

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☐ 成果報告
☒ 期中進度報告

奈米微粒的充電及靜電沈降效率的提升

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2628-E-009-008-MY3

執行期間：96 年 08 月 01 日至 99 年 07 月 31 日

計畫主持人：蔡春進教授

共同主持人：

計畫參與人員：林冠宇、陳暉霖

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、

列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年☐ 二年後可公開查詢

執行單位：交通大學環境工程研究所

中 華 民 國 97 年 5 月 29 日

摘要

靜電集塵器為目前廣泛應用的集塵設備之一，靜電集塵器分為乾式及濕式兩種，但是近年來的研究發現，乾式靜電集塵器有以下缺點：1.堆積的粉塵餅會形成絕緣層、2.在敲擊粉塵餅的過程中使粉塵再揚起而產生細微粒的二次污染、3.有背電暈的現象產生等，以上缺點均會降低集塵效率。而濕式靜電集塵器可解決以上缺點，對於次微米微粒的去除效率也較乾式靜電集塵器高，但濕式靜電集塵器仍有其缺點，如微粒收集表面水流不均勻產生槽道現象，降低洗塵效率。對黏著性粉塵，如油煙微粒的收集效率低，且其對深次微米微粒的收集效率，也仍有待進一步的改善。

本研究之最終目的在於提升靜電集塵器對於深次微米微粒之收集效率，對於一般濕式靜電集塵器所產生之問題，則利用兩片親水性多孔玻璃平板組成微粒收集面，上面塗敷金屬氧化物，以形成均勻水膜，使槽道之現象不會產生，可提升一般微粒及黏著性微粒之收集效率。目前完成的工作為奈米微粒充電器對 10~50 nm 微粒的充電效率測試，平板型濕式靜電集塵器的設計，濕式靜電集塵器內電場分佈及奈米微粒運動軌跡的模擬。

關鍵詞：濕式靜電集塵器、均勻水膜、電暈放電、微粒充電

Abstract

The electrostatic precipitator (EP) is one of the devices widely used to control the particulate pollutants. However, some limits in dry EP were found by previous researchers including: 1. Cakes accumulated on the collecting plates will produce insulating layers. 2. Sub-micron particles re-entrainment will be generated during collecting plates rapping and causes secondary pollution. 3. Back corona. All of the above phenomena will reduce the collection efficiency.

Wet EP may provide high collection efficiency for micron particulates and overcome the problems in dry EP as mentioned above. However, the channeling effect due to non-uniform scrubbing water film on the collecting plates will reduce removal efficiency. Besides, the performance of wet EP for removing Sticky dust and sub-micron particulates needs to be improved.

Experimental study will be conducted in the lab to enhance the collection efficiency of EP for sub-micron particles in this study. Two hydrophilic porous glass plates coated with metal oxide is used as collecting plates in wet EP. Uniform water film on the hydrophilic surfaces is found to improve removal efficiency for sticky particulates without generating channeling effect. So far, we have completed the charging efficiency test of 10-50 nm particles in a nanoparticle charger, the design of the flat plate wet EP, and the simulation of the electric field and particle trajectories in the EP.

Keywords: wet EP, uniform water film, corona discharge, particle charging

1. 前言

近年來奈米微粒已廣泛的應用在紡織、光電、醫藥、生化及環境相關產業上(Smith et al.,

2007)。在製造奈米相關產品的過程中，奈米微粒會經由許多途徑散佈到環境中，如進行產品搬運時奈米微粒會溢散到空氣中，之後再藉由空氣的傳輸及分子擴散進入水體中；產品製程過後所產生的副產物及廢棄物，也可能經由污染防治設備處理後直接排放於水體中(Vicki, 2007)。許多相關研究指出，奈米微粒排放到水體中會對於水中生物產生毒性反應，並間接改變整體生態環境(Oberdörster, 2004; Kashiwada, 2006; Zhu et al., 2006; Lovern and Klaper, 2006; Roberts et al., 2007; Smith et al., 2007)。此外，奈米微粒也會藉由呼吸行為進入人體並沈降在呼吸道中，或是藉由血液及淋巴液傳遞到人體各部器官中(Oberdörster, 2006)對人體造成危害。有鑑於此，如何有效的控制奈米微粒為目前最重要的課題之一。

靜電集塵器為目前廣泛應用的集塵設備之一，藉由靜電力的作用可將帶電微粒有效的收集於電極板上。但是根據微粒的擴散及電場充電機制與電力移動性的理論關係，可發現微粒帶電量會隨著粒徑減小而減少，但小於 $0.1\ \mu\text{m}$ 的電力移動性會增加，而大於 $1\ \mu\text{m}$ 的帶電量會隨著微粒粒徑增大而增加但是電力移動性降低，使得電力移動性在 $0.1\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$ 的範圍最低而呈現一個 U 形的收集效率曲線(Hinds, 1999)。近年來的研究顯示，當微粒粒徑小於數十奈米時，微粒的收集效率不會增加反而降低，這是由於奈米微粒只有部分在靜電集塵器中被充電而無法被收集的緣故。Yoo et al.(1997)發現當微粒粒徑小於 $0.03\ \mu\text{m}$ 時，因為 ESP 內部的局部充電效應，使去除效率隨粒徑變小而降低。Huang and Chen(2002)曾研究奈米微粒的部分充電效率影響收集效率的問題，他們量測微粒之平均帶電量時發現， $50\ \text{nm}$ 以下微粒之平均帶電量均小於一個基本電荷，且隨著微粒的粒徑減少而降低。因此如何提高靜電集塵器對奈米微粒的收集效率，仍有待進一步的研究。

2. 研究目的

為了提高靜電集塵器對於奈米微粒的收集效率，本研究設計了一個高效率的奈米微粒充電器，其內部接地電極壁上施加高速流動的乾淨包覆氣體，以防止帶電微粒在壁上的靜電損失，提高奈米微粒的外部充電效率。

針對靜電集塵器的研究方面，本研究設計一個平板型濕式靜電集塵器，並針對奈米微粒進行收集效率的測試，以改善目前靜電集塵器對於奈米微粒收集效率不佳的問題。目前初步完成的工作項目如下：

- a. 奈米微粒充電器對 $10\sim 50\ \text{nm}$ 微粒的充電效率測試。
- b. 設計一個平板型濕式靜電集塵器。
- c. 模擬平板型濕式靜電集塵器內電壓及電場分佈情況。
- d. 模擬奈米微粒在濕式靜電集塵器內的移動軌跡。

3. 文獻回顧

靜電集塵器分為乾式及濕式靜電集塵器兩種，目前在工業界較為廣用的是乾式靜電集塵器。相較於其他傳統的集塵設備，乾式靜電集塵器的壓損較低，所需消耗的電力較少，且操作簡單(Altman et al., 2001a; Bayless et al., 2004)。但是近年來的研究發現，乾式靜電集塵器之收集板上所堆積的粉塵餅會形成絕緣層，降低電場強度並減少收集效率(EPA, APTI course 413, 1981)，因此在使用一段時間過後，需將收集板上的粉塵餅震落。在敲擊粉塵餅的過程中，會增加粉塵再揚起的機率，而產生一些細微粒($\text{PM}_{2.5}$)的二次污染(Bayless et al. 2004)。此外，當高電阻係數的粉塵附著於收集板上時，會產生背電暈的現象，降低集塵效

率。Chung and Bai (1999)利用單級平板乾式靜電集塵器研究背電量對粉塵收集效率的影響，結果發現在固定電壓、利用增加氣膠濕度以減少微粒電阻係數的操作條件下，微粒收集效率隨著使用時間的增加並沒有明顯下降，但在沒有增加氣膠濕度的情況下，微粒收集效率會隨著使用時間增加而減少，如圖 1 所示。

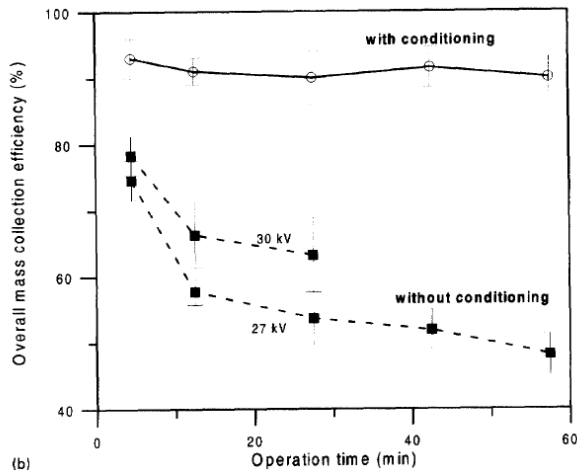


圖 1 乾式靜電集塵使用時間及去除效率的關係(Chung and Bai, 1999)

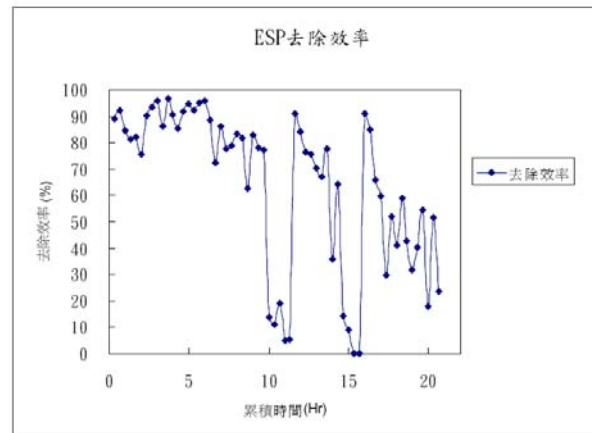


圖 4.1：ESP 去除效率 vs.累積使用時間作圖

圖 2 乾式靜電集塵器背電量及去除效率的關係(羅，2005)

羅(2005)研究以靜電集塵器去除紙錢燃燒產生的粒狀污染物，結果如圖 2 所示，初始運轉時 ESP 可將入口粒狀物(TSP)濃度由 6-392 (平均 83) mg/Nm^3 ，去除至 1-143 (平均 22) mg/Nm^3 ，初始運轉時的 TSP 去除效率為 80-99%，但經幾次運轉後其效率明顯降低，必須再次清洗集塵板，方可提升效率，但隨著清洗次數之增加，ESP 之使用時間愈短，結論為 ESP 不適於金紙焚化排氣除塵。

有關粉塵負荷於收集板時影響收集效率的問題，Huang and Chen (2003)曾對一個 12 cm (寬) $\times$ 30 cm (長) $\times$ 7.6 cm (高)的電極線—平板式單極靜電除塵器進行測試研究，空氣流量為 50~100 lpm，測試的條件為常溫常壓，使用 3 條電極銅線其直徑為 0.3、0.4、0.5 及 0.8 mm (負荷實驗時使用 0.3 mm 直徑)，最大使用之負電壓約為 -40,000 V。實驗結果發現當水泥微粒 CMD 為 1.3 μm 、電極線為 0.3 mm、氣體流速為 18.3 cm/s 及電場強度為 -4.2 KV/cm 時，隨著使用時間及粉塵餅厚度的增加，離子電流會降低，微粒穿透濃度也就越高，而當靜電集塵器使用 120 分鐘後，對於 300 nm 的微粒收集效率會降低 4%。

為了改善乾式靜電集塵器在使用上的缺點，國外已有許多學者設計開發濕式靜電集塵器。濕式靜電集塵器的特點在於利用連續流動的洗滌液沖洗收集板上的粉塵，避免絕緣層的產生，同時也解決了在敲打收集板過程中所產生的粉塵再揚起問題 (Altman et al., 2001a)，因此對於次微米微粒的去除效率也較乾式靜電集塵器高。此外，濕式靜電集塵器也有利於去除濕度高、酸性及黏著性的微粒。一般靜電集塵器可分為圓管及平板型兩種形式，而使收集電極表面產生洗滌液的方法有噴霧法及水氣凝結法兩種(Altman et al., 2001b)。噴霧法即在集塵器上方或下方噴入液滴，使收集表面形成水膜以去除附著的粉塵。水氣凝結法即在收集板外側裝設熱交換器，當收集板溫度降低時，可使高溫廢氣內的水蒸氣凝結於收集板上並形成水膜，進而達到洗滌的效果。此兩種方法的缺點在於當水霧隨著

氣流進入靜電集塵器時，因液滴的導電性較粉塵微粒高，使得電場強度增加導致電崩潰 (Bayless et al, 2004)，造成電極板產生火花及短路。

Lundgren et al. (1995)設計了一種水流式濕式靜電集塵器，並取得美國專利(United States Patent, US005395430A)，可有效改善噴霧法及水氣凝結法所產生的問題。其各部零件如圖 3a 所示。氣膠由氣體進口 11 進入濕式靜電洗塵器，首先藉由噴嘴 12 產生的洗滌液去除大部分的微粒並中和污染物，之後通過氣流擋板 23 使氣流均勻分散進入靜電集塵器 29。靜電集塵器包含電暈放電器及接地電極，如圖 3b 所示。此時洗滌液由洗滌液傳輸管 51 及洗滌液分流管 52 傳送到集塵器下游平板 33 均勻分散洗滌液後，由上而下流入靜電集塵器。微粒由電暈放電器充電後因電場作用力由接地電極棒收集，再藉由其內側之流續流動的洗滌液去除之。洗滌液最後流入洗滌液收集槽 19 後由洗滌液傳輸管 56 輸送到洗滌液供應槽進行循環利用或是流入吸收液儲存槽 20 進行處理後再循環利用。經過處理後之廢氣經過加熱器 16 霧化殘留之液滴後由氣體出口 17 排放之。此靜電集塵器的測試結果顯示，當電壓由 30 KV 增加到 75 KV 後，可將不透明度(Opacity)由 35 %降到 0 %。

Mikropul (1998)在文獻中介紹了濕式靜電集塵器的基本構造及利用，收集管柱由聚氯乙烯材質製成，充電電極線為不鏽鋼材質，連續循環供應的洗滌水在收集管柱內壁形成一層水膜，可洗除收集在壁上的微粒。作者提到當洗滌液在收集管柱內壁形成水膜時，會因為洗滌液的低導電度而造成電場強度的降低，並降低微粒去除效率。若將洗滌液的導電度提升到 $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ (飲用水導電度為 $500 \mu\text{S}/\text{cm}$)，則可避免電場強度及去除效率降低的問題。但是上述兩篇文獻並未提到測試微粒的種類及粒徑，以及如何使洗滌液形成均勻水膜的方法。

Kim et al. (2000)設計一種模場濕式靜電集塵器用以去除戴奧辛廢氣，此靜電集塵器包含 5 個平行的圓柱型集塵器，管柱由不鏽鋼材質製成，內徑為 110 或 140 mm，長 1500 mm，電暈放電電極線直徑為 30 mm，供應電壓為 20 KV。洗滌水由上往下流動，以去除吸附在收集管柱壁上的微粒。操作溫度在 80°C 以下。實驗結果顯示，當戴奧辛進口濃度為 $0.22 \text{ g}/\text{Nm}^3 \sim 0.84 \text{ g}/\text{Nm}^3$ 時，去除效率可達到 85.7%~99%。文獻中並未提到微粒粒徑的分佈範圍及產生均勻水膜的方法。

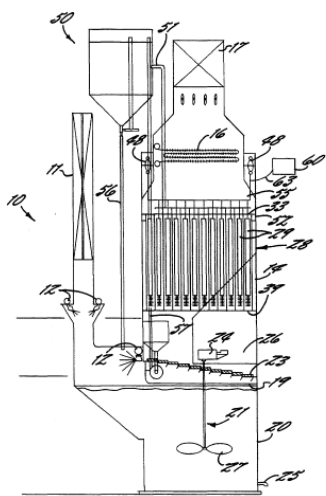


圖 3a 模廠式濕式靜電集塵器
(Lundgren et al., 1995).

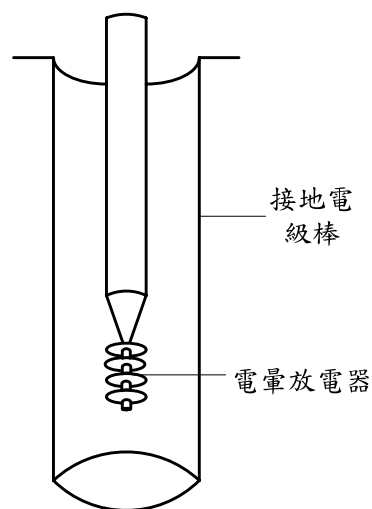


圖 3b 濕式靜電集塵器

10	濕式靜電集塵器主體	29	靜電集塵器
11	進氣管	33	集塵器下游平板
12	清洗液噴嘴	39	集塵器上游平板
14	集塵室	48	絕緣設備
16	加熱器	50	洗滌液供應槽
17	氣體出口	51	洗滌液傳輸管
19	吸收液收集槽	52	洗滌液分流管
20	吸收液儲存槽	55	集塵器懸吊架
21	攪拌器	56	洗滌液傳輸管
23	氣流擋板	57	洗滌液傳輸管
24	發電機	60	電源供應器
25	洗滌液排放口	63	電源線
26	托架		
27	螺旋槳		
28	靜電集塵裝置		

上述方法所產生的洗滌液若在收集管柱內壁無法形成均勻水膜，則會造成槽道現象(channeling)，使得微粒附著於乾燥的收集表面而無法洗除。因此，Pasic et al. (2001)研發了一種薄膜濕式靜電集塵器，並取得美國專利(United States Patent, US006231643B1)，其構造如圖 4 所示。氣膠由氣體入口進入除塵器本體，並與水氣混和後進入濕式靜電集塵器，如圖 4a。洗滌液藉由供應器 32 由薄膜 30 上方流入，形成均勻水膜後去除收集在薄膜上的微粒粉塵，最後再流入薄膜 30 下方的收集槽 34，如圖 4b。薄膜在集塵器操作的過程中為了保持完全平整的狀態，防止折皺的現象降低集塵面積，需在薄膜兩側裝設機具拉平薄膜。文獻中並未針對濕式靜電集塵設備進行測試，僅討論當薄膜應用於乾式靜電集塵設備時，薄膜不會因為氣流的干擾造成擾動，使粉塵不易附著而掉落，且在清理時可利用機械震動方式將粉塵震落。

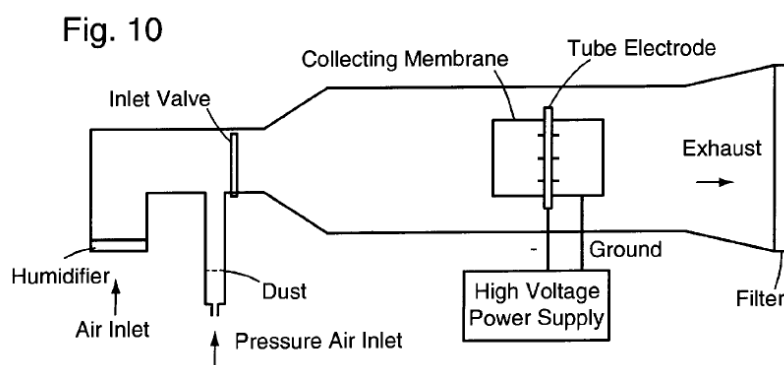


圖 4a

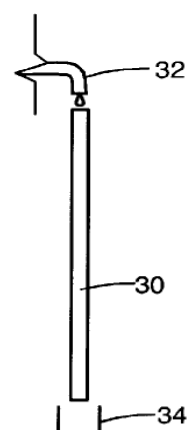


圖 4b

圖 4 薄膜濕式靜電集塵器(Pasic et al., 2001)

歸納上述之討論，目前濕式靜電集塵器仍有下列幾點有待進一步開發研究：

- 微粒收集表面可潤濕性的處理：如何使洗滌液在收集表面形成均勻水膜為最重要的研究課題。不適當的表面處理會造成收集表面產生槽道現象，降低洗塵效率。
- 針對奈米級微粒的收集效率。
- 對黏著性粉塵如油煙微粒的收集效率，及濕式靜電集塵器的使用壽命。
- 找出最佳操作參數：洗滌液流量、粉塵負荷及電場強度。

4. 研究方法

4.1 平板濕式靜電集塵器

平板濕式靜電集塵器的設計如圖 5 所示，微粒收集表面主要由兩片親水性多孔玻璃平板組成，玻璃板後側加裝兩片接地的不鏽鋼電極板，兩片玻璃平板塗敷 TiO_2 微粒可形成一個親水性的表面，有利於均勻水膜的形成。分離器內側二個多孔玻璃平板構成一個氣體的通道，中央設置黃金電極線並施加高電壓，可使微粒帶電，並且在兩接地電極中央產生電場。當氣流由下而上進入靜電集塵器時，藉由電暈放電器游離空氣產生陰陽離子而使微粒充電，之後帶電微粒因電場作用力而往兩側收集板移動，最後在玻璃板由上而下流動的均勻水膜，用於洗除被收集的微粒。由於多孔玻璃表面塗敷 TiO_2 微粒，並用紫外光由玻璃後方照射，可以使 TiO_2 產生光觸媒的作用，以進一步增加親水性，並可以氧化殘留於平板表面的有機油性物質，再生多孔玻璃表面的親水性。 TiO_2 塗敷過程如下：

- 取 0.5g TiO_2 粉末 (P25, Degussa) 置於燒杯中，再加入 50ml 超純水，以磁石攪拌 10 分鐘。
- 將 TiO_2 倒入玻璃板表面，靜置 30 分鐘。
- 將玻璃板放入高溫爐中，以 300°C 鍛燒 2 小時，再靜置於室溫冷卻。

根據上述步驟可得一潤濕性佳之玻璃板，且 TiO_2 粉末可良好的附著於玻璃表面，不易脫落。

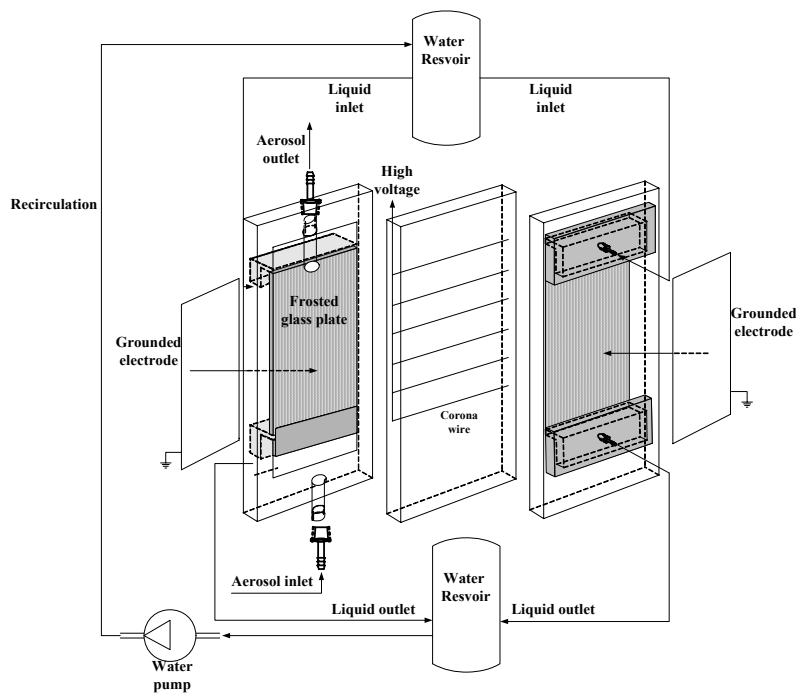


圖 5 平板濕式靜電集塵器示意圖

4.2. 電暈放電器之電壓值、電場強度以及微粒軌跡的模擬計算

濕式靜電集塵器內電暈產生的條件為電極線表面的電場強度需大於電崩潰電場強度 (field strength for electrical breakdown, E_b)， E_b 可以計算如下(Hinds, 1999)：

$$E_b = 3000 + 127d_w^{-1/2} \quad KV/m \quad (1)$$

其中 d_w 為電極線之直徑(m)。

平板型靜電集塵器之內部電壓分佈及電場強度的模擬是依據 Cooperman (1960) 所提出的理論公式來進行模擬(圖 6)，其公式如下所示：

$$V(x, y) = V_0 \frac{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \ln \left\{ \frac{\cosh[\pi(y - 2ms_y)/2s_x] - \cos(\pi x/2s_x)}{\cosh[\pi(y - 2ms_y)/2s_x] + \cos(\pi x/2s_x)} \right\}}{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \ln \left\{ \frac{\cosh(\pi ms_y/s_x) - \cos(\pi a/2s_x)}{\cosh(\pi ms_y/s_x) + \cos(\pi a/2s_x)} \right\}} + \frac{js_y \ln(d/d_w)}{\pi \epsilon_0 Z_i V_0} (s_x^2 - x^2) \quad (2)$$

其中 V_0 為供應電壓值(volt)， s_y 為電極線與電極線之間的一半距離， s_x 為電極線與接地電極間的距離， j 為電流密度， $d=(2s_y/\pi)e^{\pi b/2c}$ ， ϵ_0 為真空容量係數， Z_i 為離子電力移動度。

$$\begin{aligned} E_x = & \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right] \left[-\frac{\pi \left(-\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right) \sin\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right)}{2s_x \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right]^2} \right. \\ & + \frac{\pi \sin\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right)}{2s_x \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right]} \left. \right] / \left[-\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right] \times \log \left[\frac{[-\cos\left(\frac{\pi a}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi ms_y}{2s_x}\right)]}{[\cos\left(\frac{\pi a}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi ms_y}{2s_x}\right)]} \right] \\ & + \frac{js_y \ln(d/d_w)}{\pi \epsilon_0 Z_i V_0} \times 2x \\ E_y = & \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right] \left[-\frac{\pi \left(-\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right) \sinh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right)}{2s_x \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right]^2} \right. \\ & + \frac{\pi \sinh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right)}{2s_x \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right]} \left. \right] / \left[-\cos\left(\frac{\pi x}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi(y - 2ms_y)}{2s_x}\right) \right] \times \log \left[\frac{[-\cos\left(\frac{\pi a}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi ms_y}{2s_x}\right)]}{[\cos\left(\frac{\pi a}{2s_x}\right) + \cosh\left(\frac{\pi ms_y}{2s_x}\right)]} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

根據上述的公式，我們可以利用 Fortran 程式計算出集塵器內各點的電壓值以及電場強度。

當微粒進入靜電集塵器後，微粒的充電機制可分為擴散充電以及電場充電，根據 Fuchs (1947) 以及 Pauthenier 與 Moreau-Hanot (1932) 的理論公式，我們可以計算出奈米微粒隨時間變化的帶電量，如下所示：

$$\frac{dn_{p,diffu.}}{dt} = \pi d_p^2 \bar{C} N_i \exp\left(\frac{-n_p e^2}{4\pi \epsilon_0 d_p kT}\right) \quad (5)$$

$$\frac{dn_{p,field}}{dt} = \rho Z_i \frac{q_{sat}}{4\epsilon_0} \left(1 - \frac{n_p e}{q_{sat}}\right)^2 \quad (6)$$

$$q_{sat} = \frac{3k_d}{k_d + 2} \pi \epsilon_0 d_p^2 |E| \quad (7)$$

其中 d_p 為微粒粒徑， $\bar{C}$ 為離子之熱運動速度， N_i 為離子濃度， k 為波茲曼係數， T 為溫度， e 為電子帶電量， ρ 為空間電荷密度， q_{sat} 為微粒飽和充電度， k_d 為介電常數， E 為電場強度。

微粒在電場中的運動速度可由下列公式計算：

$$V_{px} = \frac{dx}{dt} = E_x(x, y) \times \frac{neC}{3\pi\mu d_p} \quad (8)$$

$$V_{py} = \frac{dy}{dt} = u_y + E_y(x, y) \times \frac{neC}{3\pi\mu d_p} \quad (9)$$

其中 u_y 為氣體在集塵器中 y 方向平均速度。

公式(5)~(8)為 4 個聯立 ODE，我們可以利用 Fortran 程式同時計算出微粒在各點的帶電量，以及微粒軌跡隨著時間的變化。

5. 結論與建議

5.1. 奈米微粒充電器

5.1.1. 外在充電效率

實驗結果顯示，由圖 7 和 8 可發現，對於充電電壓而言，施加越高的充電電壓，內在充電效率會隨著電壓的增加而提升，只要能施加足夠的電壓，內在充電效率皆可以提升得很高，對於充電器內部包覆氣體的施加，與不施加包覆氣體的情況比較，雖然會降低在同一充電電壓下的內在充電效率，但只要施予足夠高的充電電壓，微粒的內在充電效率仍然能達到與不施加包覆氣體時相當的效率。

5.1.2 擴散損失

從圖 9 可見，針對擴散損失來討論，在不施加包覆氣體與施加 20 L/min 的包覆氣體時，皆有小部分的擴散損失，在不施加包覆氣體的情況，擴散損失大約在 1~10 %，而施加 20 L/min 的包覆氣體則使擴散損失下降至 0.5~4 %。因此，包覆氣體的施加可以減少微粒在充電器內部的擴散損失，從結果可以推測，包覆氣體使通過充電器內部的總流量增加，縮短了微粒在充電器內部的停留時間，而使得微粒的擴散損失減少。

5.1.3 外在充電效率與靜電損失

針對外在充電效率來說，可以從圖 10 和 11 發現，改變充電器的充電電壓可以得到一個類似上凸拋物線型的曲線，可以找到一個達到最佳的外在充電效率的電壓範圍，而對於包覆氣體的施加，施加 20 L/min 的包覆氣體相較於不施加包覆氣體的情況，則需要一個更高的充電電壓才能達到最佳的外在充電效率，從此二圖中可見，不施加包覆氣體的情況，最佳的充電電壓約為+6.4 KV，而施加 20 L/min 的包覆氣體時，最佳的充電電壓則上升到+8 KV 左右。此外，包覆氣體的施加可以使最佳的外在充電效率提升至更高。

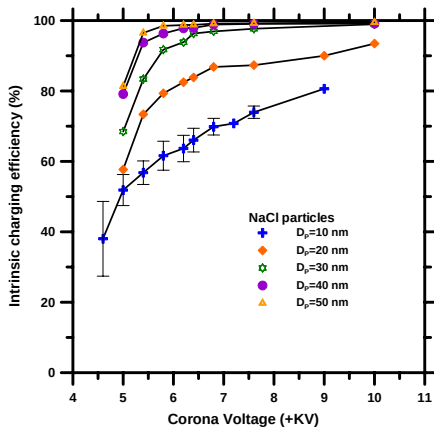


圖 7 在氣膠流量 10 L/min 和無添加包覆氣體的情況下，10~50 nm 氯化鈉微粒的內在充電效率與充電電壓之關係

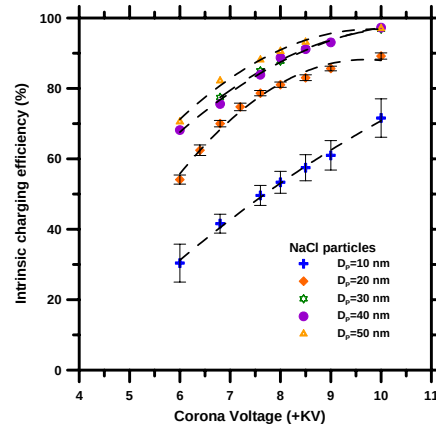


圖 8 在氣膠流量 10 L/min 和包覆氣體流量 20 L/min 的情況下，10~50 nm 氯化鈉微粒的內在充電效率與充電電壓之關係

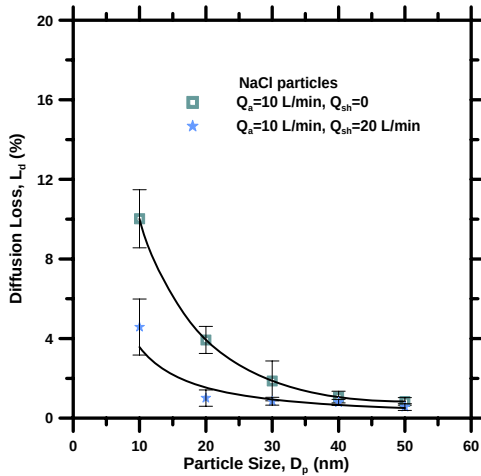


圖 9 10~50 nm 氯化鈉微粒的擴散損失與微粒粒徑之關係

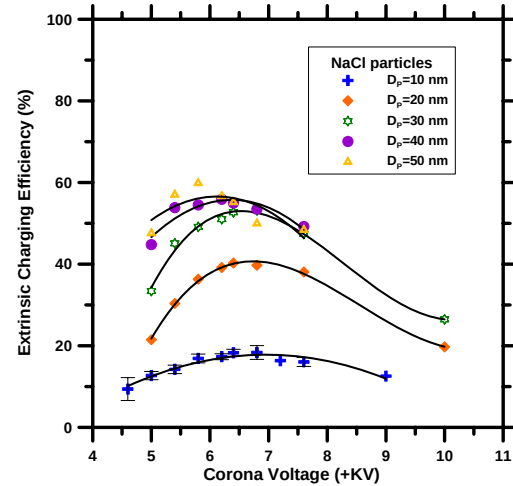


圖 10 在氣膠流量 10 L/min 和無添加包覆氣體的情況下，10~50 nm 氯化鈉微粒的外在充電效率與充電電壓之關係

由圖 12 的結果顯示，隨著充電電壓的增加，微粒在充電器內部的靜電損失幾乎呈現線性上升的趨勢，在此圖中，充電電壓從+4.6 KV 到+10 KV 的範圍裡，相同的電壓下，施加 20 L/min 的包覆氣體相較於完全不施加包覆氣體，微粒的靜電損失大約下降 30%，由此可得知包覆氣體的施加對於減少微粒在充電器內部的靜電損失有明顯的效用。但若以能達到最佳外在充電效率的充電電壓來看，不施加包覆氣體時，當充電電壓為+6.4 KV，靜電損失約為 45~50%，而施加 20 L/min 的包覆氣體，在最佳的充電電壓+8 KV 時，靜電損失則約為 10~25%，微粒在充電器內部的靜電損失以 50 nm 的微粒減少 35% 為最多，而下降最少的是 10 nm 的微粒為 25%，因此，對於提升最佳的外在充電效率而言，微粒靜電損失的減少仍然是可以再考慮的方向。

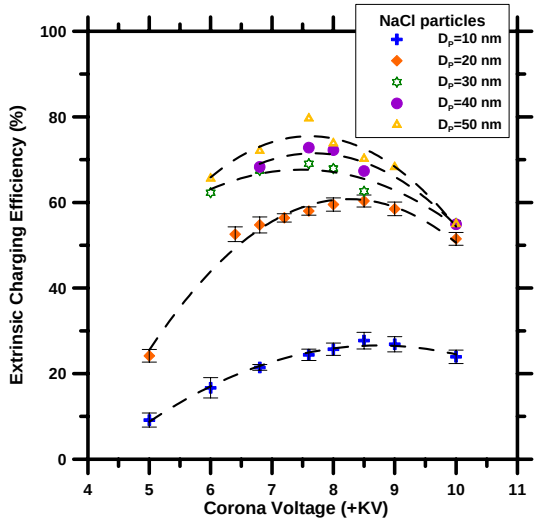


圖 11 在氣膠流量 10 L/min 和包覆氣體流量 20L/min 的情況下，10~50 nm 氯化鈉微粒的外在充電效率與充電電壓之關係

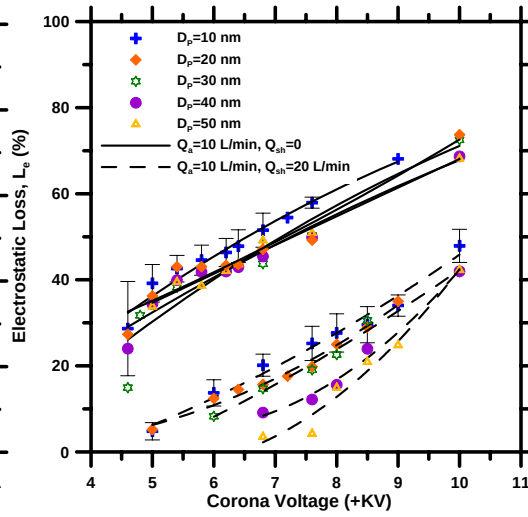


圖 12 10~50 nm 氯化鈉微粒的靜電損失與充電電壓的關係

本實驗結果發現包覆氣體對於降低微粒的靜電損失有相當大的功效，流量的提升順勢也降低微粒的擴散損失，因此，對於增進外在充電效率上成為重要的參數之一，未來改變舊有設計的情況下，包覆氣體的設計將縮小環狀空間出口的部份，用意在於加快接近充電器外壁的流速，欲將充電後的微粒快速帶離充電器而減少被強大電場吸附，另外，未來需要量測出口微粒帶電量與 Fuchs 理論比較，確認實驗值的合理性。

5.2 濕式靜電集塵器電壓分佈以及電場強度

電壓與電場強度在濕式靜電集塵器的分佈如圖 13、14 所示，當施加電壓為 10000 kV、電極線與電極線距離為 16 mm、電極線與接地電極距離為 4.5 mm 時，在電極線四周約 ± 2 mm 的範圍內，電壓值約為 30000kV。造成電壓值比施加電壓還大的原因，是因為本研究設計的濕式集塵器其電極線到接地電極的距離相當小，當電場強度達到電崩潰時，會產生空間電荷，使得離子電流密度增加，進而增加電極線與接地電極間的電壓值。此外，我們也可根據 Cooperman (1981)所提出的理論公式，來計算電流密度的大小，如下所示：

$$J = \frac{\epsilon_0 Z_i}{16s_x^3} (\alpha_j + \sqrt{\alpha_j^2 + 192(V_{j0} - V_c)(s_x E_1)^3})^3 \quad (10)$$

$$\alpha = 9(V_0 - V_c + s_x E_1)^2 - 12(s_x E_1)^2 \quad (11)$$

$$E_1 = \frac{\pi V_c}{2s \ln(r_{eff}/r_w)} \quad (12)$$

$$V_c = r_w E_0 \ln(r_{eff}/r_w) \quad (13)$$

$$r_{eff} = \frac{4s_x}{\pi} \quad \text{for } s_x/s \leq 2.0 \quad (14)$$

$$E_0 = 3 \times 10^6 f \left(\frac{T_0 P}{TP_0} + 0.03 \sqrt{\frac{T_0 P}{TP_0 r_0}} \right) \quad (15)$$

其中 V_c 為電崩潰起始電壓， T 為溫度， P 為壓力。由上述公式可知，當電極線與接地電極越小，則離子電流密度也就增大。

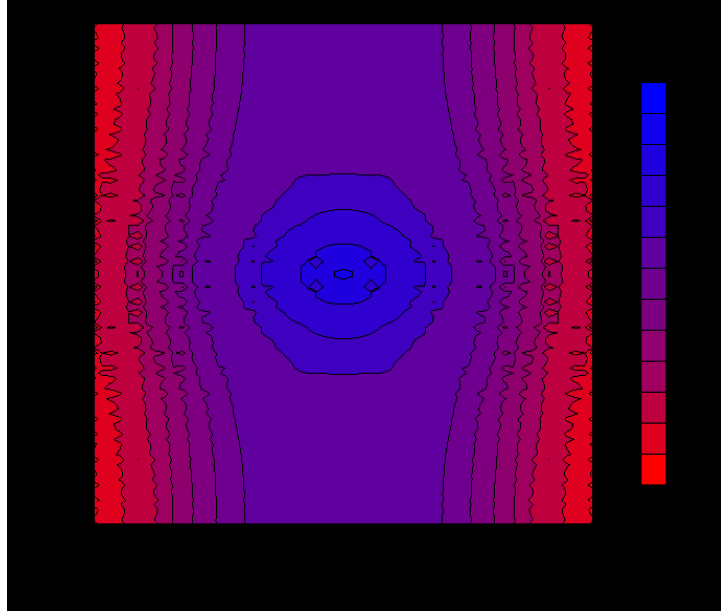


圖 13 濕式靜電集塵器內電壓分佈

5.3 微粒在濕式靜電集塵器內的移動軌跡

微粒在靜電集塵器內的移動軌跡如圖 15 所示，微粒移動方向與 y 方向平行，與 x 方向垂直，操作參數如前一節所述時，10 nm 的微粒其收集效率為 100 %，當微粒粒徑由 10 nm 上升到 100 nm 時，其收集效率也隨之下降。未來本研究將利用 Fortran 程式計算出各種微粒粒徑的臨界移動軌跡，以推估靜電集塵器對各個微粒的收集效率，並繪出效率曲線再與實驗數據進行比對。

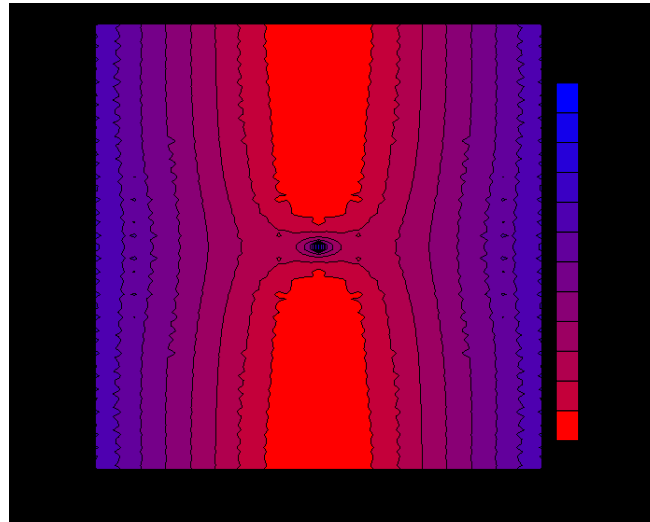


圖 14 濕式靜電集塵器內電場強度分佈

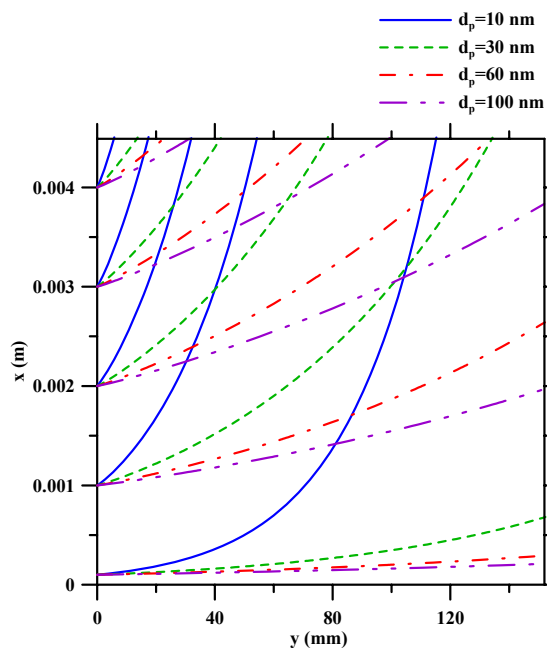


圖 15 奈米微粒在濕式靜電集塵器內部的移動軌跡

5. 參考文獻

羅玉雲，以靜電集塵裝置及濾袋室集塵裝置處理紙錢焚燒排氣之研究，國立中山大學環境工程研究所碩士論文，中華民國九十四年七月。

Altman R, Offen G, Buckley W., Ray I., 2001, Wet electrostatic precipitation: demonstrating promise for fine particulate control-part I, *Journal of Power Engineering*, 105, 1, 37-39.

Altman R, Buckley W., Ray I., 2001, Wet electrostatic precipitation: demonstrating promise for fine particulate control-part II, *Journal of Power Engineering*, 105, 2, 42-44.

Bayless D. J., Alam M. K., Radcliff R., Caine J., 2004, Membrane-based wet electrostatic precipitation, *Fuel Processing Technology*, 85, 781-798.

Fuchs, N. A., 1974, The charges on the particles of aerocolloids, *Izv. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Geogr. Geofiz.*, 11, 341-348

Huang S. H., Chen C. C., 2003, Loading characteristics of a miniature wire-plate electrostatic precipitator, *Aerosol Sci. Technol.*, 37, 109-121.

Hinds, W.C., *Aerosol Technology*, 2nd ed., Wiley: New York, 1999, pp165-168.

Kashiwada S., 2006, Distribution of nanoparticles in the see-through Medaka (*Oryzias latipes*), *Environ. Health Perspect.*, 114, 1697-1702.

Kim H. H., Yamamoto I., Takashima K., Katsura S., Mizuno A., 2000, Incinerator flue gas cleaning using wet-type electrostatic precipitator, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 33, 669-674.

Lovern S. B., Klaper R., 2006, *Daphnia magna* mortality when exposed to titanium dioxide and fullerene (C₆₀) nanoparticles, *Environ. Toxicol. Chem.*, 25, 1445-1447.

Lundgren D. A., 1995, A two-zone wet electrostatic precipitator development, *J. Aerosol Sci.*, 26, 877-878.

Lundgren D. A., Marple V. A., Herrick R. A., 1995, United States Patent, US005395430A.

- Mikropul H., 1998, Innovative wet electrostatic precipitator technology, *Filtration & Separation*, 35, 433-435.
- Oberdörster E., 2004, Manufactured nanomaterial (fullerenes, C₆₀) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass, *Environ. Health Perspect*, 12, 1058-1062.
- Oberdörster E., Zhu S., Blickley T. M., McClellan-Green P., Haasch M. L., 2006, Ecotoxicology of carbon-based engineered nanoparticles: Effects of fullerene(C₆₀) on aquatic organisms, *Carbon*, 44, 1112-1120.
- Pasic H., Alam M. K., Bayless D. J., 2001, Membrane electrostatic precipitator, United States Patent, US006231643B1.
- Pasic H., 2006, Membrane tubular wet electrostatic precipitators, *Filtration & Separation*, 43, 16-18.
- Pauthenier M., Moreau-Hanot M., 1932, Charging of spherical particles in an ionizing field., *J. Phy. Radium*, 3, 590-613.
- Roberts A. P., Mount A. S., Seda B., Souther J., Qiao R., Lin S. J., Ke P. C., Rao A. M., Klaine S. J., 2007, In vivo biomodification of lipid-coated carbon nanotubes by *Daphnia magna*, *Environ. Sci. Technol.*, 41, 3025-3029.
- Smith C. J., Shaw B. J., Handy S. R. D., 2007, Toxicity of single walled carbon nanotubes to rainbow trout, (*Oncorhynchus mykiss*): Respiratory toxicity, organ pathologies, and other physiological effects, *Aquat. Toxicol.*, 82, 94-109.
- Vicki S., 2007, Investigating the effects of nanoparticles on the environment, 3rd International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, Taipei, Taiwan, August 29-September 1, Tutorial IIB.
- Zhu S., Oberdörster E., Haasch M. L., 2006, Toxicity of an engineered nanoparticle (Fullerene, C₆₀) in two aquatic species, *Daphnia* and fathead minnow, *Mar. Environ. Research*, 62, 5-9.

6. 計畫成果自評

針對奈米微粒充電器而言，本研究已完成新型多電極線-圓管型微粒充電器對於奈米微粒充電效率的測試。研究結果發現對於 10 nm 的微粒的其充電效率為 25 %，仍有進一步提升的空間。本研究將改良先前設計的奈米微粒充電器，提高包覆氣體的流速，使得奈米微粒在充電器內部的靜電損失減低，提升外在充電效率。

針對濕式靜電集塵器的研究，目前已完成集塵器內部電壓值及電場強度分佈的模擬，並利用 Fortran 程式輔助計算出微粒在平板型濕式集塵器內的移動軌跡。未來本研究將針對不同微粒粒徑的移動軌跡進行模擬，以瞭解微粒的臨界移動軌跡，進一步計算出靜電集塵器對各粒徑微粒的收集效率。實驗測試部分，本研究已完成平板式濕式靜電集塵器的設計，並且正在製作當中，未來製作完成後即可針對不同粒徑的奈米微粒進行收集效率的測試，並與模擬計算所得到的理論收集效率進行比對。

可供推廣之研發成果資料表

☐ 可申請專利

☐ 可技術移轉

日期：__年__月__日

國科會補助計畫	計畫名稱：奈米微粒的充電及靜電沉降效率的提升 計畫主持人： 蔡春進教授 計畫編號： 學門領域：環境工程
技術/創作名稱	濕式靜電集塵器
發明人/創作人	蔡春進
技術說明	中文： 一種濕式靜電集塵器，係具有一腔體、三放電電極、二絕緣件、二接地電極，腔體內部具有一反應室，放電電極位於反應室內，絕緣件鋪設於反應室內側壁面且表面粗糙，接地電極設於腔體外側；藉此，絕緣件可使洗滌液於反應室內形成均勻水膜，而將一待處理廢氣中之污染物水洗去除，且絕緣件更可形成放電電極與接地電極間的屏蔽以避免漏電。
	英文： This invention is a wet type parallel plate electrostatic precipitator which is composed of one chamber, three corona wires, two insulating materials and two grounded-electrodes. The corona wires are on the inside of a reaction chamber. The insulating materials, which are surface-blasted, are set on the two inside surface of the reaction chamber; the two grounded-electrodes are set on the two outside surface of the reaction chamber. Uniform water film can be formed on surfaces of the insulating material to scrub the pollutants. Beside, the insulating materials can be the insulator to avoid electric leakage.
可利用之產業 及 可開發之產品	粉體製造業 餐飲業 光電、半導體業之薄膜製程及乾蝕刻製程所排放之廢氣處理
技術特點	本發明係提供一種高效率的濕式靜電集塵器，利用親水性表面使得洗滌液在收集板上形成均勻的水膜，以提高集塵器對於微粒狀污染物的洗除效率。
推廣及運用的價值	1. 本發明完成後，期可運用在粉體製造業的微粒狀污染物控制，減少奈米微粒對環境的污染。 2. 餐飲業，有效減少黏濁性粉塵及油煙的排放。