

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 子計畫三：奈米微粒控制技術研究(II)(1/2)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2621-Z-002-012-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學公共衛生學院職業醫學與工業衛生研究所

計畫主持人：陳志傑

共同主持人：黃盛修

計畫參與人員：林琮禧

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 6 月 1 日

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫期中成果報告

## 奈米微粒與健康風險研究—子計畫三： 奈米微粒控制技術研究（II）

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2621-Z-002-012

執行期間：92年08月01日至93年06月1日

計畫主持人：陳志傑 (Chih-Chieh Chen)

計畫參與人員：黃盛修、林琮禧

成果報告類型：完整報告

執行單位：國立台灣大學職業醫學與工業衛生研究所  
中華民國93年5月31日

# 中文摘要

無論從理論或是實驗中均可以發現在某些情況之下，粒徑小的微粒，尤其是粒徑小於  $1\mu\text{m}$  的微粒，常會有充電不足的現象。不帶電的微粒在電場中並不會受到庫侖力的作用而被收集，以致於當微粒小至某一程度之後，靜電集塵器的收集效率反而會有下降趨勢。換句話說，從質量濃度的觀點，靜電集塵器雖然有相當高的效率，不過卻無法有效地收集奈米粒徑的微粒。本實驗的目的即在於尋找適合的海綿濾材，以期有效收集從靜電集塵器脫逃的奈米微粒。實驗中使用定流量噴霧器(Constant Output Atomizer)產生粒徑  $100\text{--}7\text{nm}$  的固體測試微粒並利用掃描式電移動度微粒分徑儀(Scanning Mobility Particle Sizer, Model 3085)分別量測海綿及靜電集塵器上、下游的微粒濃度與分佈，藉此探討海綿濾材對於奈米微粒的收集效率如何受到孔隙度、表面風速及填充密度等條件所影響。

實驗的結果顯示，在相同厚度與相同填充密度的條件下，由於較大孔隙度的海綿具有較小的纖維直徑，較多的纖維表面積，微粒的穿透率會隨海綿孔隙度的增加而降低(15nm 的微粒在 60ppi 海綿其穿透率為 62%，而隨著孔隙度增加為 100ppi 穿透率減少至 9%)。另外，由於停留在海綿濾材時間長短不同，因此奈米微粒對於海綿的穿透率會隨著表面風速的減小而降低(15nm 的微粒表面風速由  $9.5\text{cm/s}$  增加至  $66\text{cm/s}$  時，所得到穿透率由 10.5% 上升至 62.5%)。海綿填充密度的影響與孔隙度類似，較高填充密度意味著有較多濾材表面積因此填充密度越大其奈米微粒穿透率越小。從研究中可發現，低孔隙度、低填充密度且低過濾風速可以得到較高的過濾品質。在實驗中靜電集塵器處理風量設計為  $100\text{ L/min}$ 。微粒粒徑小於最易穿透粒徑(大約  $0.3\mu\text{m}$ ) 其穿透率隨著粒徑減少而降低。不過在  $15\text{ nm}$  (穿透率為 19%) 以下，微粒因為部分充電的原因使得微粒穿透率上升。利用海綿濾材(110 ppi，填充密度 0.04，厚度  $25.4\text{ mm}$ ) 串接於靜電集塵器之後可以有效控制奈米微粒(穿透率由 19% 降低至 2.5%)。由於靜電集塵器所造成的壓降幾乎可以忽略，即使奈米微粒經過靜電集塵器時有部分充電而無法完全收集的情形，從過濾品質而言靜電集塵器仍是優於海綿濾材。

關鍵詞：過濾、奈米微粒、海綿濾材、穿透率

## Abstract

Due to the partial charging effect, the collection efficiency of an ESP tends to decrease with decreasing particle size. In other words, the collection efficiencies in terms of number density for nanoparticles of an ESP may be relatively low, although high mass collection efficiency is well achieved by a conventional ESP. The main objective of this study was to search the right types of filter foams that could efficiently collect those fugitive uncharged nanoparticles. In order to conduct the aerosol penetration tests of filter foams, a constant-output aerosol atomizer was used to generate challenge aerosol particles in the size range of 7 to 100 nm. A scanning mobility particle sizer (SMPS 3085) was used to measure the aerosol concentrations upstream and downstream of the ESP unit and/or the filter foams. Among the operation parameters were the foam porosity, foam solidity, foam thickness and filtration velocity.

The results showed that aerosol penetration through filter foams decreased with increasing foam porosity, apparently due the more surface area for aerosol deposition by diffusion. Aerosol penetration increased with increasing filtration velocity due to shorter retention time. The effect of foam packing density on aerosol penetration was very similar to foam porosity (fiber diameter) because higher packing density means more filter materials and therefore, more surface area for aerosol deposition. To take into account the air resistance together with aerosol penetration, we found that low porosity, low packing and low filtration velocity resulted in higher filter quality factor. The ESP unit tested in this work had a designed flow rate of 100 L/min. For particles smaller than the most penetrating size (about 0.3  $\mu\text{m}$ ), the aerosol penetration through ESP decreased with decreasing aerosol size until the size reached about 15 nm (19%). Aerosol penetration of particles smaller than 15 nm increased due to partial charging. Filter foam (110 ppi, packing density of 0.04 and thickness of 25.4 mm) removed most of the fugitive ESP nanoparticles (penetration from 19% down to 2.5%). The air resistance induced by the ESP was almost negligible. Therefore, ESP is superior to the filter foams from the perspective of filter quality, even for small particles with partial charging effect.

Key words : Filtration, Nanoparticles, Filter foams

# 目錄

中文摘要.....	1
Abstract.....	2
目錄.....	3
圖目錄.....	4
第一章 奈米微粒穿透海綿濾材特性研究.....	5
第一節 前言.....	5
第二節 文獻探討.....	8
第三節 實驗方法.....	14
第四節 實驗結果.....	18
第五節 結論與建議.....	21
參考文獻.....	22

## 圖目錄

FIGURE 1. SCHEMATIC DIAGRAM OF THE EXPERIMENTAL SETUP FOR FILTER FOAM AND ESP PENETRATION TEST .....	24
FIGURE 2. SCHEMATIC DIAGRAM OF THE HOME-MADE HOLDER FOR FILTER FOAMS.....	25
FIGURE 3. PRESSURE DROP OF FILTER FOAMS AS A FUNCTION OF PACKING DENSITY (A) AND FACE VELOCITY (B). .....	26
FIGURE 4. EFFECT OF THE FACE VELOCITY ON AEROSOL PENETRATION AND FILTER QUALITY. ....	27
FIGURE 5. EFFECT OF THE PACKING DENSITY ON AEROSOL PENETRATION AND FILTER QUALITY. ....	28
FIGURE 6. EFFECTS OF THE FOAM POROSITY ON AEROSOL PENETRATION AND FILTER QUALITY. ....	29
FIGURE 7. PECLET NUMBER VERSUS AEROSOL PENETRATION UNDER DIFFERENT VELOCITY.....	30
FIGURE 8. AEROSOL PENETRATION CURVES UNDER DIFFERENT APPLIED ELECTRODE VOLTAGES AT A FLOW RATE OF 80 L/MIN. ....	31
FIGURE 9. AEROSOL PENETRATION CURVES OF ESP UNDER DIFFERENT FLOW RATES AT AN APPLIED ELECTRODE VOLTAGE OF -6 KV.....	32
FIGURE 10. AEROSOL PENETRATION CURVES THROUGH FILTER FOAM AND ESP AT AN APPLIED ELECTRODE VOLTAGE OF -6 KV.....	33
FIGURE 11. COLLECTION EFFICIENCY CURVES OF ESP, FOAM, AND BOTH IN SERIES. ....	34
FIGURE 12. FILTER QUALITY CURVES OF FOAM AND ESP PLUS FOAM.....	35

## 第一章 奈米微粒穿透海綿濾材特性研究

### 第一節 前言

空氣中固體微粒和水滴的混合物，普遍稱為「微粒」( particulate matter , PM)。微粒的粒徑大小範圍很廣，其來源為不同形式的固定性和移動性污染源，另外尚有自然性污染源。微粒的特性與對環境影響均予微粒粒徑大小有著絕對的關係，包括在大氣中的停留時間、大氣化學物質附著於微粒表面能力以及對生物的健康效應影響。

粒徑介於 0.1 10  $\mu\text{m}$  之微粒在大氣中停留時間最久，大約為一星期。較大的微粒及較小微粒則分別因為沈降及擴散與微粒互相凝結存在於大氣中的時間較短。然而，即便這些細小微粒會因為微粒相互之間的凝結而減少數目濃度，但卻依然停留在大氣中。

自十四世紀起對於可呼吸性微粒產生的病變已經有不計其數的研究。許多研究指出，產生的生理效應影響與大氣中懸浮微粒濃度有極大關係，尤其在細微粒濃度比 PM10 濃度高時特別明顯。大鼠暴露在焊接煙(平均粒徑 100 nm，幾何標準差為 1.42，重量濃度  $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 之下，四小時後並沒有發現任何明顯的呼吸系統毒理現象，不過會有些許超細微粒沈積在大鼠的上呼吸道，主要沈積則發生在大鼠的下呼吸道包括細支氣管、肺泡導管、肺泡等(Yu *et al.*, 2000)。健康且出生 10~12 週的大鼠暴露在高濃度( 57、90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )的超細微粒(粒徑為 72 nm)下會產生與發炎反應相關的氧化壓力增加，且有劑量效應關係(Zhou *et al.*,2003)。

針對奈米微粒的動物實驗顯示，當大鼠暴露在相同重量濃度的次微米微粒與奈米微粒下，暴露在奈米微粒下的大鼠發生肺泡發炎機率較高，且奈米微粒只需極低劑量( 1  $\text{mg}/\text{m}^3$ )就會造成大鼠呼吸系統或產生局部性發炎。以猴子做動物實驗下也發現，奈米微粒與超細微粒(5 100 nm)會大量的沉積在鼻腔內，微粒粒徑越少時微粒沈積量越大，且沈積於肺部中之微粒粒徑則在 5 nm 與 100 nm 為最多(Yeh *et al.*,

1997)。

為了減少人類生命財產的損失，各國均制定了空氣污染防治條例以減少污染源的排放量。過去，空氣污染管制是著重於降低微粒的排放重量濃度，然而前面提到過細微粒(粒徑小於 2.5 $\mu\text{m}$ )在能見度與健康效應影響均比大微粒大的許多。有鑑於此，美國環保署制訂了 PM 2.5 的排放規範(U.S. EPA, 1996)。此一新標準的制定對於空氣污染控制設備是否能增加細小的微粒的補集效率顯的格外重要。否則，即使侍從流行病學觀點無法判斷是微粒質量、微粒數目及微粒表面積對於健康效應影響較為重要，而微米微粒及次微米微粒對於質量濃度影響皆遠大於奈米微粒，因此若以質量濃度來定量粒狀污染物毒性大小則有可能會產生嚴重誤判。

有研究指出，在發動機與運輸工具排放出來粒狀污染物的粒徑分佈中，就質量濃度而言，主要是以細微粒(fine particles)為主，而奈米微粒於數目濃度中佔了絕大部分。越靠近公路，於奈米微粒數量增加上遠比 PM10 在重量濃度上增加更多 (David, 1998)。目前最主要控制方式及在排氣端裝設不同濾材控制引擎排氣的粒狀與氣狀污染物濃度。

不同型式的靜電集塵器已經被廣泛的用於補集粒狀污染物，如：發電廠、鋼鐵業、石化業及焚化爐等。靜電集塵器對微粒的收集效率受到相當多因素影響，大致可分為微粒特性、集塵器特性及一些外在因素(如風量等)。不過無論從理論或是實驗均可以發現在某些情況之下，粒徑較小的微粒，特別是粒徑小於 100 nm 的微粒，常會有充電不足的現象，且隨著微粒粒徑越小其不帶電的比例越高，不帶電的微粒在電場中並不會受到庫侖力的作用被收集，以致於當微粒粒徑小至某一程度之後，靜電集塵器的微粒收集效率反而會變低 (Hung, 2002)。亦即，由能源消耗觀點而言，靜電集塵器雖是最有效的空氣物染防治設備，但卻無法有效過濾奈米微粒。

本研究目的在於說明利用海綿做為濾材是否可有效控制奈米微粒。一般的狀況下，濾材的過濾效率除了會因為濾材本身的特性包括種類、孔隙度、厚度、填充密度等的不同而有所差異之外，也會受到負載微粒的特性，如分佈情形所影響(Ichi tsubo,



1996)，而奈米微粒是否也會有相同的物理特性，卻鮮少被提出討論。此外，另外更可以將海綿與靜電集塵器作一串接，以期發展可以有效收集次微米至奈米微粒且操作經濟的空氣污染防治設備。彈性聚氨酯海綿(polyurethane foam)所形成的濾材，能夠符合各種過濾作用的設計準則，這些過濾作用包括了由空氣、氣體和液體中移除粉塵和污染微粒，且海綿具有開放性孔洞的骨架結構，過濾時產生的空氣阻抗與壓降均較低，也具有較大的微粒負載量，或許適合作為引擎排氣管的濾材更可以控制移動式引擎排放廢氣中奈米微粒濃度。

## 第二節 文獻探討

### 2-1 海綿過濾理論

過濾作用是以濾材收集空氣中的懸浮微粒，本研究利用單一纖維理論(single fiber theory)來估算海綿濾材對微粒收集效率 (capture efficiency) (Hinds, 1999)。

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

其中， $P_n$ ：氣膠貫穿率(aerosol penetration)

$E$ ：濾材總收集效率( the overall efficiency of a filter )

$\alpha$ ：充填密度(packing density)

$\chi$ ：海綿濾材厚度(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 )

氣懸微粒會被濾材纖維所收集有以下幾種機制：

1. 攔截沈積( interception deposition,  $E_r$  )
2. 衝擊沈積( inertial impaction deposition,  $E_i$  )
3. 擴散沈積( diffusion deposition,  $E_d$  )
4. 重力沈積( gravitational settling,  $E_g$  )

(1) 單一纖維的攔截理論中，氣懸微粒是被假設為完全順著流線走，完全忽略慣性、重力及布朗運動，是在所有過濾理論中，唯一不受表面風速影響的機制。而單一纖維理論中的攔截作用則是取決於無因次參數， $R$ 。攔截沈積效率為

$$E_r = \frac{(1-\alpha)R^2}{Ku(1+R)} \quad (2)$$

$$R = \frac{d}{d_f} \quad (3)$$

$$ku = -\frac{\ln \alpha}{2} - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4}, \quad = 0.005 \sim 0.2 \quad (4)$$

其中， $\rho_p$ ：濾材填充密度(packaging density)

$d_p$ ：微粒直徑

$d_f$ ：纖維直徑

$Ku$ ：Kuwabara hydrodynamic factor

(2) 由布朗運動造成單一纖維的擴散作用是與佩雷數有關，而佩雷數又會受微粒和纖維間表面風速影響。

$$E_d = 2Pe^{-2/3} \quad (5)$$

$$Pe = \frac{d_f U_0}{D} \quad (6)$$

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\eta d_p} \quad (7)$$

其中， $Pe$ ：佩雷數(Peclet number)

$U_0$ ：表面風速( face velocity )

$D$ ：氣膠擴散係數( aerosol diffusion coefficient )

$k$ ：波茲曼常數( Boltzmann constant)

$T$ ：溫度(K)

$C_c$ ：坎寧函修正因素( Cunningham slip correction factor)

$\eta$ ：空氣的黏滯係數( viscosity of the gas)

(3) 慣性衝擊是氣懸微粒因慣性脫離氣流，撞上濾材而被收集，其補集效率與氣懸微粒慣性(粒徑或密度)、氣懸微粒速度、流線曲率成正比。

$$E_i = \frac{(Stk)J}{2Ku^2} \quad (8)$$

$$Stk = \frac{\tau U_0}{d_f} = \frac{\rho_p d_p C_c g}{18\eta v} \quad (9)$$

$$J = (29.6 - 28\alpha^{0.63})R^2 - 27.5R^{2.8} \quad \text{for } R < 0.4 \quad (10)$$

其中， $Stk$ ：史托克數(Stoke number)

$\rho^p$ ：微粒的密度

(4)重力沈降則會受無因次常數 $G$ 的影響

$$G = \frac{V_{ts}}{U_0} = \frac{\rho_p d_p^2 C_c g}{18\eta U_0} \quad (11)$$

$$V_{ts} = \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\eta} \quad (d > 1 \mu\text{m} \text{ 與 } Re < 1.0) \quad (12)$$

$$V_{ts} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} \quad (Re < 1.0) \quad (13)$$

其中， $g$ ：重力加速度。

$V_{ts}$ ：終極沈降速度

假如 $U$ 與 $V_{ts}$ 相同方向，則單一纖維的重力沈積為

$$E_G \approx G(1 + R) \quad (14)$$

假如 $V$ 與 $V_{ts}$ 相反方向，則單一纖維的重力沈積為

$$E_G \approx G(1 - R) \quad (15)$$

一般而言，由於重力沈降的作用遠比於表面風速所形成的效應小，因此重力沈降多被忽略。

## 2-2 海綿過濾相關文獻

一般對海綿過濾品質好壞的判定，可以過濾品質  $q_f$  (filter quality) 表示 (Hinds, 1999)，如下式：

$$q_f = \frac{-\ln P}{\Delta p} \quad (16)$$

其中， $P$ ：氣懸微粒的穿透率(aerosol penetration)

$\Delta p$ ：壓降(pressure drop)

貫穿率是穿透與進入濾材微粒數目濃度之比；而壓降是所有纖維所造成壓力損失

的總合，與厚度、表面風速成正比，與纖維直徑的平方成反比；前者所表示出的是濾材的除塵性能，而後者在針對呼吸防護具的探討中是考量使用者的舒適程度，如果是用在除塵設備的評估時，則是與能源的消耗量有關。濾材品質必須在相同的測試粒徑、表面風速等條件之下才可以進行比較。換言之，一個好的濾材應同時具備有低貫穿率及低壓差二個條件。

一般的狀況下，濾材的過濾效率和濾材品質變化除了會因為濾材本身的特性包括種類、孔隙度、厚度、纖維大小與孔徑等的不同而有所差異之外，也會受到負載微粒的特性如粒徑、分佈情形所影響(Ichitsubo, 1996)。

1973 年 Davies 針對纖維性濾材提出了壓降公式

$$\Delta p = \frac{\eta t U_0 f(\alpha)}{d_f^2} \quad (17)$$

$$f(\alpha) = 64 \alpha^{1.5} (1 + 56 \alpha^3) \quad \text{for } 0.006 < \alpha < 0.3$$

其中，t：濾材厚度(filter thickness)

目前海綿廠商皆是以孔隙度(海綿在單位長度中所含有的孔洞數)做為海綿分類的項目。Vincent 等(1993)以電子顯微鏡量測各總孔隙度的海綿，利用每一種孔隙度的海綿隨機選取 50 個樣本量測纖維交接處為其纖維直徑，並取其平均值而得到一相關式：

$$d_f = (0.009633 \text{ ppi}^{-1.216}) \quad (18)$$

Kenny 以海綿製造商(Recticell International Development Center)利提出用顯微鏡量測單元直徑的標準方法進一步得到單元直徑與纖維直徑之間的關係：

$$d_f = 8.86 \times 10^{-6} + 0.076 \times \text{cell diameter} \quad (19)$$

### 2-3 靜電集塵器相關文獻

利用靜電力來收集微粒的基本原理早在 18 世紀就已經被發現並提出，但是直到 1923 年由 U. C. Berkeley 的 Fredrick Cottrell 教授設計出第一個工業用靜電集塵器

(electrostatic precipitator, ESP) 並且成功地使用在蒸汽發電廠設施之粒狀污染物控制上。迄今，許多不同型式的靜電集塵器已被廣泛運用，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。

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 cm 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。

靜電集塵器補集微粒的基本原理是藉著電暈放電的方式產生高濃度的單極離子，當微粒與這些離子混合後，帶電的微粒就會因為靜電力的作用而被收集，因此電暈放電的特性是決定靜電集塵器除塵效率的一個重要因素。在靜電集塵器中，電暈放電的產生會受到許多因素影響，其中包括：放電即與集塵板之間的距離、放電極形狀、大小、材質、供應電壓的大小與電性等等。

目前對於微粒充電的理論已有相當完整的瞭解，其中擴散充電 (diffusion charging) 與電場充電 (field charging) 被視為利用單極離子使微粒帶電的兩個基本機制。擴散充電是藉著微粒與離子在空間中做布朗運動時，因為互相碰撞而產生的帶電行為；電場充電是微粒表面攔截在電場中運動的離子因而產生的帶電現象。一般而言，兩種充電機制均能夠使各粒徑的微粒帶電，但電場充電對於較大粒徑的微粒 ( $d_p > 2\mu\text{m}$ ) 的總充電量有較大貢獻，而相對的較小微粒 ( $d_p < 0.5\mu\text{m}$ ) 則是以擴散充電為主要帶電機制 (王氏, 1993)。因此，兩者作用是同時作用在一個微粒之上，故一個微粒上的總帶電量並無法只用其中一個充電機制完全所解釋。

微粒在帶有電量之後，會受到靜電吸引的作用便會朝向放電極或是集塵板移動，此靜電利必須克服重力與托曳力等外力的影響，才會到達集塵板表面而被收集。當微粒所受到的所有外力達到平衡時，微粒速度會達到一終端速度，稱之為終極靜電速度 (terminal electrostatic velocity) 或靜電飄移速度 (electrical drift velocity)。

由於負電暈比正電暈在較低的電壓差產生 (31.0 kV/cm v.s. 33.7 kV/cm (王

氏，1993))，且比正電壓在較高電壓差之下才會產生電弧（假如放電極電壓增加至某一極限時，此時電流會流經兩電極之間，導致電場暫時消失，因此無法游離空氣）。因此，一般而言工業用的靜電集塵器大多使用負電量放電而產生高濃度離子。

靜電集塵器對微粒的收集效率受到許多因素的影響，大致上可以分成微粒特性、集塵器特性以及其他的一些外在因素如處理風量等的影響。微粒的靜飄移速度與電場強度和微粒帶電量的乘積成正比，因此假如集塵器的電場強度月低則收集效率越差，意即會有越多微粒穿透。處理風量主要則影響微粒在靜電集塵器的停留時間，停留時間越長則被收集的機會越大（Huang and Chen, 2001）。

不過，無論從理論或是實驗中均可以發現在某些情況之下，粒徑小的微粒，尤其是粒徑小於  $1\mu\text{m}$  的微粒，常會有充電不足的現象（Huang and Chen, 2002）。不帶電的微粒在電場中並不會受到庫侖力的作用而被收集，以致於當微粒小至某一程度之後，靜電集塵器的收集效率反而會有下降趨勢。

### 第三節 實驗方法

本研究目的在於瞭解影響奈米微粒在海綿濾材的收集效率因子，其中包括濾材表面風速( face velocity)、填充密度(packing density)、孔隙度(porosity)。

以濾材而言，最佳濾材是擁有高收集效率及低壓降。而濾材在不同條件下擁有不同過濾品質，在本研究也會針對不同條件下海綿濾材的過濾品質作一討論。並且利用斜背式壓力計量測濾材上游與下游的靜壓差，以得到濾材不同條件之下的壓降資料。

#### 3-1 實驗儀器與材料

為了可以更有效控制測試氣膠粒徑與濃度穩定性，本研究在實驗室中設置一個測試腔，實驗系統設置如 **Figure 1**所示，以下就各部分分別說明：

##### (1) 氣懸微粒產生系統

利用定量輸出霧化器(constant output atomizer, Model 3075, TSI Inc., St. Paul, MN, U.S.A.)來產生氣動粒徑小於 100 nm 的多粒徑分佈的氣懸微粒。此產生原理為利用高壓空氣通過一直徑為 0.343 mm 的微孔以高速射出後，由於伯努利原理高速區氣壓較低，因此會將連接瓶中的液體吸入低壓區，在藉高速空氣柱將液體破碎成微小液滴。較大的液滴則會因慣性力較大而被截取並流入儲液瓶，微小液滴(0.3  $\mu\text{m}$  ~0.35  $\mu\text{m}$ )會隨高壓空氣離開霧化器，經過稀釋、乾燥後，即成為所需的測試用氣懸微粒。微粒粒徑大小主要是調整溶液中非揮發性溶質所佔的體積分率來決定。

##### (2) 氣懸微粒的量測

氣懸微粒的量測使用微粒電移動度掃描分徑器 ( scanning mobility particle sizer(SMPS), Model 3936, TSI Inc., St. Paul, MN, U.S.A.)。SMPS 包括靜電分徑儀 ( nano DMA, Model 3085, TSI Inc., St. Paul, MN) 和凝結核微粒計數器 (condensation particle counter, Model 3022, TSI Inc., St. Paul, MN) 兩個部分。靜電分徑儀為利用微粒電移動度的不同，來區分微粒的粒徑；凝結核微粒計數器的原理為讓微粒隨氣流通過充滿正丁醇飽和蒸氣的管子(溫度為 37°C)，再將此混合氣體通過冷凝管(溫度為 10°C)，使正丁醇蒸汽凝結於微粒表面，微粒因而長大至可偵測的範



圍，再利用光計數器量測微粒的數目，偵測微粒濃度的範圍為  $0\sim 10^7$  particles/cm<sup>3</sup>，所量測的粒徑範圍是 5 ~ 1000 nm。

### (3)氣膠靜電中和器(Kr-85, Model 3077, TSI Inc., St. Paul, MN, U.S.A.)

Krypton-85 是為一放射性物質，是利用其衰變的過程中所釋放出的  $\beta$  粒子將空氣分子解離成正、負離子之後，再藉著這些離子附著到微粒的表面，以達到中和帶電微粒。Krypton-85 的半衰期為 10.3 年。實驗過程中，測試微粒產生，先經氣膠靜電中和器使微粒達成波茲曼平衡，當微粒在此分佈下，不同微粒不帶電、帶單一電荷與重複帶電的情形會呈現固定比率，因此可降低靜電對實驗結果所造成的干擾。

## 3-2 實驗步驟

### 1.海綿基本過濾特性

本研究中，為考慮到小系統較穩定且易於控制，所以在進行微粒穿透濾材實驗時，將濾材剪裁為一直徑 15 mm 的圓形置放於自製海綿握持器(home-made foam filter holder)(如 Figure 2 中進行微粒的過濾特性實驗。實驗用的海綿為美國 Fomaex International Inc.提供之聚氨酯(polyurethane)海綿。這類海綿具有完整且開放式單元，以及三維的骨架結構，因此具有多孔性即可穿透性，所以具有過濾氣懸微粒的作用。海綿也因為具有開放孔洞的骨架結構，因此過濾時空氣阻抗及所產生的壓降較低，且由於海綿其填充密度僅有 0.036，所以有較大的微粒負載量。每塊海綿厚度為 12.7 mm，填充密度為 0.036。

每一片海綿濾材在進行實驗之前均先以浸泡異丙醇(isopropanol)的方式，來去除海綿纖維上的帶電(Kanaoka et al., 1987)。

整個測試腔中溫度控制在室溫範圍(20~25°C)與相對溼度介於 10 %至 15 %。為了增加實驗系統的穩定性，系統中所有的流量均以質量流量控制器(mass flow controller, Hastings Instrument, Hampton, VA)來控制與監視，並以紅外線皂泡計(Gilian Instrument Co. west caldcoell, NT)做流量的校正。

利用斜背式壓力計量測濾材上游與下游的靜壓差，以得到海綿濾材在不同遭作條

件之下的壓降資料，在利用不同條件得到微粒在濾材的穿透率，進而求得濾材過濾品質。

以下針對控制海綿過濾時所操作變因逐一做說明：

#### (1)海綿表面風速 ( face velocity, $V$ ) 之改變

由於海綿握持器表面積為一定值，因此抽氣幫浦和量測儀器抽氣總量即為海綿之過濾流量，而所需的抽氣量則可以下式來計算之：

$$Q = A \times V$$

其中  $Q$ ：抽氣量

$A$ ：海綿握持器截面面積

$V$ ：表面風速

本實驗控制海綿表面風速為 5.6、9.5、22、38、66 cm/sec。

#### (2)海綿填充密度 ( packing density, $\alpha$ ) 之改變

海綿在未受外力擠壓時，不同孔隙度的海綿填充密度皆為相同，若將海綿體積壓縮為原來一半，則其填充密度會相對變為原來的兩倍。實驗時，利用自製的海綿握持器上的螺帽在螺絲的位置可控制海綿填充體積，因此可推算海綿填充密度。

本實驗設計填充密度為 0.036、0.106、0.216、0.36、0.541。

#### (3)海綿孔隙數 (porosity, $Po$ ) 之改變

海綿孔隙度與海綿製作過程有關，因此無法利用實驗室器具改變海綿濾材孔隙數，因此藉使用廠商提供之不同孔隙數海綿，設計有 40、60、80、100、110 ppi( pores per inch, ppi)。

### 2.靜電集塵器串聯海綿濾材部分

本研究使用小型雙鋸齒狀靜電集塵器(如 [Figure 2-A](#))。

#### (1)靜電集塵器電場電壓 ( applied voltage, $V_a$ ) 之改變

利用一高電壓直流供應器以供應電暈放電時所需要的能量，本實驗設計供應電壓為-3、-4、-5、-6kV。

## (2)靜電集塵器處理風量 ( flow rate,Q ) 之改變

利用乾燥且乾淨的高壓空氣控制流經靜電集塵器風量，本實驗設計處理風量為 40 120 L/min。而在與小型雙鋸齒狀靜電集塵器串聯的海綿濾材其截面面積則與靜電集塵器出口端截面面積相同。

實驗時，測試微粒產生後先經靜電中和器，再利用乾燥且經過高效率濾材(HEPA filter)的空氣與其在混合腔中均勻混合，確保微粒是以乾燥狀態穿過海綿。海綿握持器則放置在測試腔的後段，利用海綿握持器上下游的氣懸微粒粒數差異可得知不同粒徑區間下的穿透率，如下式：

$$P = \frac{C_{out}}{C_{in}}$$

其中，P:單一粒徑微區間粒穿透率

$C_{in}$ :單一粒徑區間微粒上游濃度

$C_{out}$ :單一粒徑區間微粒下游濃度

為了避免因為採樣時間過短而導致實驗誤差，SMPS 每次採樣時間訂為 300 秒，每次採樣分別進行五次做海綿補集效率測試，最後取五次穿透率之平均值來表示各條件之下奈米微粒粒徑與海綿補集效率之關係。

#### 第四節 實驗結果

在相同海孔隙度與表面風速之下，由於填充密度越高其海綿纖維風速改變越大，因此填充密度越高其產生壓降會越大，且壓降變化會與其填充密度成二次方的關係(Fingure 1-4A.)。海綿孔隙度越大則纖維直徑越小，因此因此相同體積的海綿其纖維表面積會隨海綿孔隙度增加而增加。而在過濾時產生的壓降與氣流於纖維間的拖曳力有關，因此可以觀察到在相同表面風速之下，海綿孔隙度越大壓降越大，且在相同孔隙度，表面風速與壓降會成一線性關係(Fingure 4B.)。

本研究根據單纖維理論就表面風速、充填密度與纖維直徑，分別探討海綿濾材對於奈米氣懸微粒穿透率的影響。

表面風速對氣懸微粒穿透率與粒徑關係的影響如 Figure 4.。由於奈米微粒主要被收集機制以擴散為主，微粒若在濾材中停留時間越長則越有機會因擴散沈積而被海綿纖維所收集，且粒徑越小的微粒其擴散作用越明顯。因此，微粒穿透率會隨著表面風速的減小而降低（表面風速 5.6 升高至 66 cm/sec，10 nm 微粒的穿透率由 0.3% 提高為 20%）；且相同表面風速之下，微粒越小擴其穿透率越低。除此之外，無論從實驗值或單一纖維理論 Figure 4.也顯示：當海綿濾材表面風速大致某一程度時(66 cm/sec)，些許微粒 ( $d_p < 40$  nm) 其主要被收集機制會從擴散沈積變為慣性衝擊沈積，因此其微粒穿透率反而是隨粒徑增加而降低。由於海綿濾材壓降會隨著濾材表面風速的增加而增加而微粒收集率卻會隨濾材表面風速增加而減少，造成海綿濾材過濾品質隨表面風速增加而下降。

如 Figure 5.所示，由於填充密度增加，纖維排列越緊密，則微粒的慣性衝擊沈積機制影響增加，因此海綿填充密度越大其微粒穿透率越低（填充密度由 0.036 增加至 0.541 則 20 nm 微粒穿透率由 21% 降低至 9%）。雖然利用提高海綿濾材的填充密度可以增加海綿對奈米微粒的收集效率，不過因為其所產生壓降與填充密度成二次方正比關係，因此反而使得過濾品質降低(填充密度由 0.036 增加至 0.541 則 20 nm 微粒穿透率由 21% 降低至 9%，過濾品質反而由 1.5 降低至 0.018)。由此可知，若以過

濾品質觀點而言，增加海綿填充密度反而會增加能源消耗。

**Figure 6.**是探討纖維直徑大小對微粒穿透率與粒徑關係之影響。海綿孔隙度越大其纖維直徑越小且海綿纖維間隙越小，微粒擴散至纖維表面被收集的所需時間越短。因此，在相同操作條件之下纖維直徑越小其微粒穿透率越低。雖然低孔隙度海綿的過濾品質比高孔隙度的海綿較高，不過若要達到與高孔隙度的海綿相同微粒收集率必須增加低孔隙度海綿數量達 4 倍(10nm 的微粒 在  $V=22\text{cm/sec}$  ,  $T=4.23\text{mm}$  ,  $a=0.216$  , 40ppi 與 110ppi 的穿透率分別為 60%與 7%)，如此一來反而會增加海綿濾材成本。

無論以實驗結果或是從單一纖維理論推估，在不同操作條件所得的趨勢均相同。只是單一纖維理論其假設狀況與實際狀況有些許差異，如：單一纖維假設纖維直徑均一，而實際上海棉纖維交接處直徑並非與纖維直徑相同；單一纖維理論的假設為二維與實際上海綿纖維構成三維的骨架結構並不相同等。這些結果也造成了單一纖維理論值與實驗值並無法完全符合的狀況。

奈米微粒被收集機制主要為布朗運動所造成的擴散沈積，由布朗運動造成單一纖維的擴散作用是與佩雷數有關，而佩雷數又會受微粒和纖維間表面風速影響。因此，從 **Figure 7.** 可觀察到在一定佩雷數以下的微粒其微粒穿透率為 0。微粒在海綿濾材中隨著氣流，同時受到擴散沈積、慣性衝擊沈積與攔截沈積等機制影響。不同大小微粒在不同表面風速之下雖然擁有相同佩雷數，不過也同時受到不同擴散沈積、慣性衝擊沈積與攔截沈積等機制影響，所以在不同操作條件之下，即使佩雷數相同其微粒穿透率也有一定差距。（海綿濾材表面風速為  $5.6\text{ cm/sec}$  粒徑為  $40\text{nm}$  的微粒與海綿濾材表面風速  $63.28\text{ cm/sec}$  粒徑為  $17.5\text{ nm}$  的微粒具有相同佩雷數 (1.02) 其穿透率則分別為 30%、42% )。

**Figure 8.**為不同粒徑微粒在不同電場電壓在靜電集塵器的穿透率，微粒的靜電飄移速度與電場強度和微粒帶電量的乘積成正比，因此電場強度越低則收集效率就越

差。靜電集塵器的處理風量大小主要影響微粒在靜電集塵器內的停留時間，停留時間越長，則被收集的機會越高，由 Figure 9.可見為處理風量對微粒穿透靜電集塵器的影響，可以明顯看出處理風量越大，則穿透率越高。這兩部分結果均與 Huang and Chen(2001) 趨勢相同。從 Figure 8.、 Figure 9.皆可觀察到不論在何種操作條件之下當微粒在大於 15nm 時，其穿透率隨著微粒粒徑增加而增加，而在微粒粒徑小於 15nm 而言，微粒穿透率反而是隨粒徑增加而減少，與 Huang and Chen (2002) 利用小型板線型靜電集塵器結果相似。主要為粒徑小的微粒，尤其是粒徑小於 1 $\mu$ m 的微粒，常會有充電不足的現象，導致不帶電的微粒在電場中並不會受到庫侖力的作用而被收集，以致於當微粒小至某一程度之後，靜電集塵器的收集效率反而會有下降趨勢。

為了可以有效控制從靜電集塵器脫逃的奈米微粒，利用海綿與靜電集塵器作一串聯，而此海綿的截面面積與小型靜電集塵器出口面積相等。由前述結果可知：增加海綿填充密度可以增加奈米微粒收集效率，不過產生壓降驟增反而造成操作成本增加；低孔隙度的海綿雖然有較高的過濾品質，不過要達到高孔隙度海綿的收集效率需要增加濾材厚度，必須增加濾材材料成本，因此使用 110ppi，T=25.4mm， $\alpha=0.036$  的海綿串聯於靜電集塵器之後。利用海綿濾材(110 ppi，填充密度 0.04，厚度 25.4 mm)串接於靜電集塵器（電場電壓為-6 kV）之後，在處理流量為 100 lpm 之下可以有效控制奈米微粒(10 nm 微粒其穿透率由 19% 降低至 2.5%)，如 Figure 10.。假使分別以靜電集塵器與海綿濾材微粒收集效率而言，則可以觀察到利用海綿濾材可以恰好補足靜電集塵器在收集效率較差部分(微粒粒徑在 15nm 以下)，進而有效控制穿透靜電集塵器的奈米微粒（如 Figure 11.）。以海綿過濾品質而言，使用靜電集塵器可以有效增加各粒徑微粒的過濾品質，其過濾品質隨著流量減少而增加（如 Figure 12.）。

## 第五節 結論與建議

- 1.在相同海孔隙度與表面風速之下，填充密度越高其產生壓降會越大，且壓降變化會與其填充密度成二次方的關係。在相同表面風速之下，海綿孔隙度越大壓降越大，且在相同孔隙度，表面風速與壓降會成一線性關係。
- 2.微粒穿透率會隨著表面風速的減小而降低。相同表面風速之下，微粒越小擴其穿透率越低。海綿濾材過濾品質隨表面風速增加而下降。
- 3.海綿填充密度越大其微粒穿透率越低，不過因為其所產生壓降與填充密度成二次方正比關係，因此反而使得過濾品質降低。因此，若以過濾品質觀點而言，增加海綿填充密度反而會增加能源消耗。
- 4.在相同操作條件之下纖維直徑越小其微粒穿透率越低，不過若要達到與高孔隙度的海綿相同微粒收集率必須增加低孔隙數海綿數量達數倍。
- 5.論以實驗結果或是從單一纖維理論推估，在不同操作條件所得的趨勢均相同。只是單一纖維理論其假設狀況與實際狀況有些許差異，如：單一纖維假設纖維直徑均一，而實際上海棉纖維交接處直徑並非與纖維直徑相同；單一纖維理論的假設為二維與實際上海綿纖維構成三維的骨架結構並不相同等。這些結果也造成了單一纖維理論值與實驗值並無法完全符合的狀況。
- 6.微粒在海綿濾材中隨著氣流運動，同時受到擴散沈積、慣性衝擊沈積與攔截沈積等機制影響。因此，不同大小微粒在不同表面風速之下雖然擁有相同佩雷數其微粒穿透率也有一定差距。
- 7.本研究利用小型雙鋸齒狀靜電集塵器由實驗結果觀察到，在不同電場電壓在靜電集塵器的穿透率，微粒的靜電飄移速度與電場強度和微粒帶電量的乘積成正比，因此電場強度越低則收集效率就越差。另外當微粒小至某一程度之後，常會有充電不足的現象，因此靜電集塵器的收集效率反而會有下降趨勢。
- 8.利用海綿濾材串接於靜電集塵器之後，在一定的操作條件之下確實可以有效控制奈米微粒。以海綿過濾品質而言，使用靜電集塵器可以有效增加各粒徑微粒的過濾品質，其過濾品質隨著流量減少而增加。

## 參考文獻

- Davies, C.N. (Ed.): Air Filtration, Academic Press, London. (1973)
- Donaldson, K; Stone, V; Clouter, A; Renwick, L; MacNee, W: Ultrafine Particles. Occupational & Environmental Medicine 58(3): 211- 215. (2001)
- Hinds, W.C.: Aerosol Technology, New York, John Wiley and Sons Inc. (1999)
- Huang, S.H. and Chen, C.C.: Ultrafine Aerosol Penetrate through Electrostatic Precipitators. Environ. Sci. Technol. 36: 4625- 4632. (2002)
- Huang, S.H., Chen, C.C.: Filtration Characteristics of a Miniature Electrostatic Precipitator. Aerosol Sci. Technol. 35: 792- 804 (2001)
- Ichitsubo, H.; Hashimoto, T.; Alonso, M.; Kousaka, Y.: Penetration of Ultrafine Particles and Ion Clusters Through Wire Screens. Aerosol Sci. Technol. 24: 119- 127. (1996)
- Kanaoka, C., Emi, H. Y., Iiyama, T.: Effect of charging state of particles on electret filtration. Aerosol Sci. Technol. 7: pp. 1- 13. (1987)
- Kenny, L.C., Aitken, R.J, Beaumont, G., Gorner, P.: Investigation and Application of a Model for Porous Foam Aerosol Penetration. J. Aerosol Sci. 32, p 271- 285. (2001)
- Kittelson, David B. Engine and Nanoparticles: A Review. J. Aerosol Sci. Vol. 29, No. 5/6, pp. 575- 588. (1998)
- U.S. EPA. National Air Quality and Emission Trend Report; <http://www.epa.gov/oar/aqtrnd96/toc.html>. (1996)
- Vincent, J.H., Aitken, R.J., Mark, D.: Porous Plastic Foam Filtration Media: Penetration Characteristics and Application in Particle Size-selective Sampling. J. Aerosol Sci. Vol. 24, No. 7, p 929- 944. (1993)
- Yeh, Hsu-Chi., Muggenburg, Bruce A., Harkema Jack R.: In Vivo Deposition of Inhaled Ultrafine Particles in the Respiratory Tract of Rhesus Monkeys. Aerosol Sci. Technol. 27: 465- 470 (1997)



- Yu, Il Je, Kim, Kwang Jin.: Pattern of deposition of stainless steel welding fume particles inhaled into the respiratory systems of Sprague– Dawely rats exposed to a novel welding fume generating system. *Toxicology Letters* 116: 103- 111 (2000)
- Zhou, Ya-Mei, Zhong, Cai-Yun, Kennedy, Ian M., Pinkerton, Kent E.: Pulmonary Responses of Acute Exposure to Ultrafine Iron Particles in Healthy Adult Rats. *Environ Toxicol* 18: 227- 235 (2003)
- 王秋森：氣膠技術學。國立台灣大學醫學院出版委員會，p 74- 81. (1993)

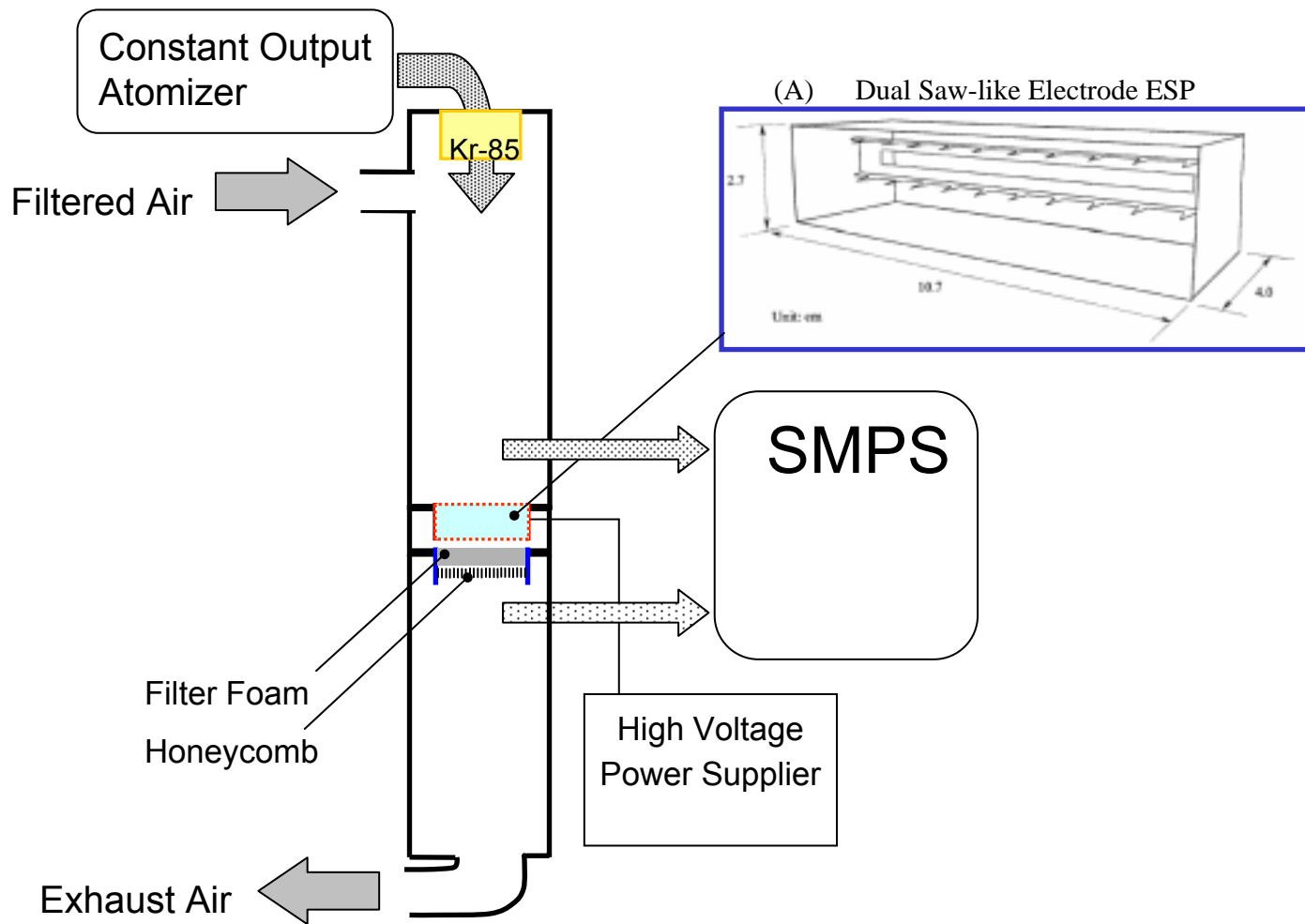


Figure 1. Schematic diagram of the experimental setup for filter foam and ESP penetration test.

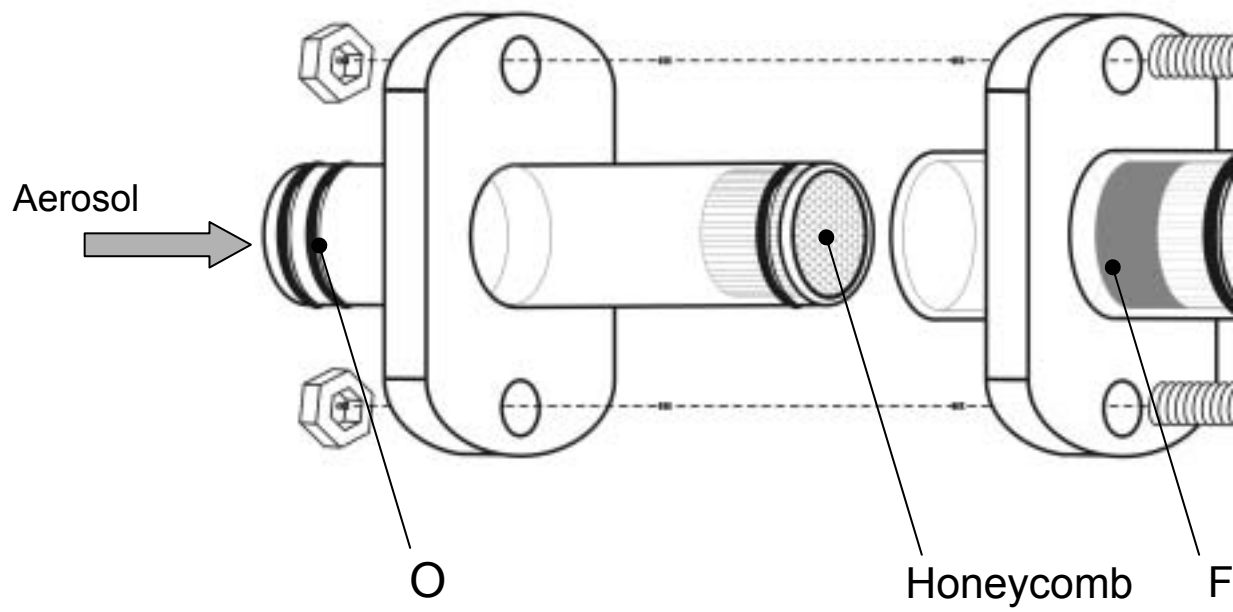


Figure 2. Schematic diagram of the home-made holder for filter fo

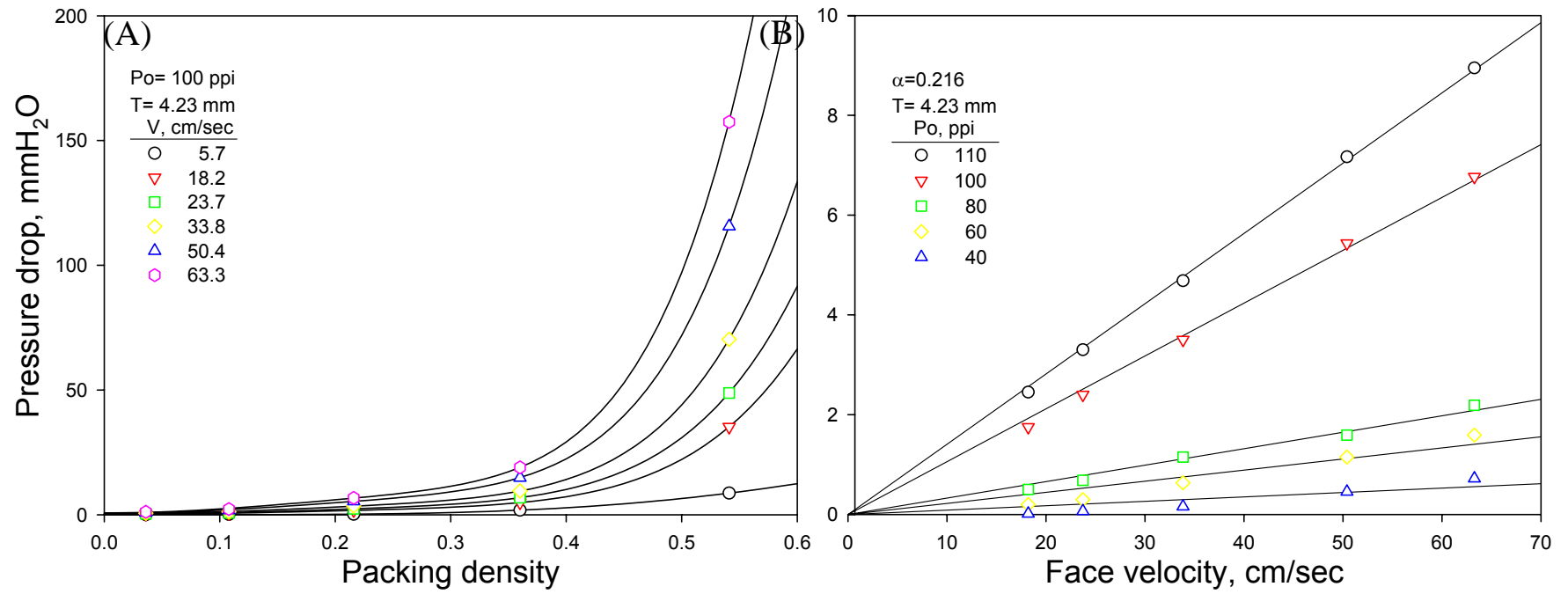


Figure 3. Pressure drop of filter foams as a function of packing density (A) and face velocity (B).

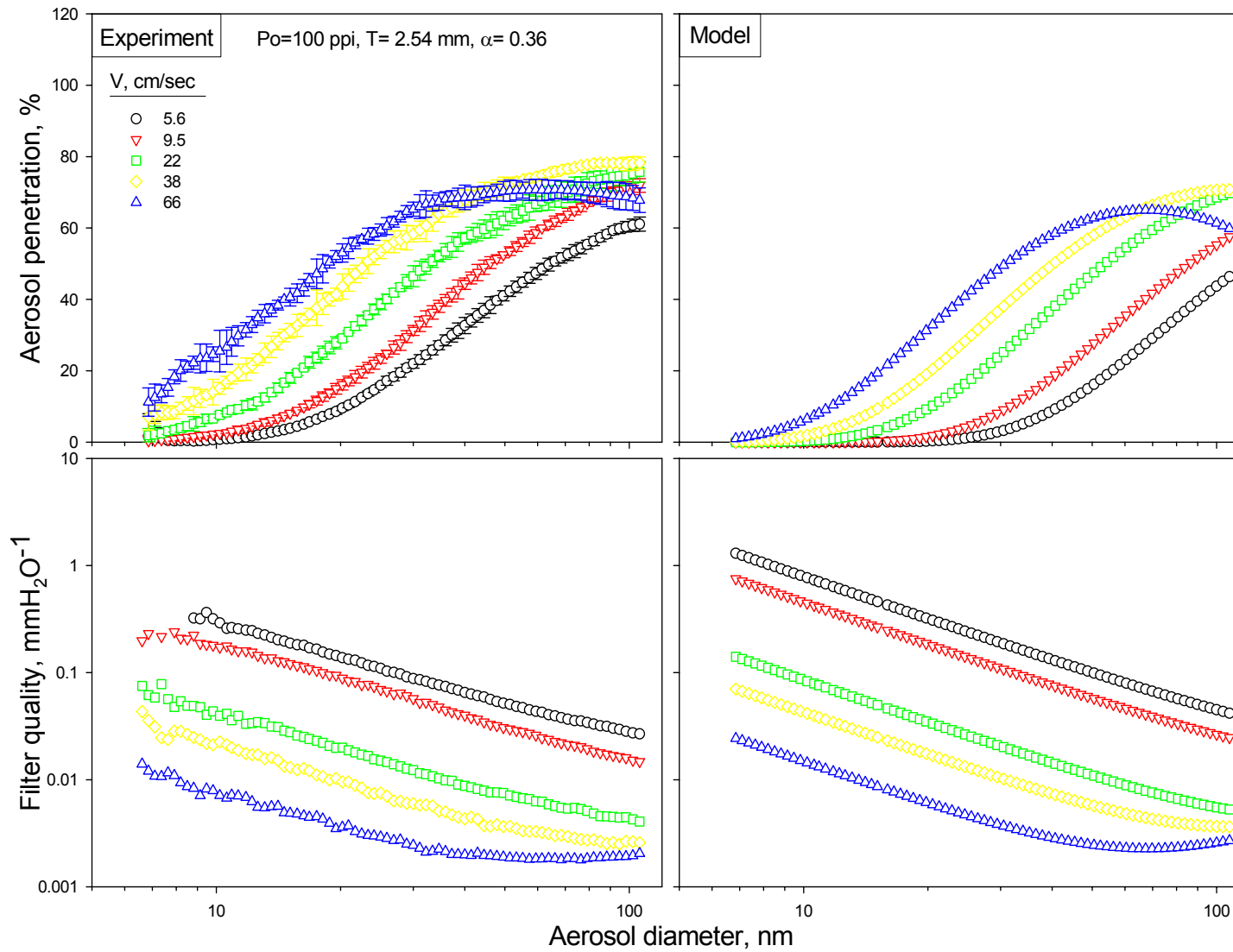


Figure 4. Effect of the face velocity on aerosol penetration and filter quality.

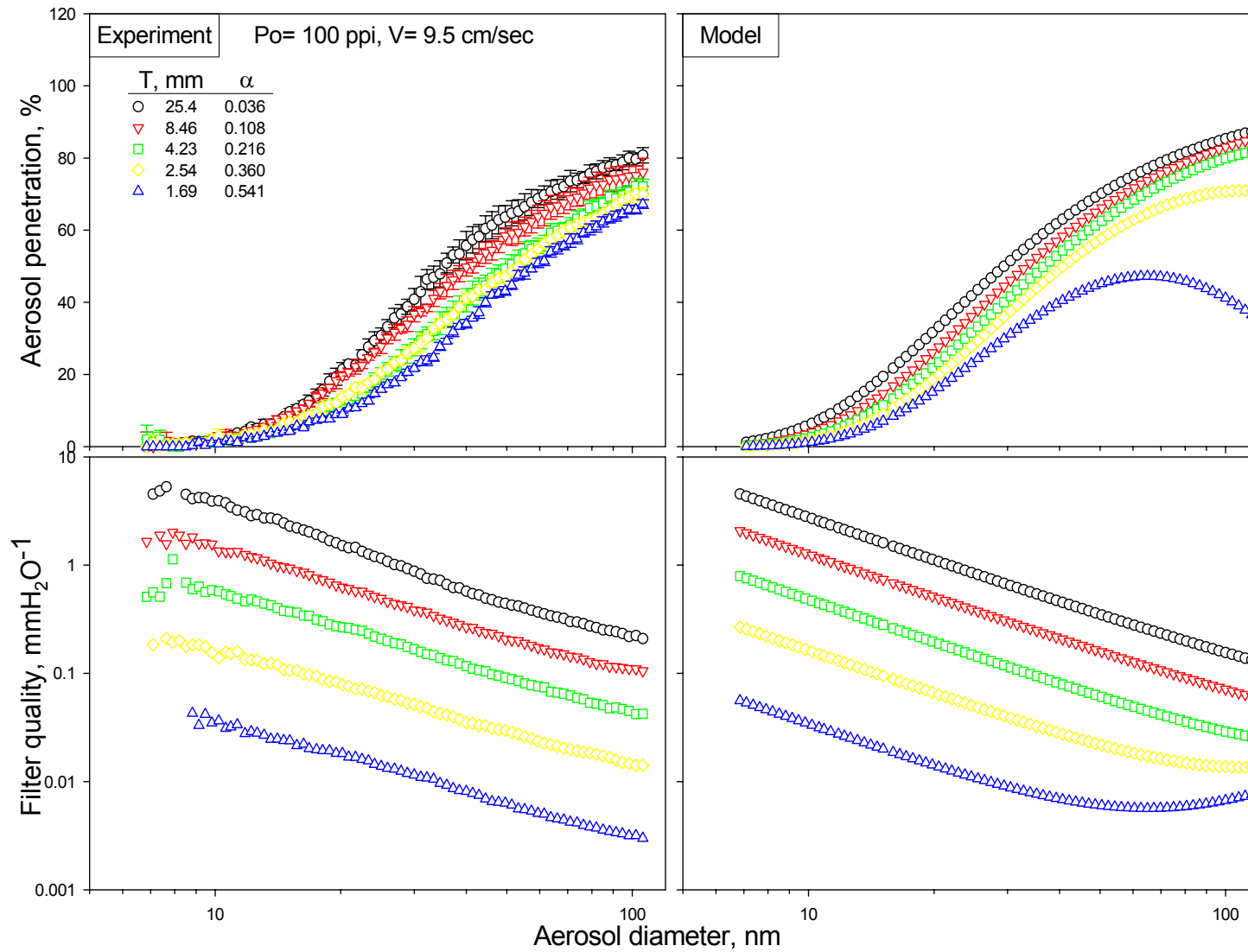


Figure 5. Effect of the packing density on aerosol penetration and filter quality.

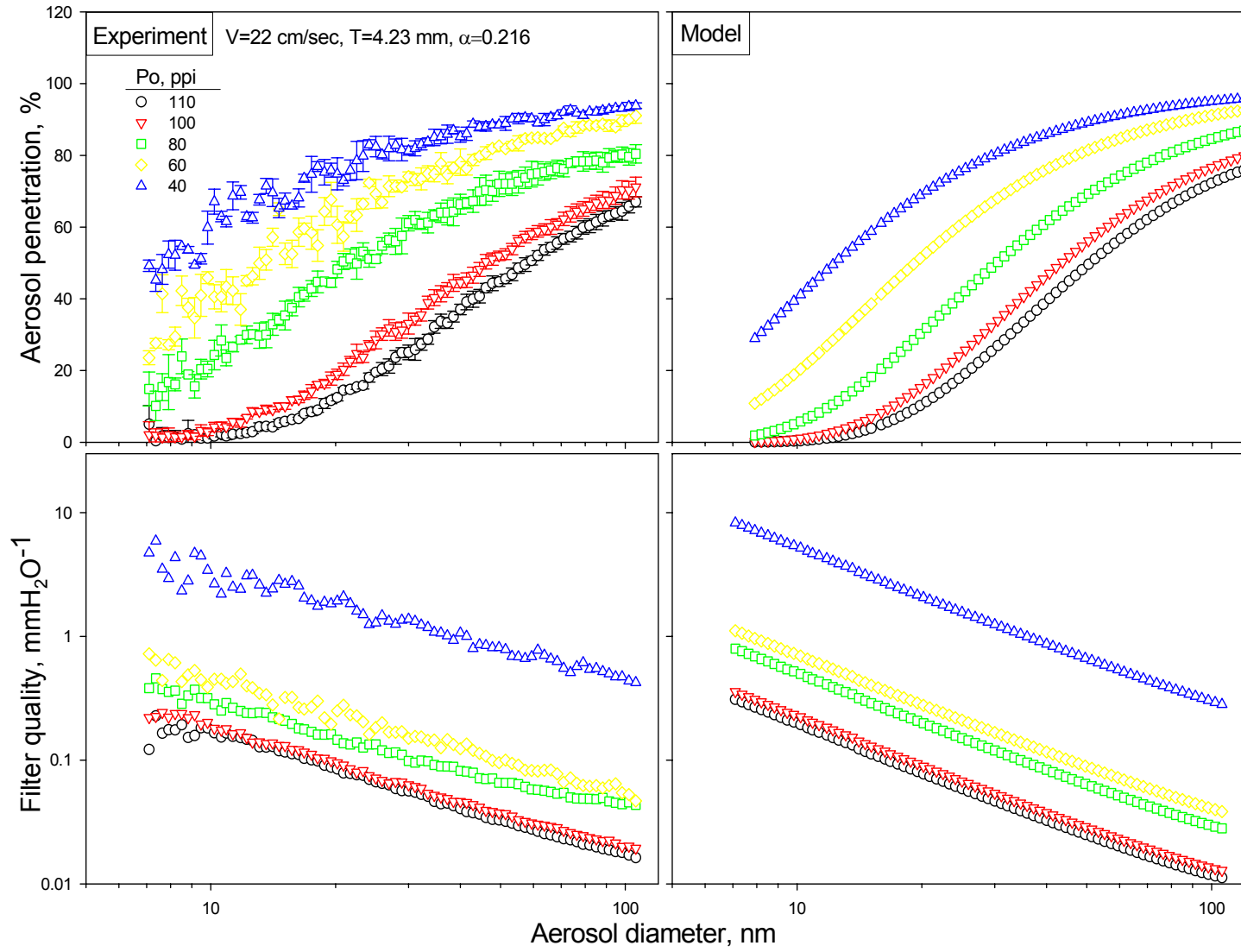


Figure 6. Effects of the foam porosity on aerosol penetration and filter quality.

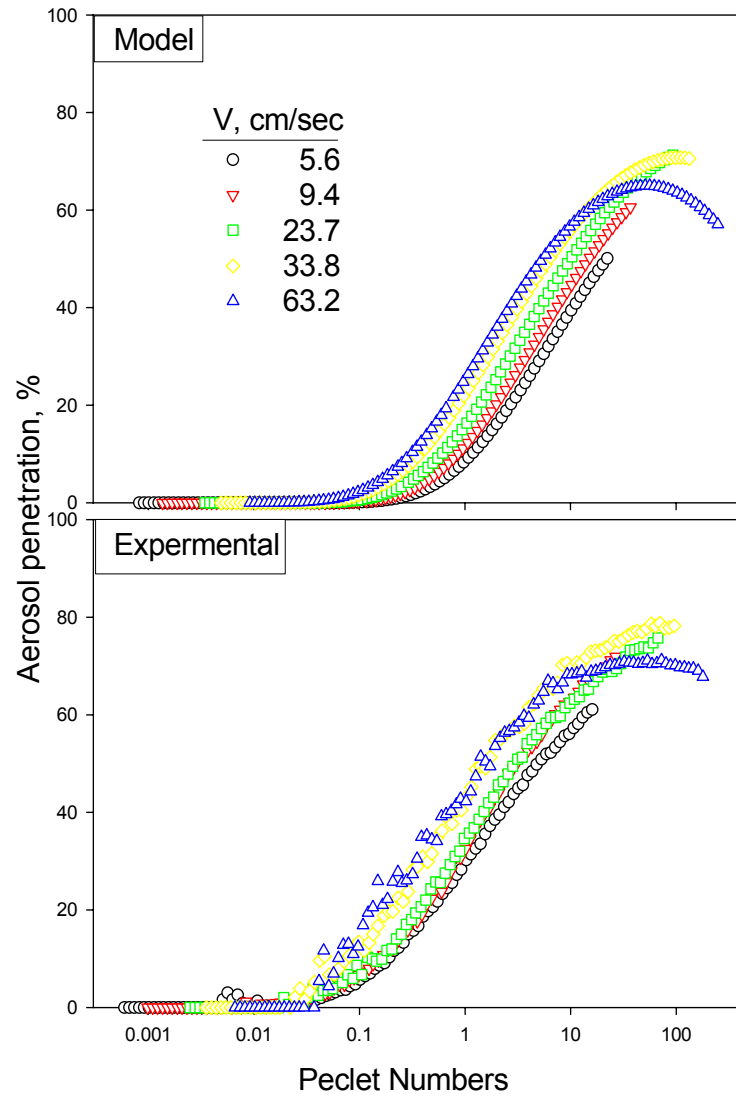


Figure 7. Peclet number versus aerosol penetration under different velocity.



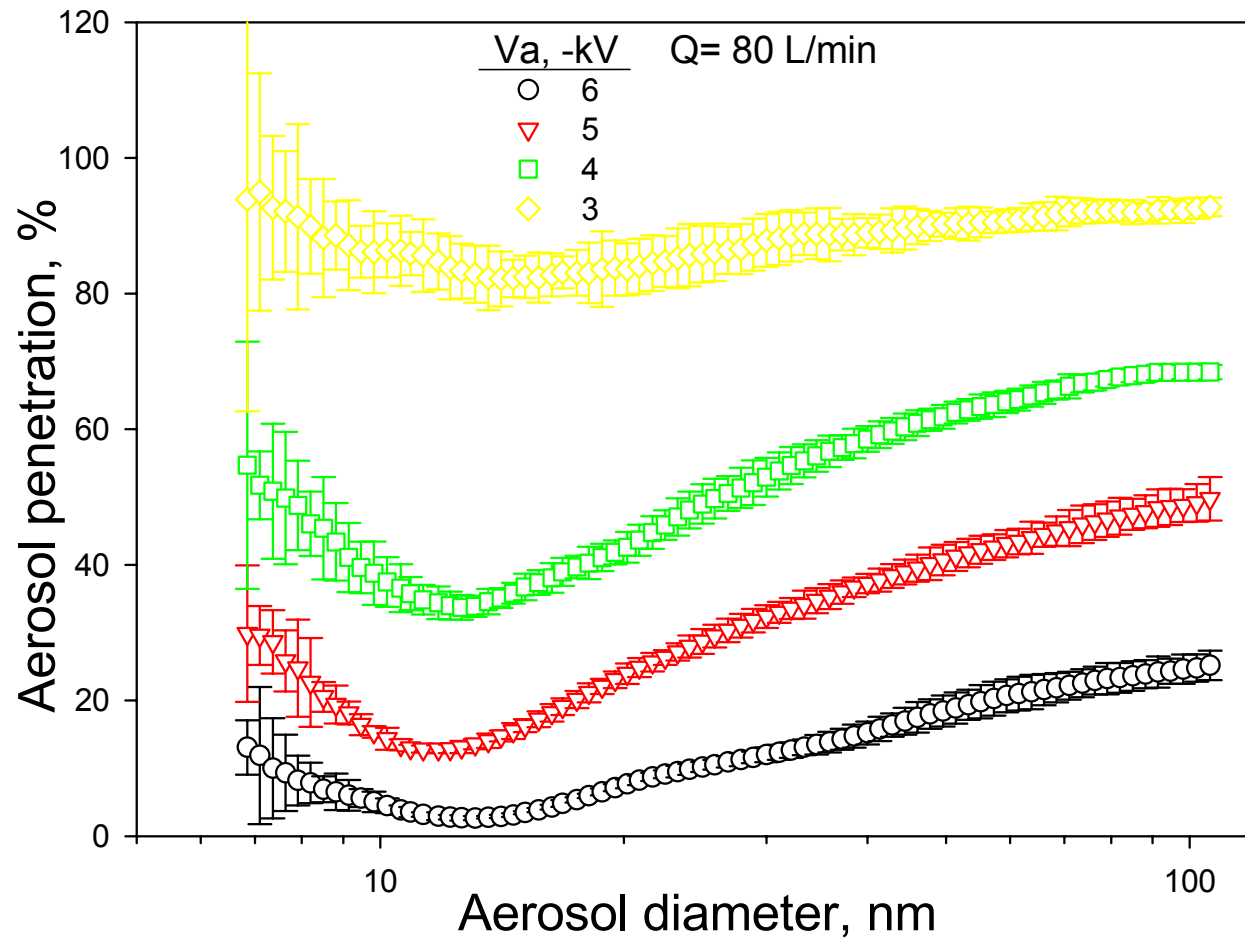


Figure 8. Aerosol penetration curves under different applied electrode voltages at a flow rate of 80 L/min.

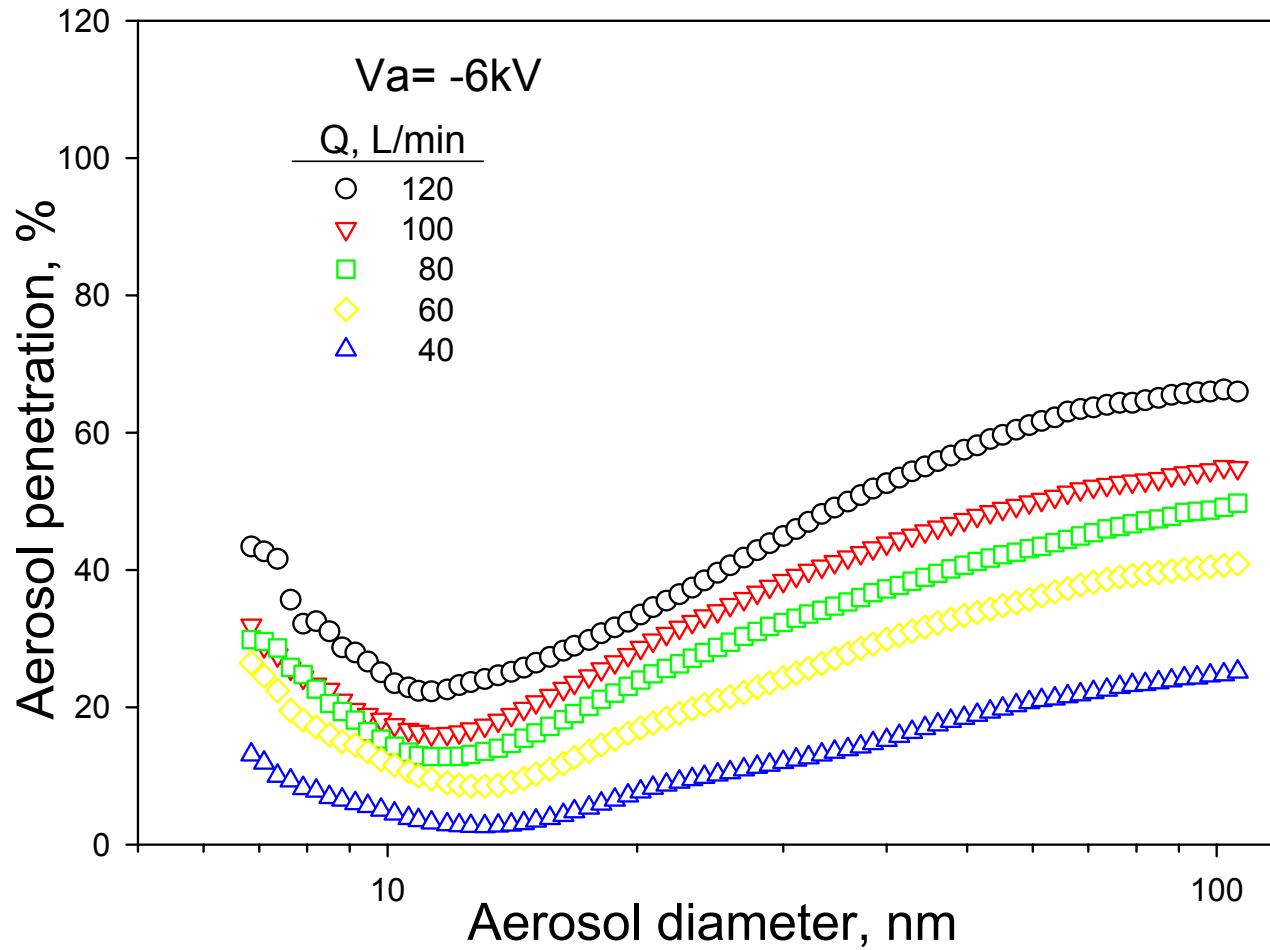


Figure 9. Aerosol penetration curves of ESP under different flow rates at an applied electrode voltage of -6 kV.

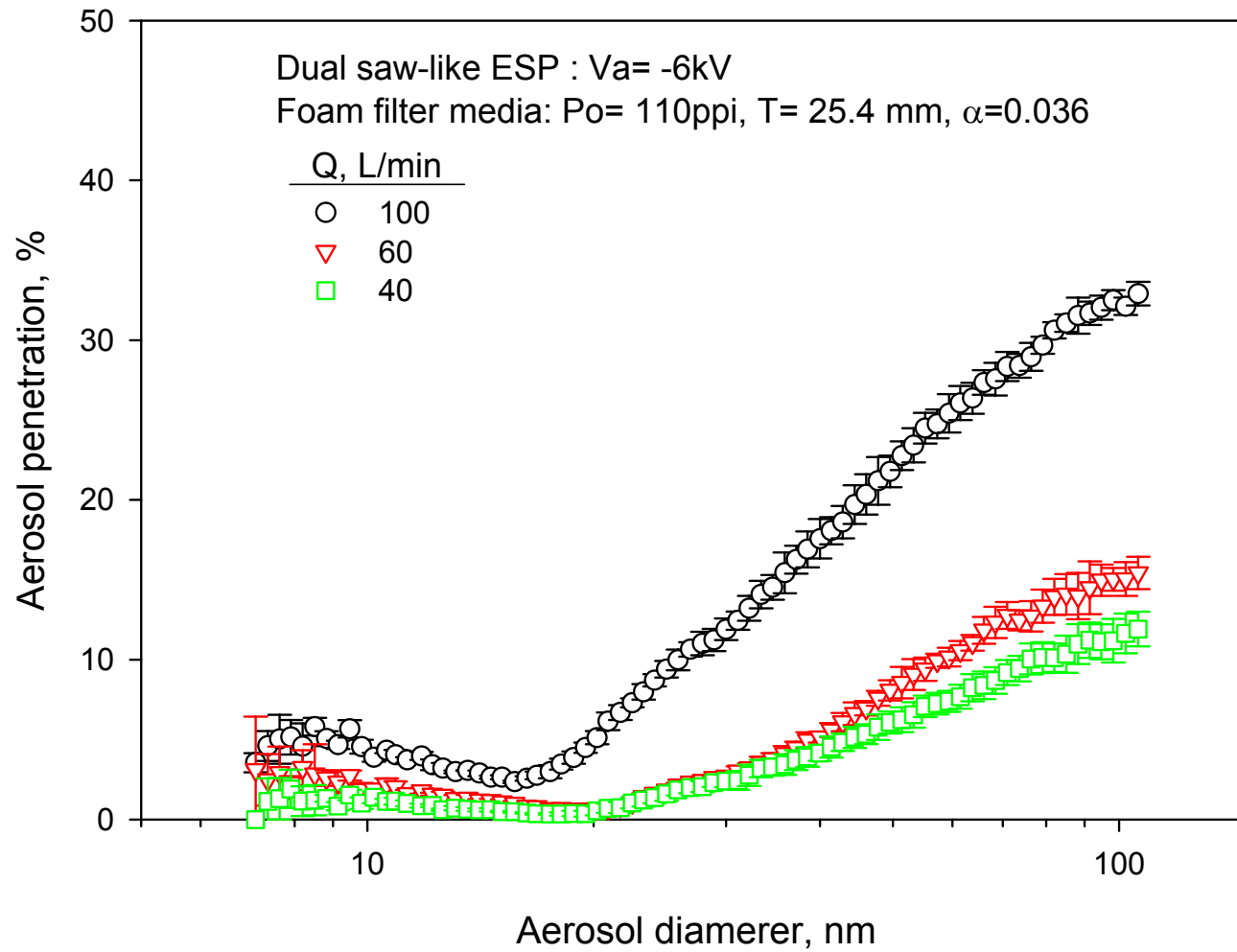


Figure 10. Aerosol penetration curves through filter foam and ESP at an applied electrode voltage of -6 kV.

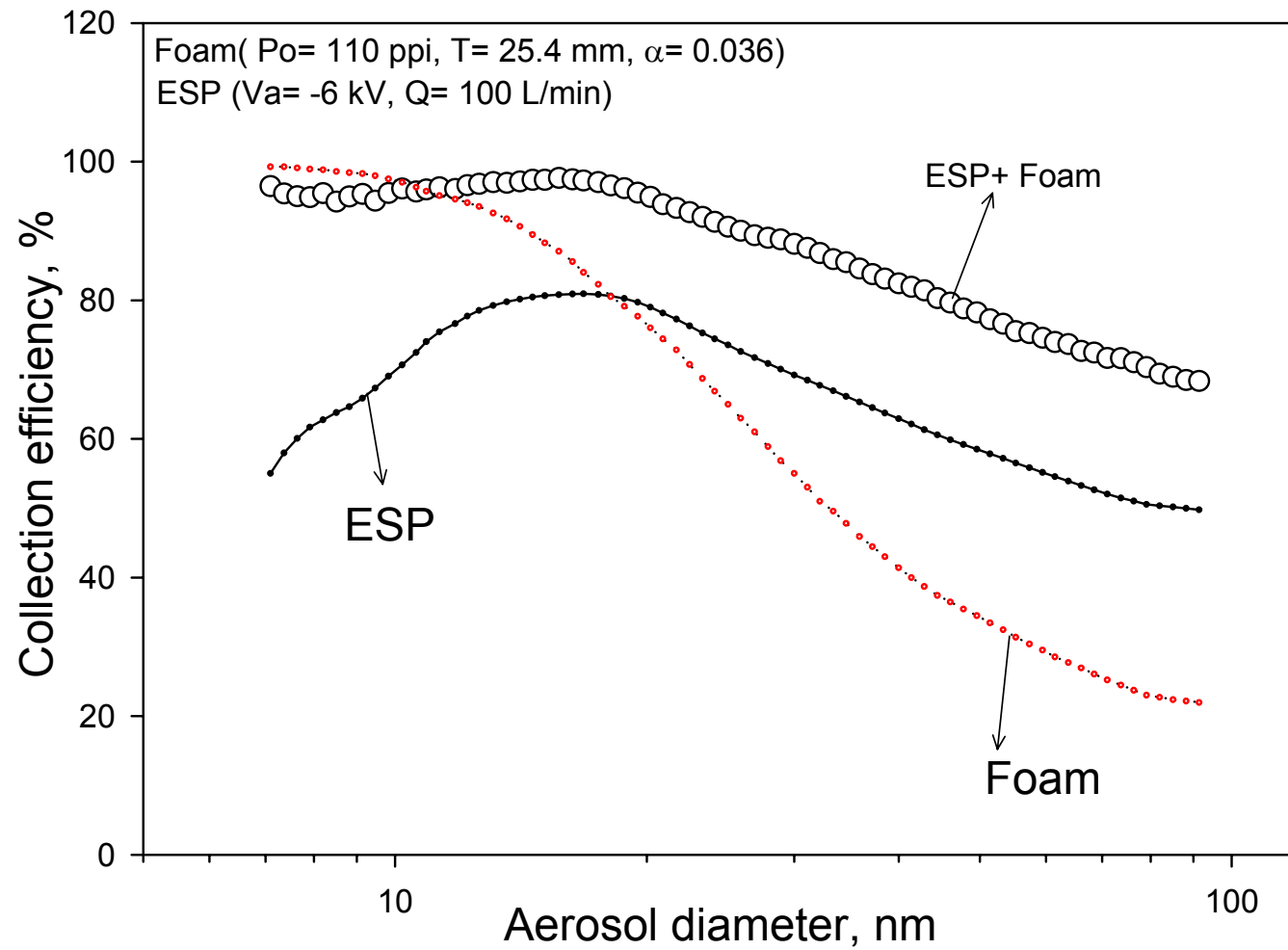


Figure 11. Collection efficiency curves of ESP, foam, and both in series.

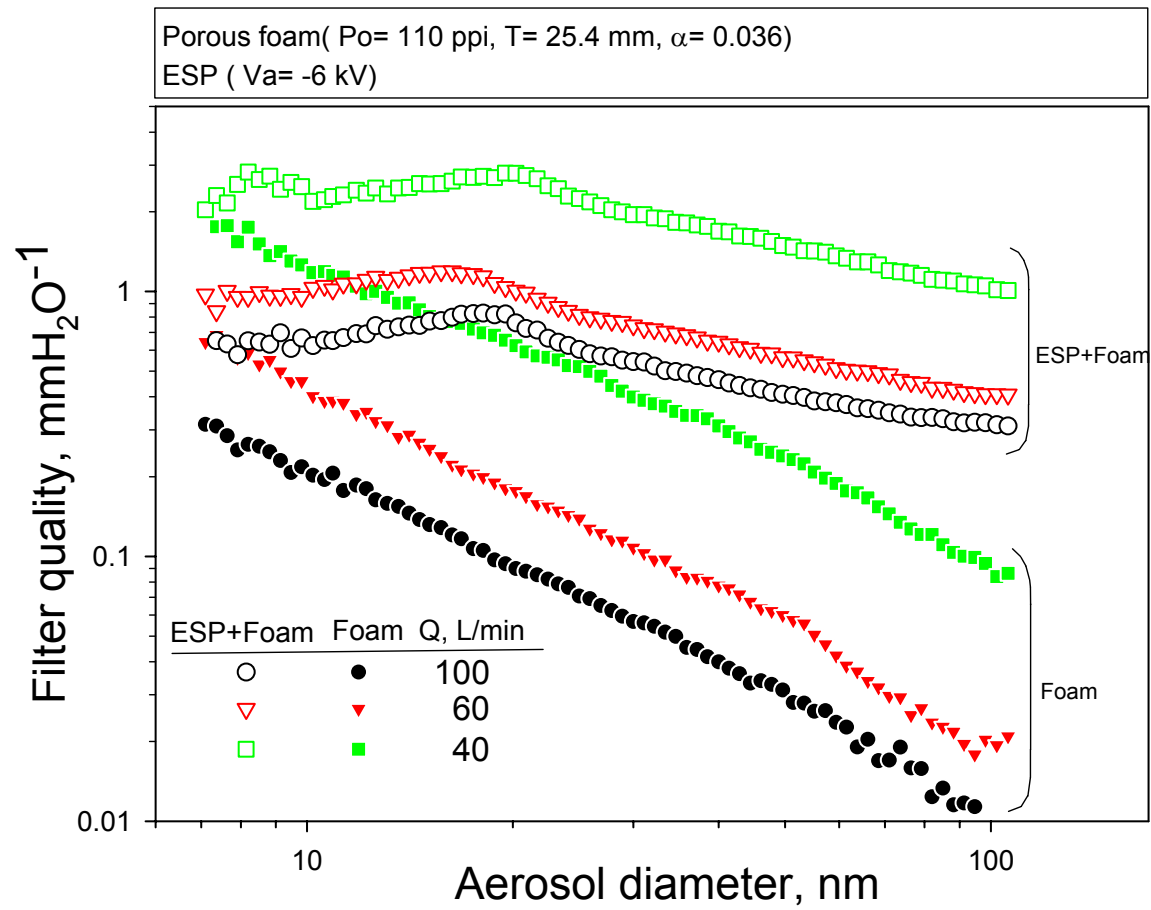


Figure 12. Filter quality curves of foam and ESP plus foam.