

## 第五章 實驗結果討論與比較

### 5.1 接觸角實驗結果比較分析

本實驗採用之流體為水，空氣以及柴油。為了探討非潤濕相先進入微模型是否會殘餘在壁面上而影響接觸角，所以實驗將以這 3 組流體對進行 6 組實驗，分別為水-空氣，空氣-水，水-柴油，柴油-水，空氣-柴油，柴油-空氣，在'-'號之前者為先進入微模型之流體。而為了探討排退與汲取階段之接觸角是否一致，所以各組流體對皆進行排退與汲取實驗。待求出各組流體對之接觸角後，再將所得接觸角代入理論排退曲線的公式中，推求出理論排退曲線並與呂元均(2002)實驗所得理論排退曲線比較分析之。

於六組實驗所求得接觸角如表 5.1-1 所示。為了探討流體間於排退與汲取過程中接觸角是否會產生改變，將表 5.1-1 整理成表 5.1-2，由表 5.1-2 可知，與空氣相關的實驗其排退與汲取階段之接觸角並沒有太大的差異，其絕對誤差值約為 0.7~1.7 度之間。就水-油部分，其在排退與汲取階段的接觸角並不一致，在汲取階段時，油-水-管壁交界面的形狀會略有改變，而影響到接觸角之量測結果，如圖 5.1-1~5.1-2 所示。

而欲探討進入微模型之先後順序是否會影響接觸角時，將表 5.1-1 整理成表 5.1-3，由表 5.1-3 可知，與空氣相關之實驗其接觸角於排退階段之絕對誤差值約在 0.24~0.29 度間，於汲取階段，其絕對誤差值約在 0.62~1.23 度之間，整體而言並無太大的差異。而油與水相關的實驗中，排退階段之接觸角絕對誤差值約為 5.28 度，在汲取

階段之接觸角絕對誤差約在 2.0 度，所以進入先後順序對於油與水間排退與汲取階段的接觸角影響不大。因此，就整體而言，非潤濕相進入微模型先後順序的影響其實是很小的。造成此結果的原因推測為微模型壁面為親水性，而兩流體對間較濕潤者即會在壁面產生一層薄膜，而此薄膜在排退或汲取階段皆存在，所以在量測接觸角時，非潤濕相先進入與否的影響其實不大。

表 5.1-4~表 5.1-6 為將本實驗所求接觸角代入 Legait 公式推求理論活塞型運動於各種寬度的孔與頸管的毛細壓力門檻值並與各種寬度的頸管與孔在微模型中所佔百分比繪成理論排退曲線，並與呂元均(2002)之水-空氣，油-空氣，水-油實驗所得排退曲線進行比較，如圖 5.1-3~圖 5.1-5 所示。由圖 5.1-3~圖 5.1-5 可知，對於接觸角等於零度或接觸角代入本實驗所得之值，理論排退曲線並沒有太大之差異，可見這 3 組流體對之接觸角對於理論排退曲線之影響有限；再者，實驗值各點與理論曲線間的誤差並未因加入接觸角此項考量後而使得理論值與實驗值更加接近，更可說明接觸角對排退曲線的影響是有限的，如表 5.1-7 所示。

表 5.1-1 接觸角實驗各組流體對之接觸角平均值

接觸角實驗各組流體對之接觸角平均值				
	排退	標準差	汲取	標準差
空氣-油	26.64	2.42	28.33	3.39
油-水	16.00	2.83	7.00	2.00
水-油	21.28	2.85	5.00	1.00
油-空氣	26.40	2.91	27.10	3.51
空氣-水	2.77	1.48	2.00	1.37
水-空氣	1.71	0.49	2.62	2.07

表 5.1-2 各組實驗中排退與汲取接階段觸角之絕對誤差

各組實驗中排退與汲取接階段觸角之絕對誤差					
空氣-油	油-水	水-油	油-空氣	空氣-水	水-空氣
1.70	9.00	16.28	0.70	0.77	0.90

表 5.1-3 三種流體對因進入先後順序不同於排退與汲取過程接觸角之絕對誤差

三種流體對因進入先後順序不同於排退與汲取過程接觸角之絕對誤差			
	空氣-油與油-空氣	油-水與水-油	水-空氣與空氣-水
D	0.24	5.28	0.29
I	1.23	2.00	0.62

表 5.1-4 水-空氣之活塞型運動理論推估值

水-空氣之活塞型運動理論推估值							
寬度(單位:cm)	孔隙深度(cm)	有效半徑(cm)	接觸角(度)	界面張力(dynes/cm)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	活塞型運動理論推估值(cm)	
頸管	0.034	0.08	0.0239	1.71	71.5	0.997	5.81
頸管	0.038	0.08	0.0258	1.71	71.5	0.997	5.38
頸管	0.042	0.08	0.0275	1.71	71.5	0.997	5.04
頸管	0.046	0.08	0.0292	1.71	71.5	0.997	4.75
頸管	0.050	0.08	0.0308	1.71	71.5	0.997	4.51
孔	0.060	0.08	0.0343	1.71	71.5	0.997	4.05
孔	0.072	0.08	0.0379	1.71	71.5	0.997	3.66
孔	0.088	0.08	0.0419	1.71	71.5	0.997	3.31
孔	0.114	0.08	0.0470	1.71	71.5	0.997	2.95
孔	0.128	0.08	0.0492	1.71	71.5	0.997	2.82

表 5.1-5 油-空氣之活塞型運動理論推估值

油-空氣之活塞型運動理論推估值							
寬度(單位:cm)		孔隙深度 (cm)	有效半徑(cm)	接觸角(度)	界面張力(dynes/cm)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	活塞型運動理論推估值(cm)
頸管	0.034	0.08	0.0239	26.4	22.8	0.82	2.27
頸管	0.038	0.08	0.0258	26.4	22.8	0.82	2.11
頸管	0.042	0.08	0.0275	26.4	22.8	0.82	1.97
頸管	0.046	0.08	0.0292	26.4	22.8	0.82	1.86
頸管	0.050	0.08	0.0308	26.4	22.8	0.82	1.76
孔	0.060	0.08	0.0343	26.4	22.8	0.82	1.58
孔	0.072	0.08	0.0379	26.4	22.8	0.82	1.43
孔	0.088	0.08	0.0419	26.4	22.8	0.82	1.29
孔	0.114	0.08	0.0470	26.4	22.8	0.82	1.15
孔	0.128	0.08	0.0492	26.4	22.8	0.82	1.10

表 5.1-6 水-油 活塞型運動理論推估值

水-油 活塞型運動理論推估值							
寬度(單位:cm)		孔隙深度 (cm)	有效半徑(cm)	接觸角(度)	界面張力(dynes/cm)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	活塞型運動理論推估值(cm)
頸管	0.034	0.08	0.0239	21.28	48.7	0.997	4.04
頸管	0.038	0.08	0.0258	21.28	48.7	0.997	3.74
頸管	0.042	0.08	0.0275	21.28	48.7	0.997	3.50
頸管	0.046	0.08	0.0292	21.28	48.7	0.997	3.30
頸管	0.050	0.08	0.0308	21.28	48.7	0.997	3.13
孔	0.060	0.08	0.0343	21.28	48.7	0.997	2.81
孔	0.072	0.08	0.0379	21.28	48.7	0.997	2.54
孔	0.088	0.08	0.0419	21.28	48.7	0.997	2.30
孔	0.114	0.08	0.0470	21.28	48.7	0.997	2.05
孔	0.128	0.08	0.0492	21.28	48.7	0.997	1.96

表 5.1-7 各流體對實驗值各點與理論排退曲線之誤差表

	$\theta$	ERROR	$\theta$	ERROR
Water-Air	1.71	4.5	0	4.6
Oil-Air	26.4	5.87	0	6.13
Water-Oil	21.28	5.43	0	5.02



圖 5.1\_1 柴油排退水達到平衡時之油-水界面

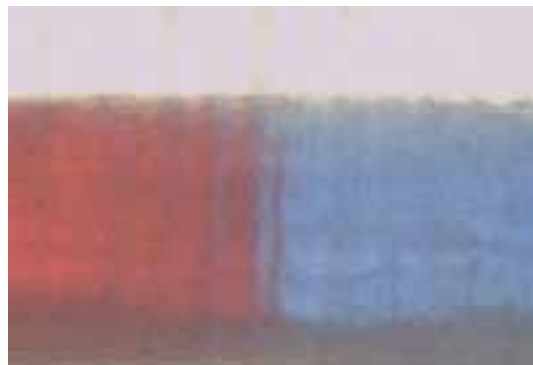


圖 5.1\_2 水汲取柴油達到平衡時之油-水界面

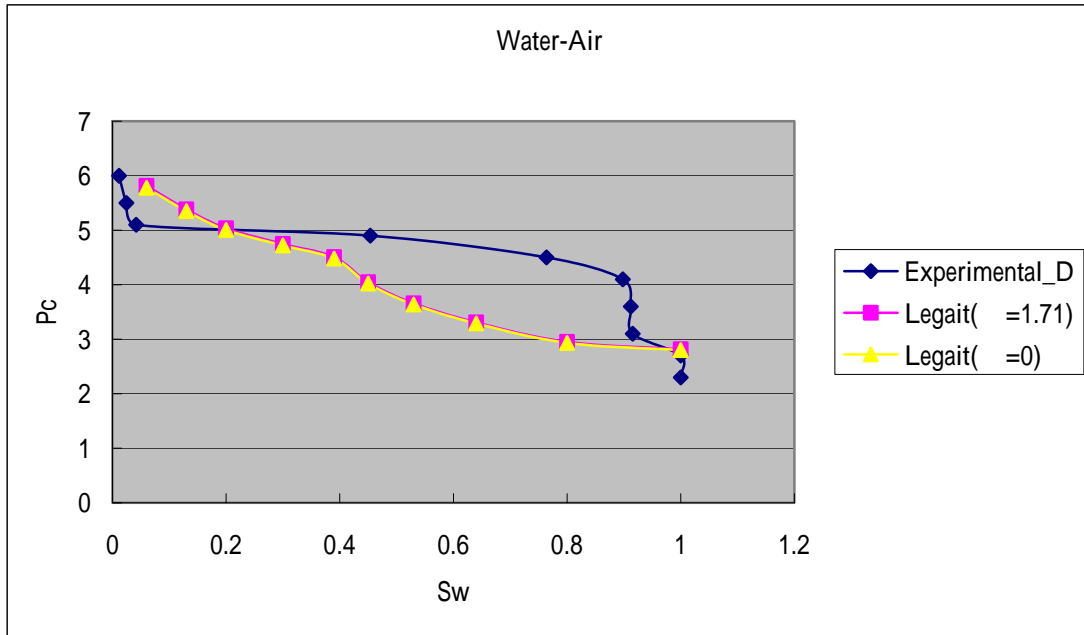


圖 5.1\_3 水-空氣之保持曲線與理論推估值

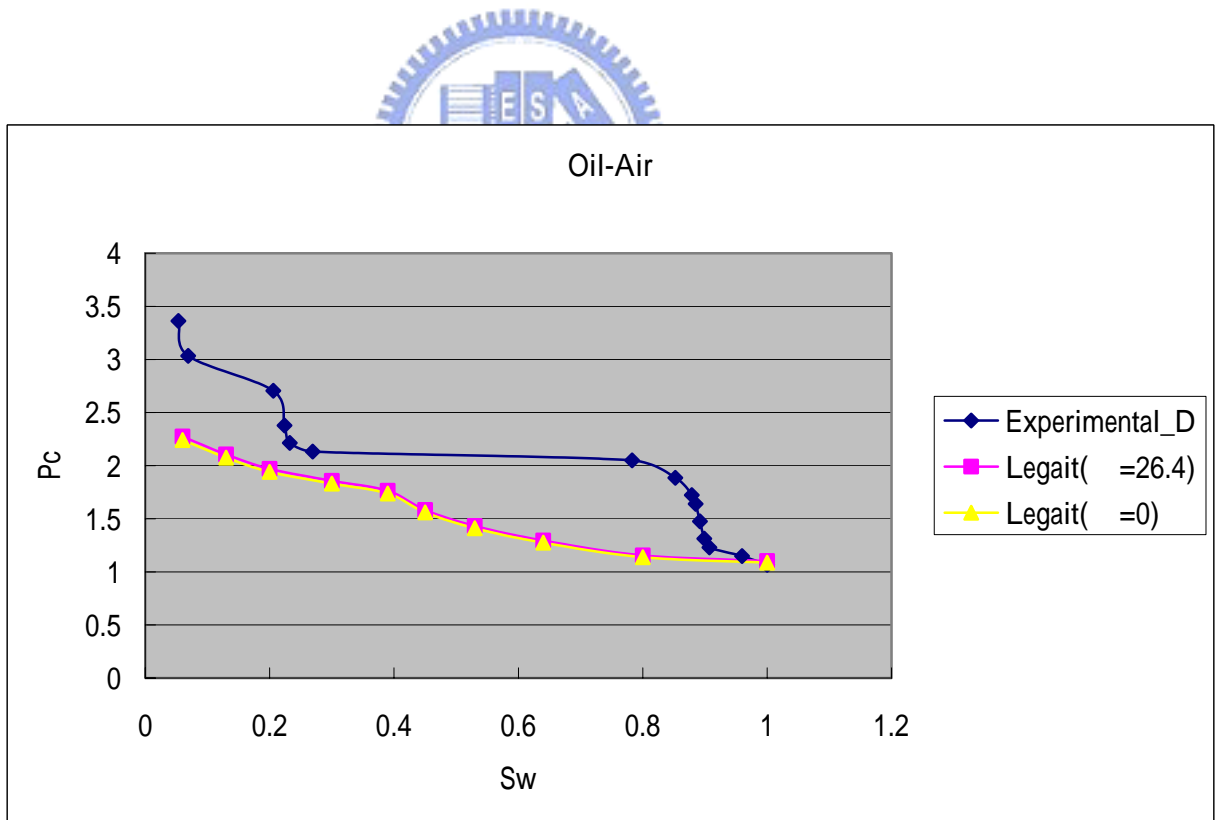


圖 5.1\_4 油-空氣之保持曲線與理論推估值

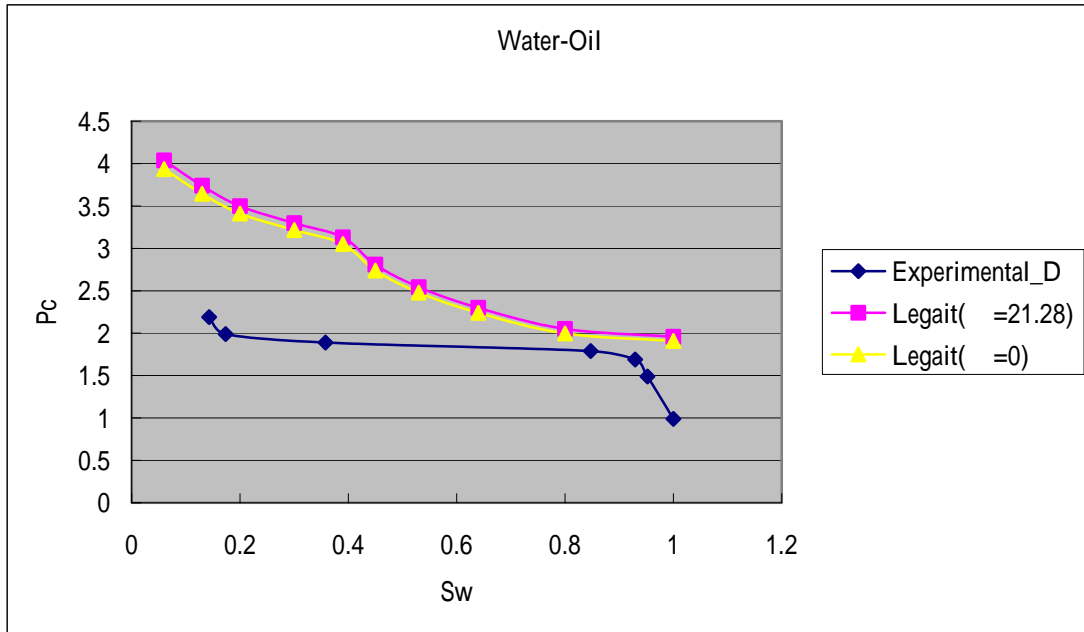


圖 5.1\_5 水-油之保持曲線與理論推估值

## 5.2 單一寬度通道網絡模型實驗實驗結果分析

在得到空氣—水流體對之接觸角後即可代入置換機制公式，以更推估各種置換機制更實際之理論毛細壓門檻值，推求結果如表 5.2-1，5.2-2 所示。

### 5.2.1 排退階段

實驗在第一階段至第八階段，系統毛細壓力由 3.6cm 增加到 4.9cm，非潤濕相仍停留在貯存槽而未進行排退，如圖 5.2.1-1~圖 5.2.1-2 所示；第九階段，當毛細壓力到達 5.2cm 時，非潤濕開始進行排退，開始排退時，非潤濕相先將所有平行非潤濕相流流動方向之通路佔領，接著開始排退垂直非潤濕相流流動方向之通路，於此階段結束後，潤濕相之飽和度大幅降低由  $Sw=0.88$  降至  $Sw=0.08$ ，但仍有潤濕相存留於垂直非潤濕相流流動方向之通路，如圖 5.2.1-3~圖 5.2.1-6

所示。

在第十階段與十一階段，雖然系統毛細壓力增加，但殘存之潤濕相並未因此而減少，如圖 5.2.1-7~圖 5.2.1-8 所示。因此在第九階段當系統毛細壓力達到該頸管之理論排退門檻值時，即視為完成排退。

在本實驗之排退過程中，各階段的平衡時間約為 4 小時。

表 5.2-1 單一寬度通道網絡模型實驗各種置換機制理論毛細壓推估值(排退階段)

寬度(CM)	寬度(單位:cm)	活塞型運動	攫斷	I1	I2
0.04	0.40	5.20	*	*	*

表 5.2-2 單一寬度通道網絡模型實驗置換機制統計表(排退階段)

	系統毛細壓力	活塞型置換
第 1 階段	3.6	*
第 2 階段	3.9	*
第 3 階段	4.1	*
第 4 階段	4.2	*
第 5 階段	4.4	*
第 6 階段	4.7	*
第 7 階段	4.8	*
第 8 階段	4.9	*
第 9 階段	5.2	○
第 10 階段	5.5	*
第 11 階段	5.8	*

註：\*代表未發生置換，○代表已發生置換





圖 5.2.1-1 實驗排退第一階段



圖 5.2.1-2 實驗排退第八階段



圖 5.2.1-3 實驗排退第四階段

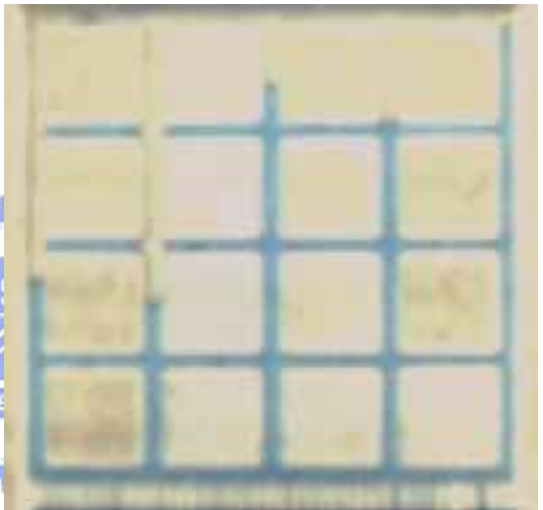


圖 5.2.1-4 實驗排退第四階段



圖 5.2.1-5 實驗排退第四階段

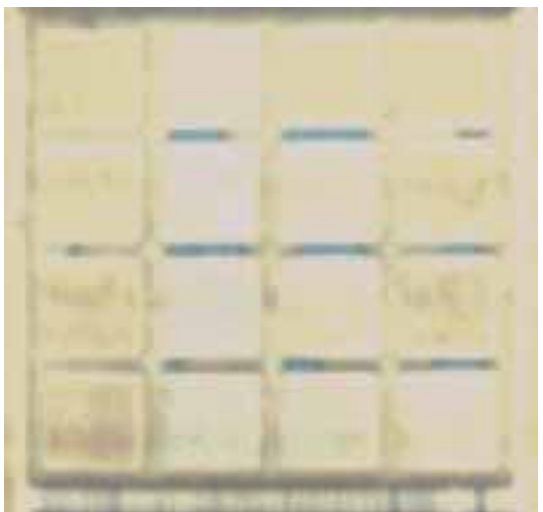


圖 5.2.1-6 實驗排退第四階段結束

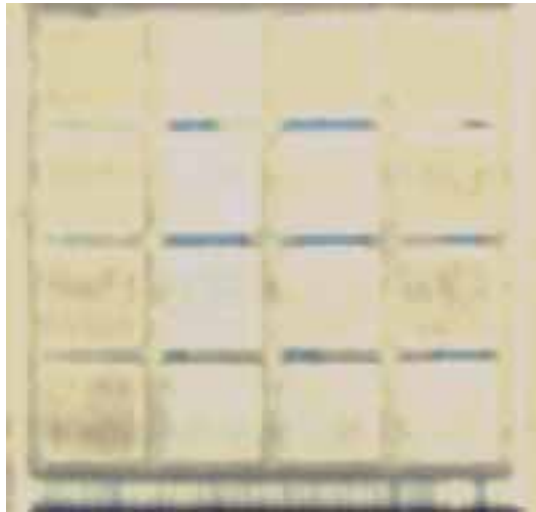


圖 5.2.1-5 實驗排退第十階段結束

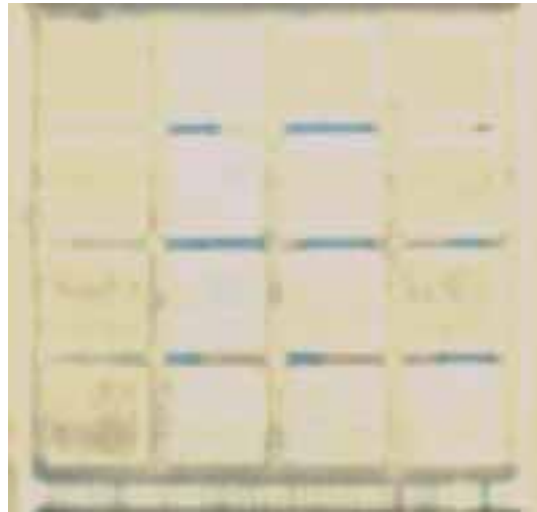


圖 5.2.1-6 實驗排退第十一階段結束



## 5.2.2 汲取階段

在汲取過程的第三階段中，系統毛細壓力為 5.0cm，理論活塞型置換門檻值為 5.22cm，所以此時已有足夠的潤濕相藉由角隅進入微模型中，將頸管內的非潤濕相填滿，因此由圖 5.2.2-1~圖 5.2.2-3 可看到頸管被潤濕相充滿的情形。

在第四階段到第十二階段，系統毛細壓力為 4.8cm~3.2cm，而 II 型汲取發生的門檻值為 4.66cm，故理論上應發生 II 型汲取，但實際

上並未發生任何取代機制，因為在排退階段結束時，含有潤濕相之頸管皆兩兩不相鄰，所以不會發生 I1 與 I2 型汲取。

在第十四階段時系統毛細壓力降至 2.8mm，且於微模型邊界附近發生潤濕相入侵‘孔’的行為，隨後並造成與該‘孔’連接的頸管發生活塞型置換，而此發生於微模型邊界之置換行為，並不屬於 I1 或 I2 型汲取的範圍，無法與理論公式比較之，如圖 5.2.2-4。

在第十五階段至第十六階段間，並無明顯的置換機制發生，直到第十七階段，系統毛細壓力已達到 2.0cm 時，潤濕相於微模型邊界之置換行為開始活躍，且在短時間內即迅速發展 I1 型汲取並佔領了整個通路，潤濕相飽和度由  $S_w=0.12\sim S_w=0.94$ ，如圖 5.2.2-5~5.2.2-8 所示。

在本實驗汲取過程中，各階段的平衡時間約 6~8 小時。

由本實驗之汲取階段可發現以下特點：

- (1) 當毛細壓力下降至 I1 型汲取之門檻值時，若‘孔’之充滿潤濕相的相鄰頸管彼此平行而不相鄰，則 I1 型汲取仍不會發生。
- (2) 在本實驗中可發現，無論是否有真正的孔，二維的網絡模型都能產生遲滯效應，因為當潤濕相由頸管行進到孔時，其曲率半徑會由小變大，使得毛細壓力須再調降才能對孔進行汲取，因此二維網絡模型即能造成遲滯效應。

表 5.2-3 單一寬度通道網絡模型實驗各種置換機制理論毛細壓推估值(排退階段)

寬度(單位:cm)	活塞型運動	攪斷	I1	I2
0.40	5.22	2.61	4.66	3.15

表 5.2-4 單一寬度通道網絡模型實驗置換機制統計表(汲取階段)

	系統毛細壓力	活塞型置換	攪斷	I1	I2	其他
第 1 階段	5.6	*	*	*	*	*
第 2 階段	5.3	*	*	*	*	*
第 3 階段	5	○	*	*	*	*
第 4 階段	4.8	*	*	*	*	*
第 5 階段	4.6	*	*	*	*	*
第 6 階段	4.4	*	*	*	*	*
第 7 階段	4.2	*	*	*	*	*
第 8 階段	4	*	*	*	*	*
第 9 階段	3.8	*	*	*	*	*
第 10 階段	3.6	*	*	*	*	*
第 11 階段	3.3	*	*	*	*	*
第 12 階段	3.2	*	*	*	*	*
第 13 階段	3	*	*	*	*	*
第 14 階段	2.8	*	*	*	*	○
第 15 階段	2.6	*	*	*	*	*
第 16 階段	2.3	*	*	*	*	*
第 17 階段	2	*	*	○	*	○

註：\*代表未發生置換，○代表已發生置換

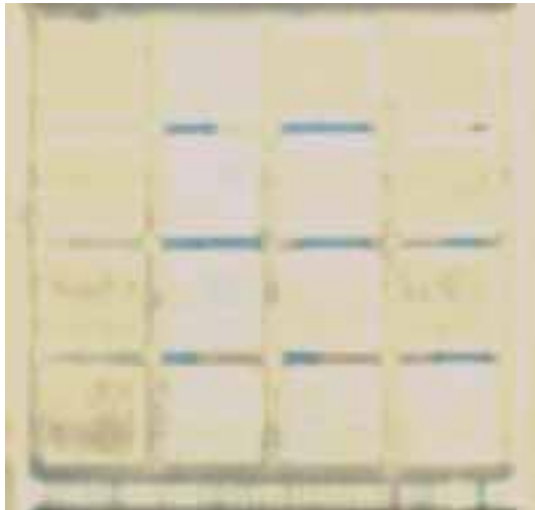


圖 5.2.2-1 實驗汲取第二階段結束

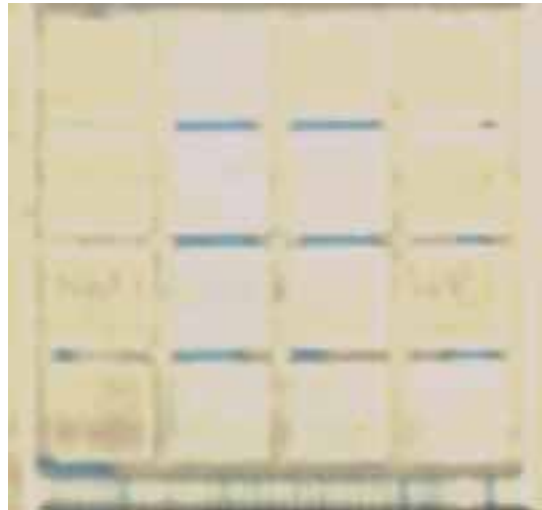


圖 5.2.2-2 實驗汲取第三階段

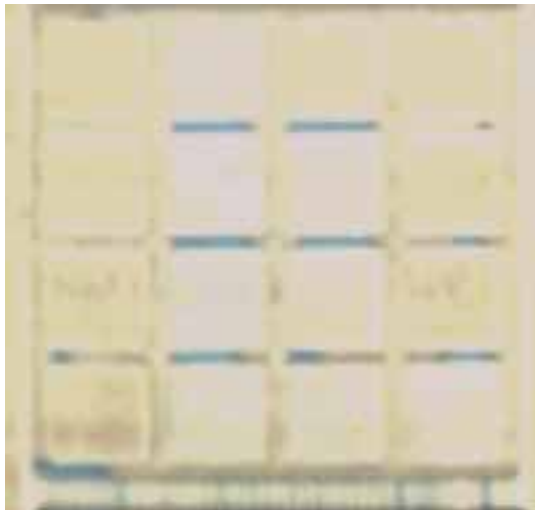


圖 5.2.2-3 實驗汲取第三階段結束



圖 5.2.2-4 實驗汲取第十四階段結束

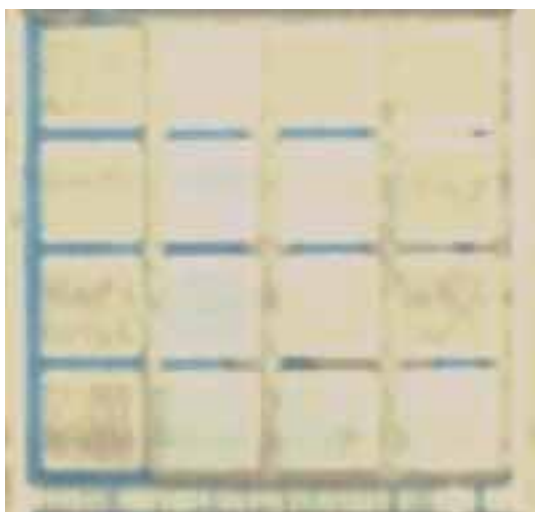


圖 5.2.2-5 實驗汲取第十七階段



圖 5.2.2-6 實驗汲取第十七階段



圖 5.2.2-7 實驗汲取第十七階段



圖 5.2.2-8 實驗汲取第十七階段

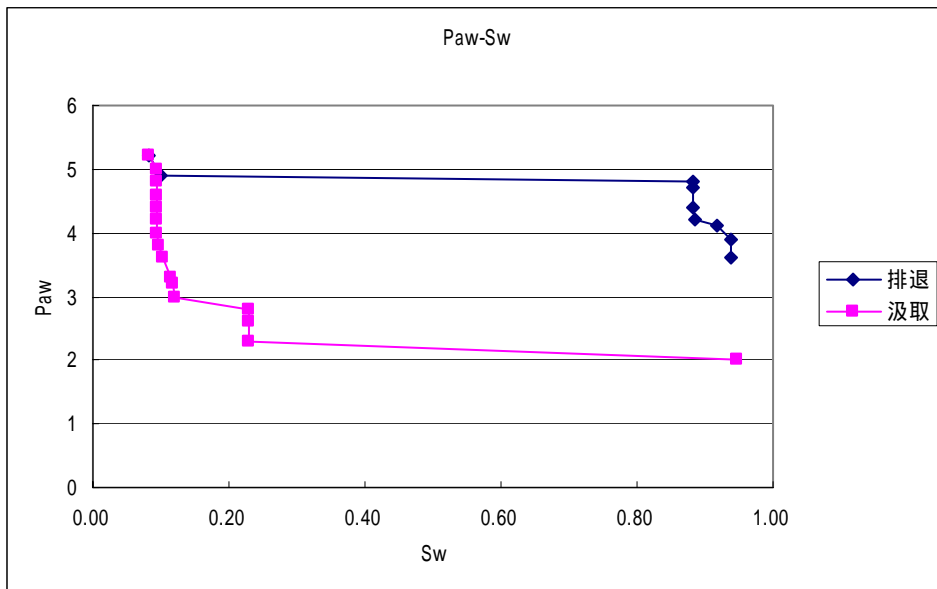


圖 5.2.3 單一寬度通道網絡模型實驗 s-p 曲線圖

### 5.3 單一寬度的孔與 5 種寬度頸管網絡模型實驗結果比較分析

在得到空氣—水流體對之接觸角後即可代入置換機制公式，以推估各種置換機制之理論毛細壓門檻值，推求結果如表 5.3-1 與表 5.3-2 所示。

#### 5.3.1 排退階段



在排退第二階段開始時，系統毛細壓力為 2.8cm，孔的非潤濕相進入儲存槽後，接著非潤濕相會先佔領孔，然後就不再往左右或往下移動，原因是毛細壓力設定在孔的活塞型運動門檻值，而其左右方即下方皆為頸管，頸管發生活塞型置換的毛細壓力門檻值大於孔發生的門檻值，所以此時的非潤濕相不再移動，實驗系統的毛細壓力為 2.8 cm，如圖 5.3.1-2 所示。

在排退第七階段時，系統毛細壓力為 4.1cm，飽和度僅增加 0.03，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。

第八階段時，系統毛細壓力增加至 4.4 cm 時，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，而寬度為 0.5 mm 的頸管其活塞型置換門檻值為 4.51cm，如圖 5.3.2-2 所示。

在排退第九階段時，系統的毛細壓力為 4.6cm，但非潤濕相突破了寬度為 0.38mm 與 0.34mm 的頸管，並停留在孔中，但非潤濕相隨後並未繼續移動，如圖 5.3.3-2 所示。

在排退第十階段時，系統毛細壓力為 4.8cm，寬度為 0.46 mm 的頸管其活塞型置換門檻值為 4.75cm，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，潤濕相飽和度也由 0.83 減少至 0.58；在本階段的排退路徑中，大部分的頸管寬度都大於 0.46，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，所以潤濕相飽和度才會迅速減少，如圖 5.3.4-2~圖 5.3.4-6 所示。

第十一階段，毛細壓力再增加 2mm 時，系統毛細壓力達到 5.0cm，寬度為 0.42mm 的頸管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，如圖 5.3.5-2 所示。

第十二階段，系統毛細壓力再增加 2mm 時，毛細壓力成為 5.2 mm，此時，非潤濕相由較易進入的頸管(0.5mm )進入孔中，且不再移動，如圖 5.3.6-2 所示。

第十三階段，系統毛細壓力再增加 2mm，毛細壓力成為 5.4mm，此時，非潤濕相並沒有移動，如圖 5.3.7-2 所示。

在第十四階段，系統毛細壓力增加至 5.6mm，此時非潤濕相突破寬度為 0.38mm 的頸管，並往下推進，在本階段的推進過程中，位於寬度為 0.38mm 的頸管該'行'的孔或頸的寬度皆大於 0.38mm，且在該'行'排退完後又往旁邊寬 0.5mm 的頸管推進，如圖 5.3.8-2 與圖 5.3.8-3 所示。

第十五階段毛細壓力已達到 5.8mm，寬度為 0.34mm 的頸管其活塞型置換門檻值為 5.81cm，但非潤濕相仍沒突破寬度為 0.34mm 的頸管而是往上突破 0.5mm 寬的頸管，並往右突破寬為 0.46 mm 的頸管，且並未往下突破 0.38mm 的頸管，如圖 5.3.9-2 所示。

排退第十六階段，毛細壓力達到 6.0cm，非潤濕相並沒有明顯的改變，如圖 5.3.10-2 所示。

排退第十七階段當毛細壓力到達 6.2cm 時，非潤濕相突破寬度為 0.38mm 的頸管後，非潤濕相即佔滿了孔，但隨後該頸管又被潤濕相佔領，如圖 5.3.11-2 與圖 5.3.11-3 所示。

排退第十八階段當毛細壓力到達 6.3cm 時，非潤濕相在突破寬度為 0.34mm 的頸管後，非潤濕相即佔領了孔，但隨後該頸管又被潤濕相佔領，如圖 5.3.12-2 與圖 5.3.12-3 所示。

在實驗過程中，每一個排退階段的平衡時間約為四小時。



在本實驗的排退階段中可發現以下幾點特徵：

- (1) 非潤濕相在排退潤濕相的過程中，非潤濕相會先排退平行非潤濕相移動方向的頸管，若因毛細壓力不夠大而無法進行排退寬度較小的頸管，則會選擇左右鄰邊最易突破的頸管，如果還是無法進行排退，則會選擇與非潤濕相移動方向相反的頸管進行排退，若還是無法發生排退，則非潤濕相就會停留在該孔中，不再移動，如圖 5.3.13-1 與 5.3.13-2 所示。
- (2) 在本實驗非潤濕相入口處的第一排頸管，其寬度為 0.34~0.5mm，如圖 5.3.1-1 微模型孔頸寬度分佈圖所示，而非潤濕相在排退的過程中，一方面因為不易突破 0.34mm 與 0.38mm 的頸管，一方面又因為 0.5mm 的活塞型運動的毛細壓力門檻值比較低，所以非潤濕相在整個排退過程中都是以寬度為 0.5mm 的頸管作為入口。

表 5.3-1 單一寬度的孔與 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

寬度(單位:cm)		活塞型(cm)
頸管	0.034	5.81
頸管	0.038	5.38
頸管	0.042	5.04
頸管	0.046	4.75
頸管	0.050	4.51
孔	0.128	2.82

表 5.3-2 單一寬度的孔與 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	活塞型置換	攪斷	I1	I2	其他
第 1 階段	2.6	*	*	*	*	*
第 2 階段	2.8	○	*	*	*	*
第 3 階段	3.1	*	*	*	*	*
第 4 階段	3.4	*	*	*	*	*
第 5 階段	3.7	*	*	*	*	*
第 6 階段	3.9	*	*	*	*	*
第 7 階段	4.1	*	*	*	*	*
第 8 階段	4.4	○	*	*	*	*
第 9 階段	4.6	○	*	*	*	*
第 10 階段	4.8	○	*	*	*	*
第 11 階段	5	○	*	*	*	*
第 12 階段	5.2	○	*	*	*	*
第 13 階段	5.4	*	*	*	*	*
第 14 階段	5.6	○	*	*	*	○
第 15 階段	5.8	○	*	*	*	*
第 16 階段	6	*	*	*	*	*
第 17 階段	6.2	○	*	○	*	○
第 18 階段	6.3	*				

註：\*代表未發生置換，○代表已發生置換

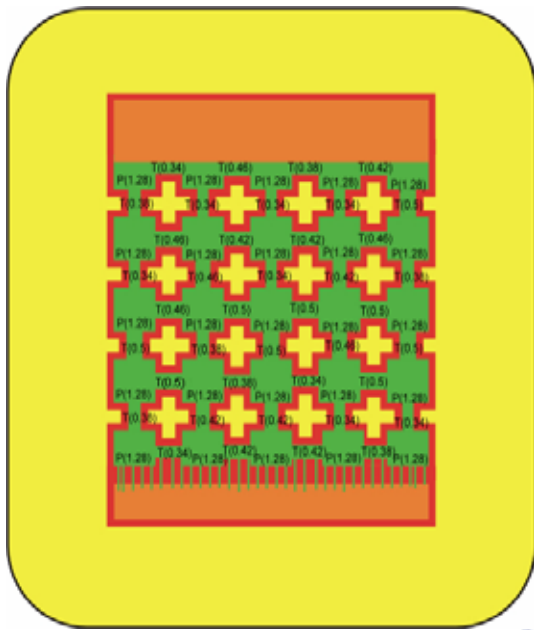


圖 5.3.1-1 微模型孔頸寬度分佈圖

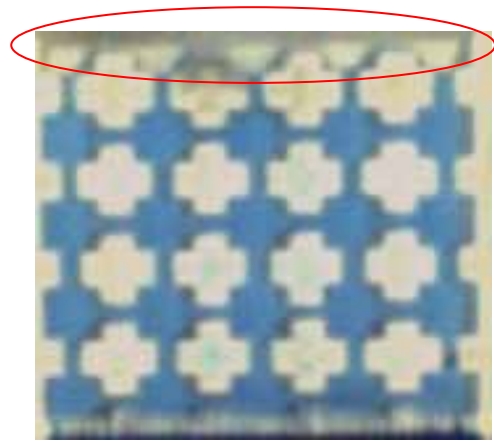


圖 5.3.1-2 實驗排退第七階段結束

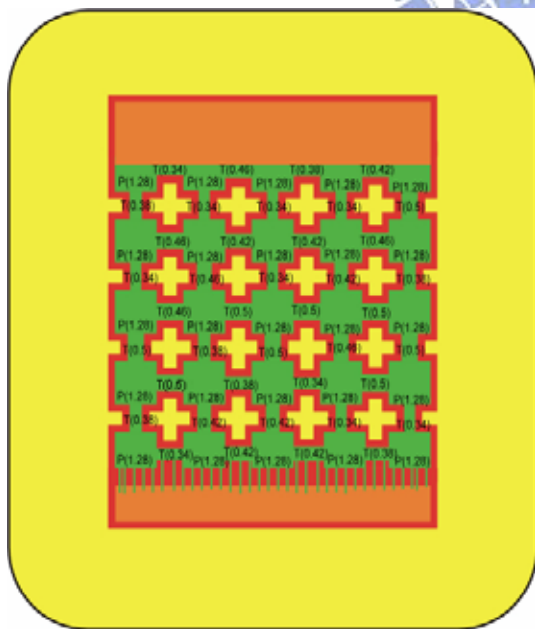


圖 5.3.2-1 微模型孔頸寬度分佈圖

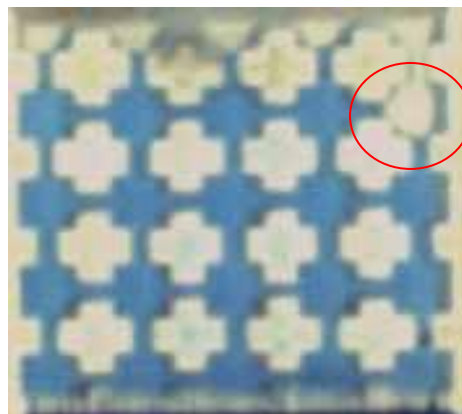


圖 5.3.2-2 實驗排退第八階段結束

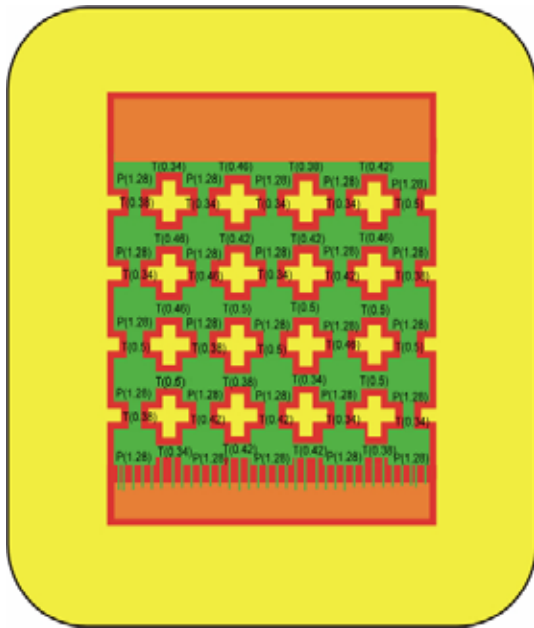


圖 5.3.3-1 微模型孔頸寬度分佈圖

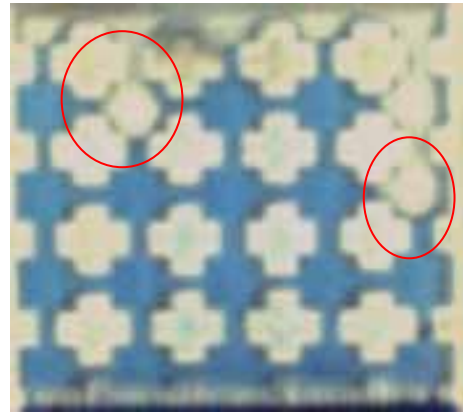


圖 5.3.3-2 實驗排退第九階段結束

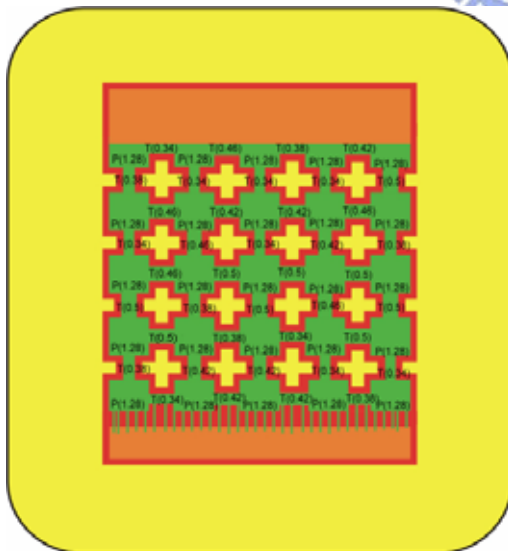


圖 5.3.4-1 微模型孔頸寬度分佈圖

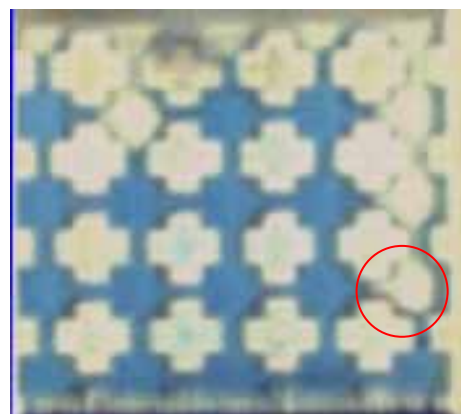


圖 5.3.4-2 實驗排退第十階段開始

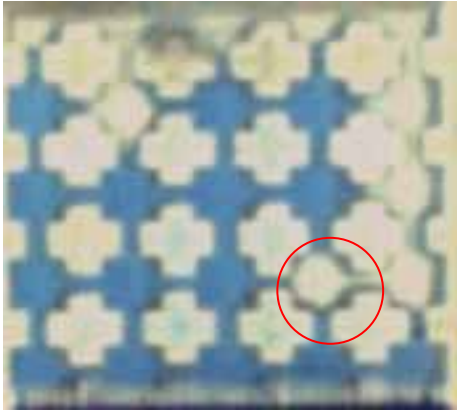


圖 5.3.4-3 實驗排退第十階段

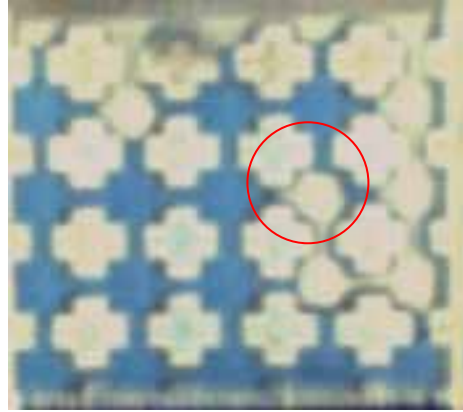


圖 5.3.4-4 實驗排退第十階段

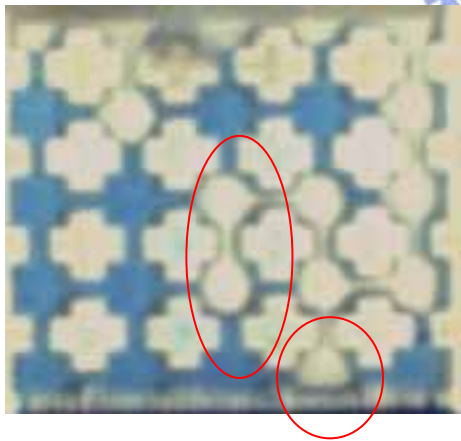


圖 5.3.4-5 實驗排退第十階段

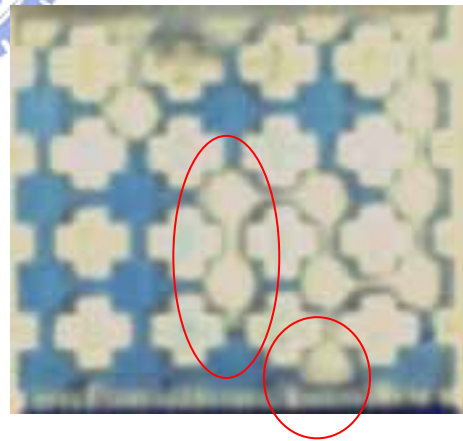


圖 5.3.4-6 實驗排退第十階段結束

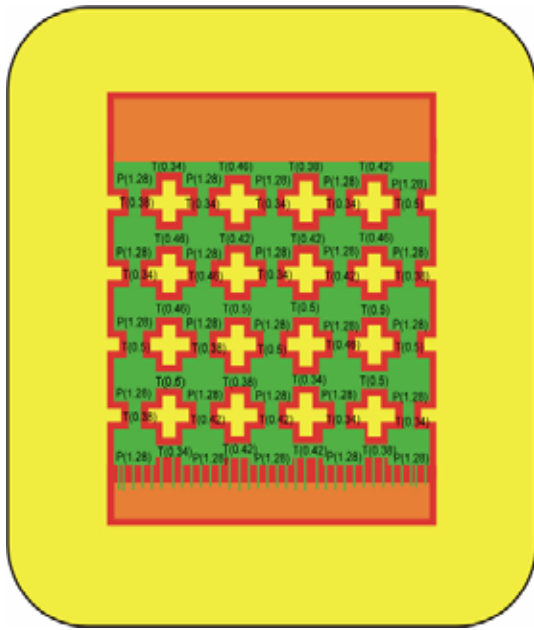


圖 5.3.5-1 微模型孔頸寬度分佈圖

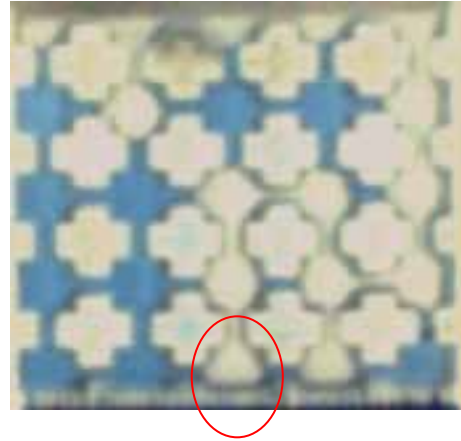


圖 5.3.5-2 實驗排退第十一階段

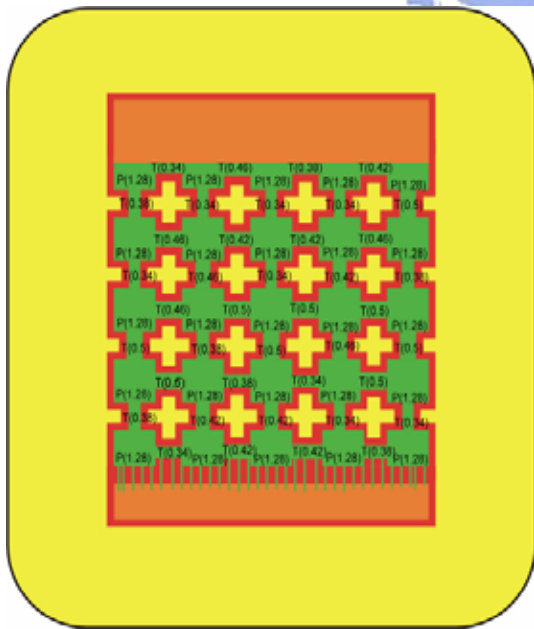


圖 5.3.6-1 微模型孔頸寬度分佈圖

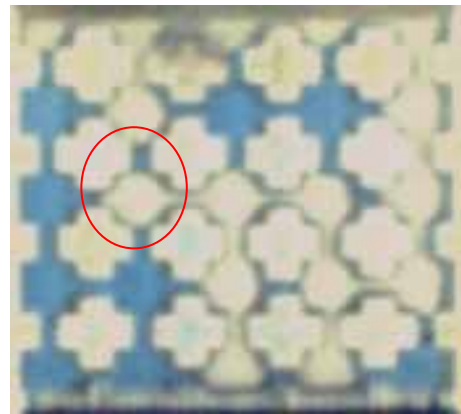


圖 5.3.6-2 實驗排退第十二階段