

94年度研究計畫 IOSH94-A102



RRPG95020223 ( 7 / .P)



# 勞工安全衛生研究報告

## 職場微粒分徑採樣之評估研究

Research on the Evaluation of Size-classified  
Sampling of Particles in the Workplace

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所委託研究報告

## 職場微粒分徑採樣之評估研究

# Research on the Evaluation of Size-classified Sampling of Particles in the Workplace

研究主持人：蔡春進

計畫主辦單位：行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

計畫研究單位：國立交通大學環境工程研究所

研究期間：中華民國 94 年 3 月至 94 年 11 月

**\* 本研究報告僅供參考用不代表本所意見 \*  
非經本所書面同意不得對外發表**

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

中華民國 95 年 1 月

## 摘要

利用泡綿當做收集板的慣性衝擊器時的收集效率較為平緩的原理，本計畫設計了一個三階粉塵採樣器，並於實驗室進行校正測試，且於工作場所進行粉塵濃度比對測試。本採樣器含可吸入性粉塵入口，截取氣動直徑  $10\mu\text{m}$  的慣性衝擊器噴嘴板及可吸入性粉塵的泡綿(第一階)，截取氣動直徑  $4\mu\text{m}$  的慣性衝擊器噴嘴板及胸腔區粉塵泡綿(第二階)，可呼吸性粉塵泡綿(第三階)，及終端濾紙(第四階)。本研究在實驗室進行微粒的收集效率實驗，結果顯示本採樣器採樣流量為  $3.2\text{ L/min}$ ，使用  $100\text{ppi}$  泡綿為衝擊板時在一倍的噴嘴板—收集板距離(jet-to-plate distance)下，可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的胸腔區及可呼吸性粉塵採樣效率規範，採樣器第二階及第三階的截取氣動直徑分別為  $9.6$  及  $4\ \mu\text{m}$ ， $\sqrt{Stk_{50}}$  為  $0.39$ 。研究亦發現固體微粒收集效率曲線與液體微粒收集效率曲線完全吻合，證明本研究所使用之泡綿收集板具有抑制固體微粒彈跳的問題，且泡綿收集板對固體微粒粉塵負荷量可高達  $9\ \text{mg}$ 。另外，本研究於不同工作場所進行現場粉塵濃度比對，結果發現兩個相同的採樣器相互之間的測值十分接近，表示現場採樣比對方法的精確性很高。在可呼吸性粉塵方面，三階粉塵採樣器與 IOSH cyclone 的測值十分接近;且在低粉塵濃度時與 Marple 採樣器的濃度接近。三階採樣器的測值在胸腔區粉塵及可吸入性粉塵方面均比 Marple 採樣器的測值低，Respicon 亦有相同的趨勢，可能原因為 Marple 採樣器內微粒會由濾紙收集板彈跳至下一階層使然，另一個可能原因為採樣器入口的效率不一樣而造成的結果。

關鍵詞：微粒、分徑、採樣器

# Abstract

Based on the principle that the collection efficiency is less sharp for an impactor with PUF substrates, this project has designed a 3-stage dust sampler. The calibration test was conducted in the laboratory and field comparison test of dust concentrations was conducted in workplaces. The sampler includes an inlet for inhalable particulate mass (IPM), a nozzle plate of the impactor with 10 $\mu$ m cut-off aerodynamic diameter and a PUF for IPM (1st stage), a nozzle plate of the impactor with 4 $\mu$ m cut-off aerodynamic and a PUF for thoracic particulate mass (TPM) (2nd stage), the PUF for respirable particulate mass (RPM) (3rd stage) and the final filter.

Results of the laboratory test for the collection efficiency show that with the 100ppi PUF substrate, and at the flow rate of 3.2 L/min, the collection efficiencies of the thoracic and respirable dusts match with the ISO/CEN/ACGIH criteria when the jet-to-plate distance is 1.0. The cut-off size is 9.6 and 4.0 $\mu$ m for 2nd and 3rd stages, respectively, and  $\sqrt{Stk_{50}}$  is 0.39. It was also found that the collection efficiency for solid particles is equal to that for liquid particles. It proves that there is no solid particle bounce on the PUF substrates for the loaded mass up to 9mg.

In addition, results of the comparison test for dust concentration at various workplaces show that two identical sampler have the same concentrations, which indicate the accuracy of the comparison test. TPM and IPM concentrations measured by the 3-stage sampler are lower than the Marple personal impactor. The Respicon has the same tendency. Possible explanation is due to particle bounce from the filter of the upper stage to that in the next stage, or the differences in the inlet sampling efficiency of the samplers.

**Key Words:** particulate, size-selective, sampler

# 目 錄

摘 要.....	i
Abstract.....	ii
目 錄.....	iii
圖目錄.....	iv
表目錄.....	vi
第一章 前言.....	1
第一節 研究背景及重要性.....	1
第二節 文獻回顧.....	6
第二章 研究方法.....	15
第一節 三階粒狀物採樣器的設計.....	15
第二節 實驗室測試方法.....	20
第三節 作業場所的比對測試.....	22
第三章 結果與討論.....	30
第一節 三階粉塵採樣器設計#2 及設計#3 的實驗室測試結果-液體微粒.....	30
第二節 三階粉塵採樣器設計#3 的實驗室測試結果-固體微粒.....	40
第三節 泡綿負荷粉塵量的影響.....	43
第四節 現場測試結果.....	59
第四章 結論.....	71
第一節 實驗室測試方面.....	71
第二節 現場採樣及鉛分析.....	71
誌謝.....	73
參考文獻.....	74

# 圖目錄

圖 1	國際新定義的分徑曲線示意圖.....	2
圖 2	TSI 的 Respicon 採樣器.....	4
圖 3	TSI Respicon 採樣器在不同風速下的三種粉塵的採樣效率.....	5
圖 4	Harvard 衝擊器在不同收集介質(a)塗油的 2- $\mu\text{m}$ 多孔金屬板(b)PUF 之 不同雷諾數下的收集效率曲線.....	7
圖 5	Sioutas et al.(1999)之 (a)PM <sub>2.5</sub> (b)PM <sub>1</sub> 個人衝擊採樣器的收集效率曲 線及微粒在採樣器內的損失率.....	8
圖 6	粉塵負荷量與截取氣動直徑值之關係.....	10
圖 7	粉塵負荷量與收集效率曲線的關係.....	10
圖 8	蔡(2004)設計的個人採樣器示意圖.....	12
圖 9	可呼吸性粉塵之穿透效率曲線.....	13
圖 10	胸腔區粉塵之穿透效率曲線.....	13
圖 11	2004 年之三階個人粉塵採樣器(設計#1).....	15
圖 12	本年度之三階個人粉塵採樣器(設計#2)(厚度 3mm 泡綿衝擊板).....	15
圖 13	三階採樣器的入口示意圖.....	17
圖 14	三階採樣器的底座示意圖.....	17
圖 15	本年度之三階個人粉塵採樣器(設計#3)(厚度 6mm 泡綿衝擊板).....	18
圖 16	圓環孔可吸入性入口.....	19
圖 17	圓環孔可吸入性入口的效率曲線.....	19
圖 18	可以同時測定採樣器微粒收集效率及內部損失率的實驗系統.....	21
圖 19	可以同時測定採樣器微粒收集效率及內部損失率的實驗系統.....	21
圖 20	粉塵負荷影響收集效率的實驗系統圖.....	22
圖 21	竹東 A 工廠採樣器配置情形以及現場作業照片.....	24
圖 22	台北 B 工廠採樣器配置情形以及現場作業照片.....	25
圖 23	湖口 C 工廠採樣器配置情形以及現場作業照片.....	25
圖 24	現場以旋轉裝置進行採樣器之比對測試.....	26
圖 25	以 ICP-MS 分析不同濃度標準鉛溶液所得到之檢量線.....	29
圖 26	三階採樣器之胸腔區粉塵收集效率曲線，液體微粒(設計#2).....	30
圖 27	APS 測得之微粒氣動直徑與真正氣動直徑的關係.....	31
圖 28	三階採樣器之胸腔區粉塵收集效率曲線，液體微粒(設計#3).....	32
圖 29	三階採樣器之可呼吸性粉塵收集效率曲線，液體微粒(設計#2).....	32
圖 30	三階採樣器之可呼吸性粉塵收集效率曲線，液體微粒。(設計#3).....	33

圖 31	胸腔區粉塵穿透率偏差值(設計#2)	33
圖 32	胸腔區粉塵穿透率偏差值(設計#3)	34
圖 33	可呼吸性粉塵穿透率偏差值(設計#2)	34
圖 34	可呼吸性粉塵穿透率偏差值(設計#3)	35
圖 35	去年的三階採樣器穿透率與 $\sqrt{Stk_{50}}$ 之關係(設計#1)	36
圖 36	三階採樣器穿透率與 $\sqrt{Stk_{50}}$ 之關係(設計#2)	36
圖 37	三階採樣器穿透率與 $\sqrt{Stk_{50}}$ 之關係(設計#3)	37
圖 38	三階採樣器微粒損失百分率(a)第一階 (b) 第二階 (c)第三階(設計#2)	38
圖 39	三階粉塵採樣器液體微粒損失百分率(a)第一階(b)第二階(c)第三階 (設計#3)	39
圖 40	三階採樣器之胸腔區粉塵收集效率曲線，固體 PSL 微粒(設計#3)	40
圖 41	胸腔區粉塵穿透率偏差值，固體 PSL 微粒(設計#3)	41
圖 42	三階採樣器之可呼吸性粉塵收集效率曲線，固體 PSL 微粒(設計#3)	41
圖 43	可呼吸性粉塵穿透率偏差值，固體 PSL 微粒(設計#3)	42
圖 44	三階採樣器穿透率與 $\sqrt{Stk_{50}}$ 之關係，固體 PSL 微粒(設計#3)	42
圖 45	粉塵負荷量與與微粒穿透效率關係圖	44
圖 46	100 ppi 泡綿之粉塵負荷	44
圖 47	兩個 Respicon 採樣器的三種粉塵濃度比較	61
圖 48	兩個 IOSH cyclone 之可呼吸性粉塵濃度比較	62
圖 49	兩組三階採樣器(設計#3)之三種粉塵濃度比較	63
圖 50	IOSH Cyclone 採樣器與 Marple 採樣器之可呼吸性粉塵濃度比較	64
圖 51	Respicon 採樣器與 Marple 採樣器之三種粉塵濃度比較	65
圖 52	三階採樣器(設計#3)與 Marple 採樣器之三種粉塵濃度比較	66
圖 53	所有採樣器與 Marple 採樣器之可呼吸性粉塵濃度比較	67
圖 54	所有採樣器與 Marple 採樣器之胸腔區粉塵濃度比較	67
圖 55	所有採樣器與 Marple 採樣器之可吸入性粉塵濃度比較	68

## 表目錄

表 1	MARS-Xpress 微波消化 .....	28
表 2	NIST1648 標準樣品之回收率。 .....	29
表 3	不同濃度鉛標準溶液查核樣品分析結果 .....	29
表 4	47mm 空白泡棉添加 NIST1648 標準品之回收率結果, 5mL 樣本溶液.....	29
表 5	47mm 空白泡綿的分析結果, 5mL 樣本溶液 .....	29
表 6	三階採樣器 $\sqrt{Stk_{50}}$ 比較表。 .....	37
表 7	控制溫溼度 (RH=45±3%, T=23±0.5°C) 濾紙五重複秤重結果.....	60
表 8	控制溫溼度(RH=35±3%, T=20±0.4°C)泡棉秤重結果 .....	60
表 9	竹東某工廠 2005/08/22 Respicon 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較.....	69
表 10	竹東某工廠 2005/08/22 IOSH cyclone 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較.....	69
表 11	竹東某工廠 2005/08/22 自行研發採樣器採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較.....	69
表 12	台北某工廠 2005/08/16 Respicon 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較....	69
表 13	台北某工廠 2005/08/16 IOSH cyclone 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較.....	69
表 14	台北某工廠 2005/08/16 自行研發採樣器採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度 比較.....	70



# 第一章 前言

## 第一節 研究背景及重要性

在工作場所實施粉塵採樣的目的，是為了能夠準確的測出侵入人體呼吸系統各部位的特定粒徑範圍的粉塵暴露濃度，並了解工作環境中的粉塵濃度是否合乎法規所訂定的界限值。目前 ACGIH、ISO 及 CEN 提出了三種採樣基準作為新的國際標準[1]，包含進入頭部空氣通道的粉塵稱為可吸入性粉塵 (inhalable particulate mass, IPM)，穿過頭部空氣到進入支氣管的粉塵稱為胸腔區粉塵 (thoracic particulate mass, TPM)、及達到氣體交換區的粉塵稱為可呼吸性粉塵 (respirable particulate mass, RPM)，後兩者的穿透率曲線的截取氣動直徑分別為 10  $\mu\text{m}$  及 4  $\mu\text{m}$ 。此規範對採樣器的穿透率曲線定義如下：

(1)可吸入性粉塵：

$$EI(d_{pa}) = 0.5[1 + \exp(-0.06d_{pa})] \times 100\% , 0 < d_{pa} \leq 100\mu\text{m} \quad (1)$$

(2)胸腔區粉塵：

$$ET(d_{pa}) = EI(d_{pa}) \left[ 1 - F\left(\frac{\ln(d_{pa}/11.64)}{\ln 1.5}\right) \right] \quad (2)$$

(3)可呼吸性粉塵：

$$ER(d_{pa}) = EI(d_{pa}) \left[ 1 - F\left(\frac{\ln(d_{pa}/4.25)}{\ln 1.5}\right) \right] \quad (3)$$

其中  $F(x)$  為正規分佈累積函數。

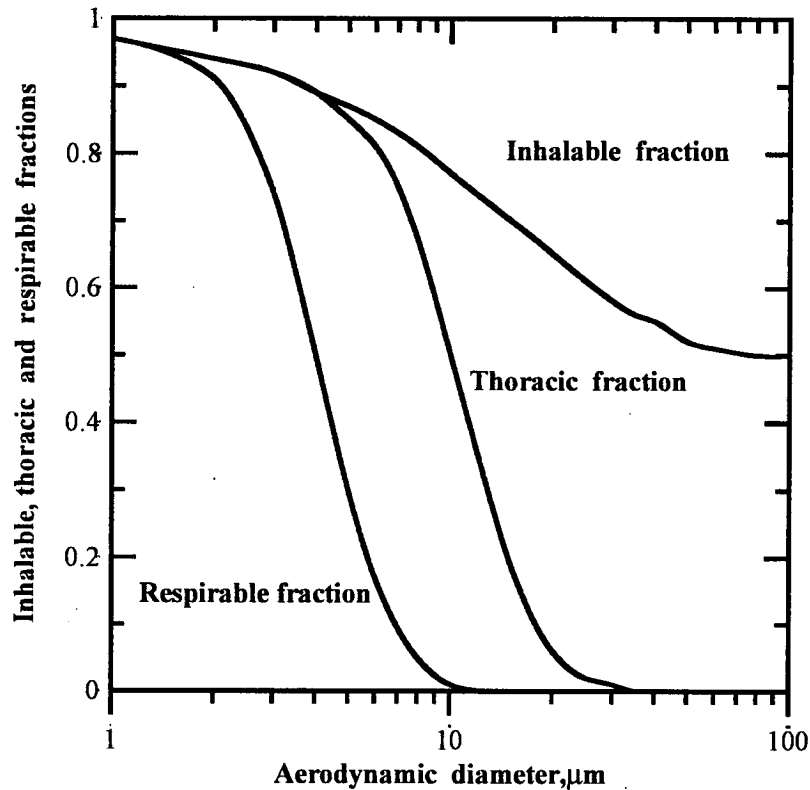


圖 1 國際新定義的分徑曲線示意圖

目前市售的粉塵分徑採樣器，大都只是針對以上三種粉塵做個別的分徑採樣，除了 TSI 的 Respicon 採樣器 (Model 8522, TSI Inc., St. Paul, MN) 外，鮮少有針對上述三種粉塵同時做分徑採樣的採樣器。以可吸入性粉塵採樣器而言，目前市面上有許多不同的設計，最常用為 IOM (Institute of Occupational Medicine) 採樣器。過去針對 IOM 及其他不同的可吸入性粉塵分徑採樣器的性能評估，可參考 Hinds 之說明[1]。

不同的胸腔區的粉塵分徑採樣器則於 Baron and John 之文章中作回顧[2]。在美國，與胸腔區粉塵採樣規範最接近者為 PM10 採樣規範[1]，但其採樣效率曲線較胸腔區粉塵效率規範陡峭。

在可呼吸性粉塵分徑採樣器方面，有許多前置收集器是旋風器的設計，如在美国最常用的是 10mm 尼龍旋風器。也有利用海綿作為前置收集器的可呼吸性粉塵分徑採樣器 [3]。

蔡和石針對市售的可呼吸個人粉塵採樣器 10mm 尼龍旋風器及 SKC 旋風器進行效能評估研究[4]，訂出這兩個採樣器的操作條件，以符合新的 ACGIH 規範，並探討採樣泵之脈動，微粒種類，及採樣器的方位對收集效率的影響。蔡等人及 Tsai

et al.針對 10 mm 尼龍旋風器之微粒收集效率易受粉塵負荷及粉塵靜電之影響，而設計出一新型 IOSH 旋風器，以解決粉塵負荷及粉塵靜電的問題[5,6]。新型 IOSH 旋風器以導電的鋁或塑膠製作，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，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 尼龍旋風器減少很多。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新 ACGIH 規範。

Tsai et al.,進一步在工作現場比對 IOSH 旋風器、10 mm 尼龍旋風器與 Marple 個人採樣器算出的可呼吸性粉塵濃度作為標準，結果發現 IOSH 旋風器的測值與標準可呼吸性粉塵十分接近，而 10 mm 旋風器則與標準值有明顯差異[7]。

賴等人，Chen et al.利用多孔性介質(海綿)，作為呼吸性粉塵採樣器的前置收集器(pre-collector)，他們改變海綿採樣的表面風速、厚度、填充密度、孔隙度，或將不同厚度、孔隙度的海綿串聯，結果發現僅能達到國際新定義曲線截取氣動直徑的要求，而其斜率仍無法與新定義曲線一致[3,8]。然而利用並聯兩組不同管徑之採樣管，且分別放入孔隙度 100、10 ppi，厚度 20、20 mm，直徑 25、13 mm 之海綿，在採樣流量 10.1 L/min 進行採樣時，他們發現可幾乎完全符合可呼吸性粉塵的新分徑曲線。因此，多孔介質對於呼吸性粉塵的收集是可行的。

目前市面僅有可以同時作三種粉塵的採樣器為 TSI 的 Respicon 採樣器(Model 8522, TSI Inc., St. Paul, MN)[9]，如圖 2 所示。它是利用一個圓環孔型的進口(annular slot)及其後面的兩個虛擬衝擊器及終端濾紙來做可呼吸性、胸腔區及可吸入性粉塵的採樣。TSI Respicon 個人採樣器對可呼吸性、胸腔區和可吸入性(未校正)三種粉塵濃度的計算方法分別如下列公式所示：

$$C_R = \frac{Mass_1}{Q_1 t} \quad (4)$$

$$C_T = \frac{Mass_1 + Mass_2}{(Q_1 + Q_2) t} \quad (5)$$

$$C_I = \frac{Mass_1 + Mass_2 + Mass_3}{(Q_1 + Q_2 + Q_3) t} \quad (6)$$

其中

- $C_R$  為可呼吸性粉塵濃度  
 $Mass_1$  為第一階濾紙上的微粒質量  
 $Q_1$  為第一階的採樣流量(2.66 L/min)  
 $C_T$  為胸腔區粉塵濃度  
 $Mass_2$  為第二階濾紙上的微粒質量  
 $Q_2$  為第二階的採樣流量(0.33 L/min)  
 $C_I'$  為可吸入性粉塵濃度(未校正前)  
 $Mass_3$  為第三階濾紙上的微粒質量  
 $Q_3$  為第三階的採樣流量(0.11 L/min)  
 $t$  為採樣時間

根據 TSI 的 Respicon 1997 的操作手冊可吸入性粉塵濃度必須以下列方式校正:

$$C_{exh} = (C_I' - C_T) \times 1.5 \quad (7)$$

$$C_I(\text{校正後}) = C_I' + C_{exh} \quad (8)$$

其中外胸腔區粉塵之濃度  $C_{exh}$  校正成原來的 1.5 倍， $C_I$  (校正後) 為  $C_I'$  與  $C_{exh}$  之和。根據 Li et al. 的研究報告，Respicon 的對可吸入性粉塵的準確度高於其他的採樣器，如 IOM 採樣器，且對於風速為 0.55 及 1.1 m/s 的風向不敏感[9]。圖 3 為 TSI Respicon 採樣器在不同風速下的三種粉塵的採樣效率，它顯示 Respicon 之可吸入性粉塵的採樣效率大致可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範。由於此發現，TSI 在 2001 年的 Respicon 之操作手冊中建議使用者需再利用公式(7)和(8)做可吸入性粉塵濃度之校正，則只須使用(6)及可算出可吸入性粉塵濃度。

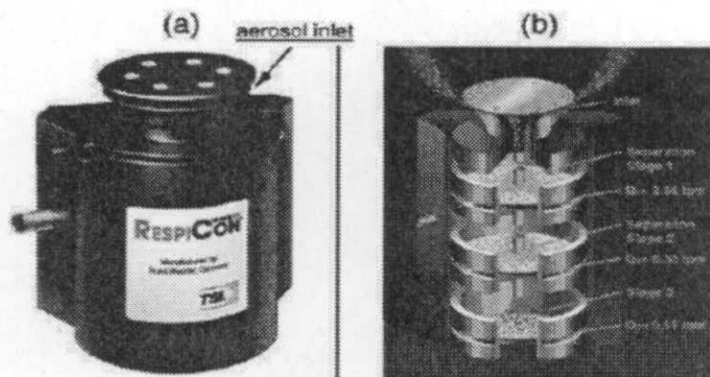


圖 2 TSI 的 Respicon 採樣器(www.tsi.com)

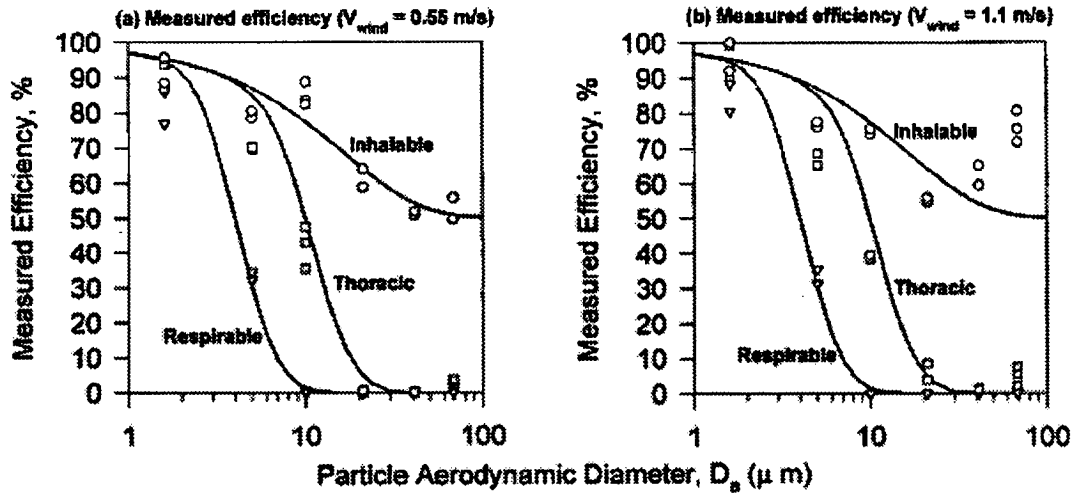


圖 3 TSI Respicon 採樣器在不同風速下的三種粉塵的採樣效率

另外，工作場所可呼吸性粉塵的濃度也可先利用多階衝擊器，如 Marple 個人多階衝擊器[10]求取粉塵粒徑分佈後，再利用不同的採樣效率規範求得三種不同的粉塵濃度。關於 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，及微粒在各階間的內壁損失等問題曾由 Rubow et al.利用實驗室產生單徑的 polystyrene latex(PSL)、oleic acid 及 ammonium fluorescein 等微粒來加以研究[10]。在國內的學者蔡(民國 93 年)也擬開發改良式的 Marple 多階個人採樣器，稱為 mMarple，作為工作場所特定種類粉塵的採樣器[4]。

在國內，多孔金屬片曾被採用作為慣性衝擊器的採樣介質[11]。Tsai et al.設計一個具有二階慣性衝擊器的個人固氣分離採樣器，實驗結果顯示：二階慣性衝擊器的截取氣動直徑分別為 9.5 和 2.0  $\mu\text{m}$ 。由研究結果可知，以多孔金屬材質作為衝擊板時，由於多孔金屬片的毛細作用可容納較多的微粒量，並且無微粒過負荷的問題。但是，由於氣流會貫穿進入多孔金屬材質內部，造成微粒收集效率曲線和傳統理論預測曲線不同。此時，以多孔金屬材質作為收集板的微粒收集效率高於平面型衝擊板。當以多孔金屬片取代傳統的平板型衝擊板作為慣性衝擊器的採樣介質，因為細小微粒(小於截取氣動直徑的微粒)的過剩收集作用，前者的微粒收集效率曲線圖形顯得較為平緩，截取氣動直徑值(cut size)亦會較小。

由於多孔介質的收集效率曲線比較平緩[8,11]，可以符合國際新定義的效率規

範，且可使用慣性衝擊器作成體積較小的個人多階衝擊器，因此本研究擬使用多孔介質作為收集板，設計一個可以同時採集工作場所三種粉塵的分徑採樣器。

## 第二節 文獻回顧

由過去的文獻可知，多孔性材質衝擊板(如 PUF 和多孔金屬片...等)作為慣性衝擊器之收集板時，有降低微粒反彈和再揚起的功能，且多孔介質的收集效率曲線比較平緩，可以符合國際新定義的效率規範。因此，本研究先將針對多孔性材質衝擊板(如 PUF 和多孔金屬片...等)做成的採樣器，及去年的相關研究，做一個文獻回顧。

Kavouras and Koutrakis 利用聚氨酯泡綿(PUF)取代傳統 PM<sub>2.5</sub> Harvard 慣性衝擊器的收集介質[12]。探討以聚氨酯泡綿作為慣性衝擊器的收集介質時的微粒收集曲線特徵，改變參數包括 PUF 的密度，雷諾數，收集介質直徑，和噴嘴至收集板距離。結果顯示使用 PUF 作為收集介質時會導致收集效率曲線的重要改變，如：50% 的截取氣動直徑從 2.48  $\mu\text{m}$  降低至 1.12  $\mu\text{m}$ ，對應的  $\sqrt{St_{50}}$  為 0.24。雖然傳統慣性衝擊器的設計理論可以正確預測平面型收集介質的 50% 截取氣動直徑，但是對於 PUF 收集介質而言，此一理論會高估 50% 截取氣動直徑的實驗值。由於微粒在碰撞 PUF 後，比起平面型衝擊板而言，較大部分的過剩動能會被 PUF 收集介質吸收，因此可降低微粒彈跳及再揚起的量。如圖 4 所示雷諾數改變時，使用 PUF 和塗油的多孔金屬收集板的收集效率曲線不同，其原因為不同的流線所致，PUF 的收集效率曲線比多孔金屬介質平緩，較適合作個人粉塵分徑採樣之用。

Sioutas et al.嘗試設計 PM<sub>2.5</sub> 及 PM<sub>1</sub> 的個人慣性衝擊器來抑止微粒的反彈。結果如圖 5 所示，一開始以不塗敷任何黏著劑的單純鋁材凹槽為收集板時，微粒反彈的現象並沒有明顯的被抑止，特別是對於截取氣動直徑以上的微粒，收集效率會有明顯的下降。當使用多孔金屬板當收集板時，可以達到提高收集效率及降低微粒損失的目的。以浸漬過黏著劑的多孔金屬片為採樣介質，由於多孔金屬片的孔隙過濾結構及黏著劑的吸附效果，可以有效收集大於截取氣動直徑以上的微粒，避免微粒反彈及再揚起的現象[13]。

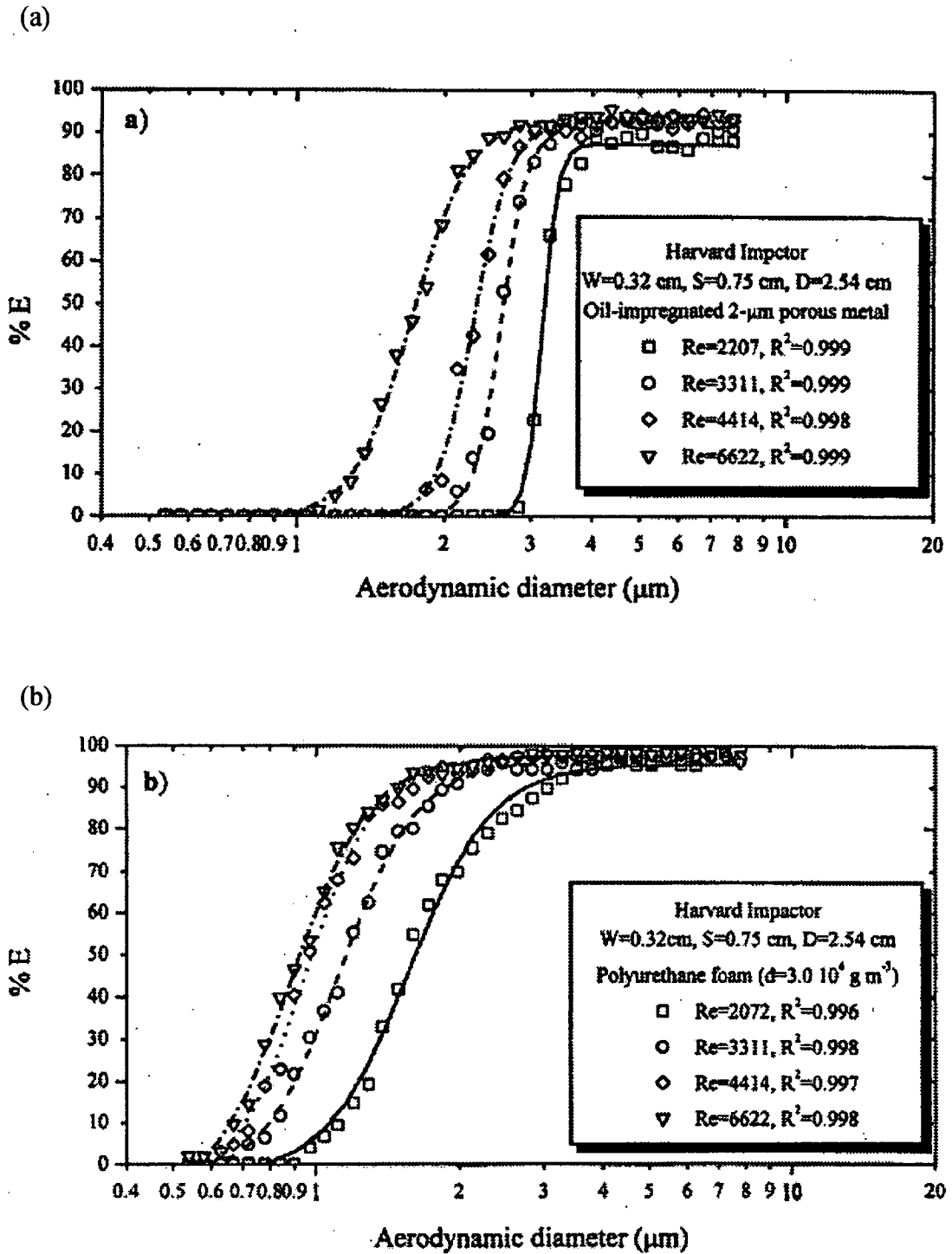
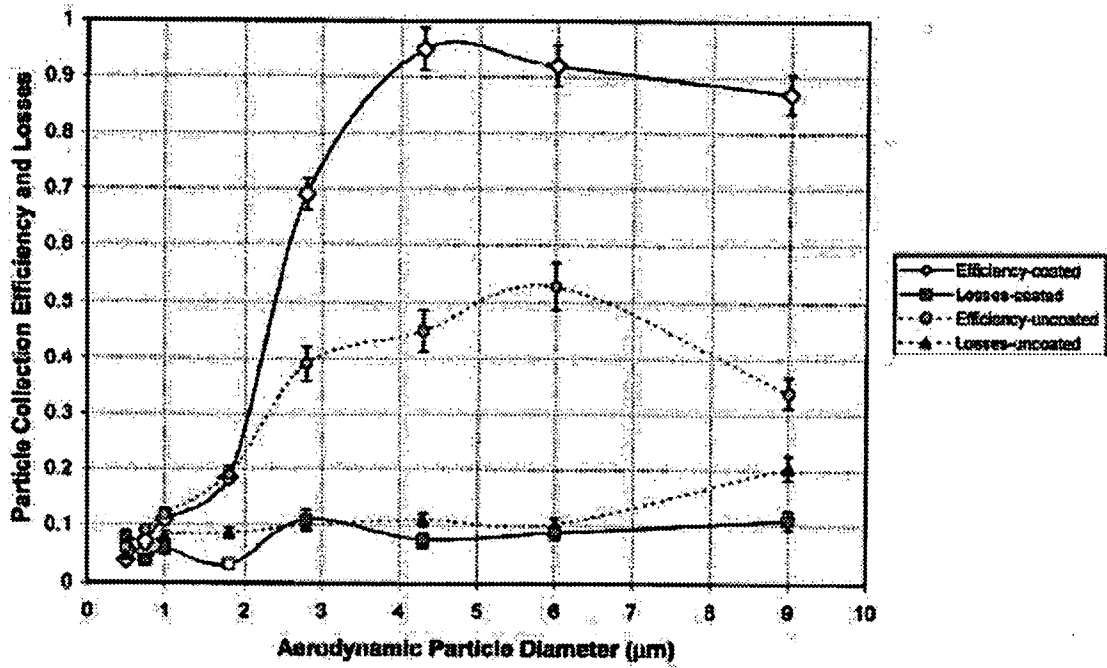


圖 4 Harvard 衝擊器在不同收集介質(a)塗油的 2- $\mu$ m 多孔金屬板(b)PUF 之不同雷諾數下的收集效率曲線

(a)



(b)

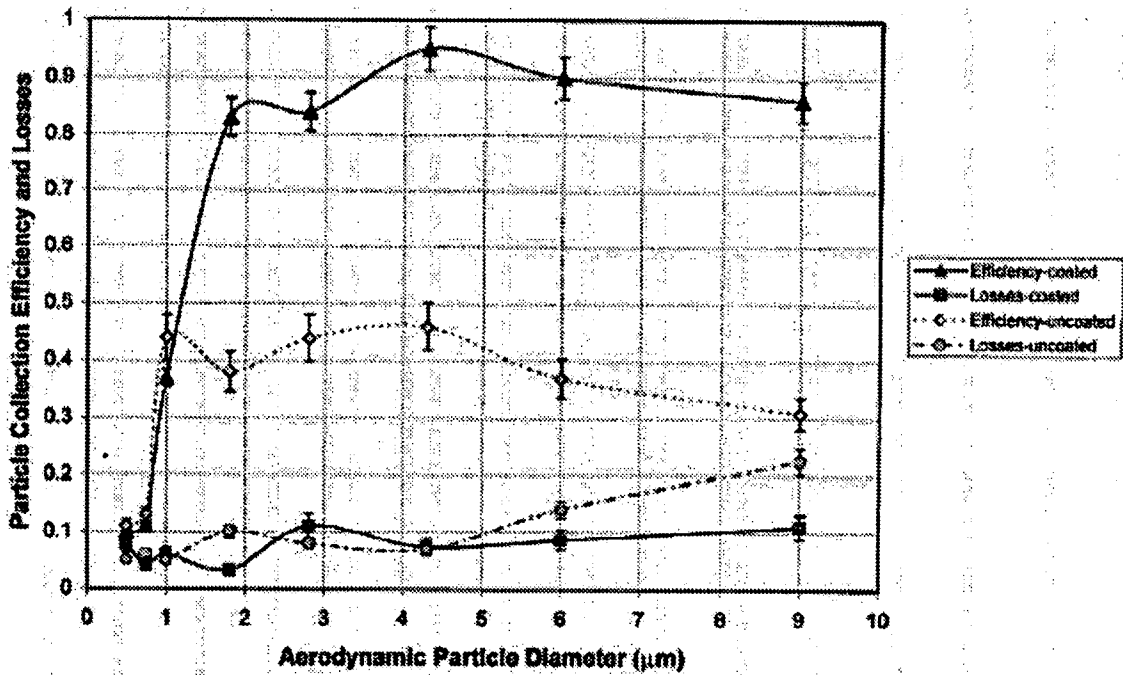


圖 5 Sioutas et al.之 (a) $PM_{2.5}$ (b) $PM_1$  個人衝擊採樣器的收集效率曲線及微粒在採樣器內的損失率[13]



Heikkinen et al. 探討不同厚度(thickness)及不同孔隙度的多孔金屬片對於固體微粒的吸附貫穿特性。結果顯示，在長時間的採樣環境下，擁有孔隙結構的多孔金屬片會因為採集到大量微粒，造成微粒的累積堵塞孔洞而降低流體的穿透性，發生採樣收集效率降低的現象[14]。採樣器上下游端壓力降的變化可以當作多孔金屬片是否要繼續使用或是更新的一個依據。另外，Marjamaki and Keskinen 探討不同孔隙度及表面粗糙度的多孔金屬片作為慣性衝擊器的收集介質時的微粒收集曲線特徵。結果顯示，慣性衝擊器的收集效率決定於多孔金屬片的孔隙特性及表面粗糙度，形成多孔金屬片特有的毛細吸附作用而增加微粒的收集效率；而多孔金屬片表面粗糙度對於微粒收集效率的影響又大於多孔金屬片的孔隙結構特性，是影響收集效率的主要因子。當以多孔金屬片取代傳統的平板型衝擊板作為慣性衝擊器的採樣介質，因為細小微粒(小於截取氣動直徑的微粒)的過剩收集作用，前者的微粒收集效率曲線圖形顯得較為平緩，截取氣動直徑值(cut size)亦會較小[15]。

Demokritou et al. 曾製作一 8 階慣性衝擊器(cutsize: 9.9、5.3、3.3、2.5、1.7、1.0、0.47 和 0.16 $\mu\text{m}$ )，其採樣流量為 30 L/min，此 8 階慣性衝擊器的特點則是使用 PUF 當做收集板，並且此 PUF 收集板具有很高的微粒固體微粒粉塵負荷量(至少 25mg)[16]。如圖 6 所示，當第四階(Cut Size:2.5 $\mu\text{m}$ )的 PUF 收集板之固體微粒粉塵負荷量由 10.9~24 mg(或噴嘴下方有 13.4~29.6  $\text{mg}/\text{cm}^2$  之負荷)時，其截取氣動直徑值僅輕微的由 2.6  $\mu\text{m}$  增加至 2.7  $\mu\text{m}$ 。如圖 7 所示，粉塵負荷量達到 25 mg 時，第四階對 9.7  $\mu\text{m}$  之微粒收集效率曲線仍然接近 100 %。因此，此採樣器使用 PUF 於固體微粒之收集且高粉塵負荷量時，可以忽略微粒的彈跳及再揚起的現象。另外，於高粉塵負荷量時，使用 PUF 收集板採集微粒時的收集效率曲線不受粉塵負荷量的影響，由以上可知，PUF 收集板具有降低微粒彈跳且防止微粒再揚起的現象，並可用於長時間的採樣。

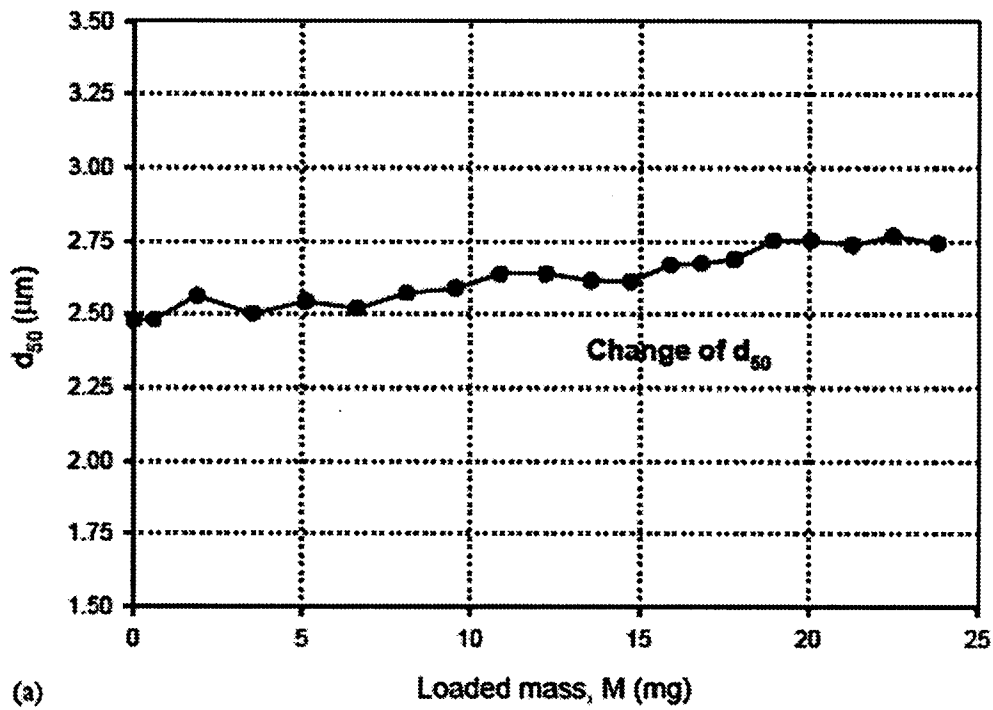


圖 7 粉塵負荷量與截取氣動直徑值之關係

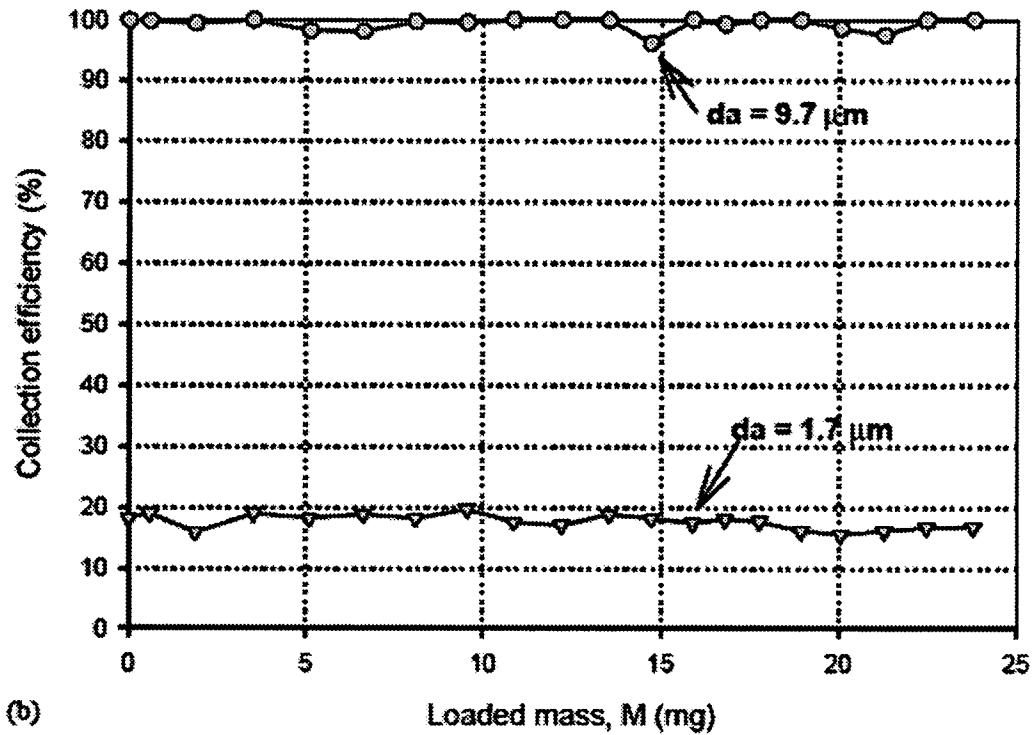


圖 8 粉塵負荷量與收集效率曲線的關係

蔡曾於去年度的研究計畫中以 PUF 為收集板設計一個三階粉塵採樣器[17]，其示意圖如圖 8 所示，採樣器之可吸入性入口，依 Witchgeret al.的經驗公式[18]而作設計，入口後面有一個過濾紙(substrate #1)，第一階為截取氣動直徑 10  $\mu\text{m}$  的慣性衝擊器，後端接#2PUF 基板(substrate #2)，第二階為截取氣動直徑 4  $\mu\text{m}$  的慣性衝擊器，後端接#3PUF 基板(substrate #3)，最後一階為一個終端濾紙(substrate #4)，substrate #4 所採之粉塵為可呼吸性粉塵，substrate#4 加上 substrate#3，為胸腔區粉塵，substrate #1 至#4 之和為可吸入性粉塵。本採樣器之流量設計為 2 L/min。

在實驗室以液體微粒的測試結果如圖 9 和圖 10 所示。當流量為 2 L/min，使用 100 ppi 之泡綿當做收集板，可呼吸性粉塵的穿透效率曲線可與 ACGIH 所規定之可呼吸性粉塵穿透效率曲線吻合，截取氣動直徑值為 3.94  $\mu\text{m}$ ，與 ACGIH 可呼吸性曲線之 4  $\mu\text{m}$  的誤差只在 1.6%左右。胸腔區穿透效率曲線的截取氣動直徑值為 9.44  $\mu\text{m}$ ，與 ACGIH 可呼吸性曲線之 10  $\mu\text{m}$  的誤差只在 5.6 %左右，但是曲線末端比 ACGIH 所規定之胸腔區粉塵穿透效率曲線陡峭，有進一步改善的必要。且本採樣器尚需針對固體微粒的負荷量對收集效率的影響進行研究，且有必要與市售的三階採樣器(如 TSI Respicon)進行現場比對測試。

Rando et al.提出於木造業工廠作業環境中利用 IOM 採樣器、GK 2.69 採樣器、SKC 鋁製旋風器和 Respicon 採樣器進行現場粉塵濃度採樣比對測試，研究結果顯示 Respicon 採樣器之外胸腔區粉塵濃度必須乘以 1.5 之校正因子，才會使 Respicon 與 IOM 採樣器之可吸入性粉塵濃度相當，否則 Respicon 會低估 23%之可吸入性濃度。而 Respicon 採樣器採集之胸腔區粉塵濃度需要乘上 0.98 倍的修正因子再減去 0.107 倍的可吸入性粉塵濃度才會與 GK 2.69 採樣器之可吸入粉塵濃度差異在  $0.006\text{mg}/\text{m}^3$  以內之相近濃度。Respicon 採樣器採集之可呼吸性粉塵濃度比 SKC 鋁製旋風器濃度為高，但是由於數據差異太大，兩者的數據很難做正確的比較[19]。

Teikari et al 提出利用 IOM 採樣器當作可吸入粉塵濃度之標準，並利用入口裝有多孔泡綿的 IOM 當作可呼吸性以及胸腔區粉塵濃度標準，並與 Respicon 等採樣器做比對。結果發現不論在實驗室或是實場中 Respicon 採樣器的可吸入性粉塵的濃度較 IOM 低了將近 50 %之濃度，但胸腔區之粉塵濃度較 IOM 採樣器所收集之粉塵

濃度為低，低了將近 40%濃度，且可呼吸性粉塵濃度高於 IOM 採樣器將近 25%之濃度[20]。

Tatum et al.提出利用 CIS 個人可吸入性粉塵採樣器和 BGI-4 可呼吸性粉塵採樣器以及 Respicon 採樣器進行現場採樣比對實驗，發現 Respicon 可吸入性粉塵濃度仍要乘上一個修正因子,否則相較於 CIS 採樣器會有濃度低估的現象[30]。

Bratveit et al.曾使用 Respicon 採樣器於電池工廠進行現場粉塵採樣，研究結果發現 Respicon 採樣器所採集的可吸入性粉塵濃度比標準 IOM 採樣器所採集的粉塵濃度為低，所以此學者建議 Respicon 採樣器之可吸入性粉塵濃度需要乘以 2.1 後，所得之可吸入性粉塵濃度才會與 IOM 之粉塵濃度相同[21]。

Koch et al.發現 Respicon 遠低於 IOM 採樣器可吸入性粉塵濃度，Respicon 的濃度需乘上 1.83 倍才可以與 IOM 接近。Koch 等人猜測可能是因為 IOM 採樣器有一個大的直接向外開口，會造成可吸入性粉塵濃度偏高[22]。

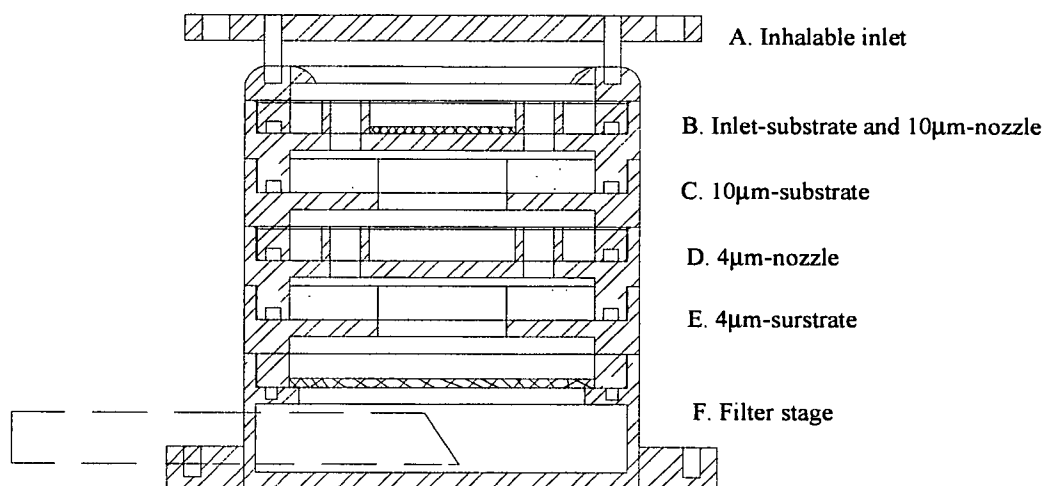


圖 8 蔡設計的個人採樣器示意圖[17]

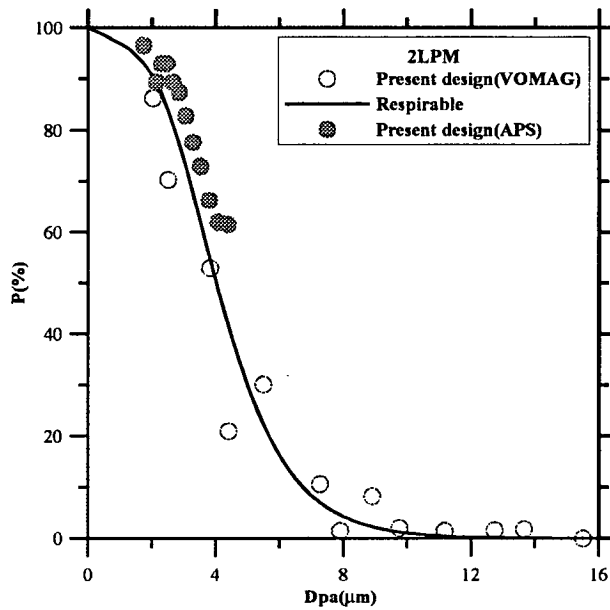


圖 9 可呼吸性粉塵之穿透效率曲線

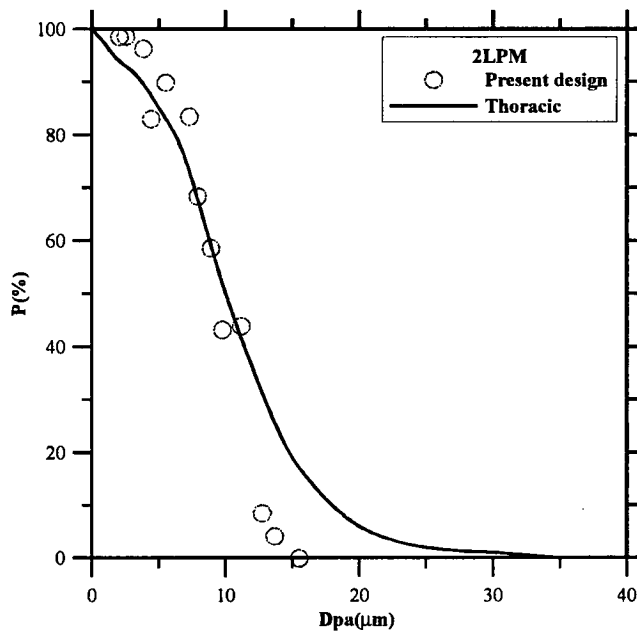


圖 10 胸腔區粉塵之穿透效率曲線

雖然多孔性材質可以作為慣性衝擊器的收集板，且具有降低微粒反彈和再揚起的功能，然而因採樣器性能的測定方法不同、標準規範與法規值定義的迥異，我們須針對採樣器的精、準度與穩定性進行鑑定，以確定採樣器的優越性，並進一步可以廣泛應用於工作環境的粉塵採樣，亦即我們需針對採樣器訂定性能規範。

賴等人及 Chen et al.曾探討文獻中對於採樣器性能的規範，如美國工業衛生師

協會(ACGIH,1984)規定的採樣器之效率曲線與理想效率曲線在每個粒徑之誤差必需在 15%以內；採樣器的累積效率曲線與氣動直徑之關係，在對數機率圖上必須呈直線關係，且判定係數(R-square)值必須大於 0.9；再者截取直徑的 95%信賴區間亦須落在截取直徑之 $\pm 10\%$ 之內[23,24]。

若是考量採樣器的採樣質量和精確度，則 NIOSH 規定 95%之樣本質量誤差必須在真實的 $\pm 25\%$ 以內，而此項規定的相對標準偏差(relative standard deviation, RSD)為 0.128[25]。

賴等人及 Chen et al.利用 Barthey and Breuer 的方法，計算採樣器效率曲線的截取直徑及斜率，並發現海綿採樣器比旋風器之分徑效率佳。除了採樣器之準確度外，為了兼顧採樣器之間的變異量或精確度，賴等人及 Chen et al.建議使用均方根誤差(Mean Square Error, MSE)作為評估之基準。根據以上的文獻，本研究所設計之採樣器其效率曲線與理想曲線在每個粒徑之誤差必須在 15%之內，並以 MSE 作為評估採樣器的指標，其中精確度以採樣器的重覆實驗數據計算而得[23,24]。

由過去之三階採樣器的研究可知，尚有以下數點可以進行研究:

- (1)過去研究之三階採樣器，jet-to-plate 的距離為 0.3 倍噴嘴直徑，本研究將改變 jet-to-plate 與噴嘴直徑之比為 1:1，並進行採樣器的改良，再進行測試。
- (2)過去我們所用的測試微粒為液體油酸微粒，尚未對固體微粒作過測試，且未對粉塵負荷量影響收集效率作過測試，因此本研究將針對固體微粒於未塗敷的 PUF 收集板上是否有反彈及降低收集效率的情形作測試，同時也對粉塵負荷量影響收集效率的問題加以探討。
- (3)需要以本年度的三階採樣器與 IOSH cyclone, Marple personal impactor, TSI Respicon 等在進行現場之測試比對，以瞭解本採樣器之準確性。
- (4)需研究以採樣器的多孔泡綿收集板分析微粒中金屬(如鉛)成份的可行性。

## 第二章 研究方法

### 第一節 三階粒狀物採樣器的設計

本計畫曾於 2004 年發展出三階個人粉塵採樣器(設計#1，如圖 11)，結果發現微粒穿透率可以符合 ISO/CEN/ACGIH 規範，此採樣器的特點為使用截取氣動直徑為 4 和 10 $\mu\text{m}$  之衝擊器配合泡綿為衝擊板，可以微粒穿透度變為平滑曲線，以符合 ISO/CEN/ACGIH 規範。

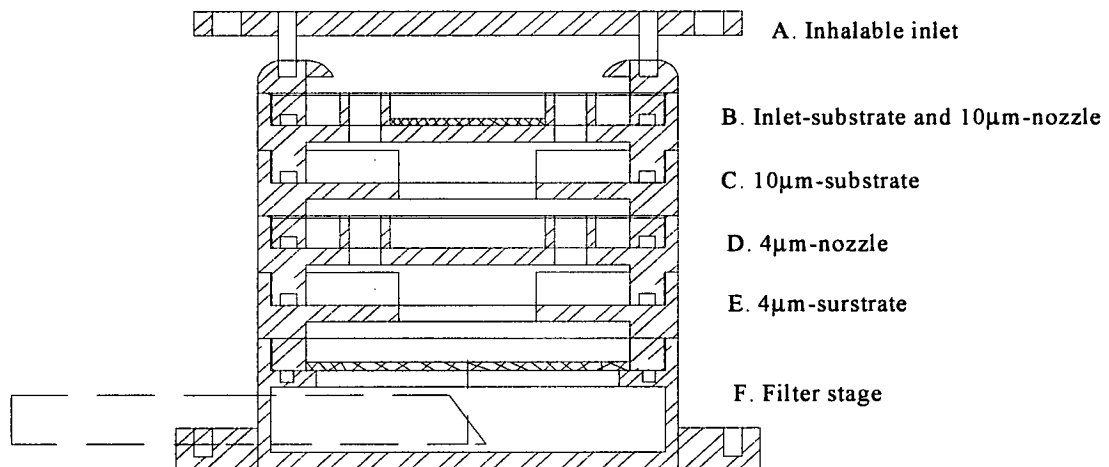


圖 11 2004 年之三階個人粉塵採樣器(設計#1)

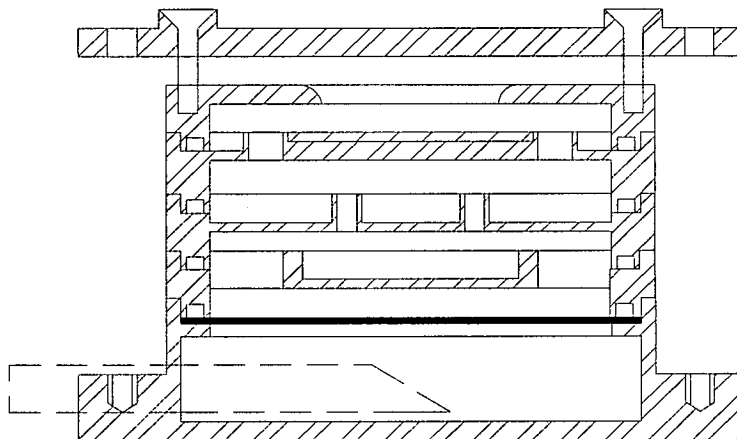


圖 12 本年度之三階個人粉塵採樣器(設計#2)(厚度 3mm 泡綿衝擊板)

根據去年在實驗室所測試的結果，今年度(2005 年)我們欲針對之前所設計之採樣器進行改良，共有兩種設計，分別為設計#2 及設計#3，其特點為：

- 1.設計將噴嘴板與收集板為同一階，因此總階數由去年所設計之 6 階減少為 5 階，且去除入口及終端濾紙兩階層不必要的金屬部份，使得本採樣器之高度較去年所設計之採樣器為低。今年度的兩個設計的重量分別為 135 g (設計#2)及 182 g (設計#3)。
- 2.本年度採樣器設計#2 所使用之濾紙皆為標準尺寸之濾紙(可吸入性入口階層濾紙直徑 25 mm 和終端濾紙直徑 47 mm)，所使用之泡綿有兩種，10  $\mu\text{m}$  之階層 (OD=47 mm, ID=15 mm)，4.0  $\mu\text{m}$  之階層(OD=22 mm)，厚度為 3mm。
- 3.本年度採樣器 jet-to-plate 與噴嘴直徑之比由 2004 年的 0.3 加大為 1.0，較符合慣性衝擊器的設計規範。

圖 12 為 2005 年的三階粒狀物採樣器設計#2 的組合圖。本採樣器之可吸入性入口在頂蓋的部份已消去多餘的尺寸(如圖 13)，只保留螺絲孔所需要的部份，使頂蓋的外徑能和採樣器本體切齊，底座也作相同的處理以減輕重量(如圖 14)。第一階為截取氣動直徑值 10  $\mu\text{m}$  的慣性衝擊器噴嘴板及放置直徑為 25 mm 之標準尺寸濾紙凹槽，以截取可吸入性粉塵。第二階為截取氣動直徑值 4  $\mu\text{m}$  的慣性衝擊器噴嘴板及可以放置泡綿收集板的凹槽，以截取胸腔區之粉塵。第三階則為放置泡綿收集板的凹槽，以截取可呼吸性粉塵。另外，我們還調整截取氣動直徑為 10  $\mu\text{m}$  和 4  $\mu\text{m}$  噴嘴至泡綿收集板為適當距離，使噴嘴直徑至收集板的距離(jet-to-plate distance)與噴嘴直徑比為 1:1。最後一階為一個終端濾紙(直徑為 47 mm)，它所採的粉塵即為可呼吸性粉塵(RPM)，可呼吸性粉塵再加上第二階的泡綿收集板所採集的粉塵則為胸腔區粉塵(TPM)。胸腔區粉塵加上第二階泡綿收集板所採集的粉塵則為可吸入性粉塵(IPM)。



A. Inhalable inlet

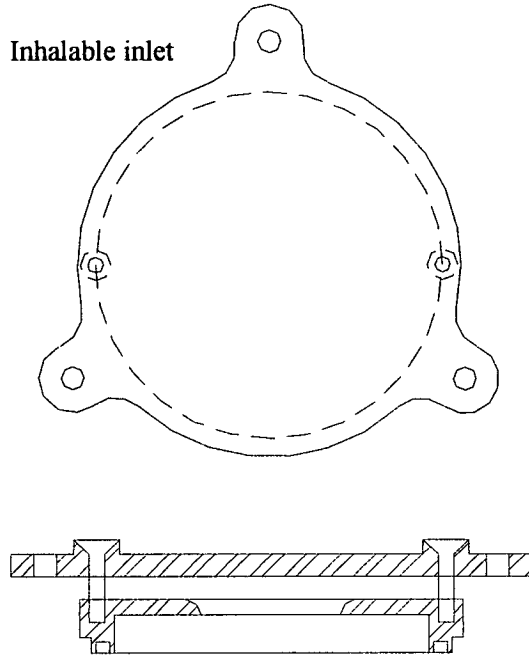


圖 13 三階採樣器的入口示意圖

E. Filter stage

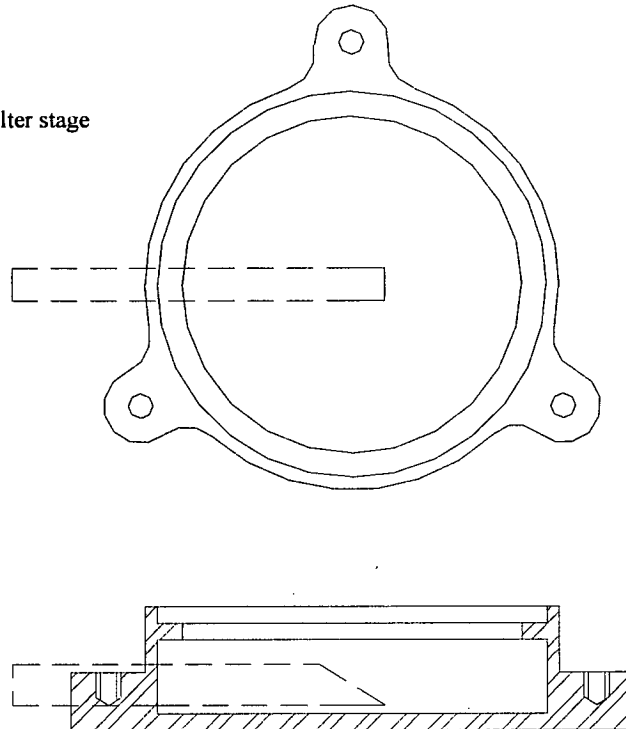


圖 14 三階採樣器的底座示意圖

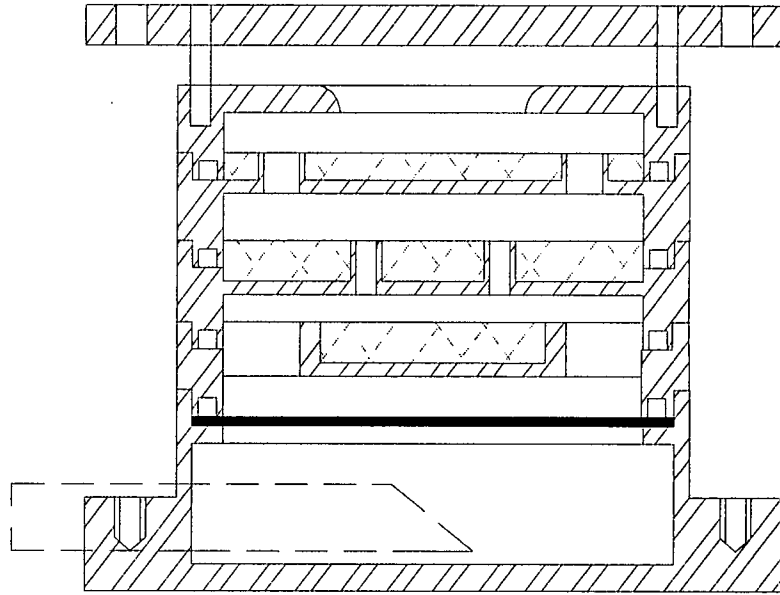


圖 15 本年度之三階個人粉塵採樣器(設計#3)(厚度 6mm 泡綿衝擊板)

本年度後來再進一步將入口階層之濾紙改為泡綿，稱為設計#3，以防止大微粒之反彈，而其直徑由原來 25mm 加大為 47mm，防止微粒之損失，且所有泡綿均改為 6mm 厚，防止微粒穿透至泡綿底部。設計#3 之示意圖如圖 15。

2005 年採樣器(設計#2 和設計#3)的可吸入性入口根據 Witschger et al.的經驗公式[18]來採計，其示意圖如圖 16 所示，以符合 ACGIH 訂定的吸入性粉塵貫穿曲線。其吸入效率 (EI) 可計算如下：

$$EI = \frac{1}{1 + 2Stk_w^{k_1} \cdot R^{k_2}} \left[ 1 + Stk_w^{k_3} \left( \frac{R \cdot (D_s / h)}{k_5} \right)^{k_4} \right] \quad (9)$$

$$\text{其中 } St = \frac{\rho_p d_p^2 U_w C}{9\mu D_s}$$

$$R = \frac{U_w}{U_s}$$

其中， $\rho_p$  為微粒密度， $d_p$  為微粒直徑， $U_w$  為外界風速， $U_s$  為入口吸入速度， $C$  為滑動校正因子， $\mu$  為氣體黏滯係數， $D_s$  為圓形蓋帽直徑， $h$  為圓形蓋帽至採樣器本體距離。與可吸入性粉塵的採樣效率規範比較可知，本圓環孔入口的效率十分接近，如圖 17 所示。

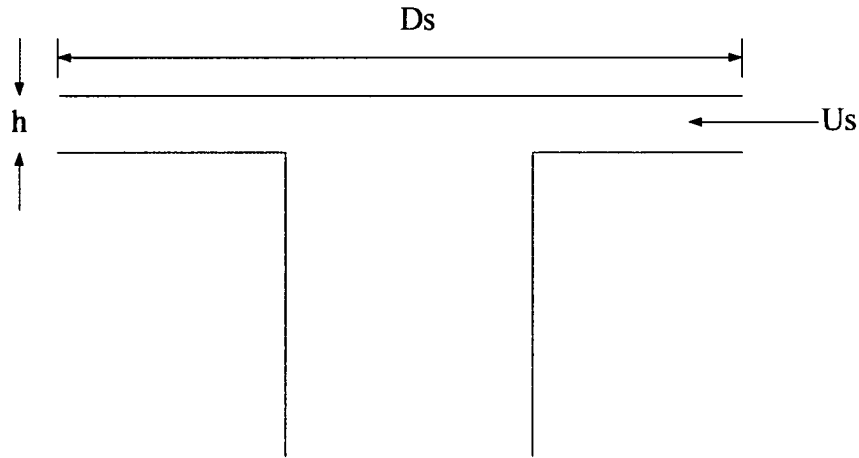


圖 16 圓環孔可吸入性入口[18]

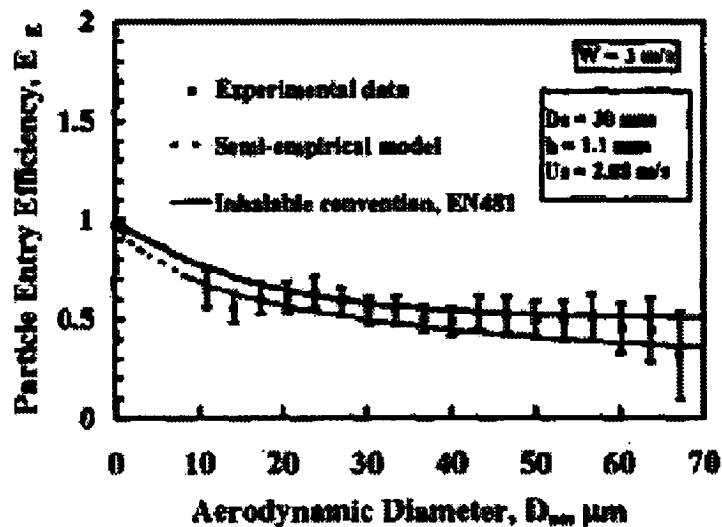


圖 17 圓環孔可吸入性入口的效率曲線[18]

胸腔區及可呼吸性衝擊器的設計，依 2004 年蔡的報告而設計，取  $\sqrt{S_{tk50}} = 0.39$ ，在採樣流量為 2 L/min 下，胸腔區的圓形噴嘴有六個，噴嘴直徑=3.5 mm，截取氣動直徑=10  $\mu\text{m}$ 。在相同採樣流量下，可呼吸性的圓形噴嘴有六個，噴嘴直徑=2.0 mm，截取氣動直徑=4  $\mu\text{m}$ 。設計#2 所使用之泡綿收集板的規格--thickness: 3 mm, SIF: Fine 100 ppi (Foamex Inc., Pennsylvania, USA)，胸腔區泡綿的尺寸 OD=47 mm, ID=15 mm，可呼吸性泡綿的尺寸 OD=22 mm。設計#3 所使用的泡綿收集板的規格--thickness: 6 mm, SIF: Fine 100 ppi (Foamex Inc., Pennsylvania,

USA)，可吸入性泡綿尺寸 OD=47 mm，中間鑽有六個直徑各為 3.5 mm 之孔洞，胸腔區泡綿的尺寸 OD=47 mm, ID=15 mm，可呼吸性泡綿的尺寸 OD=22 mm。

## 第二節 實驗室測試方法

本研究與一般慣性衝擊器不同處是使用泡綿多孔材質取代一般的平板式收集板。首先先針對收集效率進行實驗室之測試，所用之微粒有液體微粒(油酸)及固體微粒(標準 PSL 螢光微粒)。

在圖 18 的系統中 2~20  $\mu\text{m}$  的單徑液體微粒是使用振動流孔板單徑氣膠產生器 (VOMAG, Vibrating Orifice Monodisperse Aerosol Generator, TSI Model 3450, TSI INC. St. Paul, Minn.) 產生，再經乾燥及使用靜電中和器 (Kr85 Neutralizer) 去除靜電後，進入待測試的衝擊器內部進行收集。本實驗所使用的液體微粒為添加螢光黃 (Fluorescein,  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$ ) 的油酸 (Oleic Acid) 溶液，產生液體微粒時是以含有 0.4 g/L 螢光劑的油酸溶液來產生，其配製方法如下：1 升的量瓶中置入 500 mL 的酒精，將 0.4 克的  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$  加入量瓶中，再加入酒精至量瓶刻度線，置於超音波震盪器中震盪 30 分鐘，使  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$  溶解為止。剛震盪完的溶液體積刻度會微微的上升，必須等到溶液刻度降到初始的位置，然後再以此溶液加入適當量的油酸，以配成所需的油酸溶液。

欲產生不同粒徑之微粒，必須選擇不同的振動流孔板(Orifice)並調整適當的振動頻率及推進器 (Syringe Pump)的推進速率，以產生良好單徑度的微粒。由振動流孔板所噴出的均勻液滴，與適當的分散空氣(Dispersion Air)及稀釋空氣 (Dilution Air) 混合後，經充分的乾燥及靜電的去除，以獲得實驗所需的單徑微粒，而微粒的單徑度則透過 APS(Aerodynamic Particle Sizer, TSI Model 3310A)確認。

測定衝擊器之微粒收集效率及損失率時，使用螢光儀 (Fluorometer, Turner 10-AU, Cincinnati U.S.A.)為之。衝擊器下游端的濾紙 (After Filter) 分別以夾子夾入萃取溶液中進行萃取，噴嘴下方 (Nozzle (outer))及衝擊器本身的內壁 (Wall)，則利用棉花棒沾取萃取液後進行擦拭，再洗入萃取液中 (萃取液的體積視採樣時間及採樣時的濃度而定)。將裝有萃取液各個樣品瓶置入超音波震盪器中震盪 10 分鐘 (若震盪後發現尚未均勻溶解，則持續震盪至完全溶解)，之後以螢光儀偵測其濃度，再轉換成微粒的質量後即可計算衝擊器的微粒損失量。

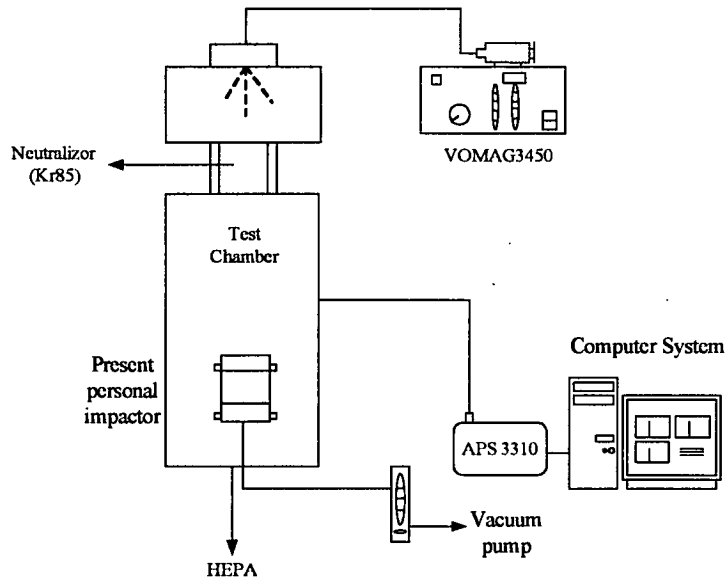


圖 18 可以同時測定採樣器微粒收集效率及內部損失率的實驗系統

為避免溫度、壓力及預防管路漏氣影響流量正確性，於每次實驗前均以泡沫流量計 (Gilibrator, Gilian Instrument Corp.) 檢驗 APS 及採樣器之流量。

使用單徑固體螢光 PSL 微粒作測試時，利用 TSI 所生產的粉塵分散器 (Small Scale Powder Dispenser, Model 3433, TSI Inc., St Paul, MN, USA)，將單徑固體 PSL 螢光微粒 (Size: 1.9、3.1、5、7、10、16 和 27  $\mu\text{m}$  from Duke Scientific, Palo Alto, CA) 導入腔體中進行採樣器測試。

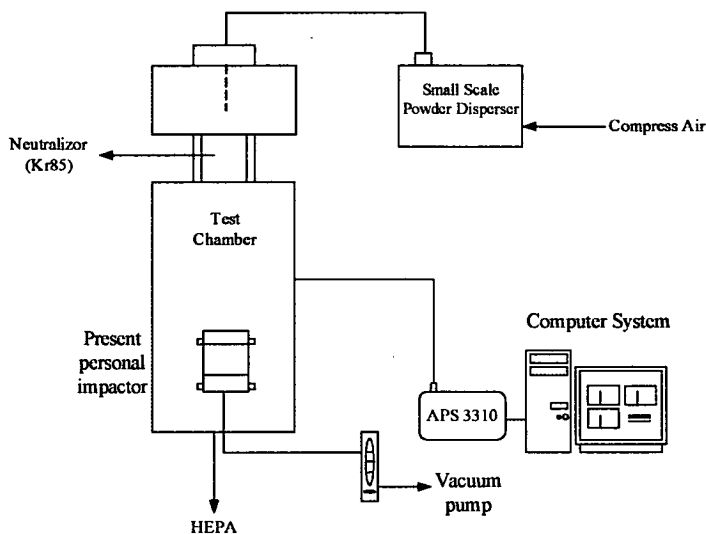


圖 19 可以同時測定採樣器微粒收集效率及內部損失率的實驗系統(固體微粒)

## PSL 萃取方法

將被泡綿收集的微粒溶於 10mL 的二甲苯中，然後置於超音波震盪器震盪 30 分鐘。(Glenny et al.,1993)

測試固體粉塵負荷對泡綿收集板之收集效率之影響時，我們使用粉塵輸送器 (Small Scale Powder Dispenser, Model 3433, TSI Inc., St Paul, MN, USA)將多徑分佈之碳粉塵(質量中間粒徑為  $7\mu\text{m}$ ，Coal Dust, Powder Technology Inc., MN, USA)導入測試腔體中，將泡綿所負荷的粉塵量進行秤重，再利用超音波霧化器產生多徑之油酸液體微粒以上下游的方式進行微粒負荷量對採樣器穿透率的測試。

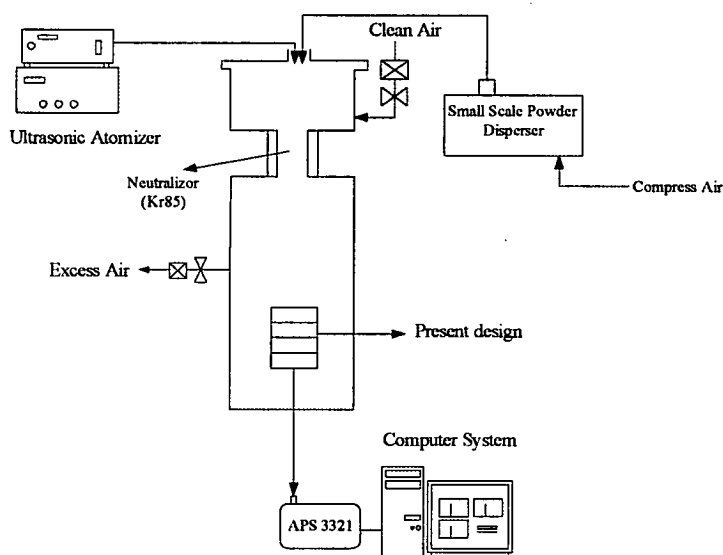


圖 20 粉塵負荷影響收集效率的實驗系統圖

## 第三節 作業場所的比對測試

### 一、主要儀器

1. Marple 個人採樣器 (Marple Personal Impactor, Model 298, SKC Inc. ), 共有八階和一個終端濾紙，第一至八階的截取氣動直徑分別為 21.3、14.8、9.8、6.0、3.5、1.55、0.93 和  $0.52\mu\text{m}$ ，總流量為 2.0L/min。作鉛分析時一~八階使用混酸纖維(MCE, mixed cellulose ester)濾紙(slotted, pore size  $0.45\mu\text{m}$ , SKC)，終端濾紙使用 MCE 濾紙( pore size  $2\mu\text{m}$ , SKC)。作秤重時一至八階使用聚氯乙烯(PVC)濾紙(slotted, pore size  $5\mu\text{m}$ , SKC )，終端濾紙使用鐵氟龍濾紙(Zefluor,

37mm, 2 $\mu$ m, Pall Corp.)。一至八階所有的濾紙的表面均需塗矽油脂(Silicon oil)以防止微粒反彈。

2. TSI Respicon 採樣器(Model 8522, TSI Inc., St Paul, MN, USA)，可同時採集三種工作場所粉塵，共有兩階和一個終端濾紙，第一階和第二階的截取氣動直徑分別為 4 和 10 $\mu$ m，總流量為 3.11L/min。作鉛分析時一至三階使用 MCE 濾紙(pore size 2 $\mu$ m, SKC)，秤重時一至三階使用鐵氟龍濾紙(Zefluor, 37mm, 2 $\mu$ m, Pall Corp.)。

3. 本研究(2005 年，設計#3)三階採樣器，流量為 3.2L/min，共有三階和一個終端濾紙，第一至三階的截取氣動直徑分別為 50、10 和 4 $\mu$ m。一至三階作鉛分析及秤重時均使用泡綿(thickness: 0.6 cm, SIF: Fine 100 ppi, Foamex Inc., Pennsylvania, USA)，終端濾紙若作鉛分析時使用 MCE 濾紙(pore size 2 $\mu$ m, SKC)，作秤重時使用鐵氟龍濾紙(Zefluor, 37mm, 2 $\mu$ m, Pall Corp.)。

4. 新型 IOSH 旋風器採樣流量在 1.7L/min，有一階濾紙可採集呼吸性粉塵，秤重時使用鐵氟龍濾紙(Zefluor, 37mm, 2 $\mu$ m, Pall Corp.)。

5. 採樣器(GilAir-5, Gilian Inc.)，其流量最高可達到 5L/min。

6. 泡沫流量校正器。

7. 分析天平(Model M3P-000V001, Sartorius Corp.) 解析度為 1 $\mu$ g。

8. 感應耦合電漿質譜儀(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer, ICP-MS, Agilent 7500ce)。

9. 微波消化器(MARS-Xpress, CEM)，使用內襯式鐵氟龍消化瓶(Lined Digestion Vessels)，瓶之內層容積為 25 mL。

## 二、藥品與器材:

1. 鉛標準液: E. Merck 公司標準鉛溶液，1,000 mg/L。

2. 硝酸: (HNO<sub>3</sub>, <70%)，J. T. Baker 公司超分析級試藥。

3. 燒杯，漏斗，量液瓶等容器均為 pyrex 玻璃

4. 標準參考樣品: NIST SRM 1648 都市粉塵(Urban Particle Matter, 簡稱 NIST1648)。

## 三、採樣場所簡介

(一) 新竹縣竹東 A 工廠

此家工廠的產品是鉛粉和黃丹，大部分的黃丹是由三個反應爐煉製成鉛粉，由濾袋屋收集，再經由輸送機送至黃丹爐煉製黃丹，球磨機製成一部份鉛粉，若鉛粉生產過剩就繼續導入黃丹爐熔煉成黃丹。此廠的廠房是屬於開放式的。我們選擇球磨機附近進行固定點採樣，利用定點設置個人採樣器進行 4~6 個小時的連續採樣，共採得 9 組有效的樣本。

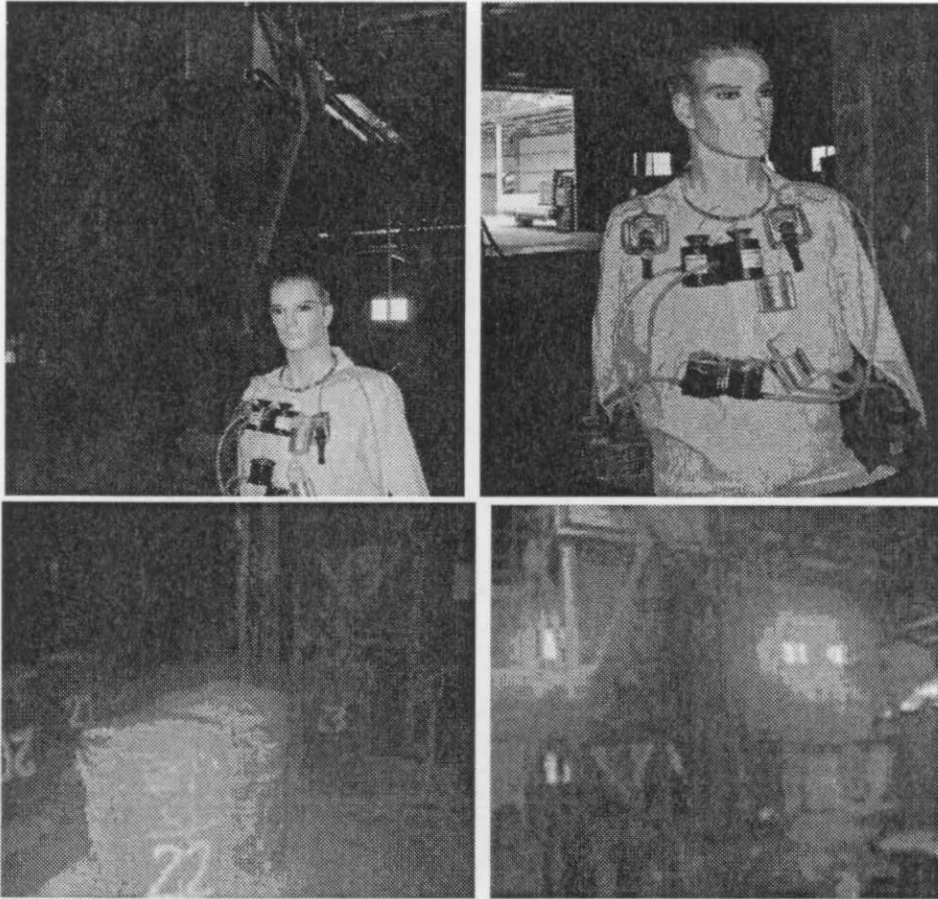


圖 21 竹東 A 工廠採樣器配置情形以及現場作業照片

## (二) 台北 B 工廠

其製程主要分為鉛粉製造，極版工程，裝配等三大階段，其中鉛粉製造和極板工程是比較會有鉛污染問題的製程。我們特地選擇微粒粒徑較大之切板區進行採樣實驗，該區是開放式的空間並與外界空氣通風良好，且每個切板機器上方都有通風設備。我們利用固定採樣點進行區域採樣，共採得四組有效樣本，採樣時間約為 4~6 小時。



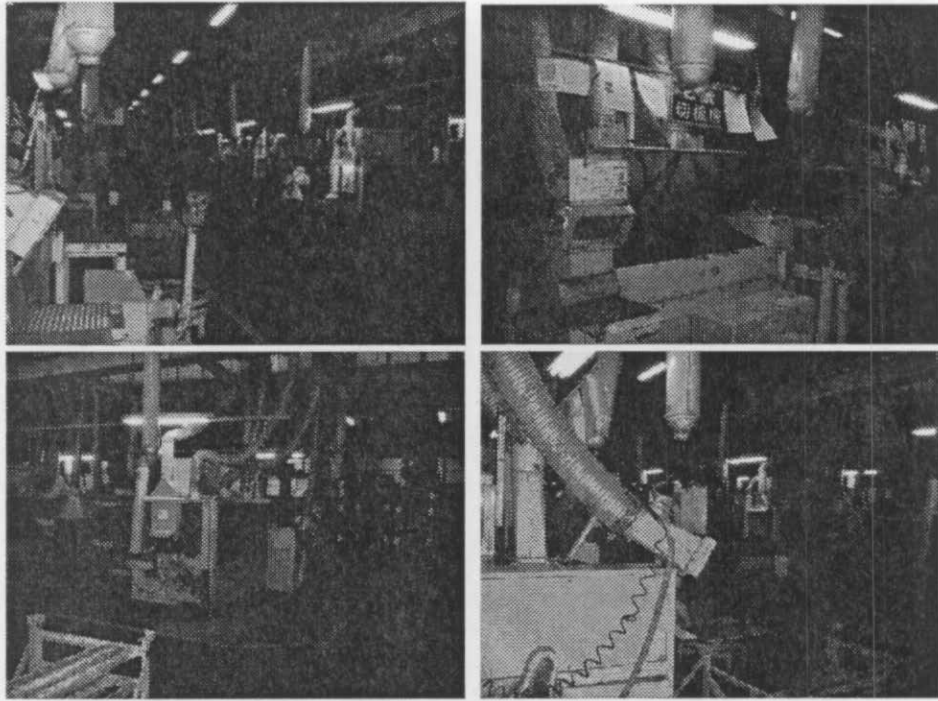


圖 22 台北 B 工廠採樣器配置情形以及現場作業照片。

### (三) 湖口 C 工廠

本鑄造廠有模具設計、製造，熔鐵設備，砂心製造，砂模製造，澆注，表面處理等程序。我們選擇在澆注區附近進行定點採樣，共採得四組有效樣本，採樣時間為 4.5 小時。

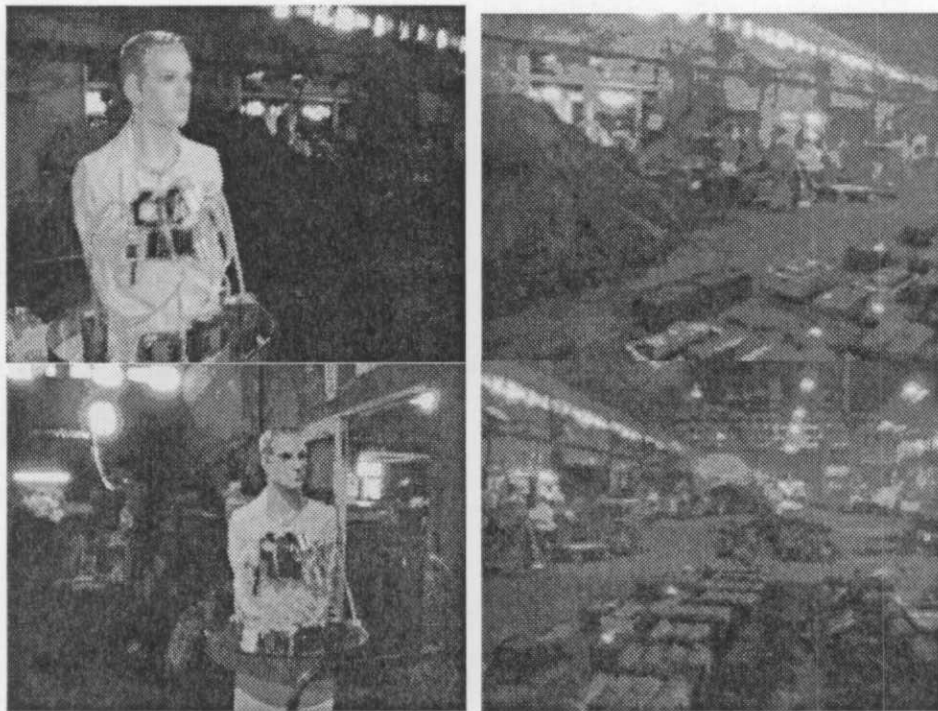


圖 2.13 湖口 C 工廠採樣器配置情形以及現場作業照片

#### 四、測試步驟

在現場的測試時，本研究利用自行設計的二組三階粉塵採樣器(設計#3)、二組，二組 IOSH cyclone，二組 Marple 個人粉塵採樣器和二組 TSI Respicon 同時在現場工作場所進行比對測試。我們選定竹東 A 工廠、台北 B 工廠和湖口 C 工廠為測試地點，以固定採樣的方式進行比對。每種採樣器在上述測試地點分別採集了 9, 4, 4 組有效樣本，採樣時間為四小時~六小時。

採樣時，將三階採樣器(設計#3)、Marple 個人採樣器、IOSH Cyclone 和 TSI Respicon 各兩個分別固定於一個旋轉台上的假人胸前，採樣器入口高度離地 1.5 公尺，旋轉台之轉速調整為每十分鐘一轉，如圖 24。

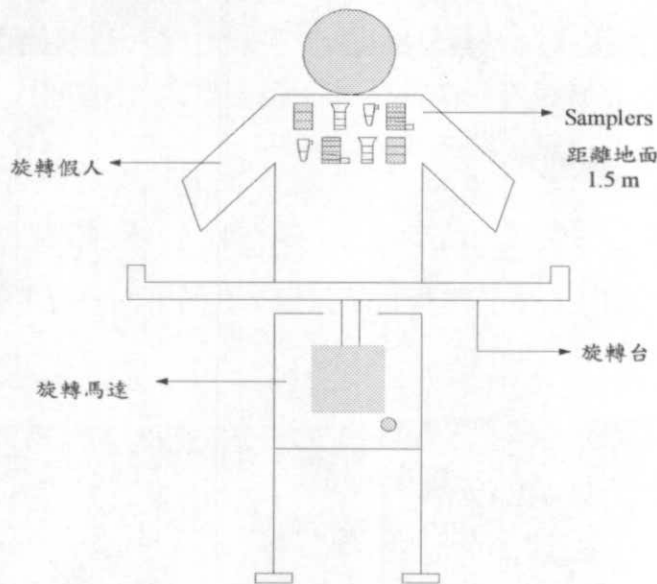


圖 24 現場以旋轉裝置進行採樣器之比對測試

在秤重分析之初，各種濾紙及泡綿各取 1 張永久置於乾燥箱中，作為標準檢查濾紙。在每組濾紙秤重之前，需將環境溫濕度控制在  $RH=45\pm 3\%$ ， $T=23\pm 0.5^{\circ}C$  (後來本研究發現泡綿秤重時的濕度要控制在更低的值， $RH=35\pm 3\%$ ，溫度要控制在  $T=20\pm 0.4^{\circ}C$ ，以防止泡綿吸收水氣，才能秤得準確的粉塵重量)，再秤量標準檢查濾紙，若其重量偏差太大，則重新檢查標準濾紙及校正天平，直到合乎標準才繼續秤重。每組濾紙秤完後隨機選取其中一張作為濾紙重複秤重。

在採樣結果的資料處理方面，先針對採樣器各階的濾紙及底層濾紙進行秤重，再根據採樣體積求出其原始濃度值。對 Marple 個人採樣器而言，各階的濃度需再以

每階的微粒損失及入口採樣效率算出的總採樣效率進行濃度修正以得到各階實際濃度值。根據 Rubow et al.的研究報告[10]，Marple 個人採樣器各階的總採樣效率為第一階至第八階分別為 50.8%、72.6%、85.1%、92.1%、95.6%、97.6%、98.2% 和 100%。在求出實際總濃度及粉塵粒徑分佈後，再根據 ISO/CEN/ACGIH 所規定之三種粉塵的採樣效率規範乘以各粒徑下的貫穿率，以得到三種粉塵的濃度。

本研究所使用的 Respicon 採樣器之三種粉塵濃度計算如公式(4)~(8)所示，而三階採樣器(設計#3)對可呼吸性、胸腔區和可吸入性三種粉塵濃度的計算公式如下所示：

$$C_R = \frac{Mass_4}{Qt} \quad (10)$$

$$C_T = \frac{Mass_3 + Mass_4}{Qt} \quad (11)$$

$$C_I = \frac{Mass_1 + Mass_2 + Mass_3 + Mass_4}{Qt} \quad (12)$$

其中

$Mass_1$  為第一階進口泡綿上的微粒質量

$Mass_2$  為第二階泡綿上的微粒質量

$Mass_3$  為第三階泡綿上的微粒質量

$Mass_4$  為終端濾紙的微粒質量

$Q$  為採樣流量(3.2 L/min)

$t$  = 採樣時間

## 五、鉛成份分析

採樣完後的鉛分析需要利用微波消化法做樣品的前處理，利用勞研所分析檢驗組的設備，進行鉛的消化及後續的分析。消化時每個樣品添加 5mL 的硝酸，再依表 1 之微波消化操作步驟作樣品的消化。消化完成後待瓶內溫度冷卻至常溫後始可打開瓶蓋。消化完成後用漏斗將消化液利用 0.22 $\mu$ m 孔徑的針頭過濾再取 100 $\mu$ L，以去離子水將消化液稀釋至 10mL。若是樣本濃度太高需再稀釋時，應維持硝酸的濃度在 13% (5mL/25mL $\times$ 65%)。消化稀釋後的樣品原來以 GFAAS 來進行分析，但是發現空白消化液的鉛濃度太高，因此期中報告以後我們改用 ICP-MS 做鉛的分析。

為了瞭解本研究之鉛分析系統(微波消化+ICP-MS)的準確性，我們利用標準參考樣品(Standard reference samples) NIST 1648 做鉛含量的回收率測試，以確定本分析系統的準確性。每次做分析時，需遵守下列步驟以確保每次分析數據的品質：

- 1.分析時 ICP-MS 的檢量線相關系數需大於 0.995 始可進行分析。
- 2.標準參考樣品分析:從微波消化步驟開始每批樣品都含兩個 NIST 1648 標準樣品，一起做消化、分析工作，以確定每批樣品的準確度。 $(\text{測值}/\text{參考值})\times 100\%$  需在 85~115 %的範圍內。
- 3.重複分析:每 10 個樣品需有一個重複分析樣品以確定分析的準確度。相對差異百分比不可大於 5%。
- 4.查核樣品分析:每分析 10 個樣品即需作標準品濃度測試。回收率許可範圍為 90~110 %。
- 5.添加樣品分析:同一天採樣的樣品每區域至少做一個添加標準品分析，添加標準品於樣品中，以確認樣品中有無嚴重的基質干擾。回收率可接受範圍 85~115 %。

表 1 為此次鉛分析所用微波消化爐之操作條件。圖 25 為利用標準鉛溶液所做的檢量線，結果發現 R<sup>2</sup> 高達 0.999。表 2 為此次 NIST1648 標準樣本的回收率，分別為 77%和 111.23%，回收率不佳的原因有可能是因為微波爐是新的，我們的操作條件設定不成熟所致。利用表 3 之標準樣品查核檢量線發現，分別在 2、5 和 10 ppb 濃度偏差分別為 17.5、8.2 和 11.2%，其中 2 ppb 時偏差比較大，但本研究尚未對方法偵測下限(MDL)做出結果。表 4 為空白泡綿添加標準粉塵後所測得之回收率，發現回收率只有 79%。且發現空白消化液中已經含有濃度為 23.53ppb 的鉛存在，因此若是採集樣本含鉛濃度低於空白消化液的含鉛濃度，那麼儀器分析出來的鉛濃度極有可能就是空白消化液中所含的鉛濃度。表 5 發現空白泡綿分析的結果會有 54.61 或是 62.93ppb 的鉛濃度存在，表示有可能泡綿在儲存、運送或裁切過程中受到鉛的汙染，因此將來在鉛粉塵採樣之前須將泡綿清洗乾淨。

表 1 MARS-Xpress 微波消化

stage	Max. power	%	Ramp time	°C	Hold time
1	600W	45	5 : 00	120	5 : 00
2	600W	90	5 : 00	150	5 : 00

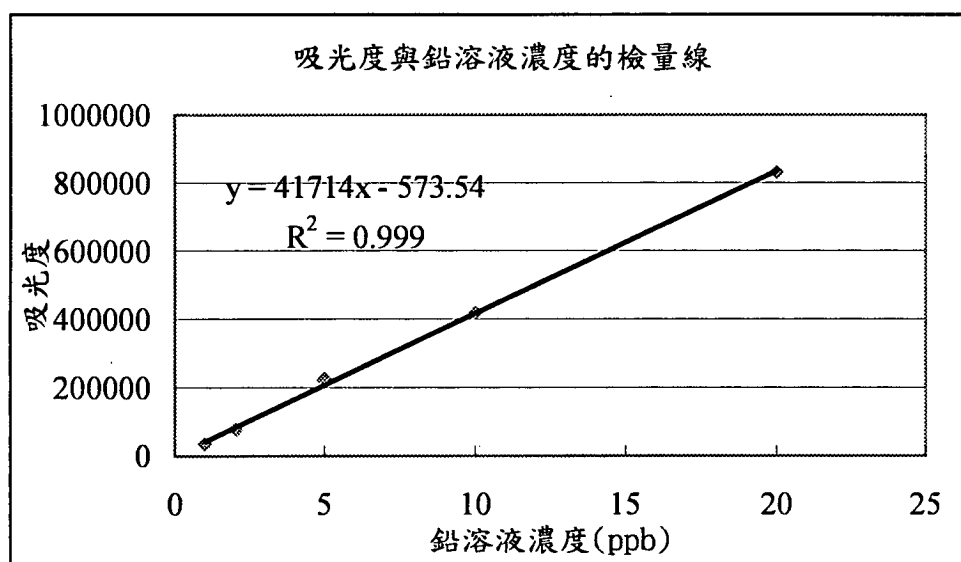


圖 25 以 ICP-MS 分析不同濃度標準鉛溶液所得到之檢量線  
(檢量線相關係數: 0.999 ; 分析時間: 94/8/30)

表 2 NIST1648 標準樣品之回收率。

標準參考樣品形式	參考值	測得值	回收率%
NIST1648	6.55 (mgPb/g-particle)	5.04 7.285	77 111.23

表 3 不同濃度鉛標準溶液查核樣品分析結果

鉛標準液濃度, ppb	實際測得濃度, ppb	偏差百分比, %
2	1.57	17.5
5	4.59	8.2
10	8.88	11.2

表 4 47mm 空白泡棉添加 NIST1648 標準品之回收率結果, 5mL 樣本溶液

樣品編號	5mL 空白消化液濃度, ppb	NIST1648 標準品 9mg 於 5mL 樣本溶液中的理論濃度, PPb	NIST1648 標準品 9mg 於 5mL 樣本溶液中的實測濃度, ppb	回收率%
#1	23.53	1165.58	925.94	79.44

表 5 47mm 空白泡綿的分析結果, 5mL 樣本溶液

樣品編號	原分析濃度, ppb	重複分析濃度, ppb	相對差異百分比, %
#2	62.93	54.61	13.22

### 第三章 結果與討論

#### 第一節 三階粉塵採樣器設計#2 及設計#3 的實驗室測試結果-液體微粒

本年度利用振動流孔板單徑氣膠產生器產生單徑液體油酸微粒進行三階採樣器的微粒穿透率及損失測試。我們根據去年三階採樣器(設計#1)的設計流量 2L/min[17] 進行今年度的採樣器(S/W 由 0.3 變成 1.0)的測試，結果發現微粒穿透率比 ISO/CEN/ACGIH 的規範高，接著使用流量 2.5L/min 進行採樣器的測試，結果發現微粒穿透率仍舊偏高，但是微粒穿透率有逐漸接近 ISO/CEN/ACGIH 規範的趨勢，因此我們使用試誤法逐漸加大流量至 3.2L/min，發現微粒穿透率可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範。

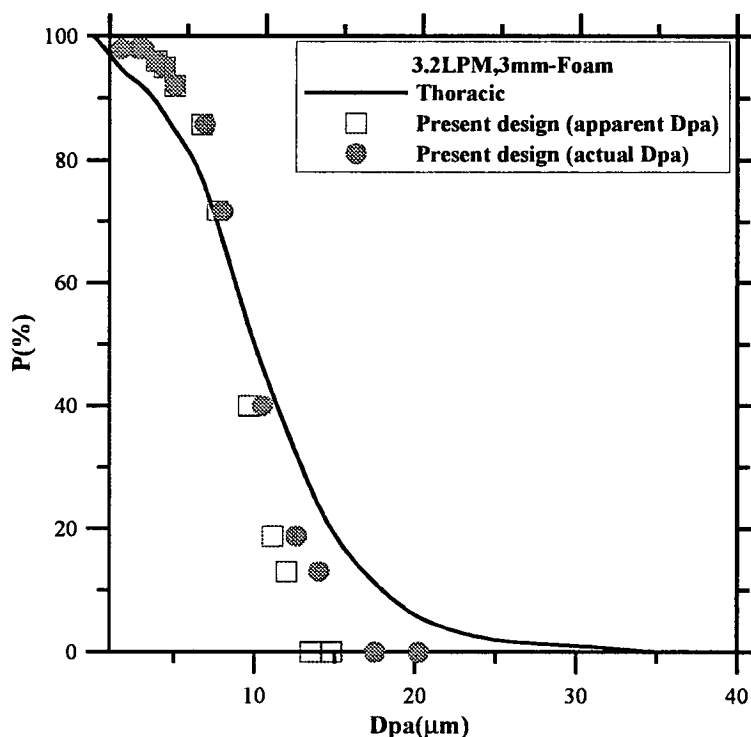


圖 26 三階採樣器之胸腔區粉塵收集效率曲線，液體微粒(設計#2)

圖 26 為今年度三階採樣器(設計#2)之胸腔區微粒穿透效率實驗結果，衝擊板為 100ppi 的泡綿，S/W 為 1.0。結果發現微粒穿透效率可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範，圖中空心方塊的數據為微粒穿透率與 APS 所測得的氣動直徑(apparent Dpa)關係，實心圓的數據為微粒穿透率與真正氣動直徑(actual Dpa)的關係，亦即後者才是微粒真正的穿透率數據。依照 Tsai et al.的文獻[26]，APS 所測得之微粒氣動直徑比真正氣動直徑低，原因為液體微粒通過 APS 噴嘴時會產生變形，使得 APS 所量測的微粒氣動直徑比真正微粒氣動直徑低，如圖 27 所示。因此我們乃根據圖 3.2 將圖 3.1 中空心方塊的實驗數據校正為實心圓的實驗數據。

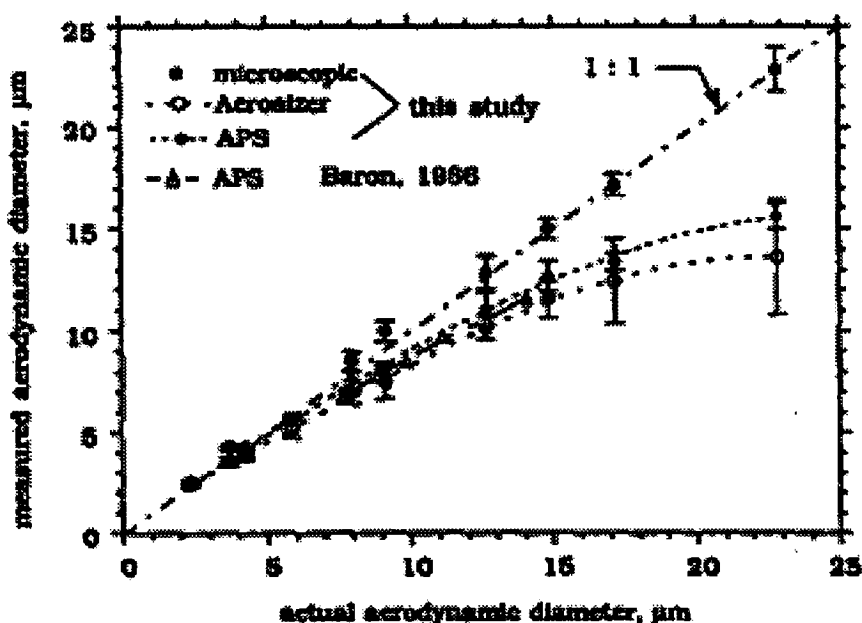


圖 27 APS 測得之微粒氣動直徑與真正氣動直徑的關係[26]

由圖 26 可得截取氣動直徑值為 9.6 $\mu$ m，與 ISO/CEN/ACGIH 規範的胸腔區截取氣動直徑 10 $\mu$ m 的誤差僅為 4 %。圖 28 為今年度三階採樣器(設計#3)胸腔區微粒穿透效率實驗室測試結果，使用厚度 6mm、100ppi 之泡綿衝擊板，S/W 為 1.0。結果可得截取氣動直徑值為 9.6 $\mu$ m 與 ISO/CEN/ACGIH 規範的胸腔區截取氣動直徑 10 $\mu$ m 的誤差僅為 4 %。

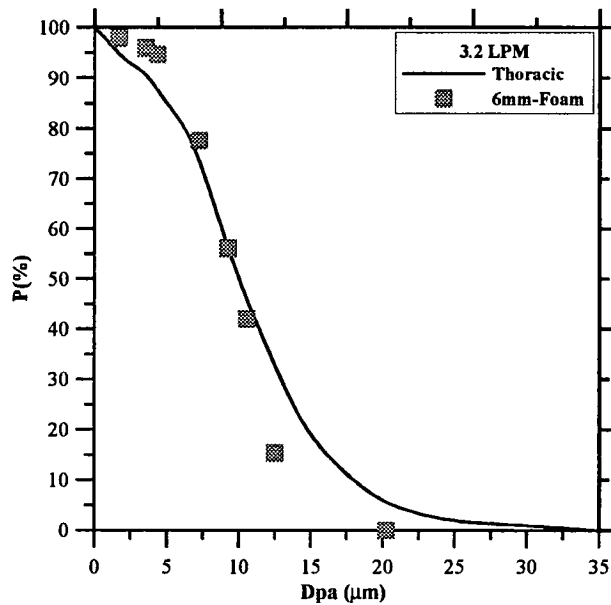


圖 28 三階採樣器之胸腔區粉塵收集效率曲線，液體微粒(設計#3)

圖 29 為今年度三階採樣器(設計#2)可呼吸性微粒穿透效率實驗結果，圖中實心方塊的數據為真正的穿透率數據，由圖可知微粒穿透效率可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範，截取氣動直徑值為  $4.0\mu\text{m}$ ，與 ISO/CEN/ACGIH 規範的  $4\mu\text{m}$  相同且略比去年的  $3.96\mu\text{m}$  正確。

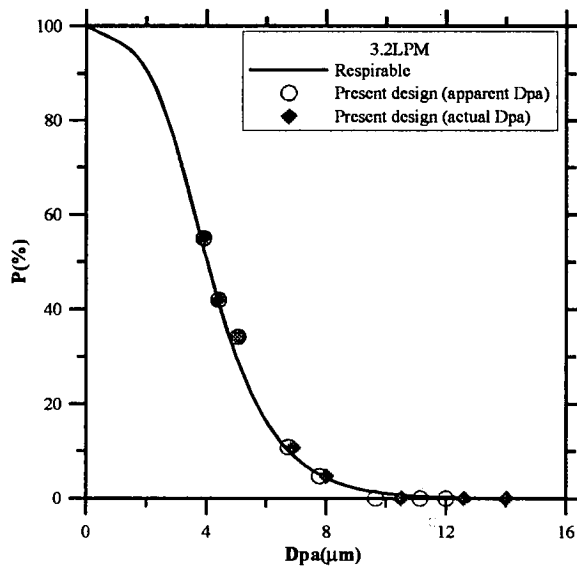


圖 29 三階採樣器之可呼吸性粉塵收集效率曲線，液體微粒(設計#2)



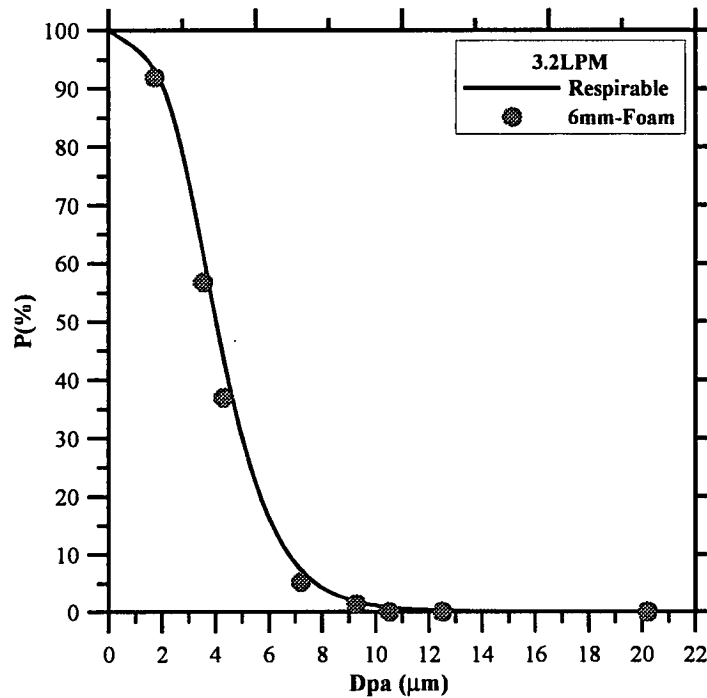


圖 30 三階採樣器之可呼吸性粉塵收集效率曲線，液體微粒(設計#3)

圖 30 為今年度三階採樣器(設計#3)之可呼吸性粉塵穿透效率實驗室測試結果，使用厚度 6mm、100ppi 之泡綿衝擊板，S/W 為 1.0。由圖中可知微粒穿透效率(設計#3)可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範，截取氣動直徑值為 4.0μm。

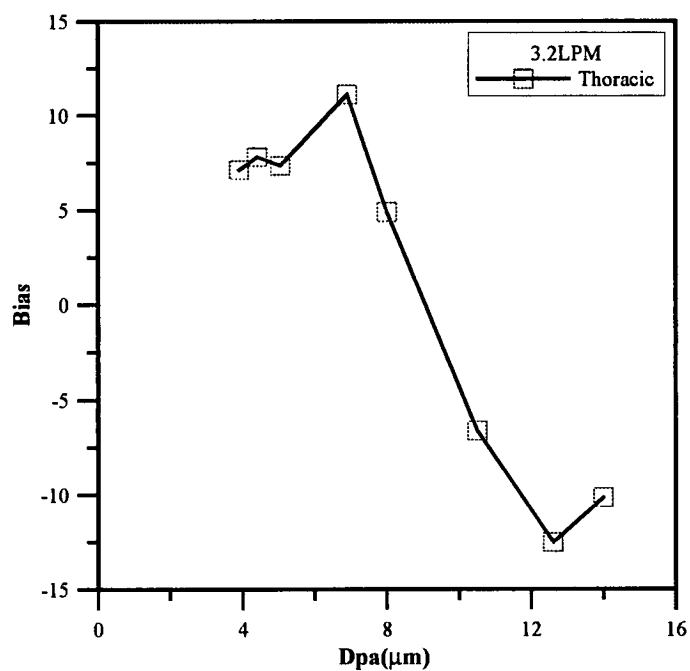


圖 31 胸腔區粉塵穿透率偏差值(設計#2)

圖 31 為設計#2 的胸腔區粉塵穿透率與 ISO/CEN/ACGIH 規範的偏差值(Bias)，結果顯示偏差值在-12.5 ~ +11.1 %之間。

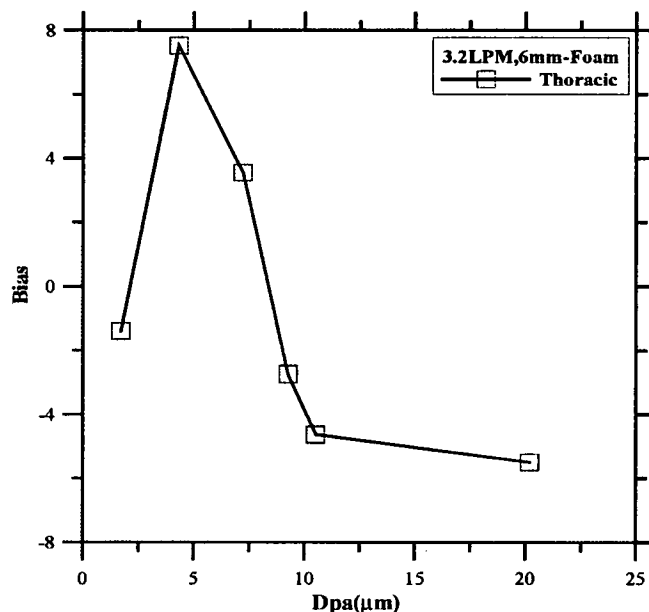


圖 31 胸腔區粉塵穿透率偏差值(設計#3)

圖 32 為胸腔區粉塵穿透效率(設計#3)與 ISO/CEN/ACGIH 規範的偏差值(Bias)，結果顯示偏差值在+7.5%~ -5.4%之間，因此本採樣器的設計#2 及設計#3 均符合美國工業衛生師協會(ACGIH)規定的採樣效率誤差必須在 15%以內，且截取氣動直徑誤差在 ± 10 %以內[27]。

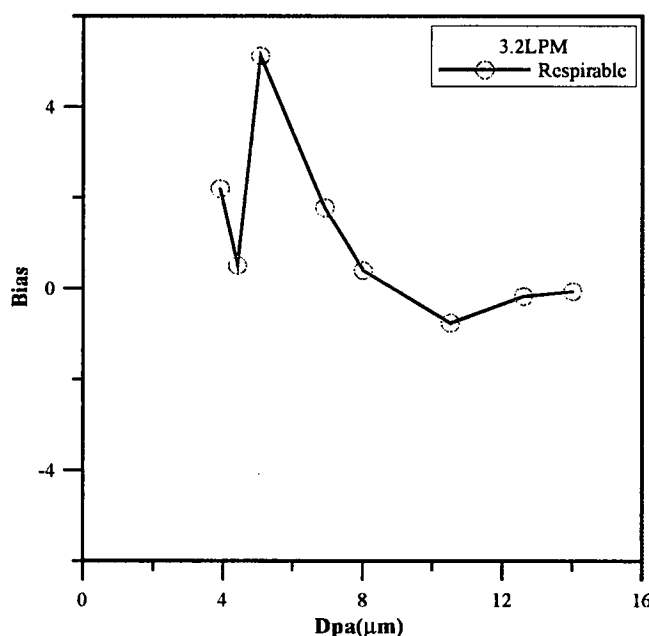


圖 33 可呼吸性粉塵穿透率偏差值(設計#2)

由圖 33 可知可呼吸性粉塵穿透率(設計#2)的偏差值(Bias)在-0.8~+5.1% 之間，符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範。

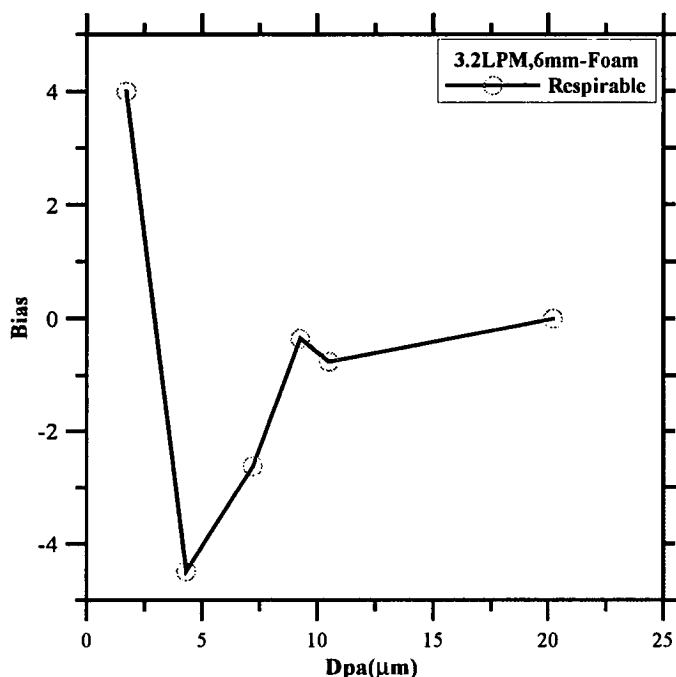


圖 34 可呼吸性粉塵穿透率偏差值(設計#3)

圖 34 為可呼吸性粉塵穿透效率(設計#3)的偏差值(Bias)為+4.0%~-4.4%之間，符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範。

由以上研究可知，今年度的三階採樣器胸腔區粉塵收集效率曲線(設計#2 及設計#3)均可以吻合三階採樣器胸腔區粉塵收集效率曲線，截取氣動直徑值皆為 9.6μm。另外，三階採樣器可呼吸性粉塵收集效率曲線也均可以吻合三階採樣器可呼吸性粉塵收集效率曲線，截取氣動直徑值皆為 4.0μm。

圖 35 至 37 分別為設計#1 (2004)、設計#2 (2005)及設計#3 (2005)的三階採樣器穿透率與  $\sqrt{Stk_{50}}$  之關係，此圖顯示設計#1(2004)胸腔區穿透率所對應的  $\sqrt{Stk_{50}}$  與可呼吸性穿透率所對應的  $\sqrt{Stk_{50}}$  值約在 0.29~0.35 之間，設計#2 (2005)與設計#3 (2005)所對應的  $\sqrt{Stk_{50}}$  值皆為 0.39。一般傳統平板型慣性衝擊器  $\sqrt{Stk_{50}}$  值為 0.49[1]。因此，由表 3.1 可知本年度設計#3 和設計#2 與去年度設計#1 的  $\sqrt{Stk_{50}}$  值都低於傳統平板型慣性衝擊器之  $\sqrt{Stk_{50}}$ ，原因為泡綿為多孔材質，部份氣流會進入泡綿中造成收集效率較平板為高(亦即穿透率降低)。

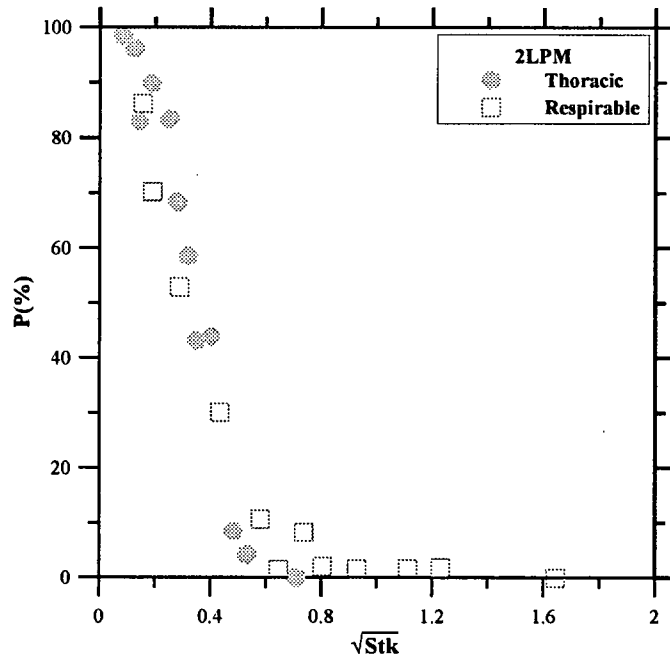


圖 35 去年的三階採樣器穿透率與  $\sqrt{Stk}_{50}$  之關係(設計#1)

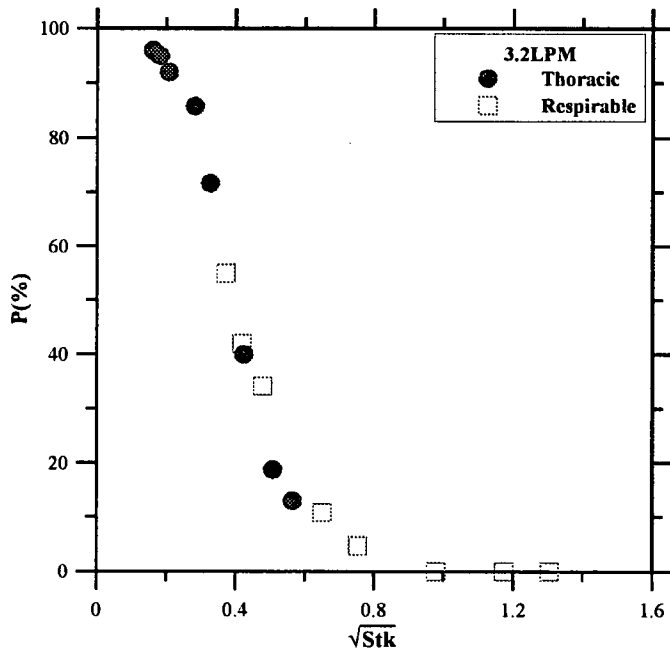


圖 36 三階採樣器穿透率與  $\sqrt{Stk}_{50}$  之關係(設計#2)

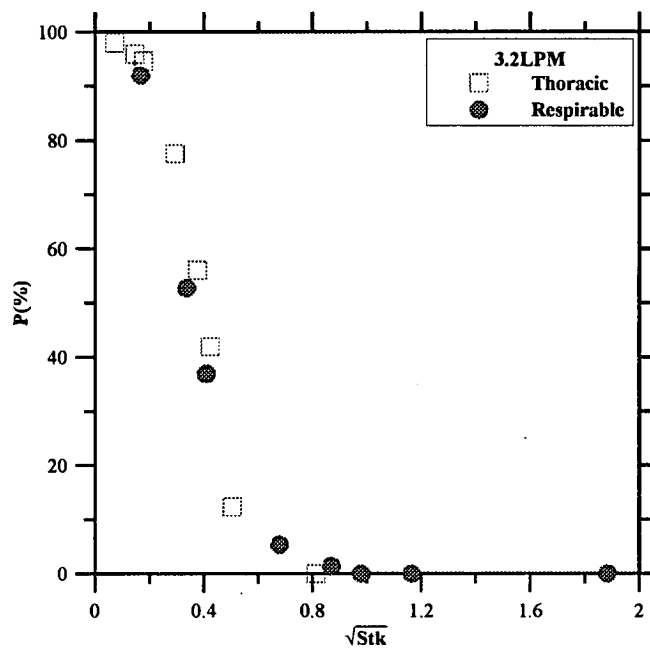


圖 37 三階採樣器穿透率與  $\sqrt{Stk}_{50}$  之關係(設計#3)

表 6 三階採樣器  $\sqrt{Stk}_{50}$  比較表

	s/w	Q(流量) L/min	實際 $\sqrt{Stk}_{50}$
2005 3-stage impactor, 液體微粒和固體微粒(設計#3)	1	3.2	0.39
2005 3-stage impactor, 液體微粒(設計#2)	1	3.2	0.39
2004 3-stage impactor, 液體微粒(設計#1)	0.3	2.0	0.32
Traditional flat-plate impactor	0.5 以上	--	0.49

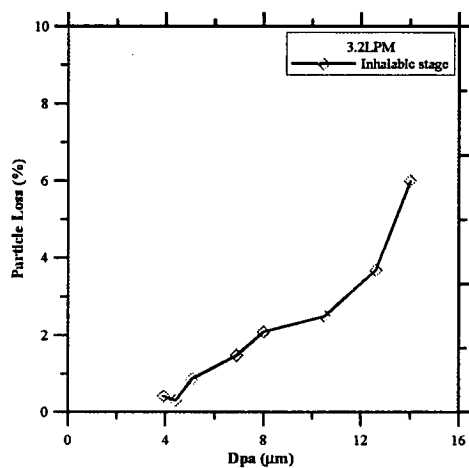
#### 液體微粒損失於採樣器內部探討

我們亦針對採樣器設計#2 和設計#3 內部的微粒損失進行測試，結果如圖 38(a)~(c)。圖 38(a)為本採樣器設計#2 微粒損失於第一階的百分率，由圖中可知微粒粒徑愈大，損失於第一階的百分率就愈高，最高為 14 $\mu$ m 的 6%。圖 38(b) 為微粒損失於第二階的百分率，顯示微粒損失百分率都在 1.6 %以下，十分輕微。微粒損失於第三階的更少，幾乎為 0%。亦即微粒損失於本採樣器內部的量除了大微粒以外，均在可接受範圍以內。

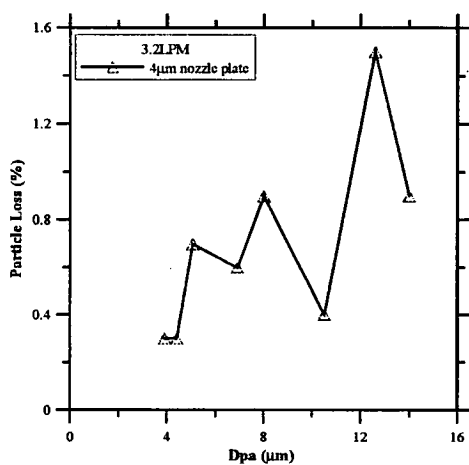
另外，液體微粒於採樣器(設計#3)內部之損失率如圖所示，結果發現液體微粒

損失於採樣器內部之損失率皆為 0%，最主要的原因為第一階泡綿收集板尺寸增加成 47 mm，可以收集到應該收集到的所有微粒，損失於採樣器第一階內部之微粒量幾乎完全為零。

(a)



(b)



(c)

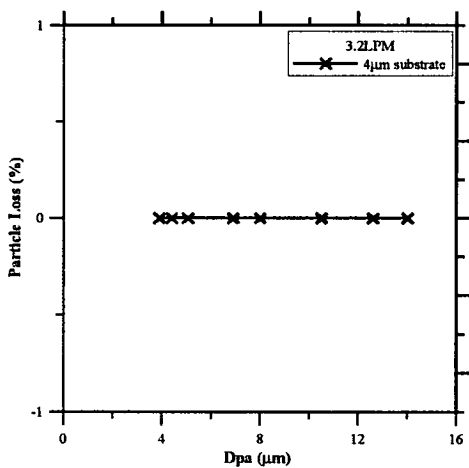
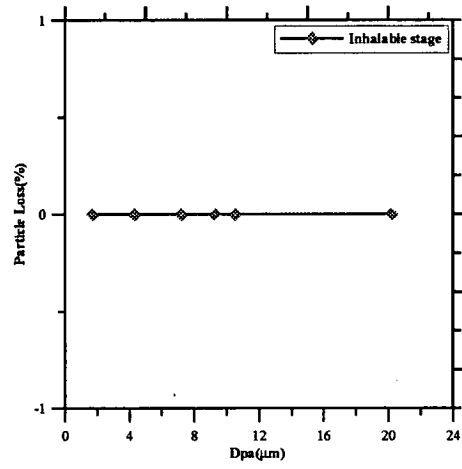
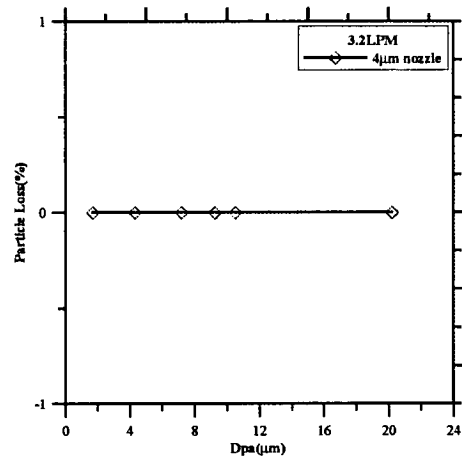


圖 38 三階採樣器微粒損失百分率(a)第一階(b)第二階(c)第三階(設計#2)

(a)



(b)



(c)

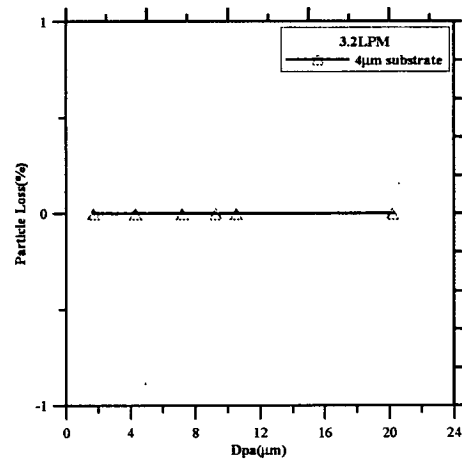


圖 39 三階粉塵採樣器液體微粒損失百分率(a)第一階(b)第二階(c)第三階(設計#3)

## 第二節 三階粉塵採樣器設計#3 的實驗室測試結果—固體微粒

我們欲針對採樣器的固體微粒收集效率進行實驗室測試研究，以了解使用泡綿收集板是否可以抑制固體微粒彈跳的問題。因此，本年度利用粉塵分散器(Small Scale Powder Dispenser, Model 3433, TSI Inc., St Paul, MN, USA)產生單徑標準 PSL 螢光微粒，進行三階粉塵採樣器微粒穿透效率及損失率測試。圖 40 為三階粉塵採樣器(設計#3)胸腔區固體微粒穿透效率實驗室測試結果，衝擊板厚度為 6mm、100ppi 之泡綿，S/W 值為 1.0。結果發現固體微粒穿透效率可得可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範，截取氣動直徑值為  $9.6\mu\text{m}$  與 ISO/CEN/ACGIH 規範的胸腔區截取氣動直徑  $10\mu\text{m}$  的誤差僅為 4 %。我們並比較本年度固體微粒和液體微粒的胸腔區穿透效率曲線，結果發現兩條曲線之間並無明顯差異，且皆可以符合 ISO/CEN/ACGIH 規範之胸腔區粉塵穿透效率曲線。此結果證明使用泡綿當作收集板並沒有固體微粒彈跳的問題。

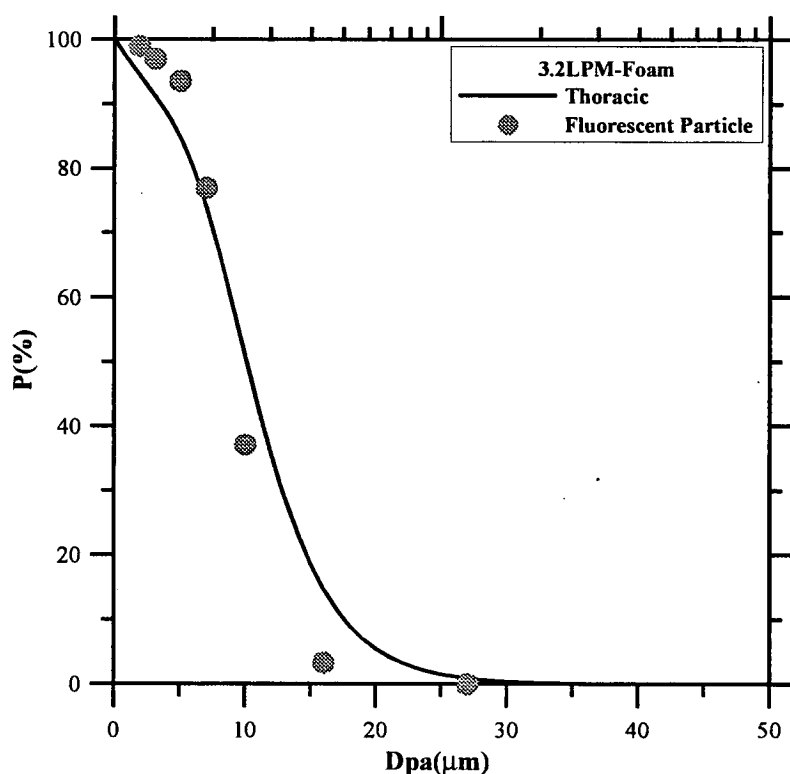


圖 40 三階採樣器之胸腔區粉塵收集效率曲線，固體 PSL 微粒(設計#3)



圖 41 為胸腔區粉塵穿透效率與 ISO/CEN/ACGIH 規範的偏差值(Bias)。結果顯示偏差值在+8.7%~-13.5%之間，因此本採樣器符合美國工業衛生師協會(ACGIH)規定的採樣效率誤差必須在 15 %以內，且截取氣動直徑誤差在  $\pm 10\%$  以內[27]。

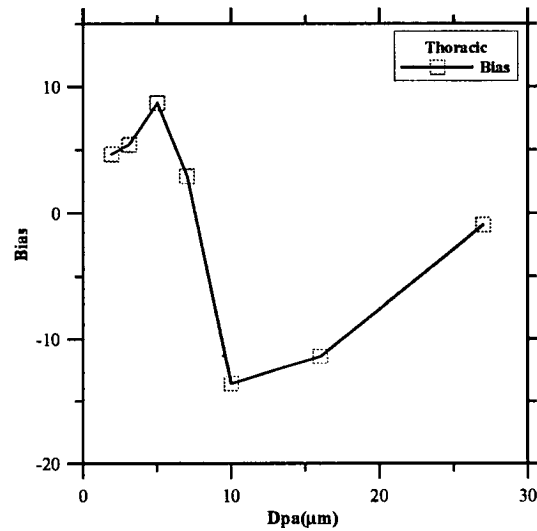


圖 41 胸腔區粉塵穿透率偏差值，固體 PSL 微粒(設計#3)

圖 42 為本年度三階粉塵採樣器可呼吸性固體微粒穿透效率實驗室測試結果，圖中可知，微粒截取氣動直徑值為  $4.0\mu\text{m}$ ，微粒穿透效率也可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範。我們也發現固體微粒穿透效率可以符合液體微粒穿透效率相同，均可符合 ISO/CEN/ACGIH 規範的可呼吸性微粒穿透效率。

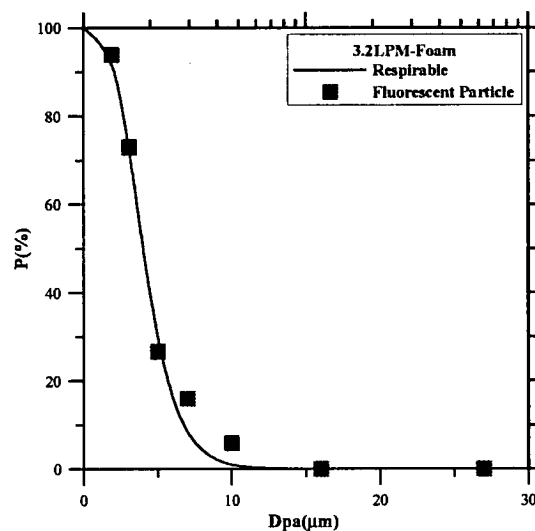


圖 42 三階採樣器之可呼吸性粉塵收集效率曲線，固體 PSL 微粒(設計#3)

圖 43 可知，可呼吸性粉塵穿透效率的偏差值(Bias)在+7.5%~-3.2%之間，符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範。

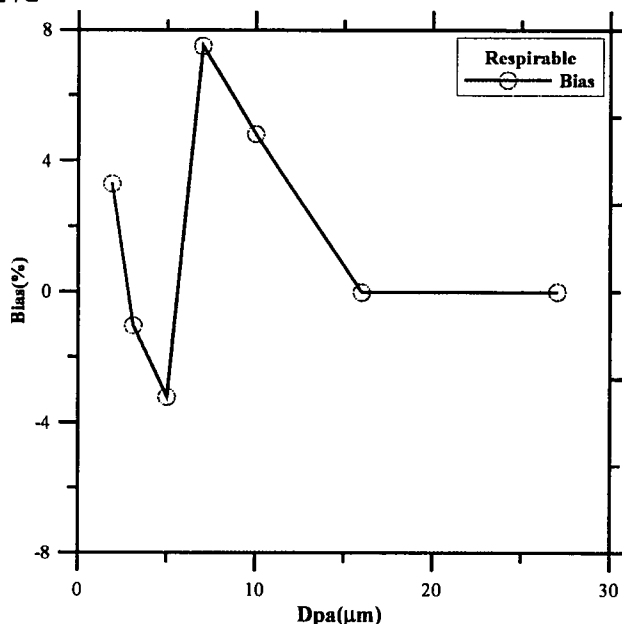


圖 43 可呼吸性粉塵穿透率偏差值，固體 PSL 微粒(設計#3)

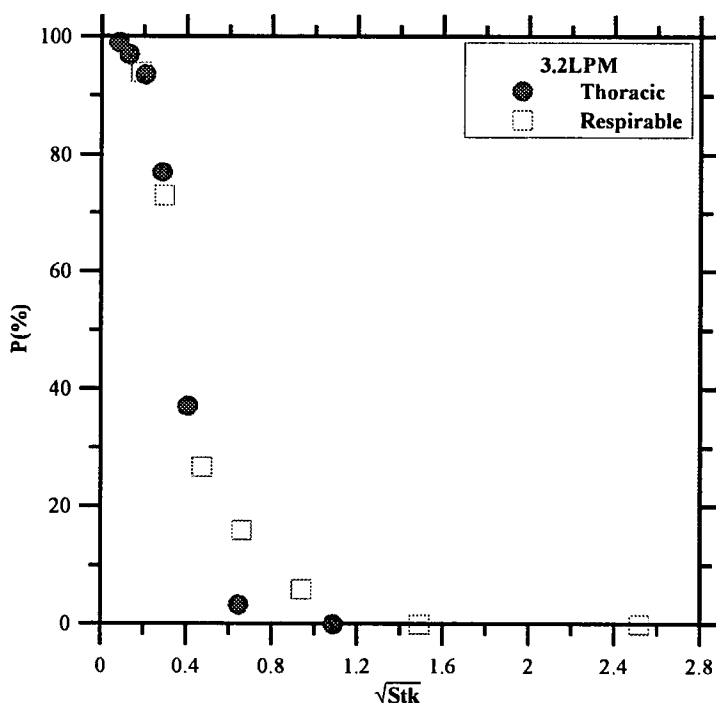


圖 44 三階採樣器穿透率與  $\sqrt{Stk}_{50}$  之關係，固體 PSL 微粒(設計#3)

圖 44 為三階採樣器(設計#3)穿透率與  $\sqrt{Stk}_{50}$  之關係，此圖顯示胸腔區穿透率所對應之  $\sqrt{Stk}_{50}$  與可呼吸性穿透率所對應之  $\sqrt{Stk}_{50}$  皆為 0.39，亦即液體微粒與固體微

粒所對應之 $\sqrt{Stk_{50}}$ 相同。

固體微粒損失於採樣器內部探討

我們亦針對本採樣器(設計#3)內部微粒損失進行實驗室測試，結果發現微粒損失於第一階、第二階和第三階的損失百分率皆接近 0%，與液體微粒結果相同。

### 第三節 泡綿負荷粉塵量的影響

Demokritou et al.曾使用泡綿當作衝擊板，結果顯示泡綿衝擊板具有很高的固體微粒粉塵負荷量[16]。因此本研究亦針對泡綿負荷量進行實驗室測試。我們先將本採樣器可以收集可呼吸性粉塵的部份取出作實驗。我們使用粉塵傳送器輸送多徑分佈之碳粉塵(Coal Dust, Powder Technology Inc., MN, USA)進入測試腔體內，經過靜電中和後，再將粉塵負荷於可呼吸性粉塵階層，直至負荷到一定的粉塵量後，我們即停止操作粉塵分散器，接著再利用超音波霧化器產生多徑油酸液體微粒，以上下游的方式進行微粒負荷量對收集效率測試。圖 45 為泡綿負荷量與微粒穿透效率關係圖。結果顯示控制流量為 3.2L/m、粉塵負荷量為 0mg 時，微粒穿透效率可以符合 ISO/CEN/ACGIH 規範之可呼吸性穿透效率，截取氣動直徑為 4 $\mu$ m 可符合 ISO/CEN/ACGIH 規範。當粉塵負荷量達到 9mg(或噴嘴下每平方公分為 47.7mg)時，泡綿收集板上的粉塵會有輕微堆積形成小山丘的情況(圖 46)，但粉塵穿透效率曲線仍然可以符合 ISO/CEN/ACGIH 規範之可呼吸性效率曲線，截取氣動直徑值略降為 3.8 $\mu$ m，與 ISO/CEN/ACGIH 規定之 4 $\mu$ m 截取氣動直徑值誤差僅在 5%以內。然而當粉塵負荷量達到 26mg 時，粉塵會全部蓋滿泡綿收集板且會堆積成小山丘，粉塵穿透效率曲線明顯變為陡峭(或收集效率增加)，截取氣動直徑值改變成 3.2 $\mu$ m，與 ISO/CEN/ACGIH 規定之可呼吸性粉塵穿透效率曲線偏離很多。其原因為大於截取氣動直徑之微粒較容易碰撞到小山丘，造成曲線末端的穿透效率急速下降而變為陡峭。若以本採樣器所能負荷最大粉塵量 9mg，在採樣流量 3.2L/m、採樣時間 8 小時情況下，本採樣器於工作場所能負荷之最大可呼吸性粉塵量為 5.9 mg/m<sup>3</sup>。

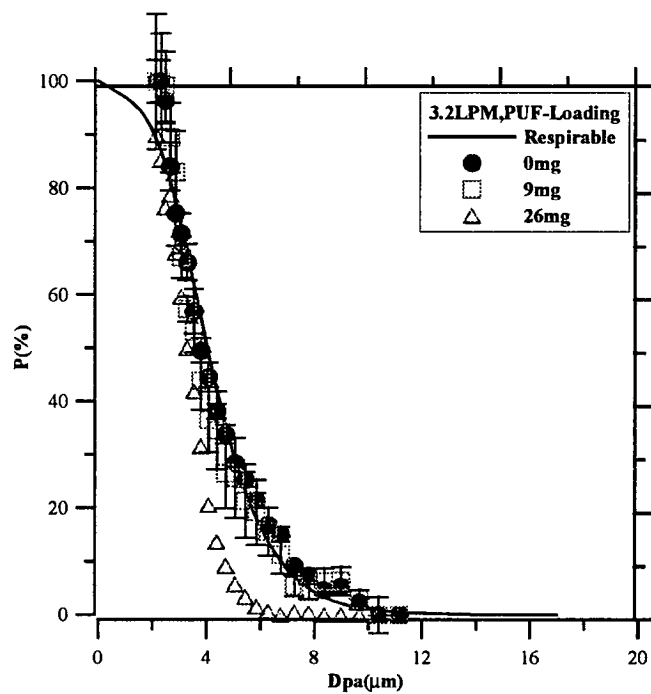


圖 45 粉塵負荷量與與微粒穿透效率關係圖

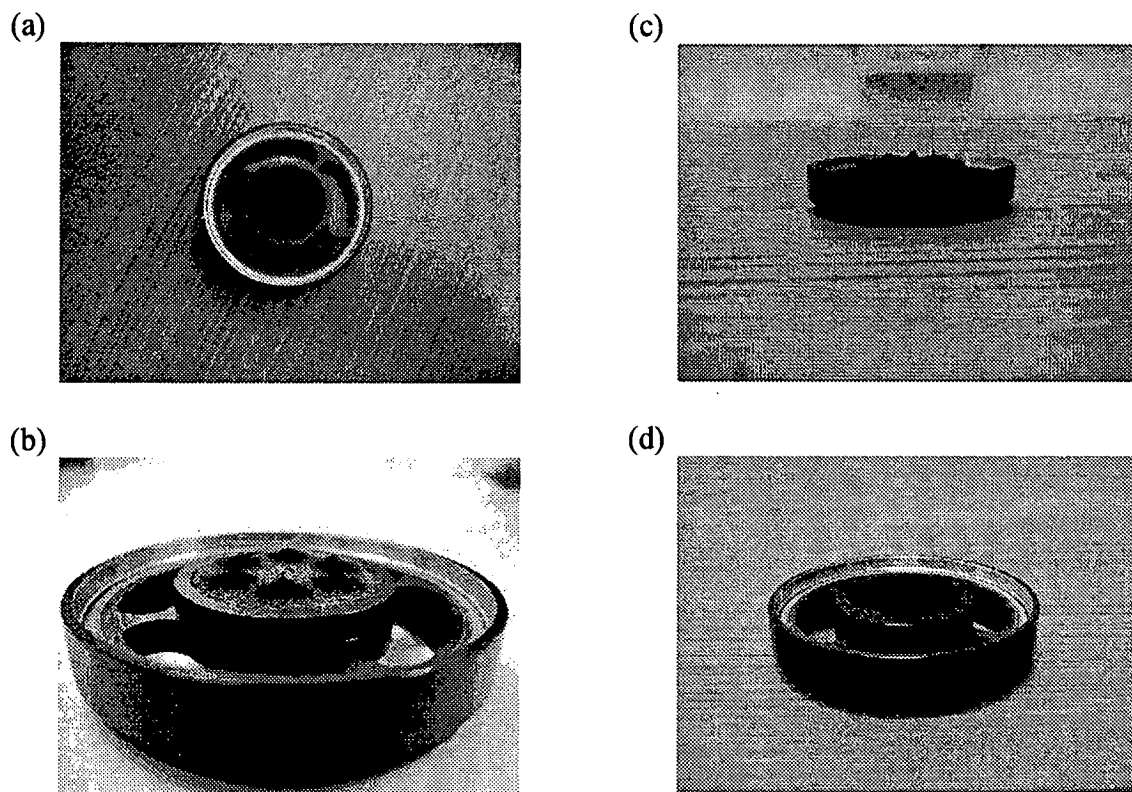


圖 46 100 ppi 泡綿之粉塵負荷  
(負荷粉塵質量分別為 a. 9 mg; b. 9 mg; c. 26 mg; d. 26 mg)

## 第四節 現場測試結果

### 一、濾紙秤重環境條件

在現場的測試方面，本研究利用自行設計的三階粉塵採樣器(設計#3)、Marple 個人粉塵採樣器、TSI Respicon 以及 IOSH Cyclone 採樣器各兩組，在工作場所進行固定點的粉塵濃度比對實驗。我們選定某鉛粉廠和某電池廠以及湖口某鑄造廠為測試地點。本研究使用如圖 24 所示之旋轉裝置，轉盤每 10 分鐘一轉，轉盤上面配有假人半身模型，其胸口佩戴八個個人採樣器來進行工作場所固定點採樣。

美國 USEPA 建議  $PM_{10}$  之濾紙於秤重時要控制的環境平均溫度為  $15\sim 30^{\circ}C$  之間，溫度變化為  $\pm 3^{\circ}C$ ，環境平均溼度為  $20\sim 45\%$ ，濕度變化為  $\pm 5\%$ [28]； $PM_{2.5}$  濾紙需要控制環境平均溫度在  $20\sim 23^{\circ}C$ ，24 小時內溫度控制  $\pm 2^{\circ}C$ ，環境平均溼度  $30\sim 40\%$ ，24 小時內濕度控制  $\pm 5\%$ [29]。我們取用兩張相同材質的 PVC(編號為 P1 和 P2，直徑為 34mm)、Zefluor 濾紙(編號為 Z1 和 Z2，直徑為 37mm)及泡綿(編號為 F1 和 F2，直徑為 25mm)進行空白濾紙的秤重，每張濾紙於 9/26 和 9/27 各秤 5 次，秤重環境  $RH=45\pm 3^{\circ}C$  和  $T=23\pm 0.5^{\circ}C$ ，類似美國 EPA 的  $PM_{10}$  濾紙秤重環境，結果如表 7 所示。PVC 和 Zefluor 濾紙同一天秤重的標準偏差都小於  $1\mu g$ ，且同一張濾紙在不同天的重量差值也小於  $1\mu g$ 。但是泡綿於同一天的秤重標準偏差為  $80\sim 200\mu g$ ，且同一個泡綿在不同天的重量標準偏差為  $126\sim 180\mu g$ 。因此在此控制條件下 PVC 和 Zefluor 濾紙的秤重極為準確，但是泡綿的秤重卻會造成很大的誤差。

後來本研究將泡綿秤重的環境濕度控制  $RH=35\pm 3\%$ ，溫度控制  $T=20\pm 0.4^{\circ}C$ ，同一泡綿在同一天秤重之標準偏差值皆小於  $5\mu g$ ，同一泡綿在不同天的標準偏差值在  $2\mu g$  以下，如表 8 所示。因此在此控制條件下泡綿的秤重極為準確，後續的泡綿秤重都是控制在此一條件下進行。本溫溼度控制條件較美國 EPA  $PM_{2.5}$  條件嚴格，在一般的室內環境下很難控制到此一條件，一天八小時之內只能秤約十張泡綿。

表 7 控制溫溼度(RH=45±3% , T=23±0.5°C)濾紙五重複秤重結果(單位 mg)

濾紙種類	PVC	PVC	PVC	PVC	Zefluor	Zefluor	Zefluor	Zefluor	Foam	Foam	Foam	Foam
濾紙編號	(9/26) P1	(9/27) P1	(9/26) P2	(9/27) P2	(9/26) Z1	(9/27) Z1	(9/26) Z2	(9/27) Z2	(9/26) F1	(9/27) F1	(9/26) F2	(9/27) P2
平均值	11.58 9	11.58 8	10.426	10.425 4	162.60 7	162.60 8	179.75 5	179.75 6	85.958	85.771 6	85.363 6	85.49
標準偏差	0.000 8	0.000 8	0.0036 3	0.0016 3	0.0008 9	0.0024 9	0.0028 7	0.0009 8	0.0803 3	0.1801 5	0.0365	0.200
前後天差值	0.001		0.0006		-0.0006		-0.0008		0.1864		-0.1216	

表 8 控制溫溼度(RH=35±3% , T=20±0.4°C)泡棉秤重結果(單位 mg)

濾紙種類	Foam	Foam	Foam	Foam
濾紙編號	(9/27) F1	(9/28) F1	(9/27) F2	(9/28) F2
第一次秤重	85.806	85.799	85.306	85.296
第二次秤重	85.794	85.8	85.305	85.306
第三次秤重	85.795	85.804	85.304	85.304
第四次秤重	85.801	85.797	85.306	85.307
第五次秤重	85.801	85.791	85.303	85.301
平均值	85.7994	85.7982	85.3048	85.3028
同一天之標準偏差值	0.00493	0.004764	0.001304	0.004438
前後天差值		-0.0012		-0.002
相對偏差, µg		0.0014		0.0023

## 二、同一類型採樣器濃度準確性探討

為了確保本研究於現場採樣濃度之精確性，我們每次於工作場所採樣時都攜帶四種不同採樣器(每種都有兩個)同時進行比對實驗，因此採樣旋轉假人上共有八個採樣器同時進行採樣。

我們先比對兩個 Respicon 採樣器在相同地點和同一時間的粉塵濃度結果，由圖 47(a)~(c)所示，發現兩個 Respicon 採樣器的三種粉塵(可呼吸性粉塵、胸腔區粉塵和可吸入性粉塵)均十分接近，幾乎為 1:1 之比值。圖 48 為兩個 IOSH cyclone 採樣器的可呼吸性粉塵濃度的比對，圖 49(a)~(c)為兩個三階採樣器(設計#3)之三種粉塵濃

度的比對，結果發現以上兩種採樣器在它們自己相互之間的粉塵測值也十分接近，幾乎為 1:1 之比值。由以上結果可以知道，我們於現場進行粉塵濃度採樣之精確性 (Precision) 很高。

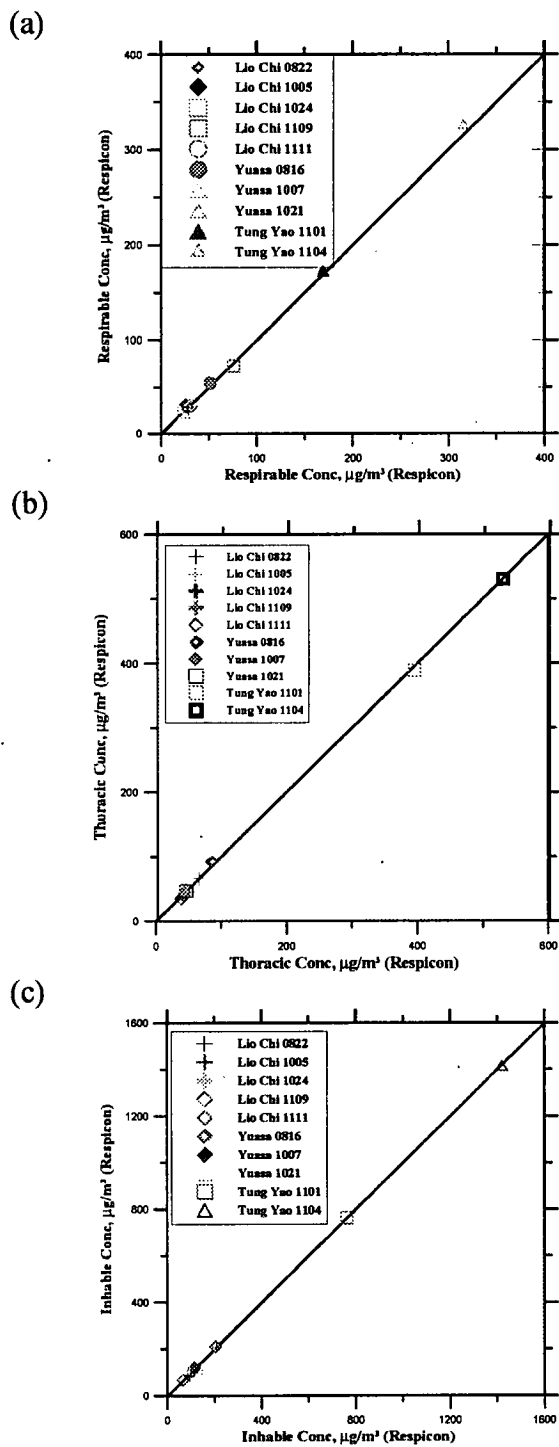


圖 47 兩個 Respicon 採樣器的三種粉塵濃度比較  
(a)可呼吸性粉塵(b)胸腔區粉塵(c)可吸入性粉塵

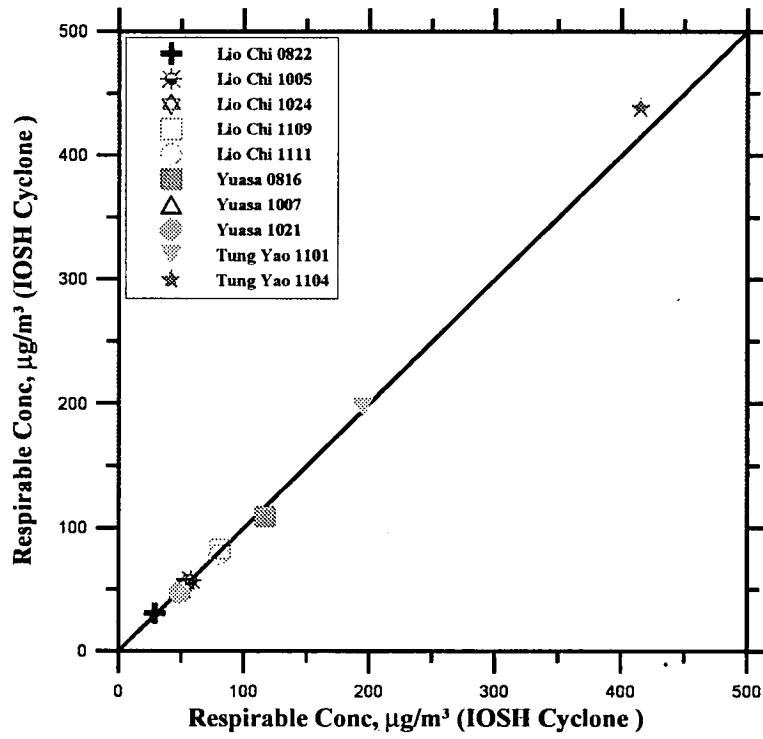
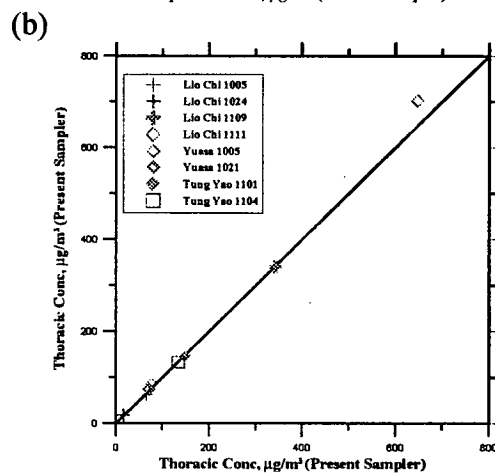
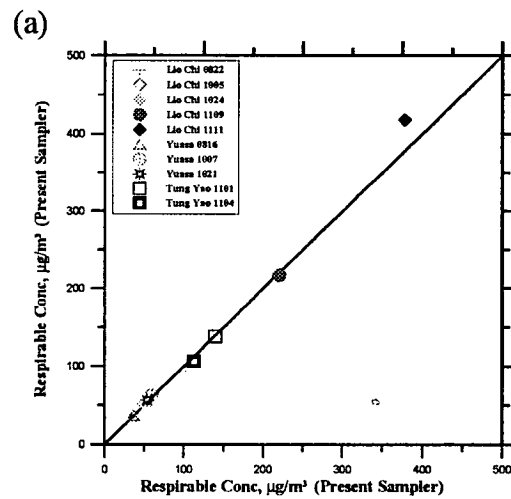


圖 48 兩個 IOSH cyclone 之可呼吸性粉塵濃度比較





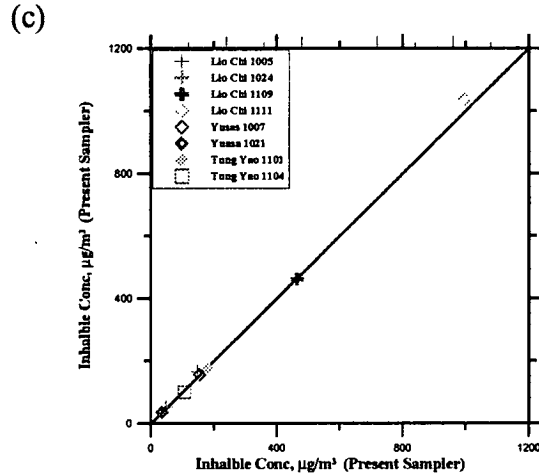


圖 49 兩組三階採樣器(設計#3)之三種粉塵濃度比較  
(a)可呼吸性粉塵(b)胸腔區粉塵(c)可吸入性粉塵

### 三、不同類型採樣器與 Marple 採樣器計算出的標準粉塵濃度比對

本研究以 Marple 個人粉塵採樣器所採集之現場粉塵並計算出的三種粉塵濃度為參考標準，並與三階採樣器(設計#3)、IOSH Cyclone 採樣器和 Respicon 採樣器所採集的粉塵濃度作比較。

圖 50 為 IOSH cyclone 和 Marple 採樣器的可呼吸性粉塵濃度比對結果，結果顯示在粉塵濃度低時( $120\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下)，兩者的濃度接近，平均標準偏差為  $\pm 29\%$ 。然而在粉塵濃度高於  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上時，IOSH cyclone 比 Marple 採樣器低 27~35%之間。

圖 51(a)~(c)為 Respicon 和 Marple 採樣器的三種粉塵濃度比較，我們發現在  $0\sim 800\mu\text{g}/\text{m}^3$  粉塵濃度之間，Respicon 之可呼吸性粉塵濃度明顯低於 Marple 採樣器，濃度的誤差在 -24~-75%之間(圖 51(a))。Respicon 胸腔區粉塵濃度及可吸入性粉塵濃度也類似，都明顯低於 Marple 的濃度，前者之誤差為 -9~-54%之間，後者之誤差為 +6~-40%之間。在可吸入性粉塵方面，Rando et al. [19]、Teikari et al[20]、Tatum et al.[30]、Bratveit et al.[21]及 Koch et al.[22]均發現 Respicon 遠比 IOM 低約在 -50~-110%之間。Koch 等人猜測可能是因為 IOM 採樣器有一個大的直接向外開口，會造成可吸入性粉塵濃度比 Respicon 高。在胸腔區粉塵方面，Li et al.的實驗室測試結果也顯示 Respicon 濃度明顯低於 ISO/CEN/ACGIH 的採樣效率規範(如圖 3 所示)，這也可以說明了我們的 Respicon 會比 Marple 低的原因。

圖 52(a)~(c)三階採樣器(設計#3)之三種粉塵濃度(可呼吸性粉塵、胸腔區粉塵和可吸入性粉塵)對 Marple 現場粉塵濃度之比較，在低粉塵濃度下( $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下)三種粉塵濃度皆與 Marple 採樣器接近，可呼吸性粉塵濃度誤差為+32~34%之間(平均標準偏差為 $\pm 18\%$ )，胸腔區粉塵濃度與 Marple 採樣器現場粉塵濃度之誤差約為-15~+23 %之間，可吸入性粉塵濃度與 Marple 採樣器現場粉塵濃度之誤差約為-28~+69%之間。然而於高粉塵濃度下(大於  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上)三階採樣器的三種粉塵的濃度均比 Marple 低，誤差分別為-20~-33%、-30.5~-43.6%和-37~-47%之間。

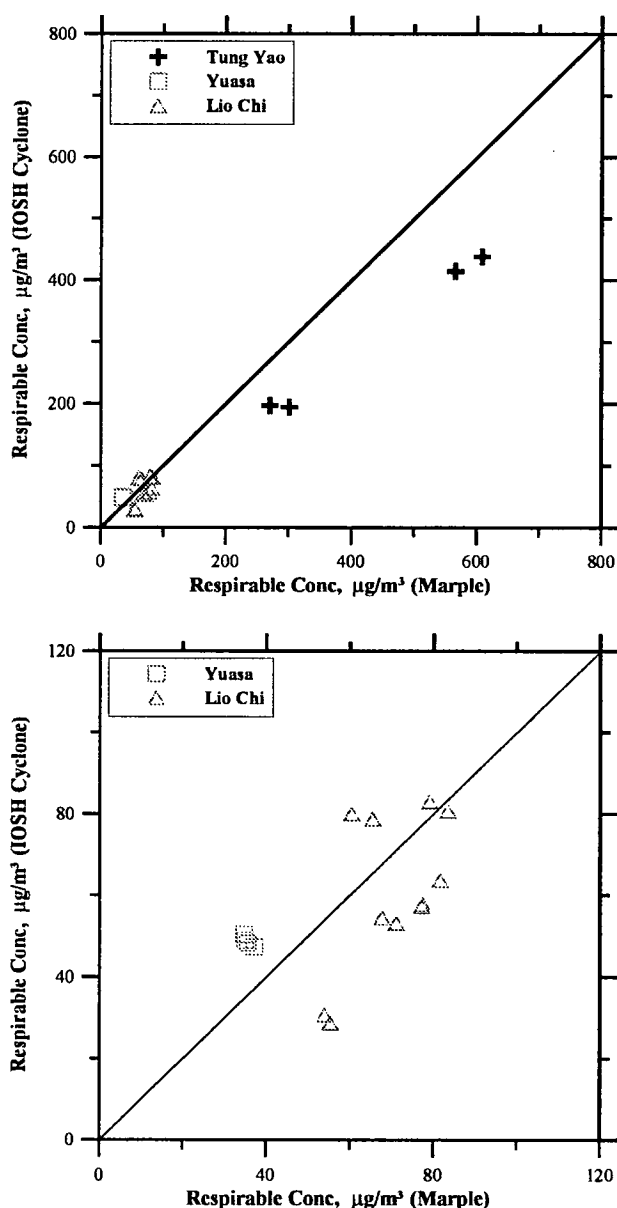


圖 50 IOSH Cyclone 採樣器與 Marple 採樣器之可呼吸性粉塵濃度比較

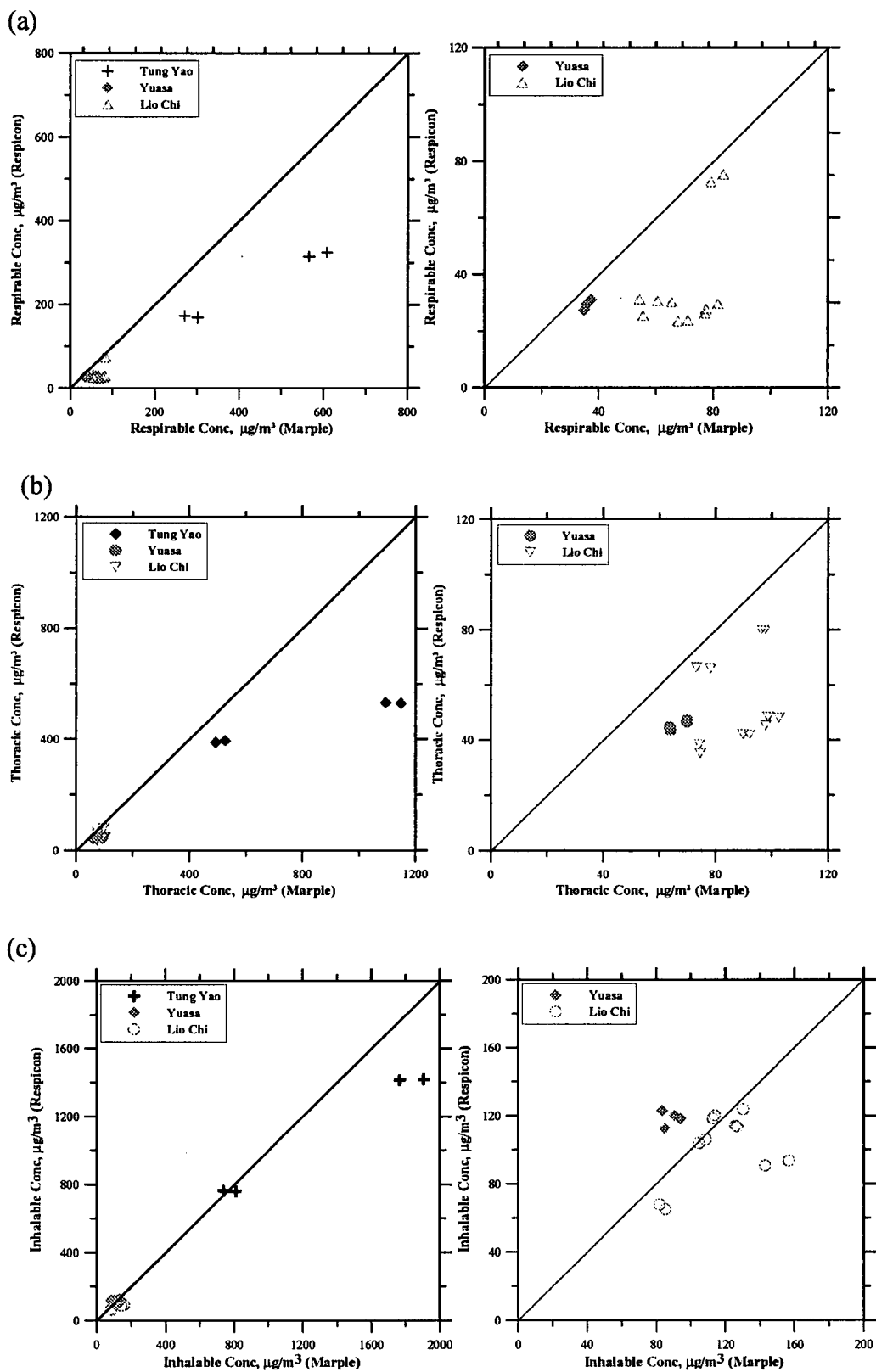


圖 51 Respicon 採樣器與 Marple 採樣器之三種粉塵濃度比較  
(a)可呼吸性粉塵(b)胸腔區粉塵(c)可吸入性粉塵

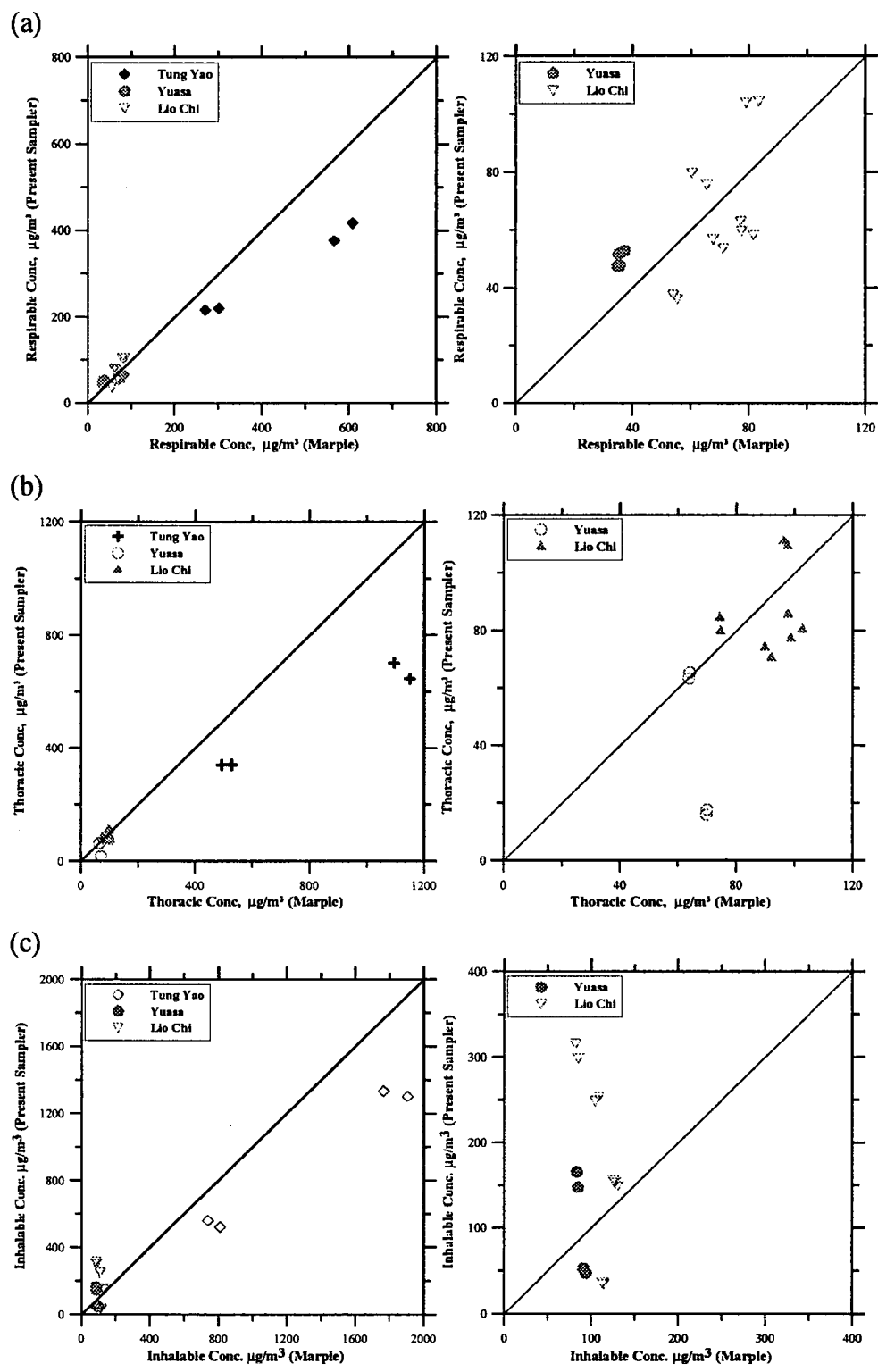


圖 52 三階採樣器(設計#3)與 Marple 採樣器之三種粉塵濃度比較  
 (a)可呼吸性粉塵(b)胸腔區粉塵(c)可吸入性粉塵

不同類型採樣器的粉塵濃度與 Marple 採樣器之線性迴歸結果如圖 53 所示。結果發現，IOSH cyclone 和本研究的三階採樣器(設計#3)之可呼吸性粉塵濃度十分接近，但兩者在高濃度時均比 Marple 採樣器偏低，造成迴歸線之斜率分別為 0.69 和 0.65，Respicon 的斜率更低為 0.55。

在胸腔區粉塵方面三階採樣器和 Respicon 的線性迴歸斜率為 0.59 和 0.50，如圖 54 所示，且在低濃度時三階採樣器比 Respicon 更接近 Marple 採樣器，如前面的圖 52 所示。

在可吸入性粉塵方面，三階採樣器和 Respicon 的線性迴歸斜率為 0.66 和 0.78，如圖 55 所示，Respicon 與三階採樣器的濃度較為接近，但皆低於 Marple。

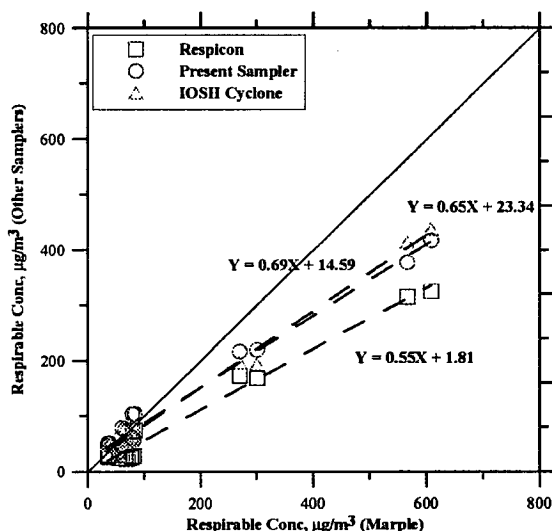


圖 53 所有採樣器與 Marple 採樣器之可呼吸性粉塵濃度比較

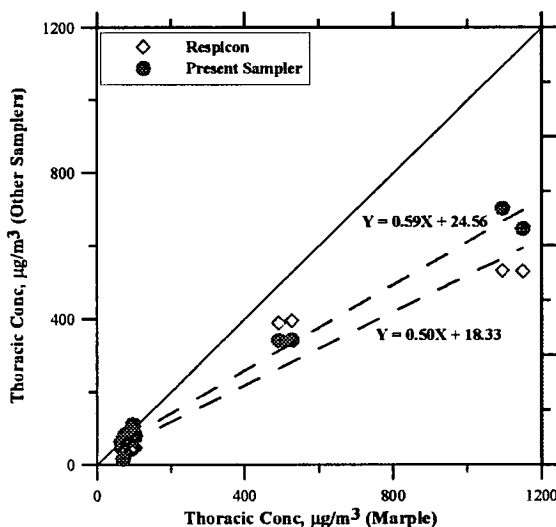


圖 54 所有採樣器與 Marple 採樣器之胸腔區粉塵濃度比較

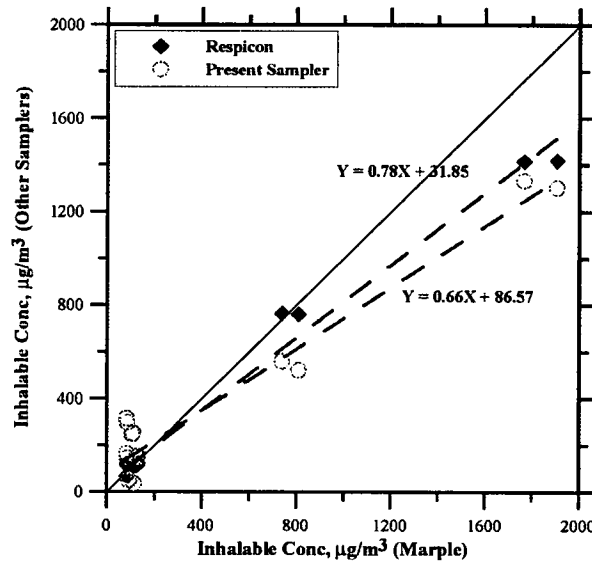


圖 55 所有採樣器與 Marple 採樣器之可吸入性粉塵濃度比較

由以上比較可以知道，2005 年三階採樣器(設計#3)和 IOSH Cyclone 所採集之現場粉塵濃度比 Respicon 採樣器所採集之現場粉塵濃度較為接近 Marple 採樣器的粉塵濃度。然而在高粉塵濃度和低粉塵濃度下，三種採樣器之胸腔區和可呼吸性粉塵濃度卻都有低於 Marple 採樣器粉塵濃度的現象，我們推測可能原因之一為較大微粒容易由濾紙收集板彈跳至下一階濾紙收集板，造成 Marple 採樣器所採集之胸腔區粉塵濃度和可呼吸性粉塵濃度會有高估的現象。

#### 四、鉛分析結果

為了瞭解勞工作業場所中粉塵含鉛濃度的多寡，所以我們使用 Respicon 採樣器、IOSH cyclone 和三階採樣器(設計#3)所收集到的粉塵進行鉛分析實驗。

表 9 為竹東某公司在同一時間使用 Respicon 採樣器所採集之現場粉塵含鉛濃度的分析結果，結果顯示現場所採集之可呼吸性粉塵、胸腔區粉塵及可吸入粉塵中約含有鉛濃度平均值分別為 0.37、1.25 和 2.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。我們使用 IOSH cyclone 和三階採樣器所採集的鉛濃度均較 Respicon 高，分別為 0.64 和 0.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (表 3.5 和 3.6)。

Respicon 於台北某公司所採集到的三種粉塵含鉛濃度平均值分別為 1.22、4.14 和 4.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如表 12 所示。如表 13 和 14 所示，我們發現 IOSH cyclone 和三階採樣器所採集鉛濃度均比 Respicon 高，分別為 2.87 和 2.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

由於兩地所採集的鉛濃度最大值不超過 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，濃度相當低，因此將來要朝以

下方向努力，才能做好鉛的分析：(1)鉛分析所使用之容器皆須需要經過酸洗，才能避免樣本受到容器中殘留鉛之污染，(2)需要有好的挾持器具避免泡綿於運送過程產生碰撞，而造成收集之粉塵損失，(3)微波消化之條件需要重新設定，(4)泡綿在採樣前須經過清洗以避免鉛之污染，(5)我們需要做 MDL 的檢驗以利於鉛分析之進行。

表 9 竹東某工廠 2005/08/22 Respicon 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較

粉塵種類	Respicon 採樣器 A 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respicon 採樣器 B 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respicon 採樣器 A 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respicon 採樣器 B 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_R$	25.48	31.33	0.37	0.37
$C_T$	66.15	66.52	1.08	1.41
$C_I$	93.60	90.75	2.00	2.45

表 10 竹東某工廠 2005/08/22 IOSH cyclone 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較

粉塵種類	IOSH cyclone 採樣器 A 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IOSH cyclone 採樣器 B 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IOSH cyclone A 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IOSH cyclone 採樣器 B 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_R$	28.76	30.72	0.47	0.81

表 11 竹東某工廠 2005/08/22 自行研發採樣器採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較

粉塵種類	自行研發採樣 A 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	自行研發採樣 B 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	自行研發採樣 A 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	自行研發採樣 B 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_R$	36.11	37.50	0.63	0.31

表 12 台北某工廠 2005/08/16 Respicon 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較。

粉塵種類	Respicon 採樣器 A 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respicon 採樣器 B 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respicon 採樣器 A 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respicon 採樣器 B 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_R$	50.75	54.51	1.00	1.44
$C_T$	85.84	92.81	4.45	3.82
$C_I$	203.11	212.22	5.92	3.65

表 13 台北某工廠 2005/08/16 IOSH cyclone 採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較

粉塵種類	IOSH cyclone 採樣器 A 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IOSH cyclone 採樣器 B 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IOSH cyclone A 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IOSH cyclone 採樣器 B 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_R$	117.15	108.82	3.55	2.20

表 14 台北某工廠 2005/08/16 自行研發採樣器採樣粉塵鉛分析與現場總粉塵濃度比較

粉塵種類	自行研發採樣 A 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	自行研發採樣 B 秤重總粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	自行研發採樣 A 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$	自行研發採樣 B 鉛分析粉塵濃度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$
C <sub>R</sub>	102.34	101.30	3.95	0.62



## 第四章 結 論

### 第一節 實驗室測試方面

本年度持續針對 2004 年的三階採樣器(設計#1)作改良，分別有設計#2 及設計#3 二種設計，而設計#3 為最終的設計，其第一階泡綿的直徑為 47mm，第二階泡綿為圓環形的形狀(OD=47mm, ID=15mm)，第三階的泡綿直徑為 22mm，終端濾紙為 47 mm。此設計可避免噴嘴過於靠近內壁，減少微粒損失。設計#3 將泡綿加厚成 6mm 避免了粉塵穿透至底部之現象，同時本設計已將收集介質的底座與噴嘴板設計在同一個階層上，可縮短採樣器的高度及減輕其重量。

#### 一、實驗室測試方面

- 1.實驗室測試結果顯示，採樣器採樣流量為 3.2L/min，使用 100ppi 泡綿為衝擊板時，微粒穿透效率曲線與 ISO/CEN/ACGIH 規範之胸腔區曲線吻合，穿透效率曲線誤差在正負 12%以內，截取氣動直徑值為 9.6 $\mu$ m，與 ISO/CEN/ACGIH 規定的 10 $\mu$ m 的誤差只在 4%左右。
- 2.可呼吸性粉塵穿透率曲線可以符合 ISO/CEN/ACGIH 規範之曲線，截取氣動直徑值與 ISO/CEN/ACGIH 規定的 4 $\mu$ m 吻合。
- 3.本採樣器各階的微粒損失量均接近零。
- 4.本採樣器使用泡綿當作收集板，對固體微粒的粉塵負荷量可以高達 9mg，而不影響收集效率曲線及截取直徑，且固體微粒穿透效率曲線幾乎和液體微粒穿透效率曲線重疊，證明使用泡綿當作收集板可以有效抑制固體微粒的彈跳及再揚起，並具有不需塗敷矽油的優點。
- 5.2005 三階採樣器設計#2 與設計#3 之胸腔區穿透率與可呼吸性穿透率對應的  $\sqrt{Stk_{50}}$  值皆為 0.39，可用於三階粉塵採樣器之設計。

#### 二、現場採樣及鉛分析

- 1.現場測試比對結果顯示兩個相同的採樣器相互之間的測值十分接近，表示現場採樣比對方法的精確性很高。
- 2.在可呼吸性粉塵方面，三階粉塵採樣器與 IOSH cyclone 的測值在 0~800 $\mu$ g /m<sup>3</sup>

之範圍內十分接近，且在低粉塵濃度時( $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下)與 Marple 採樣器的濃度接近，平均標準偏差為 $\pm 18\%$ ，但是在高濃度時三階粉塵採樣器的濃度則偏低，而 Respicon 的測值均比三階採樣器及 Marple 採樣器的濃度低。

- 3.三階採樣器的測值在胸腔區粉塵及可吸入性粉塵方面均比 Marple 採樣器的測值低，Respicon 亦有相同的趨勢，可能原因為 Marple 採樣器內微粒會由濾紙收集板彈跳至下一階層使然，另一個可能原因為採樣器入口的效率不一樣而造成的結果。

另外，有限的鉛分析數據顯示，泡綿應該可以做微波消化及鉛分析。但由於空氣中的鉛濃度很低，因此將來要朝以下方向努力，才能做好鉛的分析:(1)鉛分析所使用之容器皆須需要經過酸洗，才能避免樣本受到容器中殘留鉛之污染，(2)需要有良好的挾持器具避免泡綿於運送過程產生碰撞，而造成收集之粉塵損失，(3)微波消化之條件需要重新設定，(4)泡綿在採樣前須經過清洗以避免鉛之污染，(5)我們需要做 MDL 的檢驗以利於鉛分析之進行。

## 第二節 現場採樣及鉛分析

本研究建議如下：

- 1.利用本研發設備於作業場所可同時進行可呼吸性粉塵、胸腔性粉塵及可吸入性粉塵同步採樣。可於單次採樣中較傳統採樣方式獲取更多的勞工粒狀物有害物暴露資訊。
- 2.針對高濃度時 Marple 採樣器高估可呼吸性及胸腔區濃度之原因應持續作測試研究，取得更多之現場比對數據，並縮短採樣時間以減少粉塵在 Marple 採樣器各階層之負荷及彈跳現象。
- 3.在可吸入性粉塵方面，三階採樣器必須和 IOM 及其他標準可吸入性採樣器多作比對測試研究，並研究入口粉塵之採樣效率造成的測值差異。
- 4.泡綿秤重的環境條件十分嚴格，因此必須要有很好的溫濕度控制的秤重室才可以得到準確的重量。

## 誌 謝

本研究計畫參與人員為國立交通大學環境工程研究所蔡春進教授、張正生、陳廉潔等人，謹此敬表謝忱。

## 參考文獻

- [1] Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., New York
- [2] Baron, P., and John, W., 1999, "Sampling for Thoracic Aerosols", in *Particle Size-Selective Sampling for Particulate Air Contaminants*, ACGIH, Cincinnati.
- [3] 賴全裕、陳志傑、石東生、葉文裕、陳正堯，1997，“氣懸微粒分徑採樣器的研發”，第5卷，第2期：39-49。
- [4] 蔡春進、石東生，1994；“粉塵分粒裝置採樣器之性能評估研究”，*勞工安全研究季刊*，第2卷：23-34。
- [5] 蔡春進、石東生、蕭宏光、林國清，1997；“粉塵負荷及靜電量對IOSH尼龍旋風器的採樣效率的影響”，*勞工安全研究季刊*，第5卷，第2期：27-38
- [6] Tsai, C.J., Shiau, H.G. and Shih, T.S., 1999; "Field Study of the Accuracy of two Respirable Sampling Cyclones", *Aerosol Sci. Technol.* 31: 463-472.
- [7] Tsai, C.J., Shiau, H.G., Lin, K.C., and Shih, T.S., 1999, "Effect of Deposited Particle and Particle Charge on the Penetration of Small Sampling Cyclones", *J. Aerosol Sci.* 30:313-323.
- [8] Chen, C.C., Lai, C.Y., Shih, T.S., Yeh, W.Y., 1998, "Development of Respirable Aerosol Samplers Using Porous Foams", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 59:766-773.
- [9] Li, S. N., Lundgren, D. A., Rovell-Rixx, D., 2000, "Evaluation of Six Inhalable Aerosol Sampler," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 61:506:516.
- [10] Rubow, K.L., Marple, V.A., Olin, J., and Mccawley, M.A., 1987, "A Personal Cascade Impactor: Design , Evaluation and Calibration", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 48: 532-538.
- [11] Tsai, C.J., Huang, C.H., Wang, S.H., and Shih, T.S., 2001, "Design and Testing of a Personal Porous-Metal Denuder", *Aerosol Sci. Technol.* 35: 611-616.
- [12] Kavouras, G., and Koutrakis, P., 2001, "Use of Polyurethane Foam as the Impaction Substrate/Collection Medium on Conventional Inertial Impaction", *Aerosol Sci. Technol.* 34:46-56.

- [13] Sioutas, C, Chang, M. C., Kim, S, Koutrakis, P., and Ferguson, S. T., 1999, "Design and Experimental Characterization of a PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> Personal Sampler", *J Aerosol Sci.* 30:693-707.
- [14] Heikkinen, M.S.A., and Harley, N.H. 2000, "Experimental Investigation of Sintered Porous Metal Filters", *J. Aerosol Sci.* 31:721-738.
- [15] Marjamaki, M., and Keskinen, J., 2004, "Effect of impaction plate roughness and porosity on collection efficiency", *J Aerosol Sci.* 35: 301-308.
- [16] Demokritou, P., Lee, J. S., Ferguson, T. S., and Koutrakis, P., 2004, "A compact multistage(cascade) impactor for the characterization of atmospheric aerosols", *J Aerosol Sci.* 35:281-299.
- [17] 蔡春進，2004，"三階粒狀污染物個人採樣器之研發"，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告，IOSH93-A304。
- [18] Witschger, O., Fabries, J.F., Gorner, P., 1997, "Particle Entry Efficiency of an Annular Slot Aerosol Sampler", *J. Aerosol Sci.* 28: S679-S680.
- [19] Rando, R., Poovey, H., Mokadam, D., Brisolara, J., and Glindmeyer, H., 2005, "Field Performance of Industrial Wood Processing Dust", *J. Occup. Environ. Hyg.* 2:219-226
- [20] Teikari, M., Linnainmaa, M., Laitinen, J., Kalliokoski, P., Vincent, J., Titta, P., and Raunemaa, T., 2003, "Laboratory and Field Testing of Particle Size-Selective Sampling Methods for Mineral Dusts", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 64:5312:318.
- [21] BRÅTVEIT, M., HAALAND, I. M., MOEN, B. and MÅLSNES, A., 2003, "Exposure to Sulfuric Acid in Zinc Production", *Ann. occup. Hyg.*, 48(2): 159-170.
- [22] Koch, W., Dunkhorst, W., Lodding, H., Thomassen, Y., Skaugset, N. P., Nikanov, A., and Vincent, J., 2002, "Evaluation of the RespiCon as a personal inhalable sampler in industrial environments", *J. Environ. Monit.* 4, 657-662
- [23] 賴全裕、陳志傑、黃景祥、石東生、黃文玉，2000，"可呼吸性氣膠分徑採樣器效能比較研究"，*勞工安全衛生季刊*，8：1-18.
- [24] Chen, C.C., Lai, C.Y., Shih, T.S. and Hwang, J.S., 1999, "Laboratory Performance Comparison of Respirable Samplers", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 60:601-611.

- [25] Linden, G., and Kenny, L.C., 1992, "The Performance of Respirable Dust Samplers: Bias, Precision and Inaccuracy", *Ann. Occup. Hyg.*, 36:1-22.
- [26] Tsai, C.J., Chein, H.M., Chang, S.T., and Kuo, J.Y., 1998 ; "Performance Evaluation of an API Aerosizer<sup>TM</sup>", *J. Aerosol Sci.* 29:839-853.
- [27] American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), 1984, "Particles Size-Selective Sampling in the Workplace", In *Annals of the American Conference of Governmental Industrial Hygienists*, Cincinnati, 23-100.
- [28] Federal Register, 40 CFR, Part 50, Appendix J to Part 50 -- Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM<sub>10</sub> in the Atmosphere, [http://www.setonresourcecenter.com/cfr/40CFR/P50\\_022.HTM](http://www.setonresourcecenter.com/cfr/40CFR/P50_022.HTM)
- [29] Federal Register, 40 CFR, Part 50, Appendix L to Part 50 -- Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as PM<sub>2.5</sub> in the Atmosphere, [http://www.setonresourcecenter.com/cfr/40CFR/P50\\_024.HTM](http://www.setonresourcecenter.com/cfr/40CFR/P50_024.HTM)
- [30] Tatum, V., A. E. Ray, and D. Rovell-Rixx., 2003, "Performance of the RespiCon personal aerosol sampler in forest products industry workplaces". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 63:311-316.

國家圖書館出版品預行編目資料

職場微粒分徑採樣之評估研究 = Research on  
the evaluation of size-classified sampling  
of particles in the workplace / 蔡春進研究主  
持.-- 初版.-- 臺北縣汐止市：勞委會勞安所，  
民 95

面； 公分

參考書目：面

ISBN 986-00-5115-1 (平裝)

1. 勞工衛生

412.78

95008127

## 職場微粒分徑採樣器之評估研究

著(編、譯)者：蔡春進

出版機關：行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

221 台北縣汐止市橫科路 407 巷 99 號

電話：02-26607600 <http://www.iosh.gov.tw/>

出版年月：中華民國 94 年 12 月

版(刷)次：1 版 1 刷

定價：150 元

展售處：

國家書坊台視總店

<http://www.govbooks.com.tw/>

台北市松山區八德路三段 10 號 B1

電話：02-25781515#643

五南文化廣場

台中市中國區中山路 6 號

電話：04-22260330

印刷者：冠順印刷事業有限公司

台北市和平東路一段 87 號 2 樓 電話：(02)3322-2236

- 本書同時登載於本所網站之「出版中心」，網址為 <http://www.iosh.gov.tw/>。
- 本所保留所有權利。欲利用本書全部或部分內容者，須徵求行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所同意或書面授權。

【版權所有，翻印必究】

GPN：1009500857

ISBN：986-00-5115-1