

銅二次熔煉爐廢氣處理模型試驗

賴祖許 * 潘建成 * 司洪濤 *

摘要

文氏洗滌塔廣泛應用於空氣污染控制，因它具有非常高的集塵效率，可去除直徑小於 $2\mu m$ 的粒狀污染物。在許多工業廢氣問題上，文氏洗滌塔往往是解決空氣污染問題最佳可行的防制技術。例如粒狀污染物係具粘性、可燃性、或高腐蝕性，乾式靜電集塵機及袋濾集塵機將不適用，而文氏洗滌塔將是合適的選擇。

本模廠試驗以實體設計之文氏洗滌塔處理高溫、可燃、具黏性之銅二次熔煉爐廢氣，測試其處理效率與控制參數（液氣比、喉部斷流速及壓力降）之關係，並與預測壓力降之理論方程式相比較。試圖由本試驗求得可應用於文氏洗滌塔之設計方程式及其操作參數之最佳條件。實驗結果顯示，實驗數據與卡爾特理論方程式相符，其誤差在 $\pm 10\%$ 以內。在良好之設計條件下，當文氏洗滌塔之液氣比控制在 $1-2.5 (l/m^3)$ ，無因次喉管長度(L)在2-3之間時，其操作效率最佳。

針對質量中數粒徑為 $1 \sim 1.5 \mu m$ 之銅二次熔煉廢氣而言，在上述之最佳設計與操作參數下，文氏洗滌塔之操作壓降控制在 762 mmAq 時，其處理效率即可達90%以上。

* 中國技術服務社工業污染防治中心工程師

Air Pollution Treatment Pilot Plant of Brass 2nd Melting Furnace

Tsu-Sheu Laiy* Chien-Cheng Pan* Hung-Tao Szu*

Abstract

Venturi scrubber is widely applied in air pollution control because it has a very high efficiency. It can remove the particulate smaller than $2\mu\text{m}$ diameter. In several application, venturi scrubber is the only feasible control technique to solve air pollution problem. For example, if a particle pollutant is sticky flammable and high corrosive, electrostatic precipitator and fabric filter are not applicable, but venturi scrubber is the appropriate choice.

This pilot plant experiment used the solid design of venturi scrubber to treat high temperature, flammable, and sticky emission of brass second melting furnace testing the relationship of its treatment efficiency and control parameter (liquid-to-gas ratio, throat velocity, and pressure drop). Experimental result showed that the experimental data conformed with Calvert Theory Equation. Its error was within $\pm 10\%$. Under good design condition, best operation efficiency is when the liquid-to-gas ratio of venturi scrubber is controlled at $1\text{-}2.5 (l/\text{m}^3)$ and the dimensionless throat length(L) is between 2-3.

Speaking mainly of the aerodynamic geometric mass mean diameter of the particulate of brass second melting furnace emission which was $1\text{-}1.5\mu\text{m}$, under the above mentioned best design and operation parameter, when the operation pressure drop of venturi scrubber is controlled at 762 mmAq, its collection efficiency can reach 90% and above.

* Engineer, Industrial Pollution Control Corps, China Technical Consultants, Inc.

一、前 言

工業污染防治技術服務團於輔導銅熔煉鑄造工廠時，得知此類工廠之廢氣污染源有二，一為熔煉爐、一為乾燥爐。其廢氣特性為高溫、可燃且具黏性，粒狀污染物之質量中數粒徑為 $1\sim 1.5 \mu m$ 。目前大多數業者均採用袋濾集塵機處理熔煉爐所排放之廢氣，然因熔爐之廢氣特性常導致濾袋燒毀之情形發生；若選擇靜電集塵機處理熔爐廢氣，則投資成本太高而不符合經濟效益；填充式洗滌塔對於質量中數粒徑 $1 \mu m$ 之粒狀污染物，其處理效率僅達35%，因此選擇文氏洗滌塔處理此類廢氣為較合理可行之處理方法，且其具有構造簡單、初設成本低、高效率及操作維修容易等優點。

然由於國內之空氣污染防治技術起步較晚，國內各工程業者對於文氏洗滌塔之設計技術尚未臻成熟，因此在缺乏基礎實驗數據之情況下，所設計之文氏洗滌塔多有功能不足之情形發生。有鑑於此，服務團乃著手規劃文氏洗滌塔模型廠廢氣處理試驗，進行銅二次熔煉爐廢氣處理實廠操作測試，藉由實廠操作經驗，並將試驗所得之文氏洗滌塔設計與操作維護重點，提供予業者，以協助業者提昇污染防治設備之效率。

二、處理流程及原理

2.1 處理流程

銅二次熔煉作業係回收廢銅或銅之下腳料進行再熔煉之操作，由於銅二次熔煉作業在加料期、熔煉期及出料期皆由高溫熔煉爐逸散大量空氣污染物，如油霧及金屬燻煙等。本模廠試驗之廢氣處理流程乃於熔煉爐廢氣局部排氣系統主風管中，抽引小風量之廢氣導入文氏洗滌塔處理，再經氣液分離器去除被氣流攜出之含塵液滴，最後經由風車排放至大氣中；洗滌廢液則收集至水槽冷卻後循環使用或排放，其廢氣處理流程如圖1所示。

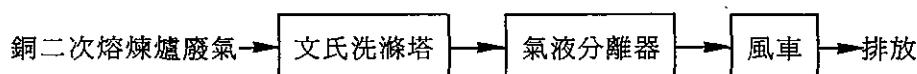


圖 1 文氏洗滌塔模廠試驗處理流程

2.2 原理

文氏洗滌塔之構造乃是由一收縮段、喉管及擴張段所構成。當氣體流經收縮段或喉管時，氣體靜壓被轉換成速度壓力（亦稱為動能），再利用此高速移動的氣流將洗滌液霧化成細小水滴，並使之加速落下，藉由氣液充分地接觸碰撞，將氣流中之粒狀污染物捕捉於液滴中，然後再藉氣液分離器自氣流中分離帶有粒狀物之液滴，達到去除廢氣中粒狀污染物之目的。在文氏洗滌塔去除粒狀物之過程中，液滴僅充當去除粒狀物之媒介，而其捕捉粒狀物之機制如下：

1. 慣性衝擊
2. 直接截留
3. 擴散(布朗運動)
4. 靜電力
5. 凝結
6. 熱梯度

因此，使氣液充分接觸碰撞乃提高文氏洗滌塔處理效率之重要操作條件。

三、設備概要及方法

3.1 設備概要

本模廠試驗於82年度，假桃園某家銅金屬熔煉工廠開始進行，試驗廢氣為經氣罩收集之銅二次熔煉爐廢氣，文氏洗滌塔設備如圖2所示，其收縮段與擴張段之角度分別為 60° 與 25° ，其長度各為30.5與36.8公分。主要設備及採樣分析儀器規格如表1所示。

3.2 試驗條件設計

本試驗操作控制變數包含氣體流率、液體流率、喉部斷面積及操作壓損。其中喉部斷面積大小由文氏管中央可升降之舌桿所控制，而液體流率則由電磁流量計計量後一部份由文氏管收縮段切線注入，另一部份由喉部中心注入，採樣工作分別於文氏洗滌塔入口前及處理後之適當位置同步進

行，分析內容則包含水力條件測試、粒狀物濃度及其粒徑分佈採樣分析，以求得文氏洗滌塔之設計資料。本試驗控制條件如表 2 所示。

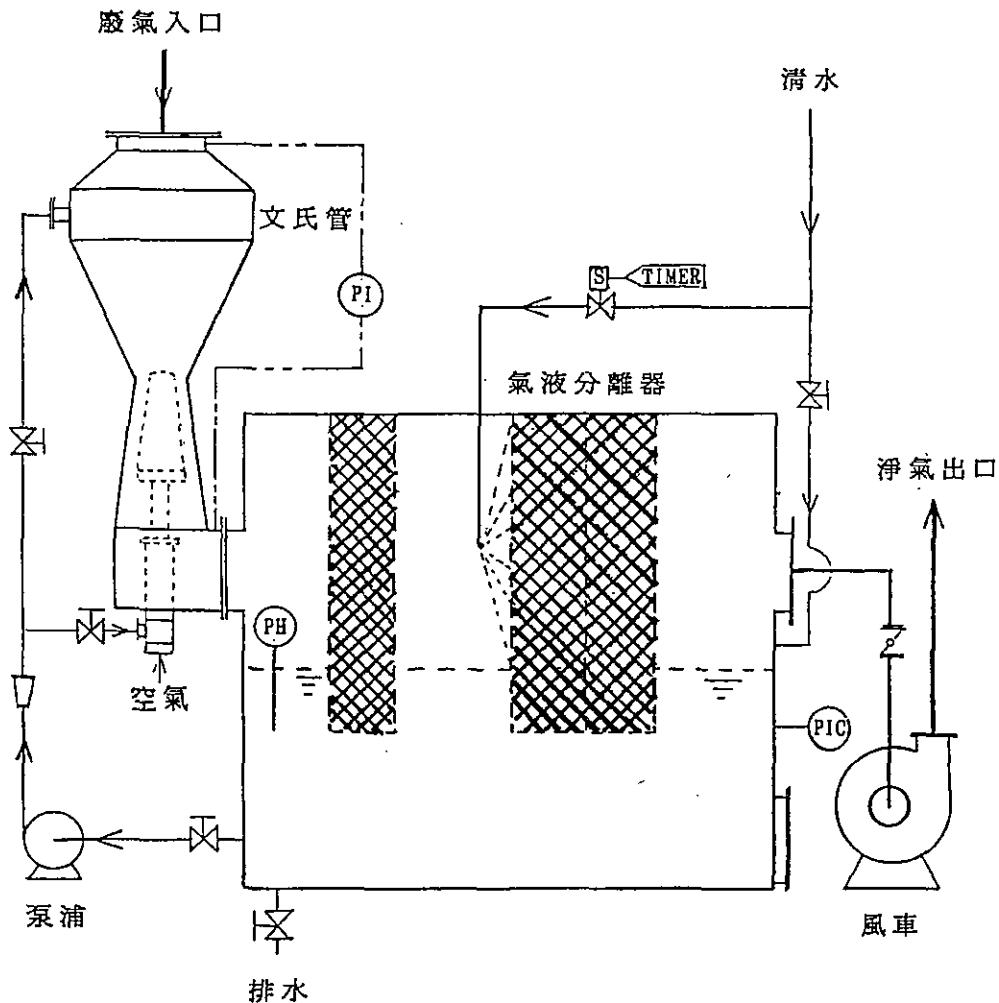


圖 2 文氏洗滌塔模型試驗設備

表 1 主要設備規格表

| 名稱 | 數量 | 規格 |
|--|--|---|
| 一、文氏洗滌塔系統 1. 文氏洗滌塔 2. 聯接管 3. 氣液分離器 4. 泵 5. 儀控設備 (1) 電磁流量計 (2) 差壓傳訊控制 制 (3) pH感測指示傳 訊器 (4) 差壓指示計 | 1 式 1 式 1 式 1 座 1 只 1 只 1 只 1 只 | 處理風量 $28\text{m}^3/\text{min}$, 進口溫度 80°C 循環水量 $571/\text{min}$ 設計壓損 $600\sim 1,200\text{mmAq}$ 。 處理風量 $33\text{m}^3/\text{min}$, 進口溫度 80°C 清洗水量 4gpm 。 設計壓損 12mmAq 。 水量 $\geq 15\text{gpm}$, 3Hp , $3,500\text{rpm}$, 3ϕ , $200V$, TEFC。 測量範圍 $1\sim 10\text{m/sec}$, 精確度 $\pm 1\%$ 。 刻度指示 $0\sim 100\%$ 感測範圍 $0\sim 760\text{mmAq}$, 指示精確度 $\pm 2\%$ 以內 刻度指示 $0\sim 100\%$ 測量範圍 $0\sim 14$, 輸出: $4\sim 20\text{A}$ 指示範圍 $0\sim 1,500\text{mmAq}$, U型管直讀式 |
| 二、風車系統 1. 風車 2. 擋板 | 1 座 1 式 | 風量 $33\text{m}^3/\text{min}$, 入口溫度 80°C 靜壓 $1,500\text{mmAq}$ 馬達 75Hp , $200V$, 3ϕ , 60HZ , TEFC。 Radial blade type |
| 三、採樣裝置 1. 煙道粉塵自動等速抽引裝置 2. 串級粒徑分離裝置 | 1 組 1 組 | 日製 KF-8808型 Anderson Mark III 分級範圍: $0.36\sim 31\mu\text{m}$ |
| 四、分析儀器 1. 精密分析天平 2. 電子自動乾燥器 3. 烘箱 | 1 台 1 台 1 台 | 瑞士 Mettler AT261, 稱重範圍 $62/205$, 精密度 $0.01/0.1\text{mg}$ $400\text{mm}\times 450\text{mm}\times 850\text{MM}$ 濕度自動控制於 $30\%\sim 50\%$ $400\text{mm}\times 450\text{mm}\times 400\text{MM}$ 控溫範圍 $0\sim 300^\circ\text{C}$ |

表 2 文氏洗絲塔模廠試驗控制條件

| 項次 | 項 目 | 控 制 條 件 |
|----|--------------------|-----------|
| 1 | 氣體流率 (m^3/min) | 20~60 |
| 2 | 液體流率 (L/min) | 22~120 |
| 3 | 壓力損失 (mmH_2O) | 200~1,700 |
| 4 | 喉部斷面積 (cm^2) | 33.5~77.6 |
| 5 | 擋板開度 (%) | 0~100 |
| 6 | 喉部長度 (cm) | 0~16 |

四、廢氣特性資料

銅二次熔煉爐試驗工廠之廢氣基本資料如表 3 及圖 3 所示。由表 3 之檢測資料顯示，其排氣溫度僅有 $42^\circ C$ ，唯由於其抽引廢氣中常挾帶由熔煉作業所產生之火星，此火星足以將袋濾集塵機之濾袋燒毀，因而造成操作上之困擾。

表 3 試驗工廠熔煉爐廢氣排放檢測資料

| 試驗項目 | 實驗平均值 | | 單位 |
|---------|-----------------|------|-----------------|
| 排放氣體含水率 | 4.3 | | % |
| 排放氣體溫度 | 42 | | $^\circ C$ |
| 排放氣體流速 | 28.2 | | m/s |
| 排放氣體量 | 濕基 | 1547 | Nm^3 / min |
| | 乾基 | 1480 | |
| 排氣組成 | CO ₂ | 0.5 | % |
| | O ₂ | 19.0 | % |
| | CO | 0.0 | % |
| 粒狀污染物 | 325 | | mg/Nm^3 |
| 總硫氧化物 | ND | | ppm |
| 質量中數粒徑 | 1.4 | | μm |

圖 3 為銅二次熔煉爐於入料期、熔解期及出湯期廢氣中粒狀物之粒徑分佈檢測結果，其質量中數粒徑平均為 $1.5 \mu\text{m}$ ；其中以出湯期所排放之粒狀物其粒徑最小。而銅二次熔煉爐廢氣中粒狀物粒徑之大小隨熔煉之廢銅原料而有所差異。

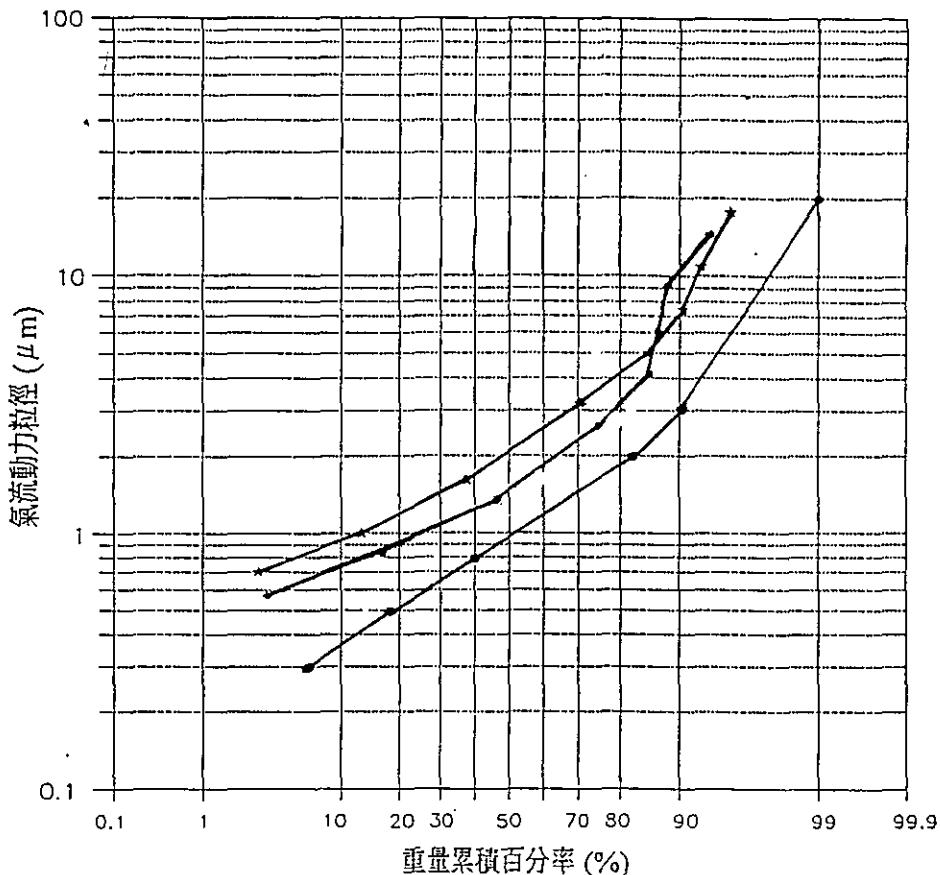


圖 3 銅二次熔煉爐粒狀污染物粒徑分佈圖

五、結果與討論

5.1 試驗結果

1. 實驗數據與理論值之比較

在文獻上已有許多的研究者提出文氏洗滌塔之理論或經驗關係式，

以預測文氏洗滌塔之壓降，其中以卡爾特修正方程式 (Modified calvert's equation) 最為簡單實用。圖 4 為本實驗數據與卡爾特修正方程式預測值之比較，橫坐標為液氣比 ($1/m^3$)，縱坐標以喉部速度壓損 ($\Delta P/\Delta H$) 表示。由圖 4 可知卡爾特修正方程式之壓降預測值與實驗值相當接近，其誤差在 10% 以內。

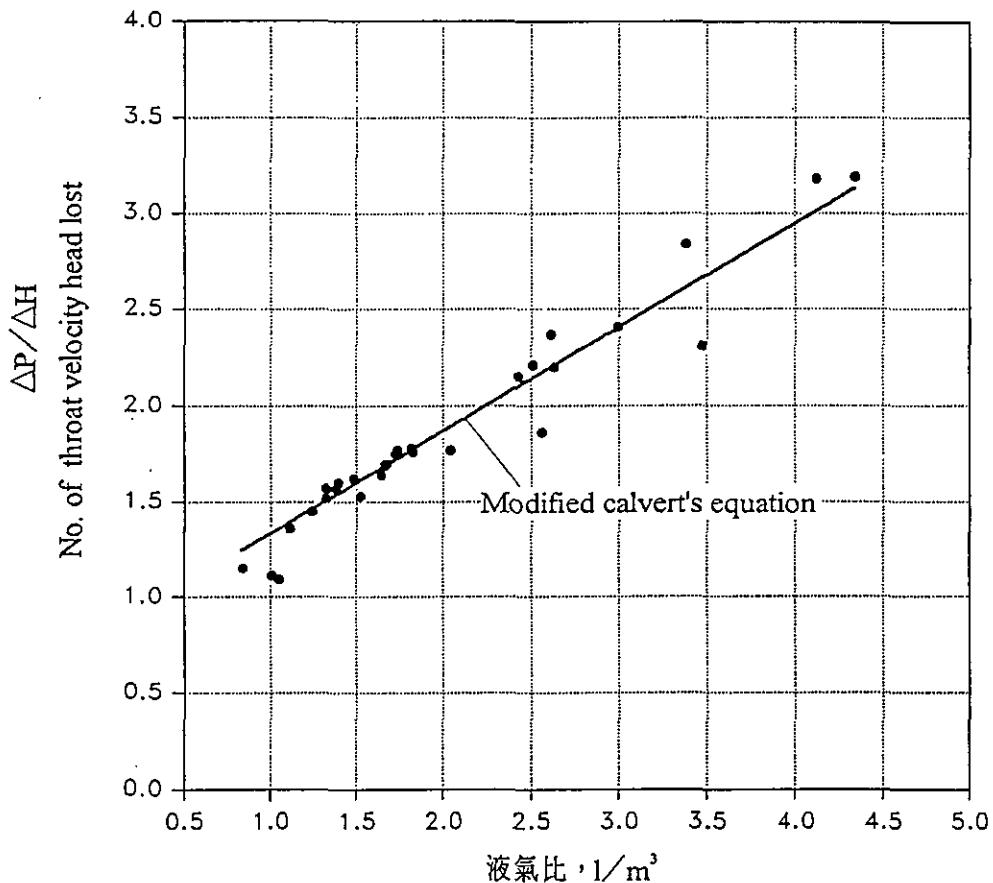


圖 4 實驗數據與卡爾特修正方程式預測壓降值之比較

$$\Delta P = 1.03 \times 10^{-3} U_{de}^2 U_G \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right)^2 \dots \text{(Modified calvert's equation)}$$

速度壓損之定義為：

$$\frac{\Delta P}{\Delta H} = \frac{-\Delta P}{\frac{1}{2gc} \frac{\rho_G}{\rho_L} U_G^2}$$

式中

ΔP : 洗滌塔壓力降，cm水柱高

U^{*de} : 校正係數

U_G : 喉部氣體速度，cm/s

$\frac{Q_L}{Q_G}$: 液氣比， m^3/m^3

gc : 980 cm/s^2

ρ_G : 氣體密度， g/cm^3

ρ_L : 液體密度， g/cm^3

2. 壓損、液氣比與喉部速度關係

由測試結果可得到壓損、液氣比與喉部速度之關係，如圖 5 所示。

由圖 5 得知，在固定液氣比的條件下，壓損與喉部速度的雙對數關係圖呈線性，其斜率約等於 2，此與預測壓力降的卡爾特修正方程式 (Modified calvert's Equation) 相符。因此在設計文氏洗滌塔時，可利用卡爾特方程式做為預測壓力降之依據。

3. 壓降與去除效率之關係

圖 6 為液氣比等於 $2(1/m^3)$ 之條件下，文氏洗滌塔壓降與去除效率之關係圖，由圖 6 可知文氏洗滌塔之壓降與去除效率成正比關係。以典型銅二次熔煉工廠 (熔煉爐之容量為 30噸) 為例，其粒狀污染物平均濃度約為 $491mg/Nm^3$ ，若欲處理至管制標準為 $50mg/Nm^3$ (不需校正含氧量) 時，其所需之去除效率為 90%，則由圖 6 可得去除效率為 90% 時，文氏洗滌塔之壓降應當控制在 $762mmAq$ 。

5.2 討論

1. 去除效率之影響因素

由試驗過程中得知影響文氏洗滌塔對粒狀污染物之去除效率的二項

主要因素為「操作壓降」與「粒狀污染物之粒徑分佈」。影響粒徑分佈之因素為製程、原料及燃料，而影響壓降之因素有：液氣比、喉部速度及喉管長度，其相互關係整理如表 4 所示。

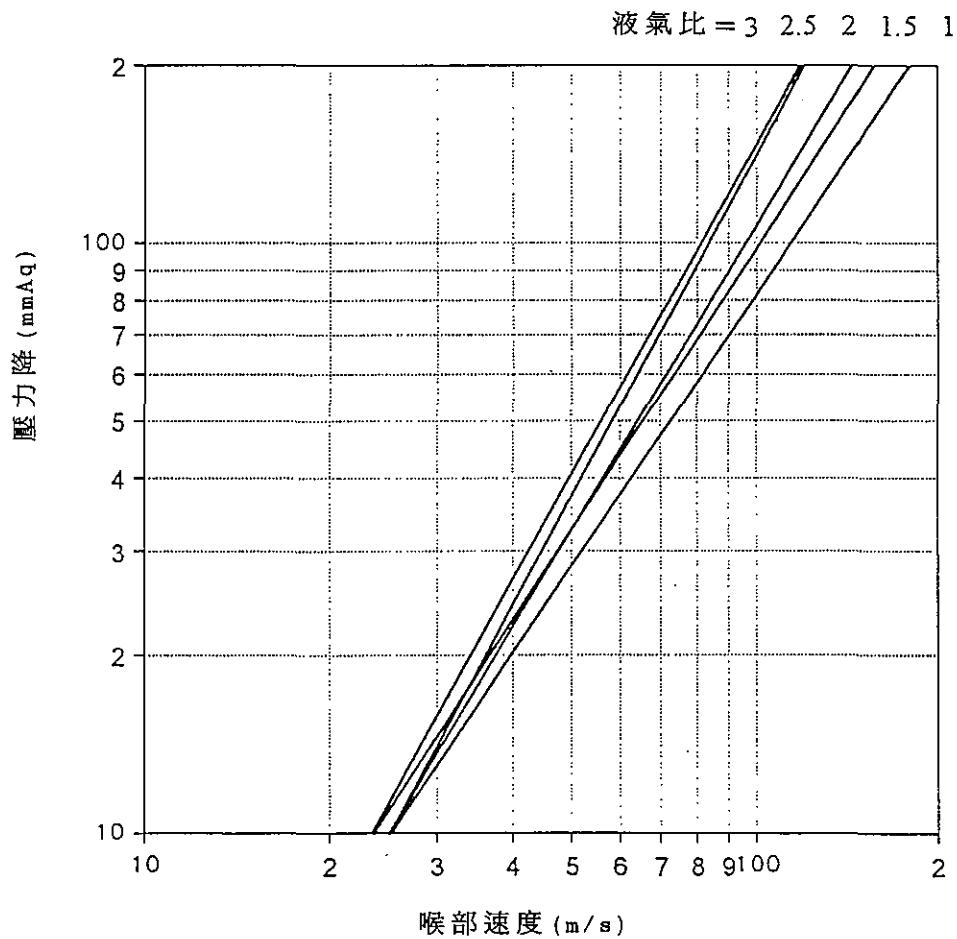


圖 5 壓力降、喉部速度與液氣比之關係圖

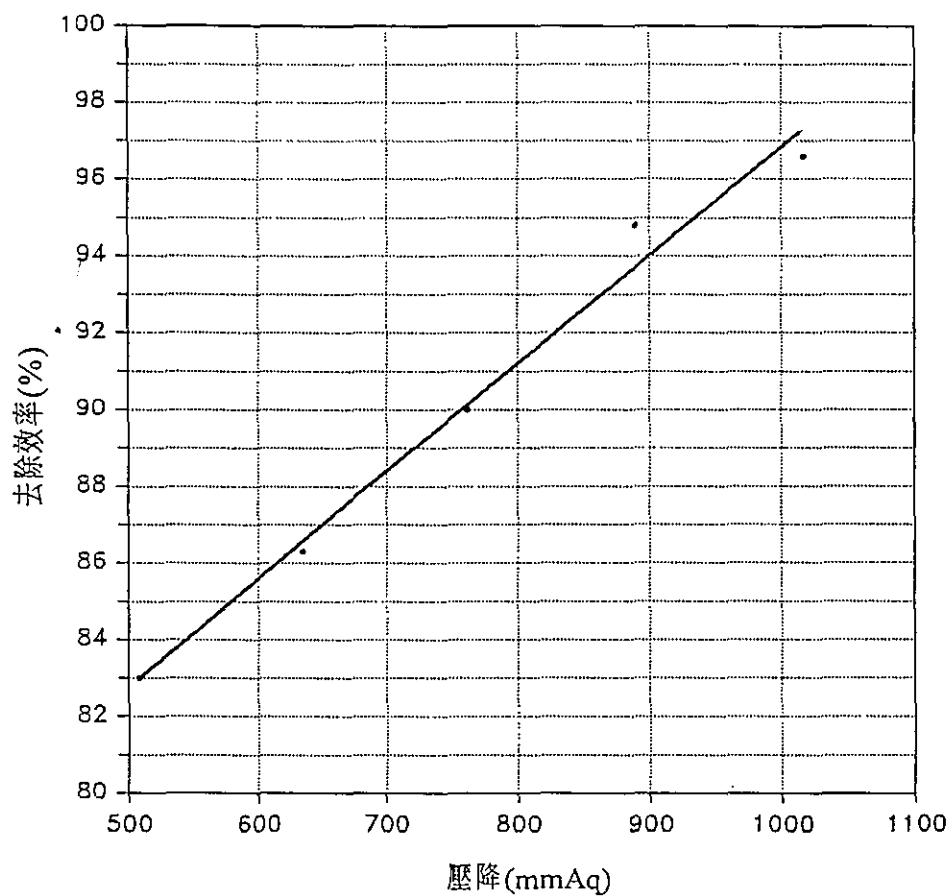


圖 6 壓降與去除效率之關係

表 4 文氏洗滌塔除塵效率之影響因素

| 項 目 | | 去 除 效 率 | 影 響 因 素 |
|-----------------------|-----|---------|------------------------|
| 粒 狀 物 粒 徑 | 愈 小 | 愈 低 | 1. 製 程 |
| | 愈 大 | 愈 高 | 2. 原 料 3. 燃 料 |
| 操 作 壓 損 | 減 小 | 降 低 | 1. 液 氣 比 2. 喉 部 速 度 |
| | 增 大 | 增 高 | 3. 喉 管 長 度 |

2. 液氣比對效率之影響

由圖 7 及圖 8 顯示在固定液氣比之下，喉部速度增加，其捕集效率亦增加，此現象為在高速下液滴霧化時，其液滴粒徑較小，捕集效率較佳。而在一定喉部速度之下，在低液氣比時，霧化液滴直徑較小，其捕集效率較高。然而，其加速較快導致液滴與粒子間的相對速度很快降至零。零相對速度意謂著零收集。在較大的液氣比時，霧化液滴之粒徑較大，較大液滴具有較低之捕集效率，如圖 8 當液氣比大於 2.5 l/m^3 時其捕效率有降低之現象。因此文氏洗滌塔在一定之喉部速度下，其液氣比操作在 $1 \sim 2.5 \text{ l/m}^3$ 之間時，有最佳之捕集效率。

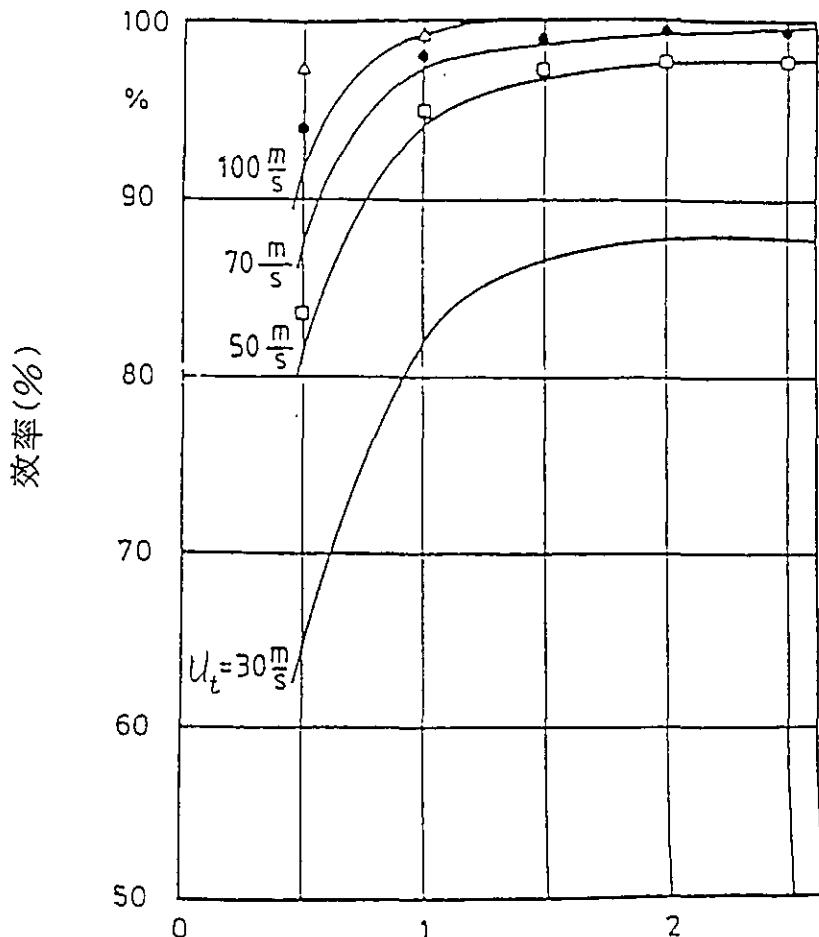


圖 7 液氣比對捕集效率的影響

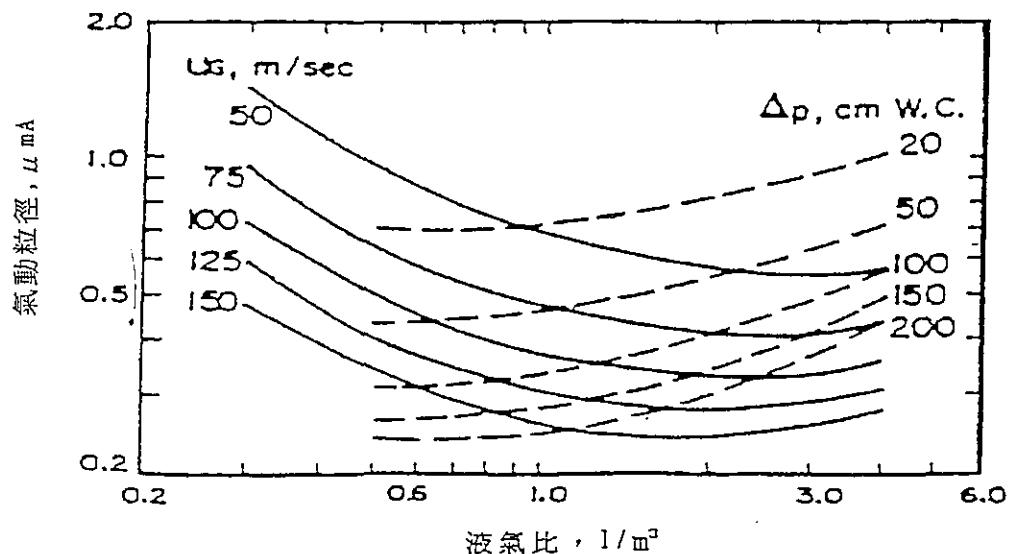


圖 8 液氣比對效率的影響

3. 喉管長度對捕集效率之影響

由理論推導可得喉管長度對效率之關係如圖 9 所示。在一定的操作條件下，喉管愈長，洗滌塔效率愈高，然喉管長度增加會導致壓損的增加，而壓損增加，動力系統的馬力也必須提高。由圖 9 可知無因次喉管長度 (L) 在 $2 \sim 3$ 之間已足夠，再增加無因次喉管長度反而會使壓降增加，而僅提昇少許之洗滌塔效率。

六、文氏洗滌塔之操作維護與故障排除

雖然文氏洗滌塔為較簡單之裝置，但乃需適當的維護，以確保較長的使用壽命及避免操作故障發生。利用文氏洗滌塔處理銅二次熔煉爐廢氣時在操作維護上應注意事項如下：

1. 在導入銅二次熔煉爐廢氣之前，應確定洗滌液泵浦已起動。
2. 檢查洗滌塔內面之磨損及腐蝕。
3. 檢查過度積塵，特別在濕／乾界面處。
4. 檢查噴嘴積塵或損壞，必要時修護或更換之。

表 5 文氏洗滌塔之故障與排除

| 問 題 | 可 能 解 決 方 法 |
|--------------|---|
| 粒狀污染物堆積在洗滌塔中 | 清潔液體分配系統 清潔排放口 檢查氣流及組件設計規格 增加洗滌液體積流率 改善沖洗系統 |
| 洗滌塔壓降太低 | 修理阻塞、破裂或洩漏之管路 檢查氣流是否在指定範圍內 調整風車速度 清潔入口導管 檢查入口靜壓是否合乎規範 |
| 洗滌塔壓降太高 | 消除洩漏 檢查氣流是否合於設計規範 調整風車驅動皮帶 調整風車速度 清潔洗滌塔 |
| 水汽 | 改進氣液分離器 減少氣流 清潔或加大排放口 清潔氣液分離器 重新焊接任何鬆動葉輪 改善沖洗系統 |

七、結論

- 由實驗結果顯示預測壓力降之理論方程式，Modified Calvert's equation 與實驗數據相符，其誤差在 $\pm 10\%$ 以內，因此可以 Modified Calvert's equation 做為文氏洗滌塔之設計方程式。
- 根據模廠試驗結果顯示，文氏洗滌塔對粒狀物去除效率是粒徑大小與壓力降的函數，而壓力降又與液氣比及喉部速度有關，在良好設計之下，

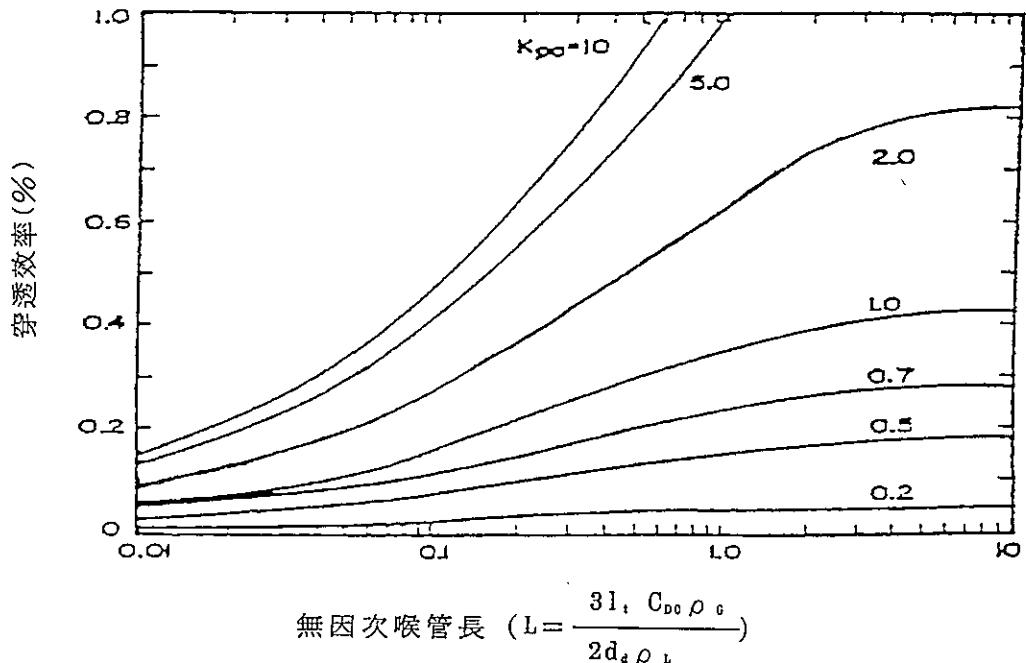


圖 9 喉管長度對效率之影響

5. 檢查管路及槽體中是否腐蝕或洩漏，特別是防護襯墊已經劣化的地方。
6. 檢查氣液分離器之結構支架。
7. 檢查泵浦是否磨損、密封及操作平順。
8. 檢查擋板及擋板連桿是否固定、有無磨損或積塵。
9. 檢查風車潤滑液、風車軸承冷卻液、皮帶是否磨損、皮帶張力、及葉輪浸蝕／腐蝕情形。
10. 檢查外部控制管路、導管及膨脹接頭各處是否洩漏。
11. 檢查所有儀錶狀況（如水位指示器、pH指示器）。並注意粉塵堆積現象，通常無法將感測器上堆積之粉塵清除時感測器必須更換。
12. 文氏洗滌塔操作上一般碰到的問題，及可能的解決方法整理如表 5 所示。

任何增加壓力降之變因，將促使洗滌效率之提高，針對質量中數粒徑為 $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 的銅二次熔煉爐廢氣而言，文氏洗滌塔的操作壓損在762mmAq時，其粒狀物去除效率高達90%以上。

3. 文氏洗滌塔為一高效率的濕式洗滌塔，適用於處理粒狀物具有黏性、可燃性或高腐蝕性的廢氣，而銅二次熔煉爐廢氣之粒狀物兼具黏性及可燃性，因此文氏洗滌塔值得推廣於金屬熔煉業以作為銅二次熔煉爐廢氣之處理設備。
4. 對此廢氣特性，文氏洗滌塔之最佳設計操作參數如下：

| 設 計 參 數 | 設 計 值 | 備 註 |
|------------------------------|-------------|--|
| 收 縮 段 角 度 | 60° | |
| 擴 張 段 角 度 | 15° - 25° | 不可大於 25° |
| 液 氣 比 ($1/\text{m}^3$) | 1 ~ 2.5 | |
| 無因次喉管長度 | 2 ~ 3 | $(L = \frac{31t_{\text{CDO}}\rho_G}{2dd\rho_L})$ |
| 操 作 壓 損 (mmH ₂ O) | 762 ~ 1,000 | |

八、參考文獻

1. S. C Yung, "Scrubber Performance Model", EPA-600/2-77-172; 1977.
2. S. C Yung, R. Pader, M. Duncan, T. Le, and S. Calvert "Performance of Gas-Atomized Spray Scrubbers at High Pressure", NTIS DE 82008 940, Prepared for u. s. Department of Energy; June, 1981.
3. S. Calvert, "How to choose a particulate scrubber", Vincent cavaseno and the staff of chemical Engineering; 1980.
4. Anthony J. Buonicore & wayne T. Davis, "Air Pollution Engineering Manual", P. 78 ~ P. 88; 1992.
5. R. H. Boll, "particulate collection and pressure drop in venturi scrubber", IEC Fund 12(40) (1973).