

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 8 月 日至 99 年 8 月 日

計畫主持人：蔡春進教授

共同主持人：

計畫參與人員：古月萍(博士後)、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 98 年 5 月 29 日

摘要

本研究設計並開發一種高效率平板式濕式靜電集塵器用以去除次微米微粒污染物。濕式靜電集塵器之收集板表面經噴砂處理後塗敷 TiO_2 奈米微粒以提高表面親水性，並使洗滌液在收集板表面形成均勻水膜。三條黃金電極線形成之電暈放電電極線在集塵器內形成電場使微粒帶電。一個氣體脈衝閥用以清潔附著在電極線表面之粉塵，使集塵器維持最佳的集塵效率。本研究利用食鹽及玉米油做為測試微粒以進行濕式靜電集塵器微粒去除效率測試。氣膠流量為 5 及 10 L/min，施加電壓為 3.8-4.3kV，洗滌液流量為 29.4 L/min。此外， TiO_2 做為固體微粒來測試高濃度粉塵負荷情況下對於乾式及濕式靜電集塵器微粒去除效率的影響。實驗結果發現當濕式靜電集塵器在無粉塵附著的情況下，粒徑分佈範圍為 10~590 nm、施加電壓為 4.3 kV、氣膠流量為 5 L/min 時，濕式靜電集塵器對於玉米油及食鹽微粒之去除效率皆大於 98%。靜電集塵器之高靜電沉降效率及微粒擴散損失可使得粒徑小於 30 nm 之微粒的收集效率達到 99%。在經過高濃度 TiO_2 粉塵負荷測試 2 小時後、粉塵負荷量 0.6 ± 0.06 g/hr/plate 時，集塵效率亦可達 95% 以上。根據上述實驗結果顯示本濕式靜電集塵器可做為高效率之奈米微粒集塵設備。

關鍵詞：濕式靜電集塵器、均勻水膜、電暈放電、微粒充電效應

Abstract

In this study, an efficient parallel plate wet electrostatic precipitator (wet ESP) was designed and developed to control the submicron particulate matters. The collecting plates of the wet ESP were sand blasted and coated with TiO_2 nanoparticles to enhance the hydrophilicity of the scrubbing water film. Three gold wires were used as corona dischargers to charge the particles and generate an electric field. A pulse jet valve was used to purge the wires clean to maintain the optimum particle collection efficiency. The particle collection efficiencies were obtained by using test particles of sodium chloride and corn oil at the aerosol flow rates of 5 and 10 L/min, applied voltages of 3.8-4.3 kV, and a scrubbing water flow rate of 29.4 L/min. The solid titanium dioxide particles were used to investigate the performance of the dry and wet ESP under the heavy particle loading conditions. Experimental results showed that the particle collection efficiencies of the designed wet ESP for the corn oil and sodium chloride in the size range from 10 to 590 nm were higher than 98% when the ESP was clean. A collection of 99% was found for the particles smaller than 30 nm due to the high electrostatic precipitation efficiency and the diffusion losses. After being heavily loaded with TiO_2 nanopowders of about 0.6 ± 0.06 g/hr/plate for 2 hours, the collection efficiency of wet ESP were also higher than 95%. The experimental results indicate that the present wet ESP can be used to control nanoparticle effectively.

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

靜電集塵器為有效去除奈米微粒之集塵設備，且在去除高濃度粉塵情況下不會有壓降過高的情形產生。但是目前傳統式乾式靜電集塵器仍有許多缺點需進一步研究，包括收集板上、放電電極線上粉塵堆積造成除塵效率下降、背電暈以及粉塵再揚起等問題；此外，許多傳統式靜電集塵器並未針對奈米微粒的收集效率進行探討，種種問題仍有待進一步的研究。

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。預計完成的工作項目如下所示：

1. 模擬平板型濕式靜電集塵器的電場分佈及收集效率。
2. 進行濕式集塵器對多徑分佈微粒的收集效率測試。
3. 進行濕式集塵器對高濃度粉塵微粒的收集效率測試。

3. 文獻回顧

3.1 濕式靜電集塵器

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暈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。

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。

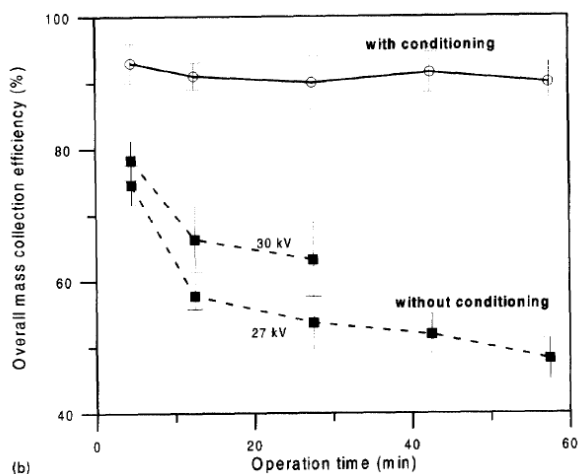


圖 1 乾式靜電集塵使用時間及去除效率的關係(Chung and Bai, 1999)

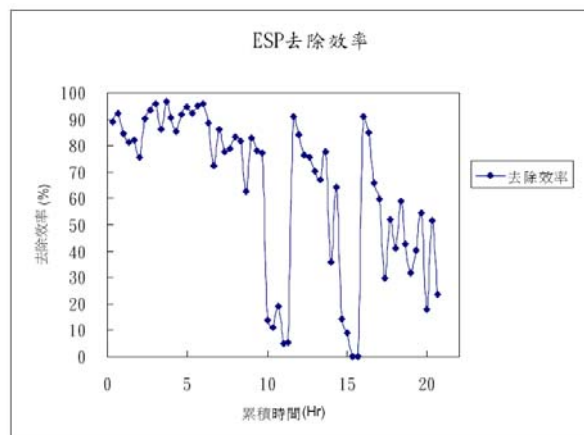


圖 4.1：ESP 去除效率 vs. 累積使用時間作圖

圖 2 乾式靜電集塵器背電暈及去除效率的關係(羅，2005)

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)×30 cm (長)×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。氣膠由氣體進口進入濕式靜電洗塵器，首先藉由噴嘴產生的洗滌液去除大部分的微粒並中和污染物，之後通過氣流擋板使氣流均勻分散進入靜電集塵器。靜電集塵器包含電暈放電器及接地電極。此時洗滌液由洗滌液傳輸管及洗滌液分流管傳送到集塵器下游平板均勻分散洗滌液後，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後由洗滌液傳輸

管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進行處理後再循環利用。經過處理後之廢氣經過加熱器霧化殘留之液滴後由氣體出口排放之。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，收集管柱由聚氯乙稀材質製成，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。

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。

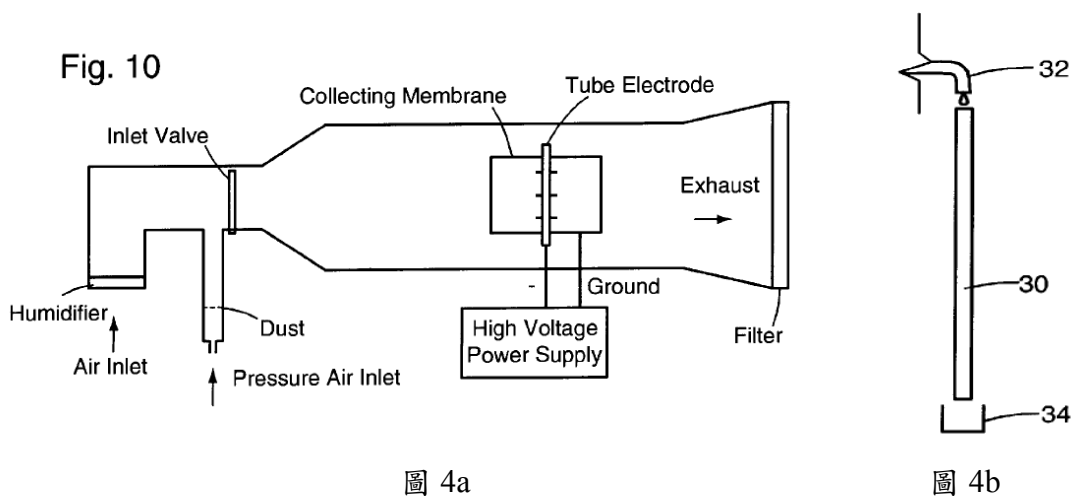


圖 4 薄膜濕式靜電集塵器(Pasic et al., 2001)

3.2 單極奈米微粒充電器

對微粒的充電是一個重要且基本的特性，帶電後的奈米微粒，在電場中的靜電力作用遠大於重力作用，善加應用此性質，即可對微粒做有效的控制。過去的研究顯示，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，粒徑為 $50\ \text{nm}$ 以下的微粒之平均帶電量均小於一個基本電荷，且隨著微粒粒徑減少而降低。然而，奈米微粒因為粒徑較小而難被充電，所以許多研究漸漸開始發展擁有較高充電效率的微粒充電器，藉此增加奈米微粒的帶電比率。

過去曾有許多學者設計不同的微粒充電器，以提高奈米微粒的充電效率。依據充電器內部產生的離子為正負離子的組合或是單一正或負離子，微粒充電器可分為雙極微粒充電器(Bipolar charger)和單極微粒充電器(Unipolar charger)。雙極微粒充電器主要是利用輻射物質同時產生空氣正負離子而使微粒充電，然而最大的缺點在於部分微粒充電後會再被相反極性的離子碰撞而無法有效地充電，導致內在充電效率太低，因此單極微粒充電器被認為是接下來具有發展性的替代充電方式，以致於後來研究的重心逐漸轉向於發展單極微粒充電器。過去有發展一系列 Hewitt 型的單極充電器(Wiedensohler et al., 1994; Buscher et al., 1994; Kruis & Fissan, 2001; Biskos et al., 2005)，這些研究除了 Wiedensohler et al.(1994)使用輻射源 ^{224}Cm 外，其他的充電器皆利用電暈放電的方式來充電，這類型的充電器主要是利用一直流高壓電以及一交流電，將高壓電施加於放電電極，而交流電則使用在電暈放電區和微粒充電區之間的金屬網上，運用此交流電的目的在於讓充電後的微粒隨著電場變化呈現軸向震盪運動，藉此讓微粒不易被吸附於充電器內部，然而 Marquard et al. (2006b)推斷交流電無法讓微粒在增加充電率和減少微粒損失之間取得平衡。另外，Chen and Pui (1999)使用放射源 ^{210}Po 來對微粒充電避免強大的電場造成損失，在設計中運用一微弱電場去除正或負離子其中之一，讓充電區僅單極離子存在，而內部微弱電場讓微粒的行進方向與離子電流方向相同，目的在於讓微粒均勻地被充電，此充電器擁有良好的充電效率，但是輻射物質有嚴格的安全使用規範以及較昂貴的處理費用，因此爾後的研究皆運用電暈放電來成為替代的充電方式。Sierra et al. (2003)提出了一種針尖放電的充電器，一高壓電施加於不鏽鋼的針尖而產生單極離子，在出口端直接與微粒碰撞而充電，此研究的結果顯示充電器擁有良好的外在充電效率，而 Alonso et al. (2006)和 Qi et al. (2008)為了減少帶電微粒的損失而改變 Sierra et al. (2003)之充電器的構造進行研究，前者縮短充電器的長度以減少損失的機會，後者則是縮小充電器的尺寸並在放電電極周圍設置一多孔的半圓金屬罩，降低微粒損失的可能以及防止微粒暴露在高電場的環境中，結果顯示微粒的外在充電效率並無提升，因此這些構造的改變並非影響充電效率的關鍵因素。另外，Qi et al. (2007)將兩個電暈放電裝置(ionizer)連結微粒通過的主腔體，讓離子以音速噴射的方式離開電暈放電裝置然後進入主腔體，目的在於不讓微粒處在有電場的環境而造成損失，結果顯示此種充電方式也無法有效提升外在充電效率。

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：

1. 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。
2. 將 TiO_2 倒入玻璃板表面，靜置 30 分鐘。
3. 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。

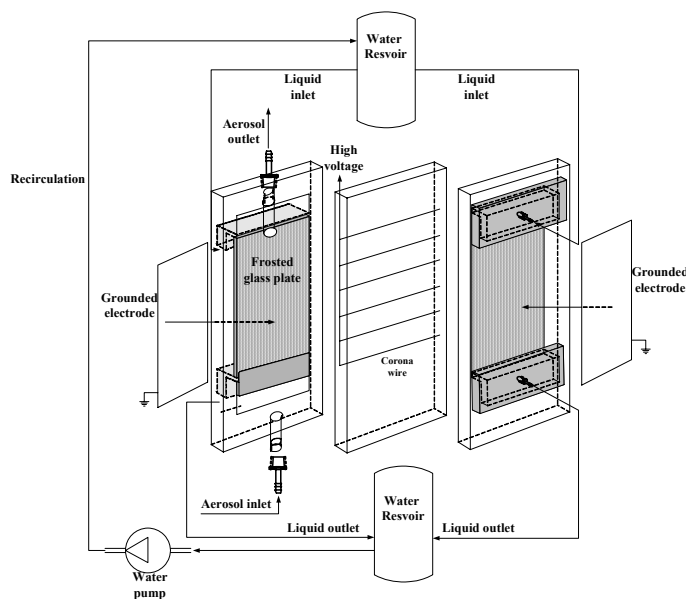


圖 5 平板濕式靜電集塵器示意圖

4.2 實驗測試方法

(1) 單徑微粒在濕式靜電集塵器內之集塵效率測試

本研究之實驗室測試系統如圖 22 所示。本測試所產生之氣膠微粒種類有固體 NaCl 、液體 corn oil，粒徑在 10~600 nm 之間。此兩種微粒利用蒸發凝結法產生， NaCl 及 corn oil 之高溫爐溫度分別為 700°C 及 250°C 。將單徑分佈之氣膠通入濕式靜電集塵器，利用 TSI Model 3080N SMPS (Scanning mobility particle sizing system) 結合 TSI 3776 CPC 測量濕式靜電集塵器前後端之單徑微粒濃度，並計算收集效率，同時建立收集效率與電位差、氣體流

量之間的關係。

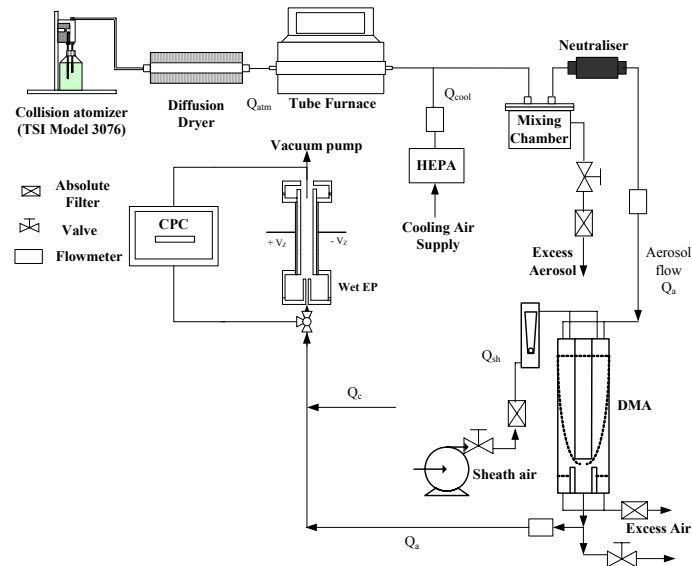


圖 22 單徑微粒在濕式靜電集塵器內之集塵效率測試流程圖

(2) 高濃度、多粒徑微粒之濕式集塵器效率測試

靜電集塵器之集塵效率與粉塵餅之電阻係數息息相關，因此必須使用多徑微粒產生高濃度的氣膠微粒作實驗測試。本研究產生之高濃度多徑微粒為 TiO_2 微粒，利用 Jet-O-Mizer (Model 000, Fluid Energy Processing and Equipment Co., Hatfield, UK) 產生，如圖 23 所示，幾何平均粒徑為 $50 \sim 184 \text{ nm}$ ，濃度為 $0.1 \sim 100 \text{ g/h}$ 。由於 TiO_2 微粒在經由儀器產生後，粒徑質量中間粒徑往往大於 $3 \mu\text{m}$ ，為了瞭解濕式靜電集塵器在粉塵負荷後對於奈米微粒的集塵效率，我們利用蒸發凝結法產生玉米油微粒進行微粒收集效率測試，可產生數目濃度約為 $2.35 \times 10^5 \text{ \#/m}^3$ ，粒徑分佈為 $10.4 \sim 590 \text{ nm}$ 。當多徑粉塵由產生器產生後，在濕式集塵器前後的微粒濃度直接用 TSI Model 3080N SMPS (Scanning mobility particle sizing system) 進行量測，以得到各粒徑之去除效率，若粉塵濃度太高時，則必需先將微粒濃度稀釋才能使用 SMPS 做測試。

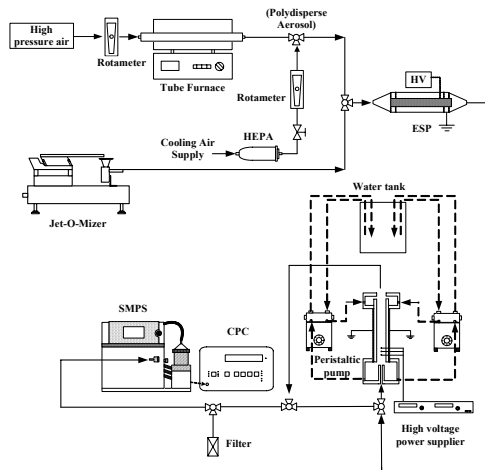


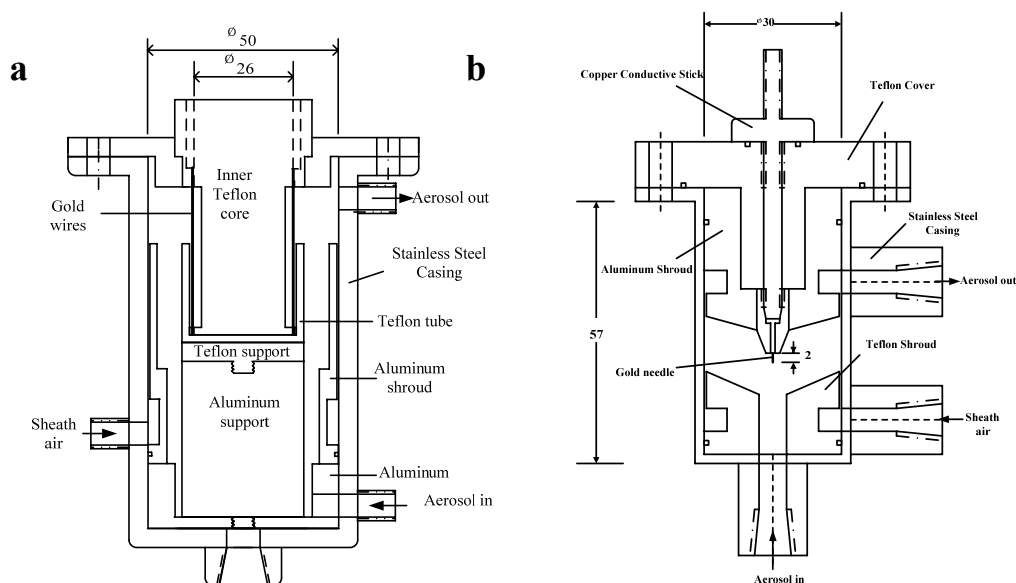
圖 23 高濃度多徑微粒濕式靜電集塵器效率測試

4.3 微粒充電效率測試

單極奈米微粒充電器

本研究所設計的兩個單極微粒充電器如圖一(a)和(b)所示。充電器 1 的鐵氟龍上蓋包含一圓盤蓋體和一中心圓柱，其中心圓柱周圍以每間隔 90 度的方式放置並固定四條長度為 26 mm、直徑為 25 μm 的黃金電極線。而為了遮蔽多餘的電極線，利用一鐵氟龍遮蔽蓋套在中心鐵氟龍柱的底部，使得放電區長度為 15 mm。一不鏽鋼外殼，為一內徑 50mm 之圓柱體。一鋁圓柱襯墊和一鐵氟龍圓柱襯墊用來填滿多餘的空間以減少微粒停留的時間。一不鏽鋼底座，用以導入氣膠流體。一包覆氣體導流套為鋁製環狀體，用以引入均勻沿著外殼內壁的包覆氣流，有與外殼內壁間距 0.5 和 0.1 mm 兩種。

充電器 2 包含一鐵氟龍上蓋，其包括一圓盤蓋體和一中空圓柱。一黃銅導電棒以螺旋的方式固定在鐵氟龍圓柱中。一放電電極座包含一鐵氟龍外殼、一導電金屬和一長度為 2 mm、直徑為 50 μm 的黃金電極線，其鐵氟龍外殼以其內螺紋由黃銅導電棒之底端旋入並固定。一不鏽鋼外殼，為一內徑 30 mm 之圓柱體。一包覆氣體導流套為鐵氟龍材質之環狀體，用以引入均勻沿著外殼內壁的包覆氣流，與外殼內壁間距 0.1 mm。一出口導流套為不鏽鋼材質之環狀體，用以維持包覆氣體均勻地沿著外殼內壁流動，與外殼內壁間距 0.1 mm。

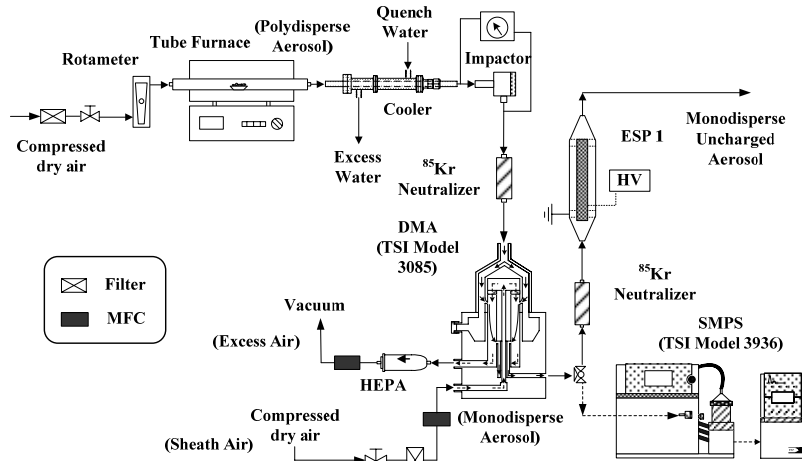


圖一 單極奈米微粒充電器裝置圖 (a)充電器 1 (b)充電器 2

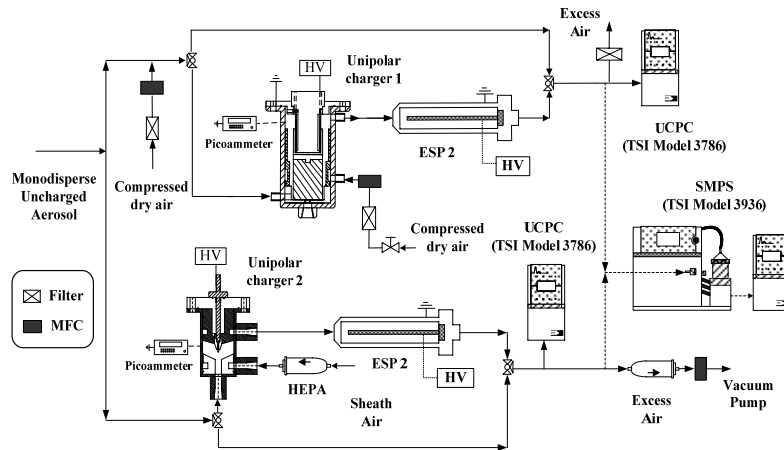
微粒充電效率測試

不帶電的單徑微粒之產生系統如圖二所示。採用 Scheibel and Porstendorfer(1983)所使用的蒸發凝結法，首先以小舟裝載 1 g 的氯化鈉或銀粉，放置於高溫爐內之石英管內部加熱，使用氯化鈉在 600~800°C，銀粉在 850~1100°C 的溫度下，以 1 L/min 的流量通過石英管及水式的冷卻裝置產生多徑的奈米微粒。利用壓差表與衝擊器控制流量確認系統中的流量。接著將奈米微粒引入 ^{85}Kr 靜電中和器(model 3077, TSI Inc.)，使微粒被充電，再利用 Nano DMA(model 3085, TSI Inc.)篩選出欲測試的單徑微粒，固定 Nano DMA 氣膠流量和包覆氣體流量分別為 1 L/min 和 10 L/min，根據不同粒徑微粒帶電後具有不同電移動度的性質，調

整電壓篩出欲選取的單徑微粒流量 1 L/min, 2.5~10 nm 的銀微粒以及 10~50 nm 的氯化鈉微粒。接著通過第二個 ^{85}Kr 靜電中和器，使帶電單徑微粒呈現電性平衡而讓大部分的奈米微粒不帶電，再使用圓柱型乾式靜電集塵器(1st ESP)去除所有帶電微粒，確保欲測試之單徑微粒不帶任何電荷。



圖二 不帶電的單徑微粒之產生系統圖



圖三 單極充電器充電效率之測試系統圖

圖三為單極充電器充電效率測試系統圖，於充電器電極線上施加高壓電，不銹鋼外殼接地，利用電暈放電產生單極離子，不帶電奈米微粒被引入單極充電器進行充電，同時在充電器內部壁上施加包覆氣體，降低過多帶電微粒靜電損失。充電後之氣膠流出充電器內部並進入後端乾式靜電集塵器(2nd ESP)，在該靜電集塵器上施加電壓可去除帶電的微粒，最後將微粒引入 CPC(model 3022, TSI Inc.)量測不同操作條件下微粒的數目濃度。

參考 Marquard et al. (2006) 對單極微粒充電器充電效率和微粒損失的計算，應用於本研究。同一操作條件下，量測四個各具不同意義微粒數目濃度，才能完整地進行效能評估。測充電器上游不帶電氣膠微粒，流量為 Q_{in} ，在未通過充電器的情況下，直接由 CPC 測其濃度稱為 C_{in} 。沿著壁上引入包覆空氣，流量為 Q_{sh} ，使得充電器出口的總流量為 Q_{out} ，稀釋因子(dilution factor) $f = Q_{out}/Q_{in}$ 。分別不施加電壓以及施加 V_1 電壓於充電器，且 2nd ESP 不施加電壓時，在充電器下游量測到微粒數目濃度為 $C_{out,OFF}$ 和 $C_{out,ON}$ 。將自施加 V_1 電壓

之充電器的出口微粒，通過施加 V_2 電壓的 2nd ESP，去除充電器出口帶電微粒，量測到充電器出口不帶電微粒數目濃度稱之 C_{out}^0 。 P_{ESP} 為微粒通過 2nd ESP 的穿透率。以下為指標性參數包含內在充電效率(η_{int})、外在充電效率(η_{ext})、擴散損失(L_d^0)以及靜電損失(L_{el})的計算方法：

$$\eta_{int} = \frac{f}{P_{ESP}} \frac{C_{out,OFF} - C_{out}^0}{C_{in}} \quad (1)$$

$$\eta_{ext} = \frac{f}{P_{ESP}} \frac{C_{out,ON} - C_{out}^0}{C_{in}} \quad (2)$$

$$L_{el} = \frac{f}{P_{ESP}} \frac{C_{out,OFF} - C_{out,ON}}{C_{in}} \quad (3)$$

$$L_d^0 = 1 - \frac{f}{P_{ESP}} \frac{C_{out,OFF}}{C_{in}} \quad (4)$$

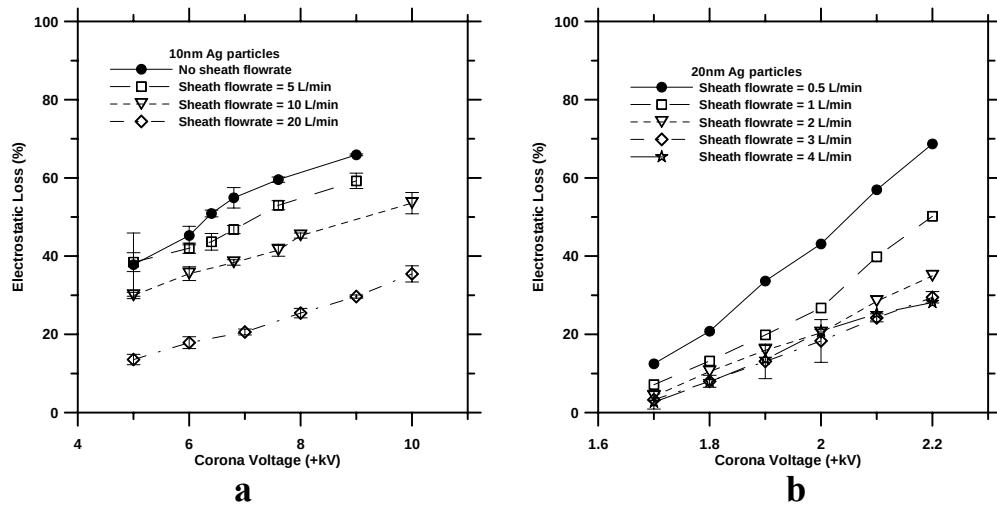
微粒帶電量分布測試

使用類似 [Alguacil and Alonso\(2006\)](#) 的實驗方法，一種串聯 DMA 的系統來量測微粒的帶電分佈，在充電器的出口使用移除靜電中和器的 SMPS(model 3936, TSI Inc.)掃描其單徑微粒帶電分佈，若有帶兩個電荷以上則會因電移動度不同出現多峰分布，則可算出微粒之帶電比例。

5. 結論與建議

5.1. 奈米微粒充電器

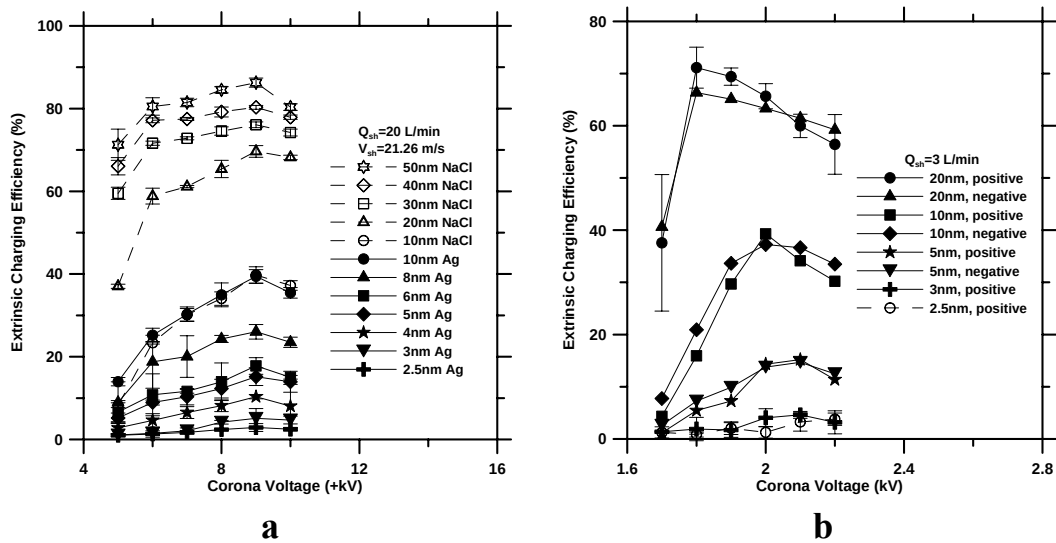
單極充電器最需要被解決的難題就是如何減少充電後的微粒因電場而損失在充電器內部。圖四(a)與(b)顯示，在不同包覆氣體流量及電壓下 10 nm 微粒通



圖四 在不同包覆氣體流量及電壓下 (a)10 nm 銀微粒通過充電器 1 (b)20 nm 銀微粒通過充電器 2 之靜電損失

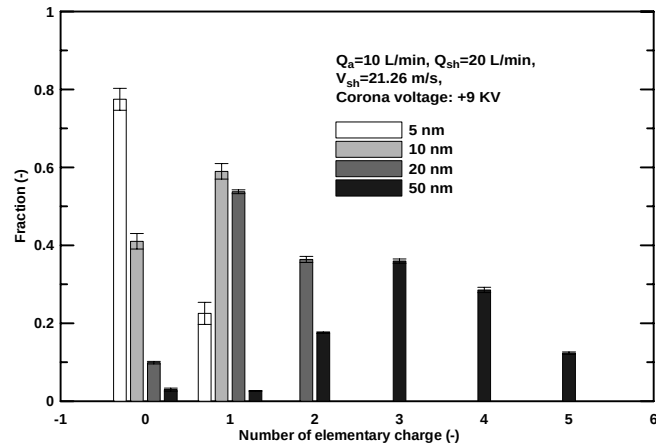
過充電器 1 以及 20 nm 微粒通過充電器 2 之靜電損失，隨著充電電壓的增加，除了離子濃度 Ni 增加之外，內部的電場也會急遽地上升，微粒在充電器內部的靜電損失幾乎呈現線性上升的趨勢，在此二圖中充電電壓分別從+5~+10 kV 和+1.7~+2.2 kV 的範圍裡，在相同的電壓下，充電器 1 和充電器 2 分別施加 20 和 3 L/min 的包覆氣體相較於不施加或施加較少量的包覆氣體的條件下，微粒的靜電損失最多皆下降約 40%，由此可得知包覆氣體的施加對於減少微粒在充電器內部的靜電損失有明顯的效用；在實驗中也發現施加包覆氣體有助益於擴散損失的降低。另外，包覆氣體流速的增加對於微粒的靜電損失有微幅的減少，但對於擴散損失而言流速的變化並沒有產生明顯的影響。

增加包覆氣體的效率測試中充電器 1 與 2 在包覆氣體流量 20 和 3 L/min 下可得到最佳的外在充電效率曲線。如圖五(a)和(b)所示，在氣膠和包覆氣體流量

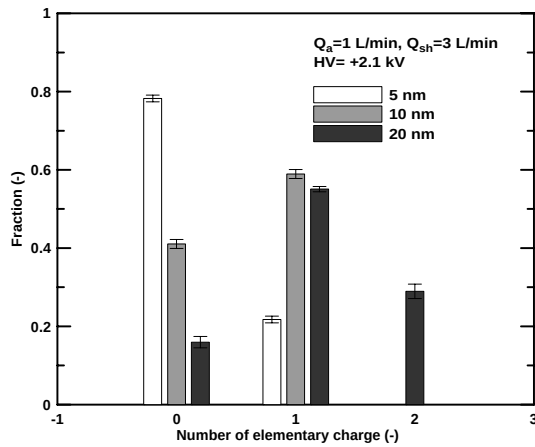


圖五 不同粒徑的微粒在最佳包覆氣體條件下之外在充電效率(a)充電器 1 在包覆氣體流量 20 L/min 和流速 21.26 m/s 下(b)充電器 2 在包覆氣體流量 3 L/min 下

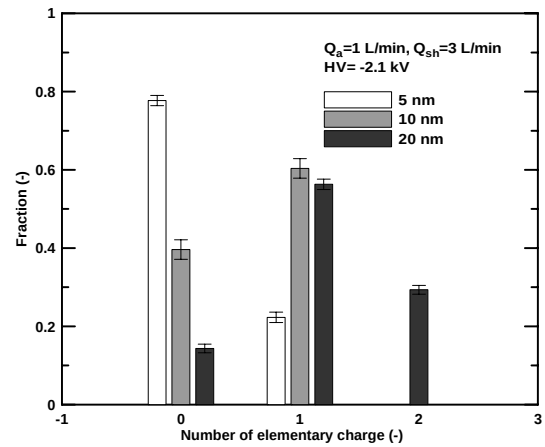
分別為 10 和 20 L/min 下 2.5~50 nm 微粒通過充電器 1 以及在氣膠和包覆氣體流量分別為 1 和 3 L/min 下 2.5~20 nm 微粒通過充電器 2，微粒的外在充電效率與充電電壓的關係圖，充電電壓的增加使得內在充電效率隨之上升，但靜電損失也同樣增加，因此外在充電效率曲線上會有一個最佳值，在最佳的操作條件下，可以找到此充電器的最佳外在充電效率。在本實驗中，充電器 1 擁有對 2.5、3、4、5、6、8、10、20、30、40、50 nm 的微粒的最高外在充電效率為 2.89、5.11、10.33、15.19、17.78、26.04、39.75、69.65、76.09、80.3、86.29%，而充電器 2 則擁有對 2.5、3、5、10、20 nm 的微粒的最高外在正電充電效率為 3.25、4.61、15.19、39.3、71.14% 和對 5、10、20 nm 微粒之最高外在負電充電效率為 14.69、37.24、66.35%，此二充電器的最佳外在充電效率皆較其他同為電暈放電之充電器的充電效率高。此外，對在最佳操作條件下的此二充電器進行出口微粒帶電量分析，如圖六(a)、(b)和(c)所示 50 nm 之微粒最多帶五個單位電荷，最大部分帶三個電荷，而粒徑為 10 nm 以下的微粒最多只能帶一個單位電荷，顯示粒徑對帶電量影響相當大，即使減少靜電損失，較小的微粒因難以被充電而效率無法大幅提升。



a



b



c

圖六 在最佳操作條件下充電器出口的微粒帶電分布圖 (a)充電器 1 在氣膠流量 10 L/min、包覆氣體流量 20 L/min 和流速 21.26 m/s、操作電壓+9 kV (b)(c)充電器 2 在氣膠流量 1 L/min、包覆氣體流量 3 L/min 和操作電壓±2.1 kV

5.2 平板濕式靜電集塵器對多徑微粒之去除效率

為了瞭解不同氣膠流量對於濕式靜電集塵器之微粒去除效率的影響，我們分別通入 5 L/min 及 10 L/min 之玉米油測試氣膠，實驗結果如圖 31 所示，當流量為 5 L/min 時，本濕式靜電集塵器對於微粒粒徑分佈在 10.4~590 nm 之玉米油微粒的去除效率皆大於 95% 以上，且在此粒徑範圍形成一個 U 型的收集效率曲線，這個實驗結果與先前許多文獻之理論結果相符(Hinds, 1999; Yoo et al, 1998)。而當氣膠流量為 10 L/min 時，濕式靜電集塵器對於 20~600 nm 微粒之去除效率皆下降，且 U 型收集效率更為明顯。而當粒徑分佈為 10~20 nm 時，集塵器對兩種氣膠流量之收集效率沒有很明顯的差異，其原因為小微粒的擴散損失因氣膠流量提高而增加。

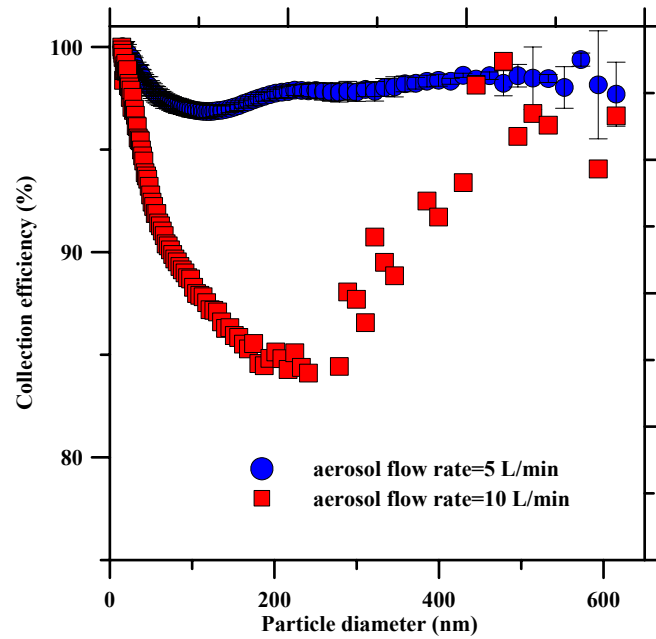


圖 31 濕式靜電集塵器在不同氣膠流量下對於玉米油微粒之去除效率，電壓 4.3 kV。氣膠流量分別為 5 及 10 L/min。

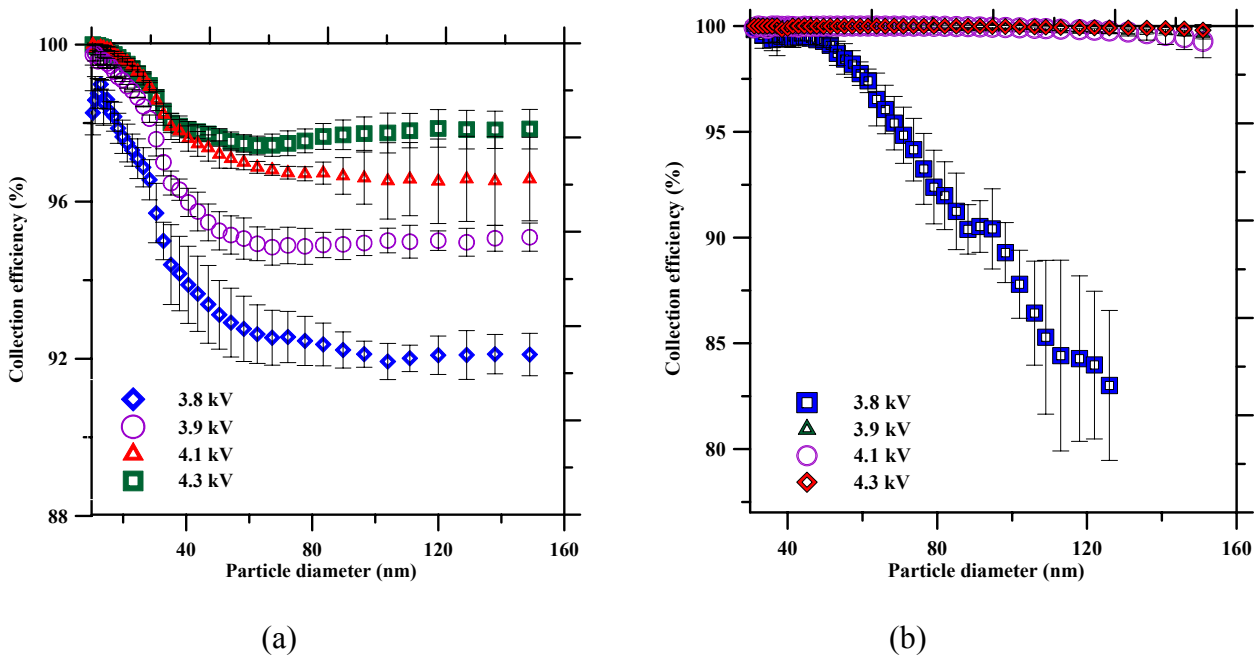


圖 32 濕式靜電集塵器在不同施加電壓下對於玉米油微粒及 NaCl 之收集效率。(a)玉米油微粒，(b)NaCl 微粒。氣膠流量為 5 L/min，施加電壓為 3.8~4.3 kV。

當施加電壓為 3.8~4.3 kV，氣膠流量為 5 L/min 時，濕式靜電集塵器對於玉米油微粒及 NaCl 微粒之去除效率分別如圖 32 a, b 所示。如預期的，集塵效率隨著施加電壓的上升而上升，且當施加電壓為 4.3 kV、粒徑分佈範圍為 10~150 nm 時，靜電集塵器對於玉米油及 NaCl 微粒之去除效率皆大於 98 % 以上。

5.3 濕式靜電集塵器之微粒負荷實驗

為了進一步瞭解固體微粒在乾式與濕式靜電集塵器內的沉降行為及其負荷量對於微粒收集效率的影響，本研究利用 TiO_2 微粒作為測試微粒，並利用粉塵產生器 Jet-O-Mizer 來產生 0.1-100 g/hr 之粉塵。在集塵器後方放置一片濾紙收集穿透靜電集塵器之微粒，以瞭解微粒的負荷量。在通入粉塵一段時間之後，我們利用玉米油微粒來測試靜電集塵器之集塵效率。當乾式靜電集塵器經過半小時之微粒負荷實驗後，其微粒負荷量約 0.68 g，集塵情形如圖 34 所示，我們可以很明顯的看出收集板上及黃金線上皆有累積的 TiO_2 粉塵，且當玉米油微粒為 38.5 nm 時，去除效率由原來的 99% 降至 91%，當粒徑為 399 nm 時，微粒的去除效率也略微下降至 96%，如圖 35 所示。當乾式靜電集塵器經過兩小時之微粒負荷實驗後，粉塵負荷量為 3.81 g，集塵器對於粒徑小於 130 nm 之微粒的去除效率降低至 40% 以下，而大於 130 nm 之微粒其收集效率甚至降為零，如圖 35 所示，顯示乾式靜電集塵器在大量粉塵附著的情況下已失去了除塵的功效。



圖 34 乾式靜電集塵器粉塵負荷照片。
負荷時間為 30 分鐘。

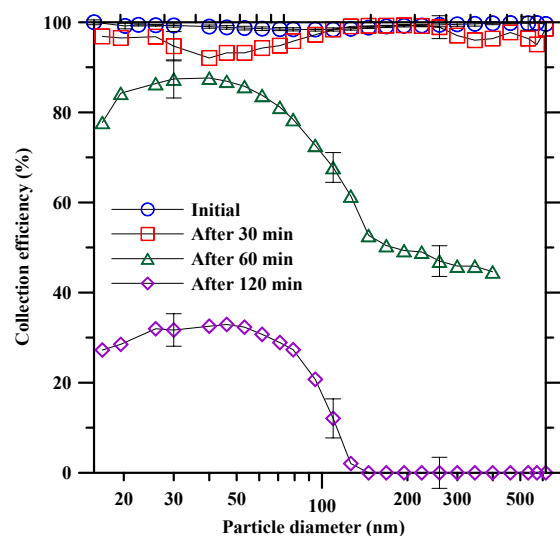


圖 35 乾式靜電集塵器經 TiO_2 粉塵
負荷 30-min 後以玉米油微粒作
收集效率實驗所得的數據，電壓
4.3 kV、氣膠流量 5 L/min。

當濕式靜電集塵器在相同的負荷量下進行粉塵負荷測試 2 小時後，收集板表面並沒有粉塵累積的現象，表示洗滌液有效的洗去粉塵，但是電極線上仍有微量粉塵附著。此外，我們利用玉米油微粒進行微粒去除效率實驗發現去除效率並沒有明顯的下降，實驗結果如圖 38 所示，且脈衝噴器閥可有效清除附著於電擊現表面之粉塵。因此我們可以判定本研究所設計之濕式靜電集塵器相較於乾式及塵器對於油性微粒及具有高電阻係數之固體微粒有較高效率之粉塵去除效率。

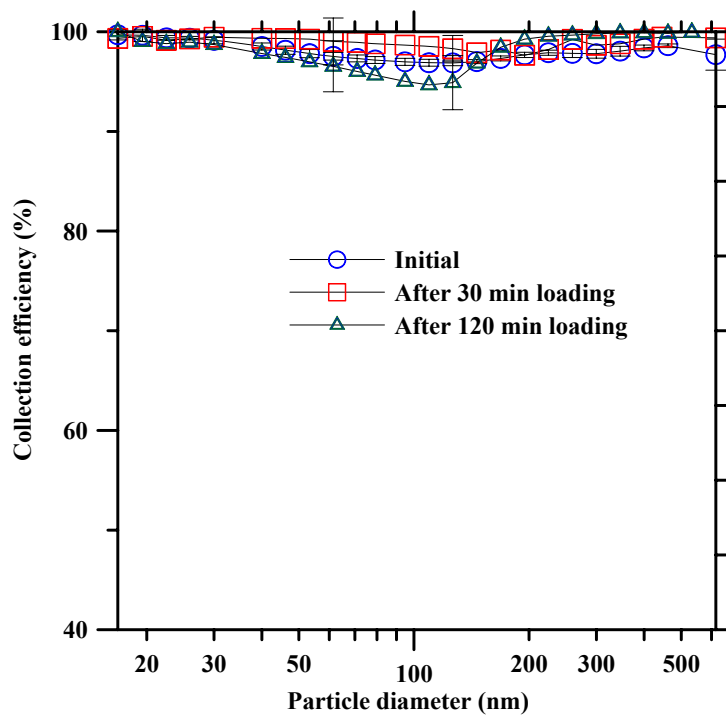


圖 38 濕式靜電集塵器經 TiO_2 粉塵負荷 30-min 後以玉米油微粒作收集效率實驗所得的數據，電壓 4.3 kV、氣膠流量 5 L/min。

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，目前已完成進行濕式集塵器對多徑分佈微粒的收集效率測試，並進行濕式集塵器對高濃度粉塵微粒的收集效率測試。本研究未來將利用數值方法針對平板濕式靜電集塵器內部電壓、電場強度及微粒收集效率進行模擬，並設計大型濕式靜電集塵器，在大風量情況下(500 L/min)進行集塵效率測試，並與理論值進行比對。

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。