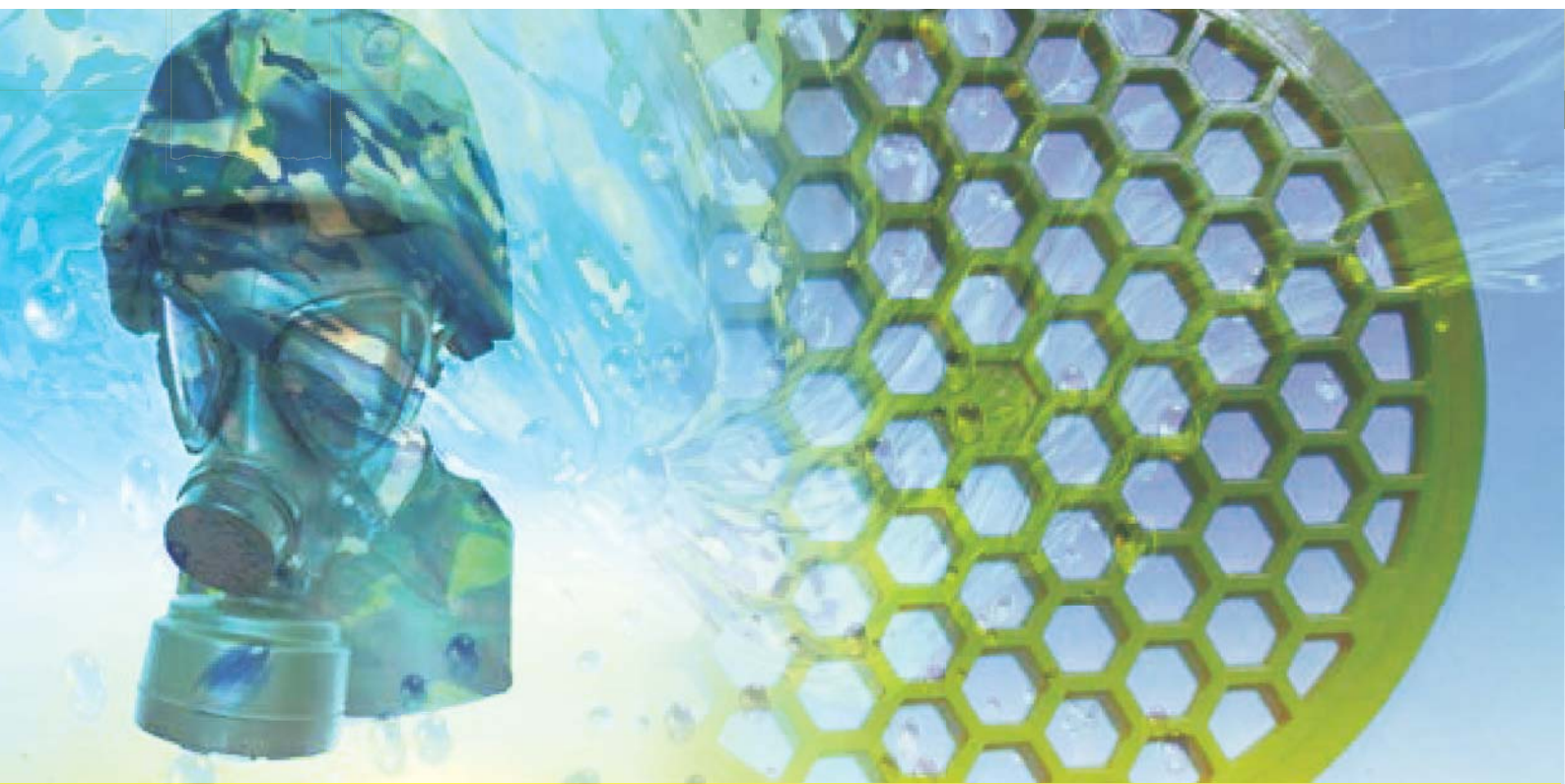




● 化生放核防護裝備研析

國造濾毒罐構型研改對降低吸氣壓阻與減輕重量之研究

提要

蘇盈嘉

- 一、本文對改良國造濾毒罐提供了一套可行的分析方法及程序，可降低生產成本並提升濾毒罐性能。
- 二、運用計算流體力學對6種概念設計的濾毒罐進行流場分析，分別以流體可視化及主篩板的壓載測試等實驗，驗證設計的性能。
- 三、蜂巢型的篩板通道設計在流場氣動力及結構負重均優於原圓孔型。蜂巢通道設計具整流增加通道面積及結構強度的優點，可增加吸附層有效流經面積降低進氣壓阻。最後以蜂巢主篩板製作的實體濾毒罐進行氣膠微粒過濾與毒氣突破實驗，能通過P100等級的過濾效率與達成60分鐘突破時間維持原有性能。
- 四、無需更換原料，改良的產品與國造62A濾毒罐相較，降低了46.48%吸氣壓阻與減少了33%的吸附劑體積。

關鍵詞：濾毒罐、計算流體力學、流場可視化、進氣壓阻、氣膠微粒過濾、毒氣突破實驗



壹、前言

防護面具的功能為防止污染物進入配戴者的呼吸系統，高性能的防護面具可確保配戴者的生命安全。全球近年來，化生放核（Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear, CBRN）武器的威脅不曾間斷，而這些武器成本低廉，殺傷力範圍廣且威嚇力強。從1989年美國伊波拉病毒、1995年日本沙林毒氣，以及2001年美國911恐怖攻擊後，一連串炭疽粉末的恐嚇事件；另外2003年第二次波灣戰爭美軍攻打伊拉克，2013年敘利亞化學武器襲擊事件，化生放核的威脅造成防護面具熱賣，防護面具的需求不僅僅限於軍隊或勞工，全民的需求性亦高。

防護面具的分類，以面罩內壓力來區分，可分為負壓式：當吸氣時，面具內壓力相對於大氣壓力較小者；及正壓式：當吸氣時，面具內壓力相對於大氣壓力較大者。正壓式具有供氣或動力裝置，常用在缺氧或立即危險的區域，而因其具有供氣動力裝置，攜行較為不方便。一般軍用、工業用防護面具及醫療口罩均屬負壓式。

軍用防護面具主要是由面罩與濾毒罐所組成，其功能是藉由濾毒罐過濾及吸附有害物質，避免吸入毒氣而造成人員的損傷，濾毒罐可有效阻絕微粒（例如炭疽菌）、神經性、血液性、糜爛性、窒息性及催淚性等化學戰劑，以及細菌（例如天花）等。¹然而軍用防護面具的特性在於有過高的吸氣壓阻，呼吸阻力對人體的影響有三方面：一是促使呼吸肌疲勞；二是使心臟負擔加重；三是加重有害空間的影響。²呼吸阻力包含吸氣阻力和呼氣阻力，吸氣時，氣流經過防護面具各部分，通路長，摩擦力大，其阻力也大，84~90%的吸氣阻力是由濾毒罐所引起。³吐氣時，氣流只受吐氣閥門的阻礙，故吐氣阻力甚小，影響較輕。而防護面具的呼吸阻力因其結構類型、濾毒罐構型與其內含充填物不同而有差別。

濾毒罐內部構造通常有過濾層（過濾氣膠微粒）及吸附層（吸附CBRN毒氣）。⁴過濾層與吸附層材質的多孔介質特性係造成罐體高吸氣壓阻的原因，吸氣壓阻為檢測濾毒罐性能的主要指標之一，以美國職業安全衛生研究所（National Institute for Occupational

- 1 國造T3-75式防護面具，http://cbrnarchives.mnd.gov.tw/ebook/weapon/weapon_protect_item8.html，檢索日期：西元2015年10月12日。
- 2 化學武器的防護，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/nbc/c/cwde.htm>，檢索日期：西元2015年10月12日。
- 3 代友紅、李俊善，〈降低防毒面具吸氣阻力研究〉《中國個體防護裝備》，第5期，西元2006年，頁16-17。
- 4 菲謝蒂，〈安心呼吸當然沒問題〉《科學人》，西元2002年3月號，頁112-113。



Safety and Health, NIOSH) 對CBRN濾毒罐的規範,⁵在進氣量85L/min的標準其吸氣壓阻須低於50mm H₂O (約490.6Pa)。

現役國造T3-75防護面具與62A濾毒罐(如圖一),分別為民國75年與62年研製生產,且62A濾毒罐的過濾、吸附等防護性能符合NIOSH規範,而由於使用單位反映,其在執行駐地訓練或戰備演訓等高負荷任務狀況下配戴,高吸氣壓阻容易使配戴者產生呼吸不適,影響作業效率。經本研究提供以進氣量85L/min的基準下測量其壓阻,其吸氣壓阻約為658.48Pa左右,已超出NIOSH規範34.2%,吸氣壓阻過大為主要缺點。

圖二(a)顯示62A濾毒罐(本文簡稱Model A)的內部構造,過濾層主要由高效率空氣微粒過濾(High-Efficiency Particulate Air, HEPA)等級之熔噴不織布所組成;吸附層則由活性碳顆粒所組成。圓孔型主篩板分隔了過濾層及吸附層,主篩板功能除隔離過濾層與吸附層外,須具有在高度運動狀態下,能承受吸附層重量的結構強度,避免因變形造成活性碳顆粒鬆脫所產生的空隙,造成濾毒罐的失效。

過濾層與吸附層的多孔介質組成,若視為巨觀、均質,以流體動力學分析其特性,流



圖一 國造T3-75防護面具與62A濾毒罐

(資料來源:本研究提供)

體在多孔介質區的流動有大的動量損耗。當流體為層流僅考慮黏性效應,則適用於Darcy方程式,⁶如方程式(1):

$$-\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{\kappa} V_s \quad (1)$$

其中 ΔP 表示該多孔介質區的壓阻, L 表示流動方向的長度, κ 為滲透率, μ 為流體的黏性係數, V_s 為進入多孔介質區的表面速度。若考慮慣性力作用,則加入一對流項修正,稱為二次項的Forchheimer方程式⁷:

$$-\frac{\Delta P}{L} = \alpha \mu V_s + \beta \rho V_s^2 \quad (2)$$

5 Centers for Disease Control and Prevention, Standard Respirator Testing Procedures, Air-Purifying Respirators, <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/APrespCBRN.html>, 2014.

6 Dullien F. A. L., Porous Media-Fluid Transport and Pore Structure (New York: Academic, 1979).

7 同註6。



其中 α 表示多孔介質滲透率的倒數又稱為黏性項係數， β 表示慣性項係數。多孔介質方程式，是以巨觀概念描述多孔介質區整體壓阻與表面速度的關係，當表面速度愈大則壓阻愈大。影響壓阻的整體因素，包括本身多孔介質特性所造成的參數 α 、 β 、 L 與 V_s 。方程式(2)的無因次化形式為：

$$f = \frac{1}{Re'} + 1 \quad (3)$$

其中 $f \equiv \Delta P / L \beta \rho V_s^2$ ， $Re' \equiv \beta \rho V_s / \alpha \mu$ ，方程式(3)稱為摩擦因子雷諾數型態方程式，⁸根據此式可分析多孔介質特性在不同流場情況下由線性逐漸轉變於非線性的變化。當進入多孔性介質區的平均速度很小時，或 Re' 數很小時，則慣性效應遠低於黏性效應，當 Re' 數增加，多孔介質的流場特性由線性(Darcy方程式)逐漸轉變為非線性(Forchheimer方程式)，與一般流場由層流瞬間轉變成紊流有所不同。

因此要降低濾毒罐的吸氣壓阻，可從兩方面來著手，一是吸附劑原料配方的調整，即改變多孔介質參數 α 、 β ，另一方面則是調整罐體內部的通道設計，降低進入吸附層的 V_s 與縮短厚度 L ，兩方面的調整均須通過後續

的氣膠微粒過濾及毒氣突破檢驗規範。一般以工業化量產與國造的濾毒罐，吸附劑原料屬大批購買且經規格檢驗通過，調整新的配方將花費較多經費不符成本效益。在吸附劑原料維持不變的條件，若僅改變罐體內部通道設計，即能達成減重與降低壓阻之目標，並仍能通過相關檢測，對產品的開發效率能夠提升。

2009年李峻溪⁹學者研究發現Model A為避免封裝時吸附層活性碳顆粒滲入將原主篩板外圍圓孔封閉而產生氣動力的缺點，流速分布不均產生局部高速的順流與流體不易經過的死區，造成吸附層的使用率降低。李峻溪學者調整主篩板圓孔的分布與面積，證明良好的通道分布與較大的通道面積可降低壓阻，減少死區與增加吸附時間。李峻溪學者的研究僅針對圓孔型主篩板進行分析，雖提出分析罐體氣動力特性的相關指標，但尚未提出適合的主篩板通道設計及後續主篩板在結構及濾毒能力的研究。

本文的研究過程，依李峻溪學者對濾毒罐內部主篩板通道設計的氣動力，並考量工業封裝技術及加工的便利性，概念設計5種濾毒罐Model B~Model F進行研究，如圖二(b)~圖二(f)，主篩板的通道設計主要為

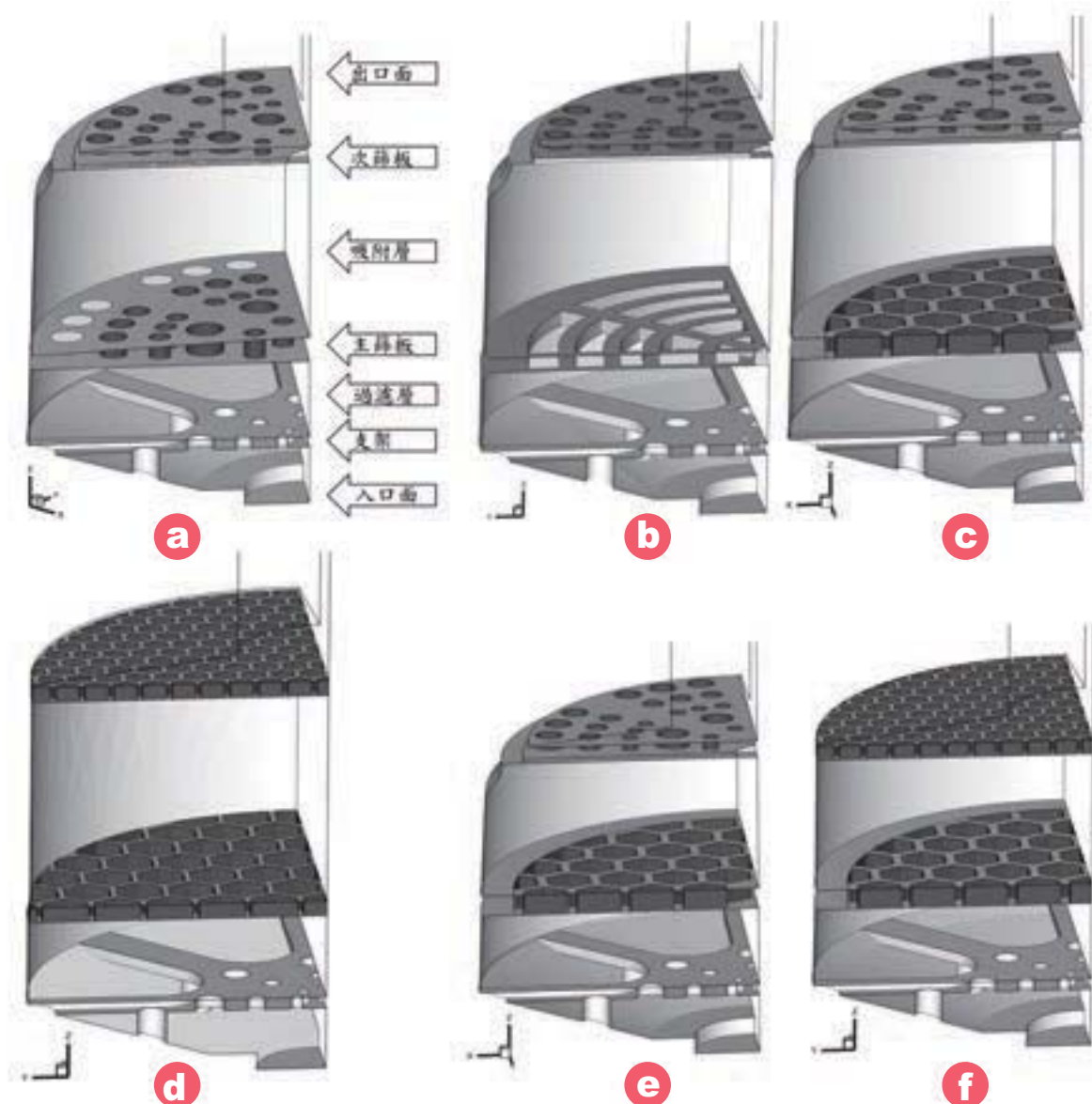
8 Andrade, Jr., J. S., Costa, U. M. S., Almeida, M. P., Makse, H. A., and Stanley, H. E., "Inertial Effects on Fluid Flow Through Disordered Porous Media," *Physical Review Letters*, Vol. 82 (1999), p. 5249-5252.

9 Li, C. C., "Aerodynamic Behavior of a Gas Mask Canister Containing Two Porous Media," *Chemical Engineering Science*, Vol. 64 (2009), p. 1832-1843.



肋條型及蜂巢型。首先，利用計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）具快速建立模型及流場模擬的方便且準確的優點，針對具多孔介質特性、造成高壓阻的吸附層進行分析，運用相關指標如進氣壓阻、有效流經面積比及空氣年齡等指標，尋找

出合適的通道設計。同時亦分析吸附層均質多孔介質的流場特性，後續則針對最適設計的主篩板進行一系列的測試，包括流場可視化、結構負重、微粒過濾及毒氣突破實驗，以確認現役原型罐Model A達成減輕罐重及吸氣壓阻之目的。



圖二 濾毒罐構型 (a) Model A (b) Model B (c) Model C (d) Model D (e) Model E (f) Model F

（資料來源：本研究提供）



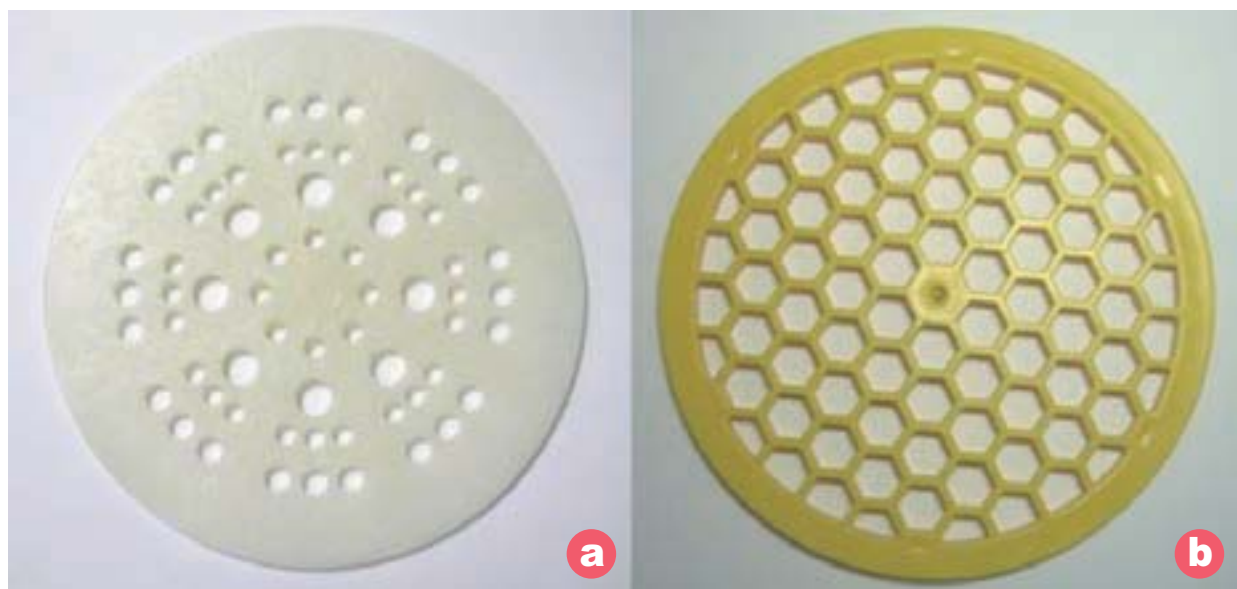
貳、研究內容

一、模型介紹

計算流體力學研究濾毒罐的氣動力特性，重點在主、次篩板的流道設計與罐體外型對吸附層氣動力特性的影響。研究發現原圓孔型主篩板設計改良成蜂巢型主篩板（如圖三）的通道設計，具整流及增加通道面積兼具結構強度的優點，可增加吸附層有效流

經面積，使均方速度降低增加吸附時間，可降低進氣壓阻，可有效達到濾毒罐輕量化目標。

本研究以濾毒罐Model A為基礎，概念設計Model B~Model F等5款模型，Model A的主、次篩板是圓孔通道設計，即為62A濾毒罐；Model B的主篩板是肋條型，次篩板是圓孔型，厚度不變；Model C的主篩板是蜂巢型，次篩板是圓孔型，厚度不變；Model D的



圖三 (a) 圓孔型主篩板 (b) 蜂巢型主篩板

（資料來源：本研究提供）

表一 構型差異說明

模型	A	B	C	D	E	F
主篩板	圓孔 有邊距	肋條型 有邊距	蜂巢 有邊距	蜂巢 無邊距	蜂巢 有邊距	蜂巢 有邊距
次篩板	圓孔 有邊距	圓孔 有邊距	圓孔 有邊距	蜂巢 無邊距	圓孔 有邊距	蜂巢 無邊距
罐體邊角	縮回	縮回	縮回	無縮回	縮回	無縮回
吸附層 厚度比例	1	1	1	1	2/3	2/3

資料來源：本研究整理



主、次篩板是蜂巢通道設計；而Model E與Model F皆以Model C為基礎，設計成吸附層厚度縮減1/3。蜂巢通道主篩板因為生產工藝技術關係，須保留邊距寬約6mm，佔主篩板半徑的11.65%。各模型差異說明如表一，模型圖同圖二。

二、數值模擬

本文主要運用CFD分析構型改變對降低壓阻與減輕罐體重量的影響，而過濾層本身材質極輕，其所產生的壓阻則遠低於吸附層，故數值模擬的觀察重點在於吸附層。在流場特性及計算效率的考慮下，計算域視過濾層（實際36層折數濾紙所構成）與吸附層假設為單一的多孔介質區外，其餘均按實體內部建構數值計算格點。因罐體結構符合幾何對稱條件，計算域以1/4罐體進行多區塊製作。在考慮結構的複雜性，為求格點能適型，以非結構、四面體網格產生格點，並在入口、出口、篩板孔洞及活性碳層等區局部加密處理。計算域之計算格點數量約為83萬個。

三、實驗設備

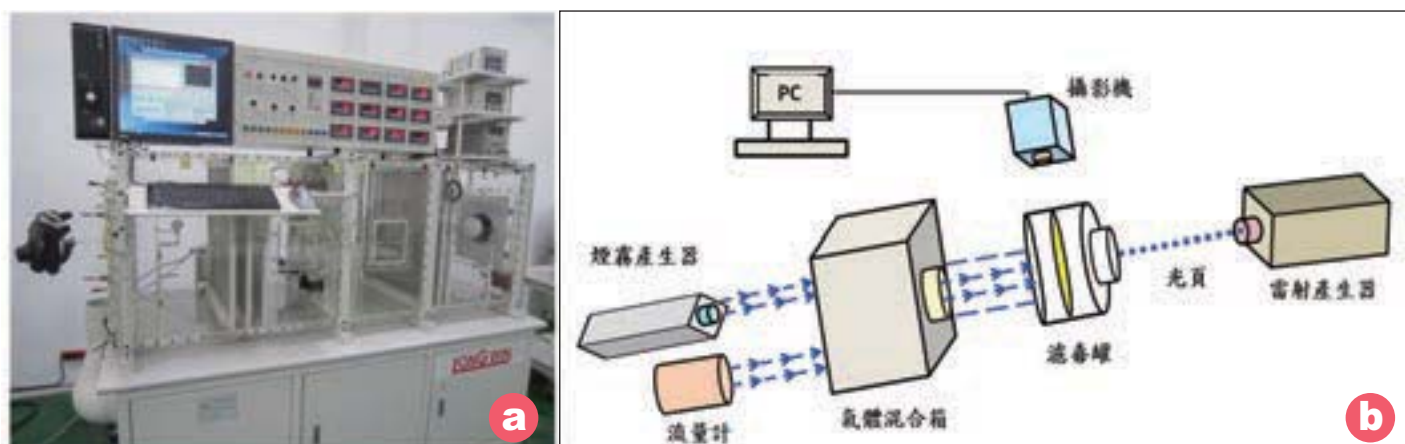
本文首先運用壓降量測實驗求得Model A的壓阻對流量關係式與推算其多孔介質方程式，並利用CFD方法概念設計改變主篩板孔洞通道分布，探討對降壓與減重的影響，

後續須以流場可視化與壓載等實驗，驗證蜂巢型主篩板所造成的濾毒罐體內流場現象與載重等性能優於原圓孔型主篩板。另以對產品Model C執行氣膠微粒過濾與毒氣突破等實驗，以確保以蜂巢型主篩板設計的濾毒罐符合NIOSH防護性能，以下簡略介紹相關實驗設備。

AMCA 210風洞為瑞領科技股份有限公司生產，該設備於執行實驗前已由國家度量衡標準實驗室完成校正作業，風洞設備如圖四(a)。本設備測試段截面積為32公分×32公分，可提供流量範圍為5至7,000L/min，利用該項風洞設備可設定所需要實驗之風量，為設備直接供給的均勻流場，進而針對濾毒罐實施壓降量測作業，其所得壓力與流量數據資料與曲線分布，皆由電腦自動存取，減少人為誤差，提升準確度。¹⁰

流場可視化主要製作與真實濾毒罐大小相同的透明壓克力罐體，內部結構不包含應填充在活性碳層的活性碳與會吸附霧油粒子的過濾層濾紙。實驗設備主要有流量計、光頁、雷射及煙霧產生器等，示意圖如圖四(b)，以攝影機錄製煙霧流經濾毒罐內主篩板的流場現象並分析。另壓載、氣膠微粒過濾與毒氣突破等將於後續章節說明。

10 廖坤峻，〈三維濾毒罐幾何構型與吸附能力分析之流場模擬〉（桃園：國防大學中正理工學院兵器工程碩士班，西元2007年）。



圖四 (a) AMCA 210風洞 (b) 流場可視化示意圖

(資料來源：本研究提供)

參、研究與討論

一、濾毒罐多孔介質特性分析

濾毒罐內過濾層與吸附層的多孔介質特性係數，沿用李峻溪¹¹學者量測Model A的吸附層與過濾層的多孔介質係數。

若將吸附層的壓力-表面速度視為一典型的2次方程式，如方程式(4)：

$$\Delta p = a_1 V_s + a_2 V_s^2 \quad (4)$$

進氣量可表示為速度與實際流經面積的乘積，則上式可表示為方程式(5)及方程式(6)：

$$\Delta p = a_1 \left(\frac{Q_{ave}}{A_{eff}} \right) + a_2 \left(\frac{Q_{ave}}{A_{eff}} \right)^2 \quad (5)$$

$$\Delta p = b_1 Q_{ave} + b_2 Q_{ave}^2, \quad b_1 = a_1 / A_{eff}, \quad b_2 = a_2 / A_{eff}^2 \quad (6)$$

若定義進氣阻抗 $R = \Delta P / Q$ ($\text{Pa} / \text{Lmin}^{-1}$) 表為阻抗方程式，則方程式(6)， $R = b_1$ ，層流特性適用於Darcy方程式； $R = b_1 + b_2 Q_{ave}$ ，二次效應適用於Forchheimer方程式。 a_1 及 a_2 係數取決於多孔材質本身的特性， b_1 及 b_2 係數除材質特性外，還與多孔介質區的有效流經面積有關。故良好的篩板通道設計將可使有效流經面積增加，表面速度減少而降低吸附層壓阻。當多孔介質特性屬Darcy方程式，則其進氣阻抗 R 為常數 b_1 ，表示其流經面積不隨進氣量增加而改變；若屬二次方程式，則其進氣

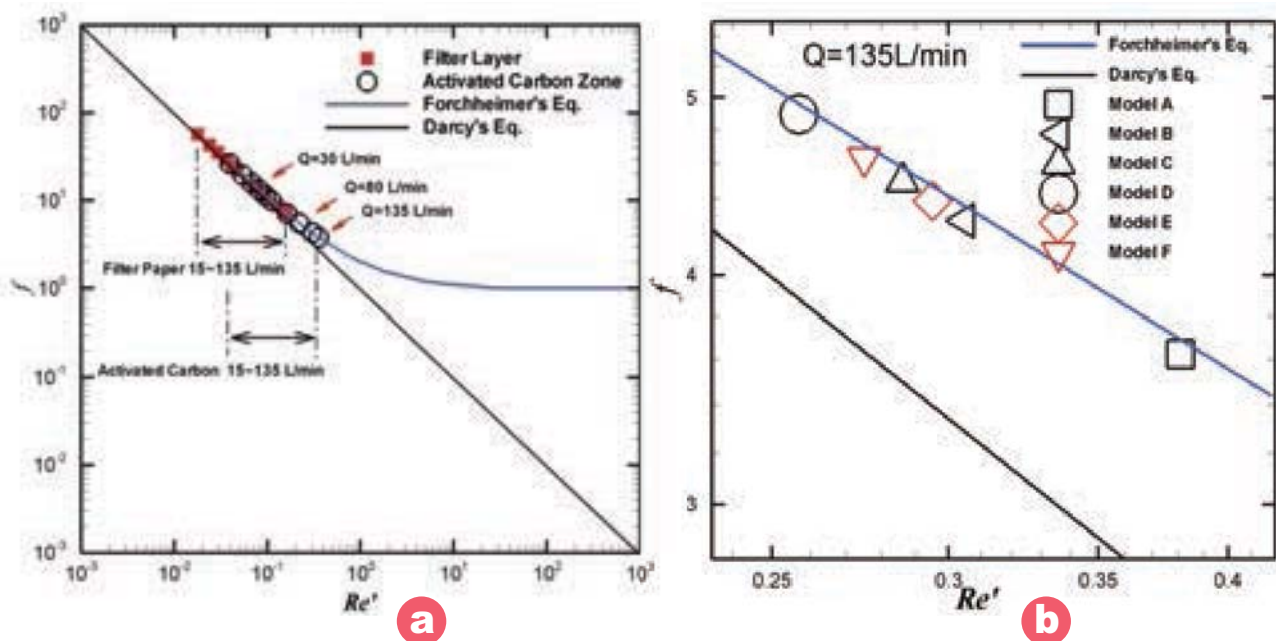
11 同註9，頁3。



阻抗值隨流率增加而呈線性增加，斜率 b_2 與有效流通面積的平方成反比。

若以摩擦因子雷諾數型態方程式來說明，圖五a中的直線表示Darcy方程式， $f=1/Re'$ 代表流場特性為層流，圖中曲線表示2次Forchheimer方程式， $f=1/Re'+1, 10^{-2}<Re'<10^{-1}$ 的範圍開始產生分叉。¹² Re' 愈大，直線與曲線的分叉愈大，表慣性效應愈強。當過濾層與吸附層的材料特性不變，以Model A分析，過濾層的進氣量15~135L/min，其 Re' 範圍為 1.8×10^{-2} ~ 1.6×10^{-1} 近似於層流，吸附層雷諾數區間約 4×10^{-2} ~ 3.81×10^{-1} ，高流量區已呈現明顯的慣性效應。在135L/min條件，比較Model

A~F的 Re' 和摩擦因子（詳見圖五b），相同吸附層厚度Model A~D， Re' 依序為0.381 (Model A)、0.305 (Model B)、0.286 (Model C)和0.257 (Model D)，摩擦因子依序為3.623、4.283、4.499和4.896，Model D具均勻通道設計與大通道面積使 Re' 變小代表慣性效應減弱， V_s 變慢，雖然 f 值增加，但因 $\Delta P \propto f V_s^2$ ，故吸附層壓阻仍隨 Re' 變小而降低。相同通道型態的Model E較Model C之 Re' 增加， f 值減少，代表流動長度變短， V_s 較快，慣性效應較強。6種模型以Model D與Model F的 Re' 較小，證明在不變更多孔材料，良好的氣動力設計可降低多孔介質區的 Re' ，減少流體慣性效應而



圖五 (a) 過濾層與吸附層之摩擦因子與雷諾數關係 (b) Model A~Model F 吸附層之摩擦因子與雷諾數關係

(資料來源：a. 廖坤峻¹³；b. 本研究提供)

12 同註10，頁3。

13 同註12。



降低壓阻。

因多孔介質區的高動量損耗，當主、次篩板的通道型態決定，在多孔介質區的流體結構受其支配。

二、吸附層的氣動力特性

本節將針對吸附層的氣動力特性做進一步的分析。依不同進氣量，根據Model A~F的主、次篩板間吸附層的壓阻，藉由方程式(2)，計算各模型吸附層表面速度 V_s ，計算出流經吸附層的面積，定義此面積為有效流經面積 A_{eff} ，與吸附層的截面積 A_c 的比值， A_{eff}/A_c 稱為有效流經面積比，則 $1-A_{eff}/A_c$ 則表示死區所佔面積比，有效流經面積比如表二。在進氣量85L/min情況，Model A的有效流經面積比66.29%，Model B與Model C分別為82.08%與87.55%。具相同內部構型但吸附層縮短的Model E為84.49%，較Model C低的原因是軸向流動距離短，出口速度較快，較不易向四周流動而增加流經面積。Model D的有

效流經面積比高達97.33%，死區所佔面積比僅2.67%，顯示主、次篩板的蜂巢設計，具流動均勻及增加流動面積的優點，產生順流或死區的區域較小。Model F的有效流經面積比90.89%，厚度減少雖可降低壓阻，但有效流經面積比因平均速度較快而降低。Model A有效流經面積比隨進氣量增加而降低，15L/min時約為68.94%，135L/min時約65.51%，約降低3.43%。相同的情況，Model C從88.05%降至87.39%，Model D僅從97.39%降至97.29%。顯示良好的通道設計，有效流經面積隨流量增加僅些微降低。取Model A~Model D吸附層三個截面的等速度分布圖，分別是近吸附層入口面、中間及出口面。很明顯的，流體自篩板通道進入吸附層，由於高動量的損耗，流體速度下降而不易向徑向流動，因此篩板的通道須面積大且分布均勻。由於原篩板的設計缺點，Model A入口面的速度分布即呈現局部高速及低速，如圖六(b)之右上圖，而Model

表二 有效流經面積比

區分	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E	Model F
15L/min	68.94	82.45	88.05	97.39	85.04	91.20
30L/min	68.19	82.36	87.92	97.38	84.89	91.15
60L/min	66.99	82.16	87.70	97.34	84.60	90.97
85L/min	66.29	82.08	87.55	97.33	84.49	90.89
115L/min	65.95	82.03	87.46	97.32	84.40	90.81
135L/min	65.51	81.99	87.39	97.29	84.33	90.76
A_{eff}/A_c 有效流經面積比(%)						

資料來源：本研究整理

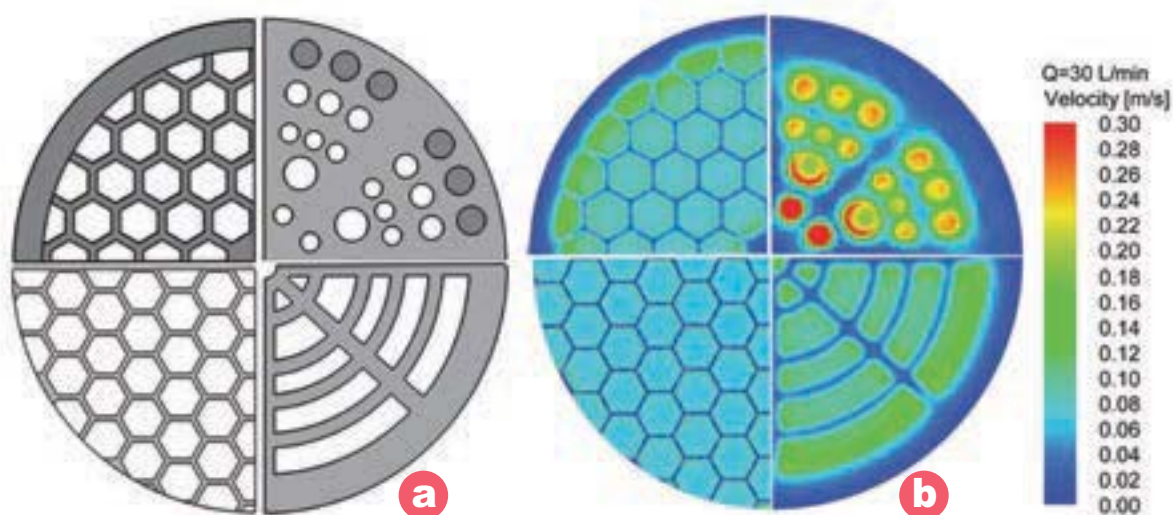


D的蜂巢篩板且不留邊距設計，速度分布最均勻，如圖六(b)之左下圖。但實際情況篩板四周需留邊距，避免吸附劑顆粒從四周掉入過濾層而失效，邊距寬度視封裝技術而定。在中間截面，因流體不易向徑向方向流動，原速度分布的差異仍存在直至出口面，因此在吸附層的流體結構，主要取決於主篩板的通道型態，如圖六(a)。蜂巢狀的通道設計有較大的通道面積與較佳的分布，在相同的入口流量會有較低的入口均速，且速度分布均勻將不易形成順流與死區。

三、空氣年齡分析

本節利用空氣年齡指標來表示氣體在吸附層的居留時間代表吸附時間。圖七(a)~圖七(f)為Model A~Model F在進氣流量30L/min的等空氣年齡圖，Model A因原主篩板通道設計的缺點，罐體周圍呈現大區域死區，

產生局部的順流與死區，使吸附層出口處的空氣年齡分布不均，出口處最快的空氣年齡約0.67秒，表示該位置為流速最快的順流區，有毒氣體將從此處最快突破。具相同的吸附層厚度Model B~Model D，蜂巢型主篩板的通道設計，使吸附層入口流速分布較均勻，通道面積增加而降低流速，圖七(b)和圖七(c)顯示在吸附層出口處的位置，罐體內縮的設計讓此處產生明顯的死區，但已遠小於Model A。圖七(d)顯示Model D的主、次篩板通道設計及出口處不內縮的設計，使空氣年齡的分布均勻，流體均勻的流經吸附層的區域，使順流與死區不易產生，巨觀呈現的 A_{eff} / A_c 可達97.33%以上。Model E和Model F等空氣年齡圖，如圖七(e)和圖七(f)，顯示吸附層厚度雖然縮短，但因主篩板蜂巢通道的設計，其出口處之空氣年齡分布均勻。入口處因



圖六 (a) 主篩板形式 (b) 主篩板靠近吸附層之入口速度分布圖

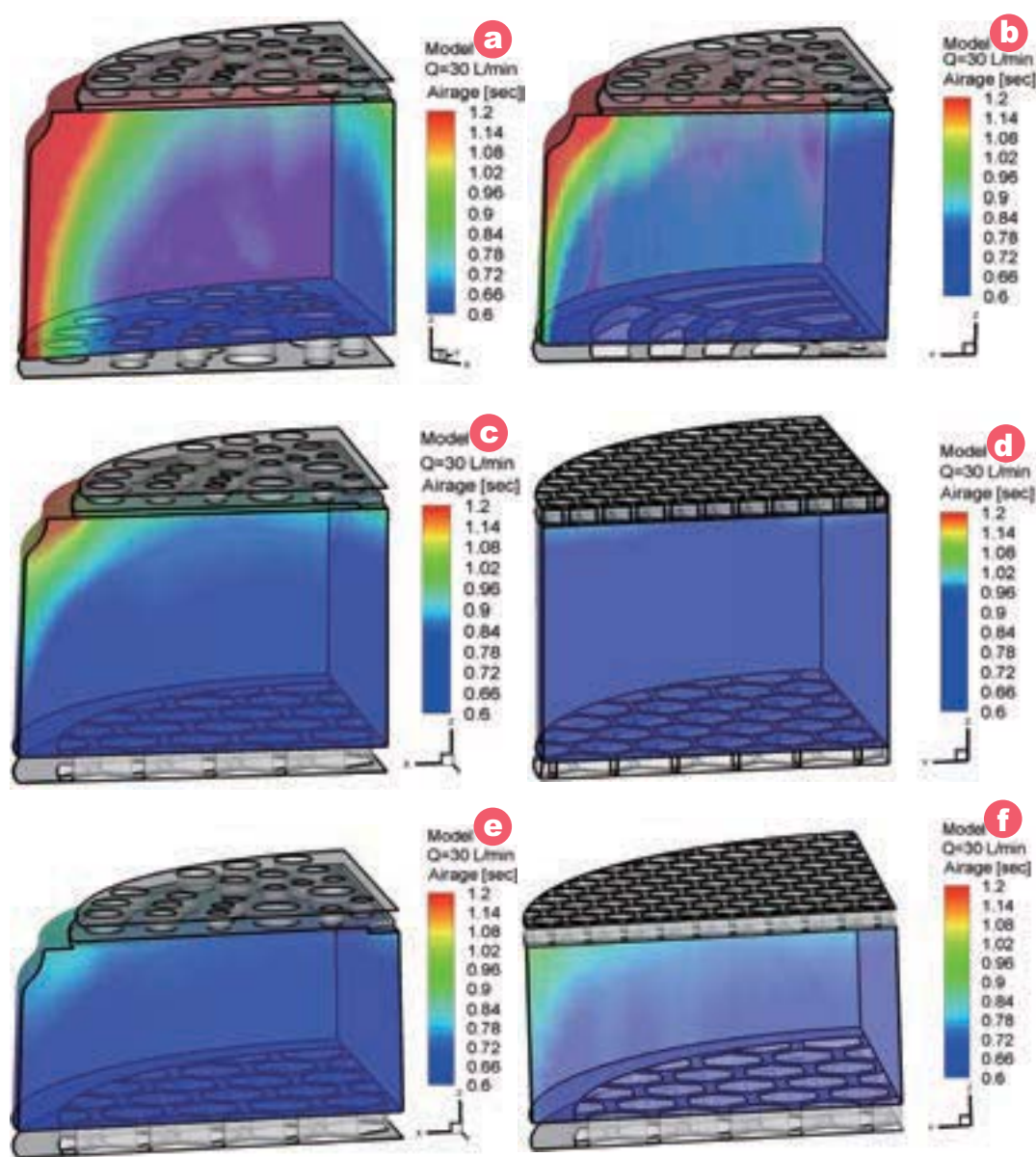
(資料來源：本研究提供)



主篩板的四周邊距較寬，該處的流速較慢，使入口速度的分布沒有Model D入口的速度分布均勻。

圖八表示6種模型吸附層出口的空氣年齡圖，Model A的氣動力設計缺點，明顯的呈

現出來，局部的順流造成出口空氣年齡最快約0.67秒，表毒氣將最先由此突破，死區的空氣年齡則高達1.6~1.8秒，則表示毒氣很難流經此處，造成吸附劑浪費。僅修改肋條型主篩板與蜂巢型主篩板的Model B和Model



圖七 各模型在進氣流量30L/min的等空氣年齡圖

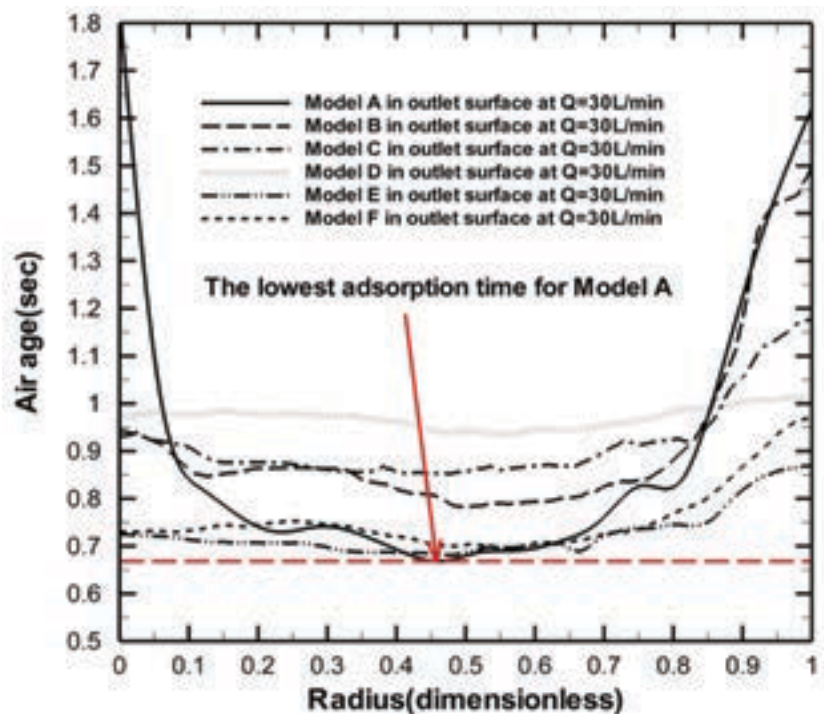
(資料來源：本研究提供)



C，其出口空氣年齡分布已較Model A均勻，出口最快空氣年齡約達0.8秒和0.9秒。改變主、次篩板及出口外型的Model D，其出口最快空氣年齡達1.0秒以上，且分布更均勻幾乎無明顯的起伏，其實際的毒氣突破時間將高於Model A。前述分析顯示，減少吸附層厚度雖可降低壓阻，減少罐體重量與節省吸附層原料，但其有效流經面積會減少。然而最重要的是，必須有足夠之吸附時間通過毒氣突破實驗，分析Model E和Model F出口的空气年齡分布，其出口最快空氣年齡分別為0.68及0.7秒均仍高於Model A的0.67秒，代表雖然吸附層厚度雖減少，但良好的通道氣動力設計，其吸附時間仍能達到Model A的測試標準。

四、進氣壓阻分析

表三為常用濾毒罐測試條件30L/min及85L/min，Model A~Model F的壓阻與阻抗值。比較Model A和Model C，主篩板分別為圓孔及蜂巢形，Model C蜂巢型主篩板的通道面積約Model A的3.53倍，在2種進氣量條件，Model C的壓阻較Model A分別減少25.18%、28.60%，顯示僅將主篩板由圓孔型改為蜂巢型即大幅降低了罐體壓阻，驗證主篩板的通



圖八 各模型吸附層出口的空气年齡圖

(資料來源：本研究提供)

道設計為影響罐體壓阻的主因。Model D為一理想的無邊距的設計，當工業封裝技術更進步，邊距可調整的更短來增加通道面積以降低壓阻，同時次篩板亦改為蜂巢型，並修改近出口處外型使流動不受阻礙，結果其整體壓阻較Model A於30L/min及85L/min條件下，分別減少了30.36%、34.98%。吸附層厚度不同，其內部通道形態相同的Model C和E，於85L/min條件下，其整體壓阻分別為470.13Pa及381.15Pa，Model E較Model C減少18.93%，原因為吸附層厚度減少而降低壓阻。當減少吸附層厚度1/3，於85L/min，Model E和Model F較Model A分別減少42.12%及46.48%的壓



表三 有效流經面積比

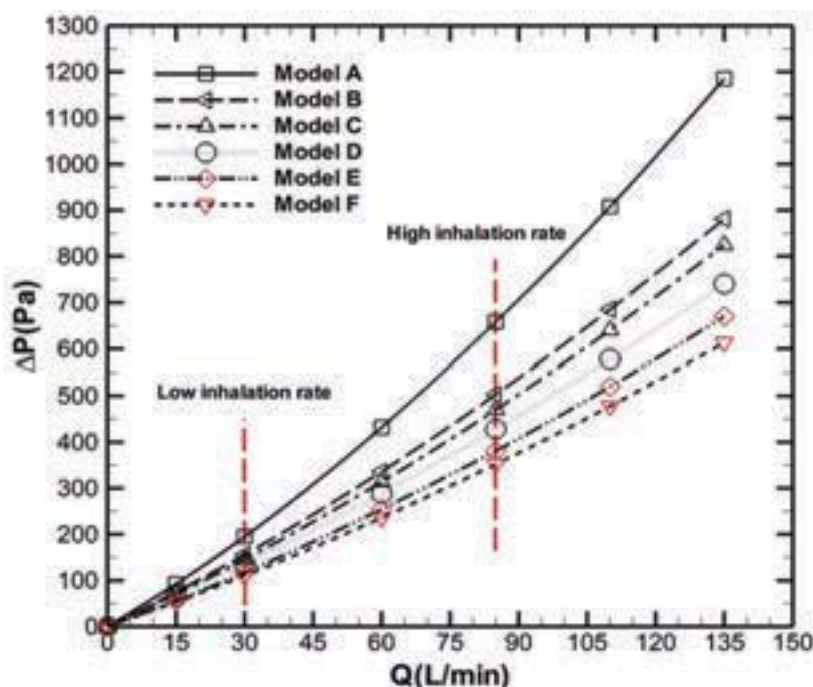
區分	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E	Model F
ΔP (Pa, 30Lmin ⁻¹)	194.92	155.87	145.84	135.74	117.38	110.69
R (Pa min L ⁻¹ , 30Lmin ⁻¹)	6.50	5.19	4.86	4.52	3.91	3.69
與Model A壓阻比較 (%)		-20.03	-25.18	-30.36	-39.78	-43.21
ΔP (Pa, 85Lmin ⁻¹)	658.48	503.03	470.13	428.17	381.15	352.45
R (Pa min L ⁻¹ , 85Lmin ⁻¹)	7.75	5.92	5.53	5.04	4.48	4.15
與Model A壓阻比較 (%)		-23.60	-28.60	-34.98	-42.12	-46.48

資料來源：本研究整理

阻。分析次篩板與修改罐體外型的氣動力效應，Model E和Model F具相同的蜂巢型主篩板及吸附層厚度，Model F的次篩板改為蜂巢及罐體出口不內縮，在85L/min的模擬結果，Model E和Model F的壓阻分別為381.15Pa及352.45Pa，Model F較Model E減少7.53%。綜合上述分析，主篩板的蜂巢通道設計為影響罐體壓阻的主因，具整流增加通道面積的優點，可達28.6%的整體壓阻。次篩板及罐體構型的局部修正，其效應使壓阻再降低數個百分比。比較Model A~Model F的整體壓阻與阻抗R如圖九和圖十，在進氣15L/min~135L/min條件，5種模型的 ΔP -Q曲線均呈現了2次效應，R-Q曲線則呈現線性。

愈高流量Model A壓阻與其餘模型的差異愈顯著，相同吸附層厚度的Model A~Model D的

ΔP -Q曲線其斜率愈高者呈現濾毒罐的氣動力較差有較大的壓阻，四者以Model D有最好的氣動力設計，同厚度的Model E和Model F則以Model F較佳。故濾毒罐良好的氣動力設計，應在高流量下降低吸附層的慣性效應，可判斷的指標包括壓阻、阻抗與Re'的降低。

圖九 各模型 ΔP -Q關係

(資料來源：本研究提供)



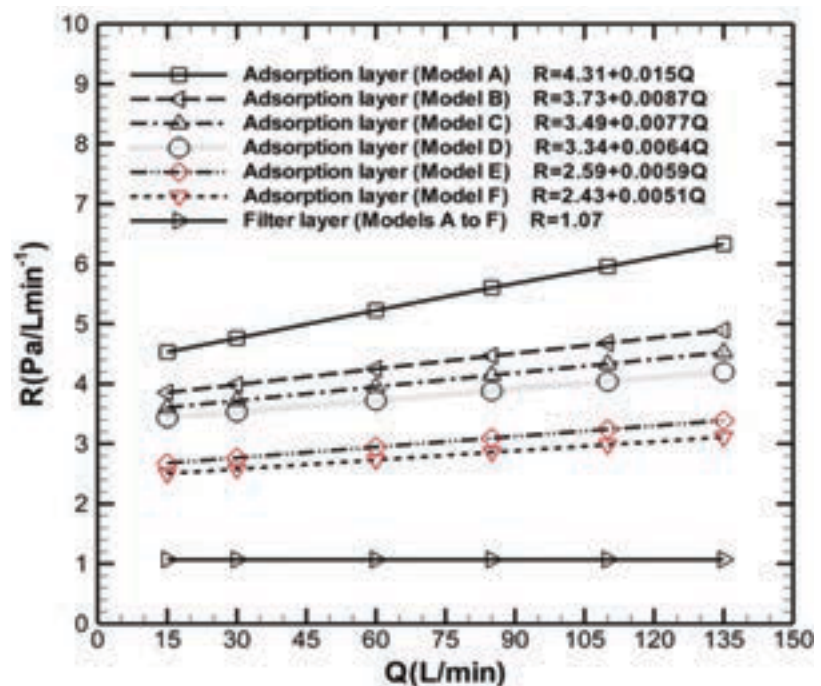
改變主、次篩板為蜂巢通道型態，確實大幅降低罐體壓阻，另Model E和Model F將吸附層厚度亦再降低罐體壓阻，但須考量能否維持原有的吸附時間，通過毒氣的突破實驗，將在後續討論。

五、蜂巢型主篩板流場可視化與空罐模擬

運用煙線流體可視化，分析蜂巢型主篩板的空罐流場特性。在進氣量30L/min的條件下，透明蜂巢型主篩板模型（Model C）如圖十一（a），顯示蜂巢型的通道較原圓孔型的通道，有更均勻的流場分布及較小迴流區域，實際用於具高動量損耗的吸附層，可減少順流與死區的產生，空罐體的可視化與數值模擬均呈現幾乎相同的結果，如圖十一（b）~圖十一（e）。Model C的蜂巢型主篩板，因避免吸附層顆粒掉落，在四周留有較寬的邊框，實驗中亦發現流體較難流經此處，吸附層材料將不易被使用而形成死區，若能提升封裝技術減少邊框寬度可實際減少死區，增加流體流經面積。

六、主篩板的壓載測試

蜂巢六角形結構的特點以很少的材料構成很大的空間，各方受力大小均等並容易將受力分散。利用此結構原理，在同樣受力的條



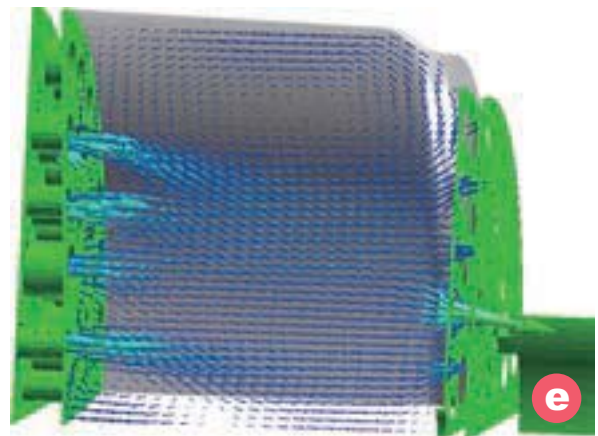
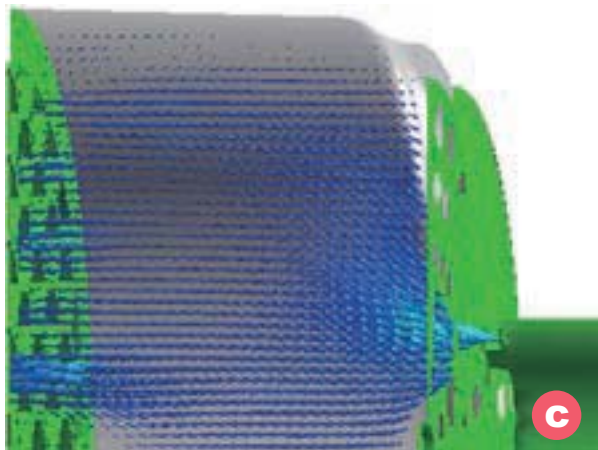
圖十 各模型R-Q關係

（資料來源：本研究提供）

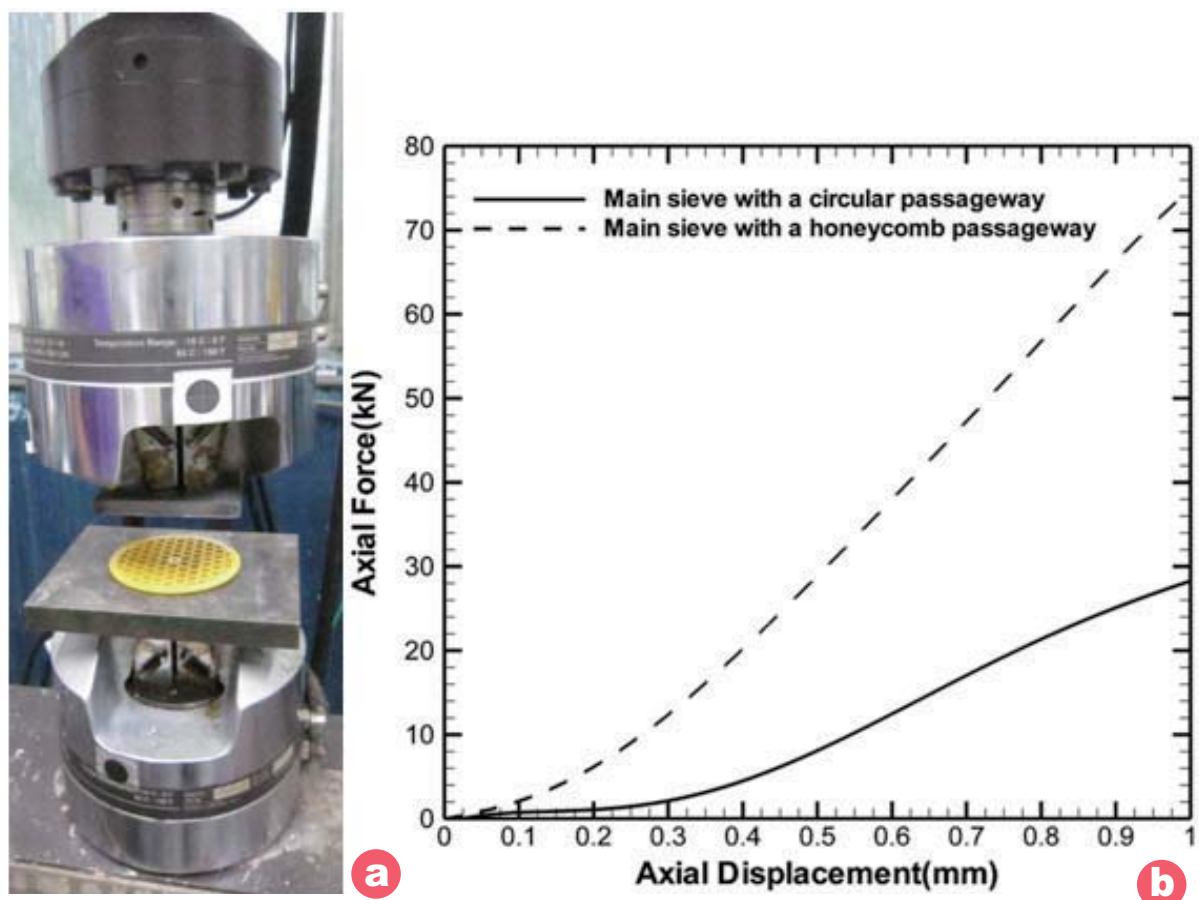
件下，可使構件的重量大大減少。本節將對原圓孔型和蜂巢型通道主篩板進行壓載測試。圓孔型與蜂巢型主篩板材質皆為尼龍，兩種主篩板以MTS 810材料試驗機進行壓載測試，如圖十二（a），當主篩板受力產生軸向變形位移達1mm變形即為失效。圖十二（b）顯示圓孔型主篩板可承載負荷約28.28kN，而蜂巢型主篩板承載負荷可達74.77kN為原主篩板的2.64倍，驗證蜂巢型主篩板的設計除較大的通道面積之優點外，在結構方面亦具備節省材料承載性較強的優點。

七、氣膠微粒過濾與毒氣突破實驗

濾毒罐的氣動力設計，除了降低壓阻之外，另一方面還是要符合過濾氣膠微粒過濾



圖十一 (a) Model C透明罐
(b) Model C流場可視化實驗
(c) Model C流場可視化模擬
(d) Model A流場可視化實驗
(e) Model A流場可視化模擬
(資料來源：同註11)



圖十二 (a) MTS 810材料試驗機 (b) 圓孔型主篩板與蜂巢型主篩板壓載實驗結果比較

(資料來源：本研究提供)

與毒氣突破的檢測標準。以NIOSH對CBRN濾毒罐的檢測標準，¹⁴須符合P100等級，也就是可過濾粒徑 $0.3\mu\text{m}$ 以上氣膠粒子，其穿透率須小於0.03%，過濾效率達99.97%。另突破實驗通常以測試氣體突破濃度達0.5%的耗時為突破時間。¹⁵

本節將以聚 α 烯烴 (Poly Alpha Olefin, PAO) 氣膠微粒過濾與氰化氫 (Hydrogen Cyanide, 化學式HCN) 氣體突破實驗來驗證，以蜂巢型主篩板通道設計的實體濾毒罐能否通過氣膠穿透與突破的性能測試。以原型 Model A及Model E來測試並相互比較。測試

14 Centers for Disease Control and Prevention, Standard Respirator Testing Procedures, Air-Purifying Respirators, Determination of Particulate Filter Penetration, <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/APrespCBRN.html>, 2014.

15 同註5，頁2。



表四 Model A與Model E氣膠微粒過濾實驗結果

區分	Model A1	Model A2	Model A3	Model E1	Model E2	Model E3
30 L/min	0	0	0	0	0	0
85 L/min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
PAO氣膠微粒過濾效率(%)						

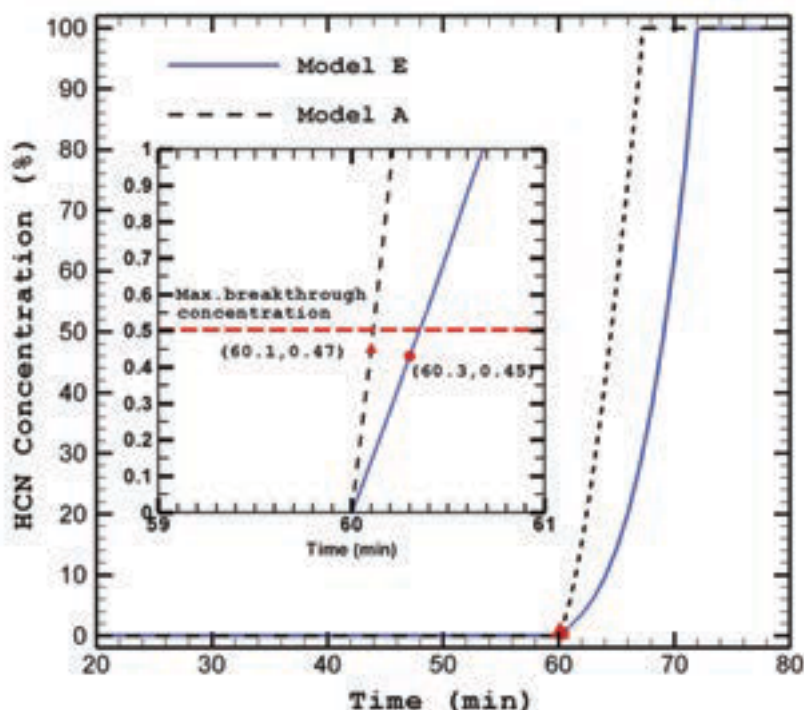
資料來源：本研究整理

減少吸附層厚度及蜂巢型主篩板通道設計的氣動力特性能否通過NIOSH測試標準。選擇Model E的原因為製作方便，不須額外花費製作新罐體外型，僅需改變罐體長度與主篩板進行封裝。只要驗證Model E的過濾性能符合標準，則氣動力特性更優越的Model D、F應也能通過相關測試。

在氣膠微粒過濾實驗，以粒徑 $0.2\mu\text{m}$ 的PAO為測試氣體，實驗設備為TSI 8127自動過濾器。進氣量30L/min下量測Model A、Model E各3個，其穿透率皆為0%；進氣量85L/min下，Model A、Model E的穿透率皆為0.001%，過濾效率均可達99.999%，屬於P100等級，符合過濾效率99.97%，達到HEPA等級的標準，量測結果如表四。

毒氣突破實驗為檢測CBRN濾毒罐性能的另一項重要指標，實驗設備為離子火焰偵測器。以火焰離子化測試法

執行，測試氣體為HCN，依測試標準在濃度940ppm的HCN氣體，其突破濃度為4.7ppm也就是0.5%濃度，測試時間以15分為一級距。分別測試Model A、Model E的突破時間，其突破時間分別約為60.1及60.3分鐘，均達到60分鐘級距符合測試標準，突破曲線圖如圖十三。



圖十三 Model A與Model E毒氣突破實驗結果比較

(資料來源：本研究提供)



比較Model A、Model E的突破曲線，Model A短時間內測試氣體濃度急速升高，Model E突破測試氣體濃度上升曲線相對較緩，原因為Model A主篩板通道設計易形成順流區的缺點有關，氣體易從此處突破。Model E蜂巢型主篩板的通道設計使氣體的流動分布較均勻，突破濃度曲線上升較緩。突破實驗的結果顯示二者的突破時間相近與圖八所顯示的二者空氣年齡結果具一致性。經氣膠穿透與突破實驗證明，罐體內部良好通道設計，其氣動力特性可降低壓阻外，節省吸附層原料仍可維持原有濾毒罐性能。

肆、結語

本文主要以計算流體力學、壓降量測與流體可視化對國造62A濾毒罐進行氣動力分析，後續驗證包括主篩板壓載、微粒過濾和毒氣突破。在不改變原多孔介質材料和維持原濾毒性能的條件下，達成降低濾毒罐吸氣壓阻與減重的目標。以上的分析方法及驗證程序可作為研改濾毒罐參考。

歸納研究結果，所獲得的結論如下：就Forchheimer方程式分析，降低進氣壓阻的關鍵在於要降低進入吸附層的平均速度 V_s （增加主篩板的通道面積）與縮短吸附層厚度 L ，但實際尚須考量主篩板強度及吸附層濾毒時間是否足夠。研究結果顯示，主篩板的通道型態為影響進氣壓降的主因，當主篩板的通

道型態決定，在多孔介質區的流體結構受其支配。蜂巢通道設計具通道面積大，分布均勻的優點，流場結構可避免形成順流、減少死區，同時降低吸附層的速度及增加吸附層流經面積（提升吸附劑使用率）。主篩板的壓載實驗證明了蜂巢通道較原來的圓孔通道，具備節省材料、受力平均且承載性較強的優點。

進氣量15~135L/min，表人體休息到激烈運動時的吸氣量，結果顯示良好的流道設計對吸附劑的使用率幾乎沒有影響。在進氣量85L/min條件，蜂巢通道設計，局部修改罐體外型及減少吸附劑填充量33%的Model F，其進氣壓阻約352.45Pa較原型的658.48Pa，降幅達46.48%。後續一系列的測試包括運用流體可視化實驗，證明蜂巢設計對流場結構的整流效果，並通過PAO氣膠微粒及HCN毒氣突破實驗維持原有性能。本文對現役濾毒罐研改，提供了一套可行的分析方法及程序，此模式優點為加工容易，節省原料成本，研究結果有效提升了濾毒罐性能。

作者簡介

蘇盈嘉中校，中正理工學院87年班，國防大學理工學院機械研究所98年班，現任職陸軍後勤訓練中心保修組主任教官。