

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告

多孔吸附關鍵陶瓷結構元件氣流、熱流及運轉負載特性

模擬分析研究

**Simulation and analysis of air flow, heat flow and operating load  
characteristics of porous adsorption ceramic structural components**

計畫編號：111B001

受委託機關(構)：國立成功大學材料科學及工程學系

計畫主持人：李旺龍

報告日期：111年12月08日

# 目錄

目錄.....	I
中文摘要.....	3
英文摘要.....	4
壹、計畫緣起與目的.....	6
貳、研究方法.....	10
一、相關文獻蒐集.....	10
二、執行方法與步驟.....	15
三、統御方程式.....	17
(一)、質量守恆方程式.....	17
(二)、動量守恆方程式.....	18
(三)、能量守恆方程式.....	19
參、結果與討論.....	21
一、氣流通過多孔性陶瓷元件之特性分析.....	21
(一)、岩棉的添加.....	25
(二)、吸附脫附濃縮槽.....	31

a. 較密的多孔性陶瓷元件-60 PPI.....	31
b. 較疏的多孔性陶瓷元件-30 PPI.....	37
(三)、燃燒室.....	43
b. 燃燒室氣流特性分析.....	48
二、VOCs 吸附試驗.....	54
(一)、實驗前的準備事項.....	54
1. 浸鍍 (dipping).....	54
2. 氣體製備.....	54
(二)、實驗設備規格.....	55
1. 氣體進行吸附反應測試模組.....	55
2. 空氣採樣器.....	57
3. 氣味偵測儀.....	57
(三)、實驗結果與討論.....	58
(四)、貫穿曲線(Breakthrough Curve, BTC).....	59
肆、結論.....	65
參考文獻.....	68

## 中文摘要

本期計畫採用有限元素法建立吸附脫附濃縮槽及燃燒室的數值分析模型。基於達西定律來修正傳輸過程中的質量、動量(Navier-Stokes 方程式)、及能量守恆方程式；分析在六種不同流速條件下，吸附脫附濃縮槽內氣流與熱流交互作用時的溫度、流速及壓力分佈。燃燒室的數值模型運作原理是把濃縮的揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)氣體燃燒成潔淨的高溫空氣，分析不同濃縮物在不同濃度條件下溫度、流速及濃度分佈，並根據燃燒室的數值模擬分析找出最佳的雙層孔洞設計。

此外也配合實驗量測，進行揮發性有機物之吸附特性試驗，透過使用 20 PPI 孔徑之多孔性陶瓷元件通過三種 VOCs 氣體在四種濃度條件下進行吸附測試，以獲得吸附動力及貫穿曲線之操作參數，之後藉由獲得之實驗數據，分析多孔吸附關鍵陶瓷結構元件之吸附特性下的 Yoon-Nelson 模型之模擬結果。VOCs 試驗結果顯示出浸鍍分子篩後的多孔性陶瓷元件不僅能提升吸附效果，其中對於親水性比較好的 VOCs 更容易被多孔陶瓷吸附。

## 英文摘要

This project uses the finite element method to establish the numerical analysis model of the adsorption-desorption concentration tank and combustion chamber. Darcy's law is implemented to modify the mass, momentum (Navier-Stokes equation), and energy conservation equation in the transport process; analyze the temperature and flow rate when the gas flow and heat flow in the adsorption-desorption concentration tank interact with each other under six different flow rates and pressure distribution. The operating principle of the numerical model of the combustor is to burn concentrated volatile organic compounds (Volatile Organic Compounds, VOCs) gas into clean high-temperature air, and analyze the temperature, flow rate and concentration distribution of different concentrates under different concentration conditions. According to the numerical simulation analysis of the combustion chamber, the optimal double-layer hole design is found.

In addition, in conjunction with the experimental measurement, the adsorption characteristic test of volatile organic compounds is carried out. By using a porous ceramic element with a pore size of 20 PPI, the adsorption test is carried out through three kinds of VOCs gases under four concentration conditions to obtain the adsorption kinetics and the operating parameters of the curve. , and then analyzed the simulation results of the Yoon-Nelson model under the adsorption characteristics of the porous adsorption key ceramic structural elements based on the obtained experimental data. The results of the VOCs test show that the

porous ceramic components after immersion-coating with molecular sieves can not only improve the adsorption effect, but VOCs with better hydrophilicity are more easily adsorbed by the porous ceramics.

## 壹、計畫緣起與目的

VOCs 是主要的環境污染物，不當的排放將造成環境汙染。燃燒法是目前常用來處理廠房排放的 VOCs 汙染物技術，去除不同濃度的 VOCs 廢氣效率可高達 95% 以上，並且熱量還可進行回收。節能蓄熱式吸附濃縮處理系統主要是由多孔介質燃燒室(簡稱燃燒室)、單槽或雙槽式吸附濃縮設備和熱交換器所組成。如圖 1 所示，將廠房製程環境 VOCs 排入吸附濃縮設備後成為潔淨空氣經煙囪排出，之後將濃縮 VOCs 脫附進入燃燒室燃燒處理成為潔淨空氣，再經煙囪排出，多孔陶瓷結構的蓄熱能力提供混合氣熱能，比傳統燃燒方式更能節省能源，降低廢氣處理成本。因此節能蓄熱式吸附濃縮處理系統中，吸附濃縮槽及燃燒室的多孔陶瓷結構將是重要關鍵元件。

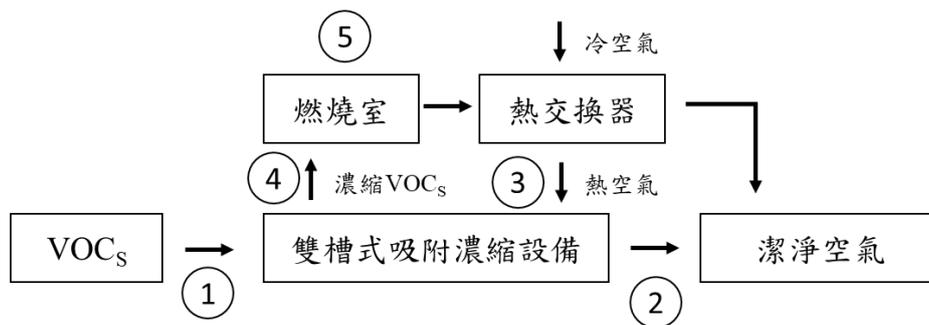


圖 1、節能蓄熱式吸附濃縮處理系統

本計畫評估吸附脫附濃縮槽模擬的可行性，其幾何模型如圖 2 所示，圖 2 (a) 為整體幾何模型的外部結構，總高度為 1500 mm 的吸附脫附濃縮槽，內部會添加壓實的岩棉，中間具有兩個可以擺放邊長為

400 mm 的立方體多孔性關鍵陶瓷元件進行吸附的存儲空間，且兩端各有兩個直徑 3 吋的管子可進行空氣流動時的通道。圖 2 (b)為吸附脫附濃縮槽的第一個步驟，VOCs 氣體自右下方進入腔體，經過多孔性陶瓷元件吸附之後，變成潔淨空氣從右上方出口排出，當多孔陶瓷材料吸附達到飽和，則切換成脫附過程，如圖 2 (c)所示，高溫空氣自左上方進入腔體，經過多孔性陶瓷元件之後，可以帶走被吸附住的有機分子，形成濃縮 VOCs 氣體從左下方出口排出並通入燃燒室，如此即完成一輪吸附及脫附過程。

本計畫將研究吸附脫附濃縮槽內不同多孔陶瓷結構對於氣流、溫度及壓力的影響，將有助於提升評估多孔陶瓷結構的吸附及脫附效率及循環時間；並規劃多孔陶瓷結構對於不同濃度的 VOCs 的吸附試驗，所得結果將進行吸附動力及貫穿曲線結果分析，也針對燃燒室在不同濃度的 VOCs 條件對於不同孔徑陶瓷結構材料的影響，評估燃燒室燃燒點最低溫度變化，來提高燃燒熱效率，並利用多孔陶瓷材料蓄熱特性，減少其外部電子元件(點火器)與燃燒液態石油氣的使用，達到高溫且低排放之燃燒室性能，使燃燒工作環境更為安全。

燃燒室的數值模型幾何外觀總高度為 1850 mm，其幾何外觀與氣體路徑如圖 3 所示，燃燒室內部有壓實保溫用的岩棉，兩塊不同

結構且皆為 300 mm\*300 mm\*400 mm 的多孔性陶瓷元件上下疊在一起放置在燃燒室中，上面那一塊為孔隙度較大，而下面那一塊為較密的多孔性材料，透過上下層擺放不同結構的多孔陶瓷元件可幫助燃燒現象，燃燒室入口處的濃縮 VOCs 氣體是從圖 2(c) 經脫附之後所產生的。濃縮 VOCs 氣體將由圖 3(b) 所標示的方向從 3 吋的入口流入燃燒室，完成燃燒反應之後，再由 4 吋的出口排出潔淨的高溫氣體會通到提供圖 2(c) 的高溫空氣入口進行下一輪的脫附，以此達成一個循環。

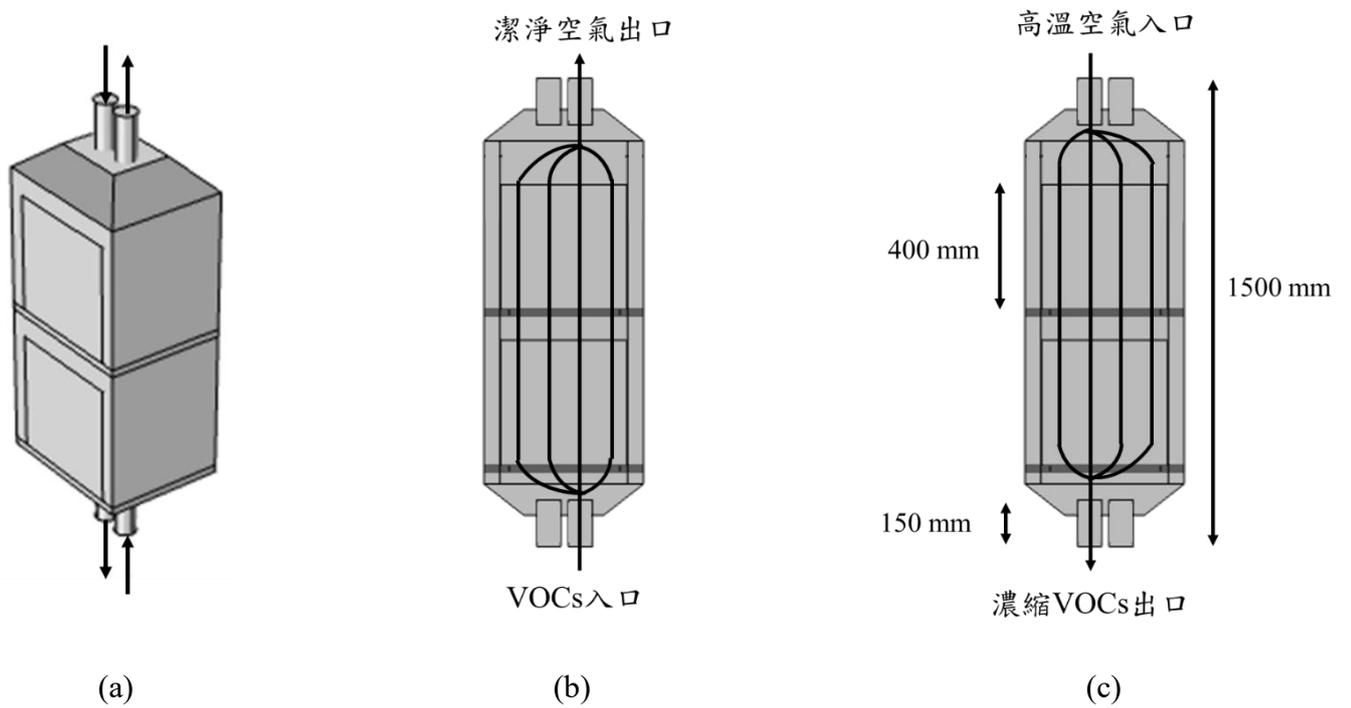


圖 2、(a) 吸附脫附濃縮槽整體外觀構造圖

(b) VOCs 進入濃縮槽進入吸附的過程 (c) 高溫空氣進入進行脫附的過程

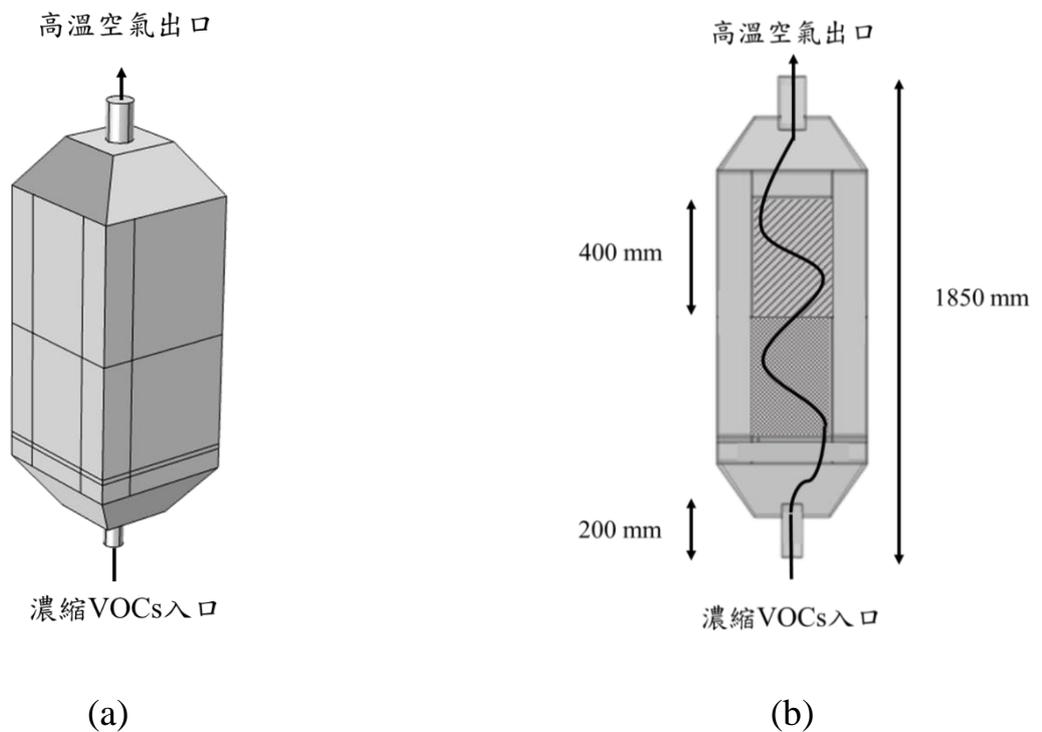


圖 3、(a) 多孔介質燃燒室整體外觀構造圖 (b) 各物件的尺寸剖面圖

## 貳、研究方法

### 一、相關文獻蒐集

節能蓄熱式吸附濃縮處理系統整合吸附濃縮槽及燃燒室設備，吸附濃縮槽能將廠房製程環境 VOCs 排入吸附濃縮設備後成為潔淨空氣經煙囪排出，之後將濃縮 VOCs 脫附進入燃燒室，因此需要考慮吸附濃縮設備及燃燒室中多孔陶瓷材料(氧化鋁)對於進出口的氣流及溫度的影響。多孔氧化鋁具有良好的吸附氣體能力，而吸附濃縮槽運作過程中包含流體的流動、熱傳與質傳。當多孔介質內部比表面積較大，流體在多孔介質中流動時，極易受到擾動，故不能僅僅使用 Navier-Stokes 方程式描述其流動狀態，必須同時耦合動量守恆方程式、質量守恆方程式與能量守恆方程式。1981 年 Vafai 和 Tien [1] 研究固體邊界及慣性力對多孔介質中流動和傳熱的影響，以研究不可滲透邊界附近的多孔介質的速度和溫度場分佈並提出數值解的動量邊界層。2009 年 Ruivo 等人 [2] 研究多孔介質內局部吸附、熱傳導和質量擴散現象，並針對乾燥劑基質通道壁提出偽氣側控制模型 (PGSCM) 的簡化公式，並建立一維數值模型。2017 年 Cheng 等人 [3] 使用三維模型描述氣體在多孔吸附床層的通道中的流動、傳熱和傳質問題，通過求解 Navier-Stokes 方程式獲得氣流的流場，並且對吸

附床層的吸附/脫附動力學進行建模。對傳熱和傳質機制進行分析，結果顯示出設計和改善吸附床塗層氣體通道中的吸附過程能夠非常好的預測。2019年 Luo 和 Xu [4] 模擬雙擴散混合對流，在固液介面上耦合多孔介質的吸附過程，討論在不同參數下流線、等溫線及濃度分佈，提供多孔介質中的滲透、吸附以及傳熱和傳質的機制。因此本研究藉上述研究成果建立吸附濃縮槽在不同操作條件下，多孔介質材料對流體運動及溫度分佈影響。

節能蓄熱式吸附濃縮處理系統另一個研究重點為燃燒室，而燃燒室的物理特性(材料特性、雙層多孔結構、幾何尺寸)和操作條件(進氣速度、換氣週期、VOCs 成分及濃度)對於 VOCs 的去除率和熱回收率有很大的影響。燃燒室採用多孔介質燃燒技術(Porous Medium Combustion, PMC)，將吸附濃縮槽集中的濃縮 VOCs 通入燃燒室燃燒，產生的熱量以多孔陶瓷結構的固體熱傳傳遞至整個腔體，又可利用自身蓄熱能力對餘熱進行回收[5]，這種燃燒方式可使燃燒溫度達到 1200°C 以上，並且由於多孔陶瓷結構有較大的體表面積提高蓄熱能力和其他燃燒法相比，提高了 VOCs 的燃燒效率。

多孔介質材料具有發泡網狀或蜂巢狀陶瓷結構或由許多顆粒組成的填充結構，是 VOCs 廢氣燃燒的載體，又是熱量傳遞的介質，因

此選用多孔介質材料需要考慮流動和熱傳特性，Pedersen-Mjaanes 和 Chan L. 等人發現把多孔性材料加入到燃燒室中可以提高燃燒室的效能[6]，目前常用成分主要有氧化鋁( $Al_2O_3$ )、碳化矽(SiC)、氧化鋯( $ZrO_2$ ) [7]。Howell 等人 [8]和 Kamal 和 Mohamad [9]專注於多孔介質燃燒技術的實驗和理論，而 Trimis 和 Drust [10]則評論 PMC 的發展及應用。Mohamad [11]介紹 PMC 的基本原理和應用。Pantangi 和 Mishra [12]總結多孔介質中基體穩定燃燒的發展。Oliveria 及 Kaviani [13]總結導致熱和化學反應的過程 PMC 中的非平衡狀態及這些過程中建模及技術。PMC 可使用預混(燃料和空氣強制通過多孔介質)或者是非預混(燃料在出口處遇到反向擴散氣流)。預混合是由兩個連續區域組成(1)燃料先進入到小孔徑的介質，在這區域先加熱直到進入(2)第二區域的大孔徑的介質，其中燃燒火焰可以在很寬的流速和空氣/燃料比範圍內保持穩定，如圖 3 所示。VOCs 氣體在多孔介質燃燒的穩定性主要由 Peclet number (Pe)決定，公式(1)

$$Pe = \frac{S_L d_m c_p \rho}{k} \quad (1)$$

其中 $S_L$ 為氣體層流火焰速度、 $d_m$ 為多孔介質孔徑、 $C_p$ 、 $\rho$ 、 $k$ 分別為 VOCs 氣體的比熱容、密度及熱傳導係數。當 $Pe > 65$ 時，VOCs 氣體可以在多孔介質中穩定燃燒；當 $Pe < 65$ 時，則會發生猝熄現象。

所以為了增強系統處理 VOCs 氣體的穩定性，通常採用雙層多孔介質[14]，即小孔徑材料作為預熱區、大孔徑材料為燃燒區。燃燒室的下方為濃縮 VOCs 氣體入口，上方是燃燒氣體排放出口，內部上方空間有點火元件，引燃 VOCs 氣體。VOCs 燃燒破壞的機制如下：



一般氣體燃燒時間為 1 秒，燃燒溫度介於 500~800°C 之條件下，VOCs 之熱破壞去除率為 98- 99 % [15]。2005 年 Wu 等人[16]使用多孔材料(氧化鋁)燃燒室進行模擬分析，使用甲烷及丙烷作為燃料，固定空氣流量進行實驗，量測溫度分佈及排放濃度，結果顯示多孔材料可透過參數操作，可將排氣濃度控制在低汙染情況。2010 年 Bobnovich 等人[17]利用在燃燒室加入兩個不同直徑的多孔氧化鋁球幫助甲烷與空氣做預混燃燒，實驗結果顯示出燃燒時有效穩定火焰及降低汙染物的排放。隔年，Charoensuk 等人[18]設計一組陶瓷球床燃燒室，使用 LPG (丙烷 40%、丁烷 60%)作為燃料，改變三個空氣入口位置及陶瓷球直徑，討論軸向溫度分佈及燃燒後氣體濃度，結果顯示陶瓷球直徑越大，火焰容易傳播且燃燒溫度較高。依據上述研究顯示出不同孔徑的多孔介質材料及 VOCs 濃度對於燃燒室的性能有很大關聯性。因此針對燃燒室，評估三種揮發性有機物(丙酮、異丙

醇、甲苯)在不同濃度條件(至少三種濃度條件)對於燃燒室燃燒點最低溫度變化，研究時間相依的流速分佈、濃度分佈、及溫度分佈變化，評估最佳的孔洞組合設計，提高燃燒熱效率及燃燒室的蓄熱能力。

多孔陶瓷結構材料對於揮發性有機物吸附試驗實驗方面，目前應用在工業揮發性有機物已發展成熟的處理技術，吸附為溶質濃縮現象，必須使用內部表面積大的多孔陶瓷結構作為吸附床，來分離氣體或液體混合物，稱為吸附操作。2004年 Tatlier 和 Erdem-Şenatalar [19]利用有效介質理論(EMT)描述隨機複合介質中的擴散行為，測試其是否適用於估計通過基材加熱方法製備的非均質開孔沸石 4A 塗層中水的有效擴散係數。固體沸石基體和分佈在基體中的空隙區域被視為系統中的兩個不同相。借助涉及熱重分析耦合使用的實驗方法，將獲得的擴散係數值與先前研究中確定進行比較。吸附質與吸附床的相互作用可歸因於三種機制：空間排列、動力學及平衡。空間排列造成的相互作用是由於分子的形狀，直鏈烴與支鏈烴的吸附強度(吸附熱)不同；使用沸石的大分子和小分子，只讓小分子通過沸石孔，大分子則被排除在外。流體邊界層的擴散以及在吸附床的孔洞中擴散皆有助於吸附質接近吸附床表面，此即為動力學相互作用造成的

影響。平衡相互作用涉及流體和固體的熱力學平衡狀態。平衡相互作用不同於動力學效應，雖然分子可能先到達吸附位置，但由於過程的可逆性，隨後會被吸附力更強的物質所取代，物理吸附具有有限的吸附速率及脫附速率，當兩種速率相等時，該過程達到平衡狀態。影響吸附的原因可分為吸附床的特性、被吸附物的特性與濃度以及環境因素。2014 年 Dobre [20]等人在各種操作條件下，分析 VOCs 與入口氣流的多孔吸附床的吸附情況，結果顯示出在較高的工作溫度情況下、較低表面速度或分子之沸點較高時，活性炭的飽和吸附容量會增加。隔年，2015 年 Gupta [21]等人則研究市售的顆粒狀活性炭去除 VOCs(甲苯和二甲苯)的吸附實驗獲得甲苯和二甲苯的穿透曲線，並開發數學模型，預測等溫條件下吸附床顆粒的溶質濃度隨時間的變化。

## 二、執行方法與步驟

本計畫將藉由有限元素法(FEM)分別建立吸附濃縮槽(圖 2)及燃燒室(圖 3)數值分析模型，吸附濃縮槽模型針對在六種不同流速條件下，吸附濃縮槽內的氣流與熱流通過 30 PPI 以及 60 PPI 兩種規格的多孔吸附關鍵陶瓷結構元件時，以模擬的方式進行與時間相依的吸附與脫附過程，分析氣流與熱流交互作用時的溫度分佈、流速分佈、

及壓力分佈等變化；燃燒室模型將評估三種揮發性有機物(丙酮、異丙醇、甲苯)在三種不同濃度條件對於燃燒室燃燒點最低溫度變化，研究時間相依的流速分佈、濃度分佈、及溫度分佈變化並評估最佳的雙層孔洞組合設計。研究方法將針對牛頓流體的基本潤滑假設下，根據達西定律(Darcy's law)考慮多孔介質內部流體的流動行為，並結合動量及能量守恆及質傳守恆求解暫態問題，以下將簡述數值模型之相關統御方程式。

### 三、統御方程式

#### (一)、質量守恆方程式

VOCs 在整個腔體擴散行為，過程傳輸和反應的質量平衡來描述：

$$\nabla(-D_i \nabla c_i) + v \cdot \nabla c_i = R_i \quad (3)$$

其中  $D_i$  為 VOCs 的擴散係數 ( $m^2/s$ )， $c_i$  為 VOCs 的成分濃度， $R_i$  為 VOCs 的反應速率。由於 VOCs 的反應只發生在多孔吸附床上，在自由流動時的反應項為零，則邊界反應速率由下式表示：

$$R_i = -k_f \cdot c_i \quad (4)$$

其中  $k_f$  為反應常數，此因子依賴溫度的變化，其展開示為：

$$k_f = A_f \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

$A_f$  為頻率因子 ( $m^3/(mol \cdot s)$ )， $E_a$  為活化能 ( $J/mol$ )， $R$  為氣體常數 ( $J/(mol \cdot K)$ )， $T$  為局部溫度 ( $K$ )。

燃燒室的 VOCs 燃燒破壞反應公式機制如(2)所述：



VOCs 透過氧氣燃燒會產生二氧化碳與水，產物(products)與反應物(reactants)的焓變定義為

$$\Delta H_r = \sum_p \Delta H_f - \sum_r \Delta H_f \quad (7)$$

由於 VOCs 產物的形成熱低於反應物的形成熱，這是放熱並釋放出熱量，因此通過能量方程式(6)中提供熱源。

## (二)、動量守恆方程式

根據達西定律(Darcy's law)，當壓力梯度造成流體在多孔介質中流動時，孔壁會阻礙動量傳遞到孔外部的流體，因此忽略流體中剪應力造成的動量傳遞。

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\kappa} \mathbf{v} \quad (8)$$

其中， $p$ 為壓力(Pa)， $v$ 為速度(m/s)， $\mu$ 為黏度(Pa·s)， $\kappa$ 為滲透率(m<sup>2</sup>)。

在均質的連續流體中，可以使用納維爾-斯托克斯方程式(Navier-Stokes equations)表示動量守恆，並用來描述流體動量變化、壓力變化、黏滯耗散與重力之間的關係。

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho_f (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho_f \mathbf{g} \quad (9)$$

其中， $\rho_f$ 為流體密度(kg/m<sup>3</sup>)， $t$ 為時間(s)。

發生滲流現象(Seepage)時，須對 Navier-Stokes 方程式做一些修正，首先將黏性項須使用 $\mu v_p / \kappa$ 代替上式中的 $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$ 。依據 Dupuit-Forchheimer 關係式上式中的 $v$ 須以 $v_p / \epsilon_p$ 代替，因此修正後的 Navier-Stokes 方程式應寫為：

$$\frac{1}{\epsilon_p} \rho_f \frac{\partial v_p}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon_p^2} \rho_f (v_p \cdot \nabla) v_p = -\nabla p - \frac{\mu}{\kappa} v_p + \rho_f \mathbf{g} \quad (10)$$

其中， $\rho_f$ 為流體密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $\epsilon_p$ 為孔隙度， $v$ 為速度( $\text{m}/\text{s}$ )， $v_p$ 為滲流速度， $t$ 為時間( $\text{s}$ )， $p$ 為壓力( $\text{Pa}$ )， $\mu$ 為黏度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )， $\kappa$ 為滲透率( $\text{m}^2$ )， $g$ 為重力( $\text{m}/\text{s}^2$ )。

### (三)、能量守恆方程式

流體在多孔介質中流動時，熱能藉由熱傳導與熱對流擴散至整個除濕倫。該過程由式(11)的能量守恆方程式來描述，左側第一項為與時間變化有關的熱源，左側第二項與移動熱源有關，左側第三項為熱傳導所產生的熱源。式(12)為傅立葉熱傳導定律(Fourier's law of heat conduction)。

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p v \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (11)$$

其中， $(\rho C_p)_{eff}$ 為有效體積熱容量( $\text{J}/(\text{K}\cdot\text{m}^3)$ )， $\rho$ 為密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $C_p$ 為流體常壓熱容( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )， $T$ 為溫度( $\text{K}$ )， $t$ 為時間( $\text{s}$ )， $v$ 為速度( $\text{m}/\text{s}$ )， $Q$ 為熱源( $\text{W}/\text{m}^3$ )， $q$ 為熱傳導所產生的熱源( $\text{W}/\text{m}^2$ )，且根據傅立葉熱傳導定律(Fourier's law of heat conduction)  $q$ 為：

$$q = -k_{eff} \nabla T \quad (12)$$

其中， $k_{eff}$ 為等效熱傳導係數( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )。

由於多孔材料包含固體與流體，因此式(11)中須使用等效體積熱容量，並考慮上述兩者的影響，並以式(13)表示；同理，式(12)中也須使用等效熱傳導係數，並以式(14)表示：

$$(\rho C_p)_{eff} = \theta_p \rho_{p,s} C_{p,s} + (1 - \theta_p) \rho C_p \quad (13)$$

$$k_{eff} = \theta_p k_{p,s} + (1 - \theta_p) k_{p,l} \quad (14)$$

$\theta_p$  為多孔介質的固相體積分率， $\rho_{p,s}$  為多孔介質密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $C_{p,s}$  為固相常壓熱容( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )， $k_{p,s}$  為固體熱傳導係數( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )， $k_{p,l}$  為流體熱傳導係數( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。

為了獲得除濕輪運行時的流速分佈、氣壓分佈與溫度分佈，須耦合動量守恆方程式與能量守恆方程式，考慮動量與溫度的變化後，計算出流體在多孔介質中的流動過程。

## 參、結果與討論

### 一、氣流通過多孔性陶瓷元件之特性分析

本計畫採用不同邊界條件對吸附脫附濃縮槽(圖 2)進行氣流流速、溫度和壓力的分佈進行討論，圖 4 為吸附脫附濃縮槽氣體路徑與邊界條件的示意圖，和進行特性分析時候所觀察的位置。吸附過程的氣體路徑是從管道 1 通入 30°C 的 VOCs 氣體並透過管道 2 的抽氣使得 VOCs 通過多孔性陶瓷元件時，當 VOCs 氣體流經關鍵多孔性陶瓷元件時有機分子與多孔氧化鋁發生物理性的吸附，最後變成潔淨空氣由管道 2 排出；經過一小時的吸附過程之後，接著通入 70°C 高溫潔淨氣體進行脫附，而乾淨的高溫空氣會從管道 3 進入，由管道 4 抽氣使高溫空氣得以通過關鍵多孔性陶瓷元件，高溫空氣會使物理性吸附的有機物脫離多孔性氧化鋁，最後變成濃縮的 VOCs 氣體並由管道 4 排出，並直後通入燃燒室進行燃燒，完成燃燒反應的濃縮 VOCs 氣體會再度變成乾淨的高溫空氣之後，再通至管道 3 進行下一輪的脫附過程。

對燃燒室(圖 3)的數值模型進行氣流、溫度及濃度的特性分析，其流體路徑示意圖與進行特性分析的位置如圖 5 所示。燃燒室的運作原理為圖 4 (a)中的管道 4 所排出的濃縮 VOCs 氣體會由圖 5 中的

管道 5 進入燃燒室，當濃縮 VOCs 氣體要從下方較密的關鍵多孔性陶瓷元件留至較疏的多孔元件的那一瞬間，會透過點火器觸發一開始的 VOCs 燃燒，接著 VOCs 氣體會持續進行燃燒反應，最後由管道 6 排出乾淨的高溫空氣，並通道圖 4 (a)中的管道 3 提供下一輪脫附過程所需的高溫乾淨空氣。

在進行第一輪的燃燒反應前，會先燃燒液態石油氣使整個燃燒模型進行預熱的動作，我們的數值模型的預熱溫度選擇為  $600^{\circ}\text{C}$ ，預熱的溫度需要高於 VOCs 的自燃溫度，即可以不需要透過點火器的觸發就可以自己進行燃燒反應的溫度。且根據工作溫度的不同，會對 VOCs 有不一樣的焚毀效率，通常比自燃溫度高  $150^{\circ}\text{C}$  時，蓄熱式焚化爐對於 VOCs 的焚化效率約為 95%；若工作溫度高於  $250^{\circ}\text{C}$  左右即可達到約 99%的焚化效率。

上疏下密的多孔雙層設計，已被證明可以確實提升燃燒的效率，當濃縮 VOCs 從較密的多孔陶瓷元件進到較疏的多孔陶瓷元件的瞬間，因為溫度高於自燃溫度所以會進行與氧氣進行不可逆燃燒反應，接著透過燃燒反應持續為整體模型進行蓄熱的功能，可以使整體工作溫度維持在一定的溫度直至燃燒完畢，之後在進行下一輪濃縮 VOCs 燃燒前的非燃燒工作期間(後面稱之為閒置時間)，整個模型的

溫度會下降，我們要透過建立的數值模型找出避免模型整體溫度低於自燃溫度的時間，這樣可以防止需要再次透過燃燒液態石油給模型升溫。

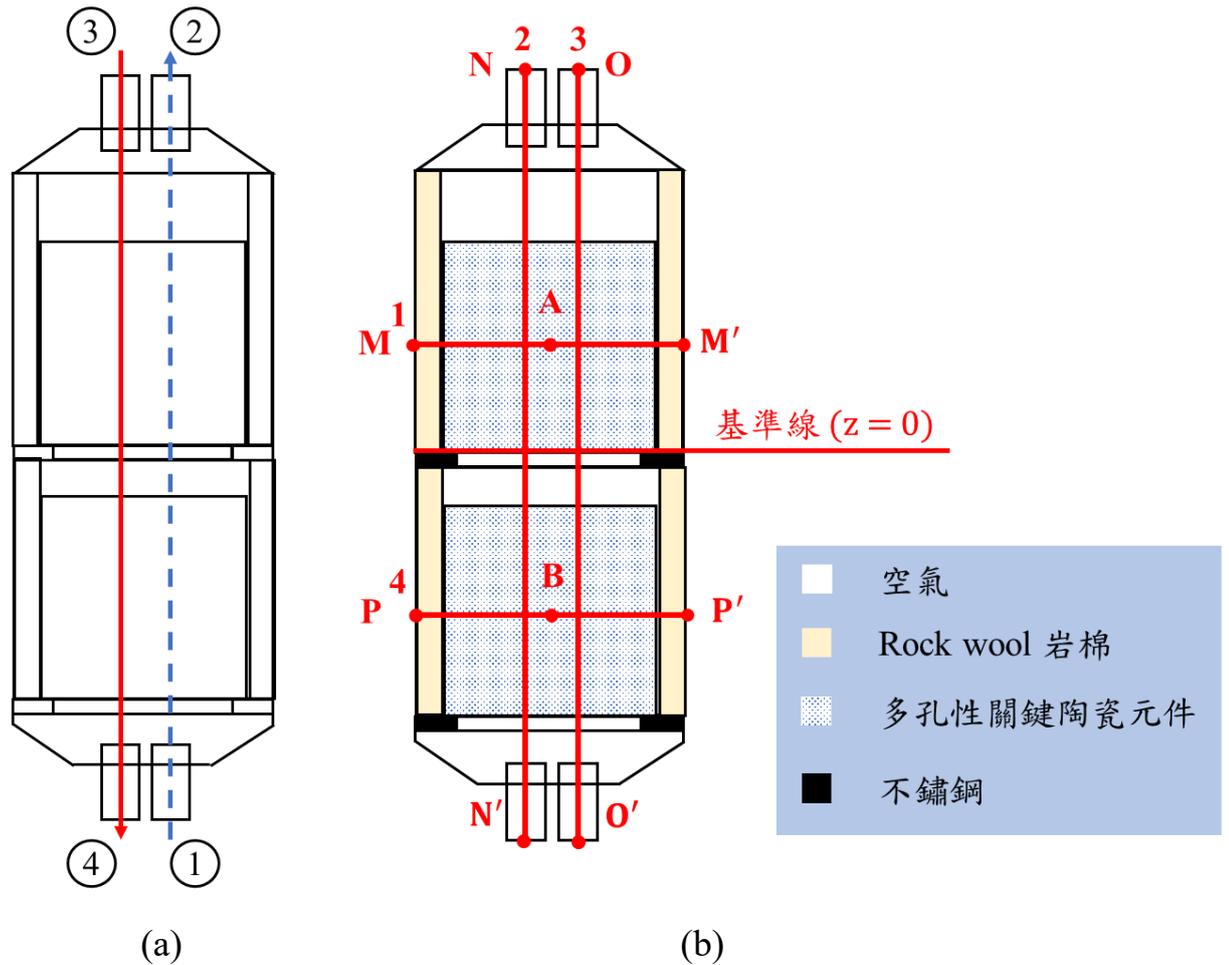


圖 4、(a) 邊界條件示意圖 (b) 分析位置與數值模型的內部結構剖析

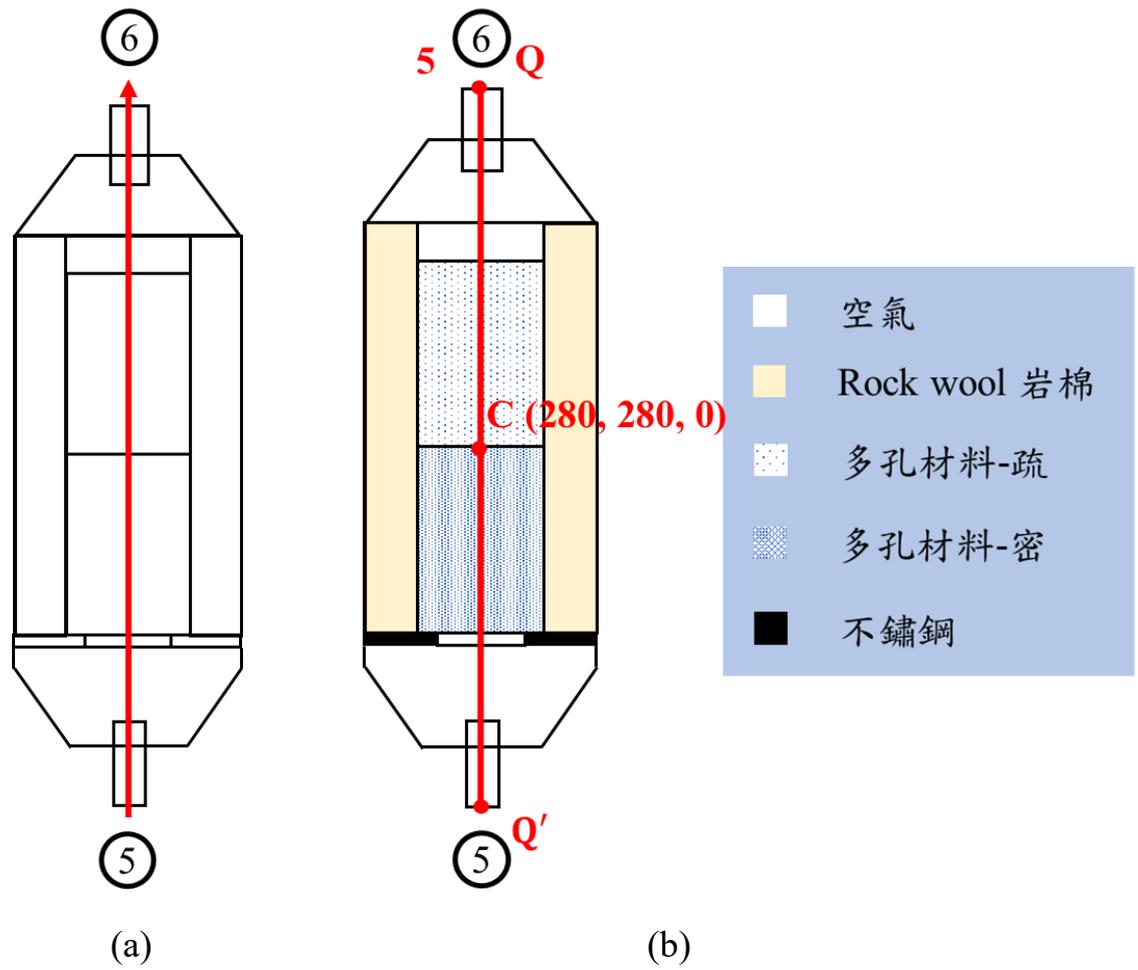


圖 5、(a) 邊界條件示意圖 (b) 燒室的內部結構分析位置與數值模型的示意圖

## (一)、岩棉的添加

岩棉在吸附脫附濃縮槽及燃燒室中是擔任保溫材的角色，表 1 為本次岩棉所使用的參數，我們進一步嘗試有無添加岩棉對整體溫度、流場與壓力分佈的影響，圖 6 為相同邊界條件之下有無添加岩棉對於整體數值模型的溫度與流線分佈對比圖。可以發現因為我們使用的關鍵多孔性陶瓷元件的熱傳導係數為  $31.6 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$  這個數值遠大於岩棉的熱傳導係數( $0.05 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$ )，大約相差 600 倍，因此有添加岩棉的情況下熱更傾向透過我們的多孔性氧化鋁去進行傳遞，且可以看到如果加了岩棉更能確保空氣穿過多孔性陶瓷元件。

圖 7 為進行脫附過程時 (圖 4 (a)中的管道 3 到管道 4)，管道 4 的出口處在抽出六種不同流率的條件之下溫度隨時間的變化，可以發現流率較小的  $0.1$ 、 $0.5$ 、 $1 \text{ m}^3/\text{min}$  的模型不論在有無添加岩棉的時候都尚未達到  $70^\circ\text{C}$ ，即整體模型仍沒有達到均溫。但沒有岩棉的添加卻可以發現在 1 小時之後因為溫度上升，代表已經有空氣穿透關鍵多孔性陶瓷元件到達管道 4 的出口處了。從流率較小的  $0.1$ 、 $0.5$ 、 $1 \text{ m}^3/\text{min}$  模型因為溫度比較高，所以推測無添加岩棉的模型能更快使模型達到均溫，但是從較大流率  $5$ 、 $10$ 、 $25 \text{ m}^3/\text{min}$  的結果卻發現無添加岩棉的數值模型卻花比較多的時間才達到  $70^\circ\text{C}$ ，因此我們進

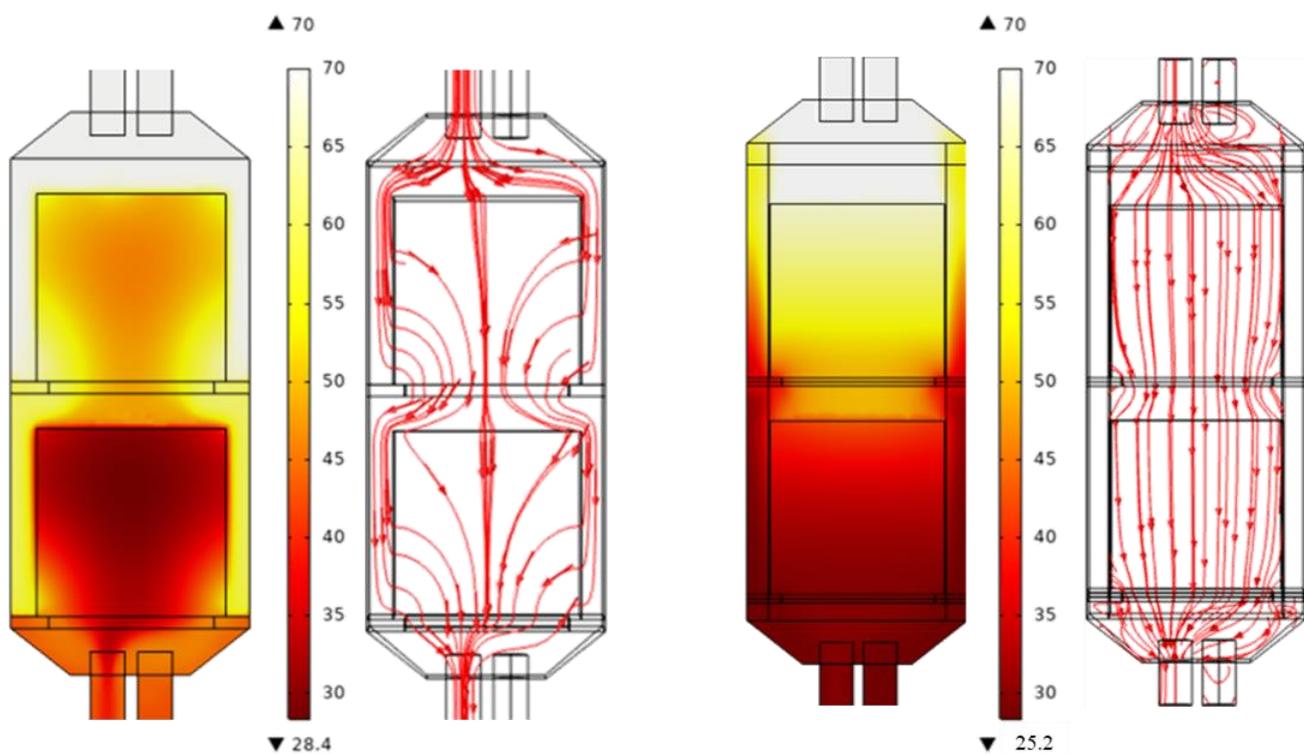
一步對於脫附過程時穿過兩塊關鍵多孔性陶瓷元件的中心線 1 ( $\overline{MM'}$ )與線 4 ( $\overline{PP'}$ )的位置去做溫度、流速與壓力的變化。

為了解釋上述發生的物理現象，我們對圖 8(a)-1 中的線 1 ( $\overline{MM'}$ )與線 4 ( $\overline{PP'}$ )的位置去做溫度、流速與壓力的變化，結果如圖 8 所示。從圖 8 (a)為有無添加岩棉造成的溫度差異可以發現我們之前對熱的傳遞的推測是正確的，可以發現岩棉因為有比較低的熱傳導率，因此溫度上升的速度會比多孔陶瓷元件慢；圖 8 (b)為有無添加岩棉造成的流速差異，且可以看到如果沒有添加岩棉，流體可以在空氣中自由的流動，因此與進入關鍵多孔性陶瓷元件裡的流速有非常大的差異，且這間接證明了不論有無添加岩棉空氣的確都可以在多孔材料中有充分的時間停留；圖 8 (c)為有無添加岩棉造成的壓力差異，因為關鍵多孔性陶瓷元件對於空氣比較難通過，因此對於有添加岩棉的模型，空氣較難通過多孔性陶瓷元件，因此在相同流率下可以看到整體模型內部的壓力大於沒有添加岩棉的模型，也因此可以說明流率為 0.1、0.5、1  $\text{m}^3/\text{min}$  時，因為空氣可以從更多的管道流入，因此流速慢的時候，無添加岩棉的模型可以比較快貫穿模型，然而對於流率較大的 1、5、25  $\text{m}^3/\text{min}$  的模型，因為空氣較難流通，造成的壓力愈大，

因此迫使空氣流通關鍵多孔陶瓷元件的力量愈強，因此會導致流率較大的模型比能更快地貫穿模型。

表 1、岩棉的參數

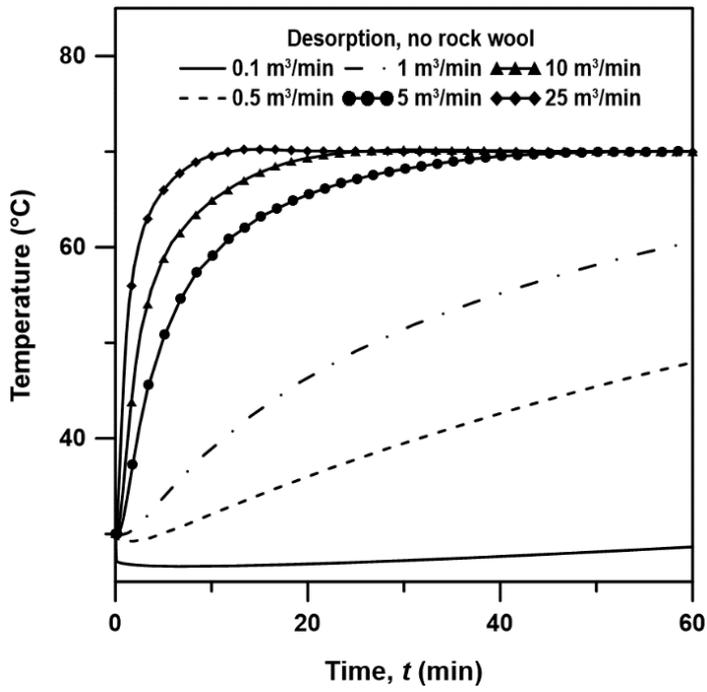
密度	常壓熱容	熱傳導率
100 kg/m <sup>3</sup>	750 J/(kg*K)	0.05 W/(m*K)



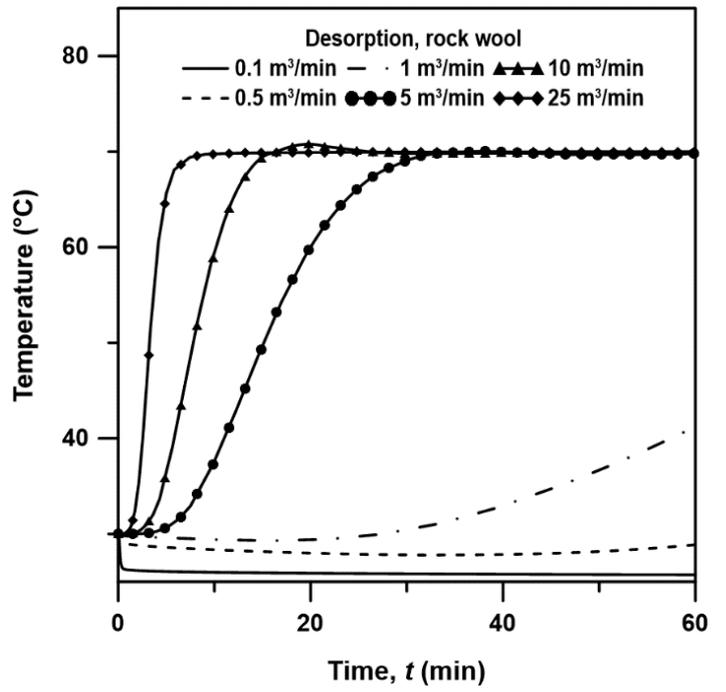
(a) 無添加岩棉的溫度、流線分佈示意圖

(b) 有添加岩棉的溫度、流線分佈示意圖

圖 6、有無添加岩棉的溫度場、流場分佈示意圖

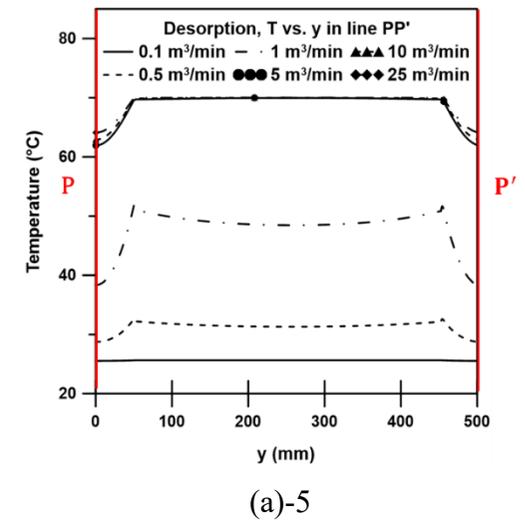
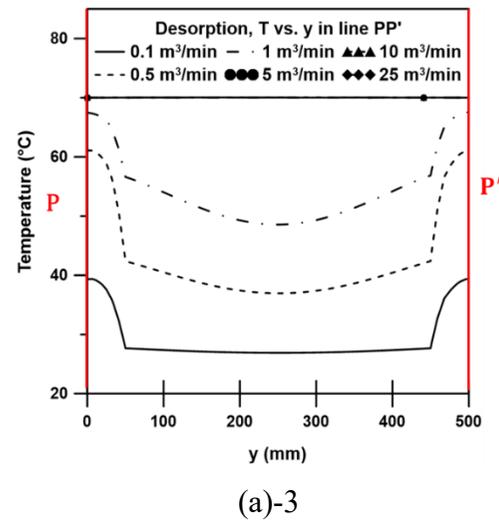
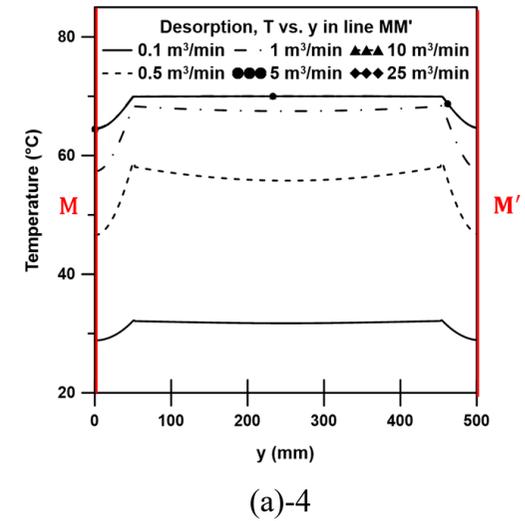
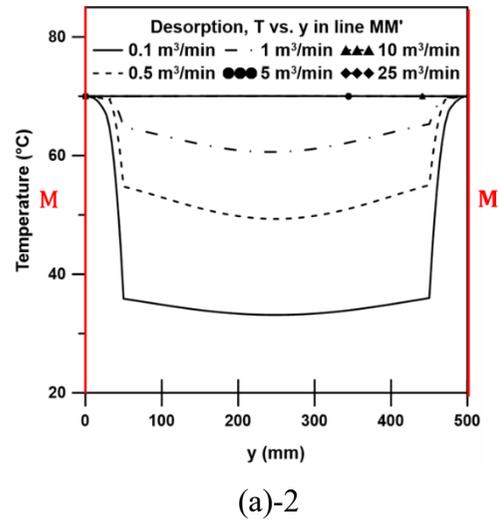
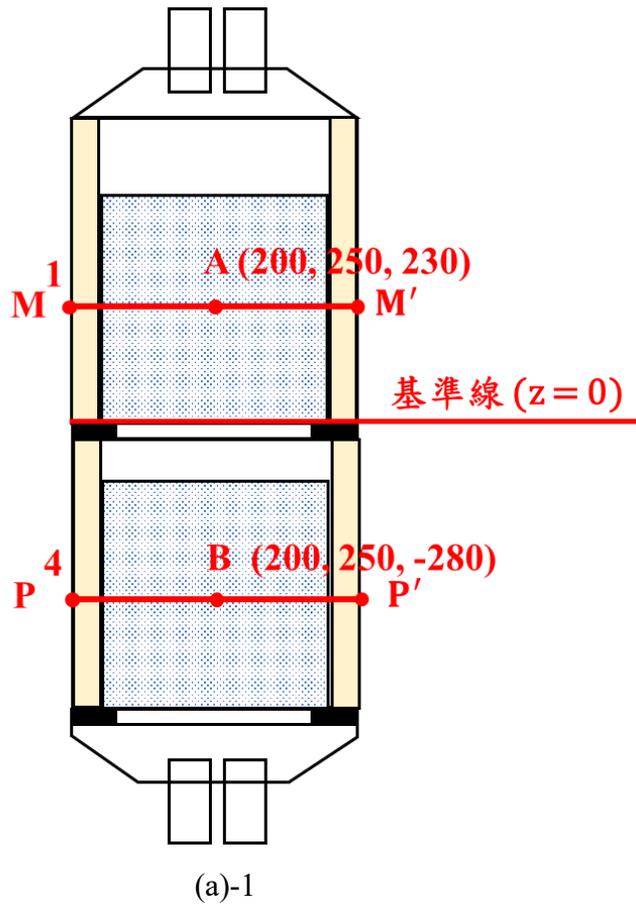


(a) 無添加岩棉的模型



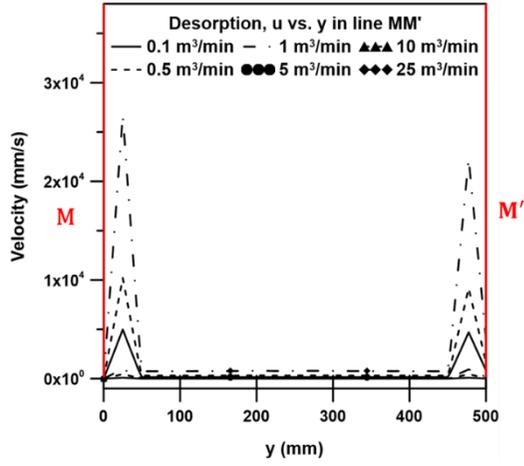
(b) 有添加岩棉的模型

圖 7、比較脫附過程時有無添加岩棉對不同流率在管道 4 出口處溫度隨時間的變化

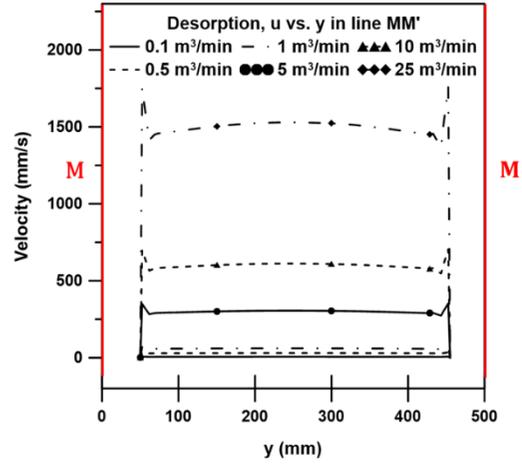


(a)

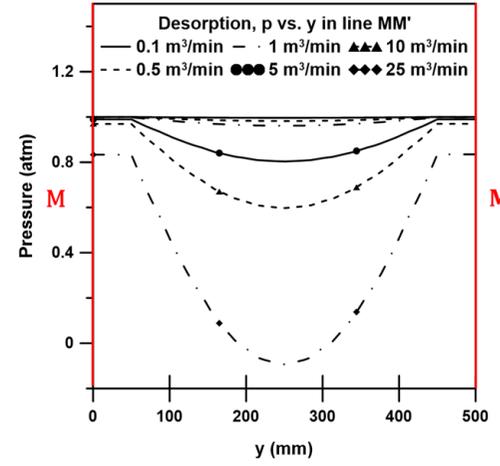
(a)-1 分析位置的示意圖( $\overline{MM'}$ 與 $\overline{PP'}$ )與溫度隨線 1 與線 4 的變化 (a)-2, 3 為無添加岩棉的模型數值解、(a)-4, 5 為有添加的模型數值解



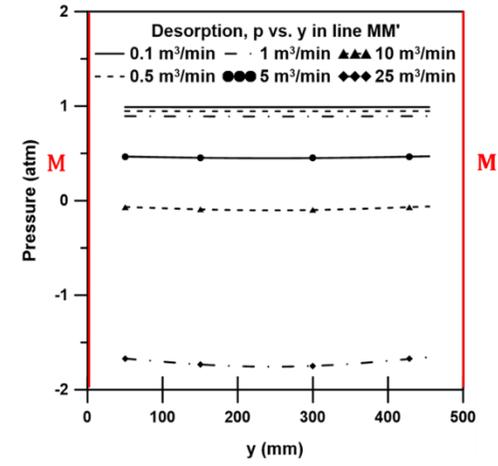
(b)-1



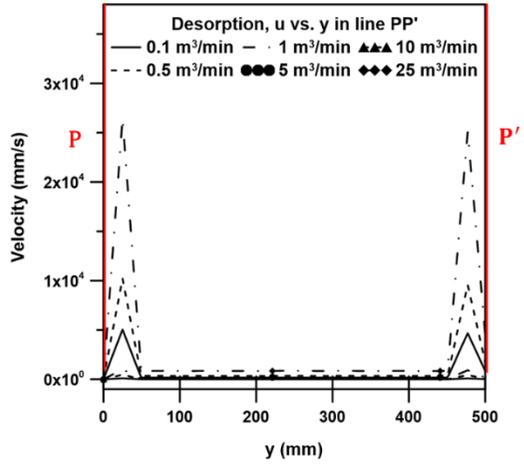
(b)-3



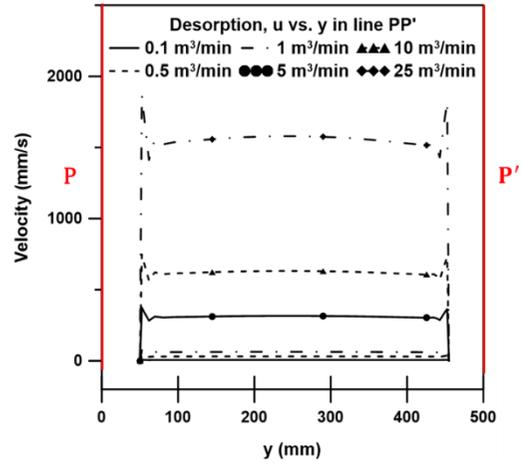
(c)-1



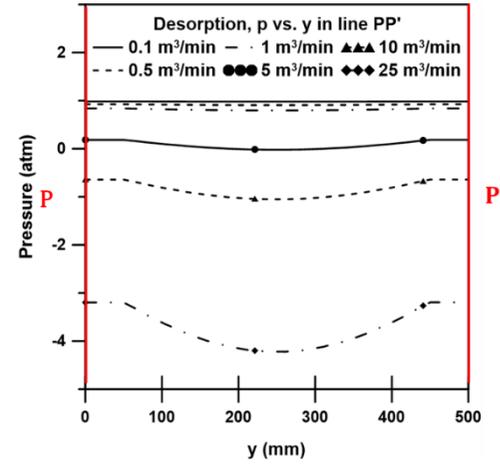
(c)-3



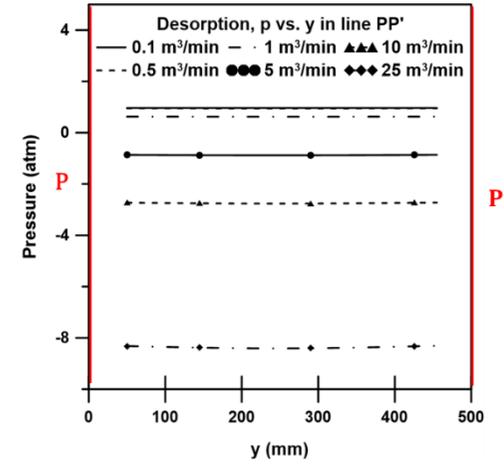
(b)-2



(b)-4



(c)-2



(c)-4

(b)

(c)

(b)-1, 2 為無添加岩棉的模型數值解 (b)-3, 4 為有添加的模型數值解

(c)-1, 2 為無添加岩棉的模型數值解 (c)-3, 4 為有添加的模型數值解

圖 8、有無添加岩棉在線 1  $\overline{MM'}$  與線 4  $\overline{PP'}$  上 (a) 溫度、(b) 流速、(c) 壓力隨位置的變化

## (二)、吸附脫附濃縮槽

吸附脫附濃縮槽會在管道 2 吸附出口處與管道 4 脫附出口處會以六種不同的邊界條件抽出不一樣的流率，分別為 0.1、0.5、1、5、10、25 m<sup>3</sup>/min。抽出流率越大，代表氣流越容易從入口處流過關鍵多孔性陶瓷元件直至出口，熱也更容易進行傳遞，因此我們利用這六種不同條件來對我們建立的數值模型進行特性分析。

PPI (Pores per Inch)常用來描述一個多孔性材料的疏密程度，PPI 前面的數值愈大代表該多孔性材料的平均孔徑愈小，代表流體也越難以通過該材料。本次計畫我們取了兩種不同孔徑的關鍵多孔性陶瓷元件進行分析，觀察不同孔徑大小對於流體整體的溫度、氣流、與壓力的特性分析。

### a. 較密的多孔性陶瓷元件-60 PPI

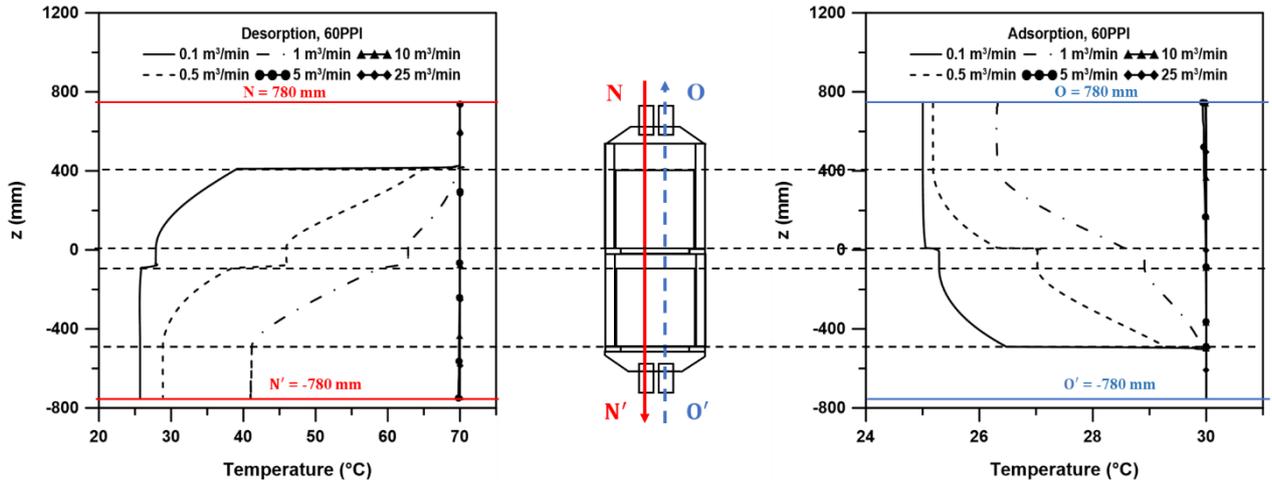
60 PPI 的關鍵多孔性陶瓷元件，其平均孔徑大小為 0.423 mm，流體較難通過，圖 9 是根據圖 4 (b)管道中間位置的線 2 ( $\overline{NN'}$ )與 3 ( $\overline{OO'}$ )分別去做吸附或脫附經一小時之後位置隨溫度、流速和壓力的變化的特性分析。

從圖 9 (a)可以發現在流率較小的 0.1、0.5、1 m<sup>3</sup>/min 時候，不論是吸附還是脫附的路徑，每當流體要進入關鍵多孔性陶瓷元件時，溫

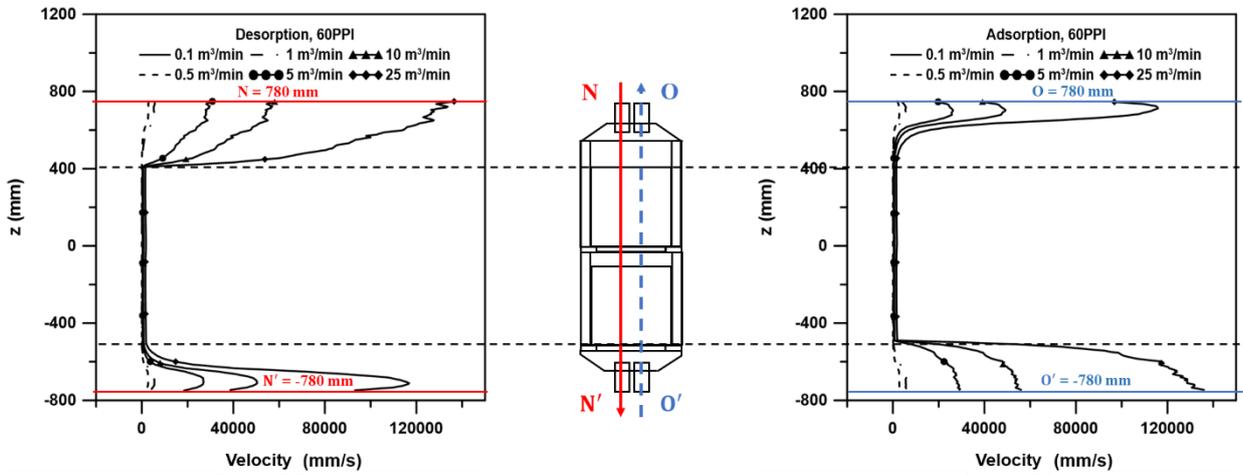
度都會發生急劇的變化，而流率較快的 5、10、25 m<sup>3</sup>/min 在經過一小時的吸附與脫附過程，模型整體均已達到均溫。因此在這邊我們將探討流率較小的三組模型，推測溫度發生急劇的變化是因為抽氣的量太少，使得流體比較難流過關鍵多孔性陶瓷元件，因此在流體得以進入我們的多孔性材料前，會先累積在外面又因為熱的傳遞是利用流體帶到模型各處，因此會造成一段急劇的溫度變化。

從圖 9 (b)可以看出，流體在多孔陶瓷元件裡的流速遠小於腔體裡的流速，由此可見當氣體流過多孔性陶瓷時，確實在裡面充分的停留，且因為我們的吸附脫附濃縮槽為完全對稱的，因此我們建立的數值模型為了節省計算時間，可以只計算一半的數值結果，之後將結果乘以二即可得到完整的數值解，因此我們可以從結果圖上看到因此出口端的流速為流速最大值的一半。

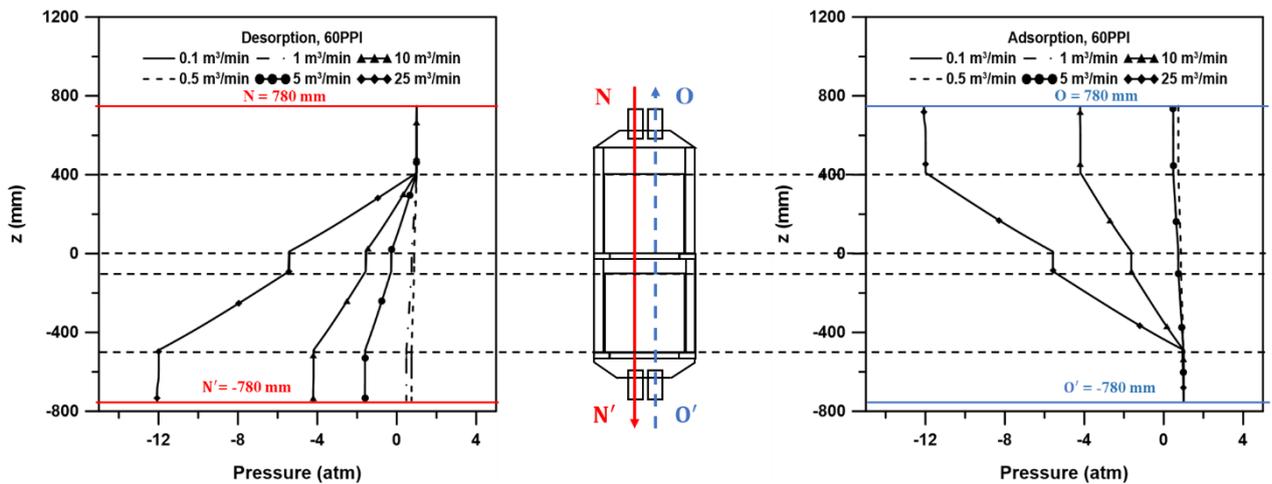
從圖 9 (c) 可以看出壓力分佈與溫度分佈有一個共通點，當氣流要通過多孔材料時都有發生明顯的變化，可以發現壓力在多孔材料中間會隨位置形成線性的梯度變化，另外可以發現流率大的時候 5、10、25 m<sup>3</sup>/min 會形成負壓，造成的原因是因為多孔材料會造成流體沒那麼順利流過，因此出口抽出的流率愈大，出口處會造成愈大的負壓，氣體就能愈容易流過關鍵多孔性陶瓷元件。



(a) 溫度在不同位置時的變化



(b) 流速在不同位置時的變化



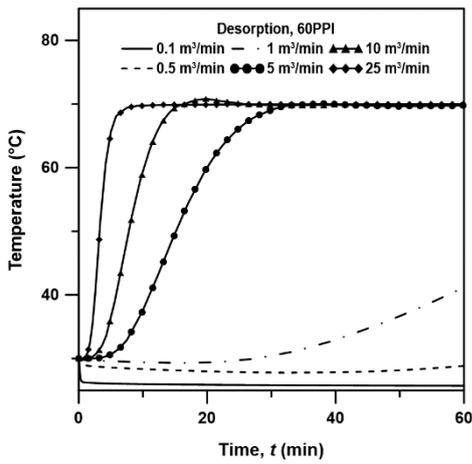
(c) 壓力在不同位置時的變化

圖 9、60PPI 的多孔陶瓷性元件在不同流率下脫附(左)與吸附(右)時溫度、流速與壓力分別在(NN')與(OO')上的變化

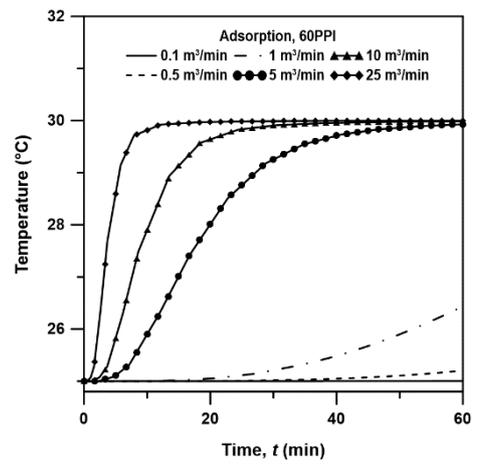
另外，帶有溫度的溫的空氣會將熱傳遞至模型各處，我們可以利用溫度來進行判斷空氣是否流通我們的關鍵陶瓷元件，因為我們很好奇這六種不同邊界條件是否都可以使氣流穿過多孔材料，尤其是流率比較小的，因此我們分別對吸附與脫附經一小時之後的出口端(管道 2 與管道 4)去觀察溫度隨時間的變化，結果如圖 10 所示。其中，圖 10 (a)為脫附時出口端N'經一小時之後他隨時間的溫度變化，圖 10 (b)為吸附時出口端 O 經 1 小時之後隨時間的溫度變化。從這兩張圖可以發現 0.1 與 0.5 m<sup>3</sup>/min 的氣流在 1 小時之後仍無法穿過 60PPI 的多孔性陶瓷元件到達出口端，因此溫度沒有上升的趨勢；1 m<sup>3</sup>/min 流率之後可以發現氣流已經穿透多孔材料，但整體數值模型尚未到達均溫，從 5、10、25 m<sup>3</sup>/min 流率較大的模型經過一小時的吸附或脫附之後模型皆已達到均溫，另外也能發現流率愈大能愈早使熱流貫穿整個數值模型。

從圖 10 (a)和圖 10 (b)我們發現 0.1 與 0.5 m<sup>3</sup>/min 流率的數值模型視覺上判讀，經一小時之後無論在吸附或脫附路徑，仍無法從入口端貫穿模型到達出口，為了找出是因為流率太小使得空氣無法穿透關鍵多孔性陶瓷元件，抑或是需要更多的時間才能穿透，因此我們將進一步分析圖 11 (a)上下兩塊關鍵多孔性陶瓷元件正中心的位置(點

A 和點 B)，對這兩個位置進行吸附路徑中溫度隨時間的變化。圖 11 (a)為吸附及脫附路徑與取的兩點位置的示意圖，圖 11 (b)是 A 點在六種不同流率下，溫度隨時間的變化，圖 11 (c)是 B 點在六種不同流率下，溫度隨時間的變化。可以發現流率越大的時候，完全穿透關鍵多孔性陶瓷元件所需的時間越短，且空氣貫穿上下兩塊多孔材料的時間大約相同。流率較大的 5、10、25  $\text{m}^3/\text{min}$  模型在一小時之後 A 點皆已到達  $30^\circ\text{C}$ ，代表氣體已經完全穿透下方的多孔材料並已經貫穿了上方的關鍵多孔陶瓷元件。接著從圖 11 (c) B 點的結果可以發現，其實流率較小的 0.1 和 0.5  $\text{m}^3/\text{min}$  還是有穿過多孔材料只是尚未到達出口端，因此可以得出，只要整個模型運作時間夠長，這兩個流率較小的數值模型仍可以貫穿吸附脫附濃縮槽的數值模型。

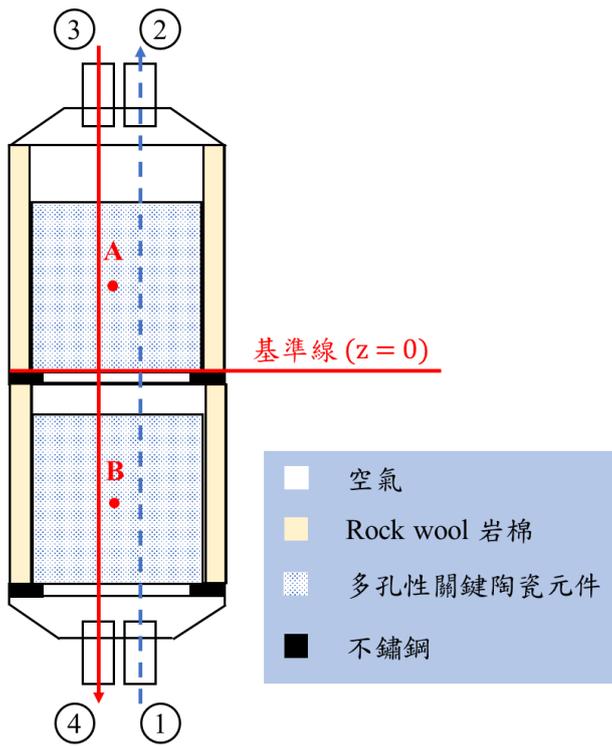


(a) 脫附時溫度隨時間的變化

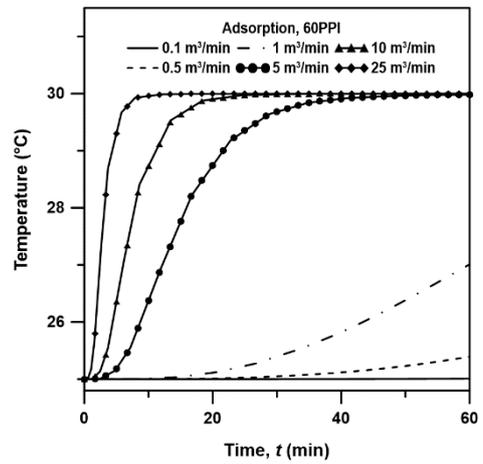


(b) 吸附時溫度隨時間的變化

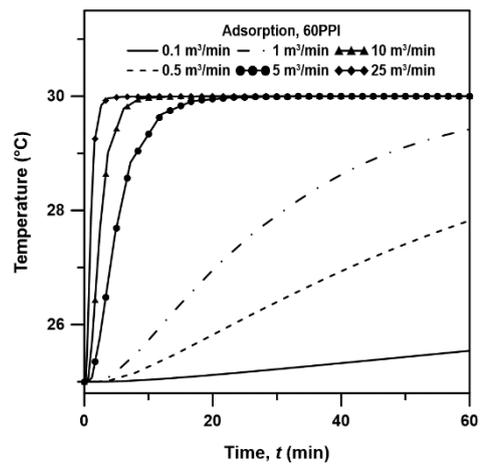
圖 10、不同流率出口端溫度隨時間的變化



(a) 位置說明圖



(b) A 點溫度隨時間變化圖



(c) B 點溫度隨時間變化圖

圖 11、在吸附的過程(路徑 1 到 2)，兩塊多孔材料中心溫度隨時間的變化

## b. 較疏的多孔性陶瓷元件-30 PPI

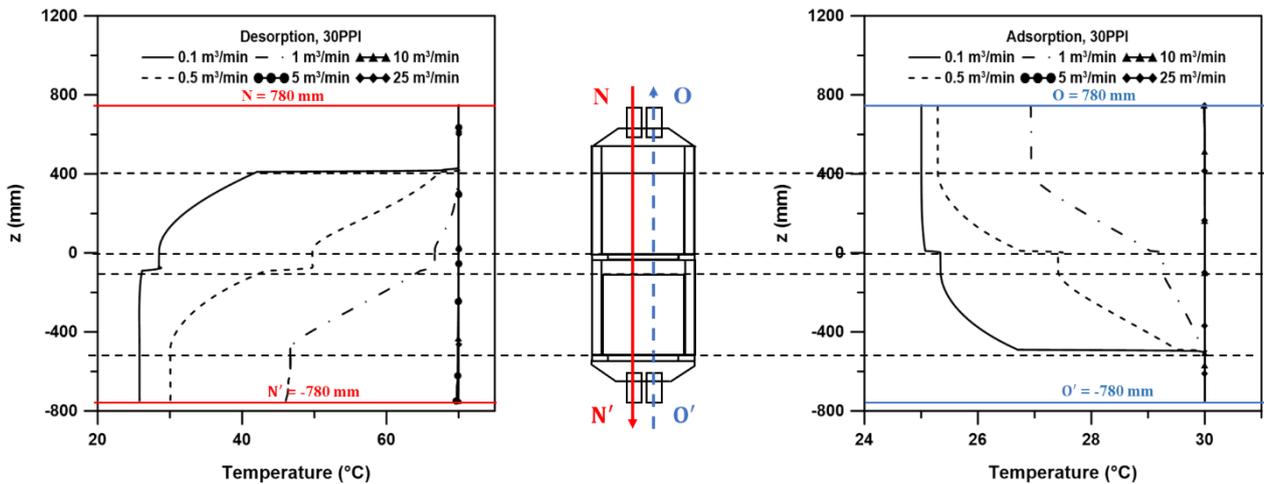
30 PPI 的關鍵多孔性陶瓷元件，其平均孔徑大小為 0.847 mm，其平均孔徑大小約為 60 PPI 關鍵多孔性陶瓷元件的兩倍大，因此 30 PPI 的固體骨架結構可以使流體更輕鬆地流過，圖 12 為根據圖 4 (b) 中管道中間的線 2 ( $\overline{NN'}$ )與 3 ( $\overline{OO'}$ ) 分別去做吸附或脫附經一小時之後位置隨溫度、流速和壓力的變化的特性分析。可以發現這 30 與 60 PPI 的關鍵多孔性陶瓷元件的溫度、流速與壓力特性分析有相似的趨勢。

從圖 12 (a)可以看到流率較小的 0.1、0.5、1  $\text{m}^3/\text{min}$ ，因為抽出的流率較小，所以入口端的流體比較難通過關鍵多孔性陶瓷元件，因此在流體要通過關鍵多孔性陶瓷元件前，會在介面處停留很長的一段時間，所以溫度會有一個急劇的變化。從結果可得知，在經過一小時之後不論是吸附路徑(管道 1 到管道 2)還是脫附路徑(管道 3 到管道 4)當出口抽出的氣體流率大於 5  $\text{m}^3/\text{min}$ ，吸附與脫附的過程皆可以完全貫穿我們建立的數值模型。

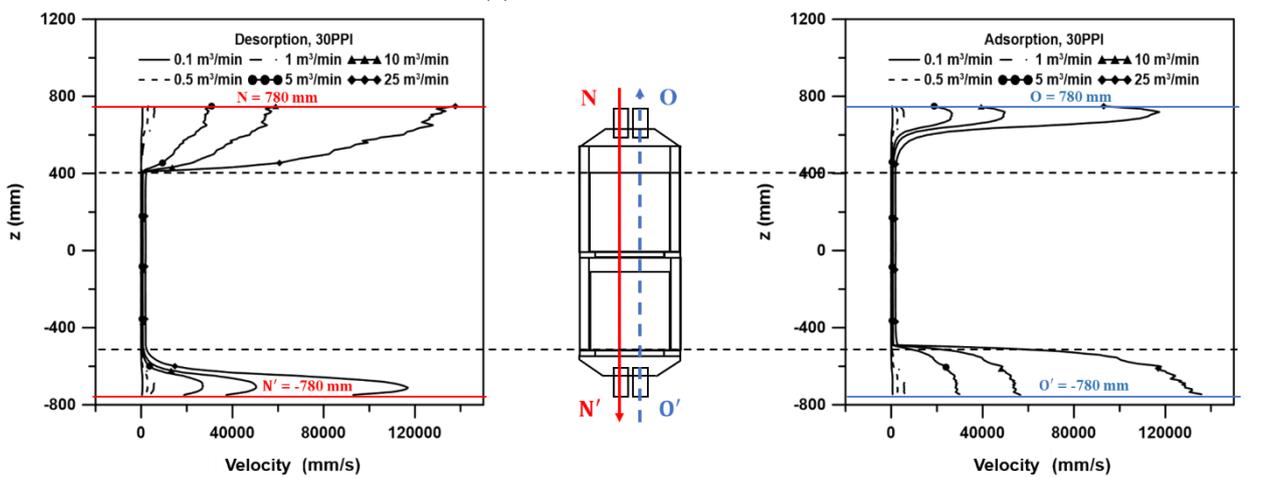
從圖 12 (b)可以看出，流體在關鍵多孔性陶瓷元件裡的流速遠小於艙體裡的流速，由此可見當氣體流過多孔性陶瓷時，確實在裡面充分的停留，且因為我們的吸附脫附濃縮槽為完全對稱的，因此我們建

立的數值模型為了節省計算時間，可以只計算一半的數值結果，之後將結果乘以二即可得到完整的數值解，因此我們可以從結果圖上看到因此出口端的流速為流速最大值的一半。

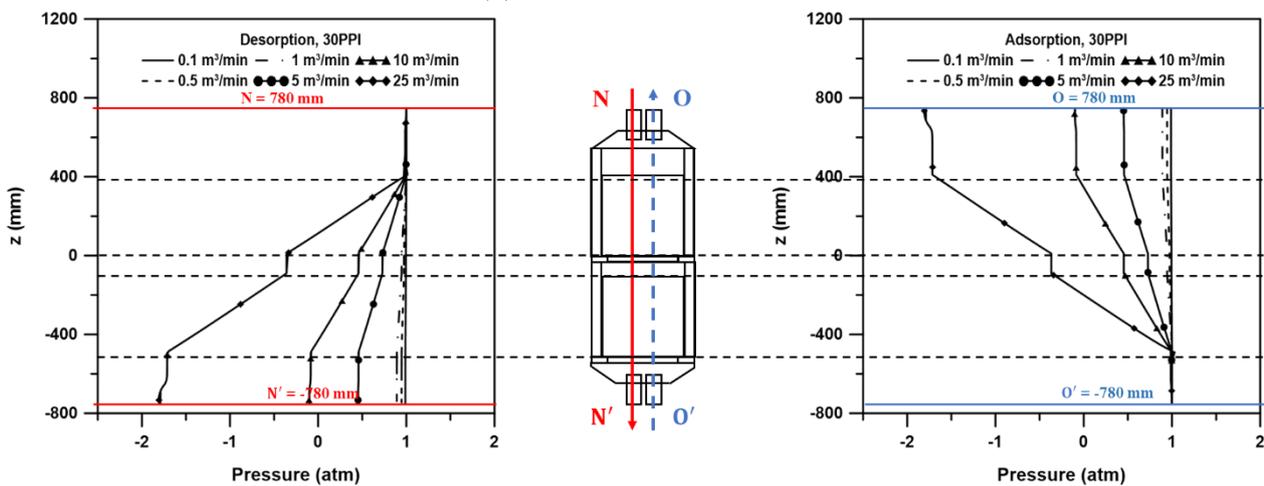
從圖 12 (c) 可以看出壓力分佈與溫度分佈有一個共通點，當氣流要通過多孔材料時都有發生明顯的變化，可以發現壓力在多孔材料中間會隨位置形成線性的梯度變化，另外可以發現流率大於  $5 \text{ m}^3/\text{min}$  會形成負壓，造成的原因是因為多孔材料會造成流體沒那麼順利流過，因此出口抽出的流率愈大，出口處會造成愈大的負壓，氣體就能愈容易流過關鍵多孔性陶瓷元件。



(a) 溫度在不同位置時的變化



(b) 流速在不同位置時的變化



(c) 壓力在不同位置時的變化

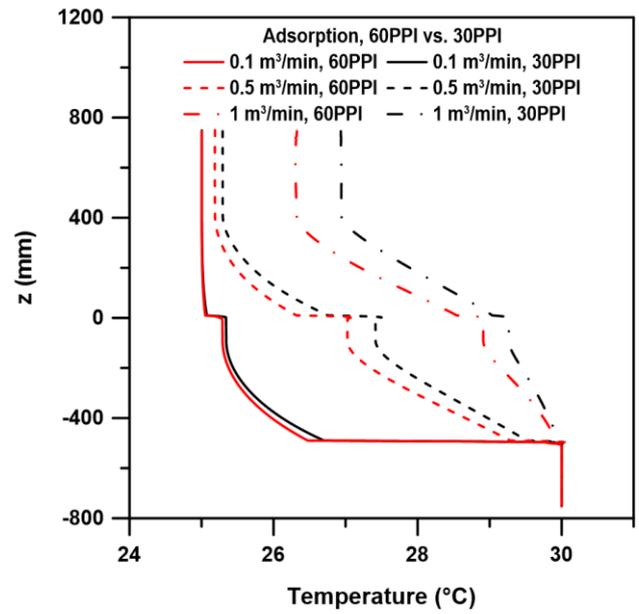
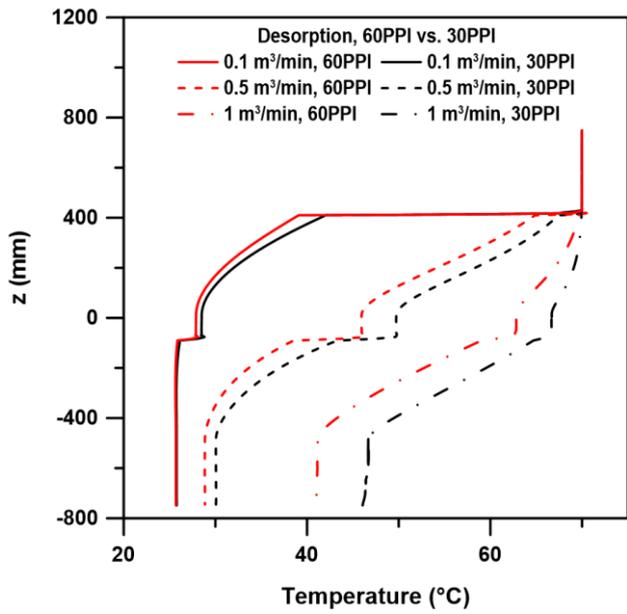
圖 12、30PPI 的多孔陶瓷性元件在不同流率下在脫附(左)與吸附(右)時溫度、流速與壓力分別在(NN')與(OO')的變化

為了進一步說明我們的數值模型可以確實模擬出較不同疏密程度的關鍵多孔性陶瓷元件，因此沿著圖 4 (b) 中的線 2 ( $\overline{NN'}$ ) 與 3 ( $\overline{OO'}$ ) 去觀察溫度、流速、和壓力的變化趨勢，分別比對 60 PPI (圖 9) 與 30 PPI (圖 12) 的結果圖，我們發現位置隨溫度及壓力的變化對於不同疏密程度的模型會有不一樣的變化，結果圖如圖 13 所示。我們發現流速在不同疏密程度的關鍵陶瓷元件數值模型中，不論是吸附還是脫附過程，經過一小時之後兩者有著相同的流速大小，推測為流速在多孔陶瓷元件都會停留一段時間，因此變化不大，而艙體中的流體流速只受邊界條件，即抽出的流率會直接影響艙體中的流速，所以在相同邊界條件下，會有相同的位置隨流速變化。

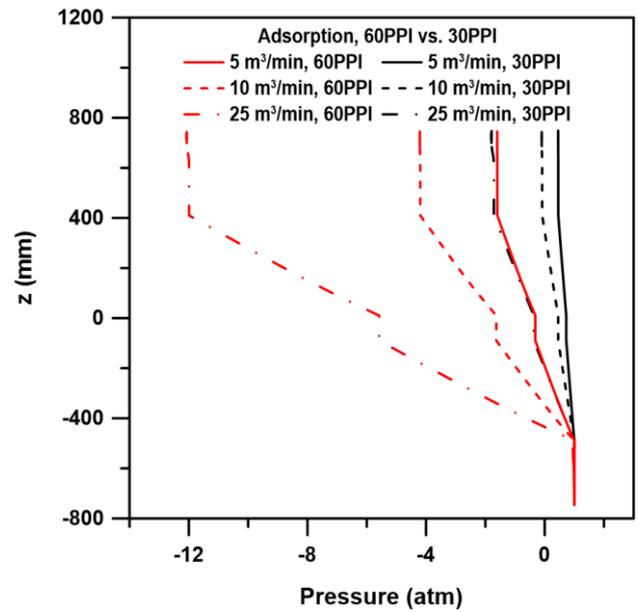
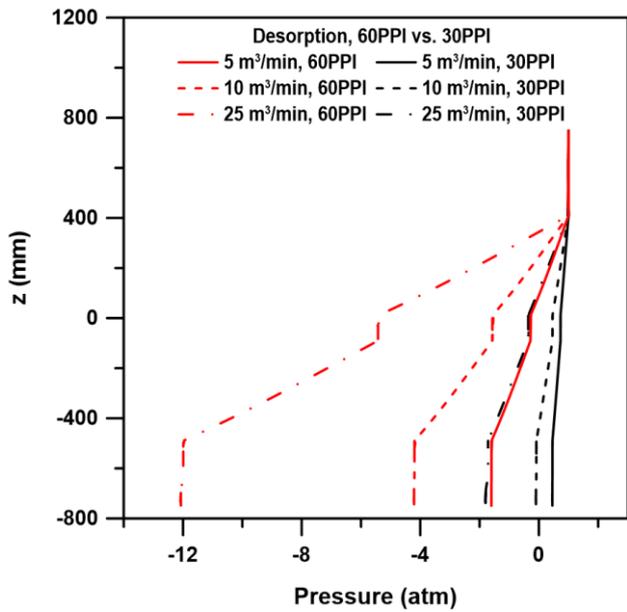
因為 60 PPI 的平均孔徑大小小於 30 PPI 的關鍵多孔性陶瓷元件，所以空氣比較難穿透我們的多孔性陶瓷元件，我們將針對這個特性進行接下來的討論。鑒於圖 9 與圖 12 溫度與壓力隨位置的變化結果，可以發現當抽出的流率大於  $5 \text{ m}^3/\text{min}$ ，不論 30 或是 60 PPI 的模型經過一小時之後皆已完全貫穿我們的數值模型，因此我們進一步探討吸附脫附路徑中不同疏密程度且流率為  $0.1$ 、 $0.5$  及  $1 \text{ m}^3/\text{min}$  的模型，並將兩者的結果列於圖 13。紅色為較密的關鍵多孔性陶瓷元件(60 PPI)黑色則代表較疏的關鍵多孔性陶瓷元件(30 PPI)。

從圖 13 (a)可以發現不論是左邊脫附路徑的對比圖或是右邊吸附路徑的對比圖都可以發現不同疏密程度的關鍵多孔性陶瓷元件有差不多的趨勢，且流體進入關鍵多孔性陶瓷元件之前，較密的多孔材料會比較疏的多孔材料更難讓流體穿過，因此可以得出 60 PPI 的數值模型在相同位置下，其吸附與脫附路徑出口處的溫度會小於 30 PPI 數值模型的結果，抽的流率愈大，疏密關鍵多孔性陶瓷元件的影響愈明顯，代表我們的數值模型確實可以因為疏密程度的不同而有所不同。

已知當流率大於  $5 \text{ m}^3/\text{min}$  時，吸附脫附濃縮槽數值模型在吸附路徑的出口端管道 2 與脫附路徑的出口端管道 4 會有負壓的產生，將吸附及脫附的  $5$ 、 $10$ 、 $25 \text{ m}^3/\text{min}$  對比結果呈現在圖 13 (b)，可以發現 60 PPI 的數值模型在在相同位置下，其吸附與脫附路徑出口處的壓力會大於 30 PPI 數值模型的結果，抽的流率愈大，疏密關鍵多孔性陶瓷元件的影響愈明顯，代表我們的數值模型可以確實表示出不同的疏密程度。



(a) 脫附(左)吸附(右)在較小流率的溫度隨位置變化



(b) 脫附(左)吸附(右)在較大流率較大的壓力隨位置變化

圖 13、30 PPI 與 60 PPI 在線段  $\overline{NN'}$  與  $\overline{OO'}$  位置隨溫度及壓力的變化比較圖

### (三)、燃燒室

燃燒室中輸入的濃度是藉由計算 VOCs 中的質量後以通量方式進行表示，以 1000 ppm 丙酮為例，一公升的混合氣體中各成分的體積占比列於表 2，透過對該 VOCs 氣體的體積比的進一步運算，乘以密度並進行整理之後可以進一步得出 VOCs 所佔的比例並以通量形式呈現。透過計算出通量可以控制流入的濃縮 VOCs 的濃度。

燃燒室的數值模型分兩個步驟進行運作，步驟一是一個為期 20 分鐘的燃燒過程(Burning process)，由圖 5 (a)的示意圖可以看到會從管道 5 通入不同濃度的濃縮 VOCs 氣體(500 ppm、1000 ppm、2500 ppm)，濃縮 VOCs 氣體在通過疏密多孔陶瓷元件介面的那一瞬間會先以點火器觸發並發生不可逆的破壞燃燒反應，之後藉由燃燒產生的反應熱使整體模型溫度持續升溫；接著步驟二是將升溫後的燃燒室模型閒置 60 分鐘(Period time)，閒置的時候因為無燃燒反應，因此數值模型會隨著時間降溫，透過避免降溫超過該 VOCs 氣體的自燃溫度，我們需要進行溫度的特性分析，否則若是模型的溫度低於 VOCs 氣體的自燃溫度就需要額外燃燒液態石油氣才能進行下一輪的燃燒濃縮 VOCs 作業。

### a. 雙層孔洞設計比較

因為上疏下密的雙層孔洞設計有較好的蓄熱燃燒效果，基於該項結論，我們比較了四種不同疏密程度的關鍵多孔性陶瓷元件組合，並將溫度分布分別列於表 3，去觀察不同的疏密孔洞組合對於整體數值模型造成的影響，從靜置 60 分鐘之後的結果圖可以看出模型 2 和模型 4 可以看出溫度分布的效果遠優於模型 1 與模型 3。

我們對於四組不同的組合進行比較，其中模型 1 與模型 2，這兩種模型下面的多孔性陶瓷元件其孔徑大小皆為上面那一塊孔徑大小的一半，只是模型 2 的整體緊密程度略高於模型 1；模型 2~4 是透過更換上面較疏的多孔陶瓷性元件，觀察疏密程度的改變是否會對於熱流等特性產生影響，圖 14 為不同疏密組合模型隨線 5(QQ') 的溫度、壓力、流速分布。

從圖 14 (a)左邊可以發現燃燒的過程(管道 5 到管道 6)因為模型 1 下方較密的多孔陶瓷材料的孔徑最大，因此熱流比較容易流過，同時可以比較快進行燃燒反應提供反應熱之外，因不同的孔徑大小，結構不同蓄熱的能力也會有所差異，發現模型 1 的數值會小於其他模型的數值結果，另外我們也發現模型 2 與模型 4 有幾乎相同的數值模擬結果，即在下方為 60 PPI 多孔材料的時候，上方多孔材料為 30

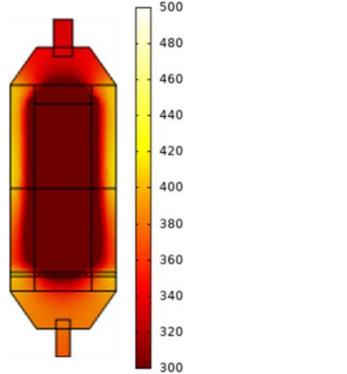
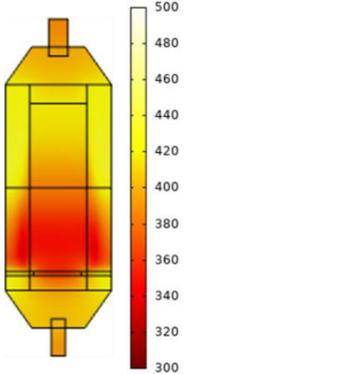
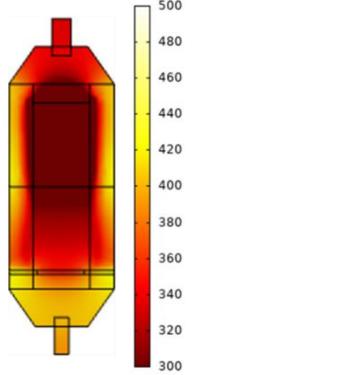
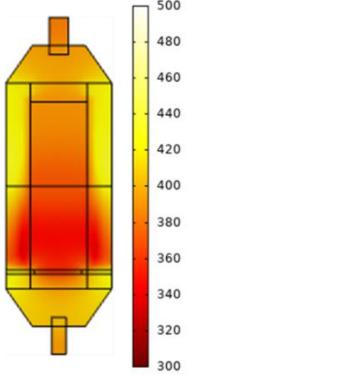
和 40 PPI 時對於氣流有相同的氣流特性；圖 14 (a)右方為燃燒過後靜置 60 分鐘之後沿線  $5(\overline{QQ'})$  位置隨溫度的變化，因為靜置時並無通入氣體，因此這個階段想要使模型各處溫度自行對流，且此時無化學反應熱因此內部的溫度會開始下降，我們找出避免溫度低於自燃溫度的時間點，透過此結果可以避免還需要額外燃燒液態石油氣提升溫度，否則下一輪的濃縮 VOCs 將無法進行燃燒反應，可以發現因為模型 2 與模型 4 比較接近均溫比較符合實際情況，綜上所述，我們推測上方為 30 PPI 搭配下方 60 PPI 的多孔材料能達到最符合實際且最好的效果。

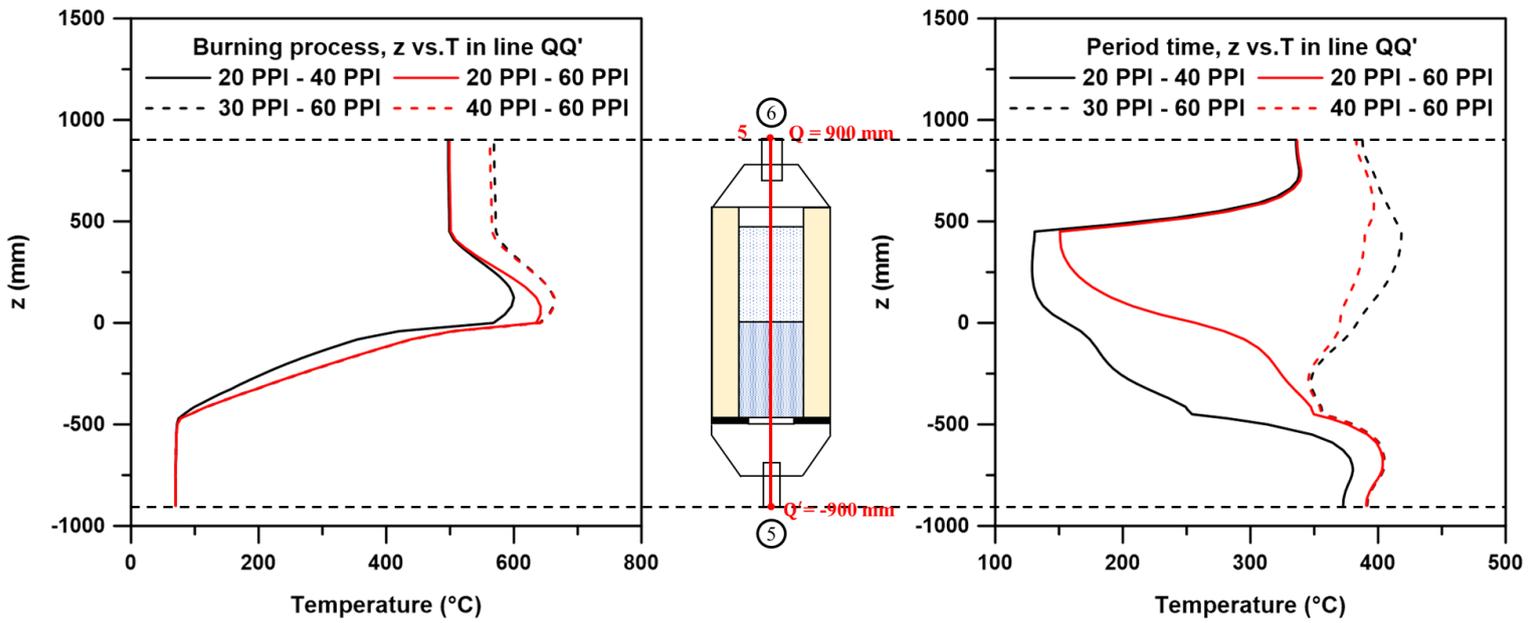
在靜置的時間，因為無通入氣流，因此在 60 分鐘之後壓力與流速在各處位置皆一樣，因此只討論燃燒過程中線  $5(\overline{QQ'})$  位置隨流速與壓力發生變化，如圖 14 (b)所示。可以發現在燃燒過程第 20 分鐘之後，因為孔徑大小的不同，的確會使空氣是否流通產生影響，愈密的多孔陶瓷元件，可以發現壓力愈大；從圖 9 (b)與圖 12 (b)可以發現流體在多孔陶瓷元件中的流速都一樣，只有在不同流率的時候多孔材料外的流速才會有變化，因此我們燃燒室數值模型是以固定流率進行模擬，因此位置隨流速的變化全部都有相同的結果。

表 2、計算 VOCs 的通量

	VOCs	氧氣	氮氣
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1.2	1.429	1.251
1000 ppm 的體積比 (L)	1*10 <sup>-3</sup>	0.21978	0.77922
(乘以密度)質量 (g)	1.2*10 <sup>-3</sup>	0.31407	0.97480
通量 (mol/m <sup>2</sup> *s)	0.07565	35.8161	127.184

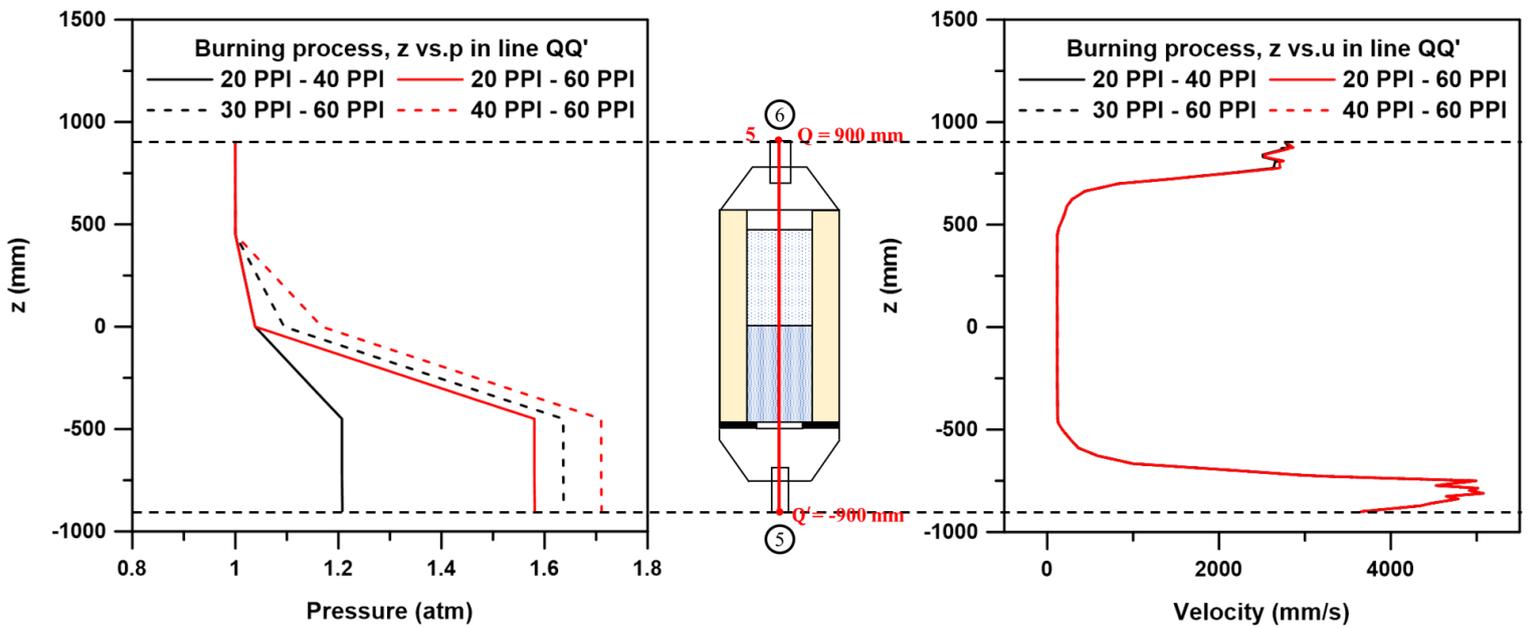
表 3、不同雙層孔洞排列組合模型分類

不同孔洞組合(疏-密)	
模型 1 - (20 PPI-40 PPI)	模型 2 - (30 PPI-60 PPI)
<p>靜置 60 min 結果圖</p> 	<p>靜置 60 min 結果圖</p> 
模型溫度最大/最小值：455°C/129°C	模型溫度最大/最小值：463°C/335°C
模型 3 - (20 PPI-60 PPI)	模型 4 - (40 PPI-60 PPI)
<p>靜置 60 min 結果圖</p> 	<p>靜置 60 min 結果圖</p> 
模型溫度最大/最小值：463°C/151°C	模型溫度最大/最小值：463°C/334°C



(a) 燃燒室步驟一的燃燒過程(左)與步驟二閒置過程(右)

分別在第 20 分鐘與 60 分鐘在線 5(QQ') 上位置隨溫度的變化

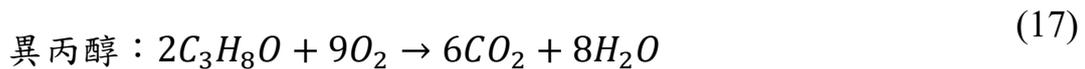
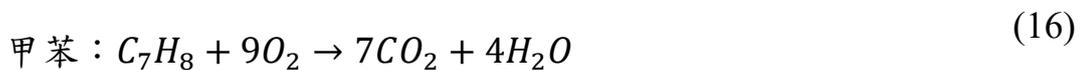
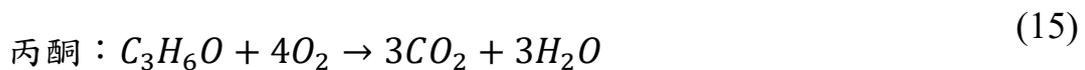


(b) 燃燒室步驟一的燃燒過程中壓力與流速在線 5(QQ') 上位置隨溫度的變化

圖 14、在線 5(QQ') 上位置隨溫度、壓力、流速的變化

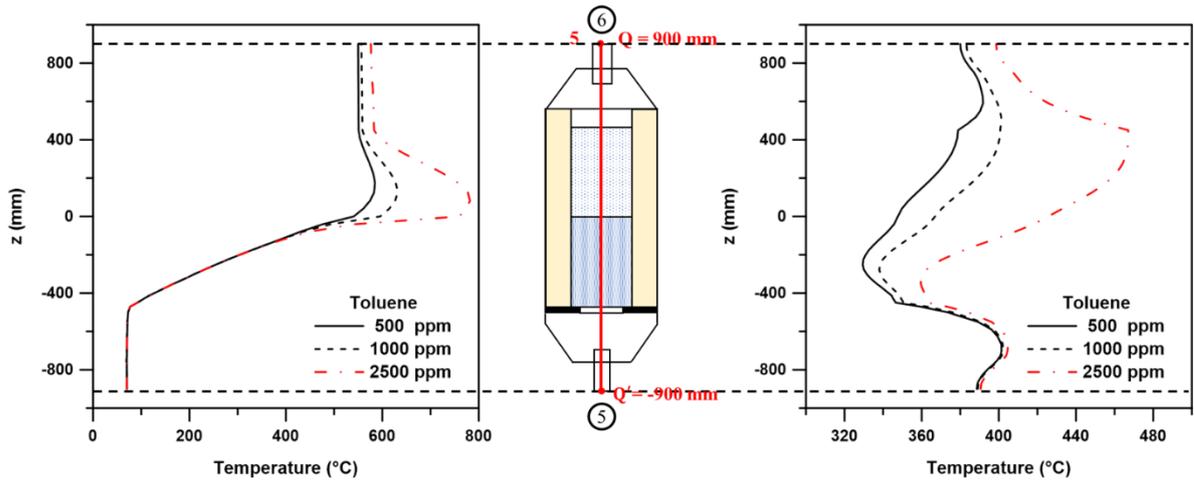
## b. 燃燒室氣流特性分析

我們分別對三種不同濃度(500、1000、2500 ppm)的濃縮 VOCs 氣體(甲苯、丙酮、異丙醇)進行溫度、流速、濃度氣流特性分析，經過燃燒過程與靜置過程後，各種濃縮 VOCs 沿線 $\overline{QQ'}$ 的位置隨溫度變化圖如圖 15 所示。在進行燃燒反應前，會先燃燒液態石油使整個模型預熱，使整個模型的溫度高於各 VOCs 的自燃溫度(甲苯： $480^{\circ}\text{C}$ 、丙酮： $465^{\circ}\text{C}$ 、異丙醇： $425^{\circ}\text{C}$ )，當溫度高於自燃溫度時，濃縮 VOCs 氣體從管道 5 流到疏密多孔的介面時會發生燃燒反應，使整個模型持續升溫。三種物種的燃燒反應式，如式(15)-(17)：

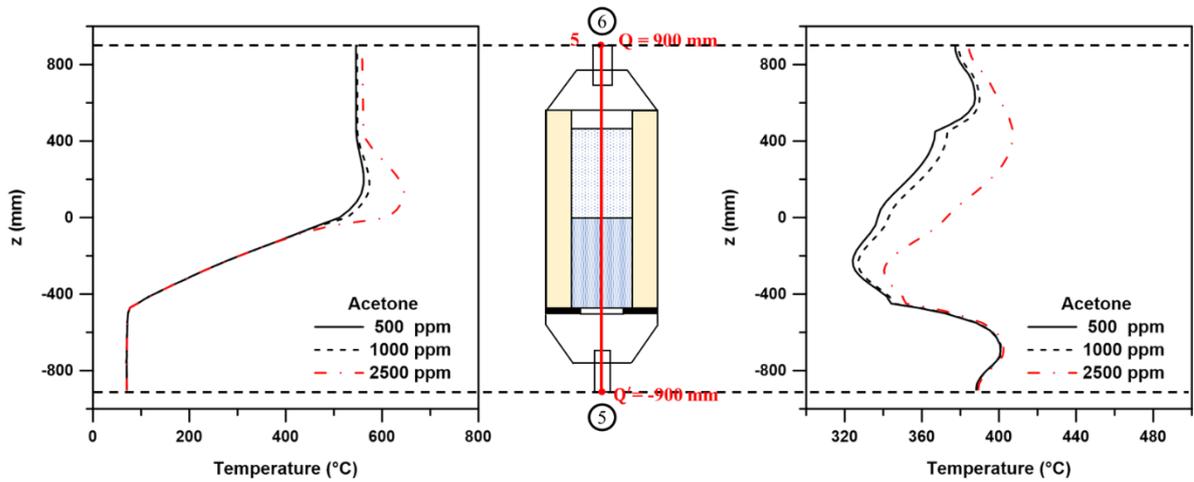


其中各 VOCs 提供的莫耳標準生成焓為甲苯： $-3905$  (kJ/mole)、丙酮： $-1788.7$  (kJ/mole)、異丙醇： $-2068.65$  (kJ/mole)。

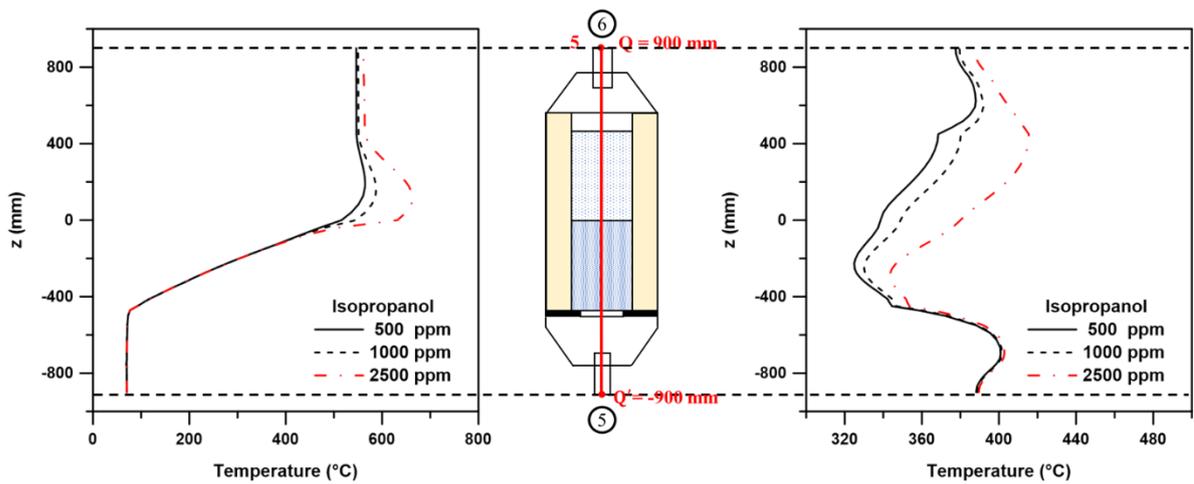
從圖 15 可以發現三種 VOCs 氣體有差不多的趨勢，濃度愈大能夠生成的反應熱愈多，模型整體的溫度也會愈高。所以從結果來說可以發現甲苯因為其莫耳標準生成焓最高，因此產生的熱也是最多的。



(a) 甲苯在不同濃度時對燃燒室數值模型的位置隨溫度變化圖



(b) 丙酮在不同濃度時對燃燒室數值模型的位置隨溫度變化圖



(c) 異丙醇在不同濃度時對燃燒室數值模型的位置隨溫度變化圖

圖 15、三種不同濃度且成分不同的濃縮 VOCs 分別經燃燒過程(左)20 分鐘後

與靜置過程(右)60 分鐘後溫度分別在線 5(QQ') 的變化

我們從圖 16 可以發現在經過 20 分鐘的燃燒過程之後，在氧氣充足的條件下，VOCs 氣體、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 會按照式(15)-(17)各燃燒反應式的化學當量係數，按比例進行增加或減少。同時透過燃燒反應式，在消耗相同莫耳數的 VOCs 氣體時，我們可以知道甲苯會製造出最多的 CO<sub>2</sub> 氣體，而甲苯與異丙醇會製造出相同的 H<sub>2</sub>O 氣體，濃度越高製造出的 CO<sub>2</sub> 與 H<sub>2</sub>O 也會越多。

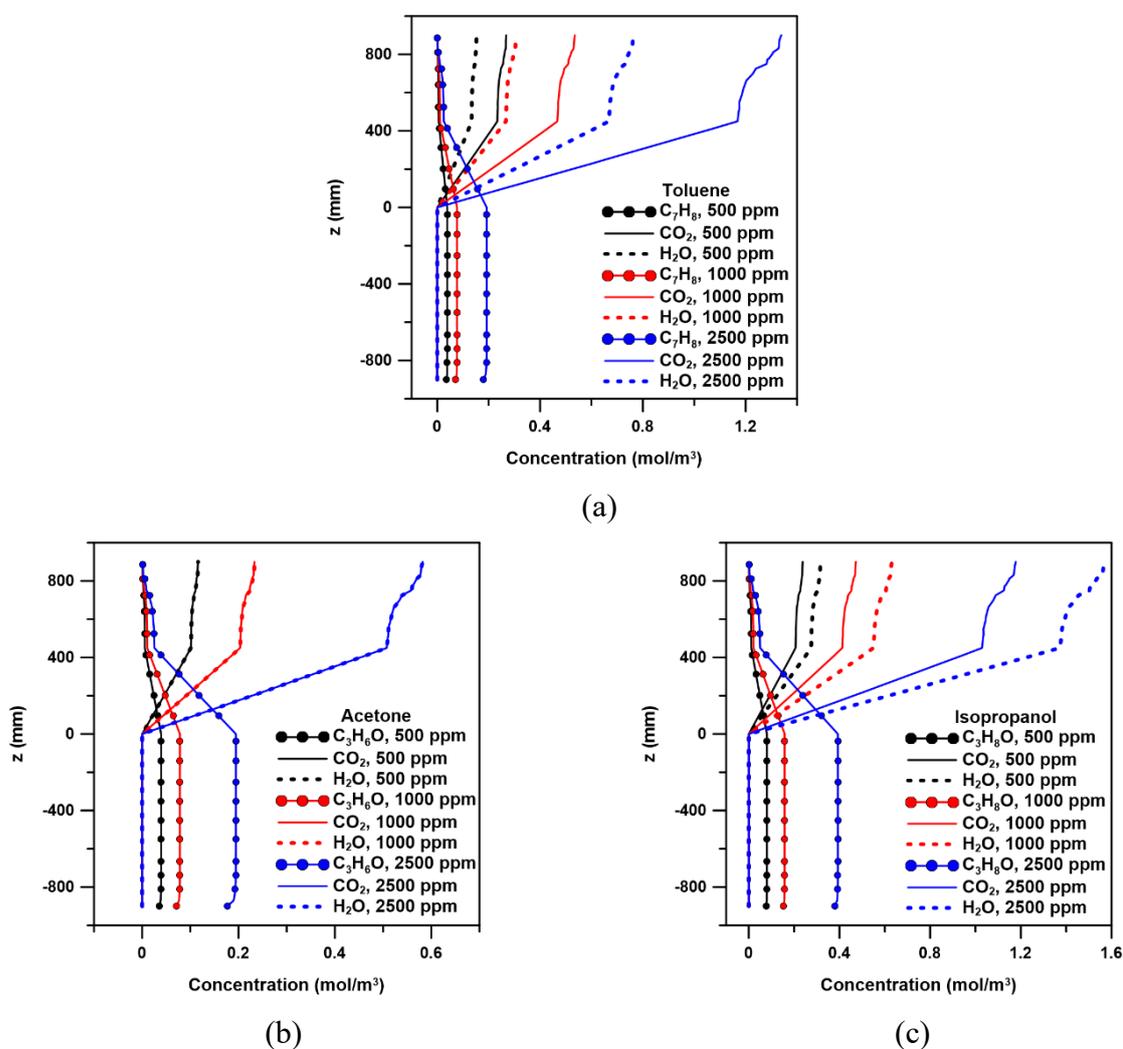
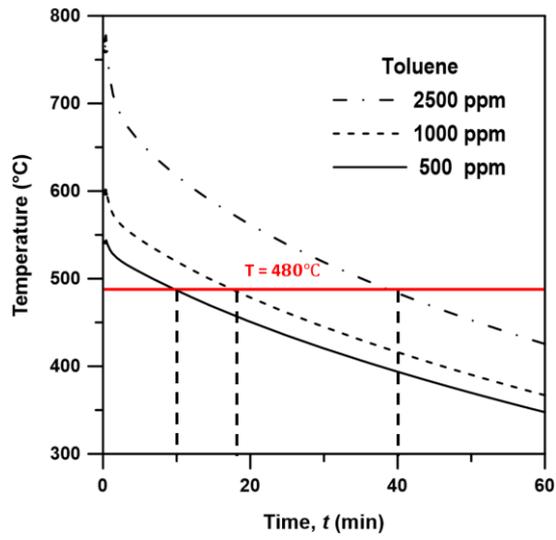
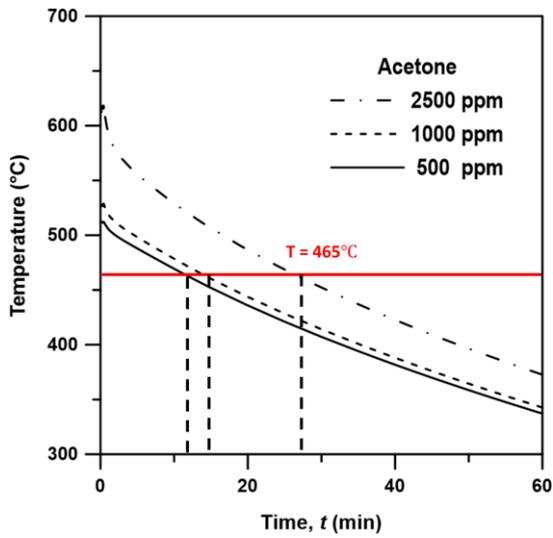


圖 16、燃燒反應之後對於 VOCs 氣體與 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 在不同濃度下線 5(QQ') 位置隨濃度的變化(a)甲苯 (b)丙酮 (c)異丙醇

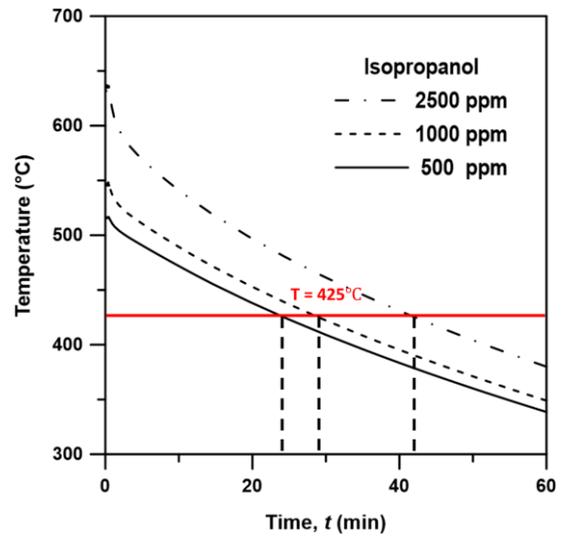
我們對於疏密多孔材料的交界面的中心點(點 C)，進行了特性分析報告，點 C 在進行燃燒過程中，因為是產生反應熱的中心點，即溫度最高的地方。因此在靜置過程中我們會以該點的溫度來判斷此時溫度是否適合進行下一輪的濃縮 VOCs 燃燒反應，若溫度低於該 VOCs 氣體的自燃溫度，則代表需要透過額外加熱並加以點火器才可以使燃燒室進行下一輪的燃燒作業，我們從圖 17 可以發現越高濃度的 VOCs 氣體，因為透過反應式產生的熱比較多，因此需要較多的時間才可以使點 C 的溫度低於自燃溫度，我們分別將不同的 VOCs 氣體在不同濃度下到達溫度最低點的時間列於表 4。同時我們另外研究了點 C 濃度對時間的變化(圖 18)，可以發現在 VOCs 氣體到達疏密關鍵多孔性陶瓷元件介面會開始發生不可逆的化學燃燒反應，當抵達至出口時，從圖 16 出口端量測到的的濃度發現燃燒效率可達 95%以上。



(a)



(b)



(c)

圖 17、點 C 在不同濃下在靜置過程中的溫度變化 (a) 甲苯 (b) 丙酮 (c) 異丙醇

表 4、VOCs 氣體在不同濃度條件最低點溫度結果

VOCs	自燃溫度 (°C)	濃度 (ppm)	所需時間 (min)
甲苯	480 °C	500	9.9
		1000	18.6
		2500	40.1
丙酮	465 °C	500	10.8
		1000	13.2
		2500	28.1
異丙醇	425 °C	500	22.2
		1000	29.6
		2500	42.3

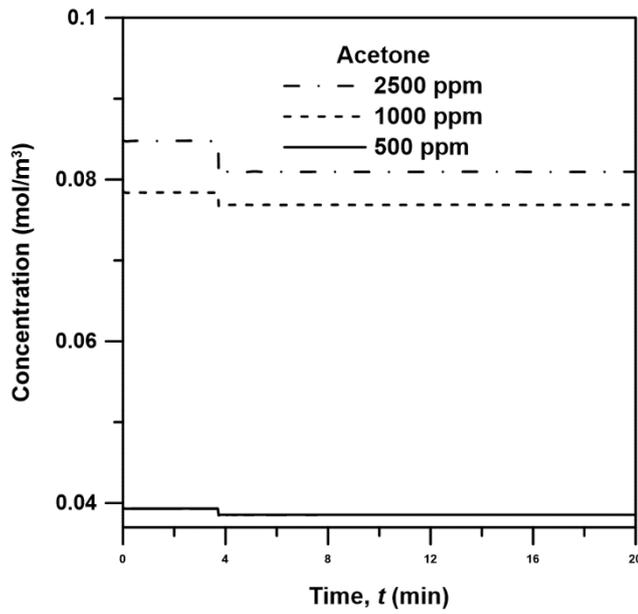


圖 18、丙酮在點 C 濃度隨時間的變化

## 二、VOCs 吸附試驗

### (一)、實驗前的準備事項

#### 1. 浸鍍 (dipping)

本計畫在開始進行吸附實驗前，要先對多孔性陶瓷元件進行浸鍍，希望可以透過在本次使用的多孔氧化鋁上鍍上分子篩提升此多孔材料的吸附效果。以 1 公升的矽酸鈉水玻璃混合 400 公克的鋁矽酸鹽分子篩溶液的比例對 20 PPI 多孔性陶瓷元件進行浸鍍，利用均質器加以攪拌後，達到分子篩隨機分佈於多孔性陶瓷元件的目的。將多孔性陶瓷元件浸入混和好的水玻璃，待到無氣泡冒出，即可取出並利用空氣噴槍將多餘的水玻璃吹落，接著置於架上晾乾後進入 80 度的烘箱烤乾半天到一天，即完成多孔性陶瓷元件的浸鍍作業。

#### 2. 氣體製備

本計畫以化學計量方式製作吸附試驗之有機氣體及組裝實驗模組，先將空氣或氮氣通過乾式氣體流量計進入採氣袋，接著使用一樣的乾式氣體流量計流入濃度為 500 ppm 的有機氣體。利用這個方法將三種不同的有機氣體(甲苯、丙酮、異丙醇)依照不同的比例與氮氣在採氣袋中混和成 4 種不同濃度 (50、200、350、500 ppm) 的有機氣體，接著開始組裝我們的吸附實驗模組並進行吸附試驗(圖 19)。

## (二)、實驗設備規格

### 1. 氣體進行吸附反應測試模組

組裝實驗模組為 316 不鏽鋼製的模具，如圖 20 所示。承載厚度約為 15 公分且直徑為 15 公分經浸鍍後的多孔陶瓷元件並密封後(單元槽具有單側氣密條(O-Ring)設計，相接後可維持氣密)，預留吸附裝置前的空間作為氣體腔室。多孔性陶瓷承載層一端連接採氣袋，另一端連接定流量之採氣泵進行吸附試驗，並在一側插入多傳感器環境監測器 (MSEM)，測量出口端的濃度。實驗開始前須使用皂泡式流量校正計比對採氣泵流量進行校正，進行吸附試驗時 MSEM 會記錄當下的氣體濃度，當濃度的數值達到飽和即代表完成一組試驗，圖 21 為吸附試驗流程圖。

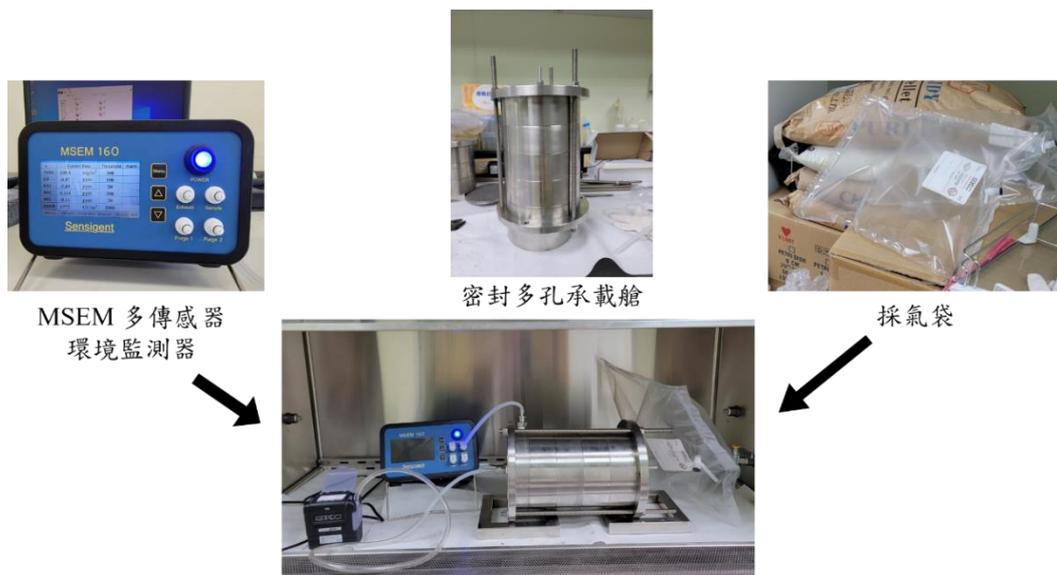
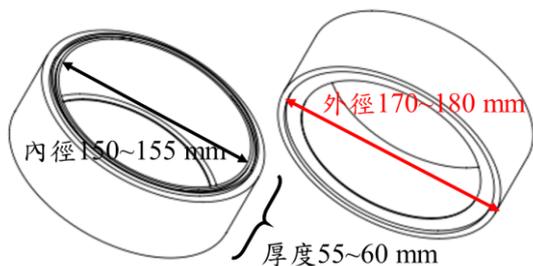
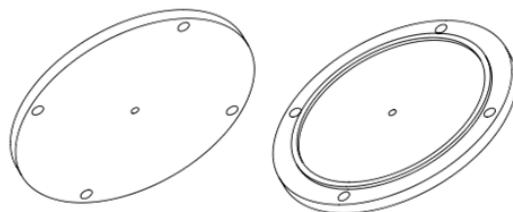


圖 19、吸附實驗模組



(a)一個單元槽的尺寸與示意圖



(b)上蓋示意圖



(c)下蓋示意圖



(d)組裝好的反應測試模組示意圖

圖 20、316 不鏽鋼製的吸附試驗模組示意圖與完成品

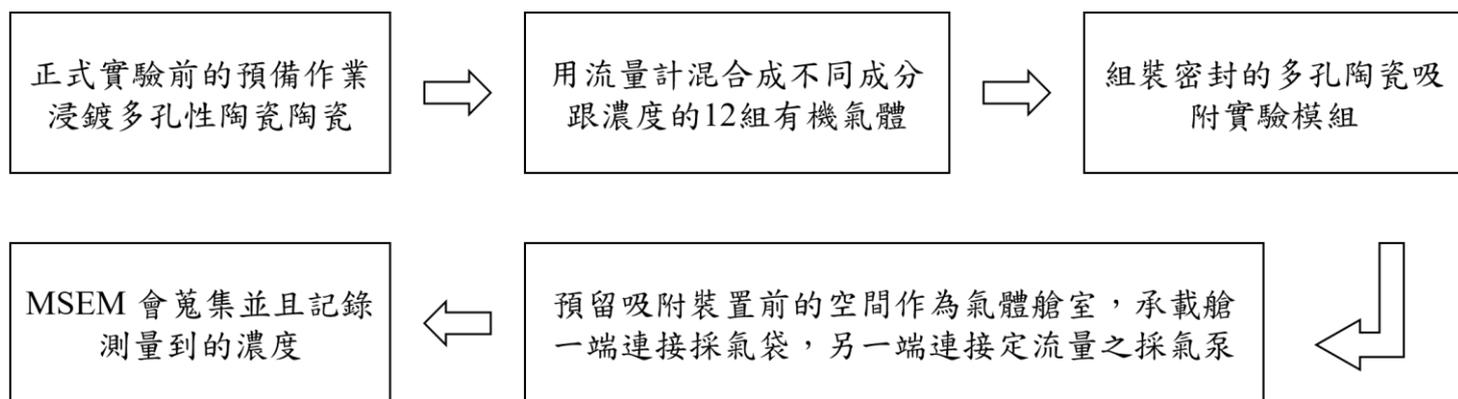


圖 21、吸附試驗操作流程圖

## 2. 空氣採樣器

空氣採樣器是用來控制吸附試驗模組中的 VOCs 氣體流過浸鍍後的多孔性氧化鋁的流速。本研究使用 SKC 公司的 AirChek Connect 藍芽傳輸觸控式空氣採樣器(圖 22)進行氣體導流，採樣時可以自動將壓力轉換成流量，連續採樣並提供準確及穩定的採樣流量，適用流量範圍為 0.005-5 L/min，氣體流量誤差小於 5%，本次試驗所採取的流量為 0.5 L/min。



圖 22、空氣採樣器

## 3. 氣味偵測儀

本次試驗模組所使用的氣味偵測儀為多傳感器環境監測儀 (MSEM) 中的攜帶式儀器 MSEM-160 (圖 23)。他不僅便於攜帶，還可對吸入空氣中的氣味和化學物質進行定性和定量的評估，除此之外，他也可以將原來的畫面外接螢幕便於觀察數值的變化，這次我們主要讀的是 TVOC (Total VOCs) 數值來判斷裡面的多孔性陶瓷元件是否已達到飽和。



圖 23、多傳感器環境監測儀 (MSEM)說明書與操作介面

### (三)、實驗結果與討論

本次實驗我們從眾多的 VOCs 分類中，選出了比較常見的 3 種類別：苯類、酮類及醇類。其中，我們又從這些類別中選擇了甲苯、丙酮及異丙醇進行吸附實驗。我們知道甲苯難溶於水，且是化工工業中十分常出現的有機氣體廢氣；丙酮在工業上的應用範圍十分廣泛，從民生、建築到醫學領域都可以發現丙酮的存在；異丙醇在 VOCs 中因為其較低的毒性與泛用性，且具有可以進一步轉化成丙酮之類不同的有機物的特性，因此也被廣泛地使用在各種工業製程裡。

本研究實驗結果如圖 24 所示，隨著使用的 VOCs 的濃度降低，多孔性陶瓷元件所需達到飽和的耗時就愈久。除此之外，我們可以從結果發現浸鍍分子篩之後的多孔性陶瓷元件對於 500 ppm 的甲苯只需要約 4 分鐘即達到飽和狀態，對於 50 ppm 的甲苯則需要花費 12 分鐘才可達到飽和；對於丙酮而言，500 ppm 需要的時間略多於丙

酮，50 ppm 的丙酮需要達到飽和需約 30 分鐘；經結果也可發現，各濃度異丙醇達到飽和所需要的時間均大於其他兩種有機物。

經過本輪實驗可發現，浸鍍分子篩後的多孔性陶瓷元件對於醇類的吸附效果最好，另外我們進行實驗時也發現這些多孔性陶瓷元件平均會增加約 1.5 克的重量，我們知道未浸鍍的多孔性陶瓷元件吸附能力並不好，因此我們可以推測出鋁矽酸鹽分子篩對於水氣具有很大的吸附能力。根據此結論，我們再進一步推敲如醇類這種親水性比較好的 VOCs 可能比較容易被分子篩吸附，故本次實驗中的結果才表現出異丙醇具有比較好的吸附效果。本次實驗也可以觀察到浸鍍過後的多孔性陶瓷元件具重複使用性，經數次循環(吸附至飽和之後進行高溫脫附)數次後仍維持一樣的吸附效果。

#### **(四)、貫穿曲線(Breakthrough Curve, BTC)**

貫穿曲線常作為分析吸附床的方法，當流體剛接觸到吸附床時，在吸附床的作用下，出口的目標物濃度幾乎為零，但一段時間之後，出口處將逐漸檢測出目標物，即吸附床的吸附能力隨時間增加而下降，最後出口測的目標物濃度將與入口一樣，此時吸附床已經達到飽和，無法繼續吸附目標物。本計畫使用 Yoon-Nelson 模型模擬與預測吸附行為與規律，並假設氣流通過吸附床中的吸附床時，部分氣體分

子被吸附而部分氣體分子通過，且吸附床飽和後無法繼續進行吸附，因此假設吸附分率的衰減率正比於貫穿分率( $f$ )與吸附分率( $r$ )的相乘，其中

$$f+r=1 \quad (18)$$

$$-\frac{dr}{dt} \propto rf \quad (19)$$

假設  $k_b$  為反應速率常數

$$-\frac{dr}{dt} = k_b rf \quad (20)$$

當  $f=1-r$  時，將上式積分可得

$$\ln \frac{f}{(1-f)} = -k_b(t - \tau) \quad (21)$$

$\tau$  為貫穿濃度達到 50 % 的初始濃度所需要的時間。整理式(21)後

$$t = \tau + \frac{1}{k_b} \ln \frac{f}{(1-f)} \quad (22)$$

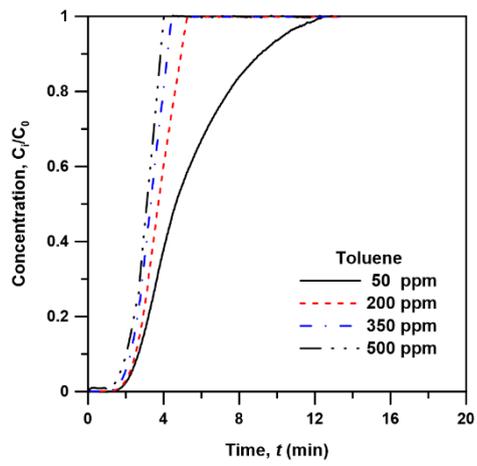
由於貫穿分率  $f = \frac{C_i}{C_0}$ ，式(17)可寫成

$$t = \tau + \frac{1}{k_b} \ln \frac{C_i}{(C_0 - C_i)} \quad (23)$$

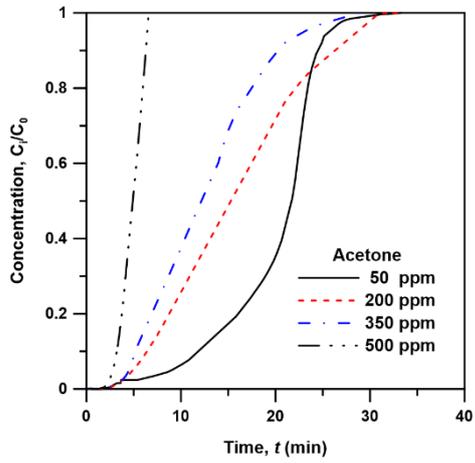
其中  $C_0$ ：VOCs 初始濃度、 $C_i$ ：VOCs 經吸附床吸附後流出之濃度，將實驗數據帶入上式即可獲得貫穿曲線。

本次實驗利用 20 PPI 之多孔性陶瓷元件對甲苯、丙酮及異丙醇進行四種不同濃度條件的吸附試驗其結果如圖 24 所示，並用此數據建立對應的 Yoon-Nelson model 吸附動力模型展示如圖 25，黑線為實驗時所獲得的實驗數據，紅線為該次實驗所對應的 Yoon-Nelson

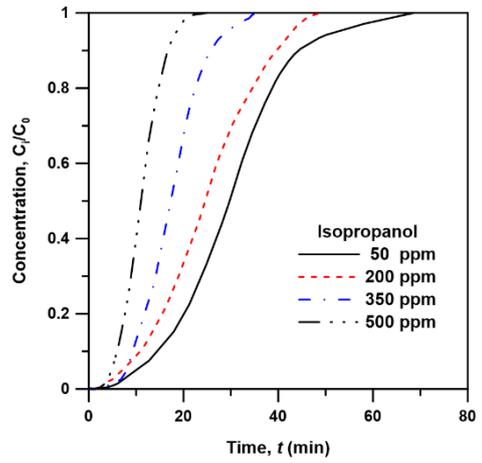
model 吸附動力模型。吸附動力模型所得之參數如表 5 所示，實驗的貫穿時間(濃度達到最大值得一半的時候)與計算模型所得之理論貫穿時間接近且  $R^2$  值皆大於 0.85，且表 6 為未進行浸鍍獲得的吸附動力模型之參數表。此外發現當氣體濃度增加時，理論上對應的模型斜率(即  $k_B$ )愈大，推測為氣體濃度變高時，因為空氣中有機物粒子數量較多，可以增加碰撞到多孔材料的機率，進而增加反應的效率，圖 26 為對異丙醇 500 ppm 進行模擬與實驗的比較，比較後誤差約為 9%，因此代表我們的模型是可信的。



(a)

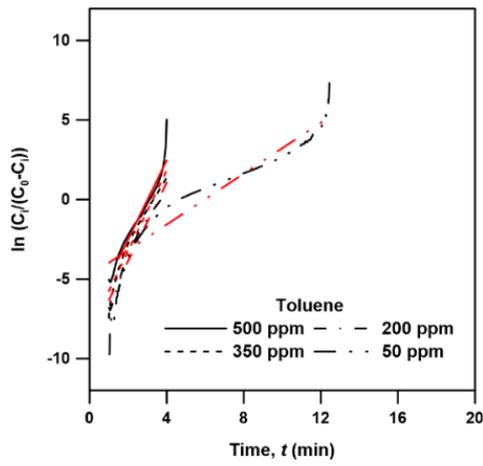


(b)

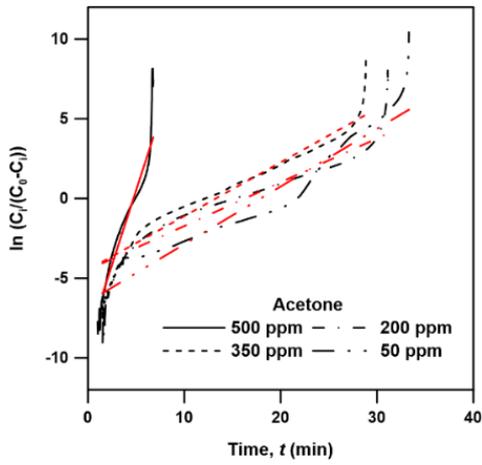


(c)

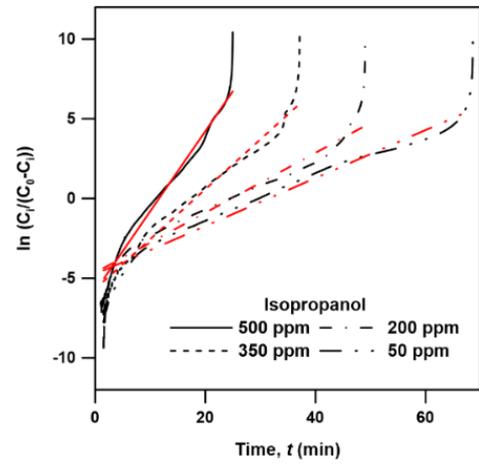
圖 24、吸附實驗的結果圖 (a)甲苯 (b)丙酮 (c)異丙醇



(a)



(b)



(c)

圖 25、不同濃度的異丙醇的 Yoon-Nelson model 的吸附動力模型結果

(a) 甲苯 (b) 丙酮 (c) 異丙醇

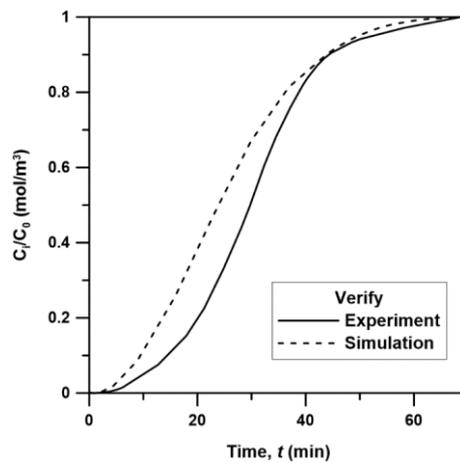


圖 26、實驗與模擬驗證結果圖

表 5、吸附動力模型所得之參數

VOCs	濃度 [ppm]	陶瓷元件試驗前後重量差 [g]	反應速率 $k_B$ [1/min]	實驗貫穿時間 $\tau_{50,exp}$ [min]	理論貫穿時間 $\tau_{50,theory}$ [min]	R <sup>2</sup>	最大吸附量 [ $\mu\text{g/g}$ ]
丙酮	500	0.54	1.741	4.9	3.9	0.95	0.52332
	350	1.68	0.336	12.2	15.2	0.94	2.10899
	200	0.6	0.269	15.3	16.4	0.93	2.40973
	50	1.36	0.359	21.7	17.5	0.94	0.09310
甲苯	500	1.06	2.105	3.1	2.0	0.92	6.83029
	350	0.62	2.818	3.3	2.6	0.95	0.20446
	200	0.37	2.358	3.7	3.1	0.95	0.14194
	50	0.88	0.798	4.6	6.7	0.88	0.23064
異丙醇	500	0.45	0.488	11.0	13.4	0.98	0.71012
	350	0.54	0.305	17.3	19.8	0.97	0.83315
	200	0.76	0.188	24.6	25.3	0.94	1.72282
	50	1.41	0.153	29.7	34.8	0.95	0.24230

表 6、前期研究未浸鍍前吸附動力模型所得之參數

VOCs	濃度 [ppm]	關鍵多孔性陶瓷元件重量 [g]	反應速率 $k_B$ [1/min]	實驗貫穿時間 $\tau_{50,exp}$ [min]	理論貫穿時間 $\tau_{50,theory}$ [min]	最大吸附量 [ $\mu\text{g/g}$ ]
丙酮	7.57	795.9	0.28	25.5	25.5	0.16308
	10.09	757.7	0.16	27.2	27.8	0.24158
	12.62	786.9	0.15	32.2	31.4	0.35358
	15.14	792.1	0.09	44.6	41.7	0.96402

## 肆、結論

透過有限元素法建立的吸附脫附濃縮槽及燃燒室的數值分析模型，基於達西定律來修正傳輸過程中的質量、動量(Navier-Stokes 方程式)、及能量守恆方程式。分析吸附脫附濃縮槽在六種不同流率條件下，流體通過多孔吸附關鍵陶瓷結構元件的吸附與脫附過程的溫度、壓力及流場分布。

我們首先探討了添加岩棉的必要性，發現添加岩棉不僅更加符合現實情況，也因為關鍵多孔性陶瓷元件的熱傳導係數遠大於岩棉的熱傳係數，從我們分析模型中的溫度、流速、壓力等可以證明添加岩棉對於流體的流動路徑與熱的傳遞等皆有更好的表現，且因為棉作為保溫材，因此也可以大幅提升數值模型蓄熱的能力。

接著我們分別比較不同疏密程度的關鍵多孔性陶瓷元件的數值模型，可以發現無論是吸附路徑或脫附路徑經過一小時之後對於 60 及 30 PPI 的關鍵多孔性陶瓷元件在流率大於  $5 \text{ m}^3/\text{min}$  的時候，因為已經貫穿整個模型，各處皆已達到均溫也代表較能獲得較好的吸附效果，但是在流率比較小如  $0.1$ 、 $0.5$ 、 $1 \text{ m}^3/\text{min}$  的數值模型中確實可以發現存在著差異，如圖 13 所示可以看出對於 60 PPI 的多孔性陶瓷元件而言，的確會因為多孔材料的孔洞排列比較緊密而使空氣較難

以通過，因此出口端溫度上升的速度會比較慢且出口端的負壓值也會比較大。另外，我們分別對於吸附脫附濃縮槽上下兩塊關鍵多孔性陶瓷元件的中心點進行溫度隨時間的變化，也證明了流率較小的模型只要時間足夠，亦可以穿透並使整個到達均溫。

而分析燃燒室的數值模型我們分別提出不同部分進行討論，首先根據數值模型的數值解結果與成本、效能等因素提出最佳孔洞組合為上面使用 30 PPI 的關鍵多孔性陶瓷元件，同時下面使用 60 PPI 的關鍵多孔性陶瓷元件，可以有最好的蓄熱效能；透過分析不同的 VOCs 氣體在不同濃度條件下的溫度、壓力、濃度的影響，可以發現丙酮各濃度平均到達自燃溫度的時間都快於另外兩種 VOCs 氣體，且隨著濃度的增加，透過反應產生的熱也愈多，因此愈高濃度的濃縮 VOCs 氣體可以愈晚達到該 VOCs 氣體的自燃溫度；在相同莫耳濃度下，發現甲苯會產生最多的  $\text{CO}_2$ ，而  $\text{CO}_2$  為其中一種溫室氣體，後續也可以討論如何處理產生出來的  $\text{CO}_2$  避免溫室氣體毫無規劃的排放出去。

本計畫完成特定孔徑之多孔吸附關鍵陶瓷通過四種濃度及三種 VOCs 進行吸附實驗，並透過我們的模型與實驗數值進行比較，充分表示我們的模型具有可信度，透過實驗獲得的數據可以計算出反應

速率與最大吸附量等吸附動力及貫穿曲線之操作參數，與之前的數據進行比對可以顯示出浸鍍分子篩的確可以提升吸附效果，吸附前後重量差平均會增加約 0.86 克，發現其中醇類的 VOCs 因為親水性比較好，更容易被多孔關鍵陶瓷元件吸附，因此醇類需要花更多的時間貫穿此多孔元件。

## 參考文獻

- [1] Vafai, K., & Tien, C. L. (1981). Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 24(2), 195-203.
- [2] Ruivo, C. R., Costa, J. J., & Figueiredo, A. R. (2009). Validity of pseudo-gas-side-controlled models to predict the behaviour of desiccant matrices. *International journal of thermal sciences*, 48(11), 2171-2178.
- [3] Cheng, D., Peters, E. F., & Kuipers, J. H. (2017). Performance study of heat and mass transfer in an adsorption process by numerical simulation. *Chemical Engineering Science*, 160, 335-345.
- [4] Luo, Z., & Xu, H. (2019). Numerical simulation of heat and mass transfer through microporous media with lattice Boltzmann method. *Thermal Science and Engineering Progress*, 9, 44-51.
- [5] Lewtas, J., Pang, Y., Booth, D., Reimer, S., Eatough, D. J., & Gundel, L. A. (2001). Comparison of sampling methods for semi-volatile organic carbon associated with PM<sub>2.5</sub>. *Aerosol Science & Technology*, 34(1), 9-22.
- [6] H. Pedersen-Hjaanes, L. Chan, E. Mastorakos (2005). Hydrogen production from rich combustion in porous media. *International Journal of Hydrogen Energy* 30, 579-592.
- [7] Pickenäcker, O., Pickenäcker, K., HEYMER, H., TAUSCHER, W., & JANSEN, F. (1999). Innovative ceramic materials for porous-

- medium burners. *Interceram*, 48(5), 326-330.
- [8] Howell, J. R., Hall, M. J., & Ellzey, J. L. (1996). Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. *Progress in Energy and Combustion Science*, 22(2), 121-145.
- [9] Kamal, M. M., & Mohamad, A. A. (2006). Combustion in porous media. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220(5), 487-508.
- [10] Trimis, D., & Durst, F. (1996). Combustion in a porous medium—advances and applications. *Combustion science and technology*, 121(1-6), 153-168.
- [11] Mohamad, A. A. (2005). Combustion in porous media: fundamentals and applications. In *Transport phenomena in porous media III* (pp. 287-304). Pergamon.
- [12] Pantangi, V. K., & Mishra, S. C. (2006). Combustion of gaseous hydrocarbon fuels within porous media—a review. *Advances in Energy Research*, 8, 455-461.
- [13] Oliveira, A. A. M., & Kaviany, M. (2001). Nonequilibrium in the transport of heat and reactants in combustion in porous media. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27(5), 523-545.
- [14] Jugjai, S., & Somjetlertcharoen, A. (1999). Multimode heat transfer in cyclic flow reversal combustion in a porous medium. *International journal of energy research*, 23(3), 183-206.
- [15] Cheremisinoff, P. N. (1992). *Industrial odour control*. Butterworth-

Heinemann Ltd. Oxford, 222.

- [16] Pedersen-Mjaanes, H., Chan, L., & Mastorakos, E. (2005). Hydrogen production from rich combustion in porous media. *International journal of hydrogen energy*, 30(6), 579-592.
- [17] Bubnovich, V., Toledo, M., Henríquez, L., Rosas, C., & Romero, J. (2010). Flame stabilization between two beds of alumina balls in a porous burner. *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3), 92-95.
- [18] Xu, K., Liu, M., & Zhao, P. (2011). Stability of lean combustion in mini-scale porous media combustor with heat recuperation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(7), 608-613.
- [19] Tathier, M., & Erdem-Şenatalar, A. (2004). Estimation of the effective diffusion coefficients in open zeolite coatings. *Chemical Engineering Journal*, 102(3), 209-216.
- [20] Dobre, T., Pârvulescu, O. C., Iavorschi, G., Stroescu, M., & Stoica, A. (2014). Volatile organic compounds removal from gas streams by adsorption onto activated carbon. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(9), 3622-3628.
- [21] Gupta, K. N., Rao, N. J., & Agarwal, G. K. (2015). Gaseous phase adsorption of volatile organic compounds on granular activated carbon. *Chemical Engineering Communications*, 202(3), 384-401