

國立交通大學

機械工程學研究所

碩士論文

介電液 FC-72 在傾斜矩形流道之流動沸騰實驗研究

Experimental Study of Flow Boiling of FC-72 In an  
Inclined Rectangular Channel



研究生：竹則安

指導教授：盧定昶 博士

中華民國 九十六年六月

介電液 FC-72 在傾斜矩形流道之流動沸騰實驗研究

Experimental Study of Flow Boiling of FC-72 In an Inclined  
Rectangular Channel

研究生：竹則安

Student:Tse-An Chu

指導教授：盧定昶

Advisor:Ding-Chong Lu



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  
June 2007  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年六月

# 介電液 FC-72 在傾斜矩形流道之流動沸騰實驗研究

研究生:竹則安

指導教授:盧定昶博士

國立交通大學 機械工程學系

## 摘要

本論文以實驗方法探討介電液 FC-72 以完全發展流，在雷諾數 500, 1200, 2000，次冷度  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $21^{\circ}\text{C}$ ,  $28^{\circ}\text{C}$  條件下，於加熱銅片朝上，工作流體在渠道水平流動( $0^{\circ}$ )和由下往上流動( $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ )以及加熱銅片朝下，工作流體在渠道由下往上流動( $135^{\circ}$ )之管道方位的沸騰熱傳特性。其中矩形流道之截面積為間隙高度 2mm、寬度 10mm，水力直徑為 3.33mm。



實驗結果發現，在單相熱傳區與部分發展核沸騰區，增加流速與次冷度可降低加熱銅片表面之溫度。在完全發展核沸騰區，流速與次冷度對加熱銅片表面之溫度則逐漸失去影響力。臨界熱通量會隨流速與次冷度的增加而升高。工作流體於渠道水平流動和由下往上流動以及加熱銅片朝上之管道方位，所得到之臨界熱通量近乎相同。至於加熱銅片朝下之管道方位所得到的臨界熱通量則遠小於加熱銅片朝上之管道方位所得到的臨界熱通量。

**關鍵字:**流動沸騰、雷諾數、次冷度、臨界熱通量、流道方位

# Experimental Study of Flow Boiling of FC-72 in an Inclined Rectangular Channel

Student:Tse-An Chu

Advisor:Ding-Chong Lu

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

This thesis describes the experimental investigation of the fully developed flow boiling heat transfer for FC-72 with Reynolds numbers 500,1200,2000 , subcooled temperatures 15°C,21.5°C,28°C,as well as test section orientations of 0° horizontal flow, 45° upflow, 90° upflow with the heated copper block face-up and 135° upflow with the heated copper block face-down. The channel is constructed having a crosssection of 2mm height and 10mm width with a hydraulic diameter of 3.33mm.

The results show that increasing both fluid velocity and subcooled temperature would reduce the wall temperature gradually at the regions of single phase heat transfer and partially developed nucleate boiling. At the region of fully developed nucleate boiling, the influences of both fluid velocity and subcooled temperature are reduced gradually. The critical heat flux (CHF) always increases as the values of flow velocity and subcooled temperature rise. The CHF values of 0°,45°,90° with heated surface upward-facing orientations are almost the same. However, the CHF values for upflow with heated surface downward-facing are much smaller than those for upflow with heated surface upward-facing.

**Keyword: flow boiling, Reynolds number, subcooled, critical heat flux, flow orientations**

## 致謝

本論文能順利完成，由衷感謝指導教授盧定昶博士對我的細心指導與照顧，老師的循循善誘讓我在學業與生活上都獲益良多。也感謝口試委員-中央大學機械系的楊建裕博士與台北科技大學冷凍空調工程系的簡良翰博士能撥冗前來，給予本論文指導與建議，使本論文內容能更趨完善。

此外也感謝在我求學生涯中指導過我的老師們，因為你們無私的教導，使我在學習過程中得到無窮的樂趣與成長。感謝大學專題指導教授-許文震博士與王啟川博士，你們的教導使我在大學生涯學習到了做實驗的嚴謹態度。感謝實驗室的中彥學長與淵元學長對於本次實驗對我的指導與建議，以及智敏學長、聖良學長、克敏學長、丘川同學在研究生涯的陪伴與鼓勵。感謝我的好友伯符、春誠、象天、馥馨，每個閒暇午後的交談，都將是我學生時期寶貴的回憶。感謝姿慧的付出，妳的微笑總帶給我動力與歡愉。

特別感謝我的家人給予我的支持與鼓勵，使我在求學的生涯能無後顧之憂。學生的旅程即將告一段落，謹以此論文獻給所有曾經幫助過我的人。

竹則安謹誌於風城交大

# 目錄

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 中文摘要.....                      | I    |
| 英文摘要.....                      | II   |
| 致謝.....                        | III  |
| 目錄.....                        | IV   |
| 表目錄.....                       | VIII |
| 圖目錄.....                       | IX   |
| 符號說明.....                      | XIX  |
| <b>第一章 緒論</b> .....            | 1    |
| 1-1 研究背景與目的.....               | 1    |
| 1-2 文獻回顧.....                  | 3    |
| 1-2-1 單相強制對流熱傳分析.....          | 3    |
| 1-2-2 流動沸騰熱傳分析.....            | 4    |
| 1-2-3 氣泡特性與流道方位對流動沸騰熱傳的影響..... | 7    |
| <b>第二章 實驗系統與參數計算</b> .....     | 23   |
| 2-1 實驗設備.....                  | 23   |
| 2-1-1 流體循環系統.....              | 23   |
| 2-1-2 測試段.....                 | 24   |
| 2-1-3 流道托架與流道方位擺置.....         | 25   |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 2-1-4 模擬加熱晶片.....         | 25 |
| 2-1-5 預熱循環系統.....         | 26 |
| 2-1-6 冷卻循環系統.....         | 26 |
| 2-1-7 數據擷取系統.....         | 26 |
| 2-1-8 量測儀器.....           | 27 |
| 2-1-9 輔助系統.....           | 27 |
| 2-1-10 影像擷取系統.....        | 28 |
| 2-2 實驗方法及步驟.....          | 29 |
| 2-2-1 實驗前準備工作.....        | 29 |
| 2-2-2 實驗量測與流譜拍攝步驟.....    | 30 |
| 2-3 實驗參數計算.....           | 31 |
| 2-3-1 工作壓力.....           | 31 |
| 2-3-2 次冷度的計算與飽和狀態的判定..... | 32 |
| 2-3-3 熱損估算.....           | 32 |
| 2-3-4 熱通量.....            | 33 |
| 2-3-5 加熱塊表面溫度.....        | 34 |
| 2-3-6 熱傳導係數.....          | 34 |
| 2-3-7 水力發展長度.....         | 35 |
| 2-3-8 不準度分析.....          | 35 |

|  |    |
|--|----|
| 第三章 結果討論與分析.....   | 50 |
| 3-1 熱損實驗.....  | 48 |
| 3-2 重複度實驗.....   | 49 |
| 3-3 遲滯現象.....  | 50 |
| 3-4 狹窄矩形流道平滑加熱面之沸騰曲線探討.....  | 50 |
| 3-5 氣泡成長流譜之探討.....   | 51 |
| 3-6 流速在傾斜流道方位( $45^\circ$ )中對於沸騰曲線的影響.....   | 53 |
| 3-7 次冷度在傾斜流道方位( $45^\circ$ )中對於沸騰曲線的影響.....  | 56 |
| 3-8 傾斜流道方位( $45^\circ$ )中各種實驗情況下臨界熱通量之比較.....  | 59 |
| 3-9 流道方位於傾斜( $45^\circ$ )、水平( $0^\circ$ )、垂直( $90^\circ$ )中對於沸騰曲線<br>的影響.....                | 59 |
| 3-10 在傾斜流道中加熱銅片朝上(Face-up)( $45^\circ$ )與加熱銅片朝下<br>(Face-down )( $135^\circ$ )對於沸騰曲線的影響..... | 61 |
| 3-11 各流道方位角度( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ )之臨界熱通量(CHF)比較.                       | 62 |
| 3-12 臨界熱通量(CHF)之經驗式與預測值.....   | 63 |
| 3-13 傾斜流道方位( $45^\circ$ )中沸騰曲線與文獻比較和熱傳經驗式...   | 65 |
| 3-14 以紐賽數(Nu)變化係數(C.V.:Nusselt number coefficient<br>of variation)探討流道方位對於熱傳係數之影響.....       | 67 |



|                |     |
|----------------|-----|
| 第四章 結論與展望..... | 104 |
| 4-1 結論.....    | 104 |
| 4-2 展望與建議..... | 107 |
| 參考文獻.....      | 109 |
| 附錄一 不準度分析..... | 112 |



## 表目錄

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 表 1-1 介電液 FC-72 於一大氣壓之物理性質..... | 15 |
| 表 2-1 水力發展長度表.....              | 36 |
| 表 2-2 不準度分析.....                | 37 |



## 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 1-1 次冷態沸騰之四個區域.....                                | 16 |
| 圖 1-2 液體沸騰起始之遲滯現象.....                               | 16 |
| 圖 1-3 流道方位示意圖.....                                   | 17 |
| 圖 1-4 Zhang、Mudawar 和 Hasan[13]實驗中流動方位示意圖.....       | 18 |
| 圖 1-5 高次冷度低流速條件下氣泡流譜.....                            | 19 |
| 圖 1-6 高次冷度高流速條件下氣泡流譜圖.....                           | 19 |
| 圖 1-7 在近飽和狀態低流速條件下氣泡流譜圖.....                         | 20 |
| 圖 1-8 在近飽和狀態高流速條件下氣泡流譜圖.....                         | 20 |
| 圖 1-9 在近飽和狀態各種流速情形下所觀測到的臨界熱通量....                    | 21 |
| 圖 1-10 Bower、Klausner[15]之重力影響判別經驗式圖.....            | 22 |
| 圖 1-11 Bower、Klausner[15]之實驗數據與重力影響判別經驗式<br>比較圖..... | 22 |
| 圖 2-1 實驗設備環路示意圖.....                                 | 38 |
| 圖 2-2 測試段組合圖.....                                    | 39 |
| 圖 2-3 測試段流道尺寸圖.....                                  | 40 |
| 圖 2-4 測試流道中加熱晶片部位之示意圖(單位 mm).....                    | 41 |
| 圖 2-5 銅塊中熱電偶埋置的位置圖.....                              | 42 |
| 圖 2-6 測試段流道拖架設計圖.....                                | 43 |

|   |       |
|---|-------|
| 圖 2-7 流道方位設計示意圖(a)水平(b)45°(c)垂直.....  | 44-45 |
| 圖 2-8 流道方位示意圖.....  | 45    |
| 圖 2-9 平滑表面測試模擬晶片.....   | 46    |
| 圖 2-10 鐵氟龍內熱電偶埋設圖.....  | 47    |
| 圖 3-1 流道方位 0°, $\Delta T_{sub}$ :28°C, Re:2000 之熱損失百分比圖.....  | 70    |
| 圖 3-2 流道方位 45°, $\Delta T_{sub}$ :28°C, Re:2000 之重複度實驗沸騰曲線<br>圖.....  | 70    |
| 圖 3-3 流道方位 45°, $\Delta T_{sub}$ :28°C, Re:2000 之遲滯效應.....  | 70    |
| 圖 3-4 流道方位 45°之沸騰曲線圖與各階段之熱傳機制(1atm, $\Delta T_{sub}$ :28, Re=2000).....   | 71    |
| 圖 3-5 流道方位 45°, $\Delta T_{sub}$ :28°C, Re=2000 情況下之氣泡發展流<br>譜圖.....  | 72    |
| 圖 3-6 流道方位 45°, $\Delta T_{sub}$ :28°C, Re=2000 情況下之氣泡發展流<br>譜圖於沸騰曲線之對應圖.....   | 73    |
| 圖 3-7 氣泡成長過程圖 (a)Heindel (b) Present Work (圖中黑<br>色區塊為生成氣泡) .....   | 74    |
| 圖 3-8 流道方位 45°, 次冷度 $\Delta T_{sub}$ :28°C (a), 21.5°C (b), 15°C (c)<br>情況下, 不同 Re 之沸騰曲線圖(Re 於單相熱傳區對於晶片<br>壁溫之影響) ..... | 75    |

|   |    |
|---|----|
| 圖 3-9 流道方位 $45^\circ$ , $\Delta T_{sub}$ : $28^\circ\text{C}$ (a), $21.5^\circ\text{C}$ (b), $15^\circ\text{C}$ (c) 情況下，不同 Re 之沸騰曲線圖 (Re 對於 CHF 之影響)..... | 76 |
| 圖 3-10 流道方位 $45^\circ$ , $\Delta T_{sub}$ : $28^\circ\text{C}$ (a), $21.5^\circ\text{C}$ (b), $15^\circ\text{C}$ (c) 情況下，不同 Re 之熱傳係數圖.....                | 77 |
| 圖 3-11(a) 流道方位 $45^\circ$ , 次冷度 $\Delta T_{sub}$ : $28^\circ\text{C}$ 情況下，不同雷諾數之流譜圖.....  | 77 |
| 圖 3-11(b) 流道方位 $45^\circ$ , 次冷度 $\Delta T_{sub}$ : $21.5^\circ\text{C}$ 情況下，不同雷諾數之流譜圖.....  | 79 |
| 圖 3-11(c) 流道方位 $45^\circ$ , 次冷度 $\Delta T_{sub}$ : $15^\circ\text{C}$ 情況下，不同雷諾數之流譜圖.....  | 80 |
| 圖 3-12 流道方位 $45^\circ$ , Re: 2000(a), 1200(b), 500(c) 情況下，不同 $\Delta T_{sub}$ 之沸騰曲線圖 ( $\Delta T_{sub}$ 於單相熱傳區對於晶片壁溫之影響) .....                            | 81 |
| 圖 3-13 流道方位 $45^\circ$ , Re: 2000(a), 1200(b), 500(c) 情況下，不同 $\Delta T_{sub}$ 之沸騰曲線圖 ( $\Delta T_{sub}$ 對於 CHF 之影響) .....                                 | 82 |
| 圖 3-14 流道方位 $45^\circ$ , Re: 2000(a), 1200(b), 500(c) 情況下，不同 $\Delta T_{sub}$ 之熱傳係數圖.....   | 83 |
| 圖 3-15(a) 流道方位 $45^\circ$ , Re=2000 情況下，不同次冷度之流譜....  | 84 |
| 圖 3-15(b) 流道方位 $45^\circ$ , Re=1200 情況下，不同次冷度之流譜圖....   | 85 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 3-15(c) 流道方位 $45^\circ$ , $Re=500$ 情況下, 不同次冷度之流譜圖...   | 86 |
| 圖 3-16 流道方位 $45^\circ$ 於各次冷度和雷諾數之臨界熱通量比較.....  | 87 |
| 圖 3-17 流道方位於 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , $\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ 情況下,<br>Re:2000(a), 1200(b), 500(c)之沸騰曲線圖..... | 88 |
| 圖 3-18 流道方位於 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , $\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ 情況下,<br>Re:2000(a), 1200(b), 500(c)之熱傳係數圖..... | 90 |
| 圖 3-19(a) 流道方位於 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , 次冷度 $\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ , $Re=2000$<br>情況下之流譜圖.....             | 90 |
| 圖 3-19(b) 流道方位於 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 次冷度 $\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ , $Re=1200$<br>情況下之流譜圖.....               | 91 |
| 圖 3-19(c) 流道方位於 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , 次冷度 $\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ , $Re=500$<br>情況下之流譜圖.....              | 92 |
| 圖 3-20 傾斜角度加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於 $\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ 下<br>, $Re: 2000(a), 1200(b), 500(c)$ 之沸騰曲線圖.....                 | 93 |
| 圖 3-21(a) 傾斜流道方位加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於<br>$\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ , $Re=2000$ 情況下之流譜圖.....                                  | 94 |
| 圖 3-21(b) 傾斜流道方位加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於<br>$\Delta T_{sub}: 28^\circ C$ , $Re=1200$ 情況下之流譜圖.....                                  | 95 |
| 圖 3-21(c) 傾斜流道方位加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於   |    |

|  |     |
|--|-----|
| $\Delta T_{\text{sub}} : 28^{\circ}\text{C}, \text{Re}=500$ 情況下之流譜圖.....   | 96  |
| 圖 3-22 各流道方位角度於不同次冷度( $\Delta T_{\text{sub}} : 28^{\circ}\text{C}$ (a), 21.5(b)<br>, $15^{\circ}\text{C}$ (c))情況下和不同雷諾數之臨界熱通量比較圖.....                    | 97  |
| 圖 3-23 不同流道方位之 CHF 在不同次冷度與流速的情況下與<br>文獻比較.....   | 98  |
| 圖 3-24 流道方位 $45^{\circ}$ , 於 $\Delta T_{\text{sub}} : 28^{\circ}\text{C}$ , 不同雷諾數之 CHF 與<br>文獻 correlations 比較.....                                      | 99  |
| 圖 3-25 流道方位 $45^{\circ}$ CHF 之實驗值與預測值之誤差比較圖.....   | 100 |
| 圖 3-26 實驗沸騰曲線與文獻比較.....  | 101 |
| 圖 3-27 流道方位 $45^{\circ}$ , 熱傳係數(h)與預測值之誤差圖.....  | 102 |
| 圖 3-28 流道方位 $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$ 和 $45^{\circ}, 135^{\circ}$ 兩組實驗之<br>紐賽數(Nu)變化係數(Coefficient of Variation)在<br>不同雷諾數(Re)於臨界熱通量時之比較圖..... | 103 |

## Nomenclature

---

|           |           |                 |
|-----------|-----------|-----------------|
| A         | 加熱面之熱傳面積  | $m^2$           |
| $A_c$     | 流道之截面積    | $m^2$           |
| C         | 常數        |                 |
| CHF       | 臨界熱通量     | $W/m^2$         |
| $C_{p,f}$ | 液體比熱      | $J/kg^\circ C$  |
| $D_b$     | 氣泡直徑      | mm              |
| $D_h$     | 水力直徑      | mm              |
| G         | 質通量       | $kg/m^2 s$      |
| g         | 重力加速度     | $m/s^2$         |
| h         | 熱傳係數      | $W/m^2^\circ C$ |
| I         | 電源器所測量之電流 | A               |
| K         | 熱傳導係數     | $W/m^\circ C$   |
| L         | 測試段長度     | mm              |
| $L_h$     | 水力發展長度    | mm              |
| P         | 系統壓力      | kpa             |
| Q         | 熱通率       | W               |
| $q''$     | 熱通量       | $W/m^2$         |
| T         | 溫度        | $^\circ C$      |





|           |             |                    |
|-----------|-------------|--------------------|
| $T_{sat}$ | FC-72 飽和溫度  | $^{\circ}\text{C}$ |
| $T_{sub}$ | FC-72 次冷度   | $^{\circ}\text{C}$ |
| $T_{in}$  | 流道進口溫度      | $^{\circ}\text{C}$ |
| $t$       | 熱電偶至晶片表面之距離 | mm                 |
| $U$       | 流道內平均速度     | $m/s$              |
| $V$       | 電源供應器所量測之電壓 | V                  |

### Greek symbols

|           |        |                   |
|-----------|--------|-------------------|
| $\theta$  | 流道方位角度 | $^{\circ}$        |
| $\lambda$ | 波長     | mm                |
| $\mu$     | 動力黏滯係數 | $N \cdot s / m^2$ |
| $\nu$     | 運動黏滯係數 | $m^2 / s$         |
| $\tau$    | 剪應力    | $N / m^2$         |
| $\rho$    | 密度     | $kg / m^3$        |
| $\sigma$  | 表面張力   | $N / m$           |

## Subscripts

|     |         |
|-----|---------|
| ave | 平均      |
| fg  | 液相與汽相之差 |
| f   | 液體      |
| g   | 氣體      |
| sub | 次冷度     |
| sat | 飽和度     |

## Dimensionless

$$Bo = \rho g \cdot (r^2) / \sigma$$

$$Bo_i = q'' / Gh_{fg}$$

$$Fr = u / \sqrt{gL}$$

$$Nu = hD/k$$

$$Pr = \nu / \alpha$$

$$Re = UD / \nu$$

$$We = \rho U^2 L / \sigma$$

$$\alpha = k / \rho C_p$$



# 第一章 緒 論

## 1-1 研究背景與目的

近年來電子製造技術突飛猛進，促使電子工業蓬勃發展，整個積體電路元件構裝技術的演進愈趨複雜，電子元件的尺寸大幅縮小，越來越多的電晶體被放入積體電路中，換言之，單位面積內的電晶體數目急遽升高，再加上積體電路的運算速度增加，導致積體電路在運作時產生非常大的熱功率，因此單位面積內產生的熱量也是直線上升，導致元件的散熱成為最迫切需要解決的問題。依據資料顯示，電子零件發生故障時，若是溫度過高造成，則溫度每增加兩度，矽晶體的可靠度降低百分之十，溫度太高容易造成不正常或無法操作的情況，最後會縮短電子零件的壽命，進而影響電腦的可靠度，因此在熱管理上就需要一個有效的散熱方法，使元件和系統能在穩定的狀況下操作。傳統電子散熱系統多以強制氣冷的方式為主要的散熱機制，利用被動式的鰭片增加熱傳面積與主動式的風扇產生強制對流提高散熱效能，但氣體的熱傳係數較差，所獲得的散熱效果十分有限，尤其對高效能的晶片所產生的過高熱通量時，強制氣冷的方式已逐漸不敷使用。直接液冷的方式可以減少傳統元件封裝所造成的接觸熱阻的問題，並利用液體相變化過程中核沸騰的機制達到較高效率的熱傳性能，因此沸騰熱傳加上強制對流的技術開發，將可大幅提升電子晶片

的散熱量。

Mudawar 和 Maddox[1]認為微電子晶片要達到  $1\text{MW}/\text{m}^2$  之散熱熱量，其微電子晶片的溫度必須使其維持低於  $85^\circ\text{C}$  下，才能確保電腦系統的穩定度。而使用介電液作為散熱的工作流體，利用流動沸騰的散熱機制可以大幅提升熱傳能力，並維持晶片在適當工作溫度工作。

FC-72 為 3M 公司生產之過氟碳化合物(Perfluorocarbon fluids) 系列，常壓下為不具毒性，不可燃之惰性液體，其高介電性質使用於電子元件散熱的技術中，可避免液漏時對電子元件造成的損壞。更將元件置入介電液中以直接液冷的技術提高散熱效率。FC-72 在常壓下沸點為  $56.6^\circ\text{C}$ ，此性質有利於在電子元件在可承受的溫度下即發生沸騰熱傳現象，利用相變化過程達到高效率的散熱機制，有關介電液 FC-72 在一大氣壓下各項熱物理性質如表 1-1[2]所示。

介電液在微小管道以流動沸騰的方式，應用於電子冷卻的研究仍舊有很大的發展空間。為了配合各種封裝方式，微管道擺置的角度與產生沸騰熱傳後的散熱能力分析也逐漸受到重視。Gersey 和 Mudawar[3]以 FC-72 為流體，將九顆  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的晶片排置在截面積  $20\text{mm} \times 5\text{mm}$  的矩形管中，在對於矩形管不同之重力影響方位，將矩形管每隔  $45^\circ$  擺設，做了  $360^\circ$  的方位與熱傳性能的測試，發現在  $0^\circ$  與  $90^\circ$  之間、晶片朝上與介電液方向往上流動時，有較佳的熱傳

效果。本論文研究將使用 FC-72 為工作流體，設計一套工作環路，在系統壓力為一大氣壓下，改變流體的次冷度與流速，並於介電液方向往上流動，在管道方位於  $0^\circ$  與  $135^\circ$  之間改變方位角度，分析各種角度的沸騰曲線與臨界熱通量，並拍攝流譜圖觀察氣泡在各種不同狀態下的特性與發展，嘗試找出介電液在微小矩形管道中，較佳的擺置方位，以達到最理想的熱傳效果，提供散熱封裝設計進一步的參考。

## 1-2 文獻回顧

### 1-2-1 單相強制對流熱傳分析

Maddox 與 Mudawar[4] 使用 FC-72 為工作流體，在截面積為  $12.7\text{mm} \times 38.1\text{mm}$  的矩形流道中，進行單一平滑晶片 (flush-mounted) ( $12.7\text{mm} \times 12.7\text{mm}$ ) 與突起加工晶片 (protruded) ( $12.7\text{mm} \times 12.7\text{mm}$ ) 單相與雙相的流動沸騰實驗。實驗結果發現，提高流速可以增加工作流體在單相時的熱傳能力，此外並針對單相流時期發展出了適用於平滑晶片與突起加工晶片的經驗式：

對於平滑晶片當  $2800 < \text{Re}_L < 1.5 \times 10^5$ 、對於加工突起晶片當  $7700 < \text{Re}_L < 1.6 \times 10^5$  時：

$$\text{Nu}_L = 0.237 \text{Re}_L^{0.608} \text{Pr}^{0.33} \quad (1-1)$$


其中  $L$  為加熱段之長度。

Gersey 和 Mudawar[3]的實驗結果發現單相流熱傳係數隨著流速增加而增加，並發現所有的晶片，在單相熱傳時期的熱傳係數皆非常接近，作者認為是在晶片與晶片間的無加熱區域導致熱邊界層重新發展而造成此現象。此外，實驗結果也顯示，管道的方位對於單相流熱傳係數的影響非常的微小。作者最後也以單相流部份實驗結果之數據，整理出一個單相流熱傳的經驗式：

$$Nu_L = 0.362 Re_L^{0.614} Pr^{0.33} \quad (1-2)$$

其中 L 為加熱段之長度

### 1-2-2 流動沸騰熱傳分析



Pan[5]提到在流動條件下，當流體溫度在低於飽和溫度的次冷態狀況下，次冷態沸騰可依照成核址密度的大小分為部分次冷態沸騰區與完全發展次冷態沸騰區。在部分次冷態沸騰區，主流液體的次冷度較高，加熱表面上成核址密度低，氣泡及其影響範圍只及於加熱表面的一部份。在氣泡影響不到的區域，其熱傳的機制仍以單相強制對流為主，因此其熱傳遞係數仍與流體的次冷度與質量流率有密切的關係。在完全發展次冷態區，加熱表面的成核址密度高，氣泡影響範圍包覆整個加熱面，這時流體的次冷度與流速對於熱傳係數的影響甚微。

Del Valle 和 Kenning[6]探討水在常壓下，於高次冷度(80°C)及高熱通率(約為臨界熱通率的 70~90%)次冷態沸騰的沸騰機制。他們將加熱面分為四個區域:最大氣泡投影區、氣泡影響區、氣泡影響重疊區、無沸騰區。參照圖 1-1，Del Valle 和 Kenning 認為對大氣泡投影區的主要熱傳機制為微液膜蒸發與氣泡消失後主流液體與熱表面接觸時的暫態熱傳導，在氣泡影響區與氣泡影響重疊區其主要熱傳機制為暫態熱傳導，在無沸騰區則以單相強制對流為主要熱傳機制。

在高度潤濕能力的液體沸騰起始時，通常伴隨著強烈的遲滯現象(Hysteresis)。由於晶片表面凹坑內殘存的微氣核很小，所以要在很高的表面過熱度沸騰才會發生。當沸騰發生後，相對於單相自然對流有著極佳的沸騰熱傳遞係數，使得表面溫度驟降，而形成沸騰起始時相當大的溫度過高(temperature overshoot)，當沸騰起始後增加熱功率，表面過熱度將沿著正常的沸騰曲線升高，而當從完全沸騰區降低熱功率時，大部份的凹坑已被活化，所以沸騰在起始熱通率時不會突然中止，這種加熱功率上升與下降不同的途徑就形成的遲滯現象，Hino 和 Ueda[7]在 R-113 沸騰起始時，發現了此現象，如圖 1-2 所示，並發現溫度過高(temperature overshoot)可達 13°C。

Tso 等人[8]以 FC-72 為工作流體，利用一系列四顆的模擬晶片

(10mm x 10mm)，放置於垂直矩形管道的實驗研究中，分別將晶片貼平於流道面(flush-mounted)與突起於流道面(protruded)，並改變流速(4.2~78cm/s)與次冷度(15~33°C)，探討其參數對於沸騰熱傳曲線的影響。結果發現，對於兩種不同情況放置的情形，在部分沸騰區時，當固定熱通量時，流速與次冷度增加，晶片溫度會降低。在完全沸騰區時，流速與次冷度對於晶片溫度的影響則非常微小。而次冷度與流速增加，皆可提高臨界熱通量，但流速在低於 20cm/s 時對於臨界熱通量的影響不大。在部分沸騰區域，相同情況下，晶片貼平於流道面(flush-mounted)時的晶片溫度將低於突起於流道面(protruded)時的晶片溫度。在完全沸騰區域，兩者不同擺置情況的晶片溫度則大致相同。而晶片貼平於流道面(flush-mounted)時的臨界熱通量，將高於突起於流道面(protruded)時的臨界熱通量。

Maddox 與 Mudawar[4]使用 FC-72 為工作流體，在 12.7mm x 38.1mm 的矩形流道中，進行單一平滑晶片(12.7mm x12.7mm)與突起加工晶片(12.7mm x12.7mm)單相與雙相的流動沸騰實驗。關於雙相的流動沸騰實驗結論提到，當增加流速對於核沸騰區的熱傳係數有顯著的影響，但對於臨界熱通量，流速的影響則甚微。在接近臨界熱通率時，流體次冷度增加了熱傳性能。此外增加流速和表面的增強結構，可以減小遲滯現象。若將流動沸騰應用在多晶片的冷卻時，次冷度的提高對於



熱傳效能影響頗大，因為次冷度的提高可以減小氣泡層的厚度，好讓流體能更順利的順著流動方向帶走熱。

Mudawar 和 Maddox[1]以 FC-72 為工作流體，觀察單一晶片 (12.7mm x 12.7mm)在垂直矩形流道(12.7mm x 38.1mm)的流動沸騰實驗中發現，增加流速與次冷度皆可提高臨界熱通量。他們認為增加流速時，可以減少氣泡層，並增加流體與加熱表面接觸的機會，達到較好的熱傳效果，進而提高臨界熱通率。作者提出了兩種產生臨界熱通量的模式；在低流速時，連續性的氣膜覆蓋整個加熱面，氣膜下的微液膜，逐漸受熱乾化導致臨界熱通量。在高流速時，氣膜與主流液體分成平行的兩層，因兩介面的相對速度過大，產生赫爾霍次不穩定性 (Helmholtz instability)，而導致臨界熱通量。

另外在低流速次冷態情形下，額外發展出新的臨界熱通量模式，作者認為是垂直於加熱面的氣柱與周圍的主流液體產生介面，造成赫爾霍次不穩定性(Helmholtz instability)所導致的結果。

### 1-2-3 氣泡特性與流道方位對流動沸騰熱傳的影響

核沸騰時，作用於氣泡的作用力包括:慣性力、浮力、表面張力及阻力。在流動沸騰中，主流液體的運動對於氣泡自加熱管壁的脫離有重大的影響，主流液體的流動會對氣泡形成一個拉力，促使氣泡脫

離表面。Levy[9]認為這個拉力與主流液體經過氣泡的壓力變化成正比，而得到下列式子：

$$F_F \propto \left( \frac{dP}{dz} \right) D_b^3 \propto \frac{4\tau_w}{D} D_b^3 \quad (1-3)$$

其中  $F_F$  為主流液體的拉力、 $D_b$  為氣泡之直徑、 $\tau_w$  為壁應力、 $D$  為沸騰通道等效直徑。

此外使氣泡脫離加熱面的浮力與阻止氣泡脫離加熱面之表面張力在垂直表面的分力分別為：

$$F_b \propto D_b^3 (\rho_l - \rho_v) g \quad (1-4)$$

$$F_s \propto D_b \sin^2 \theta \sigma \quad (1-5)$$

其中  $F_b$  為浮力、 $F_s$  為表面張力在垂直表面的分力、 $\theta$  為氣泡與加熱表面之接觸角。

Levy 考慮浮力、表面張力及主流液體流動的拉力平衡，結合 1-3、1-4、1-5 式，但不考慮接觸角的效應，並經過整理及無因次化得到下列式子：

$$Db \frac{Db}{\nu_l / (\tau_w / \rho_l)^{1/2}} = C_1 \left[ \frac{\sigma D \rho_l}{\mu_l} \right] \left[ 1 - C_2 \frac{g(\rho_l - \rho_v) D}{\tau_w} \right]^{-1/2} \quad (1-6)$$

其中  $\left[ \frac{\sigma D \rho_l}{\mu_l} \right]$  代表表面張力項、 $\left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v) D}{\tau_w} \right]^{-1/2}$  代表浮力項。

Hu 和 Pan[10]利用 26 組蒸氣產生點的實驗數據得到  $C_1=0.077$ 、 $C_2=0.98$ ，此方程式顯示浮力在流動沸騰的重要性。

若改變流道方位，浮力、表面張力及主流液體流動的拉力平衡會有不同的變化，也會改變氣泡成長與流動的特性，進而影響熱傳的能力，以下幾篇文獻將探討流道方位對流動沸騰熱傳的影響。

Gersey 和 Mudawar[3][11]做了有關流道方位對臨界熱通量影響的實驗，作者將九顆 10mm x 10mm 的晶片排置在 20mm x 5mm 的矩形管中，以矩形管每隔 45° 的擺設方位，進行 360° 全方位的熱傳性能測試。在 360° 的方位裡，主流液體與晶片相對於重力方向做了往上升流與往下流動以及晶片表面朝上與朝下的改變，如圖 1-3 所示。根據數據與氣泡觀察結果得知，當流速低於 200cm/s，在方位 180°、-135° 與 -90° 中測量到較低的臨界熱通量。在這幾個方位中，主流液體與晶片相對於重力方向是往下流與晶片表面朝下，當氣泡產生並脫離表面後，受到浮力的影響，氣泡將與主流液體產生反向流 (counterflow)，又因為晶片表面朝下，氣泡將與主流液體分成兩層 (stratification)，這兩種因素都將使氣泡聚集停滯於晶片表面，造成微液膜乾化，所以較早達到臨界熱通量。而當在低次冷度狀態下，主流液體流速高於 200cm/s，在各個方位得到接近的臨界熱通量，若在高次冷度狀態，流速高於 150cm/s 時亦可得到相同的結果。在方位 180°、-135° 與 -90° 所測量到的臨界熱通量，相對於相同情況在流道垂直晶片表面朝上(90°)，所測量到的臨界熱通量將減小

18%。文獻中最後提到在方位  $180^\circ$ （主流液體向下）的測試中發現，當主流液體在  $25\text{cm/s}$  時，剛好可使受到浮力作用影響而往上流動的氣泡相抗衡，造成氣泡的停滯現象。

Zhang 等人[12][13]以 FC-72 為工作流體，在截面積  $2.5\text{mm} \times 5\text{mm}$  的矩形流道中，以次冷度 ( $\Delta T_{\text{sub}} = 30^\circ\text{C}$ 、 $3^\circ\text{C}$ )，流速 ( $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.5$ 、 $1.0$  和  $1.5\text{m/s}$ ) 和流道方位 (以  $45^\circ$  為間隔) 作  $360^\circ$  全方位的測試如圖 1-4 所示，測量在各情況下流動沸騰的情形，並觀察氣泡特性的流譜分析。

Zhang 等人認為在高次冷度 ( $\Delta T_{\text{sub}} = 30^\circ\text{C}$ ) 及低流速 ( $0.5\text{ m/s}$ ) 條件下，在流道方位  $315^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $45^\circ$  情況時，因為流速較低，無法將氣泡強制帶走，氣泡靠浮力垂直離開表面，並附著於管道的上表面，造成氣泡聚集於管道的上下兩層，主流液體則在管道中心的分層現象。在流道方位  $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $225^\circ$  情況時，氣泡會因浮力，貼住加熱表面，並沿著加熱表面形成波浪蒸氣層。在方位  $270^\circ$  情況時，浮力方向與主流液體方向完全相反，在加熱表面造成大量的小氣泡。如圖 1-5 所示。在高次冷度 ( $\Delta T_{\text{sub}} = 30^\circ\text{C}$ ) 狀態下，當流速增加 ( $1.5\text{ m/s}$ ) 時，因為高流速使得主流液體帶有強大的拉力，主控了氣泡的特性，使得在各方位觀察得到的流譜皆相似，都大致沿著加熱表面形成小而多的氣泡，如圖 1-6 所示。

在近飽和狀態( $\Delta T_{\text{sub}}=3^{\circ}\text{C}$ )低流速(0.1 m/s)，方位的改變大大影響了流譜的情形。在流道方位  $315^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$  和  $45^{\circ}$  時，因流速極低，核沸騰的機制類似於池沸騰，氣泡先在加熱表面聚集，然後隨著浮力脫離至上表面。在流道方位  $90^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$  時，會產生蒸氣波浪層。在流道方位  $180^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$  和  $270^{\circ}$  中，因為浮力與主流液體流動方向相反，造成浮力與主流液體拉力的拉鋸，造成氣泡的停滯現象，使得氣泡聚集在表面，並與液體在管道中分成兩層，如圖 1-7 所示。而在近飽和狀態( $\Delta T_{\text{sub}}=3^{\circ}\text{C}$ ) 流速增加(1.5 m/s)，高流速使得主流液體主控了氣泡的特性，各方位觀察得到的流譜皆相似，都沿著加熱表面形成波浪蒸氣層，如圖 1-8 所示。

在臨界熱通量方面，在近飽和狀態( $\Delta T_{\text{sub}}=3^{\circ}\text{C}$ )，如圖 1-9 所示，臨界熱通量與氣泡流譜存在著相當大的關係，在低流速時，方位  $315^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$  和  $45^{\circ}$  情況下，浮力會幫助氣泡脫離加熱表面，使得氣泡不會堆積阻礙主流液體，所以可得到較高的臨界熱通量，在垂直方位中( $90^{\circ}$ )，浮力分力方向並沒有垂直於加熱表面，所以在晶片朝上的方位裡，得到最小的臨界熱通量。在晶片朝下的方位中，因為浮力會使氣泡附著於加熱表面，此外浮力也與液體流動方向相反，造成氣泡的停滯現象，使得氣泡堆積於表面，因此在此情況的方位中，都將得到較低的臨界熱通量。

Zhang 等人[14]在最近的文獻提到，當流速低於 0.2m/s 時，管道方位對於臨界熱通量與氣泡特性有顯著的影響。作者認為，重力場 (body force) 對於臨界熱通量有決定性的影響，當重力垂直於加熱晶片表面時，會在氣液介面上產生水動力不穩定性。當重力方向與流道方向平行時，浮力與主流液體同向，可以幫助氣泡順利脫離加熱表面，反之，若重力與主流液體反向，氣泡會受到與浮力相反方向的拉力，造成停滯現象並提早產生臨界熱通量。而過長的氣泡臨界波長，則會阻止液體接觸加熱表面，產生乾化現象。作者利用上述理論與數據，提出了三種流速與方位影響關係的經驗式，在考慮實際應用上，若要克服流道方位所產生的重力問題，所需要的主流液體速度。

1. 當重力垂直於加熱面時：

$$\frac{Bo}{We^2} = \frac{(\rho_f - \rho_g)(\rho_f + \rho_g)^2 \sigma g_e}{\rho_f \rho_g^2 U^4} \leq 0.09. \quad (1-7)$$

其中

$$We = \frac{\rho_f \rho_g U^2 L}{(\rho_f + \rho_g) \sigma} \quad (We \text{ 為慣性力與表面張力的比值})$$

$$Bo = \frac{(\rho_f - \rho_g) g_e \cos \theta L^2}{\sigma} \quad (Bo \text{ 為重力與表面張力的比值})$$

2. 當重力平行於加熱面時：

$$\frac{1}{Fr} = \frac{(\rho_f - \rho_g) g_e D_h}{\rho_f U^2} \leq 0.13 \quad (1-8)$$

(Fr 為慣性力與重力效應之比)

3. 由臨界波長發展出來的關係式:

臨界波長表示為:

$$\lambda_c = \frac{2\pi\sigma(\rho_f + \rho_g)}{\rho_f\rho_g U^2}. \quad (1-9)$$

又當臨界波長大於加熱段長度 L 時將產生不穩定性，所以  $\lambda_c$  需小於

L，故得到下列式子:

$$We = \frac{\rho_f\rho_g U^2 L}{(\rho_f + \rho_g)\sigma} \geq 2\pi. \quad (1-10)$$

Bower、Klausner[15]以 FC-87

為工作流體，在截面積 2.54mm x 0.56mm 的矩形流道中，次冷度

( $\Delta T_{sub}$ )=1°C，流速範圍 0.39 ~ 1.17m/s 情況下，進行多角度方

位之流動沸騰實驗，探討流速與次冷度對於流道方位之影響。文

中對於重力影響與否之判別依據實驗數據，整理出一經驗式:

$$Ja = 21.975 \times \ln(\psi) + 82.748 \quad (1-11)$$

$$\text{其中 } Ja = \frac{\rho_f \cdot C_{pf} \cdot \Delta T_{sat}}{\rho_g \cdot h_{fg}}, \quad \psi = \frac{U \cdot \mu}{\sigma} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_g}.$$

如圖 1-10 所示，此方程式之曲線繪於圖中，若實驗值位於區線之左方，代表流道方位會影響氣泡之成長，若位於右方則代表沸騰曲線不受流道方位之影響。由圖中可發現，當流速越快流

道方位對於沸騰曲線與熱傳係數的影響越小，而在相同流速下，壁過熱度越高氣泡成長越旺盛，流道方位對於此時散熱機制的影響越大。此外文獻中對於判別流道方位是否影響沸騰曲線，提出了新的定義，創造出紐賽數(Nu)變化係數(C. V. :Nusselt number coefficient of variation)。即

$$C. V. = \frac{\sigma_{\psi, Ja}}{\mu_{\psi, Ja}} \times 100 \quad (1-12)$$

其中  $\sigma_{\psi, Ja} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M (Nu_{\psi, Ja, m} - \mu_{\psi, Ja})^2}}{M-1}$  為各方位紐賽數(Nu)之標準

差， $\mu_{\psi, Ja} = \frac{\sum_{m=1}^M Nu_{\psi, Ja, m}}{M}$  為各方位紐賽數(Nu)之平均數，而 M 為流

道方位之個數。



文獻中定義當 C. V. 小於 6 時，流道方位對於氣泡發展與熱傳機制不具影響，反之大於 6 時，流道方位會影響其沸騰曲線。其文獻實驗計算結果如圖 1-11。可發現所有數據皆落在 1-11 經驗式曲線之左邊，代表 1-11 經驗式比使用 C. V. 值來判斷實驗數據之方法更為保守，故在實際設計時採用 1-11 經驗式為依據，來判斷實際操作之最低流速，為一種安全性很高的判別方式。

。



| Properties   | FC-72   |
|--|---|
| Average Molecular Weight                               | 340 kg / kmole                                |
| Critical temperature , $T_{crit}$                      | 178°C   |
| Saturation temperture , $T_{sat}$                      | 56.6°C  |
| Density of liquid , $\rho_l$                           | 1600 kg / m <sup>3</sup>                      |
| Density of vapor , $\rho_v$                            | 13.39 kg / m <sup>3</sup>                     |
| Heat of vaporization , $h_{fg}$                        | 94790 J / kg                                  |
| Thermal conductivity of liquid , $k_l$                 | 0.0538 W / m • k                              |
| Specific heat of liquid , $C_{p_l}$                    | 1102 J / kg• k                                |
| Thermal diffusivity of liquid , $\alpha_l$             | $3.064 \times 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$ |
| Kinematic viscosity of liquid , $\nu_l$                | $2.729 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ |
| Prandtl number of liquid , $Pr_l$                      | 8.900   |
| Coefficient of thermal expansion of liquid , $\beta_l$ | -0.001639K <sup>-1</sup>                      |
| Surface tension of liquid , $\sigma_l$                 | 0.008348 N/m                                  |
| Dielectric constant , 25°C ( 1KHz )                    | 1.76  |
| Dielectric Strength , KV (2.54mm gap )                 | 42  |
| Solubility of Air<br>( ml gas/100ml liquid )           | 48  |

表 1-1 介電液 FC-72 於一大氣壓之物理性質 [2]

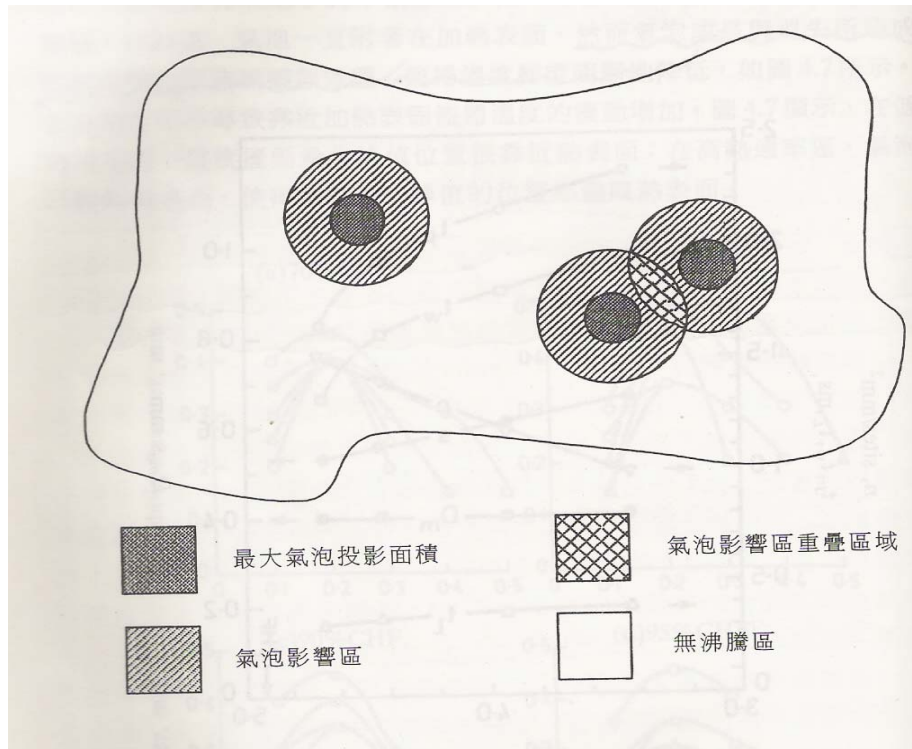


圖 1-1 次冷態沸騰之四個區域[6]

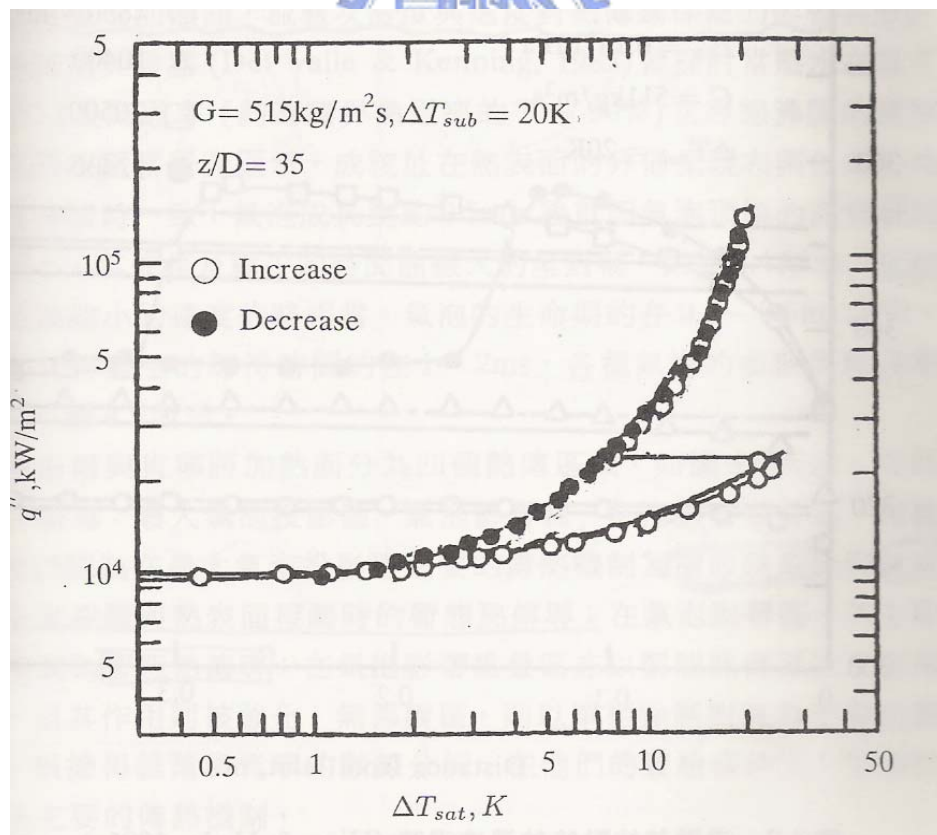


圖 1-2 液體沸騰起始之遲滯現象[7]

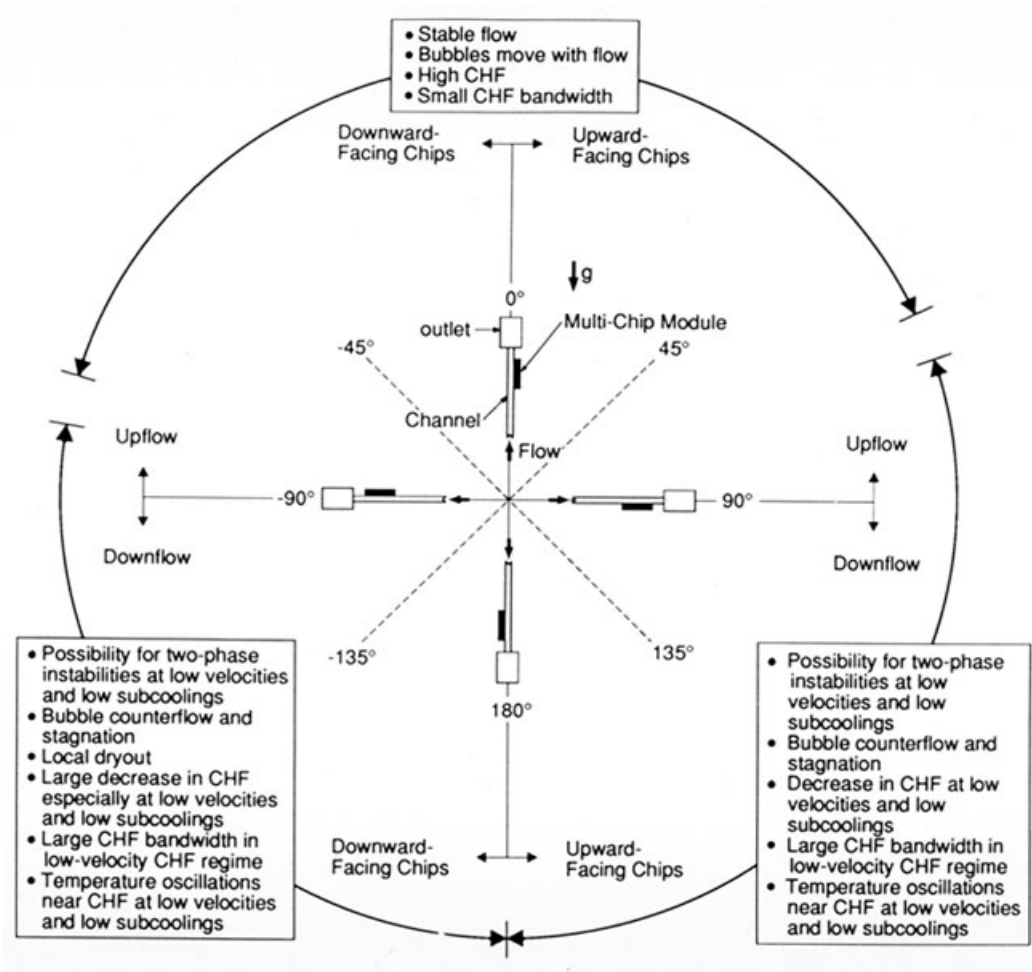


圖 1-3 流道方位示意圖[3][11]

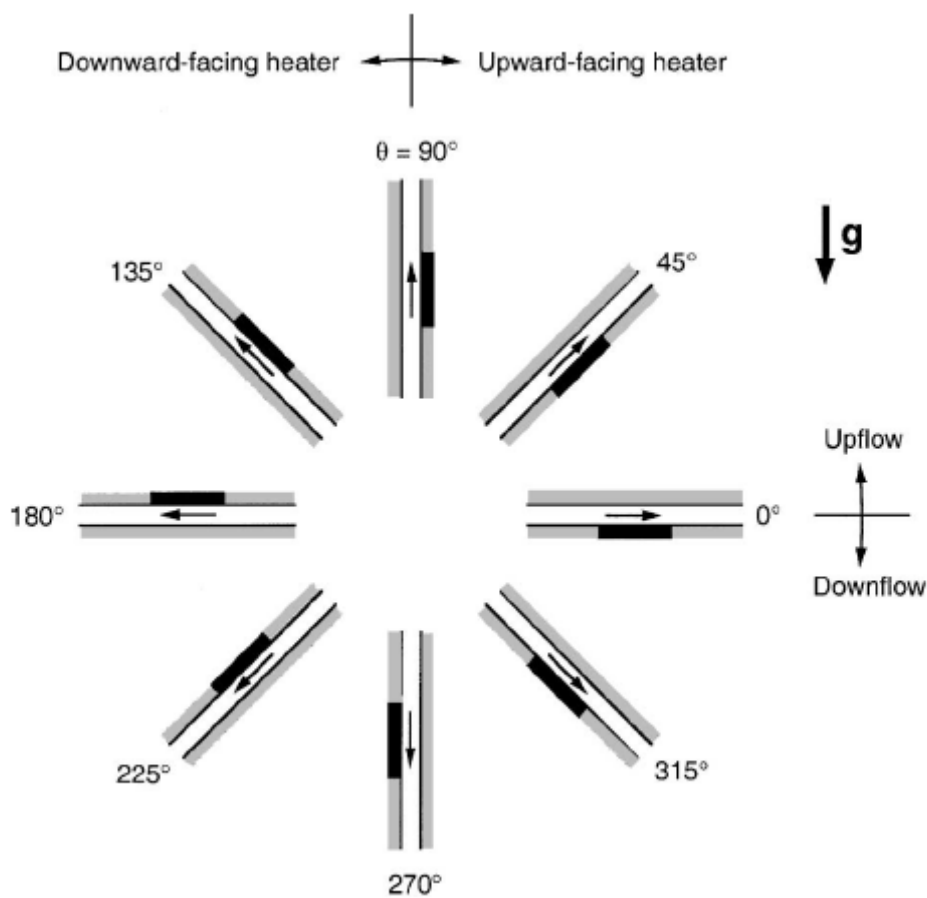


圖 1-4 Zhang、Mudawar 和 Hasan[12]實驗中流動方位示意圖

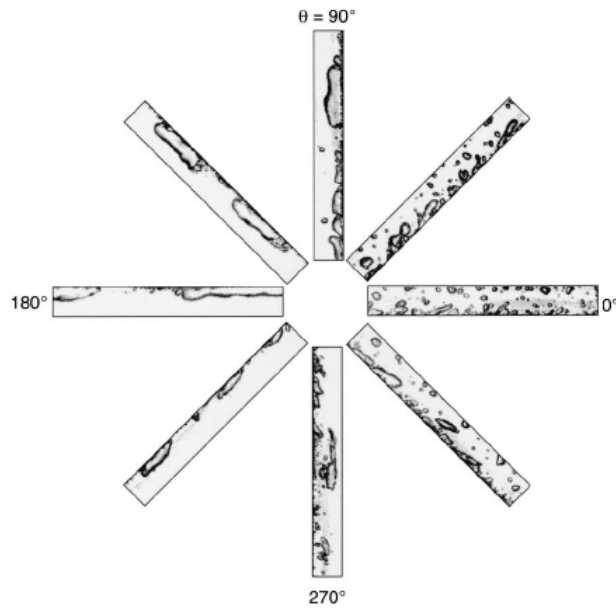


圖 1-5 高次冷度( $\Delta T_{\text{sub}}=30^{\circ}\text{C}$ )低流速(0.5 m/s)條件下氣泡流譜圖

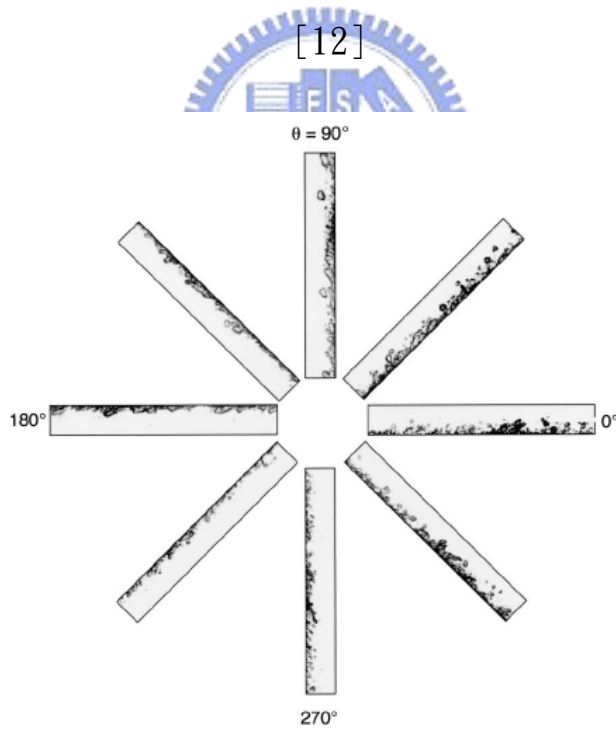


圖 1-6 高次冷度( $\Delta T_{\text{sub}}=30^{\circ}\text{C}$ )高流速(1.5 m/s)條件下氣泡流譜圖

[12]

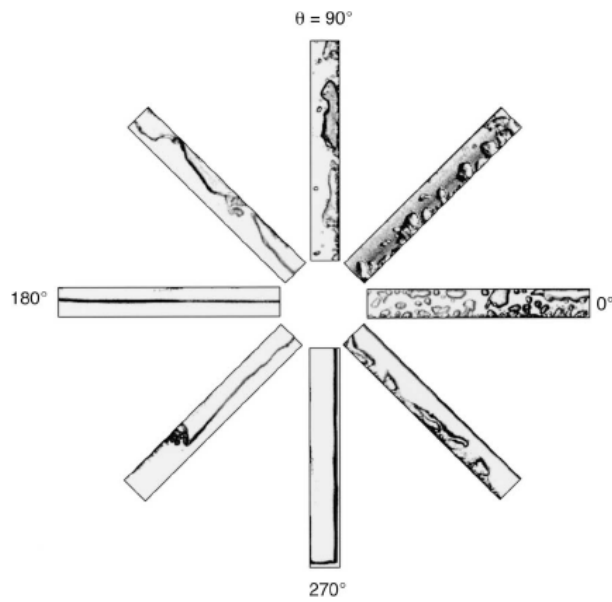


圖 1-7 在近飽和狀態( $\Delta T_{\text{sub}}=3^{\circ}\text{C}$ )低流速(0.1 m/s)條件下氣泡流譜圖

[12]

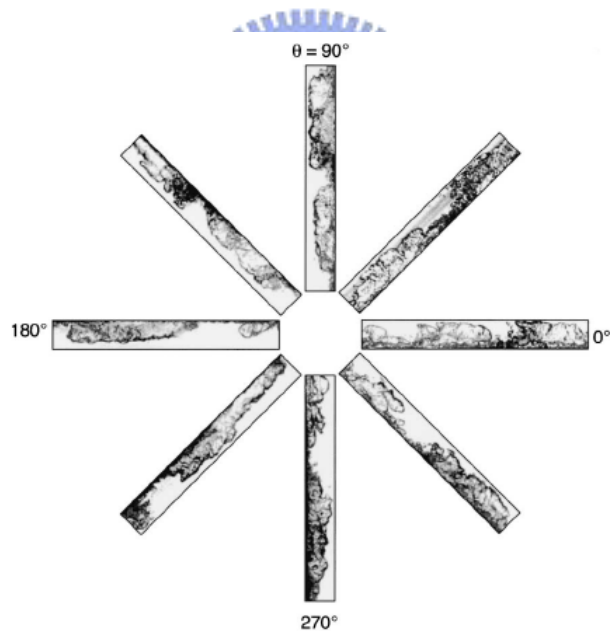


圖 1-8 在近飽和狀態( $\Delta T_{\text{sub}}=3^{\circ}\text{C}$ )高流速(1.5 m/s)條件下氣泡流譜圖

[12]

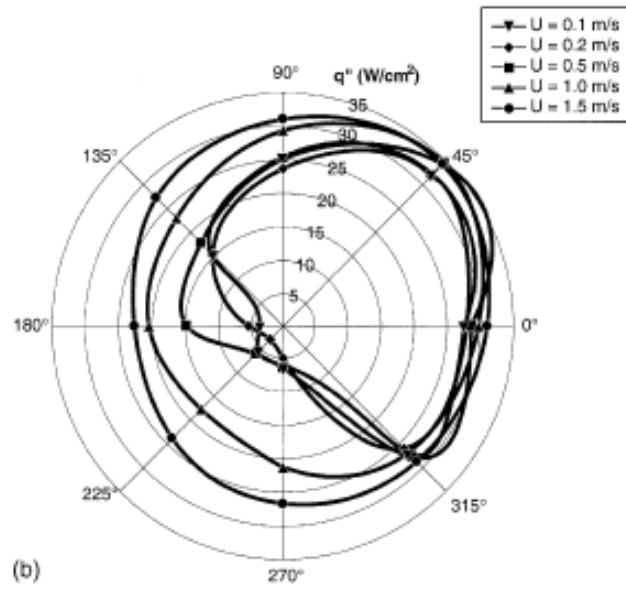


圖 1-9 在近飽和狀態 ( $\Delta T_{\text{sub}} = 3^\circ\text{C}$ ) 各種流速情形下所觀測到的臨界熱



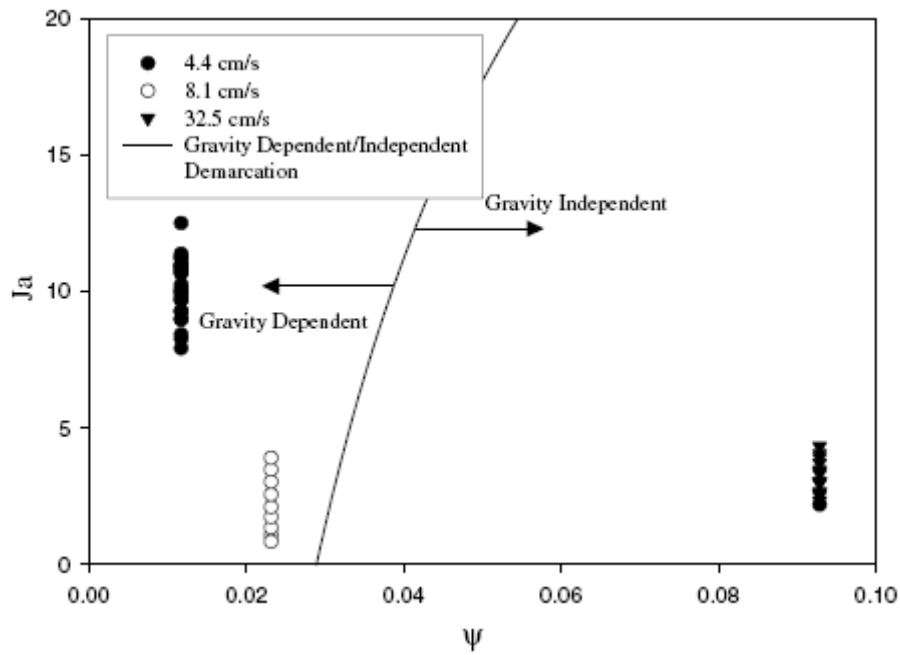


圖 1-10 Bower、Klausner[15]之重力影響判別經驗式圖

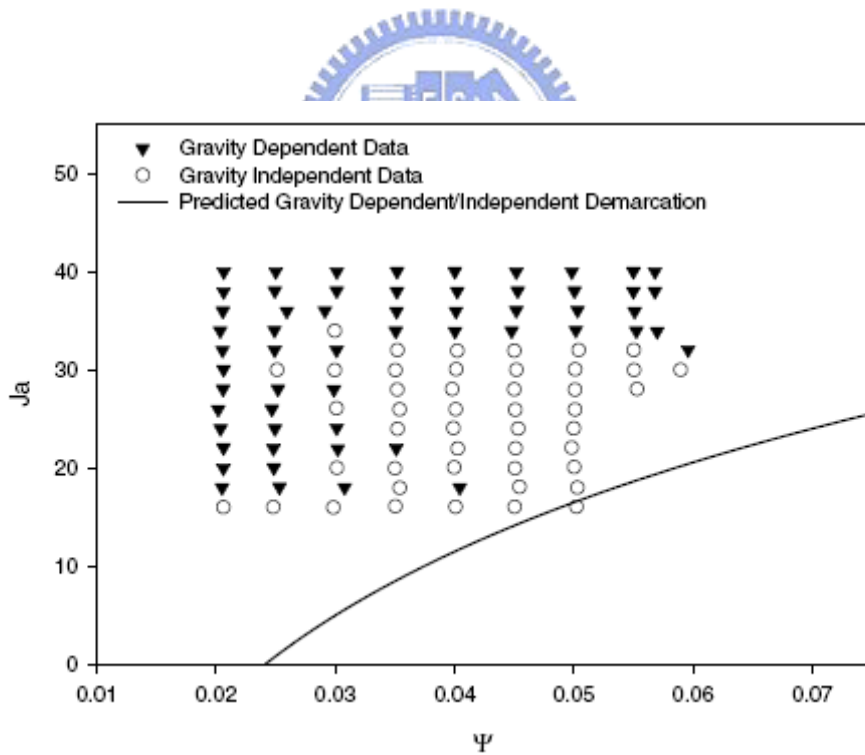


圖 1-11 Bower、Klausner[15]之實驗數據與重力影響判別經驗式比較圖




## 第二章 實驗系統與參數計算

### 2-1 實驗設備

本實驗以截面積 10mm x 10mm 之銅塊，作為模擬的電腦 CPU 晶片，使用介電液 FC-72 為工作流體，於狹窄的矩形流道中，在不同的流道方位，進行流動沸騰實驗的觀測與分析。實驗設備共分為：流體循環系統、測試段系統、預熱循環系統、數據擷取系統、輔助系統以及影像擷取系統。如圖 2-1 所示。

#### 2-1-1 流體循環系統



如圖 2-1 所示，流體循環系統為介電液流動的循環管路。其元件包含：液氣除存槽、流體驅動泵浦、儲壓器、電子式流量計、預熱段和冷凝段。系統之循環步驟為介電液自液氣儲存槽流出，經由泵浦驅動後流入流量計量取流量值，在經過預熱系統將介電液加熱，固定工作流體進入測試段前所需達到的次冷度，接著流體進入測試段進行實驗觀測與數據擷取，最後再返回液氣儲存槽並與冷卻循環系統做熱交換，將氣液儲存槽中的高溫介電液蒸氣冷凝至液態，形成一個回路循環系統。本系統所使用的介電液泵浦為 Cole-Parmer 微型齒輪式泵浦，透過泵浦提供介電液循環的動力，藉由改變馬達轉速來調整其輸出的流量，流量的控制亦可由針閥手動調整及利用旁通迴路將多餘的

流量導回液氣儲存槽。

## 2-1-2 測試段

本實驗之測試段組成如圖 2-2 所示，測試段尺寸圖如圖 2-3 所示。測試段為一長 595mm、截面積為寬 10mm x 高 2mm 的矩形狹窄流道，是由上下兩層的玻璃纖維環氧機板所組成。上層板做為可視化視窗，用以觀察介電液於管道內氣泡成長的情形與發展的位置並可拍攝成流譜。上板在測試段的兩端各有開孔連接環路做為測試段的進出口。下層板是做為主流道用，在下層板上銑出一長 540mm、寬 10mm、深 2mm 的溝槽，與上層板組合後即為實驗之測試流道。在下層板的流道表面距離進口端下游 540mm 處，有一模擬電腦晶片的加熱表面 (10mm x 10mm)，提供實驗所需的熱通量，而在距離進口端 530mm 處，埋設一熱電偶以量測流體進口溫度  $T_{in}$ 。加熱片模組如圖 2-4 所示，是先用水刀在下層板流道中，於上述的位置處切出一長 10mm、寬 10mm 且貫穿下層板的通道，然後置入長 10mm、寬 10mm、高 5mm，材質為無氧銅之銅塊，並在與玻璃纖維環氧基板的接觸面上，塗上耐高溫的矽膠用以黏著固定並防止液漏。在銅塊工作表面下方 2.45mm 處平均埋設 3 根熱電偶(如圖 2-5 所示)，用以推算加熱後銅塊所代表的模擬晶片表面工作溫度。加熱源方面，銅塊的下表面與下層板之下表面貼

齊，並在銅塊下表面處貼上加熱面積為 10mm x 10mm 的薄型電熱片，最後在電熱片下方緊密鎖上長 60mm、寬 30mm、高 10mm 之鐵氟龍，減少熱散失於空氣中。

### 2-1-3 流道托架與流道方位擺置

本流動沸騰實驗，需改變流道的方位，由於測試段兩端皆有管路，故必須設計一托架使測試段流道能與機台保持適當空間，並可使流道調整其方位角度。流道放置水平時，使用水平儀確認管道保持在水平方向，放置垂直時，則使用一掛重物之細線確定其垂直的方位，放置 45° 與 135° 時，則量測管道中心水平與垂直方向至拖架支點的距離，以確認其角度。流道托架也須配合觀測方便，在固定測試段的托架上設計一觀測視窗，提供流譜的拍攝。流道拖架與觀測視窗的設計如圖 2-6 所示，測試段利用拖架改變方位的示意圖，如圖 2-7 所示。四種角度示意圖如圖 2-8 所示。

### 2-1-4 模擬加熱晶片

本研究之模擬晶片之材料為無氧銅，其加熱工作表面為平滑加熱面，如圖 2-9 所示。其工作表面為 10mm x 10mm，工作表面以單位面積顆粒數為 4000 的砂紙研磨處理，之後再進行拋光程序，最後貼齊

流道面至入測試流道。

### 2-1-5 預熱循環系統

本實驗預熱系統的功用主要為控制介電液在進入測試段前的次冷度。預熱系統是在預熱段的介電液環路外以一封閉式的儲水容器外接一高溫恆溫槽做熱交換，其控溫範圍為  $0^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$ ，並可以依照內建的控溫程式，設定溫度維持定溫狀態。在預熱系統外部緊密包覆熱傳導係數極低的隔熱棉以防止熱量的散逸。

### 2-1-6 冷卻循環系統

冷卻循環系統主要由一恆溫槽與液氣儲存槽所構成，其工作流體為水，用以控制系統壓力及冷凝介電液蒸氣。介電液自測試段流出後為液氣兩相共存的狀態，而此系統則可用來與液氣儲存槽內自測試段流出的高溫蒸氣進行熱交換，將液氣儲存槽的介電液蒸氣冷凝至液相，以確保進入流量計的介電液為液態。

### 2-1-7 數據擷取系統

實驗數據擷取系統為 Yokogawa DA 2500E 型資料收集器，共有 60 個頻道可接收實驗數據及資料，內部設有熱電偶轉換功能，所以溫度量測時即直接以所讀數據經校正曲線轉換而得，至於壓力的量

測，則以被動式之壓力轉換器所產生之電流，經由一並聯電阻調整，進而在數據擷取器上得到正確之壓力值。

## 2-1-8 量測儀器

### 2-1-8-1 壓力轉換器

介電液於流量計進口、預熱段進口。測試段進口的壓力量測使用 Bourdon E-7 壓力轉換器，操作範圍在 0~4(kgf/cm)，誤差值為 $\pm 0.2\%$ ，輸出訊號為 4~20mA，由於數據擷取系統只能讀取電壓值，故將壓力轉換器並聯 250 $\Omega$  的標準電阻(絕對誤差值 $\pm 0.5\%$ )，以獲得 1~5V 的電壓值。本論文藉由調整流道閥口大小與流速，使系統維持在一大氣壓。

### 2-1-8-2 熱電偶

測試段表面溫度的量測則採用 OmegaT-type 熱電偶，其基本誤差為 0.5 $^{\circ}\text{C}$ ，而熱電偶的校正是以 HP2804A 型石英溫度計為基準，量取 70 點恆溫槽水溫而得的校正曲線，經由校正後誤差可達 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2-1-9 輔助系統

### 2-1-9-1 除氣系統

本實驗是針對純 FC-72 液體(無溶解氣體)在流動沸騰狀態下，做的熱傳分析實驗。由於 FC-72 液體在常壓下會溶解大量空氣，而溶入

的非凝結氣會在工作流體尚未達到飽和狀態時就先形成氣泡，並改變流體的物理性質，並有可能干擾加熱晶片表面氣泡產生的情形，造成實驗數據與結果的誤差。所以 FC-72 液體在灌入此實驗環路系統前，必須先做除氣這個步驟。除氣系統主要是由不鏽鋼容器、冷凝器和排氣閥所組成的裝置。除氣時先將除氣系統與介電液循環系統的通閥鎖緊，接著將 FC-72 液體灌入不鏽鋼容器內，以直流電源供應器加熱至介電液沸騰，將沸騰蒸發的介電液蒸氣與受熱導致氣化的非凝結氣體通入冷凝器中。在冷凝器中，介電液蒸氣凝結成液體回流至容器中，非凝結氣體則經由排氣閥排放至大氣中。如此循環持續進行，至一大氣壓飽和溫度  $56.6^{\circ}\text{C}$  為止，完成除氣動作。



#### 2-1-9-2 真空幫浦

本實驗的真空幫浦為 ULVAC 的 YTP-150M 型，其系統共分兩部份，分別為前置的油轉式幫浦(Oil rotary pump)，除氣速度每秒 100 升，與渦輪分子幫浦(Turbo molecular pump)，除氣速度為每秒 160 至 190 升。抽氣時先用油轉式幫浦將系統抽氣使壓力達道  $10^{-3}$  torr 後，在開啟渦輪分子幫浦抽氣，將系統壓力抽至  $10^{-5}$  torr 以下後，關緊所有閥口並將除氣完成的 FC-72 導入系統即可。

#### 2-1-10 影像擷取系統

在進行流譜觀測時，使用高速數位相機透過測試段觀測視窗，紀錄沸騰過程與氣泡特性。使用相機之型號為富士 S602zoom，快門速度可達 1/10000 秒，最高儲存像素為六百萬畫素之影像，近拍距離可達 10mm。

## 2-2 實驗方法及步驟

### 2-2-1 實驗前準備工作

#### 2-2-1-1 環路測漏

將環路的各部位鎖緊，灌入高壓氮氣使環路中絕對壓力達 3 大氣壓，經由壓力轉換器量取系統內壓力記錄，靜置 24 小時後再次量取系統內壓力並與先前紀錄之壓力值比對，以確定整個環路是否有洩漏，若壓力的減少超過 0.5kPa/hr，則表示環路尚未接妥或是管路焊接處加工不良，可將泡沫水塗抹於管路銜接處，在灌入高壓氮氣，重新檢查洩漏處並將漏洞排除，然後重複步驟，直到壓力減少程度低於所設定之標準為止。

#### 2-2-1-2 環路抽真空

確定系統無洩漏後放掉氮氣，將液氣儲存槽及整個環路以本實驗室的 ULVAC 真空幫浦抽真空至內部壓力達  $10^{-5}$  torr，以減少整個環路內殘存的不凝結氣體。

### 2-2-1-3 介電液除氣

除氣的步驟是先將除氣系統和介電液循環系統的通閥所緊，然後將介電液灌入不鏽鋼容器內並以直流電源供應器加熱，始容器內之介電液劇烈沸騰，介電液蒸氣伴隨釋出的空氣至冷凝器，與一逆流的冷卻系統(Reflux Chiller)進行熱交換，冷凝成液體回流至容器中，殘存空氣則由排氣閥伴隨著些許的介電液蒸氣排放至大氣中。如此循環進行約 30 分鐘，至常壓下飽和溫度誤差值在  $0.1^{\circ}\text{C}$  以內為止，藉由上述步驟消除液體中之不凝結氣體，最後將除氣完成的介電液灌入以抽真空的液氣儲存槽內，即可開始進行實驗。



### 2-2-2 實驗量測與流譜拍攝步驟

#### 步驟一

開啟資料擷取系統與電源供應器，啟動冷卻系統之恆溫槽並設定溫度，使液氣儲存槽之介電液達到工作狀態。

#### 步驟二

設定預熱系統之恆溫槽溫度以控制介電液進入測試段時之冷度。

#### 步驟三

當恆溫槽達到設定溫度後開啟介電液幫浦，並視介電液流量大小



調整旁通量。

#### 步驟四

開啟加熱系統，慢慢調整電壓、電流，使電壓和電流緩緩增加，並達到一固定值，此時測試表面溫度會慢慢上升，在此同時為保持測試段之飽和壓力為固定，必須調節管路通閥與幫浦輸出之流量，來維持測試段為固定壓力。

#### 步驟五

等到系統達到所要求壓力下之穩定狀態後，記錄當時測試段之飽和壓力、飽和溫度、介電液流量、入出口介電液溫度、熱通量以及測試晶片溫度，並同時由流道視窗觀察流道內，氣泡沸騰的現象。

#### 步驟六

由觀測視窗進行流譜觀察，用高速 CCD 相機配合閃光器在近拍模式下進行拍攝，相機快門設為 1/10000 以記錄快速流動之氣泡，光圈設為適當大小避免過暗或過亮，拍攝完成後將影像輸入電腦，進行亮度、對比度、銳利度、色調分佈、裁切等後製處理，已取得最佳圖像。

#### 步驟七

實驗結束後，依反步驟將各元件系統關閉。

### 2-3 實驗參數計算

### 2-3-1 工作壓力

測試段壓力  $P$ ，其定義為測試段進口之壓力值即

$$P=P_{in} \quad (2-1)$$

在進行次冷流動沸騰時，必須控制介電液在進入測試段前維持在特定之次冷度  $T_{sub}$ ，而定義為測試段的飽和溫度與其進口溫度的差值，即：

$$T_{sub}=T_{sat}-T_{in} \quad (2-2)$$

其中飽和溫度  $T_{sat}$  乃由測試段壓力經由程式運算對應換算出來的值

$$T_{sat}=T(P) \quad (2-3)$$

然而本實驗控制壓力值固定在一大氣壓，其飽和溫度為  $56.6^{\circ}\text{C}$ ，故

$$T_{sat}=56.6^{\circ}\text{C}。$$



### 2-3-3 熱損估算

加熱片下方用以隔熱的鐵氟龍塊熱傳導係數很低( $0.35\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )，但當加熱片溫度升高時所產生的熱通量，除了提供測試晶片加熱外，仍有部份熱經由鐵氟龍散失。Hsu[16]在水平管道流動沸騰實驗中，曾對於熱損失的估計利用 Flotherm 熱傳分析軟體進行模擬，最後分析結果顯示，熱損失占總加熱熱通量不超過 1%。

本實驗將於鐵氟龍內埋設熱電偶，如圖 2-10 所示，測量並驗證

上述結果。分別在中央由底部往上 2.5mm 與 5mm 處以及由側邊往內部 5mm 與 10mm 處，埋置各兩個熱電偶，假設溫差呈線性分佈並且四邊側面的熱損相等，利用傅立葉熱傳導定律(Fourier's law of heat conduction)[17]，則側面的總熱損  $Q_{side}$  為：

$$Q_{side} = 4k_t A_{side} \frac{\Delta T_{side}}{L_{side}} \quad (2-4)$$

同理則底面的熱損失  $Q_{bottom}$  為：

$$Q_{bottom} = k_t A_{bottom} \frac{\Delta T_{bottom}}{L_{bottom}} \quad (2-5)$$

其中  $k_t$  為鐵氟龍的熱傳導係數、 $A_{side}$  每個側面之面積、 $A_{bottom}$  為底面的面積。

由上述二式得知總熱損  $Q_{loss}$  為：

$$Q_{loss} = Q_{side} + Q_{bottom} \quad (2-6)$$

而電源供應器上輸出之功率值  $Q_{total}$  為：

$$Q_{total} = I \times V \quad (2-7)$$

其中  $I$  為電流、 $V$  為電壓。

最後由(2-7) (2-8)可計算出熱損失比  $\varepsilon$  為：

$$\varepsilon = \frac{Q_{loss}}{Q_{total}} \quad (2-8)$$

#### 2-3-4 熱通量

加熱銅塊厚度只有 5mm 且以熱傳係數極低之玻璃纖維環氧樹脂

包覆，因此忽略加熱面至工作面之側向熱損，工作面之實際加熱熱通

量  $q''_{actual}$  為：

$$q''_{actual} = \frac{Q_{total}(1-\varepsilon)}{A_{chip,s}} \quad (2-9)$$

其中  $A_{chip,s}$  為加熱片工作面積。

### 2-3-5 加熱塊表面溫度

在測試流道下方，距離測試片表面  $t$  處平面上，埋有三支熱電偶，如圖 2-5 所示。先將此三支熱電偶所量出的溫度  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  之算術平均值作為加熱片面下方之平均溫度  $T_{ave}$  為：

$$T_{ave} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (2-10)$$

因為熱電偶埋於晶片表面之下，故晶片的表面溫度需用傅立葉熱傳導定律(Fourier's law of heat conduction)加以修正：

$$T_{wall} = T_{ave} - \frac{q''_{actual}}{k} \cdot t \quad (2-11)$$

其中  $t$  為熱電偶至晶片表面距離， $k$  為測試晶片的熱傳導係數。

### 2-3-6 熱傳遞係數

次冷態熱傳遞係數  $h_{sat}$  ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ) 在本實驗中定義為：

$$h_{sat} = \frac{q''_{actual}}{(T_{wall} - T_{sat})} \quad (2-12)$$

其中  $T_{wall}$  與  $T_{sat}$  分別為測試段的平均表面溫度和工作流體的飽和溫

度。

### 2-3-7 水力發展長度

水力發展長度  $L_h$  之計算由表 2-1[18]得之計算方程式為：

$$L_h = 0.075 \text{Re} D_h$$

(2-13)

其中  $D_h$  為水力直徑：

$$D_h = \frac{4A_c}{p^*} \quad (2-14)$$

其中  $\text{Re} = U D_h / \nu$ ， $A_c$  為流道截面積、 $p^*$  為截面積周長。

套入本實驗系統之條件計算後，可求得本實驗系統之水力發展長度須大於 495mm。而本實驗管道設計符合此標準。

### 2-3-8 不準度分析

本論文實驗值之不準度分析乃參考 S. J. Kline [19] 所建議的不準度分析，本實驗之不準度分析附於表 2-2。

Hydrodynamic entrance length  $L_h$  and thermal entrance length  $L_t$  for laminar flow inside ducts\*

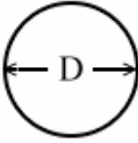
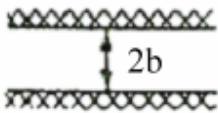
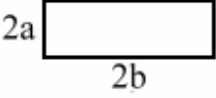
| Geometry   | $\frac{L_h/D_h}{Re}$ | $\frac{L_t/D_h}{Pe}$      |                         |
|--|----------------------|---------------------------|-------------------------|
|  |                      | Constant wall temperature | Constant wall heat flux |
|   | 0.056                | 0.033                     | 0.043                   |
|   | 0.011                | 0.008                     | 0.012                   |
|  |                      |                           |                         |
| $\frac{a}{b} = 0.25$   | 0.075                | 0.054                     | 0.042                   |
| 0.50   | 0.085                | 0.049                     | 0.057                   |
| 1.0  | 0.09                 | 0.041                     | 0.066                   |

表 2-1 水力發展長度表[18]

| <b>Parameter</b>   | <b>Inaccuracy</b>           | <b>Uncertainty</b>      |
|--|-----------------------------|-------------------------|
| <b>(Channel Geometry)<br/>Length,Width and Height</b>                  | $\pm 0.05(\text{mm})$       | $\pm 2.5\%$             |
| <b>(Simulated Chip )<br/>Thickness</b>                                 | $\pm 0.05(\text{mm})$       | $\pm 0.83\%$            |
| <b>Chip Area</b>   |                             | $\pm 0.7\%$             |
| <b>Temperature</b>   | $\pm 0.5(^{\circ}\text{C})$ | $\pm 1.7\%(\text{max})$ |
| <b>Temperature difference<br/>(<math>\Delta T_{\text{sat}}</math>)</b> |                             | $\pm 1.7\%(\text{max})$ |
| <b>Heat Flux</b>   |                             | $\pm 9.7\%(\text{max})$ |
| <b>Heat transfer<br/>coefficient(h)</b>                                |                             | $\pm 9.8\%(\text{max})$ |



表 2-2 不準度分析

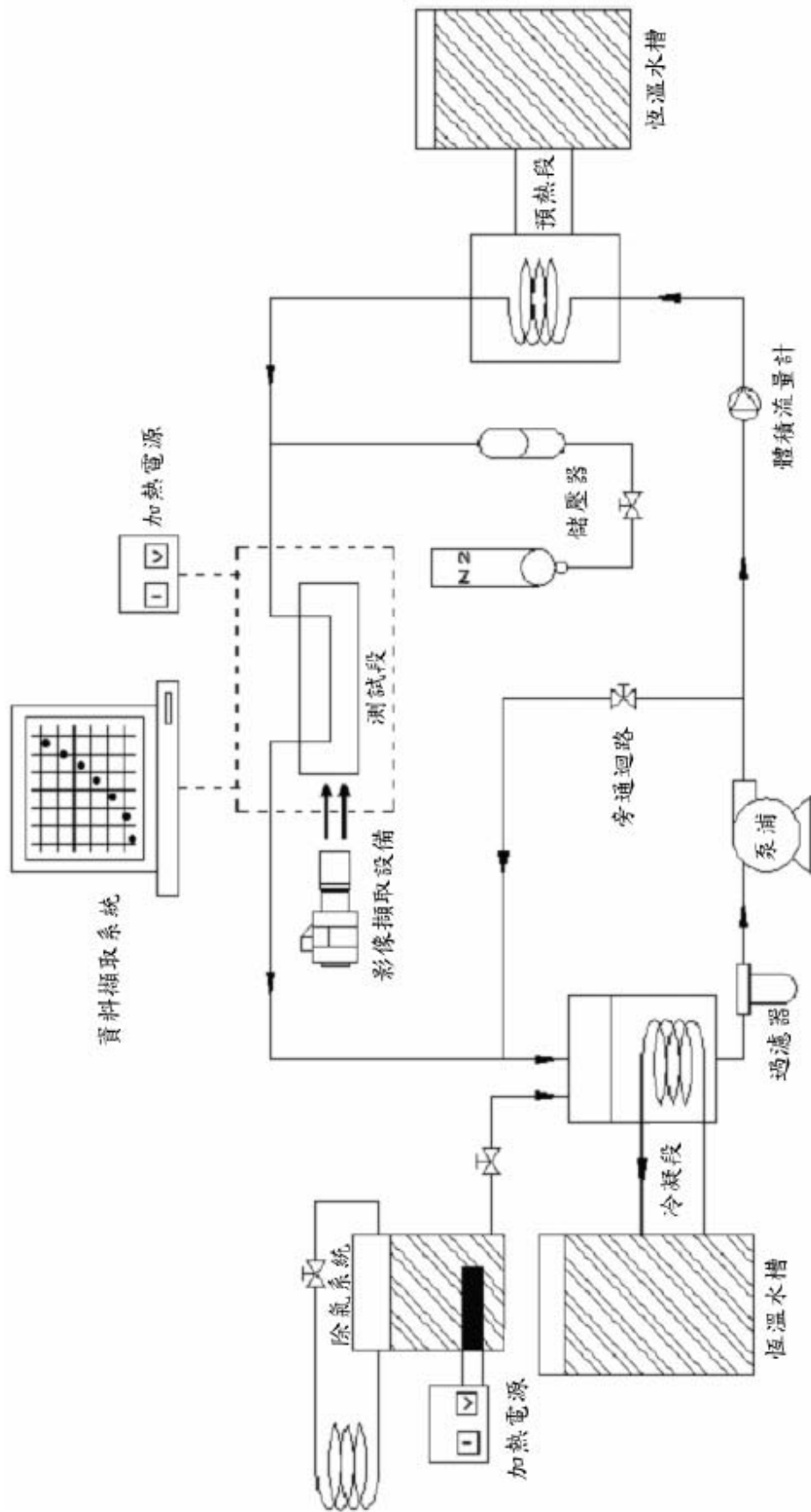


圖 2-1 實驗設備環路示意圖



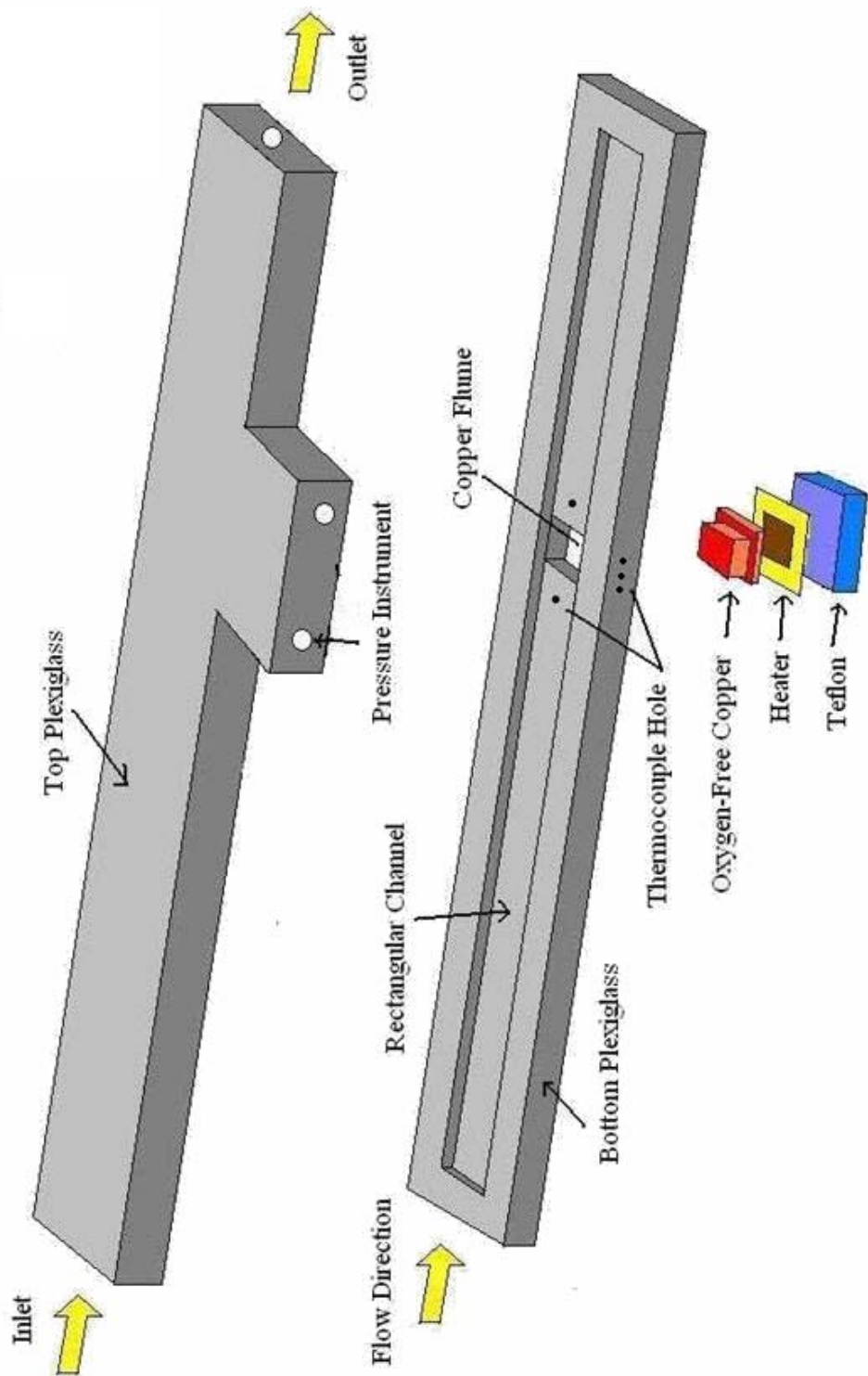


圖 2-2 測試段組合圖

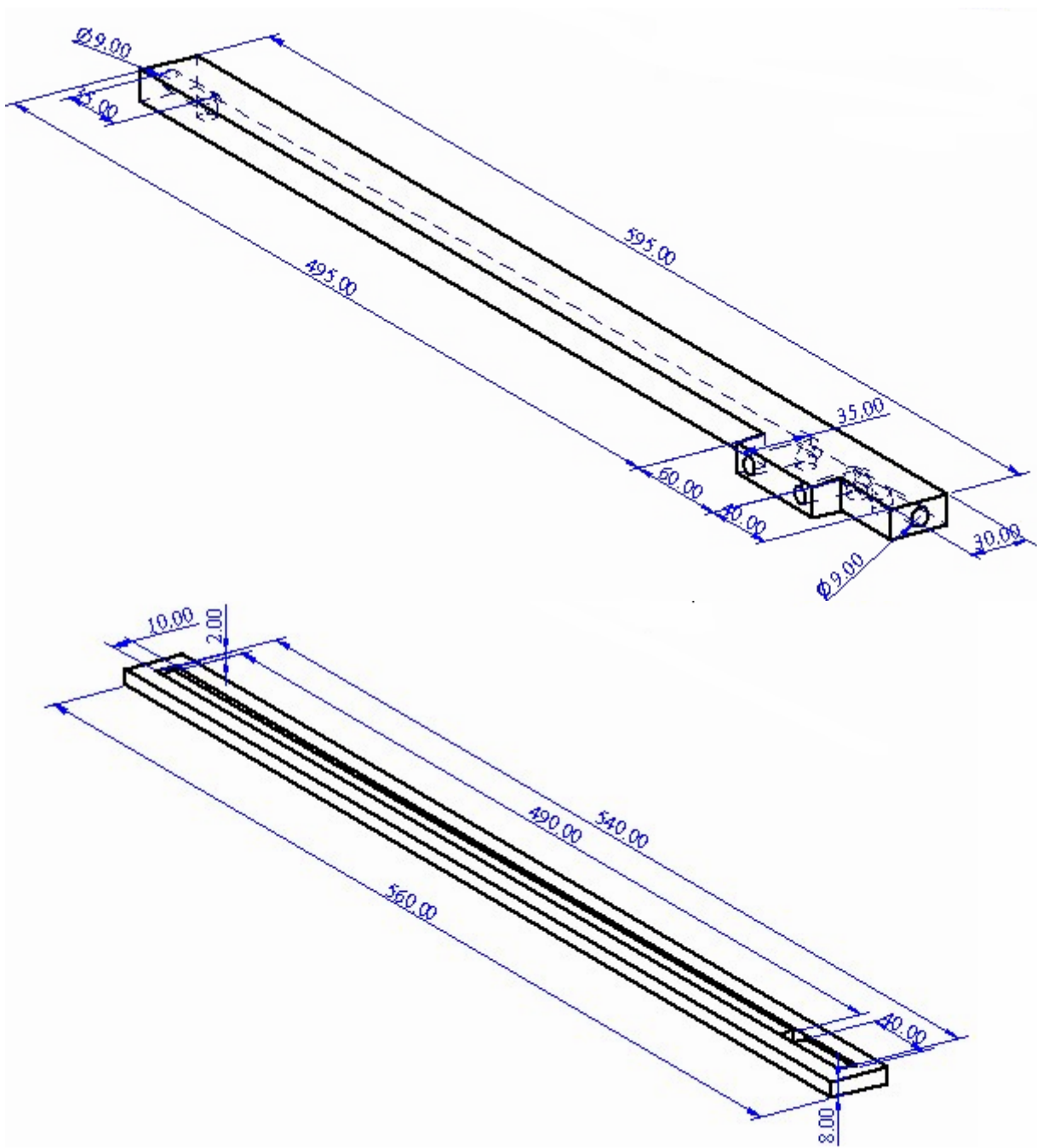


圖 2-3 測試段流道尺寸圖

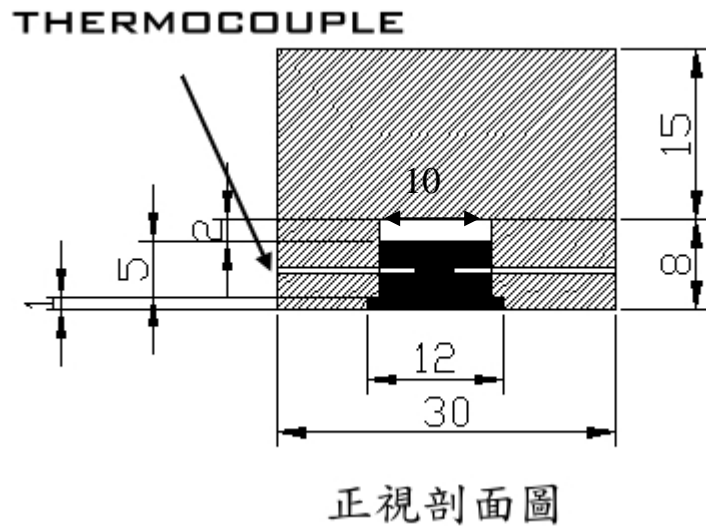
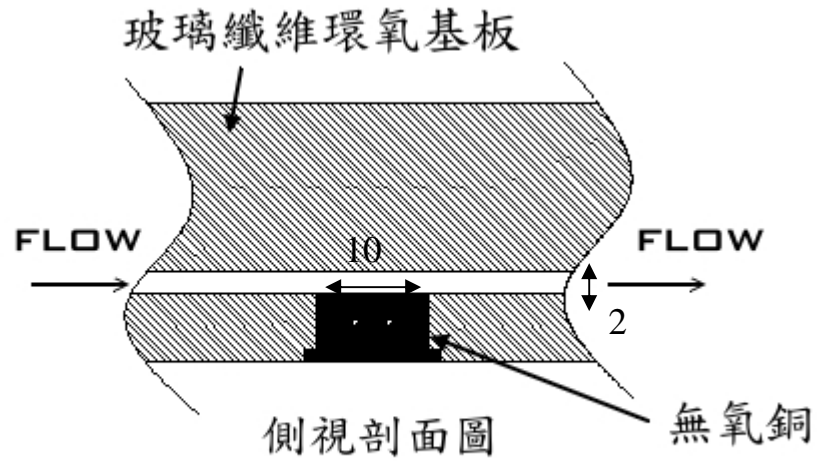


圖 2-4 測試流道中加熱晶片部位之示意圖(單位 mm)

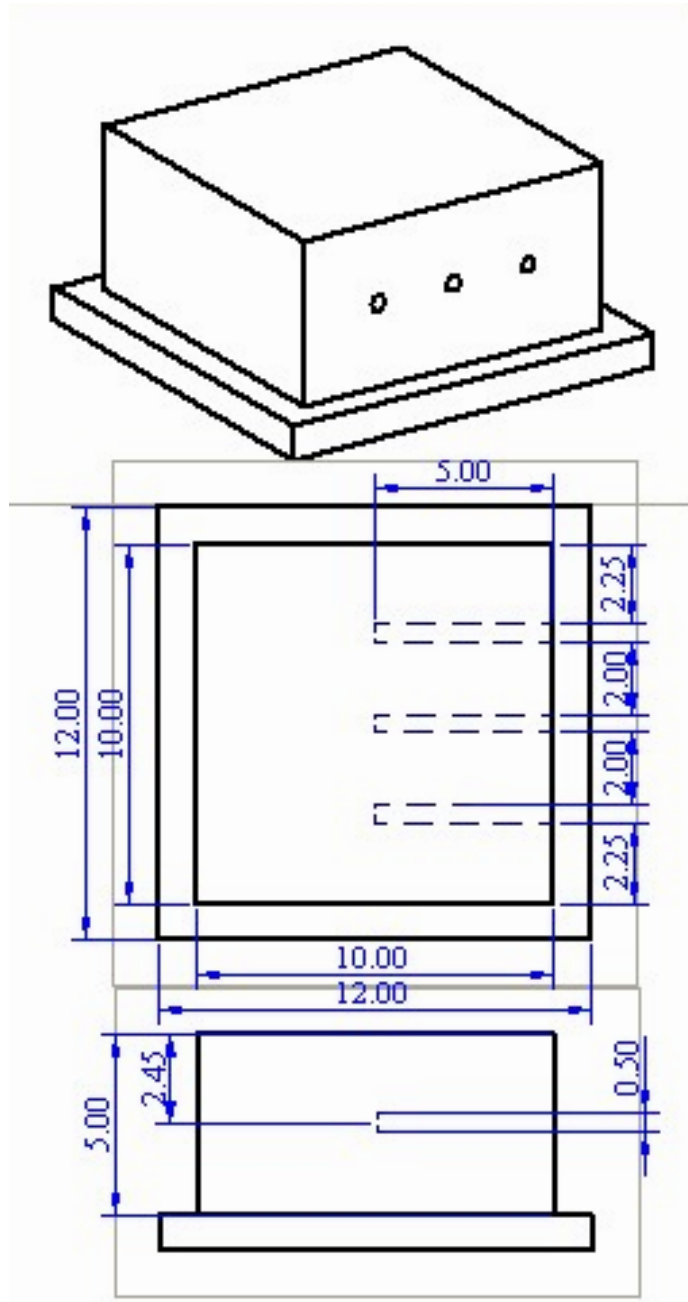


圖 2-5 銅塊中熱電偶埋置的位置圖(單位:mm)

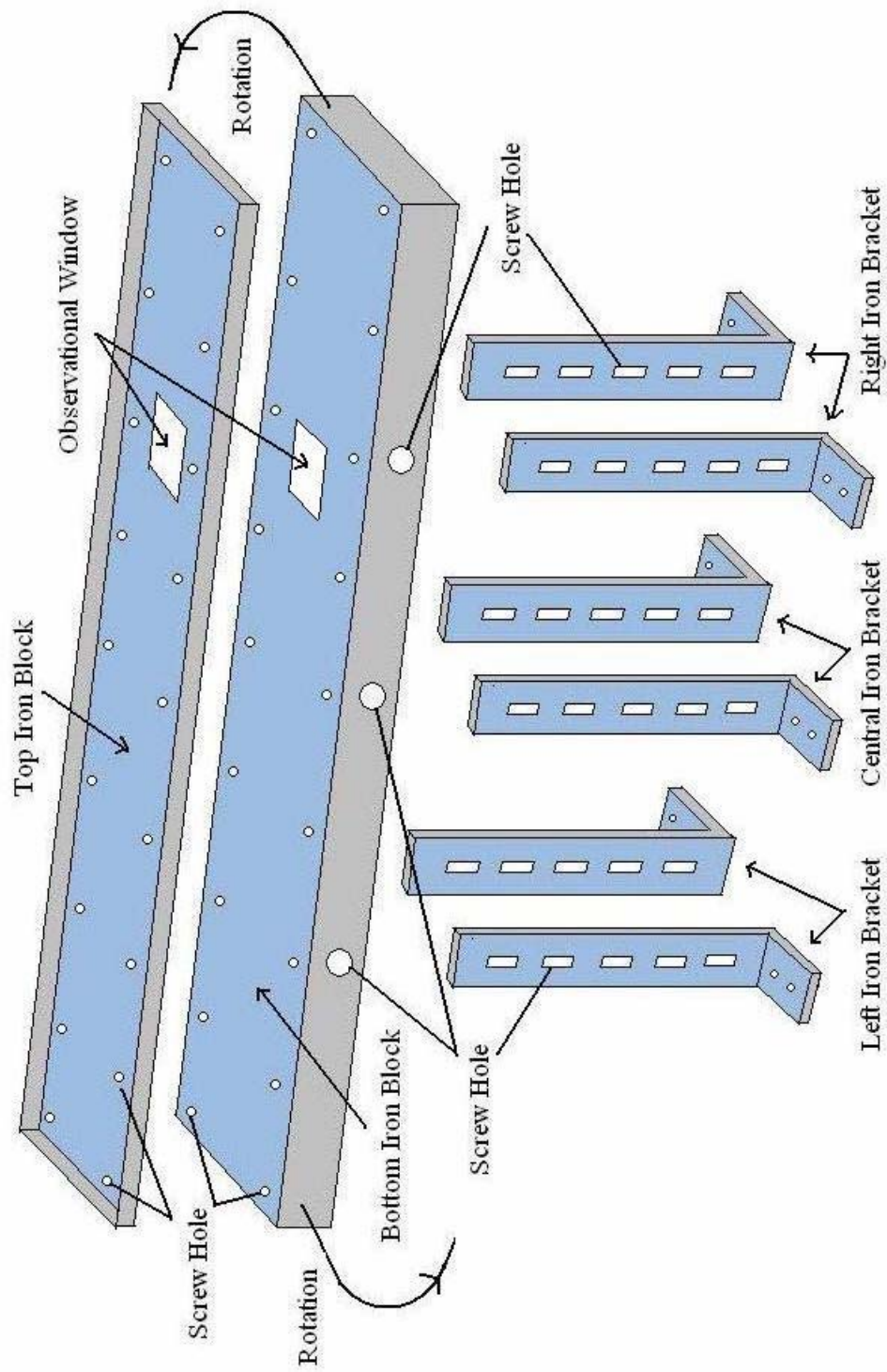
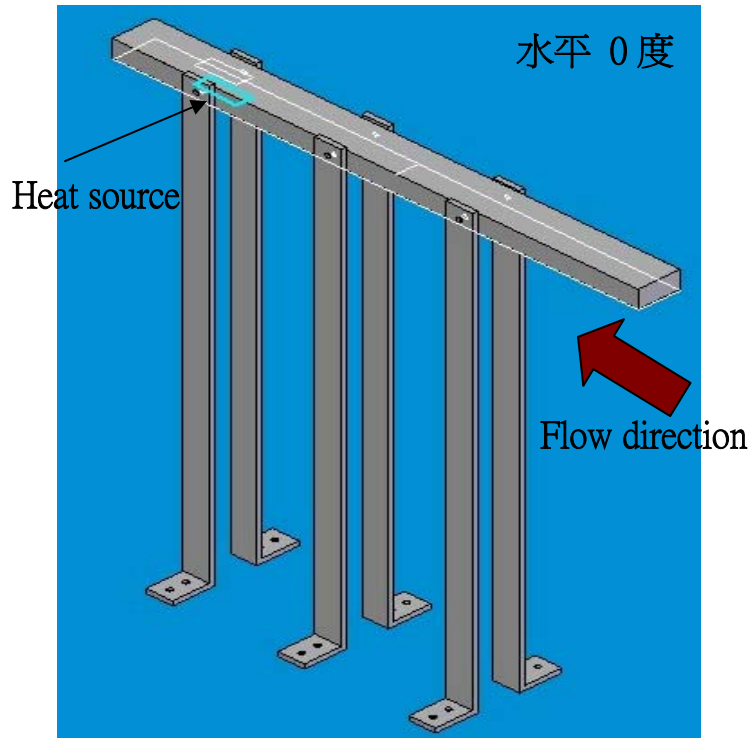
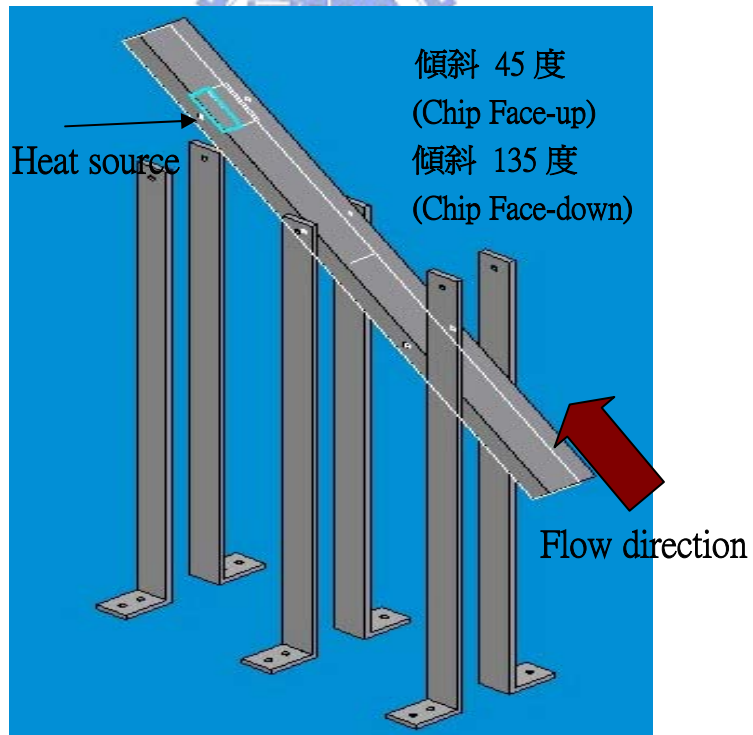


圖 2-6 測試段流道拖架設計圖

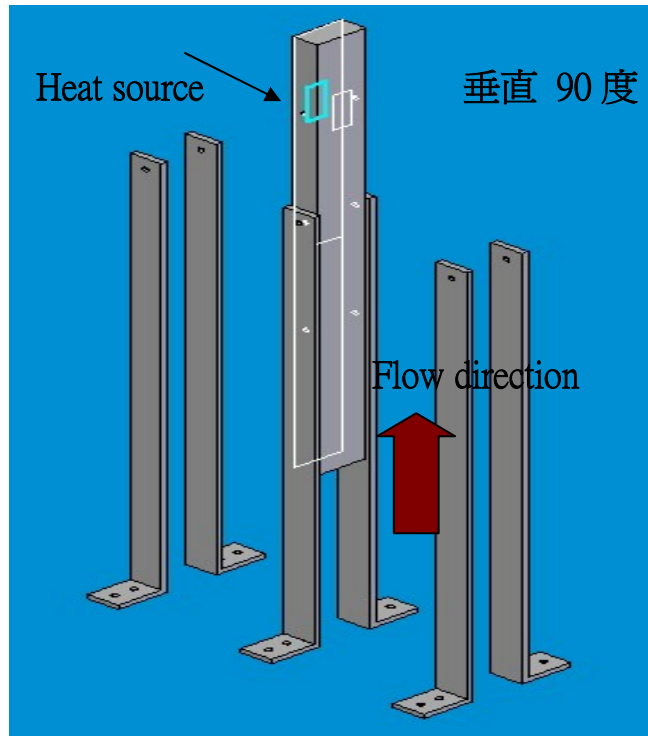


(a)



(b)

圖 2-7 流道方位設計示意圖(a)水平(0°)(b)傾斜(45°、135°)



(c)

圖 2-7 流道方位設計示意圖(c)垂直(90°)

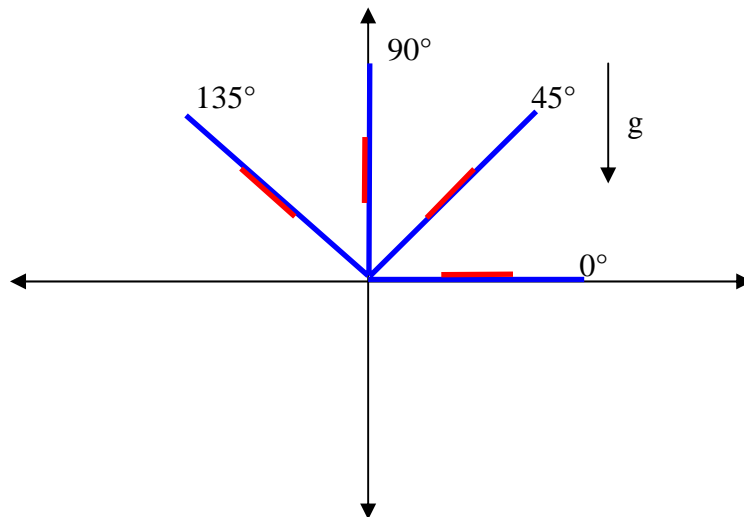


圖 2-8 流道方位示意圖

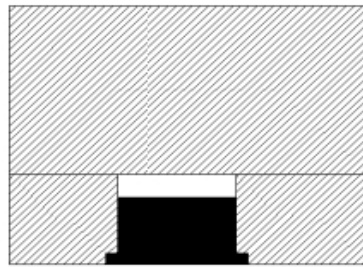
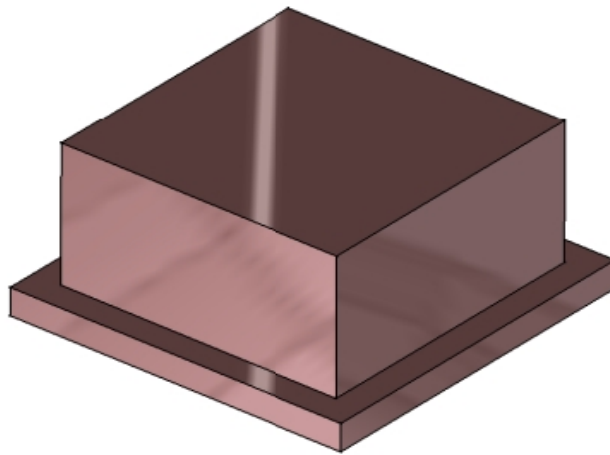
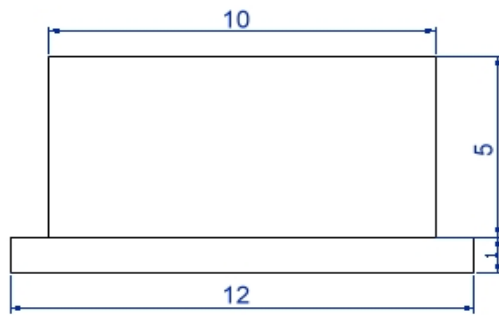
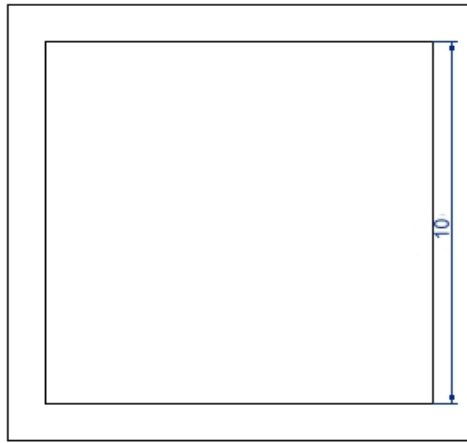


圖 2-9 平滑表面測試模擬晶片



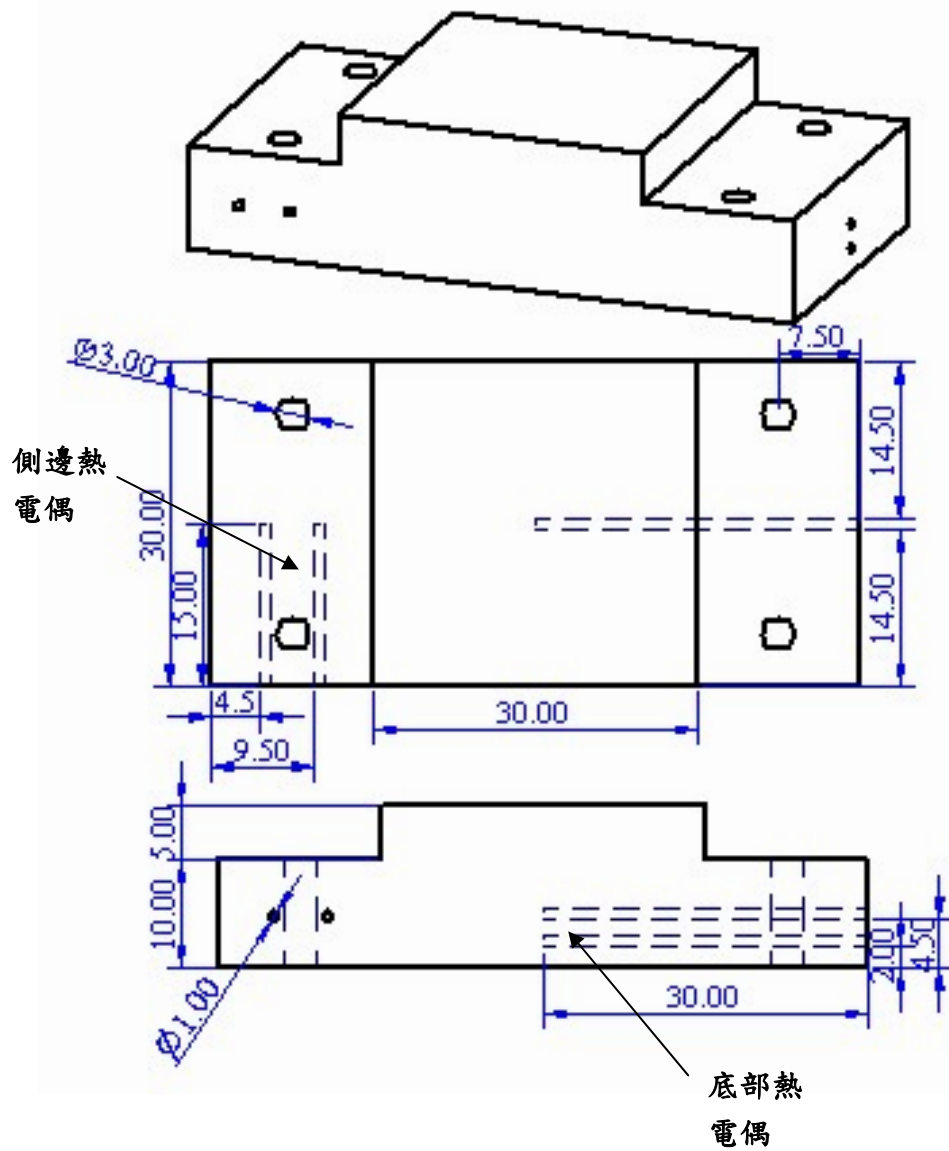


圖 2-10 鐵氟龍內熱電偶埋設圖

### 第三章 結果討論與分析

本實驗將測試介電液 FC-72 在流道方位  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  中，工作流體由下往上於截面積  $10\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，水力直徑  $D_h=3.33\text{mm}$  的狹窄矩形流道中，流經一塊模擬平滑加熱銅片，銅片表面尺寸為  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，在不同雷諾數 ( $Re=2000$ 、 $1200$ 、 $500$ )，和不同次冷度 ( $\Delta T_{sub}=28^\circ\text{C}$ 、 $21.5^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ )，於一大氣壓狀態下進行流動沸騰實驗，並拍攝流譜觀測氣泡特性與發展情況。

本次流動沸騰實驗結果，FC-72 之熱傳特性將以沸騰曲線來表達，探討熱通量與加熱銅片表面過熱度之間的關係，且對應各種實驗狀態下，所拍攝之流譜照片圖，並分析比較在不同實驗狀態下之熱傳係數、臨界熱通量與氣泡特性。最後再參考文獻資料，建立新的經驗式，以預測本次實驗狀態下之臨界熱通量與熱傳係數。

#### 3-1 熱損實驗

本實驗之熱損測試，是在一大氣壓下對應飽和溫度  $56.6$ 、 $Re=2000$ 、 $\Delta T_{sub}=28^\circ\text{C}$ ，在水平矩形流道(流道方位= $0^\circ$ )中，加熱功率為  $0.2$  至  $36.7\text{W}$  範圍下，即對應之熱通量  $2$  至  $367\text{ kW/m}^2$  的熱損實驗。其實驗結果如圖 3-1 所示。

由圖中可發現，熱損占總加熱瓦數的比率隨著加熱瓦數提高而逐

漸降低，並趨於一固定值。實驗結果發現，當加熱功率大於 4W，也大約相當於沸騰起始後，熱損百分比最高為 5%。此結果與 Hsu[16] 的熱損數值模擬中，熱損百分比為 1%之結果相近，所以在本論文的流道沸騰實驗，熱散失的情形是在可控制範圍。

### 3-2 重複度實驗

為了確保實驗之可靠性，在改變實驗參數之前，先於一大氣壓下、 $Re=2000$ 、 $\Delta T_{sub}=28^{\circ}C$ ，傾斜矩形流道(流道方位= $45^{\circ}$ )中，進行重複度實驗，此實驗是控制其工作壓力、流速、次冷度與流道方位於相同的狀態，在不同之工作日進行三次相同之實驗，觀察其沸騰曲線的變化。圖 3-2 顯示，在不同工作日，相同實驗狀態下之沸騰曲線，其結果大致一致，三條沸騰曲線中皆有相同的沸騰起始點(ONB)與臨界熱通量(CHF)。惟獨在熱通量  $50\sim 150kW/m^2$  區域間，有著些微的差異，其原因為在此熱通量區域間為部份發展核沸騰區，由流譜的觀察可發現，在此區域氣泡還未完全佈滿於銅片表面，在不同工作日相同熱通量時，氣泡於銅片表面所產生之位置與涵蓋密度皆有微小的不同，由於此熱通量區域成核址成長的不穩定，故造成不同工作日在此區域沸騰曲線的上下小幅偏移。

### 3-3 遲滯現象

在本流動沸騰實驗中發現，增加熱通量之沸騰曲線與降低熱通量之沸騰曲線並不會完全重合，會有遲滯現象(Hysteresis effect)的產生。當從完全沸騰區降低熱功率時，大部份的凹坑已被活化，成核址會更平均的分布於加熱銅片表面，更易於氣泡的成長。在降低熱通量的實驗中，氣泡將持續沸騰，相對於上升熱通量的實驗有較高之成核密度，故有較高的散熱效率。此外沸騰在起使熱通率時不會突然終止，直到加熱功率降低至成為單相強制對流的情形，沸騰曲線才再開始重合。圖 3-3 為在一大氣壓下、 $Re=2000$ 、 $\Delta T_{sub}=28^{\circ}C$ ，傾斜矩形流道(流道方位= $45^{\circ}$ )中，所測量出的遲滯現象。



### 3-4 狹窄矩形流道平滑加熱面之沸騰曲線探討

圖 3-4 沸騰曲線中，描繪出 FC-72 在次冷度  $28^{\circ}C$  狀態下，狹窄矩形流道中基本的沸騰曲線與沸騰模式。從 A 點開始加熱為單相熱傳區 (Single phase convection)，隨著熱通率增加，晶片溫度也逐漸增加，直至飽和溫度 ( $T_{sat}:56.6^{\circ}C$ ) 後，工作流體仍然維持單相熱傳機制，這是因為銅片表面凹坑內殘存的微氣核很小，所以要在很高的表面過熱度沸騰才會發生，此外流體次冷度對於成核現象的抑制也是其原因之一。而加熱直到 B 點，壁面過熱度足以活化成核孔穴，於是產

生沸騰起始點(ONB:Onset of Nucleate Boiling)。在 B 點之後核沸騰機制開始形成，氣泡會在加熱表面局部性的產生，此一區域為部份發展核沸騰區(Partially Developed Nucleate Boiling)，在此區域，成核址還未全部覆蓋整個加熱表面，氣泡及其影響範圍只及於加熱表面的一部份。在氣泡影響不到的區域，其熱傳的機制仍以單相強制對流為主，由於成核址成長的不穩定，在部份發展核沸騰區的曲線往往會小幅的上下偏移。熱通率增加至 C 點後，根據流譜的觀察，成核氣泡覆蓋了整個加熱表面，形成完全發展核沸騰區(Fully Developed Nucleate Boiling)，此區域氣泡成核密度很高，相較於前面兩種機制擁有極佳的熱傳效率。當熱通率持續增加，氣泡體積過大，相互結合後在表面形成氣膜，由於管道狹窄，氣泡也將逐漸阻塞住工作流體，導致銅片表面沒有新的工作流體補充，造成偏離核沸騰現象(Departure Nucleate Boiling)，此時銅片之表面溫度由觀察可發現，將瞬間提高  $10^{\circ}\text{C}$  以上，並從流譜觀察得知，其氣泡已逐漸在晶片表面成膜，此時即判定為接近臨界熱通量，即 D 點。隨後開始降低熱通量，大部份的凹坑已被活化，氣泡將持續沸騰，直至 E 點，從新回到單相熱傳區(Single phase convection)。

### 3-5 氣泡成長流譜之探討

圖 3-5、3-6 為氣泡在一大氣壓下、 $\text{Re}=2000$ 、 $\Delta T_{sub}=28^{\circ}\text{C}$ ，傾斜

矩形流道(流道方位=45°)中隨著加熱功率提高,所發展出來的氣泡成長流譜圖與其對應沸騰曲線圖。由圖 3-5(1)照片可發現,沸騰起始點(ONB:Onset of Nucleate Boiling),發生於晶片下游中間,隨著熱通量增加,氣泡由晶片表面下游中間處開始逐漸成長(圖 3-5 照片(2)(3)),在進入完全發展核沸騰區(Fully Developed Nucleate Boiling)之前,氣泡幾乎佈滿晶片表面之中下游區域(圖 3-5 照片(4)(5))。隨後進入完全發展核沸騰區(圖 3-5 照片(6)~(10)),氣泡已完全佈滿整個晶片表面,並隨著熱通量的增加,氣泡尺寸越來越大,並逐漸聚合,最終阻止工作液體補充至加熱表面,而產生臨界熱通量。

Heindel 等[20]發現,沸騰起始具有兩種不同之模式,第一種模式中沸騰為突發性產生,當加熱至一定熱通量,氣泡將會劇烈的在整個加熱面上產生,造成晶片溫度驟降,此為驟變模式。第二種模式中核沸騰的發生,氣泡為局部性於加熱表面下游逐漸產生,隨著熱通量增加而成長。因此沸騰曲線平滑成長,此種模式為漸變模式。Heindel 等[20]認為此兩種模式的發生無法由流速、次冷度、流道高度或是加熱位置來判斷,是一種隨機的現象。而本次實驗在所有的實驗情況下,沸騰之起始模式皆為漸變模式。圖 3-7(a)為 Heindel 等[20]於流道高度 6.96mm、 $Re=13000$ 、 $\Delta T_{sub}=4.8^{\circ}C$ 情形下,描繪出在漸變模式下之氣泡成長圖,圖 3-7(b)為本次實驗在流道高度 2mm、 $Re=2000$ 、

$\Delta T_{sub}=28^{\circ}\text{C}$  情形下，所觀察之氣泡成長圖，可發現其氣泡成長過程之結果與文獻相似，氣泡是由下游端中間處開始逐漸成長最終佈滿銅片表面。

### 3-6 流速在傾斜流道方位( $45^{\circ}$ )中對於沸騰曲線的影響

圖 3-8(a)(b)(c)為在一大氣壓下，流道方位  $45^{\circ}$ ，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )為  $28^{\circ}\text{C}$ ,  $21.5^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$  情況下，於三種不同雷諾數( $\text{Re}=2000, 1200, 500$ )條件下之沸騰曲線比較圖。當沸騰起始點(ONB: Onset of Nucleate Boiling)還未發生前，主要之熱傳機制為單相強制對流熱傳，由圖中可發現此區域中，相同之熱通量情況下，流速越高壁溫越低，曲線越往左偏移，此結果與 Maddox 與 Mudawar[4]文獻中提到增加流速可以增加工作流體在單相時的熱傳能力之結果相符。此外由圖中可發現，流速越高沸騰起始之加熱銅片表面過熱度越低，這是由於流速越快，在加熱晶片表面所造成的擾動更大，有利於成核孔穴的活化之原因所造成。

沸騰起始產生後，熱傳機制進入部份發展核沸騰區，由於氣泡還未影響之區域，其熱傳機制仍以單相強制對流為主，故在沸騰起始初期，流速越高壁面過熱度仍較低。當熱通量再逐漸增高，流速對於壁溫的影響逐漸減小，熱傳機制由核沸騰主導，故不同流速之沸騰曲線

在此區域逐漸逼近。

圖 3-9(a)(b)(c)為圖 3-8 於核沸騰區之放大圖，此圖是要探討流速對於臨界熱通量之影響。由圖中可發現在核沸騰區，流速越大沸騰曲線仍稍稍偏左，雖然在核沸騰區，熱傳機制已逐漸由核沸騰主導，但由於流速越快越可以幫助氣泡脫離晶片表面，延緩氣泡堆積於加熱表面，故流速越快可得到較高之臨界熱通量。由圖可得知在次冷度( $\Delta T_{sub}$ )=28°C 的情況下，雷諾數(Re)為 2000、1200、500 時臨界熱通量分別為 371、356、325kW/m<sup>2</sup>。在次冷度( $\Delta T_{sub}$ )=21.5°C 的情況下，雷諾數(Re)為 2000、1200、500 時臨界熱通量分別為 336、309、277kW/m<sup>2</sup>。在次冷度( $\Delta T_{sub}$ )=15°C 的情況下，雷諾數(Re)為 2000、1200、500 時臨界熱通量分別為 271、257、226kW/m<sup>2</sup>。由實驗結果可發現，當次冷度為 28°C 狀態下，雷諾數為 500 時之臨界熱通量相對於雷諾數 2000 時之臨界熱通量，降低 12.4%。此結果與 Hsu[16]在水平矩形流道之核沸騰實驗結果吻合。

圖 3-10(a)(b)(c)為在一大氣壓下，流道方位 45° 次冷度( $\Delta T_{sub}$ )為 28°C, 21.5°C, 15°C 情況下，於三種不同雷諾數(Re=2000, 1200, 500)條件下之熱傳係數變化圖。由圖中可發現，在任一條曲線中，隨著熱通量增加沸騰越旺盛，成核址密度增加氣泡帶走熱的能力越來越強，故熱傳係數隨著熱通量增加而增加直至臨界熱通量的產生。此外在同



一次冷度的情況下，由於流速越快，有利成核孔穴的活化，亦可幫助氣泡更容易脫離加熱表面，故在同一次冷度中流速越快熱傳係數越高。由實驗結果發現，當次冷度( $\Delta T_{sub}$ )= $28^{\circ}\text{C}$ 的情況下，雷諾數(Re)為 2000 時，熱傳係數可達  $8.12\text{kW}/\text{m}^2\text{C}$ 。在次冷度( $\Delta T_{sub}$ )= $28^{\circ}\text{C}$ 的情況下，雷諾數為 500 時之熱傳係數相對於雷諾數 2000 時之熱傳係數，降低 15.9%。

圖 3-11(a)(b)(c)為在一大氣壓下，流道方位  $45^{\circ}$  次冷度( $\Delta T_{sub}$ )為  $28^{\circ}\text{C}$ ,  $21.5^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$  情況下，於三種不同雷諾數(Re=2000, 1200, 500)條件下之氣泡流譜圖。分別依照熱通量 100、150、200、250、300 $\text{kW}/\text{m}^2$  以及各次冷度下之臨界熱通量來進行比較。觀察在相同次冷度以及熱通量下，不同流速對於氣泡發展的影響。由圖中可發現，在中低熱通量時(約 200 $\text{kW}/\text{m}^2$  以下)，不同流速情況下其氣泡成核址密度以及氣泡脫離之半徑差異並不大，惟獨在高熱通量尤其是接近臨界熱通量時，可以觀察到流速對於氣泡成核發展的影響。由照片可觀察到，在高熱通量和接近臨界熱通量時，相同次冷度情況下低流速時，由於成核址密度高，流速又較低，氣泡較易相互接合成大氣泡，並聚積於晶片表面上方。高流速時，由於速度會幫助氣泡脫離晶片表面，並迅速帶走氣泡使其遠離晶片，故高熱通量時氣泡較分散亦可延緩臨界熱通量的發生。此外可發現當次冷度越低，即工作流體溫度越高，

在高熱通量和接近臨界熱通量時，導致氣泡脫離半徑較大，流速對於氣泡的脫離與相互結合的程度影響就越顯著。

### 3-7 次冷度在傾斜流道方位(45°)中對於沸騰曲線的影響

圖 3-12(a)(b)(c)為在一大氣壓下，流道方位 45° 雷諾數(Re): 2000、1200、500 之情況下，於三種不同次冷度( $\Delta T_{sub}$ ):28°C, 21.5°C, 15°C 條件下之沸騰曲線比較圖。由圖中可發現，在沸騰起始點 (ONB: Onset of Nucleate Boiling) 還未發生前之單相熱傳區，在相同加熱通量時，次冷度對於壁過熱度有顯著的影響，由實驗結果可發現，在單相熱傳區相同流速與熱通量時，平均降低次冷度 1°C 壁溫也約增高 1°C。加熱直至沸騰產生後，隨著熱通量持續升高，晶片表面成核址密度逐漸提高，熱傳機制已由核沸騰主導，不同次冷度之沸騰曲線逐漸逼近，顯示工作流體之溫度對於壁過熱度的影響已大大降低。

圖 3-13(a)(b)(c)為圖 3-12 於核沸騰區之放大圖，此圖是要探討次冷度對於臨界熱通量之影響，由圖中可發現，在任一流速狀態下，次冷度越低，臨界熱通量越減小，同時臨界熱通量產生時之加熱銅片表面過熱度也降低。這是由於在狹窄的工作流道中，臨界熱通量發生的主要原因為成核氣泡互相結合，又受到加熱晶片上方上壁流道

之壓迫，使得氣泡聚集於晶片表面，並形成氣模而造成偏離核沸騰之現象。於是成核氣泡之大小，在狹窄流道中將影響臨界熱通量的產生。由於次冷度較高之流體可使氣泡凝結加速，延緩氣模之產生，所以可以提高晶片表面對於壁溫之承受能力，因而提高臨界熱通量。相反的，低次冷度之流體將會提早發生偏離核沸騰之現象而產生臨界熱通量。由實驗結果得知，在雷諾數(Re)為 2000 的情況下，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )=28°C、21.5°C、15°C 時臨界熱通量分別為 371、336、271kW/m<sup>2</sup>。在雷諾數(Re)為 1200 的情況下，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )=28°C、21.5°C、15°C 時臨界熱通量分別為 356、309、257kW/m<sup>2</sup>。在雷諾數(Re)為 500 的情況下，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )=28°C、21.5°C、15°C 時臨界熱通量分別為 325、277、226kW/m<sup>2</sup>。由實驗結果可發現，當雷諾數(Re)為 2000 的情況下，次冷度為 15°C 之臨界熱通量相對於次冷度 28°C 時之臨界熱通量，降低 27%。此結果與 Hsu[16]在水平矩形流道之核沸騰實驗結果相接近。此外當雷諾數(Re)為 2000 的情況下，次冷度 28°C 時，臨界熱通量發生之銅片表面過熱度為 45.7°C，而次冷度 15°C 時，臨界熱通量發生之銅片表面過熱度為 43.5°C，得知當次冷度降低 13°C，臨界熱通量發生時之銅片表面過熱度提前了 2.2°C。

圖 3-14(a)(b)(c)為在一大氣壓下，流道方位 45°雷諾數(Re):  
2000、1200、500 之情況下，於三種不同次冷度( $\Delta T_{sub}$ ):28°C, 21.5

°C, 15°C 條件下之熱傳係數變化圖。由於次冷度在沸騰區會影響氣泡成核之大小，次冷度越高時，相對工作流體溫度越低，氣泡成核半徑較小，較不易阻塞於晶片表面，故可提高散熱能力。由圖中可發現當次冷度越高熱傳係數亦提高。由於前文所提到高次冷度將會得到高臨界熱通量，因而得到較高之熱傳係數。由本實驗結果得到，當雷諾數 (Re) 為 2000 的情況下，次冷度為 15°C 之熱傳係數相對於次冷度 28°C 時之熱傳係數，降低 23.3%。

圖 3-15(a)(b)(c) 為在一大氣壓下，流道方位 45° 雷諾數 (Re): 2000、1200、500 之情況下，於三種不同次冷度 ( $\Delta T_{sub}$ ): 28°C, 21.5°C, 15°C 條件下之氣泡流譜圖。分別依照熱通量 100、150、200、250、300 kW/m<sup>2</sup> 以及各次冷度之臨界熱通量來進行比較。由照片可發現，在相同之加熱通量不同次冷度時，成核址密度的差異並不大，但成核之氣泡半徑則隨著次冷度減少而增加，此現象表示次冷度越高對於氣泡成長尺寸之抑制能力越強。這是由於較低之工作流體溫度，可有效促使氣泡凝結，縮減氣泡尺寸。而在高熱通量時，由照片可看出次冷度對於臨界熱通量的影響，照片顯示在接近臨界熱通量時，低次冷度之氣泡由於尺寸過大，相互結合並受到流道高度影響，被管道上壁壓迫，使得氣泡橫向連結發展，幾乎成一整個氣模，導致臨界熱通量的提早產生。反觀高次冷度在高熱通量時，氣泡半徑較小也較鬆散，不

易堆集於晶片表面上方，亦較不會受到上壁之壓迫，故可延緩臨界熱通量的產生。

### 3-8 傾斜流道方位(45°)中各種實驗情況下臨界熱通量之比較

圖 3-16 為本次實驗在三種雷諾數(Re:2000、1200、500)以及三種次冷度( $\Delta T_{sub}$ :28°C, 21.5°C, 15°C)於各種情況下所產生之臨界熱量整理比較圖，由圖中可發現，當次冷度越大時，即主流液體溫度越低，流速越快將可得到較高之臨界熱通量，本次實驗中於雷諾數 2000 次冷度 28°C 的實驗情況下，臨界熱通量可達到之最大值為 371kW/m<sup>2</sup>。



### 3-9 流道方位於傾斜(45°)、水平(0°)、垂直(90°)中對於沸騰曲線的影響

Zhang 等[12]認為，對於氣泡發展以及散熱能力的表現，主流液體在渠道中由下往上流動和加熱銅片表面朝上之流道方位，為較佳之擺設方位。本實驗即針對此條件下進行傾斜(45°)、水平(0°)、垂直(90°)三種流道方位之沸騰實驗，並以沸騰曲線、熱傳係數和氣泡流譜圖進行實驗結果之驗證。

圖 3-17(a)(b)(c)為流道方位在傾斜(45°)、水平(0°)、垂直(90°)情形下，於次冷度( $\Delta T_{sub}$ )28°C，不同雷諾數之沸騰曲線圖。由圖

中可發現，三種流道方位於各種相同流速與次冷度情形下，沸騰曲線幾乎趨於一致，惟獨在部分核沸騰區和臨界熱通量上有些微不同。在部份核沸騰區可發現，垂直流道方位(90°)之沸騰曲線約略偏左於傾斜(45°)和水平(0°)方位之沸騰曲線。其原因為在垂直流道上，浮力能幫助氣泡貼著晶片表面滑動，故氣泡將會藉由流速由主流液體沿著晶片表面將其帶走，導致在部份核沸騰區時，誘發較多成核址的產生，故在此區域提高了散熱能力。反觀在臨界熱通量方面則發現，垂直流道方位(90°)之臨界熱通量約略低於傾斜(45°)和水平(0°)方位之臨界熱通量。原因為當熱通量提高，氣泡劇烈產生，在傾斜和水平流道當中，浮力將幫助氣泡脫離晶片表面，再搭配工作流體之流速將晶片上方之氣泡帶走，但在垂直流道中，氣泡較不易脫離，故容易浮貼聚積於表面，使得臨界熱通量稍稍提早發生。由實驗結果得知，當次冷度為 28°C，雷諾數為 2000 之狀態下，垂直矩形流道之臨界熱通量相對於水平之臨界熱通量，降低 3.2%；相對於傾斜流道之臨界熱通量則降低 1.9%。

圖 3-18(a)(b)(c)為流道方位在傾斜(45°)、水平(0°)、垂直(90°)情形下，於次冷度( $\Delta T_{sub}$ )28°C，不同雷諾數之熱傳係數圖。可發現在完全核沸騰區，熱傳係數幾乎趨於一致，直到接近臨界熱通量時才產生變化，由於垂直流道之臨界熱通量較早發生，故熱傳係數在接

近臨接熱通量時，約分別低於水平流道和傾斜流道 5.4%和 3.2%。

總括來說，此三種流道方位之沸騰曲線以及臨界熱通量相差不大，這是由於此次實驗晶片工作面積較小，隨著主流液體氣泡很快即離開了晶片表面上方，故氣泡發展在此三種不同之流道方位中並無太大的不同，圖 3-19(a)(b)(c)為流道方位在傾斜(45°)、水平(0°)、垂直(90°)情形下，於次冷度( $\Delta T_{sub}$ )28°C，不同雷諾數之氣泡流譜圖。由照片可發現，在相同實驗條件下，成核密度與成核大小於此三種流道方位中，皆大致相同。



### 3-10 在傾斜流道中加熱銅片朝上(Face-up)(45°)與加熱銅片朝下(Face-down)(135°)對於沸騰曲線的影響

Zhang 等[12]提到，當加熱銅片擺置相對於重力朝上與朝下時，浮力對其氣泡發展之特性與脫離銅片表面之情形有顯著的影響。本實驗於傾斜角度情形下，將對加熱銅片朝上(Face-up)(45°)與加熱銅片朝下(Face-down)(135°)於相同實驗狀態下，進行核沸騰實驗，並以沸騰曲線和氣泡流譜圖進行實驗結果之探討。

圖 3-20(a)(b)(c)為加熱銅片朝上(Face-up)(45°)與加熱銅片朝下(Face-down)(135°)於次冷度( $\Delta T_{sub}$ )28°C，不同雷諾數之沸騰曲線圖。由圖中可發現，在單相熱傳區，加熱銅片朝上與朝下對散熱能力

並沒有太大的影響，在相同熱通量下，表面壁溫大致相同。當沸騰起始後，由於成核址密度剛開始發展的不穩定，還未能看出浮力對於銅片方位的影響，但大約在熱通量  $100\text{kW/m}^2$  後，沸騰曲線開始分離，相對於銅片朝下( $135^\circ$ )之情形，銅片朝上( $45^\circ$ )之沸騰曲線越向左偏移，且有較高臨界熱通量。由實驗結果得知，當次冷度為  $28^\circ\text{C}$ ，雷諾數為 2000 之狀態下，加熱銅片朝下之臨界熱通量相對於加熱銅片朝上之臨界熱通量降低 18%。此結果與 Gersey 和 Mudawar[11] 文獻中，提到水平流道加熱片朝上與朝下在相同實驗情況下之臨界熱通量相差大約 18% 之結論大致相同。




圖 3-21(a)(b)(c) 為加熱銅片朝上(Face-up)( $45^\circ$ )與加熱銅片朝下(Face-down)( $135^\circ$ )於次冷度( $\Delta T_{\text{sub}}$ ) $28^\circ\text{C}$ ，不同雷諾數之氣泡流譜圖。由照片可發現，受到浮力的影響，銅片朝下時氣泡不易脫離表面，故氣泡在銅片表面發展的時間比較長，尺寸也比較大。在熱通量大約  $200\text{kW/m}^2$  以後，銅片朝下之氣泡已開始互相聚合，並很快的橫向相互連結，最終在表面形成氣膜，導致臨界熱通量的提早產生，銅片朝上之氣泡，此時還並未大量互相結合，仍可以看到一顆顆個別分離的氣泡，顯示浮力對於氣泡的脫離與發展有顯著的影響。

### 3-11 各流道方位角度( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ )之臨界熱通量(CHF)比較



圖 3-22(a)(b)(c)為各流道方位角度於不同次冷度和不同雷諾數情形下之臨界熱通量比較圖。由圖中可發現，在加熱銅片朝上之流道方位( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ )其臨界熱通量之差異不大，反觀加熱銅片朝下( $135^\circ$ )之臨界熱通量則遠遠低於其餘三者。在次冷度  $28^\circ\text{C}$  雷諾數為 2000 之情形下，加熱銅片朝下之臨界熱通量低於加熱銅片朝上者約 17.8%。

圖 3-23 為各角度之臨界熱通量與 Gersey 等[11]、Zhang 等[12]之文獻比較圖。由圖中可發現，文獻結論中任何實驗情況下，加熱銅片朝下( $135^\circ$ )方位之臨界熱通量亦低於加熱片朝上之方位( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ )，此結果與本次實驗結果相似。Gersey 等[11]文獻所測量之臨界熱通量結果都較本實驗相對值低，其原因為 Gersey 等[11]使用了九個加熱晶片，故上游成長之氣泡會影響下游之晶片表面氣泡之發展，導致臨界熱通量的提早產生。而由 Zhang 等[12]之結果可發現，當流速越低，流道方位對臨界熱通量的影響就越大。

### 3-12 臨界熱通量(CHF)之經驗式與預測值

Mudawar 和 Maddox[1]認為，臨界熱通量的產生機制有兩種，當低流速時，在接近臨界熱通量，熱表面上有一層所謂的巨液膜介於葦狀大氣塊與熱表面之間，大氣塊會阻隔主流液體與表面接觸，而巨液膜因蒸發而越來越薄，最終導致乾化，產生臨界熱通量。而當高流速

時，在接近臨界熱通量的高熱通量情況下，接近加熱表面的蒸氣產生率非常高，蒸氣以氣柱的形態離開熱表面，氣柱旁的液體則向熱表面流動以補充蒸發所消耗的液體，當熱通量達到臨界值時，兩相間的相對速度將使汽液介面不穩定，而阻礙液體繼續流向表面，終至表面乾化，達到臨界熱通量。Mudawar 和 Maddox[1]綜合兩種理論加上實驗數據推導出臨界熱通量之經驗式如下：

$$q_m^{**} = \frac{q_m / (\rho_g U h_{fg})}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{15/23} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{1/23} \left(1 + \frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)^{7/23} \left(1 + 0.021 \frac{\rho_f c_{pf} \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{fg}}\right)^{16/23}}$$

$$= 0.16 We^{-8/23}$$

(3-1)

其中  $We = \frac{\rho_f U^2 L}{\sigma}$ 。



此經驗式包含了熱通量與潛熱的比值 $\left(\frac{q_m}{\rho_g U h_{fg}}\right)$ 、氣液密度比 $\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)$ 、形狀因子 $\left(\frac{L}{D_h}\right)$ 以及顯熱與潛熱 $\left(\frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)$ 的比值，而偉伯數(We)則是慣性力與表面張力的比值。

其中方程式等式左邊為根據兩種臨界熱通量模式所推導出之式子，而等式右邊之係數為根據實驗數據所推導出之實驗係數。

圖 3-24 為 Mudawar 和 Maddox[1]、Tso 等[7]、McGillis 等[21] 文獻中之臨界熱通量經驗式與本次實驗數據之比較圖。由圖中可發

現，Mudawar 和 Maddox[1]之經驗式中，流速對於臨界熱通量的影響趨勢較與本次實驗符合，由於 Tso 等[8]的經驗式中，適用的雷諾數(Re)範圍較大(300~10000)，故套用在本次實驗的雷諾數範圍 500~2000 中，流速對於臨界熱通量的影響就較小。而 McGillis 等[21]的經驗式中，適用於低流速之實驗，流速不對臨界熱通量產生影響。

依照本次實驗數據對照後，決定採用 3-1 式之經驗式加以修正，得到傾斜流道(45°)流動沸騰實驗，對應雷諾數(Re)範圍 500~2000，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )範圍 15°C~28°C 實驗狀態下之臨界熱通量預測經驗式：

$$q_m^{**} = \frac{q_m / (\rho_g U h_{fg})}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{15/23} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{1/23} \left(1 + \frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)^{7/23} \left(1 + 0.021 \frac{\rho_f c_{pf} \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{fg}}\right)^{16/23}} \quad (3-2)$$

$$= 0.26 We^{-21/46}$$

圖 3-25 為本次實驗臨界熱通量實驗值與經驗式之預測值之誤差圖，在雷諾數(Re)範圍 500~2000，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )範圍 15°C~28°C 實驗狀態下之，誤差範圍在 15%以下。

### 3-13 傾斜流道方位(45°)中沸騰曲線與文獻比較和熱傳經驗式

圖 3-26 為本次實驗在傾斜流道方位(45°)中之沸騰曲線與 Tso 等[8]、Hsiao[18]、Chang[22]和 Ke[23]文獻實驗值之比較圖。由圖中可發現，Tso 等[7]、Hsiao[18]之沸騰曲線都約略高於本次實驗之沸

騰曲線，而在接近臨界熱通量時，Tso 等[7]相對於本次實驗，臨界熱通量提早發生，而 Hsiao[18]之沸騰曲線則在接近臨界熱通量時逐漸逼近本次實驗之沸騰曲線。其原因應為管道尺寸的大小與晶片之個數所造成。Tso 等[8]實驗中，管道高度為 10mm，水力直徑為 13.3mm；Hsiao[18]實驗中，管道高度為 3mm，水力直徑為 4.8mm 皆大於本次實驗管道高度 2mm 和水力直徑 3.33mm，氣泡較不易受到管道上壁之擠壓，氣泡脫離後對晶片表面之影響較小，氣泡不易成膜，故散熱機制更佳，所以沸騰曲線都略高於本次實驗。而由於 Tso 等[7]實驗中，擺置了四個加熱晶片，故下游之晶片氣泡之發展，會被上游成長之氣泡影響，造成臨界熱通量提早產生。Chang 等[22]則為池沸騰之沸騰曲線，少了強制對流的影響，以及沒有流速幫助氣泡脫離表面，故沸騰曲線與臨界熱通量都低於本次實驗。而 Ke[23]為在水力直徑 8mm 之水平矩形渠道所進行之流動沸騰實驗，由於其實驗次冷度最高為 4.3°C，其工作流體溫度高於本次實驗達 23.7°C，可能造成氣泡尺寸過大提早互相聚合，故沸騰曲線相較於本次實驗向右偏移，其臨界熱通量也提早發生，但 Ke[23]之沸騰曲線在高熱通量時，有逐漸與本次實驗沸騰曲線重合的趨勢。

由於本實驗未測量空泡分率，Ke[23]文獻中對於 FC-72 在水平矩形流道，平滑加熱晶片流動沸騰實驗，提出了一個未包含空泡分率之

熱傳關係式，故本次實驗採用此經驗式，並根據本次實驗數據再加以修正，最後得到傾斜流道(45°)流動沸騰，對應雷諾數(Re)範圍 500~2000，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )範圍 15°C~28°C 實驗狀態下之熱傳經驗方程式：

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} = [950 \cdot Fr^{0.4} + 23 \cdot Boi^{0.4} \cdot Ja^{1.1}] \quad (3-3)$$

其中  $Fr = \frac{G^2}{\rho_f^2 \cdot g \cdot D_h}$  為流速與重力、流體密度和流道尺寸的比值，

$Boi = \frac{q''}{G \cdot h_{fg}}$  為熱通量與潛熱的比值， $Ja = \frac{\rho_f \cdot C_{pf} \cdot \Delta T_{sat}}{\rho_g \cdot h_{fg}}$  為顯熱與潛熱

的比值。

圖 3-27 為傾斜流道(45°)流動沸騰實驗，對應雷諾數(Re)範圍 500~2000，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )範圍 15°C~28°C 實驗狀態下之熱傳係數實驗數據與 3-3 式之預測值比較。由於此次熱傳經驗方程式，並沒有考慮空泡分率，故在每個實驗狀態下所對應熱傳係數之範圍為完全發展核沸騰區，由圖中可知誤差範圍在 25% 內，當流速高時(Re=2000)預測值會高估其熱傳係數，而在中低流速(Re:1200~500)中，預測值與實驗值誤差在 12% 以內。

3-14 以紐賽數(Nu)變化係數(C.V. :Nusselt number coefficient of variation)探討流道方位對於熱傳係數之影響

Bower、Klausner[15]文獻中提到以紐賽數(Nu)變化係數(C.V.:Nusselt number coefficient of variation)之大小來判斷流道方位對於流動沸騰之熱傳係數是否有影響。紐賽數(Nu)變化係數(C.V.:Nusselt number coefficient of variation)定義如下:

$$C.V. = \frac{\sigma_{\psi,Ja}}{\mu_{\psi,Ja}} \times 100 \quad (3-4)$$

其中  $\sigma_{\psi,Ja} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M (Nu_{\psi,Ja,m} - \mu_{\psi,Ja})^2}}{M-1}$  為各方位紐賽數(Nu)之標準

差,  $\mu_{\psi,Ja} = \frac{\sum_{m=1}^M Nu_{\psi,Ja,m}}{M}$  為各方位紐賽數(Nu)之平均數, 而 M 為流

道方位之各數。文獻中[15]定義當 C.V. 小於 6 時, 流道方位對於熱傳係數不具影響, 反之大於 6 時, 流道方位會影響其熱傳係數。

在此將本實驗分為兩組實驗來進行 C.V. 之計算與比較, 其中流道方位  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  為一組而流道方位  $45^\circ$  與  $135^\circ$  為另一組。圖 3-28 為兩組實驗中, C.V. 在不同雷諾數情況下於臨界熱通量時之比較圖。由圖中可發現流道方位  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  這一組之 C.V. 值很小(平均 C.V. = 1.93 < 6), 可發現在此三種流道方位中, 雷諾數範圍在 500~2000 的情況下, 其改變方位角度對於熱傳係數的影響非常小, 亦代表在此流速範圍內, 管道於由下往上流動晶片朝上之條件下, 改變其方位對於流動沸騰熱傳係數的影響不大。反觀流道方位  $45^\circ, 135^\circ$  這一組之

C. V. 值很大(平均 C. V. =17.2>6)，這代表當雷諾數範圍在 500~2000 的情況下，加熱銅片朝上與朝下之方位改變對於流動沸騰之熱傳係數影響甚巨。另外，由 C. V. 值之定義可知，當 C. V. 值越大代表流道方位對於熱傳係數的影響越大，故可推斷當流速越小，強制對流的效應減弱，流道方位的改變應對其熱傳係數影響越大而造成 C. V. 值越大，但於圖 3-28 可發現，C. V. 最大值皆發生在  $Re=1200$  時，並未於預想中的最低流速中產生，此原因應為當流速極小，氣泡互相凝聚之機會越大，加上管壁高度窄小此時容易擠壓氣泡，故在任何流道方位角度，氣泡都會互相聚積於晶片表面，造成熱傳係數的同時降低。

Bower、Klausner[15]文獻中亦提到，由於此判斷方式只考慮到流速對於氣泡脫離之幫助，並未顧及氣泡之間的互動關係，故在高過熱度時，任何方位角度之氣泡都劇烈產生且互動頻繁，造成各方位角度之熱傳機制相似，C. V. 值反而會有下降的現象產生。