

國 立 交 通 大 學

土 木 工 程 研 究 所

博 士 論 文

多相流於孔隙介質中主要流動機制之微模型實驗與研究

**Experiments and Investigation on the multi-phases flow
mechanism in porous media using micro-model**



研 究 生：陳鴻輝

指導教授：張良正博士

中 華 民 國 九 十 七 年 七 月

多相流於孔隙介質中主要流動機制之微模型實驗與研究

**Experiments and Investigation on the multi phases flow
mechanism in porous media using micro-model**

研 究 生：陳鴻輝

Student : Hung-Hui Chen

指導教授：張良正

Advisor : Liang-Cheng Chang

國 立 交 通 大 學

土 木 工 程 研 究 所



Submitted to Institute of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

in

Civil Engineering

July 2008

Hsin chu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 七 年 七 月

謝誌

將近十年之交通大學土木所博士班學習生涯，博士之研究題目「多相流特性曲線之微模型實驗與分析」對我而言有如八千里路雲和月，不斷摸索，是一場意志力與耐力的競賽，整個過程不斷地挑戰自己潛能的極限。

果不其然，在博士班指導教授張良正老師有系統地規劃我的求學目標並確切地執行後，許多博士程度該擁有的技能便水到渠成般地被培養了出來。這其中包含了英文期刊的寫作能力、對問題抽絲撥繭的邏輯推理能力、報告內容架構嚴謹度、論文獨立研究的能力、出席國際會議的英文表達能力…等，每一項不僅帶給我全新的學習體驗並令我一生受用。正謂「不經一番寒徹骨，那得梅花撲鼻香」，雖需歷經重重辛苦，但卻能換得自我學術境界的提昇。

一般博士論文是否能順利完成其風險是相當的高，所幸博士班蔡瑞彬學弟在我理論研究混沌不明及實驗分析結果撰寫面臨瓶頸時均給了我臨門一腳般的適時幫助。此外，宇文哥在我博士口試時投影片製作技術之經驗傳授；生哥認真負責的工作態度及治學嚴謹保守之風範；小朱在記不清楚有多少假日深夜中患難與共陪伴；小貓計畫執行之能力及處處幫忙解決問題之熱心是我永難忘懷之景象。更難得的是在研究室生活期間與程翔、全佑兩位最佳助理及碩士班學弟對於論文

流程圖及實驗資料圖形處理等均有相當程度的幫助。再者畢業口試時，感謝單教授信瑜、張教授憲國、陳教授主惠、方教授鴻源、吳教授瑞賢、張教授謝淵，對論文提供寶貴意見，並指出論文交代不完整之處，使本文更加完善。

這條博士之路到最後關頭越難熬甚至一度曾因懷疑自己研究能力及興趣而想放棄，但在此時一股神奇力量，由於佛菩薩和師長的加持讓我投稿文章在投稿後九天被 SCI 期刊接受了，終於符合了交通大學博士學位畢業之門檻。

最後僅以此論文獻給我親愛的父親與母親，沒有您們全力的栽培與付出我不會有今日的成就，並由衷地感謝我摯愛的妻子秀女媽媽、大兒子昱宏、小兒子昱廷，謝謝您們在我學習最低潮時，不斷地支持鼓勵我，還有大哥鴻銘、大嫂秋雲、小弟鴻賓、弟媳雅文等在我博士研讀期間之包容與代我照顧爸媽，我以和您們成為家人為榮。

陳鴻輝 謹致於交通大學土木工程研究所

多相流於孔隙介質中主要流動機制之微模型實驗與研究

學生：陳鴻輝

指導教授：張良正博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

有機溶劑被大量的應用於工業製程及一般的生活中，如晶圓製造的清洗，及隨處可見的加油站等，由於其在水中的溶解度甚低，故又稱為非水相液（NAPLs），一般而言，因其毒性高且於自然界中不易被分解，若不慎滲入含水層時，會導致地下水長期的污染，若不慎飲用對人體健康將造成很大的影響，故研究 NAPLs 於地表下的傳輸分佈，乃一重要的課題。惟 NAPLs 在土壤中為複雜的多相流傳輸，其機制複雜且仍有許多問題待進一步的釐清，其中相對滲透係數-飽和度-毛細壓力（ K_r-S-P ）特性曲線，為分析 NAPLs 傳輸最基本也最重要的關係曲線，因此本研究以微模型實驗平台探討非水相液體於孔隙介質中主要流動機制。學術上貢獻如下：(1) **微模型實驗技術開發**：整合高精度雷射雕刻，壓克力表面處理及數位影像分析等技巧，發展微模型實驗平台，以可透視微模型模擬多孔介質，可清楚的觀察到多孔介質中多相流體的流動機制，配合數位影像技術分析實驗所得之影像，可精確的求得介質中各相的飽和度，進而獲得在水、空氣及 NAPLs 等多相共存下之完整 K_r-S-P 關係曲線，由於微模型本身可重複使用，因此整個研究成果之再現性甚佳。(2) **二相流體對微模型實驗之 K_r-S-P 關係**：包括以孔頸尺寸比例組成微模型板實驗平台去證實多相流流動主要特性曲線正確性與適用性；驗證水和空氣二相流之 $P-S$ 微模型實驗，與前人以幾何形狀所推估出來的置換機制門檻值大致吻合；以連通性及潤濕性等解釋多組二相流體對 K_r-S 曲線實驗之遲滯現象；以微模型實驗結果配合 Van Genuchten 特性曲線經驗式互推估二相流體對之 $P-S$ 與 K_r-S 曲線，推估結果良好；以比例原則(Scaling rule) 推估多組二相流體於毛細壓力-飽和度曲線的結果，顯示在水和空氣二相流體對為參考流體對時，推估其他組流體對吻合度最佳。(3) **三相流體共存時之 K_r-S-P 關係曲線**：以微模型實驗取得水、空氣、柴油（LNAPL）和四氯乙烷（DNAPL）各三相共存時之 K_r-S-P 關係曲線，由單一實驗直接得到 K_r-S-P 的關係，此乃前人所無的實驗；本研究同時也發現，在三相共存的情形下，在同組實驗中各相進入多孔介質（微模型）的順序對於 K_r-S-P 關係有一定的影響，且在三相共存時，當非濕潤相之柴油與空氣兩者飽和度的比例不同時，會影響濕潤相的相對滲透。

Experiments and Investigation on the Multi-phase Flow Mechanism in Porous Media Using Micro-models

Student : Hung H. Chen

Professor : Liang C.Chang

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Organic solvents are largely used in manufacturing process such as: the cleaning of solar wafers. They can also be commonly encountered in daily routine at gas stations. The solubility of organic solvents, also known as Non-Aqueous-Phase-Liquids (NAPLs), is low in water. NAPLs are high-toxic and non-decomposable. The infiltration of NAPLs in underground water will cause long term contamination. Eventually the polluted water presents serious threats to human health once it is consumed. Therefore, it is crucial to characterize the transmission and spreading of the NAPLs under the ground surface. The diffusion mechanism of the NAPLs in soil is subtle and can be portrayed as multi-phase flows. The curve demonstrating the relationships between relative permeability, saturation, and capillary pressure ($K_r - S - P$) of NAPL plays a pivotal role in revealing the transmission of NAPLs in the ground. This study utilizes the perspective micro-model to examine the micro-behavior of multi-phase flows in porous media and obtains the corresponding curves between relative permeability, saturation, and capillary pressure between every two and three phases of water, air, LNAPL and DNAPL. The major accomplishments of this study include three parts: (1) Developing experimental micro-model techniques. A laboratory testing bed of micro-models are established integrating high precision carving machines, surface treatment apparatus of acrilans, and image process engines to clearly observe the phenomenon of the multi-phase flow in the micro-model. All of the experimental results are video taped using digital camcorders. Moreover, by using laser tools, a large number of porous media subject to identical conditions can be generated allowing numerous comparative sets of specific

experiment. The saturation of each phase is computed once the digital image analysis is performed at images. The research results are highly reproducible owing to the repeatable micro-model technique.. (2) Quantifying the $K_r - S - P$ curves in two-phase flow. The validity and adaptability of multi-phase curves are verified using micro-model testing bed tailored to adequate scale of pores. Results obtained from the P-S micro-model tests generally agree with the threshold values of displacement mechanism offered by researchers using geometric shapes. The hysteresis of experimental $K_r - S$ curves of numerous two-phase flows are depicted in terms of connectivity and humidification. The P-S and $K_r - S$ curves of two-phase flow are well-derived in conjunction with micro-model test results and empirical van Genuchten model. For the curve expressing the relation between saturation and capillary pressure, experimental results of water-air flow system corresponds to the theoretical data. Additionally, the proportion derived from the scaling rule is congruous to the experimental data. (3) Deriving the $K_r - S - P$ curves at the co-existence of three-phase flow. This study successfully obtains the experimental micro-model data showing the $K_r - S - P$ curves that include the water, air, LNAPL and DNAPL are coexist. No such effort has ever been attempted. The experimental results also show that the sequence of entering into the micro-model for the three phases will have certain impact at the $K_r - S - P$ relation. It is remarkable that the relative permeability of wetting phase varies with varying percentage of saturation of the non-wetting diesel and air in three phase co-existence case.

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	XVI
第一章 緒論.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧	3
1-3 研究方法	9
1-4 本文架構.....	12
第二章 相關理論	13
2-1 多相流於孔隙介質中之特性曲線	13
2-2 比例原則	22
2-3 孔頸置換機制	23
2-3-1 排退機制	23
2-3-2 汲取機制	25
第三章 微模型實驗系統開發	33
3-1 微模型實驗系統概述	33
3-2 微模型板設計製作	36
3-3 壓力控制系統概念說明.....	45
3-4 影像擷取分析概念說明	46
第四章 二相流置換機制之微模型實驗與分析	48
4-1 置換機制實驗.....	48
4-2 置換機制推估與實驗觀察比較分析	53

第五章 二相流體 K_r -S- P 關係曲線之微模型實驗與分析.....	74
5-1 P~S 曲線與 K_r -S 曲線微模型實驗概述.....	74
5-2 K_r -S 曲線實驗結果與遲滯現象觀察	76
5-3 P~S 實驗值與比例原則(Scaling rule)推估值之比較	93
5-4 K_r -S 曲線與 P~S 曲線之相互推估與比較結果.....	116
第六章 三相流體 K_r -S- P 關係曲線之微模型實驗與分析.....	122
6-1 微模型實驗.....	122
6-2 實驗結果分析.....	132
第七章 結論與建議.....	170
7-1 結論.....	170
7-2 建議.....	172
參考文獻.....	173
附錄一 多相流數值模擬模式 NAPL Simulator 介紹.....	179
附錄二 二相流體 P~S 曲線之孔頸網絡模式模擬.....	195
附錄三 工研院分析表面張力資料.....	202

圖目錄

圖1-1	破損之地下油槽於地下水位上之滲漏.....	2
圖1-2	有機液體污染示意圖.....	3
圖1-3	二維玻璃珠微模型實驗俯視圖.....	7
圖1-4	(A)四邊形孔隙網絡之微模型(B)六邊形孔隙網絡之微模型.....	7
圖1-5	孔頸微模型示意圖.....	8
圖1-6	整體研究方法流程圖.....	10
圖2-1	水對不同固體表面的濕潤程度(a)水為濕潤相流體，(b)水為非濕潤相 流體.....	15
圖2-2	一滴液體落在光滑表面上並與空氣相接觸時，兩兩相間界面張力向量 平衡示意圖.....	16
圖2-3	液體飽和度與毛細壓力關係.....	18
圖2-4	液體飽和度與相對滲透係數之關係.....	20
圖2-5	凸界面在矩形斷面定型通道中的活塞型運動.....	24
圖2-6	單一孔隙中二相流體(綠色是水,白色是NAPLs)之平衡位置分佈(a)初始 水佔滿孔隙(b)自發性汲取(c)強力性汲取(d)被強力汲取有NAPLs層.....	26
圖2-7	圓柱與非圓柱形角隅流現象之比較毛細壓的關係.....	26
圖 2-8	潤濕薄膜流位於孔壁中(a)真實孔隙方形介質的橫斷面 (b)模式假想孔 隙方形介質的橫斷面.....	26
圖2-9	攪斷置換發生時非濕潤相頸管內之角隅濕潤相的成長過程，(上)側視圖 (下)剖面圖：(a)毛細壓力較高時的初始狀態；(b)中間狀態；(c)攪斷將 發生時的臨界狀態；(d)攪斷發生後的最終狀態.....	28
圖2-10	Lenormand et al.(1983)的二維毛細管模型之(a) I1型汲取(b)I2型汲取	

臨界面界面示意圖.....	30
圖3-1 微模型實驗系統立面組合圖.....	35
圖3-2 壓克力化學結構式.....	37
圖3-3 孔頸單元細部放大圖.....	38
圖3-4 P-S 微模型示意圖示意圖.....	39
圖3-5 K_r -S 微模型示意圖示意圖.....	40
圖3-6 組裝完成之微模型示意圖.....	41
圖3-7 微模型凹槽剖面示意圖.....	41
圖3-8 雷射功率、加工速度和PPI.....	42
圖3-9 (a) A組矽酸鈉使用前.....	44
圖3-9 (b) A組矽酸鈉使用後.....	44
圖3-10 (a) B組 矽酸鈉使用前.....	45
圖3-10 (b) B組矽酸鈉使用後.....	45
圖3-11 微模型實驗系統壓力控制圖.....	46
圖4-1 置換機制實驗研究步驟大綱.....	48
圖4-2 置換機制研究流程圖.....	49
圖4-3 兩相間置換機制實驗步驟流程圖.....	51
圖4-4 置換機制實驗微模型示意圖.....	52
圖4-5 壓力控制系統(游標尺)示意圖.....	53
圖4-6-1 微模型孔頸寬度分佈圖.....	57
圖4-6-2 排退第一階段.....	57
圖4-7 排退第六階段.....	57
圖4-8 排退第七階段.....	57

圖4-9	排退第九階段.....	58
圖4-10	排退第十階段.....	58
圖4-11	排退第十一階段.....	58
圖4-12	排退第十二階段.....	59
圖4-13	排退第十三階段.....	59
圖4-14	排退第十四階段.....	59
圖4-15	排退第十五階段.....	60
圖4-16	排退第十六階段.....	60
圖4-17-1	微模型孔頸寬度分佈圖.....	64
圖4-17-2	汲取第一階段.....	64
圖4-17-3	汲取第一階段結束.....	64
圖4-18-1	微模型孔頸寬度分佈圖.....	65
圖4-18-3	汲取第四階段.....	65
圖4-19-1	微模型孔頸寬度分佈圖.....	66
圖4-19-2	汲取第九階段.....	66
圖4-19-3	汲取第九階段.....	66
圖4-19-4	汲取第九階段.....	66
圖4-20-1	微模型孔頸寬度分佈圖.....	67
圖4-20-2	汲取第十二階段.....	67
圖4-20-3	汲取第十二階段.....	67
圖4-20-4	汲取第十二階段.....	67
圖4-21-1	微模型孔頸寬度分佈圖.....	68
圖4-21-2	汲取第十四階段.....	68

圖4-21-3 汲取第十四階段	68
圖4-21-4 汲取第十四階段	68
圖4-22-1 微模型孔頸寬度分佈圖	69
圖4-22-2 汲取第十六階段	69
圖4-22-3 汲取第十六階段	69
圖4-22-4 汲取第十六階段	69
圖4-22-5 汲取第十六階段	69
圖4-22-6 汲取第十六階段	69
圖4-22-7 汲取第十六階段	70
圖4-23-1 微模型孔頸寬度分佈圖	70
圖4-23-2 汲取第十七階段	70
圖4-23-3 汲取第十七階段	70
圖4-23-4 汲取第十七階段	70
圖4-23-5 汲取第十七階段	71
圖4-24-1 微模型孔頸寬度分佈圖	71
圖4-24-2 汲取第十九階段	71
圖4-24-3 汲取第二十階段	71
圖4-25 五種寬度的孔與5種寬度頸管網絡模型實驗P-S曲線圖	72
圖5-1 K_r -S實驗排退過程第一階段	79
圖5-2 K_r -S實驗排退過程第二階段	80
圖5-3 K_r -S實驗排退過程第三階段	80
圖5-4 K_r -S實驗排退過程第四階段	81

圖5-5	K_r -S實驗排退過程第五階段.....	81
圖5-6	K_r -S實驗排退過程第六階段.....	82
圖5-7	K_r -S實驗排退過程第七階段.....	82
圖5-8	K_r -S實驗排退過程第八階段.....	83
圖5-9	K_r -S實驗排退過程第九階段.....	83
圖5-10	K_r -S實驗汲取過程第一階段.....	84
圖5-11	K_r -S實驗汲取過程第二階段.....	84
圖5-12	K_r -S實驗汲取過程第三階段.....	85
圖5-13	K_r -S實驗汲取過程第四階段.....	85
圖5-14	K_r -S實驗汲取過程第五階段.....	86
圖5-15	K_r -S實驗汲取過程第六階段.....	86
圖5-16	K_r -S實驗汲取過程第七階段.....	87
圖5-17	K_r -S實驗汲取過程第八階段.....	87
圖5-18	K_r -S實驗汲取過程第九階段.....	88
圖5-19	水相對空氣相的 k -S實驗曲線.....	88
圖5-20	LNAPL相對空氣相的 K_r -S實驗曲線.....	89
圖5-21	DNAPL相對空氣相的 K_r -S實驗曲線.....	89
圖5-22	水相對LNAPL相的 K_r -S實驗曲線.....	90
圖5-23	水相對DNAPL相的 K_r -S實驗曲線.....	90
圖5-24	排退階段之 Kr - S 實驗曲線(五組流體對).....	91
圖5-25	汲取階段之 Kr - S 實驗曲線(五組流體對).....	91
圖5-26	Kr - S 曲線對水-柴油流體對 (a) 排退階段 $S=0.769$ (b) 汲取	

階段 $S=0.767$ (c) 排退階段 $S=0.622$ (d) 汲取階段 $S=0.619$	92
圖5-27 P-S實驗排退過程第一階段.....	96
圖5-28 P-S實驗排退過程第二階段.....	96
圖5-29 P-S實驗排退過程第三階段.....	97
圖5-30 P-S實驗排退過程第四階段.....	97
圖5-31 P-S實驗排退過程第五階段.....	98
圖5-32 P-S實驗排退過程第六階段.....	98
圖5-33 P-S實驗排退過程第七階段.....	99
圖5-34 P-S實驗排退過程第八階段.....	99
圖5-35 P-S實驗排退過程第九階段.....	100
圖5-36 P-S實驗排退過程第十階段.....	100
圖5-37 P-S實驗汲取過程第一階段.....	101
圖5-38 P-S實驗汲取過程第二階段.....	101
圖5-39 實驗汲取過程第三階段.....	102
圖5-40 P-S實驗汲取過程第四階段.....	102
圖5-41 P-S實驗汲取過程第五階段.....	103
圖5-42 P-S實驗汲取過程第六階段.....	103
圖5-43 P-S實驗汲取過程第七階段.....	104
圖5-44 P-S實驗汲取過程第八階段.....	104
圖5-45 P-S實驗汲取過程第九階段.....	105
圖5-46 P-S實驗汲取過程第十階段.....	105
圖5-47 水-空氣推估柴油-空氣之比例值與實驗值.....	106
圖5-48 水-空氣推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值.....	106

圖5-49	水-空氣推估水-柴油之比例值與實驗值.....	107
圖5-50	水-空氣推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值.....	107
圖5-51	柴油-空氣推估水-空氣之比例值與實驗值.....	108
圖5-52	柴油-空氣推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值.....	108
圖5-53	柴油-空氣推估水-柴油之比例值與實驗值.....	109
圖5-54	柴油-空氣推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值.....	109
圖5-55	四氯乙烷-空氣推估水-空氣之比例值與實驗值.....	110
圖5-56	四氯乙烷-空氣推估柴油-空氣之比例值與實驗值.....	110
圖5-57	四氯乙烷-空氣推估水-柴油之比例值與實驗值.....	111
圖5-58	四氯乙烷-空氣推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值.....	111
圖5-59	水-柴油推估水-空氣之比例值與實驗值.....	112
圖5-60	水-柴油推估柴油-空氣之比例值與實驗值.....	112
圖5-61	水-柴油推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值.....	113
圖5-62	水-柴油推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值.....	113
圖5-63	水-四氯乙烷推估水-空氣之比例值與實驗值.....	114
圖5-64	水-四氯乙烷推估柴油-空氣之比例值與實驗值.....	114
圖5-65	水-四氯乙烷推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值.....	115
圖5-66	水-四氯乙烷推估水-柴油之比例值與實驗值.....	115
圖5-67	水相對空氣相 K_r -S曲線和經驗公式之比較.....	117

圖5-68	LNAPL相對空氣相 K_r -S曲線和經驗公式之比較.....	117
圖5-69	DNAPL相對空氣相 K_r -S曲線和經驗公式之比較.....	118
圖5-70	水相對LNAPL相 K_r -S曲線和經驗公式之比較.....	118
圖5-71	水相對DNAPL相 K_r -S曲線和經驗公式之比較.....	119
圖5-72	水相對空氣相P-S曲線和經驗公式之比較.....	119
圖5-73	LNAPL相對空氣相P-S曲線和經驗公式之比較.....	120
圖5-74	DNAPL相對空氣相P-S曲線和經驗公式之比較.....	120
圖5-75	水相對DNAPL相P-S曲線和經驗公式之比較.....	121
圖6-1	三相共存時 K_r -S-P關係曲線之研究流程.....	123
圖6-2	K_r -S-P實驗步驟流程.....	124
圖6-3	K_r -S-P微模型板示意圖(a)量測水之相對傳導係數微模型板裝置(b)量 測水之相對傳導係數微模型板裝置.....	130
圖6-4	K_r -S-P實驗配置整體示意圖.....	131
圖6-5	K_r -S-P實驗之P-S階段裝置.....	131
圖6-6	K_r -S-P實驗之 K_r -S階段裝置.....	132
圖6-7	P-S實驗排退過程第一階段.....	144
圖6-8	P-S 實驗排退過程第三階段.....	144
圖6-9	P-S 實驗排退過程第四階段.....	145
圖6-10	P-S實驗排退過程第五階段.....	145
圖6-11	P-S實驗排退過程第六階段.....	146
圖6-12	P-S實驗排退過程第七階段.....	146
圖6-13	P-S實驗排退過程第八階段.....	147
圖6-14	P-S實驗排退過程第九階段.....	147

圖6-15	P-S 實驗排退過程第十階段.....	148
圖6-16	P-S實驗排退過程第十一階段.....	148
圖6-17	P-S實驗排退過程第十二階段.....	149
圖6-18	P-S實驗汲取過程第一階段.....	149
圖6-19	P-S實驗汲取過程第二階段.....	150
圖6-20	P-S實驗汲取過程第三階段.....	150
圖6-21	P-S實驗汲取過程第四階段.....	151
圖6-22	實驗汲取過程第五階段.....	151
圖6-23	實驗汲取過程第六階段.....	152
圖6-24	實驗汲取過程第七階段.....	152
圖6-25	實驗汲取過程第八階段.....	153
圖6-26	W-O-A 情況時 P_{ow} 與水飽和度的關係.....	153
圖6-27	W-O-A 情況時 P_{aw} 與水飽和度的關係.....	154
圖6-28	W-O-A 情況時 P_{ao} 與水飽和度的關係.....	155
圖6-29	W-O-A 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係.....	155
圖6-30	W-A-O 情況時 P_{aw} 與水飽和度的關係.....	156
圖6-31	W-A-O 情況時 P_{ow} 與水飽和度的關係.....	156
圖6-32	W-A-O 情況時 P_{ao} 與水飽和度的關係.....	157
圖6-33	W-A-O 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係.....	157
圖6-34	W-D-A 情況 P_{dw} 與水飽和度的關係.....	158
圖6-35	W-D-A 情況 P_{aw} 與水飽和度的關係.....	158
圖6-36	W-D-A 情況 P_{ad} 與水飽和度的關係.....	159
圖6-37	W-D-A 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係.....	159

圖6-38	W-A-D 情況 P_{aw} 與水飽和度的關係.....	160
圖6-39	W-A-D 情況 P_{dw} 與水飽和度的關係.....	160
圖6-40	W-A-D 情況 P_{ad} 與水飽和度的關係.....	161
圖6-41	W-A-D 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係.....	161
圖6-42	O-A-W 情況 P_{ao} 與油飽和度的關係.....	162
圖6-43	O-A-W 情況 P_{ow} 與油飽和度的關係.....	162
圖6-44	O-A-W 情況 P_{aw} 與油飽和度的關係.....	163
圖6-45	O-A-W 情況時相對滲透係數與油飽和度的關係.....	163
圖6-46	O-W-A 情況 P_{ow} 與油飽和度的關係.....	164
圖6-47	O-W-A 情況 P_{ao} 與油飽和度的關係.....	164
圖6-48	O-W-A 情況 P_{aw} 與油飽和度的關係.....	165
圖6-49	O-W-A 情況時相對滲透係數與油飽和度的關係.....	165
圖6-50	WOA-WAO 情況壓力-飽和度關係.....	166
圖6-51	WAD-WDA 情況壓力-飽和度關係.....	166
圖6-52	OWA-OAW 情況壓力-飽和度關係.....	167
圖6-53	WOA-WAO 相對滲透係數比較.....	167
圖6-54	WDA-WAD 相對滲透係數比較.....	168
圖6-55	OAW-OWA 相對滲透係數比較.....	168
圖6-56	EX_woa與Parker比較.....	169
圖6-57	EX_wao與Parker比較.....	169

表目錄

表 2-1	於攝氏 25 度時，固體-液體-氣體(空氣)交界面之接觸角	14
表 3-1	試驗液體之重要性質	35
表 3-2	孔隙與通道寬度表 (單位：mm)	38
表 3-3	各種寬度之孔隙、通道的個數及面積	38
表 4-1	五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型之孔隙與通道寬度	50
表 4-2	五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型之各種寬度之孔隙、通道的個數及面積.....	50
表 4-3	五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗之各種置換機制理論毛細壓推估值(排退階段).....	55
表 4-4	五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗置換機制統計表(排退階段).....	56
表 4-5	五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗之各種置換機制理論毛細壓推估值(汲取階段).....	62
表 4-6	五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗置換機制統計表(汲取階段).....	63
表 5-1	各流體對間之界面張力及所對應之毛細壓力差	93
表 5-2	各參考流體對與推估值之比例因子	94
表 6-1	三相流中雙重取代的情況	133

第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

由於工業的發展，使得電鍍、石化、電子晶圓產業等所使用之有機溶劑如三氯乙烯 (Trichloroethylene, TCE)、四氯乙烯 (Tetrachloroethylene, PCE) 及三氯乙烷 (Trichloroethane, TCA) 等大量被使用，同時也造成廢液量急遽增加，而此廢液在自然界不易分解且有劇毒性，一旦使用不當而滲入含水層時(圖 1-1 及圖 1-2)，極易導致地下水長期的污染 (Bedient et al. 1994; 黃進富, 1996)。此類有機溶劑於水中溶解度低且在常溫下以液相存在，因此又稱為非水相液 (Nonaqueous Phase Liquid, NAPL)，其可分類為比重比水輕之輕質非水相液 (Light Nonaqueous Phase Liquid, LNAPL) 及比重比水重之重質非水相液 (Dense Nonaqueous Phase Liquid, DNAPL) (圖 1-2)，而不論是對於輕質非水相液 (LNAPL) 或是重質非水相液 (DNAPL) 的污染程度評估或後續整治，了解其在土壤中之宿命及流動過程 (Fate and Transport Process) 為極重要之關鍵 (Palmer and Johnson, 1989)。

當 NAPL 在土壤孔隙中流動，與空氣及水會一起而形成多相流，其流動機制相當複雜，目前除了現地調查試驗及數值模式模擬外，室內實驗如砂箱試驗及微模型實驗等，均為了解含非水相液之多相流在土壤中流動及分佈的重要方法。其中描述各相間(水、空氣、NAPL)互相取代現象的特性曲線為模擬多相流流動的關鍵 (Oostrom et al., 1998)，特性曲線常以 K_r -S-P 的函數關係表示，其中 K_r 為相對滲透係數 (Relative permeability)、S 為飽和度 (Saturation)、P 為毛細壓力 (Capillary pressure)。對於多相流特性曲線實驗探討，截至目前為止，國內外研究文獻並不多見。傳統上在探討複雜之多相流相 K_r -S-P 關係時，多採個別進行 P-S 與 K_r -S 模擬，再以模擬結果配合經驗公式迴歸出 P-S 與 K_r -S 的關係式，接著再藉由連結此兩關係式間接得到 K_r -S-P 的關係；惟對任一相同的 S 而言，各別的 K_r -S 與 P-S 模擬時，未考慮各相流體的分佈不一定相同，因此藉由此種間接方式連貫成 K_r -S-P 函數關係，往往與實驗中同時量測 K_r 、S 與 P 所得之 K_r -S-P 實驗結果不同，因此需要更多室內相關多相流特性曲線之基本實驗資料，以對多

相流於於孔隙介質之主要流動機制能更清楚掌握。

在室內實驗方面，以往常採用砂箱實驗來進行多相流特性曲線，但因其有實驗過程不易控制、實驗重複性差及不可透視等缺點。為克服上述缺點，相關學者提出以可透視的微模型做為探討含非水相液之多相流流動的實驗平台，此類微模型為以可透視之材料如玻璃或壓克力等，再以各種技術雕刻出各種孔隙分佈，因此具有高度可控性及可重複性，並可實際觀察流體的各種流動行為，為進行各種多相流實驗研究的良好平台。

因此，本研究目的是為發展一新的可透視微模型的實驗平台，並以其進行含非水相液之多相流於孔隙介質中流動之實驗研究，包括多相共存時之 K_r -S-P 關係曲線實驗及其流動機制的觀察。

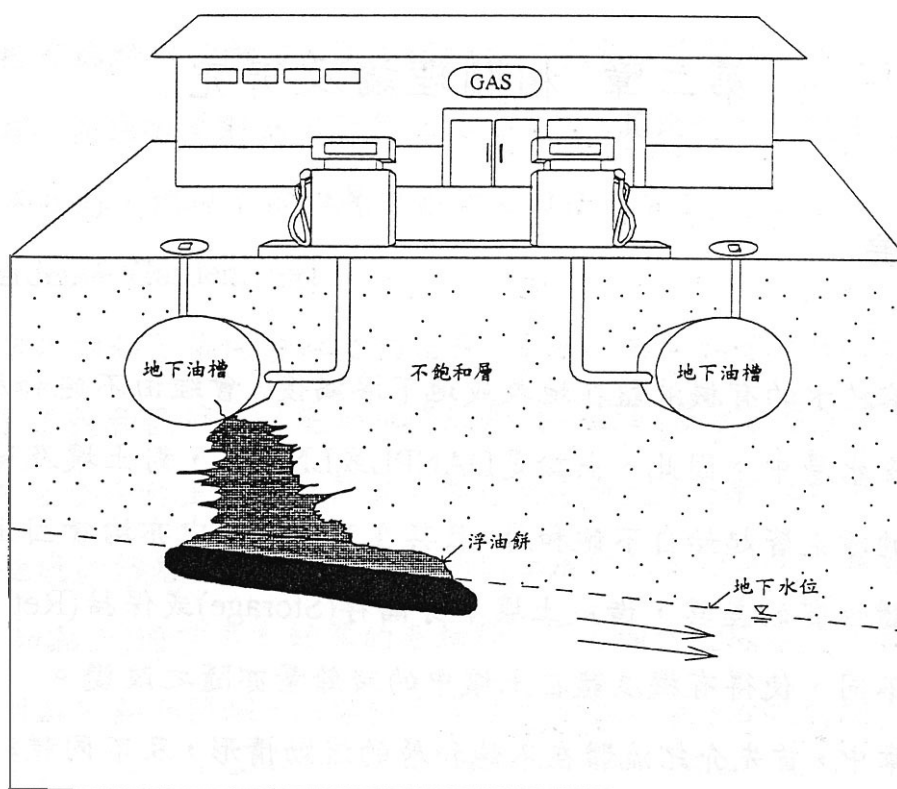


圖 1-1 破損之地下油槽於地下水位上之滲漏（黃進富,1996）

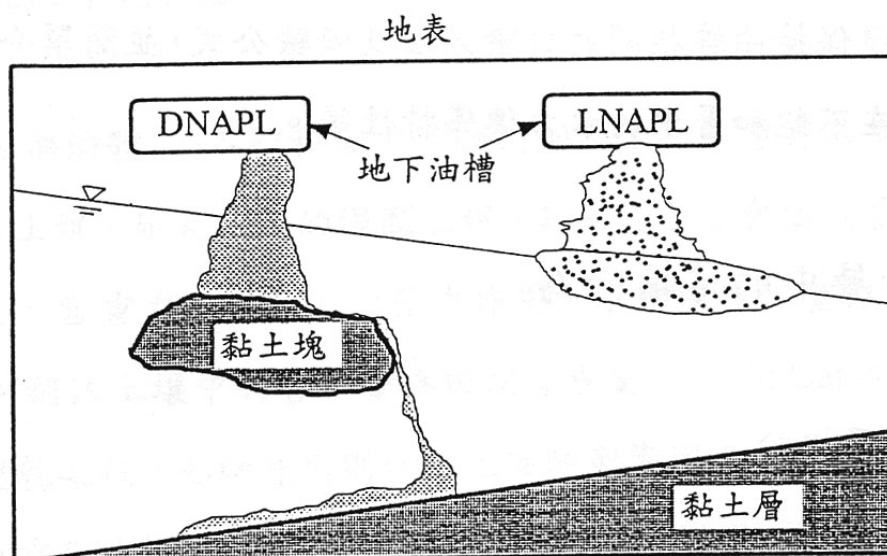


圖 1-2 有機液體污染示意圖 (黃進富,1996)

1-2 文獻回顧

包含非水相液之多相流體在地表下之流動行為是一個非常複雜過程，而以相對滲透係數(K_r)、飽和度(S)、毛細壓力(p)等參數關係之描述對了解污染物在土壤孔隙介質中流動分布是一種很有效方式。大部分欲求得多相流 K_r - S - P 曲線所採用的方法為先量測二相流的 P - S 曲線關係，再以尺度原則 (Scaling rule) 推算三相流的特性曲線。Lenhard and Parker(1987)提出對相同的孔隙介質(土壤)，若利用某一參考的流體對(通常為“水-空氣”系統)在該介質中的毛細壓力與飽和度的關係曲線為基礎流體對，再根據其他流體對與該流體對間之界面張力的比例因子(Scaling factor, β)，可得到其它流體對的 P - S 曲線關係。雖然部分學者認為實驗結果顯示尺度原則並不可行，如 Calhoun (1949)發現在不同的飽和度時，不同流體間，其毛細壓力的比值並非都是常數，而有機質的存在或溶劑，其親水性質或脫水性質也會影響經尺度原則出來的結果(Stevenson, 1982；Boyd,1991)。但多數模擬模式仍是應用尺度原則將二相所得實驗資料推展成三相流，藉此來預測三相流的情況(Stone, 1973；Aziz & Settari,1979)。多相流流動與分佈的模式模擬，其正確性不但與求解控制方程式的運算邏輯以及在空間上所切割的格網大小有關，且與所使用的 K_r - S - P 關係之正確性亦有相當大的影響。當數值模式已能夠

求解複雜的微分方程式時，則 K_r -S-P 關係的正確性，將對模擬孔隙介質中 NAPLs 移動的精確度有重大影響(Oostrom and Lenhard, 1998)。

過去十年中對多相流流動研究，包括考慮不同因子對 K_r -S-P 函數關係之影響及比例原則(scaling rules)等理論對模擬多相流流動影響研究之文獻(Busby et al. 1995; Bradford et al. 1996)。Fagerlund et al. (2006) 曾應用不同 K_r -S-P 經驗模式模擬 NAPL 流動行為，其研究主要結論是：若孔隙介質考慮形狀因子，則模擬 NAPL 流動行為包括 Brooks-Corey-Burdine 模式和 van Genuchten-Mualem 模式，模擬結果皆與實驗值有很好的吻合度。

張良正等 (2001) 運用最新的 NAPL 模擬模式(NAPL Simulator)(Guarnaccia and Pinder, 1997)，以一虛擬砂箱系統，依據實驗所得之保持特性曲線資料(鄭淑華, 1997) (K_r -S-P 關係)，探討遲滯效應與尺度原則對孔隙介質中之 NAPLs 傳輸模擬的影響。其模擬結果顯示，不論是 DNAPL 或是 LNAPL，忽略遲滯效應模擬所得之 NAPL 注入量均大於考慮遲滯效應之注入量，並且分佈範圍較廣；另外初始水分含量之分佈及尺度原則的正確性，均會對模擬結果有相當影響，其中尤以尺度原則之影響最為顯著。以空氣-水為參考流體對時，經由尺度原則所求得其它流體對之特性曲線與實際實驗值之誤差為最小，另由 DNAPL 的模擬結果顯示，不論是否有考慮遲滯效應，以空氣-水為參考流體對所推估的 NAPL 注入量也最多，因此，若欲應用尺度原則於 NAPLs 之模擬，以 GW 為參考流體對應是保守而合理的選擇。

許多文獻指出，影響 K_r -S-P 曲線本身正確性，有許多因子如初始含水量，土壤顆粒表面與流體之濕潤性，流體和土壤顆粒介質間接觸角，土壤孔隙形狀及分佈，流體性質(如黏滯度，密度)，界面張力，重力，土壤孔隙介質異質性，遲滯現象等因子均會影響 K_r -S-P 曲線之預測結果(Baker 1988; Hassanizadeh et al. 2002; Theodoropoulou et al., 2003; Das et al. 2004; Ishakoglu et al. 2005; Hilfer 2006)。Li et al. (2004) 提出比例原則模式 (scaling model)，指出當考慮相對傳導係數、毛細壓力及重力等三項因子，可由比例原則得出與汲取實驗曲線極類似結果。Li (2007) 更加上考慮潤濕性因子將比例原則模式進一步模擬應用於土壤特性曲線。另一方面，van Dijke et al. (2002) 曾提出於三相共存系統時，考量界面

張力，潤濕性等因子下，三相流體於孔隙佔有率及相對傳導性等之研究，他們特別強調這方面的模擬探討尚待實驗值去驗證模擬結果以提高模擬可信度。

以往對 K_r -S-P 之實驗研究，包括有污染場址之現地調查、室內砂箱實驗、微模型實驗等。在這些不同形式實驗研究中，NAPL 污染場址現地實驗調查是一項極耗時、昂貴且常常是極不準確之進行方式 (Demond et al.,1993)。在三相流系統中，在三相流系統中，要獲得可靠、確實的 K_r -S-P 實驗值是很耗費時間，且需要運用精密的實驗方法才能求得(Baker,1988；Delshad and Pope,1989；Demond and Roberts,1993)。

室內砂箱實驗是傳統上被採用來檢視 P-S 與 K_r -S 特性曲線關係的實驗如求 P-S 關係的張力平板裝置 (Suction plate Assembly) (Haines,1930)，及壓力儀 (Pressure Cell) (Garden,1956；Su et al., 1980；黃進富,1996)，而以砂箱求得 K_r -S 關係有 (Demond et al.,1993) 等。Demond and Roberts (1993)以砂箱實驗進行“非水液相-水”兩相的 K_r -S 實驗，該研究之砂箱介質為石英砂，實驗作法是將非水液相注入充滿水的試體內，量測當砂箱中水飽和度減少時，水的相對滲透係數 (Relative permeability)的變化。由於砂箱實驗是不可透視的，因此亦無法觀察到實驗進行過程如排退與汲取過程時非水相液的分佈情形。當時並未作到“空氣-水”、“非水液相-空氣”等 K_r -S 關係之實驗。然而因為砂箱實驗有先天上操作控制不易、砂箱孔隙介質不可透視性、實驗結果準確性低，且缺乏實驗重複性等缺點(Soll et al.,1993)。

為了解決上述砂箱實驗之諸多不確定性，而人造孔隙介質具有可透視之實驗平台，可以觀察到孔隙尺度下之液體流動行為，因此近年有一些研究文獻是以人造孔隙介質實驗作特性曲線關係探討，包括有玻璃珠 (Glass Bead) 所堆疊而成者如圖1-3 (Corapcioglu et al., 1999)；以均勻的四邊形、六邊形顆粒所構成的孔隙網絡通道如圖1-4 (Wan et al.,1994) 者；亦有以隨機產生孔隙，孔隙間再以寬度大小不同的通道連接的微模型如圖1-4及圖1-5 (Soll et al., 1993； Jia et al., 1999) 等。

微模型主要的概念是代表孔頸網絡連接之介質結構，以往在應用微模型所作的研究方面，多以觀察不同流體間的交互作用行為，或是水溶性污染物的污染

傳輸行為。早期微模型板發展大半是以化學酸蝕玻璃隨機產生孔隙通道組成，以此種蝕刻方式之微模型板所作研究如 Corapcioglu et al.(1997)以特定幾何形狀化學蝕刻作成之微模型去觀察 NAPLs 流動時入陷機制。Jia et al. (1999) 以化學蝕刻玻璃珠微模型，再應用影像分析技術量化水溶性污染物置換行為及溶質傳輸行為，並比較實驗值與數值模擬結果。Wan 等(1996)以化學蝕刻玻璃產生的微模型進行模擬岩石裂縫之“水-空氣”兩相的 P-S 實驗，其微模型中以隨機產生 30-300 μm 長度與寬度之孔隙，微模型尺寸為 8×25 mm，以染色過的水相由微模型板中央進入而去排退空氣相。其實驗只進行“水-空氣”兩相 P-S 實驗，並未探討包含非水液相之兩相 P-S 實驗。

Soll(1993)以微模型探討三相流的毛細壓力與飽和度(P-S)的關係，不過由於當時工藝技術的關係，它的微模型板是以化學酸蝕玻璃隨機產生孔隙，無法精確的掌握孔隙的形狀及深度，飽和度的計算是採用相機取得影像，再以幻燈片互相比對的方式計算出結果。Soll 當時僅探討毛細壓力與飽和度之關係，並未對相對滲透係數及飽和度之關係有進一步之研究。

Heiba (1984)所發展網狀微模型並使用滲流公式計算三相流體的相對滲透係數，所發展的模型的孔隙大小差異不大與真實的多孔介質的孔隙分布不同，其實驗是將非水液相、空氣施壓注入微模型內，改變微模型內水的飽和度，量測水的相對滲透係數而得出 K_r -S 關係曲線。Delshad and Pope (1989) 所進行的三相相對滲透係數實驗與 Heiba (1984) 方法類似，皆以玻璃為微模型之基材，但所量測為非水液相的相對滲透係數。兩者不同之處在於微模型的流體出口處，以親油性的薄膜包覆使非水液相可順利流出，將水與空氣留在微模型內防止水與空氣流出。

呂元鈞 (2002)以雷射雕刻技術產生微模型，進行可透視之微模型實驗。探討“水-空氣”、“水-非水液相”、“非水液相-空氣”等不同流體對的 P-S 與 K_r -S 關係。並應用 Van Genuchten 經驗公式，配合實驗中所得之數據，迴歸出經驗公式之曲線與實驗之 K_r -S 關係，並透過共同參數貫串求得兩相 K_r -S-P 關係。張良

正、蔡瑞彬、陳鴻輝(2003) 採用矩形斷面孔頸網絡模型之微模型孔頸幾何形狀，除了進行兩相的空氣-水 P-S 實驗外更進行流體對間置換機制包括排退與汲取的觀察與比較，同時也對理論置換機制於微模型之正確性與適用性作探討。

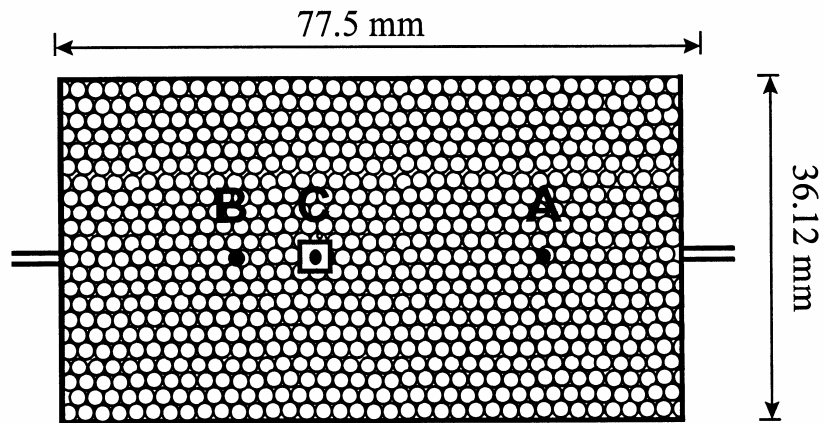


圖 1-3 二維玻璃珠微模型實驗俯視圖

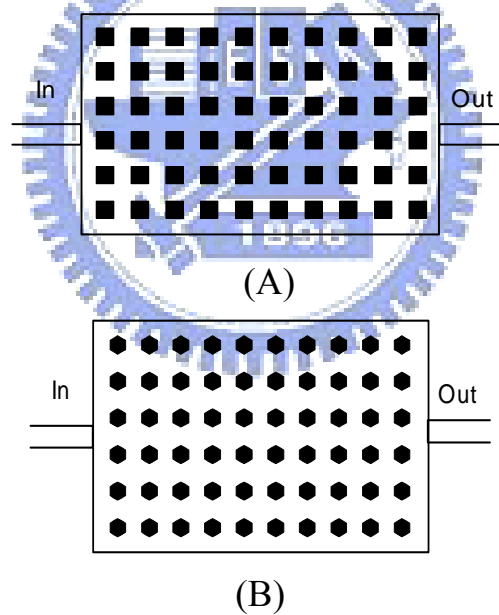


圖 1-4 (A)四邊形孔隙網絡之微模型(B)六邊形孔隙網絡之微模型

(Corapcioglu and Fedirchuk,1999)

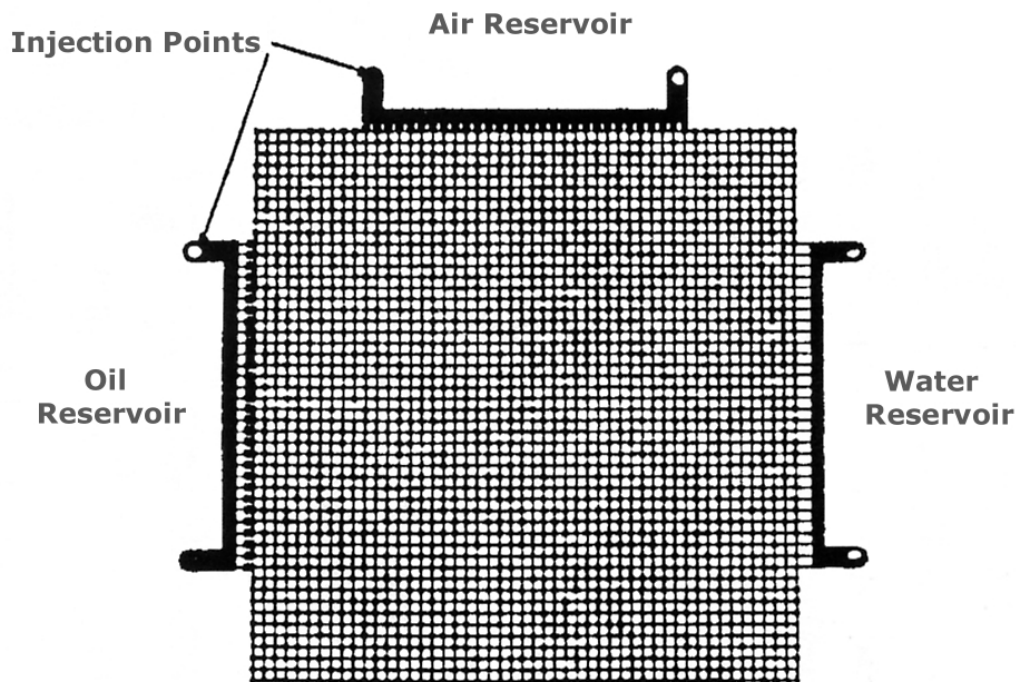


圖 1-5 孔頸微模型示意圖(Jia, Shing and Yortsos, 1999)

早期對影響 K_r -S-P 關係曲線之置換機制的實驗研究，主要是透過簡單幾何形狀的微模型實驗，觀測二相流界面在孔頸元件中移動行為，歸納出二相流在孔頸元件間的發生擬靜態置換所需的條件（例如，Lenormand et al., 1983, 1984; Li et al., 1985; Wardlaw et al., 1988）。Lenormand ; Zarcone and Sarr (1984)曾以7種毛細管所組成的網格模型進行兩相間排退與汲取置換機制之理論探討，透過幾何關係推導各置換機制發生時之門檻值。但當時其探討汲取階段在孔所發生的In型汲取時，其頸管與孔之尺寸相同，而與一般意義上孔與頸管尺寸不同的孔頸元件不同。前述研究指出在排退的過程中，二相流界面在孔或頸管中均是以「活塞型運動」進行置換；而在汲取的過程，二相流界面可以三種不同的機制進行置換，分別為：「活塞型運動」、「攪斷」、以及「In型汲取」，其中，前二者是發生在頸管中，而後者是發生在孔中。

至於對孔頸單元網絡模型中各液相間之置換公式，以往多以平行管束或孔頸幾何形狀等推導其置換門檻經驗公式，尚未以微模型實驗結果作其理論公式或經

驗公式之驗證。張良正、蔡瑞彬、陳鴻輝 等(2006)曾以 5 種不同寬度的頸管與 5 種不同寬度的孔，且孔的寬度恆大於頸管的寬度，組成微模型板。其實驗可觀察到孔於汲取階段所發生的實際置換行為，研究結果並與 R.Lenormand, et al 所觀察到的現象一致。

Van Dijke (2001)提出相對滲透係數基本上僅是飽和度的函數。然而張良正等人(2008)以可透視微模型進行五組流體對 K_r -S 實驗，結果顯示對所有流體對而言，相對滲透係數和飽和度關係曲線存在遲滯現象，以相同濕潤相飽和度下，汲取階段之 K_r -S 曲線高於排退階段之 K_r -S 曲線，這種差異可被解釋成為模型板中濕潤相流體在孔隙之連接性，該研究以模型板濕潤相分佈之影像定性解釋其原因，是因為汲取階段時濕潤相的相對滲透係數有較佳之連接性。陳鴻輝等人(2008)利用可透視微模型的實驗平台，進一步以其實驗平台進行含非水相液之多相流共存時之 K_r -S-P 關係曲線實驗。

1-3 研究方法

本研究所採用之可透視微模型實驗是一種嶄新的室內實驗方法，係結合高精度雷射雕刻之最新工藝技術、影像處理及壓克力板親水性表面處理等方法。利用雷射雕刻工具，複製出許多完全相同的多孔隙介質，以進行多組重複、對照性的實驗；藉由數位影像分析，精確的測量孔隙介質中潤濕相的飽和度；藉調整精密六腳螺絲螺距可精確控制壓力水頭差；以精密刻度流量計量測得濕潤相流量、流速，並計算出相對傳導係數，最後求得在水、空氣及 NAPL 等多相共存下之完整土壤特性曲線 K_r -S-P 關係曲線。進行之步驟是首先建構微模型實驗系統並以簡單實驗配合孔頸置換理論驗證微模型實驗，最後以微模型分別進行二相及三相流 K_r -S-P 曲線實驗。整體研究方法流程圖如圖 1-6 所示：

階段(1)

微模型實驗技術發展



階段(2)

二相流體對之 P-S 與 K-S 微
模型實驗



階段(3)

三相流體對共存時之
 K_r -S-P 關係曲線微模型
實驗

圖 1-6 整體研究方法流程圖

本研究首先發展可透視微模型實驗技術如包括微模型板孔頸通道大小、形狀、分佈的設計，微模型系統組立，微模型壓克力板表面控制處理，改善其親水性質，第一階段先完成水和空氣二相流之 P-S 微模型實驗，並擷取影像資料進行分析，取得水與空氣流體對之毛細壓力對飽和度(P-S)的資料；另外為了驗證微模型實驗系統設計之正確性與適用性，以單一寬度通道網絡模型實驗，藉由觀察比較流體對間互相置換取代的影像資料與前人以幾何形狀所推估出來的置換機制門檻值進行比較與驗證微模型實驗適用性。上述實驗亦可觀察及佐證網絡模型是否有遲滯效應及孔頸 In 型汲取之發生。

第二階段接續第一階段所設計之微模型實驗系統，完成水、空氣、LNAPL 及 DNAPL 任兩相流體對間之微模型實驗，包含任兩相之流體對間之 P-S 實驗與 K_r -S 實驗，並擷取影像資料進行分析，取得水對空氣、柴油對空氣等流體對之毛細壓

力及相對滲透係數對飽和度的實驗資料。為了探討比例原則在微模型實驗之適用性，本階段之 P-S 實驗在相同的環境條件下（孔隙介質、有效半徑皆相同），不同的流體對間，因界面張力各不相同，對應出不同的毛細壓力差，本研究應用比例原則的理論，將實驗值乘以一比例因子(Scaling factor, β)推估其他流體對之比例值，由所推估的比例值與實驗值交叉比對其關係。

K_r -S 實驗重點是探討相對滲透係數(Relative permeability)與飽和度之間的關係。也就是說，不同的流體對在相同孔隙介質的條件下，不同非濕潤相液體入侵量對濕潤相液體的相對滲透係數是否有不同的影響。對於不飽和層中土壤的 K_r -S-P 關係，van Genuchten(1980)曾經提出 P-S 及 K_r -S 關係的經驗式如下(式子(1),(2))：

$$\text{P-S relation} \quad \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha * P)^n} \right]^m \quad (1-1)$$

$$\text{K}_r\text{-S relation} \quad K_r = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (1-2)$$

本階段實驗將應用 van Genuchten 經驗公式，配合實驗中所得之數據，迴歸出經驗公式之曲線。利用式(1)配合實驗數據迴歸出經驗曲線並求出共同參數 m ，再將共同參數 m 當成式(2)的已知值，繪出 K_r -S 關係經驗曲線，再比較經驗曲線，趨勢上是否能和實驗的曲線符合及能落於實驗的排退和汲取曲線之間。若符合的話，將可由實驗所得之任一組流體對之 P-S 曲線求得該流體對之 K_r -S 曲線，意即可得到兩相流之 K_r -S-P 關係，並可做為多相流完整 K_r -S-P 實驗之準備。

第三階段以微模型實驗系統，取得水、空氣、柴油（LNAPL）和四氯乙烷（DNAPL）各三相共存時之 K_r -S-P 關係曲線。本階段之研究，針對三相共存時 K_r -S-P 關係，期使能在微模型中量測三相流體對的毛細壓力與飽和度關係時可同時得到相對滲透係數，此乃前人尚未進行過的實驗。本階段實驗由單一實驗流程可直接得到三相流體對 K_r -S-P 的關係，此乃與前人研究最大的不同。

另外在論文之附錄一，也詳細介紹 NAPL Simulator 之應用案例，是先透過室內實驗，取得土壤特性曲線 P-S 實驗資料，進一步以 NAPL Simulator 污染傳

輸數值模擬模式，藉由不同流體對之 P~S 排退及汲取實驗曲線值，模擬推估三相流體共存時 NAPL 之滲出量，並進一步了解土壤特性曲線對多相流污染傳輸數值模擬之影響。

附錄二 介紹本研究自行開發之模擬二相流之 P~S 排退及汲取模式，模擬所用之孔頸網絡模型設計板與微模型實驗板排列一致，配合前人幾何形狀所推估出來的置換機制門檻值理論，同時考慮網絡模型孔頸單元濕潤相方向性（連續性）排列時，模擬二相流之 P~S 值。

1-4 本文架構

本文共分七個章節，第一章為研究動機、目的，研究方法及文獻研究整理。第二章為相關理論介紹，包括非水相液體在不飽和層孔隙介質中的傳輸行為，土壤特性曲線，遲滯效應，比例原則，含排退及汲取之置換機制等。第三章介紹微模型實驗技術開發成果，包括微模型板孔頸網絡設計及雷射工具加工，微模型板親水性處理，微模型實驗系統組立，影像資料處理。第四章五種不同大小之孔頸網絡模型實驗與前人所提出之置換機制作比較分析。第五章討論二相流體之 K_r -S-P 關係包含水、空氣和柴油（LNAPL）或四氯乙烷（DNAPL）等流體之二相流體對間 P-S 曲線與 K_r -S 曲線微模型實驗值，並將上述實驗資料分別作(1)探討比例原則(Scaling rule)於微模型實驗 P-S 曲線推估之準確性(2)應用 van Genuchten P-S 與 K_r -S 經驗公式交互推求二相流體之 K_r -S-P 關係(3)觀察微模型實驗 K_r -S 曲線之遲滯現象。第六章介紹三相流共存之 K_r -S-P 微模型實驗成果：包括水、空氣、柴油和四氯乙烷各三相體共存時 K_r -S-P 關係曲線。第七章為本文結論與建議。另外本文於附錄一介紹 NAPL Simulator 之控制方程式及數值方法。附錄二介紹二相流體 P~S 孔頸網絡模式開發。附錄三是工研院分析表面張力資料。

第二章 相關理論

多相流於孔隙介質中主要流動機制，主要是探討多種流體對之 K_r -S-P 特性曲線，本章 2-1 節 將介紹 K_r -S-P 曲線之相關基本觀念，2-2 節將介紹比例原則(Scaling rule)之基本原理，應用比例原則可以已知之參考流體對推估其他組流體對之特性曲線。除了前述較巨觀的特性曲線本身的研究外，亦有其它研究以較微觀的孔頸尺度去解釋各相之間置換機制，因此在 2-3 節將對置換機制 (displacement mechanisms) 的理論及相關經驗式與發生條件做完整說明。

2-1 多相流特性曲線之基本觀念

本節首先將說明多相流特性曲線基本性質與理論，如流體與固體間潤濕性(含接觸角.....)，兩流體間界面張力及毛細壓力，P-S 曲線之進入壓及殘餘飽和度等定義，接著對於多相流之 K_r -S-P 曲線本身關係，遲滯現象，相對傳導係數(包含達西定理等)等定義於本節亦作完整說明，最後由於本文採用 van Genuchten 及 Parker 模式推估特性曲線，因此也對其稍作介紹。

溼潤度是代表兩種非混合性流體接觸同一固體表面的情況下，必然會有其中一種流體較另一流體容易覆蓋在固體的表面，此種於固體表面覆蓋的難易程度稱之。較容易覆蓋在固體表面的流體稱為溼潤相(Wetting phase)流體，而另一種流體則稱為非溼潤相(Non-wetting phase)流體。影響溼潤度的物理性質主要是由液體的界面張力、液體被固體表面吸附的附著力(Adhesion)，和由液體的表面張力及黏滯度(Viscosity)所組成的附著速度(Spreading speed)兩類。附著速度影響液體附著在固體表面的快慢，較低的表面張力及黏滯度會有較快的附著速度。以水和汽油接觸到一固體表面為例，由於汽油的表面張力及黏滯度皆小於水，汽油會以較快的附著速度附著於固體表面上，但之後因為固體表面吸附水的強度較吸附汽油的強度為大，故最後水會取代原先在固體表面的汽油而成為溼潤相流體(Corey, 1977)。

影響 NAPL 溼潤度的因素有土壤顆粒的礦物成份、NAPL 的化性、水的化性、是否有表面活性劑(Surfactants)或其它有機物及飽和度的改變等(Anderson, 1986)。對大多數的多孔介質而言，水為溼潤相液體，而 NAPL 為非溼潤相液體(Corey, 1977)。但當土壤中含有大量的有機質、矽酸鹽類或硫化物時，NAPL 則為溼潤相液體(Anderson, 1986)。

當兩個不同相接觸在一起時，其界面會處於較特殊之能量狀態（一般會較高），當此能量處於愈高時，基於熱力學定律，此相會儘量減少其接觸表面積，如一液體滴入固相平面則會形成三種接觸表面，固—液、液—氣、氣—固，如圖 2-2 所示，在平衡下，此二接觸面之張力（ $\gamma_{SL}, \gamma_{LS}, \gamma_{GS}$ ）應遵守下式之關係：

$$\gamma_{GS} - \gamma_{LS} - \gamma_{GL} \cos \theta = 0$$

或

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{GS} - \gamma_{LS}}{\gamma_{GL}} \quad (2-1)$$

θ 可定義為接觸角（contact angle）（液相之接觸角），根據此角度之大小，可分三類：

$0 < \theta < 70^\circ$ 濕潤

$70 < \theta < 110^\circ$ 中性流體

$\theta > 110^\circ$ 不濕潤

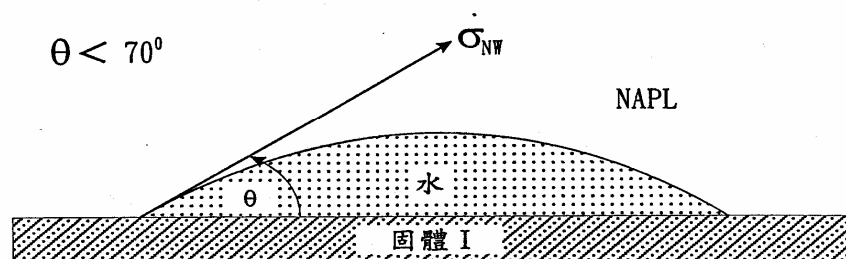
表 2-1 於攝氏 25 度時，固體-液體-氣體(空氣)交界面之接觸角

固體	液體	接觸角(度)
Glass	water	0
Tio2	water	0
Graphite	water	86
paraffin	water	106

接觸角是一個判別水是否為溼潤相流體的重要參數，不同的固體介質會產生不同的

接觸角，而不同的接觸角即代表流體與固體介質不同的溼潤程度。以水和 NAPL 同時接觸一固體表面而言，接觸角的大小說明固體介質是被水所溼潤亦或被 NAPL 所溼潤。一般而言，當接觸角介於 0 度到 70 度之間時，該流體稱之為溼潤相流體；當接觸角介於 110 度到 180 度之間時，該流體則為非溼潤相流體，若接觸角介於 70 度與 110 度之間，則屬於中性流體[Anderson, 1986]。圖 2-1(a)所示，在固體 I 中，水的接觸角 $\theta \leq 70^\circ$ ，水為溼潤相流體，而 NAPL 則為非溼潤相流體；圖 2-1(b)所示，在固體 II 中，水的接觸角 $\theta \geq 110^\circ$ ，則此時 NAPL 為溼潤相流體，而水則為非溼潤相流體。由此可知，接觸角的大小除了與流體有關外，所接觸的固體性質亦會改變接觸角的大小，兩相流體對界面張力向量平衡圖如圖 2-2。

(a)



(b)

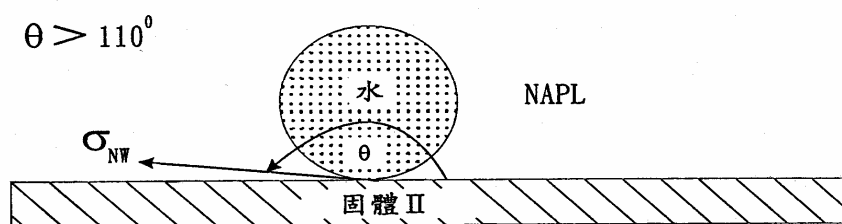


圖 2-1 水對不同固體表面的濕潤程度(a)水為濕潤相流體，(b)水為非濕潤相流體。
(改自 Mercer and Corey, 1990)

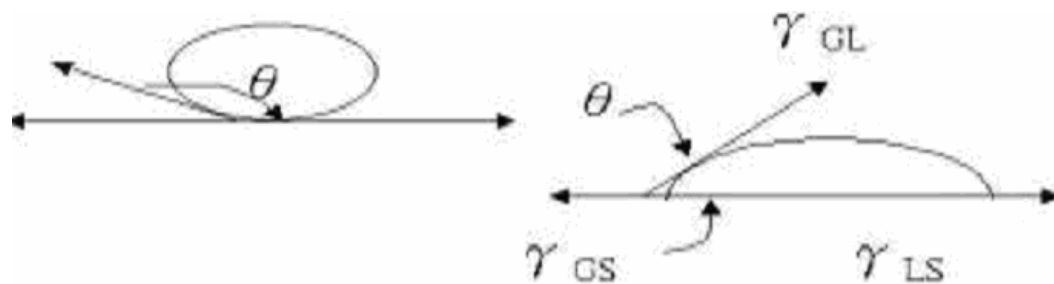


圖 2-2 一滴液體落在光滑表面上並與空氣相接觸時，兩兩相間界面張力向量平衡示意圖；其中 G:空氣，L:液體，S:固體。

兩不互溶流體界面張力 σ (Interfacial tension)，以分子的觀點來看可解釋為一流體內部分子的內在吸引力和在流體表面接觸另一流體的分子吸引力不同，界面上的分子引力因不連續而有引力差，即產生界面張力，換言之，因為有界面張力存在使得兩不互溶之流體接觸時，在兩流體間會出現一明顯的界面。而表面張力 (Surface tension) 是指在液體及其本身蒸汽相之間的界面張力。一般而言，兩不互溶液體所產生之界面張力必定比兩純液體之表面張力中較大者來的小 (Mercer and Cohen, 1990)。Davis and Lien (1993) 指出，界面張力會隨著溫度變化而改變，當溫度上升時，界面張力會變小。另外，液體的酸鹼度 (pH 值) 及化學性質亦會對界面張力造成影響 (Schowalter, 1979)。在 25°C 的室溫下，NAPL 和水之間的界面張力範圍從 0 (可溶性 NAPL 液體) 到 72 達因/公分 (水的表面張力) (Lyman et al., 1982)。而 NAPL 的表面張力範圍從 15 到 50 達因/公分 (Cohen and Mercer, 1993)。

毛細壓力 (Capillary pressure) 是指多孔介質孔隙吸引溼潤相流體或排斥非溼潤相流體的能力；即毛細壓力愈大則介質孔隙吸引溼潤相流體或排斥非溼潤相流體的能力愈強 Bear (1972)。由於毛細力的作用，可使水保持於土壤孔隙中，並造成負的壓力 (張力)。而土壤的粒徑大小分佈、夯實度大小、不同液體的侵入等，都會影響土體中液體與毛細壓力間的關係。

水 (或有機液體) 於未飽和層中流動的機制主要是重力及毛細力，接近飽和的土壤如

大雨後的濕潤土壤，水會因為重力作用而向下流動，當重力作用和表面張力作用大小相同時，重力排水即停止。當土壤漸漸變乾之後，毛細作用則佔主要的影響因素。毛細壓力(P_c)是指在多孔介質中，非溼潤相流體和溼潤相流體之間在平衡狀態下的壓力差；以水和 NAPL 為例，毛細壓力可以下式表示：

$$P_c = P_N - P_W \quad (2-2)$$

其中

P_N :NAPL(非溼潤相液體)的壓力

P_W :為水(溼潤相液體)的壓力

進入壓 P_e (Entry pressure)指非溼潤相流體欲進入土壤孔隙取代溼潤相流體時，所需的最小毛細壓力。如圖 2-3 進入壓又稱為取代壓(Displacement pressure, P_d)。當渲排作用進行時，若兩相流體間的毛細壓力小於進入壓時，則非溼潤相流體無法滲入土壤孔隙取代溼潤相流體，此時土壤孔隙中溼潤相流體的飽和度達到 100%；當非溼潤相流體壓力增加，使其與溼潤相流體間的毛細壓力大於進入壓時，非溼潤相流體會開始以連續體滲入土壤孔隙取代溼潤相流體，而溼潤相流體的飽和度會在毛細壓力大於進入壓後隨毛細壓的增大而迅速減少。汲取過程中，由於土壤孔隙會吸引溼潤相流體，所以溼潤相流體會順利以連續體進入土壤孔隙取代非溼潤相流體，故在汲取作用的過程中並不需要考慮進入壓的影響，即只有渲排作用才須考慮進入壓(黎, 1998)。

殘餘飽和度 S_r (Residual saturation)指液體在排出土壤時，隨著毛細壓力的增加，飽和度仍維持不變，即孔隙中流體的殘留量和孔隙體積的比為一定值，該飽和度稱之。如圖 2-3 中 S_{wr} 與 S_{nwr} 分別指在自然地下水流場中，流體受毛細現象的作用所形成分離且不可移動的溼潤相與非溼潤相流體的飽和度。

NAPL 在於土壤孔隙中的殘餘量狀態和流體對固體(土壤)溼潤程度的不同而不同。當土壤中同時存在水、空氣、NAPL 時，其溼潤的程度依序為水、NAPL、空氣，隨著 NAPL 所具有的相對潤溼性的不同，NAPL 存在的型式則隨之不同。在 NAPL-空

氣系統中，NAPL 視為溼潤相流體，溼潤相流體形成殘留量會以薄膜狀附在土壤顆粒表面，並形成不連續情形；當在水-NAPL 系統中，NAPL 視為非溼潤相流體，非溼潤相流體以不連續的液滴狀陷在孔隙及流通的路徑上(Wilson et al., 1988)。當 NAPL 在未飽和層往下移動時，會有部分的 NAPL 受毛細壓的吸引而被吸附在土壤顆粒表面形成殘留量。而在土壤最小孔隙的細孔喉處，由於孔隙半徑愈小其毛細壓力愈大，故更容易使 NAPL 陷入於孔隙中，形成殘留量。

造成殘留量的原因除了毛細壓力的影響外，流體和多孔介質間的界面性質、介質孔隙的幾何排列和大小分布、各流體間的黏滯度與密度的差異、流體間的界面張力、及地下水流的大小等，都會影響 NAPL 殘留在土壤中的量(Mercer and Cohen, 1990)。

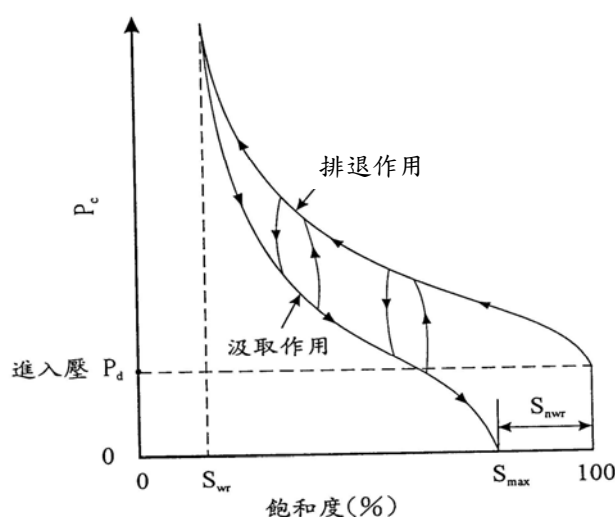


圖 2-3 液體飽和度與毛細壓力關係 (黎,1998)

遲滯效應可解釋為如圖 2-3 在汲取曲線上的任何一點，其含液比都會比在排退曲線上對應相同毛細壓力之含液比低。土壤自飽和狀態開始逐漸排出液體，隨著張力的增加，會有相對應的體積含液比，直到液體不再排出為止，此時壓（張）力與體積含液比的關係即為該土壤的主要排退曲線（Main Drainage Curve, MDC）。當土壤再重新濕潤，隨著毛細壓力的減少，也會有其相對的體積含液比，此時毛細壓力與體積含液比的關係稱為該土壤的主要汲取曲線（Main Imbibition Curve, MIC）。

Hillel (1982) 曾提出造成遲滯效應的主要原因有三：

1. 土壤孔隙的大小及幾何形狀成不規則，因此在相同的含液比下會有不同的毛細壓力 ($P \propto \frac{1}{r}$)，即所謂墨水瓶效應(Ink Bottle Effect)。
2. 液體與土壤顆粒之間的接觸角會視液體在土壤是排出或進入的情形而異，接觸角在液體進入(Advancing)即濕潤情形時會較液體排出 (Receding) 時大，因此毛細壓力相對較小 ($P \propto \frac{\cos \theta}{r}$)。
3. 當土壤再濕潤時，濕潤相液體（如水）會取代非濕潤相液（如空氣、有機液），但同時也會將非濕相液給牽絆住 (Entrapped)，使得濕相液的含液量因此減少。也因為此項原因，常使得 MWC 在毛細壓力為零時，常不能回到 MDC 的起點，此差值即為殘餘非濕潤相含量(Residual Non-wetting Fluid Content)。

此外，土壤的乾縮 (Shrinking) 及膨脹 (Swelling)，乾濕速率快慢不同，孔隙表面的粗糙程度等，都會影響土壤的遲滯效應(Davidson, Nielson & Biggar, 1966; Demond & Roberts, 1991)。

相對滲透係數(Relative permeability, $k_{ri}(S)$)可以定義：對於一個特定流體，其有效滲透係數(Effective permeability, $k_i(S)$)與飽和滲透係數(Saturated permeability, $K(S)$)的比率，其變化的範圍從 0~1 之間：

$$k_{ri}(S) = \frac{k_i(S)}{K(S)} \quad (2-3)$$

其中， $k_{ri}(S)$ 是第 i 相流體的相對滲透係數， $k_i(S)$ 是 i 相液體之滲透係數(permeability)， $K(S)$ 是飽和滲透係數(Saturated permeability)。圖 2-4 是一般相對滲透係數與飽和度的表示方法，流體（水或 NAPL）的相對滲透係數隨著飽和度的降低而減小。在達到殘餘飽和度時，其相對滲透係數接近於零，此時流動停止。

流體在未飽和層中移動，滲透係數(Permeability, K)並非定值，而是隨著土壤中的飽和度而改變，其滲透係數可以表達成飽和度的函數形式 $K(S)$ 。在多相流中可以廣義的達西定律來定義(Muskat and Meres, 1936)：

$$q_i = - \left[\frac{k_i(S)}{\mu_i} \right] (\nabla P_i - \rho_i g \nabla h) \quad (2-4)$$

其中： q_i ： i 相液體之達西速度

$k_i(S)$ ： i 相液體之滲透係數(permeability)

μ_i ： i 相液體之黏滯係數(Viscosity)

P_i ：壓力(Pressure)

ρ ：液體密度(Density)

g ：重力(Gravitational acceleration constant)

h ：高程(Elevation above a datum)

i ：第 i 相流體

多孔介質的滲透係數 K (Permeability)與流體及介質的特性有關， K 可表示為：

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2-5)$$

其中 k 是多孔介質的內滲透係數，與多孔介質孔隙率、粒徑分佈、土壤結構及其他因子有關； ρ 是密度； g 是重力常數； μ 是動黏滯係數。

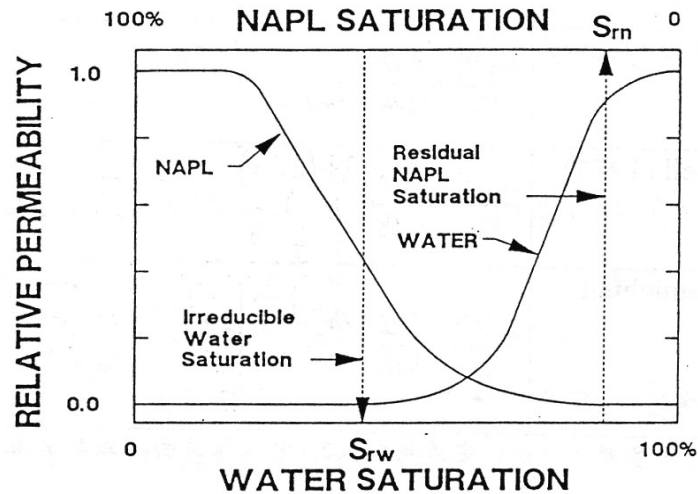


圖 2-4 液體飽和度與相對滲透係數之關係 (Palmer and Johnson, 1989)

van Genuchten(1980)提出對於未飽和層中土壤的 K_r -S-P 經驗公式可表示如下：

$$\text{P-S relation : } \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha * P)^n} \right]^m \quad (2-6)$$

$$K_r\text{-S relation: } K_r = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (2-7)$$

其中 θ 任一位置點的體積含水比， θ_r 最後的殘餘體積含水比 (Residual Volumetric Water Content)， θ_s 土壤在大氣壓力下飽和的體積含水比， m 為 P-S 曲線和 K_r -S 曲線之共同參數。

Parker (1987) 對於未飽和層中土壤曾經提出三相(水,非水相液,空氣) K_r -S-P 特性曲線模式，經驗公式如式 2-8 及式 2-9

$$\overline{S_w^{gnw}} = [1 + (\alpha_{nw} p_{nw})^n]^{-m} \quad p_{nw} > 0$$

$$1 \quad p_{nw} \leq 0 \quad (2-8)$$

$$\overline{S_t^{gnw}} = [1 + (\alpha_{gn} p_{gn})^n]^{-m} \quad p_{gn} > 0$$

$$1 \quad p_{gn} \leq 0 \quad (2-9)$$

其中 $n=1-1/m$

$$\overline{S_w^{gnw}} = \frac{S_a^{gnw} - S_{wr}}{1 - S_{wr}}, \quad \overline{S_t^{gnw}} = \frac{S_t^{gnw} - S_{wr}}{1 - S_{wr}}, \quad \overline{S_t^{gnw}} = \overline{S_w^{gnw}} + S_n^{gnw}$$

及三相 K_r -S 關係的經驗式(2-10)

$$\begin{cases} k_{rw} = \overline{S_w^v} [1 - (1 - \overline{S_w^{1/m}})^m]^2 \\ k_m = (\overline{S_t} - \overline{S_w})^v [(1 - \overline{S_w^{1/m}})^m - (1 - \overline{S_t^{1/m}})^m]^2 \\ k_{rg} = (1 - \overline{S_t})^v [1 - (1 - \overline{S_t^{1/m}})^m]^2 \end{cases} \quad (2-10)$$

$$\text{此處 } \overline{S_t} = \frac{S_n + S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}}, \quad \overline{S_w} = \overline{S_w} + \frac{S_{ne}}{1 - S_{wr}}, \quad \overline{S_w} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}}, \quad v=1/2$$

w：水 S_n^{gnw} ：三相共存時 NAPLs 相飽和度

g：空氣 S_t^{gnw} ：三相共存時水與 NAPLs 相飽和度

n：非水相液(NAPLs) S_a^{gnw} ：三相共存時水相有效飽和度

P_{n-w} : NAPLs 與水相之壓力差

S_t^{gnw} : 三相共存時水與 NAPLs 相有效飽和度

P_{g-n} : 空氣與 NAPLs 相之壓力差

S_{rw} : 三相共存時水相不連續的飽和度

S_w^{gnw} : 三相共存時水相飽和度

S_{ne} : 三相共存時 NAPLs 相不連續的飽和度

2-2 比例原則

Parker et al., (1987) 提出比例原則 (Scaling Rule)，若依比例原則的理論，則可藉由維持不同流體對間界面張力與毛細壓力的比例相同，由一已知流體對的 P-S 曲線推估另一已知流體對的 P-S 曲線。其推導過程可簡單的描述為：考量兩相液體在一個多孔介質內，彼此間的毛細效應主要由界面張力所引起的，因此，在兩相鄰液相的界面將會與 Laplace's 方程式中的毛細壓力有關：

$$P_c = \frac{2\sigma_{ij}}{r_{ij}} \quad (2-11)$$

其中 σ_{ij} 表 i 相與 j 相之間的界面張力， r_{ij} 表界面的曲率半徑。若假設在相同的排退路徑下，孔隙大小 r (Pore Size Distribution, PSD) 可以由(2-11)式及 $S_j(P_{ij})$ 等資料推估求得，因此在兩相及相同的孔隙的情形下，不同流體對之 $S_j(P_{ij})$ 及 σ_{ij} 仍可以推估相同的飽和度對孔隙大小的關係 $S(r)$ ，反之我們也可以由 $S(r)$ 及 σ_{ij} 求得 $S_j(P_{ij})$ 。所以對任兩相，空氣對水、有機液體對水或者是空氣對有機液體而言，可得到下面三個式子：

$$S_w\left(\frac{2\sigma_{aw}}{P_{aw}}\right) = S(r) \quad (2-12)$$

$$S_w\left(\frac{2\sigma_{ow}}{P_{ow}}\right) = S(r) \quad (2-13)$$

$$S_o\left(\frac{2\sigma_{ao}}{P_{ao}}\right) = S(r) \quad (2-14)$$

其中下標為 a, o 和 w 分別代表空氣、有機液體、和水相。Leverett et al. (1942)和 Miller and Miller(1956)、Dumore and Schols(1974)曾分別應用上面三個界面張力比例縮放式，去求

得其它流體對之 P-S 曲線關係。

因此，在同一個孔隙介質中，假設在兩相及相同的排退路徑下，把壓力轉換成水頭，可以由式2-15，可得到下面這個式子：

$$\frac{h_{aw}}{\sigma_{aw}} = \frac{h_{ow}}{\sigma_{ow}} = \frac{h_{ao}}{\sigma_{ao}} \quad (2-15)$$

其中 h_{aw} 、 h_{ow} 、 h_{ao} 表示以相同液體所表示的壓力水頭，如以水表示，則三個流體對皆以水壓力水頭表示。

在實際應用上，對於同一個土體結構而言，任何流體對的保持曲線，皆可用一參考流體對，如空氣-水，以比例原則的方式得到其它流體對(空氣-有機液體或水-有機液體)的水保持曲線。此法對於三相流模擬之最大優點為：不需要量測所有二相流之毛細壓力對飽和度之曲線，因為在量測上相當的耗時費力，所以利用尺度原則只要知道其中一組參考流體對的曲線，即可藉此轉換出其它兩組流體對的關係。

但有些實驗結果顯示比例原則的方法並不可行。早期文獻中在進行比例縮放方法探討時，接觸角 δ 並不適合考慮進去 (Melrose, 1965)。Demond & Roberts(1991)卻發現若將 $\cos \delta$ 因素考量進來會降低比例因子的精確性。另外，Calhoun et al(1949)當時發現在不同的飽和度時，不同流體的系統間，其毛細壓力的比值並非都是常數，當有機質或溶劑其親水性程度強弱都會造成比例原則的誤差。

2-3 孔頸置換機制原理

置換機制 (displacement mechanisms) 的理論發展，主要是透過簡單幾何形狀的微模型實驗，觀測二相流界面在孔頸通道中移動行為，歸納出二相流在孔頸通道間的發生擬靜態置換所需的條件(如 Lenormand et al., 1983; Li et al., 1985; Wardlaw et al., 1988)，Lenormand et al. (1983)曾推導出二相流在立方體孔頸元件間發生擬靜態置換所需的條件，對於其幾何形狀所推論而得之立方體孔的 In 型汲取、活塞型置換以及攔斷等理論置換機制及其發生過程進行驗證與探討。本節以上述文獻為基礎，依排退與汲取兩過程之不同，將孔頸置換機制整理如下：

2-3-1 排退機制

排退機制是非濕潤相置換濕潤相之現象，就孔頸尺度而言，二相流界面在孔或頸管中均是以「活塞型運動」進行置換 (Piston-type motion)，詳細理論介紹如下：

在潤濕相與非潤濕相之交界面處的形狀為一凸形界面，凸面為非潤濕相，凹面則為潤濕相，而潤濕相與非潤濕相在孔或頸管中移動時恆保持此凸面，類似活塞的推移，且該移動是可逆的，故稱之為活塞型運動(Lenormand R. et al., 1984)。在排退階段，孔或頸管皆是以活塞型運動來進行流體間的取代，而在汲取階段活塞型運動只發生在頸管。本實驗研究所使用之微模型是由斷面為同一深度但寬度改變的矩形通道所連接組合而成；在排退過程中，非潤濕相入侵矩形通道時，會先佔領通道中心部份，而通道角隅處仍有潤濕相存在，且在微模型中角隅的潤濕相是完全連通的。

李及鄭(2004) 重新整理 Lenormand and Legait (1983)文獻，提出孔頸網絡模型中活塞型運動相關數學推估模式如下：由圖 2-5 之 A-A'斷面圖，假設通道中角隅濕潤相的厚度遠小於通道的長度時，則角隅界面大致上平行於通道的軸向，界面在沿流線方向的曲率半徑會遠大於垂直流線方向(指向通道的中心)的曲率半徑，則根據拉普拉斯理論， $P_c = \sigma / r$ ，活塞型運動的毛細壓力門檻值可由對 z 軸方向(圖 2-5)取靜力平衡而求得，Legait (1983)指出其值為：

$$P_c = \frac{\sigma}{\rho} = \frac{\sigma}{r} \left[\cos \theta + \sqrt{\cos \theta \sin \theta + (\pi/4 - \theta)} \right] \quad (2-16)$$

其中， r 為通道的內切圓半徑；若通道為孔則 $r = r_p$ ，若通道為管則 $r = r_t$ 。

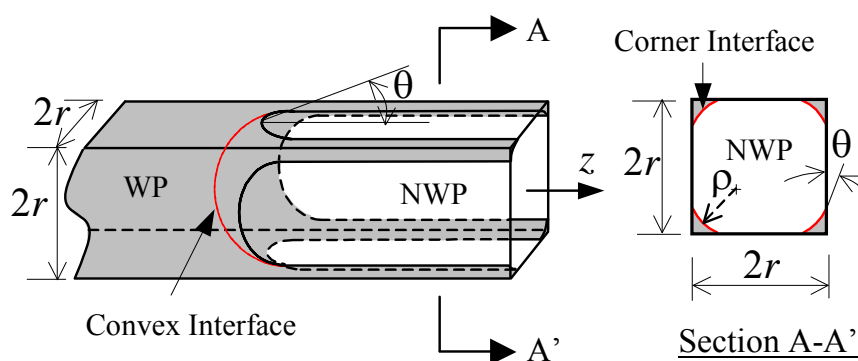


圖 2-5 凸界面在矩形斷面定型通道中的活塞型運動(重繪自 Lenormand, 1983, fig.2)。圖中左側為透視圖，右側為 A-A'剖面圖。深色為濕潤相流體。

由Laplace理論知 $P_c = \sigma/r$ 。活塞型運動的毛細壓力門檻值（critical capillary pressure）可由力平衡而求得。Lenormand et al. (1984) 提出：

$$P_c = 2\sigma \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{y} \right] \quad (2-17)$$

其中， x 為通道的邊寬， y 為通道的垂向深度。

2-3-2 汲取機制

汲取機制是濕潤相置換非濕潤相之現象，就微觀孔頸尺度而言，汲取的過程，相關文獻中均認為二相流界面可以三種不同的機制進行置換，分別為：「活塞型運動」、「攪斷」、以及「In 型汲取」，其中，前二者是發生在頸管中，而後者是發生在孔中，除了活塞型運動如前所述外，攪斷與 In 型汲取發生之前必須引進角隅流之觀念，才能用以解釋其發生原因，以下分別說明之。

角隅流

當單一孔頸通道中同時有二相流體存在時，非濕潤相是在通道的中心部分，而濕潤相是位於通道的角隅處。由於非圓形通道具有濕潤相角隅，網絡中的濕潤相可形成連續的通路，在解釋非濕潤相的入陷現象中扮演很重要的角色，以此特性而言，非圓形通道對於濕潤相角隅現象解釋是比圓形通道恰當的選擇。

孔隙空間中二相流體之位置關係,主要是由流體間界面張力及介質潤濕度和毛細壓力等因子來決定 (Patzek, T.W., Kristensen, J.D., 2001)，尤其在單一個孔隙時，最重要是孔隙幾何特徵是角隅處及其裂縫處，如圖2-6 是單一孔隙中二相流體之平衡位置分佈圖，圖2-7 圓柱與非圓柱形角隅流現象之比較，由圖中比較可得出兩圖之相同處是非潤濕相皆佔領孔隙中央，其主要之不同處在溼潤相流動機制會在非圓柱形介質角隅處，由於其在表面形成薄膜流，如三角形管斷面會在角隅處形成濕潤層，厚度達數個微米之多 ($10^{-6}m$)。圖 2-8 顯示潤濕角隅薄膜流存在於方形介質的橫斷面孔壁中。

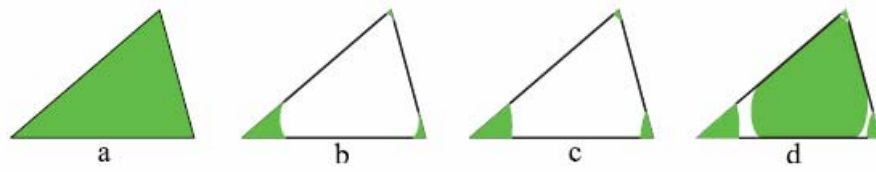


圖2-6 單一孔隙中二相流體(綠色是水,白色是NAPLs)之平衡位置分佈 (a)初始水佔滿孔隙(b) 自發性汲取(c) 強力性汲取(d) 被強力汲取有NAPLs層

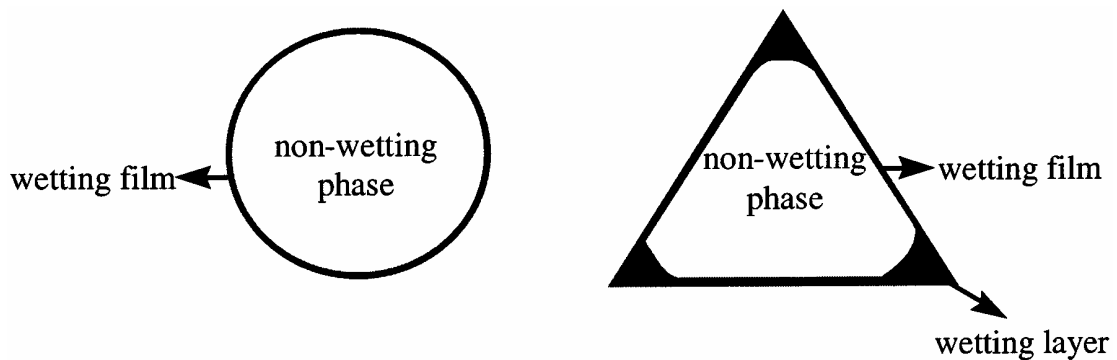


圖2-7圓柱與非圓柱形角隅流現象之比較

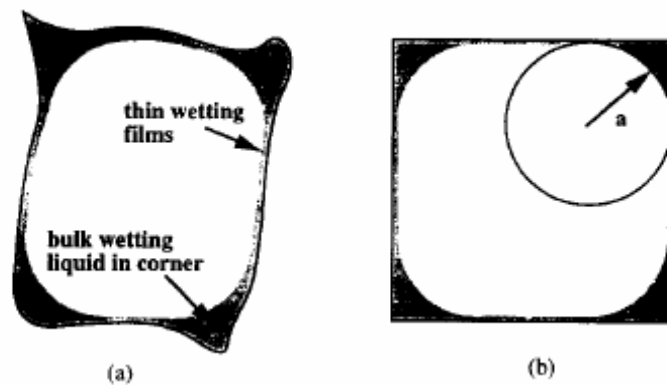


圖2-8 潤濕薄膜流位於孔壁中。(a)真實孔隙方形介質的橫斷面 (b)模式假想孔隙方形介質的橫斷面

攫斷 (Snap Off)

汲取過程中，頸管除了活塞型運動外尚有攫斷此種置換機制。當毛細壓力降低時，潤濕相藉由角隅的連續通路進入微模型內部，而使得矩形通道內角隅處的潤濕相體積(角隅流, conner flow)增加，待毛細壓力降低至攫斷發生的門檻值時，角隅流界面無法再

以改變曲率的方式維持平衡，就會崩塌，如圖 2-9(d)所示，此時潤濕相會佔領頸管且將非潤濕相往頸管兩端排入孔中，稱之為攔斷 (Lenormand et al., 1983)。

「攔斷」是在汲取過程只會發生於頸管中的另一種置換機制。在汲取過程中，濕潤相可經由兩種方式進入孔頸網絡增加濕潤相飽和度，除了凸界面的活塞型運動外；另一是經由角隅逐步擴充濕潤相體積。考慮一矩形斷面頸管，中心部分是非濕潤相，角隅部分有濕潤相角隅流。角隅濕潤相的厚度會隨著毛細壓力的降低而增加(圖 2-9)，當界面到達圖 2-9(c)所示之臨界位置時，四個角隅的界面會相接觸，其後若再降低毛細壓力，界面已無法再藉由調整界面曲率而承受壓力的變化，因此界面會在瞬間發生不穩定置換行為，濕潤相自管中央擴充截斷非濕潤相，而充滿整個頸管中，原先在頸管中的非濕潤相則排出頸管而進入兩端的孔中，此類的置換機制稱之攔斷(Lenormand, 1983)。由幾何關係(見圖 2-9(c))可導出攔斷發生的臨界條件為 $\rho(\cos\theta - \sin\theta) = r_t$ ，因此頸管中發生攔斷型汲取的門檻壓力為：

$$P_c = \frac{\sigma}{r_t} [\cos\theta - \sin\theta] \quad (2-18)$$

頸管中發生攔斷，會阻斷網絡中非濕潤相的連續性。當一個非濕潤相孔或多個相連結的孔頸周圍的頸管均被濕潤相完全充滿時，孔中的非濕潤相將無法排出而殘留在網絡中，此現象稱之為非濕潤相的「入陷」(trapping)。網絡中非濕潤相的殘留不一定都是由攔斷造成的，但攔斷是造成非濕潤相殘留的主要原因之一。

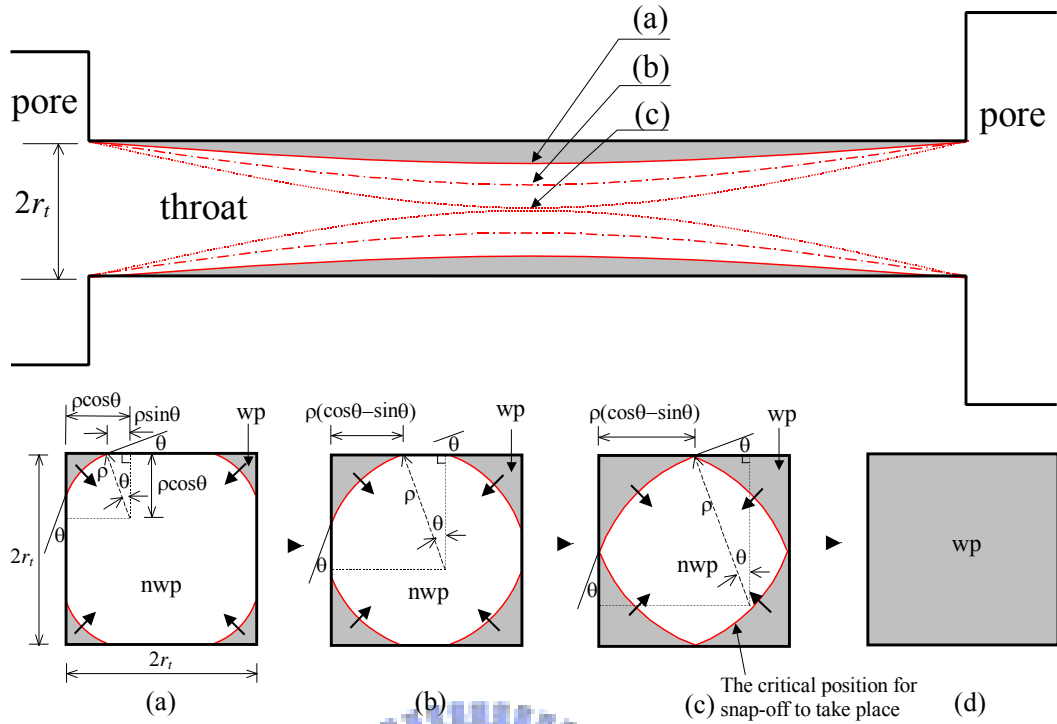


圖 2-9 攔斷置換發生時非濕潤相頸管內之角隅濕潤相的成長過程，(上) 側視圖；
(下)剖面圖：(a)毛細壓力較高時的初始狀態；(b)中間狀態；(c)攔斷將發生時的臨界狀態；(d)攔斷發生後的最終狀態。圖中深色者為濕潤相流體，紅色虛線為角隅介面(corner interface)。參考 Lenormand et al., (1983)

Lenormand et al., 1984指出其值為：

$$P_c = \frac{2\sigma}{x} \quad (x < y) \quad (2-19)$$

$$P_c = \frac{2\sigma}{y} \quad (x > y) \quad (2-20)$$

In 型汲取

當汲取發生時，若頸管中的凸界面是以活塞型運動進行置換，則當凸界面遇到孔時，會因為孔所連接的非潤濕相個數而影響其移動方式稱為 In 型汲取(Lenormand R., et al., 1983)。其中，In 型汲取的 n 是指孔周圍非潤濕相所佔領的頸管數目。圖 2-10 為 Lenormand, et al., 以矩形斷面毛細管說明 I1 型及 I2 型汲取之凸界面臨界界面位置；I1 型汲取是指孔周圍只有一根潤濕相頸管，該頸管之凸界面通過孔的移動方式；I2 型汲取

是指兩根非濕潤相頸管相鄰時，潤濕相頸管之凸界面通過孔的移動方式。在文獻中都是建議使用估計式概估之。一般假設

$$P_c = \frac{\sigma}{r_p} [C_{in} \cos \theta] \quad (2-21)$$

李天浩，鄭安孺 (2004)指出：若非濕潤相頸管中有任意兩個是位於對面的位置，則孔中的 I_n 型汲取應該不可能發生。所以立方體孔中只會有 I_1 、 I_2 、以及 I_3 型汲取，參數 $C_{I1} = 1.7$ 、 $C_{I2} = 1.15$ 、且 $C_{I3} = 0.7$ ，後兩者中的非濕潤相頸管必須是兩兩相鄰(李及鄭 (2004))。

Lenormand et al. (1983)以七種高度相同而寬度不等的毛細管所組成的二維網絡微模型，管與管間連接的方式如圖 2-10 所示，模型中並沒有真實的孔通道， I_n 型汲取是一種凸界面通過節點時的移動方式。其推導 I_1 及 I_2 型汲取公式的方法是假設四根頸管有相同的管徑的理想狀態，根據圖 2-10 界面臨界位置的曲率推導 I_1 型和 I_2 型汲取之門檻壓力值。

Lenormand et al. (1984)進一步提出

I_1 型汲取之值為：

$$P_c = \sigma \left[\frac{\sqrt{2}}{x} + \frac{2}{y} \right] \quad (2-22)$$

I_2 型汲取之值為：

$$P_c = 2\sigma \left[\frac{0.15}{x} + \frac{1}{y} \right] \quad (2-23)$$

汲取時，二相流凸界面是以活塞型運動的方式在頸管中移動，但是當凸界面通過非濕潤相孔時，其移動的方式會受到該孔所連接非濕潤相頸管的個數所影響(Lenormand et al., 1983 ; Lenormand and Zarcone, 1984 ; Wardlaw et al., 1987 ; Ioannidis et al., 1991 等) 。根據非濕潤相頸管數的不同，凸界面在孔中置換機制被稱之為「 I_n 型汲取」(Lenormand et al., 1983)，其中， n 為非濕潤相頸管的數目。Lenormand et al. (1983)亦以矩形斷面毛細管所組成的二維網絡模型為例，描述 I_1 及 I_2 型汲取臨界面位置，分別如圖 2-10 (a)及(b)所示，其中 I_1 型汲取是指當四根毛細管中有一個毛細管是被濕潤相所佔據時凸界面通過節點的方式； I_2 汲取則是指兩根非濕潤相毛細管是相鄰時，凸界面通過節點的方式。後續研究者將「 I_n 型汲取」一詞沿用到孔頸網絡型中，將凸界面在孔中的汲

取置換機制行為正式定義之。Wardlaw et al. (1987)將兩非濕潤相頸管當位於對面位置的情形稱為 I2A 汲取，其由微模型板中觀察到在同一個圓形孔中，汲取發生的難易程度為 $I1 > I2 > I2A > I3$ 。Ioannidis et al. (1990) 則是觀察到眼型(eye-shaped)的孔中，汲取發生的難易程度為 $I1 > I2 > I3 > I2A$ 。在解析上，由於各孔中 I_n 型汲取的臨界面位置會隨著孔頸的幾何形狀與相對大小關係而有所不同，很難推導得到正確的 I_n 型汲取門檻壓力值，因此在文獻中都是建議使用估計式概估之如(2-21)式，其中， C_{In} 為輸入參數，Jerauld and Salter(1990)直接令 $C_{In} = 2/n$ ；Hughes and Blunt(2000)將 Lenormand et al. (1983) 推導公式直接外插沿用於三維孔頸網絡中；另一方面，Reeves(1997)及 Held and Celia (2001)等人統計 Li and Wardlaw (1986b)以及 Ioannidis et al.(1991)的實驗觀測結果套配出估計式，其不考慮非濕潤相頸管的相對位置關係，只考慮非濕潤相頸管的數目，亦即， $I2$ 以及 $I2A$ 型汲取是使用相同的門檻壓力值。本研究使用與 Hughes and Blunt(2000)類似的孔頸網絡，因此採用該研究所推導的參數。唯參考前人研究以及根據幾何分析的結果，本文整得得出：若非濕潤相頸管中有任意兩個是位於對面的位置，則孔中的 I_n 型汲取應該不可能發生。所以立方體孔中只會有 $I1$ 、 $I2$ 、以及 $I3$ 型汲取，參數 $C_{I1} = 1.7$ 、 $C_{I2} = 1.15$ 、且 $C_{I3} = 0.7$ ，後兩者中的非濕潤相頸管必須是兩兩相鄰。

根據式 2-16，孔中一旦發生 I_n 型汲取，其四周非濕潤相頸管必然會立即接著發生活塞型置換。

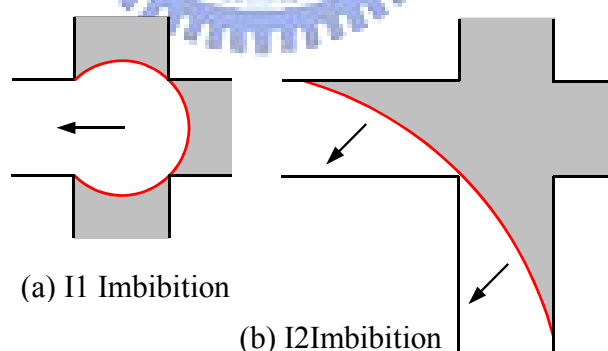


圖 2-10 Lenormand et al.(1983)的二維毛細管模型之(a) $I1$ 型汲取(b) $I2$ 型汲取臨界面示意圖。圖中四根毛細管均為相同的尺寸,深色者濕潤相(改繪自 Lenormand et al., 1983)

考量擬靜態系統之毛細壓力-飽和度時，模型四周是給予自由的邊界條件(free boundary condition)，讓非濕潤相與濕潤相均可經由與邊界連通的路徑由各邊界進出網絡模型。進行主要排退時，首先假設網絡中原先是充滿濕潤相流體，而網絡外則是非濕

潤相流體，逐步微幅增加非濕潤相壓力水頭至某個定值，可提昇毛細壓力(因為 $P_c = P_{nw} - P_w$ ，因此提昇毛細壓力的方式可以為增加 P_{nw} 或是降低 P_w ，只要保持 P_{nw} 與 P_w 間的差值為定值，就會得到相同的結果)，使非濕潤相可由孔頸網絡的上下以及四周各邊界以活塞型置換的方式進入網絡中置換濕潤相流體，同時允許濕潤相可經由濕潤相連通路徑(包括角隅流)離開網絡。網絡中的濕潤相因為角隅流的存在所以可連接成連通的路徑，因此汲取的模擬是假設網絡中的濕潤相是連接到濕潤相源，增加濕潤相源的壓力以使毛細壓力下降，因為濕潤相是相連通的緣故，所以壓力可傳遞到網絡中各個區域，網絡中的所有的角隅濕潤相會同時增厚。在模擬汲取的過程中假設網絡外的濕潤相流體只能經由角隅流的方式進入網絡中，同時予許非濕潤相流體可經由與邊界聯通的路徑離開網絡。

無論排退或是汲取，只要毛細壓力改變，必須根據二相流界面的置換機制，分析二相流界面在系統中新的平衡位置以及二相流體在各通道中重新配置的情形。排退時，對應於新的毛細壓力，沿著二相流體凸界面所在的位置檢核凸界面入侵下一個通道的可能性，若下一個通道中的活塞型運動毛細壓力門檻值小於系統的毛細壓力，則凸界面會通過該通道到達其出口處(即該通道與再下一個通道的交接處)，否則凸界面會停留在原處。如此持續檢核的動作，直到所有非濕潤相通道中的凸界面均無法再前進為止。因為孔的尺寸大於頸管，所以凸界面一旦可以通過一頸管，必定會持續向前通過下一個孔；但是通過孔的凸界面卻不一定可以通過下一個頸管，需視下一個頸管的活塞型運動毛細壓力門檻值是否小於系統的毛細壓力。因此，網絡中排退的速率主要是受到頸管所主控，並且凸界面最後停留的位置必定是在孔與未達毛細壓力門檻值的頸管交接處。

汲取時，對應於新的毛細壓力，若孔中發生脫離置換的壓力門檻值大於系統毛細壓力，且可滿足式 2-19 的幾何條件時，孔中會被濕潤相所充滿，接著孔四周的頸管會立即發生活塞型置換，若式 2-19 的幾何條件成立，則孔四周的頸管中發生活塞型置換的毛細壓力門檻值必定高於孔中發生脫離置換的毛細壓力門檻值。其次，若一頸管中發生攔斷置換的門檻壓力值大於系統的毛細壓力，頸管會被濕潤相所充滿，且在該頸管的兩端出口處會有新的凸界面形成。最後，凸界面以 I_n 型汲取入侵孔的可能性，孔中一旦

發生 *In* 型汲取，其四周的非濕潤相頸管也會立即發生活塞型置換。整理上述理論可得：濕潤相汲取的發生順序是頸管中的攪斷、孔中的脫離、以及孔中的 *In* 型汲取三種置換方式相互競爭的結果，因此孔頸徑比值的大小扮演相當重要的角色。若網絡中的平均孔頸徑比值較大，容易先發生頸管攪斷，則會有較多的非濕潤相入陷在網絡中。在汲取過程中，壓力的遞減步幅必須非常小，使得在每個置換步驟中只允許有一個置換事件發生，如此才可確保模擬或實驗可重現的結果。



第三章 微模型實驗系統開發

3-1 微模型實驗系統概述

本研究發展之微模型板是由 $300\ \mu\text{m}$ ~ $1200\ \mu\text{m}$ 之正方形孔頸單元，藉由微模型內互連通之孔隙通道，將三相流体(NAPL、空氣、水)控制在設定壓力水頭值範圍，而逐步作增加或減少壓力水頭之微模型實驗。整個微模型實驗系統包括微模型板、壓力控制系統、CCD、XY 移動平台、試驗液體、影像處理軟體等構件，實驗系統組合圖如圖 3-1 所示，有關實驗共同構件主要是 CCD，XY 移動平台，將於 3-1 節詳細說明；至於微模型和壓力控制系統，於 3-2 節及 3-3 節則分別只先作概略性介紹，主要是因為第四章二相流置換機制微模型實驗、第五章二相流體特性曲線實驗與第六章三相流體特性曲線實驗在微模型和壓力控制系統兩部份各不相同，本文將在四、五、六章各章節進一步說明；另外影像處理軟體等則於 3-4 節作完整介紹。

CCD 影像系統

本研究採用泰洛科技(Nowa Co., Ltd.)所代理的數位 CCD 影像系統，內部包含一 CCD 照相機，及一數位影像擷取卡。此系統的優點在由 CCD 到影像擷取卡都是以數位訊號傳遞，而非像以前的影像處理方式，以前的影像處理是 CCD 照相機以類比訊號傳至影像擷取卡後，擷取卡再將類比訊號轉成數位影像，而在轉置過程中會導致訊號能量的損失，造成照片失真等情形。而本研究所採用的數位 CCD 影像系統則是在 CCD 照相機時即以數位訊號取得影像，並將它分別以紅色、綠色、藍色及同步訊號等四個訊號分別傳輸，未經由任何的影像訊號的處理與轉置，更未造成訊號能量的損耗，這一點對於影像分析處理上至為重要。

該數位 CCD 影像系統最快能以每秒 25 張的速度連拍，對於觀察微模型內的變化顯已足夠。該系統另配備顯微鏡頭及廣角鏡頭，顯微鏡頭的觀察範圍為 0.8mm

×0.8mm，可充分觀察到微模型單一孔隙內的變化，廣角鏡頭的觀察範圍則是 4cm ×4cm ~32 cm ×32 cm，主要在觀察微模型整體的變化情形。

XY 移動平台

本研究將 CCD 影像系統置於一 XY 平台上，該平台能使 CCD 照相機能在平面上任意移動，並附有減速馬達，能以不同速度移動。平台也附有 Z 軸方向移動功能，可供 CCD 照相機調整焦距之用。

試驗液體

P-S 及 K_r -S 實驗曲線所選取之試驗液體，有機液體方面本研究選用屬於 LNAPL 的柴油及屬於 DNAPL 的四氯乙烷。柴油與汽油均為機動車輛的燃料油，代表加油站地下儲存槽主要的儲存液體，是土壤與地下水污染的主要來源。且柴油的揮發性較低，壓力較易控制。四氯乙烷為目前最常見的 DNAPL 污染物之一，其結構式為 1,1,2,2-Tetrachloroethane。本實驗將去離子水及有機物溶劑分別以藍色及紅色染劑加以染色，控制其濃度為 0.05%。此濃度以影響試驗液體之物理特性最小，又可清楚分辨出兩種度同的液體為原則。因此實驗中所觀察的藍色液體為水，紅色液體為有機溶液。考慮到所加染料對試驗液體表面張力的影響，特別將染色後的試驗液體，送至工研院化工所分析（附錄三），經工研院分析水表面張力之數據結果證實加入染料（濃度百分率 0.005%）前後對液體表面張力影響確實甚微之論點，因此本研究除了水表面張力之實驗數據外，並不須作其他液體之物性數據，試驗液體之性質列於表 3-1 中。

表 3-1 試驗液體之重要性質

試驗液體	化學式	密度 ($\frac{g}{cm^3}$) (24°C 下)	表面張力 (與空氣界面張力) (dynes/cm)	與水界面張力 (dynes/cm)
水 (染色後)	H_2O	0.997	71.5	
柴油		0.820	22.8	48.7
四氯乙烷	$C_2H_2Cl_4$	1.600	32.75	38.75

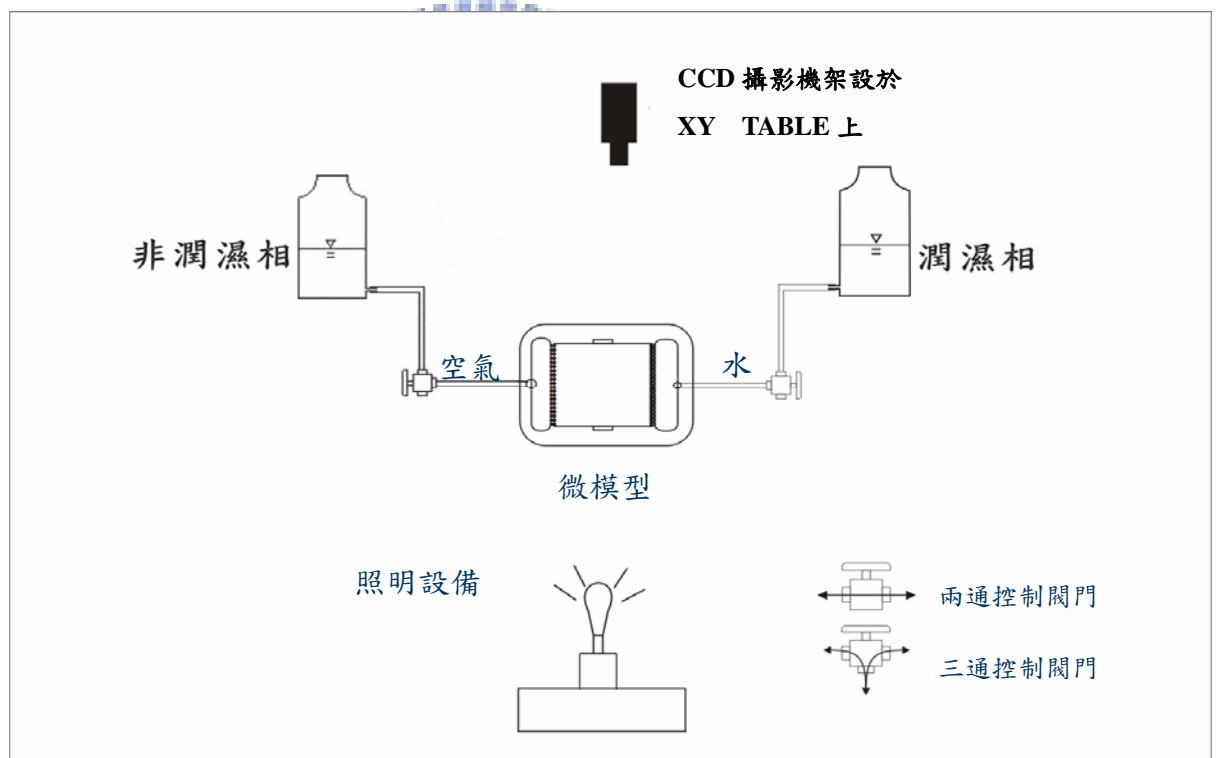


圖 3-1 微模型實驗系統立面組合圖

3-2 微模型板設計製作

以下就微模型材質、微模型板孔頸網絡設計、雷射加工技術等實驗系統開發作完整說明。前人所做的微模型實驗方面之研究，大多以玻璃材質為主，雖然微模型板內之孔隙形狀尚可控制，但在深度方面一直無法獲得很好的控制，而本研究的微模型主要以壓克力板(塑膠)為應用材質，在此先簡介其基本特性，俾使能更瞭解為何本研究選用塑膠類為主要應用材料。聚合物(polymer)，又稱為高分子或巨分子(Macromolecules)，也是一般所俗稱的『塑膠』(Plastics)或樹脂(Resin)。所謂塑膠，其實它是『合成樹脂』中的一種，形狀跟天然樹脂中的『松樹脂』相似，但因又經過化學的力量來合成，而被稱之為塑膠。

根據美國材料試驗協會所下的定義，塑膠乃是一種以高分子量有機物質為主要成分的材料，它在加工完成時呈現固態形狀，在製造以及加工過程中，可以藉『流動』(Flow)來造型.因此經由此說明我們可以得到以下幾項了解:

1. 它是高分子有機化合物
2. 它可以多種型態存在例如液體固體膠體溶液等
3. 它可以成形(Moldable)
4. 種類繁多因為不同的單體組成所以造成不同之塑膠
5. 用途廣泛產品呈現多樣化
6. 具有不同的性質
7. 可以用不同的加工方法(Processing method)

聚合物是由許多較小而結構簡單的小分子(Monomer)，藉共價鍵來組合而成的。聚合物的種類繁多，一般若是以其對熱之變化來分類，其可以分為兩大類:

1. 熱固性塑膠(Thermo set plastics):指的是加熱後，會使分子構造結合成網狀型態。一但結合成網狀聚合體，即使再加熱也不會軟化，顯示出所謂的[非可逆變化]，是分子構造發生變化(化學變化)所致。

2. 熱塑性塑膠(Thermo plastics):指加熱後會熔化，可流動至模具冷卻後成型，再加熱後又會熔化的塑膠；即可運用加熱及冷卻，使其產生可逆變化(液態 \longleftrightarrow 固態)，是所謂的物理變化。

本研究應用雷射加工技術將微模型雕刻在壓克力板(聚甲基丙烯酸甲酯，PMMA)上。壓克力塑膠其化學結構式如圖 3-2 所示，特性為非晶體聚合物，92%光線穿透率，熱變性溫度介於 74°C~102°C 間，而其應用優點在於 1.高光學透明性 2.耐候性佳 3.剛性佳 4.易染色，但其缺點在於 1.耐化性差 2.長期使用溫度最高 93°C 3.應力集中處，較易碎化，主要用途在燈罩、窗玻璃、標示牌、光學透鏡、硬式隱形眼鏡、汽車零件等。

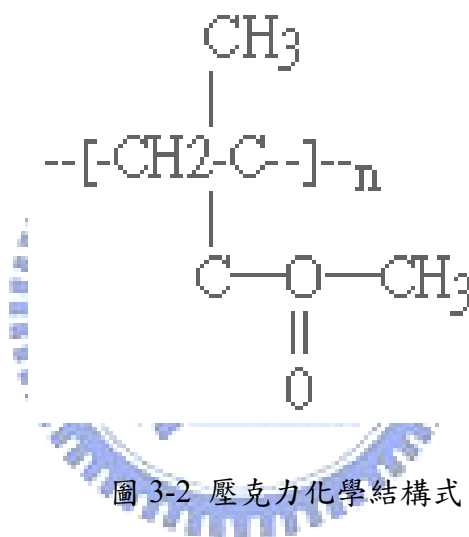


圖 3-2 壓克力化學結構式

選擇壓克力為主要應用的材質，其主要原因在於第一，壓克力塑膠為熱塑型塑膠，加工容易，透光性好，容易成型，符合本研究可透視微模型的要求，第二，壓克力塑膠也為雷射雕刻機應用良好的材質。

微模型刻在一塊 2 公分厚，尺寸大小分別為約 5 個*5 個孔隙，20 個*20 個孔隙等兩種不同尺寸之壓克力塊上，分別使用於孔頸置換機制探討 二相流 $K_r - S - P$ 微模型試驗及三相流 $K_r - S - P$ 微模型試驗平台。其孔頸單元細部放大圖如圖 3-3 所示，較大的正方形即為孔隙(Pore)，而較小的長方形為通道(Throat)，孔隙與孔隙中心點相距 2.2mm。微模型是由各五種不同寬度的通道(Throat)及孔隙(Pore)以代表土壤孔隙分佈的情形，板之各邊為 20 個孔隙，而孔隙之間以通道相連通，總共 400 個孔隙與 760 個通

道，其通道寬度列於表 3-2。微模板孔隙是由五種不同寬度之孔頸尺寸組合，其中五種不同寬度之孔及頸單元各別出現之機率都相同都各為 1/5，因此微模板孔隙分佈應該是屬於一種非連續的分佈。每一個孔隙及通道寬度的決定均由 AUTOCAD 的 Visual Basic for Application (VBA) 所均勻隨機產生，同時可計算各種寬度的孔隙與通道的個數，及所佔的比率等，如表 3-3。最後並可計算其涵蓋的總面積 18.5 cm^2 ，其中孔隙所佔的面積 7.7 cm^2 ，孔隙率約 0.42。深度方面孔隙與通道相同，其深度約為 0.8mm。

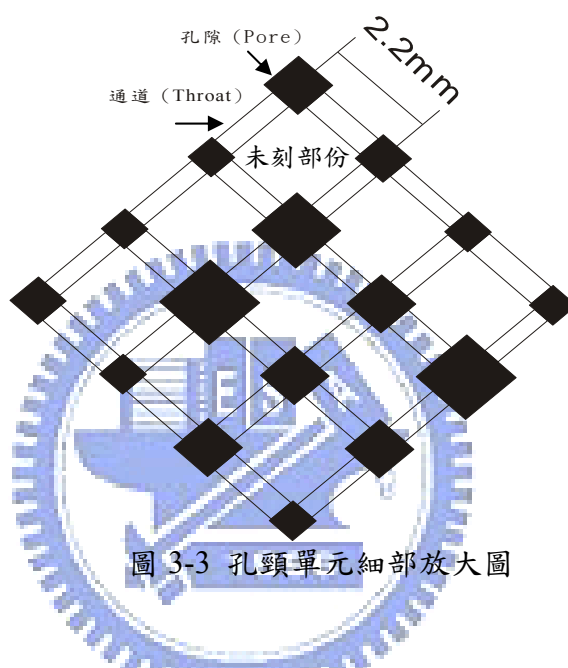


圖 3-3 孔頸單元細部放大圖

表 3-2 孔隙與通道寬度表（單位：mm）

孔隙 (Pore)	通道 (Throat)	柵欄 (Barrier)
0.60	0.3	0.1
0.72	0.34	0.2
0.88	0.38	1
1.14	0.42	
1.28	0.46	

表 3-3 各種寬度之孔隙、通道的個數及面積（單位：mm）

	寬度	個數	面積	所佔比例
孔隙	0.60	64	23.04	0.01
	0.72	88	45.62	0.03
	0.88	98	75.89	0.04
	1.14	84	109.17	0.06
	1.28	66	108.13	0.06
通道	0.30	160	102.89	0.06
	0.34	168	72.56	0.04
	0.38	142	70.07	0.04
	0.42	132	70.45	0.04
	0.46	158	92.92	0.05
合計		1160	770.74	0.42

同時本研究也在微模型兩側加刻一深度較孔隙深的槽，以便讓液體在進入微模型前，能先均勻充滿儲存槽後，再均勻的流入微模型中，不同的流體擁有其個別之儲存槽，如圖 3-3~圖 3-4 所示。此外，此儲存槽的寬度及深度亦大到足以忽略毛細效應，這裡所提到的毛細效應指的是毛細壓力對微模型的影響。

介於微模型與儲存槽之間的是柵欄(Barriers)，柵欄主要目的在防止非濕潤相液體進入濕潤相液體的儲存槽內，避免非濕潤相跑出微模型板外致實驗無法進行，混淆其他液體的顏色。非濕潤相流向濕潤相之原因是因為濕潤相會佔滿小孔隙因此非濕潤相必須有更大壓力才能置換濕潤相。而柵欄寬度的設計則是由進入壓大小來控制，由於進入壓與孔隙寬度成反比，越窄的柵欄其進入壓越大，抵擋非濕潤相液體的能力越好。因此，窄的柵欄設計在濕潤相的儲存槽旁，以抵擋非濕潤相液體的進入，而非濕潤相儲存槽則以較寬的通道連接至微模型孔隙。柵欄寬度值同樣列於表 3-2。另外在求 P-S 及 K_r -S 實驗曲線所用之微模型板如圖 3-4~圖 3-5 所示，

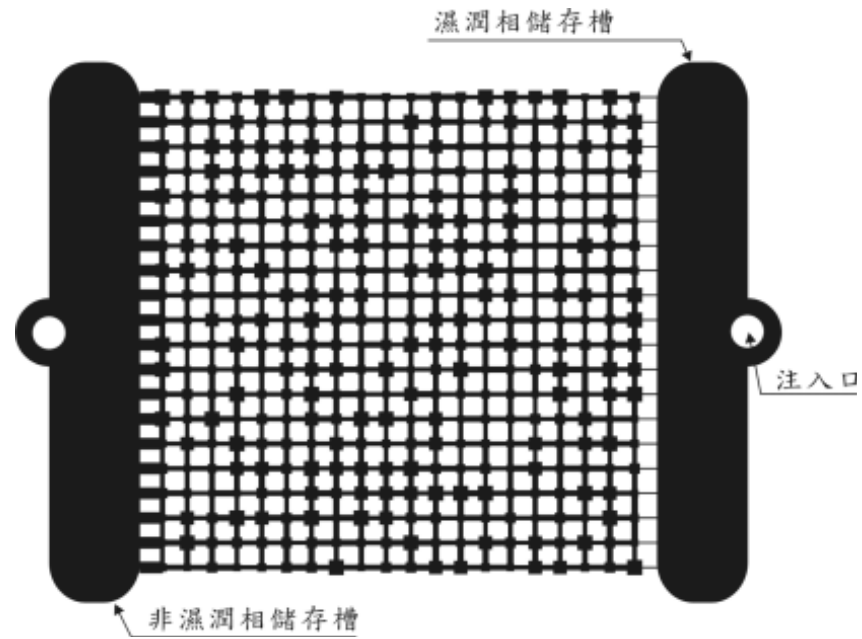


圖 3-4 P-S 微模型示意圖

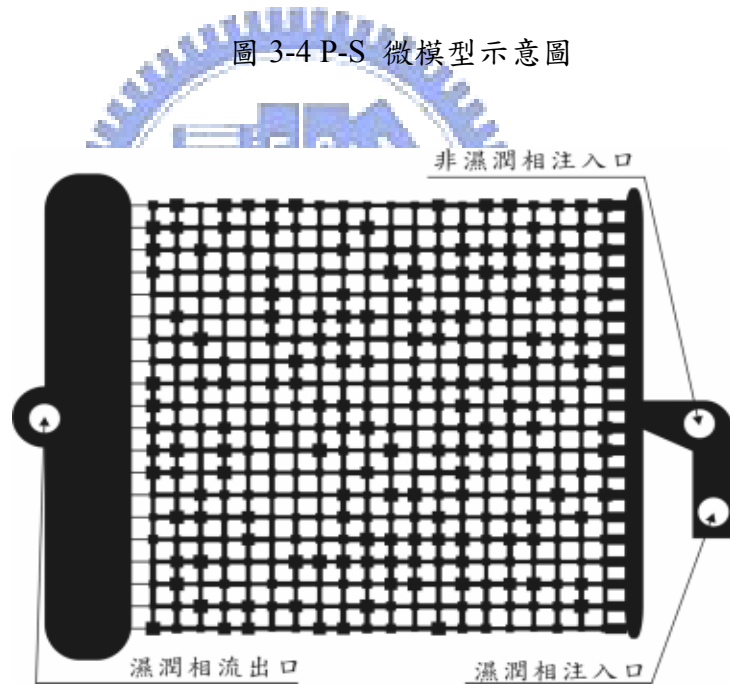


圖 3-5 K_r -S 微模型示意圖

微模型製作組合方式如圖 3-6 所示，為一刻有微模型的壓克力塊，與一壓克力平板，外面再以兩壓克力厚塊以螺絲均勻鎖緊，不過由於壓克力材料的關係，市面上壓克力均有厚薄不均的缺點，最厚的地方與最薄的地方可差距到 0.5mm 之多，這對於微模型的密合，有著很大的影響。且若是以磨床加以磨平，使其厚薄差距至 0.1mm，但在

實際組合微模型並進行實驗時可發現水仍可由未刻的部分流動。

因此本研究特別在原本未刻的部分，多雕刻一凹槽如圖 3-7 所示，黑色部分為雕刻部分，白色部分為未雕刻部分。凹槽的意義有二：第一，未雕刻部分可區隔凹槽與孔隙通道，並使得凹槽可儲存空氣。第二，凹槽相對於未雕刻部分與薄板所形成之細縫而言空間較大，因此雖然細縫中仍有濕潤相（水或柴油，端看實驗而定）

存在，但凹槽的非濕潤相空氣較難取代細縫中之濕潤相，因此便形成空氣被侷限在凹槽內，同時濕潤相也不能進入凹槽，故濕潤相僅能循設計之孔隙與通道流動。經實驗證明，此方法效果不錯。

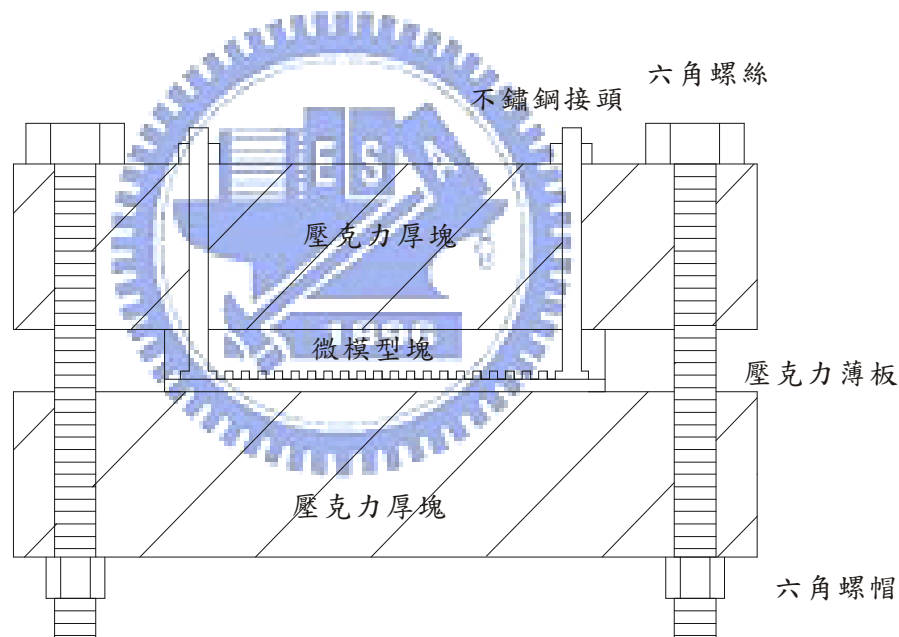


圖 3-6 組裝完成之微模型示意圖

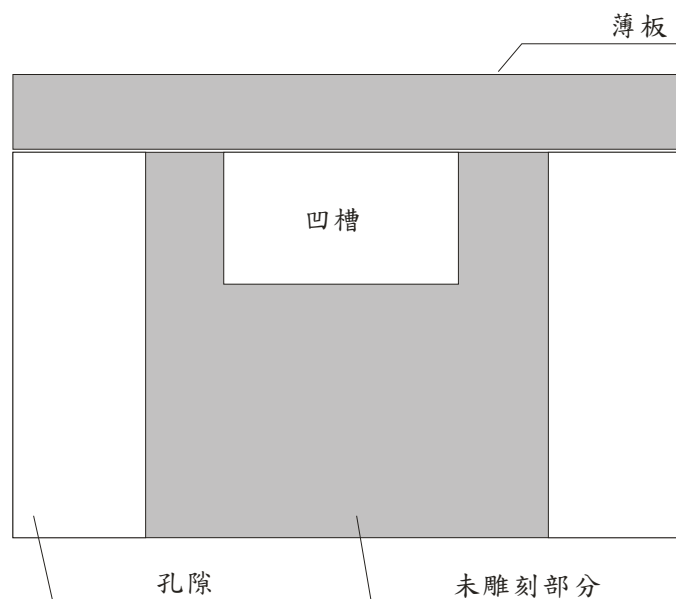


圖 3-7 微模型凹槽剖面示意圖

微模型板製作---雷射雕刻技術與 雕刻機深度檢量

前人所做的微模型實驗方面之研究，大多以玻璃材質為主，雖然微模型板內之孔隙形狀尚可控制，但在深度方面一直無法獲得很好的控制，如 Soll (1993)是以溶劑侵蝕玻璃所作成之微模型，溶蝕過後，其形狀、大小及深度均無法控制如原設計尺寸要求。有鑑於此，本研究尋找一個可精準雕刻的技術以取代溶蝕的方法，而雷射雕刻技術可解決前述孔隙尺寸加工精度不足之問題。本研究所使用組裝之機台為『ILS-III 智慧型雷射切割、雕刻系統』，該系統具有高加速與高速度的特性，可以在更短的加工時間內，完成相同的工作。同時擁有更先進的軟體驅動程式，可以有更多的雕刻效果及更精準的雕刻品質，並配備新型氣冷式二氧化碳雷射，體積小穩定性高。

雷射雕刻之控制參數可設定雷射功率、加工速度和雷射切割點的密度(PPI)。其中雷射功率，表示雷射源所發出的功率，加工速度表運動系統的速度。因此，當雷射功率越大，加工速度越小，代表雷射在加工工件上的一點所耗的能量越多，時間越久，深度也更深，反之，雷射功率越小，加工速度越大，代表雷射在工件上的一點所耗的能量較少，時間較短，自然深度也較淺。由於雷射光點的寬度為 0.007mm，故其最小可雕刻寬度為 0.01mm。至於在深度方面，本研究同時對此機台做雕刻深度上的檢測如圖 3-8，

減量線依功率與速度的不同，大致呈現一關係變化，且在相同功率、速度情形下，每一次雕刻的深度均相差 0.01mm 左右。

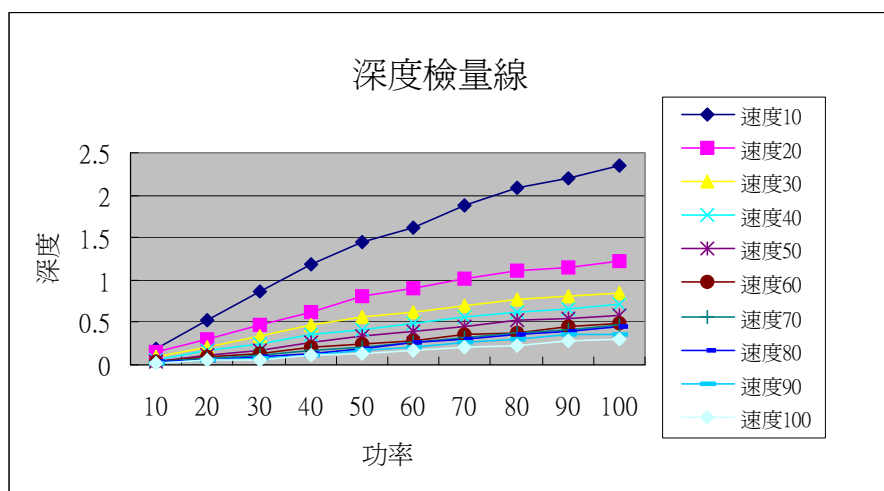


圖 3-8 雷射功率、加工速度

微模型表面處理

本研究選用壓克力為實驗的材料，應用雷射加工技術將微模型雕刻在壓克力板(聚甲基丙烯酸甲酯)。但是在顯微鏡頭觀察接觸角時發現，水的接觸角約 110 度，而柴油則是約 80 度，兩者均介於中性流體，這是與前人研究的玻璃材質及現場的土壤最大不同處。因此，本實驗在壓克力表面作處理，改變水及 NAPL 在壓克力表面的接觸角，使實驗順利進行。因為壓克力的表面，NAPL 對壓克力的附著力遠大於水對壓克力的附著力，即 NAPL 在壓克力表面是濕潤相，水反而是非濕潤相。這是在一般現地土壤中，在土壤表面最濕潤相的順序依次為水、NAPL、空氣不一致的；為此，我們尋求一種黏著劑，可以很薄、而且均勻的塗在壓克力表面，改變水在壓克力表面的附著力，以順利進行實驗。

本研究選用壓克力為實驗的材料，其優點已在前面章節敘述。然而，在實驗的過程中，我們卻發現的一個嚴重的缺失。在壓克力的表面，非水相液對壓克力的附著力略大於水對壓克力的附著力，也就是說非水相液在壓克力表面是濕潤相，水反而是非濕潤

相。此與水或非水相液在一般土壤中濕潤行為剛好相反。於是我們尋求一種黏著劑，可以很薄、而且均勻的塗在壓克力表面，改變水在壓克力表面的附著力，以順利進行實驗。矽酸鈉(水玻璃)是我們後來找到一個簡單好用的材料。本研究實驗過程中嘗試在刻好的壓克力表面，以稀釋過的矽酸鈉溶液均勻塗抹，然後置入約 70°C 烤箱中烘乾一天，盡量將表面的矽酸鈉含水量減至最低。經過多次實驗證明，此時壓克力表面的矽酸鈉可浸水五日而不崩壞，所以矽酸鈉抗水侵蝕的程度可以符合本實驗的需求。

矽酸鈉的特性

矽酸鈉 ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{H}_2\text{O}$, $n=2\sim4$) 是一種可溶於水的矽酸鹽類，俗稱水玻璃，一般用途是做為黏著劑。通常為透明黏稠狀的液體物質。當它脫水而成為玻璃態時，原本是可溶性的物質卻可以抗水的侵蝕，但若長期浸泡於水中也會崩壞。一般矽酸鈉的作法，是由純化過的矽砂與蘇打灰或硫酸鈉一同熔融。

本研究先將矽酸鈉加入純水中稀釋至 0.5% 濃度，再以滴管將稀釋後的矽酸鈉滴在壓克力表面 1~2cc 左右後，用毛刷均勻塗抹矽酸鈉水溶液在壓克力表面，並去除壓克力表面上多餘之矽酸鈉水溶液，然後置入約 70°C 烤箱中烘乾一天，盡量將表面的矽酸鈉含水量減至最低。由於矽酸鈉水溶液的濃度很低，且塗抹在壓克力表面的矽酸鈉含量非常少，並不會阻礙實驗流體在微模型中孔隙通道的流動，也不會改變孔隙尺寸大小。

矽酸鈉使用前後之比較

為證明矽酸鈉確實可以改變水在壓克力表面的濕潤度，我們做了 A、B 兩組測試的實驗，並利用 CCD 放大鏡頭拍攝其接觸角情況。A 組表面不塗任何黏著劑，B 組則在表面均勻塗抹一層矽酸鈉，同樣在水先飽和的情況下，讓有機液體從另一邊入侵。

從圖 3-9(a)，圖 3-10(a)中可發現，在未塗矽酸鈉之前，藍色部分的水呈現非濕潤的現象，紅色部分的有機液體則呈現濕潤的現象，附著於壓克力的表面。圖 3-9(b)為矽酸鈉使用後的情形，紅色有機液體從右方入侵，從有機液體與壓克力的接觸角可以定性地判斷其為非濕潤相，而在圖 3-10(b)則為油珠被包圍在孔隙中的情形。由 A、B 兩組測

試的實驗中，我們可以確定矽酸鈉確實發揮了作用，改變了水與有機液體在壓克力表面的濕潤性。

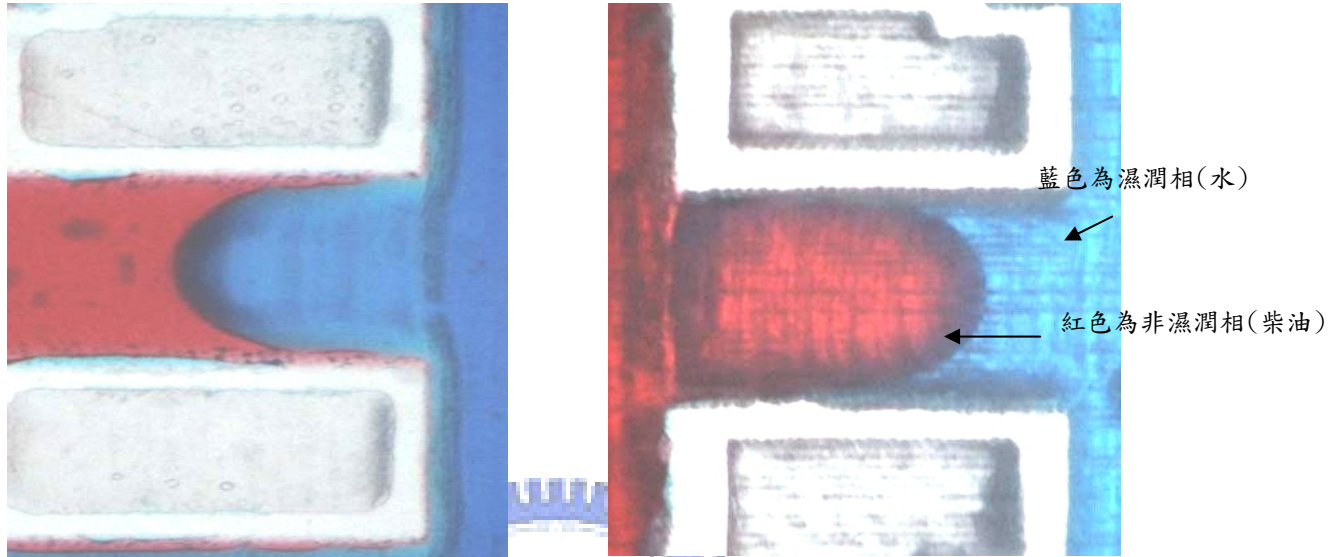


圖 3-9 (a) A 組矽酸鈉使用前(1)

圖 3-9 (b) A 組矽酸鈉使用後

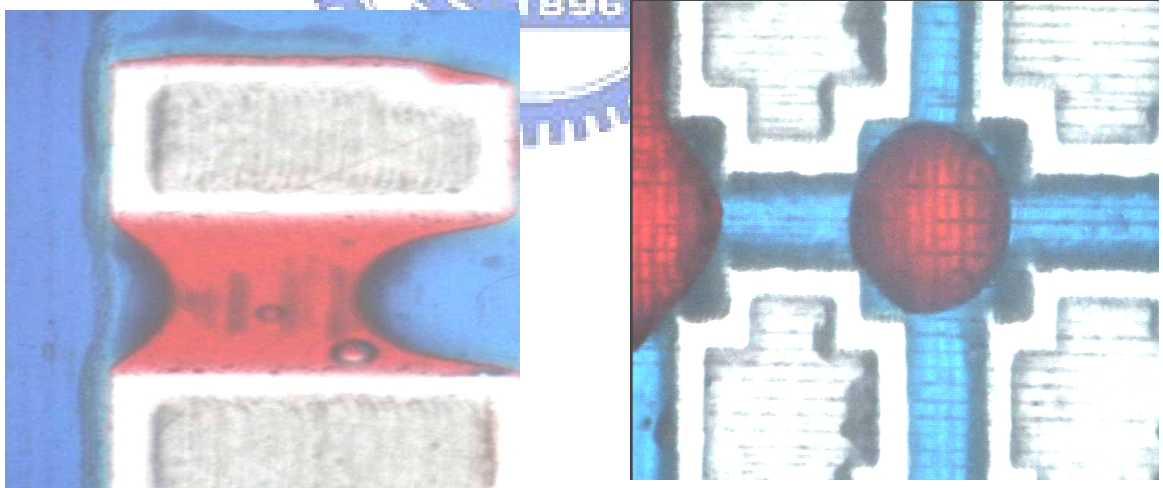


圖 3-10(a) B 組 矽酸鈉使用前

圖 3-10(b) B 組矽酸鈉使用後

3-3 壓力控制系統

壓力控制部分主要可以分為兩種，一種是水與有機液體的壓力控制。壓力控制部分主

要在於不希望因為進入微模型的液體多寡而影響液面高程，導致壓力改變，故本研究選用大口徑的玻璃罐，讓其進入孔隙的液體所導致的液面高度下降，所影響的壓力變化減至最小，以螺桿來控制升降。第二種是空氣的壓力控制，由於本實驗所需的壓力水頭不大，且每個階段壓力水頭差距僅數釐米左右，故其他常用控制空氣壓力的方式如調壓閥等已不符實驗所需，故本研究採用微模型板左側管路接空氣壓，右側端管路接一氣泡但氣泡需保持在與微模型板相同水平之位置氣泡上方可加入一定量水，藉由調整水位高度（液體壓力）當作微模型板兩側之壓力差控制。

如圖 3-11，連接壓力控制系統與微模型之間的是 TYGON 管，管的優點在於外觀透明，且在數天內不會因為非水溶相液體（NAPL）而變質變形。管子經由一不鏽鋼接頭連接至微模型板，確保其液體、氣體能順利流至微模型，並且不外漏。

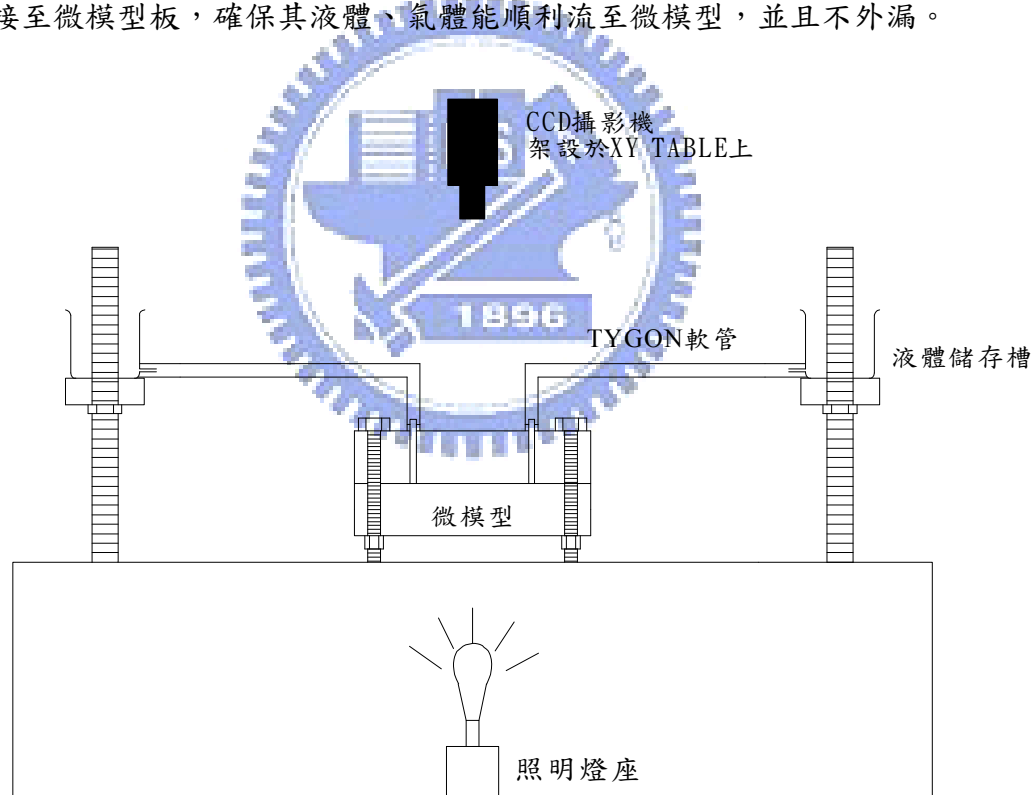


圖 3-11 微模型實驗系統壓力控制圖

3-4 影像分析

本研究採用之數位 CCD 影像系統，內部包含一 CCD 照相機，及一數位影像擷取卡。該數位 CCD 影像系統最快能以固定的速度連拍，對於觀察微模型內的變化顯已足

夠。該系統另配備顯微鏡頭及廣角鏡頭，顯微鏡頭的觀察範圍為 $0.8\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ ，可充分觀察到微模型單一孔隙內的變化，廣角鏡頭的觀察範圍則是 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \sim 32\text{cm} \times 32\text{cm}$ ，主要在觀察微模型整體的變化情形。

利用數位影像取像的目的在於可以從實驗中取得大量且具有相同高品質的影像，而數位影像分析（digital image analysis，DIA）則是可以由大量的影像資料中，經由數位化作業能夠充分的獲得掌握及分辨不同之處。另外數位影像分析也可以獲得其他方式所沒辦法得到的逼真資料。所以，本文利用數位影像分析去計算飽和度，去找出每一實驗階段的液體分佈情形。所使用的 CCD 攝影機，它可以在每一張影像上提供 640×480 像素（pixels）的解析度。而擁有越多像素的攝影系統，當然對相同的面積而言有更高的解析度。對被拍攝的物件而言，用更多像素去表現它，它的邊緣將更銳利（sharp），線條更柔和，色彩更豔麗。在電腦上螢幕所統一制定的顯色方式之一就是 RGB 模式，所有顏色都可以從紅藍綠三色中組合產生，而每種顏色份量都被定為 0-255 之間，所組成的顏色就有 $256 \times 256 \times 256 = 16^6$ 。此外利用 PHOTOSHOP 可針對每一個像素取得它的 RGB 值，故本文將利用 PHOTOSHOP 軟體對實驗影像作影像分析，以下分別敘述影像分析的步驟：

- (1) 當實驗剛開始，微模型內充滿濕潤相液體時，利用 PHOTOSHOP 軟體尋找濕潤相的液體在影像上所呈現的 RGB 值範圍，並儲存其顏色範圍，當作以後選取顏色的標準。
- (2) 記錄上一個步驟所選取的範圍，並加以儲存，以當作之後選取的範圍。避免每次選取範圍的不同，造成誤差，此時所選取範圍的總像素數(Total Pixels)，亦為計算飽和度時位於分母項的總體積。
- (3) 接下來每一階段的實驗影像，皆在第三步驟的所記錄的範圍內，利用第 一步驟所記錄的顏色標準來進行選取，並記錄其選取的總像素數，除以第三步驟的總像素，即為此階段的飽和度。
- (4) 最後，利用每一階段的飽和度與壓力，繪出保持曲線。

第四章 二相流置換機制之微模型實驗與分析

本章所用之實驗裝置和第三章微模型實驗系統裝置之說明一樣，但為求簡化實驗，僅以一組微觀的空氣-水流體對置換（互相取代）機制實驗，藉觀察流體對間互相置換取代的行為與前人所提出之流體對間之置換行為是否一致，並與前人以幾何形狀所推估出來的置換機制門檻值進行比較與驗證，並進一步確認微模型實驗設計之正確性與合理性。其中 4-1 節 介紹置換機制實驗，主要是說明五種不同孔頸寬度通道網絡模型置換機制實驗，包括試體準備、試驗步驟等.... 4-2 節則將置換機制(包括排退、汲取階段)推估結果與實驗值比較分析。

4-1 置換機制實驗

本章利用可透視微模型來替代實際土壤，配合數位影像處理，首先探討排退與汲取階段中，潤濕相與非潤濕相在孔隙尺度大小之互相取代的機制，並藉以驗證本研究實驗設計之合理性。圖 4-1 為置換機制實驗的整體研究大綱。

圖 4-1 之 (A) 部分為可透視微模型的實驗，其細部的流程圖如圖 4-2 之 (A) 部分所示。圖 4-1 之 (B) 部分為由 (A) 部分所得之實驗影像，進行影像分析以求得飽和度。實際的步驟為，首先決定選取的範圍及選取顏色的標準，而顏色標準指的是液體呈現在影像上進而挑選出來的 R、G、B 值，再來利用相同的選取範圍及顏色標準，對每一張實驗影像做篩選，篩選出來的像素加總後再除以總選取範圍內的像素數，即為飽和度。其細部的流程圖如圖 4-2 之 (B) 部分所示。

圖 4-1 之 (C) 部分為利用上面的步驟所得之實驗影像資料來做流體間取代機制與前人所提理論置換機制進行比較分析，其細部的流程圖如圖 4-2 之 (C) 部分所示。整合以上各部分的說明即為置換機制實驗之完整的研究步驟流程圖。如圖 4-2 所示。

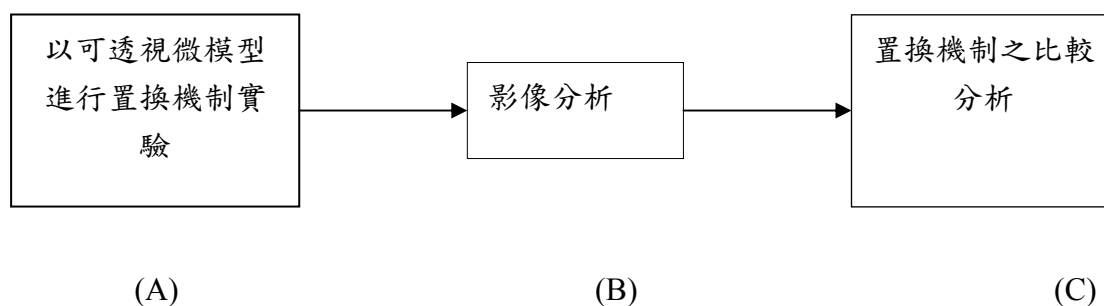


圖 4-1 置換機制實驗研究步驟大綱

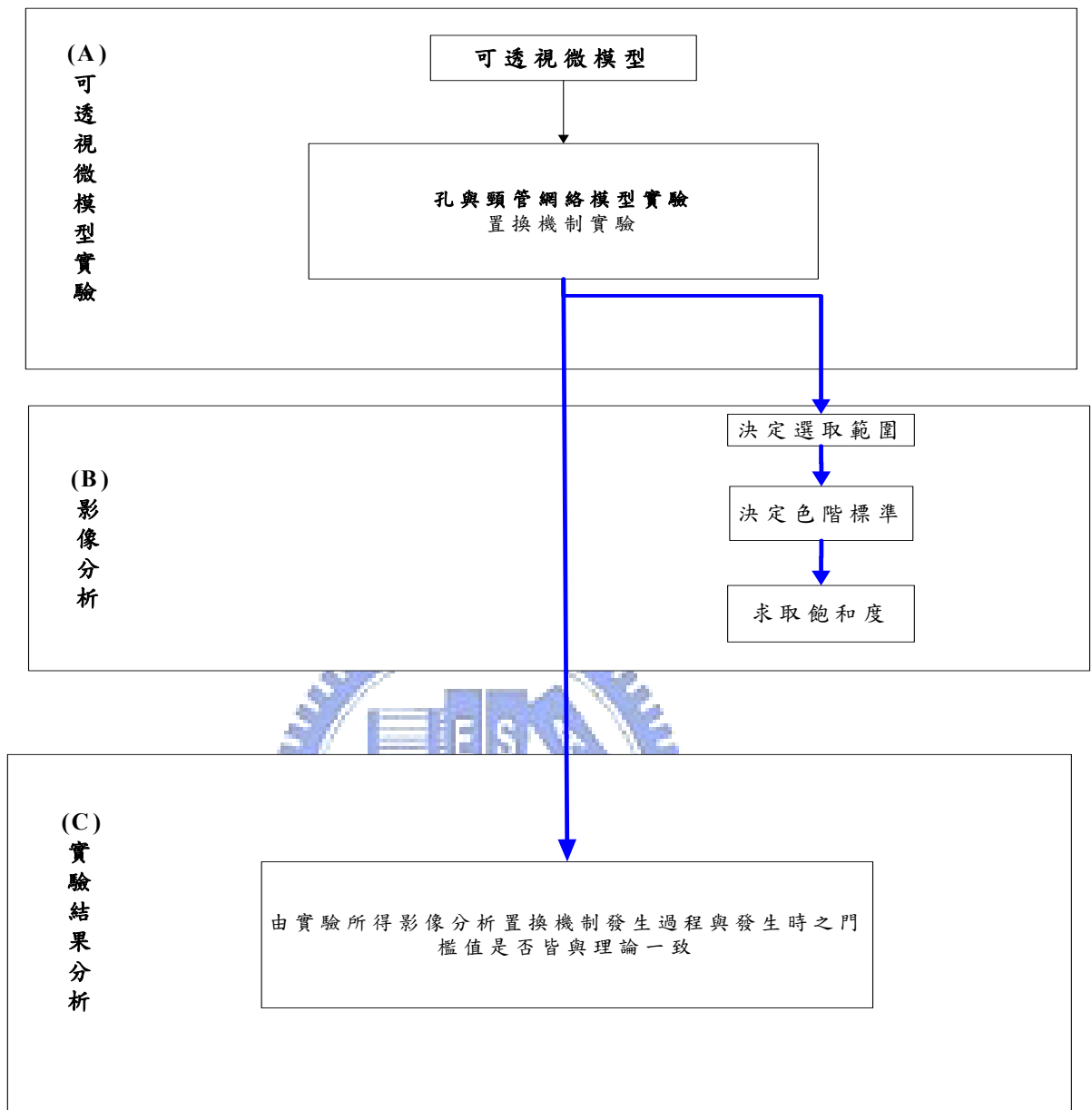


圖 4-2 置換機制研究流程圖

本章所使用之微模型置換機制實驗中的五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型，其孔隙與通道寬度尺寸如表 4-1，其每一個孔隙及通道寬度的決定均由 AUTOCAD 軟體的 Visual Basic for Application (VBA) 所均勻隨機產生，同時可計算各種寬度的孔隙與通道的個數，及所佔的比率等，如表 4-2。最後並可計算其涵蓋的總面積為 1.02 cm^2 ，其中孔隙所佔的面積五種寬度的孔與 5 種寬度頸管的實驗：約 0.44 cm^2 ，孔隙率約 0.43。通道網絡模型實驗的圖形乃由 CorelDraw 軟體所繪成，深度方面孔隙與通道相同，其深度

約為 0.8mm。

表 4-1 五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型之孔隙與通道寬度（單位：mm）

孔 (Pore)	頸管 (Throat)	柵欄 (Barrier)
0.6	0.34	0.1
0.72	0.38	
0.88	0.42	
1.14	0.46	
1.28	0.5	

表 4-2 五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型之各種寬度之孔隙、通道的個數及面積

	寬度 (mm)	個數	面積(cm^2)	所佔比例
孔隙	0.60	3	1.08	0.01
	0.72	6	3.47	0.03
	0.88	6	4.65	0.05
	1.14	4	5.20	0.05
	1.28	6	9.83	0.10
通道	0.34	10	2.39	0.02
	0.38	4	2.29	0.02
	0.42	7	6.64	0.07
	0.46	12	3.51	0.04
	0.50	7	5.07	0.05
合計		65	44.12	0.43

圖 4-3 為置換機制實驗步驟之流程圖，相對於五種不同孔頸寬度通道網絡模型之兩相間置換機制實驗步驟等內容會進一步說明，圖 4-4 置換機制實驗微模型板示意圖，圖 4-5 是本研究壓力控制系統示意圖。

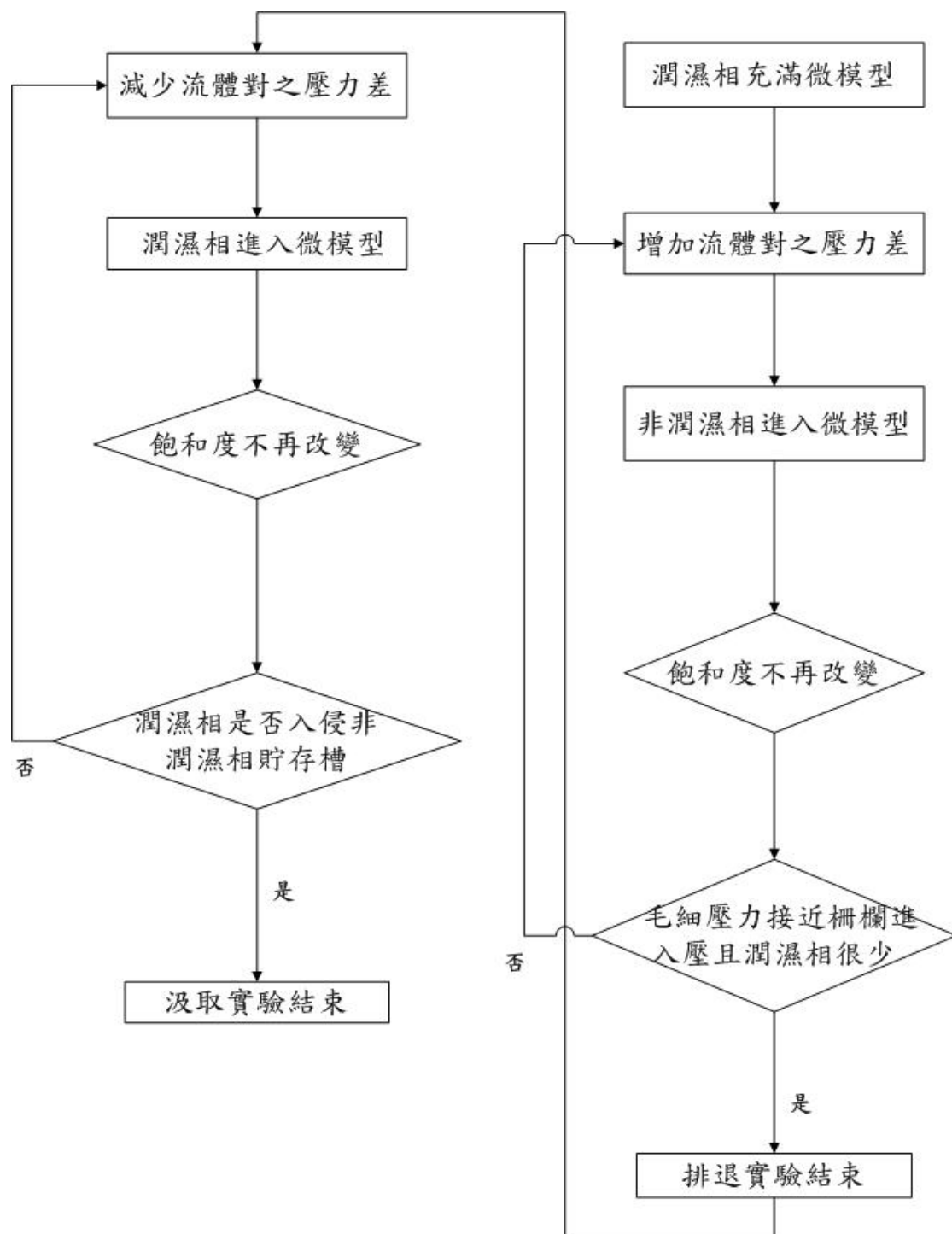


圖 4-3 兩相間置換機制實驗步驟流程圖

試驗步驟

首先以水相與氣相實驗步驟分段條列敘述：

- i. 將二氧化碳灌入微模型板中，趕走內部空氣，再將水灌入微模型板中，以

溶解二氧化碳達到飽和。

- ii. 在排退(Drainage)部分，每次下降一定的壓力水頭，等待平衡後，再次下降。本研究採用降低水相的壓力水頭以吸引非濕潤相的流體進入微模型板中，同時 CCD 以固定的速度記錄微模型內變化的情形，若在一定時間內，所拍下的照片均不變，則視為平衡。最後，當微模型內的水變得很少且毛細水頭已接近柵欄的穿透壓時，即停止下降。
- iii. 而汲取(Imbibition)部分，每次上升一定的壓力水頭，等待平衡後，再次上升。直到水進入非濕潤相的儲存槽為止。同理本研究採用逐漸升高水相的壓力水頭以排退非濕潤相。同時 CCD 以固定的速度記錄微模型內變化的情形，若在一定時間內，所拍下的照片均不變，則視為平衡。

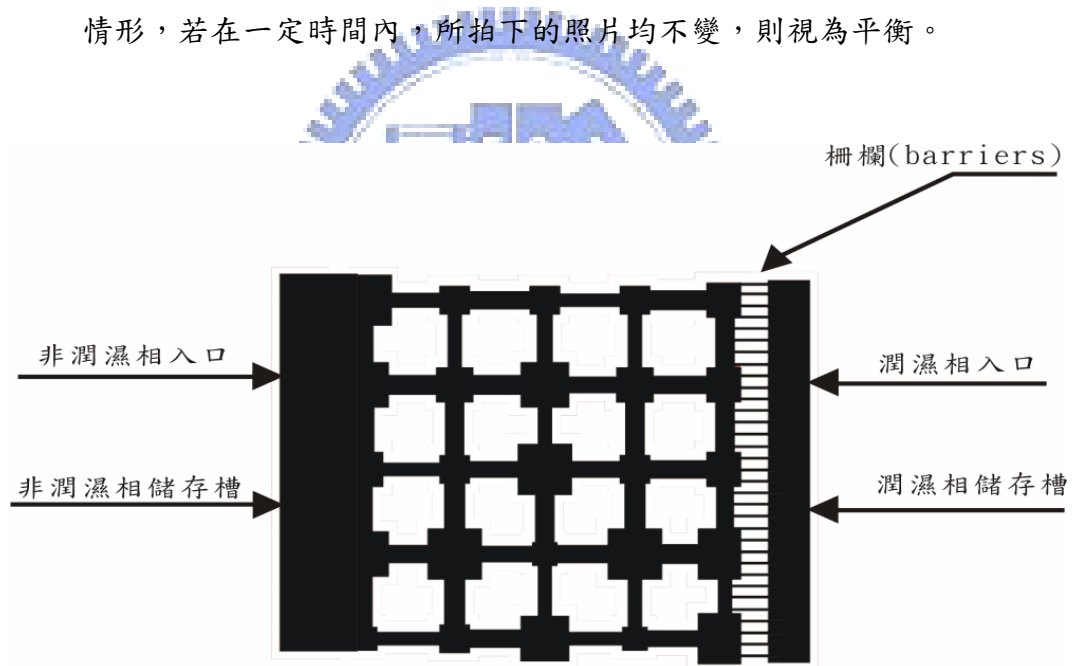


圖 4-4 置換機制實驗微模型板示意圖

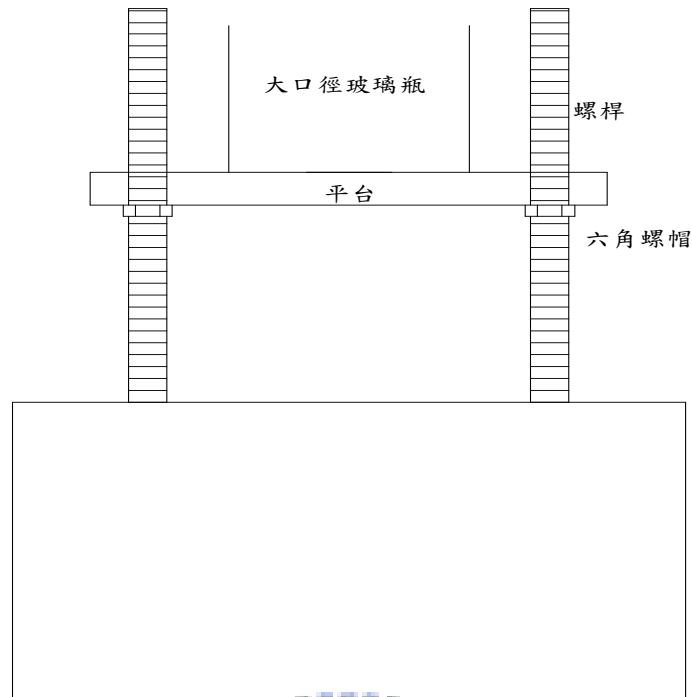


圖 4-5 壓力控制系統(游標尺)示意圖。

4-2 置換機制推估與實驗觀察結果比較分析

本章節將微模型實驗觀察結果與置換機制推估值，分成排退階段與汲取階段兩部份作比較說明之。

排退階段

圖 4-6-1 是微模型孔頸寬度分佈圖，後續圖 4-7~圖 4-16 所用微模型孔頸寬度分佈接相同於圖 4-6-1 所示。在排退初期，當非潤濕相進入儲存槽後，接著佔領孔，然後不再往左右或往下移動，此時實驗系統的毛細壓力為 2.8 cm，如圖 4-6-2 所示，而理論之活塞型運動之壓力門檻值應為 2.8cm，所以非潤濕相進入孔中。

在排退第五階段時，系統毛細壓力為 4.0cm，並無明顯變化，且非潤濕相仍停留於孔中，並未向前突破頸管。

排退第六階段時，當毛細壓力增加至 4.3cm 時，寬度為 0.5 mm 的頸管其理論活塞型運動的門檻值為 4.5cm，非潤濕相突破寬度為 0.5 mm 的頸管並且充滿與該頸管相連的孔，如圖 4-7 所示。在排退第七階段時，系統的毛細壓力為 4.5cm，非潤濕相繼續向

前突破寬度為 0.5 mm 的頸管並停留在孔中，但非潤濕相隨後突破寬度為 0.46 mm 的頸管，並停留在頸管中，未進入孔中，如圖 4-8 所示。

在排退第九階段時，系統毛細壓力為 4.8cm，寬度為 0.46 mm 的頸管其理論活塞型運動的門檻值為 4.8cm，非潤濕相突破寬度為 0.46 mm 的頸管並且充滿與該頸管相連的孔，且開始突破孔周圍的頸管，並繼續進行活塞型置換，在本階段的排退路徑中，頸管寬度都為 0.5mm，所以當系統毛細壓力達到足以排退寬度為 0.46mm 的頸管時，也就足以將寬度大於 0.46mm 的頸管或孔進行排退，此時飽和度由 $S_w=0.85$ 降至 $S_w=0.76$ ，如圖 4-9 所示。排退第十階段，系統毛細壓力達到 5.0cm，寬度為 0.42mm 的頸管其理論活塞型置換的門檻值為 5.04cm，非潤濕相突破寬度為 0.42mm 的頸管，並進入孔中，且持續進行活塞型運動；在本階段的排退路徑中，頸管寬度皆小於 0.42 mm，且該寬度的頸管數量多且相通，所以造成非潤濕相的飽和度迅速增加，由原本的 $S_w=0.76$ 降至 $S_w=0.51$ ，如圖 4-10 所示。

第十一階段，系統毛細壓力再增加 1mm 時，毛細壓力為 5.1cm，此時，非潤濕相加速了兩根寬度為 0.42mm 的頸管的穿透，因為此兩根頸管原本就已經被非潤濕相穿透一半，而系統毛細壓力再增加時，此兩根頸管位於平行流線方向的位置，再加上排退第十階段即已突破 0.42mm 的頸管，所以非潤濕相會加速此兩根頸管的排退，而不會選擇突破寬度小於 0.42mm 頸管，如圖 4-11 所示。第十二階段，系統毛細壓力再增加 2mm，毛細壓力為 5.2cm，此時，非潤濕相突破頸管 0.38mm，但此時非潤濕相並沒有再移動，而停留在頸管中，另一方面，非潤濕相由下方突破寬度為 0.46mm 與 0.5mm 的頸管並停留於頸管中，如圖 4-12 所示。

在第十三階段，系統毛細壓力增加至 5.4cm，寬度為 0.38mm 的頸管其理論活塞型運動的門檻值為 5.4cm，此時非潤濕相突破寬度為 0.38mm 的頸管往下推進並停留在孔中，另一方向上的非潤濕相亦突破 0.5mm 的頸管進入孔中，如圖圖 4-13 所示。第十四階段毛細壓力已達到 5.5cm，寬度 0.34mm 的頸管其理論活塞型運動的門檻值為

5.81cm，非潤濕相往下突破寬度為 0.46mm 的頸管進入到孔中，另一方面，非潤濕相已經進入到寬度 0.34mm 的頸管中，但並未再往孔邁進而停留在頸管中，如圖 4-14 所示。

排退第十五階段，毛細壓力達 5.6cm，非潤濕相開始突破 0.34mm 的頸管，但僅是佔領部分頸管，如圖 4-15 所示。排退第十六階段當毛細壓力到達 5.8cm 時，非潤濕相亦未完全突破最小的頸管頸管如圖圖 4-16 所示。本實驗之排退階段，每一階段之平衡時間約為 4 小時。在本實驗的排退階段中可發現以下幾點特徵：

- (1) 非潤濕相在毛細壓力足以突破‘甲’頸管的活塞型運動門檻值時，若有低於該門檻值之頸管尚未突破時，非潤濕相會優先突破該門檻值較低之頸管；若毛細壓力已到達‘甲’頸管的門檻值，且與非潤濕相相接的潤濕相頸管之門檻值皆大於‘甲’頸管之門檻值，則非潤濕相才會入侵‘甲’頸管。
- (2) 在排退階段中，非潤濕相是否會提前入侵頸管與整體頸管的排列方式相關。

有關活塞型運動的毛細壓力門檻值，Legait (1983)建議經驗預估模式如本文第二章中(2-16)式：對應於本研究中五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗之各種置換機制理論毛細壓推估結果，詳如表 4-3 所示。表 4-4 則是其置換機制統計表。

$$P_c = \frac{\sigma}{\rho} = \frac{\sigma}{r} \left[\cos \theta + \sqrt{\cos \theta \sin \theta + (\pi/4 - \theta)} \right]$$

表 4-3 五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗之毛細壓推估值(排退階段)

寬度(單位:cm)		活塞型(cm)
頸管	0.034	5.8
頸管	0.038	5.4
頸管	0.042	5.0
頸管	0.046	4.8
頸管	0.050	4.5
孔	0.060	4.1
孔	0.072	3.7
孔	0.088	3.3
孔	0.114	3.0
孔	0.128	2.8

表 4-4 五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗置換機制統計表(排退階段)

	系統毛細壓力(cm)	活塞型置換
第 1 階段	2.8	○
第 2 階段	3.1	*
第 3 階段	3.4	*
第 4 階段	3.7	*
第 5 階段	4	*
第 6 階段	4.3	○
第 7 階段	4.5	○
第 8 階段	4.6	*
第 9 階段	4.8	○
第 10 階段	5	○
第 11 階段	5.1	○
第 12 階段	5.2	○
第 13 階段	5.4	○
第 14 階段	5.5	○
第 15 階段	5.6	○
第 16 階段	5.8	○

註：*代表未發生置換，○代表已發生置換

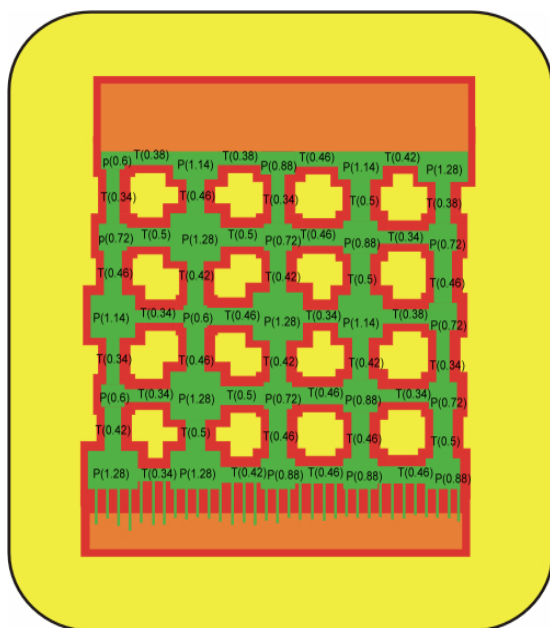


圖 4-6-1 微模型孔頸寬度分佈圖

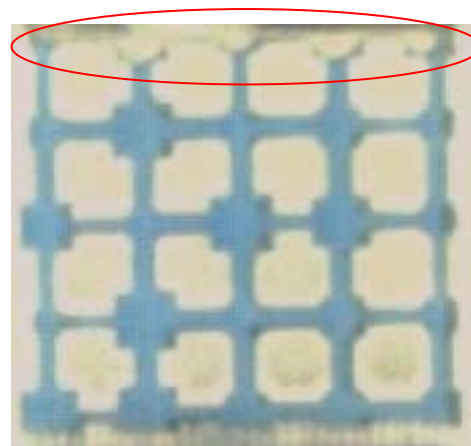


圖 4-6-2 排退第一階段

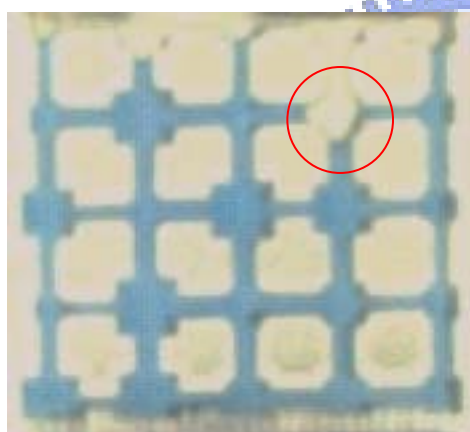


圖 4-7 排退第六階段

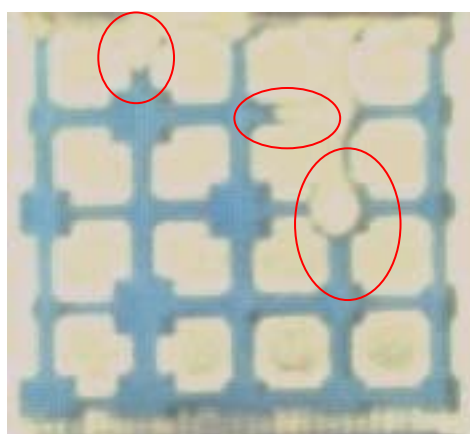


圖 4-8 排退第七階段

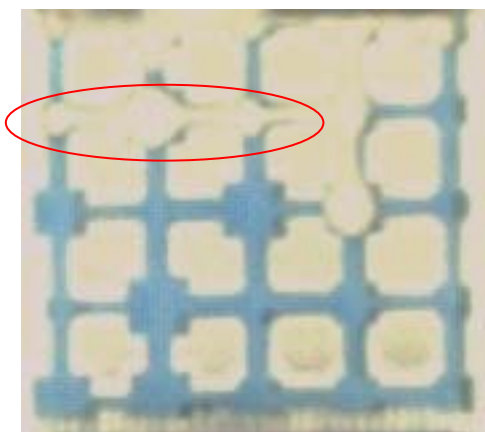


圖 4-9 排退第九階段

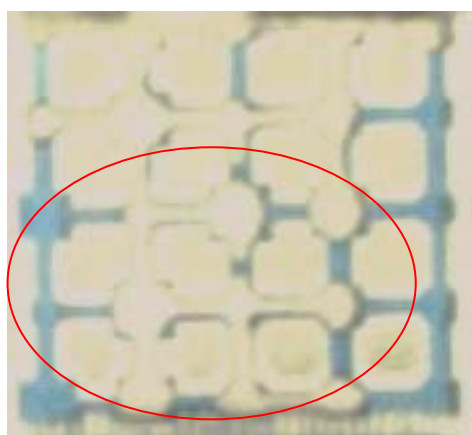


圖 4-10 排退第十階段

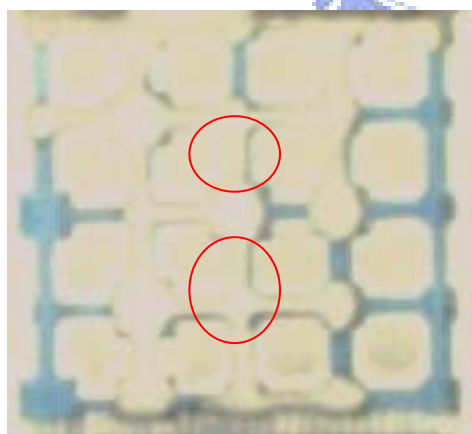


圖 4-11 排退第十一階段

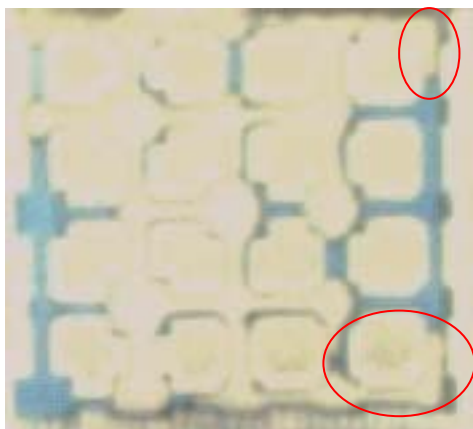


圖 4-12 排退第十二階段

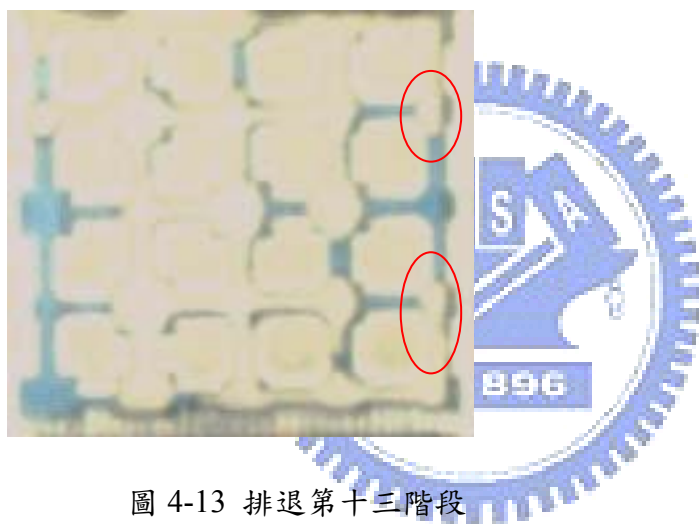


圖 4-13 排退第十三階段

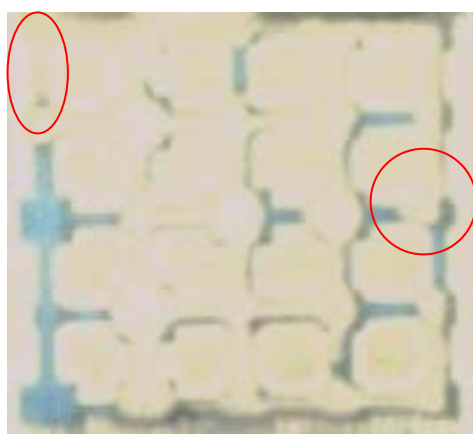


圖 4-14 排退第十四階段

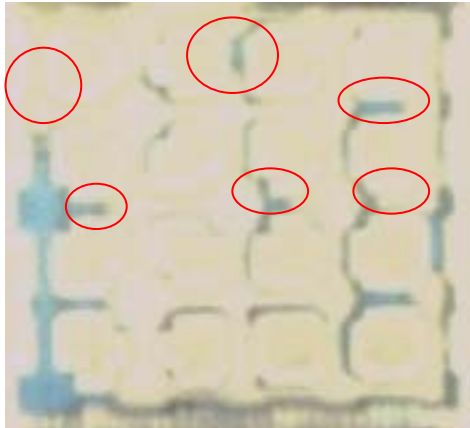


圖 4-15 排退第十五階段

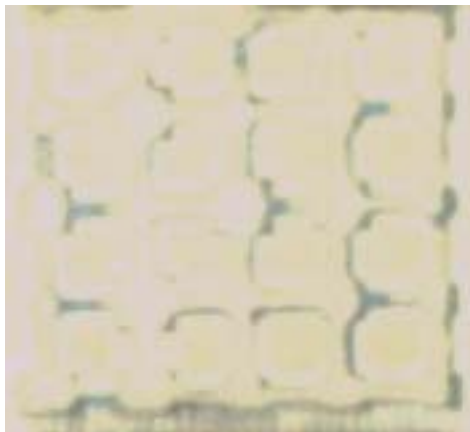


圖 4-16 排退第十六階段

汲取階段

在汲取過程發生的第一階段，毛細壓力由 5.8cm 減少至 5.5cm，此時，寬度為 0.34mm 的頸管之活塞型運動門檻值為 5.8cm，而微模型中大部分寬度為 0.34mm 的頸管在排退結束後都還有潤濕相殘留在頸管中，所以毛細壓力下降時，潤濕相也會藉由角隅流的方式流入頸管中，在系統毛細壓力到達 0.34mm 的頸管之活塞型運動門檻值時，頸管中的潤濕相的量足夠將管中的非潤濕相排出，因此該頸管即為潤濕相所佔領，潤濕相飽和度也由 0.14 增加至 0.19，如圖 4-17-2～圖 4-17-3 所示。

在第四階段時，距離潤濕相源最遠的頸管亦發生活塞型置換，若實驗在第一階段的

時間夠久，該頸管應會在汲取第一階段即發生活塞型置換，如圖圖 4-18-2 至圖圖 4-18-3 所示。

在第五階段到第八階段間，並未明顯的發生取代機制，直到第九階段在 0.34mm 的頸管發生過活塞型置換後，恰好有兩根寬度為 0.34mm 的頸管相鄰且與為模型之邊界相鄰，因此在第九階段潤濕相對孔發生汲取的行為，由於此情形並不屬於 In 型汲取中的狀況，所以也無法依 In 型汲取的理論公式比較之；且潤濕相對孔發生完汲取後，隨後又對寬為 0.5mm 的頸管進行活塞型置換，之後潤濕相又對孔進行汲取並對其相鄰的頸管發生活塞型置換，同時，與潤濕相源相鄰的一根寬為頸管 0.42mm 的頸管發生攔斷，如圖 4-19-1、圖 4-19-2、圖 4-19-3、圖 4-19-4 所示。

在第十二階段時，系統毛細壓力為 3.4cm，而寬度為 0.42mm，0.46 mm 頸管，其理論的攔斷門檻值分別為 2.5cm，2.4cm，而攔斷一發生後，潤濕相馬上對孔進行汲取，汲取之後潤濕相對頸管馬上發生活塞型置換，潤濕相飽和度由 0.27 增加至 0.40，如圖 4-20-1~圖 4-20-4 所示。

在第十四階段時，系統毛細壓力為 2.8cm，寬度為 0.88cm 與 0.72mm 的孔其理論 I1 型汲取門檻值為 3.0cm 與 3.3cm，此時只要該這兩種寬度的孔其相鄰三邊的頸管都充滿潤濕相，則會發生 I1 型汲取，如圖 4-21-1~圖 4-21-3 所示。

在汲取第十六階段時，系統毛細壓力為 2.2cm，此時寬度為 0.46mm 的頸管發生攔斷，其攔斷臨界毛細壓力門檻值為 2.4cm，而此時該頸管攔斷而導致孔發生一連串 I1 型汲取與汲取後所引發之活塞型置換，而使飽和度迅速增加，由 $S_w=0.52$ 增加至 $S_w=0.71$ ，如圖 4-22-1~圖 4-22-4 所示。

在第十七階段時，系統毛細壓力為 2.0cm，一寬度為 1.28mm 的孔發生 I1 型汲取，使得最後非潤濕相一條與非潤濕相源相連通之路徑迅速被潤濕相佔領，此時潤濕相飽和度由 0.71 增加至 0.91，如圖 4-23-1~圖 4-23-5 所示。

在第二十階段時，因為有些非潤濕相已經入陷，所以並不會再發生變化，而僅剩與

非潤濕相源連通的非潤濕相尚可繼續發生置換。此時的非潤濕相僅剩與非潤濕相源相接的孔，如圖 4-24-1~圖 4-24-3 所示。另外圖 4-25 是五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗 P-S 曲線圖。

在本實驗之汲取過程中，每一階段的平衡時間為 6~8 小時。於本實驗的汲取階段中可發現以下幾點特徵：

- (1) 於本實驗微模型邊界附近之孔的置換，無法以一般的 In 汲取比較分析，且此種孔的置換較一般 In 型汲取提早發生。
- (2) 本實驗的潤濕相飽和度乃自 I1 型汲取發生後即迅速增加。
- (3) 因為兩根相鄰的 0.34mm 之頸管發生活塞型置換後，成為兩根相鄰的潤濕頸管，相較於微模型邊界附近之其他平行而不相鄰之頸管而言具有對孔發生汲取的優勢。

Lenormand et al. (1983)建議：由於頸管攔斷發生的臨界條件為 $\rho(\cos\theta - \sin\theta) = r_t$ ，因此此頸管中發生攔斷型汲取的門檻壓力如(2-18)式為： $P_c = \frac{\sigma}{r_t}[\cos\theta - \sin\theta]$ 。至於孔之 In 型汲取門檻壓力，李天浩等人(2004)建議使用估計式如(2-21)式概估之，一般假設 $P_c = \frac{\sigma}{r_p}[C_{I1} \cos\theta]$ ，參數 $C_{I1}=1.7$ 、 $C_{I2}=1.15$ 、且 $C_B=0.7$ ，表 4-5 是孔汲取階段時，各種置換機制理論毛細壓推估結果值。表 4-6 則是置換機制統計表。

表 4-5 五種寬度的孔與頸管網絡模型之置換機制理論毛細壓推估值(汲取階段)

寬度(單位:cm)		活塞型(cm)	截斷(cm)	I1(cm)	I2(cm)
頸管	0.034	5.8	2.9	*	*
頸管	0.038	5.4	2.7	*	*
頸管	0.042	5.1	2.5	*	*
頸管	0.046	4.8	2.4	*	*
頸管	0.050	4.5	2.3	*	*
孔	0.060	*	*	3.6	2.5
孔	0.072	*	*	3.3	2.2
孔	0.088	*	*	3.0	2.0

孔	0.114	*	*	2.6	1.8
孔	0.128	*	*	2.5	1.7

表 4-6 五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗置換機制統計表
(汲取階段)

	系統毛細壓力(cm)	活塞型置換	攪斷	I1	I2	其他
第 1 階段	5.5	○	*	*	*	*
第 2 階段	5.3	*	*	*	*	*
第 3 階段	5	*	*	*	*	*
第 4 階段	4.8	○	*	*	*	*
第 5 階段	4.5	*	*	*	*	*
第 6 階段	4.3	*	*	*	*	*
第 7 階段	4.1	*	*	*	*	*
第 8 階段	3.9	*	*	*	*	*
第 9 階段	3.7	○	○	*	*	○
第 10 階	3.6	*	*	*	*	*
第 11 階	3.4	*	*	*	*	*
第 12 階	3.2	○	○	○	*	*
第 13 階	3	*	*	*	*	*
第 14 階	2.8	○	*	○	*	*
第 15 階	2.5	*	*	*	*	*
第 16 階	2.2	○	○	○	*	*
第 17 階	2	○	*	○	*	*
第 18 階	1.7	*	*	*	*	*
第 19 階	1.5	○	*	○	*	*
第 20 階	1.3	*	*	*	*	*

註：*代表未發生置換，○代表已發生置換

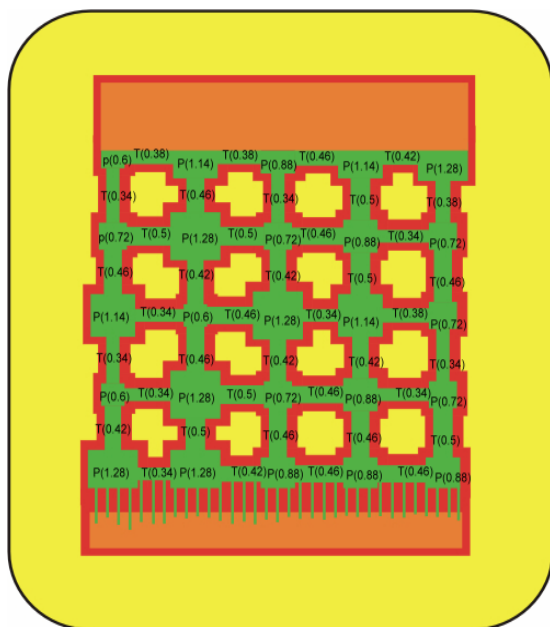


圖 4-17-1 微模型孔頸寬度分佈圖

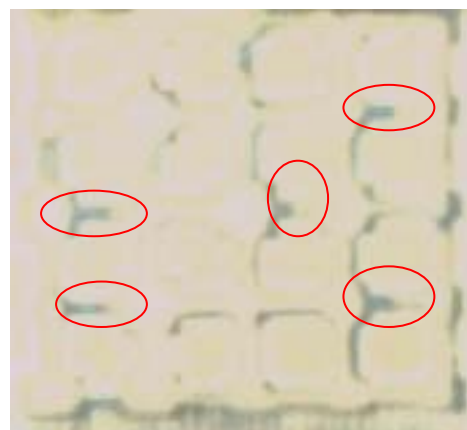


圖 4-17-2 汲取第一階段



圖 4-17-3 汲取第一階段結束

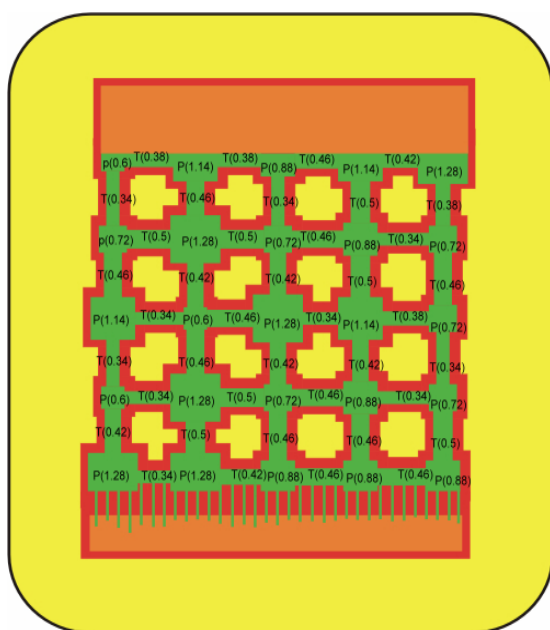


圖 4-18-1 微模型孔頸寬度分佈圖

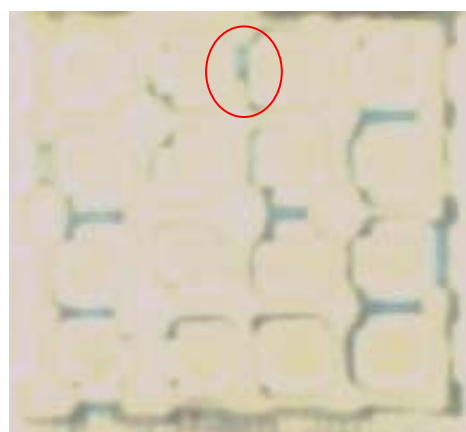


圖 4-18-2 汲取第四階段



圖 4-18-3 汲取第四階段

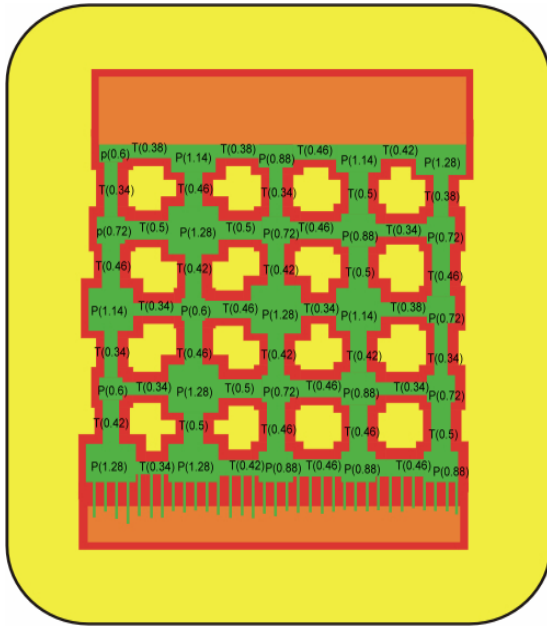


圖 4-19-1 微模型孔頸寬度分佈圖

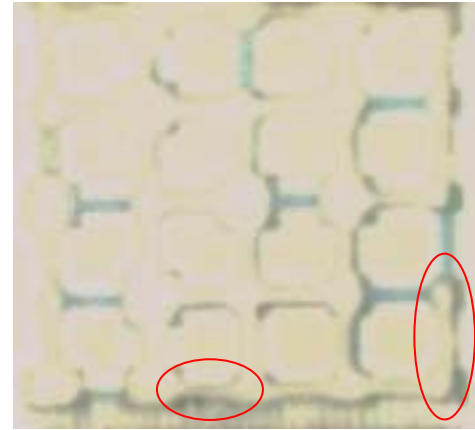


圖 4-19-2 汲取第九階段

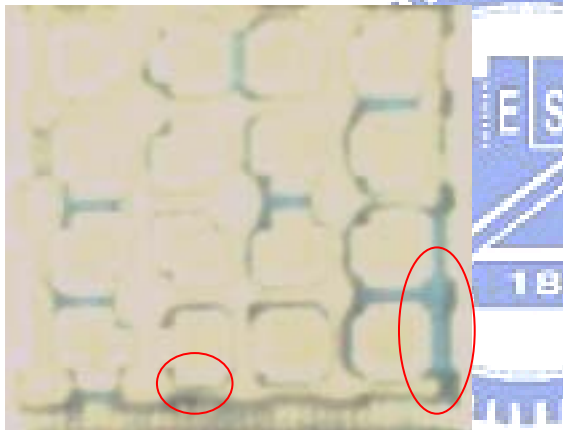


圖 4-19-3 汲取第九階段



圖 4-19-4 汲取第九階段

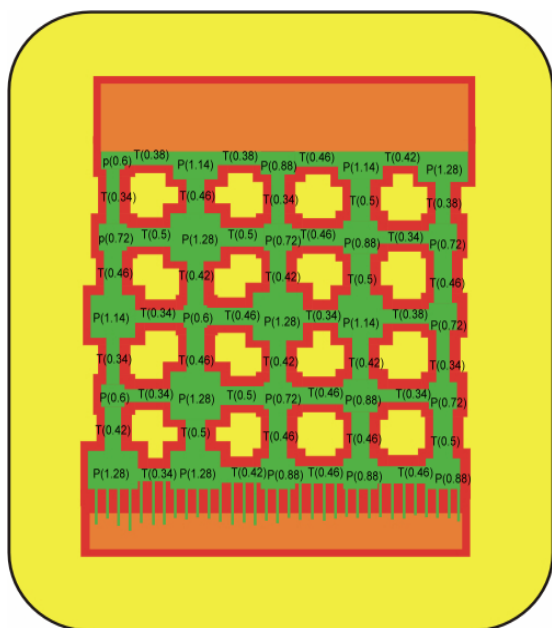


圖 4-20-1 微模型孔頸寬度分佈圖

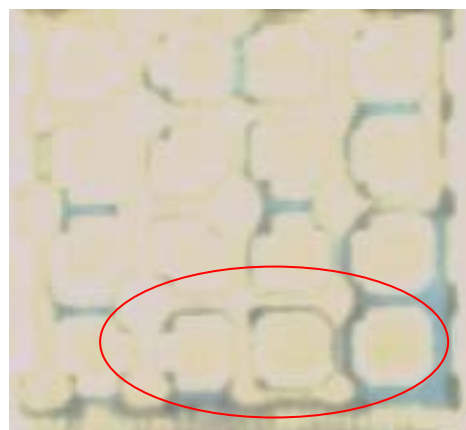


圖 4-20-2 汲取第十二階段

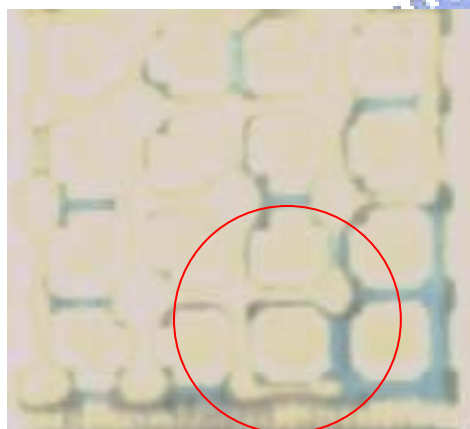


圖 4-20-3 汲取第十二階段

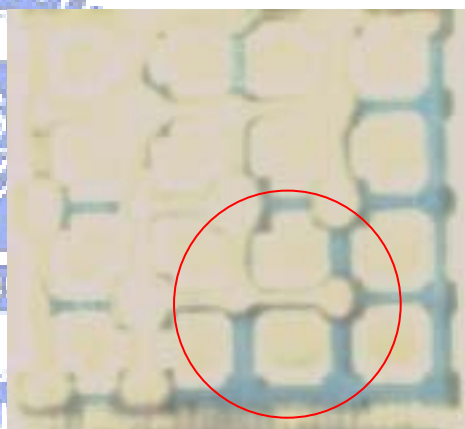


圖 4-20-4 汲取第十二階段

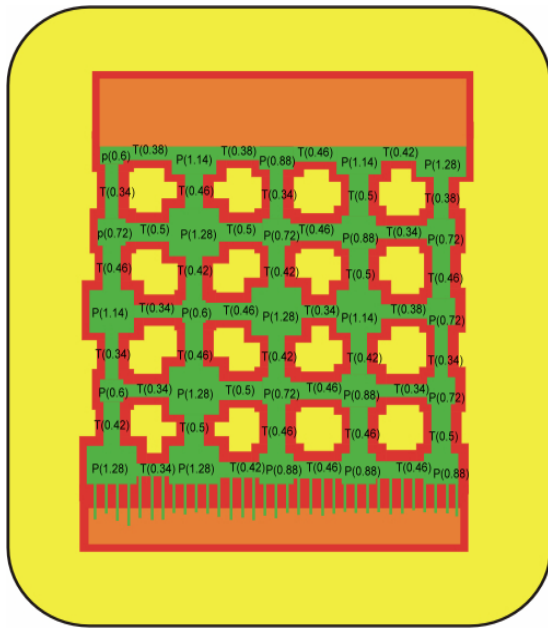


圖 4-21-1 微模型孔頸寬度分佈圖

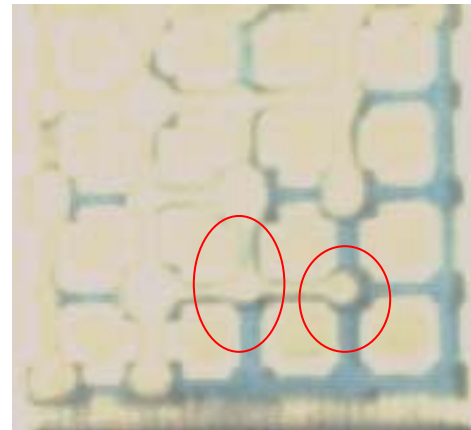


圖 4-21-2 汲取第十四階段

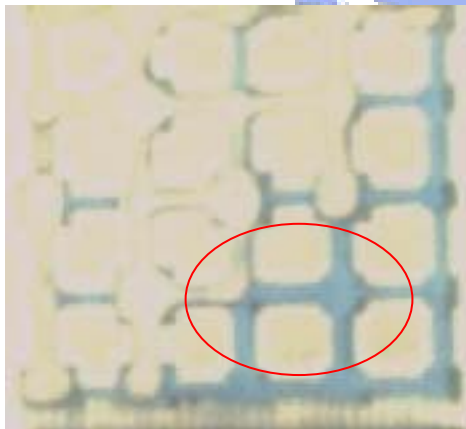


圖 4-21-3 汲取第十四階段

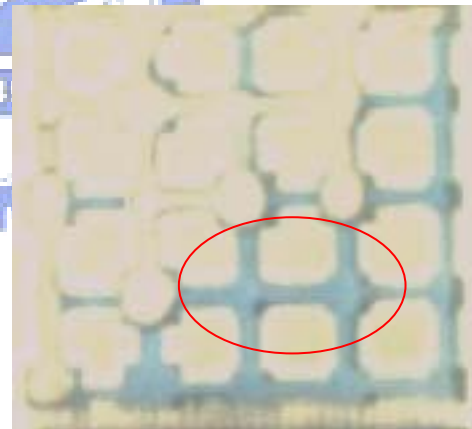


圖 4-21-4 汲取第十四階段

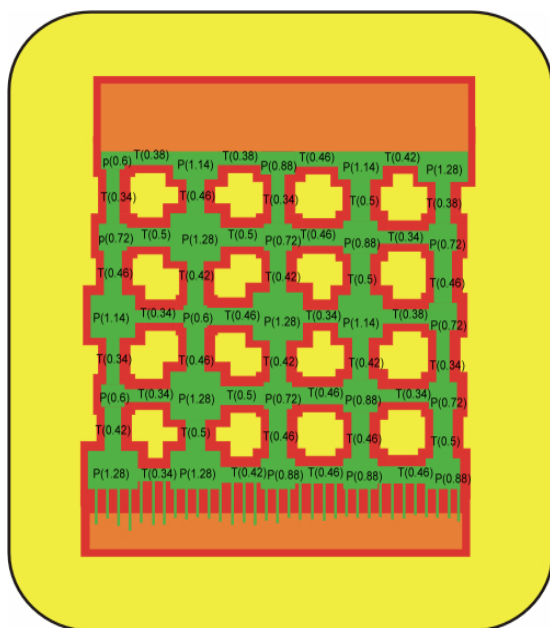


圖 4-22-1 微模型孔頸寬度分佈圖

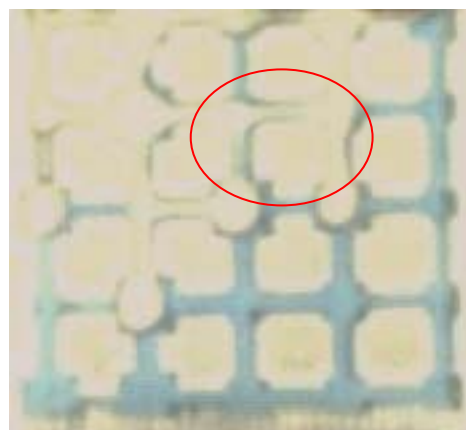


圖 4-22-2 汲取第十六階段

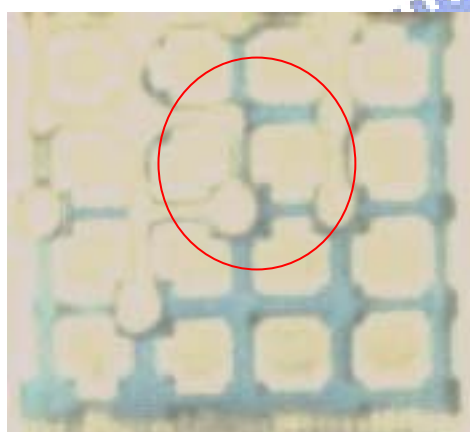


圖 4-22-3 汲取第十六階段

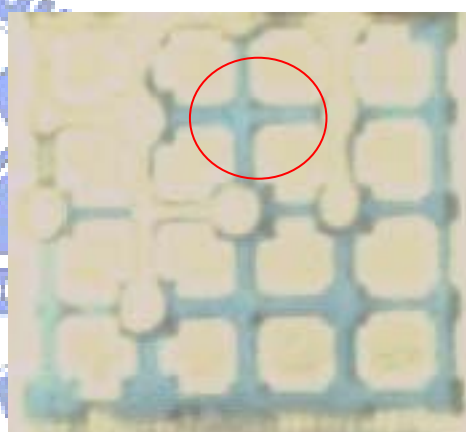


圖 4-22-4 汲取第十六階段

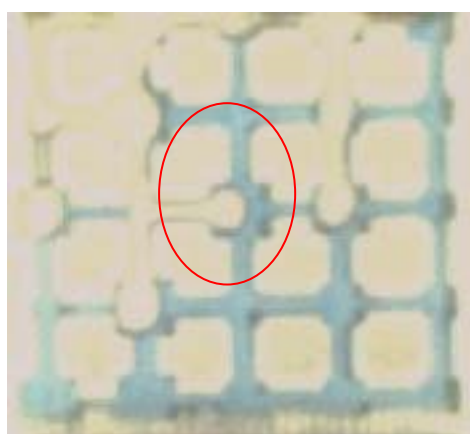


圖 4-22-5 汲取第十六階段

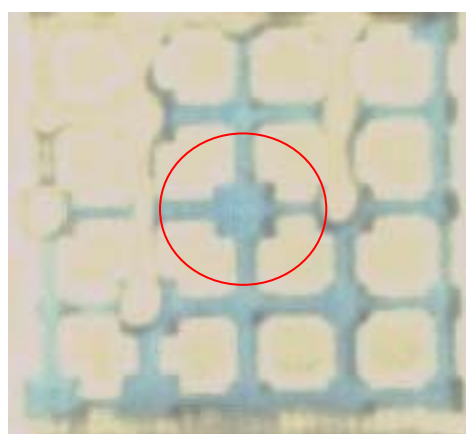


圖 4-22-6 汲取第十六階段

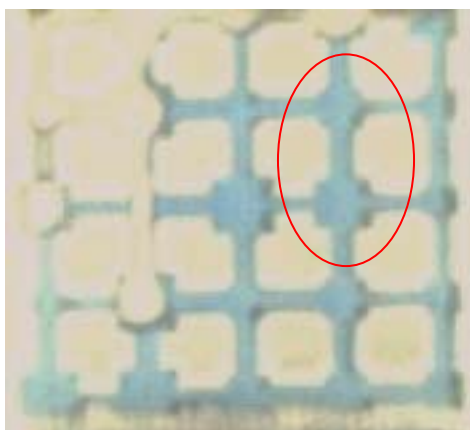


圖 4-22-7 汲取第十六階段

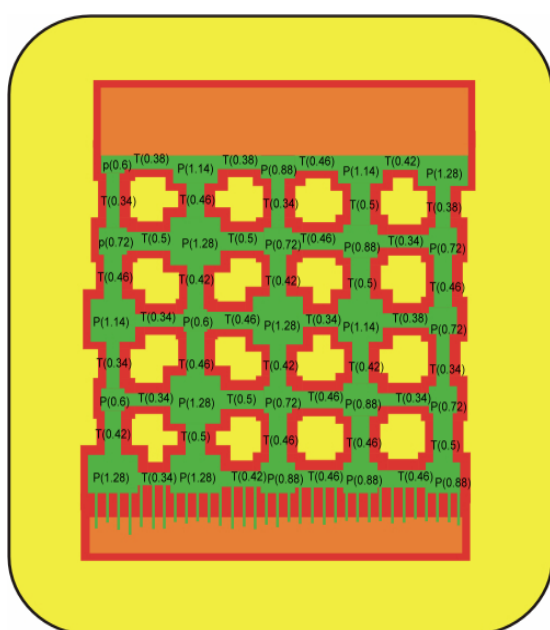


圖 4-23-1 微模型孔頸寬度分佈圖

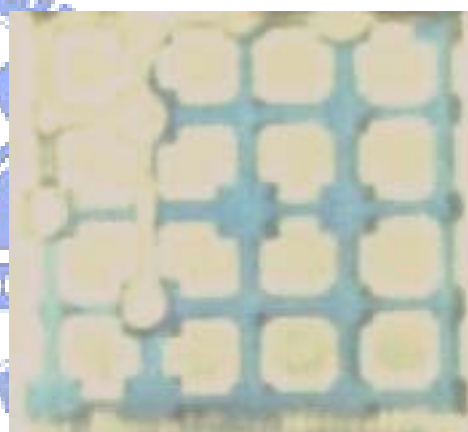


圖 4-23-2 汲取第十七階段

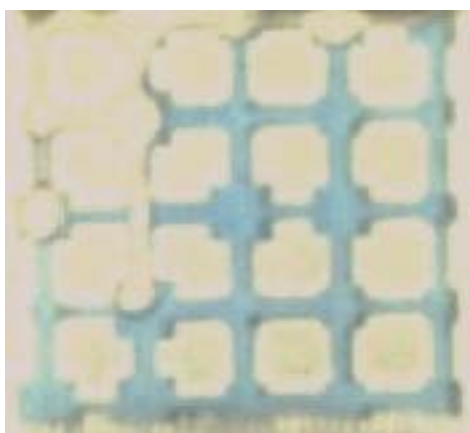


圖 4-23-3 汲取第十七階段

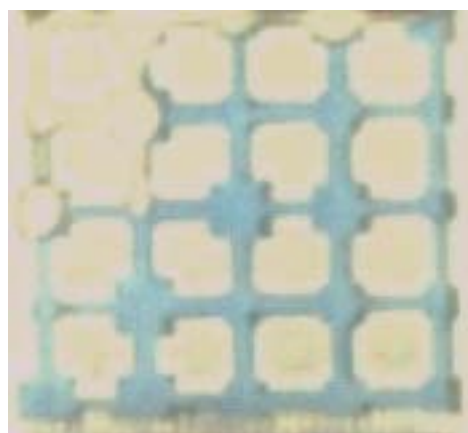


圖 4-23-4 汲取第十七階段

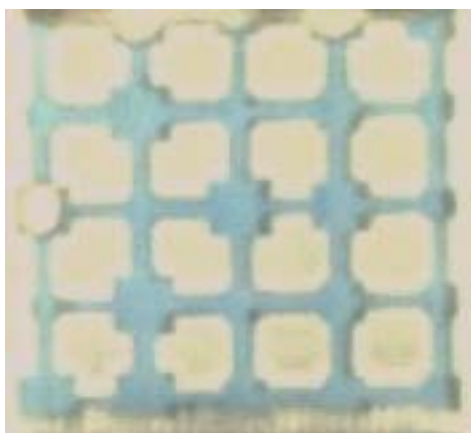


圖 4-23-5 汲取第十七階段

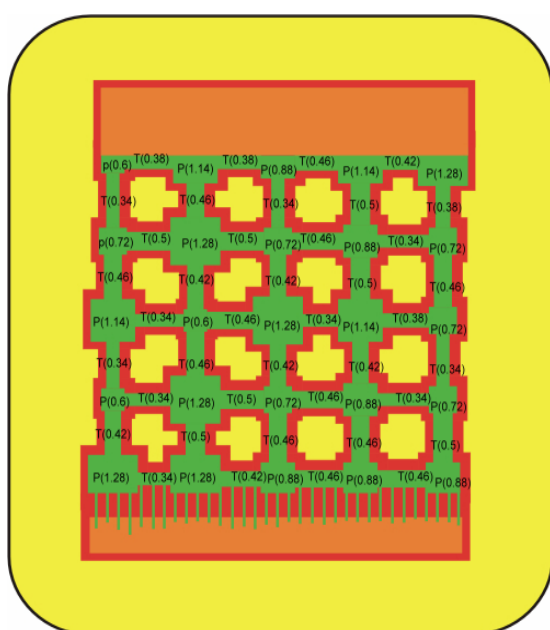


圖 4-24-1 微模型孔頸寬度分佈圖

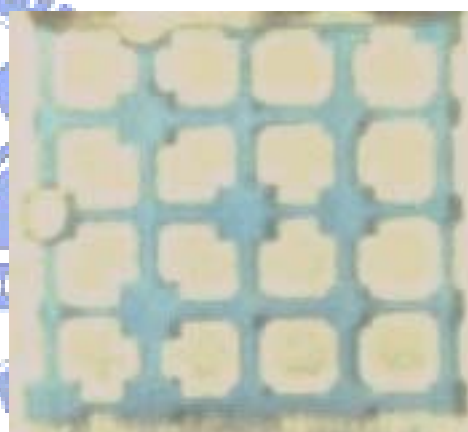


圖 4-24-2 汲取第十九階段

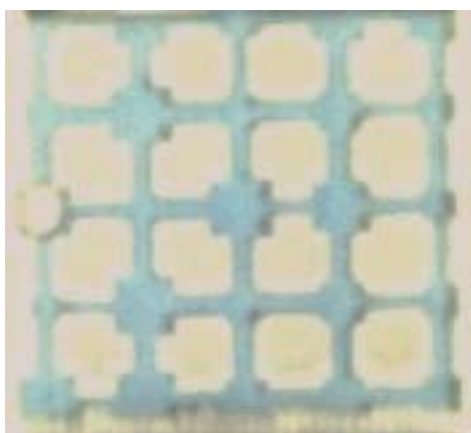


圖 4-24-3 汲取第二十階段

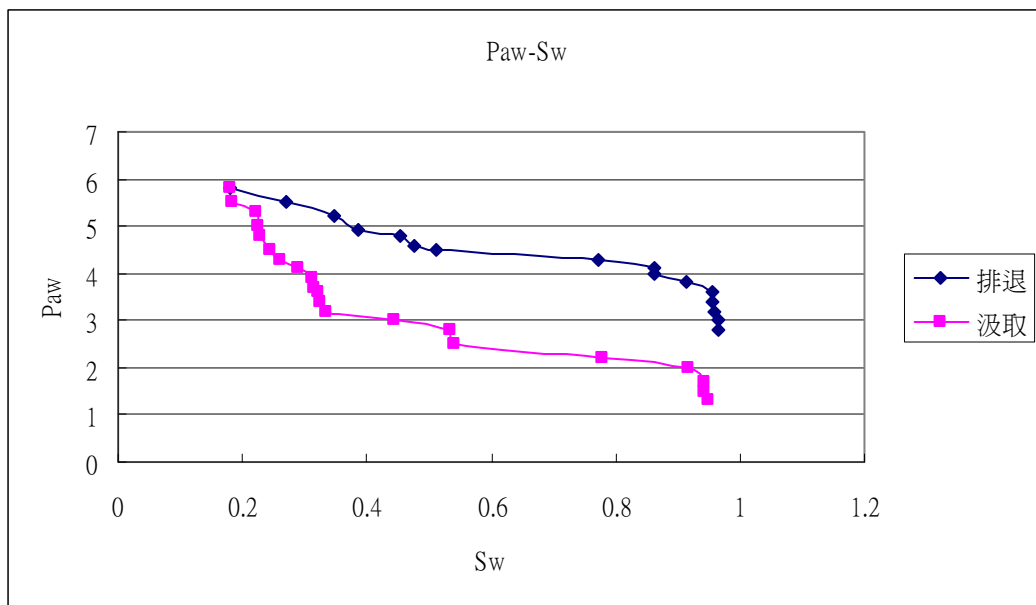


圖 4-25 五種寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗 P-S 曲線圖

結果分析

- (1) 非潤濕相在排退潤濕相的過程中會選擇易於排退的路徑；如果有兩根頸管大於等於甲頸管，且此兩根頸管一根平行非潤濕相流動方向，另一根垂直非潤濕相流動方向，則非潤濕相會優先排退平行非潤濕相流動方向的頸管再排退垂直非潤濕相流動方向的頸管。
- (2) 置換機制實驗之汲取過程中，當系統毛細壓力剛達到某些機制之門檻值時，這些置換現象卻未在此時發展完全，而是到下一個階段時才發展出完整的置換機制，此乃為本實驗是以角隅流的方式進行汲取階段的實驗，由於以角隅流的方式使潤濕相進入微模型中所需時間較長，所以會有些機制不會在原本該發生的階段發生而遲至下一個或下兩個階段才發生。
- (3) 置換機制實驗中可清楚的觀察到 I1 型汲取發生的情形，亦可由實驗拍攝的圖片中發現 R.Lenormand et al. (1983)所提出的 In 型置換機制的確是會發生於孔中。
- (4) 由實驗數據中可以發現，本實驗引用理論機制公式所推估之各種理論機制門檻值，

大致上與實驗所發生各種置換機制之毛細壓力一致。

(5)五種寬度的孔與 5 種寬度頸管的網絡模型實驗，當毛細壓力降至理論 I1 型汲取門檻值之下時，潤濕相飽和度就會激增，待各種寬度的孔之 I1 型汲取完全發展後，飽和度就不會有太大的變化；而系統的 I2 型汲取之理論毛細壓力門檻值皆小於 I1 型汲取，所以系統仍以 I1 型汲取為主。

(6)在二相流體對取代機制實驗中之五種寬度的孔與 5 種寬度頸管的網絡模型實驗中可以發現，孔的寬度為 0.6mm~1.28mm，I1 型汲取門檻值為 3.62~2.52cm，理論上當系統毛細壓力一到 3.6 cm 時，寬度為 0.6mm 的孔就應會發生 I1 型汲取，但實際上並未發生，主要是因為在系統毛細壓力為 3.6 cm 時只有少量頸管發生置換，並沒有辦法構成該孔周圍有 3 根相鄰潤濕相頸管的條件，所以並無法使寬度為 0.6mm 的孔發生 I1 型汲取，直到毛細壓力到達 2.8cm 後，已經有不少頸管被潤濕相佔領，且部分的孔周圍之潤濕相頸管皆為相鄰，此時才開始發生 I1 型汲取，使得飽和度快速增加。



第五章 二相流體 K_r-S-P 關係曲線之微模型實驗與結果分析

本章所用之實驗裝置和第三章微模型實驗系統裝置一樣，只有在壓力系統與微模型板設計有些微差異，另研究重點亦有所不同，本章主要是探討二相流體之 K_r-S-P 關係曲線。其中 5-1 節介紹微模型實驗 $P\sim S$ 曲線與 K_r-S 曲線，5-2 節說明各組 K_r-S 曲線實驗結果並解釋 K_r-S 實驗中遲滯現象發生可能原因，5-3 節整理各組 $P\sim S$ 實驗值與比例原則(Scaling rule)推估值之比較結果，5-4 節則介紹以 van Genuchten (1980)所提出之 K_r-S-P 經驗公式 將 K_r-S 曲線與 $P\sim S$ 曲線作相互推估並比較其結果，上述各項內容詳如以下各節所述。

5-1 $P\sim S$ 曲線與 K_r-S 曲線微模型實驗概述

$P-S$ 曲線實驗與 K_r-S 曲線實驗，皆分成三個階段進行，分別是事前準備、實驗步驟及影像分析，以下詳細說明之：

P-S 實驗

事前準備

1. 準備好一組微模型板及壓克力薄片，均勻塗抹矽酸鈉並烘乾，確定其矽酸鈉已有足夠的耐水性，此步驟約需兩至三日時間。
2. 先開啟燈箱，等待約一小時，使光源穩定，以確保在實驗過程中，所拍攝到的影像是同一亮度情況下所取得。
3. 開啟燈箱抽風設備及空調系統，確保試驗中環境維持約 24°C 的恆溫狀態。
4. 將試驗之液體加以染色，水為藍色，柴油及四氯乙烷為紅色，濃度約為 0.05%。
5. 校正燈箱上的透明壓克力版，使實驗維持在水平的狀態下進行。

實驗步驟

本實驗分別有水與空氣、柴油與空氣、四氯乙烷與空氣、水與柴油、水與四氯乙烷共五組，水皆為濕潤相，空氣皆為非濕潤相，柴油及四氯乙烷則視其配對之流

體而決定。以下先以水為濕潤相的情況下為例，詳述實驗步驟：

1. 將微模型組合（包含微模型板及壓克力薄片）並均勻壓緊，並以 TYGON 管連接各壓力控制系統與微模型。
2. 將二氧化碳灌入微模型板中，趕走內部空氣，再將水灌入微模型板中，放置 1 小時，以溶解二氧化碳達到飽和。等到氣泡完全消失後，再讓水繼續流動約 10 分鐘，以取代為模型中溶有二氧化碳的水體。
3. 在排退(Drainage)部分，因為每一組流體對介面張力不同，可調整的壓力範圍也不同，所以每次下降 0.1~0.4cm 壓力水頭，等待平衡後，再次下降。本研究採用降低水相的壓力水頭以吸引非濕潤相的流體進入微模型板中，同時 CCD 以每 10 秒至 300 秒一張的速度記錄微模型內變化的情形，若 30 分鐘內，所拍下的照片均不變，則視為平衡。最後，當微模型內的水變得很少且毛細水頭已接近柵欄的穿透壓時，即停止下降。
4. 而汲取(Imbibition)部分，每次上升 0.1~0.4cm 壓力水頭，等待平衡後，再次上升。直到水進入非濕潤相的儲存槽為止。同理本研究採用逐漸升高水相的壓力水頭以排退非濕潤相。CCD 取像情形及平衡判斷同排退步驟所述。

氣相與油相的試驗與上述略有不同，其主要原因在於油的飽和並不能像水一樣，可以溶解二氧化碳來飽和。在這裡，本研究先以己醇取代空氣，由於己醇的表面張力與水類似，可以把大部分的空氣趕走，填滿整個孔隙後，再利用醇類與油類有著高互溶的特性，一方面趕走己醇，另一方面溶解趕不走而殘留的己醇，持續沖洗 10 分鐘後，內部孔隙已完全充滿油類，實驗證明，其成效顯著。

由於本實驗選用的 DNAPL 為四氯乙烷，其比重高達 1.6，而且揮發性很高，實驗過程中揮發的量足以影響實驗結果。我們利用其比重大的特性，在四氯乙烷上加一層水，以阻隔其和空氣接觸而揮發。

影像分析

此部份是利用 PHOTOSHOP 對實驗影像作分析，影像分析的進行步驟因為與第三

章 3-4 節所描述內容相同，在此不多贅述。

K_r -S 實驗

K_r -S 實驗部分，只求取任兩相中濕潤相的相對滲透係數，非濕潤的流體則是以不可移動相存在於孔隙中。 K_r -S 實驗在事前準備及影像分析部分，皆和 P-S 實驗相同，惟在實驗步驟則不相同，以水~空氣流體對(水為濕潤相)為例， K_r -S 實驗步驟與 P-S 實驗不同處說明如下：

1. 將二氧化碳灌入微模型板中，趕走內部空氣，再將水灌入微模型板中，放置 1 小時，以溶解二氧化碳達到飽和。等到氣泡完全消失後，再讓水繼續流動約 10 分鐘，以取代微模型中溶有二氧化碳的水體。
2. 配置好定水頭裝置，使整個系統維持在動態平衡的狀態。觀察出流端的流量，俟流量穩定後，以每五分鐘量一次、連續量五次流量的方法，求飽和狀態時的平均流量。並以 CCD 攝影機拍攝此階段之影像以求取飽和度。
3. 從非濕潤相注入端注入少許非濕潤相，令其隨水流入孔隙中，等待水流穩定後記錄流量及影像，方式如步驟 3。
4. 重複步驟 4，直到孔隙中非濕潤相無法再增加，此時為殘餘飽和度。
5. 汲取部分，則是慢慢將非濕潤相從孔隙中抽出，直到非濕潤相無法在被抽出為止。

5-2 K_r -S 實驗結果與遲滯現象觀察

K_r -S 實驗同樣分為五組流體對個別進行，實驗過程基本上亦包括排退和汲取兩個程序，以水和柴油流體對(水為濕潤相)為例，利用實驗過程所拍攝的影像，說明並分析其實驗過程。

圖 5-1~圖 5-18，為 K_r -S 實驗每一階段達到動態平衡後所拍攝的影像，也是由這些影像來決定該階段的飽和度。圖 5-1 為初始狀態。濕潤相流體充滿整個孔隙介質，以穩定的流量由左而右流動此時相對滲透係數為 1。圖 5-2，非濕潤相由左方注入，隨濕潤相流體的流動帶入孔隙介質中。圖 5-3~圖 5-5，非濕潤相的注入量越來越多，從微

模型版的上游端逐漸向下由推進。圖 5-6～圖 5-8，非濕潤相已前進至下游端，受到柵欄的阻礙而無法繼續前進。圖 5-9 為排退過程的最後階段，孔隙介質中的非濕潤相已無法再增加，此時孔隙中濕潤相的飽和度約為 0.5，但相對滲透係數已降低至 0.02 左右。

圖 5-10，為汲取過程的第一階段，此時非濕潤相的飽和度約為 0.5，且很均勻的分佈在孔隙介質中的每個部分。圖 5-11～圖 5-15，孔隙介質中的非濕潤相逐漸循原先的注入口退出。在退出的過程中，非濕潤相只是飽和度降低，在孔隙中的分佈仍然很均勻。圖 5-16～圖 5-18，為汲取過程的最後階段，剩下少許的非濕潤相，因為受到細小通道的阻礙無法被排出，入陷於孔隙中。

圖 5-19～圖 5-23，為 K_r -S 實驗的相對滲透係數和飽和度關係實驗值與其 excel 自動選取簡單回歸曲線結果。從圖中發現排退和汲取過程分成兩條曲線，汲取曲線在排退曲線之上，而不是一個飽和度只對應一個相對滲透係數。究其原因，可從圖 5-1～圖 5-18 中， K_r -S 實驗過程的影像圖看出端倪。在排退過程的時候，非濕潤相是慢慢的從上游端入侵而佔據孔隙，其分佈集中於上游端並不均勻，如圖 4-48～圖 4-49 所示。但是在汲取過程時，不論飽和度高或低，非濕潤相都很均勻的分佈在孔隙介質的每個部分，如圖 5-13～圖 5-26。由於飽和度分佈不均勻的影響，會造成濕潤相在排退過程中，雖然有相同的飽和度，但相對滲透係數卻較低。而一直要到非濕潤相的注入量較多且較均勻時，如圖 5-7～圖 5-9，排退曲線才會慢慢靠近汲取曲線。所以汲取過程因為非濕潤相分佈均勻，其曲線較具代表性。再仔細分析圖 5-19～圖 5-23，發現幾項特色：第一是圖 5-9～圖 5-11 中，是三組液相流體對空氣相的實驗，當濕潤相之相對滲透係數趨近於零時其飽和度約只有 0.6 左右。而圖 5-22～圖 5-23 中，為濕潤相液體與非濕潤相液體的實驗，此時當濕潤相液體相對滲透係數趨近於零時其飽和度約只在 0.4～0.5 之間。另一項是液相流體對空氣相的實驗曲線斜率較大，約在飽和度 0.7 的時候，曲線有明顯的轉彎處。濕潤相液體對非濕潤相液體的實驗曲線斜率較小，且沒有明顯轉彎處。

圖 5-24 及圖 5-25 是五組流體對 K_r -S 實驗結果，顯示對所有流體對而言，相對滲透係數和飽和度關係曲線存在遲滯現象。以相同濕潤相飽和度下，汲取階段之 K_r -S 曲線高於排退階段之 K_r -S 曲線，依理論研究中相對滲透係數基本上僅是飽和度的函數，然而本研究之實驗結果和其他實驗研究(Kalaydjian et al., 1997) 皆顯示出有遲滯現象之存在，這種差異可被解釋成為模型板中濕潤相流體在孔隙之連接性，圖 5-26 顯示模型板中在水柴油流體對某個實驗階段下之流體分布影像圖，依據圖 5-26 在相同濕潤相飽和度下，非濕潤相(柴油)在汲取階段時分佈(圖 5-26-(b) 圖 5-26-(d)) 比排退階段時分佈(圖 5-26-(a) 圖 5-26-(c)) 較為均勻，這種現象暗示出汲取階段時濕潤相之連接性(圖 5-26-(b) 圖 5-26-(d))應優於排退階段之連接性(圖 5-26-(a) 圖 5-26-(c))，因此在相同濕潤相飽和度下，汲取階段之相對滲透係數會高於排退階段之相對滲透係數，同樣之結果亦在之前文獻研究中發現(Kalaydjian, 1997)，同時比較圖 5-24 及圖 5-25 五組流體對 K_r -S 實驗結果，發現汲取階段之相對滲透係數和飽和度近乎線性函數關係，但是排退階段之相對滲透係數和飽和度則是非線性函數關係，這個現象可被定性解釋，原因是汲取階段時濕潤相的相對滲透係數有較佳之連接性，因此濕潤相的相對滲透係數可被當作是微模型中濕潤相佔據孔頸單元數目之函數，因為濕潤相佔據孔頸單元數目和飽和度是線性關係，因此相對滲透係數和微模型中濕潤相飽和度呈線性關係。圖 5-24 經仔細觀察後，可看出五組流體對 K_r -S 曲線最小濕潤相飽和度(殘留飽和度)值都不相同，依據實驗流程圖中排退階段結束後即汲取階段開始之時，濕潤相殘留飽和度是指濕潤相流體能維持在微模型中流動之最小飽和度，另一方面，愈濕潤之流體愈能在愈小孔隙中流動，濕潤性和界面張力是影響殘留飽和度兩大主要因素，理論上，一較高濕潤性流體可以在較小飽和度下仍能維持角隅流動，因此流體可以在較小飽和度下，才開始停止流動(相對滲透係數接近零)。相反的，界面張力是指在兩不相溶之流體在流動時產生阻力，因此一組具較低之界面張力可以得到一較低之濕潤相殘留飽和度。綜合言之 隨著濕潤性之增加，濕潤相殘留飽和度會降低，隨著界面張力之增加，濕潤相殘留飽和度會增加，

如表 3-1，濕潤相殘留飽和度會依水~四氯乙烷、水~柴油，柴油~空氣，四氯乙烷~空氣及水~空氣等流體對而增加。

依據前述討論，五種不同之流體對中，若以水相為濕潤相之殘留飽和度會低於其他流體對，在水~四氯乙烷流體對及水~柴油流體對和上述論點是一致性的，但是在水~空氣流體對卻不一致性，水~空氣流體對之殘留飽和度較高，原因是水~空氣流體對界面張力約是其他流體對界面張力之 1.5~3 倍，因此除了水~空氣流體對外，對其他四組流體對皆可分類成兩大類，即含水相之流體對及不含水相之流體對，且殘留飽和度會隨著各組之界面張力增加而增加。

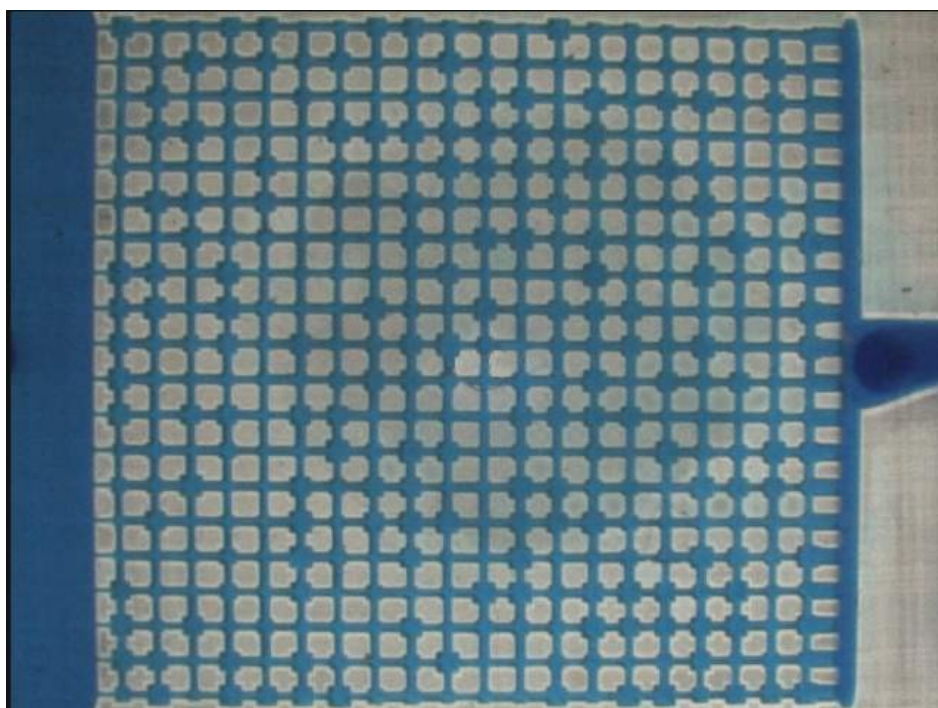


圖 5-1 K_r -S 實驗排退過程第一階段

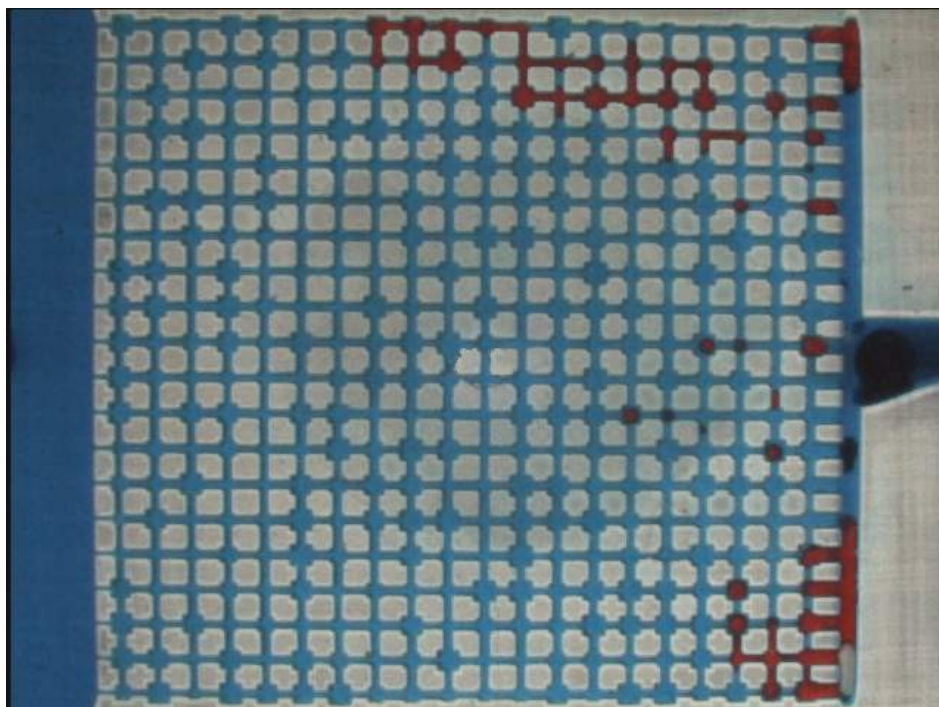


圖 5-2 K_r -S 實驗排退過程第二階段

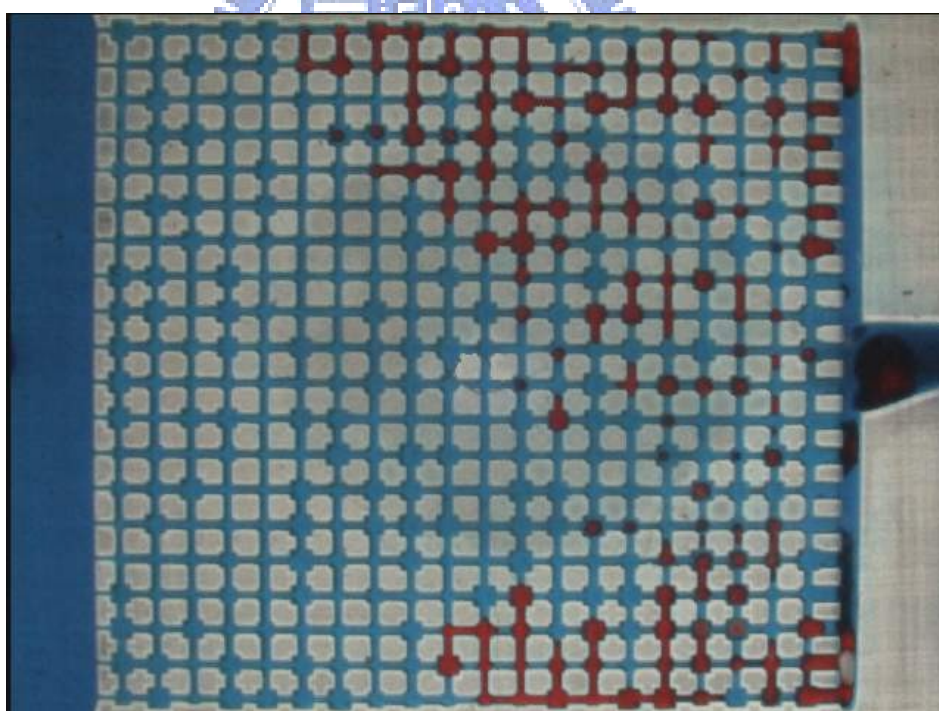


圖 5-3 K_r -S 實驗排退過程第三階段

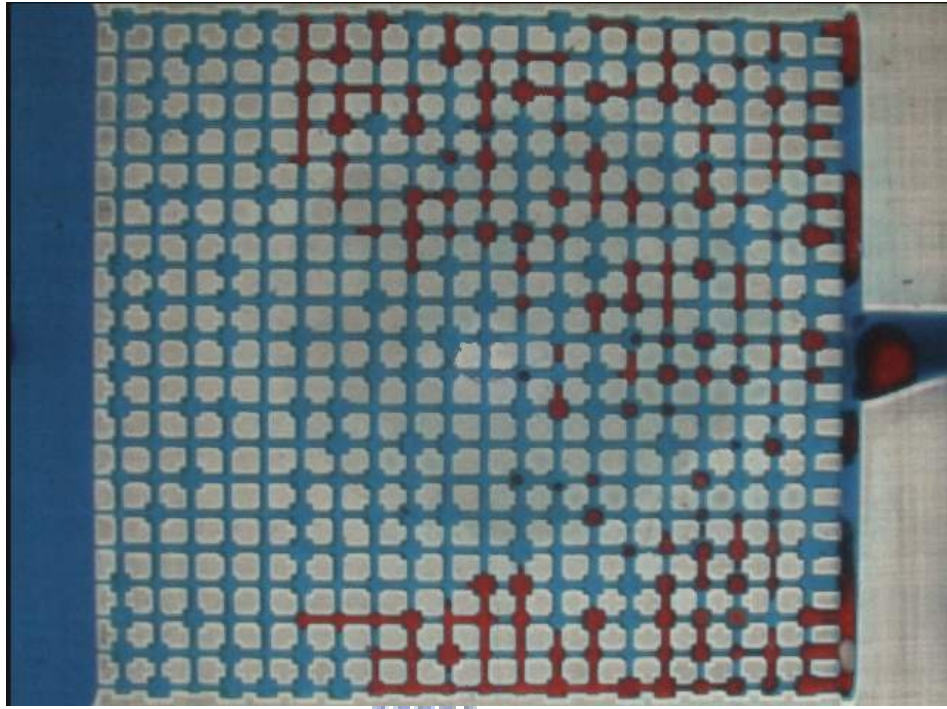


圖 5-4 K_r -S 實驗排退過程第四階段

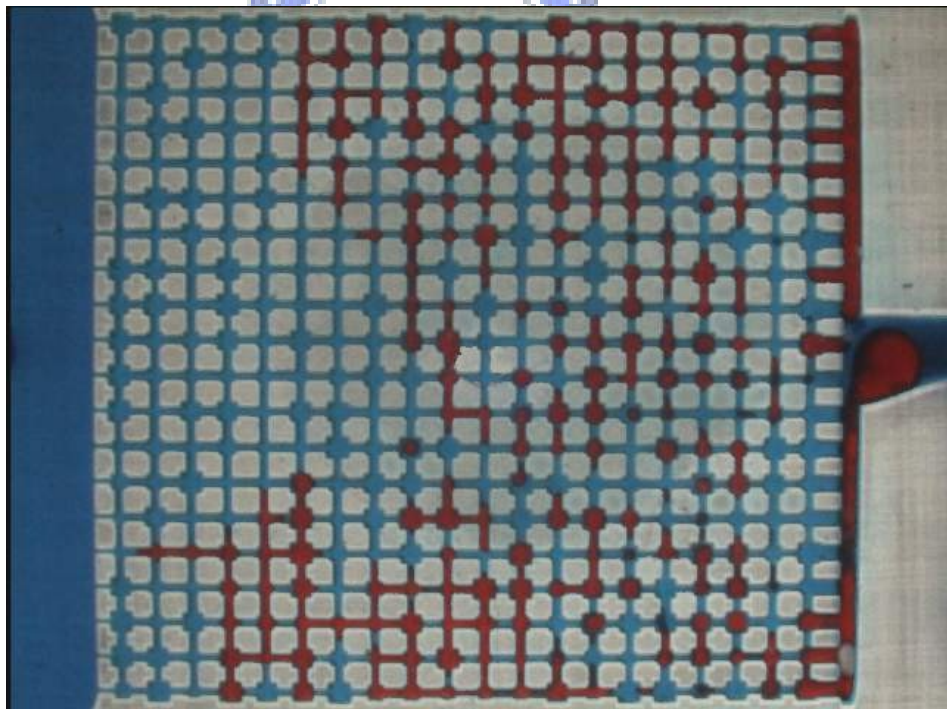


圖 5-5 K_r -S 實驗排退過程第五階段

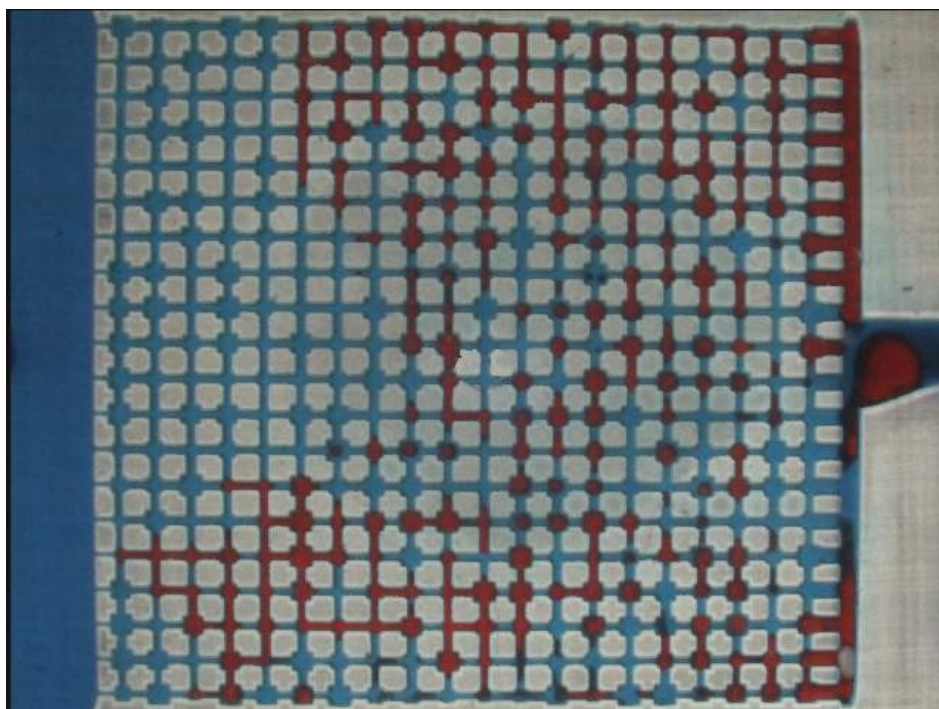


圖 5-6 K_r -S 實驗排退過程第六階段

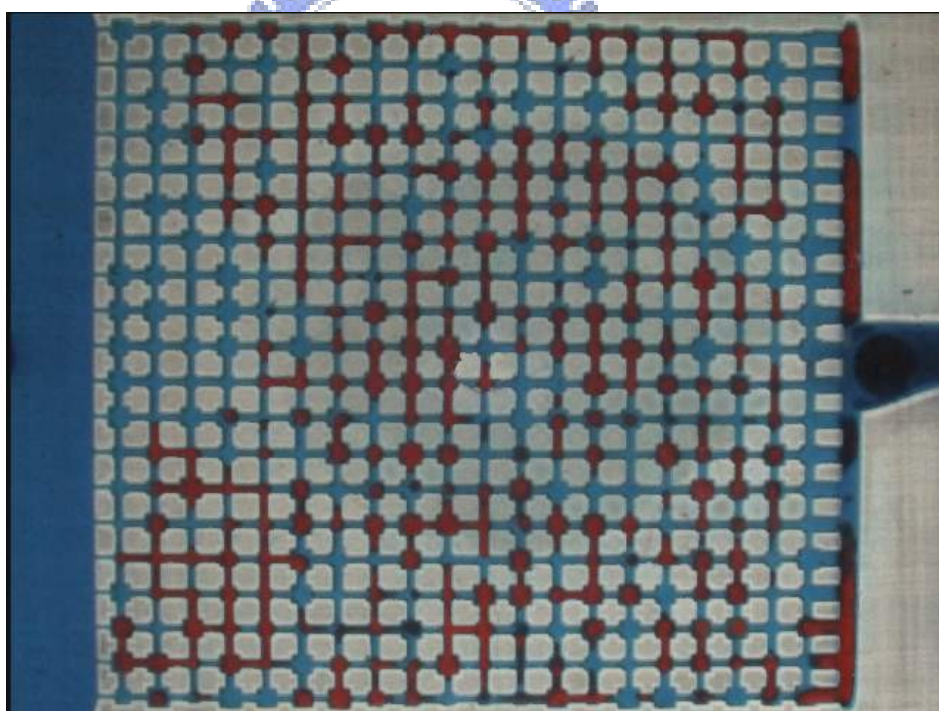


圖 5-7 K_r -S 實驗排退過程第七階段

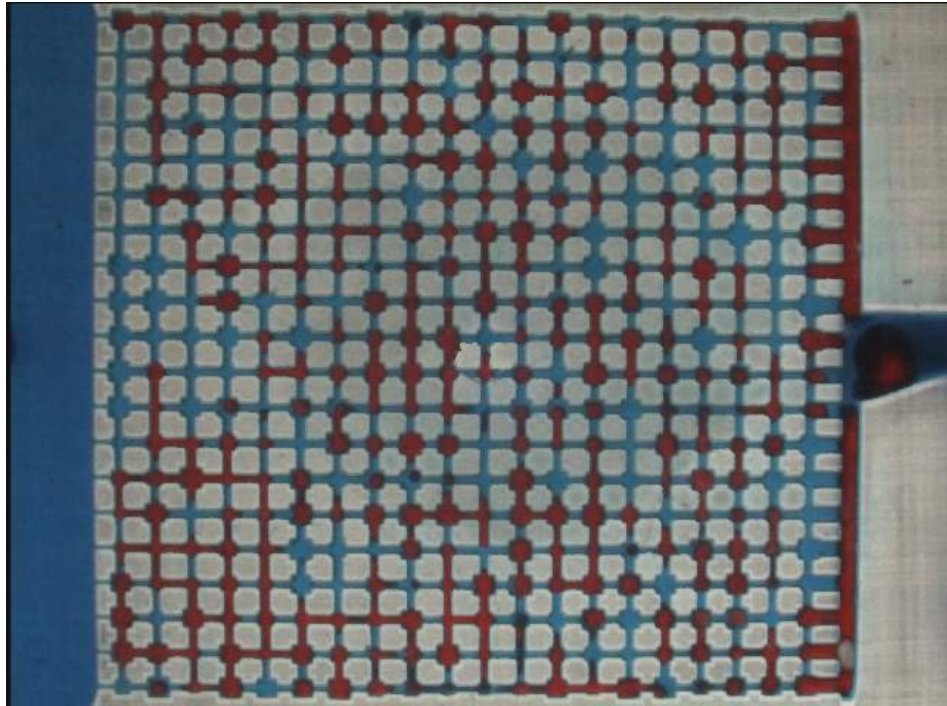


圖 5-8 K_r -S 實驗排退過程第八階段

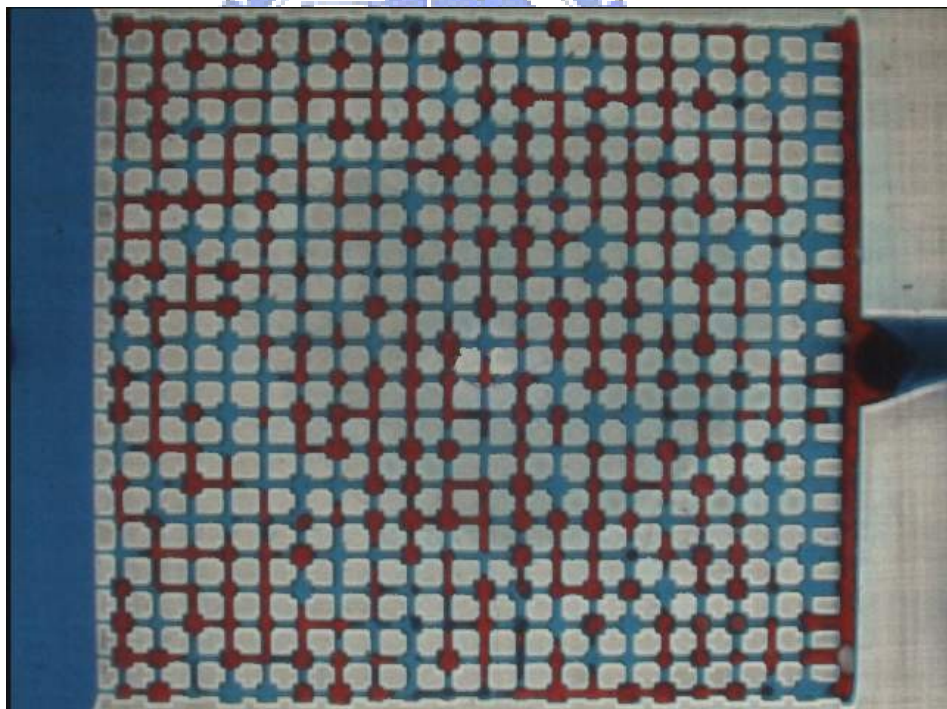


圖 5-9 K_r -S 實驗排退過程第九階段

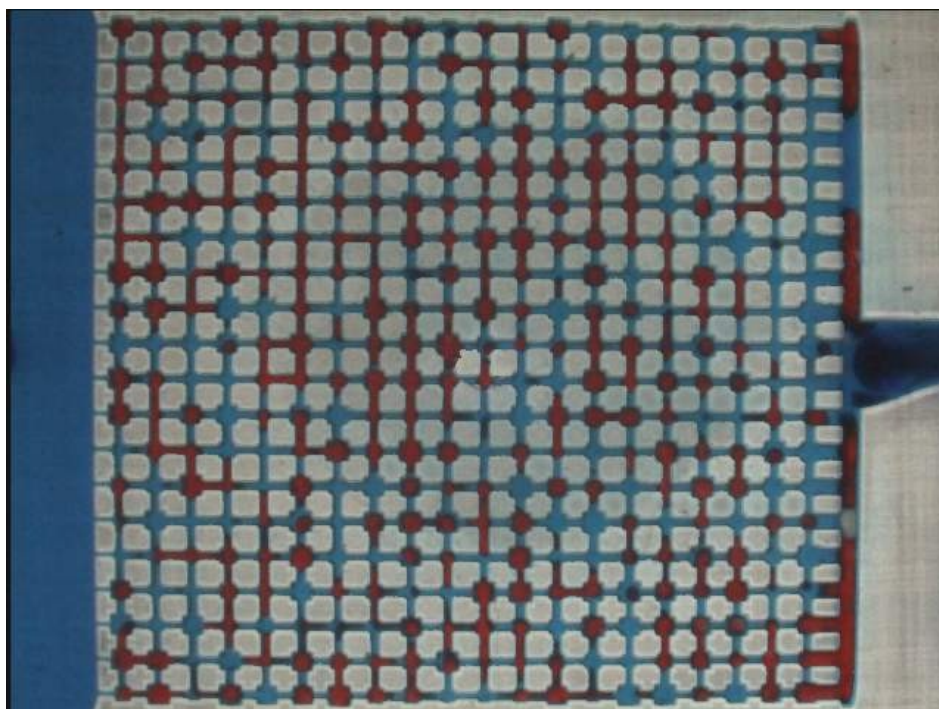


圖 5-10 K_r -S 實驗汲取過程第一階段

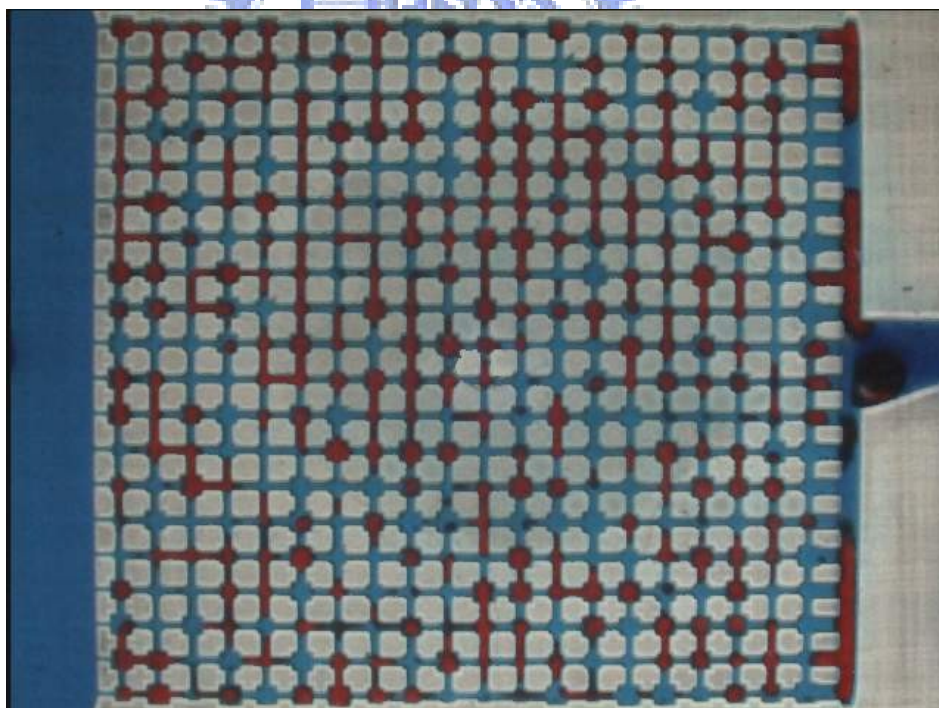


圖 5-11 K_r -S 實驗汲取過程第二階段

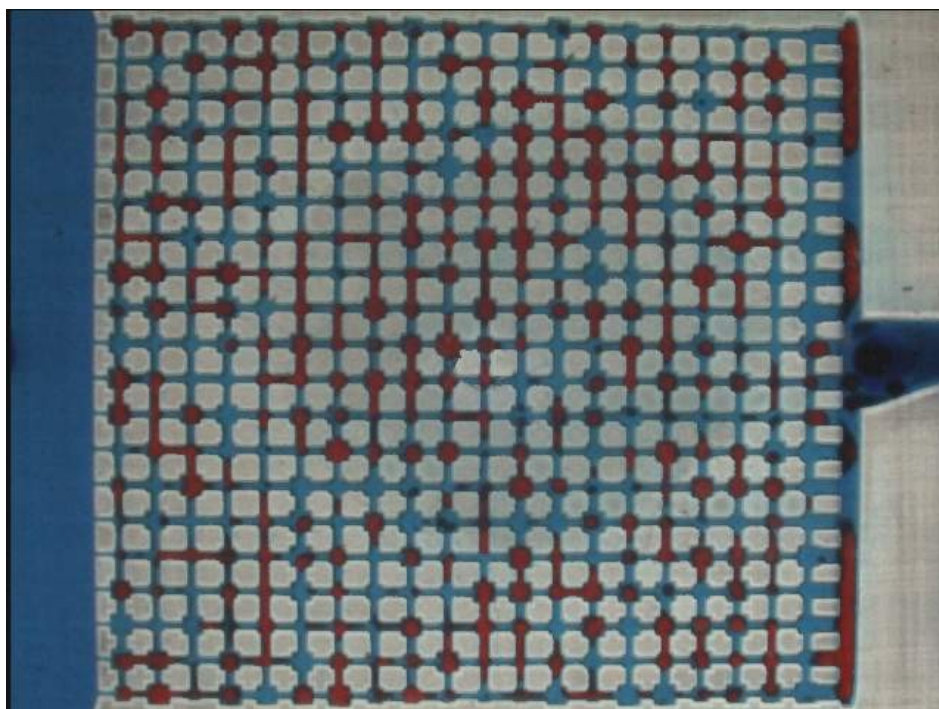


圖 5-12 K_r -S 實驗汲取過程第三階段

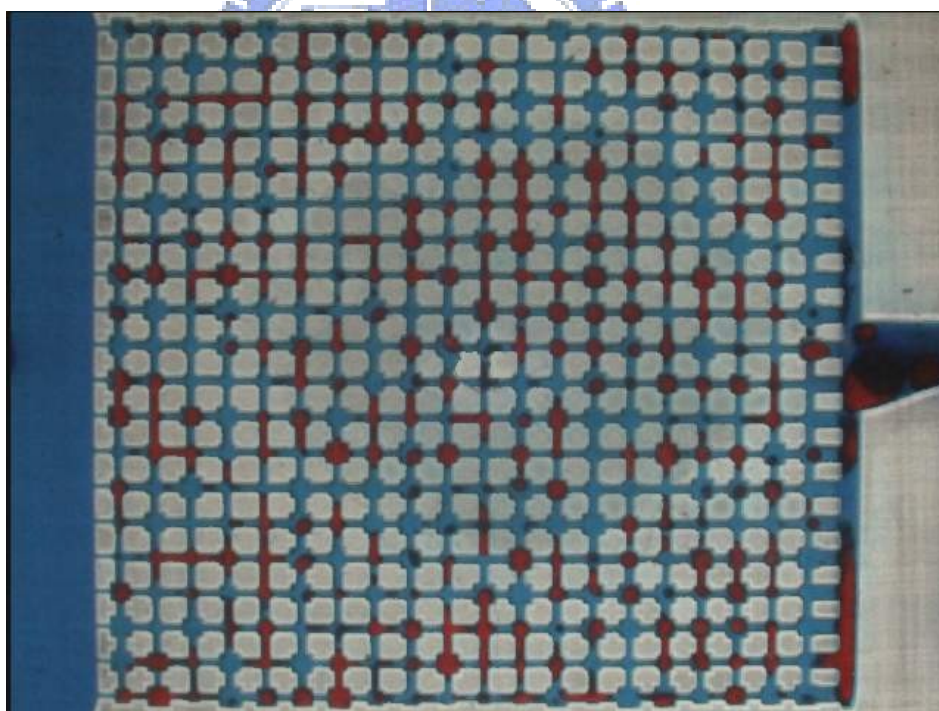


圖 5-13 K_r -S 實驗汲取過程第四階段

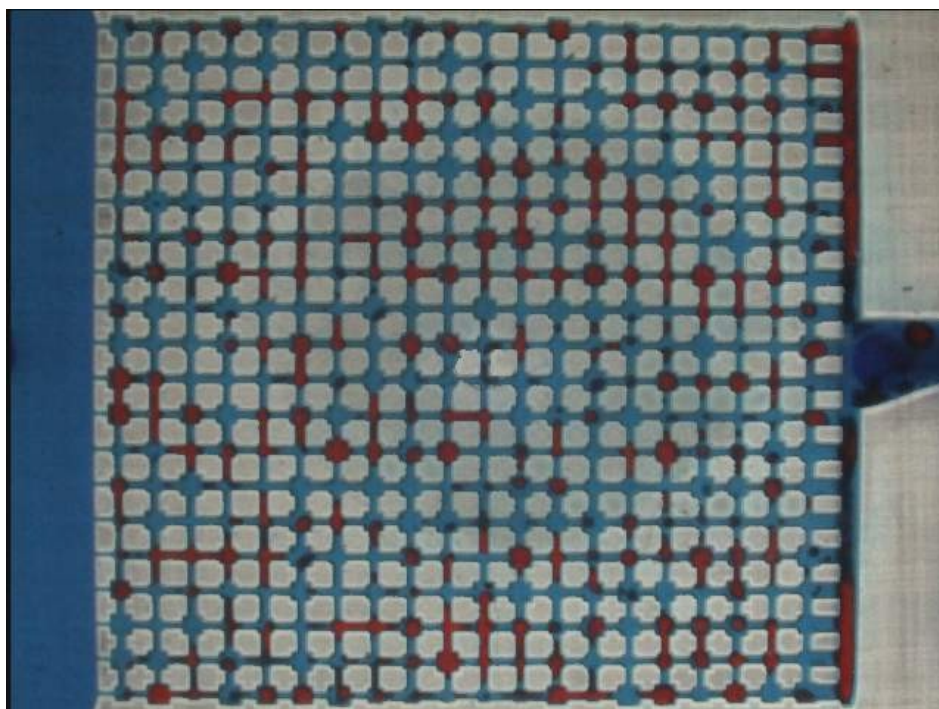


圖 5-14 K_r -S 實驗汲取過程第五階段

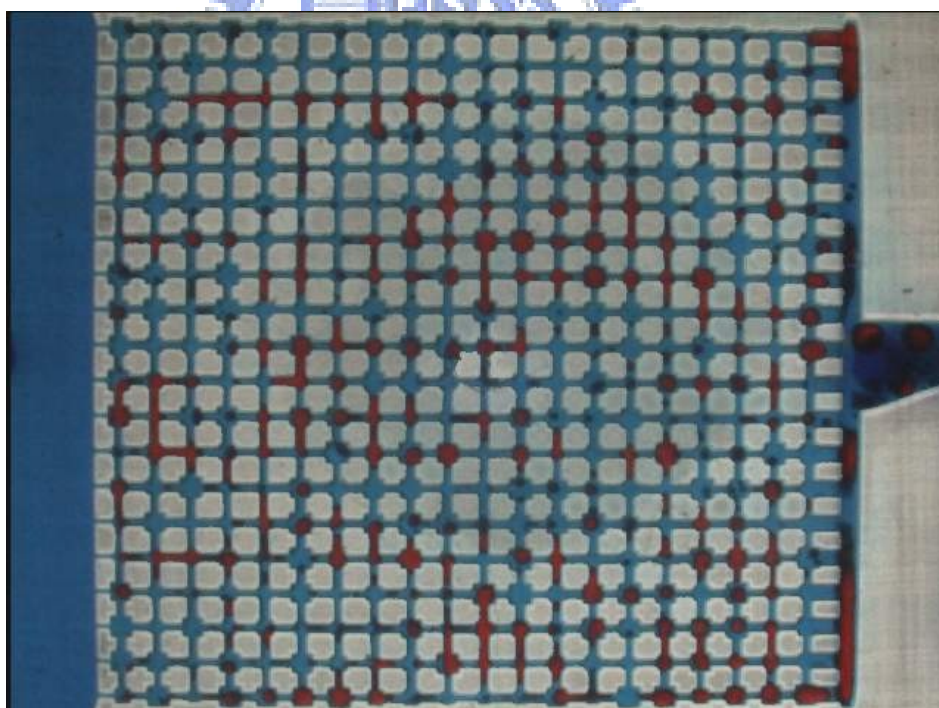


圖 5-15 K_r -S 實驗汲取過程第六階段

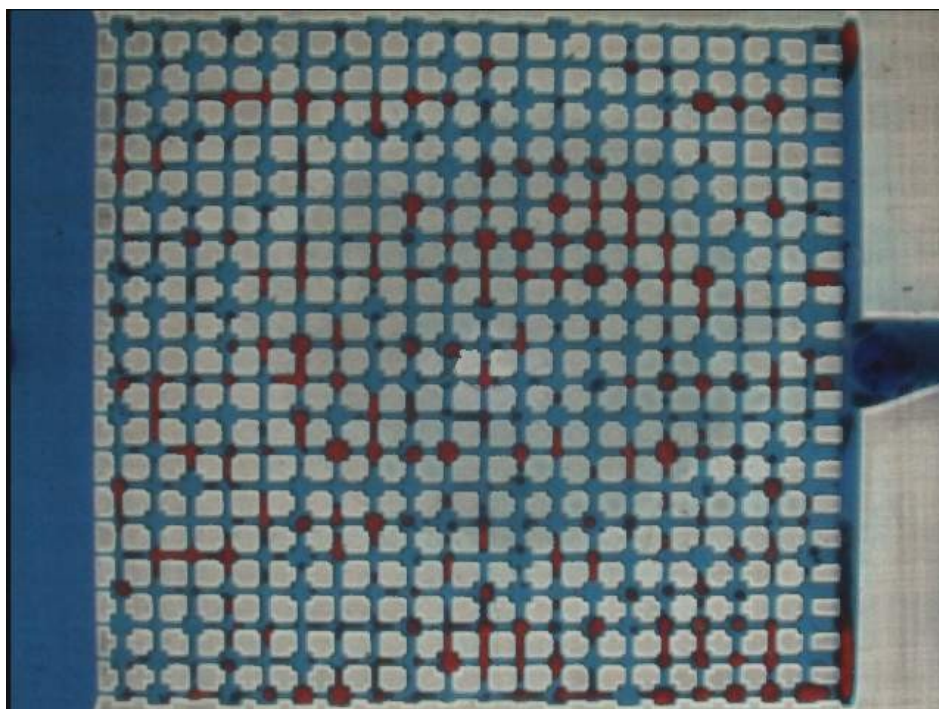


圖 5-16 K_r -S 實驗汲取過程第七階段

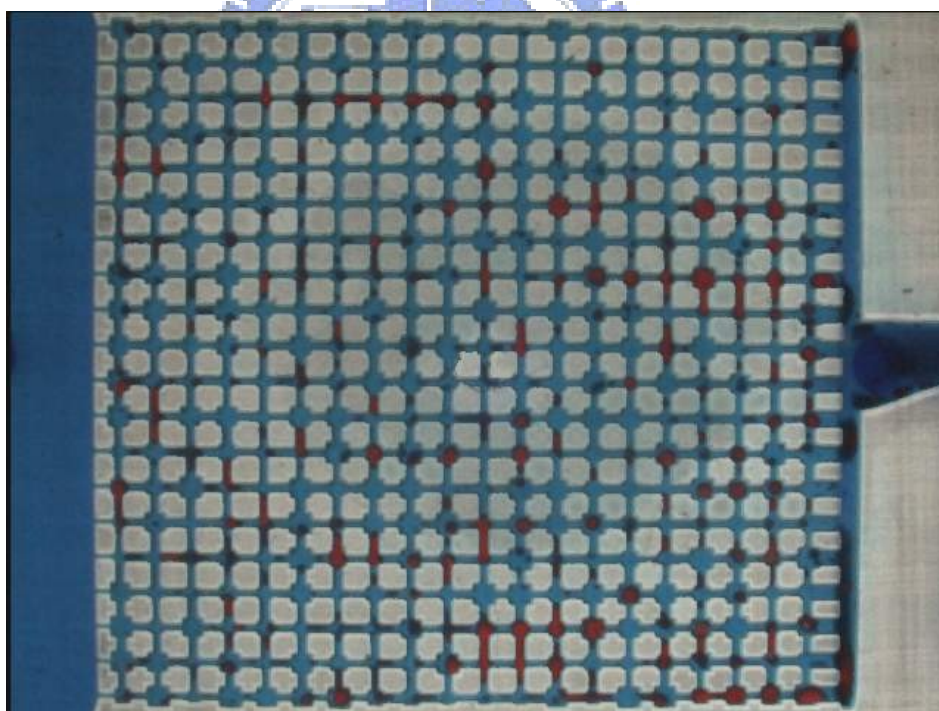


圖 5-17 K_r -S 實驗汲取過程第八階段

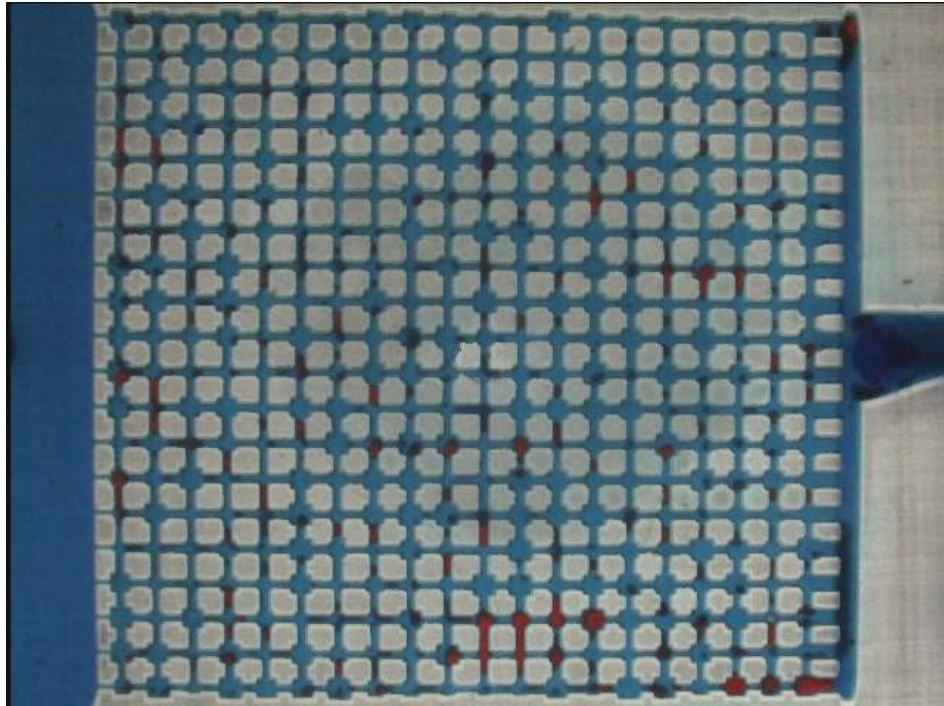


圖 5-18 K_r -S 實驗汲取過程第九階段

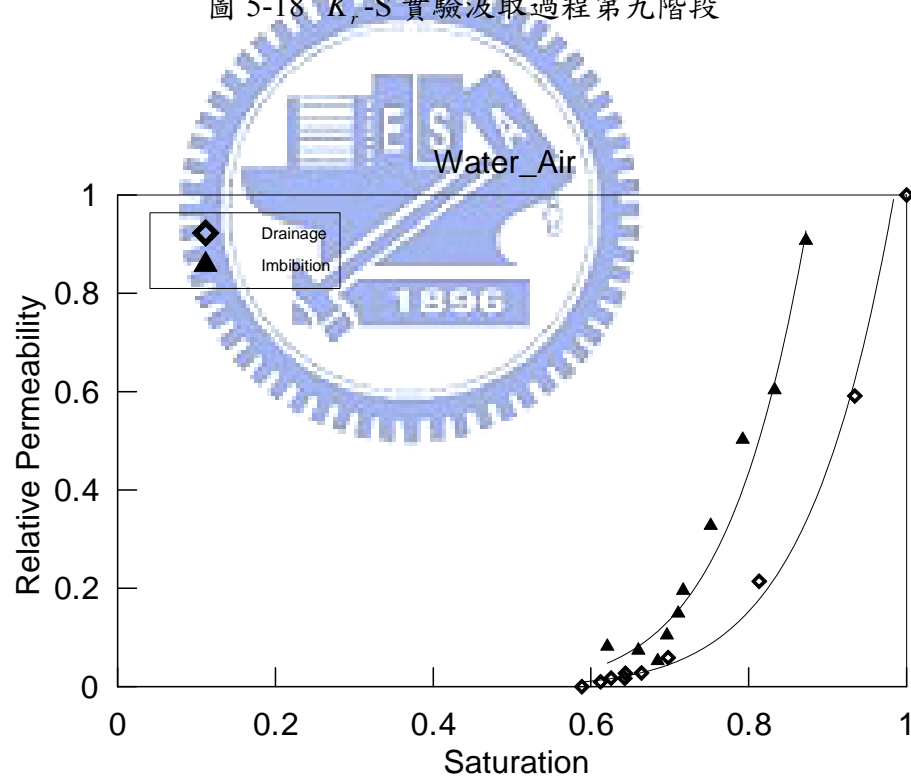


圖 5-19 水相對空氣相的 K_r -S 實驗曲線

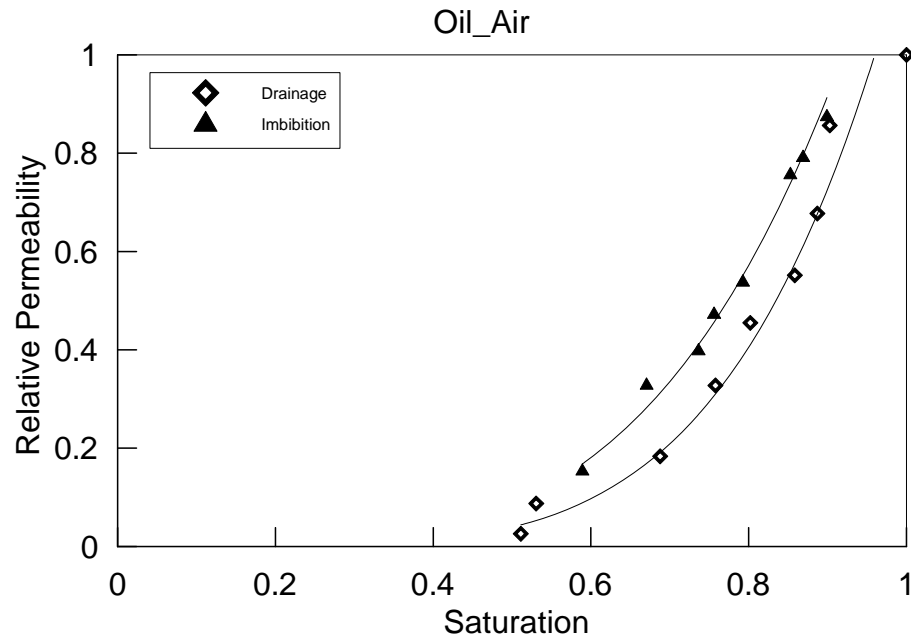


圖 5-20 LNAPL 相對空氣相的 K_r - S 實驗曲線

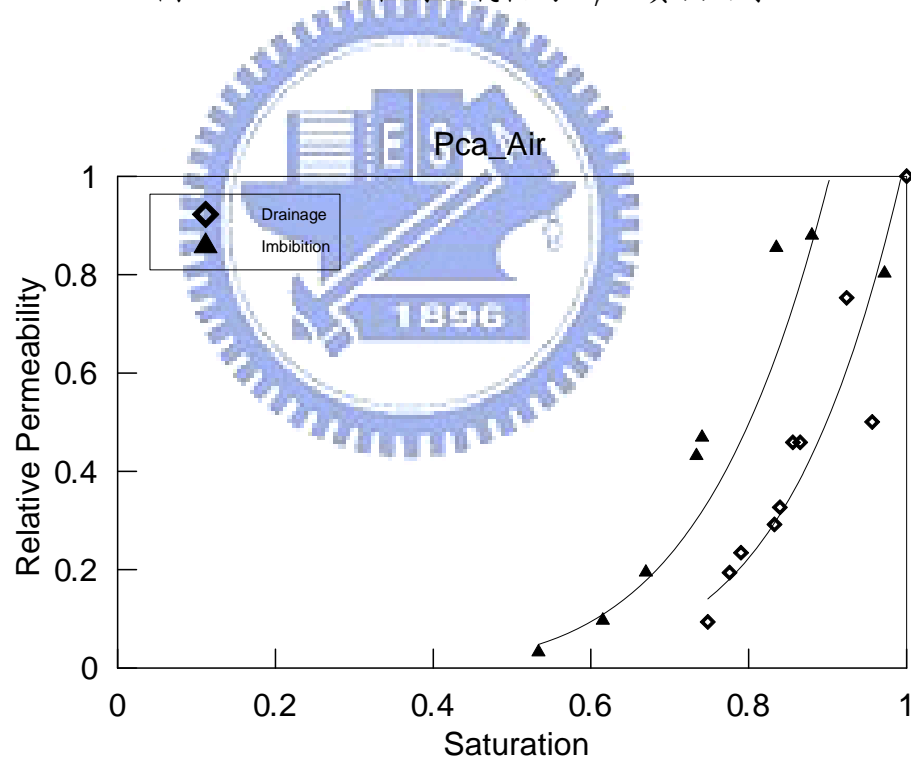


圖 5-21 DNAPL 相對空氣相的 K_r - S 實驗曲線

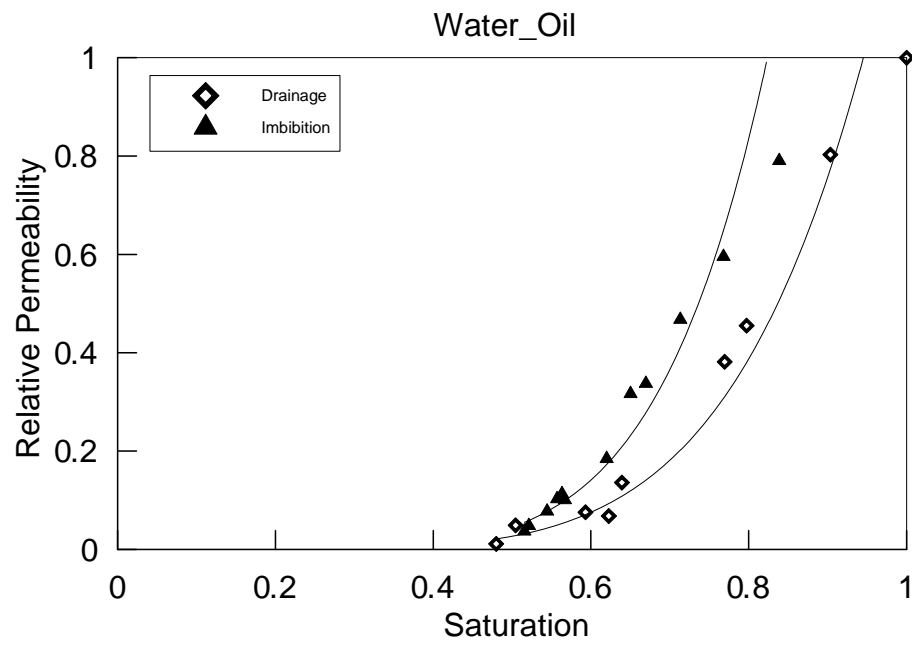


圖 5-22 水相對 LNAPL 相的 K_r -S 實驗曲線

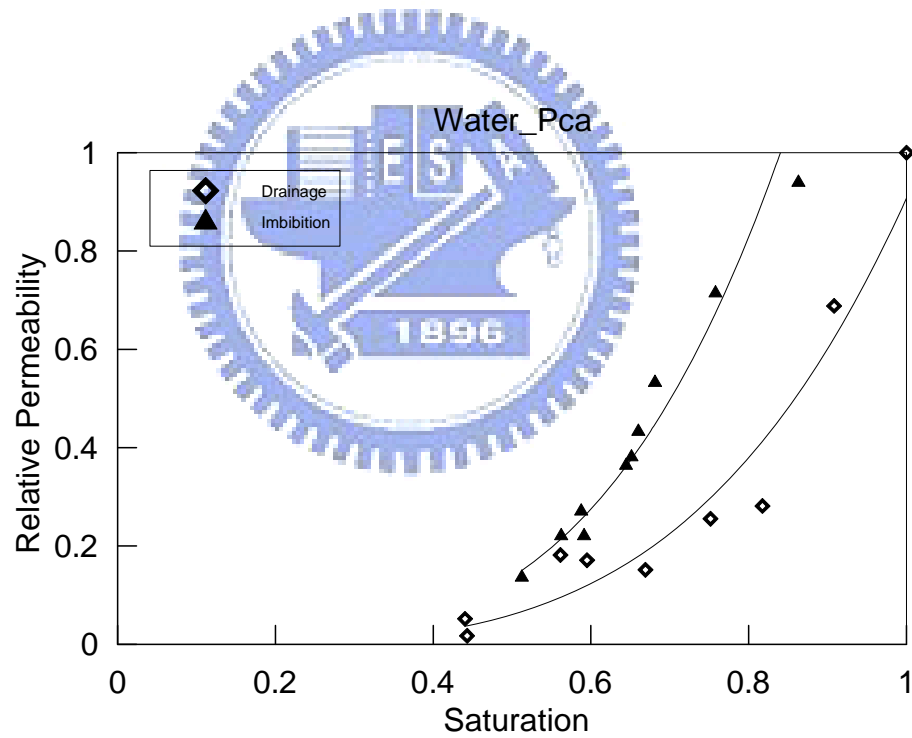


圖 5-23 水相對 DNAPL 相的 K_r -S 實驗曲線

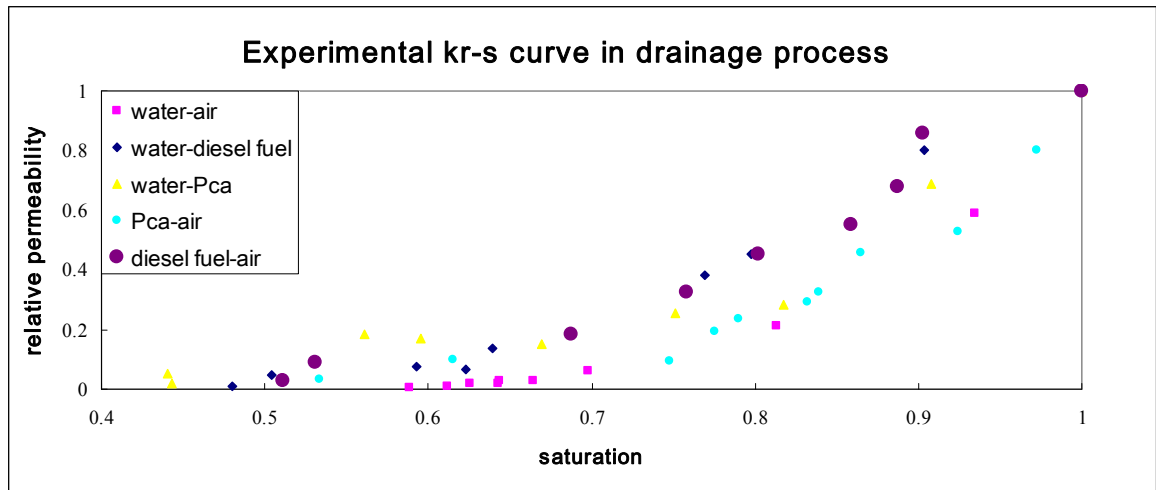


圖 5-24 排退階段之 K_r - S 實驗曲線(五組流體對)

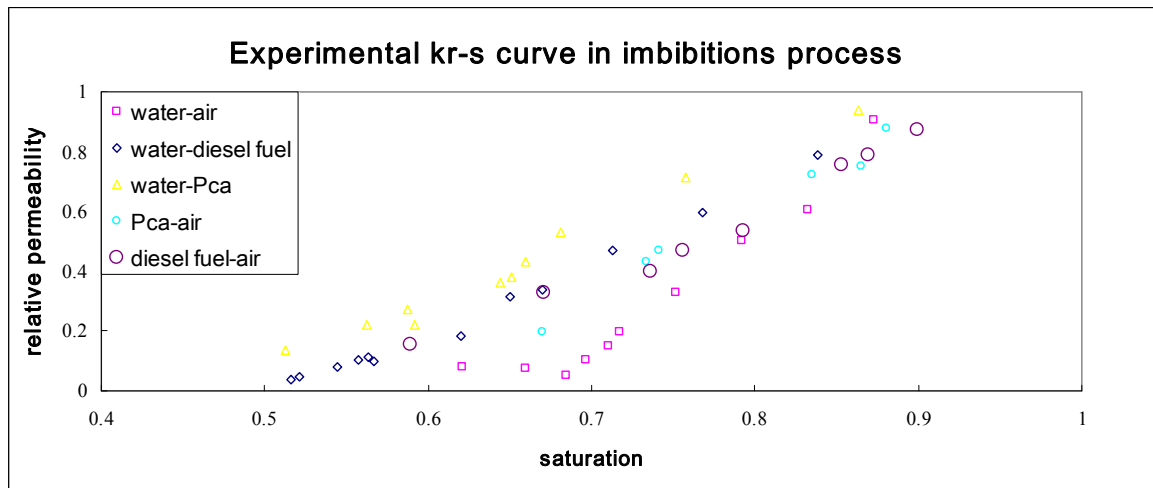


圖 5-25 汲取階段之 K_r - S 實驗曲線(五組流體對)

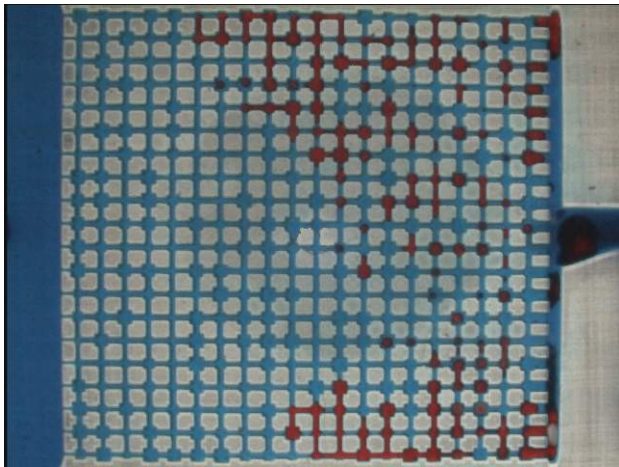
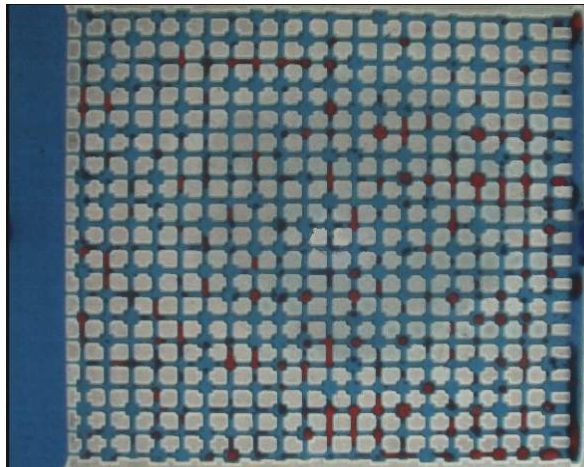
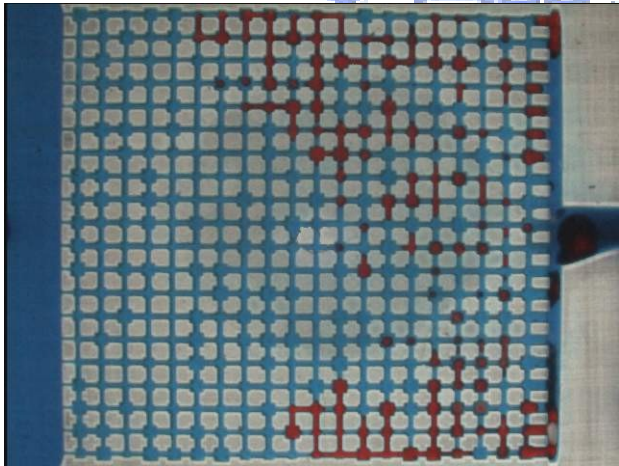
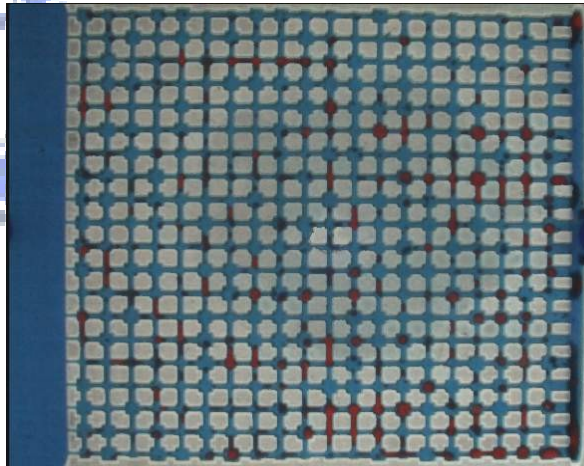
	
<p>(a) 排退階段 $S=0.769$</p>	<p>(b) 汲取階段 $S=0.767$</p>
	
<p>(c) 排退階段 $S=0.622$</p>	<p>(d) 汲取階段 $S=0.619$</p>

圖 5-26 Kr - S 曲線對水-柴油流體對 (a) 排退階段 $S=0.769$ (b) 汲取階段 $S=0.767$ (c) 排退階段 $S=0.622$ (d) 汲取階段 $S=0.619$

5-3 P~S 實驗值與比例原則(Scaling rule)推估值之比較

本節探討內容包括五組不同流體對的微模型 P-S 實驗，基本上各組實驗過程皆可分為排退(Drainage)與汲取(Imbibition)兩階段。實驗進行順序是濕潤相先行飽和於微模型板孔隙介質中，接著由非濕潤相入侵，逐漸排退出孔隙介質中的濕潤相流體，直至殘餘飽和度為止。之後濕潤相汲取重新佔據微模型板孔隙空間，直至毛細壓力差為 0 才停止。另外本節以其中一組參考流體對 P-S 實驗值配合比例原則理論推估出其他組 P-S 推估值 再交叉比較彼此之結果。其中 表 5-1 顯示不同的流體對之間，所對應出不同的毛細壓力差的理論值。並且應用比例原則的理論，將實驗值乘以一比例因子(Scaling factor, β)推估其他流體對之比例值，由所推估的比例值與實驗值交叉比對其中關係。表 5-2 表示任意流體對在推估另外四組流體對所對應的比例因子。

表 5-1 各流體對間之界面張力及所對應之毛細壓力差

流體對	孔隙深度 (cm)	孔隙寬度 (cm)	有效半徑 (cm)	界面張力 (dynes/cm)	壓力壓 (cm)
水-空氣	0.08	0.03~ 0.128	0.0218~ 0.0492	71.5	2.97~ 6.70
柴-油空氣	0.08	0.03~ 0.128	0.0218~ 0.0492	22.8	0.95~ 2.14
四氯乙烷- 空氣	0.08	0.03~ 0.128	0.0218~ 0.0492	32.75	1.36~ 3.07
水-柴油	0.08	0.03~ 0.128	0.0218~ 0.0492	48.7	2.02~ 4.56
水- 四氯乙烷	0.08	0.03~ 0.128	0.0218~ 0.0492	38.75	1.61~ 3.63

表 5-2 各參考流體對與推估值之比例因子

參考流體對 欲推估 之流體對	水- 空氣	柴油- 空氣	四氯乙烷- 空氣	水- 柴油	水- 四氯乙烷
水-空氣		3.136	2.183	1.468	1.845
柴油-空氣	0.318		0.696	0.468	0.588
四氯乙烷- 空氣	0.458	1.436		0.672	0.845
水-柴油	0.697	2.136	1.487		1.257
水- 四氯乙烷	0.558	1.700	1.183	0.797	

以下以柴油與空氣為例，說明並分析討論 P-S 實驗的排退與汲取過程。在這一組流體對中，柴油是濕潤相，空氣為非濕潤相。圖 5-27~圖 5-46 為整個排退與汲取過程的連續變化，圖 5-27 為初始狀態，此時柴油充滿整個微模型版，空氣則在右方儲存槽中準備入侵。圖 5-28 時，空氣開始入侵孔隙介質，此時的壓力差為非濕潤相對濕潤相的進入壓(entry pressure)。圖 5-29~圖 5-32，濕潤相與非濕潤相的壓力差漸大，非濕潤相逐漸入侵，將濕潤相慢慢推出孔隙，直至受到左方柵欄(Barriers)的阻礙。圖 5-33~圖 5-35，壓力差更大，但仍不足以穿透柵欄。此時，原本通路已被截斷而殘留在孔隙中的濕潤相，則藉由薄膜流的形式排退出孔隙，孔隙中絕大部分濕潤相皆被排出。圖 5-36 為排退的最後階段，只剩下最小的通道(Throat)仍保有濕潤相液體，此時達到殘餘飽和度，約為 2% ~15% 左右。

圖 5-37~圖 5-40 為汲取曲線剛開始的階段，此時兩相的壓力差逐漸降低，濕潤相慢慢的回到孔隙中。圖 5-41~圖 5-45，兩相的壓力差更小，濕潤相逐漸填滿所有的通道，有些較小的孔隙(Pores)也被濕潤相所包圍。此時仍然有許多非濕潤相是被包圍(Trap)

在孔隙中，但因為路徑已經被濕潤相所包圍，只能殘留於孔隙中無發排出。由於濕潤相的汲取是從孔隙的表面回流，由最小的通道開始填滿，所以不會因為非濕潤相占滿了孔隙中央而無法流動。從圖 5-37～圖 5-45 中就可發現，濕潤相很均勻的從最小的通道開始填滿，隨著壓力差的減小，逐漸填滿由小到大不同的通道。圖 5-46 為汲取的最後階段，此時濕潤相已逐漸從右方流出，入陷於孔隙中的非濕潤相已無法再從孔隙中被排出，則實驗結束。

P-S 各組實驗之結果如下：圖 5-47～圖 5-50，是以水和空氣為參考流體對，應用比例原則推估出另外四組流體對的比例值，以此比例值和實際經驗值相比較的結果。從圖 5-47、圖 5-48 中可發現，柴油對空氣及四氯乙烷對空氣的實驗值曲線都略高於用水和空氣為參考流體對所推估的比例值。圖 5-49 中水和柴油的實驗值則低於比例值。圖 5-50 中水和四氯乙烷的實驗值則和比例值相當吻合。

圖 5-51～圖 5-54，是以柴油和空氣為參考流體對，應用比例原則推估出另外四組流體對的比例值，以此比例值和實際實驗值之比較。由於柴油和空氣的實驗值和理論值比較起來偏大，以實驗值乘上比例因子(Scaling factor)後所得的比例值就偏大。圖 5-55～圖 5-58，是以四氯乙烯和空氣為參考流體對，應用比例原則所推估出另外四組流體對之比例值，以此比例值和本身實驗值相比較之結果。由於實驗值本身就高於理論值，所推估出的比例值也就高於相對應流體對的實驗值。此情形和柴油與空氣流體對的結果相同。皆因本身實驗值和理論值比偏高，推估其他流體對的值也就偏高。圖 5-59～圖 5-62，是以水和柴油為參考流體對，應用比例原則推估出另外四組流體對的比例值，以此比例值和實驗值相比較之結果。由於實驗值曲線和理論值相比原本就較低，所以乘以比例因子後所得的比例值就偏小。若此比例值再和柴油對空氣、四氯乙烷對空氣的實驗值相比，會呈現更大的差距，因為這兩組實驗原本就比理論值大。圖 4-42～圖 4-45，是以水和四氯乙烷為參考流體對，應用此度原則推估出另外四組流體對之比例值，以此比例值含實驗值相比較之結果。其中水和空氣流體對的實驗值和比例值相當接近，和柴

油對空氣、四氯乙烷對空氣相比，則比例值低估。和水對柴油相比則比例值高估。圖 5-63～圖 5-66，是以水和四氯乙烷為參考流體對，應用此度原則推估出另外四組流體對之比例值，以此比例值含實驗值相比較之結果。其中水和空氣流體對的實驗值和比例值相當接近，和柴油對空氣、四氯乙烷對空氣相比，則比例值低估。和水對柴油相比則比例值高估。

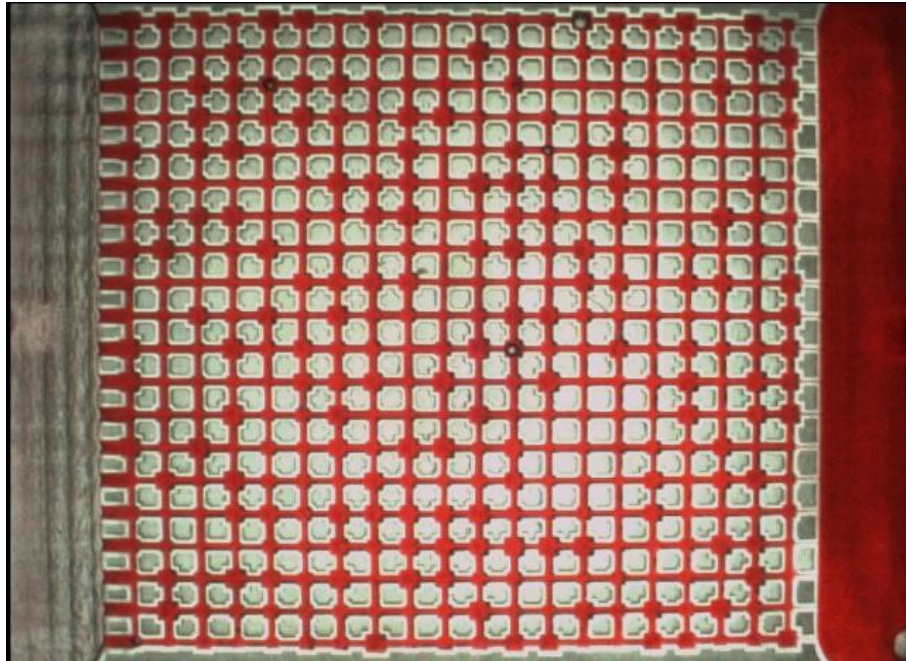


圖 5-27 P-S 實驗排退過程第一階段

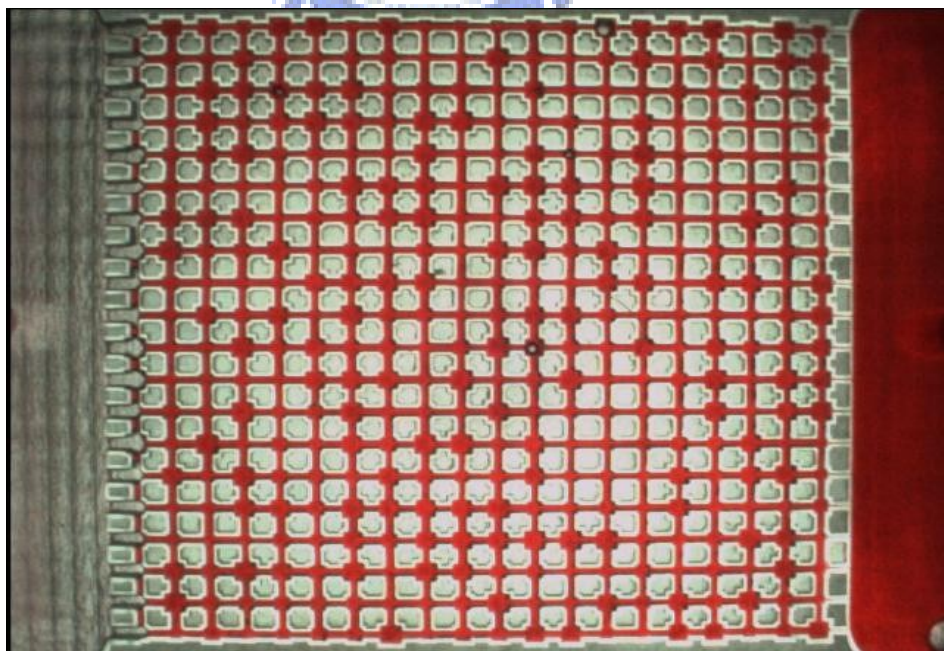


圖 5-28 P-S 實驗排退過程第二階段

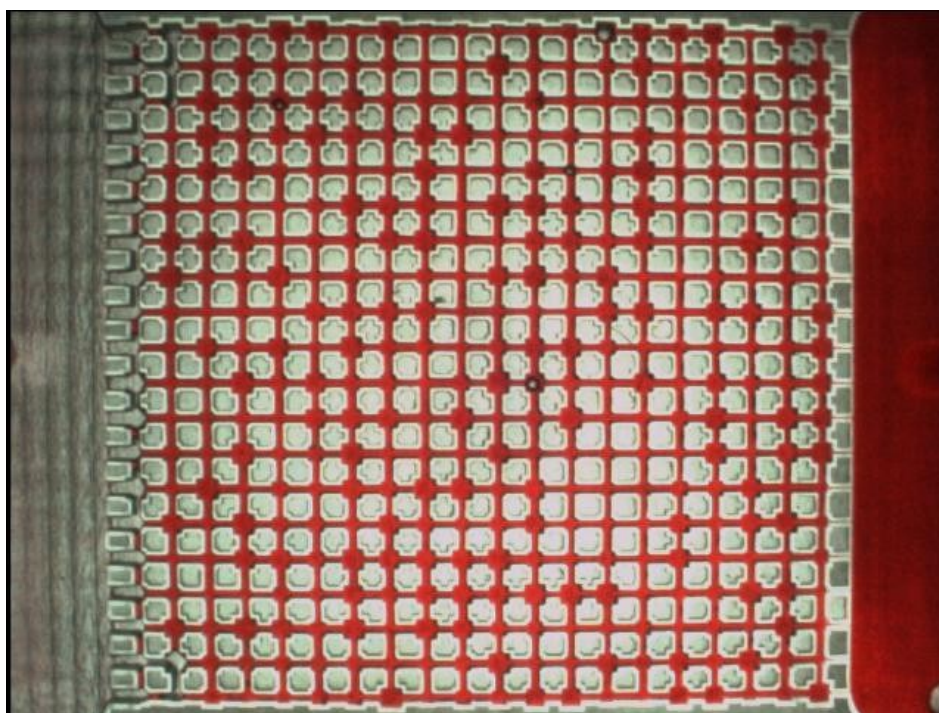


圖 5-29 P-S 實驗排退過程第三階段

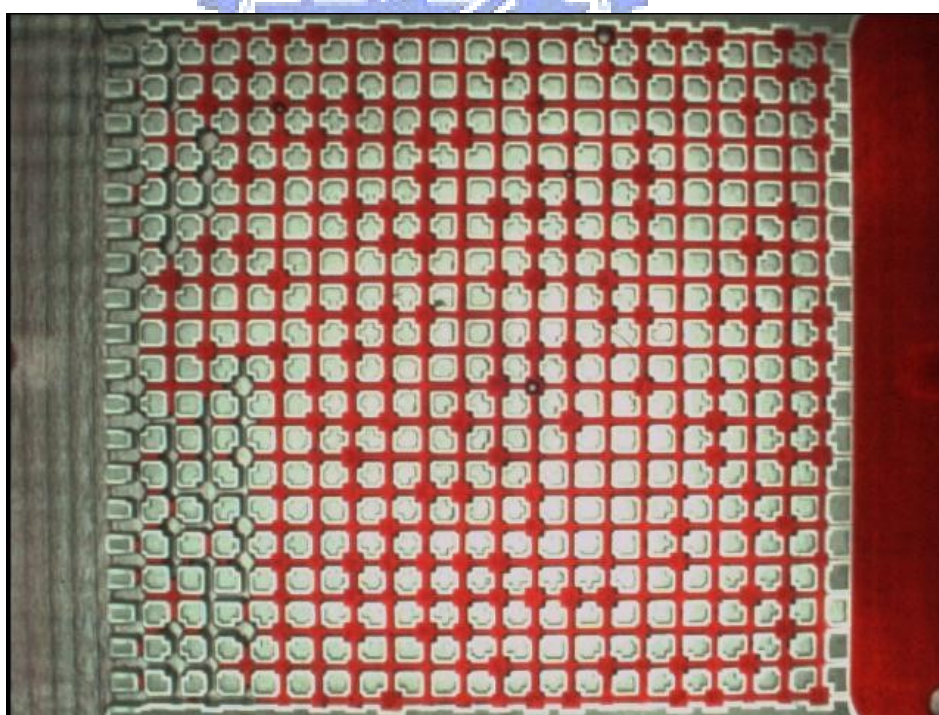


圖 5-30 P-S 實驗排退過程第四階段

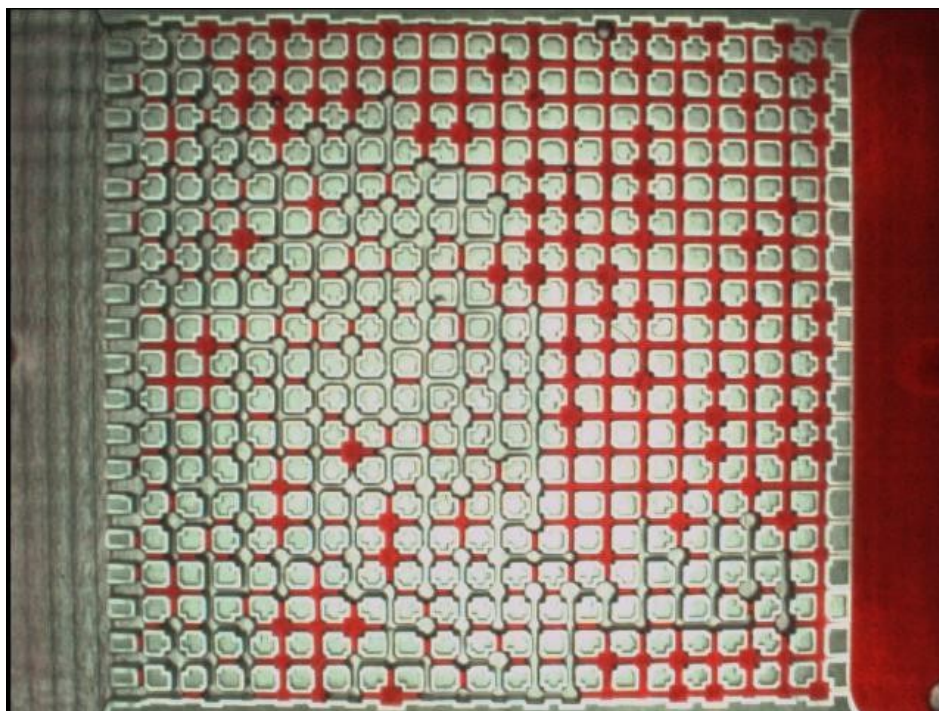


圖 5-31 P-S 實驗排退過程第五階段

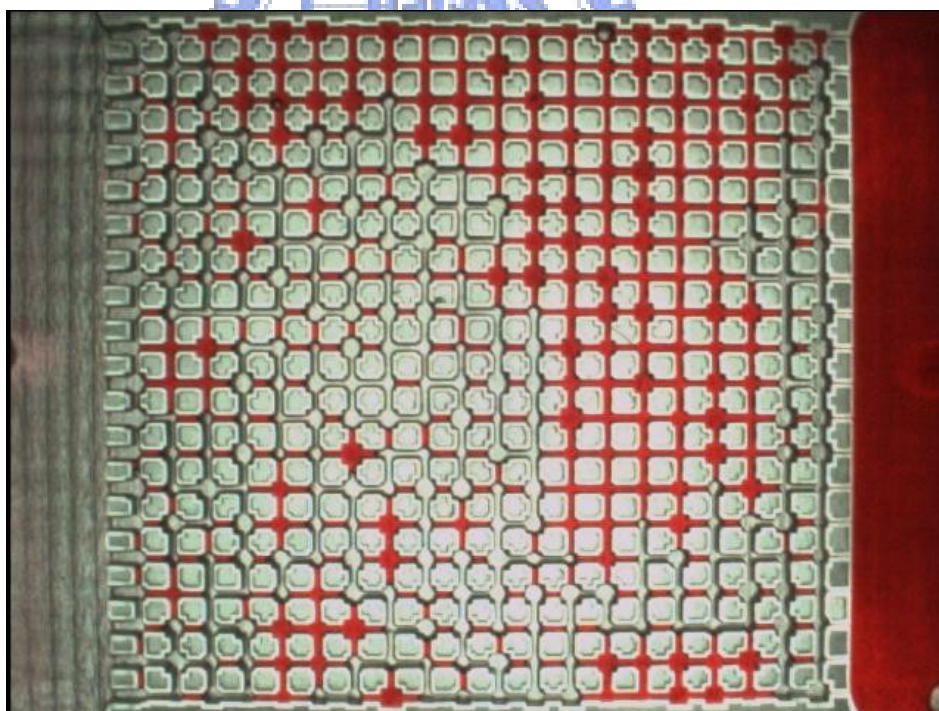


圖 5-32 P-S 實驗排退過程第六階段



圖 5-33 P-S 實驗排退過程第七階段

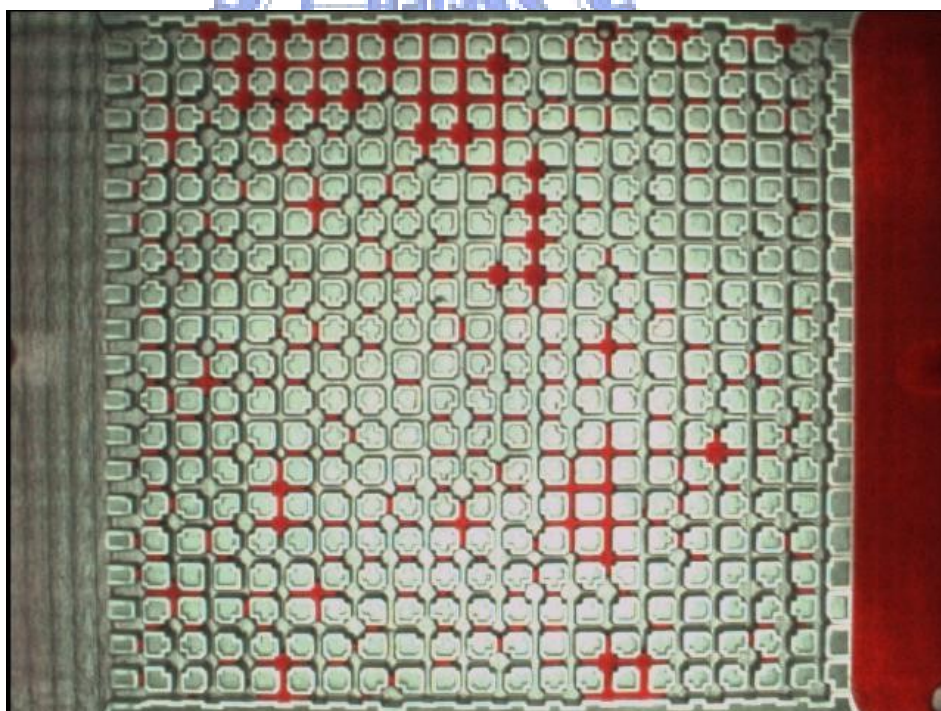


圖 5-34 P-S 實驗排退過程第八階段

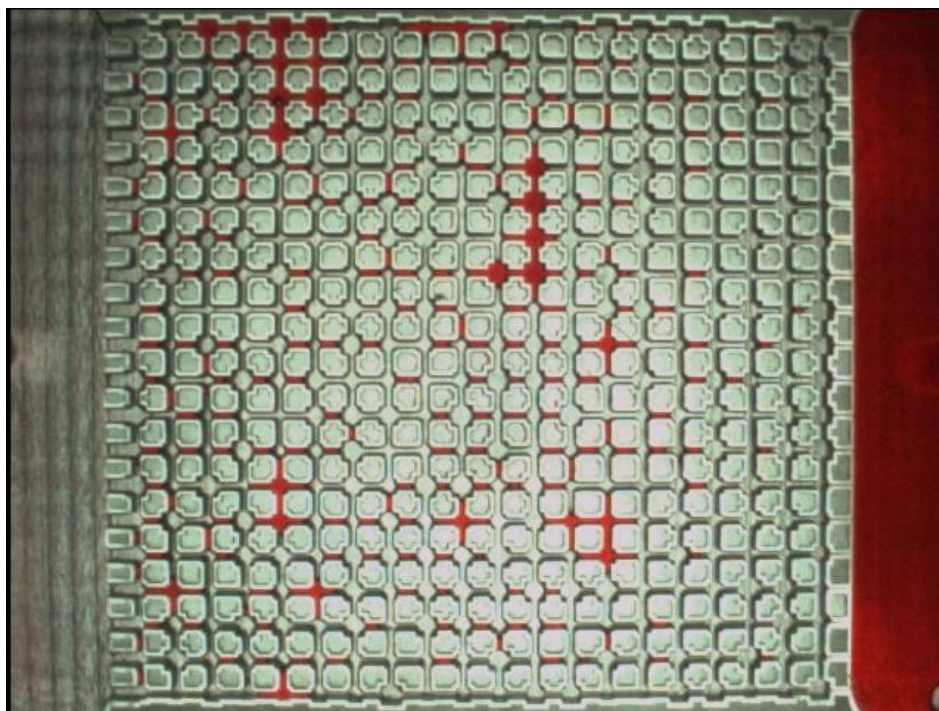


圖 5-35 P-S 實驗排退過程第九階段



圖 5-36 P-S 實驗排退過程第十階段

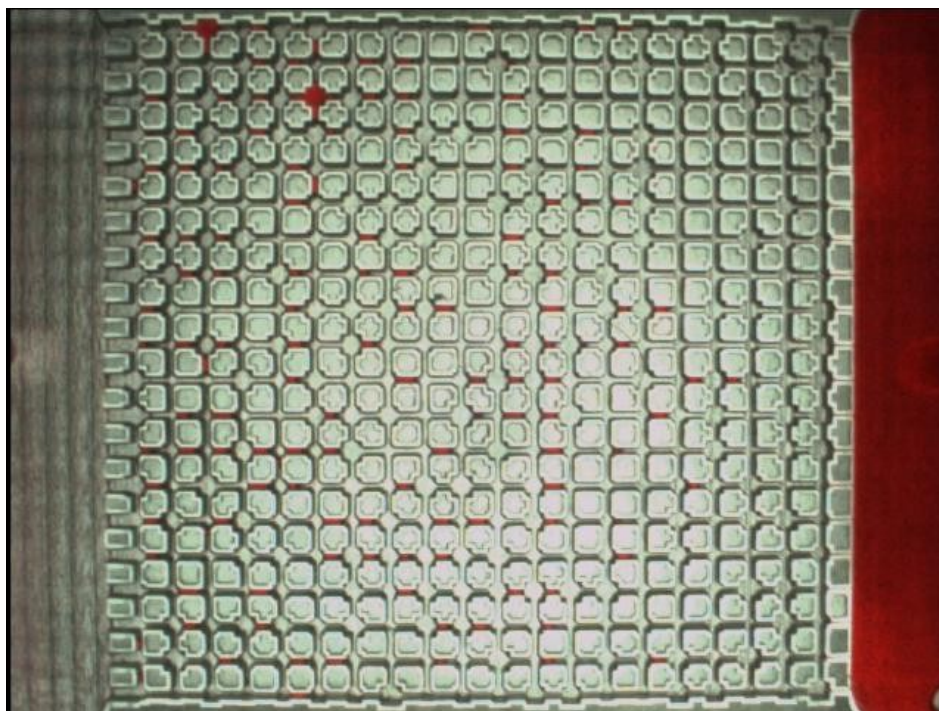


圖 5-37 P-S 實驗汲取過程第一階段

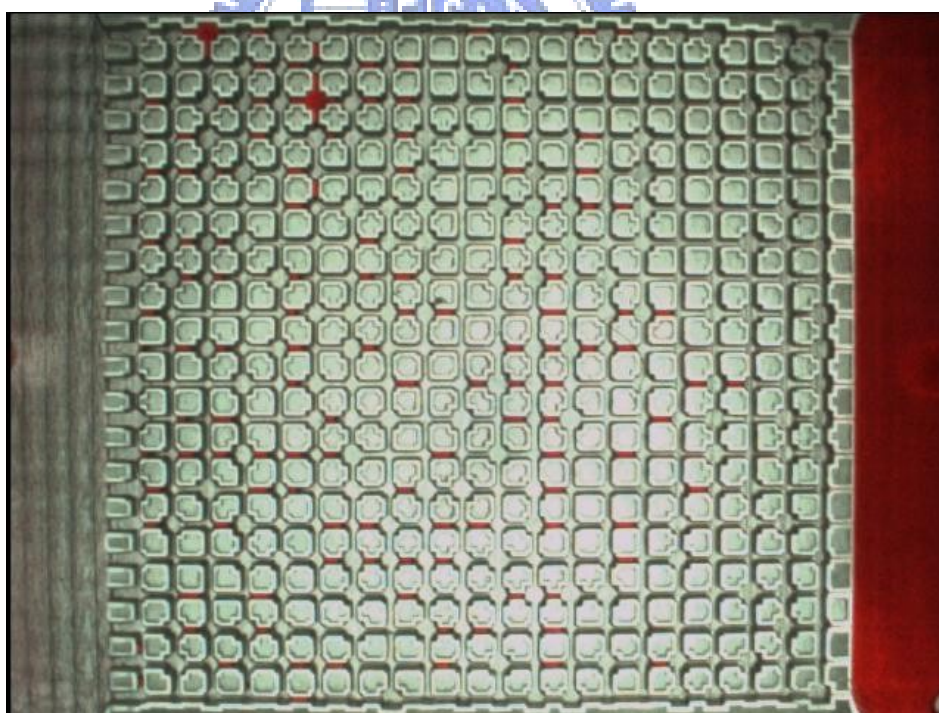


圖 5-38 P-S 實驗汲取過程第二階段

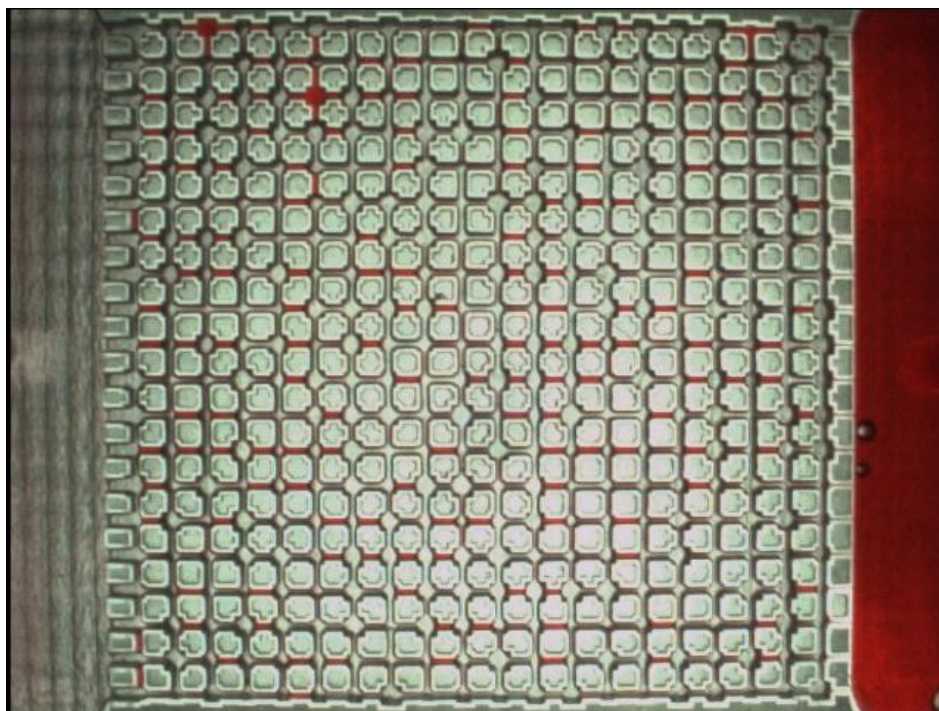


圖 5-39 實驗汲取過程第三階段

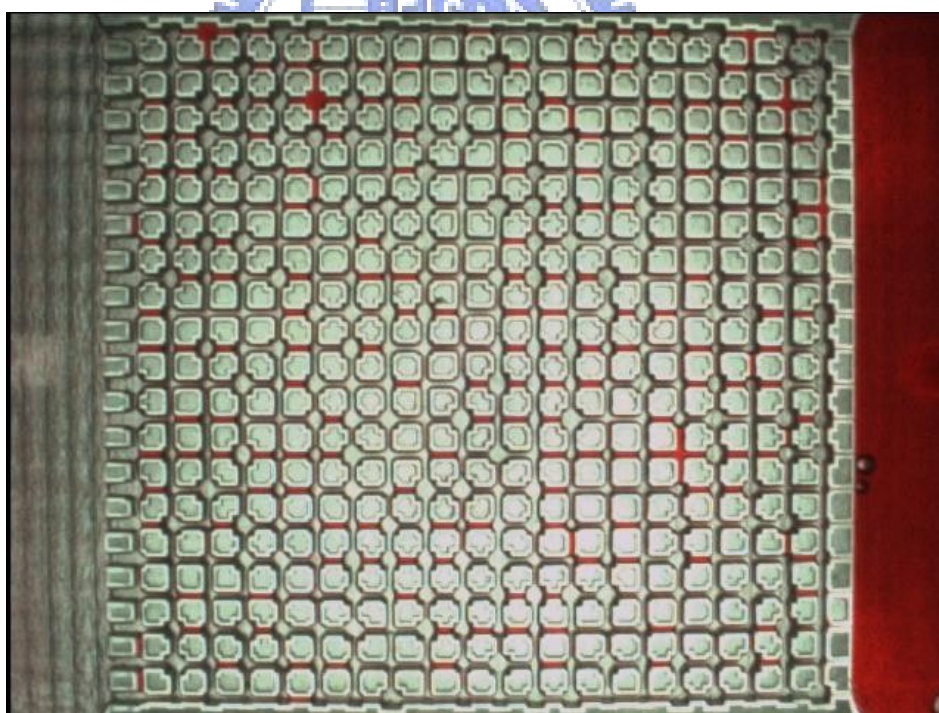


圖 5-40 P-S 實驗汲取過程第四階段

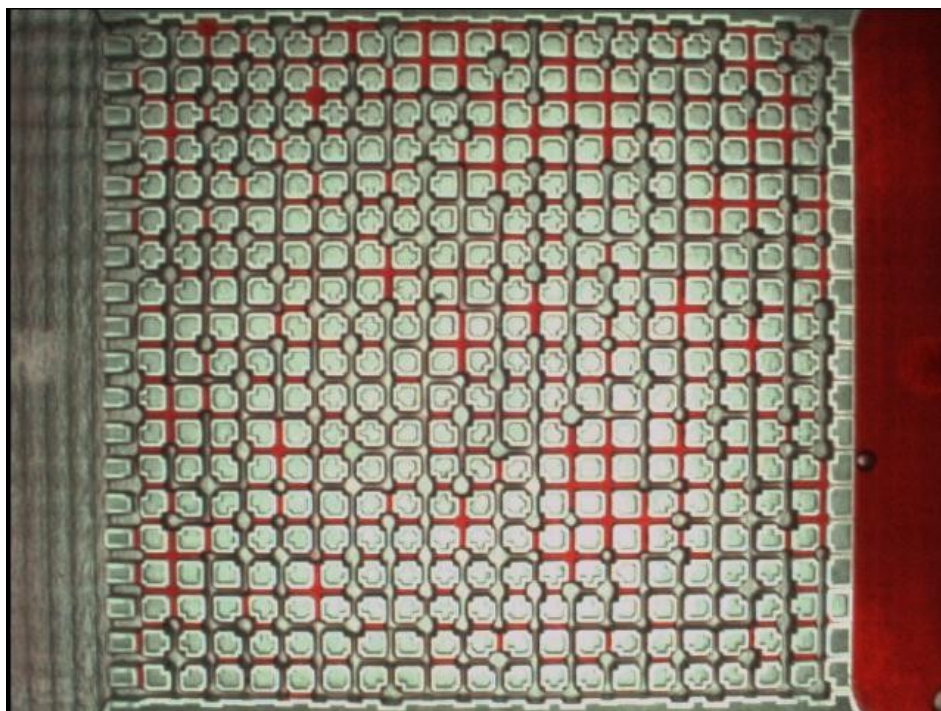


圖 5-41 P-S 實驗汲取過程第五階段

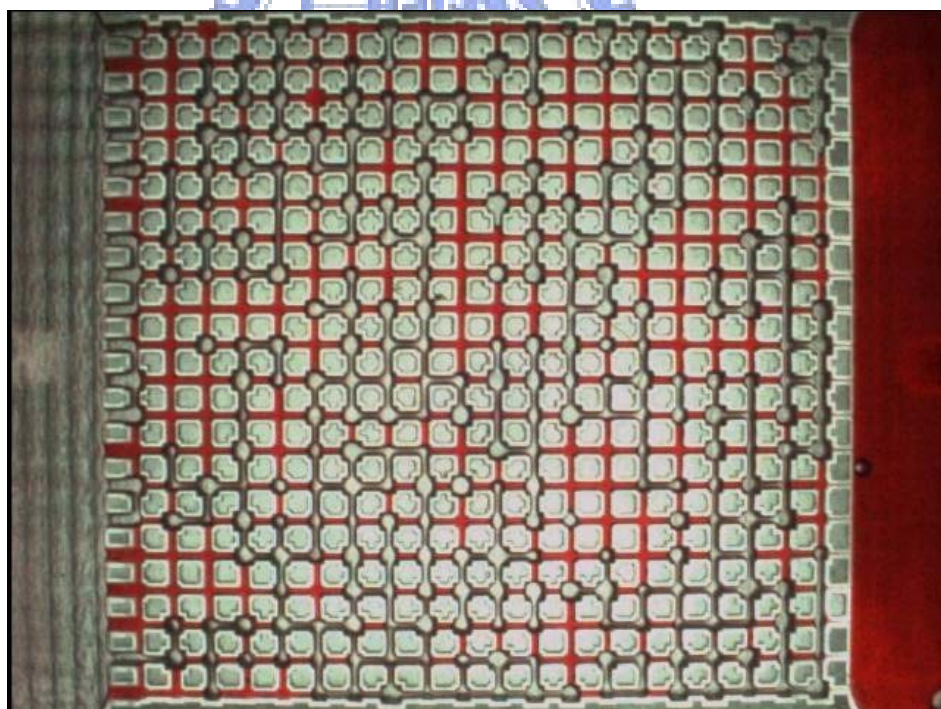


圖 5-42 P-S 實驗汲取過程第六階段

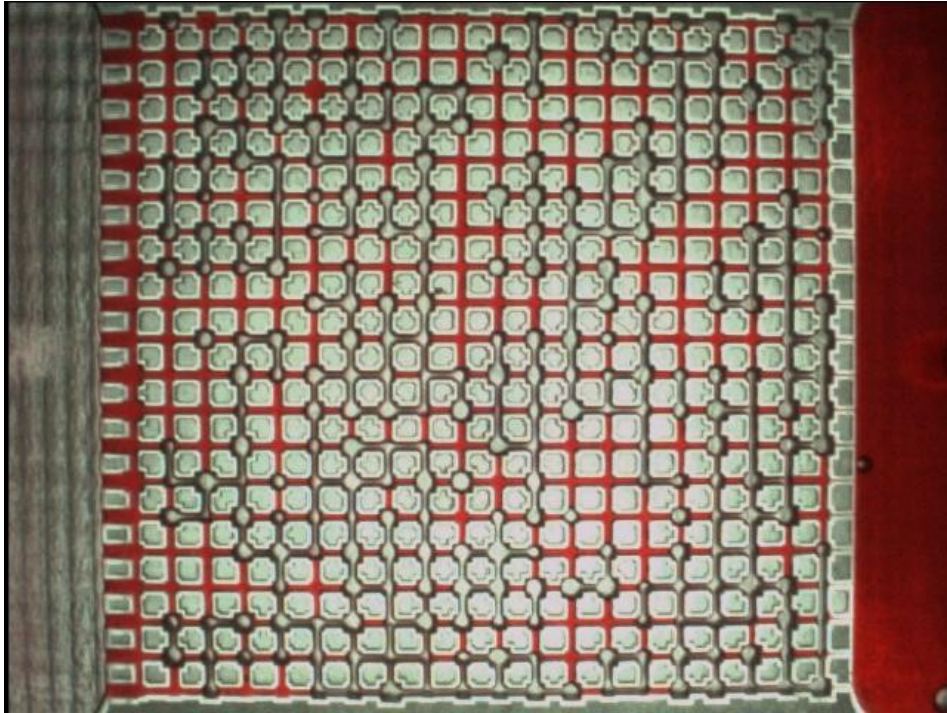


圖 5-43 P-S 實驗汲取過程第七階段

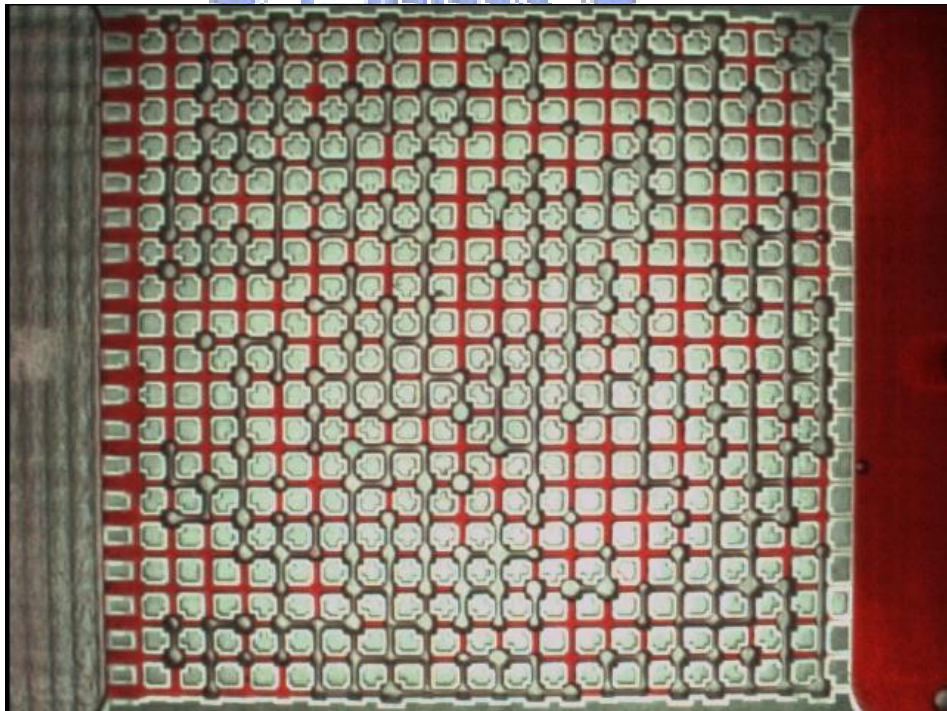


圖 5-44 P-S 實驗汲取過程第八階段

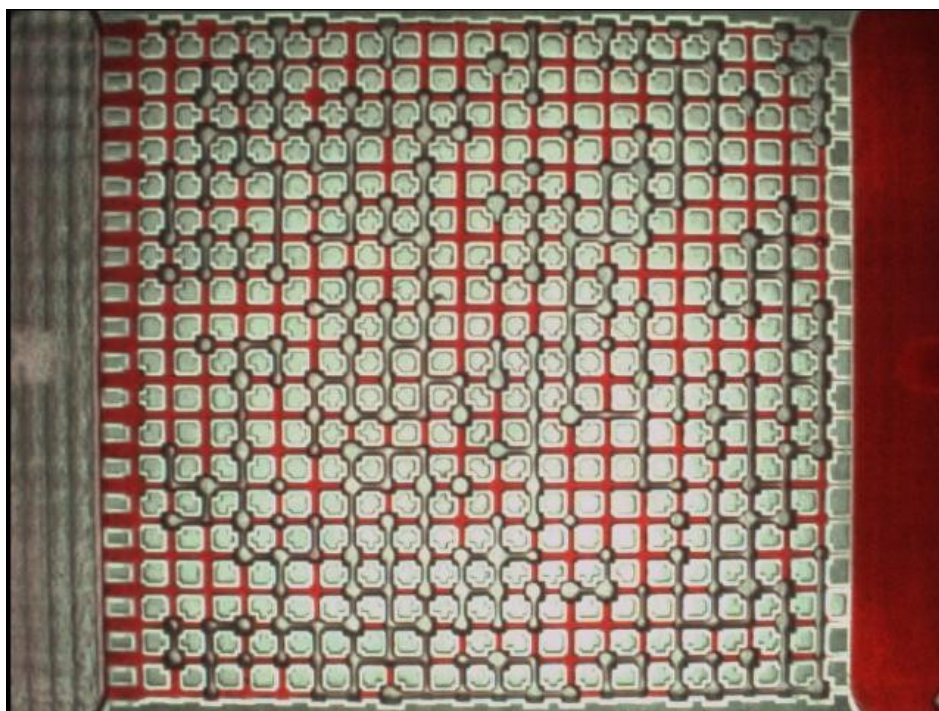


圖 5-45 P-S 實驗汲取過程第九階段

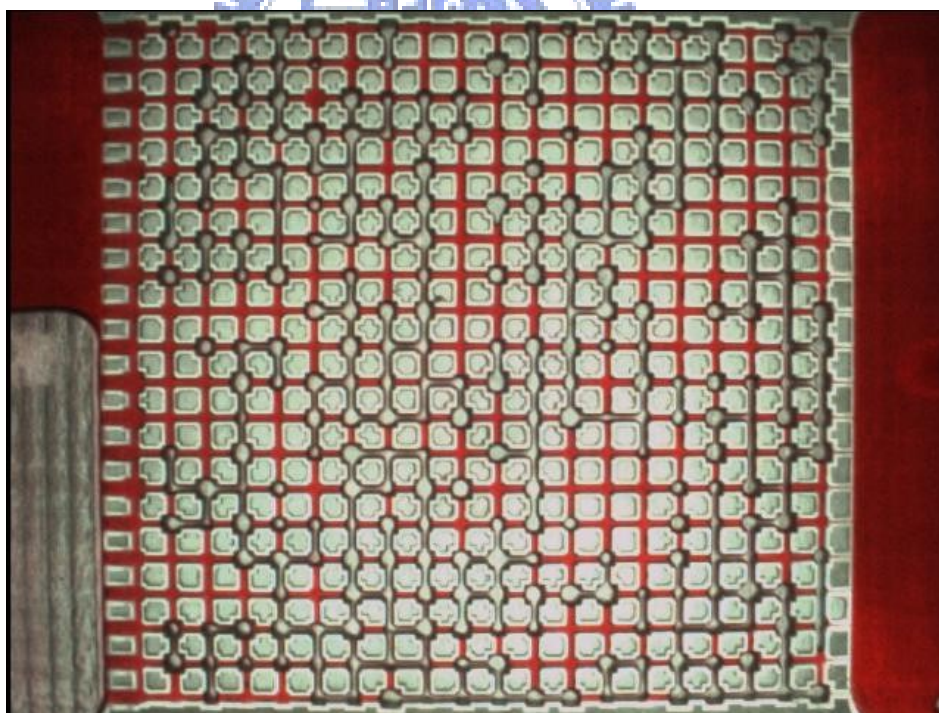


圖 5-46 P-S 實驗汲取過程第十階段

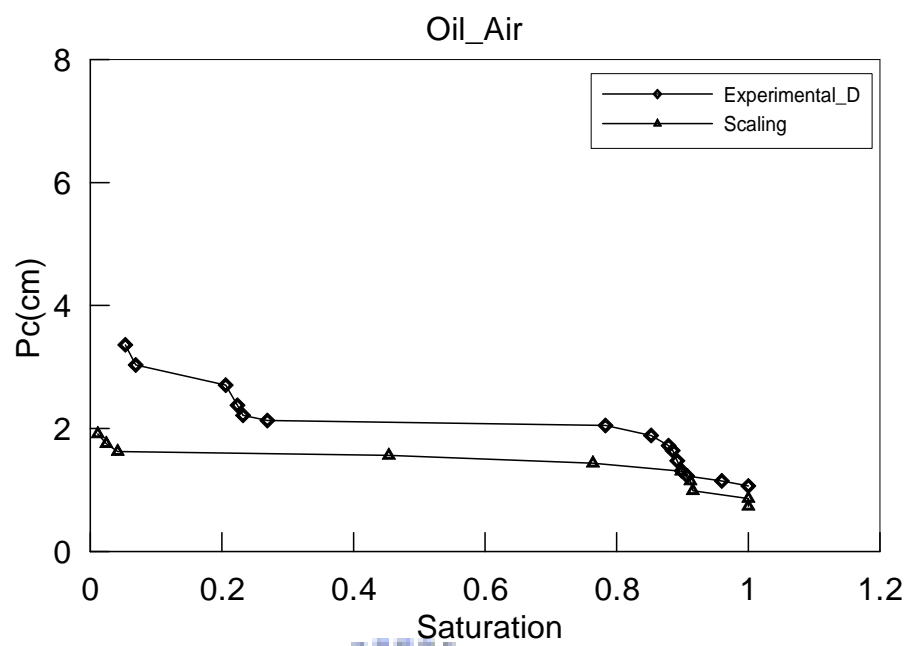


圖 5-47 水-空氣推估柴油-空氣之比例值與實驗值

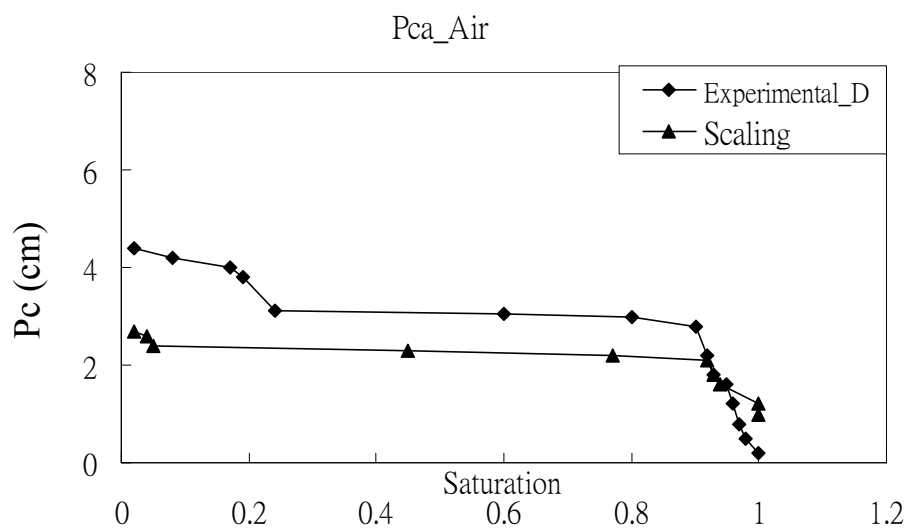


圖 5-48 水-空氣推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值

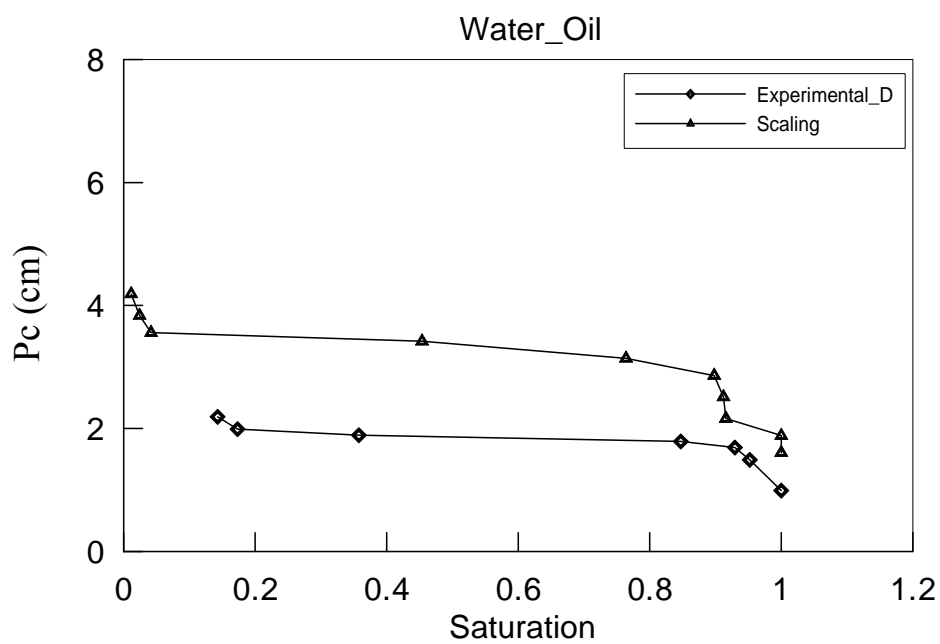


圖 5-49 水-空氣推估水-柴油之比例值與實驗值

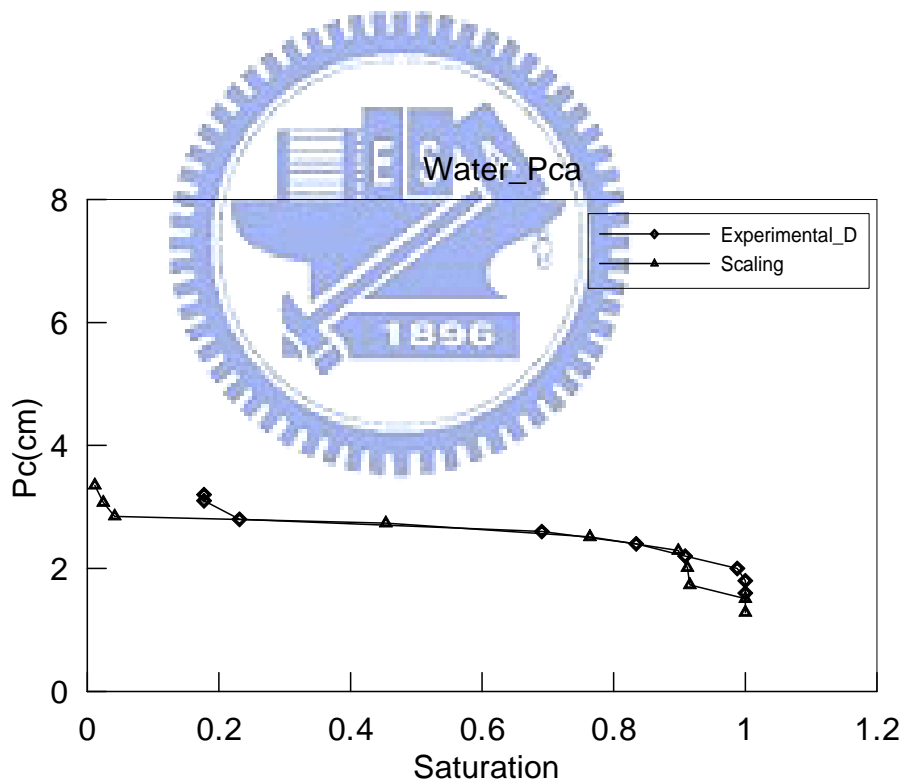


圖 5-50 水-空氣推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值

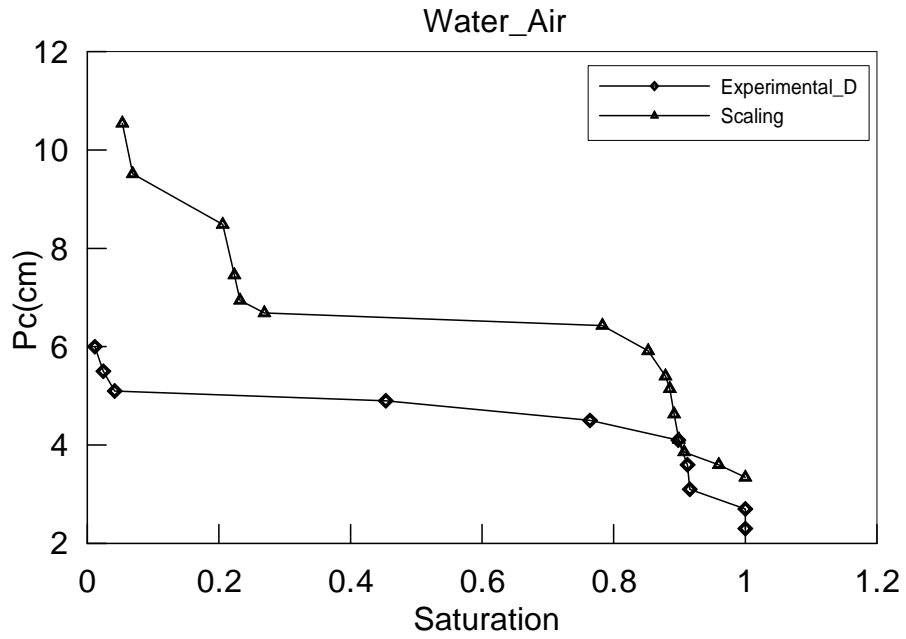


圖 5-51 柴油-空氣推估水-空氣之比例值與實驗值

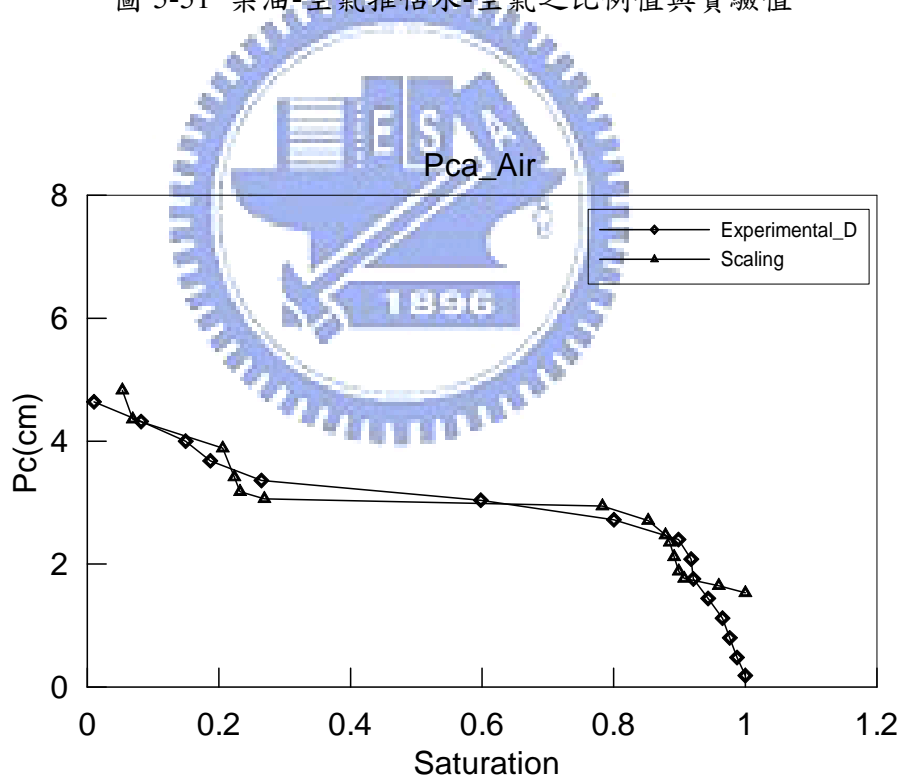


圖 5-52 柴油-空氣推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值

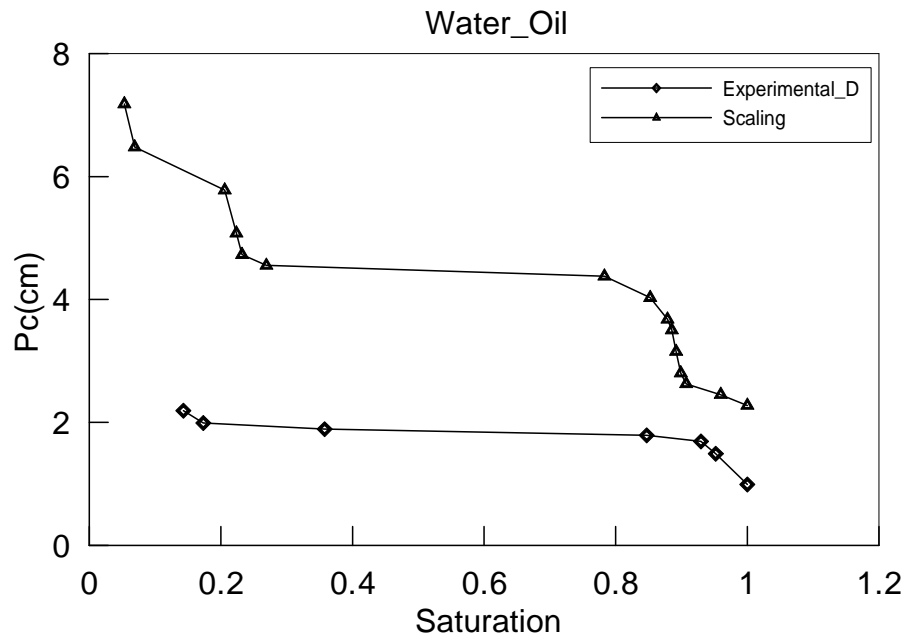


圖 5-53 柴油-空氣推估水-柴油之比例值與實驗值

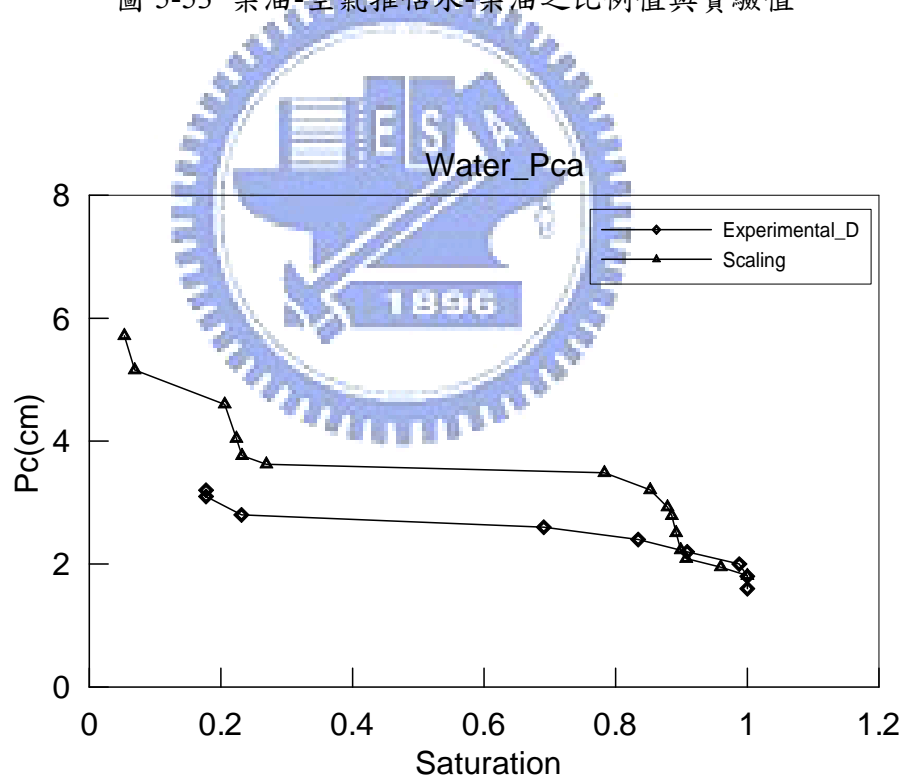


圖 5-54 柴油-空氣推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值

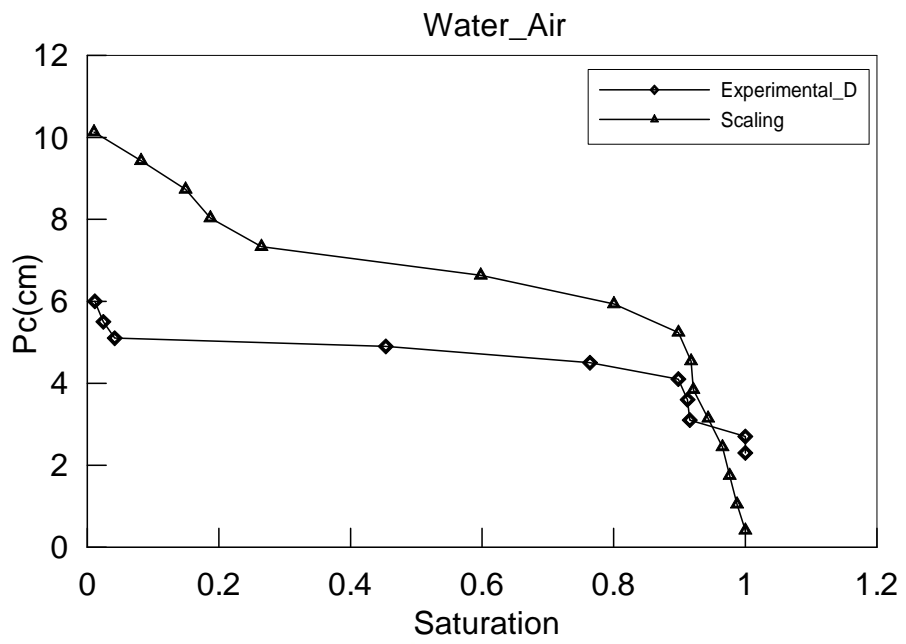


圖 5-55 四氯乙烷-空氣推估水-空氣之比例值與實驗值

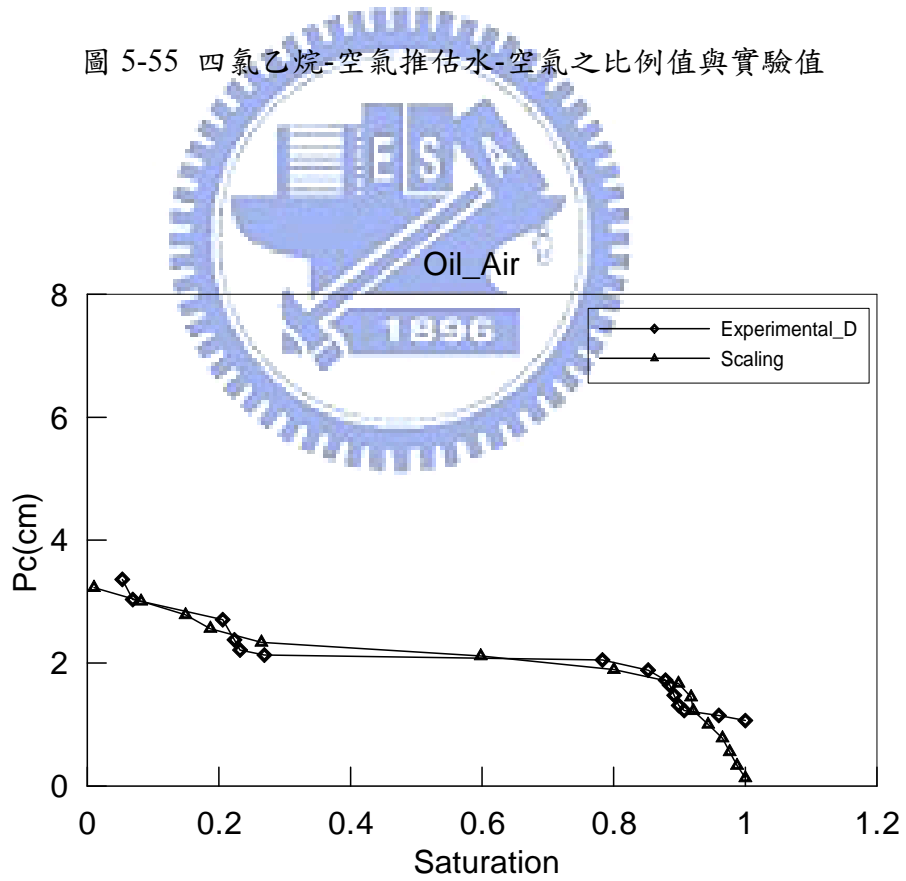


圖 5-56 四氯乙烷-空氣推估柴油-空氣之比例值與實驗值

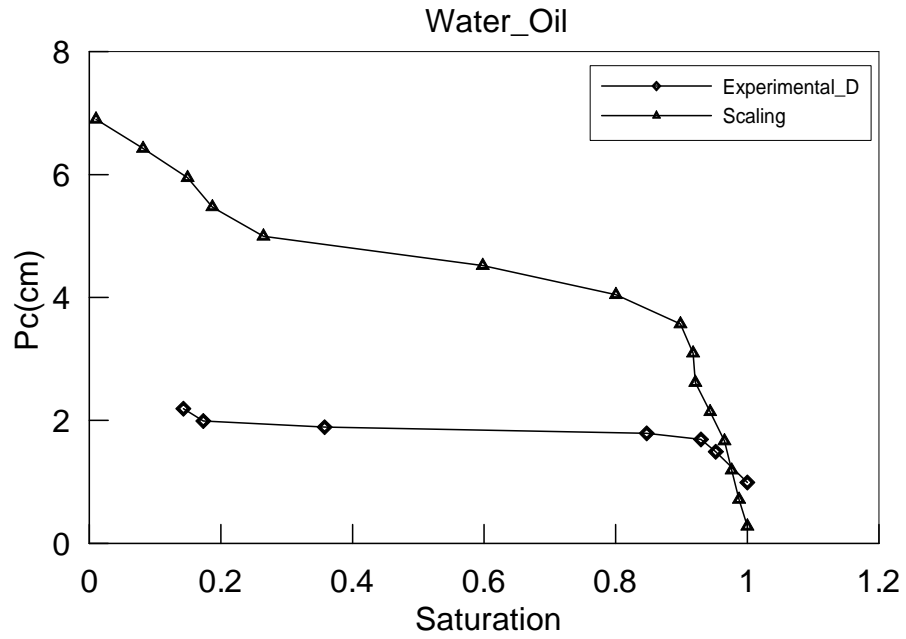


圖 5-57 四氯乙烷-空氣推估水-柴油之比例值與實驗值

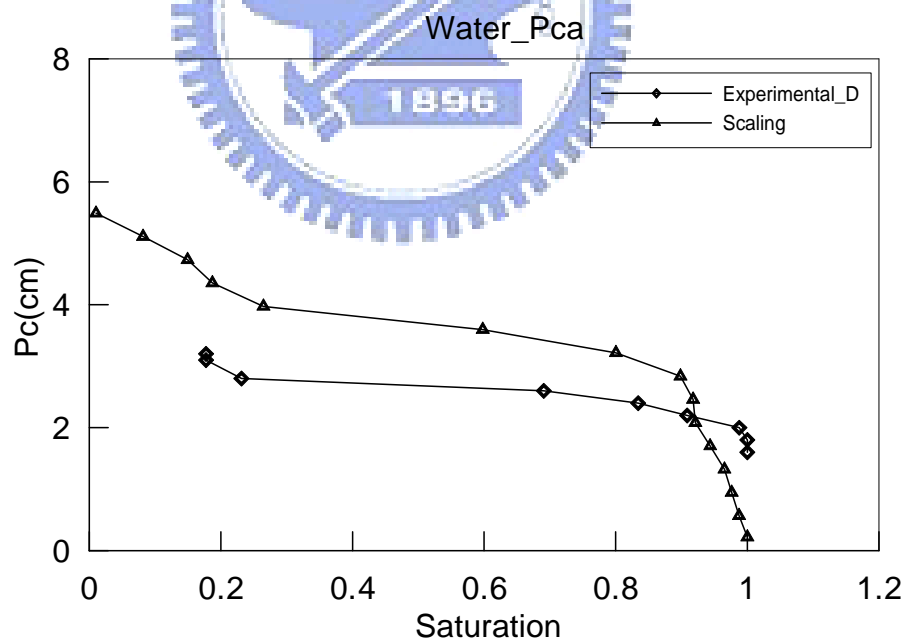


圖 5-58 四氯乙烷-空氣推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值

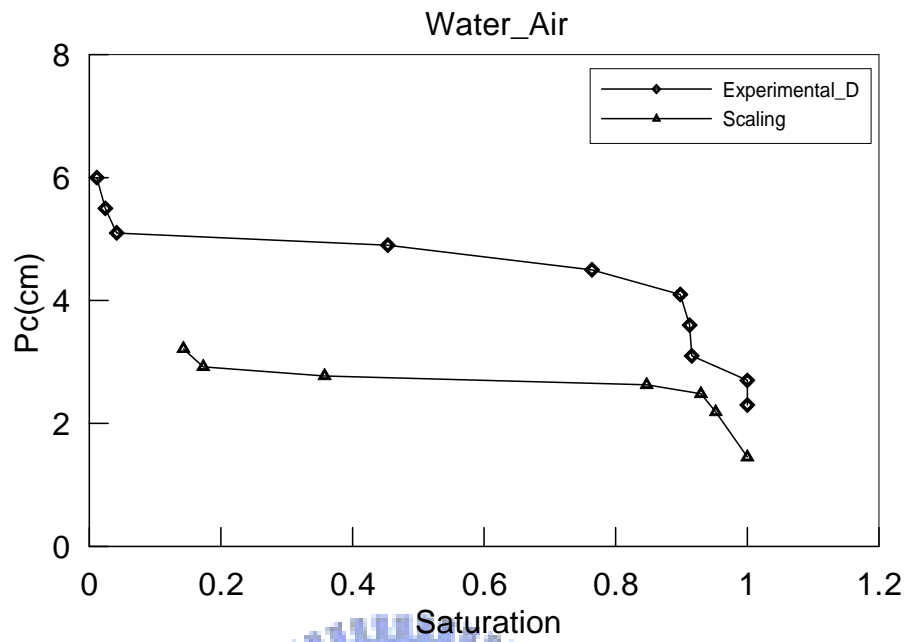


圖 5-59 水-柴油推估水-空氣之比例值與實驗值

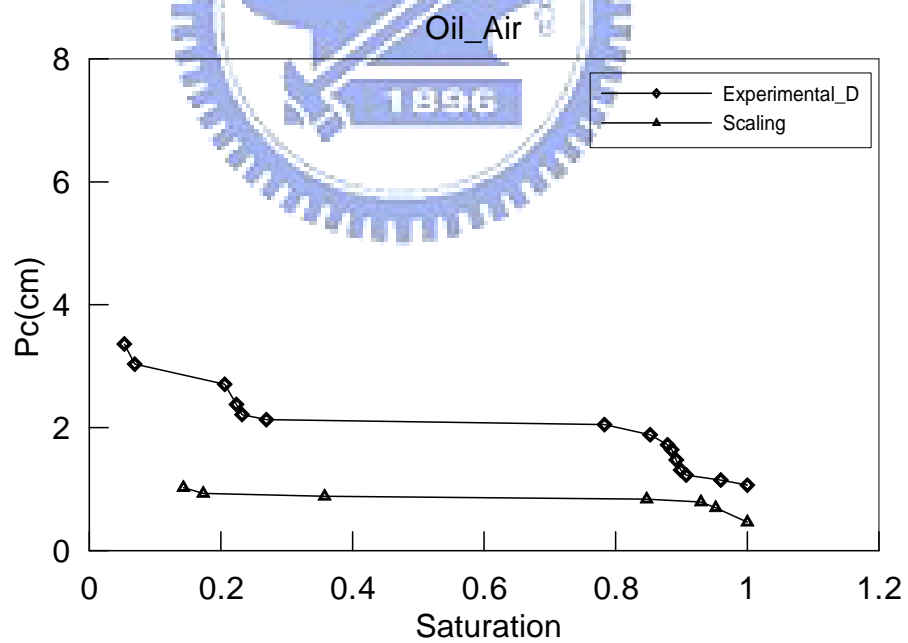


圖 5-60 水-柴油推估柴油-空氣之比例值與實驗值

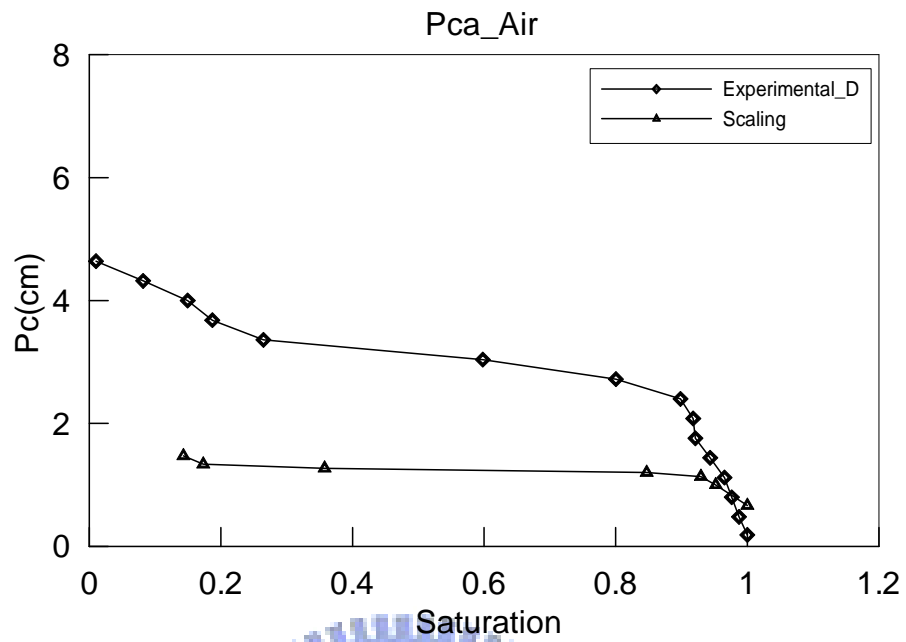


圖 5-61 水-柴油推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值

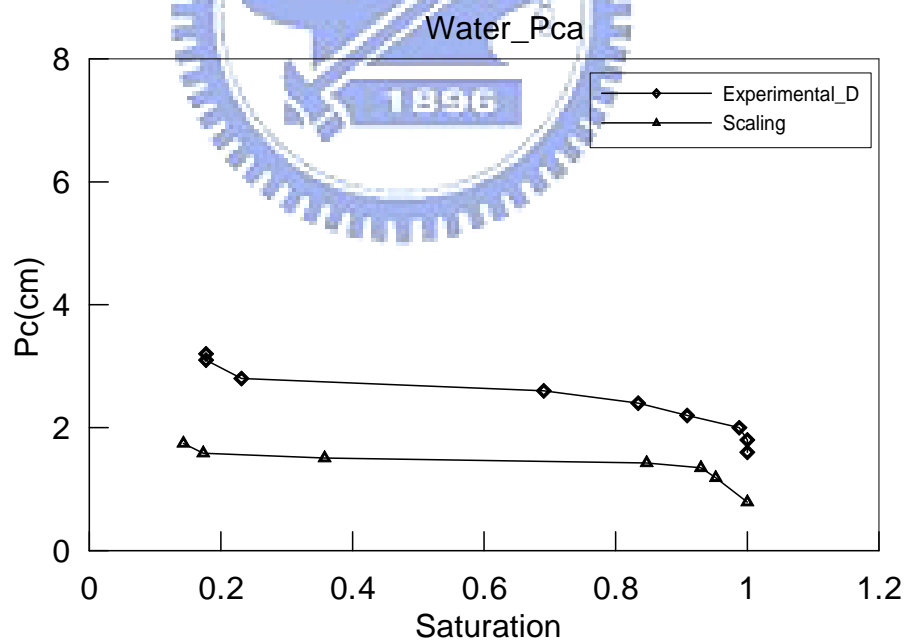


圖 5-62 水-柴油推估水-四氯乙烷之比例值與實驗值

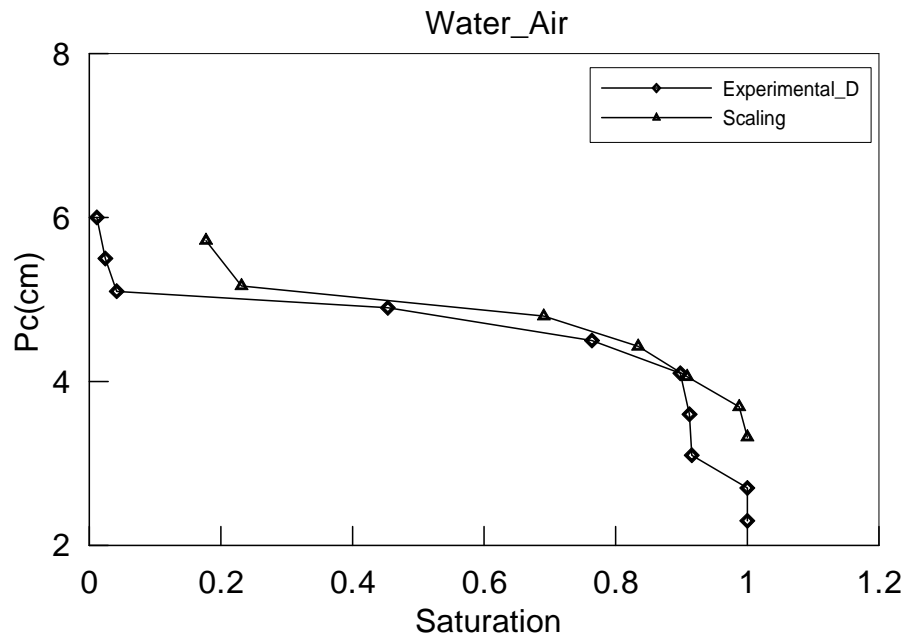


圖 5-63 水-四氯乙烷推估水-空氣之比例值與實驗值

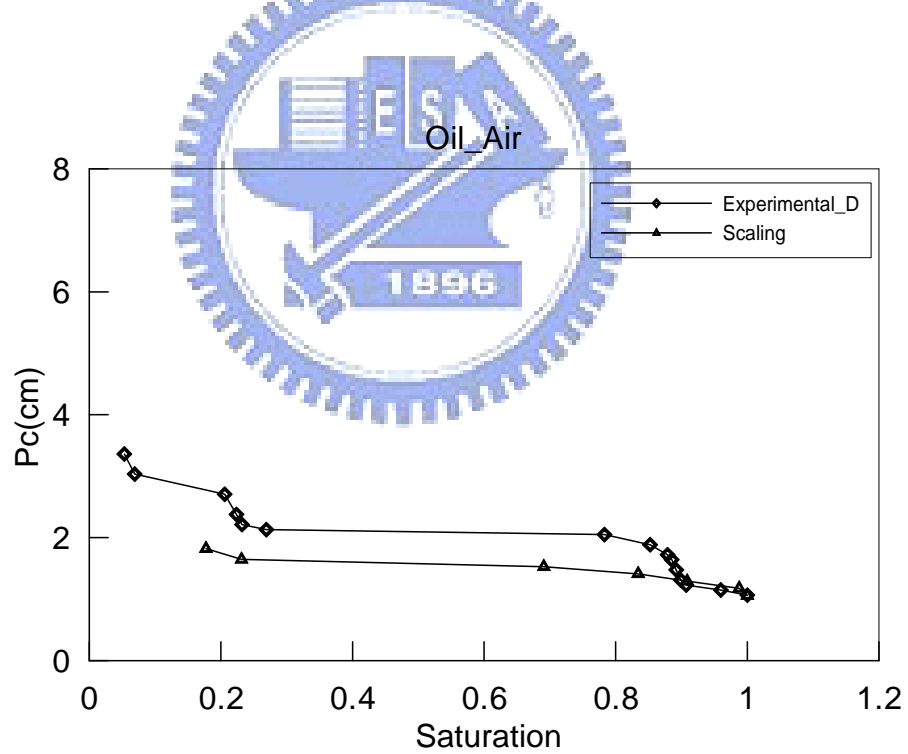


圖 5-64 水-四氯乙烷推估柴油-空氣之比例值與實驗值

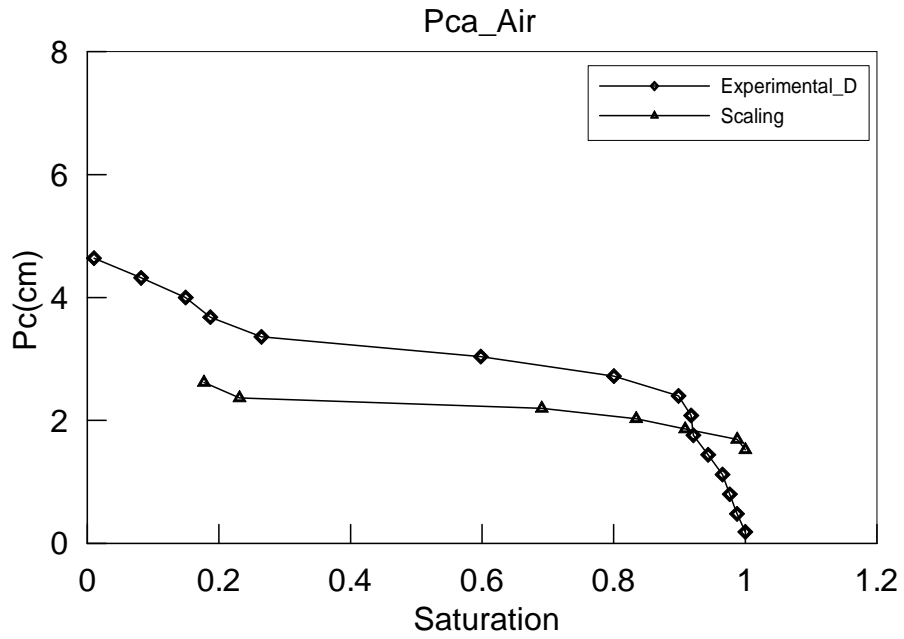


圖 5-65 水-四氯乙烷推估四氯乙烷-空氣之比例值與實驗值

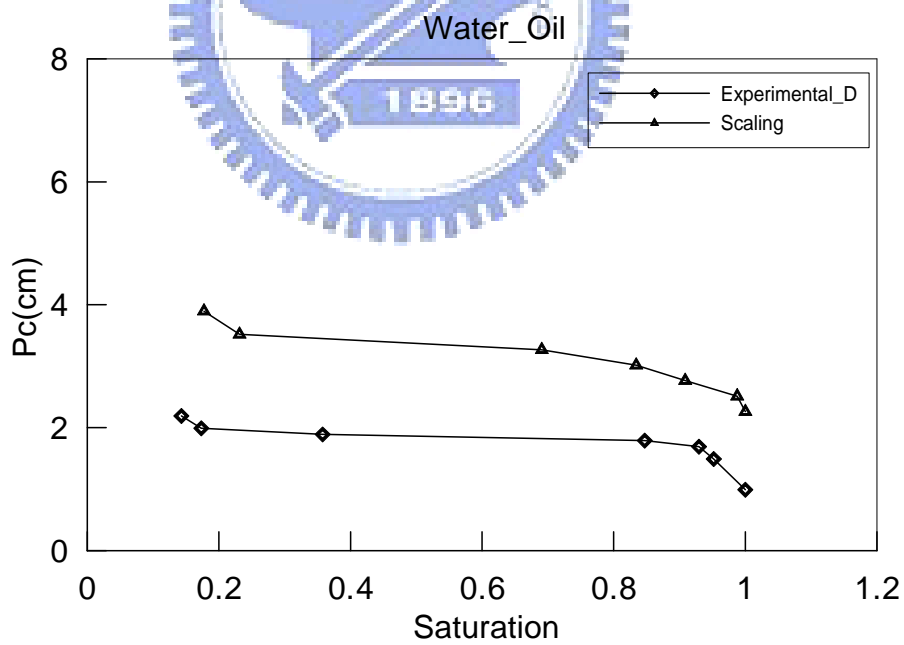


圖 5-66 水-四氯乙烷推估水-柴油之比例值與實驗值

5-4 K_r -S 曲線與 P -S 曲線之相互推估與比較

對於不飽和層中土壤的 K_r -S-P 關係，van Genuchten (1980) 曾經提出 P-S 及 K_r -S 關係的經驗公式：

$$\text{P-S relation : } \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha * P)^n} \right]^m \quad (5-1)$$

$$K_r\text{-S relation : } K_r = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (5-2)$$

圖 5-67~圖 5-71，是本文應用 van Genuchten 經驗公式如式 5-1，以實驗數據再應用簡單基因演算法(Genetic Algorithm ; G.A.)作出迴歸曲線並求出參數 m ，再將參數 m 當成式 5-2 的已知值，繪出 K_r -S 關係經驗曲線。從圖中比較經驗曲線，趨勢上皆能和實驗的曲線符合，經驗曲線也都能落於實驗的排退和汲取曲線之間。

本實驗嘗試另外一種方法來應用 van Genuchten 的經驗公式：以 K_r -S 實驗較具代表性的汲取曲線配合式 5-2 迴歸以求出參數 m ，再將參數 m 帶回式 5-1，繪出 P-S 關係經驗曲線，如圖 5-72~圖 5-75 所示。從圖中實驗和經驗曲線上來看，排退的經驗曲線落於實驗值汲取和排退曲線之間，汲取的經驗曲線則略微低估。

由於在現實的情況下，現地土壤之 P-S 關係較易從實驗中取得， K_r -S 實驗資料則相對不易取得，如果能應用 P-S 實驗資料，透過共同參數為橋樑，而求得 K_r -S 的經驗曲線，不失為一個節省人力、成本的方法。本研究應用以此方法推求出 K_r -S 經驗曲線，經實驗證明， K_r -S 經驗曲線在趨勢上確實能和 K_r -S 實驗曲線符合。

另外，由於 van Genuchten 經驗公式都是以實際土壤為考量，所迴歸的經驗曲線卻也能和壓克力微模型實驗符合。證明壓克力微模型確實能模擬實際土壤環境，做出具有可信度的實驗，同時亦證明 van Genuchten 經驗公式的可行性。

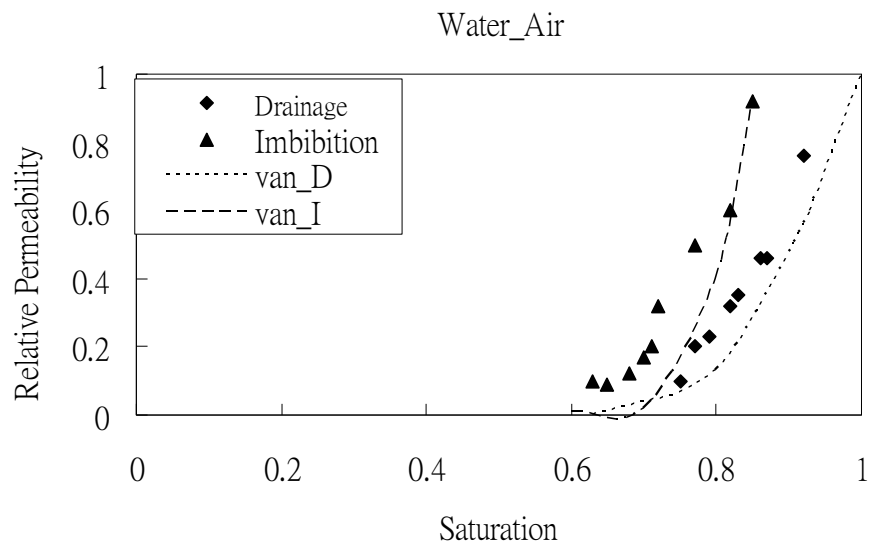


圖 5-67 水相對空氣相 K_r -S 曲線和經驗公式之比較

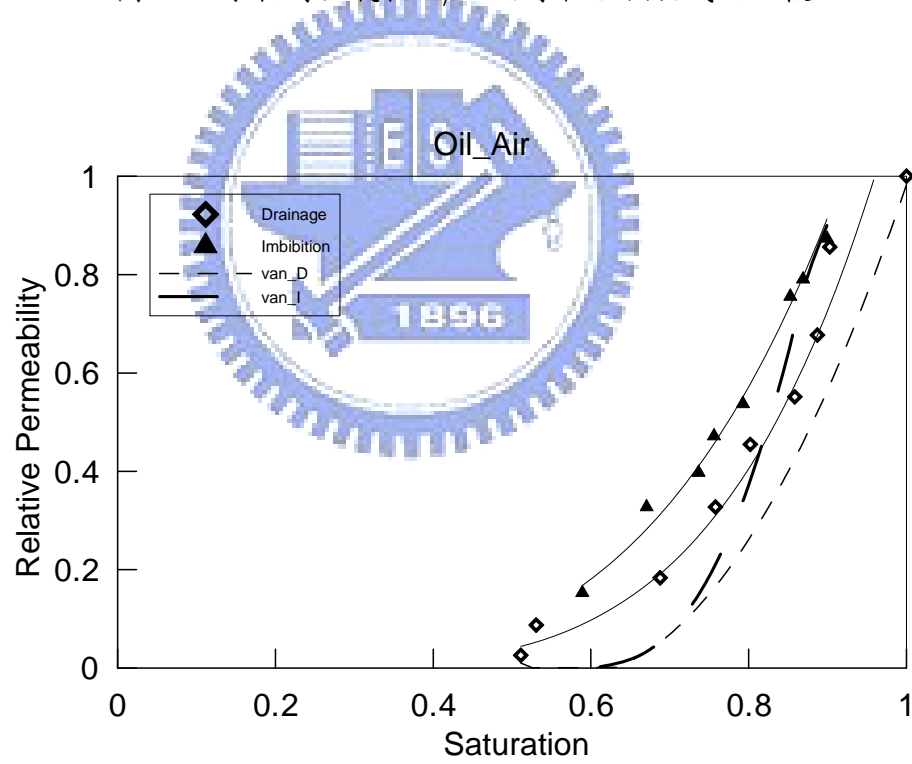


圖 5-68 LNAPL 相對空氣相 K_r -S 曲線和經驗公式之比較

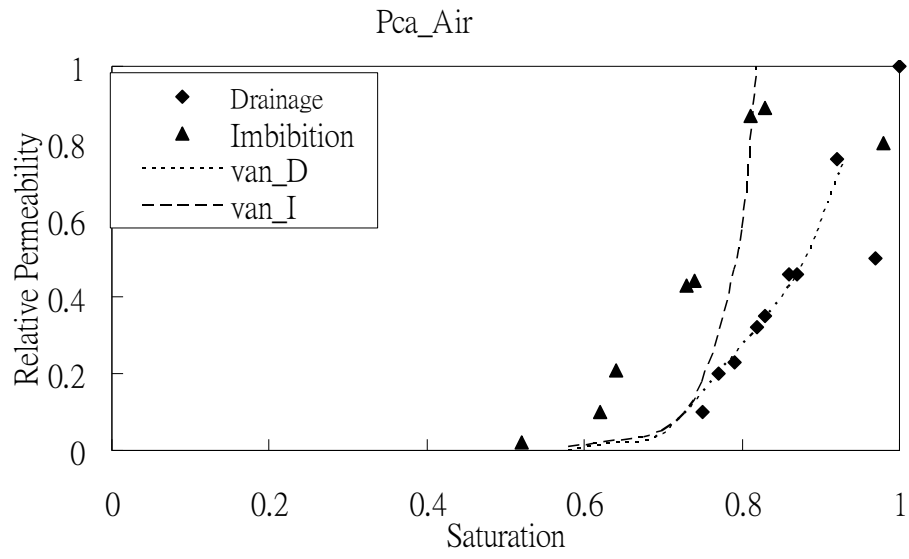


圖 5-69 DNAPL 相對空氣相 K_r -S 曲線和經驗公式之比較

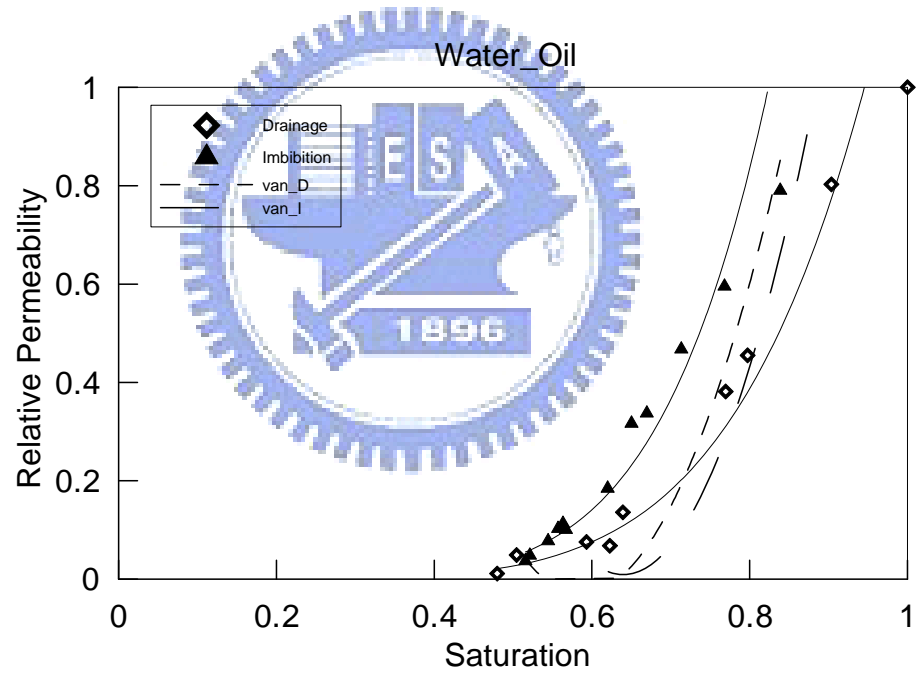


圖 5-70 水相對 LNAPL 相 K_r -S 曲線和經驗公式之比較

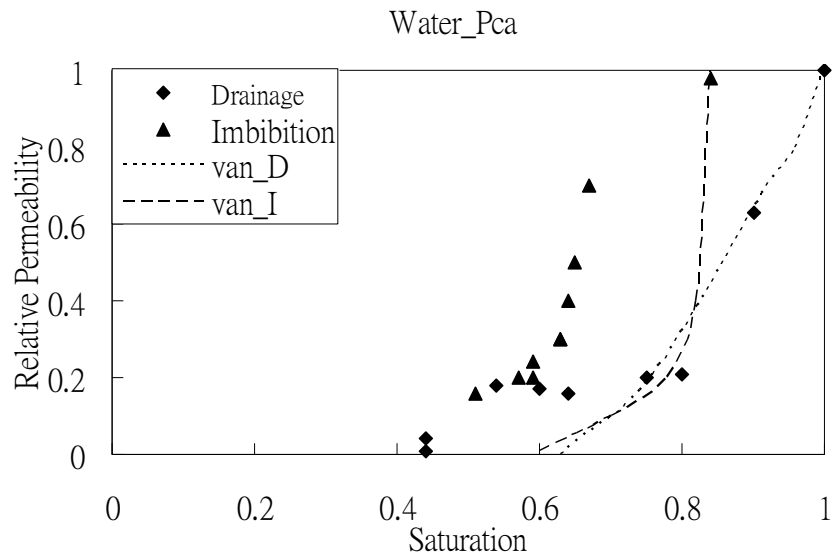


圖 5-71 水相對 DNAPL 相 K_r -S 曲線和經驗公式之比較

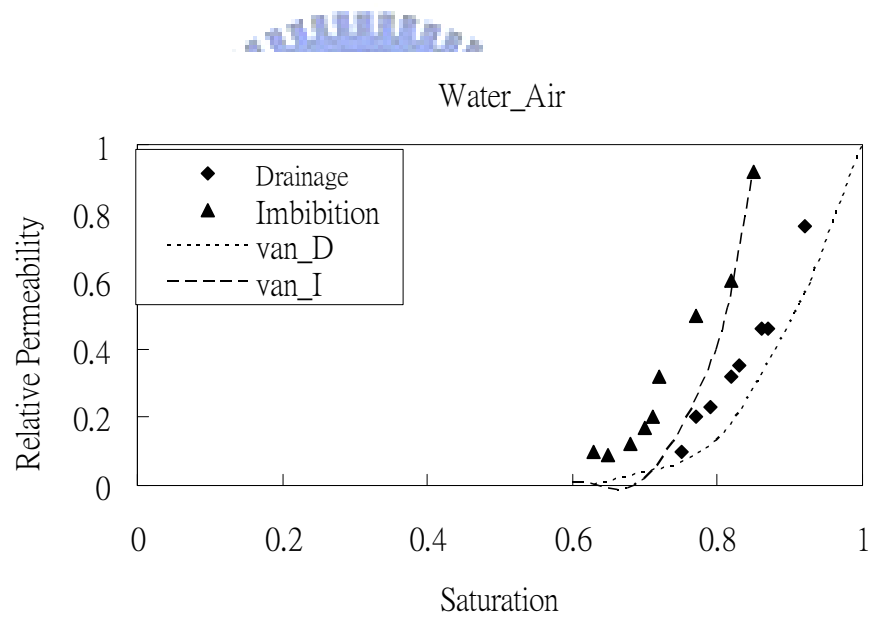


圖 5-72 水相對空氣相 K_r -S 曲線和經驗公式之比較

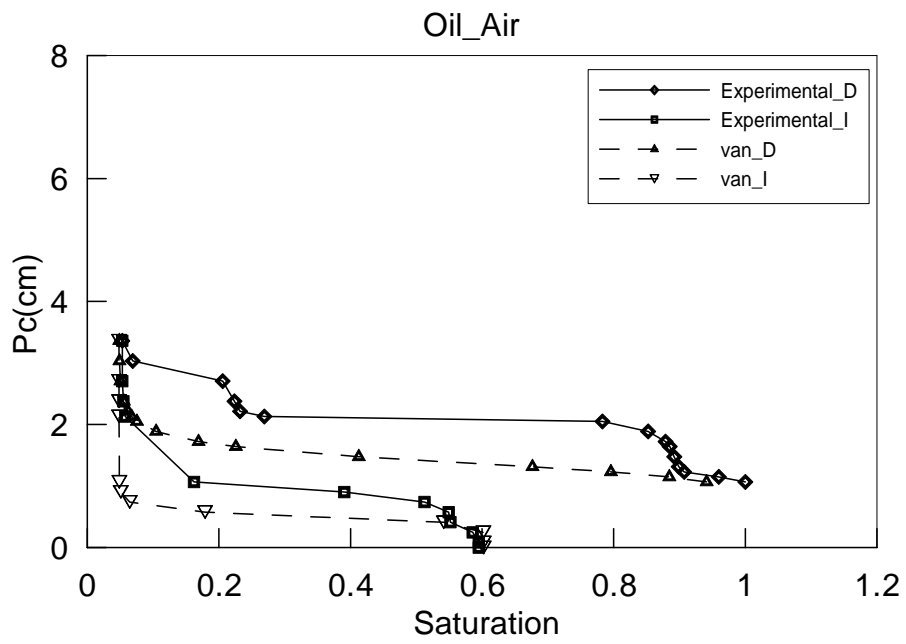


圖 5-73 LNAPL 相對空氣相 P-S 曲線和經驗公式之比較

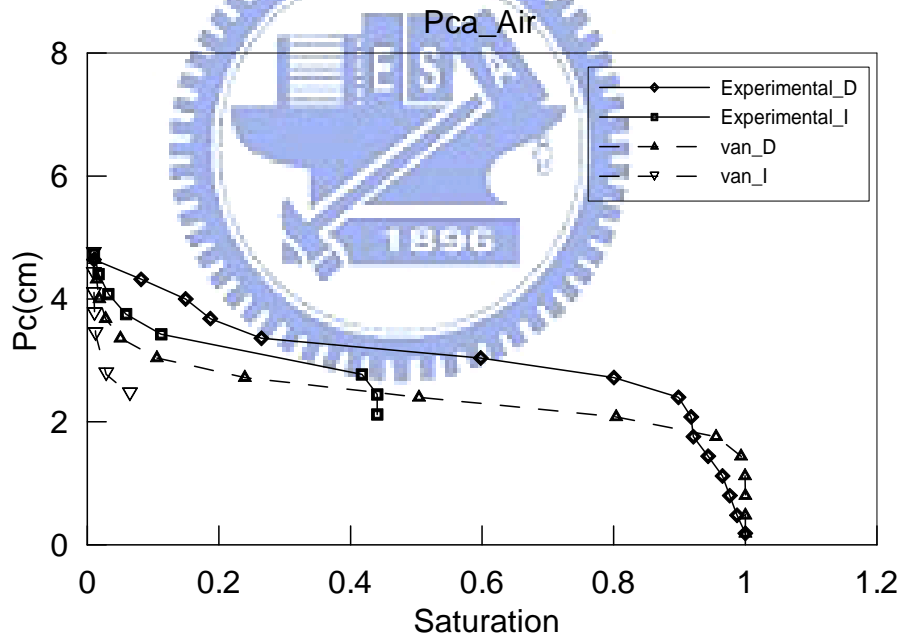


圖 5-74 DNAPL 相對空氣相 P-S 曲線和經驗公式之比較

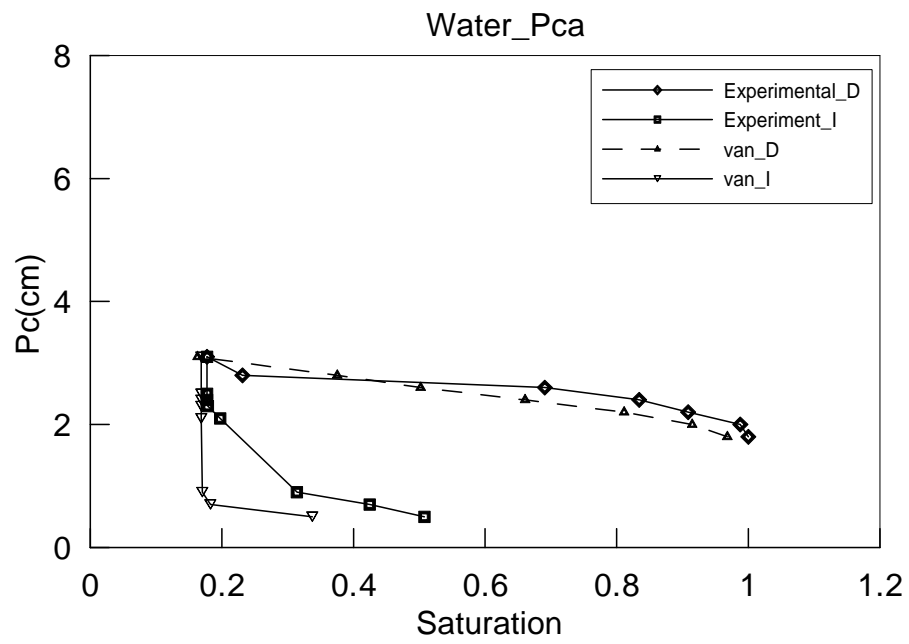


圖 5-75 水相對 DNAPL 相 P-S 曲線和經驗公式之比較



第六章 三相流體 K_r-S-P 關係之微模型實驗與分析

本章所用之實驗裝置和第三章所介紹之微模型實驗裝置約略相同，只有在壓力系統與微模型板設計上有所改變，主要研究重點是以微模型實驗探討三相流體共存時之 K_r-S-P 關係，由於在量測三相流體對的毛細壓力與飽和度關係時並可同時量相對滲透係數，此乃前人尚未進行過的實驗。6-1 節介紹三相共存時 K_r-S-P 關係曲線之微模型實驗程序、微模型板設計及壓力控制系統，6-2 節將三相共存時 K_r-S-P 關係實驗結果作整理分析，以下詳述各節內容。

6-1 三相共存時 K_r-S-P 關係曲線之微模型實驗

圖 6-1 為本章三相共存時 K_r-S-P 關係曲線之研究流程。圖 6-1(A)是 K_r-S-P 可透視微模型實驗，實驗中所使用的實驗流體為水、非水液相(LNAPL 及 DNAPL)、空氣等三種，再依實驗流體進入微模型的次序不同分成六組實驗情況。 K_r-S-P 實驗包括 P-S 與 K_r-S 兩大步驟，P-S 實驗是探討土壤的保持特性曲線， K_r-S 實驗是探討滲透係數和飽和度關係曲線。實驗進行中拍攝得每一階段的實驗影像，再由圖 6-1(B)部分進行影像分析，圖 6-1(C)部分為實驗結果分析，利用(A)、(B)所得的數據，繪出三相共存時的保持特性曲線及相對滲透係數曲線，再由三相 P-S 關係應用 Parker 的經驗式求其對應的 K_r-S 關係。在三相 K_r-S-P 實驗中，相對滲透係數、飽和度、及毛細壓力三個參數是由同一組實驗得到，本章將潤濕相進入微模型板之先後順序作分類。首先由三相流體間的壓力差使微模型中各流體的飽和度改變，當微模型中各流體的飽和度不再改變時視為平衡狀態，並維持微模型中各流體平衡狀態下的飽和度情況，量測濕潤相的滲透係數。整個三相 K_r-S-P 實驗的流程簡單來說是改變一組 P，決定一組 S 後，量測濕潤相的滲透係數，再改變一組 P 直到滲透係數為零時實驗結束。圖 6-2 為 K_r-S-P 實驗步驟流程。實驗系統共分成微模型板（如圖 6-3）、微模型實驗整體配置示意圖（如圖 6-4）與 P-S 及 K_r-S 實驗配置示意圖（如圖 6-5 圖 6-6）等三大系統，以下分述之。

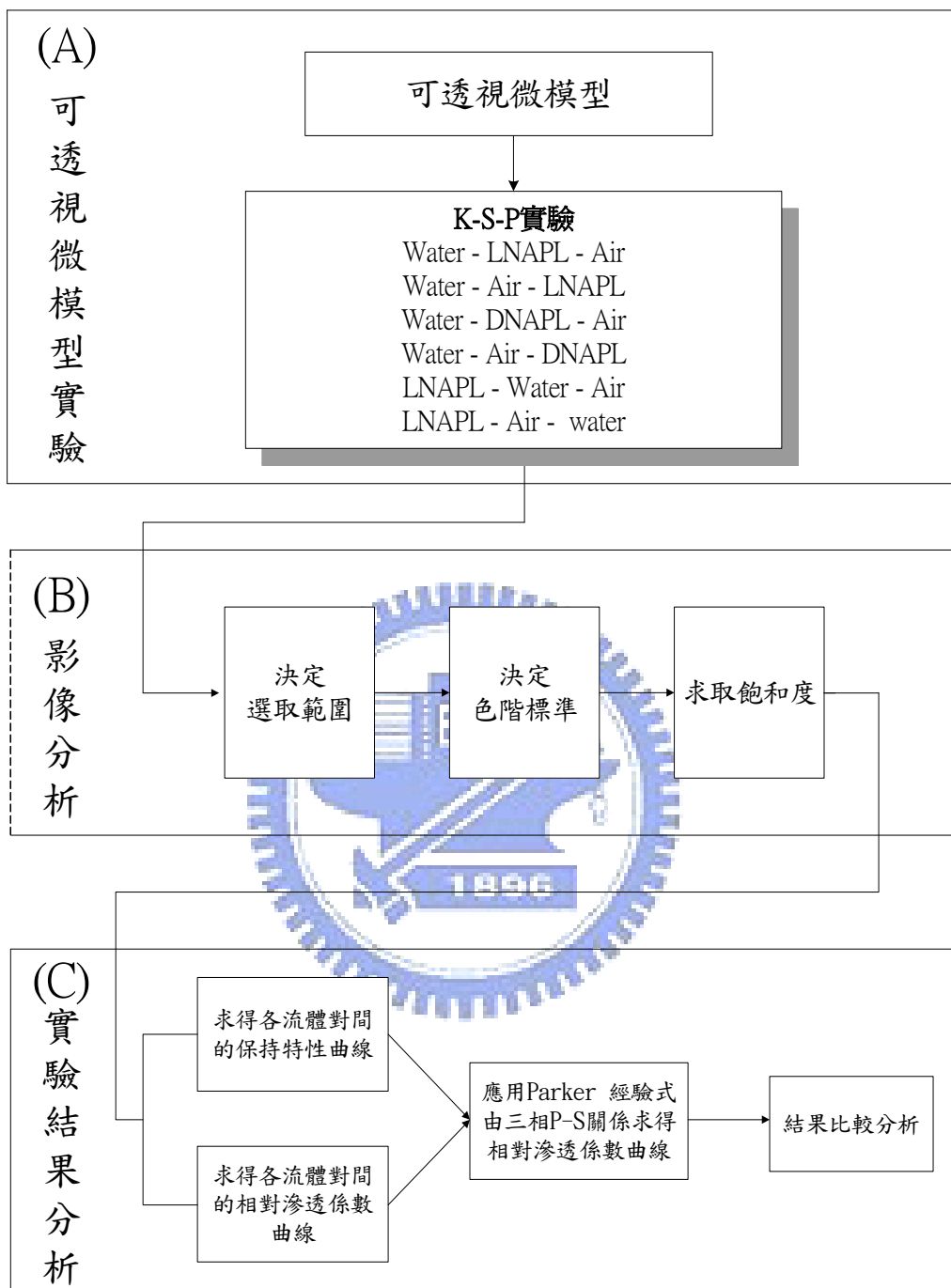


圖 6-1 三相共存時 K_r -S-P 關係曲線之研究流程

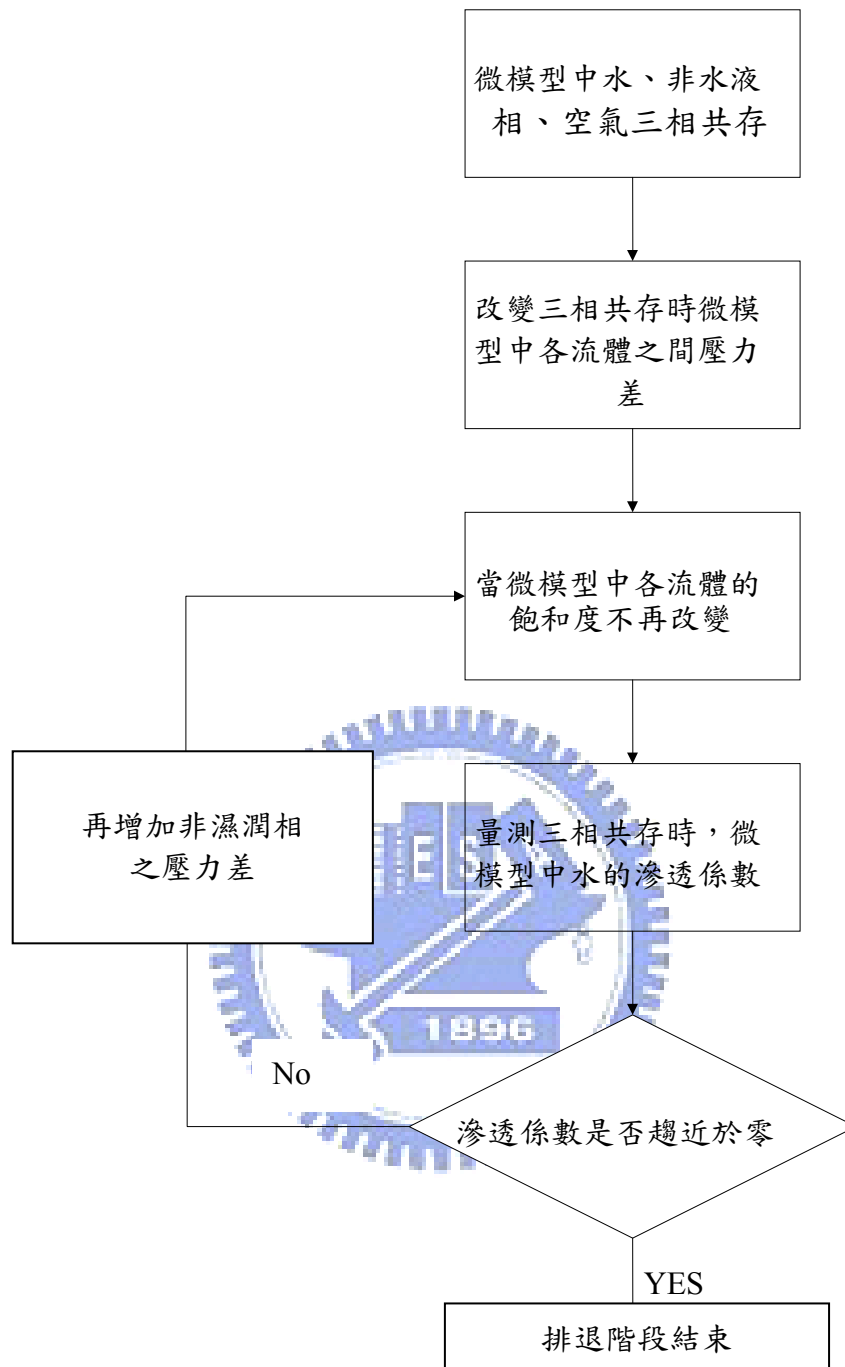


圖 6-2 K_r -S-P 實驗步驟流程

圖 6-3 (a) 為量測水滲透係數時的實驗配置，微模型板中由右向左可再細分入口儲存槽(A)、微模型(B)與出口儲存槽(C)等三個部分。在入口儲存槽(A)內有水的進入口、儲存槽兩部分。進入口設置在半圓形儲存槽的中央，是為了可均勻的填滿儲存槽；儲存槽的設計是為了讓流體在進入微模型前，能先均勻充滿儲存槽後，再均勻的流入微模型

中，不同的流體擁有其個別之儲存槽，如此量測其滲透係數時水流能均勻穩定進入微模型中。此外儲存槽的寬度及深度亦大到足以忽略毛細效應。在微模型(B)中的左邊與右邊介於微模型與儲存槽之間的是柵欄(Barriers)，上方是非水液相的進入口，下方是空氣的進入口。

圖 6-3 (b) 為量測非水液相滲透係數時的實驗配置。其微模型板中入口儲存槽(A)、微模型(B)與出口儲存槽(C)等三個部分的功用如上所示，與圖 4.3 (a) 不同之處在於實驗流體的配置與柵欄設計兩個部分。由圖 6-3 (b) 可看出非水液相(NAPL)由入口儲存槽(A)內的進入口流入微模型板，再由出口儲存槽(C)內流出口離開微模型板，且水由微模型(B)上方的進入口流入微模型板內。由於壓克力表面是親油性，所以在微模型(B)內的柵欄表面不再作加工處理，使其保持親油性，避免被水阻塞柵欄內而影響非水液相滲透係數的量測。微模型板是刻在一塊 2 公分厚，大小約 10cm*10cm 的壓克力塊上如圖 6-6 所示。圖 6-4 是 K_r -S-P 實驗系統的配置圖，調整玻璃瓶的高程便可決定微模型內各流體之間的壓力差。調整控制閥門的開關便可以將 P-S 實驗轉換為 K_r -S 實驗。

壓力控制系統

K_r -S-P 實驗中可分成 P-S 實驗系統與 K_r -S 實驗系統，兩者的壓力控制系統不盡相同，因此將分別說明 P-S 實驗與 K_r -S 實驗的壓力控制部分。圖 6-5 所示是 P-S 實驗系統實驗配置示意圖，壓力控制系統是編號 1 至 5 號的玻璃瓶所組成，編號 1、3、4 玻璃瓶是控制水、油、空氣的壓力系統；編號 2、5 玻璃瓶是對微模型造成壓力梯度的控制系統。當實驗進行時，將編號 2 與編號 5 玻璃瓶的控制閥門關閉，保持編號 1、編號 3、編號 4 玻璃瓶與微模型的暢通。P-S 實驗系統的壓力控制共分兩種情況，一種是水與非水液相的壓力控制；另一種是空氣壓力控制。壓力控制部分主要是調整玻璃瓶內流體液面的高程，造成各實驗流體的高程差，如此便可決定實驗流體在微模型中的壓力差。空氣壓力控制系統，是採用連通管原理，用水壓迫空氣進入微模型中，而空氣的進入壓可

藉由調整玻璃罐內液面高度控制。採用此方法的主要原因在於可精確地控制微模型中的空氣壓力，而且空氣壓力的控制可以經由玻璃罐內液面高度上升或下降充分獲得控制。圖 6-6 所示是 K_r -S 實驗系統實驗配置示意圖，當實驗進行時，將編號 1、編號 3 與編號 4 玻璃瓶的控制閥門關閉，保持編號 2、編號 5 玻璃瓶與微模型的暢通。實驗流體由編號 2 的玻璃瓶進入微模型內，再由編號 5 的玻璃瓶流出微模型外，由下方的量筒量測流量。

在 K_r -S 實驗中定水頭的設施是最重要的系統。實驗中調整入流口及流出口的高程，控制在一定的壓力梯度。此外，在編號 2 的玻璃瓶的定水頭部分，採用 Marriot tube 的方式，取代傳統一端入流、一端溢流的方式維持定水頭，以減少流體的使用量。

K_r -S-P 實驗過程

本實驗分別有兩類，第一類為量測水的相對滲透係數；另一類為量測非水相液的相對滲透係數，由於四氯乙烷屬列管藥品不易購買且實驗室內四氯乙烷存量不足提供實驗所需，因此本研究中非水相液的相對滲透係數量測只進行柴油的量測。

第一類實驗中依照非濕潤相進入微模型中的順序不同共分成 A、B、C、D 四組不同的實驗。

A 組：水 - 柴油 - 空氣

B 組：水 - 空氣 - 柴油

C 組：水 - 四氯乙烷 - 空氣

D 組：水 - 空氣 - 四氯乙烷

A 組至 D 組主要是探討非濕潤相入侵時，對水的滲透係數的影響；並比較非水相液與空氣兩者非濕潤相入侵的順序不同時，對水的滲透係數的影響是否有差異。

第二類實驗中依照水與空氣相進入微模型中的順序不同共分成 E、F 兩組不同的實驗。

E 組：柴油 - 空氣 - 水

F 組：柴油 - 水 - 空氣

E 組與 F 組是探討水與空氣相入侵時，對柴油的滲透係數的影響；並比較水與空氣相兩者入侵的順序不同時，對油的滲透係數的影響是否有差異。

在微模型中其濕潤程度為水 > 非水相液 > 空氣，水為濕潤相、非水相液為次濕潤

相、空氣為非濕潤相。以下以實驗 A 組量測水的相對滲透係數情況下為例，詳述實驗步驟：

1. 將微模型組合（包含微模型板及壓克力薄片）並均勻壓緊，並以 TYGON 管連接各壓力控制系統與微模型。
2. 將二氧化碳灌入微模型板中，趕走內部空氣，再將水灌入微模型板中，放置 1 小時，以溶解二氧化碳達到飽和。等到氣泡完全消失後，再讓水繼續流動約 10 分鐘，以取代為模型中溶有二氧化碳的水體。
3. 先固定水相的壓力水頭，並增加柴油相的流體壓力水頭使柴油進入微模型板中。增加柴油與水相的壓力差使微模型中的柴油相飽和度增加，模型板中的柴油佔全部流通面積達到大約 20% ~ 30% 時，進行下一步驟。至於只使柴油佔全部流通面積 20% ~ 30% 是避免空氣相還未進入微模型中時水已經形成不連續相，無法量測其滲透係數。固定水與柴油的壓力水頭差，這時微模型中只有水與柴油兩個流體。再增加空氣相對水的壓力水頭差，使空氣進入微模型中，這時微模型中水、柴油、空氣三相共存。因為每一組流體對界面張力不同，可調整的壓力範圍也不同，所以每次增加 0.1~0.2cm 壓力水頭。同時 CCD 以每 10 秒一張的速度記錄微模型內變化的情形，若 30 分鐘內，所拍下的照片均不變，則視為平衡。
4. 本實驗是先完成三相 P-S 實驗，當在微模型內各流體飽和度穩定不再改變後，保持微模型中各流體飽和度與分布情況下量測其滲透係數，因此本研究中各流體的飽和度是在連續分布且可量測其壓力水頭的情況下所進行滲透係數量測實驗。首先將水、柴油、空氣相的進入閥關閉，開啟已配置好定水頭裝置，此時的定水頭裝置的水頭高度與 P-S 實驗時水的水頭高度相同，如圖 6-5 中編號 1 與編號 2 水頭高度相同，再使水頭裝置流量與壓力穩定後再進入微模型中，並使整個系統維持在一定壓力梯度下維持動態平衡且不改變三相的飽和度狀態下量測水的滲透係數。其此時存在微模型中的壓力梯度依量測的流體不同會有不同的壓力梯度，在本研究中當量測水的滲透係數時所使用的壓力梯度略大於量測柴油的壓力梯度。在量測流量前，先

使水由流出流端流 5 分鐘，俟流量穩定後，再以每 20 分鐘量一次、連續量 2 次流量的方法，求三相共存狀態時的平均流量。並以 CCD 攝影機拍攝此階段之影像，並比對之前 P-S 實驗階段的影像，判斷是否在量測水的滲透係數實驗時造成三相流體的飽和度改變。

5. 再改變空氣相的壓力水頭，使微模型中各流體的飽和度產生變化，當微模型中各流體的飽和度不再改變時，重複步驟（3）與步驟（4）。
6. 如何決定量測流體的滲透係數時的壓力梯度，在本研究中是一個重要的關鍵，當壓力梯度太大則會破壞在微模型中流體的飽和度；當壓力梯度太小則會無法正確量測到流體的滲透係數。當在微模型中非潤濕相越多時，此壓力梯度要小以防止破壞各流體飽和度在微模型中的分布情況，但是在壓力梯度極小的情況則會因為有一臨界的水力梯度存在，因此必須先克服臨界的水力梯度才可量測流體滲透係數，在本研究中微模型板存在的臨界的水力梯度為 0.06。因此歸納數次實驗的結果得知，當量測微模型中水的滲透係數時以壓力梯度為 0.08 為最佳；當量測柴油的滲透係數時的壓力梯度為 0.09 為最佳。
7. 當水的滲透係數趨近 0 時，本實驗排退階段即結束。
8. 達到排退的最後階段時，微模型中的水皆已形成不連續相且以 0.2 壓力梯度無法使微模型中的水流動時，提高濕潤相水頭高度使濕潤相再進入微模型汲取非濕潤相步驟。固定非濕潤相的壓力水頭，每次上升 0.2cm 水相的壓力水頭，由水相汲取柴油相與空氣相，等待微模型中三相流體的飽和度不變時視為平衡，再量測水的滲透係數後，再次上升水相壓力水頭。直到水進入非濕潤相的儲存槽為止。同理本研究採用逐漸升高水相的壓力水頭以取代非濕潤相。CCD 攝影機取像情形及平衡判斷同排退步驟所述。

在量測柴油的滲透係數的 K_r -S-P 關係實驗步驟與上述略有不同，其主要原因在於油的飽和並不能像水飽和一樣先打入二氧化碳在微模型板孔隙中擠出空氣，由於二氧化

碳易溶解於水中，因此會隨水流而排出微模型板外，達到水飽和之目的。

油的飽和方法是，本研究先以高揮發性液體（己醇）以高蒸汽壓擠出空氣，可以先把大部分的空氣趕走，填滿整個孔隙後，再利用醇類與油類有著高互溶的特性，一方面趕走己醇，另一方面溶解趕不走而殘留的己醇，持續沖洗 10 分鐘後，內部孔隙已完全充滿油類，實驗證明，其成效顯著。

由於本實驗選用的 DNAPL 為四氯乙烷，其比重高達 1.6，而且揮發性很高，實驗過程中揮發的量足以影響實驗結果。我們利用其比重大的特性，在四氯乙烷上加一層水，以阻隔其和空氣接觸而揮發。



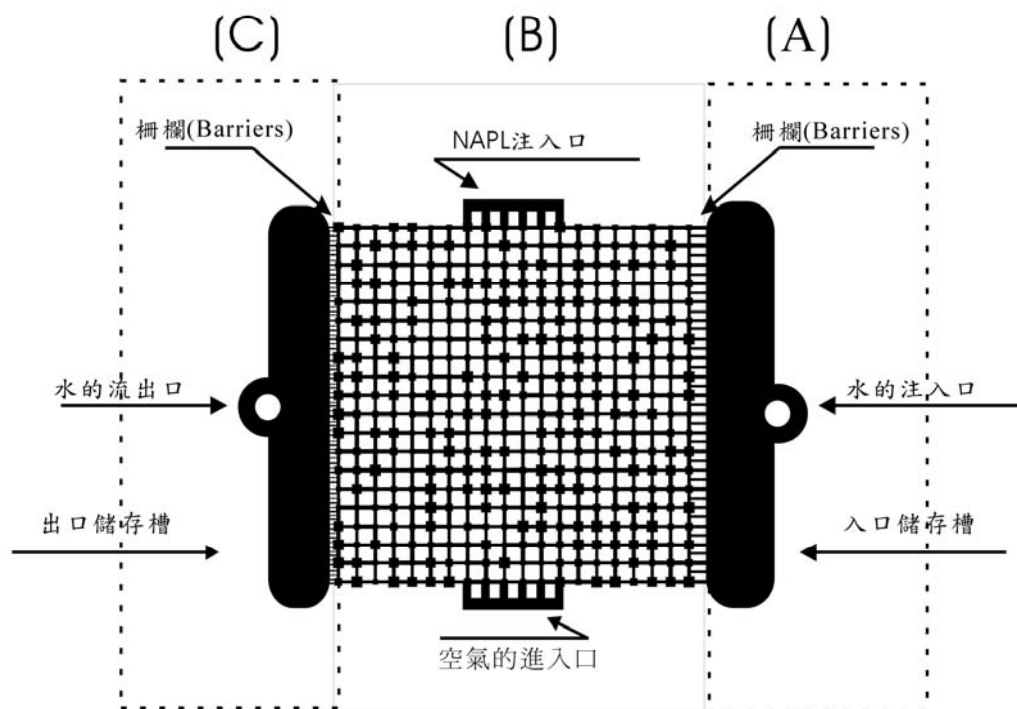


圖 6-3(a) 量測水之相對傳導係數微模型板裝置

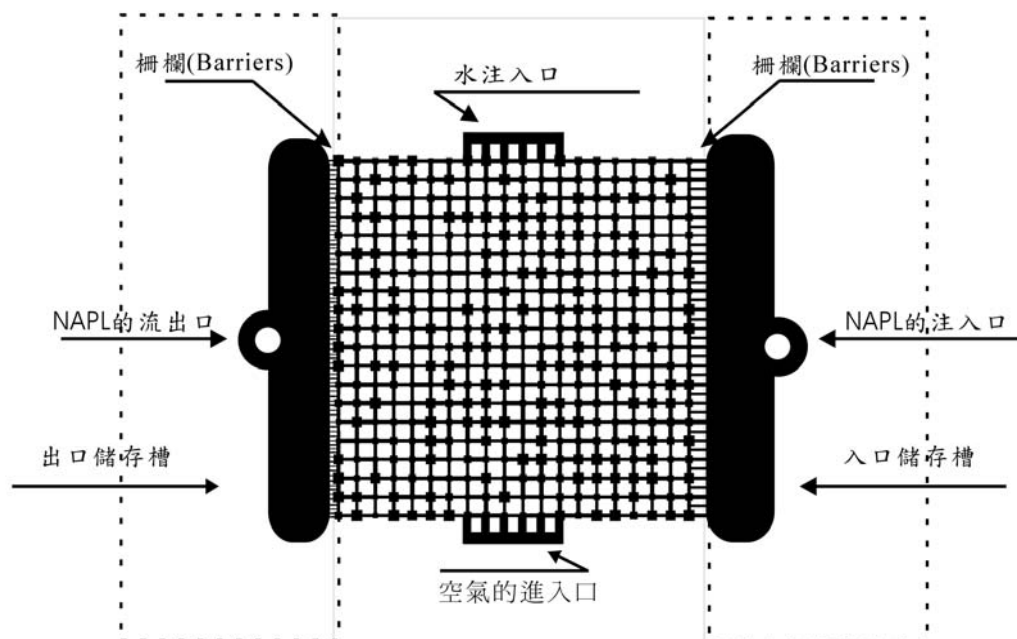


圖 6-3 (b) 量測 NAPL 之相對傳導係數微模型板裝置

圖 6-3 K_r -S-P 微模型板示意圖(a)量測水之相對傳導係數微模型板裝置

(b) 量測 NAPL 之相對傳導係數微模型板裝置

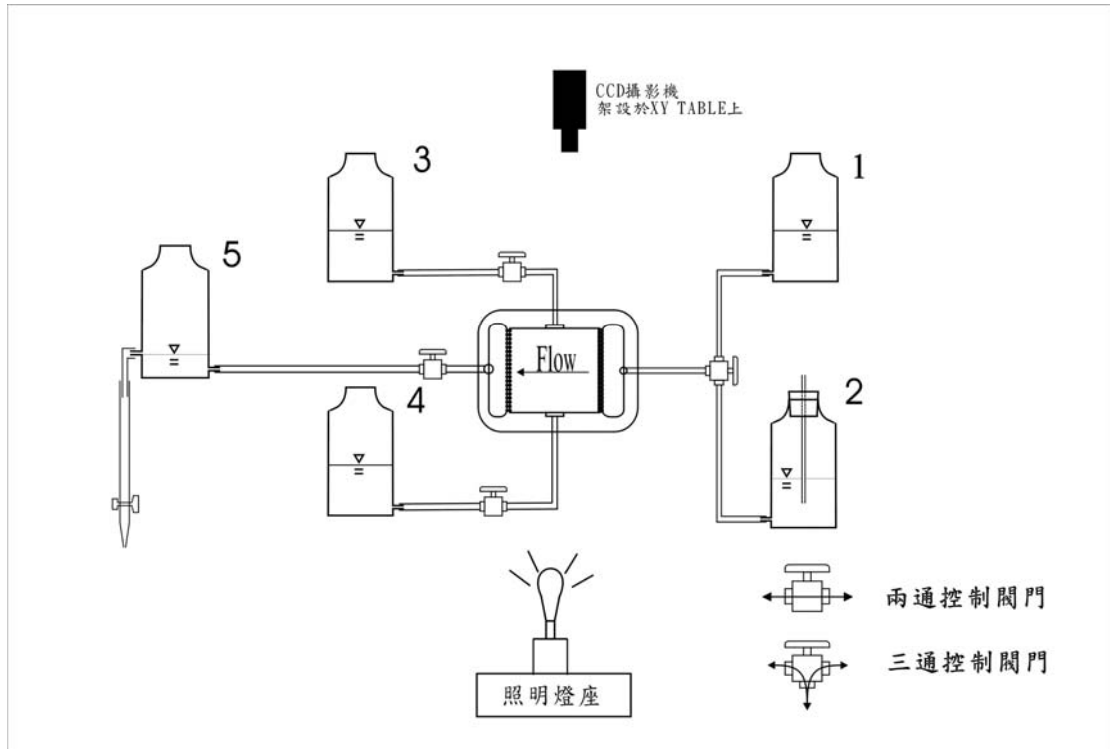


圖 6-4 K_r -S-P 實驗配置整體示意圖

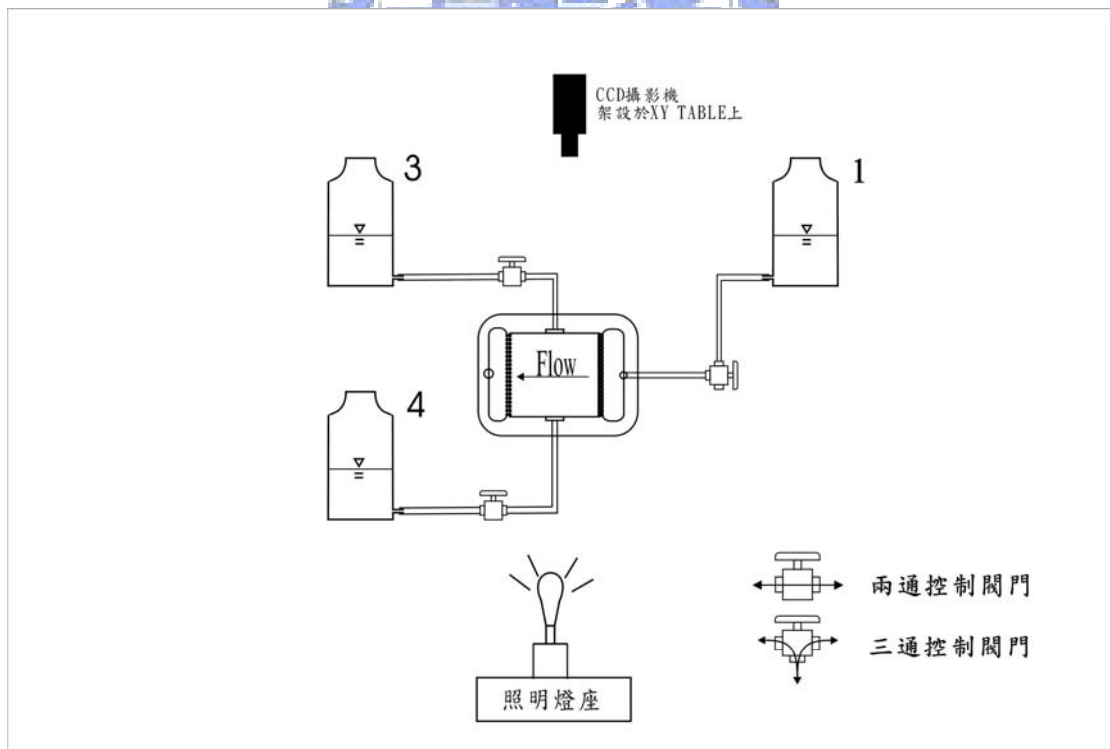


圖 6-5 K_r -S-P 實驗之 P-S 階段裝置

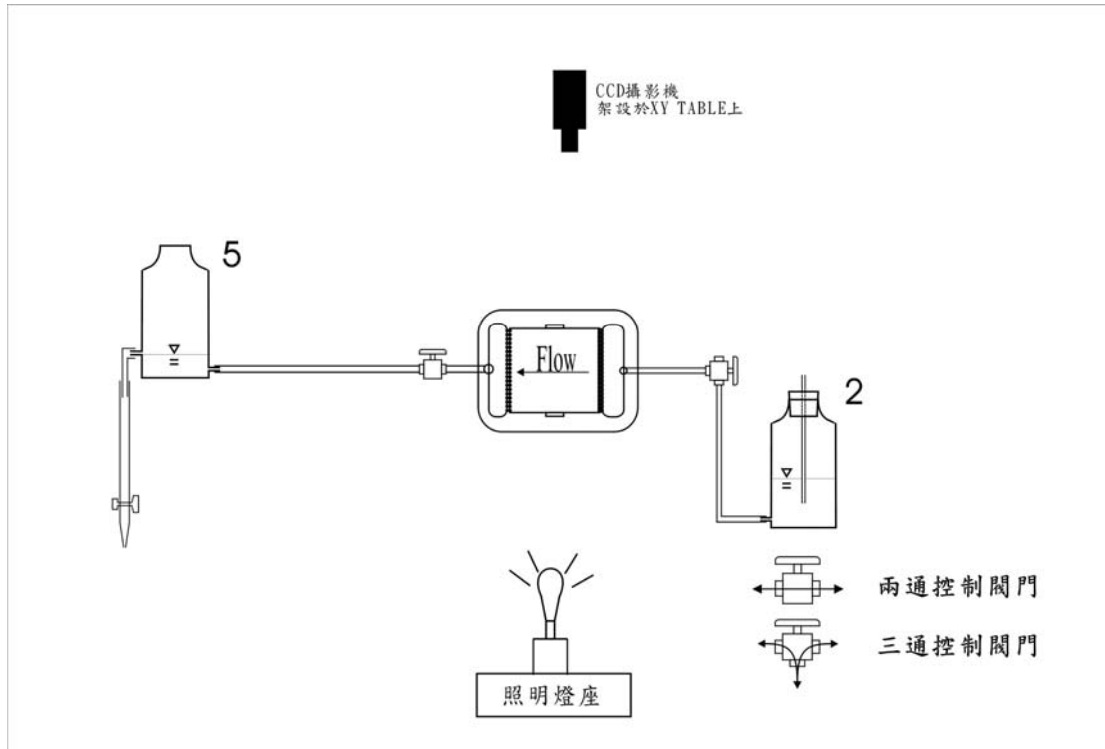


圖 6-6 K_r -S-P 實驗之 K_r -S 階段裝置

6-2 實驗結果分析

P-S 關係

三相流 K_r -S-P 實驗依照水(Water)、非水相液(LNAPL(柴油), DNAPL(四氯乙烷))與空氣(Air)三者進入微模型的順序的不同，會造成不同汲取與排退的組合，共可細分成DDD、DDI、DID、IDI、IID、III六種類型(Fenwick and Blunt, 1996)，如表 6-1 所示，“D”是指排退、“I”是指汲取。實驗 A 組“水-柴油-空氣”的情況屬於DDD類型，實驗流體進入微模型的次序首先為水、再來是柴油，最後是空氣。第一個 D 是指空氣進入微模型內取代水是排退情況；第二個 D 是指空氣進入微模型內取代柴油是排退情況；第三個 D 是指柴油進入微模型內取代排退水是排退情況。實驗 B 組“水-空氣-柴油”的情況是屬 DID 類型；實驗 C 組“水-四氯乙烷-空氣”的情況屬於DDD類型；實驗 D 組“水-空氣-四氯乙烷”的情況屬於 DID 類型；實驗 E 組“柴油-空氣-水”的情況是屬 IID 類型，實驗 E 組“柴油-水-空氣”的情況是屬 DDI 類型。

表 6-1 三相流中雙重取代的情況

排退(Drainage)		
A 組	Water- LNAPL – Air(WOA)	Double Drainage , DDD
B 組	LNAPL - Water – Air(OWA)	Drainage- Imbibition , DDI
C 組	Water- Air –DNAPL (WAD)	Imbibition -Drainage , DID
汲取(Imbibition)		
D 組	Air- Water – DNAPL(AWD)	Drainage- Imbibition , IDI
E 組	LNAPL - Air - Water (OAW)	Imbibition -Drainage , IID
F 組	Air- LNAPL - Water (AOW)	Double Imbibition , III

各相先後位置為進入微模型的順序

本章以排退(Drainage) A 組“水-柴油-空氣”(W-O-A)為例，說明並分析討論 P-S 實驗的排退與汲取過程。

在這一組流體對中，水是濕潤相，空氣與柴油為非濕潤相。圖 6-7~圖 6-25 為整個排退與汲取過程的連續變化，圖 6-7 為初始狀態，此時水充滿整個微模型版，柴油則由上方儲存槽中準備入侵。圖 6-8 時，柴油先充滿上方儲存槽後開始入侵孔隙介質，此時的壓力差為柴油相對水的進入壓(Entry pressure)。圖 6-9~圖 6-13，濕潤相與非濕潤相的壓力差漸大，非濕潤相逐漸入侵，將濕潤相慢慢推出孔隙。在圖 6-13 時，微模型中柴油相的飽和度為 0.28，水的飽和度為 0.72。這時候水在微模型中的飽和度皆為連續、柴油相的飽和度也為連續狀態，空氣相已經充滿在下方儲存槽中準備開始入侵。圖 6-14，空氣相開始入侵排退水，此時微模型內為三相共存，其壓力差為空氣相對水的進入壓(Entry pressure)。圖 6-15，空氣相排退水逐漸增加在微模型中的飽和度，此時空氣相只有與水接觸並未接觸柴油。圖 6-16，水、柴油、空氣三者開始互相接觸，這時水與柴油的飽和度已經部分被空氣包圍形成孤立(Trapped)的狀態。圖 6-17，空氣相在微模型中的飽和度再增加，水與柴油相被孤立(Trapped)的量增多。空氣相已將水可流通的斷面都截斷，此時水的滲透係數已經趨近於 0 的狀態，這時微模型內水的飽和度剩下 0.19、柴油相的飽和度已降為 0.25、空氣相的飽和度增加至 0.56。由圖中看出水與柴油相兩者都已經被空氣給截斷，存在微模型中的水與柴油相皆為孤立不連續的狀態，

其滲透係數為 0，實驗至此已完成排退的過程。

圖 6-18～圖 6-25 為汲取的過程，水再度進入微模型內汲取空氣與柴油相。圖 6-18，汲取過程開始的階段，此時水對柴油相、水對空氣相的壓力差逐漸降減少，濕潤相水慢慢的回到孔隙中。圖 6-19～圖 6-25，濕潤相水逐漸填滿通道，有些較小的孔隙(Pores)也被水所包圍。此時柴油與空氣相的飽和度逐漸減少，柴油減少的量為最多，其原因是“水-柴油”之間界面張力(48.7 dynes / cm)比“水-空氣”之間的界面張力(71.5 dynes / cm)小，所以水容易汲取柴油而較不易汲取空氣。這時有許多非濕潤相是被水包圍(Trap)在孔隙中，但因為路徑已經被濕潤相所包圍，殘存於孔隙中無法排出。由於濕潤相的汲取是從孔隙的表面回流，由最小的通道開始填滿，所以不會因為非濕潤相占滿了孔隙中央而無法流動。從圖 6-19～圖 6-25 中就可發現，濕潤相很均勻的從最小的通道開始填滿，隨著壓力差的減小，逐漸填滿由小到大不同的通道。圖 6-25 為汲取的最後階段，此時水已經佔滿非濕潤相的貯存槽，則實驗結束。這時水的飽和度增加至 0.43、柴油的飽和度減少至 0.15、空氣相的飽和度減少至 0.42。

k-S-P 各組實驗之討論

水-油-空氣(W-O-A)

首先定義空氣-水壓力差 (P_{aw})= $P_a - P_w$ ，柴油-水壓力差(P_{ow})= $P_o - P_w$ ，空氣-柴油壓力差 (P_{ao})= $P_a - P_o$ ，其中圖 6-26～圖 6-29，是“水-柴油-空氣”(W-O-A)的流體組合情況，由圖 6-26～圖 6-29 與表 5-1 兩者互相對照可清楚看出，在圖中每一點各流體之間的變化情況。圖 6-26 是“油-水”壓力差(P_{ow})與水飽和度(S_w)的關係，水由完全飽和的狀況下逐漸被油排退，當水飽和度(S_w)為 0.67 時即固定“油-水”的壓力差，最後再由空氣進入微模型內排退水，因此圖中 $P_{ow}=1.2\text{cm}$ 時， S_w 由 0.67 減少至 0.19 的變化是因為空氣排退水。當 $S_w=0.19$ 時為排退的最後階段，再改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由 0.19 增加至 0.41，當 $S_w=0.41$ 時實驗結束。圖 6-27 是“空氣-水”壓力差(P_{aw})與水飽和度(S_w)的關係，當空氣開始進入時，微模型中的水已經被油排退了一部份，所以在 $P_{aw}=2.5\text{cm}$ 、 $S_w=0.67$ 時空氣才開始進入微模型內排退水。 S_w 由 0.67 減少至 0.19，當 $P_{aw}=3.1\text{cm}$ 、 $S_w=0.19$ 時排退結束。此時改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由 0.19 增加至 0.41，當

$P_{aw}=1.7\text{cm}$ 、 $S_w=0.41$ 時實驗結束。圖 6-28 是“空氣-油”壓力差(P_{ao})與水飽和度(S_w)的關係，當空氣進入時 $S_w=0.67$ ，當 P_{ao} 增加時 S_w 逐漸減少。當 $P_{ao}=1.89\text{cm}$ 、 $S_w=0.19$ 時排退結束開始進行汲取，在汲取的過程是固定“空氣-油”壓力差(P_{ao})提高水的壓力水頭，因此在汲取過程時 P_{ao} 為定值， P_{aw} 、 P_{ow} 逐漸減少，水再進入微模型中汲取空氣、柴油相，當 $S_w=0.41$ 時實驗結束。圖 6-29 為水的相對滲透係數(K_{rw})與水飽和度(S_w)之間的關係，實驗開始時水完全充滿於微模型中，此時 $S_w=1$ ，然後柴油進入微模型中排退水，使水的飽和度由 $S_w=1$ 逐漸降低至 $S_w=0.67$ 。最後空氣再進入微模型中排退水與柴油，再使水的飽和度由 $S_w=0.67$ 逐漸降低至 $S_w=0.19$ 。因此當水的飽和度在 $S_w=0.67$ 到 $S_w=0.19$ 之間是水、柴油與空氣三相共存的情況。在三相共存時量測實驗流體的滲透係數，因此由 $S_w=0.67$ 開始量測水的滲透係數至 $S_w=0.19$ 時為排退過程結束， K_{rw} 隨 S_w 逐漸減少時而降低。當 $S_w=0.67$ 時 $K_{rw}=0.5$ 逐漸降低至 $S_w=0.19$ 時 K_{rw} 趨近於 0。水的飽和度由 $S_w=0.67$ 逐漸降低至 $S_w=0.19$ 的過程為排退階段。最後水再進入微模型中汲取柴油與空氣，使 $S_w=0.19$ 時 K_{rw} 趨近於 0 的情況增加至 $S_w=0.41$ 時 $K_{rw}=0.11$ 的過程為汲取階段。

水-空氣-油(W-A-O)

圖 6-30~圖 6-33，是“水-空氣-油”(W-A-O)的流體組合情況，圖中每一點表示各流體之間的變化情況。圖 6-30 是“空氣-水”壓力差(P_{aw})與水飽和度(S_w)的關係，水由完全飽和的狀況下逐漸被空氣排退，當水飽和度(S_w)降至 0.6 時即固定空氣-水的壓力差(P_{aw})，再由柴油進入微模型內排退水，因此圖中 $P_{aw}=3.2\text{cm}$ 時， S_w 由 0.60 降至 0.36 是因為柴油排退水。當 $S_w=0.36$ 時開始進行汲取，改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由 0.36 增加至 0.49，當 $P_{aw}=1.8\text{cm}$ 、 $S_w=0.48$ 時實驗結束。圖 6-31 是“柴油-水”壓力差(P_{ow})與水飽和度(S_w)的關係，當油進入時微模型中時水已經被空氣排退了一部份，當 $P_{ow}=0.94\text{cm}$ 、 $S_w=0.60$ 時油開始進入微模型內排退水。 S_w 由 0.6 減少至 0.36，當 $P_{ow}=1.3\text{cm}$ 、 $S_w=0.36$ 時排退結束。此時開始進行汲取，改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由 0.36 增加至 0.49，當 $P_{ow}=0.1\text{cm}$ 、 $S_w=0.49$ 時實驗結束。圖 6-32 是“空氣-油”壓力差(P_{ao})與水飽和度(S_w)的關係，當空氣與柴油同時存在微模型時 $S_w=0.60$ ，當 P_{ao} 減少時 S_w 逐漸減少。其

原因是 $P_{aw} = P_{ao} + P_{ow}$ ，所以當 P_{aw} 為定值時 P_{ow} 逐漸增加、 P_{ao} 就會逐漸減少。 S_w 由 0.60 減少至 0.36，當 $P_{ao}=1.9\text{cm}$ 、 $S_w=0.36$ 時排退結束開始進行汲取，在汲取的過程是固定“空氣-油”壓力差(P_{ao})提高水的壓力水頭，因此在汲取過程時 P_{ao} 為定值， P_{aw} 、 P_{ow} 逐漸減少，水再進入微模型中汲取空氣、柴油相， S_w 由 0.36 增加至 0.49，當 $S_w=0.49$ 時實驗結束。圖 6-33 為水的相對滲透係數(K_{rw})與水飽和度(S_w)之間的關係，實驗開始時水完全充滿於微模型中，此時 $S_w=1$ ，然後空氣進入微模型中排退水，使水的飽和度由 $S_w=1$ 逐漸降低至 $S_w=0.60$ 。最後柴油再進入微模型中排退水與空氣，再使水的飽和度由 $S_w=0.6$ 逐漸降低至 $S_w=0.36$ 。因此當水的飽和度在 $S_w=0.60$ 到 $S_w=0.36$ 之間是水、柴油與空氣三相共存的情況。在三相共存時量測實驗流體的滲透係數，因此由 $S_w=0.60$ 開始量測水的滲透係數至 $S_w=0.36$ 時排退過程結束， K_{rw} 隨 S_w 逐漸減少時而降低。當 $S_w=0.60$ 時 $K_{rw}=0.26$ 逐漸降低至 $S_w=0.36$ 時 K_{rw} 趨近於 0。水的飽和度由 $S_w=0.60$ 逐漸降低至 $S_w=0.36$ 的過程為排退階段。最後水再進入微模型中汲取柴油與空氣，使 $S_w=0.36$ 時 K_{rw} 趨近於 0 的情況增加至 $S_w=0.49$ 時 $K_{rw}=0.14$ 的過程為汲取階段。

水-四氯乙烷-空氣(W-D-A)

圖 6-34~圖 6-37 是“水-四氯乙烷-空氣”(W-D-A)的流體組合情況，由圖 6-29~圖 6-32 與表 6-1 兩者互相對照可清楚看出，在圖中每一點各流體之間的變化情況。圖 6-34 是“四氯乙烷-水”壓力差(P_{dw})與水飽和度(S_w)的關係，水由完全飽和的狀況下逐漸被四氯乙烷排退，當水飽和度(S_w)降至 0.69 時即固定“四氯乙烷-水”的壓力差(P_{dw})，再由空氣進入微模型內排退水，因此圖中 $P_{dw}=1.1\text{cm}$ 時， S_w 由 0.69 降至 0.31 是因為空氣排退水。當 $S_w=0.305$ 時開始進行汲取，改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由 0.31 增加至 0.5，當 $P_{dw}=0.1\text{cm}$ 、 $S_w=0.5$ 時實驗結束。圖 6-35 是“空氣-水”壓力差(P_{aw})與水飽和度(S_w)的關係，當空氣進入時微模型中時水已經被四氯乙烷排退一部份，當 $P_{aw}=2.3\text{cm}$ 、 $S_w=0.69$ 時空氣開始進入微模型內排退水。 S_w 由 0.69 減少至 0.31，當 $P_{aw}=3.5\text{cm}$ 、 $S_w=0.31$ 時排退結束。此時開始進行汲取，改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由 0.31 增加至 0.50，當 $P_{aw}=2.1\text{cm}$ 、 $S_w=0.50$ 時實驗結束。圖 6-36 是“空氣-四氯乙烷”壓力差(P_{ad})與水飽和

度(S_w)的關係。空氣與四氯乙烷同時存在微模型時 $S_w = 0.69$ ，當 P_{ad} 增加時 S_w 逐漸減少， S_w 由0.69減少至0.31，在 $P_{ad} = 2.4\text{cm}$ 、 $S_w = 0.31$ 時排退結束。此時開始進行汲取，改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由0.31增加至0.50。在汲取的過程中是固定“空氣-四氯乙烷”壓力差(P_{ad})提高水的壓力水頭，因此在汲取過程時 P_{ad} 為定值， P_{aw} 、 P_{dw} 逐漸減少，水再進入微模型中汲取空氣、四氯乙烷，所以在 P_{ad} 為定值時水的飽和度逐漸增加， S_w 由0.31增加至0.50，當 $S_w = 0.50$ 時實驗結束。圖 6-37 為水的相對滲透係數(K_{rw})與水飽和度(S_w)之間的關係，實驗開始時水完全充滿於微模型中，此時 $S_w = 1$ ，然後四氯乙烷進入微模型中排退水，使水的飽和度由 $S_w = 1$ 逐漸降低至 $S_w = 0.69$ 。最後空氣再進入微模型中排退水與四氯乙烷，使水的飽和度由 $S_w = 0.69$ 逐漸降低至 $S_w = 0.31$ 。因此當水的飽和度在 $S_w = 0.69$ 到 $S_w = 0.31$ 之間是水、四氯乙烷與空氣三相共存的情況。在三相共存時量測實驗流體的滲透係數，因此由 $S_w = 0.69$ 開始量測水的滲透係數至 $S_w = 0.31$ 時為排退過程結束， K_{rw} 隨 S_w 逐漸減少時而降低。當 $S_w = 0.69$ 時 $K_{rw} = 0.73$ 逐漸降低至 $S_w = 0.31$ 時 K_{rw} 趨近於0。水的飽和度由 $S_w = 0.69$ 逐漸降低至 $S_w = 0.31$ 的過程為排退階段。最後水再進入微模型中汲取四氯乙烷與空氣，使 $S_w = 0.19$ 時 K_{rw} 趨近於0的情況增加至 $S_w = 0.41$ 時 $K_{rw} = 0.19$ 的過程為汲取階段。

水-空氣-四氯乙烷(W-A-D)

圖 6-38~圖 6-41，是“水-空氣-四氯乙烷”(W-A-D)的流體組合情況，由圖 6-38~圖 6-41 與表 6-1 兩者互相對照可清楚看出，在圖中每一點各流體之間的變化情況。圖 6-38 是“空氣-水”壓力差(P_{aw})與水飽和度(S_w)的關係，水由完全飽和的狀況下逐漸被空氣排退，當水飽和度(S_w)降至0.79時即固定“空氣-水”的壓力差(P_{aw})，再使柴油進入微模型內排退水，因此圖中 $P_{aw} = 3.1\text{cm}$ 時， S_w 由0.79降至0.34是因為四氯乙烷排退水。當 $S_w = 0.34$ 時開始進行汲取，改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由0.34增加至0.51，當 $P_{aw} = 1.7\text{cm}$ 、 $S_w = 0.51$ 時實驗結束。圖 6-39 是“四氯乙烷-水”壓力差(P_{dw})與水飽和度(S_w)的關係，當四氯乙烷進入時微模型中時水已經被空氣排退了一部份，當 $P_{dw} = 0.6\text{cm}$ 、 $S_w = 0.79$ 時四氯乙烷開始進入微模型內排

退水， S_w 由 0.79 減少至 0.34。當 $P_{dw}=1.3\text{cm}$ 、 $S_w=0.34$ 時排退結束開始進行汲取，此時改變三相流體之間的壓力差，使水回到微模型內取代非潤濕相， S_w 由 0.34 增加至 0.51，當 $P_{dw}=0.1\text{cm}$ 、 $S_w=0.51$ 時實驗結束。圖 6-40 是“空氣-四氯乙烷”壓力差(P_{ad})與水飽和度(S_w)的關係，當空氣與四氯乙烷相同時存在微模型時 $S_w=0.79$ 。當 P_{ad} 減少時 S_w 逐漸減少，其原因是 $P_{aw}=P_{ad}+P_{dw}$ ，所以當 P_{aw} 為定值時 P_{dw} 逐漸增加、 P_{ad} 就會逐漸減少。當 $P_{ad}=1.8\text{cm}$ 、 $S_w=0.34$ 時排退結束開始進行汲取，在汲取的過程是固定“空氣-四氯乙烷”壓力差(P_{ao})提高水的壓力水頭，因此在汲取過程時 P_{ad} 為定值， P_{aw} 、 P_{dw} 逐漸減少，水再進入微模型中取代空氣、四氯乙烷， S_w 由 0.34 增加至 0.51，當 $S_w=0.51$ 時實驗結束。圖 6-41 為水的相對滲透係數(K_{rw})與水飽和度(S_w)之間的關係，實驗開始時水完全充滿於微模型中，此時 $S_w=1$ ，然後空氣進入微模型中排退水，使水的飽和度由 $S_w=1$ 逐漸降低至 $S_w=0.79$ 。最後四氯乙烷再進入微模型中排退水與空氣，再使水的飽和度由 $S_w=0.79$ 逐漸降低至 $S_w=0.34$ 。因此當水的飽和度在 $S_w=0.79$ 到 $S_w=0.34$ 之間是水、四氯乙烷與空氣三相共存的情況。在三相共存時量測實驗流體的滲透係數，因此由 $S_w=0.79$ 開始量測水的滲透係數至 $S_w=0.34$ 時為排退過程結束， K_{rw} 隨 S_w 逐漸減少時而降低。當 $S_w=0.79$ 時 $K_{rw}=0.64$ 逐漸降低至 $S_w=0.34$ 時 K_{rw} 趨近於 0。水的飽和度由 $S_w=0.79$ 逐漸降低至 $S_w=0.34$ 的過程為排退階段。最後水再進入微模型中汲取四氯乙烷與空氣，使 $S_w=0.34$ 時 K_{rw} 趨近於 0 的情況增加至 $S_w=0.51$ 時 $K_{rw}=0.30$ 的過程為汲取階段。

油-空氣-水(O-A-W)

圖 6-42～圖 6-45，是“柴油-空氣-水”(O-A-W)的流體組合情況，由圖 5-42～圖 5-45 可清楚看出，在圖中每一點各流體之間的變化情形。圖 6-42 是“空氣-柴油”壓力差(P_{ao})與柴油飽和度(S_o)的關係，柴油由完全飽和的狀況下逐漸被空氣排退，當柴油飽和度(S_o)降至 0.78 時即固定“空氣-柴油”的壓力差(P_{ao})，再使水進入微模型內汲取柴油，因此圖中 $P_{ao}=1.7\text{cm}$ 時， S_o 由 0.78 降至 0.22 是因為水汲取柴油。當 $S_o=0.22$ 時開始進行下一步驟，改變三相流體之間的壓力差，使柴油再回到微模型內取代水與空氣， S_o 由 0.22 增加至 0.58，當 $P_{ao}=1.0\text{cm}$ 、 $S_o=0.58$ 時實驗結束。圖 6-43 是“柴油-水”壓力差(P_{ow})與柴油飽和度(S_o)的關係，當水汲取進入時微模型中時柴油已經被空氣排退了

一部份，當 $P_{ow}=0.5\text{cm}$ 、 $S_o=0.78$ 時水開始進入微模型內汲取柴油， S_o 由 0.78 減少至 0.22。當 $P_{ow}=0.1\text{cm}$ 、 $S_o=0.22$ 時進行下一步驟，改變三相流體之間的壓力差，使柴油回到微模型內取代水與空氣， S_o 由 0.22 增加至 0.58，當 $P_{ow}=0.9\text{cm}$ 、 $S_o=0.58$ 時實驗結束。當 P_{ow} 減少時 S_o 逐漸增加，其原因是在微模型中水為潤濕相，在柴油比水壓力大（ $P_{ow} > 0$ ）的情況下，水仍然可以進入微模型中汲取柴油相，因此逐漸提高水的壓力水頭時 P_{ow} 會逐漸減少。圖 6-44 是“空氣-水”壓力差（ P_{aw} ）與柴油飽和度（ S_o ）的關係，當空氣與水相同時存在微模型中時 $S_o=0.78$ 。當 P_{aw} 減少時 S_w 逐漸減少，其原因是 $P_{aw} = P_{ao} + P_{ow}$ ，所以當 P_{ao} 在 $S_o=0.78\sim 0.22$ 之間為定值時 P_{ow} 逐漸減少、 P_{aw} 就會隨之減少。當 $P_{aw}=1.8\text{cm}$ 、 $S_w=0.22$ 時開始進行下一階段，在柴油重新進入微模型的過程是固定“空氣-水”壓力差（ P_{aw} ）提高柴油的壓力水頭，因此在此過程時 P_{aw} 為定值， P_{ao} 逐漸減少、 P_{ow} 逐漸增加，柴油再進入微模型中取代空氣與水， S_o 由 0.22 增加至 0.58，當 $S_o=0.58$ 時實驗結束。圖 6-45 為柴油的相對滲透係數（ K_{ro} ）與柴油飽和度（ S_o ）之間的關係，實驗開始時柴油完全充滿於微模型中，此時 $S_o=1$ ，然後空氣進入微模型中排退柴油，使柴油的飽和度由 $S_o=1$ 逐漸降低至 $S_o=0.78$ 。最後水再進入微模型中取代空氣與柴油，再使柴油的飽和度由 $S_o=0.78$ 逐漸降低至 $S_o=0.22$ 。因此當柴油的飽和度在 $S_o=0.78$ 到 $S_o=0.22$ 之間是水、柴油與空氣三相共存的情況。在三相共存時量測實驗流體的滲透係數，因此由 $S_o=0.78$ 開始量測柴油的滲透係數， S_o 由 0.78 減少至 0.44 時， K_{ro} 隨 S_o 逐漸減少時而降低。當 $S_o=0.78$ 時 $K_{ro}=0.44$ 逐漸降低至 $S_o=0.22$ 時 K_{ro} 趨近於 0。柴油的飽和度由 $S_o=0.783$ 逐漸降低至 $S_o=0.22$ 的過程為水與空氣取代柴油。最後柴油再進入微模型中取代空氣與水，使 $S_o=0.22$ 時 K_{ro} 趨近於 0 的情況增加至 $S_o=0.58$ 時 $K_{ro}=0.41$ ，實驗結束。

油-水-空氣(O-W-A)

圖 6-46～圖 6-49，是“柴油-水-空氣”（O-W-A）的流體組合情況，圖 6-46 是“柴油-水”壓力差（ P_{ow} ）與柴油飽和度（ S_o ）的關係，柴油由完全飽和的狀況下逐漸被水汲取，當柴油飽和度（ S_o ）降至 0.77 時即固定“柴油-水”的壓力差（ P_{ow} ），再使空氣進入微模型內排退柴油，因此圖中 $P_{ow}=0.5\text{cm}$ 時， S_o 由 0.77 降至 0.42 是因為空氣取代柴油。當 S_o

=0.42 時開始進行下一階段，改變三相流體之間的壓力差，使柴油回到微模型內取代水與空氣， S_o 由 0.42 增加至 0.62，當 $P_{ow}=1.4\text{ cm}$ 、 $S_o=0.62$ 時實驗結束。圖 6-47 是“空氣-柴油”壓力差(P_{ao})與柴油飽和度(S_o)的關係，當空氣進入時微模型中時，柴油已經被水趕走一部份，當 $P_{ao}=1.4\text{cm}$ 、 $S_o=0.77$ 時空氣開始進入微模型內排退柴油，隨著 P_{ao} 的增加 S_o 逐漸減少。當 $P_{ao}=2.0\text{cm}$ 、 $S_o=0.42$ 時開始進行下一階段。最後改變三相流體之間的壓力差，使柴油回到微模型內取代水與空氣， S_o 由 0.42 增加至 0.62，使柴油重新回到微模型中， S_o 隨著 P_{ao} 減少而增加，在 $P_{ao}=1.2\text{cm}$ 、 $S_o=0.62$ 時實驗結束。圖 6-48 是“空氣-水”壓力差(P_{aw})與柴油飽和度(S_o)的關係，當空氣與水共同存在微模型中時 $S_o=0.77$ 。 S_o 隨著 P_{aw} 增加而減少。當 $P_{aw}=2.5\text{cm}$ 、 $S_o=0.42$ 時開始進行下一階段，使柴油重新進入微模型的過程，是固定“空氣-水”壓力差(P_{aw})提高柴油的壓力水頭，因此在此過程時 P_{aw} 為定值， P_{ao} 逐漸減少、 P_{ow} 逐漸增加時 S_o 逐漸增加，柴油再進入微模型中取代空氣與水，當 $S_o=0.62$ 時實驗結束。

圖 6-49 為柴油的相對滲透係數(K_{ro})與柴油飽和度(S_o)之間的關係，實驗開始時柴油完全充滿於微模型中，此時 $S_o=1$ ，然後水進入微模型中汲取柴油，使柴油的飽和度由 $S_o=1$ 逐漸降低至 $S_o=0.77$ 。最後空氣再進入微模型中排退水與柴油，再使柴油的飽和度由 $S_o=0.77$ 逐漸降低至 $S_o=0.42$ 。因此當柴油的飽和度在 $S_o=0.77$ 到 $S_o=0.42$ 之間是水、柴油與空氣三相共存的情況。在三相共存時量測實驗流體的滲透係數，因此由 $S_o=0.77$ 開始量測柴油的滲透係數至 $S_o=0.42$ 時實驗結束， K_{ro} 隨 S_o 逐漸減少時而降低。當 $S_o=0.77$ 時 $K_{ro}=0.44$ 逐漸降低至 $S_o=0.42$ 時 K_{ro} 趨近於 0。柴油的飽和度由 $S_o=0.77$ 逐漸降低至 $S_o=0.42$ 的過程為水與空氣取代柴油階段。最後柴油再進入微模型中取代空氣與水，使 $S_o=0.42$ 時 K_{ro} 趨近於 0 的情況增加至 $S_o=0.62$ 時 $K_{ro}=0.28$ ，實驗結束。

K_r -S-P 實驗之壓力-飽和度比較

圖 6-50 為 W-O-A 與 W-A-O 之壓力-飽和度關係比較圖，中可看出 W-O-A 與 W-A-O 兩組實驗的壓力-飽和度關係的趨勢十分相近。本研究中 K_r -S-P 實驗是以滲透係數趨近於 0 時，作為實驗結束的指標。當滲透係數趨近於 0 時，在 W-O-A 與 W-A-O 兩組實驗的 P_{aw} - S_w 關係上有明顯的差異。 P_{aw} 大約在 3.1cm 左右，十分相近，但在 S_w 卻有明顯的差異。在 W-O-A 情況下，當滲透係數趨近於 0 時 $S_w = 0.19$ ；而在 W-A-O 情況下則為 $S_w = 0.36$ 。造成兩組實驗的 S_w 差異的原因為非濕潤相柴油與空氣在微模型中的比例不同。在 W-O-A 實驗情況下，是將控制微模型中柴油飽和度介於 0.2~0.3 之間，再增加微模型中空氣的飽和度，所以在 W-O-A 實驗中空氣飽和度大於柴油飽和度。而在 W-A-O 實驗中卻是相反的情況，是控制微模型中空氣飽和度介於 0.2~0.3 之間，再增加微模型中柴油的飽和度，所以在柴油的飽和度大於空氣飽和度。在水的飽和度相同的情況下，柴油與空氣相比比例不同時造成不同實驗結果，其原因在於不同流體之間的界面張力影響，由表 3-1 可知“柴油-水”的界面張力為 48.7 dynes/cm、“空氣-水”的界面張力為 71.5 dynes/cm，由於“柴油-水”的界面張力比較小所以柴油比空氣容易將水截斷形成不連續的狀態，因此在微模型中水的飽和度很大，但是大多數水的分佈情況都呈現孤立且不連續的狀態，造成微模型中水的滲透係數趨近於 0。

圖 6-51 為 W-D-A 與 W-A-D 之壓力-飽和度關係比較圖，基本上 W-D-A 與 W-A-D 的壓力-飽和度關係的趨勢十分相近，當滲透係數趨近於 0 時，W-D-A 與 W-A-D 兩組實驗在 P_{aw} 與 S_w 上有明顯差異。在 W-D-A 情況下，當滲透係數趨近於 0 時 $S_w = 0.31$ ；而在 W-A-D 則為 $S_w = 0.34$ 。造成兩組實驗的 S_w 差異的原因是在水的飽和度相同的情況下，四氯乙烷與空氣比例不同時，造成不同實驗結果。在 W-D-A 實驗中，為在微模型中空氣飽和度大於四氯乙烷飽和度；而在 W-A-D 實驗情況中是四氯乙烷飽和度大於空氣飽和度。由表 3-1 可知“四氯乙烷-水”的界面張力為 38.7dynes/cm、“空氣-水”的界面張力為 71.5 dynes/cm，由於“四氯乙烷-水”的界面張力比較小所以四氯乙烷比空氣更容易將水截斷形成不連續的狀態，因此四氯乙烷飽和度較大者對水的滲透係數影響較大。

圖 6-52 為 O-W-A 與 O-A-W 之壓力-飽和度關係比較圖，可知 O-W-A 與 O-A-W 的壓力-飽和度關係的趨勢十分相近。在 O-W-A 與 O-A-W 兩組實驗的 S_o 上有明顯的差異。當柴油滲透係數趨近於 0 時，在 O-W-A 實驗中， P_{ao} 大約在 2.0cm、 S_o 為 0.42 左

右；而在 O-A-W 實驗中， P_{ao} 大約在 1.7cm、 S_o 為 0.22。在 O-W-A 實驗中，空氣飽和度大於水的飽和度，而在 O-A-W 實驗中，水的飽和度大於空氣飽和度。由表 3-1 可知“水-柴油”的界面張力為 48.7dynes/cm、“柴油-空氣”的界面張力為 22.8dynes/cm，由於“柴油-空氣”的界面張力比較小所以空氣比水容易將柴油截斷形成不連續的狀態，因此在水的飽和度較大的情況下較容易使柴油滲透係數趨近於 0。

K_r -S-P 實驗之相對滲透係數-飽和度比較

圖 6-53 為 W-O-A~W-A-O 相對滲透係數-飽和度關係比較圖，比較柴油與空氣在微模型中比例不同時對相對滲透係數的影響。在 W-O-A 實驗情況下，空氣的飽和度比柴油相大；在 W-A-O 實驗情況下，是增加柴油相在微模型中的飽和度，所以柴油相的飽和度比空氣相大。由圖看出柴油飽和度的大小對相對滲透係數影響較大。

圖 6-55 為 W-D-A~W-A-D 相對滲透係數-飽和度關係比較圖。其結果與 W-O-A~W-A-O 相同，當四氯乙烷飽和度大時相對滲透係數較小。在圖 6-54 可明顯看出 W-A-D 在汲取過程時的相對滲透係數較 W-D-A 大，其原因為在 W-A-D 排退過程中四氯乙烷的飽和度比 W-D-A 四氯乙烷的飽和度大，且“水-四氯乙烷”的界面張力比“水-空氣”的界面張力小，當水再回到微模型中比較容易汲取四氯乙烷而造成 W-A-D 在汲取過程時的相對滲透係數較 W-D-A 大。

圖 6-55 為 O-W-A~O-A-W 相對滲透係數-飽和度關係比較圖，比較水與空氣在微模型中比例不同時對柴油的相對滲透係數的影響。在 O-W-A 實驗情況下，空氣的飽和度比水大；在 O-A-W 實驗情況下，水的飽和度比空氣相大。由圖看出空氣的飽和度的大小對柴油的相對滲透係數影響較大。

Parker 經驗公式之討論

由 Parker 經驗公式式(2-6)~式(2-7)中三相 P-S 關係之數據迴歸出參數 α 、 m ，再利

用參數 m 當成三相 K_r -S 關係式(2-8)~式(2-10)中的已知值，繪出 K_r -S 關係經驗曲線。相反地，由三相 K_r -S 關係之實驗數據只能迴歸出參數 m ，不足以繪出 P-S 關係經驗曲線，因此本研究只比較 K_r -S 關係經驗曲線與實驗數據。

圖 6-56，是利用 W-O-A 情況下 P-S 關係的實驗數據配合 Parker 經驗公式迴歸出參數 α 、 m ，再將參數 m 當成 K_r -S 關係式的已知值，繪出 K_r -S 關係經驗曲線，再比較 W-A-O 情況下 K_r -S 關係的實驗數據與 Parker 經驗公式迴歸出 K_r -S 關係式之曲線之間的差異。圖中比較 W-A-O 情況下 K_r -S 關係的實驗數據與 Parker 經驗公式迴歸出 K_r -S 關係式之曲線。由圖 6-56 看出： K_r -S 關係的實驗數據與 Parker 經驗公式迴歸曲線，再排退過程中趨勢上較符合實驗的曲線；而汲取過程中 Parker 經驗公式迴歸曲線較小於實驗的曲線。由 W-O-A 與 W-A-O 兩種情況中可看出，W-A-O 的 K_r -S 關係與由 Parker 經驗公式所得到的結果相似，其原因是 W-A-O 的情況比較符合 Parker 經驗公式的假設條件。而且 Parker 當初並未考慮汲取的情況，因此在汲取過程中 Parker 經驗公式所迴歸之 K_r -s 關係曲線與實驗數據差異較大。

本章實驗結果與討論

1. 三相 P-S 實驗中水、NAPL、空氣的壓力水頭的比較結果為空氣 > NAPL > 水，因此 $P_{aw} = P_{ao} + P_{ow}$ 的關係在六組實驗皆成立。
2. 由本實驗的觀察，當非濕潤相空氣與柴油兩者進入微模型的次序不同時，會有不同的 K_r -S-P 結果。因此不同的進入次序會影響三相 K_r -S-P 關係。在傳統上處理三相共存的問題，大多數都將三相共存問題簡化為兩相來處理，並不考量非濕潤相進入孔隙的次序與 NAPLs、空氣的比例，是會有誤差存在的。
3. 由實驗中的觀察結果可知，濕潤相的相對滲透係數在汲取時與排退時是不相同的。當微模型再濕潤時，使原本連續狀的非濕潤相會成均勻分散狀分布在大孔隙內，使流通斷面變大；且相同濕潤相的飽和度下，在汲取時張力會小於排退的情況，因此在汲取時孔隙表面的薄膜水逐漸增厚，連結被孤立的水，使水呈連續可移動的狀態。

態。相反地，排退時非濕潤相會呈連續狀分布在孔隙內，減少流通斷面。所以在相同濕潤相的飽和度下，濕潤相的相對滲透係數在汲取時比排退時大。

4. 由實驗結果得知，當三相共存時，在固定濕潤相水的飽和度下，非濕潤相中柴油與空氣兩者飽和度的比例改變時，會對濕潤相水的滲透係數產生影響。
5. 在水、柴油、空氣三相共存的情況下，柴油很容易被截斷形成孤立不連續狀態，其原因是由於“柴油-空氣”之間的界面張力是最小的，所以柴油形成孤立不連續狀態主要是空氣排退柴油所造成。
6. 就 W-D-A 與 W-O-A 實驗兩組的比較中，可知由於“空氣-柴油”的界面張力比“空氣-四氯乙烷”的界面張力小，所以在實驗過程中三相共存時空氣容易排退柴油，不易排退四氯乙烷。因此造成四氯乙烷存留在微模型中的飽和度比柴油大。
7. 本實驗中非濕潤相流體呈連續分布而非均勻分散。當非濕潤相流體飽和度大且呈現直線連續狀阻斷流通斷面時， K_r 值趨近於 0；但若使相同飽和度之非濕潤相流體以均勻分散狀分佈於微模型內時， K_r 值是不為 0。相反地，當非濕潤相流體飽和度較小且呈連續狀時對整體 K_r 值有明顯的影響，但若使相同非濕潤相流體的飽和度以均勻分散狀態分佈微模型內時對 k 值影響較小。因此非濕潤相流體的分布狀態對 K_r 值的影響會隨著非濕潤相流體飽和度增加而差異變大。因此當現地中非濕潤相流體以均勻分散時，以本實驗模擬是會低估非濕潤相流體的含量。

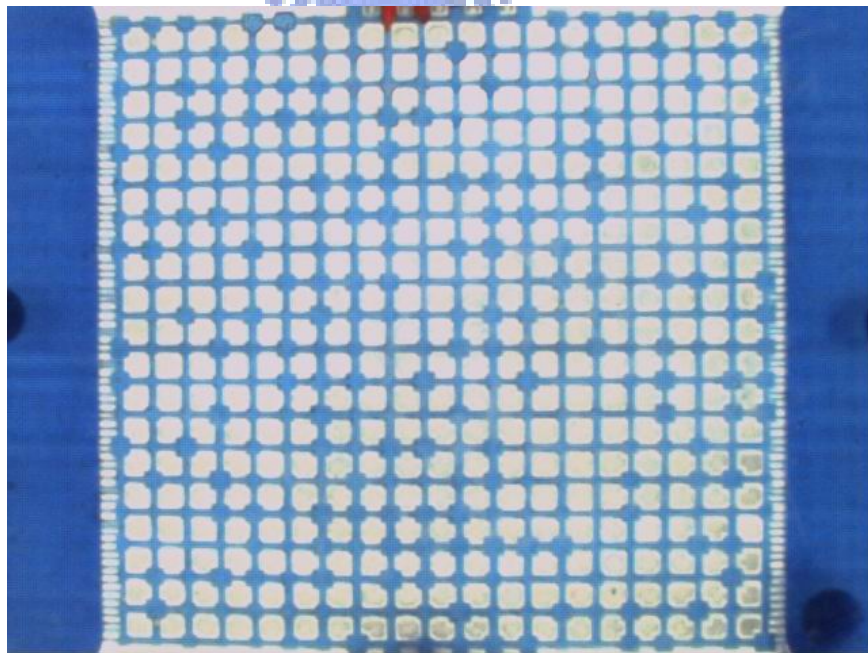


圖 6-7 P-S 實驗排退過程第一階段

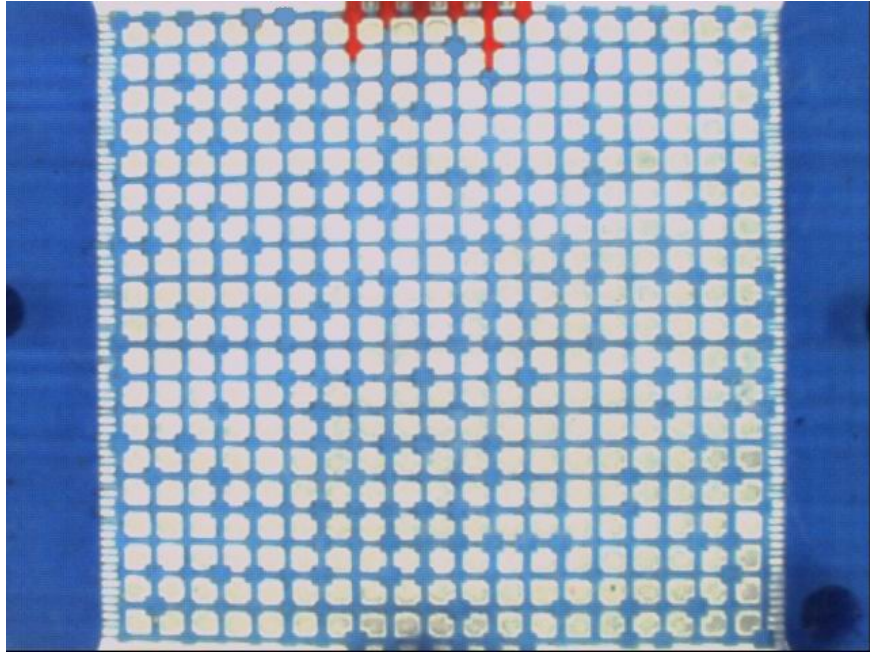


圖 6-8 P-S 實驗排退過程第三階段

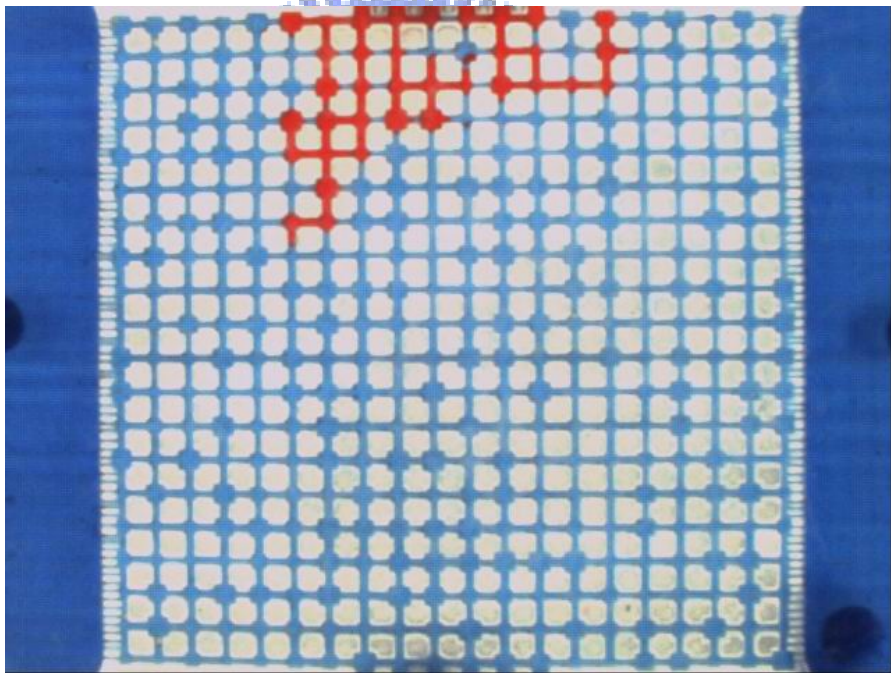


圖 6-9 P-S 實驗排退過程第四階段

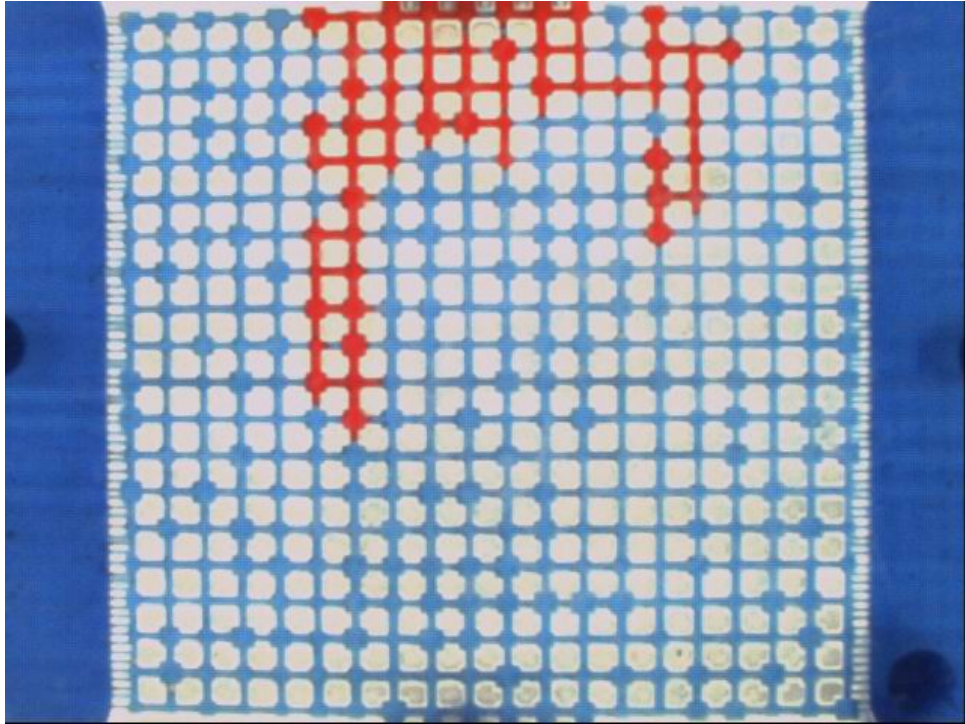


圖 6-10 P-S 實驗排退過程第五階段

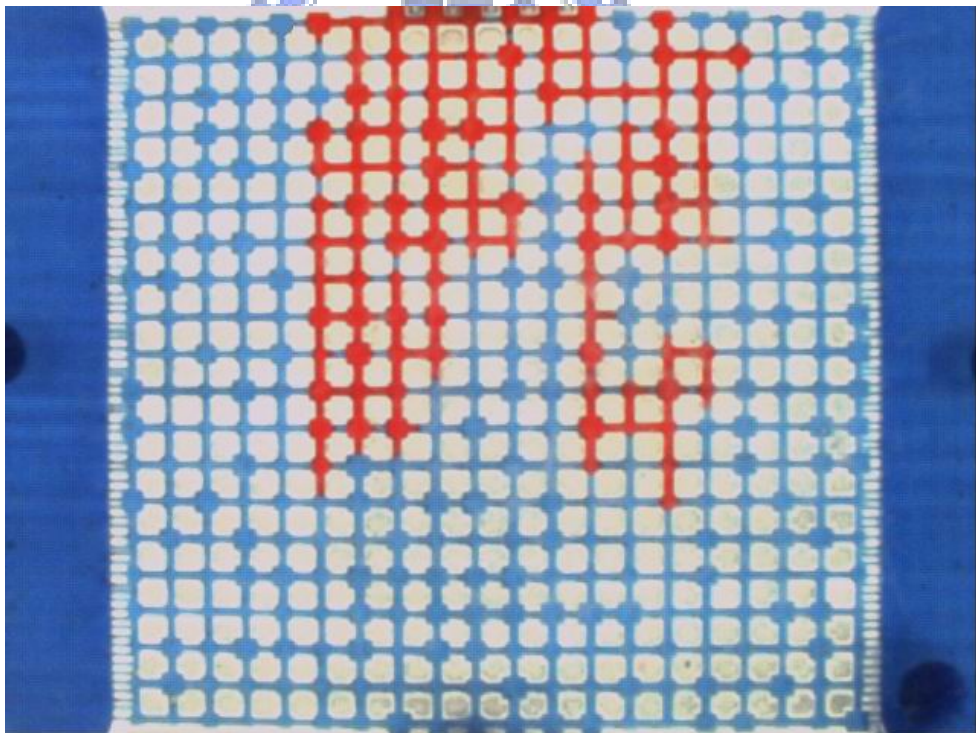


圖 6-11 P-S 實驗排退過程第六階段

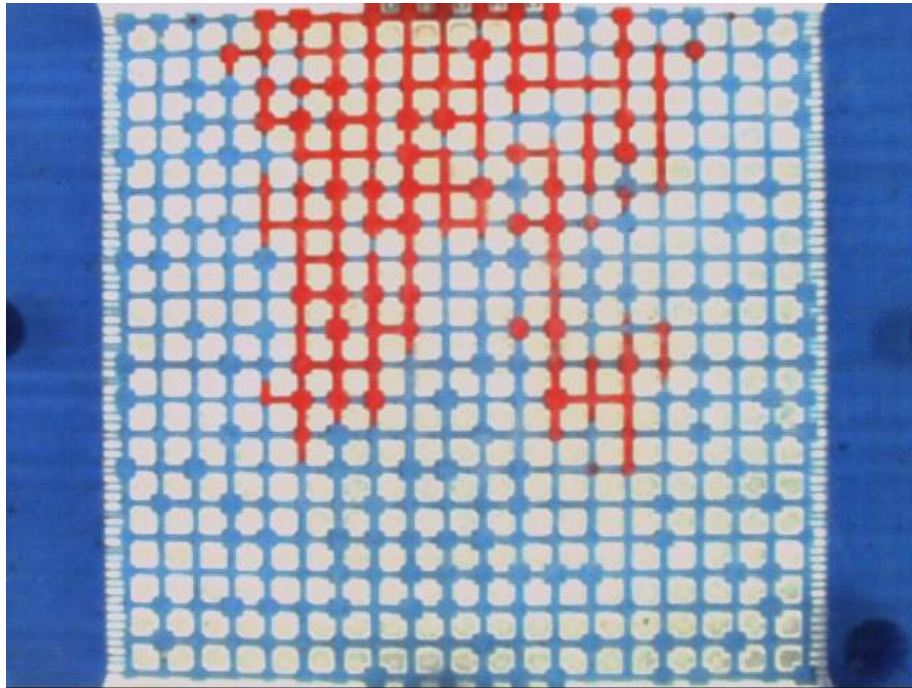


圖 6-12 P-S 實驗排退過程第七階段

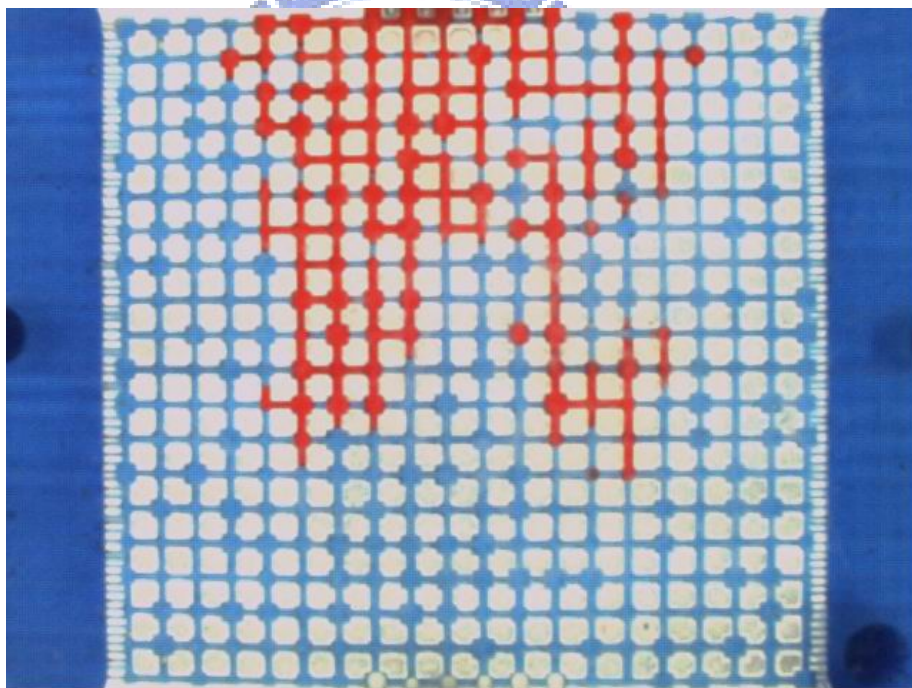


圖 6-13 P-S 實驗排退過程第八階段

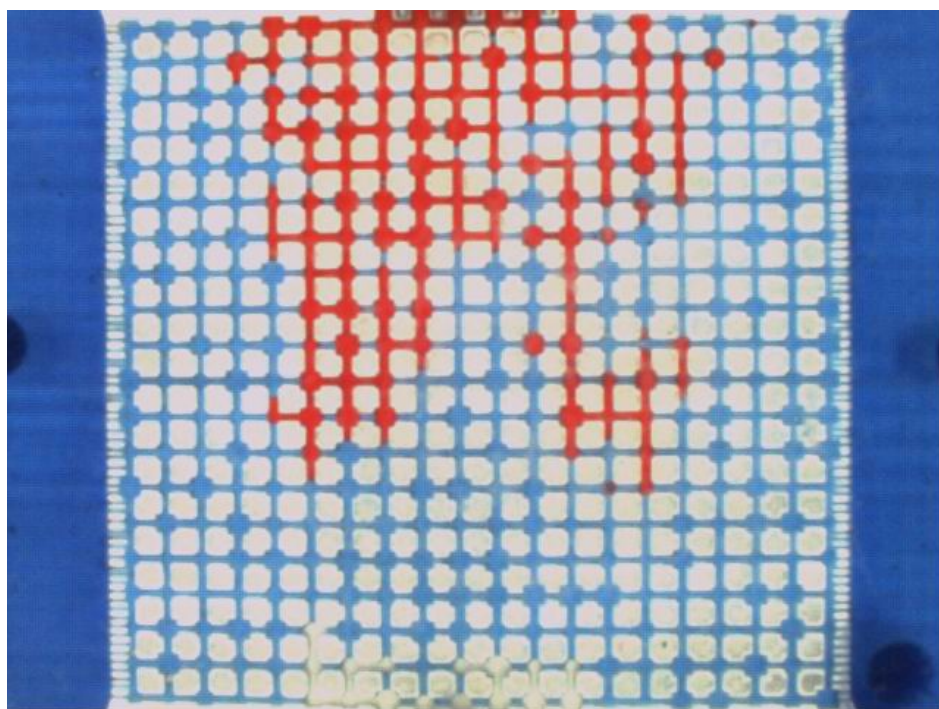


圖 6-14 P-S 實驗排退過程第九階段

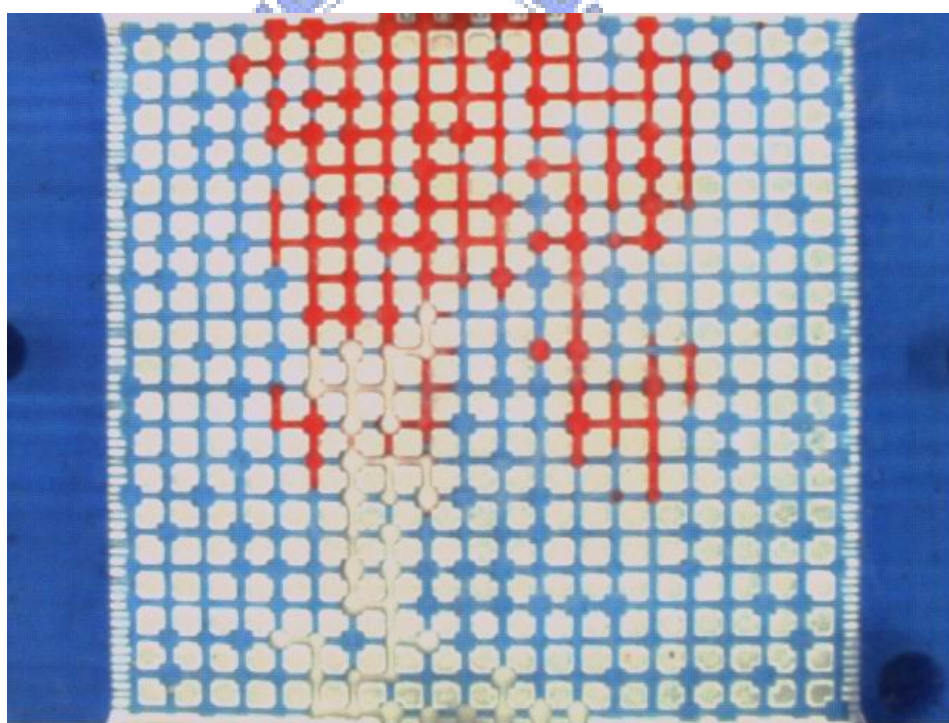


圖 6-15 P-S 實驗排退過程第十階段

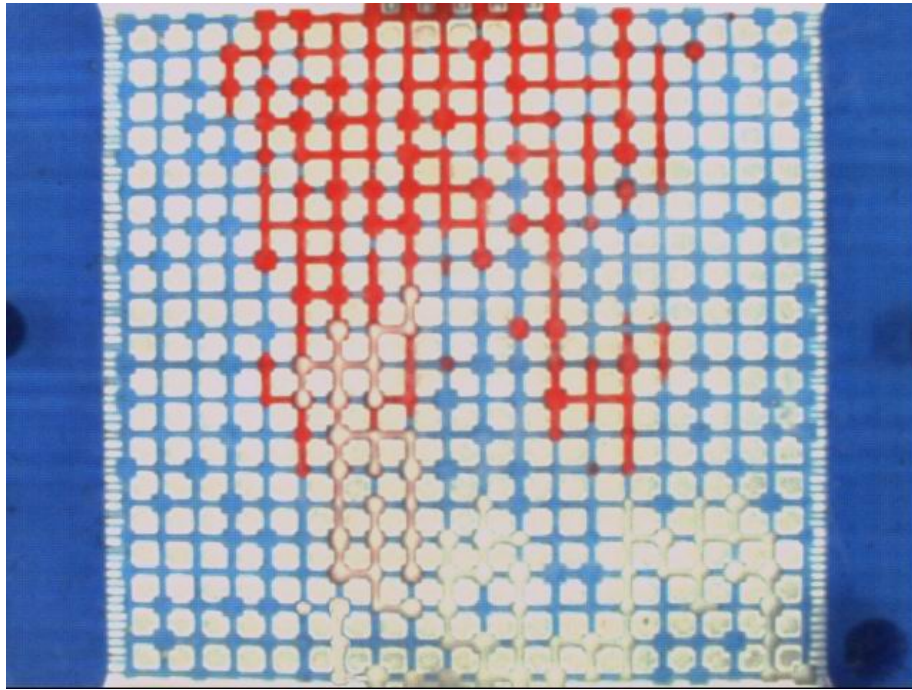


圖 6-16 P-S 實驗排退過程第十一階段

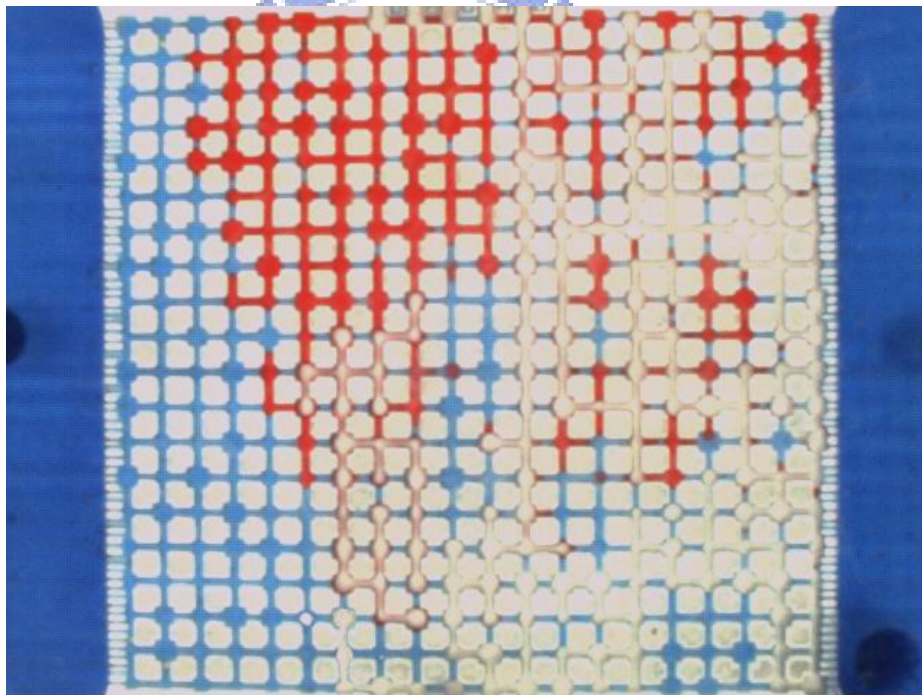


圖 6-17 P-S 實驗排退過程第十二階段

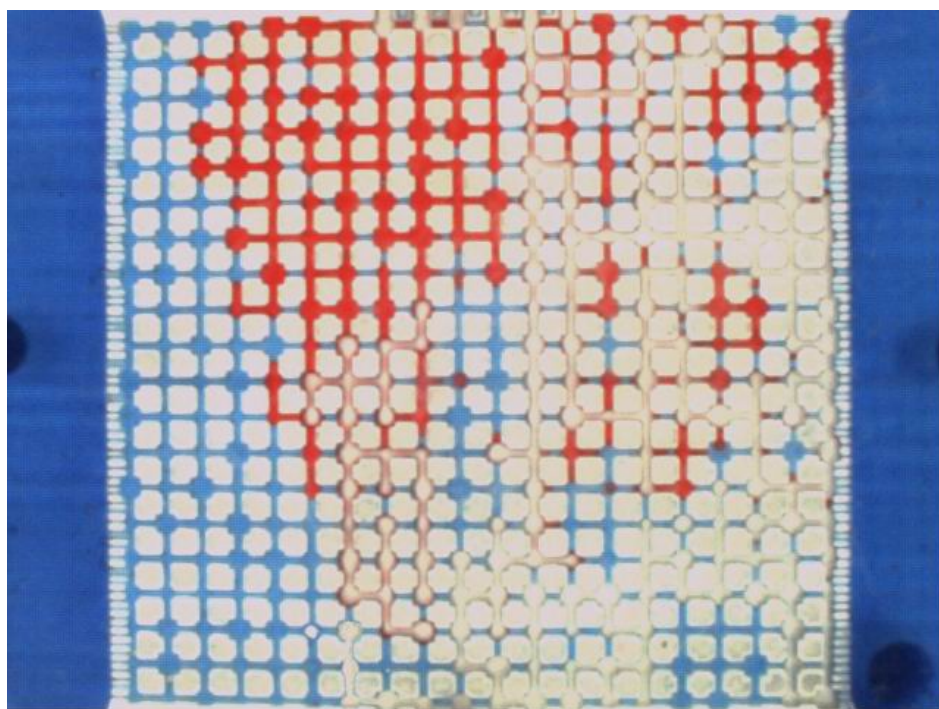


圖 6-18 P-S 實驗汲取過程第一階段

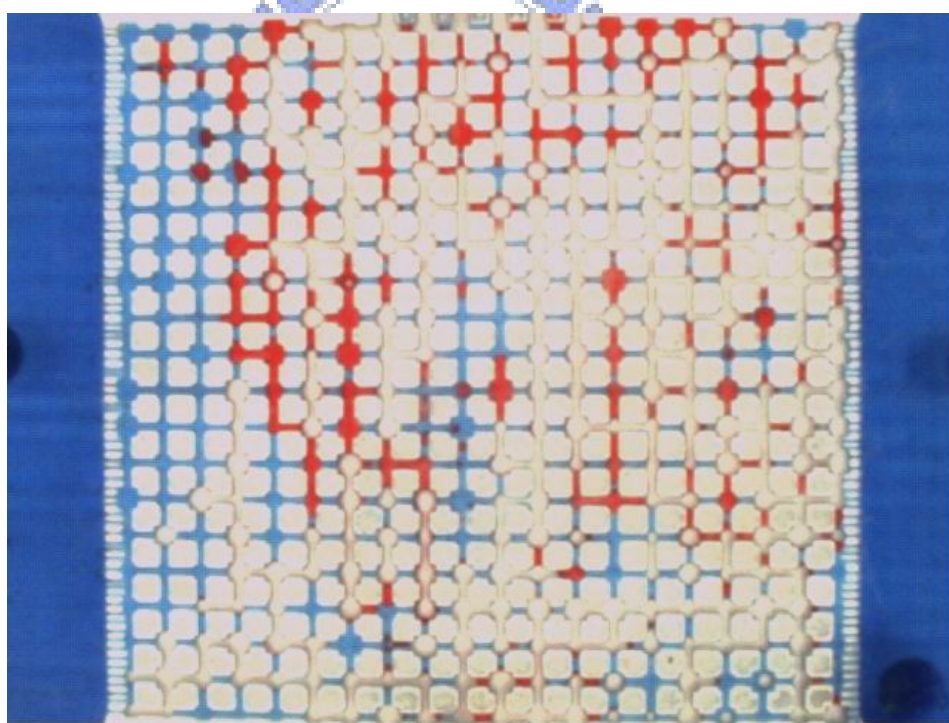


圖 6-19 P-S 實驗汲取過程第二階段

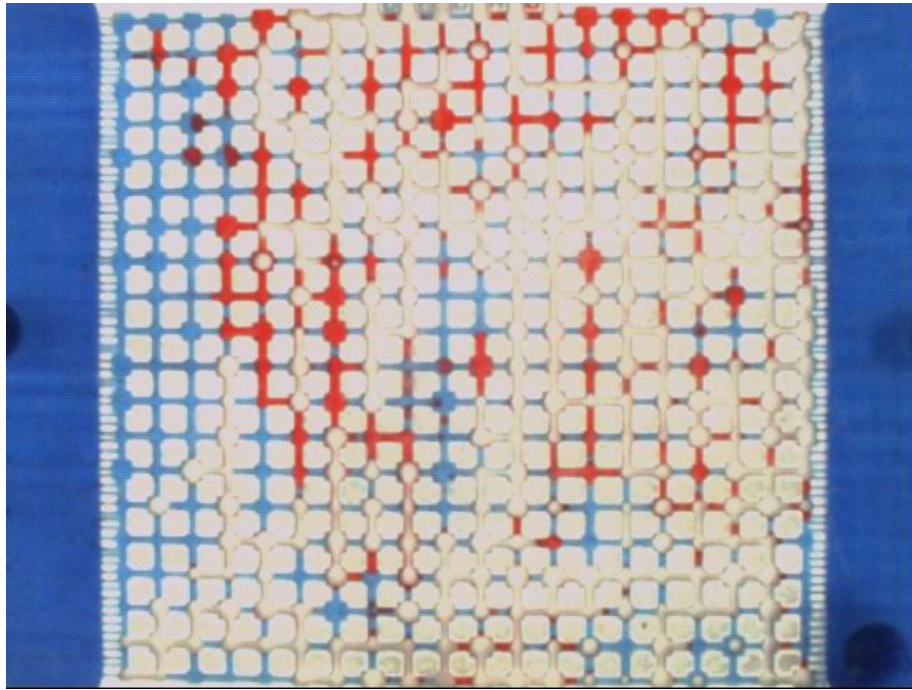


圖 6-20 P-S 實驗汲取過程第三階段

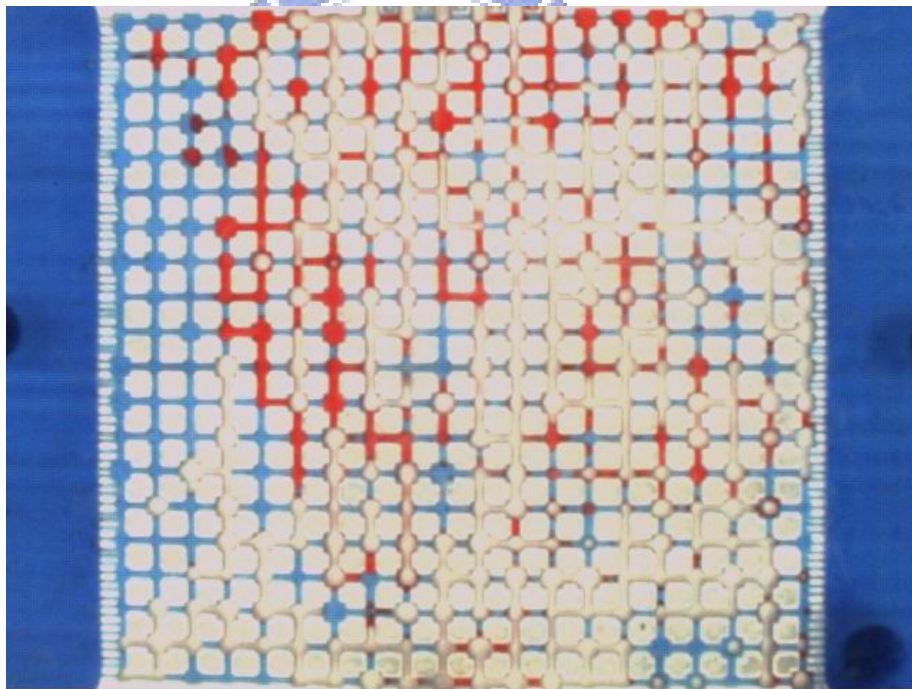


圖 6-21 P-S 實驗汲取過程第四階段

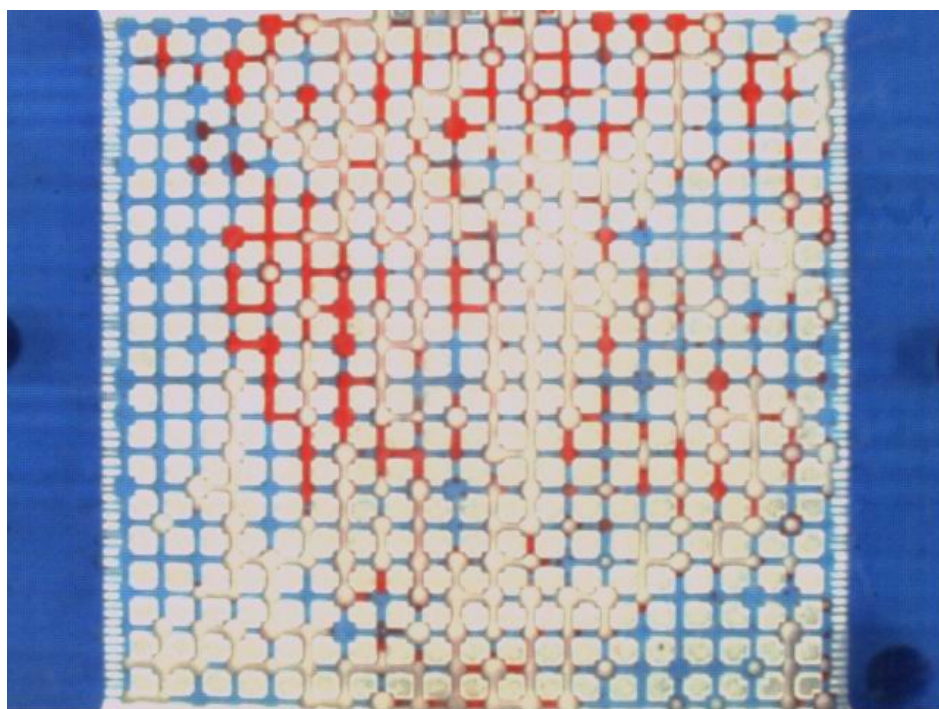


圖 6-22 實驗汲取過程第五階段

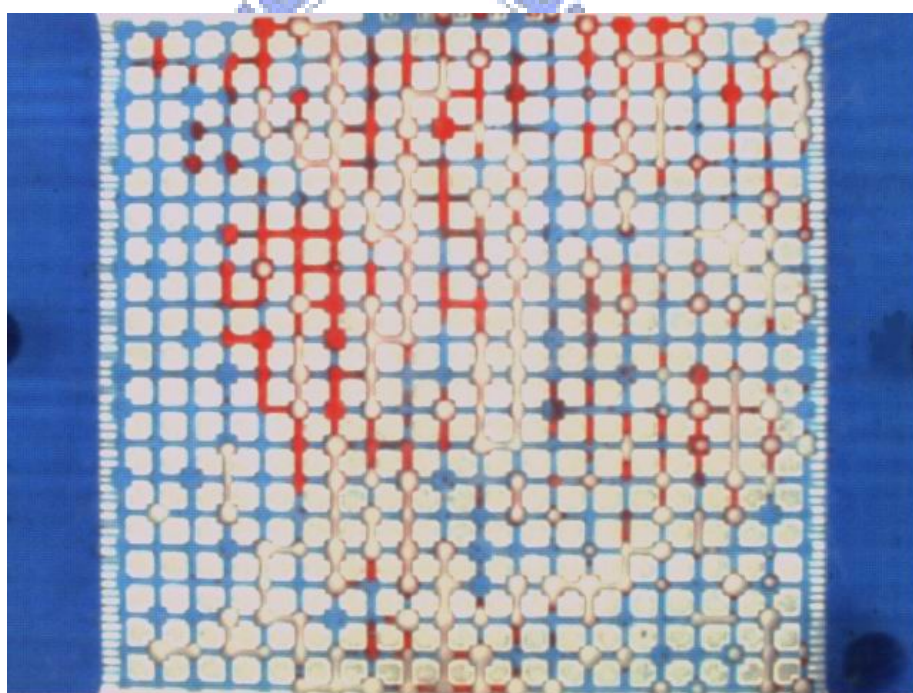


圖 6-23 實驗汲取過程第六階段

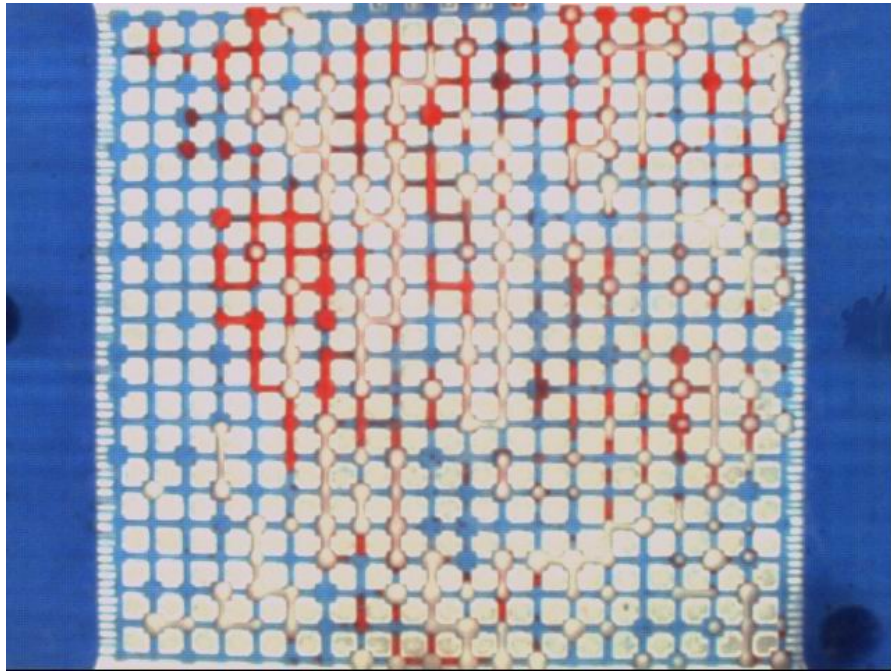


圖 6-24 實驗汲取過程第七階段

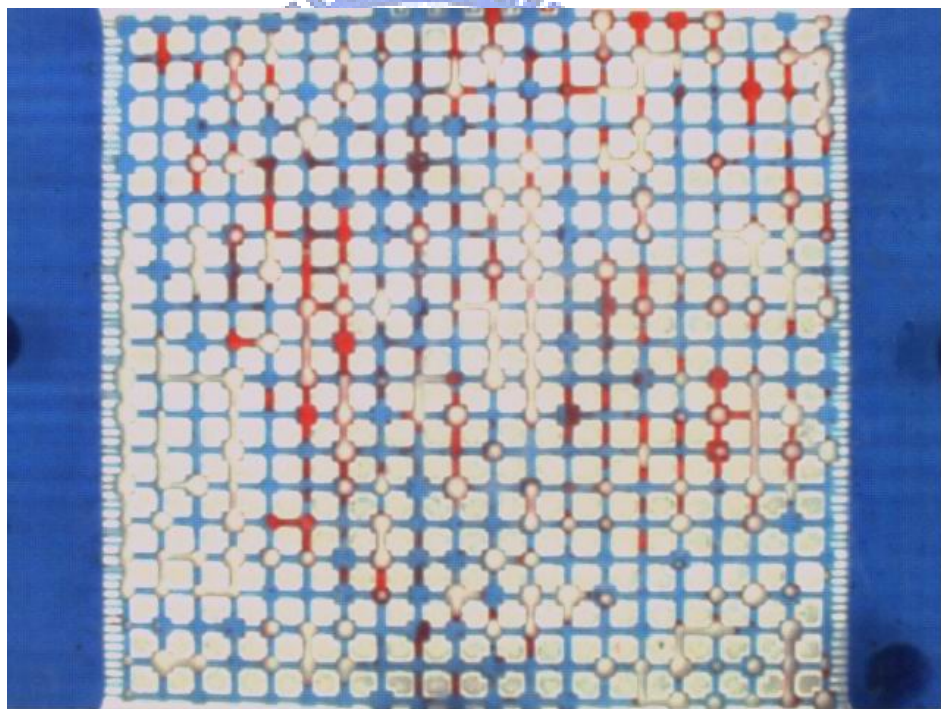


圖 6-25 實驗汲取過程第八階段

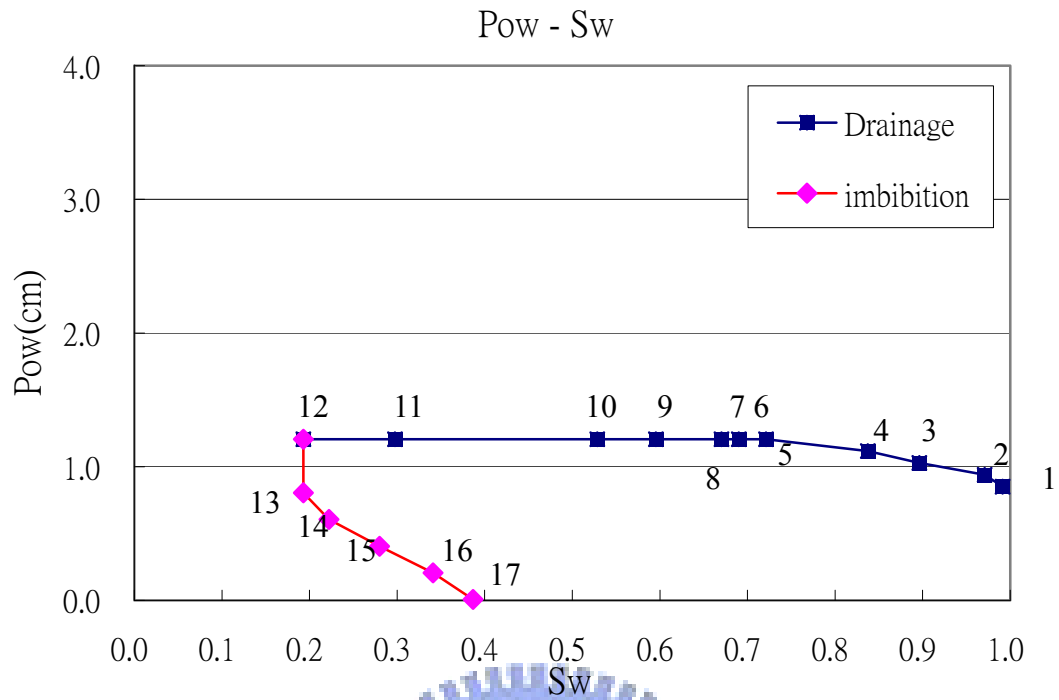


圖 6-26 W-O-A 情況時 P_{ow} 與水飽和度的關係

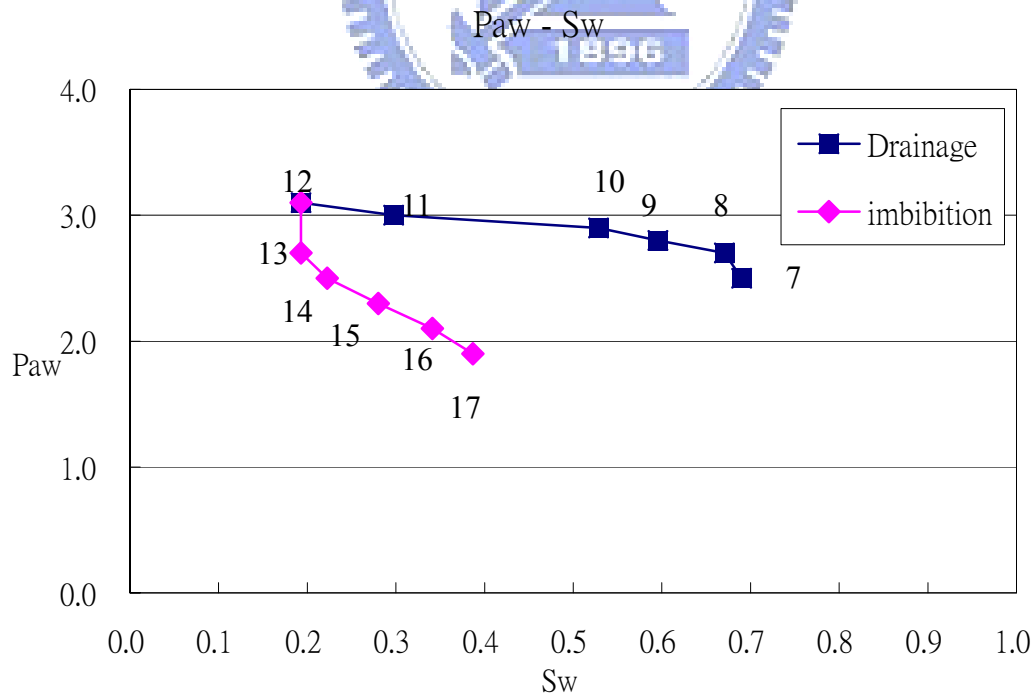


圖 6-27 W-O-A 情況時 P_{aw} 與水飽和度的關係

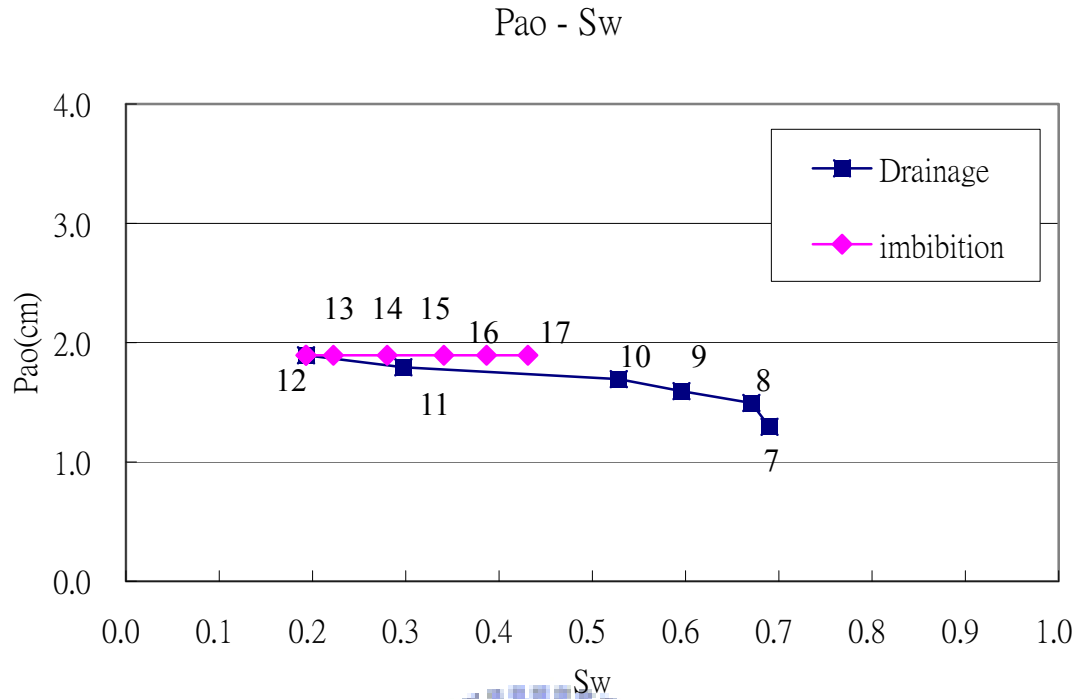


圖 6-28 W-O-A 情況時 P_{ao} 與水飽和度的關係

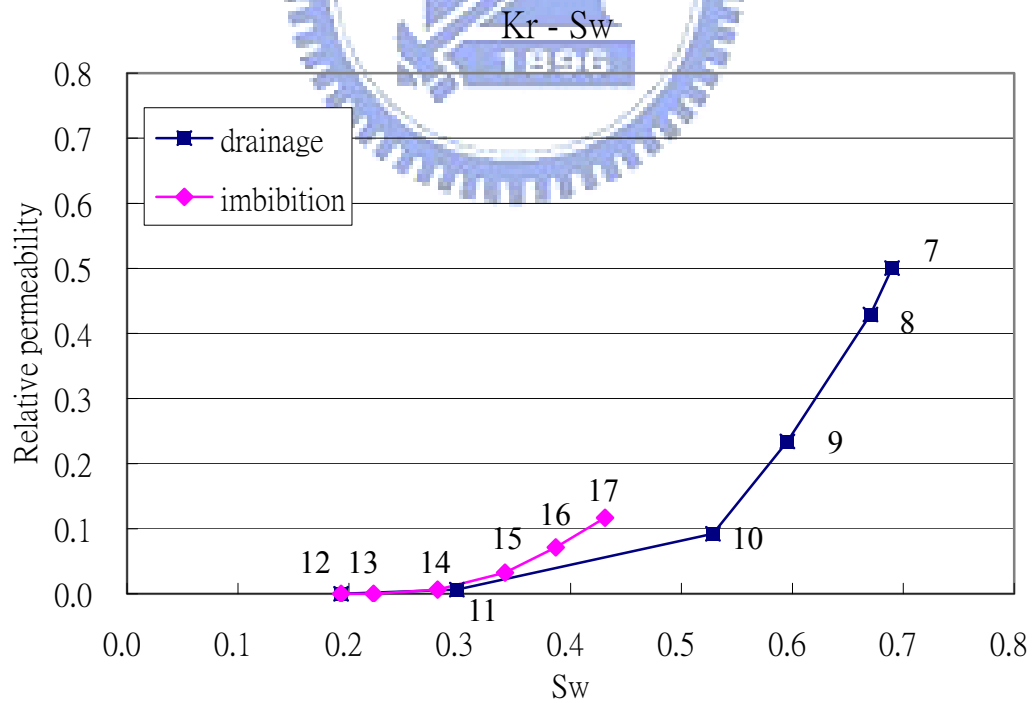


圖 6-29 W-O-A 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係

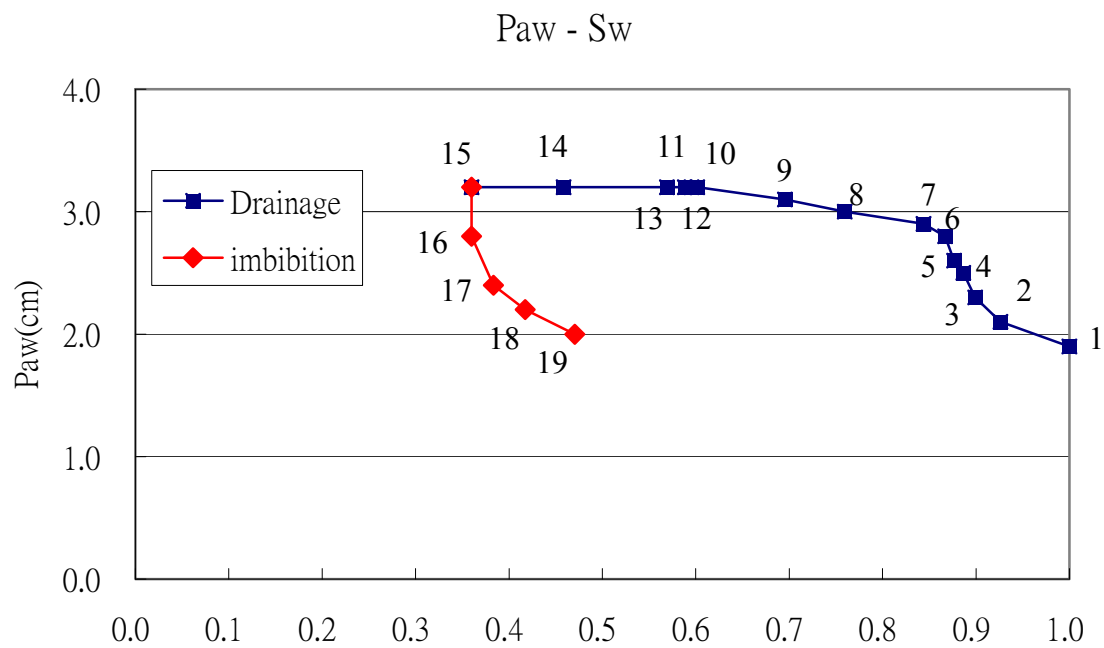


圖 6-30 W-A-O 情況時 P_{aw} 與水飽和度的關係

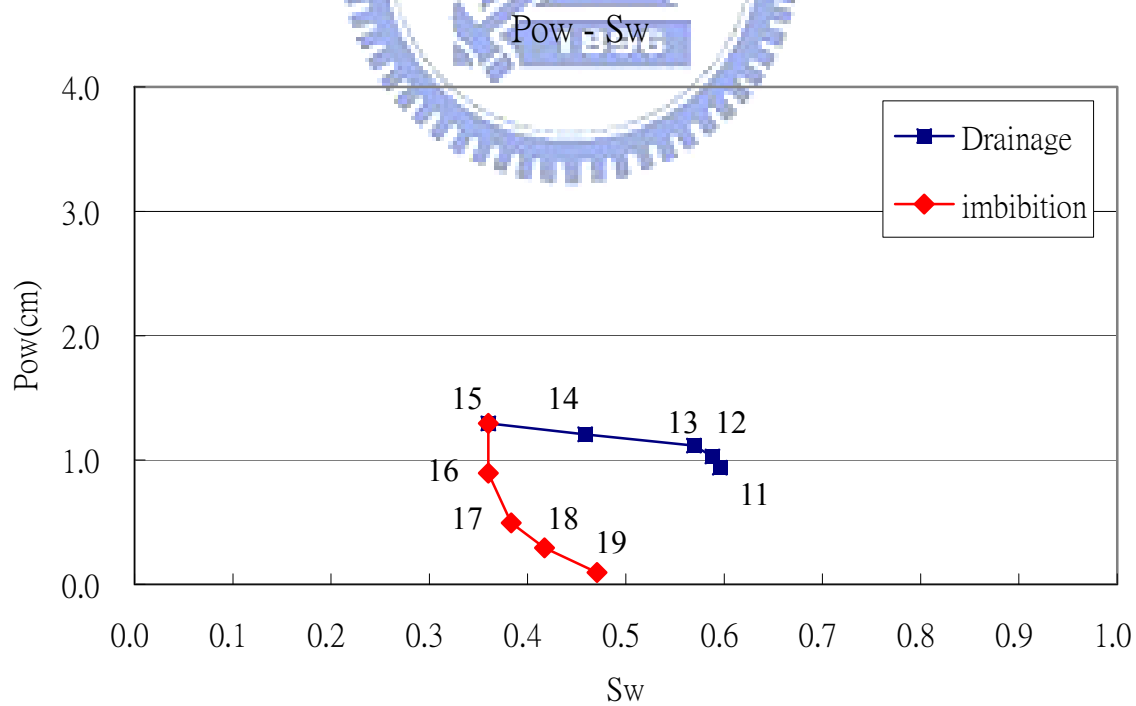


圖 6-31 W-A-O 情況時 P_{ow} 與水飽和度的關係

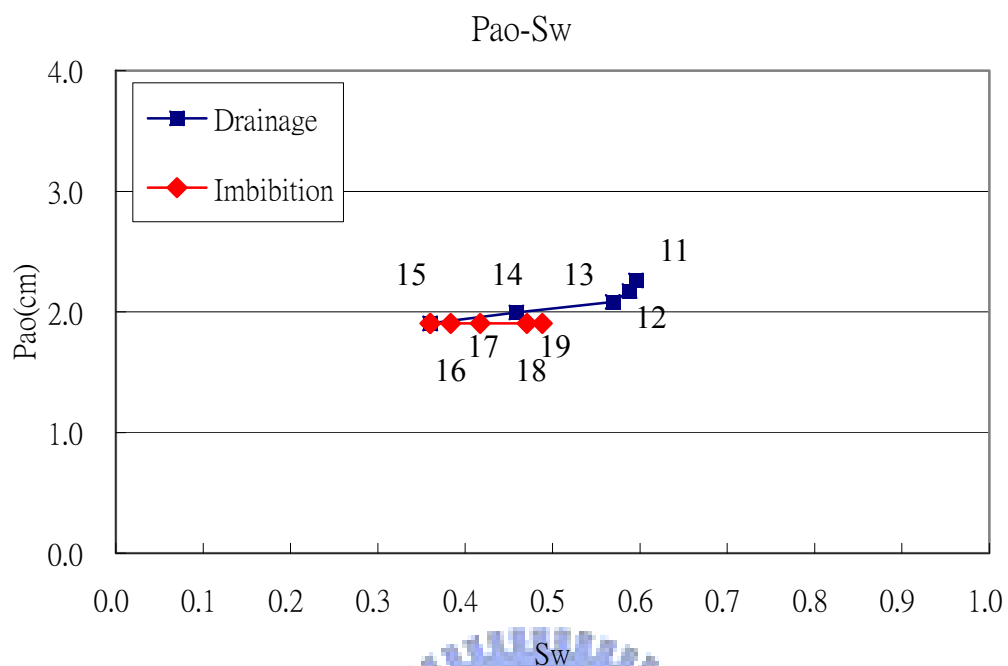


圖 6-32 W-A-O 情況時 P_{ao} 與水飽和度的關係

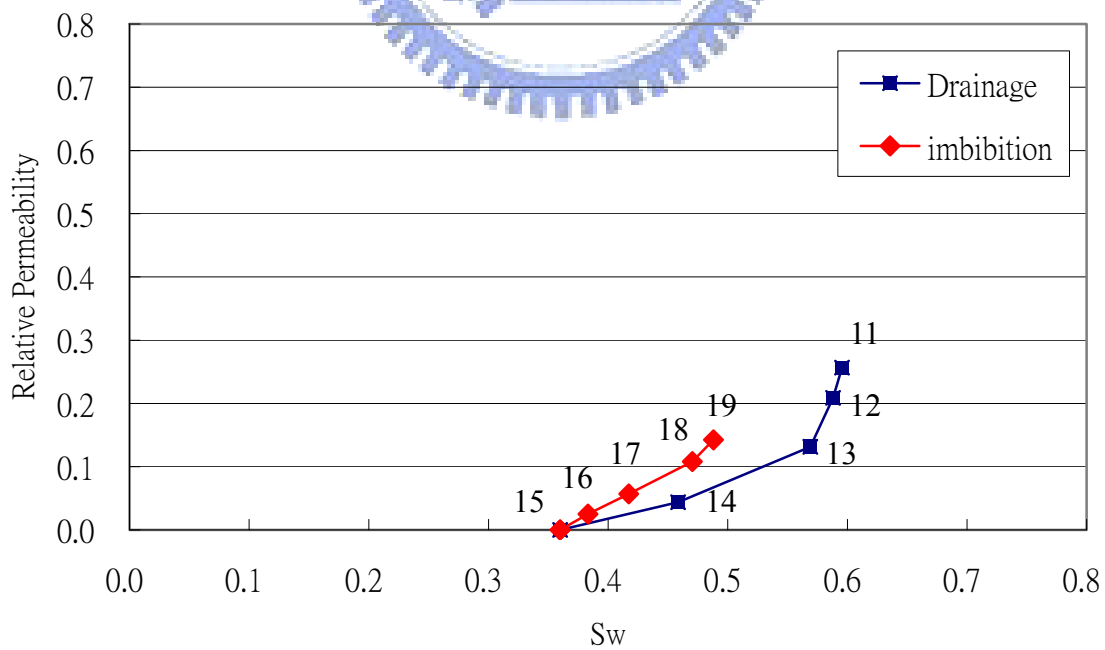


圖 6-33 W-A-O 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係

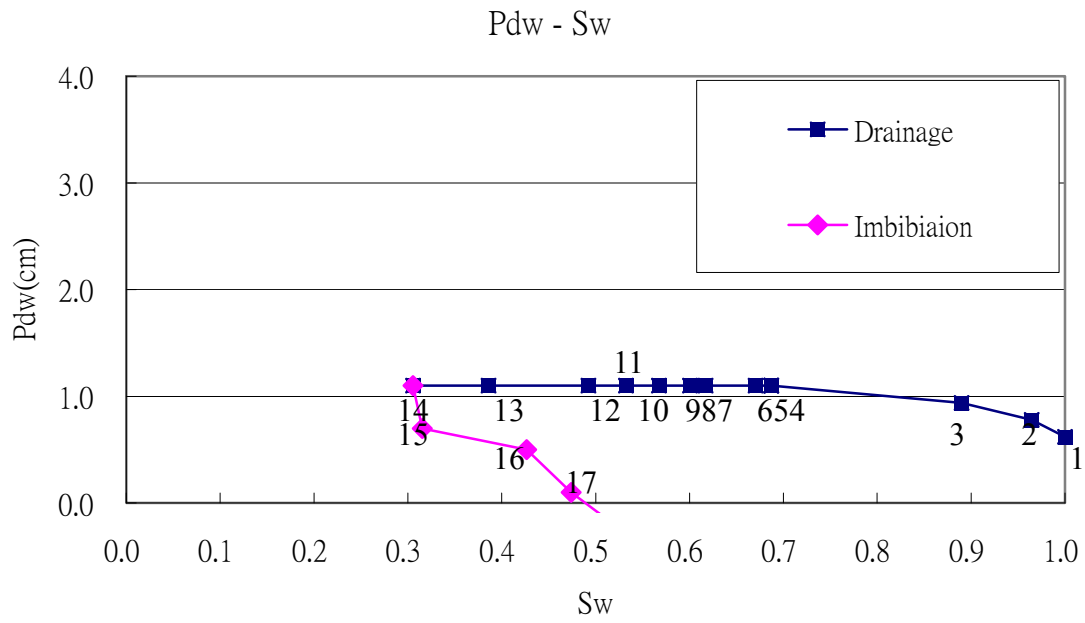


圖 6-34 W-D-A 情況 P_{dw} 與水飽和度的關係

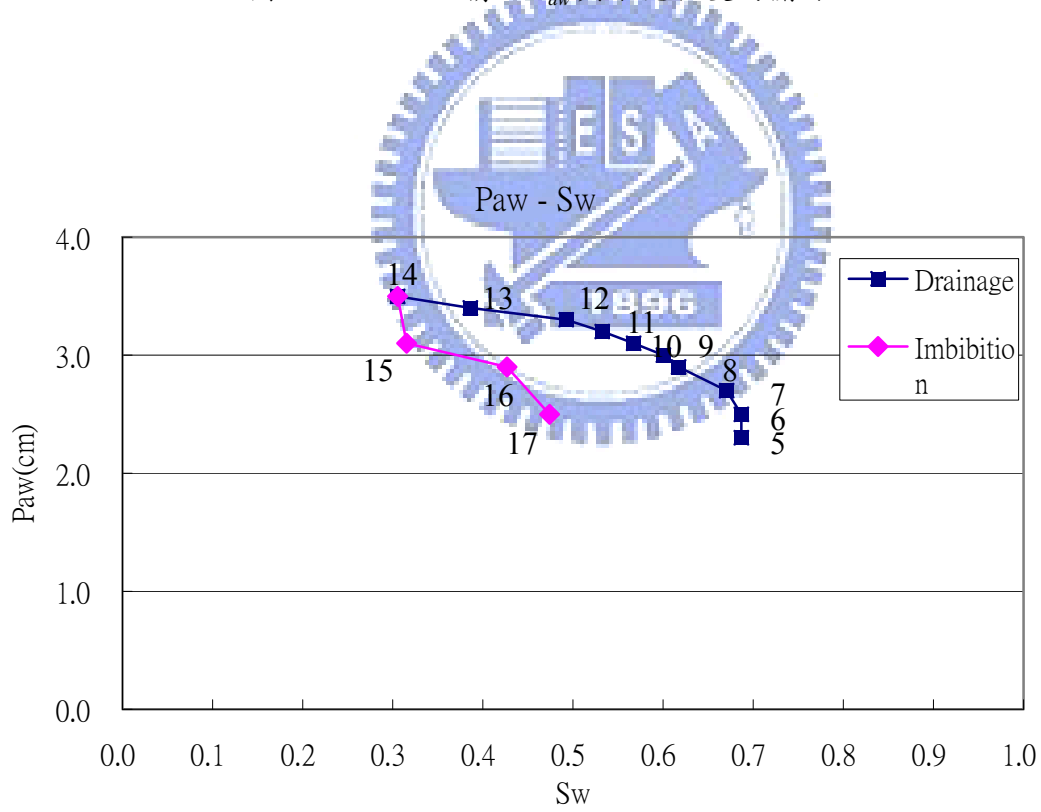


圖 6-35 W-D-A 情況 P_{aw} 與水飽和度的關係

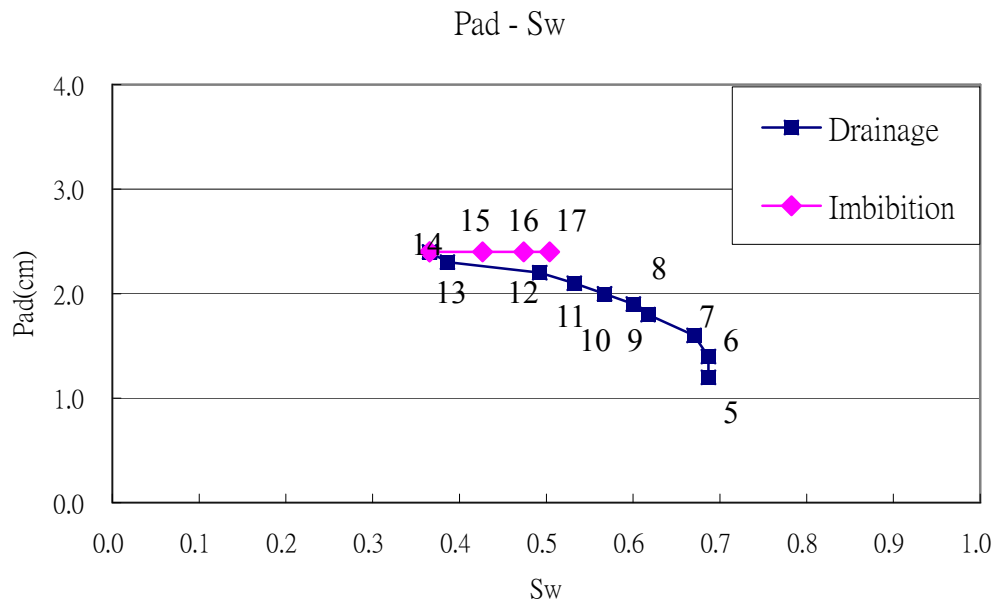


圖 6-36 W-D-A 情況 P_{ad} 與水飽和度的關係

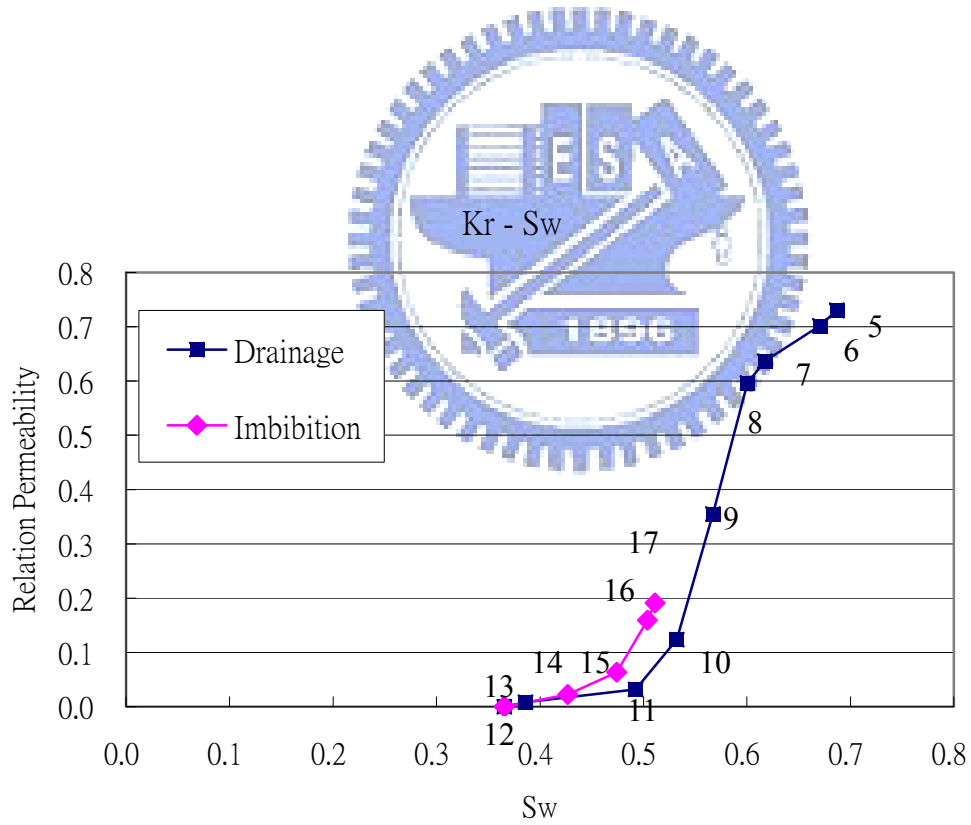


圖 6-37 W-D-A 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係

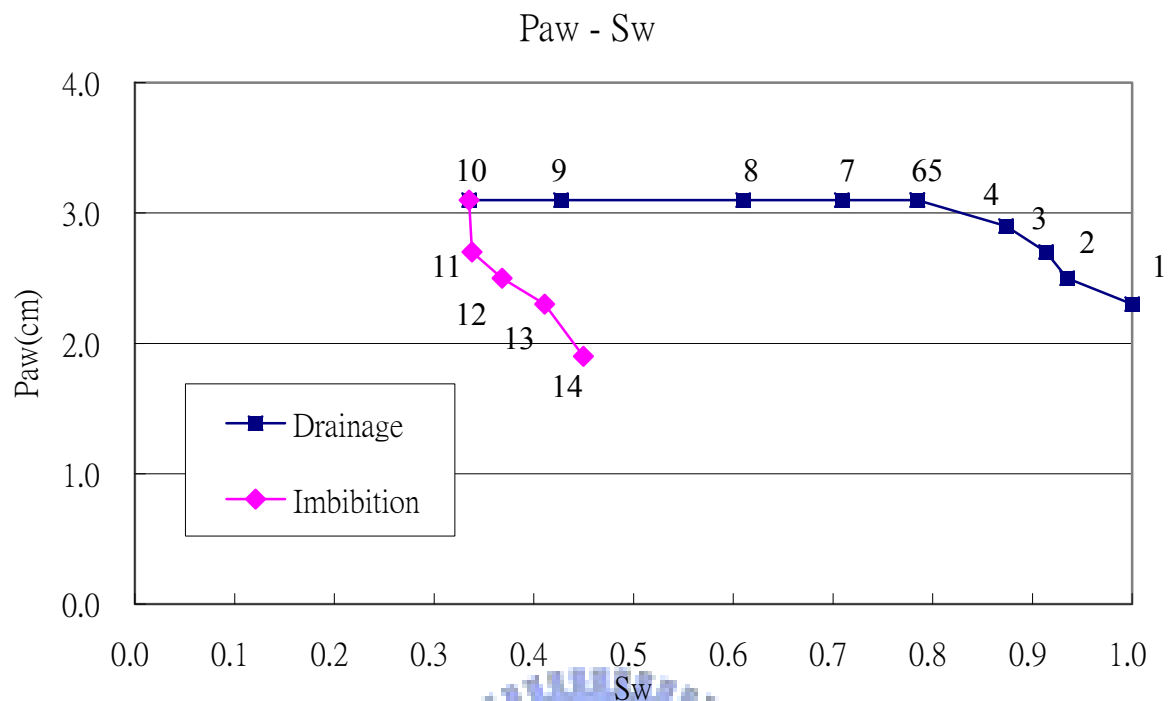


圖 6-38 W-A-D 情況 P_{aw} 與水飽和度的關係

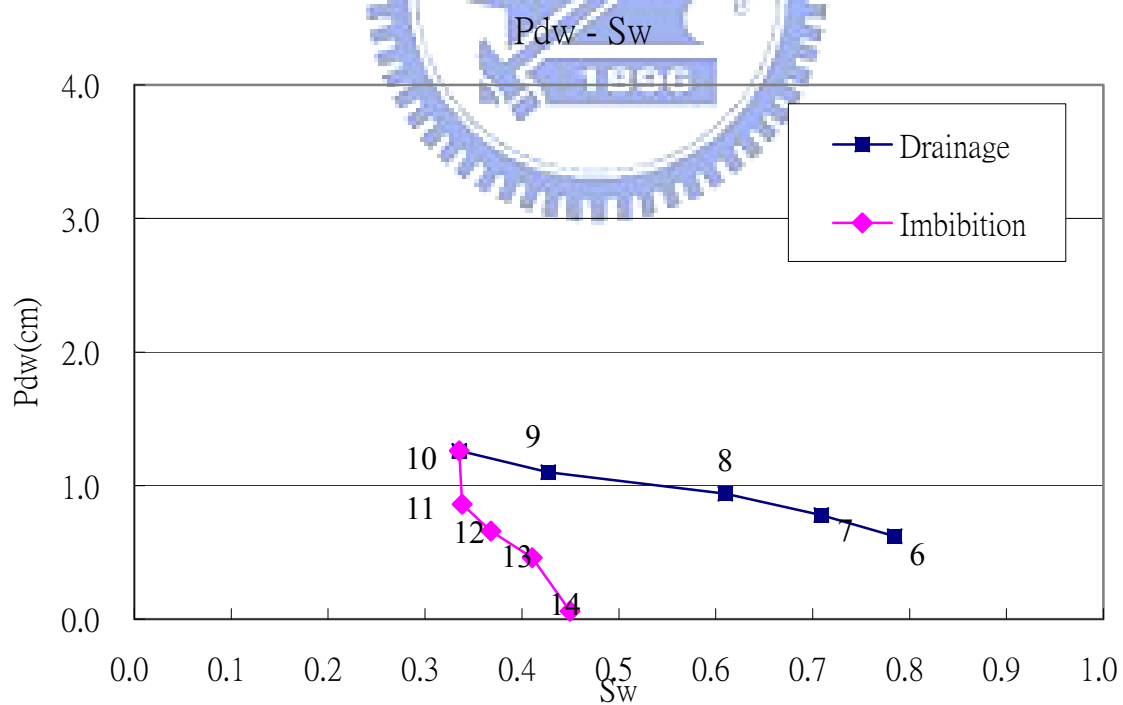


圖 6-39 W-A-D 情況 P_{dw} 與水飽和度的關係

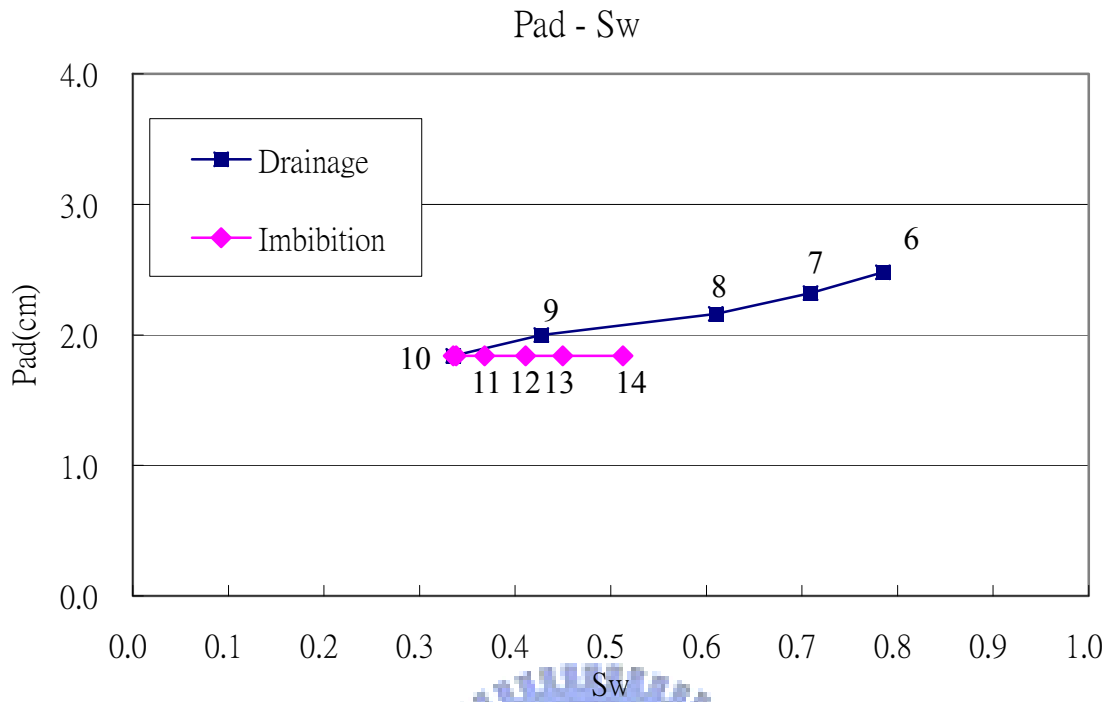


圖 6-40 W-A-D 情況 P_{ad} 與水飽和度的關係

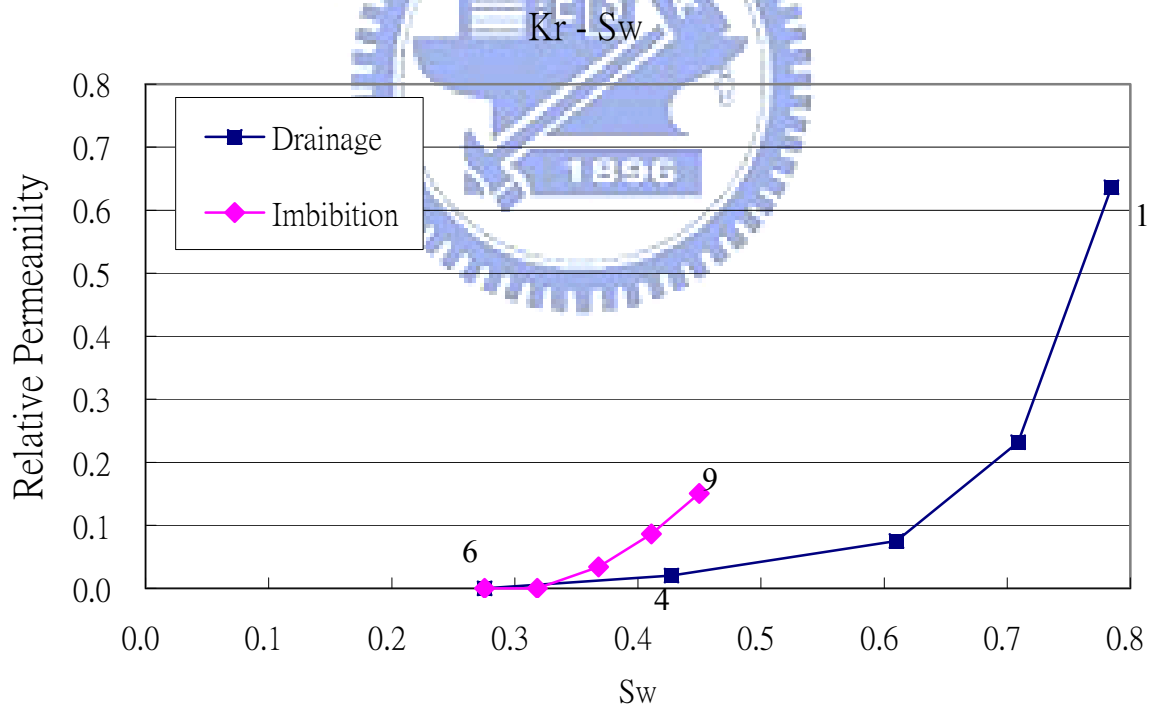


圖 6-41 W-A-D 情況時相對滲透係數與水飽和度的關係

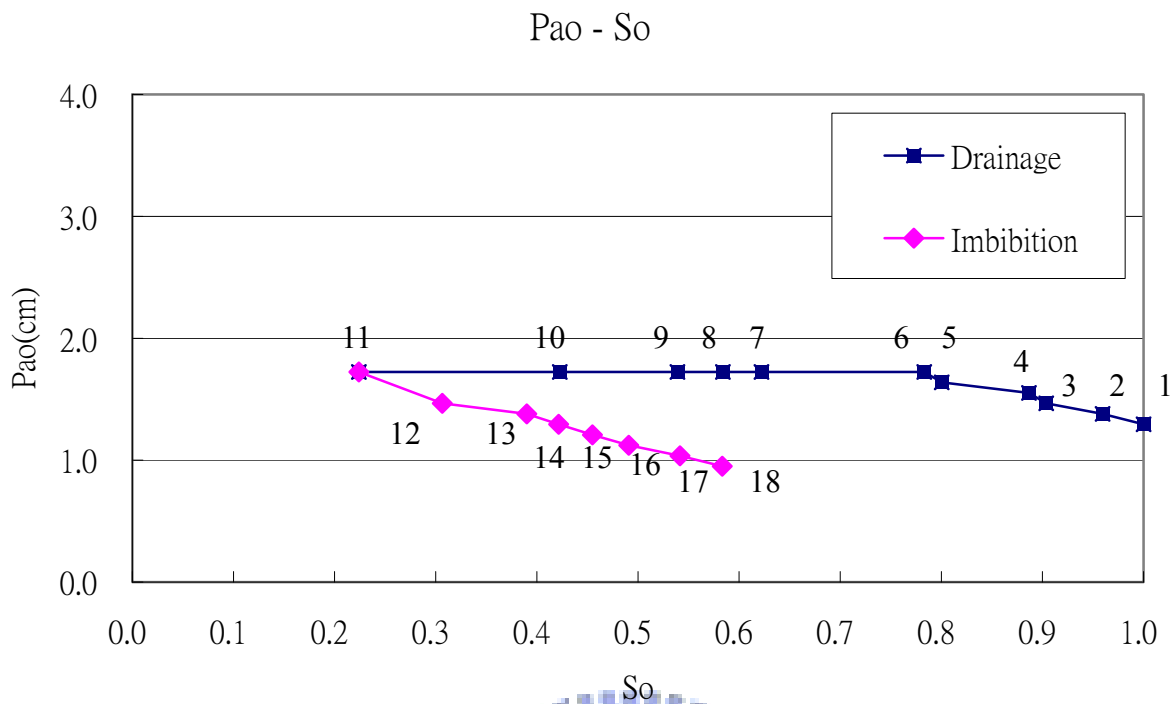


圖 6-42 O-A-W 情況 P_{ao} 與油飽和度的關係

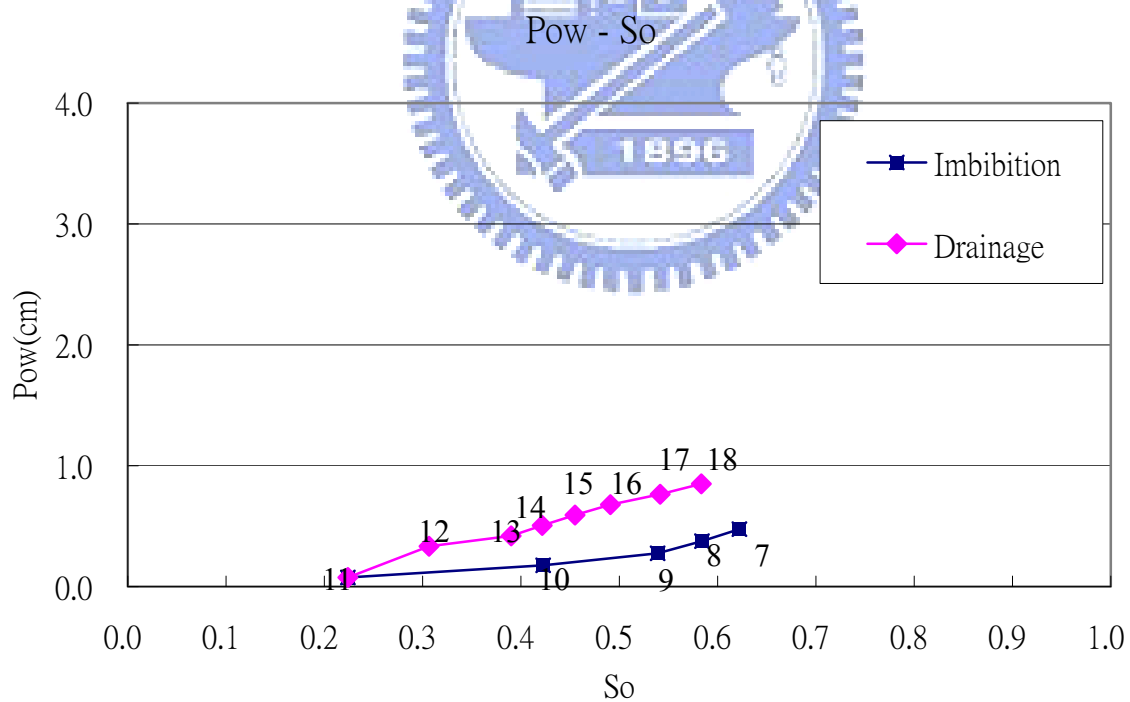


圖 6-43 O-A-W 情況 P_{ow} 與油飽和度的關係

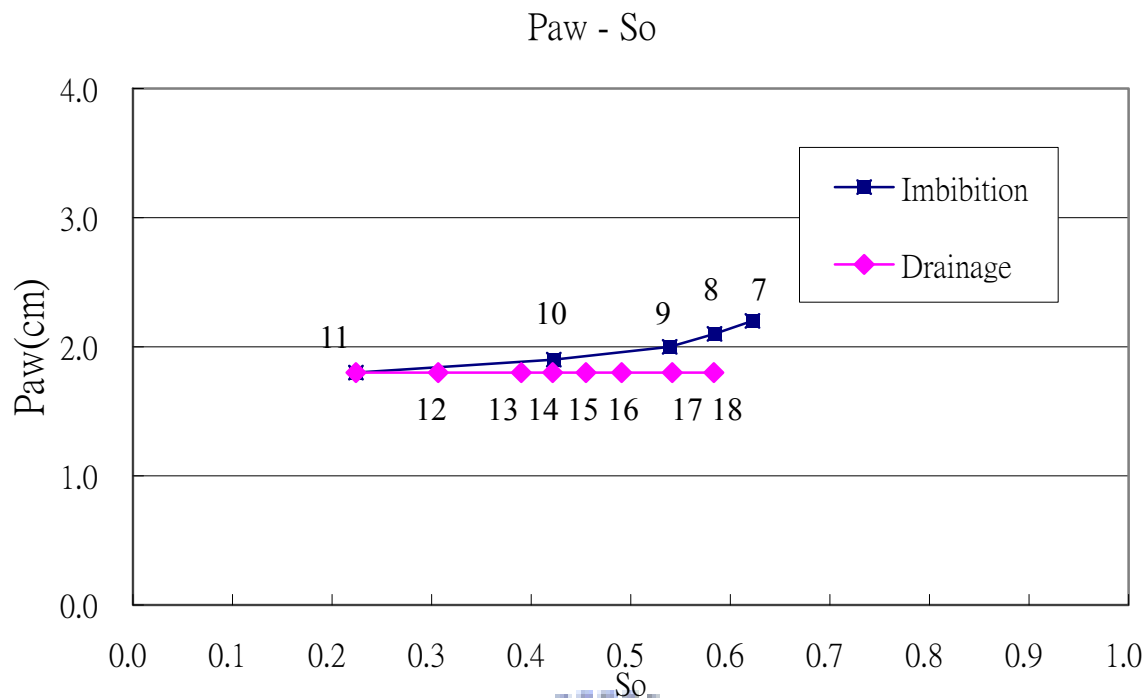


圖 6-44 O-A-W 情況 P_{aw} 與油飽和度的關係

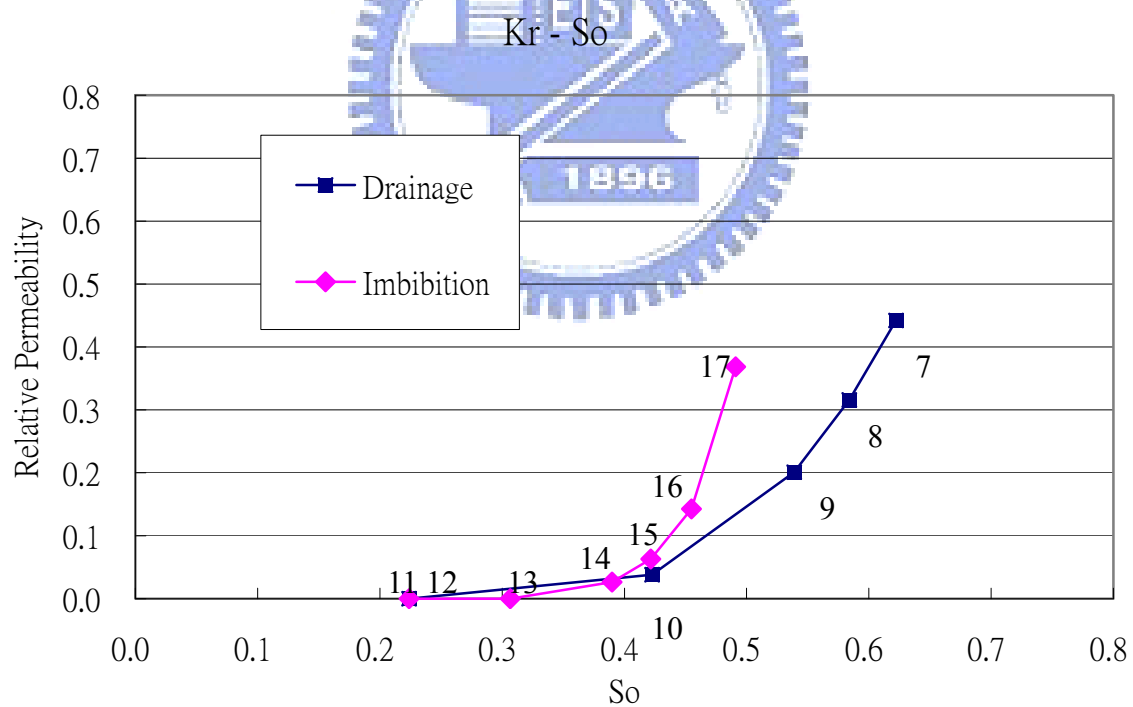


圖 6-45 O-A-W 情況時相對滲透係數與油飽和度的關係

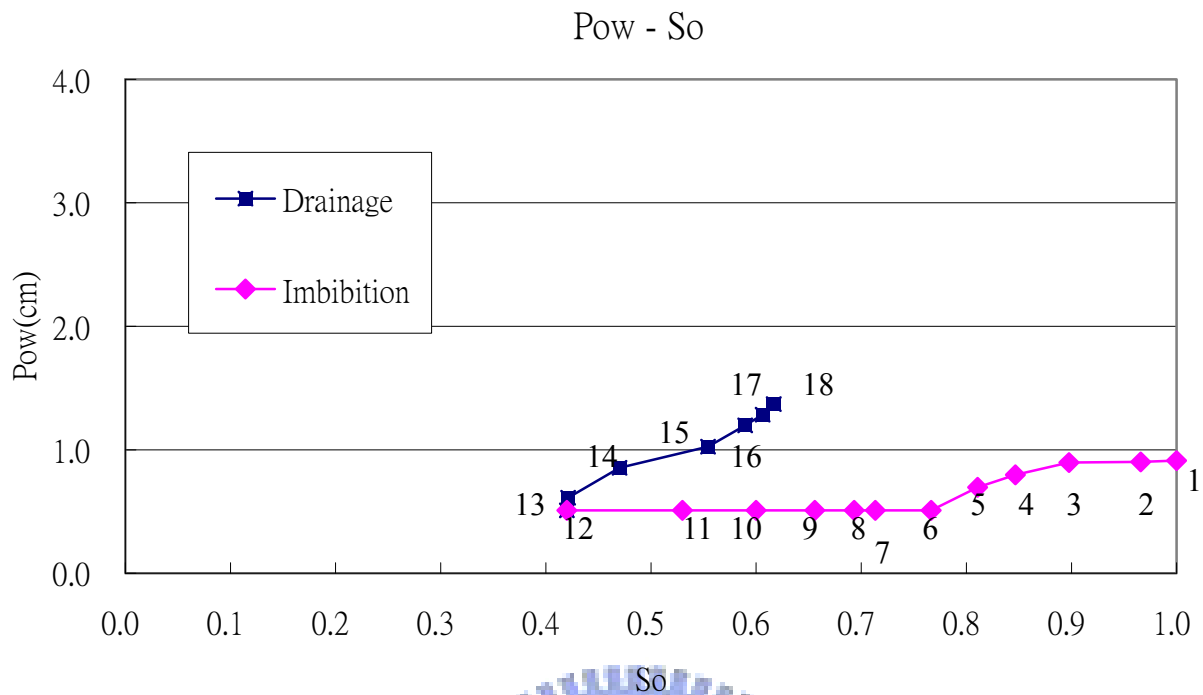


圖 6-46 O-W-A 情況 P_{ow} 與油飽和度的關係

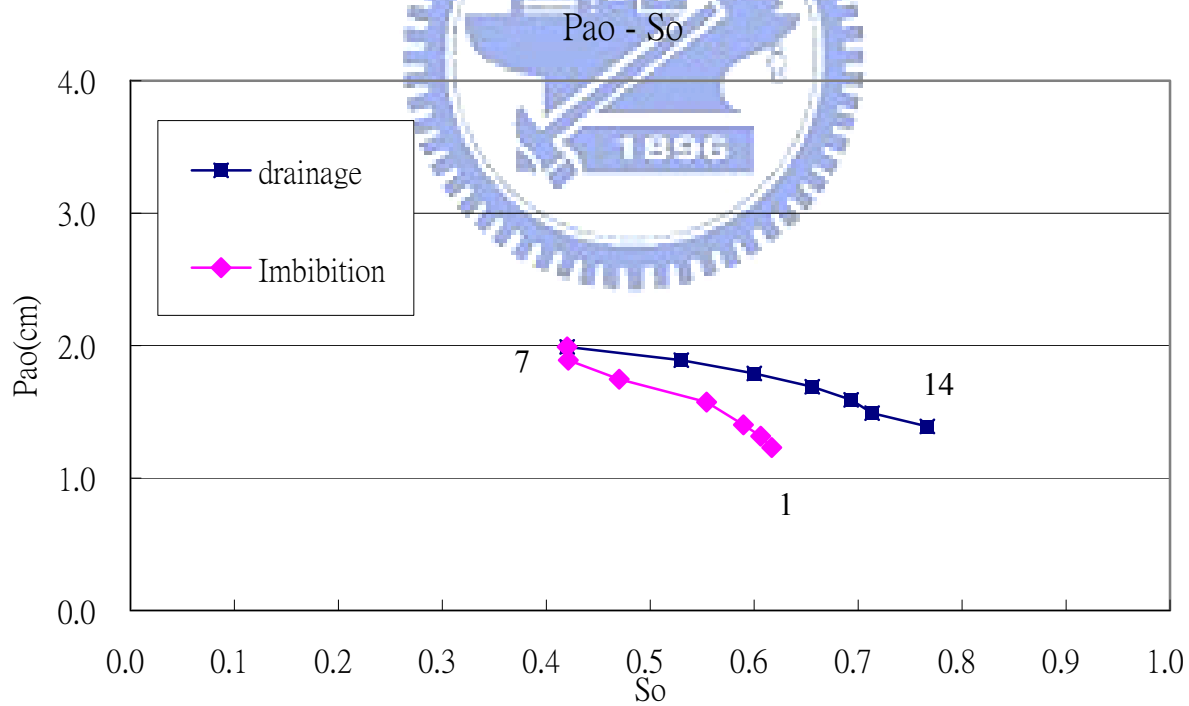


圖 6-47 O-W-A 情況 P_{ao} 與油飽和度的關係

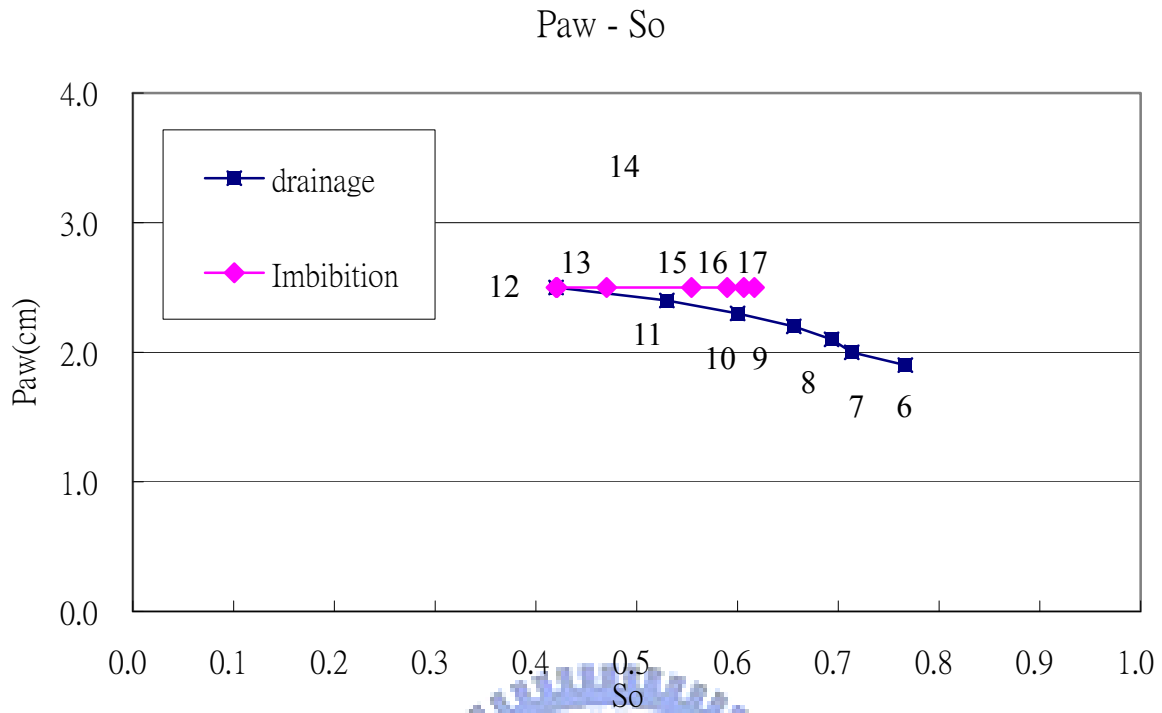


圖 6-48 O-W-A 情況 P_{aw} 與油飽和度的關係

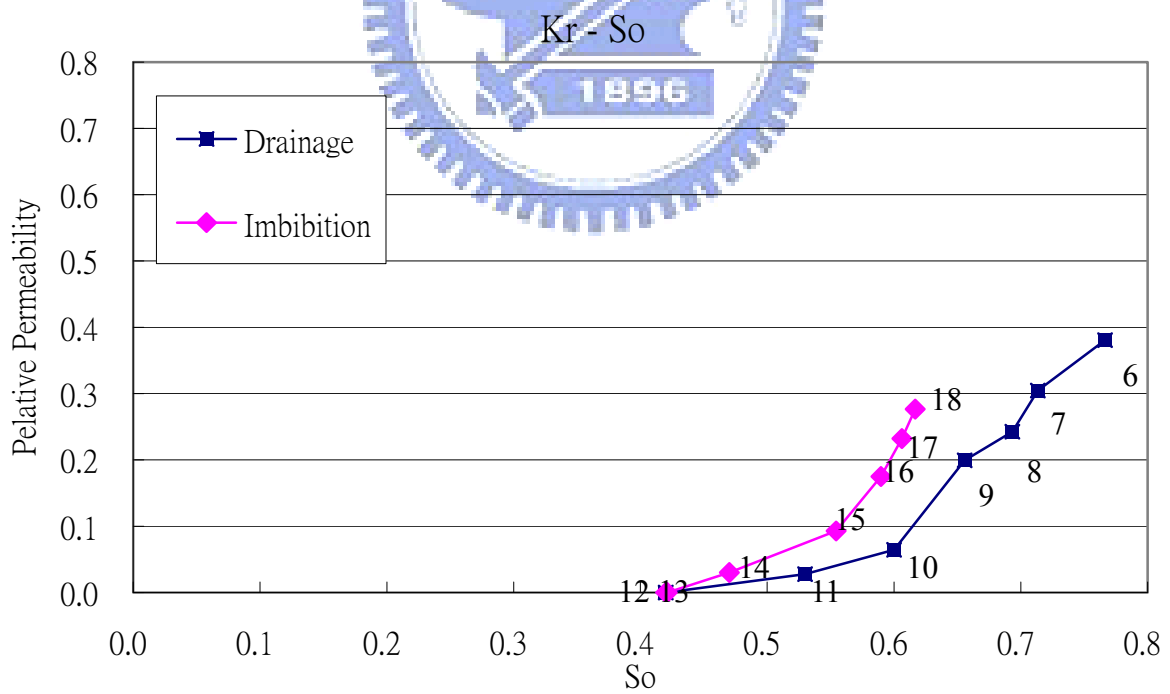


圖 6-49 O-W-A 情況時相對滲透係數與油飽和度的關係

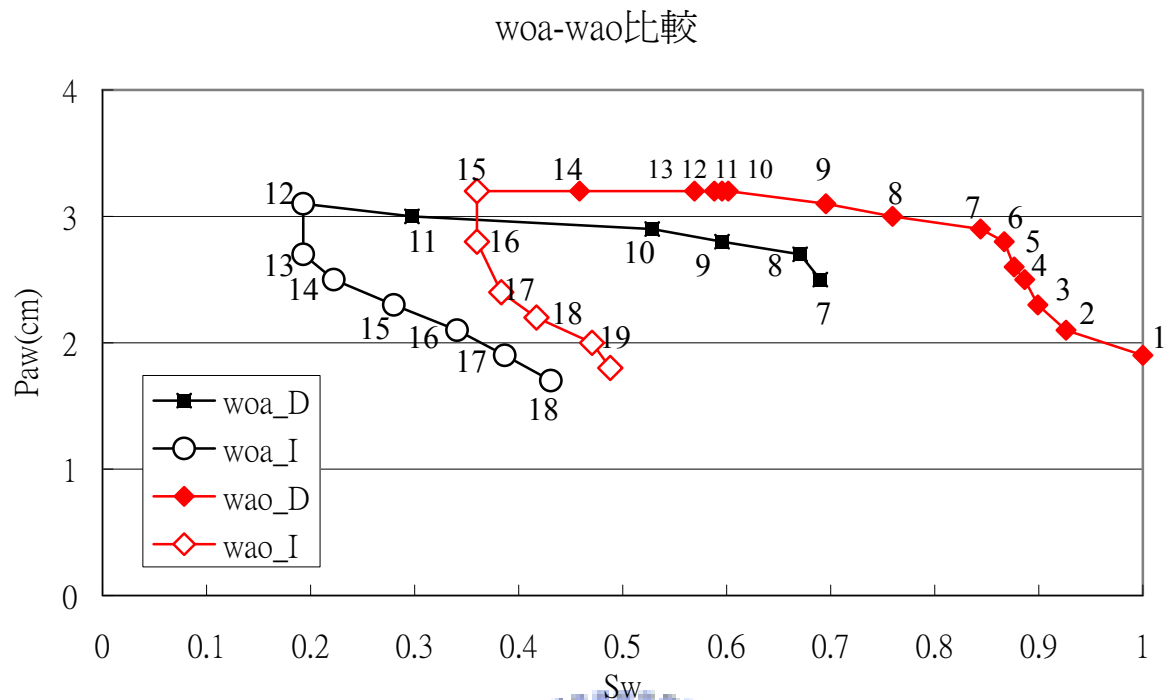


圖 6-50 W-O-A~W-A-O 情況壓力-飽和度關係

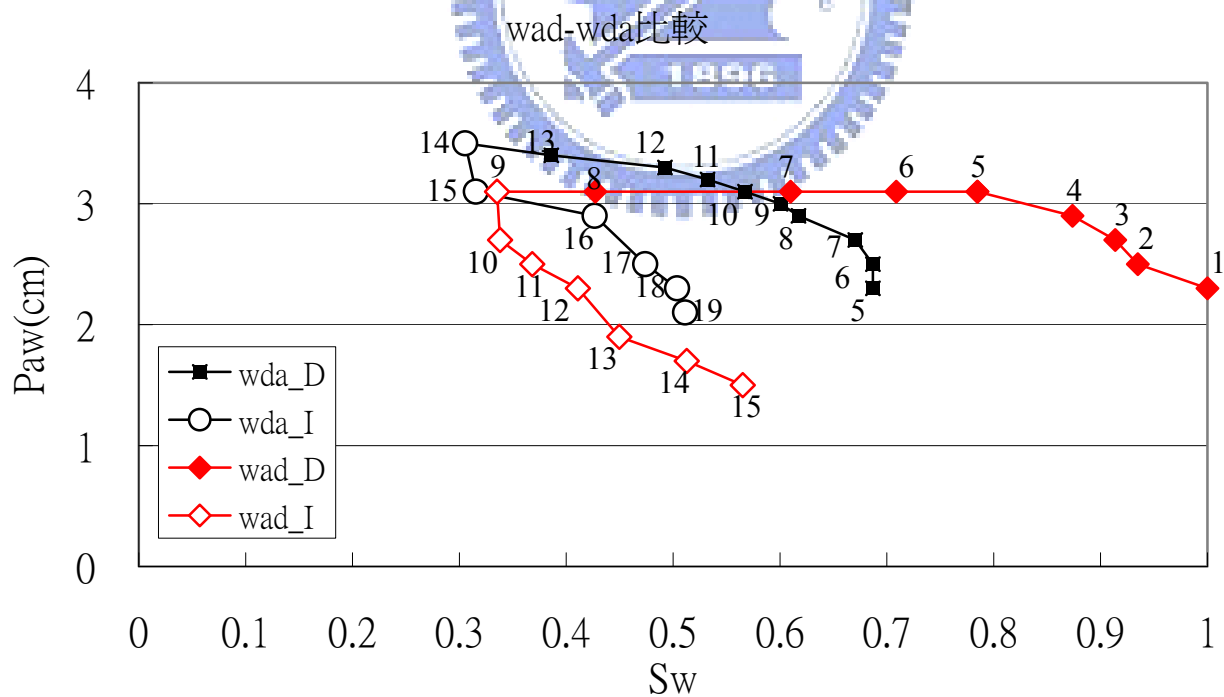


圖 6-51 W-A-D~W-D-A 情況壓力-飽和度關係

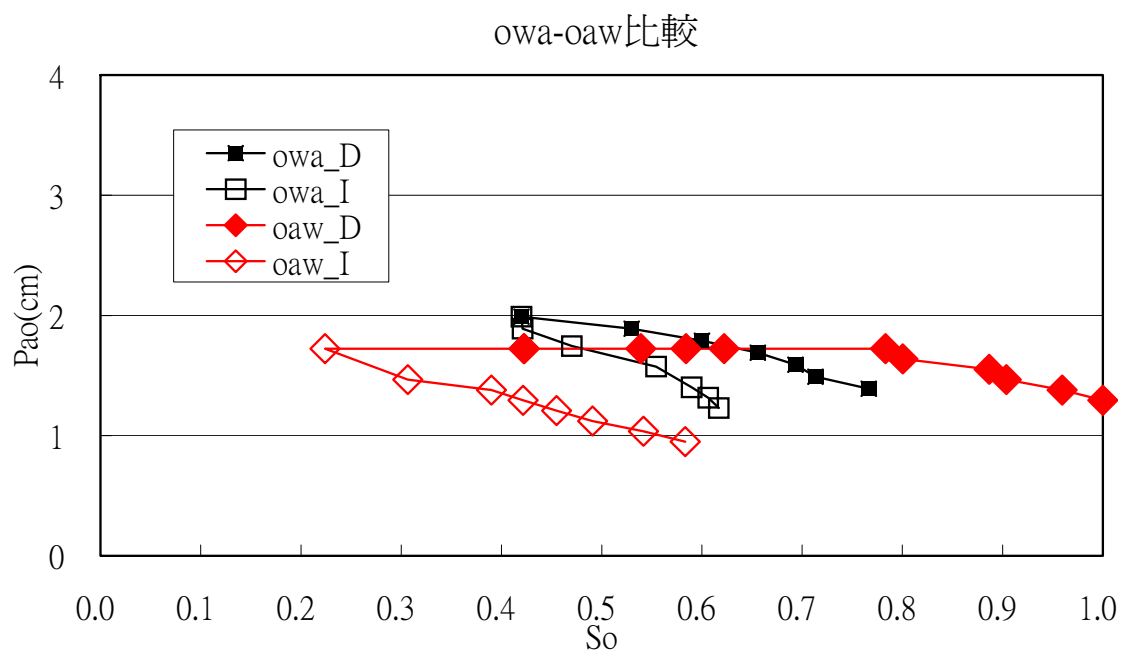


圖 6-52 O-W-A~O-A-W 情況壓力-飽和度關係

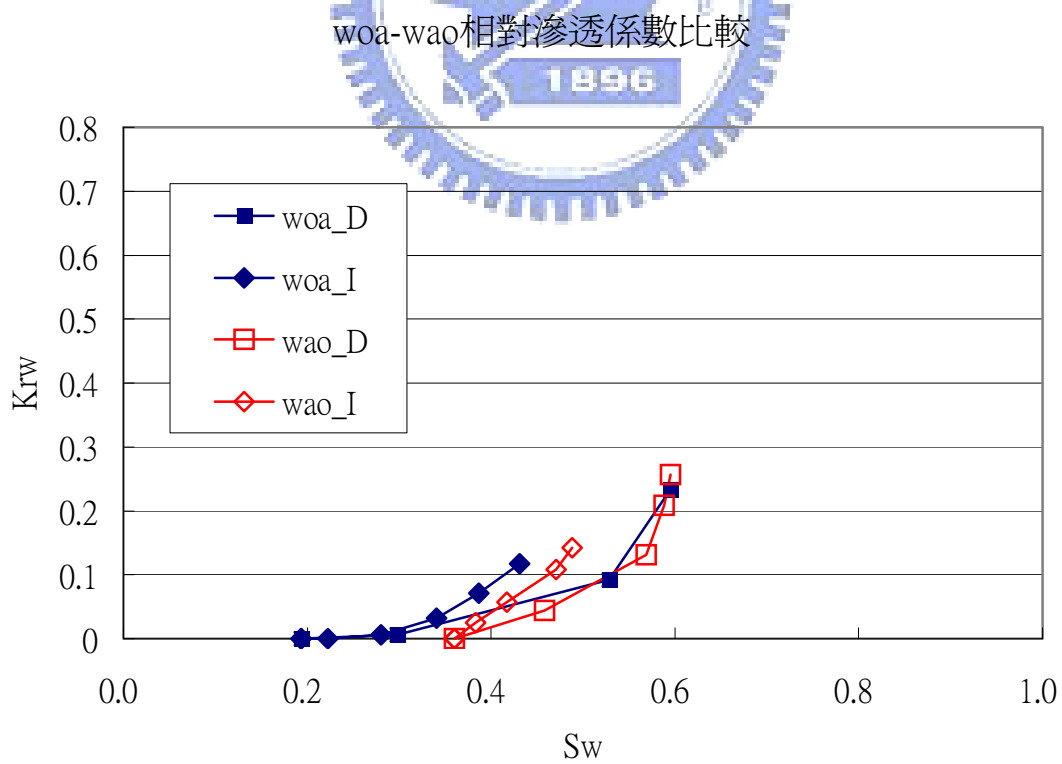


圖 6-53 W-O-A~W-A-O 相對滲透係數比較

wda-wad相對滲透係數比較

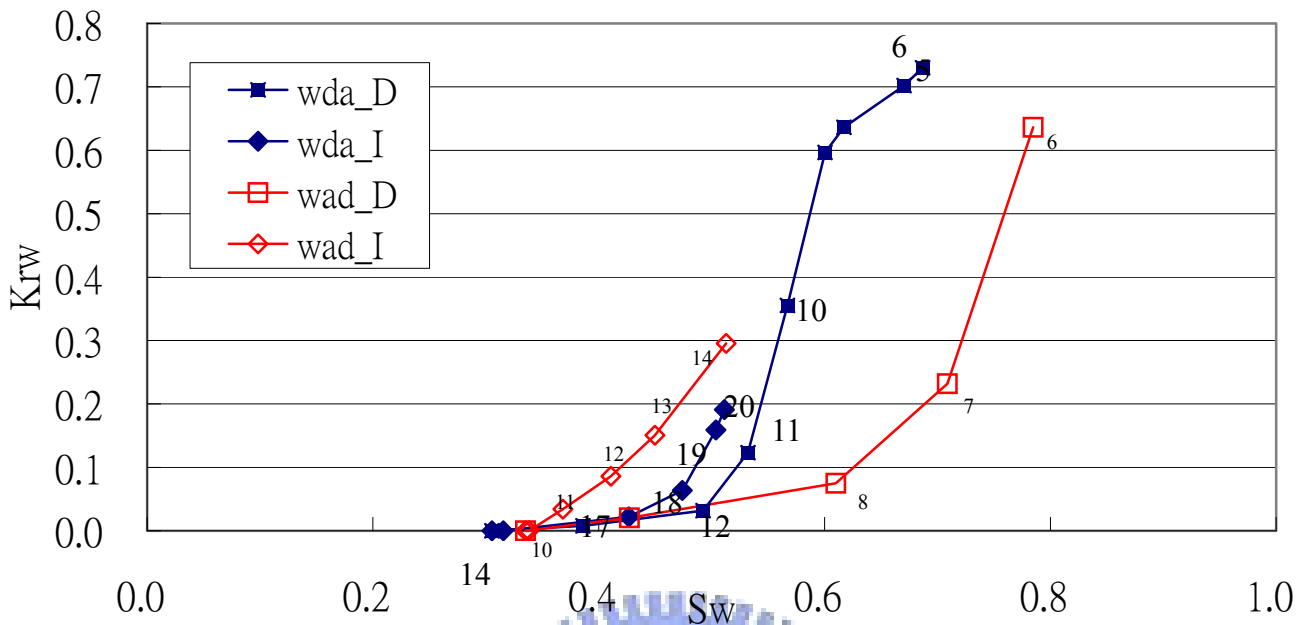


圖 6-54 W-D-A~W-A-D 相對滲透係數比較

oaw-owa相對滲透係數比較

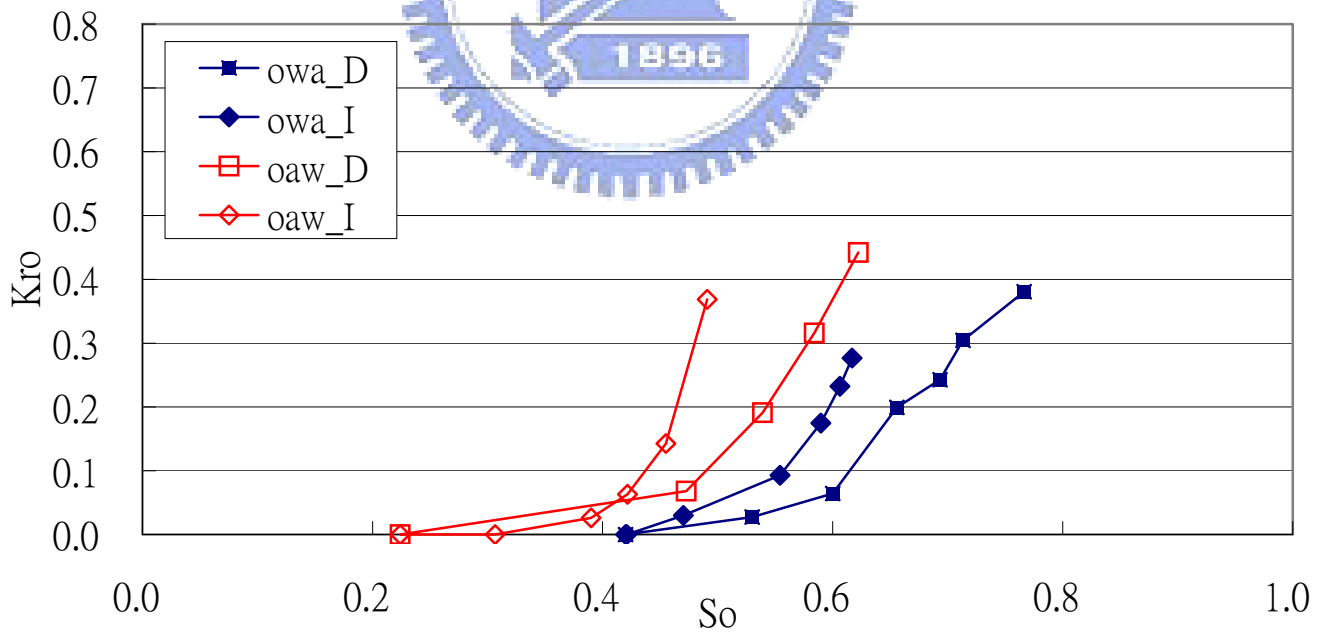


圖 6-55 O-A-W~O-W-A 相對滲透係數比較

EX_wao與Parler比較

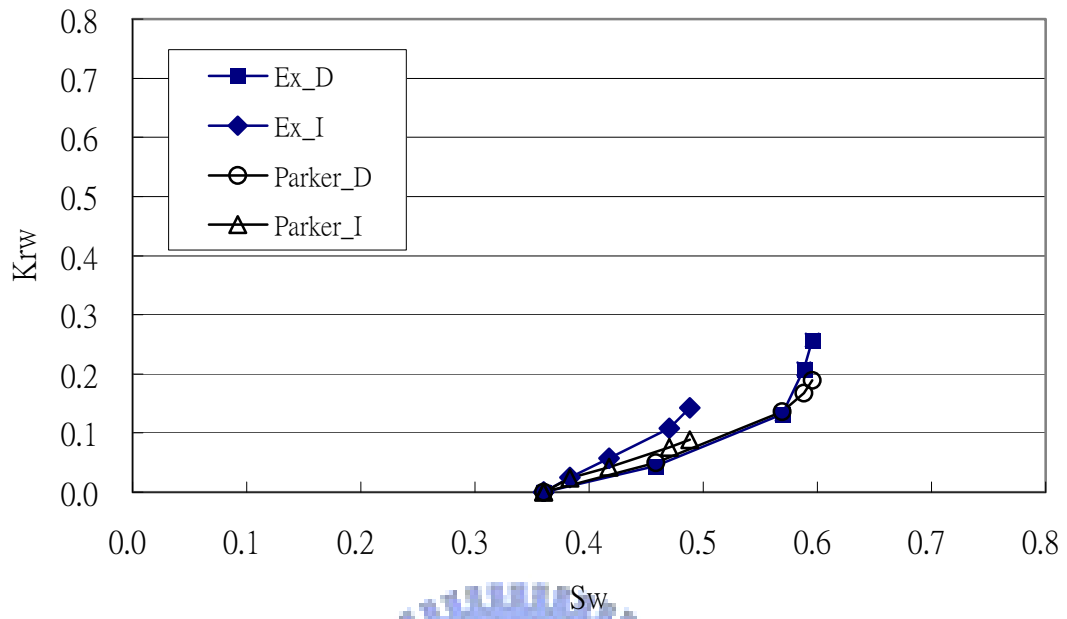


圖 6-56 實驗_W-O-A 與 Parker 比較

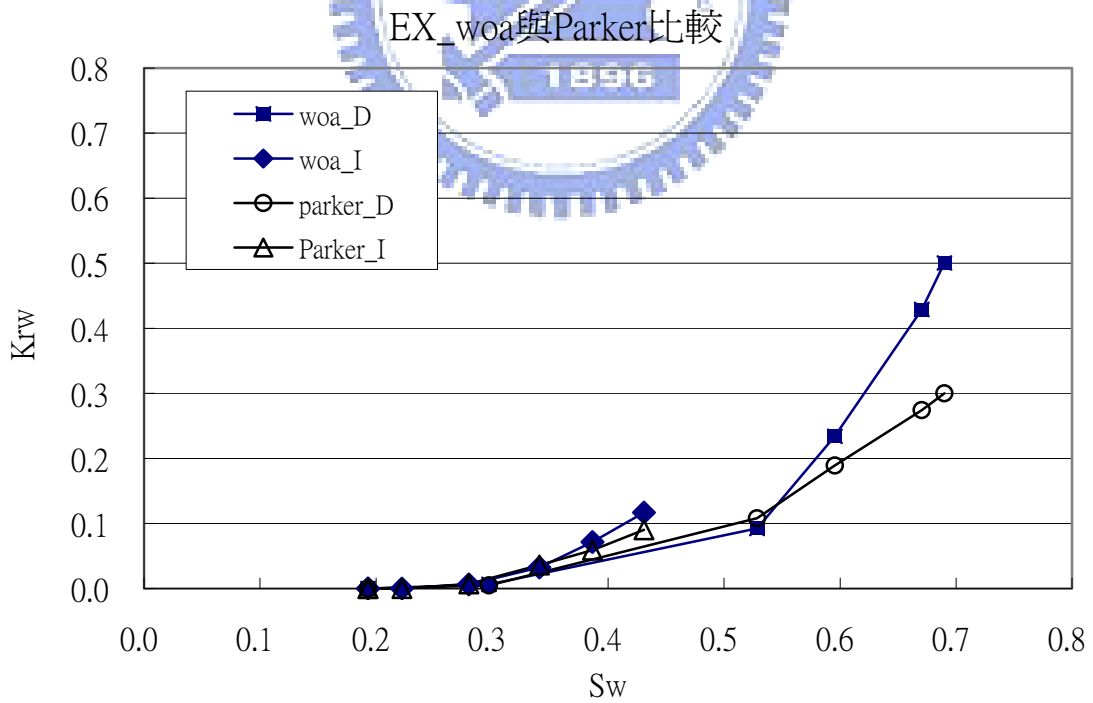


圖 6-57 實驗_W-A-O 與 Parker 比較

第七章 結論與建議

本研究主要貢獻是發展一新的可透視微模型的實驗平台，並以其進行含非水相液之多相流於孔隙介質中流動之實驗研究，包括多相共存時之 K_r - S - P 關係曲線實驗及流體對置換機制的觀察。研究主要內容分為四大部分：(1) 微模型實驗技術開發：整合高精度雷射雕刻，壓克力表面處理及數位影像分析等技巧，發展微模型實驗平台求得在水、空氣及 NAPLs 等多相共存下之完整 K_r - S - P 關係曲線，由於微模型本身可重複使用，因此整個研究成果之再現性甚佳。(2) 二相流體對微模型實驗之 K_r - S - P 關係。(3) 三相流體共存時之 K_r - S - P 關係曲線：以微模型實驗取得水、空氣、柴油 (LNAPL) 和四氯乙烷 (DNAPL) 三相共存時之 K_r - S - P 關係曲線，在同組實驗中各相進入多孔介質 (微模型) 的順序對於 K_r - S - P 關係有一定的影響，且在三相共存時，當非濕潤相之柴油與空氣兩者飽和度的比例不同時，會影響濕潤相的相對滲透。。以下本文內容中四大部分之重要結論整理如下：

7-1 結論

(1) 微模型實驗技術開發：

- 本實驗研究成功克服壓克力材料方面的親水性問題，利用在其表面塗上一層薄薄的矽酸鈉，改變水對微模型板表面之附著力，得以順利完成水、柴油、四氯乙烯及空氣各流體對之間的 K_r - S - P 實驗。
- 前人所做的微模型實驗方面之研究，大多以玻璃材質為主，是以溶劑侵蝕玻璃所作成之微模型，雖然微模型板內之孔隙形狀尚可控制，但在深度方面一直無法獲得很好的控制如原設計尺寸要求。本研究所用雷射雕刻技術可取代溶蝕的方法並可精準雕刻至所要求之孔隙大小及深度。

- 本研究成功發展出微模型實驗系統，包括微模型、壓力控制系統、CCD、XY 移動平台、試驗液體、影像處理軟體等構件。

(2) 二相流置換機制之微模型實驗與分析

- 置換機制實驗中可清楚的觀察到 I1 型汲取發生的情形，亦可由實驗拍攝的圖片中發現 R.Lenormand et al. (1983) 所提出的 In 型置換機制的確是會發生於孔中
- 由實驗數據中可以發現，本實驗引用理論機制公式所推估之各種理論機制門檻值，大致上與實驗所發生各種置換機制之毛細壓力一致

(3) 三相流體對微模型實驗之 $K_r - S - P$ 關係：

- 五組流體對 $K_r - S$ 實驗結果，發現汲取階段之相對滲透係數和飽和度近乎線性函數關係，但是排退階段之相對滲透係數和飽和度則是非線性函數關係，這個結果可由實驗過程的影像中看出是因為排退過程中非濕潤相分佈不均勻所致，另一方面，汲取階段時非濕潤相分佈較為均勻，濕潤相的相對滲透係數相對有較佳之連接性，由於濕潤相的相對滲透係數可被當作是微模型中濕潤相佔據孔頸單元數目之函數，而濕潤相佔據孔頸單元數目和飽和度是線性關係，因此汲取階段之相對滲透係數和飽和度近乎線性函數關係。
- 隨著濕潤性之增加，濕潤相殘留飽和度會降低，隨著界面張力之增加，濕潤相殘留飽和度會增加，濕潤相殘留飽和度會依水~四氯乙烷、水~柴油，柴油~空氣，四氯乙烷~空氣及水~空氣等流體對而增加。

(4) 三相流體共存時之 $K_r - S - P$ 關係曲線：

- 在傳統上處理三相共存的問題，並不考量不同相的流體進入多孔介質的先後次序，由本研究結果顯示 $K_r - S - P$ 關係受各相流體進入孔隙介質（微模型）先後順序的影響。就 W-D-A(水-四氯乙烷-空氣)與 W-O-A(水-柴油-空氣)兩組實驗比較，由實驗觀察得到，當排退過程結束時，四氯乙烷殘留在微模型中的殘留量大於柴油的殘留量。

- 由實驗觀察的結果，當三相共存時，在固定的濕潤相飽和度下，非濕潤相柴油與空氣飽和度間的比例，會影響濕潤相的相對滲透係數。此亦顯示以往模擬多相流傳輸時多將三相共存的情形簡化為兩相來處理可能帶來誤差。
- 應用 Parker 經驗公式由三相 P-S 關係所得之三相 K_r -S 關係經驗曲線，和實驗曲線在趨勢上大致能互相符合，尤其是 W-O-A 流體對推估值與實驗比較結果最佳。

7-2 建議

1. 本實驗的微模型的孔頸尺寸是屬於粗砂孔隙，建議未來能縮小微模型的孔頸尺寸，朝向細砂孔隙、粉土孔隙尺寸的微模型實驗。
2. 建議未來進一步以考慮孔頸排列方向性之邏輯判斷，開發孔頸尺度置換機制模擬模式，以不同組流體對，分別作排退及汲取之 P-S 曲線模擬，當然模擬之初始條件及邊界條件要能有擴充到與大型微模型實驗之裝置相同之條件。
3. 井間介入性示蹤劑試驗(PITT) 是利用已知濃度示蹤劑與 NAPL 間反應後濃度減少量經逆向計算而間接估算得污染場址之非水相液殘留量，但一方面對其估算量實際上無法與現地真值作比對， 另一方面亦因現地土壤孔隙介值之不可透視， 故無法得知示蹤劑其反應過程之紀錄， 建議本研究若加大微模型板尺寸至相當規模， 有機會能解決目前 PITT 技術發展上之瓶頸。

參考文獻

1. 呂元鈞，非水相液滲透係數-飽和度-毛細壓力關係之微模型試驗研究，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，(2002)。
2. 陳鴻輝，壓密導致孔隙率變化對保水曲線的影響，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，(1990)。
3. 張良正、單信瑜、陳鴻輝、歐國隆，遲滯效應與尺度原則對非水相液於孔隙介質中傳輸模擬之影響，中國土木水利工程學刊，Vol 13, No4,(2001)。
4. 張良正、蔡瑞彬、陳鴻輝，應用微模型於流體對間至換機制之研究，中國土木水利工程學刊，Vol 18, No4,(2006)。
5. 陳鴻輝、張良正，以微模型實驗於三相毛細壓力飽和度滲透係數關係之研究，第六屆地下水資源及水質保護研討會，逢甲大學，(2004)。
6. Abriola, L. M., and G. F. Pinder, A multiphase approaches to the modeling of porous media contamination by organic compounds, *Water Resource Research*, 21(1): 19-26, (1985).
7. Baker, L. E., Three-phase relative permeability correlations, Paper 17369, *Society of Pet. Eng.*, (1988).
8. Bedient, P.B., H. S., Rifai, and C. J., Newell, Ground water contamination: transport and remediation”, *Englewood Cliffs/PTR Prentice Hall*, (1994).
9. Calhoun, Jr., J.C., Lewis, and R.C., Newman, Experiments on the capillary properties of porous solids, *Pet. Trans. AIME*: 189-196, (1949).
10. Chang L.C., H. H. Chen, H.Y. Shan, and J.P. Tsai, Effect of connectivity and wettability on the relative permeability of NAPLs, *Environmental geology*, Published online: 26 February, (2008).
11. Chen, H. H., L. C. Chang, H.Y. Shan, Simulation of multiphase flow of

- LNAPLs using experimental data of soil water characteristic curves, *Proceeding of the fifth International Conference on coast environment incorporating oil spill studies*, (2004).
12. Chen, H. H., , L. C. Chang, H.Y. Shan, Experimental Studies of NAPLs on Relationships of Permeability-Saturation and Capillary pressure-saturation, *6th International Conference on Hydro informatics*, Singapore, (2004).
 13. Corapcioglu, M.Y. and P. Fedirchuk, Glass bead micro model study of solute transport, *Journal of Contaminant Hydrology*, 36(1): 209-230, (1999).
 14. Delshad, M. and G. A.,Pope, Comparison of the three-phase relative permeability models, *Transport in Porous Media*, 4(1): 59-83, (1989).
 15. Demond, A. H. and P. V., Roberts, Effect of interfacial forces on two-phase capillary pressure-saturation relationships, *Water Resource Research*, 27(1): 423-437, (1991).
 16. Demond, A. H. and P. V. Roberts, Estimation of two-phase relative permeability relationships for organic liquid contaminants, *Water Resource Research*, 29(4): 1081-1090, (1993).
 17. Extrand, C. W. and Y. Kumagait, An Experimental Study of Contact Angle Hysteresis, *Journal of Colloid and Interface Science*, 191(3):378-383, (1997).
 18. Guarnaccia, J. F., G. F. Pinder, and M. Fishman, NAPL, Simulator Documentation, Final Report, *EPA Cooperative Agreement No. CR-820499*, (1997).
 19. Haines, W. B., Studies in the Physical Properties of Soil: The Hyeteresis Effect in Capillary Properties and the Models of Moisture, *Journal of Agricultural Science*, 20(3):97-116, (1930).

20. Hoa, H. T., R. Gaudu, and C. Thirriot, Influence of the hysteresis effect on transient flows in saturated-unsaturated porous media, *Water Resource Research* 13(4): 992-996, (1977).
21. Jia. C., K. Shing, and Y.C. Yortsos, Visualization and Simulation of Non-aqueous Phase Liquids Solubilization in pore networks, *Journal of Contaminant Hydrology*, 35(4): 363-387, (1999).
22. Kool, J. B., and J. C. Parker, Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties, *Water Resource Research*, 23(2): 105-114, (1987).
23. Lenhard, R. J., and J. C. Parker, Measurement and Prediction of Saturation-Pressure Relationships in Three-Phase Porous Media Systems, *Journal of Contaminant Hydrology*, 1(3): 407-424, (1987).
24. Lenhard, R. J., M. Oostrom, C. S. Simmons, and M.D. White, Investigation of density-dependent gas advection of trichloroethylene: Experiment and a model validation exercise, *Journal of Contaminant Hydrology*, 19(4): 47-67, (1995).
25. Lenormand, R., C. Zarcone and A. Sarr, Mechanism of the Displacement of One Fluid by Another in A Network of Capillary Ducts, *Journal of Fluid Mechanics*, 135(2):337-353, (1983).
26. Leverett, M. C., Capillary behavior in porous solids, *Trans. AIME*, 142(1): 152-169, (1941).
27. Mercer, J. W., and R. M. Cohen, A review of immiscible fluids in the subsurface models, characterization and remediation, *Journal of Contaminant Hydrology*, 6(4): 107-163, (1990).
28. Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of

- unsaturated porous media, *Water Resource Research.*, 12(3): 513-522, (1976).
29. Oren P.E. and W.V., Pinczewski, Fluid distribution and pore-scale displacement mechanisms in drainage three-phase flow, *Transport in Porous Media*, 20(1-2): 105-133, (1995).
30. Oostrom, M., and R. J. Lenhard, Comparison of relative permeability-saturation-pressure parametric models for infiltration and redistribution of a light Non aqueous-phase liquid in sandy porous media, *Advances in Water Resources*, 21(2): 145-157, (1998).
31. Parker, J. C. and R. J. Lenhard, A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: Saturation-pressure relations, *Water Resource Research*, 23(12): 2187-2196, (1987).
32. Parker, J. C. and R. J. Lenhard, A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: Permeability-Saturation relations, *Water Resource Research*, 23(12): 2197-2206, (1987).
33. Parker, J. C., R. J. Lenhard, and T. Kuppusamy, A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media, *Water Resource Research*, 23(4): 618-624, (1987).
34. Patzek, T.W., Kristensen, J.D., Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: Two phase creeping flow, *Journal Colloid Interface Science*, 236 (2): 305–317, (2001).
35. Patzek, T.W., Silin, D.B., Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: I. One-phase creeping flow. *Journal Colloid Interface Science*, 236 (2): 295– 304, (2001).
36. Pinder, G. F., L. M. Abriola, On the simulation of Non-aqueous phase organic

- compounds in the subsurface, *Water Resource Research*, 22(9): 109-119, (1986).
37. Soll, W.E. and J.L. Wilson, Micro model Studies of three-Fluid Porous Media Systems: Pore-Scale Process Relating to Capillary Pressure-Saturation Relationships, *Water Resource Research*, 29(9): 963-2974, (1993).
38. Stone, H. L., Estimation of three-phase relative permeability and residual oil data, *Journal Can. Pet. Technology*, 12(1): 53-61, (1973).
39. Wan J. and J. L. Wilson, Visualization of the role of the gas-water interface on the fate and transport of colloids in porous media, *Water Resource Research*, 30(1): 11-23, (1994).
40. Wardlaw, N. C., The effects of geometry, wettability, viscosity and interfacial tension on trapping in single pore-throat pairs, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 16(3):21-27, (1982).
41. Wardlaw, N. C. and Y. Li, Fluid Topology, Pore Size and Aspect Ratio during Imbibition, *Transport in Porous Media*, 3(1): 17-34, (1988).
42. Lenormand, R., C. Zarcone and A. Sarr, Mechanism of the Displacement of One Fluid by Another in A Network of Capillary Ducts, *Journal of Fluid Mechanics*, 135(2):337-353, (1983).
43. Lenormand, R. and C. Zarcone, Role of Roughness and Edges during Imbibition in Square Capillaries, *SPE of AIME, Annual Meeting*, 1-17, (1984).
44. Li, Y. and N. C. Wardlaw, The Influence of Wettability and Critical Pore Throat Size Ratio on Snap-Off, *Journal of Colloid and Interface Science*, 109(2): 461-472, (1986).
45. Parker, J. C., Multiphase Flow and Transport in Porous Media, *Reviews of Geophysics*, 27(3): 311-328, (1989).

46. van Geel, P. J., and J. F. Sykes, Laboratory and Model Simulations of A LNAPL Spill in A Variably-Saturated Sand: Comparison of Laboratory and Model Results, *Journal of Contaminant Hydrology*, 17(3): 27-53, (1994).
47. van Genuchten, M. Th., A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of American Journal*, 44(1): 892-898, (1980).
48. Wardlaw, N. C., Y. Li, and D. Forbes, Pore Throat Size Correlation from Capillary Pressure Curve, *Transport in Porous Media*, 2(1):597-614, (1987).
49. Williams, P.J. The Surface of the Earth, an introduction to geotechnical science, *Longman Inc.*, New York, (1982).



附錄一 多相流數值模擬 NAPL Simulator 介紹

控制方程式

質量守恆方程式

NAPL Simulator所考慮的為一個三相流系統，此系統受重力、黏滯力以及毛細管壓力所控制，基本的通式如式(1)下：

$$\frac{\partial(\varepsilon S_{\alpha} \rho_i^{\alpha})}{\partial t} = -\nabla \cdot [\varepsilon S_{\alpha} \rho_i^{\alpha} V^{\alpha}] + \nabla \cdot [\varepsilon S_{\alpha} \rho^{\alpha} D^{\alpha} \cdot \nabla (\frac{\rho_i^{\alpha}}{\rho^{\alpha}})] - \varepsilon S_{\alpha} \kappa_i^{\alpha} \rho_i^{\alpha} + \rho_i^{\alpha} Q^{\alpha} + \hat{\rho}_i^{\alpha} \quad (1)$$

上式中，等號左邊為計算 α 相中成份 i 之質量隨著時間之變化率；等號右邊第一項為因對流效應而產生 α 相之淨流出量、第二項為在孔隙介質中因為流動的路徑及速度的差異所造成的延散(Dispersion)、第三項為考慮NAPL在土壤中會受生物及化學變化而產生的衰變(Decay)、第四項為源流(Source)或是沉流(Sink)、最後一項為各相界面之間的質量交換。其中，

ε : 孔隙介質的孔隙率

S_{α} : α 相的飽和度

ρ_i^{α} : α 相中之成份 i 的質量濃度[M/L³]

V^{α} : α 相的速度[L/T]，為一向量(Vector)

D^{α} : α 相的延散係數[L²/T]，為一對稱的二階張量(Symmetric second-order tensor)

Q^{α} : 源流或沉流[1/T]

κ_i^{α} : α 相中之成份 i 的衰退係數[1/T]

$\hat{\rho}_i^{\alpha}$: 各相界面之間的質量交換量[M/L³T]

其中，利用

- 亨利定律求在達平衡時，溶於水中的有機相揮發到氣相之質量交換
- 速率係數求在達平衡時，有機相溶於水相及蒸發至氣相之質量交換
- 分配係數求在達平衡時，溶於水中的有機相被固相所吸附之質量交換

在式(2)中， (i, α) 表在 α 相中的 i 成分，在給適當定義後，可完整的描述有機物在孔隙介質中的傳輸

- ◆ 若代表水相流(Water-Phase Flow)控制方程式，則其中 $(i, \alpha) = (n, W)$ 如式(2)
- ◆ 若代表有機物溶解到水相之傳輸控制方程式，則其中 $(i, \alpha) = (n, W)$ 如式(3)

◆ 若代表有機相流(NAPL-Phase Flow)控制方程式，則其中 $(i,\alpha)=(n,N)$ 如式(4)

◆ 若代表有機物揮發到氣相之傳輸控制方程式，則其中 $(i,\alpha)=(n,G)$ 如式(5)

◆ 若代表氣相流(Gas-Phase Flow)控制方程式，則其中 $(i,\alpha)=(n,G)$ 如式(6)

$$\frac{\partial(\varepsilon S_W \rho^W)}{\partial t} + \nabla \cdot [\varepsilon S_W \rho^W V^W] = \rho^W Q^W + E_n^W - E_{n/W}^G - E_{n/W}^S \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon S_W \rho_n^W)}{\partial t} = & -\nabla \cdot [\varepsilon S_W \rho_n^W V^W] + \nabla \cdot \left[\varepsilon S_W \rho^W D^W \cdot \nabla \left(\frac{\rho_n^W}{\rho^W} \right) \right] \\ & - \varepsilon S_W \kappa_n^W \rho_n^W + \rho_n^W Q^W + \hat{\rho}_n^W \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon S_N \rho^N)}{\partial t} + \nabla \cdot [\varepsilon S_N \rho^N V^N] = \rho^N Q^N - E_n^W - E_n^G \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon S_G \rho_n^G)}{\partial t} = & -\nabla \cdot [\varepsilon S_G \rho_n^G V^G] + \nabla \cdot \left[\varepsilon S_G \rho^G D^G \cdot \nabla \left(\frac{\rho_n^G}{\rho^G} \right) \right] \\ & - \varepsilon S_G \kappa_n^G \rho_n^G + \rho_n^G Q^G + \hat{\rho}_n^G \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon S_G \rho^G)}{\partial t} + \nabla \cdot [\varepsilon S_G \rho^G V^G] = \rho^G Q^G + E_n^G + E_{n/W}^G \quad (6)$$

其中

E_n^W :有機物從NAPL相溶解至水相

$E_{n/W}^G$:溶解至水相的有機物揮發至氣相

E_n^G :有機物從NAPL相揮發至氣相

$E_{n/W}^S$:溶解至水相的有機物被固體所吸附

➤ 達西定律

式(2)~式(6)中各相的速度可運用推廣的達西定律來求得，其基本的通式如式(7)

$$V^\alpha = -\frac{k \kappa_{r\alpha}}{\varepsilon S_\alpha \mu^\alpha} \cdot (\nabla P^\alpha - \gamma^\alpha \nabla Z) \quad , \alpha = W, N, G \quad (7)$$

上式中

P^α : α 相的壓力[M/(LT²)]

$\gamma^\alpha = \rho^\alpha g$: α 相的比重[M/(L²T²)]

k : 比滲透係數(Intrinsic permeability)[L²]，為一純量(Scalar)

$\kappa_{r\alpha}$: 相對滲透係數

由式(7)可得到各相的速度如下

水相速度:

$$V^W = -\frac{k\kappa_{rW}}{\varepsilon S_W \mu^W} \bullet (\nabla P^W - \gamma^W \nabla z) \quad (8)$$

NAPL相速度:

$$V^N = -\frac{k\kappa_{rN}}{\varepsilon S_N \mu^N} \bullet (\nabla(P^W + P_{cNW}) - \gamma^N \nabla z) \quad (9)$$

其中 $P_{cNW} = P_{cNW}(S_W) = P^N - P^W$

氣相速度:

$$V^G = -\frac{k\kappa_{rG}}{\varepsilon S_G \mu^G} \bullet (\nabla(P^W + P_{cNW} + P_{cGN}) - \gamma^G \nabla z) \quad (10)$$

其中 $P_{cGN} = P_{cGN}(S_{Tw}) = P^G - P^N$

依據溼潤度的考量，由最溼潤到最不溼潤依序為水-NAPL-空氣，將上式中之 κ_{rW} 、 κ_{rN} 、 κ_{rG} 分別假設為水及總液體飽和度的函數，則如式(11)~(13)所示:

$$\kappa_{rW} = \kappa_{rW}(S_W) \quad (11)$$

$$\kappa_{rN} = \kappa_{rN}(S_W, S_{Tw}) \quad (12)$$

$$\kappa_{rG} = \kappa_{rG}(S_{Tw}) \quad (13)$$

其中

$$S_{Tw} \text{ (總液體飽和度)} = S_W + S_N \quad (14)$$

數值方法

NAPL Simulator模式的邏輯運算是以 Spillette et al.(1973)所提出之 Total

velocity formulation為基礎，在時間的離散處理是採用隱式法(Implicit-in-time)，而在空間上的離散處理是利用Hermite collocation 有限元素法(Finite-element method)採用矩形元素，並採取疊代的方式(Iterative scheme)，以皮卡法(Picard method)來求得控制方程式的解。

應用NAPL Simulator模式來模擬NAPL之傳輸分佈，各相控制方程式重新整理為模式使用的形式如式(15)~式(17)

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} + \nabla \cdot q^w \\ &= \frac{1}{\rho^w} \left[\rho^w Q^w + E_n^w - E_{n/w}^G - E_{n/w}^S - \left(\varepsilon S_w \frac{\partial \rho^w}{\partial t} + q^w \cdot \nabla \rho^w \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

其中， $q^w = \varepsilon S_w V^w$

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} + \nabla \cdot q^w = Q^w + \frac{E_n^w - E_{n/w}^G - E_{n/w}^S}{\rho^{wr}} \\ & - \frac{r^w}{\rho^{wr}} \left[\varepsilon S_w \frac{\partial \rho_n^w}{\partial t} + q^w \cdot \nabla \rho_n^w + \rho_n^w \left(\varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} + \nabla \cdot q^w \right) - \rho_n^w Q^w \right] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon S_w \frac{\partial \rho_n^w}{\partial t} + q^w \cdot \nabla \rho_n^w + \rho_n^w \left(\varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} + \nabla \cdot q^w \right) - \rho_n^w Q^w \\ &= -\varepsilon S_w \kappa_n^w \rho_n^w + \left(\frac{\rho^{wr}}{\rho^w} \right) \nabla \cdot \left[\varepsilon S_w D^w \cdot \nabla \rho_n^w \right] + \left(E_n^w - E_{n/w}^G - E_{n/w}^S \right) \end{aligned} \quad (17)$$

將式(17)之等號右邊項代入式(16)之中括號內，可得下式

水相傳輸方程式(Water-Phase Flow Equation):

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} + \nabla \cdot q^w = Q^w + \frac{E_n^w - E_{n/w}^G - E_{n/w}^S}{\rho^{Nr}} \\ & + r^w \left\{ \frac{\varepsilon S_w \kappa_n^w \rho_n^w}{\rho^{wr}} - \frac{\nabla \cdot \left[\varepsilon S_w D^w \cdot \nabla \rho_n^w \right]}{\rho^w} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $r^w = \left(1 - \rho^{wr} / \rho^{Nr} \right)$

將式(15)之等號左邊兩項代入式(17)之等號左邊的括號內，重新整理可得
水相中污染值傳輸方程式(Contaminant Transport Equation in Water-Phase):

$$\begin{aligned} & \left[\varepsilon S_W + \left(1 - \frac{\rho_n^W}{\rho^{Nr}} \right) \rho^b K_d \right] \frac{\partial \rho_n^W}{\partial t} + \left[\frac{\varepsilon S_W \rho^W}{\rho^{Wr}} + \left(1 - \frac{\rho_n^W}{\rho^{Nr}} \right) \rho^b K_d \right] \kappa_n^W \rho_n^W \\ & + q^W \bullet \nabla \rho_n^W - \nabla \bullet [\varepsilon S_W D^W \bullet \nabla \rho_n^W] = (\bar{\rho}_n^W - \rho_n^W) Q^W \\ & + \left(1 - \frac{\rho_n^W}{\rho^{Nr}} \right) \left[C_n^W (\bar{\rho}_n^W - \rho_n^W) - C_{n/W}^G (H \rho_n^W - \rho_n^G) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

NAPL相傳輸方程式(NAPL-Phase Flow Equation):

$$\varepsilon \frac{\partial S_N}{\partial t} + \nabla \bullet q^N = Q^N - \frac{(E_n^W + E_n^G)}{\rho^{Nr}} \quad (20)$$

其中， $q^N = \varepsilon S_N V^N$

氣相中污染值傳輸方程式(Contaminant Transport Equation in Gas-Phase):

$$\begin{aligned} & \varepsilon S_G \frac{\partial \rho_n^G}{\partial t} + q^G \bullet \nabla \rho_n^G - \nabla \bullet [\varepsilon S_G D^G \bullet \nabla \rho_n^G] + \left(\frac{\rho^G}{\rho^{Gr}} \right) \varepsilon S_G \kappa_n^G \rho_n^G \\ & = (\bar{\rho}_n^G - \rho_n^G) Q^G + \left(1 - \frac{\rho_n^G}{\rho^{Nr}} \right) \left[C_n^G (\bar{\rho}_n^G - \rho_n^G) + C_{n/W}^G (H \rho_n^W - \rho_n^G) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

其中， $q^G = \varepsilon S_G V^G$

氣相傳輸方程式(Gas-Phase Flow Equation):

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial S_G}{\partial t} + \nabla \bullet q^G = Q^G + \frac{E_n^G + E_{n/W}^G}{\rho^{Nr}} \\ & + r^G \left\{ \frac{\varepsilon S_G \kappa_n^G \rho_n^G}{\rho^{Gr}} - \frac{\nabla \bullet [\varepsilon S_G D^G \bullet \nabla \rho_n^G]}{\rho^G} \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

其中， $r^G = (1 - \rho^{Gr} / \rho^{Nr})$

利用 Spillette et al.(1973)所提出之 Total velocity formulation，經代數處理後
可得一壓力方程式及兩個飽和度方程式。

將式(18)、(20)及(22)相加，可得壓力方程式如下

$$\nabla \bullet (q^T) = (Q^W + Q^N + Q^G) - \frac{(E_{n/W}^S)}{\rho^{Nr}} + (\Gamma_n^W) + (\Gamma_n^G) \quad (23a)$$

將上式的壓力方程式寫成對時間的離散(Time-discrete)形式，如式(23b)所示。

$$\nabla \bullet (q^T)^{k+1} = (Q^W + Q^N + Q^G)^{(k)} - \frac{(E_{n/W}^S)^{(k+1)*}}{\rho^{Nr}} + (\Gamma_n^W)^{(k+1)*} + (\Gamma_n^G)^{(k+1)*} \quad (23b)$$

其中

$$q^T = q^W + q^N + q^G$$

$$(E_{n/W}^S)^{(k+1)*} = \rho^b K_d \frac{\rho_n^{W(k+1)*} - \rho_n^{W(k)}}{\Delta t} + \rho^b K_d \kappa_n^S \rho_n^{W(k+1)*} \quad (24)$$

$$(\Gamma_n^W)^{(k+1)*} = r^W \left\{ \frac{\varepsilon S_W \kappa_n^W \rho_n^W}{\rho^{Wr}} - \frac{\nabla \bullet [\varepsilon S_W D^W \bullet \nabla \rho_n^W]}{\rho^W} \right\}^{(k+1)*} \quad (25)$$

$$(\Gamma_n^G)^{(k+1)*} = r^G \left\{ \frac{\varepsilon S_G \kappa_n^G \rho_n^G}{\rho^{Gr}} - \frac{\nabla \bullet [\varepsilon S_G D^G \bullet \nabla \rho_n^G]}{\rho^G} \right\}^{(k+1)*} \quad (26)$$

$(q^T)^k$:k 時刻 q^T 值

$(q^T)^{k+1}$:k+1 時刻 q^T 值

$(q^T)^{(k+1)*}$:由 k 時刻的 q^T 值經疊代所得之暫存的 q^T 值

將 q^W 、 q^N 、 q^G 寫成下式

$$\begin{aligned} q^W &= -\lambda_W^{(k+1)*} (\nabla P^{W(k+1)} - \gamma^{W(k+1)*} \nabla z) \\ q^N &= -\lambda_N^{(k+1)*} (\nabla [P^{W(k+1)} + P_{cNW}^{(k+1)*}] - \gamma^{N(k+1)*} \nabla z) \\ q^G &= -\lambda_G^{(k+1)*} (\nabla [P^{W(k+1)} + P_{cNW}^{(k+1)*} + P_{cGN}^{(k+1)*}] - \gamma^{G(k+1)*} \nabla z) \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $\lambda_\alpha = k \kappa_{ra} / \mu^\alpha$ ($\alpha=W, N, G$)

選擇式(18)及式(22)為飽和度方程式，透過代數上的處理將 q^W 及 q^G 改用 q^T 來表示。

$$q^W = f^W q^T + f^W \{ \lambda_N [\nabla P_{cNW} + \Delta \gamma_{WN} \nabla z] + \lambda_G [\nabla (P_{cNW} + P_{cGN}) + \Delta \gamma_{WG} \nabla z] \} \quad (28)$$

$$q^G = f^G q^T + f^G \{ \lambda_N [\nabla P_{cNW} + \Delta \gamma_{NG} \nabla z] + \lambda_W [\nabla (P_{cNW} + P_{cGN}) + \Delta \gamma_{WG} \nabla z] \} \quad (29)$$

其中

f^α 為流動分率(α 相的 fractional flow function)

$$f^\alpha = \lambda_\alpha / (\lambda_W + \lambda_N + \lambda_G) \quad (\alpha=W, G)$$

$$\Delta \gamma_{\alpha\beta} = \gamma^\alpha - \gamma^\beta$$

將式(18)及式(22)寫成時間的離散(Time-discrete)形式
水相傳輸方程式(Water-Phase Flow Equation)

$$\varepsilon \frac{S_W^{(k+1)} - S_W^{(k)}}{\Delta t} + \nabla \bullet q^{W(k+1)} = Q^{W(k)} + \frac{(E_n^W - E_{n/W}^G - E_{n/W}^S)^{(k+1)*}}{\rho^{Nr}} + (\Gamma_n^W)^{(k+1)*} \quad (30)$$

其中

$$(E_n^W)^{(k+1)*} = \{ C_n^W (\bar{\rho}_n^W - \rho_n^W) \}^{(k+1)*}$$

$$(E_{n/W}^G)^{(k+1)*} = \{ C_{n/W}^G (H \rho_n^W - \rho_n^G) \}^{(k+1)*}$$

且由式(28)可知

$$q^{W(k+1)} = f^{W(k+1)} q^{T(k+1)*} + (f^W \lambda_N)^{(k+1)} [\nabla P_{cNW}^{(k+1)} + \Delta \gamma_{WN}^{(k+1)*} \nabla z] \\ + (f^W \lambda_N)^{(k+1)} [\nabla (P_{cNW}^{(k+1)} + P_{cGN}^{(k+1)}) + \Delta \gamma_{WG}^{(k+1)*} \nabla z]$$

氣相傳輸方程式(Gas-Phase Flow Equation)

$$-\varepsilon \frac{S_{Tw}^{(k+1)} - S_{Tw}^{(k)}}{\Delta t} + \nabla \bullet q^{G(k+1)} = Q^{G(k)} + \frac{(E_n^G + E_{n/W}^G)^{(k+1)}}{\rho^{Nr}} + (\Gamma_n^G)^{(k+1)*} \quad (31)$$

其中

$$S_{Tw}=(1-S_G)$$

$$(E_n^G)^{(k+1)*} = \left\{ C_n^G (\bar{\rho}_n^G - \rho_n^G) \right\}^{(k+1)*}$$

且由式(29)可知

$$\begin{aligned} q^{G(k+1)} &= f^{G(k+1)} q^{T(k+1)*} - (f^G \lambda_N)^{(k+1)} \left[\nabla P_{cGN}^{(k+1)} + \Delta \gamma_{NG}^{(k+1)*} \nabla z \right] \\ &- (f^G \lambda_W)^{(k+1)} \left[\nabla (P_{cNW}^{(k+1)} + P_{cGN}^{(k+1)}) + \Delta \gamma_{WG}^{(k+1)*} \nabla z \right] \end{aligned}$$

利用皮卡法，以 k 時刻的 S_W 及 S_{Tw} 值代入式(30)、(31)中求得 k+1 時刻的 S_W 及 S_{Tw} 。

將式(28)代入式(30)中，可得

$$\begin{aligned} &\varepsilon \frac{S_W^{(k+1,m+1)} - S_W^{(k)}}{\Delta t} + \nabla \bullet (f^{W(k+1,m)} q^{T(k+1)*}) \\ &+ \nabla \bullet \left\{ (f^W \lambda_N)^{(k+1,m)} \left[\nabla P_{cNW}^{(k+1,m+1)} + \Delta \gamma_{WN}^{(k+1)*} \nabla z \right] \right\} \\ &+ \nabla \bullet \left\{ (f^W \lambda_G)^{(k+1,m)} \left[\nabla (P_{cNW}^{(k+1,m+1)} + P_{cGN}^{(k+1,m+1)}) \right] + \Delta \gamma_{WG}^{(k+1)*} \nabla z \right\} \\ &= Q^{W(k)} + \frac{(E_n^W - E_{n/W}^G - E_{n/W}^S)^{(k+1)*}}{\rho^{Nr}} + (\Gamma_n^W)^{(k+1)*} \end{aligned} \quad (32)$$

其中

$S_W^{(k+1,m)}$ 表 k+1 時刻已知之第 m 個疊代值

$S_W^{(k+1,m+1)}$: 表 k+1 時刻欲求之解

將式(32)之 $\nabla P_{cNW}^{(k+1,m+1)}$ 利用 1 階泰勒級數(Taylor series)展開如下

$$\nabla P_{cNW}^{(k+1,m+1)} \approx \nabla P_{cNW}^{(k+1,m)} + \nabla \left[\left(\frac{dP_{cNW}}{dS_W} \right)^{(k+1,m)} \delta S_W^{(k+1,m+1)} \right] \quad (33)$$

其中 $\delta S_W^{(k+1,m+1)} = S_W^{(k+1,m+1)} - S_W^{(k+1,m)}$ ，為疊代的增加量。

將式(33)簡化如下

$$\nabla P_{cNW}^{(k+1,m+1)} \approx \nabla P_{cNW}^{(k+1,m)} + \left(\frac{dP_{cNW}}{dS_W} \right)^{(k+1,m)} \nabla \delta S_W^{(k+1,m+1)} \quad (34)$$

當疊代的增加量變為零時，表示式(34)收斂至正解。同理 $\nabla P_{cGW}^{(k+1,m+1)}$ 利用尺度原則如式(35)

$$\frac{P_{cNW}}{\sigma_{NW}} = \frac{P_{cGN}}{\sigma_{GN}} = \frac{P_{cGW}}{\sigma_{GW}} \quad (35)$$

經整理可得

$$\begin{aligned} \nabla P_{cGW}^{(k+1,m+1)} &= \nabla \left(P_{cNW}^{(k+1,m+1)} + P_{cGN}^{(k+1,m+1)} \right) = \left(\frac{\sigma_{GW}}{\sigma_{NW}} \right) \nabla P_{cNW}^{(k+1,m+1)} \\ &= \left(\frac{\sigma_{GW}}{\sigma_{NW}} \right) \nabla P_{cNW}^{(k+1,m)} + \left(\frac{\sigma_{GW}}{\sigma_{NW}} \right) \left(\frac{dP_{cNW}}{dS_W} \right)^{(k+1,m)} \nabla \delta S_W^{(k+1,m+1)} \\ &\approx \nabla \left(P_{cNW}^{(k+1,m)} + P_{cGN}^{(k+1,m)} \right) + \left(\frac{\delta_{GW}}{\delta_{NW}} \right) \left(\frac{dP_{cNW}}{dS_W} \right)^{(k+1,m)} \nabla \delta S_W^{(k+1,m+1)} \end{aligned} \quad (36)$$

將式(34)及式(36)代入式(32)，可得

水相傳輸方程式(Water-Phase Flow Equation)

$$\begin{aligned} &\varepsilon \frac{\delta S_W^{(k+1,m+1)} + S_W^{(k+1,m)} - S_W^{(k)}}{\Delta t} + \nabla \bullet \left(f^W(k+1,m) q^{T(k+1)*} \right) \\ &+ \nabla \bullet \left\{ \left(f^W \lambda_N \right)^{(k+1,m)} \left[\nabla P_{cNW}^{(k+1,m)} + \left(\frac{dP_{cNW}}{dS_W} \right)^{(k+1,m)} \nabla \delta S_W^{(k+1,m+1)} + \Delta \gamma_{WN}^{(k+1)*} \nabla z \right] \right\} \\ &+ \nabla \bullet \left\{ \left(f^W \lambda_G \right)^{(k+1,m)} \left[\left(\frac{\sigma_{GW}}{\sigma_{NW}} \right) \left(\frac{dP_{cNW}}{dS_W} \right)^{(k+1,m)} \nabla \delta S_W^{(k+1,m+1)} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \nabla \left(P_{cNW}^{(k+1,m)} + P_{cGN}^{(k+1,m)} \right) + \Delta \gamma_{WG}^{(k+1)*} \nabla z \right] \right\} \\ &= Q^{W(k)} + \frac{\left(E_n^W - E_{n/W}^G - E_{n/W}^S \right)^{(k+1)*}}{\rho^{Nr}} + \left(\Gamma_n^W \right)^{(k+1)*} \end{aligned} \quad (37)$$

做法同上，可得

氣相傳輸方程式(Gas-Phase Flow Equation)

$$\begin{aligned}
& -\varepsilon \frac{\delta S_{Tw}^{(k+1,m+1)} + S_{Tw}^{(k+1,m)} - S_{Tw}^{(k)}}{\Delta t} + \nabla \bullet \left(f^{G(k+1,m)} q^{T(k+1)*} \right) \\
& - \nabla \bullet \left\{ \left(f^G \lambda_N \right)^{(k+1,m)} \left[\nabla P_{cGN}^{(k+1,m)} + \left(\frac{dP_{cGN}}{dS_{Tw}} \right)^{(k+1,m)} \nabla \delta S_{Tw}^{(k+1,m+1)} + \Delta \gamma_{NG}^{(k+1)*} \nabla z \right] \right\} \\
& - \nabla \bullet \left\{ \left(f^G \lambda_W \right)^{(k+1,m)} \left[\left(\frac{\sigma_{GW}}{\sigma_{GN}} \right) \left(\frac{dP_{cGN}}{dS_{Tw}} \right)^{(k+1,m)} \nabla \delta S_{Tw}^{(k+1,m+1)} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \nabla \left(P_{cNW}^{(k+1,m)} + P_{cGN}^{(k+1,m)} \right) + \Delta \gamma_{WG}^{(k+1)*} \nabla z \right] \right\} \\
& = Q^{G(k)} + \frac{\left(E_n^G + E_{n/W}^G \right)^{(k+1)*}}{\rho^{Nr}} + \left(\Gamma_n^G \right)^{(k+1)*}
\end{aligned} \tag{38}$$

求解式(37)及式(38)， S_W 、 S_{Tw} 更新如下

$$S_W^{(k+1,m+1)} = S_W^{(k+1,m)} - \delta S_W^{(k+1,m)}$$

$$S_{Tw}^{(k+1,m+1)} = S_{Tw}^{(k+1,m)} - \delta S_{Tw}^{(k+1,m)}$$

一直疊代到 $\delta S_W^{(k+1,m)}$ 、 $\delta S_{Tw}^{(k+1,m)}$ 為一足夠小的值為止。

接下來將式(19)及式(21)之污染傳輸方程式寫成時間的離散形式，如式(39)及式(40)所示。

$$\begin{aligned}
& \left[\varepsilon S_W^{(k)} + \left(1 - \frac{\rho_n^{W(k+1,m)}}{\rho^{Nr}} \right) \rho^b K_d \right] \frac{\rho_n^{W(k+1,m+1)} - \rho_n^{W(k)}}{\Delta t} \\
& + \left[\frac{\varepsilon S_W^{(k)} \rho^{W(k+1,m)}}{\rho^{Wr}} + \left(1 - \frac{\rho_n^{W(k+1,m)}}{\rho^{Nr}} \right) \rho^b K_d \right] \kappa_n^W \rho_n^{W(k+1,m+1)} \\
& + q^{W(k+1)*} \bullet \nabla \rho_n^{W(k+1,m+1)} - \nabla \bullet \left[\left(\varepsilon S_W D^W \right)^{(k+1)*} \bullet \nabla \rho_n^{W(k+1,m+1)} \right] \\
& = \left(\bar{\rho}_n^W - \rho_n^{W(k+1,m+1)} \right) Q^{W(k)} \\
& + \left(1 - \frac{\rho_n^{W(k+1,m)}}{\rho^{Nr}} \right) \left[C_n^{W(k+1)*} \left(\bar{\rho}_n^W - \rho_n^{W(k+1,m+1)} \right) - C_{n/W}^{G(k+1)*} \left(H \rho_n^{W(k+1,m+1)} - \rho_n^{G(k+1,m)*} \right) \right]
\end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\varepsilon S_W^{(k)} \right) \frac{\rho_n^{G(k+1,m+1)} - \rho_n^{G(k)}}{\Delta t} \\
& + q^{G(k+1)*} \bullet \nabla \rho_n^{G(k+1,m+1)} - \nabla \bullet \left[\left(\varepsilon S_G D^G \right)^{(k+1)*} \bullet \nabla \rho_n^{G(k+1,m+1)} \right] \\
& + \left(\frac{\varepsilon S_G^{(k)} \rho^{G(k+1,m)} K_n^G}{\rho^{Gr}} \right) \rho_n^{G(k+1,m+1)} \\
& = \left(\bar{\rho}_n^G - \rho_n^{G(k+1,m+1)} \right) Q^{G(k)} \\
& + \left(1 - \frac{\rho_n^{G(k+1,m)}}{\rho^{Nr}} \right) \left[C_n^{G(k+1)*} \left(\bar{\rho}_n^G - \rho_n^{G(k+1,m+1)} \right) + C_{n/W}^{G(k+1)*} \left(H \rho_n^{W(k+1,m)*} - \rho_n^{G(k+1,m+1)} \right) \right]
\end{aligned} \tag{40}$$

其中 $\rho_n^{W(k+1,m)*}$ 及 $\rho_n^{G(k+1,m)*}$ 為第 m 次疊代及第 m-1 次疊代值之組合，如下所列

$$\rho_n^{\alpha(k+1,m)*} = \theta \rho_n^{\alpha(k+1,m)} + (1 - \theta) \rho_n^{\alpha(k+1,m-1)}, \quad \alpha = W, G$$

θ : Weighting parameter, $0 \leq \theta \leq 2$

由以上之推導，將式(23b)、式(37)、式(38)、式(39)與式(40)配合適當的初始條件及邊界條件，並利用皮卡法疊代，可求得上述控制方程式中之 $P^W(x,t)$ 、 $S_W(x,t)$ 、 $S_{Tw}(x,t)$ 、 $\rho_n^W(x,t)$ 及 $\rho_n^G(x,t)$ 等值。

掃描曲線(Scanning curve)的計算

溼潤相流體在渲排作用和汲取作用的兩種過程中，飽和度與毛細壓力之關係變化並不相同。飽和度與毛細壓力的關係在汲取與渲排作用的過程中，其路徑並不相同，此外在渲排作用曲線上任一點，皆可重新開始進行汲取作用，沿一掃描曲線到達汲取作用的曲線；同理，在汲取作用曲線上任一點，亦可重新開始進行渲排作用，並沿一新的掃描曲線到達渲排作用的曲線。在模式當中，汲取作用、渲排作用及掃描曲線之計算如下說明：

在模式中採用 van Genuchten 經驗式，如式(41)，其中下標(f)代表汲取、渲排及不同的掃描曲線。

$$h_{c(f)} = \left[\left(S_{e(f)} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/\eta} \left(a_{(f)} \right)^{-1} \tag{41}$$

$$S_{e(f)} = \frac{S_W - S_{r(f)}}{S_{s(f)} - S_{r(f)}}, \quad 0 \leq S_{e(f)} \leq 1 \tag{42}$$

汲取、渲排及不同的掃瞄曲線計算步驟如下：

1. 當給定一初始的 $\{S_W^n, S_{r(f)}^n, S_{s(f)}^n, a_{(f)}^n\}$ 及經由計算可得到下一時刻的 S_W^{n+1} ，再將 $\{S_W^{n+1}, S_{r(f)}^n, S_{s(f)}^n, a_{(f)}^n\}$ 代入式(41)、(42)中得到 h_c^{n+1} 。

2. 當前後時刻的飽和度改變時，決定適當的保持曲線型態。

$$\delta S_W = S_W^{n+1} - S_W^n$$

- a. 當 f 現為 1 或 3 的保持曲線型態，如果 $\delta S_W > \varepsilon$ (ε 為一很小的正數)，則此時會有反轉(Reversal)產生，此時 f 從 1 變為 2；從 3 變為 4，因為下一時刻($n+1$)的飽和度大於這一時刻(n)，已變成汲取過程；若在其它情形下， f 則不改變。
 - b. 當 f 現為 5 的保持曲線型態，如果 $\delta S_W > \varepsilon$ ，則此時會有 reversal，此時 f 從 5 變為 6；若 $S_W^{n+1} \leq S_{0(4)}$ (其中 $S_{0(4)}$ 為從曲線(1)reversal 至曲線(4)時之飽和度)，則此時 f 從 5 變為 1；若在其它情形下， f 則不改變。
 - c. 當 f 現為 2 或 4 的保持曲線型態，如果 $\delta S_W < -\varepsilon$ (ε 為一很小的正數)，則此時會有反轉(Reversal)產生，此時 f 從 2 變為 3；從 4 變為 5；若在其它情形下， f 則不改變。
 - d. 當 f 現為 6 的保持曲線型態，是 NAPL Simulator 所能處理最高階(Highest-order)，故不會再產生新的渲排曲線，若是 $S_W^{n+1} \geq S_{0(5)}$ (其中 $S_{0(5)}$ 為從曲線(4)reversal 至曲線(5)時之飽和度)，則 f 從 6 變為 4；若是 $S_W^{n+1} \leq S_{0(6)}$ (其中 $S_{0(6)}$ 為從曲線(5)reversal 至曲線(6)時之飽和度)，則 f 從 6 變為 5；若在其它情形下， f 則不改變。
3. 由步驟 2 可得一更新後的 f 值，又 $S_W = S_W^{n+1}$ 可得一新的 $a_{(f)}$ 值。
 4. 由步驟 1 所得之 h_c^{n+1} 及從步驟 3 所得之 $a_{(f)}$ ，又 $S_W = S_W^{n+1}$ 再利用式(41)可得一新的 S_e 值。
 5. 由步驟 4 所得之 S_e 及令 $S_W = S_W^{n+1}$ ，可得 $S_{s(f)}$ 及 $S_{r(f)}$ 等值。再代回到步驟 1 計算。

由以上的步驟可知，在模式中不論是汲取過程、渲排過程或是掃瞄曲線均已將其涵蓋進來，隨著不同的飽和度而使保持特性曲線有所變化，將液體在土壤中之遲滯現象予以考慮。

主要溼潤相與非溼潤相流體之選定

在模擬上，主要溼潤相與非溼潤相流體之選定，可分成二相流及三相流系統來討論。

- 當系統中只有水、空氣等二相存在，此時水為溼潤相；空氣為非溼潤相流體，考慮以下三種情況：
 - 設空氣之飽和度為不可移動的殘餘飽和度(此時已接近飽和，故只能產生渲排現象)
 - 設水之飽和度為不可移動的殘餘飽和度(此時已接近乾燥情況，故只能產生汲取現象)
 - 設水、空氣皆為可移動相
- 當系統中只有水、NAPL等二相存在，此時水為溼潤相；NAPL為非溼潤相流體，考慮以下三種情況：
 - 設NAPL為不可移動的殘餘飽和度(此時已接近飽和，故只能產生渲排現象)
 - 設水為不可移動的殘餘飽和度(此時已接近乾燥情況，故只能產生汲取現象)
 - 設水、NAPL皆為可移動相
- 當系統中存在水、空氣及NAPL等三相流體時，該三相系統以水、空氣來做區分，考慮以下情況：
 - ◆ 設空氣為不可移動的殘餘飽和度
 - 水為可移動相，NAPL為不可移動的殘餘飽和度(此時水已接近飽和，故對水而言亦只能產生渲排現象)
 - NAPL為可移動相，水為不可移動相(此時已接近乾燥情況，故只能產生汲取現象)
 - 水及NAPL皆為可移動相
 - ◆ 設水為不可移動的殘餘飽和度
 - 空氣為可移動相，NAPL為不可移動的殘餘飽和度(此時已接近乾燥情況，故只能產生汲取現象，亦即指NAPL進到土壤孔隙中)

- 空氣、NAPL皆為可移動相
- ◆ 設水及空氣皆為可移動相
 - NAPL為不可移動相
 - NAPL為可移動相

Saturation-Pressure

本文在附錄中所提出之NAPL Simulator模擬模式，係應用式(16) 所示之van Genuchten經驗式加以擴充，因為van Genuchten經驗式是以飽和度(S)的型式如式(23) 及式(24)表示，在計算處理上較為方便，並且該經驗式適用範圍比較廣泛，在模擬整個保持特性曲線上可作到比較精確的程度。

$$h_{c(f)} = \left[\left(S_{e(f)} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/\eta} \left(a_{(f)} \right)^{-1} \quad (23)$$

$$S_{e(f)} = \frac{S_w - S_{r(f)}}{S_{s(f)} - S_{r(f)}}, 0 \leq S_{e(f)} \leq 1 \quad (24)$$

其中

h_c :毛細壓力水頭

a : scaling parameter

η :curve fitting parameter，其中 $m = 1 - 1/\eta$

S_e :有效飽和度

S_r :殘餘飽和度

S_s :水的最大飽和度

S_w :水現存在之飽和度

下標(f)代表不同汲取、渲排的掃描路徑(Scanning curve)

Relative Permeability-Saturation

在未飽和層，孔隙中常同時含有水、NAPL，甚至空氣。通常NAPL在地下水中移動時會取代水及空氣的位置。水對於空氣及NAPL來說為溼潤相流體，因此會沿著孔隙的邊緣前進，先填滿小孔隙中；NAPLs為非溼潤相流體，則傾向於往孔隙的中心部位移動；而剩下未被液體所佔據之空隙才由空氣填滿。這些流體

對於土壤的滲透性往往比孔隙中只充滿某一種液體時來得低，每個流體(水或 NAPL)都會因其飽和度的遞減，使其相對滲透性跟著減少，直到該流體達到其殘餘飽和度，相對滲透性變成零，即意味著該流體在土壤中已經不具流動性。

Leverett (1941)提出若在三相流系統中，水為溼潤相流體，則水相的相對滲透係數只與水的飽和度有關，與兩液相所佔的比例無關，氣相的相對滲透係數也只與空氣的飽和度有關，溼潤度介於中間的非水溶性液體(NAPL)之相對滲透係數則與水及空氣的飽和度都有關係，如式(25)、式(27)及式(29)。Parker et al. (1987)採用 Mualem (1976)所發表之理論並結合 van Genuchten (1980)所發展之經驗式，由毛細壓力與飽和度之關係式中求得相對滲透係數如下：

Relative Permeability of water:

$$\kappa_{rW} = (S_{eW})^{\epsilon} \left\{ \left[1 - (S_{Wt})^{1/m} \right]^m - \left[1 - (S_W)^{1/m} \right]^m \right\} \quad (25)$$

其中

$$S_{eW} = (S_W - S_{Wt}) / (1 - S_{Wt} - S_{Nt} - S_{Gt}) \quad (26)$$

Relative Permeability of gas:

$$\kappa_{rG} = (S_{eG})^{\phi} \left\{ \left[1 - (1 - S_G)^{1/m} \right]^m - \left[1 - (1 - S_{Gt})^{1/m} \right]^m \right\} \quad (27)$$

其中

$$S_{eG} = (S_G - S_{Gt}) / (1 - S_{Wt} - S_{Nt} - S_{Gt}) \quad (28)$$

Relative Permeability of NAPL:

$$\kappa_{rN} = (S_{eN})^{\xi} \left\{ \left[1 - (S_W + S_{Nwt})^{1/m} \right]^m - \left[1 - (1 - S_G - S_{Nnt})^{1/m} \right]^m \right\} \quad (29)$$

其中

$$S_{eN} = (S_N - S_{Nt}) / (1 - S_{Wt} - S_{Nt} - S_{Gt}) \quad (30)$$

$$S_{Nnt} + S_{Nwt} = S_{Nt}$$

$$S_{Nwt} = S_{Nt} \left(\frac{S_G}{S_W + S_G} \right) \quad (31)$$

$$S_{Nnt} = S_{Nt} \left(\frac{S_w}{S_w + S_G} \right) \quad (32)$$

S_{wt} : 水相的陷入量(Entrapment)

S_{Gt} : 氣相的陷入量

S_{Nt} : NAPL相的陷入量

S_{Nwt} : NAPL-空氣兩相系統中，NAPL為溼潤相時的陷入量

S_{Nnt} : NAPL-水兩相系統中，NAPL為非溼潤相時的陷入量

ζ 、 ϕ 、 ξ : fitting parameter

m : 為S-P關係中curve fitting parameter， η 的函數，其中 $m = 1 - 1/\eta$



附錄二 二相流體 $P\sim S$ 曲線之孔頸網絡模式模擬

本研究以文獻研究中微觀孔頸網絡理論-微模型立方體孔頸網絡，排退時孔頸單元只有活塞型運動，汲取時孔則主要以 I1、I2 及 I3 型運動，頸可能有活塞型運動或攔斷運動發生之概念(李天浩;鄭安孺,2004)，配合 Legaite 和 Laplace(1983)等人以幾何形狀所推導之門檻值，進一步考慮孔頸排列方向性之邏輯判斷，應用 visual basic.net 界面化程式設計工具，開發模擬二相流 $P\sim S$ 曲線之模式，其模擬之初始條件及邊界條件與本實際研究之微模型裝置相同，分別以 水~氯乙烷、水~空氣、水~柴油、柴油~空氣、四氯乙烷~空氣等五組流體對，作排退及汲取各兩相之 $P\sim S$ 曲線模擬。

● 孔頸尺度置換機制視窗化模擬模式開發

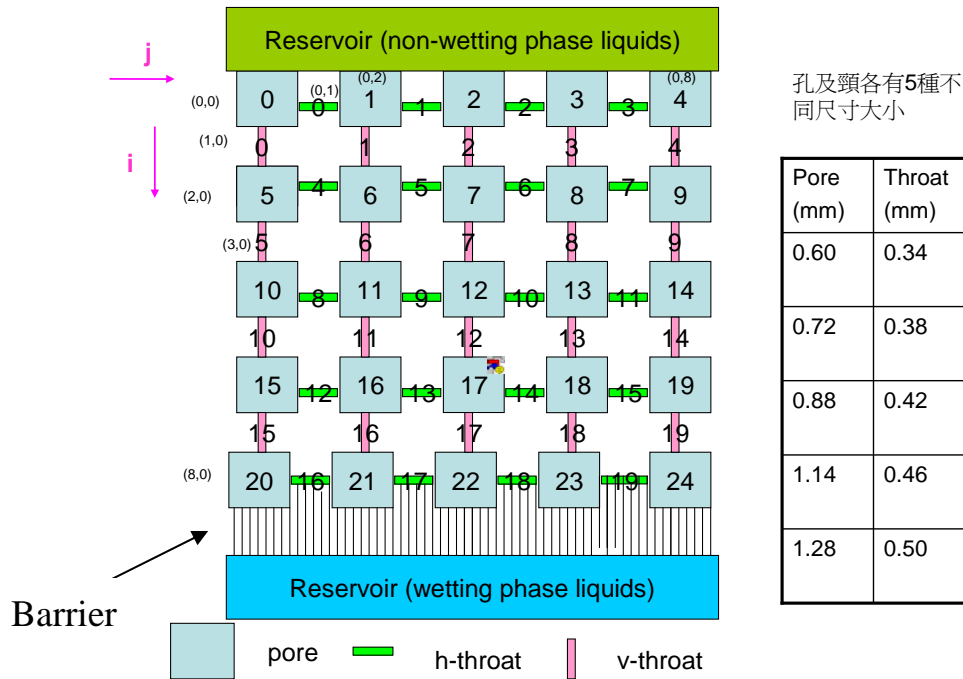
由於 visual basic.net 具有完全支援物件導向功能，包括封裝、繼承、多型等特性，撰寫模擬模式時，具降低設計時複雜度，增加程式碼重複使用性，可減少維護成本諸多優點，因此本研究採用其為模式之開發工具。

微模型板孔頸概念模式

附圖 2-1 是 5 *5 孔隙(pore)微模型板孔頸單元排列概念圖，藉由垂直與水平頸管通道連接各個孔與孔成網絡模型。上下邊界安排緩衝池作為潤濕相及非潤濕相之壓力水頭供給源。

凸界面在矩形斷面定型通道中之**活塞型運動**的毛細壓力門檻值（critical capillary pressure）如第二章圖 2-5 所示，共有兩種預估模式，一是根據拉普拉斯理論 $P_c = \sigma / r$ ，另一是 Legait (1983)由靜力平衡求得：

$$P_c = \frac{\sigma}{\rho} = \frac{\sigma}{r} \left[\cos \theta + \sqrt{\cos \theta \sin \theta + (\pi/4 - \theta)} \right]$$
 其中， r 為通道的內切圓半徑；若通道為孔則 $r = r_p$ ，若通道為管則 $r = r_t$ 。



附圖 2-1 5*5 微模型板孔頸單元排列概念圖

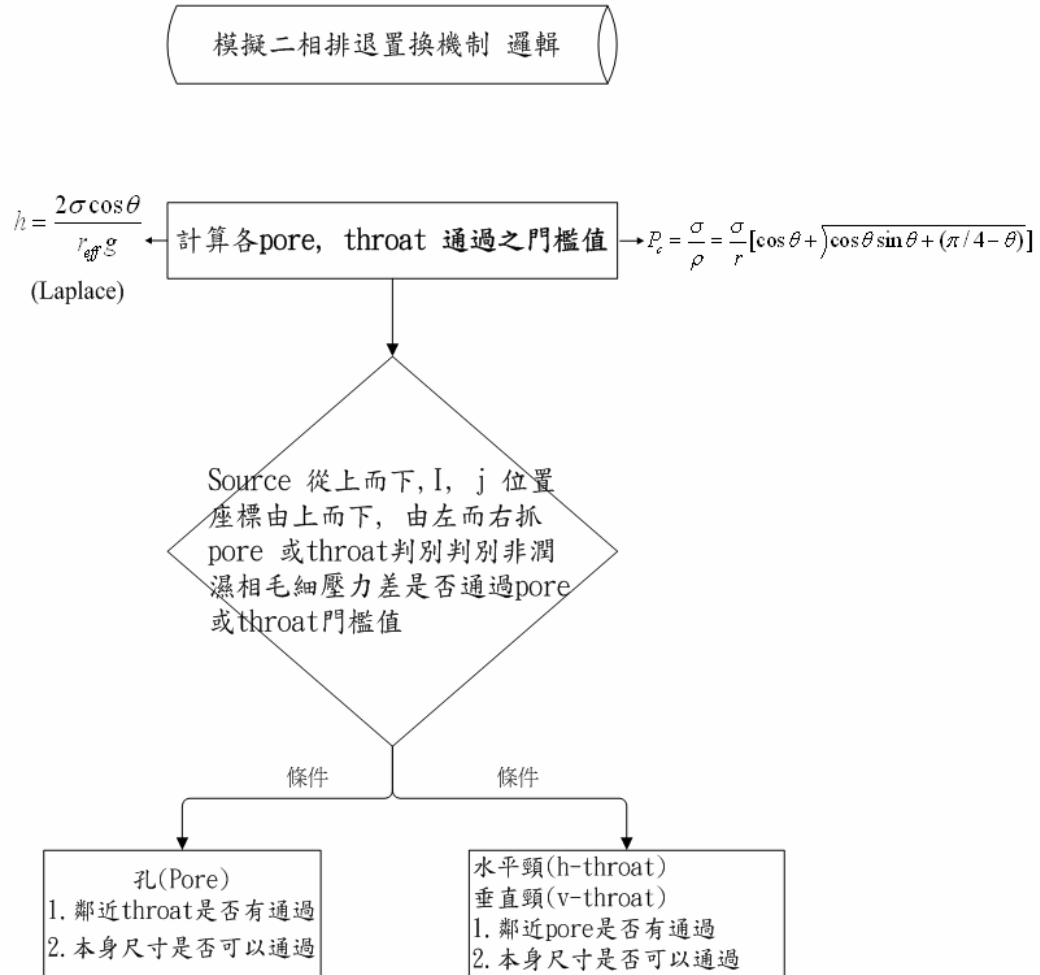
孔汲取運動的毛細壓力門檻值在文獻中都是建議使用估計式概估之。一般假設

$$P_c = \frac{\sigma}{r_p} [C_{th} \cos \theta]$$

Lenormand et al. (1983) 以 7 種毛細管所組成的網絡模型，其孔與相鄰頸管之寬度是一致的，進行兩相間排退與汲取置換機制之實驗，透過幾何關係推導各置換機制發生時之門檻值 (李天浩；鄭安孺，2004)。如第二章圖 2-10 所示，本研究採用之微模型立方體孔中只會有 I1、I2、以及 I3 型汲取，參數 $C_{I1} = 1.7$ 、 $C_{I2} = 1.15$ 、且 $C_{I3} = 0.7$ ，後兩者中的非濕潤相頸管必須是兩兩相鄰。I1、I2 分別定義為孔四周有一根或兩根通道連接非濕潤相流體。

模擬程式之排退邏輯

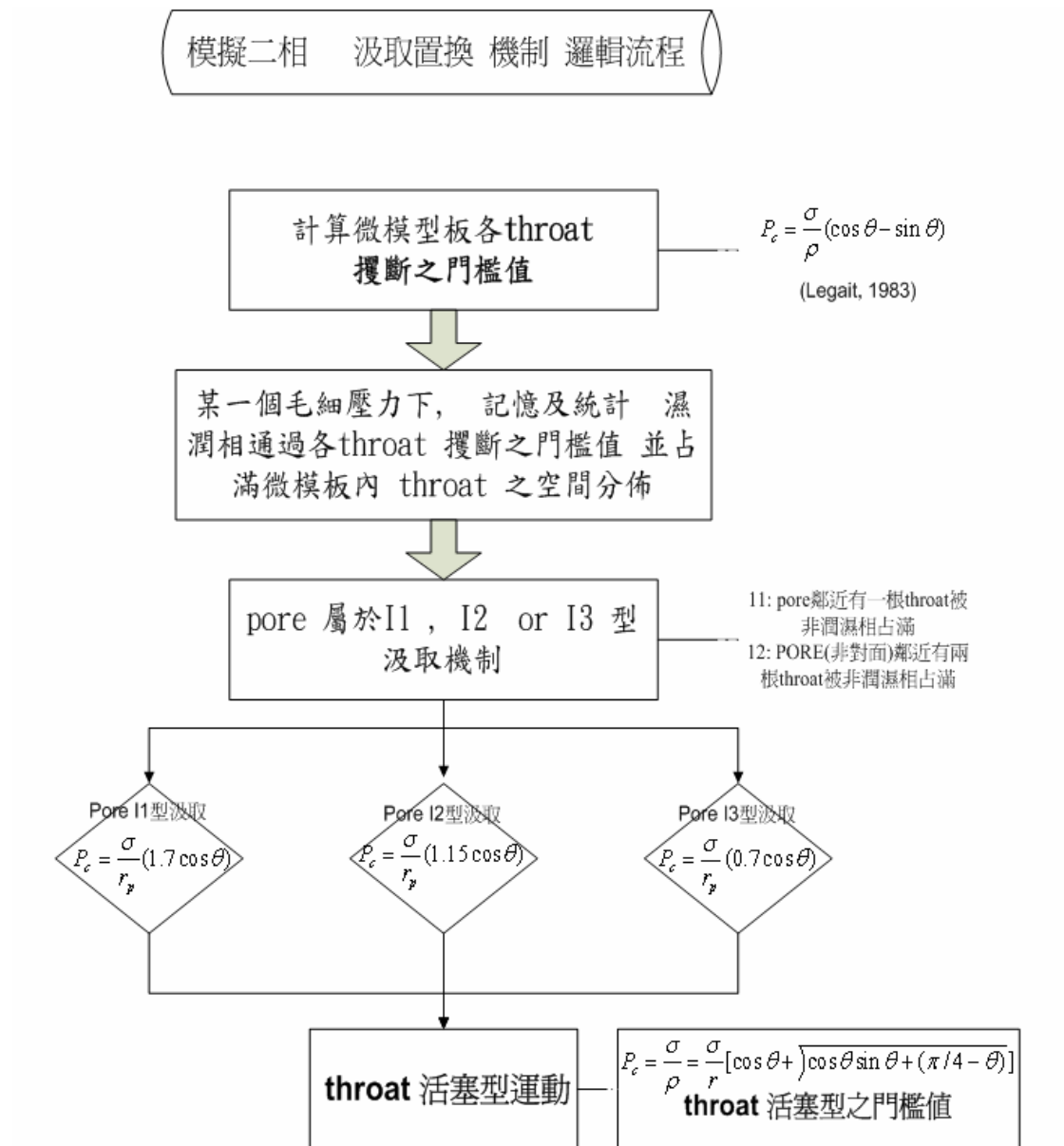
排退(非濕潤相入侵濕潤相)機制，孔、頸皆以活塞型運動為主，若微模型板孔或頸其一形成孤島則造成孔隙通道無連通性 模擬模式設計之流程如附圖 1-2



附圖 2-2 排退階段模擬模式設計流程圖

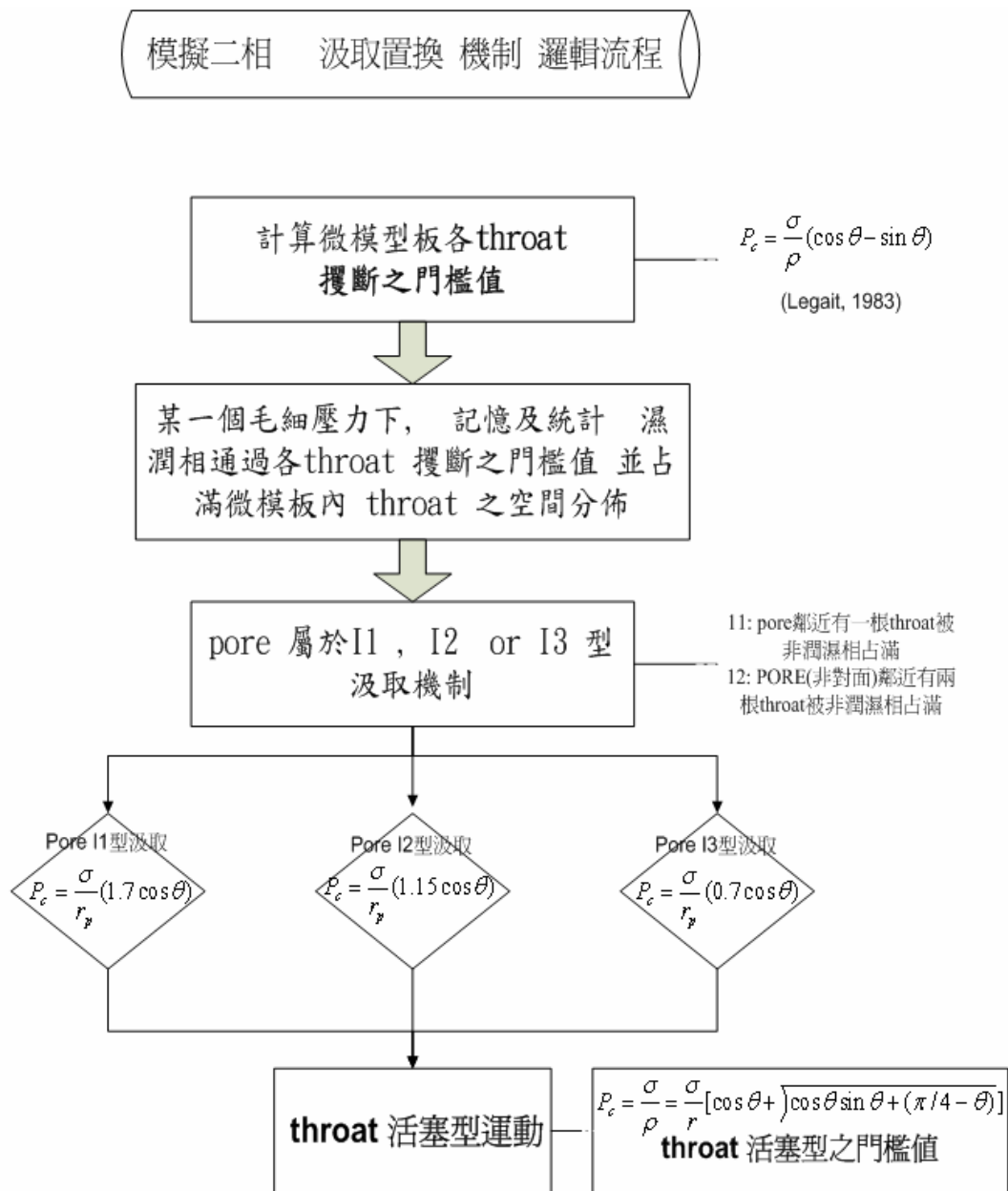
模擬程式之汲取邏輯

汲取(濕潤相入侵非濕潤相)機制，孔、頸皆以活塞型運動為主，若微模型板孔或頸其一形成孤島，因濕潤相在孔頸角隅處，具角隅流(corner flow)存在之現象則不致造成孔隙通道無連通性，模擬模式設計之流程如附圖 2-2，孔頸各會以頸單元攔斷，孔 In 型汲取，頸及鄰近頸之活塞型運動等進行置換。模擬模式設計之流程參考附圖 2-3。

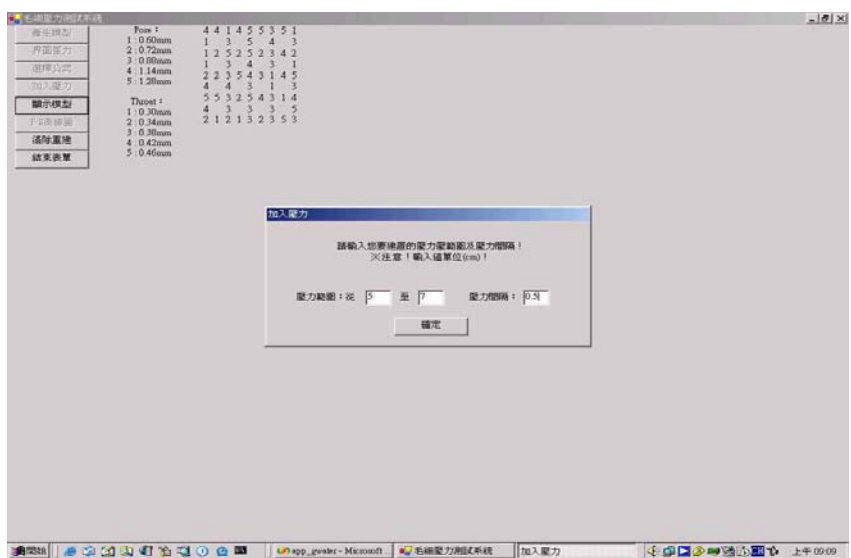


附圖 2-3 汲取階段模擬模式設計流程圖

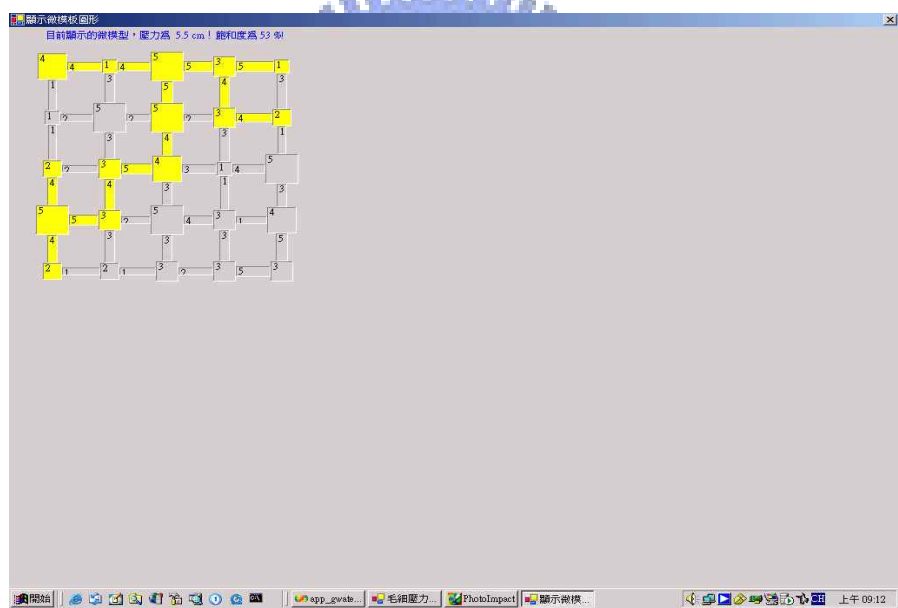
附圖 2-4 說明兩相流體對汲取階段置換模擬模式界面操作流程圖，其界面操作過程之畫面如附圖 2-5~附圖 2-7。



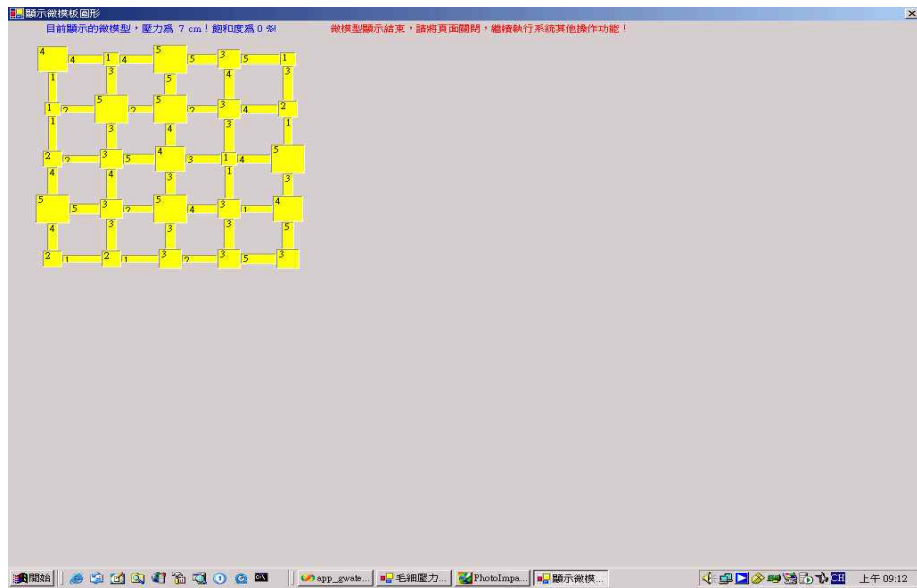
附圖 2-4 模擬模式界面操作流程圖



附圖 2-5 模擬模式界面操作(1)



附圖 2-6 模擬模式界面操作(2)



附圖 2-7 模擬模式界面操作(3)





工業技術研究院
化學工業研究所
Industrial Technology Research Institute
Union Chemical Laboratories

Address: 321 Kuang Fu Road,
Section 2, Hsinchu, Taiwan,
Technical Marketing Dept.
Tel: 886-03-5732037-9
Fax: 886-03-5732352

Analysis/Test Report

Applicant : Civil engineering department in N.C.T.U Application No. : D9113108

Co-Applicant : _____

Sampler : _____

Letter No. : _____

Name of Article : dyed water

Total Pages : 1 This Page : 1

Date Applied : 2002/03/20 Date Executed : 2002/03/21

Date Issued : 2002/04/10

- Notes :
1. This report relates only to the items tested, and the content of this report is for references, but not for advertising publicity or other commercial purpose.
 2. **To reproduce, copy and/or counterfeit this report shall be prohibited.**
 3. **Confirmation of this report is welcome.**

Item(s)	Method(s)	Result(s)	Remark(s)
Surface Tension (Platinum ring)	KRÜSS Tensiometer	71.5mN/m	Temp. : 24°C
Underneath blank	Underneath blank	Underneath blank	Underneath blank

Union Chemical Laboratories
Industrial Technology Research Institute



Officer : Chang

2002.4.12

個人履歷簡介

陳鴻輝 Hung-Hui Chen

單位：明新科技大學

土木系&環境資源管理系

學歷：

國立交通大學土木工程研究所博士(97.6)

國立中央大學土木工程研究所碩士(79.6)

國立交通大學土木工程學系學士(74.6)

國立新竹高中 (69.6)

新竹市立育賢國民中學 (66.6)

新竹市立民富國民小學 (63.6)

電話： 886-3-559-3142 ext 3288

傳真： 886-3-557-3718

Email: chf@chang.cv.nctu.edu.tw ;

j1203035@must.edu.tw



● 學術著作清單

1. Liang-Cheng Chang, **Hung-Hui Chen**, Hsin-Yu Shan, Jui-Pin Tsai. Effect of connectivity and wettability on the relative permeability of NAPLs. Environmental geology (SCI)- (**Published online**: 26 February 2008).
2. 張良正, 單信瑜, **陳鴻輝**, 歐國隆. 遲至效應尺度原則對非水象亦於孔隙介質中傳輸模擬之影響. 中國土木水利工程學刊(EI), 第十三卷, 第四期, 民國九十年.
3. 張良正, 蔡瑞彬, **陳鴻輝**. 應用微模型於流體對間至換機制之研究. 中國土木水利工程學刊(EI), 第十八卷, 第四期, 民國九十五年.
4. Liang-Cheng Chang, **Hung-Hui Chen**, Hsin-Yu Shan. Scaling Prediction Performance and its Impact on the NAPLs Flow Simulation. Environmental Geology (SCI) (**Submitted** - Manuscript ID EG-08-0104).
5. Liang-Cheng Chang, **Hung-Hui Chen**, Impact of Scaling and Hysteresis on NAPL Flow Simulation. Environmental Modeling and Assessment Edition.(SCI)(**Revised** -2008.3).

● 期刊論文

1. **陳鴻輝**. 生態工法應用於八股溝之治理, 明新學報, 第 29 期, pp 30-39, 2003.
2. **陳鴻輝**. 以試算軟體應用於水理分析, 明新學報, 第 27 期, pp 30-39, 2001.
3. **陳鴻輝**. 尺度原則應用於LNAPLS傳輸模擬之研究, 明新學報, 第 25 期, pp95-106, 2000.

4. 陳鴻輝. 五峰鄉上坪溪沿岸設施規劃設計, 明新學報, 第 23 期, pp101-107, 1999.
5. 陳鴻輝. 馬達拉生態研習中心規劃, 明新學報, 第 22 期, pp225-234, 1999.
6. 陳鴻輝. 大潤發流通事業大型商場設置環境影響評估, 明新學報, 第 21 期, pp109-118, 1998.

● 研討會論文

1. 陳鴻輝, 張良正. 以微模型孔頸置換機制模擬二相流p-s曲線模式開發, 第九屆土壤及地下水污染整治研討會, 台灣大學, 2005.
2. 陳鴻輝, 張良正. 應用微模型於流體對間置換機制之研究, 第九屆土壤及地下水污染整治研討會, 台灣大學, 2005.
3. 陳鴻輝. 探討擴散係數對孔隙介質中三相流置換機制之影響, 第十四屆水利工程研討會, 交通大學, 2005.
4. H.H.Chen. Simulation of multiphase flow of LNAPLs using experimental data of soil water characteristic curves, proceeding of the fifth International Conference on coast environment incorporating oil spill studies, wit press, 2004.
5. H.H.Chen. Experimental Studies of napl on Relationships of Permeability-Saturation and capillary pressure-saturation" 6th International Conference on Hydroinformatics, Singapore, 2004.
6. 陳鴻輝, 陳思彥. 以小型人造溼地實驗於校園廢水處理效能之研究, 第六屆地下水資源及水質保護研討會, 逢甲大學, 2004.
7. 陳鴻輝, 張良正. 以微模型實驗於三相毛細壓力飽和度滲透係數關係之研究, 第六屆地下水資源及水質保護研討會, 逢甲大學, 2004.
8. H.H.Chen, L.C.Chang. Simulation of multiphase flow of LNAPLs using experimental data of soil water characteristic curves, Second International Conference on Computation Methods in Multiphase Flow, Santa Fe, New Mexico, USA, November, 2003.
9. 陳鴻輝. 生態工法應用於永定溪之野溪治理, 水利工程研討會, 屏東, 2002.
10. 陳鴻輝. 生態工法應用於緩坡及階梯式護岸之規劃, 海峽兩岸水利科技研討會, 成功大學, 2002.
11. 陳鴻輝, 張良正. 遲滯效應對DNAPL於孔隙介質中傳輸模擬之影響, 第七屆海峽兩岸環境保護研討會, 2001.
12. 張良正, 陳鴻輝, 歐國隆. 尺度原則對DNAPLs傳輸模擬之影響, 第四屆地下水資源及水質保護研討會, pp. 137-148, 2001.
13. 陳鴻輝. 以防治工法探討山坡地土石流災害之控制, 二十一世紀土木工程技術與管理研討會, D50-D58, 2001.
14. 張良正, 陳鴻輝, 石永祺. 可透視微模型實驗於毛細細壓力飽和度關係之研究, 二十一世紀土木工程技術與管理研討會, D40-D49, 2001.
15. 陳鴻輝, 張良正. 尺度原則對LNAPL於孔隙介質中傳輸模擬之影響, 中日環境荷

爾蒙學術研討會, 2000.

16. 張良正, 陳鴻輝. 休耕農田對地下水補助技術探討(II), 農業水資源技術八十九年度計劃成果發表討論會, PP141-152, 2000.
17. 林果慶, 張謝淵, 陳鴻輝. 啟發式地下水污染偵測與模式分析, 第三屆地下水資源及水質保護研討會, PP203-213, 1999.

● 專書

1. 陳鴻輝等. 水土保持學, 文京圖書公司, 2001
2. 陳鴻輝等. 流體力學, 高立圖書公司, 1999
3. 陳鴻輝. 施工安全, 文京圖書公司, 1998
4. 陳鴻輝等. 工程數學, 文京圖書公司, 1998
5. 陳鴻輝等. 工程倫理, 文京圖書公司, 2008

● 證照

1. 土木工程技師(85.4)
2. 水土保持技師(85.12)
3. 大地工程技師(87.10)
4. 公共工程品質管理師(87.7)
5. 工程仲裁師(91.5)
6. 乙級廢水處理專責人員(79.6)
7. 土地專業代理人(84.4)

