

銅鑄造業廢氣處理模廠試驗結果與應用

司洪濤* 賴祖許* 劉文華* 吳俊耀* 余騰耀**

摘要

國內銅鑄造業計有1,397家，其主要空氣污染源為銅熔煉爐，若以回收廢銅及銅屑進行再熔煉操作者，尚有另一主要污染源為銅旋轉乾燥爐（以下簡稱銅乾燥爐），目前業者大都採用袋濾集塵機處理該兩股廢氣，然而銅熔煉爐及銅乾燥爐所排之廢氣皆具有高溫、可燃性及粘滯性，故時常發生濾袋阻塞或燒毀之情形，若以靜電集塵機處理此種廢氣，其初設成本偏高，業者投資意願低落。因此採用濕式洗滌塔處理銅鑄造業之廢氣為較合適之空氣污染防治設備，而濕式洗滌塔中，以文氏洗滌塔對粒狀污染物的去除效率最高且兼具吸收氣狀污染物之功能，又文氏洗滌塔佔地面積小，初設成本低，構造簡單且操作維修容易，非常適合銅鑄造業者使用，故工業污染防治技術服務團（以下簡稱服務團）乃自行規劃乙套文氏洗滌塔系統廢氣處理模型試驗設備，並安裝於桃園某銅鑄造工廠污染源現場，進行一系列的模廠測試工作，本文將詳細介紹整個文氏洗滌塔系統單元設備設計理念及模廠試驗所得的最佳設計參數等工程實務經驗，提供銅鑄造業及環境工程相關業者參考。

【關鍵字】

1. 銅熔煉爐(brass melting furnace)
2. 銅旋轉乾燥爐(brass rotary dryer)

*經濟部工業局工業污染防治技術服務團工程師

**經濟部工業局工業污染防治技術服務團專案經理

- 3. 文氏洗滌塔(venturi scrubber)
- 4. 模廠試驗(pilot plant test)
- 5. 粒徑分佈(particle size distribution)

一、前 言

隨著經濟迅速的發展使得國內工廠四處林立，因而造成空氣品質逐漸惡化；此外，基於生活水準的提昇，國內對生活環境品質的要求亦日益提高，因此如何運用適切之設備防制空氣污染問題，已成為產業界努力的目標。然服務團，在進行國內1,397家銅鑄造業廢氣特性調查及48家銅製品業工廠現場輔導時，發現多數業者僅熟悉本身產品製程設備之操作維修技術，對於由該製程設備（如銅熔煉爐及銅乾燥爐等）所排放之廢氣量及廢氣特性則不太明瞭，故雖設有空氣污染防治設備處理製程所排放的廢氣，但多因防制設備選擇不當或忽略設計重點而無法充份發揮該設備應有之功能，且操作時故障頻繁，導致生產不順或降低產能，有鑑於此，服務團乃針對銅鑄造業銅乾燥爐及銅熔煉爐之廢氣特性，自行規劃設計乙套文氏洗滌塔系統廢氣處理模型試驗設備，並於桃園某銅鑄造工廠（以下簡稱A廠）污染源現場組裝，進行一系列的模廠測試工作，藉此尋求最佳的設計條件，期能輔導業者以最經濟的成本，使處理後之排氣能符合現行排放標準，達到環境保護與經濟發展兼籌並顧之雙重目的。

二、模廠試驗現場簡介

2.1 製造流程

A廠位於桃園縣某鄉鎮，為一銅鑄造業，主要係生產青銅棒及青銅線等銅半製品，每月產量約為1,000公噸，其使用之原料係以回收之銅屑廢料為主，由於原料中含6%之切削油若直接送入熔煉爐中熔煉，則將產生大量黑煙，而妨礙熔煉作業之進行，因此必須先藉離心機將銅屑脫油至3%以下，再經銅乾燥爐以400~600°C的高溫將銅屑中所剩的切削油完全揮發出來，方可送入銅熔煉爐中進行二次熔煉作業，精煉完成之銅液再經連續澆鑄、鋸切、加熱、擠型及拉延等程序即製成成品出售，其主要生產製造流程如圖1所示。

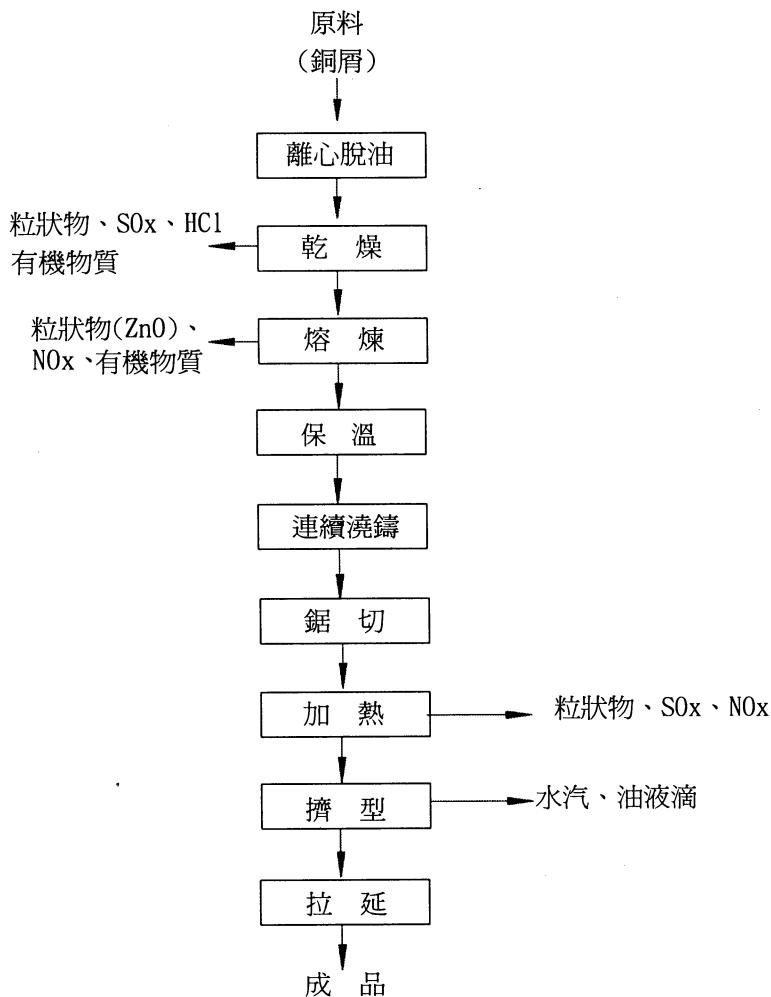


圖1 A廠青銅棒、線主要生產製造流程

2.2 廢氣污染源

A廠主要之空氣污染來源有三：(1)乾燥過程由銅乾燥爐所排之廢氣；其乾燥爐的型式係採用長圓桶狀的旋轉乾燥爐(rotary dryer)；(2)熔煉過程由銅熔煉爐加料期、熔解期及出料期所逸散之廢氣；(3)進行銅棒擠型之加熱過程由加熱爐所排放之廢氣。A廠雖有三個主要污染源，但其加熱爐與銅熔煉爐設備位置非常接近，故A廠將加熱爐所排之廢氣會同銅熔煉爐氣罩所

收集之廢氣一併處理，故共有兩股廢氣排放管道，且該兩股廢氣皆各別採用袋濾集塵機處理之，由於此兩股廢氣均具有高溫、可燃性及粘帶性之特性，經常將袋濾集塵機之濾袋阻塞或焚毀，導致工廠生產不順及降低產能，因此，服務團乃分別針對此兩股污染源進行現場模廠試驗，以求得最佳的設計參數及操作維修重點為該廠及同類型之工廠解決問題。

2.3 廢氣特性

2.3.1 銅乾燥爐廢氣特性

經離心機脫油後之銅屑原料中仍含有大量的切削油，故於乾燥爐中均為揮發出來之切削油氣，由於乾燥作業係在400~600°C之間進行，此揮發出來之油氣會自行燃燒，但因油氣之燃燒溫度不高且滯留時間不足，無法將切削油油氣完全燃燒，造成乾燥爐排氣含有大量燃燒不完全的碳氫化合物及切削油油氣並挾帶許多火星，很容易將A廠袋濾集塵機之濾袋阻塞或燒毀。A廠離心機分離下來之切削油特性分析及銅乾燥爐廢氣特性檢測結果，如表1及表2所示。

表1 A廠切削油特性分析結果

檢測項目		檢測結果	
		樣品一	樣品二
三分成份分析	水份(%)	0.02	0.02
	灰份(%)	0.83	0.52
	可燃份(%)	99.15	99.46
元素分析	碳(%)	42.23	73.66
	氫(%)	13.40	12.84
	氮(%)	0.002	0.002
	氧(%)	40.438	8.728
	硫(%)	2.49	1.04
	氯(%)	0.59	3.19
熱分值分析	高位熱值(Kcal/Kg)	13,485	13,371
	低位熱值(Kcal/Kg)	12,761	12,678
備註		切削油靜置後之上層液	切削油靜置後之下層液

表2 A廠銅乾燥爐廢氣特性檢測結果

檢驗項目		實測平均值
排放氣體含水率(%)		7.1
排放氣體溫度(°C)		550
排放氣體流速(m/sec)		18.2
排放氣體量	濕基(Nm ³ /hr)	4,412
	乾基(Nm ³ /hr)	4,100
排放氣體組成	CO ₂ (%)	2.5
	O ₂ (%)	17.8
	CO(%)	0
污染物濃度	粒狀物(mg/Nm ³)	1,650
	總硫氧化物(ppm)	460
	總氮氧化物(ppm)	N.D.
	氯化氫(ppm)	251

2.3.2 銅熔煉爐廢氣特性

A廠銅二次熔煉作業係回收廢銅及已經乾燥後之銅屑進行再熔煉之操作，由於銅二次熔煉作業在加料期、熔煉期及出料期均於高溫熔煉爐逸散出大量空氣污染物如粒狀物及油霧等物質，其中粒狀物之主要成份為氧化鋅，（鋅元素重量百分比佔64.06%）具有回收之價值，A廠銅熔煉爐粒狀物組成分析及廢氣特性檢測結果如表3及表4所示。

三、模廠試驗設備與方法

3.1 設備單元說明

服務團根據2.2節所述之兩股污染源廢氣特性乃自行設計乙套文氏洗滌塔系統廢氣處理模廠試驗設備，此系統主要包含驟冷塔、冷凝吸收塔、文氏洗滌塔、氣液分離器及高壓風車等五大單元設備，設計最大處理能量為103m³/min@1,000°C，各單元設備之間可互相搭配、組裝及串聯使用，其設備單元說明如下：

表3 A廠銅熔煉爐粒狀物組成分析結果

檢測項目		重量百分比(%)
金屬氧化物	二氧化矽	0.423
	氧化鈣	0.020
	三氧化二鋁	1.345
	三氧化二鐵	0.388
	氧化鎂	0.023
	氧化錳	0.034
元素分析	氧化鈦	0.471
	碳	12.60
	硫	0.15
	鉛	1.891
	鋅	64.06
	銅	2.576
	鎳	0.008
	鉻	0.008
備註		此粒狀物係由A廠銅熔煉爐袋濾集塵機所集下來之粉塵

表4 A廠銅熔煉爐廢氣特性檢測結果

試驗項目		實測平均值
排放氣體含水率(%)		3.3
排放氣體溫度(°C)		37
排放氣體流速(m/sec)		11.5
排放氣體量	濕基(Nm ³ /min)	167
	乾基(Nm ³ /min)	162
排放氣體組成	CO ₂ (%)	0
	O ₂ (%)	20
	CO(%)	0
粒狀污染物	進料期(mg/Nm ³)	409
	溶解期(mg/Nm ³)	274
	出湯期(mg/Nm ³)	269
總硫氧化物(ppm)		ND
總氮氧化物(ppm)		9

1. 驟冷塔

利用兩階段之噴水效果並配合低壓損之文氏收縮管，可將高溫含塵廢氣迅速地蒸發冷卻至絕熱飽和溫度，並可去除部份較大顆粒之粒狀污染物並吸收少部份酸性氣體。

2. 冷凝吸收塔

高溫廢氣經由驟冷塔蒸發冷卻至絕熱飽和溫度後進入冷凝吸收塔，於冷凝吸收塔中再將廢氣溫度進一步冷卻，由冷凝的作用促使次微米之粒狀污染物的顆粒長大，以利後續之文氏洗滌塔將之去除，且冷凝吸收塔內由於氣、液體充分地接觸，故可去除大部份廢氣中之酸性氣體。

3. 文氏洗滌塔

廢氣通過一文氏漸縮管，使廢氣之靜壓轉換為速度壓力，同時將洗滌液霧化成微小液滴，促使廢氣中之粒狀污染物與液滴充分地碰撞而達到捕集粒狀污染物之目的。此設計良好之文氏洗滌塔對於粒狀污染物之捕集效率可高達90%以上。

4. 氣液分離器

廢氣中之粒狀污染物被洗滌液捕集，最後經由氣液分離器將之去除，而乾淨的空氣則由風車排出。

5. 高壓風車

高壓風車為整個廢氣處理系統之動力來源，具有壓縮、加熱之功能；當廢氣排放至大氣中時，可避免廢氣溫度下降至飽和溫度而導致排氣中之氣態水分子凝結成液滴，而產生不透光率之困擾。

3.2 試驗設備組裝流程

3.2.1 銅乾燥爐模廠試驗廢氣處理流程

第一階段模廠試驗乃於銅乾燥爐之主排氣管道中，抽引大部份廢氣導入驟冷塔中，將500~600°C之高溫廢氣降溫至絕熱飽和溫度，再進入冷凝吸收塔，藉水蒸氣之冷凝作用促使粒狀物粒徑增大後，再以文氏洗滌塔去除此粒狀污染物，再經氣液分離器去除含塵液滴，最後乾淨空氣經由風車排放至大氣中，其廢氣處理流程設計如圖2所示。

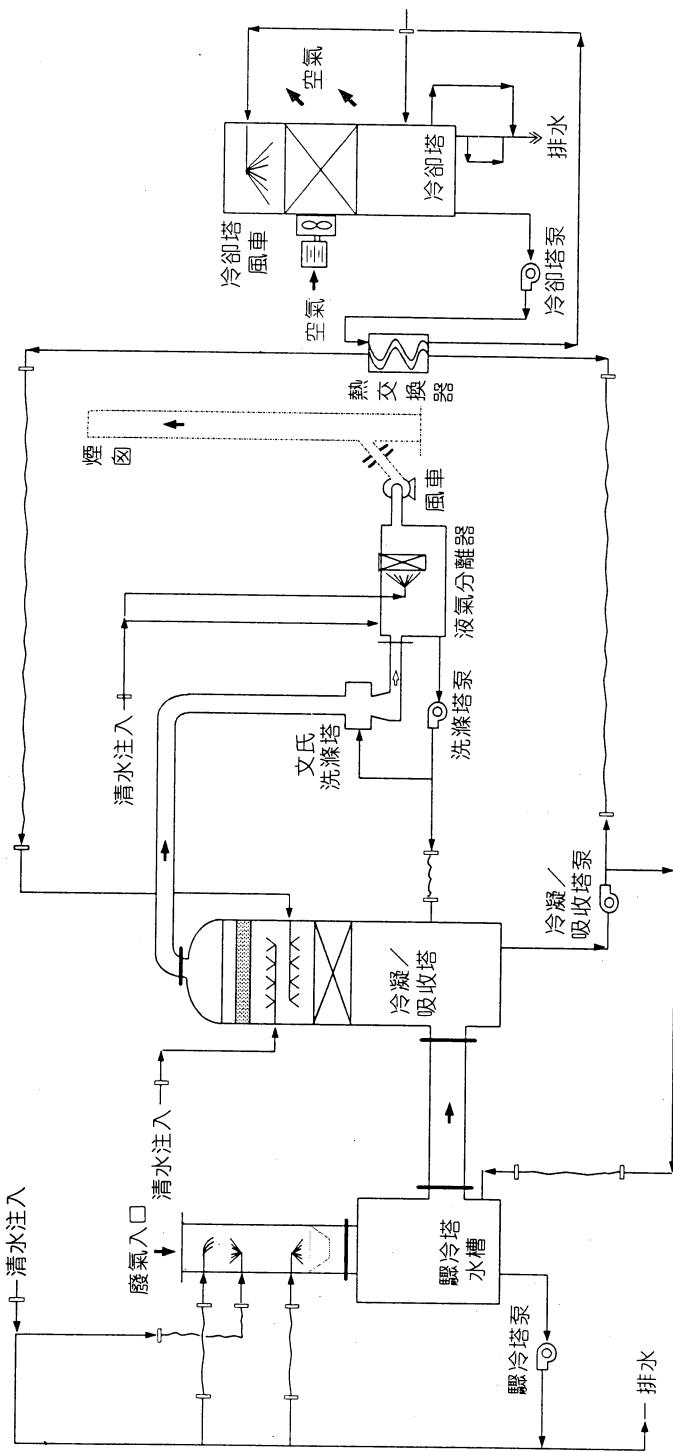


圖 2 圖 2 銅乾燥爐模試驗廢氣處理流程

3.2.2 銅熔煉爐模廠試驗廢氣處理流程

第二階段模廠試驗乃於銅熔煉爐之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中處理後，再經氣液分離器去除含塵液滴，最後乾淨空氣經由風車排放至大氣中，其廢氣處理流程設計如圖3所示。

3.3 試驗方法

兩階段的模廠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，工作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5所示。

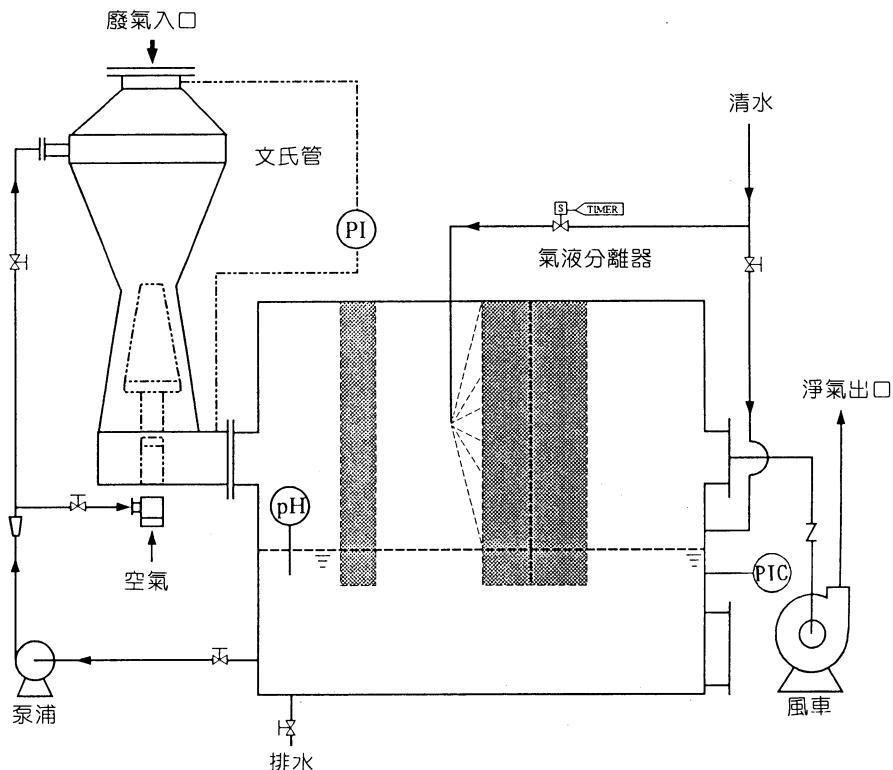


圖3 銅熔煉爐模廠試驗廢氣處理流程

表5 文氏洗滌塔系統模廠試驗控制條件

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

依據操作條件的改變及調整，觀察並採樣分析文氏洗滌塔對銅乾燥爐及銅熔煉爐廢氣之處理效率，其試驗步驟簡述如下：

1. 檢查所有的公共供應系統是否配置完成，包含電源、水源、壓縮空氣等。
2. 將文氏洗滌塔系統總電源打開。
3. 將控制盤電源打開。
4. 檢查循環水槽液位是否正常。
5. 檢查循環水路是否通暢，並起動泵浦。
6. 檢查入口溫度及壓損是否正常。
7. 檢查進口及出口擋板開度是否正常，並起動風車。
8. 測定文氏洗滌塔壓損、液氣比與斷面流速之關係。
 - 調整液氣比 Q_L / Q_G 分別為 1、2、3 L/m^3 。
 - 依次記錄壓損、風量、水量、溫度、喉部斷面流速。
 - 畫出在不同液氣比條件下，壓損與喉部斷面流速之關係圖。
9. 測定銅乾燥爐排氣中所含粒狀物之粒徑分佈。
10. 測定銅乾燥爐粒狀物去除效率曲線。
 - 調整液氣比 Q_L / Q_G 分別為 1、2、3 L/m^3 。
 - 依次調整不同的操作壓損 ΔP 。
 - 待系統穩定之後，同時檢測文氏洗滌塔入口及出口之粒狀物濃度。
 - 畫出在不同操作壓損下，其粒狀污染物之去除效率曲線。
11. 測定銅熔煉爐排氣中所含粒狀物之粒徑分佈。

12測定銅熔煉爐粒狀物去除效率曲線。

- 調整液氣比 Q_L/Q_G 等於 $2\text{L}/\text{m}^3$ 時。
- 調整不同的操作壓損 ΔP 。
- 待系統穩定之後，同時檢測文氏洗滌塔入口及出口之粒狀污染物濃度。
- 畫出不同操作壓損下，其粒狀污染物之去除效率曲線。

13當試驗結束後，準備停機時，將風車開關切入OFF位置。

14當風車停止後，確定入口溫度低於警報設定點後關閉循環泵浦。

15當泵浦停止後，停止補充水及打開排水閥。

16關閉控制盤電源。

17關閉文氏洗滌塔系統總開關電源。

四、試驗結果與討論

4.1 文氏洗滌塔壓損、液氣比與喉部速度

由測試結果可得到文氏洗滌塔壓損、液氣比與喉部速度之關係如圖4所示。由圖4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)相當接近，其誤差範圍在10%以內。

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

式中， ΔP ：文氏洗滌塔操作壓損， cmH_2O

U_{de}^* ：校正因子，無因次單位

U_G ：喉部氣體速度， cm/sec

$\frac{Q_L}{Q_G}$ ：液氣比， m^3/m^3

因此在設計文氏洗滌塔時，可直接利用圖4試驗所得的結果。

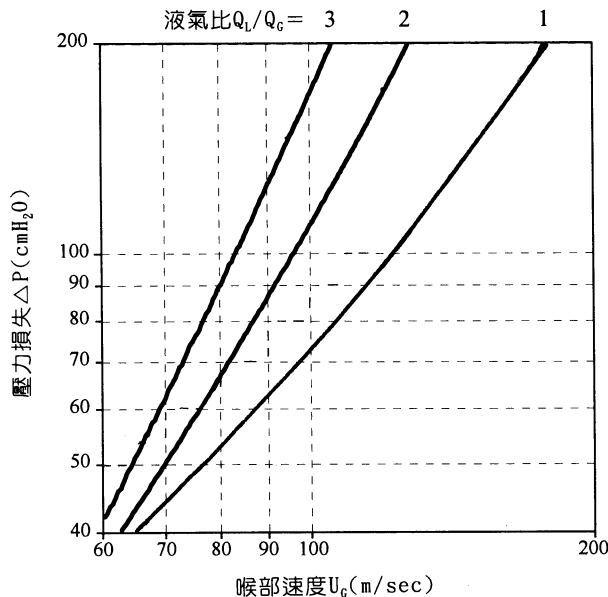


圖 4 文氏洗滌塔壓損、液氣比與喉部速度之關係

4.2 銅乾燥爐廢氣模廠試驗

4.2.1 銅乾燥爐排氣中粒狀物之粒徑分佈

A廠銅乾燥爐排氣中粒狀物之粒徑分佈檢測結果如圖 5 所示，其粒狀物中值粒徑(mass medium particle diameter) $d_{p50} = 1.2 \mu\text{m}$ ，標準偏差值 $\sigma = 4.3$ ，一微米以下的粒狀物便佔有45%之多，足見其粒狀物之粒徑非常微細。

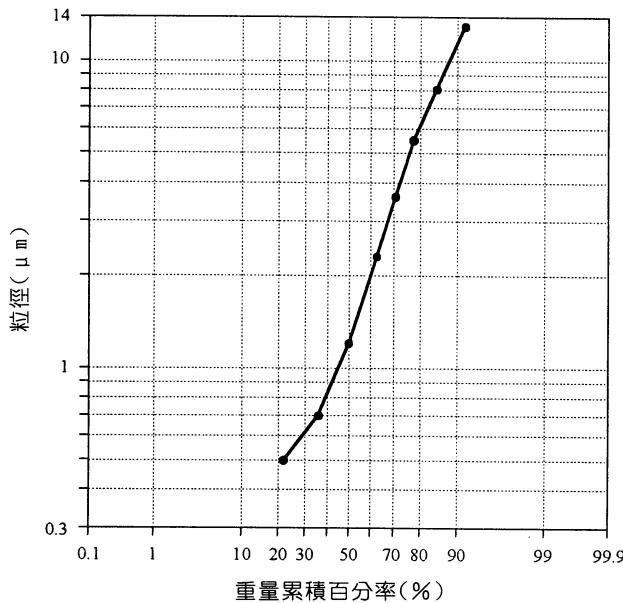


圖 5 銅乾燥爐廢氣中粒狀物之粒徑分佈

4.2.2 銅乾燥爐粒狀物之去除效率曲線

1. 文氏洗滌塔處理銅乾燥爐廢氣時，在液氣比分別為 1 、 2 、 $3\text{L}/\text{m}^3$ ，粒狀物去除效率之關係如圖 6 所示。
2. 根據模型試驗，文氏洗滌塔對粒狀物的去除率不但與壓損成一指數比例之關係，其與液氣比也有一密切之關係。因此，一良好的設計必須同時考慮到壓損、喉部速度與液氣比等之相互關係，方能設計出一高效率且經濟之設備。
3. 當壓損為 $1,200\text{mmH}_2\text{O}$ ，其粒狀物去除率皆可達 95% 以上，且其出口排放濃度約為 60 至 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，均可符合環保標準。但若考慮不透光率問題，最佳的操作條件為：壓損 $1,400\text{mmH}_2\text{O}$ ，液氣比為 $2\text{L}/\text{m}^3$ ，其粒狀污染物去除效率高達 98.9% 。

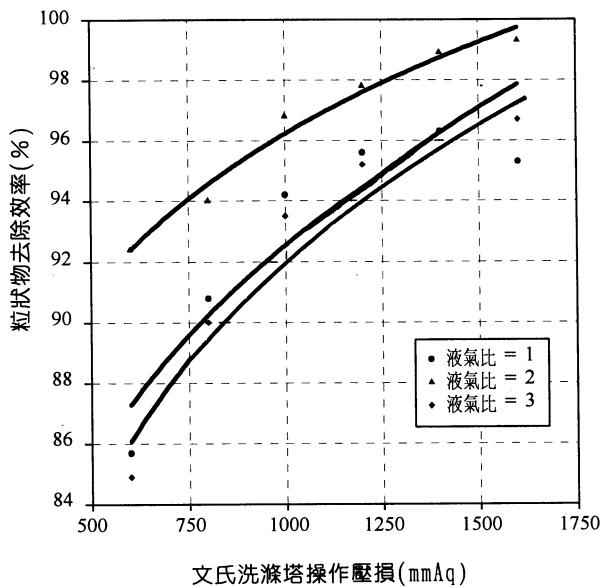


圖 6 銅乾燥爐粒狀物之去除效率曲線

4.3 銅熔煉爐廢氣模廠試驗

4.3.1 銅熔煉爐粒狀物之粒徑分佈

A廠銅熔煉爐排氣中粒狀物之粒徑分佈檢測結果如圖7所示，其粒狀物中值粒徑 $d_{p50} = 1.4 \mu\text{m}$ ，標準偏差值 $\sigma = 2.2$ ，一微米以下的粒狀物佔有24%之多，此粒狀物之粒徑較銅乾燥爐排氣中之粒狀物稍為粗大一些，但粒徑仍屬非常微細。

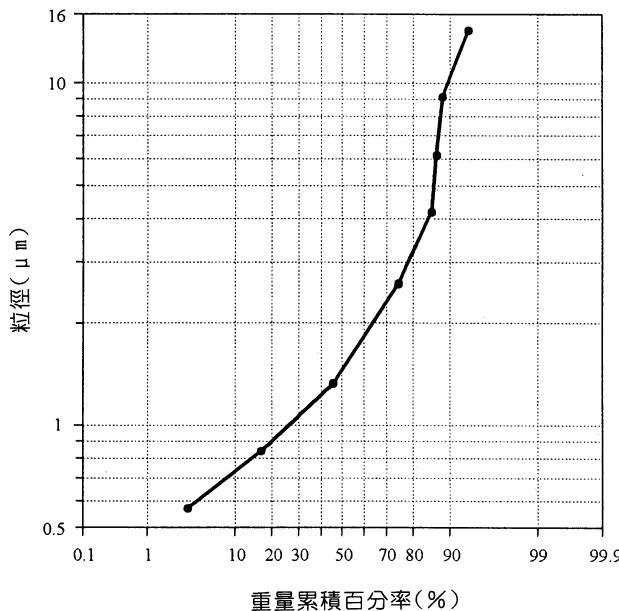


圖 7 銅熔煉爐廢氣中粒狀物之粒徑分佈

4.3.2 銅熔煉爐粒狀物之去除效率曲線

1. 經測試結果，文氏洗滌塔處理銅熔煉爐廢氣，在液氣比 = $2\text{L}/\text{m}^3$ ，其壓力降與去除效率之關係如圖 8 所示。
2. 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，任何增加壓力降之變因，將促使洗滌效率之提高。
3. 針對中值粒徑為 $1.4 \mu\text{m}$ 的銅熔煉爐廢氣而言，文氏洗滌塔的操作壓損在 $1,000\text{mmAq}$ 及液氣比 = $2\text{L}/\text{m}^3$ 時，其粒狀物去除效率高達 97% 以上，即可符合銅熔煉爐廢氣處理目標粒狀污染物濃度 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 之要求。

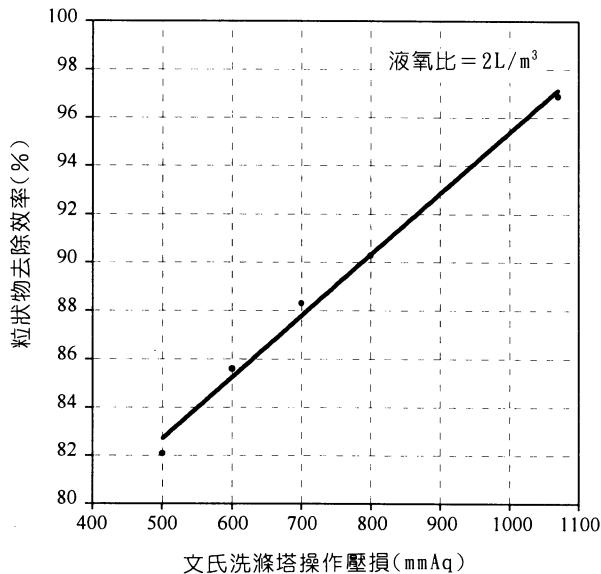


圖 8 銅熔煉爐粒狀物之去除效率曲線

五、應用實例

茲將應用模廠試驗之結果，設計乙套文氏洗滌塔系統處理 B 廠 2 號爐高溫廢氣，其詳細的設計步驟如下：

5.1 污染源廢氣特性調查

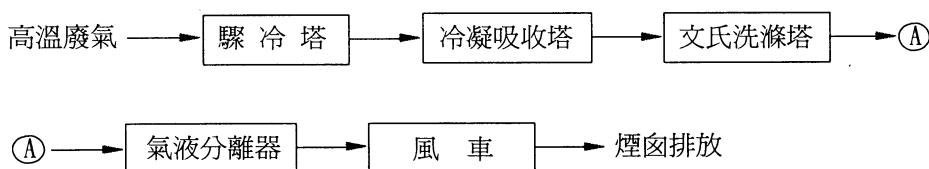
在設計空氣污染防治設備處理空氣污染問題時，首先要針對污染源做詳細的廢氣特性調查，以做為選擇廢氣處理流程及設備單元功能計算之參考。B 廠 2 號爐廢氣溫度為 500°C，粒狀物濃度之實測值為 1,648 mg/Nm³，其中大多數為燃燒不完全之碳氫化合物，且具有可燃性、腐蝕性及黏性，其廢氣特性之檢測結果如表 6 所示。

表6 B廠2號爐廢氣特性之檢測結果

試驗項目		實測平均值
排放氣體含水率(%)		7.8
排放氣體溫度(°C)		500
排放氣體流速(m/sec)		18.2
排放 氣體量	濕基(Nm ³ /h)	4,320
	乾基(Nm ³ /h)	4,020
排放 氣體 組成	CO ₂ (%)	2.5
	O ₂ (%)	17.8
	CO(%)	0.0
污染物 濃度	粒狀染物(mg/Nm ³)	1,648
	SO ₂ (ppm)	456
	NO ₂ (ppm)	N.D.
	HC1(ppm)	245

5.2 廢氣處理流程設計

空氣污染防制成功與否的關鍵，在於是否選擇恰當的廢氣處理流程，當然解決同樣一個廢氣污染源，可能有數種不同處理流程皆可達成目的，此時就必須考慮污染源廢氣特性、初設成本、操作成本、工廠水電是否充足及設備裝設空間大小等諸方面之因素，今B廠2號爐廢氣溫度高達500°C，其所含之粒狀物具有可燃性、腐蝕性及黏性，又B廠本身具有廢水處理廠，且工廠可裝設空氣污染防制設備的空間有限，故詳加評估各方面因素，該污染源非常適合採用濕式洗滌法加以處理，故設計之廢氣處理流程如下：



5.3 設備單元功能計算

5.3.1 驟冷塔設計

驟冷塔係設計將高溫廢氣(500°C)冷卻至絕熱飽和溫度，設計時必須先將表6中各氣體成份如 CO_2 、 O_2 、 CO 、 SO_2 、 NO_2 、 HCl 及 H_2O 水蒸氣等，以理想氣體狀態方程式轉換成質量流率或莫耳流率，再以質能平衡的方法計算出所需蒸發的水量($16.2\text{L}/\text{min}$)及絕熱飽和溫度(67.3°C)，有關驟冷塔之設計理論及方法可參考化工單元設計驟冷塔相關書籍，茲將驟冷塔之入口及出口氣流狀態計算結果列於表7。

表7 驟冷塔入口及出口氣流狀態

氣流特性		入口	出口
水蒸汽	(kg/h)	273.36	1245.25
CO_2	(kg/h)	197.34	197.34
O_2	(kg/h)	1021.62	1021.62
N_2	(kg/h)	4003.00	4003.00
HCl	(kg/h)	1.60	1.60
SO_2	(kg/h)	0.52	0.52
粒狀物	(kg/h)	6.62	6.62
氣體溫度	($^{\circ}\text{C}$)	500	67.32
靜壓	(cmAq)	-2.50	-12.5
氣體流率	乾基	4020.00	4020.00
	濕基	4360.09	5569.25
	實際	12535.39	7,121.06
氣體密度		0.4386	0.9085

5.3.2 冷凝吸收塔設計

冷凝吸收塔是一種填充洗滌塔的特殊設計，可將已飽和之廢氣(67.32°C)再冷卻至 55°C 並同時吸收 HCl 及 SO_2 酸性氣體，設計要求 HCl 去除99.9%， SO_2 去除率90%。另外冷凝吸收塔兼具第一階段去除粒狀污染物的作用。粒狀物去除

效率和水蒸汽凝結之莫耳體積成正比。茲以驟冷塔出口之氣流狀態當做冷凝吸收塔的入口氣流狀態，可以計算出冷凝吸收塔之塔徑(0.81m)及填充高度(1.0m)注意此填充高度與選用的填充物種類型式尺寸有關，有關冷凝吸收塔之設計理論及方法亦可參考化工單元設計填充塔相關書籍，茲將冷凝吸收塔之入口及出口氣流狀態計算結果列於表8。

表8 冷凝吸收塔入口及出口氣流狀態

氣流特性		入口	出口
水蒸氣 (kg/h)		1245.25	585.25
CO_2 (kg/h)		197.34	197.34
O_2 (kg/h)		1021.62	1021.62
N_2 (kg/h)		4003.00	4003.00
HCl (kg/h)		1.60	0.00
SO_2 (kg/h)		0.52	0.05
粒狀物 (kg/h)		6.62	4.98
氣體溫度 ($^{\circ}\text{C}$)		67.32	55
靜壓 (cmAq)		-12.5	-13.64
氣體流率 (m^3/h)	乾基	4020.00	4018.83
	濕基	5569.25	4746.95
	實際	7121.06	5856.67
氣體密度 (kg/ m^3)		0.9085	0.9916

5.3.3 文氏洗滌塔設計

1. 決定操作壓損及液氣比

由圖6 實驗所得之操作壓損與去除效率之關係可以查出粒狀物總去除效率95%時，所需求之最低操作壓降為 935mmAq ，今考慮安全係數及煙囪排氣不透光率問題，設計之操作壓損採用 1400mmAq ，最佳液氣比為 $2\text{L}/\text{m}^3$ 。

2. 決定文氏管尺寸

由操作壓損 $1,400\text{mmAq}$ 及設計之液氣比 $2\text{L}/\text{m}^3$ 查圖4 實驗所得之壓損、液氣比與喉部速度之關係可以得知喉部速度為 106m/sec ，此方法所查得之速度係對一密度為 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 之氣體而言，因冷凝吸收塔出口氣體狀態相當於文

氏洗滌塔入口狀態，故由表 8 得知文氏洗滌塔入口之實際氣體密度為 0.9916 kg/m^3 ，實際喉部速度應校正為 $106 \times 1.2 / 0.9916 = 117 \text{ m/sec}$ ，其實際之氣體流率為 $5856.67 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，因此喉部橫截面面積為 $5856.67 / (3600 \times 117) = 0.014 \text{ m}^2$ 或 140 cm^2 。所以可選擇 $10\text{cm} \times 14\text{cm}$ 矩形喉管或直徑 13.4cm 之圓形喉管便足夠。喉管之長度取 50cm ，其收縮角與擴張角度分別取 60° 及 15° ，則其收縮段與擴張段之長度，依其特定角度連接入口及出口導管而定。

茲將文氏洗滌塔入口及出口氣體狀態計算結果列於表 9。

表9 文氏洗滌塔入口及出口氣流狀態

氣體成份	入口	出口
水蒸氣 (kg/h)	585.25	591.58
CO ₂ (kg/h)	197.34	197.34
O ₂ (kg/h)	1021.62	1021.62
N ₂ (kg/h)	4003.00	4003.00
HCl (kg/h)	0.00	0.00
SO ₂ (kg/h)	0.05	0.05
粒狀物 (kg/h)	4.98	0.34
氣體溫度 (°C)	55	54.35
靜壓 (cmAq)	-13.64	-153.34
氣體流率 (m ³ /h)	乾基	4018.83
	濕基	4746.95
	實際	5856.67
氣體密度 (kg/m ³)	0.9916	0.8551

5.3.4 氣液分離器設計

文氏洗滌塔之後必須緊接著一個氣液分離器去除排氣中所有的水滴，由表 9 可知文氏洗滌塔出口氣體流率為 $6798.79 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，其氣體密度為 0.855 kg/m^3 ，

氣液分離器必須依此氣流狀態來設計，今可設計一個旋風分離器來當做此廢氣處理系統的氣液分離器，此旋風分離器去除液滴之設計原理與用在除塵方面的旋風集塵機設計原理相同，故有關旋風分離器之設計理論及方法可參考化工單元設計旋風集塵機相關書籍，或以簡單的旋風分離器經驗公式（如下列3式）直接求得：

- 旋風分離器本體直徑可由下述公式計算：

$$D = 55 \frac{Q_G}{U_G}$$

式中，D：旋風分離器本體直徑，mm

Q_G ：實際氣體流率， m^3/h

U_G ：氣體速度， m/s

- 進氣口面積可由下述公式計算：

$$A = \frac{278Q_G}{U_G}$$

式中，A=入口面積， mm^2

- 入口橫截面尺寸可遵循下列式子計算：

進口長度： $0.44D$

進口寬度： $0.21D$

旋風分離器圓柱本體長度大約為 $1.75D$ 至 $2.0D$

對一入口流速 20m/sec 之旋風分離器而言，其直徑由公式求出旋風分離器直徑 $D = 55(6798.79/20)^{0.5} = 1014\text{mm}$ 入口截面為 $446\text{mmL} \times 213\text{mmW}$ 。

5.3.5 選擇及設計周邊設備

最後一個設計步驟為定出周邊設備之規格，如泵浦、風車及控制儀器等。另外亦需要仔細考量設備材質、結構強度及防腐蝕等問題。

5.4 主要設備規格

應用模廠試驗之結果所設計之文氏洗滌塔系統，其主要設備規格整理如表10所示。

表10 主要設備規格

設 備 單 元	設 備 規 格
驟冷塔	1.處理風量12,535Am ³ /hr @ 500°C 2.蒸發水量16.2 L/min 3.冷卻溫度67.3°C
冷凝吸收塔	1.處理風量7,121Am ³ /hr @ 67.3°C 2.HCl去除效率99.9% 3.SO ₂ 去除效率90% 4.塔徑0.81m 5.填充高度1.0m
文氏洗滌塔	1.處理風量5,878Am ³ /h @ 55 °C 2.操作壓損1,400mmAq 3.液氣比2 L/m ³ 4.喉管直徑13.4m 5.喉管長度50cm 6.收縮段之收縮角度60° 7.擴張段之擴張角度15°
氣液分離器 (旋風分離器)	1.處理風量6,799Am ³ /hr @ 55 °C 2.旋風分離器直徑1014mm 3.入口截面積446mmL×213mmL

六、結論

每一個空氣污染問題均有其獨特的性質，因此環境工程師必須深入了解污染源特性如廢氣溫度、壓力、污染物組成等諸多因素，以便設計具有處理效率之設備，然而設計一個成功的空氣污染防治系統，不僅於理論上的計算，有時得依據設備製造商的經驗，使用者的操作經驗及模廠試驗所得的數據，尤其是當污染源廢氣的基本特性資料欠缺時，一般理論基礎很難有效地運用在設計程

序上，又此一廢氣特性亦無任何類似之處理成功實例時，則有必要利用縮小尺寸之模廠設備於污染源現場進行測試，再根據模廠試驗結果進行實廠放大的設計是比較可靠的方法。本文詳細介紹了整個文氏洗滌塔系統單元設備設計理念及針對銅鑄造業廢氣進行兩組模廠試驗所得到的最佳設計參數等工程實務經驗，提供銅鑄造業及環境工程相關業者參考運用，期能對國內產業界及從事環保工程實務人員能有所助益。

參考文獻

1. 經濟部工業局工業污染防治技術服務團，文氏洗條塔設計與操作實務講習會講義，83年5月。
2. 司洪濤等，文氏洗滌塔設計與操作實務，工業污染防治季刊第47期，p. 71～91，82年7月。
3. 司洪濤，文氏洗滌塔之設計，經濟部工業局八十三年度環保技術人才培訓班講義，p5.1～5.46，83年3月7～18日。
4. 司洪濤、翁瑞舟，有害事業廢棄物焚化爐排氣濕式洗滌控制技術，工業污染防治季刊第51期，83年7月。
5. 司洪濤、翁瑞舟，醫療性廢棄物焚化爐排氣濕式洗滌控制技術，1993年工業污染防治工程實務技術研討會論文集，p493～512，82年10月。
6. 經濟部工業局工業污染防治技術服務團，廢氣處理系統模型試驗設備建立及推廣專案綜合報告，編號IPC-82F-015，82年6月。
7. 經濟部工業局工業污染防治技術服務團，工業廢氣模廠處理設備應用與推廣專案綜合報告，編號IPC-83F-017，83年6月。
8. 經濟部工業局工業污染防治技術服務團，非鐵金屬鑄造業空氣污染防治輔導專案—銅鋅綜合報告，編號IPC-83F-003。
9. Donald Baker, Cooling Tower Performance, Chemical Publishing Co., Inc. 1984.
- 10Ralph F. Strigle, Random Packings and Packed Towers, Design and Applications, Gulf Publishing Company 1987.
- 11Nicholas P. Cheremisinoff, Paul N. Cheremisinoff, Cooling Towers Selection Design and Practice, Ann Arbor Science Pub-

- lishers, 1983.
- 12H.B.rauer, Y.B.G. Varma, Air Pollution Control Equipment, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1981.
- 13Benitez, J., Process Engineering and Design for Air Pollution Control, PTR Prentice Hall, 1993.
- 14U.S.EPA, Handbook:Control Technologies for Hazardous Air Pollutants, EPA 625/6-91-014, June 1991.
- 15S.C.Yung et. al, Mobile Bed Flux Force/Condensation Scrubber, EPA-600/7-79-071, 1979.
- 16Anthony J. Buonicore, Wayne T. Davis, Air Pollution Exngineering Manual, ISBN 0-442-00843-0, Van Nostrand Reinhold, 1992.
- 17Kenneth C. Schiffner, Howard E. Hesketh, Wet Scrubber, Lewis Publishers, Inc. 1986.