

# 水泥業空氣污染防治評估

（三）

（四） 鄭 福 田 \*

（五） 陳 志 傑 \*\*

（六） 楊 舒 華

## 一、前 言

水泥生產是一種高度機械化的生產過程，對於周圍環境，可能造成空氣、噪音、土地甚或水污染之間問題，其中以空氣污染最受矚目，尤其是原料或成品在研磨離析、輸送、包裝過程中所產生之粒狀性物質，更是空氣污染主管機關的一個管制重點，根據臺灣地區公害防治先驅計畫之調查結果顯示在高雄地區所排放於環境中之微粒物質，由水泥工廠所排放者約佔34%，除此之外，水泥之製造，需要消耗鉅量能源，根據國內調查結果，水泥業為耗用能量最密集工業之一，由於石化燃料之使用，其所產生排放於大氣中之氣態污染物，亦值得注意。

## 二、污染之生成

（一）微粒物質

水泥廠排放之微粒物質，基本上是原料、半成品或水泥成品，其主要成份有碳粒、矽酸鹽、亞鐵酸鹽、鋁酸鹽等，由於各種生產單元，設備無法予以完全處理，以致由廢氣或輸送過程中排出，污染工廠內部之作業環境和廠房周圍之環境。

### （二）氣態污染物

#### 1. 硫氧化物

水泥廠產生之硫氧化物或硫化物，主要來自燃料中之硫份，少部份來自於原料中，硫份在旋窯行化學反應後隨廢氣排放至大氣中。由於水泥製造過程中，有甚多中間產物存在，因此硫在旋窯中之反應甚為複雜，主要之反應包括有：

- (1) 硫鐵礦之氧化  $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$
- (2) 硫酸鈣之還原  $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$

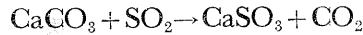
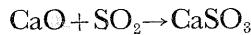
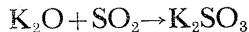
有碳存在而溫度又高於  $1000^\circ\text{C}$  時，則  $4\text{CuSO}_4 + 2\text{C} \rightarrow 4\text{CuO} + 2\text{CO}_2 + 4\text{SO}_2$

（3）與氧之化合：依據燃燒廢氣之理論，旋窯使用重油或煤為燃料時，若採用之過量空氣均為10%，且均能够完全燃燒，則所得到的硫氧化物最多分別為 2000 ppm 及 1500 ppm 左右，但是由於在燒成、鍛燒和乾燥的過程中，粉料中的鹼（alkali）與硫氧化物起作用，因而形成

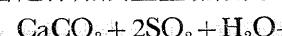
\* 臺大環境工程研究所副教授

\*\* 臺大環境工程研究所研究生

鹼的硫酸鹽，若  $\text{SO}_x$  過量，則會繼續和  $\text{CaO}$  或  $\text{CaCO}_3$  作用而形成  $\text{CaSO}_3$ 。此作用導致  $\text{SO}_x$  濃度大幅的降低，下式為其可能的反應式：



此硫酸鹽將會凝結在預熱孔和旋窯中預冷的部位，除少部分的廢氣中排出之外，其餘大部分仍返回燒成帶，而再度揮發成蒸氣或隨熟料而排出旋窯，此即所謂之「內循環」(internal cycle)。旋窯廢氣，一部分可作為生料之乾燥，因此在生料中，若有水份存在，則廢氣中之二氧化硫會起作用成重亞硫酸鈣：



再進入旋窯，氧化成硫酸鈣： $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  此即所謂之「外循環」(external cycle)，剩餘之  $\text{SO}_2$  則隨廢氣而排入大氣之中。由於大部份的二氧化硫(75%以上)，在生產過程中，均已被吸收，經實測結果，其廢氣中二氧化硫濃度約為 100—200 ppm，其排放係數約為每公噸產品產生 0.09 公斤二氧化硫。

## 2. 一氧化碳

一氧化碳主要是由含碳化合物（如燃料）燃燒不完全而產生者，碳如不完全氧化成二氧化碳，則其熱值損失達 70% 以上，形成能源之浪費，同時由於其可燃性，而有爆炸之可能，故水泥廠之操作，極重視排氣中一氧化碳之濃度，一氧化碳之排放係數為 0.58 公斤／公噸。

## 3. 氮氧化物

水泥廠排放氮氧化物乃由於高溫燃燒之結果，主要之產物為一氧化氮。一氧化氮之形成受最高火焰溫度，過剩空氣量及在高溫帶之停留時間所影響。



很不幸的，水泥旋窯之燃燒條件恰好是產生高濃度  $\text{NO}$  之狀況，為求燒成效果之良好，氣體溫度需在  $1800^\circ\text{C}$  ( $2100^\circ\text{K}$ ) 以上；為使燃燒完全，過剩空氣量為 10% 左右，而產生最高濃度  $\text{NO}$  之條件則為過剩空氣 10—15%；氣體在旋窯之停留時間亦不致太短，致使  $\text{NO}$  形成高濃度之情況。

在溫度達  $2000^\circ\text{K}$  時， $\text{NO}$  形成之反應平衡常數即為  $1000^\circ\text{K}$  時之 200 倍，在平衡條件下， $\text{NO}$  濃度可達 2950 ppm，但其達到平衡時間相當長，故旋窯中氮氧化物之生成不致這麼高，其排放係數為 0.13 公斤／公噸。

除以上三種之氣體外，尚可能產生硫化氫、氟化物及碳氫化物，但其量甚少，由於目前水泥業造成之空氣污染問題，以粒狀物最多，因此本文重點亦著重於此方面之探討。

## 三、粒狀污染物之排放情形

### ① 排放係數之推估

由於水泥廠微粒物質之排放，不單是從煙囪出口，因此排放係數無法從煙囪採樣決定之，乃

就「燒失量」來作理論上之探討。依據質量平衡之觀念，原料使用量應為熟料生產量與其它洩漏物質總量之和，在此洩漏總量指在高溫燒成階段中去除之二氧化碳。

乾燥過程中去除之水份，以及排出於環境中之微粒物質。其關係可以以下式簡單表示之：

$$\text{洩漏於環境中之(微粒)總量} = (\text{原料使用量}) \times (1 - \text{燒失量}) - \text{熟料生產量}$$

(上式不計微量物質如：硫之(S)變化)。

現以國內某甲、乙兩水泥廠為例，上述關係可見表一。

表一

單位：(公噸／年)

甲 廠			乙 廠			
	原 料 用 量	燒 失 量 %	理 論 量	原 料 用 量	燒 失 量 %	理 論 量
石 灰 石	1,964,147	39.32	1,191,844	2,236,530	37.87	1,389,556
粘 土	106,504	5.70	100,433	218,512	4.46	208,766
矽 砂	65,861	1.08	65,150	—	—	—
鐵 渣	15,575	— 3.72	16,154	34,156	— 2.24	34,921
煤	97,210	81.0	18,470	256,228	81.0	48,683

理論熟料產量=1,392,051

理論熟料產量=1,681,926

實際熟料產量=1,375,939

實際熟料產量=1,666,840

洩漏於環境中之量 16,112

15,086

由上表結果可知，洩漏於環境中之微粒物質分別佔各該廠熟料生產量之 1.12% 與 0.91%。

以甲廠為例，在正常操作之下，生料部份以  $1500 \text{ kg/Nm}^3 \times 2.0 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$ ，熟料部份以  $1200 \text{ mg/Nm}^3 \times 1.6 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$  計算，民國69年產量為 1,375,939 公噸；由上述二主排放源排出之量為 6,770 公噸，佔總排放量 16,112 公噸的 42%，其餘 58% 則為不正常狀況例如靜電集塵器跳開，或由其他較小排氣量之煙囪，或由生產過程中輸送，儲存物料時之溢出或洩出所造成。

## (二)煙囪廢氣含塵量之測定

### 1. 生料部份

水泥廠集塵設備之排氣煙囪上，除少部份由於煙囪材質為混凝土，不易開挖取樣口外，而由目測方式作為集塵設備效率好壞之判斷外，大部份之煙囪均設有採樣口，而集塵設備之進氣口，除少部份新設之集塵設備外，大半均未留下採樣口，因此很難評論集塵設備之收塵效率。

#### (1)集塵設備出口之測定結果。

就六家留有採樣口之煙囪測定結果列如表一。

根據臺灣地區空氣污染物排放標準訂為  $700 \text{ mg/Nm}^3$ ，則在出口部位的十個採樣次中，僅有四次合乎標準，其中甲廠五號窯靜電集塵器之排放口，第一次採樣時，因噴霧塔故障，廢氣溫度高達  $170^\circ\text{C}$ ，影響收塵效率，含塵濃度達  $2500 \text{ mg/Nm}^3$ ，第二次採樣時，噴霧塔功能正常，溫度降至  $135^\circ\text{C}$ ，含塵濃度為  $1145 \text{ mg/Nm}^3$ 。

#### (2)集塵設備進口之測定結果（如表一）。

進口部位之含塵濃度，則依各廠之設計流程而有所不同，一般可分成兩類，一為設有前集塵設備 (precollector) 者，如乙廠 4 號窯 EP 及己廠 2 號窯 EP，因為在生料磨選粉機之後，有旋風式收集機預先收塵，EP 成為二次集塵設備，進口濃度各為  $46 \text{ g/Nm}^3$  和  $44 \text{ g/Nm}^3$ 。甲廠五號窯靜電集塵器雖有類似 Settling chamber 之沉塵室構造，然而效果不良，靜電集塵器進口含塵濃度仍高達  $460 \text{ g/Nm}^3$ 。至於未設有預處理設備者，其進口濃度將達  $600 \sim 800 \text{ g/Nm}^3$ 。

## 2. 熟料部份：

熟料部份之採樣結果列如表二，由表二可見均超過目前之污染物排放標準。

## 3. 水泥成品部份：

幾乎全部水泥廠之袋式集塵器均未設有採樣口的裝置，特商請甲廠於水泥磨袋式集塵器之進口和出口，各開採樣口一，採樣結果（如表三）顯示進口濃度達  $294 \text{ g/Nm}^3$ ，遠大於原設計值之  $9.9 \text{ g/Nm}^3$ ，出口濃度為  $259.5 \text{ mg/Nm}^3$ ，雖未超出規定之排放標準，但以袋式收塵機之效能而言，可小於  $100 \text{ g/Nm}^3$ ，故此集塵設備應準備加以檢修、維護。

表一 生料部位採樣濃度

廠代號	別(號)	測點	煙函半徑(m)	採樣點數	含塵量 $\text{mg/Nm}^3$	排氣溫度 °C
甲	#5 NSP	進口	—	3	459,574.65	120°C
甲	#5 NSP	出口	1.15	3	2,493.5	170
甲	#5 NSP	出口	1.15	3	1,145.28	135
乙	#3 SP	出口	1.5	3	943.51	125
乙	#4 SP	進口	—	4	50,313.55	128
乙	#1 LP	出口	1.5	3	411.88	137
乙	#1 LP	進口	—	2	35,738.41	138
乙	#3 SP	出口	1.5	3	1,324.64	131
乙	#4 SP	出口	1.75	3	285.67	122
丙	#3 LP	出口	—	3	1,152.88	150
丁	#1 NSP	出口	1.5	3	325.92	107
戊	#6 SP	出口	1.242	3	3,737.65	93
己	#2 NSP	出口	1.75	3	302.17	120
己	#2 NSP	進口	—	3	43,925.97	120

表二 熟料部位採樣濃度

廠代號	窯別(號)	測點	煙函半徑(m)	採樣點數	含塵量 $\text{mg/Nm}^3$	排氣溫度 °C
甲	#5 NSP	出口	1.75	3	1,144.75	210
甲	#3 SP	出口	1.4	3	1,247.09	212
乙	#3 SP	出口	1.38	3	1,388.08	203
乙	#3 SP	進口	—	2	4,144.25	250
乙	#1 LP	出口	1.4	3	2,587.20	187
丙	#3 LP	出口	0.965	2	1,377.79	120
戊	#6 SP	出口	1.7	3	1,350.89	207
己	#2 NSP	出口	1.88	6	1,035.0	220

表三 水泥成品部位採樣結果

廠代號	測點	煙窗半徑 (m)	採樣點數	含塵量 mg/Nm <sup>3</sup>	排氣溫度 °C
甲	過濾袋進口	0.45	2	29,434.0	75
甲	過濾袋出口	0.45	2	259.45*	75

\* 除塵效率達 99.1%。

#### (三) 煙窗廢氣含塵粒徑分佈之測定結果

顆粒大小亦為廢氣重要性質之一，本研究使用美國 SIERRA 公司之 Cascade Impactor 作煙窗粒徑之採樣測定，測定結果列如表四。

##### 1. 生料部份：

生料細度影響水泥燒成之難易與能量之消耗，生料愈細，自然愈易於燒成，但如此則增加了生料磨的研磨負擔，若生料粉太粗，雖節省研磨之成本，但因燒成不易，反而易導致單位時間內產能的減少，且燃料費用相對的提高，所以生料粉細度、產能、及品質間，應尋求一最佳之配合，一般生料粉徑生料磨粉碎成細粉後，送入選粉機，其規格設定為通過 200 節後之剩餘為 15—20%。

此種粒徑之粉塵經由沉塵室或旋風式收塵機的初次收塵後其粒徑約為  $D_p = 15\mu$  左右，再經靜電集塵器做二次收塵之後，其粒徑分佈為  $D_p = 2.0\mu$ ,  $\sigma = 3.125$ ，乙廠四號窯 EP 出口之粒徑為  $D_p = 2.3\mu$ ,  $\sigma = 3.03$ ，乙廠三號窯 EP 出口之粒徑達  $4.4\mu$ ，顯示必定有某些集塵室效能不佳，導致大顆粒之粒子逸出。

##### 2. 熟料部份

由表四可見乙廠三號窯，其旋風集塵器進口與出口濃度分別為  $4144 \text{ mg/Nm}^3$ ,  $1388 \text{ mg/Nm}^3$ ，前者粒徑為  $D_p = 9.0\mu$ ,  $\sigma = 6.43$ ，表示粒徑分佈甚廣，出口粒徑為  $5.2\mu$ ,  $\sigma = 3.71$  顯示此多管旋風式集塵器效率不甚理想，亟須改善。

##### 3. 水泥成品部份

水泥研磨是製成水泥最後的一道步驟，對於品質的控制更須加強。一般而言，粒徑在  $3 \sim 30\mu$  之間的水泥，對水泥強度的影響最大，小於  $3\mu$  者對早期強度之發生乃屬必要，若大於  $60\mu$ ，則被認為對水泥強度之發生並無貢獻。

一般水泥磨的現場操作，設在通過 200 號篩的剩餘為 5—8%，本研究所測得唯一一組數據為甲廠十號水泥磨之袋濾式集塵器，進口粒徑為  $D_p = 12.5\mu$ ,  $\sigma = 3.15$ ，出口為  $2.8\mu$ ,  $\sigma = 2.54$ ，含塵濃度為  $260 \text{ mg/Nm}^3$ 。

#### (四) 廠區內空氣含塵量之測定

由於約有 50% 之粒狀物非經煙窗而由原料、成品之包裝、輸送或研磨中洩漏，可能會造成廠區工作環境之惡化，因此乃進行水泥廠內之空氣取樣，其結果列如表五，顆粒之粒徑分析，乃使用美國 Anduson 公司之 Cascade Impactor 在乙廠採樣分析，其結果如表六。

表四 煙 囱 含 霧 粒 徑 分 析 結 果

採樣地點		甲廠5號窯 EP入口	甲廠5號窯 EP出口	乙廠4號窯 EP入口	乙廠4號窯 EP出口	乙廠3號窯 MC入口	乙廠3號窯 MC出口	甲廠10號水泥 磨BF入口	甲廠10號水泥 磨BF出口
溫度 (°C)	11.5	13.3	132	130	250	203	80	80	
流 量 (CC/a $\mu$ )	71.17	185.55	162.45	181.7	290.96	169.73	210.33	210.33	
採樣口徑 (mch)	3/32	5/32	7/32	6/32	7/32	7/32	5/32	5/32	
	A <sup>+</sup>	B <sup>++</sup>	A	B	A	B	A	B	
第	1	層	25.79	60.23	16.18	97.71	17.29	98.84	
1	2	15.39	51.5	9.64	96.18	10.30	96.53	9.73	
2	3	6.21	26.57	3.86	71.76	4.13	75.14	3.9	
3	4	3.74	11.44	2.31	49.62	2.47	49.71	2.33	
4	5	2.39	5.33	1.45	29.00	1.55	30.64	1.46	
5	6	1.33	2.06	0.78	16.03	0.84	15.03	0.79	
6	7	0.74	0.54	0.42	6.87	0.45	5.78	0.42	
7	8	0.45	0.26	0.21	3.05	0.24	2.31	0.21	
Dp.50(μ)		15.0	2.0	2.3	4.4	9.0	5.2	12.5	
σ		3.41	3.125	3.03	3.38	6.43	3.71	2.717	

<sup>+</sup> A : 各層粒徑 ( $\mu$ )

<sup>++</sup> B : 重量累積百分比 (%)

由表五及表六，可知

1. 廠內空氣中之顆粒粒徑小於  $4.7\mu$  以下者，佔約58%，此類細小顆粒，易於進入人體呼吸管道之深部，對健康之影響頗大。
2. 甲廠：包裝室側含塵達  $2500\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，各倉庫以各帶、槽運機仍有洩漏，所以造成中心點高達  $2623\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。
3. 乙廠：最嚴重地區為鐵道沿線，因受散裝車上貨及冷卻機出口多管旋風集塵器效率欠佳且煙囱低矮，濃度高達  $3000\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  以上。
4. 丙廠：最嚴重區域為水泥磨的包裝室附近，高達  $5000\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  以上，顯示包裝室之袋式集塵器效能不良或完全故障，熟料庫老舊，散逸之粉塵使測值達  $2713\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。
5. 丁廠：為一相當標準之廠區，各廠房及其輸送設備密封良好，鮮見洩露事件，但包裝室一側仍高達  $3648\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，卡車行車沿線之濃度達  $1000\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。
6. 戊廠：水泥磨的7號窯附近之輸送設備，如圖4—8，洩漏情況嚴重，預熱機亦有溢料的情形，使含塵量高達  $8000\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  及  $9800\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。
7. 由以上資料可以推知：幾乎所有的水泥磨或包裝室附近，均無有效的吸塵操作，一般濃度約達  $3000\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，而輸送設備的洩出粉塵，則以戊廠7號窯附近最為嚴重；根據勞工安全衛生法第五條規定而訂定之空氣中有害物質容許濃度標準，見表4—8，水泥應屬第三類，粒徑  $5\mu$  以下者不得超過  $5\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，另由廠區含塵粒徑分析得知小於  $5\mu$  以下者佔 64%，則戊廠水泥磨以7號窯附近之含塵量已超過規定。

表五 廠區含塵量測定

濃度範圍 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	甲		乙		丙		丁		戊	
	採樣次數	%	採樣次數	%	採樣次數	%	採樣次數	%	採樣次數	%
<500	1	17	3	23	0	0	5	50	3	25
500—1000	3	51	3	23	3	30	2	20	1	8
1000—2000	0	0	3	23	2	20	2	20	3	25
2000—4000	2	32	4	31	3	30	1	10	2	17
4000—6000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>6000	0	0	0	0	0	0	0	0	3	25
平均		1,220		1,597		2,325		941		3,022

表六 廠區含塵粒徑分佈

粒徑 ( $\mu$ )	10.0	9.0	5.8	4.7	3.3	2.1	1.1	0.7	0.4	D <sub>p</sub> =3.0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$\sigma=3.0/0.74$
重量 (mg)	9.3	8.3	8.4	7.4	6.3	7.0	5.6	5.2	4.2	$=4.0$
累積重量 (mg)	61.7	52.4	44.1	35.7	28.3	22.0	15.0	9.4	4.2	
累積百分比 (%)	100	84.93	71.47	57.86	45.87	35.66	24.31	15.24	6.81	

## 五)集塵設備經濟模式之建立

### 1.投資額模式之建立。

本研究收集臺灣地區水泥業集塵設備之投資額，利用臺灣地區機械設備物價指數表，調整至民國71年9月後，以  $y = ax^b$  之模式做迴歸分析。

水泥廠所使用之集塵設備主要有三種：靜電集塵器、旋風式集塵器和袋式集塵器。

#### (1)靜電集塵器：(EP)

經統計分析結果，EP 投資額和處理能量間之關係如下：

$$EPC = 97.585 \cdot 10^4 \cdot X^{0.740} \quad (R = 0.994)$$

$$EPVC = 97.585 \cdot 10^4 \cdot X^{-0.159} \quad (R = 0.884)$$

EPC：集塵設備投資額 (元)

EPVC：單位流量投資額 (元)

X：處理能量 (capacity)  $m^3/sec$

生料部份由於廢氣量甚大，溫度也較高，由預熱機排出廢氣時，仍可達  $350^\circ C$ ，須增設噴霧塔加以冷卻以降低溫度。一般均採用靜電集塵器處理廢氣，事實上此部份之集塵器不應以污染防治設備視之，因為實際上其為生產用途設備的一部分，尤其是未設置預集塵器時，須將全部的生料粉送入靜電集塵器，故其設計，使用均須詳加考慮。

#### (2)旋風集塵器：

旋風式集塵器之投資額與處理能量之關係可以表成：

$$MCC = 18.809 \cdot 10^4 \cdot X^{0.806}$$

(R = 0.997)

$$MCVC = 18.809 \cdot 10^4 \cdot X^{-0.165}$$

(R = 0.914)

式中： MCC：旋風式集塵器投資額 (元)

MCVC：單位流量投資額 (元)

X：流量 ( $m^3/sec$ )

#### (3)袋濾式集塵器：

袋濾式集塵器投資額和處理能量之關係，可以下列式表示：

$$BFC = 32.091 \cdot 10^4 \cdot X^{0.887}$$

(R = 0.973)

$$BFVC = 32.091 \cdot 10^4 \cdot X^{-0.113}$$

(R = 0.772)

式中： BFC：袋式集塵器之投資額 (元)

BFVC：單位流量投資額 (元)

X：流量 ( $m^3/sec$ )

### 2.集塵設備操作維護費模式之建立。

各種集塵設備操作維護費之模式建立，乃根據處理廢氣流量和操作維護費之關係，試用各種迴歸模式而選取相關係數最大者，其結果如下：

### (1) 操作維護費方面：營運管理

靜電集塵器： $y = 2.32X^{0.951} \cdot 10^4$

旋風式集塵器： $y = 1.569X^{1.063} \cdot 10^4$

袋式集塵器： $y = 5.538X^{1.026} \cdot 10^4$

式中： $x$ ：流量 ( $m^3/sec$ )

$y$ ：操作維護費 (元/年)

可以看出，操作維護費與處理能量之關係，以幾何迴歸：

$y = ax^b$  之型式最佳。

### (2) 單位流量操作維護費方面：

其迴歸模式以  $y = \frac{x}{a+bx}$  之型式最佳，分別為

靜電集塵器： $y = \frac{x}{-7.897 + 0.711x} \cdot 10^4$

旋風式集塵器： $y = \frac{x}{-1988 + 0.57x} \cdot 10^4$

袋式集塵器： $y = \frac{x}{-0.049 + 0.179x} \cdot 10^4$

式中： $x$ ：處理之廢氣流量  $m^3/sec$

$y$ ：單位廢氣流量之操作維護費用

### (3) 擴散模式計算結果

本研究計算所需資料均採用一般值 (normal value)，即生料部分之排氣量以  $2.0 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$  計，冷卻部分之排氣量以  $1.6 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$  計，排氣溫度各約為  $130^\circ\text{C}$  及  $210^\circ\text{C}$ 。排放濃度依據本實驗實地量測結果，生料部分設為  $1500 \text{ mg/Nm}^3$ ，熟料部分設為  $1200 \text{ mg/Nm}^3$ 。根據上述資料所推演之排放資料列表於七，其中1—3號煙囪為由生料部位排出者。

將風速分為六級，以  $1.5, 2.46, 4.47, 6.93, 9.61$  及  $12.52 \text{ m/sec}$  為代表風速，利用 Briegs 三分之二定律，可求得不同風速下之煙囪有效高度如表八，將表七、表八值假定不同混合層高度下利用 RAM 擴散模式，可求得在主風向下風處之粒狀物濃度，則如圖一、二，圖一、圖二乃分別為混合層高度 250 公尺，500 公尺之情況。

在混合層高度為 250 公尺，風速級為 1 時，由於有效高度皆超過 250m，所以計算值皆為 0，但若風速稍大而使有效高度減低，則易發生低混合層之局限污染 (trapped fumigation)，而使污染物濃度大幅提高。

由距離—濃度圖得知，在不穩定的狀況之下 (穩定度 A、B)，最大濃度發生的距離均在 2 公里之內，甚至有位於 500 公尺內部發生最大濃度者，顯示煙囪高度的不足和排放方式欠佳。

表七 甲 廠 排 放 資 料

煙囪號碼 別	1	2	3	4	5	6
煙囪徑 (m)	2.91	2.5	2.3	2.8	2.8	3.5
煙囪高度 (m)	56.6	50	47	25	20	20
排氣溫度 °C	130	130	130	210	210	210
排氣速度 (m/s)	6.11	8.7	13.57	5.28	5.55	9.38
排放量 (g/sec)	41.32	43.4	114.58	26.44	27.78	73.33

表八 各煙囪在不同風速下之有效高度\*

煙囪號碼 別	風速級	1	2	3	4	5	6
1		259.805	170.219	113.937	90.513	79.025	73.813
2		263.548	170.144	111.007	86.308	74.158	68.543
3		306.041	193.473	122.020	92.142	77.431	70.590
4		307.948	189.803	111.635	78.179	61.769	53.223
5		318.119	195.587	113.340	78.155	60.509	51.093
6		553.756	334.374	187.118	124.123	92.527	75.670

\* 假設排氣溫度與大氣溫度不變之條件下。

## (七) 法令檢討

目前適用於水泥廠粒狀污染物之管制法規有：

### 1.臺灣地區空氣污染物排放標準。

(1) 規定煙塵之排放口標準為  $700 \text{ mg/Nm}^3$ 。

(2) 工商廠場周界標準為  $1000 \text{ mg/Nm}^3$  (臺灣省轄區舊廠)， $500 \text{ g/Nm}^3$  (臺北市轄區及所有新廠)。

其中煙塵含量之周界標準係在排放口無法測定或煙塵由廠房溢散時適用之。其測定點為在離周界間五公尺，外十五公尺範圍內，擇適當地點取樣。

### 2. 依據勞工安全衛生法所訂定之空氣中有害物質容許濃度標準，見表4—8。

水泥屬於第三類塵埃 (游離矽酸30%以上)：粒度以  $5\mu$  下之容許濃度為  $5 \text{ mg/Nm}^3$ 。

### 3. 國外類似之法規：

#### (1) 排放口標準：

——美國：根據環境保護署 (EPA)，1972年所訂定之「新靜態源之實施標準」(Standards of Performance for New Stationary Sources) 規定：

(a) 自窑中：懸浮微粒容許排放量為  $0.15 \text{ kg}$ /每噸進料或透光度 (opacity) 20%。

(b) 自熟料冷却器：懸浮容許排放量為： $0.25 \text{ kg}$ /每噸進料，或透光度 10%。

(c) 其他設備：比照(a)

(a) 中若設生料熟料比為 1.57，外加 15% 的漏氣量，則排放標準約為  $137 \text{ mg/Nm}^3$ 。

——英國： $230 \text{ mg/Nm}^3$ ：煙囗高度在60—80公尺，視不同的生產過程而定。

——西德：非 EP 之集塵設備，每公升排氣量  $75 \text{ mg/Nm}^3$ ，無此條件者，每公升  $120 \text{ mg/Nm}^3$ ；裝設 EP 者，每公升排氣量  $120 \text{ mg/Nm}^3$ ；若更進一步，無此條件者，每公升  $150 \text{ mg/Nm}^3$ 。

——東德：氣體含塵量達  $10 \text{ g/Nm}^3$  者，集塵後，排放口不得超過  $100 \text{ mg/Nm}^3$ 。

——其他：蘇聯  $90 \text{ mg/Nm}^3$ 、日本  $200 \text{ mg/Nm}^3$ 、荷蘭  $150 \text{ mg/Nm}^3$ 、瑞典  $150 \text{ mg/Nm}^3$ 、瑞士  $100 \text{ mg/Nm}^3$ 。

由以上之比較可知我國目前之排放標準，尚屬寬鬆。

#### 4.周界標準：

由測定結果深知周界含塵之粒徑  $D_{p,50}$  為  $3.0\mu$ ，小於  $5\mu$  以下者佔64%，依勞工安全衛生標準為  $5 \text{ mg/Nm}^3$ （小於  $5\mu$  者），則總懸浮微粒（TSP）標準約為  $7.82 \text{ mg/Nm}^3$ ，然而水泥廠區有甚多的設備和操作地點離周界很近，部份位於市區的水泥廠，其部份設備更是緊臨者周界，則廠外居民每日長久處於超過勞工安全衛生標準之空氣，對於健康甚為不利。

### (八)粒狀污染物產生之原因

由利用燒失量所推算出之排放係數與由生產過程中主要排放源的旋窯廢氣，冷卻機廢氣等處經集塵設備而排出之排放量，可以推知除了由集塵設備排氣煙囗排出之外，尚有一部分的排放發生於生產過程之中：

#### 1.由生產過程所排出：

- (1)廠房老舊、儲存、取料或進料時，易由未封閉處洩露。
- (2)大部份石礦碎解處，僅設單管旋風式集塵器，效率差，且多未有密閉或隔離之措施。
- (3)輸送帶、輸送槽之密封不良。
- (4)少部份儲存庫房、冷卻機，未裝設集塵設備，進料、取料或運轉時，易造成大量的排放。
- (5)設備、管道的破損或銜接不良。
- (6)物料露天置放，因風而揚起或因雨而流失。

#### 2.由集塵設備排氣煙囗所排放：

- (1)由實測值得知：幾乎所有的集塵設備進口濃度均超過設計值，形成超重負荷，使排放濃度大幅提高。
- (2)操作條件改變時，尤其是冷卻機部分，常因窯皮的脫落或熟料出料不均勻而在冷卻機內形成突穿（break through），均會造成溫度和負荷的升高，而影響集塵效率。
- (3)由於沒有完整而有效的檢查制度，只能做事後的檢修工作。

#### 3.除此之外，尚有多項較重要之因素，須詳細討論：

##### (1)煙囗高度的不足：

煙囗愈高，愈能得到良好的擴散作用，減輕對周圍環境的污染程度，以甲、乙兩廠為例，所有的煙窯均未能合乎國外規定之高度，尤其是冷卻機部分，其高度大抵在20—25公尺之間，遠低於最低要求的70公尺高度。高度的不足，若再發生集塵設備的故障，將對附近環境產生高濃度的污染，甚至發生嚴重事件（episode）。

## (2) 噴霧塔功能不足：風量±10%、溫度±20°C

因預熱機出口的廢氣高達  $350^{\circ}\text{C}$ ，雖然部分的熱量可在生料的乾燥過程中加以吸收利用，但整體而言，溫度仍然太高，尤其是生料庫滿或生料磨故障時，因溫度過高而影響集塵效率，水泥廠目前使用之噴霧塔，常因能量不足，或噴嘴作用不良，維護欠佳等因素，無法充分發揮降低溫度及改變比電阻的功能，而造成集塵設備效能之降低，應檢討噴霧塔之功能。

## (3) 超負荷：風量±10%、溫度±20°C

根據設計值，甲廠 5 號窑靜電集塵器入口含塵濃度為  $20 \text{ g/Nm}^3$ ，10 號水泥磨袋式收塵機入口設計為  $10 \text{ g/Nm}^3$ ，而實測值却高達  $459.6 \text{ g/Nm}^3$  及  $294 \text{ g/Nm}^3$ ，顯示超重負荷相當嚴重，亦是效能不良的原因之一。

## (4) 漏氣的影響：風量±10%、溫度±20°C

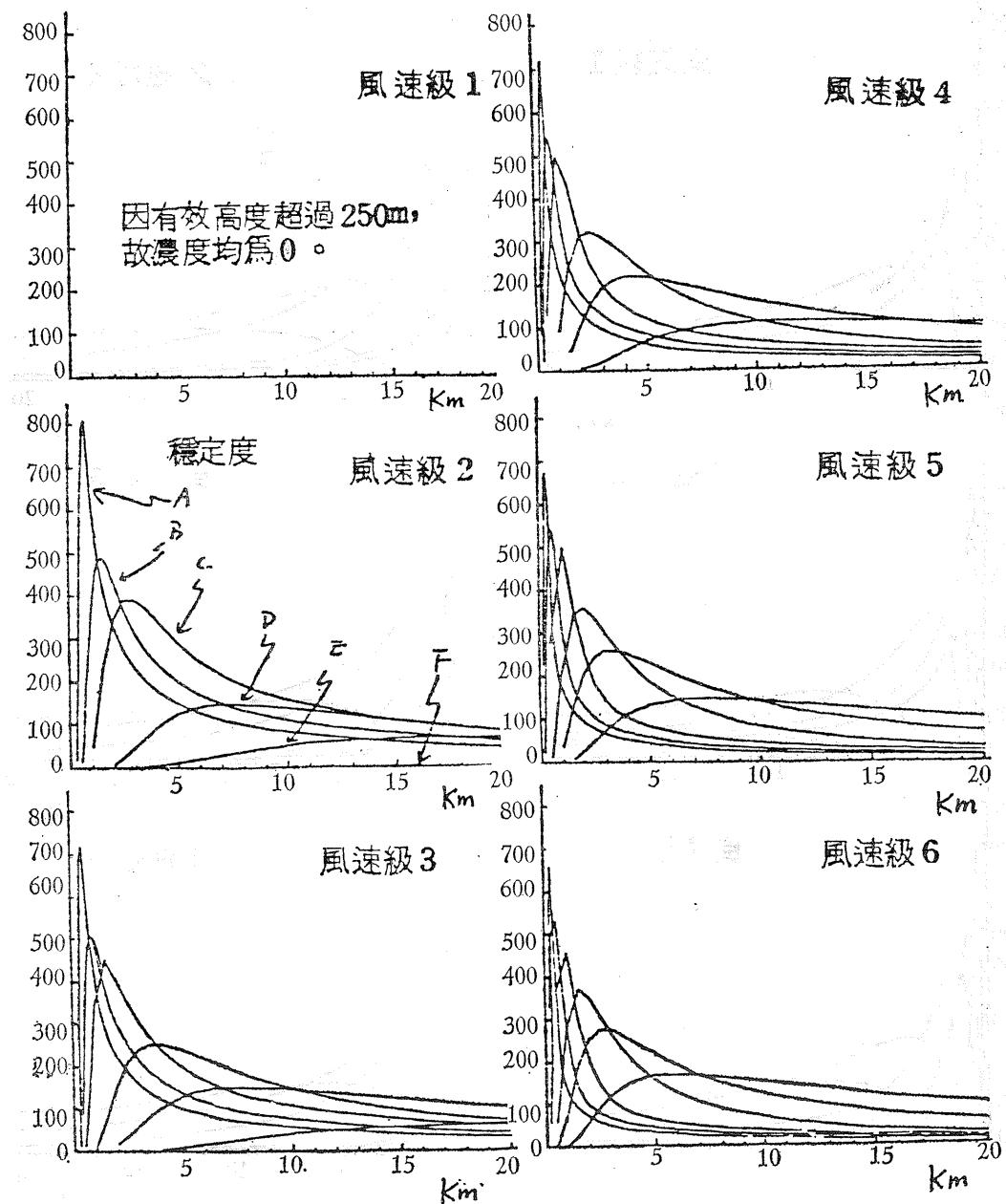
在水泥生產過程中，由於原料進口無法完全密封，故漏氣為不可免之現象，但一般以 15% 為正常，所以旋窯廢氣最後出口排氣量之一般值 (normal value) 應在  $1.8\text{--}2.0 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$  左右，但以甲廠 5 號窑為例 (28)，排氣量有高達  $3.58 \text{ Nm}^3/\text{kg-cl}$ ，雖然稍有稀釋的作用，但由於需要處理廢氣體積的加大，可能造成集塵設備之超重負荷，降低效率，反而得不償失，而且若有破洞的發生，在操作狀況改變形成正壓時，即是造成粉料洩出的主要排放點。

## (5) 靜電集塵器故障：

目前水泥廠採用之靜電集塵器，大部分為兩室或三室串聯的型式，常常因為極板、極線的變形，極線的腐蝕斷落，敲擊系統的故障，外部電氣設備的故障，或是燃燒不穩定，CO 量超過設定值均會造成靜電集塵器的踏開，而失去收塵的功能。根據本研究現場訪視與各廠提供資料結果顯示，各廠停窑之原因有原料不足，飼料系統故障、餘熱系統故障、旋窯系統故障、冷却系統故障、燃燒系統故障、集塵系統故障、熟料系統故障、儀表故障、停電、缺水等，集塵系統故障所需之修復時間達 8—10 小時，而水泥廠經常不會因為集塵系統故障而停窑修復，須等到有上列原因而需停窑時，再順便修復集塵系統，因此造成粒狀物之大量排放，故可考慮串聯或並聯多室式集塵設備，以減輕當集塵設備故障而無法停窑修復時之粒狀物排放量。

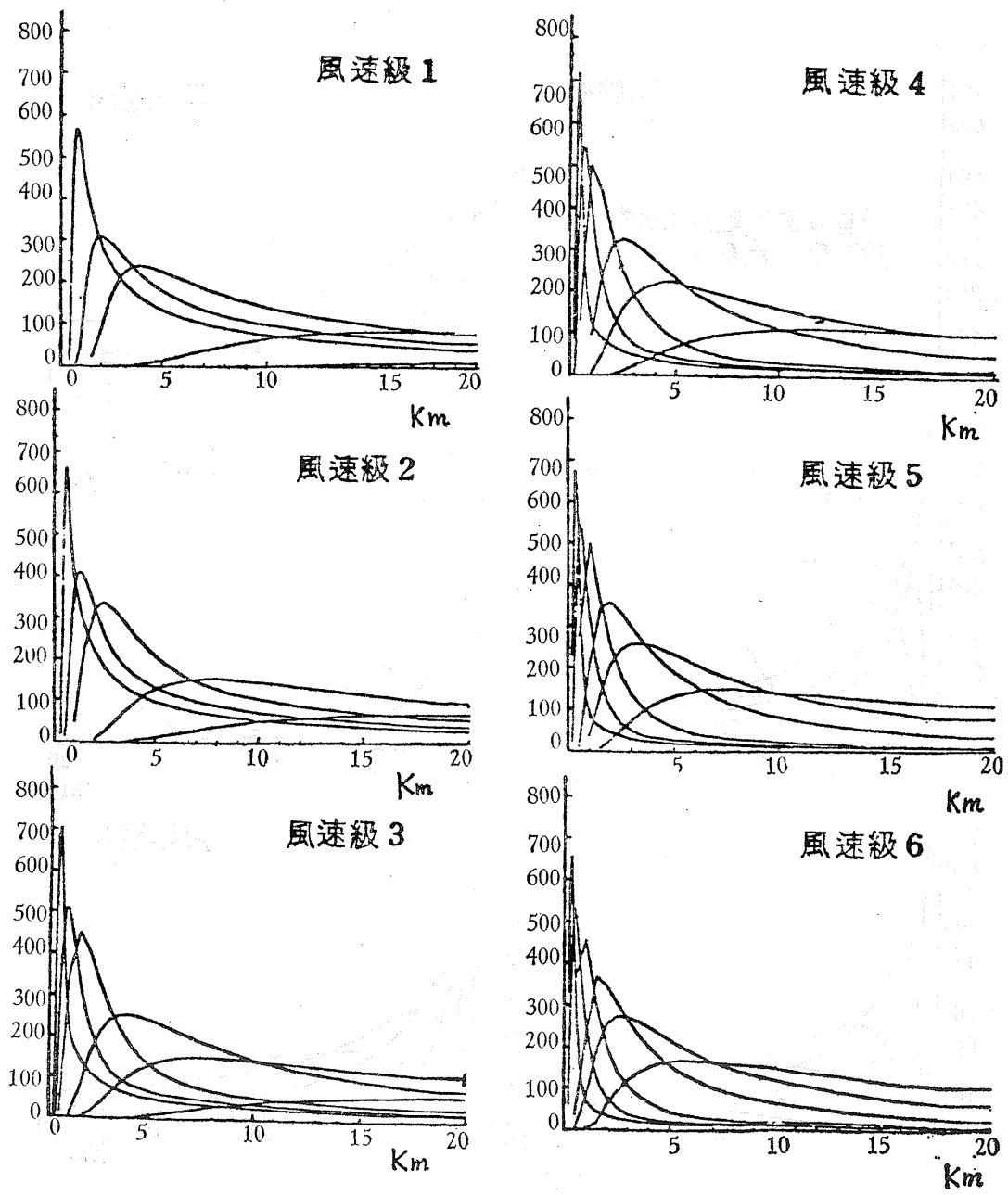
## 四、結論

水泥業之空氣污染問題，主要還是在微粒物質之排放，氣態污染物之產生，尚待更進一步之研究，才可推估得其排放情形。目前各水泥廠對微粒排放之情形均能體認其問題之嚴重性，唯在空氣污染防治設備之充實與操作維護上，則尚待加強，特別是各項設備操作之穩定，避免防污設備故障是為首要之務。對於排放標準之研訂，宜作更深入之探討後再作適切之修正，俾使環境保護工作益臻完善。



圖一 距離—濃度變化圖 (混合層高度 : 250m)

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



圖二 距離—濃度變化圖 (混合層高度：500m)