

## 摘要

在深床過濾行為的討論中，本論文將以布朗運動模擬方法探討個別膠體粒子在多孔性過濾器的網絡中吸附過濾的動態行為。本研究的模擬條件包含三種不同的網絡模型，分別為改良式正方形、正三角型、和蜂窩型網絡，在相同的初始可穿透度之下，並配合二種不同型態的 DLVO 能量曲線來進行探討。特徵過濾函數  $F_1(\mathbf{a}, s)$  和  $F_2(\beta, s)$  將分別由過濾床出口的粒子濃度比及壓降曲線在達到穩定時計算而得。模擬結果發現，在相同的網絡架構模型下，在無能障狀態的 DLVO 能量曲線時，單位收集器體積所吸附的膠體粒子體積值較具有 DLVO 能障時高。若在相同的能量曲線之下進行三種不同網絡架構的過濾效率比較，結果發現蜂窩型網絡較為容易過濾膠體粒子，其原因在於在網絡的節點上具有較少的進出管數值，因此其單位收集器體積所能過濾的膠體粒子體積值將會較其他網絡模型為高。在相同的過濾條件下，針對三種網絡模型進行實驗數據的模擬，結果發現正三角型網絡模型對深床過濾的動態行為具有最佳的預測性。

關鍵字：過濾、網絡、模擬、膠體粒子、布朗運動、多孔性過濾器。

# Abstract

The dynamic behavior of deep bed filtration is investigated in the present paper by using the Brownian dynamic simulation method to track the individual particles moving through the network structure of porous media in the filter bed. Present simulations include three different network structures of modified square, triangular and honeycomb with the same initial permeability, and two types of DLVO interaction energy curves. The specific filtration functions of  $F_1(\mathbf{a}, \mathbf{s})$  and  $F_2(\beta, s)$  are determined from the breakthrough curves of effluent concentration and the pressure drop, respectively. It is found that, since the “barrierless” type interaction energy curve favors particle deposition on the pore walls, hence its corresponded specific deposit  $\mathbf{s}$  is higher than that of interaction energy curve with energy barrier existed for the same network structure. When comparing the filtration effect of those three different network structures with the same interaction energy curve, the honeycomb network can filter those particles the easiest because of its lowest coordination number, so its corresponded specific deposit  $\mathbf{s}$  is the highest. When comparing the available experimental data with those simulation results

of three different network structures in the same filter bed, it is found that the triangular network offers the best accuracy on predicting the dynamic behavior of granular filtration.

Keywords: Filtration, Network, Simulation, Particle, Brownian Motion, Porous Media.

# 目錄

摘要	I
Astract	II
目錄	IV
圖表目錄	VI
誌謝	XIII
一、緒論	1
二、文獻回顧與理論分析	4
1、深床過濾的現象方程式	4
2、網絡模型	7
3、楔型管模型	10
4、布朗動態模擬法	11
5、DLVO 理論的能量曲線	11
三、模擬方法	16
四、結果與討論	20
1、模擬結果探討	20

2、與實驗數據之比較	30
五、結論與展望	37
六、參考文獻	42
七、符號說明	44
八、附錄	50
附錄一：楔型管內的流場分佈與軌跡吸附方程式的推導	50
附錄二：在模擬流程中，過濾器的可穿透度、壓降及其他參數的計算	63
附錄三：於本論文研究過程中，已發表的文獻與會議報告	65
附錄四：於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管的條件，在相同的 DLVO 能障曲線下，不同的膠體濃度對於可穿透度與壓降變化的探討	66
附錄五：膠體粒子大小對於 DLVO 能障曲線形狀改變影響的探討	77
附錄六：於不同的網絡模型、DLVO 能障、楔型管管型、及有無布朗運動的模擬條件下，filtration functions $F_1(c, \dots)$ (break-through concentration) 與 $F_2(c, \dots)$ (pressure drop) 的比較與探討	81
附錄七：以正三角型網絡模型、SCT 楔型管的條件下，進行模擬並與實驗數據比較的探討	112
作者簡歷	116

# 圖表目錄

圖 2-1 於本文中所使用的三種結構不同的網絡模型,其中(a).代表正三角型網絡模型;(b).代表改良式正方型網絡模型;(c).代表蜂窩型網絡模型	9
圖 2-2 膠體粒子沈積於 SCT 楔型管之示意圖	13
圖 2-3 於本文中所使用的二種不同的能量曲線,其中 Curve A 的 $N_{E1}=105.0$ 、 $N_{DL}=10.75$ ,而 Curve B 的 $N_{E1}=0.0$ 、 $N_{DL}=0.0$ , $N_{E2}=1.0$ and $N_{L0}=7.0$ 均為二種曲線的其餘的 DLVO 無因次參數值	15
圖 3-1 模擬方法流程圖	17
表 3-1 於論文中所使用之模擬條件	18
圖 4-1 於本文中,在三種不同的網絡模型下,探討在圖 2-3 之中所介紹的二種不同 DLVO 的能量曲線時,膠體粒子的進出口濃度比對 Pore Volume 的趨勢影響	22
圖 4-2 於本文中,在三種不同的網絡模型下,探討在圖 2-3 之中所介紹的二種不同 DLVO 的能量曲線時,壓降差對 Pore Volume 的趨勢影響	23
圖 4-3 於本文中,在三種相異的網絡模型下,探討在圖 2-3 之中所介紹的二種不同 DLVO 的能量曲線時,可穿透度比對 Pore Volume 的趨勢影響	24
圖 4-4 於本文中,在圖 2-3 所示的二種不同 DLVO 能量曲線之下,三種不同網絡模型的 $F_1(\mathbf{a},\mathbf{s})$ 對單位體積收集量 $\mathbf{s}$ 的趨勢關係	26
圖 4-5 於本文中,在圖 2-3 所示的二種不同 DLVO 能量曲線之下,三種不同網絡模型的 $(F_2(\mathbf{b},\mathbf{s})-1)$ 對單位體積收集量 $\mathbf{s}$ 的趨勢關係	27
表 4-1 於本文中在三種不同的網絡模型之下,二特徵過濾函數 $F_1(\mathbf{a},\mathbf{s})=1-\mathbf{a}_1\mathbf{s}^{\mathbf{a}_2}$ 與 $F_2(\mathbf{b},\mathbf{s})=1+\mathbf{b}_1\mathbf{s}^{\mathbf{b}_2}$ 表示式中, $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 、 $\mathbf{b}_1$ 與 $\mathbf{b}_2$ 各參數的數值	29
圖 4-6 於 Soo 和 Radke <sup>[26,27]</sup> 的實驗數據之中,利用三種不同的網絡模型進行可穿透度比 $K/K_0$ 理論與實驗結果的比較,所使用的模擬條件之中,其中油滴平均大小為 5.1 $\mu\text{m}$	33
圖 4-7 於 Soo 和 Radke <sup>[26,27]</sup> 的實驗數據之中,利用三種不同的網絡模型進行可穿透度比 $K/K_0$ 理論與實驗結果的比較,所使用的模擬條件之中,其中油滴平均大小為	

9.0 <i>mm</i>	34
圖 4-8 於 Soo 和 Radke <sup>[26,27]</sup> 的實驗數據之中，利用三種不同的網絡模型進行可穿透度比 $K/K_0$ 理論與實驗結果的比較，所使用的模擬條件之中，其中油滴平均大小為 2.2 <i>mm</i>	35
2.2 <i>mm</i>	36
附表 4-1 附錄四模擬條件中所描述 DLVO 曲線四種能障的各項參數值 <sup>[1]</sup>	67
附圖 4-1-1 附錄四之四種 DLVO 曲線能障示意圖 <sup>[1]</sup>	67
附表 4-2 附錄四圖形中所使用的模擬條件中各項操作變因	68
附圖 4-2-1 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及有布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	69
附圖 4-2-2 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及有布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	69
附圖 4-2-3 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及有布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	69
附圖 4-3-1 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及有布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	70
附圖 4-3-2 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及有布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	70
附圖 4-3-3 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及有布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	70
附圖 4-4-1 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及有布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	71
附圖 4-4-2 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有	

Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及有布朗運動之下， 壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	71
附圖 4-4-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及有布朗運動之下， 進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	71
附圖 4-5-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及有布朗運動之下， 可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	72
附圖 4-5-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及有布朗運動之下， 壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	72
附圖 4-5-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及有布朗運動之下， 進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	72
附圖 4-6-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及無布朗運動之下， 可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	73
附圖 4-6-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及無布朗運動之下， 壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	73
附圖 4-6-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及無布朗運動之下， 進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	73
附圖 4-7-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及無布朗運動之下， 可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	74
附圖 4-7-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及無布朗運動之下， 壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	74
附圖 4-7-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及無布朗運動之下， 進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	74
附圖 4-8-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及無布朗運動之下， 可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	75

附圖 4-8-2 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及無布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	75
附圖 4-8-3 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及無布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	75
附圖 4-9-1 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及無布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢	76
附圖 4-9-2 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及無布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢	76
附圖 4-9-3 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution 不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及無布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢	76
附表 5-1 附錄五圖形中所使用的模擬條件中各項操作變因	78
附圖 5-1-1 膠體粒子在具有 A 形狀的吸附能障時，改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢	79
附圖 5-1-2 膠體粒子在具有 B 形狀的吸附能障時，改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢	79
附圖 5-1-3 膠體粒子在具有 C 形狀的吸附能障時，改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢	80
附圖 5-1-4 膠體粒子在具有 D 形狀的吸附能障時，改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢	80
附圖 6-1-1 SCT 楔型管 ( Sinusoidal Constricted Tube) 示意圖 <sup>[1]</sup>	84
附圖 6-1-2 HCT 楔型管 ( Hyperbolic Constricted Tube) 示意圖 <sup>[1]</sup>	84
附圖 6-1-3 PCT 楔型管 ( Parabolic Constricted Tube) 示意圖 <sup>[1]</sup>	84
附表 6-1 附錄六圖形中所使用模擬條件中的各項操作變因	85
附圖 6-2-1 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	86
附圖 6-2-2 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	86
附圖 6-3-1 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	87
附圖 6-3-2 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子不具有布朗運動	

行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	87
附圖 6-4-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	91
附圖 6-4-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	91
附圖 6-5-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	92
附圖 6-5-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	92
附圖 6-6-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	93
附圖 6-6-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	93
附圖 6-7-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	94
附圖 6-7-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	94
附圖 6-8-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	95
附圖 6-8-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	95
附圖 6-9-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	96
附圖 6-9-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	96
附圖 6-10-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	97
附圖 6-10-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	97
附圖 6-11-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	98
附圖 6-11-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\quad, \quad)$ 的影響	98
附圖 6-12-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\quad, \quad)$ 的影響	102

附圖 6-12-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve A 能障, 當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	102
附圖 6-13-1 於 SCT 楔型管, DLVO Curve A 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	103
附圖 6-13-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve A 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	103
附圖 6-14-1 於 SCT 楔型管, DLVO Curve B 能障, 當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	104
附圖 6-14-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve B 能障, 當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	104
附圖 6-15-1 於 SCT 楔型管, DLVO Curve B 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	105
附圖 6-15-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve B 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	105
附圖 6-16-1 於 SCT 楔型管, DLVO Curve C 能障, 當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	106
附圖 6-16-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve C 能障, 當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	106
附圖 6-17-1 於 SCT 楔型管, DLVO Curve C 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	107
附圖 6-17-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve C 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	107
附圖 6-18-1 於 SCT 楔型管, DLVO Curve D 能障, 當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	108
附圖 6-18-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve D 能障, 當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	108
附圖 6-19-1 於 SCT 楔型管, DLVO Curve D 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_1( , )$ 的影響	109
附圖 6-19-2 於 SCT 楔型管, DLVO Curve D 能障, 當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時, 不同網絡模型對於 filtration functions $F_2( , )$ 的影響	109
附表 6-2 附錄六中所討論之特徵過濾函數, 於正三角型網絡模型時, $F_1(a, s) = 1 - a_1 s^{a_2}$ 與 $F_2(b, s) = 1 + b_1 s^{b_2}$ 的表示式中, $a_1, a_2, b_1$ 與 $b_2$ 各參數的數值	110
附表 6-3 附錄六中所討論之特徵過濾函數, 於蜂窩型與改良式正方型網絡模型時, $F_1(a, s) = 1 - a_1 s^{a_2}$ 與 $F_2(b, s) = 1 + b_1 s^{b_2}$ 的表示式中, $a_1, a_2, b_1$ 與 $b_2$ 各參數的數值	111

附表 7-1 針對 Soo 和 Radke 文獻 <sup>[25]</sup> 中可穿透度對 Pore Volume 實驗進行比較時所使用模擬條件	113
附圖 7-1-1 以正三角型網絡模型 SCT 楔型管進行模擬,並與 Soo 和 Radke 文獻 <sup>[25]</sup> 中(圖九)可穿透度對 Pore Volume 實驗比較的結果	114
附圖 7-1-2 以正三角型網絡模型 SCT 楔型管進行模擬,並與 Soo 和 Radke 文獻 <sup>[25]</sup> 中(圖十)可穿透度對 Pore Volume 實驗比較的結果	114
附圖 7-1-3 以正三角型網絡模型 SCT 楔型管進行模擬,並與 Soo 和 Radke 文獻 <sup>[25]</sup> 中(圖十一)可穿透度對 Pore Volume 實驗比較的結果	115

## 誌謝

這是一段很漫長且艱辛的歷程，在這篇論文完成的同時，也終將劃下完美的句點。六年攻讀博士的日子中，由人間掉入地獄，再由谷底深處重返人世，這種五味雜陳的箇中滋味，到如今卻也是目前活過的歲月中最深刻的體認，對於周遭的一切，也有了新的認識。

我的父母，由六年前並不贊成我繼續攻讀博士，隨著歲月穿梭，從不再堅持反對的立場，到完全支持著這個兒子任性的決定，在最痛苦的時刻，總是能感受到他們站在我的後方默默的鼓勵與關懷，有人曾說小孩子要長大歷練之後才會知道父母的辛勞，這段日子以來，感覺到父母對我的重要不下上百次，很感謝他們對我無悔的付出，在生命歲月中有他們在身旁，我很幸福，謝謝您們。

恩師張有義，在我最需要幫助的時候拉了我一大把，他的為人，讓我知道活著也可以這麼豁達，他對學問的認真及要求，讓我瞭解做學問就是得要求自己不斷的精進，他以自身的行動告訴他的學生，書要認真唸；也把自己當成每個學生的朋友，去關懷學生求學之外生活上的問題與困境，在求學的歷程能遇到這麼一位亦師亦友的師長，我很幸福，謝謝您。

我的女友麗君，一位即將取得藝術管理碩士的女孩，以包容關愛的心溫暖著心裡已殘破不堪的我，不管自己發脾氣是否無理取鬧，能陪著自己，忍受著火冒三丈的無名怒火，告訴我壓力的抒發使自己能從陰影中走出來，以及讓我知道原來愛情是如此的偉大，都是她。在人生的旅程能與她相隨，我很幸福，謝謝妳。

徐武軍老師、徐治平老師、楊怡寬老師、李國禎老師、以及程學恆老師，很感謝你們在百忙之中撥空指導，並且提出相當重要的觀念，讓我在完成這本論文的同時，獲得更多新的體認。在東海求學的路途上一直受到你們的照顧，能認識你們並且接受你們的教導，我很幸福，謝謝你們。

118 的伙伴們，維權學長、豐嘉、建源、維振、豐彬、清豐、弘偉、朗青、振芳、錦維、愷之、家信、曜麟、建智、偉庭、思璋、以及皮卡丘；E205 的成員們，世偉學長、耿毅、騰輝、容馨、良樺、英齡、晴美、子晏、偉佑、茂展、裕昇、棋樺、元泰，很感謝這六年以來你們的幫忙，你們的協助與鼓勵對我而言無比的重要，有你們相伴，才有現今我的人生與學業的完整，少了你們，就有了缺憾，能有你們共度博士求學生涯，我很幸福，也在這祝你們一帆風順。

塑發中心的沈曉復博士、坤德大哥，大肚鄉的嘉德大哥、全安大哥，家鄉的俊廷，以及東海的廣欽、明廣，交大的彥成，台大的明弘學長、禮賢等諸多好友們，你們帶給我的是筆墨無法形容的友情，有此摯友，可謂不枉此生，人生對於友情的詮釋莫過於此，有你們的照顧，我很幸福，謝謝你們。

寫完這本論文，或許代表的是在東海校園的學生生涯結束，但卻是一個新的起步，未來的日子會不會很崎嶇我並不清楚，但是至少自己知道，憑著所抱持的信念而活，努力的堅持下去，將會得到想要的人生，這十二年就是最好的例證。