

木業鍋爐廢氣特性及處理技術

吳俊耀* 黃順和* 余騰耀**

一、前 言

台灣地區林產工業分佈廣、家數多、勞力密集、數十年來對台灣地區經濟發展的貢獻，佔有其重要地位，目前國內木材加工廠約有 4,000家，從業人員約70,000人，由於木材加工製造程序中，容易產生空氣、噪音及水污染，而造成附近環境的衝擊。因此，木業工廠的運作，一方面需維持與附近居民間的調和關係，另一方面則需因應逐年嚴格的公害管制標準，而成爲木業工廠經營管理上的新課題。

有鑑於國內之木業工廠目前所遭遇之諸多環保問題中，以燃燒廢木料之鍋爐排放黑煙最爲人所垢病，亦是業界最主要之困擾。因此，本文謹彙整工業污染防治技術服務團於去年度專案輔導木業工廠所得經驗，介紹國內木業鍋爐廢氣排放特性、闡述合理的燃燒管理、廢氣處理原則，並列舉一設計範例，以期能提供業界在選擇處理設備及工程公司在設計上之參考。

二、廢氣特性

木業工廠之熱氣來源，主要爲蒸氣鍋爐提供。需要使用熱氣之製程如乾燥、熱壓及烘乾均以蒸氣來產生熱能。因爲木業工廠於製程時產生大量木屑及木塊，所以蒸氣鍋爐均以廢木料爲燃料，即可處理產生之廢料且同時提供能量供乾燥程序使用。鍋爐燃燒之廢木料主要來源爲切割程序所產生之鋸屑、砂光程序所產生之微細木粉、裁邊程序產生之廢木塊及原木切割程序產生之廢木塊、木片。較細小之鋸屑及砂粉大多採用風車經風管送至鍋爐燃燒，其他廢料如木塊及木片則以人工投送燃燒。少數工廠亦設置木塊破碎機將木塊切碎後以輸送帶自動進料。

合板廠及製材乾燥廠所需要之蒸氣鍋爐操作壓力約爲 $4\sim 7\text{kg}/\text{cm}^2$ 。製材乾燥廠因乾

*工業污染防治技術服務團工程師

**工業污染防治技術服務團技術組組長

操作業時間較長，需連續操作，所需燃料也增加。目前，家具廠使用蒸氣的程序逐漸減少，只供烘乾塗膜，而一些工廠已經改用自然乾燥方式作業。木業蒸汽鍋爐排放廢氣特性因使用廢木塊之種類、鍋爐型式及操作條件等因素而異。目前國內合板製造大都使用柳安木為其原料，廢氣排放特性則說明如下：

2.1 氣狀污染物

木業鍋爐排放之氣狀污染物主要為碳氫化合物、氮氧化物及硫氧化物，碳氫化合物之生成乃由於木材燃燒過程揮發及無法完全燃燒所引起，其排放量因鍋爐型式、爐內溫度及停留時間而異；氮氧化物則由於高溫燃燒所產生，然一般木業鍋爐燃燒溫度較重油鍋爐低，約為 $980\sim 1,200^{\circ}\text{C}$ ，因此產生之氮氧化物排放濃度較低。同時因木材含硫率低，燃燒時硫氧化物濃度亦可合乎目前國內現行排放標準。

依國內18家木業工廠鍋爐廢氣檢測資料顯示，硫氧化物(SO_x)濃度範圍在 $0\sim 54\text{ppm}$ 之間，而氮氧化物(NO_x)濃度範圍則在 $10\sim 258\text{ppm}$ 之間。

2.2 粒狀污染物

木業鍋爐排放廢氣中粒狀污染物可分為砂土粉塵、飛灰及含碳顆粒。砂土粉塵乃由於塵土挾雜於樹皮或廢木料所引起，廢氣中若含有砂土粉塵可能造成鍋爐之磨損。至於廢木料燃燒產生飛灰或未完全燃燒之含碳顆粒則有別其他燃燒系統產生之灰燼，其主要特徵為比重低，約 $0.15\sim 0.5$ ，且其排放濃度以燃料添加初期最高，其後逐漸下降至下次加料，因此粒狀污染物濃度之最高及最低值相差甚遠，而造成廢氣處理上之困擾。

由於檢測時很難對粒狀污染物濃度之最高最低值分別予以測試，且粒狀污染物濃度隨鍋爐操作狀況影響甚大，依國內18家工廠鍋爐廢氣檢測結果分析，粒狀污染物未加以控制時其平均濃度約在 $101\sim 1,194\text{mg}/\text{Nm}^3$ （未經含氧量校正值）之間；然經6%含氧量校正後，其粒狀污染物濃度值則介於 $241\sim 3,582\text{mg}/\text{Nm}^3$ 之間。

此外，由於粒狀污染物所引起排氣中不透光率問題，根據美國奧立岡(Oregon)地區研究報告亦曾統計廢木料燃燒系統排放粒狀污染物濃度與不透光率間關係如圖1所示。

2.3 廢氣量

木業鍋爐廢氣排放量隨各工廠使用鍋爐容量大小而異，目前國內常用木業之鍋爐為煙管式鍋爐，在規模較大的合板廠，亦有使用水管式鍋爐。由於蒸汽鍋爐的容量大小，可用傳熱面積表示，傳熱面積愈大者，所需供給燃料較多，產生之廢氣量亦較大，圖2為國內木業鍋爐廢氣排放量與鍋爐傳熱面積之關係圖，由於國內木業工廠對於鍋爐操作管理並非十分嚴謹，因此圖2中所列廢氣量與鍋爐傳熱面積關係迴歸相關係數(R^2)僅 0.37 。

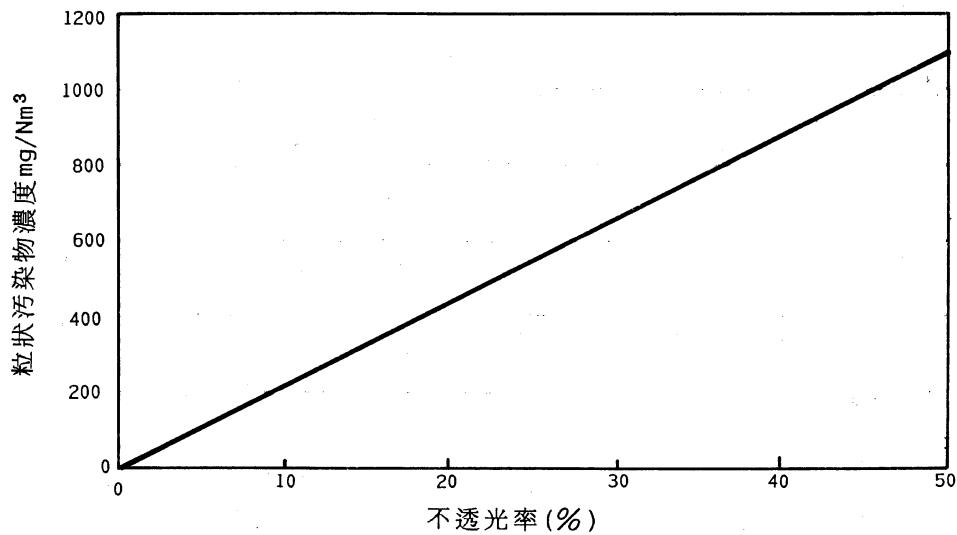


圖 1 鍋爐排放廢氣與不透光率之關係⁽¹⁾

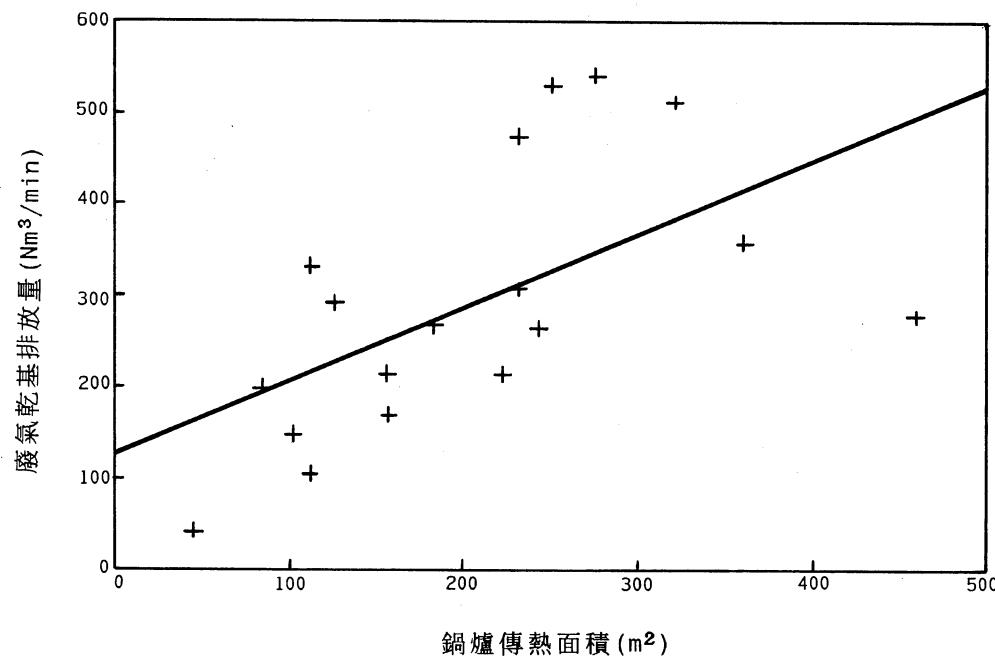


圖 2 鍋爐廢氣乾基排放量與傳熱面積關係圖

2.4 廢氣排放溫度

鍋爐廢氣排放溫度隨鍋爐操作條件、熱效率及蒸汽產生狀況而有很大的差異，一般而言，廢氣排放溫度愈高鍋爐效率愈低，台灣地區目前木業工廠鍋爐排氣溫度介於72~246°C之間。

2.5 廢氣含氧量

一般以木塊為燃料之燃燒系統合理之空氣比(m) 約為2~2.5，即廢氣含氧量在13.5~15%之間，經分析國內18家木業工廠鍋爐廢氣測試資料結果含氧量在10.3~16.7%之間，而以14~16%居多。

2.6 含水率

廢氣中含水率的多寡隨廢木塊乾燥程度而異，國內檢測資料發現廢氣含水率介於6~12%之間。

2.7 污染物排放係數

依國外調查資料，木業鍋爐各項污染物之單位污染量如表1。

表1 木材鍋爐各項污染物排放係數⁽²⁾

廢氣污染項目		污染量 (Kg/MT)
粒狀污染物		4.4
硫氧化物		0.075
氮氧化物 (50,000~400,000 1b蒸氣/小時)		1.4
一氧化碳		2~24
VOC	非甲烷性	0.7
	甲烷性	0.15

三、合理的燃燒管理

台灣地區木業工廠所使用之廢木料燃燒鍋爐主要為橫型煙管鍋爐及直式水管鍋爐。

200~250kg/m²-hr為準。

3.1.2 著火熱(著火時所需熱量)

燃燒室內空氣過量的話，爐內的熱能會被消耗於空氣的加熱上，致使爐內溫度升不上來，達不到著火所需熱量，於是著火時間拖延，造成燃燒不完全，而產生黑煙。通常木材鍋爐床溫度介於450~550°C之間，亦有高達850°C者以確保完全燃燒。

3.1.3 木材之含水率

木材含水率多的時候，著火熱則被用於水的加熱、蒸發，以致延後著火時間，尤其是加熱溫度降低時，情形更為突顯，同時燃燒效率也會降低，例如，在同一燃燒條件下，降低10%的木材含水率，可增加4%的鍋爐效率，並減少粒狀污染物的排放。圖3為木材著火時間與含水率之關係圖。

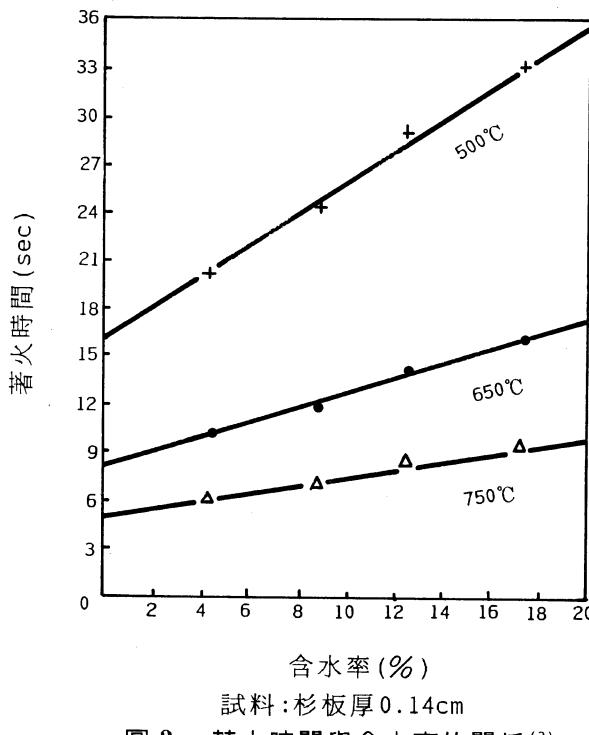


圖3 著火時間與含水率的關係⁽³⁾

此外，木材發熱值與含水率成反比，如圖4。假設全乾時高發熱值為4,500kcal/kg；含水率15%時為3,550kcal/kg；含水率50%時則只有2,600kcal/kg。當發熱值提高時，燃燒溫度也隨著變高，燃料開始著火；若燃燒效率良好，使得爐膛溫度升高，產生良性循環。

煙管型鍋爐產生蒸氣效率較好，內部配列橫向煙管，下設磚砌燃燒室，廢木料於燃燒室燃燒，熱氣從後方進入煙管而達到傳熱目的以產生蒸氣。煙管鍋爐依製程蒸氣需要量來設置，最大承受壓力約為 $7\sim 10\text{kg/cm}^2$ ，蒸氣容量約為 $0.3\sim 10\text{t/hr}$ ，鍋筒徑約 $1.0\sim 3.0$ 公尺，長度約為 $2\sim 5$ 公尺，煙管外徑約為 $65\sim 100\text{mm}$ ，傳熱面積約 $10\sim 250\text{ m}^2$ 。合板廠及製材廠因乾燥程序需要使用熱氣較多，故需設置較大之鍋爐，傳熱面積約 $150\sim 300\text{m}^2$ 。家具廠只需要少量的熱氣用於烘乾程序，因此只需設置小型鍋爐即可，傳熱面積約僅為 10m^2 。

由於一般業者對於各項燃燒條件認識不夠，以致鍋爐燃燒系統疏於管理，以下則就鍋爐各項燃燒控制因子及其操作維護方法分別加以說明：

3.1 鍋爐燃燒控制因子

3.1.1 燃燒室的計算

決定鍋爐燃燒室的大小，可由燃燒室的熱負荷及爐床燃燒率判斷之，兩項因子的計算如下：

1. 燃燒室熱負荷(Q_H)

$$Q_H = \frac{W \times H}{V \times h}$$

式中： H_e =低發熱量(kcal/kg)

W =木材焚燒量(kg)

h =燃燒時間(hr)

V =燃燒室總容積(m^3)

Q_H =每立方米淨燃燒室容積每小時燃燒產生熱量($\text{kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$)

一般廢木料之燃燒室燃燒熱負荷以 $10\sim 20 \times 10^4 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$ 為準。

2. 爐床燃燒率(G)

爐床每平方米每小時可以燃燒之處理量稱之為爐床燃燒率，其計算式如下：

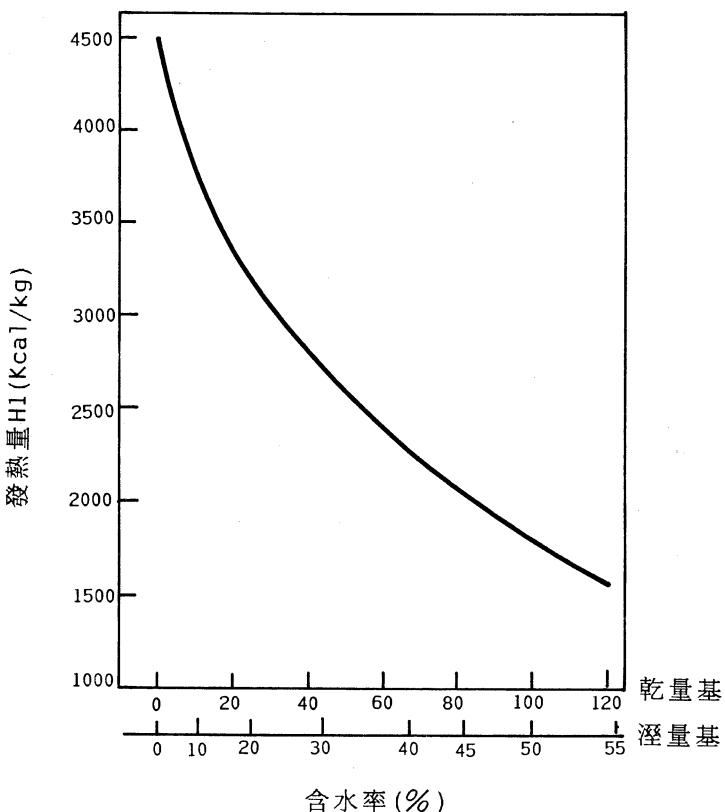
$$G = \frac{W}{h \times A}$$

式中： A =爐床面積(m^2)

W =操作時間內之燃燒量(kg)

h =燃燒時間(hr)

一般自然通風之燃燒室爐床燃燒率以 $100\sim 150\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 為準，而強制通風量者以

圖 4 含水率與低發熱值之關係⁽³⁾

木材低發熱值隨含水率變化之關係如下所示：

$$H_1 = \frac{H_{ho} - 600(9ho + u/100)}{1 + u/100}$$

式中： H_1 = 使用時低發熱值 (Kcal/kg)

H_{ho} = 全乾時的發熱值 (Kcal/kg)

ho = 全乾材中含氫量 (kg/kg)

u = 使用時含水率 (乾量基準) (%)

3.1.4 發熱值

木材的發熱值為鍋爐燃燒系統重要操作參數之一，茲將數種乾木材之成份及熱值分析整理於表 2。國內目前合板業大多數以柳安木為原料。

表2 典型乾木材之成分及熱值分析

木材種類	木材質量成分分析(%)						熱值(kcal/kg)		燃燒需氧量 (kg/1000 kcal)	無過量空氣之 CO ₂ 量(%)
	C	H	S	O ₂	N ₂	灰	高	低		
楠木	48.8	6.4	—	44.4	—	0.4	4,667	4,322	1.27	20.2
檜木	55.0	6.5	—	38.1	—	0.4	5,483	5,135	1.28	19.5
杉木	52.3	6.3	—	40.5	0.1	0.8	5,028	4,691	1.29	19.9
鐵杉	50.4	5.8	0.1	41.4	0.1	2.2	4,789	4,476	1.26	20.4
松木	52.6	7.0	—	40.1	—	1.3	5,339	4,460	1.27	19.2
樺木	49.8	6.5	—	43.4	—	0.3	4,805	4,455	1.28	20.0
山毛櫟	51.6	6.3	—	41.4	—	0.7	4,867	4,528	1.31	20.1
榆木	50.4	6.6	—	42.3	—	0.7	4,894	4,540	1.29	19.8
紅橡木	49.5	6.6	—	43.7	—	0.2	4,828	4,465	1.28	19.9
柳安木	48.8	6.4	—	39.4	4	1.4	4,207	3,852	—	—

3.1.5 理論空氣量，過剩空氣率（空氣比）及廢氣量

使燃料完成燃燒所需空氣的理論量，可根據燃料組成成份，依下式計算：

$$\text{理論空氣量}(A_0) = 8.89C + 26.67(H - \frac{O}{8}) + 3.33S \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

例如：

在絕對乾燥時，柳安木的組成成份大約是：碳(C) 48.8%；氫(H) 6.4%；氧(O) 39.4%；灰分 1.4%。由此計算可得，在絕對乾燥時間所需理論空氣量為 4.73 Nm³。

如果已知固體燃料的發熱值，可用下式計算大約理論空氣量：

$$A_0 = \frac{1.01H_L}{1000} + 0.5 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

式中：H_L：低發熱值

其次，為使爐膛內燃料達到完全燃燒，其所需的空氣量通常比理論空氣量高。

$$\text{過剩空氣率}(m) = \frac{A}{A_0}$$

式中：A = 理論空氣量

A = 實際供給空氣量

但是如果供給量太多時增加了燃燒空氣，卻阻礙其通風性，燃燒溫度也降低。故供

給的空氣量宜止於其最低需要量。固體燃料的過剩空氣率為2~2.5。

理論燃燒氣量概略值的計算，可依下式：

$$G_0 = \frac{0.89H}{1000} + 1.65 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

3.1.6 燃燒速度

燃燒速度是由可燃物與氧氣的接觸是否良好而定。因此，固體燃料愈細，與空氣的接觸面愈大，燃燒速度就愈大。

3.2 鍋爐之操作維護

3.2.1 鍋爐管理

良好的鍋爐操作管理主要決定於各項鍋爐操作條件是否能夠確實掌握，因此鍋爐操作人員必須藉由不斷地記錄鍋爐操作狀況，以建立鍋爐之最佳管理，例如藉由記錄鍋爐之進料量、空氣供應、氣體溫度與排煙情況等資料，適當的調整鍋爐操作，可使鍋爐排放粒狀污染物的濃度降低至最低，表3為一典型的鍋爐操作記錄表格，業者可模擬此方式來記錄工廠鍋爐資料。

表3 木材鍋爐操作記錄表

木材鍋爐										
日期：					操作員：					
公司：					每小時產量估計：					
地址：					每小時運至鍋爐廢材量：					
鍋爐大小：					廢材種類及型式：					
時間	爐柵上部 之通風量	強制 通風量	氣體 出口溫度	黑 密 及 顏 色	煙 度	粉塵 排風量	天氣	風向 風速	輔助 燃料	備註

3.2.2 起爐

鍋爐操作最困難的地方，可算是起爐的時候。工廠一開工，鍋爐就必須開始處理廠內的廢材，除非鍋爐已事先預熱並燃燒良好，否則的話，為了避免進入新廢料會導致爐火熄滅，不如加速燃燒。在第一批廢材進入鍋爐之前爐內必須有良好的爐火，鍋爐操作

時間最好在工廠開始生產之前一小時就起爐，其實在前一天可以先將乾的端材、刨光殘木片、切片等收集下來，此廢木料是良好的起火材料。起爐時先將爐柵上部風門關緊，將空氣量設得很低，如果空氣供應量控制適當，一旦廢料進入爐內，爐火會繼續保持。一般上，在爐柵上部通風口灌入過多空氣會過度冷卻進料，而冷空氣對乾燥廢木料並不利，適度的控制爐柵上部通風空氣量可以使爐火保持燃燒，故風門必須打開在其正常操作位置下。

3.2.3 進料

由於鍋爐內完全燃燒與否，受進料量的多寡與控制影響甚鉅，以下即分別就人工進料及機械進料方式予以討論。

1. 人工進料

燃燒是完全建立在燃料進入爐內以相同速率被消耗燃燒，操作者應調整鍋爐使得進入之氣體溫度在 $315\sim485^{\circ}\text{C}$ ，當過多燃料投入爐內，不僅容易使爐內溫度急遽下降，且因缺乏燃燒空氣量而造成燃燒不完全產生黑煙。鍋爐操作的好與壞直接影響黑煙的產生量，黑煙屬粒狀污染物，它可指示出爐內的殘材是否燃燒完全，所謂的「沒有黑煙」是表示鍋爐操作良好，鍋爐排出的污染物很少。

人工進料方式容易因間歇性的投入造成短時間鍋爐燃燒負荷突增的情況，台灣地區目前多數木業工廠即採用此種操作方式，因此須先瞭解鍋爐設計條件，增加進料次數，減少每次的進料量，以減少負荷突增。另外，在工廠休息時段，蒸汽需求量有所變化時，鍋爐操作員更應不斷注意爐內狀況，調整風門。

2. 機械式進料

以人工進料會週期性遮蔽燃燒室內火焰，而造成排氣粒狀污染物突增，為克服此問題，可採用機械式定速投送較小木屑進入燃燒室的進料系統，如此可維持定量燃燒。此系統經常包含一木料破碎系統使大塊木料破碎以利於輸送，而經收集之廢木屑先貯存於投入箱(surge bin)內，投入箱需有防止木屑架橋或阻塞之搖動器或振動器且為V型底以便於木屑輸送；在投入箱底部則設置木屑輸送設備使木屑定量送入鍋爐，木屑輸送設備可使用螺旋機或空氣輸送系統。

以機械式進料操作時，由於是連續式燃燒，產生蒸汽較為穩定，若生產線上蒸汽消耗量降低，產生之蒸汽無法完全消耗時，應於鍋爐設置蒸汽洩壓閥，以排放多餘蒸汽。

3.2.4 停爐

鍋爐操作中的另一個重要關鍵就是在工廠停工作業後，此時鍋爐已經快接近停爐，爐內僅剩一堆木料，約停產半小時後爐內差不多有 100%是固定碳，此時應該將爐柵上部的風門關上，只有等到爐內的碳完全燒盡，方可關上強制通風鼓風機。

部的風門關上，只有等到爐內的碳完全燒盡，方可關上強制通風鼓風機。

如果遇到工廠在生產期間，鍋爐無法正常操作，以致下班後尚留著大堆燃料，那麼鍋爐操作員必須留下來看守，直至此堆燃料燒盡為止。許多工廠的鍋爐都因內部堆積大量燃料在爐內兩側，而鍋爐內部構造及爐壁又未加設冷卻系統，以致爐內過熱而受到損壞。

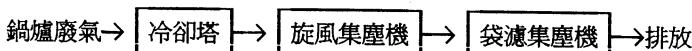
3.2.5 清潔與維修

一般來說，鍋爐一星期至少要完全清除一次灰渣。在清潔過程中必須連帶對鍋爐作一次徹底的檢查，並將所發現到的缺陷報告給工廠主管。爐壁的漏洞以及風門發生彎曲等外部的缺失比爐內部容易察覺。如果發現鍋爐需要修理的話，則必須馬上進行，儘快使鍋爐回復至正常的操作狀況。

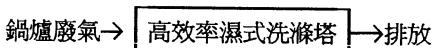
四、廢氣處理程序

針對於台灣地區木業鍋爐排放廢氣特性，處理設備之選擇主要在於去除廢氣中之粒狀污染物，在經濟性的考慮下，建議採用下列兩種處理流程處理之。

方案一：



方案二：



兩項處理方案以方案一初設費用較高，然在不考慮濾袋異常破損的情況下，以方案一操作費用較為低廉；由於高效率濕式洗滌塔種類繁多，然以文氏洗滌塔較為典型，以下即以文氏洗滌塔討論之。使用文氏洗滌塔處理鍋爐廢氣，由於鍋爐進料後與進料前粒狀物濃度相差很大，為達空氣污染物排放標準時，需以濃度高時為設計依據，而需較高之處理效率，因此文氏洗滌塔之設計需選用較高之壓力損失，而造成較高的操作費用，以下分別兩方案中各項處理單元說明之。

4.1 冷卻塔

鍋爐燃燒所排放之廢氣溫度偏高，一般均在 250°C 左右，亦有少數鍋爐所排放廢氣溫度介於 130~180°C 之間，在高溫下若選用袋濾集塵機處理廢氣，適宜之濾袋材質均很昂貴。因此，需將廢氣溫度先行冷卻，以採用諾米克斯(Nomex) 濾材為例，廢氣溫度應先行冷卻至 200°C 以下，較為安全。然冷卻溫度不宜降至 100°C 以下，避免水份凝結造

成濾袋阻塞。

冷卻方式之選擇、可選用稀釋法，熱交換法及蒸發冷卻法，選用稀釋法會增加廢氣中含水量及廢氣量造成處理上的困擾；熱交換法則常因粒狀污染物的阻塞，造成清理上的困難；使用蒸發冷卻法，雖可解決部份鍋爐廢氣中火星所造成的問題，然因蒸發冷卻增加廢氣中含水率，使用時應極為小心，避免高含水率影響後續處理單元。

4. 2 旋風集塵機或火星捕捉器

旋風集塵機在鍋爐廢氣處理系統中，不僅在於去除較大顆粒粒狀污染物降低後續處理設備負荷，同時旋風集塵機亦具有火星捕捉器的功能，避免火星進入濾袋內。因此旋風集塵機設計上的考慮有別木屑粉塵收集處理系統，應以較高效率之旋風集塵機為預處理設備，確保火星能完全被捕獲，必要時可選用較高效率之多管式旋風集塵機。

旋風集塵機設計時亦應考慮鍋爐廢氣中粒狀污染物比重較低，一般約為 0.15~0.5 之間，因此收集不易。

4. 3 袋濾集塵機

袋濾集塵機應用於處理鍋爐廢氣應注意濾袋所能承受之溫度及火星的問題，濾袋之清洗方式則以脈動式為主。若進入濾袋之廢氣溫度高於 200°C，濾袋材質可選用玻璃纖維或鐵弗龍(Teflon)，然較不經濟。若廢氣在 200°C 以下則可用諾米克斯(Nomex)濾袋。

袋濾集塵機之設計過濾速度不宜過高，一般均在 2m/min 以下，表 4 中列出國外三家以廢木塊為燃料鍋爐廢氣之袋濾集塵機設計條件。

表 4 廢木塊鍋爐廢氣袋濾集塵機之設計條件

項 目 廠 別	1	2	3
處理風量(CMM)	70	6,500	680
廢氣預處理設備	旋風集塵機	垂直衝擊管	重力沉降室、旋風集塵機、機械式火星捕捉器
濾袋入口溫度(°C)	132	260~288	190
入口粒狀污染物濃度(mg/Nm ³)	411	755	1,144
出口粒狀污染物濃度(mg/Nm ³)	52	9.1~20	—
濾袋材質	Nomex	Teflon	Nomex
濾袋清洗方式	脈動式	脈動式	脈動式
過濾速度(m/min)	0.9	1.4	1.5
壓力損失(mmAq)	100	150	100

4.4 文氏洗滌塔

文氏洗滌塔可處理鍋爐廢氣中之粒狀污染物並可避免火星的困擾，然由於目前國內木業鍋爐採人工進料方式，粒狀污染物濃度隨鍋爐進料有很大的變化，因此在文氏洗滌塔之設計應以高濃度為設計依據，所需壓力損失亦相對提高，而造成操作費用偏高，使用文氏洗滌塔以低風量較為經濟。表5列舉國外文氏洗滌塔處理燃燒廢木塊鍋爐廢氣之設計依據，惟此設計依據乃針對自動加料之蒸汽鍋爐，若考慮廢氣濃度的變動，則應先行確認廢氣濃度、溫度及粒徑分佈等條件再行設計。

表5 廢木塊鍋爐文式洗滌塔設計條件⁽⁵⁾

項 目	設 計 依 據
喉部	可調整之環形或矩形喉管，調整範圍為25~100%
材質	SS316L，若有氯鹽存在時（當洗滌液重覆使用）應選用SS317L或同品質合金，建議使用該規格前應先測試
壓力損失	一般約為150~500mmAq，視燃料特性而定（木塊愈乾燥，使用之壓損愈小）
出口料狀污染物濃度	約為46mg/Nm ³ ，以12%CO ₂ 為校正依據
廢氣進口溫度度度	無廢熱回收裝置為310~420°C；有廢熱回收裝置時160~260°C
出口溫度	濕木塊燃料70~75°C；乾木塊燃料65~70°C
液氣比(L/G)	循環使用時0.8~1.11/m ³ ，非循環使用0.5~0.8 1/m ³
氣液分離裝置置置	旋風集塵機或多翼式分離器
入口速度	15~18m/s
出口速度	接煙囪時9m/s，接風車時18~20m/s

五、廢氣處理例

為使業界在鍋爐廢氣處理設備的選擇上，能更明瞭處理設備之設計及材質之選擇考慮，本節乃針對應用袋濾集塵機處理木業鍋爐廢氣，說明處理系統及處理單元之設計程序。

假設某一製造合板的木業工廠，每日合板產量約25,000kg。工廠的原木來源為進口的柳安木，每日使用量約為50,000kg。該廠目前未設有任何廢氣污染防治設備，廠內的

廢木料經蒸氣鍋爐燃燒後，產生之廢氣直接由煙囪排放至大氣中。由於該廠進料採人工方式，進入的燃料量不一，造成鍋爐內因燃燒不完全而產生黑煙，尤其是在起火及加料時，黑煙之排放情形更為嚴重。今擬規劃廢氣處理設備去除鍋爐所排放黑煙，其規劃內容如下：

5.1 廢氣特性

工廠的廢氣來源主要為鍋爐燃燒廢木料時由於不完全燃燒所產生粒狀污染物，其廢氣特性如下：

1. 廢氣量 = $500\text{Nm}^3/\text{min} = 958\text{m}^3/\text{min}$, at 250°C ,

2. 廢氣溫度 = 250°C 。

3. 含水率 = 6 %。

4. 含氧量 = 14%。

5. 粒狀污染物

• 濃度： $1750 \sim 2,060\text{mg/Nm}^3$

• 鍋爐進料（高濃度）時與非進料（低濃度）時粒狀物之粒徑分佈如圖 5。

6. 鍋爐操作時間為 8 小時。

5.2 廢氣處理原則

目前國內環保標準，由煙囪排出的黑煙不透光率(opacity)不得超過20%，起火時之不透光率可到40%，但在一小時內不透光率超過20%之累積時間不得超過3分鐘。至於粒狀污染物方面，既存污染源在民國78年7月1日以後之排放濃度以下式計算：

$$C = 1,372.6Q^{-0.297}$$

而民國82年 7月 1日以後之粒狀污染物排放濃度以下式計算：

$$C = 1,860.3Q^{-0.386}$$

以上之 C 為排放濃度(mg/Nm^3)

Q 為排放量(Nm^3/min)

本個案煙囪總排氣量為 $500\text{Nm}^3/\text{min}$ ，則目前粒狀污染物排放濃度不得超過 $272\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，而 82 年 7 月以後之排放濃度不得超過 $227\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，以上之排放標準為 6 % 含氧量之校正值。

在比較評估各種集塵設備之適用性及優缺點之後，木業鍋爐排放之粒狀污染物如欲達到日愈嚴格的環保標準，可使用靜電集塵機、高效率洗滌塔及袋濾集塵機。但是靜電集塵機設備費用高，目前國內木業業者接受程度可能不大。至於高效率洗滌塔與袋濾集塵機兩者之比較，則以袋濾集塵機處理效率較高，且無產生廢水之困擾。因此，本例中以袋濾集塵機處理為主。

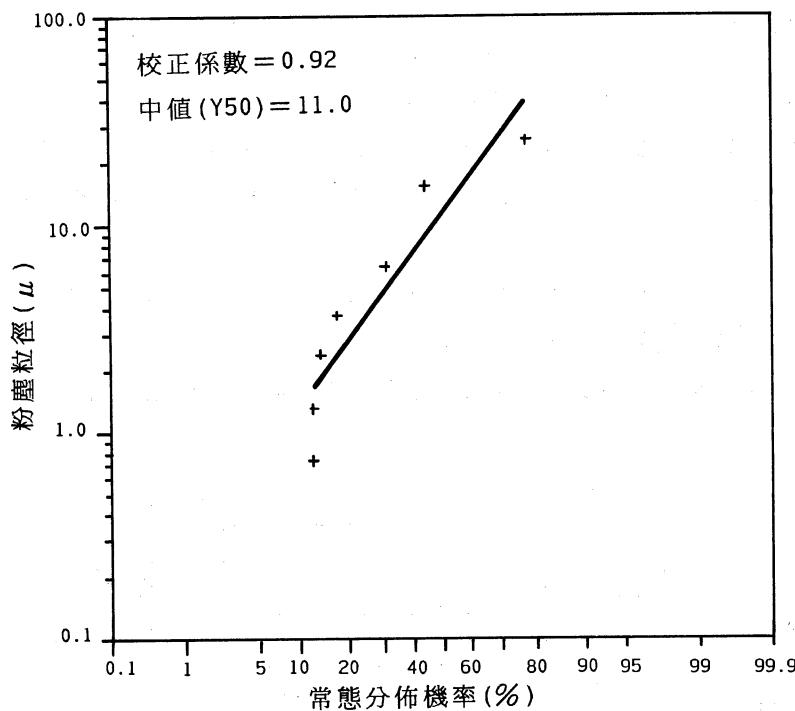


圖 5 A 鍋爐高濃度廢氣粉塵粒徑分佈

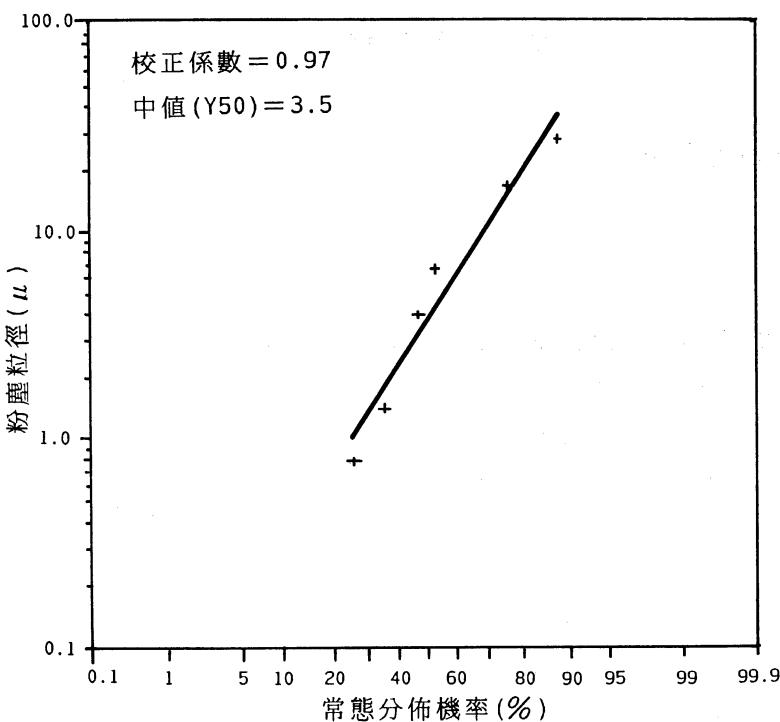


圖 5 B 鍋爐低濃度廢氣粉塵粒徑分佈

5.3 廢氣處理流程及說明

廢氣處理流程如圖 6。廢氣處理方法說明如下：

1. 冷卻塔：鍋爐排放廢氣溫度為 250°C，為避免濾袋因溫度過高受損，因此廢氣必須先行冷卻至濾袋所能承受溫度。本例之廢氣冷卻方式採蒸發冷卻法，且廢氣冷卻至 Nomex 濾袋所能承受溫度 180°C。
2. 旋風集塵機：主要目的在於去除廢氣所含的火星及大顆粒粉塵，以減低濾袋負荷及避免濾袋受損，旋風集塵機則採用高效率型式。
3. 袋濾集塵機：廢氣中剩餘之微細粉塵再通過濾袋收集，濾袋之清洗方式採用脈動式清洗。

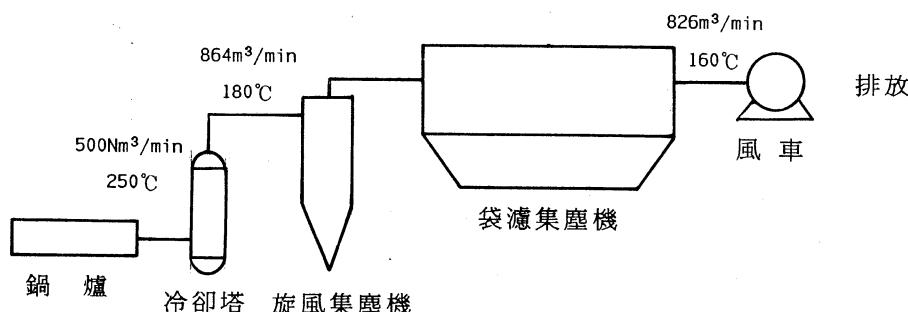


圖 6 廢氣處理流程

5.4 處理設備功能計算

5.4.1 冷卻塔

1. 設計依據

- 冷卻要求：廢氣經冷卻塔後，溫度由 250°C 冷卻至 180°C。
- 冷卻方式：採用蒸發冷卻方式。
- 冷卻塔之停留時間即水滴蒸發時間取 1.5sec。

2. 計算廢氣由 250°C 降至 180°C 所放出熱量

$$(1) \text{廢氣量, } Q_a = \frac{(1\text{atm})(958 \times 10^3)/\text{min}}{\text{atm-l}} \\ (0.082 \frac{\text{l}}{\text{g-mol-K}})(523\text{K}) \\ = 2.23 \times 10^4 \text{ g-mol/min}$$

(2) 熱廢氣所放出熱量，(Q)

- 假設廢氣組成為 20% O₂ 及 80% N₂。

• 氮與氧之定壓比熱如下：

$$Cp_{N_2} = 6.52 + 1.18 \times 10^{-3} T + 0.08 \times 10^5 T^{-2}$$

$$Cp_{O_2} = 7.23 + 1.01 \times 10^{-3} T + 0.045 \times 10^5 T^{-2}$$

Cp的單位為 cal/g-mol-K

$$\begin{aligned} \cdot QH &= 2.23 \times 10^6 \left[\frac{1}{5} \int_{523}^{453} CpO_2 dT + \frac{4}{5} \int_{523}^{453} CpN_2 dT \right] \\ &= 1.2 \times 10^7 \text{ cal/min} \end{aligned}$$

3. 決定冷卻塔尺寸

(1) 冷卻塔體積 (V)

$$V = 958 \text{ m}^3/\text{min} \times 1.5 \text{ sec} \times \frac{\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}}{\text{ }} = 23.9 \text{ m}^3$$

(2) 塔尺寸

$$\cdot \text{取塔高與塔直徑比, } \frac{H}{D} = 3$$

• 塔高 H=6.5m

• 塔直徑 D=2.2m

(3) 冷卻塔之熱損失

• 冷卻塔表面積, A = π × D × H = 44.22 m²

$$\cdot \text{冷卻塔內平均溫度} = \frac{1}{2} (250 + 180) = 215^\circ\text{C}$$

• 冷卻塔之總熱係數, U=11 kcal/m²-h-°C

• $UH_L = U \times A \times \Delta T$

$$= 11 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C} \times 44.22 \text{ m}^2 \times (215^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C})$$

$$= 1.48 \times 10^6 \text{ cal/min}$$

4. 決定冷卻塔噴水量 (AQW)

(1) 水蒸汽之定壓比熱

$$Cp_{H_2O} = 6.89 + 2.88 \times 10^{-3} T + 0.24 \times 10^5 T^{-2} (\text{kcal/g-mol-K})$$

(2) 假設水由 32°C 進入塔內，在 150°C 以水蒸汽由塔底排放。

$$Hw = 1,000g [(100^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C}) \times \text{cal/g-}{}^\circ\text{C}] + 539 \text{ cal/g}$$

$$+ \frac{1}{18} \int_{373}^{423} Cp_{H_2O} dT$$

$$= 6.27 \times 10^5 \text{ cal/kg}$$

(3) 所需冷卻的淨熱

$$Q_{HN} = Q_H - Q_{H1} = 1.1 \times 10^7 \text{ cal/min}$$

(4) 所需水量

$$Q_w = \frac{Q_{HN}}{H_w} = \frac{1.1 \times 10^7 \text{ cal/min}}{6.27 \times 10^5 \text{ cal/kg}} = 17.5 \text{ l/min}$$

5. 經蒸發冷卻後之廢氣量

$$Q_w = 2.23 \times 10^4 \text{ g-mol/min} \frac{17500 \text{ g/min}}{18 \text{ g-mol}}$$

$$= 23,272 \text{ g-mol/min}$$

$$= 23,272 \text{ g-mol/min} \times 0.082 \frac{\text{atm}, 1}{\text{g-mol-K}} \times (273^\circ\text{C} + 180^\circ\text{C}) \times \frac{1}{10^3 \text{ l}}$$

$$= 864.46 \text{ m}^3 / \text{min at } 180^\circ\text{C}$$

5.4.2 旋風集塵機

1. 設計依據

(1) 入口速度 = 20 m/s

(2) 採高效率型旋風集塵機 (參見圖 7)

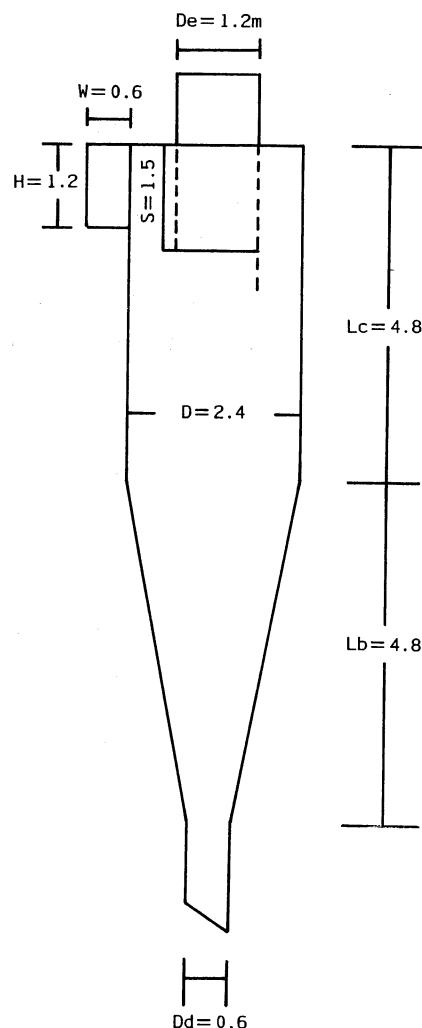


圖 7 旋風集塵機本機尺寸大小

2. 尺寸設計

(1) 旋風集塵機入口斷面積

$$A = \frac{864\text{m}^3/\text{min} \times 1\text{min}/60\text{sec}}{20\text{ m/sec}}$$

$$= 0.72\text{m}^2$$

(2) 旋風集塵機各部份尺寸

$$H \times W = 0.72\text{m}^2$$

$$H = 2W$$

$$W = 0.6\text{m}$$

$$H = 1.2\text{m}$$

$$D = 2H = 2.4\text{m}$$

$$De = 1/2D = 1.2\text{m}$$

$$S = 0.625D = 1.5\text{m}$$

$$Lb = 2D = 4.8\text{m}$$

$$Lc = 2D = 4.8\text{m}$$

$$Dd = 0.25D = 0.6\text{m}$$

5.4.3 袋濾集塵機

1. 設計依據

(1) 入口廢氣溫度 = 180°C (假設不考慮旋風集塵機之熱損失)

(2) 處理風量 = 864m³/min, at 180°C

(3) 濾袋脫塵方式採用脈動噴射式(pulse-jet type)

(4) 濾袋材質採用Nomex 濾袋

(5) 過濾速度 = 1.2m/min

2. 集塵機尺寸計算

(1) 所需過濾面積(A)

$$A = \frac{864\text{m}^3/\text{min}}{1.2\text{m}/\text{min}}$$

$$= 576\text{m}^2$$

(2) 所需濾袋數

- 本例假設使用之濾袋尺寸為128mm × 3,050mmL，每只濾袋之過濾面積為1.2m²。

- 所需之濾袋數(n)

$$n = \frac{576\text{m}^2}{1.2\text{m}^2} = 480\text{只}$$

取n=480(12×40)

• 以上濾袋數與濾袋尺寸可因製造廠商而有不同的安排與選擇。

(3)本例中袋濾集塵機所佔空間約為12m(長)×3m(寬)×8m(高)

5.4.4 集塵風車

1. 假設入口廢氣溫度 = 160°C

$$2. \text{排風量} = 23,272 \text{ g-mol/min} \times 0.082 \frac{\text{atm-1}}{\text{g-mol-k}} \times (273+160) \times \frac{1}{10^3} = 826 \text{ m}^3 / \text{min}$$

取排風量 = 830 m³ / min at 160°C

3. 假設風車全壓 : 350mmAq

4. 風車型式：採高效率之後曲葉片風車

5. 假設風車機械效率 $\eta = 0.65$

$$6. \text{風車馬力} = \frac{Q \times TP}{6120 \times \eta} \times \text{安全係數} = \frac{830 \times 350}{6120 \times 0.5} \times 1.2 \\ = 88\text{KW} \times 1.34 = 117\text{HP}$$

風車選用 125HP

六、參考資料

- (1) U.S. Environmental Protection Agency, Compilation of Air Pollutant Emission Factors (Vol II), 1985.
- (2) U.S. Environmental Protection Agency, Combustion of Wood Residue In Conical (Wigwam) Burners, Emission Controls And Alternatives, PEDCo-Environmental Specialists Inc., 1975.
- (3) 中小企業振興事業團，公害防止事業指導，製材及木製家具裝備品製造業，昭和54年
○
- (4) The Fabric Filter Manual Volume II , The McIlvaine Company, 1975.
- (5) Kenneth C. Schiffner & Howard E. Hesketh, Wet Scrubbers, 1986.
- (6) U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Conservation and Renewable Energy Office of Industrial Programs, Improved Combustion of Wood Waste In Industrial Boilers, Technical Information Center U.S. Department of Energy, 1982.
- (7) 謝錦松，黃正義，固體廢棄物處理，淑馨出版社，1988○
- (8) 陳陵援譯，木材的乾燥，徐氏基金會出版，1988○
- (9) 賴耿陽譯，實用鍋爐學，復漢出版社，1990○