

# 中高溫氣體除塵技術與系統之開發

陳一順\*、邱耀平\*\*、李書哲\*\*\*

## 摘要

近十年來，歐、美、日本等工業先進國家致力積極發展淨煤氣化技術，並實際應用於整合型氣化複循環發電及多聯產化工程技術研發。若使用這先進的淨煤技術，燃燒或氣化後之高溫氣體會含有大量懸浮粒狀物質，除了環境保護的考量外，也需要在高溫高壓的狀態下清除燃燒排氣中的懸浮粒狀物質；藉由除塵流程，可防範下游之燃氣渦輪機或製程組件受到損壞，以確保氣渦輪機動力系統或單元操作設備的正常運作。舉例而言，如果不作高溫過濾處理，含懸浮粒狀物質之高溫氣體，將會附著在燃氣渦輪機的葉片，並造成葉片機械性質的破壞。目前常被應用在淨化氣體中的懸浮粒狀物質之裝置主要可分為：(1)重力沉降箱、(2)旋風分離器、(3)濕式洗滌器、(4)濾袋集塵器、(5)靜電集塵器、(6)陶瓷過濾器、以及(7)流動式顆粒床過濾器。目前高溫氣體過濾技術有兩大主流：一為陶瓷高溫過濾技術，另一技術則是使用流動式顆粒床過濾技術。前者之致命缺點為價格昂貴，且陶瓷棒易於高溫環境下斷裂，經常造成系統停機維修。後項技術優點為：以石英砂為濾材，乃不可燃物，價格便宜，在操作上無失火之慮；而且，顆粒體濾材可在操作中連續淨化循環再生使用，不會影響到系統的連續操作。本篇文章將藉由一套二維過濾顆粒床模型，搭配不同邊界條件的設計，探討流動式顆粒床過濾之影響因素。未來將依據此二維實驗結果，設計三維過濾器測試模型並應用於先進燃煤發電系統及多聯產化工程。

【關鍵詞】 高溫氣體、粒狀物質、高溫廢氣淨化裝置、流動式顆粒床過濾器

---

\*行政院原子能委員會核能研究所 副工程師

\*\*行政院原子能委員會核能研究所 簡任副研究員

\*\*\*行政院原子能委員會核能研究所 副研發師

## 一、前言

近年來，為因應全球暖化及石化燃料短缺的窘境，世界各先進國家莫不積極投入潔淨能源的研究與開發，特別針對如何減少碳排放的淨煤技術最受到各方矚目。在石油及天然氣存量日益減少下，煤礦的蘊藏量以目前來看，其量豐富且成本價格便宜，因此成為燃煤發電廠的發電主要燃料。目前新式燃煤發電技術-整合型氣化煤複循環系統(IGCC; integrated gasification combined-cycle)為所發展之淨煤發電技術之一；就技術發展觀點而言，IGCC 具有進料多元化煤炭、生質物(biomass)、石油焦、瀝青及國內廢棄物資源開發利用等)特性，能源取代性高，可提高能源安全性。因此建立 IGCC，其所生產之合成氣(syngas)可替代石油及天然氣，並可作為天然氣複循環機組之燃料或化工製程之原料，以因應石油及天然氣短缺之危機。

然而，煤在氣化過程中將產生大量高溫含微粒物質的合成氣，並釋放出有害氣體污染物質，如硫、氮與鹼系等污染成分的物質；因此，在 IGCC 淨煤發電相關技術開發中，以高溫除塵技術開發為重要發展關鍵技術之一<sup>[1,2]</sup>。這些先進的淨煤技術，氣化後之高溫合成氣體含有大量粒狀物質，除了環境保護的考量外，也需要在高溫高壓的狀態下清除合成氣中的粉塵粒狀物質<sup>[3]</sup>，防範下游之燃氣渦輪機(gas turbine)受到損壞，以確保氣渦輪機動力系統的正常運作；如果不作高溫過濾處理，高溫氣體中的粒狀物質將會附著在燃氣渦輪機的葉片，將嚴重損壞發電機之壽命使發電效率降低。此外，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，乃刻不容緩之要務。

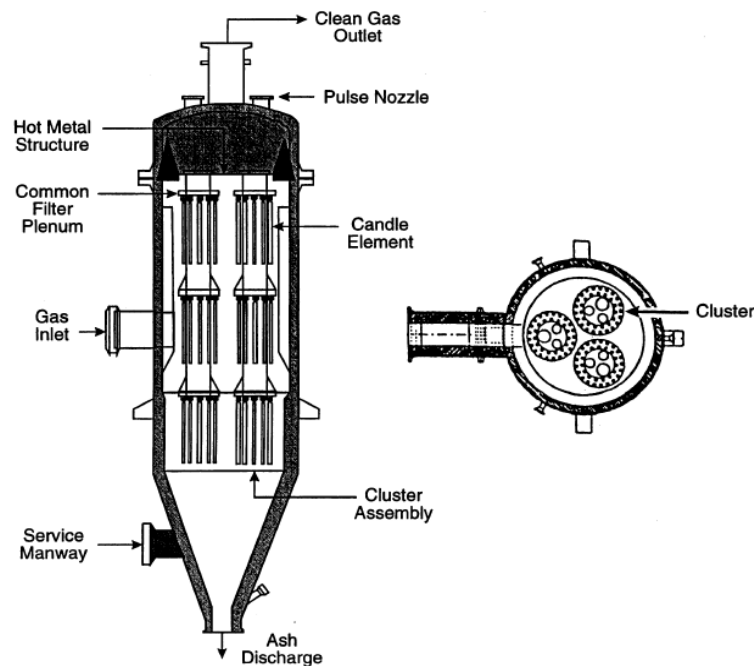
## 二、中高溫氣體除塵技術發展現況

### 2.1 氣體除塵技術發展

重力沉降箱、旋風分離器、濕式洗滌器、濾袋集塵器及靜電集塵器之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氣體淨化技術的方向進行研發，目前以商業化市場之陶瓷濾棒過濾(如圖 1 所示)與顆粒床過濾技術最為被廣泛採用<sup>[4,5]</sup>。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<sup>[5-8]</sup>、陶瓷價格昂貴及機械可靠度差<sup>[9]</sup>，因此經常造成系統需停機維修等問題。

依據陶瓷過濾器目前所面臨到的問題，顆粒床過濾器(granular bed filter, GBF)技術利用細小砂礫或類似顆粒狀物質作為過濾介質來進行氣體中之粉塵微粒過濾程序。此過濾介質也符合低成本<sup>[10,11]</sup>、耐高溫及酸鹼性質、使用壽命長，並可以循環重新再使用、容易更換以及高除塵效率等優點條件。



利用上述的材質特性，顆粒床過濾器的濾材可在操作中連續淨化循環，而這些都是傳統濾袋系統所無法取代；所以顆粒床過濾系統深具替代傳統集塵器及陶瓷過濾器的發展潛力及價值。目前美、歐、日各國均投入大量人力及物力<sup>[12-15]</sup>，全力發展顆粒床淨化系統的開發，同時國內的產官學術界亦日益重視相關系統之研發<sup>[16-20]</sup>。近幾年，原子能委員會核能研究所研究團隊積極規劃開發高溫淨化技術及設備，冀望將流動式顆粒床發展成複合功能的過濾系統；除了粉塵微粒的去除外，對於廢氣中的酸鹼性的成份亦可能一併做淨化的處理，其相關成果將陸續發表<sup>[21-24]</sup>。

## 2.2 顆粒床過濾器存在之問題

圖 2 為移動式顆粒床過濾器(moving granular bed filter)濾材流場型態示意圖，顆粒床過濾器主要由進氣口葉片與出氣口葉片所構成，並於其中填入石英

砂濾材。當含有粉塵之合成氣氣體進入顆粒床體，藉由從上往下移動之濾材所攔阻，而達到過濾粉塵的效果，大量乾淨之合成氣體將可被送往渦輪機組進行發電。此外，含有粉塵之濾材將由顆粒床過濾床體的濾材排出端流出，可經由篩分程序重新產生乾淨的再生濾材並使用於床體中，以達到連續循環及濾材重新再使用之目的。另由圖 2 所示，當在顆粒床體中的濾材由上往下移動時，位於進出口葉片的濾材流場易產生停滯區，導致影響顆粒床體中的整體濾材流動型態之順暢及濾材使用率。

顆粒床過濾器系統的進出氣口葉片尺寸、傾斜角與放置位置、濾材質量流率、濾材間及與床體壁面的摩擦角等，都是影響流場型態的因素。其中又以進出氣口葉片設計最為重要，乃因在顆粒床體中置入葉片組，將可增加合成氣進入顆粒床淨化系統的粉塵微粒攔阻過濾面積，提升整體過濾效率；但另一方面，在顆粒床體內增加了進出氣口的葉片組，濾材顆粒的流動不再只有垂直向下運動，因此受到濾材間及與葉片壁面的摩擦力影響，濾材會在各葉片組的轉折處堆積形成停滯區(stagnant zone)與半停滯區(quasi-stagnant zone)，如圖 2 所示；如此隨著合成氣進入的粉塵微粒則會被濾材顆粒所形成的停滯區所吸附而阻擋，久而久之，終將造成系統合成氣進出氣口處產生堵塞現象，使合成氣無法持續進入顆粒床體，造成過濾系統的失效。

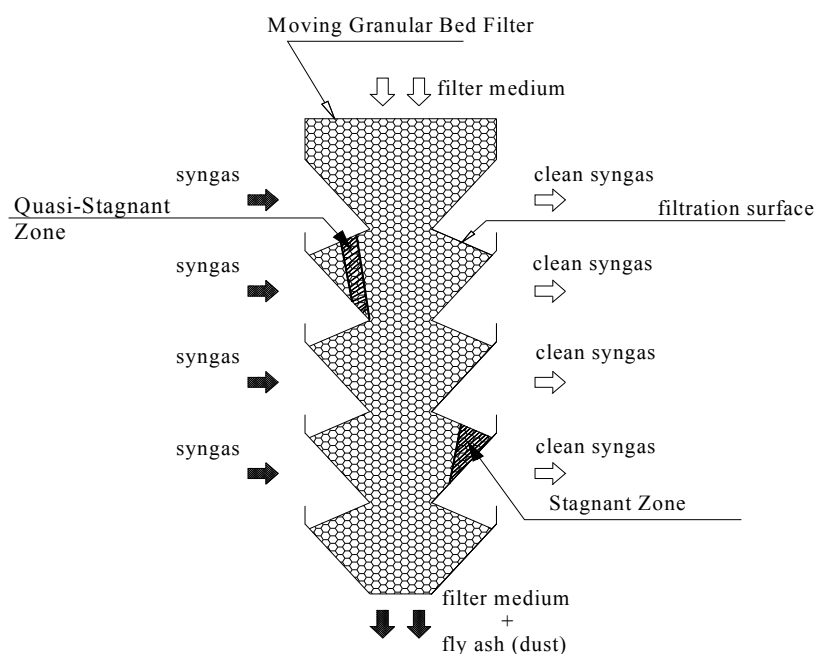


圖 2 移動式顆粒床過濾器之濾材流場型態示意圖

由上述了解，濾材於床體內的流場型態所產生的停滯區，將會直接影響至顆粒床過濾系統的過濾效率<sup>[10,11,14,25-27]</sup>，因此了解顆粒床體內濾材流動型態與速度場行為，將是發展顆粒床過濾器的主要關鍵。本文將藉由葉片的設計及幾何配置，探討在連續操作的條件下之濾材流動的情形，以找出消除濾材停滯區的最佳設計條件及相關幾何配置參數，得到流動式顆粒床過濾器之最佳化的配置設計。

### 三、流動式顆粒床過濾設備及執行成果

#### 3.1 設備與執行方法

本文測試所採用的二維顆粒床過濾設備如圖 3 所示，其目的在於驗證濾材顆粒在顆粒床體內部流動的現象是否順暢。顆粒床過濾器之配置參數包括兩側葉片與流動校正單元之長度、角度及放置位置等。二維顆粒床體之測試流場的尺寸為寬 380mm、厚 50mm 及高 1,160mm，固定於設備的正中央；另外，床體前後兩邊均以 8 mm 透明強化玻璃板及壓克力板作為壁面材料，主要目的為方便觀察記錄與後續影像分析。於濾材流場的入口端置入一濾材儲槽，其主要的功能為儲存顆粒床內連續運轉時所需之濾材顆粒體；二維過濾系統之濾材將採用由上往下的重力作用方式進行輸送，輸送控制採用輸送帶搭配馬達與變頻器以控制穩定的濾材質量流率。由於濾材流動穩定性之控制非常重要，因此輸送帶須保持張力均勻及水平輸送，方能確保濾材流動平穩順暢；此外，濾材儲槽、顆粒床體的幾何配置及輸送帶之間也需保持軸對稱。

由於在流場測試過程中，濾材顆粒於葉片轉折處產生無法消除之流場靜止區，在本文稱之為停滯區。因此，為了進一步探討停滯區與濾材流場間的關係，於本文將定義出殘留面積百分比(residual area percentage)，來探討其滯留區域的面積，並由該定義找出最佳系統之設計參數。其定義如下：

$$R (\%) = \frac{A_R}{A} \times 100 \%$$

其中 R 為殘留面積百分比、AR 為追蹤區域之追蹤粒子的殘留面積、A 為追蹤區域的總面積。濾材顆粒殘留面積百分比可定義為濾材於床體內流動一段時間後，所剩餘的追蹤濾材之殘留面積，當超過一段長時間後，殘留面積仍無法消除，此即為停滯區。

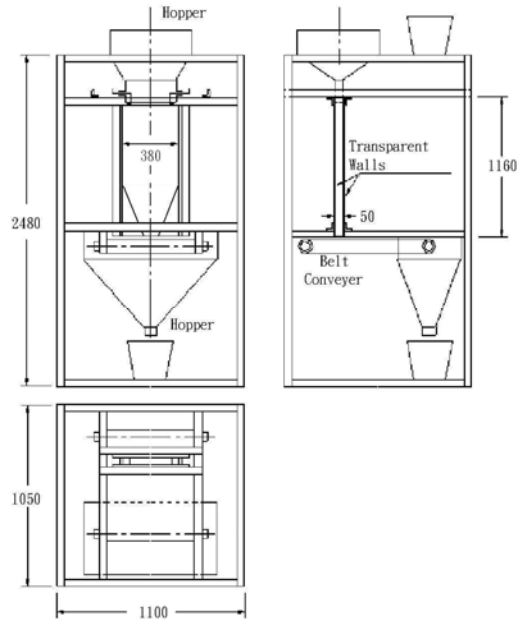
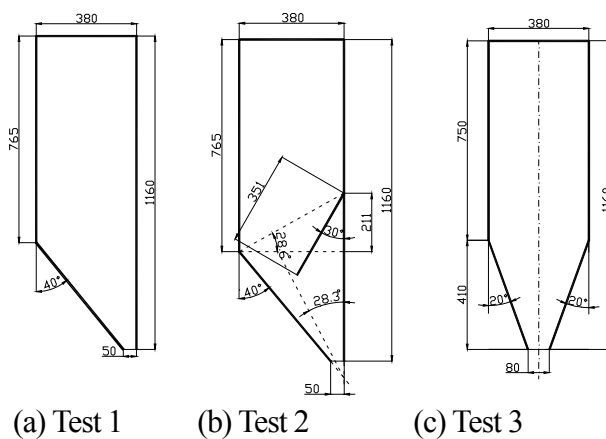


圖 3 二維顆粒床過濾設備示意圖

依據濾材流動性質資料庫所設計的二維顆粒床系統，其 8 種不同邊界條件之過濾器床體的外型及幾何配置如圖 4 所示<sup>[28,29]</sup>。利用所規劃的幾何外形及觀測邊壁之摩擦效應對濾材流動之影響進行相關濾材流場實驗，驗證顆粒濾材在內部流動的現象是否順暢，以便讓流動式顆粒床過濾器根據這樣的設計產生最佳化的流動現象。



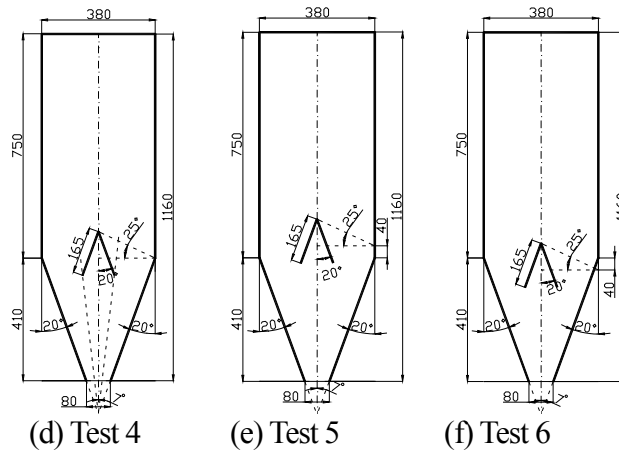


圖 4 二維顆粒床過濾器設計與配置<sup>[28, 29]</sup>

### 3.2 執行成果與討論

圖 5 至圖 11 為各設計配置之流場型態。追蹤粒子採用黑色之濾材，由此可清楚看出床體中濾材流動的型態，濾材質量流率為 323 g/min。濾材持續流動測試過程中，將於濾材入口處不斷填充原色濾材以維持濾材流動的連續性；在過濾器結構上，圖 5 至圖 7 採用壓克力材質的觀測壁面，而圖 8 至圖 11 則採用玻璃材質的觀測壁面。圖 5 為 Test 1 幾何外型之連續運轉 5 小時的流場型態圖，其結果顯示，這些仍然無法被帶走的追蹤粒子所形成的停滯區面積，總共是原流場面積的 53 %；換言之，停滯區域大於流動區面積。根據相關文獻顯示，在床體中置入流動校正單元(flow-corrective elements)設計<sup>[30,31]</sup>可有效解決儲槽中停滯區的形成，及改善濾材的流動型態。而在顆粒床過濾器濾材流場型態研究中，置入流動校正單元(flow-corrective elements)設計，相關文獻結果顯示能有效消除靜止區的形成<sup>[17,27]</sup>；因此，在下組測試將於系統中置入流動校正單元，以解決停滯區產生的現象。

圖 6 為 Test 2 幾何外型於二維顆粒床過濾器之右側加入一流動校正單元的配置，以改變濾材於顆粒床體中的流動方向，以期減少停滯區域。由圖示得知，置入流動校正單元之幾何配置，濾材流動顆粒之流動區域主要分佈於右側；因此，當右側端之流動顆粒無法利用顆粒之間剪力傳達至床體左側端，使靠近流場左側之追蹤粒子無法被帶離流出床體，因而產生停滯區。直到連續流動 5 小時後，整體停滯區總面積仍有 39 %，但遠比沒有流動校正單元的配置(Test 1)來的小；整體而言，此結果證實流動校正單元的配置方式可有效的改善停滯區的產生。

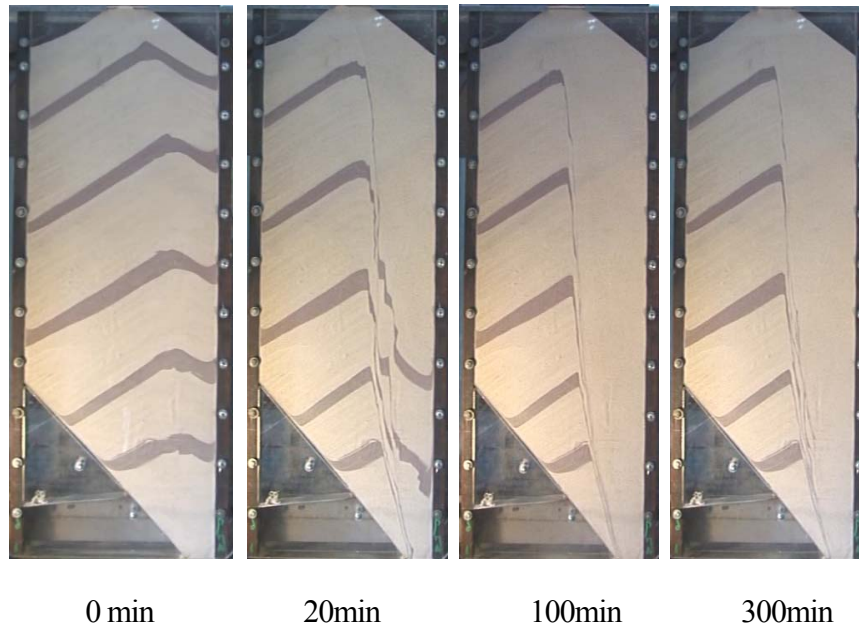


圖 5 Test 1 幾何外型之濾材流場型態

經由上述之不對稱幾何外型的濾材流場測試可得知，顆粒床體之濾材流場主要可分成流動區與停滯區，在置入一流動校正單元後，雖可減少停滯區的面積，但濾材流場還是存在著相當大面積的停滯區；因此，由測試結果判斷有可能為二維過濾器系統上下方開口不一致所導致。本階段的測試將改變過濾器系統之不對稱幾何外型的設計，以解決過濾器系統所產生的流場停滯區現象。圖 7 為 Test 3 對稱幾何外型之過濾器系統設計示意圖，系統幾何配置採用兩側葉片傾斜角  $20^\circ$  為濾材出口端的設計；測試結果顯示，在 350 min 時，其床體中濾材流動達到穩定狀態。因此，由圖 7 可以看到系統中的濾材流動主要都在中間的區域，左、右半邊則為微小的滯留區。整體停滯區總面積為 26.57 %，與不對稱幾何外型的停滯區相比，已明顯下降許多。

為探討前後壁面對於濾材流動及流場停滯區的影響，因此本階段測試將採用玻璃材質為觀測壁面。圖 8 為以玻璃材質為觀測壁面之濾材流場圖，濾材質量流率為 323 g/min；首先將原色濾材充滿於床體中，並於過濾器床體之上方置入黑色追蹤濾材，在濾材流動期間，將填入黑色追蹤濾材 7 次(每隔 10 min 填入 1 次)，並在完成此階段後，再持續填入原色濾材 3 小時，以維持濾材流動之連續性。與壓克力壁面相比(Test 3 濾材流場型態結果)，由於玻璃材質具有小的壁面摩擦係數，因此可明顯降低停滯區的面積(流場測試進行至 240 min，停滯區為 12.03%)；另一方面，在濾材流動過程中，可得到均勻且對稱的濾材流動流場(由左、右停滯區的面積比較)。



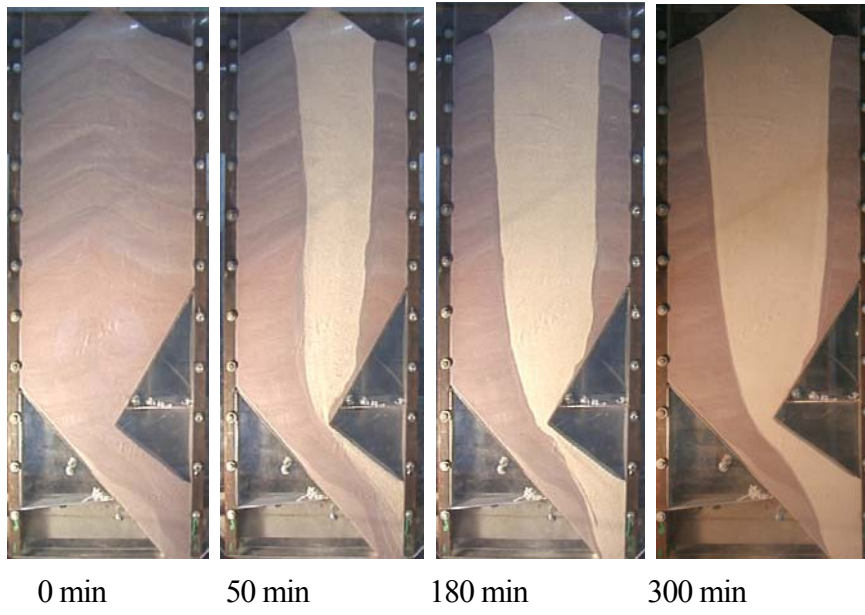


圖 6 Test 2 幾何外型之濾材流場型態

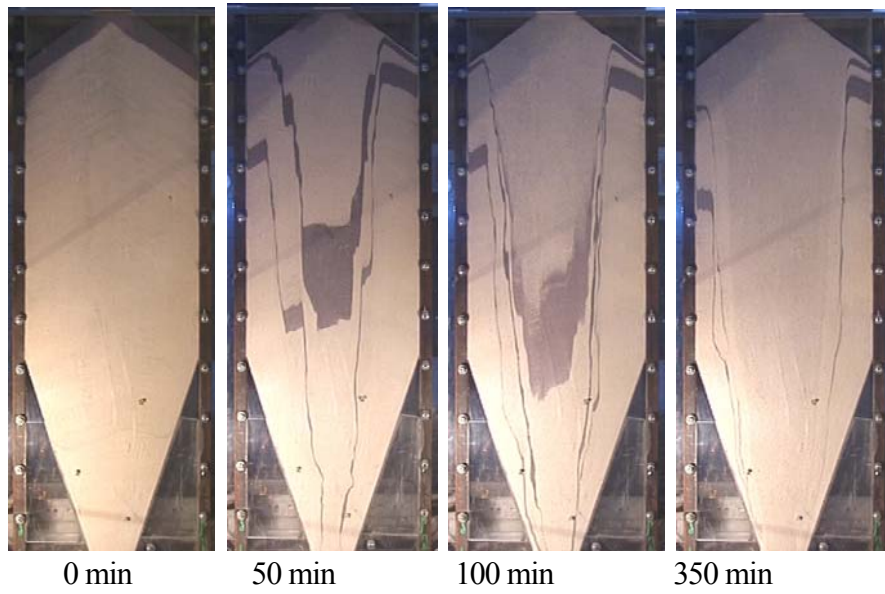


圖 7 Test 3 幾何外型之濾材流場型態

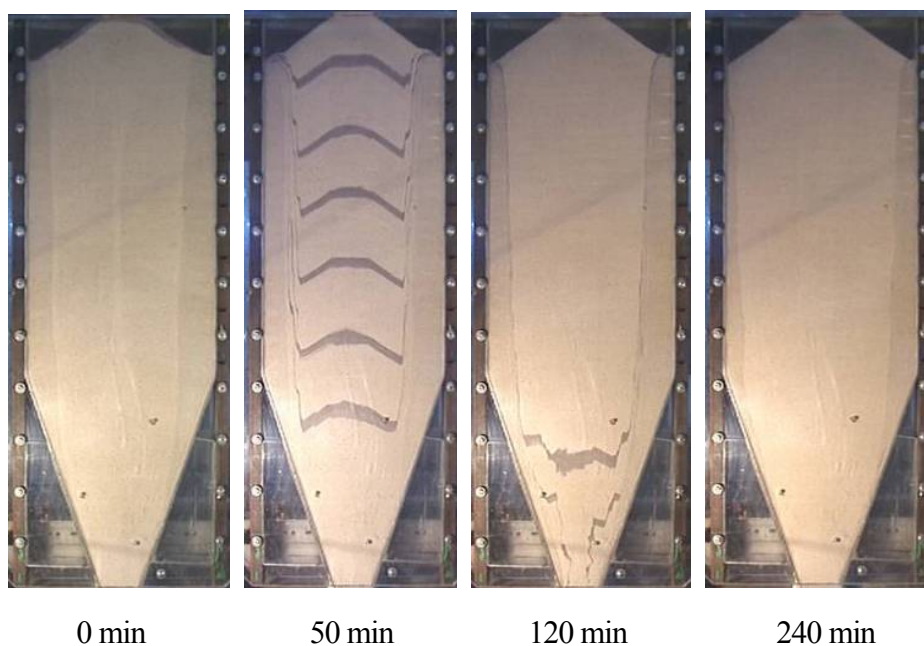


圖 8 Test 3 幾何外型之濾材流場型態(採用玻璃壁面)

圖 9 為 Test 4 幾何配置之濾材流場型態，根據 Johanson 所提出的設計理論置入流動校正單元的幾何配置，以非常迅速地消除顆粒床體之濾材流動型態的停滯區。測試結果顯示，連續流動 63 分鐘時，其床體中黑色追蹤濾材已全部流光，代表 Test 4 的幾何配置可完全的消除濾材流場之停滯區。

為了驗證 Johanson 所提出的設計理論之正確性，接下來將進行上移與下移流動校正單元的濾材流場型態測試。圖 10 為 Test 5 上移流動校正單元 4 cm 之測試，濾材連續流動經過 360 分鐘後，流場之停滯區可完全消除。雖於流動校正單元上移 4 cm 仍可消除完全停滯區，但其達成的時間比 Johanson 所提出的幾何配置要來的長。

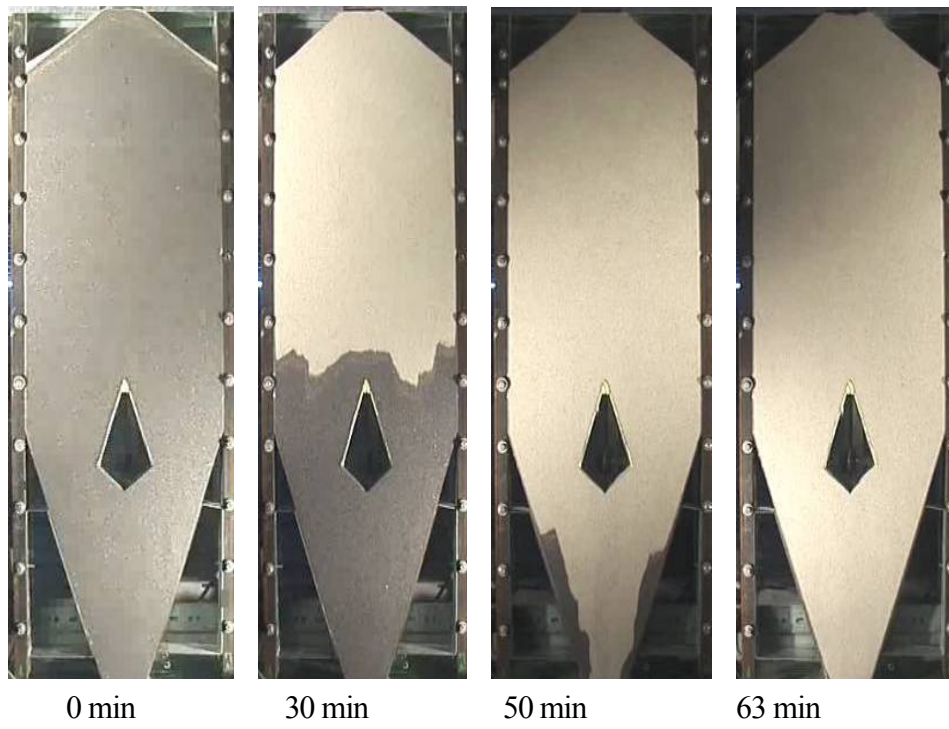


圖 9 Test 4 幾何配置之濾材流場型態

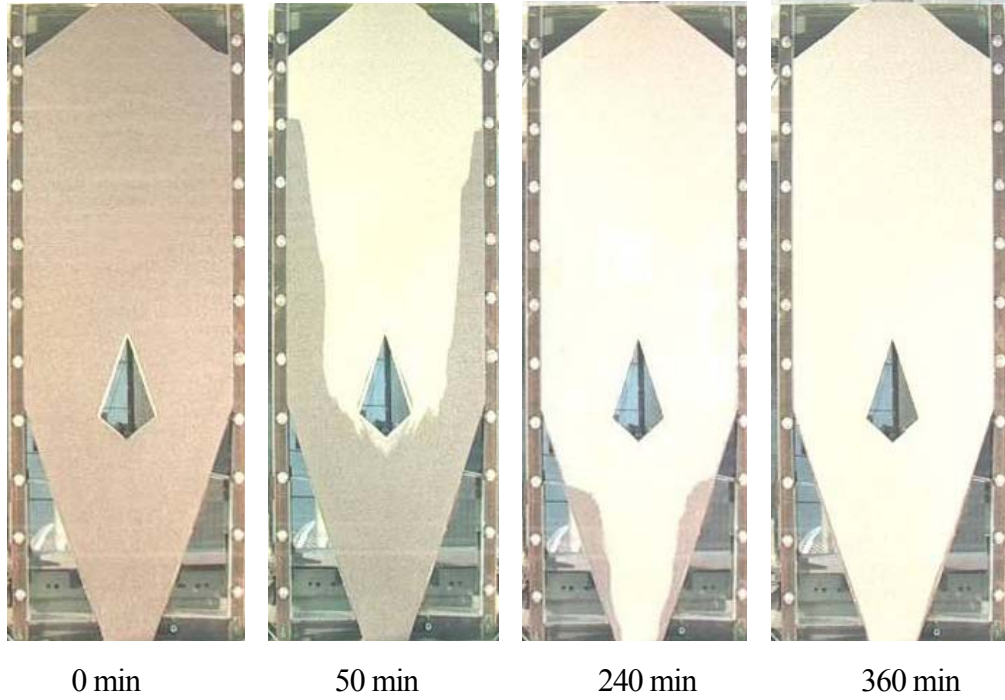


圖 10 Test 5 濾材流場型態(流動校正單元上移 4 cm)

如圖 11 所示，下移 4 cm 之幾何配置將使流動校正單元與兩側斜角間的距離變小。依據質量守衡，在流動面積縮小的情況下，顆粒體的流動速度勢必上升，由於濾材顆粒體的流動速度過快，造成剪應力無法傳到兩側靠近葉片的顆粒體，時間不到 60 分鐘，追蹤顆粒始流出顆粒床中，但在兩側斜角轉折處上仍有流場停滯區的產生。顆粒床體的停滯區隨著時間增加而慢慢遞減，經過 600 分鐘的實驗後，發現床體中停滯區可完全消除。雖然濾材連續流動 600 分鐘後，仍可將黑色追蹤粒子全部帶走，但其達成時間最長(與原設計理論位置及上移 4 cm 的測試比較)。

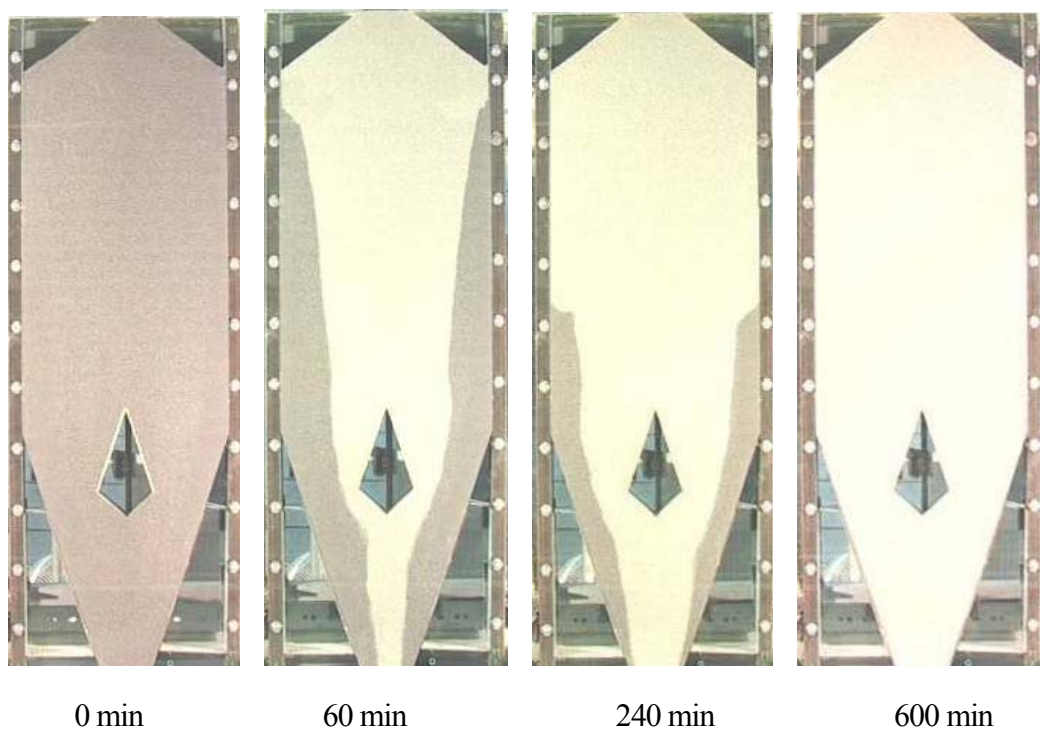


圖 11 Test 6 濾材流場型態(流動校正單元下移 4 cm)

Test4、Test5、Test6 三組幾何配置的停滯區可完全消除，當流動校正單元於理論位置時，在 63 分鐘時可完全消除流場的停滯區。但本文流場測試設備與 Johanson 理論所提出的測試邊界條件不同，因為該理論的應用於邊界條件為前後壁面相距無限遠之理想流場，濾材流場的顆粒流動將不受前後壁面摩擦力之影響。但是應用於實際狀況，前後壁面與流動濾材間會產生摩擦力，故除了理論的預測位置外，需增加上移 4 cm 與下移 4 cm 流動校正單元來驗正其影響性。測試結果發現，在上移及下移的最終結果都可消除停滯區，但會增加停滯區停留於顆粒床體中的時間。

圖 12 為不同幾何配置之濾材流場速度向量分佈圖，圖 12(a)為 Test 3 對稱



型幾何外型搭配玻璃壁面之參數條件的濾材流場速度向量分佈，由圖示可以得知床體流場的兩側端，存在著大範圍的濾材顆粒停滯區。當濾材流入顆粒床時，因顆粒間及顆粒與壁面互相摩擦而造成流速變慢。仔細觀察，雖然受到摩擦力影響，兩側的濾材仍會被中間之顆粒體帶動，不會形成永久停滯區。另濾材流場的中間流速比起兩側端部份，有很明顯的差異，且濾材在接近出口端時，因在此處開口截面積較小，顆粒體流動速度快，其垂直和水平速度變化均較大，速度變化較為劇烈，流場較為混亂，顆粒與顆粒間的摩擦力造成顆粒的翻滾現象，表面的顆粒更容易沒入顆粒床中，使得部份追蹤粒子無法判別。

圖 12(b)為 Test 4 幾何配置之濾材流場速度向量分佈結果分析，當濾材與流動校正單元產生碰觸時，其濾材顆粒體會延長濾材流動的流線，並將在壁面上的濾材顆粒帶走，因此其流動校正單元之設計能有效消除停滯區。

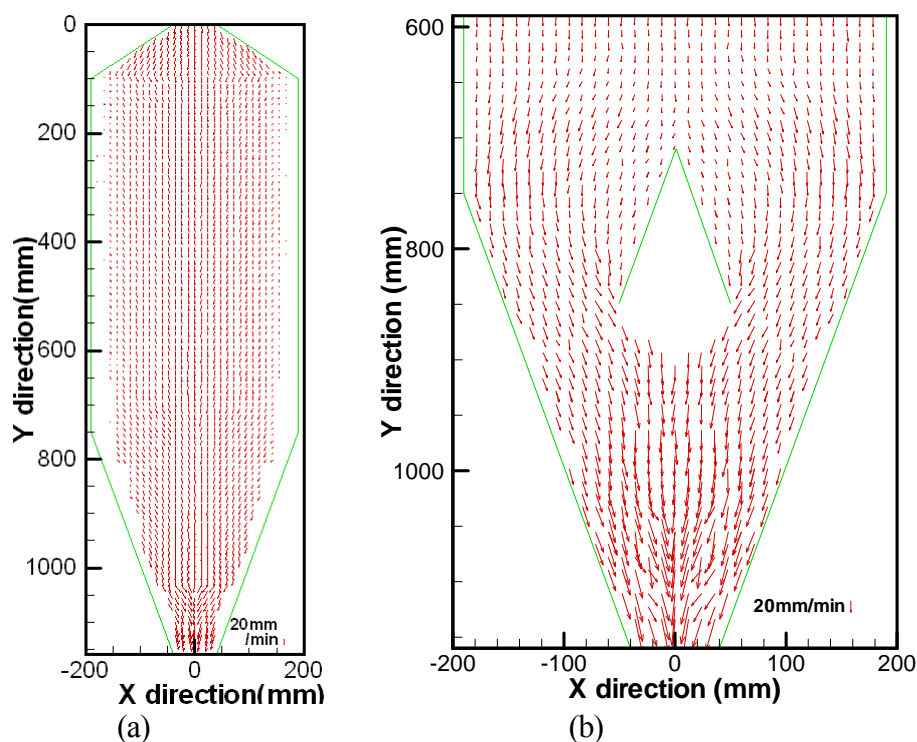


圖 12 不同幾何配置之濾材流場速度向量分佈圖

#### 四、結論

本篇研究之目的在提供未來工業界實際設計流動式顆粒床過濾器的參考，除使用實際濾材石英砂，亦針對該種濾材在不同幾何外型之過濾器，進行

各項流動性質之測試、分析與比較，然後根據所得之實驗結果再調整流場幾何外型配置。然而，雖然停滯區的存在會造成降低整體濾材流場之流動性質，但相反的，在流動非常順暢之石英砂濾材流場，若經過長時間流動，亦會對流場壁面產生極大之磨耗，而可能需要停機維修甚至更新壁面。因此，耐磨耗及可長時間觀察及紀錄之壁面材質也是流場實驗所必須考量之因素。

各種流場幾何配置都有其優缺點，若以對稱形幾何流場外型來說，的確可以在最少時間中，有效的降低停滯區的面積。非對稱形的外型幾何配置，雖然無法降低停滯區的面積，但其非對稱形的幾何外型可提供流場左右兩邊不同的幾何配置；因此，未來若加入適當之流動校正單元，可應用於左右不同流動性質之濾材流場及提供複合式過濾器之研發參考。

## 五、參考文獻

1. Ji, Z., Shi, M., Ding, F., Transient flow analysis of pulse-jet cleaning system in ceramic filter, *Powder Technology*, 2004, 139, 200.
2. Sasatsu, H., Misawa, N., Shimizu, M., Abe, R., Predicting the pressure drop across hot gas filter (CTF) installed in a commercial size PFBC system, *Powder Technology*, 2001, 118, 58.
3. Zakkay, V., Gbordzoe, E. A. M., A review of hot-gas cleanup devices for PFBC, in: *Combustion en Lechos Fluidizados, Program Comett Comunidad Economical European*, Zaragoza, Spain, 1989, 216.
4. Wilson, K. B., Hass, J. C., Moving granular bed filter development program, In *Proceedings of the Eleventh International Pittsburgh Coal Conference*, Pittsburgh, PA, 1994, 131.
5. Ahmadi, G., Smith, D. H., Gas flow and particle deposition in the hot-gas filter vessel of the Pinon Pine project, *Powder technology*, 2002, 128, 1.
6. Stringer, J., Leitch, A. J., Ceramic Candle Filter Performance at the Grimethorpe (UK) Pressurized Fluidized Bed Combustor, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114, 371.
7. Choi, J. H., Seo, Y. G., Chung, J. W., Experimental study on the nozzle effect of the pulse cleaning for the ceramic filter candle, *Powder Technology*, 2001, 114, 129.
8. Dittler, A., Ferer, M. V., Mathur, P., Djuranovic, P., Kasper, G., Smith, D. H., Patchy cleaning of rigid gas filters—transient regeneration phenomena

- comparison of modelling to experiment, *Powder Technology*, 2002, 124, 55.
9. Kamiya, H., Deguchi, K., Gotou, J., Horio, M., Increasing phenomena of pressure drop during dust removal using a rigid ceramic filter at high temperatures, *Powder Technology*, 2001, 118, 160.
  10. Kuo, J. T., Smid, J., Hsiau, S. S., Chou, C. S., Granular Bed Filter Technology, Program National Science Council, R.O.C.(A), 1998, 22, 17.
  11. Kuo, J. T., Smid, J., Hsiau, S. S., Wang, C. Y., Chou, C. S., Stagnant zones in granular moving bed filters for flue gas clean-up, *Filtration & Separation*, 1998, 35, 529.
  12. Everaert, K., Baeyens, J., Creemers, C., Adsorption of dioxins and furans from flue gases in an entrained flow or fixed/moving bed reactor, *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, 2003, 78, 213.
  13. Sarra, A., Miller, A. L., Shadle, L. J., Experimentally measured shear stress in the standpipe of a circulating fluidized bed, *AIChE Journal*, 2005, 51, 1131.
  14. Duo, W., Seville, J. P. K., Buchele, N. F. H., Cheng, C. K., Patchy cleaning of rigid gas filters: II. Experiments and model validation, *Chemical Engineering Science*, 1997, 52, 153.
  15. Zhao, J., Huang, J., Wu, J., Fang, Y., Wang, Y. Y., Modeling and optimization of the moving granular bed for combined hot gas desulfurization and dust removal, *Powder Technology*, 2008, 180, 2.
  16. Smid, J., Hsiau, S. S., Peng, C. Y., Lee, H. T., Moving bed filters for hot gas cleanup, *Filtration & Separation*, 2005, 42, 34.
  17. Chou, C. S., Chen, S. H., Moving granular filter bed of quartz sand with louvered-walls and flow-corrective inserts, *Powder Technology*, 2007, 172, 41.
  18. Macias-Machin, A., Cuellar, J., Estevez, A., Jaraiz, E., 1992, Simple design of a crossflow moving bed heat exchanger-filter, *Filtration & Separation*, March/April, 155.
  19. Song, X., Wang, Z., Jin Y., Gong M., Investigations on hydrodynamics of radial flow moving bed reactors, *Chemical engineering & technology*, 1993, 16, 383.
  20. Tanabe, E. H., Barros, P. M., Rodrigues, K. B., Aguiar, M. L., Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters, *Separation and purification technology*, 2011, 80, 187.
  21. Chen, Y. S., Hsiau, S. S., Cake formation and growth in cake filtration, *Powder*

- Technology, 2009, 192, 217.
22. Chen, Y. S., Hsiau, S. S., Lai, S. C., Chyou, Y. P., Li, H. Y., Hsu, C. J., Filtration of dust particulates with a moving granular bed filter, *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171, 987.
  23. Chen, Y. S., Hsiau S. S., Lee, H. Y., Chyou, Y. P., Hsu C. J., Size separation of particulates by trommel screen system, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2010, 49, 1214.
  24. Chen, Y. S., Hsiau S. S., Lee, H. Y., Chyou, Y. P., Hsu C. J., Filtration of dust particulates using a new filter system with louvers and sublouvers, *Fuel*, 2012, 99, 118.
  25. Hsiau, S. S., Smid, J., Wang, C. Y., Kuo, J.T., Chou, C. S., Velocity profiles of granules in moving bed filters, *Chemical Engineering Science*, 1999, 54, 293.
  26. Hsiau, S. S., Smid, J., Tsai, F. H., Kuo, J. T., Chou, C. S., Velocities in moving bed filters, *Powder Technology*, 2001, 114, 205.
  27. Hsiau, S. S., Smid, J., Tsai, F. H., Kuo, J. T., Chou, C. S., Placement of flow-corrective elements in a moving granular bed with louver-walls, *Chemical Engineering and processing*, 2004, 43, 1037.
  28. Smid, J., Hsiau, S. S., Chyou, Y. P., Huang, T. C., Liu T. C., Flow patterns and velocity fields in two-dimensional thin slice panel with flow-corrective insert, *Advanced Powder Technology*, 2012, 23, 548.
  29. Hsu, C. J., Liu, T. C., Hsiau, S. S., Chyou, Y. P., Chen, Y. S., Smid, J., The investigation of flow pattern in 2-stage dual-hopper, 中華民國力學學會第三十四屆全國力學會議論文集，2010年，雲林。
  30. Johanson, J. R., The placement of insert to correct flow problems, *Powder Technology*, 1968, 1, 328.
  31. Johanson, J. R., Kleysteuber, W. K., Flow-corrective inserts in bins, *Chemical Engineering and Processing*, 1966, 62, 79.