

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩士論文

濕式靜電旋風集塵器實場測試研究

Studies wet electrostatic cyclone in the actual operation of
the test plant

The logo of National Central University (NCU) is a circular seal. It features a central shield with a book and a torch, surrounded by the letters 'ES' and 'A'. The year '1895' is inscribed at the bottom of the shield. The entire seal is encircled by a decorative border.

研究生：王秉才

指導教授：蔡春進教授

中華民國 103 年 6 月

濕式靜電旋風集塵器實場測試研究

**Studies wet electrostatic cyclone in the actual operation of the test
plant**

研究生：王秉才

student : Binner-Tsai Wang

指導教授：蔡春進

Advisor : Chuen-Jinn Tsai

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩士論文

A Thesis

**Submitted to Degree Program of Industrial Safety and Risk Management
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Industrial Safety and Risk Management**

June, 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一零三年六月

致謝

濕式靜電旋風集塵器的研究能夠順利開始，首先要感謝的就是指導教授 蔡春進老師。感謝老師在學術上不厭其煩的指導，並提供許多協助的資源，讓我能夠把研究順利完成，從教授身上可以學習到研究認真的態度，與作學問精確嚴謹的方法。在論文的修訂上，要特別感謝 簡弘民博士、程裕祥所長及 黃建彰博士提供了寶貴且專業的意見與指正，使得本論文的內容更加地圓融與充實，同時也給我許多啟發與收穫，秉才在此由衷感謝。

我還要感謝實驗室的夥伴們，所有幫助過我的學長學弟和一起打氣加油的同學，在實驗的規劃設計、儀器的準備及論文的寫作編排上提供許多協助及意見，還有在生活上的相處中，真正讓我感受到”夥伴”兩個字的重要。感謝冠宇、盧偉、能駿、怡伶、CUC、紹銘、俊男及毅弘等學長姐們的照顧，平時提供許多歡笑及力氣的國瑞、麒鈺、子宜、ADE 及明芳學弟妹們。

最後感謝我的家人，一直以來給我自由發揮空間，讓我不用擔心世俗的眼光，能專注於課業與研究，我的榮耀與喜悅來自於您們大家，也願分享與您們!

秉才 於民國一〇三年六月二十三日

摘要

乾式靜電集塵器具有低操作壓損及高處理效率之優點，使其廣泛地被工業界所使用。然而該設備也有以下缺點，如使用上易發生粉塵餅堆積，進而導致處理效率降低、粉塵再揚起、背電暈及無法連續性操作等問題。

為改善上述問題，本研究設計一個濕式靜電旋風集塵器(wet electrostatic cyclone)，本集塵器主要由旋風器、放電電極和循環水槽組成。當粉塵進入本集塵器後，旋風器會先將粒徑大於 $1\ \mu\text{m}$ 之微粒去除，再由放電電極產生的電暈對微粒進行充電，讓微粒移動至低電位區(旋風器內壁為本設備接地端，故電位為 $0\ \text{V}$)，再由壁面上均勻水膜將微粒帶至循環水槽中，以去除 $1\ \mu\text{m}$ 以下之微粒。

完成本集塵器設計後，即用 Al_2O_3 油酸(OA)及碳煙(Soot)進行測試，結果顯示風量在 $1000\ \text{L}/\text{min}$ 時的去除效率在 $97\sim 99\%$ 之間，風量在 $2500\ \text{L}/\text{min}$ 時的去除效率在 $88\sim 95\%$ 之間；風量在 $4500\ \text{L}/\text{min}$ 時的去除效率在 $78\sim 92\%$ 之間。

於半導體廠實場測試結果顯示，當集塵器操作電壓為 $-18\ \text{KVdc}$ 電流為 $4.8\ \text{mA}$ ，在連續操作 26 天下仍然可以對質量中間粒徑(mass median aerodynamic diameter, MMAD)為 $220\ \text{nm}$ 、質量濃度為 $20 - 50\ \text{mg}/\text{m}^3$ 的酸排放微粒維持 90% 以上的去除效率。實驗結束開啟設備進行檢視，收集壁面可持續保持清潔，本表示本集塵不會有粉塵餅堆積、粉塵再揚起的問題，且具有連續操作的功能。

關鍵詞：旋風集塵器、濕式靜電集塵器、濕式靜電旋風集塵器、空污控制設備

Abstract

Dry electrostatic precipitators (ESP) have been widely used to remove particles emitted from industrial processes for its advantage of low pressure drop and high collection efficiency. However, some disadvantages also exist including, for example, accumulated dust cakes on the discharge and collection electrodes resulting in problems of reduction of the collection efficiency, particle re-entrainment, back corona and discontinuous operation, etc.

In order to solve the problems associated with the traditional dry ESPs, a wet electrocyclone mainly consisting of a cyclone, discharge electrodes and circulation water channels was developed. The dust flow is first drawn into the device, after which the cyclone is used to segregate particles larger than 1 μm and then discharge electrodes with generated corona are used to charge particles. The charged particles of less than 1 μm are then moved to the low-potential zone (the inner wall of the cyclone is the grounding end of the device, thus with 0 V electric potential), subsequently carried to the circulation water channel by scrubbing water uniformly filmed onto the wall.

After the design of the wet electrocyclone, Al_2O_3 , oil acid and soot are chosen for validation test, the results of which show that the particle collection efficiency ranged from 97~99%, 88~95 % and 78~92 % at the dust flow rate of 1000, 2500 and 4500 L/min, respectively.

Field test results in a semiconductor industry showed that the present wet electrocyclone can be operated continuously for 26 days at collection efficiency of higher than 90% to control acid particles with mass median aerodynamic diameter (MMAD) of 22nm and mass concentration ranged from 20~50 mg/m^3 , when the operation voltage and current are 4.3 kV and 4.8 mA, respectively. The collection wall was checked to be clean after experiments, indicating that no dust cake deposition and particle re-entrainment exist and continuous operation could be achieved.

Keywords: cyclone particulator, wet electrostatic precipitator, wet electrocyclone, Air pollution control equipments.



目錄

致謝	i
摘要	ii
Abstract.....	iii
目錄	v
圖目錄	vi
表目錄	viii
符號說明	ix
一、 前言	1
1.1. 研究背景.....	1
1.2. 研究目的.....	7
二、 文獻回顧	9
2.1. 固定污染源空氣排放標準.....	9
2.2. 電極 I-Vcurves 的相關研究.....	10
2.3. 靜電理論公式.....	13
2.4. 靜電旋風集塵器的相關研究.....	15
三、 研究方法	20
3.1. 實驗室測試規劃.....	20
3.2. 實場測試規劃.....	21
3.3. 監測及採樣方法.....	21
3.4. 實驗設備.....	23
3.5. 實驗設備的 QA/QC	26
四、 實驗結果	28
4.1 實驗室產生粉塵濃度.....	28
4.2 在實場中濕式靜電旋風集塵的測試效率.....	29
4.3 長時間的實場測試效率與結果.....	29
4.4 設置實場機台的長時間運轉成本.....	31
五、 結論	33
六、 參考文獻	34
附錄-採樣分析紀錄.....	36

圖目錄

圖 1.1 為單區靜電集塵器(a)及雙區靜電集塵器(b)(王等人, 2003)。	4
圖 1.2 常見線式和板式集塵電極的幾何外型(王等人, 2003)。	5
圖 1.3 長芒刺電暈電極的結構(王等人, 2003)。	5
圖 1.4 靜電旋風除塵器結構(1.高壓靜電、2.出氣管、3.放電電極、4.收集壁面、5.絕緣礙子)(黃等人, 2003)。	6
圖 1.5 靜電+過濾網結構(1.高壓靜電、2.預電荷區、3.金屬網、4.濾料、5.支架)(黃等人, 2003)。	6
圖 1.6 靜電旋風集塵器主要電極形式和佈置方式(a.圓形線狀電極沿除塵器軸線佈置、b.圓形線狀電極沿排氣管四周佈置、c.直芒刺狀電極沿排氣管四周佈置、d.圓圈芒刺電極沿排氣管高度佈置)(黃等人, 2003)。	7
圖 2.1 放電針尖對接電針尖和放電針尖對接地平板的 I-V 曲線(陳等人, 2007)。	10
圖 2.2 改變高壓端和接地端針間的距離(d)的 I-V 曲線(陳等人, 2007)。	11
圖 2.3 改變針尖的半徑(a)的 I-V curve(陳等人, 2007)。	11
圖 2.4 改變同極針尖的間隔距離(s)的 I-V curve(陳等人, 2007)。	11
圖 2.5 多點-平板靜電集塵器(multipoint-to-plane electrostatic precipitator, MPPEP)示意圖(Le, 2013)。	12
圖 2.6 不同尖端間距(S)和施加電壓(Va)放電情況(Rong, et.al., 2010)。	12
圖 2.7 Lu(2012)實驗結果與 Deutsch-Anderson 方程式計算結果比較, 處理風量為 1000~4500 L/min, 施用電壓為 21 kV(a)油酸微粒(b)Al ₂ O ₃ 微粒(c) SiO ₂ 微粒(Le, 2012)。	17
圖 2.8 電壓大小對除塵效率的影響(許等人, 1997)。	18
圖 2.9 處理風量對去除效率的影響(許等人, 1997)。	18
圖 2.10 濕式靜電旋風器對於油酸、氧化鋁、碳煙微粒的去除效率比較(盧, 民國 101 年)。	19
圖 2.11 不同放電電極數量對於微粒去除效率的影響(盧, 民國 101 年)。	19
圖 3.1 實場測試濕式靜電旋風集塵器的流程圖。	22
圖 3.2 實場測試濕式靜電旋風集塵器的照片。	22
圖 3.3 高濃度粉塵微粒產生器(Jet-O-Mizer, Fluid Energy Model 000)。	23
圖 3.4 MOUDI 實際照片及內部結構示意圖。	24
圖 3.5 47 mm 鋁製濾紙固定座。	24
圖 3.6 煙道採樣專用的多孔金屬固氣分離器內部結構示意圖。	25
圖 4.1 濕式靜電旋風器對於不同粒徑微粒的去除效率比較。	28
圖 4.2 濕式靜電旋風集塵器實場測是效率。	29
圖 4.3 濕式靜電旋風集塵器長時間的實場測試效率結果。	30

圖 4.4 有連續清洗壁面(a)與無清洗壁面(b)的測試結果照片。.....31
圖 4.5 入口有細水霧(a)與無細水霧(b)噴灑的測試結果照片。.....31



表目錄

表 1.1 各國細懸浮微粒空氣品質標準制定現況。[環保署網站]	2
表 1.2 2011 年全台各縣市 PM _{2.5} 年平均濃度排序。[環保署網站].....	3
表 4.1 濕式靜電旋風集塵器長時間的實場測試資料。	30
表 4.2 評估設計 500 Nm ³ /min 的濕式靜電旋風集塵器一年用電成本。	32



符號說明

A	收集面積(m ²)
A ₂	流孔板面積(m ²)
a	常數(a ≤ 2)
β ₁ 、β ₂ 、β ₃ 及 β ₄	回歸係數
C	流量係數
\bar{C}	離子的平均熱運動速度(m/s)
D	風管直徑(m)
d	放電尖端至收集板之間距離(m)
d ₁	放電電極針尖的直徑(m)
E	無電暈放電下的電場強度(V)
E _b	電崩潰電壓(V)
E _q	電場強度(V)
E _l	放電電極表面之電場強度(V)
e	一個電子之電量 = 4.8 × 10 ⁻¹⁰ stC
ε	微粒的介電係數
ε ₀	空氣的容電係數
I	總電流(A)
K _E	常數值
k	Boltzmann constant
N _i	離子濃度(#ions/m ³)
N _{De}	德意志數(Deutsch Number)
P ₁ 、P ₂	位置壓力(Pa)
Q	氣體流量(m ³ /s)
q	微粒之帶電量(C)

r_1	放電電極針尖的半徑(m)
r_2	放電電極針尖到收集極板的間距(m)
t	微粒之充電時間(sec)
μ	氣體黏滯係數($N \cdot s/m^2$)
V	管內流速(m/s)
V_c	零界電壓(V)
V_{TE}	微粒的飄移速度(m/s)
ν	運動黏滯係數($N \cdot s/m^2$)
W	微粒移動速度(m/s)
Z_i	空氣離子的動力移動性(m^2/Vs)
η_t	總去除效率(%)
η_c	旋風去除效率(%)
η_e	靜電去除效率(%)



一、前言

1.1. 研究背景

細懸浮微粒(Fine Particulate Matters)，係指懸浮在空氣中氣動直徑小於 2.5 μm 以下的粒子(以下簡稱 $\text{PM}_{2.5}$)。 $\text{PM}_{2.5}$ 可分為自然界產出及人為產出這兩種，人為的來源又可分為原生性有機碳、衍生性有機碳、元素碳及各種無機鹽類等，其反應機制都相當複雜。

根據流行病學研究結果指出，長期暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 的環境與肺癌的發生率、小孩肺部發展遲緩、氣喘呼吸道病人的住院率、心血管疾病的發生及死亡率有關(Pope et al., 2002; Gauderman et al., 2004)， $\text{PM}_{2.5}$ 對於人體健康有明顯的影響，濃度每增加 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，會增加 25% 的呼吸道疾病死亡及 11% 的心血管疾病死亡(Pope et al., 2002)。

有鑑於此，世界各國已開始建立有關 $\text{PM}_{2.5}$ 的管制標準，而台灣也於 2012 年八月起將 $\text{PM}_{2.5}$ 納入管制標準。表 1.1 為目前世界上已公布 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準制定現況的國家及標準值，美國在 2006 年修訂空氣品質標準制時，訂出年平均濃度 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日平均濃度 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。我國於 2009 年開始針對 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準進行檢討及防治策略的推動，表 1.2 為 2011 年全台各縣市 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均濃度排序，平均濃度為 31.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，遠高於美國年平均濃度兩倍之高，因此台灣在 2012 年參考美國及日本管制標準，針對 $\text{PM}_{2.5}$ 進行中長期污染管制策略。世界衛生組織(World Health Organization,WHO)預計在 2015 年達成 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質減量目標為 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2020 年達成 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質減量目標為 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表 1.1 各國細懸浮微粒空氣品質標準制定現況。[環保署網站]

空氣品質標準 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		我國	WHO	USEPA	加州	EU	澳洲	日本	加拿大	UK	新加坡	香港
施行日			2006/10	2006/9	2006/5	2008/5	2005	2009	2006	2004/12		
PM ₁₀	年平均值	65	20	--	20	40	--	--	30	40	--	55
	24 小時平均值	125	50	150	50	50 ^{&}	50 [*]	100	50	50	150	180
PM _{2.5}	年平均值	--	10	15	12	25 ^{***}	8	15	--	25	15 ^{**}	35 [*]
	24 小時平均值	預警值 65	25	35	--		25	35	30 [*]	--	35	75 [*]

備註：***為目標值於 2010 年 1 月 1 日生效，2015 年 1 月 1 日為空品標準值。

#限制一年不得超過 5 天。

&限制一年不得超過 35 天。

+加拿大 2010 年目標值。

**為 2014 年要符合年平均之標準值。

☆香港環保署之建議值。



表 1.2 2011 年全台各縣市 PM_{2.5} 年平均濃度排序。[環保署網站]

2011 全台各縣市 PM _{2.5} 全年監測濃度排序					
排序	縣市	PM _{2.5} 年均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	排序	縣市	PM _{2.5} 年均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	嘉義市	74.3	12	新竹市	30.7
2	高雄市	44.2	13	苗栗縣	29.4
3	金門站	41.7	14	新竹縣	28.6
4	台南市	36.6	15	台北市	27.1
5	嘉義縣	36.2	16	新北市	26.3
6	南投縣	36	17	桃園縣	25.2
7	彰化縣	35.2	18	澎湖縣	24.8
8	台中市	34.2	19	花蓮縣	20.9
9	馬祖站	34.1	20	基隆市	20.2
10	雲林縣	33.1	21	宜蘭縣	19.7
11	屏東縣	32.7	22	台東縣	14.1

目前市面針對有效去除 PM_{2.5} 常見的處理設備有：靜電集塵器、文式洗滌塔及袋式集塵器，靜電集塵器的缺點是需要經常得清洗收集壁面及放電尖端、收集壁面及放電尖端都是耗材、無法處理高沸點聚合物質；文式洗滌塔的缺點是有較大的操作壓損（約在 10 inH₂O）；袋式集塵器的缺點是占地面積大及無法處理高溫廢氣、高濕及高沸點聚合物質。

靜電集塵器(ESP, electrostatic precipitator)的作用是利用高壓電產生器產生高壓電壓，傳導至放電電極產生電場，電場使電子加速到很高的速度，這些高速電子具有相當大的能量，當這些電子撞擊空氣分子時，可將其外層電子釋放出來，進而產生更多的自由電子和正離子，這種現象稱之為電離。新的電子又被加速到能引起再次碰撞電離所需的速度，不斷的產生更多的自由電子，稱為雪崩相乘效應（avalanche

multiplicatoin)，其中正離子被電極吸收，負離子在電場作用下流向收集極板，此為微粒充電的主要機制。主要機制有電場充電 (field charging) 及擴散充電 (diffusion charging) 兩種。電場充電主要對粒徑大於 $1.0\ \mu\text{m}$ (微米) 之微粒有效；擴散充電則對小於 $0.3\ \mu\text{m}$ 以下粒徑之微粒有效；在 0.3 至 $1.0\ \mu\text{m}$ 間之微粒，兩種機制同樣重要。大於 $1.0\ \mu\text{m}$ 以上微粒之飽和充電量隨著微粒之粒徑平方成正比，與電場強度亦成正比，因此大微粒之帶電量多，易被收集。

目前市面上的靜電除塵器的種類，依據放電電極的幾何型狀分為線-管型和線-板型；依據氣流流場流向可以分為立式和臥室；依據清灰的方式可分為乾式和濕式；依據電荷方式集分離區域佈置可分為單區和雙區，如圖 1.1、圖 1.2、圖 1.3、圖 1.4 及圖 1.5 所示(王等人，2003)。

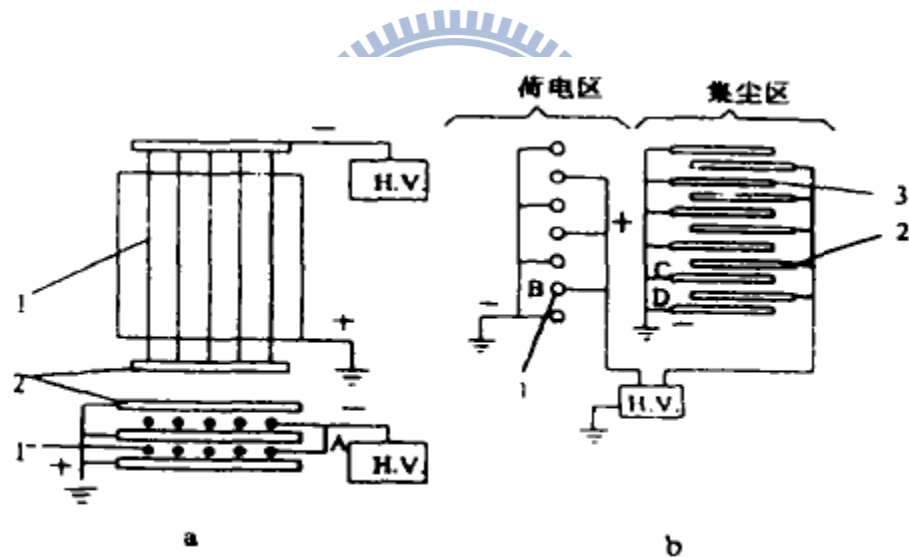


圖 1.1 為單區靜電集塵器(a)及雙區靜電集塵器(b)(王等人，2003)。

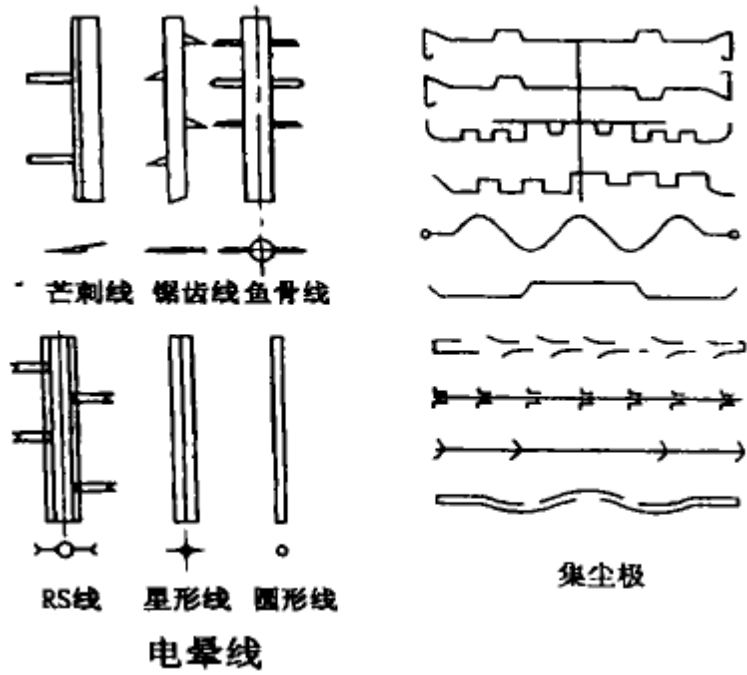


圖 1.2 常見線式和板式集塵電極的幾何外型(王等人，2003)。

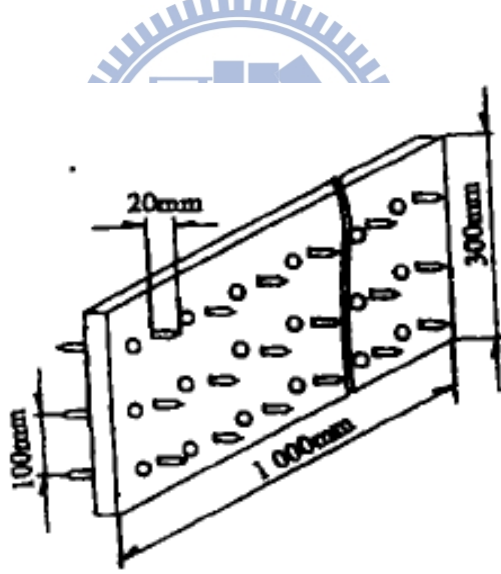


圖 1.3 長芒刺電暈電極的結構(王等人，2003)。

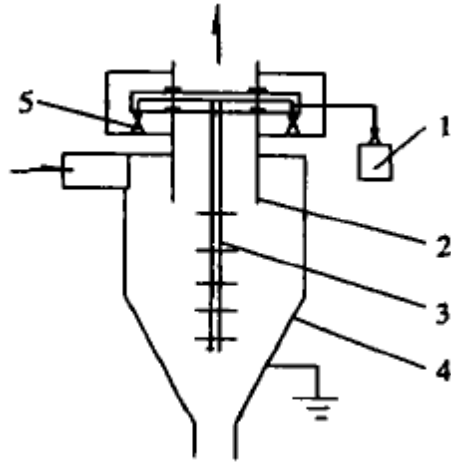


圖 1.4 靜電旋風除塵器結構(1.高壓靜電、2.出氣管、3.放電電極、4.收集壁面、5.絕緣礙子)(黃等人，2003)。

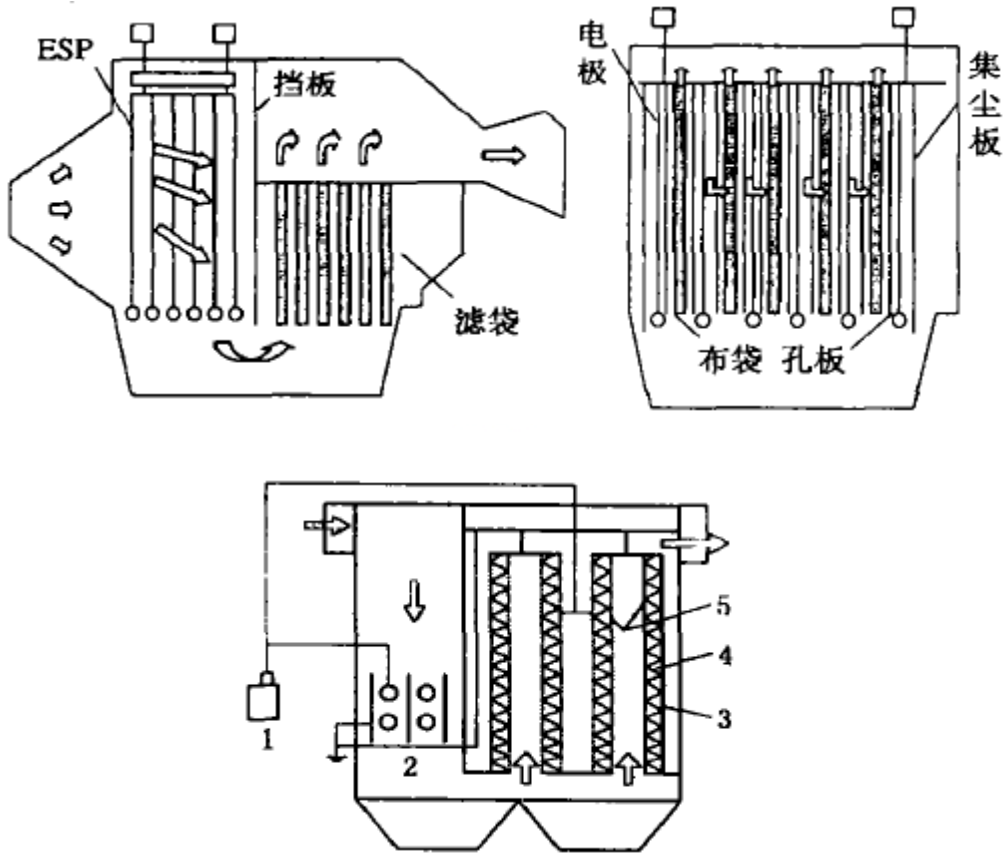


圖 1.5 靜電+過濾網結構(1.高壓靜電、2.預電荷區、3.金屬網、4.濾料、5.支架)(黃等人，2003)。

靜電旋風集塵器是在旋風集塵器中放置高壓靜電放電電極，如圖 1.6 靜電旋風集

塵器主要電極形式和佈置方式；旋風集塵器的優點在於結構簡單及製作價格便宜，靜電集塵器的優點在於對次微米的微粒有較佳的收集效果，結合兩種設計的優點，微粒粒徑越大受離心力就越大，次微米微粒雖不受離心力影響，但受靜電力影響，便可以提高微粒去除效率。

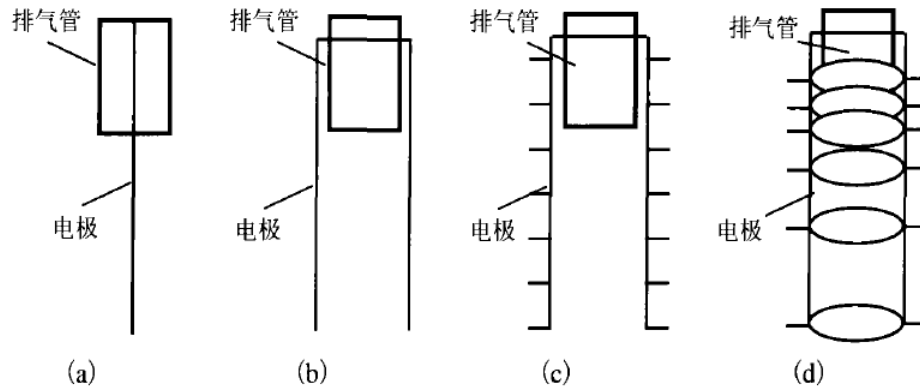


圖 1.6 靜電旋風集塵器主要電極形式和佈置方式(a.圓形線狀電極沿除塵器軸線佈置、b.圓形線狀電極沿排氣管四周佈置、c.直芒刺狀電極沿排氣管四周佈置、d.圓圈芒刺電極沿排氣管高度佈置)(黃等人，2003)。

1.2. 研究目的

多數的靜電集塵器都是依據實驗室產生的微粒進行實驗，實驗室產生微粒質量濃度與實場產生微粒質量濃度有相當大的不同，且實驗室內能進行的實驗時間非常的短暫，無法得知長時間運轉下靜電除塵器可能產生的各種現象，因此本研究是為了測試濕式靜電旋風集塵器實場運轉狀況，將於實場實驗並比對實驗室實驗結果。

本設備使用外緣呈尖銳的圓盤作為放電電極，產生電暈放電；細水滴由旋風器入口噴入，會因電場充電而帶電，在離心力及靜電力的作用下，水滴會徑向飄移至旋風器壁面形成水膜，可連續清洗旋風器壁面累積的粉塵至下方的漏斗中，並在水滴徑向飄移過程中增加微粒的去除效果。如此即可以避免傳統乾式靜電旋風集塵器內因粉塵累積而導致收集效率降低的問題。

在測試上我們採取連續運轉不停機的模式，觀察設備壁面在有循環水的情況下是

否會累積粉塵，實場中酸氣對於設備長時間運轉是否會有影響，並記錄水中的 pH 濃度讀值、導電度讀值及水中陰陽離子濃度。藉以推算出本設備循環水的更換週期及其他相關之操作成本。

本研究目的是將濕式靜電旋風集塵器進行實場的實驗，實場實驗最重要的兩個重點分別是：1.該系統長時效連續運轉下,針對粒狀污染物的去除效率趨勢；2.該系統在運轉中所消耗的能源成本估算。



二、文獻回顧

有關於濕式靜電旋風集塵器的相關研究文獻分類為：1.固定污染源空氣排放標準、2.電極 I-V curves 的相關研究、3.靜電理論公式及 4.靜電旋風集塵器的相關研究。

2.1. 固定污染源空氣排放標準

根據行政院環保署於中華民國 102 年 04 月 24 日發布固定污染源空氣污染物排放標準之規定，粒狀污染物重量濃度依排氣量區分排放濃度，如表 2.1 固定污染源(粒狀)空氣排放標準。

表 2.1.1 固定污染源(粒狀)空氣排放標準。

粒狀污染物(重量濃度)	排氣量 Q (Nm ³ /min)	濃度 C (mg/Nm ³)	周界 (μg/Nm ³)	換算常數, a ₁	換算常數, a ₂
	30 以下	500	500	0.58	2.8×10 ⁻⁴
	50	411			
	100	314			
	200	241			
	300	206			
	500	169			
	800	141			
	1000	129			
	2000	99			
	3000	85			
	5000	70			
	8000	58			
	10000	53			
	20000	41			

	30000	35			
	50000	29			
	70000 以上	25			
	燃燒過程	50 ₍₂₎			
		100 ₍₃₎			
	燃燒以外過程	100 ₍₄₎			

* (2)(3)(4) 使用加熱爐、裂解爐及鍋爐以外之燃燒過程。

2.2. 電極 I-V curves 的相關研究

根據多位學者研究，可以將放電電極和收集板分為針、線、板及電暈四種狀態的相互組合，當放電電極及收集板都是相同狀態條件時，並且針>線>板的 I-V curves；當放電電極及收集板是不同狀態條件時，會增加四個影響實驗的參數，參數分別為放電電極的直徑、收集板的面積、放電電極分佈的間距及放電電極與收集板的距離，如圖 2.1 所示。圖 2.2 顯示改變高壓端和接地端針間隔距離(d)的 I-V 曲線結果，當間隔的距離(d)增加時最大電壓值會相對升高；圖 2.3 則顯示改變針尖的半徑(a)的 I-V 曲線結果，當針尖的半徑越小時消耗電流量越大；圖 2.4 為改變同極針尖間隔距離(s)的 I-V 曲線結果，當針尖間隔距離增加時消耗電流量相對升高。

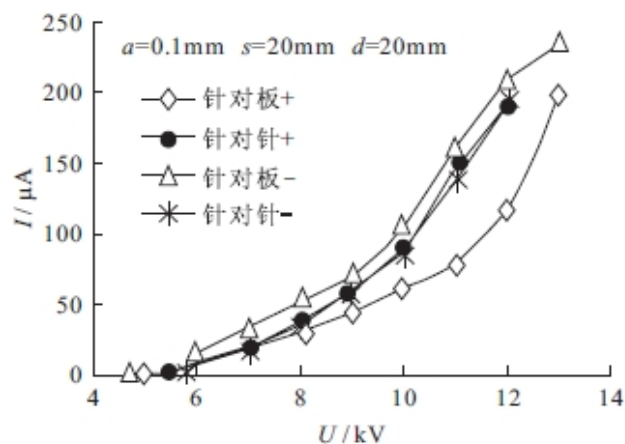


圖 2.1 放電針尖對接電針尖和放電針尖對接地平板的 I-V 曲線(陳等人，2007)。

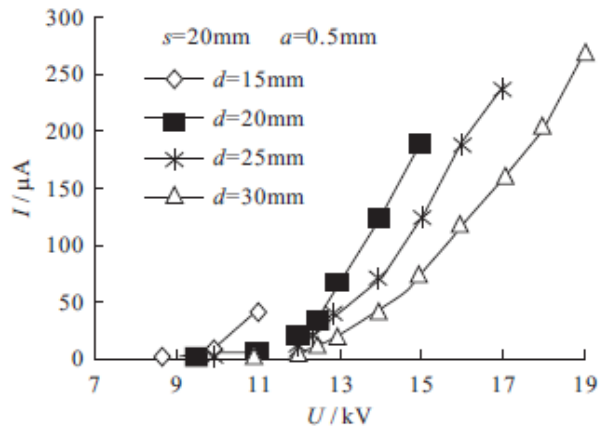


圖 2.2 改變高壓端和接地端針間的距離(d)的 I-V 曲線(陳等人, 2007)。

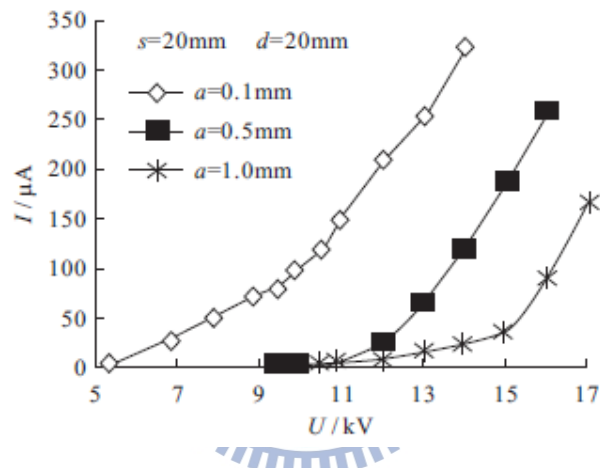


圖 2.3 改變針尖的半徑(a)的 I-V curve(陳等人, 2007)。

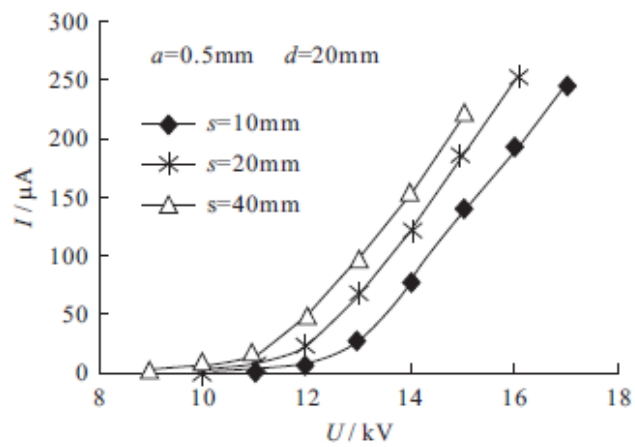


圖 2.4 改變同極針尖的間隔距離(s)的 I-V curve(陳等人, 2007)。

Le(2013)針對 MPPESP 做相關研究，如圖 2.5 為多點-平板靜電集塵器(multipoint-to-plane electrostatic precipitator, MPPESP)示意圖，研究結果顯示收集效率受操作條件所影響，當氣體流量增加、施用電壓(V_a)及離子電流減小、放電尖端與板間距(d)增加、尖端半徑(a)增加、尖端間距(S)減少及針尖長度減少，其 MPPESPs 收集效率降低，圖 2.6 顯示放電尖端相互作用使總電場變得更均勻，電離子區域體積變小且放電強度減小。

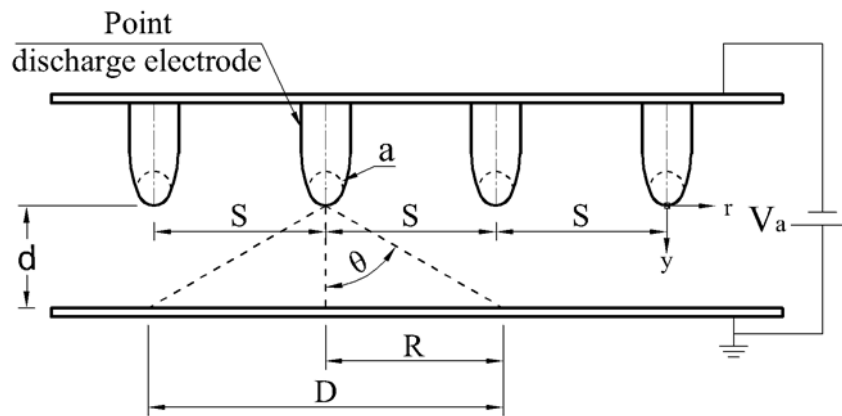


圖 2.5 多點-平板靜電集塵器(multipoint-to-plane electrostatic precipitator, MPPESP)示意圖(Le, 2013)。

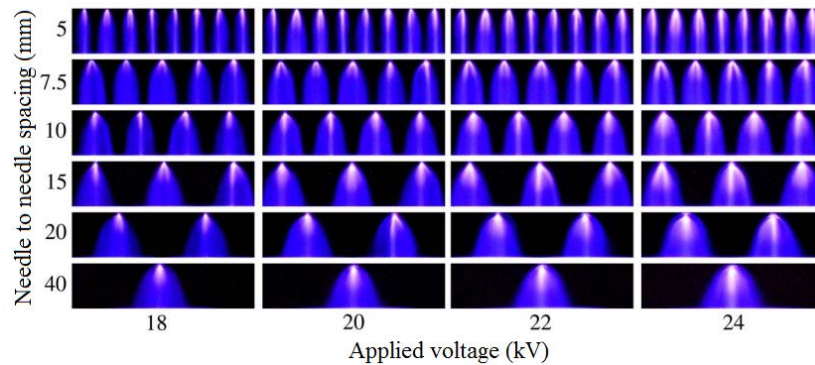


圖 2.6 不同尖端間距(S)和施加電壓(V_a)放電情況(Rong, et.al., 2010)。

Kozlov and Solovyov (2006)研究針-板型的靜電集塵器，結果指出放電針尖數量增

加時，總消耗電流會成正比趨勢增加，Adamiak and Atten (2004)推導出 I-V curves 公式如下：

$$I = aZ_i\varepsilon_0V(V - V_c)/d \quad (2.1)$$

I 為總電流，A。

a 為常數($a \leq 2$)。

Z_i 為空氣離子的動力移動性， m^2/Vs 。

V 為電壓值，V。

V_c 為零界電壓，V。

ε_0 為空氣的容電係數。

d 為放電尖端至收集板之間距離，m。

2.3. 靜電理論公式

本研究中放電電極是用多個針尖平均分佈在旋風集塵器的中心，收集極板為旋風器的外殼，此一設計近似針與板的結構；針與板的靜電理論公式已有多為學者提出相關研究結果，在無電暈放電下的電場強度 E 公式如下：

$$E = \frac{V}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.2)$$

r_1 為放電電極針尖的半徑，m。

r_2 為放電電極針尖到收集極板的間距，m。

當放電電極針尖的表面 $r \cong r_1$ 時，電場強度公式修正如下：

$$E = E_1 = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.3)$$

E_1 為放電電極表面之電場強度，V。

當電場強度大於電崩潰電壓 E_b 時，則會形成電暈放電，此時電崩潰電壓公式如

下：

$$E_b = 3000 + 127d_1^{-0.5} \quad (2.4)$$

d_1 為放電電極針尖的直徑，m。

將公式(2.3)與公式(2.4)結合，令 $E_b = E_{1c}$ 則計算產生電暈之臨界電壓 V_c 公式為：

$$V_c = E_b r_1 (r_2/r_1) \quad (2.5)$$

當電暈產生時，徑向位置的電場強度公式如下：

$$E = \frac{1}{r} \left\{ (E_1 r_1)^2 + \frac{I}{2\pi\epsilon_0 Z_i} (r^2 - r_1^2) \right\}^{0.5} \quad (2.6)$$

在穩定狀態時，離子電流 I 公式如下：

$$I = 2\pi r (1) E Z_i N_i e \quad (2.7)$$

$E Z_i$ 為離子之速度，m/sec。

N_i 為離子濃度，#ions/m³

e 為一個電子之電量 = 4.8×10^{-10} stC = 1.6×10^{-19} C

電暈放電電場強度隨著距離 r 的變化公式如下：

$$E_{\text{wall}} = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 Z_i}} \quad (2.8)$$

$$V = V_c + E_{1c} r_1 \left[\sqrt{1 + \theta} - 1 - \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \theta}}{2} \right] \quad (2.9)$$

$$V_c = E_{1c} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.10)$$

$$\theta = \frac{I r_2^2}{2\pi\epsilon_0 Z_i E_{1c}^2 r_1^2} \quad (2.11)$$

微粒被充電的方式兩種機制：1. 電場充電(field charging)；2. 擴散充電(diffusion charging)。這兩種機制可同時作用公式為：

$$n_p = \frac{3\varepsilon E_0 D_p^2}{\varepsilon + 24K_E e} \frac{\pi K_E Z_i e N_i t}{1 + \pi K_E Z_i e N_i t} + \frac{D_p kT}{2K_E e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K_E D_p \bar{C} N_i t e^2}{2kT} \right] \quad (2.12)$$

ε 為微粒的介電係數

\bar{C} 為離子的平均熱運動速度

K_E 為一常數值。

t 為微粒之充電時間，sec。

2.4. 靜電旋風集塵器的相關研究

有學者的研究指出，微粒在靜電旋風集塵器中的停滯時間長短，會影響微粒去除效率，停滯時間越長去除效率越高(Dietz, 1982；Lim et al. 2004)。Lapple (1951)根據實驗結果，推導出微粒在靜電旋風集塵器的停留時間計算公式如下：

$$t_c = \frac{V_{cyclone} - V_{outletcore}}{Q} \quad (2.13)$$

旋風器去除效率可由 2.14 公式(Lapple)計算得知，靜電集塵器去除效率可由 2.15 德意志-安德森公式計算得知，學者 Chen(2001)和廖(民國 86 年)分別提出了將旋風器與靜電集塵器串聯的機制，推導出機制對於微粒的去除效率，如公式 2.16。

$$\eta_c = \frac{1}{1 + \left[\frac{(D_p)_{cut}}{D_{pj}} \right]^2} \quad (2.14)$$

D_p 為微粒之直徑，m。

$$\eta_e = \left[1 - \exp^{-V_{TE} \left(\frac{A}{Q} \right)} \right] \times 100\% \quad (2.15)$$

A 為靜電集塵區的有效面積， m^2 。

Q 為氣體流量， $N \cdot m^3/min$ 。

V_{TE} 為微粒的飄移速度， m/sec 。

$$\eta_t = 1 - (1 - \eta_c)(1 - \eta_e) \quad (2.16)$$

η_t 為總去除效率，%。

η_c 為旋風去除效率，%。

η_e 為靜電去除效率，%。

Le (2012)使用 Matts-Ohnfield equation (M-O)方程式(2.17)及 Deutsch-Anderson 方程式(2.18)將 Lu(2012)濕式旋風靜電集塵器實驗數據進行微粒收集效率計算預測，圖 2.7 為模擬計算與實驗數據比較結果，模擬結果顯示與實驗誤差可在 10% 以內；另外研究指出對油酸、 Al_2O_3 及 SiO_2 微粒收集效率可達 80% 以上，風量在 1000L/min 時，收集效率為 95.5~99.9%；2500L/min 時，收集效率為 86.7~98.7%；當風量提升為 4500L/min 時，收集效率則降為 79.3~97.8%。

$$\eta(\%) = \{1 - \exp[-(N_{De})^k]\} \times 100\% \quad (2.17)$$

$$\eta(\%) = \{1 - \exp\{-[\beta_1(N_{De})^{\beta_2} + \beta_3(N_{De}) + \beta_4]\}\} \times 100\% \quad (2.18)$$

η 為靜電旋風集塵器的總集塵效率，%。

N_{De} 為德意志數(Deutsch Number)。

β_1 、 β_2 、 β_3 及 β_4 為線性回歸得到的係數。

$$N_{De} = \frac{W \cdot A}{Q} \quad (2.19)$$

$$W = \frac{qE_p C}{6\pi\mu\alpha} \quad (2.20)$$

W 為微粒移動速度，m/s。

A 為收集面積， m^2 。

q 為微粒之帶電量，C。

E_q 為電場強度，V。

μ 為氣體黏滯係數， $N \cdot s/m^2$ 。

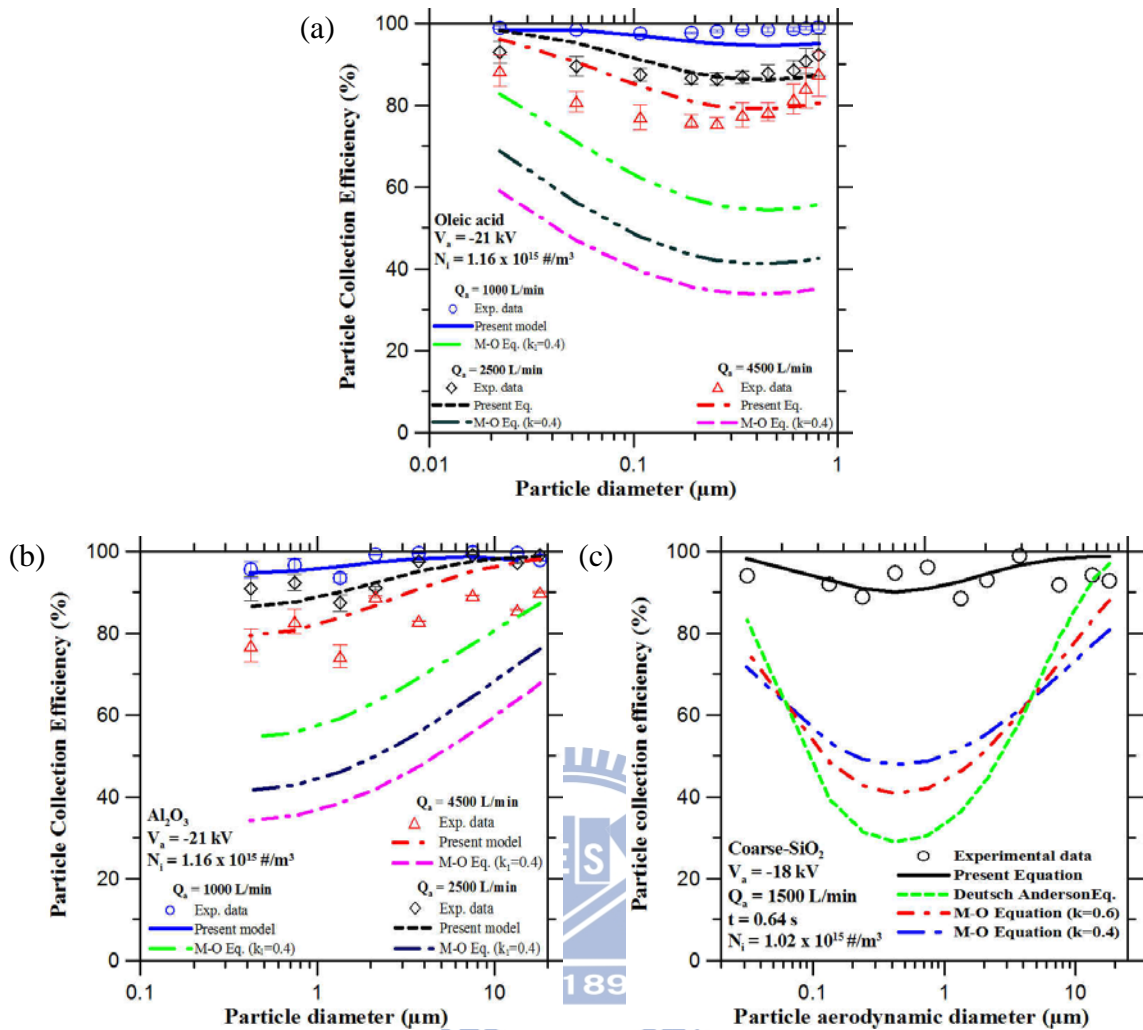


圖 2.7 Lu(2012)實驗結果與 Deutsch-Anderson 方程式計算結果比較，處理風量為 1000~4500 L/min，施用電壓為 21 kV(a)油酸微粒(b)Al₂O₃ 微粒(c) SiO₂ 微粒(Le, 2012)。

根據多位學者許等人(1997)的研究，微粒在靜電旋風中會同時受到靜電力及離心力的共同作用，電壓升高除塵效率逐漸升高，如圖 2.8 所示；在固定電壓輸出的條件下，若風量增大去除效濾效率會下降，處理風量對去除效率的影響如圖 2.9 所示。

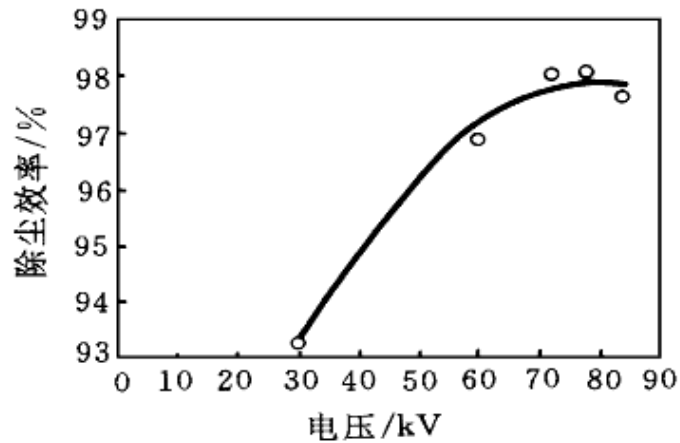


圖 2.8 電壓大小對除塵效率的影響(許等人，1997)。

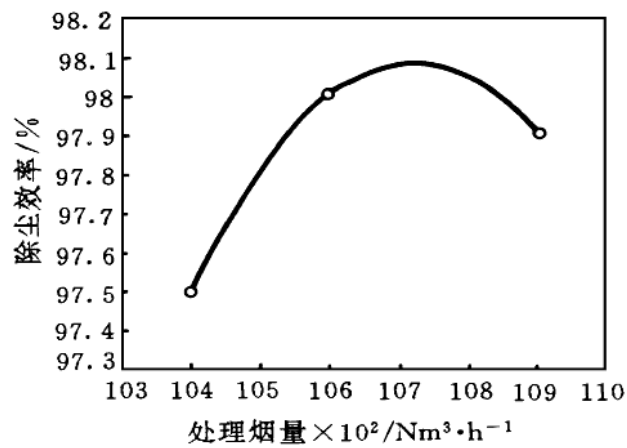


圖 2.9 處理風量對去除效率的影響(許等人，1997)。

微粒的電阻係數高低對於靜電集塵的效率是有決定性的影響，根據盧(民國 101 年)研究指出，在相同操作條件下，針對三種不同比電阻係數的次微米微粒進行實驗，相同粒徑範圍內的集塵效率以比電阻係數低的碳煙最高，其次為油酸，最後為比電阻係數最高的氧化鋁最低，如圖 2.10 所示；改變電極的數量會影響微粒充電時間，進一步會影響到去除效率，充電時間越長則微粒的去除效率越高，如圖 2.11 所示。

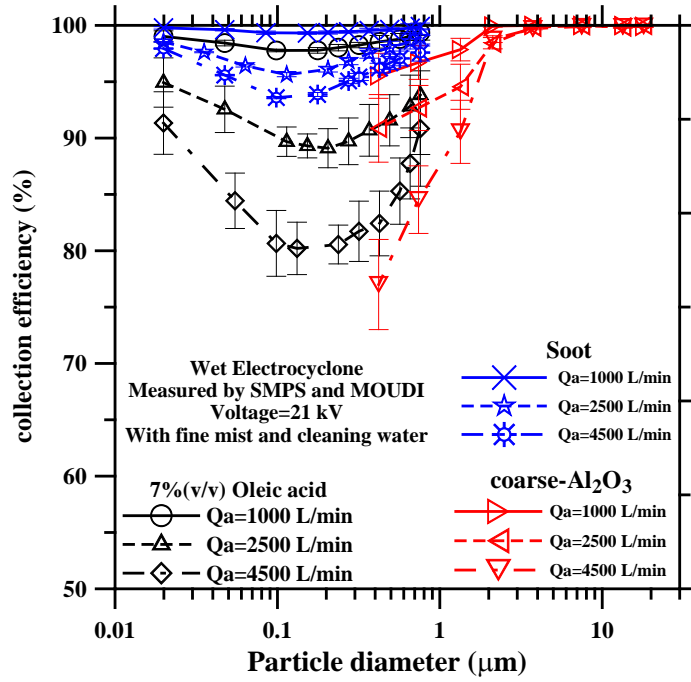


圖 2.10 濕式靜電旋風器對於油酸、氧化鋁、碳煙微粒的去除效率比較(盧，民國 101

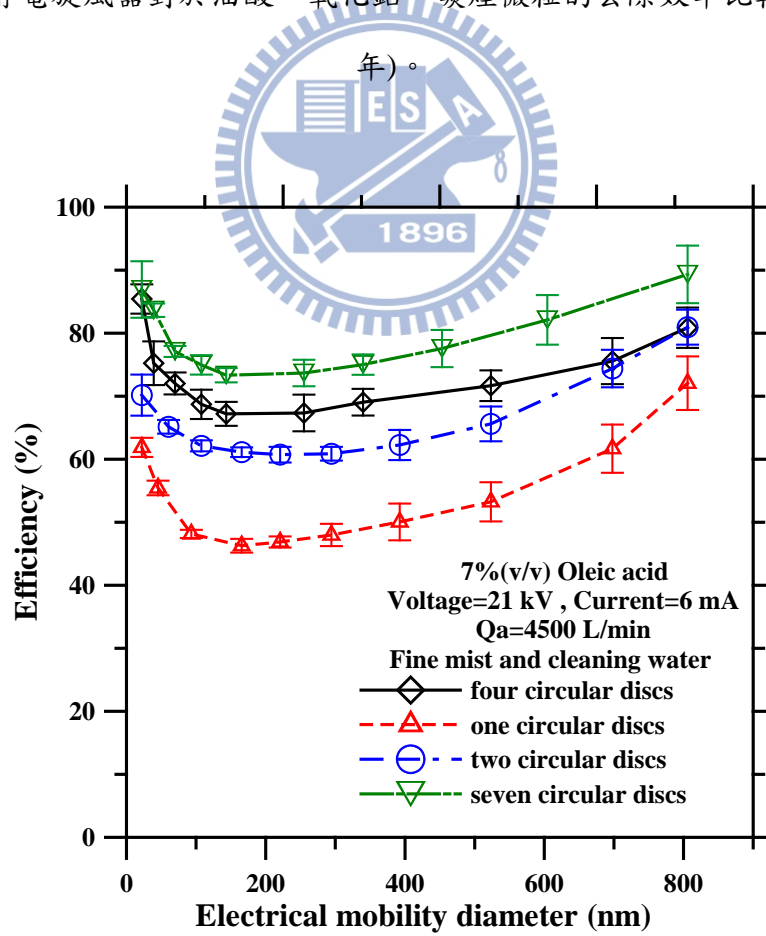


圖 2.11 不同放電電極數量對於微粒去除效率的影響(盧，民國 101 年)。

三、研究方法

本實驗測試所使用之機台為蔡春進教授開發的高效率濕式靜電旋風集塵器(wet electrocyclone)，其放電電極是由 7 層針尖電極所組成，各電極與旋風器收集壁面為相等距離；研究分為兩階段的實驗過程，第一階段為在實驗室進行測試，第二階段為在實場進行測試。測試氣體流量分為 1000 LPM 及 4500 LPM，使用實場煙道排放出的廢氣做為測試氣體來源，上述實驗高壓靜電產生器產生固定的電壓(21kVdc)，測試濕式靜電旋風集塵器在各種操作條件下微粒的去除效率。

3.1. 實驗室測試規劃

實驗需產生兩種粒徑範圍不同的微粒，分別為 0.01 ~ 1 μm 及 1 ~ 10 μm ；粒徑範圍 0.01 ~ 1 μm 的微粒是使用定量輸出霧化器(Atomizer Model 3076 PSI)，將配製好的油酸溶液(7 v/v)霧化產生多徑微粒(電阻係數=8.0~16 $\times 10^8 \Omega\text{-cm}$)。當進流壓力調至 35 psi 時產生的氣流量為 3.5 L/min，注入系統後的數目濃度為 0.1~6 $\times 10^6$ 顆每立方公分。粒徑範圍 1 ~ 10 μm 的微粒是使用高濃度粉塵產生器(Jet-O-Mizer, Fluid Energy Model 000)產生，將粒徑範圍在 8~10 μm 的氧化鋁微粒，以 150 $^\circ\text{C}$ 烘乾 2 小時(電阻係數=10 $\times 10^{12} \Omega\text{-cm}$ Zhuang et al., 2000)(電阻係數>10 $\times 10^{14} \Omega\text{-cm}$ Shackelford et al., 1994)至於產生器上，壓縮空氣流量 10 L/min，根據計算固定投入微粒量為 1 g/m³，藉此使產生在入口的微粒質量濃度維持長時間的穩定。

在未施加高壓靜電條件下，同步量測入口(C_{in})及出口(C_{out})微粒的濃度，分別在不同流量下，濕式靜電旋風集塵器出口端濃度除以進口端濃度即可得到不同粒徑微粒之穿透率 $P_{wyclone}$ 如下：

$$P_{wyclone} = C_{in}/C_{out} \quad (3.1)$$

未施加高壓靜電時，濕式旋風集塵器不同粒徑微粒的去除效率 $\eta_{wyclone}$ 。

$$\eta_{wyclone} = 1 - P_{wyclone} \quad (3.2)$$

靜電集塵器在不同粒徑微粒的去除效率 η_{esp} 。

$$\eta_{esp}(d_p)(\%) = \frac{\eta_{wesp}(d_p)(\%) - \eta_{wyclone}(d_p)(\%)}{100\% - \eta_{wyclone}(d_p)(\%)} \times 100\% \quad (3.3)$$

3.2. 實場測試規劃

實場實驗地點位於桃園的 TFT-LCD 面板製造廠，廢氣來源為濕式洗滌塔 CVD 排氣系統，CVD 製程的方法是將反應氣體引入反應室中，在基材表面上進行化學反應形成薄膜。

根據過去協助廠商檢測的結果得知，未經處理直接排放的 PM₁₀ 濃度高達 30878 μg/m³，微粒的質量中間粒徑為 0.4 μm，經濕式洗滌塔(Wet-scrubber)處理後出口 PM₁₀ 濃度反而增加為 40760 μg/m³，微粒的質量中間粒徑變小為 0.2 μm；濕式洗滌塔處理後所分析出，陰離子在中 PM₁₀ 佔 10 %，陽離子在中 PM₁₀ 佔 < 1 %，物質有 HF、HCl、HNO₂、HNO₃、SO₂、CH₃COOH 及 NH₃，其中以 CH₃COOH 的濃度最高為 2485 ppbv，其次是 HF 的濃度為 1615ppbv 及 NH₃ 的濃度為 1300ppbv。

當中 HF 來源可能是前端製程於清洗 CVD 機台反應腔(chamber)之沉積物時，採用 SF₆ 作為其清洗氣體，所造成的氣態污染物。

本研究採樣規劃分為兩個週期，第一週期(101/06/28 ~ 101/07/12)為入口未噴細水霧的狀態，第二週期(101/07/12 ~ 101/07/24)為入口噴細水霧的狀態，每週採樣二次。

3.3. 監測及採樣方法

圖 3.1 為實場測試濕式靜電旋風集塵器的流程圖，圖 3.2 為實場測試濕式靜電旋風集塵器的照片。實驗室及實場測試在開始前，需將濕式靜電旋風集塵器上的儀錶歸零，啟動風車後使用圖 3.1 中的流孔板壓差計進行流量範圍校正。啟動高壓靜電產生器及循環水泵浦後，再分別使用兩組 MOUDI、濾紙匣採樣器和多孔金屬固氣分離器，在濕式靜電旋風集塵器的入口及出口進行同步採樣，並在每次採樣同時取水槽中的循環水，量測水中的 PH 值及導電度值。

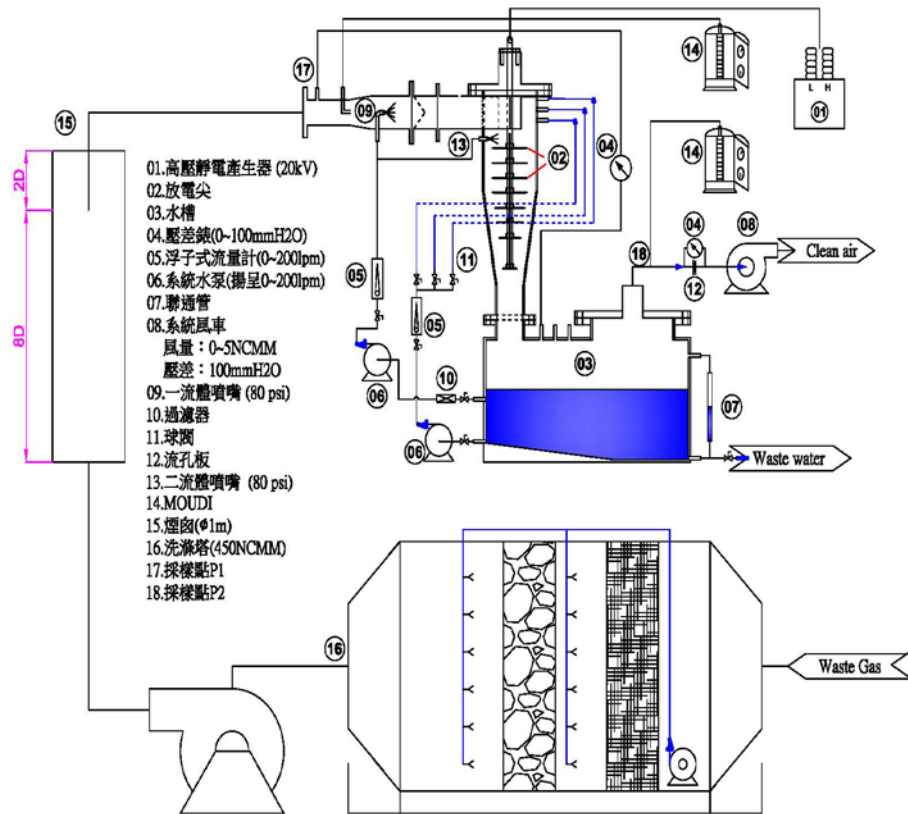


圖 3.1 實場測試濕式靜電旋風集塵器的流程圖。



圖 3.2 實場測試濕式靜電旋風集塵器的照片。

3.4. 實驗設備

1. **高濃度粉塵產生器**：測試濕式靜電旋風器是否會因壁面粉塵阻塞而降低效率的次微米和微米級 Al_2O_3 微粒，以及微米及微粒收集效率測試用的由高濃度粉塵產生器(Jet-O-Mizer, FluidEnergy Model 000)所產生，如圖 3.3 所示。

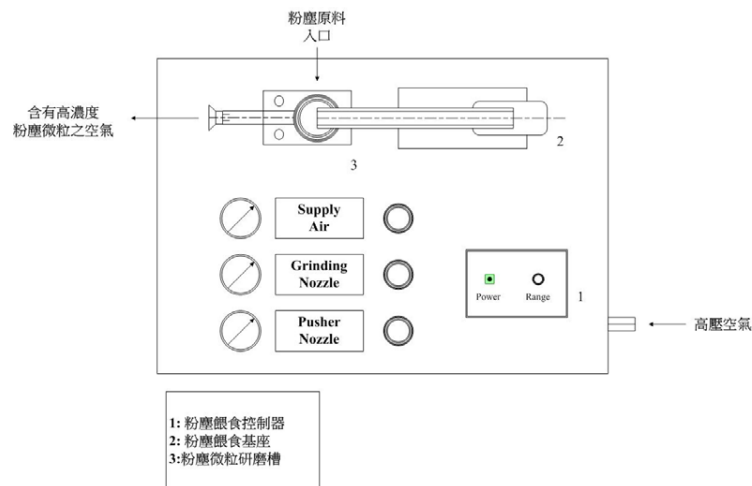


圖 3.3 高濃度粉塵微粒產生器(Jet-O-Mizer, Fluid Energy Model 000)。

2. **MOUDI 10 階衝擊器**：MOUDI 10 階衝擊器(Microorifice Uniform Deposit Impactor, MOUDI)，圖 3.4 為 MOUDI 10 階衝擊器實際照片及內部結構示意圖，內部總共有 10 個階層的衝擊器，每一個階層有不同孔徑的噴口片，由大到小從第零階到第九階排列，各階層收集微粒的粒徑範圍也不同。其原理利用在同一氣流中，不同粒徑的微粒具有不同的慣性力，當採集的氣體通過噴孔片時，微粒隨著氣體的流速加速，粒徑越大的微粒慣性力就越大，慣性力大的微粒會直接衝擊在收集板上的濾紙，慣性力小的微粒就會擴散到下一個階層。原廠商設計的採樣流量為 30L/min，可將收集的微粒粒徑由上到下分徑為 18、10、5.6、2.5、1.8、1.0、0.56、0.32、0.18、0.10、0.056 及 $<0.056 \mu\text{m}$ (after filter) 等 10 個粒徑區間。

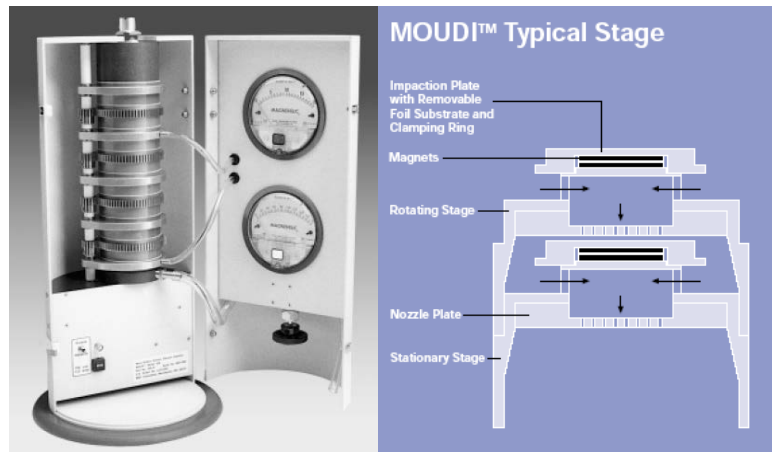


圖 3.4 MOUDI 實際照片及內部結構示意圖。

3. **濾紙匣採樣器**：本研究使用濾紙匣採樣器，如圖 3.5 所示，為 47 mm 鋁製濾紙固定座，內含不銹鋼支撐網，可以採集氣體中 TSP 的濃度。



圖 3.5 47 mm 鋁製濾紙固定座。

4. **多孔金屬固氣分離器**：本研究使用多孔金屬固氣分離器(Porous Metal Denuder, PMD)，圖 3.6 為實際照片及內部結構的示意圖。將煙道排放的酸性或鹼性氣體通過直徑 4.7cm，厚度為 0.23cm，孔隙直徑為 100 μ m 的多孔金屬片，再由金屬片上塗敷的化學物質吸收。多孔金屬固氣分離器分為：第一階為鐵氟龍濾紙，可以用來收集微粒，第二、三階為塗敷化學物質的多孔金屬片，用來吸收通過多孔金屬片氣體中的酸性和鹼性氣體。

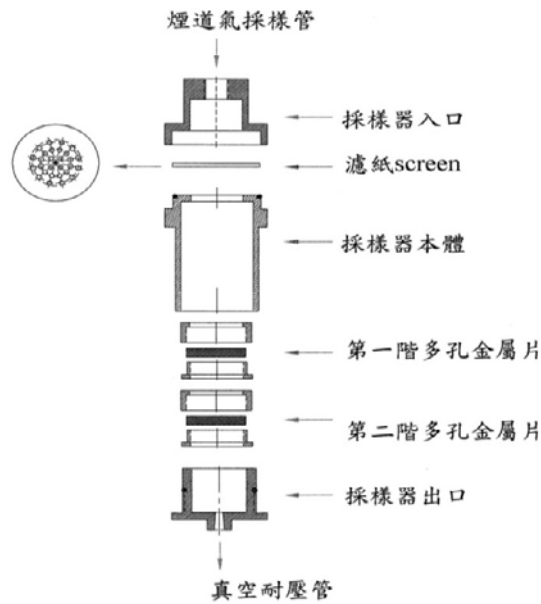


圖 3.6 煙道採樣專用的多孔金屬固氣分離器內部結構示意圖。

5. **手提式多參數水質分析儀：**手提式多參數水質分析儀，是由德國 WTW 公司所生產，產品型號為 Cond 340i，此儀器攜帶方便可量測 pH(範圍：-2.00~+19.99，精確度：0.01)、ORP(範圍：-1999~+1999，精確度：0.01)及導電度值(範圍：0~1999 $\mu S/cm$ ，精確度：1 $\mu S/cm$)。
6. **離子層析儀：**離子層析法乃是使待測溶液通過充填樹脂之分離管，離子與樹脂產生交換作用而吸附於樹脂交換基之上，此時加入流洗液沖提，使其脫離交換基，再度變成自由離子，再不斷重複此一吸附一沖提循環作用。由於溶液中離子電荷數，離子半徑及質量等因素，對樹脂之親和力會產生差異，親和力越大越容易吸附，且越難沖提，因此造成通過分離管所需之時間不同，並且各自形成離子群，此時再測量其總導電值，便可做定性、定量分析。離子交換樹脂一般是以苯乙烯(styrene)及二乙烯基苯(divinylbenzene)所合成的共聚物，再經磺酸化而成強陽離子交換樹脂；或經胺基化成為陰離子交換樹脂。

3.5. 實驗設備的 QA/QC

在進行實場採樣工作前，需將濕式靜電旋風集塵器及採樣設備的流量進行校正，濾紙進行調理、編號、秤重及紀錄，多孔金屬片進行清洗、塗敷。

1. **濾紙準備：**MOUDI 及濾紙匣採樣器皆使用直徑 47mm 的鐵氟龍濾紙作為採樣使用，採樣需現場採集樣品使用的濾紙及空白標準濾紙(實驗室空白 Laboratory Blank 和現場空白 Field Blank)，首先要先放置乾燥箱除濕調理 24 小時(RH = 40 ± 3%，T = 20 ± 2°C)進行調理。在採樣前後濾紙需在恆溫恆濕的潔淨室進行秤重，潔淨室的相對濕度控制在 RH = 40 ± 3%，溫度控制在 T = 21 ± 1°C，濾紙在每次秤重前要做靜電消除，連續秤重五次所測得標準值要在 5 µg 以內。
2. **濕式靜電旋風集塵器流量校正：**使用流孔板及壓差計，量測出流量與壓差的關係。

$$Q = k' A_2 \sqrt{\frac{2\Delta PRT}{P_1 M_w}} = k' A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3.4)$$

$$k' = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (3.5)$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (3.6)$$

$$Re_D = \frac{VD}{\nu} \quad (3.7)$$

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.261\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0.7} + \left[0.0188 + 0.0063 \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0.8}\right] \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.3} \beta^{3.5} + (0.043 + 0.08e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1}) \left[1 - 0.11 \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0.8}\right] \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.031 \left[\frac{2L_2^l}{1-\beta} - 0.8 \left(\frac{2L_2^l}{1-\beta}\right)^{1.1}\right] \beta^{1.3} \quad (3.8)$$

Q為體積流率(m^3/sec)

d為孔口板直徑(m)

D為風管直徑(m)

A_2 為流孔板面積(m^2)

P_1 及 P_2 位置壓力(Pa)

C為流量係數(ISO1998)

V為管內流速(m/s)

ν 為運動黏滯係數($N-s/m^2$)

$L_1 = L'_2 = 0.0254/D$

3. 手提式多參數水質分析儀：極常數用標準液來自動校正，標準液為 0.01 mol/l KCL 溶液。先將 340i 連接上電極，按 CAL 鍵，直到顯示 CELL，顯示初始化固定的電極常數 0.475 l/cm ，按 M 鍵終止校正功能。將電極放入到標準液中，按 RUN/ENTER 鍵，開始自動讀值，數值穩動後，螢幕會顯示測試出來的電極常數和電極狀態圖，確認無誤後，按下 M 鍵返回測試模式。

四、 實驗結果

本實驗分為兩個階段，第一階段實驗是在實驗室進行去除效率測試；第二階段是將設備移置實場，使用實場產生的廢氣條件，進行入口使用細水霧及無使用細水霧的實場測試效率比較。

4.1 實驗室產生粉塵濃度

實驗高壓靜電產生器固定產生最高電壓(21kVdc)時，測試濕式靜電旋風集塵器在各種操作條件下微粒的去除效率。由圖 4.1 得知，濕式靜電旋風器流量在 1000 LPM 時的去除效率為 95% 以上；2500 LPM 時的去除效率為 90% 以上；4500 LPM 時的去除效率為 80% 以上。

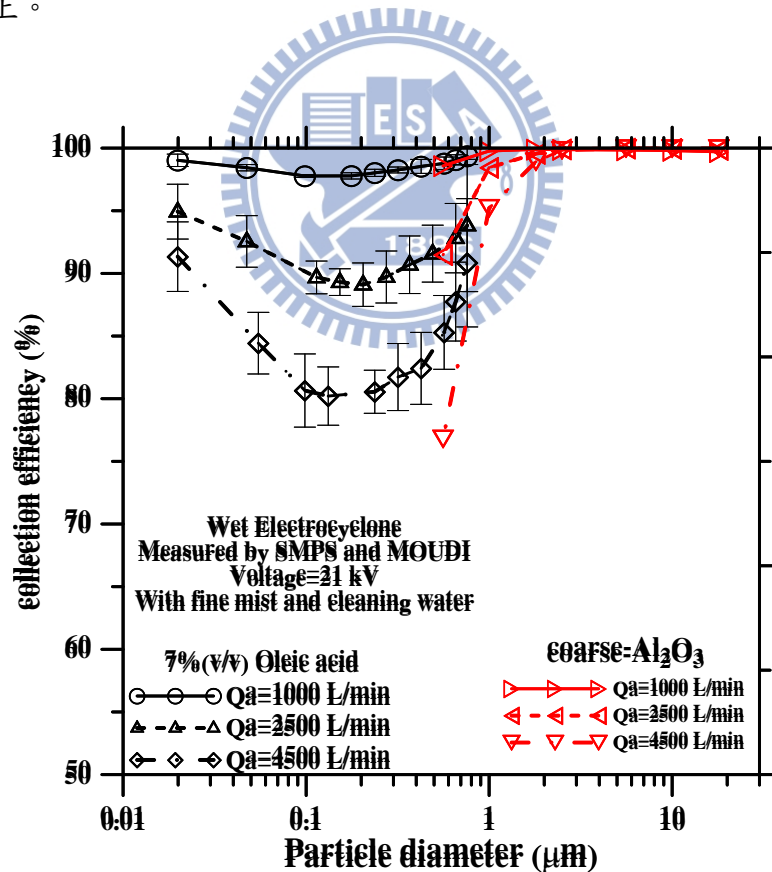


圖 4.1 濕式靜電旋風器對於不同粒徑微粒的去除效率比較。

4.2 在實場中濕式靜電旋風集塵的測試效率

實場高壓靜電產生器固定產生最高電壓(18kVdc)時，在 Factory A 風量 1620 L/min 時，總去除效率為 94 %，出口濃度為 0.8 mg/Nm³；在 Factory B 風量 1620 L/min 時，總去除效率為 92.8 %，出口濃度為 1.37 mg/Nm³，風量 2700 L/min 時，總去除效率為 84.6 %，出口濃度為 0.31 mg/Nm³。

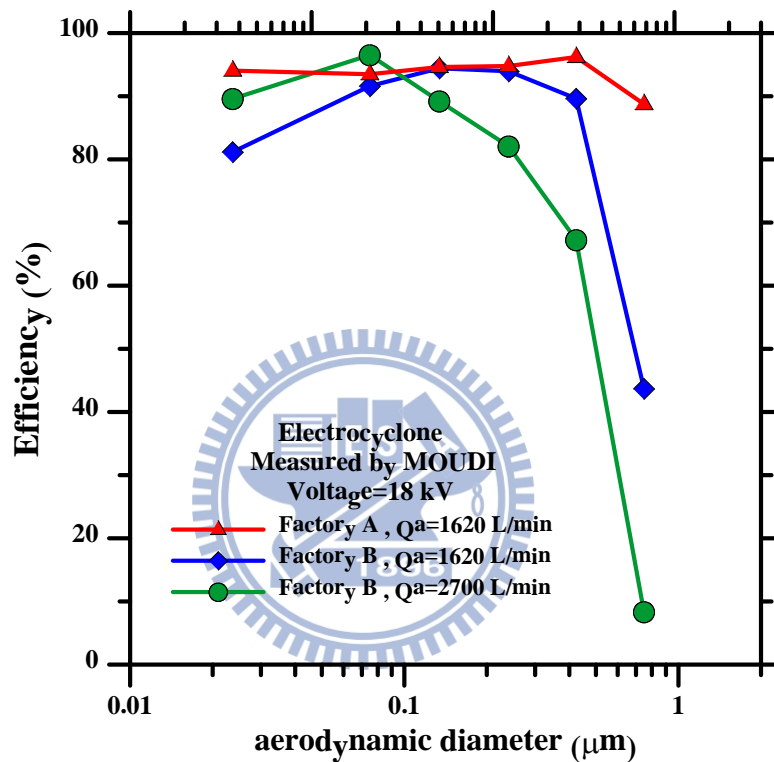


圖 4.2 濕式靜電旋風集塵器實場測試效率。

4.3 長時間的實場測試效率與結果

圖 4.3 為濕式靜電旋風集塵器長時間的實場測試效率結果，結果顯示設備連續運轉操作 26 天時，設備的處理效率仍然維持 90 % 以上。

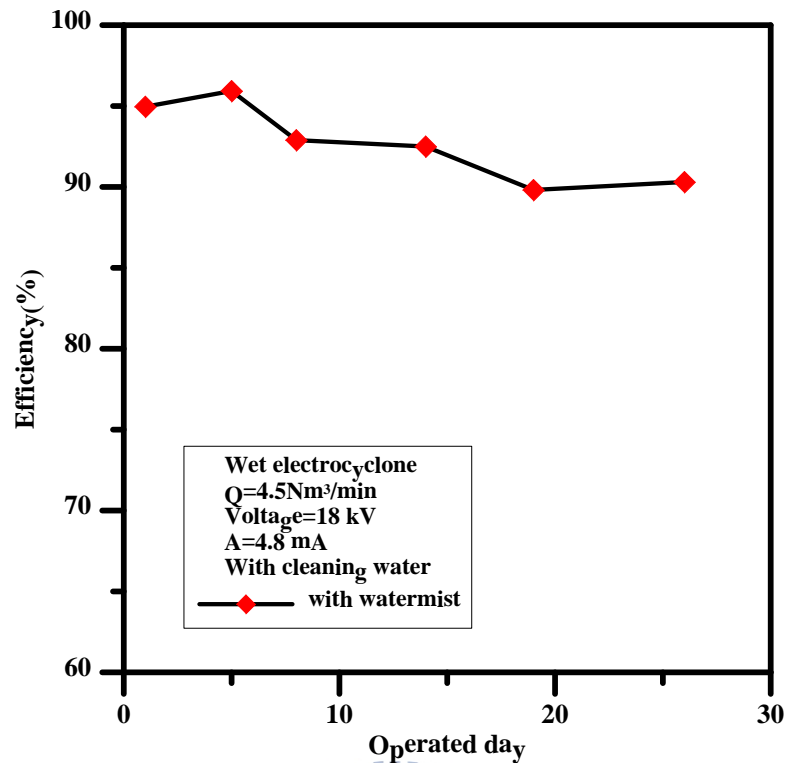
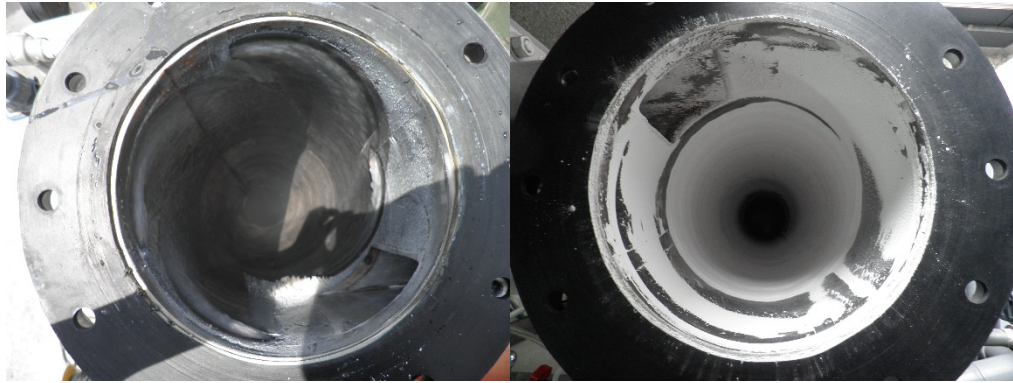


圖 4.3 濕式靜電旋風集塵器長時間的實場測試效率結果。

表 4.1 濕式靜電旋風集塵器長時間的實場測試資料。

操作天數	入口濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	出口濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	效率(%)
1	14474.16	1085.73	94.96
5	27906.04	2842.28	95.93
8	55088.59	5340.05	92.89
14	47853.69	2411.63	92.50
19	56742.28	2308.28	89.81
26	39998.66	2842.28	90.31

在實場連續運轉 26 天後，有連續性清洗可以確實達到讓收集壁面保持乾淨的狀態，如圖 4.4(a)所示。在實驗室實驗，若無清洗壁面狀態會呈現如圖 4.4(b)所示。如圖 4.5(a)所示設備入口有使用細水霧及圖 4.5(b)無使用細水霧噴灑的測試結果，對於放電電極的潔淨度有相當的影響，有細水霧的放電電極明顯可以保持較好的潔淨度。



(a)

(b)

圖 4.4 有連續清洗壁面(a)與無清洗壁面(b)的測試結果照片。



(a)

(b)

圖 4.5 入口有細水霧(a)與無細水霧(b)噴灑的測試結果照片。

4.4 設置實場機台的長時間運轉成本

由實場測試結果得知，濕式靜電旋風集塵器風車運轉至最大風量，此時氣體流量為 4500 L/min @35 °C 系統壓損為 32 mmH₂O，該系統風車電壓電流為 220 V 15A(3.3 kw)，高壓靜電運轉電壓電流為 18 kVdc 4.8 mA(86.4 W)，高壓水泵及循環水泵電壓及電流為 220V 6A(1.32 kw)，實驗 24 小時連續操作，總共持續 22 天，總耗電量為 2877 kw，假設每度電要 6 元，花費約新台幣 17262 元。

假設實場需要處理風量為 500NCMM，靜電旋風集塵器最大風量預估為 250 NCMM 系統壓損為 10 mmH₂O，所以需設置兩台，設置成本在新台幣 600 萬元。連續運轉的操作成本，每天運轉 8 小時一年需新台幣 39 萬元；每天運轉 12 小時一年需新台幣 58 萬元；每天運轉 24 小時一年需新台幣 116 萬元，如下表 4.2：

表 4.2 評估設計 500 Nm³/min 的濕式靜電旋風集塵器一年用電成本。

項目	20HP 風車	高壓電	高壓水泵	循環水泵	電量(kw)
V(V)	220	120000	220	220	
I(A)	40	0.0183	2	9.5	
Kw	15.3	2.2	0.4	4.2	22.1
8hr*365day*NT6	387192				
12hr*365day*NT6	580788				
24hr*365day*NT6	1161576				



五、 結論

本研究設計的濕式靜電集塵器是為了解決乾式靜集塵器操作上會發生粉塵餅堆積的現象，進而導致處理效率降低和無法連續操作的問題。

本集塵器主要由旋風器、靜電放電電極與微粒收集壁面組成，旋風器的功能為去除 $1\ \mu\text{m}$ 以上的微粒， $1\ \mu\text{m}$ 以下經電極充電後被收集於收集壁面上。為解決粉塵堆積於放電電極及收集壁面，本集塵器分別在兩處加裝細水霧和三道洗壁水，使收集壁面及放電電極保持乾淨的狀態。

實驗結果顯示，本集塵器連續操作 26 天後，均未發生粉塵堆積且對粉塵去除效率仍在 90% 以上，表示加裝細水霧和三道洗壁水可有效讓收集壁面及放電電極一直維持乾淨的狀態。

本系統設置成本在 1.2~1.5 萬元/CMM，根據計算一台濕式靜電旋風集塵器的最大處理風量為 $250\ \text{Nm}^3/\text{min}$ ，欲設計可以處理實場最大風量為 $500\ \text{Nm}^3/\text{min}$ 的濕式靜電旋風集塵器，需使用兩台濕式靜電旋風集塵器採用系統並聯模式，連續運轉一年的操作成本約 116 萬新台幣；與乾式靜電集塵器比較在操作費用上，濕式靜電旋風集塵器僅增加 22 萬元新台幣的循環水泵電費，佔總體電量的 20%，可節省每年 12 次清理乾式靜電集塵板的處理費用約 100 萬新台幣。

六、參考文獻

- Adamiak, K., Atten, P., 2004, Simulation of corona discharge in point-plane configuration. *Journal of Electrostatics*. 61: 85-98.
- Chen, C. J., 2001, Enhanced Collection Efficiency For Cyclone By Applying An External Electric Field, *Sep. Sci Technol.*, 36: 3, 499- 511.
- Dietz, P.W., 1982, Electrostatically Enhanced Cyclone Separators, *Powder Technol.*, 31: 211-216.
- Kozlov, B. A., Solovyov, V. I., 2006, Limit Current of a Multipoint Corona Discharge. *Technical Physics.*, 51: 821-826.
- Lapple, C. E., 1951, *Process Use Many Collector Types*. *Chem. Eng.*, 58: 144-151.
- Le, T.C., 2013, *Study of the Collection Efficiency of Multipoint-to-Plane Electrostatic Precipitators*, *Unpublished master thesis*, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan.
- Lim, K. S., Kim, H. S., Lee, K. W., 2004, Comparative performances of conventional cyclones and a double cyclone with and without an electric field. *Journal of Aerosol Science.*, 35: 103-116.
- Pope, C. A. III., Thun, M. J., Namboodiri, M. M., Dockery, E. W., Evans, J. S., Speizer, F. E., Heath, C. W., Jr., 1995, Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U. S. adults. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 151: 669-674.
- Rong, M.Z., Liu, D.X., Wang, D., Su, B., Wang, X.H. and Wu, Z. (2010). New Structure Optimization Method for the Interneedle Distance of a Multineedle-to-Plane Barrier Discharge Reactor”, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 38(4): 966–972.
- 王顯龍、何立波、賈明生、陳恩鑒，靜電除塵器的新應用及其發展方向，工業安全與環保，中華民國九十二年十一月。

許德玄、曲志和，靜電旋風機除塵技術現場實驗，中國技術論文在線，中華民國八十六年十一月。

陳海半、朱益民、宿鵬浩、楊加元，多針電極結構雙極電暈放電伏安特性，高電壓技術，中華民國九十六年十月。

黃斌、姚強、李水清，靜電增強脫除 PM2.5 研究發展，電站系統工程，中華民國九十二年十一月。

廖俊賢，靜電提昇璇風集塵器收集次微米微粒效率之研究，國立中興大學環境工程研究所碩士論文，中華民國八十六年六月。

盧緯，去除奈米和微米微粒的高效率濕式靜電旋風集塵器，國立交通大學環境工程研究所碩士論文，中華民國一百零一年八月。



附錄-採樣分析紀錄

附表 1.1 微粒重量分析結果—實驗室測試 ESP 入口(風量 1000L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1011217	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (μg)	校正係數	校正後重量(μg)	重量濃度 (μg/m ³)	dM/dlogDpa (μg/m ³)	Dp ₅₀
1011217-1	M1A0	10461	1.15	12030.6	39967.5	53667.2	18
1011217-1	M1A1	10713	1.20	12855.1	42706.6	167298.1	10
1011217-1	M1A2	36270	1.15	41710.5	138568.4	550285.3	5.6
1011217-1	M1A3	39091	1.03	40263.7	133762.1	381906.7	2.5
1011217-1	M1A4	6482	1.02	6612.0	21966.2	153967.8	1.8
1011217-1	M1A5	6479	1.02	6608.8	21955.4	86007.5	1
1011217-1	M1A6	1856	1.02	1893.5	6290.6	24981.3	0.56
1011217-1	M1A7	320	1.02	326.4	1084.3	4461.6	0.32
1011217-1	M1A8	80	1.03	82.8	275.1	1101.0	0.18
1011217-1	M1A9	0	1.04	0.2	0.7	2.7	0.1

附表 1.2 微粒重量分析結果—實驗室測試 ESP 出口(風量 1000L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1011217	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (μg)	校正係數	校正後重量(μg)	重量濃度 (μg/m ³)	dM/dlogDpa (μg/m ³)	Dp ₅₀
1011217-2	M1A0	272.3	904.7	1214.8	272.3	904.7	18
1011217-2	M1A1	25.4	84.5	331.1	25.4	84.5	10
1011217-2	M1A2	64.4	213.9	849.6	64.4	213.9	5.6
1011217-2	M1A3	48.0	159.5	455.3	48.0	159.5	2.5
1011217-2	M1A4	6.7	22.4	156.8	6.7	22.4	1.8
1011217-2	M1A5	15.5	51.5	201.8	15.5	51.5	1
1011217-2	M1A6	26.9	89.5	355.3	26.9	89.5	0.56
1011217-2	M1A7	9.6	31.9	131.1	9.6	31.9	0.32
1011217-2	M1A8	11.3	37.6	150.6	11.3	37.6	0.18
1011217-2	M1A9	1.7	5.5	21.7	1.7	5.5	0.1

附表 1.3 微粒重量分析結果—實驗室測試 ESP 入口(風量 2500L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1011217	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1011217-3	M1A0	6808	1.15	7829.2	26009.8	34925.2	18
1011217-3	M1A1	6030	1.20	7236.0	24039.1	94170.2	10
1011217-3	M1A2	16893	1.15	19426.7	64538.4	256296.1	5.6
1011217-3	M1A3	20308	1.03	20917.2	69490.2	198402.7	2.5
1011217-3	M1A4	3574	1.02	3645.3	12110.1	84883.7	1.8
1011217-3	M1A5	3617	1.02	3689.1	12255.9	48010.9	1
1011217-3	M1A6	965	1.02	984.3	3270.0	12985.8	0.56
1011217-3	M1A7	157	1.02	159.7	530.7	2183.4	0.32
1011217-3	M1A8	42	1.03	43.1	143.0	572.4	0.18
1011217-3	M1A9	4	1.04	4.6	15.2	59.6	0.1

附表 1.4 微粒重量分析結果—實驗室測試 ESP 出口(風量 2500L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1011217	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1011217-4	M1A0	9	1.15	10.4	34.4	46.2	18
1011217-4	M1A1	3	1.20	3.6	12.0	46.9	10
1011217-4	M1A2	4	1.15	4.1	13.8	54.6	5.6
1011217-4	M1A3	18	1.03	18.1	60.2	171.9	2.5
1011217-4	M1A4	16	1.02	16.1	53.5	375.3	1.8
1011217-4	M1A5	56	1.02	57.3	190.4	746.0	1
1011217-4	M1A6	82	1.02	83.8	278.5	1106.2	0.56
1011217-4	M1A7	13	1.02	13.5	44.7	184.0	0.32
1011217-4	M1A8	8	1.03	8.0	26.7	106.8	0.18
1011217-4	M1A9	6	1.04	6.4	21.4	83.9	0.1

附表 1.5 微粒重量分析結果—實驗室測試 ESP 入口(風量 4500L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1011217	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1011217-5	M1A0	11019	1.15	12672.1	42098.5	56528.8	18
1011217-5	M1A1	8250	1.20	9900.0	32889.3	128839.8	10
1011217-5	M1A2	19422	1.15	22334.8	74199.6	294662.9	5.6
1011217-5	M1A3	20727	1.03	21348.8	70923.9	202496.2	2.5
1011217-5	M1A4	3737	1.02	3811.5	12662.5	88755.2	1.8
1011217-5	M1A5	3489	1.02	3559.2	11824.1	46319.7	1
1011217-5	M1A6	892	1.02	910.0	3023.3	12006.2	0.56
1011217-5	M1A7	156	1.02	158.7	527.3	2169.5	0.32
1011217-5	M1A8	42	1.03	43.1	143.0	572.4	0.18
1011217-5	M1A9	2	1.04	1.7	5.5	21.7	0.1
1011217-5	M1TA	11019	1.15	12672.1	42098.5	56528.8	<0.1

附表 1.6 微粒重量分析結果—實驗室測試 ESP 出口(風量 4500L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1011217	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1011217-6	M1A0	18	1.15	20.7	68.8	92.3	18
1011217-6	M1A1	3	1.20	3.4	11.2	43.7	10
1011217-6	M1A2	6	1.15	6.4	21.4	85.0	5.6
1011217-6	M1A3	34	1.03	35.2	117.0	334.1	2.5
1011217-6	M1A4	41	1.02	41.4	137.6	964.3	1.8
1011217-6	M1A5	167	1.02	170.5	566.6	2219.5	1
1011217-6	M1A6	207	1.02	211.1	701.4	2785.6	0.56
1011217-6	M1A7	20	1.02	20.4	67.8	278.9	0.32
1011217-6	M1A8	8	1.03	8.7	28.7	115.0	0.18
1011217-6	M1A9	0	1.04	0.0	0.0	0.0	0.1
1011217-6	M1TA	18	1.15	20.7	68.8	92.3	<0.1

附表 1.7 ESP 實驗室測試效率結果。

Dpa	Qa=1000LPM			Qa=2500LPM			Qa=4500LPM		
	入口 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	出口 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	效率 (%)	入口 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	出口 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	效率 (%)	入口 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	出口 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	效率 (%)
18	53667.2	1214.8	99.70	34925.2	46.2	99.87	56528.8	92.3	99.97
10	167298.1	331.1	99.80	94170.2	46.9	99.95	128839.8	43.7	99.97
5.6	550285.3	849.6	99.85	256296.1	54.6	99.98	294662.9	85.0	99.97
2.5	381906.7	455.3	99.88	198402.7	171.9	99.91	202496.2	334.1	99.83
1.8	153967.8	156.8	99.90	84883.7	375.3	99.56	88755.2	964.3	98.91
1	86007.5	201.8	99.77	48010.9	746.0	98.45	46319.7	2219.5	95.21
0.56	24981.3	355.3	98.58	12985.8	1106.2	91.48	12006.2	2785.6	83.10
TSP	1423679.3	3867.9	99.73	732490.0	2921.8	99.60	832372.3	6918.4	99.17

附表 1.8 微粒重量分析結果—工廠 A electrocyclone 入口(風量 1620L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣 體積 (m^3)	標準採樣體 積(m^3)	流量 (L/min)
1010629	30	35	100	1.000	0.90	0.87	30
濾紙編號		採樣量 (μg)	校正係數	校正後重量(μg)	重量濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dM/dlogDpa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Dp ₅₀
1010629-1	M1A0	0	1.15	0.00	0.00	0.00	18
1010629-1	M1A1	0	1.20	0.00	0.00	0.00	10
1010629-1	M1A2	0	1.15	0.00	0.00	0.00	5.6
1010629-1	M1A3	0	1.03	0.00	0.00	0.00	2.5
1010629-1	M1A4	0	1.02	0.00	0.00	0.00	1.8
1010629-1	M1A5	18	1.02	18.36	21.08	82.60	1
1010629-1	M1A6	36	1.02	36.72	42.17	167.46	0.56
1010629-1	M1A7	131	1.02	133.62	153.45	631.38	0.32
1010629-1	M1A8	377	1.03	388.31	445.93	1784.61	0.18
1010629-1	M1A9	309	1.04	321.36	369.05	1445.71	0.1
1010629-1	M1TA	22	1.00	22.00	25.26	25.26	<0.1

附表 1.9 微粒質量分析結果—工廠 A electrocyclone 出口(風量 1620L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1010629	30	35	100	1.000	0.90	0.87	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1010629-2	M1A0	0	1.15	0.00	0.00	0.00	18
1010629-2	M1A1	0	1.20	0.00	0.00	0.00	10
1010629-2	M1A2	0	1.15	0.00	0.00	0.00	5.6
1010629-2	M1A3	0	1.03	0.00	0.00	0.00	2.5
1010629-2	M1A4	0	1.02	0.00	0.00	0.00	1.8
1010629-2	M1A5	16	1.02	16.32	187.42	734.19	1
1010629-2	M1A6	95	1.02	96.90	1112.80	4419.16	0.56
1010629-2	M1A7	251	1.02	256.02	2940.13	12097.39	0.32
1010629-2	M1A8	337	1.03	347.11	3986.20	15952.62	0.18
1010629-2	M1A9	387	1.04	402.48	4622.07	18106.40	0.1
1010629-2	M1TA	37	1.00	37.00	424.91	424.91	<0.1

附表 1.10 微粒重量分析結果—工廠 B electrocyclone 入口(風量 1620L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1020710	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1020710-1	M1A0	0	1.15	0.00	0.00	0.00	18
1020710-1	M1A1	0	1.20	0.00	0.00	0.00	10
1020710-1	M1A2	0	1.15	0.00	0.00	0.00	5.6
1020710-1	M1A3	0	1.03	0.00	0.00	0.00	2.5
1020710-1	M1A4	0	1.02	0.00	0.00	0.00	1.8
1020710-1	M1A5	41	1.02	42.02	139.61	554.42	1
1020710-1	M1A6	301	1.02	306.82	1019.29	4193.94	0.56
1020710-1	M1A7	3545	1.03	3651.56	12131.01	48547.83	0.32
1020710-1	M1A8	1015	1.04	1056.02	3508.24	13743.12	0.18
1020710-1	M1A9	498	1.00	497.80	1653.77	6567.46	0.1
1020710-1	M1TA	185	1	184.80	613.93	820.56	<0.1

附表 1. 11 微粒質量分析結果—工廠 B electrocyclone 出口(風量 1620L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1020710	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1020710-2	M1A0	0	1.15	0.00	0.00	0.00	18
1020710-2	M1A1	0	1.20	0.00	0.00	0.00	10
1020710-2	M1A2	0	1.15	0.00	0.00	0.00	5.6
1020710-2	M1A3	0	1.03	0.00	0.00	0.00	2.5
1020710-2	M1A4	0	1.02	0.00	0.00	0.00	1.8
1020710-2	M1A5	23	1.02	23.66	78.62	312.20	1
1020710-2	M1A6	31	1.02	31.82	105.72	435.01	0.56
1020710-2	M1A7	214	1.03	220.63	732.95	2933.25	0.32
1020710-2	M1A8	57	1.04	58.86	195.55	766.06	0.18
1020710-2	M1A9	42	1.00	41.80	138.87	551.47	0.1
1020710-2	M1TA	37	1.00	37.00	424.91	424.91	<0.1

附表 1. 12 微粒重量分析結果—工廠 B electrocyclone 入口(風量 2700L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積(m ³)	流量 (L/min)
1020715	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (µg)	校正係數	校正後重量(µg)	重量濃度 (µg/m ³)	dM/dlogDpa (µg/m ³)	Dp ₅₀
1020715-1	M1A0	0	1.15	0.00	0.00	0.00	18
1020715-1	M1A1	0	1.20	0.00	0.00	0.00	10
1020715-1	M1A2	0	1.15	0.00	0.00	0.00	5.6
1020715-1	M1A3	0	1.03	0.00	0.00	0.00	2.5
1020715-1	M1A4	0	1.02	0.00	0.00	0.00	1.8
1020715-1	M1A5	7	1.02	7.34	24.40	96.89	1
1020715-1	M1A6	23	1.02	23.66	78.62	323.47	0.56
1020715-1	M1A7	304	1.03	312.71	1038.86	4157.49	0.32
1020715-1	M1A8	141	1.04	146.64	487.16	1908.39	0.18
1020715-1	M1A9	75	1.00	74.80	248.50	986.83	0.1
1020715-1	M1TA	35	1	34.60	114.95	153.63	<0.1

附表 1. 13 微粒質量分析結果—工廠 B electrocyclone 出口(風量 2700L/min)。

Date	Time (min)	溫度 (C)	濕度 (%)	氣壓 (atm)	實際採樣體積 (m ³)	標準採樣體積 (m ³)	流量 (L/min)
1020715	10	24	75.7	1.000	0.30	0.301	30
濾紙編號		採樣量 (μg)	校正係數	校正後重量(μg)	重量濃度 (μg/m ³)	dM/dlogDpa (μg/m ³)	Dp ₅₀
1020715-2	M1A0	0	1.15	0.00	0.00	0.00	18
1020715-2	M1A1	0	1.20	0.00	0.00	0.00	10
1020715-2	M1A2	0	1.15	0.00	0.00	0.00	5.6
1020715-2	M1A3	0	1.03	0.00	0.00	0.00	2.5
1020715-2	M1A4	0	1.02	0.00	0.00	0.00	1.8
1020715-2	M1A5	7	1.02	6.73	22.36	88.82	1
1020715-2	M1A6	8	1.02	7.75	25.75	105.96	0.56
1020715-2	M1A7	54	1.03	56.03	186.15	744.95	0.32
1020715-2	M1A8	15	1.04	15.81	52.52	205.73	0.18
1020715-2	M1A9	3	1.00	2.60	8.64	34.30	0.1
1020715-2	M1TA	4	1	3.60	11.96	15.98	<0.1

附表 1. 14 ESP 實場效率結果。

Dpa	工廠 A Qa=1620LPM			工廠 B Qa=1620LPM			工廠 B Qa=2700LPM		
	入口 (μg/m ³)	出口 (μg/m ³)	效率 (%)	入口 (μg/m ³)	出口 (μg/m ³)	效率 (%)	入口 (μg/m ³)	出口 (μg/m ³)	效率 (%)
0.56	187.4	21.1	88.8	139.6	78.6	43.7	24.4	22.4	8.3
0.32	1112.8	42.2	96.2	1019.3	105.7	89.6	78.6	25.8	67.2
0.18	2940.1	153.4	94.8	12131.0	733.0	94.0	1038.9	186.1	82.1
0.1	3986.2	214.1	94.6	3508.2	195.6	94.4	487.2	52.5	89.2
0.056	4622.1	347.6	92.5	1653.8	138.9	91.6	248.5	8.6	96.5
0.01	424.9	25.3	94.1	613.9	115.6	81.2	114.9	12.0	89.6
TSP	13273.5	803.6	93.9	19065.8	1367.3	92.8	1992.5	307.4	84.6