

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

高溫燃氣淨化技術應用與發展

**Application and development of high-temperature flue gas cleanup  
technology**

計畫編號：1012001INER041

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：蕭述三

聯絡電話：(03) 4267341

E-mail address：sshsiau@cc.ncu.edu.tw

核研所聯絡人員：陳一順

報告日期：2012 年 12 月 5 日

## 目 錄

目 錄.....	i
圖目錄.....	iii
表目錄.....	vi
中文摘要.....	1
英文摘要.....	3
壹、計畫目的.....	5
貳、實驗方法與設備.....	12
一、過濾機制簡介.....	12
二、冷性能過濾效率實驗設備.....	17
三、冷性能過濾效率實驗方法與步驟.....	26
四、冷性能過濾效率實驗參數.....	33
參、結果與討論.....	36
一、過濾器內部氣密對壓降行為與過濾效率之影響.....	36
二、中擋板長度對壓降行為與過濾效率之影響.....	39
三、自由面風速對壓降行為與過濾效率之影響.....	53
四、質量流率對壓降行為與過濾效率之影響.....	64
五、粉塵粒徑分析.....	76
肆、結論與未來規劃.....	82
一、結論.....	82
二、未來規劃.....	85

陸、参考文献.....86

## 圖目錄

圖 1 流動式顆粒床過濾器設計示意圖.....	8
圖 2 顆粒床停滯區示意圖.....	10
圖 3 兩段過濾模式.....	10
圖 4 三維流場實驗模型配置.....	18
圖 5 氣體供應裝置示意圖.....	19
圖 6 粉塵供應器(a)前視圖(b)側視圖.....	20
圖 7 濾材輸送裝置.....	21
圖 8 皮托管與壓力計裝置圖.....	22
圖 9 採樣裝置.....	24
圖 10 三種中擋板參數設置-前視圖.....	34
圖 11 過濾器內部中擋板設置示意圖.....	34
圖 12 過濾器內部不同氣密程度之壓降.....	38
圖 13 過濾器內部不同中擋板長度之壓降.....	41
圖 14 不同中擋板長度在自由面風速 7.4 cm/s 下之壓降行為.....	44
圖 15 不同中擋板長度在自由面風速 12.3 cm/s 下之壓降行為.....	45
圖 16 不同中擋板長度在自由面風速 17.2 cm/s 下之壓降行為.....	45
圖 17 不同中擋板長度在質量流率 110 g/min 下之壓降行為.....	50
圖 18 不同中擋板長度在質量流率 330 g/min 下之壓降行為.....	51
圖 19 不同中擋板長度在質量流率 660 g/min 下之壓降行為.....	51

圖 20 不同自由面風速在質量流率 110 g/min 下之壓降行為 .....	56
圖 21 不同自由面風速在質量流率 330 g/min 下之壓降行為 .....	56
圖 22 不同自由面風速在質量流率 660 g/min 下之壓降行為 .....	57
圖 23 不同自由面風速在中擋板長度 40 mm 下之壓降行為 .....	61
圖 24 不同自由面風速在中擋板長度 80 mm 下之壓降行為 .....	61
圖 25 不同自由面風速在中擋板長度 120 mm 下之壓降行為 .....	62
圖 26 不同質量流率在自由面風速 7.4 cm/s 下之壓降行為 .....	67
圖 27 不同質量流率在自由面風速 12.3 cm/s 下之壓降行為 .....	68
圖 28 不同質量流率在自由面風速 17.2 cm/s 下之壓降行為 .....	68
圖 29 不同質量流率在中擋板長度 40 mm 下之壓降行為 .....	73
圖 30 不同質量流率在中擋板長度 80 mm 下之壓降行為 .....	73
圖 31 不同質量流率在中擋板長度 120 mm 下之壓降行為 .....	74
圖 32 中擋板長度 40 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s、過濾效率 97.90% 下之 $D_{50}=18.78\mu\text{m}$ .....	78
圖 33 中擋板長度 80 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s、過濾效率 98.07% 下之 $D_{50}=17.52\mu\text{m}$ .....	79
圖 34 中擋板長度 80 mm、質量流率 330 g/min、自由面風速 17.2 cm/s、過濾效率 98.34% 下之 $D_{50}=16.10\mu\text{m}$ .....	79
圖 35 中擋板長度 80 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 7.4 cm/s、 過濾效率 99.09% 下之 $D_{50}=14.70\mu\text{m}$ .....	80

圖 36 中擋板長度 80 mm、質量流率 330 g/min、自由面風速 7.4 cm/s、 過濾效率 99.34% 下之 $D_{50}=14.46\mu\text{m}$ .....	80
圖 37 中擋板長度 120 mm、質量流率 330 g/min、自由面風速 7.4 cm/s、過濾效率 99.55% 下之 $D_{50}=13.37\mu\text{m}$ .....	81
圖 38 不同進口自由面風速下之過濾效率.....	84
圖 39 不同濾材質量流率下之過濾效率.....	84

## 表目錄

表 1 過濾器內部不同氣密程度實驗之參數及過濾效率 .....	39
表 2 過濾器內部不同中擋板長度實驗之參數及過濾效率 .....	41
表 3 不同中擋板長度在自由面風速 7.4 cm/s 下之過濾效率 .....	46
表 4 不同中擋板長度在自由面風速 12.3 cm/s 下之過濾效率 .....	46
表 5 不同中擋板長度在自由面風速 17.2 cm/s 下之過濾效率 .....	47
表 6 不同中擋板長度在質量流率 110 g/min 下之過濾效率 .....	52
表 7 不同中擋板長度在質量流率 330 g/min 下之過濾效率 .....	52
表 8 不同中擋板長度在質量流率 660 g/min 下之過濾效率 .....	53
表 9 不同自由面風速在質量流率 110 g/min 下之過濾效率 .....	57
表 10 不同自由面風速在質量流率 330 g/min 下之過濾效率 .....	58
表 11 不同自由面風速在質量流率 660 g/min 下之過濾效率 .....	58
表 12 不同自由面風速在中擋板長度 40 mm 下之過濾效率 .....	62
表 13 不同自由面風速在中擋板長度 80 mm 下之過濾效率 .....	63
表 14 不同自由面風速在中擋板長度 120 mm 下之過濾效率 .....	63
表 15 不同質量流率在自由面風速 7.4 cm/s 下之過濾效率 .....	69
表 16 不同質量流率在自由面風速 12.3 cm/s 下之過濾效率 .....	69
表 17 不同質量流率在自由面風速 17.2 cm/s 下之過濾效率 .....	70
表 18 不同質量流率在中擋板長度 40 mm 下之過濾效率 .....	74
表 19 不同質量流率在中擋板長度 80 mm 下之過濾效率 .....	75

表 20 不同質量流率在中擋板長度 120 mm 下之過濾效率 .....	75
表 21 $D_{50}$ 粒徑分佈與過濾效率一覽.....	78



## 中文摘要

整合型氣化煤複循環系統(IGCC, Integrated Gasification Combined-Cycle)為近年來歐、美、日等工業先進國家致力發展二十一世紀的新式先進燃煤技術，而這些系統在前端均會產生高溫高壓之燃氣及飛灰，因此須在進入後端氣渦輪機機具前控管粉塵濃度，方能使系統有效運作。

延續上年度計畫(名稱：淨煤發電高溫氣體淨化技術發展)成功開發出一活動組合式三維流動式兩階段顆粒床過濾器模型，於本年度計畫將繼續採用此三維模型，並依據去年二維流場與三維過濾器初步過濾實驗所得之結果為基礎，延續進行並開發能達到更高冷性能效率之兩階段顆粒床過濾系統。計畫中將針對影響過濾器效率的參數部分進行探討，如進口自由面風速、濾材質量流率、床體間的壓降及粗細顆粒床高度等，盼以進一步解析兩階段過濾器系統中最重要之過濾效率指標。

本計畫中將採用三種進口自由面風速(7.4 cm/s、12.3 cm/s、17.2 cm/s)搭配三種濾材質量流率(110 g/min、330 g/min、660 g/min)進行冷性能過濾效率測試，期間測量紀錄床體間壓降變化並與過濾效率結果進行比較分析。計畫結果顯示，中擋板長度 120 mm 搭配質量流率 330 g/min 在最低自由面風速 7.4 cm/s 下有 99.56%之最佳過濾效率；而最差之過濾效率則為 97.88%，其實驗操作參數為中擋板長

度 40 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 下。同時實驗結果也闡明，過濾效率會隨著中擋板長度變長而增加，並隨著自由面風速的提高而降低，且在質量流率 330 g/min 時達到最好的過濾效率。另粒徑分析結果也說明越高之過濾效率可得到越佳之  $D_{50}$ (median size) 分佈，其中最佳過濾效率 99.56% 時之  $D_{50}$  為  $13.37 \mu\text{m}$ ，最差過濾效率為 97.88% 時之  $D_{50}$  為  $18.78 \mu\text{m}$ 。

上述三維冷性能兩階段過濾系統測試模型實驗所得之結果，將可作為未來進行三維熱模實驗的基礎，計畫的最終目標則是朝建立商業化之高溫燃氣流動式兩階段顆粒床過濾系統而邁進。

關鍵詞：兩段式顆粒床過濾器、壓降、過濾效率

## **Abstract**

The Integrated gasification combined-cycle system for power generation and the advanced coal-fired power plants have been developed in United States, Europe and Japan in recent years. High temperature syngas is generated during the gasification process using biomass or coal. The high temperature syngas contains many dust particulates and fly ashes which should be filtrated before entering gas turbine.

This project extended the study of previous year with the successful development of a 3D two-stage filtration system. In accordance to the results of previous year, the higher performance of 3D two-stage filtration system will be pursued. The parameters of inlet surface velocity, media mass flow rate, pressure drop, level of granular bed which may affect the efficiency of filtration in this 3D two-stage filtration will be discussed.

During the cold test, three inlet surface velocities (7.4 cm/s 、 12.3 cm/s 、 17.2 cm/s) and three media mass flow rates (110 g/min, 330 g/min, 660 g/min) will be employed. The measurements of pressure drop and efficiency of filtration in this two-stage filtration system will be recorded and analyzed. The experimental results show that the best

filtration efficiency(E%) will be obtained by central plate length of 120 mm with mass flow rate of 330 g/min in the lowest free surface velocity. And the worst E% will be obtained as following parameters: central plate length of 40 mm, mass flow rate of 110 g/min, and free surface velocity of 17.2 cm/s. The results also pointed out that the E% is increasing as central plate length increasing, decreasing as free surface velocity rising. And the best E% can be achieved in mass flow rate of 330 g/min. By the way, the results of particle analysis show that the  $D_{50}$  (median size) of particle distribution is 13.37  $\mu\text{m}$  in the best E% of 99.56% and is 18.78  $\mu\text{m}$  in the worst E% of 97.88%.

With the result of this project, it is helpful to design the 3D two-stage moving granular bed for the hot test. The final goal of the project, is to establish the design rules for the commercialized moving granular bed filter.

Key words : two-stage granular bed filter, pressure drop, filtration efficiency

## 壹、計畫目的

人們對於能源的需求一直是不間斷的，尤其隨著現今科技發展與人類工業社會的迅速發展而日益增加，所以現存能源需要能被充分開發且利用。隨著環保意識的高漲，人們對於環境的要求也逐漸的增加，於是相關推廣清潔生產技術、工業廢棄物減量、發展對環境衝擊最小之廢棄物處理技術…等政策被積極推動進行。

在世界各國石油及天然氣等各種能源的存量日益減少下，煤的蘊藏量就目前而言，其量豐富且價格便宜，故為燃煤發電廠的發電主要材料之一，尤佔我國使用總體能源 32%以上。但是煤在燃燒的過程中將產生大量的微粒物質，並釋放出有害的氣體污染物質，如：硫、氮與鹼系等污染成分的物质，故發展氣體淨化技術乃為現今當前的要務之一，如此不僅可以發展廉價且安全的電力外，也可防止有害氣體排放至大氣，同時也滿足政府對有害氣體的規範。

在氣化過程中的高溫合成氣體內含有大量的粉塵微粒物質，因此在高溫高壓的狀態下需清除粉塵微粒物質，防範渦輪機(gas turbine)發電系統受到損壞，確保系統的正常運作。如不加以進行過濾處理，氣體中的粉塵微粒物質撞擊渦輪發電機進氣端之葉片，將嚴重損壞發電機之壽命。除此之外，當粉塵微粒物質排放至大氣中不僅在環境上造成污染且也危害到人類的健康，故發展高溫氣體淨化技術乃為現今電漿氣化發電技術開發中當前的要務之一，透過淨

化機構保護下游設備，如管線、熱交換器、渦輪發電機等，防止其遭侵蝕、腐蝕、或結垢等侵害，並增加下游設備之選用自由度，以達到便宜、操作簡單、高效率及高穩定性的目標。

傳統氣體淨化技術除了因低溫過濾所造成的能源利用效率降低外，更有二次污染或無法滿足下游設備規格需求等缺點。因此，世界各國皆漸漸朝高溫燃氣淨化技術的方向進行研發，其優點在於可增加顯熱利用率，提高能源效率並可簡化程序設備，如熱交換器等；且當熱回收時因有較高之溫度差，回收效率高設備成本也低，此外利用乾式過濾方式，亦可減少廢水的產生並降低處理成本，故高溫高壓除塵裝置，已為目前工業上急需之技術。

就除塵淨化裝置而言，目前商業化市場以陶瓷濾棒技術最成熟、最為被廣泛採用，陶瓷過濾技術乃利用一耐高溫高壓之桶槽內置入排列整齊之陶瓷濾棒來進行除塵。然而傳統之陶瓷濾棒在高溫下其機械可靠性差，常有陶瓷表面易堵塞、碎裂、濾材價格昂貴及機械精密度要求嚴格經常造成系統停機維修等問題。而解決這些問題的根本之道，就是重新選擇過濾濾材，而該過濾介質需符合價格成本低、耐高溫及酸鹼、機械强度高不易毀壞、使用壽命長可以循環重新再使用、容易更換以及除塵效率佳等優點。

先進國家於近十多年來，致力發展一新構想，即是選取利用細小砂礫或類似顆粒狀物質為過濾濾材，而這種利用細小砂礫來過濾

的方式，在淨水過程中已被廣泛的應用且效果良好，因而被引用到氣體的淨化上，這種以細小砂礫來過濾的方式統稱為深層過濾器或顆粒床過濾器 (granular bed filter)。先進國家如美國之能源部 (Department of Energy)[1]、歐洲非核能研究發展委員會 (European Communities Non-Nuclear Energy R&D Programme) [2-3]及日本各大實業界[4]均投入相當大之人力物力發展顆粒床淨化系統，學術界亦日益重視相關系統之研究開發[5-9]。流動式顆粒床廢氣淨化系統之設計構造及操作方式有許多種，圖 1 所示即為典型的流動式顆粒床過濾器系統架構示意圖。

圖中剖面處為一環狀容器，在內外緣壁間有數組呈百葉窗排列方式的葉片，容器內則由上而下不斷填充顆粒狀之過濾濾材，含煙塵燃氣由中央煙道進入環狀容器內側，經由內側百葉窗開口穿過顆粒過濾濾材後被淨化，再通過外側百葉窗開口流出，濾材與塵粒則沿著環狀容器往下流出，再另行分離，而分離過的濾材則藉由氣送循環系統送回過濾器再繼續使用。

此過濾系統優點為所使用的介質為不可燃物，在操作上無失火之慮且顆粒體濾質可在操作中連續淨化循環再生使用，不影響到系統的連續操作。這些優點是傳統濾袋系統所無法代替的，所以顆粒床過濾系統深具替代傳統集塵器的潛力。藉著合適之過濾器，降低進料氣體的微粒成分可提高下游設備的使用壽命和工作效率。靜電

集塵、濾袋式集塵已成功地在中溫( $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ )中壓下，除排出氣體中的微粒子。但以上設備如在高溫、高壓下欲除去氣體中的微粒子會耗去大量的能量。由現有的循環式氣體渦輪發電、燃燒氣化、流體化床燃燒及合成氣體燃料等系統對除塵效果的要求，更再次突顯顆粒床過濾器之特點。

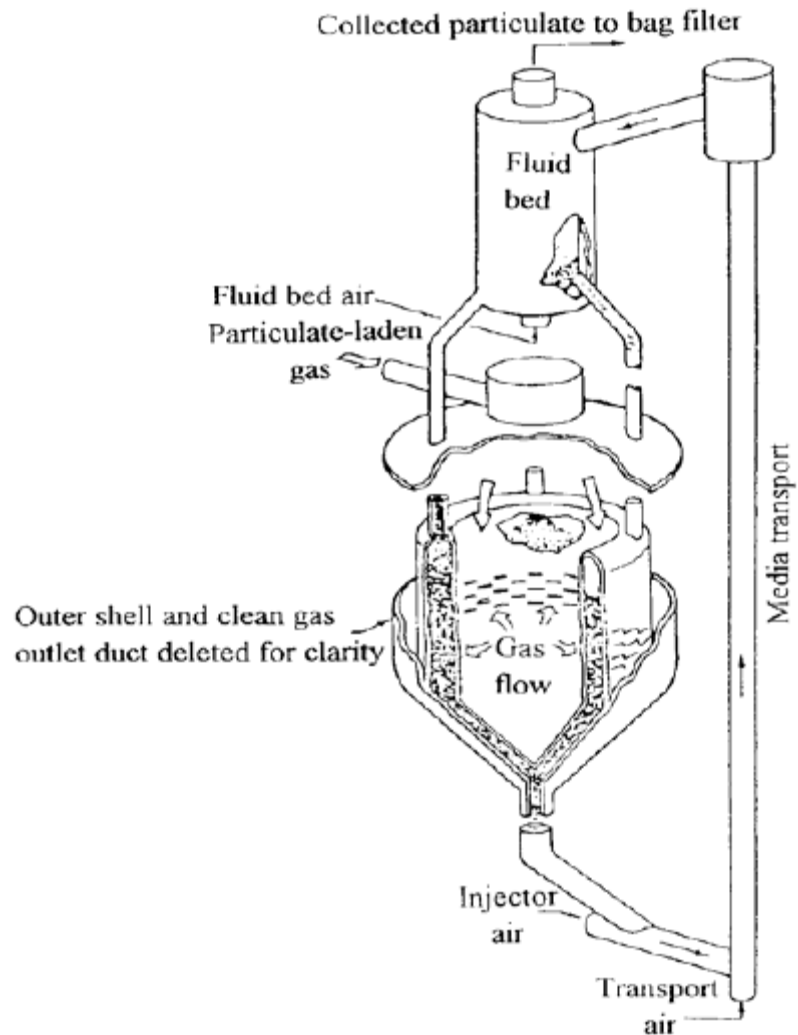


圖 1 流動式顆粒床過濾器設計示意圖



流動式顆粒床過濾器為顆粒床過濾系統設計中關鍵之一環，尤其過濾器內部的流動校正單元設計十分重要。流動校正單元之設計是為了增加燃氣進入顆粒床過濾器之進口面積，而非單單僅由進風口進入系統隨即排出，因為這些流動校正單元之存在，不僅使濾材顆粒不是單純向下垂直運動，而且也是為了消除進口與出口間所堆積形成一個停滯區(stagnant zone)或流動極為緩慢之半停滯區(quasi-stagnant zone)，如圖 2 所示。燃氣之塵粒則會為此濾材（半）停滯區之濾材吸附，終將造成燃氣進口處之堵塞，因而系統將因燃氣無法持續進入顆粒床而無法有效運作。相關研究技術發展中，這是一大瓶頸。

根據以上的問題所在與多年對高溫燃氣淨化技術研發的經驗，本計畫將利用不同粒徑之濾材進行除塵淨化過濾，並藉由粗細不同粒徑之濾材構成兩段過濾(two stage filtration)模式，其示意圖如圖 3 所示，第一段過濾層中放置粗顆粒濾材(coarse Media)，第二段過濾層置入細顆粒濾材(fine Media)，當不同粒徑大小之飛灰進到第一段過濾層時，其大粒徑之飛灰先被粗濾材阻擋，小粒徑之飛灰會通過第一段過濾層持續往第二段過濾層移動，此時小粒徑的飛灰會被該層濾材所形成的過濾層攔阻，藉著兩段過濾的模式將不同粒徑之飛灰攔阻並吸附於濾材中，如此可有效控制不同粒徑之飛灰攔阻與吸附於濾材中並且降低飛灰微粒物質的濃度，達到最佳的過濾效率。

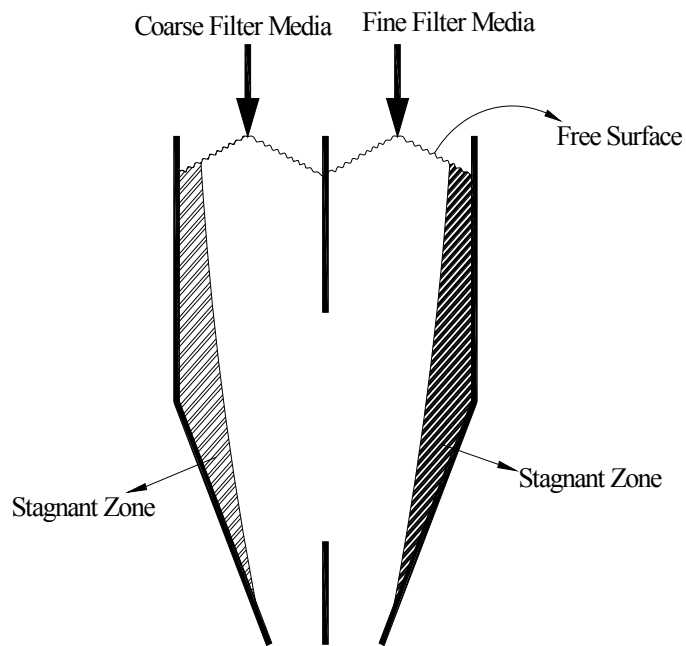


圖 2 顆粒床停滯區示意圖

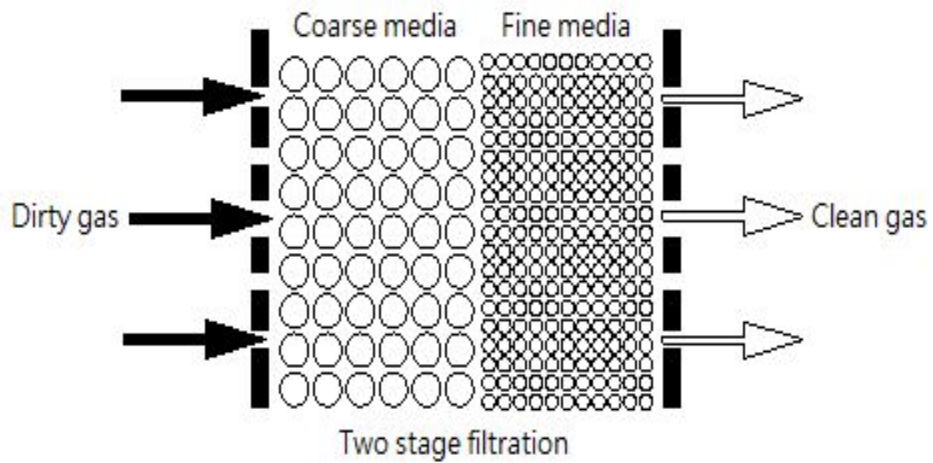


圖 3 兩段過濾模式

根據前年雙濾材流場實驗結果及已建構之三維兩階段雙濾材顆粒床過濾器及週邊系統，今年將計畫執行的一系列冷性能過濾實

驗，實驗操作參數將包含不同進口自由面風速、不同濾材質量流率、床體間的整體壓降等，以進一步解析兩階段過濾器系統中最重要過濾效率指標，並期使雙濾材過濾系統能達到實際過濾不同粒徑大小粉塵之目的，使過濾下來的粉塵能快速被濾材帶出床體外，進而可以因雙濾材的持續供應，持續地過濾粉塵而不停機，達到高商業可行化、可持續過濾而無需停機、過濾效率高等優點之高溫燃氣流動式兩段式顆粒床過濾系統。

## 貳、實驗方法與設備

### 一、過濾機制簡介

在顆粒床過濾中為使過濾參數更加完整化，同時也可依據實驗所得之最佳參數進行無因次參數式的定義，以方便提供在未來相關領域研究的參考。相關研究文獻中模擬高溫氣體溫度 850°C、壓力為 1000 Kpa 的條件下，定義且設計出在常溫 20°C 狀態下操作的顆粒床過濾器且在相同過濾無因次參數下，實際進行過濾實驗，由結果顯示過濾效率超過 99% 與低壓降之結果，由此研究得知無因次參數定義乃可在常溫下模擬高溫及高壓下之過濾行為。

Zevenhoven et al.[10]中提到分離過濾機制方面共有慣性衝擊 (inertial impaction)、重力沉降 (gravitational settling)、擴散 (diffusion)、攔截 (interception) 與靜電集塵 (electrostatic attraction) 等項目，大致而言，在粉塵微粒大於 0.5  $\mu\text{m}$  以上的過濾機制，主要以慣性衝集、攔阻與重力沉降[11]為主；就粉塵微粒粒徑在小於 0.1  $\mu\text{m}$  時，主要過濾機制為擴散[12]。而底下將逐一說明機制的原理，以更進一步了解分離過濾機制對於過濾實驗的影響。

#### (一)慣性衝擊(inertial impaction)

當一粉塵微粒尺寸大到不能迅速地適應氣體流線遇到濾材顆粒而突然改變方向時所產生過濾機制行為，而粉塵微粒將會因慣性作用被阻止改變流動方向，因而撞上濾材(filter material)

顆粒而被其捕集下來，此一特性為沿著原氣體路徑而此繼續被捕捉於過濾濾材上，稱為慣性衝擊(inertial impaction)。而史托克數(Stokes number, St) 為該機制過濾效率下的重要指標[12]:

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 UC_s}{9\mu d_g} \quad (12)$$

其中， $\rho_p$  與  $d_p$  分別為粉塵飛灰顆粒的密度與粒徑；U 為表面速度； $C_s$  為康寧漢滑移修正係數(Cunningham slip correction factor)； $\mu$  為氣體黏度； $d_g$  為濾材粒徑，一般而言，當過濾效率大於 90%時其 St 則大於 0.01。

### (二)攔截(interception)

攔截機制發生於伴隨著氣流流線而來的粉塵微粒，當粉塵微粒中心處至過濾濾材表面距離將小於粉塵微粒半徑時，觸碰到濾材時便隨即會被捕集下來。而此機制若粉塵微粒粒徑與床體濾材顆粒粒徑比為 1:1000 或更小[13]時，該機制可以被忽略。而該機制則可以以攔截數(interception number, R)來表示:

$$R = \frac{d_p}{d_g} \quad (13)$$

### (三)重力沉降(gravitational)

依據重力原理可將大粒徑且移動慢的粉塵微粒捕集，因此對於越大的粉塵微粒該機制的影響也就相當明顯。但由於此過

濾機制適用於大微粒與低氣速之過濾，將會導致過濾粒徑過大與不符合經濟範圍，且對於氣體中的粉塵微粒小於 100  $\mu\text{m}$  時 [13]，粉塵粒子不容易受重力作用而沉降，一般而言該機制對於細微粉塵的微粒影響是可選擇忽略的。該機制將可以 Grashof number 無因次參數來表示：

$$G_r = \frac{\rho_p d_p^2 g C_s}{18\mu U} \quad (14)$$

#### (四)擴散(diffusion)

當粉塵微粒小於 0.1  $\mu\text{m}$  時，其微粒與氣體分子間的運動會因碰撞而導致不規則(random)的移動，此隨機運動稱為布朗寧運動(Brownian motion)現象，而微粒子因擴散作用而偏離氣流流線後，被捕捉收集於過濾濾材上。而該機制可用 Peclet number 無因次參數來決定其過濾效率，其表示式為：

$$P_e = \frac{3\pi\mu d_p U d_g}{C_s kT} \quad (15)$$

其中，k 為波茲曼常數(Boltzman constant)與 T 為絕對溫度。此外，當描述過濾濾材與氣體間行為時，須用幾何、流體動力及濾材的移動軌跡路徑來加以進行描述。其中，幾何方面則藉由固定過濾器直徑 D 與濾材粒徑  $d_g$  比例：

$$L = \frac{D}{d_g} \quad (16)$$

而流體動力方面則依據濾材粒徑定義出雷諾數(Reynolds

number,  $Re$ ) 無因次參數來描述:

$$Re = \frac{\rho_f U d_g}{\mu} \quad (17)$$

其中， $\rho_f$  為氣體之密度。另外，在顆粒軌跡路徑上則使用 Stokes number (就慣性衝擊機制而言)、Peclet number (就擴散機制而言)與 Grashof number (就重力沉降機制來講)與 interception number 來描述。而就一慣性衝擊過濾器的過濾效率，則可定義為下列關係表示式：

$$\eta = f(St, Re, R) \quad (18)$$

另外，顆粒床過濾器中需要再用氣體與流體密度比(ratio of gas and fluid densities,  $P$ )與福祿數(Froude number,  $Fr$ )，來描述其移動床中的流體動力行為，而無因次參數表示式如下：

$$P = \frac{\rho_g}{\rho_f} \quad (19)$$

$$Fr = \frac{U^2}{g d_g} \quad (20)$$

因此，就一移動式顆粒床過濾器的整體過濾效率，則可以表示底下一關係式[10]:

$$\eta = f(St, Re, R, P, Fr) \quad (21)$$

針對不同過濾之應用方面上，在本研究中將對過濾相關參數定義過濾無因次參數，而這些無因次參數的定義，可作為未來顆粒床過濾系統設計上的依據。

### (五)粉塵濃度及粒徑分析

一般業界所使用高溫燃氣系統都控制在濃度 5000~10000 ppmw 之間，在實驗中粉塵濃度控制在 7500 ppmw，而在此濃度範圍內，若風速能承載的濃度越高，其經濟效益越好，但仍須考慮粉塵濃度過高時，會導致進風管路中有粉塵堆積現象的產生。目前的新式燃煤發電系統中，由於燃煤氣化過程中粉塵飛灰，必須加以過濾清除，否則會附著在系統輸送管線、管壁及發電機進氣口端，使得氣渦輪機葉片造成侵蝕、腐蝕或結垢等破壞，進而造成發電機運轉之發電效率及壽命。為了保護渦輪機，一般對於粉塵微粒物質的濃度與粒徑分佈皆有相當嚴格之規範，而不同公司所生產的渦輪機因其設計特性，對於規範的限制也略有不同，但趨勢皆是其粒徑越大則相對所能容忍的濃度則越低，亦即粒徑越大則對渦輪機發電設備的破壞越大。燃煤系統產生燃氣中各種污染物對發電設施之危害與允許規範為：粉塵微粒物質的粒徑應小於 10  $\mu\text{m}$ ，其中 90%需小於 5  $\mu\text{m}$  否則會造成侵蝕，濃度則要小於 100 ppmw，而大於該值則會產生沈積。

因此在本研究中將針對顆粒床過濾前後的粉塵飛灰粒徑及濃度進行分析，將定義其粉塵飛灰粒徑 10  $\mu\text{m}$  與濃度 100 ppmw 為一分水嶺進行分析，並使被顆粒床過濾器過濾後的出口粉塵



飛灰粒徑及濃度，符合渦輪機的規範。

## 二、冷性能過濾效率實驗設備

### (一)實驗測試裝置

本論文所採用的三維模型，係依照二維模擬系統之最佳結果設計，建立三維模型配置系統，如圖 4 所示。

顆粒床床高 1570 mm，床寬 380 mm，床深 500 mm，內置一不對稱流動校正單元(左葉片與中心夾角  $20^\circ$ ，長 169 mm，右葉片與中心夾角  $15^\circ$ ，長 176 mm)，乾淨濾材從上儲槽(hopper)置入，由上往下垂直接流動，並經由輸送帶將使用過的濾材排出，左側為混合空氣與粉塵灰粒的待測氣體入口，此處的設計為一擴張段(diffuser)，可降低模擬廢氣或燃氣通過濾材時的速度，且均勻分散至自由流動濾材端面進行過濾。右側為氣體通過過濾床後的漸縮段(contraction)出氣口，經由軟管連接至模擬煙道之壓克力硬管，並在此測量過濾效率。

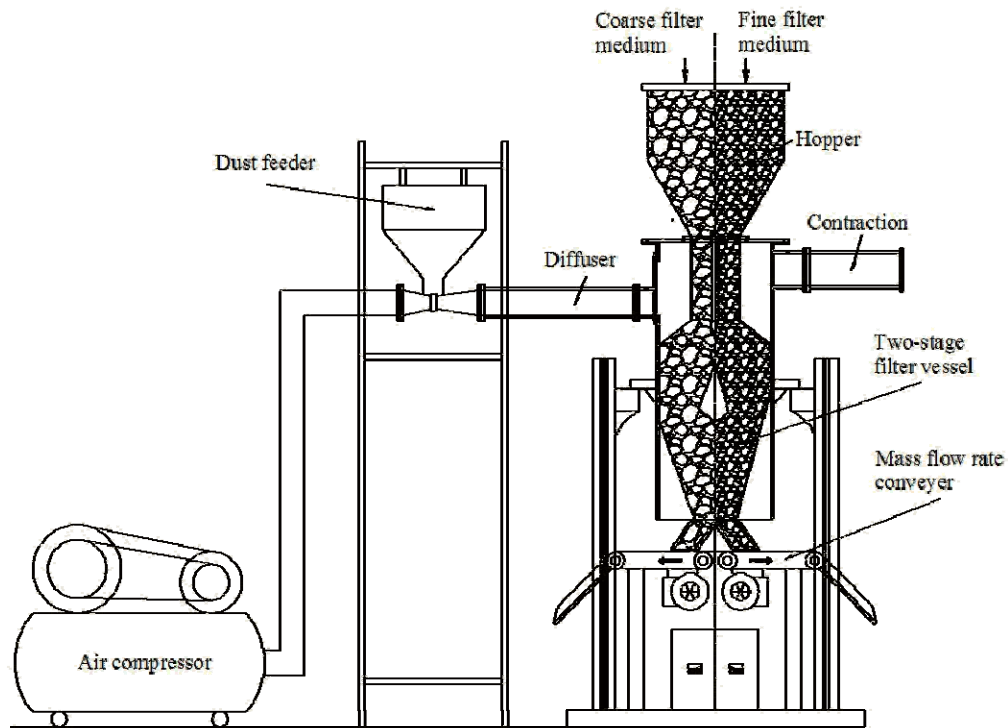


圖 4 三維流場實驗模型配置

冷模設備之氣體供應裝置、粉塵灰粒供應裝置、濾材輸送裝置分別說明如下：

#### 1. 氣體供應裝置

如圖 5 所示，包含以下各部件：

- A. 空壓機及高壓氣瓶：所使用空壓機型號為復盛 TA-120/15HP 單段氣冷往復式空壓機，使用壓力介於 0~7 kg/cm<sup>2</sup>G，活塞變位量 2171 L/min，並附帶一  $\phi$  550 mm  $\times$  1604 mm 之高壓氣瓶，儲存容量為 360 升。
- B. 微油過濾器：型號為 T15P，使用壓力為 10 kg/cm<sup>2</sup>G 以下，可處理風量達 1.7 m<sup>3</sup>/min，目的為過濾含有微油之

供應氣源，以達到提供無油氣源的目的。

C.流量控制球閥：可控制流量用，搭配流量計使用。

D.壓力調節/顯示暨流量顯示器：為壓力調節器搭配一孔口板式流量計。

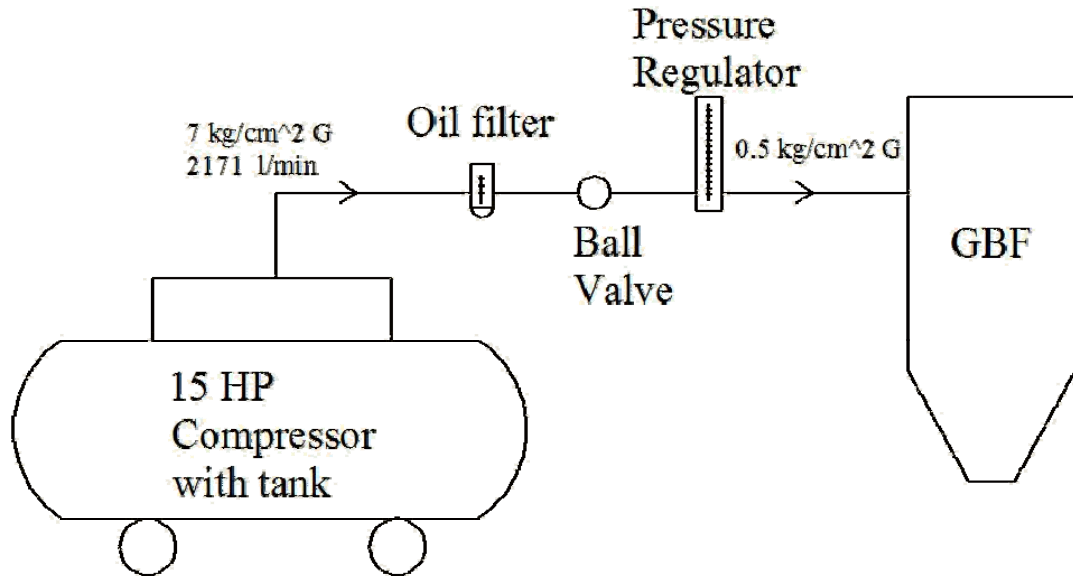


圖 5 氣體供應裝置示意圖

## 2.粉塵灰粒供應裝置

此裝置的功用在控制混合粉塵灰粒的進料量，藉由變頻器控制馬達轉速以控制螺旋閥的轉速，達到所需要的粉塵灰粒的進料量，如圖 6。文式管其前後流量應相等，故在單位時間內前端截面積大，氣體流速慢且壓力大，後端則因截面積小，氣體流速快且壓力小，故當粉塵灰粒進入下方文式管後，可利用此原理協助將粉塵送進過濾器內。螺旋閥的上方架設一漏斗形儲槽存放粉塵灰粒，為了防止粉塵灰粒在儲槽

內結塊與架橋的現象發生，在儲槽邊壁上架設一攪拌器，利用不停的攪拌動作破壞粉塵灰粒在儲槽內的架橋現象。

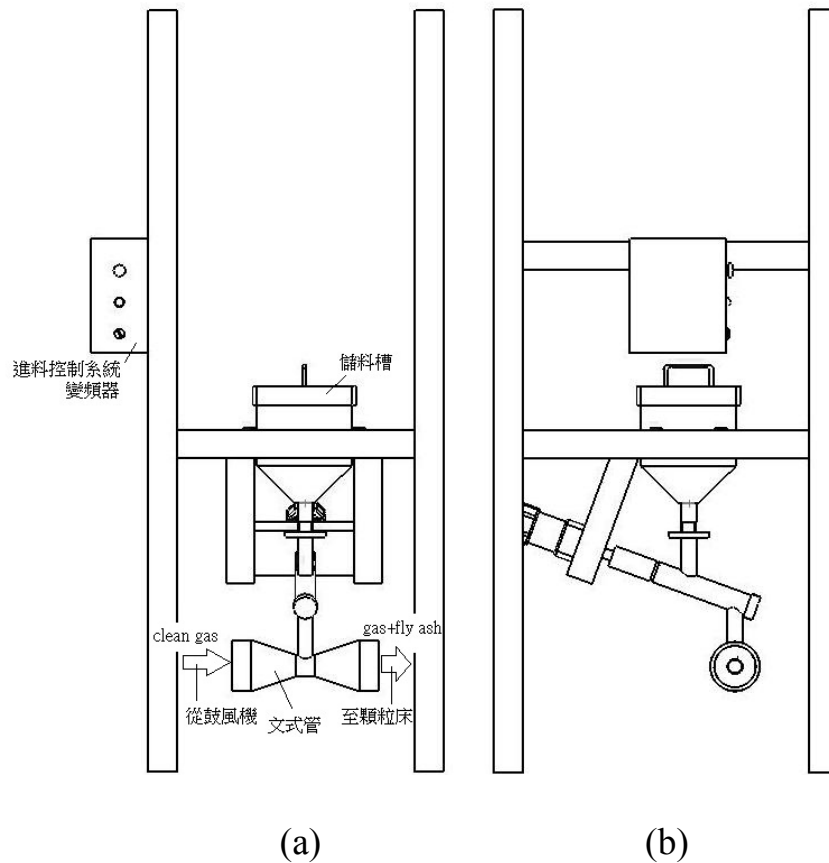


圖 6 粉塵供應器(a)前視圖(b)側視圖

### 3. 濾材輸送裝置

如圖 7 所示，此裝置為控制濾材質量流率用，藉由兩組變頻器控制馬達轉速，以調整所需要的濾材質量流率。若質量流率調整適當，則能使過濾器的過濾效率達到高點，若質量流率太快，因為濾材間快速的重力衝擊作用則會有產生大量的濾材破碎，且濾材間孔隙過大會使得過濾器的過濾性能

下降；反之，質量流率太慢，雖然濾材間重力衝擊作用減少使得濾材破碎量下降，但是會使濾材攔阻粉塵而超出飽和，使得過濾效率降低。

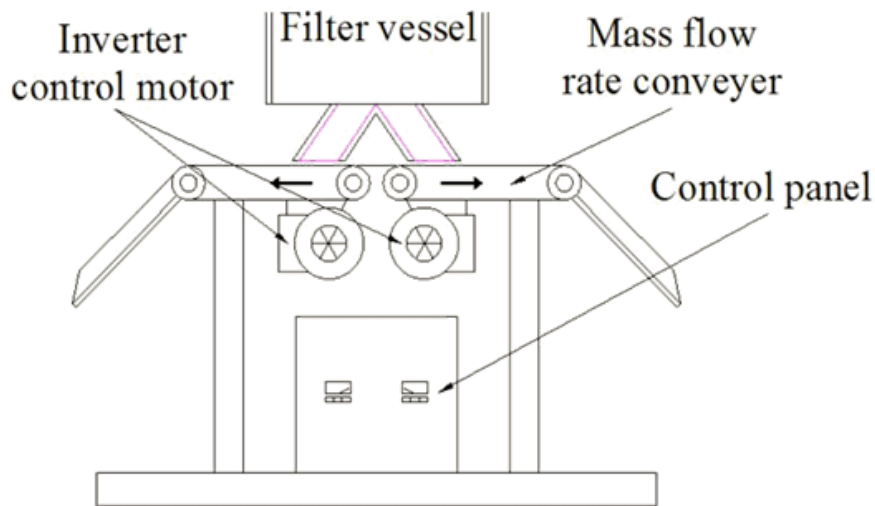


圖 7 濾材輸送裝置

## (二)量測與觀測設備

### 1. 電子磅秤

使用在量測濾材的循環流率測量，精度 0.1 g，最大荷重能力 30kg。

### 2. 數位影像擷取系統(digital image processing system)

包括高階彩色數位攝影機(SONY DCR-TRV900 NTSC)、數位照相機(NIKON COOLPIX 5700)、數位影像擷取卡(UPMOST UPG 502A)及個人電腦(Pentium III 1800 MHz)。

### 3. 皮托管及斜臂式壓力計

使用在量測進口空氣流速及壓力，並採用符合規定之皮托

管(日本品川 NG-4)及傾斜式壓力計(日本品川 NG-5)，一台用於量測過濾器之壓降，另一台用於量測出口端的壓差。如圖 8 所示，在斜臂式壓力計所用之水管與水槽液面面積比值，一定要超過 100 倍以上。

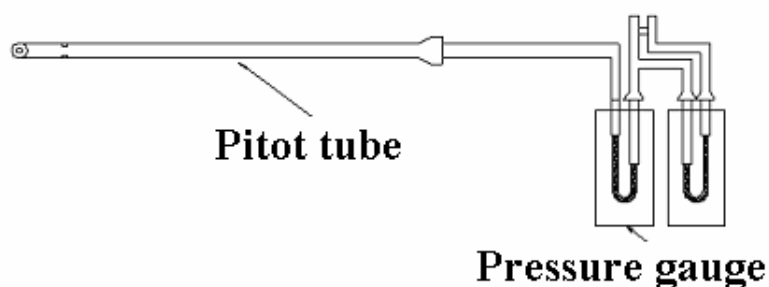


圖 8 皮托管與壓力計裝置圖

#### 4.粒狀物採樣裝置

採樣時在測定點先測其排氣速度，求得等速吸引流量之後，接著可同時進行排氣吸引及粒狀物試樣過濾補集工作，可分為兩部份：粒狀物補集部及吸引流量測定部，簡單說明如下：

##### (1)粒狀物捕集部：

粒狀物補集部之組成如下：由吸引嘴(常規為 4、6、8、10 mm)、濾紙、濾紙固定器(日本品川)、連結管等所構成。本實驗使用之吸引嘴為 8 mm 之錐形玻璃製品，用來導引已過濾之出口合成氣流進到圓筒濾紙，而且必須滿足以下條件：

- A. 為避免吸氣嘴內外之氣體產生亂流，吸引嘴之內徑須大於 4 mm 以上。
- B. 吸氣嘴之前端，須加工成  $30^\circ$  以下之銳角或成平滑之半球狀。
- C. 吸氣嘴之內外面皆須平滑。
- D. 吸氣嘴至粒狀物補集部之採樣管，內面需平滑，其截面不可急遽變化或彎曲。
- E. 吸氣嘴之材料需用：硬質玻璃、石英玻璃、不銹鋼或具相同等級性能者。

此部份除吸引嘴外，尚由濾紙及濾紙固定器所組成，濾紙捕集到之飛灰烘乾後即可用來計算過濾效率，其形狀有圓形濾紙和圓筒濾紙，依不同形狀使用不同的濾紙固定器。但是圓形濾紙使用應在有效直徑 30 mm 以上者。所使用之過濾材料，應為採集捕集率為 99 % 以上者，為避免濾紙發生破損情形，濾紙背面之金屬網須要使用固定器支持。裝濾紙處不能有漏氣的現象，宜採用依濾紙形狀並容易裝卸濾紙之固定器，且濾紙固定器須由耐腐蝕性材料所製作而成。在固定器及連結管的選擇上，如下：

- A. 固定器：用於支撐穩定粒狀物補集器，故宜用不銹鋼或其他同等性能材料所製。

B.連結管：從粒狀物補集部到吸引用橡皮管(真空管)之連接部分。

(2)吸引流量測定部：

吸引流量測定部部分包括除塵裝置(日本品川)、真空吸引幫浦(美國 GAST)、濕度計、流量計所構成，如圖 9 所示即為採樣裝置。

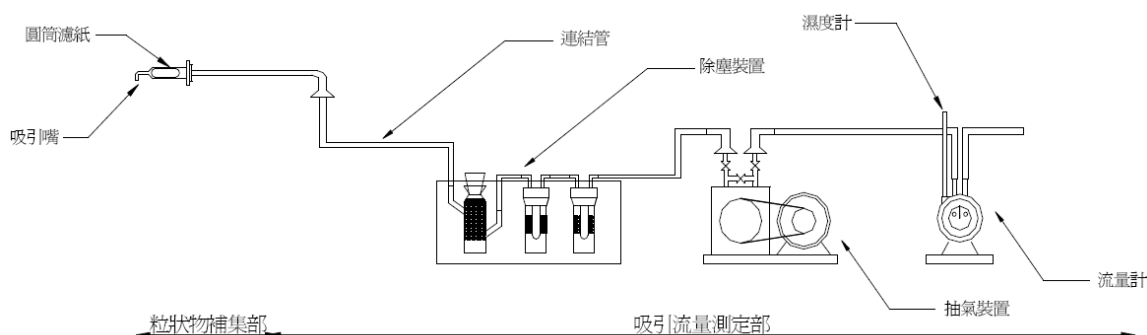


圖 9 採樣裝置

經連結管之保護裝置可用來除濕、除塵、除酸，其用意為保護下游之抽氣裝置、溼度計及流量計，不至於因空氣中雜質及溼度而影響過濾效率測定之準度。真空吸引幫浦設有一真空壓力調節旋鈕，可調整幫浦內真空程度以達到調節空氣流量，並使粒狀物捕集器入口端與過濾器出口端達到等速吸引之目的。吸引流量測定裝置則是由體積流量計及依體積流量計校正後之面積流量計或瞬間流量計等所組成。體積流量計用於吸引氣體總量之測定，而瞬間流量計則是用於吸引流量的確認。



A.體積流量計:可採用濕式或乾式之氣體流量計，但若是使用乾式氣體流量計時，通過之氣體須先經過乾燥處理。

B.面積流量計或瞬間流量計:依規定方法先予以校正及操作，僅作含水量測定時，可不用裝設瞬間流量計。在吸引流量測定部的設備上，目前是採用體積流量計來做為吸引氣體體積的量測設備。

此部之作用乃是利用捕集成氣流經過濾器出口端的飛灰粒徑後，與入口飛灰濃度相比經計算而得，便可知曉本過濾系統的過濾效率。

#### 5.乾燥容器及乾燥劑

乾燥劑將置於乾燥容器中，而乾燥容器將使用在濾紙做烘乾處理後，放置保存及冷卻。乾燥容器採用直徑 30 cm、高 15 cm 的圓筒型容器及顆粒狀的乾燥劑。

#### 6.微量天平

微量天平用在量測濾紙重量，精度可達 0.001 g。

#### 7.測試濾紙及濾紙稱量瓶

以圓筒形的濾紙為測試濾紙(美國 WHA-TMAN88RH )，而濾紙稱量瓶則採用長形的玻璃圓筒。

#### 8.烘烤箱

型號為 RHD 902 加一 PID 控制器，可控制內部溫度及設

定溫度使用，左側及上方均有一進一出之氣孔，作為調節空氣之用。本烘烤箱使用在濾紙的烘乾用途上，最大加熱溫度為 600 °C。

### 三、冷性能過濾效率實驗方法與步驟

#### (一)粉塵灰粒樣品採集方法

本實驗中所測試的顆粒床過濾器，主要是要過濾經過氣化或燃燒後夾雜著粉塵灰粒的氣體，在這裡將採用煙道採集懸浮微粒的方法是依據環檢所之「排放管道中粒狀污染物採樣及其濃度之測定方法」規定[14]來做採樣。以下將就選擇測定位置、選擇測定點、過濾器進口端的煤灰堆積與粒狀物的採集及保存等部分加以敘述說明：

##### 1.選擇測定位置

在選擇測定位置時，應避免選在煙道彎曲部分或截面形狀急遽變化的部分，盡量選在排氣氣流經整流後較為一致的地方，且應選在測定作業安全又易測定的場所。所以正常測定的位置應選在離彎曲、收縮或放大管道口之管道直徑下游 8 倍以上且在其上游 2 倍以上之處；若是無法在上述條件設置適當測定孔時，則至少應該選在離彎曲處、收縮或放大煙道口之管道直徑下游 1.5 倍至 8 倍且上游 0.5 至 2 倍之處來做測量。

##### 2.選擇測定點

應視煙道截面之形狀和大小來做選擇，依下列方法將煙道截面分成數個小等分面積，然後在每一小等分面積設測定點。測定點的週邊如果有粒狀物堆積的情形發生時，必須扣除該部分之測定截面。若為圓形截面，則是依圓形截面之測定點方法。如煙道直徑超過 4.5 m 時，測定點需要為 20 點。在本實驗設備中的燃氣排氣孔直徑小於 54 cm，在這樣的標準之下，圓形截面的測定點為一點。

### 3. 過濾器進口端的濾餅堆積

由於要利用表面過濾機制的運作來增加顆粒床過濾器的過濾效果，因此需要在過濾濾材的表面堆積一層濾餅。首先必須關閉顆粒體輸送裝置，接著通入粉塵灰粒混合氣體，並在煤灰粉塵在進口端堆積形成濾餅時，利用壓力計觀察進口與出口端的壓力變化，直到壓力降呈現穩定狀態後，啟動輸送帶並使濾材開始流動。

### 4. 採樣濾紙之保存

(1) 補集粒狀物前，濾紙需要先置於溫度 110 °C 的烘烤箱中 2 小時，進行充分的烘烤乾燥。

(2) 接著將烘烤過的採樣濾紙放置於乾燥容器中，冷卻至室溫，用微量天秤量測。在秤量的時候，最好是在相對濕度 50 % 左右的環境下進行。

(3)要秤量之濾紙，在使用前應該要妥善的保存在防塵容器中，不能沾染到粒狀物。

## 5.粒狀物之補集

### (1)補集前處理

首先，在粒狀物採集之前，使用皮托管及壓力計來測量每個測定點的風速，測定方法如下：

#### A.排氣動壓之測定方法

測量排氣之動壓時，使用已知皮托管係數之皮托管及傾斜式壓差計。將皮托管之全壓孔正對於測定點之排氣流向，用壓力計測定其動壓，而動壓原則上需採用可讀到 0.1 mm 值者。在該測定點皮托管與排氣流向的角度偏差不可超過 10°。

#### B.排氣靜壓之測定方法

在各測定點使用壓力計量測皮托管的靜壓孔的壓力。

#### C.排氣流速和排氣流量的計算

將所量測到的動壓及靜壓值，代入方程式計算可得到排氣流速和排氣量，詳述如下：

##### (A)排氣流速的計算

各測定點的排氣流速，可使用下列方程式求出：

$$V_{air} = C \times (2gh/r)^{1/2}$$

$V_{air}$  : 空氣流速(m/sec)

$C$  : 皮托管係數，在此採用 0.85

$h$  : 皮托管之動壓測定值 (kgf/m<sup>2</sup> 或 mmH<sub>2</sub>O)

$r$  : 管道內溼排氣單位體積之質量，在此採用 1.2 (kgf/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度(9.81 m/s<sup>2</sup>)

(B)排氣流量之計算

$$qm = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times V_{air} \times \left(1 - \frac{X_W}{100}\right) \times \frac{273 + \theta_m}{273 + \theta_s} \times \frac{P_a + P_s}{P_a + P_m} \times 60 \times 10^{-3}$$

$qm$  : 氣體流量計之等速吸引流量 (L/min)

$d$  : 吸氣嘴之內徑 (mm)

$V_{air}$  : 排氣之流速 (m/s)

$X_W$  : 濕排氣中水蒸氣體積百分率 (%), 在此採用 25°C 的飽和水蒸汽壓為 0.78

$\theta_m$  : 氣體流量計所吸引氣體之溫度(°C)

$\theta_s$  : 排氣之溫度 (°C)

$P_a$  : 大氣壓力 (mmHg)

$P_s$  : 測定點之靜壓力 (mmHg),  $P_s = (P_t - c^2h) / 13.6$

$P_t$  : 測定點之全壓力 (mmHg)

$P_m$ ：氣體流量計所吸引氣體之錶壓力 (mmHg)

(2)粒狀物的補集步驟之注意事項

A.將採樣濾紙放置於粒狀物補集器中，然後將粒狀物補集器裝在固定器上，最後必須要確保全部裝置的氣密性。

B.將吸氣孔保持與氣流流向相同方向送至測定點，直到吸氣開始的同時，才將吸氣孔轉向，使其正向排氣氣流，並依等速吸引方式吸引氣體，其容許範圍依下列規定：

(A)在測定點，排氣流動方向與吸氣孔方向的角度偏差，不可超過  $10^\circ$ 。

(B)由吸氣孔至吸引氣體之流速，對在測定點排氣流速之相對誤差，應在  $-5\sim+10\%$  的範圍內。

(C)氣體通過濾紙之表面流速(Superficial Velocity)，原則上為  $0.5\text{ m/s}$  以下。

(D)當總補集量達到  $5\text{ mg}$  以上或是採樣氣體體積達到  $2000\text{ L}$  時，即完成採樣，而本實驗將以  $4000\text{ L}$  的採樣氣體體積為補集量。

(E)當完成吸引排氣後，立即停止吸引，並且迅速將吸氣孔背向吸氣方向。

(F)補集粒狀物後之濾紙，應妥善保存在防塵容器中，不能使其沾有其它的粒狀物。

### (3)補集後處理

A.補集粒狀物前濾紙先置於溫度 105 °C 的烘烤箱中 2 小時，進行充分的乾燥。

B.烘烤過的採樣濾紙置於乾燥器中，冷卻至室溫後，用微量天秤量之。在進行秤量時，最好將環境控制在濕度 50 % 左右來進行。

C.秤量後之濾紙，經由與補集前的重量做比較，將出口端所得到的補集重量值代入下列公式中做計算：

$$C_{out} = [(m_{di} - m_{do}) / m_{air}] \times 10^6$$

其中：

$C_{out}$ ：排氣中粒狀物濃度(ppmw)

$m_{di}$ ：過濾前捕集之粒狀物質量(g)

$m_{do}$ ：過濾後捕集之粒狀物質量(g)

$m_{air}$ ：採樣時間內所抽取的空氣總重(g)

即可得到出口端的濃度。

D.最後將出口端的濃度代入下式中，即可計算出過濾效率：

$$E = \left[ 1 - \frac{C_{out}}{C_{in}} \right] \times 100\%$$

其中：

$C_{in}$ ：進氣中粒狀物濃度(ppmw)

$C_{out}$ ：排氣中粒狀物濃度(ppmw)

$E$ ：過濾效率(%)

## (二)冷性能過濾效率實驗步驟

### 1.控制濾材質量流率

將濾材填充至上儲槽內，啟動輸送裝置，先將濾材流動約一小時，待測試段內之濾材流動達到穩態之後，量取某時間間隔內流出之濾材質量，反覆修正輸送裝置速度控制開關之讀數，直至達到實驗所要求之質量流率為止，但是實驗到此先關閉質量流率控制器，只需先調整好所需之讀數即可，待堆積濾餅步驟完成方可開啟。

### 2.控制並開啟粉塵灰粒體的進口濃度

先開啟輸送粉塵灰粒體的螺旋供應器約 5 分鐘，待供應量呈現穩定狀態之後，利用量杯及微量天平將粉塵灰粒體的供應量調整至單位時間內所需的大小，本實驗將濃度調整至 7500 ppmw。

### 3.控制並開啟進口風速

開啟鼓風機，調整控制器頻率，待風速穩定之後選擇適當刻度的斜臂式壓力計，然後將連接於斜臂式壓力計之皮托管放置於燃氣進口的管路中，經由壓力計的刻度顯示，再將壓力差代入白努力定理，即可換算得到進口風速值。

### 4.開始堆積濾餅階段



由於此時質量流率控制器尚未啟動，顆粒床過濾器是屬於固定床階段，通入之燃氣粉塵會在自由面上堆積形成濾餅，從此階段開始每隔 30 分鐘觀察並記錄過濾器壓降變化情形，藉由壓降變化來判定濾餅是否堆積完成。

#### 5.開始移動床實驗

待壓降穩定後，啟動濾材質量流率控制器的開關，此時顆粒床過濾器由固定床轉變為移動床，此時為濾材的流動開始。

#### 6.粉塵過濾效率採樣

將粒狀物補集器及吸氣嘴由測定孔插入排氣管管道內部，以等速吸引法來做捕集動作，再將粒狀物補集器所補得之粒狀物質量及流量吸引裝置所吸得之氣體量 2000 公升，求出過濾效率。

### 四、冷性能過濾效率實驗參數

#### (一)氣體路徑對過濾效率影響之分析

氣體路徑之長短主要由中擋板長度所決定。從儲槽底端有兩負責導引粗細濾材至過濾器內部的輸送管道，中間有一壓克力平板再延伸而形成的就是中擋板，當中間擋板越長，合成廢氣經過過濾器內部的所需路徑也越長。當合成廢氣行經過濾器內部路徑越長，流動濾材將有更多機會攔阻合成廢氣中的粉塵粒子，所以上述兩種參數設計都是為了增加氣體路徑而使濾材

攔阻粉塵粒子的效率提昇，進而分析比較此參數對系統過濾效率的影響。因此本計畫測試中將設計中間擋板長度為 40 mm、80 mm、120 mm 三種等參數來觀察對過濾效率之影響，如圖 10、圖 11 所示。

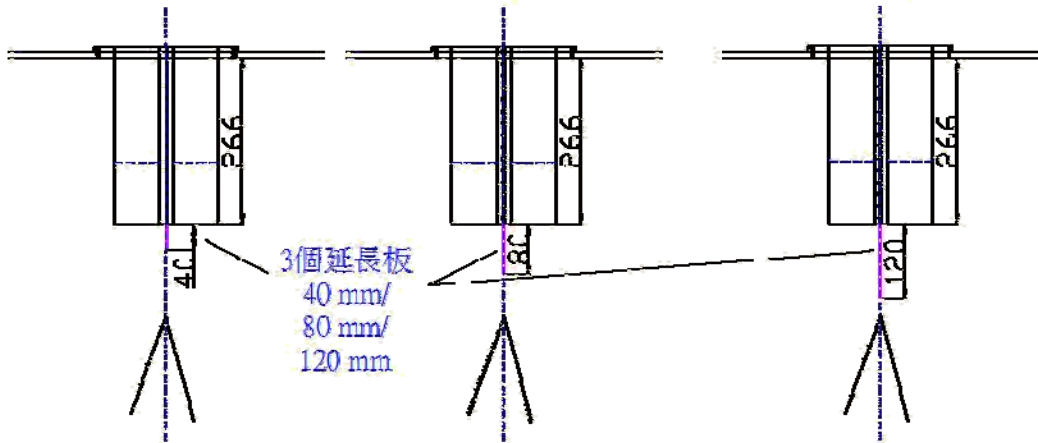


圖 10 三種中擋板參數設置-前視圖

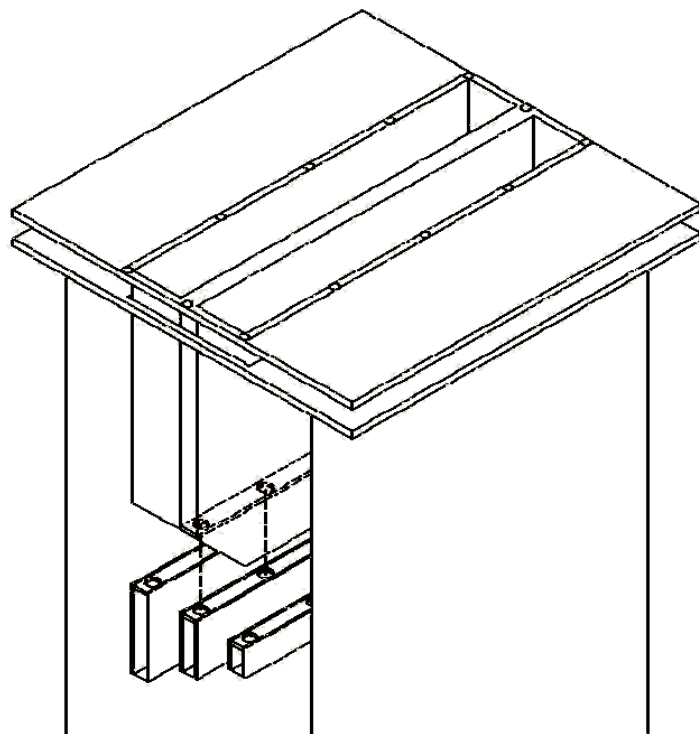


圖 11 過濾器內部中擋板設置示意圖

## (二)建立不同進口自由面風速下之過濾效率資料庫

進口氣源由空壓機所供應，當自由面風速越大時，所能承載的粉塵量相對也較多。但對過濾器而言，當自由面風速過大時，將會導致過濾器還來不及將粉塵燃氣攔阻就已排出，造成過濾效率降低；反之，自由面風速過小時，則粉塵會堆積於進風口處，導致系統快速堵塞。因此自由面風速若調整至適當值時，才能使得過濾器發揮最大作用，卻又不失經濟價值。在本計畫測試中，將使用自由面進口風速 7.4 cm/s、12.3 cm/s、17.2 cm/s 來進行一系列的實驗。

## (三)建立不同濾材質量流率下之過濾效率資料庫

濾材質量流率由顆粒體輸送裝置所控制，本計畫將使用三種濾材質量流率 110 g/min、330 g/min、660 g/min 來進行測試。測試中若質量流率調整適當，則能使過濾器的過濾效率達到高點，若質量流率太快，因為濾材間快速的重力衝擊作用則會有產生大量的濾材破碎，且濾材間孔隙過大會使得過濾器的過濾性能下降；反之，質量流率太慢，雖然濾材間重力衝擊作用減少使得濾材破碎量下降，但是會使濾材攔阻粉塵而超出飽和，使得過濾效率降低。

## 參、結果與討論

本計畫研究成果將探討三維冷性能兩階段過濾器內不同參數下對過濾效率的影響以及壓降行為，探討項目可分為下列幾項：一、過濾器內部氣密對壓降行為與過濾效率之影響、二、中擋板長度對壓降行為與過濾效率之影響、三、自由面風速對壓降行為與過濾效率之影響、四、質量流率對壓降行為與過濾效率之影響、五、粉塵粒徑分析。

### 一、過濾器內部氣密對壓降行為與過濾效率之影響

如圖 12 所示為過濾器內部不同氣密程度之壓降行為，表 1 為各組實驗參數一覽及過濾效率，三組實驗參數皆為中擋板 120 mm、自由面風速 17.2 cm/s、質量流率 330 g/min。實驗主要為在正式開始進行一連串冷性能過濾效率實驗前的前期實驗測試，因過濾器內部部份壓克力板與壓克力板之間有些微間距，此次實驗目的為測試過濾器內部氣密程度對過濾效率及壓降影響之差距。氣密改善方式為在壓克力板之間貼上膠條，以防止氣體從此處通過；另在各壓克力部件的連接處附近，也纏上絕緣膠帶以避免氣體從旁溢出。三組實驗結果的壓降行為均顯示，壓降會從初始開始緩緩爬升直到達到一最高點之後便會急遽地下降，降至低點之後又會開始緩慢爬升一段後漸趨平緩，此行為乃是由於操作過濾器從固定床(fixed bed)模式轉換到移動床(moving bed)模式的緣故

所導致。過濾器在固定床模式時藉由堆積濾餅來利用其表面過濾機制以得到更好之過濾效果，等濾餅堆積到一定程度便會開始飽和，此時壓降上升幅度漸趨平緩；當過濾器床體轉換為移動床時，先前堆積的濾餅厚度因自由面上持續被新進的濾材所覆蓋而逐漸破壞，致使壓降行為呈現快速下降的結果，當後續移動床模式下濾材與進口氣體達到一定的混合及動態平衡，壓降才會漸漸走向平緩的態勢。第一組(test no.1)實驗中結果顯示，在過濾器內部中尚未作任何氣密處理時，初始壓降在固定床濾餅堆積時上升幅度並不是非常穩定，且於 300 分鐘左右即達到最高壓降約 33 mmH<sub>2</sub>O 左右，移動床階段時壓降也並不是很和緩，最後過濾效率為 97.64%，所以無論是壓降行為的展現或是最後過濾效率的結果都尚未達到理想的地步。在第二組(test no.2)實驗中做更進一步的過濾器內部氣密程度處理，其結果顯示達壓降最高點 37 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 320 分鐘時，而且在固定床時壓降上升也比較穩定，此結果表示內部氣密改善之後，進口氣體行進方向大多數均流通於濾材之間，因此固定床堆積濾餅時壓降穩定持續上升，又因濾餅堆積較為完整之故，最高壓降會比第一組實驗的壓降高，其 98.22% 的過濾效率也比第一組實驗過濾效率較佳。第三組(test no.3)實驗再改善過濾器壓克力間的氣密程度，壓降趨勢大抵與第二組實驗接近，唯一不同的是最高壓降於 330 分鐘左右可達到 38 mmH<sub>2</sub>O，

過濾效率 98.53% 比之第二組實驗也有些微改善。此三組實驗證明改善過濾器內部部份壓克力板與壓克力板之間的空隙，可將實驗設備中的儀器誤差降至最低，以求更準確地獲得實驗結果，另外也證明過濾器內部的氣密程度也確實影響內部整體壓降及整體過濾效率，往後實驗中也將採此同標準的設置來進行一連串的實驗。

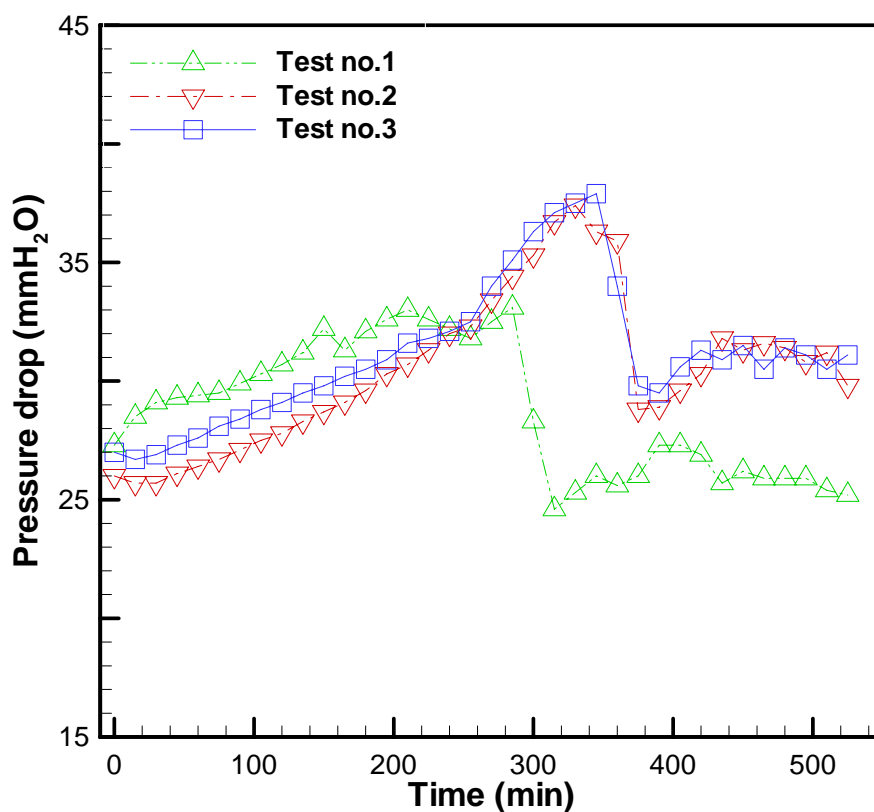


圖 12 過濾器內部不同氣密程度之壓降

表 1 過濾器內部不同氣密程度實驗之參數及過濾效率

Test no.	Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
1	120	17.2	330	97.64
2	120	17.2	330	98.22
3	120	17.2	330	98.53

## 二、中擋板長度對壓降行為與過濾效率之影響

本節研究主要探討設置不同中擋板長度(Central Plate Length, CPL)時對壓降行為及過濾效率有何影響。實驗參數為在各種中擋板長度(CPL 40 mm、CPL 80 mm、CPL 120 mm)時固定在單一實驗操作參數，如：進口自由面風速、濾材質量流率下的壓降行為及過濾效率變化，計有(一)設置中擋板對過濾效率之影響、(二)中擋板長度對不同自由面風速下之過濾效率、(三)中擋板長度對不同質量流率下之過濾效率等小節，茲將討論分述如下：

### (一)設置中擋板對過濾效率之影響

此四組實驗為四組中擋板配置 CPL 0 mm、CPL 40 mm、CPL 80 mm、CPL 120 mm 對壓降行為與過濾效率之影響，如圖 13 壓降行為圖及表 2 過濾效率所示。CPL 0 mm 這一組因無中擋板設置，所以進口氣體流經過濾器床體時所受到阻力較小，亦即

氣體行經路線比較短故整體壓降偏低，實驗結果顯示在固定床堆積濾餅階段時於 120 分鐘前後即達到最高壓降 31.5 mmH<sub>2</sub>O，而後在移動床時壓力持續降到 25 mmH<sub>2</sub>O 左右保持穩定。裝設 CPL 40/80 mm 中擋板後其整體壓降行為已有明顯變化，其中 CPL 80 mm 的實驗最高壓降已達到 37 mmH<sub>2</sub>O 上下，因中擋板延長至 80 mm 的緣故，床體壓力於堆積濾餅時整體壓力顯著提高，故要達到濾餅堆積飽和的時間也往後延長，至 310 分鐘壓力上升斜率才明顯緩和，切換移動床操作及隨後的穩定持續壓力也維持著比 CPL 0 mm 實驗的壓降還高的狀態；在過濾效率的提昇方面，因氣體路徑隨之延長之故，挾帶粉塵的合成進口氣體勢必得通過更多濾材才能到達出口，所以濾材有更多機會捕集粉塵，致使過濾效率跟著提高至 98.34%，比起沒有中擋板時的實驗提高了 3.59%過濾效率。至於 CPL 120 mm 的實驗對於整體壓力的改變更為明顯，在 350 分鐘時最高壓降達到 38.5 mmH<sub>2</sub>O 上下，切換移動床的時間點也往後延長了 20 分鐘，而過濾效率上升幅度雖沒有來的前兩組實驗的比較那樣提昇顯著，但仍然提高 0.19%而達到 98.53%。



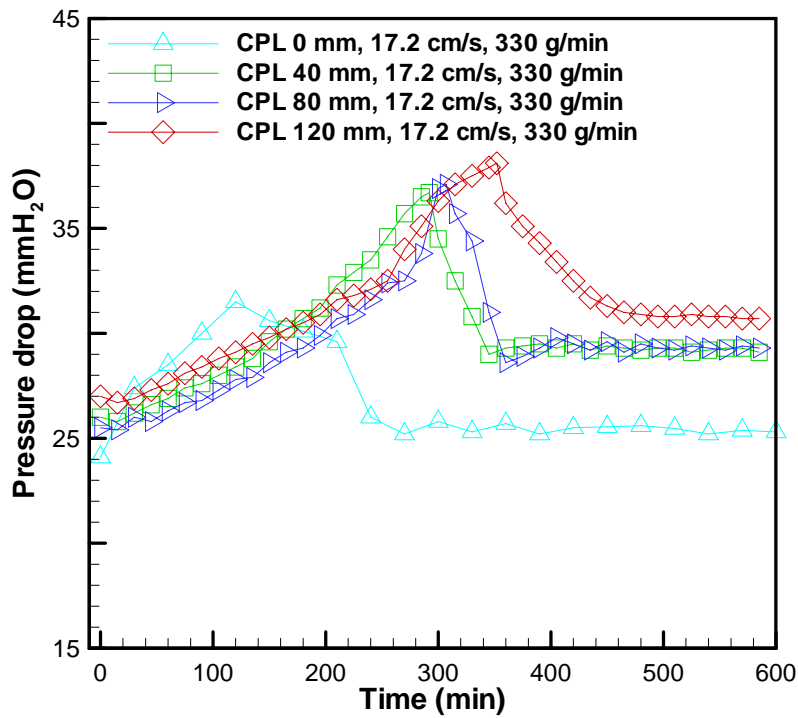


圖 13 過濾器內部不同中擋板長度之壓降

表 2 過濾器內部不同中擋板長度實驗之參數及過濾效率

Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
0	17.2	330	94.75
40	17.2	330	98.19
80	17.2	330	98.34
120	17.2	330	98.53

綜觀四組實驗比較的實驗結果來說，可發現延長中擋板長度確實對過濾器床體的整體壓降及進出口間的過濾效率有所影響，這也是由於中擋板長度的增減直接影響了挾帶粉塵的合成

進口氣體經過床體行徑長短所致，故其整體壓降及過濾效率會隨著中擋板長度的延長而提高。

## (二)中擋板長度對不同自由面風速下之過濾效率

此節研究為不同中擋板配置 CPL 40 mm、CPL 80 mm、CPL 120 mm 分別固定在 7.4 cm/s(圖 14、表 3)、12.3 cm/s(圖 15、表 4)、17.2 cm/s(圖 16、表 5)下對壓降行為與過濾效率的探討。

如圖 14 所示為固定進口自由面風速 7.4 cm/s 下的床體壓降變化。其中中擋板長度 40 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 27.2 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 360 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；中擋板長度 80 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 27.7 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.3 mmH<sub>2</sub>O 上下；而中擋板長度 120 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 28.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.3 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 15 所示為固定進口自由面風速 12.3 cm/s 下的床體壓降變化。其中中擋板長度 40 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 31.1 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 330 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 26.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；中擋板長度 80 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 31.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 360 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 27.0 mmH<sub>2</sub>O 上下；而中擋板長度

120 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 32.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.1 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 16 所示為固定進口自由面風速 17.2 cm/s 下的床體壓降變化。其中中擋板長度 40 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 36.4 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.3 mmH<sub>2</sub>O 上下；中擋板長度 80 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 37.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 315 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；而中擋板長度 120 mm、質量流率 110 g/min 可達最高壓降 37.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 31.2 mmH<sub>2</sub>O 上下。

從以上實驗數據比較可以發現，中擋板長度 40 mm 達最高壓降的時間比較短，由於中擋板長度短故通過合成氣體量大，同時粉塵挾帶量也較多，因此在固定床階段時濾餅堆積的情況相形之下也較中擋板長度 120 mm 時容易達到飽和，另從圖 14、圖 15、圖 16 整體壓降行為觀察，實驗操作於固定床階段時同一自由面風速下其上升趨勢均呈現一致的情況，當實驗於移動床階段時的穩定壓降，則普遍以中擋板長度 120 mm 時的壓降為略高於其它中擋板長度。從表 3、表 4、表 5 呈現的過濾效率一覽表發現，在中擋板長度較長時過濾效率的表現均比較良好，這

是因為當中擋板長度較長時其於固定床階段所堆積的濾餅形成計較為緊密，所造成淺層過濾的效果比中擋板長度較短時更為明顯，進而能夠捕集更多進口氣體中的粉塵粒子，因此過濾效率會隨著中擋板長度的增加而提昇。

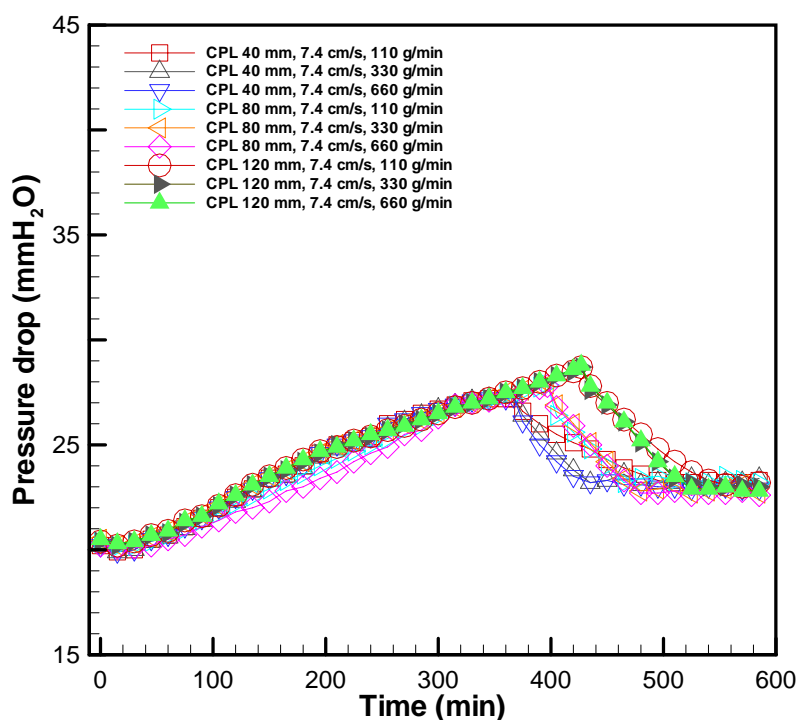


圖 14 不同中擋板長度在自由面風速 7.4 cm/s 下之壓降行為

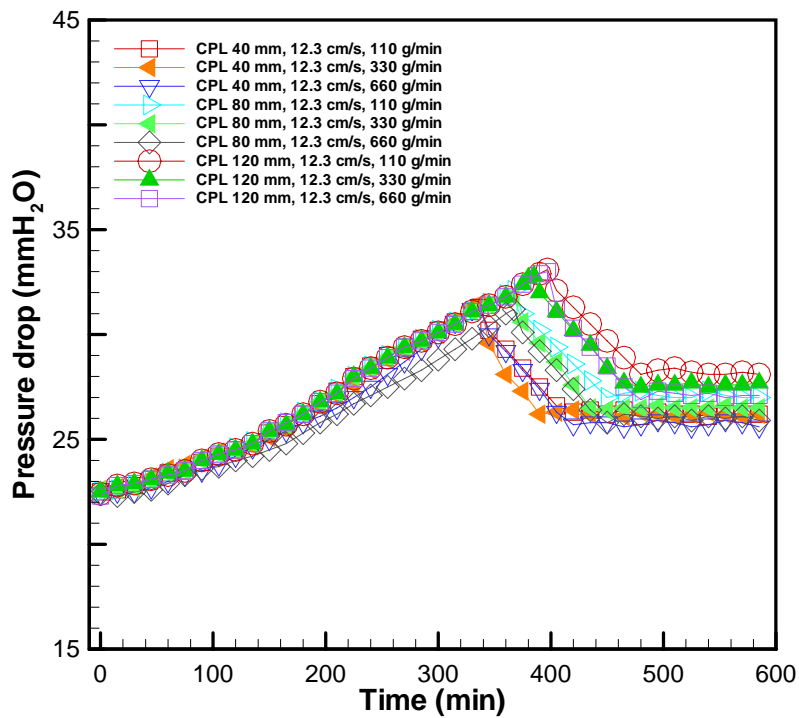


圖 15 不同中擋板長度在自由面風速 12.3 cm/s 下之壓降行為

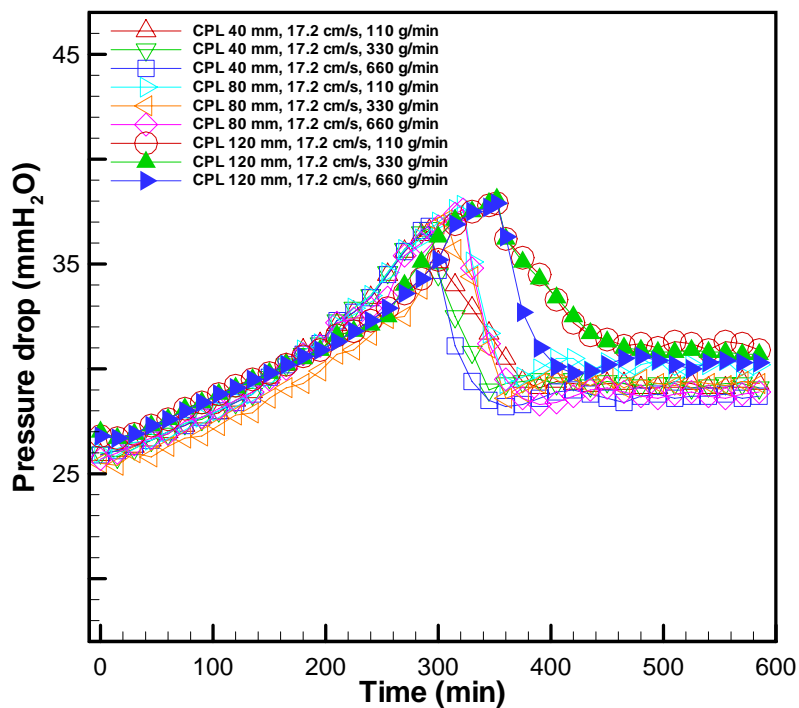


圖 16 不同中擋板長度在自由面風速 17.2 cm/s 下之壓降行為

表 3 不同中擋板長度在自由面風速 7.4 cm/s 下之過濾效率

Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
40	7.4	110	98.85
		330	99.21
		660	99.02
80		110	99.09
		330	99.34
		660	99.18
120		110	99.28
		330	99.56
		660	99.39

表 4 不同中擋板長度在自由面風速 12.3 cm/s 下之過濾效率

Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
40	12.3	110	98.41
		330	98.73
		660	98.49
80		110	98.47
		330	98.89
		660	98.57
120		110	98.61
		330	98.95
		660	98.88

表 5 不同中擋板長度在自由面風速 17.2 cm/s 下之過濾效率

Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
40	17.2	110	97.90
		330	98.19
		660	98.01
80		110	98.07
		330	98.34
		660	98.26
120		110	98.28
		330	98.53
		660	98.31

### (三)中擋板長度對不同質量流率下之過濾效率

此節研究為不同中擋板配置 CPL 40 mm、CPL 80 mm、CPL 120 mm 分別固定在不同質量流率 110 g/min(圖 17、表 6)、330 g/min(圖 18、表 7)、660 g/min(圖 19、表 8)下對壓降行為與過濾效率的探討。

如圖 17 所示為固定濾材質量流率 110 g/min 下的床體壓降變化。其中中擋板長度 40 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 36.4 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.3 mmH<sub>2</sub>O 上下；中擋板長度 80 mm、自由面

風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 37.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 315 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；而中擋板長度 120 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 37.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 31.2 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 18 所示為固定濾材質量流率 330 g/min 下的床體壓降變化。其中中擋板長度 40 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達最高壓降 36.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.1 mmH<sub>2</sub>O 上下；中擋板長度 80 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達最高壓降 36.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 300 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.3 mmH<sub>2</sub>O 上下；而中擋板長度 120 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達最高壓降 37.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.7 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 19 所示為固定濾材質量流率 660 g/min 下的床體壓降變化。其中中擋板長度 40 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達最高壓降 36.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.7 mmH<sub>2</sub>O 上下；中擋板長度 80 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達最高壓降 37.4 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 315 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.9 mmH<sub>2</sub>O 上下；而中擋板長度 120 mm、自由面風速 17.2 cm/s 可達最高壓降 37.7 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的



穩定壓降維持在 30.3 mmH<sub>2</sub>O 上下。

從以上實驗數據比較可以發現，中擋板長度在同樣濾材質量流率下，同樣以 40 mm 達最高壓降的時間比較短，由於中擋板長度短故通過合成氣體量大，同時粉塵挾帶量也較多，因此在固定床階段時濾餅堆積的情況相形之下也較中擋板長度 120 mm 時容易達到飽和，另從圖 17、圖 18、圖 19 整體壓降行為觀察，實驗操作於固定床階段時同一自由面風速下時其上升趨勢均呈現一致的情況，當實驗於移動床階段時的穩定壓降，則普遍以中擋板長度 120 mm 時的壓降為略高於其它中擋板長度。從表 6、表 7、表 8 呈現的過濾效率一覽表發現，在中擋板長度較長時過濾效率的表現均比較良好，這是因為當中擋板長度較長時其於固定床階段所堆積的濾餅形成計較為緊密，所造成淺層過濾的效果比中擋板長度較短時更為明顯，進而能夠捕集更多進口氣體中的粉塵粒子，因此過濾效率會隨著中擋板長度的增加而提昇。

隨著上述實驗不管以進口自由面風速或是濾材質量流率作為同樣基準進行分析，在整體壓降行為的趨勢上都以較長中擋板長度 120 mm 所能達到的壓降為最高，因此在過濾器固定/移動床切換的操作時間上也越往後延後，反之亦然，所以整體壓降會隨著中擋板長度的增加而增加，過濾器移動床的切換時間點(最高壓降)

也會隨著中擋板長度的增加而延後；而在過濾效率的表現上，當中擋板長度越長時均會呈現較好的過濾效率，因此可說過濾效率會隨著中擋板長度的增加而提昇。

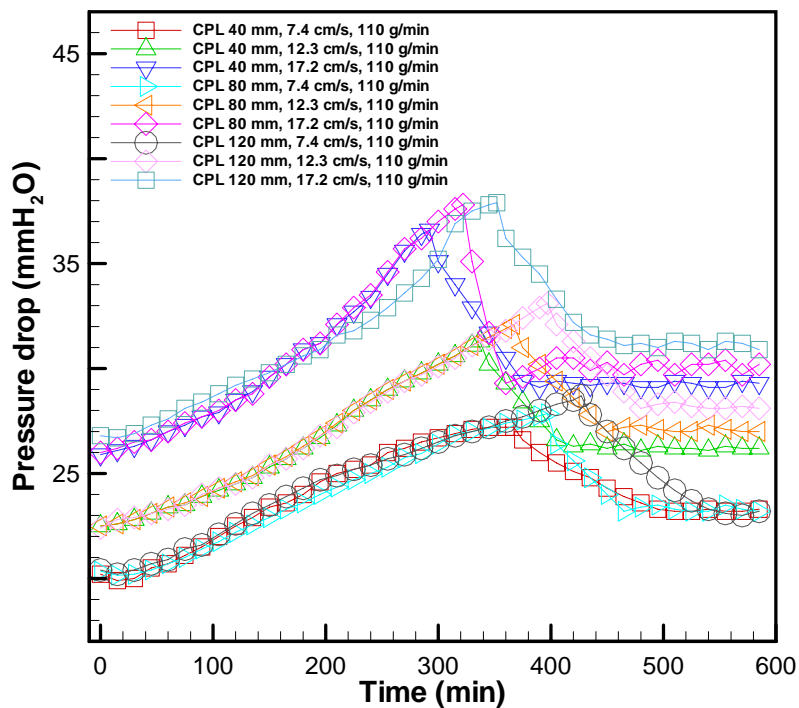


圖 17 不同中擋板長度在質量流率 110 g/min 下之壓降行為

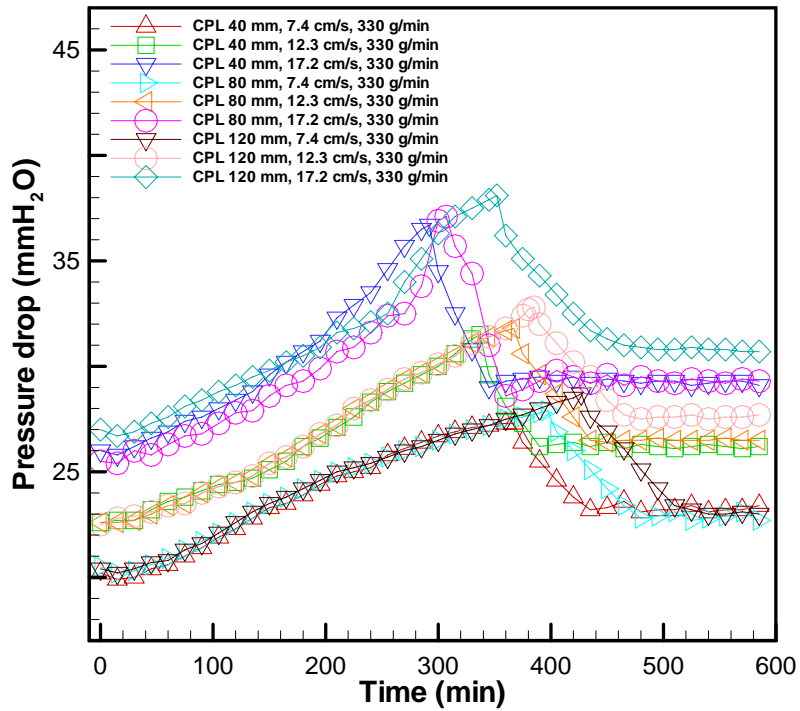


圖 18 不同中擋板長度在質量流率 330 g/min 下之壓降行為

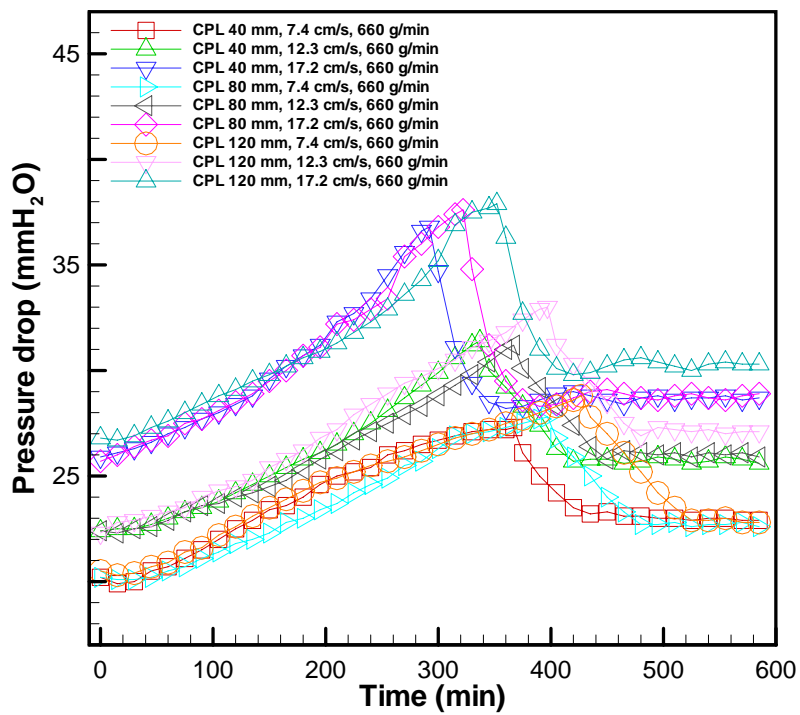


圖 19 不同中擋板長度在質量流率 660 g/min 下之壓降行為

表 6 不同中擋板長度在質量流率 110 g/min 下之過濾效率

Central plate length (mm)	Mass flow rate (g/min)	Free surface velocity of air (cm/s)	Filtration efficiency (%)
40	110	7.4	98.85
		12.3	98.41
		17.2	97.90
80		7.4	99.09
		12.3	98.47
		17.2	98.07
120		7.4	99.28
		12.3	98.61
		17.2	98.28

表 7 不同中擋板長度在質量流率 330 g/min 下之過濾效率

Central plate length (mm)	Mass flow rate (g/min)	Free surface velocity of air (cm/s)	Filtration efficiency (%)
40	330	7.4	99.21
		12.3	98.73
		17.2	98.19
80		7.4	99.34
		12.3	98.89
		17.2	98.34
120		7.4	99.56
		12.3	98.95
		17.2	98.53

表 8 不同中擋板長度在質量流率 660 g/min 下之過濾效率

Central plate length (mm)	Mass flow rate (g/min)	Free surface velocity of air (cm/s)	Filtration efficiency (%)
40	660	7.4	99.02
		12.3	98.49
		17.2	98.01
80		7.4	99.18
		12.3	98.57
		17.2	98.26
120		7.4	99.39
		12.3	98.88
		17.2	98.31

### 三、自由面風速對壓降行為與過濾效率之影響

本節研究主要探討在不同進口自由面風速 (free surface velocity of inlet air) 下時對壓降行為及過濾效率有何影響。操作參數為在各種自由面風速 (7.4 cm/s、12.3 cm/s、17.2 cm/s) 時固定在單一實驗操作參數，如：濾材質量流率、中擋板長度下的壓降行為及過濾效率變化，計有(一)固定質量流率下不同自由面風速之壓降與過濾效率、(二)固定中擋板長度下不同自由面風速之壓降與過濾效率等小節，茲將討論分述如下：

### (一)固定質量流率下不同自由面風速之壓降與過濾效率

此節研究為不同自由面風速 7.4 cm/s、12.3 cm/s、17.2 cm/s 分別在不同質量流率 110 g/min(圖 20、表 9)、330 g/min(圖 21、表 10)、660 g/min(圖 22、表 11)下對壓降行為與過濾效率的探討。

如圖 20 所示為固定濾材質量流率 110 g/min 下的床體壓降變化。其中自由面風速 7.4 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 28.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；自由面風速 12.3 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 32.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.1 mmH<sub>2</sub>O 上下；而自由面風速 17.2 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 37.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 31.2 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 21 所示為固定濾材質量流率 330 g/min 下的床體壓降變化。其中自由面風速 7.4 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 28.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；自由面風速 12.3 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 32.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 385 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 27.7 mmH<sub>2</sub>O 上下；而自由面風速 17.2 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 37.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後

的穩定壓降維持在 30.7 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 22 所示為固定濾材質量流率 660 g/min 下的床體壓降變化。其中自由面風速 7.4 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 28.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 22.8 mmH<sub>2</sub>O 上下；自由面風速 12.3 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 32.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 27.1 mmH<sub>2</sub>O 上下；而自由面風速 17.2 cm/s、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 37.7 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.3 mmH<sub>2</sub>O 上下。

從以上實驗結果比較可以合理發現，自由面風速越高時兩端壓降越大，且由於當自由面風速較快時，在固定床階段時濾餅堆積的情況相形之下也比較快達到飽和，所以自由面風速 17.2 cm/s 達最高壓降切換為移動床操作的時間普遍均為較短，另比較高的自由面風速其進出口間的整體壓降也高於低自由面風速時。從表 9、表 10、表 11 呈現的過濾效率一覽表發現，在低自由面風速時過濾效率的表現均比較良好，因為當自由面風速處於較低時在固定床階段所堆積的濾餅形成比較緊密，故其淺層過濾的效果比高自由面風速時更為明顯，能夠捕集更多進口氣體中的粉塵粒子，因此可以說過濾效率會隨著自由面風速的增加而降低。

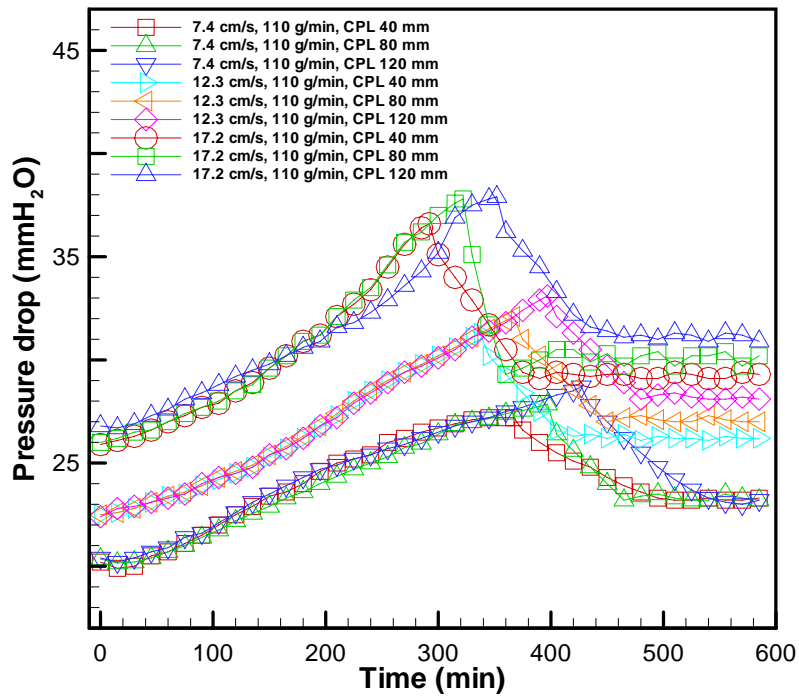


圖 20 不同自由面風速在質量流率 110 g/min 下之壓降行為

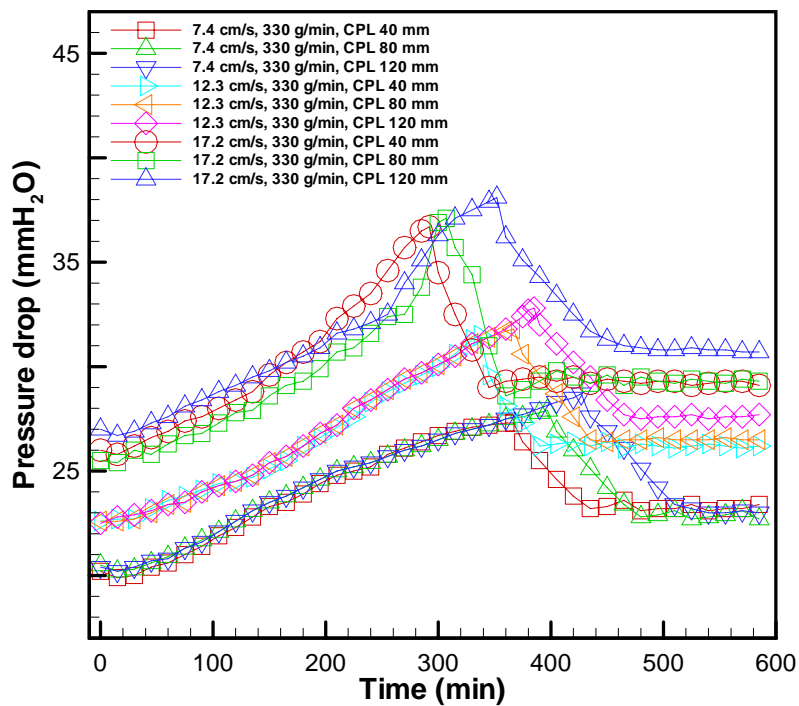


圖 21 不同自由面風速在質量流率 330 g/min 下之壓降行為



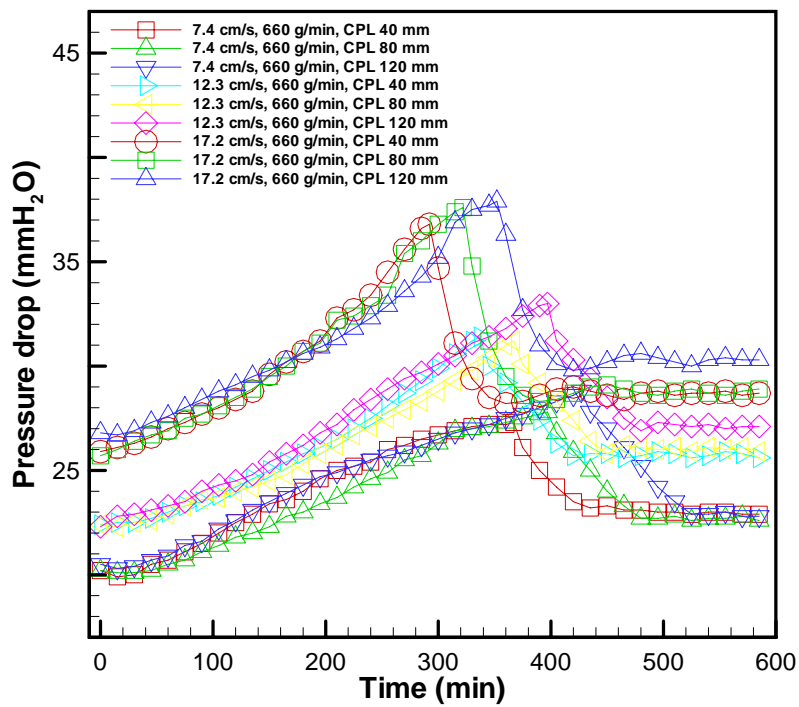


圖 22 不同自由面風速在質量流率 660 g/min 下之壓降行為

表 9 不同自由面風速在質量流率 110 g/min 下之過濾效率

Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Central plate length (mm)	Filtration efficiency (%)
7.4	110	40	98.85
		80	99.09
		120	99.28
12.3		40	98.41
		80	98.47
		120	98.61
17.2		40	97.90
		80	98.07
		120	98.28

表 10 不同自由面風速在質量流率 330 g/min 下之過濾效率

Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Central plate length (mm)	Filtration efficiency (%)
7.4	330	40	99.21
		80	99.34
		120	99.56
12.3		40	98.73
		80	98.89
		120	98.95
17.2		40	98.19
		80	98.34
		120	98.53

表 11 不同自由面風速在質量流率 660 g/min 下之過濾效率

Free surface velocity of air (cm/s)	Mass flow rate (g/min)	Central plate length (mm)	Filtration efficiency (%)
7.4	660	40	99.02
		80	99.18
		120	99.39
12.3		40	98.49
		80	98.57
		120	98.88
17.2		40	98.01
		80	98.26
		120	98.31

## (二)固定中擋板長度下不同自由面風速之壓降與過濾效率

此節研究為不同自由面風速 7.4 cm/s、12.3 cm/s、17.2 cm/s 分別固定在不同中擋板長度 40 mm(圖 23、表 12)、80 mm(圖 24、表 13)、120 mm(圖 25、表 14)下對壓降行為與過濾效率的探討。

如圖 23 所示為固定中擋板長度 40 mm 下的床體壓降變化。其中自由面風速 7.4 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 27.2 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 360 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.3 mmH<sub>2</sub>O 上下；自由面風速 12.3 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 31.1 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 330 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 26.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；而自由面風速 17.2 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 36.4 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.3 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 24 所示為固定中擋板長度 80 mm 下的床體壓降變化。其中自由面風速 7.4 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 27.7 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；自由面風速 12.3 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 31.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 360 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 27 mmH<sub>2</sub>O 上下；而自由面風速 17.2 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 37.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 315 分鐘，切換移動床之

後的穩定壓降維持在 30.2 mmH<sub>2</sub>O 上下。

如圖 25 所示為固定中擋板長度 120 mm 下的床體壓降變化。其中自由面風速 7.4 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 28.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；自由面風速 12.3 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 32.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.1 mmH<sub>2</sub>O 上下；而自由面風速 17.2 cm/s、濾材質量流率 110 g/min 可達到最高壓降 37.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.9 mmH<sub>2</sub>O 上下。

以上實驗結果指出，自由面風速越高時兩端壓降越大，且由於當自由面風速較快時，在固定床階段時濾餅堆積的情況相形之下也比較快達到飽和，所以自由面風速 17.2 cm/s 達最高壓降切換為移動床操作的時間普遍均為較短，另比較高的自由面風速其進出口間的整體壓降也高於低自由面風速時。從表 12、表 13、表 14 呈現的過濾效率一覽表發現，在低自由面風速時過濾效率的表現均比較良好，因為當自由面風速處於較低時在固定床階段所堆積的濾餅形成比較緊密，故其淺層過濾的效果比高自由面風速時更為明顯，能夠捕集更多進口氣體中的粉塵粒子，故過濾效率會隨著自由面風速的增加而降低。

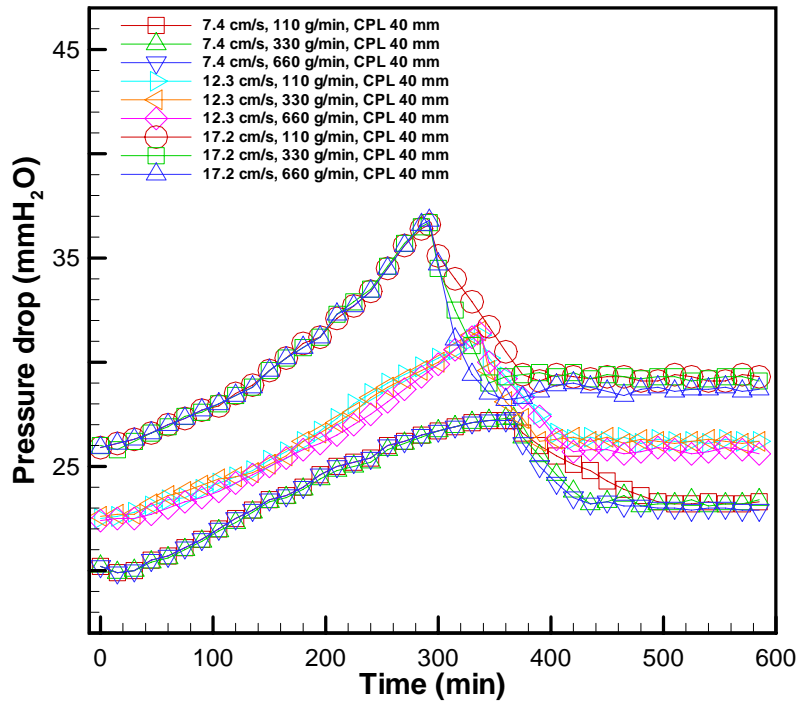


圖 23 不同自由面風速在中擋板長度 40 mm 下之壓降行為

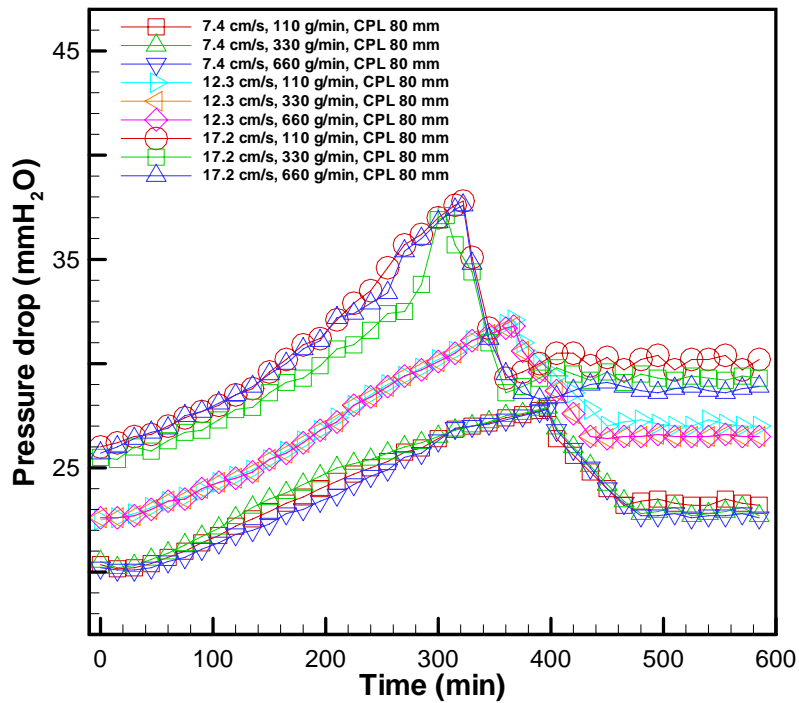


圖 24 不同自由面風速在中擋板長度 80 mm 下之壓降行為

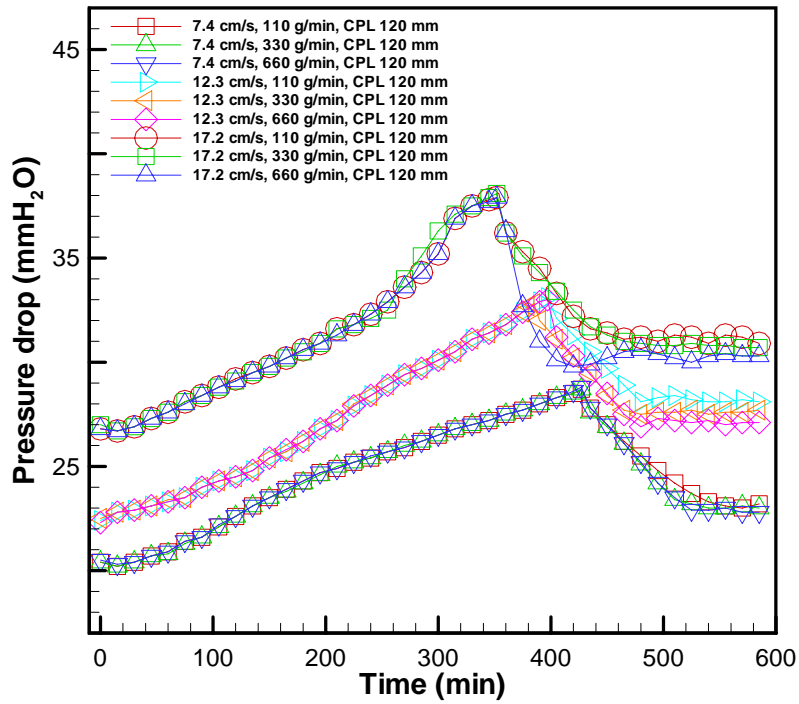


圖 25 不同自由面風速在中擋板長度 120 mm 下之壓降行為

表 12 不同自由面風速在中擋板長度 40 mm 下之過濾效率

Free surface velocity of air (cm/s)	Central plate length (mm)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
7.4	40	110	98.85
		330	99.21
		660	99.02
12.3		110	98.41
		330	98.73
		660	98.49
17.2		110	97.90
		330	98.19
		660	98.01

表 13 不同自由面風速在中擋板長度 80 mm 下之過濾效率

Free surface velocity of air (cm/s)	Central plate length (mm)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
7.4	80	110	99.09
		330	99.34
		660	99.18
12.3		110	98.47
		330	98.89
		660	98.57
17.2		110	98.07
		330	98.34
		660	98.26

表 14 不同自由面風速在中擋板長度 120 mm 下之過濾效率

Free surface velocity of air (cm/s)	Central plate length (mm)	Mass flow rate (g/min)	Filtration efficiency (%)
7.4	120	110	99.28
		330	99.56
		660	99.39
12.3		110	98.61
		330	98.95
		660	98.88
17.2		110	98.28
		330	98.53
		660	98.31

隨著上述實驗不管以濾材質量流率或是中擋板長度作為同樣基準進行分析，在整體壓降行為的趨勢上都以較高自由面風速 17.2 cm/s 所能達到的壓降為最高，反之亦然。故實驗結果指出整體壓降會隨著自由面風速的增加而增加，過濾器移動床的切換時間點(最高壓降)也會隨著自由面風速的增加而提前；而在過濾效率的表現上，當自由面風速較低時均會呈現較好的過濾效率，因此可說過濾效率會隨著自由面風速的降低而提昇。

#### 四、質量流率對壓降行為與過濾效率之影響

本節改以從不同濾材質量流率的觀點出發，實驗設定為三種濾材質量流率 110 g/min、330 g/min、660 g/min 在單一自由面風速 7.4 cm/s 與 17.2 cm/s 的比較下對過濾器整體壓降及進出口過濾效率有何影響。

本節研究主要探討在不同濾材質量流率(mass flow rate of media)下時對壓降行為及過濾效率有何影響。操作參數為在各種濾材質量流率(110 g/min、330 g/min、660 g/min)時固定在單一實驗操作參數，如：進口自由面風速、中擋板長度下的壓降行為及過濾效率變化，計有(一)固定自由面風速下不同質量流率之壓降與過濾效率、(二)固定中擋板長度下不同質量流率之壓降與過濾效率等小節，茲將討論分述如下：



### (一)固定自由面風速下不同質量流率之壓降與過濾效率

此節研究為不同濾材質量流率 110 g/min、330 g/min、660 g/min 分別固定在不同自由面風速 7.4 cm/s(圖 26、表 15)、12.3 cm/s(圖 27、表 16)、17.2 cm/s(圖 28、表 17)下對壓降行為與過濾效率的探討。

如圖 26 所示為固定自由面風速 7.4 cm/s 下的床體壓降變化。其中濾材質量流率 110 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 28.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；濾材質量流率 330 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 28.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 23 mmH<sub>2</sub>O 上下；而濾材質量流率 660 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 28.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 420 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 22.8 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 27 所示為固定自由面風速 12.3 cm/s 下的床體壓降變化。其中濾材質量流率 110 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 32.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.1 mmH<sub>2</sub>O 上下；濾材質量流率 330 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 32.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 385 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 26.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；而濾材質量流率 660 g/min、中擋板長度 120

mm 可達到最高壓降 32.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 390 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 27.1 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 28 所示為固定自由面風速 17.2 cm/s 下的床體壓降變化。其中濾材質量流率 110 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 37.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.9 mmH<sub>2</sub>O 上下；濾材質量流率 330 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 37.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.7 mmH<sub>2</sub>O 上下；而濾材質量流率 660 g/min、中擋板長度 120 mm 可達到最高壓降 37.7 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.3 mmH<sub>2</sub>O 上下。

從三種濾材質量流率在單一自由面風速之間的比較可以發現，不論是在固定床濾餅堆積階段時壓降的上升曲線，或是達到最高的壓降及達到最高壓降時間點基本上都沒有很大的變化，唯一的差別為固定床切換為移動床之後穩定持續的壓降，在濾材質量流率 110 g/min 的時候其動態穩定壓降會比濾材質量流率 660 g/min 時要高。在過濾效率的比較方面，則以濾材質量流率 330 g/min 時普遍最高，次之為濾材質量流率 660 g/min 時，最後才為濾材質量流率 110 g/min 時。從表 15、表 16、表 17 呈現的過濾效率實驗結果指出，過濾效率並沒有隨著濾材質量流

率成正比或反比的關係，而是以中間的濾材質量流率 330 g/min 時最高，這是由於過低的濾材質量流率會造成合成氣體不易通過，而使自由面表面的風速過大進而造成已堆積濾餅的破壞，而過高的濾材質量流率則會造成濾餅堆積的厚度無法保持及達到飽和，兩者因素都會造成以堆積濾餅所形成的淺層過濾機制無法充分發揮效果，因此在同一自由面風速的操作參數下，過低或過高的濾材質量流率對於過濾效率的提昇都沒有助益，故在同一自由面風速下會以濾材質量流率 330 g/min 的過濾效率為最佳。

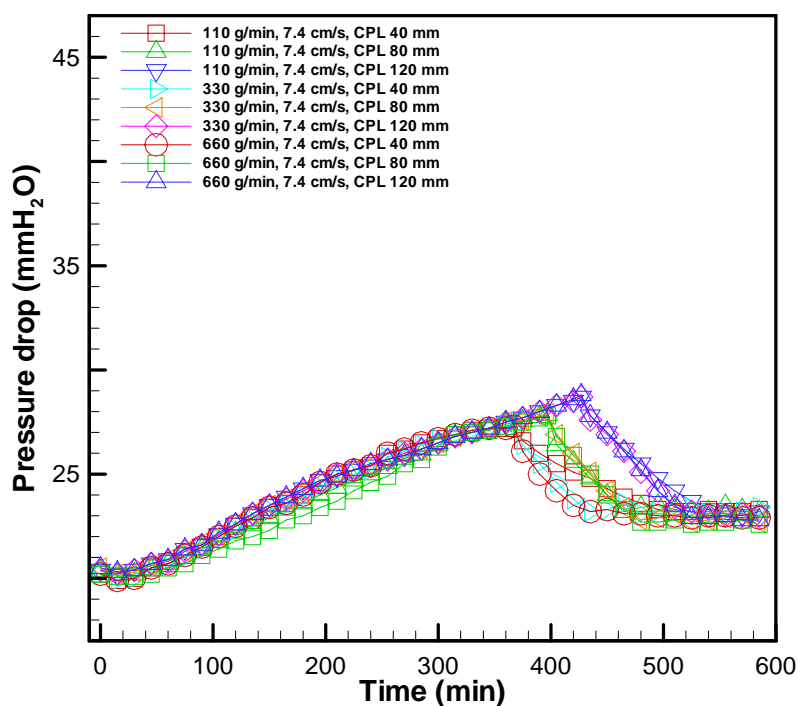


圖 26 不同質量流率在自由面風速 7.4 cm/s 下之壓降行為

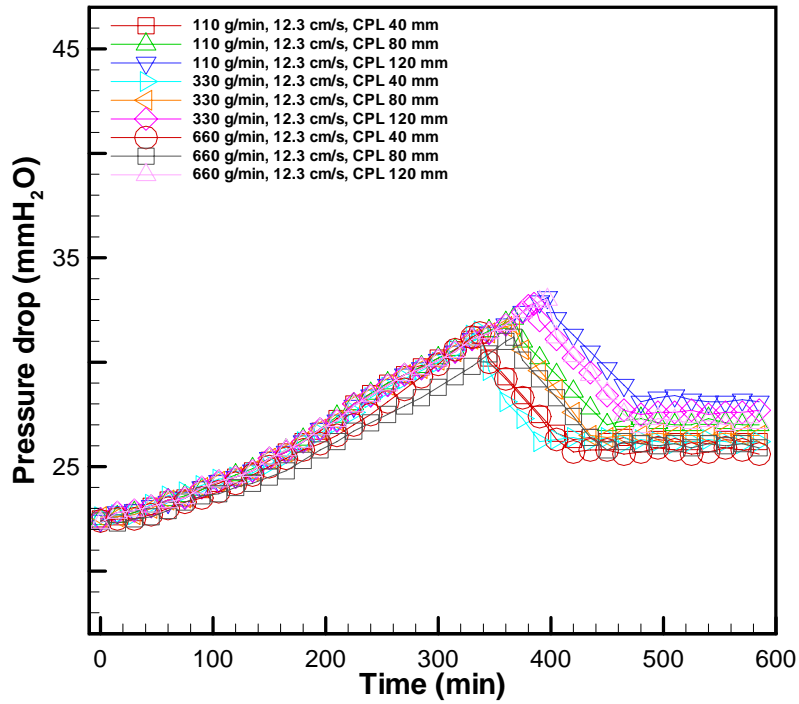


圖 27 不同質量流率在自由面風速 12.3 cm/s 下之壓降行為

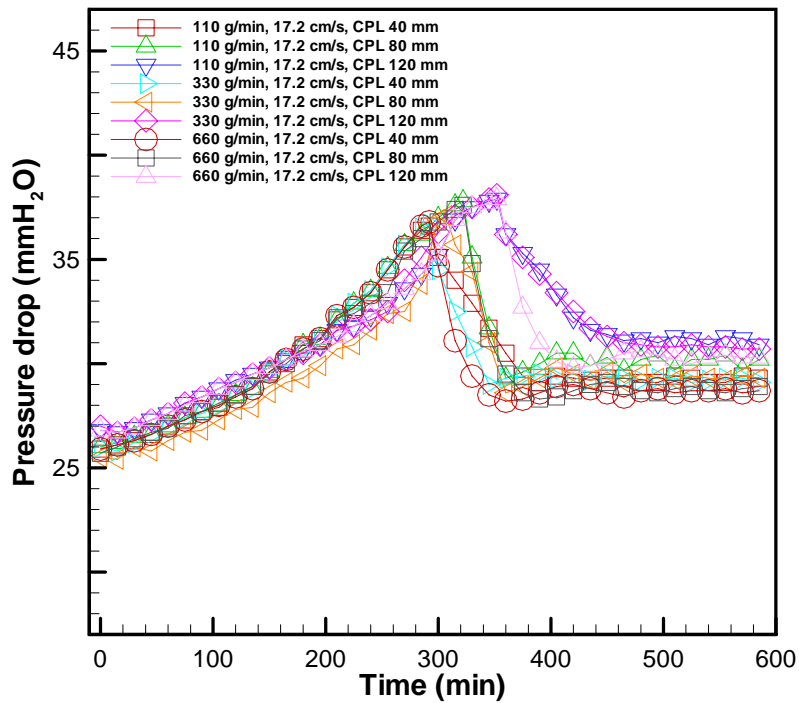


圖 28 不同質量流率在自由面風速 17.2 cm/s 下之壓降行為

表 15 不同質量流率在自由面風速 7.4 cm/s 下之過濾效率

Mass flow rate (g/min)	Free surface velocity of air (cm/s)	Central plate length (mm)	Filtration efficiency (%)
110	7.4	40	98.85
		80	99.09
		120	99.28
330		40	99.21
		80	99.34
		120	99.56
660		40	99.02
		80	99.18
		120	99.39

表 16 不同質量流率在自由面風速 12.3 cm/s 下之過濾效率

Mass flow rate (g/min)	Free surface velocity of air (cm/s)	Central plate length (mm)	Filtration efficiency (%)
110	12.3	40	98.41
		80	98.47
		120	98.61
330		40	98.73
		80	98.89
		120	98.95
660		40	98.49
		80	98.57
		120	98.88

表 17 不同質量流率在自由面風速 17.2 cm/s 下之過濾效率

Mass flow rate (g/min)	Free surface velocity of air (cm/s)	Central plate length (mm)	Filtration efficiency (%)
110	17.2	40	97.90
		80	98.07
		120	98.28
330		40	98.19
		80	98.34
		120	98.53
660		40	98.01
		80	98.26
		120	98.31

## (二) 固定中擋板長度下不同質量流率之壓降與過濾效率

此節研究為不同濾材質量流率 110 g/min、330 g/min、660 g/min 分別固定在不同中擋板長度 40 mm(圖 29、表 18)、80 mm(圖 30、表 19)、120 mm(圖 31、表 20)下對壓降行為與過濾效率的探討。

如圖 29 所示為固定中擋板長度 40 mm 下的床體壓降變化。其中濾材質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 36.4 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.3 mmH<sub>2</sub>O 上下；濾材質量流率 330 g/min、自

由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 36.5 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.1 mmH<sub>2</sub>O 上下；而濾材質量流率 660 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 36.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 285 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.7 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 30 所示為固定中擋板長度 80 mm 下的床體壓降變化。其中濾材質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 37.6 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 315 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.2 mmH<sub>2</sub>O 上下；濾材質量流率 330 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 36.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 300 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 29.3 mmH<sub>2</sub>O 上下；而濾材質量流率 660 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 37.4 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 315 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 28.9 mmH<sub>2</sub>O 上下。如圖 31 所示為固定中擋板長度 120 mm 下的床體壓降變化。其中濾材質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 37.8 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘左右，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.9 mmH<sub>2</sub>O 上下；濾材質量流率 330 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 37.9 mmH<sub>2</sub>O 的時間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.7 mmH<sub>2</sub>O 上下；而濾材質量流率 660 g/min、自由面風速 17.2 cm/s 可達到最高壓降 37.7 mmH<sub>2</sub>O 的時

間為 345 分鐘，切換移動床之後的穩定壓降維持在 30.3 mmH<sub>2</sub>O 上下。

從三種濾材質量流率在單一中擋板長度之間的比較可以發現，不論是在固定床濾餅堆積階段時壓降的上升曲線，或是達到最高的壓降及達到最高壓降時間點基本上都沒有很大的變化，唯一的差別為固定床切換為移動床之後穩定持續的壓降，在濾材質量流率 110 g/min 的時候其動態穩定壓降會比濾材質量流率 660 g/min 時要高。在過濾效率的比較方面，則以濾材質量流率 330 g/min 時普遍最高，次之為濾材質量流率 660 g/min 時，最後才為濾材質量流率 110 g/min 時。從表 18、表 19、表 20 呈現的過濾效率實驗結果指出，過濾效率並沒有隨著濾材質量流率成正比或反比的關係，而是以中間的濾材質量流率 330 g/min 時最高，這是由於過低的濾材質量流率會造成合成氣體不易通過，而使自由面表面的風速過大進而造成已堆積濾餅的破壞，而過高的濾材質量流率則會造成濾餅堆積的厚度無法保持及達到飽和，兩者因素都會造成以堆積濾餅所形成的淺層過濾機制無法充分發揮效果，因此在同一自由面風速的操作參數下，過低或過高的濾材質量流率對於過濾效率的提昇都沒有助益，故在同一自由面風速下會以濾材質量流率 330 g/min 的過濾效率為最佳。



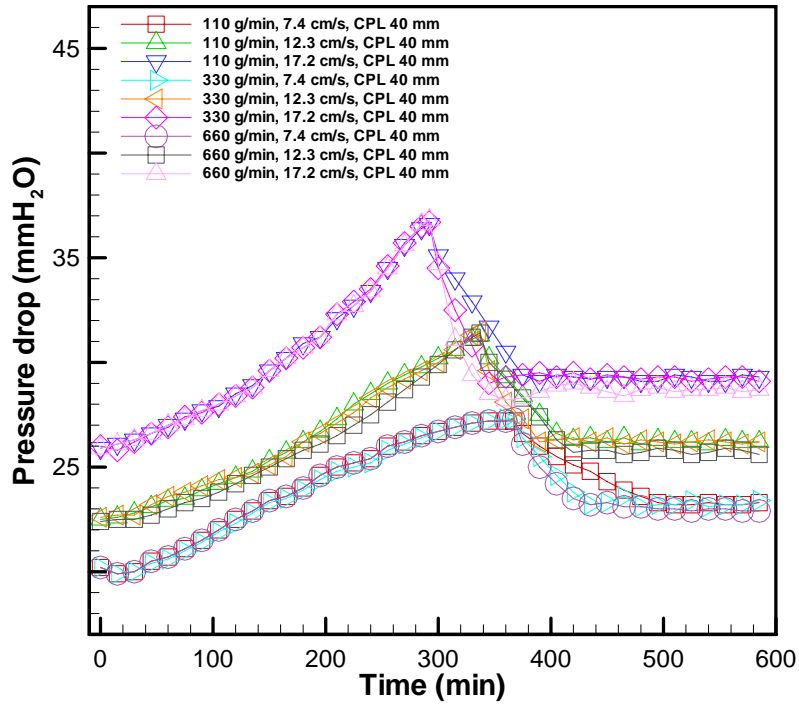


圖 29 不同質量流率在中擋板長度 40 mm 下之壓降行為

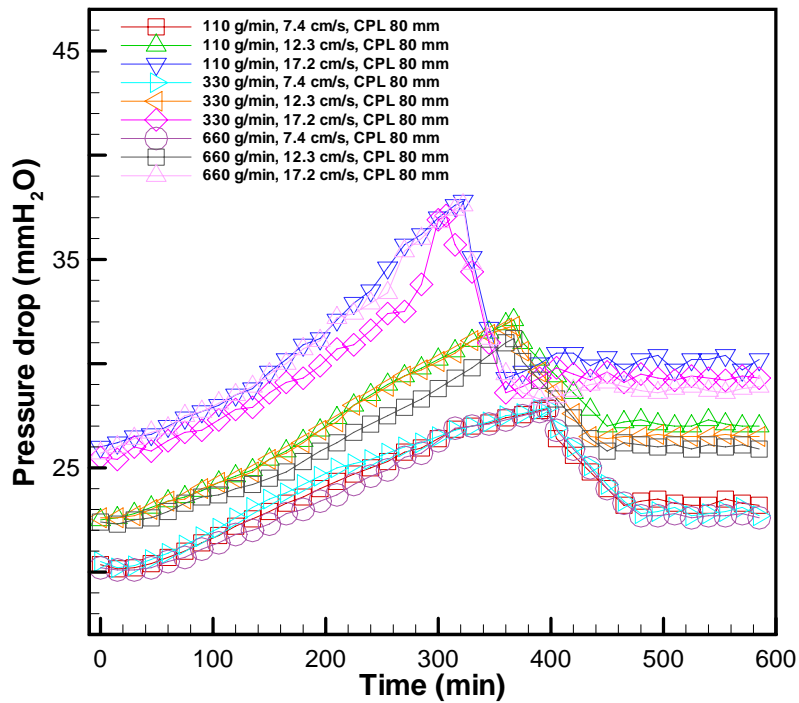


圖 30 不同質量流率在中擋板長度 80 mm 下之壓降行為

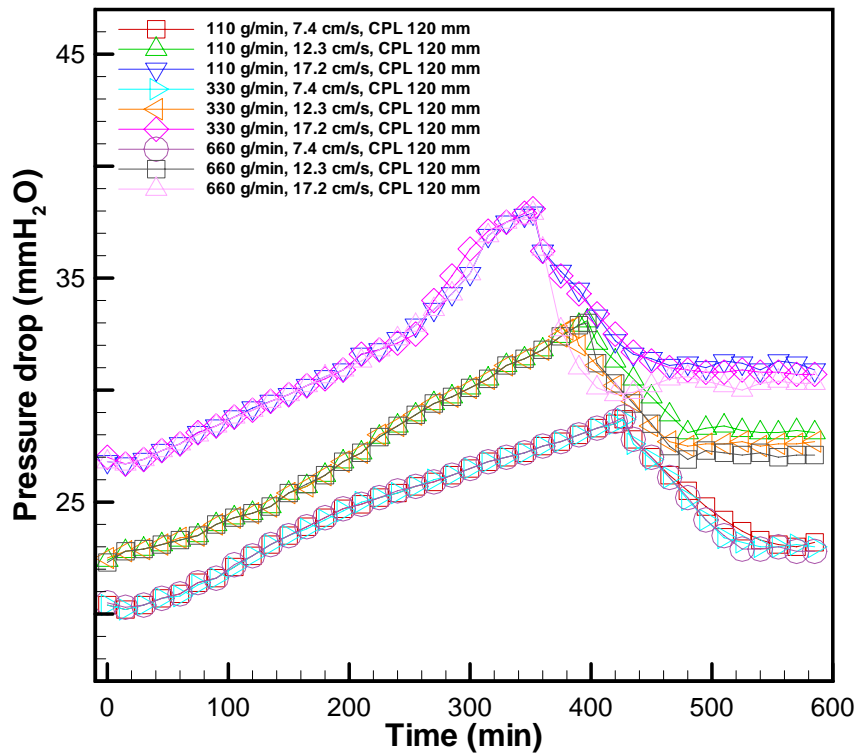


圖 31 不同質量流率在中擋板長度 120 mm 下之壓降行為

表 18 不同質量流率在中擋板長度 40 mm 下之過濾效率

Mass flow rate (g/min)	Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Filtration efficiency (%)
110	40	7.4	98.85
		12.3	98.41
		17.2	97.90
330		7.4	99.21
		12.3	98.73
		17.2	98.19
660		7.4	99.02
		12.3	98.49
		17.2	98.01

表 19 不同質量流率在中擋板長度 80 mm 下之過濾效率

Mass flow rate (g/min)	Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Filtration efficiency (%)
110	80	7.4	99.09
		12.3	98.47
		17.2	98.07
330		7.4	99.34
		12.3	98.89
		17.2	98.34
660		7.4	99.18
		12.3	98.57
		17.2	98.26

表 20 不同質量流率在中擋板長度 120 mm 下之過濾效率

Mass flow rate (g/min)	Central plate length (mm)	Free surface velocity of air (cm/s)	Filtration efficiency (%)
110	120	7.4	99.28
		12.3	98.61
		17.2	98.28
330		7.4	99.56
		12.3	98.95
		17.2	98.53
660		7.4	99.39
		12.3	98.88
		17.2	98.31

根據以上實驗結果指出，不管以進口自由面風速或是中擋板長度作為同樣基準進行分析，在整體壓降行為的趨勢上都以較高濾材質量流率 110 g/min 所能達到的壓降為最高，其次為 330 g/min，最低壓降則為 660 g/min，這是因為當質量流率較快時濾材間的縫隙較大，故合成氣體所遭受阻力較小，因此整體壓降會隨著濾材質量流率的降低而增加，不過移動床的切換時間點(最高壓降)並不會隨著濾材質量流率的變化而有所提前或延後，因為影響切換時間點的主因乃是進口自由面風速及中擋板長度兩項操作參數；在過濾效率的表現上，當濾材質量流率控制在 330 g/min 時均會呈現較好的過濾效率，次之為 660 g/min 時，最後為 660 g/min 時，因此可說過濾效率的表現並不會隨著濾材質量流率而呈現正反之關係，而是以濾材質量流率 330 g/min 為最好。

## 五、粉塵粒徑分析

粉塵粒徑分析可應用範圍甚廣，如陶瓷製品(陶瓷材料的品質管理、工程管理及研究開發)、化工業(橡膠、聚合物的品質管理、研究開發)、塗料、顏料(油墨、漆料、粉末塗料等等的品質管理、研究開發)、藥品、化妝品(製藥廠的藥品品質管理，農藥、點眼藥劑等)、食品(牛奶、水果食品、沙拉醬等品質管理)，經由上述之例子說明，凡是與粒子有關之產品，都需要測定它們的大小，以

管制產品的品質。近年來對粉粒體大小的要求已達奈米等級，因此粒徑的測定技術不僅重要，對於本研究來說也可作為間接判定過濾器操作參數的適用性與否。本實驗採用 HORIBA 的 LA-950 雷射光散射式粒徑分佈分析儀，其量測原理為 Mie 散射原理，可測量範圍從 10nm 到 3mm 不等，粒徑分佈結果通常可分  $D_{90}$  粒徑、 $D_{50}$  粒徑、 $D_{10}$  粒徑，其下標數字代表平均粒徑分佈曲線中累積分佈為 90%、50%、10% 時的最大顆粒的等效直徑（平均粒徑），本實驗以  $D_{50}$  作為判斷標準，也就是說當一個樣品的累計分佈百分數達到 50% 時所對應的粒徑，它的物理即為粒徑大於它的顆粒占 50%，小於它的顆粒也占 50%，因此  $D_{50}$  也稱作為中位徑或中值粒徑。

本研究共取六組實驗分析，其中中擋板長度 40 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s、過濾效率 97.90% 為過濾效率最差一組，而中擋板長度 120 mm、質量流率 330 g/min、自由面風速 7.4 cm/s、過濾效率 99.55% 則為過濾效率最好之組別，另外選取中擋板 80 mm 之四組實驗組數作為比較之用，詳細參數一覽如表 21 所列。從表 21 的粒徑分析結果中可以發現，過濾效率由上而下為最好至最差依序排列，而粒徑分析  $D_{50}$  的測量數據則剛好呈現反比的結果，亦即粒徑分析  $D_{50}$  之值會隨著過濾效率的提高而降低，圖 32 至圖 37 即為各個組別粒徑分析量測結果的直方圖。

表 21 D<sub>50</sub> 粒徑分佈與過濾效率一覽

Central plate length (mm)	Mass flow rate (g/min)	Free surface velocity of air (cm/s)	Filtration efficiency (%)	D <sub>50</sub> , Median size (μm)
40	110	17.2	97.90	18.78
80	110	17.2	98.07	17.52
80	330	17.2	98.34	16.10
80	110	7.4	99.09	14.70
80	330	7.4	99.34	14.46
120	330	7.4	99.55	13.37

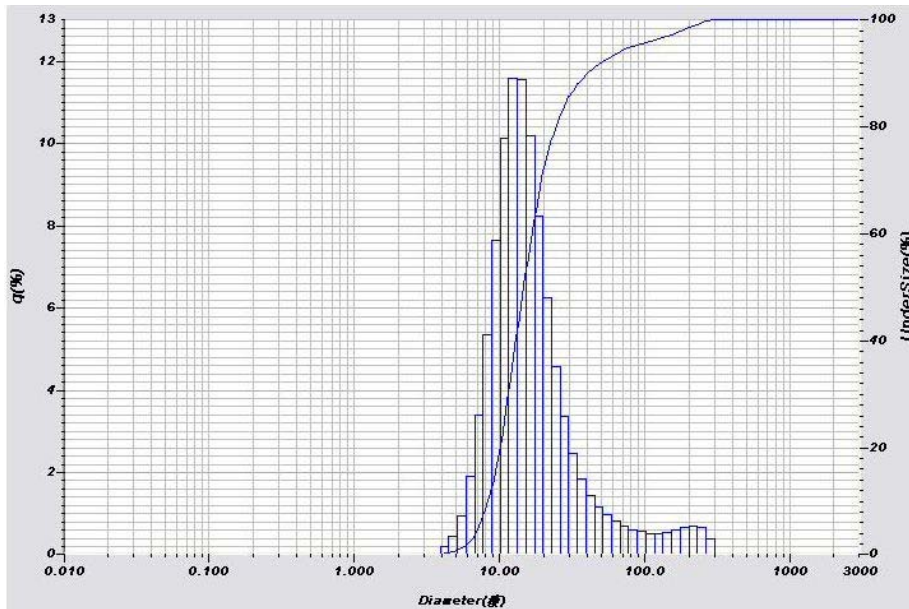


圖 32 中擋板長度 40 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s、過濾效率 97.90% 下之 D<sub>50</sub>=18.78 μm

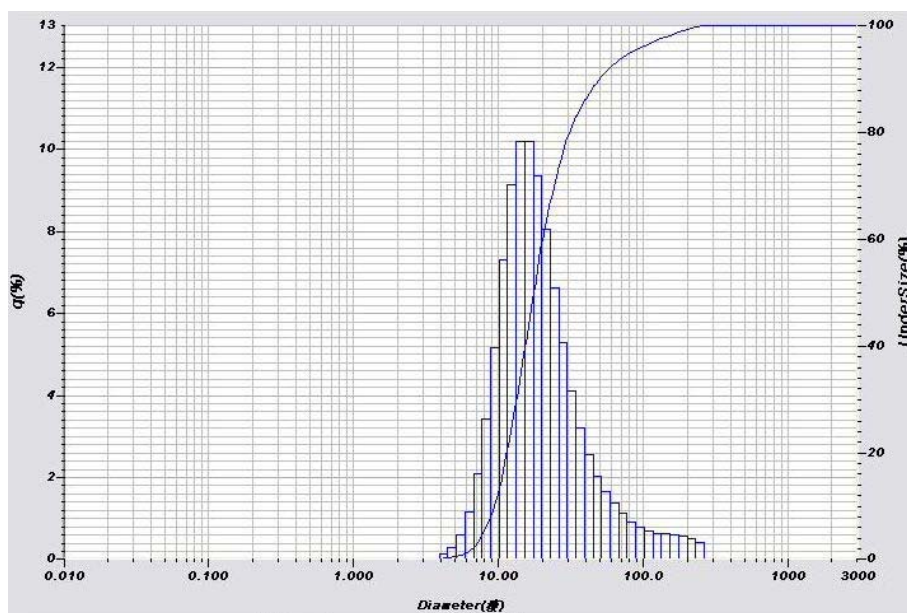


圖 33 中擋板長度 80 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 17.2 cm/s、過濾效率 98.07% 下之  $D_{50}=17.52 \mu m$

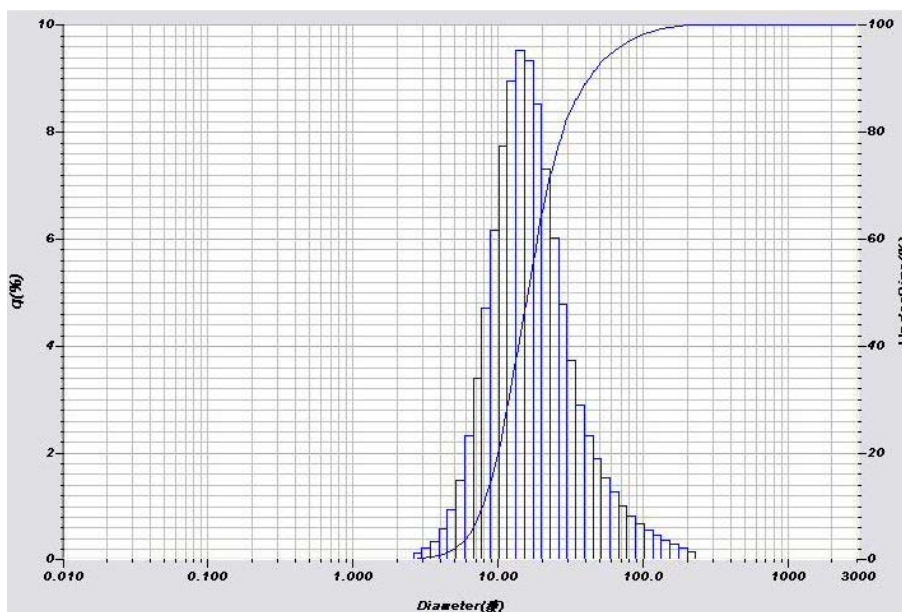


圖 34 中擋板長度 80 mm、質量流率 330 g/min、自由面風速 17.2 cm/s、過濾效率 98.34% 下之  $D_{50}=16.10 \mu m$



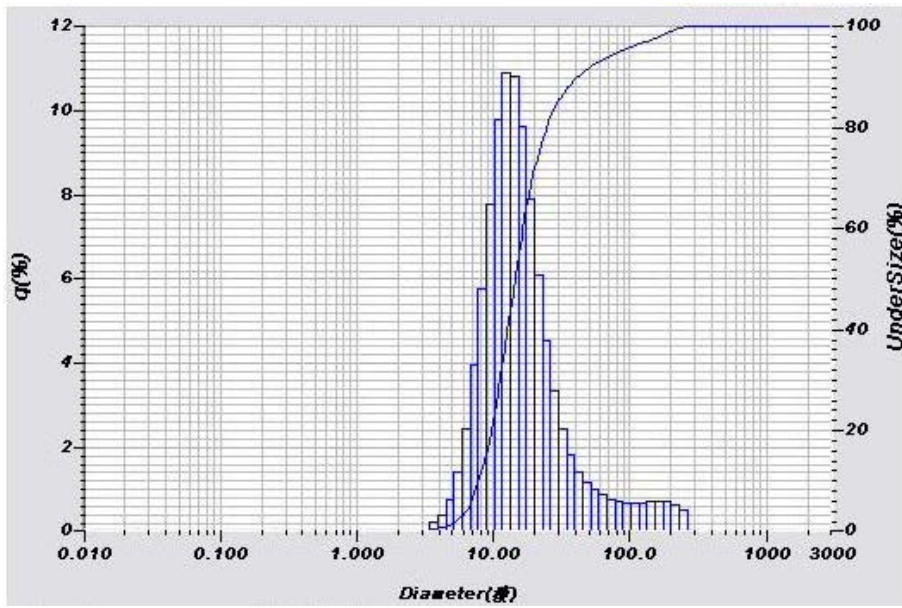


圖 35 中擋板長度 80 mm、質量流率 110 g/min、自由面風速 7.4 cm/s、  
過濾效率 99.09% 下之  $D_{50}=14.70 \mu m$

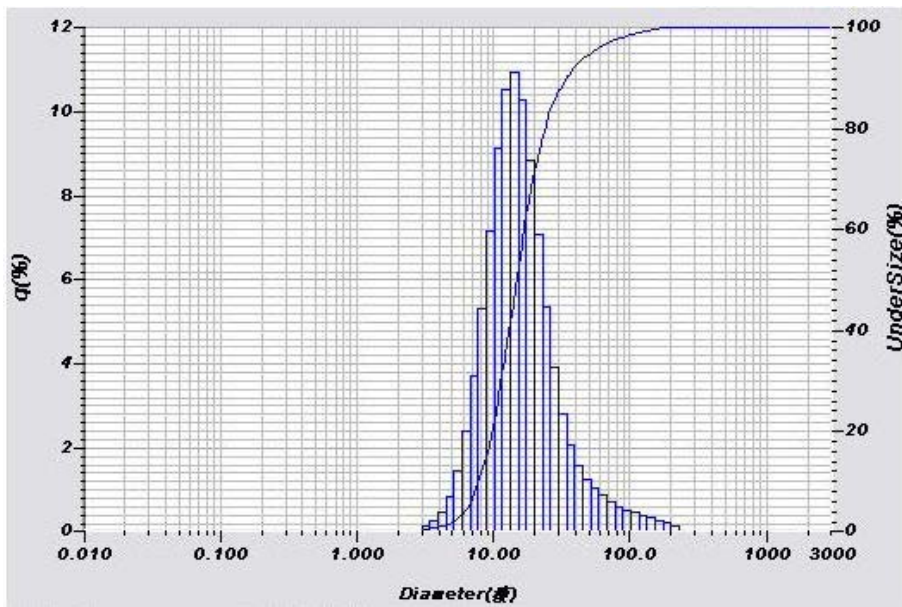


圖 36 中擋板長度 80 mm、質量流率 330 g/min、自由面風速 7.4 cm/s、  
過濾效率 99.34% 下之  $D_{50}=14.46 \mu m$



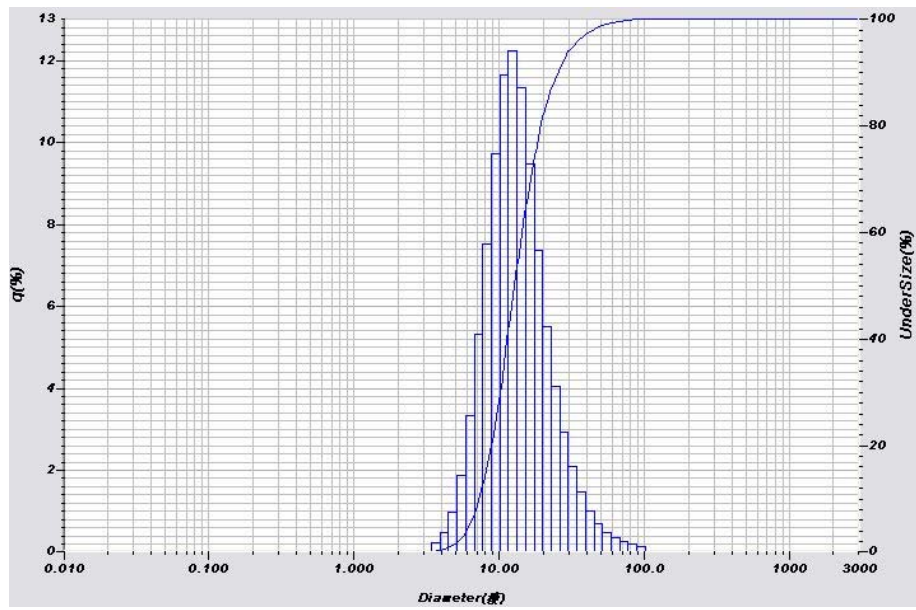


圖 37 中擋板長度 120 mm、質量流率 330 g/min、自由面風速 7.4 cm/s、過濾效率 99.55% 下之  $D_{50}=13.37 \mu m$

## 肆、結論與未來規劃

### 一、結論

本計畫首先依據前期之二維流場的最佳化結果之幾何模型配置及相關文獻，設計出三維兩階段過濾器主系統及其周邊設備，並依據此模型進行一系列冷性能過濾效率實驗，以下茲將相關研究結果整理如下：

#### (一)過濾器內部氣密對壓降行為與過濾效率之影響

在進行一系列冷性能過濾效率測試前，先改善過濾器內部部份壓克力板與壓克力板之間的空隙，可將實驗設備中的儀器誤差降至最低，以求更準確地獲得實驗結果，而實驗結果也確實指出過濾器內部的氣密程度越好，內部整體壓降及整體過濾效率都會隨著提高。

#### (二)中擋板長度對壓降行為與過濾效率之影響

延長中擋板長度會對過濾器床體的整體壓降及進出口間的過濾效率造成直接影響，這也是由於中擋板長度的增減影響了挾帶粉塵的合成氣之路徑長短所致，故實驗結果指出整體壓降及過濾效率會隨著中擋板長度的延長而提高，其中以中擋板 120 mm 實驗的過濾效率 99.56% 為最高。

#### (三)自由面風速對壓降行為與過濾效率之影響

從不同自由面風速 7.4 cm/s、12.3 cm/s、17.2 cm/s 在單一濾

材質量流率下的三組實驗結果指出，最高壓降為自由面風速 17.2 cm/s 時，且達到最高壓降的時間較短，亦即壓降會隨著自由面風速的增而增加。如圖 38 所示從過濾效率方面比較發現，自由面風速 7.4 cm/s 時平均有比較高的過濾效率，也就是說過濾效率會隨著自由面風速的增加而降低。

#### (四)質量流率對壓降行為與過濾效率之影響

實驗結果指出，三種濾材質量流率 110 g/min、330 g/min、660 g/min 在單一自由面風速下的整體壓降而言，改變濾材質量流率對於其趨勢並沒有太大變化，而唯一差別是在於切換為移動床之後維持的動態穩定壓降，較低濾材質量流率會略高於較高的濾材質量流率；過濾效率方面的實驗結果如圖 39 所示，過濾效率並不會隨著濾材質量流率成正比或反比的關係，而是整體而言在濾材質量流率 330 g/min 時可達到最佳過濾效率。

#### (五)冷性能過濾效率之粉塵粒徑分析

本計畫之粉塵粒徑分析採用  $D_{50}$ (median size)分佈來作為標準，也就是單一樣品體積中的累積粒徑百分比達到 50%之粒徑，其物理意義為大於此粒徑的體積佔 50%，小於此粒徑的體積分佈亦然。此粉塵粒徑分析樣品選擇上以最佳及最差過濾效率的組別來進行分析，分析結果發現，越高之過濾效率可得到越佳分佈，其中最佳過濾效率 99.56%時之  $D_{50}$  為  $13.37 \mu\text{m}$ ，最

差過濾效率為 97.88% 時之  $D_{50}$  為  $18.78 \mu\text{m}$ 。

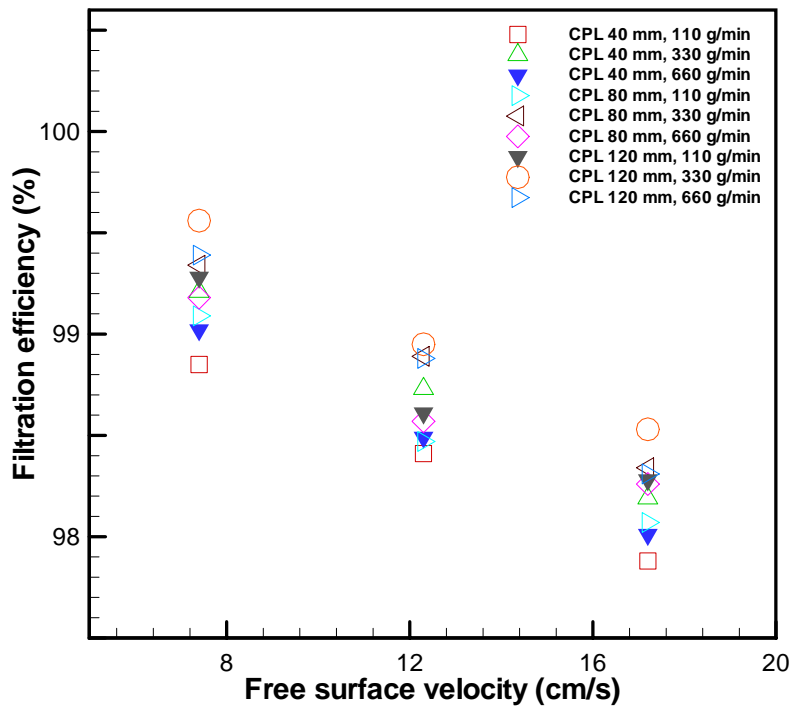


圖 38 不同進口自由面風速下之過濾效率

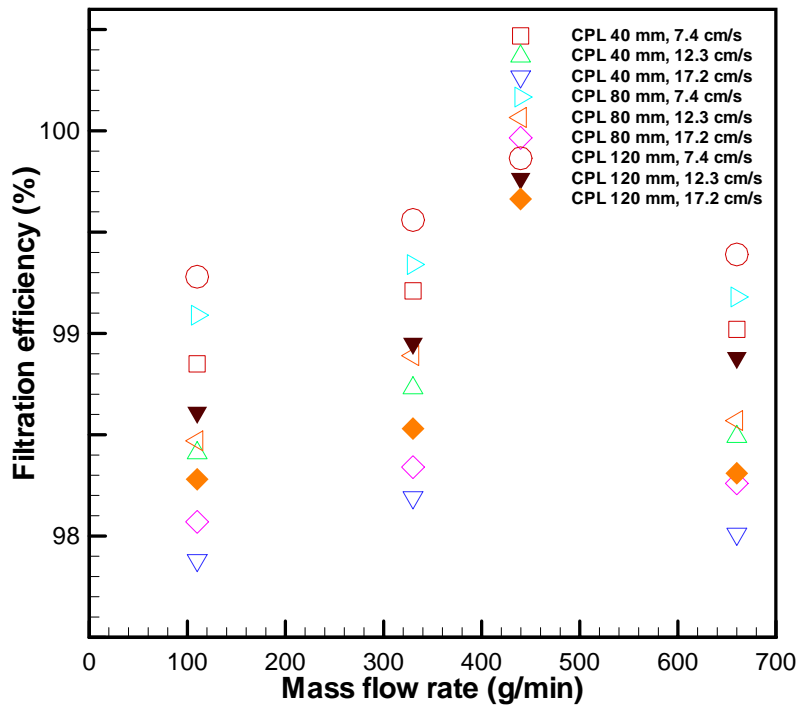


圖 39 不同濾材質量流率下之過濾效率

## 二、未來規劃

未來研究規劃中，將持續本計畫中三維兩階段過濾系統實驗資料的建立，並進行過濾效率之測試，未來規劃項目分別簡述如下：

### (一)過濾效率測試及冷性能資料庫之建立

將持續進行對於顆粒床過濾器的冷性能過濾效率實驗。實驗在進出氣口中需設有採樣設備對粉塵粒狀污染物進行採樣，含粉塵氣流由進氣管道進入過濾器，經過過濾器淨化後，乾淨之氣流由出口管道排出，過濾後將依據粉塵濃度來進行過濾效率的計算，後續實驗將繼續補足冷性能資料庫尚欠缺之部份，並朝更佳之過濾效率為目標邁進。

### (二)粉塵粒徑分析

未來研究中將朝向以粉塵粒徑  $10\ \mu\text{m}$  為一分水嶺之努力方向進行分析，並使顆粒床過濾器過濾後的出口粉塵粒徑符合渦輪機的規範。

為俾使三維顆粒床過濾器系統實現可商業化及實際達到中高溫除塵的目標，未來研究規劃了此三維冷性能測試，希望建立一朝向高效率除塵之高溫淨煤氣化系統的里程碑，並為地球的綠色環保盡一份心力。

## 伍、參考文獻

1. Cicero, D. C., Dennis, R. A., Geiling D. W. and Schmidt, D. K., 1994, “Hot-Gas Cleanup for Coal-Based Gas Turbines,” ASME Mechanical Engineering, pp. 70-75.
2. Zevenhoven, C. A. P., Andries, K. R. G., Hein, K. R. G. and Scarlett, B., 1993, “High Temperature Gas Cleaning for PFBC Using a Moving Granular Bed Filter,” in Gas Cleaning at High Temperatures, edited by R. Clift and J. P. K. Seville, Blackie Academic & Professional, pp. 400-418.
3. Andries, J., Scarlett, B., Bernard, J. G., Zevenhoven, C. A. P., van de Leur, R. H. M., Ennis, B., de Hann, P. H., Hogervorst, A. C. R., and Nikolic, M., 1987, “Closed loop controlled integrated hot gas clean up,” Final Report EC Contract EN3F-0028-NL ( GDF ) , Delft University of Technology.
4. Ishikawa, K, Kawamata N. and Kamei K., 1993, “Development of a Simultaneous Sulfur and Dust Removal Process for IGCC Power Generation System,” in Gas Cleaning at High Temperatures, edited by R. Clift and J.P.K. Seville, Blackie Academic & Professional, pp. 419-435.
5. Doyle, III, F. J., Jackson, R., and Ginestra, J. G., 1986, “The Phenomena of Pinning in an Annular Moving Bed Reactor with Crossflow of Gas,” Chemical Engineering Science, Vol. 41, No. 6, pp. 1485-1495.
6. Tsubaki, J. and Chi T., 1988, “Gas Filtration in Granular Moving Beds - An Experimental Study,” Canadian J. of Chemical Engineering, Vol. 66, pp. 271-275.
7. Macias-Machin, A., Cuellar, J., Estevez, A. and Jaraiz, E., 1992, “Simple Design of a Crossflow Moving Bed Heat Exchanger-Filter,” Filtration & Separation, March/April, pp. 155-161.

8. Song, X., Wang, Z., Jin Y. and Gong M., 1993, "Investigations on Hydrodynamics of Radial Flow Moving Bed Reactors," *Chemical Engineering Technology*, Vol. 16, pp. 383-388.
9. Ghadiri, M., Seville, J. P. K. and Clift, R., 1993, "Fluidised Bed Filtration of Gases at High Temperatures," *Trans. IChemE*, Vol. 71, Part A, pp. 371-381.
10. Zevenhoven, C.A.P., Scarlett, B., Andries, J., 1992, The Filtration of PFBC combustion gas in a granular bed filter, *Filtr. Sep.*, 29, 239-244.
11. Lee, K. W. and Schmidt, E. W., 1984, Collection of aerosol particles using granular bedfilters in the maximum penetration regime. In: "Powder Technol." 547-556. Iinoya et al. Eds. Hemisphere Publ. Corp., New York, USA.
12. Gal, E., Tardos, G. and Pfeffer, R., 1985, "A study of inertial effects in granular bedfiltration," *AIChE J.*, 31, pp.1093-1104.
13. Coury, J. R., Thambimuthu, K. V. and Clift, R., 1987, Capture and rebound of dust in granular bed filters. "Powder Technol." 50, 253-265.
14. 行政院環境保護署環境檢驗所，2002，「排放管道中粒狀污染物採樣及其濃度之測定方法」， NIEA A101.71C.