

微奈米複合纖維空氣濾材之研究

The investigation of Micro/Nano Fiber Composite for HEPA Filter Technology

周欣穎, 戴崇峰, 張浩哲
H. Y. Chou, C. F. Dai, H. J. Chang
紡織產業綜合研究所
Taiwan Textile Research Institute
周欣穎: sychou.1133@ttri.org.tw

摘要

本技術結合熔噴與靜電紡絲製程技術，開發微奈米纖維為主體的高濾效低壓損過濾器，其特徵具有高比表面積的特性，同時提供高通量、低壓損，增加纖維對粒子攔截、慣性衝擊、擴散的機率，以提高對氣膠微粒之去除效率，所製備之精密過濾材之濾效率為 99.97% 壓損僅有 3.8mmH₂O，濾材容塵量高達 112.6 g/m²，並結合複合不織布工程及產品設計與開發工程之能量，生產高效能微奈米纖維過濾器，使其成為具有輕薄、高濾效、低壓損、省能耗等特性之高效率 HEPA 空氣濾網。

關鍵字：靜電紡絲，熔噴，微奈米纖維，高效能空氣過濾器

Abstract

This technology integrated with the meltblown and electrospun process technology, developed a filter which high filtration efficiency and low pressure drop. This main fiber diameter distribution has one scale in micrometer and another in nanometer. Then combined with the nonwoven composite engineering and product design and development engineering to manufacture a “high-performance micro-/ nano-fiber filter”. The best filtration efficiency performance we observed was 99.97% and only 3.8 mm H₂O pressure drop under a standard operation test. Besides, compared to traditional micron fiber membrane, nano and micron fiber composite membrane also has the characteristics of the higher porosity, surface area and lower pressure drop.

Keywords : Electrospun 、 Meltblown 、 Micro/Nano Fiber 、 HEPA

前言

近年石油價格居高不下，造成油價電費也持續上漲。其中，就商用大樓用 HVAC(暖氣，換氣，空調)系統而言，在建築耗能中空調系統的耗電量約佔 60%，其中濾網所消耗的能源成本佔整個空調系統耗能的 30%，此部份在今後 5 年間將會成為能源成本削減的主要對象。現在能源價格的上升、以及針對降低溫室氣體排放的行動，與大樓經營有很深的關連，多數的大樓已經不是將能源成本視為固定費用，而是開始考慮更積極地進行管理。來自 HVAC 的能源成本，由於達到商用大樓能源成本的約 1/3，蘊藏著對能源節約大幅貢獻的可能性，因此如何節能成為許多企業重要的投資考量。本技術所開發之精密空調箱濾材，為一具低壓損結構之微奈米複合空氣濾網，可大幅節省能源消耗，可應用於建築空調、半導體製程產業之無塵室外部進氣過濾及生技產業之進氣循環等，節省能源，提升產業競爭力。而空氣濾材方面所謂高效率濾材是針對 $0.1\sim0.3\ \mu\text{m}$ 微粒的捕捉效率要達到 99.97%以上，傳統之玻璃纖維介質濾材具有高孔隙率、高比表面積大的特性，在提供高通量以增加對氣膠微粒去除效率同時增加了濾材的壓損。秉持壓損值愈低對於能源損耗越低的概念，增加微奈米纖維不織布空氣濾網過程的操作性，使其成為具有輕薄、高濾效、低壓損、省能耗等特性之高效率空氣濾網。

一般微粒過濾的方法有機械式和靜電式，機械式的是當微塵碰到纖維，纖維用凡得瓦爾力(Van der Waals forces)將微塵黏著，靜電式是用某種方法把靜電充到纖維裡面，讓纖維產生永久的帶電，當微塵接近纖維時即被纖維內的電荷用庫倫力(Coulombic force)吸附。因為微塵很小，故靜電對微塵的吸附力特別強，也大大的提高了濾材的過濾效果。然而根據歐盟最新規範，所謂 HEPA 濾網是不需要經過靜電駐極也可達到高效率過濾效能。本技術利用靜電紡絲技術之優勢[1-4]，結合熔噴纖維成形技術，製備出以微奈米纖維為主體的高效能空氣濾材。其具有高孔隙率、高比表面積大的特性，同時提供高通量、低壓損，增加纖維對粒子攔截 (Interception)、慣性衝擊 (Inertial impaction)、擴散 (Diffusion)的機率，以提高對氣膠微粒之去除效率，取代傳統之玻璃纖維介質

濾材，並藉由光硬化交聯技術與複合纖維網結構，強化膜材機械特性，以增加奈米纖維不織布高效能空氣濾材在製作成高效率空氣濾網過程的操作性。使其具有輕薄、高濾效、低壓損、省能耗等特性之高效率空氣濾網。

理論

靜電紡絲工作原理

靜電紡絲技術是使用高壓電將高分子溶液製備成奈米纖維，其主要機構包括線電極、收集器、滾筒電極、高壓電供應器等，滾筒電極將高分子帶到線電極，線電極通上高壓電誘發高分子形成 cone jet (圖 1)，cone jet 向收集器方向延伸與甩動溶劑揮發形成高分子奈米纖維，奈米纖維沉積在收集器的基材上 [5]。

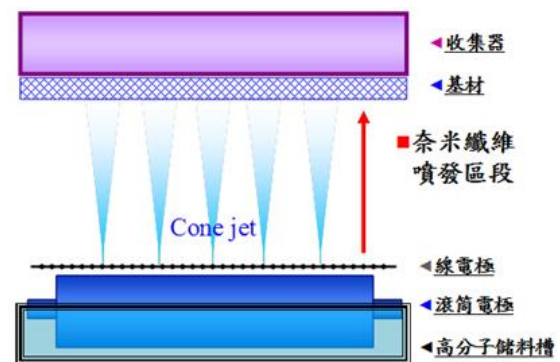


圖 1 靜電紡絲機構圖

HEPA 高效率空氣濾材

HEPA 中文的意思為“高效空氣微粒子過濾”，HEPA 是具有世界統一標準的過濾器，對於 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上的微粒子其過濾效率可達 99.97%以上，ULPA 則是以 HEPA 的基礎進一步加強 HEPA 的過濾效果。HEPA 和 ULPA 廣泛應用於無菌(塵)室、手術室、GMP 工程、半導體元件的生產和某些特定嚴格要求空氣潔淨度之場合。國內目前在半導體等工作環境所使用之 HEPA 等級玻璃纖維濾網，必須仰賴進口，因此為了提昇產業競爭力，研發具有市場競爭力之 HEPA 級濾網，自給自足奈米纖維原材料以取代進口，帶領國內過濾產業邁向國際舞臺[6-8]。

空氣過濾作用機制探討

過濾是一種相當複雜之程序，在說明濾材對氣膠微粒之過濾效率時，通常以單一纖維效率(Single-Fiber Efficiency)作為估算濾材之粒狀污染物捕集效率。假設所有纖維(Fiber)之直徑相同，且與氣流方向垂直，則將單一纖維所收集到之顆粒數與在同一纖維上理論可收集的微粒數比，即稱為單一纖維效率。而不織布的過濾效率是所有的單根纖維濾效的加總加上篩分現象所造成的結果，因此在不考慮纖維帶靜電的前提下，過濾材的效能為擴散沈積、直接截取、衝擊沈積、重力沈降加上纖維集結成網後的篩分等五種效率的組合(圖 2)。而根據前四種過濾效率的影響因子看來，過濾材的濾效跟纖維的細度有絕對的關係，纖維越細，理論濾效越高[9-10]。

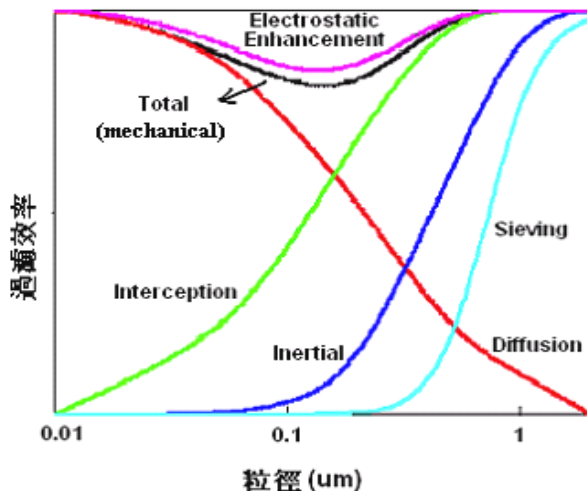


圖 2. 不同理論基礎下所呈現過濾效率對不同粒徑關係圖

奈米纖維過濾所產生的新機制

氣流在纖維表面的流動會因纖維粗細不同，而產生不同的氣流排擠現象，當氣流通過粗纖維表面之前與通過粗纖維時，由於纖維曲率半徑大，造成氣流在通過纖維前後的氣流速度差異大，因而形成過濾材在使用時產生壓損。另一方面，當氣流通過細纖維表面前後，因纖維曲率半徑小，其氣流較容易的通過纖維表面，因此在氣流通過纖維表面時，其速度不會有明顯的差異，所產生的壓損亦較低。當材料達到奈米級尺寸時(圖 3)，氣流通過奈米纖維表面時的速度不為零(不連續流)，此不連續流的判斷可依據紐森數(Kn :Kundsen number)大小而定，當 Kn 值 > 0.1 時，可呈現此一不連續流現象，此時微粒與纖維表面接觸的機率變大，因而增加被攔截的機會，致使過濾效

能比一般微米級纖維高；相對的，由於氣流流經纖維表面時的速度不為零，因此壓損值更低[11-14]。

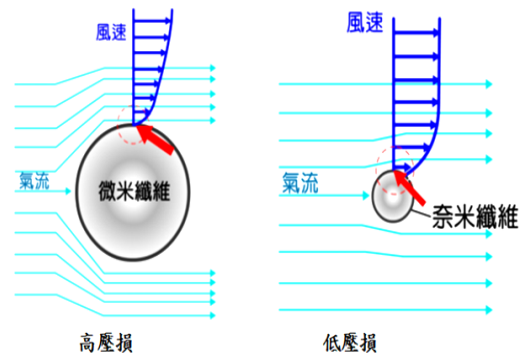


圖 3 氣流流經纖維表面示意圖

實驗

靜電紡絲奈米纖維製備條件

- (1) 將 PVA 溶於 H₂O 備成 6%~15%(w/v)之高分子溶液。
- (2) 在 PVA 溶液中添加交聯劑：2.7%~13.5%(w/v) 配製成一系列的 PVA 交聯配方溶液。
- (3) 利用靜電紡絲技術(參數:線電極幅寬:40 cm，電極直徑 4 cm，操作電壓 45 kV，電極轉速 15 unit，收集距離 11 cm)

熔噴纖維製備條件

- (1) 選擇適當的 PP 高分子聚合物
- (2) 放入熔噴設備中
- (3) 用熔噴技術(模頭壓力 :1420 psi，螺桿轉速 :139 rpm，風壓：2、5、10 psi，收集距離：30、60 cm)

熔噴電紡同步複合製程

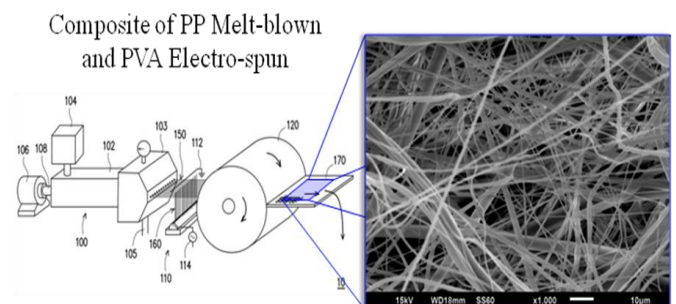


圖 4. 結合靜電紡絲與熔噴同步匯入技術所開發之微奈米複合纖維

結果與討論

濾效/壓損影響到過濾的效能與產品競爭力，經過初步熔噴/靜電紡絲複合微奈米纖維的基重均勻度可達 1.62%，進一步將所製備之複合濾材進行濾效/壓損效能分析，此複合濾材除了濾效需優於傳統玻璃纖維等濾材，進一步以低壓損為研究目標，接著以平均濾效壓損誤差分析方式裁剪布寬 40cm，布長 30cm，取樣 10cm×10cm，以 TSI3160 進行濾效壓損測試分析。分析結果如表 1 所示，熔噴纖維尺寸為 1~3 μm 、基重 19~22g/m²，搭配奈米纖維平均尺寸為 200nm 匯入量為 0.48±0.06 g/m² 參數條件下，在 0.3 μm 粒子濾效≥ 99.97%，壓損僅有 3.8mmH₂O。

表 1 微奈米纖維結構設計與其效能分析

No	1	2	3	4
Avg. Diameter(μm)	9-11	9-11	2-7	1-3
Basis Weight(g/m ²)	15-16	15-16	18-22	19-22
Weight of nanofiber layer(g/m ²)	0.44±0.05	0.47±0.08	0.43±0.05	0.48±0.06
Efficiency(%)	84.8	84.6	97.9	99.97
Pressure Drop(mmH ₂ O)*	0.78	0.94	1.52	3.8

此外由 MPPS 分析理論可知 MPPS(Most Penetratable Particulate Size)就是最容易穿透粒徑，將不同粒徑大小進行過濾，接著以實際的複合過濾膜進行 TSI3160 分析，粒徑大小 0.3 μm 穿透率最高，也最難過濾，因此過濾分析常以粒徑大小 0.3 μm 作為過濾分析之試驗指標。除此之外我們也針對不同粒徑大小進行 TSI3160 過濾分析結果如以下，平均粒徑 1~3 μm 粒子濾效≥99.93%、1~10 μm 粒子濾效≥99.93%、粉塵濾效≥99.9%、複合濾網濾材壓損≤3.8mmH₂O、複合濾網壓損均勻度變異≤9.75% (TSI 3160)。

將最佳操作參數下所製備之微奈米複合纖維進行奈米纖維濾膜的濾材壽命分析，為濾材一年壽命加速試驗(圖 5)，我們將上述穩定的微奈米纖維空氣濾材製作成 5V 標準尺寸型(610 mm×610 mm×292 mm)的 HEPA 空氣過濾器，再進行容塵量之測試。測試條件使用 0.3 μm 微粒，定風量 602 m³/hr，實驗結果顯示，隨著通風量增加，壓力損失也跟著增加，過濾效能提升，表示纖維膜成功捕捉空氣中微粒，而隨著微粒通過數量增加而阻塞了纖維之間的孔隙而導致壓損提升，從起始壓損 3.8mmH₂O 到約 20 mmH₂O

為止，且過濾效能無法再持續增加時，判定當 HEPA 過濾器達到約初始壓損的兩倍左右時，即要更換該 HEPA 過濾器。進一步，將濾膜取出裁切成面積 10 cm×10 cm 尺寸秤取奈米纖維濾膜上捕集到的顆粒重量，本實驗結果濾材容塵量可達 112.6g/m² 與標準 V Type 濾網半年使用壽命(容塵量 60 g)比較，本技術所開發的微奈米纖維不織布濾材初步估計使用壽命超過一年以上。綜合以上分析本技術利用熔噴/靜電紡絲同步匯入製程可製備低壓損高容塵之精密複合過濾材。

高效率濾網 High Efficiency Filter Performance Data – Mini Pleat V Type

Efficiency	V Type Size (W×H×D)	Screen Size (L×W)	Rated Capacity	Pressure Drop (mmH ₂ O)	
濾效 (%) (@0.3 μm)	外框尺寸 (mm)	濾網尺寸 (m)	額定風量 (m ³ /hr)	初始壓損	最終壓損
99.97%	610 x 610 x 292	34 x 0.6	602	3.8	20



圖 5 熔噴/靜電紡絲複合纖維濾材容塵量分析

結論

本技術所開發之複合纖維過濾材，不同熔噴製程操作參數的調控，如吐出量、空氣牽伸氣壓、加熱溫度、高分子材料等可製備出不同纖維細度的微米纖維，纖維的細度會影響複合奈米纖維之濾材的濾效及壓損效果，配合靜電紡絲奈米設備之設計與匯入製程，在 0.3 μm 粒子濾效高達 99.97%，壓損僅有 3.8mmH₂O，達成高濾效低壓損精密過濾材的需求。接著也進行濾材壽命試驗結果 HEPA 空氣過濾器總面積之總容塵量為 112.6 g/m² 估計使用壽命超過一年，其分析結果優於市售標準 V Type 濾網半年使用壽命(容塵量 60 g)。由實驗結果可證明結合靜電紡絲奈米纖維成形技術、熔噴纖維技術進行同步匯入製程，製備出低壓損高容塵精密濾材。其具有高孔隙率、高比表面積大的特性，提供高通量、低壓損，強化纖維對粒子攔截 (Interception)、慣性衝擊 (Inertial impaction)、擴散 (Diffusion) 的機率，以增加對氣膠微粒之去除效率，進而取代傳統之玻璃纖維介質濾材，並藉由熱交聯技術與複合纖維網結構，強化膜材

機械特性，以增加微奈米纖維不織布在製作過程的操作性。使其成為具有輕薄、高濾效、低壓損、省能耗等特性之精密過濾材。

參考文獻

1. Park S.A., Park K., Yoon H., Son J.G., Min T., Kim G.H.: Apparatus for preparing electrospun nanofibers: designing and fabrication. *Polymer International*, 56, 1361-1366 (2007).
2. Barhate R.S., Ramakrishna S.: Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of Membrane Science*, 296, 1-8 (2007).
3. Teo W.E., Ramakrishna S.: A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. *Nanotechnology*, 17, 89-106 (2006).
4. Huang Z.M., Zhang Y.Z., Kotaki M., Ramakrishna S.: A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63, 2223-2253(2003).
5. Doshi J, Reneker D H. *Journal of Electrostatics*, Vol.35, pp.151-160 (1995).
6. Zong X, Kim K, Fang D , et al. *Polymer*, Vol.43(16), pp.4403-4412(2002).
7. Czajka R, "Development of medical textile market", *Fibers & Textiles in eastern Europe*, 13:13-15 (2005)
8. Hegde RR, Dahiya A, Kamath MG, Nanofiber nonwovens, Department of Materials Science & Engineering, The University of Tennessee, UK(2005)
9. Flendrig, L. M.; Velde, A. A.; Chamuleau, R. A. "Semipermeable hollow fiber membranes in hepatocyte bioreactors: a prerequisite for a successful bioartificial liver," *Artif. Organs*, 21, 1177-1181 (1997b).
10. ziz, C. E.; Fitch, M. W.; Linqvist, L. K.; Pressman, J. G.; Georgiou, G.; Speitel, G. E. "Methanotrophic biodegradation of trichloethylene in a hollow fiber membrane bioreactor," *Environ. Sci. Technol.*, 29, 2547-2583 (1995).
11. Callies, R.; Jackson, M. E.; Brindle, K. M., Measurements of the growth and magneticresonance imaging, *J. Biotechnol.*, 12, 75-78 (1994).
12. Davis, R. J.; Gainer, J. L.; O'Neal, G.; Wu, I. W. Photocatalytic decolorization of wastewater dyes, *Wat. Environ. Res.*, 66, 50-53 (1994).
13. Wang, C. C.; Lee, C. M.; Lu, C. J.; Chuang, M. S.; Huang, C. Z. Biodeg, radation of 2,4,6-trichlorophenol in the presence of primary substrate by immobilized pure culture bacteria, *Chemosphere*, 41, 1873-1879 (2000).
14. Zhu, C.; Chung, T. S.; Loh, K. C., Activated carbon-filled cellulose acetate hollow fiber membrane for cell immobilization and phenol degradation, *J. Appl. Polym. Sci.*, 76, 695-707 (2000).