

# 國立交通大學

環境工程所

碩士論文

工作場所奈米微粒的暴露研究

Research on the Exposure of Nanoparticles in Workplaces

研究生：吳承翰

指導教授：蔡春進 博士

中華民國九十六年八月

## 摘要

本研究為評估不同工作場所內勞工對於 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 與 PM<sub>0.1</sub> 微粒的暴露質量濃度，以及了解三種微粒之間的質量濃度關係，分別於鉛粉廠與鑄造廠中選取六個位置，以雙道採樣器(SA241 Dichotomous PM10/2.5 sampler, 簡稱 Dichot, Thermo Fisher Sci. Inc., MA, USA.)、雷射粉塵計(TSI DustTrak, Model 8520, TSI Inc., St. Paul, MN, USA.)、慣性衝擊器(Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor, MOUDI, Model 110, MSP Corp., St. Paul, USA)以及掃描式電動度粒徑分析儀(Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS, Model 3936, TSI Inc., St. Paul, MN, USA)進行 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 與奈米微粒的濃度測量。將 SMPS 所量測到不同位置奈米微粒的數目濃度關係繪成等濃度曲線後，可得到奈米微粒的數目濃度分佈圖，從奈米微粒的數目濃度分佈圖中發現鉛粉廠中的奈米微粒數目濃度最高的地方為工作人員收集鉛粉的區域，奈米數目濃度範圍介於  $1.3 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  至  $1.8 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，而整個廠區的奈米數目濃度範圍則介於  $7.76 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$  至  $4.65 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，平均數目濃度約為  $1.78 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，背景濃度約為  $5 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$ 。鑄造廠中的奈米微粒數目濃度最高的地方為鐵粉回收區以及中週波融解爐融解廢鐵的區域，奈米數目濃度範圍分別介於  $4.6 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  至  $1.04 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  以及  $3.2 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  至  $3.15 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，而整個廠區的奈米數目濃度範圍則介於  $2.82 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  至  $3.15 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，平均數目濃度約為  $9.21 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，背景濃度約為  $1.5 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 。

為瞭解工作場所中所發生的事件與微粒的質量濃度之間的關係性，本研究在定點使用 DustTrak 對於微粒的質量濃度進行長時間的及時監測，為了確認 DustTrak 數據的可信度，本研究以在同一時間相同地點使用 Dichot 所量測到的數據與 DustTrak 的數據進行相互比對，結果發現在鉛粉廠中

$$PM_{10, dusttrak} = 2.09 \times PM_{10, dichot} - 6.47 \quad (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad ;$$

$$PM_{2.5, dusttrak} = 2.56 \times PM_{2.5, dichot} - 12.01 \quad (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad ; \quad \text{在鑄造廠中}$$

$$PM_{10, \text{dustrak}} = 1.20 \times PM_{10, \text{dichot}} - 6.90 \quad (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad ;$$

$PM_{2.5, \text{dustrak}} = 1.66 \times PM_{2.5, \text{dichot}} - 35.16$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。在工作場所內的工作情況與暴露濃度息息相關，以 DustTrak 的測量結果發現在鉛粉廠中導致  $PM_{10}$  與  $PM_{2.5}$  微粒質量濃度上升的主要事件為工作人員更換鉛粉桶，瞬間最高濃度分別可達到  $7 \text{ mg}/\text{m}^3$  與  $4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，平均濃度分別約為  $244 \mu\text{g}/\text{m}^3$  與  $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，背景濃度分別約為  $166 \mu\text{g}/\text{m}^3$  與  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。鑄造廠中導致  $PM_{10}$  與  $PM_{2.5}$  微粒質量濃度上升的主要事件為中週波融解爐的開啟，瞬間最高濃度分別可達到  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$  與  $7 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，平均濃度分別約為  $615 \mu\text{g}/\text{m}^3$  與  $479 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，背景濃度分別約為  $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$  與  $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。同時發現添加物種類對於  $PM_{10}$  與  $PM_{2.5}$  微粒質量濃度有著顯著的影響，在本研究所選擇的鑄造廠中對於  $PM_{10}$  與  $PM_{2.5}$  的質量濃度影響最大的是全球化劑、其次為接種劑。

為了計算出奈米微粒的質量濃度以提供未來做為制定法規時的參考，本研究在定點放置 MOUDI 用以量測奈米微粒的質量濃度，並且結合 SMPS 與 MOUDI 計算出鑄造廠中奈米微粒的有效密度約為  $3.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，再利用已知的奈米微粒有效密度搭配奈米微粒數目濃度分佈圖，可以繪出奈米微粒質量濃度分佈圖。為瞭解工作人員的質量暴露濃度，本研究在採樣的過程中利用人工的方式將工作人員的時間-活動模式加以記錄，結合此時間-活動模式以及奈米微粒質量濃度分佈圖，可以推估出工作人員的平均奈米微粒數目濃度與質量濃度暴露量，其中鑄造廠暴露濃度最高的工作人員為天車吊桶作業人員，其奈米微粒平均暴露數目濃度與暴露質量濃度分別為  $5.17 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 、 $11.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

## Abstract

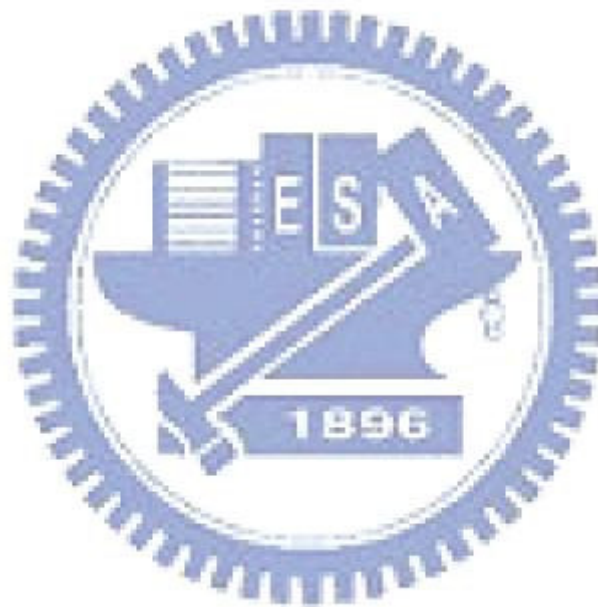
In this research, the exposure level of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>0.1</sub> mass concentrations to workers in different workplaces was assessed, and the relationship of mass concentrations between these three dust fractions was compared. Six locations in the lead powder and iron foundry plants were chosen for concentration mapping purpose. SA241 Dichotomous PM10/2.5 sampler (Dichot, Thermo Fisher Sci. Inc., MA, USA.), TSI DustTrak (Model 8520, TSI Inc., St. Paul, MN, USA.), Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI, Model 110, MSP Corp., St. Paul, USA) and Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, Model 3936, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) were used to measure the concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>0.1</sub>. We used the nanoparticle number concentrations measured by SMPS for mapping the particle number concentrations. The highest nanoparticle number concentration in the lead powder plant was measured in the area where workers bagged the lead powder. This concentration was between  $1.3 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  to  $1.8 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ . The nanoparticle number concentrations of the whole plant ranged between  $7.76 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$  to  $4.65 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  with the average of about  $1.78 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ . The background nanoparticle number concentration was about  $5 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$ . The highest nanoparticle number concentration in the iron foundry plant was measured in the area where the iron powder was recycled and where the iron was melted by the middle frequency furnace. The concentrations were between  $4.6 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  to  $1.04 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  and  $3.2 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  to  $3.15 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ , respectively. The nanoparticle number concentrations of the whole plant ranged between  $2.82 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  to  $3.15 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  with the average of about  $9.21 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ . The background nanoparticle number concentration was about  $1.5 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ .

In order to understand the relationship between particles mass concentrations

and the work activities in the workplaces, the DustTrak was used to measure the real time particle mass concentrations during long duration in a stationary location. The Dichot was also used to measure the particle mass concentrations at the same time at the same location for comparing with the data obtained by the DustTrak. In the lead powder plant, the relationship is  $PM_{10,dusttrak} = 2.09 \times PM_{10,dichot} - 6.47$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), and  $PM_{2.5,dusttrak} = 2.56 \times PM_{2.5,dichot} - 12.01$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). In the iron foundry plant, the relationship is  $PM_{10,dusttrak} = 1.20 \times PM_{10,dichot} - 6.90$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), and  $PM_{2.5,dusttrak} = 1.66 \times PM_{2.5,dichot} - 35.16$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). In the lead powder plant, the results measured by DustTrak showed that when workers changed the barrel, the instantaneous  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  mass concentrations increased significantly to  $7 \text{ mg}/\text{m}^3$  and  $4 \text{ mg}/\text{m}^3$ , respectively. The average concentration is  $244 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively, and the background concentration is  $166 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. In the iron foundry plant, when the middle frequency furnace opened, the instantaneous  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  mass concentrations increased significantly to  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$  and  $7 \text{ mg}/\text{m}^3$ , respectively. The average concentration is  $615 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $479 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively, and the background concentration is  $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. The  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  mass concentrations were found to be affected by the additives in the iron foundry plant. Nodulant affected  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  mass concentrations more than inoculant.

For future regulation, nanoparticle personal exposure level was assessed in this research. The MOUDI was used to measure the nanoparticle mass concentrations in a stationary location of the iron foundry plant. Then the effective density of the nanoparticle was calculated from the SMPS and MOUDI data and found to be about  $3.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ . The nanoparticle mass concentration mapping was made from the

effective density and the number concentration mapping from the SMPS measurement. The time-activity of workers was recorded manually during sampling, and the average exposure levels of nanoparticle mass concentrations and nanoparticle number concentrations to workers were calculated from the time-activity pattern and the mapping data. In the iron foundry plant, the worker with the highest exposure level was the crane driver whose average exposure levels of nanoparticle number concentrations and nanoparticle mass concentrations were found to be  $5.17 \times 10^4 / \text{cm}^3$  and  $11.39 \mu\text{g} / \text{m}^3$ , respectively.



中華民國九十六年八月

## 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
第一章 前言.....	1
1.1 研究背景與重要性.....	1
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 職場奈米微粒暴露評估.....	3
2.2 職場 PM <sub>2.5</sub> 與 PM <sub>10</sub> 微粒暴露評估.....	5
第三章 實驗方法.....	7
3.1 工作場所 PM <sub>10</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 及奈米微粒濃度測量.....	7
3.2 奈米微粒個人暴露評估量的估算方法.....	9
第四章 結果與討論.....	14
4.1 工作場所 PM <sub>10</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 及奈米微粒的濃度分佈.....	14
4.2 奈米微粒暴露濃度的估算.....	19
4.2.1 工作場所奈米微粒的密度分析.....	19
4.2.2 工作場所奈米微粒個人的暴露濃度推估.....	21
第五章 結論.....	53
參考文獻.....	54

## 圖目錄

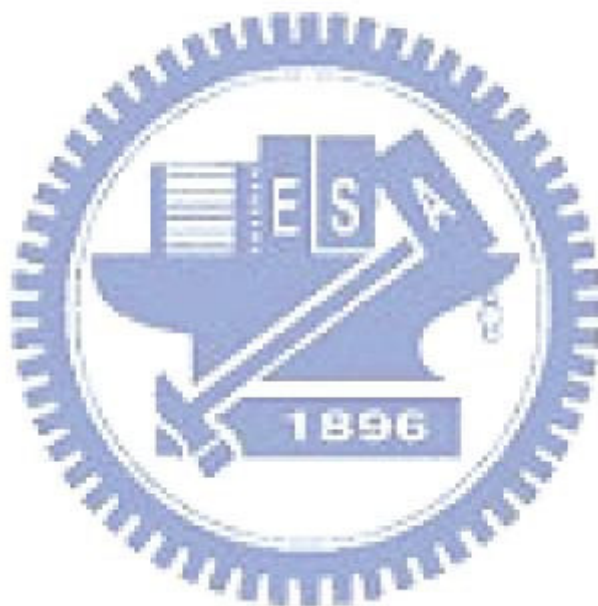
圖 3.1	A 作業場所製程佈置圖	13
圖 3.2	B 作業場所製程佈置圖	13
圖 4.1	A 廠 DustTrak 與 Dichot 所量測 PM <sub>10</sub> 重量濃度的關係	26
圖 4.2	A 廠 DustTrak 與 Dichot 所量測 PM <sub>2.5</sub> 重量濃度的關係	26
圖 4.3	A 廠 Dichot 所量測 PM <sub>2.5</sub> 與 PM <sub>10</sub> 重量濃度的關係	27
圖 4.4	A 廠 DustTrak 與 Dichot 量測 PM <sub>10</sub> 重量濃度的關係	27
圖 4.5	A 廠 DustTrak 與 Dichot 量測 PM <sub>2.5</sub> 重量濃度的關係	28
圖 4.6(a)	08242006 DustTrak PM <sub>10</sub> 濃度變化	28
圖 4.6 (b)	10172006 DustTrak PM <sub>10</sub> 濃度變化	29
圖 4.6(c)	10242006 DustTrak PM <sub>10</sub> 濃度變化	29
圖 4.7(a)	08242006 DustTrak PM <sub>2.5</sub> 濃度變化	30
圖 4.7 (b)	10172006 DustTrak PM <sub>2.5</sub> 濃度變化	30
圖 4.7 (c)	10242006 DustTrak PM <sub>2.5</sub> 濃度變化	31
圖 4.8 (a)	工作人員以鐵鎚敲擊旋轉閘出料口與鉛粉桶	31
圖 4.8 (b)	更換鉛粉桶前鉛粉滿桶狀況	32
圖 4.9(a)	鉛粉塊通過熔鉛爐後經冷卻槽運送至鉛棒切斷機	32
圖 4.9 (b)	噴灑水氣後水氣與高熱的鉛粉塊接觸所產生的蒸氣	33
圖 4.10 (a)	鉛粉主機內的溫度過高時會自動停止操作	33
圖 4.10 (b)	鉛粉主機內的溫度下降後再恢復正常作業	34
圖 4.11	A 廠 SMPS 現場採樣作業	34
圖 4.12 (a)	A 廠 06092006 奈米微粒數目濃度分布	35
圖 4.12 (b)	A 廠 08242006 奈米微粒數目濃度分布	35
圖 4.13	A 廠 100nm 以下奈米微粒數目濃度定點長時間採樣濃度變化	36
圖 4.14	B 廠 DustTrak 與 Dichot PM <sub>10</sub> 重量濃度關係	36
圖 4.15	B 廠 DustTrak 與 Dichot PM <sub>2.5</sub> 重量濃度關係	37
圖 4.16	B 廠 Dichot 所量測 PM <sub>2.5</sub> 與 PM <sub>10</sub> 重量濃度的關係	37
圖 4.17(a)	10122006 DustTrak PM <sub>10</sub> 濃度變化	38
圖 4.17(b)	10122006 DustTrak PM <sub>2.5</sub> 濃度變化	38
圖 4.18(a)	10192006 DustTrak PM <sub>10</sub> 濃度變化	39
圖 4.18(b)	10192006 DustTrak PM <sub>2.5</sub> 濃度變化	39
圖 4.19(a)	09072006 DustTrak PM <sub>10</sub> 濃度變化	40
圖 4.19(b)	09072006 DustTrak PM <sub>2.5</sub> 濃度變化	40
圖 4.20(a)	10262006 DustTrak PM <sub>10</sub> 濃度變化	41
圖 4.20(b)	10262006 DustTrak PM <sub>2.5</sub> 濃度變化	41
圖 4.21	B 廠現場採樣作業	42



圖 4.22 (a)	B 廠 09072006 奈米微粒數目濃度分布	42
圖 4.22 (b)	B 廠 10192006 奈米微粒數目濃度分布	43
圖 4.22 (c)	B 廠 10262006 奈米微粒數目濃度分布	43
圖 4.23 (a)	B 廠 09072006 100nm 以下奈米微粒數目濃度定點長時間採 樣濃度變化	44
圖 4.23 (b)	B 廠 10192006 100nm 以下奈米微粒數目濃度定點長時間採 樣濃度變化	44
圖 4.25 (c)	B 廠 10262006 100nm 以下奈米微粒數目濃度定點長時間採 樣濃度變化	45
圖 4.24 (a)	鐵水傾倒時所逸散的煙煙	45
圖 4.24 (b)	鐵水傾倒時所逸散的煙煙	46
圖 4.25 (a)	B 廠 09072006 SMPS 所量測奈米微粒平均數目濃度粒徑分 布	46
圖 4.25(b)	B 廠 10192006SMPS 所量測奈米微粒平均數目濃度粒徑分布	47
圖 4.25(c)	B 廠 10262006SMPS 所量測奈米微粒平均數目濃度粒徑分布	47
圖 4.26 (a)	B 廠 09072006 中週波溶解爐開爐時奈米微粒數目濃度粒徑 分布	48
圖 4.26 (b)	B 廠 10192006 中週波溶解爐開爐時奈米微粒數目濃度粒徑 分布	48
圖 4.27 (a)	B 廠 10192006 nano MOUDI 所量測微粒質量濃度粒徑分布	49
圖 4.27 (b)	B 廠 10262006 nano MOUDI 所量測微粒質量濃度粒徑分布	49
圖 4.28 (a)	10192006 有效密度 $3.0 \text{ g/cm}^3$ nano MOUDI 與 SMPS 微粒質 量濃度比較	50
圖 4.28 (b)	10262006 有效密度 $3.0 \text{ g/cm}^3$ nano MOUDI 與 SMPS 微粒質 量濃度比較	50
圖 4.29	B 廠 $\text{PM}_{10}$ 與 $\text{PM}_{0.1}$ 的關係	51
圖 4.30 (a)	B 廠 09072006 奈米微粒質量濃度分布	51
圖 4.30 (b)	B 廠 10192006 奈米微粒質量濃度分布	52
圖 4.30 (c)	B 廠 10262006 奈米微粒質量濃度分布	52

## 表目錄

表 3.1	採樣的時間與地點	12
表 4.1	A 廠作業場所 PM <sub>10</sub> 與 PM <sub>2.5</sub> 微粒的重量濃度	23
表 4.2	A 廠 SMPS 採樣數據	23
表 4.3	B 廠作業場所 PM <sub>10</sub> 與 PM <sub>2.5</sub> 微粒的重量濃度	24
表 4.4	B 廠所使用的原料、添加物資料	24
表 4.5	B 廠 SMPS 採樣數據	25



## 第一章 前言

### 1.1 研究背景與重要性

大氣懸浮微粒對人體的呼吸器官會造成危害，其危害的程度根據粒徑的大小、微粒濃度、表面積、成份及沉積在人體呼吸系統位置而有所不同。Oberdorster (2001)的研究顯示，老鼠長期吸入奈米微粒會對肺部造成發炎反應，且奈米微粒所具有的高表面積則是造成此危害的重要參數之一。Harrison et al. (2000)的研究指出，與細微粒(0.1~2.5  $\mu\text{m}$ )和粗微粒(2.5~10  $\mu\text{m}$ )具有相同質量的超細微粒(<0.1  $\mu\text{m}$ )，其表面積是細微粒的100~1000倍及粗微粒的10000倍，危害更大。因此奈米微粒對人體健康和環境的影響值得研究學者注意。

相較於大氣中的懸浮微粒，工作人員在工作場所的長時間逗留導致工作場所的微粒更加容易藉由呼吸系統進入人體，進而對工作人員產生很大的健康危害。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微粒暴露濃度，許多研究學者便利用 DustTrak (Model 8520, TSI Inc., St. Paul, MN, USA.)進行微粒濃度的即時監測，搭配雙道採樣器(Dichotomous sampler, 簡稱 Dichot, Model 241, Andersen Inc., Smyrna, Georgia, USA.)作為定點採樣，以校正 Dusttrak 的  $\text{PM}_{10}$  及  $\text{PM}_{2.5}$  容易因為微粒散光度的影響而產生的採樣濃度偏差，並且以標準的 10 階 MOUDI (Model 110, MSP Corp., St. Paul, USA) 測量微粒的粒徑分佈進而得到更正確的微粒質量分佈濃度，將這些濃度分佈提供為立法保護勞工安全時的參考值。然而奈米微粒的危害程度更大於粗微粒，因此過去學者便利用 nanoMOUDI 慣性衝擊器 (Model 115, MSP Corp., St. Paul, USA) 採集奈米微粒的質量分佈，它結合標準的 10 階 MOUDI，可以作為固定點的奈米微粒採樣，其優點可以採集奈米微粒質量分佈且樣本可以做後續的化學分析，但是其缺點為採樣時間通常很長。另外，可以作短時間奈米微粒數目濃度分佈監測的儀器為 TSI model 3936 SMPS (scanning mobility particle sizer, 掃描式電動度粒徑分析儀，粒徑範圍 2-1000 nm)，適合作工作場所奈米微粒的定點、即時監測之用，但無法作奈米微粒的採樣，且數目濃度分

佈轉換為質量濃度分佈時會受到微粒之密度及形狀所影響。

在作業環境測定中，了解暴露來源以作有效控制是一個重要的工作。由於 SMPS、MOUDI 和 nanoMOUDI 並不適合做為工作場所奈米微粒濃度個人採樣之用因此為了得知微粒之暴露來源，本研究擬採用人工跟監的方式測定勞工工作時的工作位置及停留時間，並結合 TSI SMPS 在工作場所的不同位置所作連續的監測，以求取工作場所全區域的奈米微粒濃度分佈圖(mapping)，再利用奈米微粒分佈圖及勞工工作位置及時間，即可以計算出工作人員的奈米微粒個人暴露量。

因為對所有的工作場所進行奈米微粒濃度的量測需花費大量的人力與財力，為了解奈米微粒的個人暴露質量分佈濃度，本研究擬同時在同一定點進行 TSI SMPS 與 nanoMOUDI 的採樣及監測，以建立  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  與  $PM_{0.1}$  三種微粒之間質量濃度關係，對於尚未進行奈米微粒濃度量測的工作場所，可利用此關係值進行初步的評估。



## 第二章 文獻回顧

由於工作人員在工作場所容易因微粒而使呼吸系統受到危害，因此本研究擬使用 SMPS、MOUDI、nanoMOUDI、Dustrak 和 Dichot 以了解工作場所中 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 及奈米微粒的質量濃度及粒徑分佈，然而上述儀器在工作場所 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 及奈米微粒的濃度採樣及個人暴露評估上都有值得改進的空間，因此本研究將針對上述缺點及目前工作場所微粒採樣現況做以下的文獻回顧。

### 2.1 職場奈米微粒暴露評估

由於沒有適當的個人暴露評估儀器，目前職場的奈米微粒濃度測量均以定點固定式的測量方式為主。Kuhlbusch and Fissan (2005) 曾於三個不同碳黑廠(Carbon black)之不同工作場所測量原始粒徑為<10nm~500nm 之碳黑微粒之逸散濃度，結果發現小於 500nm 氣動直徑之微粒很少，只有在使用柴油堆高機之工作場所才有許多<100nm 之超細微粒存在，在粉體包裝區則有粗微粒濃度之增加。

Peters and Heitbrink (2005)在一個柴油引擎工廠的加工及組裝區進行全區域的及時濃度及粒徑分佈測量，並製作成空間的濃度分佈圖(稱為 concentration mapping)，結果發現冬天時使用的氣體燃燒加熱器(gas-fired heater)產生大量的奈米微粒，以 CPC(condensation particle counter)測得之濃度>1,000,000 p/cc。

Mohlmann (2005)發表 BGIA (德國勞工安全衛生研究所)在不同工作場所的奈米微粒粒徑分佈及濃度測量結果，以建立資料庫。目前發現雷射光柱焊接，PVC 紙之熱空氣熔接，以及鎢金屬-惰性氣體焊接等作業之奈米微粒濃度較高。本項研究所使用的及時微粒監測儀器很多，包括 Dekati 電氣低壓衝擊器(ELPI, electrical low pressure impactor)、SMPS (掃描電動度微粒分析儀, scanning mobility particle sizer)、多階衝擊器等。

D'Arcy 等人(2005)則在汽車工廠的 15 個工作場所進行微粒質量、表面積及數目濃度之分佈測量，使用之儀器為 APS(氣動直徑測定儀)、SMPS、MOUDI(multi-orifice uniform deposit impactor 多微孔均勻沈積衝擊器)、P-trak(TSI 公司，類似手提式 CPC)等，結果發現不同車體焊接和鋁件模具鑄造(die cast)之奈米微粒(<100nm)及細微粒(<1 μm)之微粒濃度最高，不同工作場所中，奈米微粒(<100nm)質量濃度為 0.02~0.1 mg/m<sup>3</sup>，而總質量為 0.08~1.1 mg/ m<sup>3</sup>(VMD=440~10,000nm)；沈積於呼吸系統之次微米濃度為 0.007~0.058 mg/m<sup>3</sup>，微粒數目濃度為 9,000~380,000 1/cm<sup>3</sup>間(NMD=42~160nm)，表面積濃度為 460~12,000μm<sup>2</sup>/ m<sup>3</sup>(SMD=130~490nm)。

以上均為固定點的採樣結果，但是甚少有個人的暴露評估數據。個人暴露評估方式可分為兩種：直接的評估方法(direct assessment methods)與間接的評估方法(indirect assessment methods)，直接的評估方法即是以個人暴露偵測器(personal monitor)直接佩戴於受試者呼吸帶(breathing zone)進行數小時或數天之採樣，直接以此推估個人暴露量。間接的評估方法應用時間-活動模式記錄，以估計個人在不同微環境(microenvironment)之暴露時間長短，然後結合該環境中定點量測所得之污染物濃度值，來間接推估個人對於污染物之總暴露量。

但是目前因為沒有個人的奈米微粒採樣器及監測器，因此直接評估方法並不可行，需使用間接評估方法才行。若能使用個人時間-活動模式 (Time-Activity Pattern)調查 (Leaderer 等, 1993)，以得到時間-活動模式記錄，然後結合於工作場所微環境定點量測所得之污染物濃度值，則可以間接推估個人對於污染物之總暴露量，其所應用之公式 (Ott, 1985) 如下：

$$E_i = \sum_j C_j T_{ij} \quad (2.1)$$

其中，E<sub>i</sub> 指 i 個人在一定時間內之總暴露值(integrated exposure)、C<sub>j</sub> 指微環境 j 之污染物濃度、T<sub>ij</sub> 指 i 個人停留於微環境 j 之時間，j 指 i 個人在一定時間內所停留之微環境總數。

## 2.2 職場 PM<sub>2.5</sub> 與 PM<sub>10</sub> 微粒暴露評估

Michaels (1997)指出自從 1952 年的倫敦霧事件發生，空氣中的微粒濃度逐漸成為學者們研究的重點。過去的研究以總懸浮微粒(TSP)為主，逐漸進展到胸腔區粉塵(截取氣動直徑 10 $\mu$ m 以下的微粒，類似大氣的 PM<sub>10</sub>)、可呼吸性粉塵(截取氣動直徑 4 $\mu$ m 以下的微粒)、大氣的 PM<sub>2.5</sub> 以及本研究所著重的奈米微粒。

因為微粒對人體的危害會隨著微粒表面積增加而增加，工作場所的奈米微粒濃度又遠高於一般的室內外空氣，因此為了確保工作場所人員的健康，奈米微粒暴露量的評估已經是刻不容緩的議題，然而已經確定 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 等微粒對於人體健康存在著嚴重風險的我們，在對於某工作場所進行奈米微粒濃度評估的同時，對於 PM<sub>10</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 的濃度量測勢必不能忽略。

藉由簡單的操作方法，DustTrak 能夠輕易的在短時間內量測到微粒的 PM<sub>10</sub> 或 PM<sub>2.5</sub> 重量濃度，並且能夠得到即時的濃度變化資料，也因為 DustTrak 的小巧輕便，背在身上就可以當作個人採樣器的優點，本研究利用 DustTrak 在採樣的時間內全程量測 PM<sub>2.5</sub> 與 PM<sub>10</sub> 的重量濃度即時變化。

考慮到 Michaels 與 Kleinman (2000)所提出短時間內的粉塵重量對於人體的影響，藉由 PM<sub>2.5</sub> 與 PM<sub>10</sub> 重量濃度即時變化圖，本研究擷取其中的 1 小時計算出短時間的平均暴露濃度，並且將員工的工作情況與粉塵濃度的即時變化進行比較，可以判斷出影響粉塵濃度上升與下降的原因。

為了計算工作場所內員工的暴露濃度，本研究仿效 Peters et al. (2005)利用能夠即時量測微粒濃度的儀器(本研究所使用來量測微粒即時濃度的儀器為 DustTrak 與 SMPS)，在工作場所內不同點反覆量測不同粒徑的微粒濃度，並且畫成濃度分佈圖。

在 Kim et al. (2004)指出使用 DustTrak 作為量測工具時，因為利用散光原理量測粉塵濃度，因此會因粉塵的特性不同而產生不同的讀值，如粉塵的粒徑分佈、吸光能力、形狀以及散光係數等，均會影響粉塵的散光量。在 Ramachandran et al. (2003)也提到環境中具有不同的相對溼度時，對於利用散光原理來量測粉塵重量濃度的儀器也會有著不同的影響。

結合以上的文獻回顧可以發現，由於目前並沒有適當的奈米微粒個人採樣器，因此本研究在工作場所使用 TSI SMPS 求取奈米微粒濃度數目分佈圖，搭配 MOUDI 估算出奈米微粒的有效密度後，結合時間-活動模式以計算工作人員的奈米微粒個人暴露量。並且利用 Dichot 與 DustTrak 量測作業場所內 PM<sub>10</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 的重量濃度以了解 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 以及 PM<sub>0.1</sub> 之間的關係。

。





### 第三章 實驗方法

本研究將使用 Dichot、Dustrak、MOUDI 和 nanoMOUDI 進行工作場所中的奈米微粒進行現場採樣，然後將收集到的奈米微粒，以微量天平秤重得到奈米微粒重量濃度，及利用 SMPS 了解工作場所中奈米微粒的粒徑分佈及工作人員的暴露數據。

#### 3.1 工作場所 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 及奈米微粒濃度測量

本研究從 06092006 起至 10262006，在鉛粉廠（A 廠）與鑄造廠（B 廠）進行多次採樣，採樣過程同時以 DustTrak、Dichot、SMPS、MOUDI 及 nano-MOUDI 等儀器進行即時或人工的量測，並推估作業人員的職業暴露濃度。詳細的採樣時間與所使用的設備內容如表 3.1 所示，每次採樣時 DustTrak、SMPS、MOUDI 及 nano-MOUDI 等儀器為全程採樣，而 Dichot 則劃分為 1~6 個間隔時段，並且在採樣的過程中紀錄 Dichot 的採樣時間週期，以便後續用於和直讀式設備如 DustTrak 所量測微粒濃度作比較。

A 廠作業程序包含熔鉛爐、鉛棒冷卻槽、鉛棒切斷機、鉛粒提升機、鉛粉製造機、鉛粉袋濾機及旋轉閘出料，A 廠作業場所製程佈置圖如圖 3.1 所示，其作業流程為先將一條一條的鉛塊投入熔鉛爐，在熔鉛爐中熔成一條連續的鉛棒，經過鉛棒冷卻槽冷卻後，以鉛棒切斷機將鉛棒切成一小塊一小塊的鉛粉塊，再經過鉛粒提升機將鉛粉塊運送至鉛粉主機內，當鉛粉塊在鉛粉主機內被磨成粉，並由鉛粉袋濾機析出後由旋轉閘出料流入鉛粉桶或包裝袋，桶裝或包裝後利用工作車搬運至存放區。作業場所微粒主要逸散源為旋轉閘出料包裝區，本區為主要逸散源。

B 廠作業流程為先將銑鐵與鋼鐵等原料投入中週波熔解爐(平時兩台操作兩台保溫)，利用電力發熱將其熔解為鐵水，再將鐵水澆鑄成型，鑄件經過輸送作業區冷卻後，再輸送至振動分模機，將鑄砂及鑄件分離，分模後的不良品則成為鑄鐵返材送回中週波熔解爐繼續處理。B 廠採樣區域為灰鐵的熔解與澆鑄作業區，該作業區的程序包含原料

配料（銑鐵、鋼鐵及鑄鐵返材等）、中週波熔解爐高溫熔融以及混砂、機械自動造模、合模、澆鑄、鑄模冷卻等程序，該作業利用天車吊桶將高溫熔融鐵水移送到澆鑄區進行澆鑄作業，該場所奈米微粒的主要逸散源來自於將高溫熔融鐵水自熔解爐傾倒至吊桶的作業及後續將吊桶內的融熔鐵水傾倒至澆鑄區貯存桶作業。B廠作業場所製程佈置圖如圖3.2所示。

本研究採用 Dichot 與 DustTrak 採集工作場所中的 PM<sub>2.5</sub> 與 PM<sub>10</sub> 微粒。Dichot 採樣器共分為六大部分：全方位的氣膠入口、虛擬衝擊板、兩個 37mm 的濾紙支撐板、三角支撐架、兩個浮子流量計以及真空馬達，在設計流量 16.67 與 1.67 lpm 的操作條件下，可將懸浮微粒分徑為粗微粒與細微粒。利用下列公式可算出 PM<sub>2.5</sub> 與 PM<sub>10</sub> 的濃度：

$$C_f = \frac{M_f}{Q_f \times t} \quad (3.1)$$

$$C_c = \frac{M_c - C_f \times Q_c \times t}{Q_t \times t} \quad (3.2)$$

其中 C<sub>f</sub> 為 PM<sub>2.5</sub> 的重量濃度 (μg/ m<sup>3</sup>)、C<sub>c</sub> 為 PM<sub>2.5</sub>~ PM<sub>10</sub> 的重量濃度 (μg/ m<sup>3</sup>)、M<sub>f</sub> 為 Dichot 所收集到細微粒的重量 (μg)、M<sub>c</sub> 為 Dichot 所收集到粗微粒的重量 (μg)、Q<sub>f</sub> 為通過細微粒收集濾紙的空氣流量 (lpm)、Q<sub>c</sub> 為通過粗微粒收集濾紙的空氣流量 (lpm)、Q<sub>t</sub> = Q<sub>c</sub> + Q<sub>f</sub>、t 為採樣時間。

Dichot 所使用的濾紙在秤重分析之初，需將濾紙置於乾燥箱中調理，並同時以一張空白濾紙作為標準檢查濾紙。在每組濾紙秤重之前，需將環境溫濕度控制在 RH=40±5%，T=21.5±1.5°C，以防止濾紙吸收水氣的干擾，才能準確秤得粉塵重量，每組濾紙秤完後並隨機選取其中一張濾紙作重複秤重實驗。若標準空白濾紙重量偏差太大，則需重新校正天平直到合乎標準才繼續秤重。

DustTrak 是一種攜帶方便、操作簡單的儀器，以內置氣泵將氣膠微粒吸入光學室中，利用偵測微粒 90 度直角光散射原理可量測懸浮微粒的總散光強度，DustTrak 可以

用以即時量測 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、可呼吸性粉塵、PM<sub>10</sub> 的重量濃度以了解短時間內微粒的濃度變化。然而利用散光量量測微粒質量濃度的儀器，會受到微粒特性與環境條件的影響，因此在使用 DustTrak 這方便的儀器之前，必須先經過謹慎而仔細的校正。此儀器可量測的濃度範圍為 0.001 ~ 100 mg/m<sup>3</sup>，粒徑範圍為 0.1~10μm，操作流量可介於 1.4 至 2.4 lpm（本研究流量設定在 1.7 lpm），適用於採樣環境溫度 0~50°C。

TSI SMPS 可測量粒徑範圍 10-1000 nm，適合作工作場所奈米微粒的定點、即時監測之用。本研究所使用的 SMPS 系統包含 TSI 3081 DMA、TSI 3022 CPC，由於工作場所奈米微粒濃度為本研究探討重點之一，因此 SMPS 的操作條件設定為 Sheath flow 15 L/min、Aerosol flow 1.5L/min，掃描範圍由 5.83 nm 至 228.8 nm，每次掃描時間為 135 秒。本次所選擇的工作場所包含鉛粉廠與鑄造廠，由於鑄造廠工作環境溫度較高，為避免 CPC 無法正常操作，本研究採用防護罩將 SMPS 包覆，同時以移動式冷氣機提供低溫空氣作為冷卻空氣，使防護罩內的 CPC 可以維持正常操作。

於選定的工作場所所以 Dichot、DustTrak、SMPS、MOUDI 及 nano-MOUDI 做定點採樣，如圖 3.1 #1 所標示位置及圖 3.2 stationary 所標示位置，以便探討作業場所懸浮微粒的特徵，並企圖找出 nano-MOUDI 奈米微粒質量濃度與 TSI SMPS 數目濃度之間的關係，以便進一步推估勞工個人奈米微粒的總暴露質量濃度。

### 3.2 奈米微粒個人暴露評估量的估算方法

MSP MOUDI 與 naon MOUDI（如前所述）現場採樣所得數據，需將空氣動力直徑轉換成微粒移動等量直徑（mobility equivalent diameter）以便和 TSI SMPS 做比較。

移動等量直徑與體積等量直徑的關係可由電移動度（electrical mobility） $Z_p$  的定義獲得：

$$Z_p = \frac{neC_{ve}}{3\pi\eta\chi d_{ve}} = \frac{neC_{me}}{3\pi\eta d_{me}} \quad (3.3)$$

$$d_{me} = d_{ve} \frac{C_{me}\chi}{C_{ve}} \quad (3.4)$$

其中克寧漢校正係數：

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left[ \alpha + \beta \exp\left(-\frac{\gamma d}{2\lambda}\right) \right] \quad (3.5)$$

此處  $d_{ve}$  是體積等量直徑、 $d_{me}$  是移動等量直徑、 $C_{me}$  是在體積等量直徑時的克寧漢校正係數、 $C_{ve}$  是在移動等量直徑時的克寧漢校正係數、 $\chi$  是動力形狀因子 (dynamic shape factor) (Hinds, 1999)。對固體微粒而言  $\alpha = 1.142$ 、 $\beta = 0.558$ 、 $\gamma = 0.999$ ；對油滴微粒而言  $\alpha = 1.207$ 、 $\beta = 0.440$ 、 $\gamma = 0.596$ 。

另外，依據最終沉降速度的定義，空氣動力直徑與體積等量直徑的關係如下式：

$$d_a = d_{ve} \sqrt{\frac{\rho_p C_{ve}}{\chi \rho_0 C_a}} \quad (3.6)$$

此處  $d_a$  是空氣動力直徑、 $C_a$  是在空氣動力直徑時的克寧漢校正係數、 $\rho_p$  是微粒組成的真實密度、 $\rho_0$  是單位密度。

空氣動力直徑、體積等量直徑與移動等量直徑之間的關係表示成 (Kasper, 1982)：

$$\rho_0 d_a^2 C_a = \frac{\rho_p}{\chi} d_{ve}^2 C_{ve} = \rho_{eff} d_{me}^2 C_{me} \quad (3.7)$$

此處  $\rho_{eff}$  為有效密度，其定義為：

$$\rho_{eff} = \rho_p \frac{d_{ve}^3}{d_{me}^3} \quad (3.8)$$

最後，奈米微粒的質量濃度可表示成：

$$m = \frac{\pi}{6} N \rho_{eff} d_{me}^3 = \frac{\pi}{6} N \rho_p d_{ve}^3 \quad (3.9)$$

其中， $N$  為數目濃度、 $m$  為質量濃度。由於作業場所奈米微粒的有效密度無法由採樣過程獲得，因此在本研究中須由 TSI SMPS 與 MSP naon MOUDI 做比較後，獲得微粒的有效密度  $\rho_{eff}$ 。再依該有效密度推估作業場所奈米微粒的質量濃度分布。

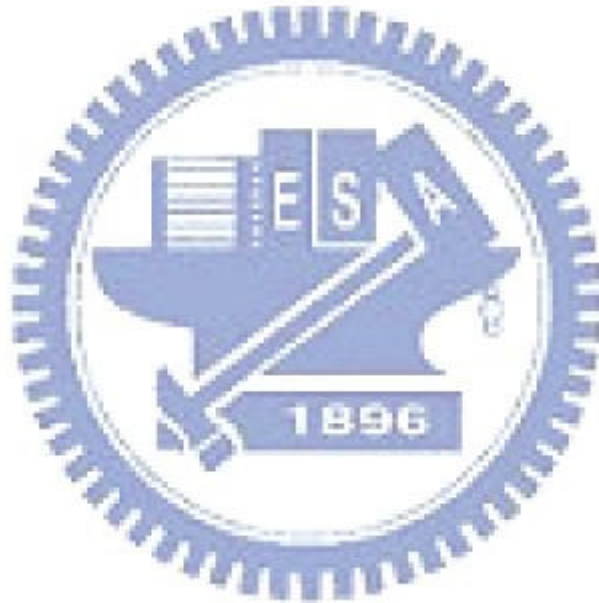


表 3.1 採樣的時間與地點

	日期	時間		使用儀器				
		開始	結束	A	B	C	D	E
A 廠	06092006	10:00	13:40	有	有	有	無	無
	08242006	11:00	15:10	有	有	有	有	無
	10172006	10:00	16:20	有	有	無	有	有
	10242006	08:30	14:40	有	有	無	有	有
B 廠	09072006	09:50	13:10	有	有	有	有	無
	10122006	12:40	15:50	有	有	無	無	無
	10192006	11:00	15:40	有	有	有	有	有
	10262006	09:00	16:00	有	有	有	有	有

註 1：A 代表 DustTrak、B 代表 Dichot、C 代表 SMPS、D 代表 MOUDI、E 代表 nano-MOUDI



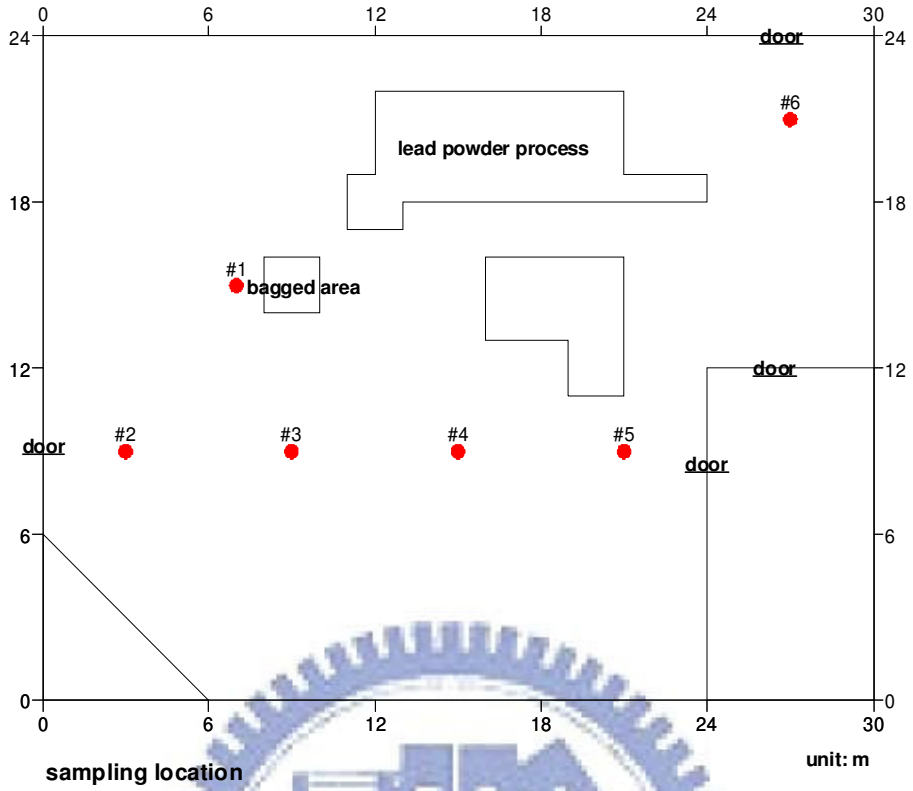


圖3.1 A作業場所製程佈置圖

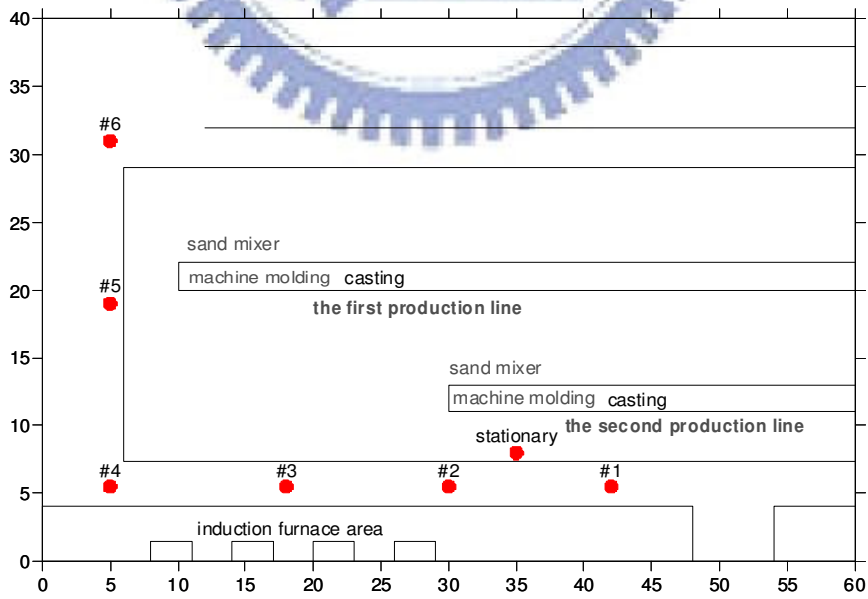


圖 3.2 B 作業場所製程佈置圖

## 第四章 結果與討論

### 4.1 工作場所 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 及奈米微粒的濃度分佈

#### A廠工作場所PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>與奈米微粒的濃度特徵

A廠作業場所製程佈置圖如圖3.1所示，於固定點採樣所獲得DustTrak與Dichot PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>微粒的重量濃度如表4.1所示。

由表4.1可以看出Dichot在A廠所量測結果除了在夏天所量測到的前兩筆數據(06092006、08242006)外PM<sub>10</sub>的濃度範圍介於158.89 μg/m<sup>3</sup>至288.10μg/m<sup>3</sup>之間。PM<sub>2.5</sub>的濃度範圍介於108.06μg/m<sup>3</sup>至136.60μg/m<sup>3</sup>之間。夏天所量測到的PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>濃度偏低的原因是當時戶外陣風相當大所導致。

由DustTrak所測得PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>濃度均較Dichot所量得濃度偏高，如圖4.1、4.2所示，除了10242006的數據外DustTrak/Dichot PM<sub>2.5</sub>的比值介於2~3之間，而 DustTrak/Dichot PM<sub>10</sub>的比值則介於1.5~2.5之間。

在10242006 DustTrak/Dichot比值遠高於其他採樣結果的原因為該廠已經24小時連續不斷地生產了7天(此種情形與其他採樣日期狀況不同)，以致冷卻槽中的鉛塊容易凝固在槽上使冷卻槽無法運行，此時工作人員必須手動停止機械運行，並且加以處理。為了改善這種狀況的發生頻率，該廠員工在操作機械時會不斷噴灑水以降低冷卻槽的溫度，導致工廠內部具有較高的相對溼度，進而影響了DustTrak對微粒濃度的量測。

A廠 PM<sub>2.5</sub>與PM<sub>10</sub>的關係如圖4.3所示，由結果可獲知A廠中粗微粒與細微粒的比例約為4：6，兩者間的關係式為： $PM_{2.5} = 0.6 \times PM_{10} + 14.63$ 。

因為10242006的採樣環境條件異於其他日期的採樣，因此將10242006的數據排除後，Dichot與DustTrak兩者所量測PM<sub>10</sub>重量濃度間的關係如圖4.4，其關係式為 $DustTrak = 2.09 \times Dichot - 6.47$ ，相關係數0.93。而Dichot與DustTrak兩者所量測PM<sub>2.5</sub>



重量濃度間的關係如圖4.5，其關係式為  $DustTrak = 2.56 \times Dichot - 12.01$ ，相關係數為0.92。

DustTrak在A廠所量測PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>的即時濃度如圖4.6(a)至(c)與圖4.7(a)至(c)，並且將PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>即時的濃度變化以及在採樣時所記錄的員工工作紀錄表、工廠作業事件紀錄進行比較。發現在該廠導致濃度大幅度上升的主要原因有兩個，一個是鉛粉桶裝快要裝滿時，員工會利用鐵槌輕敲旋轉閘出料口與鉛粉桶，目的是讓桶子內的鉛粉能均勻填充，使超出桶面的鉛粉較為平坦，如圖4.8(a)-(b)，此時DustTrak所偵測到的PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>粉塵濃度會急速上升，瞬間最高濃度可達5 ~ 7 mg/ m<sup>3</sup>，這種事件的發生頻率固定，約每10~15分鐘會出現一次，一次約持續5~10分鐘(會隨著員工的工作習慣而改變)，導致一段高峰期的發生，而在這種事件發生後，員工更換新的鉛粉桶，此時因新的鉛粉桶內的鉛粉水平面較低，鉛粉不易逸散，因此會有一段時間的低粉塵濃度，直到水平面逐漸上升，在下一次更換鉛粉桶時濃度再次達到高峰。而另外一個原因則是當機械運作一段時間後，鉛塊容易因凝固而黏滯在冷卻槽，為了防止鉛塊因溫度過高而黏滯在冷卻槽上，員工會利用噴霧器在冷卻槽四周噴出大量霧氣來幫助鉛塊快速降溫，如圖4.9(a)-(b)，此時DustTrak所偵測到的PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>粉塵濃度會急速上升，瞬間最高濃度可達2 ~ 3 mg/ m<sup>3</sup>，這種事件的發生頻率不固定，持續的時間通常也較短。

當機械操作一段時間後，可能會因為冷卻槽的鉛塊凝固在冷卻槽上，使冷卻槽阻塞無法繼續運作，此時工作人員需手動停機並加以清理，或鉛粉主機內的溫度過高，必須暫時停止運作讓主機內的溫度降低，再繼續生產，如圖4.10(a)-(b)。此類狀況會不定期發生而導致作業場所粉塵濃度降低。08242006及10172006 PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>的濃度變化頗為規律，高濃度與低濃度伴隨著固定的事件有規律的起伏，而10242006當天的現場環境由於灑水次數頻繁，導致廠內相對濕度遠高於08242006與10172006，直接的影響了DustTrak所量測到的粉塵重量濃度，不但導致即時濃度變化圖中濃度的變化劇烈，也使10242006 DustTrak高估粉塵重量濃度的情況遠遠較08242006與10172006嚴重。

分別在六個採樣點作SMPS現場移動採樣，每個採樣點採樣兩次。圖4.11為現場採樣作業照片，所得100nm（移動等量直徑）以下奈米微粒數目濃度（#/cm<sup>3</sup>）如表4.2所示。

將所得數目濃度（#/cm<sup>3</sup>）以Surfer軟體進行等濃度曲線計算，所得結果如圖4.12(a)-(b)。圖4.12(a)為A廠作業場所06092006採樣的奈米微粒數目濃度分布圖、圖4.12(b)為08242006採樣的奈米微粒數目濃度分布圖，由圖4.12(a)-(b)可看出在旋轉閘出料處附近濃度最高，然後向四面八方逸散。該場所作業型態穩定，因此兩次的採樣結果很接近。08242006同時在接近逸散源附近實施定點長時間採樣，100nm以下奈米微粒數目濃度採樣的結果如圖4.13所示，該定點採樣結果顯示數目濃度會隨現場作業狀況而變動，濃度約介於 $7.76 \times 10^3$  #/cm<sup>3</sup>至 $4.65 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>，平均濃度約為 $1.78 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>。由濃度分布圖可知除了逸散源附近外，廠內奈米微粒濃度並不高，接近戶外所測得濃度，這可能是該場所為半開放式空間，外界空氣容易吹入室內，造成空氣對流現象較顯著。

### B廠工作場所PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>與奈米微粒的濃度特徵

B廠作業場所製程佈置圖如圖3.2所示，於固定點採樣所獲得DustTrak與Dichot PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>微粒的重量濃度如表4.3所示。

B廠在生產不同的產品時，會於中週波溶解爐投入不同比例的原料，在將鐵水澆鑄成型的過程中也會因產品的需求而添加不同的添加物，因此在鑄鐵廠所量測的微粒濃度無論是PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>都會隨現場生產條件不同而有顯著的變化。相較於A廠的單純，B廠無論在原料、添加物以及生產線上的變化都較大，為了解採樣數據與這些變化因素的相關性，在B廠採樣時該廠所使用的原料、添加物等資料如表4.4所示。

表4.4中材料A為銑鐵、B為鋼鐵、C為返材，添加物D為砂心(Core)、E為接種劑

(inoculant)、F為球化劑(nodulant)。比較表4.3與表4.4可以觀察出添加物對於粉塵性質與濃度的影響較原料組成的百分比來的大，對於PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>濃度影響最大的是球化劑，有添加球化劑時的粉塵濃度明顯較沒有添加球化劑時的粉塵濃度高。其次對於PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>濃度影響最大的是接種劑，比較沒有添加球化劑的數據，可以發現PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>的濃度會隨著接種劑的重量百分比升高而提升。

由表4.3可看出PM<sub>10</sub> DustTrak/ Dichot的比值介於0.5~2之間，PM<sub>2.5</sub> DustTrak/ Dichot的比值則介於1~1.8之間。Dichot與DustTrak量測的PM<sub>10</sub>重量濃度關係如圖4.14，兩者的關係式為  $DustTrak = 1.20 \times Dichot - 6.90$ ，相關係數為0.79。Dichot與DustTrak量測的PM<sub>2.5</sub>重量濃度關係如圖4.15，兩者的關係式為  $DustTrak = 1.66 \times Dichot - 35.16$ ，相關係數為0.96。與PM<sub>2.5</sub>的相關係數相比，PM<sub>10</sub>的相關係數遠低於PM<sub>2.5</sub>的相關係數，可見B廠中使用不同的添加物對於粗微粒的微粒性質影響大於細微粒。

為了進一步了解添加物對於粗微粒與細微粒的影響，以Dichot量測的PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>的重量濃度兩者的關係如圖4.16所示，PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>所得到的關係式為  $PM_{2.5} = 0.65 \times PM_{10} + 63.71$ ，相關係數為0.96，PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>相關係數相當的高，可見煉鐵廠中使用不同的添加物會影響粗微粒的散光性質，因此對於DustTrak量測粗微粒的結果產生較大的影響。

以 DustTrak 作定點即時濃度變化測量及在採樣時所記錄的員工工作紀錄、工廠發生事件狀況紀錄，可以發現促使粉塵濃度上升的主要原因有將原料投入中週波熔解爐、中週波熔解爐傾倒鐵水於鐵桶、鐵桶傾倒鐵水於澆鑄成型作業區、工作車經過、員工去除鐵水中的鐵渣、員工利用高壓空氣清理澆鑄成型區以及將鑄砂回收至混練區等步驟。為了確定各個事件對於粉塵濃度的影響，在各個事件發生時，利用 DustTrak 在距離事件發生處約 5 公尺處，對於不同事件所引起的粉塵濃度變化進行額外的紀錄，經由這些紀錄我們可以發現對於粉塵濃度提高的影響，將原料投入中週波熔解爐>員工去除鐵水中的鐵渣>中週波熔解爐傾倒鐵水於鐵桶>鐵桶傾倒鐵水於澆鑄成型作業區，其中將原

料投入中週波熔解爐、中週波熔解爐傾倒鐵水於鐵桶、鐵桶傾倒鐵水於澆鑄成型作業區等事件對於粉塵濃度的影響僅發生於開始的 5~10 秒，之後便緩緩下降，即使整個事件持續了 5~10 分鐘，也僅有開始的 5~10 秒對於粉塵濃度有明顯的影響。其他的事件會受到場地背景值的影響，像是工作車經過會受到地面粉塵量的影響、鑄砂回收至混練區會受到回收量的影響等。

正常的生產情況下粉塵濃度的起伏有著一定的規律，這是因為工廠平均每10~15分鐘進行一次澆鑄成型的作業，而一次澆鑄成型的作業伴隨著固定次數的鐵水運送，原料投入中週波熔解爐的間格時間也相當固定。像10122006所量測PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>（如圖4.17(a)-(b)）與10192006所量測PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>（如圖4.18(a)-(b)）的圖形波峰波谷的間格時間相當規律。

09072006採樣時，當天早上進行鑄模的同時也測試一條新的生產線，工作車的行走頻繁，以及新生產線使用前的清理，大幅度的影響了DustTrak所量測到微粒濃度的變化，直到中午過後，停止測試生產線，濃度變化才趨於穩定，如圖4.19(a)-(b)所示。在10262006採樣時，當天生產作業中多次出現機械故障，不得不交替使用兩條不同的生產線，為了彌補停機時的進度，曾經有兩條生產線同時運作的情況，時間大約是11：30至13：00，也曾經出現澆鑄成型作業區的澆鑄口阻塞，導致火星四處逸散，如圖4.20(a)-(b)所示。

亦分別在六個採樣點作SMPS現場採樣，每個採樣點採樣兩次。圖4.21為現場採樣作業照片，該作業場所接近中週波熔解爐區及澆鑄區室內溫度較高，本研究採用防護罩將SMPS包覆，同時以移動式冷氣機提供低溫空氣作為冷卻空氣，使防護罩內的CPC可以維持正常操作。

所得100nm以下奈米微粒數目濃度（#/cm<sup>3</sup>）如表4.5所示，由Surfer軟體所推估的數目濃度等曲線圖如圖4.22(a)-(d)。圖4.22(a)-(c)分別為09072006、10192006、10262006進

行現場採樣所得的100nm以下奈米微粒數目濃度分布圖，在B廠由於一號至四號中週波熔解爐輪流開爐傾倒鐵水，因此在靠近中週波熔解爐爐區附近採樣點#2、#3與#4奈米微粒數目濃度偏高。另外靠近採樣點#5附近由於空氣較不流通，容易累積微粒導致濃度偏高。採樣點#6濃度較低的原因為該處接近戶外通道，通風良好。該廠作業場所因每次採樣時的作業型態不盡相同，09072006採樣時由第一條生產線進行生產作業，10192006採樣時由第二條生產線進行生產作業，而10262006採樣時有接近四分之三時間由第一條生產線進行生產作業，另約四分之一時間則由第二條生產線進行生產作業。除此之外，生產原料與添加的球化劑與接種劑的組成亦不相同。因此所測得的100nm以下奈米微粒數目濃度分布圖變化較大。

09072006、10192006及10262006採樣現場100nm以下奈米微粒數目濃度在固定點長時間採樣的結果分別如圖4.23(a)-(c)所示，奈米微粒主要來源為金屬高溫熔融蒸氣所凝結，數目濃度會隨現場作業狀況而變動，濃度變動範圍極高。以09072006採樣而言，如圖4.23(a)所示100nm以下奈米微粒數目濃度約介於 $2.31 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 至 $2.96 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，平均濃度約為 $9.21 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 。瞬間濃度升高原因主要來自於高溫熔融鐵水自中週波熔解爐傾倒至吊桶的作業及後續將吊桶內的鐵水傾倒自澆鑄區貯存桶作業時所逸散的金屬煙塵，如圖4.24(a)-(b)，該作業場所奈米微粒數目平均濃度約為戶外奈米微粒數目濃度的6.8倍，最高可達21.8倍。同時，由所獲得的數據可觀察出作業場所經過一段時間生產後，室內奈米微粒數目濃度會隨著作業時間的增加而有升高的趨勢，此結果顯示奈米微粒除了聚集成較大微粒外，亦會累積滯留於空氣中。

## 4.2 奈米微粒暴露濃度的估算

### 4.2.1 工作場所奈米微粒的密度分析

TSI SMPS所量測的數目濃度分布與MSP naon MOUDI所測得質量濃度分布作比較

時，需要將TSI SMPS的移動等量直徑與MSP naon MOUDI的空氣動力直徑做轉換。移動等量直徑與空氣動力直徑兩者粒徑的轉換以及將數目濃度換算成質量濃度，均需要知道微粒的有效密度。

根據 Park 等（2003）對引擎所排放微粒作量測，發現微粒的有效密度會因為微小微粒間的聚集（aggregate）改變，當微粒不規則的聚集時微粒與微粒間會產生空隙而導致有效密度變小。所聚集而成的顆粒越大，則有效密度越小，亦即不同粒徑大小的微粒具有不同的動力形狀因子導致有效密度不同。

由於作業場所奈米微粒的有效密度無法直接獲得，因此本研究在針對TSI SMPS所量測的數目濃度分布與MSP naon MOUDI所測得質量濃度分布作比較時，需先假設微粒的平均有效密度，然後將TSI SMPS所量測的數目濃度轉換成質量濃度，同時將MSP naon MOUDI的空氣動力直徑以所假設的平均有效密度轉換成移動等量直徑，兩者的關係如前章所述。所得結果再將TSI SMPS推估的質量濃度分布與MSP naon MOUDI所測得質量濃度分布作比較找出適當的平均有效密度。

09072006、10192006與10262006於B作業場所分別以TSI SMPS與MSP naon MOUDI作長時間定點採樣，TSI SMPS所測得作業場所奈米微粒平均數目濃度粒徑分布如圖4.25(a)-(c)，由於採樣時作業場所作業型態不盡相同，因此導致此三次所測奈米微粒平均數目濃度粒徑分布有所差異。以09072006、10192006採樣所得數據為例，當中週波熔解爐開爐時奈米微粒濃度會上昇，其濃度約為平均濃度的1.5倍及3倍，如圖4.26(a)-(b)。

而10192006與10262006採樣現場以MSP naon MOUDI所得質量濃度粒徑分布如圖4.27(a)-(b)所示，10192006採樣時由第二條生產線進行生產作業，發現當天作業所添加的原料與球化劑、接種劑會產生較高濃度的粒狀物。

本研究嘗試以平均有效密度 $1.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $2.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $3.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $4.0 \text{ g/cm}^3$ 作比較，發現B作業場所奈米微粒的平均有效密度為 $3.0 \text{ g/cm}^3$ 時，TSI SMPS所推估的質量濃度粒徑

分布與MSP naon MOUDI所測得質量濃度粒徑分布有較佳的吻合，如圖4.28(a)-(b)。MSP naon MOUDI所測得質量濃度粒徑分布在移動等量直徑小於40 nm時有較高的質量濃度，其可能原因來自於微粒在衝擊板上過度負載後引起固體微粒在慣性衝擊器內彈跳而導致質量濃度分布的偏差，因此值得進一步探討如何精確進行奈米微粒質量濃度採樣分析。

為了了解B廠所產生的奈米微粒與PM<sub>10</sub>的相關性，利用比較MOUDI與SMPS所推估的有效密度3.0 g/cm<sup>3</sup>計算出100nm以下奈米微粒的重量濃度，Dichot所量測的PM<sub>10</sub>重量濃度與所推估PM<sub>0.1</sub>重量濃度的關係如圖4.29所示，所得到的關係式為 $PM_{0.1} = 0.03 \times PM_{10} + 4.88$ ，相關係數為0.87，可見B廠中PM<sub>10</sub>與100nm以下的奈米微粒重量濃度具有一定的正關係性。

#### 4.2.2 工作場所奈米微粒個人的暴露濃度推估

以B作業場所為例，將現場所測得100nm以下奈米微粒數目濃度以平均有效密度3.0 g/cm<sup>3</sup>轉換成奈米微粒質量濃度，09072006、10192006及10262006 B作業場所奈米微粒質量濃度等曲線圖如圖4.30(a)-(c)，由所推估的質量濃度分布亦顯示該作業場所奈米微粒質量濃度會隨現場作業狀況而有明顯變動，一天內於不同時段亦有不同的質量濃度分布。以10192006及10262006採樣比較，由圖4.27(a)-(b) MOUDI與nano MOUDI的質量濃度顯示10192006採樣時作業場所的微粒質量較10262006採樣時高，但是10192006採樣現場奈米微粒質量濃度分布介於6.5 g/m<sup>3</sup>至19 g/m<sup>3</sup>之間（圖4.23(b)），而10262006採樣現場奈米微粒質量濃度則分布介於4.0 g/m<sup>3</sup>至27 g/m<sup>3</sup>之間（圖4.23(c)）。此現象顯示移動點採樣結果會受到採樣當時作業場所作業型態的瞬間變化而影響，如中週波熔解爐開爐。未來值得進一步探討採取多點定點採樣取代移動點採樣，觀察微粒數目或質量濃度變化與時間的關係，俾利更準確推估作業場所奈米微粒數目或質量濃度在任何一个時

間點上的分布狀況。

本研究在B廠選定天車吊桶作業人員作為奈米微粒個人的暴露評估，原因包含該作業為移動性且將高溫熔融鐵水自中週波熔解爐傾倒至吊桶的作業及後續將吊桶內的熔融鐵水傾倒至澆鑄區貯存桶作業屬於高暴露作業。推估天車吊桶作業人員的奈米微粒數目濃度暴露量與質量濃度暴露量，計算結果顯示天車吊桶作業人員於中午12點50分至下午4點00分之間的奈米微粒數目濃度暴露量與質量濃度暴露量分別為 $8.19 \times 10^6 \cdot \text{min}/\text{cm}^3$ 、 $1.80 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{min}/\text{m}^3$ ，奈米微粒平均暴露數目濃度與平均暴露質量濃度分別為 $5.17 \times 10^4 / \text{cm}^3$ 、 $11.39 \text{ } \mu\text{g} / \text{m}^3$ 。

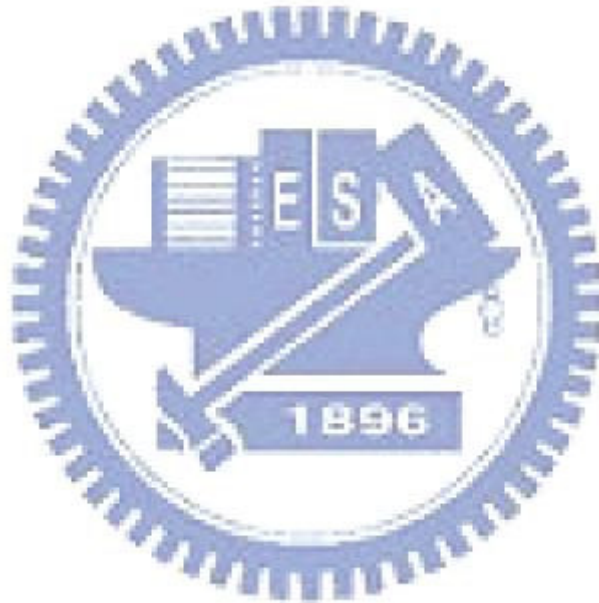




表 4.1 A 廠作業場所 PM<sub>10</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 微粒的重量濃度

Sampled Date	PM <sub>2.5</sub>			PM <sub>10</sub>		
	Dichot (µg/m <sup>3</sup> )	DustTrak (µg/m <sup>3</sup> )	Ratio <sup>a</sup>	Dichot (µg/m <sup>3</sup> )	DustTrak (µg/m <sup>3</sup> )	Ratio
0609	31.67	70.00	2.21	55.09	89.00	1.62
0824	76.00	171.00	2.25	103.88	244.00	2.35
1017	108.06	291.80	2.70	169.78	352.04	2.07
1017	114.00	293.00	2.57	172.17	359.00	2.09
1017	116.61	243.00	2.08	167.15	301.00	1.80
1017	108.83	278.00	2.55	158.89	348.00	2.19
1024	125.70	721.00	5.74	180.00	824.00	4.58
1024	128.90	640.00	4.97	178.00	779.00	4.38
1024	136.60	669.00	4.90	211.90	821.00	3.87
1024	128.00	678.00	5.30	181.90	817.00	4.49

註a：Ratio代表的是同樣時間內DustTrak與Dichot量測的重量濃度比值（DustTrak/Dichot）。

表 4.2 A 廠 SMPS 採樣數據

Location label	Number concentration, #/cm <sup>3</sup>	
	0609	0824
#1	1.32E+04	1.79E+04
#2	3.88E+03	7.39E+03
#3	3.28E+03	9.67E+03
#4	6.61E+03	7.89E+03
#5	4.36E+03	8.29E+03
#6	5.81E+03	6.66E+03
Background	5.57E+03	4.93E+03

d<sub>me</sub><100 nm

表 4.3 B 廠作業場所 PM<sub>10</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 微粒的重量濃度

Sampled Date	PM <sub>2.5</sub>			PM <sub>10</sub>		
	Dichot (µg/m <sup>3</sup> )	DustTrak (µg/m <sup>3</sup> )	Ratio	Dichot (µg/m <sup>3</sup> )	DustTrak (µg/m <sup>3</sup> )	Ratio
0907	234.00	270.00	1.15	417.00	400.00	0.96
1012	100.00	104.44	1.04	211.20	430.71	2.04
1012	106.00	138.44	1.31	297.70	494.50	1.66
1012	111.00	134.22	1.21	281.20	412.32	1.47
1012	109.00	134.50	1.23	297.84	429.36	1.44
1019	188.47	320.00	1.70	370.10	444.00	1.20
1019	403.75	733.00	1.82	649.00	949.00	1.46
1019	306.67	476.00	1.55	611.44	652.00	1.07
1019	387.37	547.00	1.41	734.59	762.00	1.04
1026	38.50	56.00	1.45	207.00	104.00	0.50
1026	60.50	87.00	1.44	164.30	131.00	0.80
1026	36.90	52.00	1.41	161.50	102.00	0.63
1026	91.80	105.00	1.14	229.50	163.00	0.71

註 a：Ratio 代表的是同樣時間內 DustTrak 與 Dichot 量測的重量濃度比值 (DustTrak/Dichot)。

表 4.4 B 廠所使用的原料、添加物資料

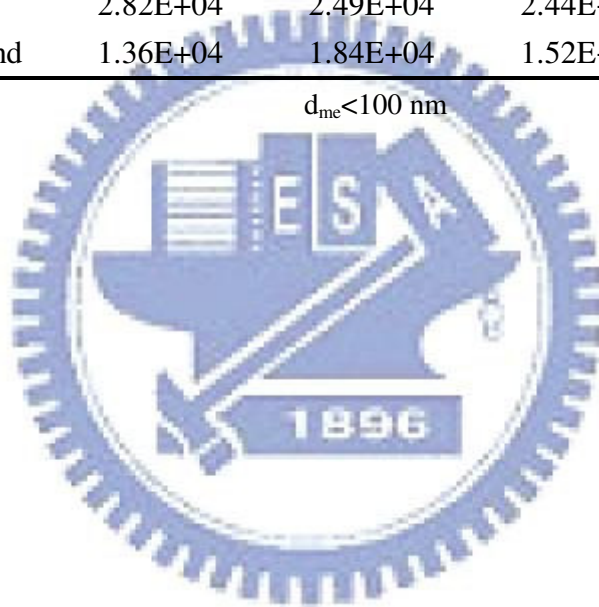
Date	Mass of Production (kg/day)	Raw Material (%) <sup>a</sup>			Additive (%) <sup>a</sup>		
		A	B	C	D	E	F
907	19375.88	8.88	22.04	115.79	16.38	0.65	0
1012	26061.14	37.5	8.34	110.88	24.4	0.42	0
1019	15978.6	45.2	16.01	122.38	3.02	0.54	1.99
1026	40608	64.2	6.34	57.11	0	0.4	0

註 a：表中的 (%) 指重量百分比。

表4.5 B廠SMPS採樣數據

Location label	Number concentration, #/cm <sup>3</sup>		
	0907	1019	1026
#1	4.18E+04	3.25E+04	7.37E+04
#2	4.17E+04	8.83E+04	1.31E+05
#3	4.31E+04	6.49E+04	3.15E+05
#4	3.02E+04	8.73E+04	1.36E+05
#5	4.64E+04	5.64E+04	1.04E+05
#6	2.82E+04	2.49E+04	2.44E+04
Background	1.36E+04	1.84E+04	1.52E+04

$d_{me} < 100 \text{ nm}$



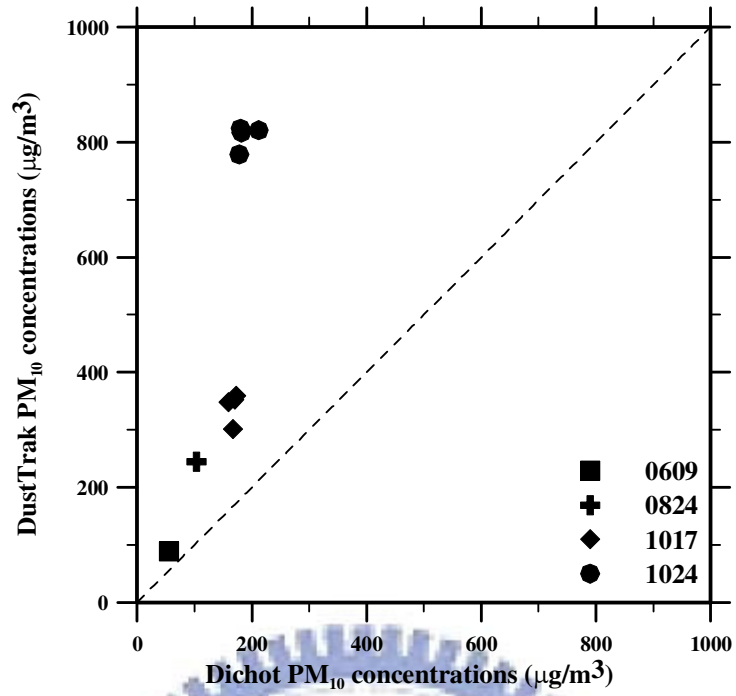


圖4.1 A廠 DustTrak與Dichot所量測PM<sub>10</sub>重量濃度的關係

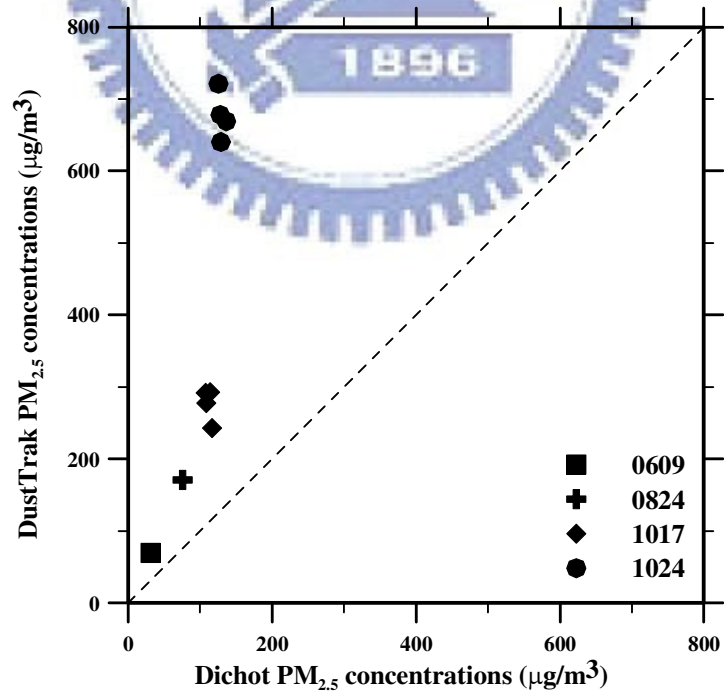


圖4.2 A廠 DustTrak與Dichot所量測PM<sub>2.5</sub>重量濃度的關係

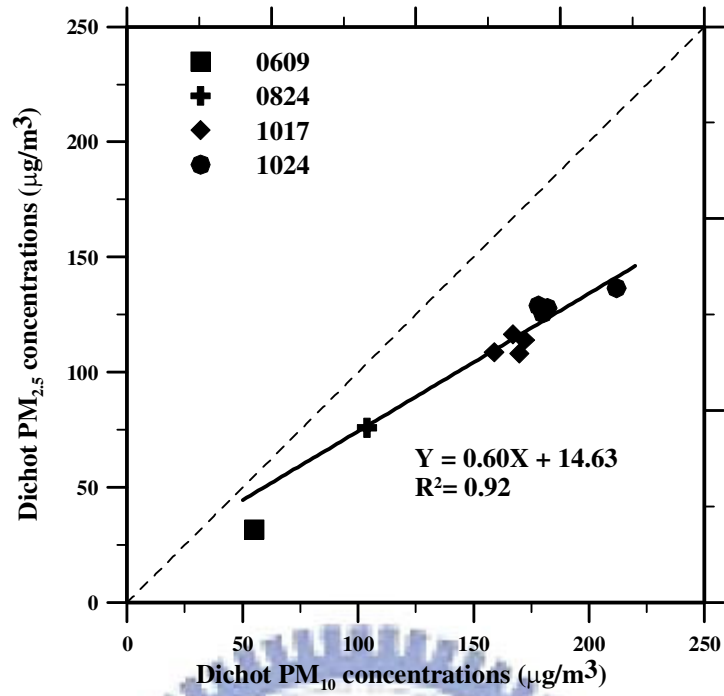


圖4.3 A廠Dichot所量測PM<sub>2.5</sub>與PM<sub>10</sub>重量濃度的關係

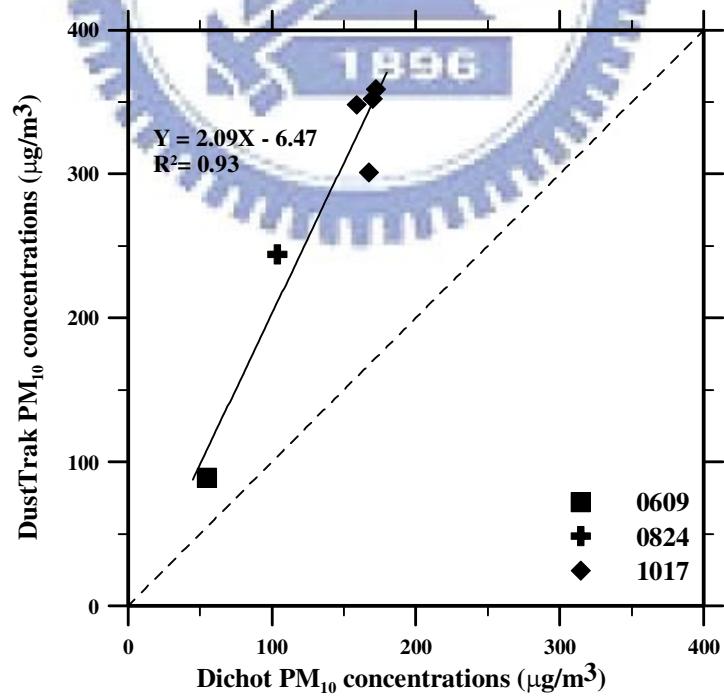


圖4.4 A廠DustTrak與Dichot量測PM<sub>10</sub>重量濃度的關係

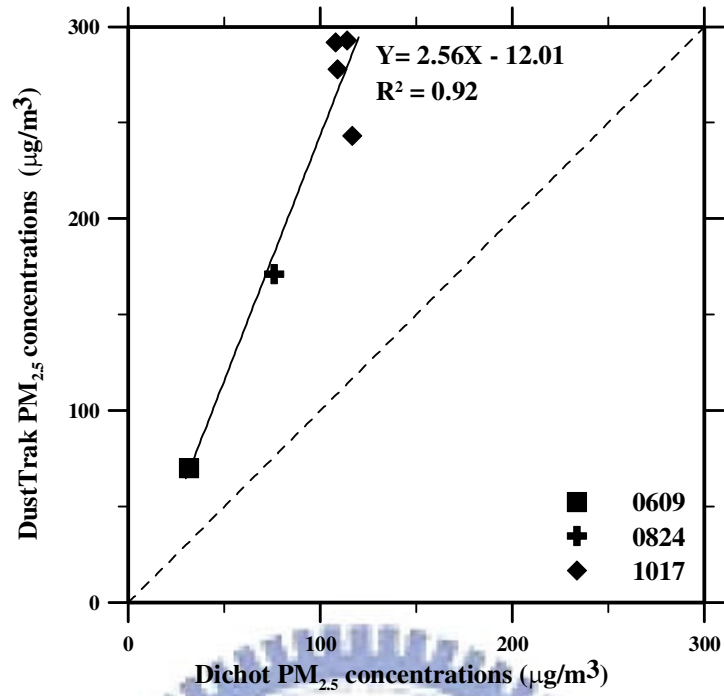


圖4.5 A廠DustTrak與Dichot量測PM<sub>2.5</sub>重量濃度的關係

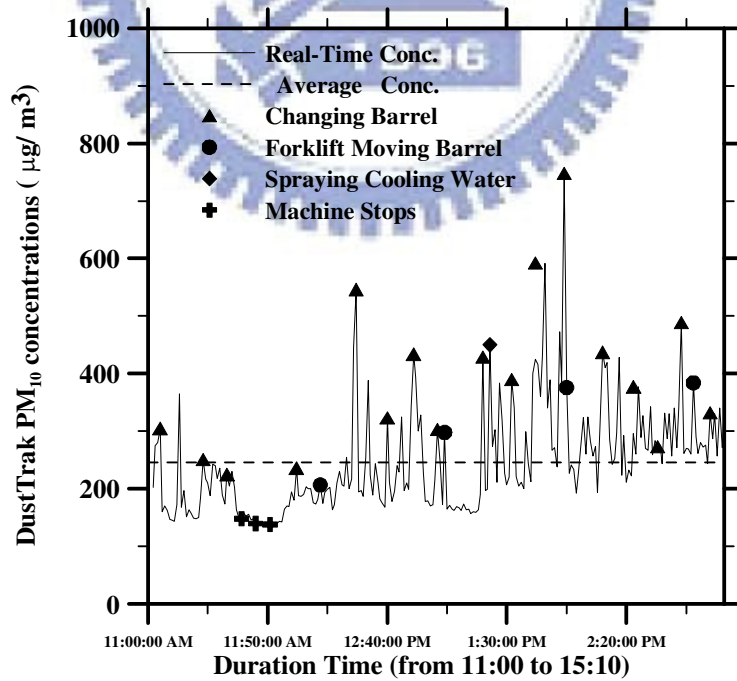


圖4.6(a) 08242006 DustTrak PM<sub>10</sub>濃度變化

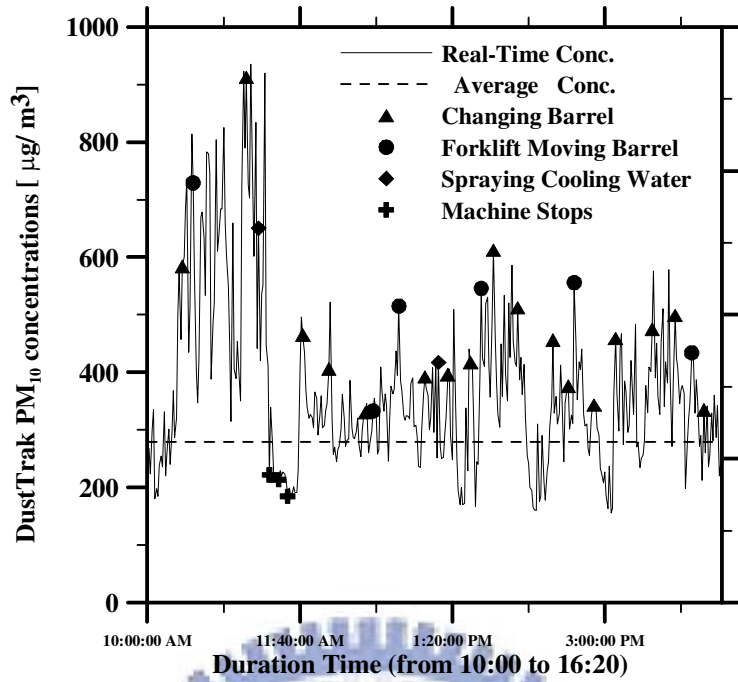


圖4.6(b) 10172006 DustTrak PM<sub>10</sub>濃度變化

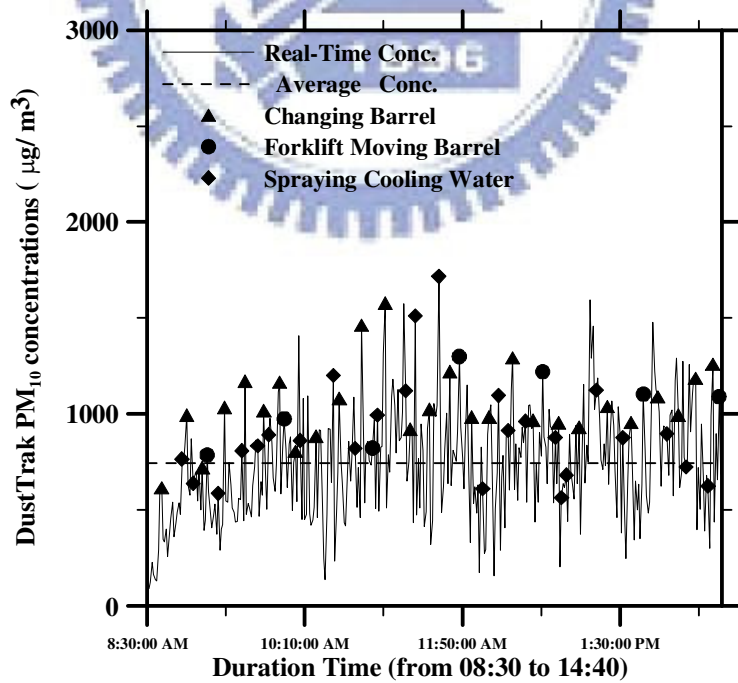


圖4.6(c) 10242006 DustTrak PM<sub>10</sub>濃度變化

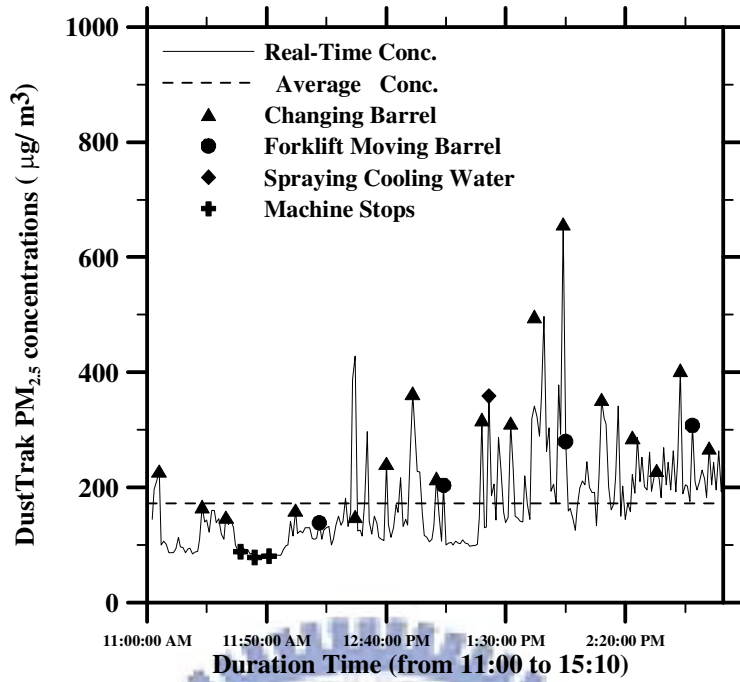


圖4.7(a) 08242006 DustTrak PM<sub>2.5</sub>濃度變化

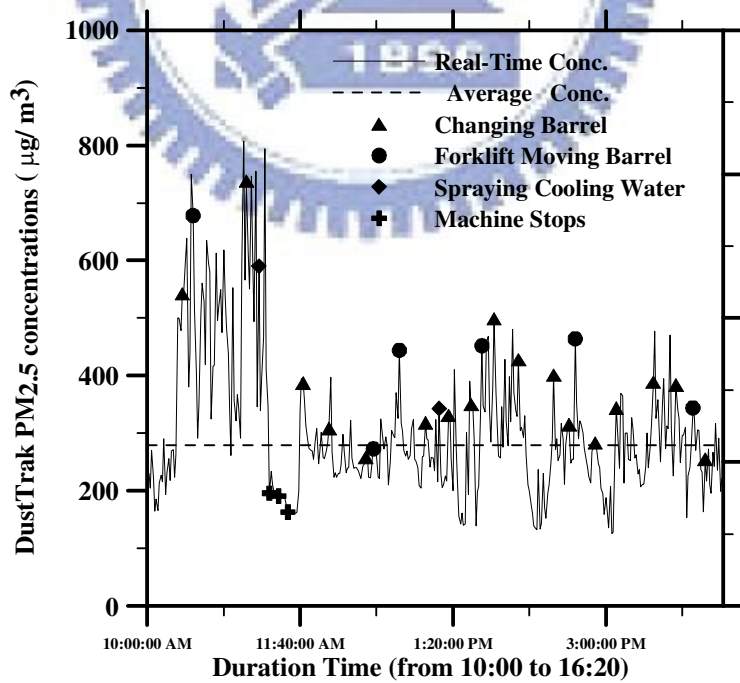


圖4.7 (b) 10172006 DustTrak PM<sub>2.5</sub>濃度變化



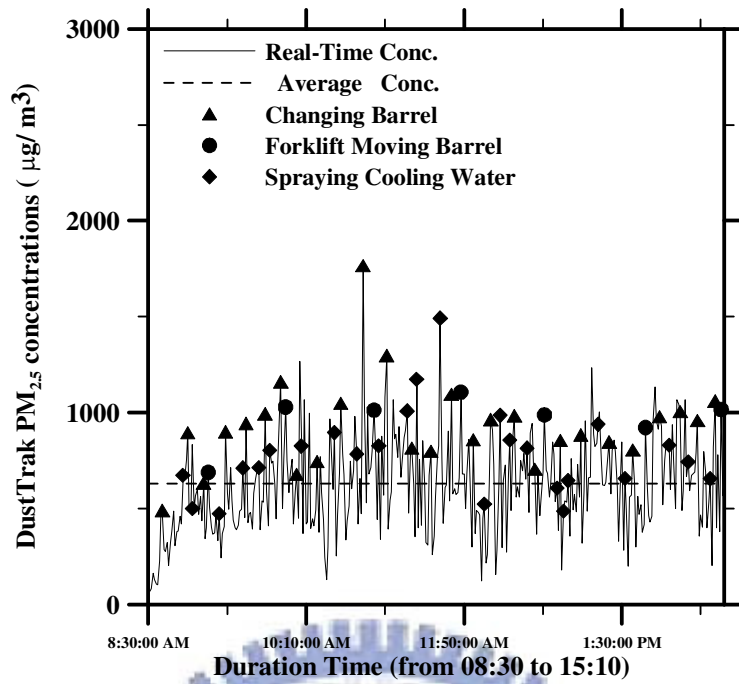


圖4.7 (c) 10242006 DustTrak PM<sub>2.5</sub>濃度變化



圖4.8 (a) 工作人員以鐵鎚敲擊旋轉閥出料口與鉛粉桶



圖4.8 (b) 更換鉛粉桶前鉛粉滿桶狀況



圖4.9(a) 鉛粉塊通過熔鉛爐後經冷卻槽運送至鉛棒切斷機



圖4.9 (b) 噴灑水氣後水氣與高熱的鉛粉塊接觸所產生的蒸氣



圖4.10 (a) 鉛粉主機內的溫度過高時會自動停止操作



圖4.10 (b) 鉛粉主機內的溫度下降後再恢復正常作業



圖4.11 A廠SMPS現場採樣作業

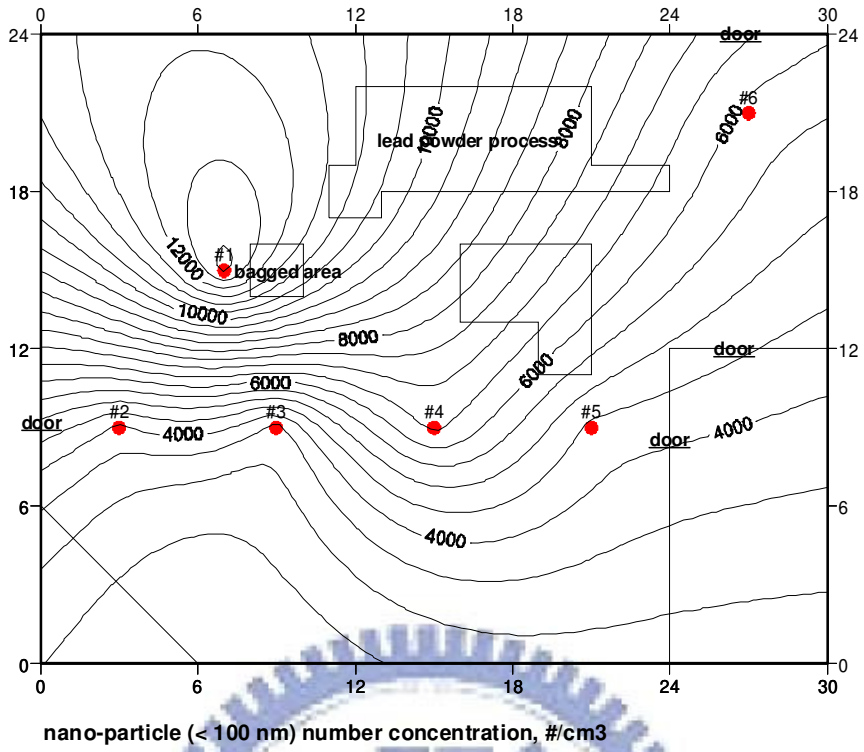


圖4.12 (a) A廠06092006奈米微粒數目濃度分布

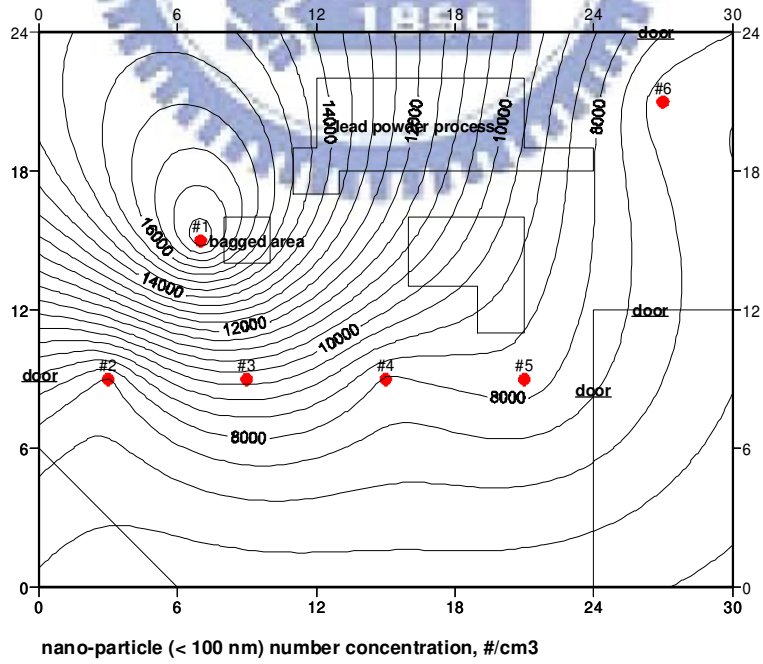


圖4.12 (b) A廠08242006奈米微粒數目濃度分布

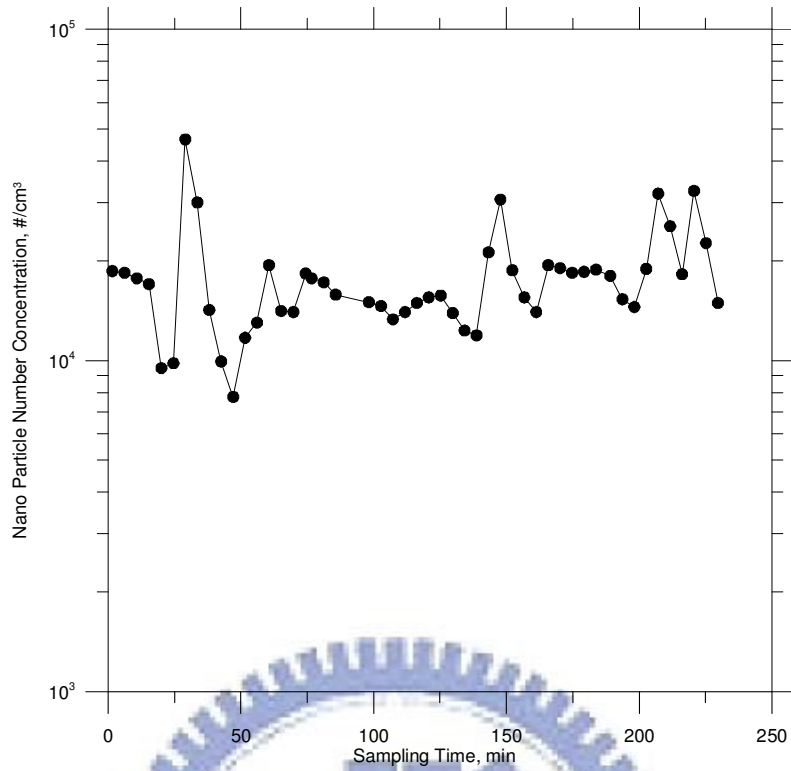


圖4.13 A廠100nm以下奈米微粒數目濃度定點長時間採樣濃度變化

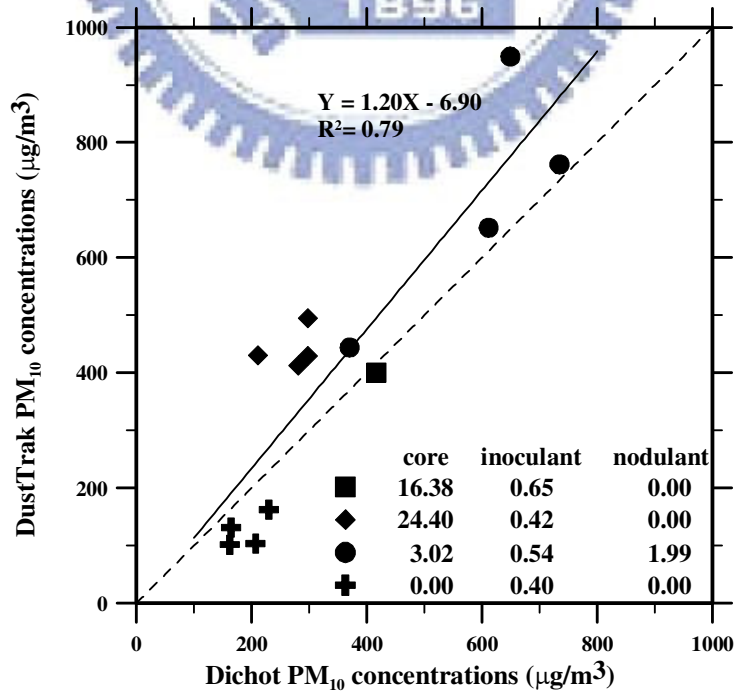


圖4.14 B廠DustTrak與Dichot PM<sub>10</sub>重量濃度關係

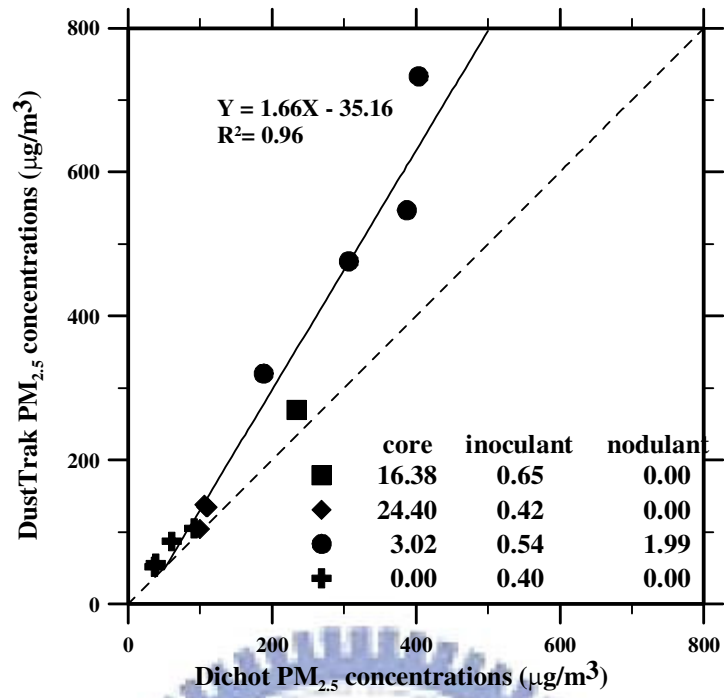


圖4.15 B廠DustTrak與Dichot PM<sub>2.5</sub>重量濃度關係

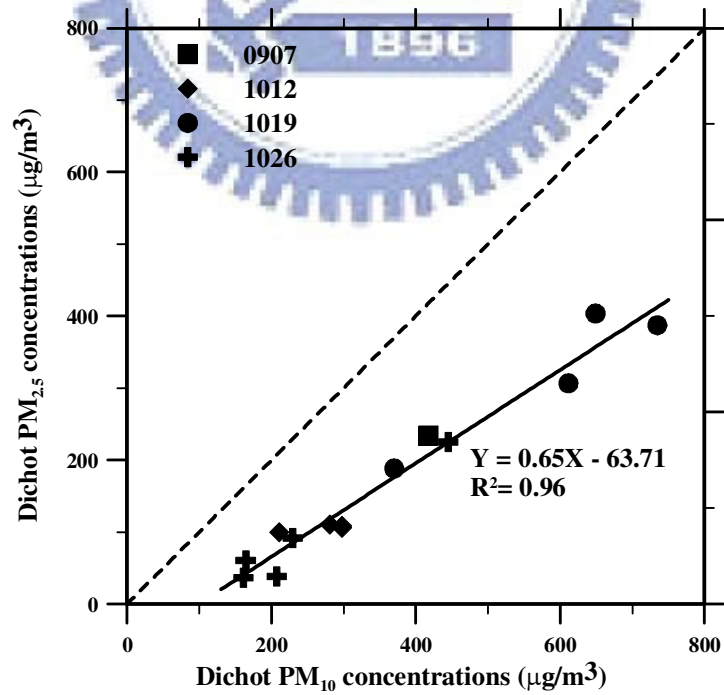


圖4.16 B廠 Dichot所量測PM<sub>2.5</sub>與PM<sub>10</sub>重量濃度的關係

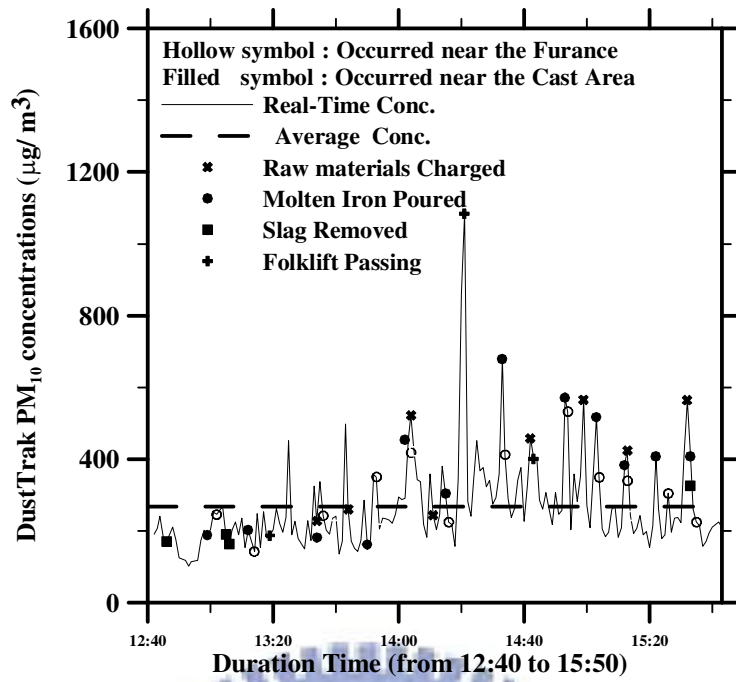


圖 4.17(a) 10122006 DustTrak PM<sub>10</sub> 濃度變化

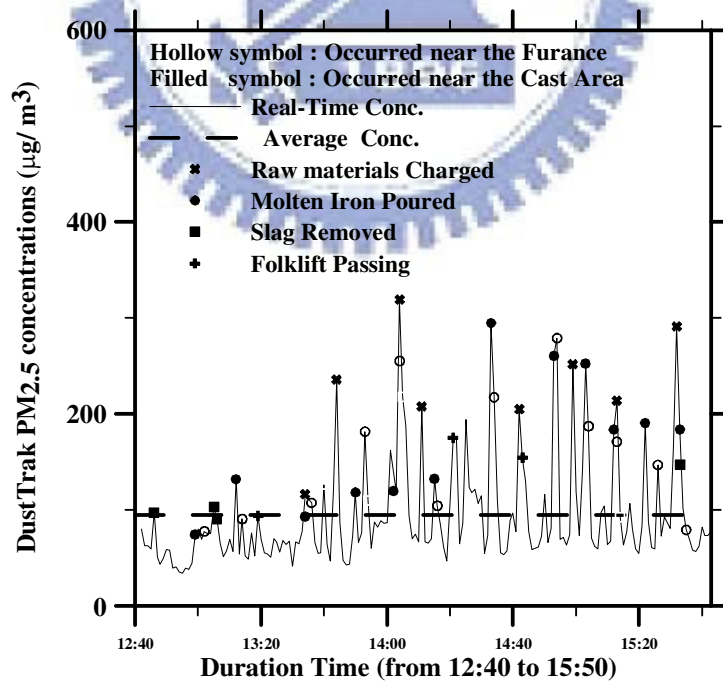


圖 4.17(b) 10122006 DustTrak PM<sub>2.5</sub>濃度變化



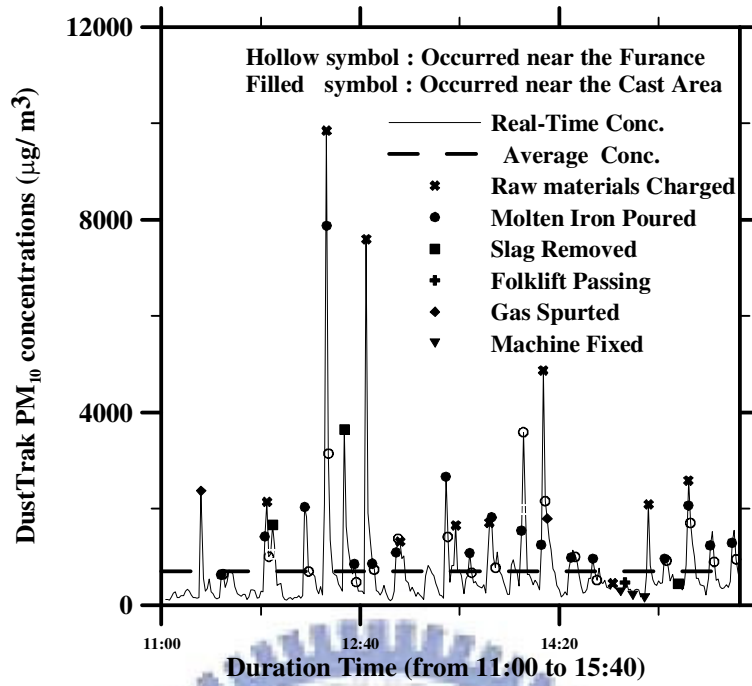


圖 4.18(a) 10192006 DustTrak PM<sub>10</sub> 濃度變化

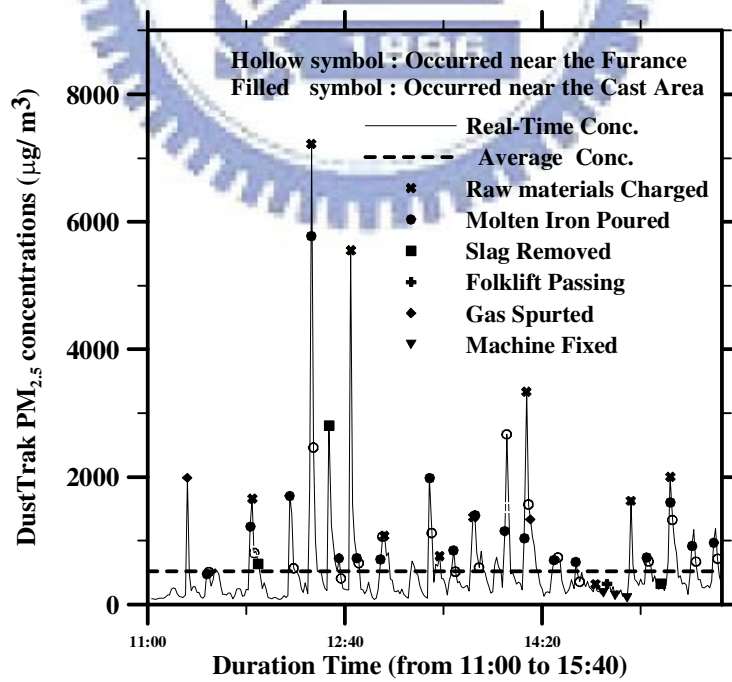


圖 4.18(b) 10192006 DustTrak PM<sub>2.5</sub>濃度變化

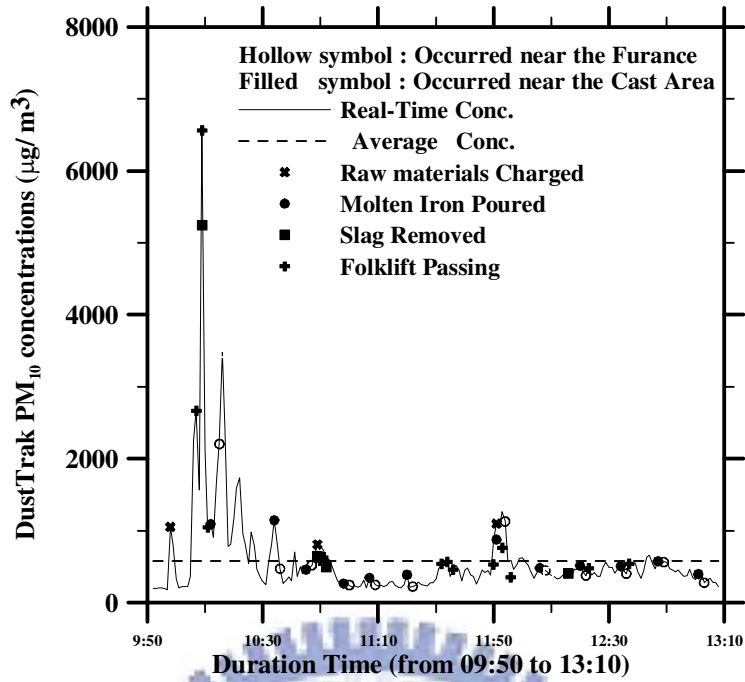


圖 4.19(a) 09072006 DustTrak PM<sub>10</sub>濃度變化

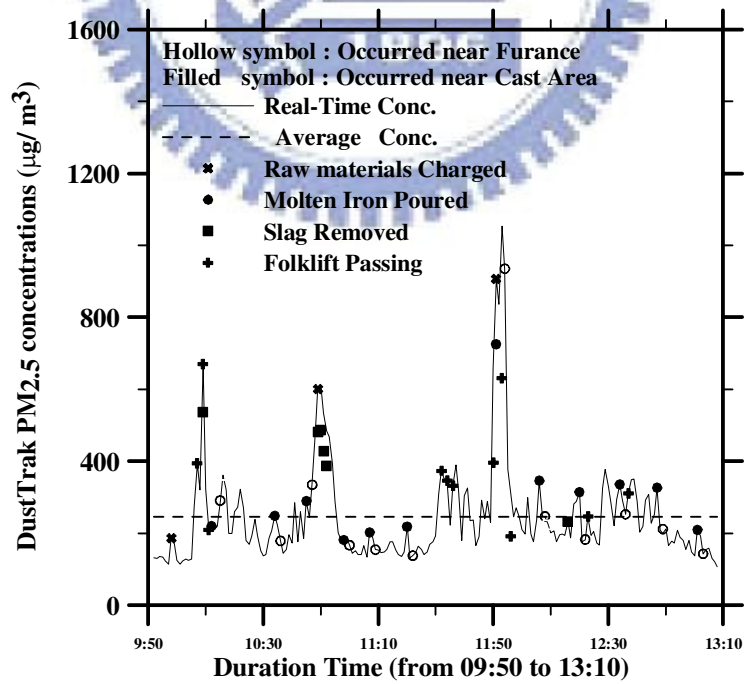


圖 4.19(b) 09072006 DustTrak PM<sub>2.5</sub>濃度變化

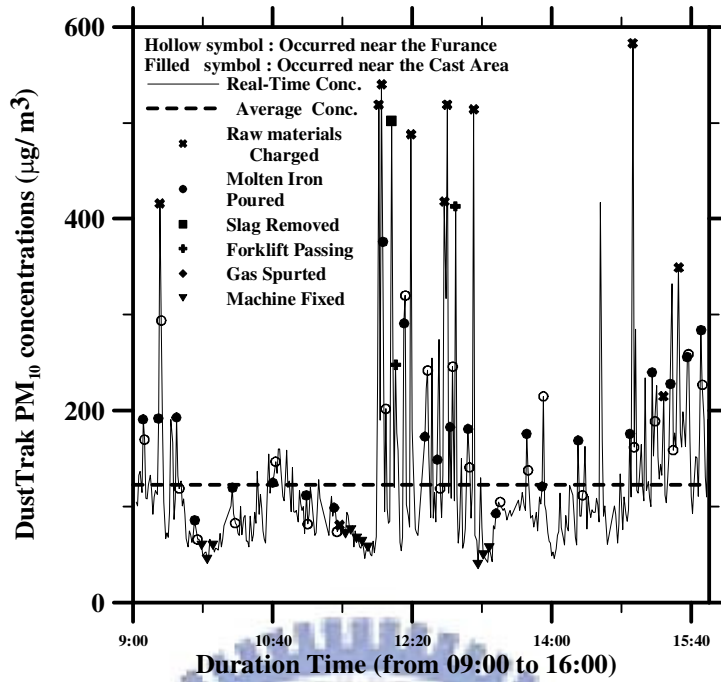


圖 4.20(a) 10262006 DustTrak PM<sub>10</sub> 濃度變化

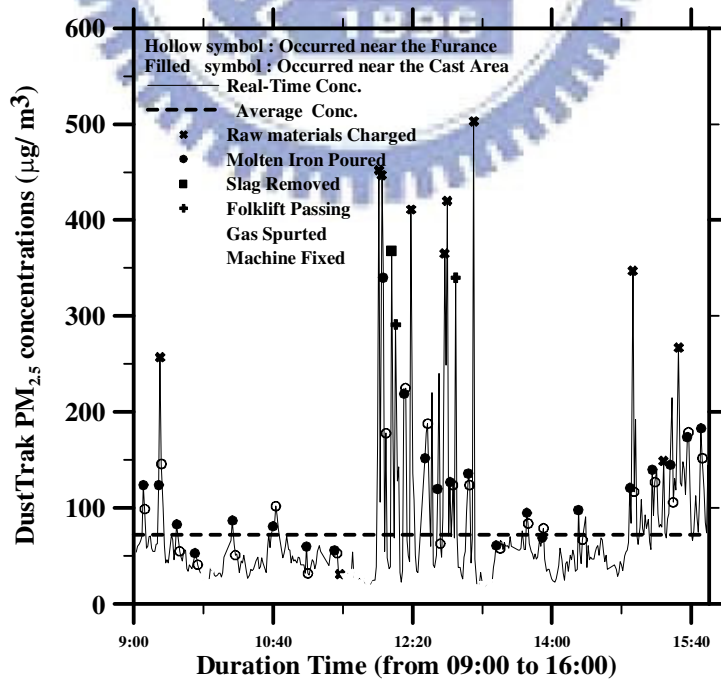


圖 4.20(b) 10262006 DustTrak PM<sub>2.5</sub>濃度變化



圖4.21 B廠現場採樣作業

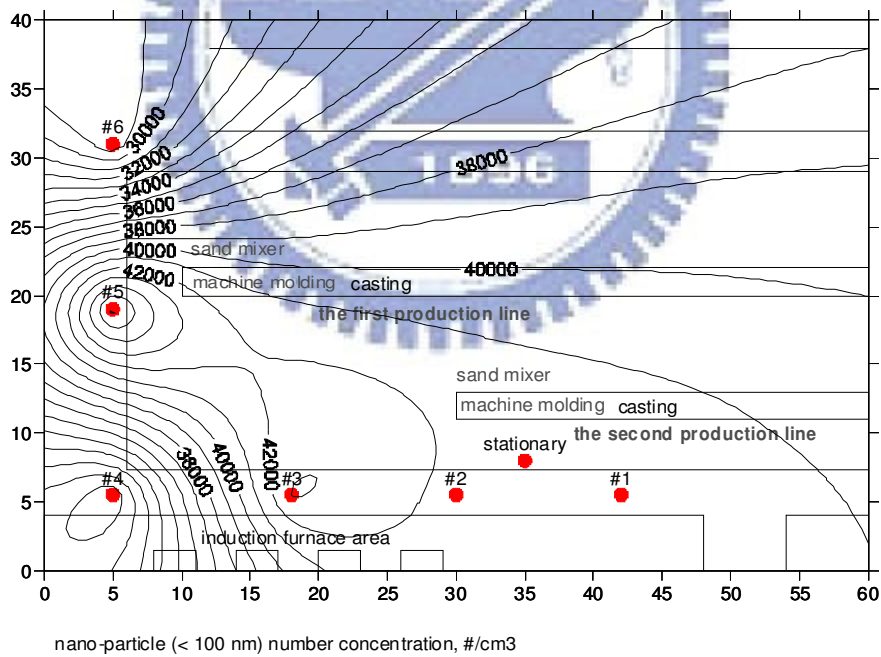


圖4.22 (a) B廠09072006奈米微粒數目濃度分布

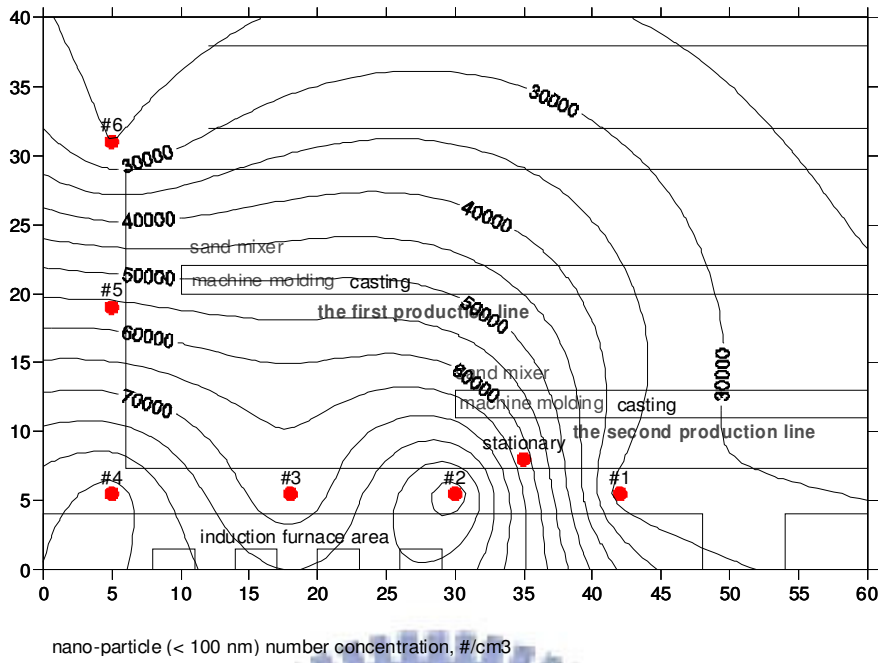


圖4.22 (b) B廠10192006奈米微粒數目濃度分布

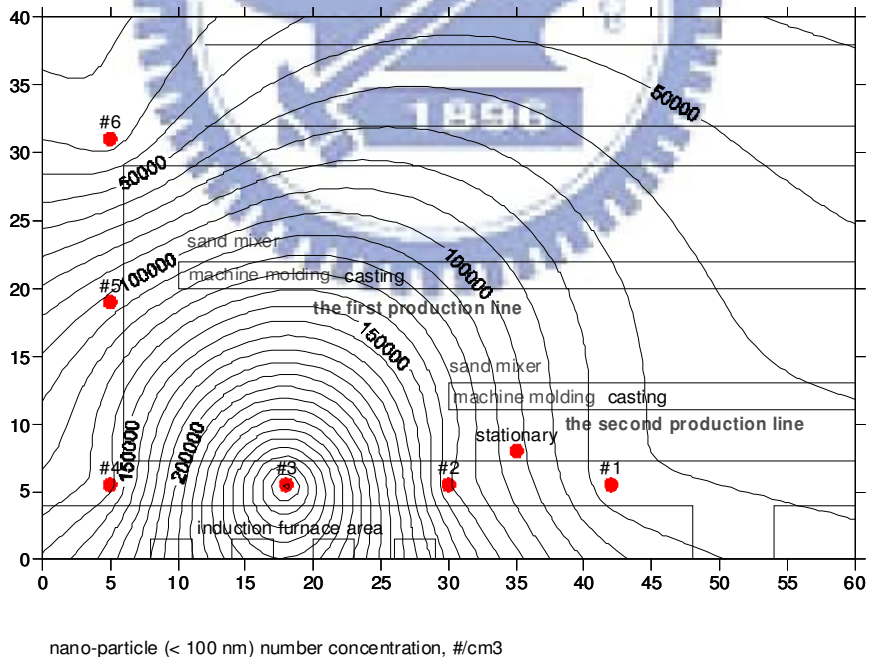


圖4.22 (c) B廠10262006奈米微粒數目濃度分布

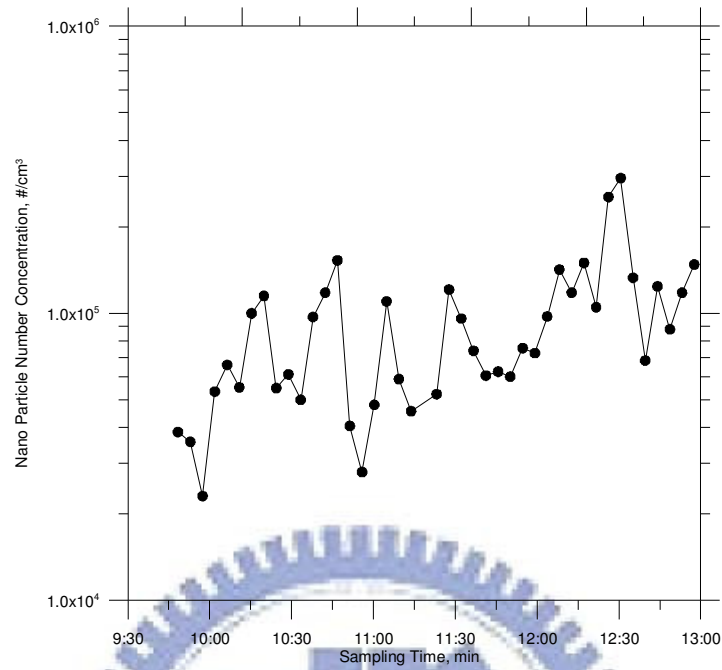


圖4.23 (a) B廠09072006 100nm以下奈米微粒數目濃度定點長時間採樣濃度變化

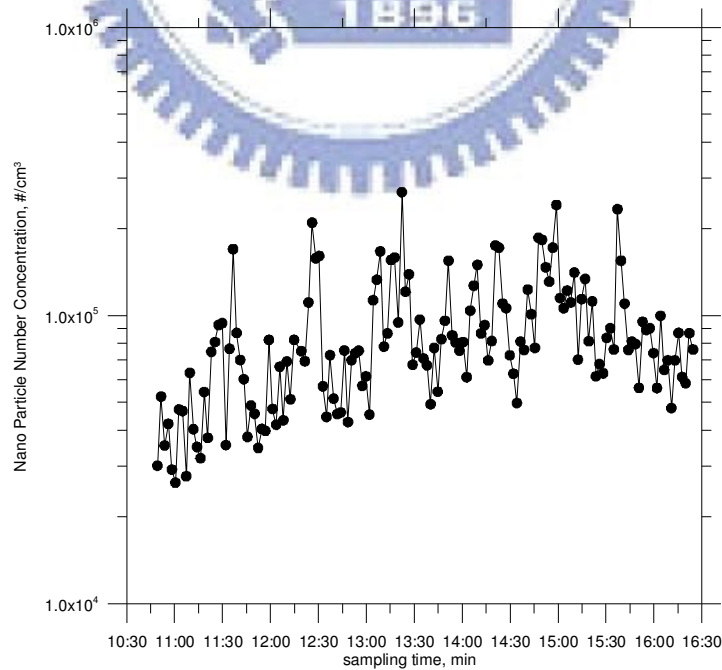


圖4.23 (b) B廠10192006 100nm以下奈米微粒數目濃度定點長時間採樣濃度變化

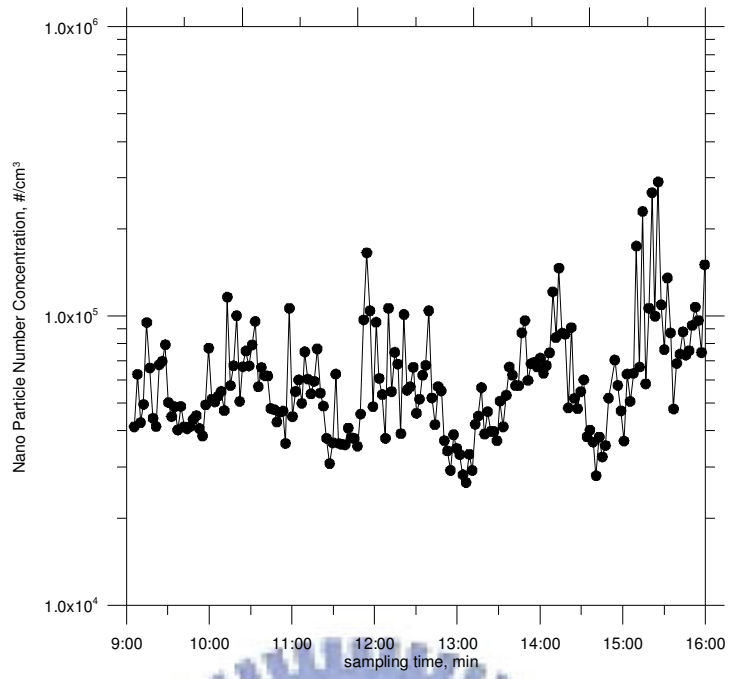


圖4.23 (c) B廠10262006 100nm以下奈米微粒數目濃度定點長時間採樣濃度變化



圖4.24 (a) 鐵水傾倒時所逸散的煙塵



圖4.24 (b) 鐵水傾倒時所逸散的煙

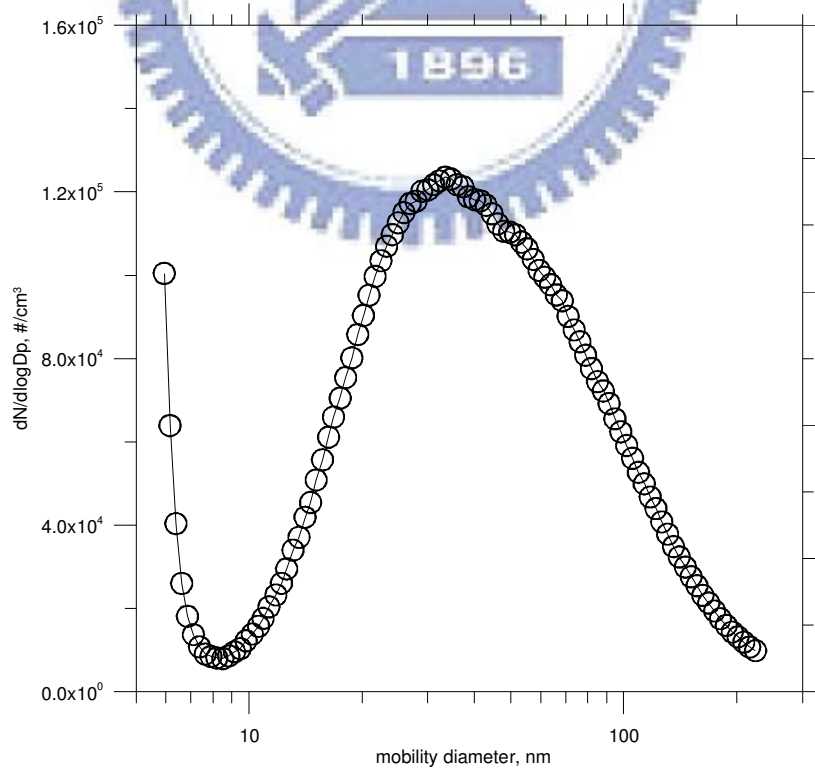


圖4.25 (a) B廠09072006 SMPS所量測奈米微粒平均數目濃度粒徑分布



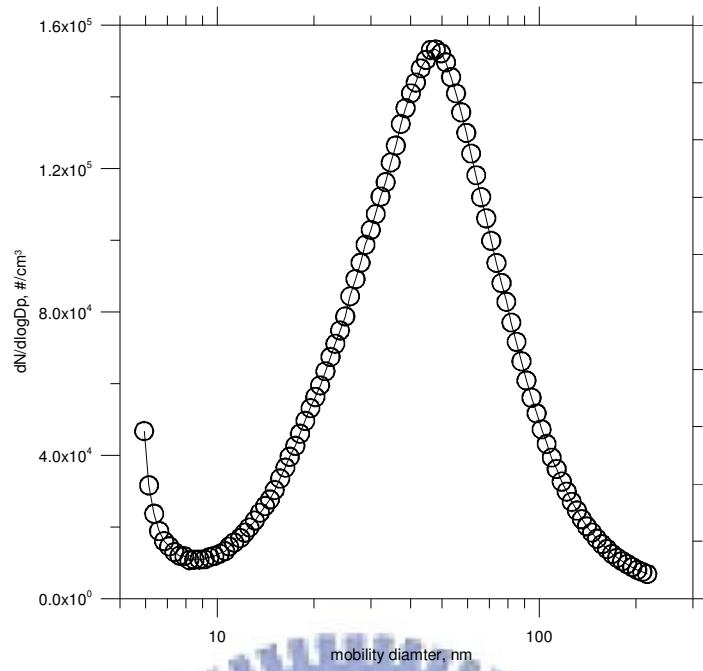


圖4.25 (b) B廠10192006SMPS所量測奈米微粒平均數目濃度粒徑分布

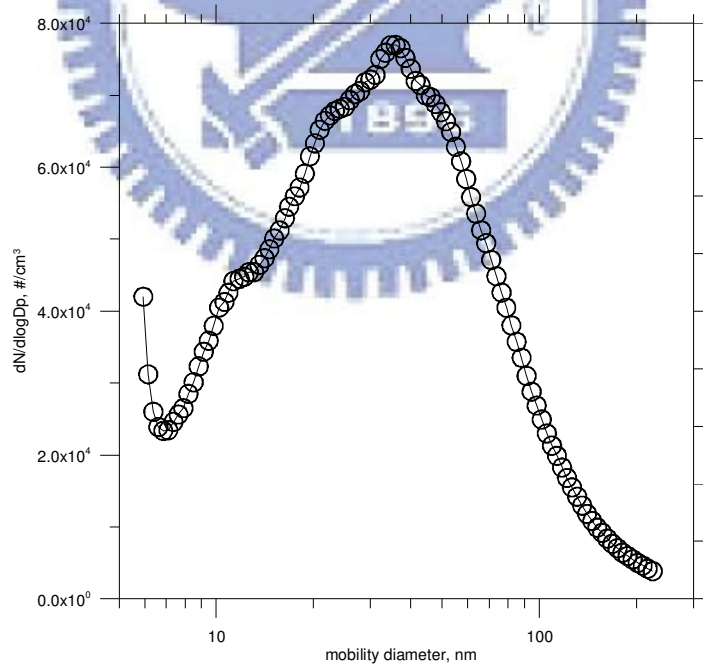


圖4.25(c) B廠10262006SMPS所量測奈米微粒平均數目濃度粒徑分布

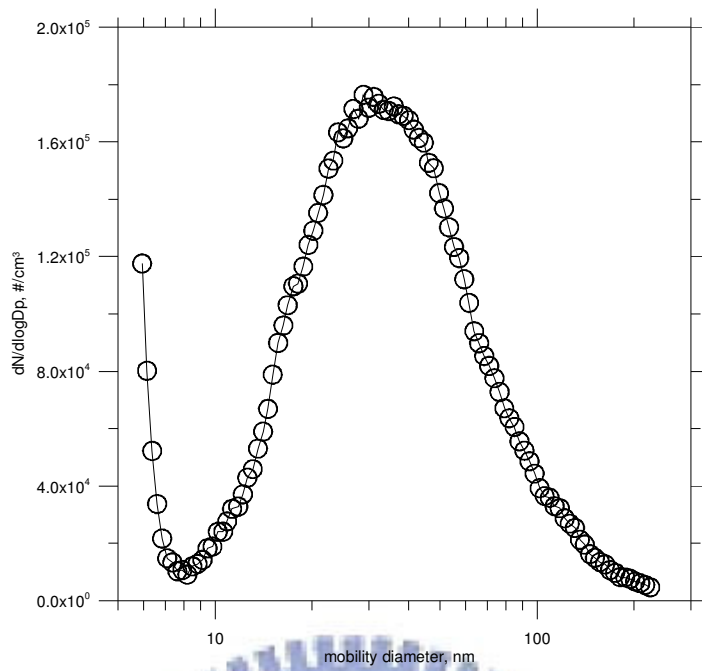


圖4.26 (a) B廠09072006中週波熔解爐開爐時奈米微粒數目濃度粒徑分布

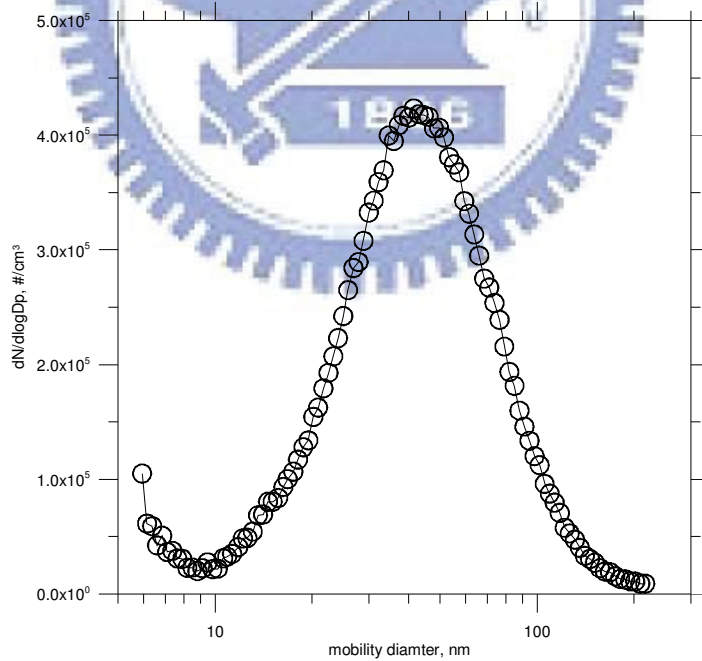


圖4.26(b) B廠10192006中週波熔解爐開爐時奈米微粒數目濃度粒徑分布

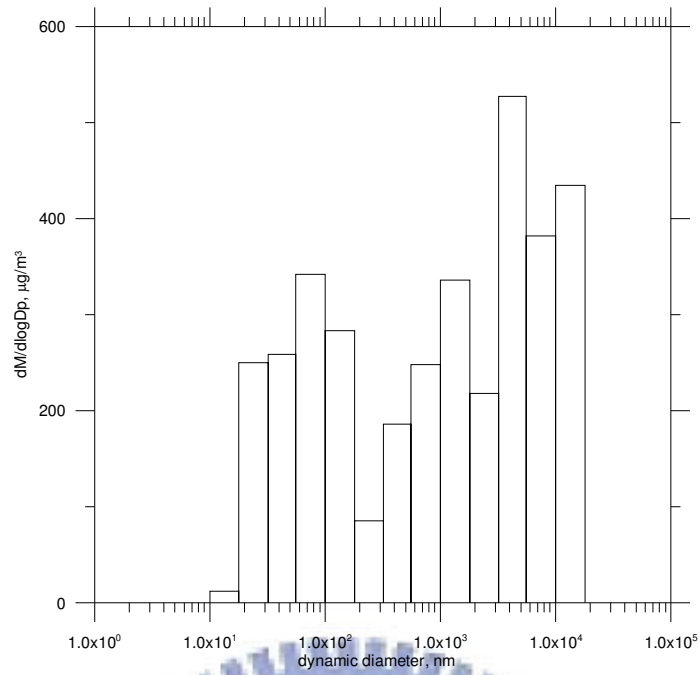


圖4.27 (a) B廠10192006 nano MOUDI所量測微粒質量濃度粒徑分布

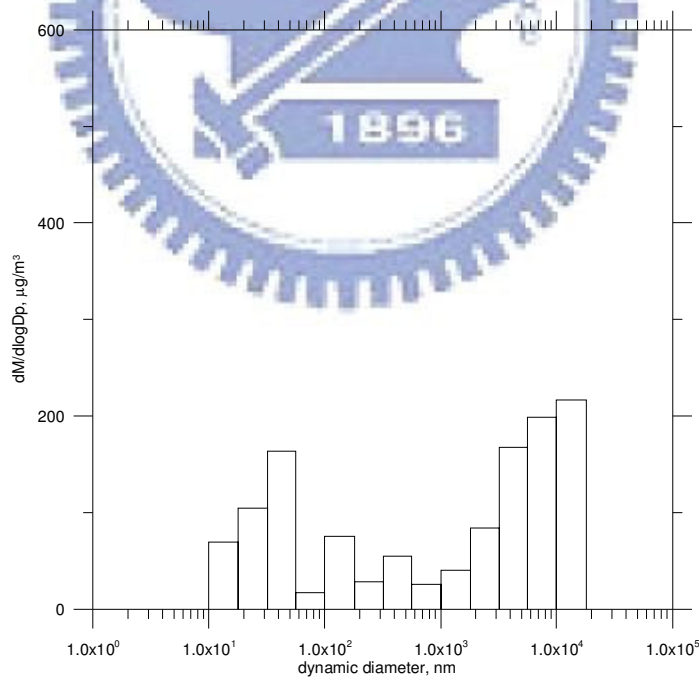


圖4.27(b) B廠10262006 nano MOUDI所量測微粒質量濃度粒徑分布

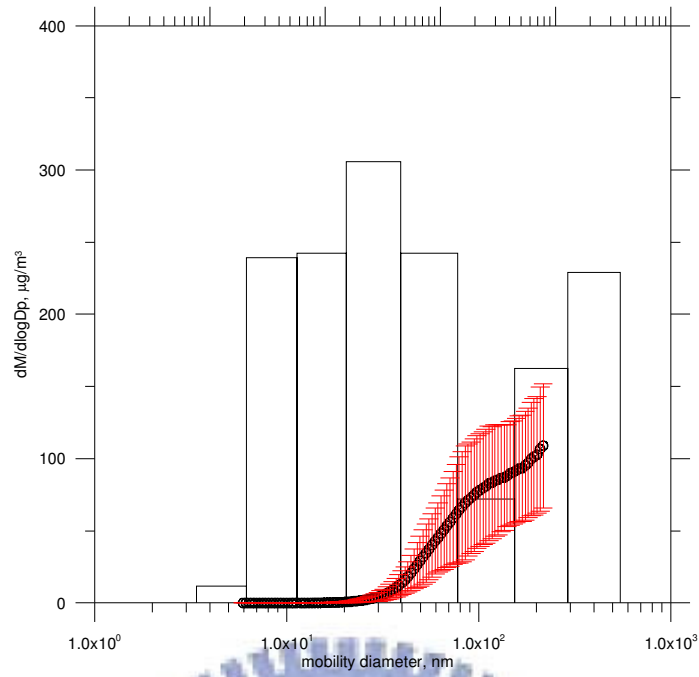


圖4.28 (a) 10192006有效密度 $3.0 \text{ g/cm}^3$  nano MOUDI與SMPS微粒質量濃度比較

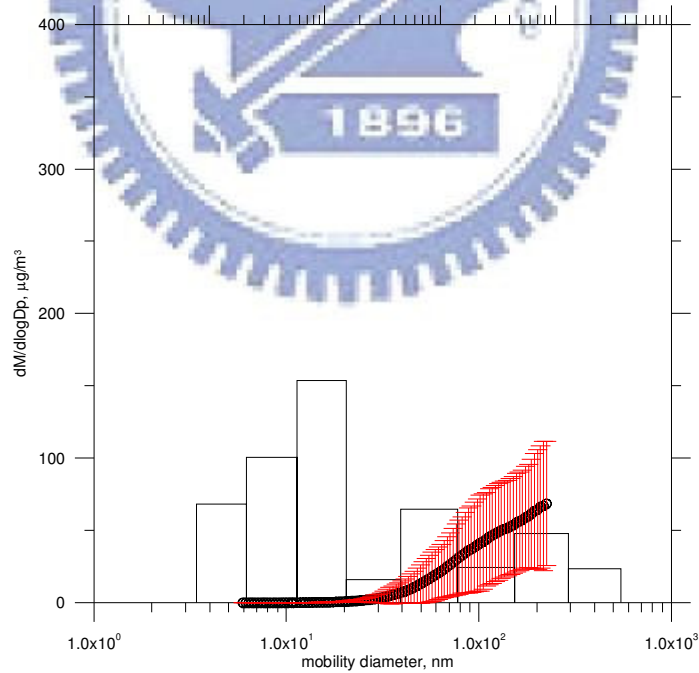


圖4.28 (b) 10262006有效密度 $3.0 \text{ g/cm}^3$  nano MOUDI與SMPS微粒質量濃度比較

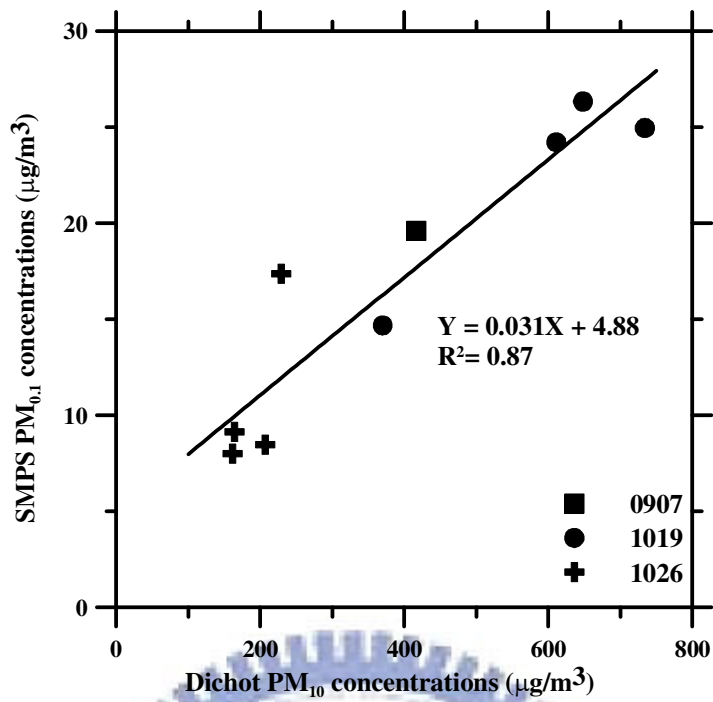


圖4.29 B廠 PM<sub>10</sub>與PM<sub>0.1</sub>的關係

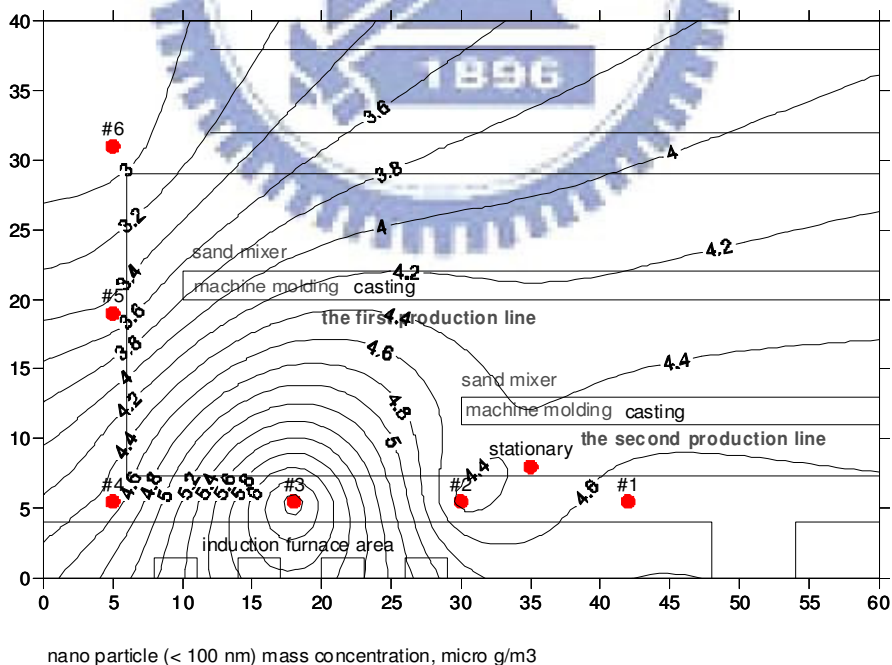


圖4.30 (a) B廠09072006奈米微粒質量濃度分布

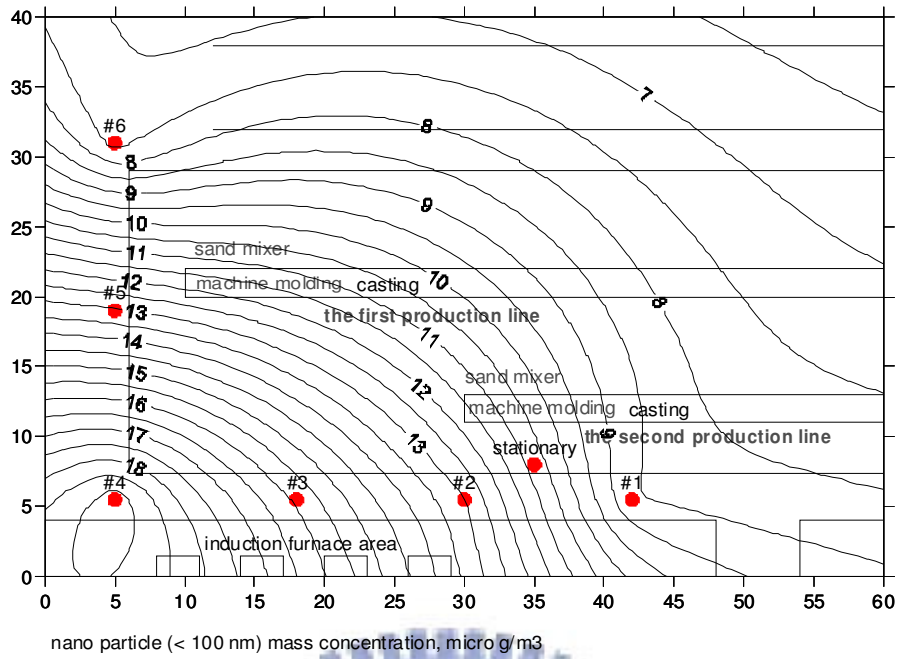


圖4.30 (b) B廠10192006奈米微粒質量濃度分布

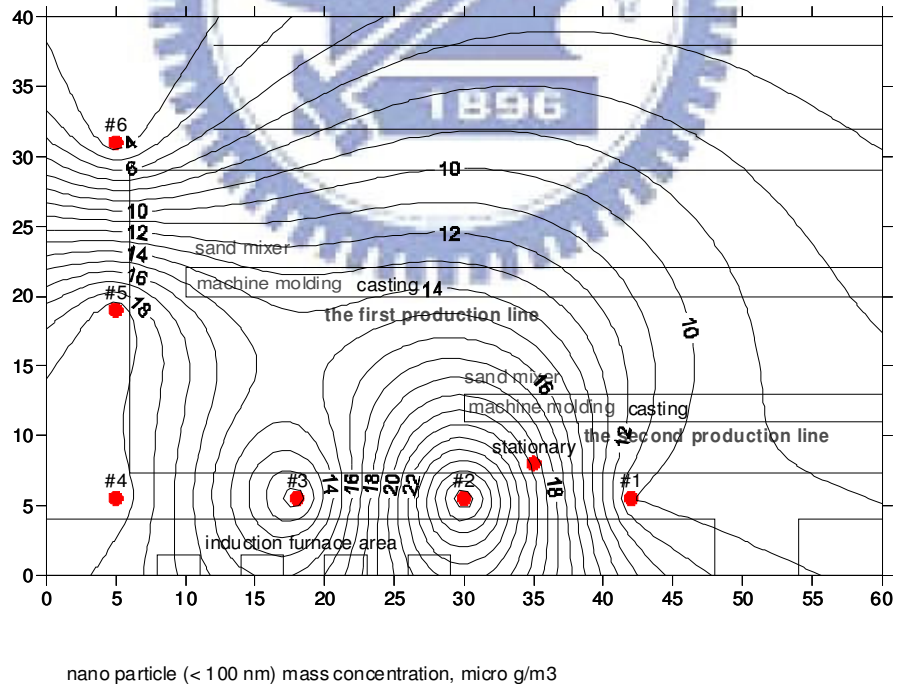


圖4.30 (c) B廠10262006奈米微粒質量濃度分布

## 第五章 結論

本研究分別於鉛粉廠（A廠）與鑄造廠（B廠）進行PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>與奈米微粒的濃度測量，測量結果發現A廠中PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>的關係式為  $PM_{2.5} = 0.6 \times PM_{10} + 14.63$ ，100nm以下奈米微粒數目濃度約介於  $7.76 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$  至  $4.65 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，平均濃度約為  $1.78 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 。由濃度分布圖可知除了逸散源附近外，廠內奈米微粒濃度並不高，接近戶外所測得濃度。B廠PM<sub>10</sub>與PM<sub>2.5</sub>的重量濃度兩者的關係式為  $PM_{2.5} = 0.65 \times PM_{10} + 63.71$ ，100nm以下奈米微粒數目濃度約介於  $2.31 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  至  $2.96 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，平均濃度約為  $9.21 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 。瞬間濃度升高原因主要來自於高溫熔融鐵水自中週波熔解爐傾倒至吊桶的作業及後續將吊桶內的鐵水傾倒自澆鑄區貯存桶作業時所逸散的金屬煙塵，該作業場所奈米微粒數目平均濃度約為戶外奈米微粒數目濃度的6.8倍，最高可達21.8倍。

本研究發現B作業場所奈米微粒的平均有效密度為  $3.0 \text{ g/cm}^3$ ，利用所推估的有效密度  $3.0 \text{ g/cm}^3$  計算出100nm以下奈米微粒的重量濃度，發現Dichot所量測的PM<sub>10</sub>重量濃度與所推估PM<sub>0.1</sub>重量濃度的關係式為  $PM_{0.1} = 0.03 \times PM_{10} + 4.88$ ，可見B廠中PM<sub>10</sub>與100nm以下的奈米微粒重量濃度具有一定的正關係性。

本研究利用人工記錄方式記錄作業人員的時間活動模式，並搭配微粒數目濃度分布與質量濃度分布可推估作業人員的奈米微粒數目濃度暴露量與質量濃度暴露量，B廠天車吊桶作業人員奈米微粒平均暴露數目濃度與平均暴露質量濃度分別為  $5.17 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 、 $11.39 \text{ \mu g/m}^3$ 。

## 參考文獻

- 蔡春進, 2005, 職場微粒分徑採樣之評估研究, 勞工安全衛生研究所期末報告。
- 王鵬堯、石東生, 2003, “勞工有害物暴露活動與時間自動連續監測技術現場測試與個人暴露模式之建立”, 行政院勞工安全衛生研究所委託研究報告。
- 陳志傑、賴全裕、吳章甫、葉文裕、陳春萬, 1996, “勞工個人暴露影像監測技術評估”, 勞工安全衛生研究季刊, 第四卷第一期。
- Biswas P, and Flagan RC, (1984), “High Velocity Inertial Impactors.” *Environ. Sci. Technol.* 18, 611-616.
- Demokritou P, Lee JS, Ferguson TS, and Koutrakis P, (2004), “A compact multistage(cascade) impactor for the characterization of atmospheric aerosols.” *J Aerosol Sci.* 35:281-299.
- D’Arcy JB, Dasch JM, Johnson J, Sutherland J, Carlson D, (2005), “Fine and ultrafine particle emissions from current manufacturing technologies.” Proceeding of 2nd International Symposium on Nanotechnology and Occupational Health, p.31, Minneapolis, Minnesota, USA, Oct. 3-6.
- Dave KV, Lawrence AK, Dru S, and Murray MF, (2003), “Current Chemical Exposures Among Ontario Construction Workers.” *Applied Occupational and Environmental Hygiene.* 18: 1031-1047.
- Fred R, Pat A, Barbara Z, John S, Kerry EK, David W, JoAnn SL, and John S, (2005), “Real-Time Measurements of Jet Aircraft Engine Exhaust.” *J. Air & Waste Management Assoc.* 55: 583-593.
- Geller MD, Kim S, Misra C, Sioutas C, Olson BA, and Marple VA (2002), “A methodology for measuring size-dependent chemical composition of ultrafine particles.” *Aerosol Sci. Technol.* 36: 748-762.
- Gurumurthy R, John LA, Gregory CP, and Ken S, (2003), “Characterizing Indoor and Outdoor 15 Minute Average PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Urban Neighborhoods.” *Aerosol Science and Technology* 37: 33 - 45.
- Heikkinen MSA, and Harley NH, (2000), “Experimental Investigation of Sintered Porous Metal Filters.” *J. Aerosol Sci.* 31: 721-738.



- Harrison RM, Shi JP, Xi S, Khan A, Mark D, Kinnersley R, and Yin J,(2000), “Measurement of Number, Mass and Size Distribution of Particles in the Atmosphere.” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* ,358(1775):2567-2579.
- Huang CH, Chang CS, Chang SH, Tsai CJ, Shih TS, Tang DT, (2005), “Use of porous foam as the substrate of an impactor for respirable aerosol sampling.” *J. Aerosol Sci.* 36: 1373–1386.
- Israel R, and Rosner DE, (1983), “Use of a Generalized Stokes Number to Determine the Aerodynamic Capture Efficiency of Non-Stokesian Particles from a Compressible Gas Flow.” *Aerosol Sci. and Technol.* 2:45-51.
- Jee YK, Shannon RM, Robert FH, Thomas JS and David CC, (2004), “Comparison of Fine Particle Measurements from a Direct-Reading Instrument and a Gravimetric Sampling Method.” *J. of Occupational and Environmental Hygiene.* 1:707-715.
- John V, Maryanne B, and David L, (2000), “Mist Concentration Measurements II: Laboratory and Field Evaluations.” *Applied Occupational and Environmental Hygiene.* 15(4): 370–379.
- Kasper G, (1982), ‘Dynamics and Measurement of Smokes. I. Size Characterization of Nonspherical Particle’, *Aerosol Sci. Technol.* 1:187-199
- 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.
- Kauppien E, Hillamo R, Ruuskanen J, Hakkarainen T, and Rouhiainen P, (1986), “Theoretical and Experimental Study of Particle Collection Characteristics of High-Velocity Multijet Cascade Impactors.” *J Aerosol Sci.* 17:506-510
- Kuhlbusch T, and Fissan H, (2005) “Occupational exposure in the carbon black industry.” Proceeding of 2nd International Symposium on Nanotechnology and Occupational Health, p.23, Minneapolis, Minnesota, USA, Oct. 3-6.
- Leaderer BP, Liroy PJ, Spengler JD, (1993), “Assessing Exposures to Inhaled Complex Mixtures”, *Environmental Health Perspectives Supplements*, 101:167-177 °
- Marjamaki M, and Keskinen J, (2004), “Experimental Study on the Effect of Impaction Plate Porosity and Roughness on Impactor Collection Efficiency,” *J Aerosol Sci.* 35:301-308.

- Marple VA, and Olson BA ,(1999),. A Micro-Orifice Impactor with Cut Sizes Down to 10 Nanometers for Diesel Exhaust Sampling, Final Report Generic Center for Respirable Dust, PennsylvaniaState University, University Park, PA.
- Marple VA and Willeke K, (1976).”Impactor design.” *Atmospheric Environ.* 10:891-896.
- Mohlmann C, (2005) “Occurrence of ultrafine aerosols a diverse workplaces.” Proceeding of 2nd International Symposium on Nanotechnology and Occupational Health, p.33, Minneapolis, Minnesota, USA, Oct. 3-6, 2005.
- Moschandreas DJ, Relwani S, (1991), “The Shadow Sensor: an Electronic Activity Pattern Sensor”, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* , 1:357-367 ◦
- Oberdorster G, (2001), “Plumunary effects of inhalaed ultrafine particles.” *Int Arch Occup Environ Health.* 74:1-8
- Ott WR, (1985),“Total Human Exposure”, *Environ. Sci. and Technol.*, 19:880-886 ◦
- Park K, Cao F, Kittelson, DB and McMurry PH, (2003), ‘Relationship Between Particle Mass and Mobility for Diesel Exhaust Particle’, *Environ. Sci. Technol.*, 37:577-583 ◦
- Peters TM, and Heitbrink W, (2005), “Particle concentration mapping in a diesel engine machining and assembly center.” Proceeding of 2nd International Symposium on Nanotechnology and Occupational Health, p.50, Minneapolis, Minnesota, USA, Oct. 3-6.
- Peters TM, Chen HM and Lundgren DA,(1993), “Comparison and Combination of Aerosol Size Distributions Measured with a Low Impactor, Differential Mobility Particle Sizer, Electrical Aerosol Analyzer and Aerodynamic Particle Sizer”, *Aerosol Sci. and Technol.* 19:396-405.
- Roger AJ, Derrick F, Bruce AT, and Michael PM, (2001), “Environmental Tobacco Smoke in the Nonsmoking Section of a Restaurant: A Case Study.” *Elsevier Sci.*
- Sioutas C, Chang MC, Kim S, Koutrakis P, and Ferguson ST, (1999), “Design and Experimental Characterzation of a PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> Personal Sampler”, *J Aerosol Sci.* 30:693-707.
- Sarder SB, Fine PM, Mayo PR and Sioutas C, (2005), “Size-fractionated measurements of ambient ultrafine particle chemical composition in Los Angeles using nanoMOUDI.” *Environ. Sci. Technol.* 39, 932-944.

Thomas MP, William AH, Douglas EE, Thomas JS and Andrew DM, (2005), “The Mapping of Fine and Ultrafine Particle Concentrations in an Engine Machining and Assembly Facility.” *Ann. Occup. Hyg.*, pp:1-9

Tsai CJ, and Cheng YH, (1995), “Solid particle collection characteristics on impaction surfaces of different designs.” *Aerosol Sci. Technol.* 23: 96–106.

Wang HC, and John W, (1997), “Comparative bounce properties of particle materials.” *Aerosol Sci. Technol.* 7: 285–299.

