



九十一年度環保署/國科會空污防制科研合作構想書

計畫名稱：室內空氣清淨技術及成效評估

細項計畫名稱：室內空氣清淨機使用策略研究

Study on the Strategy of Using Indoor Air Cleaners

執行單位：中華醫事學院

計畫主持人：郭玉梅

計畫編號：91-EPA-Z-273-001

共同主持人：陳志傑，台灣大學公共衛生學院

研究人員：林琮禧

連絡方式：台北市中正區仁愛路一段一號聯教館 308 室

(02)2312-3456 # 8471 or 8469

## Abstract

Most people are aware that outdoor air pollution can damage their health but may not know that indoor air pollution can also have significant effects. Studies from the United States and Europe showed that people in industrialized nations spend more than 90% of their time indoors. With more energy-efficient building construction and less ventilation with outside air, indoor air quality can suffer. Removing airborne particles may reduce allergic reactions of people suffering from asthma, hay fever, sinusitis and other respiratory problems. In addition to the HVAC system, air cleaners may be one part of the solution.

Two types (ESP and filter) of commercially available indoor air cleaners were acquired from a local departmental store for testing collection efficiency, pressure drop across the air cleaner, and energy consumption in a bench test system. Polydisperse aerosol particles were generated using a constant output aerosol generator and an ultrasonic atomizing nozzle. The former was to produce particles ranging from 10 nm to 1  $\mu\text{m}$ , and the latter one was mainly for generating particles larger than 1  $\mu\text{m}$ . The aerosol outputs from both generators were then neutralized by using a radioactive source (Kr-85) to neutralize the aerosol particle to the Boltzmann charge equilibrium. The main aerosol size-spectrometers were a Scanning Mobility Particle Sizer (working size range 20 nm  $\sim$  0.6  $\mu\text{m}$ ) and an Aerodynamic Particle Sizer (0.8  $\sim$  30  $\mu\text{m}$ ). An inclined manometer was used for monitoring the pressure drop across the air cleaners. These air cleaners were also used in a small meeting room similar to the ANSI/AHMA AC-1-2002 air cleaner certification chamber to measure the Clean Air Delivery Rate (CADR), but without the humidity and temperature conditioning. The decay rates were measured by using real time aerosol instruments and a Mini Infra-Red Analyzer (MIRAN).

The results of penetration test showed that aerosol penetration through ESP- or filter-type air cleaners increased with increasing face velocity (corresponding to flow rate) for submicrometer-sized particles. For micrometer-sized particles, the aerosol penetration through filter-type air cleaners might decrease with increasing face velocity due to higher inertial impaction. The decay constants are strongly aerosol size dependent. Particles near the most penetrating size (about 0.3  $\mu\text{m}$ ) had the lowest decay constant, while particles larger or smaller than 0.3  $\mu\text{m}$  all showed higher decay constants. Devices equipped with options of different speeds probably should operate under high flow rate to obtain higher decay rate, and thus higher CADR.

## 中文摘要

大多數人知道室外空氣污染會對健康造成影響，但是並不清楚室內空氣污染也會有明顯的影響。根據美國及歐洲研究調查顯示，在工業化國家中，人的一生有將近 90% 的時間處於室內。節約能源之大樓建築減少了與外界空氣之流通更使得室內空氣品質堪慮。如能移除空氣中之微粒應可降低具有過敏體質之人們遭受氣喘、乾草熱、鼻竇炎以及其他呼吸系統疾病之危害。除了空調系統外，使用空氣清淨機以降低室內空氣污染物應是可行之道。

本研究針對目前市售之主要的兩種型式之空氣清淨機（靜電集塵式、濾材過濾式）在實驗室系統中測試其集塵效率、壓力損失以及能源耗損。測試所需的微粒是由一定量輸出霧化器及超音波霧化噴嘴產生，其中定量輸出霧化器產生的微粒粒徑介於 10 nm ~ 1  $\mu\text{m}$ ，而超音波霧化噴嘴則產生大於 1  $\mu\text{m}$  之微粒。產生之微粒先經一放射性中和器（Kr-85）以中和其電性至波茲曼分佈。利用微粒電移動度掃描分徑器及氣動微粒分徑器分別量測粒徑介於 20 nm ~ 0.6  $\mu\text{m}$  及 0.8 ~ 30  $\mu\text{m}$  之微粒。至於空氣清淨機之壓力損失則利用傾斜式壓力計來量測。此外現場之實地測試則是在一小會議室中進行，除了溫濕度沒有加以控制外，此一會議室空間與美國國際標準協會/美國家電製造協會（ANSI/AHAM）於 2002 年公布用以量測空氣清淨機乾淨空氣排放率（Clean Air Delivery Rate, CADR）的測試腔大小相當，而利用直讀式氣膠量測儀器以及可攜式紅外線吸收光譜儀（MIRAN）求得污染物與追蹤氣體衰減率。

靜電集塵式及濾材過濾式空氣清淨機之測試結果顯示，就次微米的微粒而言，其穿透率和表面風速（正比於空氣流率）成正比。至於微米大小之微粒，其通過濾材過濾式空氣清淨機的穿透率則會因表面風速的增加而遞減，主要是由於慣性衝擊所致。微粒的衰減率與其粒徑大小有明顯相關。通常，對於最易穿透粒徑（大約是 0.3  $\mu\text{m}$ ）之微粒其衰減率最小，而較大或較小的微粒則有較大的衰減率。若該空氣清淨機具有不同操作風量之設計，則建議應選擇高風量運轉以獲得較高的乾淨空氣排放率。

關鍵詞：空氣清淨機，集塵效率，過濾集塵，靜電集塵

## 一、文獻探討

根據美國環保署研究調查顯示，人的一生有將近 90% 的時間是處於室內，雖然室內與室外空氣污染程度有一定的相關，但是室內仍有其特殊且室外所沒有的污染源，例如香菸、拜香、炒炸油煙等等。目前，國內對於室內空氣品質的規定相當不健全，僅在勞工安全衛生相關法規中對於人員多寡、空間大小等條件有換氣量的規定，但對於補充空氣、循環空氣的品質並無任何建議值。

整題而言，室內空氣污染物一般所衍生之健康問題，最常見為頭痛、作嘔、呼吸道感染、過敏、溼熱症等。而大眾常聽之大樓疾病症候群 (Sick Building Syndrome, SBS) 及大樓急迫症候群 (Tight Building Syndrome, TBS) 事實上就是一些室內污染物共同所造成的。為了減低室內空氣污染物，依照清除效率主要分三種方式：移除污染源或控制其散佈、改善通風、空氣清淨。通常利用空氣清淨的方式可以輔助前兩種清除方法，可使特定污染物濃度降到一定程度 (US EPA, 1990)。因此，為了因應不良的室內空氣品質所帶來的種種問題，各種類型具有各種功能的空氣清淨機乃相繼上市。如今在市面上已經發展出各式各樣的空氣清淨機，從最輕便、簡單的小型空氣清淨機到較為複雜且昂貴的大型空氣清淨系統都有，小型室內空氣清淨機被發展出來以改善個人小幅空間的空氣品質，大型空氣清淨系統則運用於大樓空調系統或工業空氣污染防治設備。

室內空氣清淨機由於操作簡單方便，而且許多的研究均指出其確實可以降低污染物的濃度，因此越來越被民眾所接受與使用。一般來說，空氣清淨機的效能良劣取決於其清除污染物的效率以及單位時間內所能處理的空氣量，所以一個具有高效率但是單位時間內的氣體處理量少，或者是單位時間的氣體處理量大但效率低的空氣清淨機都不能算是一個高品質的產品。目前較常用之室內空氣清淨機型態有靜電集塵式與濾材過濾式。關於靜電集塵式室內空氣清淨機已有實驗室測試結果指出會有臭氧產生的問題。實地使用空氣清淨機改善室內懸浮微粒濃度時，會受到房間的大小、通風換氣率、室內空氣清淨機本身處理空氣流量、滲入與滲出量、補充空氣量與處理設備效率、回流空氣量與處理效率等因素所影響，進而影響室內空氣品質。所以有必要對靜電集塵式與濾材過濾式兩種空氣清淨機型對室內空氣品質改善的特性做一深入的探討。此外，空氣清淨機效能的良窳不應只看污染物的去除效率，其耗用的能量也應一併考量。在本實驗中，以不同處理容量的空氣清淨機，放置在一固定的空間，做空氣品質的觀察與監測，尋求在不同處理風量下，兩樣式的空氣清淨機所展現的最經濟清除效能，使消費者在考慮空氣清淨機的清除效果外，還可以更進一步的考慮到更經濟的操作風量。

前述之操作變項 ( 污染物收集處理原理、處理容量、處理效率、能量消耗率等資料、處理空間大小、換氣量、污染源排放量、空氣清淨機制放地點 [ 混合因子 ]、處理污染物種類 [ 懸浮微粒包括粒徑大小 ] ) 大體可由圖一來呈現。

欲改善室內或工作環境空氣品質，機械通風是最常用的方式。通風的效用包括：降

低人員暴露於空氣傳播物質，使暫時性危害被稀釋或防護具失效時能夠保護人員。若能夠利用局部排氣系統將污染源收集並排出，又比單純利用稀釋通風的效果更好(Nicholas et al., 2002)。

通風率主要和排氣量 ( $Q$ , 單位為 cfm) 有關，若一房間體積是  $V$  (單位為  $\text{ft}^3$ )，其每小時換氣率 (Air changes per hour, ACH) 可用下列式子表示 (Burton, 1989)：

$$\text{ACH} = (Q/V) \cdot 60 \quad [1]$$

根據此式，考慮有效排氣量，加入空氣中其他影響因子  $k$ ，可得：

$$Q' = Q/k \quad [2]$$

帶入式[1]可得：

$$\text{ACH}' = (Q'/V) \cdot 60 \quad [3]$$

有許多方式可以評估通風率，然而最簡單的方式，也是最常用的就是用濃度衰減方式 (ASTM Standard, 1993; Brüel & Kjær Manual, 1991; Grot and Lagus, 1991; Decker, 1995; Samfield, 1992; Weber and Daftarian, 1975, Marshall et al., 1996)。此方式使追蹤氣體導入，並均勻混合，在要測的空間進行濃度量測。若通過的空氣流量是固定的，氣體濃度與時間的關係如下式：

$$C_t = C_0 \cdot e^{(-\text{ACH}' \cdot t)} \quad [4]$$

其中  $C_0$  代表氣體初始濃度，而  $C_t$  代表  $t$  時間時氣體濃度，取自然對數結果為：

$$\ln C_t = \ln C_0 - \text{ACH}' \cdot t \quad [5]$$

亦可寫成直線方程式的形式

$$y = b + mx \quad [6]$$

得到斜率為  $-\text{ACH}'$ ，而  $\ln C_0$  則為  $y$  截距。因此可以畫出氣體濃度自然對數與時間的圖，得到通風率，做為空氣換氣情況的背景值。若量測的污染物濃度除換氣之外，亦因為其他機制造成濃度降低，則此通風率應正名為衰減率或衰減常數 (Decay rate or Decay constant)。

除通風換氣之外，空氣清淨機也是常用來改善室內空氣品質設備。一般來說，空氣清淨機根據清除不同大小污染物的方式，分做三類：過濾集塵、靜電集塵、離子產生；也可結合兩種以上清除機制，以達到清除目的。然而對於這三大類的空氣清淨機而言，除非另外裝設針對氣態污染物移除單元如活性炭等吸附劑，否則僅對於粒狀物具有捕集的效能。依照其型態與使用方式，大致上可以分為管內型 (in-duct units) 與室內清淨機 (stand-alone portable units) 兩種。管內型清淨設備是泛指加裝於空調系統 (heating, ventilation and air-conditioning system, HVAC) 中的過濾裝置，而室內清淨機則是指那些

具有完整且獨立機體的空氣污染物處理設備 (US EPA, 1990)。

根據不同空氣清淨機做下列探討 (Huang and Chen, 2001)：

### 1. 靜電集塵式空氣清淨機 (electrostatic air cleaner, ESP)

在 18 世紀已有利用靜電力來收集微粒的基本原理，到了 1923 年，由 Fredrick Cottrell 設計出第一個工業用靜電集塵器。迄今，許多不同型式的靜電集塵器已被廣泛運用。其除塵原理乃是利用靜電力來收集微粒，主要構造包括：(1) 放電電極、(2) 收集板電極，而一般工業用途的靜電集塵器另外還裝有 (3) 粉塵抖落的設備、(4) 漏斗以及 (5) 其他輔助單元如：門、節氣閥、安全裝置等，以達連續操作的目的。基於使用的目的以及經濟效益的考量上，許多種不同形式的靜電集塵器被發展出來，一般來說，可依照下列五種不同的方式來分類：

- (A) 單階或雙階：靜電集塵器的原理是使粒狀物帶電後，利用靜電吸引的方式收集下來。然而在設計上，若微粒充電與收集同時發生，則稱之為單階式靜電集塵器；至於雙階靜電集塵器則是指微粒先經充電後再進入收集的步驟。
- (B) 乾式或濕式：乾式與濕式靜電集塵器在移除沈積於收集板上的粒狀物之方法有所不同。乾式集塵器是以敲擊的方式進行清塵，而濕式集塵器顧名思義則是藉由集塵板頂端注入適量的水來移除其上之微粒。利用敲擊除塵的方式常會伴隨著粒狀物在揚起的問題產生；相對的，濕式集塵器則可以避免相同的問題，並且具有可以同時處理部份氣體污染物的優點，但是卻需考慮污水的二次公害問題。
- (C) 平板式或圓筒式：靜電集塵器依集塵板形狀之不同可分為平板式與圓筒式兩種。理論上，圓筒式靜電集塵器相較於平板式靜電集塵器有較均勻的電場，因此在其他條件相同的情況之下會有較高的集塵效率，然而卻因為結構上的複雜程度，而限制其廣泛取代平板式靜電集塵器的可能。
- (D) 水平或垂直式：根據集塵器內氣體流動的方向為水平或垂直來分類。
- (E) 冷式或熱式：氣體的溫度會影響其本身與微粒之電阻的大小。微粒之電阻大小會影響其充電以及被收集後的行為。根據文獻指出，為了使集塵器的效率維持在某種程度上，因此常藉著提昇或降低待處理氣體的溫度以調整較合適的粒狀物之電阻。
- (F) 依放電極電性與種類分類：在電性上，放電極可以是正極或負極，至於在種類上，可大致分成板線型 (Plate-Wire) 與平板型 (Flat-Plate) 兩種靜電集塵器。一般在工業界所使用的靜電集塵器以板線型較為常見，放電極的材質一般是使用高碳鋼、不鏽鋼、銅、鈦合金、鎢、銅鋼合金以及鋁等材料，直徑約在 0.13 至 0.38 公分之間。放電極根據系統之機械需要而有不同的尺寸及形狀，大部份的設計使用圓形的細線，亦有些設計使用其他如：方形線、扭結線、帶鉤的線等形狀的放電極。

## 2. 過濾集塵式空氣清淨機

過濾集塵式空氣清淨機的除塵原理乃是利用乾燥過濾的方式，藉著能量的提供，驅使空氣通過濾材，以達氣、固分離的目的。因此，此種空氣清淨機的除塵效率取決於濾材的種類、形式以及處理風量的大小。

平面式濾材 (flat or panel filters) 是機械式空氣清淨機所使用的濾材中屬於最簡單、效率較差的一種。通常是由一些較粗的金屬纖維、海綿、玻璃纖維、動物纖維、植物性或合成纖維編織而成 (U.S. EPA, 1990)。這一類的濾材由於基於通風量以及能量消耗的考量之下，其充填密度 (packing density) 一般來說並不會太高，雖然常會於濾材表面做一些處理 (如於表面塗佈一層油)，但是整體的過濾效率仍然不佳。根據研究顯示，這一類的濾材對於花粉大小的微粒 ( $10 \sim 100 \mu\text{m}$  (Hinds, 1982)) 尚有 75% 的去除效率，不過對於香菸微粒 ( $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$  (Hinds, 1982)) 與大部份黴菌孢子等大小的微粒就不具有太高的效率 (Small, 1957)。

為了改善平面式濾材的缺點，因而發展出一些具有摺皺的濾材 (pleated or extended surface filters)。相對於平面式濾材，由於其具有較大的表面積，因此若是將兩種濾材運用在同一台空氣清淨機上，在相同的通氣量之下，摺皺式濾材顯然有較低的表面風速，所以，若允許在相同的空氣阻抗下操作，摺皺式濾材在製作上就可以減小纖維直徑並提高充填密度，而過濾效率乃因此提昇。高效率濾材 (high efficiency particulate air filters, HEPA) 是摺皺式濾材中屬於極端的一個例子，其是在第二次世界大戰的時候，美國原子能委員會為了移除工廠排氣中的放射性粉塵而設計出 (Nelson, 1988)，其對於粒徑為  $0.3 \mu\text{m}$  的 DOP 微粒具有 99.97% 的捕集效率。HEPA 濾材雖然具有很高的除塵效率，但是其缺點就是所造成的空氣阻抗太高，而在現階段的技術中是採用折疊的方式，以增加過濾面積來降低空氣阻抗。

### (a) 過濾集塵式空氣清淨機污染物去除原理

「過濾」截至目前為止仍然被斷定為不但是科學、更是藝術 (Davices, 1983)。雖然由單纖維理論 (single fiber theory) 出發，已知有擴散 (diffusion)、攔截 (interception)、慣性衝擊 (inertial impaction)、重力沈降 (gravitational settling) 以及靜電作用 (electrostatic attraction) 等等機制，但是各機制之間的交互作用 (interaction) 則仍不十分清楚。

一般說來，對於次微米微粒較重要的作用機制有擴散及靜電作用，而慣性衝擊與攔截則大都作用在大微粒上，至於重力沈降在一般過濾理論上，因為相對於其他四種機制其所占的份量甚微，所以一般均可忽略不加以考慮。也正由於此兩極化的作用，大、小微粒均易被濾除，而剩下中間一些比較不容易被收集的微粒，而對於這些微粒的粒徑一般稱之為所謂的最易穿透粒徑 (the most penetrating size) 或者是 collection minimum。由過去的經驗得知，一般的最易穿透粒徑約略在  $0.1 \sim$



0.5  $\mu\text{m}$  左右。

過濾作用是以濾材捕集空氣中的懸浮微粒，通常以單一纖維理論 (Single Fiber Theory) 來估算濾材的捕集效率 (capture efficiency) (Hinds, 1982)。

$$P_n = \exp \left[ \frac{-4\alpha\chi E_{\Sigma, n}}{(1-\alpha)\pi d_f} \right] \quad [7]$$

其中， $P_n$ ：氣懸微粒貫穿率 (aerosol penetration)

$\alpha$ ：濾材充填密度 (packing density)

$\chi$ ：濾材厚度 (filter thickness)

$d_f$ ：纖維直徑 (fiber diameter)

$E_{\Sigma, n}$ ：總單一纖維過濾效率 (total single fiber filtration efficiency)

濾材的總單一纖維過濾效率包括： $E_d$ ：擴散沈積 (diffusion deposition)， $E_r$ ：攔截沈積 (interception deposition)， $E_i$ ：衝擊沈積 (impaction deposition)， $E_g$ ：重力沈積 (gravitational settling)， $E_p$ ：介電力 (dielectrophoretic force)， $E_{c, n}$ ：庫侖力 (Coulombic force)， $E_m$ ：感應力 (image force)，而前四種機制統稱為機械過濾機制 (mechanical capture mechanisms)，後三種則稱為靜電過濾機制 (electrostatic capture mechanisms)。

$$E_{\Sigma, n} = f(E_d, E_r, E_i, E_g, E_p, E_{c, n}, E_m) \quad [8]$$

從以上的探討可以知道，濾材捕集微粒的效率取決於纖維直徑的大小、充填密度、濾材厚度、纖維帶電量、微粒的大小、微粒帶電量以及表面風速等因素。

#### (b) 過濾集塵式空氣清淨機的過濾品質

根據先前的研究結果證明，濾材的效率會隨著表面風速減少、纖維直徑減小、充填密度增加、濾材厚度增厚以及纖維與微粒之帶電量增加而提昇 (Huang and Chen, 1996)。然而對於濾材之過濾品質 (filter quality) 好壞的判定，除了除塵效率之外，也必須同時考量其所造成的空氣阻抗 (Moyer et al., 1989)，因為空氣阻抗的大小，會影響能源的耗損，換言之，一個好的濾材應同時具備有高微粒捕集率以及低空氣阻抗二個條件。至於過濾品質  $q_F$  則定義如下：

$$q_F = \frac{-\ln P}{\Delta p} \quad [9]$$

其中，P：氣懸微粒貫穿率（Aerosol penetration）

$\Delta p$ ：空氣阻抗（Pressure drop）

濾材之空氣阻抗乃是氣流在流經所有纖維時所造成壓力損失的總合，與厚度、充填密度、表面風速成以及濾材之纖維總表面積成正比，由此可見，濾材效率的提昇，勢必會增加空氣阻抗，而欲使兩者的性能同時提昇，現階段是採取較低的過濾風速，在作法上，是將較多的濾材折入相同的容積之中。不過，這樣的作法卻又增加了濾材的成本。

濾材在使用的過程中，一旦因為負載過多的微粒而阻塞時，就必須清洗或丟棄。最近幾年在濾材的使用上也有了相當大的變化，其中以帶電纖維濾材（electret）的使用最具代表性，此濾材固然能顯著的提高過濾效率，尤其是次微米的氣懸微粒，但是其最大的缺點是此靜電作用力會隨著微粒的附著而逐漸降低，也就是說使用一段時間之後，其過濾效率會因靜電作用力降低而降低，所以各濾材帶電量的估計也是濾材品質評估中很重要的一項。

## 二、ANSI/AHAM AC-1-2002 家用室內空氣清淨機評估方法簡述

空氣清淨機之污染物收集效率，主要與清淨機本身之污染物收集效率以及所處理之空風量有關。因此美國家電製造協會 (Association of Home Appliance Manufacturers, AHAM) 擬定 CADR (Clean Air Delivery Rate, CADR) (ANSI/AHAM AC-1-2002, 2002)，為清淨機本身之污染物收集效率以及所處理之空風量之乘積。它是目前歐美廠商較廣泛採用的空氣清淨機性能指標，在此標準下可以提供廠商與消費者對於清淨機的使用上的效能與特性有一個基本準則

ANSI/AHAM AC-1-2002 所擬定的測試室內空氣清淨機的一個標準操作程序。擬定 CADR 為測試空氣清淨機有效處理風量 (feet<sup>3</sup>/min)，更嚴格而言，CADR 為在測試腔中空氣清淨機運轉時所造成微粒的移除率減室內環境自然衰減率，再乘以測試腔體積。

為了確保測試結果的準確性和減少測試誤差，AHAM AC-1 標準中對測試微粒的測試粒徑和建議來源均有明確的說明。香菸 (tobacco smoke) 為經由香菸濾嘴供氣燃燒香菸草，產生的微粒粒徑範圍 0.09 ~ 1.0 μm；室內粉塵 (Dust) 為市售的測試粉塵為 0.5 ~ 3 μm；花粉則使用未去脂構樹花粉 (Non-defatted Paper Mulberry Pollen) 粒徑 0.5 ~ 11 μm。

AC-1 測試標準中所用的測試房間大小為 10<sup>1</sup>/<sub>2</sub> ft. x 12 ft. x 8 ft.，1008 ft<sup>3</sup>，其換氣率以 SF<sub>6</sub> 為追蹤氣體量測必須小於 0.03<sup>1</sup>/<sub>hr</sub>。清淨機測試過程中環境之溫濕度須控制於 21±2.5°C、40±5%，清淨機之供應電源為 120±1V、60±1Hz。測試前空間之微粒背景濃度須潔淨至香煙 90 particles/cc，粉塵 0.03 particles/cc，花粉 0.03 particles/cc，清淨機測試之粒子初始濃度為香煙 24,000~35,000 particles/cc，粉塵 200~400 particles/cc，花粉 5~15 particles/cc。

在測試前先使用 HEPA 濾材將測試腔潔淨至規定濃度，啟動風扇使其均勻混合一分鐘。關上風扇後三分鐘，進行濃度測量。當達初始濃度範圍時即進行自然沉積或清淨機效能測試，經由以微粒量測儀器測量測試腔中微粒自然衰減及清淨機運轉時的濃度變化。在開始量測第二分鐘，一分鐘記錄一筆，在微粒到達儀器可量測的最低濃度時，應該至少已經有九筆數據已被紀錄，否則此數據不可被認可。由於測試腔中的換氣率可以忽略，所以在計算衰減常數時，沒有把換氣率計算。衰減常數，k，是根據下式而來：

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad [10]$$

其中，C<sub>t</sub> = 在時間 t 時的微粒濃度 (particles/cc)

k = 衰減常數 (minute<sup>-1</sup>)，decay constant

$t_i$  = 時間 (minute)

從上式中，可以藉由對  $\ln C_t$  和  $t_i$  做線性回歸得到。

將測試資料經統計分析即可求得自然衰減常數  $K_n$  及量測衰減常數  $K_e$ ，將兩者相減再乘以測試空間大小即可獲得 CADR 值。

$$\text{CADR} = V (k_e - k_n) \quad [11]$$

其中，CADR, Clean Air Delivery Rate,  $\text{ft}^3/\text{min}$

$V$  = 測試腔體積 ( $\text{feet}^3$ )

$k_e$  = 量測衰減常數 ( $\text{minute}^{-1}$ )

$k_n$  = 自然衰減常數 ( $\text{minute}^{-1}$ )

### 三、實驗儀器與方法

本研究主要是分別在實驗室系統與現場實地操作測試室內空氣清淨機以探討其效能和能量消耗特性，內容包括：

1. 在實驗室測試空氣清淨機過濾風速、ESP 電場電壓對不同粒徑微粒之集塵效率的影響。
2. 在一小型會議室實地測試空氣清淨機，過濾風速對室內微粒濃度之影響。
3. 根據空氣清淨機實地測試結果，探討其乾淨空氣排放率（CADR）及其在一般室內環境實際使用時之最佳策略

#### 一、實驗室測試部分

實驗室實驗系統設置如圖二所示，以下就各部分做一說明：

##### 1. 氣懸微粒產生

測試所需之多粒徑微粒將由一定量輸出霧化器及超音波霧化噴嘴產生，其中定量輸出霧化器（Constant Output Atomizer, Model 3075, TSI Inc., St. Paul, MN, U.S.A.）產生的是粒徑介於 10 nm 至 1  $\mu\text{m}$  之微粒。超音波霧化噴嘴（Ultrasonic Atomizing Nozzle, Model 8700-120 MS, Sono-Tek Inc., Ponghkeepsie, NY, U.S.A.）中把送入的液體破碎成為小液滴，經過稀釋、乾燥後則產生大於 1  $\mu\text{m}$  之微粒。產生之微粒先經中和器（Kr-85）中和其電性至波茲曼分佈。

##### 2. 氣懸微粒量測

在實驗過程中，產生微粒後，先經帶電中和再送入測試腔中稀釋與乾燥，空氣清淨機則置於測試腔後段，並於出風口設置採樣口以供儀器進行採樣，再利用微粒電移動度掃描分徑器（Scanning Mobility Particle Sizer, Model 3934, TSI Inc., St. Paul, MN, U.S.A.）及氣動微粒分徑器（Aerodynamic Particle Sizer, Mode APS 3320, TSI Inc., U.S.A.）分別量測粒徑介於 20 nm ~ 0.7  $\mu\text{m}$  及 0.8~30  $\mu\text{m}$  之微粒。

##### 3. 空氣清淨機之性能測試

實驗室中測試之空氣清淨機為市售小型車用之單階鋸齒式靜電集塵器與以海綿為濾材自製之過濾式集塵器。所測試之靜電集塵器是 AB-1502 Air Purifier (Aero Buster)，主體構造如圖三。本研究利用一高壓直流電供應器（High Voltage DC Power Supplier, Model SL50PN300, SPELLMAN High Voltage Electronics Corporation）以供應靜電集塵器電暈放電時所需的能量，此一電壓

與所產生的電流量可直接由電源供應器上直接讀出；再利用一直流電源供應器（DC Power Supplier, Model 6210, TES）供應靜電集塵器上的軸扇所需的能量，所供應電壓與所產生的電流量可直接由面板讀出，改變此一電壓可控制風扇之轉速，進而產生不同的過濾風速（或風量）。

過濾式集塵器主要構造為過濾用之濾材以及風扇，如圖四所示。本研究利用 Stephenson & Lawyer, Inc. 所提供的聚氨基海綿（亦即俗稱之 PU 海綿）作為自製過濾式集塵器的濾材。將海綿分割成厚度 (Fiber thickness, T) 為 12.7 mm (or 0.5 inch)，方便實驗改變其濾材過濾之厚度。此種海綿之纖維直徑 (Fiber diameter,  $d_f$ ) 為 35.6  $\mu\text{m}$ ，孔隙度 (Pore grade) 為 100 ppi，填充密度 (Packing density,  $\alpha$ ) 為 0.03。由於海綿具有開放性孔洞的骨架結構，因此過濾時相對上空氣阻抗及壓降較低，且有易清洗特性可重複使用，同時可減少因負載而使過濾特性改變之影響，對於實驗之重複測試有其優點。至於海綿最底層則置放一蜂窩狀金屬篩網 (Honeycomb) 以固定支撐海綿，此篩網的截面積中，空隙佔了 90% 以上，因此可以忽略其所造程的微粒損失。

#### 一、現場實地測試部分

本研究採用之空氣清淨機分別為宏興電器製造之 AC-2103R 靜電集塵式空氣清淨機與 Honeywell 公司出產之 HE 8120 過濾式空氣清淨機，其型式及規格如圖五及六所示。其中宏興電器的 AC-2103R 空氣清淨機除了配備靜電集塵外，其在進風口處另有一層活性碳濾材與可清洗不織布做為初過濾層，而其電極電壓為 5 kv，說明書上建議之最大使用坪數為 10 坪。至於 Honeywell 公司的 HE 8120 空氣清淨機內部具備兩層濾材以過濾微粒，其中一層為活性碳濾網（型號：HF-8120/38002），另一層則為折疊式濾材（HEPA 濾心，型號：HEP-7120），建議之適用坪數為 4~8 坪。至於空氣清淨機所耗功率，則以瓦特計（Mode：S2-334W-12，台技電機）加以測量。

在實際環境測試時，以一間小型會議室為實驗系統，如圖七。此測試腔的長寬高分別為 2.9 公尺，3.4 公尺及 3 公尺（體積約為 29.6  $\text{m}^3$  或 1045  $\text{ft}^3$ ）。該會議室在密閉下之換氣率是以六氟化硫（ $\text{SF}_6$ ）為追蹤氣體，在室內釋放追蹤氣體  $\text{SF}_6$  之後，在空氣完全混合的狀況下，室內  $\text{SF}_6$  的濃度因通風混合之稀釋作用與排除作用，而使其濃度以指數函數遞減，利用可攜帶式紅外光吸收光譜儀 (Mini Infra Red Analyzer, MIRAN 1B2, The Foxboro Company, East Bridgewater, MA, USA) 逐時連續量測  $\text{SF}_6$  濃度，再根據其濃度變化推算空間之換氣率，量測結果得知該空間密閉時換氣率為 0.03 1/hr。

室內環境現場之微粒濃度主要是利用 P-trak Ultrafine Particle Counter (Model 8525, TSI Inc.) 來進行量測。P-trak 可量測微粒濃度為 0~ $5 \times 10^5$  particles/ $\text{cm}^3$ ，量測

粒徑大小為  $0.02\sim 1\ \mu\text{m}$ 。實驗進行時，P-trak 放置於測試腔中央，離地約 75 cm，空氣清淨機置放於距離 P-trak 約 50 cm 處。然而此採樣點或許並非不是最理想的採樣點，不過考慮此空間不是太大以及假設為微粒完全混合均勻，那採樣點位置與實驗結果也不會產生太大影響。利用點燃香菸產生微粒以利空氣清淨機進行清除。所使用的香菸放置在溫濕度控制在  $23 \pm 5\ ^\circ\text{C}$  與  $32 \pm 5\ \% \text{ RH}$  的防潮箱內，時間超過一個月。實驗進行時是先將空氣清淨機置放於小會議室當中，點燃香菸使室內微粒濃度超過  $30,000\ \text{particles}/\text{cm}^3$ ，開啟軸扇均勻混合一分鐘，關閉軸扇等待扇葉完全靜止後一分鐘，將門緊閉，開啟儀器記錄微粒濃度。量測所得到之逐時微粒濃度，依照式[10]，可計算其衰減常數。

## 四、結果與討論

本研究分別在實驗室系統及現場實地測試空氣清淨機在不同操作參數下之除塵效率，因此以下將分別針對實驗室及現場實地測試之結果加以說明及討論，最後將針對實地操作空氣清淨機探討其乾淨空氣排放率 (CADR) 及其在一般室內環境實際使用時之最佳策略。

### 一、實驗室測試

實驗室測試主要是針對兩種型式之空氣清淨機 (包括靜電集塵器及自製海綿過濾集塵器) 過濾風速、ESP 電場電壓對不同粒徑微粒之集塵效率，而空氣清淨機之過濾風速在本研究中是以處理空氣流率來表示。圖八是利用圖三所示之小型靜電集塵器，在放電電壓為 7 kV 下，測試處理空氣流率分別為 11.09, 33.29 及 42.81 L/min 下，其不同粒徑微粒之穿透率曲線，由通過集塵器之微粒穿透率即可得知其對微粒之集塵效率。結果明顯可見處理空氣流率越大則微粒之穿透率越高，亦即集塵效率越低，這是因為處理空氣流率越大，過濾風速也越大，進而影響微粒在集塵器的停留時間，因此當停留時間越短則微粒穿透集塵器之機會就越大，也就是其集塵效率越差。此外在相同操作條件之下，處理效率是微粒粒徑函數，較大與較小的微粒均較容易被集塵器收集，而中央一些不容易被收集的微粒，其大小就是所謂的最易穿透粒徑，由圖八觀察到最易穿透粒徑大小大約是在 0.2  $\mu\text{m}$ ~0.5  $\mu\text{m}$  之間，其並未隨著處理空氣流率改變而有明顯變化之情形。圖九則是在固定之處理空氣流率 (33.29 L/min) 下，改變靜電集塵器放電極之電壓由 5 到 8 kV，以探討不同放電電壓下微粒在靜電集塵器之穿透率。結果發現放電電壓越高其微粒之穿透率越低，這是因為微粒的靜電飄移速度和電場強度和微粒帶電的乘積成正比之故。

圖十探討過濾風速 (以處理空氣流率表示之) 對過濾式集塵器之影響。利用圖四所示自製之以海綿為過濾濾材之過濾式集塵器，濾材過濾厚度為 7.62 cm (亦即用了 6 層之海綿濾材，每層厚度為 1.27cm or 0.5 in.) 測試在處理空氣流率分別為 12.8, 21.6 及 31.8 L/min 下，不同粒徑微粒之微粒穿透率。對粒徑比較小的微粒而言，過濾風速上升微粒之穿透率也上升，這是因為對小微粒而言，擴散為其主要收集機制，因此過濾風速越大，微粒在海綿中的停留時間越短，因此被收集的機會就越小，相對穿透的機會就越大。至於粒徑較大的微粒，其穿透率隨過濾風速增加而下降，主要是因對於較大之微粒而言其被收集之主要機制為慣性衝擊，過濾風速增加，則微粒的慣性衝擊機制越明顯，微粒撞擊到海綿纖維的機會也就相對增加，收集效率也就增加。

### 二、現場實地測試

在 ANSI/AHAM 之家用室內空氣清淨機之評估方法建議進行空氣清淨機測試時，如果使用香煙為微粒源則其室內微粒初始濃度應介於 24,000~35,000 particles/cm<sup>3</sup>。圖十一是探討在密閉之小會議室測試空間中，利用 P-trak 量測不同微粒初始濃度下微粒之自然衰減造成之濃度降低情形。結果發現微粒之衰減率並非固定不變，當起始微粒濃度



越高則微粒之衰減常數越大，這是因為微粒之濃度衰減主要因重力沈降及擴散沈積而造成，同時室內風速不大因此微粒沈積在室內之後即附著在表面上，因此表面上之氣懸微粒濃度即為零。而對靜止、同溫的微粒而言，其擴散的速度通常以通量（flux）代表，同一方向的微粒通量是和局部濃度梯度成正比，因此微粒起始濃度高時會有較高的衰減常數。而根據重複實驗測試結果，發現微粒起始濃度在 25,000~30,000 particles/cm<sup>3</sup> 時，所測量及計算所得之衰減常數較穩定一致，因此在後續之實地測試實驗中所使用之微粒起始濃度均是介於 25,000~30,000 particles/cm<sup>3</sup>。

由於所使用之氣膠量測儀器本身會抽取一定量之空氣來偵測微粒之濃度，為瞭解氣膠量測儀器例如 SMPS 或 P-trak 對微粒衰減之影響，因此實驗測試使用一部 P-trak、同時使用兩部 P-trak 以及同時使用一部 SMPS 及 P-trak 時微粒衰減結果（見圖十二）。使用一部 P-trak 時衰減常數為 0.35 1/hr，使用兩部 P-trak 時衰減常數為 0.64 1/hr，同時使用一部 SMPS 及一部 P-trak 衰減常數為 0.78 1/hr。本研究在進行空氣清淨機之現場實地測試時則僅使用一部 P-trak 來進行微粒濃度量測。至於進行實地測試之小會議室中其微粒粒數濃度及粒徑分佈隨著時間之變化情形，則可由 SMPS 之逐時量測得知，結果見圖十三。

#### （一）小型靜電集塵器及自製海綿過濾集塵器之現場實地測試

圖十四為在密閉的小型會議室中測試小型之靜電集塵器”Aerobuster”在操作電極電壓為 7 kV 時，處理空氣流率分別為 11.09、33.29 及 42.81 L/min 時微粒之衰減情形。結果發現處理空氣流率越高亦即過濾風速越大微粒之衰減常數越大，這結果似乎與前述圖八在實驗室所獲得之結果不一致，不過因為在現場實地測試時，過濾之空氣流率越大代表整個房間單位時間微粒通過靜電電暈區次數越多，相對被收集的機會也會相對增加，且單位時間風量增加整體房間內的氣流對流運動也會增加，因此造成更多微粒因對流擴散而沈積於房間牆面或在裡面的物體表面上，所以在現場實地測試時於單位時間操作風量越大微粒衰減常數會越大。

圖十五則是測試小型之靜電集塵器”Aerobuster”在 33.29 L/min 之處理空氣流率下，分別使用 4、6 及 7kV 之電極電壓所得到之微粒衰減情形。結果顯示當電極電壓由 4 增加到 7kV 時，微粒之衰減常數則由 0.550 增加到 0.906。此代表了微粒受到電壓增大之影響而增加靜電集塵器對微粒之收集。

本研究嘗試開發可重複使用之海綿過濾集塵器，海棉被切割成固定之厚度大小來進行不同厚度濾材之集塵效率實驗，圖十六是使用固定功率之風扇來抽氣通過不同海綿厚度（以使用不同層數之海綿來控制厚度）之過濾集塵器時其表面之過濾風速。結果發現海綿厚度越大則其表面風速呈現急速減少之趨勢，不過當增加到一定厚度後會達到一較穩定之風速。圖十七則分別利用不同層數之海綿在現場實地測試其對微粒之衰減情形，所使用之海綿分別為 1、3、5、7 及 12 層海綿，由於其風扇之功率固定因此其單位時間過濾風量也不同，由前述之圖十六已知其過濾風速非呈現線性關係，因此其過濾空氣流率分別為 300、186、139、109 及 63 L/min。結果發現使用之海綿越多層其微粒之

衰減常數越小，代表微粒被收集的較少，這主要是因為雖然微粒經過較多層數的海綿時其集塵效率會較高，但是因為其處理風量較小，因此反而不及層數少之海綿過濾器有很大之單位處理風量所達到之集塵效果。

## (二) 市售室內空氣清淨機之現場實地測試

由於一般市售之靜電集塵器並無法改變其供應之電極電壓，因此在現場實地測試中與過濾式之空氣清淨機一樣都只測試其不同處理空氣流率下其對微粒之除塵效果。圖十八是利用宏興電器製造之 AC-2103R 靜電集塵式空氣清淨機所進行之測試結果。該靜電集塵器有低中高三種不同之處理風量選擇，其所對應之處理空氣流率經測量分別為 2944、4093 及 4856 L/min，所測得之微粒衰減常數分別為 6.546、8.105 及 9.855 1/hr，此結果顯示處理空氣流率越大則對微粒之清除效果越佳。ANSI/AHAM AC-1-2002 家用空氣清淨機評估方法中建議以乾淨空氣排放率 (CADR) 作為空氣清淨機性能評估之指標，其為測試腔中清淨機運轉所造成之微粒移除率減去室內自然衰減率再乘以測試腔體積而得，其中室內微粒自然衰減率經測量為 0.353 1/hr，而室內體積 1045 ft<sup>3</sup>。因此當靜電集塵器之處理空氣流率分別為 2944、4093 及 4856 L/min，其乾淨空氣排出率 (CADR) 分別為 107.86、135.01 及 165.49 ft<sup>3</sup>/min (見表一)。

圖十九是利用 Honeywell 公司出產之 HE 8120 過濾式空氣清淨機在現場測試其對微粒之清除，同樣的該機型也有低中高等三種處理空氣流率之選擇其所對應之處理空氣流率經測量分別為 2233、3040 及 3554 L/min，所測得之微粒衰減常數分別為 3.654、5.250 及 6.408 1/hr，此結果同樣顯示處理空氣流率越大則對微粒之清除效果越佳。其乾淨空氣排出率 (CADR) 之計算結果如表一所示，分別為 57.48、85.29 及 105.46 ft<sup>3</sup>/min。

不管是靜電集塵器或是過濾集塵器，CADR 之計算結果均顯示顯示市售的空氣清淨機在高操作流量 (亦即高處理空氣流率) 下有較高的 CADR 值。儘管如此，其耗用能源之情形則並沒有被討論，對於消費者而言如果在相同之乾淨空氣排出率之下選用一較省電之產品應是較為划算之選擇，同時這也代表此一產品具有良好之能源效率。因此本研究嘗試以消耗單位能量所能提供之乾淨空氣量來表示空氣清淨機之性能。評估方式是將所得到之乾淨空氣排出率再除以清淨機操作所消耗的功率，計算公式如下，結果見表一。

$$\frac{CADR}{Power} = \frac{V(K_e - K_n)}{3600 * V_e * I}$$

V: 測試腔體積 (1035 ft<sup>3</sup>)

k<sub>e</sub> = 量測衰減常數 (hr<sup>-1</sup>)

k<sub>n</sub> = 自然衰減常數 (hr<sup>-1</sup>)

V<sub>e</sub>: 電壓 (volt)

## I: 電流 (ampere)

結果發現比較所測試之兩種型式空氣清淨機，以靜電集塵器之消耗單位能量所提供之乾淨空氣量較大顯示其能源效率略佳，同時研究結果顯示，所測試之三種風量其單位能量所供出的 CADR 值差不多，因此消費者在選用空氣清淨機時，應可選用能源效率較佳之產品。

## 五、結論與建議

本研究針對靜電集塵式與過濾式空氣清淨機測試之結果，得到以下數點結論：

1. 就次微米的微粒而言，不論是靜電集塵式與過濾式空氣清淨機，其微粒穿透率和表面風速（正比於空氣流率）成正比。
2. 至於微米大小之微粒，其通過濾材過濾式空氣清淨機的穿透率則會因表面風速的增加而遞減，主要是由於慣性衝擊所致。
3. 微粒的衰減率與其粒徑大小有明顯相關。通常，對於最易穿透粒徑（大約是  $0.3\ \mu\text{m}$ ）之微粒其衰減率最小，而較大或較小的微粒則有較大的衰減率。

就本研究所測試之靜電集塵式及濾材過濾式空氣清淨機之測試結果顯示，若該空氣清淨機具有不同操作風量之設計，則建議應選擇高風量運轉以獲得較高的乾淨空氣排放率。

## 六、參考文獻

- AHAM, Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Cord-Connected Room Air Cleaners, Standard AC-1-2002, Association of Home Appliance Manufacturers, Chicago, 2002
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 1998. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice, 23rd ed., ACGIH, Cincinnati, OH.
- American Society for Testing and Materials: Standard Test Methods for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. ASTM Standard E741-93. ASTM Philadelphia (1993).
- Association of Home Appliance Manufacturers. 2002. American national standard method for measuring performance of portable household electric cord-connected room air cleaners. ANSI/AHAM AC-1-2002. Chicago, IL: Association of Home Appliance Manufacturers.
- Brüel & Kjaer Manual. 1991. Measuring Ventilation Using Tracer-Gases. Brüel & Kjaer, Nærum, Denmark.
- Burton DJ. 1989, Industrial ventilation workbook, chapter 3. DJBA, Inc., Salt Lake City.
- Burton DJ. 1998, "General Methods for the Control of Airborne Hazards", In: The Occupational Environment – Its Evaluation and Control, Salvatore R. DiNardi (ed.), pp.839-842. AIHA, Fairfax, VA.
- Davies CN. 1983, Filtration of Aerosols. J. Aerosol Sci. 14:147-161.
- Decker J. 1995 Evaluation of Isolation Rooms in Health Care Settings Using Tracer Gas Analysis. Appl Occup Environ Htg 11:887-891.
- Grot RA, Lagus PL. 1991. Application of Tracer Gas Analysis to Industrial Hygiene Investigations, Lagus Applied Technologies, Inc., San Diego, CA.
- Hinds WC. 1982. Aerosol Technology. New York; John Wiley and Sons, Inc. 164-186.
- Huang SH, Chen CC. 1996. Filtration Mechanisms of Personal Protective Particulate Respirators, (Expanded Paper) The 1996 International Conference on Aerosol Science and Technology, Chungli, Taiwan, December 5-7.
- Huang SH, Chen CC. 2001. "The Study of Filtration and Loading Characteristics of Miniature Electrostatic Precipitators".
- Marshall JW, Vincent JH, Kuehn TH. 1996. Brosseau, L.M.: Studies of Ventilation Efficiency in a Protective Isolation Room by the Use of a Scale Model. Infect Control Hosp

Epidemiol 17:5-10.

Moyer ES, Stevens GA. 1989 Worst Case. Aerosol Testing Parameters: III. Initial Penetration of Charged and Neutralized Lead Fume and Silica Dust Aerosols through Clean, Unloaded Respirator Filters. Am. Ind. Hyg. Assoc. J.50(5):271-274.

Nelson HS, Hirsch SR, Ohman JL, PlattsMills TAE, Reed CE, Solomon WR. 1988. Recommendations for the use of residential air-cleaning devices in the treatment of allergic respiratory diseases. Journal of Allergy and Clinical Immunology 82(4): 661-669.

Nicholas P, William P, Ronald PD, Matthew AL. 2002. A simple and inexpensive method for determining the effective ventilation rate in a negatively pressurized room using airborne particles as a tracer. Applied Occupational and Environmental Hygiene, Volume 17(10):704-710.

Samfield MM. 1992. Air Infiltration Measurements Using Tracer Gases: A Literature Review. Govt. Reports, Announcements, and Index. Issue 9.

Small WS. 1957. Report of the Subcommittee on Air Processing-American Academy of Allergy. J. Allergy. 28:455.

Yung Sung Cheng, Jian Chun Lu, and Tuo Rong Chen. 1998. Efficiency of a Portable Indoor Air Cleaner in Removing Pollens and Fungal Spores. Aerosol Science and Technology 29: 92-101.

US EPA. 1990. Residential air cleaning devices: a summary of available information.

Weber AM, Daftarian H. 1975. NIOSH Health Hazard Evaluation Report – Lockheed Martin Aeronautical Systems, HETA 98-0347-2758. National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati, OH.

王秋森，陳時欣，2002，氣懸膠技術學，新文京開發出版有限公司

翁怡玫，2002，海綿過濾特性探討，台灣大學公衛學院職業醫學與工業衛生研究所碩士論文

Table 1. Comparison of CADR and energy consumption of the commercially available air cleaners

Air cleaner type	Flow rate L/min	Power watt	k l/hr	CADR ft <sup>3</sup> /min	CADR/POWER ft <sup>3</sup> /Joule	
ESP	Low	2944	64	6.5	107.86	0.028
	Med	4093	81	8.1	135.01	0.028
	High	4856	93	9.9	165.49	0.030
Filter	Low	2233	57	3.7	57.48	0.017
	Med	3040	73	5.3	85.29	0.019
	High	3554	88	6.4	105.46	0.020

Room Volume= 1045 ft<sup>3</sup>  
 Natural Decay = 0.353 1/hr ( measured by P-trak)

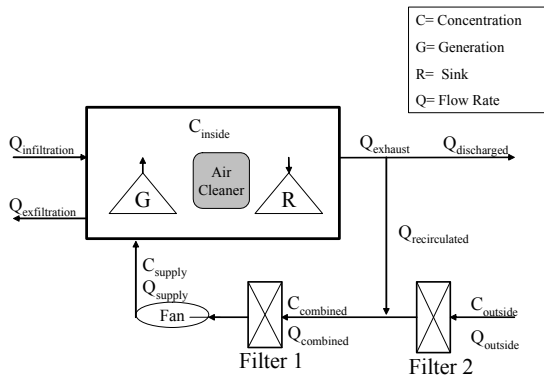


Figure 1. Major factors affecting indoor air quality

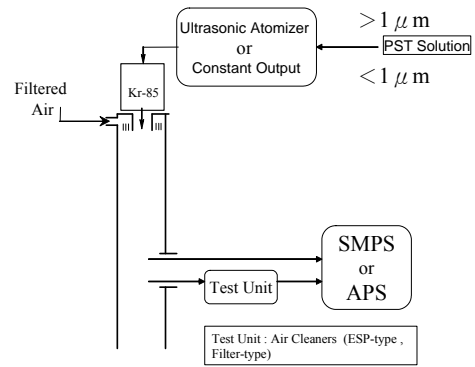


Figure 2. Schematic diagram of the experimental system.

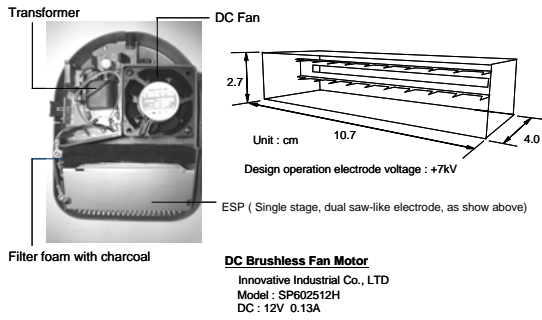


Figure 3. Components of a small electrostatic precipitator "Aerobuster".

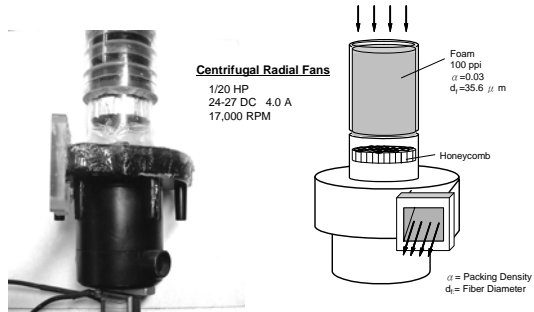


Figure 4. Components of a home-made filter-type air cleaner.

出產公司	宏興電器
型號	AC-2103R
最大適用坪數	10 坪
電壓電流	110V 60Hz
所耗功率	高 93 W
	中 81 W
	低 64 W
前置濾網	活性炭濾網、不織布、可洗泡棉
電場電壓	5 kV
產品尺寸	48.3x15.5x38(cm)
重量	6.8kg



Figure 5. The commercially available ESP-type air cleaner used in the field test chamber.

出產公司	Honeywell
型號	HE 8120
適用坪數	4-8 坪
電壓電流	110V 60Hz
所耗功率	高 88 W
	中 73 W
	低 57 W
活性炭濾網	HF-8120/38002
HEPA 濾心	HEP-7120
產品尺寸	38 x 17 x 36.5 cm
重量	4.1 kg



Figure 6. The commercially available filter-type air cleaner used in the field test chamber.

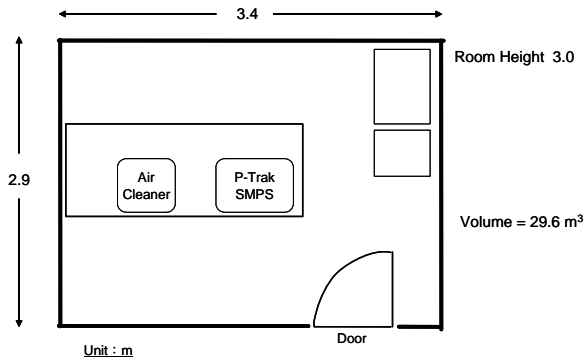


Figure 7. Top-view of the field test chamber.

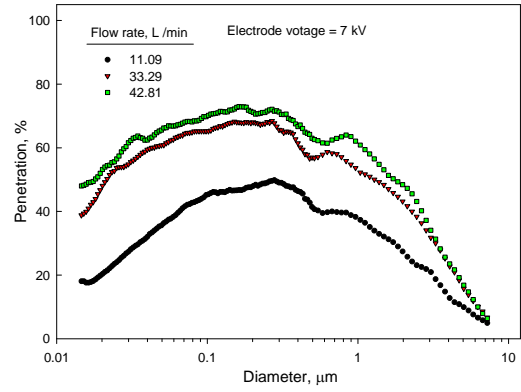


Figure 8. Aerosol penetration curves under different gas flow rates for the ESP-type air cleaner "Aerobuster" operated at an applied electrode voltage of +7 kV in the experimental system.

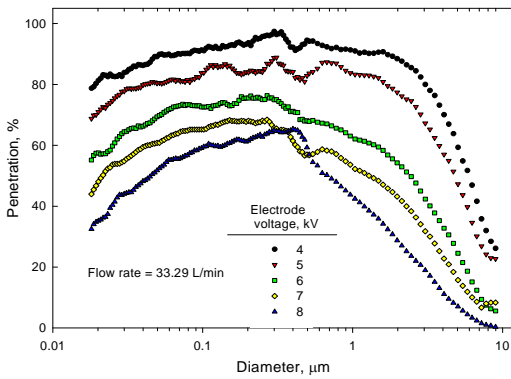


Figure 9. Aerosol penetration curves under different applied electrode voltages for the ESP-type air cleaner "Aerobuster" operated at a gas flow rate of 33.29 L/min in the experimental system.

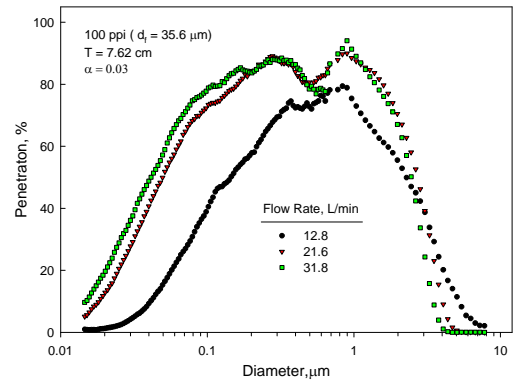


Figure 10. Aerosol penetration through the home-made foam filter with a foam of 7.62 cm in thickness under different gas flow rates tested in the experimental system.

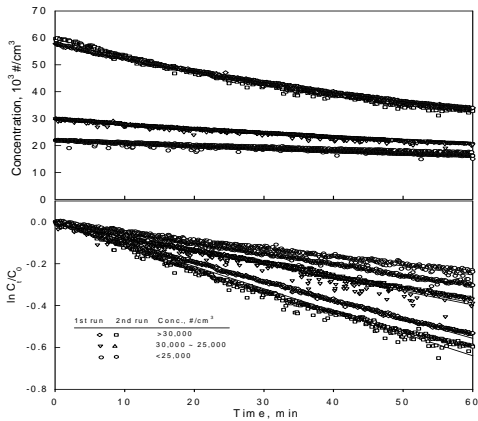


Figure 11. Duplicate test on particle natural decay rates under different particle concentration levels in the field test chamber.

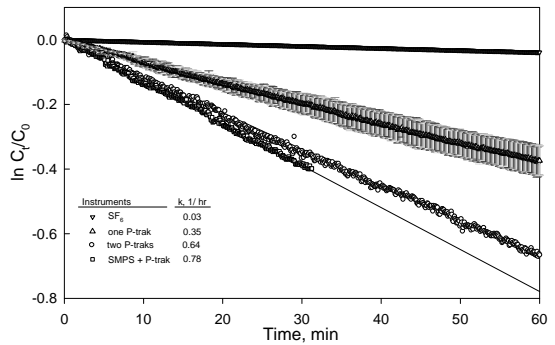


Figure 12. Effect of aerosol measuring instruments on the measurement of particle natural decay rates in the field test chamber.

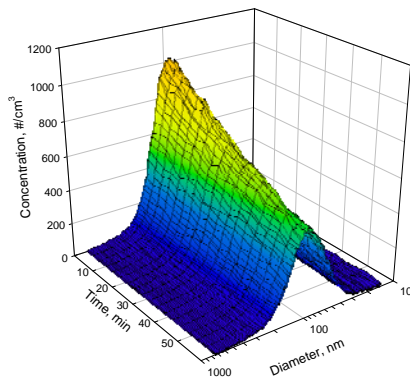


Figure 13. Time-resolved particle concentrations and size distributions measured by SMPS in the field test chamber.

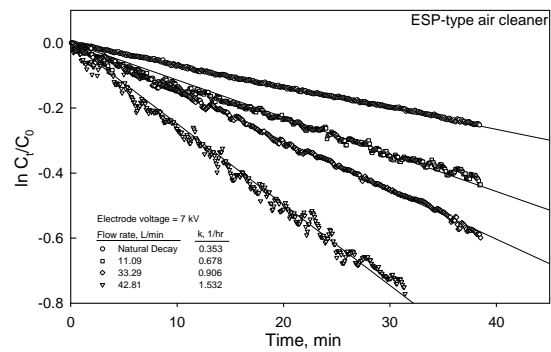


Figure 14. Particle decay rates under different gas flow rates for the ESP-type air cleaner "Aerobuster" with an applied electrode voltage of +7 kV in the field test chamber.



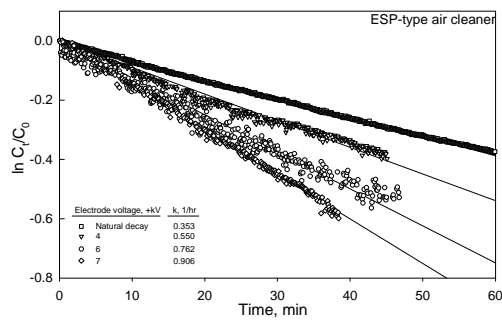


Figure 15. Particle decay rates under different applied electrode voltages of the ESP-type air cleaner "Aerobuster" operated at a gas flow rate of 3329 L/min in the field test chamber.

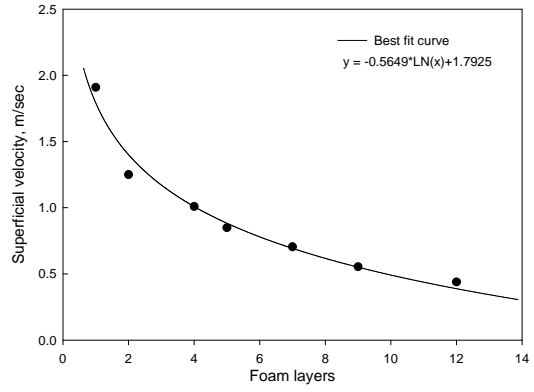


Figure 16. Effect of packing foam layers on the superficial velocity of the home-made foam filter.

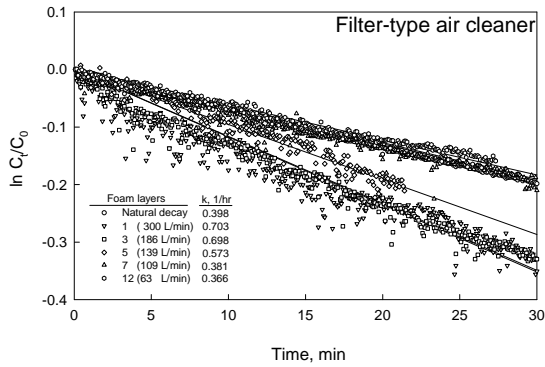


Figure 17. Particle decay rates for different foam thickness of the home-made foam filter with the same applied energy in the field test chamber.

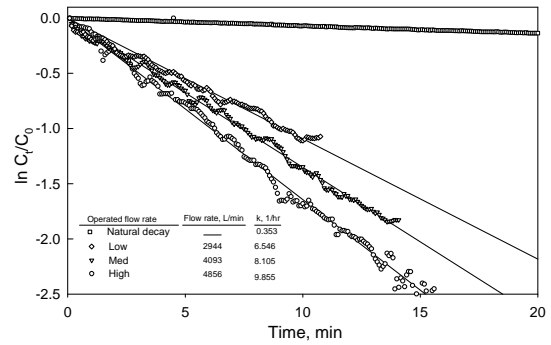


Figure 18. Particles decay rates under different operated gas flow rates for the commercially available ESP-type air cleaner in the field test chamber.

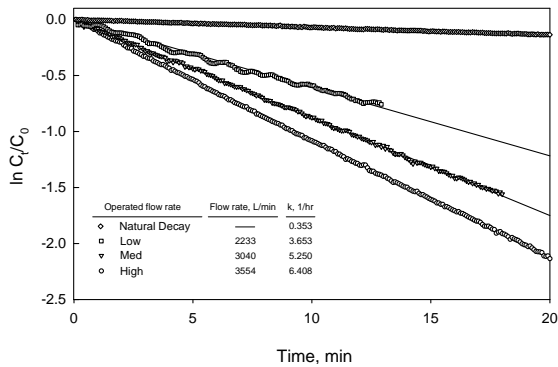


Figure 19. Particles decay rates under different operated gas flow rates for the commercially available Filter-type air cleaner in the field test chamber.