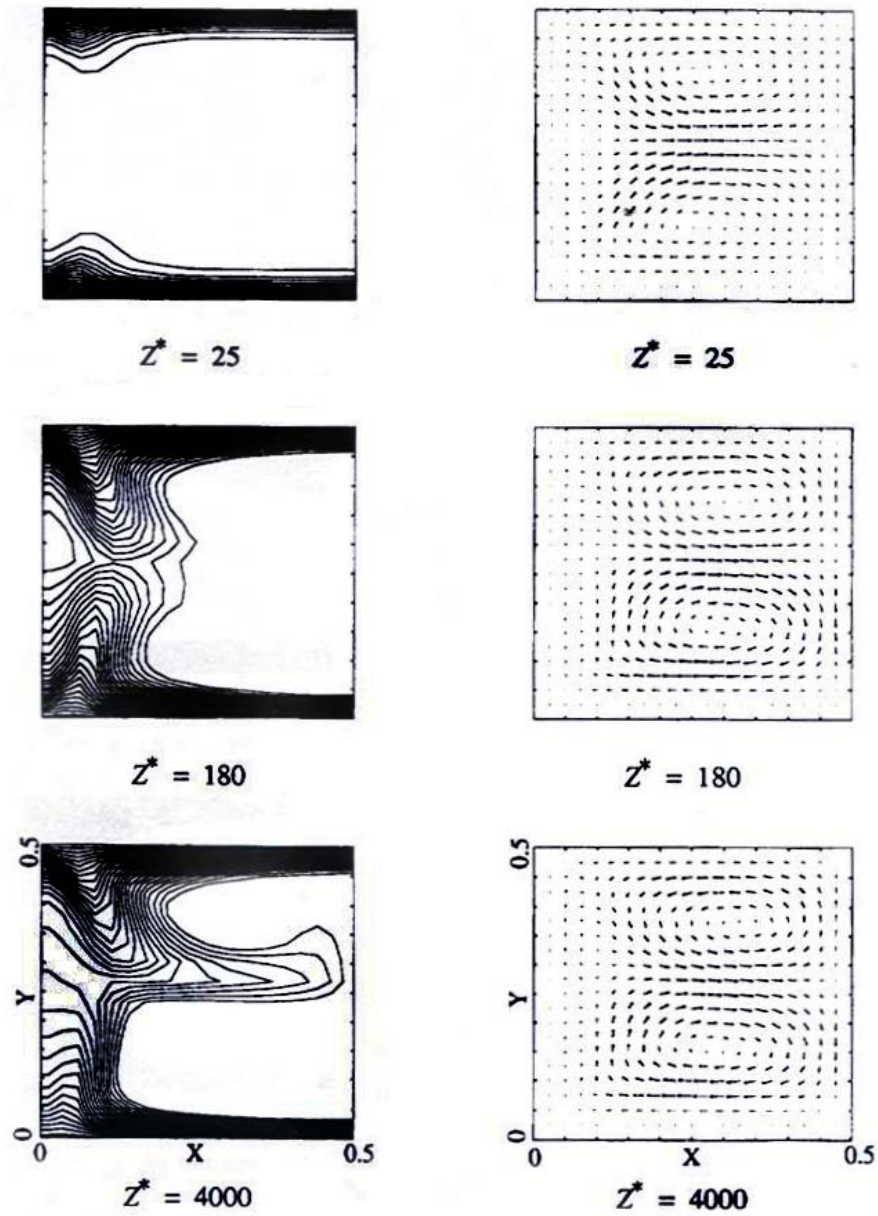


圖 1-10 continued 【21】

## 第二章 實驗設備與步驟

### 2.1 工作流體介紹

本次實驗所用的高分子聚合物為聚丙醯胺 (polyacrylamide)，是美國Polyscience公司的產品，為白色粉末，其分子式為  $(C_3H_5NO)_n$ ，分子量範圍約  $5 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。結構式如圖 2-1 所示【12】，圖中可發現它具有胺基化合物 (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為去離子水 (distilled water)，配置濃度為 1000wppm。對於其他物理特性方面，Tiu et al. 【22】以密度儀 (pycnometer) 量測聚丙醯胺水溶液的密度，發現在濃度小於 2000 wppm 時，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，比熱值如 Young 【23】所提假設與純水的性質相同，熱傳導係數由許家棟【24】測量結果得知。

### 2.2 實驗設備

實驗設備系統如圖 2-2 所示，其中實驗設備包括：(1) 上儲存桶 (2) 下儲存桶 (3) 熱交換器 (4) 流量計 (5) 整流段 (6) 測試段 (7) 混合段 (8) 交流電源控制器 (9) 蠕動式幫浦 (10) 恆溫水槽 (11) 資料擷取系統 (12) 取樣區。

(1) 上儲存桶 (upper tank)：

放置於高處，用以收集工作流體，再利用重力作用將流體往下輸送到整流區，以達到測試層流狀態。

(2) 下儲存桶 (bottom tank):

放置於低處，用以收集工作流體，並且放於恆溫水槽中以控制工作流體溫度。

(3) 熱交換器 (heat exchanger):

位於測試段入口前，使得工作流體流入測試段進口時的溫度能保持一定值。

(4) 流量計 (flowmeter):

由台灣的詠欣公司所生產的浮子式流量計，流量範圍在 0.06—1.5 (L/min)。



(5) 整流段 (calming section):

如圖 2-3 所示，長度為 23 公分，其材質為壓克力，形狀類似噴嘴 (nozzle)，主要目的是使工作流體能以均勻的速度場進入測試段。本實驗是以數值計算軟體 FLOTHERM 模擬流體流經整流段，進入測試段時的流場速度分佈，如圖 2-4 所示，圖 2-4(a) 為整流段入口端的速度場側視圖，圖 2-4(b) 為整流段入口端的速度場立體視圖，圖 2-4(c) 為整流段入口端截面的速度分佈圖，由於本實驗是利用重力作用將流體往下輸送，再流進整流段內，由於慣性速度，在整流段下



半部產生較快的流速，上半部產生逆向(-V)的流速，此為一個非均勻的流場；如圖 2-5 所示，圖 2-5(a)為整流段出口端的速度場側視圖，圖 2-5(b)為整流段出口端的速度場立體視圖，圖 2-5(c)為整流段出口端截面的速度分佈圖，由出口端截面的流場分佈可以清楚的看到，當流體流出整流段時，流場呈現對稱均勻的分佈；圖 2-6 為流體剛離開整流段後進入測試段的速度場，圖 2-6(a)為其速度場側視圖，圖 2-6(b)為其速度場立體視圖，圖 2-6(c)為其速度分佈圖，由圖可知，流場仍然是呈現均勻分佈，因此假設流體經過整流段進入測試段時為均勻流場成立。

#### (6) 測試段 (test section):

如圖 2-7 所示。測試段總長為 244 公分，剖面可分為三部分：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銅板，銅板上面放電加熱片並且在外層覆蓋上絕熱材料，電加熱片透過電源供應器所產生的熱量會先傳到銅板，使得熱源均勻分布後，最後傳到在流道中流動的流體。形成上下兩面加熱，其他兩面為絕緣的狀態。圖中空白處為工作流體流過的區域，其截面尺寸為 12mm × 6mm，寬高比 2:1，水力直徑 ( $D_h$ ) 為 8 mm 的矩形管道。而 T-型熱電偶放在截面上下兩邊銅板間的中心點位置，在軸向位置，第一個量測截面為距離入口處 13 公分的位置，之後每隔 20 公分取一量測截面，上下共

24 個量測點以量測加熱面溫度。另外在測試段距離進口 130 公分與 240 公分處右方配置接頭，使流體能流入差壓計，測量在完全發展區的壓力差值。

(7) 混合段 (mixing section):

如圖 2-8 所示，長度為 12 公分，並在通道內每相隔 2 公分的地方上下相間放置小方塊，以達到出口端的流體溫度混合的作用，而在出口的位置放置熱電偶量測流體出口溫度。

(8) 交流電源控制器 (AC power controller):

作用在控制由 110V AC 所提供的功率大小，主要是藉由調整可變電阻以控制輸入加熱帶的功率，達到上下兩片加熱帶加熱的效果，提供實驗所需加熱邊界條件。



(9) 蠕動式幫浦 (peristaltic pump):

由英國 Watson-Marlow 公司生產，控制轉速範圍在 0.5~55rpm；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桶。

(10) 恆溫水槽 (circulating water bath):

提供出口端經加熱過後的工作流體與恆溫水槽內的流體有熱交換的作用，使得工作流體在進入測試段前的溫度可以保持一定。

(11) 資料擷取系統 (data acquisition):

以 Agilent 34970A 資料蒐集/切換器，配合 Agilent 34901A 的 20 個頻道介面卡，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。

#### (12) 取樣區(sampling section)：

依照實驗條件需求取樣，並利用黏度計量測高分子水溶液黏度的變化，判斷高分子的鏈結在實驗前後是否受到破壞，以保持實驗的準確性。

### 2.3 實驗量測儀器

實驗量測部分有四：(1) 流量量測、(2) 溫度量測、(3) 差壓量測、(4) 黏度量測：

(1) 流量量測直接由體積流量計的刻度讀取體積流率，代入校正曲線中得到實際的體積流率，量測進入流量計前的流體溫度，得知流體密度，流體密度與體積流率的乘積為質量流率。

(2) 溫度量測以 T-type 熱電偶當作量測溫度儀器，其誤差值在  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  之間，可將其連接至資料擷取器上，再將資料擷取器連接至電腦讀取數據。放置於整流段末端與測試段接合處矩形截面的中心位置與混合段末端矩形截面的中心位置，如圖 2-3 與 2-5 所示，此兩點是用來量測工作流體在進出口的流體溫度  $T_{b, in}$  與  $T_{b, out}$ 。另在測試段  $x=13$ 、33、53、73、93、113、

133、153、173、193、213、223 (cm) 位置的截面，每個截面上下兩邊銅板的中點，用來量測壁面溫度，共 24 個壁溫量測點。

(3) 差壓量測採用 Foxboro 公司所生產的差壓計，其輸出訊號為電流值，範圍在 4~20 mA，誤差值為 $\pm 0.1\%$ 。用來量測工作流體的壓力差值。

(4) 黏度量測是使用 Brookfield 旋轉式流變儀，其包括量測系統 (UL Adapter) 和控制系統 (LV DVIII) 兩個部份。工作範圍如下：最高溫度： $(120^{\circ}\text{C})$ ；轉速範圍： $(0.01\sim 250\text{rpm})$ ；剪切率範圍： $(1\sim 300\text{s}^{-1})$ 。

## 2.4 實驗儀器校正



(1) 恆溫水槽校正：恆溫水槽的校正是利用絕對溫度計量測每一個溫度點時恆溫水槽裡純水的溫度，並對照恆溫水槽本身的熱電耦量測的溫度值，以確定恆溫水槽的控制溫度是否正確。量測結果恆溫水槽每一個溫度點與用絕對溫度計量出的溫度值相差約為 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，故可以採信恆溫水槽的控制溫度。

(2) 熱電耦校正：熱電耦亦是使用絕對溫度計校正，將熱電耦一端接至 Agilent 34970A 資料蒐集/切換器，感測溫度端放在恆溫水槽中，讓絕對溫度計盡量靠近熱電耦。控制恆溫水槽的每個溫度點，對照熱電耦與絕對溫度計的值，結果兩者相差約為

$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，故可以採信熱電耦的量測值。

(3) 流量計校正：本實驗流量計為浮子式流量計，讀取刻度為體積流率 $Q_1$ ，校正方法是在流量計的入出口處放置熱電耦，用以量測流體溫度，目的是為了知道流體在當時溫度下的密度，體積流率與密度的乘積即為質量流率，使用精準度 $\pm 0.1\text{g}$ 的磅秤加上碼錶，量測一段時間（60sec）流體經由流量計流出的重量，將重量除以時間即為質量流率。由熱電耦量測的流體溫度值，在流量計入口端與出口端的溫差不到 $0.1^{\circ}\text{C}$ ，所以假設溫度相等密度也相等，將量測到的質量流率除以密度即為體積流率 $Q_2$ ，對照 $Q_1$ 與 $Q_2$ 可以得到流量計的校正曲線如圖 2-9 所示，不同工作流體有不同流量計校正曲線。

## 2.5 實驗原理

工作流體的性質，如：密度、比熱等皆與水相似，因此以水的性質來代表聚丙醯胺水溶液的性質，其流體溫度(bulk temperature)取測試段入口與測試段出口流體的平均溫度 $T_{b,f}$ 為參考溫度，即

$$T_{b,f} = \frac{(T_{b,out} + T_{b,in})}{2} \quad (2.1)$$

### (一) 摩擦因子

在固定質量流率的情況下，可計算出當時的流速與雷諾數。另外由差壓計讀取到的差壓 $\Delta p$ ，代入下列公式：

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.2)$$

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

$$f_F = \frac{f}{4} \quad (2.3)$$

在改變流體的質量流率時，可以得到不同的雷諾數，並且計算當時的摩擦因子  $f_F$ ，看是否符合方程式  $f_F = \frac{16}{\text{Re}^*}$ ，其中  $\text{Re}^*$  為廣義雷諾數，定義如式 (1.11)，本實驗測試段寬高比為 2:1，故由表 1-1 中取  $a=0.244$ ， $b=0.7276$ 。

## (二) 熱傳係數

計算熱傳係數之前，必須先有以下假設：

1. 熱源所產生的熱通量經由銅板傳導，且為均勻分布：電加熱片平貼在銅板上並在銅板與電加熱片之間塗上導熱膏。
2. 忽略流體在軸向的熱傳導： $Pe$  為軸向熱對流與軸向熱傳導的比值，本實驗  $Pe$  最小約為 1000，所以忽略流體軸向的熱傳導。
3. 忽略銅板在軸向的熱傳導：因為銅板厚度 (0.003 m) 遠小於銅板的長度 (2.44 m)，所以假設銅板只有徑向熱傳。
4. 假設流體在測試段流動方向的溫度是呈線性分布：因為流體入出與出口溫差都在 28°C 以下，故此假設成立。

由量測可得知工作流體在測試段入口 ( $T_{b,in}$ ) 與出口 ( $T_{b,out}$ ) 的

溫度，根據我們假設流體在測試段流動方向的溫度是呈線性分布，可以推算流體在軸向位置  $x$  的流體溫度：

$$T_x = T_{b,in} + (T_{b,out} - T_{b,in}) \left( \frac{x}{L} \right) \quad (2.4)$$

其中  $x$  為離測試段入口的距離； $L$  為測試段的長度。

由電熱片所產生的熱量 ( $Q_{total}$ ) 消耗的地方可分為兩部分，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 ( $Q_{loss}$ )， $Q_{total}$  計算如下：

$$Q_{total} = I \cdot V = Q_{sensible} + Q_{loss} \quad (2.5)$$

工作流體吸收電熱片的熱量  $Q_{sensible}$ ：

$$Q_{sensible} = m C_p (T_{b,out} - T_{b,in}) \quad (2.6)$$

$Q_{loss}$  的量測方法則是先以純水當工作流體，依照公式(2.5)、(2.6)

計算加入熱量  $Q_{total} = I \cdot V$  與水的  $Q_{sensible}$ ，二者差就是  $Q_{loss}$ 。

測試段單位面積的熱傳量 (heat flux)  $q_x''$  為：

$$q_x'' = \frac{Q_{sensible}}{LW} \quad (2.7)$$

其中  $L$  為測試段截面的長度； $W$  為測試段截面的寬度。故局部熱傳係數  $h_x$  為：

$$h_x = \frac{q_x''}{T_{wx} - T_x} \quad (2.8)$$

其中  $T_{wx}$  為上板加熱或是下板加熱時的局部壁溫 (local wall temperature)； $T_x$  是由 (2.4) 計算出來的局部流體溫度 (local fluid

temperature)。而局部紐賽數 (local Nusselt number)  $Nu_x$  為：

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot D_h}{k} \quad (2.9)$$

當邊界條件為上下板同時加熱時，此時的局部熱傳係數分為上下

板兩部分：

$$h_{x,u} = \frac{q''_{x,u}}{T_{wx,u} - T_x} \quad (2.10)$$

$$h_{x,l} = \frac{q''_{x,l}}{T_{wx,l} - T_x} \quad (2.11)$$

其中下標  $u$  與下標  $l$  分別代表上板及下板。而局部紐賽數也分為上下

板兩部分：

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

$$Nu_{lx} = \frac{h_{x,l} \cdot D_h}{k} \quad (2.13)$$

並定義平均的局部紐賽數  $\overline{Nu}_x$  為：

$$\overline{Nu}_x = 2 \left( \frac{1}{Nu_{ux}} + \frac{1}{Nu_{lx}} \right)^{-1} \quad (2.14)$$

參數計算：

(一) 工作流體冪次法則之  $n$ 、 $K$  計算：

由於輕剪力流體的剪應力 ( $\tau$ )-剪切率 ( $\dot{\gamma}$ ) 曲線是呈指數型式：

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.15)$$

將測量到的剪應力及其所相對應的剪切率值代入 (2.15)，並將其兩



邊取 log 值得到：

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

利用線性迴歸，即可以求出所需要的 n 與 K 值。

(二) 局部紐塞數  $Nu_x$  與進口位置 x 的關係：

發展區的局部熱傳係數與距離 x 有關，因此局部紐塞數亦與距離 x 有關，流體隨著距離的增加而進入完全發展狀態，此時局部紐塞數會趨近一定值而與距離無關。為了解在發展狀態時的局部紐塞數的變化情形，定義一與距離相關的無因次化參數  $G_z$  (Graetz number)：

$$G_z = \frac{\dot{m} C_p}{kx} \quad (2.17)$$

上式為顯熱與軸向熱傳導的比值，由此可由紐塞數  $Nu_x$  與格雷茲數  $G_z$  的關係圖得知流體從測試段入口至完全發展之前的局部紐塞數的變化。

(三) 混合對流

當下板加熱時，除了有強制對流外，亦有自然對流的效應產生，故必須考慮浮力效應的影響，與浮力效應有關的無因次參數為格雷斯荷夫數 (Grashof number  $Gr$ )，為將浮力效應加入無因次動量方程式後的浮力項與雷諾數平方的乘積，定義為浮力與黏滯力的比值：

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta \theta_c D_h^3}{\eta^2} \quad (2.18)$$

其中  $\rho$  為流體密度； $g$  為重力； $\beta$  為熱膨脹係數； $\theta_c$  為特徵溫度  
( $= q'' D_h / k$ ， $q''$  為熱通量； $k$  為熱傳導係數)； $D_h$  為流道水力直徑， $\eta$   
為視黏度。

雷諾數為慣性力與黏滯力的比值，代表強制對流的無因次參數，  
將格雷斯荷夫數除以雷諾數的平方，可以得到浮力與慣性力的比值。  
若  $(Gr/Re^2) \approx 1$ ，強制對流與自然對流的效應都必須考慮；若  
 $(Gr/Re^2) \ll 1$ ，則忽略自然對流的效應；若  $(Gr/Re^2) \gg 1$ ，則忽略  
強制對流的效應。以上  $Re$  在此皆以廣義雷諾數  $Re^*$  如式 (1.11) 代入計  
算。

## 2.6 實驗測試範圍

工作流體：純水以及濃度 1000wppm 聚丙醯胺水溶液。

流體入口溫度：30°C。

流量範圍：純水—0.0017kg/s~0.01kg/s。

聚丙醯胺水溶液—0.001kg/s~0.0085kg/s。

雷諾數範圍：純水： $Re=250\sim1100$ ， $Re^*=257\sim1131$  ( $n=1$ )

聚丙醯胺水溶液： $Re^*=60\sim540$

熱通量範圍：1. 上板加熱其他三面絕熱：100W、150W、200W。

2. 下板加熱其他三面絕熱：100W、150W、200W。

3. 上下板同時加熱其他兩面絕熱：各 50W、75W、100W。

## 2.7 實驗步驟

### (一) 調配聚丙醯胺水溶液

1. 在室溫約為 25°C 的環境下，先準備約為調配量一半的去離子水，倒入容器中。
2. 加入所需要量的聚丙醯胺粉末，並且用攪拌棒攪拌一段時間後，將剩餘的一半去離子水倒入容器中。
3. 聚丙醯胺粉末要完全溶解需要一段時間，因此等待二至三天且在此期間要不斷攪拌。
4. 調配好之聚丙醯胺水溶液需放置陰涼處，不可受陽光照射，以免變質。



### (二) 量測聚丙醯胺水溶液黏度

1. 使用 Brookfield 旋轉式流變儀量測聚丙醯胺水溶液黏度，最初控制溫度為 25°C。
2. 開始調整轉速，從 50rpm 開始至 90rpm 每增加 5rpm 記錄黏滯係數、剪應力及剪切率。
3. 調整溫度，每增加 5°C 重複步驟 2，至 55°C 為止。

### (三) 量測未加熱時測試段的壓力差降

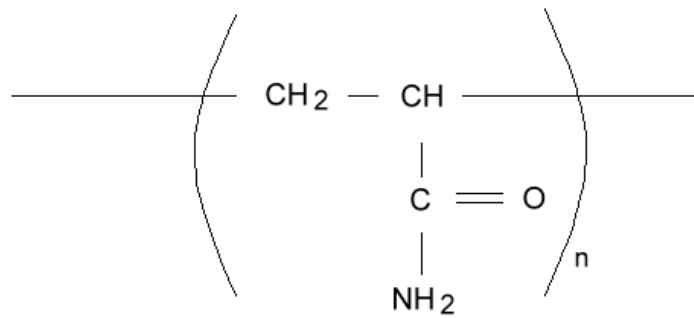
1. 將所有儀器電源打開先預熱。

2. 將工作流體倒入下方儲存桶，設定恆溫水槽溫度使工作流體溫度保持一定值，約  $30^{\circ}\text{C}$ 。
3. 開啟蠕動式幫浦，把工作流體從下方儲存桶送至上方儲存桶。
4. 讓上方儲存桶的工作流體因為重力而經由管子流下，在到達整流段之前會再經過一個熱交換器，控制入口流體溫度為  $30^{\circ}\text{C}$ 。
5. 利用流量計旋鈕的來調整流量。
6. 在旋扭固定後，記錄進入流量計前的工作流體穩態溫度值（由熱電耦量測），並記錄流量計讀數以及穩態差壓值。
7. 轉動旋鈕來改變工作流體流量，重複步驟 5 與步驟 6，記錄不同流量下的穩態差壓值。
8. 起初工作流體為水，與之前研究者使用水為工作流體所做的實驗結果做比較，確認實驗設備是否沒問題。
9. 實驗設備確定沒問題，使用聚丙醯胺水溶液為工作流體，重複步驟 2~7。

#### （四）量測加熱時測試段的壓力差降、流體進出口溫度與壓力差降

1. 將所有儀器電源打開先預熱。
2. 將工作流體倒入下方儲存桶，設定恆溫水槽溫度使工作流體溫度保持一定值，約  $30^{\circ}\text{C}$ 。
3. 開啟蠕動式幫浦，把工作流體從下方儲存桶送至上方儲存桶。

4. 讓上方儲存桶的工作流體因為重力而經由管子流下，在到達整流段之前會再經過一個熱交換器，控制入口流體溫度為  $30^{\circ}\text{C}$ 。
5. 利用流量計旋鈕調整流量。
6. 在旋扭固定後，記錄當時進入流量計前的工作流體溫度值（由熱電偶量測）。
7. 開啟電源供應器，調整加熱量為  $200\text{W}$ ，首先為上板加熱。
8. 在固定流量與加熱量的條件下，待溫度趨於穩定時，記錄穩態壓降值與熱電偶的溫度值（測試段入出口流體溫度、測試段壁溫）。
9. 重複步驟 5~8，記錄不同流量的穩態壓降值與溫度值。
10. 改變邊界條件：下板加熱，重複步驟 5~9。
11. 改變邊界條件：上下板同時加熱，重複步驟 5~9，其中步驟 7 的加熱瓦數改變為上下板各加熱  $100\text{W}$ 。
12. 改變工作流體為聚丙醯胺水溶液，重複步驟 5~11，其中步驟 7 的加熱瓦數條件增加兩項： $150\text{W}$  以及  $100\text{W}$ ；步驟 11 中的加熱瓦數條件增加兩項： $75\text{W}$  以及  $50\text{W}$ 。



Polyacrylamide

圖 2-1 聚丙醯胺結構式【11】

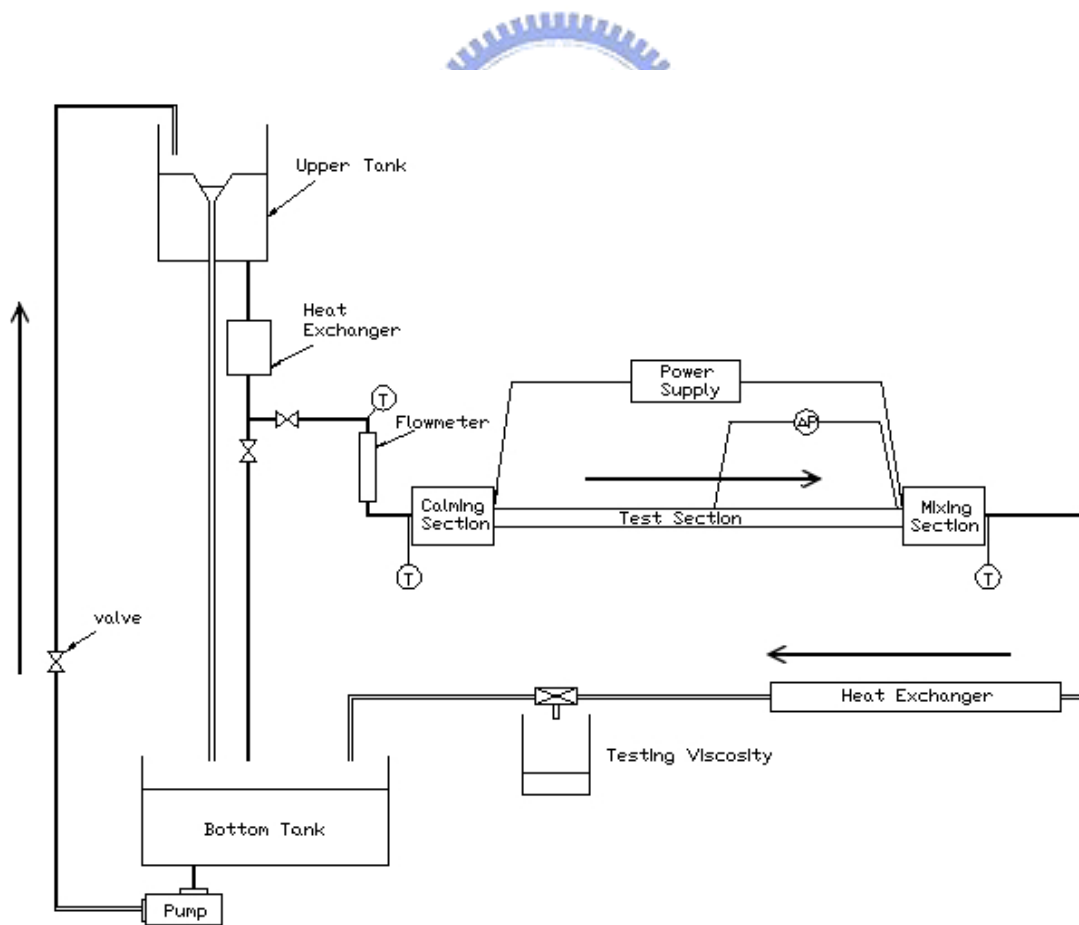
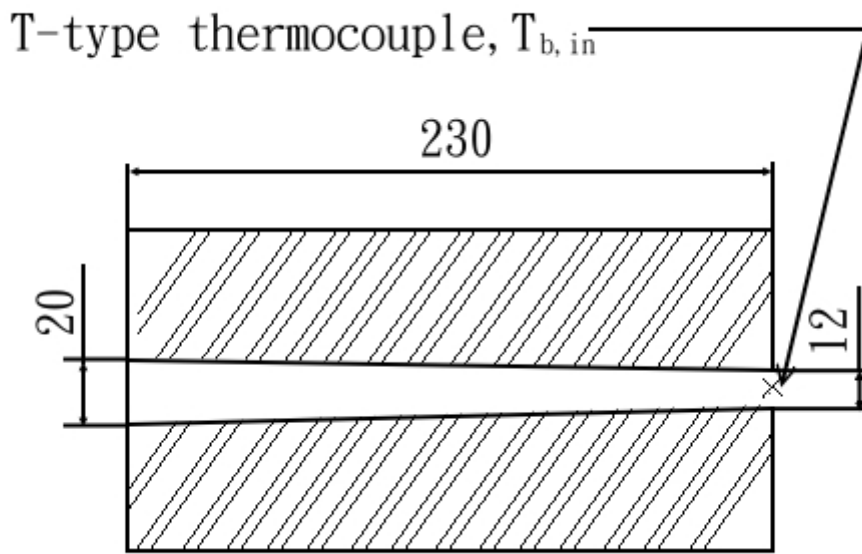
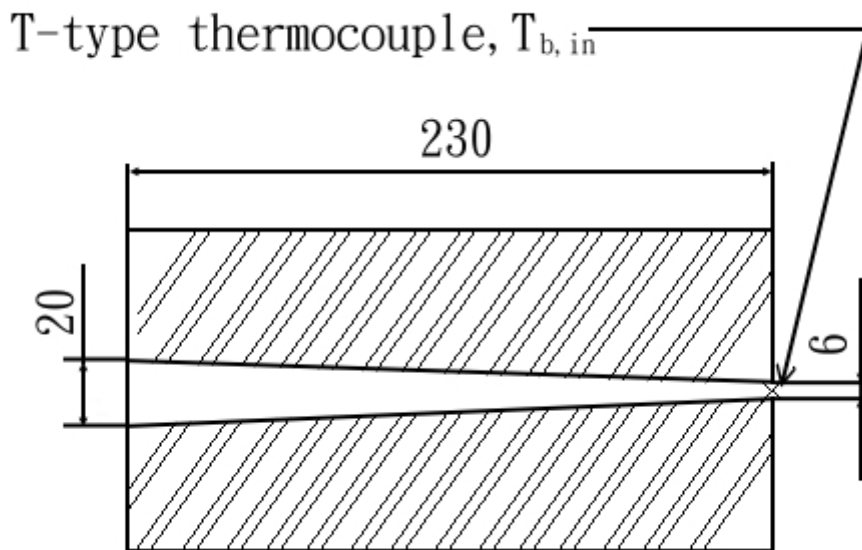


圖 2-2 實驗設備示意圖



俯視圖

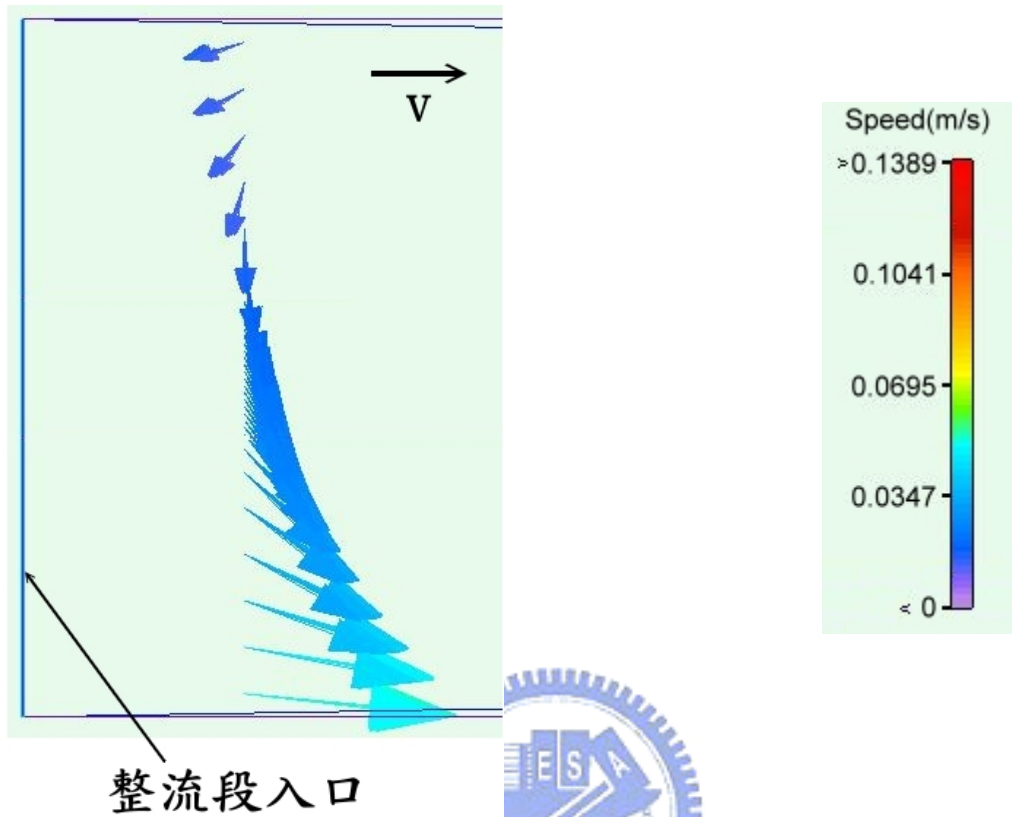


前視圖

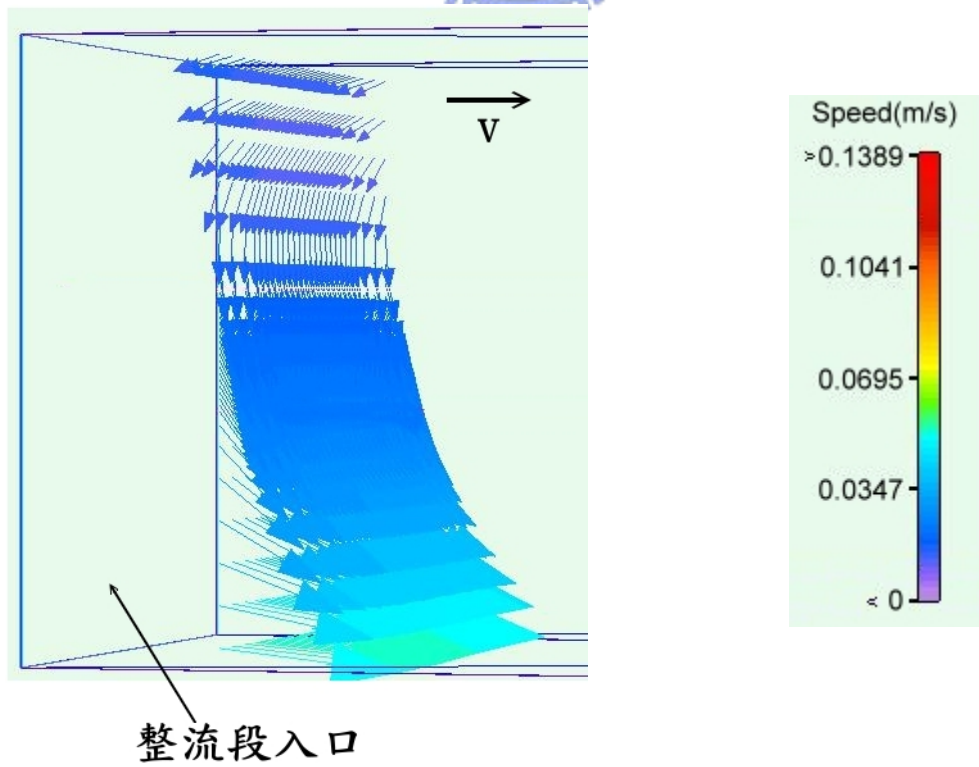
單位 [mm]

圖 2-3 整流段示意圖

2-4(a)入口端速度場側視圖



2-4(b)入口端速度場立體視圖





2-4(c)入口端截面速度分佈圖

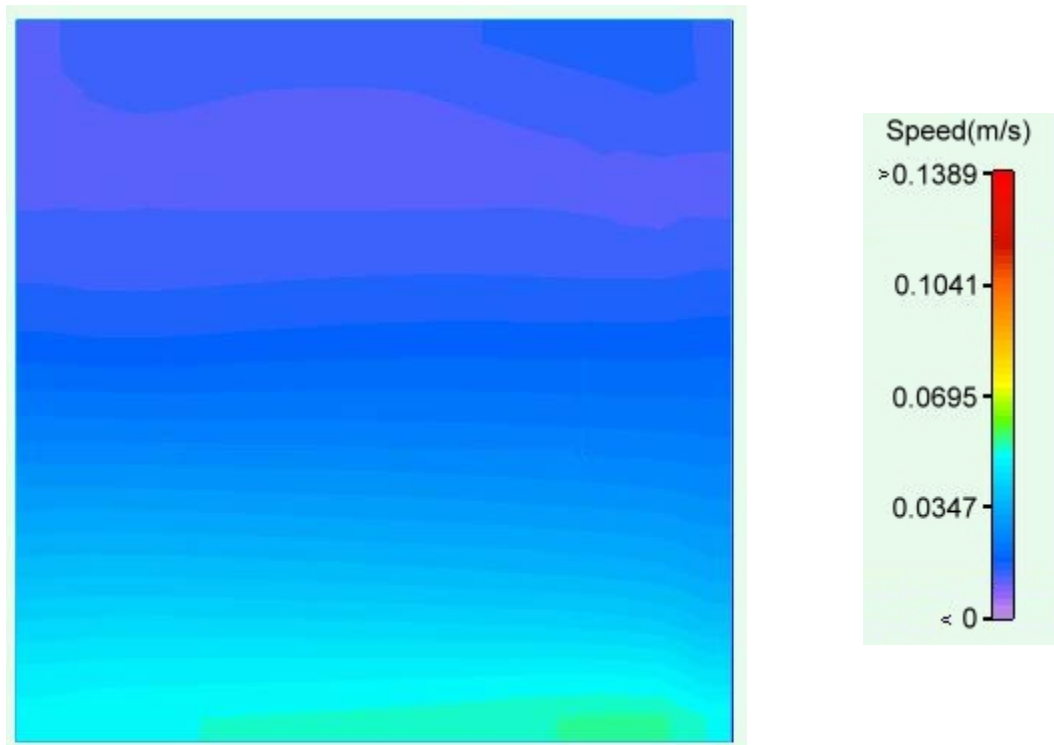
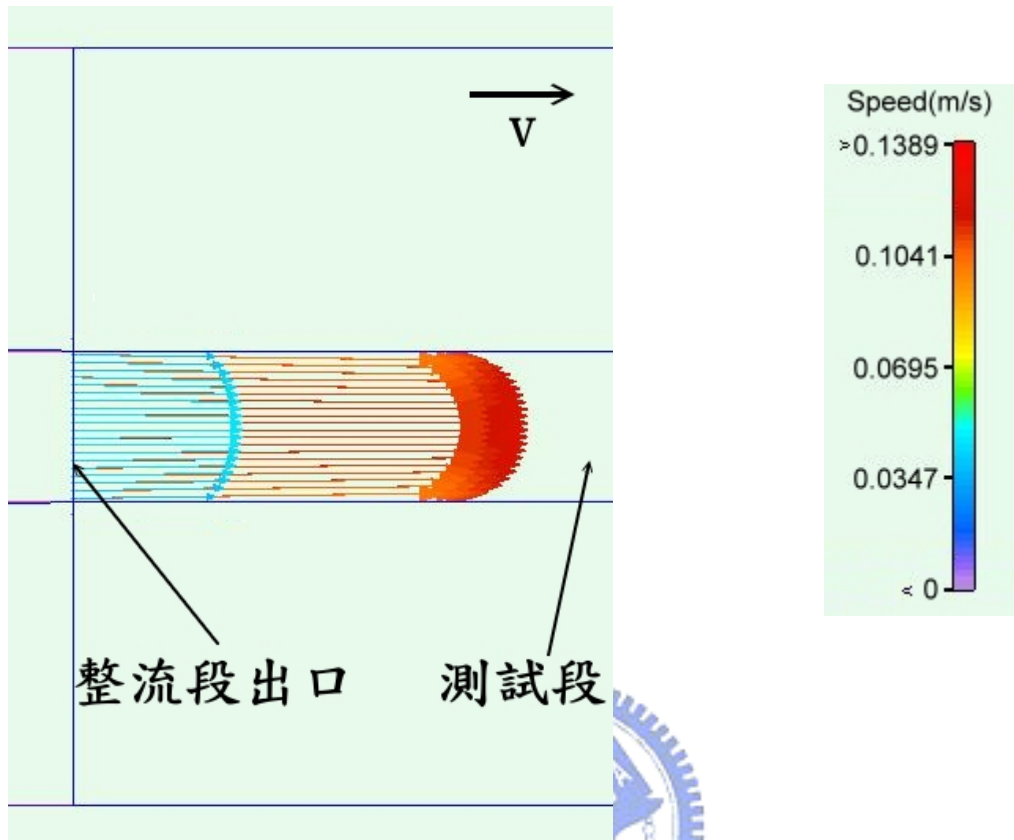
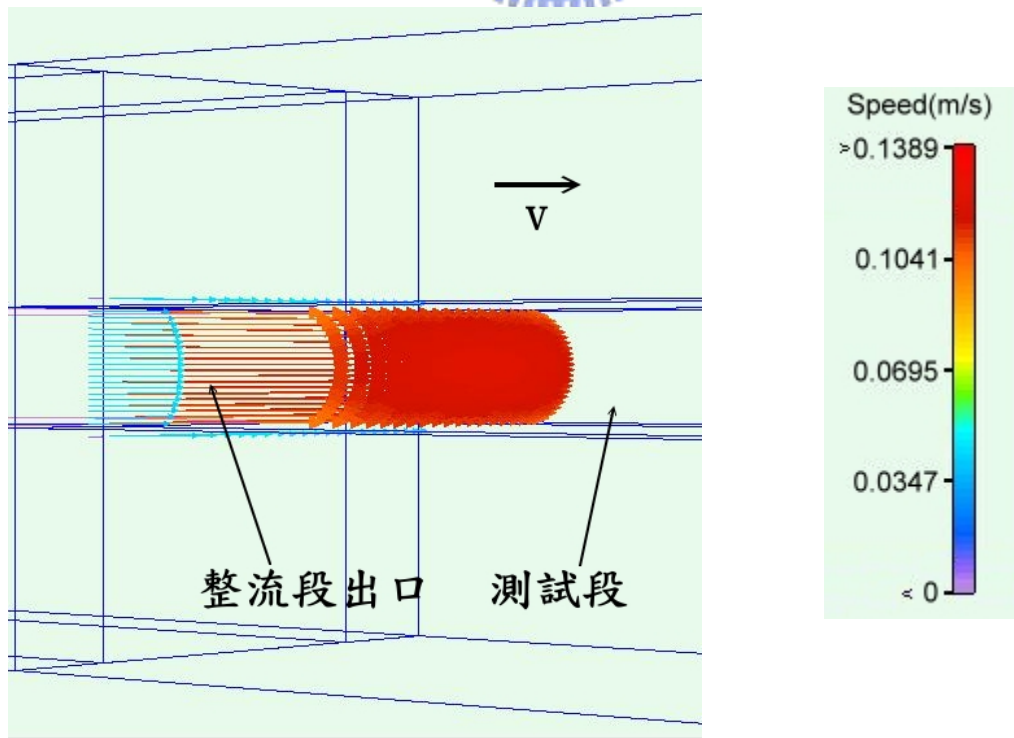


圖 2-4 模擬整流段入口端速度場與速度分佈圖

2-5(a) 出口端速度場側視圖



2-5(b) 出口端速度場立體視圖



2-5(c) 出口端截面速度分佈圖

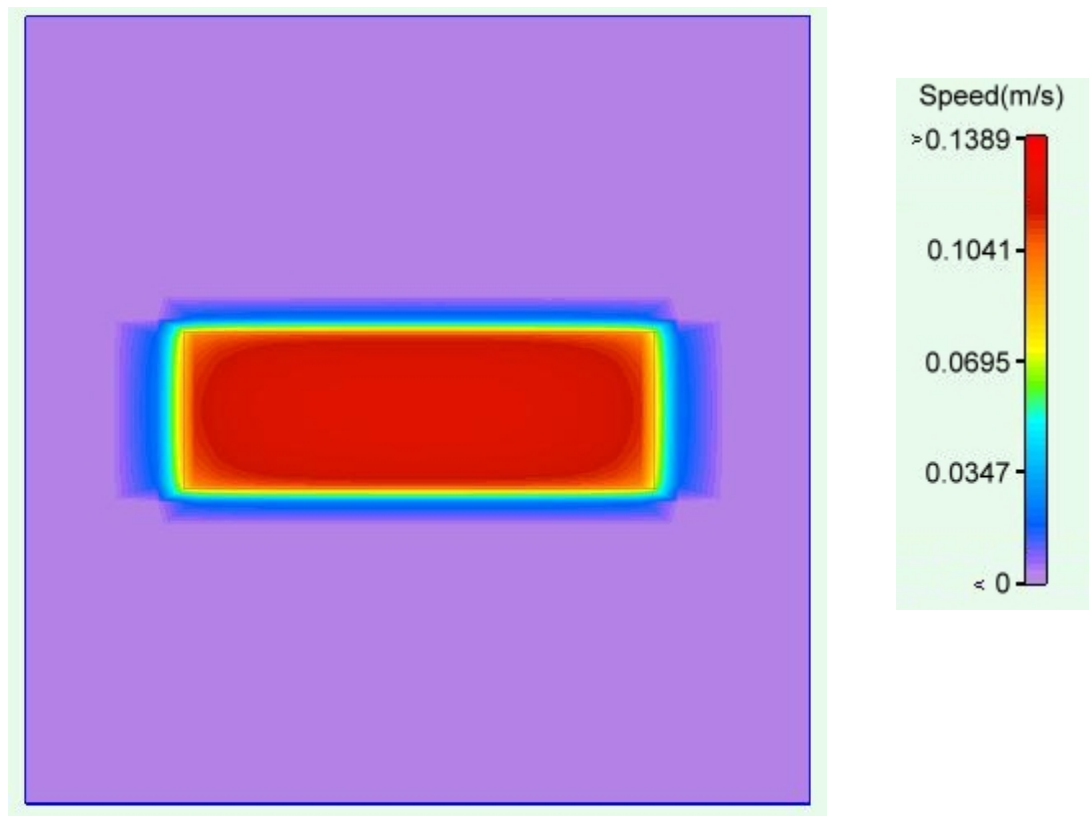
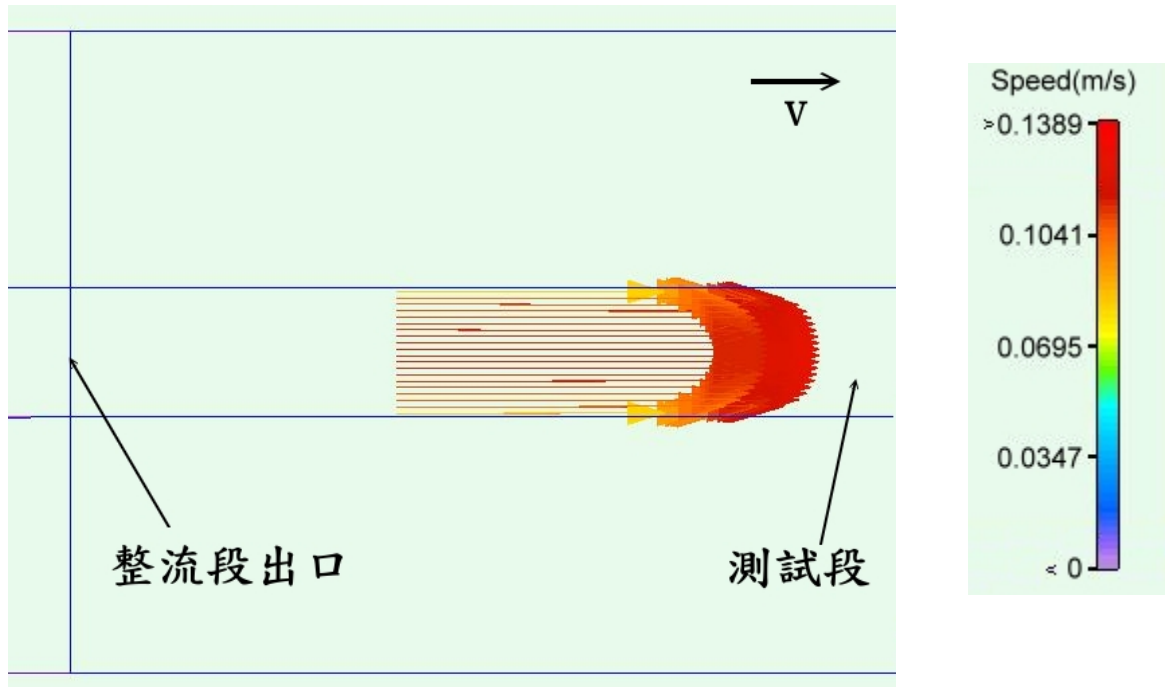
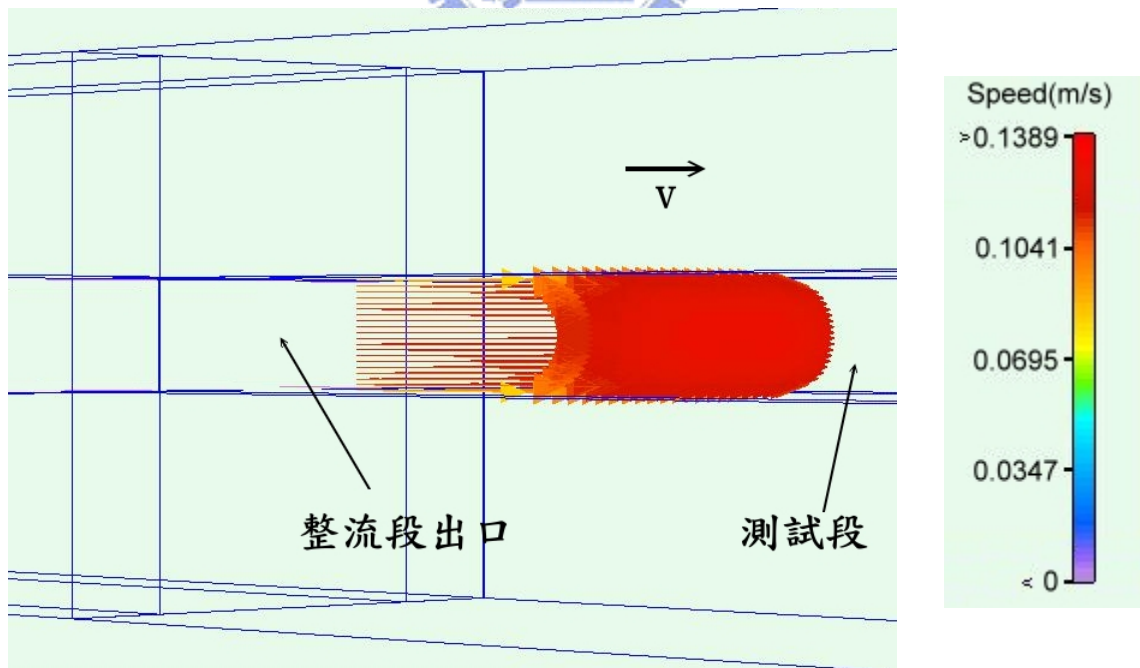


圖 2-5 模擬整流段出口端速度場與速度分佈圖

2-6(a) 測試段入口端速度場側視圖



2-6(b) 測試段入口端速度場立體視圖



2-6(c)測試段入口端截面速度分佈圖

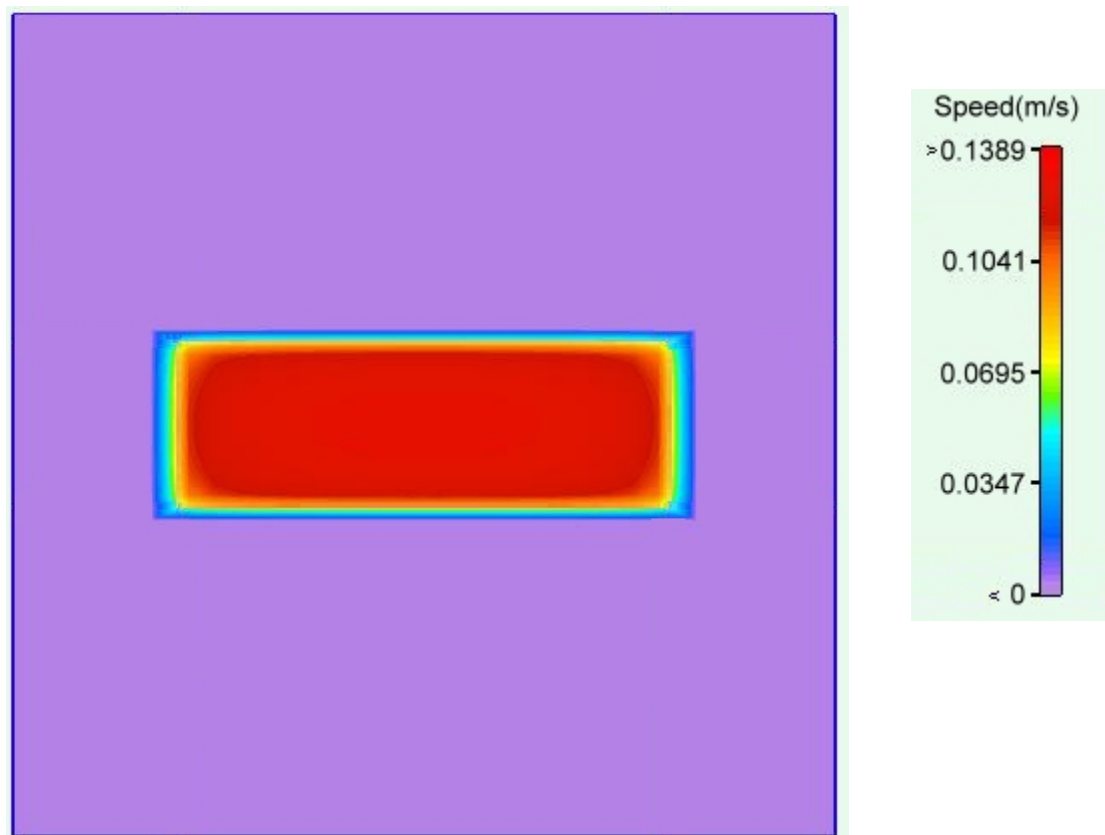


圖 2-6 模擬測試段入口端速度場與速度分佈圖

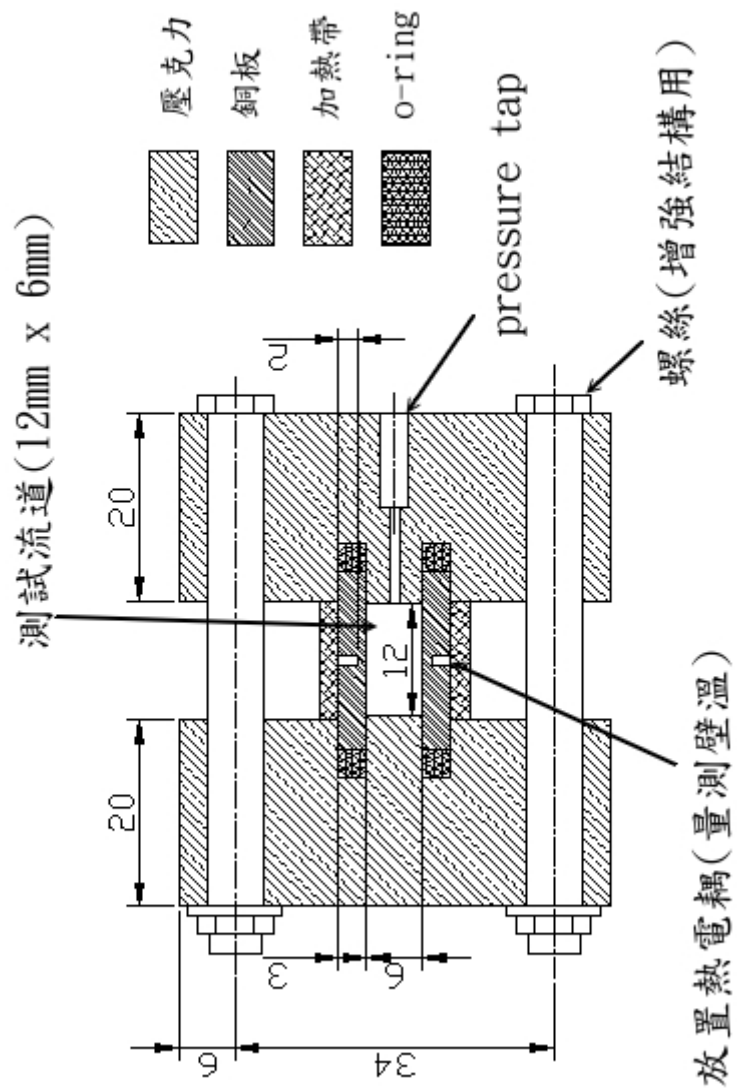
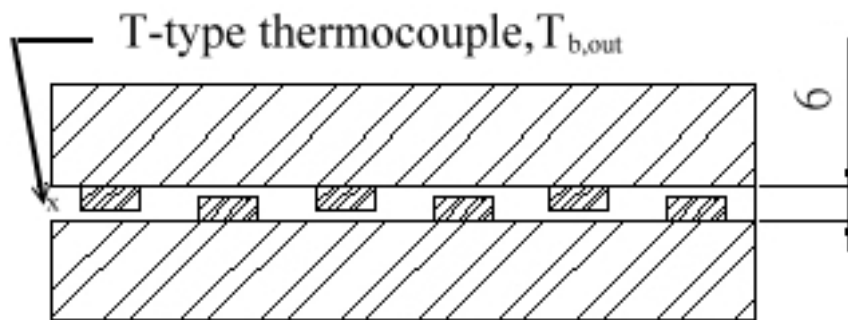
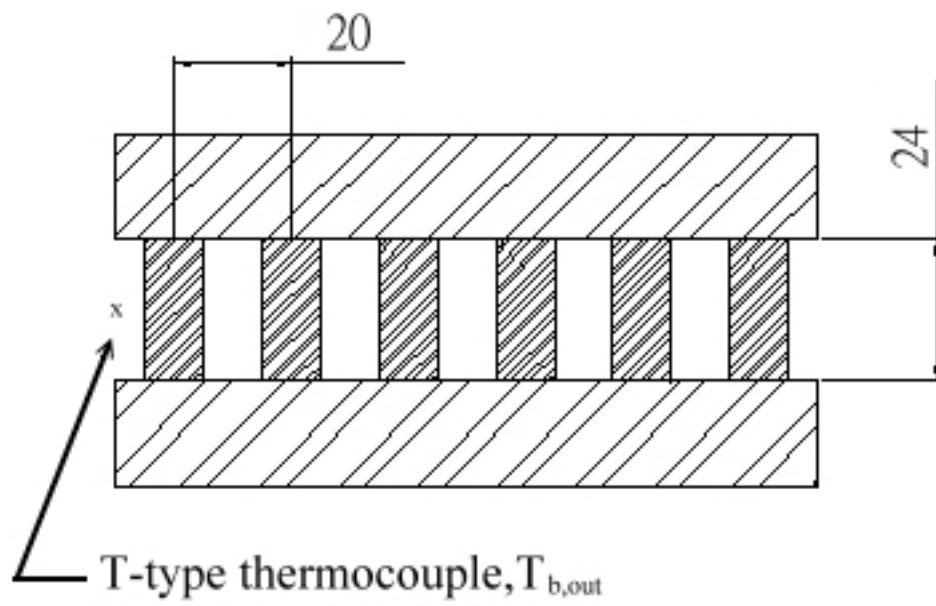


圖 2-7 測試段截面示意圖



前視圖

單位[mm]

圖 2—8 混合段示意圖

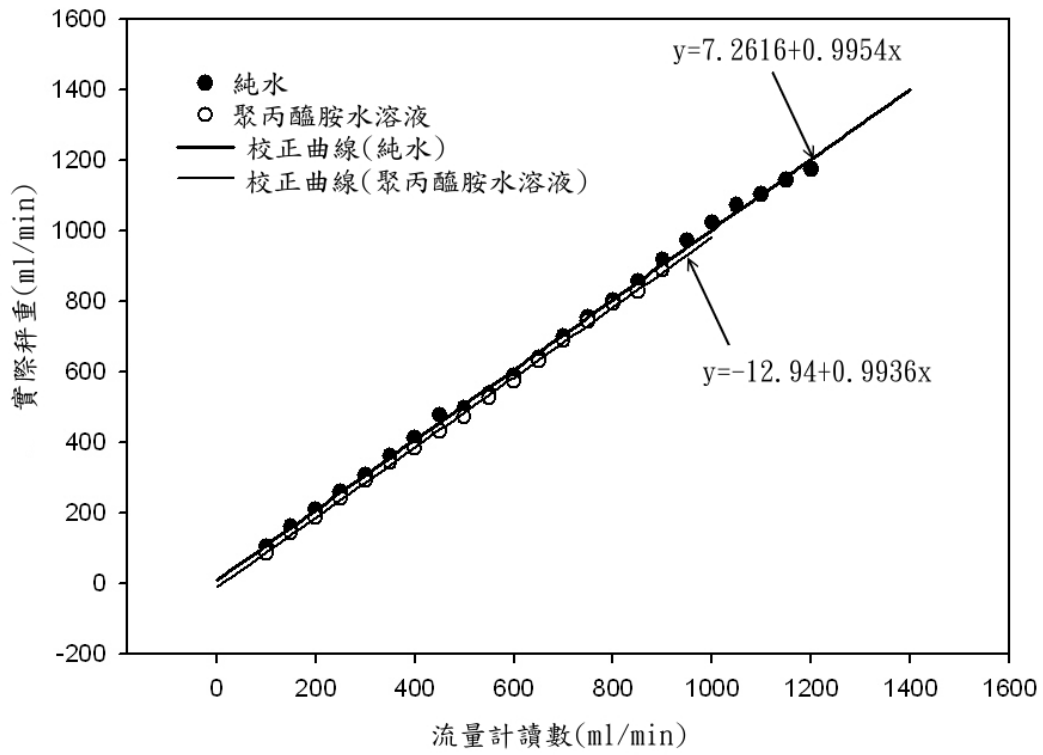


圖 2-9 流量計校正曲線

