

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Engineering
College of Mechanical Engineering
National Taiwan University
Master Thesis

利用微觀紋影技術觀察二元混合流體在微矩形管內沸

騰時之 Marangoni 對流現象

Visualization of the Marangoni convection during
boiling of binary mixtures in a square capillary tube by
micro-schlieren technique

黃建元

Chien-yuan Huang

指導教授：孫珍理 博士

Advisor: Chen-li Sun, Ph.D.

中華民國 102 年 6 月

June 2013

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

利用微觀紋影技術觀察二元混合流體在微矩形管內沸騰時之
Marangoni 對流現象

Visualization of the Marangoni Convection During Boiling of
Binary Mixtures in a Square Capillary Tube by Micro-Schlieren
Technique

本論文黃建元君 (R00522314) 在國立臺灣大學機械工程學系完
成之碩士學位論文，於民國 102 年 6 月 14 日承下列考試委員審查通
過及口試及格，特此證明

口試委員：

孫珍理

(簽名)

黃振聲 (指導教授)

林怡河

楊耀坤

(簽名)

系主任

致謝

謝謝大家。



摘要

本研究以控制熱通量的加熱條件，搭配微觀紋影技術，觀察耐熱玻璃製成之方型毛細管內的二元混合系統沸騰現象。分別探討方型毛細管管徑、工作流體濃度與不同二元混合系統對熱傳效果的影響及濃度所引起之 Marangoni 對流可視化之關係，最後利用紋影技術進行液氣介面附近濃度梯度之量化。本研究選用的方型毛細管管徑分別為 200 μm 、500 μm 及 900 μm ，工作流體為不同濃度的異丙醇/水 (2-propanol/water)、仲丁醇/水 (2-butanol/water)、正丁醇/水 (1-butanol/water)、乙二醇/水 (ethylene glycol/water)、乙酸/水 (acetic acid/water) 及丁酸/水 (butyric acid/water) 的混合溶液。二元混合系統依其表面張力與溫度之關係，可分為正混合系統與負混合系統兩種，其中正混合系統為異丙醇/水與仲丁醇/水兩種，負混合系統為正丁醇/水、乙二醇/水、乙酸/水及丁酸/水四種；而依有無共沸點可分為：具有共沸點的異丙醇/水、仲丁醇/水、正丁醇/水及丁酸/水四種，及不具共沸點的乙二醇/水及乙酸/水兩種。

實驗結果顯示，在方型毛細管管徑對熱傳效果影響方面，異丙醇/水及丁酸/水的混合系統，在不同濃度下，皆會受到管徑的影響且趨勢一致；正丁醇/水、乙二醇/水及乙酸/水的混合系統則是在高濃度之實驗條件下，較易受到管徑的影響；而在仲丁醇/水的混合系統中，熱傳係數之趨勢則是較不受到管徑改變之影響。在工作流體濃度對熱傳效果影響方面，異丙醇/水、仲丁醇/水、正丁醇/水、乙二醇/水及乙酸/水混合系統之熱傳係數皆會因莫耳濃度的不同而改變，而在丁酸/水的混合系統中，濃度的改變對於熱傳係數較無影響。在二元混合系統對熱傳效果影響方面，異丙醇/水及乙酸/水的混合系統受到 Marangoni 效應影響較為顯著，在低濃度時，異丙醇/水之混合系統受到 Marangoni 效應的影響較大，將遠離加熱面的冷流體拉引至靠近

加熱面的區域，進而提升熱傳效果；而在乙酸/水的混合系統中，在低濃度時，乙酸/水之混合系統受到 Marangoni 效應的影響較大，將靠近加熱面的流體牽引至遠離加熱面的區域，進而降低熱傳效果。而在具有共沸點的異丙醇/水、仲丁醇/水及正丁醇/水混合系統中，實驗觀察到當管徑較小、濃度接近共沸點及工作流體之液態莫耳分率高於氣態莫耳分率時，成核氣泡會發生震盪現象。

在紋影觀察方面，當管徑越大時，越易觀察到紋影條紋，而在管徑為 200 μm 時，皆無觀察到紋影條紋；經由計算並比較各實驗條件下溫度改變所造成之折射率變化及濃度改變所造成之折射率變化，可證實本研究所觀察到之折射率梯度主要係由濃度變化引起，因此利用濃度梯度與影像灰階值之關係式即可量化沸騰時液氣介面附近的濃度梯度。

關鍵字：微觀紋影技術、二元混合系統、Marangoni 對流、折射率梯度、濃度梯度之量化、局限沸騰。

Abstract

In this study, we employ a micro-schlieren system to observe Marangoni convection induced by concentration gradient during boiling of binary mixtures in square capillary tubes of various sizes. The effects of channel size, concentration of working fluids and mixture characteristic on boiling heat transfer are investigated experimentally. From the relation between refractive index gradient and grayscale ratio, we are able to quantify the concentration gradient near the vapor-liquid interface.

The inner widths of square capillary tubes we use are 200 μm , 500 μm and 900 μm , and our working fluids are binary mixtures of 2-propanol/water, 2-butanol/water, 1-butanol/water, ethylene glycol/water, acetic acid/water and butyric acid/water. In general, binary mixtures can be classified into positive mixtures and negative mixtures. In this work, positive mixtures include 2-propanol/water and 2-butanol/water.

Our experimental results reveal that both size of the square capillary and concentration play a prominent role in the heat transfer coefficients. Yet, heat transfer of 2-butanol/water mixtures is independent of size of capillary and varying concentration has no impact on the heat transfer of butyric acid/water mixtures. Results of this work confirm that the concentration induced Marangoni convection is significant to the boiling of binary mixtures. For 2-propanol/water and acetic acid/water mixtures, we find out that the Marangoni effect is particularly vital at low concentration. Heat transfer of 2-propanol/water mixture is enhanced at low concentration because the surface tension gradient acts to induce liquid motion towards the heated surface. Nevertheless, opposite trend is found for acid/water mixture. An interesting phenomenon, bubble oscillation, is

discovered in smaller square capillary tube when concentrations are close to the azeotropic point and the mole fraction of liquid phase is higher than that of vapor.

Usually, the schlieren patterns can be easily found in square capillary tubes of larger size. No schlieren phenomenon is observed in capillary of 200 μm in width. By comparing the refractive index derivatives with respect to temperature and concentration, we verify that the schlieren indeed corresponds to the concentration induced Marangoni convection. With the correlation of refractive index gradient and grayscale ratio, we are able to quantify the concentration gradients near the liquid-vapor interface during boiling of binary mixtures when the Marangoni convection is strong.

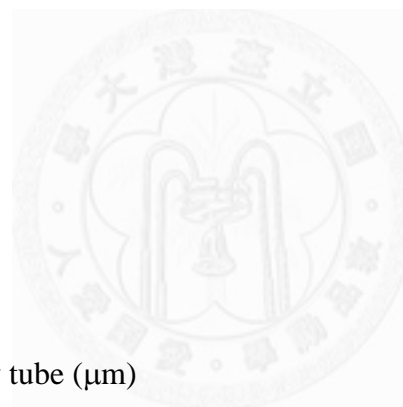
Keywords : micro-schlieren technique, binary mixtures, Marangoni convection, refractive index gradient, quantification of concentration gradient, confined boiling.

目錄

| | |
|--|-----|
| 口試委員會審定書 | i |
| 致謝 | ii |
| 摘要 | iii |
| Abstract..... | v |
| 目錄 | vii |
| 符號索引 | ix |
| 圖目錄 | xi |
| 表目錄 | xiv |
| 第一章 導論 | 1 |
| 1.1 前言 | 1 |
| 1.2 文獻回顧 | 2 |
| 1.2.1 氣泡受熱的變化情形 | 2 |
| 1.2.2 Marangoni 對流的影響 | 3 |
| 1.2.3 流場限制 (confinement) 對核沸騰之影響 | 5 |
| 1.2.4 紋影技術之應用 | 6 |
| 1.3 研究目的 | 6 |
| 第二章 實驗量測與不確定性分析 | 8 |
| 2.1 實驗設備 | 8 |
| 2.1.1 微流道元件 | 8 |
| 2.1.2 微觀紋影系統 | 8 |
| 2.1.3 加熱裝置 | 10 |
| 2.1.4 資料擷取系統 | 11 |
| 2.1.5 工作流體 | 12 |
| 2.2 實驗量測 | 12 |
| 2.3 不確定性分析 | 13 |
| 2.3.1 表面溫度 | 13 |
| 2.3.2 過熱溫度 | 14 |
| 2.3.3 熱通量 | 15 |
| 2.3.4 熱傳係數 | 15 |
| 2.3.5 莫耳分率 | 16 |
| 2.3.6 濃度梯度 | 16 |
| 2.3.7 無因次參數 | 17 |
| 第三章 實驗結果與討論 | 20 |
| 3.1 沸騰曲線 | 20 |

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 3.1.1 | 方型毛細管管徑對沸騰曲線之影響 | 20 |
| 3.1.2 | 莫耳分率對沸騰曲線之影響 | 21 |
| 3.1.3 | 混合系統對沸騰曲線之影響 | 23 |
| 3.2 | 熱傳係數 | 24 |
| 3.2.1 | 方型毛細管管徑對熱傳係數之影響 | 24 |
| 3.2.2 | 莫耳分率對熱傳係數之影響 | 26 |
| 3.2.3 | 混合系統對熱傳係數之影響 | 28 |
| 3.2.4 | Marangoni number 與熱傳係數之關係 | 28 |
| 3.3 | 紋影觀察之結果與討論 | 30 |
| 3.3.1 | 方型毛細管管徑對紋影觀察之影響 | 31 |
| 3.3.2 | 溫度及濃度造成之折射率變化與紋影觀察之關係 | 32 |
| 3.3.3 | 濃度梯度之量化 | 35 |
| 第四章 | 結論與建議 | 37 |
| 4.1 | 結論 | 37 |
| 4.1.1 | 沸騰熱傳特徵 | 37 |
| 4.1.2 | 紋影系統之最小可偵測濃度梯度及量化 | 38 |
| 4.2 | 建議 | 39 |
| 參考文獻 | | 41 |
| 附錄 A | | 43 |

符號索引



- Ca* Capillary number $Ca = \frac{\mu Q}{D^2 \sigma}$
- C_p* 比熱 specific heat (kJ kg⁻¹ °C⁻¹)
- D* 方型毛細管管徑 inner width of square capillary tube (μm)
- E* 加熱面至熱電偶之距離 the distance between top surface of heater element and thermocouple (mm)
- h* 熱傳係數 heat transfer coefficient (W cm⁻² °C⁻¹)
- h_{lv}* 工作流體之潛熱 heat of vaporization (kJ kg⁻¹)
- Ja* Jakob number $Ja = \frac{\rho_l c_{p_l} (T_s - T_{sat})}{\rho_v h_{lv}}$
- k* 熱傳導係數 thermal conductivity (W m⁻¹ °C⁻¹)
- m* 物質重量 component weight (g)
- Ma* Marangoni number $Ma = \frac{\Delta \sigma}{\rho_l \nu_l^2} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} \cdot Pr$
- n* 折射率 refractive index
- N* 量測樣本總數 number of sample
- P* 壓力 pressure (Pa)
- q''* 熱通量 heat flux (W cm⁻²)
- Q* 體積流率 volume flow rate (m³ s⁻¹)
- R* 氣體常數 universal gas constant (m² s⁻² °C⁻¹)
- T* 溫度 temperature (°C)
- u* 工作流體流速 flow velocity (m s⁻¹)

| | |
|------|---|
| U | 總誤差 total error |
| V | 電壓 voltage (V) |
| We | Weber number $We = \frac{\rho_1 Q^2}{D^3 \sigma}$ |
| w | 液體重量百分濃度 liquid mass fraction |
| x | 液體莫耳分率 liquid mole fraction |
| y | 氣體莫耳分率 vapor mole fraction |



希臘符號

| | |
|----------|---|
| ρ | 工作流體密度 density (kg m^{-3}) |
| σ | 表面張力 surface tension (mN m^{-1}) |
| μ | 黏滯係數 viscosity (N s m^{-2}) |

符號下標

| | |
|------|---|
| ave | 平均 average |
| bp | 沸點 boiling point |
| d | 露點 dew point |
| h | 過熱溫度 superheat, $\Delta T_h = T_s - T_{\text{sat}}$ |
| i | 取樣點 sample number |
| l | 液體 liquid |
| rand | 隨機誤差 random error |
| s | 加熱表面 the top surface of heater element |
| sat | 飽和點 saturation point |
| sys | 系統誤差 systematic error |
| v | 氣體 vapor |

圖目錄

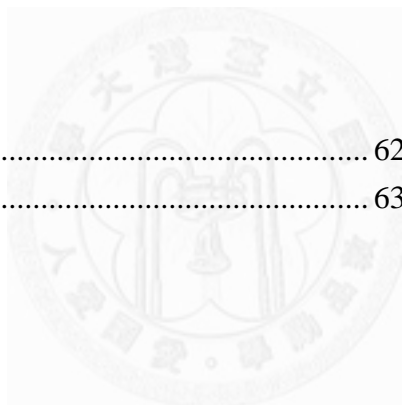
| | |
|---|----|
| 圖 2.1 實驗設備裝置圖 | 64 |
| 圖 2.2 加熱塊尺寸及標註圖 (單位: mm) | 65 |
| 圖 2.3 加熱面上之溫度以最小平方法擬合曲線圖 | 66 |
| 圖 3.1 工作流體為異丙醇與水之純物質在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 | 67 |
| 圖 3.2 工作流體為異丙醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 | 67 |
| 圖 3.3 工作流體為異丙醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線(續) | 68 |
| 圖 3.4 工作流體為仲丁醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 | 69 |
| 圖 3.5 工作流體為正丁醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 | 70 |
| 圖 3.6 工作流體為乙二醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 | 71 |
| 圖 3.7 工作流體為乙酸與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 | 71 |
| 圖 3.8 工作流體為丁酸與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 | 72 |
| 圖 3.9 工作流體為丁酸與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線(續) | 72 |
| 圖 3.10 工作流體為異丙醇與純水在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖,其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋 | 73 |
| 圖 3.11 工作流體為同一濃度之異丙醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖,其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋 | 74 |
| 圖 3.12 工作流體為同一濃度之異丙醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖(續),其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象 | 75 |
| 圖 3.13 工作流體為同一濃度之仲丁醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖,其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象 | 76 |
| 圖 3.14 工作流體為同一濃度之正丁醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖,其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象 | 77 |
| 圖 3.15 工作流體為同一濃度之乙二醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖,其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋 | 78 |
| 圖 3.16 工作流體為同一濃度之乙酸與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係 | |

| | |
|--|----|
| 數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋..... | 79 |
| 圖 3.17 工作流體為同一濃度之丁酸與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋..... | 80 |
| 圖 3.18 在相同管徑方型毛細管內，異丙醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象..... | 81 |
| 圖 3.19 在相同管徑方型毛細管內，仲丁醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象..... | 82 |
| 圖 3.20 在相同管徑方型毛細管內，正丁醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象..... | 83 |
| 圖 3.21 在相同管徑方型毛細管內，乙二醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋..... | 84 |
| 圖 3.22 在相同管徑方型毛細管內，乙酸與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋..... | 85 |
| 圖 3.23 在相同管徑方型毛細管內，丁酸與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋..... | 86 |
| 圖 3.24 工作流體為 $x = 0.015$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 87 |
| 圖 3.25 工作流體為 $x = 0.015$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 88 |
| 圖 3.26 工作流體為 $x = 0.07$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 89 |
| 圖 3.27 工作流體為 $x = 0.07$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 90 |
| 圖 3.28 工作流體為 $x = 0.015$ 之仲丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 91 |
| 圖 3.29 工作流體為 $x = 0.015$ 之仲丁醇與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 92 |
| 圖 3.30 工作流體為 $x = 0.2$ 之正丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 93 |
| 圖 3.31 工作流體為 $x = 0.3$ 之正丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態..... | 94 |
| 圖 3.32 工作流體為 $x = 0.9$ 之乙二醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不 | |

| | |
|--|-----|
| 同過熱溫度下之流場型態 | 95 |
| 圖 3.33 工作流體為 $x = 0.015$ 之丁酸與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 96 |
| 圖 3.34 工作流體為 $x = 0.15$ 之丁酸與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 97 |
| 圖 3.35 工作流體為 $x = 0.15$ 之丁酸與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 98 |
| 圖 3.36 工作流體為 $x = 0.69$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $200 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 99 |
| 圖 3.37 工作流體為 $x = 0.69$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 100 |
| 圖 3.38 工作流體為 $x = 0.85$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $200 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 101 |
| 圖 3.39 工作流體為 $x = 0.85$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 102 |
| 圖 3.40 工作流體為 $x = 0.5$ 之仲丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 103 |
| 圖 3.41 工作流體為 $x = 0.3$ 之正丁醇與水混合物在管徑為 $200 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態 | 104 |
| 圖 3.42 2-propanol/water 混合系統之濃度梯度量化結果 | 105 |
| 圖 3.43 2-butanol/water 混合系統之濃度梯度量化結果 | 106 |
| 圖 3.44 1-butanol/water 混合系統之濃度梯度量化結果 | 107 |
| 圖 3.45 ethylene glycol/water 混合系統之濃度梯度量化結果 | 108 |
| 圖 3.46 butyric acid/water 混合系統之濃度梯度量化結果 | 109 |

表目錄

| | |
|---|----|
| 表 2.1 各實驗條件下之 $\partial n/\partial x$ 與 $\partial n/\partial T$ | 62 |
| 表 2.2 各實驗條件下之 Marangoni number | 63 |



第一章 導論

1.1 前言

隨著半導體產業的高速發展，製程技術大幅提升，摩爾定律 (Moore's Law) [1] 指出在相同大小的 IC (integrated circuit) 上所能容納的電晶體 (transistor) 數量，約每隔十八個月會增加一倍，而電晶體數量越多使得 IC 運算的速度越快，性能也提升一倍。然而，伴隨而來的是 IC 運作時產生的大量廢熱，降低晶片的工作效能，因此晶片散熱將是未來技術持續發展須克服的重大課題。

傳統的散熱方式如鰭片 (fin)、風扇 (fan) 受到 IC 尺寸日趨微小化的空間限制，無法完全發揮其散熱能力，而利用微流道 (microchannel) 內相變化熱傳為一可行的發展方向 [2]。相變化熱傳係指工作流體因受熱產生相變化後，進而帶走大量熱量 (即物質的潛熱) 的散熱方式。一般使用的工作流體多為單一純物質，如水、醇類、製冷劑 (refrigerant) 等，如：應用 R-134a 於中央處理器 (Central Processing Unit, CPU) 之散熱模組 [3]，若改為二元混合系統，則會因工作流體組成成分的影響而與單一流體的物理性質，例如沸點溫度、露點溫度、表面張力等有很大的差異。

工作流體由液態變成氣態的相變化吸熱過程可分為沸騰 (boiling) 與蒸發 (evaporation) 兩種方式，其中沸騰是液體在表面及內部同時發生的劇烈汽化現象。流體在固體表面上受熱產生的池沸騰 (pool boiling) 現象，可依過熱溫度 (excess temperature) 不同分為自由對流沸騰 (free convection boiling)、核沸騰 (nucleate boiling)、過渡沸騰 (transition boiling)、及薄膜沸騰 (film boiling) 四個階段，若欲利用沸騰過程達到散熱的目的，則可將過熱溫度控制在工作流體發生核沸騰的範圍內，以達到高散熱效率的目的。因此在微觀尺度下，探討工作流體為二元混合系

統在核沸騰時的流場機制，做為未來散熱設計的基礎，是一值得深入研究的方向。

1.2 文獻回顧

在微流道內核沸騰的研究中，有一部分在探討氣泡與工作流體間介面之熱量及質量傳遞現象。本節將回顧有關核沸騰時氣泡受熱變化及單一純物質工作流體、二元混合系統之液氣介面熱、流場型態的文獻。

1.2.1 氣泡受熱的變化情形

1998 年，Dhir [4] 將工作流體發生池沸騰時，均質成核 (homogeneous nucleation) 或異質成核 (heterogeneous nucleation) 後產生的氣泡運動 (bubble dynamics) 分為三個階段：(1) 氣泡成長 (bubble growth) 主要是液氣介面因受熱蒸發造成氣泡膨脹之現象，但截至當時，仍無法確立蒸發現象是否由靠近加熱面處之薄液層 (microlayer) 主導。(2) 氣泡脫離 (bubble departure) 則是在驗證實驗及數值模擬的結果後，發現氣泡的平衡可以簡化成附著力 (adhesion force) 及介面張力 (interfacial tension) 所主導。(3) 氣泡產生頻率 (bubble release frequency) 是由氣泡成長時間 (growth time) 及等待氣泡脫離後下一顆成核氣泡出現所需要的時間 (waiting time) 所決定。

1961 年，Moore 與 Mesler [5] 將微型的熱電偶 (thermocouple) 嵌入加熱面以量測純水在通以定熱通量 42.6 W cm^{-2} 及 63.7 W cm^{-2} 核沸騰時，加熱面表面溫度的變化。實驗結果顯示在此兩種加熱條件下，表面溫度都會出現非週期性的快速溫度降，即約在 2 ms 內溫度下降約 11°C 到 17°C ，而隨後在約 5 ms 內回到原先的溫度，其中又以高熱通量的加熱條件下出現頻率較高。因此，Moore 與 Mesler [5] 認為氣泡

與加熱面間的薄液層蒸發主導了氣泡成長及熱量傳遞，即薄液層的蒸發現象迅速帶走了加熱表面的熱量，造成十分劇烈的溫度降；其中由實驗結果也可發現，溫度快速下降時所帶走之熱通量約為加熱面所提供之熱通量的 5 倍，而後因持續的熱通量補充，加熱表面溫度回升。

2004 年，Stephan 與 Kern [6] 建構了理論模型以分析丙烷與正丁烷混合系統在核沸騰時的熱量及質量傳遞現象。此模型為一在加熱面上的球型對稱小氣泡，而依氣泡的曲率不同而可將氣泡與加熱面之間的區域分為吸附力較大的吸附薄膜層 (absorbed liquid film)、曲率變化最大的薄液層，以及外圍大量的工作流體區 (macro region)。模型模擬結果發現，丙烷與正丁烷的二元混合系統在定熱通量條件下加熱時，薄液層的質量分率變化最大、熱通量亦最大。由於薄液層較快的蒸發速率，因此在氣泡成長、薄液層減少的情況下，外圍的工作流體向薄液層流入補充而增強了對流效應，在吸附薄膜層的部分則因附著壓而降低了揮發性。而為了找出主導外圍工作流體熱傳現象的變因，Stephan 與 Kern [6] 分別利用模型模擬了一般混合、不考慮薄液層影響、限定氣泡成核址 (nucleation site)、及限定氣泡脫離尺寸等四種情況，結果顯示氣泡的脫離尺寸對於外圍流體的熱傳係數影響最為深遠。

1.2.2 Marangoni 對流的影響

工作流體受到加熱影響產生溫度梯度，因而造成工作流體表面張力的不平衡而發生牽引流動的現象，稱之為 thermal induced Marangoni effect。而在二元混合系統中，兩種不同物質混合，受到加熱後沸點較低的物質會先發生氣化，產生濃度梯度，造成工作流體表面張力不平衡，稱之為 concentration induced Marangoni effect。

1966 年，McGrew 等 [7] 將氣泡置於加熱與冷卻平板間，並分別選用四種單一

純物質工作流體：正丁基醇 (n-butyl alcohol)、甲醇 (methanol)、四氯化碳 (carbon tetrachloride) 及純水，實驗發現無論在 $50^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 或 $20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 溫度降的溫度梯度條件下，液氣介面附近的流場皆會因表面張力的差異而出現擾動。為了避免影響流場的觀察，McGrew 等 [7] 控制工作流體的過熱溫度在初始核沸騰的階段，結果顯示流場因受到表面張力的牽引，氣泡外圍會產生渦流 (vortex)，若流場內有兩顆氣泡，則會因此外圍流動而靠近、結合。除了空氣氣泡外，核沸騰時的成核氣泡亦會出現相同的流場型態。McGrew 等 [7] 認為氣泡的快速成長及伴隨的脫離加熱面是造成高熱傳率的主因，而溫度梯度造成的 Marangoni flow 則增強了流場內熱混合，進而提高熱傳效率。

1996 年，McGillis 與 Carey [8] 製作了高度為 7.1 cm、內徑為 2.5 cm 的池沸騰環境，下方通以固定 200 W cm^{-2} 的熱通量加熱寬度為 1.27 cm 的矩形區域，其溫度的實驗不確定性為 0.1°C 。McGillis 與 Carey [8] 選擇了甲醇、異丙醇 (2-propanol)、及乙二醇 (ethylene glycol) 水溶液作為本實驗的工作流體，量測此三種工作流體在不同的莫耳分率下的最大熱通量 CHF (critical heat flux)，並將實驗結果與兩條預測關係式做比較，此兩條關係式的差異僅在於是否考慮 Marangoni effect。結果顯示考慮了 Marangoni effect 的關係式所預測的 CHF 與實驗結果較為吻合，尤其在莫耳分率較低的實驗條件下，甲醇與異丙醇水溶液 CHF 會較純水時高，而隨著莫耳分率上升，CHF 逐漸下降，此與考慮 Marangoni effect 的關係式趨勢預測相同，而乙二醇水溶液 CHF 變化情形雖恰與前兩者相反，但此關係式仍可成功預測。因此，McGillis 與 Carey [8] 認為考慮了表面張力梯度之模型的成功預測顯示 Marangoni effect 為主要造成 CHF 變化的原因。

1998 年，Ahmed 與 Carey [9] 利用異丙醇與水的二元混合系統分析在不同重力

情況下核沸騰時，Marangoni effect 對流場的影響。Ahmed 與 Carey [9] 建構寬度為 7.62 cm 的矩形實驗區，並以放入電熱棒的銅塊作為加熱裝置，再將熱電偶經過冷點補償 (cold-junction compensation) 後記錄溫度以計算熱通量並利用最小平方法 (least-squares method) 擬合得到加熱面溫度，最後將實驗設備置於垂直飛行的飛機上以在高重力 (約 2 倍重力) 及低重力 (約 0.01 倍重力) 環境下進行實驗。在一般重力情況下，將純水與莫耳分率為 0.015 的異丙醇水溶液之實驗結果相比，發現二元混合系統所量得之 CHF 約為純水的三倍，可見 concentration induced Marangoni effect 對 CHF 有很大的影響。莫耳分率在 0.02 以下的異丙醇水溶液表面張力梯度變化最為劇烈，而低重力實驗結果也顯示莫耳分率為 0.015 時所量得之 CHF 較莫耳分率為 0.025 時高，意即表面張力梯度越大，CHF 越大，這也表示在低重力時，Marangoni effect 主導 CHF 的變化，而也因表面張力將工作流體拉向加熱面與成核氣泡之間，延遲了乾涸 (dryout) 的發生。

1.2.3 流場限制 (confinement) 對核沸騰之影響

1992 年，Lee 等 [10] 建造了一不鏽鋼容器以進行水之核沸騰實驗，容器內部使用條狀不鏽鋼 (ANSI 304) 通電作為加熱裝置，並控制內部一不鏽鋼圓柱與條狀不鏽鋼之間距 (gap) 以改變實驗限制條件，容器其中一面為玻璃以進行觀測。實驗結果顯示，當熱通量較低時，水在限制空間內核沸騰時之熱傳係數較一般池沸騰時高，與先前之研究結果相同；而在水中加入 10 ppm 至 50 ppm 的表面活性劑 (surfactant) 對熱傳係數無明顯的影響。Lee 等 [10] 認為在受限氣泡與加熱表面間有一薄層 (microlayer)，其將薄層分為三部分：乾燥區 (dry region)、蒸發區 (interline evaporating region) 及流體區 (bulk layer region)，並由實驗結果推論可能因蒸發區大

量帶走熱量及流體區的補充造成空間受限之核沸騰有較高之熱傳係數，此流場機制也防止薄層發生乾涸的現象。

1.2.4 紋影技術之應用

紋影技術為科學及工程學科之基礎工具，2001年，Settles [11] 整理了紋影技術之發展並簡要介紹其原理及特性，在流體力學方面，紋影技術起先應用於可壓縮流 (compressible flow)，利用流場密度差異所造成之折射率不同，進行可視化。2011年，Hsiao and Sun [12] 利用微觀紋影技術 (micro-schlieren technique) 量化微流道內之濃度梯度。Hsiao and Sun [12] 利用聚二甲基矽氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 製作 T 型微流道 (T-microchannel)，兩側分別通入純水及重量百分率濃度為 $w = 10\%$ 之酒精水溶液，以得到實驗之濃度梯度場結果，並利用模擬軟體 CFD-ACE+ 建立理論之結果。比較模擬與實驗之結果，可以發現濃度梯度之偵測極限 (sensitivity limit) 為 $2 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ ，由於濃度梯度與灰階值比在可偵測到濃度梯度時呈線性關係，Hsiao and Sun [12] 依此關係並利用最小平方法建立了乙醇/水混合溶液濃度梯度與灰階值比關係式。

1.3 研究目的

本研究之目的主要在於利用微觀紋影技術來觀測微矩形流道內，二元混合系統在控制熱通量的加熱條件下，沸騰氣泡介面旁的 Marangoni 對流現象，並探討其熱傳特徵。紋影技術係指將光線通過局部折射率不同之流場，光線通過流場後會產生偏折，而閃過位於焦點處之刀緣 (knife-edge) 或被其阻擋，所造成的影像上有黑色或白色之條紋，進而可視化肉眼無法觀察到的流場特徵之技術。二元混合流體依其

表面張力與溫度之關係可分為正混合 (positive mixture) 系統與負混合 (negative mixture) 系統，受熱後會出現不同對流型態與熱傳特性。本實驗中使用異丙醇/水 (2-propanol/water) 及仲丁醇/水 (2-butanol/water) 的正混合系統和正丁醇/水 (1-butanol/water)、乙二醇/水 (ethylene glycol/water)、乙酸/水 (acetic acid/water) 及丁酸/水 (butyric acid/water) 的負混合系統；其中有共沸點 (azeotropic point) 的混合溶液為異丙醇/水、仲丁醇/水、正丁醇/水及丁酸/水之混合系統，沒有共沸點的混合溶液為乙二醇/水及乙酸/水之混合系統，搭配微觀紋影系統來觀測其變化，加熱條件約為 1 W cm^{-2} 至 4 W cm^{-2} ，過熱溫度約為 0°C 至 90°C ；微矩形流道係使用材質為熱玻璃 (borosilicate glass) 之方型毛細管，內徑有 $200 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$ 及 $900 \mu\text{m}$ 三種，管壁厚度分別為 $100 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 及 $180 \mu\text{m}$ ，長度皆為 $1000 \mu\text{m}$ 。

第二章 實驗量測與不確定性分析

2.1 實驗設備

本研究所使用的實驗設備主要可分為工作流體的加熱裝置、影像觀測和記錄系統及資料擷取系統三部份，如圖 2.1 所示。供給工作流體至微流道元件中，以控制電源供應器功率的方式來進行加熱，透過資料擷取系統記錄量測的溫度與熱通量的變化，再搭配高速攝影機擷取微流道內沸騰的現象。

本研究係以六種二元混合系統做為工作流體，在微小矩形流道中進行等熱通量加熱的沸騰實驗，其中各工作流體分別使用二至七種不同莫耳分率的混合溶液，以產生不同溶液性質，其性質如附錄 A.19 至 A.24 所示。

2.1.1 微流道元件

考慮到透光性及避免影響紋影觀察的結果，本實驗在耐熱玻璃 (borosilicate glass) 製成的方型毛細管 (square capillary tube, WaleApparatus, vitrotubes) 內進行沸騰實驗。其中選用了 200 μm 、500 μm 及 900 μm 三種內徑，管壁厚度分別為 100 μm 、100 μm 及 180 μm ，長度皆為 1000 μm 。

2.1.2 微觀紋影系統

微觀紋影系統包含紋影顯微鏡 (DM IL LED, Leica Microsystems)、功率 5 瓦的可調式 LED (light-emitting diode) 光源、放大倍率為 10 倍 (Leica, N PLAN, NA 值為 0.25) 之物鏡 (objective lens) 及刀緣 (knife-edge)，並外接高速攝影機 (high speed

camera, IDT, NX7-S1) 觀察與記錄流道內的沸騰現象，同時利用高速攝影機控制軟體 (Motion Studio, IDT) 拍攝實驗影像，其解析度為 1920×1080 pixels，擷取速率為 2000 fps (frame per second)。

LED 光源發出之光線經過聚光器 (condenser) 之一次聚焦後進入欲觀察流場，由於流場內部溫度及濃度不均，造成折射率的差異，因此光線會產生偏折，偏折光線隨後進入物鏡，產生二次聚焦。在二次聚焦後之焦點處放置 50% 遮光率 (cutoff) 之刀緣阻擋部分偏折光線，以產生具有黑白條紋之紋影影像，並在焦點後放置高速攝影機以記錄沸騰時之流場影像。

由實驗架構圖可知，重力方向、加熱方向及方型毛細管放置方向三者互相垂直，而刀緣進級方向與加熱方向相同。由於若接近加熱面之局部流體折射率較大，因此沿著加熱方向前進，局部流體之折射率會越來越小，意即折射率在 Y 方向之梯度為正向梯度。由 Snell's law 可知，光在通過不同介質時，會偏向折射率較大之介質，而本實驗之光線在通過流場後，又經由物鏡的二次聚焦而使得本來偏向正 Y 方向之偏折光線轉向至負 Y 方向，進而閃過位於焦點處之刀緣，使得實驗擷取之影像若有觀測到紋影，則會出現白色之條紋。

流體之折射率會因溫度及濃度的不同而改變，而本實驗之流場係因溫度之差異而造成局部濃度的不同，因此所觀察到之紋影條紋會同時反應出溫度及濃度之差異所造成之折射率梯度。為了比較溫度變化及濃度變化所造成之折射率梯度差異，分別計算出在固定溫度下之折射率梯度及在固定濃度下之折射率梯度，其中固定溫度下之折射率梯度係指固定工作流體實驗濃度之沸點溫度，計算出在此溫度下時所對應之液態莫耳分率及氣態莫耳分率的折射率，將兩者折射率差值與莫耳分率差值相除即可得該實驗濃度下因濃度變化而造成之折射率梯度；而固定濃度下之折射率梯

度係指固定工作流體之實驗濃度，計算出在此濃度下時所對應之沸點溫度及露點溫度的折射率，將兩者折射率差值與溫度差值相除即可得該實驗濃度下因溫度變化而造成之折射率梯度，計算之結果如表 2.1 所示。由於各實驗條件之濃度變化所造成之折射率梯度皆遠大於溫度變化所造成之折射率梯度，因此本研究之結果可視為僅因濃度梯度之差異而產生紋影條紋。

2.1.3 加熱裝置

將兩組電熱棒置入加熱塊中，以數字型直流電源供應器 (laboratory DC power supply, GW, GPC-3060D) 控制電壓，可提供控制熱通量的加熱條件。電熱棒內的材質為鎳鉻合金線纏繞的電纜蕊，纏繞圈數會影響電熱棒的內電阻進而影響其發熱量。電熱棒中的空隙並以氧化鎂粉填滿，以減低熱損。電熱棒最大的發熱功率為 250 W，最大承受電壓為 60 V，內電阻為 28.6 Ω 。

加熱塊的尺寸如圖 2.2 所示，材質為不鏽鋼 (ANSI 304)，其熱傳導係數為 14.9 $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，電熱棒的置入孔直徑為 10 mm、深度為 30 mm。在加熱塊的側面加工四個直徑為 1 mm、深度為 5 mm 的孔，用來嵌入熱電偶以量測加熱塊的溫度，如圖 2.3 所示。熱電偶的溫度擷取是以每秒 1000 筆的取樣速率，經資料擷取卡接收傳送至電腦端，經過濾波與平滑處理後，將 1000 組數值作平均，可以得到加熱塊上四個溫度點每秒的讀值。實驗中加熱塊面上的溫度與熱通量的計算是經由最小平方方法的曲線擬合後，得到直線關係式 $T = T_s + (q''/k) \cdot E_i$ ，其中 T_s 及 q'' 可由式 (2.1) 及 (2.2) 計算得之。

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i^2 \sum_{i=1}^4 T_i - \sum_{i=1}^4 E_i \sum_{i=1}^4 E_i T_i}{4 \sum_{i=1}^4 E_i^2 - \left(\sum_{i=1}^4 E_i \right)^2} \quad (2.1)$$

$$q'' = \frac{4 \sum_{i=1}^4 E_i T_i - \sum_{i=1}^4 E_i \sum_{i=1}^4 T_i}{4 \sum_{i=1}^4 E_i^2 - \left(\sum_{i=1}^4 E_i \right)^2} \cdot k \quad (2.2)$$

其中 T_s 為加熱塊上表面的溫度， q'' 為加熱塊上的熱通量，計算的熱電偶總數量為 4， E_i 為加熱塊上表面到熱電偶的距離， T_i 為熱電偶溫度， k 為加熱塊的熱傳導係數。

實驗過程中的加熱都是藉由接觸來傳導熱，如電熱棒與加熱塊、加熱塊與微流道還有熱電偶與加熱塊上的量測孔之間。為了降低接觸時的熱阻，在上述的接觸面上均勻塗佈導熱膏 (thermal grease, Prolimatech, PK-3)，其熱傳導係數為 $11.2 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

2.1.4 資料擷取系統

在實驗過程中，量測沸騰現象時的溫度變化，藉由資料擷取卡記錄量測數值，以進行實驗數據的研究分析。實驗中以熱電偶 (thermocouple) 來進行量測，熱電偶是以兩種不同特性的金屬導線，在量測端點焊而成。當量測端與冷端有溫度差時，即產生微小的電壓差，稱為 Seebeck effect。利用溫度校正曲線將量測到的電壓反推，即可得到量測端的溫度。實驗中的溫度範圍高達 150°C ，所以在這裡選用 T-type 的熱電偶，適用的溫度範圍在 -270°C 至 400°C 。

在實驗數據的擷取方面使用資料擷取卡 (data acquisition board, National Instruments, PCI NI-6221) 來記錄，以連接盒 (National Instruments, SCB-68) 連接熱電偶的電壓訊號。連接盒內有溫度感應元件，可對熱電偶冷端接點作溫度補償，以降低量測溫度的不確定性。配合 LabVIEW 8.0 (National Instrument) 以程式對溫度及熱通量等數據做即時監控與紀錄。

2.1.5 工作流體

本實驗使用的流體有：純水（注射用蒸餾水，信東生技）、異丙醇（2-propanol, TEDIA, 純度 99.95%）、仲丁醇（2-butanol, nacalai tesque, 純度 99%）、正丁醇（1-butanol, Fisher scientific, 純度 99.9%）、乙二醇（ethylene glycol, Fisher scientific, 純度 99.95%）、乙酸（acetic acid, nacalai tesque, 純度 99%）及丁酸（butyric acid, nacalai tesque, 純度 99%）。以二元混合的方式，混合不同莫耳分率的工作流體，其中異丙醇/水之混合系統實驗濃度有：莫耳分率為 $x=0$ （純水）、 $x=0.015$ 、 $x=0.07$ 、 $x=0.6$ 、 $x=0.69$ 、 $x=0.85$ 及 $x=1$ （異丙醇）；仲丁醇/水之混合系統實驗濃度有：莫耳分率為 $x=0.015$ 、 $x=0.3$ 及 $x=0.5$ ；正丁醇/水之混合系統實驗濃度有：莫耳分率為 $x=0.2$ 、 $x=0.3$ 及 $x=0.9$ ；乙二醇/水之混合系統實驗濃度有：莫耳分率為 $x=0.03$ 及 $x=0.9$ ；乙酸/水之混合系統實驗濃度有：莫耳分率為 $x=0.015$ 及 $x=0.75$ ；丁酸/水之混合系統實驗濃度有：莫耳分率為 $x=0.015$ 、 $x=0.15$ 、 $x=0.65$ 及 $x=0.75$ 。

2.2 實驗量測

在實驗開始前須先去除工作流體中的雜質。將工作流體混合均勻後，以容許顆粒大小 $0.22\ \mu\text{m}$ 的濾嘴（syringe filters, ChromTech, SNY 2225）過濾以去除雜質，過濾後以保鮮膜密封防止污染。準備完成後的實驗步驟如下所述：

1. 將矩型毛細管裝置在觀測平台上並調整至水平，再將放置好熱電偶的加熱塊與其接觸。其中熱電偶與加熱塊之間塗上導熱膏並確保接觸良好。檢查熱電偶的訊號線至連接盒是否接觸良好。
2. 將工作流體輸入矩型毛細管中，利用影像觀測系統確定流道之位置，並將畫面調整至適當大小以利後續觀察與記錄。

3. 以電源供應器供給固定功率至加熱塊來對矩型毛細管加熱。首先加熱至過冷溫度約 20°C 左右，之後固定每 30 分鐘調整電功率，以期達到穩定加熱的需求。
4. 利用 LabVIEW 程式監控熱電偶所量測到的溫度，並記錄不同時間點的變化。以紋影顯微鏡搭配高速攝影機，來記錄微流道內的沸騰現象，對照溫度、熱通量等物理量變化來作分析研究。

2.3 不確定性分析

實驗過程中有許多可能影響結果的誤差，需藉由不確定性分析來估算實驗量測值的誤差，用以證明實驗結果的可信度。實驗的誤差主要可分為系統誤差 (systematic uncertainty) 與隨機誤差 (random uncertainty) 兩種，系統誤差是指因實驗儀器本身精密度影響所造成的誤差，而隨機誤差是指因實驗取樣次數影響的誤差，可由式 (2.3) 所示。

$$U_z = \sqrt{U_{z,\text{sys}}^2 + U_{z,\text{rand}}^2} \quad (2.3)$$

其中 U_z 為量測誤差， $U_{z,\text{sys}}$ 為系統誤差， $U_{z,\text{rand}}$ 為隨機誤差。

若實驗結果 Z 受到 k 個獨立變數的影響，即 $Z = f(z_1, z_2, \dots, z_k)$ ，因為誤差傳遞 (error propagation) 的關係，所得到的相對誤差如式 (2.4) 所示。

$$\frac{U_z}{Z} = \left[\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial Z / \partial z_i}{\partial z_i / z_i} \cdot \frac{U_{z_i}}{z_i} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial Z}{\partial z_i} \frac{U_{z_i}}{Z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

其中 U_z/Z 為 Z 之相對誤差， U_z 為 Z 之不確定性， U_{z_i} 為各獨立量測變數的不確定性。

2.3.1 表面溫度

加熱塊上表面溫度的不確定性主要包含溫度量測的誤差及加熱塊的加工定位誤差，其中量測的誤差可由式 (2.5) 得。

$$U_{T_s,sys} = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(T_i - T_s - \frac{q''}{k} E_i \right) \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

其值為 1.21°C。加工定位誤差 $U_{E,sys}$ 則是量測四個熱電偶嵌入孔的誤差取平均後之值，其不確定性為 0.12 mm。

表面溫度估算結果如圖 2.3 所示。圖中以空心點表示熱電偶與加熱塊平面的距離對應量測溫度及其不確定性，以實心點表示經由最小平方法曲線擬合後，所估算的加熱塊上表面溫度。由於需考慮加工定位誤差的傳遞，表面溫度的不確定性由式 (2.6) 得。

$$U_{T_s} = \sqrt{U_{T_s,sys}^2 + (B \cdot U_{E,sys})^2} \quad (2.6)$$

其中 U_{T_s} 為加熱塊上表面溫度不確定性估算，B 則為最小平方法曲線之斜率。計算可得表面溫度的不確定性為 1.21°C。

2.3.2 過熱溫度

式 (2.7) 為實驗量測溫度、工作流體飽和溫度與過熱溫度之關係式，結合式 (2.4) 可得過熱溫度的不確定性，如式 (2.8) 所示。

$$\Delta T_h = T_s - T_{sat} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{U_{\Delta T_h}}{\Delta T_h} &= \left[\left(\frac{\partial \Delta T_h / \Delta T_h}{\partial T_s / T_s} \cdot \frac{U_{T_s}}{T_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_h / \Delta T_h}{\partial T_{sat} / T_{sat}} \cdot \frac{U_{T_{sat}}}{T_{sat}} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(1 \cdot \frac{U_{T_s}}{\Delta T_h} \right)^2 + \left(-1 \cdot \frac{U_{T_{sat}}}{\Delta T_h} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

其中， $U_{T_{sat}}$ 為工作流體飽和溫度之不確定性，約為 ±1% 左右。 $U_{\Delta T_h}$ 為過熱溫度之不確定性，其相對誤差皆小於 ±4%。

2.3.3 熱通量

由式 (2.2) 可得加熱塊上表面熱通量，結合式 (2.4) 可得熱通量的不確定性，如式 (2.9) 所示。

$$U_{q''} = \left\{ \sum_{i=1}^4 \left[k \cdot \frac{4E_i - \sum_{k=1}^4 E_k}{4 \sum_{k=1}^4 E_k^2 - \left(\sum_{k=1}^4 E_k \right)^2} \right]^2 (U_{T, \text{sys}}^2 + U_{T, \text{rand}}^2) + \sum_{i=1}^4 \left[k \cdot \frac{\left(4T_i - \sum_{k=1}^4 T_k \right) \left[4 \sum_{k=1}^4 E_k^2 - \left(\sum_{k=1}^4 E_k \right)^2 \right] - \left(4 \sum_{k=1}^4 E_k T_k - \sum_{k=1}^4 E_k \sum_{k=1}^4 T_k \right) \left(8E_i - 2 \sum_{k=1}^4 E_k \right)}{\left[4 \sum_{k=1}^4 E_k^2 - \left(\sum_{k=1}^4 E_k \right)^2 \right]^2} \right]^2 U_{E, \text{sys}}^2 \right\}^{1/2} \quad (2.9)$$

其中 $U_{T, \text{rand}}$ 為熱電偶的取樣誤差，其值為每秒截取到的 1000 組溫度取平均後之標準差，約為 0.02°C 。實驗過程中熱通量的相對誤差皆小於 $\pm 8.7\%$ 。

2.3.4 熱傳係數

由式 (2.10) 可得加熱實驗時的熱傳係數，結合式 (2.4) 可得熱傳係數的不確定性，如式 (2.11) 所示。

$$h = \frac{q''}{\Delta T_h} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{U_h}{h} &= \left[\left(\frac{\partial h / h}{\partial q'' / q''} \cdot \frac{U_{q''}}{q''} \right)^2 + \left(\frac{\partial h / h}{\partial \Delta T_h / \Delta T_h} \cdot \frac{U_{\Delta T_h}}{\Delta T_h} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(1 \cdot \frac{U_{q''}}{q''} \right)^2 + \left(-1 \cdot \frac{U_{\Delta T_h}}{\Delta T_h} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

其中實驗過程中熱傳係數的相對誤差皆小於 $\pm 0.1\%$ 。

2.3.5 莫耳分率

本研究中莫耳分率 x 之定義是以有機溶液為計算基礎，當 $x=0$ ，代表純水，若是 $x=1$ ，代表有機溶液。有機溶液 i 在水中的莫耳分率計算如式 (2.12) 所示。

$$x = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}m_i}{M_{\text{H}_2\text{O}}m_i + M_i m_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2.12)$$

其中 x 為莫耳分率， M 代表該液體之分子量， m 代表該液體之質量。

莫耳分率相對誤差如式 (2.13) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{U_x}{x} &= \left[\left(\frac{\partial x}{\partial m_i} \frac{U_m}{x} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial m_{\text{H}_2\text{O}}} \frac{U_m}{x} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{M_i m_{\text{H}_2\text{O}} m_i}{M_{\text{H}_2\text{O}} m_i + M_i m_{\text{H}_2\text{O}}} U_m \right)^2 + \left(\frac{-M_i}{M_{\text{H}_2\text{O}} m_i + M_i m_{\text{H}_2\text{O}}} U_m \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

其中 U_m 為量測重量時之不確定性，由於秤重使用的微量天平 (Semi-Micro Balance, Mettler Toledo, MS205-DU) 精度為 0.2 mg，因此 U_m 為 ± 0.1 mg， U_x 為莫耳分率之不確定性。其誤差值約為 $\pm 0.00011\%$ 至 $\pm 0.00109\%$ 。

2.3.6 濃度梯度

由式 (2.14) 可得加熱實驗時的熱傳係數，其中 A_1 及 A_2 為常數，結合式 (2.4) 可得熱傳係數的不確定性，如式 (2.15) 所示。

$$\frac{\partial x}{\partial Y} = A_1 \frac{I}{I_0} + A_2 \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{U_{\partial x/\partial Y}}{\partial x/\partial Y} &= \left[\left(\frac{\partial(\partial x/\partial Y)/(\partial x/\partial Y)}{\partial I/I} \cdot \frac{U_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_0/I_0}{\partial(\partial x/\partial Y)/(\partial x/\partial Y)} \cdot \frac{U_{I_0}}{I_0} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(1 \cdot \frac{U_I}{I} \right)^2 + \left(-1 \cdot \frac{U_{I_0}}{I_0} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.15)$$

其中， U_l 為灰階值之不確定性， U_{l_0} 為參考灰階值之不確定性，實驗過程中濃度梯度的相對誤差皆小於 $\pm 5.1\%$ 。

2.3.7 無因次參數

1. Marangoni number

Marangoni number 之定義如式 (2.16) [13] 所示。

$$Ma = \frac{\Delta\sigma}{\rho_l U_l^2} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} \cdot Pr \quad (2.16)$$

工作流體在受到加熱時，混合系統內沸點較低的物質會先發生汽化，造成系統內的表面張力不平衡，產生表面張力梯度，導致在兩相流的液氣界面處發生牽引流動的現象，因此定義 Marangoni number 來說明此現象，如式 (2.16) 所示。其中 $\Delta\sigma$ 為工作流體在沸點溫度及露點溫度之表面張力差， Pr 為工作流體之 Prandtl number。

Marangoni number 之相對誤差式如式 (2.17) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{U_{Ma}}{Ma} &= \left[\left(\frac{\partial Ma / Ma}{\partial x / x} \cdot \frac{U_x}{x} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(1 \cdot \frac{U_x}{x} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

其中 U_{Ma} 為濃度 Marangoni number 之不確定性， U_x 為莫耳分率之不確定性。在本研究中，Marangoni number 之相對誤差小於 $\pm 0.073\%$ ，計算之結果如表 2.2 所示。

2. Weber number

Weber number 之定義如式 (2.18) 所示。

$$We = \frac{\rho_l Q^2}{D^3 \sigma} \quad (2.18)$$

根據慣性力與表面張力的比值可以定義出無因次參數 Weber number，如式 (2.18) 所示。其中 ρ 為工作流體的密度， Q 為體積流率， σ 為工作流體的表面張力， D 為方型毛細管的管徑。其相對誤差分析如式 (2.19) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{U_{We}}{We} &= \left[\left(\frac{\partial We / We}{\partial D / D} \cdot \frac{U_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\partial We / We}{\partial Q / Q} \cdot \frac{U_Q}{Q} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(-\frac{W + 2D}{WD + D^2} \cdot U_D \right)^2 + \left(2 \cdot \frac{U_Q}{Q} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

其中 U_D 為微流道深度的不確定性， U_Q 為體積流率的不確定性， U_{We} 為 Weber number 的不確定性，相對誤差約為 $\pm 15\%$ 。

3. Capillary number

Capillary number 之定義如式 (2.20) 所示。

$$Ca = \frac{\mu_1 Q}{D^2 \sigma} \quad (2.20)$$

根據工作流體的黏滯係數與其表面張力的比值可以定義出無因次參數 Capillary number，如式 (2.20) 所示。其中 μ_1 為工作流體的黏滯係數， Q 為體積流率， σ 為工作流體的表面張力， W 為微流道的寬度， D 為微流道的深度。其相對誤差分析如式 (2.21) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{U_{Ca}}{Ca} &= \left[\left(\frac{\partial Ca / Ca}{\partial D / D} \cdot \frac{U_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\partial Ca / Ca}{\partial Q / Q} \cdot \frac{U_Q}{Q} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(-\frac{U_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{U_Q}{Q} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

其中 U_D 為微流道深度的不確定性， U_Q 為體積流率的不確定性， U_{Ca} 為 Capillary number 的不確定性，相對誤差約為 $\pm 10\%$ 。



4. Jakob number

Jakob number 之定義如式 (2.22) 所示。

$$Ja = \frac{\rho_l c_p (T_s - T_{\text{sat}})}{\rho_v h_{\text{lv}}} \quad (2.22)$$

Jakob number 的定義為工作流體加熱的過熱溫度所需能量與加熱至完全汽化時的潛熱之比值，如式 (2.22) 所示。其中 ρ_l 為工作流體的液態密度， ρ_v 為工作流體的氣態密度， c_p 為工作流體之比熱， h_{lv} 為工作流體之潛熱， T_s 為加熱塊上表面的溫度，

T_{sat} 為工作流體的飽和溫度。其相對誤差分析如式 (2.23) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{U_{Ja}}{Ja} &= \left[\left(\frac{\partial Ja / Ja}{\partial T_s / T_s} \cdot \frac{U_{T_s}}{T_s} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left(\frac{U_{T_s}}{T_s - T_{\text{sat}}} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

其中 U_{T_s} 為加熱塊上表面溫度的不確定性， U_{Ja} 為 Jakob number 的不確定性，最大誤差約為 $\pm 4\%$ 。

第三章 實驗結果與討論

3.1 沸騰曲線

在加熱過程中，紀錄過熱溫度及熱通量的變化，可得到不同混合系統在不同莫耳分率時的沸騰曲線 (boiling curve)。本實驗選用六種不同二元混合流體，其中正混合系統有：異丙醇/水 (2-propanol/water) 及仲丁醇/水 (2-butanol/water) 兩種；負混合系統則有：正丁醇/水 (1-butanol/water)、乙二醇/水 (ethylene glycol/water)、乙酸/水 (acetic acid/water) 及丁酸/水 (butyric acid/water) 四種。本節將針對不同混合系統，探討其沸騰曲線在不同莫耳分率、管徑時的變化。

3.1.1 方型毛細管管徑對沸騰曲線之影響

在異丙醇/水的混合系統中，如圖 3.1 至圖 3.3 所示，毛細管管徑為 900 μm 時，其沸騰曲線較管徑為 200 μm 及 500 μm 時為平緩，尤其在過熱溫度低於 30°C 時，熱通量幾無變化，而在過熱溫度超過 30°C 後，熱通量開始有上升的趨勢；而毛細管管徑為 200 μm 及 500 μm 時，沸騰曲線趨勢皆為隨著過熱溫度上升，熱通量上升。管徑為 900 μm 時，熱通量亦較低，最大值約為 1.8 W cm^{-2} ，而管徑為 200 μm 及 500 μm 時，最大值約為 2 W cm^{-2} 。

在仲丁醇/水的混合系統中，如圖 3.4 所示，過熱溫度低於 20°C 時，其熱通量變化較小，尤其在管徑為 900 μm 時較為明顯，而在過熱溫度超過 30°C 後，三種管徑之沸騰曲線皆為直線上升。在熱通量的部分，管徑為 900 μm 時，最大值約為 2.5 W cm^{-2} ，而管徑為 200 μm 及 500 μm 時，熱通量最大值約為 3 W cm^{-2} 。

在正丁醇/水的混合系統中，僅有 200 μm 及 500 μm 之沸騰曲線可供比較。如圖 3.5 所示，兩者之趨勢相同，皆為隨著過熱溫度上升，熱通量上升。唯最大熱通量有些許差異，管徑為 200 μm 時，熱通量最大值約為 1.8 W cm^{-2} ，管徑為 500 μm 時，熱通量最大值約為 2 W cm^{-2} 。

在乙二醇/水的混合系統中，如圖 3.6 所示，隨著過熱溫度上升，相對應的熱通量亦隨之上升。最大熱通量的部分，管徑為 200 μm 及 500 μm 時，約為 5 W cm^{-2} ，管徑為 900 μm 時則較低，約為 4.5 W cm^{-2} 。

在乙酸/水的混合系統中，如圖 3.7 所示，沸騰曲線在過熱溫度 0°C 至 40°C 左右之範圍內，熱通量皆隨之上升，三種管徑之最大熱通量差距不大，200 μm 及 500 μm 時，約為 2.6 W cm^{-2} ，管徑為 900 μm 時，則略低為 2.5 W cm^{-2} 。

在丁酸/水的混合系統中，如圖 3.8 所示，與正丁醇/水、乙二醇/水及乙酸/水的混合系統相同，沸騰曲線皆為隨著過熱溫度上升，熱通量上升，而三種管徑之最大熱通量皆約為 4 W cm^{-2} 。

總結上述六種不同二元混合系統在不同管徑下之沸騰曲線，毛細管管徑為 900 μm 時，在相同過熱溫度下，其所能到達之熱通量較管徑為 200 μm 及 500 μm 時低，最大熱通量亦較低。而正混合系統之異丙醇/水及仲丁醇/水混合溶液，兩者之沸騰曲線在較低過熱溫度的情況下，熱通量無明顯上升之趨勢，尤其在毛細管管徑為 900 μm 時特別明顯。

3.1.2 莫耳分率對沸騰曲線之影響

在異丙醇/水的混合系統中，實驗之莫耳分率為 $x = 0$ (純水)、 $x = 0.015$ 、 $x = 0.07$ 、 $x = 0.6$ 、 $x = 0.69$ 、 $x = 0.85$ 及 $x = 1$ (異丙醇)。如圖 3.1 至圖 3.3 所示，當莫耳分率

為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.07$ 時，在相同過熱溫度下，所對應到的熱通量較純水及異丙醇為高，此現象在管徑越小、過熱溫度越高時，越為明顯；而管徑為 $900 \mu\text{m}$ 時，沸騰曲線與純水及純異丙醇差異不大。當莫耳分率為 $x = 0.6$ 、 $x = 0.69$ (共沸點) 及 $x = 0.85$ 時，在相同過熱溫度下，所對應到的熱通量與純水及純異丙醇相比，無顯著的差異，唯 $x = 0.69$ (共沸點) 時，在相同過熱溫度下，所對應到的熱通量與其他混合濃度相比為低，當管徑為 $200 \mu\text{m}$ 時，此現象更為明顯；而管徑為 $900 \mu\text{m}$ 時，沸騰曲線與純水及純異丙醇差異不大。

在仲丁醇/水的混合系統中，實驗之莫耳分率為 $x = 0.015$ 、 $x = 0.3$ 及 $x = 0.5$ 。如圖 3.4 所示，當管徑為 $200 \mu\text{m}$ 及 $500 \mu\text{m}$ 時，在相同過熱溫度下，莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，所對應到的熱通量較莫耳分率為 $x = 0.015$ 、 $x = 0.5$ 時大，尤其是莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，最大熱通量約 2.6 W cm^{-2} ，低於 $x = 0.3$ 之 3.1 W cm^{-2} 及 $x = 0.5$ 之 2.8 W cm^{-2} 。

在正丁醇/水的混合系統中，實驗之莫耳分率為 $x = 0.2$ 、 $x = 0.3$ 及 $x = 0.9$ 。如圖 3.5 所示，當管徑為 $200 \mu\text{m}$ 時，莫耳分率為 $x = 0.3$ 之條件下，過熱溫度高於 30°C 後，其熱通量會急遽上升，而當莫耳分率為 $x = 0.2$ 及 $x = 0.9$ 時，則無此現象；過熱溫度為 50°C 時， $x = 0.3$ 有最大熱通量，約為 1.8 W cm^{-2} 。當管徑為 $500 \mu\text{m}$ 時，莫耳分率為 $x = 0.3$ 之條件下，過熱溫度高於 30°C 後，依然有熱通量急遽上升之現象，唯過熱溫度為 50°C 時， $x = 0.9$ 有最大熱通量，約為 2 W cm^{-2} 。

在乙二醇/水的混合系統中，實驗之莫耳分率為 $x = 0.03$ 及 $x = 0.9$ 。如圖 3.6 所示，由沸騰曲線可發現當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，在相同過熱溫度下，所對應到之熱通量皆大於莫耳分率為 $x = 0.03$ 之實驗結果，特別是當管徑為 $900 \mu\text{m}$ 時，其熱通量差值約為 1.5 W cm^{-2} 。

在乙酸/水的混合系統中，實驗之莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.75$ 。如圖 3.7 所示，由沸騰曲線可發現當莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，在相同過熱溫度下，所對應到之熱通量皆大於莫耳分率為 $x = 0.015$ 之實驗結果，當過熱溫度大於 30°C 時，兩濃度流體所對應到之熱通量越為接近，特別是當管徑為 $900\ \mu\text{m}$ 時，其熱通量差值約為 $0.1\ \text{W cm}^{-2}$ 。

在丁酸/水的混合系統中，實驗之莫耳分率為 $x = 0.015$ 、 $x = 0.15$ 、 $x = 0.65$ 及 $x = 0.75$ 。如圖 3.8 及圖 3.9 所示，四種不同濃度之丁酸/水混合溶液之沸騰曲線，在管徑分別為 $200\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$ 及 $900\ \mu\text{m}$ 之條件下相比，皆無明顯差異。

總結上述六種不同二元混合系統在不同濃度下之沸騰曲線，在異丙醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.07$ 時，對應之熱通量較高，而在莫耳分率為 $x = 0.69$ 時，所對應之熱通量最低；在仲丁醇/水的混合系統中，則是莫耳分率最低之實驗條件有最低熱通量；在正丁醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，沸騰曲線有陡升之現象發生；在乙二醇/水及乙酸/水的混合系統中，則是較高的實驗莫耳分率有較高之熱通量；在丁酸/水的混合系統中，濃度的差異對於沸騰曲線則無明顯影響。

3.1.3 混合系統對沸騰曲線之影響

以異丙醇/水之正混合系統為例，當加入少許異丙醇至水中，如莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.07$ 時，由沸騰曲線可發現，在相同過熱溫度下，所對應到之熱通量較純水及異丙醇溶液為高，在管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 及 $500\ \mu\text{m}$ 時尤為明顯。意即正混合系統所產生之 Marangoni 效應有提升熱傳能力之效果。而在靠近共沸點之濃度時，即莫耳分率為 $x = 0.69$ 時，可發現熱通量較其他濃度為低，此現象亦在管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 及

500 μm 時特別明顯。

3.2 熱傳係數

在沸騰實驗過程中，量測並紀錄加熱塊內的熱電偶溫度，可計算得知方型毛細管壁面的溫度，及沸騰發生時的熱通量，並由式 (3.1) 計算其熱傳係數。

$$h = \frac{q''}{T_s - T_{bp}} \quad (3.1)$$

其中 h 為熱傳係數、 q'' 為熱通量、 T_s 為微流道加熱面上的溫度、 T_{bp} 為工作流體的沸點溫度。

本節將分別針對不同毛細管管徑、莫耳分率及混合系統討論其對熱傳係數之影響。

3.2.1 方型毛細管管徑對熱傳係數之影響

在異丙醇/水的混合系統中，如圖 3.10 至圖 3.12 所示，在所有實驗的混合濃度中，在相同過熱溫度下，其熱傳係數皆為管徑為 500 μm 時最高，管徑為 200 μm 時次之，管徑為 900 μm 時最低。除了莫耳分率為 $x = 0.6$ 外，當過熱溫度高於 40°C 後，管徑為 500 μm 及 200 μm 所求得之熱傳係數會逐漸接近 0.04 $\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$ ，而管徑為 900 μm 時之熱傳係數約為 0.02 $\text{W cm}^{-2} \text{°C}^{-1}$ ，唯莫耳分率為 $x = 0.015$ 、管徑為 500 μm 時，其熱傳係數約為 0.06 $\text{W cm}^{-2} \text{°C}^{-1}$ 。

在仲丁醇/水的混合系統中，如圖 3.13 所示，在三種不同混合情形下，其熱傳係數皆無太大差異。特別是當莫耳分率為 $x = 0.5$ 時，管徑為 200 μm 與 500 μm 之實驗結果幾乎相同，表示管徑的差異對於仲丁醇/水混合溶液之熱傳係數無顯著影響。

在正丁醇/水的混合系統中，僅有管徑為 200 μm 及 500 μm 之實驗結果可供比較。

如圖 3.14 所示，在過熱溫度低於 40°C 之情況下，莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 所求得之熱傳係數高於管徑為 $500\ \mu\text{m}$ 之結果；在過熱溫度超過約 40°C 後，則轉變成管徑為 $500\ \mu\text{m}$ 所求得之熱傳係數高於管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 之結果，但在莫耳分率為 $x = 0.2$ 時，熱傳係數曲線趨勢恰好相反。而在莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 及 $500\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數曲線差異不大，亦即管徑對於莫耳分率為 $x = 0.2$ 及 $x = 0.9$ 時影響較大。

在乙二醇/水的混合系統中，如圖 3.15 所示，當莫耳分率為 $x = 0.03$ 時，三種管徑之熱傳係數曲線差異不大，意即管徑的影響並不顯著。而當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，熱傳係數有較大區別，在過熱溫度低於 30°C 時，管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 及 $900\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數較高，但在過熱溫度超過 30°C 後，管徑為 $500\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數反而較管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 及 $900\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數高，表示當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，其熱傳係數會受到管徑之影響。

在乙酸/水的混合系統中，如圖 3.16 所示，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，三種管徑之熱傳係數曲線差異不大，意即管徑的影響並不顯著。而當莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，在過熱溫度低於 20°C 之實驗條件下，管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數曲線明顯高於管徑為 $500\ \mu\text{m}$ 及 $900\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數，而管徑為 $500\ \mu\text{m}$ 及 $900\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數曲線差異仍然很小；而當過熱溫度高於 20°C 後，三種管徑之熱傳係數曲線幾乎相同，表示管徑的差異僅在過熱溫度低於 20°C 時有所影響。

在丁酸/水的混合系統中，如圖 3.17 所示，在所有實驗的混合濃度中，在相同過熱溫度下，其熱傳係數皆為管徑為 $900\ \mu\text{m}$ 時最高，管徑為 $500\ \mu\text{m}$ 時次之，管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 時最低。唯當莫耳分率為 $x = 0.15$ 時，管徑為 $500\ \mu\text{m}$ 及 $200\ \mu\text{m}$ 之熱傳係數差異較小。

總結上述六種不同二元混合系統在不同管徑下之熱傳係數，異丙醇/水及丁酸/水的混合系統，所受到管徑的影響較為一致，異丙醇/水混合系統之熱傳係數為管徑為 500 μm 時最高，管徑為 200 μm 時次之，管徑為 900 μm 時最低；而丁酸/水混合系統之熱傳係數則是管徑為 900 μm 時最高，管徑為 500 μm 時次之，管徑為 200 μm 時最低。正丁醇/水、乙二醇/水及乙酸/水的混合系統則是在高濃度之實驗條件下，較易受到管徑的影響，分別是正丁醇莫耳分率為 $x = 0.9$ 、乙二醇莫耳分率為 $x = 0.9$ 及乙酸莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，熱傳係數曲線與低濃度時有所差別。而在仲丁醇/水的混合系統中，熱傳係數之趨勢則是較不受到管徑的差異所造成之影響。

3.2.2 莫耳分率對熱傳係數之影響

在異丙醇/水的混合系統中，如圖 3.18 所示，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，熱傳係數較其他濃度之混合溶液高，意即熱傳效果較佳。而當莫耳分率為 $x = 0.6$ 時，情況較為特殊，在管徑為 200 μm 之實驗條件下，其熱傳係數相較其他濃度為最差，但當管徑更改為 500 μm 時，其熱傳係數約與莫耳分率為 $x = 0.015$ 時相同，即有較佳之熱傳效果。接近共沸點之濃度，即當莫耳分率為 $x = 0.69$ 時，在三種管徑下之熱傳係數均較低。

在仲丁醇/水的混合系統中，如圖 3.19 所示，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，其熱傳係數較其他濃度之混合溶液為低，意即熱傳效果較差。而當莫耳分率為 $x = 0.3$ 及 $x = 0.5$ 時，兩者之熱傳係數差異不大。

在正丁醇/水的混合系統中，僅有管徑為 200 μm 及 500 μm 之實驗結果可供比較。如圖 3.20 所示，當莫耳分率為 $x = 0.2$ 及 $x = 0.3$ 時，其熱傳係數較莫耳分率為 $x = 0.9$ 之混合溶液為低，意即熱傳效果較差，係因正丁醇/水之混合系統共沸點約發生在莫

耳分率為 $x = 0.25$ 時，故接近此濃度之混合流體熱傳效果不佳。

在乙二醇/水的混合系統中，如圖 3.21 所示，在三種不同管徑之情況下，莫耳分率為 $x = 0.9$ 時之熱傳係數皆大於莫耳分率為 $x = 0.03$ 時之熱傳係數。在過熱溫度約為 20°C 時，兩濃度之熱傳係數差值約為 $0.1 \text{ W cm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，而當過熱溫度上升至約為 40°C 時，濃度之熱傳係數差值減少至約為 $0.05 \text{ W cm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

在乙酸/水的混合系統中，如圖 3.22 所示，在三種不同管徑之情況下，莫耳分率為 $x = 0.75$ 時之熱傳係數皆大於莫耳分率為 $x = 0.015$ 時之熱傳係數。當管徑為 $200 \mu\text{m}$ 時，在過熱溫度約為 10°C 時，兩濃度之熱傳係數差值約為 $0.05 \text{ W cm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，而當過熱溫度上升至約 20°C 時，濃度之熱傳係數差值減少至約為 $0.02 \text{ W cm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；而當管徑為 $500 \mu\text{m}$ 及 $900 \mu\text{m}$ 時，在不同過熱溫度，兩濃度之熱傳係數差值約維持在 $0.02 \text{ W cm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

在丁酸/水的混合系統中，如圖 3.23 所示，四種實驗濃度在不同管徑下之熱傳係數，皆為莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.15$ 時較低，而莫耳分率為 $x = 0.65$ 及 $x = 0.75$ 時較高，係因丁酸/水之混合系統共沸點約發生在莫耳分率為 $x = 0.04$ 時，故接近此濃度之混合流體熱傳效果不佳。

總結上述六種不同二元混合系統在不同濃度時之熱傳係數，在異丙醇/水的混合系統中，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，熱傳係數較高；在仲丁醇/水的混合系統中，當莫耳分率為 $x = 0.3$ 及 $x = 0.5$ 時，兩者之熱傳係數較高；在正丁醇/水的混合系統中，當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，熱傳係數較高；在乙二醇/水的混合系統中，當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，熱傳係數較高；在乙酸/水的混合系統中，當莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，熱傳係數較高；在丁酸/水的混合系統中，濃度的改變對於熱傳係數較無影響。

3.2.3 混合系統對熱傳係數之影響

在正混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.07$ 之異丙醇/水混合溶液有較高的熱傳係數，意即加入少許異丙醇至水中有助於提升熱傳效果；而仲丁醇/水之正混合系統中則沒有觀察到此現象，反倒是莫耳分率為 $x = 0.3$ 及 $x = 0.5$ 之仲丁醇/水混合溶液之熱傳係數較莫耳分率為 $x = 0.015$ 時高。在負混合系統中，正丁醇/水、乙二醇/水及乙酸/水之混合系統，皆為濃度越高之混合流體，熱傳係數越高，意即加入少許水至正丁醇、乙二醇及乙酸中有助於提升熱傳效果；而丁酸/水之負混合系統的熱傳係數則較不受到濃度改變之影響。

在具有共沸點之混合系統中，異丙醇/水及正丁醇/水的混合溶液在接近共沸點時，熱傳係數均較其他濃度為低，而仲丁醇/水及丁酸/水的混合溶液在接近共沸點時則無此現象；在無共沸點之混合系統中，乙二醇/水及乙酸/水的混合溶液皆為混合濃度越高時，有較高之熱傳係數。

3.2.4 Marangoni number 與熱傳係數之關係

Marangoni number 之定義如前所述，計算之結果如表 2.2 所示。在相同二元混合系統中，其值越大，表示該混合濃度之 Marangoni 效應越強。

在異丙醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，Marangoni number 為 5.08，莫耳分率為 $x = 0.07$ 時，Marangoni number 為 9.01，莫耳分率為 $x = 0.6$ 時，Marangoni number 為 0，莫耳分率為 $x = 0.69$ 時，Marangoni number 為 0.07，莫耳分率為 $x = 0.85$ 時，Marangoni number 為 0.13，由於異丙醇/水為正混合系統，因此 Marangoni 效應越強時，會有較佳的熱傳能力，而比較 Marangoni number 及相同管徑之熱傳係數曲線圖可發現，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.07$ 時，即在 Marangoni number 較大之

混合濃度下，確實有較佳之熱傳效果，而在莫耳分率為 $x = 0.6$ 及 $x = 0.69$ 時，即在 Marangoni number 較小之混合濃度下，熱傳效果較差，表示 Marangoni 效應在異丙醇/水的混合系統中有顯著的影響。

在乙酸/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，Marangoni number 為 0.11，莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，Marangoni number 為 0.06，由於乙酸/水為負混合系統，因此 Marangoni 效應越強時，會有較差的熱傳效果，而比較 Marangoni number 及相同管徑之熱傳係數曲線圖可發現，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，即在 Marangoni number 較大之混合濃度下，確實有較差之熱傳效果，而在莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，即在 Marangoni number 較小之混合濃度下，熱傳效果較佳，表示 Marangoni 效應在乙酸/水的混合系統中有顯著的影響。

在乙二醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.03$ 時，Marangoni number 為 9.08，莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，Marangoni number 為 3.72，由於乙二醇/水為負混合系統，因此 Marangoni 效應越強時，會有較差的熱傳效果，而比較 Marangoni number 及相同管徑之熱傳係數曲線圖可發現，當莫耳分率為 $x = 0.03$ 時，即在 Marangoni number 較大之混合濃度下，確實有較差之熱傳效果，而在莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，即在 Marangoni number 較小之混合濃度下，熱傳效果較佳，表示 Marangoni 效應在乙二醇/水的混合系統中有顯著的影響。

在仲丁醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，Marangoni number 為 6.4，莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，Marangoni number 為 0.44，莫耳分率為 $x = 0.5$ 時，Marangoni number 為 0.15，由於仲丁醇/水為正混合系統，因此 Marangoni 效應越強時，理應會有較佳的熱傳能力，而比較 Marangoni number 及相同管徑之熱傳係數曲線圖可發現，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，即在 Marangoni number 較大之混合濃度下，熱傳效果卻

無顯著提升，而在莫耳分率為 $x = 0.3$ 及 $x = 0.5$ 時，即在 Marangoni number 較小之混合濃度下，熱傳效果較佳，表示 Marangoni 效應在仲丁醇/水的混合系統中較無影響。

在正丁醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.2$ 時，Marangoni number 為 0.37，莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，Marangoni number 為 0.47，莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，Marangoni number 為 2.65，由於正丁醇/水為負混合系統，因此 Marangoni 效應越強時，理應會有較差的熱傳能力，而比較 Marangoni number 及相同管徑之熱傳係數曲線圖可發現，當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，即在 Marangoni number 較大之混合濃度下，熱傳效果卻無顯著降低，而在莫耳分率為 $x = 0.2$ 及 $x = 0.3$ 時，即在 Marangoni number 較小之混合濃度下，熱傳效果反而較佳，表示 Marangoni 效應在正丁醇/水的混合系統中較無影響。

在丁酸/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，Marangoni number 為 0.29，莫耳分率為 $x = 0.15$ 時，Marangoni number 為 9.75，莫耳分率為 $x = 0.65$ 時，Marangoni number 為 20.4，莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，Marangoni number 為 20.3，由於丁酸/水為負混合系統，因此 Marangoni 效應越強時，理應會有較差的熱傳能力，而比較 Marangoni number 及相同管徑之熱傳係數曲線圖可發現，當莫耳分率為 $x = 0.65$ 及 $x = 0.75$ 時，即在 Marangoni number 較大之混合濃度下，熱傳效果卻無顯著降低，而在莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.15$ 時，即在 Marangoni number 較小之混合濃度下，熱傳效果亦無顯著提升，表示 Marangoni 效應在丁酸/水的混合系統中較無影響。

3.3 紋影觀察之結果與討論

3.3.1 方型毛細管管徑對紋影觀察之影響

由圖 3.1 至圖 3.9 可發現，在有觀察到紋影現象之二元混合系統的實驗濃度，僅在管徑為 500 μm 或 900 μm 之實驗條件下出現。在異丙醇/水的混合系統中，如圖 3.24 至圖 3.27 所示，觀察到紋影之莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.07$ ，兩濃度之紋影現象皆在管徑為 500 μm 及 900 μm 時可觀察到，管徑為 200 μm 時則沒有出現紋影條紋；在仲丁醇/水的混合系統中，如圖 3.28 及圖 3.29 所示，當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，可觀察到紋影現象，其發生在管徑為 500 μm 及 900 μm 時，管徑為 200 μm 時則沒有出現紋影條紋；在正丁醇/水的混合系統中，僅有管徑為 200 μm 及 500 μm 之實驗結果可供比較，如圖 3.30 及圖 3.31 所示，而觀察到紋影之莫耳分率為 $x = 0.2$ 及 $x = 0.3$ ，兩濃度之紋影現象皆在管徑為 500 μm 時可觀察到，管徑為 200 μm 時則沒有出現紋影條紋；在乙二醇/水的混合系統中，如圖 3.32 所示，當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，可觀察到紋影現象，其發生在管徑為 500 μm 時，管徑為 200 μm 及 900 μm 時則沒有出現紋影條紋；在乙酸/水的混合系統中，實驗之莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.75$ ，兩濃度在三種管徑之實驗條件下，皆無觀察到紋影現象；在丁酸/水的混合系統中，如圖 3.33 至圖 3.35 所示，觀察到紋影之莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.15$ ，其中莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，僅在管徑為 900 μm 時可觀察到，而莫耳分率為 $x = 0.15$ 時，則在管徑為 500 μm 及 900 μm 時皆可觀察到紋影條紋，管徑為 200 μm 時則皆沒有出現紋影條紋。

Merzkirch [14] 提到，由於刀緣放置方向為 Y 方向，因此僅能偵測到折射率在 Y 方向之變化，而紋影影像之強度與 Y 方向之折射率梯度及 Z 方向之長度有關，因此 Y 方向之折射率梯度越大、 Z 方向之長度越長，所觀察到的紋影影像之強度越強。而相同濃度之二元混合流體在 Y 方向之折射率梯度相同，因此 Z 方向之長度決定了

是否能夠觀察到紋影影像，當管徑越大時，Z 方向之長度也隨之增加，因此較易觀察到紋影條紋。在異丙醇/水、仲丁醇/水及正丁醇/水的混合系統中，部分實驗濃度在管徑為 500 μm 時即可觀察到紋影條紋；而在丁酸/水的混合系統中，則是管徑為 900 μm 時才可觀察到；值得一提的是，在乙二醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，管徑為 500 μm 時，有觀察到紋影現象，但在管徑為 900 μm 時，卻反而觀察不到，這可能是實驗上的疏失所造成之結果。

在觀察紋影同時，實驗發現若工作流體具有共沸點時，則當選用之濃度接近共沸點，氣泡會有震盪 (oscillation) 的情形發生。在異丙醇/水的正混合系統中，如圖 3.36 至圖 3.39 所示，震盪的現象發生在莫耳分率為 $x = 0.69$ 及 $x = 0.85$ 時，此二濃度特徵為靠近共沸點且液態莫耳分率高於氣態莫耳分率，且僅發生在管徑為 200 μm 及 500 μm 時；在仲丁醇/水的正混合系統中，如圖 3.40 所示，震盪的現象發生在莫耳分率為 $x = 0.5$ 時，此濃度特徵為靠近共沸點且液態莫耳分率高於氣態莫耳分率，且僅發生在管徑為 500 μm 時；在正丁醇/水的負混合系統中，如圖 3.41 所示，震盪的現象發生在莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，此濃度特徵為靠近共沸點且液態莫耳分率高於氣態莫耳分率，且僅發生在管徑為 200 μm 時；因此可歸納出：若選用較小的管徑及接近共沸點之濃度，並且在液態莫耳分率高於氣態莫耳分率之濃度區域，即會有氣泡震盪之現象。而在丁酸/水的負混合系統中，由於共沸點為莫耳分率 $x = 0.04$ ，此濃度非常接近純丁酸，可能因此無震盪現象發生。

3.3.2 溫度及濃度造成之折射率變化與紋影觀察之關係

在異丙醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.19、溫度改變所造成之折射率變化為 $-1.8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.07$

時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.12、溫度改變所造成之折射率變化為 $-1.5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.6$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.04、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.6 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.69$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.03、溫度改變所造成之折射率變化為 $0 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.85$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.02、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。由於在異丙醇/水的混合系統中，各實驗濃度之濃度改變所造成之折射率變化皆遠大於溫度改變所造成之折射率變化，因此拍攝影像之紋影條紋可視為僅因濃度變化而觀察到之折射率梯度。當莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.07$ 時，可觀察到紋影條紋，表示在異丙醇/水的混合系統中，Marangoni number 大於 5.08 時，會產生 Marangoni 效應，且濃度改變所造成之折射率變化大於 0.12 時，可藉由紋影技術觀察得到。

在仲丁醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.27、溫度改變所造成之折射率變化為 $-1.8 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.11、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.5$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.07、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.6 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。由於在仲丁醇/水的混合系統中，各實驗濃度之濃度改變所造成之折射率變化皆遠大於溫度改變所造成之折射率變化，因此拍攝影像之紋影條紋可視為僅因濃度變化而觀察到之折射率梯度。當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，可觀察到紋影條紋，表示在仲丁醇/水的混合系統中，Marangoni number 大於 6.4 時，確定有 Marangoni 效應之影響，且濃度改變所造成之折射率變化大於 0.27 時，可藉由紋影技術觀察得到。

在正丁醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.2$ 時，濃度改變所造成之折射率

變化為 0.18、溫度改變所造成之折射率變化為 $-1.1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.3$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.14、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.9 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.05、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。由於在正丁醇/水的混合系統中，各實驗濃度之濃度改變所造成之折射率變化皆遠大於溫度改變所造成之折射率變化，因此拍攝影像之紋影條紋可視為僅因濃度變化而觀察到之折射率梯度。當莫耳分率為 $x = 0.2$ 及 $x = 0.3$ 時，可觀察到紋影條紋，表示在正丁醇/水的混合系統中，Marangoni number 大於 0.37 時，確定有 Marangoni 效應之影響，且濃度改變所造成之折射率變化大於 0.14 時，可藉由紋影技術觀察得到。

在乙二醇/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.03$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.5、溫度改變所造成之折射率變化為 $-2.1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.24、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。由於在乙二醇/水的混合系統中，各實驗濃度之濃度改變所造成之折射率變化皆遠大於溫度改變所造成之折射率變化，因此拍攝影像之紋影條紋可視為僅因濃度變化而觀察到之折射率梯度。當莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，可觀察到紋影條紋，表示在乙二醇/水的混合系統中，Marangoni number 大於 3.72 時，確定有 Marangoni 效應之影響，且濃度改變所造成之折射率變化大於 0.24 時，可藉由紋影技術觀察得到。值得一提的是，當莫耳分率為 $x = 0.03$ 時，理應也可由紋影技術觀察得到，可能是由於實驗上的疏失，造成此結果。

在乙酸/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.32、溫度改變所造成之折射率變化為 $-2 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.07、溫度改變所造成之折射率變化為 -0.6×10^{-3}

$^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。由於在乙酸/水的混合系統中，各實驗濃度之濃度改變所造成之折射率變化皆遠大於溫度改變所造成之折射率變化，因此拍攝影像若出現紋影條紋，即可視為僅因濃度變化而觀察到之折射率梯度。當莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.75$ 時，皆無法觀察到紋影條紋，可能原因為：在正丁醇/水的混合系統中，Marangoni number 低於 0.11 時，Marangoni 效應較不顯著；或者是濃度改變所造成之折射率變化低於 0.32 時，無法利用紋影技術觀察。

在丁酸/水的混合系統中，莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.56、溫度改變所造成之折射率變化為 $-1.9 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.15$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.34、溫度改變所造成之折射率變化為 $-1.3 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.65$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.15、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.6 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，濃度改變所造成之折射率變化為 0.13、溫度改變所造成之折射率變化為 $-0.6 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。由於在丁酸/水的混合系統中，各實驗濃度之濃度改變所造成之折射率變化皆遠大於溫度改變所造成之折射率變化，因此拍攝影像之紋影條紋可視為僅因濃度變化而觀察到之折射率梯度。當莫耳分率為 $x = 0.015$ 及 $x = 0.15$ 時，可觀察到紋影條紋，表示在正丁醇/水的混合系統中，Marangoni number 大於 0.29 時，確定有 Marangoni 效應之影響，且濃度改變所造成之折射率變化大於 0.34 時，可藉由紋影技術觀察得到。

3.3.3 濃度梯度之量化

由上述分析可知，本實驗所觀察到之紋影條紋皆因流場內濃度差異而產生，即不同亮度之紋影條紋代表局部流場不同的濃度梯度。為了量化流場內濃度梯度之差異，實驗進行時，需固定光圈的大小及光源的強度，以確保所有拍攝之影像在無濃

度梯度之情況下，灰階值相同。將有觀察到紋影條紋之影像用 Matlab 軟體分析，即可得各影像之灰階值，並利用折射率與濃度之關係式，找出在 Y 方向折射率變化與濃度變化之關係。由於刀緣進級方向與熱傳方向相同，因此白色條紋係因 Y 方向濃度梯度大於 0 時所產生，再利用 Hsiao and Sun [12] 發展出之濃度梯度與灰階值比之關係式，即可量化 Y 方向之濃度梯度。量化之結果如圖 3.42 至圖 3.46 所示。

第四章 結論與建議



4.1 結論

本研究主要可分為兩個部分，分別為二元混合系統沸騰熱傳特徵之探討及應用紋影技術進行 Marangoni 對流的可視化，並量化流場內部之濃度梯度。結論茲分述如下：

4.1.1 沸騰熱傳特徵

- 1) 由實驗結果發現，異丙醇/水及丁酸/水的混合系統會因管徑的不同而造成熱傳係數的差異；正丁醇/水、乙二醇/水及乙酸/水的混合系統之熱傳係數則是在高濃度之實驗條件下，較易受到管徑的影響；而在仲丁醇/水的混合系統中，熱傳係數之趨勢則是較不受到管徑的差異影響。
- 2) 在正混合系統中，即異丙醇/水及仲丁醇/水之混合溶液，當莫耳分率較低時，異丙醇/水的混合系統有較大之熱傳係數，如：當莫耳分率為 $x = 0.015$ 時，熱傳係數較其他實驗濃度為高。這是因為在低濃度時，異丙醇/水之混合系統受到 Marangoni 效應的影響較大，將遠離加熱面的冷流體拉引至靠近加熱面的區域，進而提升熱傳效果；而仲丁醇/水的混合系統中，則是當莫耳分率為 $x = 0.3$ 及 $x = 0.5$ 時，兩者之熱傳係數較莫耳分率為 $x = 0.015$ 時為高，但 Marangoni number 卻是莫耳分率為 $x = 0.015$ 時較高，表示仲丁醇/水之混合系統較不受到 Marangoni 效應的影響。
- 3) 在負混合系統中，即正丁醇/水、乙二醇/水、乙酸/水及丁酸/水之混合溶液，

當莫耳分率較高時，熱傳係數較大，如：正丁醇/水及乙二醇/水的混合系統皆為莫耳分率為 $x = 0.9$ 時，熱傳係數較高，其中正丁醇/水之混合溶液實驗濃度分別為莫耳分率 $x = 0.2$ 、 $x = 0.3$ 及 $x = 0.9$ ，而三者之 Marangoni number 差異不大，因此較不易發現 Marangoni 效應的影響；乙二醇/水之混合溶液也是相同的情形，由於實驗莫耳分率 $x = 0.03$ 及 $x = 0.9$ 所對應之 Marangoni number 在同一個冪次上，因此也不易發現 Marangoni 效應的影響；在乙酸/水的混合系統中，則是當莫耳分率為 $x = 0.75$ 時，熱傳係數較莫耳分率為 $x = 0.015$ 時高，這是因為在低濃度時，乙酸/水之混合系統受到 Marangoni 效應的影響較大，將靠近加熱面的流體牽引至遠離加熱面的區域，進而降低熱傳效果；唯丁酸/水的混合系統中，即使實驗莫耳分率 $x = 0.015$ 、 $x = 0.15$ 、 $x = 0.65$ 及 $x = 0.75$ 所對應之 Marangoni number 差異甚大，但濃度的改變對於熱傳係數無顯著影響，表示丁酸/水之混合系統較不受到 Marangoni 效應的影響。

4.1.2 紋影系統之最小可偵測濃度梯度及量化

- 1) 由於本實驗架構僅可偵測到折射率在 Y 方向的變化，因此紋影影像之強度僅與 Y 方向之折射率梯度及 Z 方向之流道深度有關。由實驗結果可發現，在相同實驗濃度下，當管徑為 $900\ \mu\text{m}$ 時，較易觀察到紋影條紋，而當管徑為 $200\ \mu\text{m}$ 時，本研究皆無觀察到紋影現象。
- 2) 由於折射率會受到溫度及濃度的影響，我們在分別計算各實驗條件下溫度變化所造成之折射率梯度及濃度變化所造成之折射率梯度後證實，本研究所觀察之折射率梯度主要係由濃度變化所造成，即可由微紋影進行 concentration induced Marangoni 對流的可視化。

- 3) 在異丙醇/水的混合系統中，濃度改變所造成之折射率變化大於 0.12 時，可觀察到紋影條紋；在仲丁醇/水的混合系統中，濃度改變所造成之折射率變化大於 0.27 時，可觀察到紋影條紋；在正丁醇/水的混合系統中，濃度改變所造成之折射率變化大於 0.14 時，可觀察到紋影條紋；在乙二醇/水的混合系統中，濃度改變所造成之折射率變化大於 0.24 時，可觀察到紋影條紋；然而，在乙酸/水的混合系統中，濃度改變所造成之折射率變化最大達到 0.32，皆未觀察到紋影條紋；在丁酸/水的混合系統中，濃度改變所造成之折射率變化大於 0.34 時，可觀察到紋影條紋。
- 4) 由 Sun and Hsiao [15] 可知，當管徑為 200 μm 時，本紋影系統可偵測之 Y 方向最小折射率梯度為 $6.3 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$ ；當管徑為 500 μm 時，本紋影系統可偵測之 Y 方向最小折射率梯度為 $2.5 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$ ；當管徑為 900 μm 時，本紋影系統可偵測之 Y 方向最小折射率梯度為 $1.4 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$ 。
- 5) 本實驗使用流體之折射率與濃度之關係為線性，因此可利用 Hsiao and Sun [12] 發展出之濃度梯度與灰階值比之關係式，進行濃度梯度之量化。

4.2 建議

- 1) 使用不同水力直徑之微流道。本研究僅使用管徑為 200 μm 、500 μm 及 900 μm 之方型毛細管，若能使用其他深度和水力直徑之微流道，對於紋影觀察之探討會更加深入。
- 2) 將加熱面設定為定溫邊界條件。本研究為定熱通量之沸騰實驗，若能固定加熱面之溫度，即可比較工作流體沸騰時，兩者之差異。
- 3) 氣泡震盪現象之探討。本研究實驗所發現之震盪現象，尚未找出合理之物理解

釋，僅歸納出發生震盪現象之實驗條件為：小管徑、接近共沸點及液態莫耳分率高於氣態莫耳分率之濃度會發生震盪現象。

- 4) 使用其他正混合系統。由於本研究在正混合系統僅選用異丙醇/水及仲丁醇/水之混合溶液，若能增加其他正混合系統作為工作流體，對於不同混合系統對熱傳係數的影響能進行更廣泛的探討。
- 5) 利用數值模擬進行驗證。本實驗所使用之流體所呈現出的流場型態不盡相同，若能使用數值方法模擬流場沸騰時的情況，即可與實驗結果相互對照，以釐清並研究沸騰發生的不同對流現象。
- 6) 利用背景導向紋影 (background oriented schlieren) 技術量化濃度梯度。本研究所使用之紋影技術僅限於觀察一維之濃度梯度，無法全域性地探討整個流場之濃度梯度變化，因此建議後續研究者可利用背景導向紋影技術進行二維之量化分析。

參考文獻

- [1] R. Schaller, "Moore's law : past, present, and future," *IEEE Spectrum*, vol. 34, pp. 52-59, 1997.
- [2] W. Qu and I. Mudawar, "Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sinks," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 2045-2059, 2004.
- [3] Y. Madhour, J. Olivier, E. Costa-Party, S. Paredes, B. Michel, and J. R. Thome, "Flow boiling of R134a in a multi-microchannel heat sink with hotspot heaters for energy-efficient microelectronic CPU cooling applications," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 1, pp. 873-883, 2011.
- [4] V. K. Dhir, "Boiling heat transfer," *Annual Review Fluid Mechanics*, vol. 30, pp. 365-401, 1998.
- [5] F. D. Moore and R. B. Mesler, "The measurement of rapid surface temperature fluctuations during nucleate boiling of water," *AIChEJ*, vol. 7, pp. 620-624, 1961.
- [6] P. Stephan and J. Kern, "Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 25, pp. 140-148, 2004.
- [7] J. L. McGrew, F. L. Bamford, and T. R. Rehm, "Marangoni flow : an additional mechanism in boiling heat transfer," *Science*, vol. 153, pp. 1106-1107, 1966.
- [8] W. R. McGillis and V. P. Carey, "On the role of Marangoni effects on the critical heat flux for pool boiling of binary mixtures," *Journal of Heat Transfer*, vol. 118, pp. 103-109, 1996.
- [9] S. Ahmed and V. P. Carey, "Effects of gravity on the boiling of binary fluid mixtures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 41, pp. 2469-2483, 1998.
- [10] M. T. Lee, Y. M. Yang, and J. R. Maa, "Nucleate pool boiling in a confined space," *Chemical Engineering Communications*, vol. 117, pp. 205-217, 1992.
- [11] G. S. Settles, *Schlierne and Shadowgraph Techniques : Visualizing Phenomena in Transparent Media*. New York: Springer, 2001.
- [12] T.-h. Hsiao and C.-l. Sun, "Application of micro-schlieren technique to quantitative analysis of mass transport in a micromixer," presented at the Proceeding of ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, Hamamatsu, Shizuoka, Japan, 2011.
- [13] Y. Fujita and Q. Bai, "Critical heat flux of binary mixtures in pool boiling and its

- correlation in terms of Marangoni number," *International Journal of Refrigeration*, vol. 20, pp. 616-622, 1997.
- [14] W. Merzkirch, *Flow Visualization*. New York: Academic Press, 1974.
- [15] C.-l. Sun and T.-h. Hsiao, "Quantitative analysis of microfluidic mixing using microscale schlieren technique," *Microfluidics and Nanofluidics*, in press.
- [16] W. R. McGillis, "Boiling from localized heat sources in pure and binary fluid system," Ph.D., University of California, Berkeley, U.S.A., 1993.
- [17] C. L. Yaws, *Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [18] G. Thomson, "The Antoine equation for vapor-pressure data," *Chemical Reviews*, vol. 38, pp. 1-39, 1946.
- [19] S. Ohe, *Vapor-Liquid Equilibrium Data*. Tokyo, Japan: Kodansha, 1989.
- [20] B. E. Poling, J. M. Prausnitz, and J. P. O'connell, *The Properties of Gases and Liquids*. New York: McGraw-Hill, 2001.

附錄 A



A.1 純物質的物理性質

液體莫耳分率

$$x = \frac{m_1/M_1}{m_1/M_1 + m_2/M_2} \quad (\text{A.1})$$

其中， x 為液體莫耳分率， m_1 、 m_2 為純物質的質量， M_1 、 M_2 為純物質的分子量。

氣體莫耳分率

將氣體視為理想氣體，且將液體視為非理想液體時，氣體莫耳分率可由 McGillis [16] 所提到的計算方式，如式 (A.2) 所示。

$$y = \frac{x\gamma_1 P_{1,\text{sat}}}{P} \quad (\text{A.2})$$

其中， y 為氣體莫耳分率， γ_1 為活性係數 (activity coefficient)， P 為系統的壓力， $P_{1,\text{sat}}$ 為純物質的飽和蒸汽壓。

氣體密度

氣體密度可由狀態方程式 (equation of state) 得到，如式 (A.3) 所示。

$$\rho_v = \frac{P}{R(T_b + 273.15)} \quad (\text{A.3})$$

其中， ρ_v 為氣體密度 (kg m^{-3})， P 為絕對壓力 (kPa)， T_b 為系統溫度 ($^{\circ}\text{C}$)， R 為不同物質之氣體常數 ($\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

液體密度

液體密度可由 Yaws [17] 所提到的計算方式，如式 (A.4) 所示。

$$\rho_l = 1000 \times AB \left(1 - \frac{T_b + 273.15}{T_c + 273.15} \right)^C \quad (\text{A.4})$$

其中， ρ_l 為液體密度 (kg m^{-3})， T_c 為純物質之臨界溫度 ($^{\circ}\text{C}$)，A、B、C 均為常數，如表 A.25 所示。

表面張力

表面張力可由 Yaws [17] 所提到的計算方式，如式 (A.5) 所示。

$$\sigma = A \left(1 - \frac{T_b + 273.15}{T_c + 273.15} \right)^B \times 10^{-3} \quad (\text{A.5})$$

其中， σ 為表面張力 (N m^{-1})，A、B 均為常數，如表 A.26 所示。

液體比熱

純物質液體比熱可由 Yaws [17] 所提到的計算方式，如式 (A.6) 所示。

$$c_p = \frac{1000}{M} (A + BT_b + CT_b^2 + DT_b^3) \quad (\text{A.6})$$

其中， c_p 為液體比熱 ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)，A、B、C、D 均為常數，如表 A.27 所示。

飽和蒸汽壓

純物質飽和蒸汽壓可由 Antoine equation [18] 求得，如式 (A.7) 所示。

$$P_{\text{sat}} = \frac{1.013 \times 10^5}{760} 10^{A - B/(T_b + C)} \quad (\text{A.7})$$

其中， P_{sat} 為飽和蒸汽壓 (Pa)，A、B、C 均為常數，如表 A.28 所示。

A.2 混合系統的物理性質

相圖的計算

- 1) 給定系統壓力 P 與液體莫耳分率 x 的條件下，猜測沸點溫度 T_{bp} 。
- 2) 利用 Ohe [19] 中的計算方式可得飽和蒸氣壓 P_{sat} 及活性係數 γ ，如式 (A.7) 至式 (A.9) 所示。
- 3) 將計算所得之飽和蒸氣壓及活性係數導入 $P_m = x\gamma_1 P_{1,sat} + (1-x)\gamma_2 P_{2,sat}$ ，可得混合後的壓力 P_m 。
- 4) 檢查混合壓力 P_m 與系統壓力 P 是否相等。
- 5) 若 P_m 與 P 不相等，則修正猜測的沸點溫度值，重複步驟 2 至 4 直到疊代出正確值。
- 6) 利用式 (A.2) 計算氣體莫耳分率 y 。
- 7) 由液體莫耳分率 x 所對應之沸點溫度與氣體莫耳分率 y 所對應之露點溫度即可繪出相圖，如圖 A.1 至圖 A.3 所示。

活性係數

$$\ln \gamma_1 = -\ln[x + A_{12}(1-x)] + (1-x) \left[\frac{A_{12}}{x + A_{12}(1-x)} - \frac{A_{21}}{A_{21}x + (1-x)} \right] \quad (\text{A.8})$$

$$\ln \gamma_2 = -\ln[(1-x) + A_{21}x] - x \left[\frac{A_{12}}{x + A_{12}(1-x)} - \frac{A_{21}}{A_{21}x + (1-x)} \right] \quad (\text{A.9})$$

其中， γ_1 、 γ_2 為活性係數， A_{12} 、 A_{21} 均為常數。

混合氣體密度

混合系統的氣體密度可由氣體莫耳分率加權之純物質氣體密度的總和，如式 (A.10) 所示。

$$\rho_{v,m} = y\rho_{v,1} + (1-y)\rho_{v,2} \quad (\text{A.10})$$

其中， $\rho_{v,m}$ 為混合系統的氣體密度 (kg m^{-3})， $\rho_{v,1}$ 、 $\rho_{v,2}$ 為純物質的氣體密度 (kg m^{-3})，可由式 (A.3) 計算得之，計算後結果如表 A.13 至表 A.18 所示。

混合液體密度

假設混合系統符合理想氣體，混合前後體積不變，混合系統的液體密度可由式 (A.11) 求得。

$$\rho_{l,m} = \frac{\rho_1\rho_2[xM_1 + (1-x)M_2]}{xM_1\rho_2 + (1-x)M_2\rho_1} \quad (\text{A.11})$$

其中， $\rho_{l,m}$ 為混合系統的液體密度 (kg m^{-3})， M_1 、 M_2 為分子量， ρ_1 、 ρ_2 為純物質密度 (kg m^{-3})，可由式 (A.4) 計算得之，計算後結果如表 A.13 至表 A.18 所示。

混合表面張力

混合系統的表面張力是利用 Poling 等 [20] 的方法來計算，流程如下所示。

- 1) 給定莫耳分率 x 與系統溫度 T_b ，計算純物質表面張力 σ_1 與 σ_2 ，以及活性係數 γ_1 與 γ_2 。
- 2) 猜測 $x_{\sigma,1}$ 值，且計算出對應之 $\gamma_{\sigma,1}$ 及 $\gamma_{\sigma,2}$ 。
- 3) 由式 (A.12) (A.13) 計算可得混合表面張力 $\sigma_{1,m}$ 與 $\sigma_{2,m}$ 。
- 4) 檢驗 $\sigma_{1,m}$ 與 $\sigma_{2,m}$ 是否相等。
- 5) 若 $\sigma_{1,m}$ 與 $\sigma_{2,m}$ 不相等，則修正猜測的 $x_{\sigma,1}$ 值，且重複步驟 2 至 4 直到疊代出正確值。

$$\sigma_{1,m} = \sigma_1 + \frac{RT_b}{A_1} \ln \frac{x_{\sigma} \gamma_{\sigma,1}}{x \gamma_1} \quad (\text{A.12})$$

$$\sigma_{2,m} = \sigma_2 + \frac{RT_b}{A_2} \ln \frac{(1-x_\sigma)\gamma_{\sigma,2}}{(1-x)\gamma_2} \quad (\text{A.13})$$

其中， $\sigma_{1,m}$ 、 $\sigma_{2,m}$ 為利用不同純物質所計算的混合表面張力 (N m^{-1})，計算後結果如表 A.7 至表 A.9 所示。

混合液體黏滯係數

混合系統的液體黏滯係數可由純物質密度的比例加權之純物質液體黏滯係數的總和，如式 (A.14) 所示。

$$\mu_{l,m} = \frac{xM_1\rho_2}{xM_1\rho_2 + (1-x)M_2\rho_1} \mu_1 + \frac{(1-x)M_2\rho_1}{xM_1\rho_2 + (1-x)M_2\rho_1} \mu_2 \quad (\text{A.14})$$

其中， $\mu_{l,m}$ 為混合液體黏滯係數 (Pa s)，計算後結果如表 A.13 至表 A.18 所示。

混合液體比熱

混合系統的液體比熱可由液體莫耳分率加權之純物質液體比熱總和，如式 (A.15) 所示。

$$c_{p_{l,m}} = x c_{p_1} + (1-x) c_{p_2} \quad (\text{A.15})$$

其中， $c_{p_{l,m}}$ 為混合系統液體比熱 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)，計算後結果如表 A.13 至表 A.18 所示。

混合潛熱

混合系統潛熱可由 Clapeyron 關係式計算，如式 (A.16) 所示。

$$h_{lv,m} = T \left(\frac{\partial P_{\text{sat}}}{\partial T} \right)_m \left(\frac{1}{\rho_{v,m}} - \frac{1}{\rho_{l,m}} \right) \quad (\text{A.16})$$

其中， $h_{lv,m}$ 為混合系統的潛熱 (kJ kg^{-1})，計算後結果如表 A.13 至表 A.18 所示。

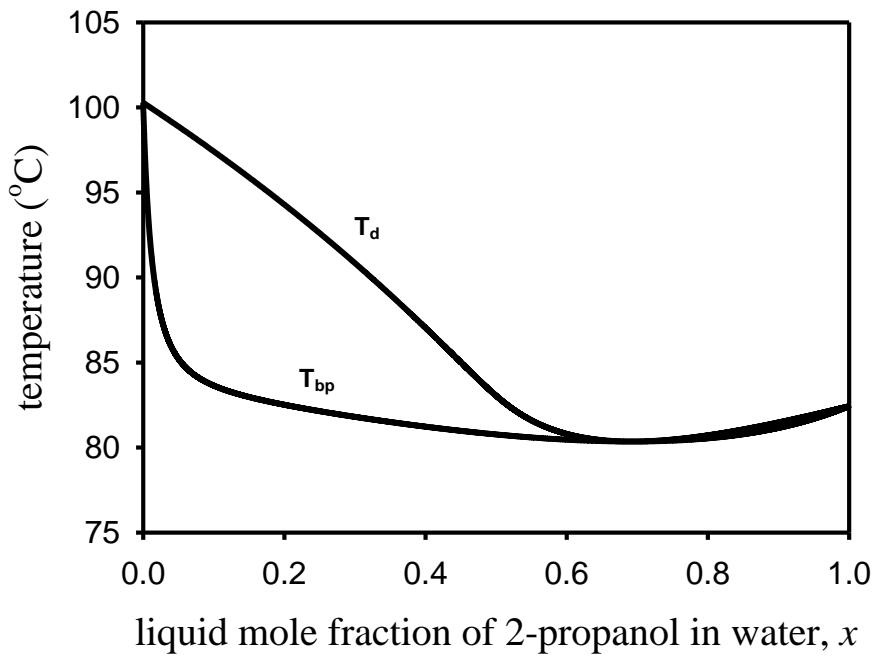


圖 A.1 異丙醇/水 (2-propanol/water) 混合系統相圖

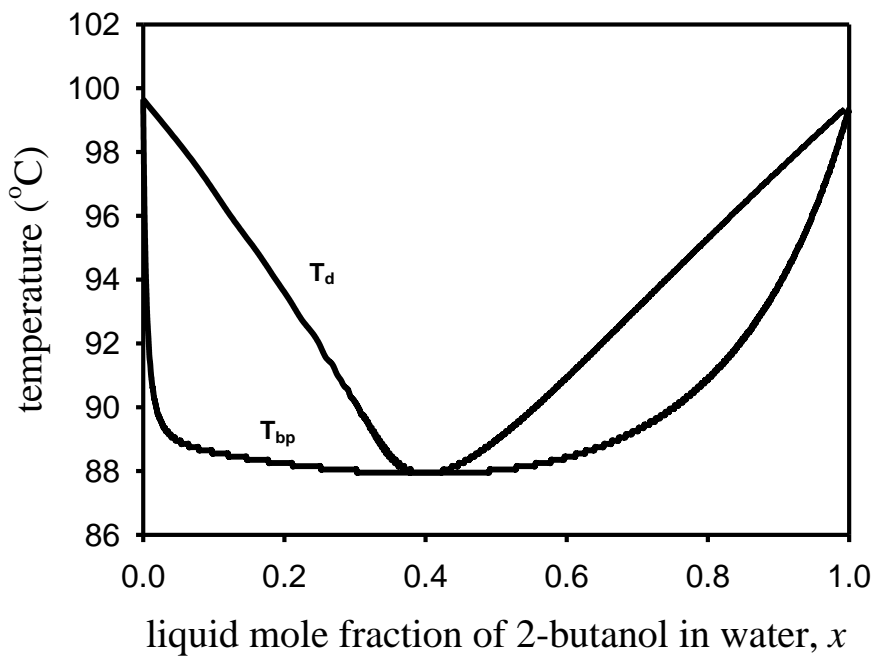


圖 A.2 仲丁醇/水 (2-butanol/water) 混合系統相圖

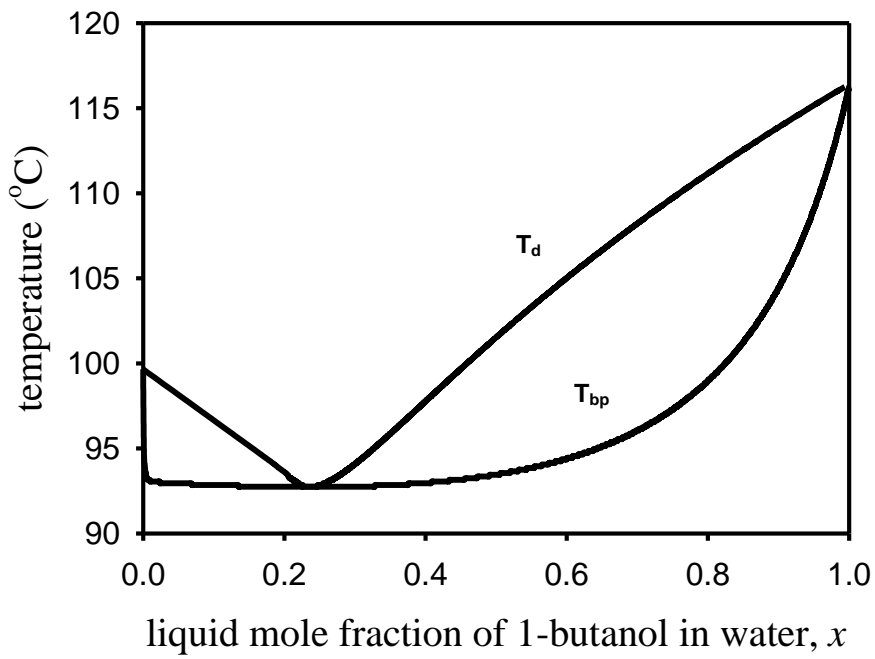


圖 A.3 正丁醇/水 (1-butanol/water) 混合系統相圖

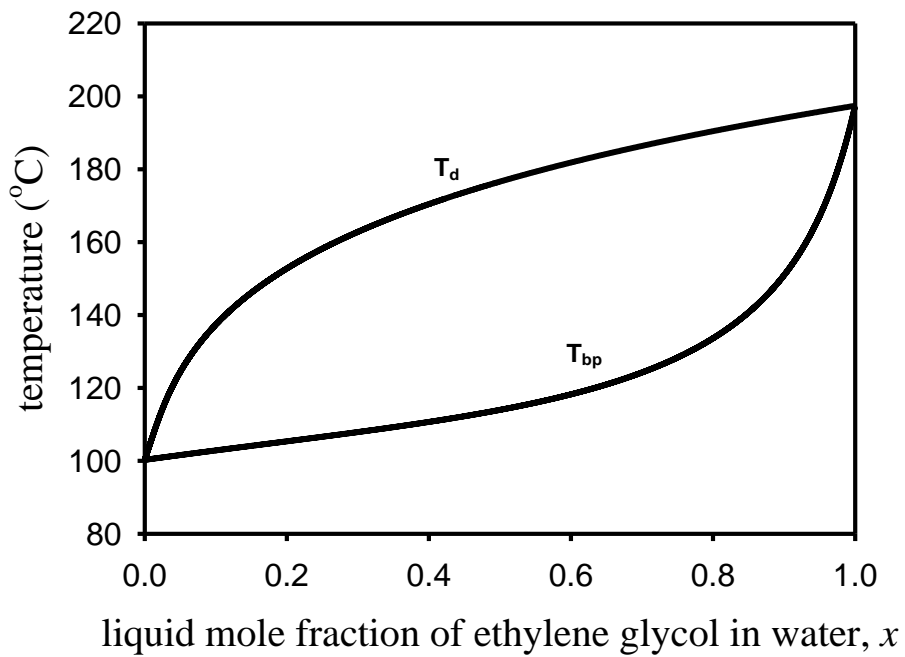


圖 A.4 乙二醇/水 (ethylene glycol/water) 混合系統相圖

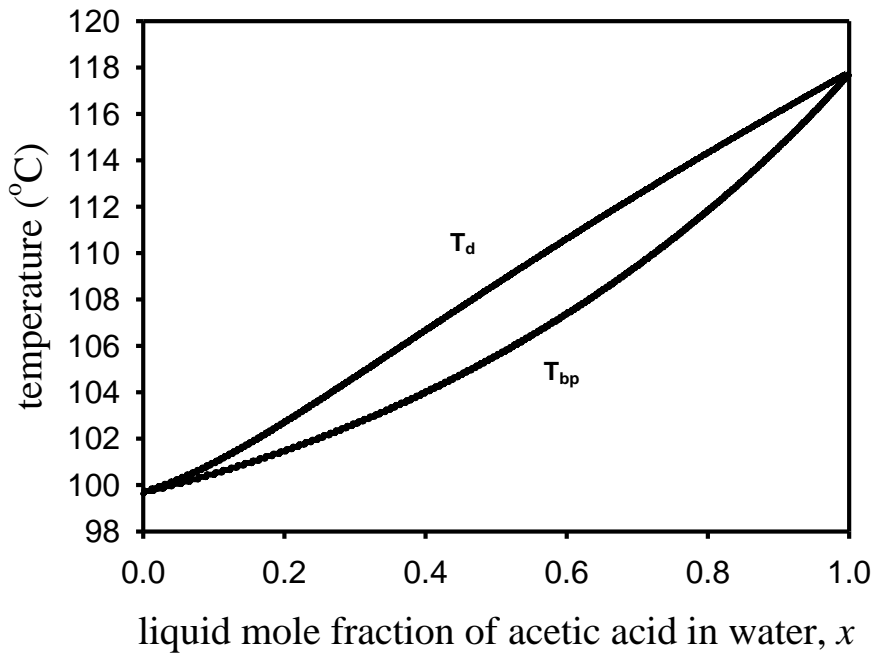


圖 A.5 乙酸/水 (acetic acid/water) 混合系統相圖

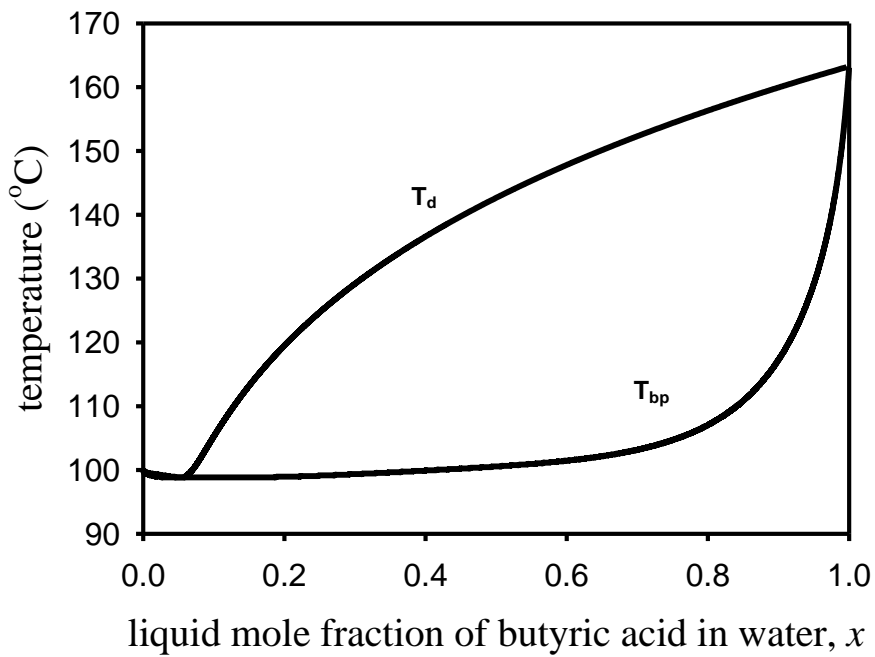


圖 A.6 丁酸/水 (butyric acid/water) 混合系統相圖

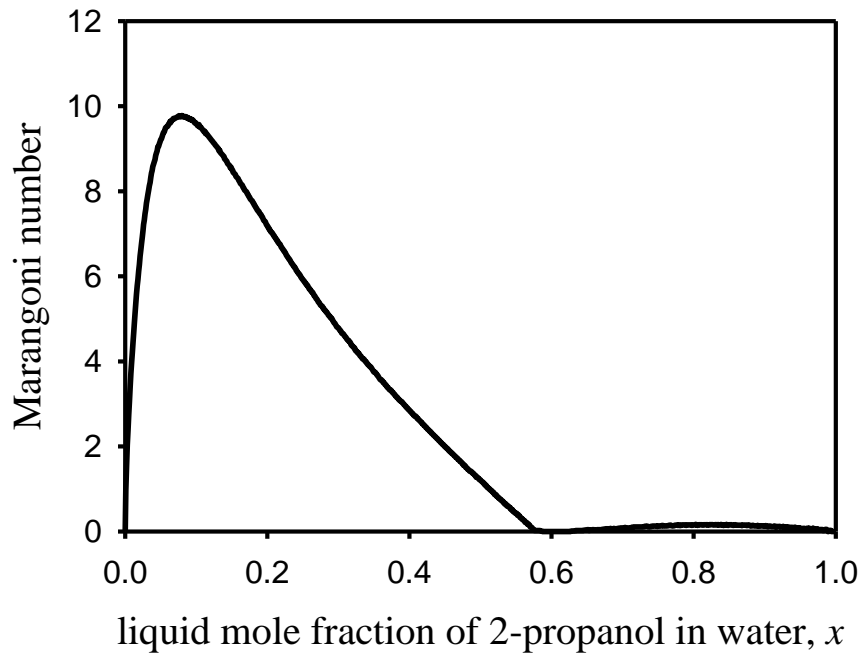


圖 A.7 2-propanol/water 莫耳分率對 Marangoni number 之關係圖

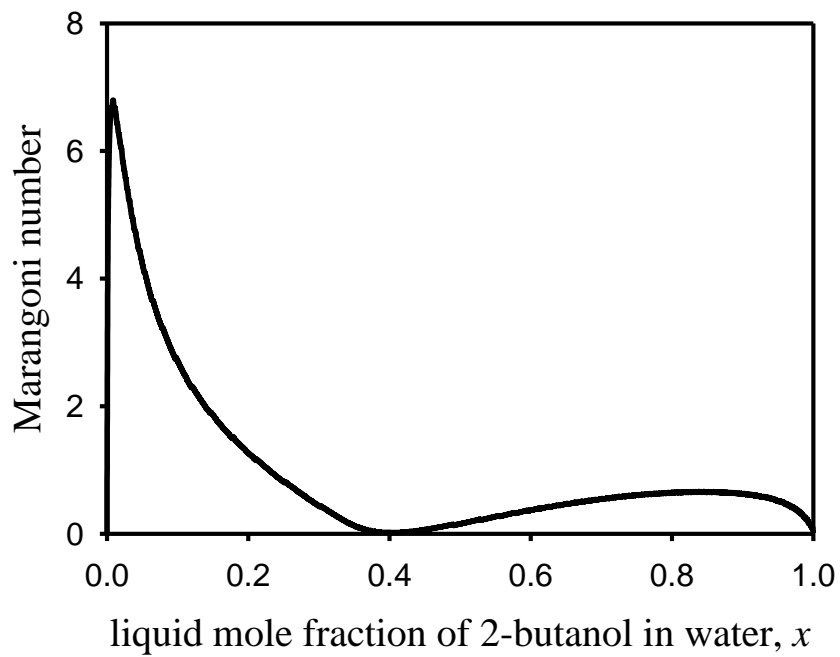


圖 A.8 2-butanol/water 莫耳分率對 Marangoni number 之關係圖

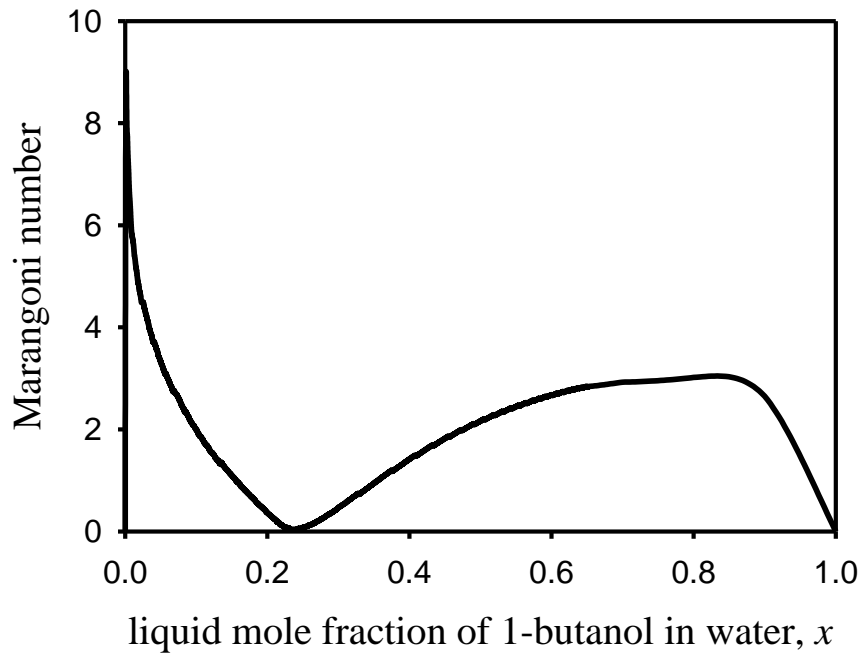


圖 A.9 1-butanol/water 莫耳分率對 Marangoni number 之關係圖

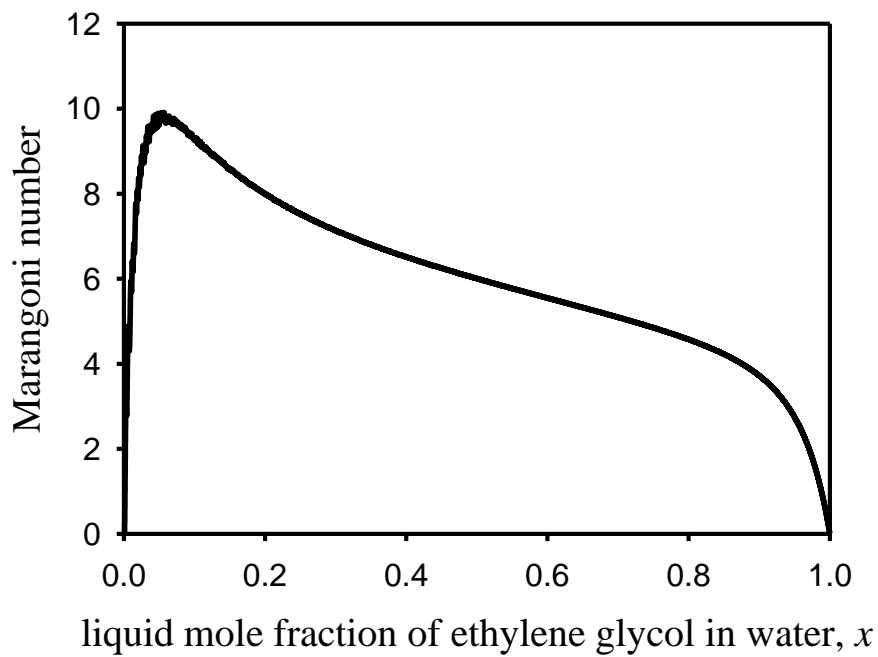


圖 A.10 ethylene glycol/water 莫耳分率對 Marangoni number 之關係圖

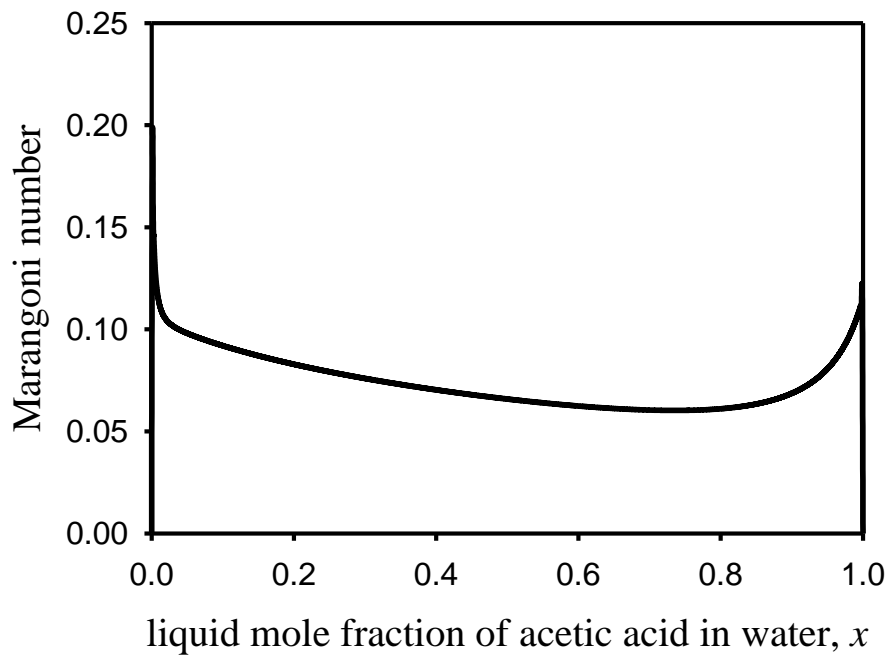


圖 A.11 acetic acid/water 莫耳分率對 Marangoni number 之關係圖

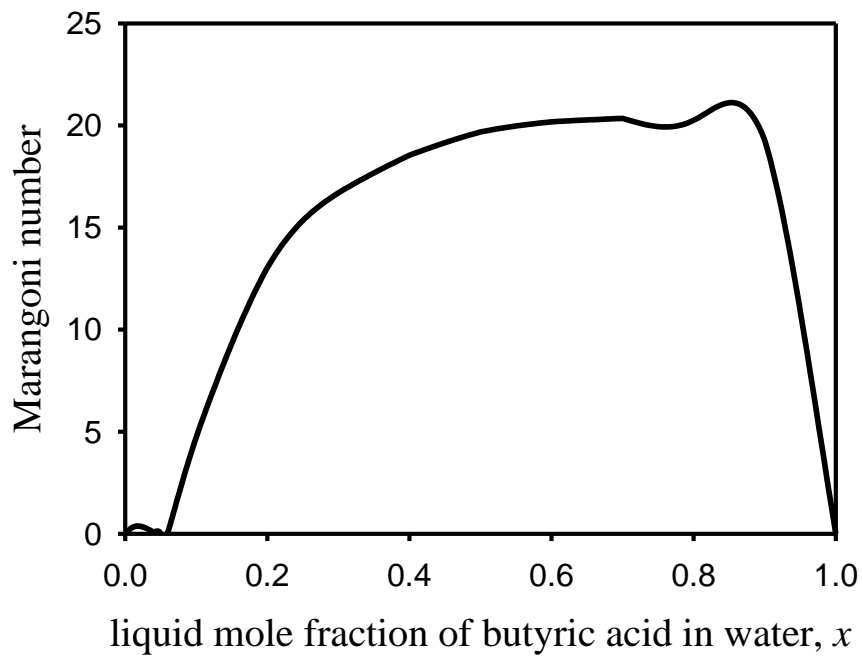


圖 A.12 butyric acid/water 莫耳分率對 Marangoni number 之關係圖

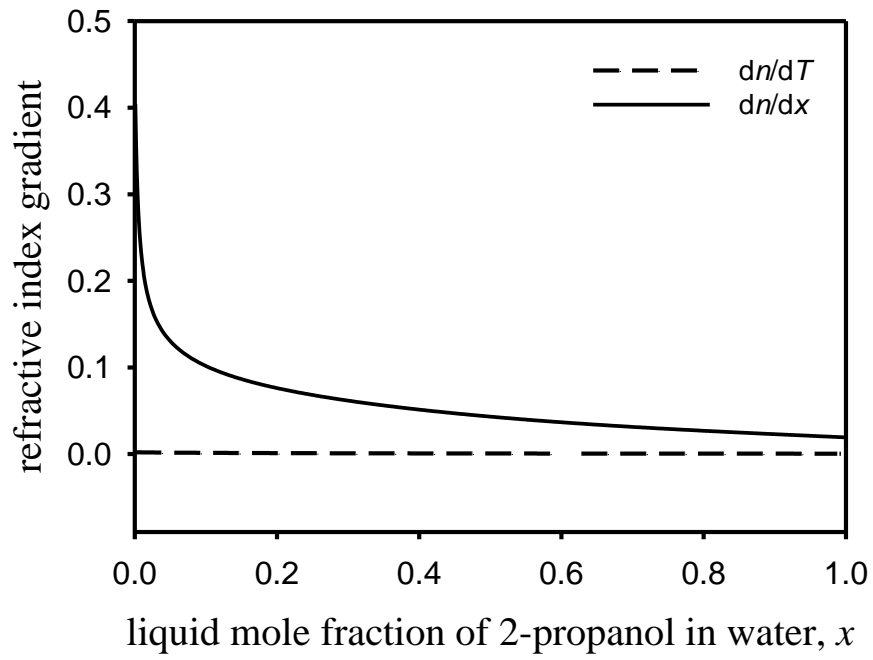


圖 A.13 2-propanol/water 莫耳分率對折射率梯度之關係圖

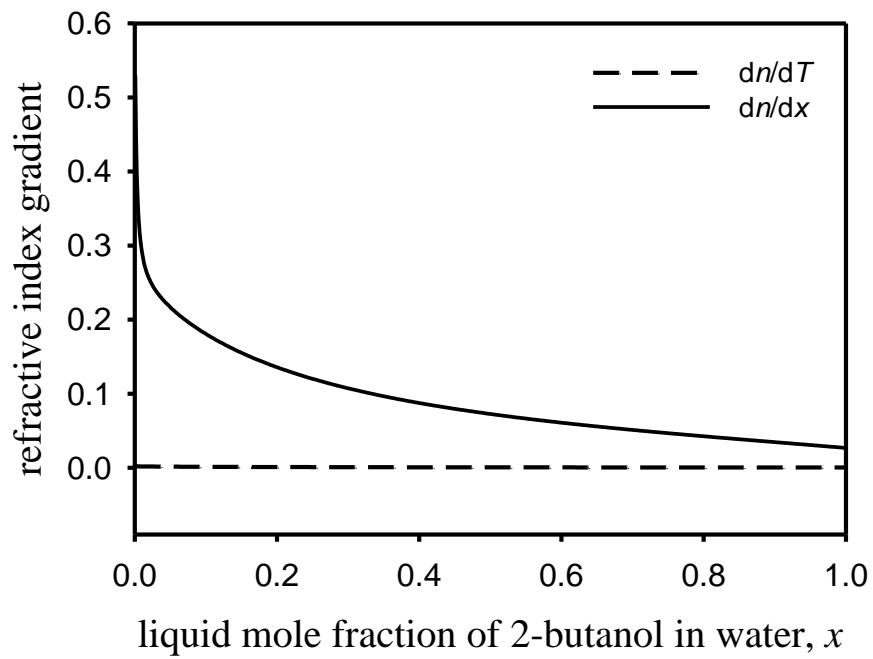


圖 A.14 2-butanol/water 莫耳分率對折射率梯度之關係圖

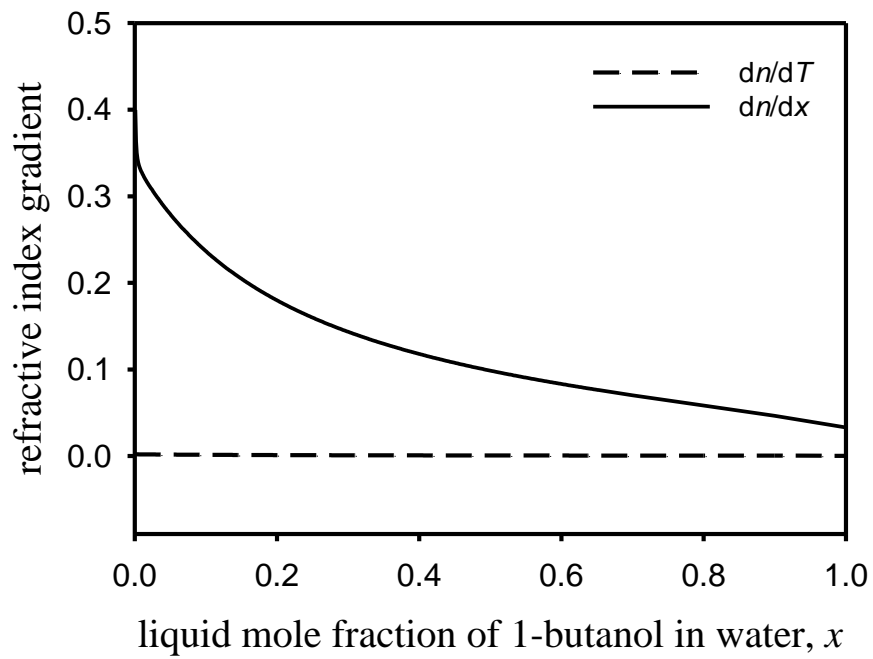


圖 A.15 1-butanol/water 莫耳分率對折射率梯度之關係圖

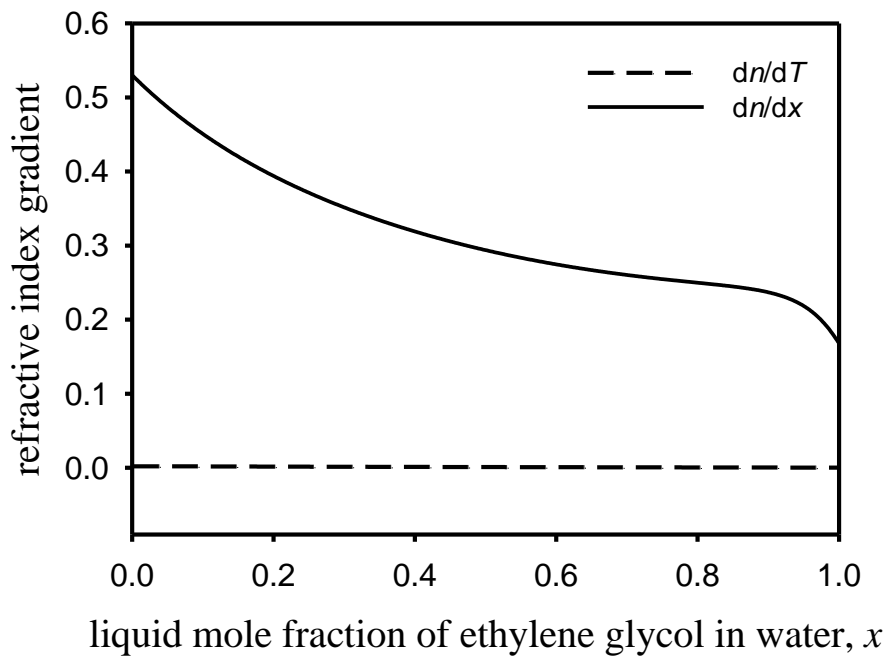


圖 A.16 ethylene glycol/water 莫耳分率對折射率梯度之關係圖

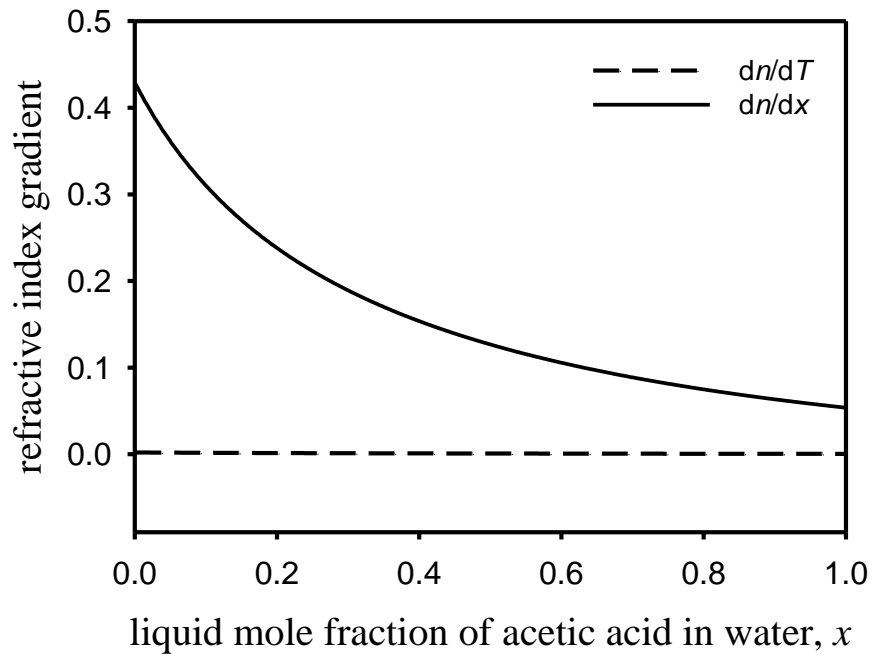


圖 A.17 acetic acid/water 莫耳分率對折射率梯度之關係圖

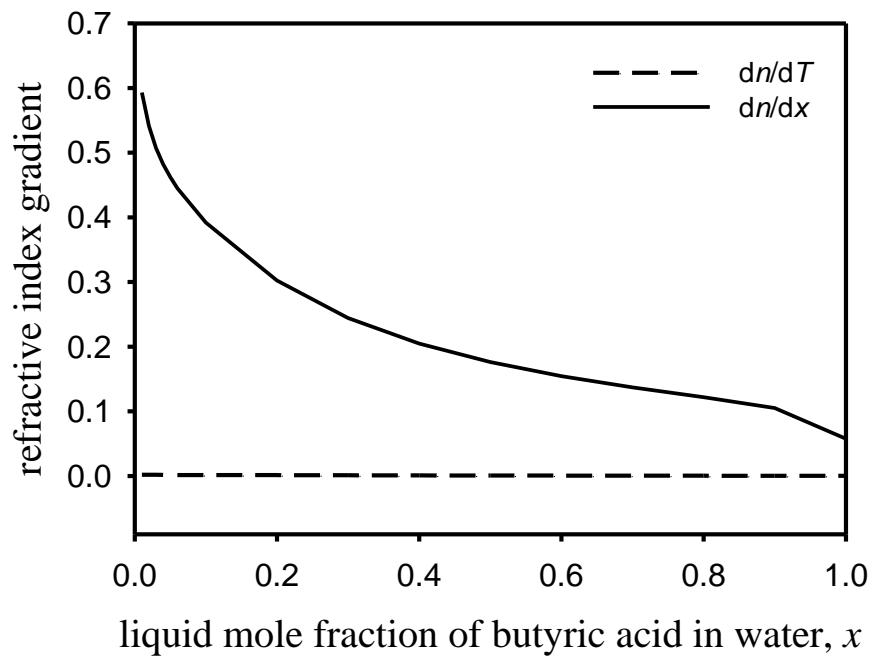


圖 A.18 butyric acid/water 莫耳分率對折射率梯度之關係圖

表 A.19 2-propanol/water 的物理性質

| liquid mole fraction | ρ_l (kg m ⁻³) | ρ_v (kg m ⁻³) | σ (mN m ⁻¹) | μ_l (N s m ⁻²) | h_{lv} (kJ kg ⁻¹) | c_{pl} (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 955 | 0.59 | 58.36 | 2.70×10^{-4} | 2290 | 4.20 |
| 0.015 | 939 | 0.67 | 23.31 | 2.93×10^{-4} | 2073 | 4.19 |
| 0.07 | 897 | 0.88 | 18.67 | 3.06×10^{-4} | 1690 | 4.13 |
| 0.1 | 888 | 1.31 | 19.13 | 3.88×10^{-4} | 1093 | 4.09 |
| 0.2 | 841 | 1.36 | 18.08 | 4.20×10^{-4} | 1059 | 3.96 |
| 0.3 | 809 | 1.40 | 17.47 | 4.42×10^{-4} | 1033 | 3.85 |
| 0.4 | 787 | 1.44 | 17.01 | 4.59×10^{-4} | 1006 | 3.74 |
| 0.5 | 770 | 1.49 | 16.63 | 4.73×10^{-4} | 975 | 3.63 |
| 0.6 | 757 | 1.55 | 16.31 | 4.83×10^{-4} | 938 | 3.53 |
| 0.69 | 740 | 1.75 | 15.17 | 4.30×10^{-4} | 836 | 3.45 |
| 0.7 | 747 | 1.63 | 16.03 | 4.90×10^{-4} | 896 | 3.42 |
| 0.8 | 738 | 1.73 | 15.76 | 4.93×10^{-4} | 844 | 3.31 |
| 0.85 | 732 | 1.78 | 16.54 | 4.72×10^{-4} | 716 | 3.22 |
| 0.9 | 730 | 1.86 | 15.49 | 4.91×10^{-4} | 736 | 3.21 |
| 1 | 723 | 2.05 | 15.16 | 4.81×10^{-4} | 703 | 3.10 |

表 A.20 2-butanol /water 的物理性質

| liquid mole fraction | ρ_l (kg m ⁻³) | ρ_v (kg m ⁻³) | σ (mN m ⁻¹) | μ_l (N s m ⁻²) | h_{lv} (kJ kg ⁻¹) | c_{pl} (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 955 | 0.59 | 58.36 | 2.70×10^{-4} | 2290 | 4.20 |
| 0.015 | 945 | 1.15 | 18.63 | 11.6×10^{-4} | 1215 | 4.16 |
| 0.1 | 930 | 1.26 | 17.71 | 23.0×10^{-4} | 1127 | 4.03 |
| 0.2 | 891 | 1.29 | 17.73 | 30.8×10^{-4} | 1104 | 3.88 |
| 0.3 | 867 | 1.32 | 17.75 | 35.7×10^{-4} | 1079 | 3.72 |
| 0.4 | 850 | 1.36 | 17.76 | 39.1×10^{-4} | 1048 | 3.57 |
| 0.5 | 838 | 1.42 | 17.75 | 41.5×10^{-4} | 1011 | 3.42 |
| 0.6 | 829 | 1.49 | 17.71 | 43.4×10^{-4} | 964 | 3.27 |
| 0.7 | 821 | 1.58 | 17.64 | 44.9×10^{-4} | 904 | 3.12 |
| 0.8 | 815 | 1.72 | 17.51 | 46.1×10^{-4} | 828 | 2.96 |
| 0.9 | 810 | 1.96 | 17.25 | 47.1×10^{-4} | 726 | 2.81 |
| 1 | 806 | 2.41 | 16.77 | 47.9×10^{-4} | 584 | 2.66 |

表 A.21 1-butanol/water 的物理性質

| liquid mole fraction | ρ_l (kg m ⁻³) | ρ_v (kg m ⁻³) | σ (mN m ⁻¹) | μ_l (N s m ⁻²) | h_{lv} (kJ kg ⁻¹) | c_{pl} (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 955 | 0.59 | 58.36 | 2.70×10^{-4} | 2290 | 4.20 |
| 0.1 | 878 | 1.05 | 19.21 | 2.54×10^{-4} | 1525 | 4.00 |
| 0.2 | 838 | 1.02 | 19.23 | 2.66×10^{-4} | 1416 | 3.81 |
| 0.3 | 810 | 1.06 | 18.81 | 2.80×10^{-4} | 1417 | 3.63 |
| 0.4 | 788 | 1.16 | 18.12 | 2.98×10^{-4} | 1470 | 3.65 |
| 0.5 | 771 | 1.28 | 17.47 | 3.22×10^{-4} | 1487 | 3.28 |
| 0.6 | 757 | 1.42 | 16.88 | 3.54×10^{-4} | 1454 | 3.10 |
| 0.7 | 746 | 1.58 | 16.37 | 3.98×10^{-4} | 1362 | 2.93 |
| 0.8 | 736 | 1.78 | 15.97 | 4.43×10^{-4} | 1202 | 2.75 |
| 0.9 | 728 | 2.01 | 15.51 | 4.80×10^{-4} | 956 | 2.58 |
| 1 | 721 | 2.29 | 15.14 | 5.60×10^{-4} | 605 | 2.41 |

表 A.22 ethylene glycol/water 的物理性質

| liquid mole fraction | ρ_l (kg m ⁻³) | ρ_v (kg m ⁻³) | σ (mN m ⁻¹) | μ_l (N s m ⁻²) | h_{lv} (kJ kg ⁻¹) | c_{pl} (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 955 | 0.59 | 58.36 | 2.70×10^{-4} | 2290 | 4.20 |
| 0.03 | 968 | 0.59 | 49.39 | 3.86×10^{-4} | 2275 | 4.13 |
| 0.1 | 979 | 0.59 | 45.54 | 6.56×10^{-4} | 2268 | 4.06 |
| 0.2 | 995 | 0.59 | 42.31 | 8.74×10^{-4} | 2245 | 3.92 |
| 0.3 | 1006 | 0.59 | 40.41 | 10.03×10^{-4} | 2223 | 3.79 |
| 0.4 | 1014 | 0.60 | 38.96 | 10.72×10^{-4} | 2197 | 3.65 |
| 0.5 | 1019 | 0.60 | 37.66 | 10.94×10^{-4} | 2166 | 3.52 |
| 0.6 | 1023 | 0.61 | 36.31 | 10.71×10^{-4} | 2123 | 3.39 |
| 0.7 | 1023 | 0.62 | 34.74 | 10.00×10^{-4} | 2056 | 3.27 |
| 0.8 | 1020 | 0.65 | 32.66 | 8.69×10^{-4} | 1933 | 3.15 |
| 0.9 | 1009 | 0.75 | 29.32 | 6.55×10^{-4} | 1652 | 3.05 |
| 1 | 968 | 1.60 | 21.54 | 3.23×10^{-4} | 894 | 3.05 |

表 A.23 acetic acid/water 的物理性質

| liquid mole fraction | ρ_l (kg m ⁻³) | ρ_v (kg m ⁻³) | σ (mN m ⁻¹) | μ_l (N s m ⁻²) | h_{lv} (kJ kg ⁻¹) | c_{pl} (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 955 | 0.59 | 58.36 | 2.70×10^{-4} | 2290 | 4.20 |
| 0.015 | 959 | 0.61 | 20.73 | 9.05×10^{-4} | 2210 | 4.15 |
| 0.1 | 1013 | 0.68 | 19.68 | 9.76×10^{-4} | 1991 | 3.97 |
| 0.2 | 1022 | 0.77 | 19.58 | 10.4×10^{-4} | 1788 | 3.75 |
| 0.3 | 1028 | 0.85 | 19.46 | 10.8×10^{-4} | 1614 | 3.54 |
| 0.4 | 1033 | 0.94 | 19.33 | 11.1×10^{-4} | 1456 | 3.33 |
| 0.5 | 1037 | 1.08 | 19.19 | 11.4×10^{-4} | 1303 | 3.12 |
| 0.6 | 1041 | 1.16 | 19.01 | 11.6×10^{-4} | 1159 | 2.90 |
| 0.7 | 1040 | 1.30 | 18.81 | 11.8×10^{-4} | 1021 | 2.69 |
| 0.75 | 1043 | 1.37 | 18.70 | 11.9×10^{-4} | 955 | 2.58 |
| 0.8 | 1045 | 1.45 | 18.58 | 12.0×10^{-4} | 889 | 2.48 |
| 0.9 | 1047 | 1.64 | 18.32 | 12.1×10^{-4} | 762 | 2.26 |
| 1 | 1049 | 1.87 | 18.02 | 12.2×10^{-4} | 640 | 2.05 |

表 A.24 butyric acid/water 的物理性質

| liquid mole fraction | ρ_l (kg m ⁻³) | ρ_v (kg m ⁻³) | σ (mN m ⁻¹) | μ_l (N s m ⁻²) | h_{lv} (kJ kg ⁻¹) | c_{pl} (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 955 | 0.59 | 58.36 | 2.7×10^{-4} | 2290 | 4.20 |
| 0.015 | 955 | 0.67 | 20.26 | 9.31×10^{-4} | 1453 | 4.15 |
| 0.1 | 957 | 0.72 | 19.28 | 11.0×10^{-4} | 1305 | 3.96 |
| 0.15 | 957 | 0.72 | 19.28 | 11.6×10^{-4} | 969 | 3.86 |
| 0.2 | 957 | 0.73 | 19.27 | 12.2×10^{-4} | 748 | 3.75 |
| 0.3 | 958 | 0.74 | 19.23 | 12.9×10^{-4} | 471 | 3.53 |
| 0.4 | 958 | 0.75 | 19.18 | 13.5×10^{-4} | 302 | 3.32 |
| 0.5 | 959 | 0.75 | 19.12 | 13.8×10^{-4} | 193 | 3.10 |
| 0.6 | 959 | 0.77 | 19.04 | 14.1×10^{-4} | 131 | 2.88 |
| 0.65 | 959 | 0.77 | 18.98 | 14.2×10^{-4} | 114 | 2.78 |
| 0.7 | 959 | 0.78 | 18.89 | 14.3×10^{-4} | 107 | 2.67 |
| 0.75 | 959 | 0.80 | 18.76 | 14.4×10^{-4} | 110 | 2.56 |
| 0.8 | 959 | 0.82 | 18.54 | 14.5×10^{-4} | 123 | 2.45 |
| 0.9 | 960 | 0.96 | 17.64 | 14.7×10^{-4} | 194 | 2.24 |
| 1 | 960 | 2.45 | 13.65 | 14.8×10^{-4} | 467 | 2.02 |

表 A.25 式 (A.4) 計算液體密度所用之常數

| working fluid | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> |
|-----------------|----------|----------|----------|
| 2-propanol | 0.26785 | 0.26475 | 0.24300 |
| 2-butanol | 0.27343 | 0.26350 | 0.26040 |
| 1-butanol | 0.26891 | 0.26674 | 0.24570 |
| ethylene glycol | 0.32503 | 0.25499 | 0.17200 |
| acetic acid | 0.35182 | 0.26954 | 0.26843 |
| butyric acid | 0.31132 | 0.26192 | 0.27997 |

表 A.26 式 (A.5) 計算表面張力所用之常數

| working fluid | <i>A</i> | <i>B</i> |
|-----------------|----------|----------|
| 2-propanol | 65.930 | 1.2222 |
| 2-butanol | 65.688 | 1.2222 |
| 1-butanol | 64.526 | 1.2222 |
| ethylene glycol | 106.491 | 1.2222 |
| acetic acid | 57.050 | 1.0703 |
| butyric acid | 56.230 | 1.1930 |

表 A.27 式 (A.6) 計算液體比熱所用之常數

| working fluid | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> |
|-----------------|----------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 2-propanol | 72.525 | 7.9553×10^{-1} | -2.6330×10^{-3} | 3.6498×10^{-6} |
| 2-butanol | 95.037 | 5.6593×10^{-1} | -1.8256×10^{-3} | 2.6675×10^{-6} |
| 1-butanol | 83.877 | 5.6628×10^{-1} | -1.7208×10^{-3} | 2.2780×10^{-6} |
| ethylene glycol | 75.878 | 6.4182×10^{-1} | -1.6493×10^{-3} | 1.6937×10^{-6} |
| acetic acid | -18.944 | 10.971×10^{-1} | -2.8921×10^{-3} | 2.9275×10^{-6} |
| butyric acid | 28.210 | 11.040×10^{-1} | -2.8523×10^{-3} | 2.9528×10^{-6} |

表 A.28 式 (A.7) 計算飽和蒸汽壓所用之常數

| working fluid | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> |
|-----------------|----------|----------|----------|
| 2-propanol | 8.1182 | 1580.92 | 219.62 |
| 2-butanol | 7.4743 | 1314.19 | 186.51 |
| 1-butanol | 7.4768 | 1362.39 | 178.73 |
| ethylene glycol | 8.7945 | 2615.40 | 244.91 |
| acetic acid | 7.2996 | 1479.02 | 216.82 |
| butyric acid | 6.1095 | 2634.47 | -3.47 |



表 2.1 各實驗條件下之 $\partial n/\partial x$ 與 $\partial n/\partial T$

| mixture type | x | $\partial n/\partial x$ | $\partial n/\partial T$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) |
|-----------------------|-------|-------------------------|--|
| 2-propanol/water | 0.015 | 0.19 | -1.8×10^{-3} |
| | 0.07 | 0.12 | -1.5×10^{-3} |
| | 0.6 | 0.04 | -0.6×10^{-3} |
| | 0.69 | 0.03 | 0 |
| | 0.85 | 0.02 | -0.5×10^{-3} |
| 2-butanol/water | 0.015 | 0.27 | -1.8×10^{-3} |
| | 0.3 | 0.11 | -0.9×10^{-3} |
| | 0.5 | 0.07 | -0.6×10^{-3} |
| 1-butanol/water | 0.2 | 0.18 | -1.1×10^{-3} |
| | 0.3 | 0.14 | -0.9×10^{-3} |
| | 0.9 | 0.05 | -0.4×10^{-3} |
| ethylene glycol/water | 0.03 | 0.5 | -2.1×10^{-3} |
| | 0.9 | 0.24 | -0.4×10^{-3} |
| acetic acid/water | 0.015 | 0.32 | -2.0×10^{-3} |
| | 0.75 | 0.07 | -0.6×10^{-3} |
| butyric acid/water | 0.015 | 0.56 | -1.9×10^{-3} |
| | 0.15 | 0.34 | -1.3×10^{-3} |
| | 0.65 | 0.15 | -0.6×10^{-3} |
| | 0.75 | 0.13 | -0.6×10^{-3} |



表 2.2 各實驗條件下之 Marangoni number

| mixture type | x | Ma |
|-----------------------|-------|------|
| 2-propanol/water | 0.015 | 5.08 |
| | 0.07 | 9.01 |
| | 0.6 | 0 |
| | 0.69 | 0.07 |
| | 0.85 | 0.13 |
| 2-butanol/water | 0.015 | 6.4 |
| | 0.3 | 0.44 |
| | 0.5 | 0.15 |
| 1-butanol/water | 0.2 | 0.37 |
| | 0.3 | 0.47 |
| | 0.9 | 2.65 |
| ethylene glycol/water | 0.03 | 9.08 |
| | 0.9 | 3.72 |
| acetic acid/water | 0.015 | 0.11 |
| | 0.75 | 0.06 |
| butyric acid/water | 0.015 | 0.29 |
| | 0.15 | 9.75 |
| | 0.65 | 20.4 |
| | 0.75 | 20.3 |



圖 2.1 實驗設備裝置圖

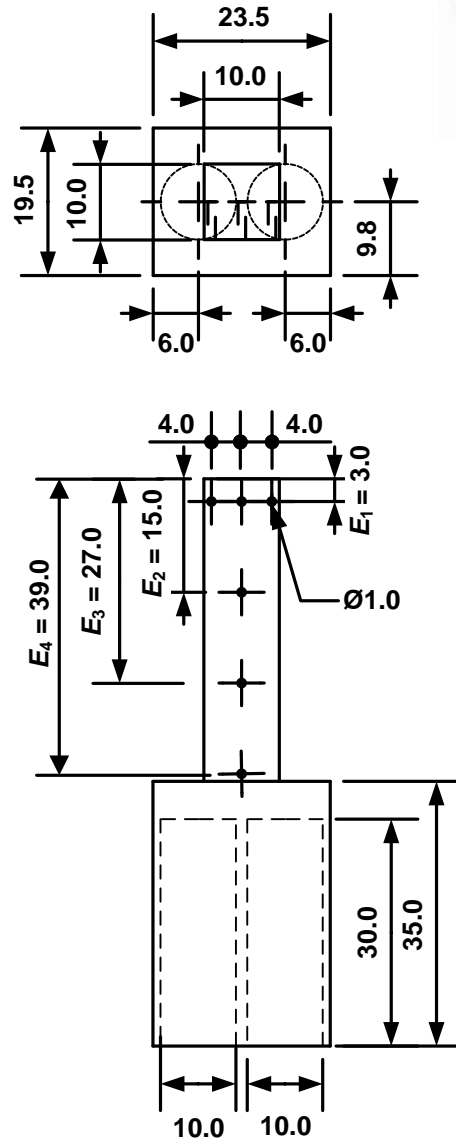


圖 2.2 加熱塊尺寸及標註圖 (單位: mm)

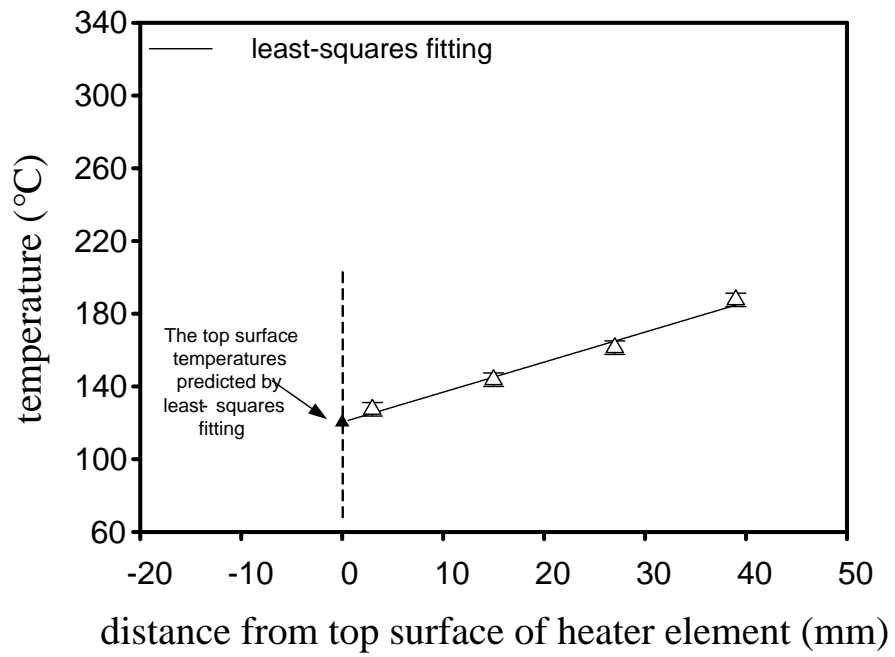


圖 2.3 加熱面上之溫度以最小平方法擬合曲線圖

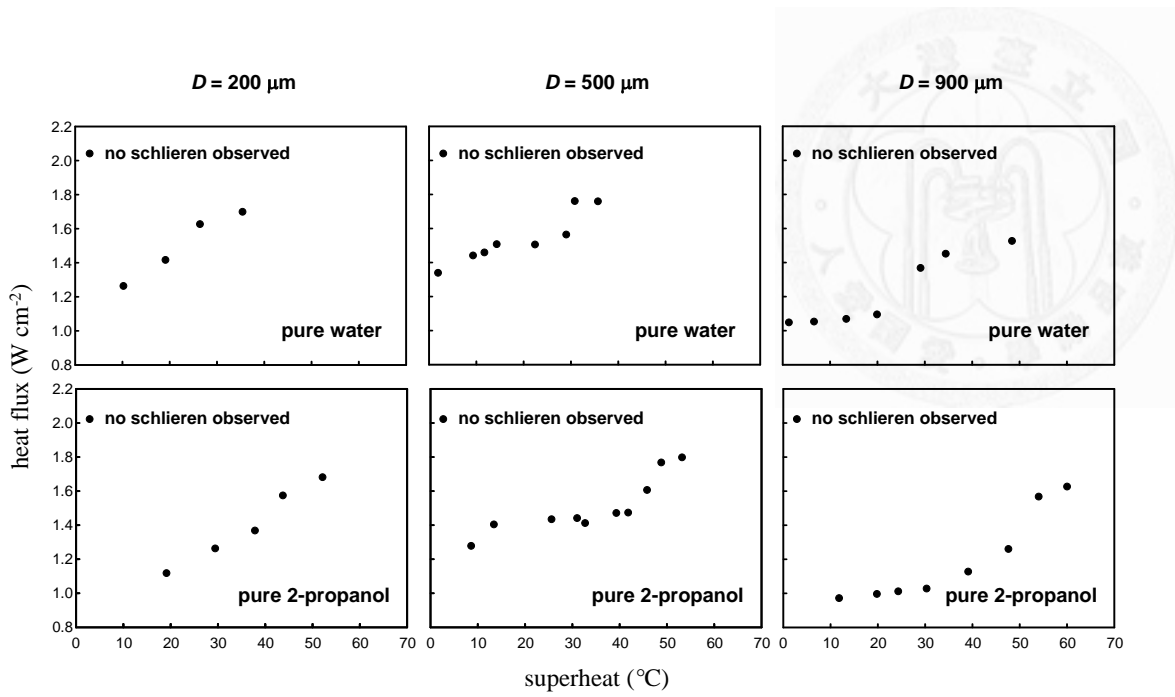


圖 3.1 工作流體為異丙醇與水之純物質在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線

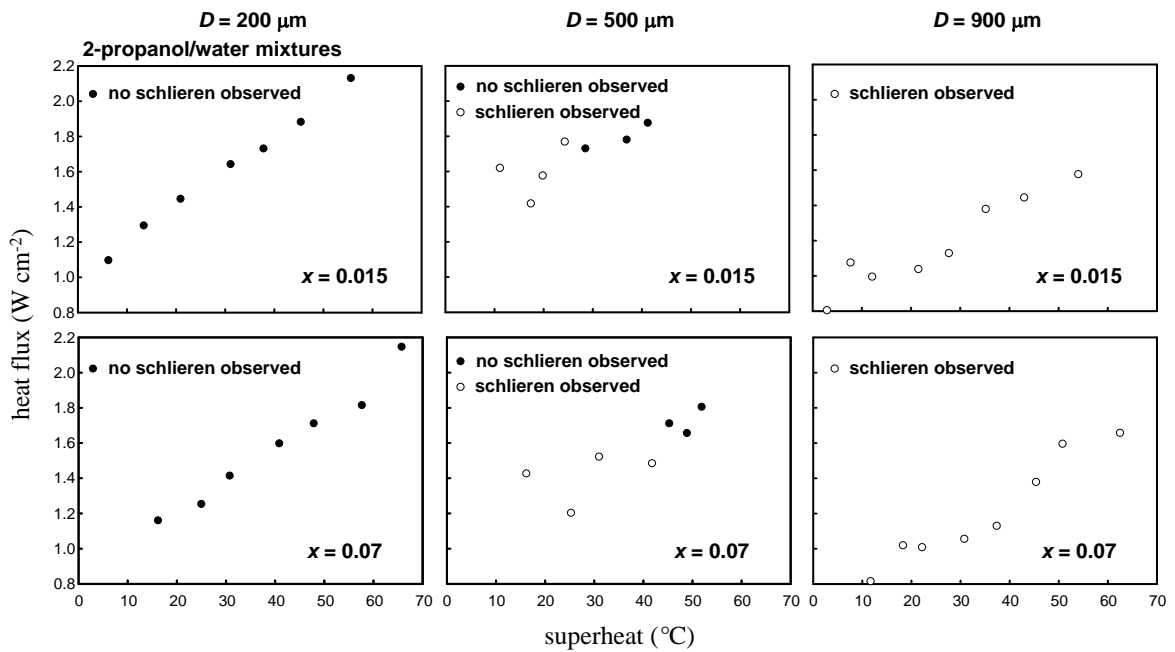


圖 3.2 工作流體為異丙醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線

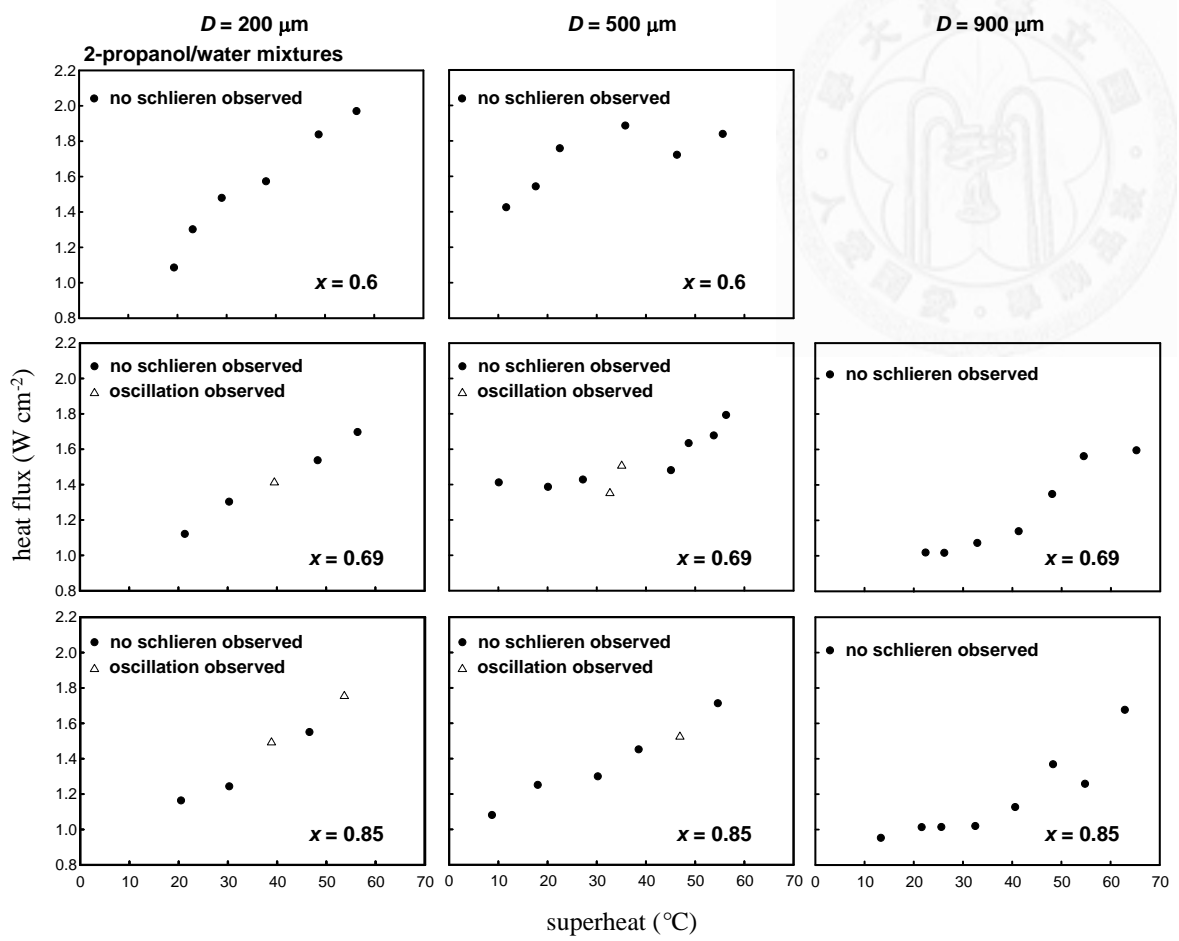


圖 3.3 工作流體為異丙醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線(續)

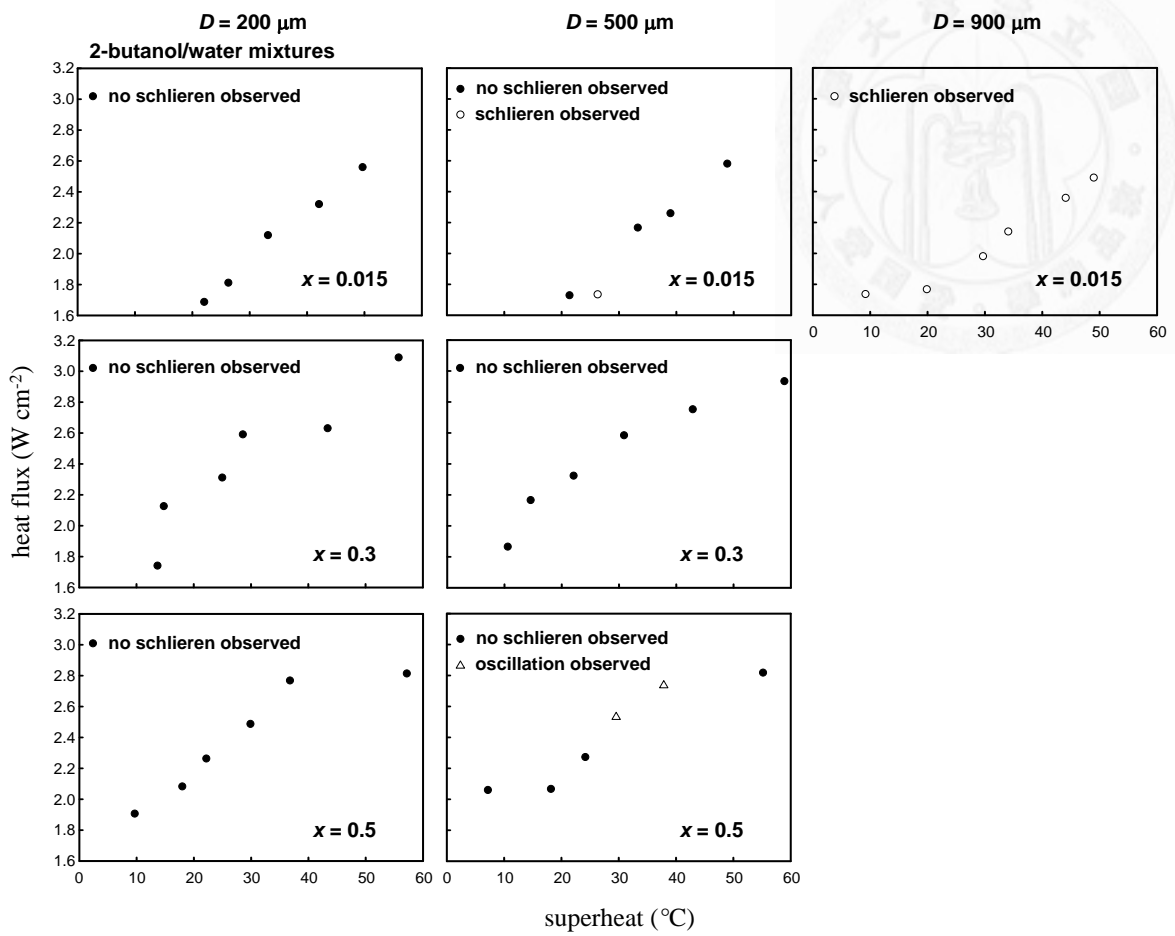


圖 3.4 工作流體為仲丁醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線

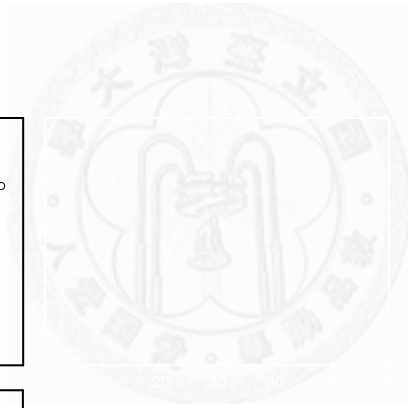
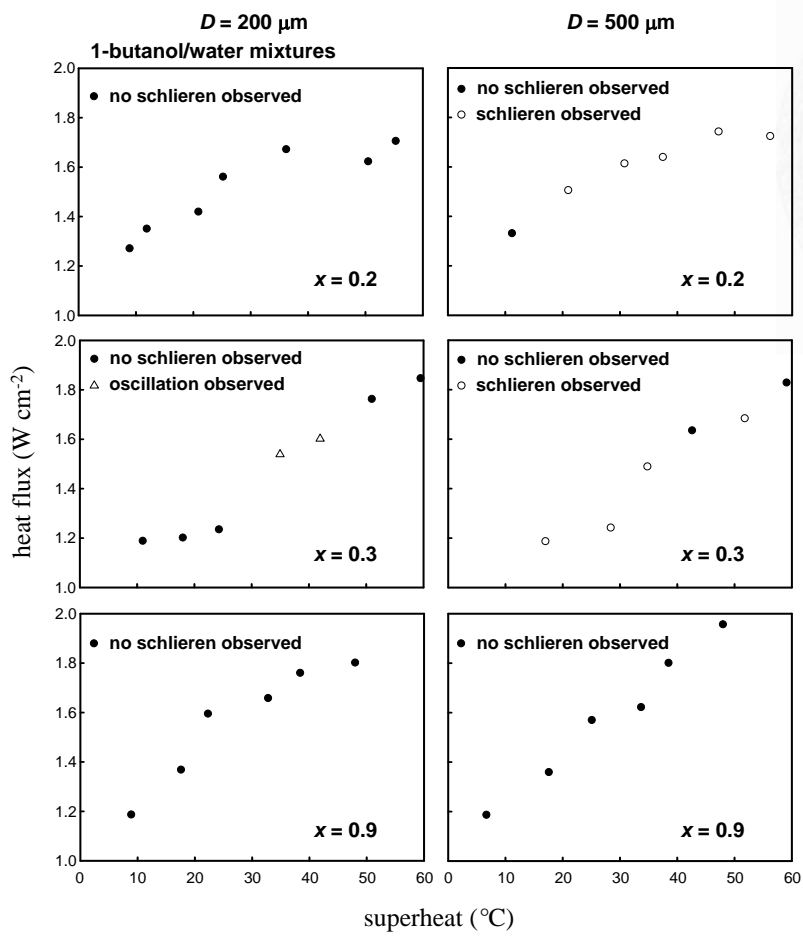


圖 3.5 工作流體為正丁醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線

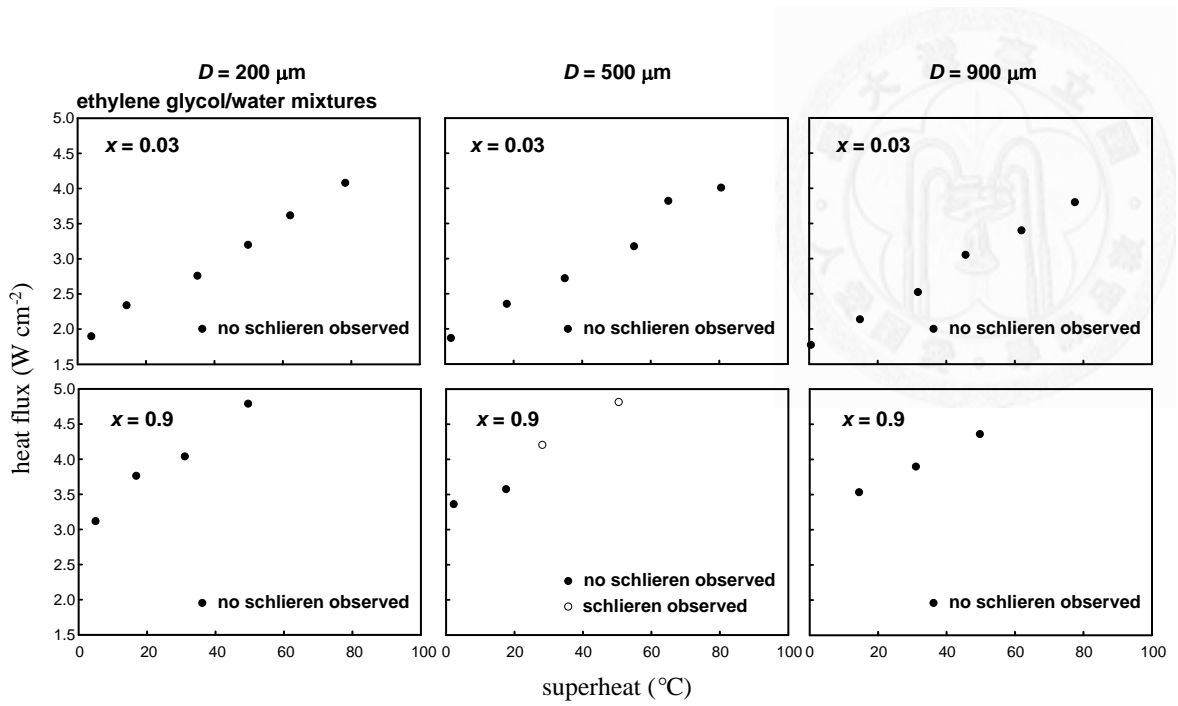


圖 3.6 工作流體為乙二醇與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線

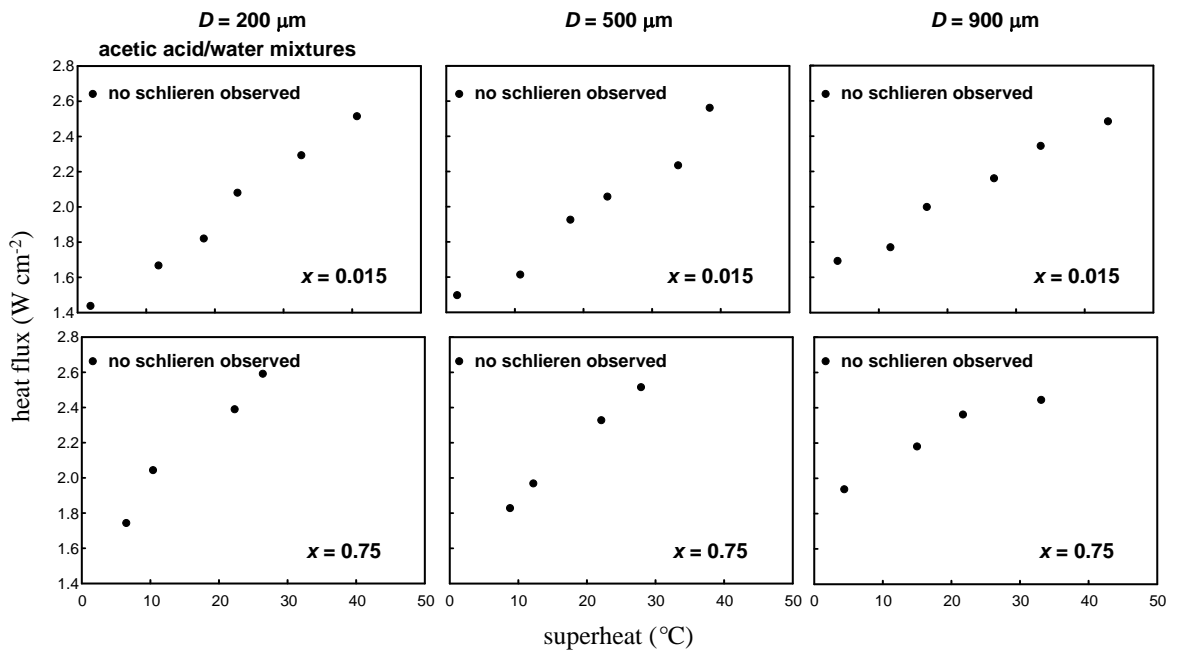


圖 3.7 工作流體為乙酸與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線

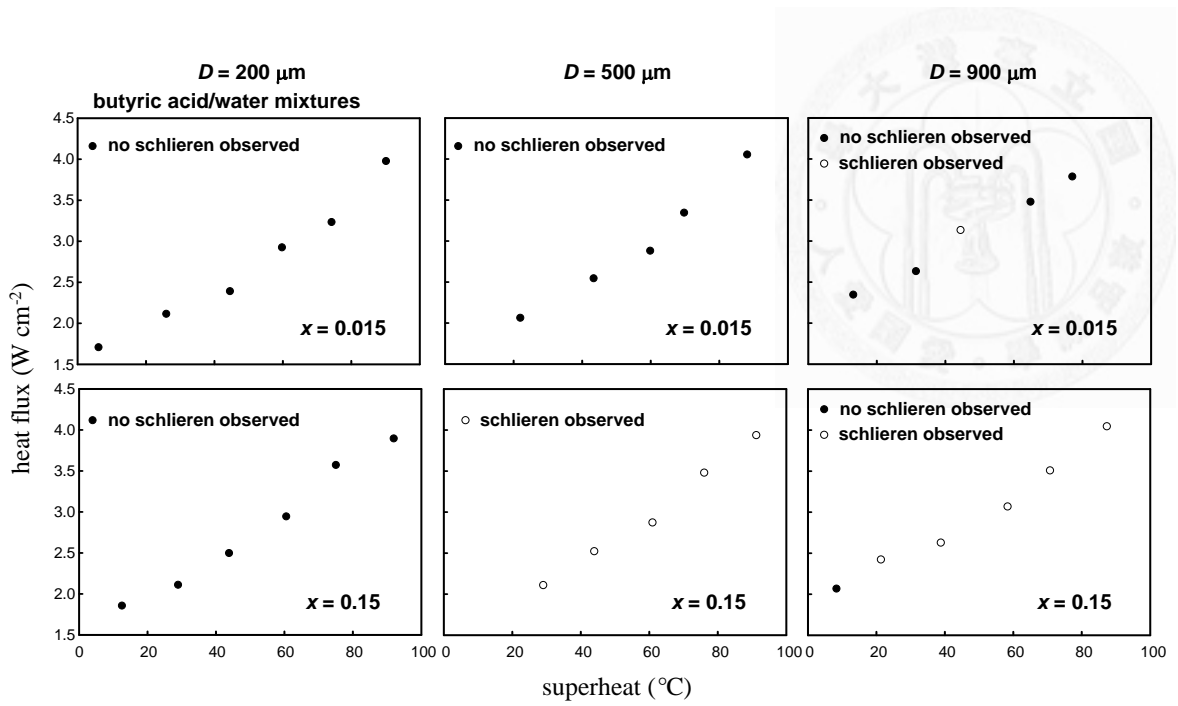


圖 3.8 工作流體為丁酸與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線

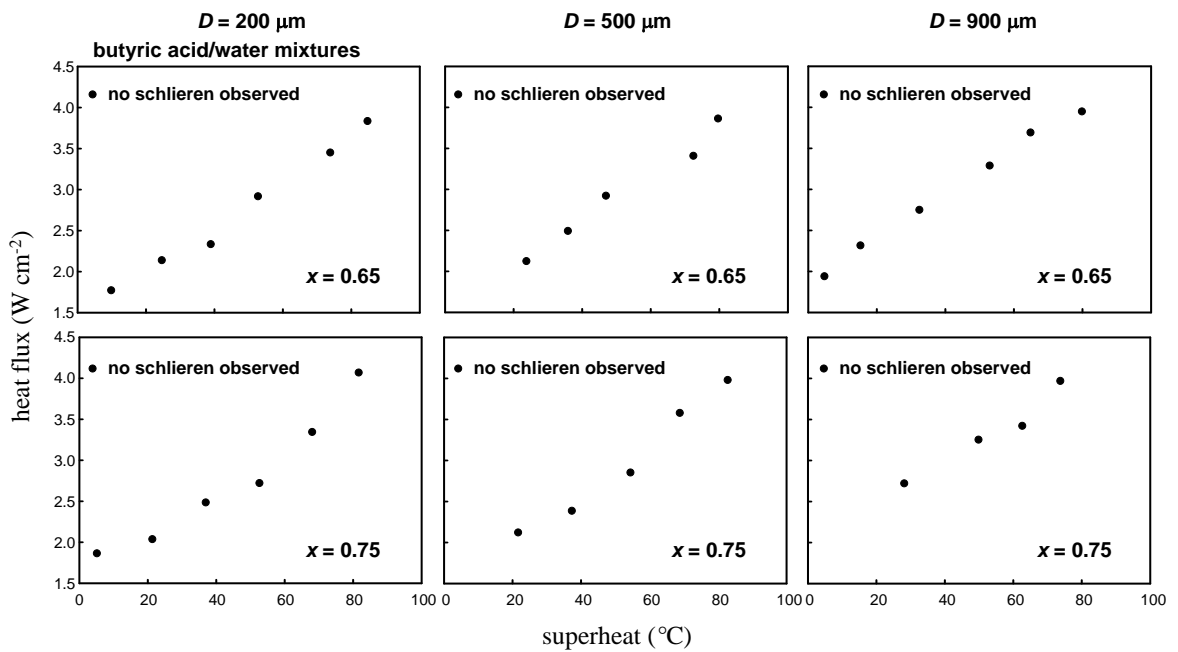


圖 3.9 工作流體為丁酸與水之不同濃度混合物在不同管徑方型毛細管內之沸騰曲線 (續)

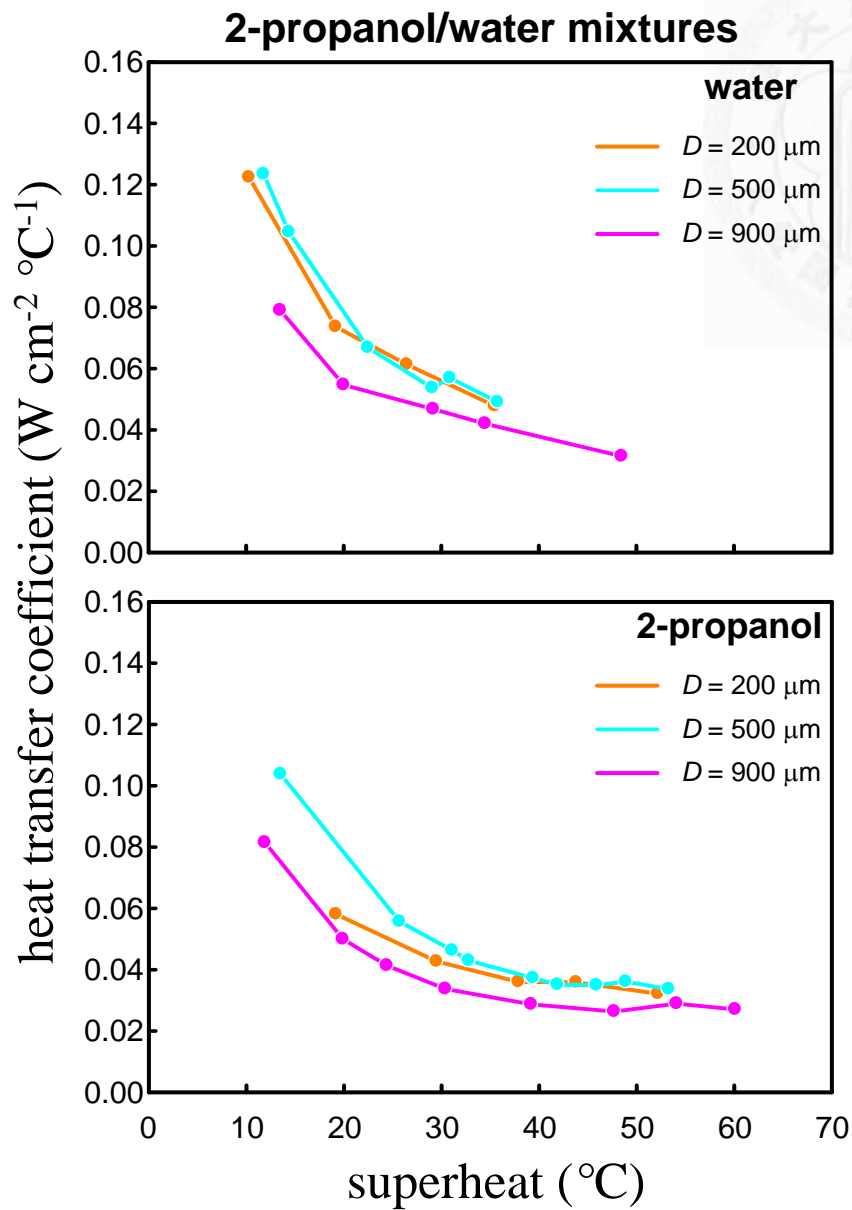


圖 3.10 工作流體為異丙醇與純水在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋

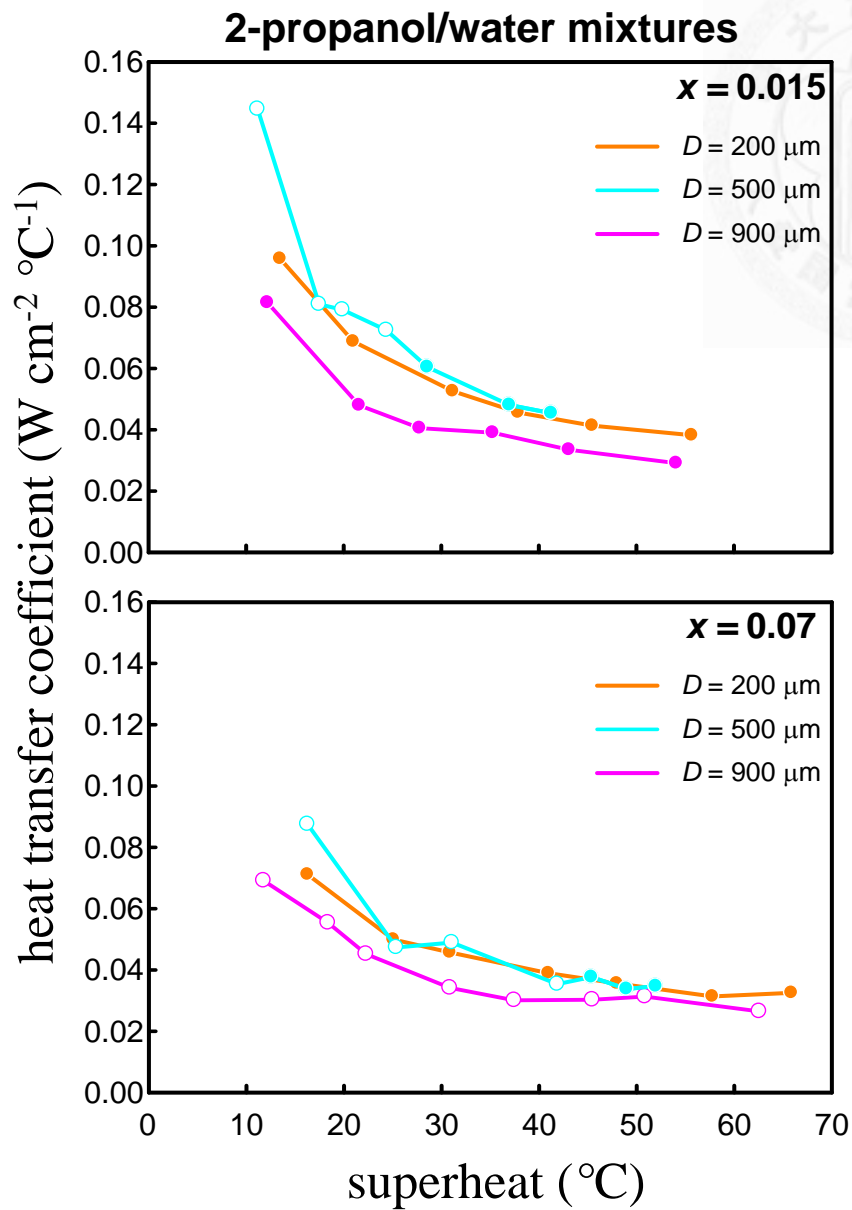


圖 3.11 工作流體為同一濃度之異丙醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋

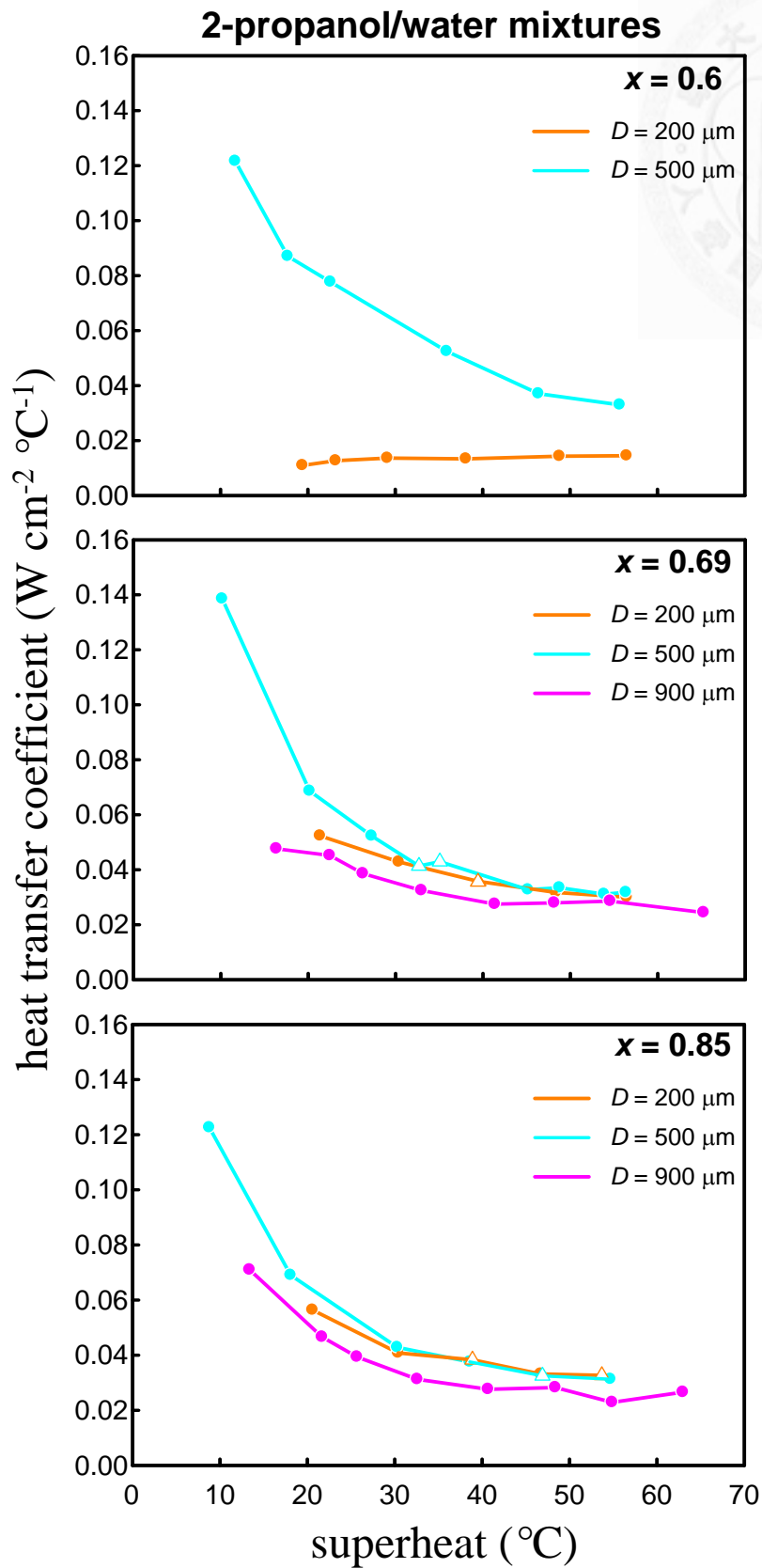


圖 3.12 工作流體為同一濃度之異丙醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖(續)，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象

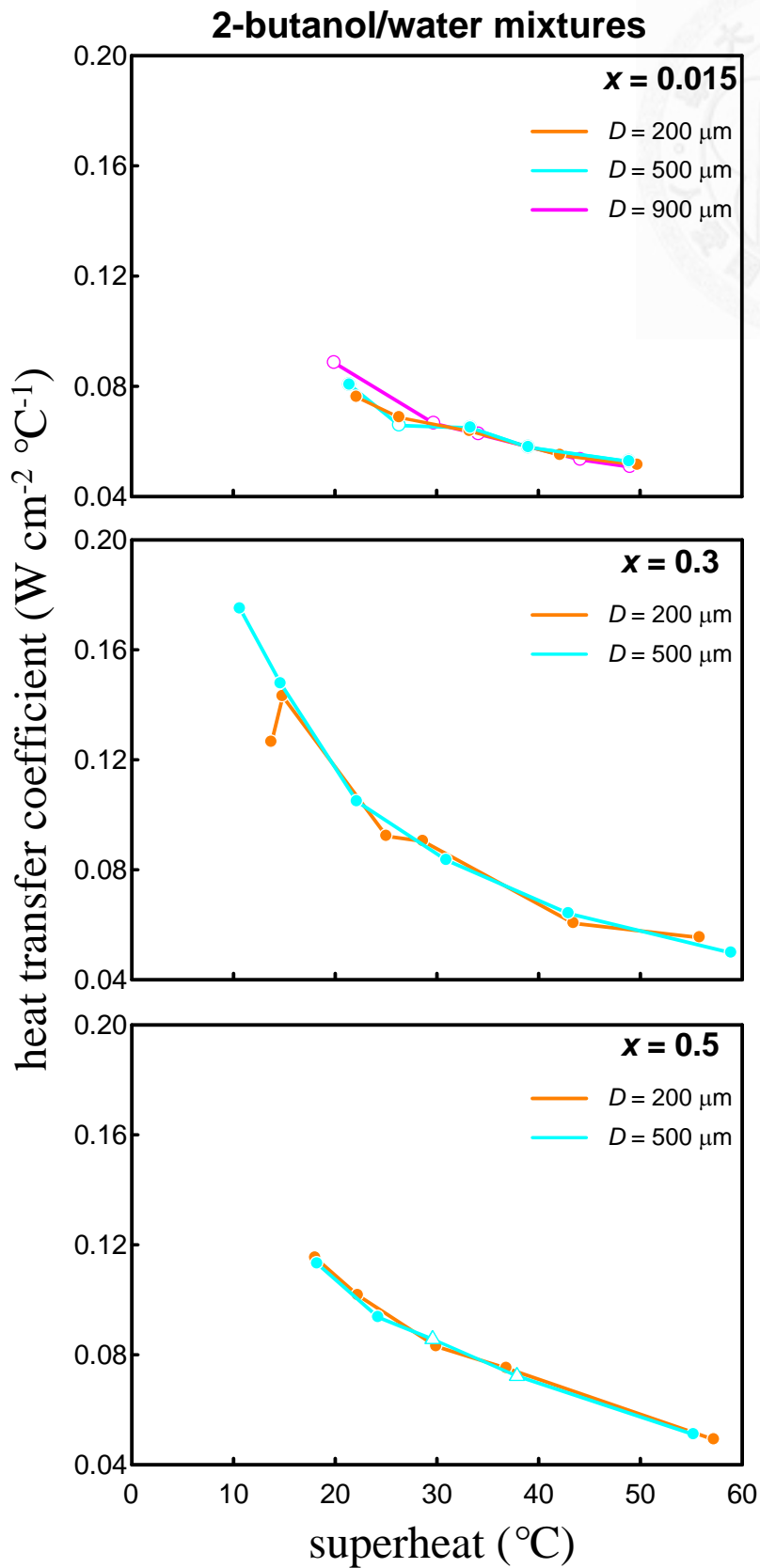


圖 3.13 工作流體為同一濃度之仲丁醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象

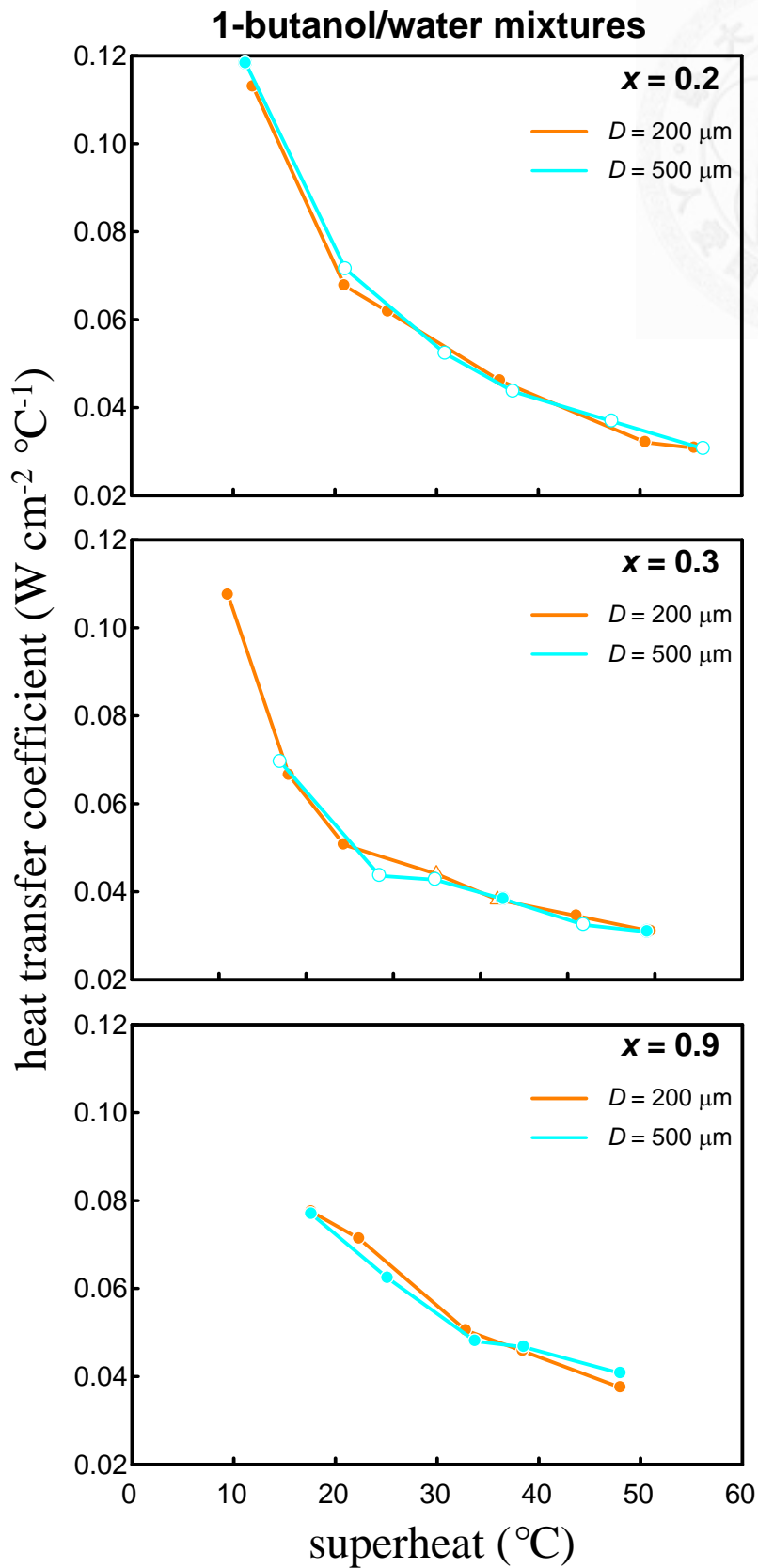


圖 3.14 工作流體為同一濃度之正丁醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象

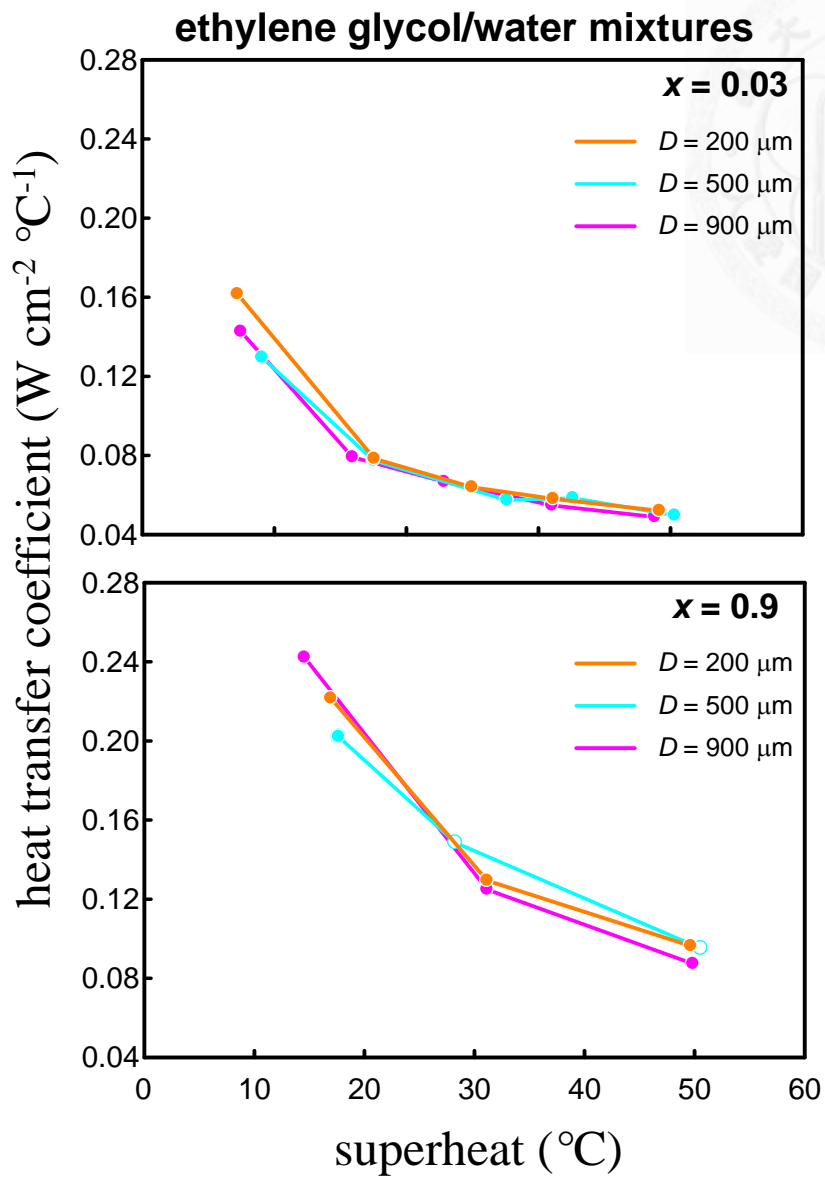


圖 3.15 工作流體為同一濃度之乙二醇與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋

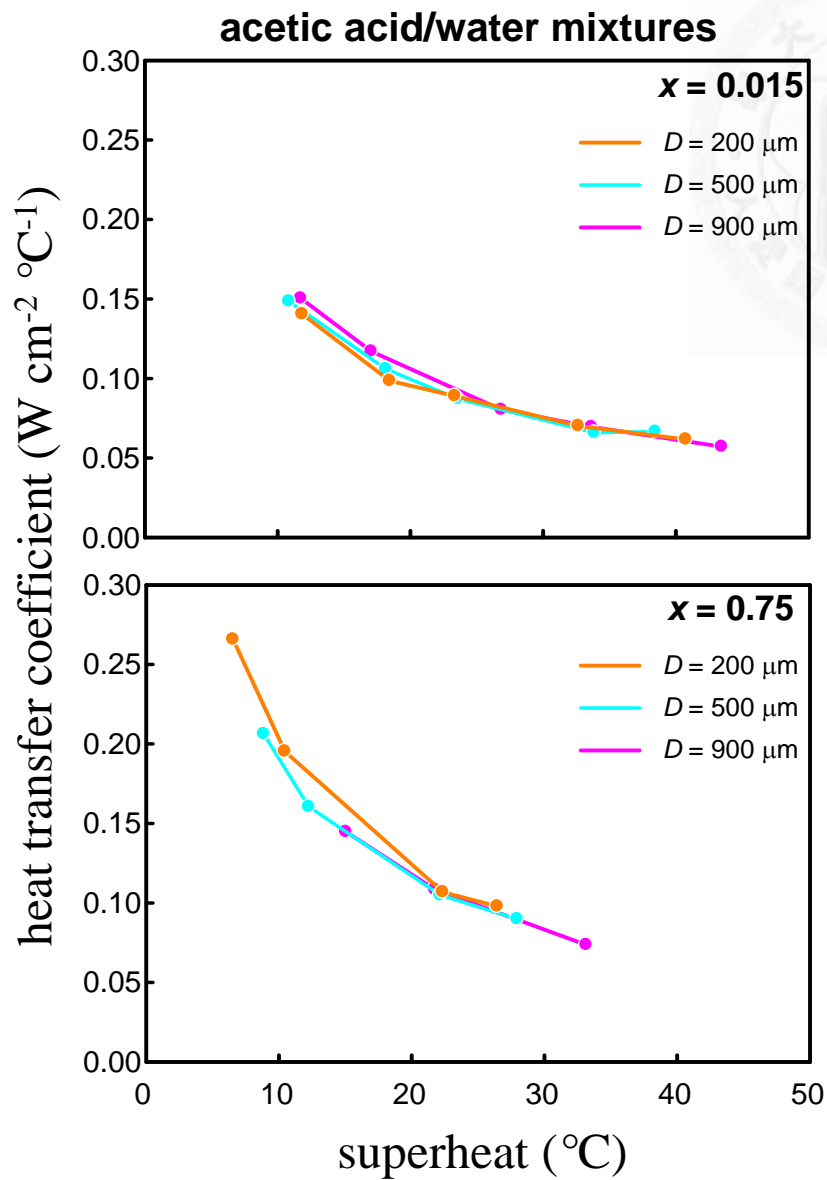


圖 3.16 工作流體為同一濃度之乙酸與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋

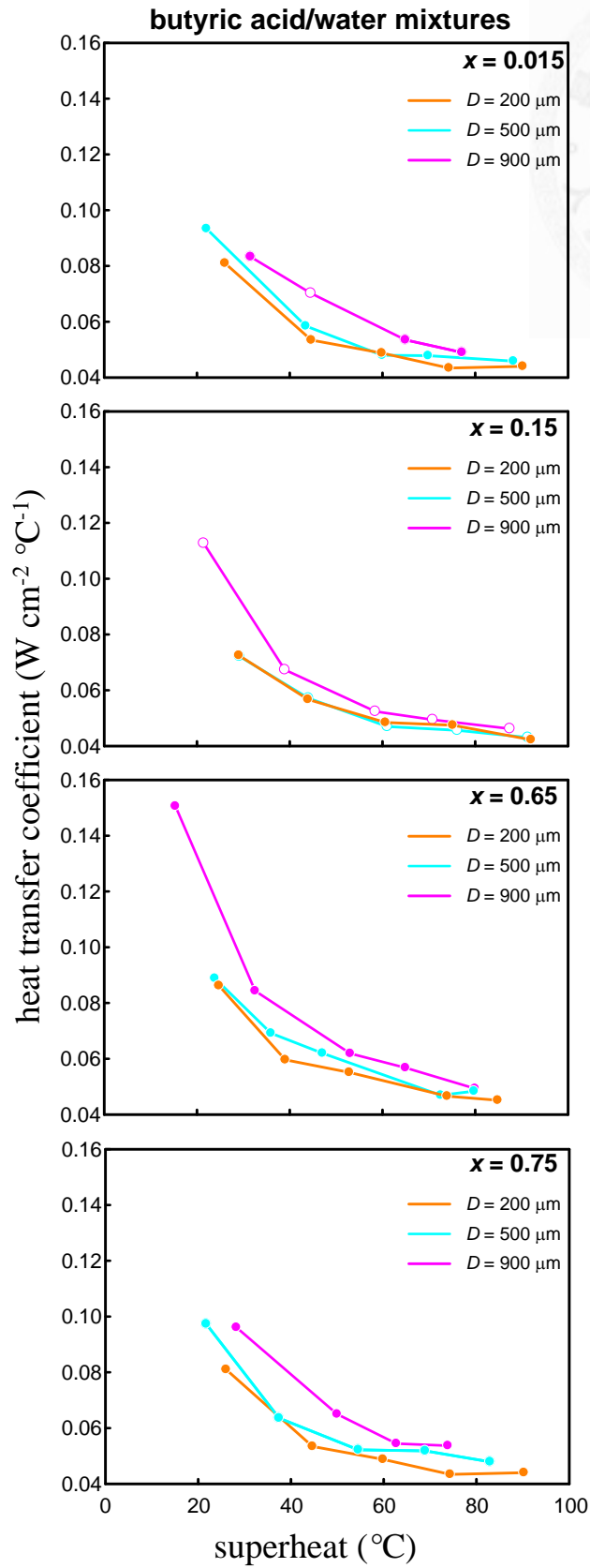


圖 3.17 工作流體為同一濃度之丁酸與水混合物在不同管徑方型毛細管內之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋

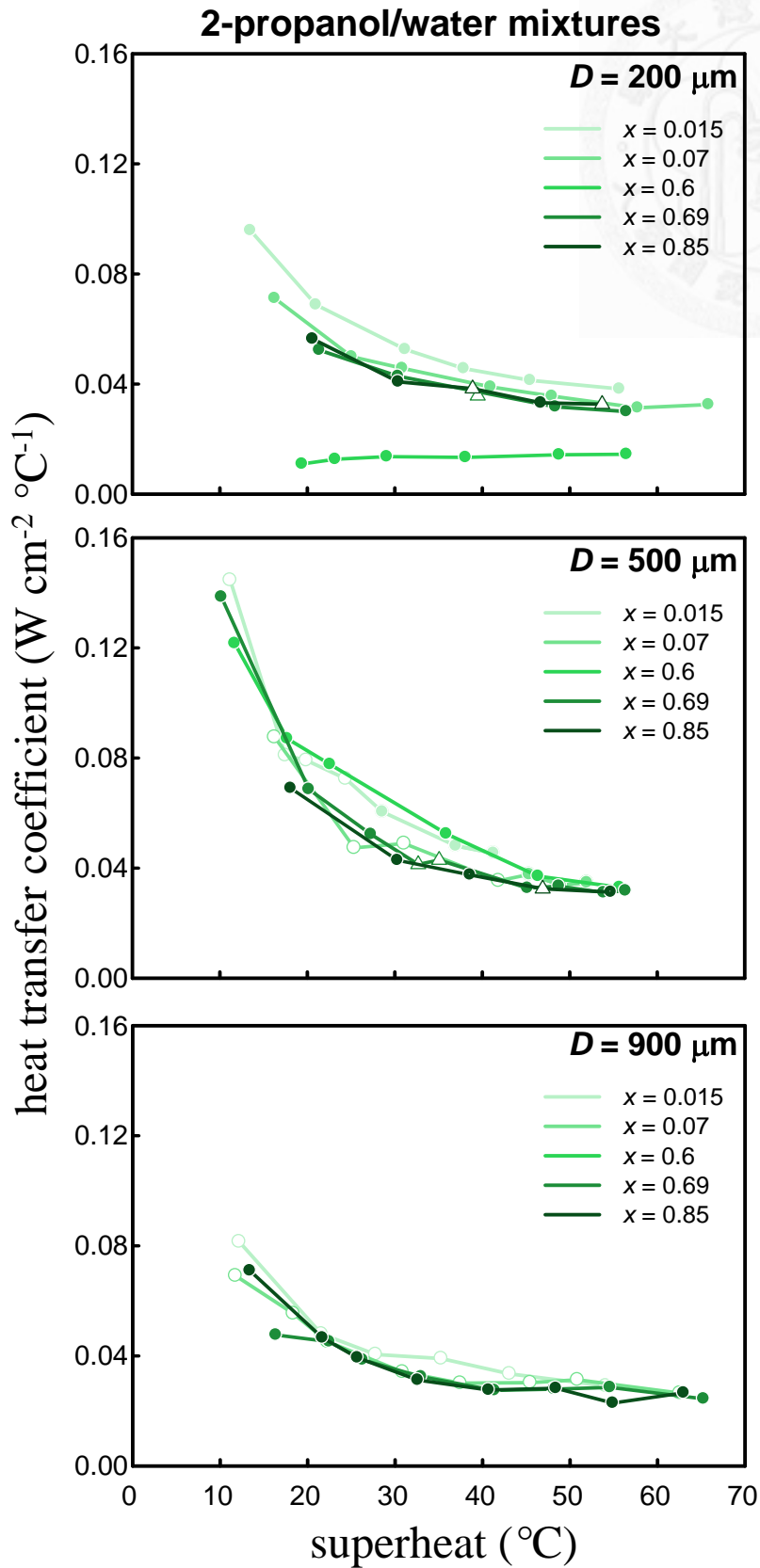


圖 3.18 在相同管徑方型毛細管內，異丙醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象

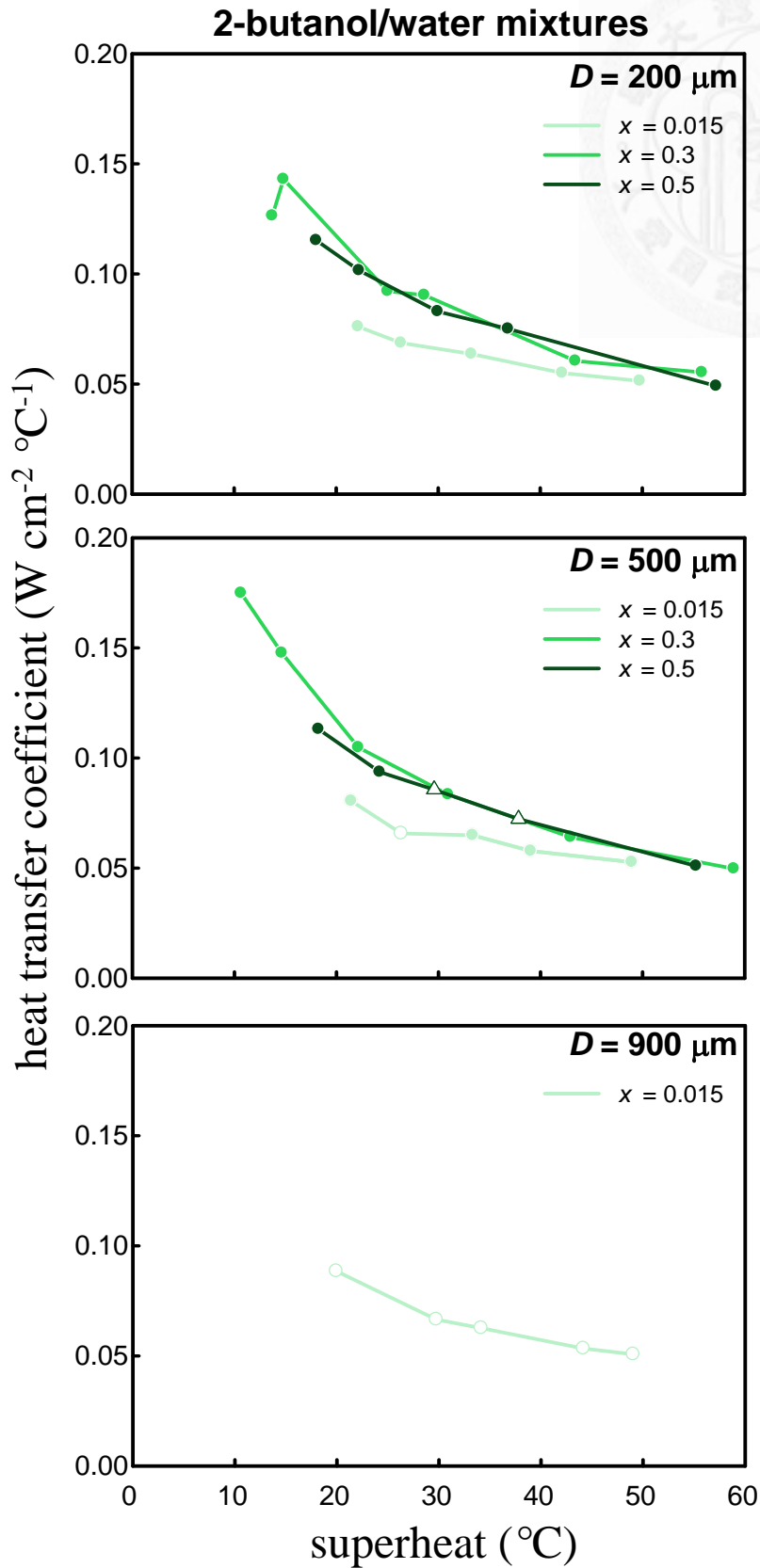


圖 3.19 在相同管徑方型毛細管內，仲丁醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象

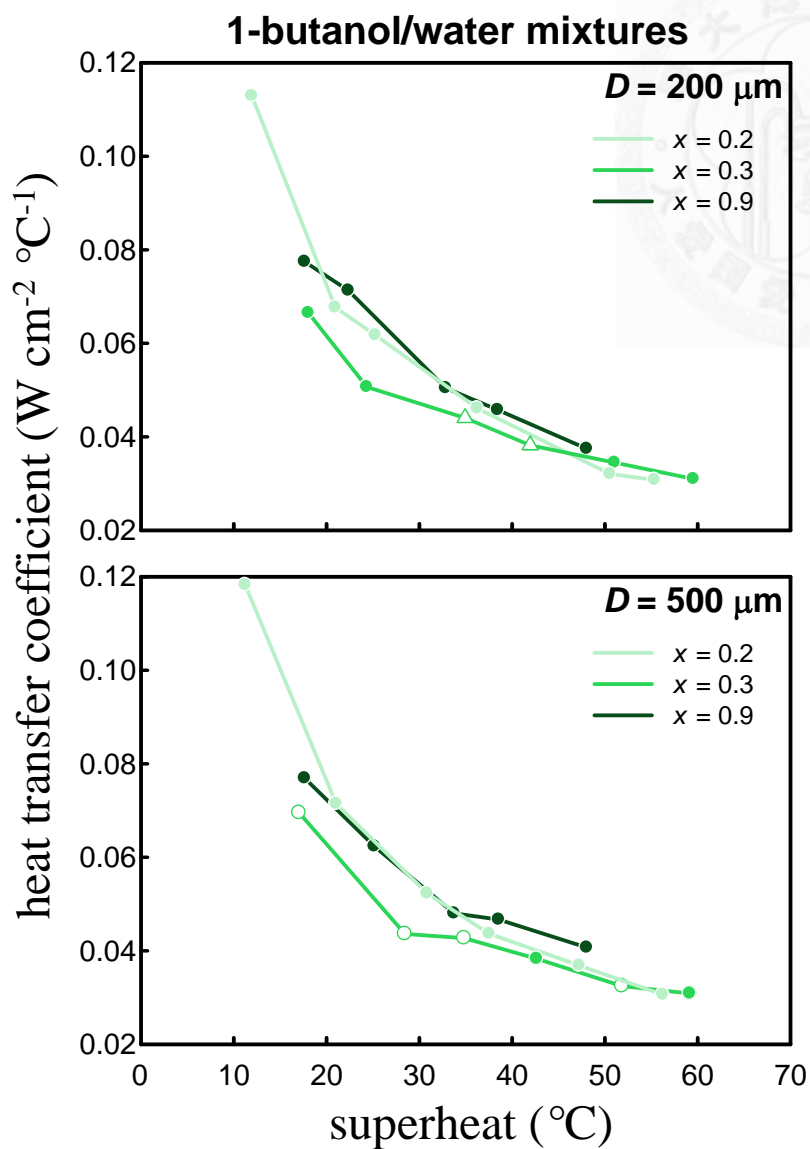


圖 3.20 在相同管徑方型毛細管內，正丁醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋、空心三角形圖例表示有觀察到震盪現象

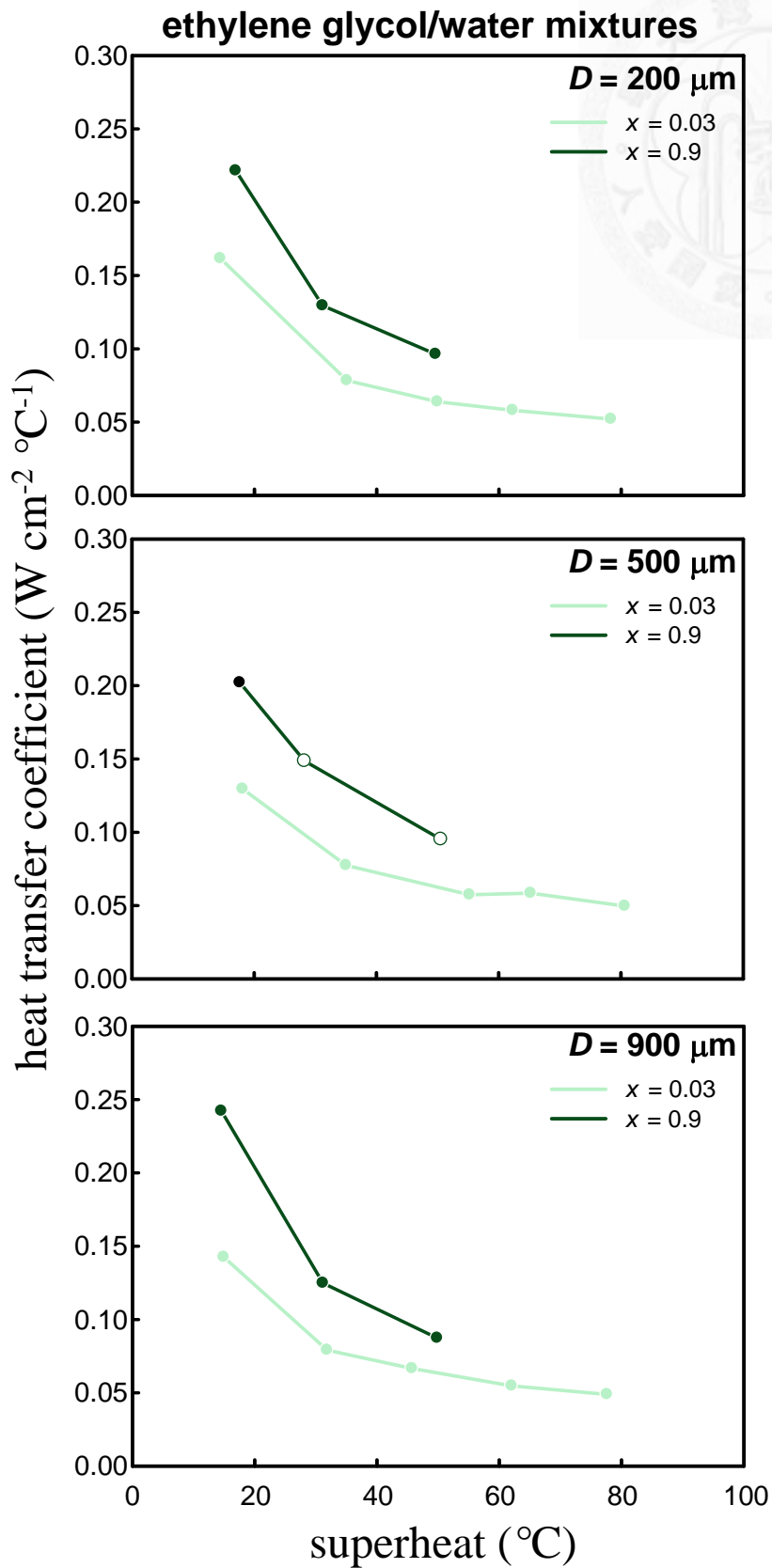


圖 3.21 在相同管徑方型毛細管內，乙二醇與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋

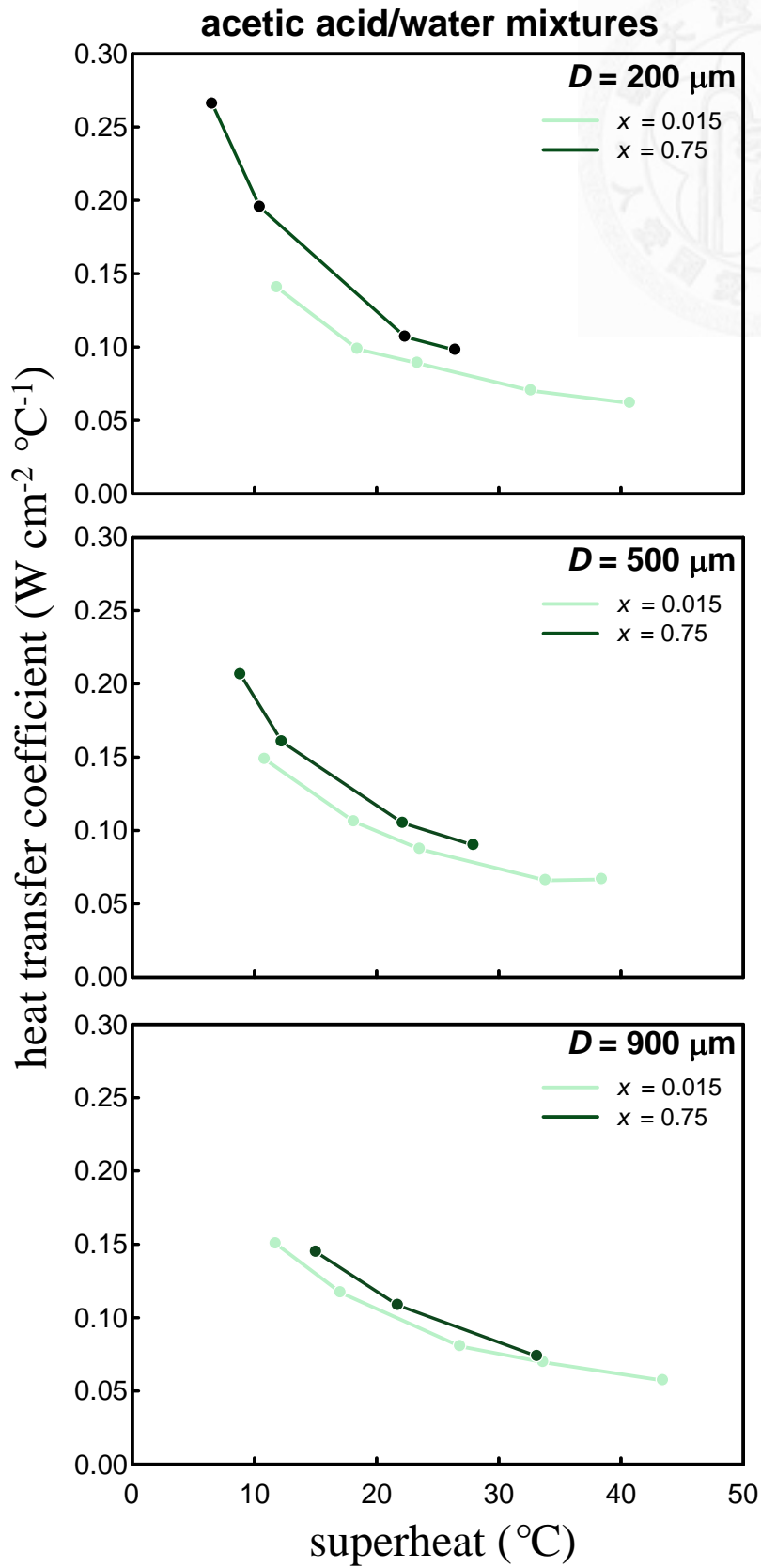


圖 3.22 在相同管徑方型毛細管內，乙酸與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋

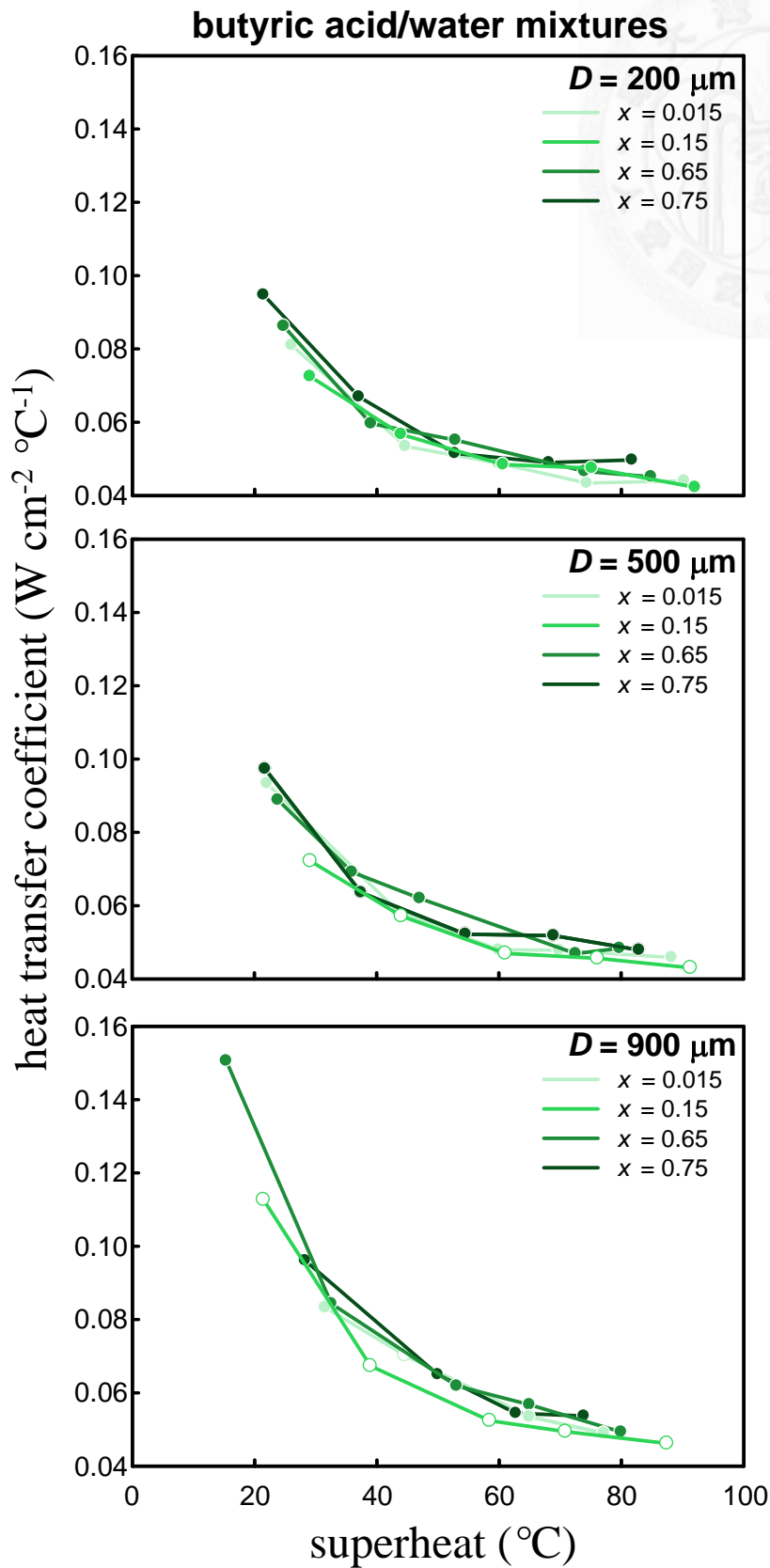


圖 3.23 在相同管徑方型毛細管內，丁酸與水在不同混合莫耳分率下之熱傳係數曲線圖，其中實心圓形圖例表示沒有觀察到紋影條紋、空心圓形圖例表示有觀察到紋影條紋

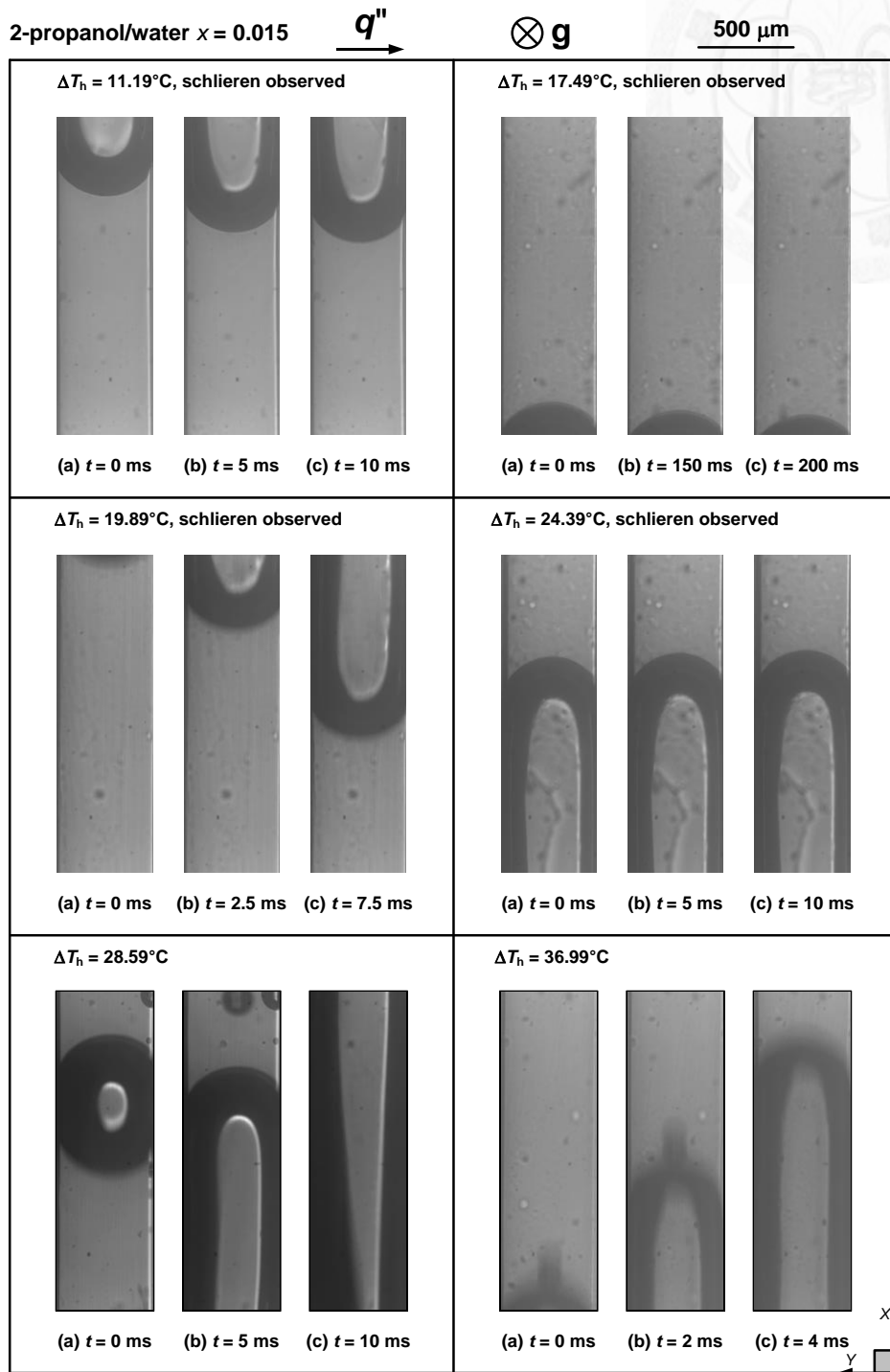


圖 3.24 工作流體為 $x = 0.015$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

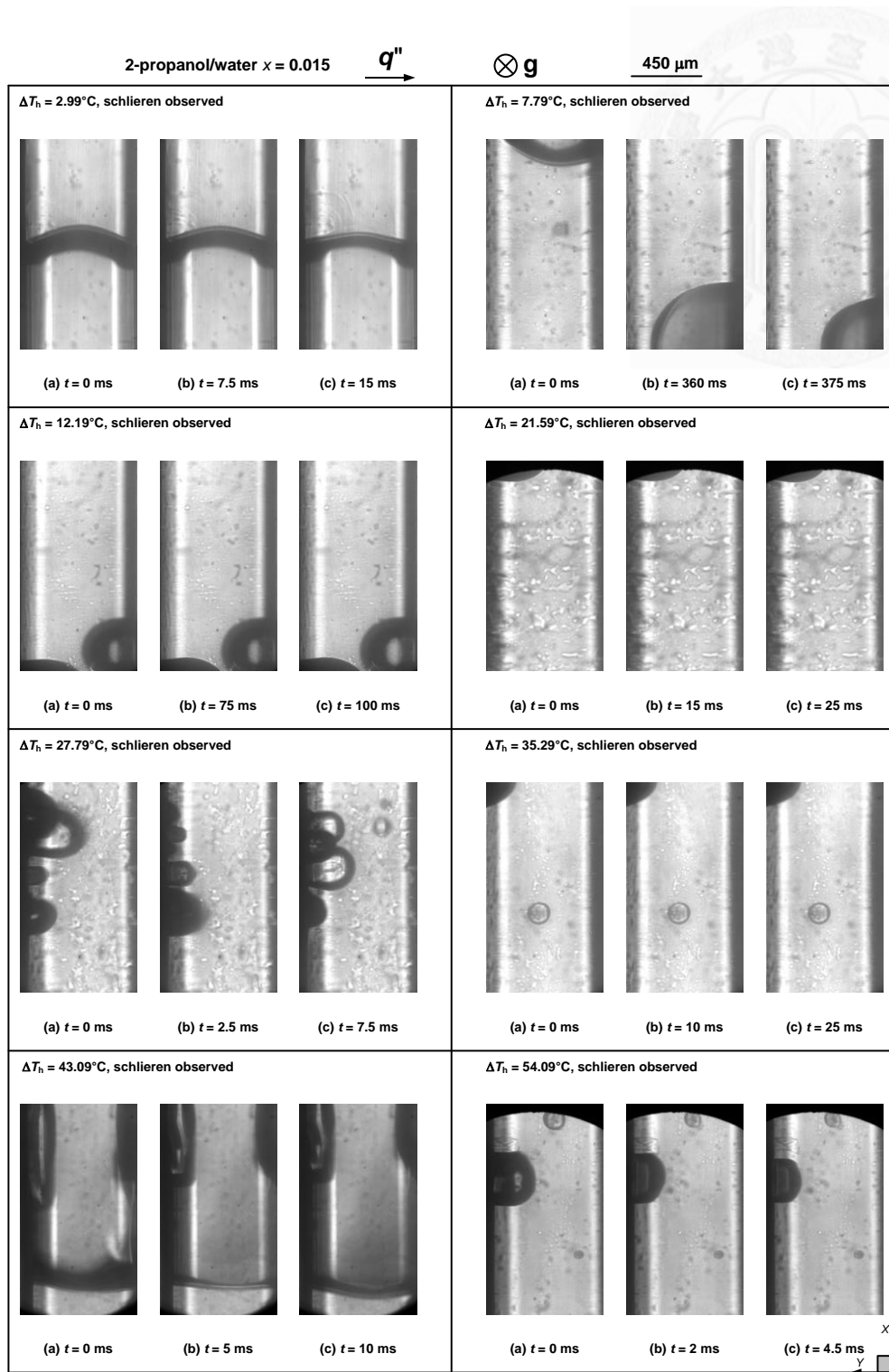


圖 3.25 工作流體為 $x = 0.015$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

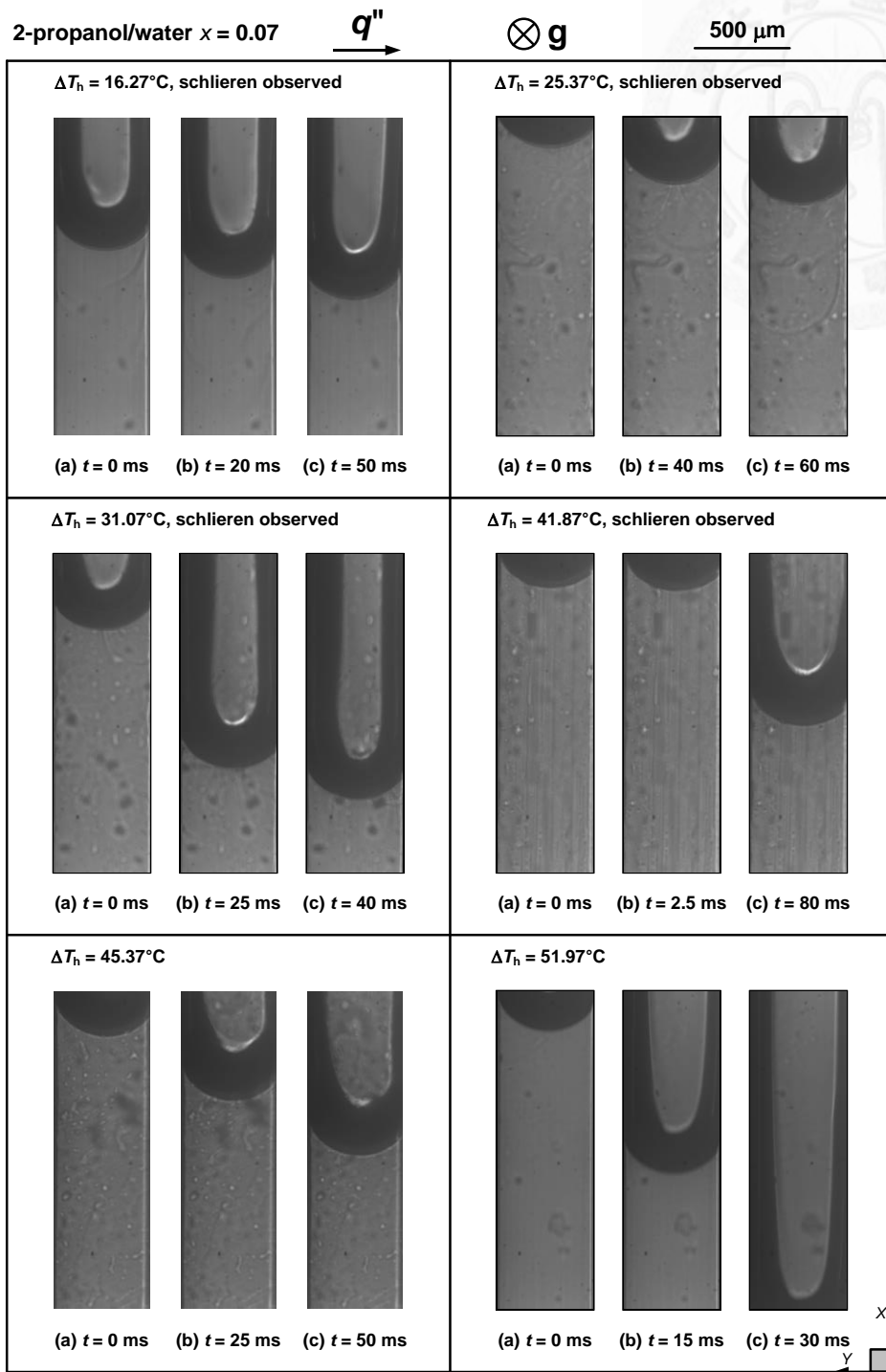


圖 3.26 工作流體為 $x = 0.07$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

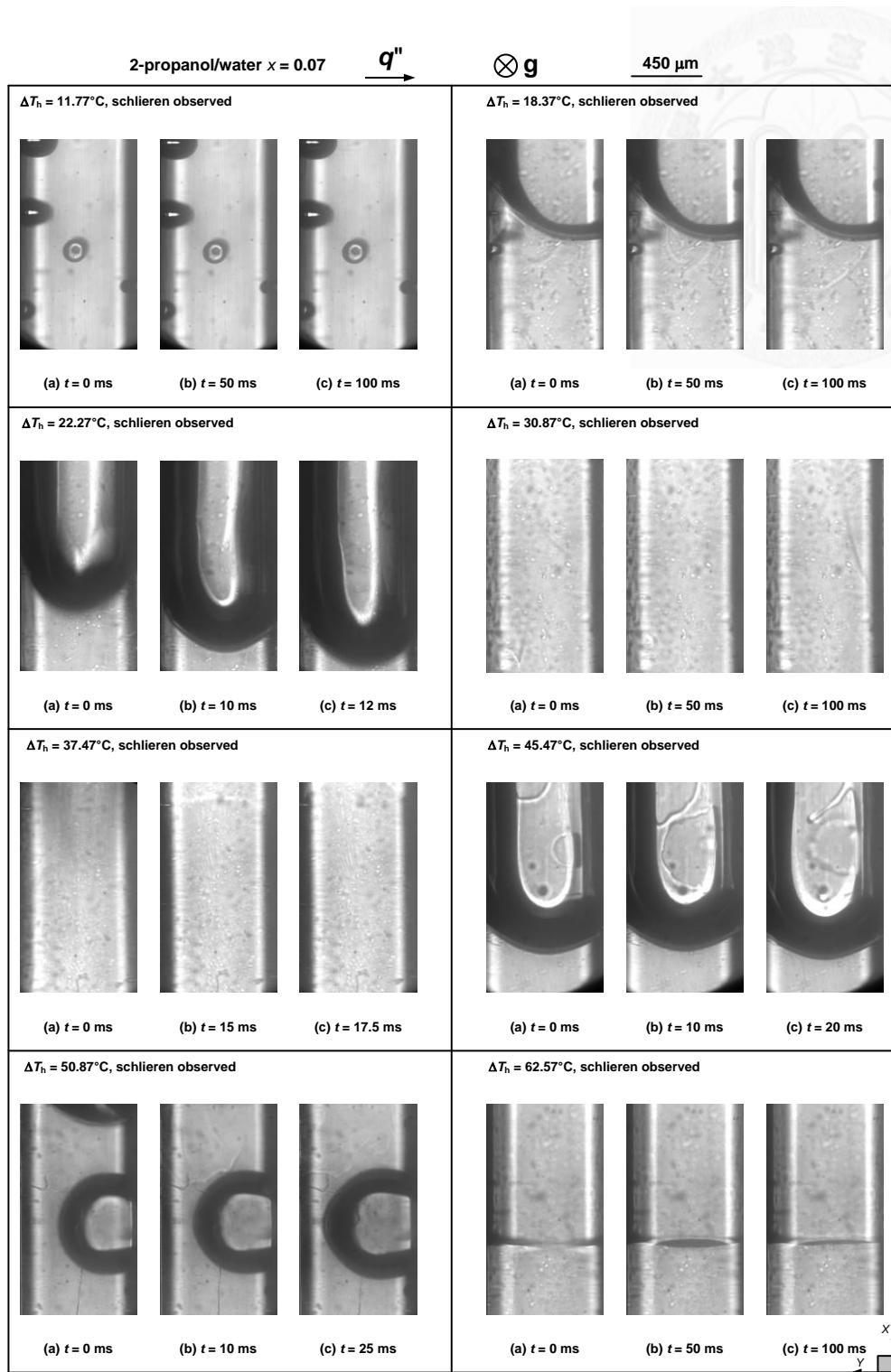


圖 3.27 工作流體為 $x = 0.07$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

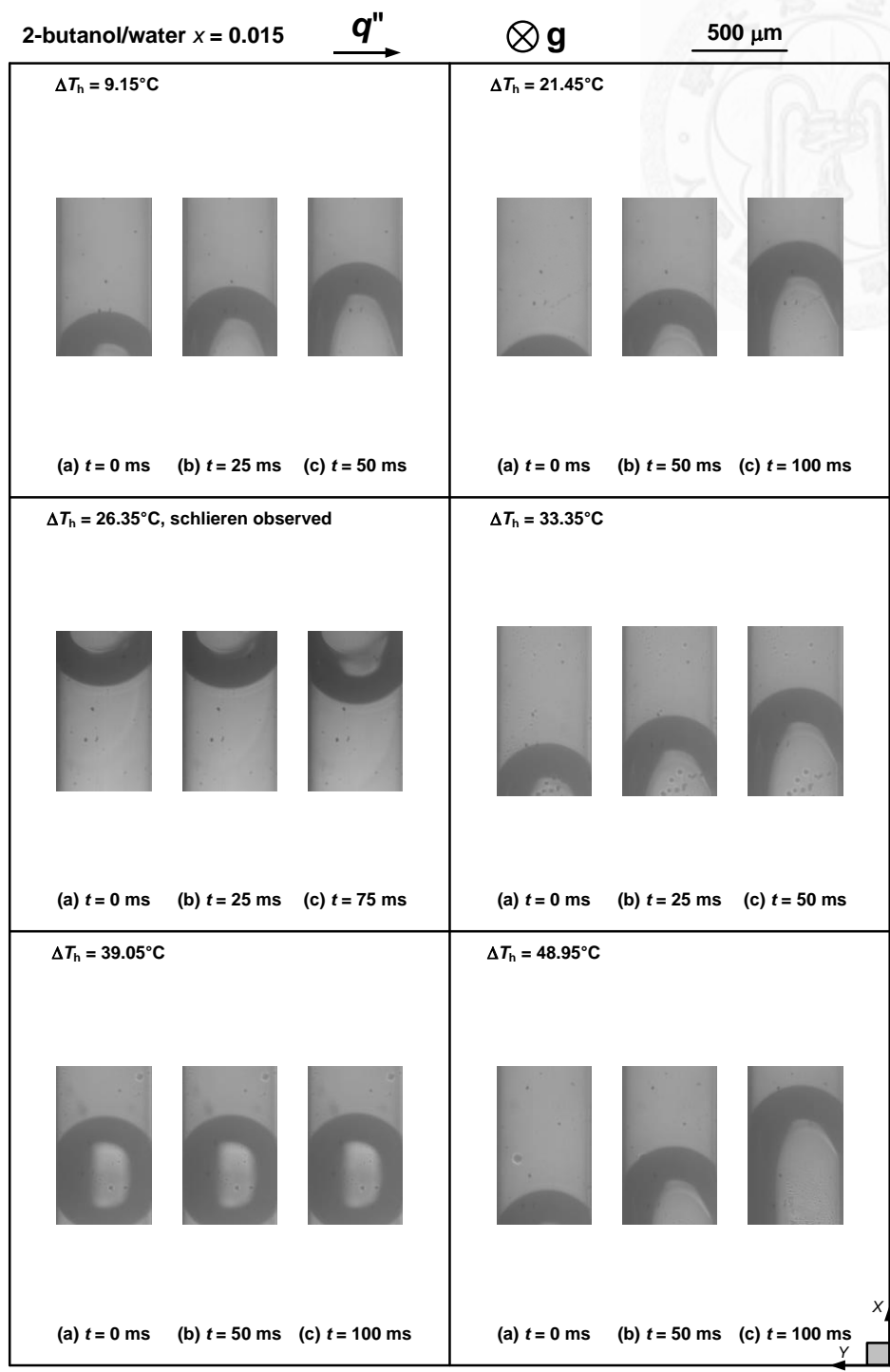


圖 3.28 工作流體為 $x = 0.015$ 之仲丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

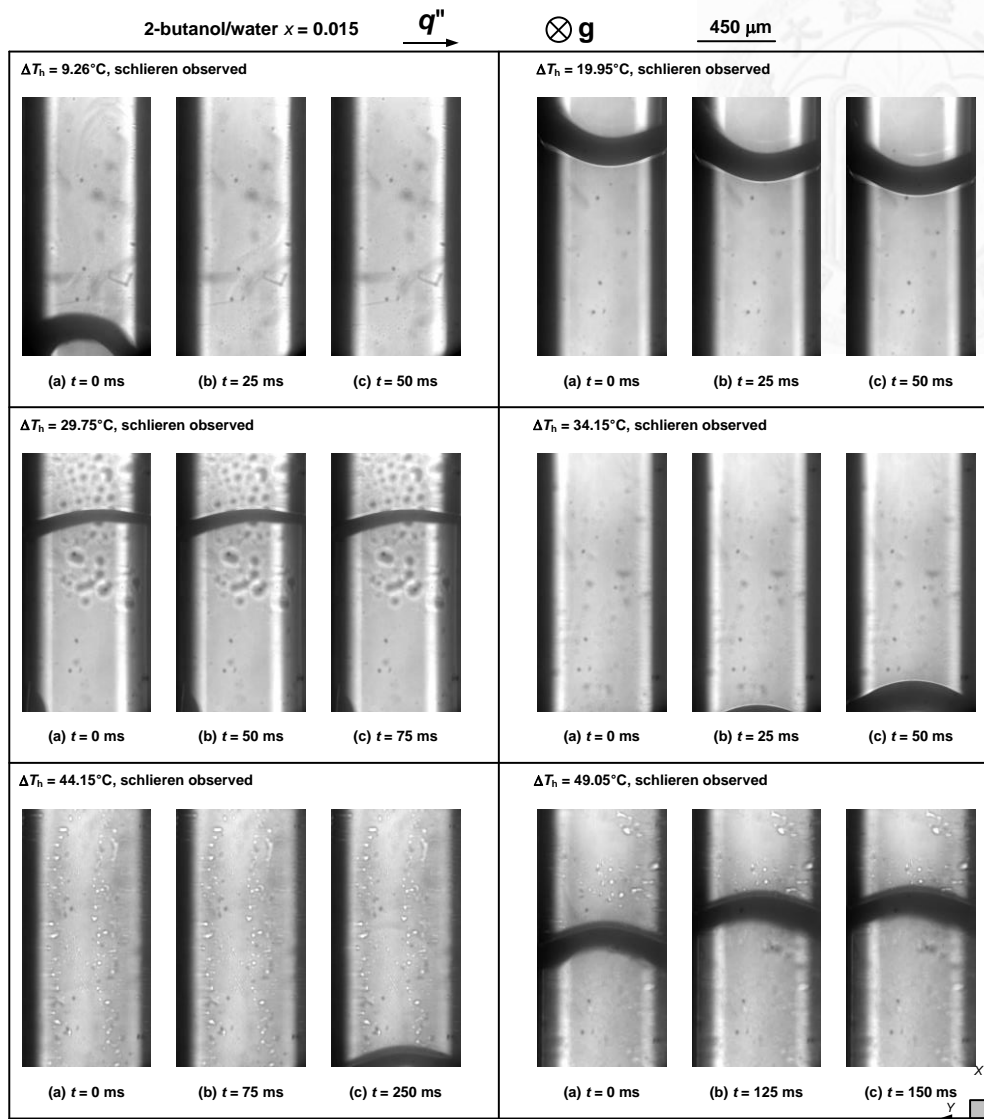


圖 3.29 工作流體為 $x = 0.015$ 之仲丁醇與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

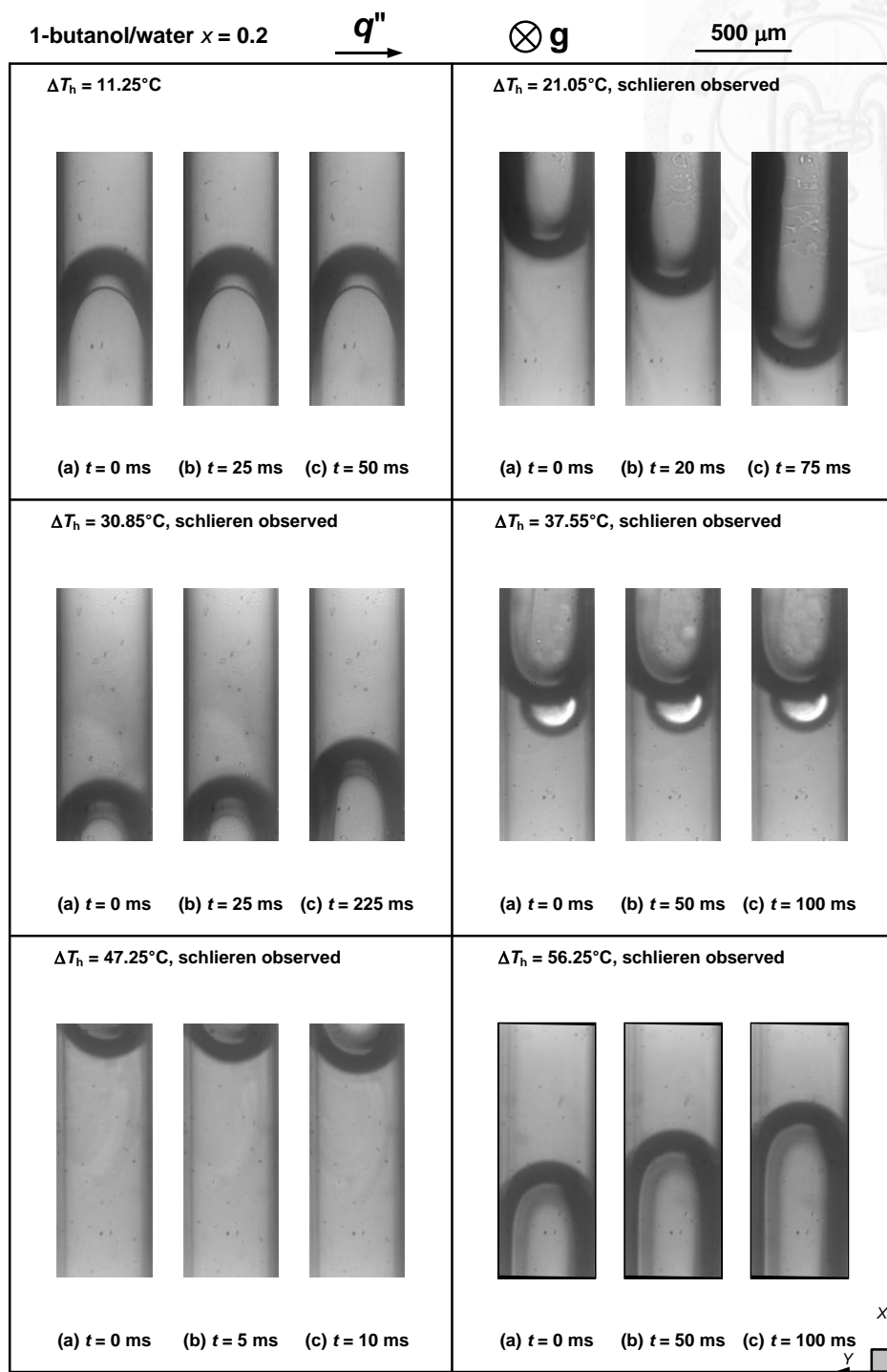


圖 3.30 工作流體為 $x = 0.2$ 之正丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

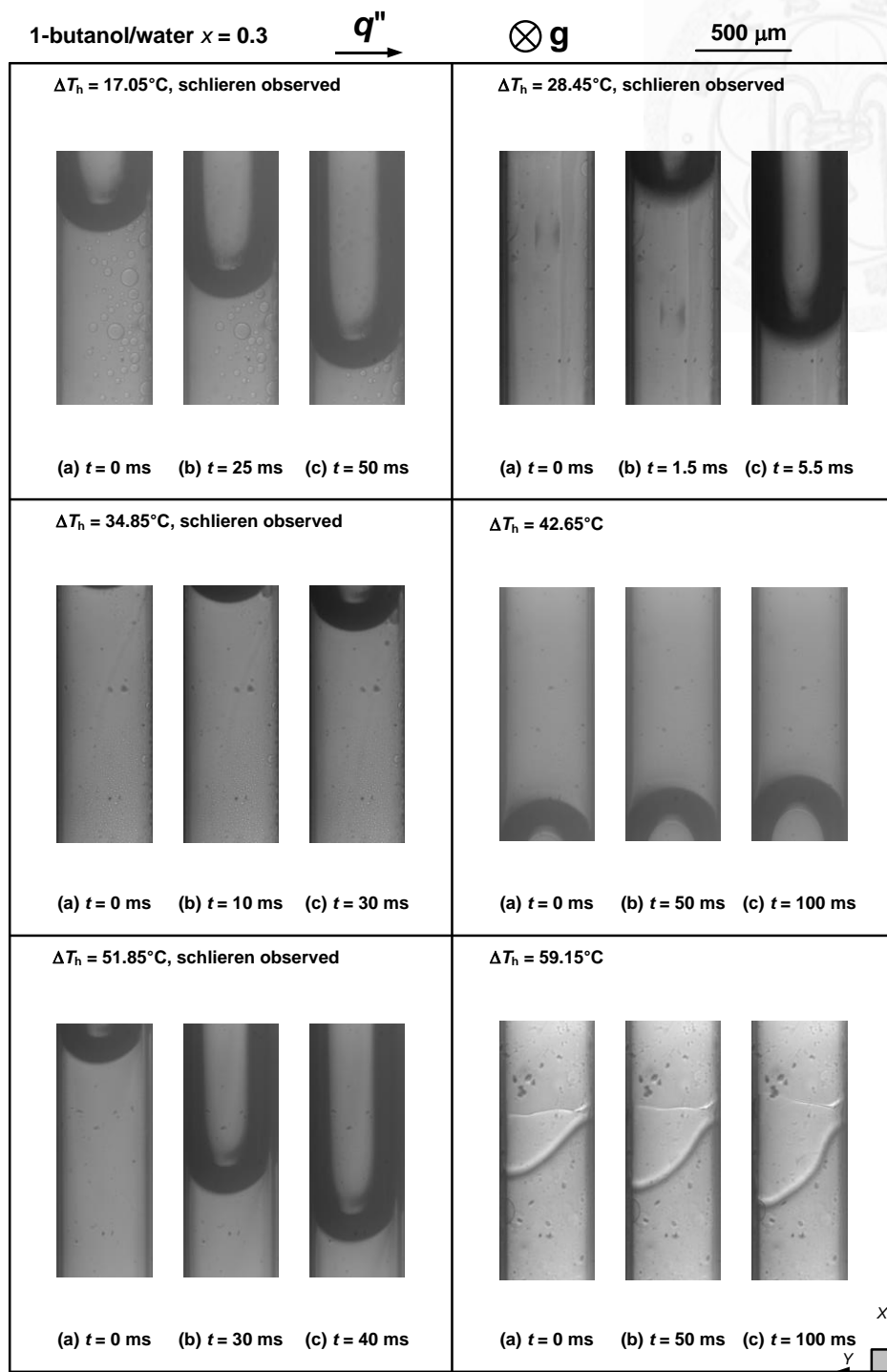


圖 3.31 工作流體為 $x = 0.3$ 之正丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

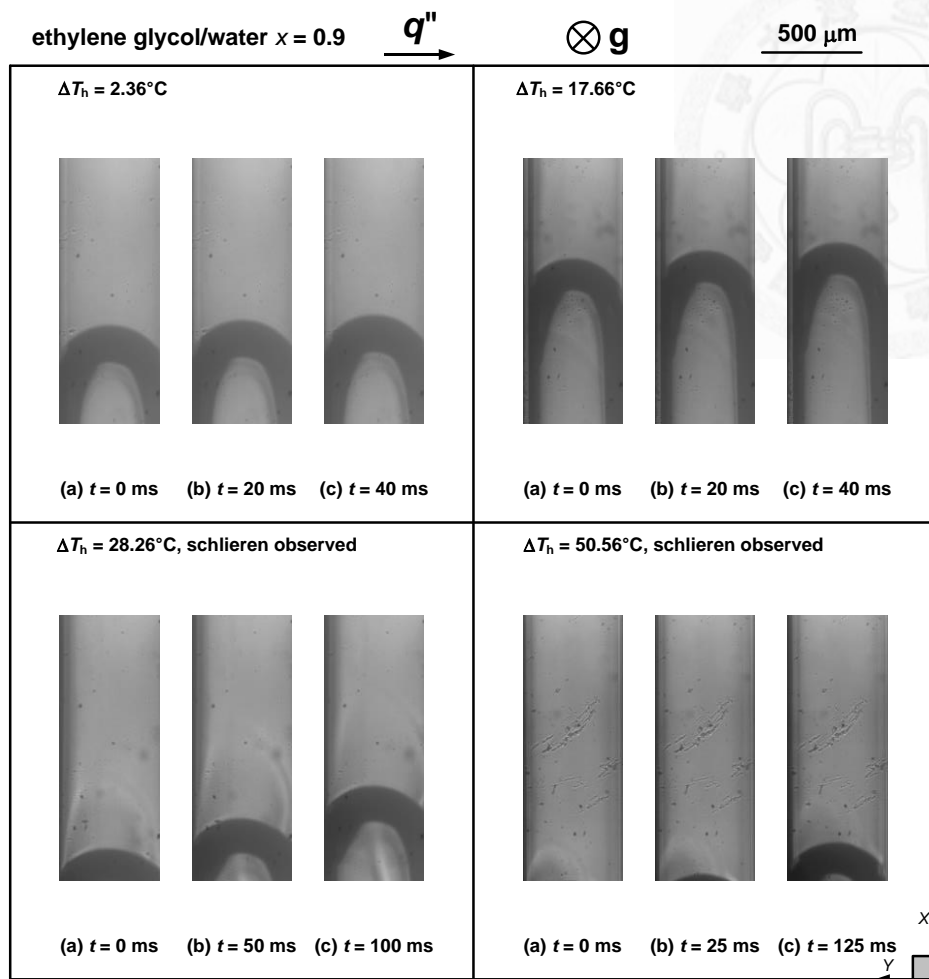


圖 3.32 工作流體為 $x = 0.9$ 之乙二醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

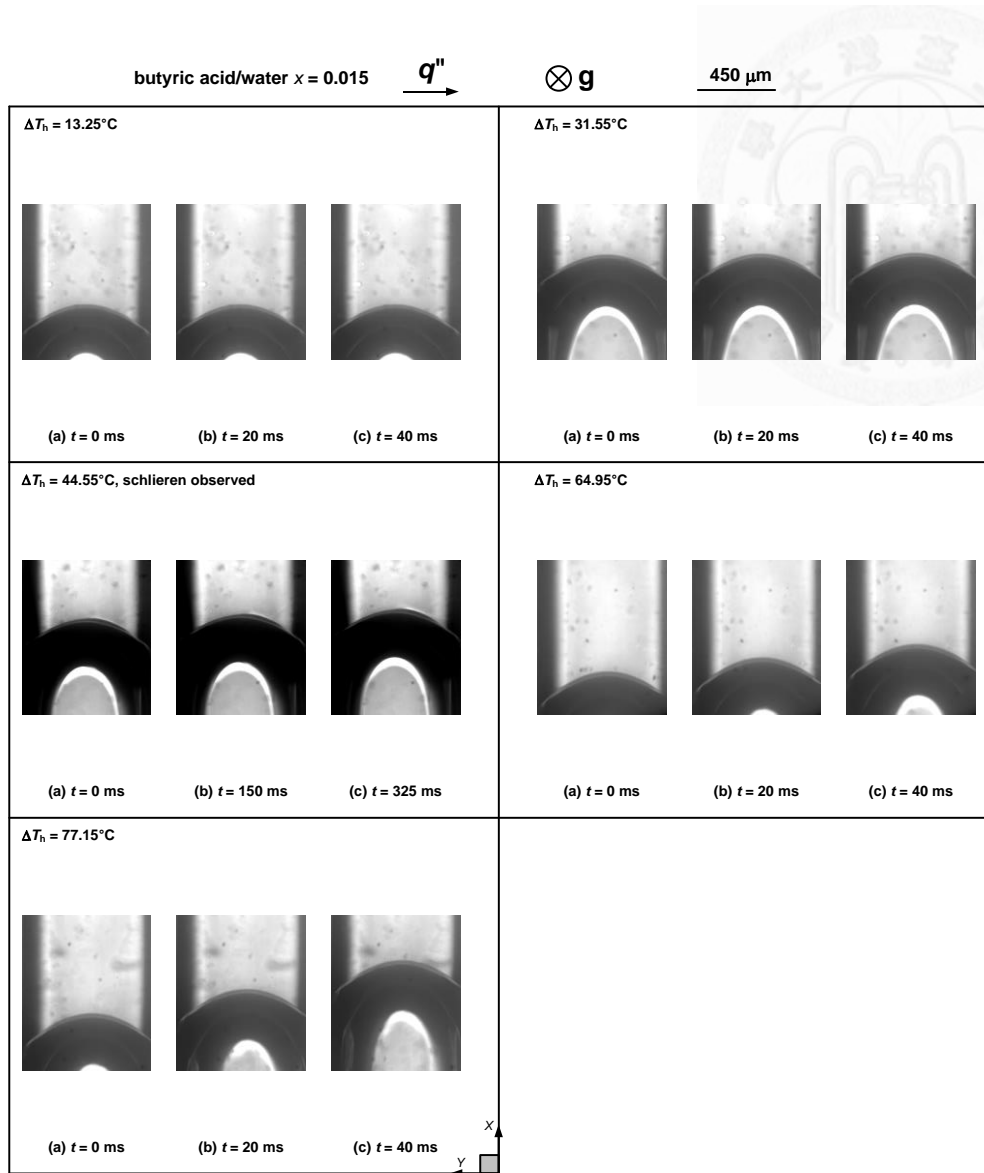


圖 3.33 工作流體為 $x = 0.015$ 之丁酸與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

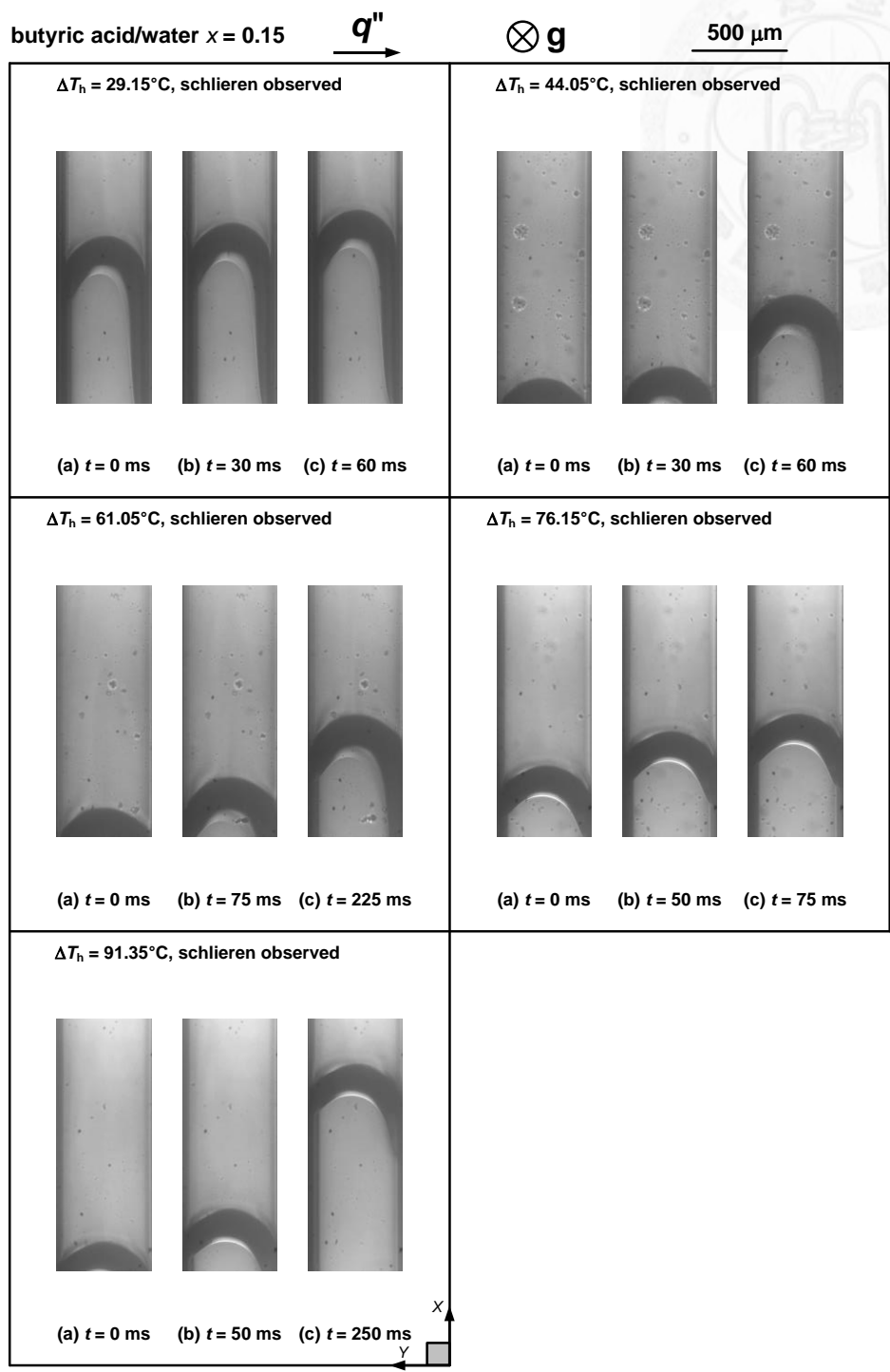


圖 3.34 工作流體為 $x = 0.15$ 之丁酸與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

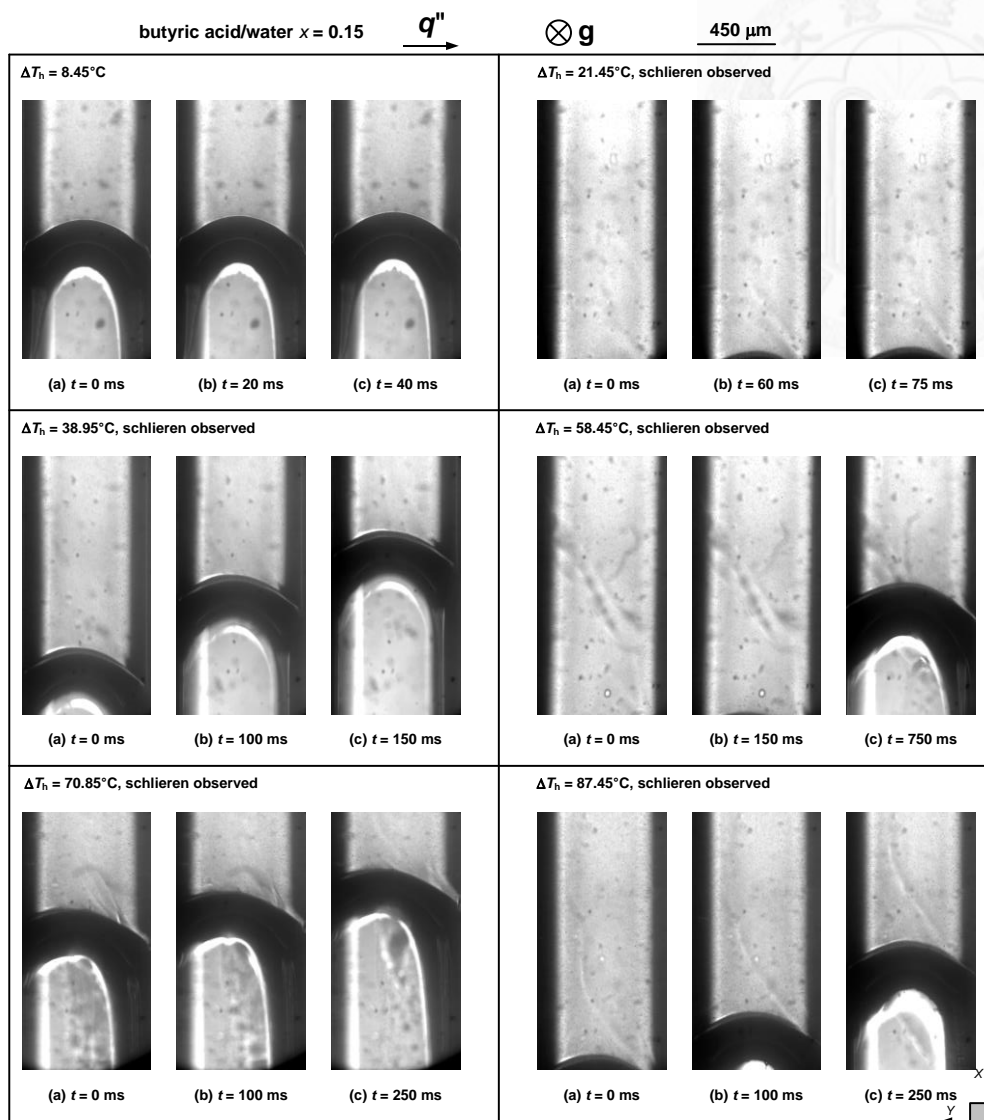


圖 3.35 工作流體為 $x = 0.15$ 之丁酸與水混合物在管徑為 $900 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

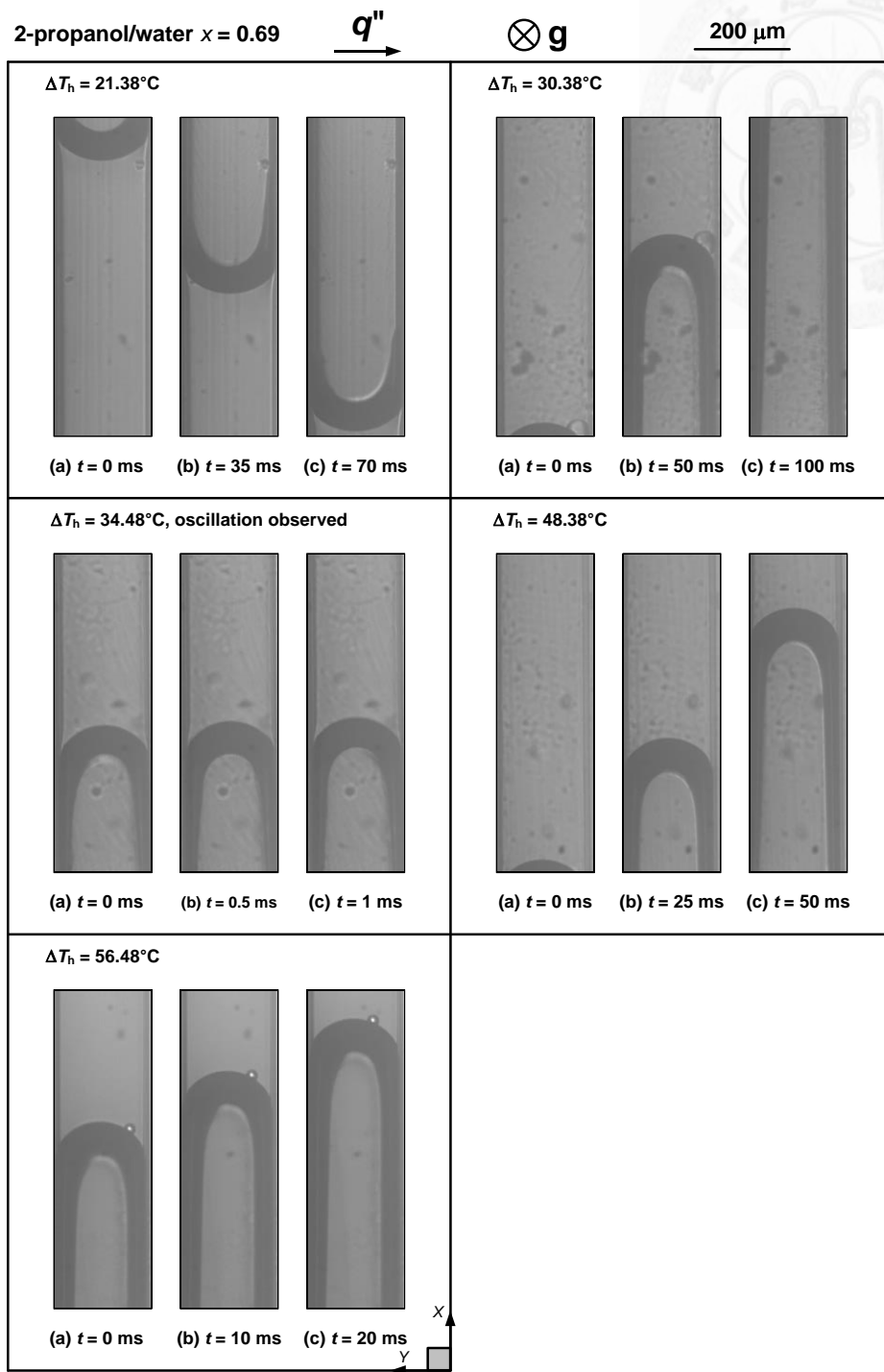


圖 3.36 工作流體為 $x = 0.69$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 200 μm 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

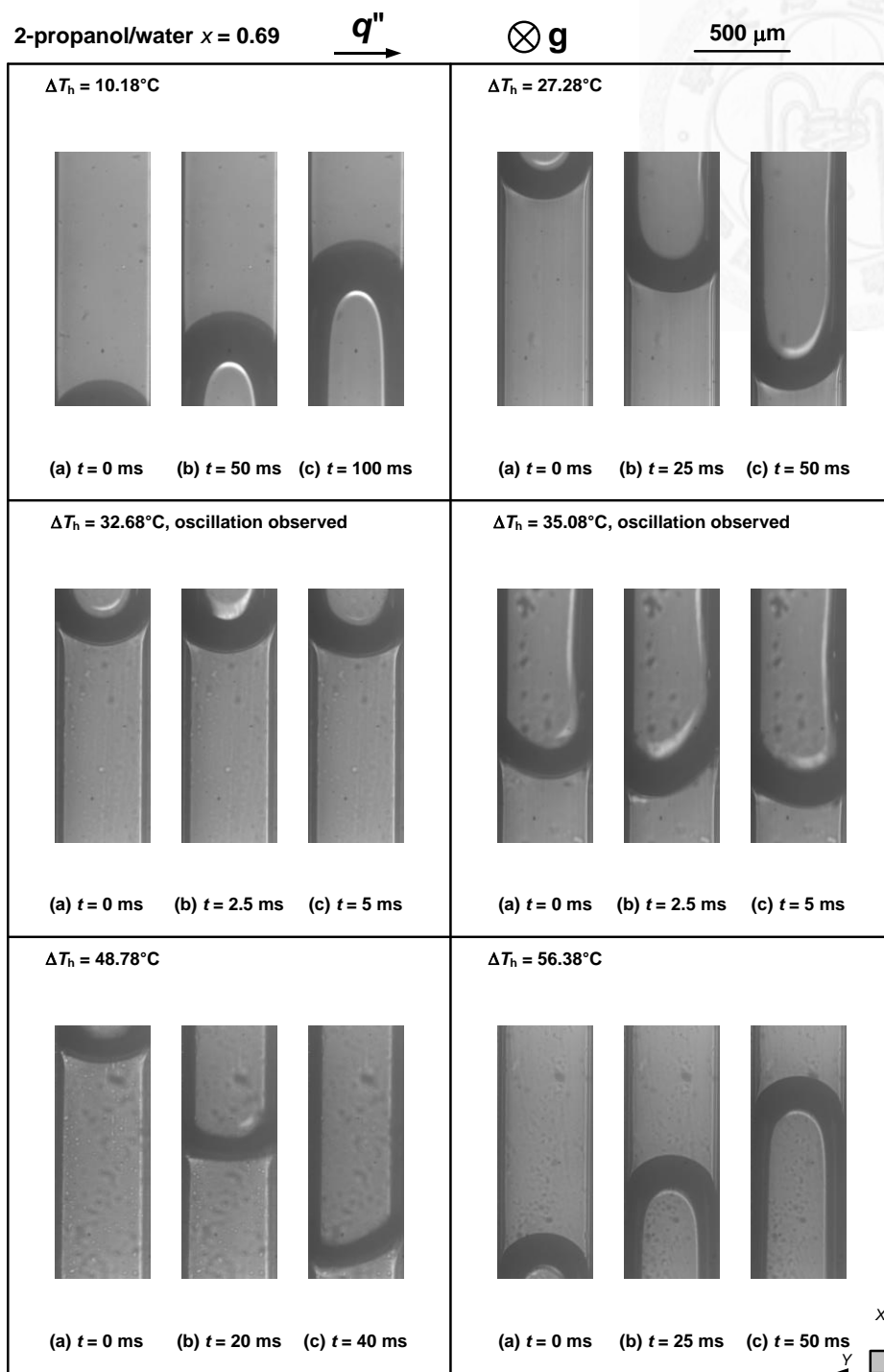


圖 3.37 工作流體為 $x = 0.69$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

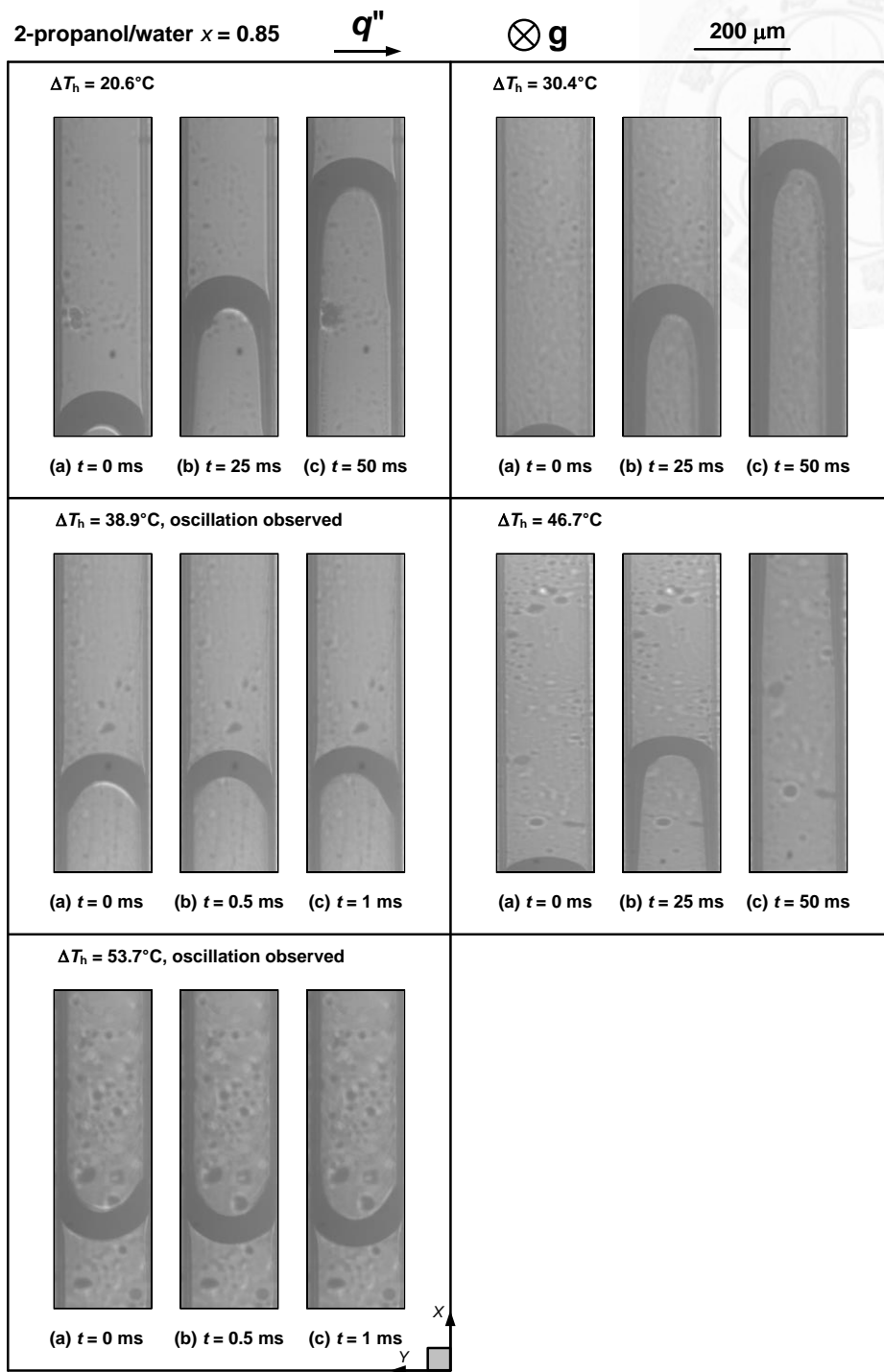


圖 3.38 工作流體為 $x = 0.85$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $200 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

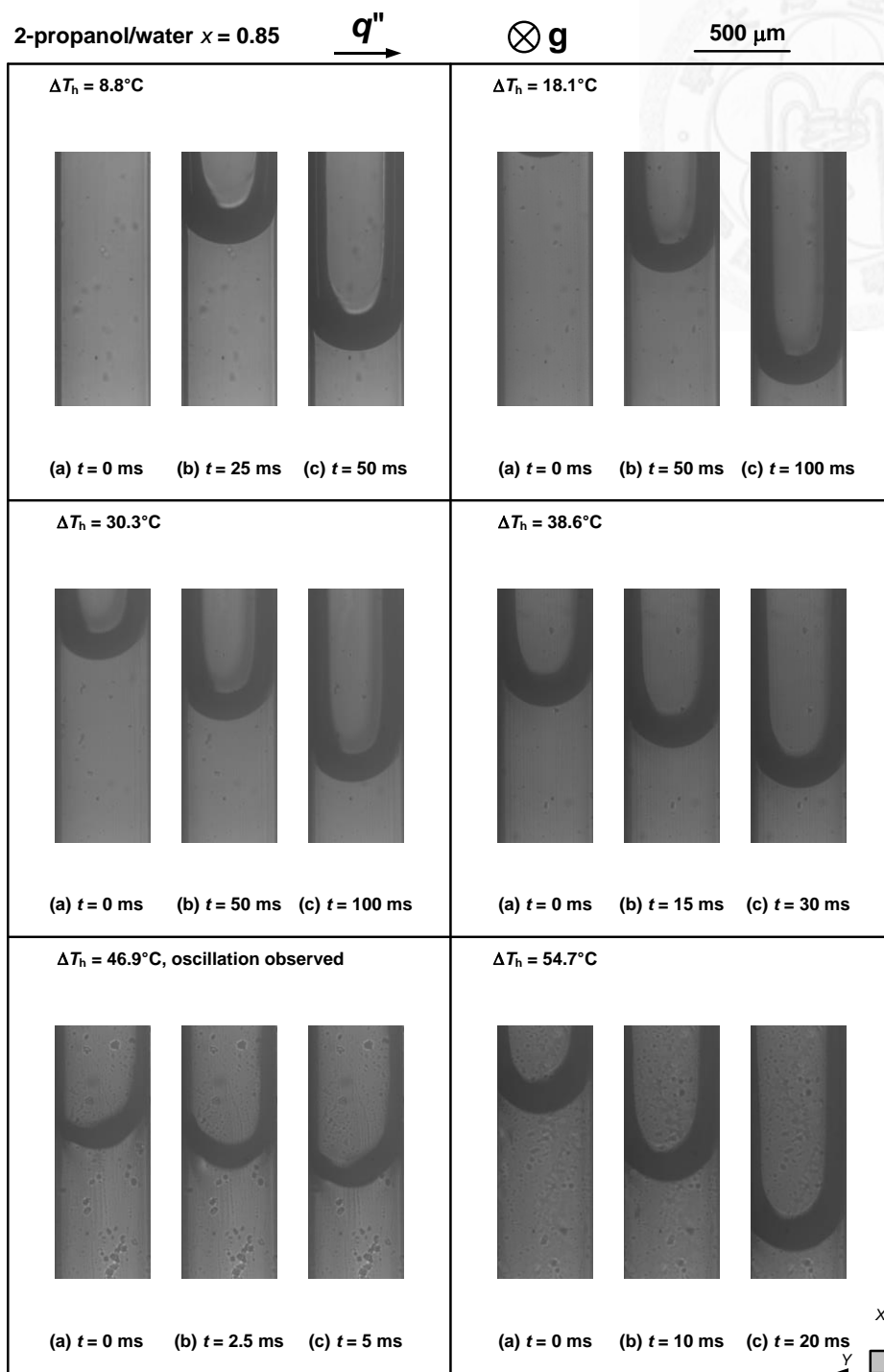


圖 3.39 工作流體為 $x = 0.85$ 之異丙醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

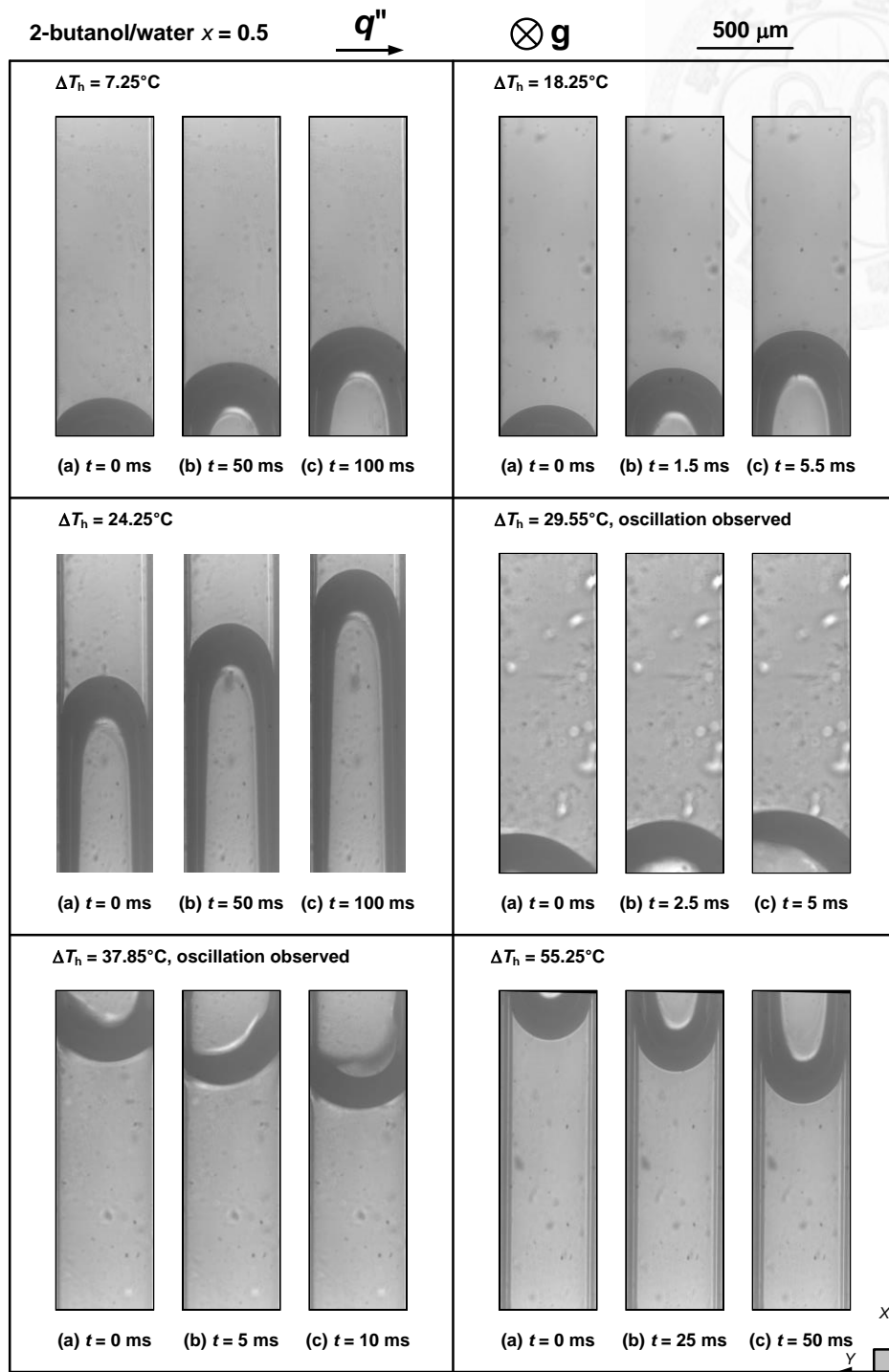


圖 3.40 工作流體為 $x = 0.5$ 之仲丁醇與水混合物在管徑為 $500 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

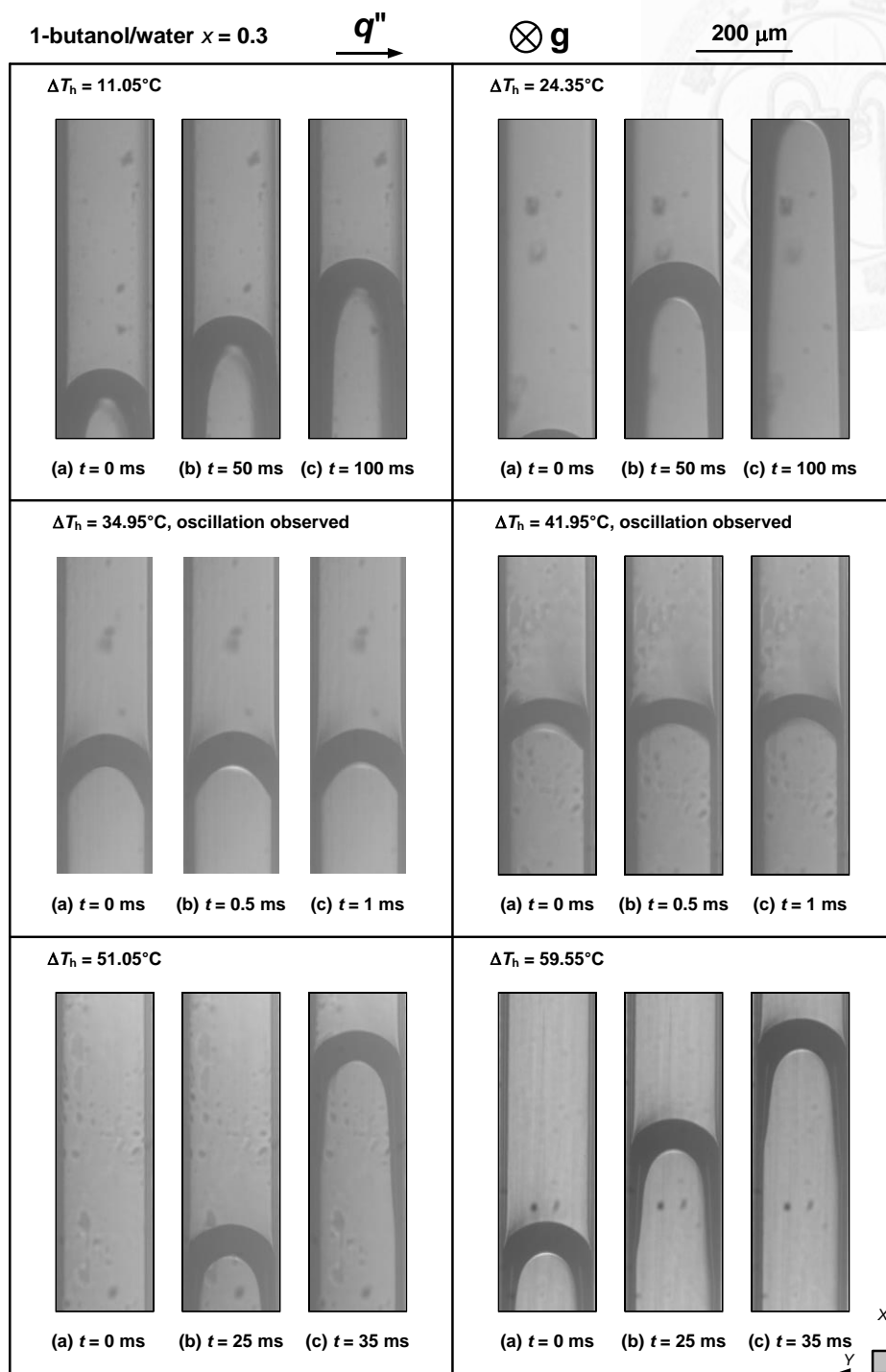


圖 3.41 工作流體為 $x = 0.3$ 之正丁醇與水混合物在管徑為 $200 \mu\text{m}$ 方型毛細管內不同過熱溫度下之流場型態

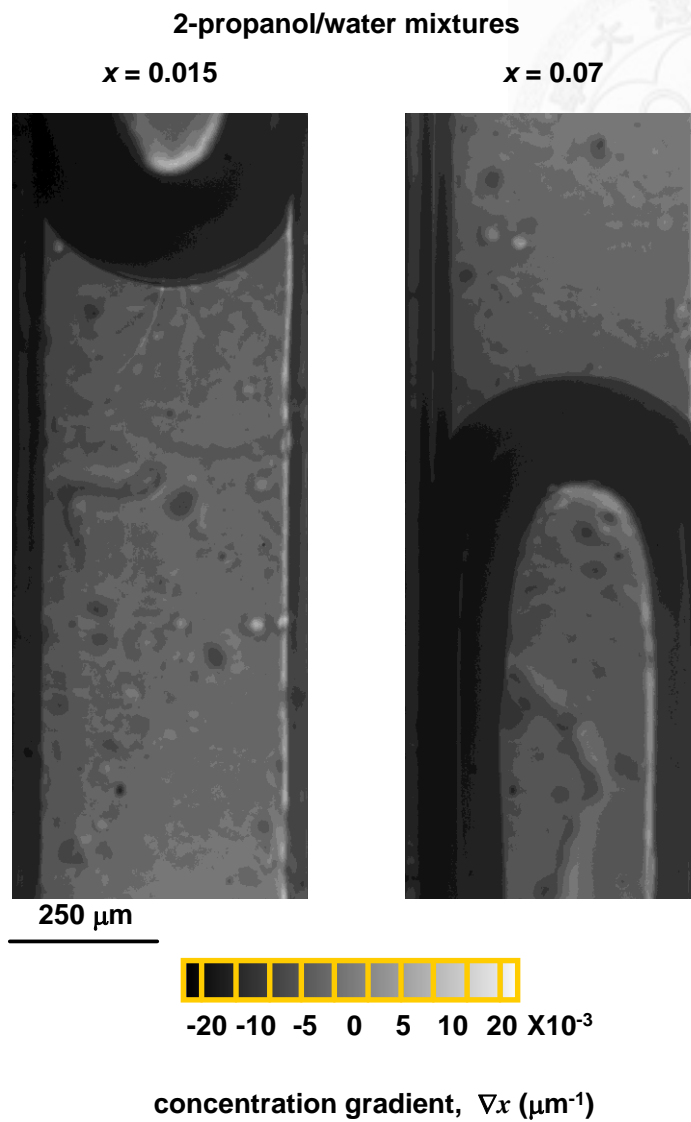
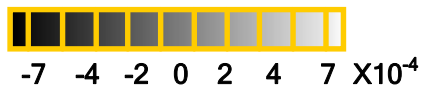


圖 3.42 2-propanol/water 混合系統之濃度梯度量化結果

2-butanol/water mixtures
 $x = 0.015$



250 mm



concentration gradient, $\tilde{N}x (\text{mm}^{-1})$

圖 3.43 2-butanol/water 混合系統之濃度梯度量化結果

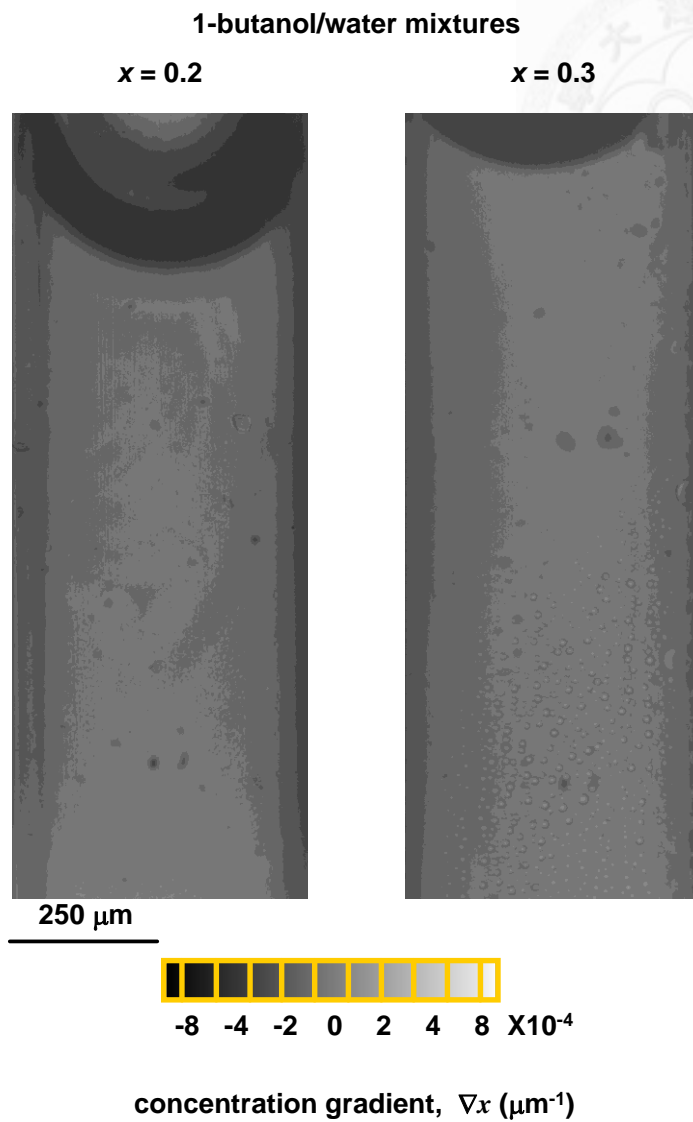
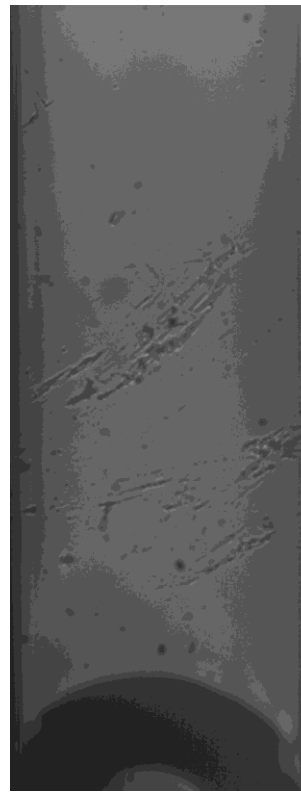


圖 3.44 1-butanol/water 混合系統之濃度梯度量化結果

ethylene glycol/water mixtures

$x = 0.9$



250 μm



-54 -27 -13 0 13 27 54 $\times 10^{-2}$

concentration gradient, ∇w (μm^{-1})

圖 3.45 ethylene glycol/water 混合系統之濃度梯度量化結果

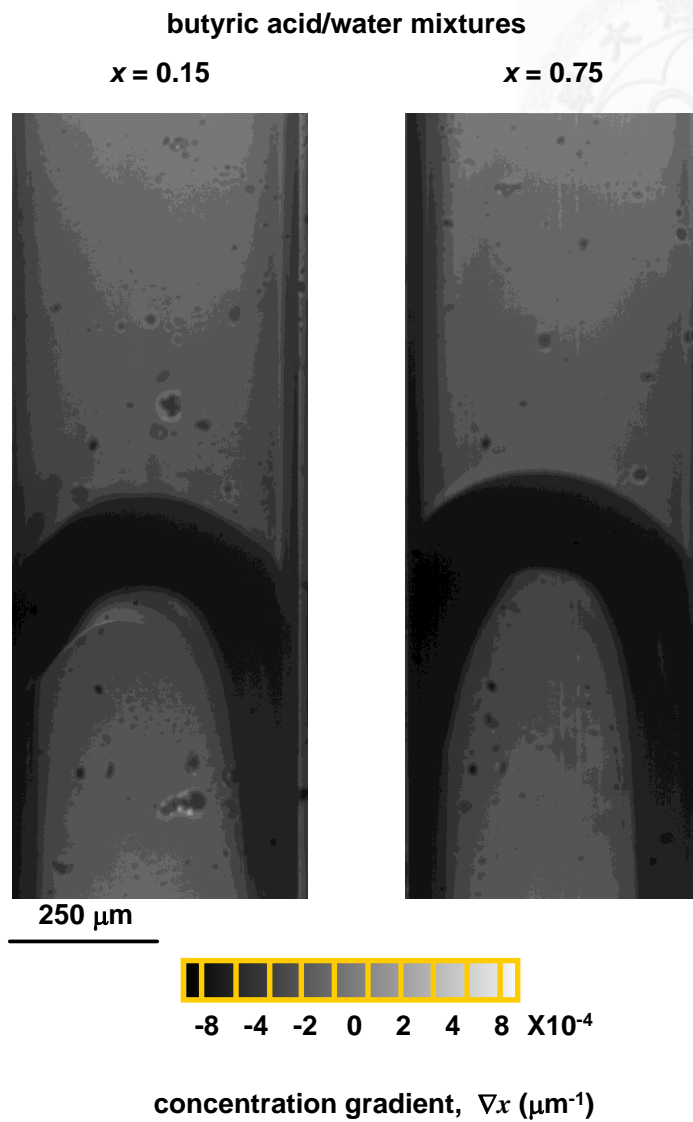


圖 3.46 butyric acid/water 混合系統之濃度梯度量化結果