

# 水份調節法在水泥廠靜電集塵器的應用

## — 煙道氣調節技術 —

楊柳村\* 張瑞進\*\*

### 摘要

利用蒸汽或水份的噴注增加排放廢氣中的濕度，以便有效地控制塵粒電阻，達到改善靜電集塵器的集塵性能，是工業製程中經常使用的煙道氣調節法 (flue gas condition)。尤其在高溫煙道氣之排氣過程中使用噴水方法處理，一方面可以冷卻降溫，減少處理流量，另一方面可增加煙道氣濕度，調節塵粒電阻，更具有雙重調節靜電集塵性能的效果。

本文主要討論水份調節方式對於水泥廠熟料靜電集塵器集塵效益的影響。從水份對於塵粒電阻的影響，冷卻降溫，至減少氣體處理量的觀點，逐步探討水份提昇靜電集塵性能的可行性。最後，並由微細粒子的收集以及增加水份可能衍生操作的問題，評估水份調節在於水泥廠靜電集塵的效益。

### 一、前言

靜電集塵器是一種可有效處理廢氣中微細塵粒的污染防治設備，在水泥工業上的應用，除兼具污染防治與資源回收的功能外，同時又有高度自動化的可行性，因此廣為資本與勞力密集的水泥業所採用。

近年來，由於廢氣中粒狀物排放法規日趨嚴格，小粒徑塵粒的排放也漸漸受到重視，國內水泥業者為因應此環保法規的新趨勢，也紛紛投下鉅資，更新既有的污染防治設備，以符合更嚴格的環保法規。靜電集塵器挾其較高的集塵性能及低運轉費用的優勢，已成為水泥廠最主要的空氣污染防治設備。然而，靜電集塵器初期製造價格昂貴，以增添設備提高集塵性能的方式，勢必要耗費鉅大的投資與時間。因此如何提昇既有靜電集塵性能以符合環保法規，是國內水泥廠現階段的燃眉之急。

\*工研院能資所空氣污染研究室副研究員

\*\*工研院能資所空氣污染研究室主任

為協助產業界面對日益嚴格的環保標準，工研院能資所自七十八年起，在經濟部科技顧問室資助下，進行一系列空氣污染防治技術本土化的開發<sup>(1)(2)</sup>。在比較各種靜電集塵性能改善方案後，本所選擇最為經濟的水份調節方法，作為水泥廠靜電集塵器性能提昇技術的開發與研究。利用國內首座靜電集塵實驗廠(2MW)的功能<sup>(3)(4)(5)</sup>，藉模擬水泥廠靜電集塵器的操作，以開發水份調節應用在水泥廠靜電集塵器的操作技術。

本文乃就塵粒電阻的變化，以及降溫減少廢氣處理流量的觀點，討論水份調節的效果；並以實際案例計算說明水份調節對於集塵效率的影響，以作為業者應用上的參考。

## 二、水份調節原理

在煙道或噴霧水塔內注入蒸汽或注入水份以增加廢氣中水份的含量，調節塵粒電阻改善集塵性能，是工業製程上經常採用的方法。在水份的噴注效益方面，除了促進塵粒表面電阻的作用外，水份也可吸收廢氣含有的熱量，一方面降低廢氣溫度，而達到增進電力操作性能；另一方面，減少廢氣處理體積，提昇靜電集塵性能的功效<sup>(6)(7)(8)(9)</sup>。

水份含有很高的蒸發潛熱(1 atm 下  $\Delta H = 540 \text{ kcal/kg}$ )。當水份與高溫廢氣接觸，水份會吸收廢氣中的熱量，降低廢氣的溫度。而廢氣經冷卻的結果<sup>(5)</sup>，也可以增加氣體的密度，因而可在較大的操作電壓下操作；其次，降低溫度可以減少氣體的黏度而增加塵粒的漂移速度<sup>(6)</sup>(migration velocity)。

廢氣降低溫度最大的優點，乃在於廢氣經由冷卻的結果，可以減少氣體處理流量，間接地增加有效集塵面積(SCA)，而達到提昇集塵性能的功效。設未加入水份時，氣流溫度為  $T_1$ 、流量為  $Q_1$ 、加入水份後氣流溫度降為  $T_2$ 、流量為  $Q_3$  ( $Q_3 = Q_1 + Q_2$ ； $Q_2$ 為加入水份後，水份增加之體積)，由於溫降對於體積的變化大於水份增加體積的變化，因此  $Q_1 > Q_3$  根據氏公式(Deutch Formula)：

$$\eta = 1 - \exp \left[ - \frac{Ap}{Q} \cdot \omega \right]$$

$$= 1 - \exp \left[ - SCA \cdot \omega \right]$$

$\eta$ ：集塵效率(%)

$Ap$ ：總集塵面積( $\text{m}^2$ )

$Q$ ：流量( $\text{m}^3/\text{hr}$ )

$\omega$ ：漂移速度(migration velocity, m/sec)

$SCA = \frac{Ap}{Q}$ ：有效集塵面積(Specific Area, sec/m)

未調節前集塵效率， $\eta_1$ ，

$$\eta_1 = 1 - \exp \left[ - \frac{Ap_1}{Q_1} \cdot \omega \right]$$

加入水份後，集塵效率， $\eta_2$ ，

$$\eta_2 = 1 - \text{Exp} \left[ -\frac{\Delta p_1}{Q_1} \cdot \omega \right]$$

設電力條件與集塵面積不變，則  $\Delta p_1 = \Delta p_2$ ， $\omega_1 = \omega_2$

$$\therefore Q_1 > Q_2 \quad \therefore \eta_2 > \eta_1$$

即表示加入水份，在電力條件不變的狀況下，可提高靜電集塵效率。

在塵粒電阻方面，水份在低溫時會在塵灰層(dust layer)冷凝形成水膜(film)，當酸氣存在下會增強塵粒表面與吸附酸氣的導電性而降低塵粒電阻，此即表面電阻的調節作用。在水泥廠生料塵粒收集的製程中，即利用噴霧水塔，將靜電集塵器入口溫度控制在  $90^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$  之間，利用水份調節塵粒電阻的作用控制塵粒電阻的範圍，增進靜電集塵器的操作性能。然而，在水泥窯冷卻機靜電集塵器，乃利用體積電阻的作用，維持在熱端(Hotside) 下操作 (溫度約在  $250^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ ) (參見圖 1)；加入水份固然會使得廢氣溫度降低，而具有減少廢氣處理體積的效果，但是同樣地也會使塵粒電阻的變化向低溫偏移 (參見圖 2)。若是加入水份的結果，使得偏移的方向為水平方向，則加入水份可以增加靜電集塵器集塵性能。反之，偏移的方向是向上，則需謹慎地評估，尤其在塵粒電阻接近於臨界點時 ( $10^{11} \sim 10^{12} \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ )，更是特別考慮的項目。至於加入水份的多寡，除了應考慮塵粒電阻的變化趨勢以外，由於塵粒之粘度較高，尚須考慮調整敲擊的力量與敲擊的頻率，以維持正常操作。

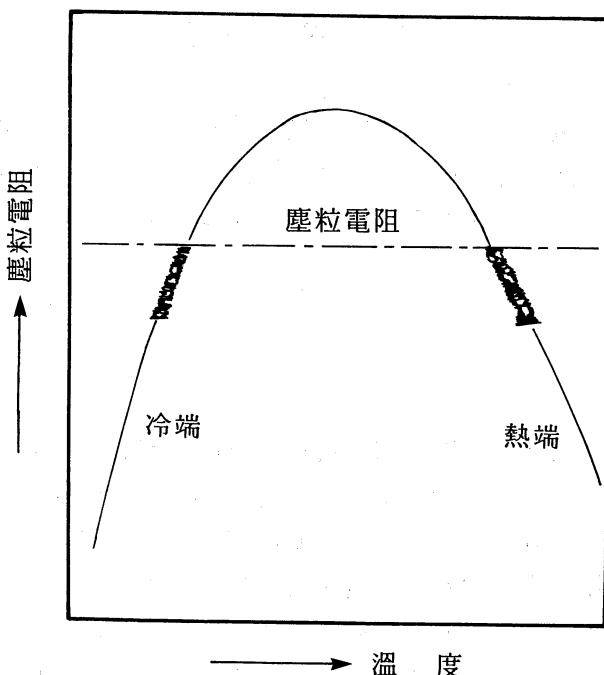


圖 1 依高溫與低溫塵粒電阻的不同，靜電集塵器可分為熱端(Hot-side)與冷端(cold-side)<sup>(10)</sup>。

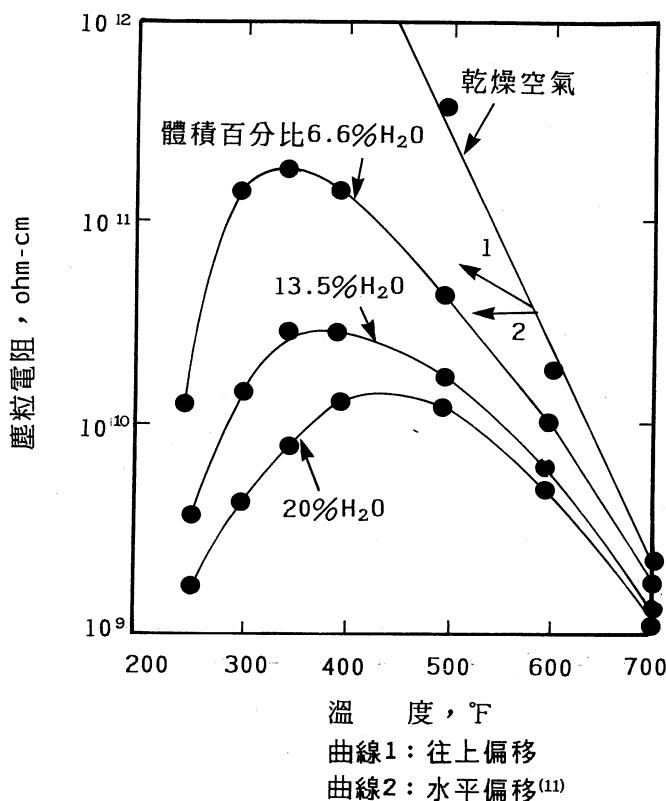


圖 2 塵料電阻vs、水份與溫度圖。

### 三、塵粒電阻效應

一般而言，各電力區域的操作電壓與電流特性曲線(V-I characteristic curve)可用於解釋靜電集塵器的集塵性能。因此，在設計一部新的靜電集塵器或改善現有靜電集塵器性能時，塵粒電阻是首要考慮的重要參數。就塵粒灰層的電場強度而言：

$$E = RI \quad (\text{參見圖 3})$$

E：電場強度，kv/cm

I：電量電流密度，A/cm<sup>2</sup>

R：塵粒電阻，Ω - cm

因此，電流密度不變時，高塵粒電阻將使得塵灰層表面之電場強度增加。當電場強度大於崩潰電壓(break voltage)時，即產生反電暈(back corona)（參見圖 4）而影響靜電集塵器的集塵性能，除此之外，高塵粒電阻將使得塵灰附著在極板的力量增加而不易去除。相對地，低塵粒電阻塵粒一接觸極板則易於喪失電子，使塵粒無足夠的吸引力附著在極板上（參見圖 5）；因此，隨著敲擊或氣流通過再度逸散至煙道中，而導致靜電集塵器集塵性能的降低。一般理想的塵粒電阻範圍在  $10^9 \sim 10^{11}$  ohm-cm 之間<sup>(13)</sup>。（參見圖 6）。

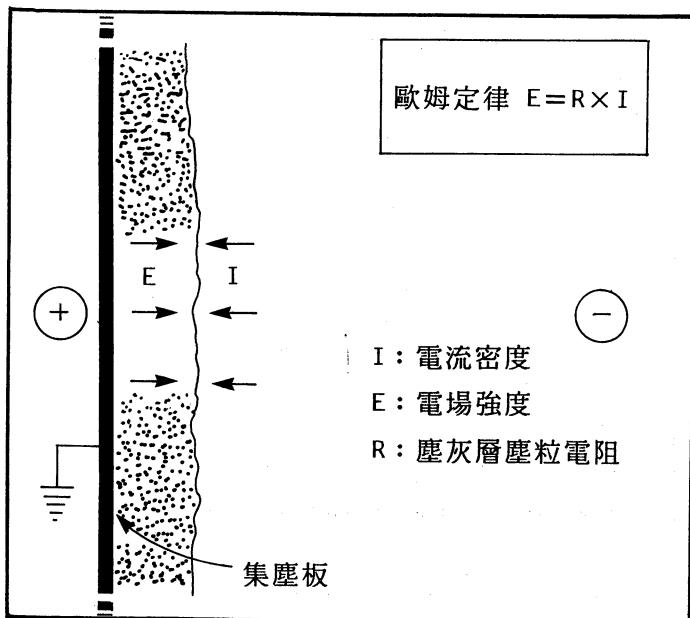


圖3 塘灰層電場強度示意圖<sup>(12)</sup>

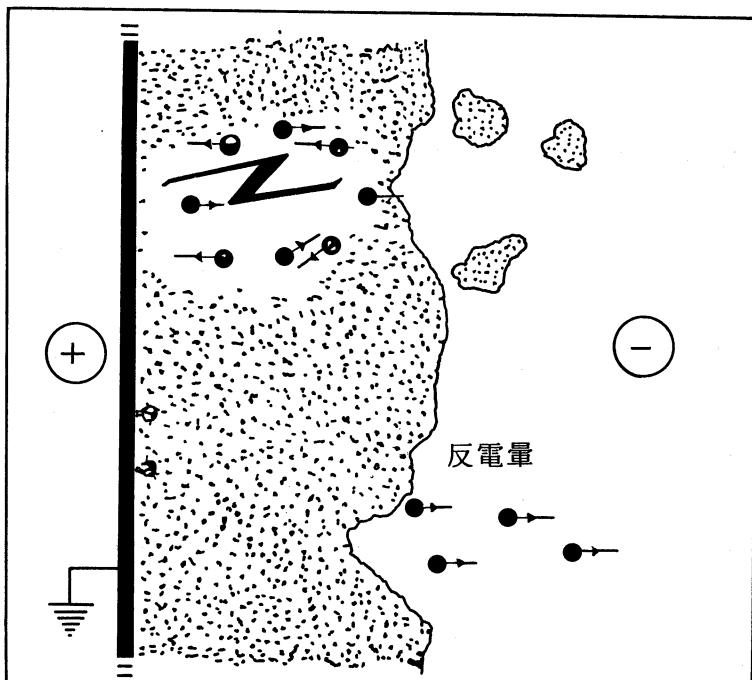


圖4 反電暈現象示意圖<sup>(12)</sup>

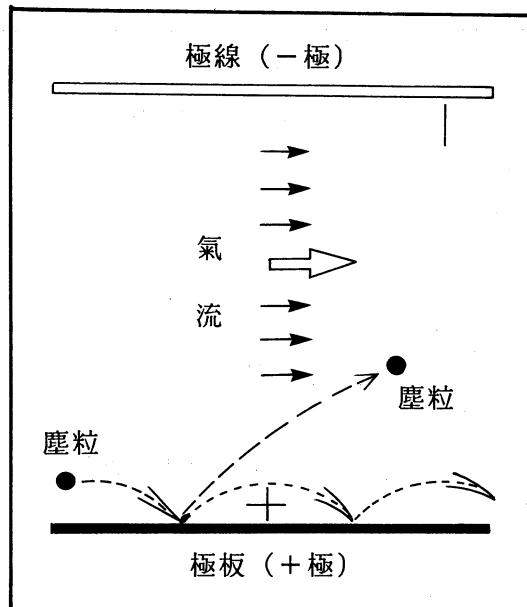


圖 5 低電阻塵粒易於喪失電子，形成跳躍(dance)  
現象或逸散至氣流中<sup>(10)</sup>

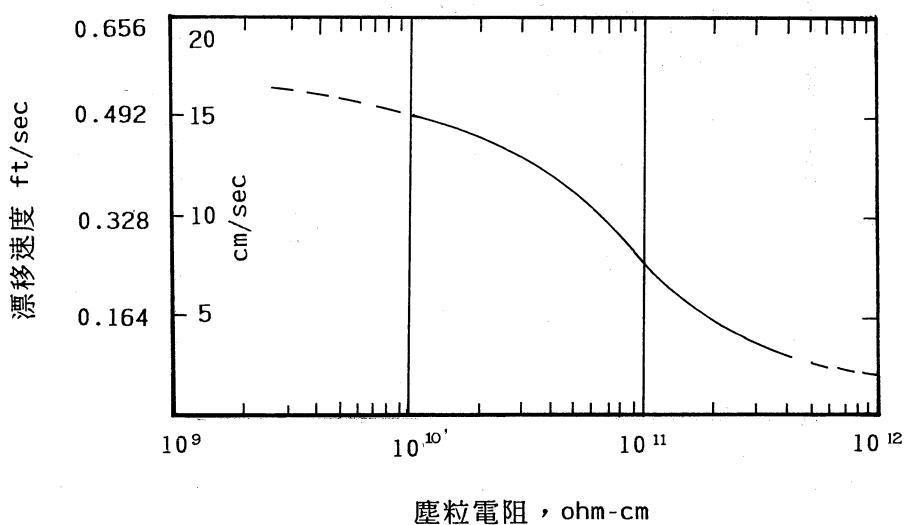


圖 6  $\omega$  在塵粒電阻大於  $10^{11}$  ohm-cm 以上時，即明顯呈現下降趨勢。  
因此一般操作維持在  $10^9 \sim 10^{11}$  ohm-cm 間<sup>(14)</sup>。

塵粒電阻的影響因素很多，包括溫度、氣體成份（水份或酸氣）、塵粒組成、電場強度、塵灰孔隙度以及塵灰的比表面積。為了簡化起見，可將這些因素歸納為三項組合<sup>(19)</sup>：即體積電阻 (volume resistivity)、表面電阻 (surface resistivity) 與酸氣吸附電阻 (absorbed acid resistivity) 茲分別說明如下：

### 3.1 體積電阻

體積電阻係指電子穿透塵粒體積使之導電的難易程度，一般較不受外界環境的影響，僅受分子本身束縛電子的作用所影響。在高溫時，電子獲得較高的能量，而明顯地降低體積電阻，其實驗公式如下<sup>(19)</sup>：

$$\rho_v = \text{EXP} [ -1.89161\ln X - 0.96961\ln Y + 1.2371\ln Z \\ + 3.63876 - (0.069078)E + \frac{9980.58}{T} ]$$

$\rho_v$ ：體積電阻

X：Li+Na原子濃度比率 (percent atomic concentration)

Y：Fe原子濃度比率

Z：Mg+Ca原子濃度比率

E：供應電場強度 (kv/cm)

T：絕對溫度 (°K)

### 3.2 表面電阻

表面電阻係指電子游移在塵粒表面之導電難易程度。因此表面電阻易受溫度、電場強度以及水份濃度的影響；在低溫條件下，因水氣受塵粒吸收或在塵粒表面凝結，使得表面電阻的作用極為明顯，其實驗公式如下<sup>(19)</sup>：

$$\rho_s = \text{EXP} \{ 27.59774 - 2.23331\ln X - (0.00176)W \\ + (0.069078)E - (0.00073895)W [\text{EXP} (\frac{2303.3}{T})] \}$$

$\rho_s$ ：表面電阻 (ohm-cm)

W：煙道氣水份含量 (Vol%)

### 3.3 酸氣吸附電阻

酸氣冷凝在塵粒表面或被塵粒吸附致塵粒電阻產生變化，此因素稱之為酸氣吸附電阻。實驗發展之公式<sup>(19)</sup>乃以SO<sub>3</sub>為主，其中SO<sub>3</sub>又與K、Ca、Mg作用。因此依Ca、Mg、K成份，公式分別為：

Z≤3.5或 X≥1.0%時

$$\rho a = \text{EXP} [85.1450 - (0.708046) CSO_3 - \frac{23267.2}{T} - (0.069078) E]$$

Z>3.5或X<1.0%時

$$\rho a = \text{EXP} [59.0677 - (0.854721) CSO_3 - \frac{13409.47}{T} - (0.069078) E]$$

$\rho a$ ：酸氣吸附電阻

CSO<sub>3</sub>: SO<sub>3</sub> 濃度 (ppm, 乾燥情況下)

K : 鉀原子濃度

### 3.4 塵粒電阻

塵粒電阻即由前三項所組合，其公式為：

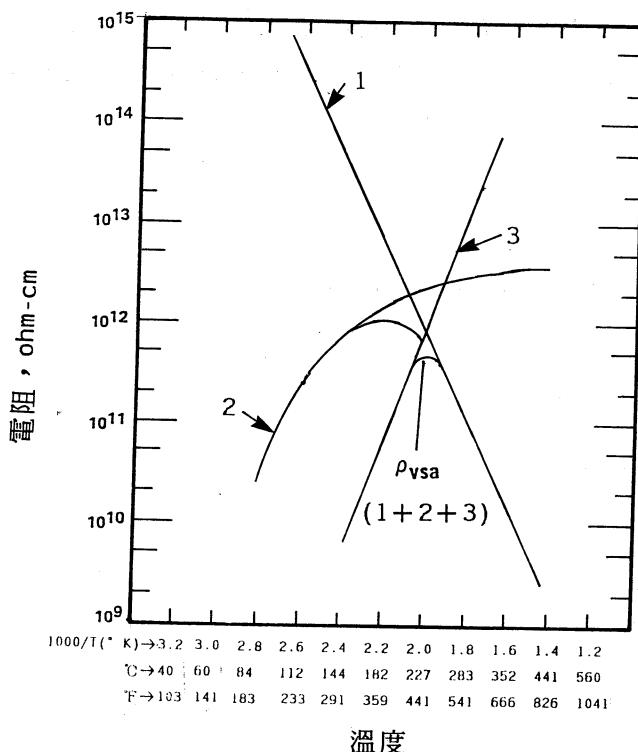
$$\frac{1}{\rho vs} = \frac{1}{\rho v} + \frac{1}{\rho s}$$

$$\frac{1}{\rho vsa} = \frac{1}{\rho vs} + \frac{1}{\rho a}$$

$\rho vsa$ ：塵粒電阻

塵粒電阻依據體積電阻、表面電阻與酸氣吸附電阻主導強弱的不同，隨溫度的變化趨勢會呈現尖峰的現象（參見圖7）。其尖峰的遞移變化又隨著塵粒成份與水份、酸氣而有所不同。靜電集塵器在尋求最佳的設計與操作，即盡量避免氣體溫度在此範圍之內；若氣體溫度在最不理想情況時（例如在曲線頂端），則須考慮將氣體加以冷卻以降低其溫度或予以噴霧以增加其濕度，或二者同時使用以進行調節<sup>(9)</sup>。

塵粒電阻對於溫度變化的趨勢，可使用塵粒電阻測試儀在實驗室或現場測試<sup>(10)</sup>，依測試結果，選擇並控制最佳操作溫度。在缺乏塵粒電阻測試儀器時，可使用嘗試錯誤的方法比較各種不同溫度下的操作狀況，以尋求塵粒電阻對於溫度的分佈，或者應用電腦模擬程式求出塵粒電阻與溫度、水份、化學劑的變化。工研院能資所在進行水份調節對靜電集塵效益評估實驗，即使用SRI 點面式塵粒電阻測試儀測試水泥灰塵粒電阻對溫度的變化，目前已成功開發出此方面的軟體。



曲線1. 體積電阻

曲線2. 表面電阻

曲線3. 酸氣吸附電阻

曲線1.2.3 塵粒電阻<sup>(15)</sup>

圖7 塘粒電阻的元件(component) 電阻

#### 四、案例說明

例：選擇國內某一水泥廠水泥窯冷卻機出口靜電集塵器作為測試對象。其出口排放廢氣量為 $350\text{m}^3/\text{min}$ ，排放溫度 $350^{\circ}\text{C}$ ，濃度 $5\text{g}/\text{Nm}^3$ ，集塵效率 $95\%$ 。其測試條件及結果如下：

表1 測試基本條件—氣體成份與塵粒成份

成份	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{N}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
Vol%	19.19	0.48	-	76.53	0.02	3.73

塵粒組成

成份	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Li}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$
WT%	4.28	22.95	65.12	2.52	3.14	0.41	0.63	0.76	-	-	0.21

1. 計算水份注入時，溫度與塵粒電阻及體積的變化趨勢：利用本所發展之塵粒電阻電腦模擬程式<sup>16)</sup>計算塵粒電阻與水份、溫度；注入水份與溫度；注入水份與體積的關係。其運算得出結果參見圖 8、圖 9、圖 10所示。

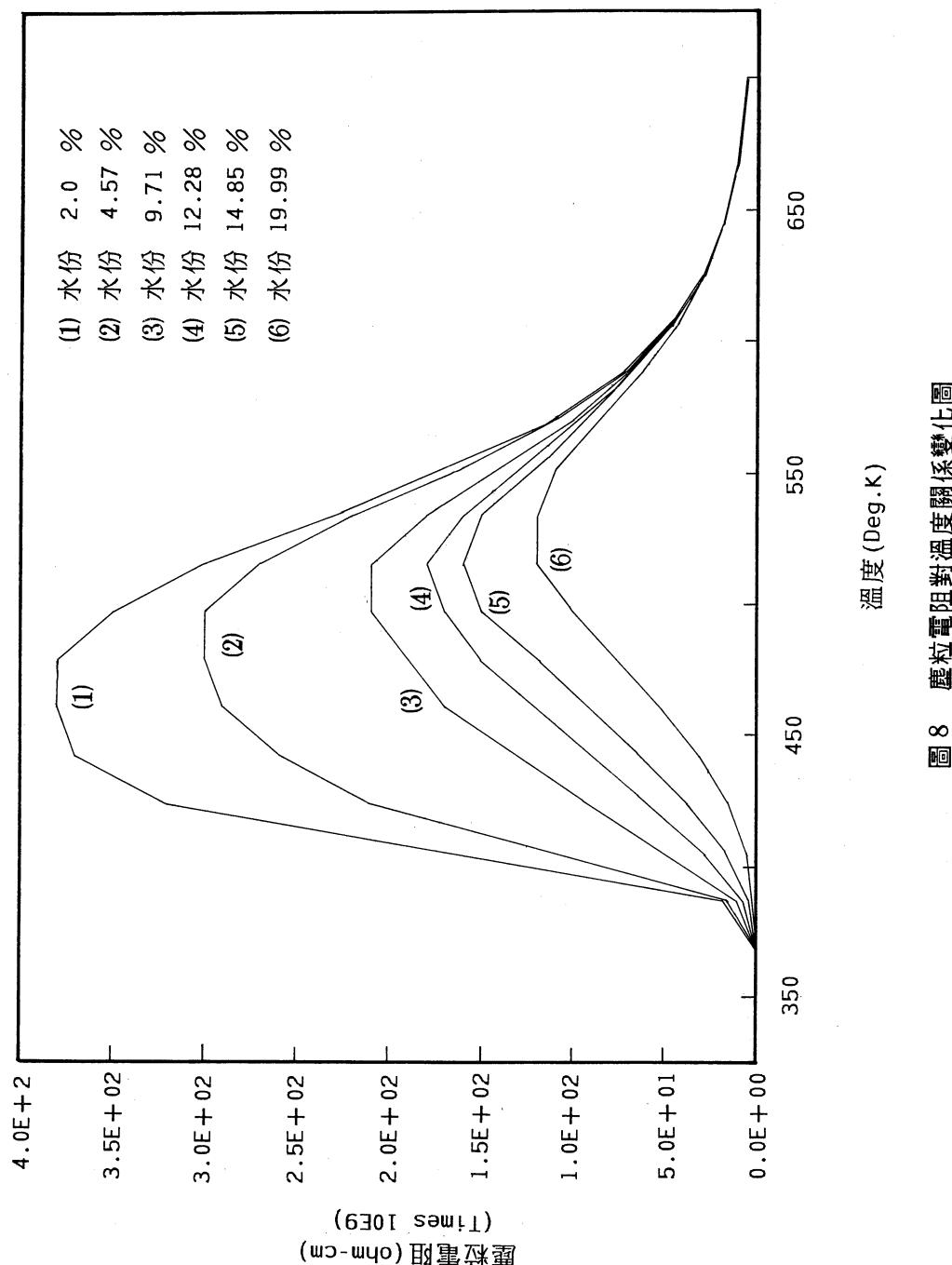


圖 8 塵粒電阻對溫度關係變化圖

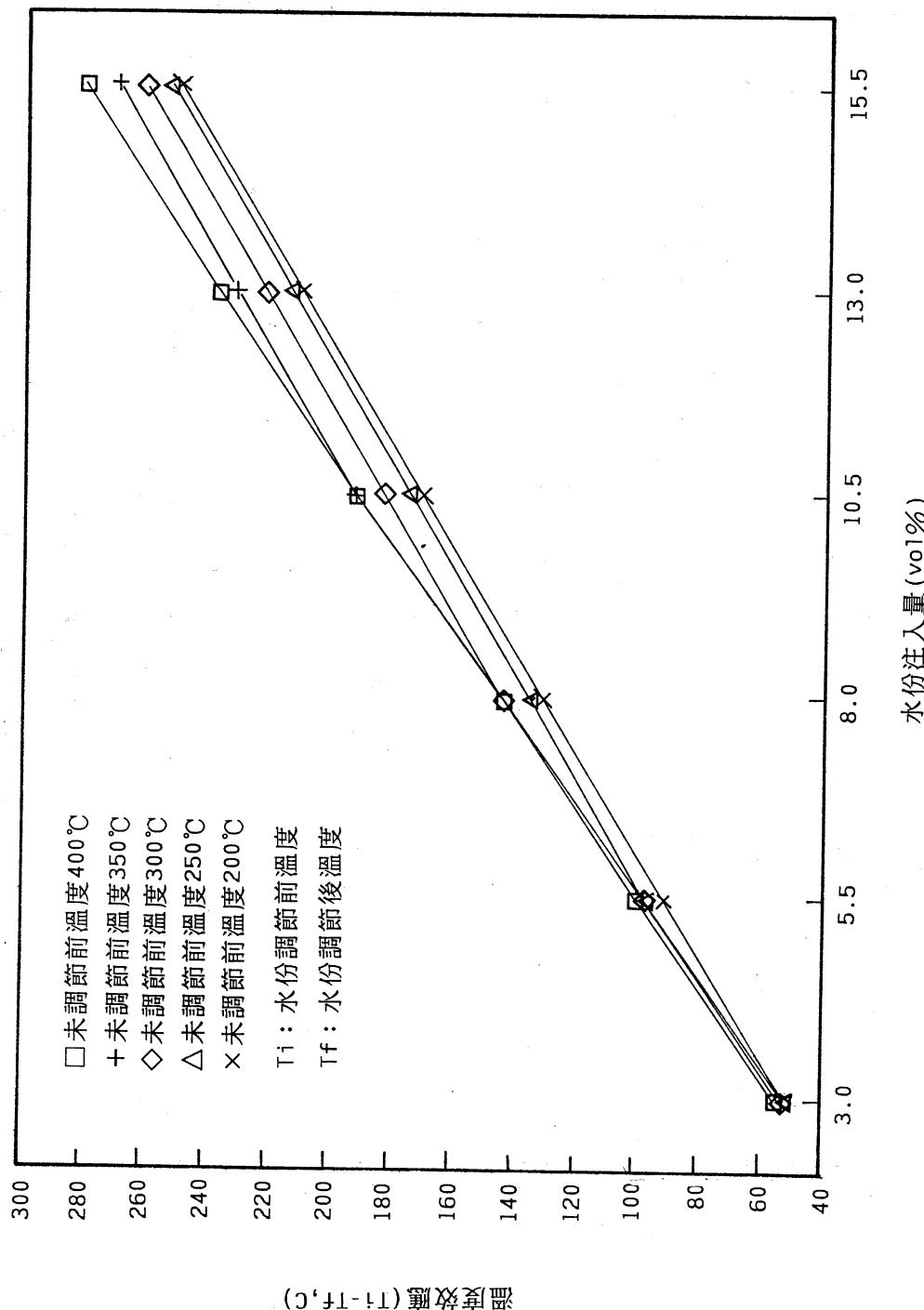
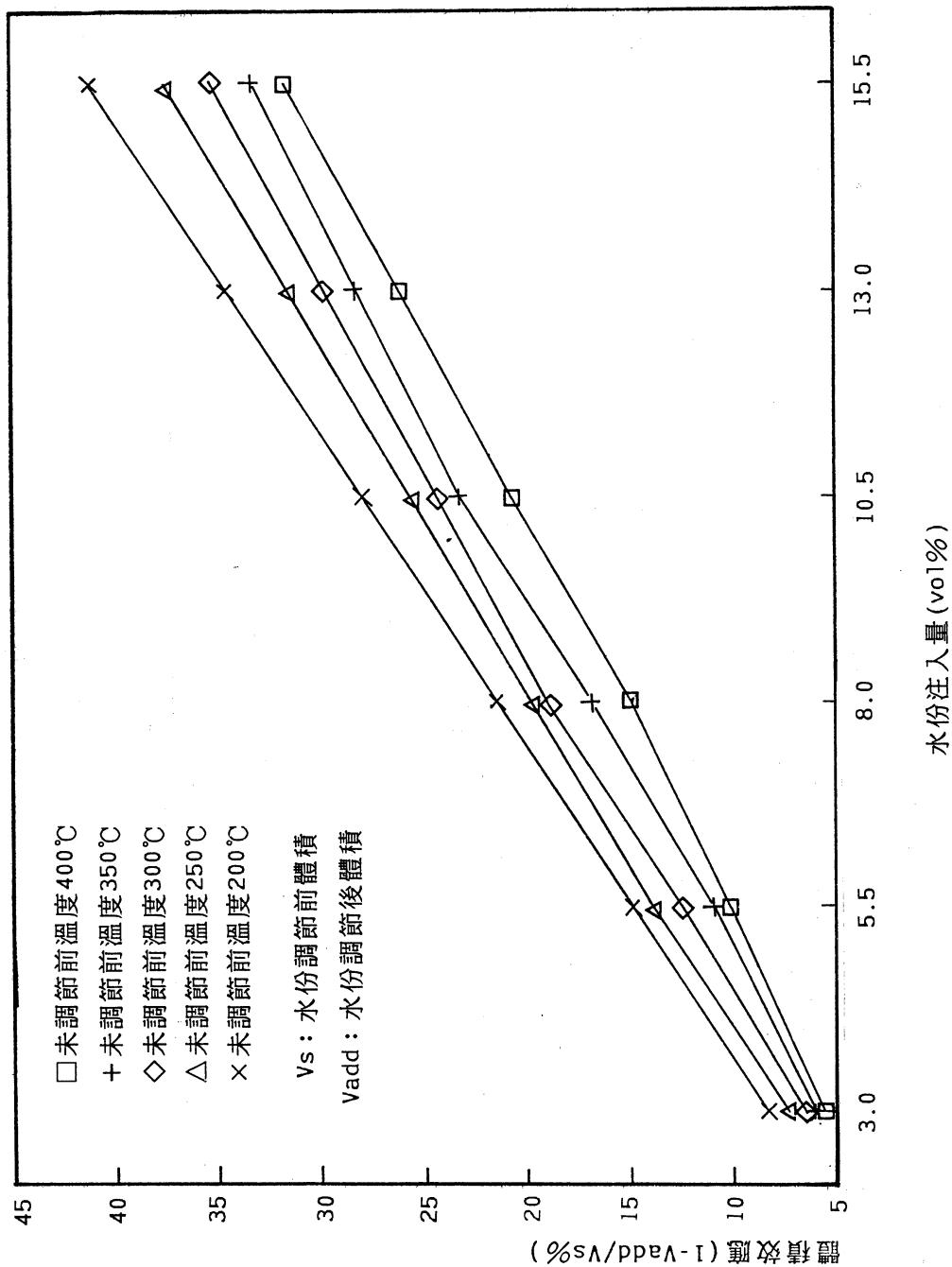


圖 9 溫度效應對注入水份關係圖



2. 運用電腦模擬運算結果，現場水份調節對集塵效益影響的測試，測試結果如下：

表 2 列舉水份調節前後的測試條件，其中，Test - II 與 Test - V 則是在只啓動第二室之敲擊器以觀察敲擊引起再逸散 (reentrainment) 的比較。六個測試的總集塵效率與部份集塵效率 (< 16  $\mu$ ) 的結果列於表 3。其中，Test - I 的測試條件與表 1 相同，其量測的集塵效率亦大致相等 (99.13% 與 99.14%)，代表實驗數據的再現性 (reproducibility)。

表 2 測試條件表

測試編號 Date	第一室 電壓 (kv)	第一室 電流 (mA)	第二室 電壓 (kv)	第二室 電流 (mA)	風量 (m <sup>3</sup> /min)	入溫度 (°C)	入塵 口粒 (g/Nm <sup>3</sup> )	水份 調節	敲擊 狀況	出口塵粒 (mg/Nm <sup>3</sup> )	備註
Test - I July 23	50	99	51	108	3279	284	21.5	NO	兩室	187.1	A
Test - II July 24	53	43	48	101	3261	290	22.4	NO	第二室	396.5	B
Test - III July 25	48	38	46	59	3270	293	10.2	NO	NO	95.1	B
Test - IV July 26	54	26	51	43	3090	260	7.7	YES	NO	139.4	B
Test - V July 27	49	35	45	144	3086	254	10.6	YES	第二室	140.1	B
Test - VI July 28	54	150	47	228	3106	251	11.5	YES	兩室	56.7	B

A - 靜電集塵器出口以冷空氣注入

B - 靜電集塵器出口未注入冷空氣

表 3 某水泥廠冷卻機靜電集塵器水份調節測試結果

Test - II	集塵效率	W cm/sec	小於 16 $\mu$ 之效率
I	99.13%	8.64	30%
II	98.23%	7.31	35%
III	96.45%	6.06	50%
IV	98.19%	6.89	75%
V	99.19%	8.26	70%
VI	99.61%	9.57	70%

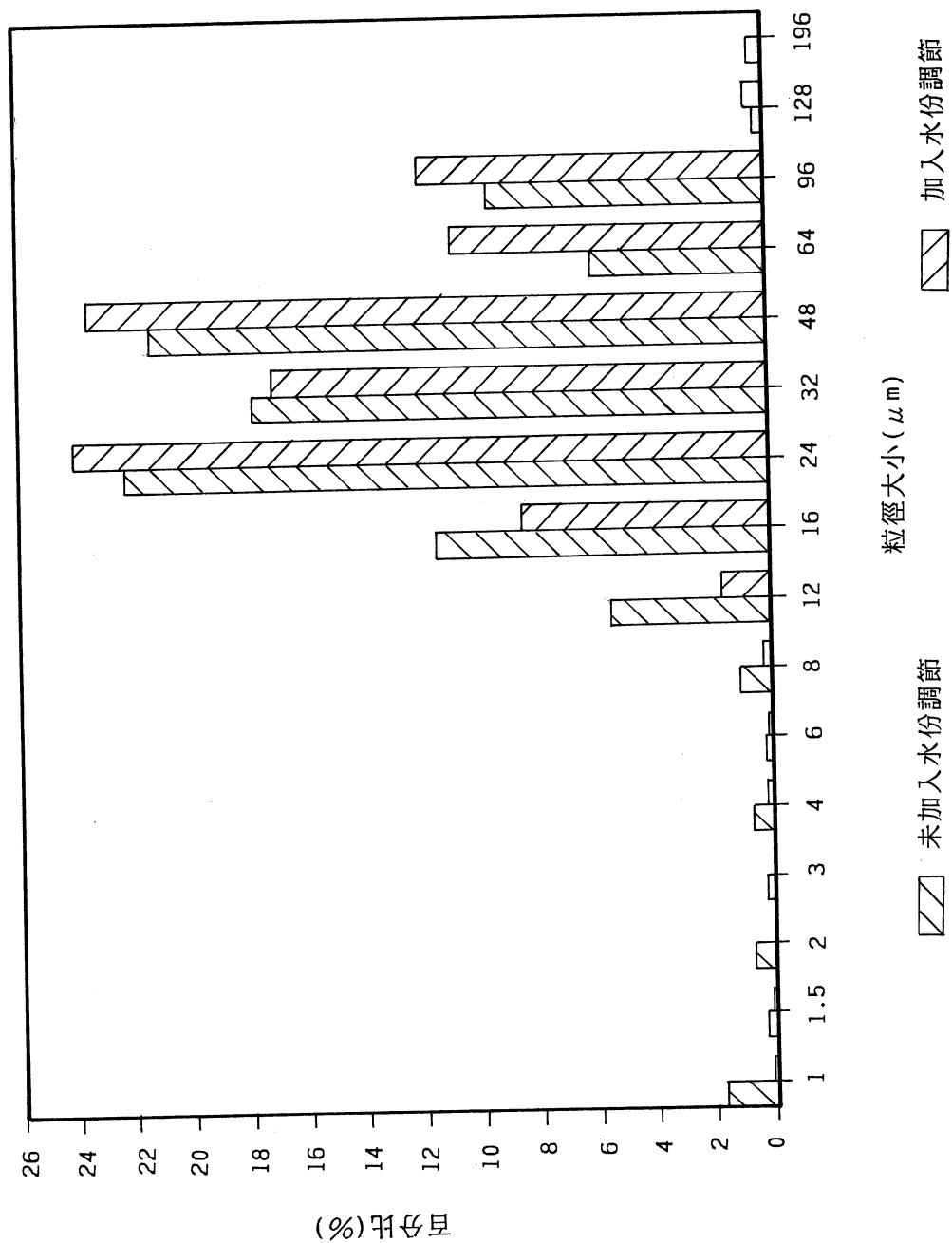


圖11 靜電集塵器入口塵粒分佈圖

比較水份調節前後之數據，集塵效率有顯著的提昇，由於噴注水於煙道氣中，造成操作溫度降低約25~30°C，雖然水份蒸發會增加煙道氣的體積，但整體而言，體積仍下降約 6%，此為效率提昇的主因，此亦可從圖8得到佐証。另外，由於CEP-2 是操作在熱端(Not side)，由圖9可看出，溫度降低使操作點接近電阻的高峰區 (peak region)，在控制水份調節注入量時，選擇溫度降低25~30°C 即避免此區域，電阻係數略為降低，使等效漂移速度增加，進一步提昇集塵效率。

水份調節之另一目的則是提昇小顆塵粒(<16 μ)的部份集塵效率。未加入水之前，此部份集塵效率為50%，當敲擊一室及兩室時，所量測之部份效率分別降低15%與20%，顯見再逸散的嚴重性。經過水份調節後，小於16 μ之集塵效率提昇為75%，而敲擊所降低的效率僅為5%。以上結果代表水份調節對水泥塵粒具有凝聚作用(agglomeration)，使得小於16 μ之集塵效率提高。圖11進一步證實入口塵粒調節前後的粒徑有顯著的變化，也因為凝聚成較大塵粒，不僅提高總集塵效率，同時降低再逸散的損失，如Test IV 與V的比較。

## 五、結語

水份調節方法應用在水泥廠熟料靜電集塵器的操作中，固然能夠達到增加濕度與降溫減少處理流量的效果，但是，降低溫度的同時也會使得塵粒電阻的變化由高溫往低溫遞移。因此，應用水份調節技術作為靜電集塵性能提昇方法之前，必須先行評估其操作電力特性以及體積效益的影響。工研院能資所目前正利用國內首座靜電集塵實驗廠，進行一系列水份注入對於水泥熟料靜電集塵性能測試實驗，也願意提供業者此方面技術上的服務，希望有興趣的業者可向本院洽詢。

## 六、參考資料

- (1)張瑞進，祝經益，王劍煌，連永昌，工研院靜電集塵實驗廠之設計及功能規劃，第六屆空氣污染控制技術研討會，中華民國78年 9月27日。
- (2)張瑞進，王劍煌，工研院靜電集塵實驗廠規劃及其研究方向，工業污染防治季刊第八卷第三期，pp60-76，78年 7月。
- (3)葛家賢，張瑞進，能資所固定空氣污染源排放控制技術的開發 I . 靜電集塵技術，能源資源與環保季刊，11期，pp22-31，中華民國79年 8月。
- (4)Chang R.C. and Ger J.S. , An investigation of wider plate spacing design on cement cooler ESP, 4th International Conference on Electrostatic Precipitation, Beijing, Sep.1990.
- (5)葛家賢，張瑞進，靜電集塵器之電壓電流特性曲線，機械工程，175期，pp9-16，中

華民國79年 6月。

- (6)D.J. Helfritch, P.L. Feldman and B. Neistein, Electrostatic Precipitator upgrades for furnace solvent injection, EPRI Report, paper ID.7B。
- (7)J.DALMON, G.L. DALTON & R.S. HANSEN, A comparison of electrostatic precipitator performance enhancement technologies , 6th symposium on the transfer and utilization of particulate control technology, vol. 2, pp3.1-3.16, Nov. 1986.
- (8)Christer Mauritzer, Kjell Porle, Martin Kirston, Experience with pulsed energization of precipitators for a wide range of processes and operating condition, 3rd International Conference on Electrostatic Precipitation, Italy, pp534-556, Oct. 1987.
- (9)工研院能資所，幸福水泥公司東澳廠，靜電集塵器(CEP-2) 性能評估計劃期末報告，中華民國79年 9月。
- (10)Jaroslav Bohm, Electrostatic precipitator, Elsevier Scientific Publishing Company, p215,p171,1982.
- (11)U. S. Environmental Protection Agency, Control techniques for particulate emissions from stationary sources,vol 1,office of air quality planning and standards,Research Triangle Park North Casobina, 1980.
- (12)Sigvard Matts, Flakt Electrostatic Precipitator an update on sizing and pulsing, Flake Company, p7。
- (13)Southern Research Institute, Electrostatic Precipitator Guideline, vol 3, Troubleshooting, EPRI CS-5198, pp5.20-5.22,1987。
- (14)H.J.White, Industrial electrostatic precipitation, Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1963。
- (15)Roy E. Bickelhaupt,A technique for predicting fly ash resistivity, EPA-600 /T-79-204,pp10-61,1979。
- (16)楊柳村，塵粒電阻電腦模擬程式，申請著作權之中。