

# 第一章 前言

## 1.1. 研究緣起

目前 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1997)、ISO(International organization for standardization, 1983)及 CEN(European Committee for Standardization, 1992)針對工作場所的粉塵提出了三種粉塵採樣的規範 (Hinds, 1999, pp. 245-255)，定義了三種粉塵，包含進入頭部空氣通道之後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之後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)，後兩者的收集效率曲線的截取氣動直徑分別為  $10\mu\text{m}$  及  $4\mu\text{m}$ 。圖 1.1 為 ACGIH/ISO/CEN 定義的新的採樣效率規範圖，此規範對於三種粉塵的採樣效率曲線定義如下：

- (1) 可吸入性粉塵：

$$EI(D_{pa}) = 0.5 \left[ 1 + \exp(-0.06D_{pa}) \right] \times 100\%, \quad 0 < D_{pa} \leq 100\mu\text{m} \quad (1.1)$$

- (2) 胸腔區粉塵：

$$ET(D_{pa}) = EI(D_{pa}) \left[ 1 - F \left( \frac{\ln(D_{pa}/11.64)}{\ln 1.5} \right) \right] \quad (1.2)$$

- (3) 可呼吸性粉塵：

$$ER(D_{pa}) = EI(D_{pa}) \left[ 1 - F \left( \frac{\ln(D_{pa}/4.25)}{\ln 1.5} \right) \right] \quad (1.3)$$

其中  $F(x)$  為正規分佈累積函數。

市面上依照 ACGIH/ISO/CEN 所定義的採樣效率規範而設計出許多針對可吸入性粉塵、胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵之個別的粉塵採樣器。在可吸入性粉塵方面，最常用的為 IOM( Cat. No. 225-70, Skc Inc., Eighty Four, PA, USA) 採樣器( Mark and Vincient, 1986)和 Button(Cat. No. 225-360, Skc Inc., Eighty Four, PA, USA)採樣器(Aizenberg et al, 2000)；在胸腔區粉塵方面，常用的是 GK 2.69 (Cat. No. GK 2.69, BGI Inc., MA, USA) 旋風器(Maynard et al,1999)；在可呼吸性粉塵方面，常用的是 GS-3 可呼吸性粉塵旋風器(Cat. No. 225-62-37, Skc Inc., Eighty Four, PA, USA) 以及 BGI-4 family (Cat. No. BGI4L, BGI Inc., MA, USA)可呼吸性粉塵旋風器(Bartley et al,1994)，以上所提到的採樣器都是針對某一種粉塵作個別採樣。

目前市面上可針對三種粉塵同時做採樣的採樣器只有 TSI 的 Respicon (Model 8522, TSI Inc., St. Paul, MN) 採樣器一種。以上所提到的採樣器將在第二章的文獻回顧做更詳盡的介紹。



## 1.2 研究目的

過去的學者利用可同時採集三種粉塵的 Respicon 採樣器在實驗室以及現場進行了許多測試研究。Respicon 採樣器具有一個圓環型入口以及兩個虛擬的慣性衝擊器，採樣器內部的三個流量需要個別校正，採樣器重量不利於長時間配戴，且價錢高不便於國內大量使用。本研究為瞭解決 Respicon 採樣器的這些問題而設計出一個新的個人粉塵採樣器，具有一個圓環型入口、一個可吸入性粉塵衝擊器、一個胸腔區粉塵衝擊器以及終端濾紙，採樣器內部只有一個流量，且採用聚氨酯泡綿 (Polyurethane Foam)當作慣性衝擊器的收集板，其可以符合 ACGIH/ISO/CEN 較為平緩的收集效率曲線，並解決固體微粒在慣性衝擊器中的反彈和再揚起問題。我們進一步進行此個人粉塵採樣器與 Respicon 採樣器在實驗室中對於靜風下(<0.1 m/sec)的固體微粒以及液體微粒的收集效率測試，並在工作場所中利用 Respicon 採樣器當做採樣標準與新型個人粉塵採樣器所採集的一種粉塵濃度做比較。

## 第二章 工作場所粉塵採樣器的文獻回顧

在本章節中將會對於新型個人粉塵採樣器為何要使用泡綿當作慣性衝擊器的收集板作一系列的文獻回顧，並對於上一章所提到的可吸入性粉塵、胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵之個別的粉塵採樣器以及可同時採集三種粉塵的 Respicon 採樣器做更詳盡的介紹。

### 2.1 多孔介質衝擊板

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 ACGIH/ISO/CEN 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)做成的採樣器做一個文獻回顧。

Kavouras and Koutrakis (2001) 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。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 1.2 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. (1999) 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 1.3 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。

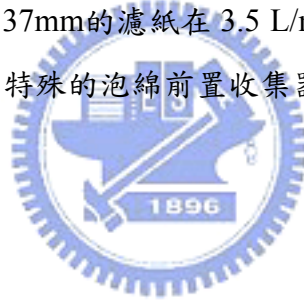
Heikkinen et al. (2000) 探討不同厚度 (thickness) 及不同孔隙度的多孔金屬片對於固體微粒的吸附貫穿特性。結果顯示，在長時間的採樣環境下，擁有孔隙結構的多孔金屬片會因為採集到大量微粒，造成微粒的累積堵塞孔洞而降低流體的穿透性，發生採樣收集效率降低的現象。採樣器上下游端壓力降的變化可以當作多孔金屬片是否要繼續使用或是更新的一個依據。另外，Marjamaki and Keskinen (2004) 探討不同孔隙度及表面粗糙度的多孔金屬片作為慣性衝擊器的收集介質時的微粒收集曲線特徵。結果顯示，慣性衝擊器的收集效率決定於多孔金屬片的孔隙特性及表面粗糙度，形成多孔金屬片特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數。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。

Demokritou et al. (2004) 曾製作一 8 階慣性衝擊器 (cutsizes: 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)。如圖 1.4(a)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 mg/cm<sup>2</sup>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 1.4(b)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。

## 2.2 可吸入性粉塵採樣器

Vincent et al.(1986) 提出IOM採樣器的入口設計是在風洞經過試驗，模擬人類口鼻吸入空氣中粒狀物的行為模式，IOM採樣器的密封蓋設計可以減少運送之影響，並於採樣前後將濾紙與濾紙匣一起秤重，濾紙上和濾紙匣內壁所有的粉塵皆包含於數據內，分析粉塵時不致漏失，且可以維持採樣的完整性。Aizenberget al.(2000)指出Button採樣器在採樣時不受方向、風速影響，其為不銹鋼製，可以減少靜電干擾，並減少採集過大( $>100\mu\text{m}$ )之微粒，且使用防護外殼可在研磨環境下進行重金屬微粒採樣。Kenny et al. (1997)指出CIS 可吸入性粉塵採樣器(Cat. No. CIS, BGI Inc., MA, USA)利用 37mm的濾紙在 3.5 L/min的採樣流量，風速為 0.5 and 1 m/sec<sup>2</sup> 下進行採樣，可利用特殊的泡綿前置收集器來進行胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵的採樣。



## 2.3 胸腔區粉塵採樣器

在胸腔區粉塵採樣器方面，有 GK2.69 旋風器。Maynard et al (1999)提出 GK2.69 旋風器相較於其他現行的胸腔區採樣器有較接近 ACGIH/ISO/CEN 定義的採樣效率以及低的採樣誤差，且被廣泛運用於油滴的採樣工作。IOM 胸腔區粉塵 ( Cat. No. 225-70, Skc Inc., Eighty Four, PA, USA) 採樣器，其利用特殊的泡綿前置收集器來收集胸腔區粉塵。

## 2.4 可呼吸性粉塵採樣器

Bartley et al. (1994)提出BGI 可呼吸性粉塵旋風器採用不導電的塑膠材質製成，利用 37mm 濾紙來收集可呼吸性粉塵在 2.2 L/min的流量下進行採樣會較接近

可呼吸粉塵採樣規範曲線，且有對電荷的影響較不敏感之優點。Bartley et al. (1994) 提出GK2.69 旋風器所使用的 4.2 L/min採樣流量，其相較於現行可呼吸性粉塵採樣器所用的 1.7 或是 2.2 L/min之採樣結果較為準確。Gautam et al. (1997)提出GS-3 可呼吸性粉塵旋風器為導電性塑膠製，並採用正切角進氣口設計，減少因衝擊損失之微粒，其有三個進氣口，可以避免受風速與採樣風向敏感度之影響，並克服Dorr-Oliver旋風分離器之採樣問題。Kar et al. (1995)提出GS-1 旋風分離器有相似於Dorr-Oliver 旋風器的採樣效率，其有單一進口並採用導電性塑膠製造，相較於Dorr-Oliver 旋風器可以減少靜電干擾，其適用柴油粒狀物採樣。

## 2.5 TSI 粉塵採樣器

TSI 的 Respicon 採樣器 (Model 8522, TSI Inc., St. Paul, MN) (Li et al., 2000) 是目前市面僅有可以同時作三種粉塵的採樣器，它是利用一個圓環型的進口(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。根據 Li et al. (2000)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。TSI 在 2001 年的 Respicon 之操作手冊中建議使用者需做可吸入性粉塵濃度之校正，圖 2.1、2.2 分別為 TSI 的 Respicon 採樣器的細部構造以及在 0.55 及 1.1 m/s 風速下針對可吸入性粉塵、腔區粉塵、呼吸性粉塵的採樣效率。

本研究所使用的 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：

$$C_R = \frac{M_1}{Q_1 t} \quad (2.1)$$

$$C_T = \frac{M_1 + M_2}{(Q_1 + Q_2) t} \quad (2.2)$$

$$C_I' = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{(Q_1 + Q_2 + Q_3) t} \quad (2.3)$$

其中

$C_R$  : 可呼吸性粉塵濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$M_1$  : 第一階濾紙上的微粒質量( $\mu\text{g}$ )

$Q_1$  : 第一階的採樣流量(2.66 L/min)

$C_T$  : 胸腔區粉塵濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$M_2$  : 第二階濾紙上的微粒質量( $\mu\text{g}$ )

$Q_2$  : 第二階的採樣流量(0.33 L/min)

$C'_I$  : 可吸入性粉塵濃度(未校正前) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$M_3$  : 第三階濾紙上的微粒質量( $\mu\text{g}$ )

$Q_3$  : 第三階的採樣流量(0.11 L/min)

$t$  : 採樣時間(min)

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:



$$C_{exth} = (C'_I - C_T) \times 1.5 \quad (2.4)$$

$$C_I(\text{校正後}) = C'_I + C_{exth} \quad (2.5)$$

其中外胸腔區粉塵之濃度  $C_{exth}$  校正成原來的 1.5 倍， $C_I$  (校正後) 為  $C'_I$  與  $C_{exth}$  之和。

## 2.6 小結

目前市面上可以同時針對三種粉塵進行分徑採樣的採樣器只有 TSI 的 Respicon 採樣器。根據 Li et al. (2000) 的研究報告，Respicon 對可吸入性粉塵的準確度高於其他的採樣器，且對於風速為 0.55 及 1.1 m/s 時的風向不敏感，因而 TSI 在 2001 年的 Respicon 之操作手冊中建議使用者不需做可吸入性粉塵濃度之校正。可是根據 Rando et al. (2005) 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 之校正因數，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 % 之可吸入性粉塵濃度；且 Respicon 採樣器採集之胸腔區粉塵濃度需要乘上 0.98 倍的修正因數再減去 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。

Teikari et al. (2003) 則利用 IOM 採樣器當作可吸入性粉塵濃度之標準，並利用入口裝有多孔泡綿的 IOM 採樣器當作可呼吸性及胸腔區粉塵濃度標準，並與 Respicon 等採樣器做粉塵濃度採樣比對。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濃度均較 IOM 低了將近 50 % 之濃度，胸腔區之粉塵濃度較 IOM 採樣器所收集之粉塵濃度低了將近 40% 的濃度，且可呼吸性粉塵濃度高於 IOM 採樣器將近 25% 之濃度。Bratveit et al. (2003) 則曾使用 Respicon 採樣器於電池工廠進行現場粉塵採樣，結果發現 Respicon 採樣器所採集的可吸入性粉塵濃度比標準 IOM 採樣器所採集之粉塵濃度為低，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。Koch et al. (2002) 也發現 Respicon 採樣器的可吸入性粉塵濃度遠低於 IOM 採樣器，且 Respicon 採樣器的粉塵濃度需乘上 1.83 倍才可以與 IOM 接近。他們猜測可能是因為 IOM 採樣器有一個大的直接向外開口，容易造成可吸入性粉塵濃度偏高之故。

Jones et al. (2005) 利用分析胸腔區粉塵採樣器所得到的粉塵分佈，來看四種胸腔區粉塵採樣器 (GK2.69 旋風器、Modified SIMPEDS 旋風器、CATHIA 採樣器 (inertial separation)、IOM 胸腔區粉塵採樣器 (多孔泡綿前置裝置) 的表現，結果發現 GK2.69 旋風器、Modified SIMPEDS 旋風器和 CATHIA 採樣器都和標準的胸腔區粉塵分佈極為接近，但對於標準的胸腔區粉塵 ( $d_{ac} < 7\mu\text{m}$ ) 會有採集粉塵過量的情形，IOM 採樣器相對於標準的胸腔區粉塵有低估粉塵濃度的情形。Kenny et al. (2001) 利用可以同時採集可呼吸性粉塵以及可吸入性粉塵的 IOM 採樣器，其是利用 (Porous



polyurethane)泡綿當作IOM採樣器的前置收集器，可吸入性粉塵的濃度是濾紙和泡綿經由稱重計算所得，而可呼吸性粉塵是只計算濾紙部份，並發現IOM採樣器所得到的可呼吸性粉塵和標準採樣方法所採集的可呼吸性粉塵濃度幾乎沒有差異且極為吻合。

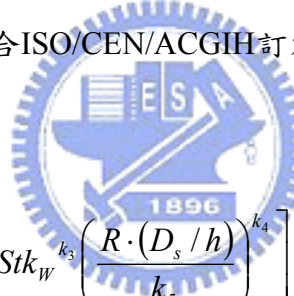


## 第三章 研究方法

### 3.1. 新型粉塵採樣器的設計

圖 3.1(a)~(c)為本研究所設計的新型粉塵採樣器，它由圓環型的可吸入性入口，二個慣性衝擊器及終端濾紙所組成，利用聚氨酯泡綿(Polyurethane Foam)當作慣性衝擊器的收集板。圓環型可吸入性入口為 a, b，可截取可吸入性以上的粉塵，並由泡綿 1 (PUF 1)所收集；第一階為胸腔區粉塵慣性衝擊器(c, d)，可截取胸腔區以上的粉塵，並由泡綿 2 (PUF 2)所收集；第二階為可呼吸性粉塵慣性衝擊器(d, e)所構成，可截取可呼吸性以上之粉塵，並由泡綿 3 (PUF 3)收集，終端濾紙 f 收集可呼吸性粉塵，本採樣器之抽氣流量為 3.2 L/min (GilAir-5, Gilian Inc.)。

可吸入性入口根據Witschger et al. (1997)的經驗公式而設計，其示意圖如圖 3.2，吸入效率 (EI) 可以符合ISO/CEN/ACGIH訂定的吸入性粉塵貫穿曲線。吸入效率 (EI) 可計算如下：


$$EI = \frac{1}{1 + 2Stk_w^{k_1} \cdot R^{k_2}} \left[ 1 + Stk_w^{k_3} \left( \frac{R \cdot (D_s / h)}{k_5} \right)^{k_4} \right] \quad (3.1)$$

其中

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 U_w C}{9\mu D_s}, \quad R = \frac{U_w}{U_s}$$

上式中， $\rho_p$  為微粒密度， $d_p$  為微粒直徑， $U_w$  為環境風速， $U_s$  為入口吸入速度， $C$  為滑動校正因數， $\mu$  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。依據上述經驗公式，我們所設計的新型粉塵採樣器的圓環型入口尺寸  $D_s = 5$  cm， $h = 3$  mm，入口吸入速度  $U_s = 0.113$  m/s，環境風速  $U_w = 0.55$  m/s。新型採樣器的圓環型入口的吸入效率曲線與ACGIH/ISO/CEN之採樣效率規範接近，曲線誤差為 $\pm 26\%$ 以內，如圖3.3所示。

在圓環型入口之下有胸腔區及可呼吸性粉塵慣性衝擊器，其尺寸依照 Tsai (2005) 的報告來設計，在採樣流量為 3.2 L/min 下，胸腔區慣性衝擊器噴嘴有六個，噴嘴直徑 = 3.5 mm。在相同採樣流量下，可呼吸性慣性衝擊器的圓形噴嘴有六個，噴嘴直徑 = 2.0 mm。本研究使用泡綿收集板作成的慣性衝擊器可以使微粒收集效率曲線變為較平滑，以符合胸腔區或可呼吸性粉塵採樣規範。泡綿收集板的厚度為 6 mm，孔隙度 100 ppi (Foamex Inc., Pennsylvania, USA)，可吸入性泡綿 (PUF 1) 為圓形 OD = 47 mm，中間鑽有六個直徑各為 3.5 mm 之孔洞；胸腔區泡綿 (PUF 2) 為圓環形 OD = 47 mm，ID = 15 mm；可呼吸性泡綿 (PUF 3) 為圓形 OD = 22 mm，如圖 3.4(a)~(e)。

兩個衝擊器之噴嘴至收集板的距離 (jet-to-plate distance) 與噴嘴直徑比均為 1:1。新型採樣器的最後一階為一個終端濾紙 (直徑為 47 mm)，它所採集的粉塵即為可呼吸性粉塵；可呼吸性粉塵再加上泡綿 3 收集板所採集的粉塵則為胸腔區粉塵；胸腔區粉塵加上泡綿 1、2 收集板所採集的粉塵則為可吸入性粉塵。

### 3.2 新型粉塵採樣器的實驗室校正—單徑微粒測試

本研究在實驗室中進行新型採樣器的固體與液體微粒收集效率測試。實驗在測試腔體內於靜風條件下進行，圖 3.5 為腔體示意圖，腔體高度為 80 cm；腔體內徑為 50 cm；腔體內在測試區內的平均風速  $U_w$  為 0.005 m/s，流量  $Q$  為 61.5 L/min。

為了瞭解腔體中的微粒濃度分佈，首先針對腔體中的微粒均勻度測試。實驗時利用五個垂直採樣管均勻放置於測試區 19.5 cm 範圍內，並以相同的 30 分 (液體微粒) 或 7 小時 (固體微粒) 採樣時間和抽氣量 2 L/min 進行測試，如圖 3.6(a)、(b) 所示。表 3.1 為腔體中的微粒濃度分佈結果，我們發現在相同的抽氣流量 2 L/min 下，五個垂直採樣管採集到的微粒濃度十分接近，相對偏差值在  $\pm 10\%$  以內，表示微粒在腔體中的分佈十分均勻，所以接下來進行個人採樣器的微粒收集效率測試。

測試收集效率時，2~13  $\mu\text{m}$ 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，然後再經乾燥及靜電中和器 (Kr85 Neutralizer, TSI Model 3054, TSI INC. St. Paul, Minn.) 去除微粒靜電，最後進入測試腔體進行實驗。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，產生時是以含有 0.4 g/L 螢光劑的油酸溶液來產生，配製溶液時在 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。接下來將上述溶液加入適量的油酸，以配成可以產生特定粒徑的溶液濃度。VOMAG 所產生的微粒的單徑度則透過 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI Model 3321, TSI Inc., St Paul, MN, USA) 確認。

依照 Tsai et al. (1998) 的文獻，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，因此我們乃根據圖 3.7 將實驗數據校正為真正微粒氣動直徑，而得到微粒真正的收集效率值。

使用單徑固體螢光 PSL 微粒 (Size from Duke Scientific, Palo Alto, CA) 於腔體中作測試時，則是利用 TSI 的粉塵分散器 (Small Scale Powder Dispenser, Model 3433, TSI Inc., St Paul, MN, USA) 產生粉塵，接者再將微粒導入腔體中，最後進行新型採樣器的微粒收集效率測試。

採樣器的微粒收集效率則是利用新型採樣器和一個垂直採樣管同時放置於腔體中的測試區進行粉塵採樣，如圖 3.8(a)、(b) 所示。實驗中所使用的單徑液體微粒為  $5.05\mu\text{m} \sim 14.5\mu\text{m}$ ；單徑固體微粒為  $6.15\mu\text{m} \sim 27.7\mu\text{m}$ ，液體微粒採樣時間為 30 分；固體微粒採樣時間為 7 小時，新型採樣器和垂直採樣管的採樣流量為 3.2 L/min。採完樣後，採樣器內部各部份所收集或附著的液體或固體微粒則分別利用

NaOH 溶液以及二甲苯溶液來進行萃取。除了 3.2 L/min 的採樣流量外，本研究也測試了 1.6 L/min 流量下的採樣器的微粒收集效率以及損失率。

垂直採樣管的濾紙 (Glass Fiber , 47mm , 2 $\mu$ m, Pall Corp.)、粉塵採樣器的各階泡綿以及終端濾紙則分別以夾子夾入萃取溶液(0.001N NaOH-液體微粒；二甲苯 (Glenny et al,1993) -固體微粒)中進行萃取，垂直採樣管的內部、新型粉塵採樣器的圓環型入口以及衝擊器的噴嘴部分，則利用棉花棒沾取萃取液後進行擦拭，再放入萃取液中 (萃取液的體積一般為 40 ml，但視採樣時間及採樣時的濃度作調整)，並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。樣本溶液以螢光儀(Fluorometer, Turner 10-AU, Cincinnati U.S.A.)偵測其濃度，再轉換成微粒的質量濃度後，即可計算粉塵採樣器的微粒收集效率及內部損失率。

### 3.2.1 採樣器的收集效率及內部微粒損失率的計算

$$E_{inh}(\%) = E'_{inh}(\%) \times E_{asp}(\%) \quad (3.2)$$

$$E_{tho}(\%) = E'_{tho}(\%) \times E_{asp}(\%) \quad (3.3)$$

$$E_{resp}(\%) = E'_{resp}(\%) \times E_{asp}(\%) \quad (3.4)$$

其中

$E_{inh}$  : 採樣器包含圓環形入口吸入效率所得的可吸入性粉塵收集效率

$E'_{inh}$  : 採樣器不包含圓環形入口吸入效率所得的可吸入性粉塵收集效率

$E_{tho}$  : 採樣器包含圓環形入口吸入效率所得的胸腔區粉塵收集效率

$E'_{tho}$  : 採樣器不包含圓環形入口吸入效率所得的胸腔區粉塵收集效率

$E_{resp}$  : 採樣器包含圓環形入口吸入效率所得的可呼吸性粉塵收集效率

$E'_{resp}$  : 粉塵採樣器包含圓環形入口吸入效率所得的可呼吸性粉塵收集效率

$E_{asp}$  : 採樣器圓環形入口吸入效率

$$E'_{inh}(\%) = \left( \frac{M_2 + M_5 + M_8 + M_9}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.5)$$

$$E'_{tho}(\%) = \left( \frac{M_8 + M_9}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.6)$$

$$E'_{resp}(\%) = \left( \frac{M_9}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.7)$$

$$E_{asp}(\%) = \left( \frac{\sum_{i=1}^9 M_i}{M_{10}} \right) * 100\% \quad (3.8)$$

圓環形入口微粒沉降效率(%)

$$D_{inlet}(\%) = \left( \frac{M_1}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.9)$$

胸腔區慣性衝擊器噴嘴板的微粒損失(%)

$$\text{損失}(\%) = \left( \frac{M_3}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.10)$$

可呼吸性慣性衝擊器噴嘴板背面的微粒損失(%)

$$\text{損失}(\%) = \left( \frac{M_4}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.11)$$

可呼吸性慣性衝擊器噴嘴板的微粒損失(%)

$$\text{損失}(\%) = \left( \frac{M_6}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.12)$$



PUF 3 支撐板上的微粒損失 (%)

$$\text{損失(\%)} = \left( \frac{M_7}{\sum_{i=1}^9 M_i} \right) * 100\% \quad (3.13)$$

其中

$D_{inlet}$ : 圓環形入口微粒沉降效率

$M_1$  : 圓環型入口所收集的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

$M_2$  : PUF 1 所收集的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

$M_3$  : 胸腔區慣性衝擊器噴嘴板的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

$M_4$  : 可呼吸性慣性衝擊器噴嘴板背面的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

$M_5$  : PUF 2 所收集的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

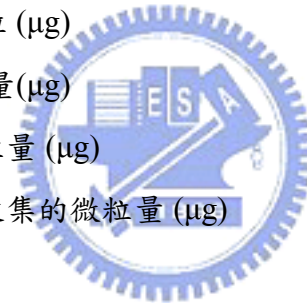
$M_6$  : 可呼吸性慣性衝擊器噴嘴板的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

$M_7$  : PUF 3 支撐板上的微粒 ( $\mu\text{g}$ )

$M_8$  : PUF 3 所收集的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

$M_9$  : 終端濾紙所收集的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )

$M_{10}$  : 垂直採樣管的濾紙所收集的微粒量 ( $\mu\text{g}$ )



### 3.2.2 新型粉塵採樣器的實驗室校正—多徑微粒測試

在實驗室中進行單徑微粒對於粉塵採樣器的收集效率測試時，我們發現氣動直徑  $< 5\mu\text{m}$  的 PSL 固體螢光微粒濃度極低，即使經過長時間(3 小時)的採樣，也無法得到採樣器的收集效率值，所以改用多徑固體的氯化鉀微粒作測試，並以 APS 做採樣器的上下游濃度分布監測，據以算出微粒收集效率。

圖 3.9 為產生多徑固體微粒的實驗系統，進行採樣實驗時，氣動直徑  $0.5\sim 5\mu\text{m}$  的固體微粒以超音波霧化器(Ultrasonic Generator, Model 06-05108, Sono-Tek Inc., NY, USA)產生，首先經過超音波霧化器噴嘴(Ultrasonic Nozzle, Model 06-04005, Sono-Tek Inc., NY, USA)將氯化鉀溶液霧化產生多徑微粒，再以 APS 量測採樣器下游的微粒濃度  $N_{2i}$  ( $\#/ \text{cm}^3$ )，垂直採樣管出口的微粒濃度當成上游  $N_1$  ( $\#/ \text{cm}^3$ )，實驗前

後利用垂直採樣管確認腔體中的微粒濃度分布， $N_1$ 的微粒濃度誤差在 10 %以內所得到的 $N_{2i}$ 值方可信賴，微粒的收集效率 $E_i$ 計算方式如下：

$$E_i (\%) = \frac{N_{2i}}{N_1} * 100\% \quad (3.14)$$

其中

$E_i$  : 微粒的收集效率

$N_1$  : 上游端微粒濃度( $\#/cm^3$ )

$N_{2i}$  : 下游的微粒濃度( $\#/cm^3$ )

$i=1$  ,  $E_i = E_{inh}$  ,  $N_{2i} = N_{2 inh}$

$i=2$  ,  $E_i = E_{tho}$  ,  $N_{2i} = N_{2 tho}$

$i=3$  ,  $E_i = E_{resp}$  ,  $N_{2i} = N_{2 resp}$

$N_{2i}$ 依圖 3.10(a)~(c) 之採樣器器組合而定，圖 3.10 (a)為圓環型入口加上下方漏斗可以測出微粒濃度 $N_{2 inh}$ ，即可計算出 $E_{inh}$ 。圖 3.10 (b)、(c)分別為 $N_{2 tho}$ 和 $N_{2 resp}$ 的量測組合圖。



### 3.3 新型粉塵採樣器現場測試

本研究使用如圖 3.11 所示之旋轉裝置進行採樣器之現場比對測試，轉盤上面配有假人半身模型，其胸口佩戴不同的採樣器來進行工作場所的定點採樣。採樣時，將新型採樣器、Marple 個人採樣器、IOSH 旋風器和 TSI Respicon 採樣器各兩個分別固定於一個旋轉臺上的假人胸前，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。

現場的比對測試，是在 A、B 和 C 三廠的工作場所為之，A 廠為鉛粉廠球磨機，B 廠的採樣點為鉛蓄電池切板區，C 廠為鑄鐵廠澆鑄區。我們所選定的 A 廠、B 廠和 C 廠測試地點平均風速分別為 0.03 m/s、0.085 m/s 以及 0.035 m/s，每種採



樣器在上述測試地點各分別採集了 10、6、8 組有效樣本，採樣時間為四~六小時。所用的採樣器及濾紙規範如下。

- (1) Marple 個人採樣器 (Marple Personal Impactor, Model 298, Skc Inc., Eighty Four, PA, USA), 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 2.0 L/min。作秤重時一至八階使用聚氯乙稀(PVC)濾紙( slotted, pore size 5 $\mu\text{m}$ , Pall Corp.), 終端濾紙使用鐵氟龍濾紙(Zefluor, 37mm, 2 $\mu\text{m}$ , 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 $\mu\text{m}$ , 總流量為 3.11 L/min。秤重時一至三階使用鐵氟龍濾紙(Zefluor, 37mm, 2 $\mu\text{m}$ , Pall Corp.)。
- (3) 本研究的粉塵採樣器, 流量為 3.2 L/min, 有一個圓環型入口、一個胸腔區粉塵慣性衝擊器、一個可呼吸性粉塵慣性衝擊器和終端濾紙, 截取氣動直徑分別為 50、10 和 4  $\mu\text{m}$ 。作秤重時使用鐵氟龍濾紙(Zefluor, 47mm, 2 $\mu\text{m}$ , Pall Corp.)。
- (4) 新型 IOSH 旋風器採樣流量在 1.7 L/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  $\mu\text{m}$ , Pall Corp.)。
- (5) 微量天平 (Model M3P-000V001, Sartorius Corp., Bradford, MA, Germany), 秤重結果可精準至 1  $\mu\text{g}$ 。

### 3.3.1 採樣場所簡介

A 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 10 組有效的樣本, 圖 3.12(a)、(b) 分別為 A 工廠的產品製程與現場圖。

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 6 組有效樣本，採樣時間約為 4~6 小時，圖 3.13(a)、(b)分別為 B 工廠的產品製程與現場圖。

C 工廠有模具設計、製造，熔鐵設備，砂心製造，砂模製造，澆注，表面處理等程式。我們選擇在澆注區附近進行定點採樣，共採得 8 組有效樣本，採樣時間為 4.5 小時，圖 3.14(a)、(b)分別為 C 工廠的產品製程與現場圖。

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。

### 3.3.2 濾紙以及泡綿秤重的 QA/QC



新型粉塵採樣器所使用的泡綿在秤重前需要靜置於除濕箱調理 24 小時 ( $RH=40\pm 5\%$ ,  $T=23\pm 1^\circ\text{C}$ )，泡綿秤重時盡量要靠近秤盤的中心部份，避免秤盤的上蓋磨擦到泡綿。由於夏天室內的室內溫度在  $27\sim 30^\circ\text{C}$ ，溼度在 80%以上，會對容易吸濕的泡綿秤重造成影響，所以我們利用在密閉的天平室內同時使用除濕機和冷氣機，來降低溼度和溫度以利進行泡綿秤重實驗。

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  $15\sim 30^\circ\text{C}$  之間，溫度變化為  $\pm 3^\circ\text{C}$ ，平均溼度為 20~45%，濕度變化為  $\pm 5\%$  (Federal Register, 40 CFR, Part 50, Appendix J)。 $PM_{2.5}$  濾紙於秤重時要控制的環境：平均溫度在  $20\sim 23^\circ\text{C}$ ，24 小時內溫度控制  $\pm 2^\circ\text{C}$ ，環境平均溼度 30~40%，24 小時內濕度控制  $\pm 5\%$  (Federal Register, 40 CFR, Part 50, Appendix L)，須在此範圍下選定一個溫溼度條件來進行秤重。剛開始我們利用秤重環境條件在  $RH=45\pm 3^\circ\text{C}$  和  $T=23\pm 0.5$

°C來進行泡綿秤重，秤重結果如表 3.2 所示，結果發現泡綿連續秤重五次的秤值標準偏差為 80~200  $\mu\text{g}$ ，且同一泡綿在相同溫溼度下於不同天的秤值標準偏差為 126~180  $\mu\text{g}$ ，表示泡綿的秤重溫溼度在RH=45 $\pm$ 3 °C和T=23 $\pm$ 0.5 °C下需要再度作調整。因此本研究後來將泡綿秤重的環境條件控制在較低的RH=35 $\pm$ 3%，溫度則為T=22 $\pm$ 0.4°C，利用此秤重條件來得到表二的泡綿秤重結果，我們發現在此一環境條件下，同一泡綿連續五次秤重之標準偏差值皆小於 5  $\mu\text{g}$ ，在不同天秤值的標準偏差值如表 3.3 所示都在 2 $\mu\text{g}$ 以下。因此在秤重在RH=35 $\pm$ 3%和T=22 $\pm$ 0.4°C條件下，泡綿的秤重極為準確，在後續的泡綿秤重工作都是控制在此一條件下進行，並將濾紙及泡綿各取一張永久至於乾燥箱中，作為標準檢查濾紙和泡綿。

另外我們也嘗試利用添加氟素撥水劑(Fuso Water repellent)在泡綿中，氟素撥水劑可以用來減少泡綿對於空氣中水氣的吸收，目的是為了利於泡綿秤重的進行，但是發現添加氟素撥水劑對於泡綿的秤重並沒有明顯的改善。

### 3.3.3 粉塵濃度計算與統計分析



在採樣數據處理方面，先針對採樣器各階的濾紙進行秤重，再根據採樣體積求出其原始濃度值。對 Marple 個人採樣器而言，各階所收集到的粉塵濃度需再除以每階的微粒損失及入口採樣效率，以得到各階實際粉塵濃度值。根據 Rubow et al. (1987)的研究報告，Marple 個人採樣器各階的總採樣效率(含入口採樣效率及損失率)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 %。在求出實際粉塵濃度及粒徑分佈後，再乘以 ISO/CEN/ACGIH 所規定之三種粉塵濃度各粒徑下的微粒收集效率，以得到三種粉塵的濃度。本次現場比對研究以 Respicon 採樣器算出的三種粉塵濃度為參考濃度。

本研究所使用的 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公式(2.1)~(2.3)所示：

本研究的粉塵採樣器對可呼吸性、胸腔區和可吸入性三種粉塵濃度的計算公式如下所示：

$$C_R = \frac{M_4}{Qt} \quad (3.15)$$

$$C_T = \frac{M_3 + M_4}{Qt} \quad (3.16)$$

$$C_I = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4}{Qt} \quad (3.17)$$

其中

$M_1$  : 第一階進口泡綿上的微粒質量( $\mu\text{g}$ )

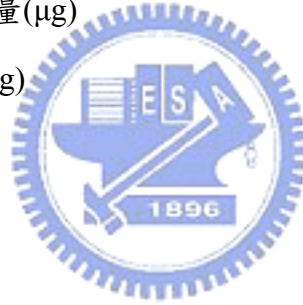
$M_2$  : 第二階泡綿上的微粒質量( $\mu\text{g}$ )

$M_3$  : 第三階泡綿上的微粒質量( $\mu\text{g}$ )

$M_4$  : 終端濾紙的微粒質量( $\mu\text{g}$ )

$Q$  : 採樣流量(3.2 L/min)

$t$  : 採樣時間(hr)



我們所關心的現場採樣濃度樣本是屬於由兩個母體中成對的抽樣，在此種抽樣情形下的樣本彼此間是相關的，且稱為兩組成對的樣本，而我們關心這兩個母體的表现(以母體平均數當指標)有無差異(雙尾檢定)。舉例來說，若是要比較A,B兩種施肥方式對蕃茄產量的影響，我們關心的就是兩種方式所生產的蕃茄產量 $U_A$ 與 $U_B$ 是否相同，寫成數學式子就是檢定 $H_0: U_A = U_B$ 對 $H_1: U_A \neq U_B$ 。驗證上述關係時，首先的工作是收集資料，統計分析的方法與資料如何取得有密切的關係，我們的現場採樣濃度樣本屬於相關樣本取樣，其在兩組樣本的時候又稱為成對取樣。我們的採樣結果就是利用成對取樣來做分析，即是成對平均值檢定的方法，基本上是將兩組成對資料變成一組資料，再利用t檢定，令

$$d_i = X_{1i} - X_{2i}, i = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (3.18)$$

$d_i$ 這組資料的平均數 $\bar{d}_i$ ，為兩組資料平均數的差，即

$$\bar{d}_i = \left( \frac{\sum d_i}{n} \right) = \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \quad (3.19)$$

$$d_i \text{這組資料的標準差為 } S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{(n-1)}} \quad (3.20)$$

對兩組相關樣本( $X_i, Y_i$ )平均數是否為相等問題的雙尾檢定

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 \equiv \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases} \quad (3.21)$$

利用樣本t檢定，棄卻域為 $|t| > t_{n-1, \alpha/2}$

$$t = \frac{\bar{d}}{\left( \frac{S_d}{\sqrt{n}} \right)} \quad (3.22)$$



我們在同一採樣點利用兩個不同的採樣器進行粉塵採樣，其得到的粉塵濃度值為相關的兩組樣本，若是使用不正確的檢定方法，可能導致不同結論。首先我們比較兩個相同的採樣器在同一時間和同一採樣地點下的粉塵樣本，利用獨立樣本間的成對 t test 分析得到在顯著差異 $\alpha = 0.05$ 下，可以判別在相同的採樣器彼此間粉塵濃度是否有明顯差異，得到現場採樣方法的準確性。接下來針對 Respicon 採樣器和新型粉塵採樣器的三種粉塵濃度個別做比較，可以判別在不同地點之新型粉塵採樣器和 Respicon 採樣器所採集的一種粉塵彼此間是否有明顯差異。

## 第四章 結果與討論

### 4.1 粉塵採樣器於實驗室的校正結果

本研究利用 Tsai (2005)的報告來設計一個新型的粉塵採樣器來進行現場粉塵與實驗室粉塵測試採樣，而採樣器利用泡綿作為慣性衝擊器的收集板來收集粉塵，並於實驗室進行採樣器收集效率、圓環型入口吸入效率以及入口微粒收集效率測試。

圖 4.1 為粉塵採樣器之可吸入性粉塵收集效率在不同流量下的實驗結果，我們發現 3.2 L/min 之抽氣流量相較於 1.6 L/min 會有較接近標準可吸入性粉塵效率曲線，氣動直徑  $>20 \mu\text{m}$  以上的微粒會有低估的情形，圖中的固體和液體微粒的收集效率並沒有差異，顯示利用泡綿當作慣性衝擊器的收集板可以解決固體微粒在收集板上的彈跳問題。

圖 4.2 為粉塵採樣器之胸腔區微粒收集效率在不同流量下的實驗結果，我們發現 3.2 L/min 以及 1.6 L/min 的抽氣量所得到的胸腔區微粒收集效率對於標準胸腔區粉塵效率曲線而言均有很接近的特性，並由圖中可知微粒收集率可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範，截取氣動直徑值為  $9.6\mu\text{m}$ 。固體和液體微粒的收集效率在圖中並沒有差異，泡綿當作收集板可以解決固體微粒在收集板上的彈跳問題。

圖 4.3 為粉塵採樣器之可呼吸性微粒收集效率在不同流量下的實驗結果，我們發現 3.2 L/min 以及 1.6 L/min 的抽氣量所得到的可呼吸性微粒收集效率對於標準可呼吸性粉塵效率曲線而言均十分接近，3.2 L/min 之收集效率曲線更符合採樣標準。固體和液體微粒的收集效率在圖中並沒有差異，顯示泡綿可以解決固體微粒在收集板上的反彈，並由圖中可知微粒收集效率可以符合 ISO/CEN/ACGIH 的規範，截取氣動直徑值為  $4.0 \mu\text{m}$ 。

圖 4.4 為粉塵採樣器之圓環形入口在不同流量下吸入效率的曲線實驗結果，我們發現 3.2 L/min 較 1.6 L/min 的抽氣量所得到的吸入效率為高，且皆有氣動直徑越大吸入效率越低的趨勢，由圖中可知氣動直徑 $<14.5\mu\text{m}$  微粒的圓環形入口的吸入效率會接近 ACGIH/ISO/CEN 所提出的可吸入性粉塵收集效率曲線。

圖 4.5 為粉塵採樣器之圓環形入口在不同流量下的微粒沉降效率曲線實驗結果，我們發現 3.2 L/min 相較 1.6 L/min 的抽氣量所得到的沉降效率為低，且皆有氣動直徑越大沉降效率越高的趨勢。我們利用下述所描述的理論公式計算發現 3.2 L/min 的微粒入口沉降效率極為接近理論公式值，固體和液體微粒的沉降效率在圖中並無差異。藉由入口的沉降效率得到可吸入性粉塵的收集效率值，我們更進一步比對可吸入性粉塵收集效率在 3.2 L/min 流量下的理論值與實驗值，發現可吸入性粉塵的收集效率的理論值與實驗值極為接近，但是不論實驗值或是理論值都有氣動直徑 $>20\mu\text{m}$  微粒的收集效率過低的情形，氣動直徑 $<8\mu\text{m}$  微粒的收集效率略為偏高的情形，結果如圖 4.6 所示。

圓環型入口的微粒沉降效率 $D'_{inlet}$ 的理論公式，可以計算如下：

$$D'_{inlet} = V_{ts} * (\pi/Q) * (R_1^2 - R_2^2) * 100\% \quad , \quad 1 - D'_{inlet} = E''_{inh} \quad (4.1)$$

其中

$D'_{inlet}$  : 理論的微粒沉降效率

$V_{ts}$  : 微粒的終端沉降速度(m/s)

$Q$  : 採樣器的抽氣流量(L/min)

$R_1$  : 圓環型入口上蓋的半徑(mm)

$R_2$  : 從圓環型中心處至微粒沉降位置的距離(mm)

$h$  : 圓環型入口的高度(mm)

$E''_{inh}$  : 理論的可吸入性粉塵收集效率

由以上實驗室測試結果顯示，粉塵採樣器採樣流量為 3.2 L/min，使用 100ppi 泡綿為收集板時，可吸入性微粒收集效率曲線與 ISO/CEN/ACGIH 規範之可吸入性曲線吻合，收集效率曲線誤差在正負 5 % 以內，而在氣動直徑  $>7\mu\text{m}$  的粒徑會有收集效率略高的情形。胸腔區的微粒收集效率曲線與 ISO/CEN/ACGIH 規範之胸腔區曲線吻合，收集效率曲線誤差在  $\pm 16\%$  以內，截取氣動直徑值為  $9.6\mu\text{m}$ ，而在氣動直徑  $<9.8\mu\text{m}$  的粒徑會有收集效率偏低的情形。我們亦發現可呼吸性粉塵的收集率曲線可以符合 ISO/CEN/ACGIH 規範的可呼吸性曲線，截取氣動直徑值與 ISO/CEN/ACGIH 規定的  $4\mu\text{m}$  吻合，收集效率曲線誤差在正負 24 % 以內，而在氣動直徑  $<4.3\mu\text{m}$  的粒徑會有收集效率偏高的情形。本採樣器各階的微粒損失量均接近零，而圓環形入口會有將氣動直徑  $>16\mu\text{m}$  的粒徑收集的情形。本採樣器使用泡綿當作收集板，固體微粒和液體微粒的收集效率十分接近，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。

## 4.2. 現場測試結果

### 4.2.1 採樣器精確性比對



為了瞭解兩兩相同採樣器在相同採樣時間下，採樣器彼此間的採樣濃度準確性，首先比對兩個 IOSH 旋風器在同一採樣時間下於 A、B、C 三個採樣地點的採樣粉塵濃度，發現其所採集的可呼吸性粉塵濃度比值接近 1:1，結果如圖 4.7 所示。我們利用兩兩獨立樣本做成對 t 檢定分析，結果發現兩個 IOSH 旋風器採樣器的粉塵濃度並沒有顯著差異。利用相同的比對方法，在可呼吸性粉塵部分；兩個粉塵採樣器的粉塵濃度、兩個 Respicon 採樣器的粉塵濃度、兩個 Marple 採樣器的粉塵各自均十分接近，兩兩相同採樣器的粉塵濃度如表 4.1 所示並沒有顯著差異，且結果如圖 4.8、圖 4.9、圖 4.10 幾乎為 1:1 之比值。表 4.1 顯示各個採樣器的胸腔區粉塵和可吸入性粉塵，且同時應用兩兩獨立樣本的成對 t 檢定分析，也會得到粉塵濃度沒有顯著差異的趨勢，因此我們於現場進行粉塵濃度採樣之精確性(Precision)很高。



#### 4.2.2 現場採樣粉塵濃度比較

圖 4.11 是本研究使用不同採樣器在各個採樣地點對可呼吸性粉塵的實驗結果，由圖可知，IOSH旋風器所採集到的可呼吸性粉塵濃度比Respicon採樣器所採集到的濃度高，判定係數(Coefficient of Determination)  $R^2$ 為 0.99; 粉塵採樣器所採集到的可呼吸性粉塵濃度比Respicon採樣器所採集到的濃度高 ( $R^2$ 為 0.98)，若以IOSH旋風器當作標準時，粉塵採樣器對於可呼吸性粉塵採樣準確度優於Respicon。圖 4.12 是本研究的粉塵採樣器與 Respicon採樣器之胸腔區粉塵濃度比較，我們發現粉塵採樣器的胸腔區粉塵濃度比Respicon採樣器低( $R^2$ 為 0.98)。圖 4.13 是本研究使用不同採樣器在各個採樣地點對可吸入性粉塵的樣本比對結果，其中粉塵採樣器所採集到的可吸入性粉塵與Respicon採樣器的濃度十分接近( $R^2$ 為 0.97)。

由以上的結果顯示，本新型採樣器與 TSI 的 Respicon 採樣器對於三種粉塵的收集效率尚屬符合。



為了更仔細知道三種粉塵在 A.B.C.工廠所佔的濃度比例，我們以 Marple 採樣器所計算出的粉塵濃度乘以 ISO/CEN/ACGIH 採樣效率規範，再據此計算出三種粉塵在三個工廠所佔的比例。表 4.2 為 A、B 和 C 採樣點三種粉塵濃度所佔的比例，表中顯示 A 採樣點的可呼吸性粉塵所佔的比例大部分都大於胸腔區粉塵和可吸入性粉塵，但是仍有一次採樣結果是可吸入性粉塵所佔的比例大於胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵，推測可能是採樣前一天工廠的球磨機停工和更換零件，因而導致沉積在機器底部的大粉塵揚起於採樣區域四周；B 採樣點的可呼吸性粉塵所佔的比例與可吸入性粉塵所佔的比例相當，均大於胸腔區粉塵所佔的比例；C 採樣點的可吸入性粉塵所占的比例比可呼吸性粉塵及胸腔區粉塵均高。因此我們可以發現因為 A、B 採樣點小微粒所佔的比例較多且 C 採樣點大微粒所佔的比例較多，易造成於 C 採樣點時的採樣濃度誤差較大，而於 A、B 採樣點的採樣濃度誤差較小。

以上是針對 A.B.C.三個工廠的所有數據做分析，接下來我們分別針對三個不同工廠所採集到的粉塵樣本做兩兩獨立樣本的成對 t 檢定分析。

表 4.3 為我們使用新型粉塵採樣器、IOSH 旋風器、Marple採樣器和Respicon採樣器於A採樣點所採集到的三種粉塵(可呼吸性粉塵、胸腔區粉塵和可吸入性粉塵)的統計分析結果，本研究發現由於A採樣點的粉塵濃度較低( $30\sim 160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )，且其粒徑分佈顯示小微粒所佔的比例居多，(如圖 4.14 所示，A廠的粒徑分佈為典型的雙峰分佈，小於  $4\ \mu\text{m}$  微粒的粒徑分佈範圍為  $\text{MMAD}=0.684\sim 1.06\ \mu\text{m}$ 、 $\text{GSD}=1.78\sim 2.63$  和大於  $4\ \mu\text{m}$  微粒的粒徑分佈範圍為  $\text{MMAD}=8.82\sim 12.6$ 、 $\text{GSD}=1.38\sim 2.76$ )，所以造成粉塵採樣器在可呼吸性粉塵濃度上與Respicon採樣器及IOSH旋風器並無顯著差異。在胸腔區粉塵方面，粉塵採樣器與Respicon採樣器卻皆有顯著差異。在可吸入性粉塵方面，粉塵採樣器和Respicon採樣器相互之間則無顯著差異。

採樣地點B的粉塵濃度為較低的  $0\sim 230\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，粒徑分佈如圖 4.15 所示為典型的雙峰分佈，小於  $4\ \mu\text{m}$  的微粒分佈： $\text{MMAD}=1.41\sim 2.83\ \mu\text{m}$ 、 $\text{GSD}=1.42\sim 2.86$  和大於  $4\ \mu\text{m}$  的微粒分佈： $\text{MMAD}=9.37\sim 11.0\ \mu\text{m}$ 、 $\text{GSD}=1.58\sim 1.79$ ，利用兩兩獨立樣本的成對t檢定分析B採樣點的所有樣本，結果發現Respicon採樣器與粉塵採樣器在三種粉塵濃度並無顯著差異。在可呼吸性粉塵濃度部分，Respicon採樣器、IOSH 旋風器、新型粉塵採樣器的粉塵濃度並無顯著差異，如表 4.4 所示。

採樣地點C的粒徑分佈顯示大微粒所佔的比例居多(如圖 4.16 所示C地點的粒徑分布，大於  $4\ \mu\text{m}$  微粒的粒徑分布： $\text{MMAD}=16.8\sim 35.1\ \mu\text{m}$ 、 $\text{GSD}=2.36\sim 6.00$ )，其現場粉塵濃度為較高的  $0\sim 2500\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。表 4.5 為利用兩兩獨立樣本的成對t檢定分析C採樣點的所有樣本所得，結果發現Respicon採樣器與粉塵採樣器在可吸入性粉塵濃度並無顯著差異，但是在胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵濃度有顯著差異。在可呼吸性粉塵濃度部分，Respicon採樣器與IOSH旋風器、IOSH 旋風器與粉塵採樣器的粉塵濃度並無顯著差異。

### 4.3 現場採樣結果討論

由以上比較可知，本研究自行設計的粉塵採樣器與 IOSH 旋風器可呼吸性粉塵濃度皆比 Respicon 採樣器高。Feather and Chen. (2003)發現 Respicon 採樣器於靜風下對於三種粉塵濃度採樣有低估的現象。造成粉塵採樣器在高濃度、大粒徑下測值低估的主要原因是因為圓環型的進口吸入效率的經驗公式是在定風速下(0.55 至 2.08 m/sec)而非在現場極靜風下(0.03 m/sec)得到的，會造成採樣濃度的低估，尤其對大微粒的低估會更嚴重。



## 第五章 結論與建議

本研究自行設計一個可以同時針對三種粉塵進行採樣的粉塵採樣器，並在實驗室進行採樣器校正測試、然後將粉塵採樣器、IOSH 旋風器、Respicon 採樣器和 Marple 個人多階衝擊器(Marple personal cascade impactor)於現場進行粉塵採樣測試，藉以量測比較各採樣器在工作場所中三種粉塵(可呼吸性粉塵、胸腔區粉塵和可吸入性粉塵)的濃度。本研究的結論及建議如下：

### 實驗室的採樣器的校正結果：

本粉塵採樣器之圓環形入口在 3.2 L/min 的吸入效率會接近(Witschger et al,1997)所提出的入口吸入效率曲線，且粉塵採樣器之圓環形入口的微粒收集效率接近理論公式值。

採樣器在採樣流量為 3.2 L/min，使用孔隙度為 100ppi 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，二個慣性衝擊器的截取氣動直徑分別為 9.6及 4  $\mu\text{m}$ 。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十分吻合，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。

### 現場測試比對結果：

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。在可呼吸性粉塵方面，粉塵採樣器與IOSH 旋風器的測值在 0~800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之範圍內十分接近;而Respicon採樣器的測值均比粉塵採樣器及IOSH 旋風器的濃度低，且粉塵採樣器和Respicon採樣器的三種粉塵濃度無顯著差異。

粉塵採樣器在 A 廠中所採集的可呼吸性粉塵濃度與 Respicon 採樣器和 IOSH 旋風器皆無顯著差異，且其可吸入性粉塵濃度與 Respicon 採樣器也無顯著差異，然而胸腔區粉塵濃度與 Respicon 採樣器皆有顯著差異。在採樣地點 B 發現 Respicon 採樣器與粉塵採樣器在三種粉塵濃度都無顯著差異。採樣地點 C 的結果發現 Respicon 採樣器與粉塵採樣器在可吸入性粉塵濃度並無顯著差異，但是在胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵濃度有顯著差異。



## 第六章 參考文獻

- 蔡春進,2005,“職場微粒分徑採樣之評估研究”,行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告,IOSH94-A102.
- 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.
- Aizenberg, V., Grinshpun, S., Willeke, K., Smith, J., Baron, P., 2004,“Performance Characteristics of the Button Personal Inhalable Aerosol sampler”, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 61:398-404.
- Bartley, D. L., Chen, C. C., Song, R. G., 1994,“Respirable Aerosol Sampler Performance Testing”, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 55(11): 1036-1046
- Bratveit, M., Haaland, I. M., Moen, B. and Malsens, A., 2003, “Exposure to Sulfuric Acid in Zinc Production”, *Ann. occup. Hyg.*, 48(2): 159–170.
- 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.
- 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)
- 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)
- Feather, G.A., Chen, B.T., 2003, “Design and Use of a Setting Chamber for Sampler Evaluation Under Calm-Air Conditions”, *Aerosol Sci Technol.*, 37: 261-270.
- Glenny, R.W., Bernard, S., Brienkley, M., 1993; “Validation of fluorescent-labeled microspheres for measurement of regional organ perfusion”, *J Applied Physiol.*, 74(5), 2585.
- Gautam, M. and Sreenath, A., 1997,“Performance of a Respirable Multi-inlet Cyclone”, *J Aerosol Sci.*, 28(7): 1265-1281.

- Heikkinen, M.S.A., and Harley, N.H. 2000, "Experimental Investigation of Sintered Porous Metal Filters", *J. Aerosol Sci.*, 31:721–738.
- Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Jones, A. D., Aitken, R. J., Fabries, J. F., Kauffer, E., Liden, G., Maynard, A., Riediger, G., Sahle, W., 2005, "Thoracic Size-Selective Sampling of Fibres: Performance of Four Types of Thoracic Sampler in Laboratory Tests", *Ann. occup. Hyg. Assoc. J.*, 49(6): 481–492.
- 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
- Kenny, L.C., Gussman, R.A., 1997; "Characterization and modeling of a family of Cyclone aerosol preseparator". *J Aerosol Sci.*, 28: 677-688.
- Kar, K and Gautam, M., 1995, "Orientation Bias of the Isolated 10 mm Nylon Cyclone at Low Stream Velocity", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 56:1090-1098.
- Kavouras, G., and Koutrakis, P., 2001, "Use of Polyurethane Foam as the Impaction Substrate/Collection Medium on Conventional Inertial Impaction", *J. Aerosol Sci.* 34:46–56.
- Li, S. N., Lundgren, D. A., Rovell-Rixx, D., 2000, "Evaluation of Six Inhalable Aerosol Sampler". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 61:506:516.
- Maynard, A.D., 1999; "Measurement of aerosol penetration through six personal thoracic samplers under calm air conditions". *J Aerosol Sci*; 30: 1227-1242.
- Mark, D., and Vincent, J. H., 1986, "A New Personal Sampler for Airborne Total Dust in Workplaces". *Ann. Occup. Hyg.*, 30:89-102
- Mark, D. and Vincent, J. H., 1986, "A New Personal Sampler for Airborne Total Dust in Workplaces", *Ann. Occup. Hyg.*, 30: 89-102.
- Marjamaki, M., and Keskinen, J., 2004, "Effect of impaction plate roughness and porosity on collection efficiency," *J. Aerosol Sci.*, 35: 301-308.
- 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
- 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.

- 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.
- Teikari M, Linnainmaa M, Laitinen J, Kalliokoski P, Vincent J, Titta P, Raunemaa T., 2003, “Laboratory and Field Testing of Particle Size-Selective Sampling Methods for Mineral Dusts”. *Am Ind Hyg Assoc J.*, 64(3): 312-318.
- 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.
- Witschger, O., Fabries, J.F., Gorner, P., 1997, “Particle Entry Efficiency of an Annular Slot Aerosol Sampler”, *J. Aerosol Sci.*, 28: S679–S680.

