

廢氣處理

垃圾焚化廠廢氣處理系統規劃設計與運轉 之探討

司洪濤* 鄭乙任* 李遠志*

摘要

近年來，垃圾問題普遍受到民眾的關切，又因台灣地區地狹人稠，垃圾掩埋場址一地難求，加上事業單位產生之事業廢棄物數量龐大，因此在進入垃圾掩埋場之前，必須先作好垃圾減量與安定化處理等工作，而垃圾焚化處理乃兼具前述兩項功能之處理技術，故逐漸為國內各界所接受。然垃圾焚化爐常因廢氣處理系統規劃設計上之缺失或操作維護上之經驗不足，而造成空氣污染防治設備受損，或未能發揮預期之污染物去除效率，而排放黑煙或產生臭味等二次公害問題，故本文敘述國內垃圾焚化廠廢氣處理設備之發展、管制標準、各種控制方式及運轉現況，提供各界參考與指正。

【關鍵字】

1. 垃圾焚化爐(waste incinerator)
2. 空氣污染控制(air pollution control)
3. 粒狀物(particulate)
4. 酸性氣體(acid gas)
5. 戴奧辛(dioxin)

*中國技術服務社工業污染防治中心工程師

一、前　　言

台灣地區各鄉鎮市垃圾產生量日益大增，為延長垃圾掩埋場的使用壽命，垃圾處理採用焚化法已被國內各界所接受，不僅環保主管機關於各期之「垃圾處理方案」中已規劃多座垃圾焚化廠，並訂定各階段應達到的垃圾焚化比率，國內各大環保廠商亦已積極參與移轉國外環保技術的行列，至於民眾排斥與反對興建垃圾焚化廠的聲音，自台北市內湖垃圾廠運轉成功後已逐漸緩和，故台灣地區將如歐美及日本一樣走向垃圾高焚化率的時代。目前國內垃圾焚化廠已陸續完成建廠，其中屬於公有垃圾焚化廠之建廠情形如表1。然而垃圾焚化廠可能產生的二次污染問題亦引起高度重視，不僅管制標準逐漸嚴格，管制項目亦有所增加，特別是垃圾焚化廠排放廢氣中之空氣污染物，除傳統的粒狀污染物(particulate)、硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)及氯化氫(HCl)外，「重金屬」及「PCDD/PCDF」之排放濃度及其影響，目前亦迭受各方矚目。茲依國內垃圾焚化廠廢氣處理管制法規與市場潛力、空氣污染物來源與特性、廢氣處理系統規劃設計、設計考量與運轉問題檢討，分別敘述如下。

二、廢氣處理管制法規與市場潛力

2.1 廢氣處理管制法規

焚化爐目前適用之空氣污染物排放標準為83.04.20修訂公告之「固定污染源空氣污染物排放標準」、81.11.30公告之「廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準」及86.08.04公告之「廢棄物焚化爐戴奧辛管制及排放標準」。此外，排放標準亦須合乎環境影響評估之要求，比較嚴格者為規劃焚化廠之排放標準。表2為國內外焚化廠廢氣污染物排放值，表3則為國內運轉中或建廠中垃圾焚化廠廢氣處理系統所訂定之性能效率標準。而於訂定廢氣處理系統性能效率標準時，尚需考量法規修訂嚴格之趨勢及設備性能老化之問題，採取較排放標準更為嚴格之性能效率標準，故須同時考量焚化之廢棄物組成，進而預估由燃燒室排放口之廢氣污染物組成與濃度，再判斷目前已商業化之空氣污染防治設備，對空氣污染物所能達到的去除效率，而妥訂焚化廠之廢氣處理系統之性能效率標準。

表1 公有垃圾焚化廠一覽表

編號	廠名	設廠容量	單爐處理容量	爐數	工程進度	廠址
1	內湖廠	900公噸／日	300公噸／日	3	完工運轉	台北市
2	木柵廠	1500公噸／日	375公噸／日	4	完工運轉	台北市
3	北投廠	1800公噸／日	450公噸／日	4	建造中	台北市
4	新店廠	900公噸／日	450公噸／日	2	完工運轉	台北縣
5	樹林廠	1350公噸／日	450公噸／日	3	完工運轉	台北縣
6	八里廠	1350公噸／日	450公噸／日	3	建造中	台北縣
7	台中廠	900公噸／日	300公噸／日	3	完工運轉	台中市
8	南寮廠	900公噸／日	450公噸／日	2	建造中	新竹市
9	溪州廠	900公噸／日	450公噸／日	2	建造中	彰化縣
10	嘉義廠	300公噸／日	150公噸／日	2	建造中	嘉義市
11	台南廠	900公噸／日	450公噸／日	2	建造中	臺南市
12	仁武廠	1,350公噸／日	450公噸／日	3	建造中	高雄縣
13	南區廠	1,800公噸／日	450公噸／日	4	建造中	高雄市
14	中區廠	900公噸／日	300公噸／日	3	建造中	高雄市
15	后里廠	900公噸／日	450公噸／日	2	建造中	台中縣
16	宜蘭廠	600公噸／日	300公噸／日	2	建造中	宜蘭縣
17	基隆廠	600公噸／日	300公噸／日	2	建造中	基隆市
18	崁頂廠	900公噸／日	450公噸／日	2	建造中	屏東縣
19	鹿草廠	900公噸／日	300公噸／日	3	招標中	嘉義縣
20	岡山廠	1,350公噸／日	450公噸／日	3	招標中	高雄縣
21	永康廠	900公噸／日	300公噸／日	3	招標中	臺南市

註：公有垃圾焚化廠設廠總容量合計約21,900公噸／日。

86年8月12日

表2 國內外焚化廠廢氣污染物排放值一覽表

項目	單位	台灣		美國		歐聯		義大利		荷蘭		德國		比利時		丹麥		日本		瑞士		法國		英國		瑞典		捷克			
		法規值	實廠設計值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值	法規值			
Particulate	mg/Nm ³ dry	81.11	85.11	1993.12	1994.8	1984	1993	1990	1994.8	1988	1991	1995	1992	1991	1989	1986	1986	1993	1993	1993	1993	1993	1993	1993	1993	1993	1993	1993			
SOx	ppm day	30	19	11	40.5	6	11	11	40	24	12	11	33	33	33	22	22	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33			
HCl	ppm dry	80	35	30	19	200	15	19	19	300	公式計算	12	19	116	116	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
HF	mg/Nm ³ dry	40	30	23	7	50	7	7	7	100	526	12	14	34	34	34	68	68	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20			
NOx	ppm dry	—	—	1.1	3	1.1	1.1	1.1	1.1	2	—	—	—	2	2.2	2.2	—	—	2.2	2.2	—	—	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2		
CO	ppm dry	180	120	118	107	200	37	108	107	200	306	61	70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	187	
Pb	mg/Nm ³ dry	2	0.5	0.16	0.6	2	—	44	44	100	61	—	44	132	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88		
Cd	mg/Nm ³ dry	0.3	0.1	0.016	0.06	0.1	0.06	0.11	0.06	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.5	
Hg	mg/Nm ³ dry	0.3	0.2	0.06	0.06	0.1	0.06	0.11	0.06	0.1	—	0.03	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08	
2,3,7,8-TCDD, TEQ	mg/Nm ³ dry	0.1	0.1	9.1	0.1	9.1	0.1	0.1	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
備註		實廠指仁武、溪州、后里等廠		—		—		自1994年起適用歐聯新法規標準		—		自1994年起適用歐聯新法規標準		實廠指Matthindo廠		—		—		自1994年起適用歐聯新法規標準		Hg(含Tl、Cd)；Pb(含Cu、Mn)		—		—		—		—	

註：1.排放值係以1大氣壓，0°C，含水量10%之乾基為基準狀態；惟載奧辛之排放值含氯量採11%。

2.指PCDD+PCDF Total Mass，相當於ng/Nm³ TEQ。

表3 國內運轉或興建中垃圾資源回收廠所訂定之廢氣排放標準

項目	86年6月						設廠容量 (公噸/日)	設廠容量 超過 240公噸/日者
	1.台北市 內湖廠	2.台北市 木柵廠	3.台北市 北投廠	4.高雄市 南區廠	5.高雄市 中區廠	6.台中市 台中廠		
Oxygen Basis	900 (3×300)	1500 (4×375)	1800 (4×450)	900 (3×300)	900 (3×300)	900 (2×150)	900 (2×450)	900 (3×450)
Particulate (mg/Nm ³)	70	50	20	20	20	30	20	50
Opacity(%)	20	20	10	10	10	10	10	20
HCl(ppm)	80	60	20	20	25	20	60	80
SOx(ppm)	300	50	25	25	35	25	50	150
NOx(ppm)	200	200	150	105	200	150	200	250
CO(ppm)	80	80	35	60	80	60	80	120
HF(mg/Nm ³)	5	5	0.7	—	0.7	1	0.7	5
Pb(mg/Nm ³)	—	2	0.55	0.6	0.6	0.75	0.6	1.5
Cd(mg/Nm ³)	—	0.1	0.06	0.06	0.075	0.06	0.1	0.75
Hg(mg/Nm ³)	—	0.1	0.06	0.06	0.5	0.06	0.1	0.75
As(mg/Nm ³)	—	0.5	0.4	—	0.4	0.5	0.4	0.5
Cr(mg/Nm ³)	—	0.5	0.4	—	0.4	1.5	0.4	0.5
Zn(mg/Nm ³)	—	3	1.1	—	1.1	—	1.1	1.5
2,3,7,8-TCDD (ng/Nm ³ ,TEQ)	—	—	0.10	—	0.10	—	—	—

註：1.「焚化爐標準」係指環保署空污處於81.11.30公佈實施之「廢棄物焚化爐或奧辛管制及排放標準」。

Oxygen Basis 11%。

2.ACI-Activated Carbon Injection。

3.SNCR採氨水或尿素溶液噴霧。

表3 國內運轉或興建中垃圾資源回收廠所訂定之廢氣排放標準（續）

86年6月									
廠名 項目	11.屏東崁頂 12.基隆市	13.高雄仁武 14.彰化溪洲 15.台中后里	16.宜蘭利澤 17.金門縣	18.台北縣 八里廠	19.新竹市 南寮廠	20.台南縣 永康廠	21.嘉義縣 鹿草廠	22.高雄縣 岡山廠	焚化爐 標準
設廠容量 (公噸/日)	900 (2×450)	1350(3×450) 900(2×450) 900(2×450)	600 (2×300)	120 (2×60)	1350 (3×450)	900 (2×450)	900 (3×300)	1350 (3×450)	設廠容量超過 240公噸/日者
空氣污染 防治設備	SNCR + 半乾式洗滌塔 + 袋滤集塵機 + ACI	新設 污染源 既 有 污染源 新設 污染源							
Oxygen Basis	10%	10%	10%	10%	6%	10%	6%	6%	10%
Particulate (mg/Nm ³)	22	30	20	20	10	10	20	20	C=1364.2Q ^{0.336}
Opacity(%)	10	10	10	—	—	10	—	—	20
HCl(ppm)	30	30	25	40	30.7	30.7	25	25	40
SOx(ppm)	50	35	30	60	35	35	30	30	150
NOx(ppm)	180	120	105	105	180	180	105	105	220
CO(ppm)	110	80	80	88	88	80	80	80	150
HF(mg/Nm ³)	2	—	—	2	2	—	—	—	—
Ph(mg/Nm ³)	0.6	0.5	0.5	1	0.3	0.3	0.5	0.5	3
Cd(mg/Nm ³)	0.1	0.1	0.3	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.3
Hg(mg/Nm ³)	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
As(mg/Nm ³)	—	—	—	0.1	0.1	—	—	—	—
Cr(mg/Nm ³)	—	—	—	0.2	0.2	—	—	—	—
Zn(mg/Nm ³)	—	—	—	0.7	0.7	—	—	—	—
2,3,7,8-TCDD (ng/Nm ³ ,TEQ)	—	0.10	0.10	0.45	—	—	0.10	0.10	1.0

註：1.「焚化爐標準」係指環保署空保處於81.11.30公佈實施之「廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準」，Oxygen Basis 10% O₂，86.8.6公佈實施之「廢棄物焚化爐氮氧化物管制及排放標準」。

2.ACt-Activated Carbon Injection。

3.SNCR采氨水或尿素溶液噴霧。

2.2 廢氣處理市場潛力

依據環保署研訂之「台灣地區垃圾資源回收(焚化)廠興建工程計畫」，民國90年台灣地區之總垃圾生產量為30,000公噸／日，綜合前述公有建廠總容量約21,900公噸／日以及採BOT/BOO方式之民有建廠總容量約6,300公噸／日，合計已達28,200公噸／日，約可焚化處理台灣地區總垃圾生產量百分之九十。

若以每座1,000公噸／日焚化廠之廢氣處理設備總費用新台幣3.5億元來計算，則初步估計未來台灣地區焚化廠廢氣處理設備市場潛力(不含運轉、維修及藥品消耗等費用)則高達新台幣100億元。

三、空氣污染物來源與特性

由於垃圾成份複雜，燃燒後產生之空氣污染物與一般燃料不同，垃圾於焚化爐中以850~1050°C高溫焚化，焚化爐產生之高溫廢氣經過鍋爐熱交換系統回收廢熱冷卻後，此時廢氣溫度降至約220~260°C，其廢氣主要成份為N₂、H₂O、CO₂及O₂等氣體，此外廢氣中亦含有粒狀污染物、酸性氣體(硫氧化物、氮氧化物、氯化氫)、重金屬及微量有機污染物等空氣污染物，茲逐項說明如下：

3.1 粒狀污染物

粒狀污染物主要為飛灰，其化學成份為SiO₂、Al₂O₃、CaO及少量重金屬，其粒狀物粒徑分佈範圍甚廣；而粒狀物濃度則與廢棄物中之灰分含量、焚化爐爐體之設計及空氣供給率等有關。當廢氣流經鍋爐時，因鍋爐內部設有改變氣體流向之水管壁及產生蒸汽之水管群，使較大粒徑之粒狀物經與其碰撞及阻擋之作用而沉落，或附著於管壁上，再由吹灰設備吹除並收集於集灰斗內。一般而言，鍋爐約可去除廢氣中10~20%之粒狀污染物，其餘則需由下游之空氣污染防治設備處理。

3.2 酸性氣體

酸性氣體包括硫氧化物(SO₂及SO₃合稱SOx)、氮氧化物(NO及NO₂合稱NOx)、氯化氫(HCl)等，茲分述如下：

3.2.1 硫氧化物

廢棄物及輔助燃料中之硫成分在燃燒後形成硫氧化物，主要是以 SO_2 之形態存在於廢氣中，僅少量再由 SO_2 轉換成 SO_3 。

3.2.2 氮氧化物

氮氧化物(NO_x)之形成主要與焚化爐內焚化溫度之控制及廢棄物中含氮之化學成分有關，故燃燒產生之 NO_x 可分成兩大類。一為因空氣中氮氣(N_2)因氧化而產生之熱氮氧化物(Thermal- NO_x)，通常 Thermal- NO_x 需至 1200°C 以上高溫始發生；另一為燃料中氮成分因氧化而產生之燃料氮氧化物(Fuel- NO_x)。

垃圾焚化爐由於爐內之高溫區尚不足以達到大量形成 Thermal- NO_x 之溫度，尤其是採用流體化床型式之垃圾焚化爐，故大部份 NO_x 之排放係由廢棄物所含之氮成分所引起（即 Fuel- NO_x ）。

3.2.3 氯化氫

氯化氫主要來自廢棄物中含氯之聚合物如 PVC 塑膠桶，塑膠瓶及塑膠袋等；部份則來自無機氯鹽類，如廚餘之鹽份。

3.3 重金屬

垃圾及廢棄物焚化過程中，為有效焚化有機物質，需要相當高之溫度。然而溫度昇高之同時，亦會增加垃圾廢棄物中之部分重金屬以氣體形態或附著於飛灰而隨廢氣排出。一般而言，垃圾廢棄物焚化廠排放廢氣中所含重金屬量，與垃圾廢棄物組成（如鉛多存在於印刷顏料中，鎘為塑膠產品普通採用之安定劑，汞則常見於電池及螢光燈管中）、重金屬存在形式、焚化爐之操作狀況及空氣污染防制設施均有密切關係。表4為部份重金屬及其化合物之揮發溫度，其中與現行廢氣排放標準有關之 Pb、Cd 及 Hg 三種重金屬，其揮發溫度均在焚化溫度以下。

表4 重金屬之揮發溫度

名稱	揮發溫度($^\circ\text{C}$)	存在型態
汞 (Hg)	14	Hg
砷 (As)	32	As_2O_3
鎘 (Cd)	214	Cd
鉛 (Pb)	627	Pb
鉻 (Cr)	1,613	$\text{CrO}_2/\text{CrO}_3$
鎳 (Ni)	1,210	Ni(OH)_2

Source : Clyde R. Dempsey and E. Timothy Oppelt, "Incineration of Hazardous Waste : A Critical Review Update", AIR & WASTE , Vol. 43 , January 1993 , pp.25-73.

3.4 微量有機與無機污染物

3.4.1 戴歐辛及呋喃

戴歐辛(Dioxin)及呋喃(Furan)分別為命名為 Polychlorinated Dibenzo-P-Dioxins(簡稱PCDDs)與 Polychlorinated Dibenzo-P-Furan(簡稱PCDFs)等210種同源有機化合物之統稱。

垃圾廢棄物中，一些含氯苯或氯酚等之有機化學劑（如塑膠、殺蟲劑、除草劑、清潔劑及木材防腐劑等）於焚化過程中，因燃燒溫度太低、氧氣不足、混合不充份或停留時間太短，而導致不完全燃燒，成為爐內產生PCDDs及PCDFs之主要原因。此外，若干未經完全燃燒破壞之前驅物質（如氯苯及氯酚等）隨廢氣離開燃燒室後，在充份氧量、具催化性物質（如 $CuCl_2$ ）具活性接觸面（如飛灰）及特定之溫度範圍（如 $250^{\circ}C \sim 400^{\circ}C$ ），會發生低溫再合成現象(de novo synthesis)。

行政院環保署已於86.8.6公佈焚化爐戴奧辛之排放標準，依該標準恐無法僅藉高溫分解的方法即得符合排放標準要求，而應在良好燃燒實務(good combustion practice,GCP)及空氣污染防治策略上謀求因應之道。

3.4.2 PAH & CO

除戴歐辛及呋喃之外，由於廢棄物具有組成不均勻之特性，因此其焚化後所排放之廢氣內尚含有一群多苯環芳香族碳氫化合物 (polycyclic aromatic hydrocarbons，簡稱為PAH)之致癌性有機污染物。由於PAH之排放量與燃燒效率有關，且其族群大多監測不易，故通常以廢氣中之一氧化碳(CO)及總碳氫化合物(THC)濃度作為指標，以達到限制有機污染物排放的目的。而一氧化碳為廢棄物燃燒不完全之產物，由於焚化爐技術之改進，燃燒溫度、空氣量及廢氣與空氣混合程度均可良好控制，一般而言，正常運作之焚化爐於燃燒室出口之CO濃度已相當低。

四、廢氣處理系統規劃設計

4.1 粒狀污染物處理設備

目前國內垃圾焚化爐所選用之粒狀污染物控制設備，主要有靜電集塵機(electro static precipitator，簡稱ESP)及袋濾集塵機(bagfilter)二種，其他濕式除塵的洗滌塔(wet scrubber)如文氏洗滌塔(Venturi scrubber)或濕式靜電集塵機(wet-ESP)，因需廢水處理的問題，比較少被採用。

4.1.1 袋濾集塵機

袋濾集塵機係使廢氣通過濾袋，令粒狀污染物附著於過濾層上，定時再以振動、逆洗氣流或脈動沖洗等方式，清除附著於濾袋上之粒狀污染物。其集塵效果與廢氣流量、溫度、含塵量、濾布材質及其表面處理有關，粒狀污染物去除效率一般可達99%以上。袋濾集塵機之優點為：

- 1.集塵效率高，可保持一定水準，較不易因進氣條件變化而影響其集塵效率。
- 2.當使用適當材質或進行表面處理後，可以承受含酸鹼性之廢氣。
- 3.對 $1\mu\text{m}$ 以下之微細塵粒之去除效果佳。

缺點為：

- 1.為抵抗廢氣中所含之酸鹼物質，需小心選用材質。
- 2.耐熱性差，應謹慎選用濾布材質。
- 3.耐濕性差，處理親水性較強之粉塵應提高廢氣溫度，以避免結露，易形成阻塞。
- 4.風壓損失較大，故較耗電源。
- 5.濾袋壽命有一定期限（2~3年），需有備品隨時更換。

4.1.2 靜電集塵機

靜電集塵機乃利用正負電極間之高壓電場，在負電電極尖端放電，產生電暈（corona）現象，讓通過高壓電場之廢氣氣體分子電離化，而促使廢氣中之塵粒帶有負電荷，再由靜電集塵機之正極板吸著並中和粉塵電性，經過一段時間後，經捶擊收集電極極板，使附著於極板上之粒狀物塵粒掉落於集塵漏斗內去除之。靜電集塵機之集塵效率與廢氣流量、粉塵粒徑分佈、凝聚性、比電阻、電極板距、電壓、電流等因素有關，一般可達95%以上。其優點為：

- 1.對粒徑大於 $1\mu\text{m}$ 以上之粒狀污染物可達到高集塵效率。
- 2.可以在高溫狀態下操作。
- 3.可以處理大量之氣體。
- 4.耐酸鹼性及耐濕性較佳。
- 5.操作及維護成本低。

缺點為：

- 1.集塵效果受進氣條件變化影響較大。
- 2.過高或過低比電阻之粉塵甚難收集。

3. 粒徑介於 $0.1\text{ }\mu\text{m} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 之粒狀污染物，因荷電困難，去除較難。
4. 需要技術層次較高之人員作維護保養。
5. 影響效率之因素多，故不易排除故障。
6. 進口廢氣溫度須較高，以避免酸性腐蝕之現象。
7. 操作之溫度區域適合PCDD/PCDF之再合成。

4.2 酸性氣體處理設備

垃圾廢棄物經焚化後，廢氣中的酸性氣體一般可藉由乾式、半乾式及溼式等三種洗滌方式加以去除，茲分別說明如下：

4.2.1 乾式洗滌法

乾式洗滌法亦常被稱為乾式噴注法(dry injection)，其係將消石灰粉(Ca(OH)_2)直接藉壓縮空氣噴入煙管或煙管上某段反應器(reactor)內，使鹼性消石灰粉與酸性廢氣充分接觸而達到中和去除的目的，一般在應用乾式洗滌法時，其前通常需要先加一個冷卻降溫塔(quencher)，藉噴入冷水先將廢氣降至 150°C 以增進酸性氣體的去除效率，惟受限於固氣的接觸時間，乾式洗滌法單獨的去除效率並不高(僅 $30\% \sim 50\%$)，而需藉由後續的袋濾集塵機濾袋表面的濾餅進行二次反應方能提高酸性氣體之去除效率。整個系統最大的優點為設備簡單、維修容易、造價便宜，且消石灰粉輸送管線不易結垢阻塞，但缺點為藥劑的消耗量大，整體的去除效率較其他兩種方法為低，產生的反應物及未反應物量亦較多，增加最終處置之負荷。

4.2.2 半乾式洗滌法

半乾式洗滌法與乾式洗滌法最大的不同在於噴入之鹼性藥劑為泥漿狀(slurry)，而非乾粉，故需要有一組調藥設備，採用的鹼性藥劑一般均為石灰系物質，如顆粒狀之生石灰(pebbleLime)或粉狀消石灰(Ca(OH)_2 powder)，由於噴入之泥漿乳劑本身含降溫作用，故其前不需如乾式法加裝冷卻降溫塔；泥漿乳劑噴入後與廢氣接觸進行中和反應而去除酸性氣體，當單獨使用時對酸性氣體去除效率約在 $80\sim 90\%$ 左右，若其後再接袋濾集塵機以提供未反應藥劑二次反應的機會，整個系統對酸性氣體的去除效率可提高至 98% 以上。本法最大的特性為結合了乾式法與溼式法的優點，既較乾式法之去除效率高，亦免除了溼式法過多廢水的困擾，惟本系統較易發生管路阻塞問題，必須定期清洗，尤其在間歇運轉操作時，每次停爐後均須立即以清水循環管路進行清管。

4.2.3 溼式洗滌法

溼式洗滌塔通常接於粒狀污染物去除設備(如靜電集塵機或袋濾集塵機)之

後，一般先噴入足量的水使廢氣降到飽合溫度（視廢氣中水分含量而定，一般約在70°C左右），再使飽合的廢氣與噴入的鹼性藥劑在塔內進行中和反應而去除酸性氣體，可用的鹼性藥劑有NaOH溶液或Ca(OH)₂溶液，雖然苛性鈉較消石灰為貴，但其去除效率較佳、用量較少、且不會因pH值調節不當而產生管線結垢等問題，故一般多採用NaOH溶液作為鹼性中和劑，整個洗滌塔之中和劑噴入系統係採循環的方式設計，當循環液的pH值或鹽度超過一定標準時即需要排洩(blowdown)，再補充新鮮的NaOH溶液以維持一定的酸性氣體去除效率。溼式洗滌塔的最大優點為酸性氣體的去除效率高(99%以上)，並附帶有去除重金屬物質的潛力（如後接濕式靜電集塵機），其缺點則為造價較高，用電量及用水量亦較高，且排洩的廢水須加以處理。

4.3 提高重金屬及PCDD/PCDF去除效率之設備

除了前述傳統之酸性氣體及粒狀污染物之外，如何提高重金屬及PCDD/PCDF之去除效果，亦應是規劃設計空氣污染防治設備的重點。茲就重金屬物質及PCDD/PCDF之去除方式分述如下：

4.3.1 去除重金屬物質

- 1.儘量降低廢氣溫度，促使已揮發之重金屬凝結為粒狀污染物或附著於submicron的粒狀物，再由高效率之集塵設備（如濕式靜電集塵機）收集之，即可提高重金屬的去除效率。
- 2.在乾式系統中，噴入吸附物質，如活性碳(PAC)或焦炭粉(coke)，吸附廢氣中無法有效凝結之重金屬，吸附物質再由後續之除塵設備收集去除。
- 3.在乾式系統中，噴入化學藥劑（如Na₂S）與重金屬形成硫化物顆粒（如HgS），再由後續之除塵設備收集去除。
- 4.在溼式系統中，將廢氣溫度降至飽合露點，再加入催化劑（如CuCl₂）將重金屬轉換為可溶解之物質（如HgCl₂）以利被水吸收，再加入螯合劑確保吸收效果，被水吸收之重金屬將隨排洩水泵至廢水處理廠進行物化處理。

4.3.2 去除PCDD/PCDF

- 1.在乾式系統中，藉飛灰、消石灰顆粒進行吸附，惟當效果不佳時應加入多孔質活性碳粉，強化PCDD／PCDF吸附效果，吸附物質再由後續之除塵設備收集去除。
- 2.在溼式系統中，部份歐洲空氣污染專業廠商目前正致力開發PCDD/PCDF之去除藥劑，但尚未商業化，亦未有應用實績。
- 3.針對PCDD/PCDF之去除，德國BASF亦成功開發出去除戴奧辛(dioxine)的氧化觸媒，其戴奧辛觸媒亦可以裝置在脫硝(SCR)反應器內，以達到同時去除NOx與

PCDD／PCDF 兩類污染物，又可節省設置所佔的空間。

4.4 廢氣處理流程綜合評估

綜合前述分析及國外焚化廠廢氣處理流程之應用現況與趨勢，並考量廢水零排放原則及日趨嚴格之酸性氣體與重金屬排放標準，國內焚化廠廢氣處理之基本流程多數為半乾式洗滌塔與袋濾集塵機之組合。有關廢氣處理流程之綜合比較如表 5 所示。

此基本處理流程已普遍應用於歐美及日本各國，技術已成熟，且被美國環保署 (USEPA) 指定為最佳已證明技術 (best demonstrated technology, BDT)，對空氣污染之防制性能極佳，與其它處理流程比較，特別是對 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下之細微粒狀污染物，其收集效果最佳。至於重金屬及微量有機物化合物之去除，該基本流程已可達一定之去除效果，但再輔以活性碳粉噴入系統則對重金屬與微量有機物的去除效果更佳；另外由於濾袋表面上之濾餅可產生二次反應，故對酸性氣體之去除效果亦相當優良。此外，因採半乾式洗滌法，故不產生洗滌廢水，同時避免了處理洗滌廢水之困擾。

典型的半乾式廢氣處理流程詳如圖 1 所示，廢氣氮氧化物於鍋爐內與還原藥劑 (尿素) 反應，並經鍋爐冷卻後，溫度降至 $220^\circ\text{C} \sim 260^\circ\text{C}$ ，進入半乾式洗滌塔與噴射成霧狀之 Ca(OH)_2 泥漿反應，以去除部份酸性氣體，此外，為增加重金屬及微量有機物之去除效果，於袋濾式集塵器前噴入粉狀活性碳，廢氣溫度亦宜控制在 $140^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 之間，部份未反應之酸性氣體亦可透過袋濾集塵機濾布上之層餅產生二次反應，增加去除效率。經過袋濾集塵機後之廢氣溫度約 $130^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$ ，正常情況下已不需再加熱即可直接排入大氣。

五、設計考量與運轉問題檢討

5.1 脫硝設備設置之必要性

焚化垃圾所產生的氮氧化物 (NOx)，90% 以上是由燃料內含有之氮元素所產生 (Fuel NOx)，一般濃度範圍在 $150 \sim 200\text{ ppm}$ @ $10\% \text{ O}_2$ ，目前台灣 NOx 排放標準為 350 ppm @ $6\% \text{ O}_2$ (或 257 ppm @ $10\% \text{ O}_2$)，焚化爐空氣污染物排放標準為 180 ppm @ $10\% \text{ O}_2$ ，故若欲達到前述較嚴格的標準，NOx 最好控制在可能發生濃度範圍的低

表5 焚化爐典型廢氣處理流程綜合比較

廢氣處理流程	去除效果						PCDD/F	特徵
	Dust	SOx	HCl	NOx	重金属			
溼式系統	1.ESP+PT	3+	3.5+	4+	+	+	-	(1)應用於廢氣水份含量較高的情況。 (2)在廢氣飽和溫度以下(含操作)。
	2.PT+WESP	3+	3.5+	4+	+	2+	+	(3)產生之廢水必須適當處理。
	3.VS+PT+WESP	4+	3.5+	4+	+	3+	+	(4)處理之後之排放廢氣若未經再加熱有白煙現象。
	4.ESP+PT+HE+SCR	3+	3.5+	4+	4+	+	4+	(5)乾式靜電集塵機之操作溫度若不當，會有PCDD/F再合成現象。
	5.SNCR+VS+PT+WESP	4+	3.5+	4+	2+	3+	+	(6)腐蝕情況較嚴重，設備須採用較高等級之耐蝕材質。
	6.VS+PT+WESP+HE+SCR	4+	3.5+	4+	4+	3+	4+	
乾式系統	1.DSI+BF	4+	2+	3+	X	2+	2+	(1)沒有廢水問題，但飛灰量較大，若含有重金屬應適當處理後再處置。
	2.SD+BF	4+	3+	3.5+	X	2.5+	2.5+	(2)廢氣溫度小心控制，溫度太高將降低去除效率，溫度太低則會有酸性氣體凝結形成結垢現象。
	3.DSI+APC+BF	4+	2+	3+	X	3.5+	3.5+	(3)可燃性或爆炸性顆粒應事先去除。
	4.SD+APC+BF	4+	3+	3.5+	X	4+	4+	
	5.SNCR+SD+APC+BF	4+	3+	3.5+	2+	4+	4+	
	6.SD+APC+BF+HE+SCR	4+	3+	3.5+	4+	4+	5+	
乾溼混合系統	1.SD+ESP+PT	3+	3.5+	4+	+	+	+	(1)綜合幹式與溼式系統的優點。 (2)可達廢水零排放要求。
	2.SD+BF+PT	4+	4+	4.5+	+	3+	+	
	3.SD+APC+BF+PT	4+	4+	4.5+	+	4+	4+	
	4.SNCR+SD+APC+BF+PT	4+	4+	4.5+	2+	4+	4+	
	5.SD+APC+BF+PT+HE+SCR	4+	4+	4.5+	4+	4+	5+	
	6.ESP+PT+HE+APC+BF+HE+SCR	5+	4+	4.5+	4+	4+	5+	
	7.SD+ESP+PT+HE+APC+BF+HE+SCR	5+	4+	4.5+	4+	4+	5+	

註：1.VS：文氏洗滌塔，PT：鹼性吸收塔，ESP：乾式靜電集塵機，WESP：溼式靜電集塵機，DSI：鹼劑乾粉噴入，SD：噴霧乾燥塔或半乾式洗滌塔，BF：袋濾集塵機，SNCR：無鹽媒脫硝，SCR：觸媒脫硝，HE：熱交換器(加熱用)，APC：活性碳粉噴入
2.+，2+，3+，4+，5+表示去除效果之相對指標，X表示不具去除效果，—表示負面反效果

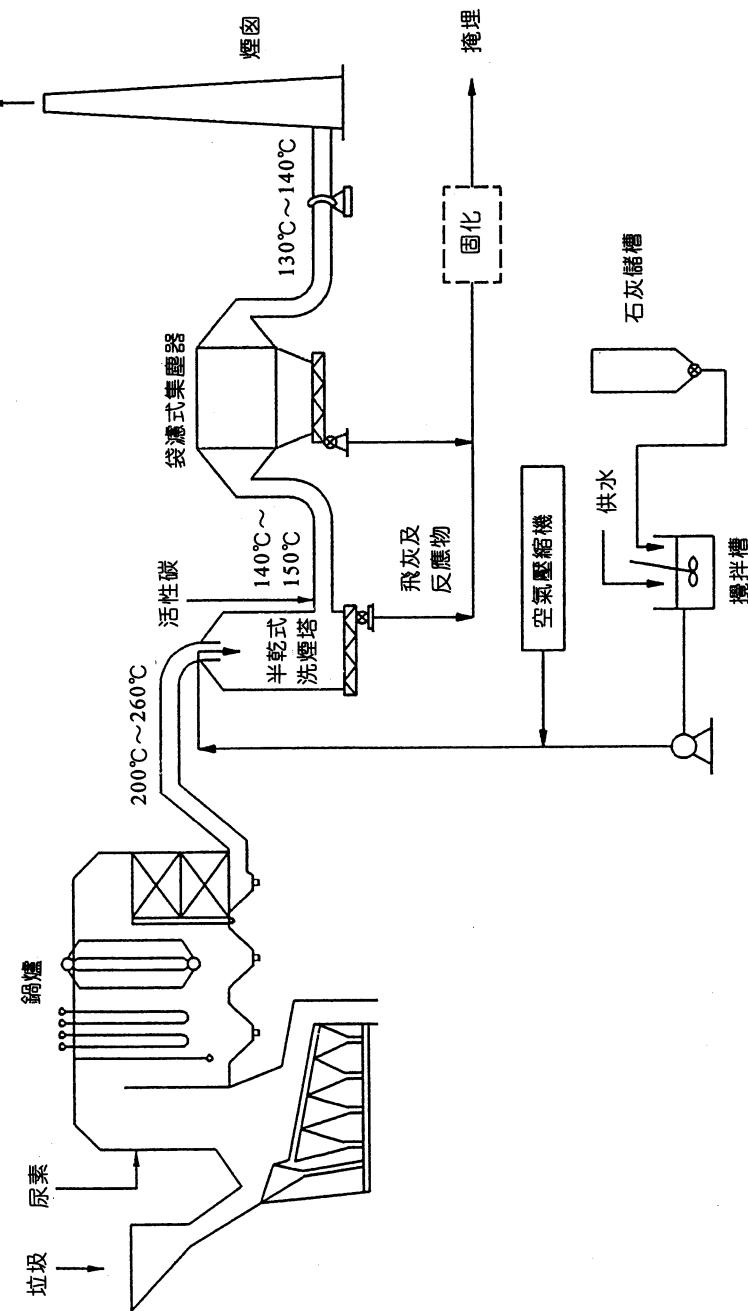


圖1 典型半乾式廢氣處理流程

限(即150ppm@10% O₂)，而控制的方法可直接藉自動燃燒控制(automatic combustion control, ACC)，並設定在低氧燃燒的範圍來達成，不需增設其他額外的脫硝設備。但若經煙囪擴散模式分析，氮氧化物之最大著地濃度加上背景濃度，有超過環境空氣品質標準之虞時(尤其在台灣地區由汽機車廢氣已造成背景濃度過高)，則可採用選擇性觸媒還原法脫硝(SCR)或選擇性非觸媒脫硝(SNCR)設備來降低NOx濃度，有關SNCR及SCR之比較詳如表6所示。SNCR之脫硝去除效率一般在50%以下，SCR 則可達70%以上，但由於SCR設備的造價約為SNCR之5~10倍(按SNCR採用何種還原劑：NH₃或(NH₂)₂CO而不同)，且需要龐大空間容納觸媒反應器(catalytic reactor)，操作維修費亦因較大的壓降及觸媒須定期更換而提高，故除非須嚴格要求NOx排放濃度在70ppm以下，並不適合採用SCR來脫硝。此外，站在同一生活圈空氣污染物總量管制的立場，不如將投資SCR設備所需的額外資金應用在背景濃度的改善方面更為恰當。

5.2 半乾式洗滌塔消石灰藥品之用量及品質選擇

為配合半乾式洗滌塔內鹼性藥劑無法完全反應的特性，將未反應藥劑回收循環再利用，具有節省藥劑用量的正面功效，但亦應考量如下的負面影響。由於從洗滌塔後續集塵設備所收集下來的反應產物，其內尚含有飛灰及未反應物，如何將其分離或於混合輸送時避免雜質造成管線及調藥設備之結垢與阻塞等，都應予以考量，以免徒增維修頻率與困難；此外，飛灰中吸附有重金屬，若不斷循環使用將使重金屬濃度累積而增高，易造成環保問題。最後，具有循環回收系統實績廠設計、安裝及測試經驗的合格廠商並不多，故為保障整個系統的可信賴度，通常不要求採用循環回收系統。

其次鑑於承包商須針對消石灰之純度、化學成份鹽類含量訂定規格，得於設計階段列入考量，以避免未來運轉時造成管線及調藥設備之結垢與阻塞。國內焚化廠初期大致採用國外知名空污設備製造商之經驗及高純度消石灰作為設計基準，致使消石灰藥品須由國外進口，以其量大運輸不便且價格較國產消石灰高出數倍等缺失，後期焚化廠設計時尤應加以克服，儘量採用國產消石灰藥品。

表6 氮氧化物NOx去除技術效能與經濟綜合評估

項目	技術	選擇性非觸媒還原法 (SNCR)	選擇性觸媒還原法 (SCR)
一、處理設施	1.去除效率	25%~35%	60%~75%
	2.處理前效率	150ppm(處理前)	150ppm(處理前)
	3.處理後濃度	105ppm(處理後)	50ppm(處理後)
二、經濟分析 (新台幣)	1.設備成本	700~1000萬元	3000~5000萬元
	2.操作成本	130~220萬元 (1)電力 (2)藥品 • Urea • NH ₃ • 觸媒 • 其他費用	140~190萬元/年 10~20萬元/年 100~120萬元/年 (or 50~80萬元/年) — 20~80萬元/年
			70~80萬元/年 — 30~50萬元/年 20~30萬元/年 20~30萬元/年
	1.儲槽容積	30m ³ (15m ³ ×2)	30m ³
	2.設備空間	6m(L)×7m(W)×7.5m(H)	11m(L)×16m(W)×6.5m(H)
三、設備空間需求	3.其他	—	觸媒反應塔另需佔據廢氣管道空間
	1.優點	(1)設備費用低 (2)裝置簡易 (3)設備空間小	(1)NOx去除效率高
	2.缺點：	(1)NOx去除效率較低	(1)設備費用高 (2)設備佔用空間大且安裝維護不易 (3)反應塔易因煙塵阻塞降低處理效率
五、綜合評估		雖然選擇性觸媒還原法(SCR)處理效率較高，惟設備成本過高，且觸媒反應塔之裝設於既存廢氣管道，其安裝及維護不易，經評估考量結果建議宜採高溫無觸媒之選擇性非觸媒還原法(SNCR)較符合經濟效益及實際需求。	

[註]：上表係以焚化廠單爐產生廢氣量80,000Nm³/HR，處理前廢氣濃度150ppm以上(based on 10% O₂, dry air 0°C, 1 atm)，焚化爐內廢氣平均溫度850~1050°C，鍋爐出口至誘引抽風機之間廢氣溫度200~400°C為評估基準。

5.3 戴奧辛排放之控制

5.3.1 戴奧辛排放之影響因素

國內垃圾焚化廠甚為缺乏有關廢氣中戴奧辛排放之檢測資料，據悉環保署除著手建立戴奧辛標準實驗室外，並由環境檢驗所陸續進行戴奧辛之檢測，惟相關資料並未公布；唯一乙份調查報告見於84年5月環保署進行之「有害空氣污染物砷、鉻、鎘及戴奧辛管制規範及排放標準研討計畫」，曾針對國內某座垃圾焚化廠廢氣戴奧辛進行檢測，其濃度約在80~150ng/Nm³之間，咸認此數值有偏高現象。檢討其原因係燃燒溫度過低且呈現不穩定之現象所致，並歸納其背景因素如下：

1. 垃圾缺乏混合或翻攪

國內一般垃圾組成不均勻以致熱值變化甚大，且因垃圾清運時間不同，垃圾乾、濕之間差異明顯，若進料前垃圾未充分混合或翻攪，將造成燃燒溫度之不穩定變化。

2. 燃燒狀況異常時，缺乏即時之因應措施

雖然目前焚化廠之燃燒系統均為完全自動控制，惟其燃燒控制參數之設定，皆以垃圾熱值穩定為基礎，無法即隨燃燒狀況反饋修正或啟動輔助燃燒系統，以維持足夠之燃燒溫度，因此在缺乏操作人員之手動因應下，將造成燃燒溫度偏低。

3. 運轉管理不良，燃燒狀況缺乏監督

對於整廠運轉缺失缺乏追蹤及考核之管理架構，致使燃燒溫度偏低等操作不佳現象無法改善。

5.3.2 戴奧辛減量對策

針對戴奧辛形成之原因分析與國內既有垃圾焚化廠之運轉現況，建議採取可行之改善措施，以將戴奧辛之排放減少到最低程度，並於新規劃之垃圾焚化廠審慎修正相關規範之設計。茲綜合說明如下：

1. 在設計方面

依照「廢棄物焚化爐戴奧辛管制及排放標準」之規定，並深入收集國外垃圾焚化廠減低戴奧辛排放對策及相關設計規範，作為強化國內新規劃焚化廠之參考，其要點包括：

- (1) 良好燃燒條件之設計改進。
- (2) 防止於燃燒後段再合成之設計方法。

- (3)燃燒控制系統之功能檢討。
- (4)最佳廢氣處理設備及戴奧辛去除設備之研選。

2.在運轉方面

規劃設計階段，探討各項運轉實務方案，以供新規劃焚化廠研擬或既有焚化廠修正運轉管理方式之參考。

- (1)加強燃燒運轉及廢氣監控系統之追蹤及管理

除探討改善運轉實務之管理架構外，另對於燃燒運轉資料如燃燒溫度、進料速度及助燃空氣量等資料，建議比照廢氣連續自動監測設施連線作業規範草案之作法，除建立廠內管理追蹤系統外，並即時傳輸於中央環保署核考。

- (2)加強垃圾混合或翻攬操作之訓練與管理

嚴格考核垃圾吊車操作人員之操作狀況，並施以定期訓練、檢定測驗，並彈性調整操作人員之工作負荷。

- (3)加強垃圾產源之管制，並推動垃圾分類工作

對於潛在含有戴奧辛、前驅物之垃圾應訂立分類管制方式，禁止進入焚化廠，以避免戴奧辛之生成。

六、結論

就垃圾焚化爐空氣污染防治技術而言，我們期望垃圾焚化爐能將垃圾廢棄物完全氧化燃燒，所排放之廢氣都是充分氧化燃燒之產物，而沒有不完全燃燒的產物，由於這些不完全燃燒的產物，甚難利用傳統的空氣污染防治設備加以去除，另外在垃圾焚化爐操作運轉上若經常排放黑煙，首先必須檢討的是，垃圾焚化爐的燃燒效率是否達到設計規範的要求，若燃燒效率偏低，則需考慮如何提昇焚化爐的燃燒效率，而不是僅從空氣污染控制方面著手。焚化爐之空氣污染防治設備設置的主要目標，乃是在去除在焚化過程中無法避免產生的空氣污染物，例如：粒狀物、氯化氫(HCl)、硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)等，至於其它不完全燃燒所產生之有害空氣污染物，如PAH及PCDD/PCDF等污染物，除了良好的焚化爐廢氣處理系統規劃設計之外，並應從良好的運轉管理上事先加以預防，以避免垃圾焚化爐操作過程中突發性之不穩定燃燒時，產生高濃度黑煙及有害空氣污染物，而引起鄰近居民的抗議或遭受環保單位稽查取締。

參考文獻

1. 林榮琳，廢棄物焚化爐廢氣處理系統之規劃設計與運轉，空氣污染防治控制設計實務與操作講習會，編號：87-TF01，87年1月。
2. 司洪濤，乾式煙道噴注法處理燃燒廢氣中酸性氣體之研究，國立中大學環工所碩士論文，85年6月。
3. 方榮堂，噴霧乾燥反應器中氫氧化鈣泥漿液滴同時去除焚化廢氣中二氧化硫，氮氧化物及氯化氫之實驗分析，國立成功大學碩士論文，民國81年6月。
4. 蔡聖欽，應用濾布塵餅吸附劑去除燃燒廢氣中酸性氣體之研究，國立中山大學環境工程研究碩士論文，民國83年6月。
5. 陳坤緯，陳瑞燕，國內濕式煙道氣除硫系統吸收劑特性評估，煤碳燃燒與污染控制技術論文集，台北，民國79年。
6. 蕭仁銘，黃志峰，賴重光，乾式注入除酸技術探討，第十一屆空氣污染控制技術研討會論文專輯，民國83年11月27~28日。
7. 簡聰文，煙道氣濕式除硫氮整合系統操作性能之研究，國立成功大學環境工程研究所碩士論文，民國83年6月。
8. 經濟部工業局，事業廢棄物化爐設計與選用手冊，編號ISBN 957-00-7522-8，民國85年6月。
9. 司洪濤，濕式文氏洗滌系統之設計實務與操作維護，空氣污染防治控制設備設計實務與操作講習會，編號87-TF01，87年1月。
10. 莊錦烽，濕式靜電集應機之設計實務與操作維護，空氣污染防治設備設計實務與操作講習會，編號87-TF01，87年1月。
11. 黃自立，選擇性觸媒還原法之氮氧化物控制實務，氮氧化物控制技術講習會，編號87-TT03，87年1月。
12. 羅成信，選擇性非觸媒還原法之氮氧化物控制實務，氮氧化物控制技術講習會，編號87-TT03，87年1月。
13. 司洪濤，國外氮氧化物控制技術實例介紹，氮氧化物控制技術講習會，編號87-TT03，87年1月。