

靜電集塵機中敲擊再逸散對集塵效能之影響

葉志强* 張瑞進**

摘要

靜電集塵機(electrostatic precipitator, 簡稱ESP)是收集空氣中微細塵粒的重要空氣污染防治設備。近年來，由於人們對於環保問題的重視，促使環保標準越來越高，在現有的污染防治設備上，便產生了各種改善的方法，靜電集塵機也不例外，在乾式的靜電集塵機中，敲擊(rapping)對於靜電集塵機中再逸散(reentrainment)影響很大。本文介紹目前在靜電集塵機中使用的敲擊系統，敲擊再逸散的基本理論，以及在評估敲擊再逸散所用的量測工具，重要變數及參數，以增進國內對這方面的瞭解。

一、前言

人類文明日新月異，發展越來越快，在新興科技產品隨處可見的今日社會，也飽受著其所伴隨而來的大問題—環境問題一的威脅。環境問題的範圍甚廣，舉凡水污染、空氣污染、噪音、惡臭、土壤污染、地盤下陷、振動及廢棄物均包含在內。在空氣污染方面，主要問題來自空氣中的懸浮微粒(suspended particulate)、SO_x、NO_x等排放物，在去除空氣中的懸浮微粒上，靜電集塵機是一相當有效的設備。因為靜電集塵機包含了以下優點，故其使用日漸廣泛；1. 對於各種粒徑大小的塵粒，均有很高的集塵效率。2. 操作成本低。3. 處理量大。4. 操作溫度範圍大(90°C~425°C)和5. 使用壽命長。

靜電集塵機主要的原理，是利用外加高壓電壓的方式，將自煙囪或其他處排放，含有大量塵粒的廢氣導入，使空氣中的塵粒充電加速後，再使用接地金屬板收集這些已被充電的懸浮微粒，而達到淨化空氣的目的。其主要步驟可分為四大部份：

1. 電場與電暈電流(corona current)之產生。
2. 懸浮微粒之充電(particle charging)。
3. 荷電微粒之捕集(particle collection)。
4. 被捕捉微粒之去除(particle removal)。

*工業技術研究院能源與資源研究所空氣污染研究室副研究員

**工業技術研究院能源與資源研究所空氣污染研究室主任

本文將針對第四部份，作較詳細的探討，對於其他三部份，有興趣者可參照有關資料，在此不再贅述。

二、敲擊對集塵效能的影響

在靜電集塵機的操作中，使得已附著於集塵板上的固體塵粒，再落入氣流中的現象叫再逸散。產生逸散之主要原因有以下幾種：

1. 由於敲擊產生再逸散。
2. 塵粒被高流速氣體沖刷下來。
3. 在集塵極 (collecting electrode) 上因火花 (spark) 發生，使已收集到的灰塵再掉落。
4. 大顆塵粒撞到灰塵層，又跳回氣流中。
5. 由於靜電力的作用，造成灰塵層間之排斥力。
6. 灰斗 (hopper) 因滾起 (boil-up) 造成的再逸散。

在以上六種原因中敲擊再逸散佔總逸散量的 6.5%~53% 之間，當敲擊與敲擊間的時間間隔 (敲擊間隔 rapping interval) 增加時，敲擊再逸散量減少了總逸散量的 18% 到 53%，而且，有塵粒再凝聚 (agglomeration) 成較大顆粒的現象發生。以下就敲擊及非敲擊因素產生的再逸散，分別討論之。

2.1 敲擊再逸散

針對敲擊器的使用，目前有兩種方式評估、處理，其一是常常敲擊，並給予最大的敲擊加速度，以使集塵板及放電線 (discharge wire) 上殘留的灰塵層的厚度減至最小，其二則調整敲擊變數，特別是敲擊強度 (lapping intensity) 及敲擊頻率，以使再逸散的量減少，其中以後者為最常使用。

敲擊後灰塵塵粒是否掉落，取決於塵粒分子內聚力 (coherent forces) 及附著力 (adherent forces) 合力的影響，其中若再細分，則包括了凡得瓦爾力 (Van der waals forces)，磨擦所生的電力 (triboelectric)，毛細管力 (capillary) 表面偶極 (surface dipole) 以及電場電暈力 (electric-field corona forces)，其公式如下：

$$P = (A_1/d) + (A_2/d) + 10^5 (\epsilon_0/2) [\epsilon' (J \rho K)^2 - E_g]^3$$

其中 A_1 是凡得瓦爾和偶極常數

A_2 是毛細管常數

ϵ_0 是自由空間的容許度 (permittivity)

ϵ' 是灰塵的相對容許度

J 是灰塵層的電流密度

ρ 是灰塵的電阻係數

k 是一常數，取決於顆粒的彈性 (1~20)

E_g 是氣體空間中的電場，大略等於(使用電壓)／(電極間距)

由上式可知，毛細管力，凡得瓦爾力和偶極力均為附著力，且與顆粒直徑成反比。電力則在高電阻係數顆粒時是附著力，但在低電阻係數塵粒時可能變為分離力(負值)。所以，歸納上式及其說明，影響敲擊效率(rapping efficiency)的因素包括力、灰塵層的壓縮情形及孔隙率(porosity)、複雜電偶常數(complex dielectric constant)、空氣中的濕度、灰塵層表面上所吸附的雙極性分子(adsorbed surface dipole)、物質電場強度、灰塵層的電流密度等。前面的討論，以敲擊器敲在集塵板上為主。一般說來，對於極線的敲擊，以一直敲擊為最常見的處置方式。對於放電極的敲擊，造成再逸散的影響並不大，卻間接影響著電力狀況，若久未敲擊，因極線表面積小，很容易積灰，而嚴重降低了集塵效率，應特別注意。

在灰的除去方面，泰西卡(Tassicker, O.J.)發展出一個相當基本的理論，此理論只要考慮灰塵層的拉伸強度(P)和垂直於板面的加速度(a_n)而已，它預測灰塵層在

$$a_n > \frac{P}{\delta l} = \frac{P}{M/A}$$

時便可移去， δ 是灰的體積密度， l 是灰塵層灰厚度， M/A 是單位面積上的灰塵質量。由此公式，我們可以知道，在一定灰厚度下，敲擊強度必須高於灰塵層拉伸強度與單位面積上質量之比值，才能將灰敲掉。如果加速度固定，則唯有 $M/A > P/a_n$ 式滿足時，才可移去灰塵，換句話說，當灰表面密度大於灰塵層拉伸強度對板面垂直向加速度之比時。既然單位面積上灰的質量取決於兩次敲擊間的時間間隔，敲擊間隔便與集塵板上灰除去的效率，有著密切的關係。此外，隨著敲擊器的敲擊時間長短，也和敲擊效率有關。在這方面所做過的實驗證明了泰西卡的基礎理論可給予一個約略的關係。

如果敲擊於平行於板面上的方向，其所要達到與垂直方向敲擊效率相同時，所需要的強度，大約是垂直方向的兩倍。

綜合前人在這方面所作的研究顯示，降低敲擊強度，固然降低了敲擊的效果，卻也降低了敲擊再逸散的程度，當敲擊間隔增加時，敲擊的效果亦更顯著，此外，敲擊會產生垂直層化(vertical stratification)的現象，高度越低的部份，灰塵濃度越高。以上是定性的分析。

在定量方面，就煤灰而言，當加速度在150g以上，敲擊間隔在30分鐘左右時，其敲擊再逸散量最低，增加敲擊間隔，會造成再逸散塵粒的平均粒徑加大，造成這一現象的主要原因是來自微粒的凝聚(agglomeration)。敲擊造成的再逸散，對於粒徑大小在 $2\mu m$ 以下者並不明顯，如圖1，圖2。

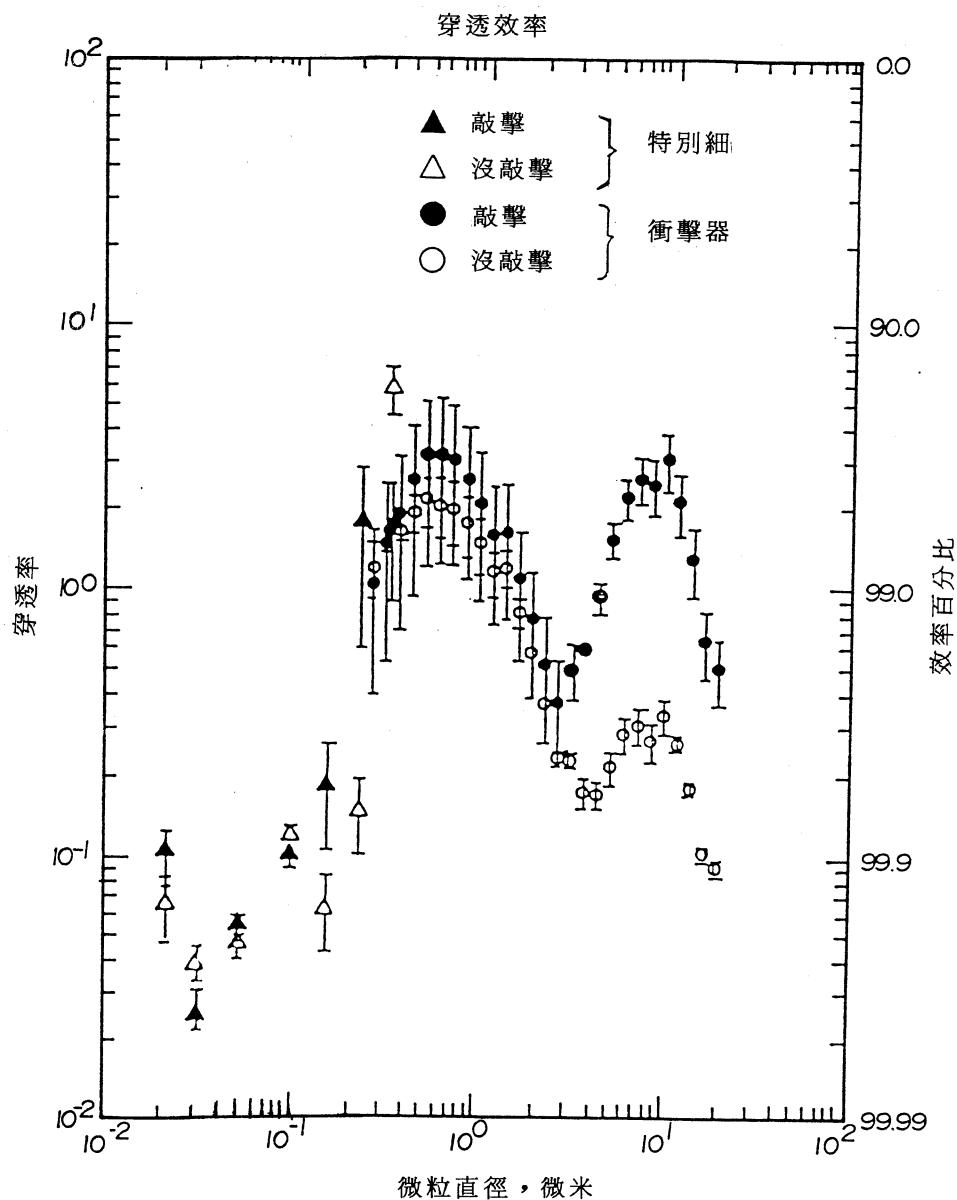


圖1 特別細取樣系統和瀑簾式衝擊器在敲擊與沒敲擊時的分級效率，
第四號工廠，在變動區間內，可信度為50%

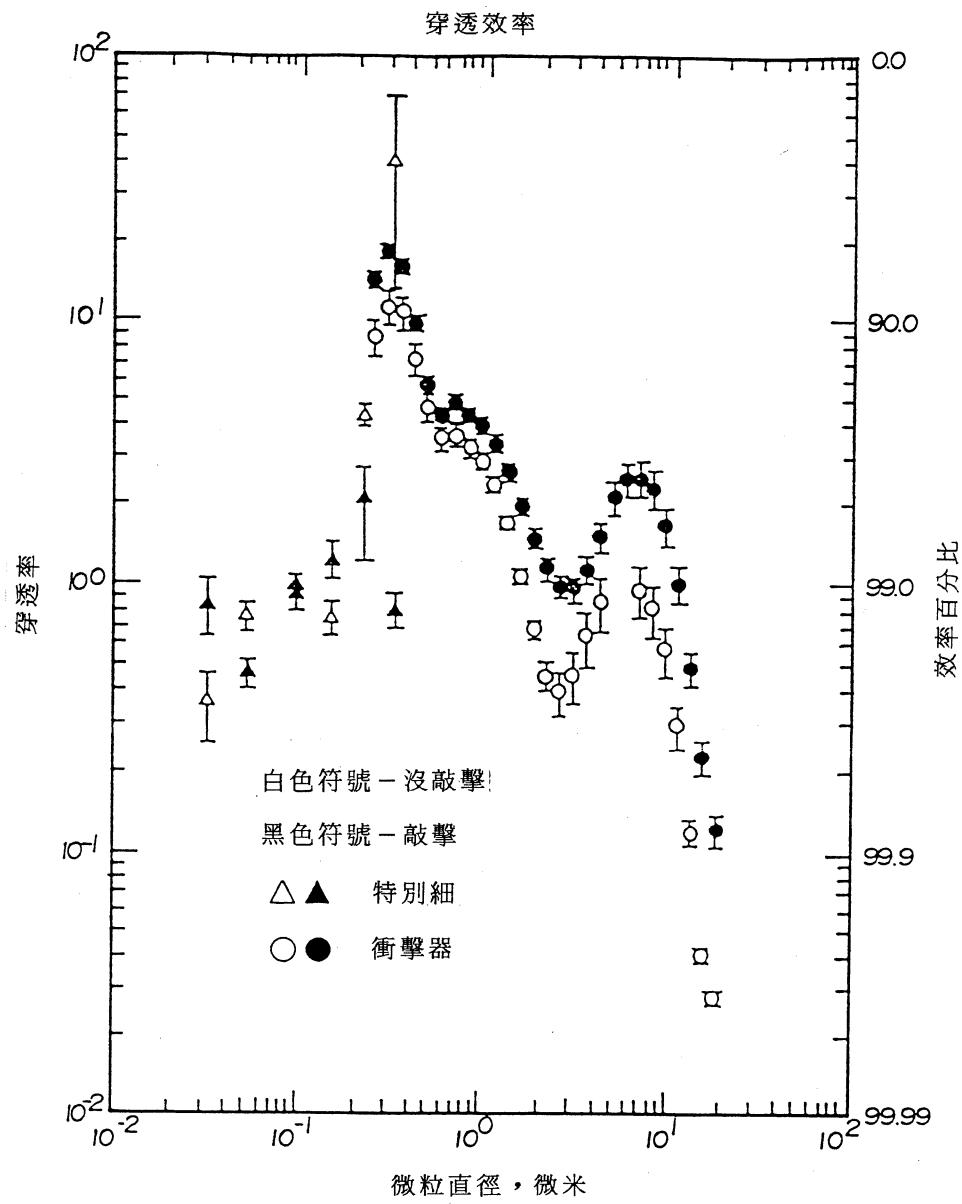


圖 2 特別細取樣系統和爆築式衝擊器在敲擊與沒敲擊時的分級效率，
第二號工廠，一般電流密度

在其他的操作條件方面，其重要因素包含了電力狀況，氣體成份等，如圖 3。若降低操作電流密度，敲擊產生的再逸散將更嚴重，因電吸附力減弱之故。

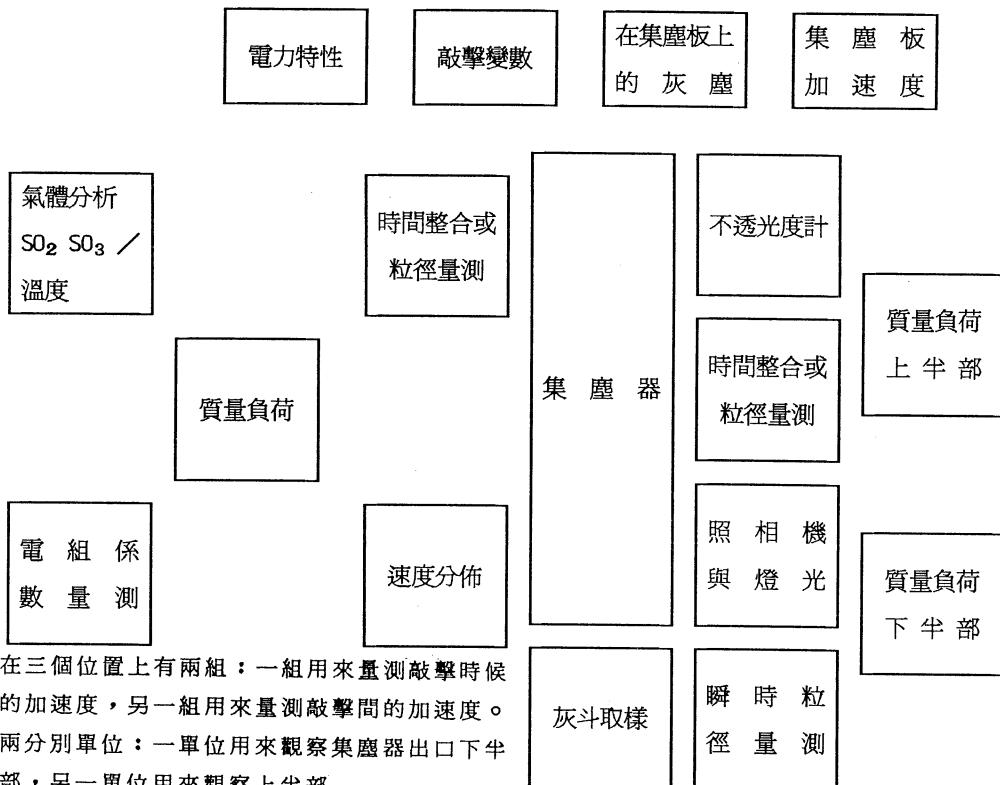


圖3 敲擊再逸散研究上的實驗設計塊狀圖

2.2 包括敲擊再逸散的穿透率

雖然要把靜電集塵機複雜的機構和再逸散間之關係量化很困難，若先作如下的假設，對一特定粒徑已吸附於集塵板上的塵粒，再逸散的比例一定，而且，此一比例不隨集塵機的長度而改變。則我們可用單一式子表示之

$$P_{N_R} = [R + (1-R) + (1-n)^{1/N_R}] N_R$$

P_{N_R} 是經過再逸散修正後，對一特定粒徑的穿透率

R是再逸散灰塵比率

N是再逸散發生的級數

n是沒有再逸散時對一特定粒徑大小塵粒的分級收集效率

將上式修正之，則可得到在一特定粒徑下，敲擊再逸散對所有再逸散量的比值(f_R)

$$f_R = \frac{R}{(1-n-1)+R} \text{ 或}$$

$$f_R = \frac{R[1-(1-n)^{1/N}]}{(R-1)[1-((1-n)^{1/N})+1]}$$

要減少這方面的再逸散量，可以參照發生再逸散的成因，針對那些原因予以改善，如氣體流速最好不高於 1.5m/sce 等，因超過本範圍，在此不做詳細說明。

三、敲擊錘種類及特性

由不同廠商，依不同的設計理念，目前的敲擊衝擊力可單一衝擊或振動型的敲擊錘所提供之。上述任一型又可依動力來源分為電力或空壓式，使用加速型或重力型衝擊，以下將一一介紹之。

3.1 單一衝擊用敲擊錘(電磁線圈)

電磁線圈式敲擊錘(electromagnetic solenoid rapper)包含了一個由激發線圈所舉起的柱塞(plunger)，當不再激發線圈時，柱塞使放鬆，藉重力而下落，碰到鐵砧上，再經一根連桿把敲擊力傳送到所要清潔的電極上。此種敲擊錘多位於集塵機頂端，放電極或收集板均可使用，所產生的加速度多在 $30\sim 50\text{g}$ 之間，其形狀如圖4。

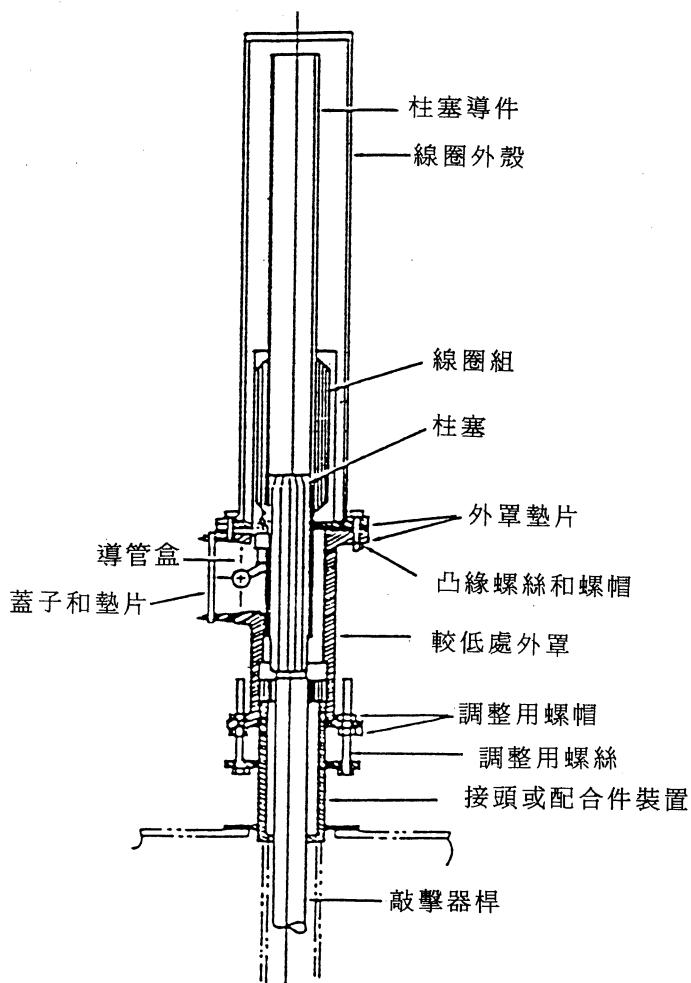


圖4 典型的電磁型敲擊器組

3.2 振動器(電磁式)

電磁式推動器包含了一組平衡式彈簧負荷的電極，懸掛於兩個同步電磁線圈間，當激發時，電極成直線形振動，振動能量便經過敲擊錘桿傳到電極上，在用於放電極時，敲擊錘桿須覆以電氣絕緣裝置，以避免漏電，其組合可見圖5，其控制方式可藉改變電能輸入大小、操作時間長短及振動頻率三種方式加以操縱。

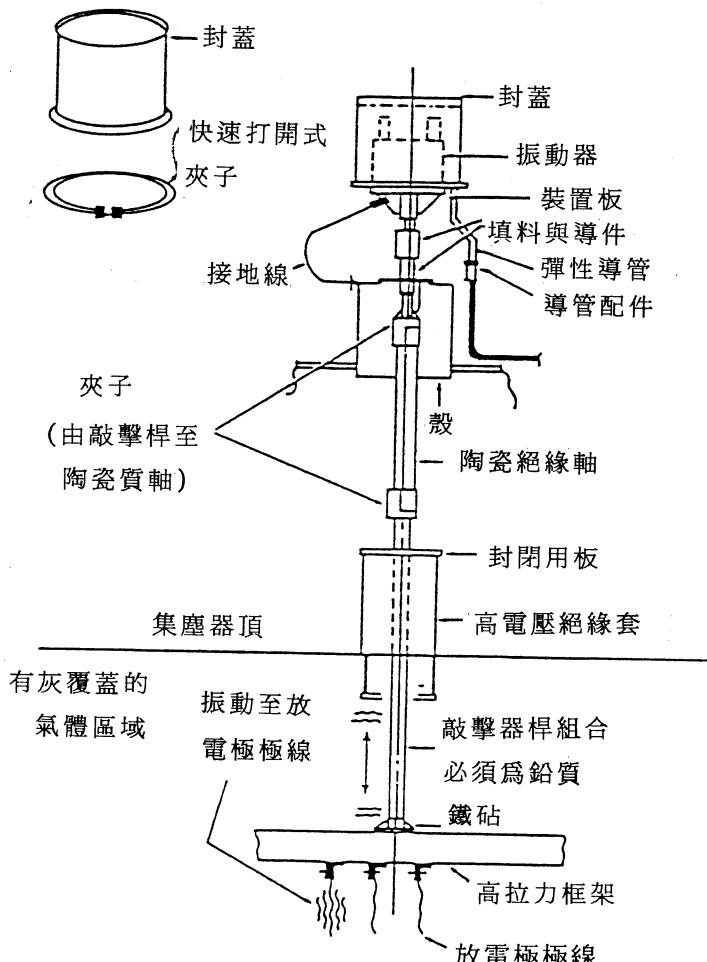


圖 5 典型的振動敲擊器

3.3 振動器(離心不平衡式馬達)

此系統包含機械式振動器，上有可調式凸輪，重量裝置於單一軸或用一兩端式馬達固定在兩個軸上，操作時，離心式凸輪重量移動，使整個組合開始振動，馬達直接裝在

敲擊錘柱上，傳動此振動力，其控制包含了由凸輪重量的調整，改變離心程度，操作時間長短，以及操作頻率等方式。

3.4 單一撞擊(用馬達驅動的凸輪)

此機構已包含馬達傳動軸，在靜電集塵機中，傳動軸水平運轉，凸輪連接在軸上，藉軸轉動到凸輪凸出部份的終點，敲擊錘搖擺下落，撞到在單一收集電極末端的一個鐵砧。此種控制限制於操作時間和軸速度的調整。

3.5 單一撞擊(用馬達驅動的搖擺式敲擊錘)

此機構包含一放在集塵機內集塵板間的軸，敲擊錘頭用彈簧葉片臂連於軸上，軸則由一馬達驅動的機械結構所振動，敲擊錘撞擊到連於集塵板末端的鐵砧上。此種敲擊器可藉改變操作時間和錘搖擺的弧度所控制。

3.6 單一撞擊機械式敲擊錘

圖 6 顯示了這種系統的架構，它包含經過整個靜電集塵機的傳動軸，此傳動軸帶動其上的搖擺形敲擊錘，當敲擊錘桿搖擺過中心凸輪盤，便舉起敲擊錘桿，此時敲擊錘藉重力落下，而撞擊到連於放電極或集塵極結構的鐵砧，其控制方式同 3.4。

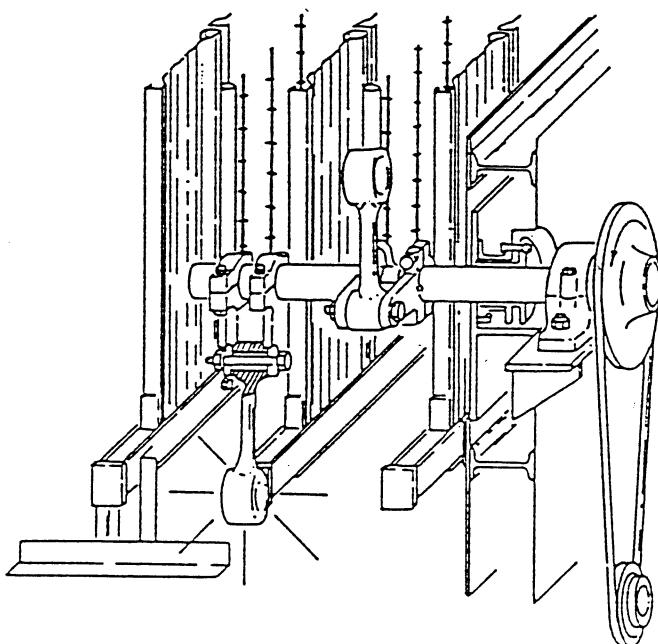


圖 6 機械型敲擊器

3.7 振動器(氣壓式)

此系統的主要部份通常包含一個在袖型圓筒中的往復式活塞，這一組合直接固定在敲擊錘桿的末端，桿可傳動敲擊能量至桿上。其控制包括了改變空氣壓力，敲擊時間和敲擊間隔。

在以上的各種系統中，通常以電力或氣壓衝擊式應用於較困難的敲擊應用上較為成功，在決定使用型式之前宜先分析所要收集灰的成份、特性，在一般的情形下，脈衝型(impulse)用在收集板敲擊較為有效，對於放電極的敲擊器以振動型較佳。

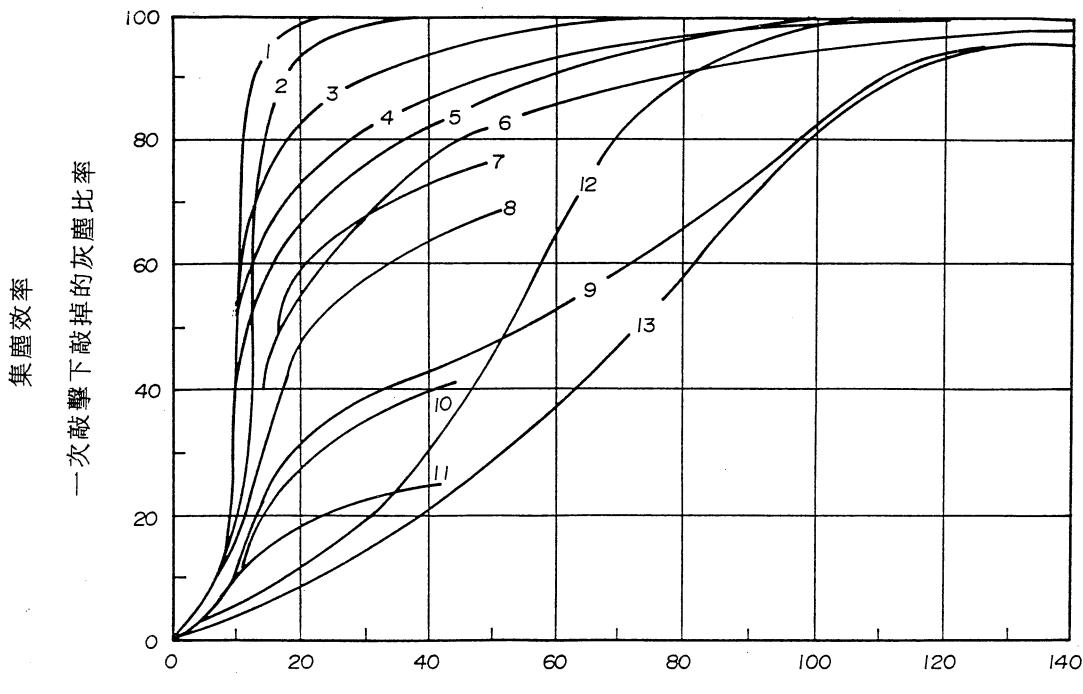
四、敲擊系統及量測工具

根據我們的了解，敲擊造成的再逸散，其再逸散時間並不長(根據我們的實驗測試，再逸散維持的時間通常不超過兩分鐘)在量測敲擊產生的再逸散比率時，勢必要使用反應速度快的量測儀器，以獲取整段敲擊後所產生再逸散的歷史，由此觀之，雖有人使用過Andersen Sampling System, cascade impactor及mass train，卻都無法即取得當時的塵粒粒徑大小分佈，事後取得的都是平均值，並非很準確，較好的方式包含了不透光度計(transmissometer)，瞬間粒徑分析儀(real-time particle sizer)，前者本單位目前已裝設並使用中，對後者則可望於下年度中購買。

4.1 敲擊系統

敲擊系統所施的力，除在垂直於集塵板上外，亦可平行於板面。圖7和圖8顯示了平行及垂直於板面上，加速度與敲擊效率間的實驗結果，由兩圖比較，我們可以知道，對於飛灰及易於除去的灰，其加速度值只要在10到30 g之間即可，對於難以除去的灰，欲除去板上90%的灰，平均加速度要在100g左右，平均加速度值甚至要高到200g左右方可完全除去，用垂直板面方向較平行方面的敲擊所需加速度較低。在溫度方面，當溫度上升時，灰塵層的淨握力便下降，直至軟化甚至部份熔化為止，在本所目前所使用的是電磁式敲擊器，由日本公司所製造。電磁式敲擊器已於前面介紹過在評估敲擊力大小時，應注意其大小會隨溫度升高而改變，分析其原因，亦在於敲擊器內部電磁線圈的吸引力會隨溫度而變化之故。雖然它也可調整大小和方向，卻不能控制，在做實驗時較不方便。為此，我們改採機械式，以一定高度，一定重量的錘自由落下，使位能轉換為動能，再經敲擊連桿法傳送到每一集塵板或放電極上。

由林盛隆的碩士論文中，我們發現，另一個參數—敲擊位置亦有其重要性，這又和每個區域敲擊錘的數目有關，若僅有一個敲擊錘，則以取在中間的位置較佳。



在集塵板上沿剪力(平行)方向敲擊產生的最大加速度 ("g")

圖 7 對不同集塵機灰塵層，平均每英吋約有 0.2克者，在剪力方向
(平行方向) 的敲擊率，與最大加速度(g值)的關係。

曲線 1，飛灰，70到300°F 開關關著。

曲線 2，飛灰，300°F，開關關著。

曲線 3，飛灰，200°F，開關開著。

曲線 4，水泥窯進灰，70°F，開關關著。

曲線 5，和曲線4同，但300°F。

曲線 6，同曲線4和5，但200°F。

曲線 7，水泥灰，300°F，開關關著。

曲線 8，與曲線 7同，但200°F。

曲線 9，水泥窯進灰，200或300°F，開關開著。

曲線10，水泥灰，300°F，開關開著。

曲線11和10同，除了在 200°F下。

曲線12，飛灰，70°F開關開著。

曲線13，水泥窯進灰，70°F，開關開著。

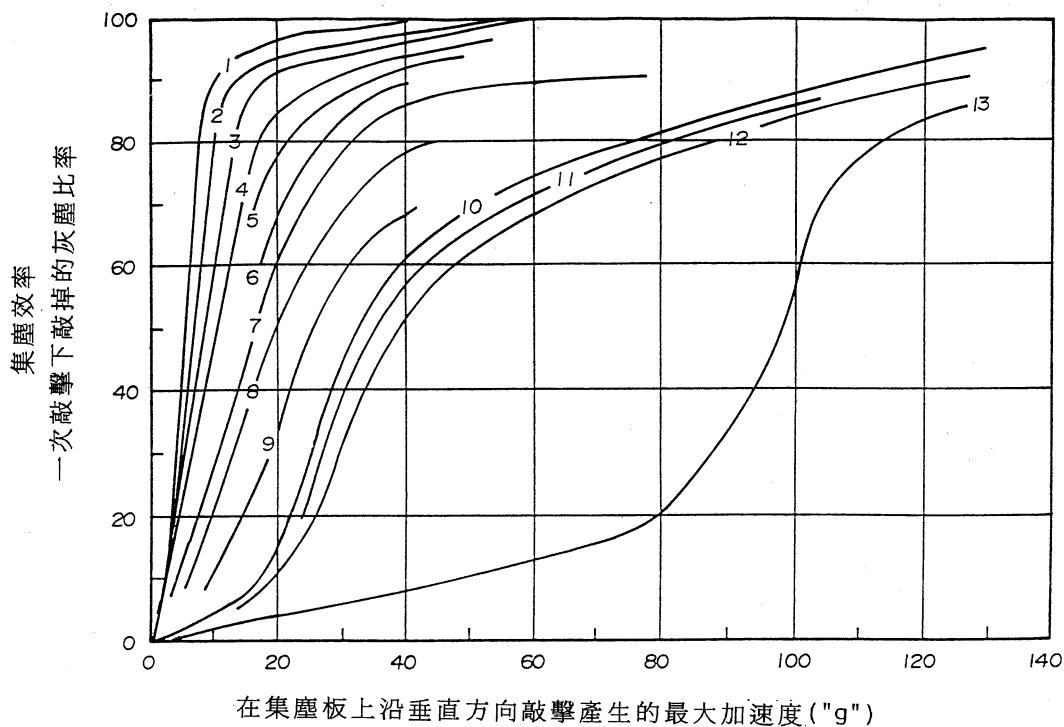


圖 8 對不同集塵機灰塵層，平均每英吋約有 0.2克者，在正方向（垂直方向）的敲擊率，與最大加速度(g值)的關係。

曲線 1，飛灰，70到300°F 開關關著。

曲線 2，飛灰，300°F，開關關著。

曲線 3，飛灰，200°F，開關開著。

曲線 4，水泥窯進灰，70°F，開關關著。

曲線 5，和曲線4同，但 300°F。

曲線 6，同曲線4和5，但200°F。

曲線 7，水泥灰，300°F，開關關著。

曲線 8，與曲線 7同，但200°F。

曲線 9，水泥窯進灰，200或300°F，開關開著。

曲線10，水泥灰，300°F，開關開著。

曲線11和10同，除了在200°F下。

曲線12，飛灰，70°F開關開著。

曲線13，水泥窯進灰，70°F，開關開著。

4.2 量測工具

4.2.1 不透光度計

就如前面所提到過的，大部份的量測工具無法迅速地顯示敲擊造成的再逸散增加量，本研究使用公認的標準：不透光度計的讀數。但不透光度計 (transmissometer) 只代表了環保單位通過與否的一個基準，至於如何將之與敲擊再逸散的濃度相連，則是一項問題。根據安施 (Ensor, D.S) 等人的研究，他們使用電腦模擬的方式，導出以下的關係式。

$$\Omega_p = 100(1 - e^{-S_m wL})$$

Ω_p 是質量消失係數 (mass extinction coefficient) (m^2/g)

w 是微粒在實際狀況下的質量濃度 (g/m^3)

L 是煙囪的直徑 (m)

關於質量消失係數 S_m ，對於球面物體而言，可用下式算出

$$S_m = \frac{\int_{d_1}^{d_2} \pi Q D^2 / 4 N(D) dD}{\rho \int_{d_1}^{d_2} \pi / 6 D^3 N(D) dD}$$

Q 是光線消失係數，取決於顆粒直徑，反射指數及光的波長

D 是微粒直徑 (μm)

$N(D)$ 是以數目計的粒徑分佈 (#/ m^3 在 D 和 $D + \Delta D$ 之間者)

ρ 是微粒密度 (g/cm^3)

由上式可知， S_m 越大時，對於一定的質量濃度的不透光度便越大。就上述理論，便產生了圖 9 的質量消失係數作為穿透率關係式。

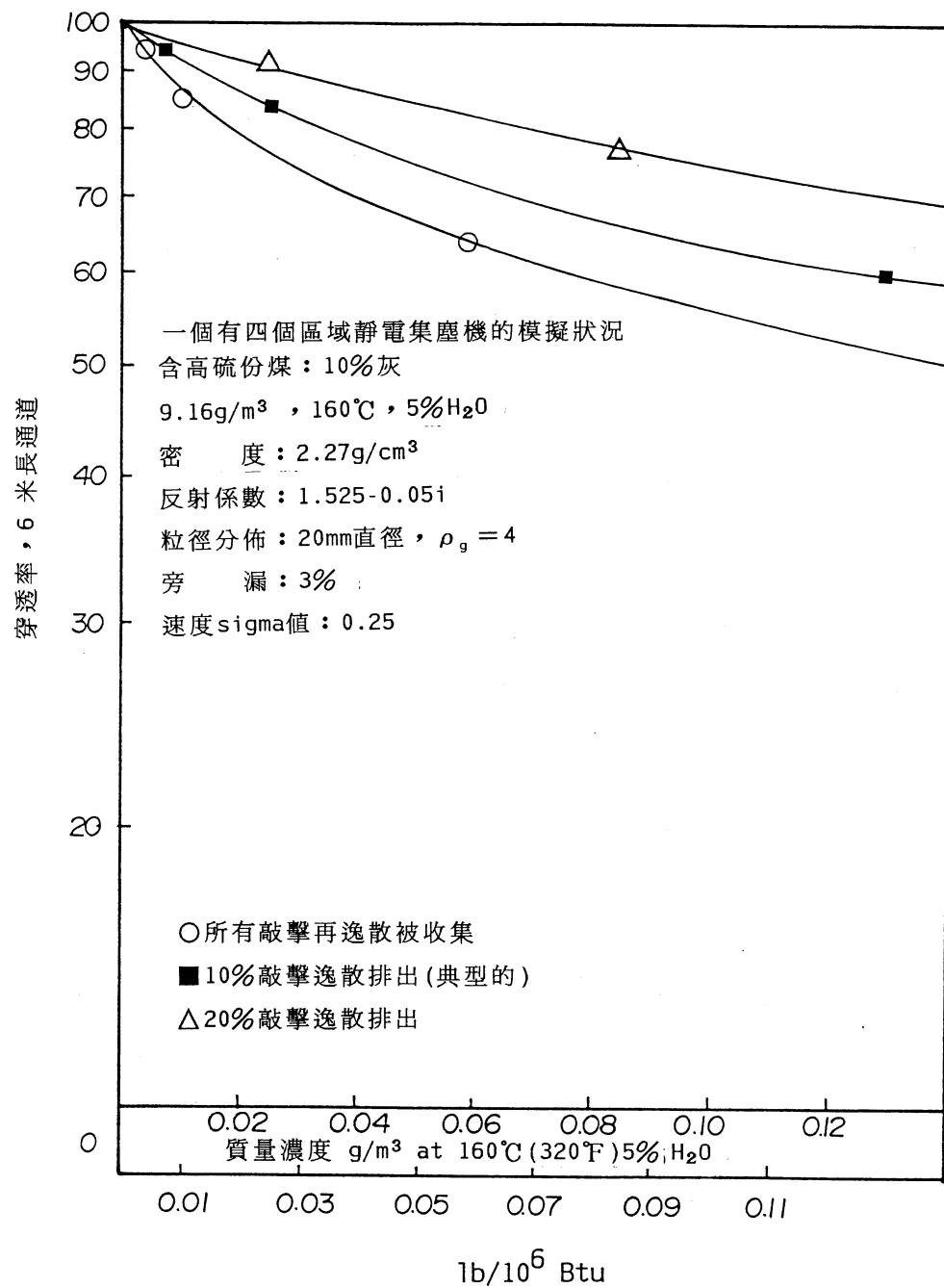


圖 9 用電腦模擬的方法，得到光穿透率與質量濃度的關係

4.2.2 加速度規

集塵板上的加速度可用下面的圖10之裝置方式，為求得每塊板面上的加速度分佈，我們採用一個方向裝三個加速度規先測得水平方面三個位置的加速度值，再測得垂直方向的加速度值，即可獲得整塊板面上的加速度(g)值分佈情形了。

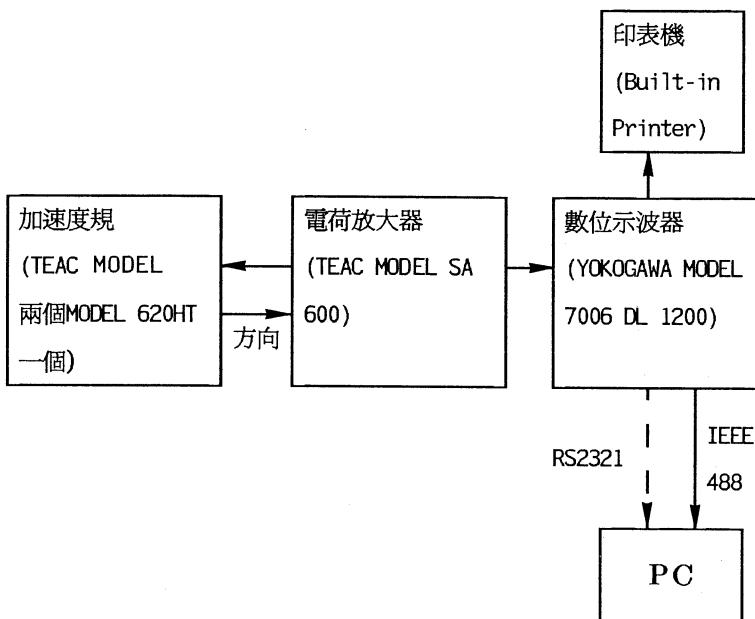


圖10 集塵板上加速度量測系統圖

五、結語

在研究敲擊再逸散問題時，我們應注意最佳的敲擊間隔隨區域之不同不盡一致，越接近入口的區域，其最佳敲擊間隔必最少，因為集塵板或放電極的灰累積甚快，故電壓降亦增加得越快。另一方面，就算是同一區域中，集塵板上所用的敲擊器和放電極上用的，其敲擊頻率也不一樣，使用者不可不知。由煤灰效率測試得知，當集塵機尺寸加大時，敲擊再逸散對所有再逸散的比例亦隨之增加。在理論方面，南方研究學院從西元1975年便開始使用電腦程式模擬靜電集塵機內部的集塵情形，到了西元1984年，他們所發表模擬程式，在敲擊再逸散方面，有兩種方法可估算：1. 實驗法。2. 動力計算法。

在實驗方面，他們利用由六個全尺度(full-scale)靜電集塵機所取得的資料分析，得知敲擊排放量是最後一個電力段灰塵去除量的函數如下式：

$$n/N = 1 - \exp(-X/N)$$

$$\text{其中 } X = -\ln(1 - n_0)$$

η_0 是在正常操作情形下所測得的總質量集塵效率

N是電力段的數目

敲擊排放量和最後一個電力段的灰塵去除量之間，可用簡單的指數關係來表示：

$$Y = AX^N$$

其中Y是敲擊後的排放量 (mg/m^3)

X是最後一個電力段的灰塵去除量 (mg/m^3)

A, B為常數，其值隨操作溫度而有不同之值；關於動力計算法，主要根據兩個基本假設：

1. 再逸散灰塵量與粒徑大小分佈已知。

2. 再逸散的灰塵立即被充電至原來在氣流中同位置的同粒徑顆粒一樣。

由上述的假設，計算過程可簡化如下：

1. 利用道氏方程式(Deutsch equation)計算集塵板上灰塵層增加的速率，由這一資料，計算每一小段長度內在敲擊時集塵板上的灰塵層厚度。
2. 敲擊後，每一小段長度內的塵層完全被去除，再逸散的灰塵併入在這一小段內未被收集的灰塵中，而由氣流帶到下一個小段內再被收集。
3. 利用集塵效率的估算模式，計算靜電集塵機的出口排放量。

在未來的靜電集塵機發展趨勢上來看，在敲擊再逸散方面，會將之歸入連續控制範圍之內，隨著再逸散量，電量分佈的情形，作適當的調整。

廣義的敲擊系統評估包含了對極板極線的選擇，從敲擊的觀點來看，極線及極板的設計應注意到容易把灰敲掉的特性，近日有人嘗試用較粗的鋼纜下加重錘，其效果不錯。本研究室亦使用鏈形極線，以上目前正申請專利中；且均屬於較新的極線。

總而言之，在實際的靜電集塵機設計中，有許多方面需要考慮，本文旨在對這一方面作一概略性的介紹，實際上的改善需要更進一步的探討與比較。

六、參考資料

- (1) 簡又新，意識共識與環保，行政院環境保護署，民國79年5月。
- (2) 林盛隆，靜電集塵機中敲擊再逸入特性之研究，國立台灣大學環境工程研究所碩士論文，民國75年6月。
- (3) White, H. J. Industrial Electrostatic Precipitation, Addison Wesley Publishing Company, Inc., Mass., 1963.
- (4) Nichols, G. B. and Gooch, J.P., An Electrostatic Performance Model, SoRI-EAS-74-344, SRI, Birmingham, Alabama, pp.74-84, 1972.
- (5) Spencer, H.W., Rapping Reentrainment Studies, Symposium on Particulate Control in Energy Processes, EPA-600/7-76-010, pp.317-341, Sept.1976.

- (6) McDonald, J. R. and Pdean, A. H., Electrostatic Precipitator Manual, Ob-238 923, Noyes Data Corp., pp.305-331, Jul.1982.
- (7) Tassicker, O.J, Some Aspects of Electrostatic Precipitator Research in Australia., J. Air Pollut. Control Assoc. 25:122-128, Feb.1975.
- (8) Tassicker, O.J., Aspects of Forces on Charged Particles in Electrostatic Precipitators Dissertation, Wollongong University College, University of New South Wales, Australia, 1972.
- (9) Sproul, W.T, Fundamentals of Electrode Rapping in Industrial Electrical Precipitators, J. Air Pollut. Control Assoc. 15:50-55, Feb.1965.
- (10) Penney, G.W. and B. H. Klingler, Contact Potentials and Adhesion of Dust, Trans. Amer. Inst. Elec. Eng., Part I 81:200-204, 1962.
- (11) Schwartz, L.B., and M. Lieberstein, Effect of Rapping Frequency on the Efficiency of an Electrostatic Precipitator at a Municipal Incinerator, Proceedings of the Fourth Annual Environmental Engineering and Science Conference, Louisville, Kentucky, March, 1975.
- (12) Ensor, D. S., Lawless, P. A. and Sparks, L.E., Relationship of Opacity to the Loss Mechanisms in ESP's Proceedings: Sixth Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, Vol.1, Dec.1986.
- (13) Gooch, J. P. et. al., Electrostatic Precipitator Rapping Reentrainment and Computer Model Studies, Southern Research Institute, Final Report, Aug.1978.
- (14) Rapping Reentrainment in a Nearly Full-Scale Pilot Electrostatic Precipitator, PB-255 988, Southern Research Institute, May 1976.
- (15) Gooch, J. P. and Francis, N. L., A Theoretically Based Mathematical Model for Calculation of Electrostatic Precipitator Performance, J. Air Pollution Control Assoc. 25:108-113, Feb. 1975
- (16) Oglesby, S. and Nichols, G. B., A Manual of Electrostatic Precipitator Technology, Part-I Fundamentals, Southern Research Institute, Aug. 1970.
- (17) Fulkner, M. G. and Dubard J. L., A Mathematical Model of Electrostatic Precipitation (Revision 3), Volume 1, Modeling and Programming, EPA-600/7-84-069 a, SRI, Birmingham, Alabama, 1984.
- (18) Sproull, W. T., Minimizing Rapping Loss in Precipitators at a 2000-Megawatt Coal-Fired Power Station, J. Air Pollu. Control Assoc. 22:181-186, Mar. 1972.
- (19) Leslie E. Sparks and Norman Plaks, Pilot Scale Experiments to Improve Performance of Electrostatic Precipitators Proceedings: The Third International Conference in Electrostatic Precipitation, pp.1035-1041, Oct. 1987.

- (20) Smith, W. B., Cushing; K. M., and McCain, J. D., Procedures Manual for Electrostatic Precipitator Evaluation., EPA-600/7-77-059, June 1977.
- (21) Gooch, J. P. Electrostatic Precipitator Performance Proceedings: Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, vol. 1, PP.1-18, Electrostatic Precipitators, EPA-600/7-79-0440, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, Feb. 1979.