

結合旋風集塵器與靜電集塵器對改善 飛灰總收集效率之研究

陳啟仁*、王鳳生**、鄭曼婷***

摘要

本研究採用旋風集塵器結合靜電集塵器收集飛灰塵粒。飛灰濃度介於 $0.16\sim 1.35\text{g}/\text{m}^3$ 之間。氣體的流量控制在 $15.8\text{m}^3/\text{min}$ 到 $44.3\text{m}^3/\text{min}$ 之間。實驗分別在高電壓及無電場情況下進行。以期了解靜電力對旋風集塵器收集飛灰效率之影響。

實驗結果顯示，靜電旋風集塵器的總收集效率比起旋風集塵器有很大的改善效果，尤其在低流量時更是高達 98% 以上。此外，由於流量及濃度增大後造成的膠凝作用，反彈及揚起作用亦是影響飛灰去除效率的因素。高濃度時，飛灰會有膠凝作用而使旋風機的去除效率提升。高流量時，反彈及揚起效應增加，在高下灰量的配合下，此一效應明顯地降低旋風集塵器及靜電旋風集塵器的去除效率。

【關鍵字】

1. 旋風集塵器 (Cyclone)
2. 靜電集塵器 (Electrostatic Precipitator)

*大仁藥專環境工程衛生科講師、中山大學企業管理研究所博士班研究生

**中山大學企業管理系教授

***中興大學環境工程系教授

一、前　　言

旋風集塵器為應用旋轉氣流的離心力，將微粒從載塵氣流中分離出來的一種裝置。自從 1886 年第 1 台旋風集塵器被設計出來後，已被廣泛地運用在各種工業上，至今雖已超過 100 年時間，仍然是最為普遍被使用的除塵設備之一 (Doerschlag, 1977)。其理由是旋風集塵器造價便宜、操作簡單、可處理高溫、高壓及高濃度氣體，沒有移動部位 (Moving Part)、易於維修、建造容易、適應大範圍的操作條件等特性 (Heumann, 1991; Dirgo, 1985; Parker, 1981)。但是旋風集塵器的缺點為對於小粒徑之塵粒收集效率不高 (Leith, 1973)。雖然如此，此裝置還是普遍被應用於工業界粒狀物去除系統之前處理設備，以減輕主要處理設備之負荷。

除了旋風集塵器外，其它常用的除塵設備包括重力沈降槽、靜電集塵器、濕式洗塵器及袋式集塵器。其中重力沈降槽設備簡單、維修容易，但是佔地面積大且效率差；而靜電集塵器雖然除塵效率高，然其建造成本昂貴；濕式洗塵器的洗塵效率則隨壓損加大而增加，但有廢水再處理的問題；袋式集塵器收集效率雖高，但是其缺點包括濾袋容易起火燃燒，不能處理水性物質及壓損大等問題。大致而言，旋風集塵器的效率僅高於重力沈降槽，它是屬於一種較低效率的除塵設備，過去關於旋風機的研究多著重於探討其除塵機制及除塵效率的提升方法 (Koch, 1977)。由於旋風集塵器是靠慣性力來去除顆粒，對小粒徑顆粒而言，其慣性力小，故去除效率低。而通常為了提高效率，就必須提高速度，而導致壓損的增加，亦即操作費用的升高。因此，旋風集塵器的最佳化便應運而生。最佳化的目的為在固定可接受的壓損值下，藉著改變及調整各種結構參數來使得旋風集塵器的收集效率達到最高。但是，對低於 10 微米以下之收集效率仍然很差。面對目前環保意識日強及污染排放標準日趨嚴格，設計最佳空氣污染防治設備成為最主要課題之一。改善集塵設備的方法包括幾何形狀之改變、控制操作條件及防止被收集的塵粒再反彈或再逸入氣流中。然而，這些改善措施皆僅就旋風集塵器內部做調整，使其離心力發揮至最大效用，其改善效果有限。

提昇旋風機收集效率可在機內加上電場，亦即同時利用離心力和靜電力來做為

除塵的機制，藉此希望能改善小顆粒收集效率不佳之缺點。目前有關靜電旋風集塵器收集塵粒效率的實驗數據仍然非常缺乏，而且有關膠凝效應（Agglomeration Effect）對粉塵收集效率影響僅有 Mothes 和 Loffler (1985) 提出當粉塵濃度愈高時去除效率會改善，至於膠凝作用對靜電旋風機收集效率的影響至今尚未曾探討過。本研究是以實驗方式探討靜電旋風集塵器收集飛灰效率。飛灰來源取自興達火力發電廠，所使用的旋風集塵器為工業上採用的多管旋風集塵器之單體。此類型的操作性能及收集效率甚少有完整詳細的資料，本研究結合旋風集塵器與靜電集塵器對收集飛灰之效率改善作更進一步地探討，論文內容除前言外，全文依序進行旋風集塵器之特性、旋風集塵器之去除效率、靜電旋風集塵器之特性、實驗設備與方法、結果與討論，最後是結論。

二、旋風集塵器之特性

大部分由氣流中除去顆粒所用之離心分離器是不含有移動部位的。其典型代表為圖 1 中所示之旋風集塵器，其係由一具有錐形底部(Conical Bottom)之直立圓筒，一接近頂部之入口，以及一在錐底處之粉塵出口所組成。出口管延伸入圓筒內，以防止空氣由入口至出口之短路現象(Short Circuiting)。進入旋風集塵器之載塵氣流，沿一螺旋路徑 (Spiral Path)，繞旋風集塵器之圓筒本體往下移。在漩渦 (Vortex) 中產生之離心力，具有使粒子徑向地移向器壁之傾向，且到達器壁之粒子往下滑落，掉入錐內而被收集。旋風集塵器基本上為一沈降裝置，在其內部利用一徑向作用之強大離心力取代垂直作用之較弱重力。

旋風集塵器被很廣泛地運用於各種工業上，而根據不同的須要設成各種不同的型式。一般而言，旋風集塵器的設計分成兩大類 (Aklyama, 1986)，一種為同向流式旋風機 (Uniflow Cyclone)，如圖 2 所示，載塵氣流以水平方向進入漩渦管 (Vortex Tube) 後被固定於旋風集塵器內的葉片強迫成為旋轉氣流，懸浮顆粒被離心力拋向管壁而被介於漩渦管和出口管之間的間隙所收集，而處理過後較乾淨的空氣則由中間的同心管排出，通常同向流式旋風機在實用上設計成多階段而予以串聯，亦即由

第一段所處理過的氣體作為第二段之入口氣體，如此往下游移動，氣體則愈來愈乾淨。此類型的旋風集塵器之優點包括：1.分離功能僅和氣體流量有關而和其裝配之零附件無關。2.不須特別的維修保養。3.可處理高濃度的廢氣。4.較少發生阻塞現象。5.壓損較逆流式 (Reverse Flow) 旋風機小。6.旋風集塵器各部零附件不會被裝置的方位和氣流方向所影響。7.較無像逆流式旋風機有洩漏現象。另一種為較普遍傳統的逆流式旋風集塵器。載塵氣流進入旋風機後旋轉向下，顆粒被附著在壁，而氣流則朝相反方向離去。此類型的旋風機可分為二種，一種為切線型，另一種為軸翼型。二者之差別在於產生迴旋運動導流進入集塵器的方法。圖 3 為切線型旋風集塵器，迴旋運動係以一個切線氣體進口產生。長方形螺旋進口通道內壁與圓柱體相切，入口設計成沿著 180 度的旋轉體漸次與之接合。圖 4 為軸翼型旋風集塵器。旋轉氣流是藉著在其內加裝導翼，以和旋風機垂直方向進入的廢氣被導翼強迫成為螺旋氣流。

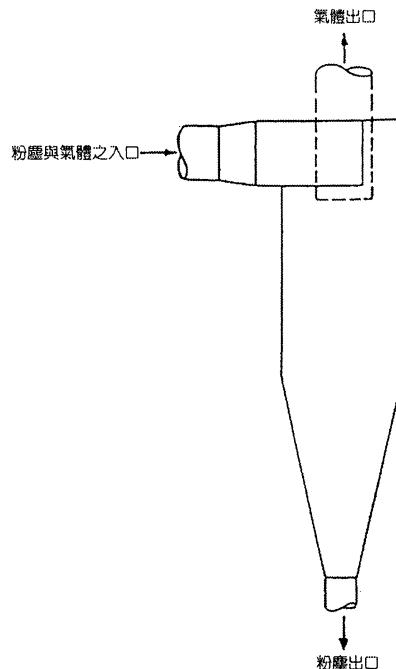


圖 1 旋風集塵器示意圖

44 結合旋風集塵器與靜電集塵器對改善飛灰總收集效率之研究

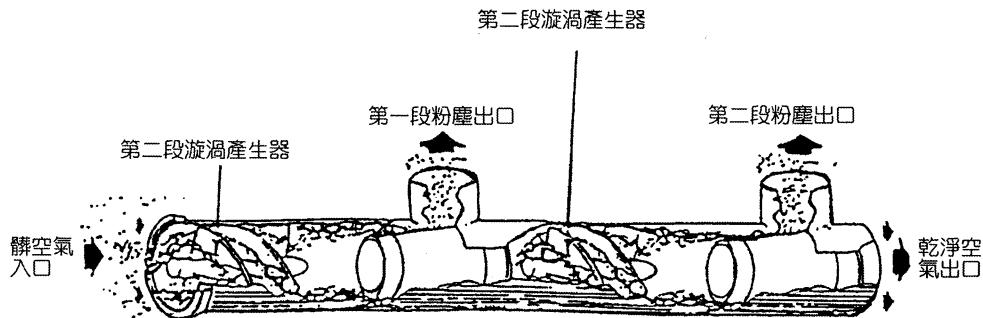


圖 2 同向流式旋風集塵器

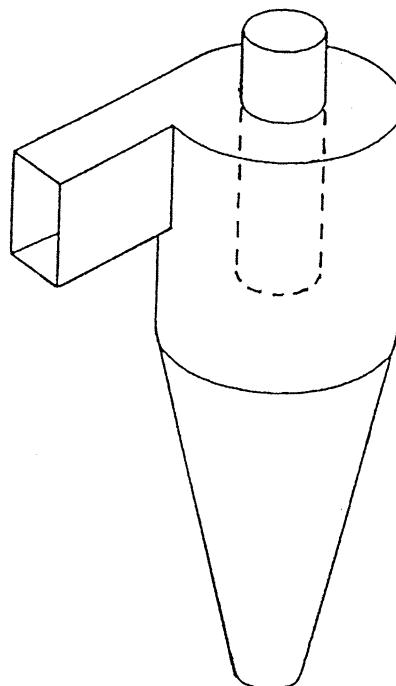


圖 3 切線型旋風集塵器

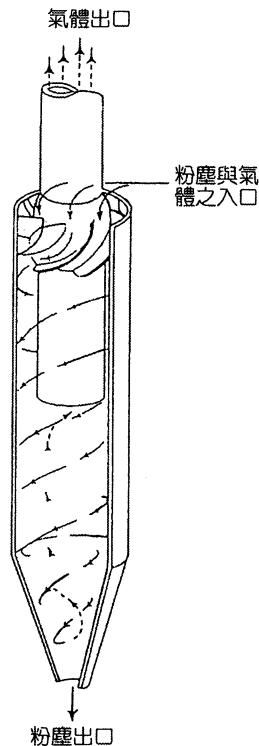


圖 4 軸翼型旋風集塵器

三、旋風集塵器之去除效率

旋風集塵器之分級效率定義為對任一特定粒徑之微粒的去除效率。已經有許多的理論被發展來預測其效率，大部份的模式皆考慮到粒徑大小、密度，氣體速度和黏度對收集效率的影響，而對於旋風集塵器的幾何形狀、尺寸大小及粉塵的濃度則較少考慮到 (Dirgo, 1985)。Lapple (1950) 假設粉塵非常均勻地進入旋風集塵器，而在停留時間內從入口寬度一半的地方移動至筒壁，則具有 50% 的收集效率。Lapple 計算此粒徑大小稱為截取直徑 (Cut Diameter)。

46 結合旋風集塵器與靜電集塵器對改善飛灰總收集效率之研究

$$d_{s0} = \left(\frac{9\mu b}{2\pi \rho_p V_i N} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

其中 μ 是氣體黏度， b 是入口寬度， ρ_p 是粉塵密度， V_i 為入口速度， N 則為旋轉圈數。任何一個粒徑的收集效率可以從和 d_{s0} 之比值獲得。Theodore 和 Depaola (1980) 找出效率和 d_{s0} 之關係式為：

$$\eta = \frac{1}{[1 + (d/d_{s0})^{-2}]} \quad (3.2)$$

Barth (1956) 假設在旋風集塵器的中心有一假想的圓柱體，此圓柱體從氣體的出口處一直延伸至旋風分離器的底部。粉塵顆粒在進入旋風機後即繞著此一假想的中心圓柱體旋轉，對大顆粒而言離心力大於拖曳力，故會被拋向牆壁而收集；然而對小顆粒而言，離心力小於拖曳力，所以會被帶至圓柱體內部而被帶至外面無法被收集。Barth 定義一個終端沈降速度其中 Q 是氣體流量， h^* 是旋風機核心高度， V_t

$$V_{ts} = \frac{Qg}{2\pi h^* V_t^2} \quad (3.3)$$

為氣體的切線速度，而任何顆粒之收集效率則決定於其本身的沈降速度和 V_{ts} 的比值

$$V_{ts}/V_{ts} = \frac{\pi h^* V_t^2 \rho_p d^2}{9\mu Q} \quad (3.4)$$

根據實驗結果，Bath 發展出一效率方程式

$$\eta = \frac{1}{[1 + (V_{ts}/V_{ts})^{-3.2}]} \quad (3.5)$$

Leith-Licht (1972) 考慮擾流 (Turbulence) 效應。假設旋風集塵器內部任何高度的粉塵濃度完全且均勻混合。由此導出的效率方程式。

$$\eta = 1 - \exp \cdot [-2(C\Psi)^{1/(2n+2)}] \quad (3.6)$$

$$\rho_p d^2 V_i (n+1)$$

式中的 $\Psi = \frac{\rho_p d^2 V_i (n+1)}{18 \mu D}$ 為各種顆粒及氣體特性之結合，而 C 則為旋風機各個尺寸之結合的常數。式中的 n 是旋風機的漩渦指數。

Dietz (1981) 對 Leith-Licht Model 做修正。Dietz 將旋風集塵器分成三個區域，即入口區、下流區及上流區，並假設由於擾流效應在各個區域內之徑方向的濃度為均一分佈。此外，並假設中心區域和外圍區域的顆粒可相互交換。Dietz

$$\text{Model 計算收集效率 } \eta = 1 - [k_0 - (k_1^2 + k_2)^{0.5}] \times \text{Exp} \left[\frac{-\pi(2S-a)\rho_p d^2 V_i}{18\mu ab} \right] \quad (3.7)$$

式中的 k_0 、 k_1 、 k_2 為顆粒、氣體性質及旋風分離器尺寸大小之函數，S 為出口管長，a 為入口高度。

Mothes & Loffler (1984) 實驗發現在旋風集塵器內粉塵濃度隨位置而改變，並非如 Leith-Licht 所假設，在任一高度之徑方向濃度為均勻分佈。此外，前述各模式完全未考慮濃度對收集效率的影響 (Mothes, 1985)。Muschelknautz、Mothes、Motha、Loffler 曾發現當濃度愈高時去除效率會愈好。Mothes & Loffler 以雷射都普勒速度分析儀 (Laser Doppler Velocity Meter) 測量發現，當入口氣流中粉塵濃度增加時，氣體在分離室中的切線速度會降低。然而由去除效率的量測結果顯示，當濃度增加時去除效率卻呈穩定地增加 (Mothes, 1985)，由實驗指出此現象是由於膠凝 (Agglomeration) 作用所致，亦即對小的顆粒而言，無法藉離心力將之去除，但可被大的顆粒攔截而去除。膠凝作用的有效與否取決於粉塵的濃度，此乃高濃度時，去除效率會提高的原因。Loffler 亦實驗指出，徑方向的濃度分佈，對小顆粒而言幾乎都一樣；而對大顆粒而言愈靠近核心部份濃度愈小，在靠近牆壁的地方濃度會突然升高，這是因為反彈效應所造成。(Mothes, 1988) 更進一步將模式加以改善，考慮再提起 (Re-entrainment) 效應，將旋風機分成 4 個區域。第 4 區域在筒身和漏斗交接的地方，顆粒會因為氣體被轉向而有再揚起現象，此一現象 Ogawa (1984)

曾有相同發現，再揚起的量和流量成正比。

顆粒的收集在旋風集塵器內是很複雜的過程。為了要精確計算，除了上述之因素外尚包括流場及顆粒軌跡的量測和計算，顆粒間交互作用等都必須要了解。由於旋風集塵器內部三度空間的流場很複雜，想要正確地預測顆粒的去除效率非常困難。Lee (1985) 以簡化的經驗式 $d_{50} = K \cdot Q^{-n}$ 來描述去除效率。式中 d_{50} 為收集效率 50% 之粒徑大小， Q 為流量， k, n 則為常數。由於建造及安裝較容易簡單，Vaughan (1988) 曾以小型軸流式旋風機進行測試實驗，結果發現 d_{50} 比傳統切線型小。當流量增加，其分級效率曲線向小粒徑方向移動，而其 d_{50} 和流量之間的關係可以 $d_{50} = K/Q^n$ 來描述。

四、靜電旋風集塵器之特性

Petroll&Langhammer 提出靜電力可用來明顯地提升傳統旋風集塵器的去除效率。Dietz (1982) 在旋風集塵器的中心加入一電極棒，並通入高電壓，使其在徑方向形成一電場。因此若以 Dietz 所發展的旋風集塵器模式的力平衡方程式除了拖曳力和慣性力（離心力）的平衡外，必須在慣性力外再加上靜電力，而靜電力的大小則為電場強度和顆粒所帶電荷的乘積。亦即當外加電場愈強且顆粒荷電愈多的話，靜電力會愈強，去除效率也會愈好，由結果發現在低流量時靜電力為重要的去除機制，對收集效率有明顯增加。當流量增加時其截取直徑會增加。在高流量時，慣性力為主要去除機制，此時靜電力的存在對去除效率並無太大影響。

Buericke (1983) 利用高溫高壓流體化床燃燒後所產生的飛灰，以 45.7 公分直徑的靜電旋風機在外加電壓為 660KV 下做實驗發現，在低流量時去除效率有很大的改善效果，其原因為滯留時間較長所致。在各個粒徑的收集效率皆高於旋風機，但隨著粒徑的增加，其差距會逐漸減少。靜電力和旋風機大小無關，但離心力則會隨著尺寸的增大而減少，進而降低去除效率。由於靜電力和旋風機大小無關，故可以建立較大的靜電旋風機而不會影響其效率。此外靜電旋風機還具有以下優點：1.其價格低廉。2.具有自清能力 (Self-Cleaning Capability)。3.在非滿載時 (火力發電廠)，

溫度和流量會降低，導致入口速度降低，此時對旋風機而言會降低其效率，然而對於靜電旋風機而言卻會提高其效率。

Plucinske (1989) 以一小型的靜電旋風集塵器（直徑 4 公分）在外加電壓 8KV 下對粒徑 0.5~5 微米之微粒做實驗，結果發現電場效應對小顆粒及低流量時有很好之收集效果。對多粒徑分佈 (Polydisperse) 而言未加電場時之總收集效率隨著流量之增加而增加；加上電場後總收集效率隨流量的增加而減少。

五、實驗設備與方法

靜電旋風機的實驗設備如圖 5 所示。實驗設備主要分為五部份，第一部份為飛灰下灰系統，其組件包含一螺旋下灰機和控制器。飛灰的下灰速率可由控制器作精確地控制。飛灰盛裝於下灰機內，於實驗時將控制器打開至一固定值便可產生預期之下灰率(Feeding Rate)，配合風量可得到一定濃度的載塵氣流。第二部份為以鑄鐵為材質之靜電旋風機的本體，包含旋風機的筒身和其下端收集飛灰的漏斗，圓筒直徑為 0.22m，圓筒和錐形管長度分別為 0.55m 和 0.33m，其出口管徑為 0.15m，在出口管正中央垂直懸掛直徑為 0.025m，長度為 1m 之電極棒。電極棒下方針狀電極用以增加微粒充電的效果。第三部份為高壓供電系統，其入口端接 110 V 的電極，於出口端可產生 25KV 的高壓電，而由此高電壓所造成的電場分佈見圖 6。其負極接靜電旋風機的高壓電極棒，正極則接筒身。靜電旋風機內部產生的強大電場將載塵氣流中的粉塵充電而增加其收集效果。第四部份為量測儀器如圖 5 所示，本實驗以雷射粒徑分析儀(Particle Counter-Sizer-Velocimeter)直接在線上 (On-Line) 分析經過旋風機處理及未經旋風機處理之飛灰的濃度及粒徑分佈。第五部份為動力系統，以風扇在管線末端抽氣來產生載塵氣流，流量以變頻器控制。

本實驗所採用的雷射粒徑分析儀 (INSITEC PCSV-P 型) 是利用雷射光散射原理，直接在線上真實的情況及環境中量測顆粒的濃度及粒徑分佈。量測時，當個別單一的顆粒一個接著一個通過雷射光束時，粒徑分析儀量測由顆粒所散射之光強度，以決定載塵氣流中顆粒的粒徑分佈和濃度。雷射粒徑分析儀的能力及特色包括：

50 結合旋風集塵器與靜電集塵器對改善飛灰總收集效率之研究

1.線上測量。2.可同時量測顆粒的粒徑大小、濃度和速度，濃度的測量上限可達 5×10^5 顆/秒。3.量測所須時間很短，在 1 秒鐘由所收集的散射光強度即可得到微粒粒徑分佈的結果。4.可測高溫及高壓下微粒的大小及濃度。操作原理是根據量測單一顆粒經過雷射光的採樣體積(Sample Volume)時所散射出來的光強度。雷射光被聚焦於傳送器(Transmitter)和接收器(Receiver)中央，只有通過此一採樣體積的顆粒，所散射出來的光才會被接收器所收集。接收器所收集的散射光會被聚集在光纖上，然後再傳送到訊號處理機去做分析。訊號處理機所偵測到的光強度和顆粒粒徑有關，經過統計結果便能決定出載塵氣流中的粒徑分佈及濃度大小。

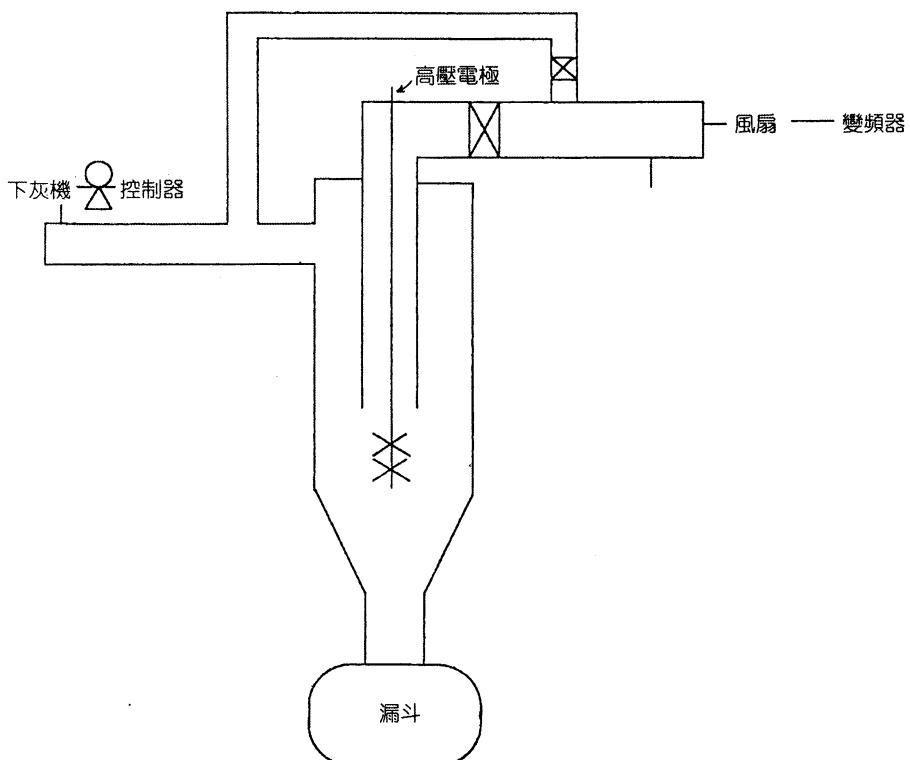


圖 5 靜電旋風集塵器之實驗設備

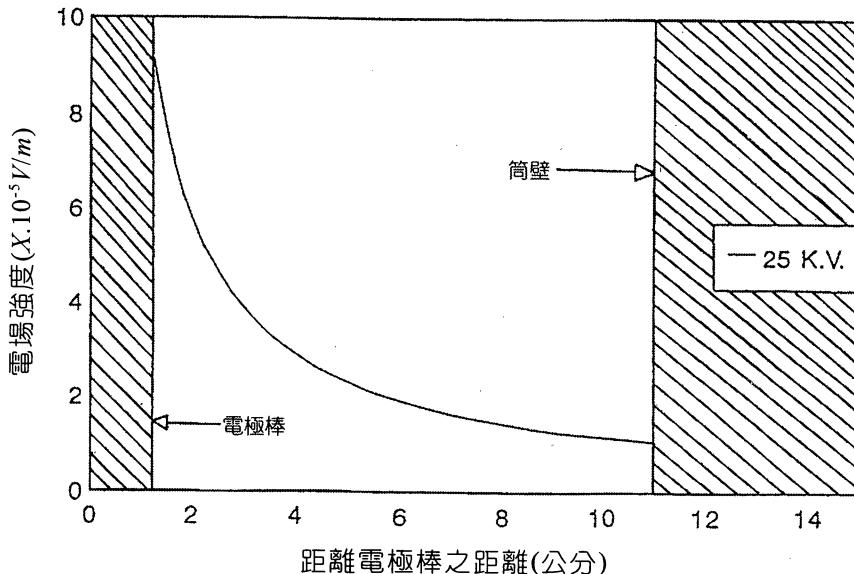


圖 6 靜電旋風集塵器內電場強度之分佈

實驗的方法首先調整控制器旋鈕至一定值，然後打開開關讓飛灰由螺旋下灰機輸送出來，同時以容器承接所下之飛灰，並以天平稱重，連續量測四次取平均值。之後改變控制器旋鈕值，重覆上述步驟便可得到控制器旋鈕值和下灰量間的關係見表 1。控制器的旋鈕值，以 SCR 表示。載塵的氣體其流量是由連接風扇之變頻器來控制，因此必須以實驗方法找出變頻器的頻率值和風量之關係。實驗方法是以皮托管在距離靜電旋風機出口下游處，在一個頻率值下，由管壁開始，每隔 1 公分量測其速度值，直到另一端管壁為止。各個不同頻率在管內速度分佈值如圖 7 所示。由於管內徑方向的速度分佈值幾乎一樣，將這些值予以算術平均即可得到平均流速。由結果得知，本實驗各個不同流速皆高於飛灰在管路內的最低速度（見表 2），因此可避免飛灰沈積在管路內而造成誤差。將平均流速乘上截面積可得到頻率值和流量的關係（見圖 8）。本實驗控制飛灰的下灰量分別為 7.2g/min、13.9g/min 及

52 結合旋風集塵器與靜電集塵器對改善飛灰總收集效率之研究

21.2g/min，流量介於 $15.8\text{m}^3/\text{min}$ 到 $44.3\text{m}^3/\text{min}$ 之間。各種操作條件的飛灰濃度值參考表 3。量測粒徑分佈時假設飛灰在管路內各方向之濃度為均一分佈，故以雷射粒徑分析儀在管路中央由採樣體積所測得的值代表粒徑分佈及濃度的平均值。靜電旋風機的電壓值為 25KV，實驗步驟如下：

表 1 下灰量和控制器旋鈕值之關係

實驗次數	下灰量 (g/min)	SCR							
		0.5	0.6	0.7	0.8	1	2	3	4
1		3.1	7.2	10.8	13.7	20.7	63.7	108.0	191.0
2		3.0	7.3	10.9	13.8	21.3	64.0	107.0	190.0
3		3.8	7.0	11.1	14.1	21.6	62.4	106.0	190.0
4		3.3	7.2	10.9	13.9	21.2	64.2	107.4	193.0
平均		3.3	7.2	10.9	13.9	21.2	63.6	107.1	191.0

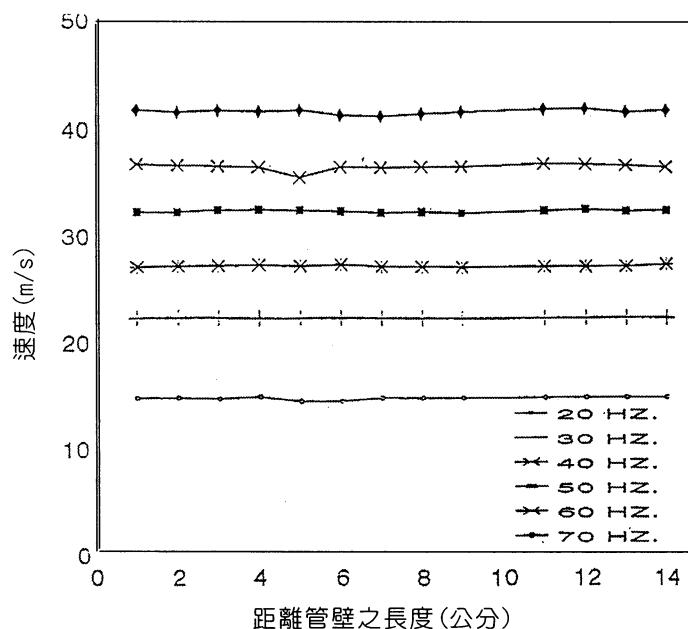


圖 7 管路內氣體之速度分佈

表 2 最低煙道傳輸速度

塵 粒 種 類	最低煙氣速度 (m/sec)	
	光 滑 煙 道	粗 糙 煙 道
Fly Ash 飛 灰	10.6	13.7
Salt Cake 鹽 塊	13.7	16.7
Soda Ash 蘇 打 灰	13.7	16.7
Cement 水 泥	16.7	19.8
Metallic Fines 金屬微粒	16.7	19.8

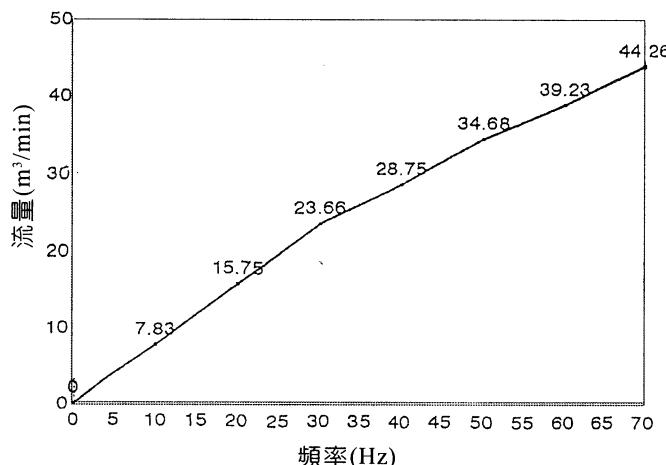


圖 8 變頻器頻率值與流量之關係

- 打開風扇以變頻器控制頻率為 20 Hz，其相對流量為 $15.8 m^3/min$ ，待其穩定。
- 啟動螺旋下灰機 (Dust Feeder) 以控制器控制下灰量為 $7.2 g/min$ ，待其穩定。
- 將旋風集塵器前面的三通閥切至 By Pass 處使載塵氣流未經過旋風集塵器。以架設在旋風集塵器後面的雷射粒徑分析儀測量載塵氣流之粒徑分佈，經過三次測量後取平均值做為代表在此操作條件下之粒徑分佈。
- 將三通閥切換至 By Cyclone 處使得塵氣流經過旋風集塵器，同樣以雷射粒徑分析

儀測量此時的粒徑分佈且予以平均，此時的平均值即為在此操作條件下經過旋風集塵器之粒徑分佈。

- 5.在同樣條件下通入 25K.V.的電壓再以上述同樣的方式量測此時的粒徑分佈，所得平均值即為靜電旋風集塵器在此條件下之粒徑分佈。
- 6.在同樣的下灰量下 (7.2 g/min)，改變頻率(風量)分別在 $23.7\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $28.8\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $34.7\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $39.2\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $44.3\text{ m}^3/\text{min}$ 之流量下重覆上述的步驟。
- 7.改變下灰量至 13.9 g/min ，同上述步驟相同，分別測量在 $15.8\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $23.7\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $28.8\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $34.7\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $39.2\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $44.3\text{ m}^3/\text{min}$ 下，未經旋風機(By Pass)，經過旋風機(By Cyclone)及經過靜電旋風機(By Electrocyclone) 的粒徑分佈。
- 8.改變下灰量至 21.2 g/min ，重覆上述的步驟，可得到在此操作條件下之粒徑分佈。

表 3 各種不同操作條件下之飛灰濃度值

下灰量 (g/min)	飛灰濃度 (g/m ³)	15.8	23.7	28.8	34.7	39.2	44.3
	流量 (m ³ /min)						
7.2		0.46	0.30	0.25	0.21	0.18	0.16
13.9		0.88	0.59	0.48	0.40	0.35	0.31
21.2		1.35	0.90	0.74	0.61	0.54	0.48

六、結果與討論

以雷射粒徑分析儀量測飛灰於未經旋風集塵器，經由旋風集塵器及經由靜電旋風集塵器，在不同的風量及下灰量下之粒徑分佈及濃度大小，並據此分析計算出在各種不同條件下之總收集效率為本研究之重點。而飛灰的粒徑分佈、有無加入電場、風量的大小及飛灰之下灰量則為影響收集效率之關鍵，以下則依序探討在各種不同操作條件下之實驗結果及討論造成此一結果的可能因素。

- 1.以皮托管量測旋風機出口管路橫截面的速度，所得結果如圖 7 所示。在各個不同的頻率值下速度分佈皆非常均勻，顯見此時氣流在管路內為一完全發展狀態。將各個速度值乘上管路截面積即可得到操作條件中的流量值。
- 2.將下灰量除以由上述所得的流量值即可求出飛灰的濃度值，所得結果如表 3 所示，濃度值介於 $0.16 \sim 1.35 \text{ g/m}^3$ 之間。由表中得知，下灰量愈大，流量愈低則所得到的濃度值愈高；反之，下灰量愈小，流量愈大，濃度愈低。
- 3.旋風機的總去除效率在不同的操作條件下如表 4 所示。由表 4 中得知旋風機的總去除效率在流量 $15.8 \text{ m}^3/\text{min}$ ，下灰量 7.2 g/min 時僅有 57.2%，隨著流量的增加而增加，其原因是流量愈大，離心力愈大，故藉由離心力為主要去除機制的旋風機其總去除效率和流量成正比。然而，此一正比關係在下灰量為 21.2 g/min 之操作條件下有一例外，即當流量增加到 $44.3 \text{ m}^3/\text{min}$ 時，總效率反而下降。其原因為在此一操作條件下，顆粒在旋風機內會有反彈及再揚起效應，亦即顆粒在高流量及高濃度條件下，原本應該已被除去的部份會再流入氣流中而無法被收集到，導致總去除效率反而下降。而下灰量對總去除效率的影響則發現下灰量愈大，總去除效率愈高。其原因是因為下灰量愈大，粉塵濃度就愈高，由於膠凝作用，使得總去除效率因而提升。

表 4 旋風機之總去除效率

下灰量 (g/min)	流量 (m^3/min)	15.8	23.7	28.8	34.7	39.2	44.3
7.2	57.2	63.9	66.2	67.8	69.4	73.5	
13.9	63.9	66.0	66.7	69.8	71.3	78.0	
21.2	73.6	76.4	78.9	79.6	82.9	81.8	

56 結合旋風集塵器與靜電集塵器對改善飛灰總收集效率之研究

4. 靜電旋風機的總去除效率在不同的操作條件下如表 5 所示。由表中發現，總去除效率和流量成反比，在所有的下灰量條件下都一樣，無一例外。其理由是因為流量愈大，顆粒在靜電旋風機內的停留時間愈少，荷電的機會也就愈少，故藉由靜電力為主要去除機制的靜電旋風機其總去除效率會和流量成反比。至於下灰量對總去除效率的影響，由表中發現當下灰量為 13.9g /min 時總去除效率最高，在各個流量下皆無例外，其理由是在低下灰量 (7.2g /min) 下，膠凝效用較下灰量為 13.9g /min 時小；而在高下灰量 (21.2g /min) 下，膠凝效用固然最高，但由於此時在靜電旋風機內粉塵濃度最高，故單位顆粒的荷電量會因而下降，對於以靜電力為主要去除機制的靜電旋風機自然會使其總去除效率下降。

表 5 靜電旋風機之總去除效率

下灰量 (g/min)	流量 (m ³ /min)	總去除 效率(%)	15.8	23.7	28.8	34.7	39.2	44.3
7.2		98.2	95.5	88.3	85.1	84.2	83.9	
	13.9	98.9	96.6	91.4	89.8	89.3	87.8	
	21.2	98.6	93.1	89.7	88.6	86.4	86.5	

5. 旋風機及靜電旋風機在下灰量同是 7.2g/min 下比較其總去除效率之差值，其結果如表 6 所示。在流量為 15.8 m³/min 時，兩者之總效率差高達 41.0%，顯見在此操作條件下，靜電旋風機的總去除效率遠勝於旋風機的總去除效率，亦即加入靜電力對去除效率的改善相當顯著。隨著流量的增加總去除效率差逐漸降低，這是因為流量愈高，旋風機的效率提升，而靜電旋風機的效率反而下降故兩者的差距逐漸減少。當下灰量增為 21.2g /min 旋風機及靜電旋風機的總去除效率差值如表 7

所示。在流量為 $15.8 \text{ m}^3/\text{min}$ 時，總去除效率差仍為所有流量中最高者。隨著流量的增加，總去除效率差逐漸減少。但相較於下灰量為 $7.2\text{g}/\text{min}$ 時各別流量的總效率差皆較小，其原因為在高下灰量下旋風機的總去除效率由於膠凝作用而提升，但靜電旋風機的總去除效率則由於電荷密度減少而下降，故在兩種原因加成下造成高下灰量的總效率差小於低下灰量的總效率差。

表 6 不同流量下旋風機與靜電旋風機之總去除效率差（下灰量 $7.2\text{g}/\text{min}$ ）

流 量 (m^3/min)	旋風機 總去除效率(%)	靜電旋風機 總去除效率(%)	總去除效率差 (%)
15.8	57.2	98.2	41.0
23.7	63.9	95.5	31.9
28.8	66.2	88.3	22.1
34.7	67.8	85.1	17.3
39.2	69.4	84.2	14.8
44.3	73.5	83.9	10.4

表 7 不同流量下旋風機與靜電旋風機之總去除效率差（下灰量 $21.2\text{g}/\text{min}$ ）

流 量 (m^3/min)	旋風機 總去除效率(%)	靜電旋風機 總去除效率(%)	總去除效率差 (%)
15.8	73.6	98.6	25
23.7	76.4	93.1	16.7
28.8	78.9	89.7	10.8
34.7	79.6	88.6	9.0
39.2	82.9	86.4	3.5
44.3	81.8	86.5	4.7

6.既有的生產設備如何以最經濟的方式達到有效提昇其生產效率是生產管理上經常面對的課題。由上述的實驗結果顯示，只要在旋風集塵器內裝上電極棒和外接高

壓供電系統即可大幅改善旋風集塵器之缺點，而得到和昂貴的靜電集塵器相差不大的收集效率。因此，本研究可有效提昇空氣污染防治設備之技術效率，可作為日後生產管理者之改善參考。

七、結論

本研究以實驗方式探討將靜電集塵器及旋風集塵器結合後去除飛灰效率之改善情況。結果顯示，靜電旋風機在低下灰量及低流量時總去除效率比旋風集塵器有很大的改善效果，去除效率高達 98%以上。隨著流量的增加及飛灰濃度的減少，總去除效率逐漸下降而逐漸與旋風機的效率接近。因此，靜電旋風機適用於低流量，能量損失小或較低效率之旋風機。

儘管本研究將工業界最常用的空氣污染防治設備即旋風集塵器與靜電集塵器予以結合並以實驗的方式證明對飛灰的去除效率有很大的改善效果。亦由實驗中找出最佳的操作條件。然而，由於缺乏建造成本，操作成本及管理成本等資料及數據，無法進一步就此一新設計的空氣污染防治設備做成本效益分析。未來的研究方向將朝向結合污染防治工程技術及環境管理定出最適的操作條件。

參考文獻

1. Aklyama, T. and T. Marui, Experimental Investigation on Dust Collection Efficiency of Straight-Through Cyclone with Air Suction by Means of Secondary Rotational Air Charge, Industrial Engineering of Chemical Process Design, Dec, pp.914~918, 1986.
2. Boericke, R. R., Electrocyclone for High-Temperature High-Pressure Dust Removal, Journal of Energy, Vol.7, No.1, Jan.-Feb., pp.43~46, 1973.
3. Dietz, P. W., Collection Efficiency of Cyclone Separators, American Institute of Chemical Engineering Journal, Vol.27, No.6, Nov., pp.888~892, 1981.

4. Dietz, P. W., Electrostatically Enhanced Cyclone Separators, Powder Technology, Vol.31, pp.221~226, 1982.
5. Dirgo, J. and D. Leith, Cyclone Collection Efficiency : Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions, Aerosol Science & Technology, Vol.4, pp.401~415, 1985.
6. Dirgo, J. and D. Leith, Performance of Theoretically Optimised Cyclones, Filtration and Separation, March/April, pp.119~125, 1985.
7. Doerschlag, C. and G. Miczek, How to Choose a Cyclone Dust Collector, Chemical Engineering, Vol. 114 pp.64~72, 1977.
8. Gauthier, T. A., Uniflow Cyclone Efficiency Study, Powder Technology, Vol. 62, pp.217~225, 1990.
9. Heumann, W. L., Cyclone Separator : A Family Affair, Chemical Engineering, Jun., pp.118~123, 1991.
10. Koch, W. H. and W. Licht, New Design Approach Boots Cyclone Efficiency, Chemical Engineering, Nov., pp.80-88, 1977.
11. Lee, K. W., J. A. Gieseke and W. H. Piispanen, Evaluation of Cyclone Performance in Different Gass, Atmosphere Environment, Vol.19, No.6, pp.847~852, 1985.
12. Leith, U. and W. Licht, The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collector-A New Theoretical Approach, American Institute of Chemical Engineering Symposium, pp.196~206, 1972.
13. Leith, D. and W. Licht, Cyclone Performance and Design, Atmosphere Environment, Vol.7, pp.527~549, 1977.
14. Mothes, H. and F. Loffler, Investigation of Cyclone Grade Efficiency Using a Light Scattering Particle Size Measuring Technique, The Annual Conference of the GAEF, pp.184~185, 1984.

60 結合旋風集塵器與靜電集塵器對改善飛灰總收集效率之研究

15. Mothes, H. and F. Loffler, Motion and Deposition of Particles in Cyclones, German Chemical Engineering, Vol.8, pp.223~233, 1985.
16. Mothes, H. and F. Loffler, Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators, Chemical Engineering, Vol.28, No.2, pp.231~240, 1988.
17. Ogawa, A., Re-entrainment of Dust from the Dust Layer on the Deposited Dust in the Cyclone Dust Collectors, Particle Science & Technology, Vol.2, pp.305~314, 1984.
18. Parker, R., R. Jain and S. Calvert, Particle Collection in Cyclones at High Temperature and High Pressure, Environmental Science & Technology, Vol.15, No.4, Apr., pp.451~458, 1981.
19. Petty, J. H., Chemical Engineers' Handbook, 5th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 20-81~20-86, 1973.
20. PlucinskiJ., L. Grdon and J. Nowicki, Collection of Aerosol Particles in a Cyclone with an External Electric Field, Journal of Aerosol Science, Vol.20, No.6, pp.695~700, 1989.
21. Theodore, L. and D. V. Paola, Prediction Cyclone Efficiency, Journal of Air Pollution Control Association, Vol.30, No.10, pp.1132~1133, 1980.
22. Vaughan, N. P., Construction and Testing of an Axial Flow Cyclone Preseparator, Journal of Aerosol Science, Vol.19, No.3, pp.295~305, 1988.