

—蘇盈嘉—

不同進氣口設計對降低防毒面具 進氣壓降之研究

提要

- 一、本文運用數值模擬針對防毒面具以不同進氣口設計對降低進氣壓降之分析研究，可提供產研單位參考。
- 二、本研究毋須改變防毒面具濾毒罐內部的材料特性，僅以機械氣動力觀點設計，達到降低進氣壓降並維持濾毒罐防護性能的期望目標。
- 三、新的概念性設計之三道進氣口防毒面具設計對國造T3-75面具與美國新一代M50防護面具等進氣壓降作比較，分別降低67.4%與40.1%，未來可提供呼吸器的設計者和生產商參考運用。

關鍵詞：數值模擬、防毒面具濾毒罐、進氣口、進氣壓降、氣動力



壹、前言

防毒面具由面罩、口鼻罩與濾毒罐組成，其功能為防止污染物進入配戴者的呼吸系統，對於身處於受到威脅的環境或戰爭中的配戴者而言，防毒面具可保護個人的生命安全。2013年敘利亞化學武器襲擊事件期間，防毒面具供不應求，讓民眾重視到防毒面具的不可或缺性。

普遍而言，軍用防毒面具是全罩式兼淨氣式（負壓式），使得配戴者吸氣時，受汙染的空氣經由濾毒罐過濾層過濾微粒以及吸附層吸附毒氣後，空氣流入面罩，氣體流經口鼻罩上方的目鏡，此時氣體對於面罩內的氣體而言溫度相對低，此冷氣體可避免目鏡起霧，該氣體再經過口鼻罩的進氣單向閥進入口鼻罩內部的空腔，而進入配戴者的呼吸系統。配戴者吐氣時，呼出的空氣則直接從面罩的排氣單向閥直接流出。吸氣與吐氣過程中，由於面具與濾毒罐產生的氣體流速差

異而產生了進氣壓降與排氣壓降，而本研究主要探討進氣壓降，透過李峻溪的研究，¹ 主要是濾毒罐以及口鼻罩的進氣單向閥所造成的，尤其是濾毒罐的阻力最大，因濾毒罐內部兩大構造：過濾層與吸附層具有多孔介質特性，氣體在多孔介質材料的流動有大的動量損耗而造成高壓降。²

有關軍用化生放核（Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear, CBRN）濾毒罐的防護能力，以美國職業安全衛生研究所規範（National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH），過濾層須以至少99.97%的過濾效率，過濾粒徑0.3微米以上的氣膠粒子，達到高效率空氣微粒過濾等級（High-Efficiency Particulate Air, HEPA），³ 而吸附層加入活性碳以吸附毒氣，以達到毒氣破出時間的標準。另外濾毒罐的進氣壓降標準，在85 L/min進氣量，進氣壓降最大不超過50 mmH₂O (490.8 Pa)，防毒面具（含濾毒罐）則為65 mmH₂O (638 Pa)，⁴ 過濾層與吸

- 1 C. C. Li, Y. C. Su, and Y. C. Chang, "Dual Inlets Design of an Air Purifying Respirator to Study Inhalation Pressure Drop Reduction and Heart Rate Prediction," International Conference on Mechanical and Industrial Engineering, Malaysia, 2015.
- 2 Li, C. C., "Aerodynamic Behavior of a Gas Mask Canister Containing Two Porous Media," Chemical Engineering Science, Vol. 64 (2009), p. 1832-1843.
- 3 Centers for Disease Control and Prevention, Standard Respirator Testing Procedures, Air-Purifying Respirators with Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Protection, <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/APresp.html>, 2015.
- 4 Centers for Disease Control and Prevention, Standard Respirator Testing Procedures, Air-Purifying Respirators, <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/APrespCBRN.html>, 2015.

附層的防護CBRN性能愈好，相對所造成的進氣壓降就愈大。

而呼吸阻力影響人體有三方面：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。相關文獻^{5、6、7、8}更是指指出呼吸阻力會導致配戴者過度換氣而有呼吸困難的現象，會使心跳率或攝氧率增加，顯著降低配戴者的耐力和表現，尤其是激烈運動時，人員戴面具後，隨著活動量的加大，面具的呼吸阻抗相應增加，人員必須用力呼吸，產生的更大進氣流率與呼吸阻抗對人的生理影響更顯著。李峻溪以受測者實際配戴濾毒罐在不同運動功率下進行呼吸生理實驗，發現配戴防毒面具雖可保護配戴者的生命安全，但在高強度的運動下，高進氣壓降將對

配戴者的呼吸生理造成負擔，將使無氧呼吸提早產生。⁹ 無氧呼吸時血液中乳酸大量堆積，將使身體快速產生疲勞而影響配戴者的工作及安全。

美軍在阿富汗與伊拉克作戰，飽受炎熱沙漠氣候及核生化的威脅，原M40面具（如圖一[a]）已不符合實需（在流量30 L/min其進氣阻抗為120 Pa），¹⁰故以7年的時間花費數百萬美金由AVON公司研究美軍新一代的防護面具M50（如圖一[b]）。在休息狀態（流量30 L/min）的呼吸阻抗約M40的1/2，為我國軍現役防護面具的1/4。自2006年9月開始換裝之M50防毒面具已替代在美軍服役15年之久的M40面具，每年換裝十萬具，改善人員配戴的舒適性與執行任務的持續性，並匡列2007年

- 5 Lerman, Y., Shefer, A., Epstein, Y., and Keren, G., "External Inspiratory Resistance of Protective Respiratory Devices: Effects on Physical Performance and Respiratory Function," *Am J Ind Med*, Vol. 4 (1983), p. 733-740.
- 6 Louhevaara, V. A., "Physiological Effects Associated with the Use of Respiratory Protective Devices," *Scand J Work Environ Health*, Vol. 10 (1984), p. 275-281.
- 7 Zimmerman, N. J., Eberts, C., Salvendy, G., and McCabe, G., "Effects of Respirators on Performance of Physical, Psychomotor and Cognitive Tasks," *Ergonomics*, Vol. 34 (1991), p. 321-334.
- 8 Johnson, A. T., Scott, W. H., Lausted, C. G., Benjamin, M. B., Coyne, K. M., Sahata, M. S., and Johnson, M. M., "Effect of Respirator Inspiratory Resistance Level on Constant Load Treadmill Work Performance," *Am Ind Hyg Assoc J*, Vol. 60 (1999), p. 474-479.
- 9 C. C. Li, Y. C. Su, and Y. C. Tsai, "The Respiratory Physiological Characteristics of Workers Using Respirators Mounted with Different Types of CBRN Canisters," *International Conference of Environmental and Occupational Health*, Malaysia, 2014.
- 10 王小東、王岩，〈新一代軍用防毒面具M50〉《中國個體防護裝備》（北京），2008年第2期，西元2008年4月，頁52-53。

至2013年共計289.5百萬美元預算支用，該面具研製測評期程規劃至2020年。¹¹

M50面具其特點為高性能的過濾材料和符合人因設計的淚滴構型濾毒罐，雙濾毒罐對稱結構設計與寬大單眼窗結構設計，其中雙濾毒罐結合了人因、戰術、對稱重量均衡、荷重低、成本低，呼吸壓阻低以及高度鎖定機制等綜合考量，該濾毒罐與面罩的結合座亦突破以往濾毒罐所遵循的北大西洋公約組織(North Atlantic Treaty Organization, NATO)40 mm標準，使濾毒罐並非以往之螺紋構型。濾毒罐符合CBRN濾毒規範，使作戰人員配戴時，低呼吸壓降影響生理負荷低，

進而作業效率高。

Avon官方網站公布M50面具(含濾毒罐)呼吸壓阻性能，以進氣量30 L/min的基準下測量，進氣壓阻只有98.1 Pa，¹³美軍在戰場上若配戴此款面具與敵人作戰，則可預計在長時間的配戴，對配戴者的生理影響應有改善，可提升軍人的戰鬥能力。

馮冬云等人¹⁴介紹國內外防毒面具綜述中，發現各國新一代軍用防護面具款式，英國S10面具亦為面罩配置濾毒罐單一入口之設計(如圖二[a])，為解決進氣壓降問題，於西元2000年開始研發GSR (General Service Respirator) 面具(圖二[b])，為面罩臉頰處兩



圖一 構型(a) 美軍M40防護面具¹²



(b) 美軍M50防護面具 (資料來源：同註11)

11 M50面具預算，<http://www.dtic.mil/ndia/2007jointcbcdip/Briefs/GroundEnsemble>，檢索日期：西元2016年4月13日。

12 美軍M40面具，<http://www.jesseshunting.com/gas-masks-respirators-scbas-and-escape-hoods>，檢索日期：西元2016年4月13日。

13 M50面具呼吸壓阻，<http://www.avon-protection.com/Military/m50.htm>，檢索日期：西元2016年4月13日。

14 馮冬云、王勇，〈國內外防毒面具的應用現狀與綜述〉《安防科技》(河北)，2012年第3期，西元2012年3月，頁30-35。



圖二 (a) 英軍S10防護面具¹⁵



(b) 英軍GSR防護面具¹⁶

側配置濾毒罐之雙進氣入口設計，以取代原S10面具，並將S10面具汰除。

我國現役T3-75防毒面具與62A濾毒罐（如圖三[a]、[d]），其構型與美軍M40面具與英軍S10面具雷同，皆為面罩配置濾毒罐單一入口之設計，國軍兵工廠陸續於92年研發

T3-92面具及94年研發T3-94面具如（圖三[b]、[c]），T3-92面具改善了原T3-75面具因濾毒罐的位置固定而影響部分官兵射擊不便性之缺點，T3-92面具的濾毒罐可調整方向。而T3-94面具改善了T3-92面具原雙眼窗設計，T3-94面具具有更寬廣的視野角度，但兩者迄今



圖三 (a) 國造T3-75防毒面具 (b) 國造T3-92防毒面具 (c) 國造T3-94防毒面具 (d) 國造62A濾毒罐

（資料來源：本研究提供）

15 英國S10面具，<http://omegasurvivalguide.blogspot.tw/2012/08/tools-gas-mask.html>，檢索日期：西元2016年4月13日。

16 英國GSR面具，<http://www.naval-systems-tech.com/suppliers.htm>，檢索日期：西元2016年4月13日。

仍尚未取代T3-75面具完成換裝，除使用效益待評估外，國軍希望在有限的研發經費內，研發生產國軍新一代防護面具。

基於此，本文嘗試改良乙款現役的軍用防毒面具，雖然濾毒罐的防護性能與進氣壓降皆符合NIOSH規範，期望再精進改良，在維持防護性能的條件下，發展設計進氣壓降更低的防毒面具，為本文的研究目的。本研究目標首要改善由過濾層、吸附層及口鼻罩的進氣單向閥等所造成的高進氣壓降，須從濾毒罐與面具內部流道等標的物設計探討。

濾毒罐的設計要點在於降低進氣壓降並且能維持其防護能力，兩者有相互限制關係。李峻溪以流體力學分析濾毒罐內流場氣動力行為，將過濾層與吸附層視為巨觀、均值且等向的多孔介質區，¹⁷從Forchheimer方程式做研究分析。¹⁸

$$-\frac{\Delta P}{L} = \alpha \mu V_s + \beta \rho V_s^2 \quad (1)$$

在方程式(1)， μ 為流體黏性係數， ρ 是流體密度，依據Forchheimer方程式分析，影響多孔介質壓降 ΔP 的整體因素，包括本身材質特性所造成的參數：黏性項係數 α 、慣性項係

數 β 、流動方向長度 L 與進入多孔介質區的平均速度 V_s 。

而工業用過濾器，在多孔性材質特性已固定下，探討的焦點在於操作條件與構型改變對產品整體壓降的影響，而不是注重多孔介質內部微結構的探討。如Subrenat¹⁹曾對多摺數構型的過濾器進行實驗、數值計算等研究探討，重點在於操作條件及摺數效應對壓降的影響。

參考M50面具設計，乃採淚滴形構型的濾毒罐。面罩結合雙罐濾毒罐，其雙進氣口設計是以進氣流量減半，進氣壓降可減少50%以上的概念而設計。M50面具在進氣流量85 L/min時，進氣壓降約307.7 Pa，低於NIOSH標準的51.8%。

有關吸附層吸附毒氣時間多寡的分析，李峻溪運用了空氣年齡指標代表氣體在濾毒罐內部的居留時間，藉以判斷毒氣吸附時間，作為分析濾毒能力的指標，其優點為不用去求解複雜的暫態吸附模式，將可節省大量的數值計算時間。²⁰

面具內部流道改良的設計要點著重在口鼻罩的進氣單向閥，探討其功能，當配戴者吐氣時，進氣單向閥關閉以避免吐氣氣流回

17 同註2，頁1。

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

19 Subrenat, A., Bellettre, J., and Cloirec, P. L., "3-D Numerical Simulations of Flow in a Cylindrical Pleated Filter Packed with Activated Carbon Cloth," *Chemical Engineering Science*, Vol. 58 (2003), p. 4965-4973.

20 同註17。

流至目鏡而造成起霧，當配戴者吸氣時，口鼻罩的進氣單向閥才開啟，而配戴者為了克服進氣單向閥而產生了進氣阻抗，若將進氣單向閥移除，就沒有進氣阻抗的負荷，但須要設計其它的構造以避免氣流回流至目鏡而造成起霧。

Hsiao²¹運用了計算流體力學建構研究模型並計算模擬，此方法可快速評估模型是否滿足初始設計。計算流體力學使用了數值方法和演算法來解決空氣流體的問題，毋須透過實驗以計算出空氣流體在各種條件下的氣動力行為，有益於輔助設計運算。

美軍實驗方面，Lamar Garrett等人²²提出M50呼吸防護具，於進氣流量85 L/min時單一濾毒罐進氣阻力為30 mmH₂O (294.3 Pa)，較前一代M40面具於進氣流量85 L/min時進氣阻力50 mmH₂O (490.5 Pa)減少進氣阻力

40%。

中國大陸實驗方面，韓卓珍等人²³以MFT-2呼吸防護具為基礎下，改良為單一大視窗並將面罩下方雙側改良為雙進氣入口，實驗數據顯示雙濾毒罐進氣阻力較單一濾毒罐進氣阻力減少50%。

於數值模擬方面，李坤燃²⁴利用電腦輔助設計、分析及實體模型實驗來改善現有呼吸過濾器之缺點，尋求具有呼吸通暢性和充分過濾功能之呼吸過濾器。以Pro/Engineer軟體做呼吸過濾的外型設計，其結構資料產生NC碼來製作實驗用的實體模型，並利用Gambit做網格切割，輸入Fluent軟體進行空氣流場模擬。張靜等人²⁵運用計算流體力學分析與參數化設計方法，用UG二次開發工具構建參數化的呼吸防護面具罩體幾何模型，實現面具罩體最佳化設計的目的。

- 21 Hao-Ming Hsiao, Yi-Hsiang Chiu, Kuang-Huei Lee, Chien-Han Lin., "Computational modeling of effects of intravascular stent design on key mechanical and hemodynamic behavior," Computer-Aided Design, Vol. 44 (2012), p. 757-765.
- 22 Garrett, L., Harper, W. H., Ortega, S.V., and White, T. L., "Joint Service General Purpose Mask (JSGPM) Human Systems Integration (HSI) Evaluation: Comfort and Vision Correction Insert Stability Evaluation," Report (ARL-TR-3900, 2006), p. 1-76.
- 23 韓卓珍、叢繼信、郭振聲，〈液體推進劑雙罐大眼窗防護面具之研製〉《醫療衛生裝備》（天津），第31卷第1期，西元2010年1月，頁53-54。
- 24 李坤燃，〈呼吸過濾器的空氣流場分析〉（林口：長庚大學機械工程研究所碩士班，西元2002年）。
- 25 張靜、余世浩，〈基於 CFD 分析的呼吸防護面具罩體設計〉《中國個體防護裝備》（北京），2011年第2期，西元2011年4月，頁14-16。
- 26 下一世代的核生化防護面具發展，Scheurer, W., "Design and Development of New Advanced US Government Military Masks and Filters," PPT, AVON Protection, 檢索日期：西元2016年4月13日。

2004年VOJIR²⁶在下一世代的核生化防護面具發展，說明以往的防護面具因缺乏舒適性，適應不良而大大降低其功效，為確保防護面具的主要功能及保護佩戴者使用的舒適性並減少感官退化及增加通信能力，該文提出二個防護面具設計重要的設計參數。1.勒沙特列原理(Le Chatelier's principle)，其內容為當一個處在平衡的系統受到外力干擾時，例如：濃度、溫度、壓力等，則平衡會朝向抵消此破壞因素的方向移動，而達成新的平衡，可以藉此預測出平衡的移動情形。主要是應用在防護面具排氣閥的設計。在呼氣時面罩內的空氣壓力較高，氣體流至壓力較低的排氣閥區域，閥的膜片受壓力而瞬間變形，讓氣體流出直到面罩內外壓力平衡而閥門關閉，若閥片材質太過剛性或壓力造成開合疲乏，將會造成外界毒氣流入。2.吸氣流量與死區：在不同運動條件，不同吸氣量進入濾毒罐所產生的

阻抗造成使用者的呼吸生理受影響，而最重要是減少面具內死區空間的增加，死區意指面具內部吐氣未完全排出所佔據的體積，當CO₂氣體濃度愈高，人體氧氣不足將產生頭昏，嚴重者會引起相關併發症。死區空間與面具的口鼻罩的設計有關，口鼻罩可減少面具內的死區，使氣體可容易到達肺部，此外口鼻罩可防止濕氣進入眼窗而影響視野。

基於上述的論點，本文期望在不改變過濾層與吸附層的材料特性(多孔性介質係數)之條件下，發展設計進氣壓降更低的防毒面

具。本文的研究過程，由於防毒面具構型較複雜，為節省實體製造成本，首先運用Solidworks軟體建構三款研究模型，以計算流體力學建構面罩與濾毒罐組合的網格系統，並執行運算分析。

在濾毒罐設計方面，由多孔介質方程式分析，進氣壓降與過濾層及吸附層兩者的厚度與進氣通道截面積大小有關，且增加了第二、三罐濾毒罐構型設計探討。

在面具設計方面，觀察美軍M50面具，已將面具內的口鼻罩進氣閥門移除(如圖四)，使配戴者吸氣時，氣流只會經過面具進氣閥門，



圖四 M50面具之口鼻罩設計

(資料來源：本研究提供)

減少了小開孔面積的口鼻罩進氣閥門之高進氣壓降。故本研究仿M50設計而改良面具內部流道設計，移除口鼻罩單向閥並於口鼻罩頂端處開立一孔洞的進氣流道，設計該孔洞面積等同於M50孔洞面積，約為 342 mm^2 ；另為避免氣體回流而增設了氣流隔板。用數值模擬三種構型的內部流場並分析氣動力行為，期望指標設定為防護性能須維持過濾與吸附時間標準，且進氣壓降低於M50面具的25%。

貳、研究內容

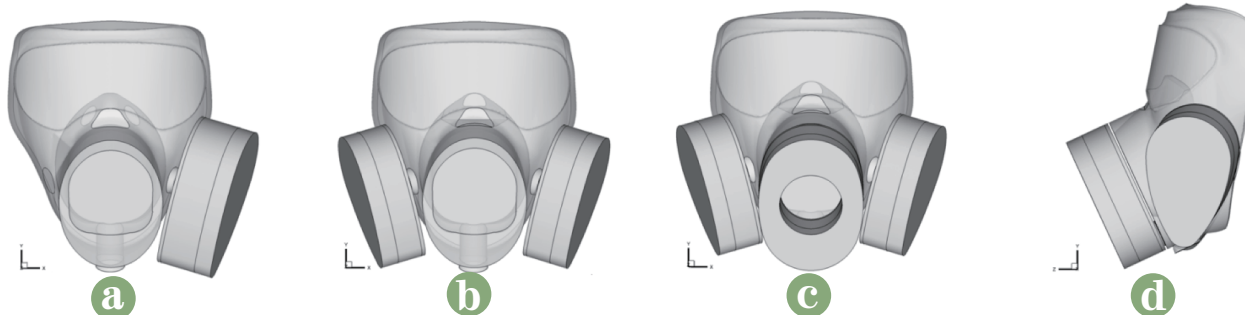
一、模型設計分析

為有利於研究之不同進氣口之設計因子分析，將國造T3-75防毒面具設計為單罐濾毒罐配置在防毒面具臉頰處（3D模型如圖五[a] Model A），後續運用數值模擬分析Model A進氣壓降值，與原T3-75防毒面具配置單罐62A濾毒罐之實驗進氣壓降值比較，差異僅約3%，說明了本研究以Model A代表國造T3-75防毒面具配置單罐62A濾毒罐之可行性。

62A濾毒罐是已符合過濾與吸附等試驗標準的產品。本研究另設計Model B與Model C（如圖五），期望目標為進氣壓降小於M50，並且濾毒罐吸附時間符合標準。

在濾毒罐設計部分，構型簡化區分過濾層、吸附層、流道等三區域。過濾層、吸附層是造成濾毒罐進氣壓降的主因。為降低濾毒罐的進氣壓降，依方程式（1），我們須考慮過濾層與吸附層的厚度、進氣通道截面積及多孔性介質係數。本研究須設定二個固定條件，第一個條件是過濾層的厚度不變，以利Model B與Model C皆符合過濾標準。第二個條件是過濾層與吸附層的材料、裝填密度不變，即多孔性介質係數不變。

雙罐濾毒罐設計，若配置Model A濾毒罐則太大又太厚，故濾毒罐必須縮小。以方程式（1）分析，進氣流量減半，其進氣壓降可降低至一半以下，那濾毒罐進氣通道截面積可以縮為原來的0.5倍。一旦流通面積變小，進氣速度變快壓阻又變大，但厚度變小，依方程式（1）進氣壓降同時會變小，須考慮吸附毒氣的時間是否足夠？故本研究雙罐濾毒



圖五 構型(a) Model A (b) Model B (c) Model C (前視圖) (d) Model C (左視圖)

（資料來源：本研究提供）

罐Model B，保守設計其進氣通道截面積與吸附層厚度各別減少為Model A的0.81倍與0.7倍。若Model B性能符合期望目標時，本研究建議增加第三個濾毒罐配置於面具上，即Model C，一般而言，揚聲器設計配置在防毒面具前方，為避免妨礙揚聲器聲波傳遞，第三個濾毒罐採甜甜圈構型，三款構型的過濾層與吸附層厚度比各為1:1:1與1:0.7:0.7，面積比皆為1:0.81:0.81，各模型設計說明如表一。而三款構型的濾毒罐整體重量比為1:1.1:1.7。

在防毒面具設計部分，Model B與Model C的設計皆移除了原Model A的口鼻罩閥門，以減少閥門的壓降，並同時於口鼻罩頂端處開立一大孔洞面積的進氣流道，且增設隔板以避免氣體回流至面具的目鏡而造成起霧。

二、進氣壓降量測

本文運用AMCA (Air Movement and

Control Association) 風洞量測Model A的進氣壓降，該AMCA風洞由國內瑞領科技有限公司產製，其規格流量範圍約5.7 L/min至509.6 L/min，以全自動化電腦控制與資料擷取，進而分析進氣壓降與流量的關係。對於淨氣式防毒面具而言，進氣流量變化範圍在15 L/min至135 L/min，²⁷相當於人體休息至劇烈運動時的進氣量。

三、隔點設計

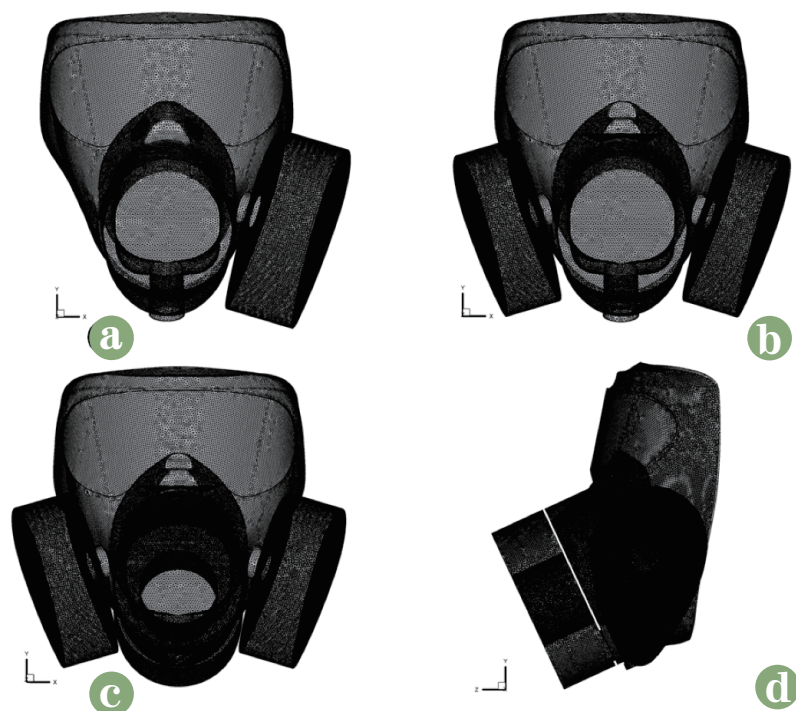
考量到數值模擬的計算效率，將濾毒罐內部過濾層 (36摺不織布組成) 與吸附層 (活性碳顆粒組成) 各別簡化成單一的多孔介質區，濾毒罐計算域區分三區塊，面具計算域採全區域製作。另考量整體結構的複雜性，為求格點能適型，以非結構、四面體網格產生格點，格點數量約為506萬至612萬個 (網格系統圖如圖六)。

表一 構型設計說明

區分			Model A	Model B	Model C
面具口鼻罩	閥門		有	無	無
	隔板		無	有	有
濾毒罐	過濾層	厚度 (m)	0.015	0.015	0.015
			1:1:1		
		面積 (m ²)	8.33*10 ⁻³	6.74*10 ⁻³	6.74*10 ⁻³
			1 : 0.81 : 0.81		
	吸附層	厚度 (m)	0.015	0.0105	0.0105
			1 : 0.7 : 0.7		
		面積 (m ²)	8.33*10 ⁻³	6.74*10 ⁻³	6.74*10 ⁻³
			1 : 0.81 : 0.81		

資料來源：本研究整理

27 同註19。



圖六 格點系統 (a) Model A (b) Model B
(c) Model C (前視圖) (d) Model C (左視圖)

(資料來源：本研究提供)

在方程式(2)、(3)中，其中 ρ 是流體密度， μ_i 表 i 方向的速度分量。動量方程式(3)是暫態流場，雷諾平均三維Navier-Stoke方程式， p 為壓力， τ_{ij} 表黏性剪應力張量， g_i 為重力加速度項。重力方向與入口垂直。假如流體並非層流時，包氏假說證實 $\overline{\rho u'_i u'_j}$ ，即代表所謂的雷諾應力項與平均流速有關。 S_i 是源項，描述多孔性介質區中所產生的壓力梯度，如方程式(2)且具有等向性。入口雷諾數的範圍從950~8,100，故採低雷諾數修正的紊流模式，工作氣體是空氣，氣體密度為 1.225 kg m^{-3} 且黏滯係數為 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

四、統御方程式²⁸

本文中所採用的統御方程式皆遵守連續及動量守恆方程式。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + S_i \quad (3)$$

空氣年齡方程式為方程式(4)，其中， τ 為空氣年齡，指局部平均居留時間； μ_{eff} / σ_x 為紊流模式實際上的擴散； $\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t$ （ μ_{eff} 為有效黏度， μ_l 為分子黏度， μ_t 為紊流黏度）且 $\sigma_\tau = 1$ 為Schmidt Number。²⁹

28 F. Wang and X. F. Wang, "The effect and adaptation of filtering respirators for physiological function," Journal of PLA Institute of Physical Education, Vol. 22 (2003), p. 76-78.

29 同註17。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \tau) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\tau} \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \right) + \rho \quad (4)$$

五、數值方法與邊界條件

本研究運用軟體FLUENT 12.1.2為數值求解器，以網格中心的有限體積法為離散法則，就統御方程積分式在四面體非結構的計算域網格進行離散處理。其中對流項的離散以一階上風法處理、時間項以一階全隱式法、擴散項則以中央差分法予以離散。³⁰壓力-速度耦合的計算則利用SIMPLE法則處理，相關離散的代數方程式則利用TDMA的方法求解，各案例計算的殘值收斂均達到 1×10^{-3} 以下。

防毒面具與濾毒罐：以穩態流場模擬時，入口邊界設定為質量流率的入口條件，出口邊界條件為壓力流出條件，各固體壁面為速度無滑移條件，環境溫度為攝氏25度，壓力為一大氣壓。面具於閥門區域、濾毒罐之過濾層與吸附層區域皆設定為多孔性介質區，給予壓降量測實驗所得之多孔介質參數設定為邊界條件，以進行後續的數值模擬計算。

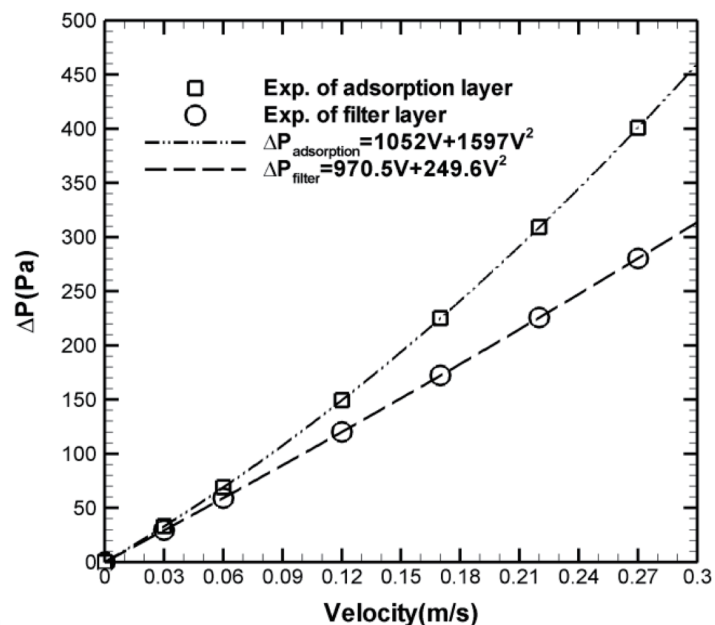
參、研究與討論

一、決定濾毒罐的多孔介質參數

Model A之濾毒罐進氣壓降，乃為濾毒罐內部的過濾層與吸附層之多孔介質特性所引起，多孔介質特性為壓力-表面速度之2次方程式。³¹

$$\Delta p = a_1 V_s + a_2 V_s^2 \quad (5)$$

其中， a_1 是黏性項係數， a_2 是慣性項係數。 V_s 為進入多孔介質區的平均速度，以不同的進氣流量以量測進氣壓降。除此之外，運用曲線擬合，以求得實驗後的過濾層與吸附層之進氣壓降與速度關係式（如圖七）顯示，方程式分別如下。



圖七 Model A濾毒罐過濾層與吸附層之實驗值與曲線擬合

（資料來源：本研究提供）

30 Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, (New York: Academic, 1979).

31 同註2，頁2。

$$\Delta p_{filter} = 970.5V + 249.6V^2 \quad (6)$$

$$\Delta p_{adsorption} = 1052V + 1597V^2 \quad (7)$$

$$\nabla p = \frac{\mu}{\alpha} V + C\left(\frac{1}{2}\rho V|V|\right) \quad (8)$$

導入多孔介質方程式(8)可知，

$$\frac{1}{\alpha_{filter}} = 3.6158 \times 10^9 m^{-2},$$

$$C_{filter} = 2.7171 \times 10^4 m^{-1},$$

$$\frac{1}{\alpha_{adsorption}} = 1.8854 \times 10^9 m^{-2},$$

$$C_{adsorption} = 8.3601 \times 10^4 m^{-1}$$

最後將二層的多孔介質係數代入整體模型模擬，其計算結果與實驗比較，有相當好的近似，顯示過濾層與吸附層的多孔介質係數已正確的被找到(如圖八)。

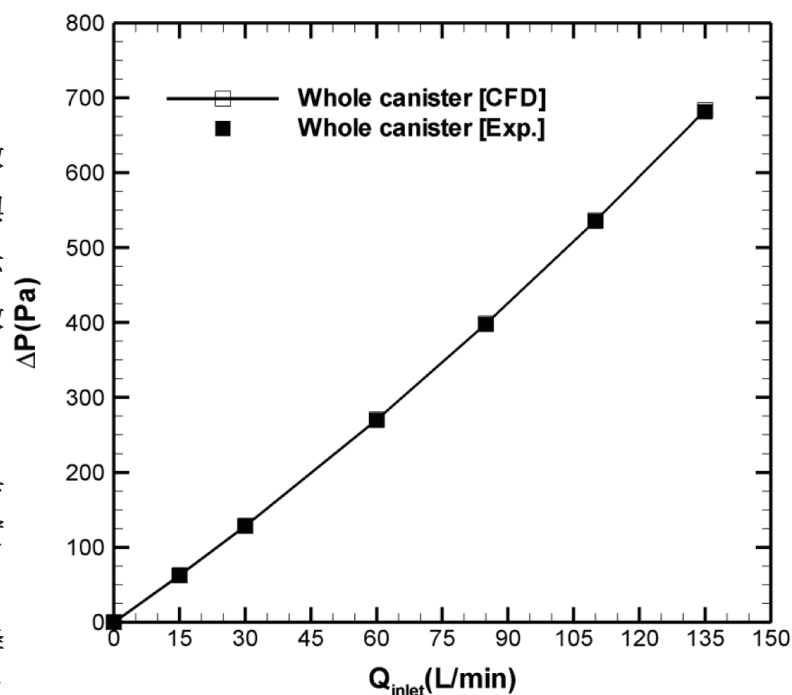
二、進氣壓降分析

圖九顯示Model A與M50面具在0 L/min至135 L/min條件下，實驗與數值模擬進氣壓降的結果，Model A實驗與數值模擬進氣壓降的最大差異僅3%，這顯示了進氣壓降的模擬值相當接近實驗值，同

時驗證了網格系統建立、數值方法與邊界條件設定的可行性。

於流量85 L/min時，Model A的進氣壓降約565.1 Pa，沒超過NIOSH對於CBRN面具配置濾毒罐638 Pa標準，Model B的進氣壓降約260.3 Pa，分別低於Model A (565.1 Pa) 與M50面具 (307.7 Pa) 約53.9%與15.4%。結果顯示，雙進氣口與移除單向進氣閥等設計顯著降低面具整體進氣壓降。

而於流量85 L/min時，Model C的進氣壓降約184.3 Pa，分別低於Model A與M50面具約67.4%與40.1%。更是低於NIOSH標準的71.1%。由於Model C的濾毒罐重量是Model A的1.7倍，基於重量負荷考量，建議第三罐的



圖八 Model A濾毒罐之實驗值與模擬值結果

(資料來源：本研究提供)

濾毒罐平時為備用，若配戴者需長時間工作或處於CBRN環境時，使用第三罐濾毒罐將大幅降低進氣壓降，可使配戴者呼吸更舒適且降低生理影響。

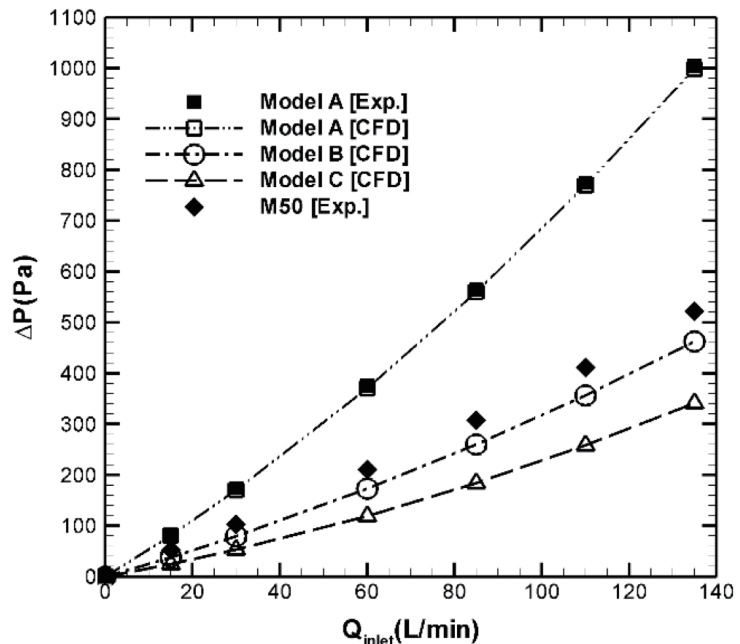
圖十顯示各模型在30 L/min條件下的進氣壓降分布圖，三個濾毒罐設計的Model C壓降顯著最低，且口鼻罩單向閥的移除也可以有效降低壓降。然而口鼻罩單向閥移除後，必須於氣流通道處增加隔板設計以避免目鏡起霧。

三、速度分布與向量

圖十一顯示三種模型的速度分布與向量，提供了流體方向的資訊。本研究不考慮吐氣過程，故進氣時，空氣流量依序從濾毒罐進入面罩，中途經過口鼻罩單向閥（Model A）或口鼻罩進氣孔（Model B和Model C）進入口鼻罩內，最後從面罩排氣口排出。Model B和Model C的隔板處明顯發現，氣流不會因為隔板而造成回流與滯留。

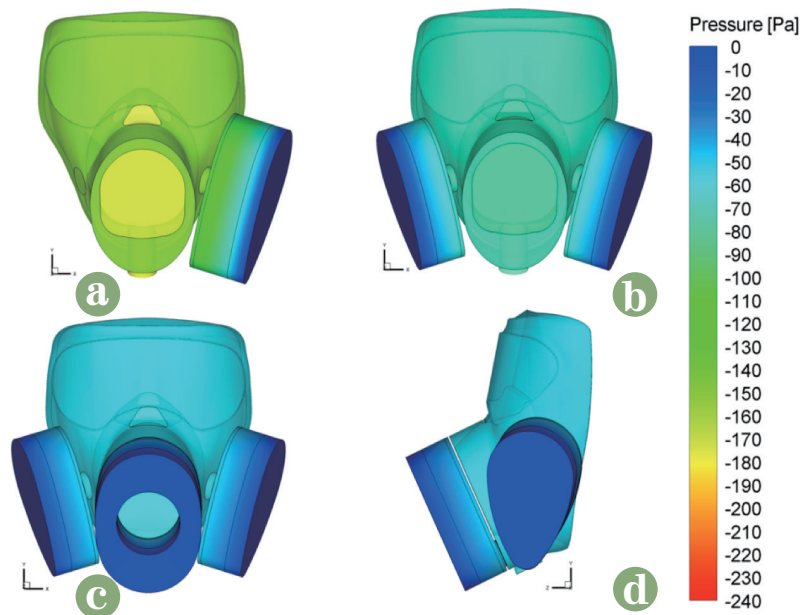
四、空氣年齡分析

圖十二顯示各模型濾毒罐在30 L/min條件下的空氣年齡分布圖。空氣年齡以氣體在吸附層停留的時間代表吸附



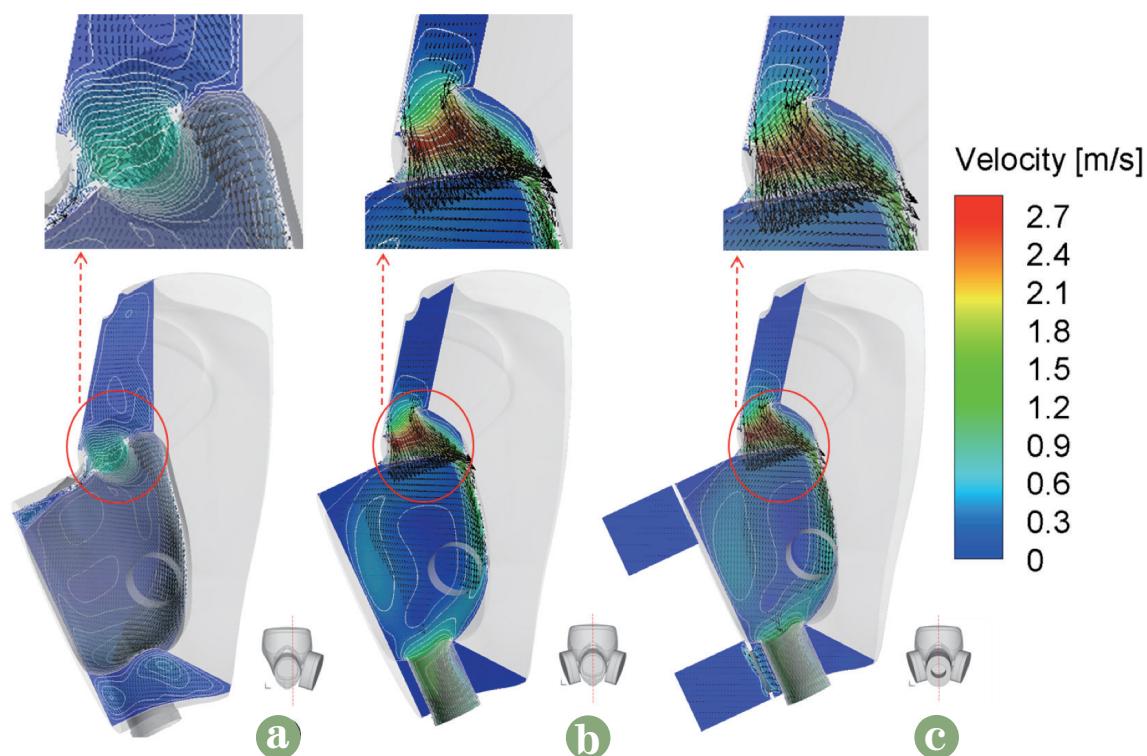
圖九 各模型的進氣壓降與流量關係

（資料來源：本研究提供）



圖十 在流量30 L/min時的進氣壓降分布圖 (a) Model A (b) Model B (c) Model C (前視圖) (d) Model C (左視圖)

（資料來源：本研究提供）

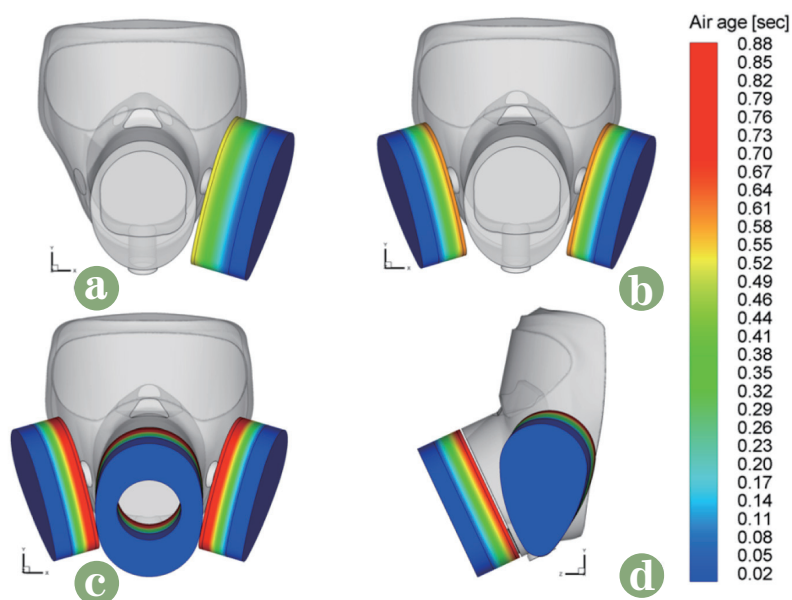


圖十一 在流量30 L/min時的速度分布與向量圖 (a) Model A (b) Model B (c) Model C (左視圖)

(資料來源：本研究提供)

時間的指標，故濾毒罐過濾層空氣年齡值為零。相較各模型，相同進氣流率條件下，Model C的吸附層區具有高空氣年齡值，顯示三進氣口設計的Model C顯著增加空氣年齡值。

圖十三顯示各模型在30 L/min條件下，吸附層出口面的空氣年齡值分布圖，Models A-C的空氣年齡分布有部分區段呈現較低值，原因是受到氣體流入面具的入口面影



圖十二 在流量30 L/min時的空氣年齡圖 (a) Model A (b) Model B (c) Model C (前視圖) (d) Model C (左視圖)

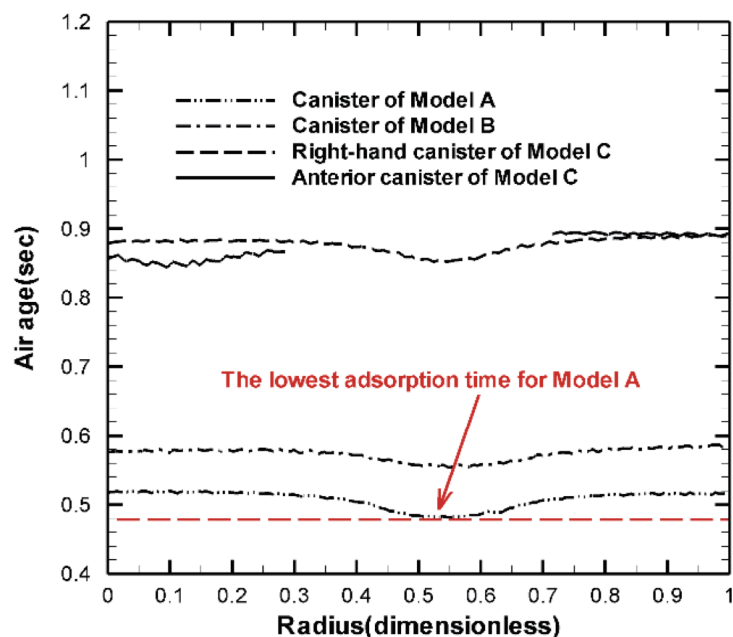
(資料來源：本研究提供)

響導致，而Model C前端濾毒罐設計屬中間鏤空，故造成空氣年齡分布斷層。Models A-C的平均空氣年齡值約0.5、0.57、0.88秒。Model A是已經通過毒氣突破實驗的產品，故空氣年齡大於0.5秒相對的代表該濾毒罐吸附層亦可達到毒氣突破實驗標準，本研究Model B和Model C的設計，其濾毒罐吸附時間都符合其標準。

肆、結語

本研究呈現乙款具有降低進氣壓降性能且符合毒氣吸附時間之三道進氣口設計的防毒面具，以Model A為基礎改良為三進氣口的Model C沒有單向進氣閥，數值模擬比較進氣壓降結果，在85 L/min條件下，Model C (184.3 Pa) 分別67.4%與40.1%低於Model A (565.1 Pa) 與M50面具 (307.7 Pa)，另Model C的平均空氣年齡 (0.88 s, 30 L/min) 是高於Model A (0.5 s, 30 L/min) 約76%，顯示濾毒罐吸附層維持原該有的防護功能。

根據上述結果，初步設計面具採三進氣口及移除單向進氣閥等構型，顯著降低面具的進氣壓降，且口鼻罩內部隔板設計不會造成氣體回流與滯留，可改善原國造T3-75面具與62A濾毒罐高進氣壓降的缺點，對於配戴



圖十三 流量30 L/min各模型吸附層出口面空氣年齡值分布圖

(資料來源：本研究提供)

者而言，可降低生理負荷且具安全防護性能，進而提高配戴者戰鬥能力。

本研究的三罐構型的防毒面具設計具有創新性，目前尚未發現各國有三罐構型的防毒面具，此新的概念性設計可以提供呼吸器的設計師和生產商參考運用。

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，現任職陸軍航空基地勤務廠航補庫庫長。