

國立交通大學
機械工程研究所
碩士論文

介電液 FC-72 在垂直矩形流道之流動沸騰

實驗研究

**Experimental Study of Flow Boiling of FC-72 in
A Vertical Rectangular Channel**

研究生:蕭淵元

指導教授:盧定昶博士

中華民國九十五年六月

介電液 FC-72 在垂直矩形流道之流動沸騰
實驗研究

**Experimental Study of Flow Boiling of FC-72 in
A Vertical Rectangular Channel**

研究生：蕭淵元
指導教授：盧定昶

Student : Yuan-Yuan Hsiao
Adviser : Ding-Chong Lu

國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

In

Mechanical Engineering

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

介電液 FC-72 在垂直矩形流道之流動沸騰實驗研究

研究生：蕭淵元

指導教授：盧定昶 博士

國立交通大學 機械工程研究所

摘要

本論文以實驗方法探討介電液 FC-72 於垂直矩形流道內之流動沸騰現象。在完全發展流的狀態下，流經表面積為 10mm*10mm 平滑表面之加熱銅塊，進行沸騰熱傳分析。本實驗矩形流道剖切面之高度為 3mm、寬度為 12mm、水力直徑為 4.8mm。本實驗之操作條件為介電液 FC-72 在一大氣壓下、雷諾數為 800、1600、2400，次冷度為 33°C、28°C、23°C。

本流動沸騰實驗結果皆會發生沸騰曲線之遲滯現象。在單相熱傳區及部份發展核沸騰區，隨次冷度及流速之增加對加熱壁面溫度的影響會逐漸減低，而所有不同次冷度及流速之沸騰曲線在接近核沸騰起始點會幾乎重疊；當達到完全發展核沸騰時，次冷度及流速之影響會逐漸減小；而臨界熱通量及熱傳係數則隨次冷度與流速的增加而升高，但熱傳係數在接近臨界熱通量時會稍有減小的趨勢。

關鍵字：流動沸騰、流速、次冷度

Experimental Study of Flow Boiling of FC-72 in A Vertical Rectangular Channel

Student: Yuan-Yuan Hsiao

Advisor: Ding-Chong Lu

Institute of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The goal of this thesis is to investigate the flow boiling phenomena of di-electric liquid FC-72 in a vertical rectangular channel by experimental method. At a state of fully developed flow, the boiling heat transfer of the FC-72 flow through a smooth heated copper block which surface area of 10mm square is analyzed. The experimental test section is a rectangular channel with a cross section of height of 3 mm, width of 12 mm, the hydrodynamic diameter of 4.8 mm. The operation conditions of FC-72 in the experiment are 1 atm , fluid Reynolds number 800 , 1600 , 2400, and subcooled temperatures of 23°C , 28°C , 33°C .

The results of the flow boiling experiment show that hysteresis of boiling curve always exists. At the region of single phase heat transfer and partially developed nucleate boiling , increasing both subcooled temperature and fluid velocity would reduce the wall temperature gradually. All boiling curves of different subcooled temperature and Reynolds number almost coincide near the onset of nucleate boiling.

In the region of fully developed nucleate boiling , the influences of both Reynolds number and fluid subcooled temperature are reduced gradually. Besides , both the critical heat flux and the heat transfer coefficient increase with increasing fluid subcooled temperature and Reynolds number , but the heat transfer coefficient would decline severely in the vicinity near the critical heat flux.

Key words : flow boiling 、 velocity 、 subcooled temperature



誌 謝

在舊約聖經的詩篇九十篇十二節說：「耶和華啊！求你指教我如何數算自己的日子。」這兩年中，感謝神給我從祂而來的智慧，使我能把握每分每秒。兩年研究所生涯的論文研究能順利完成，在此由衷感謝指導教授 盧定昶博士細心的指導與督促，並且在考台大、清大、交大、成大的博士班及申請獎學金時幫忙寫推薦函，在此獻上十二萬分的感激與謝意。

在論文口試期間，承蒙本校機械所的楊文美博士與台北科技大學冷凍空調工程所的簡良翰博士撥冗細審，並提出許多寶貴意見與殷切指正，使本論文疏漏謬誤之處得以斧正。

研究期間，感謝博士班學長余致廣和碩士班學長許中彥提供建議，及在實驗設備上的經驗傳承；也感謝同學吳克敏在實驗過程中所提供的幫助。

研究所生涯最蒙神恩典的事，就是這兩年住在新竹市召會的學生中心受屬靈的成全，這是繼大學住四年學生中心的第六年。這段時間和弟兄姊妹一同過著甜美喜樂的召會生活，就像補充本詩歌 712 首提到的：「教會生活輝煌之至，這是神美麗園子，在此經歷基督成長，讚美主！神在基督裡的豐富，不斷的供應我們，祂是何等新鮮，便利，又親近！」我也經歷到詩篇一百三十三篇一節所說的：「弟兄和睦同居，是何等的善，何等的美！」與弟兄姊妹一同過召會生活，是我做研究最大的動力。

在從事研究時，雖然經歷了許多的煎熬，但卻對聖經中的話有寶貴的經歷。腓立比書四章六至七節說：「應當一無罣慮，只要凡事藉著禱告、祈求，帶著感謝，將我們所要的告訴神，神那超越人所能理解的平安，必在基督耶穌裡，保衛我們的心懷意念。」腓立比書四章十三節說：「我在那加我能力者的裡面，凡事都能作。」帖撒羅尼迦前書五章十六至十八節：「要常常喜樂，不住禱告，凡事謝恩，因為這是神在基督耶穌裡對我們的旨意。」在我心中深處覺得「享受主是一切問題的解答」，對主認識有多少，就能經歷祂多少。

在研究所期間最難忘的有兩件事。第一是和同住的弟兄們一同竭力開展校園福音。我們常常在清晨六點的晨興和晚上的晚禱中為同學禱告，結果帶了許多同學信主，甚至帶了十幾位弟兄們一同住學生中心受成全。在帖撒羅尼迦前書二章十九至二十節說：「當我們主耶穌來臨的時候，我們在祂面前的盼望、喜樂或所誇的冠冕是甚麼？不就是你們嗎？因為你們就是我們的榮耀，我們的喜樂。」

第二，是父親在我畢業前夕信主得救。讚美神的應許不曾落空，「一人得救，全家都必得救。」非常感謝教會中的弟兄姊妹常常為我們禱告，不僅為我的研究和課業禱告及祝福，也一同為家人及校園福音工作禱告。我們還得繼續像腓立比書三章十三節所說的：「忘記背後，努力面前的，向著標竿，竭力追求，要得神在基督耶穌裡召我向上去得的獎賞。」

最後，要感謝的是我的親人，特別是在高雄及新竹的父母親，謝謝你們平常照顧我的生活及關心我的研究和前途。每次回到家享用你們親手擺設的筵席，和

你們吃飯及談話就覺得很溫馨。因著你們的扶持，使我對於到台大繼續從事博士班研究充滿鬥志，對未來有更好的規劃。也承蒙小叔蕭松和從高中生涯到研究所階段提供獎學金栽培我；小叔作事嚴謹及殷勤的態度一直是我效法的榜樣，使我今天能有機會在課業上有好的表現。還要感激我兩位親愛的姊姊，有時慷慨地提供一些零用金扶持我；雖然我們都在不同縣市，但當我們齊聚在一起交通時，姊姊們總是能夠對我訴說恩典、安慰和鼓勵，使我不覺得屬靈狀況枯乾，就像大姊說的：「交通開百路」、「交通治百病」、「交通蒙大福」。更要感謝我的姊妹在許多方面的幫助，在屬靈的造就上，也給我許多的成全，使我在教會中能和聖徒們一同配搭服事大專生及青少年；在我撰寫論文時，甚至細心幫忙文字內容的校正，使本論文能更加縝密。

最後，我要把本論文獻給我親愛的家人、教會的弟兄姊妹、學校的師長與同學，還有曾經幫助並扶持過我的每一個人，願神的祝福臨及你們，願恩典與你們同在。

蕭 淵 元 謹誌

主後 2006 年 6 月於風城交大

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	vii
表目錄	xii
圖目錄	xiii
符號說明	xix
第一章 緒 論	1
1-1 研究背景	1
1-2 研究目的	3
1-3 文獻回顧	3
1-3-1 單相熱傳分析	4
1-3-2 流動沸騰熱傳分析	6
1-3-3 臨界熱通量	7
1-3-4 氣泡特性與流譜分析	8
第二章 流動沸騰理論分析	19
2-1 單相熱傳分析	19

2-2 池沸騰曲線	19
2-3 池沸騰熱傳機制	21
2-4 流動沸騰熱傳分析.....	21
2-4-1 速度與次冷度的影響	22
2-4-2 工作流體熱力性質的影響	24
2-4-3 不凝結氣體的影響	24
2-4-4 微小管道之數目的影響	24
2-5 臨界熱通量	24
2-6 流譜分析	26
第三章 實驗系統與參數計算	34
3-1 實驗設備	34
3-1-1 工作流體之循環系統	34
3-1-2 測試段流道系統.....	35
3-1-3 流道托架與觀測視窗	36
3-1-4 模擬 CPU 晶片	37
3-1-5 預熱循環系統	37
3-1-6 冷卻循環系統	37
3-1-7 量測儀器	38

3-1-7-1 壓力轉換器	38
3-1-7-2 熱電偶	38
3-1-8 輔助系統	39
3-1-8-1 除氣系統	39
3-1-8-2 真空泵	39
3-1-8-3 影像擷取系統	40
3-1-9 數據擷取系統	40
3-2 實驗方法及步驟	40
3-2-1 實驗前準備工作	40
3-2-2 實驗量測與流譜拍攝步驟	42
3-3 實驗參數計算	43
3-3-1 工作壓力	43
3-3-2 次冷度的計算與飽和狀態的判定	43
3-3-3 熱損估算	44
3-3-4 熱通量	45
3-3-5 表面溫度	45
3-3-6 熱傳係數	46
第四章 結果討論與分析	58

4-1 熱損值與熱損百分比	58
4-2 實驗之流動沸騰曲線探討	59
4-3 氣泡成長流譜之探討	60
4-4 核沸騰曲線之遲滯現象	62
4-5 不同次冷度對單相熱傳及臨界熱通量之探討	63
4-6 不同次冷度對熱傳係數之探討	64
4-7 不同次冷之氣泡流譜圖探討	65
4-8 不同流速對單相熱傳及臨界熱通量之探討	66
4-9 不同流速對熱傳係數之探討	68
4-10 不同流速之氣泡流譜圖探討	68
4-11 熱傳經驗方程式	69
第五章 結論與建議	123
5-1 結論	123
5-2 建議	125
參考文獻	126
附錄一 晶片表面粗糙度量測之前置作業	132

附錄二 晶片表面粗糙度	133
附錄三 不準度分析	134
自傳	136
學歷與經歷	142



表 目 錄

表 3-1 介電液 FC-72 於一大氣壓之熱物理性質	47
表 3-2 水力發展長度表	48
表 3-3 晶片表片粗糙度第一次量測數據	49
表 3-4 晶片表片粗糙度第二次量測數據	49
表 3-5 晶片表片粗糙度第三次量測數據	49
表 4-1 實驗最大之不準度.....	72



圖目錄

圖 1-1	藉由氣冷散熱方式	10
圖 1-2	藉由熱管散熱方式	10
圖 1-3	藉由熱交換器散熱方式	11
圖 1-4	藉由直接液冷散熱方式	11
圖 1-5	臨界熱通量之機制	12
圖 1-6	臨界熱通量及次冷度 30°C 之八種流向的氣泡流譜	13
圖 1-7	次冷度 30°C、流速 0.5m/s 之八種流向的氣泡流譜	14
圖 1-8	次冷度 30°C、流速為 1.5m/s 之八種流向的氣泡流譜	15
圖 1-9	次冷度 3°C、流速為 0.1m/s 之八種流向的氣泡流譜	16
圖 1-10	次冷度 3°C、流速為 1.5m/s 之八種流向的氣泡流譜	17
圖 1-11	CHF、飽合流狀態隨不同速度之八種流向的氣泡流譜分析圖	18
圖 2-1	池沸騰曲線示意圖	28
圖 2-2	流動沸騰熱傳示意圖	29
圖 2-3(a)	Zhang, Mudawar and Hasan [29], FC-72 在次冷度 3°C 時，八種不同 流向之流速與熱通量關係圖	30
圖 2-3(b)	Zhang, Mudawar and Hasan [29], FC-72 在次冷度 30°C 時，八種不同 流向之流速與熱通量關係圖	31
圖 2-4	垂直流道中之流譜型態	32

圖 2-5(a) Ghristopher 和 Mudawar [53]在水平矩形流道進行次冷度 3°C之流譜拍攝	33
圖 2-5(b) Ghristopher 和 Mudawar [53]在水平矩形流道進行次冷度 29°C之流譜拍攝	33
圖 3-1 工作流體之循環系統示意圖	50
圖 3-2 測試段流道示意圖	51
圖 3-3 測試段流道尺寸設計標示圖	52
圖 3-4(a) 流道中加熱晶片之正視剖面圖及尺寸設計標示圖	53
圖 3-4(b) 流道中加熱晶片之側視剖面圖	53
圖 3-5 測試段流道之托架設計圖	54
圖 3-6 測試段流道之托架尺寸標示圖	55
圖 3-7 模擬電腦 CPU 晶片之無氧銅(oxygen-free copper)銅塊	56
圖 3-8(a) 鐵氟龍側面熱損實驗熱電偶配置圖	57
圖 3-8(b) 鐵氟龍底面熱損實驗熱電偶配置圖	57
圖 4-1 輸入功率與熱損值之關係圖	73
圖 4-2 輸入功率與熱損百分比之關係圖	74
圖 4-3 一大氣壓、Re800、次冷度 33°C 沸騰發展過程之沸騰曲線圖	75
圖 4-4 FC-72 在垂直矩形流道中流過平滑加熱面之氣泡流譜圖	76
圖 4-5 本流動沸騰實驗在完全發展流下之流體速度分布圖	77
圖 4-6 (a) Heindel et al 在流道高度為 6.96mm 拍攝之氣泡成長過程圖[55].....	78
圖 4-6 (b) 本實驗在流道高度為 3mm 時所拍攝之氣泡成長過程圖[55]	79

圖 4-7	次冷度 33°C、Re800、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	80
圖 4-8	次冷度 28°C、Re800、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	81
圖 4-9	次冷度 23°C、Re800、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	82
圖 4-10	次冷度 33°C、Re1600、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	83
圖 4-11	次冷度 28°C、Re1600、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	84
圖 4-12	次冷度 23°C、Re1600、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	85
圖 4-13	次冷度 33°C、Re2400、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	86
圖 4-14	次冷度 28°C、Re2400、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	87
圖 4-15	次冷度 23°C、Re2400、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖	88
圖 4-16	Re800、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰曲線比較圖	89
圖 4-17	Re1600、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰曲線比較圖	90
圖 4-18	Re2400、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰曲線比較圖	91
圖 4-19	一大氣壓、Re800、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰 起始點至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖	92
圖 4-20	一大氣壓、Re1600、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰 起始點至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖	93
圖 4-21	一大氣壓、Re2400、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰 起始點至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖	94
圖 4-22	一大氣壓下，臨界熱通量 CHF 與不同次冷度之關係圖	95

圖 4-23	在一大氣壓及臨界熱通量下，晶片壁溫與不同次冷度之關係圖.....	96
圖 4-24	本實驗與 Tso, Tou 和 Xu [36]以不同次冷度在核沸騰後至 臨界熱通之沸騰曲線比較圖	97
圖 4-25	Re800、垂直 90° 流向時，不同次冷度之熱傳係數比較圖	98
圖 4-26	Re1600、垂直 90° 流向時，不同次冷度之熱傳係數比較圖	99
圖 4-27	Re2400、垂直 90° 流向時，不同次冷度之熱傳係數比較圖	100
圖 4-28	在一大氣壓及臨界熱通量下，熱傳係數 h 與不同次冷度之關係圖...	101
圖 4-29	Re=800，流向垂直 90°，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	102
圖 4-30	Re=800，流向垂直 90°，次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	102
圖 4-31	Re=800，流向垂直 90°，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	102
圖 4-32	Re=1600，流向垂直 90°，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	103
圖 4-33	Re=1600，流向垂直 90°，次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	103
圖 4-34	Re=1600，流向垂直 90°，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	103
圖 4-35	Re=2400，流向垂直 90°，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	104
圖 4-36	Re=2400，流向垂直 90°，次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	104
圖 4-37	Re=2400，流向垂直 90°，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖...	104
圖 4-38	次冷度 23°C，流向垂直 90°，不同雷諾數之沸騰曲線比較圖.....	105
圖 4-39	次冷度 28°C，流向垂直 90°，不同雷諾數之沸騰曲線比較圖.....	106
圖 4-40	次冷度 33°C，流向垂直 90°，不同雷諾數之沸騰曲線比較圖.....	107

圖 4-41	一大氣壓、次冷度 23°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數 之沸騰起始點至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖	108
圖 4-42	一大氣壓、次冷度 28°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數 之沸騰起始點至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖	109
圖 4-43	一大氣壓、次冷度 33°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數 之沸騰起始點至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖	110
圖 4-44	一大氣壓，臨界熱通量 CHF 與不同雷諾數之關係圖	111
圖 4-45	在一大氣壓及臨界熱通量下，晶片壁溫與不同雷諾數之關係圖.....	112
圖 4-46	本實驗與 Tso, Tou 和 Xu [36]以不同流速在核沸騰後至 臨界熱通量沸騰曲線比較圖.....	113
圖 4-47	次冷度 23°C，流向垂直 90°，不同雷諾數之熱傳係數比較圖.....	114
圖 4-48	次冷度 28°C，流向垂直 90°，不同雷諾數之熱傳係數比較圖.....	115
圖 4-49	次冷度 33°C，流向垂直 90°，不同雷諾數之熱傳係數比較圖.....	116
圖 4-50	在一大氣壓及臨界熱通量下，熱傳係數 h 與不同雷諾數之關係圖.....	117
圖 4-51	次冷度 23°C，流向垂直 90°，Re800 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	118
圖 4-52	次冷度 23°C，流向垂直 90°，Re1600 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	118
圖 4-53	次冷度 23°C，流向垂直 90°，Re2400 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	118
圖 4-54	次冷度 28°C，流向垂直 90°，Re800 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	119
圖 4-55	次冷度 28°C，流向垂直 90°，Re1600 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	119

圖 4-56	次冷度 28°C, 流向垂直 90°, Re2400 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	119
圖 4-57	次冷度 33°C, 流向垂直 90°, Re800 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	120
圖 4-58	次冷度 33°C, 流向垂直 90°, Re1600 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	120
圖 4-59	次冷度 33°C, 流向垂直 90°, Re2400 之近臨界熱通量氣泡流譜圖.....	120
圖 4-60(a)	介電液 FC-72 在垂直矩形流道中之沸騰熱傳係數實驗值 與預測值之比較圖.....	121
圖 4-60(b)	介電液 FC-72 在垂直矩形流道中之沸騰熱傳係數實驗值 與預測值之比較圖.....	122
圖附二	表面粗糙度之定義圖	133



符 號 說 明

A	加熱面之熱傳面積	m^2
A_c	流道之截面積	m^2
a	每垂直加熱面之重力	m/s^2
B	突出流道之高度	mm
CHF	臨界熱通量	W/m^2
$C_{p,f}$	液體比熱	$J/Kg^\circ C$
c	比熱	$J/Kg^\circ C$
D	流道直徑	mm
D_i	流道內緣直徑	mm
D_o	流道外緣直徑	mm
D_h	水力直徑	mm
F	摩擦因子	
g	重力加速度	m/s^2
H_d	流道高度	mm
h_{fg}	蒸發潛熱	KJ/Kg
h	熱傳係數	$W/m^2^\circ C$
I	電源供應器所量測之電流	A
K	流體熱傳導性	$W/m^\circ C$



K_c	銅塊熱傳導性	$W/m^{\circ}C$
L_h	水力發展長度	mm
L	測試段長度	mm
n	雷利數之指數	
P	系統壓力	kPa
Q	熱通率	W
q''	熱通量	W/m^2
r	氣泡半徑	mm
T_{sat}	介電液 FC-72 之飽和溫度	$^{\circ}C$
T_{sub}	介電液 FC-72 之飽和溫度	$^{\circ}C$
T_{in}	流道進口溫度	$^{\circ}C$
T_{wall}	壁面溫度	$^{\circ}C$
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

無因次參數

Fo	傅立葉數	$Fo = \frac{\alpha \cdot t}{H^2}$
Gz	葛瑞茲數	$Gz = \frac{Re \cdot Pr \cdot D_i}{L}$
Nu _l	加熱源長度之紐賽數	$Nu_l = \frac{h \cdot l}{k}$
Pe	培雷數	$Pe = Re \cdot Pr$
Pr	普朗特數	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$
Ra _l	加熱源長度上之雷利數	$Ra_l = \frac{g \beta q'' l^4}{k \nu \alpha}$
Re	雷諾數	$Re = \frac{UD}{\nu}$
We	偉伯數	$We = \frac{\rho_f \cdot U^2 \cdot L}{\sigma}$



希臘符號

α	熱擴散係數	
β	熱膨脹係數	1/K
ΔU	速度差	m/s
ΔT	溫度差	°C
θ	流道內之流動角度	
ε	熱損失率	
λ	中間介面波長	
μ	動力黏滯力	N · S/m ²

ν	運動黏滯力	m^2/s
ρ_g	氣體密度	Kg/m^3
ρ_f	液體密度	Kg/m^3
σ	表面張力	N/m

下標符號

ave	平均數
cri	臨界點
fg	液相及氣相之差
f	液體
g	氣體
sub	次冷度
sat	飽和度



第一章 緒論

1-1 研究背景

隨著高科技時代的來臨，電子設備朝縮小化及提升高效能方向進行，在元件縮小化且密集化的同時亦增加了熱通量(heat flux)，促使電子散熱裝置日趨重要。在早期的筆記型電腦主要是採用自然對流的方式散熱，隨著 CPU 熱量的提高，現在筆記型電腦通常利用強迫對流來幫助散熱。筆記型電腦的微處理器雖然小，但熱通量可達 10^6W/m^2 。電子元件故障時，主要影響因素來自於溫度，因為電子元件的溫度每上升 10°C ，可靠度將會降低一半 [1]。為使電子元件能夠在正常且最佳的狀態下操作，必須設計特殊機構來達到散熱和控制溫度的目的。目前的散熱方式主要有三大種類：

1. 氣冷方式 [2]：利用增加散熱片面積或再加上風扇作強制對流散熱，如圖 1-1 所示。
2. 熱管冷卻方式 [3~4]：利用熱管或微熱管，甚至再加上熱交換器，如圖 1-2、圖 1-3 所示。
3. 直接液冷方式：利用液體的單相或雙相流動沸騰直接散熱，如圖 1-4 所示。

第一種方式的散熱方法使用散熱片或風扇，最大的好處是成本低，被大多數廠商所接受。

第二種方式是利用熱管(heat pipe)或微熱管(micro heat pipe)，熱管可以有效

地將熱從一端傳導到另一端。熱管其長度及直徑都非常小，裏面有芯和工作流體，例如：水。將管內先抽成真空後再將工作流體灌入，其熱傳效果比同尺寸的銅材高出一百多倍。這種散熱概念是由美國俄亥俄州 G.M 公司的 Gauglar [5] 在 1942 年所提出的觀念。而熱管這個詞首先是出現在 1963 年 Grover [6] 的專利中。其優點是沒有移動式的零件，全部零件都密封在內，不必消耗電力，而且因為是完全密封，所以使用壽命長久。

第三種方式是「直接液冷」的方式，其優點一方面是熱傳效果較佳；另一方面也可減少傳統元件形成接觸熱阻的問題。例如在本論文中是利用 3M 公司 [7] 的 FC-72 為工作流體，利用相變化的核沸騰熱傳機制，經由實驗證明具有高效率的熱傳性能 [8~10]。因此相變化的沸騰熱傳加上強制對流技術的開發，將可大幅提升微電子晶片的散熱量。Mudawar and Maddox [11] 認為微電子晶片要達到 $1\text{MW}/\text{m}^2$ 之散熱熱通量，其微電子晶片的溫度必須使其維持低於 85°C 下，才能確保電腦系統的穩定度。對此類微冷卻技術的發展，主要希望用來解決目前高密度電子元件之散熱問題，他們提出使用介電液為散熱工作流體之優點要具有：化學穩定性佳、無毒、具不可燃性和高介電性、相較於氣體有較高的熱傳係數。

Bar-Cohen, 1993 [12] 認為採用介電液有低沸點溫度的特點，例如：FC-72 沸點溫度為 56.6°C ，也是一種環保的冷劑，因為 FC-72 為非氟氯碳化物 (non-CFCs)，不含氯，避免造成臭氧層的破壞。

1-2 研究目的

近年來微電子晶片體積越來越小，相對於已往的晶片具有較高的密集性，所以散熱的考量就越形重要。關於使用「直接液冷方式」來模擬CPU散熱的技術，此項技術已採用於開發的電子產品。在過去一些相關研究中，以流動沸騰的方式用於電子冷卻的研究至今依舊有很大的發展空間。本研究主要目的為要探討介電液FC-72在矩形流道內對測試模擬晶片之流動沸騰實驗，並探討氣泡成長特性、兩相流沸騰熱傳過程、熱傳係數及臨界熱通量(critical heat flux)與不同參數之關連性分析。所選用的參數分別為流體冷度及流速，在系統壓力為一大氣壓之完全發展流(fully developed flow)的狀態下，探討介電液FC-72在垂直矩形流道之流動沸騰熱傳性能。另外為提供對電子元件散熱設計進一步的參考，將使用數位相機將氣泡流譜(flow pattern)拍攝下來，以觀察所拍攝流譜在各種參數下的變化。

1-3 文獻回顧

介電液(dielectric fluid)使用的紀錄可追溯到 1940 年末期的軍用電子系統，但是直到 1980 年這項技術才被認真考慮使用於解決數位電腦的高溫散熱問題，其技術成功應用於 1980 年的 Gray-2 (FC-72 單相熱傳對流)及 SS-1(FC-77 單相對流)超級電腦上，有效減少電子元件的封裝比重及改善系統的雜訊與高溫問題。Mudawar and Anderson [13] 認為電子元件的封裝會在晶片及封裝材質介面形成接觸熱阻，而直接液冷可減少此熱阻問題。

本節文獻回顧細分為四小節，分別為單相熱傳分析、流動沸騰熱傳分析、臨界熱通量、氣泡特性與流譜分析。

1-3-1 單相熱傳分析

Peng and Peterson [14~16] 分析工作流體對於單相熱傳與壓降在層流 (laminar flow) 區及紊流 (turbulent flow) 區之影響因素，在不同的矩形微流道的寬高比 (aspect ratios) 及水力直徑，Nu 不僅是 Re 與 Pr 的函數，同時也會隨著幾何形狀的不同而有所差異。

Peterson et .al [17] 利用甲醇 (Methanol) 為工作流體在矩形微流道中的平板做單相強制對流的實驗。結果發現流體的流速、冷度、性質和微流道的幾何結構 (microchannel geometric configuration) 對於熱傳、冷卻性能及流體流動模式會產生影響。

Wahib、Owhaib and Palm [18] 以 R-134a 為工作流體，分別以 1.7mm、1.2mm、0.8mm 的管徑在單圓管微流道 (single circular micro-channels) 進行單相熱傳的實驗。此實驗之雷諾數 (Re) 之範圍為 1000~17000，其熱傳係數會隨著管徑的縮小而增加。實驗結果可歸納在不同幾何形狀大小之流道，其實驗值與經驗式也將有所差異。相對於大流道而言，在紊流區時，大流道與微流道之實驗值皆與經驗式非常接近；但在層流區，當 Re 低於 5000 時，微流道之實驗值與經驗式會有很大的差異，而 1.7mm、1.2mm、0.8mm 的熱傳係數幾乎很接近。

Choi et al. [19] 在 1991 年發展層流區及紊流區之經驗式如下：

當 $Re < 2000$ 時：

$$Nu = 0.000972 Re^{1.17} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(1-1)$$

當 $2500 < Re < 20000$ 時：

$$Nu = (3.82 \times 10^{-6}) Re^{1.96} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(1-2)$$

Yu [20] 發展之紊流(turbulent flow)區， $6000 < Re < 20000$ ，其經驗式如下：

$$Nu = 0.0007 Re^{1.2} Pr^{0.2} \dots\dots\dots(1-3)$$

Bhowmik and Tou [21] 以水為工作流體，模擬電腦 CPU 晶片散熱的流動沸騰實驗，利用一開關控制熱源為 ON 或 OFF，對一系列四顆 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的晶片在垂直矩形流道進行暫態自然對流熱傳 (transient nature convection heat transfer) 的熱傳分析，將晶片平貼在流道面(flush-mounted chip)讓水流過矩形流道作散熱。其熱通率範圍為 $1 \sim 6 \text{ KW/m}^2$ ，建立的單相熱傳經驗式如下：

$$Nu_l = 1.06 Fo^{-0.47} Ra_l^{0.25} \dots\dots\dots(1-4)$$

$$Nu_l = hl/k = q''l/k(T_{\text{wall}} - T_{\text{in}}) \dots\dots\dots(1-5)$$

$$Ra_l = g\beta q'' l^4 / k\nu\alpha \qquad Fo = \alpha t / H^2$$

其中 l 為流過晶片的特徵長度， h 為水的熱傳係數， k 為晶片的熱傳導係數， T_{wall} 為加熱壁面溫度， T_{in} 為測試段進口溫度， g 為重力加速度， β 為熱膨脹係， q'' 為加熱通量， α 為熱擴散係數， ν 為運動黏滯力， H 為晶片厚度。

1-3-2 流動沸騰熱傳分析

Lee and Simon [22]在均勻加熱通道上進行次冷沸騰的實驗，所建立的核沸騰曲線與流體速度及次冷度為彼此互相獨立的關係。對於單加熱源在不同速度及次冷度，隨著壓力的增加會造成沸騰曲線有向左偏移的現象。Samant and Simon [23]認為沸騰曲線之傾斜程度在核沸騰區域時，會隨著速度之增加而更傾斜。Maddox and Mudawar [24] 及 Mudawar and Maddox [11] 也提出沸騰曲線會隨著流體速度及次冷度之增加而更傾斜。

McGillis et al [25]以 R-113 作為冷劑，在四種不同突出流道表面的高度，分別為 0.0mm、0.8mm、1.6mm、2.4mm 進行垂直矩形流道的流動沸騰實驗，並提出在完全發展核沸騰時，其流體速度並不會造成任何影響。而突出流道表面的晶片之表面溫度高於平貼流道表面的晶片。

Gersey and Mudawar [26] 使用 FC-72 為工作流體，將九顆 10mm*10mm 的晶片排列放置在垂直矩形流道中進行強制對流沸騰熱傳的實驗，觀察晶片突出於流道表面之效應，突出高度為 1mm，流道寬度為 20mm，結果發現流速及次冷度對沸騰曲線所造成的影響在晶片平貼於流道表面時與在晶片突出流道表面時之結果很相似。McGillis et al. [25]也認為在核沸騰狀態下，在晶片平貼於流道表面時與在晶片突出流道表面時之結果很相似。

1-3-3 臨界熱通量

Galloway and Mudawar [27~28] 提出臨界熱通量之機制，如圖 1-5 所示。

圖 1-5 中之右邊的壁面為絕緣，而左邊為加熱壁面，而流體之流向在一個重力場的情況下垂直向上流。在加熱面上會產生蒸氣波浪層(wavy vapor layer)，使得加熱面乾化，但是在蒸氣波浪的谷底部位會餘留一些濕潤線(wetting front)的不連續之液體接觸面，且其濕潤線的間距會沿著流動方向向下游成長。而臨界熱通量的觸發是由上游端的劇烈沸騰使得濕潤線被翻騰的氣泡破壞所導致，臨界熱通量起始時上游端會先被蒸氣覆蓋，接著覆蓋面快速的發展向下游處推進，直至整個加熱面被蒸氣層所覆蓋。在此臨界熱通量機制的流動沸騰系統中， a 為流體之加速度， g 為重力加速度。當 $a/g \gg 1$ 時，波長所受變數之影響為根據泰勒不穩定 (Taylor instability)，即表面張力與重力之平衡。當 $a/g = 1$ 時，波長所受變數之影響將更為複雜，在不同的速度下會產生不同特徵的不穩定性。當 $a/g \ll 1$ 時，波長所受變數之影響為根據赫爾霍次不穩定(Helmholtz instability)，即在高速度時表面張力與慣性力之平衡。但在低速度時，可能會造成整個加熱裝置的壁面溫度遽升，而導致燒燬。

Zhang, Mudawar and Hasan [29]以 FC-72 為工作流體，在矩形微流道垂直方向、水平方向及傾斜方向，共八種流動方向進行流動沸騰在飽和流狀態及次冷流狀態對臨界熱通量的影響。在此流動沸騰實驗中影響臨界熱通量有三項主要因素，分別為重力(body force)、表面張力(surface tension force)及慣性力(inertia)。

1-3-4 氣泡特性與流譜分析

Zhang, Mudawar 和 Hasan [29] 以 FC-72 為工作流體在截面積 $5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的矩型流道中流動，進行飽和流狀態及次冷流狀態對臨界熱通量的流動沸騰實驗，觀察在不同條件下的氣泡特性與分析流譜，其流向分為垂直方向、水平方向及傾斜方向共八種流動方向。

在此實驗中，作者以速度、飽和度、次冷度、流向為參數。以 0.1 m/s 、 0.2 m/s 、 0.5 m/s 、 1.0 m/s 及 1.5 m/s 為速度的變數，而飽和度為 56.6°C ，次冷度以 3°C 及 30°C 為變數，流向以正 X 軸為 0° ，逆時針每增加 45° 為一個流向。如圖 1-6 所示，其他角度分別為 45° ， 90° ， 135° ， 180° ， 225° ， 270° ， 315° 。

在次冷度為 30°C ，速度為 0.5 m/s 的條件下，如圖 1-7 所示，在 $\theta=315^\circ$ ， 0° ， 45° 時，此時加熱面在流道下端，由於自然對流所造成的浮力效應，氣泡將垂直向上沿著加熱表面離開，故可以看見在管道中的上層及下層都是氣泡。另外在 $\theta=90^\circ$ ， 135° ， 180° 及 225° 時，此時加熱面已漸漸變成在流道上端，氣泡非常容易合併而變成蒸氣波浪層，沿著加熱表面流動，故比在 $\theta=315^\circ$ ， 0° ， 45° 時的氣泡大。而在 $\theta=270^\circ$ 時，會有非常多的小氣泡，多半都是鄰近在加熱表面。在次冷度為 30°C ，速度為 1.0 m/s 的條件下，因流速增加，阻力也增加，故其結果與速度為 0.5 m/s 時相差不多。當速度增加到最大速度為 1.5 m/s 的條件下，如圖 1-8 所示，由於速度增加，氣泡互相影響越劇烈，故氣泡之特徵為小而多。在次冷度為 3°C ，速度為 0.1 m/s 的條件下，如圖 1-9 所示，在 $\theta=315^\circ$ ， 0° ， 45° 時，

氣泡一樣會受自然對流所產生的浮力影響，在流道內會合併成許多大氣泡在加熱表面上。在 $\theta=90^{\circ}$ ， 135° 時，氣泡合併成蒸氣波浪層。在 180° ， 225° ， 270° 時，蒸氣與液體分開成上下兩層，此現象稱為分層(stratification)現象，氣泡形成膜沸騰(film boiling)狀態，故其臨界熱通量較小。當速度增加到最大速度為 1.5 m/s 時，如圖 1-10 所示，其氣泡會互相影響越劇烈，且特徵為小且多，與圖 1-8 一樣。在飽和流狀態下，他們用圓盤分佈圖將臨界熱通量、八種流向及不同速度之關係表示如圖 1-11。主要可分為六種狀態：波浪蒸氣層(wavy vapor layer)、池沸騰(pool boiling)、蒸氣在液體上之分層(stratification of vapor above liquid)、蒸氣淤塞(vapor stagnation)、蒸氣逆向流(vapor counterflow)、蒸氣分離同心流(separated concurrent vapor flow)。



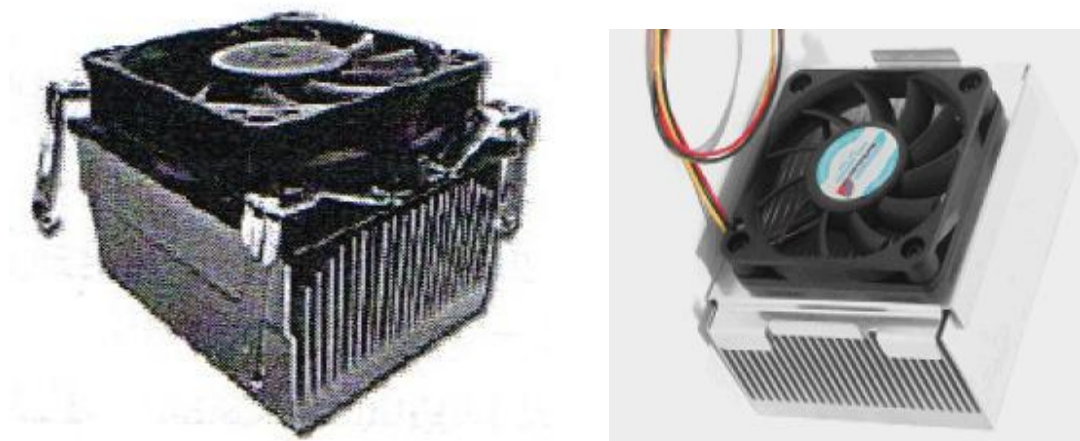


圖 1-1 藉由氣冷散熱方式 [2]

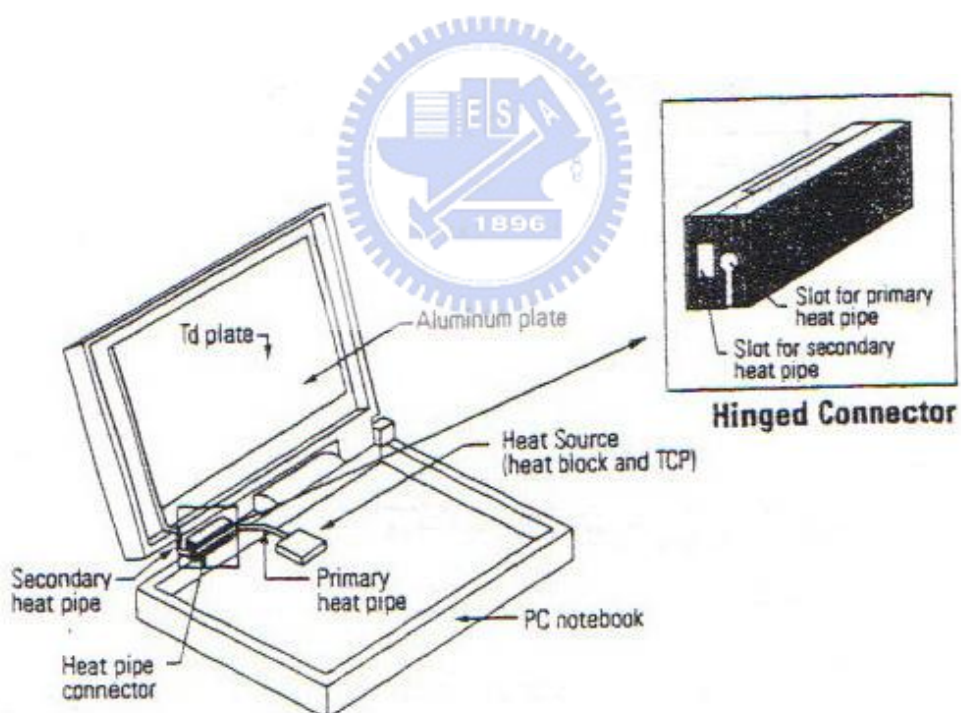


圖 1-2 藉由熱管散熱方式 [3]

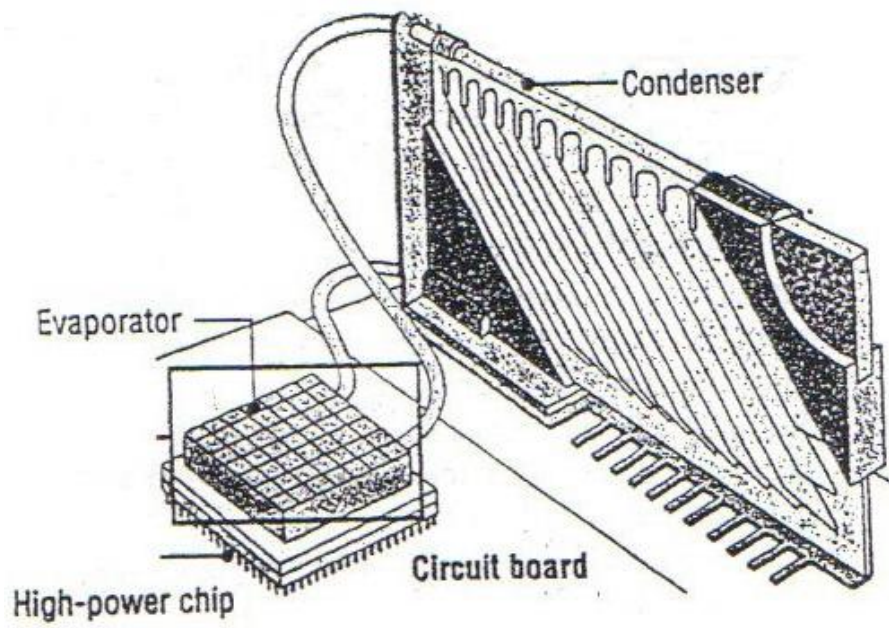


圖 1-3 藉由熱交換器散熱方式 [4]



圖 1-4 藉由 FC-72 直接液冷散熱方式

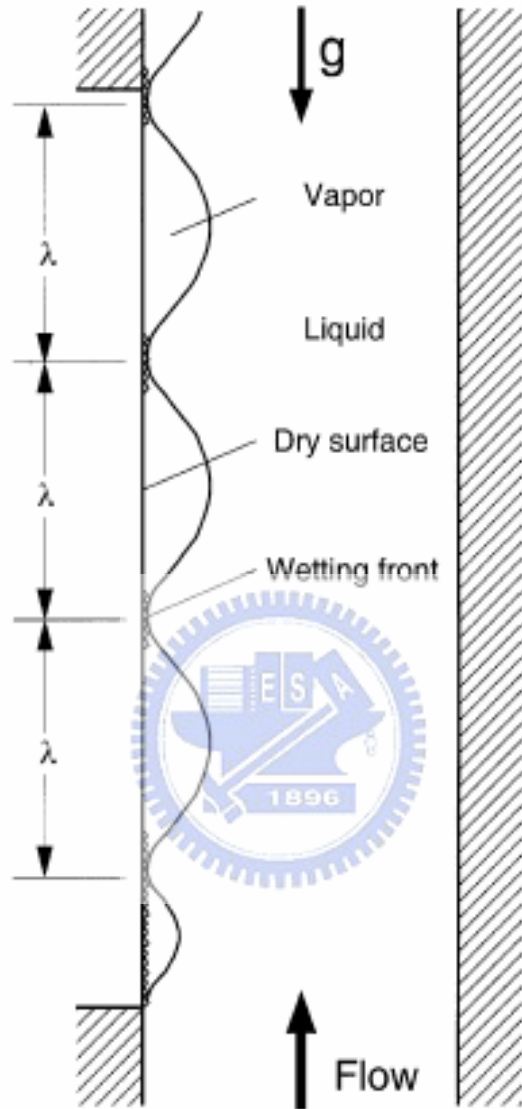


圖 1-5 為波浪狀蒸氣層沿著加熱表面在臨界熱通量(CHF, critical heat flux)之垂直向上的熱傳遞現象，此時重力場為一個重力場 [27~28]。

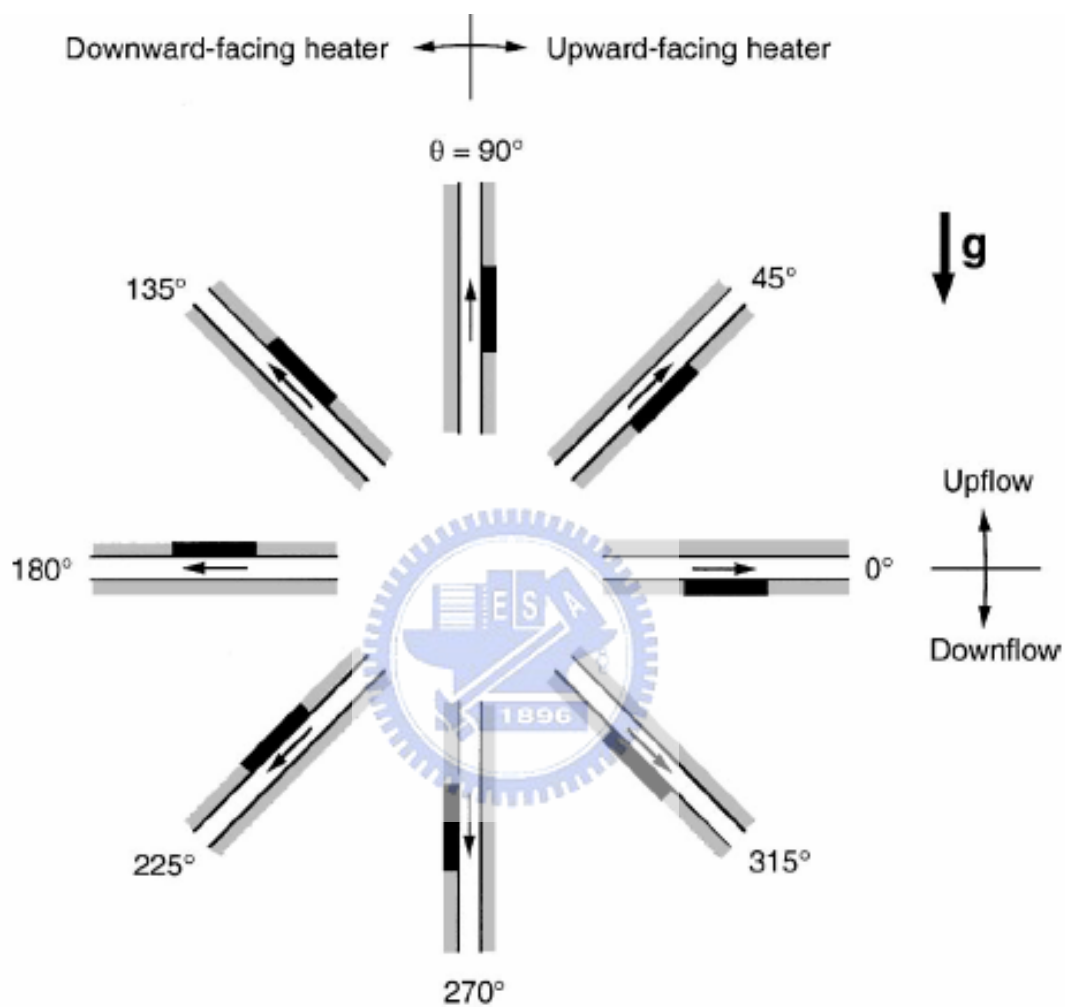


圖 1-6 為工作流體 FC-72 在流道中的八種流動方向，以正 X 軸方向定為 0° ，依序以逆時針每 45° 為一個流向，分別為 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° ，最後再回到 0° [29]。

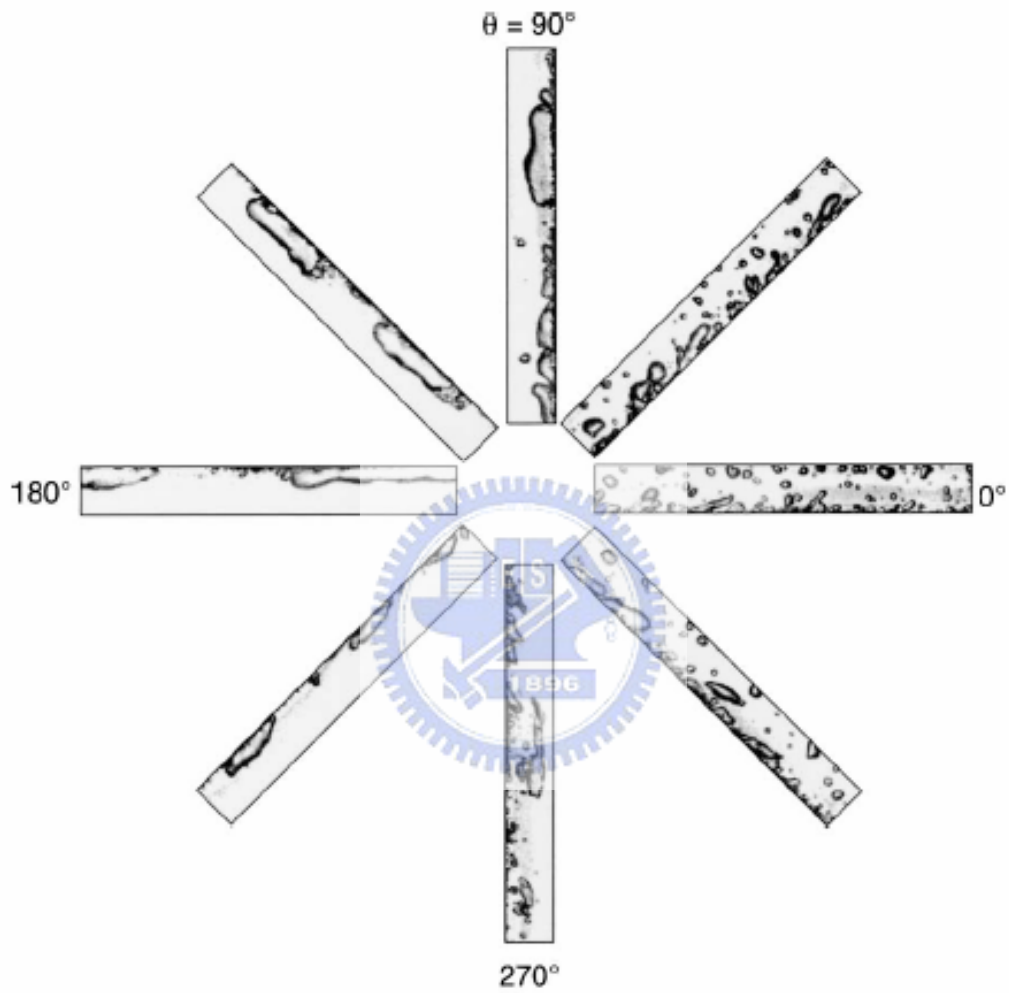


圖 1-7 為工作流體 FC-72 在流道中之八種流向的氣泡流譜，其條件是次冷度為 30°C ，而流速為 0.5m/s [29]。

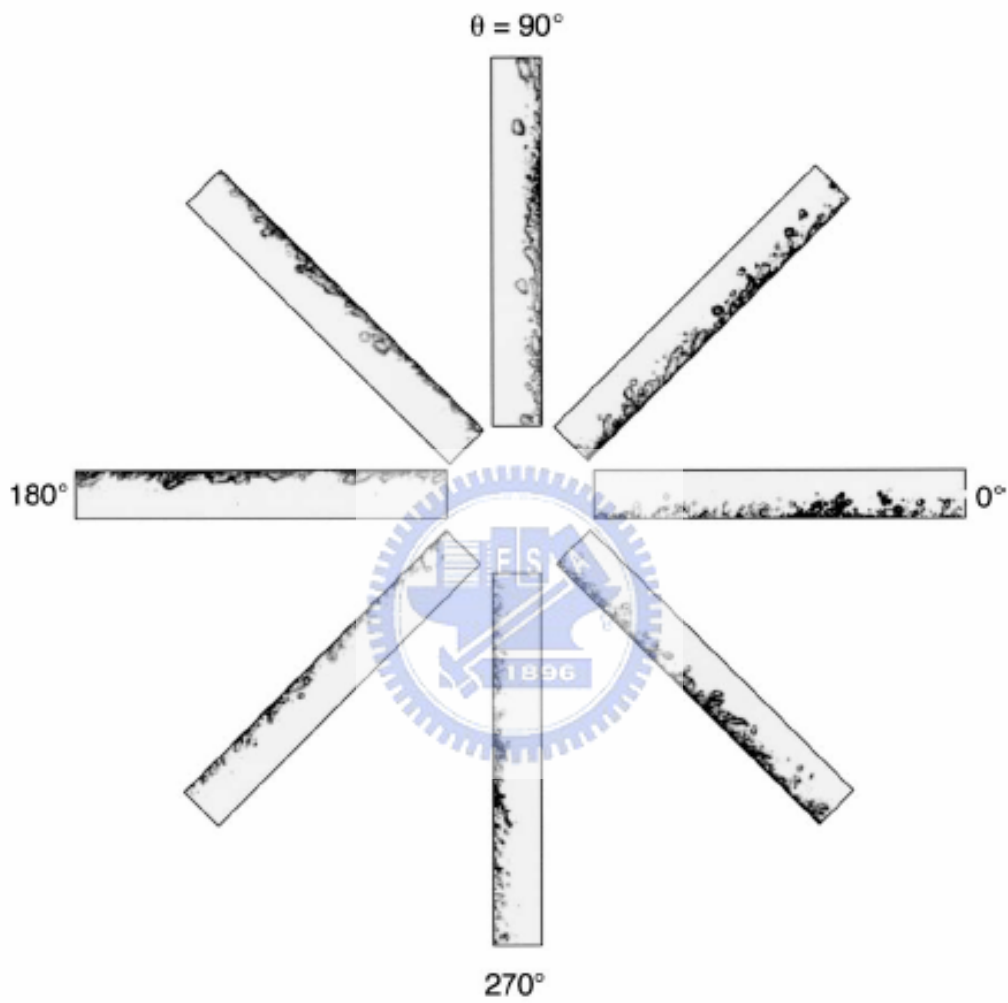


圖 1-8 為工作流體 FC-72 在流道中之八種流向的氣泡流譜，其條件是次冷度為 30°C ，而流速為 1.5m/s [29]。

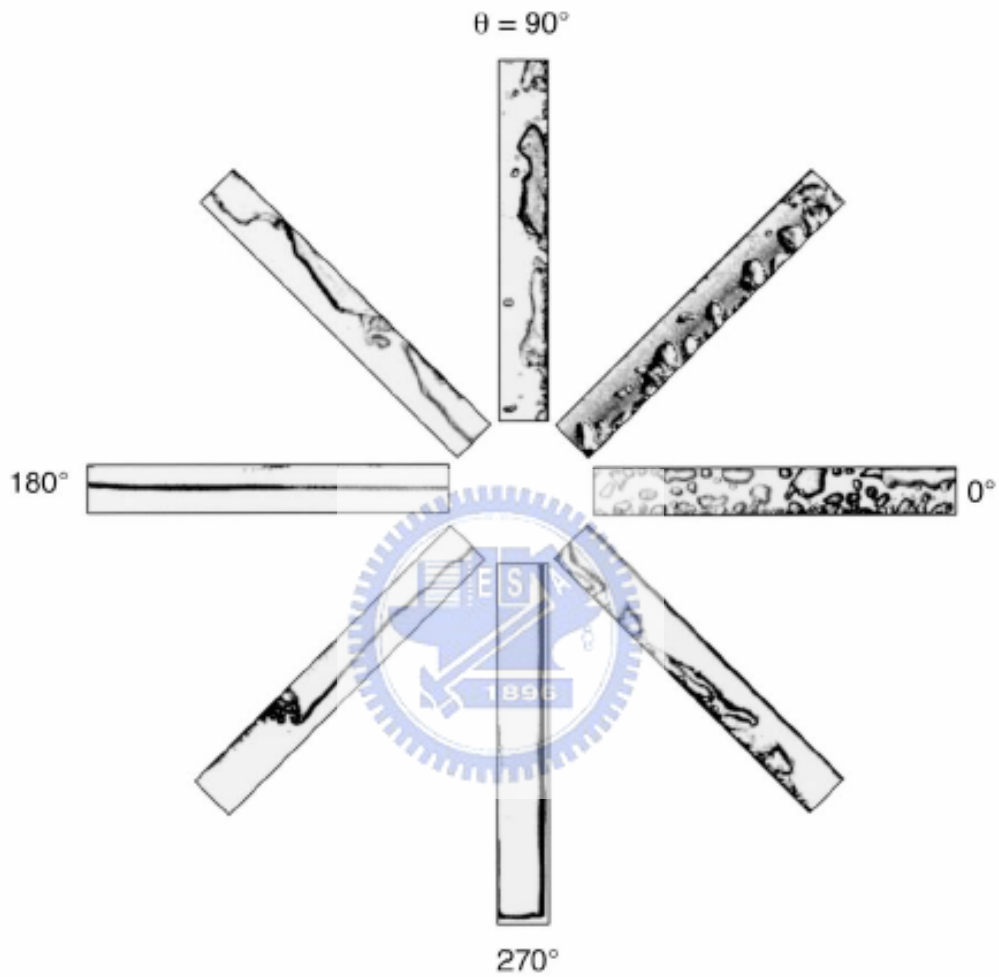


圖 1-9 為工作流體 FC-72 在流道中之八種流向的氣泡流譜，其條件是次冷度為 3°C ，而流速為 0.1m/s [29]。

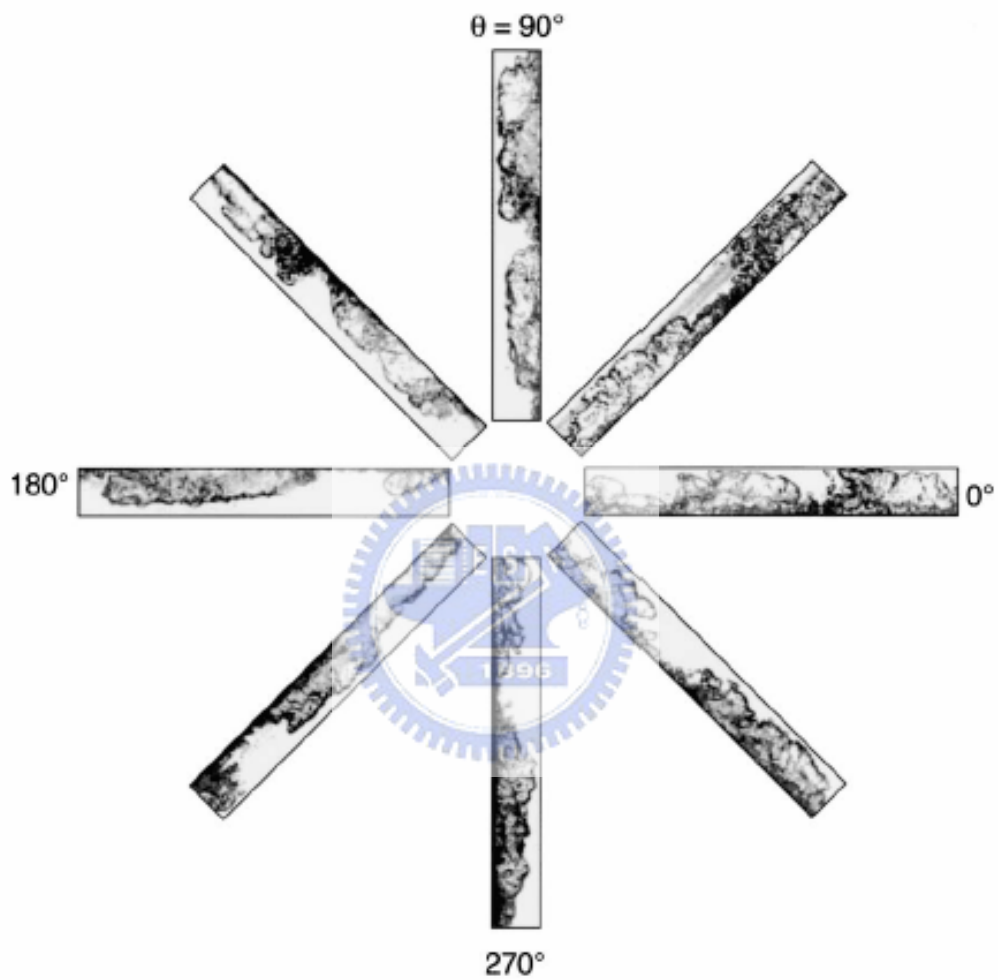


圖 1-10 為工作流體 FC-72 在流道中之八種流向的氣泡流譜，其條件是次冷度為 3°C ，而流速為 1.5m/s [29]。

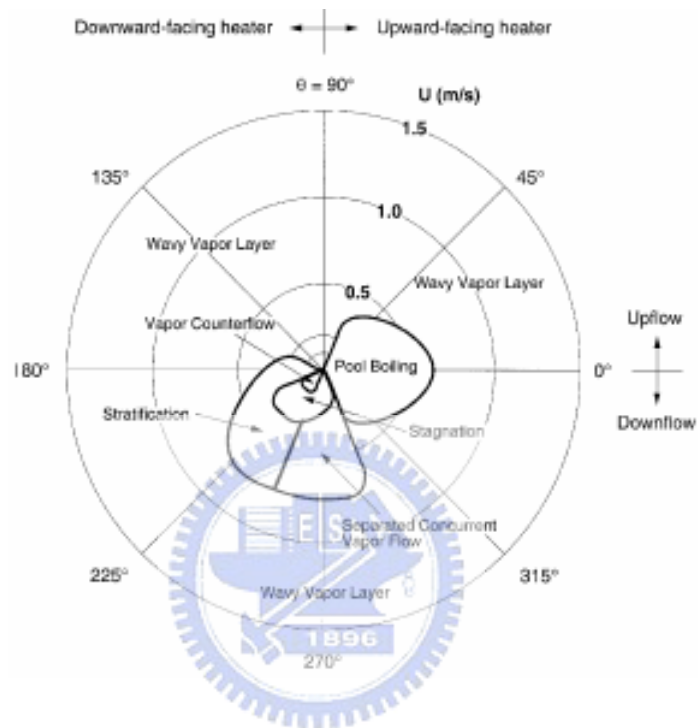


圖 1-11 為工作流體 FC-72 在流道中隨著不同速度之差異之八種流向的氣泡流譜分析圖，其條件是在臨界熱通量(CHF, critical heat flux), 飽和流狀態 [29]。

第二章 流動沸騰理論分析

2-1 單相熱傳分析

Bhowmik and Tou [30] 以 FC-72 為工作流體，模擬電腦 CPU 晶片散熱的流動沸騰實驗，利用一開關控制熱源為 ON 或 OFF，對一系列四顆 10mm*10mm 的晶片在 5mm*20mm 的矩形流道垂直方向進行暫態強制對流熱傳 (transient forced convection heat transfer) 的熱傳分析，將晶片貼平在流道面讓介電液 FC-72 流過矩形管道作散熱。雷諾數(Re)範圍為 800~2625，其熱通率範圍為 1~7 W-cm⁻²，其建立的單相熱傳經驗式如下：

$$Nu_l = 0.776 Pe_l^{1/3} Fo^{-0.74} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$Nu_l = hl/k = q''l/k(T_{wall} - T_{in}) \dots\dots\dots (2-2)$$

$$Pe_l = Re_l Pr \qquad Re_l = Ul/\nu \qquad Fo = \alpha t/H^2$$

其中 l 為流過晶片的特徵長度， h 為水的熱傳係數， k 為晶片的熱傳導係數， T_{wall} 為加熱壁面溫度， T_{in} 為測試段進口溫度， q'' 為加熱通量， α 為熱擴散係數， ν 為運動黏滯力， H 為晶片厚度。

2-2 池沸騰曲線

Nukiyama [31] 在 1934 年以水平白金絲浸入水中加熱作沸騰實驗，所繪出熱通量對過熱度 ΔT 的沸騰曲線，可分為四個區域，分別為單相自然對流區(single

phase nature convection region)、核沸騰區(nucleate boiling region)、部分膜沸騰區(partial film boiling region)、膜沸騰區(film boiling region)，如圖 2-1 所示。

A-C：單相自然對流區

此區為加熱源對壁面加熱所造成初始的液體溫度差，由於液體有溫差，所以造成了密度差而產生自然對流，此時加熱壁面並無氣泡產生。

C-D-E：核沸騰區

當熱通量達到一定通量值時，即開始產生氣泡(C 點)，此時的過熱度為起始沸騰過熱度，隨著熱通量的增加，當達到一定程度時，壁過熱度($T_{\text{wall}}-T_{\text{sat}}$)突然比自然對流區的過熱度小，使熱傳率大大提昇，故曲線往左上方偏移到(D 點)。隨著加熱壁面溫度持續加溫，熱通量增加到某一程度，所產生的氣泡幾乎佔滿整個加熱壁面，過熱度會急速增加，此時熱通量為近臨界熱通量(E 點)。

E-F：部份膜沸騰區

加熱壁面上會存在一層不穩定的蒸氣膜，而液體仍會斷斷續續地重新潤濕加熱壁面，形成液體與氣體相互交替覆蓋的現象。

F-G：膜沸騰區

隨著熱通量的增加，氣泡也隨之增加，此時加熱壁面會被氣泡完全覆蓋，而在加熱壁面上形成一個氣膜，氣泡則規則地由蒸氣膜上週期性地產生。熱量的傳遞主要是靠蒸氣膜內的傳導和對流，當壁面溫度甚高時，則主要是靠輻射來傳遞熱量，此時的熱傳係數比起核沸騰大很多。

E-D-B-A：沸騰遲滯現象(boiling hysteresis)

當達到近臨界熱通量時，降低對壁面的加熱功率，沸騰曲線不會與增加對壁面加熱功率的曲線重合，此現象稱為沸騰遲滯現象(boiling hysteresis)

2-3 池沸騰熱傳機制

Bar-Cohen and Rohsenow [32] 認為當氣泡由表面脫離後，液體迅速由兩側補入所引起的局部擾動，使得對流熱傳增強。並以此為基礎發展出以下的核沸騰關係式：

$$\left(\frac{C_{p_l} \cdot \Delta T}{h_{lv}}\right) = C_{sf} \left[\frac{q''}{\mu_l \cdot h_{lv}} \cdot \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}\right)^{0.5} \right]^{0.33} \cdot \left[\frac{\mu_l \cdot C_{p_l}}{k_l}\right]^{1.7} \dots\dots\dots(2-3)$$

其中 C_{sf} 為經驗常數，且隨加熱面與工作流體的不同而異。若無適當的經驗值，他們建議使用 0.013。

Katto, Yokoyama and Terai [33] 提出成核數目與熱傳係數成正比，在粗糙的表面會有許多的孔穴，這些孔穴會使氣泡陷入，因而提供更多、更大的氣泡成長位置。故粗糙表面的成核密度大於光滑表面。

2-4 流動沸騰熱傳分析

圖 2-2 [34] 為管流流動沸騰示意圖。當加熱源對壁面開始加熱時，流體剛吸收從壁面傳來的熱量，壁面溫度及流體平均之溫度還沒達到飽和溫度，故在流道中流動的型態是單相流；隨著加熱的時間所產生更多的熱量，壁面會先達到沸點

溫度產生沸騰現象，但是流體平均溫度還未達到沸點溫度，則此時之流動型態稱為次冷態沸騰；當流體平均溫度也達到了飽和溫度，此時壁面溫度及流體溫度皆達到飽和溫度，則稱為飽和態流動沸騰；隨著從壁面加熱的溫度繼續升高，會產生分層(stratification)現象，管內壁會有一層液膜，而氣體在管子中央流動，且挾帶一些液滴，稱為液滴流(drop flow)，此時強制對流熱傳的效應流過液膜，會使流體的流動型態成為環狀流(annular flow)，此環狀流熱傳效果佳；隨著壁溫的升高，流道後段的液膜會越來越薄，液體的成分會遠小於氣體的成分，最後液膜乾化(dryout point)即達到臨界熱通量，而流動型態最後又成為單相流。

2-4-1 流速與次冷度的影響

Zhang, Mudawar 和 Hasan [29] 以 FC-72 為工作流體在截面積 $5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的矩型流道中流動，進行飽和流狀態及次冷流狀態對臨界熱通量的流動沸騰實驗，觀察在不同的條件下的氣泡特性與分析流譜，其流向分為垂直方向、水平方向及傾斜方向共八種流動方向。圖 2-3(a)及圖 2-3(b)分別為次冷度 3°C 及 29°C 時之不同流速對八種流向之熱通量的影響，結果發現比較兩圖後，次冷度較大者，其各流向之臨界熱通量大於次冷度較小者，這是因為次冷度較大者，其工作流體溫度較低，冷凝效果較佳，故臨界熱通量較大。而流速較快者，可帶走較多的熱量，臨界熱通量較大，故從圖 2-3(a)及圖 2-3(b)可發現流速較大者，其曲線較靠外圍，代表臨界熱通量較大。

Peng、Wang and Peterson [35] 在 1998 年發現一個使雙元混合物之流動沸騰熱傳效果達到最佳化的混合濃度，此最佳化混合濃度的大小則由流速與次冷度來決定。Tso, Tou, and Xu [36]以 FC-72 為工作流體，模擬電腦 CPU 晶片散熱的流動沸騰實驗，利用一系列四顆 10mm*10mm 的晶片在狹窄矩形流道做垂直方向的沸騰熱傳分析，分別將晶片貼平在流道面(flush-mounted chip)及突出流道面(protruded chip)讓介電液 FC-72 流過矩形流道，並觀察其流體速度及次冷度對臨界熱通量所造成影響，其中晶片突出高度(B)為 2mm。流速範圍在 4.2~78cm/s，雷諾數在 1000~30000，次冷度範圍在 15°C~33°C，並提出以下結論：

1. 在部份發展流時，增加流體流速及次冷度可使晶片表面溫度下降；然而在完全發展核沸騰時，流體之流速及次冷度並不太會影響晶片表面溫度。
2. 臨界熱通量會隨著流體速度及次冷度之增加而變大，但在速度低於 20cm/s 之情況下則影響不大。
3. 在部份發展核沸騰時，晶片貼平於流道的表面溫度比晶片突出流道的表面溫度低；而在完全發展核沸騰時，前者與後者之晶片表面溫度所受的影響差異不大。
4. 晶片貼平於流道之臨界熱通量會高於晶片突出流道之臨界熱通量。

Mudawar and Qu [37] 在 2002 年之實驗結果發現，在低流速區之流速的增加通常會使氣泡的脫離直徑變小，而進口流速的增加會導致起始沸騰熱通量、出口次冷度及流道底面過熱度的增高。

2-4-2 工作流體熱力性質的影響

Bergles、Bakhrū and Shires [38] 在 1988 年進行矩形管道內單邊加熱面的次冷流動沸騰實驗，發現流體的熱物理性質及壓力值為主要影響因素。

2-4-3 不凝結氣體的影響

Wu and Simon [39] 在 1994 年探討在小的加熱區域中，介電液內之不凝結氣體對於次冷流動沸騰的影響，其實驗結果發現 FC-72 在含有不凝結氣體及除氣後，在低熱通量的狀況下，其沸騰曲線會有明顯之差異；而在高熱通量時則差異性不大，其原因為接近壁面的液膜在高熱通量時會被加熱面除氣。但即使在高熱通量部分的沸騰曲線不太受不凝結氣體之影響，其臨界熱通量仍然會降低 10%。



2-4-4 微小管道之數目的影響

Peng、Wang and Peterson [35] 在 1998 年之實驗結果發現，增加矩形流道中的微小管道數量，並利用適當的管道結構配置亦能改善流動熱傳係數；而熱傳係數的增加量是隨著流道尺寸縮小而降低。

2-5 臨界熱通量

當達到臨界熱通量時，此時熱傳係數會由一個極大值降到一個相當低的值，而壁面的溫度也會突然升的很高，甚至會把加熱的壁面燒毀，故在本流動沸

騰實驗中，要注意何時會發生溫度的驟升，則必須迅速關閉加熱源以保護電加熱片。流動沸騰的臨界熱通量依其蒸氣乾度的大小主要有兩種不同的機制：

1. 偏離核沸騰機制 (DNB, departure from nucleate boiling)
2. 液膜乾化機制

當流動型態為次冷沸騰或低蒸氣乾度時，此時即為偏離核沸騰機制。加熱表面附近會有劇烈的蒸氣產生，使主流的液體無法補充蒸發所消耗的液體，因此會在加熱表面上會形成導熱不佳的蒸氣膜；而在高蒸氣乾度的流動沸騰，其雙相流的型態為環形流，臨界熱通量的形成主要是液膜的乾化，所以也稱此時的臨界熱通量為乾化熱通量。而影響 CHF 的五個影響流動沸騰的因素，包括重力(body force)、流速、次冷度、表面張力(surface tension)、及乾度(quality)。

Ma and Chung [40] 在 2001 年以 FC-72 為工作流體，進行在微重力 (microgravity) 下的強制對流沸騰之實驗對臨界熱通量的影響，其結果發現在微重力與在地球重力(terrestrial gravity)的情況下相較，其臨界熱通量會較低。

Mudawar, Howard and Gersey[41] 提出在近垂直表面下，隨著不同流體流向及加熱表面的方向，流體所流之加速度與所受重力場之影響也會不同，故流體加速度及重力加速度對臨界熱通量將造成影響。

Howard and Mudawar[42]認為表面方位之效應對於臨界熱通量之影響分為三種情形：近水平向上(near-horizontal upward-facing)，近垂直(near-vertical)，and 向下(downward-facing)。在近水平向上狀況下，蒸氣將受浮力(buoyancy)垂直向

上離開加熱表面 [43]。而近垂直狀況下，蒸氣波浪將沿著加熱表面伸展，如圖 1-5 的臨界熱通量機制之流動沸騰。而向下的情況，蒸氣將在加熱表面上反覆成層，並降低臨界熱通量 [44~49]。

Mudawar and Maddox [11]、Lee and Simon [22]、Samant and Simon [23]認為流體在矩形流道中受單一加熱原加熱的狀況下，臨界熱通量會隨著流體速度及次冷度之增加而增加；Willingham and Mudawar [50]，McGillis et al. [25] 認為在多晶片模組的情況下，臨界熱通量也會隨流體速度及次冷度之增加而增加。

Yu、France、Wambsganss and Hull [51] 在 2002 年之實驗發現在高乾度的情況下，臨界熱通量會隨著質通量的增加而增加。



2-6 流譜分析

Dukler and Taitel [52] 分析雙相流之流譜，在垂直流道中較常見的流動型態包括：氣泡流(bubbly flow)、彈狀流(slug flow)、攪拌流(churn flow)、環形流(annular flow)與液滴流(drop flow)，如圖 2-4 所示。其中氣泡流與液滴流屬於分散流(dispersed flow)，氣泡或液滴分散在連續的液體或氣流中。而環形流(annular flow)是一種分層流(stratification flow)，液體沿著管壁以液膜(liquid film)的型態流動，氣體則在管路的中央流動。在低蒸氣乾度的沸騰流道裡，若管壁的加熱通量超過所謂的臨界熱通量，管壁附近將形成一蒸氣薄膜(vapor film)，而形成所謂的反環形流(inverted annular flow)。而彈狀流(slug flow)又稱袋狀流，液體如子彈般

裝著氣體。攪拌流(churn flow)是一種極端不穩定的流譜，屬於彈狀流與環狀流之間的過渡流譜。

Ghristopher 和 Mudawar[53]使 FC-72 在水平矩形流道進行流動沸騰實驗，並觀測流道側向面之氣泡特性及成長過程之流譜。流道截面積為 $5.0\text{mm}\times 2.5\text{mm}$ ，加熱面長度為 101.6mm ，寬度為 5mm ，工作流體流速範圍為 0.25m/s 至 10m/s ，次冷度為 3°C 、 16°C 、 29°C 。結果發現蒸氣波浪層之長度及高度會沿著流動方向增大，但隨著工作流體之次冷度及流速之增加而減小。在圖 2-5 所拍攝之氣泡成長流譜中，作者針對 3°C 及 29°C 兩種次冷度比較在流速為 1m/s 時之氣泡特徵。在流道進口至 25mm 處且次冷度 3°C 之狀況下，所形成的氣泡為小而分散，對於液體的返回充填沒有構成太多的阻礙。但隨著氣泡越往下游流動，氣泡開始互相結合形成較大的氣膜，這些氣膜會覆蓋加熱壁面，使液體不容易返回加熱壁面充填，最後在接近臨界熱通量處形成蒸氣波浪層，大幅阻礙液體返回加熱壁面之充填，故只有小部份接觸面積與濕潤面接觸得以散熱。工作流體次冷度為 29°C 時之氣泡成長模式與次冷度 3°C 時非常相似，但是因為流體的低溫抑制氣泡產生，並且加速生成氣泡凝結，故氣泡層的高度及長度較小，且發展也較慢。

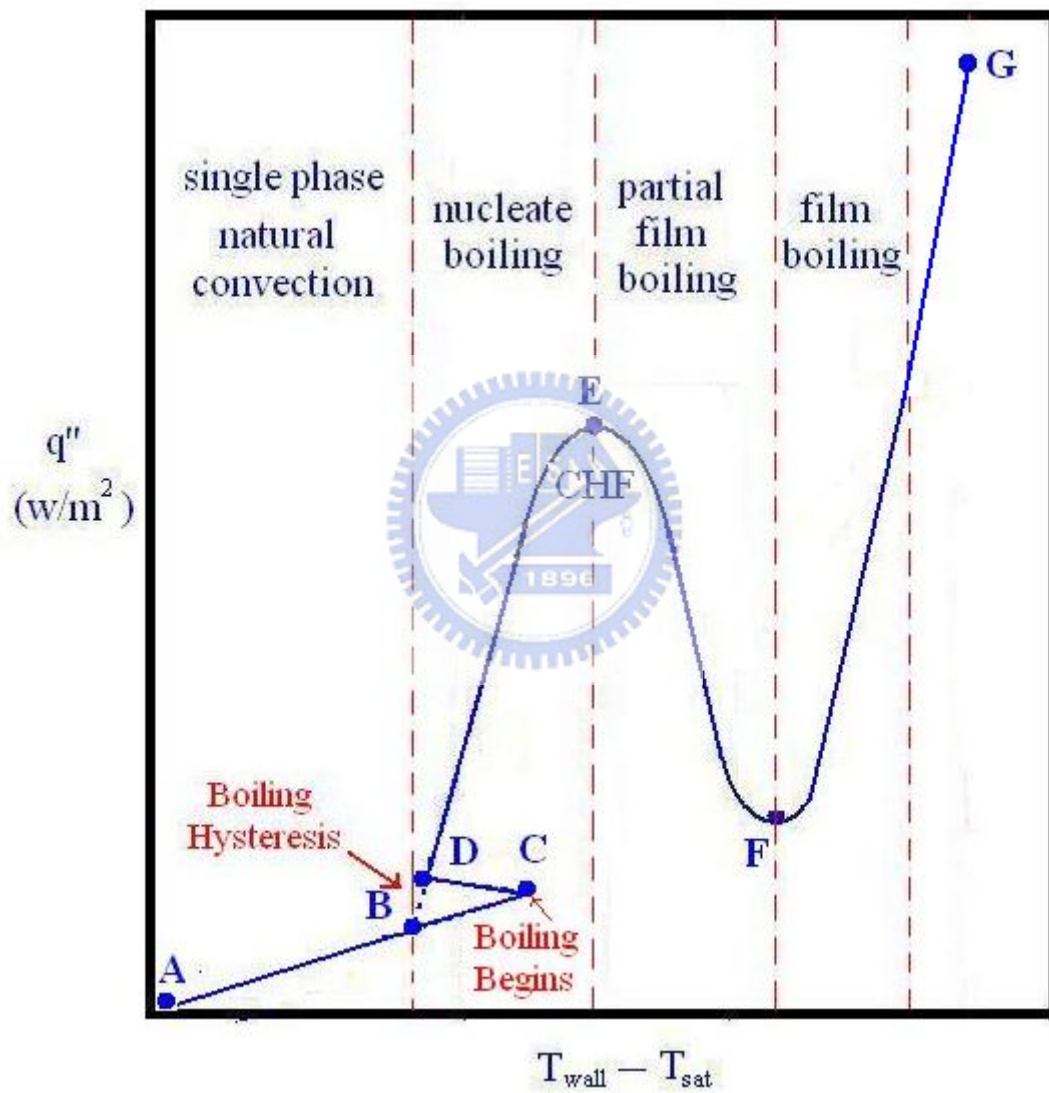


圖 2-1 池沸騰曲線示意圖 [31]

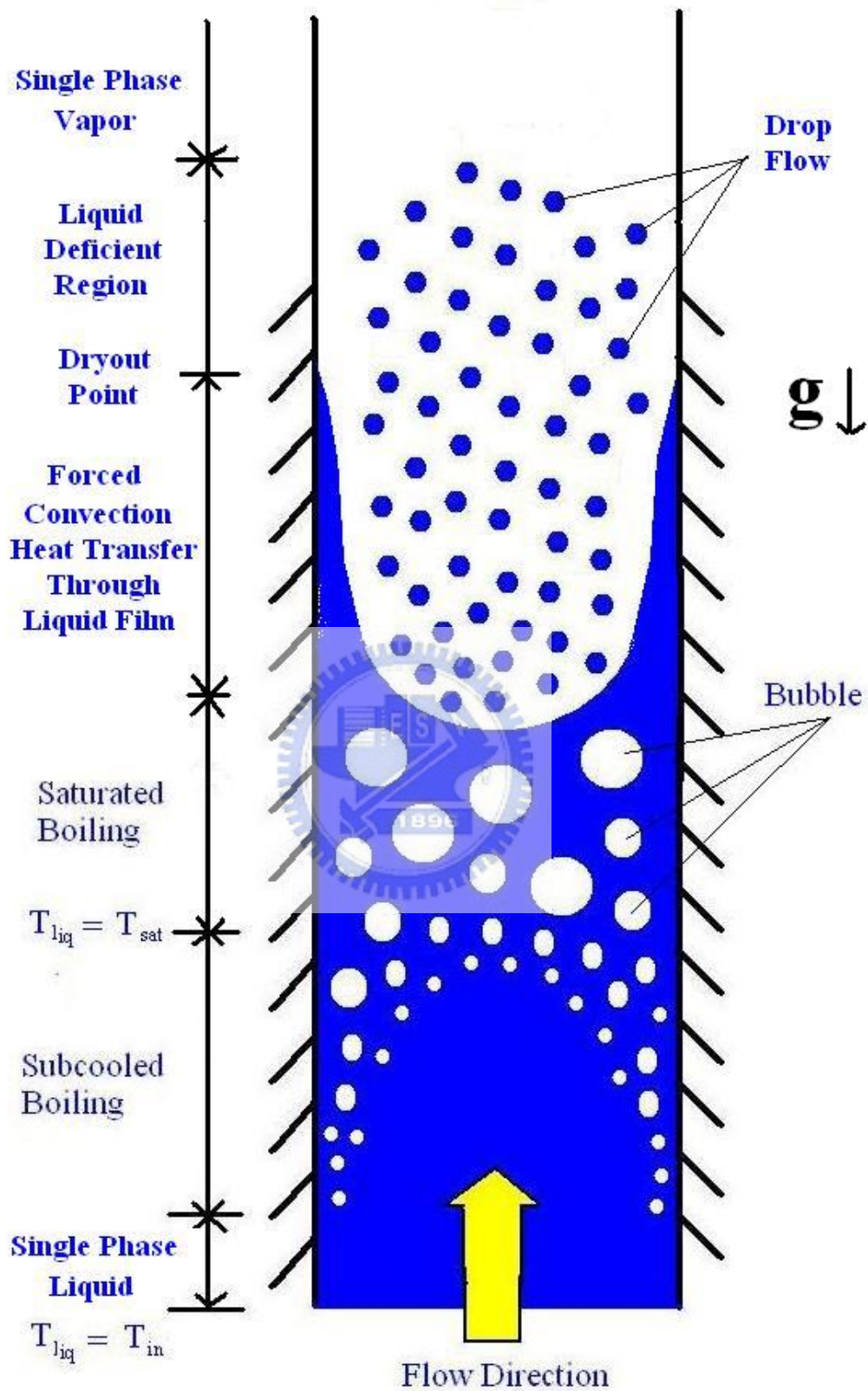


圖 2-2 流動沸騰熱傳示意圖 [34]

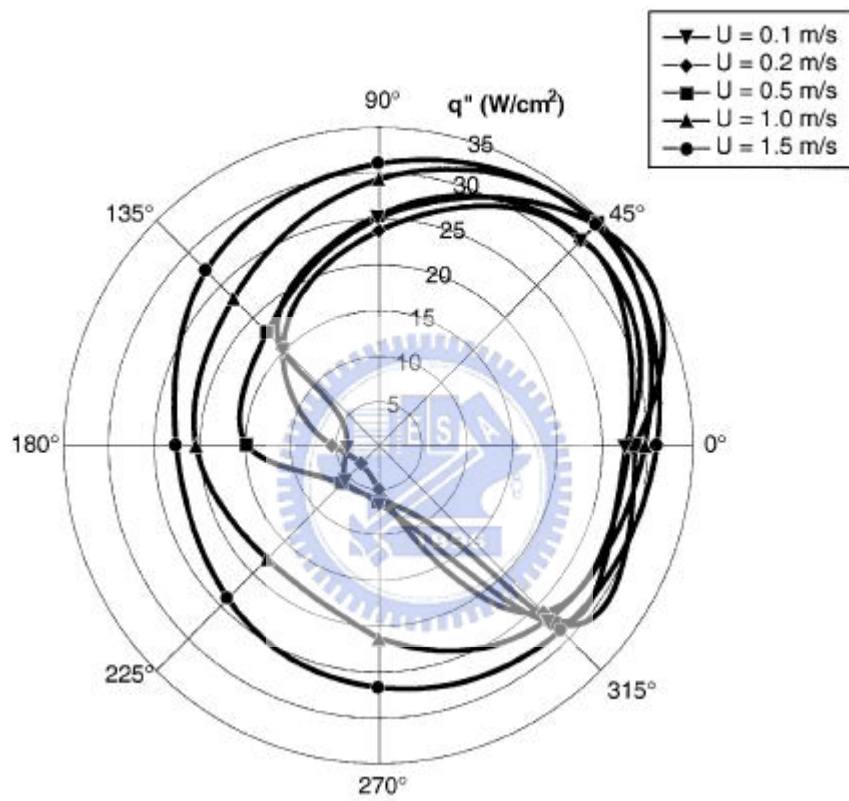


圖 2-3(a) Zhang , Mudawar and Hasan [29] , FC-72 在次冷度 3°C 時，八種不同

流向之流速與熱通量關係圖

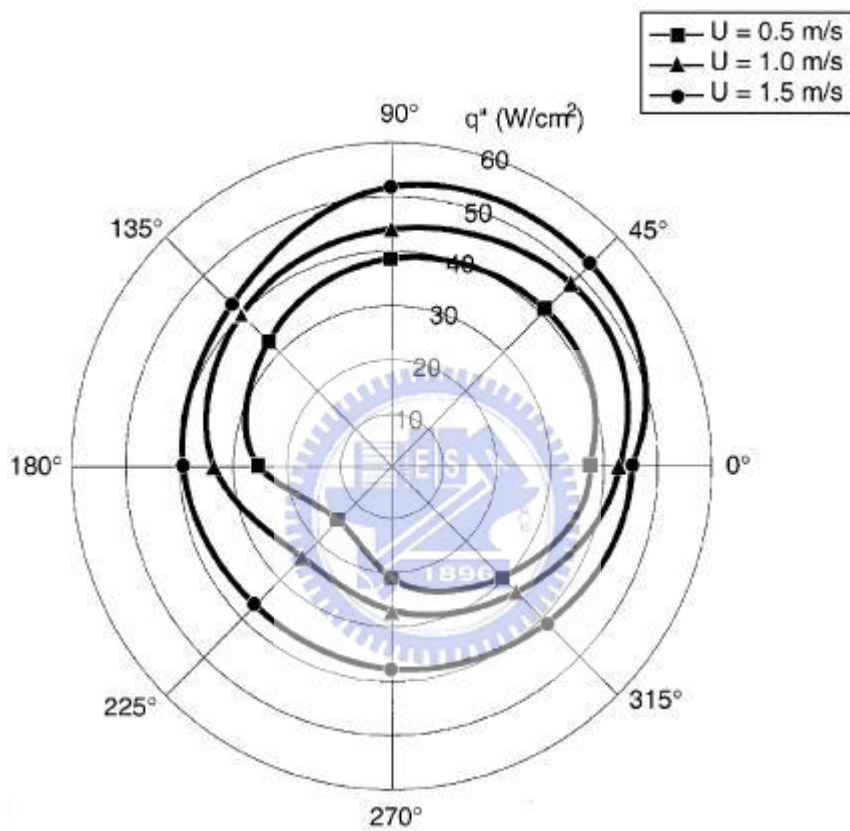


圖 2-3(b) Zhang, Mudawar and Hasan [29], FC-72 在次冷度 30°C 時，八種不同

流向之流速與熱通量關係圖

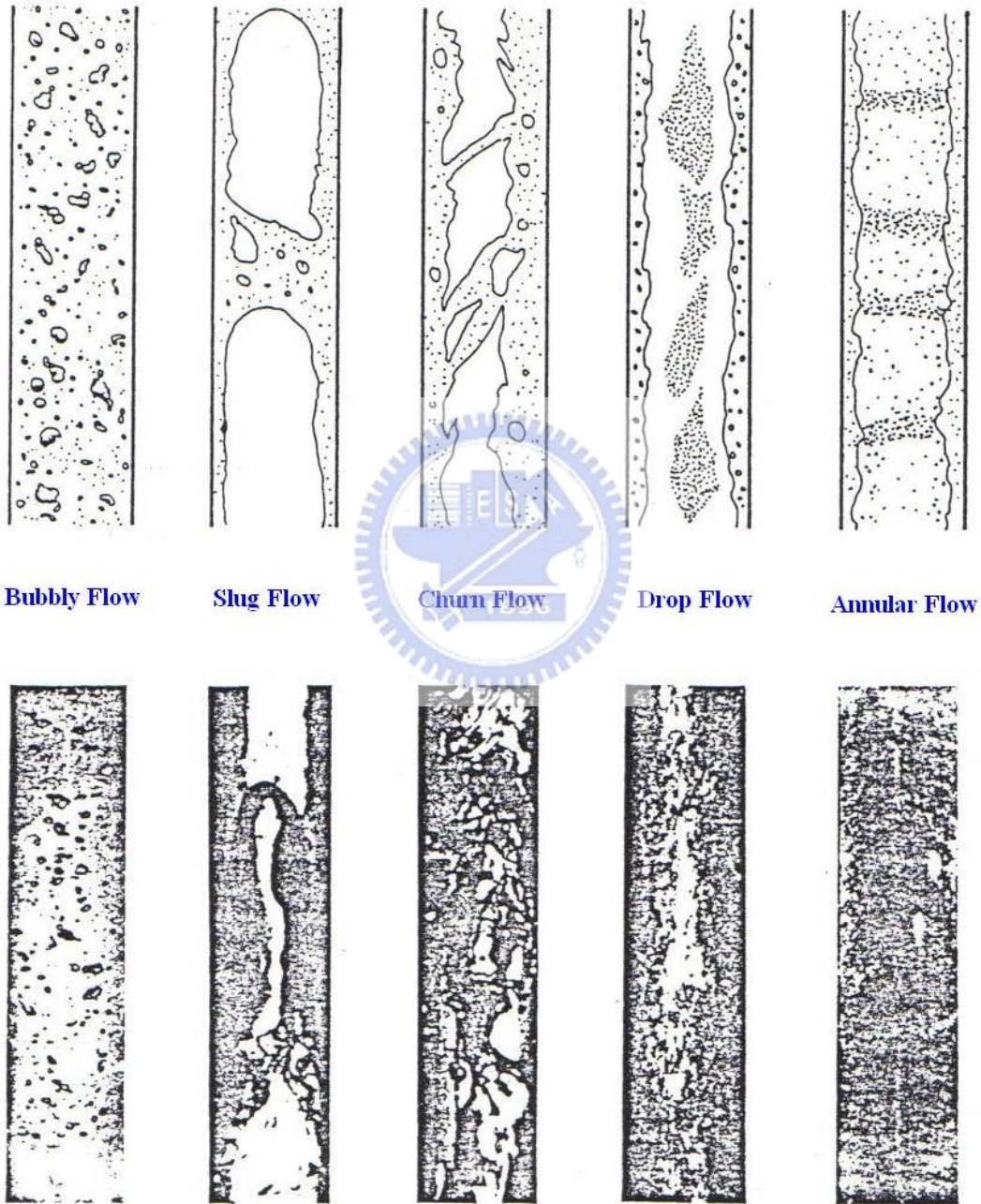


圖 2-4 垂直流道之流譜型態 [52]

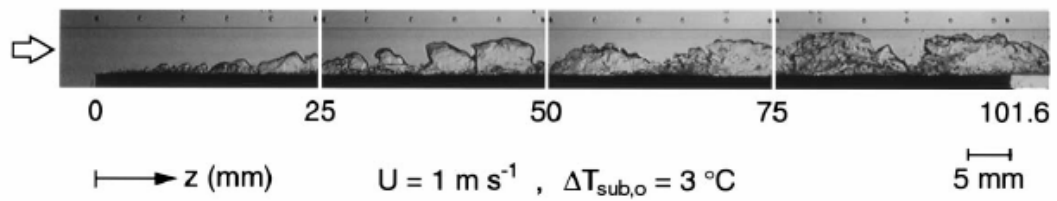


圖 2-5(a) Ghristopher 和 Mudawar [53]在水平矩形流道進行次冷度 3°C之流譜拍攝

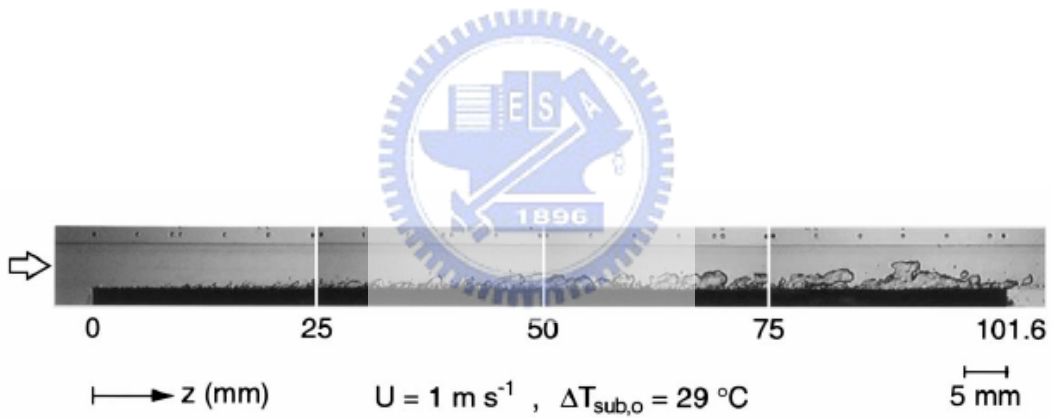


圖 2-5(b) Ghristopher 和 Mudawar [53]在水平矩形流道進行次冷度 29°C之流譜拍攝

第三章 實驗系統與參數計算

本實驗以 FC-72 為工作流體在矩形流道中進行垂直向上的流動沸騰實驗，並在流道中放置一塊體積為 10mm*10mm*5mm 的無氧銅塊，作為模擬電腦之 CPU 晶片。介電液 FC-72 在一大氣壓下的各項熱物理性質如表 3-1 [7]所示。

3-1 實驗設備

本流動沸騰實驗設備共分為：工作流體循環系統、測試段流道系統、預熱循環系統、冷卻循環系統、影像擷取系統、數據擷取系統及輔助系統，如圖 3-1 所示。



3-1-1 工作流體之循環系統

工作流體之循環系統為介電液流動的循環管路，其元件包含：液氣貯存槽、流體驅動泵浦、儲壓器、流量計、預熱段與冷凝段，如圖 3-1 所示。系統之循環步驟為介電液自液氣儲存槽流出，經由泵驅動後流入流量計量取流量值，再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要的次冷，流體進入測試段進行實驗觀測與數據擷取，最後再返回液氣貯存槽，並確保進入流量計的介電液為液態，以上形成一個循環系統。在泵出口下游處裝有一旁通迴路，可以進行流量的控制調整，系統壓力藉由管路閘口與泵的調整，控制在一大氣壓，另有一儲壓器外接一氮氣桶，藉以穩定整個環路的壓力。本系統所使用的介電液泵浦

為 Cole-Parmer 微齒輪式泵浦，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貯存槽。

3-1-2 測試段流道系統

為了使介電液 FC-72 進入測試段流道時形成完全發展流(fully developed flow)，故須先計算水力發展長度 L_h ，其計算根據表 3-2 [54]

$$L_h = 0.075 \cdot Re \cdot D_h \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

其中 Re 為慣性力(inertia force)與黏滯力(viscosity force)之無因次參數比值， D_h 為水力直徑：

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

A_c 為流道截面積 $3\text{mm} \times 12\text{mm}$ ， p 為截面積周長 30mm ，水力直徑計算結果為 4.8mm 。

雷諾數 Re 定義為：

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

其中 V 為介電液之平均流速， ν 為運動黏滯係數(kinematic viscosity coefficient)，本實驗雷諾數最大為 2400，故水力發展長度至少需要 864mm。本實驗之測試流道設計長度為 1000mm、截面為寬 12mm×高 3mm 的矩型流道，由上下兩層的玻璃纖維環氧基板(plexiglass)所組成。上層板長作為可視化視窗，用以觀察介電液於流道氣泡成長的情形，並可拍攝流譜。上板在測試流道兩端各有開孔連接環路

作為測試段的進出口。下層板為主流道用，在下層板上銑出一長 1000mm、寬 12mm、深 3mm 的溝槽，與上層板組合後即為實驗之測試段流道。在下層板的流道表面距離進口端 864mm 處，有一用以模擬電腦晶片之長 10mm、寬 10mm 的加熱面，提供實驗所需的熱通量。本實驗之測試段示意圖及其尺寸標示，分別如圖 3-2 及圖 3-3 所示。加熱晶片模組如圖 3-4a 及圖 3-4b 所示，先用水刀在下層板流道中，於上述的位置切出一長 10mm、寬 10mm 且貫穿下層板的通道，然後置入長 10mm、寬 10mm、高 5mm，材質為無氧銅銅塊，並且在與玻璃纖維環氧基板的接觸界面上，塗上耐高溫矽膠，用以黏著固定與防止液漏。在銅塊工作表面下方 2mm 處各埋有四根熱電偶，用以推算加熱後銅塊與液體接觸面的溫度；銅塊下表面與上層板之下表面貼齊，並在銅塊下表面處貼上加熱面積為 10mm×10mm 的電加熱片，最後在電加熱片下方緊密鎖上長 78mm、寬 40mm、高 28mm 之鐵弗龍，減少熱散失於空氣中，如圖 3-2 所示。

3-1-3 流道托架與觀測視窗

本流動沸騰實驗是將測試段流道作垂直流向的擺置，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，並維持穩固流道在垂直流向；而設計觀測視窗是為了能觀測氣泡流譜，並利用高速照相機將其流動情形拍攝下來，流道托架及觀測視窗之設計與尺寸標示，如圖 3-5 及圖 3-6 所示。

3-1-4 模擬 CPU 晶片

本研究之模擬 CPU 晶片的加熱工作表面為平滑加熱面，如圖 3-7 所示，其工作面長寬為 10mm×10mm，貼齊流道表面，置入測試段。晶片表面粗糙度量測由工研院材料所的表面粗糙度計(Surfcorder，SE1700)量測，其量測次數為三次，數據分別由表 3-3 至表 3-5 所示，其粗糙度顆粒單位為 μm ，探針前進探測的速率為 0.050mm/s，探針量測方向分別為 Ra 及 Rz。Ra_{max} 分別為 0.0555 μm 、0.0570 μm 、0.0591 μm ；Ra_{min} 分別為 0.0468 μm 、0.0498 μm 、0.0516 μm ；Rz_{max} 分別為 0.35 μm 、0.35 μm 、0.4 μm ；Rz_{min} 分別為 0.2 μm 、0.35 μm 、0.4 μm 。表面加工過程如附錄 A，表面粗糙度定義如附錄 B。



3-1-5 預熱循環系統

本實驗系統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進行熱交換，其控溫範圍為 0°C 至 100°C，並可以內建的控溫程式維持定溫狀態；另外在預熱系統外部緊密包覆傳導係數低的隔熱棉以防止熱量的散逸。

3-1-6 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，而此系統可用來與自測試段流出的高溫蒸氣進行熱交換，將液氣貯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。

3-1-7 量測儀器

3-1-7-1 壓力轉換器

壓力轉換器於流量計進口、預熱段進口，放置於流道測試段部分，如圖 3-2 所示。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^2)，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 Ω 的標準電阻（絕對誤差值 $\pm 0.5\%$ ），以獲得 1~5V 的電壓值。本論文所有實驗藉由調整流道出口之閥口大小及泵流速來使系統維持在 101.325KPa。

3-1-7-2 熱電偶

本實驗溫度量測採用 Omega T-type 熱電偶，基本誤差為 0.5°C，經過校正後誤差可達 0.2°C。其校正是以 HP28004A 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。本實驗熱電偶之裝置位於測試段進出口之孔洞，各裝置一條，如圖 3-2 所示；裝置於 CPU 測試模擬晶片內部四條，插入深度皆為 3mm，如圖 3-4(a)所示；裝置於鐵氟龍塊側邊兩條及底部兩條，如圖 3-8(a)及圖 3-8(b) 所示。

3-1-8 輔助系統

3-1-8-1 除氣系統

本實驗主要針對純 FC-72 液體在流動沸騰狀態下進行熱傳特性分析，由於 FC-72 在常壓下會溶解大量空氣，且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，並改變流體熱物理性質，造成實驗數據與結果偏差，所以 FC-72 灌入系統之前必須先做除氣(degas)的動作。除氣系統主要是由不銹鋼容器、冷凝器、和排氣閥所組成之裝置，如圖 3-1 所示。除氣時先將除氣系統和介電液循環系統的通閥鎖緊，然後將介電液灌入不銹鋼容器內，以直流電源供應器加熱，使介電液沸騰，將沸騰蒸發的介電液蒸氣與受熱氣化的非凝結氣體通入冷凝器中，然後經由排氣閥排放至大氣中，在冷凝器中所凝結成液態的介電液則回流至容器中。如此循環持續進行，直到常溫下所量測到的飽和溫度為 56.6°C 為止，表示完成除氣動作。

3-1-8-2 真空泵

本實驗的真空泵 ULVAC 的 YTP-150M 型，其系統共分兩部分，分別為前置的油轉式泵 (Oil rotary pump)，除氣速度每秒 100 升，與渦輪分子泵 (Turbo molecular pump)，除氣速度為每秒 160 至 190 升。抽氣時將系統抽氣使壓力達 10^{-5}torr 以下之後，關緊所有通閥並將除氣過的 FC-72 導入系統即可。

3-1-8-3 影像擷取系統

本實驗進行流譜觀測時，使用 Panasonic 公司的高速 CCD 相機，可分三種操作模式。第一種模式其畫素解析度為(1280H*1024V)，每秒可拍 628 張；第二種模式其畫素解析度為(512H*512V)，每秒可拍 5100 張；第三種模式其畫素解析度為(1280H*1024V)，每秒最高能拍 30000 張。本實驗流譜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。

3-1-9 數據擷取系統

本實驗採用 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，因其內部設有電阻溫度感測器(RTD, Resistance Temperature Detector)轉換功能，所以溫度測量時，即直接以所讀數據經校正曲線轉換而得；至於壓力的量測，則以一被動式之壓力轉換器所產生之電流，經由一並聯 250Ω 的電阻調整，進而在數據擷取機上得到正確之壓力值。

3-2 實驗方法及步驟

3-2-1 實驗前準備工作

步驟一：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

壓力轉換器擷取系統內壓力紀錄，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，以確定液汽貯存槽及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焊接不良，必須重新檢查環路並將洩漏排除，然後重複前述測漏步驟直到環路確定無洩漏之虞。

步驟二：環路抽真空

確定系統無洩漏後放掉氮氣，將液氣貯存槽及整個環路以本實驗室的 ULVAC 真空泵抽真空，直到內部壓力達 10^{-5} torr，以減少液氣貯存槽及環路內殘存的不凝結氣體。



步驟三：介電液除氣

除氣(degas)的步驟是先將除氣系統和介電液循環系統的通閥鎖緊，然後將介電液灌入不銹鋼容器內，並以直流電源供應器加熱，使容器內之介電液劇烈沸騰，介電液蒸氣伴隨釋出的空氣置冷凝器，與一逆流的冷卻系統進行熱交換，使介電液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，至一大氣壓飽和溫度 56.6°C 為止，藉由上述步驟消除液體中之不凝結氣體後，最後將除氣後的介電液灌入已抽真空的液氣貯存槽內即可開始進行實驗。

3-2-2 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，使液氣貯存槽之介電液達到工作狀態。

步驟二：

當恆溫槽達到設定溫度後，開啟介電液泵，並視介電液流量大小調整旁通量。

步驟三：

設定預熱系統之溫度，以控制介電液進入測試時段之次冷度。



步驟四：

開啟加熱系統，慢慢調整電壓、電流，使電壓、電流緩緩增加，並達到一固定值，此時測試表面溫度亦會慢慢上升。而為了保持測試段之飽和壓力為固定，必須同時調節管路通閥與泵輸出之流量，來維持測試段為固定壓力。

步驟五：

等系統達到所要求壓力下之穩定狀態後，紀錄當時之測試段之飽和壓力、飽和溫度、介電液流量、入出口介電液溫度、熱通量值及測試表面溫度，同時

也由視窗觀察流道內的沸騰現象。

步驟六：

由視窗進行流譜觀察，用高速相機在近拍模式下進行拍攝，光圈設定為適當大小，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、色調分布、裁切等後製處理，以取得最佳的圖像。

步驟七：

實驗結束後，依反步驟一一將各單元系統關閉。



3-3 實驗參數計算

3-3-1 工作壓力

測試段壓力 P ，其定義為測試段進口之壓力值，即

$$P = P_{in} \dots\dots\dots(3-4)$$

3-3-2 次冷度的計算與飽和狀態的判定

在進行次冷流動沸騰時，必須控制介電液在進入測試段時維持在特定之次冷度 T_{sub} ，而其定義為測試段的飽和溫度與進口溫度的差值，即

$$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_{in} \dots\dots\dots(3-5)$$

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，即

$$T_{sat} = T(P) \dots\dots\dots(3-6)$$

本實驗控制壓力值固定在一大氣壓，其飽和溫度為 56.6°C ，故

$$T_{sat} = 56.6^\circ\text{C} \dots\dots\dots(3-7)$$

3-3-3 熱損估算

本實驗熱損之估算量測方式如(圖 3-8a)，在鐵氟龍正中央埋設一根 T-Type 的熱電偶而量出溫度 T_A ，而另有一根熱電偶，以第一根熱電偶為中心，向側面

延伸距離 L_{AB} ，所量測到的溫度值為 T_B ，假設 T_A 分別與 T_B 成線性分佈，且四個側面的熱損失值相等，可用傅立葉熱傳導定律求得四個側面的熱損 Q_{side} 為

$$Q_{side} = 4k_t A_{side} \frac{T_A - T_B}{L_{AB}} \dots\dots\dots(3-8)$$

同理如(圖 3-8b)，在鐵氟龍正中央埋設一根 T-Type 的熱電偶而量出溫度 T_A ，而另有一根熱電偶，以第一根熱電偶為中心向底面延伸距離 L_{AC} ，所量測到

的溫度值為 T_C ，其底面的熱損失 Q_{bottom} 為

$$Q_{bottom} = k_t \cdot A_{bottom} \frac{T_A - T_C}{L_{AC}} \dots\dots\dots(3-9)$$

其中 k_t 是鐵氟龍的熱傳導係數， A_{side} 為每個側面的面積， A_{bottom} 為底面的面積，如果忽略銅塊側面的熱損失，則總熱損 Q_{loss} 為

$$Q_{loss} = Q_{side} + Q_{bottom} \dots\dots\dots(3-10)$$

由此可統計出在各加熱量 Q_{total} 時的熱損失比 ε 為

$$\varepsilon = \frac{Q_{loss}}{Q_{total}} \dots\dots\dots(3-11)$$

其中 Q_{total} 為電源供應器上輸出之功率值，由於所使用之薄型加熱片其電阻會隨溫度與輸出功率變化，故以電流 I 與電壓 V 之乘積做計算：

$$Q_{total} = I \times V \dots\dots\dots(3-12)$$

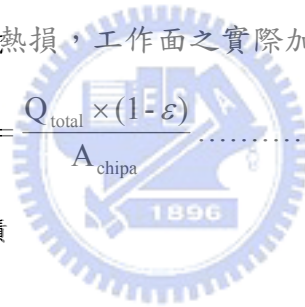
3-3-4 熱通量

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

忽略加熱面置工作面之側向熱損，工作面之實際加熱通量 q_{actual}'' 為

$$q_{actual}'' = \frac{Q_{total} \times (1 - \varepsilon)}{A_{chipa}} \dots\dots\dots(3-13)$$

其中 A_{chips} 為加熱片工作面積



3-3-5 表面溫度

在測試流道下方，距離測試片表面 t 處平面上，埋有四條熱電偶，將此四條熱電偶所量出的溫度 T_1 、 T_2 、 T_3 與 T_4 之算術平均值作為加熱片面下方平均溫度 T_{ave}

$$T_{ave} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} \dots\dots\dots(3-14)$$

因為熱電偶埋藏於測試流道表面下，故測試流道的平均表面溫度需用傅立葉熱傳導定律（Fourier' law of conduction）加以修正：

$$T_{\text{wall}} = T_{\text{ave}} - \frac{q_{\text{actual}}''}{k} \times t \dots\dots\dots(3-15)$$

其中 t 為熱電偶至測試片表面的距離， k 為測試片的熱傳導係數。

3-3-6 熱傳係數

次冷態熱傳係數 h_{sub} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) 在本實驗中定義其參考值為：

$$h_{\text{sub}} = \frac{q_{\text{actual}}''}{(T_{\text{wall}} - T_{\text{sat}})} \dots\dots\dots(3-16)$$

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。



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 , ρ_l	1600 kg / m ³
Density of vapor , ρ_v	13.39 kg / m ³
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
Thermal diffusivity of liquid , α_l	3.064×10^{-8} m ² / s
Kinematic viscosity of liquid , ν_l	2.729×10^{-7} m ² / s
Prandtl number of liquid , Pr_l	8.900
Coefficient of thermal expansion of liquid , β_l	-0.001639K ⁻¹
Surface tension of liquid , σ_l	0.008348 N/m
Dielectric constant , 25°C (1KHz)	1.76
Dielectric Strength , KV (2.54mm gap)	42
Solubility of Air (ml gas/100ml liquid)	48

表 3-1 介電液 FC-72 於一大氣壓之熱物理性質 [7]

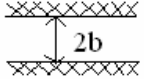

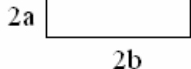
Hydrodynamic entrance length L_h and thermal entrance length L_t for laminar flow inside ducts			
Geometry	$\frac{L_h / D_h}{Re}$	$\frac{L_t / D_h}{Pe}$	
		Constant wall temperature	Constant wall heat flux
	0.011	0.008	0.012
	0.056	0.033	0.043
			
$\frac{a}{b} = 0.25$	0.075	0.054	0.042
$\frac{a}{b} = 0.50$	0.085	0.049	0.057
$\frac{a}{b} = 1.00$	0.090	0.041	0.066

表 3-2 水力發展長度表 [54]

Surfcoorder SEI700	
DATE	: 6/ 2/20
TIME	: 10:28:24
M speed	: 0.050mm/s
Standard	: ANSI
Cut off	: λ.c 0.800mm
E Length	: 4.000mm
Ra	: 0.0517 μm
Ra1	: 0.0500 μm
Ra2	: 0.0555 μm
Ra3	: 0.0534 μm
Ra4	: 0.0530 μm
Ra5	: 0.0468 μm
Ramax	: 0.0555 μm
Ramin	: 0.0468 μm
Rz	: 0.2500 μm
Rt1	: 0.3500 μm
Rt2	: 0.2500 μm
Rt3	: 0.2000 μm
Rt4	: 0.2500 μm
Rt5	: 0.2000 μm
Rtmax	: 0.3500 μm
Rtmin	: 0.2000 μm
Rmax	: 0.3500 μm
Sm	: 0.1106mm
PC	+0.080-0.010 μm : 19
PC	+0.200-0.080 μm : 0

表 3-3 晶片表片粗糙度第一次量測數據

Surfcoorder SEI700	
DATE	: 6/ 2/20
TIME	: 10:32:36
M speed	: 0.050mm/s
Standard	: ANSI
Cut off	: λ.c 0.800mm
E Length	: 4.000mm
Ra	: 0.0534 μm
Ra1	: 0.0498 μm
Ra2	: 0.0512 μm
Ra3	: 0.0548 μm
Ra4	: 0.0570 μm
Ra5	: 0.0542 μm
Ramax	: 0.0570 μm
Ramin	: 0.0498 μm
Rz	: 0.2700 μm
Rt1	: 0.3500 μm
Rt2	: 0.2500 μm
Rt3	: 0.2000 μm
Rt4	: 0.2500 μm
Rt5	: 0.3000 μm
Rtmax	: 0.3500 μm
Rtmin	: 0.2000 μm
Rmax	: 0.3500 μm
Sm	: 0.0765mm
PC	+0.080-0.010 μm : 11
PC	+0.200-0.080 μm : 0

表 3-4 晶片表片粗糙度第二次量測數據

Surfcoorder SEI700	
DATE	: 6/ 2/20
TIME	: 10:39:46
M speed	: 0.050mm/s
Standard	: ANSI
Cut off	: λ.c 0.800mm
E Length	: 4.000mm
Ra	: 0.0552 μm
Ra1	: 0.0547 μm
Ra2	: 0.0528 μm
Ra3	: 0.0591 μm
Ra4	: 0.0516 μm
Ra5	: 0.0580 μm
Ramax	: 0.0591 μm
Ramin	: 0.0516 μm
Rz	: 0.2800 μm
Rt1	: 0.2500 μm
Rt2	: 0.2500 μm
Rt3	: 0.3000 μm
Rt4	: 0.2000 μm
Rt5	: 0.4000 μm
Rtmax	: 0.4000 μm
Rtmin	: 0.2000 μm
Rmax	: 0.4000 μm
Sm	: 0.0900mm
PC	+0.080-0.010 μm : 12
PC	+0.200-0.080 μm : 0

表 3-5 晶片表片粗糙度第三次量測數據

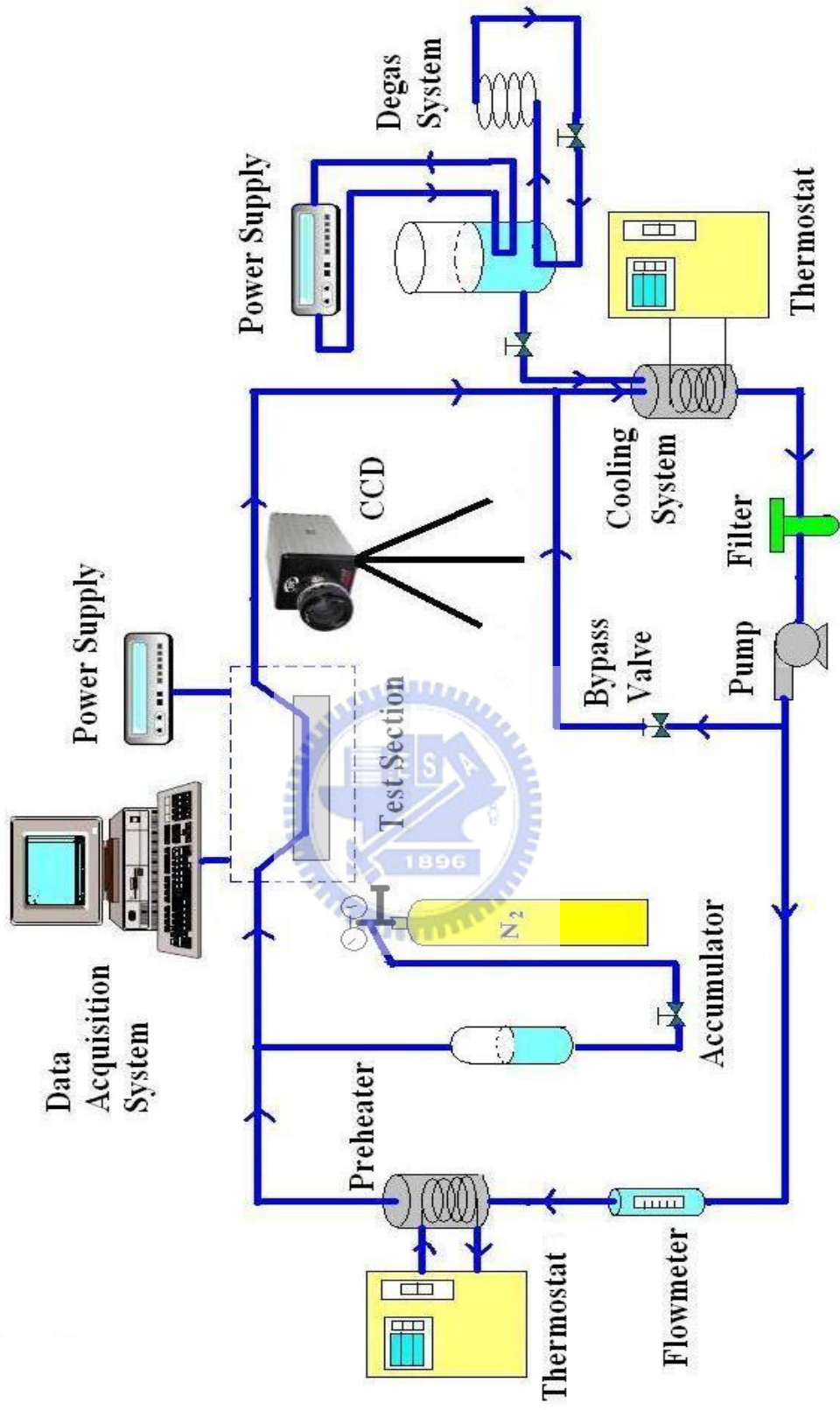


圖 3-1 工作流體之循環系統示意圖

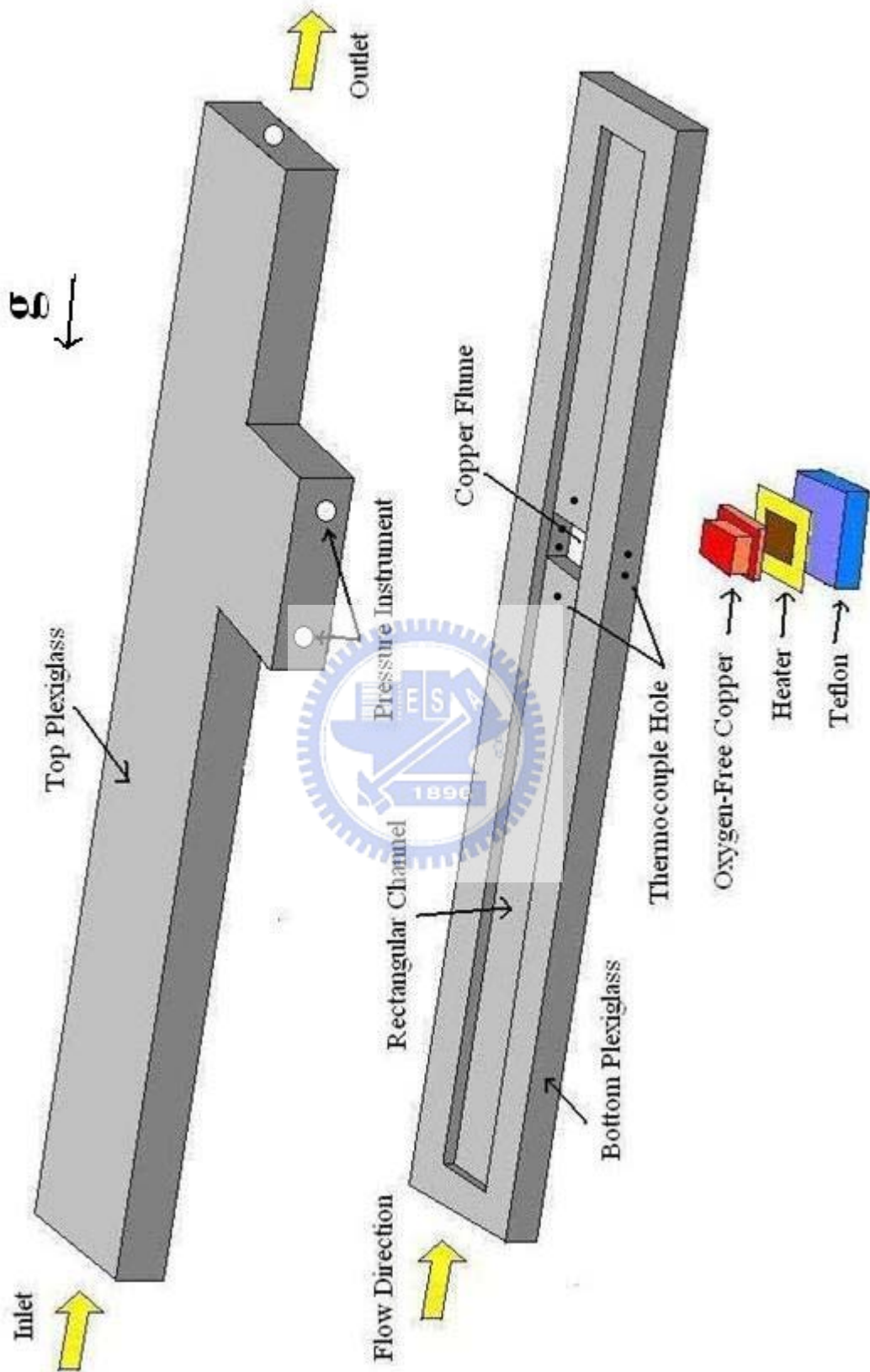


圖 3-2 測試段流道示意圖

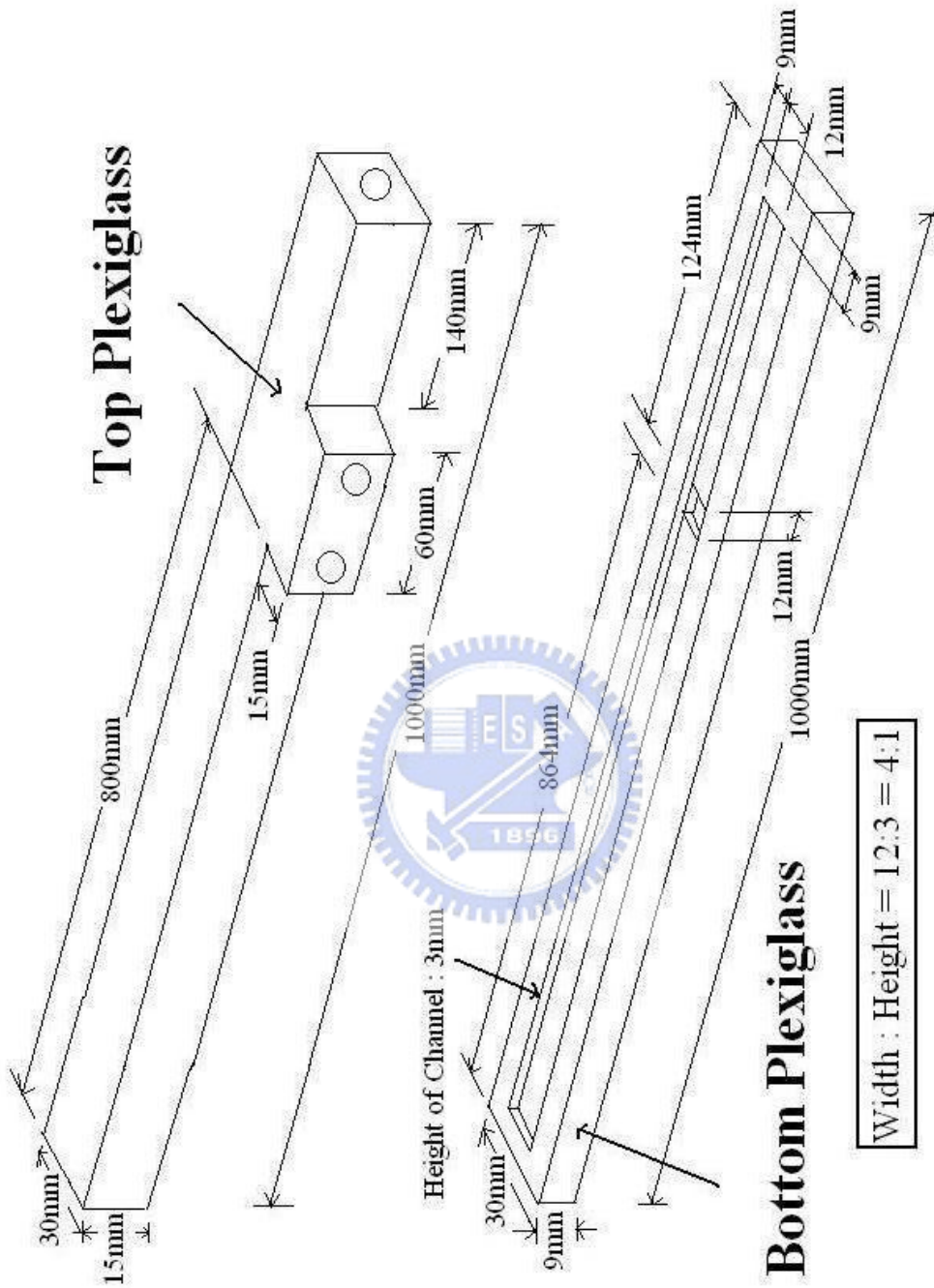


圖 3-3 測試段流道尺寸設計標示圖

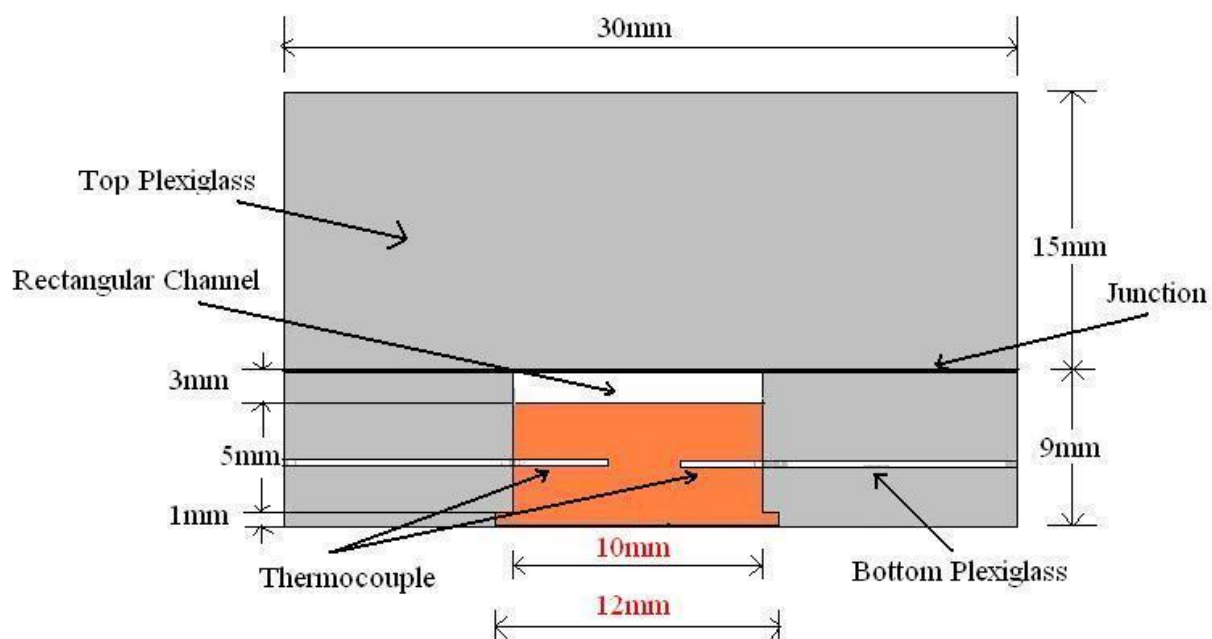


圖 3-4(a) 流道中加熱晶片之正視剖面圖及尺寸設計標示圖

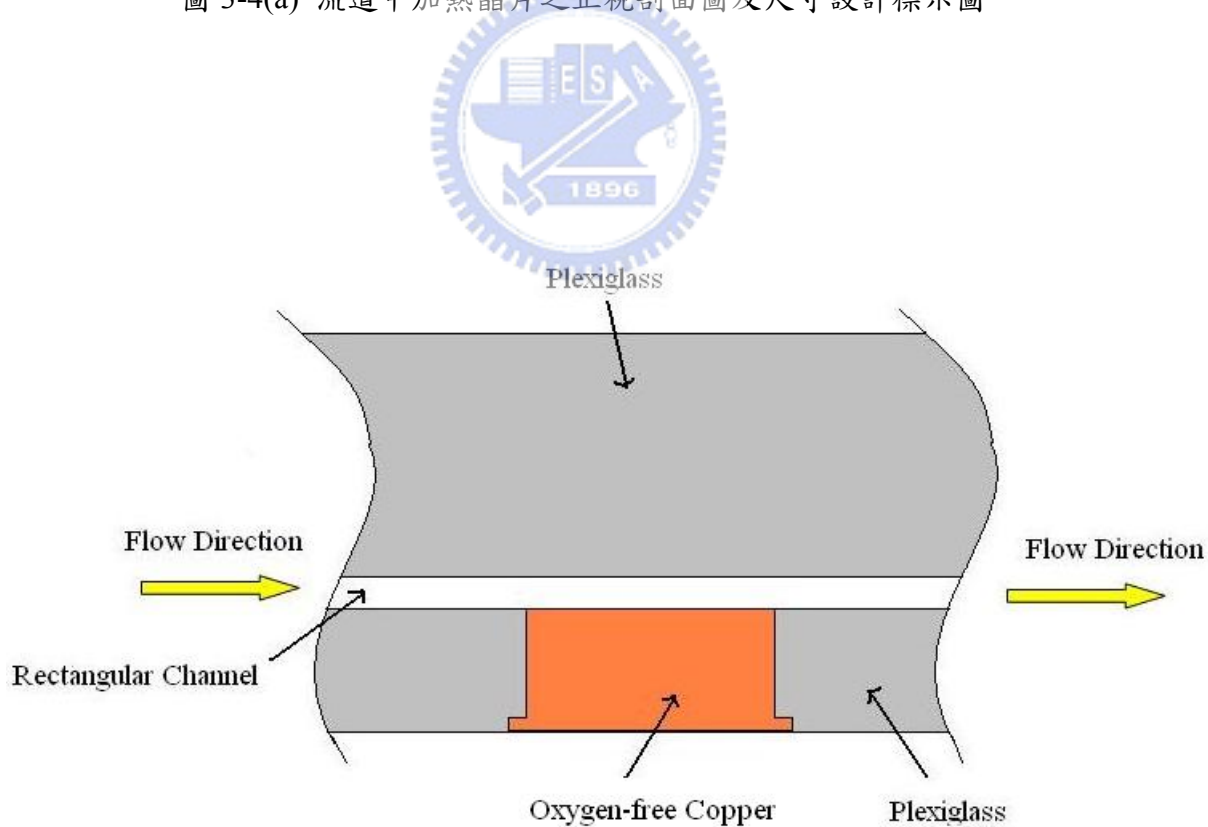


圖 3-4(b) 流道中加熱晶片之剖視剖面圖

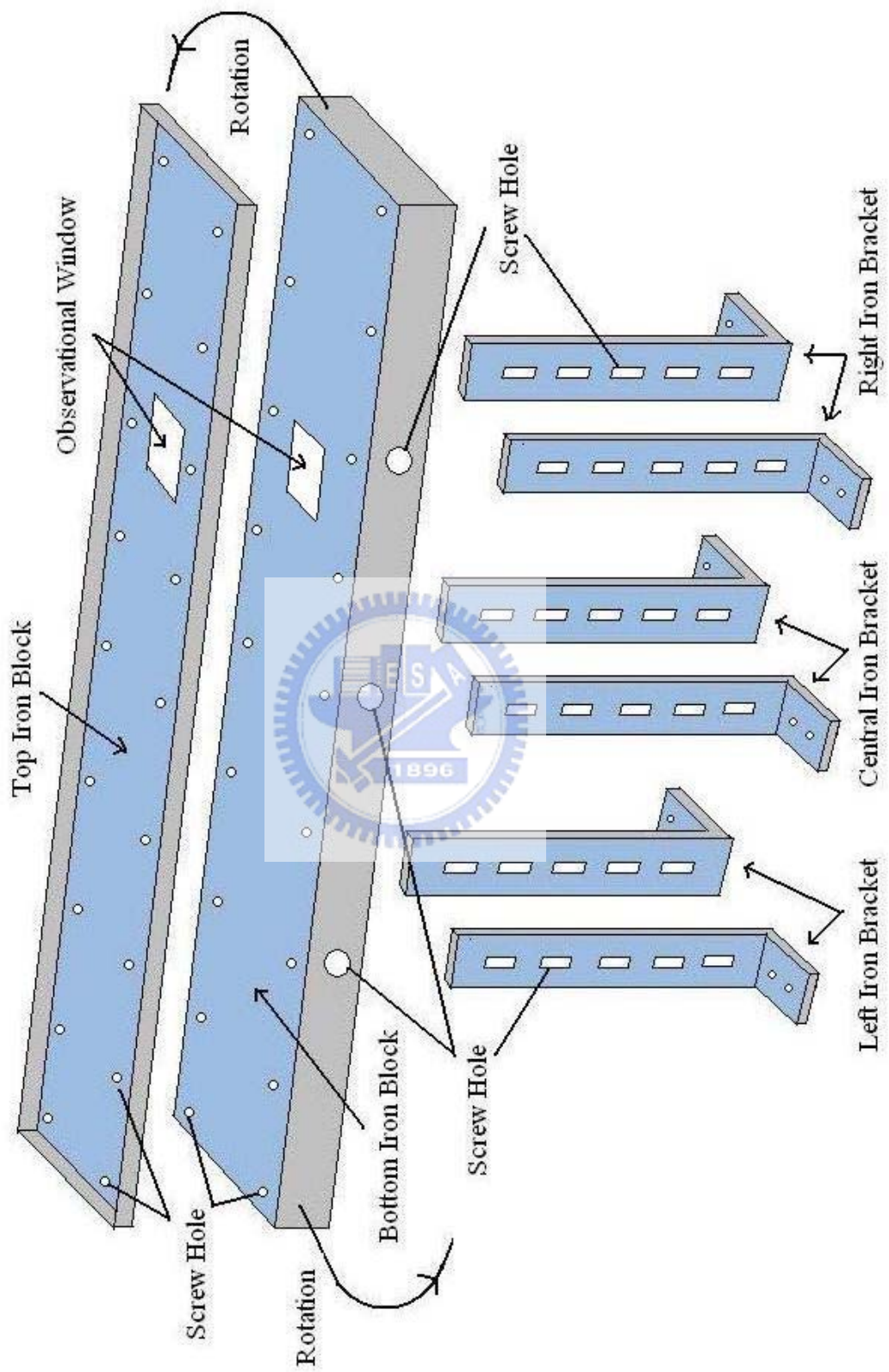


圖 3-5 測試段流道之托架設計圖

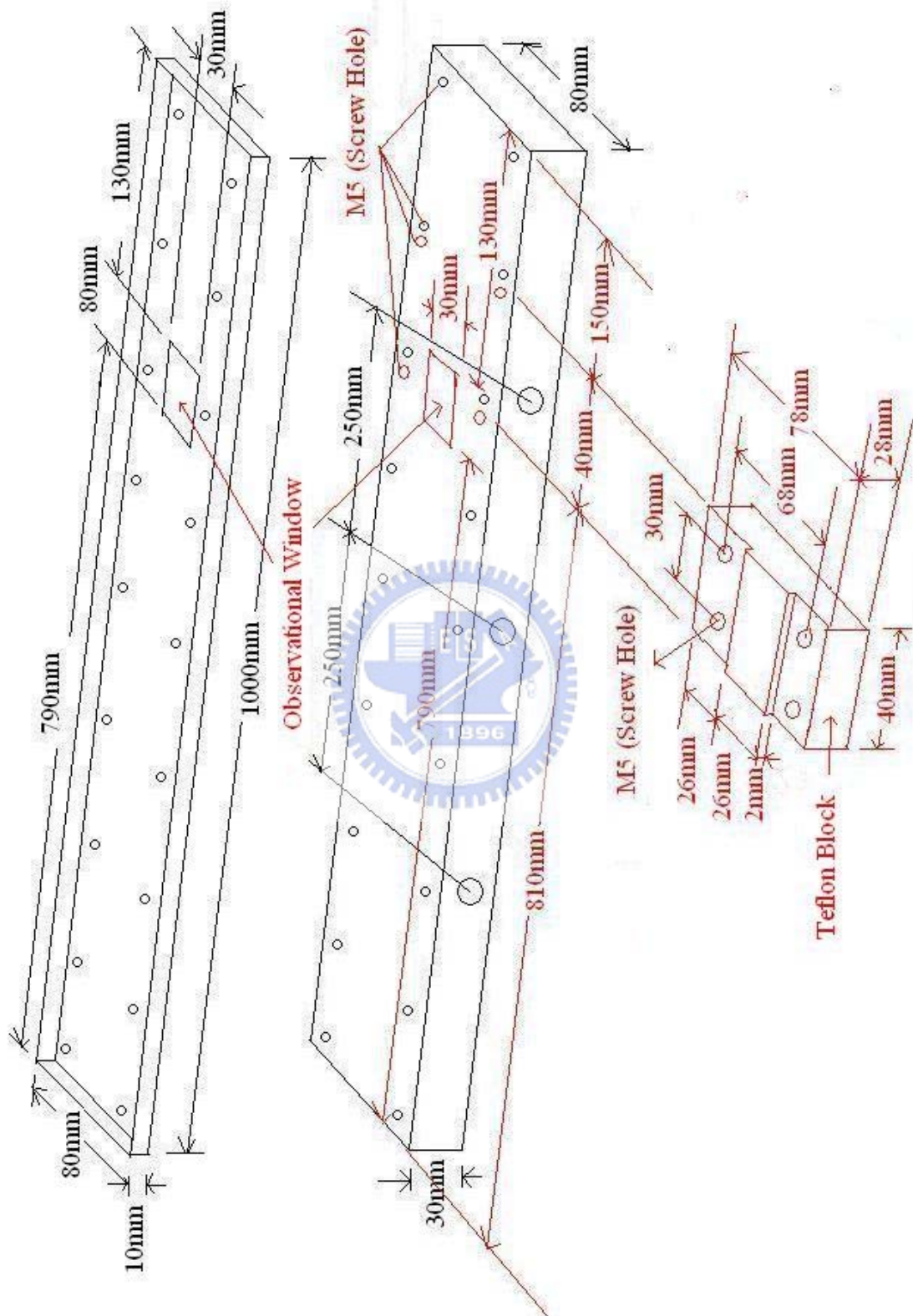


圖 3-6 測試段流道之托架尺寸標示圖

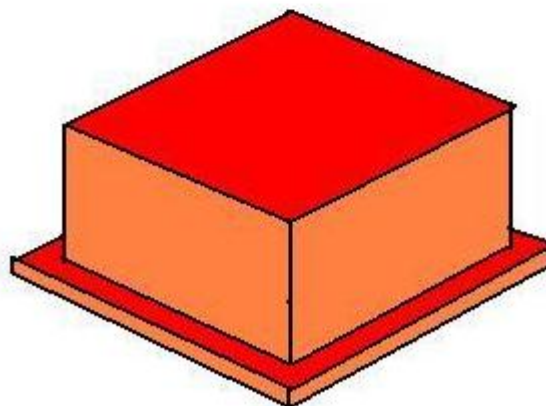
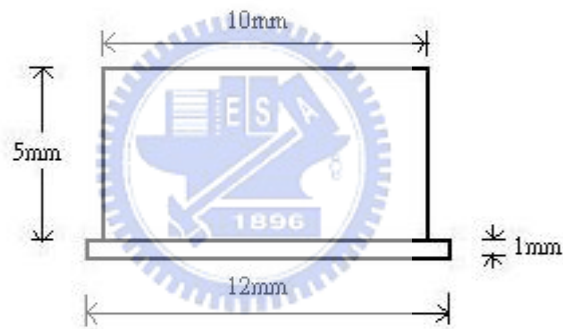
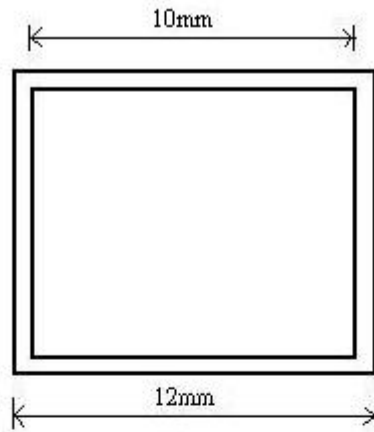


圖 3-7 模擬電腦 CPU 晶片之無氧銅(oxygen-free copper)銅塊

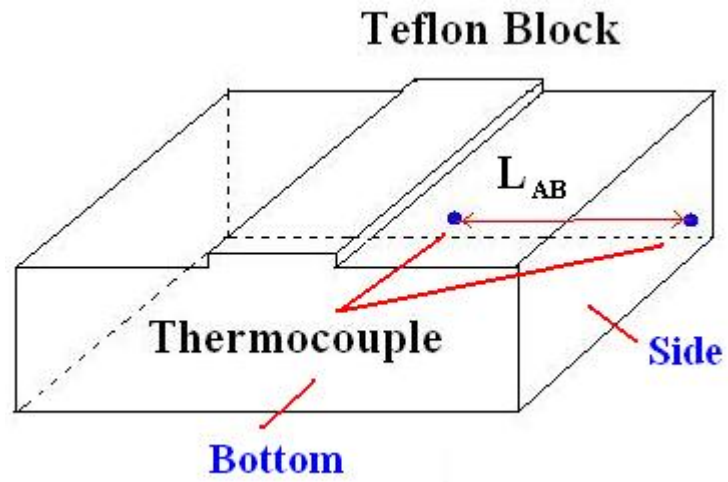


圖 3-8(a) 鐵氟龍側面熱損實驗熱電偶配置圖

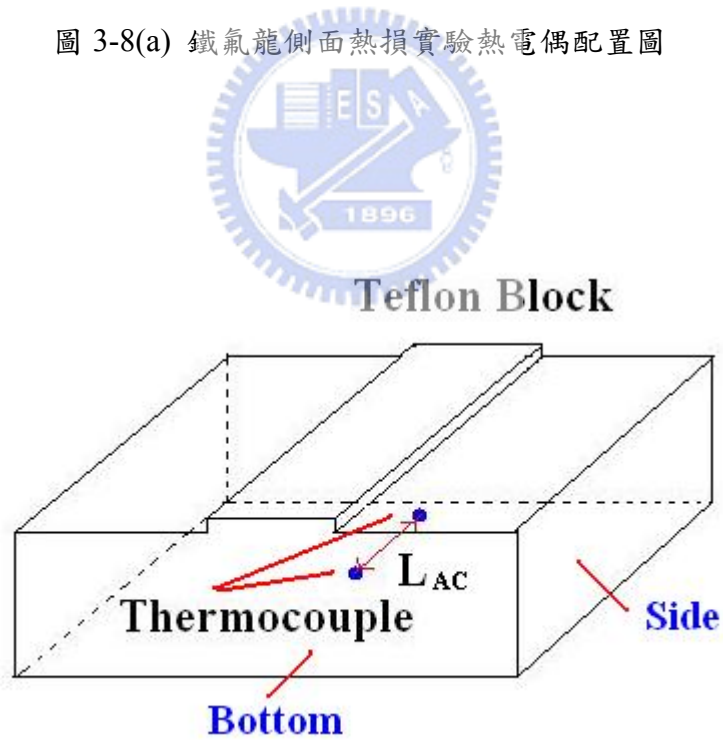


圖 3-8(b) 鐵氟龍底面熱損實驗熱電偶配置圖

第四章 結果討論與分析

本實驗目前之流道藉由一不鏽鋼托架將流道垂直放置，操作條件為介電液 FC-72 在測試段進口為一大氣壓下，由下往上流經平滑銅塊加熱面，在不同次冷度與流速下，進行流動沸騰分析，實驗之控制參數如下：

- 1、雷諾數分別為 800、1600 及 2400，分別所對應之流速為 0.04m/s、0.09m/s 及 0.13m/s
- 2、次冷度分為 23°C、28°C 及 33°C，分別所對應之工作流體溫度為 33.6°C、28.6°C 及 23.6°C

本流動沸騰實驗依其控制不同流速及次冷度為變數，將以 FC-72 之核沸騰曲線來探討熱通量與加熱壁面過熱度之關係，並分析比較在不同條件下之臨界熱通量、熱傳係數及氣泡流譜圖。

4-1 熱損值與熱損百分比

本熱損實驗數據之操作條件為一大氣壓下、雷諾數 800、次冷度 33°C、流向為垂直 90 度，輸入功率最大瓦數為 26W，所對應之熱通量為 260kW/m²。圖 4-1 為輸入功率與熱損值之關係圖，圖 4-2 為輸入功率與熱損百分比之關係圖。本熱損實驗圖說明其熱損值會隨著輸入功率越大而越大，但其熱損百分比會隨著輸入功率越大而越小。

4-2 流動沸騰實驗之沸騰曲線探討

圖 4-3 為一大氣壓、次冷度 33°C 、雷諾數為 800、垂直 90° 流向之沸騰發展過程的核沸騰曲線圖。在低熱通量時，如圖 A 點處，單相熱傳(Single Phase Convection)為其主要機制。隨著熱通量增加，壁面溫度持續上升至超過飽和溫度後，熱傳機制卻依舊維持在單相熱傳，這是因為加熱表面的成核孔穴(Nucleation Cavities)需要相當的壁面過熱度使其活化，方能促使核沸騰現象發生，流體次冷度對成核現象的抑制也是其原因之一。繼續提高加熱通量後，壁面過熱度足以活化成核孔穴，氣泡開始由這些活化之孔穴產生，圖中 B 點為單相熱傳結束點，意即核沸騰起始現象之起始點(Onset of Nucleate Boiling—ONB)。核沸騰在 B 點處開始形成後，氣泡在加熱表面局部性地生成，此一區域為部份發展核沸騰區(Partially Developed Nucleate Boiling)，氣泡對加熱面的覆蓋面積與成核址密度(Nucleation Site Density)會隨著熱通量的增加而增加，熱傳機制從由單相熱傳偏向核沸騰熱傳的混合機制。另外在部份發展核沸騰區中，沸騰曲線常會不穩定地向左或向右偏移，這是由於成核址的成長不穩定所造成，當成核址活化不完全時，沸騰曲線會向右發展而壁溫偏高，然而當成核址大量活化時，壁面溫度則會下降，使沸騰曲線向左發展。熱通量增加到了 C 點後，成核氣泡覆蓋整個加熱表面，形成了完全發展核沸騰(Fully Developed Nucleate Boiling)，在此區域中增加熱通量，成核址密度也會持續小幅增加，此外生成氣泡在此區域中出現結合現象，到了 D 點處，由於結合氣泡的體積龐大，其發展受到小間距流道的間隙高

度之限制與壓迫，結合之氣泡開始向下發展至加熱面，阻礙流體在沸騰後返回充填至加熱表面，因而在加熱表面上產生局部性的覆蓋氣膜，開始偏離核沸騰機制。隨著加熱通量上升，氣體劇烈地產生，氣膜對加熱面的覆蓋越加旺盛，到了 E 點處，因液體的返回充填嚴重受到氣膜阻礙，其散熱通量遠低於加熱通量，氣膜因此完全覆蓋了加熱表面，此時加熱通量接近臨界熱通量。如果開始減低加熱通量，則氣泡的成核密度隨之減小，但是由於加熱面上的成核址已成熟發展，成核址會保持均勻分佈在整個加熱面上，因此在部分發展核沸騰區的成核址密度較熱通量上升時的情況為高，使得壁溫相對較低，而沸騰曲線向左偏移到 F 點。到了 F 點核沸騰停止，熱通量下降與熱通量提升之沸騰曲線重合，熱傳機制恢復為單相熱傳。



4-3 氣泡成長流譜之探討

對照圖 4-3，圖 4-4 為一大氣壓、次冷度 33°C 、雷諾數 800、垂直 90° 流向時所拍攝的氣泡成長流譜圖，其中圖(a)為核沸騰起始點(Onset of Nucleate Boiling, ONB)，當核沸騰發生後，晶片表面之孔穴即開始逐漸由下游向上游流向發展成核，圖(b)至圖(f)即為部份發展核沸騰(Partially Developed Nucleate Boiling)。隨著加熱量不斷增加，整塊 CPU 測試模擬晶片的成核孔穴至終則完全發展出氣泡，圖(g)至圖(i)即為完全發展核沸騰(Fully Developed Nucleate Boiling)。當液體的返回充填嚴重受到氣膜阻礙時，此時散熱通量遠低於加熱通

量，氣膜則完全覆蓋了加熱表面，導致臨界熱通量的產生，圖(j)為接近臨界熱通量。

在部份發展核沸騰之沸騰狀態皆可發現，氣泡是由加熱面下游端的兩側處開始成長，隨熱通量的增加，氣泡沿著下游端的兩側向上游與中間處成長，直至覆蓋整個加熱面，這是因為本實驗工作流體之流動為完全發展流，如圖 4-5 流體速度分佈圖所示，靠壁面兩側之流速較中間之流速慢，故兩側壁溫較高，會先產生氣泡。另外，根據 Heindel 等人[55]之文獻探討，流道之幾何形狀也會影響沸騰起始的模式。他們發現核沸騰的起始具有兩種模式，第一種模式之沸騰是突然性的發生，氣泡劇烈的在整個加熱壁面上形成，此稱之為驟變模式。第二種模式之沸騰則是發生在局部性由加熱表面下游處開始生成，且隨著熱通量的增加而向上游逐漸成長，稱之為漸變模式。在圖 4-6(a)中，Heindel 等人以 FC-72 流經流道高度(H_d)為 6.96mm 的實驗模組，實驗次冷度範圍為 5°C 至 43°C，流速為 0.1m/s 至 1m/s，所觀察描繪出在驟變模式下的氣泡成長過程圖；圖 4-6(b)則為本實驗以流道高度為 3mm 的實驗模組所觀察到的氣泡成長過程圖。生成氣泡在圖中以黑色區塊表示，相比較之後可以發現有明顯的差異處。當流道高度為 6.96mm 且沸騰起始為驟變模式時，氣泡由加熱表面下游端的中間處開始大量成長，隨熱通量的增加，氣泡由下游端的中間處向上游與兩側成長，直至覆蓋整個加熱面。當流道為 3mm 時，沸騰起始模式為漸變模式，與流道高度為 6.96mm 時有非常大的差異。氣泡是由加熱表面下游端的兩側處開始成長，隨著熱通量的增加，氣泡沿

著下游端的兩側向上游與中間處成長，直至覆蓋整個加熱面。經研究與探討後，發現流道高度的差異為造成此差異的主要因素。在本實驗中採間距較小之矩形流道，由拍攝流譜可發現核沸騰的模式為漸變模式。

4-4 核沸騰曲線之遲滯現象

在本流動沸騰實驗中皆可發現，增加熱通量之沸騰曲線和降低熱通量之沸騰曲線並不會重合，此原因為當加熱熱通量達到近臨界熱通量後，若開始降低熱通量，則氣泡的成核密度隨之減小，加熱面上的成核址已成熟發展，成核址會保持均勻分布在整個加熱面上，因此在部分發展核沸騰區的成核址密度也將較熱通量上升時的情況為高，使得壁溫相對較低，故降低熱通量之沸騰曲線會在增加熱通量之沸騰曲線之左邊，此現象稱之為沸騰曲線之遲滯現象(hysteresis of boiling curve)。圖 4-7 至圖 4-9 為雷諾數 800 時，次冷度分別為 33°C、28°C、23°C 之核沸騰曲線圖；圖 4-10 至圖 4-12 為雷諾數 1600 時，次冷度分別為 33°C、28°C、23°C 之核沸騰曲線圖；圖 4-13 至圖 4-15 為雷諾數 2400 時，次冷度分別為 33°C、28°C、23°C 之核沸騰曲線圖。其中當雷諾數 2400，次冷度為 33°C 及 23°C 時，增加功率的沸騰曲線經 ONB 後都明顯出現溫度向左滑落之現象，代表工作流體流速越快，可促使氣泡成核密度越大，散熱量越大，故壁面溫度越低。而不同次冷度沸騰曲線之遲滯程度會隨著次冷度越大而越大。

4-5 不同次冷度對單相熱傳及臨界熱通量之探討

圖 4-16 至圖 4-18 為在一大氣壓、垂直 90° 流向時，分別比較當雷諾數為 800、1600、2400 之不同次冷度條件下的沸騰曲線圖，其次冷度變數分別為 33°C 、 28°C 及 23°C 。當核沸騰(ONB, onset of nucleate boiling)發生前，主要的熱傳機制為單相熱傳。在相同的加熱通量下，壁溫隨次冷度不同會呈現明顯差異，次冷度越高，曲線越往左偏移，並維持此顯著差異直至沸騰起始點。當發生核沸騰現象後，不同次冷度的沸騰曲線會開始相逼近，在相同的加熱通量下，三條沸騰曲線之壁溫差異逐漸減小，次冷度對壁溫的影響亦開始降低；當加熱片表面達到完全沸騰時，沸騰曲線即進入完全發展核沸騰區，可發現沸騰曲線皆相當逼近，此時之次冷度對壁溫之影響很小，因為完全發展核沸騰之後，所有孔穴皆已活化成核，次冷度對氣泡的成核將減少抑制效應。

在圖 4-19 至圖 4-21 中，當雷諾數為 800 時，次冷度 33°C 的臨界熱通量為最高，其值為 260.68kW/m^2 ，壁面可承受的溫度為 89.2°C ；當雷諾數為 1600 時，次冷度 33°C 的臨界熱通量為最高，其值為 267.9kW/m^2 ，壁面可承受的溫度為 89.8°C ；當雷諾數為 2400 時，次冷度 33°C 的臨界熱通量為最高，其值為 280.1kW/m^2 ，壁面可承受的溫度為 91°C 。故次冷度越高則臨界熱通量越大，如圖 4-22 所示。其壁面可承受的溫度亦越高，如圖 4-23 所示。這是因為次冷度越高，代表流體溫度越低，氣泡表面張力越小，可促使氣泡凝結加速，延緩氣膜形成，因而延後臨界熱通量的發生。而過熱度是隨著次冷度的增加而減低，這是因為次冷

度越高，則活化成核孔穴所需的壁面過熱度越低。

圖 4-24 為本實驗與 Tso, Tou 和 Xu [36] 以不同次冷度在核沸騰後至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖。他們實驗的流道截面積為 $20\text{mm}\times 10\text{mm}$ ，加熱晶片共四片，每片間距為 10mm ，面積皆為 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ ，以測試段下游的第四片加熱片和本實驗作比較，其次冷度與本實驗同為 23°C 及 33°C 。本實驗在流速為 0.13m/s 與他們的實驗在 0.27m/s 之結果皆可看出次冷度較高者，其臨界熱通量較高；其曲線之主要差異在於他們實驗的流體流速高於本實驗，強制對流效果較佳，故可從圖中看出沸騰曲線比本實驗陡，且臨界熱通量比本實驗高，而壁過熱度比本實驗低。



4-6 不同次冷度對熱傳係數之探討

圖 4-25 至圖 4-27 為在一大氣壓、垂直 90° 流向時，分別比較當雷諾數為 800、1600、2400 之不同次冷度下的熱通量與熱傳係數之關係圖，其次冷度變數分別為 33°C 、 28°C 及 23°C 。從核沸騰後至 130kW/m^2 之熱通量，因其熱傳係數之不穩定性超過 17.5%，如(表 4-1)所示。故只探討 130kW/m^2 至臨界熱通量之熱傳係數，結果發現熱傳係數隨次冷度增加而增大，其熱傳係數之曲線會先有往上升的趨勢，但在接近臨界熱通量前皆會有下降的趨勢，因為在接近臨界熱通量時，氣膜阻礙了液體向下加熱壁面之返回充填，使得壁過熱度會越來越大，故加熱通量除上壁過熱度後，熱傳係數會變小。在圖 4-25 中，當雷諾數為 800，次冷

度 33°C 在臨界熱通量時的熱傳係數為最高，其值為 7996 W/m²°C；在圖 4-26 中，當雷諾數為 1600，次冷度 33°C 在臨界熱通量時的熱傳係數為最高，其值為 7298 W/m²°C；在圖 4-27 中，當雷諾數為 2400，次冷度 33°C 在臨界熱通量時的熱傳係數為最高，其值為 7104 W/m²°C，故次冷度越大，其熱傳係數越佳，如圖 4-28 所示。由於熱傳係數是加熱通量除上壁過熱度算出的值，在前一節曾探討到次冷度越高，則活化成核孔穴所需的壁面過熱度越低，故較高次冷度之熱傳係數會高於低次冷度時的熱傳係數，意即流體在高次冷度時之熱傳效果較佳。

4-7 不同次冷度之氣泡流譜圖探討

圖 4-29 至圖 4-31 為一大氣壓、雷諾數為 800、垂直 90° 流向時，不同次冷度下臨界熱通量之氣泡流譜圖；圖 4-32 至圖 4-34 為一大氣壓、雷諾數為 1600、垂直 90° 流向時，不同次冷度下臨界熱通量之氣泡流譜圖；圖 4-35 至圖 4-37 為一大氣壓、雷諾數為 2400、垂直 90° 流向時，不同次冷度下臨界熱通量之氣泡流譜圖。成核氣泡脫離半徑是隨著次冷度減小而增大，故次冷度越高，則對氣泡成長尺寸的抑制效果越佳，並使氣泡尺寸隨熱通量成長的幅度縮小，這是因為高次冷度的流體具有較低的溫度，氣泡表面張力較小，可較能促使生成氣泡的凝結，縮減生成氣泡的尺寸。故在雷諾數為 800、1600、2400 時，皆可發現次冷度 23°C 臨界熱通量之氣泡最大，其次是 28°C，而次冷度 33°C 之氣泡最小。在次冷度 23°C 的情況下，由於氣泡大幅成長且無法及時凝結，其尺寸成長超過了流道的間隙高

度，因此受到管壁的壓迫，使得氣泡橫向發展並互相結合形成一層氣膜，此氣膜會阻礙液體往加熱面之返回充填，故其臨界熱通量會較低。但是在次冷度 33°C 時，氣泡表面張力較小，生成氣泡的尺寸較容易受到抑制，且能夠及時的凝結，導致其臨界熱通量較高。

4-8 不同流速對單相熱傳及臨界熱通量之探討

圖 4-38 至圖 4-40 為在一大氣壓、垂直 90° 流向時，分別比較當次冷度為 23°C、28°C、33°C 之不同流速條件下的沸騰曲線圖，其變數分別為雷諾數 800、1600 及 2400。當核沸騰(ONB, onset of nucleate boiling)發生前，主要的熱傳機制為單相熱傳。相同的加熱通量下，壁溫會隨流速增加而降低，流速越高，曲線越往左偏移。當發生核沸騰現象後，在相同的加熱通量下，流速對壁溫的影響開始降低；當加熱片表面達到完全核沸騰時，沸騰曲線即進入完全發展核沸騰區，可發現沸騰曲線皆幾乎相當逼近，此時流速對壁溫之影響很小，因為完全發展核沸騰之後，所有孔穴皆已活化成核，流速對氣泡的成核將減少抑制效應。

當次冷度為 23°C 時，雷諾數為 2400 的臨界熱通量為最高，其值為 247 kW/m²，壁面可承受的溫度為 90°C；當次冷度為 28°C 時，雷諾數為 2400 的臨界熱通量為最高，其值為 252.8 kW/m²，壁面可承受的溫度為 90.2°C；當次冷度為 33°C 時，雷諾數為 2400 的臨界熱通量為最高，其值為 280.1 kW/m²，壁面可承受的溫度為 91°C。另外也可從沸騰起始點至臨界熱通量之沸騰曲線圖觀察並比較

出其差異，如圖 4-41 至圖 4-43 所示。故較高的流速具有較高的臨界熱通量，亦即較高的雷諾數具有較高的臨界熱通量，如圖 4-44 所示；其壁面可承受的溫度亦越高，如圖 4-45 所示。根據 Tso 等人[35]的實驗指出，流速對臨界熱通量的影響只有在流速大於 20cm/s ($Re=9700$)時才會有明顯的影響。然而在相同次冷度與熱通量下，當雷諾數為 2400 時，成核孔穴活化的效果最佳，孔穴在活化後的壁面溫度最低，故可使臨界熱通量延後發生，原因是由於強制對流的流速越高，熱傳遞率越高；此外起始過熱度隨流速的增加而減低，這是因為高流速在加熱表面所造成的擾動有利於成核孔穴的活化，因此流速越高，則活化成核孔穴所需的壁面過熱度越低。




圖 4-46 為本實驗與 Tso, Tou 和 Xu [36]以不同流速在核沸騰後至臨界熱通量之沸騰曲線比較圖。他們實驗的流道截面積為 20mm×10mm，加熱晶片共四片，每片間距為 10mm，面積皆為為 10mm×10mm，以測試段下游的第四片加熱片和本實驗作比較，流速與本實驗同為 0.04m/s、0.08m/s 及 0.13m/s。本實驗與他們的實驗在次冷度為 33°C 之結果皆可看出流速較高者，其臨界熱通量較高。其曲線之差異研判為測試段截面積及水力直徑不同，他們的水力直徑為 13.3mm，而本實驗之水力直徑為 4.8mm，由於氣泡受表面張力及流道高度之影響，故水力直徑較大者之氣泡較不易相結合形成低熱傳遞率之氣膜，故臨界熱通量比本實驗高，而壁過熱度比本實驗低，沸騰曲線比本實驗陡。

4-9 不同流速對熱傳係數之探討

圖 4-47 至圖 4-49 為在一大氣壓、垂直 90° 流向時，分別比較當次冷度為 23°C 、 28°C 、 33°C 之不同雷諾數下的熱通量與熱傳係數之關係圖，其變數分別雷諾數為 800、1600 及 2400。比較從 130 kW/m^2 至臨界熱通量之熱傳係數，結果發現熱傳係數隨流速增加而增大，其熱傳係數之曲線會先有往上升的趨勢，但在接近臨界熱通量前皆會有下降的趨勢，因為在接近臨界熱通量時，氣膜阻礙了液體向下加熱壁面之返回充填，使得壁面過熱度會越來越大，故加熱通量除上壁面過熱度後，熱傳係數會變小。當次冷度為 23°C ，雷諾數 2400 在臨界熱通量時之熱傳係數為最高，其值為 $7396\text{ W/m}^2\text{C}$ ；當次冷度為 28°C ，雷諾數 2400 在臨界熱通量時之熱傳係數為最高，其值為 $7524\text{ W/m}^2\text{C}$ ；當次冷度為 33°C ，雷諾數 2400 在臨界熱通量時之熱傳係數為最高，其值為 $8143\text{ W/m}^2\text{C}$ ；故由結果可知，工作流體之流速越快，則雷諾數越大，其熱傳係數越佳，如圖 4-50 所示。

在前三節曾探討到熱傳係數是由加熱通量除上壁面過熱度算出的值，由於流速越快，在加熱表面所造成的擾動更有利於成核孔穴的活化，因此流速越高，則活化成核孔穴所需的壁面過熱度越低，故較高流速之熱傳係數會高於低流速時的熱傳係數，即流體在高雷諾數時之熱傳效果較佳。

4-10 不同流速之氣泡流譜圖探討

圖 4-51 至圖 4-53 為一大氣壓、次冷度 23°C 時，垂直 90° 流向時，不同雷諾

數下臨界熱通量之氣泡流譜圖；圖 4-54 至圖 4-56 為一大氣壓、次冷度 28°C 時，垂直 90° 流向時，不同雷諾數下臨界熱通量之氣泡流譜圖；圖 4-57 至圖 4-59 為一大氣壓、次冷度 33°C 時，垂直 90° 流向時，不同雷諾數下臨界熱通量之氣泡流譜圖。結果顯示不同流速情況下之氣泡成核址密度差異並不大，而成核氣泡脫離半徑則是隨著流速增加而減小，故流速越高，則對氣泡成長尺寸的抑制效果越佳，並使氣泡尺寸隨熱通量成長的幅度縮小，這是因為高流速流體其擾動造成活化孔穴的效果較佳，且較能促使生成氣泡的凝結，縮減生成氣泡的尺寸，故在次冷度為 23°C、28°C 及 33°C 時，皆能發現雷諾數 800 在臨界熱通量下的氣泡結合狀況最大，而雷諾數 2400 在臨界熱通量下的氣泡結合狀況最小，意即雷諾越高的情況下，由氣泡結合所造成的氣膜較小，故液體向加熱表面之返回充填較低雷諾數的情況容易，且可帶走的熱量高於低雷諾數的情況，同時也會延緩臨界熱通量的發生。

4-11 熱傳經驗方程式

本實沸騰熱傳經驗方程式經由無因次化推導後，紐賽數為流體對流熱傳能力與加熱片熱傳導能力之比值。在 4-1 式中，紐賽數(Nu)與雷諾數(Re)、普朗特數(Pr)、熱通量(q'')、介電液比熱(C_p)及壁過熱度($T_{\text{wall}}-T_{\text{sat}}$)有關。在 4-2 式中，將紐賽數與對流熱傳係數移項整理後，推導出預測之熱傳係數(h)為介電液熱傳導係數(k)、普朗特數(Pr)、加熱面特徵長度(L)、介電液比熱(C_p)、雷諾數(Re)、加

熱通量(q'')及壁過熱度($T_{\text{wall}}-T_{\text{sat}}$)之函數，再乘上一係數加以修正，其中 $\frac{k \cdot \text{Pr}^{1/3}}{L \cdot C_p}$ 為

常數，故其經驗式表示如 4-3 式：

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot L}{k} = 51000 \cdot \text{Re}^{0.09} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \frac{q''}{C_p \cdot (T_{\text{wall}} - T_{\text{sat}})} \dots\dots\dots(4-1)$$

$$h = 51000 \cdot \frac{k \cdot \text{Pr}^{1/3}}{L \cdot C_p} \cdot \text{Re}^{0.09} \cdot \frac{q''}{(T_{\text{wall}} - T_{\text{sat}})} \dots\dots\dots(4-2)$$

$$h = 516 \cdot \text{Re}^{0.09} \cdot \frac{q''}{(T_{\text{wall}} - T_{\text{sat}})} \dots\dots\dots(4-3)$$

上式中 $h_{(\text{predicted})}$ 為沸騰熱傳係數預測值，單位為 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ；Pr 為普朗特數；

Re 為雷諾數； q'' 為加熱通量，單位為 (kW/m^2) ， T_{wall} 為加熱壁面溫度； T_{sat} 為 FC-72

在一大氣壓下之飽和溫度； $T_{\text{wall}}-T_{\text{sat}}$ 為壁過熱度($^{\circ}\text{C}$)。

雷諾數 Re 定義為：

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \dots\dots\dots(4-4)$$

其中 V 為介電液之平均流速， D_h 為水力直徑， ν 為運動黏滯係數(kinematic viscosity coefficient)。

普朗特數 Pr 定義為：

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \dots\dots\dots(4-5)$$

其中 α 為熱擴散係數(thermal conductivity)。

本實驗沸騰熱傳經驗方程式適用範圍為：測試段流道之水力直徑為 4.8mm，雷諾數 800 至 2400，次冷度 23°C 至 33°C 。圖 4-60(a)及 4-60(b)為使用本實驗沸騰熱傳經驗方程式所得之預測值與實驗值比較圖，從圖中可發現預測值與

實驗值所連成的每一點幾乎為三條直線，左邊線性分佈的點為雷諾數在 800 時之曲線；中間線性分佈的點為雷諾數在 1600 時之曲線；右邊線性分佈的點為雷諾數在 2400 時之曲線。雷諾數在 1600 時之誤差最小，其誤差小於 5%，雷諾數在 800 及 2400 時之誤差分別小於+10%及-10%。



	誤差範圍	實驗最小值	最大不準度
電流	± 0.01	0.07	14.2%
電壓	± 0.1	0.4	25%
輸入熱通量		0.023	17.8%
壁面過熱度	± 0.05	1.32	3.8%
晶片面積	± 0.02		2%
晶片厚度	± 0.05		5%
熱傳係數			17.5%

表 4-1 實驗最大之不準度

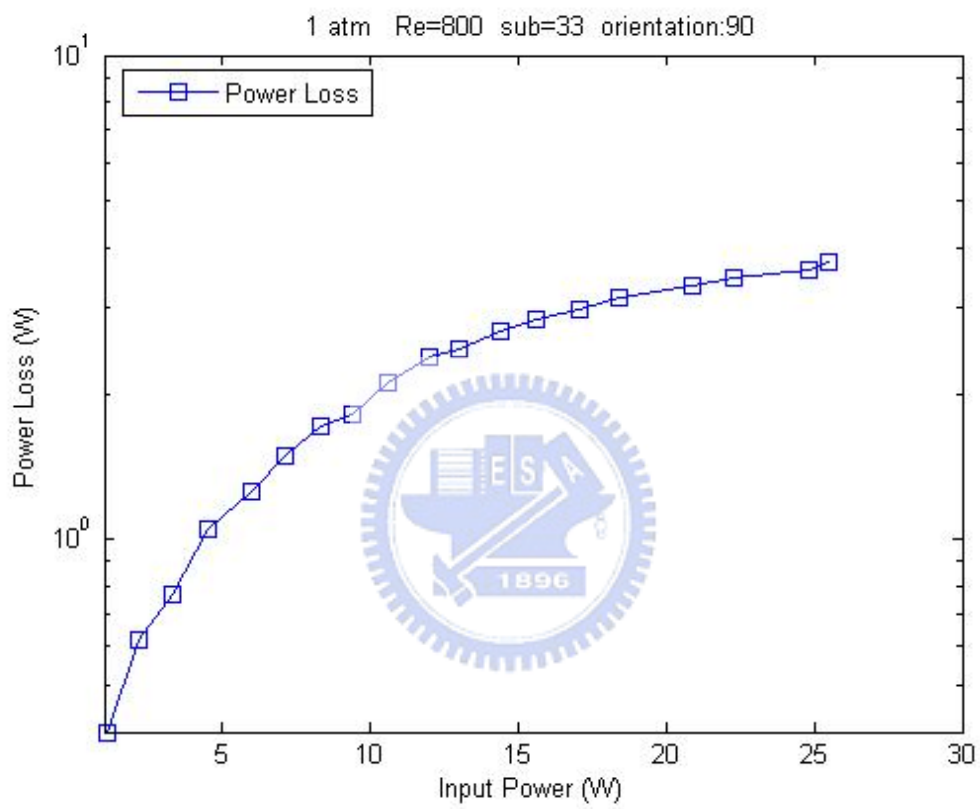


圖 4-1 輸入功率與熱損值之關係圖

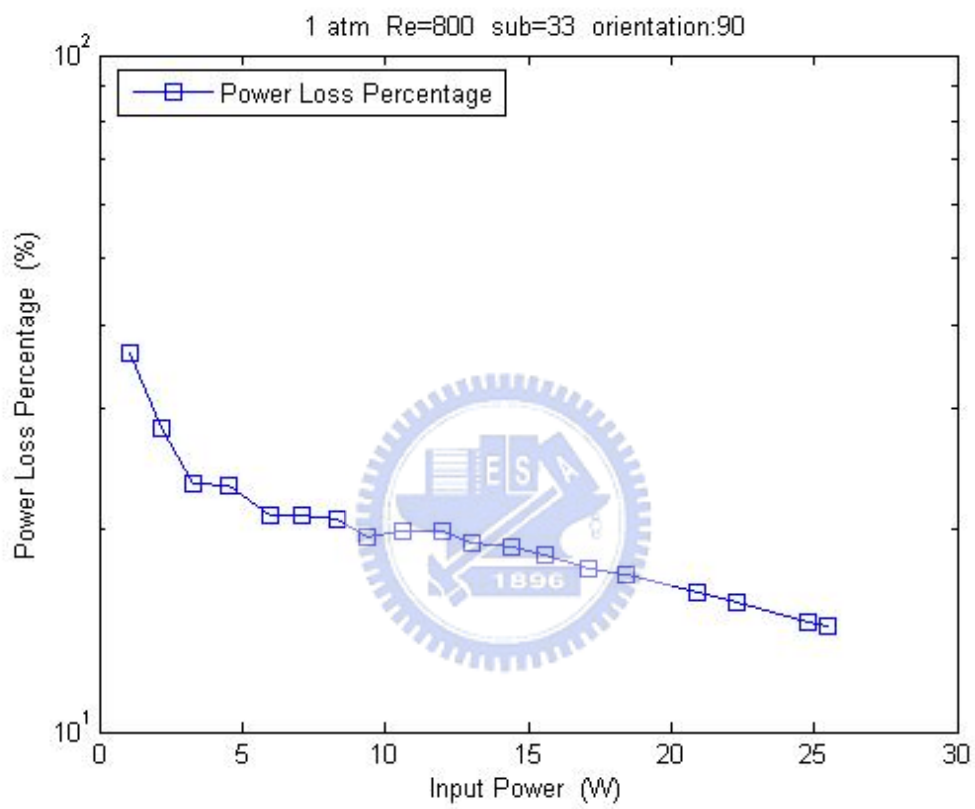


圖 4-2 輸入功率與熱損百分比之關係圖

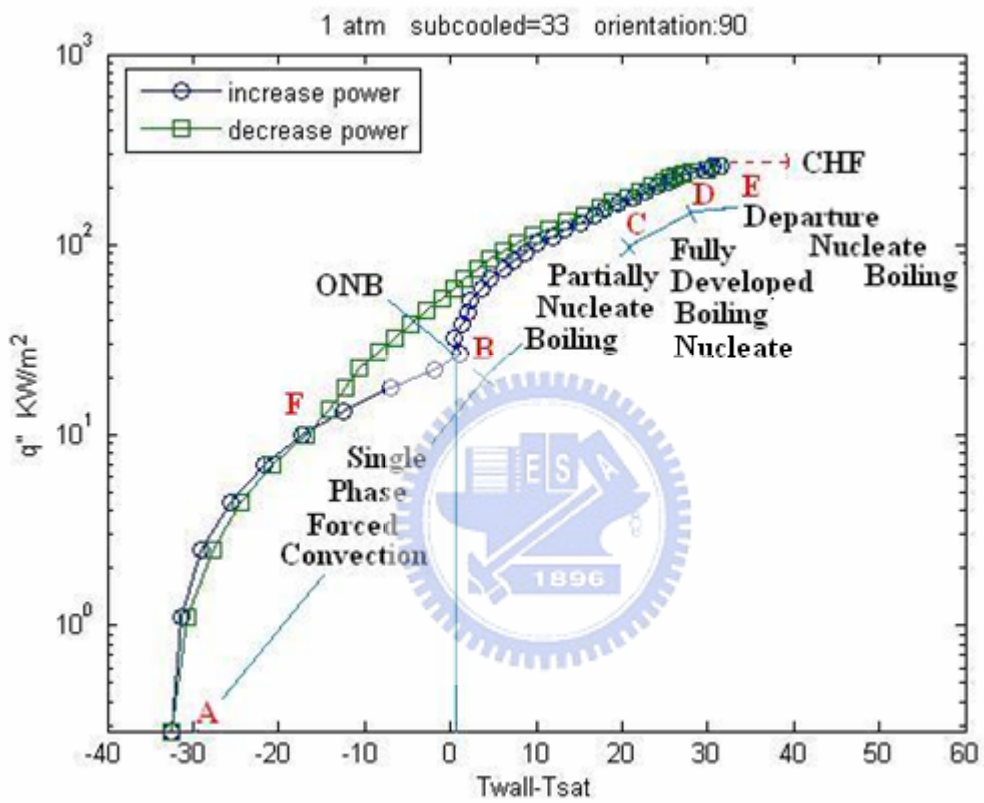


圖 4-3 一大氣壓、 $Re=800$ 、次冷度 $33^{\circ}C$ 、垂直 90° 流向沸騰發展

過程之沸騰曲線圖

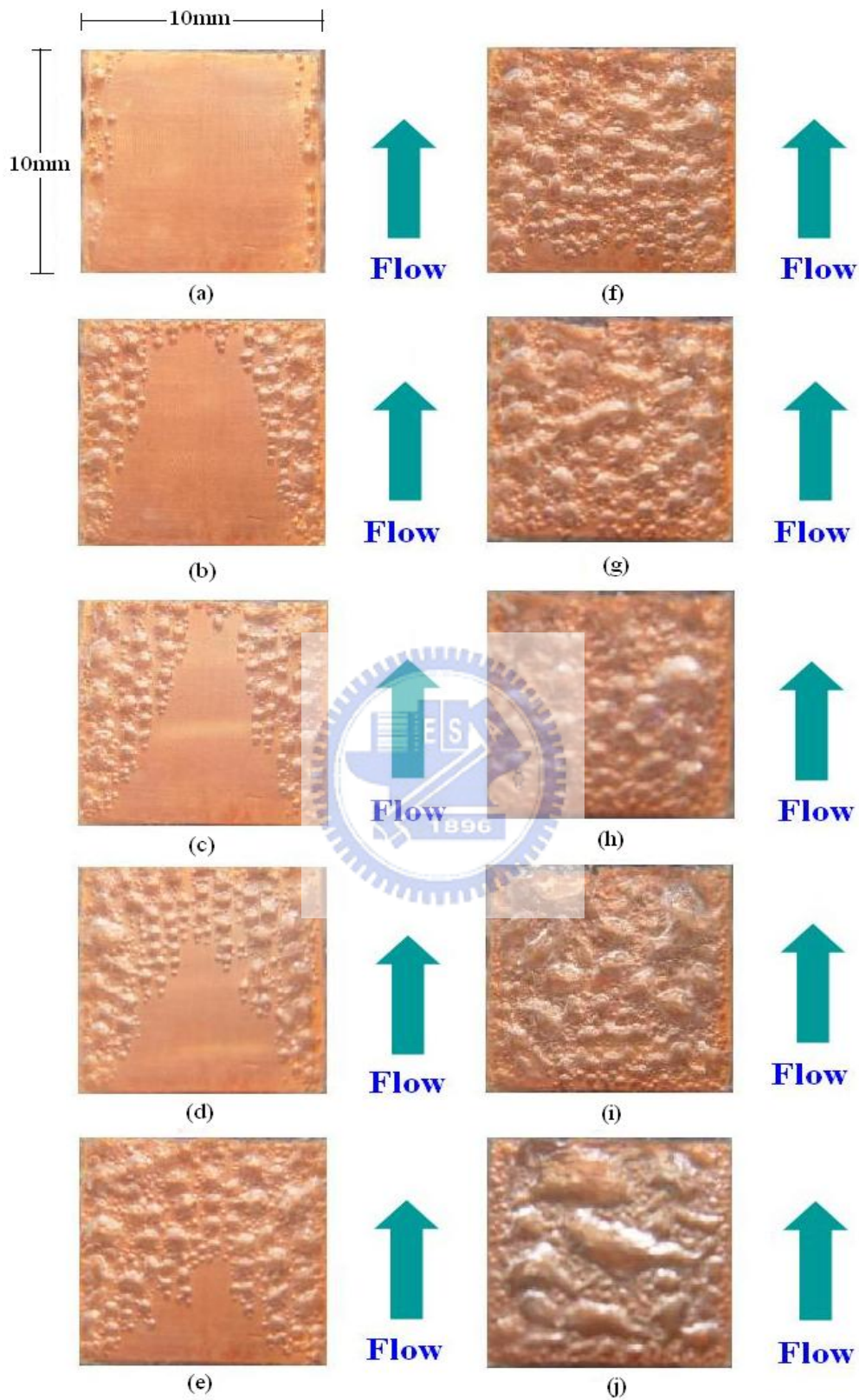


圖 4-4 FC-72 在垂直矩形流道中流過平滑加熱面之氣泡流譜圖，

其工作條件為 1atm、 $Re=800$ 、次冷度 $33^{\circ}C$ 、垂直 90° 流向

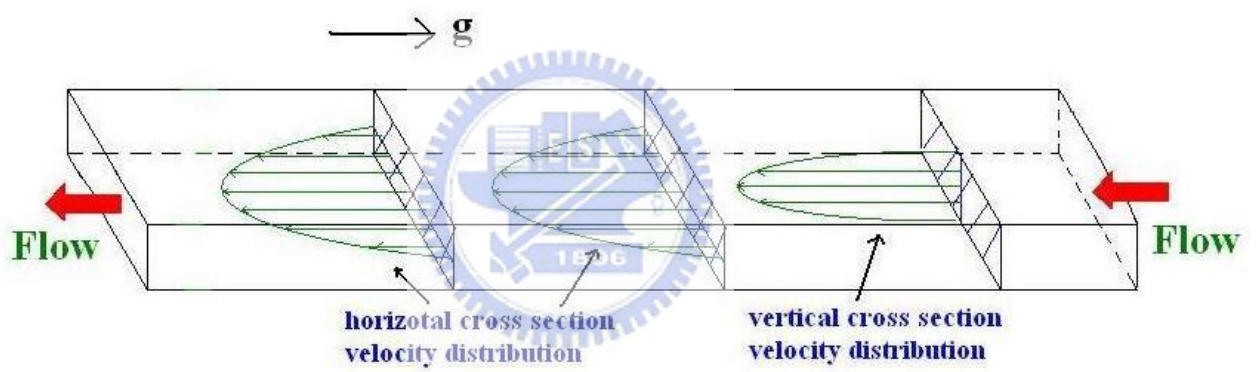


圖 4-5 本流動沸騰實驗在完全發展流下之流體速度分布圖

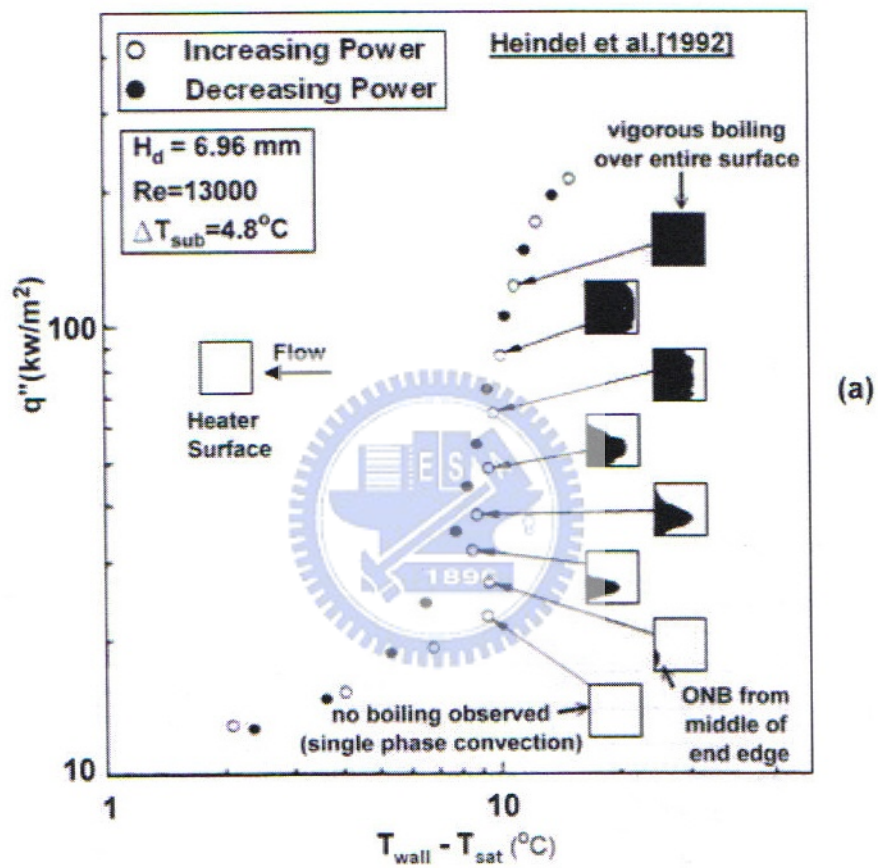


圖 4-6 (a) Heindel et al [55] 在流道高度為 6.96mm 拍攝之氣泡成長過程圖

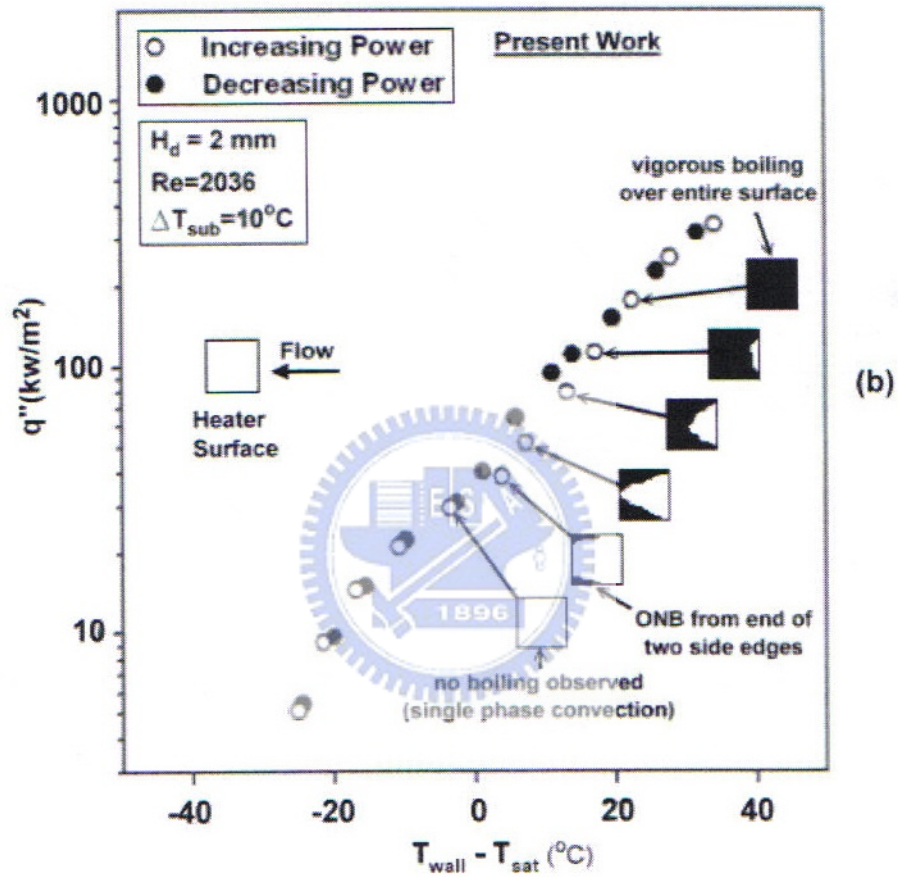


圖 4-6 (b) 本實驗在流道高度為 3mm 時所拍攝之氣泡成長過程圖 [55]

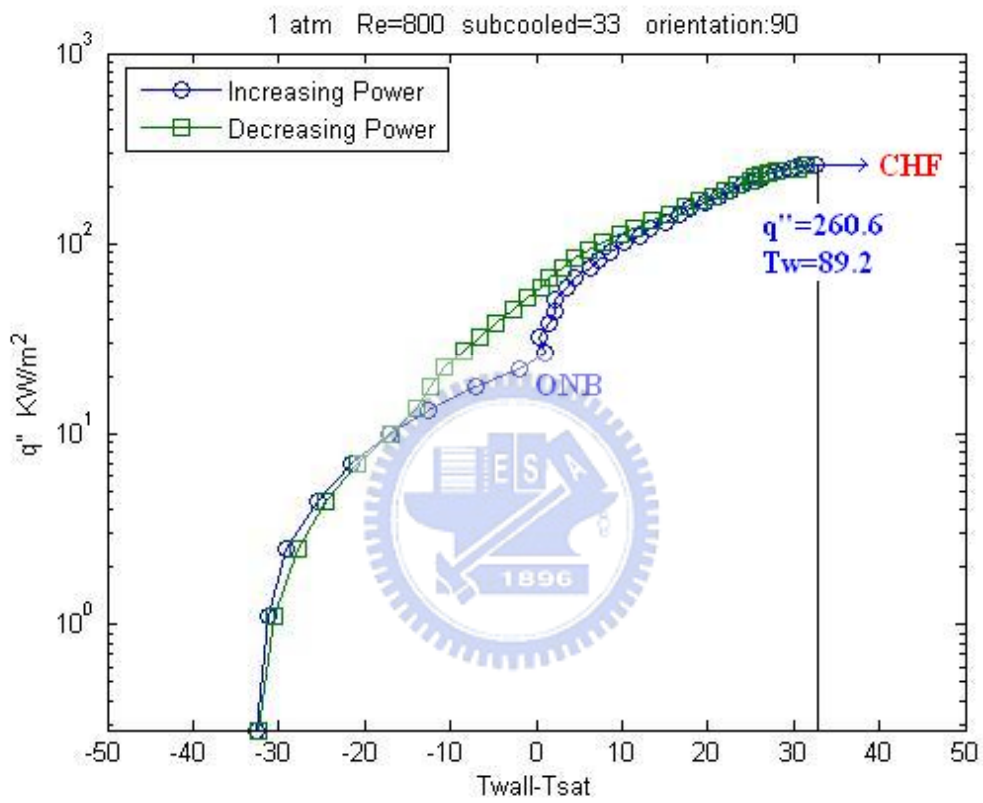


圖 4-7 一大氣壓、次冷度 33°C、Re800、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

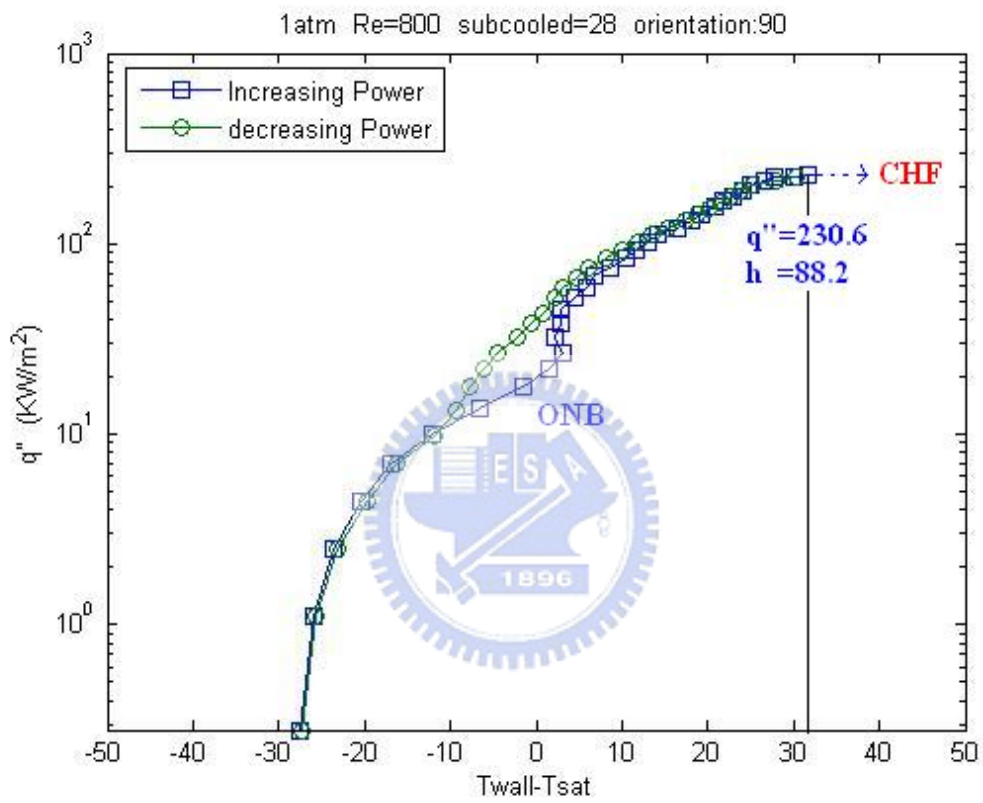


圖 4-8 一大氣壓、次冷度 28°C、Re800、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

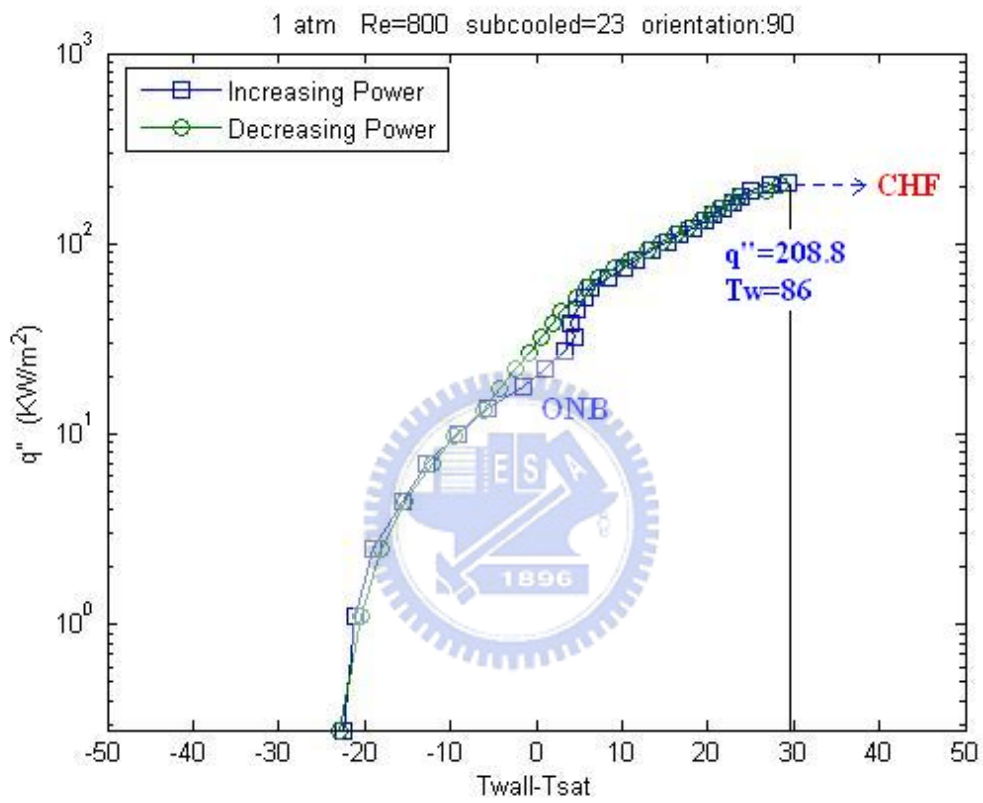


圖 4-9 一大氣壓、次冷度 23°C、Re800、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

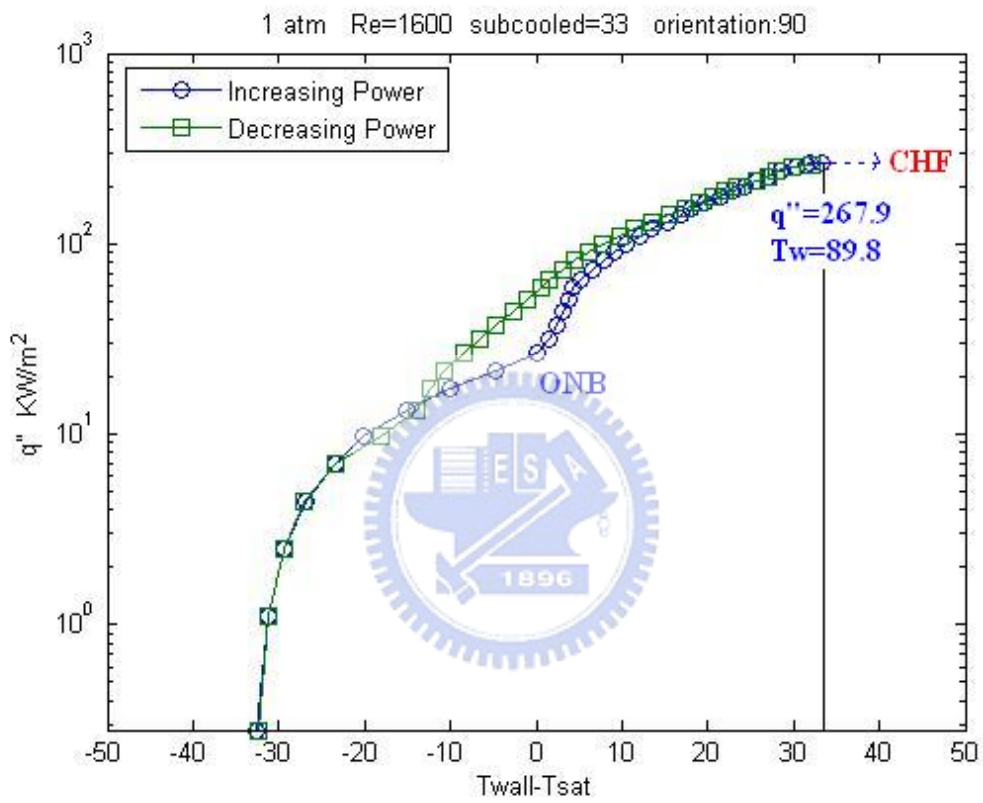


圖 4-10 一大氣壓、次冷度 33°C、Re1600、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

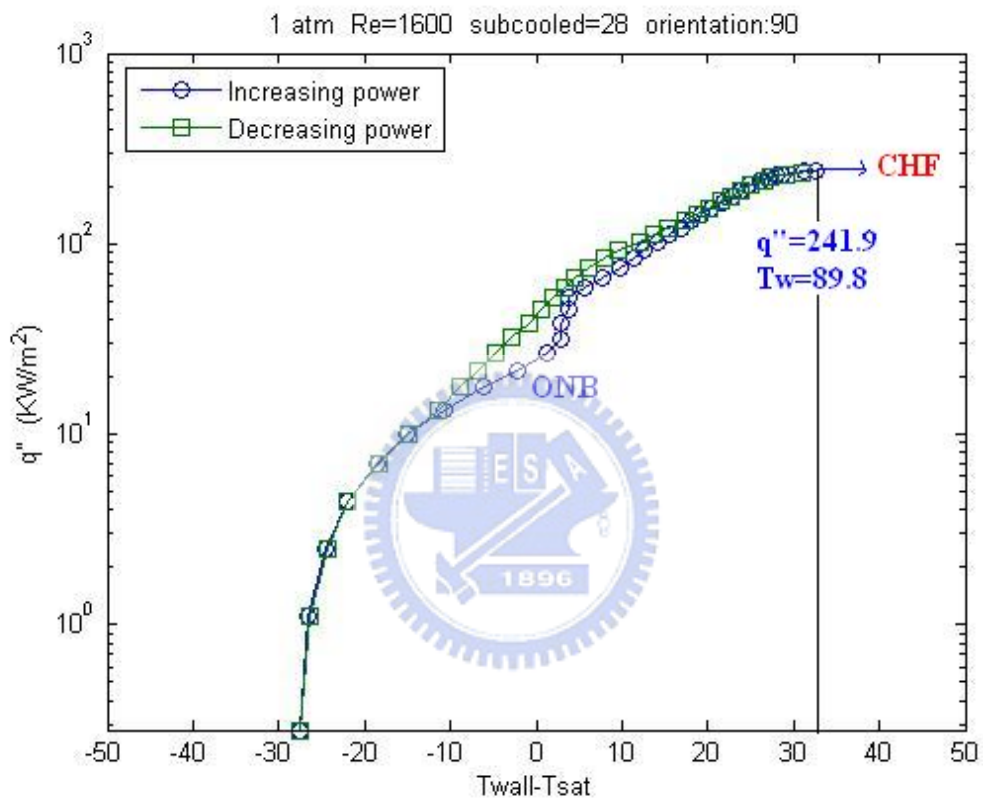


圖 4-11 一大氣壓、次冷度 28°C、Re1600、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

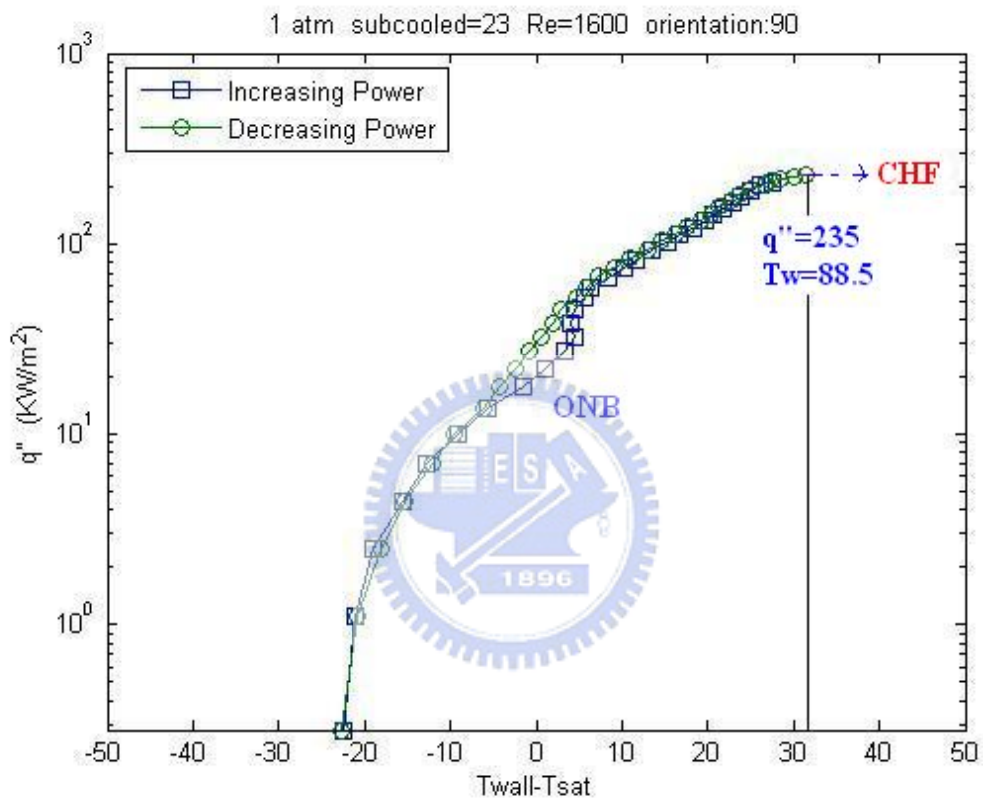


圖 4-12 一大氣壓、次冷度 23°C、Re1600、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

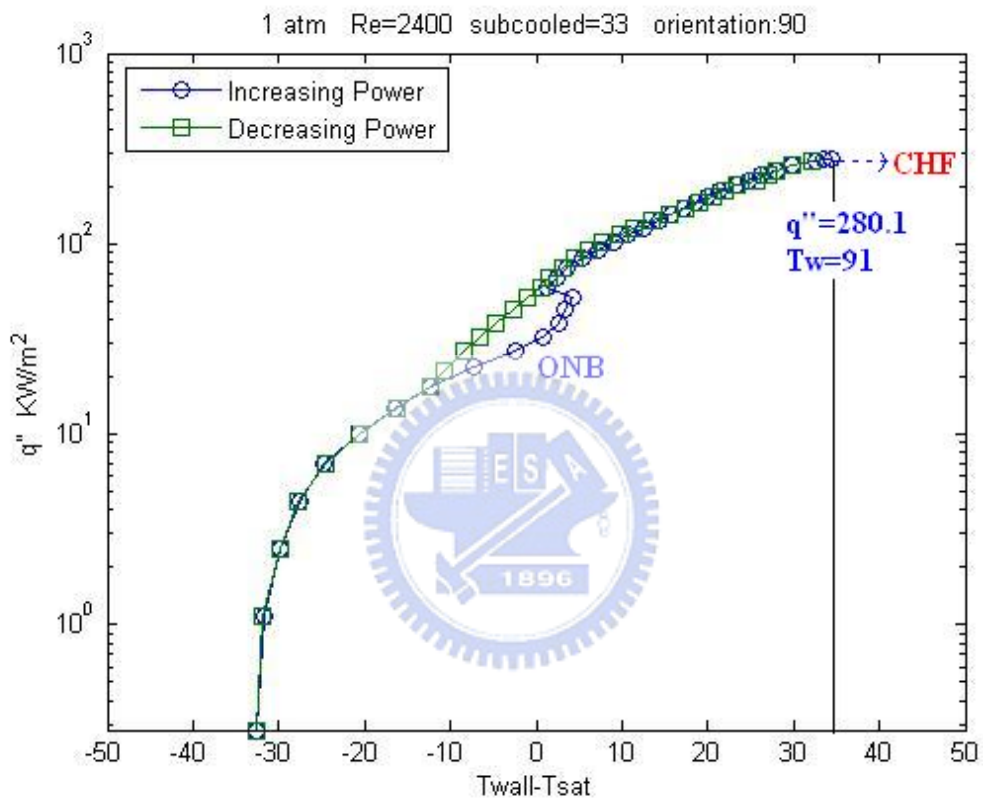


圖 4-13 一大氣壓、次冷度 33°C、Re2400、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

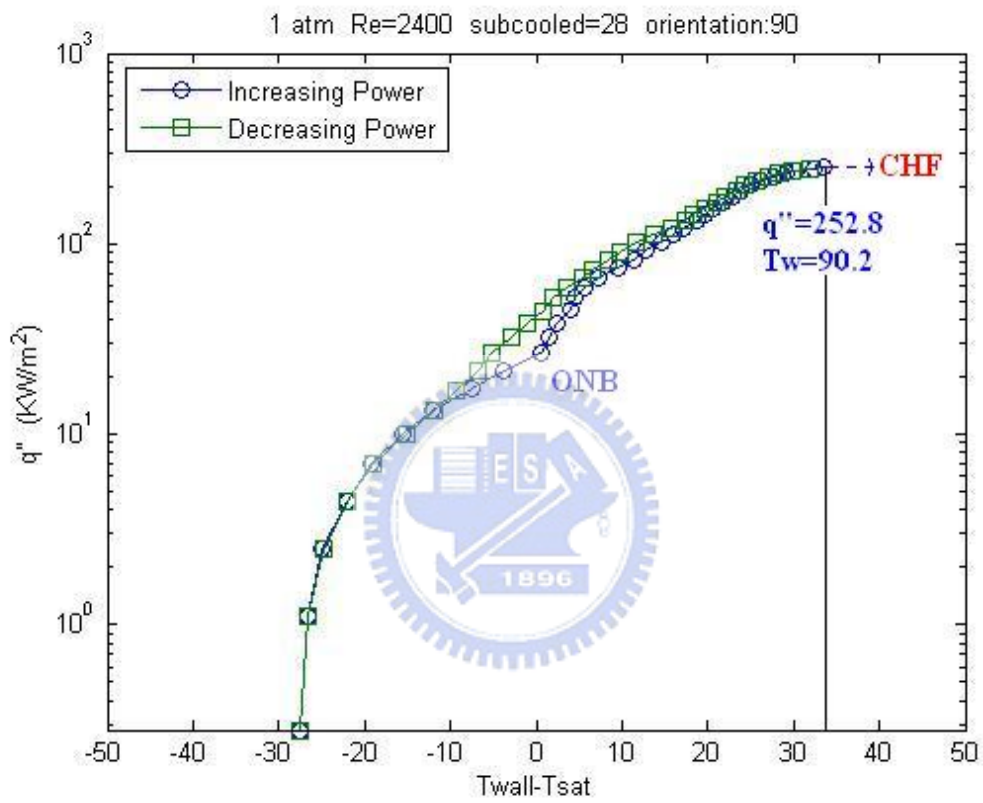


圖 4-14 一大氣壓、次冷度 28°C、Re2400、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

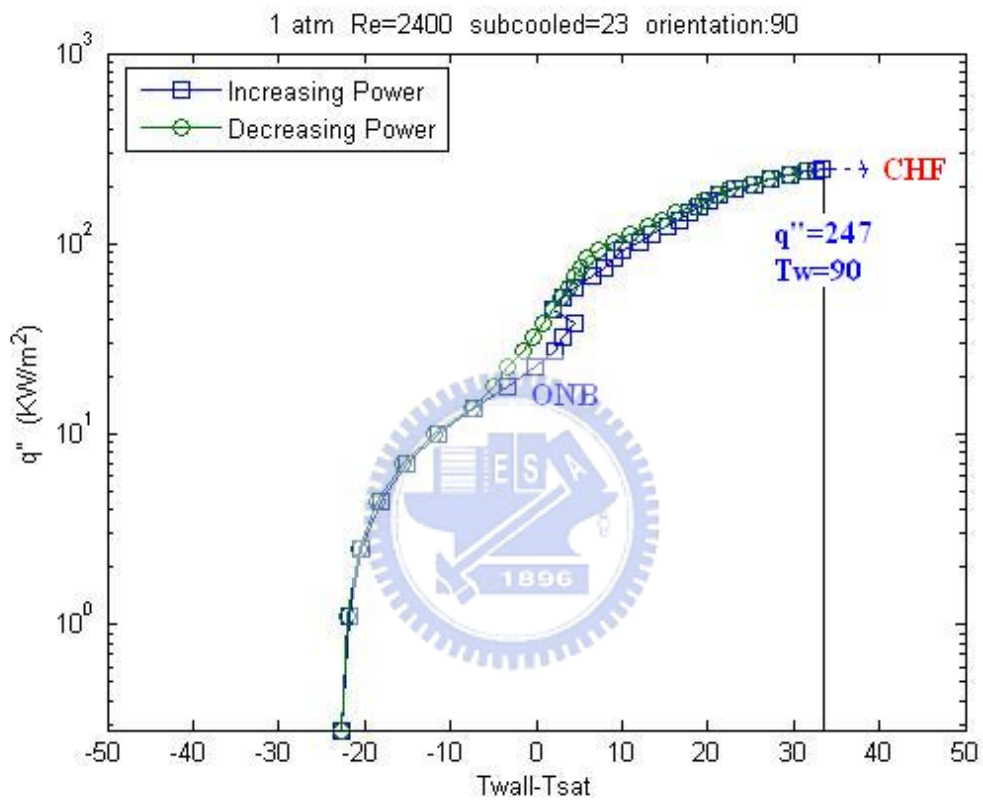


圖 4-15 一大氣壓、次冷度 23°C、Re2400、垂直 90° 流向之沸騰曲線圖

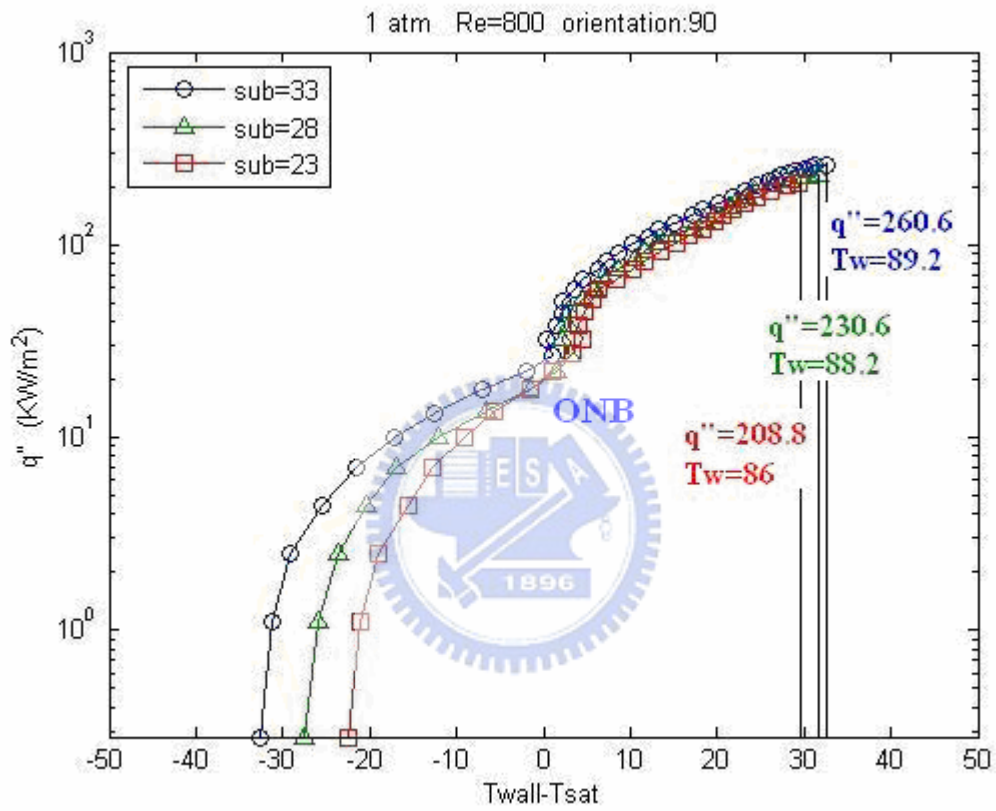


圖 4-16 一大氣壓、Re800、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰曲線比較圖

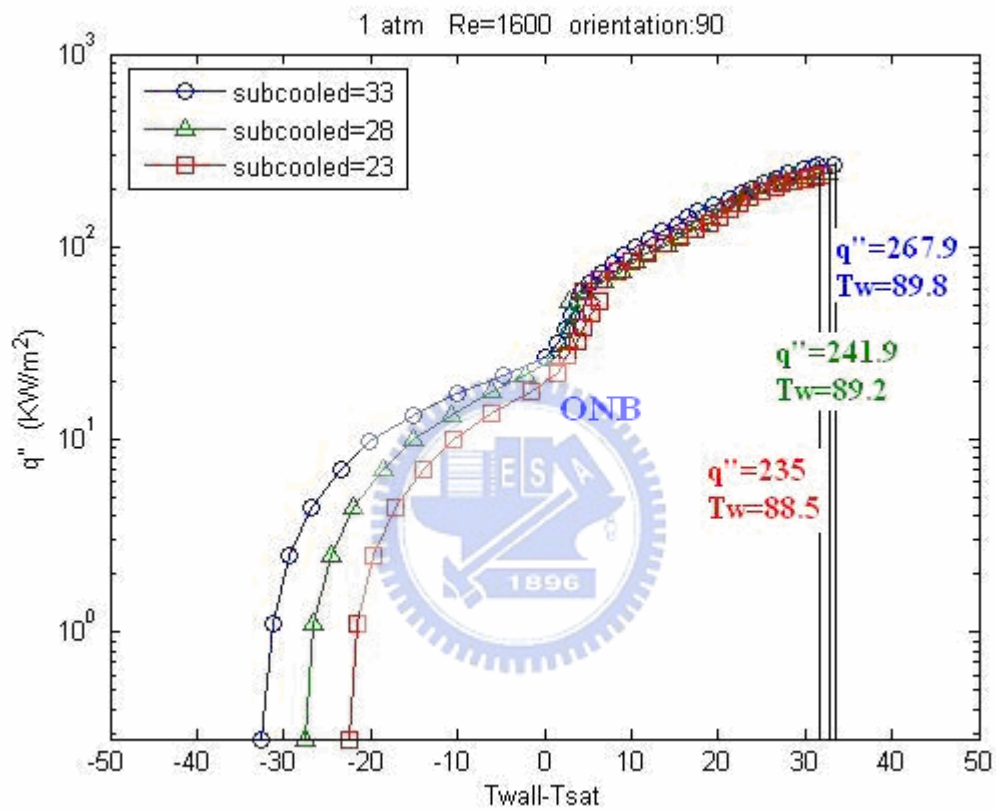


圖 4-17 一大氣壓、Re1600、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰曲線比較圖

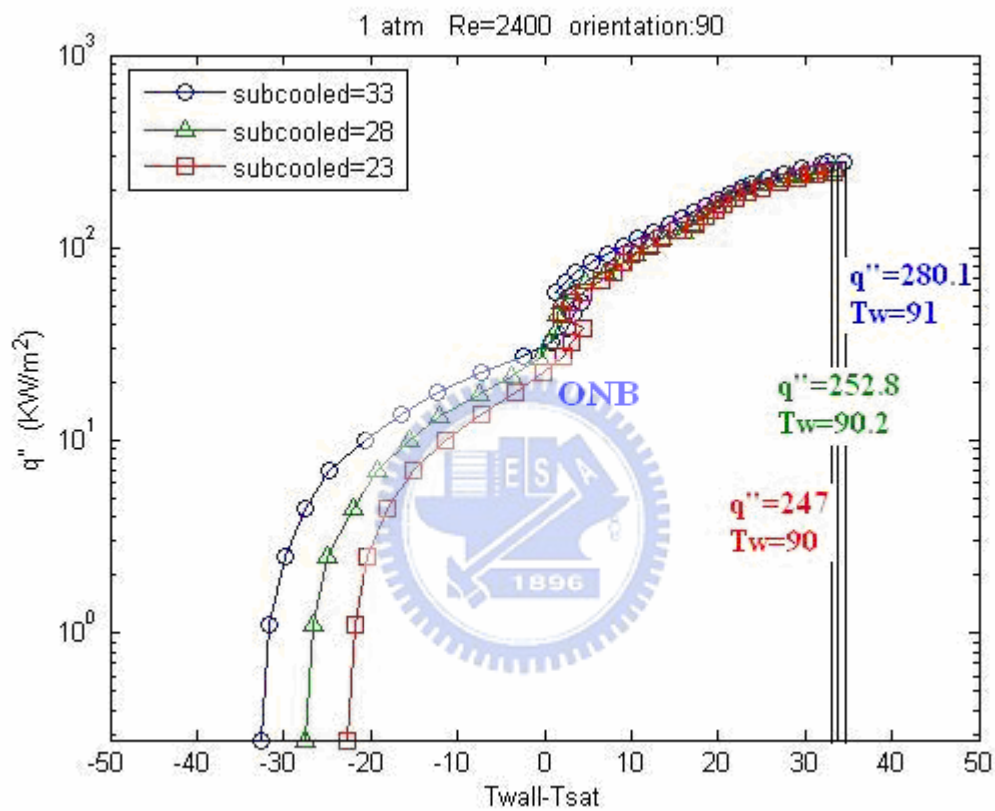


圖 4-18 一大氣壓、Re2400、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰曲線比較圖

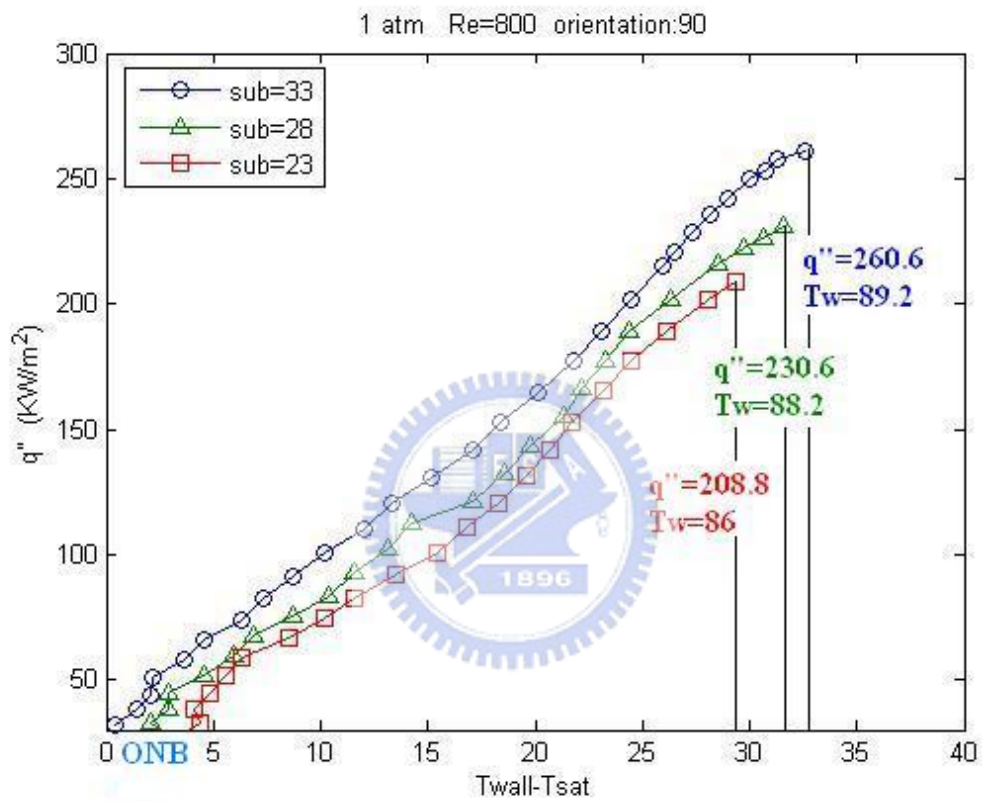


圖 4-19 一大氣壓、Re800、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰起始點至臨界

熱通量之沸騰曲線比較圖

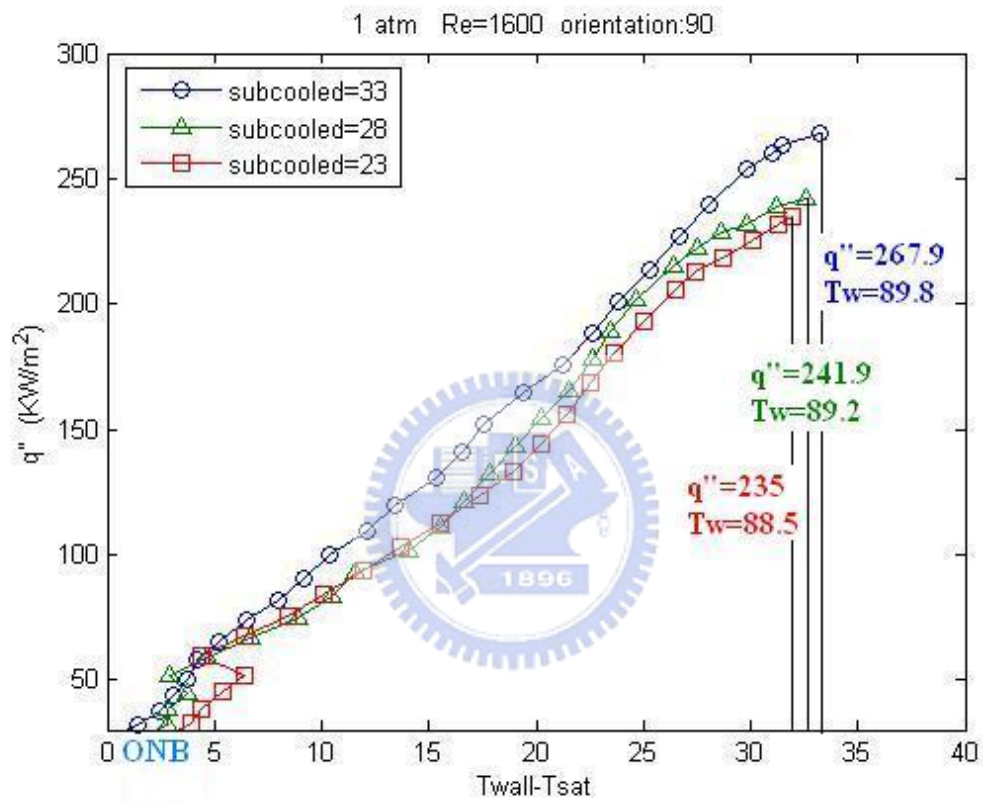


圖 4-20 一大氣壓、 $Re=1600$ 、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰起始點至臨界

熱通量之沸騰曲線比較圖

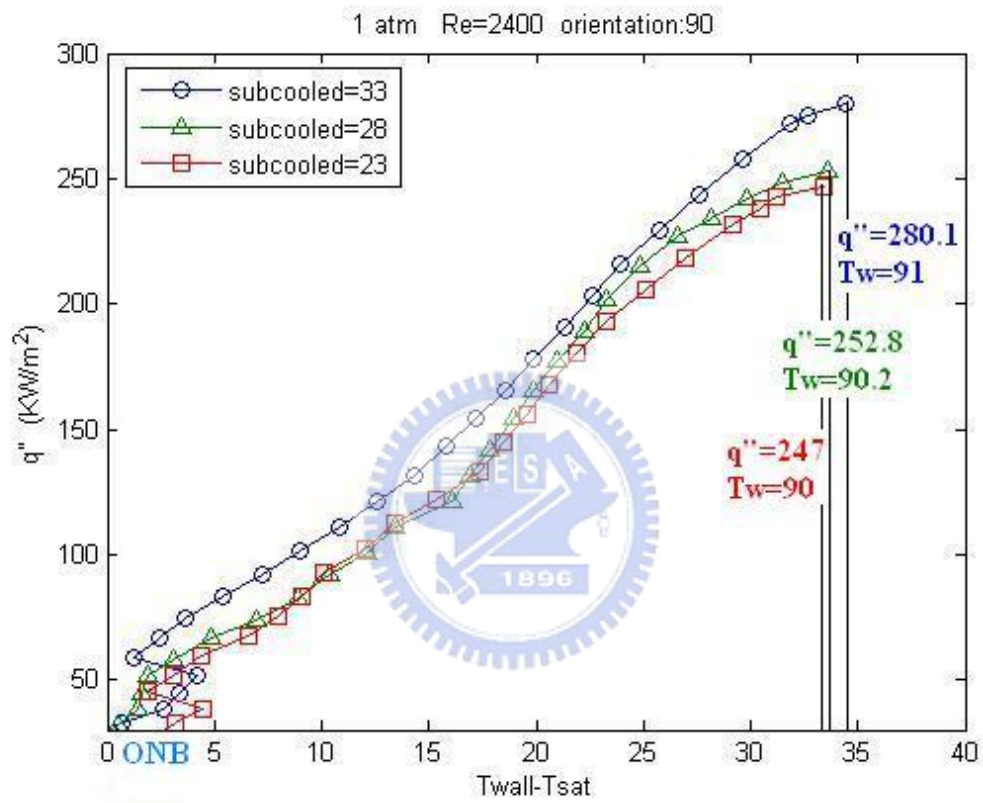


圖 4-21 一大氣壓、Re2400、垂直 90° 流向時，不同次冷度之沸騰起始點至臨界

熱通量之沸騰曲線比較圖

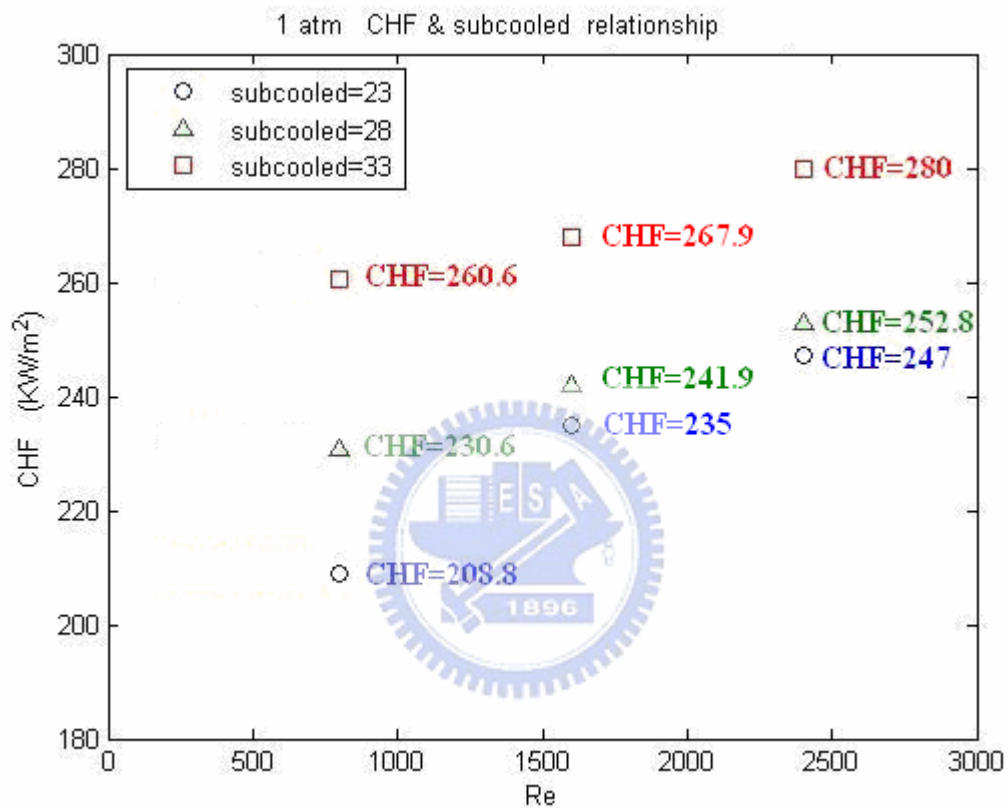


圖 4-22 一大氣壓下，臨界熱通量 CHF 與不同次冷度之關係圖

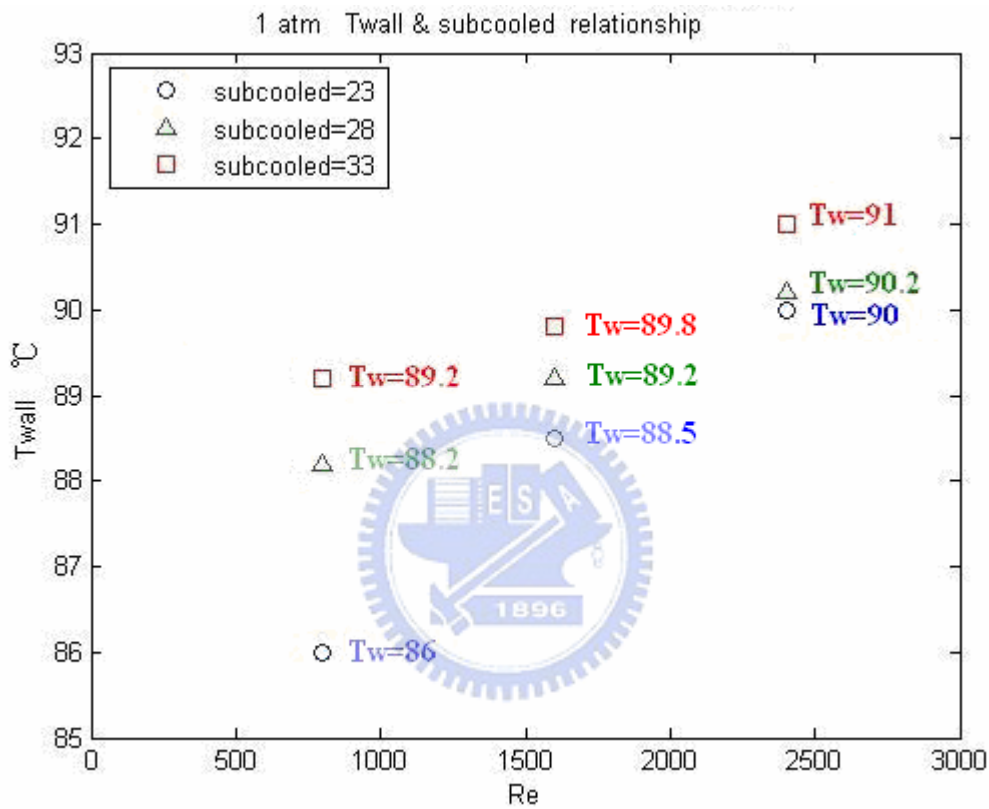


圖 4-23 在一大氣壓及臨界熱通量下，晶片壁溫 T_{wall} 與不同次冷度之關係圖

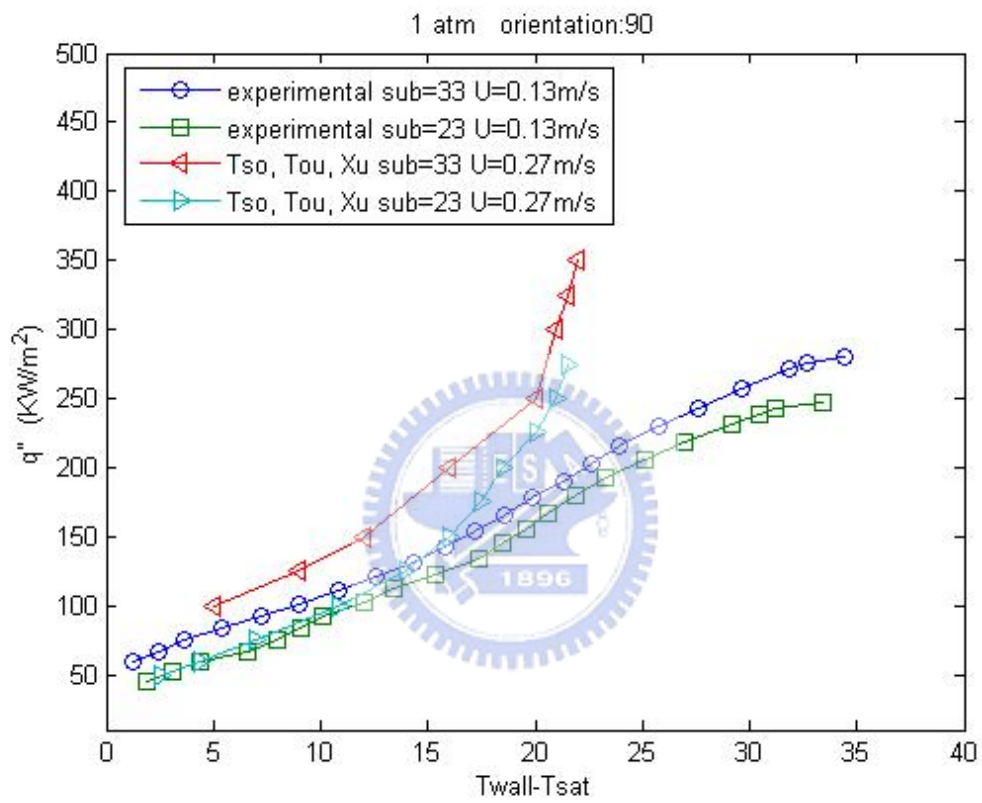


圖 4-24 本實驗與 Tso, Tou 和 Xu [36]以不同次冷度在核沸騰後至臨界熱通量之

沸騰曲線比較圖

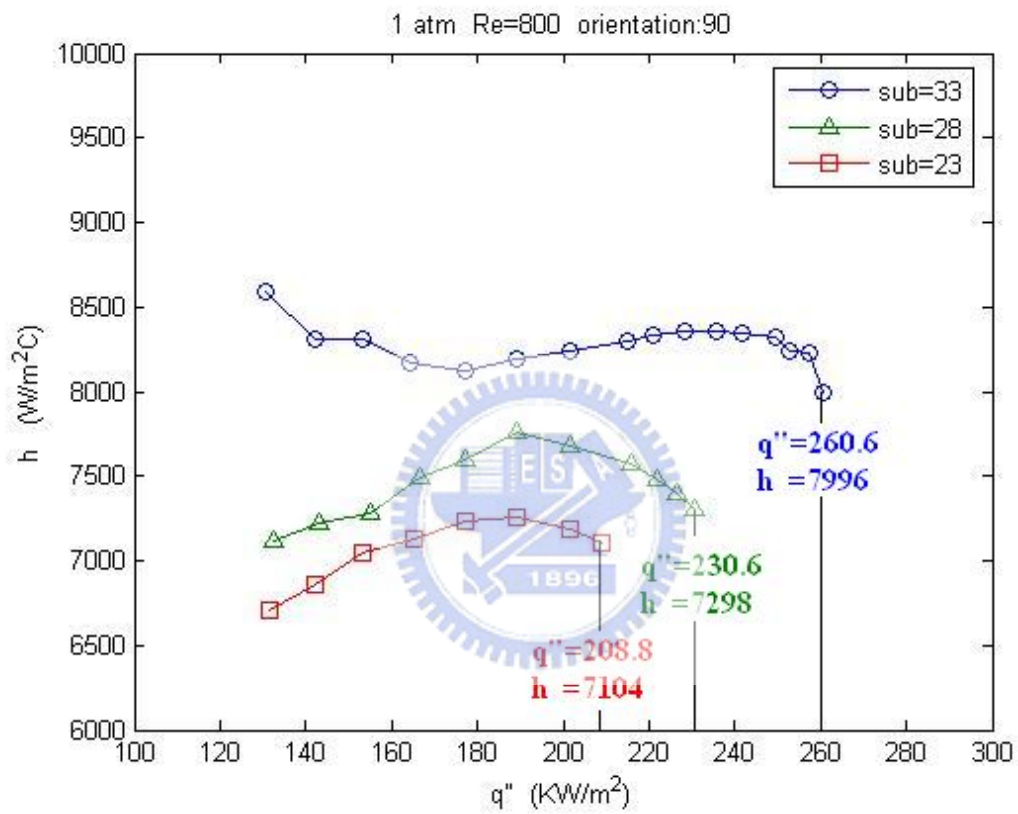


圖 4-25 一大氣壓、Re800、垂直 90° 流向時，不同次冷度之熱傳係數比較圖

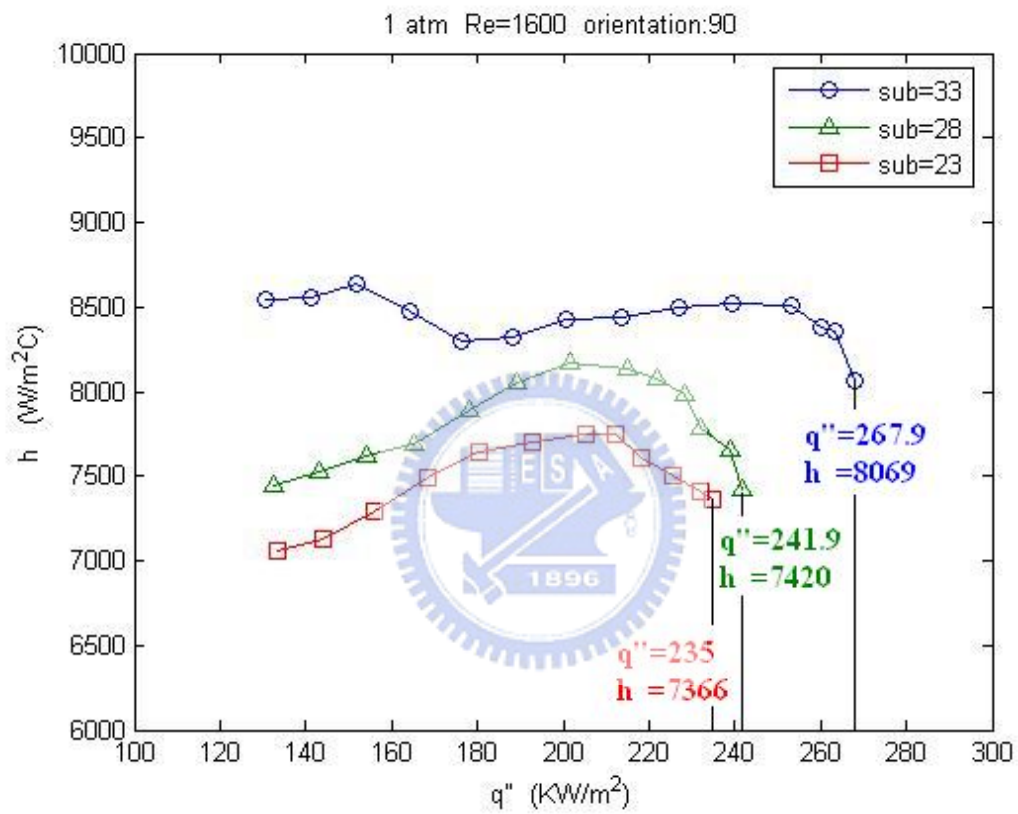


圖 4-26 一大氣壓、Re1600、垂直 90° 流向時，不同次冷度之熱傳係數比較圖

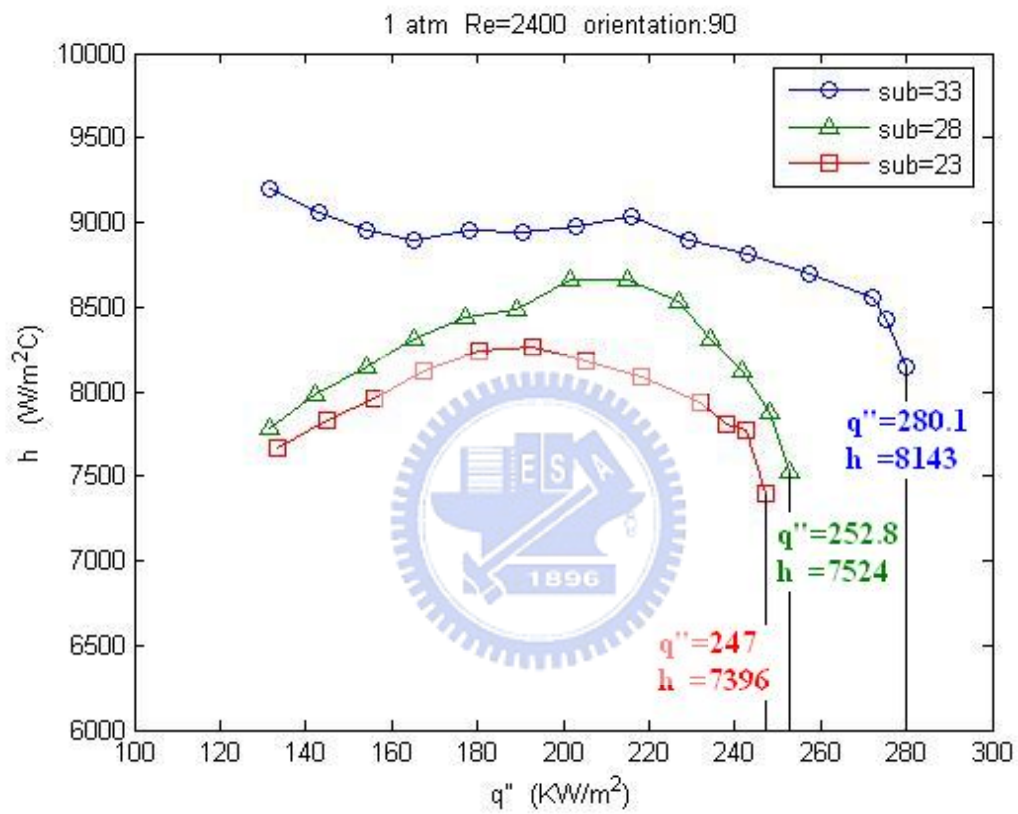


圖 4-27 一大氣壓、Re2400、垂直 90° 流向時，不同次冷度之熱傳係數比較圖

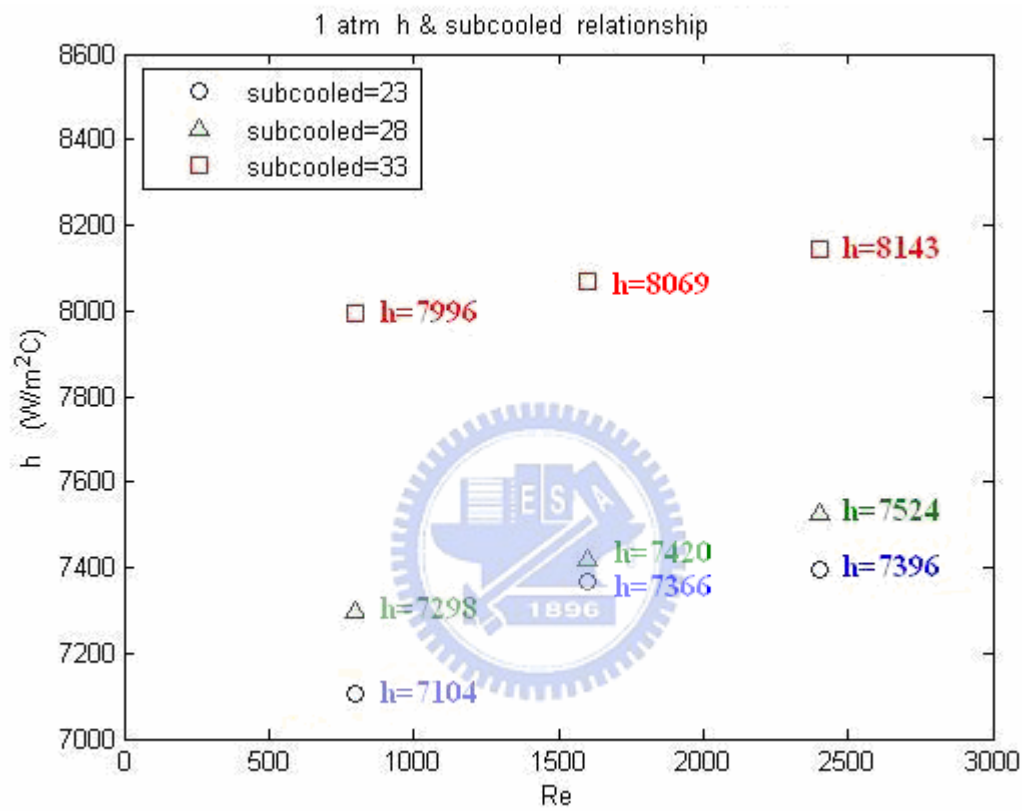


圖 4-28 在一大氣壓及臨界熱通量下，熱傳係數 h 與不同次冷度之關係圖



圖 4-29 1 atm， $Re=800$ ，流向垂直 90° ，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖



圖 4-30 1 atm， $Re=800$ ，流向垂直 90° ，次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

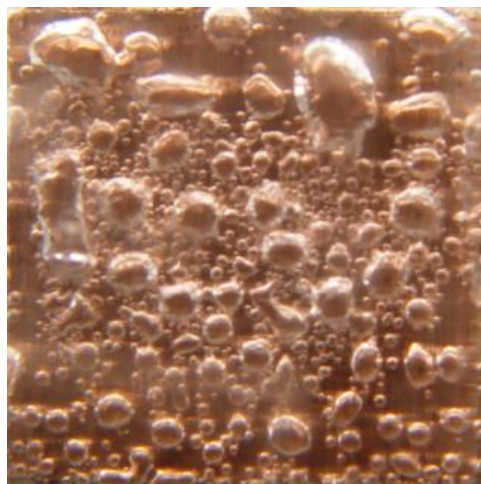


圖 4-31 1 atm， $Re=800$ ，流向垂直 90° ，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

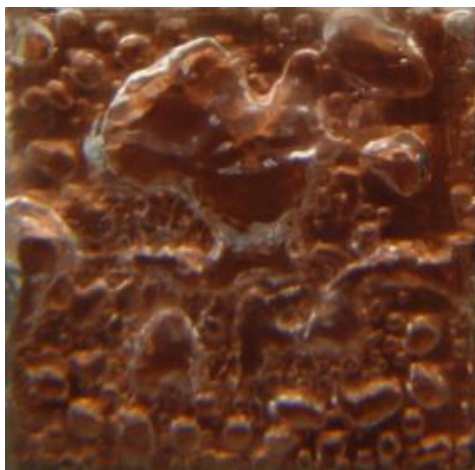


圖 4-32 1 atm， $Re=1600$ ，流向垂直 90° ，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

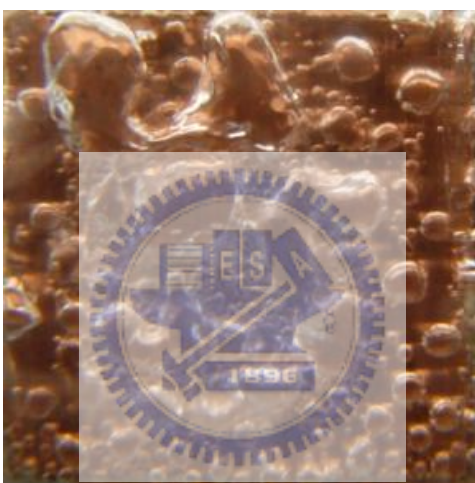


圖 4-33 1 atm， $Re=1600$ ，流向垂直 90° ，次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖



圖 4-34 1 atm， $Re=1600$ ，流向垂直 90° ，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖



圖 4-35 1 atm， $Re=2400$ ，流向垂直 90° ，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

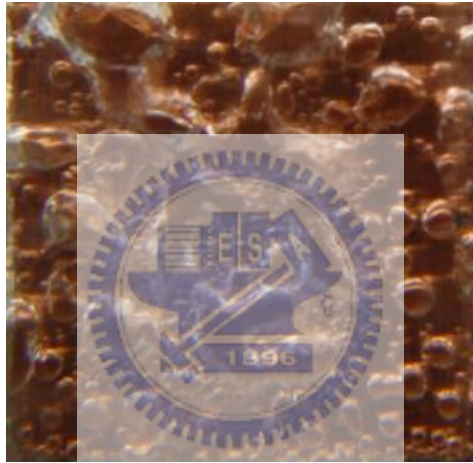


圖 4-36 1 atm， $Re=2400$ ，流向垂直 90° ，次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖



圖 4-37 1 atm， $Re=2400$ ，流向垂直 90° ，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

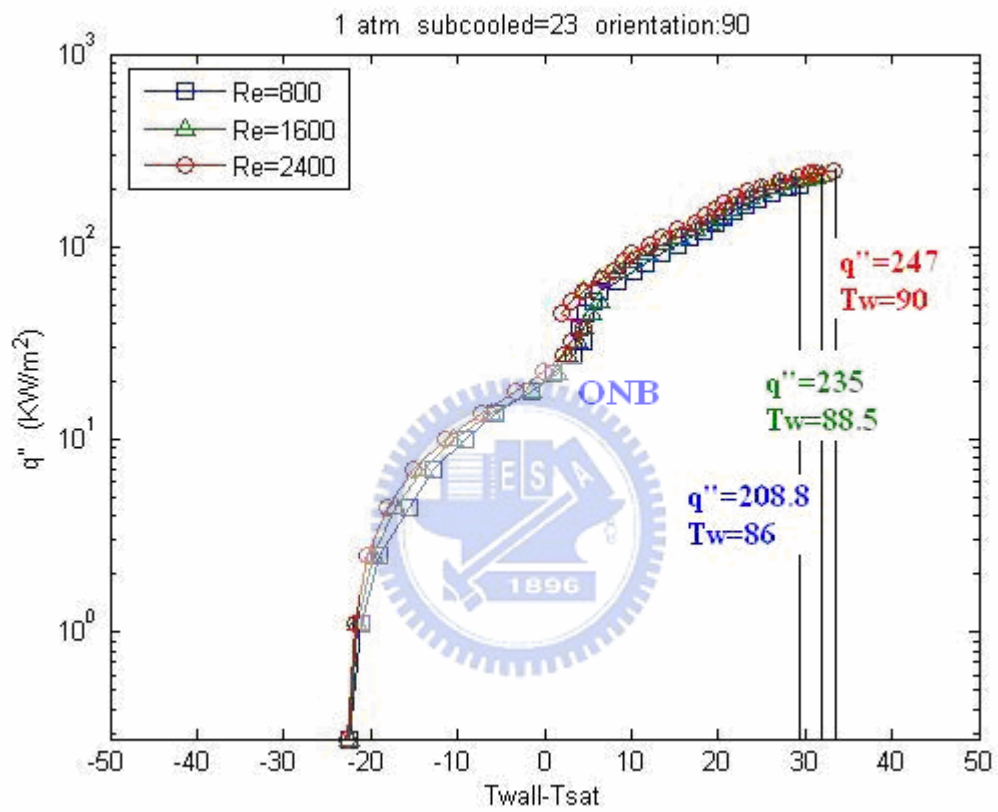


圖 4-38 一大氣壓、次冷度 23°C 、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之沸騰曲線比較圖

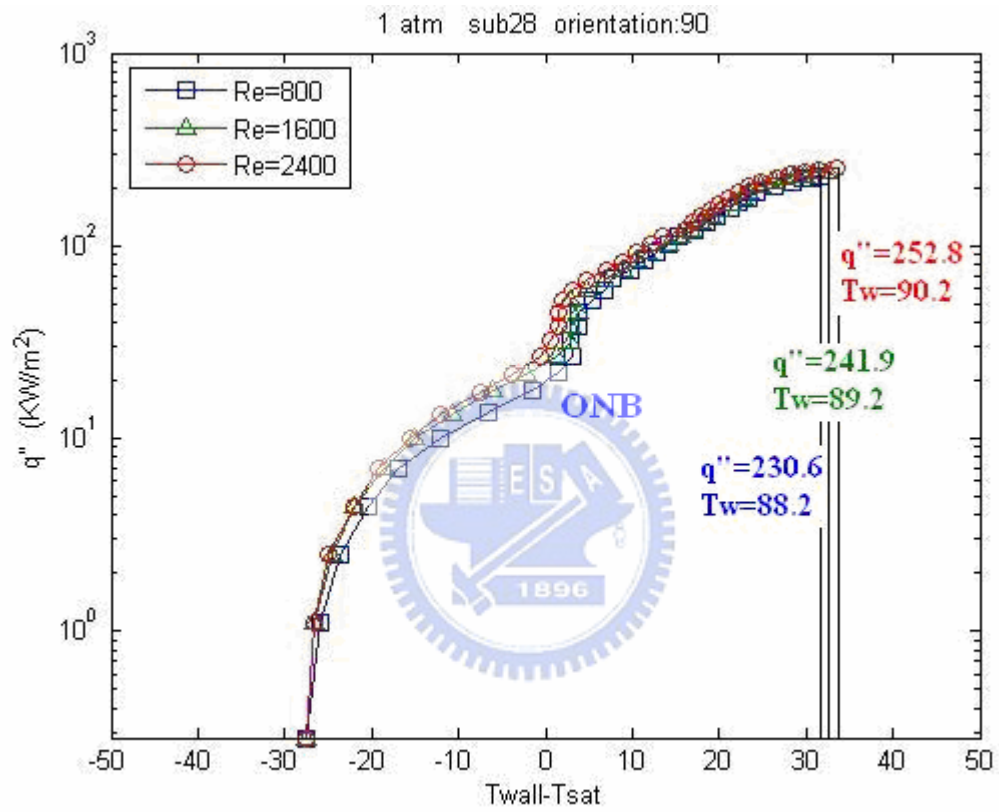


圖 4-39 一大氣壓、次冷度 28°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之沸騰曲線比較圖

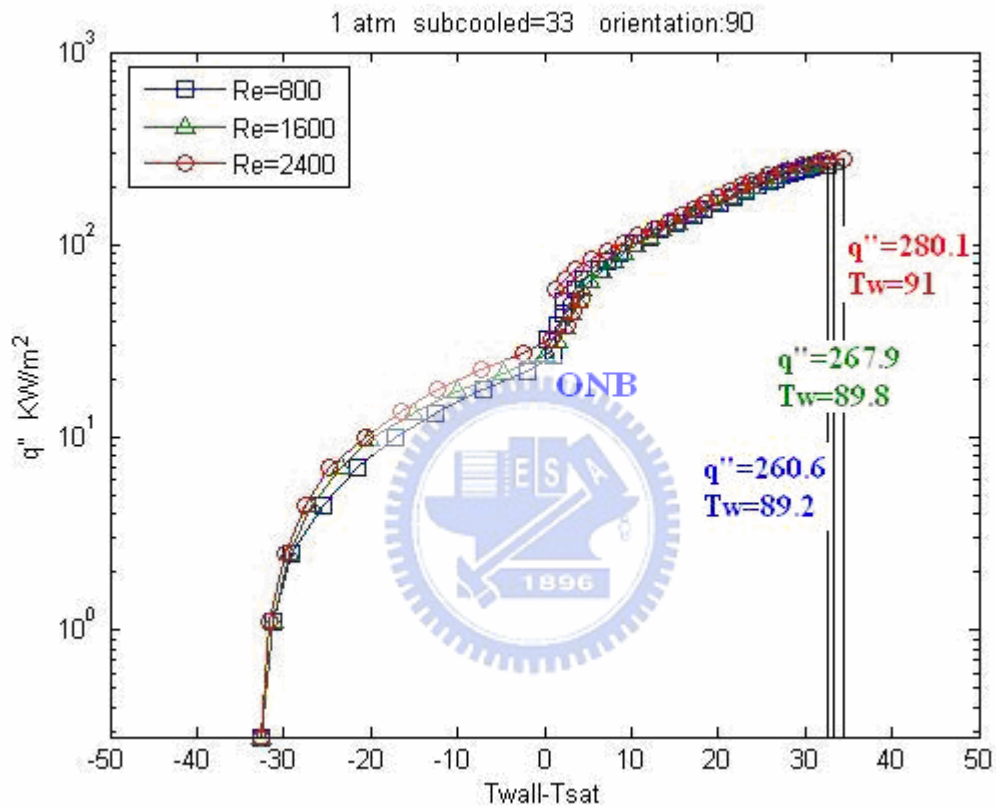


圖 4-40 一大氣壓、次冷度 33°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之沸騰曲線比較圖

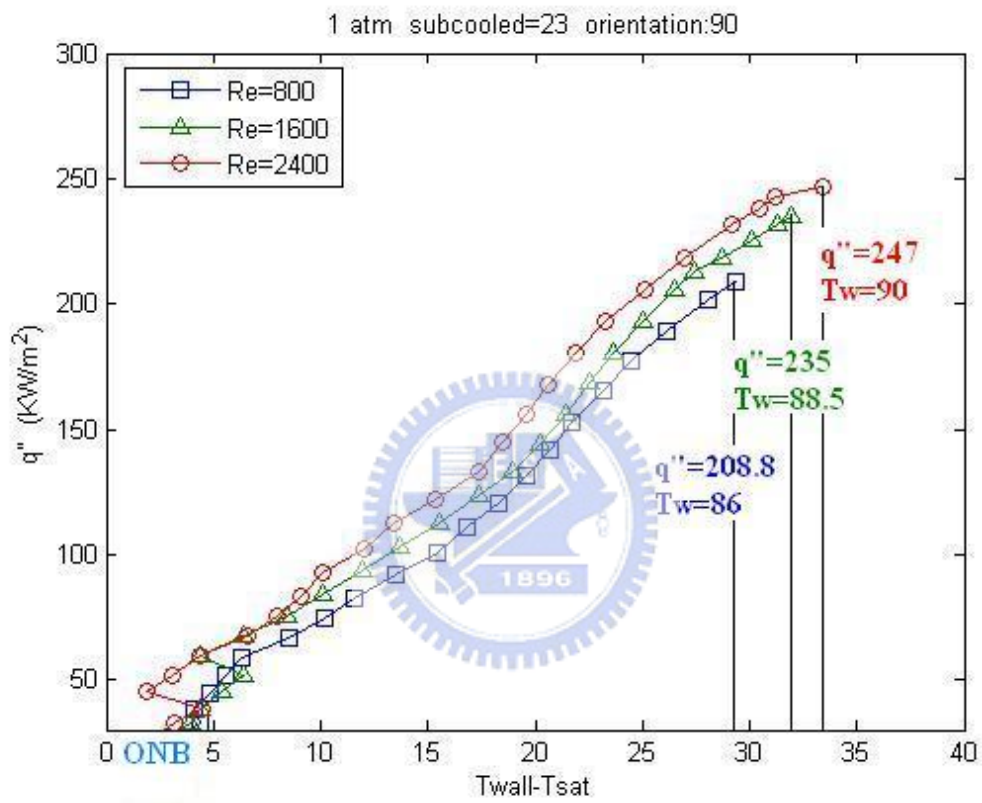


圖 4-41 一大氣壓、次冷度 23°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之沸騰起始點至

臨界熱通量之沸騰曲線比較圖

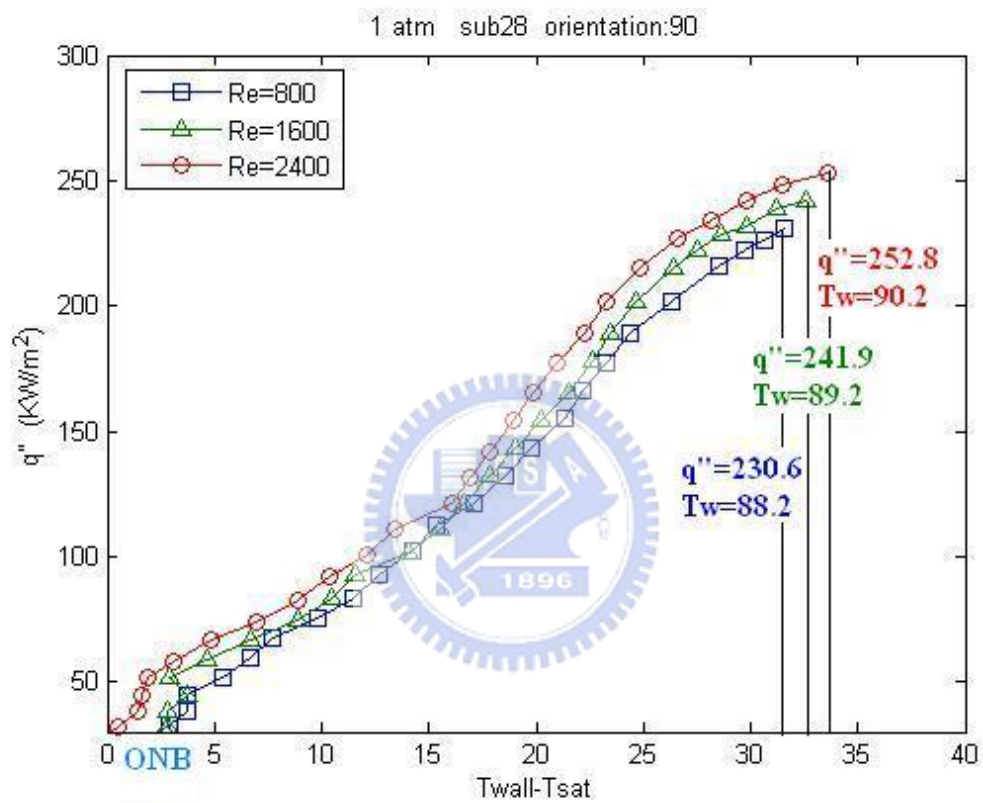


圖 4-42 一大氣壓、次冷度 28°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之沸騰起始點至

臨界熱通量之沸騰曲線比較圖

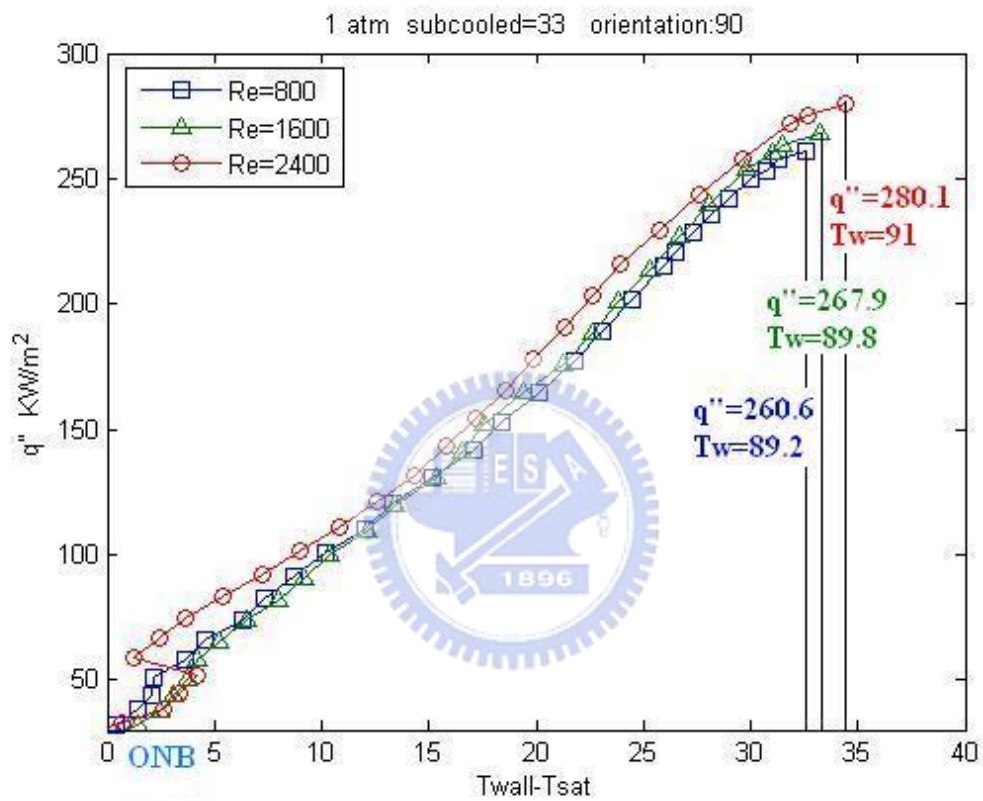


圖 4-43 一大氣壓、次冷度 33°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之沸騰起始點至

臨界熱通量之沸騰曲線比較圖

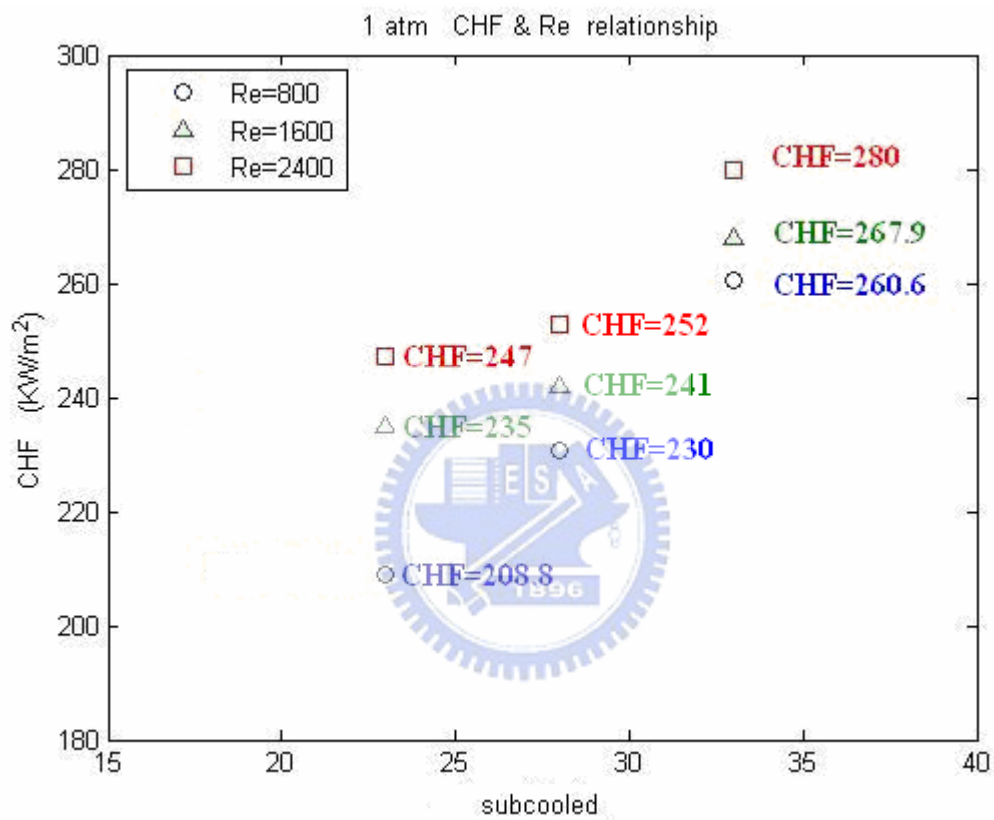


圖 4-44 在一大氣壓下，臨界熱通量 CHF 與不同雷諾數 Re 之關係圖

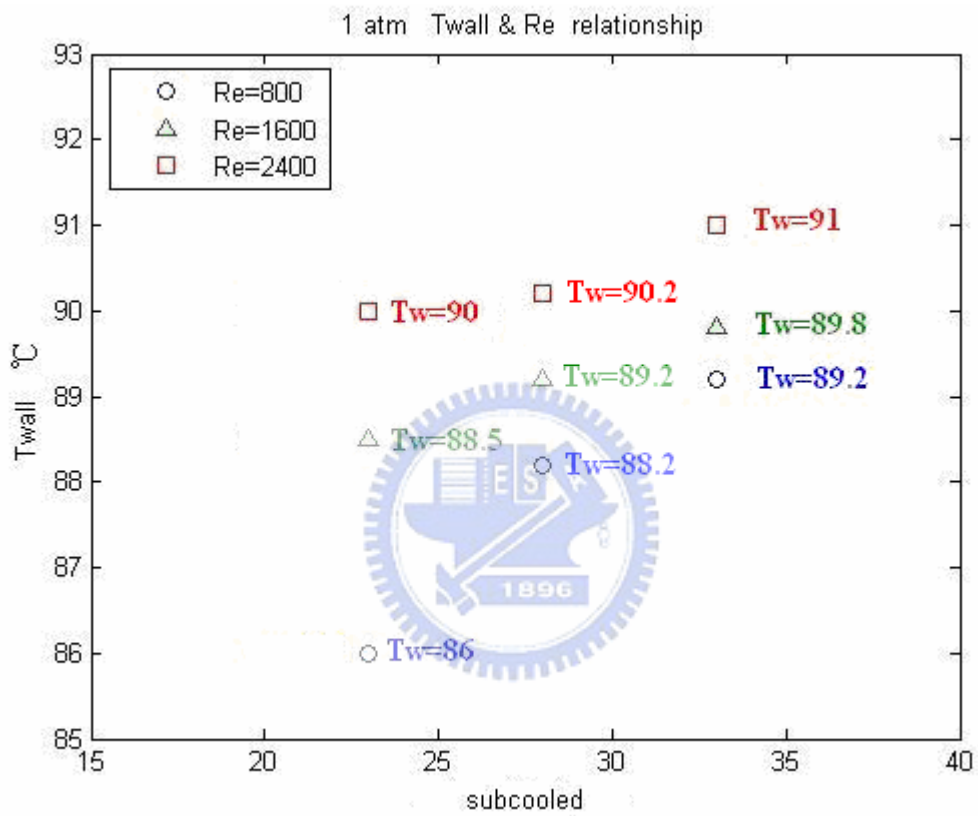


圖 4-45 在一大氣壓及臨界熱通量下，晶片壁溫 T_{wall} 與不同雷諾數之關係圖

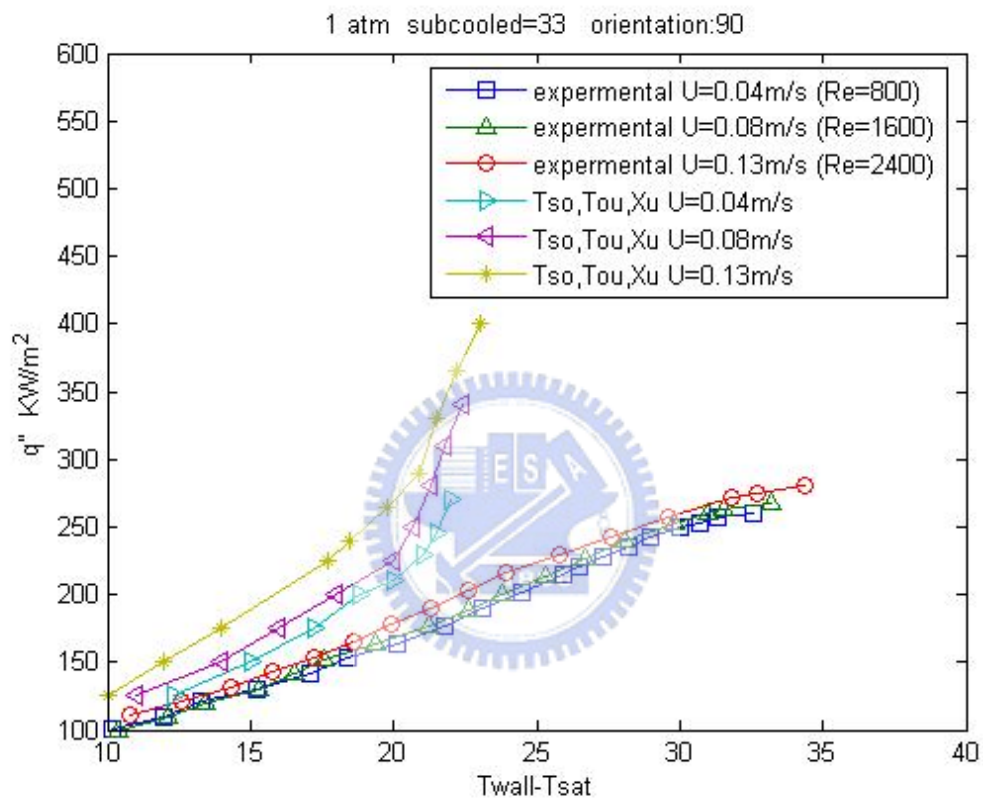


圖 4-46 本實驗與 Tso, Tou 和 Xu [36] 以不同流速在核沸騰後至臨界熱通量之沸

騰曲線比較圖

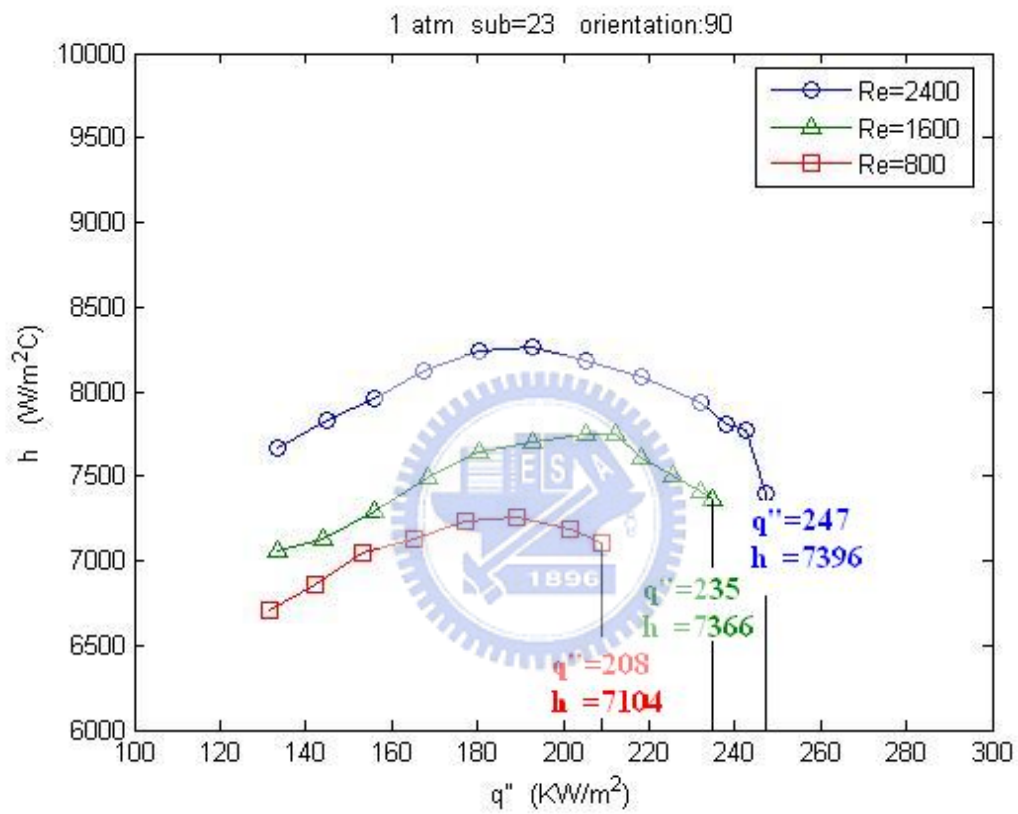


圖 4-47 一大氣壓、次冷度 23°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之熱傳係數比較圖

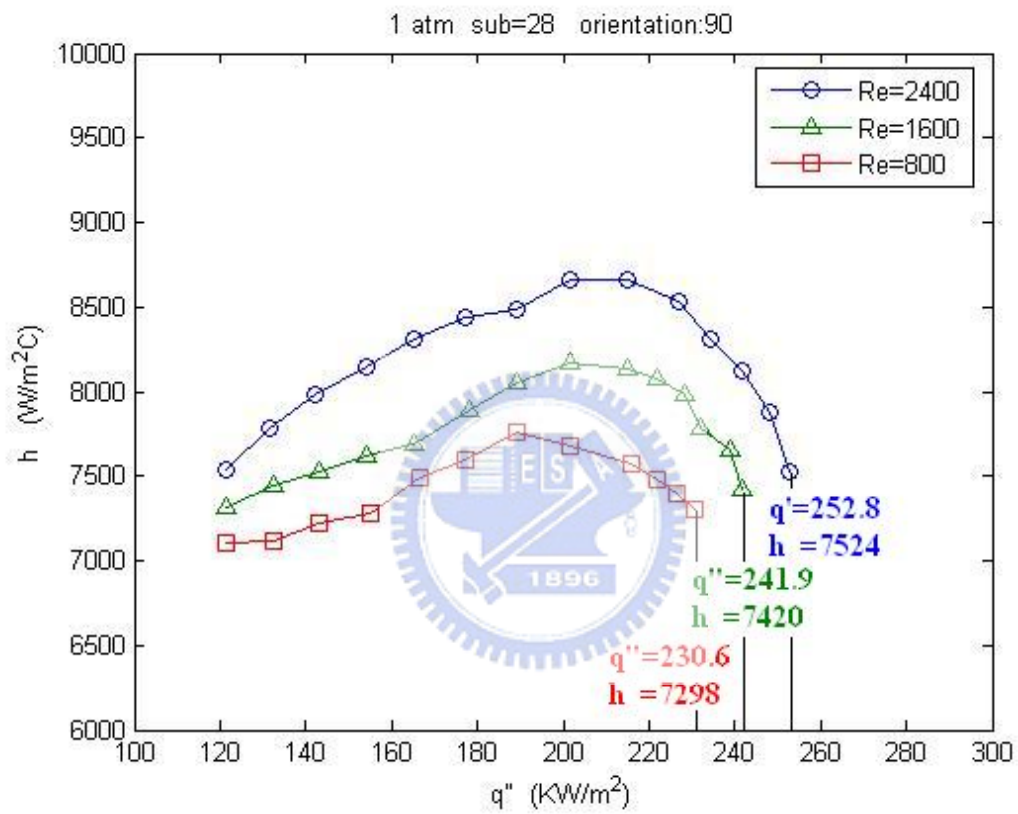


圖 4-48 一大氣壓、次冷度 28°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之熱傳係數比較圖

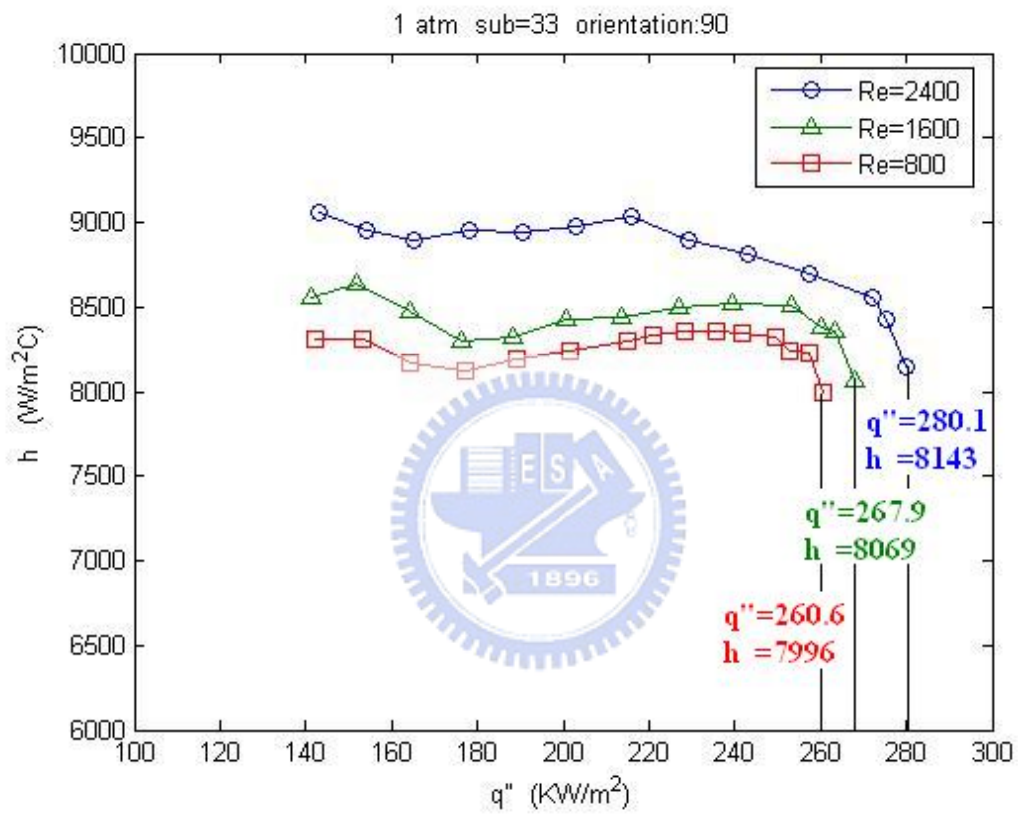


圖 4-49 一大氣壓、次冷度 33°C、垂直 90° 流向時，不同雷諾數之熱傳係數比較圖

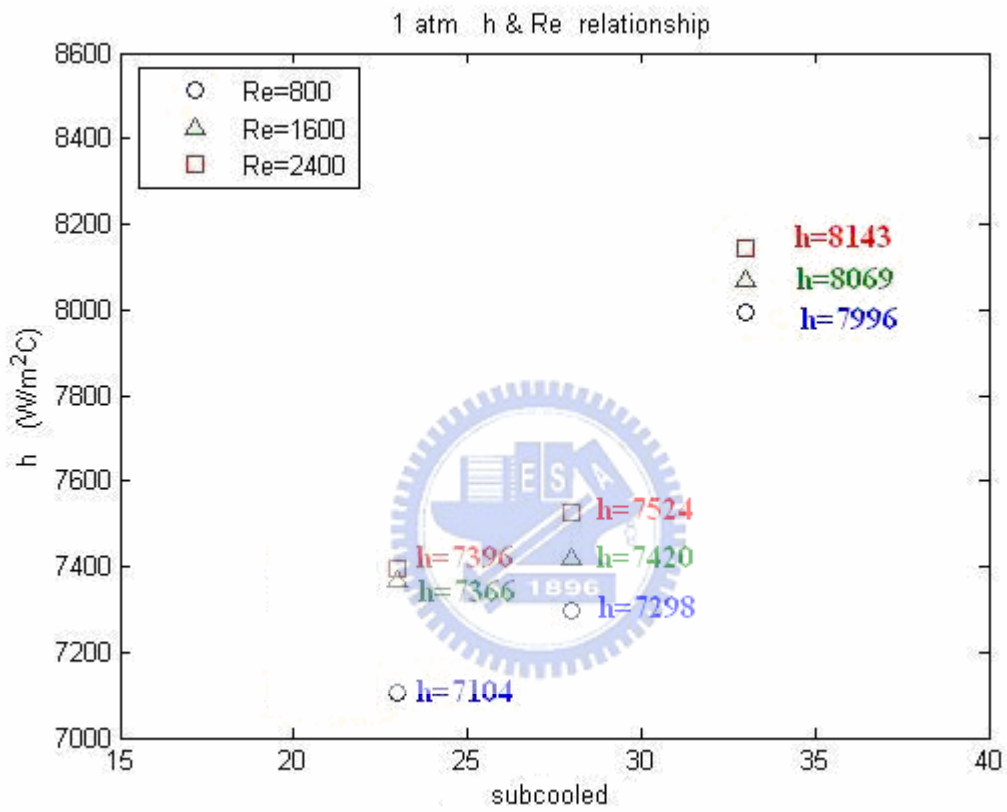


圖 4-50 在一大氣壓及臨界熱通量下，熱傳係數 h 與不同雷諾數之關係圖



圖 4-51 1 atm， $Re=800$ ，流向垂直 90° ，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖



圖 4-52 1 atm， $Re=1600$ ，流向垂直 90° ，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

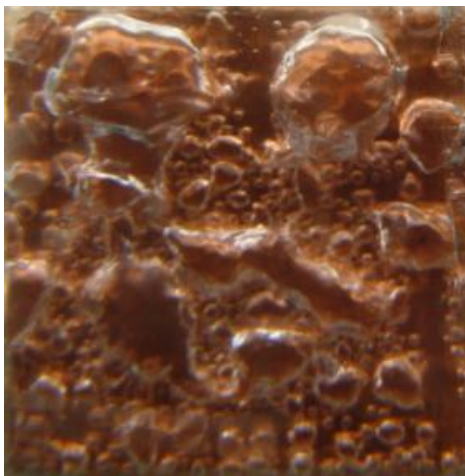


圖 4-53 1 atm， $Re=2400$ ，流向垂直 90° ，次冷度 23°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

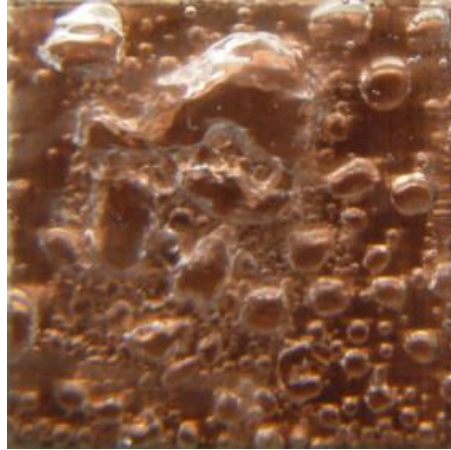


圖 4-54 1 atm, $Re=800$, 流向垂直 90° , 次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

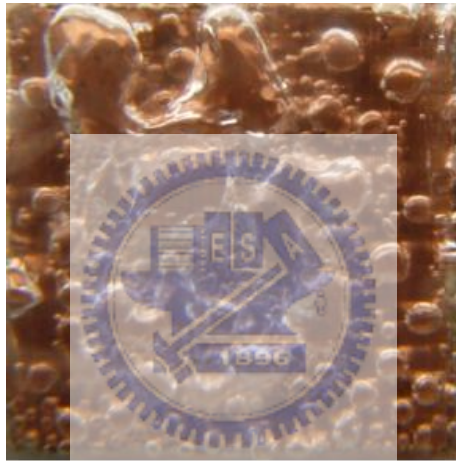


圖 4-55 1 atm, $Re=1600$, 流向垂直 90° , 次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

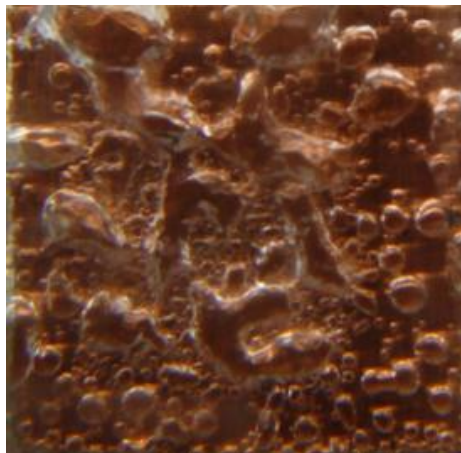


圖 4-56 1 atm, $Re=2400$, 流向垂直 90° , 次冷度 28°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

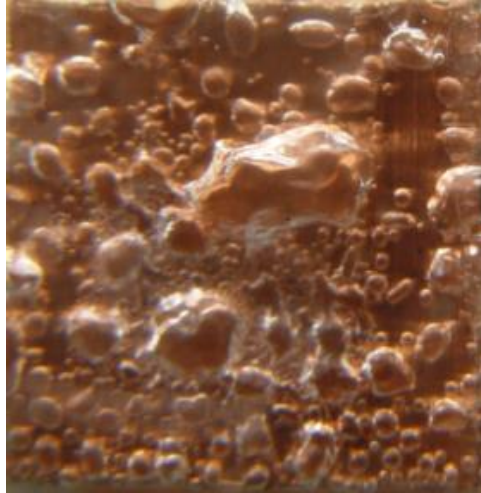


圖 4-57 1 atm， $Re=800$ ，流向垂直 90° ，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

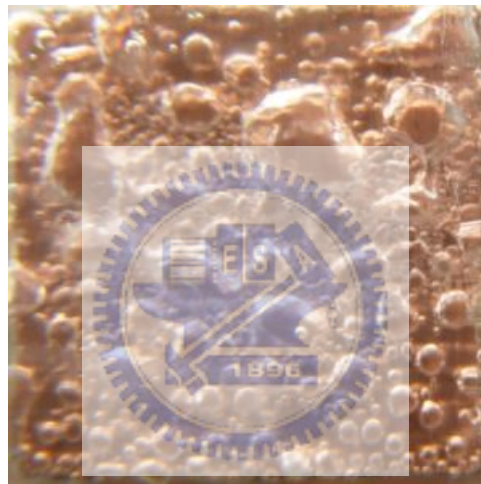


圖 4-58 1 atm， $Re=1600$ ，流向垂直 90° ，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

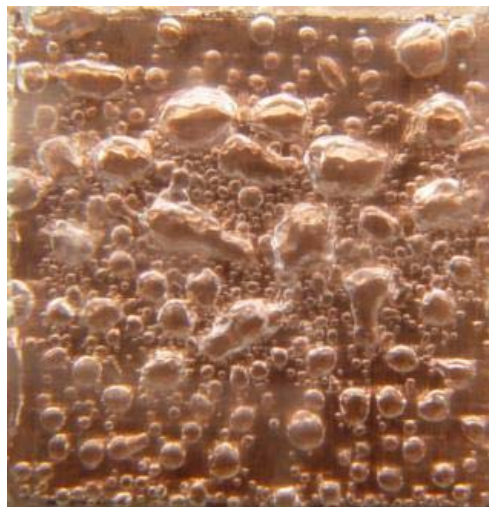


圖 4-59 1 atm， $Re=2400$ ，流向垂直 90° ，次冷度 33°C 之近臨界熱通量氣泡流譜圖

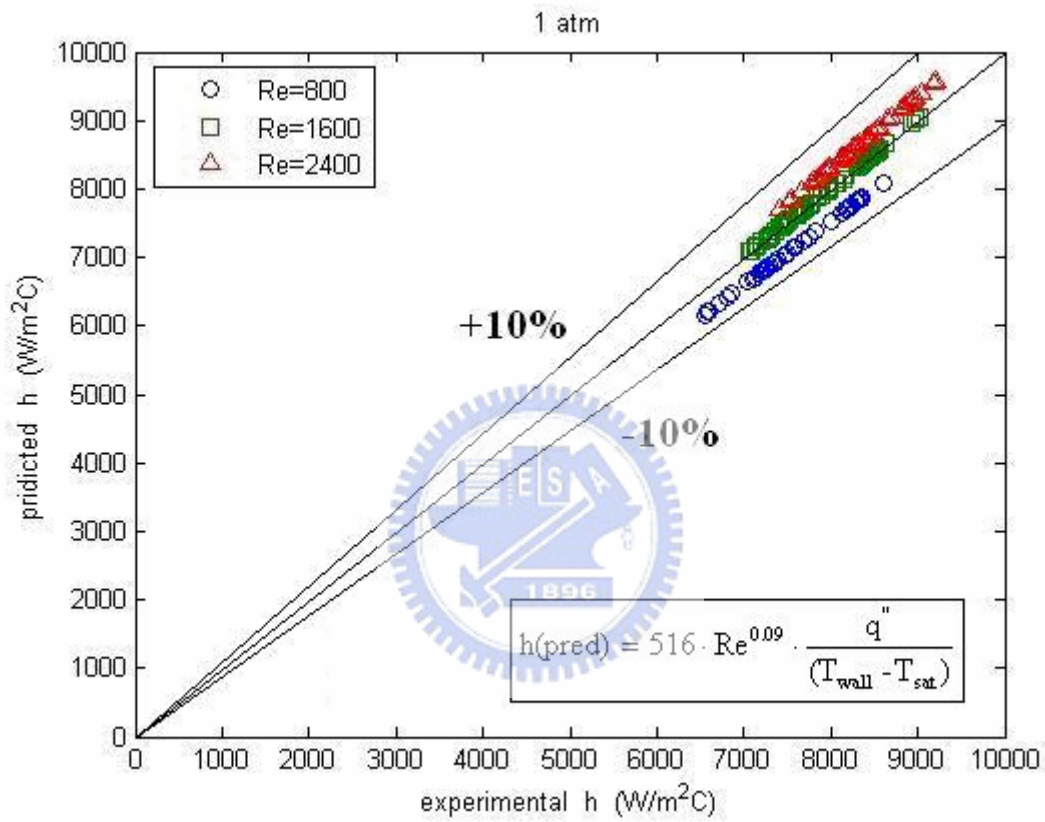


圖 4-60(a) 介電液 FC-72 在垂直矩形流道中之沸騰熱傳係數實驗值與預測值

之比較圖

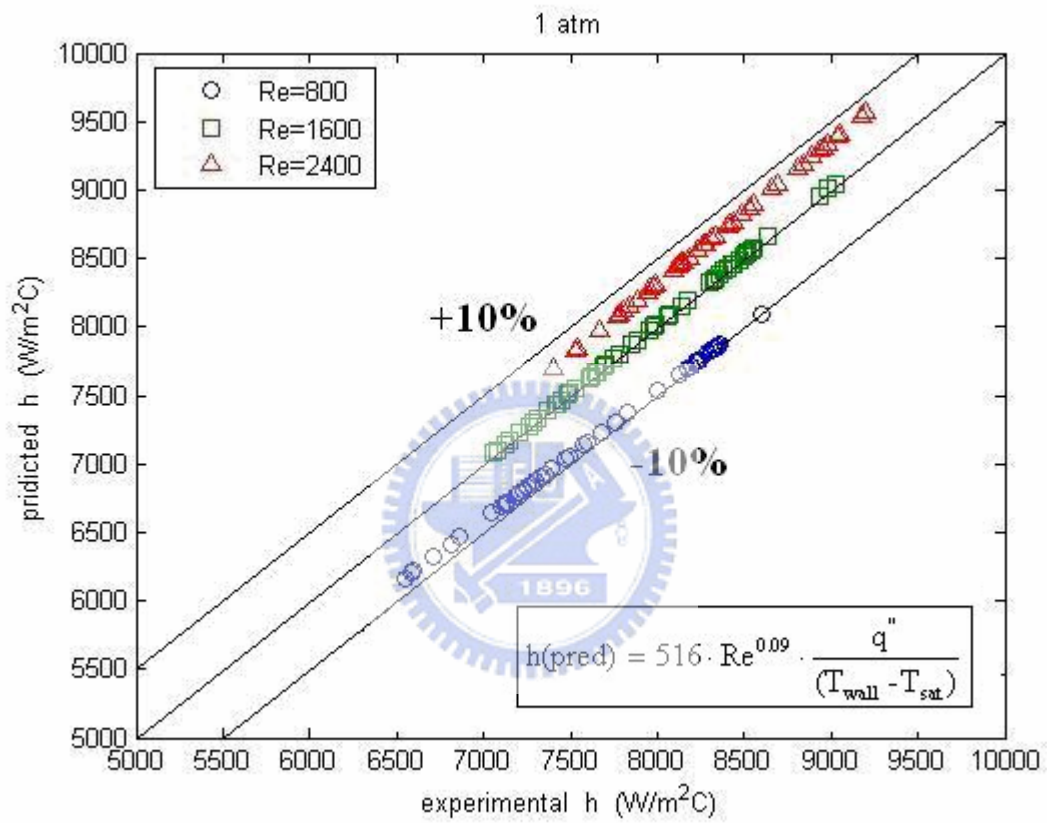


圖 4-60(b) 介電液 FC-72 在垂直矩形流道中之沸騰熱傳係數實驗值與預測值之比較圖

第五章 結論與建議

5-1 結論

本論文以實驗方法探討介電液 FC-72 於垂直矩形流道內，在完全發展流狀態下，使介電液 FC-72 在長為 1000mm，流道高度為 3mm，流道寬度為 12mm 的流道中，流經一平滑加熱面之測試模擬晶片，其面積為 10mm*10mm。本實驗之操作條件設定在一大氣壓的狀態下，以工作流體之流速及次冷度為變數，來探討對臨界熱通量、熱傳係數及流譜的影響。其工作流體之流速為 0.04m/s、0.09m/s 及 0.13m/s，分別對應其雷諾數為 800、1600 及 2400；其工作流體之次冷度範圍為 23°C、28°C 及 33°C，分別對應其工作流體溫度為 33.6°C、28.6°C 及 23.6°C。其實驗結果歸納如下：

1. 在所有不同次冷度及流速之流動沸騰實驗中，曲線皆會產生沸騰遲滯現象；降低熱通量之沸騰曲線會位於增加熱通量之沸騰曲線的左邊。
2. 在單相熱傳區固定流體流速而改變次冷度時，加熱壁面之溫度會隨流體次冷度增高而降低，且有明顯之差異；而所有不同次冷度之曲線在接近核沸騰起始發生點會幾乎逼近相交。核沸騰發生後，其沸騰機制由核沸騰主導，次冷度之影響對沸騰曲線幾乎很小，所有曲線幾乎接近重合。
3. 在高熱通量時，流體流速為固定，臨界熱通量隨次冷度越高而越大；熱傳係數亦隨次冷度增加而增大，其熱傳係數之曲線會先有往上升的趨勢，

但在接近臨界熱通量時，其熱傳係數之曲線會開始有往下降的趨勢。

4. 在固定熱通量及流體流速的狀況下，核沸騰發生後，隨熱通量繼續增加，沸騰曲線進入完全發展核沸騰區，氣泡成核直徑會隨著次冷度越高而越小，且其冷凝效果較佳；反之，次冷度越低，氣泡成核直徑會越大，容易形成氣膜，阻礙液體之返回充填，冷凝效果越差。
5. 在單相熱傳區固定流體次冷度而改變流體流速時，加熱壁面之溫度會隨流體流速越快而越低，其壁過熱度之差異不大；而所有不同流速之曲線在接近核沸騰起始發生點會幾乎逼近相交。核沸騰發生後，其沸騰機制由核沸騰主導，流體流速之影響對沸騰曲線較小，所有曲線幾乎接近重合。
6. 在高熱通量時，流體次冷度為固定，臨界熱通量隨流體流速越快而越大；熱傳係數亦隨流體流速增加而增大，其熱傳係數之曲線會先有往上升的趨勢，但在接近臨界熱通量時，其熱傳係數之曲線會開始有往下降的趨勢。
7. 在固定熱通量及流體次冷度的狀況下，核沸騰發生後，隨熱通量繼續增加，沸騰曲線進入完全發展核沸騰區，氣泡成核直徑會隨著流體流速越快而越小，且其冷凝效果較佳；反之，流體流速越慢，氣泡成核直徑會越大，容易形成氣膜，阻礙液體之返回充填，冷凝效果越差。

8. 本實驗熱傳經驗方程式經由無因次化後之熱傳係數為次冷度、加熱通

量、壁過熱度及雷諾數之函數，再乘上一係數加以修正，其經驗式如下：

$$h(\text{pred}) = 516 \cdot \text{Re}^{0.09} \cdot \frac{q''}{(T_{\text{wall}} - T_{\text{sat}})}$$

雷諾數在 1600 時之誤差最小，其誤差小於 5%，雷諾數在 800 及 2400

時之誤差分別小於+10%及-10%。

5-2 建議

延續主動式元件驅動工作流體之電子冷卻研究

一、以 FC-72 為工作流體，在水平方向及傾斜方向，共七種流動方向進行

流動沸騰在飽和流狀態及次冷流狀態對流動沸騰熱傳及臨界熱通量的

影響，如圖 1-6 所示，並與 Zhang, Mudawar and Hasan [29]的結果進行

比較。在此實驗中影響流動沸騰熱傳及臨界熱通量有三項主要因素，分

別為重力(body force)、表面張力(surface tension force)及慣性力(inertia)。

二、比較不同介電液的性能。

三、在不同幾何形狀及長度之流道，比較熱傳係數及臨界熱通量的影響。

參考文獻

- [1] 陳永樹，「電子構裝概論」，2000，全華書局，pp.55
- [2] Ralph L. Webb , 2003, November 15-21, Department of Mechanical Engineering , The Pennsylvania State University , “Next Generation Devices for electronic Cooling” , pp.1-9 , 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress Washington , D.C
- [3] Fujikura , Mochizuki , Mashiko. M , Nguyent .K , Saito. T , Goto .Y , K. , 1996: “Cooling CPU Using Hinge Heat Pipe Proc”. International Heat Pipe Symposium Melbourne
- [4] Stassberg. D. ,1981: “Cooling Hot Microprocessors”. EDN Asia , No. 4 , pp.36-48
- [5] Gaugler .R.S, Apple. 21 December ,1942, Published 6 June 1966 , “Heat Transfer Devices”, US Patent 2350348.
- [6] Grover. G.M , Apple. 2 December 1963, Published 18 January 1966, “Evaporation-Condensation Heat Transfer Devices”, US Patent 3229759.
- [7] 3M Company,Product Manual,1986: Fluorinert Liquids, Industrial Chemical Products Division,3M Center,St. Paul,MN.
- [8].Xu. G.P, Tou. K.W, Tso .C.P, 1998, Numerical modeling of turbulent heat transfer from discrete heat sources in a liquid-cooled channel, Internat.J.Heat and Mass Transfer Vol. 41, pp. 1157-1166.
- [9] Chu .R.C, Heat transfer in electronic systems, in: Proceedings of the 8th Int. Heat transfer Conference, San Francisco 1, 1986, pp. 293-305.
- [10] Hannemann. R, Fox .L.R, Mahalingam .M, March 1987,” Heat transfer in microelectronic components”, in : Proc. of International Symp. on Cooling Technology for Electronic Equipment, Hawaii.

- [11] Mudawar, I., Maddox, D.E., 1989. Critical heat flux in subcooled flow boiling of fluorocarbon liquid on a simulated electronic chip in a vertical rectangular channel. *Int. J Heat and Mass Transfer* 32, pp. 379-394.
- [12] Bar-Cohen, A., 1993. Thermal management of electronic components with dielectric liquid. *JSME , Series B* 36, pp. 1-24.
- [13] Mudawar , I., Anderson , T.M. , 1993, “Optimization of Enhanced Surfaces for High Flux Chip Cooling by Pool Boiling”, *J. of Electronic Packaging*, Vol. 115, pp. 89-100
- [14] Peng .X.F, Wang .B.X, G.P. Peterson, H.B. Ma, 1994 , ” Experimental investigation of heat transfer in flat plates with rectangular microchannels”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 38 Vol.1, pp.127–137.
- [15] Peng .X.F, Peterson .G.P, 1995,” Convection heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 39 Vol. 12, pp. 2599–2608.
- [16] Peng .X.F, Peterson .G.P, 1995, “The effect of thermofluid and geometrical parameters on convection of liquids through rectangular microchannels (technical note)”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 38 Vol. 4 , pp. 755–758.
- [17] Peng .X.F and Wang. B.X ; G.P.Peterson and.Ma H.B , 1994 , Experimental investigation of heat transfer in flat plates with rectangular microchannels , *International Journal Heat Transfer*. Vol.38. No.1, pp. 127-137
- [18] Wahib Owhaib , Bjorn Palm , 2004. Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science* 28, pp. 105-110
- [19] Choi .S.B, Barron .R.F, Warrington. R.O, 1991,”Fluid flow and heat transfer in Microtubes”, in: *Micromechanical Sensors, Actuators and Systems*, in: D. Choi, et al. (Eds.), *ASME DSC*, vol. 32, pp. 123–128.
- [20] Yu. D, Warrington R, Barron. R, Ameen .T, 1995 ,”An Experimental and Theoretical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microtubes, *Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Conference*, vol. 1,

pp. 523–530.

- [21] Bhowmik. H. , Tou .K.W. , 2005, Experimental study of transient natural convection heat transfer from simulated electronic chips , *Experimental Thermal and Fluid Science* , 29 , pp. 485-492
- [22] Lee, T.Y., Simon, T.W., 1989. High-Heat-Flux forced convection boiling from small regions. In: Shah, R.K. (ED.), *Heat Transfer in Electronics*, ASME HTD, vol. 3, pp. 7-16
- [23] Samant, K.R., Simon, T.W., 1989. Heat transfer from a small heated region to R-113 and FC-72. *ASME Journal of Heat Transfer* 111, pp. 1053-1059
- [24] Maddox, D.E., Mudawar, I., 1989. Single and two-phase convective heat transfer from smooth and enhanced microelectronic heat sources in a rectangular channel. *ASME Journal of Heat Transfer* 111, pp. 1045-1052
- [25] McGillis, W.R., Carey, V.P., Strom, B.D., 1991. Geometry effect on critical heat flux for subcooled convective boiling from an array of heated elements. *ASME Journal Of Heat Transfer* 113 , pp. 463-471
- [26] Gersey, C.O., Mudawar, I., 1993. Nucleate boiling and critical heat flux from protruded chip arrays during flow boiling. *ASME Journal of Electronic Packaging* pp. 78-88
- [27] Galloway. J.E, Mudawar. I., 1989 ,”CHF mechanism in flow boiling from a short heated wall---Part 1. Examination of near-wall conditions with the aid of photomicrography and high-speed video imaging” , *International Journal Heat and Mass Transfer* 36 , pp. 2511-2566
- [28] Galloway. J.E, Mudawar. I, 1993 ,” CHF mechanism in flow boiling from a short heated wall---Part 2. Theoretical CHF model “, *International Journal Heat and Mass Transfer* 36 , pp. 2527-2540
- [29] Hui Zhang , Issam Mudawar , Mohammad M. Hasan , 2002 , “Experimental assessment of the effects of body force , surface tension force , and inertia on flow boiling CHF “*International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 , PP. 4079-4095

- [30] Bhowmik, H., Tou, K.W., 2005, Study of transient forced convection heat Transfer from discrete heat sources in a FC-72 cooled vertical channel, International Journal of Thermal Sciences 44, pp. 499-505.
- [31] Nukuyama, S., 1934, "The Maximum and Minimum Value of Heat Transfer from Metal to Boiling Water under Atmosphere Pressure", International Journal Heat and Mass Transfer, Vol.9, pp.1419-1433
- [32] Bar-Cohen, A. and Rohsenow, W. M., 1984, "Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled Plates", Journal Heat Transfer, V.106, pp.116-123
- [33] Katto, Y., Yokoyama, S. and Terakura, K., 1992 "Nucleate and Transition Boiling in Narrow Space between Two Horizontal, Parallel Disk Surfaces", Bull., JSME20, V.143, pp.638-643
- [34] 潘欽，沸騰熱傳與雙相流，2001，俊傑書局，pp.170
- [35] Peng, X. F., Wang, B. X., Peterson, G. P., 1998, "Flow Boiling of Binary Mixtures in Microchanneled Plates", International Journal Heat Mass Transfer, Vol. 41, No.1, pp. 101-106
- [36] Tso, C.P., Tou, K.W., Xu, G.P., 2000, "Flow boiling critical heat flux of FC-72 from flush-mounted and protruded simulated chips in a vertical rectangular channel", International Journal of Multiphase Flow, 26, pp. 351-365
- [37] Mudawar, I., Qu, Weilin, 2002, "Prediction and Measurement of Incipient Boiling Heat Flux in Micro-Channel Heat Sink", International Journal Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp.3933-3945
- [38] Bergles, A. E., Bakhru, N., Shires, Jr., J. W., Nov 1988, "Cooling of High Power Density Computer Components", Report No. DSR 70712-60, Engineering Projects Lab, Massachusetts Institute of Technology
- [39] Wu, P.S., Simon, T.W., 1994, "Effects of Dissolved Gases on Subcooled Flow Boiling from Small Heated Regions with and without Streamwise Concave Curvature", Thermal Phenomena in Electronic Systems, 1994. I-THERM IV. Concurrent Engineering and Thermal Phenomena., InterSociety Conference on,

pp. 23-31

- [40] Yue Ma , J.N. Chang , 2001, “An experimental study of critical heat flux (CHF) in microgravity forced-convection boiling”, International Journal of Multiphase Flow Vol. 27 , , pp. 1753-1767.
- [41] Mudawar. I , Howard .A. H , Gersey .C.O, 1997 , “An analytical model for near-saturated pool boiling CHF on vertical surfaces” , International Journal Heat and Mass Transfer 40 , pp. 2327-2339
- [42] Howard .A.H, Mudawar. I, 1999 ,” Orientation effects on pool boiling CHF and modeling of CHF for near-vertical surfaces “, International Journal Heat and Mass Transfer 42 , pp. 1665-1688
- [43] Zuber . N, Tribus .M , Westwater. J. W , 1961 ,” The hydrodynamic crisis in pool boiling of saturated and subcooled liquids” , in: International Developments in Heat Transfer : Proceedings of International Heat Transfer Conference , Boulder , CO , pp. 230-236
- [44] Class .C.R , DeHaan .J.R , Piccone .M , Cost .R.B, 1960 ,” Boiling heat transfer to liquid hydrogen from flat surfaces” , in: K.D. Timmerhaus (Ed.) , Advances in Cryogenic Engineering , vol. 5 Plinun Press , New York , NY , pp.254-261
- [45] Githinji .P.M, Sabersky .R.H , 1963 , “Some effects of orientation of the heating surface in nucleate boiling” , Journal Heat Transfer 85 , pp. 379
- [46] Marcus . W.R , Dropkin .D , 1963 , “The effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer “, International Journal Heat and Mass Transfer 6 , pp.863-867
- [47] Chen. L.T , 1978 ,”Heat transfer to pool-boiling Freon from inclined heating plate” , Lett. Heat Mass Transfer 5 . pp. 111-120
- [48] Mishikawa. K, Fujita .Y , Uchida. S , Ohta. H , 1983 ,” Effect of heating surface orientation on nucleate boiling heat transfer” , in : Y. Mori , W.J. Yang(Eds.) , Proceedings of ASME- JSME Thermal Engineering Joint Conference , vol. 1 , Honolulu , HI , pp. 129-136
- [49] Kumar, V. , Prasad, M. , Verma ,M.K., Garg ,N.S., 1990 ,”Effect of inclination on

pool boiling heat transfer from a flat plate” , Indian Chem. Eng. 32 , pp. 61-64

- [50] Willingham, T.C., Mudawar, I., 1992. Forced-convection boiling and critical heat flux from a linear array of discrete heat sources. International Journal Heat and Mass Transfer 35, pp. 2879-2890
- [51] Yu, W. , France , D. M. , Wambsganss, M. W. , Hull, J. R. , 2002, ”Two-Phase \ Pressure Drop , Boiling Heat Transfer , and Critical Heat Flux to Water in a Small-Diameter Horizontal Tube” , International Journal Multiphase Flow , Vol. 28, pp. 927-941
- [52] Dukler , A. E and Taitel , Y. , 1986 , “Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid System : Measurement and Modeling “ , Multiphase Science and Technology , Ed. Hewitt , G. F. , Delhaye , J. M. and Zuber , N. , Hemisphere ; Vol. 2 , Ch. 1 , Hemisphere pub. Col , Washington.
- [53] Ghristopher ,S. J.,Mudaqwr, K.,1999, ”Critical heat flux in a long, rectangular channel subjected to one-sided heating-I. foiw visualization,”International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.1,pp.1835-1847
- [54] 許中彥 , 2005, ”介電液 FC-72 在水平矩形狹窄流道內之流動沸騰熱傳與氣泡特性之實驗研究”, 國立交通大學機械工程研究所碩士論文 , pp.33
- [55] Heindel, T. J., Ramadhani, S., Incropera, F. P., 1992, “Liquid Immersion Cooling of a Longitudinal Array of Discrete Heat Sources in Protruding Substrates: II-Forced Convection Boiling ,” Journal of Electronic Packing, Vol. 114 , pp.63-70
- [56] Kline, S.J.,1985, “The Purpose of Uncertainty Analysis” , J. Fluids Engineering, Vol.107, pp.153-160

附錄一 晶片表面粗糙度量測之前置作業

一、研磨

研磨時將研磨器分別裝上不同號數之碳化矽砂紙，並於研磨時通水以便研磨時將所產生之雜屑帶走，研磨時多半用拇指及中指食指將試片握穩，再以平穩速度向前推進，回程時試片須離開砂紙，等到試片上所有刮痕方向一致時方換至下一號數之砂紙，且此時研磨方向須轉動 90 度，待新刮痕之方向完全取代上一次之刮痕方向時，方可再換之下一號數之砂紙。本次研磨共使用 200、400、800、1000、1200、1600、2000 的砂紙，號碼數越小則砂紙越細，越可使晶片光滑



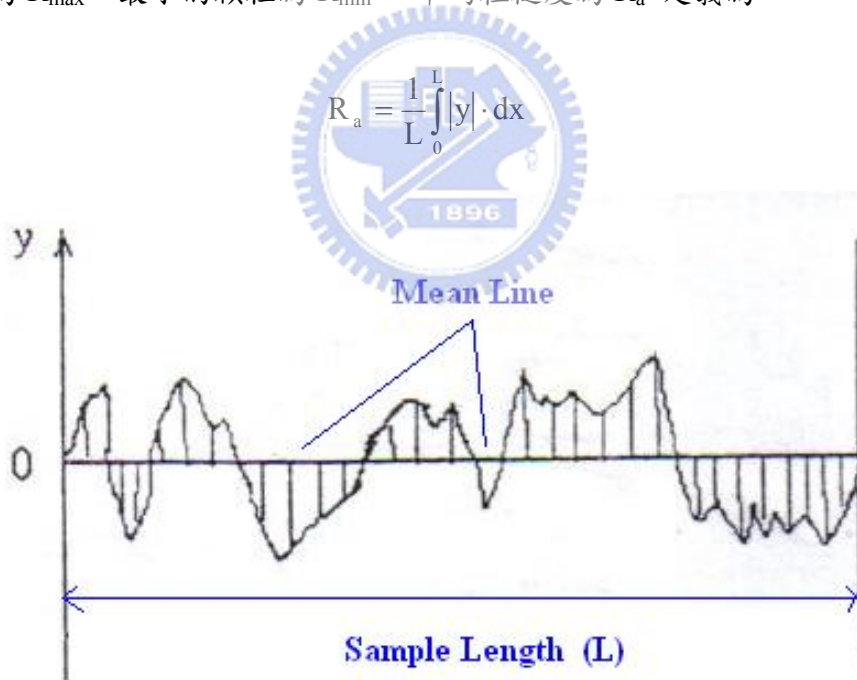
二、拋光

晶片經過研磨後，需要進行拋光以去除前一步驟所產生之刮痕。手握穩晶片，以一定壓力將晶片壓在拋光機的拋光絨布上旋轉，並同時注入氧化鋁粉懸浮液，讓氧化鋁粉之細小顆粒與試片磨耗，藉以拋光晶片。氧化鋁懸浮液的粉末大小有三種，多半先用較大者來拋光，之後再用較小者，不過在換到下一道懸浮液時，要先以清水洗淨拋光絨布，且最好是各自使用獨立的絨布以避免混合在一起。

附錄二 晶片表面粗糙度

本實驗之晶片雖定義為光滑表面，但所謂光滑表面是指平均粗糙度較小的表面，因為真實表面都是凹凸不平的，只是程度不同而已。實驗晶片之粗糙度由工研院材料所的表面粗糙度計(Surfcorder，SE1700)量測。

粗糙度計的探針接觸待測物表面並於取樣點附近形有一段距離(Sample Length, L)，對於所接觸的表面其顆粒大小也隨之記錄下來，其紀錄結果如圖 A-1 所示，其中 y 即為表面顆粒大小，單位為 μm 。而在 Sample Length 中最大的顆粒為 R_{\max} ，最小的顆粒為 R_{\min} ，平均粗糙度為 R_a 定義為：



圖附二 表面粗糙度之定義

附錄三 不準度分析

本論文實驗值之不準度分析乃參考 S. J. Kline [56] 所建議的不準度分析方法如下：

法如下：

設有一實驗值 R 是由測量值 x_1 、 x_2 、 x_3 x_n 所計算而來，而這些測量值

各有不準度為 $\frac{\delta x_1}{x_1}$ 、 $\frac{\delta x_2}{x_2}$ $\frac{\delta x_n}{x_n}$ ，R 的誤差量為

$$\delta R = \frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n$$

因為 δx_1 、 δx_2、 δx_n 皆很小，所以 δR 可近似為

$$\delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

所以 R 的不準度可以寫成

$$\begin{aligned} \frac{\delta R}{R} &= \left[\left(\frac{\partial R/R}{\partial x_1/x_1} \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial R/R}{\partial x_2/x_2} \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R/R}{\partial x_n/x_n} \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{\partial \ln R}{\partial \ln x_1} \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln R}{\partial \ln x_2} \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \ln R}{\partial \ln x_n} \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \dots \dots (a) \end{aligned}$$

依照以上公式可以用來分析本實驗所須計算的總熱通量 q''_{total} ，熱損失

q''_{loss} ，過熱度 ΔT ，及熱傳係數 h 。

A. 總熱通量 q''_{total} 是由電流 I 與電壓 V 相乘而得

$$q''_{total} = IV$$

從公式 (a) 可知不準度為

$$\frac{\delta q''_{total}}{q''_{total}} = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2}$$

B. 熱損失 q''_{loss} ，由 3-8 得

$$q''_{\text{loss}} = q_{\text{side}} + q_{\text{bottom}}$$

將鐵氟龍的尺寸代入再使用公式 (a) 可得

$$\frac{\delta q''_{\text{loss}}}{q''_{\text{loss}}} = \sqrt{\left(\frac{\delta A_{\text{side}}}{A_{\text{side}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta A_{\text{bottom}}}{A_{\text{bottom}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta l_{12}}{l_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\delta l_{13}}{l_{13}}\right)^2 + \left(\frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\delta T_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{T_1}{T_1 - T_3} \cdot \frac{\delta T_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\delta T_2}{T_2}\right)^2 + \left(\frac{T_3}{T_1 - T_3} \cdot \frac{\delta T_3}{T_3}\right)^2}$$

C. 真正由加熱片接受的熱量 $q'' = q''_{\text{total}} - q''_{\text{loss}}$ ，用公式 (a) 計算可知不準度為

$$\frac{\delta q''}{q''} = \sqrt{\left(\frac{q''_{\text{total}}}{q''_{\text{total}} - q''_{\text{loss}}} \cdot \frac{\delta q''_{\text{total}}}{q''_{\text{total}}}\right)^2 + \left(\frac{q''_{\text{loss}}}{q''_{\text{total}} - q''_{\text{loss}}} \cdot \frac{\delta q''_{\text{loss}}}{q''_{\text{loss}}}\right)^2}$$

D. 過熱度 ΔT 是由加熱片中的熱電偶所測得之壁溫 T_w 減去 FC-72 在一大氣壓下

的飽和溫度 T_{sat} 而得， $\Delta T = T_w - T_{\text{sat}}$ ，以公式 (a) 分析可得

$$\frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T} = \left[\left(\frac{\delta T_w}{T_w}\right)^2\right]^{1/2}$$

E. 熱傳係數 $h = \frac{q''}{\Delta T}$ ，以公式 (a) 可計算出

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q''}{q''}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2}$$

註：本實驗的不準度分析，如表 4-1 所示。

自 傳

家庭背景

家中成員除了我之外，尚包括雙親、大姊、二姊。父親除了務農外，目前長時間在高雄美濃照顧年邁體弱的爺爺奶奶。父親在鄉下雖然很忙，但是卻常抽空回家和家人相聚；母親是家庭主婦，我們平常回到家時，她都會準備非常豐盛的菜餚，並且常常關心我們的身體和課業。印象最深刻的是，母親在我國小和國中時，都會親自做愛心便當送到學校給我吃，使我覺得非常溫馨；大姊在台灣銀行高雄分行上班。在我高一求學時帶我信主得救，並且常常分享聖經中的故事和召會生活的點滴，使我的求學過程更加充實。二姊在台南新樓醫院上班，在我大學時曾送我一本聖經，並在聖經的第一頁寫上腓立比書四章五至七節送給我。藉著讀聖經，使我在生活中更認識並經歷主。另外，二姊還常常提供生活費及獎學金扶持我，使我能安然讀書。我們家是個基督徒家庭，平常都會參與教會的聚會並邀約聖徒到家裡一起享受心靈饗宴，家庭氣氛非常和諧喜樂，大家也彼此在生活中照顧與扶持，顯得格外溫馨，這是我能好好唸書與做研究的一大動力。

求學過程

在國小及國中階段，懵懂的我不知道讀書的重要性，所以成績不是很理想。後來大姊在升學考試中，考上第一志願—高雄女中，全家族的親人都以她為榮。因著看見大姊在學業上有好的表現，大家都很肯定她，這就激發了我在課業上有

奮發圖強的態度，因著有大姊作我的榜樣，我順利的考上了高雄市立中正高工。

在選填志願時，父親和叔叔們建議我填選冷凍空調科，因為他們都從事冷凍空調的工作，希望我藉著讀冷凍空調科，能傳承他們的事業，因此我就選讀了冷凍空調科。起初我並不是太有興趣，但因著不想讓家人和叔叔們失望，所以很專注於課業，希望能有好的表現。高一結束時，因成績還不錯，就漸漸培養出對冷凍空調的興趣。在高二及高三時，除了專心致力於課業外，小叔更是提供我工讀的機會，作為他的助理，常常和他去裝修及保養冷氣，所以學得許多寶貴的實務經驗。小叔常常鼓勵我要多考一些專業證照，以提升自己的實力，所以我經過許多專業的磨練後，考上了甲種電匠證書、乙種電匠證書、自來水承裝證書、乙級室內配線、丙級室內配線、丙級冷凍空調裝修、丙級電器修護、丙級自來水管配管等八張專業證書及證照。我不僅學得許多理論及得到好成績，再加上有許多寶貴的實務經驗，使我對冷凍空調科越來越有興趣。因此要升大學時，心中就立志要考上全國第一志願，就是台北科技大學的冷凍空調工程系。結果後來很慶幸地以全國第三名考進台北科技大學。

在大學生活中，有一位教會的學長對我說了一些話，因此改變了我整個大學生活。他說，若是想用教會生活和社團活動來充實自己，必須先顧好成績，這樣一方面在人面前有好見證；另一方面也對研究所的推薦甄試入學有很大的幫助。所以我就立定心志在課業上要積極進取，並且積極參與社團活動、系上活動、課外研習及訓練的機會。在課業方面，除了主修冷凍空調工程系之外，也輔修了能

源科技學程及教育學程。由於冷凍空調與能源應用有密不可分的關係，故我選擇修習能源科技學程為第二專長，總共修習三十學分，並獲得能源科技學程專長證書；而教育學程是我的興趣，使我在課程中獲得從事教育的職前訓練，並得到技職教育概論的學分證書。在專題研究方面，我所研究的主題為駐波型熱聲製冷機之實務。在畢業前夕參加全系專題研究競賽，結果獲得全系第一名優等獎。在系上活動方面，我曾擔任過班級班代、系學會師聯組組員。在社團方面，我擔任過新望社創社社長、副社長、活動長及迎新聯誼總召，課餘也在教會擔任志工服事青少年。在課外研習方面，從大一到大四參加四年大專生企業人才培訓研習營，並獲得訓練證書。此課程訓練共分生涯規劃系列、管理規劃系列、人際關係系列、潛能激發系列，共 56 種學分。在這些課程中，使我學到紮實的領導能力、表達能力、如何建立良好的人際關係，並從許多名人身上吸取了他們在生涯規劃及管理規劃的寶貴經驗。另外，我亦投入美國冷凍空調協會(ASHRAE)研習，並獲得研習證書。由於課業成績、名次和綜合表現還不錯，所以在大四上學期甄試考上了交通大學機械工程研究所的熱流組。

在交大讀研究所時，深覺得校園風景真是優美，校地也非常廣大。在課外活動方面，我非常喜愛觀賞一年一度由清華大學出戰交通大學的梅竹賽，特別是這兩年的棒球賽，交大都戲劇性的逆轉勝清華大學，並且連續五年拿下梅竹賽的冠軍，讓我深深以身為交大人為榮。

這兩年除了專心致力於研究及修習熱流組的核心課程外，另外還修習一些半

導體、奈米和光電科技的課程，總共三十三學分，使自己能多充實一些高科技相關的知識。由於在碩一下學期成績還不錯，我很幸運的獲得月光山獎學金兩萬元。我本身就對研究和任教很有興趣，所以在畢業前夕參加博士班考試，於是考上了台灣大學、清華大學、交通大學和成功大學的機械所博士班。對於即將面臨新的環境及研究，我應當要像聖經中腓立比書三章十三節所說的：「忘記背後，努力面前的，向著標竿，竭力追求。」

社團活動暨教會生活

我的社團活動就是甜美喜樂的教會生活。我在主後一九九七年二月四日參加高雄舉辦的高中特會信主得救。在得救的第十年，我終於和姊妹們同心合意的帶領全家蒙恩得救，心中的喜樂真是難言。

在大一時，我很喜樂的搬進台北科技大學的學生中心，和十二位弟兄們一同受成全過教會生活。我們不僅一同在課業上彼此扶持，也在生活中分享如何經歷基督與彼此代禱。詩篇一百三十三篇一節說：「弟兄和睦同居，是何等的善，何等的美！」在我要升大二時，因著有一個負擔要將福音普及整個校園，所以我們常一同禱告並仰望主，求主使我們在校園內有一個社團，可以舉辦許多福音系列的講座及生命之旅，使同學們也能有機會認識這位主耶穌。這位主實在是信實的，不久我們在暑假就正式成立一個社團，名叫「新望社」，意即要「興旺校園的福音」，是「宇宙新人的希望」，是「新耶路撒冷的終極盼望」，也「期盼能帶

給學校新的盼望」。創立社團這年，我擔任了新望社的創社社長，在開學前，我們在陽明山及十五會所舉辦了創社以來的第一次新生命之旅。這次活動來了非常多的同學，並有同學願意信主，成為神家中的一份子。一個多月後，在林口巨蛋體育館舉辦了全台大專福音特會，全場坐滿將近兩萬人，我們邀到了九十多位同學一同和我們去 1027 的福音特會，生命的種子撒在他們的裡面，後來許多同學陸續信主得救，甚至搬進學生中心和我們同受成全。

在課餘時間，有四個在職的家為我們打開，讓我們可以聚餐、讀聖經，他們也十分關心我們的課業與屬靈幸福，我們常常會帶一些學校的同學一起來享受心靈饗宴，漸漸有一些同學就願意接受主，也搬進學生中心和我們一同生活。除了例常性的週中聚餐外，我們每個學期都會舉辦期中及期末特會，使我們能夠更明白神的心意和神永遠的經綸，也使我們的心靈更加充實。

研究所這兩年，我與十六位弟兄同住交通大學的學生中心。我們每天五點多就會起來晨興享受主並為校園福音工作禱告，一方面求主興旺校園的福音；另一方面也為同伴的課業及生活彼此代禱。「聖經研習社」是我們在校園中的社團，我們的社團活動包括社團擺攤、出外踏青、在家庭聚會中享受神的話，也有兩個屬於學生的主日聚會。教會就像是個大家庭，我們有時會和年長聖徒、青職聖徒及青少年聖徒一同聚會，甚至也參與服事青少年聖徒。在大學及研究所時代服事的青少年，現在都在屬靈生命上有成長，這使我心中無比的喜樂。

回想在研究所的生活中常有的景象，就是和服事者及許多弟兄姊妹在一起禱

告及經營校園福音工作。大家雖然課業及研究都非常繁忙，但是我們卻藉著交通與禱告彼此顧惜，主不僅在課業上祝福我們，也祝福了這個校園的福音工作。在短短兩年之內，約有二十位弟兄姊妹住進學生中心。這正如帖撒羅尼迦前書二章十九至二十節所說的：「當我們主耶穌來臨的時候，我們在祂面前的盼望、喜樂或所誇的冠冕是甚麼？不就是你們嗎？因為你們就是我們的榮耀，我們的喜樂。」



學歷與經歷

姓名	蕭淵元	生日	70年9月19日	
籍貫	台灣省高雄縣	聯絡電話	0910-064-036	
研究所	國立交通大學 機械工程研究所			
平均成績	84.8分	修習學分	33學分	
大學	國立台北科技大學 冷凍空調工程學系			
成績	83.6分	修習學分	160學分	
雙輔修	能源科技學程	教育學程		
研究所 畢業論文	介電液 FC-72 在垂直矩形流道 之流動沸騰實驗研究			
大學專題	駐波型熱聲製冷機之實務			
工作經歷	研究所 碩二 微電腦 助教			
	研究所 碩一 熱力學 助教			
	大學 冷凍空調工程師助理			
服務證書 暨 訓練證書	台北科大服務證書 (2000~2004)			
	大專生企業人才訓練證書 (2000~2004)			
	技職教育學分訓練合格證書 (2001)			
	甲種電匠合格證書 (2001)			
	乙種電匠合格證書 (2000)			
	自來水承裝合格證書 (2001)			
	英文小老師聘書 (1997~1998)			
中英文對照 之 技能證照	室內配線	乙級	(2001)	
	室內配線	丙級	(2000)	
	自來水管配管	丙級	(2001)	
	家電修護	丙級	(2000)	
	冷凍空調裝修	丙級	(1999)	
課外活動 與 社團幹部	迎新聯誼 總召	(2003年)	系學會 師聯組 組員 (大學)	
	新望社 創社社長	(2001年)	大專企業人才培訓學員(大學)	
	新望社 副社長	(2002年)	聖經研習社 研習員(研究所)	
	新望社 活動長	(2003年)	班級 班代 (2000)	
	美國 ASHRAE 分會 研習員		教會志工(2000年~2006年)	

座右銘

忘記背後
努力面前
向著標竿
竭力追求