

污染防治技術

泛論氣流特性與靜電集塵器系統 整體性能之關係

譚明德* 張瑞進*

摘要

由於工業用靜電集塵機(ESP)的處理量日益增加，若氣流品質不是很好時，將有嚴重的壓力損失，以大型電廠為例，管路上若增加1吋水柱的壓損，則每年需多耗用價值數十萬美元以上的功率，且環保法規的標準愈來愈高，使得現有ESP設備必需隨時加以改善，以提高集塵效率，而控制氣流特性就是其中一種方法。若氣流品質任它惡化下去，將造成煙道(duct)、導流片(turning Vanes)、肘管(elbow)、分佈板(distribution plate)、放電極易積灰，甚至有沖蝕(erosion)發生，減低設備壽命，大幅降低ESP效率(約為20%~30%)。

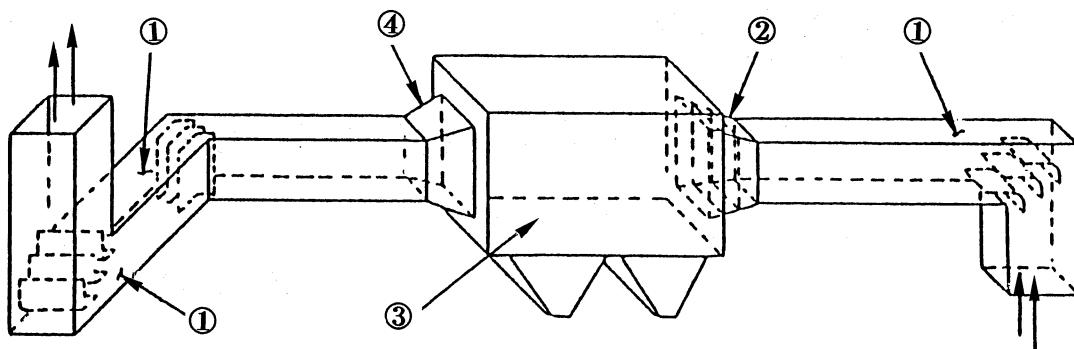
所謂「知彼知己，百戰百勝」，本文將介紹一些影響氣流品質的因素，及控制氣流特性的方法，分煙道、ESP入口段、ESP內部及ESP出口段(圖1)四部份介紹，並告訴讀者如何去判別氣流品質的好壞，以決定是否要改善現有ESP設備的氣流特性，而現今各大ESP製造商在改良ESP性能時，全用模型先進行相關整流技術之測試，再將好的結果應用於實體ESP上。故本文亦介紹模型測試的優點、方法，以供業者也能自行研究改善ESP性能的方法。

一、前言

由於ESP本身的壓損不大，一般不超過 $0.75\text{in} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ESP本體各部份之壓降值，參考表1)，而風道轉彎處由於渦流區的產生，造成的壓損很大，故在轉彎處加裝導流片，避免渦流區的產生，以減少壓損。

*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



①煙道 ②ESP入口段 ③ESP內部 ④ESP出口段

圖1 ESP 系統需要控制氣流的區域

表1 ESP各組件之典型壓降值

組 成	典 型 壓 降 值 (in H ₂ O)	
	低	高
擴 散 器	0.010	0.09
入 口 變 遷	0.07	0.14
出 口 變 遷	0.007	0.015
擋 板	0.0006	0.123
收 集 板	0.0003	0.008
全 部	0.09	0.38

Leif指出氣流分佈對ESP效率影響的過程如下：

不均勻(non-uniform) 氣流分佈→粒子分佈不均勻→空間電荷分佈不均勻→電流分佈不良→反電暈(back-corona)及火花(spark)發生頻繁→操作電壓、電流的平均值降低→再逸散量增加→ESP效率降低

上述過程對高電阻塵粒(dust)及細小(fine)塵粒而言，特別明顯。White及EPA亦指出高流速區會造成沖蝕(erosion)、再逸散，甚至使塵粒直接流過收集區而未曾被收集過，而低流速區，灰粒可能大量聚集在電暈極線區域上，會抑制電暈放射作用，甚至產生不均勻的電暈放射，所需的集塵面積會比氣流均勻分布的情況大。

為了避免上述現象發生，本文將指出一些會影響氣流品質的因素，並介紹解決的方法，為了使業者也能有自行診斷並改善ESP性能的能力，在本文中，亦將介紹模型測試的方法，以供業者參考。

二、煙道(duct)

雖然直管的壓損不大，但由於塵粒本身的重量，會有自然沈降的現象，故直管中的流速有一下限，以防止塵粒積在管道內，而影響流速分佈，燃氣(flue gas)煙道的流速一般為 $15\sim 20\text{m/sec}$ ，其它種類的塵粒，其下限如表 2 所示（與通道的光滑程度亦有關）。

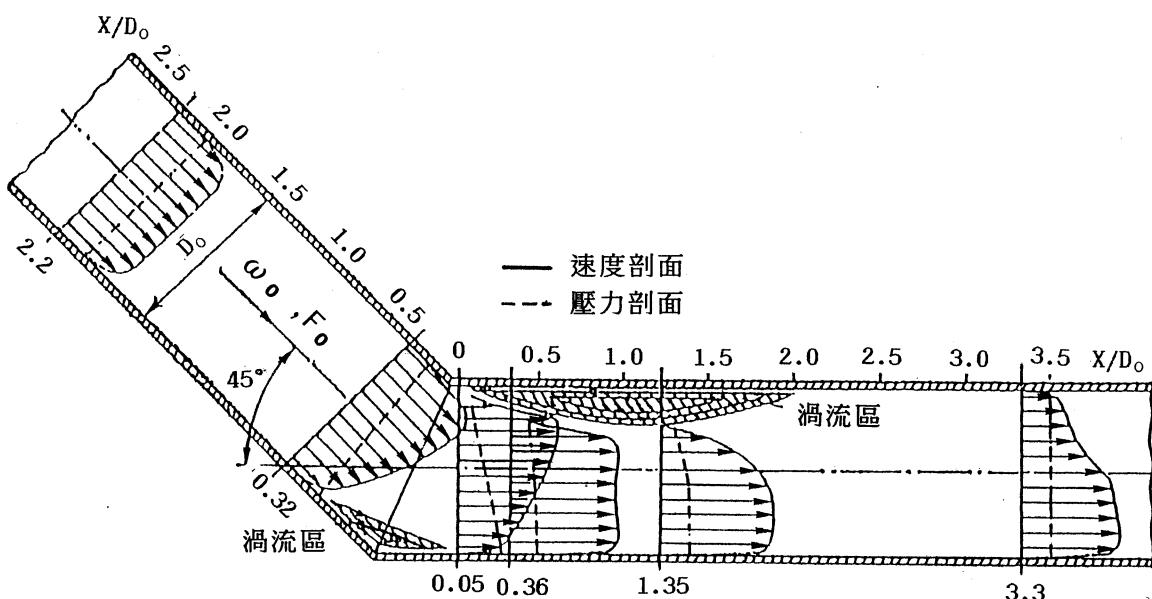
表 2 最低煙道傳輸速度

塵粒種類	最低煙氣速度(m/sec)	
	光滑煙道	粗糙煙道*
Fly Ash 飛灰	10.675	13.725
Salt Cake 鹽塊	13.725	16.775
Soda Ash 蘇打灰	13.7257	16.775
Cement 水泥	16.775	19.825
Metallic Fines 金屬微粒	16.775	19.825

* 內部突出物、暴露的膨脹接頭等

在彎曲的管路中，由於流體的轉彎，出現了從曲率中心向管子外壁的離心力，使得流體從直管流到彎曲管時，外壁的壓力增高而內壁的壓力降低，所以，在外壁處流體的流速將減少，而在內壁處流速將相對地增大，因此，在這個地方，外壁附近出現擴散效

應，而在靠近內壁處則出現收縮效益，流體從彎管流到直管時，則有相反的現象發生，擴散效應導致流體脫離內外壁面而產生渦流區(圖2)。由於慣性而流向外壁的運動更加劇了從內壁的分離，故內壁的渦流區較大。由於離心力的出現及在管壁上具有邊界層，在彎曲的管中產生二次流(secondary flow)，使流線具有螺旋線形狀(圖3)，由上述可知，彎曲的管路其壓損主要是由內壁形成的渦流引起，這個渦流與二次流則決定了轉彎後速度分佈的特性。



肘管：內壁和外壁彎曲圓弧半徑相等的彎曲管段。

彎管：當進口截面積和出口截面積相等時，其內壁
和外壁的圓弧是同心圓

圖2 肘管及其後直管段的壓力和速度剖面的變化

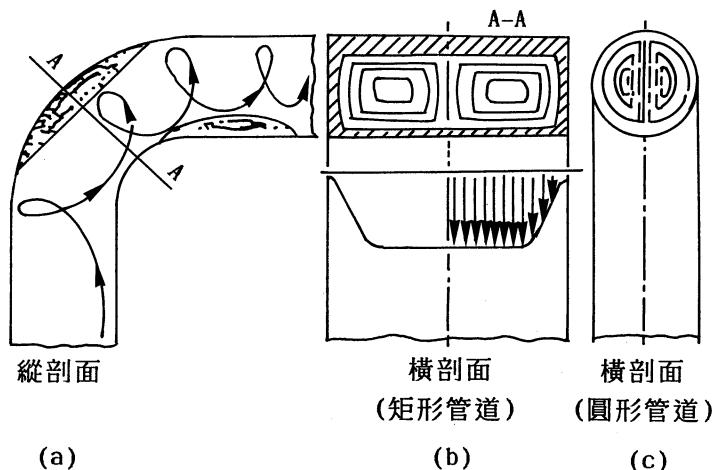


圖 3 肘管中的流線形狀及二次流

降低渦流與二次流影響的方法有三：

1. 增加彎曲管路橫截面的高寬比D/W(圖 4)。
2. 採用倒圓或斜切轉角(圖 5)， $R_0/b_0(R_0/D_0, r_0/b_0, r_0/D_0)$ 愈大，阻力愈小。
3. 加裝導流片(圖 6)。

以加裝導流片之效果最好，將分肘管與彎管兩部份討論之。

具光順圓角肘管中，由導流片組成空氣動力柵，由於柵上產生的空氣動力作用，使流體向內壁偏斜，這種偏斜作用可防止流體從管壁分離和避免渦流區的產生，若在轉角後需要立即得到均勻的速度分佈，則採用“標準的”數量，

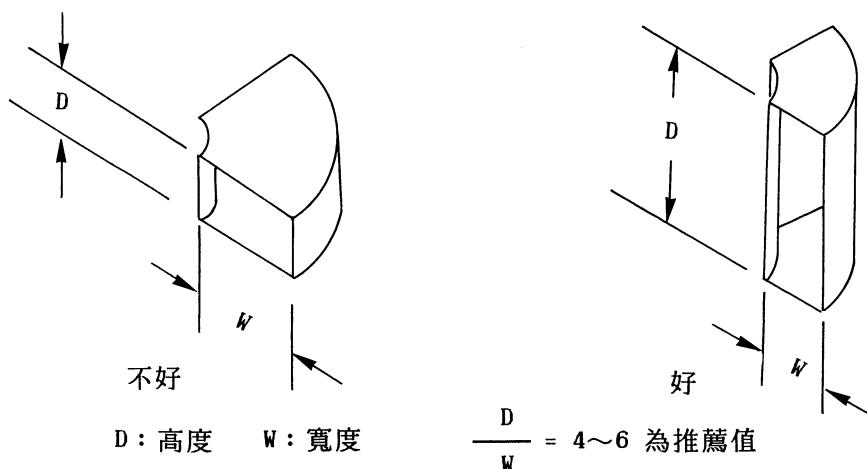


圖 4 彎曲管路橫截面

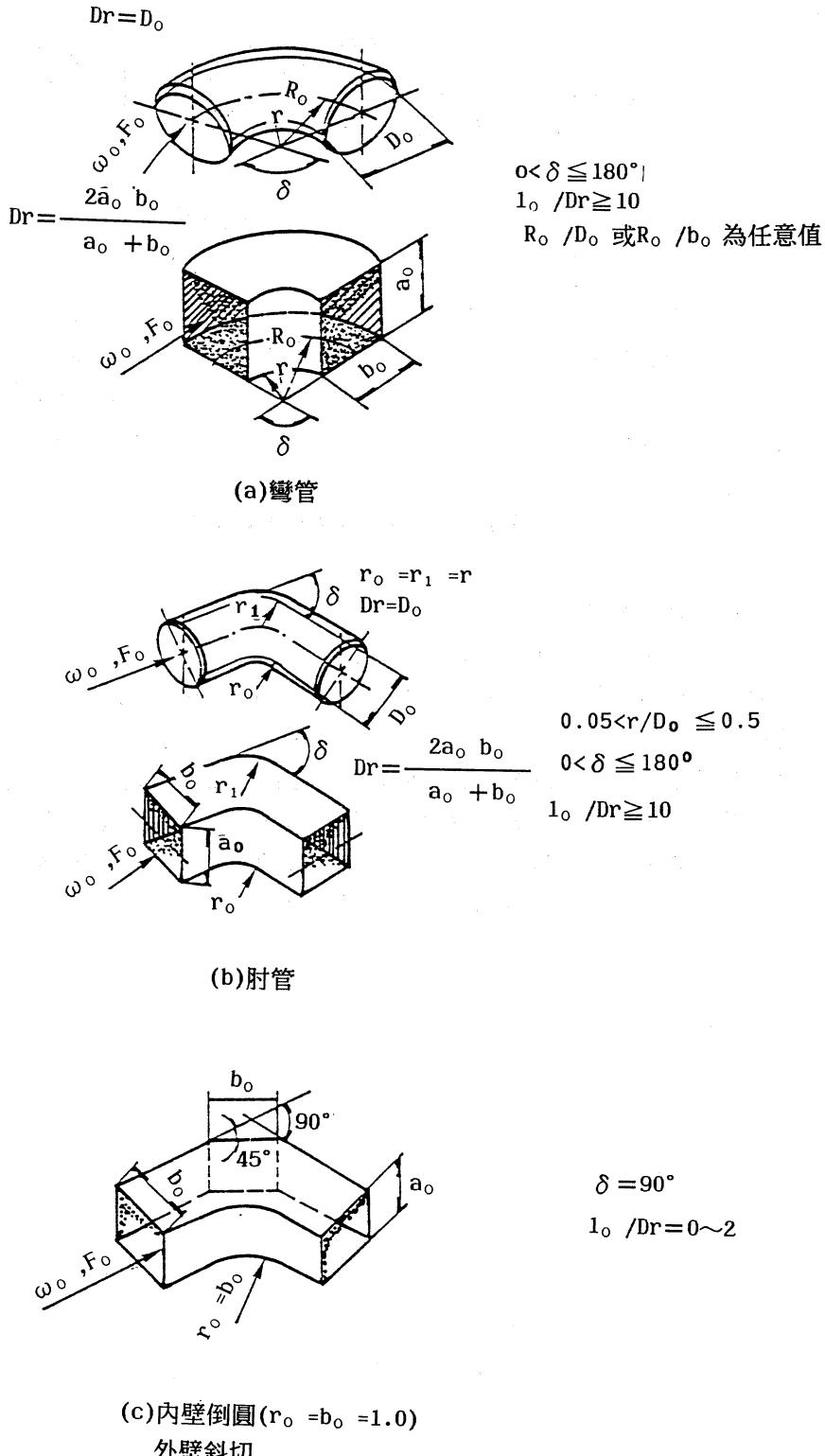


圖 5 彎曲管路之轉角設計

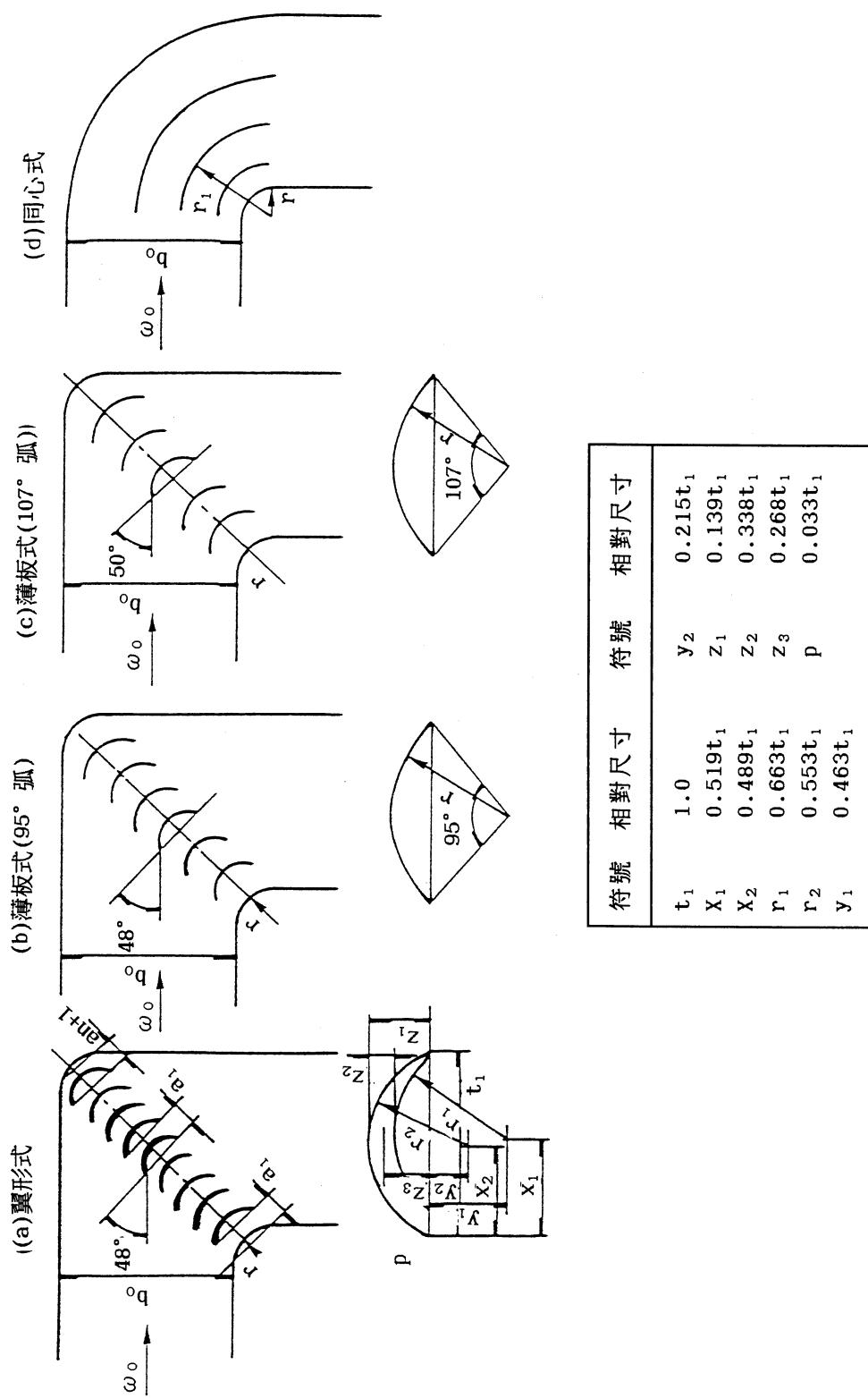


圖 6 常見的導流片型式，(a)-(c)用於直管，(d)用於彎管

$$n \text{ 標準} = 2.13 \left(\frac{r}{D_0} \right)^{-1} - 1 \quad \text{矩形肘管用 } b_0 \text{ 代替 } D_0$$

一般而言，靠近內壁圓弧處安裝導流片，近外壁處則可減少導流片數目，其效果亦不錯(圖 7)，所用導流片數目有“最佳的”與“最少的”兩種，

$$n \text{ 最佳} = 1.4(r/D_0)^{-1}$$

$$n \text{ 最少} = 0.9(r/D_0)^{-1}$$

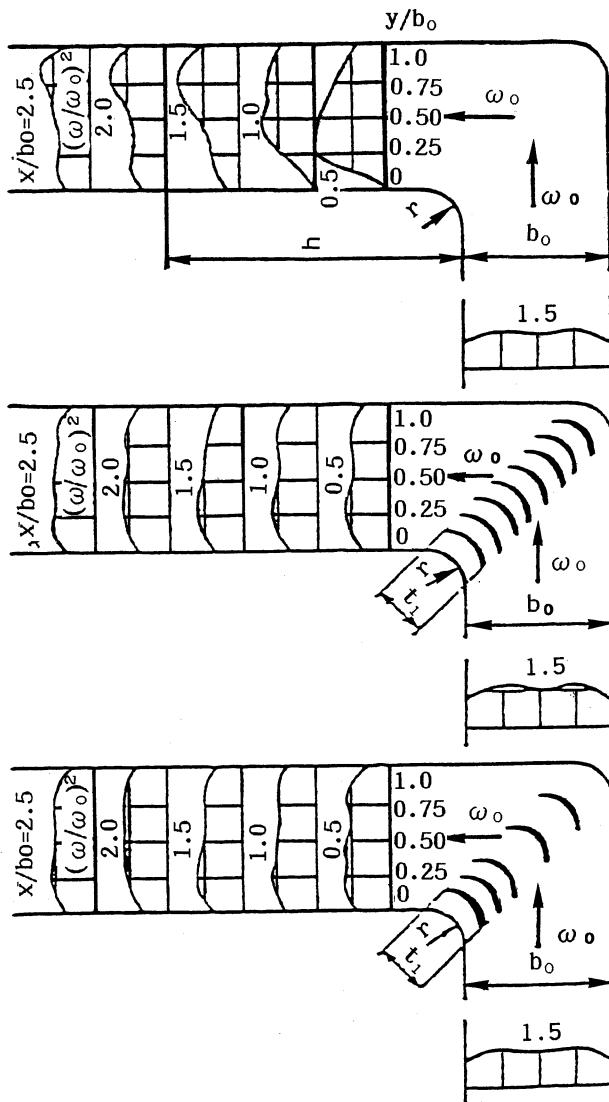


圖 7 肘管中無因次速度分佈圖

在上述三種式子中，以“最佳的”數目可得到最小阻力及最有利的速度分佈，若導流採用翼型式，則導流片弦長 t_1 ，與肘管圓弧半徑 r 需滿足

$$t_1 = \sqrt{2r} \quad \text{或} \quad t_1 = D_0(r/D_0)\sqrt{2}$$

上述三式才是正確的，肘管內徑與外徑比的最佳值為0.66（方形通道）或 0.7（圓形通道），若肘管轉角為銳邊或斜邊，則導流片弦長 $t_1 = (0.15 \sim 0.60)D_0$ ，而數目公式為

$$n \text{ 標準} = 3 \frac{D_0}{t_1} - 1$$

$$n \text{ 最佳} = 2 \frac{D_0}{t_1}$$

$$n \text{ 最少} = 1.5 \frac{D_0}{t_1}$$

對於擴大型肘管($b_1 > b_0$)而言(圖8)，導流片數目如下：

$$n \text{ 標準} = 2.13 \frac{S}{t_1} - 1$$

$$n \text{ 最佳} = 1.4 \frac{S}{t_1}$$

$$n \text{ 最少} = 0.9 \frac{S}{t_1}$$

$$S = \sqrt{b_0^2 + b_1^2}$$

導流片之間距為

$$n \text{ 標準} : a_1 = \frac{S}{n+1}$$

$$n \text{ 最佳} : a_1 = 0.67 \frac{S}{n+1} \left(1 + \frac{i-1}{n}\right) \text{ 且 } a_{n+1}/a_1 = 2$$

$$n \text{ 最少} : a_1 = \frac{S}{n+1} \left(0.5 + \frac{i-1}{n}\right) \text{ 且 } a_{n+1}/a_1 = 3$$

何時該在肘管中裝導流片？

等截面肘管： $r/b_0 \leq 0.4 \sim 0.5$

擴張型肘管： $r/b_0 \leq 1.0$

收縮型肘管： $r/b_0 \leq 0.2$

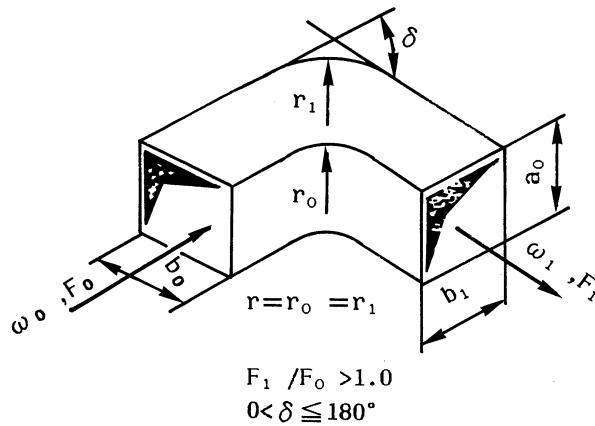


圖 8 擴大型肘管

在彎管中裝同心圓式導流片，將彎管分成一組窄長截面的彎管，從而導致壓損減少，其數量如表 3 所示，間距為

$$r_1 = 1.26r_{1-1} + 0.07b_0$$

表 3 彎管

r_0/b_0	0~0.1	0.1~0.4	0.4~1.0	1.0
導流片數目	3~4	2	1	0

三、ESP入口

因為風道與 ESP 入、出口的截面積不同，必須用擴散器 (Diffuser) 和收縮器 (Contractor) 將它們連接起來，一般常用於 ESP 的擴散器型式有三種 (圖 9)，WEDGE 型不適用於多室 (multiple chamber) 的 ESP，以 NOZZLE 型較適合，這三種對氣流分佈的影響分述如後。

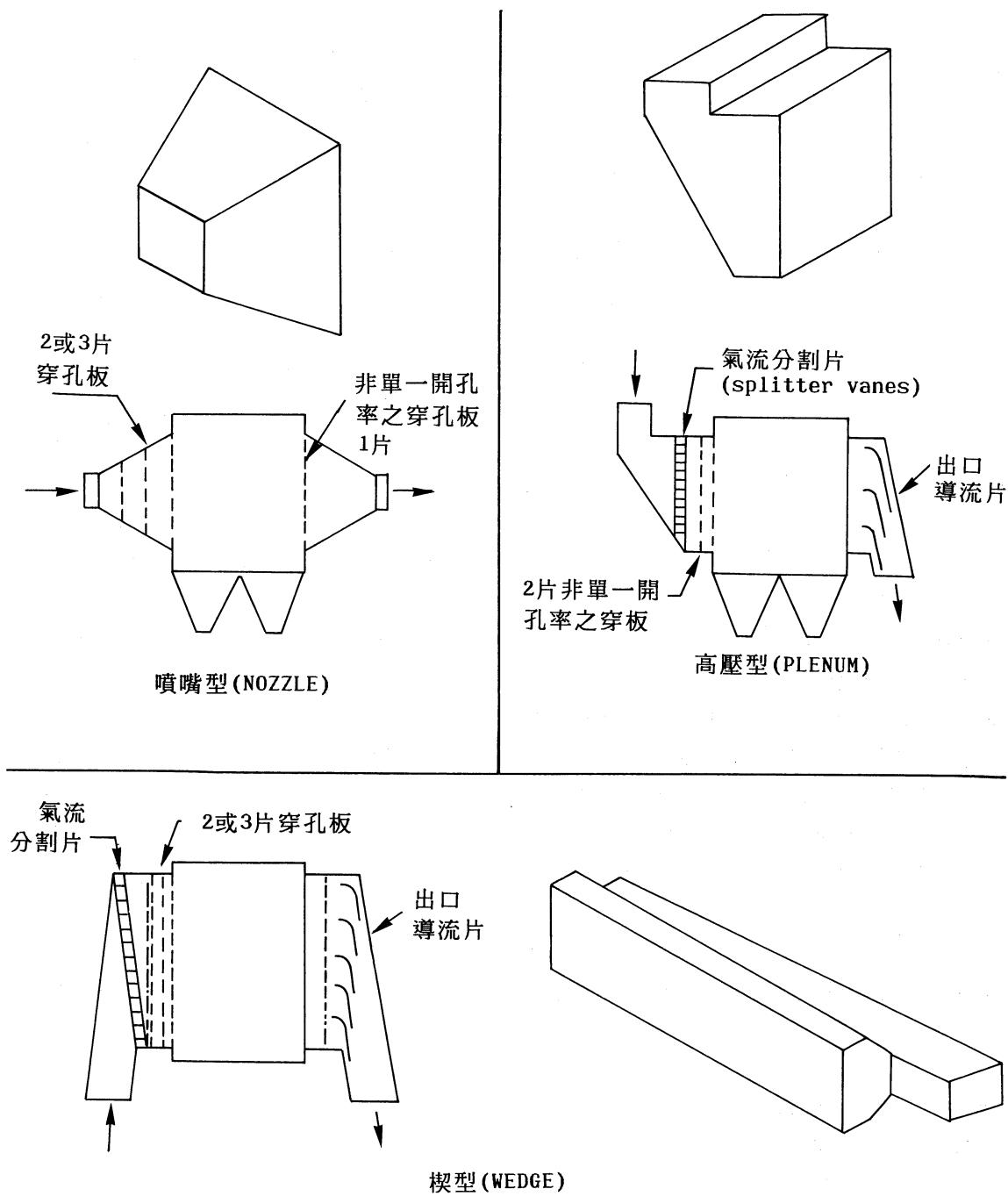


圖9 常用於ESP的三種擴散器

3.1 NOZZLE型

此型的壓力損失由“管道擴張所造成的軸向正壓力梯度”與“管壁的黏滯損失所造成的軸向負壓力梯度”決定，當前者大於後者時，流體開始從壁面分離，產生渦流，而擴散器本身更具有放大此效應之作用，造成擴散器出口的速度分佈極不穩定且擾動情形(turbulence)嚴重，對ESP效率有極不好的影響。要避免產生流體分離現象，則擴散器擴散半角要小於 7° 才行($1,6,8,\sim 12$)，可是對實際風道面積與ESP入口面積之比而言，擴散器的長度將很長，在空間使用上不符經濟效益，故一般擴散半角為 $30^\circ \sim 60^\circ$ ，以節省空間，可是此時流體一進入擴散器，立刻產生流體分離現象，改善的方法如圖10所示，但NOZZLE型ESP常用的整流方式卻是穿孔板(peforated plate, diffusion plate, distribution plate)(圖11)，以圓形孔較常用，其構想來自風洞中的網狀整流器(screen)，與蜂巢整流器(honeycomb)，網狀整流器著重在減少軸向擾動，蜂巢整流器著重在減少縱向擾動，由於流體從穿孔板流出時類似許多小型噴射流(jet flow)，具有小尺寸和高擾動強度(turbulent intensity)的特色，此強度在板後一段距離內會達到最高值，然後再遞減(圖12)，而這些小噴射流最後都會重新合併混合，約在板下游 $5\sim 10$ 倍 mesh length(鄰孔圓心之間距)，使速度分佈較均勻，像圖13所示，穿孔板放在擴散器出口接近ESP入口處，則速度分佈尚未混合均勻便進入ESP，整流效果不好。Gary指出整流效果與開孔率(孔的投影面積／板的總面積)有關，而與孔徑大小無關。一般而言，開孔率愈小，整流效果愈好(圖14)，但過小，則小噴射流合併混合的效果不好，而開孔率的恰當範圍有兩種說法，文獻記載的是 $50\% \sim 65\%$ (屬歐美系統)，而國內委託日本廠商製作的ESP，卻都採用 $30\% \sim 50\%$ 的開孔率。同樣的，孔徑大小，文獻記載為 $1\sim 2.5$ 吋($2.5\sim 7$ cm)，日本廠商卻有使用 10 cm的case，這些都值得詳加探討。板厚約為 $1/16\sim 1/8$ 吋鋼板，圓孔利用沖孔(punch)方法製成，由於孔板上亦會積灰，需裝敲擊器，定時敲灰，為了使落下的灰不積在ESP入口處而影響氣流分佈，設計時應注意(圖15)。

一般而言，用數片穿孔板的整流效果較好(圖16)，但過多，整流效果不一定好。由圖16知，當間距大於一定長度後，其整流效果差不多，且開孔率大的板子放在上游，開孔率小的板子放在下游，其整流效果好且壓損小(圖17)。有時在同一板子上採用兩種開孔率，或使用兩種不同型式的穿孔板(圖18)。圓孔的排列方式有平行排列，交叉排列(圖19)，其重要參數可由下列經驗公式求出：

$$\text{孔數 } n = 1.27 f F_p / d^2$$

f : 有效開孔率

F_p: 穿孔板總面積

d : 孔直徑

$$\text{平行排: } S_1 = 0.785 d^2 / S_1 f$$

$$S_2 = 0.785 d^2 / S_1 f$$

$$\text{當 } S_1 = S_2 \text{ 時, } S_1 = 0.89 d / \sqrt{f}$$

$$\text{交叉排: } S_1 = 0.63 d \tan \theta / \sqrt{f}$$

$$S_2 = 1.25 d / \sqrt{f \cdot \tan \theta}$$

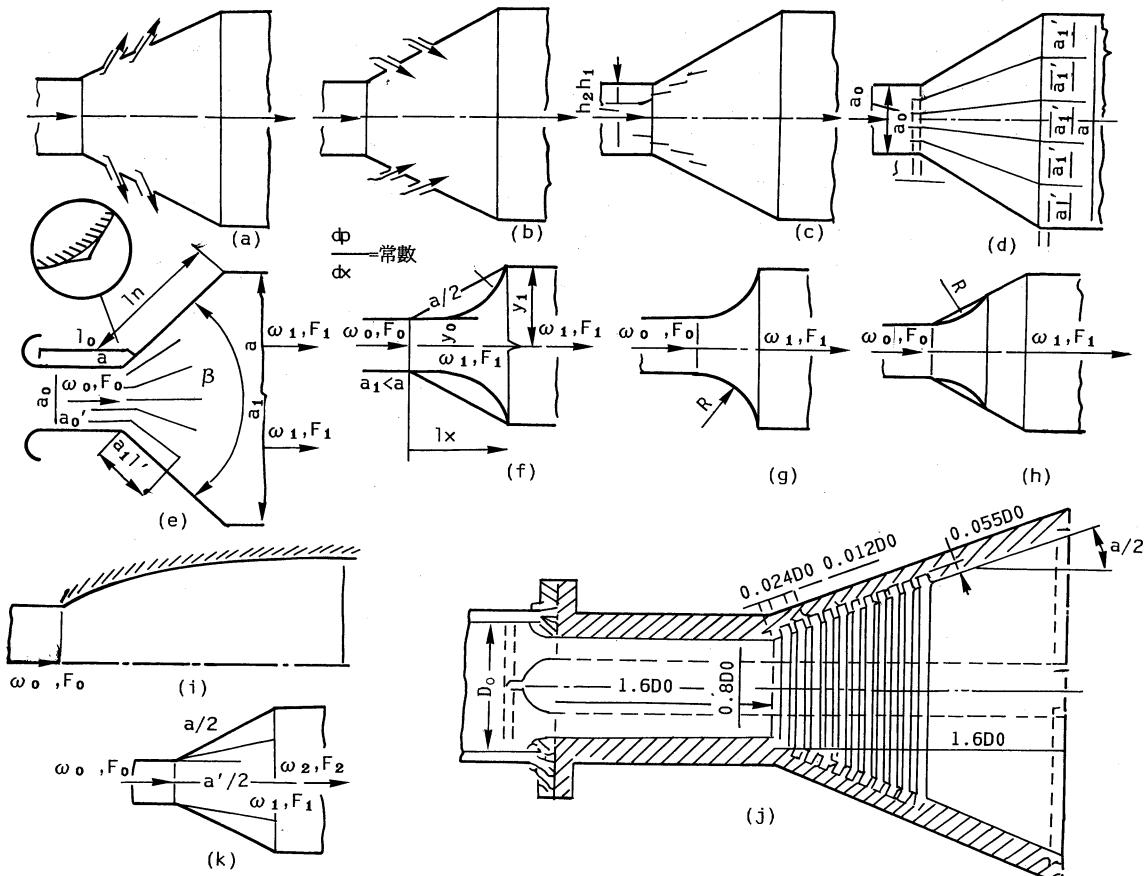
當橫向距離 = 斜向距離 ($S_2 = S_2'$, $\theta = 60^\circ$) 時

$$S_1 = 0.82 d / \sqrt{f}$$

$$S_2 = 0.95 d / \sqrt{f}$$

$$\text{當 } S_1 = S_2 \text{ 時, } S_1 = 0.89 d / \sqrt{f}$$

經本作者調查驗證結果，上式僅供參考，尚無法精確地用於
ESP之穿孔板設計。



(a)抽出邊界層 (b)吹除邊界層 (c)導流片 (d)長隔板 (e)短隔板
(f)等壓曲面漸擴管 ($dp/dx = \text{常數}$) (g)全圓弧曲面漸擴管
(h)部份圓弧曲面漸擴管 (i)預分離漸擴管 (j)肋化漸擴管
(k)階段型漸擴管

圖10 改善漸擴管內部流場的方法

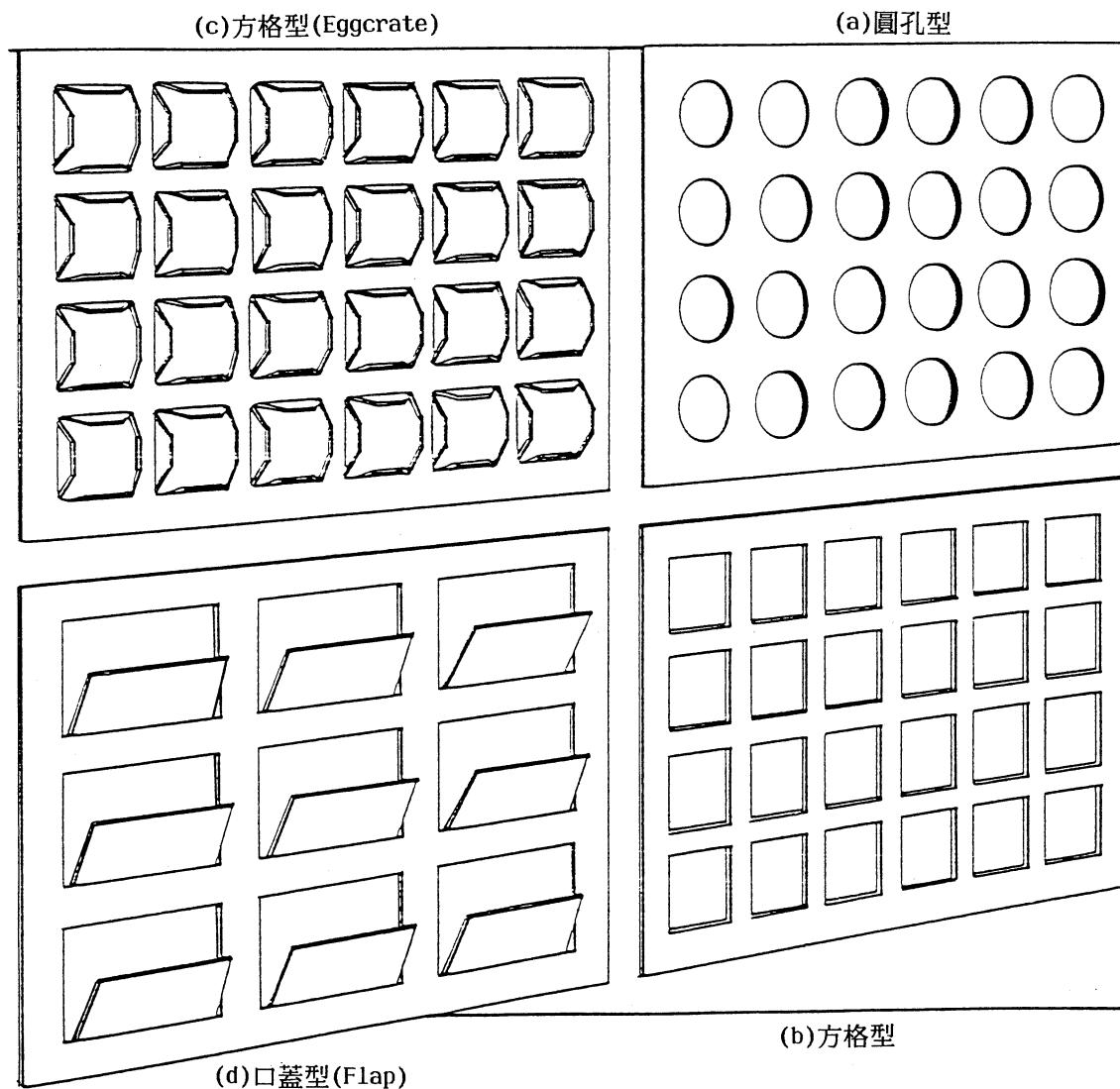


圖11 不同型式的穿孔板

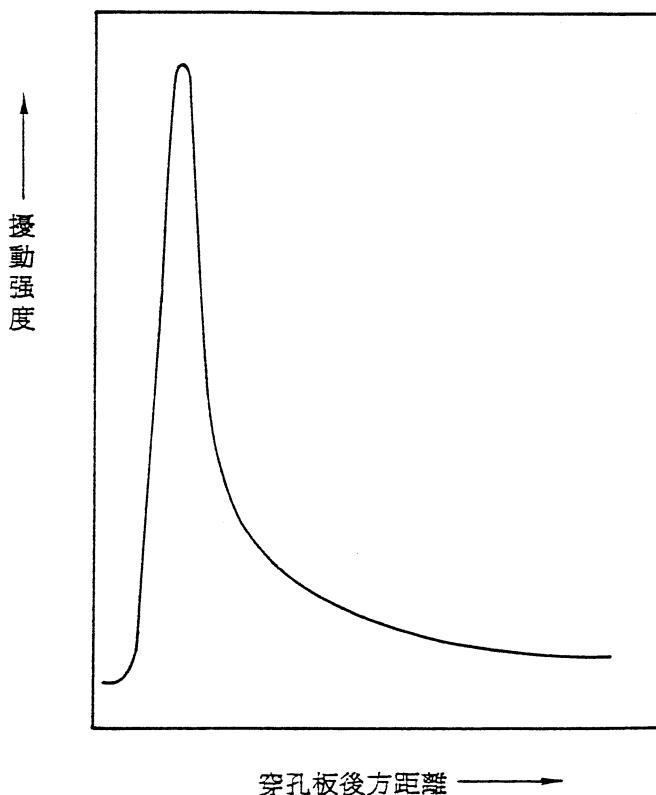


圖12 穿孔板後方擾動強度之趨勢

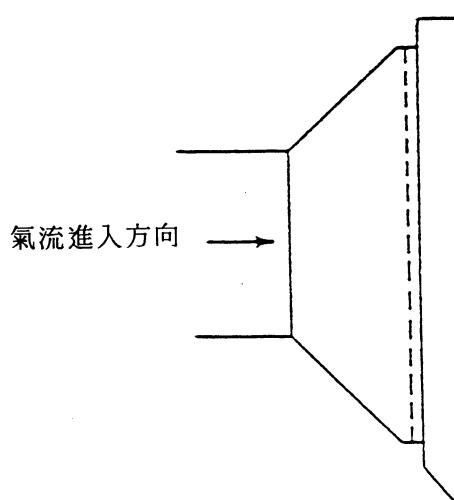


圖13 錯誤的整流板安裝位置(側視圖)

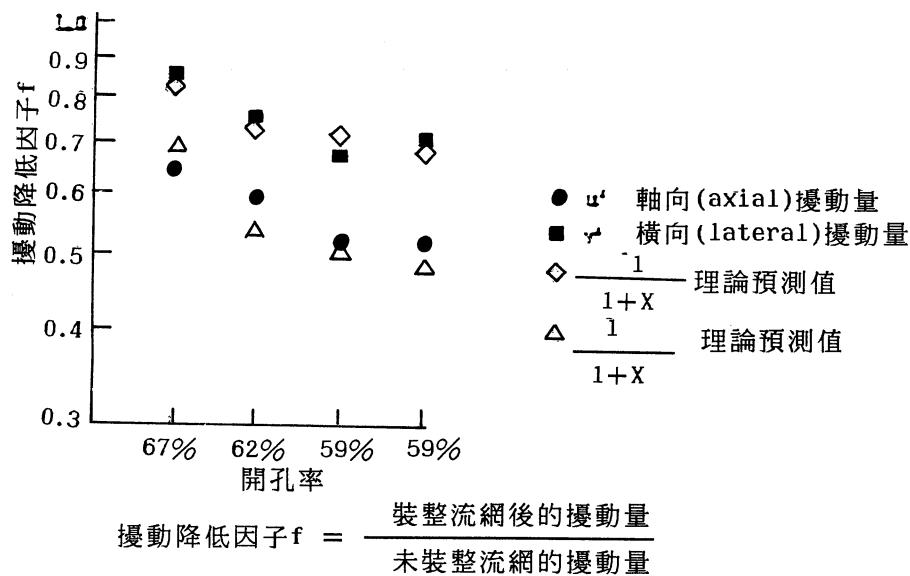


圖14 開孔率與整流效果的關係

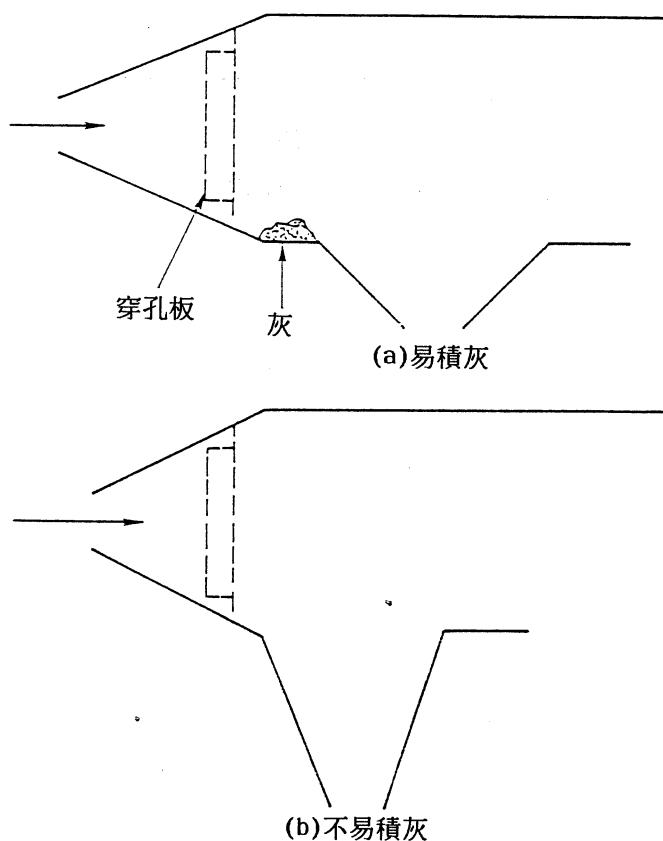


圖15 ESP 入口段斜度設計

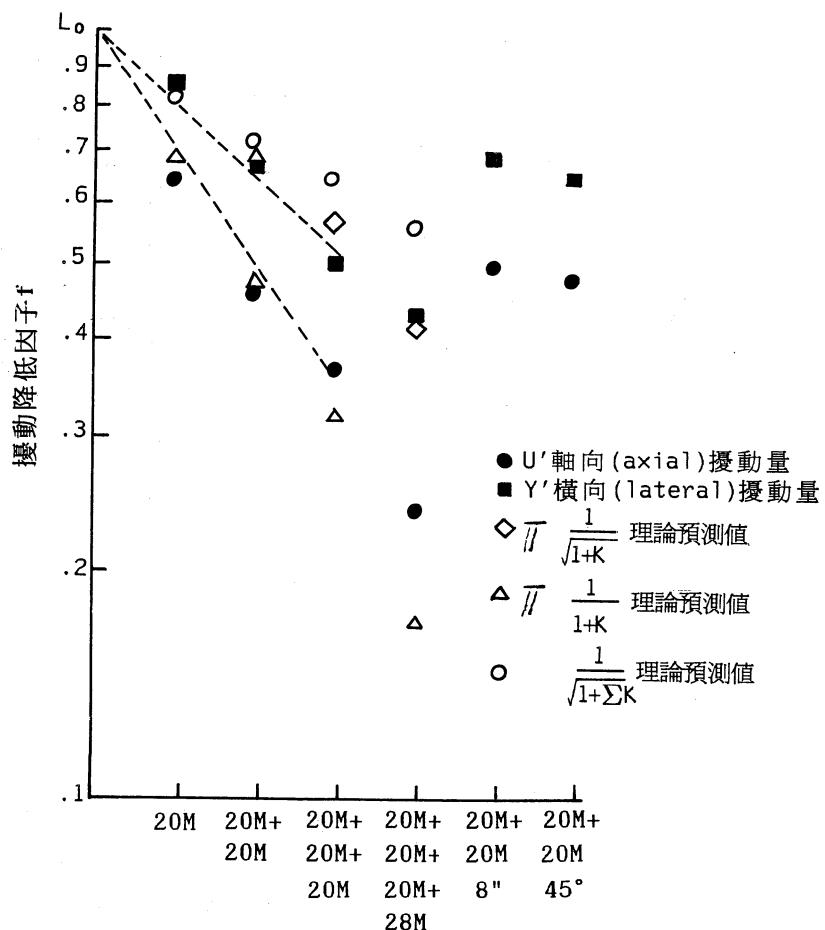
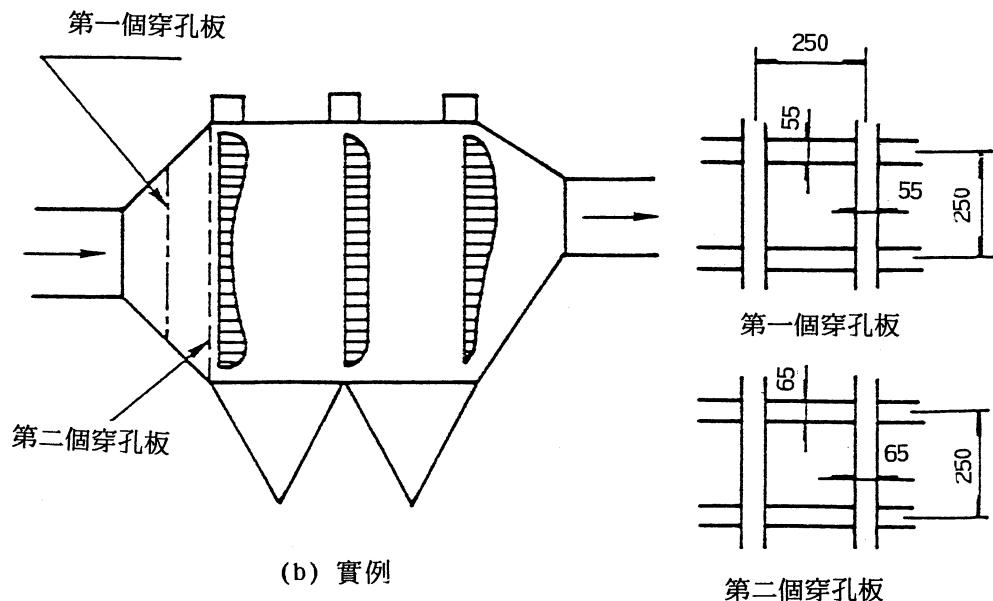
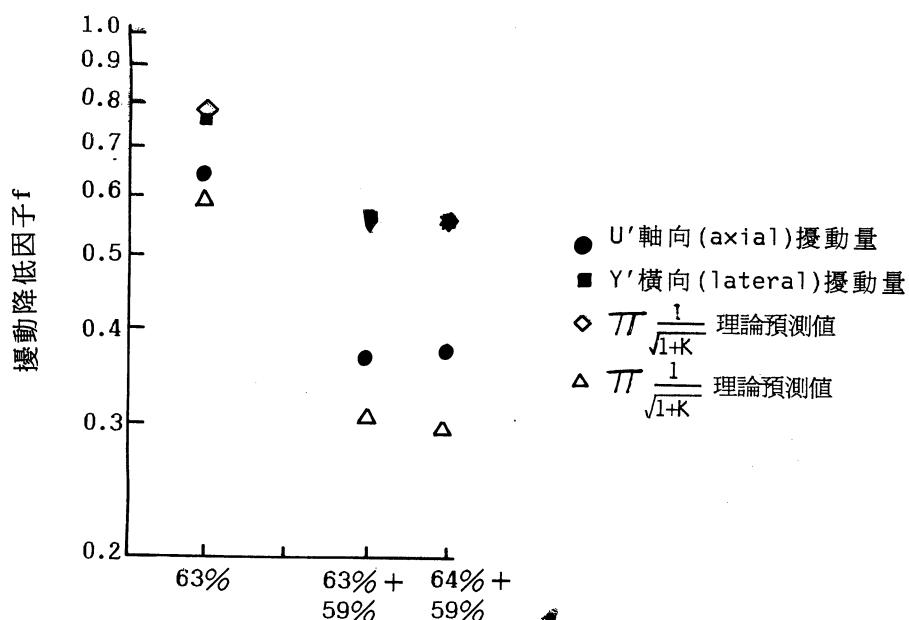


圖16 數片整流網串聯使用之整流效果

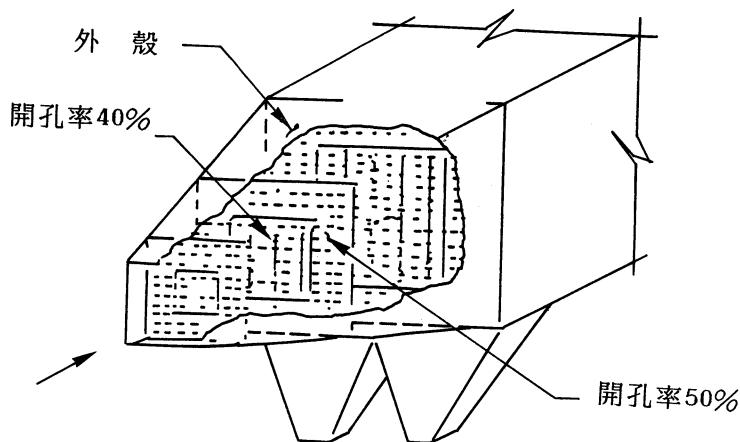


(b) 實例

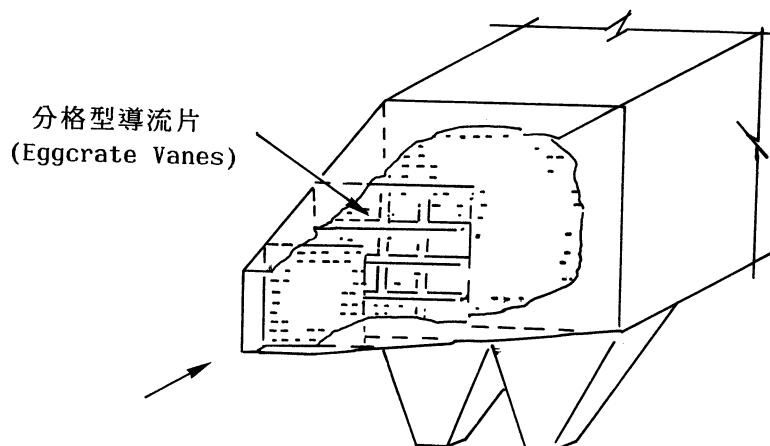


(a) 將不同開孔率之網串聯使用的整流效果

圖17 不同開孔率之網串聯使用的整流效果

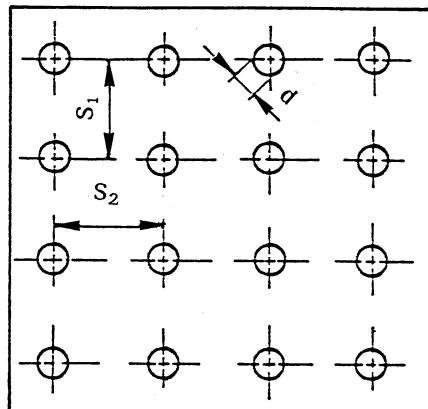


(a) 同一塊穿孔板上有兩種不同的開孔率

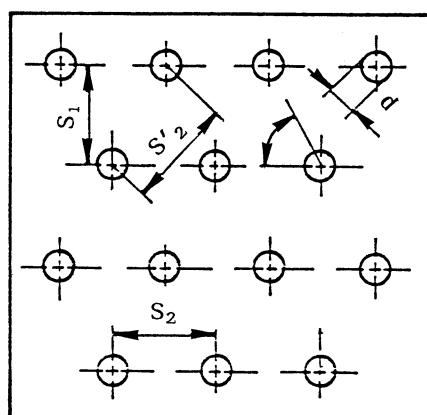


(b) 中間板子為分格型整流板

圖18 不同型式穿孔板之組合



(a)平行排



(b)交叉排

圖19 穿孔板上的圓孔排列方式

3.2 WEDGE型與PLENUM型

Nozzle型一般只採用穿孔板，就可達到整流的目的，但WEDGE型與PLENUM型因其結構有轉角存在，若只用穿孔板，將無法達到整流目的(圖20)，且這兩型穿孔板的孔常採用不均勻分佈，即高速度區域具有較多的孔，低速度區域具有較少的孔，這是考慮到整流與再逸散效果。另有結合穿孔板與導流片觀念的導向板(圖11d)，其整流效果如圖21及圖22所示。為了克服轉角問題，常在轉角處採用vane stiffener，設計時需注意兩點：1. 攻角不可太小。2.chord-to-gap ratio (vane的寬度／相鄰vane之間距) 大於 0.5。裝置時，有兩種方向供選擇(圖23)。

*若是下沖式入口，為避免將第一個灰斗所收集的灰捲起，採用圖23b型，效果最好(圖24)。

一般進入ESP的平均流速(ESP入口體積流率／ESP入口橫截面積)為 $1\sim 3\text{m/sec}$ ，此流速範圍與ESP型式、塵粒特性有關，例如處理飛灰(Fly ash)，若用plate-wire型ESP(圖25a)，則流速不可超過 1.5m/sec ，若用flat plate型ESP(圖25b)，則流速不可超過 1m/sec ，處理低電阻塵粒，則流速應小於 1m/sec ，以防止“非因敲擊所造成的再逸散”(nonrapping reentrainment)。

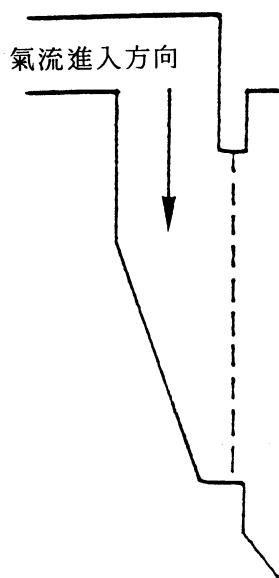


圖20 轉角處缺乏導流片，整流效果不好

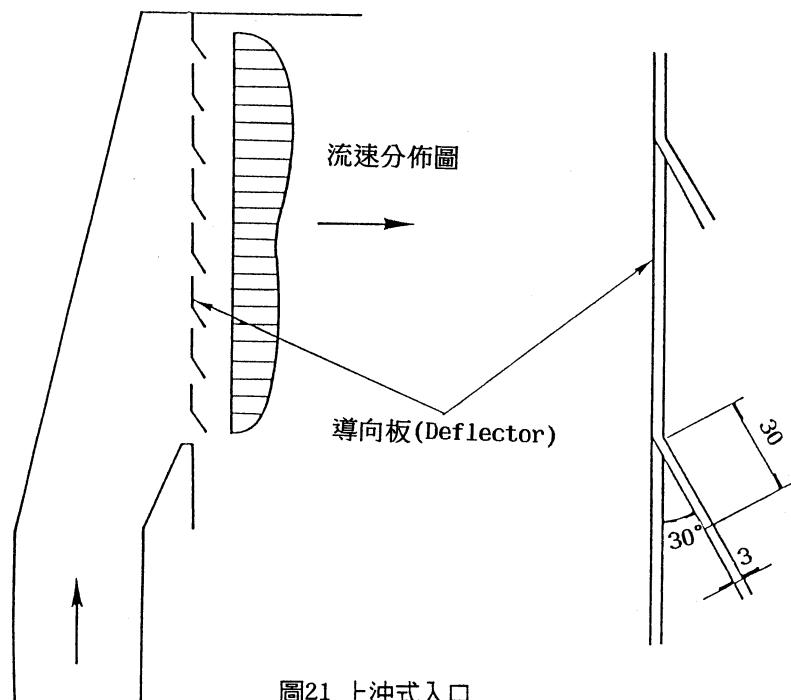


圖21 上沖式入口

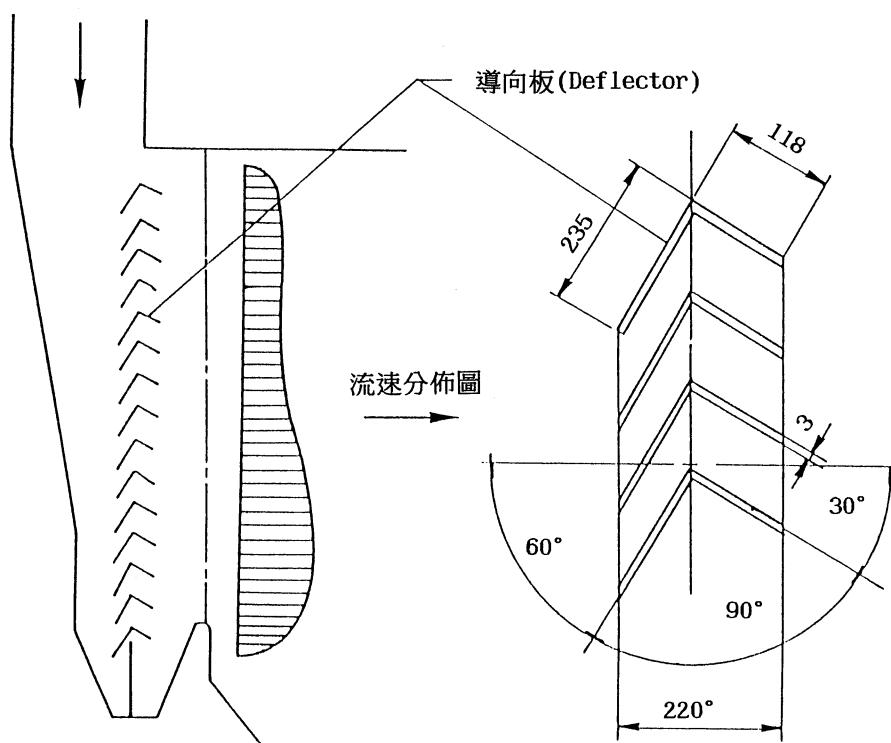


圖22 下沖式入口

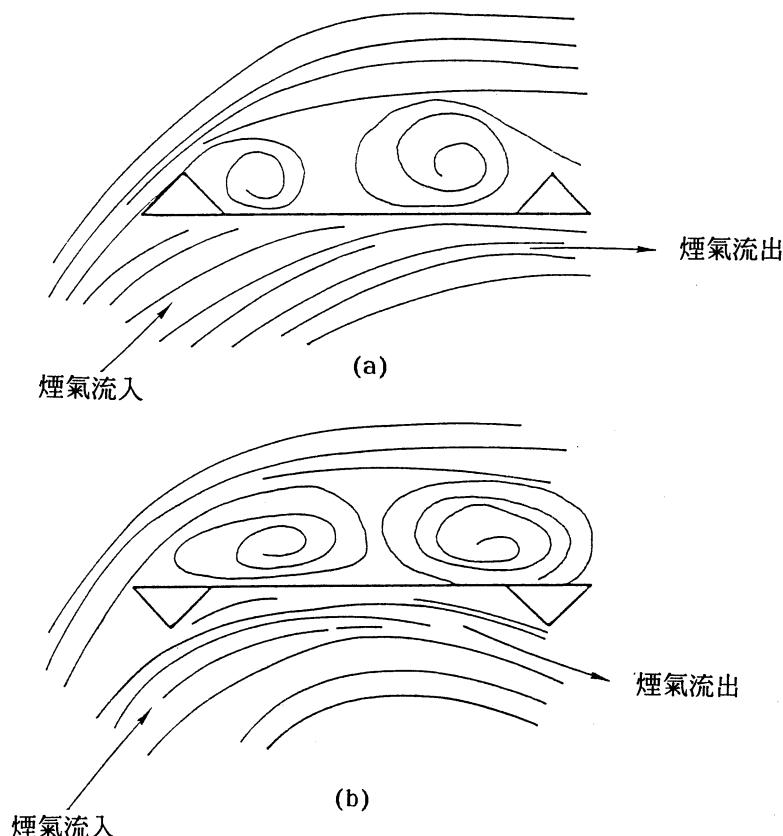


圖23 Vane Stiffener的裝設方式，以(b)的整流效果最好

V ：平均流速 (mean velocity)

V_h ：局部流速 (local velocity)

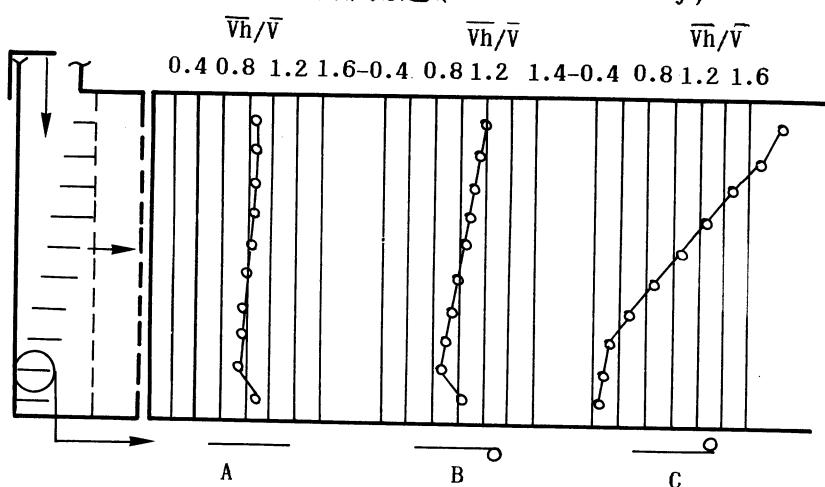


圖24 導流片上加裝stiffeners後的速度分佈圖(B、C的stiffeners位置不同)

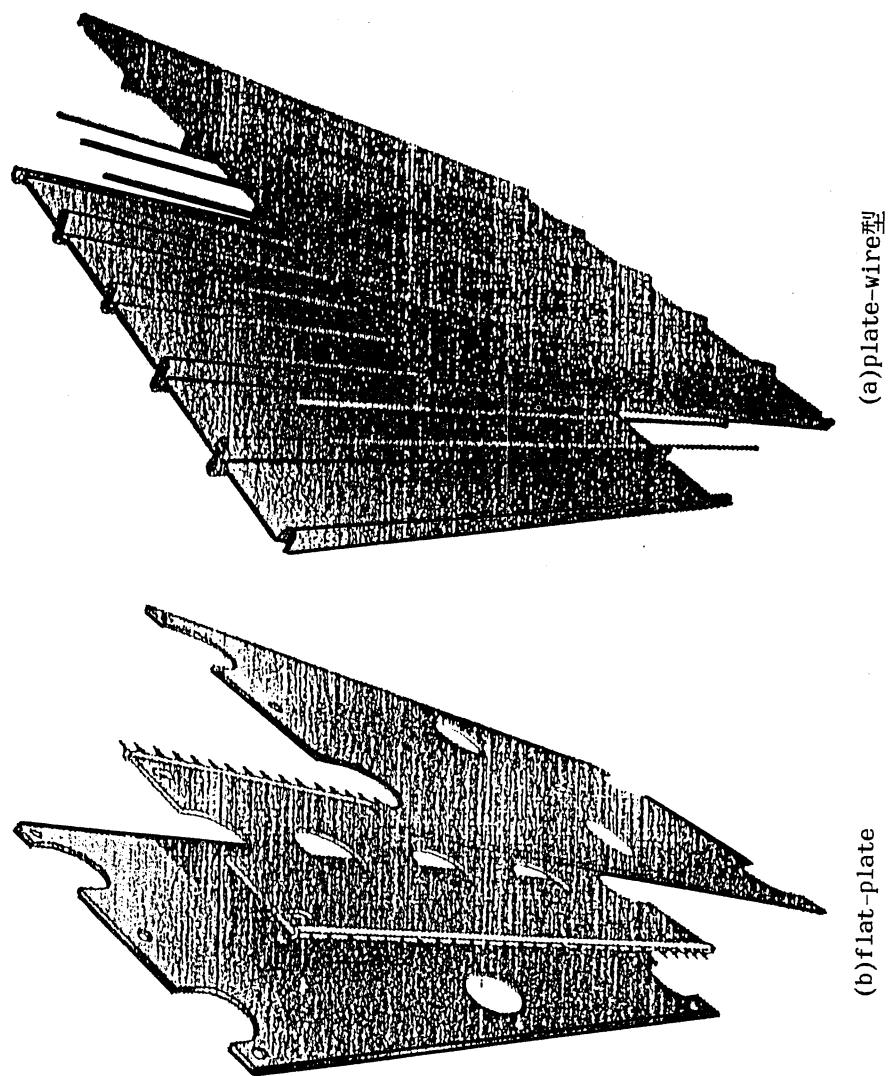
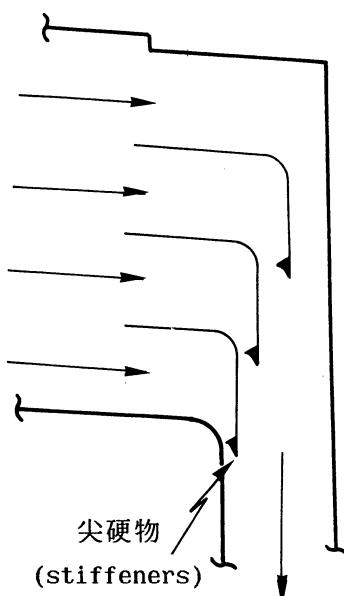


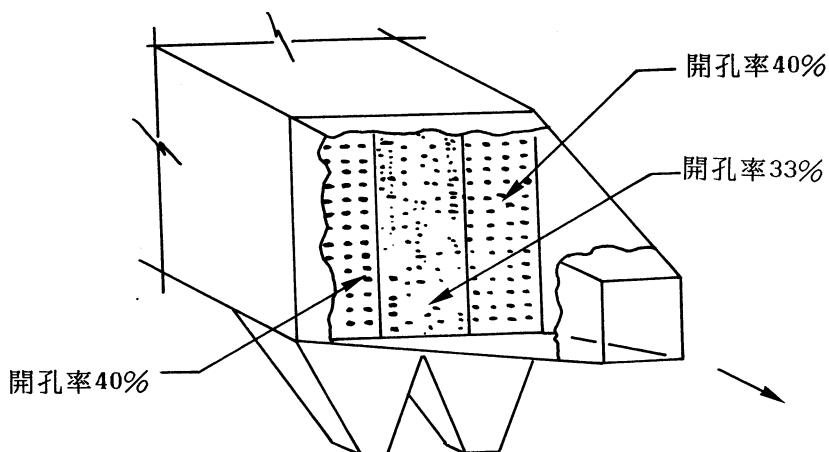
圖25 ESP 極板線的兩種型式

四、ESP出口

由於ESP出口段的截面積漸減，速度漸增，產生一壓力梯度，當收縮角度大於 10° 且收縮面積比小於0.3時，就產生流體脫離壁面的現象，使得ESP出口速度分佈不均勻，由於ESP最後一個灰斗所收集的灰極細小(fine)，易受外界擾動而被捲起帶出ESP，造成再逸散現象，故一般不希望ESP出口底部的速度太高，此時需裝整流裝置，如ESP入口整流裝置一樣，有vane stiffeners與穿孔板仇(圖26)，穿孔板常只用一片，不像ESP入口二、三片串聯使用，且同一板上常有兩種以上不同之開孔率，其整流效果如圖27所示，ESP出口氣流方向朝上，在敲擊時(rapping)，再逸散的損失比出口氣流方向朝下者少。



(a) 具有尖硬物的導流片(stiffener vanes)



(b) 在同一板上有不同開孔率

圖26 ESP出口段的整流裝置

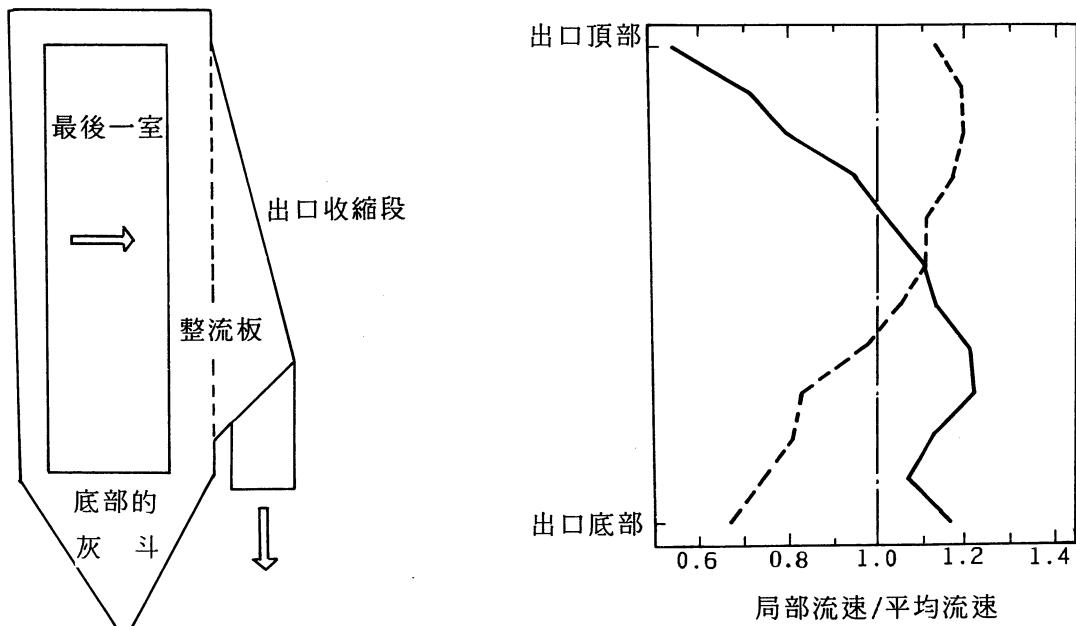


圖27 單一開孔率(——)與非單一開孔率(-----)

判斷ESP入、出口速度分佈的品質之標準：

1. 在速度軌跡(velocity profile)上，85%的數據不大於速度平均值的1.15倍，99%的數據不大於平均值的1.4倍。
2. 若ESP有許多室(multiple chambers)同時處理同一污染源，則各室入、出口速度分佈均勻性之標準同，且由各室的平均值求出總平均速度值(overall average velocity)，則各室入、出口速度平均值與總平均速度值的差異(deviation) 不可超過10%。
3. Root Mean Square (RMS)偏差值小於20%是“好”(good)，RMS 小於10%是“最佳”(optimum)，最差狀況，RMS也要維持在30%以下。
4. 當處理高電阻及細小粒子時，入口氣流分佈要極佳，RMS 愈小愈好。
5. ESP出口速度分佈要考慮到再逸散效果，故底部接近灰斗區域之流速不希望太高。

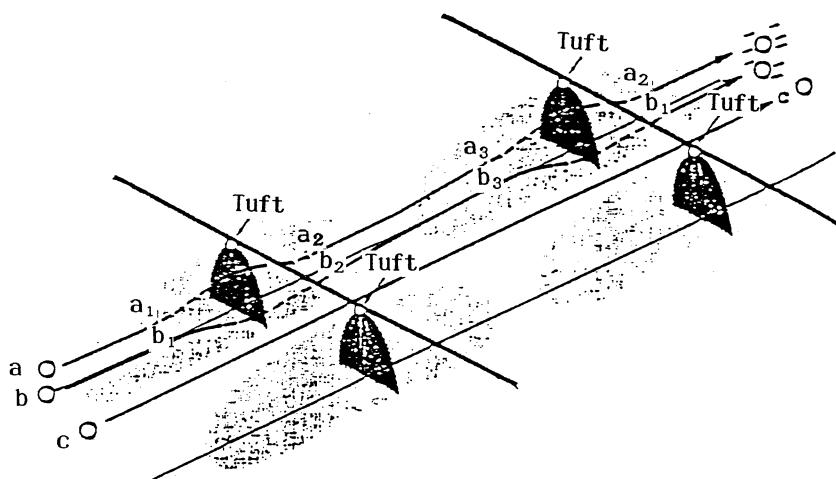
五、ESP內部

一般來說，只要ESP夠長，則ESP內部的氣流分佈品質一定比ESP入、出口的氣流分佈好，由於氣流的擾動程度(turbulence level)亦會影響ESP集塵效率，故仍有許多研究在探討ESP內部的流場型式與特性(flow pattern and characteristics)，以期再提高ESP集塵效率，研究內容大致分為下列幾點：

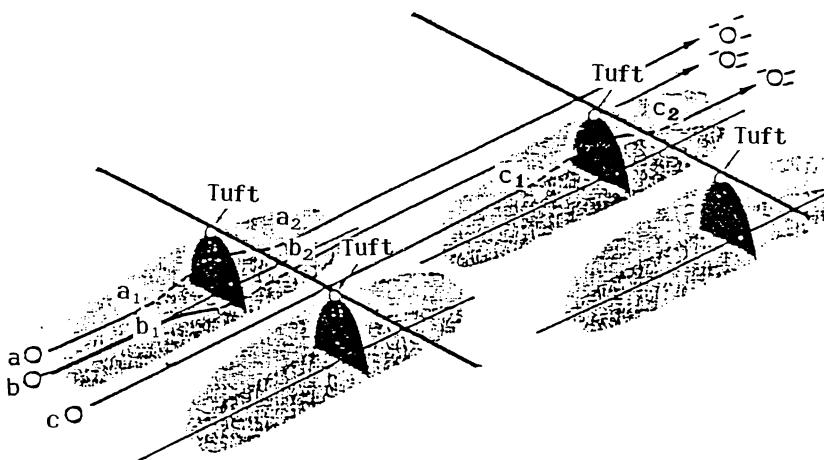
5.1 洩漏量(sneakage)

5.1.1 電子洩漏量 (electric sneakage) :

塵粒雖經過極板極線間之區域，但卻由電暈區之間通過，並未被充電，則細小塵粒由於本身重量沈降效果不大，又未被充電而未能被吸附到收集板上，故此洩漏量影響細小塵粒的收集效率，造成此現象的原因是電暈所造成的二次流所引起的，這種現象對負電暈放電的光滑極線及具有尖點或釘狀物的放電極線而言，相當普遍，寬尖點間距最明顯，改善的方法是將尖點前後交錯排列(圖28)。



(a) 尖點前排列順序一致(in-line)



(b) 尖點前後交錯排列(staggered)

圖28 放電尖點排列方式

5.1.2 氣體洩漏量(gas sneakage)

約有 5%~10%的氣流由極板極線的上、下方流出，使得這部份氣流未被充電而失去被收集板吸附的機會，尤其當從極板極線下方漏出的氣流進入灰斗時，會造成渦流，將灰斗中收集的灰捲起，然後又隨主氣流流出ESP，降低集塵效率，這是因為極板極線間的壓力與其上、下方區域的壓力不同，造成氣流有垂直方向的運動而使得流線方向偏向於上、下方(圖29)。主氣流速度、洩漏速度與主氣流方向的流率之關係如圖30所示，改善的方法是：

1. 減少ESP內部突出物數目與尺寸，以降低壓力差。
2. 增加板間距，使突出物的影響相對地減少。
3. 縮短收集板的長度。
4. 使用反洩漏擋板(anti-sneakage baffles)。
5. 使用purge gas，將一部份ESP出口氣流引入灰斗及極板極線的上方，將洩漏氣體吹回去。
6. 增加極板極線高度。

氣體洩漏量與ESP的型式亦有關，一般而言，

Wet ESP < Plate-Wire ESP < Flat-Plate ESP

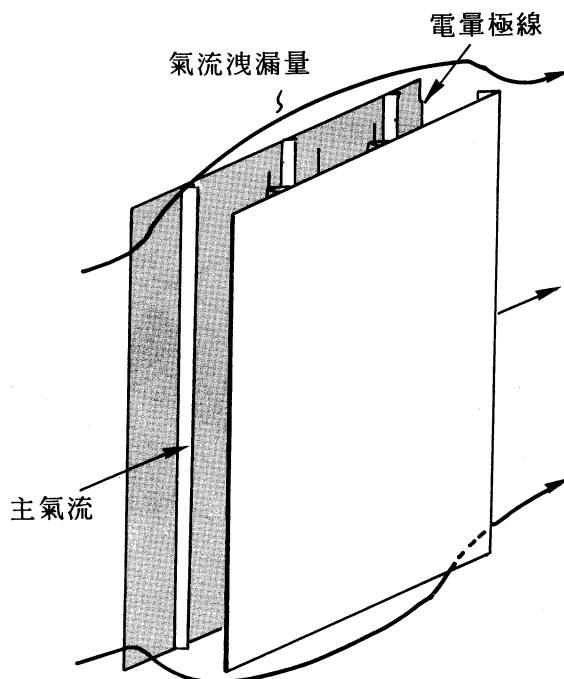


圖29 氣流洩漏量

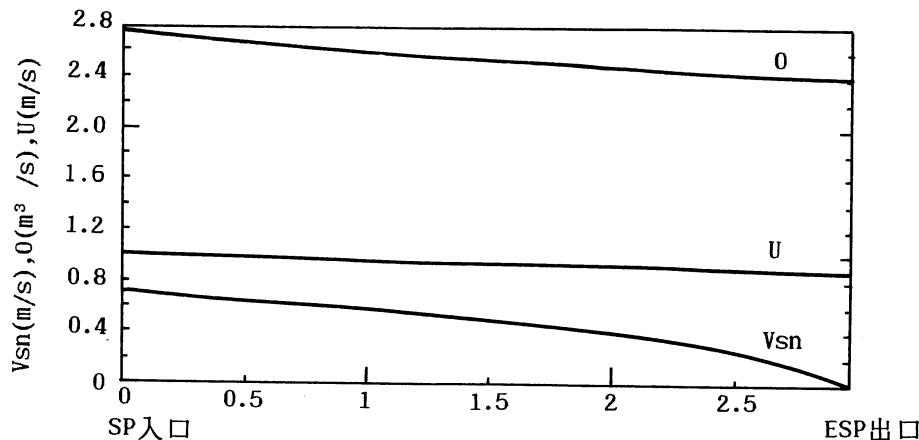


圖30 主氣流速度U，洩漏速度Vsn與主流方向

5.2 二次流(亦稱電暈風、電子風、離子風)

Yamamoto由理論及實驗發現Wire-type ESP內部由電暈所造成的二次流，會影響流場特性，此二次流的強度受到電流密度、電暈極性(polarity)、氣流流率與放電極幾何形狀(geometry)的影響，故ESP內部之流場特性由傳統的流體機制(fluid mechanism)與二次流效應所決定，至於何者較重要，由無因次參數NEHD (Electro Hydro Dynamic Number)來評估。

i : 放電極線每單位長度之電流量

$$b : \text{離子移動性 (ion mobility)} = \frac{qc}{6\pi\nu a}$$

ρ : 氣流密度

U_0 : ESP入口之氣流平均速度

q : 粒子電荷

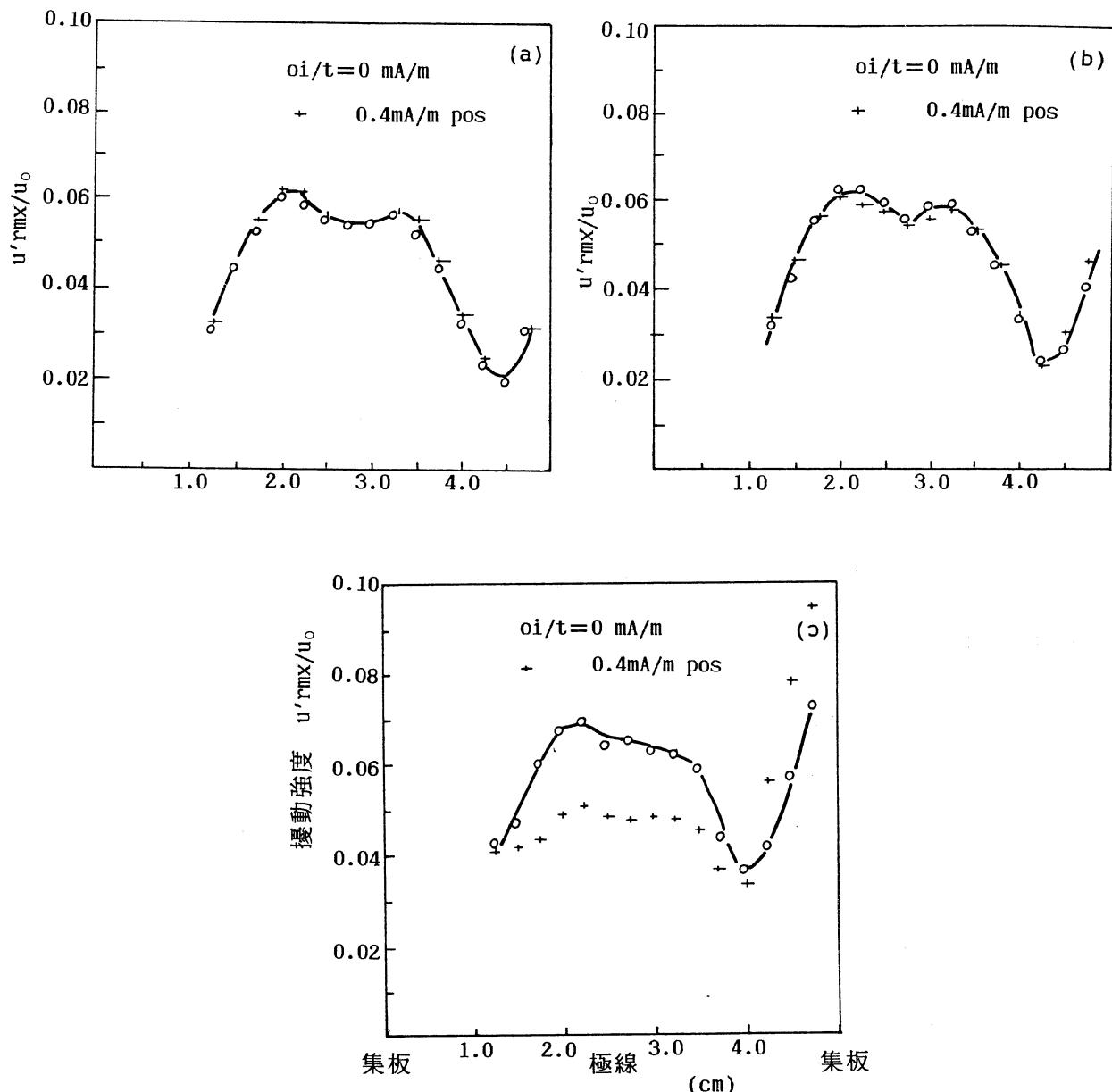
a : 粒子半徑

c : Cunningham factor

ν : 黏滯性 (dynamic viscosity)

NEHD愈大，表示由二次流所造成的擾動程度愈大，ESP效率受其影響也愈大，若是ESP內部突出物所造成的擾動程度很大，則不管流速及電流值為多少，皆可忽略二次流效應，但記住此時洩漏量也增加，且近年來，ESP內部流速有愈來愈低之趨勢，故二次流效應也愈來愈多人研究。

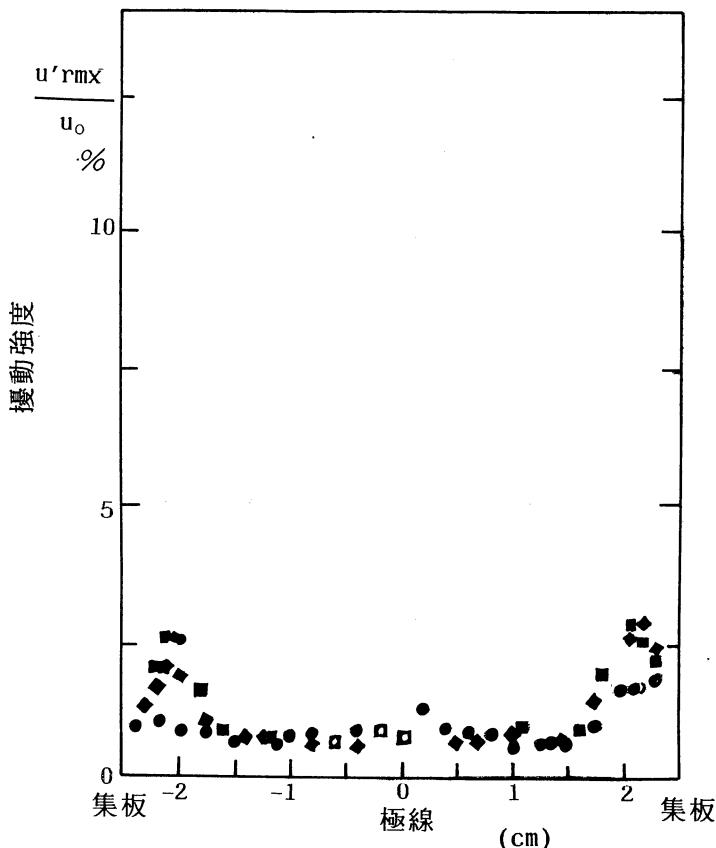
正電暈放電產生之二次流，其增加的擾動程度幾乎為0(圖31)，在低流速時，甚至會減少擾動程度，其原因為極線附近的高電流密度加熱流體，增加了氣體黏滯性(kinematic viscosity)，使得雷諾數變小，而使極線後方產生的渦流(wake)變得很穩定，流場幾乎是二維性質(2-Dimensional)。雖然NEHD增加，渦流也會變大，但對擾動程度的影響不大(圖32)，故一般均忽略正電暈放電之二次流效應。



(a) ESP入口主流平均流速 $U_0 = 331 \text{ cm/sec}$

(b) $U_0 = 220 \text{ cm/sec}$ (c) $U_0 = 125 \text{ cm/sec}$

圖31 正電量放電ESP的電子風效應與流速的關係



ESP入口主氣流平均流速 $U_0 = 2 \text{ m/sec}$

，無擋板(baffles)

$i/l = 0 \text{ mA/m}$ ●

$i/l = 0.04 \text{ mA/m}$ ◆

$i/l = 0.10 \text{ mA/m}$ ■

圖32 正電暈放電，NEHD與擾動強度的關係

負電暈放電之二次流效應隨主氣流速度減小而增強(圖33)，亦隨電流密度增加而增強(圖34)。一般而言，當 $NEHD > 0.5$ 時，此二次流效應不可忽略，這是因為其產生的渦流不穩定，加強了流場的三維特性(3-Dimensional)，Larsen 認為將尖點前後交錯佈置(圖35)，可減少此二次流效應，他亦證明此二次流效應愈強，則集塵效率愈低。

極線形狀之設計，一般以儘量減少流場擾動為原則。

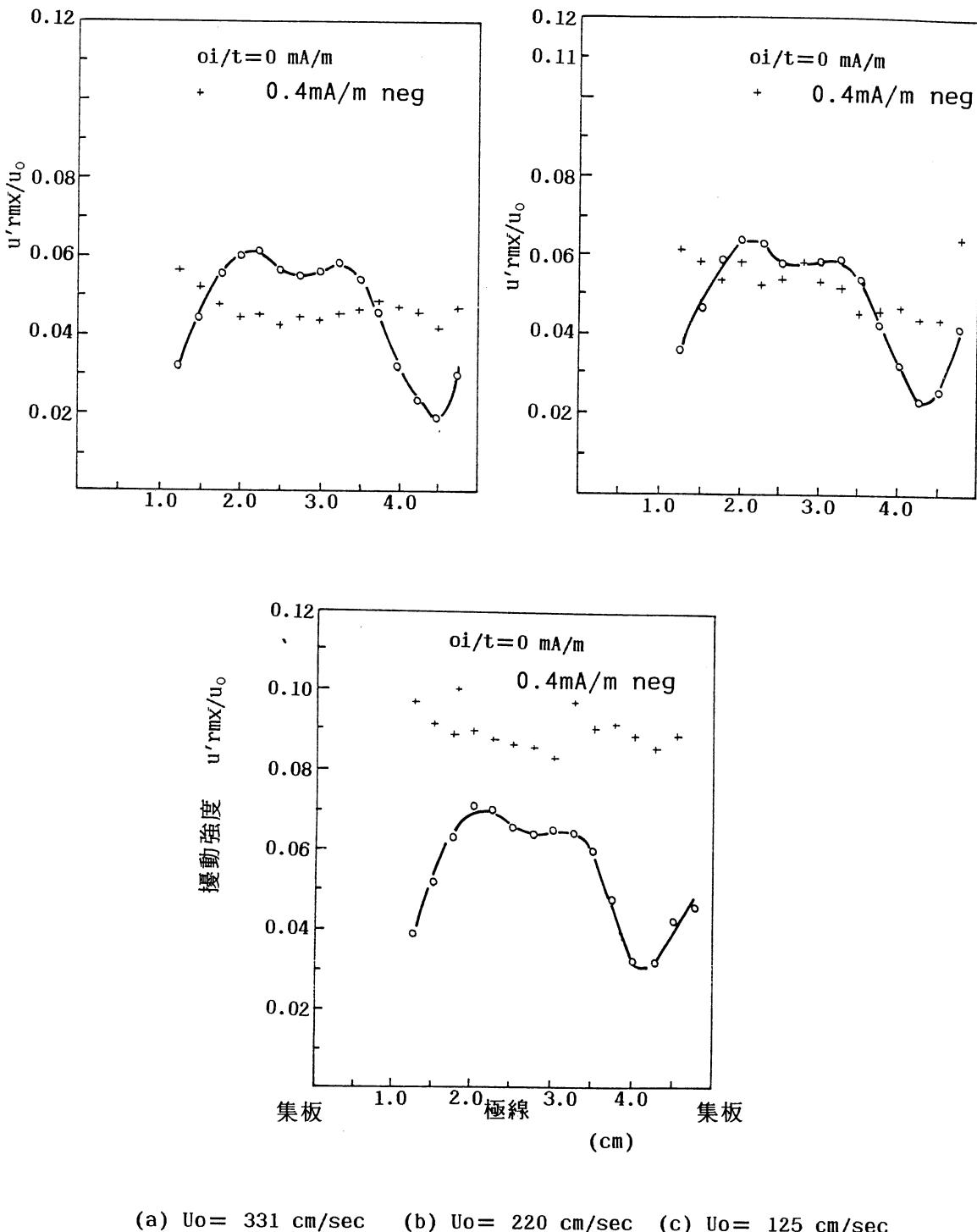
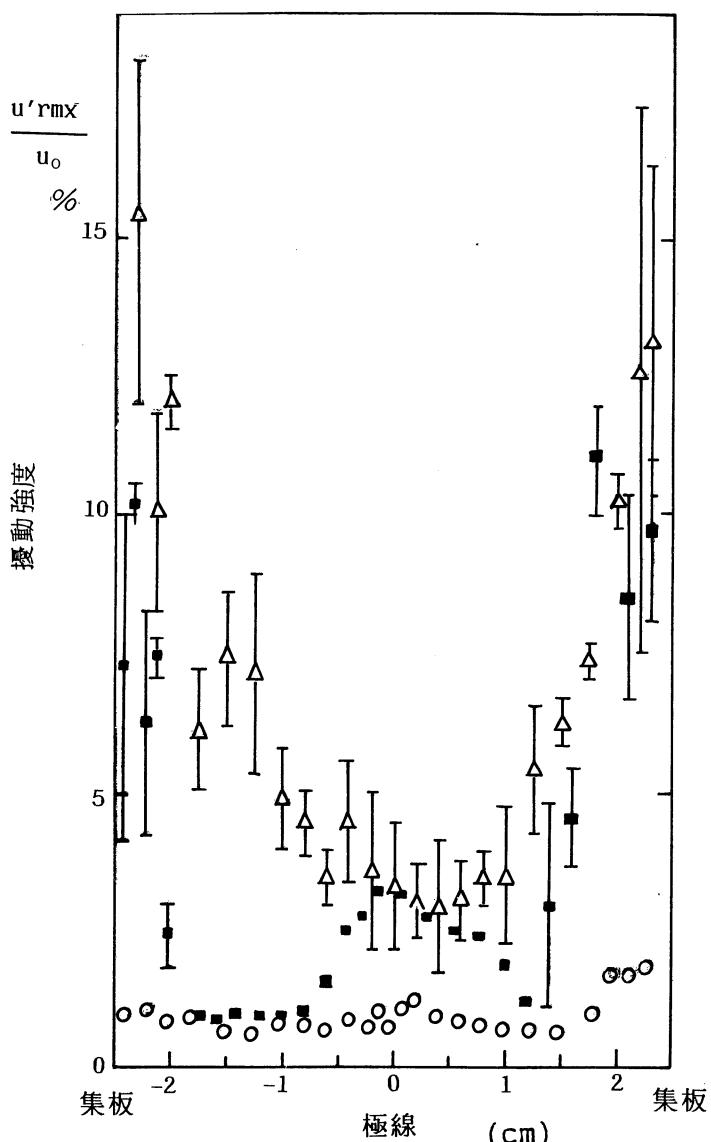


圖33 負電量放電ESP的電子風效應與流速的關係



$U_0 = 2 \text{ cm/sec}$, 無擋板

$i/l = 0 \text{ mA/m}$ ○

$i/l = 0.04 \text{ mA/m}$ ■

$i/l = 0.20 \text{ mA/m}$ △

圖34 負電暈放電，電流密度與擾動強度的關係，ESP入口主氣流平均流速

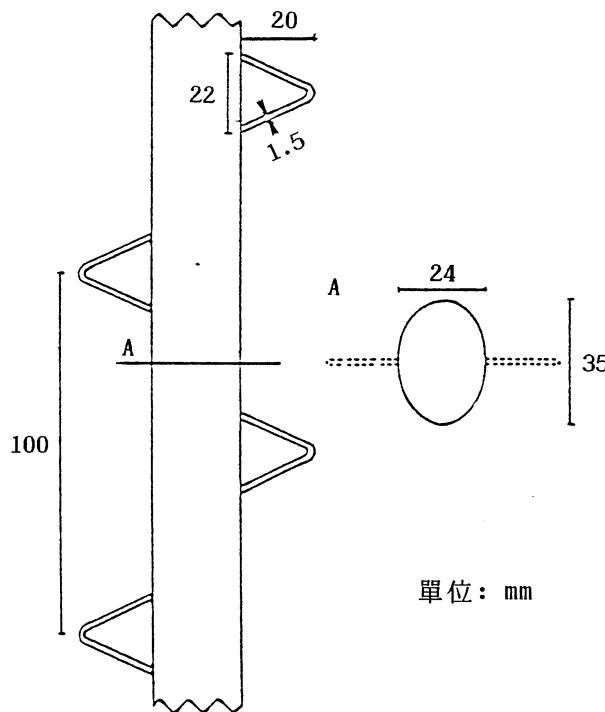


圖35 極線上的尖點為V字型，並為非對稱(asymmetric)佈置

六、模型測試

有關 ESP模型測試，最早從1950年代初期開始，到1960年代末期已廣為使用，使用模型試驗的原因為：

- 1.省時省錢。
- 2.得到所需的設計資料。
- 3.確保產品性能合乎規格。
- 4.分析運轉中ESP發生之問題並加以改善。

為了使模型的流場型式(flow pattern)近似實體ESP的情況，需滿足三項要求：

- 1.幾何近似(geometric similarity)：

$$\frac{\text{模型尺寸}}{\text{實體尺寸}} = \text{常數}$$

- 2.運動近似(kinematic similarity)：

$$\frac{\text{模型內流速}}{\text{實體內流速}} = \text{常數}$$

$$\frac{\text{模型內加速度}}{\text{實體內加速度}} = \text{常數}$$

3. 動力近似(dynamic similarity)：

$$\frac{\text{模型內動壓(dynamic pressure)}}{\text{實體內動壓}} = \text{常數}$$

由動力近似更推導出一些無因次參數，例如雷諾數、馬赫數、弗路德數(Froude number)等，理想狀況是這些參數在模型與實體的值完全相同，但這是不可能的，假設要模擬直徑16英呎，溫度 300°F的煙道流場，模型用室溫空氣做流體，尺寸比例1/16，則由雷諾數相等，(密度、黏滯性均考慮溫度效應)

$$Re = \frac{\rho_{\text{實}} V_{\text{實}} L_{\text{實}}}{\mu_{\text{實}}} = \frac{\rho_{\text{實}} \left(\frac{460+70}{460+300} \right) V_{\text{模}} \frac{L_{\text{實}}}{16}}{\mu_{\text{實}} (1.33)}$$

可推得 $V_{\text{模}} = 30.5 V_{\text{實}}$ ，則馬赫數絕不會相同，若煙道流速為50ft/sec，則模型之流速將為超音速，這在製作上很困難又費錢，是不可能如此做的。

一般在ESP的模型測試上，使用乾淨氣流只考慮幾何尺寸比例、雷諾數，若為含塵粒氣流，則需考慮電子弗路德數，若研究壓力損失，則需考慮尤拉數(Euler Number)。因為上述例子，故實體與模型的雷諾數不要求相同，而只要求其值在紊流場範圍內，因為紊流場的流型(flow pattern)皆相似，而模型在較低之雷諾數下測試，所造成的壓降才不致太高，所需動力設備的價格也較便宜，而幾何尺寸比例從1/4到1/16都可以，模型使用的流體不一定要和實體一樣，溫度不一定要相同，但流體密度和黏滯性修正係數要考慮進去(如前例)：

$$\text{雷諾數 } Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{\text{慣性力}}{\text{黏滯力}}$$

$$\text{弗路德數 } Fr = \frac{V^2}{gL} = \frac{\text{慣性力}}{\text{重力}}$$

$$\text{尤拉數 } Eu = \frac{\Delta P}{1/2 V^2} = \frac{\text{壓力差(pressure differential)}}{\text{速度頭(velocity head)}}$$

$$\text{電子弗路德數} = \frac{\rho V^2}{6\pi Na\mu WL} = \frac{\text{慣性力}}{\text{身體力(body force)}}$$

ρ : 流體密度

V : 特徵速度(characteristic velocity)

L : 線性特徵尺寸

μ : 流體黏滯性

g : 重力加速度

N : 單位體積所含塵粒數目

a : 塵粒半徑

W : 游移速度(migration velocity)

ΔP : 壓力梯度(pressure gradient)

模型最好放在鼓風機(blower)的吸入端，並且風量可調大小，測量流速工具可用皮托管(pitot tube)、熱線測速儀(hot-wire/film)、或雷射測速儀(LDV)，亦可用視流法(例如噴煙、加熱油膜、黏細線等方法)觀察流場。模型測試後之數據應用到實體上，一定會有差異性存在，因為兩者間的一些細部結構不相同，所以最理想的情況是將實體ESP全部系統等比例縮小，但大部份研究ESP的模型皆專注於ESP系統某部份的某類問題之探討，故只要這部份力求與原型一樣，則模型所得結果應用於實體時，差異性將減少。

一般模型測試皆針對改善問題而做，而判斷實體ESP氣流品質好壞的方法如下：

1. 在ESP出、入口測量速度分佈狀況及其間的壓力損失(圖36)。
2. 檢查灰斗的收集量。
3. 關機，檢查極板極線上的積灰情形。
4. 在室溫操作下，在出口灰斗內燒煙霧彈，看煙霧飛散的情形(簡易視流法的一種)。
5. 在ESP出口煙道裝濁度計(opacity)監測塵粒含量。
6. 在ESP出口漸縮段裝透明觀測窗，供目視檢查。

若由上法查出氣流特性需改善時，則改善的步驟如圖37所示。

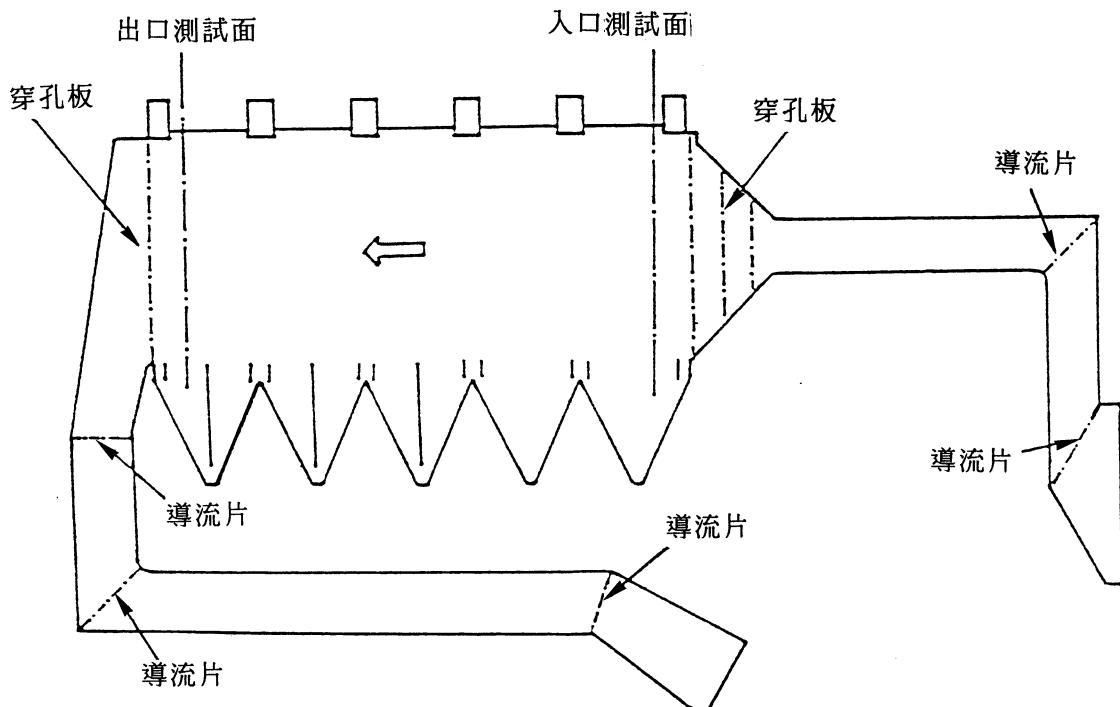


圖36 ESP入、出口量測速度分佈的量測點位置

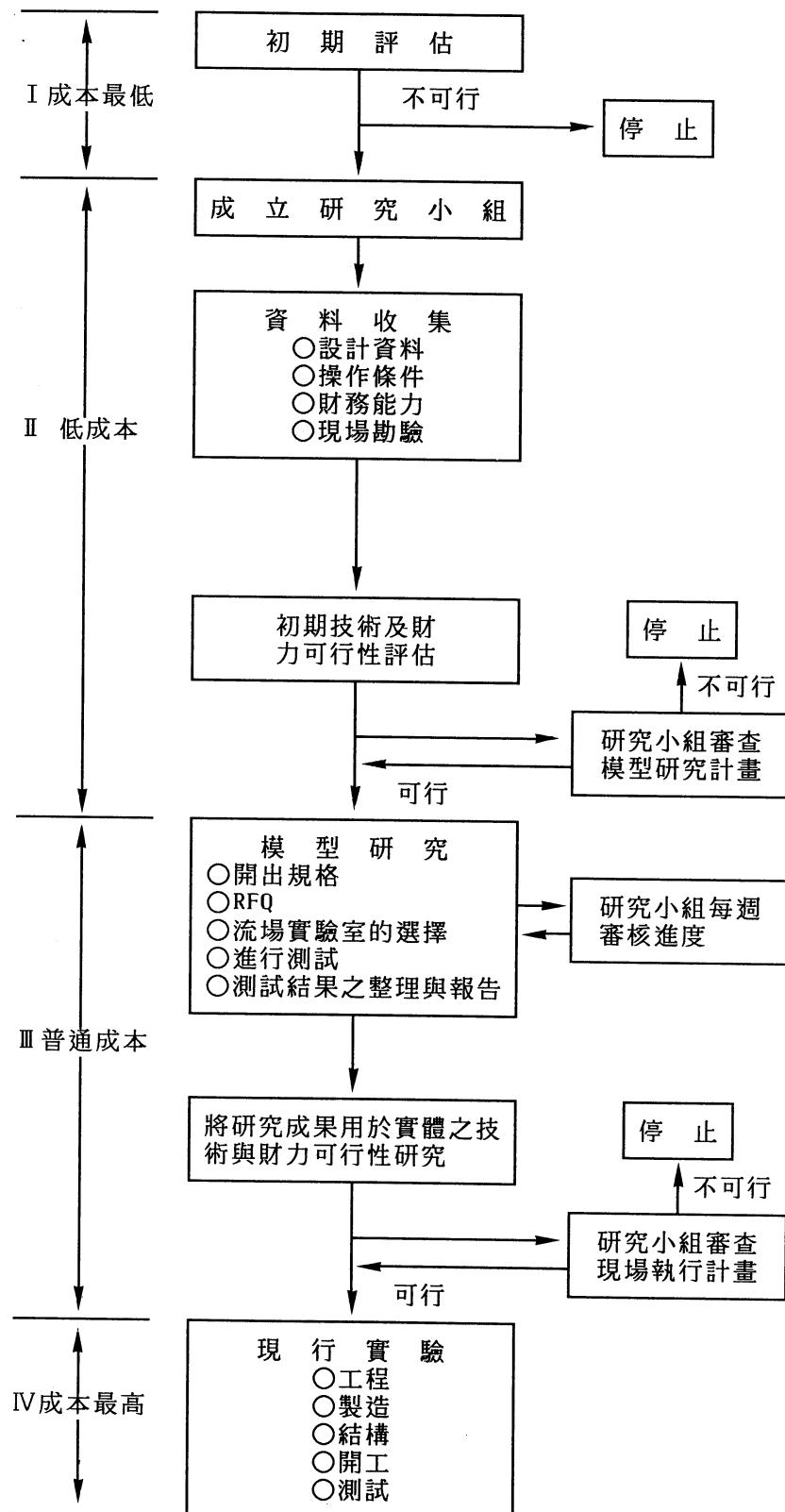


圖37利用模型改善實體ESP性能之程序

七、結 語

本文將ESP系統的氣流特性分四部份討論，由於ESP內部結構相當複雜，而前人的研究模型又都很簡單，故其模型測試的結果應用於實體ESP 上的效果有待進一步確認，而另外三部份，則因實體構造簡單，在模型製做與測試上也較方便，其研究成果應用於實體ESP 上之差異性也比較小，由於管路的應用在工業界相當普遍，故有關改善管路氣流特性的方法，在文獻記載上較易找到，可是擴散器及漸縮器內部加裝整流裝置之應用範圍則較窄，且能做實體ESP 驗證模型測試數據的廠商又更少，而驗證的結果又多被列為商業機密，故本所目前研究重點在擴散器及漸縮器內部之整流裝置，以期將相關技術提供給業界參考。

八、參考文獻

- (1)Oglesby Sabert and Nichols, Grady B., A Manual of Electrostatic Precipitator Technology Part I - Fundamentals, Sourthern Research Institute, PP.124~151, Aug 1970.
- (2)Grieco, Gary J., Precipitator Gas Flow, 1986.
- (3)Matts Sigvard, Flakt electrostatic precipitator—an update on sizing and pulsing, Flakt.
- (4)Turner, James H., Lawless, Phil A., Toshiaki Yamamoto, Coy,David W., Greiner, P. Gary, Mackenna, John D. and Vatavuk,William M., Sizingand Costing of Electrostatic Precipitators, JAPCA, Vol.38, No.4, PP.458~471, April 1988.
- (5)Lind Leif, Influence of Gas Distribution on Precipitator Performance, 6th Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, Vol.2, PP.33-1~33-15, 1986.
- (6)White, H. J., Industrial Electrostatic Precipitator, Addison-Wesley Publ, Comp., PP.335~410, 1963.
- (7)EPA Manual—Operation and Maintenance Manual for ESP, PP.2-50~2-53, 1985.
- (8)Self, S. A., Mitchner M, Khim, K. D., Choi, D. H., and Leach R., Effect of Turbulence on Precipitator Performance, 2nd Int. Conf. on ESP, PP.249 ~264, 1984.
- (9)依德利契克，流體阻力手冊，蘇聯出版，PP.178~306及PP.359~389,1975.
- (10)Grieco, G. J. and Patel Bhikhu, Precipitator Efficiency Increased by

- Modifying Flow, Power Engineering, PP.73~76, April 1979.
- (1) Patankar, S. V. and Prakash C., A Control-Volume Finite-Element Method for Predicting Flow and Heat Transfer in Ducts of Arbitrary Cross-Sections-----Part II : Application to Some Test Problems, Numerical Heat Transfer, Vol.12, PP.413~437, 1987.
- (2) Sovran G. and Klomp, E. D., Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with rectangular, Conical or Annular Cross-Section, Fluid Mechanics of Internal Flow, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, PP.270~319, 1967.
- (3) LURGI, Horizontal Precipitators, BS 780/Bs 800, PP.15, Sep.1982.
- (4) Loehrke, R. I. and Nagib, H. M., Control of Free-Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation, J. of Fluids Engineering, PP.342 ~353, Sep. 1976.
- (5) Scheiman J. and Brooks, J. D., Comparison of Experimental and Theoretical Turbulence Reduction from Screens, Honeycomb, and Honeycomb-Screen Combinations, J. of Aircraft, Vol.18 No.8, PP.638~643, Aug. 1981.
- (6) 苗君易等人, 蜂巢整流器的整流效應, 中國機械工程學會第六屆學術研討會, PP.123~130, Dec. 1989.
- (7) Rae, W. H. and Pope A., Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons , Inc., PP.37~98, May 1984.
- (8) Burton C. L. and Smith D. A., Precipitator Gas Flow Distribution, J. of the Air Pollution Control Association, Vol.25 No.2, PP.139~143, Feb. 1975.
- (9) 三菱重工技報, Vol.8, No.2, PP.74.
- (10) Vath, D. E. and Rabkin S., New Precipitator Layout at Keystone Helps Keep overall Plant Cost Down, Power Engineering, PP.53~56, Nov, 1965.
- (11) Leonard, G. L., Mitchner M. and Self, S. A., An Experimental Study of the Electrohydrodynamic Flow in Electrostatic Precipitators, J. Fluid Mech., Vol.127, PP.123~140, 1983.
- (12) Hein, A. G., A New Concept in Electrostatic Precipitator Gas Distribution , 7th Particulate Control Symposium, PP.25-1~25-11, 1989.
- (13) Gas Flow Model Studies, Industrial Gas Clean Institute Publication No.Ep-7, Revision 4, Oct. 1981.
- (14) Engelbrecht, H. L., Air Flow Model Studies for Electrostatic Precipitators , Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control

- Technology, Vol.1, PP.57~78, 1979.
- (25) Li Enliang, Wang Yingmin and Raper, J. A., Study of Gas Velocity Distribution in Electrostatic Precipitators, Aerosol Science and Technology , PP.947~952, 1990.
- (26) Toshiaki Yamamoto, Lawless, P. A. and Sparks, L. E., Gas and Electrical Sneakage in Electrostatic Precipitators, 3rd Int. Conf. on ESP, PP.721~735, 1987.
- (27) Yamamoto T., Lawless, P. A., Plaks N. and Sparks, L. E., Three-Dimensional Secondary Flow and Electrohydrodynamics for Various Electrostatic Precipitator Configurations, 7th Particulate Control Symposium, PP.31-1~31-15, 1989.
- (28) Parker, K. R. and Hughes G., A Visual Investigation of Corona Induced Turbulence in A Laboratory Scale Model Precipitator, 3rd Int. Conf. on ESP, PP.379~399, 1987.
- (29) Lawless, P. A. and Yamamoto T., Improving ESP Performance by Reducing Losses, 3rd Int. Conf. on ESP. PP.433~422, 1987.
- (30) Yamamoto T. and Velkoff, H. R., Electrohydrodynamics in an Electrostatic Precipitator, J. Fluid Mech., Vol.108, PP.1~18, 1981.
- (31) Adachi T., Ohkubo T., Murakami T. and Chang, J. S., Analysis of Flow Field in ESP, 3rd Int. Conf. on ESP, PP.363~378, 1987.
- (32) Self, S. A., Kihm, K. D. and Mitchner M., Precipitator Performance Improvement through Turbulence Control, 3rd Int. Conf. on ESP. PP.443~480 , 1987.
- (33) Koopmans G. and Hoogenboom Q., Corona Wind in A Plate-Wire Electrostatic Precipitator, 3rd Int. Conf. on ESP, PP.495~501, 1987.
- (34) Larsen, P. S., Sorensen, L. S., Christensen, E. M. and Christiansen, J.V., Secondary Flow and Turbulence in Negative Corona Precipitator With Large Diameter-Barbed Electrodes, 3rd Int. conf. on ESP, PP.421~431, 1987.
- (35) larsen, P. S. and S rensen, S. K., Effect of Secondary Flows and Turbulence on Electrostatic Precipitator Efficiency, Atmospheric Environment, Vol.18 No.10, PP.1963~1967, 1984.
- (36) Gilbert, G. B., Experimental Flow Modeling for Power Plant Equipment, Power Engineering, PP.54~57, May 1974.
- (37) Flow Visualization III, edited by Yang W. J., Hemisphere Publishing Corporation, 1985. P