

空氣污染防治(八)

陸、除煙霧裝置

鄭 福 田*

一、緒 言

煙霧 (mist)，乃小至 $1\mu\text{m}$ 以下大至數毫米液體顆粒之總稱。 $1\mu\text{m}$ 以下之煙霧，主要是由於蒸氣受異相（或同相）成核，冷凝所造成，較大之煙霧則可能由於泡沫破裂，液面濺逸，噴灑等而造成。小粒煙霧，由於表面張力之作用而維持圓形，但大至毫米時，則可能變為橢圓形。

最早引起液滴受重視之來源為空氣經過冷卻塔所帶來者，除非管線破裂，否則冷卻塔之煙霧主要為水，但可能含有極微量之殺藻或防腐蝕藥劑，其所造成之影響為水份之損失和冷卻塔附近之毛毛雨。然而由於硫酸或磷酸冷凝形成之煙霧，則具有強烈之腐蝕性。

一般而言，除煙霧裝置原用於化學工廠，例如用於鍋爐以製造乾水蒸汽，用於去除蒸餾塔蒸氣中之焦油等，對於空氣污染管制嚴格之地區，尤其是製酸廠規定嚴格之酸霧排放標準，則為兼顧生產與空氣污染，更應審慎設計之。

二、基本理論

從氣流中去除液滴，基本上和去除固體粒子原理相同，但更為簡單化，其理由：(1)小液滴由於表面張力作用而呈圓形，一般固體則否。而一般除塵理論均假設粒子為圓形而推衍，因此這些理論用於除煙霧時不需任何修正。(2)乃煙霧附着在收集面之後，和收集面本身之親水性或疏水性有極大之關係，如煙霧和收集表面之吸引力大於煙霧間互相吸引力時，則煙霧會潤溼收集面，形成液膜，而可能再度被氣流携出，如收集面為疏水性，則收集之煙霧不易再被携出。

(一)慣性力收集器 (Inertial Collectors)

慣性力主要之收集機構為慣性衝擊，另一次要因素為截流，由於煙霧粒徑較大，因此由於擴散作用所造成之衝擊者甚少，收集體本身通常為圓柱體，圓球或細長片 (ribbon)，其原理和收集粒子者一樣。

收集效率 E 是慣性衝擊參數 (inertial impaction parameter) 或分離數 (separation number) ϕ 之函數，

$$\phi = D_p^2 V \rho_p / 18 \mu D_b \quad (1)$$

ρ_p : 煙霧密度

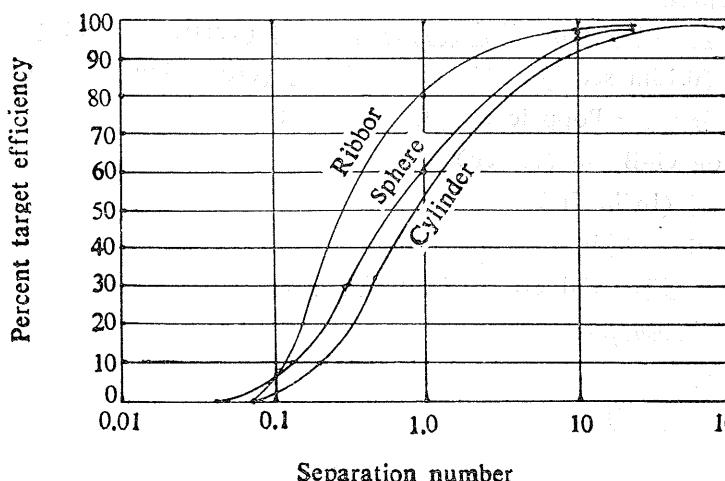
* 臺灣大學環境工程研究所副教授
本小組委員

V：接近收集面之氣流速度

D_p ：煙霧直徑

D_b ：衝擊柱體或圓球體之直徑或細長片寬度

μ ：氣體之黏滯性



圖一 分離數與收集效率關係圖

或(1)中之 $\frac{D_p^2 V \rho_p}{18\mu}$ 乃慣性衝擊參數，亦即停止距離 (stop distance)，亦即把含煙霧之氣體以 V 之速度注入靜止之空氣中，煙霧水平移動之距離稱為停止距離。分離參數和收集效率間之關係如圖一所示。由圖一可見，如分離數大於 6，則收集效率可達到 80% 以上。

假設 E 代表單一收集體 (collection body) 之效率，如一除煙霧器含有 (n) 數個串聯之收集體，則其總收集效率為

$$E_t = 100[1 - E/100]^n \quad (2)$$

Carpenter 及 Othmer 氏認為線網形除煙霧器 (wire mesh eliminator) 之效率應如下：

$$E_t = 100[1 - (1 - E/100C)^n] \quad (3)$$

其中

$$C = n/k'F \quad (4)$$

k' ：線直徑和線總長乘積除以除煙霧器垂直於氣流面之截面積之值

F：每層收集體垂直於氣流面之面積 (frontal area)

對於百葉窗型之除煙霧器，如含有一組之平行板，和氣流方向成 θ 角，則 Calvert 氏認為：

$$E_t = 100\{1 - \exp[-(\mu_t/v)t(n\omega\theta/b\tan\theta)]\} \quad (5)$$

μ_t ：受重力作用時，煙液滴之終端速度，如 $D_p < 100 \mu\text{m}$

$$\text{則 } \mu_t = \frac{D_p^2 \rho_p g}{18\mu}$$

W：板寬

b：板間距，以垂直於氣流方向之距離量度

Q：板和氣流方向之傾斜角

n：板之排行數

慣性衝擊參數可以決定達到某種分離效率所需之氣體速度，但仍有一最大速度之限制以防產

生溢流和液滴再被揚起 (flooding and reentrainment)。

Souders 及 Brown 認爲最大速度如下：

$$V = k \sqrt{(\rho_D - \rho) \rho} \quad (5)$$

ρ : 氣流之密度

k : 經驗常數，根據 York 等建議對於垂直流向 (vertical flow) 之除煙霧裝置 $k = 0.35$ ft/sec (0.10m sec^{-1})，對於互相垂直向流 (cross flow) 者則 $k = 0.40$ ft/sec

對於針織之線型分離器，Poppele 認爲 k 值應如下：

$$k = (\log G - B)/m \text{ (ft/sec)} \quad (6)$$

G : 煙霧負荷 (lb/hr ft²)

B : m 常數如表一所載

對於百葉窗型之分離器，Calvert 等認爲 V 值如下：

$$V = \sqrt{\alpha \cos \theta / \rho \delta} \quad (7)$$

δ : 液膜厚度

λ : 液體之表面張力

二) 旋風分離器

旋風分離器之原理和用於去除固體塵埃者一樣，在本刊除塵篇裏有專文討論，不再贅述。但

表一 利用方程式(6)計算所得之 k 值

Eliminator type	York ^b type 421	York ^b type 931
Mesh density (lb/ft ²) ^c	12	5
Wire surface area (ft ² /ft ³) ^d	132	55
Flood point		
Liquid loading (lb/hour ft ²) ^e	25-930	25-930
B	3.71	7.22
m	-3.18	-8.70
Load point		
Liquid loading (lb/hour ft ²) ^e	5-930	5-930
B	4.64	7.64
m	-7.15	-11.1

^a $k = (\log G - B)/m$, ft/second. B and m are the constants in this equation.

^b Designation of eliminators manufactured by O. H. York, Inc., New Jersey.

^c To convert a metric density kg m⁻³ to lb/ft³, divide by 16.018.

^d To convert metric surface area m²m⁻³ to ft²/ft³, divide by 3.28.

^e To convert metric liquid loading kg/hour m² to lb/hour ft², divide by 4.882.

爲避免在壁上之液體再度被揚起，對於氣流之切線速度 (tangential velocity) 或稱旋轉速度 (Spinning speed) 有一上限，否則液體會移到出氣管，最後隨氣流排出。

Stairmand 認爲最高旋轉速度，略低於進口氣流速度，爲液膜表面之剪力函數，可用 eV^2 代表，如 ρ 用 kg/m^3 , V : m/sec

則根據 Stearman 及 Williamson 對於空氣／水之系統 $\rho V^2 = 1330$,

空氣／油系統 $\rho V^2 = 2660$

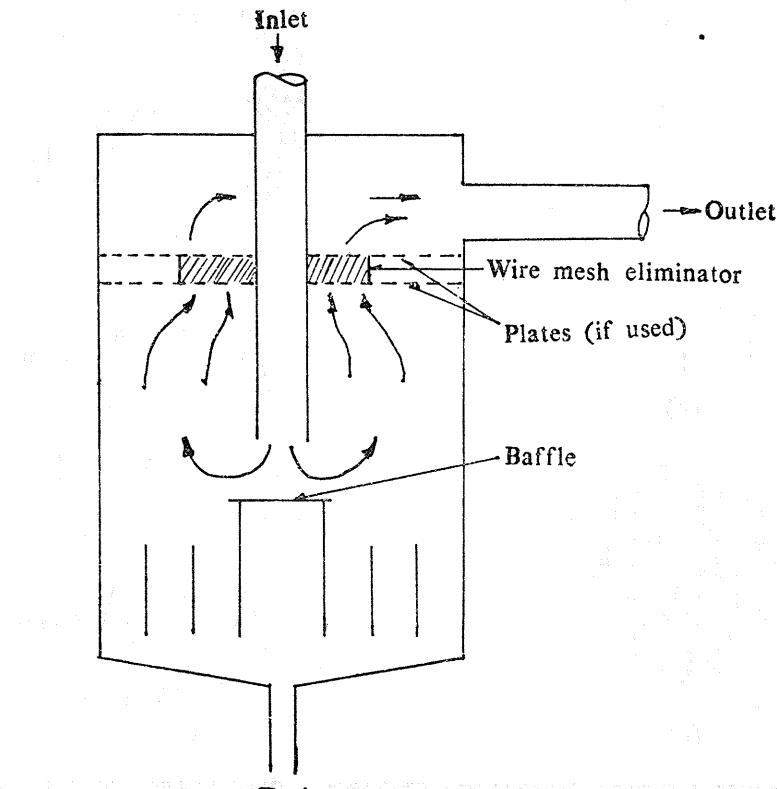
如在一般之大氣條件下 $\rho_{air} = 1.185$ ，則 $V = 33\text{m}/\text{sec}$ ，此代表一相當保守之數值，Calvert 等認爲 $V = 45\text{m}/\text{sec}$ 還不致於造成液體再被揚起 (reentrainment)。壓力增加則氣體密度增加，此時速度下降，壓力達五大氣壓時，則最大速度爲 $15\text{m}/\text{sec}$ 。

三、各種除煙霧器

(一) 單階除煙霧器 (Single-stage Mist Eliminators)

1. 分離室 (Disengagement chambers)

最簡單之除煙霧設備爲藉重力去除之沉降室，假設其長 L ，寬 B ，氣體流率爲 Q ，則可去除最小液滴之直徑爲 $d_{min} = \sqrt{18Q\mu/\rho_p gBL}$ (8)



圖二 Knock-out drum

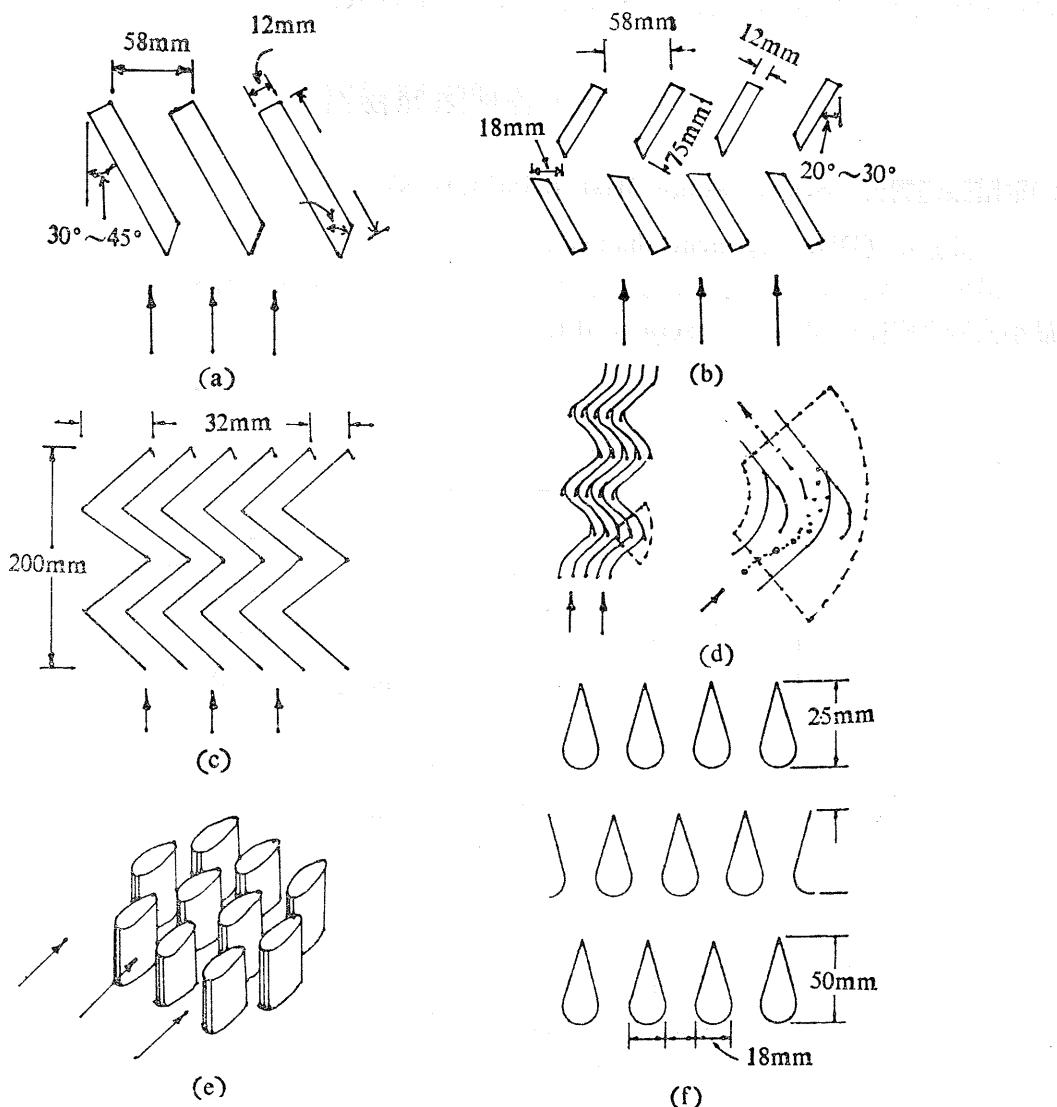
如在水平流之槽中，增加水平板之數目，減少液滴之沉降距離，則可增加去除效率，如採用波浪型板，則有利於收集液滴之排除，降低壓力降。

另外一種分離室為“Knock-out” drum，如圖二所示，適合於去除大於 $100\mu\text{m}$ 之液滴，earman 及 williamson 建議進氣管之管徑須使氣流速度 V 和 ρ 之關係為 $\rho V^2 < 185$ ，一般情況而言 $V < 11 \text{ m/sec}$

即直徑 3.5m 之 Knock-out drum，進氣管直徑 0.5m，

其處理能力為 $7800 \text{ m}^3/\text{hr}$

2. 慣性力分離器：Venetian Blind, V, W 和 Wave Separators



圖三 簡單慣性力分離器(a)單排擋版(b)雙排擋版(c)W型分離器(d)波浪型分離器
(e)平流眼淚型(f)豎流眼淚型

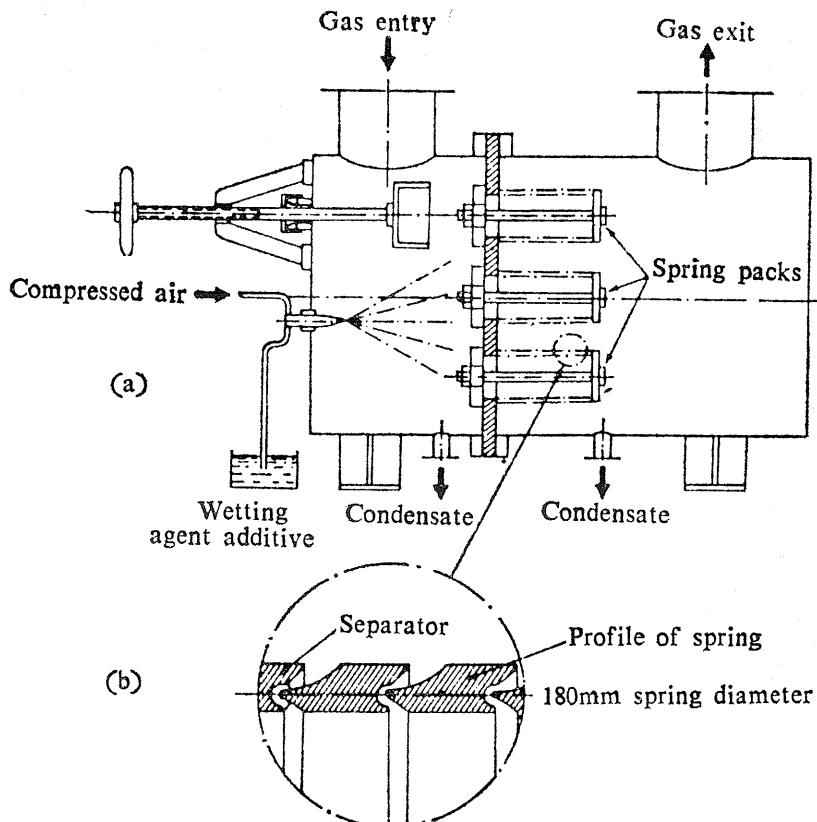
Venetian Blind, V, W 及波浪型分離器普遍用於較大粒徑液滴之分離，尤其是用於冷卻水塔濺出之水滴，其優點為佔地小，壓力降小。其操作之主要原理乃使氣流轉向衝擊在收集板上分離之。如圖三(a)所示，乃在氣流方向設置 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之平行收集板，板長 75mm，寬 12mm，板間距 58mm，其氣流速度則維持在 $1 \sim 2 \text{ m/sec}$ 之間，板之排列角度依氣流設計速度而變，以得最佳之分離效果。圖三(b)乃另加一排 20° 或 30° 之收集板，其結果為低速時圖三(a)者可達60%之去除效果而圖三(b)者可達85%，壓力降則圖三(b)者比圖三(a)者多10%。

圖三(c)是 Bell 和 Strauss 設計之垂直向流之 V 或 W 型去煙霧裝置，根據此二氏之實驗，其去煙霧效果在表面速度 (Superficial velocity) 4.8 m/sec 下，可達76%。Calvert 等報導氣流速度在 $3 \sim 6 \text{ m/sec}$ ，煙霧粒徑在 $84 \mu\text{m} \sim 1.2 \text{ mm}$ 之間時，則其效果可達 100%。此型式之壓力降在 4.8 m/sec 氣流下，低於 50 巴 (Pa 即等於 0.2 吋水柱)。

圖三(d)為波浪型去煙霧裝置，由長 11mm 互成 90° 之弧形線條所構成，線條間距 3.8mm，根據 Brink 研究，此型對於 $15 \mu\text{m}$ 之煙霧可達 68% 之去除效果。圖三(e), (f)為眼淚型之去煙霧裝置。

3. 變距型分離器

如圖四所示，此型原理和波浪型者一樣，組板條之間距可以藉彈簧螺絲加以調整，去除效率如表二所示。



圖四 變距型分離器

表二 變距型分離器去除效率

	Inlet concentration (gm/m ³)	Outlet concentration (gm/m ³)	Efficiency (%)
Phosphoric acid mist from acid, manufactured as P ₂ O ₅	52	0.06	99.9
Sulfuric acid mist from acid, manufactured as sulfur trioxide	18	0.15	99.16
Hydrogen chloride in waste gases from CaCl ₂ manufacture	17.7	0.0004	99.998
Hydrogen fluoride in waste gases from superphosphate manufacture	1.8	0.005	99.73
Hydrogen chloride waste gases from pickling	0.08	0.0002	99.75
Waste gases from sulfuric acid, manufacture—ammonia added			
Sulfuric acid	0.8	0.05	93.75
Sulfur dioxide	6	0.2	96.7

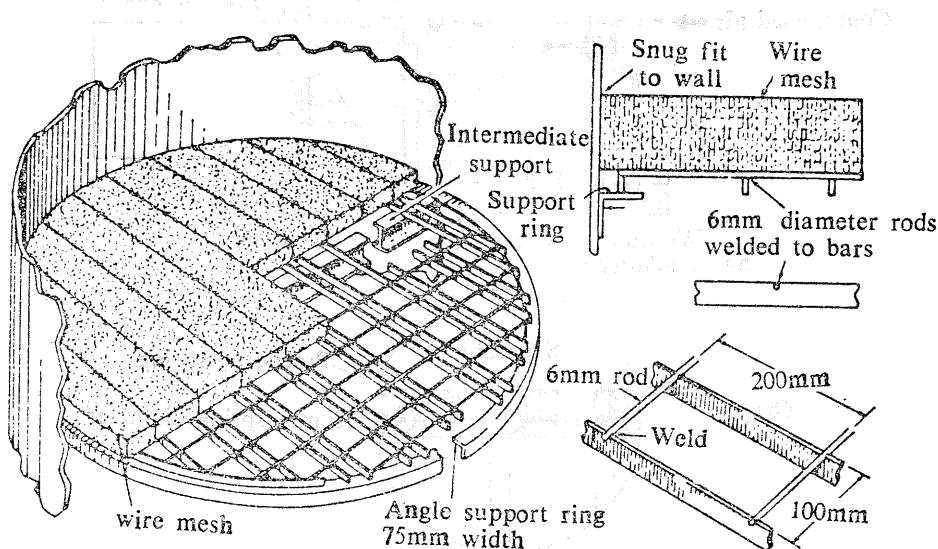
（二）多階段型除煙霧器

1. 簡單衝擊分離器

最簡單型之除煙霧器乃成排之垂直管而氣流則和管互相垂直通過，Calvert 等之設計為直徑 19mm 管，等距排列，成六行，氣流速度 1~7m/sec，對於 84μm 以上之液滴去除效果可達 95~100%。圖三(e)乃垂直桿式，桿本身依流線型設計，其 k 值為 1 (方程式(5))，在 8.5m/sec 之氣流下，對於 11 μm 之水滴可達 100% 之去除效果，對 5 μm 者，則可達 46%。

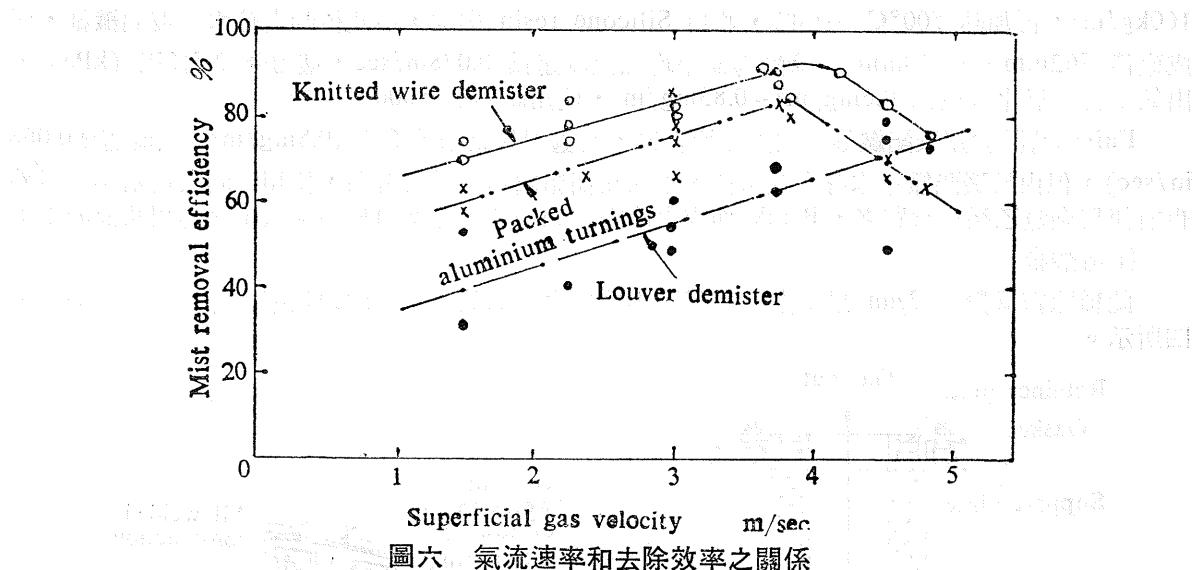
Chilton 則試驗圖三(f)之型式，排兩排，而流速 1m/sec 時可達 66% 效果，流速 3m/sec，則可達 85%，增為三排，則去除效果達 90%。

2. 線網型除煙霧器

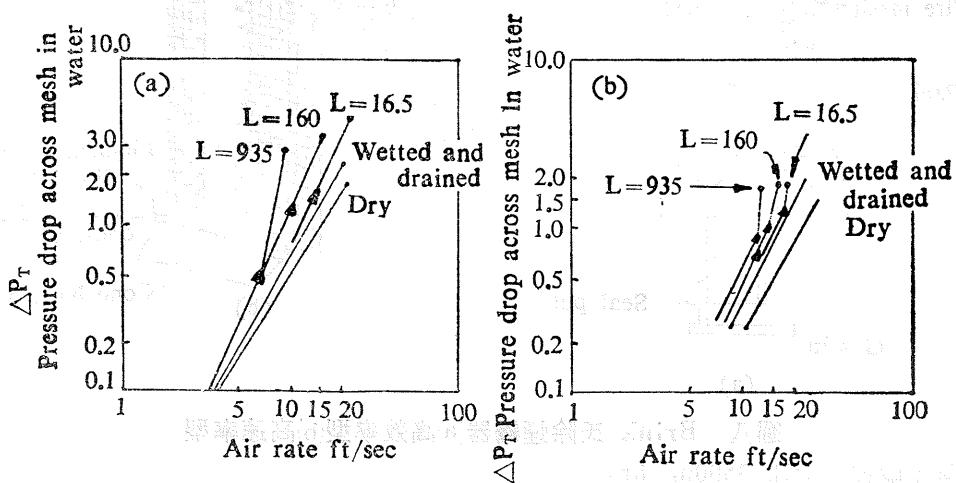


圖五 線網型除煙霧器

此種型式如圖五所示，主要是內金屬線織成網狀，供液滴碰撞以去除之。根據 Bell 和 Strauss 報告，用一 $600 \times 600\text{mm}$ 除霧器，深 100mm ，由 0.25mm 不鏽鋼線作成，充填密度為 160kg/m^3 ，在氣流速度 4m/sec 下，可達 92% 之去除效果。氣流速度太大，則產生再揚液滴之現象而使效果降低，如圖六。經過此種除煙霧裝置之壓力降在負載點下操作時，都在 250巴 (Pa) 以下，圖七是表示氣流速度，到達負載點 (loading point) 時，則壓力降急速增加，則可能產生溢流或再揚液之現象。



圖六 氣流速率和去除效率之關係



圖七 壓力降和氣流速率之關係

通常對於二階式除煙霧器而言，第一階之除煙霧器供小液滴之聚合成長。如硫酸煙霧之處理，第一階在下面，用高密度之線網構成，(密度達 $192\sim 224\text{kg/m}^3$)，第二階段安裝在其上面，線網密度為 $80\sim 113\text{kg/m}^3$ ，上下二階段除煙霧器相隔間距為其直徑之 $\frac{1}{4}$ ，氣流之速度可達 $4.6\sim 5.5\text{m/sec}$ ，壓力降為 $370\sim 500\text{ 巴 (Pa)}$ ，處理後含硫酸煙霧是約為 $35\sim 70\text{mg/m}^3$ ，去除效果一般達 90% 以上。對於磷酸廠而言，為預防磷酸煙霧在第一階段造成阻塞現象，而裝設輔助噴水設

施，其處理能力為進氣含磷酸濃度 $112\sim165\text{gm/m}^3$ ，出氣為 $0.038\sim0.025\text{gm/m}^3$ ，氣流速度 8.4m/sec ，壓力降最大為 10仟巴 (kPa) 。

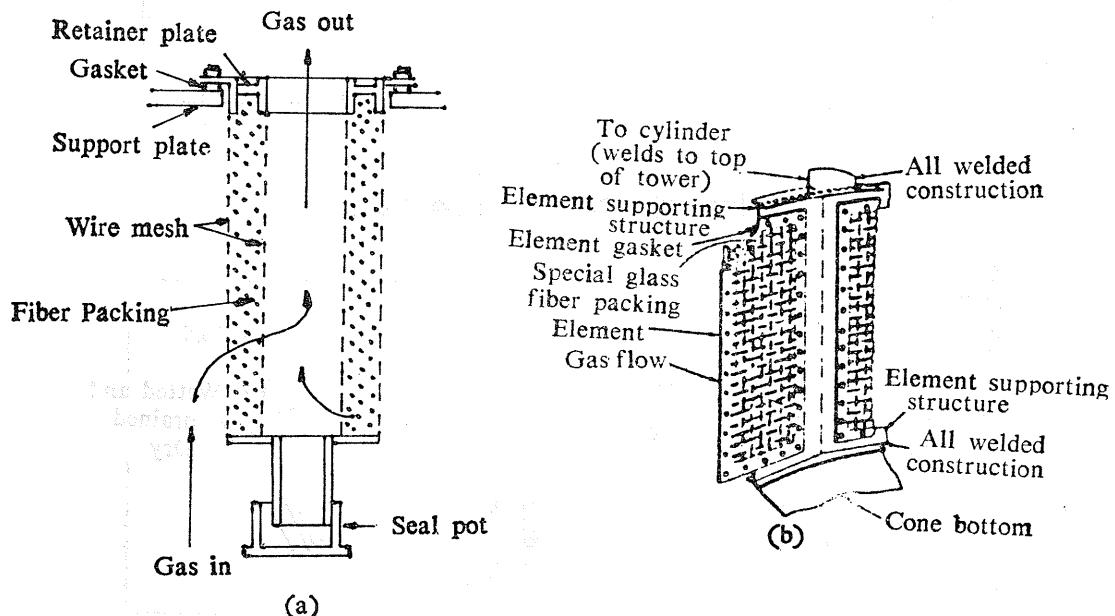
3. 纖維式除霧器

由於很多細纖維，不具疏水性 (hydrophobic)，被液體潤溼 (wet)，使纖維無光澤，截留液體，造成除煙霧器阻塞，因此最好選擇疏水性之纖維，否則要在親水性纖維之表面加以特殊處理，使其具有疏水性，Fair 曾把玻璃纖維壓縮，使其由原來之填充密度 $3\sim48\text{kg/m}^3$ 變為 $112\sim160\text{kg/m}^3$ ，再加熱 500°C 一小時，並用 Silicone resin 處理，由此得到之疏水性玻璃纖維，作成直徑 762mm ，厚 50mm 之除酸霧器平均氣流流速為 0.078m/sec ，壓力降 2.5仟巴 (kPa) ，出氣中含三氧化硫僅為 $0.6\text{mg/m}^3\sim0.83\text{mg/m}^3$ ，使用時間為 5000 小時。

Fair 同時試驗用聚酯纖維作成之除煙霧器，其處理效果稍差 (出氣 0.8mg/m^3 ，氣流速度 0.068m/sec)，但由於聚酯纖維本身有疏水性，不須用樹脂處理，為其優點，使用時間長達兩年。另外也有使用聚氯乙烯作材質者，Brink 作成之除霧器如圖八。此型對於各種氣體之應用狀況如下：

(1) 硫酸廠

此種除霧器對於 $3\mu\text{m}$ 以上之液滴可達 100% 之去除效果。其處理效率與操作狀況如表三、四所示。



圖八 Brink 氏除煙霧器(a)高效率型(b)高速率型

(2) 氯氣：處理能力達 $3500\text{m}^3/\text{hr}$ 。

(3) 磷酸煙霧：

有一圓筒型模型廠，使用時間達 2521 小時，進氣濃度 1.9gm/m^3 ，出氣 $0.15\sim0.06\text{gm/m}^3$ ，去除效果 $95\sim99\%$ ，平板型者之使用時間為 7400 小時，效率達 92% 。

(4) 同時含有磷酸及硫酸煙霧廠：

Brink 報導圓筒型除霧器，可使進氣為 $2.8\sim7.2\text{gm/m}^3 \text{P}_2\text{O}_5$, 1gm/m^3 硫酸者之出氣變為 $0.30\sim0.074\text{gm/m}^3 \text{P}_2\text{O}_5$, 0.01gm/m^3 硫酸。

表三 纖維型除霧器對硫酸廠之去除效果

Contact plant production	Mist loading of gases leaving absorber and entering mist eliminator ^a (gm m ⁻³ H ₂ SO ₄)	Mist loading of gases leaving mist eliminator (gm m ⁻³ H ₂ SO ₄)	Collection efficiency with droplets less than S μm (%)
Mist eliminator A ^b			
99% H ₂ SO ₄ and 65% oleum at full capacity	1.10	0.053	95.1
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at 75% capacity	1.13	0.052	95.3
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at full capacity	1.42	0.058	95.9
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at 60% capacity	0.23	0.0044	98.1
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at 60% capacity	0.31	0.0060	98.1
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at 60% capacity	0.24	0.0044	98.1
Mist eliminator B ^b			
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at full capacity	0.51	0.0030	99.4
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at 60% capacity	0.65	0.0040	99.4
99% H ₂ SO ₄ and 25% oleum at 60% capacity	0.69	0.0033	99.5
99% H ₂ SO ₄ only at 60% capacity	0.24	0.0016	99.3
99% H ₂ SO ₄ only at 60% capacity	0.075	0.0037	99.3

^a The mist loading values given are for droplets 3 μm diameter or less.

^b Mist eliminator A was designed for 100% efficiency for droplets larger than 3 μm and for 95% efficiency for droplets less than 3 μm. Mist eliminator B was designed for 100% efficiency on droplets larger than 3 μm and 99% on droplets less than 3 μm.

表四 纖維型除煙霧器對硫酸廠之操作參數

	Cylindrical	Flat
Superficial velocity (m sec ⁻¹)	0.076-0.200	2.01-2.50
Efficiency on particles greater than 3 μm	100%	100%
Efficiency on particles less than 3 μm	95-99%	90-98%
Pressure drop (Pa)	1250-3750	1500-2000

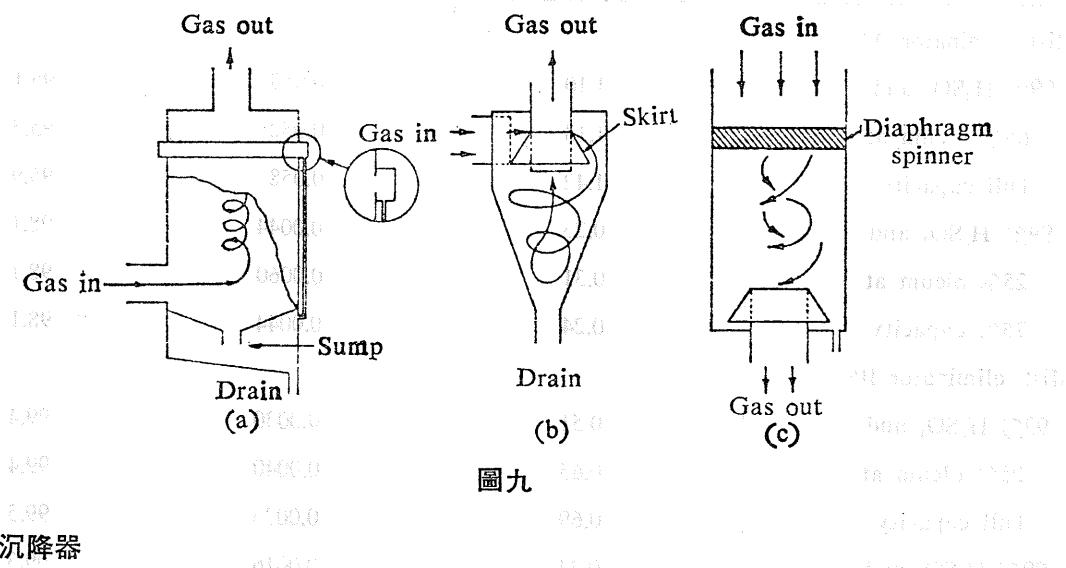
(5)壓縮氣體：

可用於氣體之淨化，如把氣體中之液體除去，其操作可達溫度 67°C，壓力 3.7×10^5 kPa，

如除空氣中之油、水、硫酸等，氮中之油，二氧化碳中之油與水，氫氣中之油與水，等。

(三) 旋風除霧器

可裝在文氏滌氣器之後，以去除大於 $10\mu\text{m}$ 之液滴，其構造如圖九。



圖九

(四) 靜電沉降器

和一般用於去除塵埃之靜電集塵器原理一樣，但使用於去除硫酸或磷酸時，則應特別留意。使用於硫酸煙霧時，收集管由鉛製成，放電電極則製成星型，沉降器底有坡度，以排液體，由於硫酸之冷凝而形成 PbSO_4 厚達 $1\sim 3\text{mm}$ ，縮短鉛管壽命，因此應用水沖洗之。

一般商業化之 EP 可製成 4m 長，直徑 300mm ，電壓 70kV 。

(五) Ceramic Candles

這是用耐酸之陶土作成多孔性之圓筒，欲處理氣體經小孔之速度可達 0.3m/sec ，Massey 稱其除酸霧效果為 $72\sim 98.6\%$ ，出氣濃度為 $30\sim 150\text{mg/m}^3$ ，壓力降 $1.7\sim 2.7$ 仟巴 (kPa)。

(六) 文氏滌氣器

其原理和除塵器一樣，將在本刊中由其他委員討論，不再贅述，Brink 和 Contant 曾用此種滌氣器以處理磷酸煙霧，滌氣器為長方形 $150\times 863\text{mm}$ ，長方型段長 300mm ，以 25° 收縮，經喉部後，以每 1.5m 由 2.2° 角放大至 15° ，進氣濃度為 50gm/m^3 ，其收集效率為 $0.5\mu\text{m}$ 者 79% ， $0.6\mu\text{m}$ 者 91% ， $0.8\mu\text{m}$ 者 90% ， $1.0\mu\text{m}$ 者 98% ， $1.5\mu\text{m}$ 者 99% 。

(七) 音波聚滴器 (Sonic Agglomerators)

此型較適合於濃度高之處理，其能量遠比文氏滌氣器高。早期之實驗式裝置為直徑 2.43m ，高 7.6m 之塔，使氣體進入，並在塔中曝露於強烈之音波 (150dB , 2.25 KHz) 4秒，使液滴聚合增大，再經多重旋風分離器，氣流量為 $40,000\text{m}^3/\text{hr}$ ，進氣濃度 3.5gm/m^3 ，出氣為 $0.14\sim 0.018$

gm/m³，相當於96~99.5%之去除效果。另外也可使此音波聚滴器接線網型除霧器，其效果比二階式除霧器佳。

四、結語

除煙霧器主要乃去除液滴，對於製酸廠所造成之煙霧，防止冷卻水塔或其他有水蒸氣小水滴造成之小雨或妨礙視程等處適用之。