

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫二：實驗室規模高溫流動式顆粒過濾床設計製造與性能測試(II)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-002-025-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：郭景宗

計畫參與人員：郭英民，王宗源

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 93 年 12 月 13 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

流動式顆粒床高溫過濾技術應用於生質廢棄物氣化燃燒發電系統之

研究-

子計畫二：實驗室規模高溫流動式顆粒過濾床設計製造

與性能測試(II)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：92-2211-E-002-025-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

計畫主持人：郭景宗

計畫參與人員：王宗源 郭英民

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告

處理方式：可公開查詢

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

中 華 民 國 92 年 11 月 15 日

## ABSTRACT

The filtration of dust-laden gas in a cross flow granular bed filter was investigated by experiments. The parameters varied in the experiments were the granule size and filtration velocity. The spreading of dust deposits was observed from the transparent side panels of the filter. The flow distributions on either side of the filter were measured. The dust deposits in the bed had little influence on the flow distribution on the inlet side. When the bed became dirty, a marked change in flow distribution was observed on the outlet side of the filter panel due to the blocking effect of dust deposits around the central section of the granular bed filter. The particle collection efficiencies showed the expected trend of increasing with time at low filtration velocities. At higher filtration velocities, dependent upon the size of the filter granules, the collection efficiency may decrease with time due to dust re-entrainment.

## 中文摘要

此實驗在研究帶粉塵的流體經過顆粒床的收集效率，實驗中各種各樣的參數是由粒徑和過濾速度組成，觀察到過濾器中粉塵沉積物從透明的濾床擴散，而流場的分布情形可從過濾器另一端量測出來，在顆粒床進口端粉塵沉積物對流場的分布有些微的影響，當整個濾床變髒時，可發現流場分布有顯著的改變，導致在出口端過濾器濾床處的粉塵沉積物在中間部分有阻塞效應，在低過濾速

度粉塵分子之收集效率顯示預期的趨勢隨時間增加，在高過濾速度下，依濾材顆粒粒徑大小決定，收集效率可能隨著時間下降由於粉塵的再次進入。

## 前言：

顆粒床是一種高效率的集塵技術，能將氣體中的粉塵、帶電荷的重金屬離子甚至有害的氣體成分，藉由通過細小砂礫或類似的顆粒狀物質為過濾介質吸附下來，而在化學加工業、發電廠或焚化爐上操作條件均在高溫高壓的情況下，所以高溫過濾集塵技術在現今工業扮演很重要的一環。站在能源的角度來看，若產生的氣體在操作溫度和操作壓力下就能被潔淨，那製造過程在能源節約的角度上會更佳且在生產技術上會更加完善，效率亦可大大提升。而工業上所遭遇到的操作條件錯綜複雜，如從高濃度酸性氣體中分離出次微米或奈米級微粒；但在特定情況下，過濾物質中一些濃縮成份如焦油(Tar)會造成濾材回收再生的問題。為避免這些問題所產生的不便，慎選濾材和過濾器材質是應用此類設備時必須要的考量。

目前市場以陶瓷濾棒技術最成熟、最為被廣泛採用。但傳統之陶瓷濾棒在高溫下其機械可靠性差，在陶瓷表面常會產生應力集中、強度不足、易堵塞、碎裂等詬病，加上陶瓷材料成本高及機械精密度要求嚴格經常造成系統停機維修等問題，且維修上有其困難。所以我們必須從最根本的地方著手，重新選擇過濾材質。顆粒床過濾器(Granular Bed Filter GBF)，為最近十幾年發展出的新構想，主要以細小的砂礫或類似的顆粒來當過濾材質，而利用這種介質來過濾流體的情況相當良好。

顆粒床過濾器主要分為四種模式操作：1. 固定式 2. 批次式流動床 3. 連續式流動床 4. 流體化床，其中連續式流動床的濾材具有(半)連續性再生特性，將過濾材質採自動循環式，使得在長時間氣體過濾的課題上引人注意。顆粒過濾床的主要優勢在高溫氣體過濾時可使用低價的耐高溫濾材，又可結合靜電效應或其他機制加強過濾效率，且具有高溫穩定性和可連續操作(保持同一壓降)的能力，可應用在循環再生系統的使用上。此外，塵粒收集可結合移除有害氣體成分的功能等等。具體的商業化產品如 Siemens-Westinghouse 的 SMGBF(Yang, W.C, 1995) 及 Combustion Power CompanyI 的 CPC MGBF(Wilson, K.B, 1996)。CPC MGBF 更已在過濾器中添加污染物吸附劑，廣泛應用於多方面之空氣污染控制。

## 研究目的

在顆粒床的過濾研究上，本文首先觀察顆粒床煙塵的過濾情形，紀錄長時間過濾粉塵滲透深度。研究煙塵過濾時顆粒床前後壓降與理論差異。並討論過濾總效濾與塵粒粒徑分級效率。在濾材的流動研究上，將過濾層批次流動，研究此時煙塵的過濾情形，並探討過濾層流動對過濾性能的影響。

擁有常溫過濾的技術之後，本文應用這些基礎，設計與製造等同實驗室規模之高溫(500 以上)流動式顆粒過濾床。顆粒床內部的葉片角度，參酌先前的冷模顆粒床過濾器的設計理論與實務經驗。可拆式顆粒床的絕熱問題，以生質廢棄物焚化燃燒爐的設計經驗，將高溫染塵煙氣濾淨後，再將攜帶之廢熱予

以冷卻後排出。完成的過濾床連接供灰器為染塵煙氣供應源。高溫濾材的選擇，以石英砂(主成分 99%  $SiO_2$ ) 等耐熱不易破裂的濾材為主。高溫流動式顆粒過濾床的測試，首先進行高溫固定床的測試，量測的項目有：(一)更新系統匹配並做運轉測試。(二)濾床進出口前後壓降量測。(三)顆粒過濾床前後及冷卻塔溫度量測。

## 文獻回顧

顆粒床過濾器的主要收集機制包括三種：(1)慣性衝擊機制(2)直接攔截機制(3)布朗擴散機制。慣性衝擊機制被迂迴曲折的流動形式所引起；當擴散對次微米顆粒為主要效應時，結塊附聚效應是主要的收集機制。為增強其分離效率，以靜電效應強化是常被使用的。

顆粒床過濾器包含了靜態(固定式)或移動(流動式)的顆粒層。其相關參考參數包括：過濾層尺寸、所需的過濾效率、可接受的壓降、粒徑在 1mm 數量級的濾材和孔隙率大約 0.4(乾淨的顆粒)。

Miyamoto 和 Bohn (1974) 由砂礫床的初始收集效率  $E$  所設計的式子預測出和過濾層厚度、固定砂礫的粒徑的  $(-5/3)$  次方、Darcy air flow velocity 的  $(-2/3)$  次方成正比的關係。由過濾實驗可以確定收集效率。Miyamoto 和 Bohn (1975) 由利用砂礫層來過濾氯化銨的實驗得知此過濾器的過濾效率。過濾效率一開始是比較低的，慢慢的成長直到 threshold load 開始。壓降也會開始變成不穩定。在 Gutfinger 和 Tardos (1979) 的研究中，以理論的方式結合慣性和擴散的效應。其作法為把擴散引進 Lagrangean 運動方程式，並視為 body

force。此body force是以擴散速度的觀點來評估，擴散速度是在一個過濾單元周圍，以擴散方程式順序求得其解。而Lagrangean 方程式合併慣性、擴散和黏滯力，以數值方式在塵粒在一個球體的過濾器附近的情況來求解。由此解也可得知過濾器的效率。在實驗上，以樹乳、空氣微塵、水泥灰、碳鋅粉末和細小砂礫，氣體速度的範圍在10到30cm/sec；塵粒的粒徑範圍在0.04 到5.0 microns。顆粒床包含5 in 的派克斯玻璃管，玻璃管被50meshs的銅製網格所支撐。實驗有作到寬範圍的過濾情況於電中性的過濾系統，並且在理論和實驗結果有一個好的修正情形。從實驗中也可証實靜電過濾也助於提升過濾效率。

在之後的Gutfinger et al.有敘述到高溫氣體淨化。Otani et al.(1989)研究顆粒床的收集性能，以非均勻球體，粒徑分佈在0.5到2.0mm，作為濾材，表面速度為0.4~120 cm/s。以實驗數據作基礎，預測各個收集機制所對應的收集效率方程式，並解釋雷諾數對粒子收集的影響。J.T.Kuo(1998) 針對不同流動式顆粒床之葉片進出口設計，研究流動式顆粒床過濾器之流動情形與靜止區，葉片進出口設計包括：不同的葉片傾斜角度，不同葉片長度，不同的葉片與葉片間距，對稱型與不對稱型。S.S.Hsiau(1999) 測試三種對稱型葉片和二種非對稱型葉片的流動式顆粒床。發現流動區裡最好的流動情況為不存在停滯區，通常這種情況自由表面區會太窄造成氣體速度過高。進而使粉塵大量阻塞於間隔之中。

## 研究方法

先定義收集效率

根據實驗可訂出收集效率 $E$

$$E = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \quad (1)$$

其中 $W_{in}$  表示給定的一段時間內粉塵進入系統的量； $W_{out}$  表示給定的一段時間內粉塵離開過濾器且被衝擊器收集到的量，假設定義粉塵的濃度為 $C$ ，堆積增加的體積流率為 $Q$ ，然後可以得到 $W_{in} = C_{in}Q$ 和 $W_{out} = C_{out}Q$ ，而過濾器的收集效率也可改寫成

$$E = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (2)$$

流入的粉塵分子堆積情形，由伴隨著流體進入的粉塵的進灰器的速率或由串式衝擊器中粉塵樣品經質量平衡分析所決定。

從穩定流動的粉塵流體中，在過濾器出口端粉塵樣品的收集，經過三小時，雖然對粉塵大小分佈分析是不足的，但對決定收集效率是十分足夠。Table 13是由每經過三小時在出口端堆積的粉塵樣品決定全部顆粒床過濾器的收集效率，在圖12中顯示隨時間變動地所有過濾器效率，結果顯示，從乾淨的顆粒床開始操作，一般來說所有的效率隨時間增加而上升，當用彩玉石(粒徑最大的濾材)作測試時，由收集效率顯示在前六小時這段期間，隨著過濾速度的增加而降低，當超過六小時後，顆粒床粉塵堆積的增加，收集效率衰退，使得隨著過濾速度變化的情形越來越不明顯，從Tests 2-1和2-2中，所有的收集效率很明顯的增加，而 Test 2-3在三種速度測試下有最高的收集效率。在Test 2-3顆

粒床中間的濾材在九小時後有漏氣的現象因此沒有量測到，從Test 3-3收集效率隨著時間發生無法預測的突然下降，可能可被解釋是由於粉塵沉積物在較高過濾速度再一次進入導致緊密的顆粒床結構變鬆散。

假如在進口端與出口端粉塵的粒徑分佈方程式為已知，則過濾器的分級效率可被計算出來從下面的方程式中

$$\eta = 1 - (1 - E) \frac{f_o(d_p)}{f_i(d_p)} \quad (3)$$

$f(d_p)$  在方程式 (3) 中為對數正態的機率濃度方程式如下面的形式

$$f(d_p) = \frac{1}{d_p \ln(\sigma_g) \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln(d_p) - \ln(d_{50}))^2}{2 \ln^2(\sigma_g)} \right] \quad (4)$$

顆粒床的分級效率如Figure 13所示，是由方程式(3) Malvern Mastersizer法計算出來，依過濾器中粉塵在進口端與出口端的粒徑分佈(已堆積十二小時)可辨別，分級效率可藉由另外兩個進口端粉塵粒徑分佈模組相似求出，在濾床中粉塵粒徑小於5 $\mu$ m的區域隨著效率曲線陷落。

在最低收集效率時最主要的不同就是粉塵的粒徑，在這種環境的操作條件下，當粉塵粒徑大於5 $\mu$ m慣性移動的這種機械效應是最顯著的，而擴散收集這種機械效應在粒徑小於5 $\mu$ m的粉塵最明顯，過濾器操作主要藉著慣性的衝擊模式，而所有的趨勢均顯示，分級效率隨著最主要的指標過濾器內流場速度的增加而下降。

粉塵在顆粒床過濾器內堆積導致分級效率隨時間改變，當採用Tests 1-1和3-2的結果來分析，兩個皆有相同的過濾速度，Figure 14用來圖示分級效率，由方程式(3)，依照粉塵在進口端用MOUDI串式衝擊器所收集到的粒徑分佈和在出口端用TSI APS比較，如Figure 14所示，分級效率在Test 1-1中很顯著的增加在前六小時的階段，隨著時間的拉長在Tests 1-1和3-2中分級效率隨後很明顯的降了下來，這種現象可能是由於壓力增強所導致的，造成粉塵沉積物再一次進入過濾床內。

## 結果討論

此實驗在研究帶粉塵的流體經過顆粒床的收集效率，可觀察到過濾器中粉塵沉積物從透明的濾床擴散，而流場的分布情形可從過濾器另一端放氣孔量測出來，當濾床中間部分是乾淨時，過濾器有最高的流體通過量，粉塵沉積物在濾床中對進口端流場分佈有一點影響，當整個濾床變髒時，可發現流場分布有顯著的改變，導致在出口端過濾器濾床處的粉塵沉積物在中間部分有阻塞效應，而磨差係數，用Ergun方程式預測乾淨濾床的壓降值比量測出來比較小，對小粒徑濾材壓降的增加率比較高，而小粒徑濾材增加壓降在後面的階段變成可以加速過濾測試，在顆粒床設計測試，超過99.5%的收集效率是可以達到的，在前六小時的階段，粉塵堆積有助於所有測試情況收集效率的增加，當操作時間過長，收集效率有衰退下降的趨勢，收集效率發生無法預測的突然下降，可能是由於粉塵沉積物再一次進入所導致的，所有的趨勢均顯示，隨著過濾器內流場

速度的增加將會導致分級效率下降，而過濾器操作主要的指標為慣性的衝擊器模式，對粒徑小於5 $\mu\text{m}$ 粉塵的收集效率顯示擴散的機械性質很明顯，在可比較的表面速度下，小粒徑濾材分級效率較

高，粉塵沉積物在分級效率上對濾床的影響是十分明顯的。

Table 13: Dust cumulation in the filter and overall filtration efficiency

Test No.	Time											
	0~3 hr			3~6 hr			6~9 hr			9~12 hr		
	$\bar{C}_i$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\eta}$	$\bar{C}_i$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\eta}$	$\bar{C}_i$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\eta}$	$\bar{C}_i$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\eta}$
1-1	358	4151	98.42	377	8575	99.60	371	12893	98.78	385	17374	98.79
1-2	297	4459	97.99	279	8665	98.40	277	12854	98.72	329	17850	99.12
1-3	207	3992	97.39	200	7859	97.66	202	11795	98.40	191	15522	98.55
2-1	287	3307	97.94	276	6547	99.48	313	10210	99.47	271	13382	99.45
2-2	284	4282	98.41	278	8488	98.75	283	12793	99.29	296	17303	99.46
2-3	133	2629	99.56	151	5594	99.46	175	9042	99.48	-	x	-
3-1	288	2542	97.95	279	5016	98.43	266	7392	99.32	222	9367	98.91
3-2	200	2321	98.61	218	4877	99.69	220	7450	99.19	230	10135	99.29
3-3	158	2396	98.99	140	4451	95.89	139	6503	96.29	155	8783	96.10

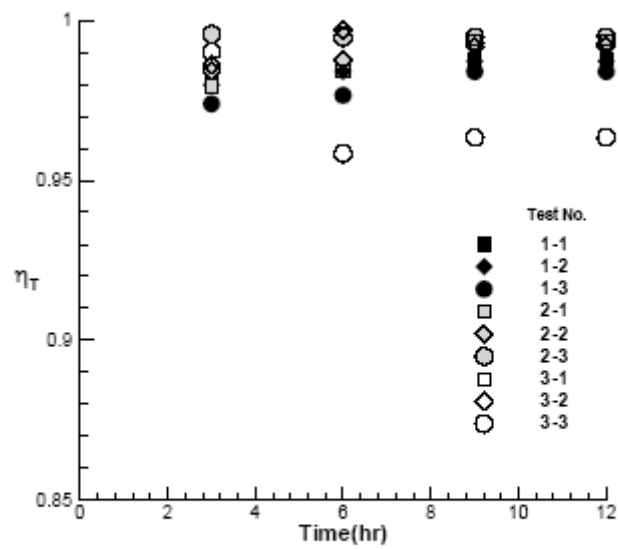


Figure 12. Filter overall collection efficiency.

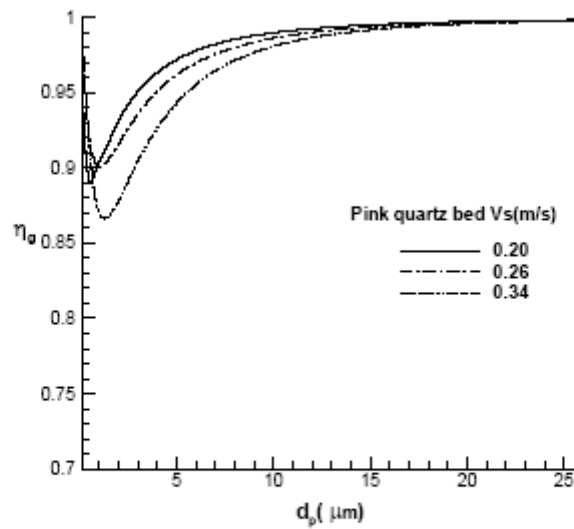


Figure 13. Filter grade efficiency averaged over 12 hours using different particle sizing techniques.



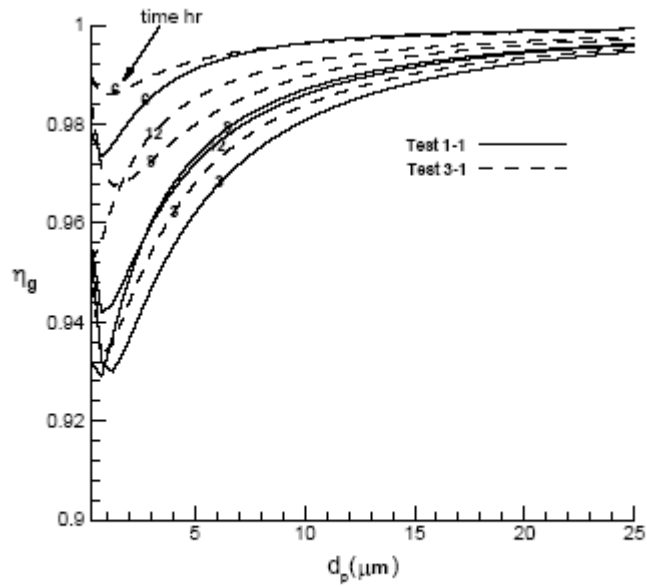
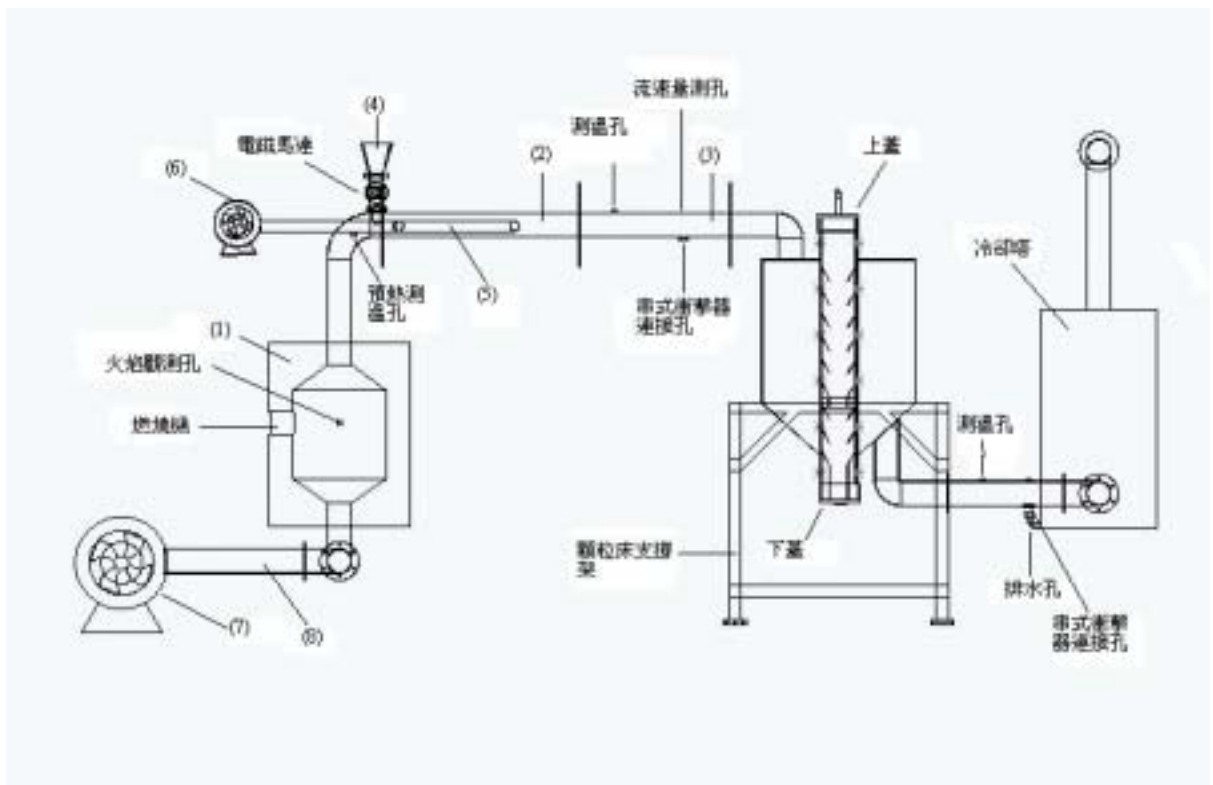


Figure 14. Effect of dust accumulation on filter grade efficiency.



1. 燃燒機與燃燒爐；2-3輸送管；4. 粉塵供應器；5. 進灰管；6. 風機；  
7. 主流道風機；8. 風機進口管

Figure15. 高溫流動式顆粒床系統圖