

國立交通大學
環境工程研究所
碩士論文

個人奈米採樣器的設計及驗證

**Design and validation of a personal nanoparticle
sampler**

研究生:洪紹銘

指導教授:蔡春進 博士

中華民國一百年一月

個人奈米採樣器的設計及驗證

Design and validation of a personal nanoparticle sampler

研究生：洪紹銘

Student : Shao-Ming Hung

指導教授：蔡春進

Advisor : Chuen-Jinn Tsai

國立交通大學

環境工程研究所



Submitted to Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Environmental Engineering

2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年壹月

摘要

奈米物質具有獨特的物化特性而被廣泛的應用在不同領域，其產量持續地成長當中，人們也因此開始關注暴露在奈米微粒中對健康所造成的潛在影響。由於奈米物質具有粒徑小和表面積大的特性，許多研究均顯示奈米物質相較於相同化學成分的塊材物質對生物有較大的影響。2005 年 NIOSH 建議勞工在每日工作 8 小時、一週工作 40 小時的情況下，TiO₂ 細微粒及超細微粒的暴露時量平均濃度應分別小於 1.5 mg/m³ 和 0.1 mg/m³。然而目前市面上尚未有合適的採樣器可供個人奈米微粒的暴露評估。因此本研究主要目的為研發了一組可用於作業場所採集奈米微粒的個人採樣器。

本採樣器(IOSH-NCTU PNS)重 250 g、高 105 cm、直徑 6.3 cm，包含一個旋風器和一個微孔衝擊器，分別用來分離可呼吸性微粒(respirable particulate matter, RPM)及奈米微粒(NPs)，且在 2.0 L/min 的操作流量下，產生的壓損為 125 cm H₂O。此微孔衝擊器(含 137 個直徑 55 μm 噴嘴)具有一個可旋轉且塗敷矽油的鋁箔衝擊基質的衝擊板，使微粒可均勻分布在衝擊基質上並降低微粒彈跳的發生。最後在衝擊器下方設置有一片用來採集奈米微粒的終端濾紙。

本研究先於實驗室利用液體和固體微粒進行本採樣器的微粒收集效率曲線校正，再進行微粒負載測試，之後與微孔均勻沉積衝擊器(MOUDI) 進行實驗室內比對以驗證本採樣器校正曲線的準確性。

校正結果顯示當 S/W 為 13.8，旋風器和微孔衝擊器的截取氣動直徑分別為 3.98±0.1 μm 和 101.4±0.1 nm。而 S/W 由 3.13 增加至 16.2，微孔衝擊器的截取直徑會由 72.5 nm 上升至 111 nm。由微粒負荷測試結果可知，本採樣器在高微粒濃度負荷下壓損幾乎不會改變且微粒最大負荷量為 0.65 mg。此外實驗室比對測試的結果顯示本採樣器採集到的 RPM 及 NPs 濃度和 MOUDI 均十分接近。因此，本研究設計的採樣器已可用於評估作業人員 RPM 及 NPs 的暴露量。

關鍵詞：奈米微粒、個人奈米採樣器、可呼吸性旋風器、多微孔衝擊器

Abstract

Production of nano-materials has increased continuously because of their unique physicochemical characteristics and extensive applications. There is a great concern for the potential health effects due to exposure to nanoparticles. Because of small size and large surface area, many studies have shown that the biological effects of nano-materials are greater than bulk materials of the same chemical composition. In 2005, the NIOSH recommended the exposure limits of 1.5 mg/m^3 for fine TiO_2 and 0.1 mg/m^3 for ultrafine TiO_2 , in terms of time-weighted average concentrations (TWA) for up to 8 hr/day during a 40-hour work. However, there are no active personal sampling devices to assess the exposure levels of workers to engineered nanoparticles (NPs).

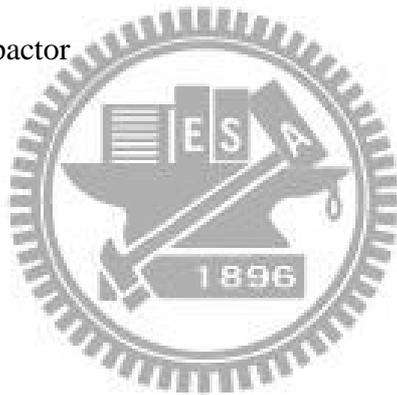
To meet the demand, a novel IOSH-NCTU personal nanoparticle sampler (IOSH-NCTU PNS) was designed and tested. The PNS operates at 2 L/min with a pressure drop of 125 cm H_2O by a SKC XR 5000 pump. The PNS consists of a respirable cyclone and a micro-orifice impactor (with 137, 55 μm in diameter nozzles) in series for classifying respirable particulate matter (RPM) and NPs, respectively. The impactor plate is rotated by a stepper motor to deposit particles uniformly on the substrate. A final filter is used to collect NPs. The sampler is light weighted (250 g) and compact (H-10.5 cm, D- 6.3 cm).

Both liquid and solid particles were used to calibrate the sampler for the collection efficiency. The effect of heavy particle mass loading on performance of the PNS was evaluated. For assessing its accuracy, the measured RPM and NPs concentrations by the PNS were compared with those of a collocated MOUDI.

Calibration results show that the cutoff aerodynamic diameter (dpa_{50}) of the respirable cyclone and the micro-orifice impactor is $3.98 \pm 0.1 \mu\text{m}$ and $101.4 \pm 0.1 \text{ nm}$,

respectively, with the S/W of 13.8. A decreasing S/W from 16.2 to 3.13 in the micro-orifice impactor results in a decreased dp_{a50} from 111 to 72.5 nm. The particle loading tests reveals that the PNS has a maximum loading of 0.65 mg with a less than 5 % shift of dp_{a50} and a negligible solid particle bounce. The change in the pressure drop was less than 5 cm H₂O after heavy particle loading, and the RPM and NPs concentrations agreed well with those of the MOUDI. Therefore, the present IOSH-NCTU PNS sampler is capable of assessing personal exposure levels of RPM and NPs in workplaces.

Key words : nanoparticles, personal nanoparticle sampler, respirable cyclone, micro-orifice impactor



致謝

喔耶!總算輪到我了。

兩年多的時光匆匆流過，感謝這段時間內，蔡老師對我的細心指導與教誨。

在研究過程中，不知經歷了多少挫折與失敗，但幸好有許多打球的好夥伴陪我一起渡過。包括男排的洸儀、Ian、展帆、京澄、信元；女排的靜宜學姐、小雞、大王、家馨、恰恰、雅茹；壘隊的傑哥、王董、彥禎學長、文彬學長、理安學長、亮毅、蝦味鮮、介華、小貓、小咖、排骨飯、庚轅、謝賽、sky、玉米頭和榮正壘球隊的各位。

此外感謝實驗室的士軒學長、正生學長、承翰師傅、冠宇、凱迪、苦哥、怡伶學姊、羅楚大大、政毓、宏達、周尤尤、俊男、天天、技恩弟弟、芸伊、栢森、毅弘、怡伶、能駿、盧緯、香菇、盈禎、能凱、穎慧、小貓、炯朝、豐琪、偉恩、秉才等陪我度過碩士班生活。

蕭先生、鄭老闆、蔡師傅、王廠長，謝謝您們幫我製作如此困難的研究設備。

最後感謝我的家人，有你們無私的支持，使我可以無後顧之憂的完成碩士學業。

特別感謝：傑哥、俊男、宏達、冠宇、政毓、炯朝、秉才、偉恩總在我研究不順時提供我最大的幫助。



目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
致謝.....	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
一、 背景分析	1
1.1 研究背景及重要性.....	1
1.2 可攜帶式奈米微粒監測器.....	3
1.3 微粒分徑採樣器.....	6
1.3.1 個人可呼吸性微粒採樣器	7
1.3.2 小型奈米微粒分徑採樣器	8
1.4 研究目的.....	19
二、 個人奈米採樣器	20
2.1 個人奈米採樣器的設計.....	20
2.2 微粒粒徑計算理論.....	24
2.3 旋風器相關理論.....	26
2.4 個人採樣幫浦.....	28
三、 實驗系統與方法	31
3.1 多微孔衝擊器微粒收集效率測試	31
3.2 可呼吸性旋風器收集效率的測試	33
3.3 多微孔衝擊器微粒負荷與壓損變化、微粒收集效率之關係	34
3.4 個人奈米採樣器與 MOUDI 的實驗室比對系統	36
3.5 品保品管(QA/QC).....	37

四、 實驗結果	40
4.1 多微孔衝擊器校正結果.....	40
4.2 可呼吸性旋風器的測試結果.....	42
4.3 多微孔衝擊器微粒負荷與壓損變化、微粒收集效率之關係	44
4.4 個人奈米採樣器與 MOUDI 比對結果	49
五、 結論.....	53
參考文獻.....	54
附錄.....	58



圖目錄

圖 1.1 懸浮微粒在人體呼吸道的沉積情形[7]。	1
圖 1.2 超細及細微 TiO ₂ 微粒的質量劑量與老鼠肺部洗滌液內之嗜中性白血球含量的關係曲線[5]。	2
圖 1.3 超細及細微 TiO ₂ 與 Al ₂ O ₃ 微粒造成老鼠肺部發炎情形[8]。	3
圖 1.4 奈米微粒表面積監測儀(TSI Model 3550, NSAM)。	5
圖 1.5 手提式 CPC(TSI Model 3007, CPC)。	5
圖 1.6 奈米氣膠採樣器 (資料來源： http://www.tsi.com)。	6
圖 1.7 奈米氣膠採樣器內部構造示意圖 (資料來源： http://www.tsi.com)。	6
圖 1.8 濾材的收集效率與微粒粒徑的關係[26]。	9
圖 1.9 奈米微粒分徑器的示意圖[26]。	9
圖 1.10 不鏽鋼纖維濾紙在不同的過濾速度下的收集效率曲線[26]。	10
圖 1.11 不同的過濾速度下，氣流通過不鏽鋼纖維濾材時所產生的壓損[26]。	11
圖 1.12 超細微粒的個人分徑採樣器[27]。	12
圖 1.13 奈米採樣器的真實圖片(左)和示意圖(右)[28]。	12
圖 1.14 奈米採樣器的設計參數[28]。	13
圖 1.15 奈米採樣器各階衝擊器的微粒收集效率曲線[28]。	13
圖 1.16 PCIS 的圖片[29]。	14
圖 1.17 PCIS 所使用的個人攜帶型幫浦[29]。	15
圖 1.18 截取氣動直徑 0.25 μm 階層的微粒負荷量與收集效率的關係[29]。	15
圖 1.19 截取氣動直徑 1.0 μm 階層的微粒負荷量與收集效率的關係[29]。	16
圖 1.20 熱泳沉降器設計圖[32]。	17
圖 1.21 利用 SMPS 及 TEM 影像分析法，分析眾數為 45 及 90nm 的多徑分佈微粒的結果[32]。	17
圖 1.22 TiO ₂ 微粒暴露評估準則[14]。	19
圖 2.1 個人奈米採樣器的(a)示意圖(b)實體圖。	21
圖 2.2 可呼吸性旋風器(a)示意圖(b)實體圖(c)分解圖。	21
圖 2.3 多微孔衝擊器(a)實體圖(b)分解圖((b1)多微孔噴嘴板基座、(b2)多微孔噴嘴焊接板(b3)鋁箔基質基座、(b4)馬達支撐座、(b5)步進馬達、(b6)採樣器底座)。	22
圖 2.4 濾紙匣。	22
圖 2.5 個人奈米採樣器實際配戴圖。	22
圖 2.6 旋風器示意圖與各符號代表意義[42]。	27
圖 2.7 本研究測試 XR-5000 幫浦所能承受的壓損之實驗架設圖。	29
圖 2.8 XR-5000 幫浦所能承受的壓損對應流量的關係。	30
圖 3.1 多微孔噴嘴板示意圖 (單位：mm)。	31
圖 3.2 多微孔衝擊器微粒收集效率測試系統。	33

圖 3.3 可呼吸性旋風器微粒收集效率測試系統。.....	34
圖 3.4 鋁製圓盤。.....	35
圖 3.5 以微小粉末分散器分散 TiO ₂ 粉體，再利用 MOUDI、APS 和 SMPS 測量 分散後粉體的重量濃度及微粒數目濃度分佈。.....	35
圖 3.6 多微孔衝擊器微粒負荷與壓損變化、微粒收集效率測試系統。.....	36
圖 3.7 個人奈米採樣器與 MOUDI 實驗室比對系統。.....	37
圖 4.1 多微孔衝擊器在不同 S/W 值之下的微粒收集效率曲線。.....	40
圖 4.2 多微孔衝擊器在不同 S/W 值之下，液體微粒收集效率和 \sqrt{Stk} 的關係。.....	41
圖 4.3 個人奈米採樣器壓損測試。.....	42
圖 4.4 可呼吸性旋風器壓損測試。.....	43
圖 4.5 可呼吸性旋風器微粒收集效率曲線(旋風器入口尺寸為 2.4 mm x 2.4 mm)。.....	43
圖 4.6 以 APS 和 SMPS 量測被 SSPD 分散的 TiO ₂ 粉體的粒徑分佈。.....	44
圖 4.7 以 MOUDI 量測被 SSPD 分散的 TiO ₂ 粉體的重量濃度分佈。.....	45
圖 4.8 以 SMPS 量測衝擊器微粒負載實驗時 TiO ₂ 微粒的粒徑分佈。.....	46
圖 4.9 經 nano-TiO ₂ 微粒負載測試後的採樣器的微粒收集效率測試結果。.....	47
圖 4.10 本採樣器微粒負載後微粒彈跳現象。.....	48
圖 4.11 本衝擊器 $\sqrt{St50}$ 與 Marple 比較[49]。.....	49
圖 4.12 本採樣器與 MOUDI 在實驗室比對採集奈米微粒的結果。.....	50
圖 4.13 本採樣器與 MOUDI 在實驗室採集可呼吸性微粒的結果。.....	50

表目錄

表 1.1 奈米微粒分徑器實驗參數[26]。	10
表 1.2 PCIS 的設計參數與操作參數[29]。	14
表 2.1 迷你型旋風器設計參數[44]。	28
表 4.1 經微粒負載後採樣器的實驗數據。	47
表 4.2 單位基質塗敷量下之微粒最大負荷量，和 MOUDI 之比較[48]。	48
表 4.3 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.01% OA, 採樣時間：120 min)。	51
.....	51
表 4.4 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.1% OA, 採樣時間：50 min)。	51
表 4.5 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(1% OA, 採樣時間：20 min)。	51
表 4.6 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.01% OA, 採樣時間：120 min)。	52
.....	52
表 4.7 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.1% OA, 採樣時間：50 min)。	52
表 4.8 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.5% OA, 採樣時間：20 min)。	52



一、背景分析

1.1 研究背景及重要性

奈米物質的廣泛定義係指一種合成物的三維空間中，至少有一維的長度介於1-100 nm。而隨著奈米技術的快速發展，商業化的奈米產品也愈來愈多。當奈米產品提供功能性的好處的同時，奈米產品在製造過程時奈米物質的逸散及使用時可能的釋出，是否會對人體造成傷害已逐漸被人們重視。

根據Royal Society & the Royal Academy的報告，奈米微粒可視為一種新的化學物質[1]，而當一種新物質被製造後，可透過該物質的特性及其進入生物體的途徑作為評估其危害性的方法。過去曾有研究指出奈米微粒可藉由生物體的吸入作用、皮膚和消化道進入其體內[2][3]。此外因奈米微粒與較大的懸浮微粒相比，具有較不易被肺部的巨噬細胞吞噬、表面積較大及反應性較強的特性，所以奈米微粒進入生物體內後更容易與肺部區上皮細胞相互作用而產生危害[4][5][6]。不僅如此，不同形狀及尺寸的奈米微粒在進入生物體後，也會在不同器官中沉積，進而引起呼吸道、心臟與血管系統、中樞神經和免疫系統的損害。圖1.1為被吸入的微粒在人體內的沉積情形，如圖所示，奈米微粒較容易到達肺泡區，當微粒粒徑在10至100 nm時，微粒在肺泡區的沉積效率最高[7]。

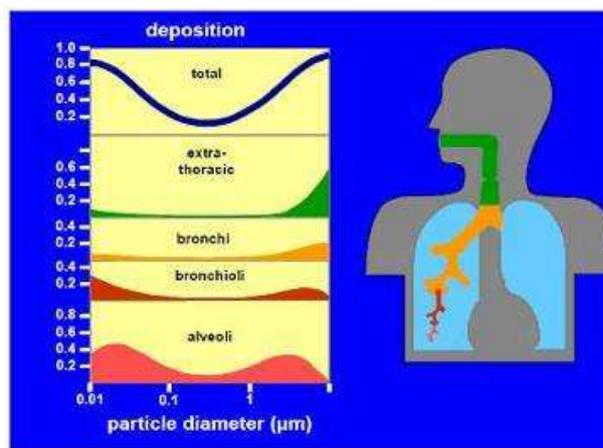


圖 1.1 懸浮微粒在人體呼吸道的沉積情形[7]。

過去學者曾將超細微粒 TiO_2 (20 nm) 及細微粒 TiO_2 (250 nm) 注入老鼠呼吸系統內，觀測老鼠肺部洗滌液中的嗜中性白血球 (neutrophils) 的含量[5]，結果如圖 1.2 所示。當注入相同質量的劑量時，老鼠肺部因超細 TiO_2 微粒(20 nm) 產生的嗜中性白血球含量較細 TiO_2 微粒(250 nm)多，顯示超細 TiO_2 微粒在老鼠肺部產生較嚴重的發炎反應。此外，老鼠所吸入的奈米微粒不僅會累積在其鼻腔、肺臟及大腦，亦會轉移到全身的循環系統，造成肺部發炎、肝臟病、心臟病、大腦的損害或是中樞神經系統組織損害[5]。另外曾有學者比較 TiO_2 和 Al_2O_3 的超細微粒及奈米微粒在老鼠肺部引起的發炎情形，結果如圖 1.3 所示[8]，粒徑 20 nm 的 TiO_2 微粒及 Al_2O_3 微粒較粒徑 250 nm 的相同微粒更為明顯。不僅如此，當老鼠暴露在這兩種超細微粒的時間越長，老鼠肺部的嗜中性白血球含量會逐漸降低，顯示對肺部的危害也較趨緩。另一方面，當暴露時間達 59 天時，老鼠肺部因 20nm 的 Al_2O_3 超細微粒引發的發炎情形較 TiO_2 超細微粒更明顯，表示不同種類的超細微粒在進入生物體後，產生的影響也有所不同。

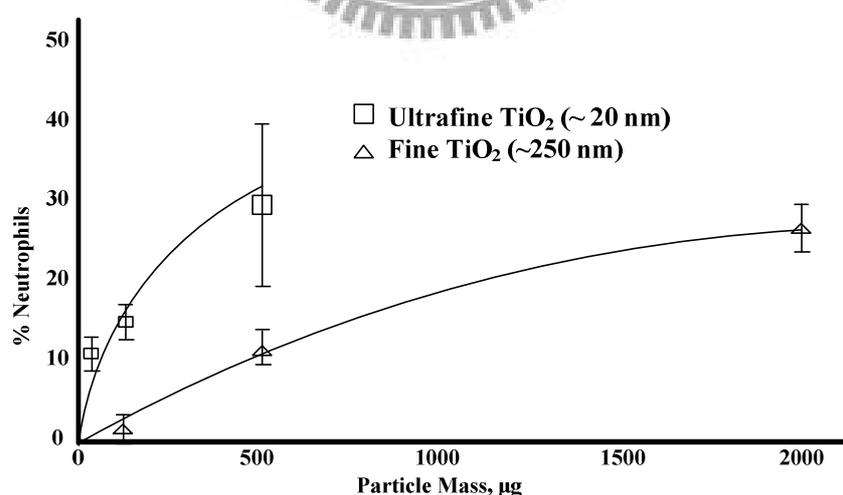


圖 1.2 超細及細微 TiO_2 微粒的質量劑量與老鼠肺部洗滌液內之嗜中性白血球含量的關係曲線[5]。

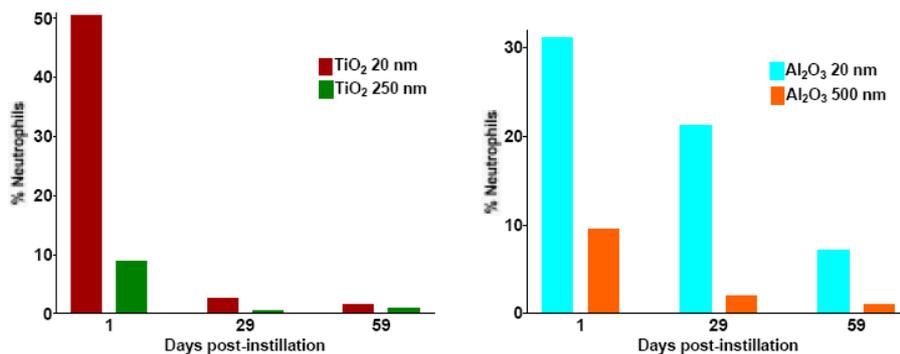


圖 1.3 超細及細微 TiO₂ 與 Al₂O₃ 微粒造成老鼠肺部發炎情形[8]。

近年來毒理學研究結果顯示，被吸入的奈米微粒可能由呼吸道轉移到血液及人體其他器官和神經系統[8][9]，此外有學者曾針對奈米微粒之劑量、毒性及流行病學的結果進行研究[7]，結果顯示奈米微粒的確會對人體造成影響。根據美、英及日等國的研究報告，奈米粉體製造作業場所的人員為最容易暴露奈米微粒的族群[10][11][12][13]。因此美國勞工安全衛生研究院(NIOSH)認為在現行細 TiO₂ 微粒暴露濃度限值(德國 MAK--1.5 mg/m³, DFG 2000)或總 TiO₂ 微粒暴露濃度限值下(OSHA--15 mg/m³, 29 CFR 1910.1000; ACGIH--10 mg/m³, ACGIH, 2001)，勞工仍可能因暴露過多的奈米 TiO₂ 微粒產生致癌問題，所以為確保勞工免於 TiO₂ 的暴露危害，NIOSH 於 2005 年 11 月針對 TiO₂ 發表了一份「現有知識佈告欄」(CIB, Current Intelligence Bulletin)的報告[14]，提出工作場所 TiO₂ 微粒的暴露建議值(REL, recommended exposure limit)，在考慮勞工每日工作 8 小時以內，一週工作 40 小時情形下建議 TiO₂ 的暴露時量平均濃度值(TWA, time-weighted average concentration)為 1.5 mg/m³，可呼吸性及奈米微粒為 0.1 mg/m³。在此限值下，NIOSH 計算出勞工終生的致癌機率將低於千分之一。

1.2 可攜帶式奈米微粒監測器

在相同質量下，因為奈米微粒的表面積遠比其同材料的大顆微粒大，易增加

與生物體接觸反應的機會，因此有學者指出以奈米微粒的表面積作為其毒性評估的指標較適合[4][8][15]，有鑑於此，準確的量測微粒的表面積濃度相當重要。目前市面上能夠有效監測奈米微粒的表面積濃度的儀器，主要為 TSI 公司所生產的奈米微粒表面積監測儀(Nanoparticle surface area monitor, NSAM, Model 3550)，如圖 1.4 所示，NSAM 雖然不是個人奈米採樣器，但因其體積不大(13.3cm x 38cm x 28cm)重量也只有 6.8 Kg，因此一般人可以藉由攜帶 NSAM 來進行個人暴露評估。

NSAM 可監測到沉積於肺泡區或胸腔區奈米微粒的表面積，其設計原理為先在儀器入口以旋風集塵器去除 1 微米以上的微粒，接著利用擴散充電的原理使微粒帶電，再利用電場使帶電的奈米微粒被收集到法拉第杯，並以靜電電流計測量電流，因電流計測得的帶電量與微粒表面積成正比，因此藉由電量數據可得微粒的表面積。雖然 NSAM 量測的數據可作為個人的奈米微粒暴露評估之用，但無法採集到微粒，因此無法對採集的樣本作後續的重量及化學成份分析。

此外 TSI 公司也研發了一款手提式核凝微粒計數器(Condensation Particle Counter, CPC, Model 3007, TSI Inc., MN, USA)，長 29.2 cm × 寬 14 cm × 高 14 cm，如圖 1.5 所示。此 CPC 重量只有 1.7kg，可供個人攜帶。CPC 的設計原理是將微粒與 37°C 的正丁醇飽和蒸汽混合後，再導入溫度為 10°C 的冷卻管內，使正丁醇蒸氣凝結在微粒表面使微粒成長，再利用光偵測器來測得微粒的數目濃度。同樣地，該儀器也只能作即時監測，無法採集可供重量分析的微粒樣本。

奈米氣膠採樣器(Nanometer Aerosol Sampler, NAS, Model 3089, MN, USA)是一部可收集帶電超細微粒的儀器，長 20.3cm × 寬 25.6 cm × 高 22.8 cm，重 3.75 kg，如圖 1.6 所示。該儀器收集微粒的原理與靜電集塵器相似。如圖 1.7 所示，是讓欲進入 NAS 的氣膠帶電，再經導管導入 NAS。而 NAS 的中央置有一圓型平板和一支方向與微粒流場垂直的電極。當微粒隨流場被帶到電極附近時，會因為電極產生的負電電場，使正電的微粒被吸引至電極，並隨著流場流至電極下方的基質上(基質直徑 3 mm、內含 200 個網格)，進而被收集，而收集微粒後的基

質可做為其他分析使用。

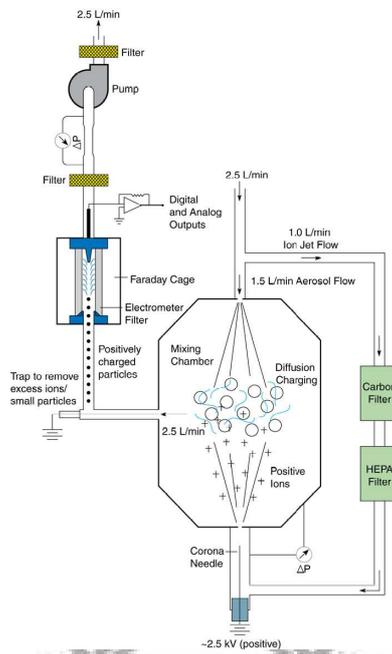


圖 1.4 奈米微粒表面積監測儀(TSI Model 3550, NSAM)。

(資料來源：<http://www.tsi.com/en-1033/models/13864/3007.aspx>)

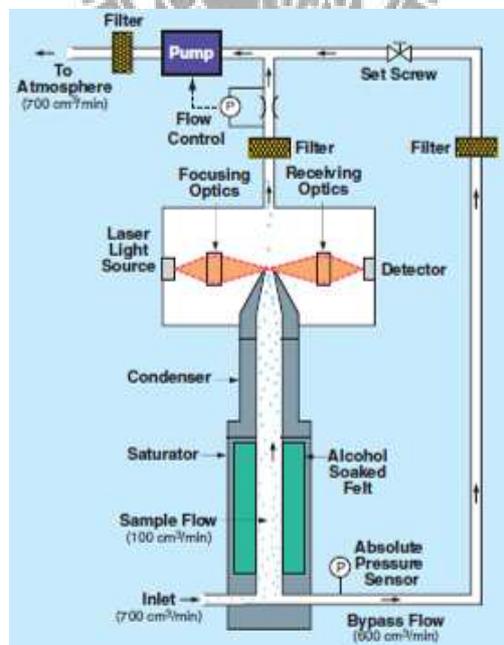


圖 1.5 手提式 CPC(TSI Model 3007, CPC)。

(資料來源：http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Spec_Sheets/3007_1930032.pdf)



圖 1.6 奈米氣膠採樣器 (資料來源：<http://www.tsi.com>)。

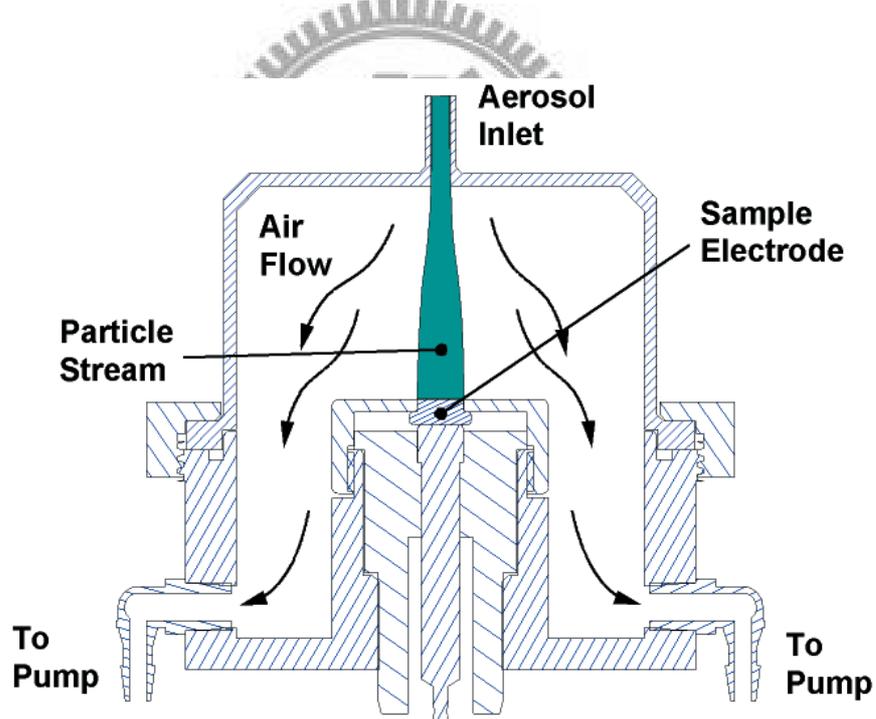


圖 1.7 奈米氣膠採樣器內部構造示意圖 (資料來源：<http://www.tsi.com>)。

1.3 微粒分徑採樣器

低壓衝擊器為一種在短時間內(1 秒)可解析奈米微粒分佈的採樣器[16]；而

在國內常被環工學者使用的微粒採樣器為微孔均勻附著衝擊器(Micro-orifice Uniform Deposit Impactor, MOUDI, Model 110, MSP Co)與 Nano-MOUDI(Nano Micro-orifice Uniform Deposit Impactor, Model 122, MSP Co)，MOUDI 採樣器在設計流量 30 L/min 的操作條件下可將懸浮微粒分徑為 18、10、5.6、3.2、1.8、1.0、0.56、0.32、0.18、0.10、0.056 及 $<0.056 \mu\text{m}$ (後端濾紙)；Nano-MOUDI 採樣器在設計流量 30 L/min，可將微粒再細分為 0.032、0.018、0.01 及 $<0.01 \mu\text{m}$ 。上述兩種採樣器均可以用於量測奈米微粒分佈，但因為體積太大，所以不適用於工作場所的個人採樣之用。

1.3.1 個人可呼吸性微粒採樣器

評估人體可呼吸性微粒暴露量的採樣器的收集效率規範包括有 ACGIH、ISO 及 CEN 等所訂的效率曲線[17]。為了準確收集可呼吸性粉塵，採樣器通常利用前置旋風器去除粒徑大於 $4 \mu\text{m}$ 的微粒，例如 10 mm 尼龍旋風器及新型 IOSH 旋風器[18]。新型 IOSH 旋風器係使用導電的鋁合金製作而成，並加大內徑尺寸及出口管長以降低微粒累積於內壁的厚度，進而減少微粒負荷對收集效率的影響。實驗結果顯示，新型 IOSH 旋風器的微粒收集效率幾已不受粉塵靜電之影響，而其截取氣動直徑因粉塵負荷所造成的變化遠較 10 mm 尼龍旋風器小。不僅如此，新型 IOSH 旋風器採樣流量在 1.7 L/min 時，其收集效率曲線能符合 ACGIH 規範。此外曾有學者利用海綿做為前置分徑器，進而設計出一個可呼吸性粉塵採樣器[19]。其實驗方法係利用不同的海綿表面風速、厚度、填充密度及孔隙度或是串聯不同厚度、孔隙度的海綿進行測試，實驗結果發現僅能達到國際定義曲線截取氣動直徑的要求，不過其斜率仍無法與 ACGIH 曲線一致。

至於工作場所可呼吸性粉塵的濃度也可利用多階慣性衝擊器量測，如 Marple 個人多階衝擊器[20]，在求取粉塵粒徑分佈後，利用採樣效率規範即可得可呼吸性粉塵的濃度。有關 Marple 個人多階衝擊器之各階收集效率與粒徑之關係，入口採樣效率、在衝擊板上塗油對固體微粒反彈程度之影響，及微粒在各階

的內壁損失等問題，均曾有學者利用實驗室產生單徑的聚苯乙烯乳膠(polystyrene latex, PSL)、油酸(oleic acid)及 ammonium fluorescein 等微粒來加以研究[20]。

在國內，多孔金屬片曾被採用做為慣性衝擊器的衝擊基質[21]，其研究結果顯示，以多孔金屬材質做為衝擊板時，由於金屬片的毛細作用可容納較多的微粒量，所以無微粒過負荷的問題。但因為氣流會貫穿進入多孔金屬材質內部，所以會造成微粒收集效率曲線和傳統理論預測的曲線不同[22]。

此外曾有學者探討以聚氨基甲酸酯(Polyurethane, PU)泡綿做為慣性衝擊器的收集基質時的微粒收集曲線特徵[23][24][25]。結果顯示，使用聚氨酯泡綿做為收集基質時會導致收集效率曲線明顯改變，而收集效率曲線的改變與 PUF 基質的密度、流體雷諾數、衝擊基質直徑和噴嘴至衝擊板(jet-to-plate)的距離等影響因子有關[23]，且傳統慣性衝擊器的設計理論會高估聚氨酯泡綿收集介質的截取氣動直徑。但使用聚氨基甲酸酯泡綿的好處在於可改善固體微粒在慣性衝擊器中的反彈及再揚起問題，同時具有較高的收集容量和不需塗敷衝擊板等優點。

1.3.2 小型奈米微粒分徑採樣器

為了能發展出奈米微粒的分徑採樣器，過去 Otani 等人提出一種新的構想：利用不銹鋼纖維濾材作為奈米微粒的分徑器[26]。典型的濾紙收集效率(Typical E curve)如圖 1.8 中的實線所示，隨著氣流通過濾材的速度上升，濾紙的慣性收集機制會更加顯著，而濾材因擴散收集的效率會降低，使得收集效率曲線會向左移動，如圖 1.8 中的虛線所示。若繼續增加通過濾材的速度時可以使濾材的收集效率曲線成為微粒分徑器的理想收集效率曲線。

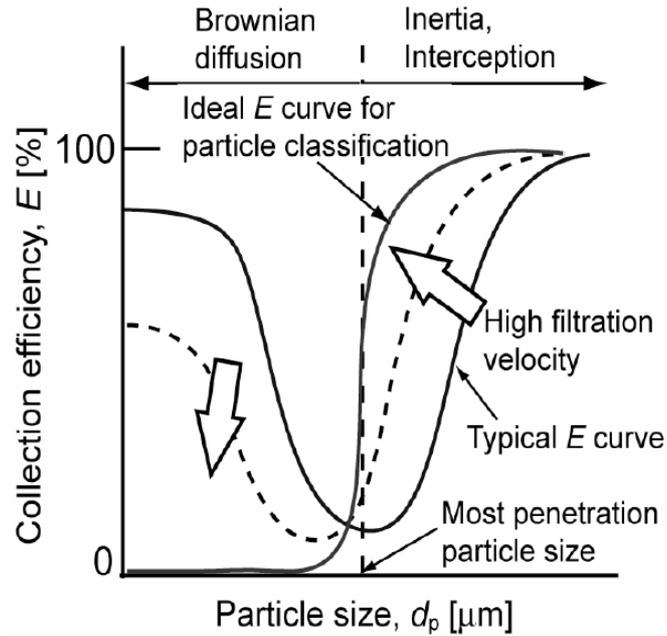


圖 1.8 濾材的收集效率與微粒粒徑的關係[26]。

為了提高微粒通過濾材時的過濾速度，Otani 等人將濾紙的有效過濾面積縮小至 4 mm [26]，並利用粒徑介於 6-200 nm $ZnCl_2$ 微粒在操作流量介於 3-40 L/min 之間測試不鏽鋼纖維濾材的微粒收集效率。實驗系統如圖 1.9 所示，表 1.1 為詳細的實驗參數。

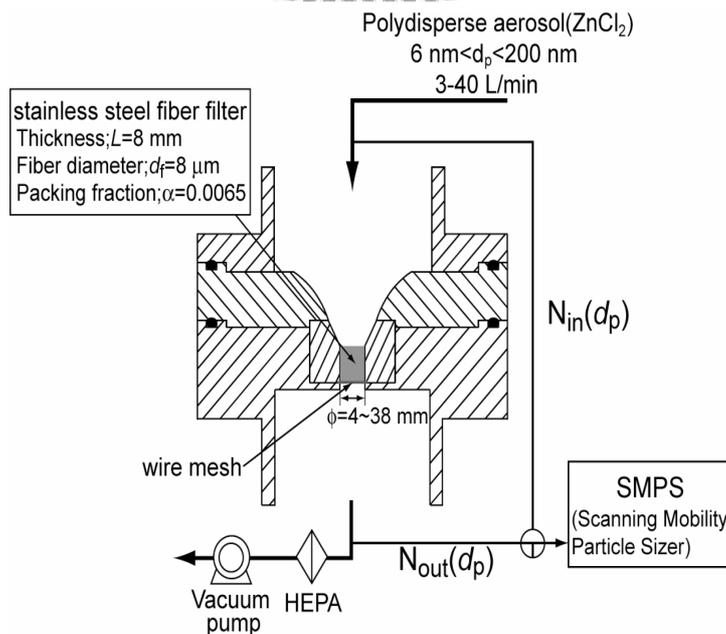


圖 1.9 奈米微粒分徑器的示意圖[26]。

表 1.1 奈米微粒分徑器實驗參數[26]。

Test filter	Unknown stainless steel fiber filter Fiber diameter: 8 μm Thickness: 8 mm Packing density: 0.0065 Filtration area: 4 mm
Test aerosol	Polydisperse ZnCl ₂ particles
Filtration velocity	0.05-50 m/s (Volumetric flow rate: 3-40 L/min)

實驗結果如圖 1.10 所示，當過濾速度為 20 m/sec 時，不鏽鋼纖維濾材的截取直徑約為 100 nm，對於粒徑範圍介於 8-100 nm 微粒的收集效率約為 20%；當過濾速度提高至 50 m/sec 時，不鏽鋼纖維濾紙的截取直徑約為 50 nm，且對於粒徑範圍介於 8-20 nm 微粒的收集效率均為 0%；對於粒徑 300 nm 以上的微粒的收集效率接近 100%，為一條理想的收集效率曲線。

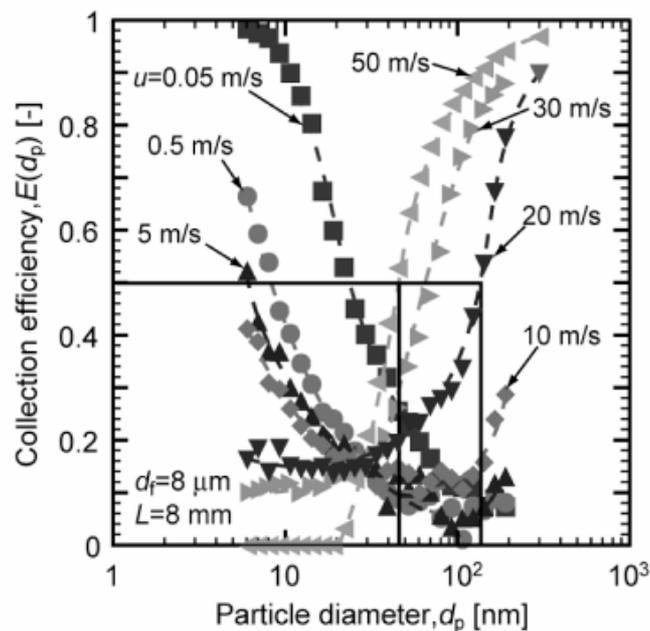


圖 1.10 不鏽鋼纖維濾紙在不同的過濾速度下的收集效率曲線[26]。

圖 1.11 呈現出不同的過濾速度下，氣流通過不鏽鋼纖維濾材時所產生的壓損。如圖所示，當過濾速度為 20 與 50 m/sec 時，濾紙產生的壓損分別約為 10 與 28 kPa (約為 40 及 112 in H₂O)，低於 LPI 採樣器最後一階的壓損 90 kPa。但由於此採樣器的壓損太大，因此也無法作個人採樣之用，只能作固定點採樣器。

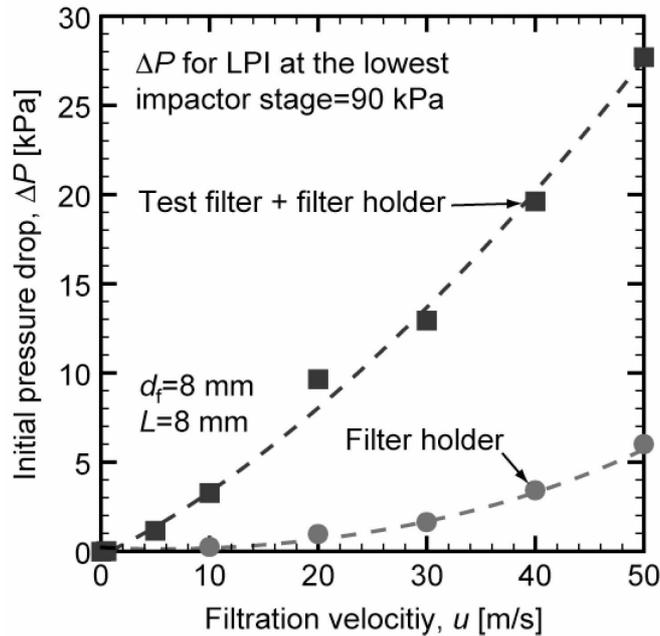


圖 1.11 不同的過濾速度下，氣流通過不鏽鋼纖維濾材時所產生的壓損[26]。

Otani 教授的研究團隊進一步於 2010 年研發了兩組可攜帶式的個人採樣器 [27][28]。第一組如圖 1.12 所示，此採樣器長 66 mm、寬 77 mm，是以兩片不鏽鋼慣性濾材(inertial filter,孔洞直徑為 5.6 μm)作為微粒分徑之用[27]。實驗結果顯示，此採樣器在 6.0 L/min 的操作流量下，產生的壓損約為 5.7 kPa (58 cm H₂O)，而不鏽鋼濾材的截取氣動直徑分別為 700 nm 與 140 nm。該採樣器雖可供個人攜帶，但仍無法有效分離 100 nm 以下的微粒。

第二組採樣器的實體圖及設計參數如圖 1.13、圖 1.14 所示。此採樣器長、寬分別為 195 mm 與 82 mm，為一個五階的奈米採樣器，包含四階慣性衝擊器和最後一階不鏽鋼濾材，各階設計的截取直徑分別為 10 μm 、2.5 μm 、1 μm 、0.5 μm 及 70 nm [28]。實驗結果如圖 1.14 和圖 1.15 所示，此採樣器在操作流量 40 L/min 的條件下，產生的壓損約為 30 kPa (306 cm H₂O)，各階的截取直徑為 9.7 μm 、2.71

μm 、 $1.08\ \mu\text{m}$ 、 $0.46\ \mu\text{m}$ 及 $65\ \text{nm}$ ，與原設計值差異不大。雖然該個人採樣器可分離 $65\ \text{nm}$ 的微粒，但仍無法提供大部分學者較關心的 NPs 數據，且該研究也尚未評估微粒負荷對不鏽鋼濾材的奈米微粒分徑效果的影響。

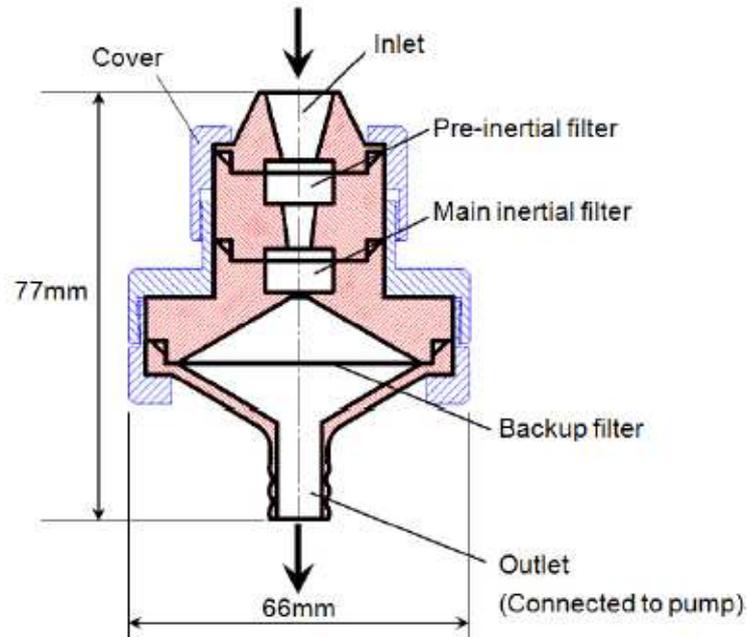


圖 1.12 超細微粒的個人分徑採樣器[27]。

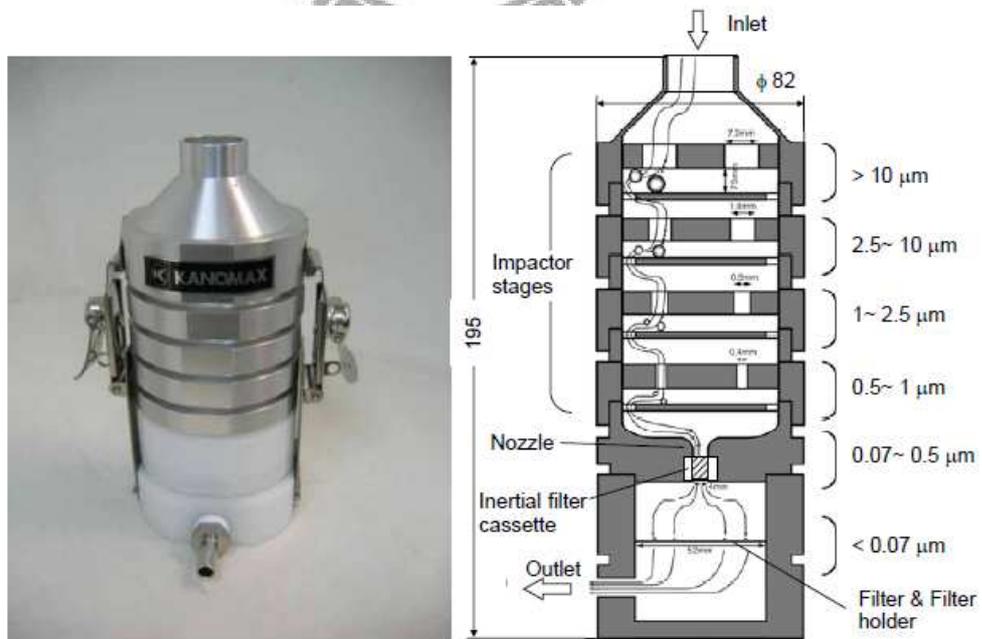


圖 1.13 奈米採樣器的真實圖片(左)和示意圖(右)[28]。

Stage	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁	PM _{0.5}
Nozzle diameter (mm)	7.2	1.8	0.8	0.4
Nozzle length (mm)	7.5	3	2	2
Nozzle-plate separation (mm)	7.5	4.5	2	2
Number of nozzles at each stage (-)	6	25	50	100
Diameter of impaction plate (mm)	60	60	60	60
Air velocity through nozzle (m/s)	2.73	10.8	26.5	53.1
d_{p50} (μm)				
Designed	10	2.5	1	0.5
Measured	9.7	2.71	1.08	0.46
Error (%)	-3	8	8	-8

圖 1.14 奈米採樣器的設計參數[28]。

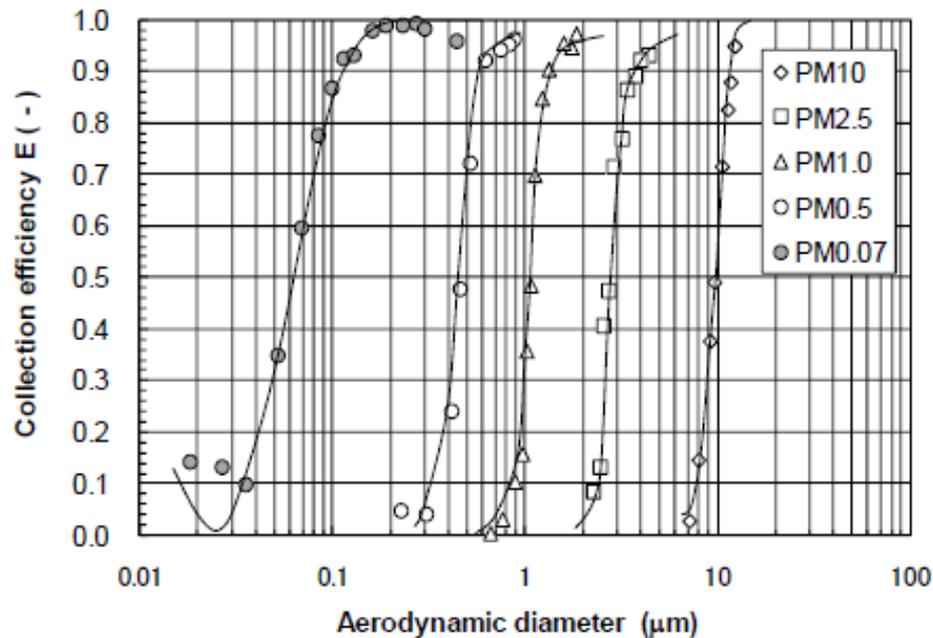


圖 1.15 奈米採樣器各階衝擊器的微粒收集效率曲線[28]。

另外，有學者研發出最後一階截取氣動直徑為 250 nm 的四階個人採樣器 (PCIS, Personal Cascade Impactor Sampler) [29]，如圖 1.16 所示。該採樣器係利用慣性衝擊原理所設計，其設計參數如表 1.2 所示。當流量為 9 L/min 時各階層的截取氣動直徑分別為 0.25、0.5、1.0、2.5 μm ，採樣器所產生的壓損為 11 in H₂O，因此可以使用個人攜帶型幫浦進行個人採樣，如圖 1.17 所示。

如圖 1.18 與圖 1.19 所示，由於微粒的彈跳會影響 PCIS 的微粒收集效率，彈跳的微粒也會造成低粒徑的微粒重量高估，且 PCIS 採樣器僅能分離出粒徑 < 250 nm 的微粒，無法針對粒徑 < 100 nm 的微粒進行分徑，故仍無法用於工作場

所個人暴露奈米微粒的評估。

表 1.2 PCIS 的設計參數與操作參數[29]。

Design impaction cutpoint (μm)	Experimentally determined cutpoint (μm)	D^a (cm)	U^b (cm/s)	ΔP^c (in of H ₂ O)	L^d (cm)
2.5	2.60	0.09	645.5	0.3	1.9
1	0.95	0.05	2041.2	0.6	2.1
0.5	0.52	0.036	2110.0	1.5	1.9
0.25	0.23	0.014	4568.8	3.9	2.5
Teflon filter	—	3.7	10.3	4.7	—

^aAcceleration slit nozzle width of each jet.

^bAverage jet velocity.

^cPressure drop (*measured* for all stages and after-filter).

^dLength of the acceleration jet (also length of the deposit).

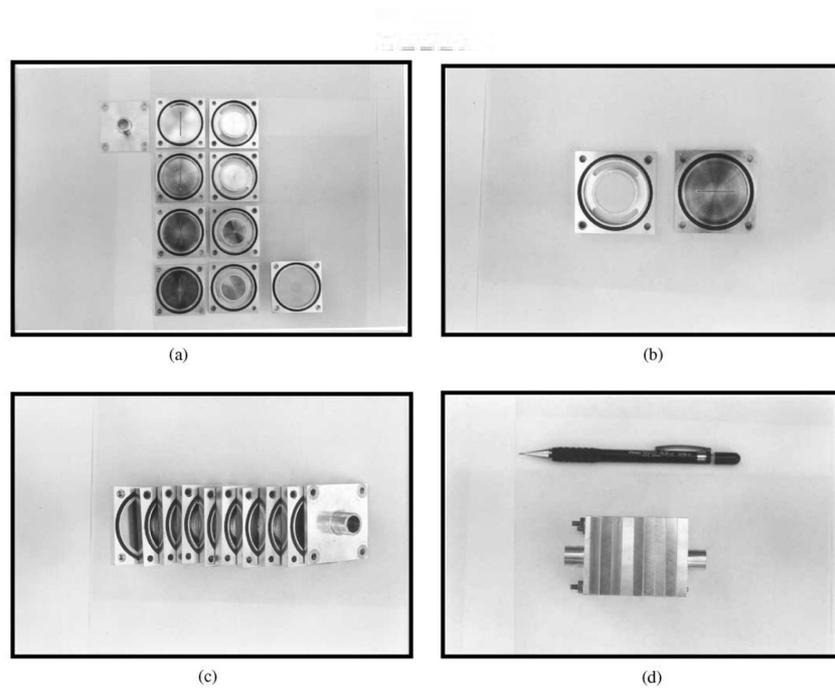


圖 1.16 PCIS 的圖片[29]。

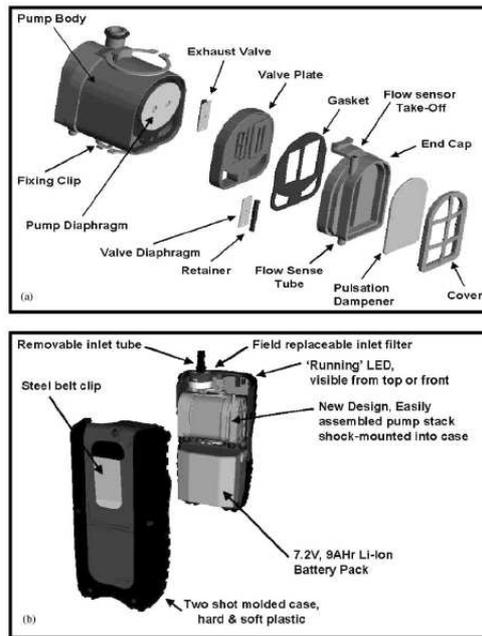


圖 1.17 PCIS 所使用的個人攜帶型幫浦[29]。

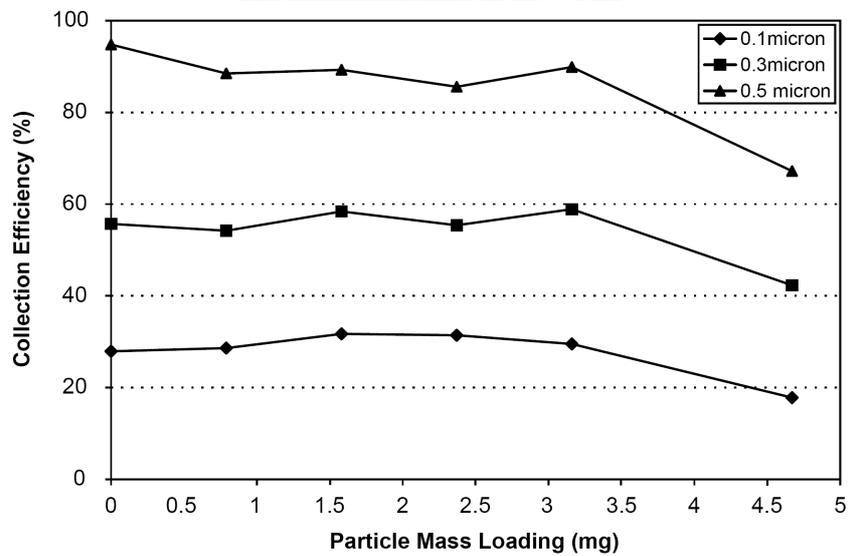


圖 1.18 截取氣動直徑 $0.25 \mu\text{m}$ 階層的微粒負荷量與收集效率的關係[29]。

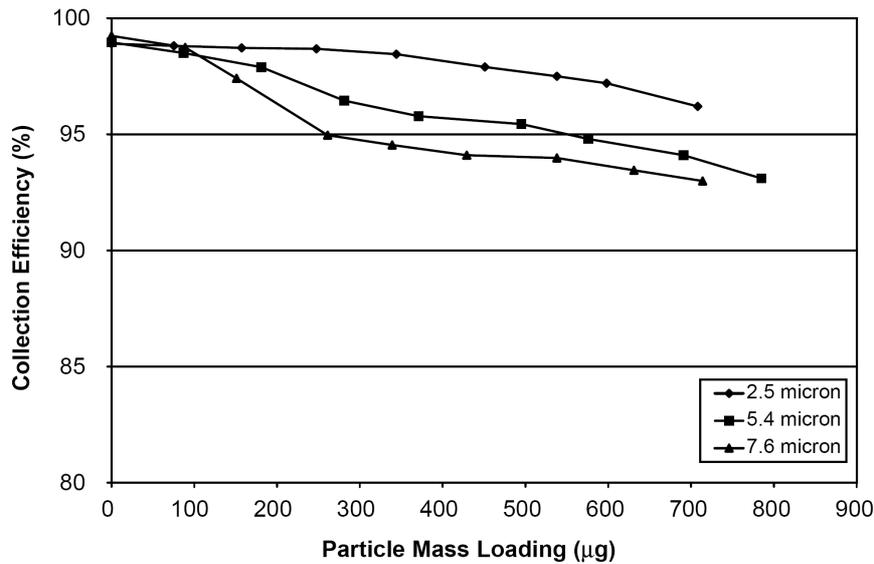


圖 1.19 截取氣動直徑 1.0 μm 階層的微粒負荷量與收集效率的關係[29]。

此外也有學者利用熱泳沉降器 (Thermophoretic Precipitator, TP) 收集奈米微粒[30][31][32]。例如 Lorenzo 學者在 2007 年設計的熱泳沉降器[32]，如圖 1.20 所示，該儀器將微粒收集在穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscopy, TEM)專用的格網上，再利用 TEM 分析微粒形狀、晶型。此外該學者也使用數值模擬方法算出一個關係式，可經由分析微粒的 TEM 影像而推算出微粒的數目濃度以及粒徑分佈。圖 1.21 為眾數為 45 及 90nm 的多徑分佈微粒，利用 SMPS 及 TEM 影像分析法所量測的結果。由該圖所示，兩者結果十分接近。然而此儀器雖可準確的推算出微粒數目濃度以及粒徑分佈，但仍然無法得知微粒的重量濃度。

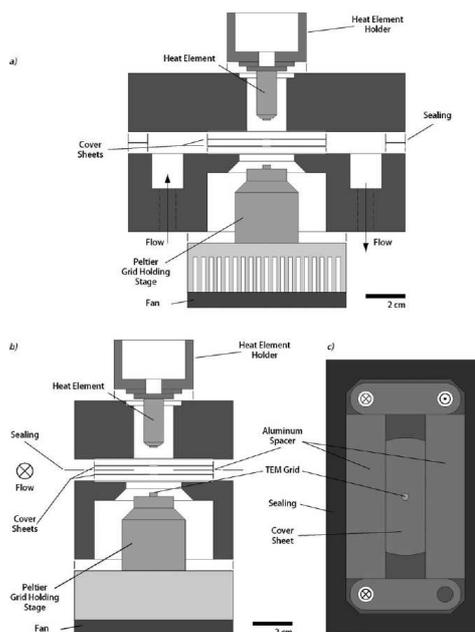


圖 1.20 熱泳沉降器設計圖[32]。

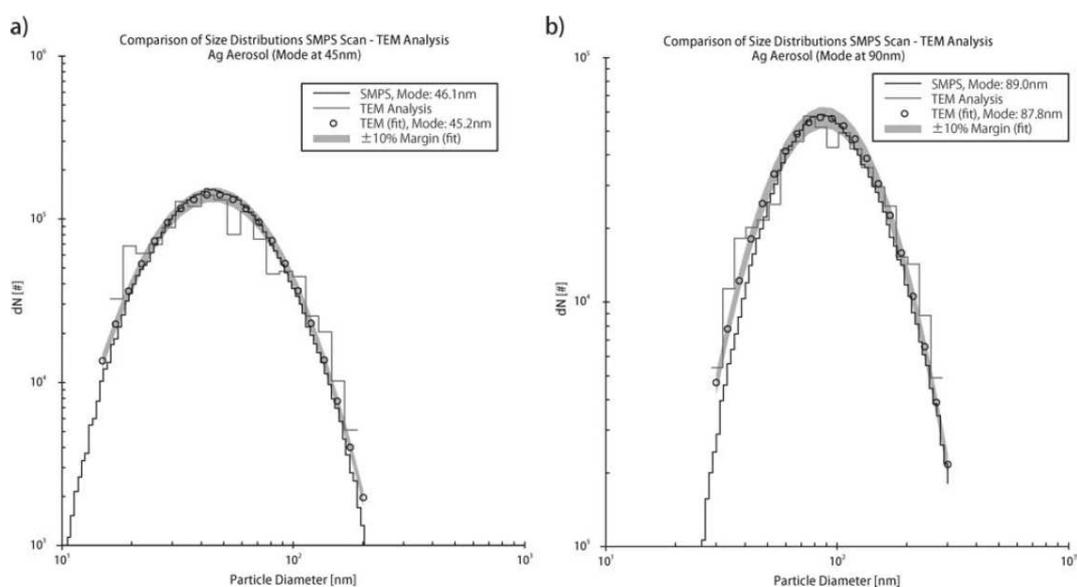


圖 1.21 利用 SMPS 及 TEM 影像分析法，分析眾數為 45 及 90nm 的多徑分佈微粒的結果[32]。

由以上回顧可知，目前尚無合適的個人奈米採樣器，在未有採樣器之過渡期間，為了評估未知粒徑分佈的 TiO_2 對健康可能產生的危害，NIOSH 在 2005 年時提出一套決定工作場所中的 TiO_2 可呼吸性微粒與奈米微粒是否超過 REL 值的

準則，內容如以下所示，圖 1.22 為詳細流程圖[14]：

1. 利用一截取直徑為 4 μm 的可呼吸性旋風器+5 μm 孔徑的 PVC 濾紙 [33]，及另一相同的旋風器+混合 O.V 濾紙(MCEF, mixed cellulose ester filter)同時進行採樣。若是 PVC 濾紙所採集到的可呼吸性微粒重量濃度小於或等於 0.1 mg/m^3 [33]，則可確定採樣地點的 TiO_2 可呼吸性微粒與奈米微粒重量濃度均低於 REL 值，無需進一步的改善方案。
2. 若 PVC 濾紙上可呼吸性微粒的重量濃度大於 0.1 mg/m^3 ，則需使用穿透式電子顯微鏡 TEM(transmission electron microscope)觀察 MCEF 濾紙上可呼吸性微粒與超細微粒所佔的比例，並利用能量分散式 x-光分析儀(EDXA, energy dispersive x-ray analyzer)決定不同粒徑微粒中 TiO_2 的含量，再計算出 TiO_2 可呼吸性微粒與超細微粒重量濃度。為避免經常性的 TEM 人工觀測，可使用感應耦合電漿(ICP, induced coupled plasma)分析 PVC 濾紙上可呼吸性 TiO_2 的重量濃度 [34]，決定其在可呼吸微粒中的比例，並可作為 TEM/EDXA 方法的品管之用，但限於 TiO_2 可呼吸性微粒重量濃度。
3. 若 ICP 決定出 PVC 濾紙上的 TiO_2 可呼吸性微粒重量濃度小於或等於 0.1 mg/m^3 ，則無需進一步的改善方案；若 TiO_2 可呼吸性微粒重量濃度大於 1.5 mg/m^3 ，則表示 REL 超過，需要控制 TiO_2 的暴露濃度。若 ICP 決定出的 TiO_2 重量濃度介於 0.1 mg/m^3 與 1.5 mg/m^3 之間，則 TEM/EDXA 量到的 TiO_2 可呼吸性微粒與超細微粒的重量濃度需依下式計算是否超過 REL 值：

$$\text{合計值} = \frac{\text{TiO}_2\text{超細微粒的重量濃度, mg/m}^3}{0.1 \text{ mg/m}^3} + \frac{\text{TiO}_2\text{細微粒的重量濃度, mg/m}^3}{1.5 \text{ mg/m}^3}$$

若上式中的合計值(Sum)值若大於 1 表示採樣地點的 TiO_2 濃度超過 REL 值，需要控制 TiO_2 的暴露濃度；若 Sum 值小於或等於 1 則表示採樣地點的 TiO_2 濃度低於 REL 值，無需進一步的改善方案。

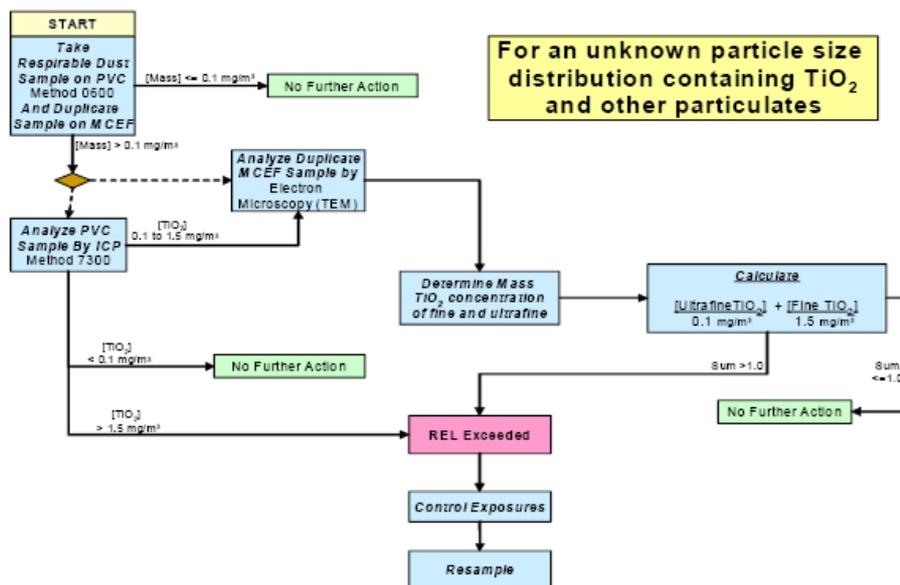


圖 1.22 TiO_2 微粒暴露評估準則[14]。

1.4 研究目的

為了評估作業場所人員的奈米微粒暴露量，本研究研發一個適用於作業場所的個人奈米採樣器，可配戴在操作人員的身上，以得知勞工的奈米微粒暴露量，採集到的奈米微粒並可作進一步的重量及化學成分分析，數據將可作為將來奈米物質風險管理之用。

本研究先在實驗室進行此個人奈米採樣器的微粒收集效率曲線的校正、壓損測試及微粒負荷等實驗，確認本採樣器可有效採集奈米微粒後，再於實驗室與 MOUDI 作進一步的採樣比對。

二、個人奈米採樣器

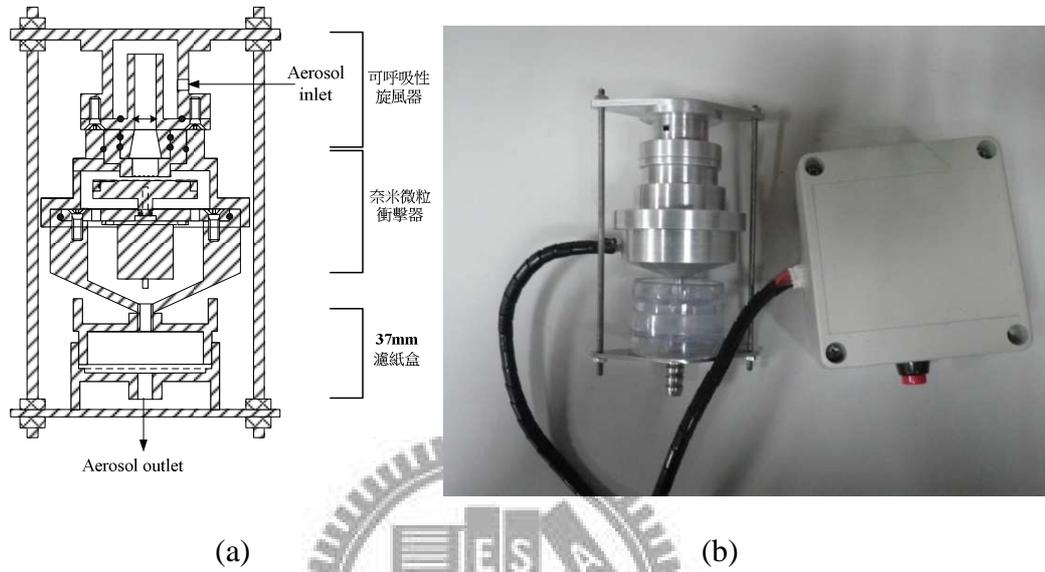
2.1 個人奈米採樣器的設計

由於市面上尚無個人奈米採樣器，因此只能在定點採集奈米微粒，並搭配工作人員行為模式的間接方法計算出工作人員的個人暴露量，或是將採集到的可呼吸性微粒樣本，利用 TEM 觀察樣本中可呼吸性微粒與奈米微粒的比例，再推估出奈米微粒的暴露濃度。但這些方法均無法直接量測出個人奈米微粒質量暴露濃度。而有學者曾指出因為不同區域的污染物濃度不同，再加上個人的行為模式會影響其暴露的濃度量，因此用定點採樣所得到的暴露值來代表個人的暴露值並不恰當[29]。

為了直接評估工作人員在作業場所時的個人奈米微粒暴露質量濃度，國內曾有學者利用理論計算的方式[35]，預測靜電旋風器、纖維濾紙是否適合用來分離奈米微粒[36]。結果顯示，若使用靜電旋風器或纖維濾紙分離奈米微粒，會因為奈米微粒容易因擴散機制而被靜電旋風器或纖維濾紙所收集，因此其奈米微粒的收集效率會高估，所以無法使用於分離奈米微粒。

而本研究設計了一組可同時收集奈米微粒(NPs, Nanoparticles)和可呼吸性微粒(RPM, Respirable particulate matter)的個人奈米採樣器(IOSH-NCTU PNS)，如圖 2.1(a)所示。第一階為一截取直徑 4 μm 的可呼吸性旋風器，其切線方向置有一正方形入口，作為採樣器的採樣入口(sampling inlet)，如圖 2.2 所示；第二階為多微孔衝擊器，其內部的多微孔噴嘴焊接板(圖 2.3(b2))上焊有一片多微孔噴嘴板，使採樣器在特定的操作流量下，截取直徑為 100 nm。焊接板下方的衝擊基座(圖 2.3 (b3))上放置一片直徑 25 mm 鋁箔衝擊基質以收集粒徑介於奈米微粒和可呼吸性微粒的微粒($\text{PM}_{0.1-4.0}$)。為避免微粒彈跳並使微粒平均分布在衝擊板上，本採樣器用一個步進馬達(圖 2.3(b5))(SPC-15RF, 元本電子股份有限公司)帶動衝擊板旋轉。而採樣器的終端濾紙是放在濾紙匣(圖 2.4)內直徑 37 mm (孔洞直徑為

1 μm)的鐵氟龍濾紙(Teflo R2PL037, Pall Corp., USA, 作為收集 100 nm 以下之微粒之用。本採樣器長 10.5 cm、直徑 6.3 cm, 重量約 250 g。圖 2.1(b)為本採樣器之實體, 圖 2.5 為本採樣器實際配戴圖。



(a) (b)
圖 2.1 個人奈米採樣器的(a)示意圖(b)實體圖。

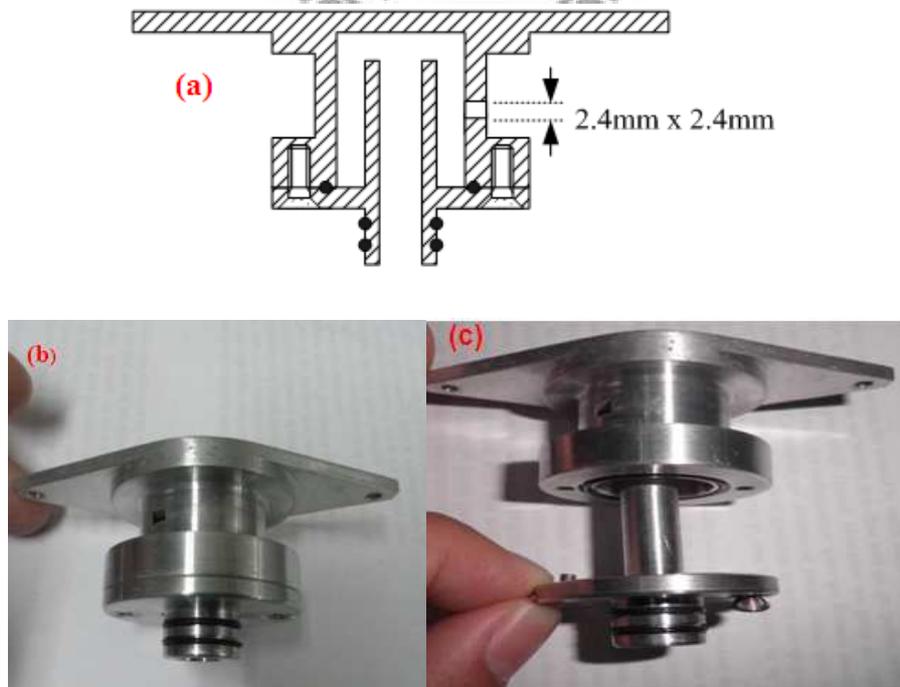


圖 2.2 可呼吸性旋風器(a)示意圖(b)實體圖(c)分解圖。

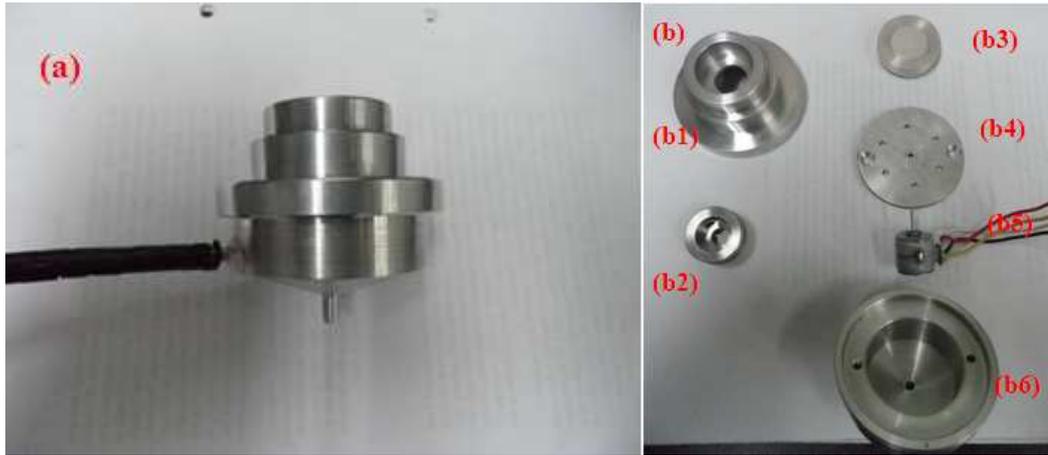


圖 2.3 多微孔衝擊器(a)實體圖(b)分解圖((b1)多微孔噴嘴板基座、(b2)多微孔噴嘴焊接板(b3)鋁箔基質基座、(b4)馬達支撐座、(b5)步進馬達、(b6)採樣器底座)。



圖 2.4 濾紙匣。



圖 2.5 個人奈米採樣器實際配戴圖。

本採樣器內的微孔數目是根據蔡等人的實驗結果[37]，其實驗結果顯示當採樣器微孔數為 250 個(平均孔徑為 55 μm)、操作流量 3.65 L/min 時，採樣器的截取直徑為 100 nm，但其採樣器壓損與體積過大，不適合佩帶於人。為改善壓損過大的問題，本研究設計的採樣器壓損必須降低，實際方法為減少採樣器的多微孔數以降低操作流量，且壓損所對應的流量仍需使本衝擊器的截取直徑為 100 nm。透過公式(2.1)，可計算本採樣器多微孔衝擊器上的噴嘴數目。

$$250(\text{個}) \times \frac{\text{個人奈米採樣器操作流量 (L/min)}}{3.65 \text{ L/min}} \quad (2.1)$$

≡ 多微孔衝擊器上噴嘴的數目(個)

為了使本旋風器能截取可呼吸性微粒(RPM)，本研究同樣根據蔡等人[37]旋風器的實驗結果($\sqrt{St_{50}}$ 為 0.174)及衝擊器校正的流量，並透過公式(2.2)-(2.4)，計算可呼吸性旋風器的入口大小。

$$0.174^2 = St_{50} = \frac{\rho_p CVD_p^2}{9\mu W} \Rightarrow V = 5.35 \text{ m/s} \quad (2.2)$$

$$\text{可呼吸性旋風器入口截面積 (m}^2\text{)} = \frac{\text{奈米微粒衝擊器操作流量 (L/min)}}{V \text{ (m/s)}} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{可呼吸性旋風器入口截面積 (m}^2\text{)} &= \text{旋風器入口高度 (H}_c\text{)} \times \text{旋風器入口寬度 (B}_c\text{)} \\ \Rightarrow H_c &= B_c \end{aligned} \quad (2.4)$$

其中 ρ_p 為微粒的密度(kg/m^3)、 C 為滑動修正因子(Slip correction factor)、 V 為旋風器入口氣體速度(m/s)、 D_p 為微粒的直徑(m)、 μ 為氣體的黏滯係數($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)、 W 為旋風器內徑(m)。

2.2 微粒粒徑計算理論

本實驗使用的微粒共有三種，分別為油酸(Oleic acid)、NaCl 和奈米二氧化鈦(nano-TiO₂)。因本研究所使用的單徑微粒的產生器為靜電分離器((Electrostatic Classifier, Model 3080, TSI Inc., MN, USA)，其篩選出的微粒為具有等電移動度直徑(Particle Mobility Diameter, D_{pme})的微粒，但本研究是採用氣動直徑(Particle Aerodynamic Diameter, D_{pa}) 計算微粒的收集效率，因此透過公式(2.5)可將 D_{pme} 轉為 D_{pa} [38][39]。

$$\sqrt{C_{Dpa}} D_{pa} = \sqrt{\frac{C_{Dpme} \rho_p}{\chi \rho_0}} D_{pme} \quad (2.5)$$

其中

C_{Dpa} 為氣動直徑的滑動校正係數。

D_{pa} 為微粒氣動直徑, m。

C_{pme} 為等電移動度直徑的滑動校正係數。

D_{pme} 為微粒等電移動度直徑, m。

ρ_p 為微粒的密度, kg/m³。

ρ_0 為單位密度, 1000 kg/m³。

χ 為微粒形狀因子。

由公式(2.5)可知，若要將微粒由電移動度直徑改為氣動直徑，則需知道微粒的真實密度。但因奈米微粒容易聚集(agglomerate)而成長形成不規則的形狀，且聚集後的微粒內部會存在著比例不等的空洞，因而導致微粒的密度與塊材密度不同，因此本研究在進行計算氣動直徑時，是以微粒的有效密度代替塊材密度。

根據 Hinds[17]，可將油酸液滴可視為圓形球體微粒($\chi=1$)，且其有效密度為 895 kg/m³。至於 NaCl 微粒的有效密度，過去曾有學者指出，當 NaCl 的粒徑 < 1000

nm 時，不同的微粒產生系統會產生三種不同形狀的 NaCl 微粒：快速的乾燥可以產生出狀似圓形的 NaCl 微粒，此時微粒的形狀係數 χ 為 1.02 ± 0.01 ，而有效密度約為 $2059 \pm 36 \text{ kg/m}^3$ ；緩慢乾燥系統產生的低濃度 NaCl 微粒會呈現立方體的形狀，當微粒粒徑從 200 上升至 800 nm 時，微粒的形狀係數會從 1.06 上升至 1.17，有效密度則從 1974 kg/m^3 下降至 1624 kg/m^3 ；而高濃度的 NaCl 微粒在通過混合/乾燥腔(Mixing/Drying Chamber)時會因聚集而成長為不規則形的 NaCl 微粒，其形狀係數介於 1.3-1.4 之間，而有效密度介於 $1393\text{-}1145 \text{ kg/m}^3$ 之間[40]。當本研究使用噴霧器—乾燥管系統產生 NaCl 奈米微粒時假設 NaCl 的有效密度為 1800 kg/m^3 ；而當本研究使用蒸發/凝結法—混合/乾燥腔產生 NaCl 奈米微粒時則假設 NaCl 的有效密度為 1269 kg/m^3 ； ρ_{air} 為氣體密度（本研究中氣體密度約為 1.2 kg/m^3 ）。

因本研究係使用微小粉末分散器(Small Scale Powder Disperser, SSPD, Model 3433, TSI Inc., St. Paul, MN, USA)產生 TiO_2 微粒。又因目前文獻上尚無學者定量以 SSPD 產生的 TiO_2 微粒的密度。為決定 TiO_2 微粒密度，本研究利用方程式(2.6)將 MOUDI 質量濃度分佈得到的質量中間氣動直徑(Mass Median Aerodynamic Diameter, MMAD)與幾何標準偏差(Geometric Standard Deviation, GSD)轉換成數目中間氣動直徑(Number Median Aerodynamic Diameter, NMAD)，再利用方程式(2.7)計算出 TiO_2 微粒密度。將此微粒密度代入方程式(2.8)即可將 SMPS 測到的微粒電移動度直徑轉為氣動直徑[17]。

$$NMAD = \frac{MMAD}{\exp(3 \ln^2 \sigma_g)} \quad (2.6)$$

$$\rho_p = \frac{NMAD^2 \times \rho_0 \times C_{NMAD}}{NMD^2 \times C_{NMD}} \quad (2.7)$$

$$D_{Pa} = D_{pm} \times \left(\frac{C_{D_{pm}}}{C_{D_{Pa}}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{\rho_p}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

其中

C_{NMAD} : 數目中間氣動直徑的滑動校正係數。

C_{NMD} : 數目中間直徑的滑動校正係數。

σ_g : 質量中間氣動直徑幾何標準偏差值

D_{pa} : 微粒的氣動直徑，nm。

D_{pme} : 微粒的電移動度直徑，nm。

C_{Dpme} : 電移動度直徑的滑動校正係數。

C_{Dpa} : 氣動直徑的滑動校正係數。

ρ_p : 微粒密度， kg/m^3 。

ρ_0 : 微粒單位密度，為 1000 kg/m^3 。

2.3 旋風器相關理論

旋風器是一種利用離心力去除微粒的設備。其原理是當帶有微粒之氣流沿著切線方向進入旋風器時，會因為氣流旋轉，使得較大微粒受到離心力的影響，先行偏離流線，於旋風器內壁部分被收集。當氣流繼續流至下方圓錐體時，氣流旋轉速度增加，產生更大的離心力，使較小微粒也開始偏離流線而撞擊至腔體內壁而被收集。移除部份微粒、較乾淨的空氣則由下往上翻轉，經旋風器上方出口排出。

一般常用的旋風器為一種切線型旋風器，其各部份符號代表意義如圖 2.6。因為旋風器具備有結構簡單、操作容易、維持費用低、可負荷高濃度粉塵與在高溫高壓下使用等優點，所以在工業上常用來作為前處理的除塵設備。又因為使用上較不易產生微粒反彈及再揚起的現象[41]，且其微粒收集效率曲線與傳統可呼吸性採樣設備相似[17]，因此也常作為可呼吸性微粒採樣。

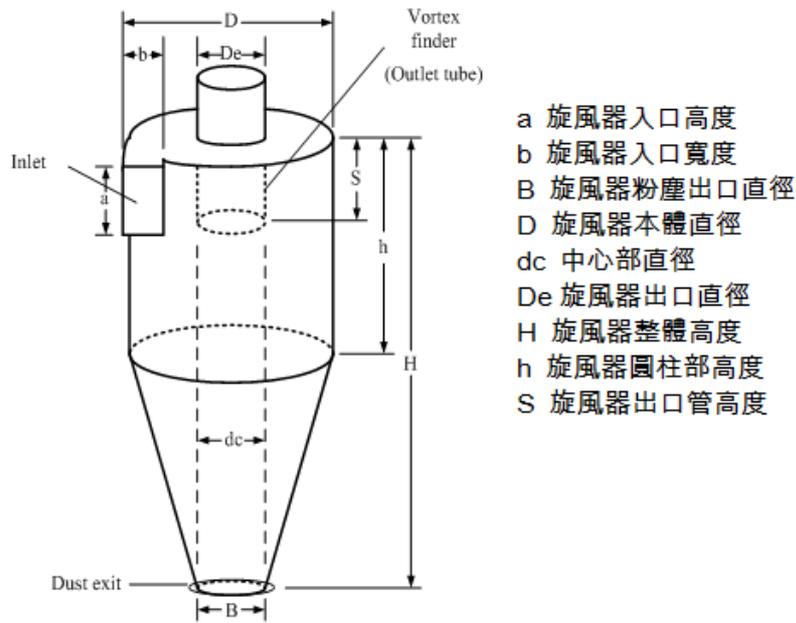


圖 2.6 旋風器示意圖與各符號代表意義[42]。

旋風器截取直徑理論計算，最早由 Lapple [43]提出，如公式(2.9)所示：

$$D_p = \sqrt{\frac{9\mu Bc}{2\pi N_t V_i \rho_p C}} \quad (2.9)$$

其中 N_t 為氣體在旋風器內旋轉的圈數， $N_t = \frac{1}{H_c} (L_c + \frac{Z_c}{2})$ ，

V_i 為氣體進口速度(m/s)

Bc 為進口處寬度(m)。

H_c ：旋風器進口高度, m

L_c ：旋風器圓柱體長度, m

Z_c ：旋風器圓錐體長度, m

因旋風器常作為預篩選的設備，因此若降低旋風器的截取氣動直徑，提升微粒的收集效率，將可減低後端處理設備的微粒負荷。而根據公式(2.9)，縮小旋風器的入口處或增加旋風器主體的長度將可達到上述目標。此外也有學者利用其他方式來降低旋風器的截取直徑，例如 2009 年，曾有學者發表兩種迷你旋風器的

設計，其作法為縮小旋風器的尺寸，設計參數如表 2.1 所示[44]。二種迷你旋風器在 0.3 L/min 的操作流量下，壓損分別為 20 與 1.8 in H₂O，截取氣動直徑為 0.3 μm 與 1.0 μm [44]。另外也有學者在旋風器內加裝一旋轉式的推進器(Rotary impeller)，稱為動力式旋風器(dynamic cyclone)，同樣地也可增加旋風器的收集效率[45]。不僅如此，也有學者提出適當的旋風器出口處尺寸設計也可增加收集效率[46]。

表 2.1 迷你型旋風器設計參數[44]。

Model	Dc (in)	a (in)	S (in)	H (in)
1.0 μm mini-cyclone	0.023	0.046	0.075	0.313
0.3 μm mini-cyclone	0.014	0.025	0.042	0.174

此外壓損也是旋風器設計的重要參數，較大的壓損雖然可以增加旋風器的收集效率，但相對來說，所需耗費的動力成本則會大幅增加。而本研究設計的旋風器的截取氣動直徑為 4 μm，為一個可呼吸微粒的旋風器。

2.4 個人採樣幫浦

本研究使用的個人採樣幫浦為 SKC 公司所開發的攜帶型高壓損幫浦 (XR5000, SKC Inc., PA, USA)，其長寬高分別為 8 cm × 6 cm × 10 cm，重量約 1054 g (含電池)，如圖 2.7 所示。在不更換電池的情況下此幫浦可連續操作 40 小時，並且具有自動確認流量的功能，當採樣器的壓損在採樣過程中急遽上升，使得流量低於採樣開始時所設定之值達 15 秒以上時，此時幫浦會自動停止，記錄停止採樣的時間，並且重新啟動。當 5 次重新啟動都無法恢復應有的流量時，幫浦將完全停止運轉。

為了確認 XR-5000 幫浦實際操作時所能承受的壓損，在使用該幫浦進行實驗之前，本研究對於不同流量下該幫浦所能承受的壓損進行測試，測試系統如圖 2.7 所示。利用泡沫流量計(Bubble meter, Model PN#800268, Gillian Instrument Corp. C)來測量 XR-5000 幫浦的抽氣量，並且以針閥控制壓損的變化，以 5 cm H₂O 為一個單位。確認幫浦能在流量為 X L/min (cm³/min)、壓損為 Y cm H₂O 的條件下連續使用 30 分鐘以上後，在流量不變的條件下將壓損增加至 Y+5 cm H₂O，重複以上步驟直到幫浦在 X L/min、Y+n cm H₂O 的條件下因壓損過大無法負荷而自動關機時，則判斷 XR5000 在 X L/min 時所能承受的最大壓損為 Y+n-5 cm H₂O。

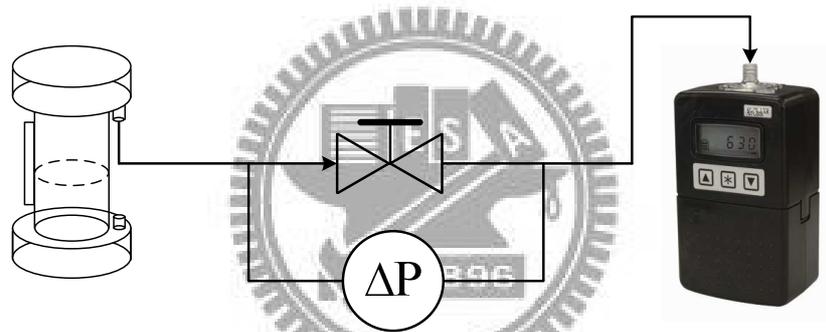


圖 2.7 本研究測試 XR-5000 幫浦所能承受的壓損之實驗架設圖。

測試結果顯示隨著流量從 1.08 L/min 升高至 5.0 L/min，採樣器所能承受的壓損從 280 cm H₂O 降至 45 cm H₂O，實驗結果如圖 2.8 所示。

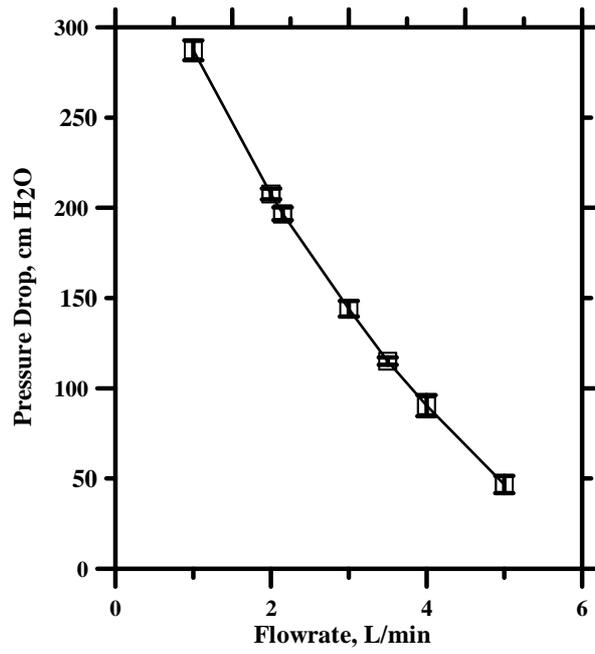


圖 2.8 XR-5000 幫浦所能承受的壓損對應流量的關係。



三、 實驗系統與方法

本採樣器的操作流量視多微孔衝擊器的設計而定，該流量須讓衝擊器的微粒截取氣動直徑為 100 nm 且 XR-5000 個人幫浦必須可以負荷採樣器產生的壓損。因此本研究先進行衝擊器的校正實驗，再進行旋風器的校正曲線測試。待前二項實驗結束後，再進行採樣器微粒負荷實驗與比對實驗。

3.1 多微孔衝擊器微粒收集效率測試

根據蔡等人[37]實驗結果，當本衝擊器內的噴嘴數為 137 個、2.0 L/min 的操作流量下，截取直徑為 100 nm。為準確控制本採樣器多微孔噴嘴的數目及位置，本研究設計一直徑 13 mm 的噴嘴板，如圖 3.1 所示。噴嘴板厚度 0.12 mm，內徑 6.8 mm 的面積內含有 137 個直徑約 55 μm (實際測量後平均直徑為 $54.3 \pm 0.5 \mu\text{m}$) 的微孔。而透過公式(3.1)-(3.4)，可計算出噴嘴間的間距。其計算原理是在正三角形的頂點各置上一噴嘴，則每一個三角型與噴嘴重疊的角度約為 180° (為一半圓)，因此噴嘴板上正三角形的數量應為 274 個(噴嘴數的兩倍)。再將噴嘴板的面積除以正三角形的總數即可求得的單一三角形的面積，進而推算三角形的邊長，而此邊長即為噴嘴間的間距(約 0.55 mm)。

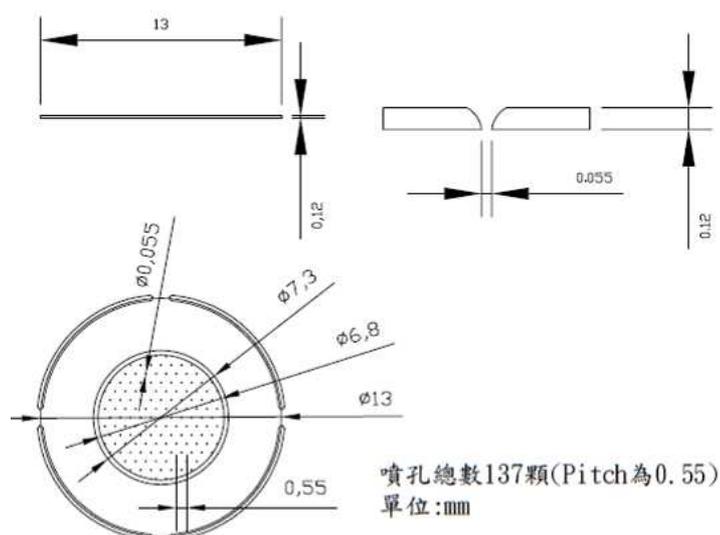


圖 3.1 多微孔噴嘴板示意圖 (單位：mm)。

$$\text{噴嘴板面積(mm}^2\text{)} = \pi \left(\frac{\text{噴嘴板直徑(mm)}}{2} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$\text{正三角形數量} = 2 \times \text{噴嘴數} \quad (3.2)$$

$$\text{一個正三角形面積} = \frac{\text{噴嘴板面積}}{\text{正三角形數量}} \quad (3.3)$$

$$\text{噴嘴間的間距(mm)} = \text{正三角形邊長} = \sqrt{\frac{4 \times \text{三角型面積}}{3}} \quad (3.4)$$

因本採樣器的微孔直徑略小於 55 μm ，因此本採樣器噴嘴-衝擊板距離(S)與噴嘴直徑(W)的比值不能以 MOUDI 第九階的 S/W 值(10.6)作為設計值。為此本研究採以改變噴嘴板-衝擊板的距離(S)和噴嘴直徑(W)比值(S/W)的方式，使本衝擊器在 2.0 L/min 的流量下，截取直徑為 100 nm。

圖 3.2 為多微孔衝擊器收集效率測試系統示意圖，而本研究選擇油酸(液體微粒)和 NaCl(固體微粒)作為本衝擊器的微粒收集效率的測試微粒。多徑微粒是由定量霧化器(Constant output atomizer, Model 3076, TSI Inc., MN, USA)產生，經乾燥、稀釋後導入靜電分離器篩選欲測試的單徑微粒，被篩選出的單徑微粒再通過靜電中和器(Aerosol Neutralizers, Model 3077, TSI Inc., MN, USA)以去除微粒電荷，之後藉由後端三向閥(Three way valve)的調整，讓微粒分別導入旁通管(上游, Upstream)及衝擊器(下游, Downstream)，再以核凝微粒計數器(Condensation Particle Counter, CPC, Model 3776, TSI Inc., MN, USA)分別量測衝擊器上、下游的微粒數目。將 CPC 所測得的上游粒徑的數目(N_{upstream})及下游($N_{\text{downstream}}$)粒徑的數目濃度帶入公式(3.5)即可計算衝擊器對各粒徑的微粒收集效率。而此實驗在不同的粒徑下各須進行十次以上的重複以求取平均值。另外本研究在各校正實驗中皆固定旁通道的管線長度與經過採樣器的管線長度，以減低微粒傳輸損失造成量測的誤差。

$$\text{Collection Efficiency}(\%) = \left(1 - \frac{N_{\text{downstream}}}{N_{\text{upstream}}} \right) \times 100\% \quad (3.5)$$

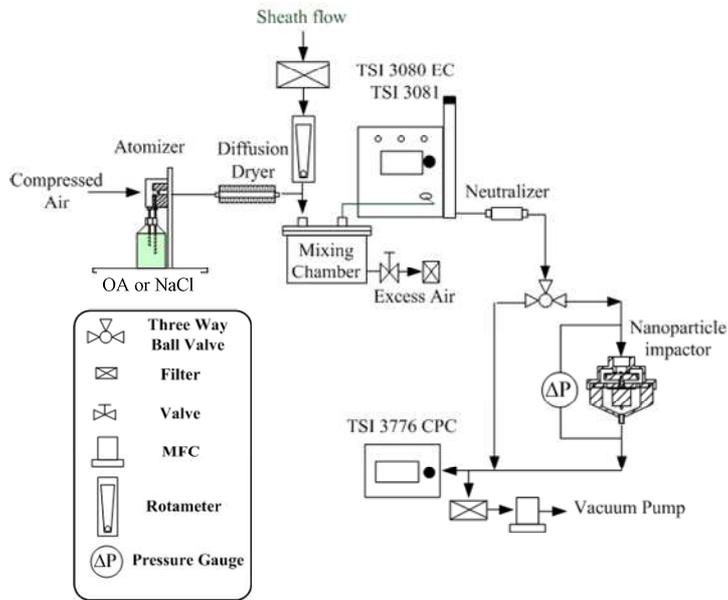


圖 3.2 多微孔衝擊器微粒收集效率測試系統。

3.2 可呼吸性旋風器收集效率的測試

本研究設計的旋風器的截取氣動直徑設定為 $4\ \mu\text{m}$ ，為一個可呼吸性旋風器。根據衝擊器的實驗結果(詳細敘述如 4.1 節所示)，旋風器的操作流量為 2.0 L/min，旋風器的入口大小應為 $2.4\ \text{mm} \times 2.4\ \text{mm}$ 。

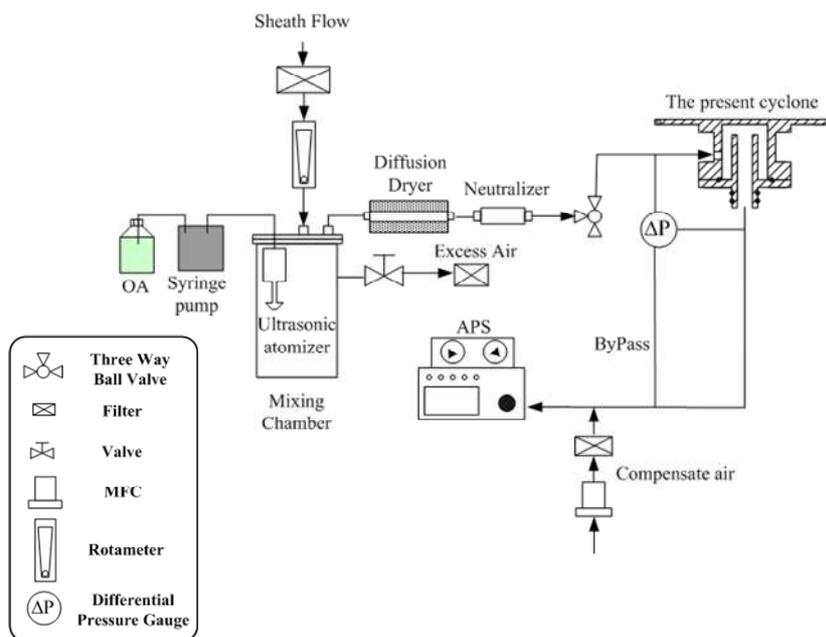


圖 3.3 可呼吸性旋風器微粒收集效率測試系統。

圖 3.3 為可呼吸性旋風器微粒收集效率測試系統。本實驗使用的油酸微粒是將配置完成的油酸溶液透過蠕動幫浦(Micro tube pump, MP-3, Tokyo Rikakikai Co., Ltd, Sunnyvale, CA, USA)導入超音波霧化器內(Ultrasonic atomizing nozzle, Model 06-05108, Sono-Tek Corp., NY, USA)，藉由超音波震盪將油酸溶液霧化而成。產生的油酸微粒再經過乾燥、去靜電等過程後，由三向閥分別導入旁通管(上游)及旋風器(下游)內，並使用氣動直徑微粒測定儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS, Model 3321, TSI Inc., St. Paul, MN, USA)測量上下游各微粒粒徑的數目濃度，最後利用公式(3.5)即可得旋風器對各微粒粒徑的收集效率。同樣地，旋風器對不同粒徑的微粒收集效率實驗各須進行十次以上的重複以求取平均值。

3.3 多微孔衝擊器微粒負荷與壓損變化、微粒收集效率之關係

為探討多微孔衝擊器的微粒負荷量是否對採樣器壓損變化及微粒收集效率產生影響，且根據 NIOSH 報告建議勞工在每日工作八小時內、一週工作四十小時的情形下，TiO₂ 的曝露時量的平均濃度值須小於(1.5 mg/m³)的標準，本研究將以實驗室自行產生的 TiO₂ 微粒進行衝擊器的微粒負荷實驗。在進行負載實驗前，本研究將先針對 TiO₂ 微粒的質量濃度及粒徑分佈進行評估，以推算 TiO₂ 微粒的有效密度。實驗方法為將 TiO₂ 粉體平均鋪在一個具有三道同心圓凹槽軌道的鋁製圓盤上(圖 3.4)，並置於微小粉末分散器(Small Scale Powder Dispenser, SSPD, Model 3433, MN, USA)內，透過操作流量為 18.5 L/min 的分散器提供足夠的剪力(shear stress)將 TiO₂ 粉體均勻分散，最後由 SMPS、APS 及 MOUDI 等儀器測量被分散的 TiO₂ 粉體的粒徑分佈及重量濃度，分散測試系統架設如圖 3.5 所示。



圖 3.4 鋁製圓盤。

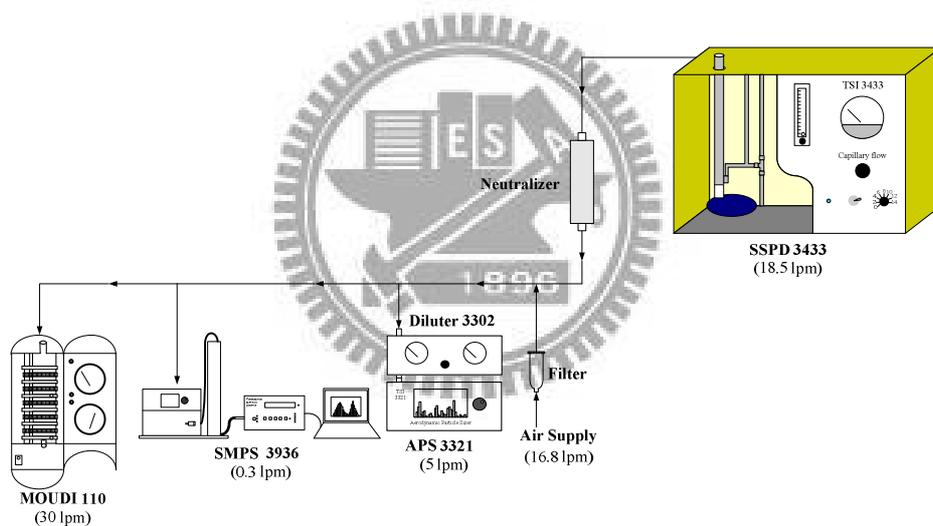


圖 3.5 以微小粉末分散器分散 TiO_2 粉體，再利用 MOUDI、APS 和 SMPS 測量分散後粉體的重量濃度及微粒數目濃度分佈。

本衝擊器微粒負載測試系統如圖 3.6 所示。係以微小粉末分散器分散 TiO_2 粉體，再導入靜電中和器後進入混合腔體內混合均勻，以得到濃度穩定的 TiO_2 微粒，最後通入本採樣器中。於負荷實驗過程中，5 分鐘即紀錄一次衝擊器壓損，以評估負荷微粒對本採樣器壓損的影響，且為了不影響採樣器的壓損讀值，實驗過程中還需確認腔體內外的壓力平衡。微粒負荷實驗測試時間是根據 SMPS 測

得的 TiO_2 微粒的重量濃度結果而定。微粒負荷實驗結束後即進行衝擊器的微粒收集效率測試，最後再將衝擊器下方的鋁箔衝擊基質秤重，並減去由微粒收集效率曲線試驗所增加的微粒重量，即可得到本衝擊器的微粒負荷量，藉由公式(3.6)可計算出採樣器的微粒負荷濃度。另外，實驗中使用的管長及管徑需固定，以避免微粒因傳輸損失而造成實驗數據的誤差。

$$\text{微粒負荷濃度 (mg/m}^3\text{)} = \frac{\text{微粒負荷重量 (mg)}}{\text{負荷時間 (min)} \times 2.0 \text{ (L/min)}} \times \frac{1000 \text{ (L)}}{1 \text{ (m}^3\text{)}} \quad (3.6)$$

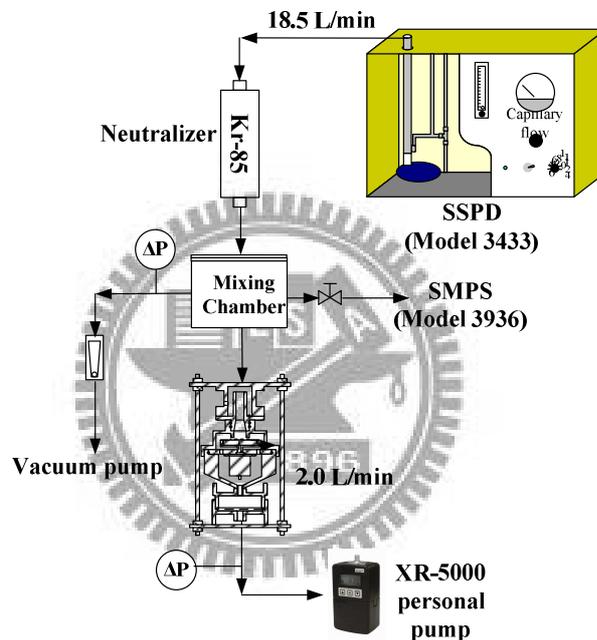


圖 3.6 多微孔衝擊器微粒負荷與壓損變化、微粒收集效率測試系統。

3.4 個人奈米採樣器與 MOUDI 的實驗室比對系統

完成衝擊器及旋風器的校正實驗後，需進行本採樣器與 MOUDI 的實驗室比對，透過比對可了解本採樣器與 MOUDI 採集 NPs 濃度的差異，且可確認採樣器對奈米微粒採樣之準確性及驗證實驗室校正結果是否正確。

實驗系統如圖 3.7 所示，本研究使用定量霧化器產生不同濃度的油酸微粒以進行比對實驗，並將 35 L/min 的乾淨空氣通入混合腔體，使 MOUDI 及本採樣

器有足夠的採樣流量。在實驗進行中，需維持腔體內的壓力平衡，以確保腔體內流量及微粒濃度穩定。

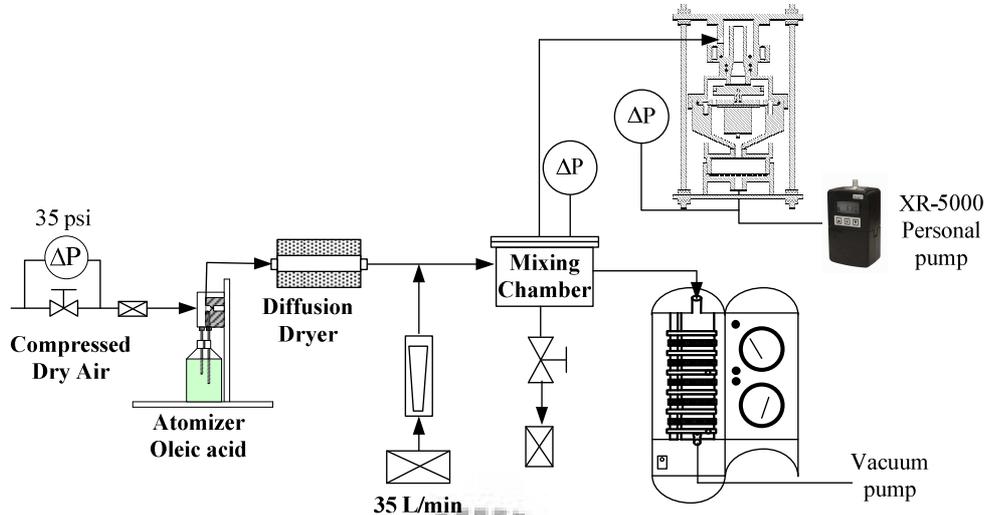


圖 3.7 個人奈米採樣器與 MOUDI 實驗室比對系統。

3.5 品保品管(QA/QC)

為了確保實驗結果的準確性與可信度，因此本研究在實驗前進行儀器及實驗系統背景值與漏氣的測試。

本研究會在使用核凝微粒計數器(Condensation Particle Counter,CPC, Model 3776,TSI Inc., MN,USA)於實驗計數之前在入口端接上一高效率微粒空氣過濾器(High Efficiency Particulate Air Filter, HEPA Filter, Pall Gellman Sciences Inc., Ann Arbor, MI)，以確認核凝微粒計數器內部的乾淨程度，測試時間為 5 分鐘，測試流量為 0.3 L/min (Low flow mode)，測試結果必須滿足：

1. 平均濃度 $< 0.05 \text{ particle/cm}^3$ 。
2. 瞬間濃度 $< 0.2 \text{ particle/cm}^3$ 。

此外，本研究使用的氣動直徑分析儀同樣地也會測試內部乾淨的程度，測試時間為 30 秒，測試流量為 5.0 L/min，測試結果必須滿足：

1. APS 平均濃度 $<0.01 \text{ particle/cm}^3$ 。

本研究的測漏方法為在實驗系統前端接上真空計(Gauge Pressure meter)，並透過接於實驗系統後端的真空幫浦抽至負壓 30 cm Hg 後，關閉連接實驗系統與幫浦之間的閘門。測漏標準為經過 10 分鐘後，真空計上顯示的數值不得低於 20 cm Hg。

另外，本實驗使用的濾紙有兩種，分別為鐵氟龍濾紙(Teflo R2PL037, R2PL047, Pall Corp., USA)與鋁箔 (Alumium foil, 25 mm, 47 mm)。而濾紙在實驗使用前，會於溫度 $22.0 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、溼度 $40 \pm 3.0\%$ 的環境下調理至少 24 小時。此外本研究濾紙秤重是使用一六位數的天平(Sartorius CP2P-F, 最小可測的重量為 0.001 mg)，且在秤重前會以靜電消除器(constant ionizing air blower, Model CSD-0911, MEIMEI, Japan)去除靜電，以增加濾紙秤重的穩定性。本研究濾紙秤重的步驟如下：

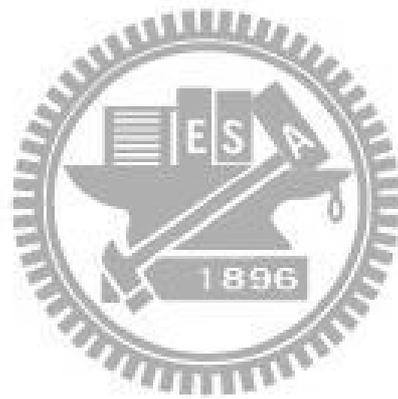
- (1)紀錄秤重當時的溫度與相對溼度。
- (2)進行實驗室空白的秤重，以確認天平的穩定性(本次秤重數據的平均值與上次秤重平均值差異，鐵氟龍濾紙不得高於 $\pm 3 \mu\text{g}$ 、鋁箔不得高於 $\pm 2 \mu\text{g}$)。
- (3)將待秤的濾紙置於靜電消除器前數秒後，再放至天平得到穩定後的數值作為濾紙的重量，以此重複五次的平均值則為該濾紙的重量。

此外本研究會在欲使用的鋁箔上塗敷矽黃油，以降低實驗中產生微粒彈跳的現象，塗敷的步驟如下：

- (1)將欲塗敷之鋁箔濾紙先秤重。
- (2)將已秤重鋁箔放在已清洗乾淨的壓克力板，再將壓克力上蓋蓋上，在蓋時需注意不可使鋁箔產生皺摺，並且要使壓克力板與上蓋壓密。
- (3)將裝有鋁箔的壓克力置於報紙上，矽黃油由壓克力板上方噴灑至壓克力板上。
- (4)將塗敷後的濾紙再予以秤重，以便得知每張鋁箔的塗敷量。
- (5)將塗敷且秤重後的鋁箔依序放至在鐵盤上，並於 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 的溫度下，烘乾 90 分

鐘。

(6)烘乾後的鋁箔會再進行秤重，以確認塗敷在鋁箔上的矽黃油不會在烘乾的過程中揮發。



四、實驗結果

4.1 多微孔衝擊器校正結果

本研究製造的衝擊器內部的孔洞數目已可精準的控制在 137 個，而孔洞平均直徑為 $54.3 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

圖 4.1 為本衝擊器的液體及固體微粒收集效率測試結果，由液體微粒(Oleic Acid)測試結果可知，當 S/W 值為 9.76、13.8 和 16.2 時，衝擊器的截取直徑分別為 86.6 nm、101.4 nm 和 111 nm。其中當 S/W 為 13.8 時，衝擊器的截取直徑最接近 100 nm，因此本衝擊器的 S/W 設定為 13.8 ($S=750 \mu\text{m}$)。此外，固體微粒(NaCl)所校正出的微粒收集效率曲線也和液體微粒的曲線十分相近，表示置有塗敷矽油基質與旋轉的衝擊板能有效防止微粒彈跳，並有效地分離固體奈米微粒。

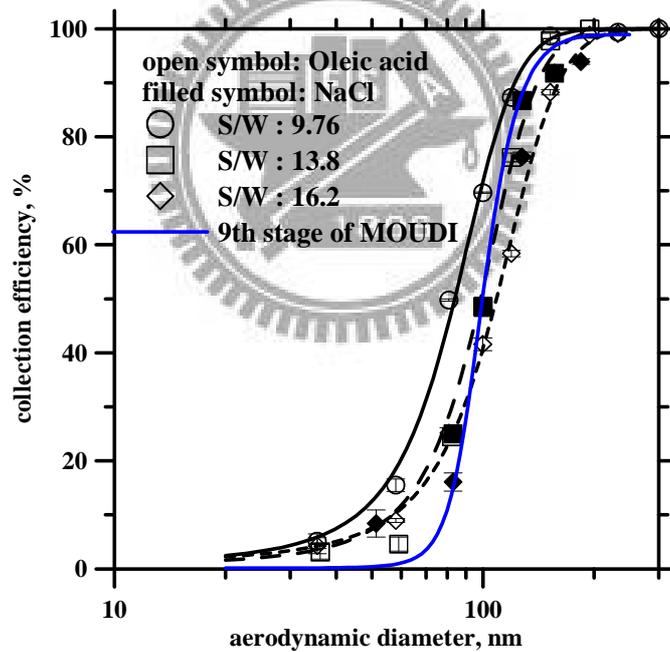


圖 4.1 多微孔衝擊器在不同 S/W 值之下的微粒收集效率曲線。

(微孔數目：137 個、流量：2.0 L/min、壓損：122 cm H₂O)

圖 4.2 為本衝擊器在不同 S/W 值之下，液體微粒收集效率曲線和 \sqrt{Stk} 的關係圖，當 S/W 值為 9.76、13.8 和 16.2 時， $\sqrt{St_{50}}$ 分別為 0.521、0.583 及 0.624。由此結果可知，當 S/W 值改變時， $\sqrt{St_{50}}$ 值會因截取直徑改變的影響而改變。歸

納以上結果可知當噴嘴板-衝擊板的距離(S)增加時，S/W 值會提高，微粒收集效率曲線會向右偏移，使截取氣動直徑與 $\sqrt{St_{50}}$ 隨之提高。此外，當 S/W 為 13.8 時，因本衝擊器微孔流速與截取氣動直徑均與 MOUDI 第九階接近，所以 $\sqrt{St_{50}}$ 值也與 MOUDI 第九階($\sqrt{St_{50}}=0.585$)相近。

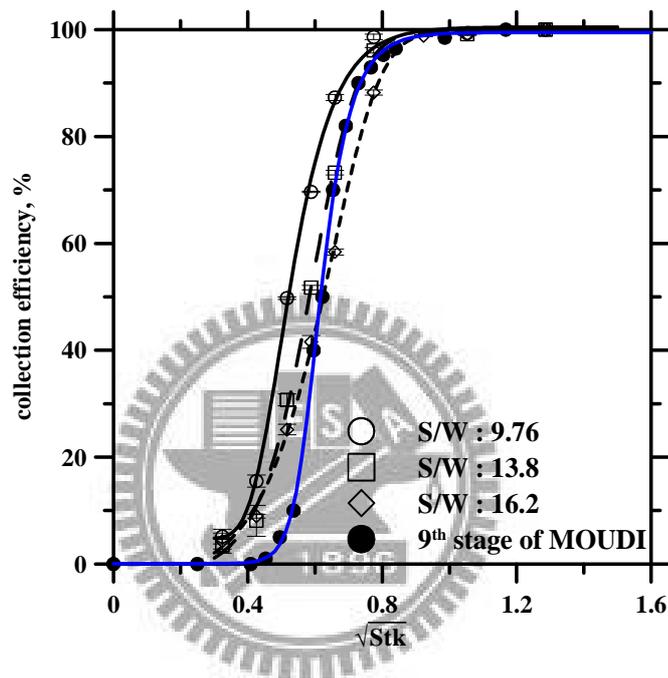


圖 4.2 多微孔衝擊器在不同 S/W 值之下，液體微粒收集效率和 \sqrt{Stk} 的關係。

由於個人採樣幫浦在不同流量下均有一個可負荷的最大壓損，故須先針對幫浦及本採樣器作壓損測試，確保幫浦可提供足夠的抽力。測試結果如圖 4.3 所示，當操作流量為 2.0 L/min 時，本採樣器的壓損約為 125 cm H₂O(旋風器、衝擊器和後端濾紙產生的壓損分別為 1 cm H₂O、122 cm H₂O 和 1-5 cm H₂O)。本研究使用的 XR-5000 幫浦在 2.0 L/min 最大可承受壓損約為 210 cm H₂O，遠高於本組採樣器產生的壓損，故無抽力不足之虞。

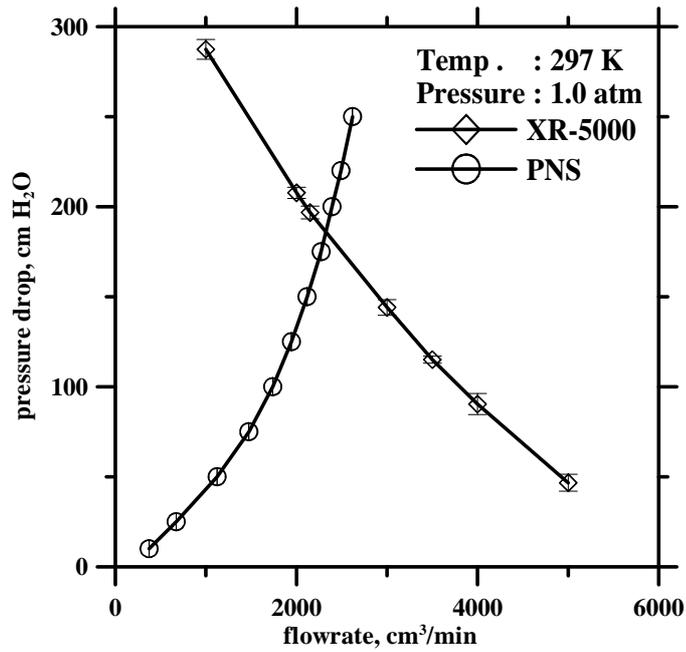


圖 4.3 個人奈米採樣器壓損測試。

4.2 可呼吸性旋風器的測試結果

根據衝擊器的校正結果，本採樣器的採樣流量為 2.0 L/min。圖 4.4 為可呼吸性旋風器壓損測試結果。如圖所示，此旋風器於流量 2.0 L/min 的操作條件下，產生的壓損約為 10 mm H₂O (1 cm H₂O)。

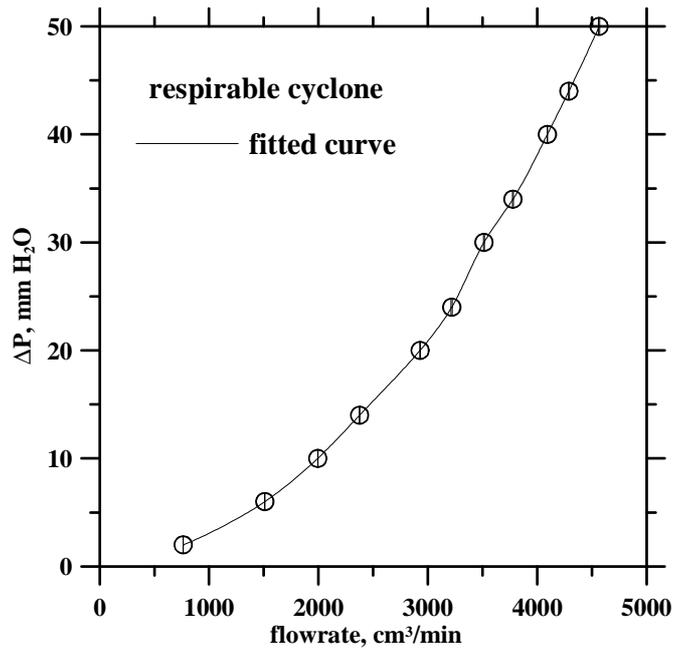


圖 4.4 可呼吸性旋風器壓損測試。

圖 4.5 為可呼吸性旋風器的微粒收集效率曲線，結果顯示該旋風器的截取氣動直徑為 $3.98 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ，與本研究設計值相近。但微粒收集效率曲線較可呼吸性微粒準則(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)略顯陡峭。

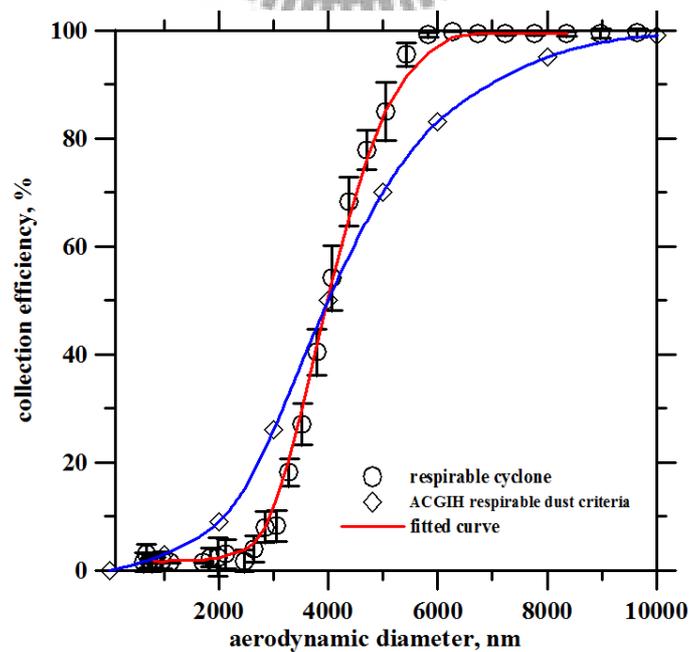


圖 4.5 可呼吸性旋風器微粒收集效率曲線(旋風器入口尺寸為 2.4 mm x 2.4 mm)。

4.3 多微孔衝擊器微粒負荷與壓損變化、微粒收集效率之關係

為了確認本實驗使用的 TiO₂ 微粒的密度，本研究利用 APS、SMPS 和 MOUDI 分別量測以 SSPD 分散的 TiO₂ 粉體的粒徑分佈及質量分佈。如圖 4.6 與圖 4.7 所示，TiO₂ 微粒粒徑分佈呈現 log-normal，微粒的數目中間直徑(Number Median Diameter, NMD)為 225 nm，幾何標準偏差為(σ_g)為 2.13；而質量中間氣動直徑約為 1.11 μm ， σ_g 為 1.99，RPM 濃度為 $2.2 \pm 0.5 \text{ mg/m}^3$ 。由圖 4.7 可知，APS 與 MOUDI 量測 4 μm 以下的質量分佈相近，但粒徑 4 μm 以上卻差異甚大，原因可能是部分通過 APS 的微粒聚集變大，使得 APS 測量到的大顆微粒數值變大，雖然不影響 TiO₂ 微粒粒徑分佈，但轉換成質量濃度時，大微粒質量會增加許多[47]。

將上述得到的數目中間直徑、幾何標準偏差和質量中間氣動直徑代入公式 (2.6)-(2.7)內，得到 TiO₂ 微粒的密度為 870 kg/m^3 。

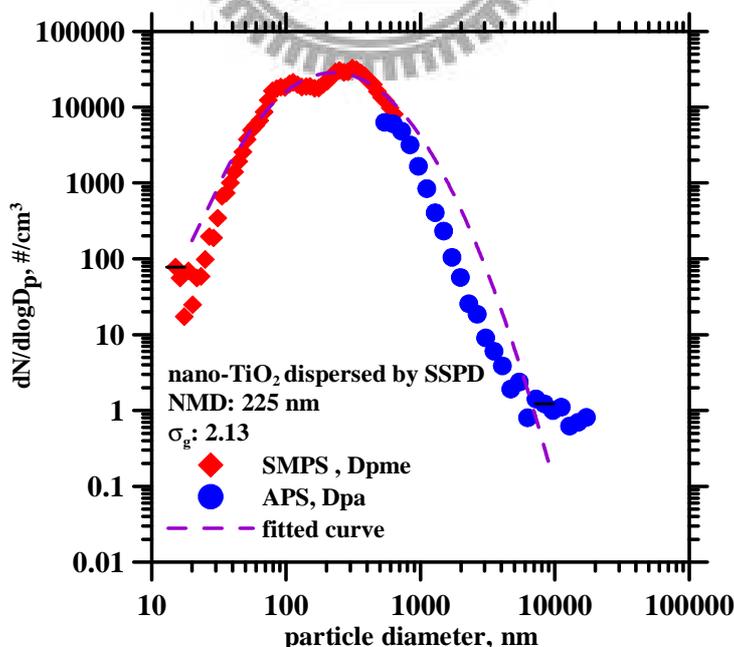


圖 4.6 以 APS 和 SMPS 量測被 SSPD 分散的 TiO₂ 粉體的粒徑分佈。

(Dpa 表示氣動直徑、Dpme 表示電移動度直徑)

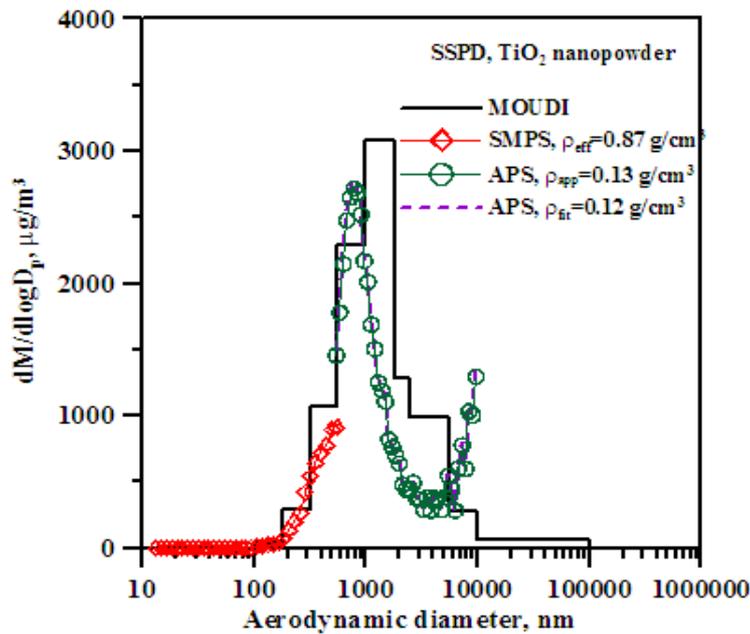


圖 4.7 以 MOUDI 量測被 SSPD 分散的 TiO_2 粉體的重量濃度分佈。

圖 4.8 為 SMPS 在衝擊器負載實驗過程中測到的 TiO_2 粒徑分佈，由圖可見以 SSPD 分散出的 TiO_2 微粒的數目濃度雖然不穩定，但實驗過程中微粒的濃度只用以估算微粒負載的時間，因此並不會影響到實驗結果。而 SMPS 測量到的粒徑分佈峰值為 212 nm，質量濃度為 $33.9 \pm 10.0 \text{ mg/m}^3$ 。圖 4.9 與表 4.1 為衝擊器經負載實驗後的微粒收集效率曲線及數據，當微粒負載量為 0.65 mg、1.08mg、2.5 mg 和 5.7 mg 時，因為 TiO_2 微粒堆積在鋁箔基質上，使得噴嘴-衝擊板距離由原本的 750 μm 縮短為 700 μm 、550 μm 、500 μm 、150 μm ，所以本衝擊器的截取直徑由 100 nm 降低至 96.7 nm、88.5 nm、85.8 nm 與 69.8 nm。因此在不影響本採樣器截取直徑的條件下(截取直徑改變 < 5%)，最大微粒負荷量為 0.65 mg，換言之，本採樣器在 8 小時工作時間內，最大的微粒負荷濃度為 0.72 mg/m^3 。

此外本研究在微粒負荷實驗後，同時以液體和固體微粒進行本採樣器的微粒收集效率測試，以確認本採樣器是否有微粒彈跳現象。由圖 4.10 可知，經微粒負荷後的採樣器對於氣動直徑 200 nm 以上的微粒的收集效率降低至 95%，表示有微粒彈跳的現象發生。而在整個實驗過程中，高濃度微粒的負荷對本採樣器的

壓損幾乎沒有影響。

本研究也將實驗結果轉換成單位基質塗敷量下之微粒最大負荷量，並與 MOUDI 比較。如表 4.2 所示，當本採樣器單位面積塗敷量為 0.19 mg/cm^2 ，微粒最大負荷量為 0.65 mg ；而 MOUDI 在 0.25 mg/cm^2 、 0.5 mg/cm^2 和 1.0 mg/cm^2 的單位塗敷量下，微粒最大負荷量分別只有 0.2 mg 、 0.5 mg 和 3.0 mg 。此結果顯示，本採樣器在單位塗敷量下可承受的微粒量高於 MOUDI。

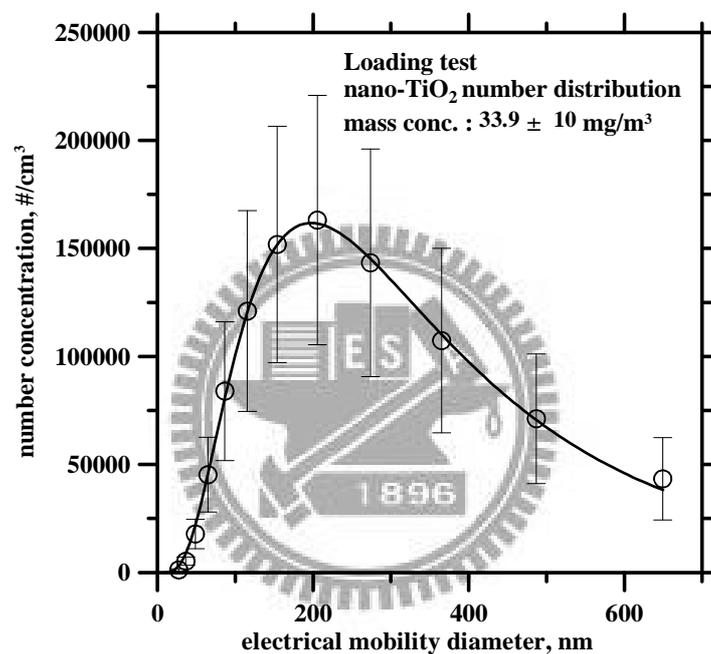


圖 4.8 以 SMPS 量測衝擊器微粒負載實驗時 TiO₂ 微粒的粒徑分佈。

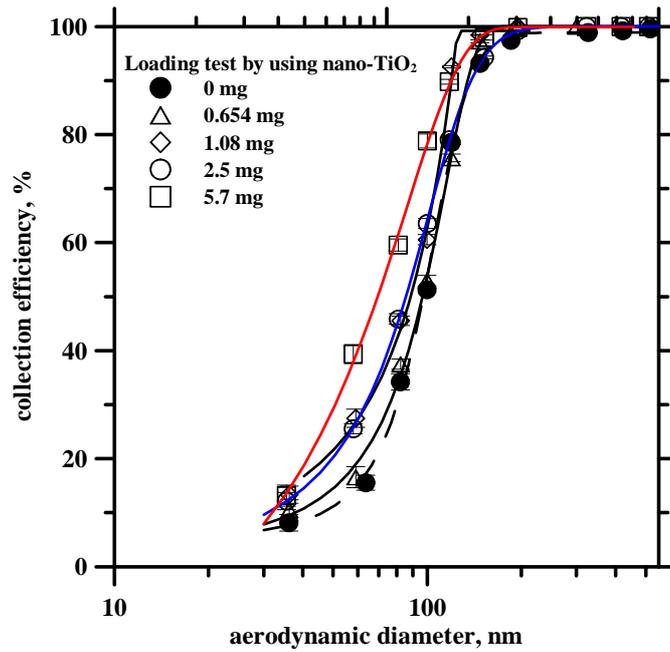


圖 4.9 經 nano-TiO₂ 微粒負載測試後的採樣器的微粒收集效率測試結果。

表 4.1 經微粒負載後採樣器的實驗數據。

鋁箔基質負載重量 (mg)	0.654	1.08	2.5	5.7
壓損變化(cm H ₂ O)	1(120→121)	2(F22→124)	1(122→123)	3(118→121)
負載時間(min)	10	15	240	80
TiO ₂ 微粒負載濃度 (mg/m ³)	32.7	36	5.21	35.6
負載後採樣器的截取直徑, nm	96.7	88.5	85.8	69.8
TiO ₂ 堆積在鋁箔基質的高度, μm	50	200	250	600
噴嘴與衝擊基質的距離, μm	700	550	500	150

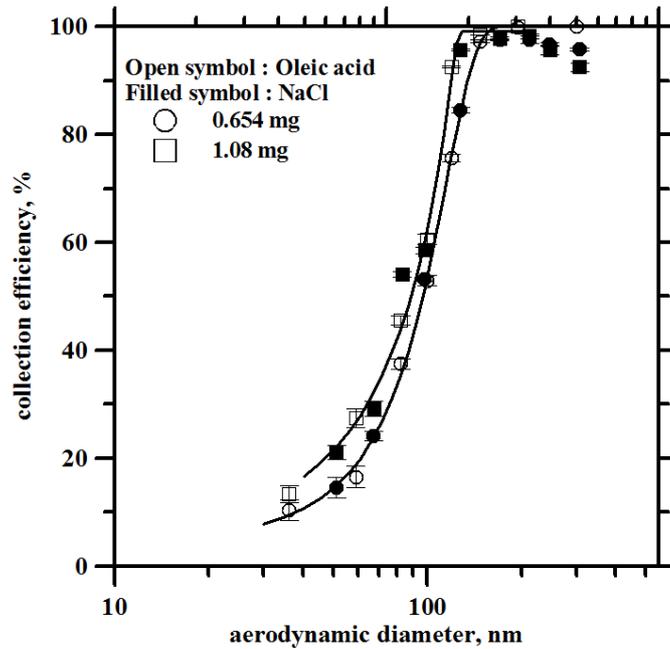


圖 4.10 本採樣器微粒負載後微粒彈跳現象。

表 4.2 單位基質塗敷數量下之微粒最大負荷量，和 MOUDI 之比較[48]。

	單位面積塗敷數量 (mg/cm ²)	微粒最大負荷量(mg)
本採樣器	0.19	0.65
MOUDI	0.25	0.2
	0.5	0.5
	1.0	0.5

本研究也將本衝擊器的 S/W 與 \sqrt{Stk} 的關係與 Marple 學者的比較，如圖 4.11 所示。本衝擊器的 S/W 值與 $\sqrt{St_{50}}$ 之關係呈一線性，與 Marple 的單一噴嘴的 $\sqrt{St_{50}}$ 值 ($\sqrt{St_{50}}=0.477$)[53] 差異很大，此外因微粒負載後改變 S/W 與 $\sqrt{St_{50}}$ 也可對應在此趨勢上。

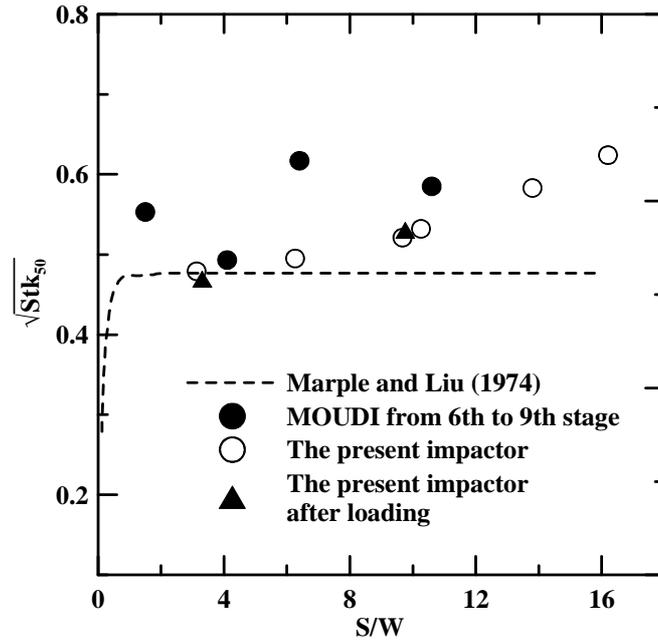


圖 4.11 本衝擊器 $\sqrt{St50}$ 與 Marple 比較[49]。

4.4 個人奈米採樣器與 MOUDI 比對結果

根據本實驗的校正曲線，在 2.0 L/min 的操作流量之下，旋風器與衝擊器的截取氣動直徑分別為 3.98 μm 和 101.4 nm，表示鋁箔基質所收集的微粒範圍約介於 $\text{PM}_{0.1-4.0}$ 。實驗室比對結果如圖 4.12、圖 4.13、表 4.3 至表 4.8 所示。由三次比對結果可見，MOUDI 採集的 NPs 濃度分別為 81.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、289.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 694.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，低於本採樣器的 133.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、446 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 955 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，兩採樣器 NPs 濃度差異達 30% 以上；而 MOUDI 採集 RPM 濃度分別為 204.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1507.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 13037.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，與本採樣器採集的 236.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1566 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 13396.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 相近。造成兩採樣器 NPs 濃度差異的可能原因為奈米油酸微粒通過 MOUDI 各階產生的損失導致。

為減少奈米微粒通過 MOUDI 產生的損失，因此本研究利用只有第九階噴嘴的 MOUDI，與本採樣器再進行比對。結果顯示，只含第九階噴嘴的 MOUDI 所採集的 NPs 濃度為 191.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、510.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 987 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，較本採樣器採集的

180.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、434 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 935 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 高，主要是因為本採樣器對奈米微粒的收集效率較 MOUDI 第九階高，而兩採樣器採集的 NPs 濃度相近(濃度差異 < 15%)。此外實驗結果亦可證明奈米微粒通過 MOUDI 各階噴嘴時確實會產生微粒損失。

由實驗壓損的記錄顯示，本採樣器在高濃度微粒負荷下，壓損最大僅升高 7.0 cm H₂O，表示本採樣器可承受高濃度微粒負荷。

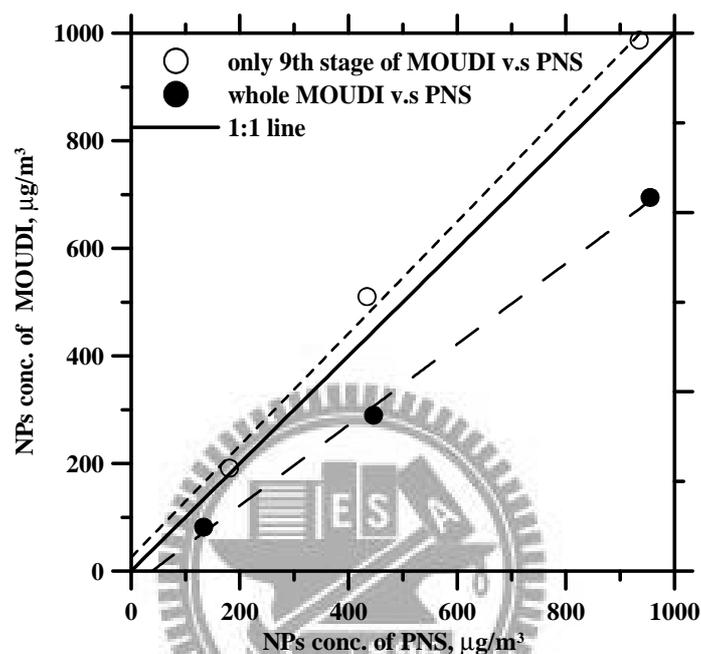


圖 4.12 本採樣器與 MOUDI 在實驗室比對採集奈米微粒的結果。

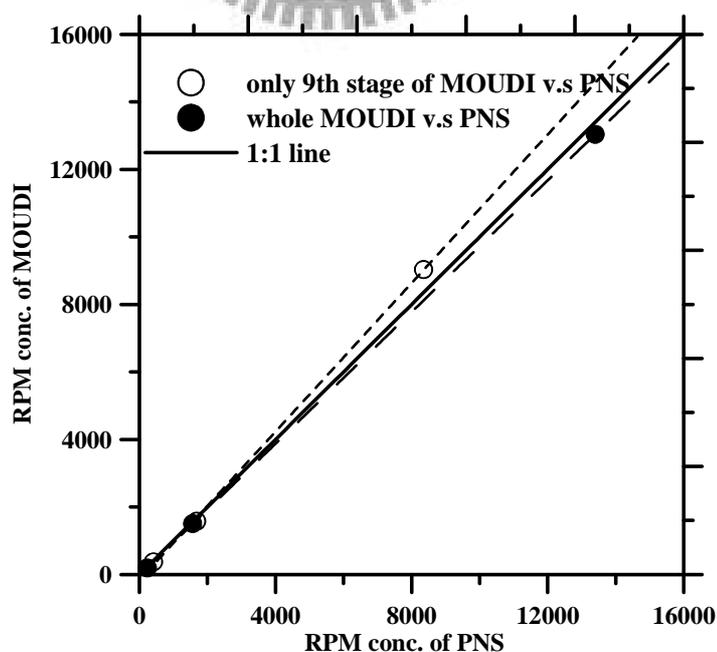


圖 4.13 本採樣器與 MOUDI 在實驗室採集可呼吸性微粒的結果。

表 4.3 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.01% OA, 採樣時間：120 min)。

使用的微粒	採樣時間：120 min	
	MOUDI	個人奈米採樣器
0.01% (v/v) Oleic acid		
壓損變化 (cm H ₂ O)	0	1(127→128)
PM _{0.1-4.0} 重量 (µg)	404.9	24.7
PM _{0.1-4.0} 濃度 (µg/m ³)	112.5	102.8
PM _{0.1-4.0} 濃度差異, %	8.64	
NPs 重量 (µg)	294	32
NPs 濃度 (µg/m ³)	81.7	133.3
NPs 濃度差異, %	63.3	
RPM 濃度差異, %	21.6	

表 4.4 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.1% OA, 採樣時間：50 min)。

使用的微粒	採樣時間：50 min	
	MOUDI	個人奈米採樣器
0.1% (v/v) Oleic acid		
壓損變化 (cm H ₂ O)	0	3(125→128)
PM _{0.1-4.0} 重量 (µg)	1826.1	112
PM _{0.1-4.0} 濃度 (µg/m ³)	1217.4	1120
PM _{0.1-4.0} 濃度差異, %	8.0	
NPs 重量 (µg)	434.6	44.6
NPs 濃度 (µg/m ³)	289.7	446.0
NPs 濃度差異, %	53.9	
RPM 濃度差異, %	3.91	

表 4.5 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(1% OA, 採樣時間：20 min)。

使用的微粒	採樣時間：20 min	
	MOUDI	個人奈米採樣器
1% (v/v) Oleic acid		
壓損變化 (cm H ₂ O)	0	6(123→129)
PM _{0.1-4.0} 重量 (µg)	7405.8	497.7
PM _{0.1-4.0} 濃度 (µg/m ³)	12343.1	12441.7
PM _{0.1-4.0} 濃度差異, %	0.8	
NPs 重量 (µg)	416.8	38.2
NPs 濃度 (µg/m ³)	694.7	955
NPs 濃度差異, %	37.5	
RPM 濃度差異, %	2.75	

表 4.6 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.01% OA, 採樣時間：120 min)。

使用的微粒	採樣時間：120 min	
	MOUDI 第九階噴嘴	個人奈米採樣器
0.01% (v/v) Oleic acid		
壓損變化 (cm H ₂ O)	0	1(123→124)
PM _{0.1-4.0} 重量 (µg)	661.1	56.3
PM _{0.1-4.0} 濃度 (µg/m ³)	183.6	234.7
PM _{0.1-4.0} 濃度差異, %	27.8	
NPs 重量 (µg)	689.2	43.4
NPs 濃度 (µg/m ³)	191.4	180.3
NPs 濃度差異, %	5.54	
RPM 濃度差異, %	10.8	

表 4.7 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.1% OA, 採樣時間：50 min)。

使用的微粒	採樣時間：50 min	
	MOUDI 第九階噴嘴	個人奈米採樣器
0.1% (v/v) Oleic acid		
壓損變化 (cm H ₂ O)	0	3(126→129)
PM _{0.1-4.0} 重量 (µg)	1602.2	122.3
PM _{0.1-4.0} 濃度 (µg/m ³)	1068.2	1223.3
PM _{0.1-4.0} 濃度差異, %	14.52	
NPs 重量 (µg)	765.4	43.4
NPs 濃度 (µg/m ³)	510.3	434
NPs 濃度差異, %	14.52	
RPM 濃度差異, %	4.99	

表 4.8 MOUDI 與本採樣器實驗室比對結果(0.5% OA, 採樣時間：20 min)。

使用的微粒	採樣時間：20 min	
	MOUDI 第九階噴嘴	個人奈米採樣器
0.5% (v/v) Oleic acid		
壓損變化 (cm H ₂ O)	0	7(127→134)
PM _{0.1-4.0} 重量 (µg)	4709.1	296.7
PM _{0.1-4.0} 濃度 (µg/m ³)	7848.5	7416.7
PM _{0.1-4.0} 濃度差異, %	5.50	
NPs 重量 (µg)	592.2	37.4
NPs 濃度 (µg/m ³)	987	935
NPs 濃度差異, %	5.27	
RPM 濃度差異, %	5.48	

五、結論

為了評估工作人員的奈米微粒曝露量，本研究設計一組個人奈米採樣器，此採樣器主要分為三部份，第一部分及第二部份分別為截取直徑 $4.0\ \mu\text{m}$ 的可呼吸性旋風器和截取直徑為 $100\ \text{nm}$ 的多微孔衝擊器(內含 137 個平均直徑 $54.3\ \mu\text{m}$ 微孔)，為防止微粒彈跳，衝擊板上置有塗敷矽油的衝擊基質，並在下方裝有步進馬達使其可旋轉；第三部份為濾紙匣，其內部為用來收集奈米微粒的鐵弗龍濾紙。

由實驗室校正結果顯示，在操作流量 $2.0\ \text{L/min}$ 的條件下，旋風器的截取氣動直徑為 $3.98\ \mu\text{m}$ ，其收集效率曲線較 ACGIH 略顯陡峭；當 S/W 值為 13.8 (S: $750\ \mu\text{m}$) 時，本衝擊器的截取直徑為 $101.4\ \text{nm}$ 。此外，整組採樣器產生的壓損約為 $125\ \text{cm H}_2\text{O}$ ，而本研究使用的 XR-5000 個人幫浦在該流量可負荷採樣器產生的壓損。

微粒負荷實驗結果顯示，衝擊器改變截取直徑的主因為堆積在衝擊板的微粒造成 S/W 縮短所致。而本採樣器在不改變截取直徑的情況下，基質單位塗敷量可負荷的最大微粒負荷量為 $0.65\ \text{mg}$ ，較 MOUDI 高。此外，本採樣器 S/W 與 $\sqrt{St50}$ 呈線性關係，與單一噴嘴理論不同。

實驗室比對測試結果顯示，本採樣器採集的可呼吸性微粒和奈米微粒濃度均與 MOUDI 差異不大，表示本採樣器能有效的截取可呼吸性微粒及奈米微粒，且在高濃度微粒負荷下本採樣器幾乎不會增加壓損。

参考文献

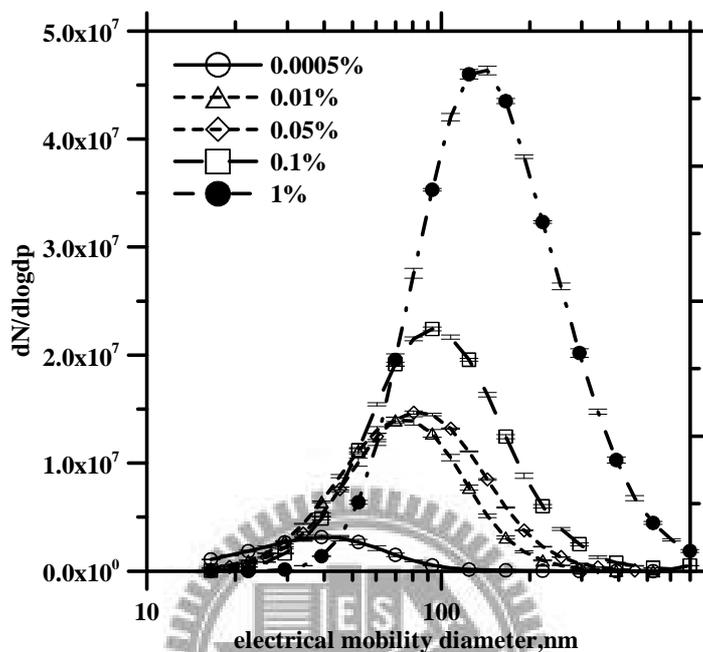
- [1] The Royal Society & the Royal Academy of Engineering (2004). Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. 29 July
- [2] Crosera M, Bovenzi M, Maina G, Adami G, Zanette C, Florio C, Larese FF. Nanoparticle dermal absorption and toxicity: a review of the literature. *Int Arch Occup Environ Health* 2009;82:1043-55.
- [3] Butz, T. et al. Quality of Skin as a Barrier to ultra-fine Particles. http://www.unileipzig.de/%7Enanoderm/Downloads/Nanoderm_Final_Report.pdf, in *Nanoderm Final Report to the EU*, 2007
- [4] Oberdörster G. Significance of particle parameters in the evaluation of exposure-dose-response relationships of inhaled particles. *Inhal Toxicol* 1996;8:73-89.
- [5] Oberdörster G. "An emerging discipline. Proceeding of International Symposium on Environment Nanotechnology. *Nanotoxicology* 2004 :71-91,
- [6] Zhu Y, Hinds WC, Kim S, Shen S, Sioutas C. Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic. *Atmos Environ* 2002;36:4323-35.
- [7] Kreyling WG, Semmler M, Möller W. Proceeding of International Symposium on Environment Nanotechnology. Health implications of nanoparticles 2004:93-110.
- [8] Oberdörster G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int Arch Occup Environ Health* 2001;74:1-8.
- [9] Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 2005;113:823-39.
- [10] Aitken RJ, Greely KS, Tran CL. Nanoparticle: an occupation hygiene review. United Kingdom: Health and safety Executive. Research Report 274. HSE Books, Norwich UK.
- [11] ASCC (Australian Safety and Compensation Institute, Inc. 2003 Occupational and education personal eye and face protection devices. ANSI Z87.1.
- [12] Lam CW, James JT, McCluskey. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental risk. *Crit Rev Toxicol* 2006;36:189-217.

- [13]Maynard AD. Nanotechnology: the next big thing or much ado about nothing. *Ann Occ Hyg* 2007;51:1-12.
- [14]NIOSH. NIOSH Current Intelligence Bulletin: Evaluation of Health Hazard and Recommendations for Occupational Exposure to Titanium Dioxide(draft) 2005.
- [15] Tian F, Cui D, Schwarz H, Estrada GG, Kobayashi H. Cytotoxicity of single wall carbon nanotubes on human fibroblasts. *Toxicol Vitro* 2006;20:1202-12.
- [16]Maricq MM, Xu N, Chase RE. Measuring particulate mass emissions with the electrical low pressure impactor. *Aerosol Sci. Tech* 2006;40:68-79.
- [17]Hinds WC. *Aerosol Technology, properties,behavior, and measurement of airborne particle*. 2nd ed. John Willey & Sons Inc publisher;1999.
- [18] Tsai CJ, Shiau HG, Lin KC, Shih TS. Effect of deposited particles and particle charge on the penetration of small sampling cyclones. *J Aerosol Sci* 1999;30: 313-23.
- [19]Chen CC, Lai CY, Shih TS, Yeh WY. Development of respirable aerosol samplers using porous foams. *Am. Ind. Hyg. Assoc J* 1998;59:766-73.
- [20]Rubow KL, Marple VA, Olin J, Mccawley MA. A personal cascade impactor: design, evaluation and calibration. *Am Ind Hyg Assoc J* 1987;48:532-8.
- [21]Tsai CJ, Huang CH, Wang SH, Shih TS. Design and testing of a personal porous metal denuder. *Aerosol Sci Tech* 2001;35:611-6.
- [22]Huang CH, Tsai CJ, Shih TS. Particle collection efficiency of an inertial impactor with porous metal substrates. *J Aerosol Sci* 2001;32:1035-44.
- [23]Kavouras IG, Koutrakis P. Use of polyurethane foam as the impaction substrate/collection medium on conventional inertial impaction. *Aerosol Sci Technol* 2001;34:46-56.
- [24]Kavouras IG, Ferguson ST, Wolfson JM, Koutrakis P. Development and validation of a high volume low cut-off inertial impactor (HVLI). *Inhal Toxicol* 2000;12:35-50.
- [25] Huang CH, Chang CS, Chang SH, Tsai CJ, Shih TS, Tang DT. Use of porous foam as the substrate of an impactor for respirable aerosol sampling. *J Aerosol Sci* 2005;36: 1373-86.
- [26] Otani Y, Eryu K, Furuuchi M, Tajima N, Tekasakul P. Inertial Classification of Nanoparticles with Fibrous Filters. *Aerosol Air Qual Res* 2007;33:343-52.

- [27] Furuuchi M, Choosong T, Hata M, Otani Y, Tekasakul P, Takizawa M, Nagura M. Development of a personal sampler for evaluating exposure to ultrafine particles. *Aerosol Air Qual Res* 2010;10:30-7.
- [28] Furuuchi M, Eryu K, Nagura M, Hata M, Kato T, Tajima N, Sekiguchi K, Ehara K, Seto T, Otani Y. Development and performance evaluation of aur sampler with inertial filter for nanoparticle sampling. *Aerosol Air Qual Res* 2010;10:185-92.
- [29] Misra C, Singh M, Shen S, Sioutas C, Hall PM. Develop and Evaluation of a Personal Cascade Impactor Sampler(PCIS). *J Aerosol Sci* 2002;33: 1027-1047.
- [30] Azong-Wara N, FISSAN H, Asbach C, Stahlmecke B, Kaminski H, Plitzko S, Kuhlbusch TAJ, 2009. A novel personal thermophoretic sampler for nanoparticle exposure assessment, presented at AAAR'09 28th Annual Meeting.
- [31] Volckens J, Koehler K, Marchese A, Prieto A, 2009. A personal sampler for engineered nanoparticles, presented at AAAR'09 28th Annual Meeting.
- [32] Lorenzo R, Kaegi R, Gehrig R, Grobety B, Burtscher. A thermophoretic precipitator for the representative collection of atmospheric ultrafine particles for microscopic analysis. *Aerosol Sci Tech* 2007;41:934-43.
- [33] NIOSH Manual of Analytical Method (NMAM). Method 0600—Particulates not otherwise regulated, respirable, <http://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdfs/0600.pdf>
- [34] NIOSH Manual of Analytical Method (NMAM). Method 7300—Elements by ICP, <http://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdfs/7300.pdf>
- [35] 蔡春進，2007。個人奈米微粒採樣器的研發。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所報告，IOSH
- [36] 蔡春進，2008。奈米微粒個人採樣器收集效率最佳化及驗證研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所報告，IOSH97-A323。
- [37] 蔡春進，2009。個人奈米採樣器收集效率測試。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所報告，IOSH98-A323
- [38] Peter TM, Chein HM, Lundgren DA. Comparison and Combination of Aerosol Size Distributions Measured with a Low Pressure Impactor, Differential Mobility Particle Sizer, Electrical Aerosol Analyzer, and Aerodynamic Particle Sizer. *Aerosol Sci and Tech* 1993;19:396- 405.
- [39] Sioutas C, Eileen A, Wolfson JM, Koutrakis P. Evaluation of the

- Measurement Performance of the Scanning Mobility Particle Sizer and Aerodynamic Particle Sizer. *Aerosol Sci Tech* 1999b;30:84-92.
- [40] Zelenyuk A, Yong C, Imre D. From Agglomerates of Spheres to Irregularly Shaped Particles: Determination of Dynamic Shape Factors from Measurements of Mobility and Vacuum Aerodynamic Diameters. *Aerosol Sci Tech* 2006;40:197-217.
- [41] Cohen BS, Hering SV (1995). *Air sampling instruments*. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists Inc.
- [42] Tsai C J, Shiau HG., Lin KC, Tung TS. Effect of Deposited Particles and Particle Electrostatic Charge on the Penetration Efficiency of Small Sampling Cyclones. *J Aerosol Sci* 1999;30:313-23.
- [43] Lapple CE. Gravity and Centrifugal Separation. *Ind Hyg. Quart* 1950;11:40-8.
- [44] Hsiao TC, Chen DR, Son SY. Development of mini-cyclones as the size-selective inlet of miniature particle detectors, *Aerosol Sci* 2009;40:481-91.
- [45] Jiao J, Zheng Y. Experimental and numerical investigations of a dynamic cyclone with a rotary impeller. *Chem Eng Process* 2008;47:1861-6.
- [46] Xiang RB, Lee KW. Effects of Exit Tube Diameter on the Flow Field in Cyclone. *Particulate Science and Technology* 2008;26:467-81.
- [47] Stein SW, Gabrio HJ, Oberreit D, Hairston P, Myrdal PB, Beck T. An Evaluation of Mass-Weighted Size Distribution Measurements with the Model 3320 Aerodynamic Particle Sizer. *Aerosol Sci Tech* 2002;36:845-54.
- [48] Marple VA, Rubow KL, Behm SM. A Microorifice Uniform Deposit Impactor(MOUDI): Description , Calibration, and Use. *Aerosol Sci Tech* 1991;14:434-46.
- [49] Marple VA, Liu BYH. Characteristics of laminar jet impactors. *Environ Sci Tech*. 1974; 8: 648-54.

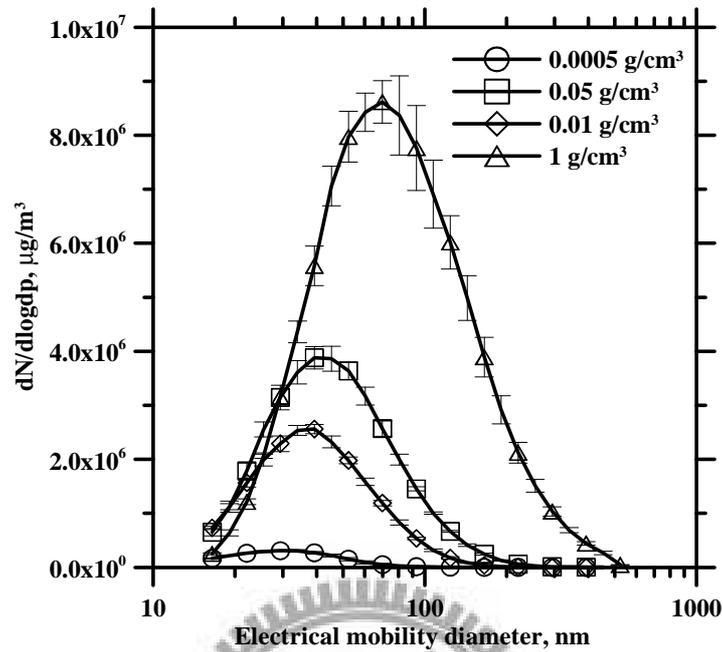
附錄



附錄 1 不同濃度的油酸溶液的粒徑分佈。

附錄 2 不同濃度的 Oleic acid 溶液實驗數據。

OA conc. %(v/v)	Median diameter, nm	Mean diameter, nm	Mode, nm	Geo. Std. Dev.	Total conc.,#/cm
0.0005	38.83±0.31	44.33±2.78	39.24±0.05	1.62±0.08	(1.70±0.08)×10 ⁶
0.01	72.61±0.39	80.98±0.45	73.78±0.13	1.64±0.003	(7.56±0.02)×10 ⁶
0.05	82.74±0.53	93.76±0.45	83.08±5.58	1.68±0.004	(8.37±0.01)×10 ⁶
0.1	96.27±0.31	112.81±0.68	93.06±0.10	1.71±0.01	(1.27±0.05)×10 ⁷
1	145.80±0.34	173.83±0.71	143.30±0.23	1.72±0.01	(2.76±0.01)×10 ⁷



附錄 3 不同濃度的 NaCl 溶液的粒徑分佈。

附錄 4 不同濃度的 NaCl 溶液實驗數據。

NaCl conc. , g/cm ³	Median diameter, nm	Mean diameter, nm	Mode, nm	Geo. Std. Dev.	Total conc. (#/cm ³)
0.005	30.53±0.30	33.67±0.55	31.25±2.49	1.48±0.02	(1.44±0.22)×10 ⁵
0.01	38.18±0.51	43.79±0.49	36.61±2.88	1.60±0.01	(1.37±0.03)×10 ⁶
0.05	44.40±0.61	52.22±0.53	41.4±2.69	1.67±0.004	(2.25±0.01)×10 ⁶
1	73.78±1.45	92.54±1.19	65.11±5.40	1.87±0.01	(6.02±0.03)×10 ⁶