

中小型焚化爐廢氣重金屬控制技術 介紹

楊慶熙*、葉芳露**、曾德意***、陳明輝***、黃志峰***、
李怡萱***、王厚傳***、謝長良***、陳 旺****

摘 要

台灣地區由於人口的逐漸增加及經濟活動的日益頻繁，廢棄物的產量也逐年增加，因此焚化法處理垃圾減量愈加重要。但焚化法造成二次污染公害問題，尤其廢氣中微量毒性物質，其強烈之毒害性與不易去除的特性，使得掌握其控制技術成為現代環保的重要課題。工研院能資所多年接受環保署委託，致力於半乾式處理系統本土化技術開發與推廣，早期已對廢氣中酸氣、粉塵之控制研究相當完善，半乾式處理系統對除酸效率已達 90%以上、除塵已達 99%以上。本計畫再將半乾式處理系統應用於焚化爐廢氣中毒性物質控制技術開發，建立本土化焚化爐廢氣重金屬污染物之控制技術，各種污染物去除效率：(1)酸性氣體 $\text{SO}_2 > 90\%$ ， $\text{HCl} > 95\%$ ；(2)重金屬污染物(鉛) $> 99\%$ ；(3)重金屬污染物(鎘) $> 99\%$ ；(4)重金屬污染物(汞) $> 90\%$ ；(5)粒狀污染物 $> 99\%$ 。

【關鍵字】

- 1.半乾式吸收滌氣系統(Semi-dryer Absorption System)
- 2.焚化爐廢氣(Waste Gas of Incinerator)
- 3.重金屬(Heavy Metal)

*行政院環境保護署空保處簡任技正

**行政院環境保護署空保處第二科科長

***行政院環境保護署空保處第二科技士

****工業技術研究院能源與資源研究所空氣污染防治研究室

一、前 言

焚化法可說是最佳的中間處理方法，不僅可以達體積減量，減低毒性，亦可回收有用的資源。唯其在焚化過程中，廢棄物所含之重金屬，無法受熱分解破壞，反而因揮發進入廢氣中，且重金屬微粒不易被粒狀物控制設備所攔除而發散至大氣中，造成污染，再加上鉛、鎘、汞具累積性毒性，不容忽視。在未來垃圾處理以焚化法為主下，焚化爐的興建也會有增加的趨勢，而焚化後廢氣處理方面，半乾式滌氣技術已是公認的最佳方法之一；它不僅可有效地處理廢氣中的酸氣(如 SO_2 、 HCl)、塵粒，甚至可處理如重金屬毒性物質，因此對重金屬鉛、鎘、汞之控制技術是日前迫切需要研究的課題。

二、焚化廢氣中重金屬之特性與去除機制

一般來說，比重大於 5 稱為重金屬。塑膠、橡膠、廢電池、油漆等物品中含有微量的重金屬，經焚化後存在於底灰、飛灰、廢氣中。Klein 按照揮發性將金屬分成四類：(1)Al、Ca、Mg、Fe 等高沸點金屬，焚化後不易揮發，常存於底灰中，也是構成飛灰基質的主要成分，(2)Cd、As、Pb、Zn、Cu 等，高溫燃燒時揮發成氣態，當廢氣冷卻時，金屬冷凝成微粒附著於飛灰上，(3)Hg、Se 高揮發性金屬在焚化過程中皆是氣相存在，於廢氣中排出，(4)第 2 和第 3 類之綜合。

重金屬物質經過高溫燃燒後，部分揮發、部份存於灰渣中，這二者之比例和重金屬之飽和溫度有關，當飽和溫度越高越易冷凝、沈降，飽和溫度低則易揮發存於煙氣中，重金屬於焚化過程會和化學物質發生反應，因此焚化產物有可能為元素態金屬、金屬氧化物、金屬氯化物等，針對汞、鎘、鉛、鋅、銅等金屬，其於焚化中的存在形式可歸納如下：(1)汞：皆以“氣態”形式存在($\text{Hg}^{(0)}$ 、 HgCl_2 、 Hg_2Cl_2)，(2)

84 中小型焚化爐廢氣重金屬控制技術介紹

鎘：揮發性 Cd 、 CdCl_2 ，高溫時以氣態存在；非揮發性 CdO ，附著於飛灰上，(3)鉛：揮發性 PbCl_2 ，高溫時以氣態存在；非揮發性 Pb 、 PbO ，附著於飛灰上(4)鋅： Zn 、 ZnCl_2 ，具有揮發成蒸汽或附著於飛灰上的雙重特性(5)銅：以飛灰(CuCl_2)或底灰(Cu)形式存在。由於各類重金屬物化組成、飽和溫度不同，其在焚化系統之濃度分佈情形亦有所差異，Morselli 等人量測結果發現錳及鉻在底灰中佔有七成左右；鉛、砷、鋅在底灰和飛灰分佈相近，約 40~50%；鎘於焚化過程為揮發態，但在冷卻系統中容易冷凝附著在飛灰，故鎘在廢氣中佔 20.8%，飛灰佔 48.4%，底灰佔 30.8%；至於汞因高揮發性，廢氣中佔 95%以上。一般而言，金屬氯化物之揮發性較金屬氧化物或金屬元素為高，並且具有較高的溶解度，因此可利用改變金屬之物化性質來提高其去除效率。

含重金屬物料經由高溫環境下之焚化，揮發存於廢氣中，當廢氣經過冷卻設備及熱回收鍋爐後，部分重金屬會因凝結或吸附作用而被除塵設備所去除，且若廢氣通過集塵設備之溫度愈低，去除效果愈佳。此去除機制主要依據下列的反應機構：

揮發性重金屬因溫度降低達到飽和，經凝結成微粒而被除塵設備去除。

1. 飽和溫度較低的重金屬元素雖無法達到凝結之條件，但可因飛灰表面的催化作用，反應形成飽和溫度較高、較易凝結的氧化物和氯化物，而被除塵設備去除。
2. 仍以氣態存在的重金屬，因吸附於飛灰表面，隨飛灰被集塵器去除。
3. 利用金屬氯化物之水溶性，藉濕式洗滌方式去除。

目前最難處理的重金屬算是汞，傳統的處理技術並無法符合越趨嚴格的法規標準，因此應對現有設備做一改善，以強化其去除效率。汞於廢氣中存在之型態主要有(1)元素態汞(2)氧化汞(3)氯化汞三種，當廢氣經過熱回收設備降溫至 220°C 時，由於垃圾焚化爐含有高濃度之 HCl ，故氯化汞含量最高，佔 80%，皆以氣態存在。為提高其去除效率，文獻中曾提及諸多之改善方式：Kristina L. Nebel and David M. White 曾比較使用各種方法來控制 Hg ，認為影響因子包括 1.廢棄物組成 2.燃燒效率(碳含量)3.空氣污染防制設備型式 4.煙氣溫度。其中以碳成份及溫度較為重要，透過飛灰上的碳會增進 Hg 的吸附去除能力，至於汞在 $300^\circ\text{F}\sim 400^\circ\text{F}$ 環境下是以蒸汽型態存在，無法冷凝在微粒(particulates)上，因此根據文獻中理論計算，溫度應控制在低於 300°F 下。

注入活性碳之技術已在 Zurich,Switzerland、Amager,Denmark 及 Kassel,Germany 等國應用。在 Zurich MWC 空氣污染防制設備是乾式吸收+靜電集塵機，測試發現在未添加活性碳下，降低溫度會提昇汞的捕捉率，但效率未超過 30%；當添加活性碳後去除效率可達 90%，且發現活性碳注入量與 Hg 去除效率並無明顯影響。平均而言，去除效率可在 85%以上。

三、實驗設備

1. 實驗設備

本實驗所利用之焚化爐廢氣半乾式處理系統位於大發資源再生專業區內，主要營業項目為廢電線、電纜、廢鐵鋁線材、廢電話交換機件、廢電腦機件、廢電子元組件、廢日光燈管、廢映像管及下腳料之拆解(如圖 1、2)等處理、焚化處理。焚化爐及其廢氣量 5000Nm³/hr，處理流程及處理設備(如圖 3)為半乾式除酸系統及袋式集塵機，其處理單元包括：(1)一次燃燒焚化爐；(2)二次燃燒焚化爐；(3)多管旋風分離(冷卻)器；(4)降溫塔；(5)半乾式除酸塔；(6)袋式集塵器；(7)風車；(8)煙囪。



圖 1 焚化廢料—電子下腳料

86 中小型焚化爐廢氣重金屬控制技術介紹

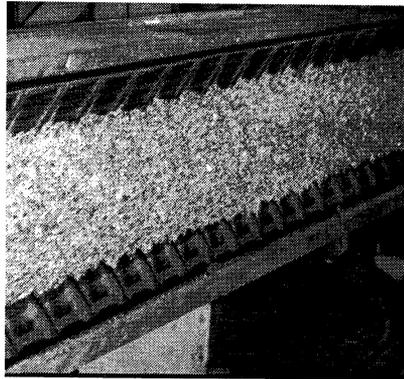


圖 2 焚化廢料－廢電路板

2. 重金屬控制實驗步驟規劃

- (1) 檢測孔：針對檢測位置及活性碳注入口之煙道管挖孔(約 $\Phi 4''$)，以利檢測單位取樣分析。其檢測位置如圖 3 標示，分為除酸塔入口、袋式集塵機入口、袋式集塵機出口等，儘量取煙氣混合均勻之位置，活性碳注入口位置則在除酸塔出口及袋式集塵機入口之間的煙道管。
- (2) 活性碳注入設備與注入點方式：本方式為直接製作壹台活性碳注入設備，含活性碳儲槽及螺旋輸送機，再將此活性碳注入設備置放於半乾式實驗系統中，於除酸塔與袋式集塵機之間煙道管注入活性碳。
- (3) 焚化廢棄物種類：(a)電子下腳料；(b)廢電路板。
- (4) 實驗變數：劑量(鈣系)比：3 組；(b)鈣及活性碳劑量：2 組；共：5 組，二種廢棄物種類共 10 組。
- (5) 委請環保署認可之檢測公司，於焚化爐系統操作中取樣分析重金屬含量，視焚化爐系統操作狀況而決定取樣分析之次數。

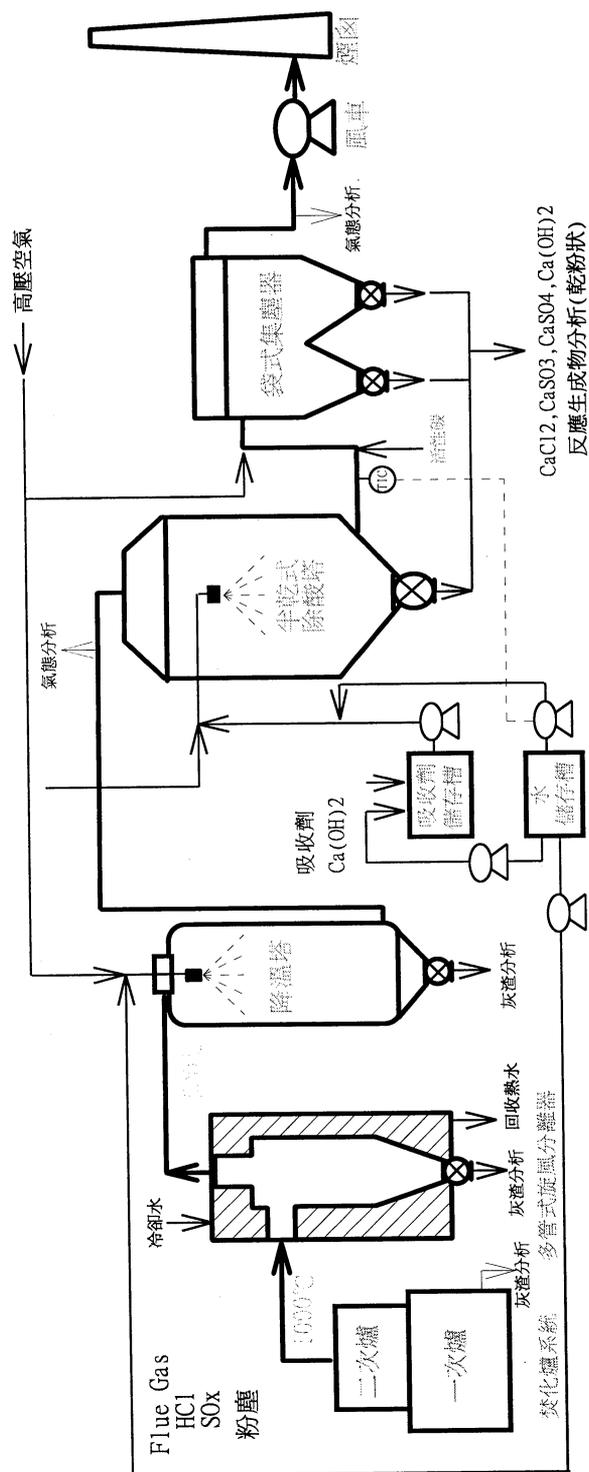


圖 3 中小型焚化爐微量毒性物質控制技術開發實驗流程與取樣分析位置圖

四、實驗結果與討論

焚化爐重金屬污染物控制實驗之條件，在焚化二種不同廢棄物下，使用氫氧化鈣及活性碳為吸收或吸附劑，且不同劑量下探討重金屬控制去除效率及質量平衡。所以本實驗系統之進料，依業主提供參考選定為電子下腳料及廢電路板，其系統操作與實驗條件如表 1 與表 2 所示。氫氧化鈣及活性碳為吸收或吸附劑對重金屬控制去除效率實驗結果探討如下：

表 1 焚化電子下腳料廢氣半乾式處理系統實驗條件

廢棄物處理種類	電子下腳料	電子下腳料	電子下腳料	電子下腳料	電子下腳料
焚化處理量(kg/h)	380	380	380	380	380
溫度(°C)					
除酸塔入口	150-200	150-200	150-200	150-200	150-200
除酸塔出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
袋式集塵機出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
Ca(OH) ₂ 用量(l/h)	0	0	0	80	120
活性碳用量(kg/h)	0	5	10	0	0
劑量比(Ca/S)	-	-	-	2.2	3.1
Ca(OH) ₂ 濃度(%)	-	-	-	5	5

1. 氫氧化鈣吸收劑對重金屬去除效果

重金屬鉛、鎘皆屬於高溫燃燒時揮發成氣態，當廢氣冷卻時，金屬冷凝成微粒附著於飛灰上，隨飛灰之去除而去除。而本實驗使用之氫氧化鈣，主要於除酸作用，但酸鹼反應後在高溫下水份被蒸乾，形成似飛灰的塵粒物質，其粒徑細小具大表面積，可供金屬塵粒附著，於集塵設備中一併去除。當然本實驗仍希望氫氧化鈣具吸附作用對高揮發性重金屬如汞，有去除之效果。

表 2 焚化廢電路板廢氣半乾式處理系統實驗條件

廢棄物處理種類	廢電路板	廢電路板	廢電路板	廢電路板	廢電路板
焚化處理量(kg/h)	390	390	390	390	390
溫度(°C)					
除酸塔入口	150-200	150-200	150-200	150-200	150-200
除酸塔出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
袋式集塵機出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
Ca(OH) ₂ 用量(l/h)	0	0	0	80	120
活性炭用量(kg/h)	0	5	10	0	0
劑量比(Ca/S)	-	-	-	2.2	3.1
Ca(OH) ₂ 濃度(%)	-	-	-	5	5

氫氧化鈣添加劑量是以除酸效果來考量。一般氫氧化鈣吸收劑為得良好除酸效果，其劑量比(Ca/S)操作在 2 以上。故本實驗劑量比調整分別為 0、2.2 及 3.1 三組比較。其實驗結果如表三所示。由表可知，屬高溫燃燒時揮發成氣態，當廢氣冷卻時，金屬冷凝成微粒之重金屬如鉛，在沒有氫氧化鈣添加下，其去除效率仍可達 90%以上，可見鉛凝結成核後易附著於飛灰上，隨飛灰之去除而去除，但在添加氫氧化鈣下，其去除效率有明顯之增加，達 99%以上，可見氫氧化鈣反應物之飛灰仍有助於鉛等的去除效果。另外對重金屬鎘而言，在沒有添加氫氧化鈣下，其去除率只達 56%，很明顯偏低，可見鎘對飛灰之附著性差，去除效果差。重金屬鎘在氫氧化鈣添加下，其去除效率可達 99%以上，可見氫氧化鈣反應物之飛灰很明顯地對重金屬鎘的附著性較佳，所以其去除效率佳。對另一重金屬鉻而言，亦有同樣之效益，在沒有氫氧化鈣添加下，無任何去除效率，在氫氧化鈣添加下，其去除效率可達 30-78%。

由以上實驗之結果，氫氧化鈣除了對酸吸收反應除酸外，其反應物乾燥形成之飛灰，對高溫燃燒時揮發成氣態，冷卻時凝結成微粒之重金屬而言，提供良好的附著性，提高其處理效果。重金屬鎘、鉻對此現象尤為明顯。但由實驗結果，

90 中小型焚化爐廢氣重金屬控制技術介紹

發現氫氧化鈣的添加，對高揮發性的重金屬汞，卻無任何去除效果。因此汞的去除，將利用活性炭注入吸附探求之。

表 3 氫氧化鈣添加對重金屬去除率

廢棄物處理種類	電子下腳料	電子下腳料	電子下腳料	廢電路板	廢電路板
焚化處理量(kg/h)	380	380	380	390	390
溫度(°C)					
除酸塔入口	150-200	150-200	150-200	150-200	150-200
除酸塔出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
袋式集塵機出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
Ca(OH) ₂ 用量(l/h)	0	80	120	80	120
活性炭用量(kg/h)	0	0	0	0	0
劑量比(Ca/S)	-	2.2	3.1	2.2	3.1
Ca(OH) ₂ 濃度(%)	-	5	5	5	5
鉛去除率(%)	99.2	>99	>99	>99	>99
鎘去除率(%)	56	>99	>99	>99	>99
汞去除率(%)	-	-	-	-	-
粉塵去除率(%)	98.8	99.7	99.7	99.8	99.3

2. 活性炭吸附劑對重金屬去除效果

由前項實驗結果之敘述，因焚化而產生重金屬如屬於第二類者，當廢氣冷卻後凝結成核，附著於氫氧化鈣飛灰或焚化飛灰上，隨之去除而去除。而第三類者之重金屬汞，在上述實驗中仍無法有效的處理之，因此必須尋求吸附劑的添加，吸附氣態中的汞。影響吸附之因素在材質的選用及活化過程均將影響吸附劑性質，這些性質包括(1)比表面積(2)孔隙大小分佈(3)粒徑大小(4)硬度(5)表面所帶官能基及極性等，介紹如下：

(1)比表面積

比表面積與孔隙結構是吸附劑主要性質，其決定了吸附容量及溶液中可被去除吸附質之大小及類型。吸附是表面作用現象，故其吸附容量直接與可吸附的表面積有關，而實際上比表面積為決定吸附劑單層飽和吸附容量的主要因子。

(2)孔隙大小分佈

孔隙大小及孔隙大小分佈決定於吸附劑之材質、活化程度及再生次數。孔隙大小分佈影響其吸附容量及吸附速率，一般商業性活性碳其孔隙體積及孔隙大小分佈範圍非常廣，故可利用性大。

(3)粒徑大小

吸附劑之粒徑大小對吸附容量的影響，視個別吸附系統之吸附劑、吸附質而異，較無顯著變化。

(4)硬度

硬度影響吸附劑反沖洗及再生時之耗損。

(5)表面所帶官能基及極性

在原活性碳表面是非極性，而且對非極性的有機分子具極高之親和力。依據文獻報告可將活性碳依其所具有之官能基性質分為二類，即酸化活性碳及鹼性活性碳。酸化活性碳具有氧化物官能基能使中性蒸餾水 pH 下降並具親水性。鹼性活性碳所具有氧化物官能基能使中性蒸餾水 pH 上升並具疏水性。

本研究針對三種不同的活性碳及氫氧化鈣，就比表面積及平均孔徑加以分析比較，其結果整理如表 4。由表可知 HPAC(細粉狀)之活性碳比表面積都比 CGAC(顆粒狀)或 TPAC(粉狀)大，平均孔徑則以氫氧化鈣最大，但比表面積最小約活性碳的 1/50~1/80，至於活性碳之平均孔徑，CGAC、TPAC、HPAC 則大至相當，其中以 TPAC 活性碳平均孔徑較大。由上分析因 HPAC 活性碳之比面積較大，平均孔徑與 TPAC 活性碳差距不大，所以選定 HPAC 活性碳做為重金屬去除實驗之吸附劑，其物性分析如表 5。

表 4 各種活性碳及氫氧化鈣物性分析表

吸附劑	Area(m ² /g)			Average Pore radius(A)
	Single Point Surface Area	BET Surface Area	Langmuir Surface Area	
CGAC	630.45	619.08	823.81	9.59
TPAC	734.08	720.99	982.63	12.09
HPAC	963.82	970.76	1329.30	10.71
Ca(OH) ₂	11.98	12.24	16.86	52.79

表 5 HPAC 活性碳物性分析

項目	內容
規格/size	200 Mesh 通過率 > 90%
硬度(%)	> 95[ASTM-D4058-92]
碘值(mg/g)	> 1050[JIS-1474]
甲基藍脫色力(ml/g)	> 180[JWWA]
BET 總比表面積(m ² /g)	> 1100[BET 法]
灰份(%)	< 10[ASTM-D2866-93]
水份(%)	< 5[ASTM-D2867-91]
pH 值	7-10(鹼性) 4-6(微酸性)

以 HPAC 活性碳為吸附劑，實驗參數為活性碳之劑量，實驗結果整理如表 6 所示。

由表 6 中可知，在不同焚化物下，活性碳注入量對汞去除率之關係如圖 4 所示。在電子下腳料焚化下，注入活性碳的量愈多處理效果較差，而在廢電路板焚化下，注入活性碳的量愈多處理效果較佳，兩者處理效率皆可達 90% 以上效果相當良好。一般而言在相同汞濃度負荷下，活性碳注入量愈多汞去除效果較佳，然而實驗發現電子下腳料焚化下，注入活性碳量愈多處理效果較差。因此有必要

表 6 活性炭添加對重金屬去除率

廢棄物處理種類	電子下腳料	電子下腳料	電子下腳料	廢電路板	廢電路板
焚化處理量(kg/h)	380	380	380	390	390
溫度(°C)					
除酸塔入口	150-200	150-200	150-200	150-200	150-200
除酸塔出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
袋式集塵機出口	120-150	120-150	120-150	120-150	120-150
Ca(OH) ₂ 用量(l/h)	0	0	0	120	120
活性炭用量(kg/h)	0	10	5	5	10
汞/活性炭($\times 10^{-3}$)	-	0.96	1.1	0.66	0.73
Ca(OH) ₂ 濃度(%)	-	-	-	5	5
鉛去除率(%)	99.2	99.9	99.5	>99	>99
鎘去除率(%)	56	38	25	>99	>99
汞去除率(%)	-	83	91	70	91
粉塵去除率(%)	98.8	98.5	97.5	99.4	98.9

探求其汞進入系統量對活性炭注入量比值，對重金屬汞的去除率。在不同焚化物下，兩者之關係如圖 5 所示。由圖可知，活性炭注入率與汞之去除率無明顯之影響。另由表 6 中知，活性炭之添加對其它重金屬鉛、鎘等的去除效率無任何影響，可見活性炭對氣態重金屬汞而言處理效率佳，但對凝結成固態之重金屬而言無處理之效果。

94 中小型焚化爐廢氣重金屬控制技術介紹

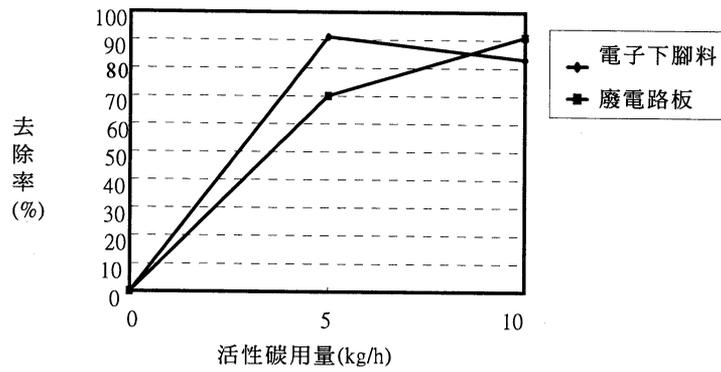


圖 4 活性炭用量對汞去除率之關係

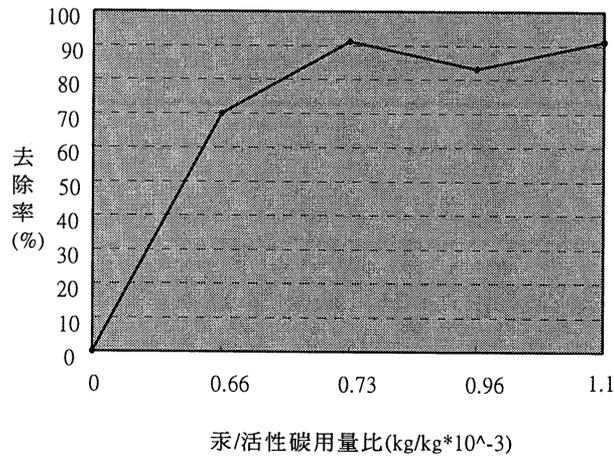


圖 5 汞/活性炭比對汞去除率之關係

3. 重金屬去除實驗中質量平衡探討

質量平衡之估算必須了解焚化廢棄物組成及焚化系統操作條件如過量空氣、焚化量、Ca(OH)₂量、降溫水量、一次爐灰渣量、分離器灰渣量、除酸塔灰渣量、集塵機灰渣量及廢氣排放量等，本實驗系統之質量平衡經由業主提供焚化

爐相關資料，再計算整理得廢棄物組成、系統操作條件、所需空氣量及系統空氣洩漏量等，如表 7 所示。

表 7 焚化爐系統廢棄物組成、操作條件及質量計算彙整

項 目	電子下腳料	廢電路板	燃料油
廢棄物組成			
水份(%)	0.5	0.86	0.38
灰份(%)	56.66	59.49	0.04
可燃份(%)	42.84	39.66	99.58
碳(%)	37.03	30.29	87.3
氫(%)	0.93	2.77	10.52
氮(%)	0.37	1.12	0.64
氧(%)	3.96	3.55	0.28
硫(%)	0.02	ND	0.05
氯(%)	0.53	1.92	-
Mst(kg/kg)	4.38	4.247	13.61
操作條件			
過量空氣(%)	250	200	20
焚化量(kg)	760	760	80
Ca(OH) ₂ 量(kg)	240	240	-
降溫水量(kg)	1400	1400	-
一次爐灰渣量(kg)	350	82	-
分離器灰渣量(kg)	11	6	-
除酸塔灰渣量(kg)	16	31	-
集塵機灰渣量(kg)	5	50	-
廢氣排放量(Nm ³ /m)	113	109	-
質量平衡計算			
所需空氣量(kg)	11650	9684	1306
排氣組成總莫耳數(kg-mole)	458.22	342.8	51.12
氧莫耳數(kg-mole)	70.14	47.02	4.76
理論氧含量(%)	15.3	14.35	-
檢測排氣氧含量(%)	16	15.5	-
空氣洩漏量(kg)	3058	3730	-

96 中小型焚化爐廢氣重金屬控制技術介紹

由表 7 整理得系統焚化電子下腳料與廢電路板之質量平衡如圖 6 與圖 7 所示。由圖 6 與圖 7 可知，電子下腳料與廢電路板焚化系統輸入與輸出質量差分別為 537kg 及 75kg，與輸入值相比誤差為 3%及 0.5%，而誤差之產生可能由各設備與煙道殘留、各種數據之量測及計算之假設等，但誤差皆在 5%以下，因此質量之平衡仍在一合理範圍。

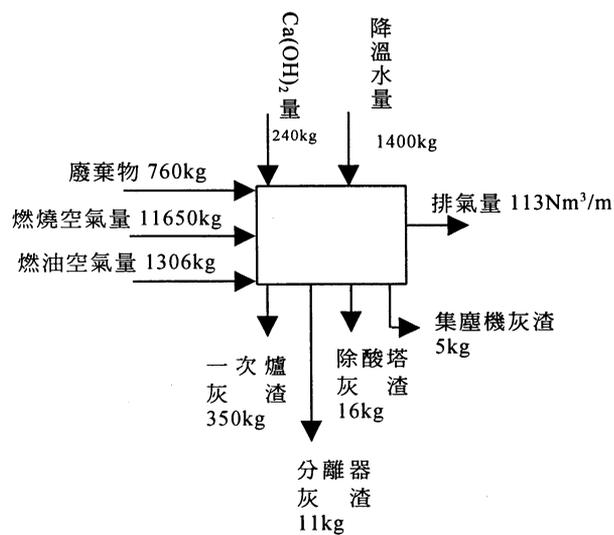


圖 6 電子下腳料質量平衡

$$\begin{aligned} \text{輸入} &= 760 + 11650 + 1306 + 240 + 1400 + 3058 = 18414 \text{ kg} \\ \text{輸出} &= 350 + 11 + 16 + 5 + 113 \times 120 \div 22.4 \times 28.9 = 17877 \text{ kg} \\ \text{輸入} - \text{輸出} &= 18414 - 17877 = 537 \text{ kg} \end{aligned}$$

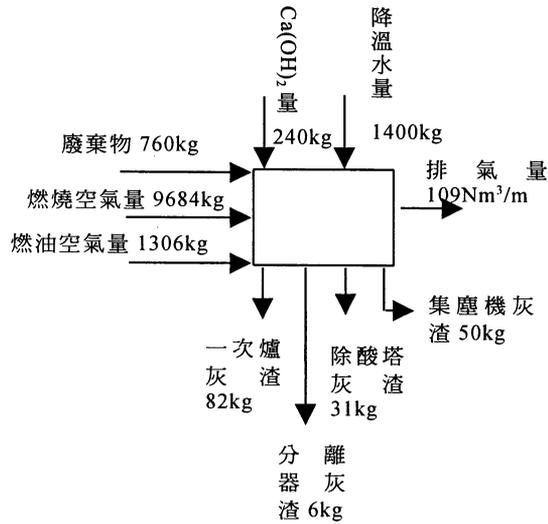


圖 7 廢電路板質量平衡

$$\begin{aligned} \text{輸入} &= 760 + 9684 + 1306 + 240 + 1400 + 3730 = 17120 \text{ kg} \\ \text{輸出} &= 82 + 6 + 31 + 50 + 109 \times 120 \div 22.4 \times 28.9 = 17045 \text{ kg} \\ \text{輸入} - \text{輸出} &= 17120 - 17045 = 75 \text{ kg} \end{aligned}$$

4. 灰渣毒性物質溶出試驗之探討

本重金屬去除實驗中，半乾式除酸塔與袋式集塵機產生的灰渣做毒性物質溶出試驗，其結果如表 8 所示。由表可知半乾式除酸塔與袋式集塵機灰渣，不論是電子下腳料或廢電路板為焚化物時，溶出試驗發現除酸塔與袋式集塵機灰渣之鉛含量遠超出標準值，故灰渣被歸類為有害事業廢棄物處置之。除鉛含量過高外，其於重金屬項目低於毒性物質溶出試驗標準值。

表 8 灰渣毒性物質溶出試驗結果

項目	電子下腳料		廢電路板		標準值
	除酸塔灰渣	袋式集塵灰渣	除酸塔灰渣	袋式集塵灰渣	
pH	7.42	60	7.62	4.60	<2 or >12
鉛及其化合物	20.1mg/L	37.80 mg/L	31.9 mg/L	6.82	5.0
鎳及其化合物	0.358mg/L	0.182 mg/L	0.389 mg/L	0.118	1.0
鉻及其化合物	ND<0.05	ND	0.032 mg/L	0.131	5.0
銅及其化合物	6.22 mg/L	19.0 mg/L	52.3 mg/L	14.9	--
鋅及其化合物	4.25 mg/L	8.57 mg/L	4.93 mg/L	1.64	-
六價鉻化合物	ND(<0.02)	ND	ND	ND	2.5
汞及其化合物	0.00357mg/L	0.00385mg/L	0.00400	0.0122	0.2
砷及其化合物	ND<147ug/L	ND	ND	ND	5.0

六、結論與檢討

工研院能資所多年接受環保署委託，致力於半乾式處理系統本土化技術開發，早期已對廢氣中除酸、除塵之去除研究相當完善，半乾式處理系統對除酸效率已達 90% 以上；除塵效率已達 99% 以上。本計畫再將半乾式處理系統應用於焚化爐廢氣

中毒性物質控制技術開發，用以評估焚化爐廢氣半乾式處理系統對毒性物質控制之效能，計畫執行結果有以下幾點結論與建議：

- 1.建立本土化焚化爐廢氣重金屬污染物之控制技術，重金屬控制實驗系統流程：半乾式除酸塔+袋式集塵機；煙氣處理量 1,000-5,000 m³/h，且各種污染物去除效率：(1)酸性氣體 SO₂> 80%，HCl>95%；(2)重金屬污染物(鉛)> 99%；(3)重金屬污染物(鎘)> 99%；(4)重金屬污染物(汞)> 90%；(5)粒狀污染物> 99%
- 2.重金屬去除實驗中，氫氧化鈣之添加有助於重金屬去除效率的提昇，尤其對鎘、鉻提昇去除率更為明顯。唯對汞而言，無處理之效果
- 3.重金屬去除實驗中，活性碳之添加有助於重金屬汞的去除率，可達 90%。實驗之結果發現汞之去除率與活性碳之添加量無直接關係，這與前述國外文獻中之結果，頗為類似。
- 4.由質量平衡中，電子下腳料與廢電路板焚化系統輸入與輸出質量差分別為 537kg 及 75kg，與輸入值相比誤差為 3%及 0.5%，而誤差之產生可能由各設備與煙道殘留、各種數據之量測及計算之假設等，但誤差皆在 5%以下，因此質量之平衡仍在合理範圍。
- 5.重金屬去除實驗中，半乾式除酸塔與袋式集塵機灰渣毒性物質溶出試驗結果，不論是電子下腳料或廢電路板為焚化物時，溶出試驗發現除酸塔與袋式集塵機灰渣之鉛含量遠超出標準值，故灰渣被歸類為有害事業廢棄物處置之。除鉛含量過高外，其於重金屬項目低於毒性物質溶出試驗標準值。

七、文獻參考

- 1.Fernandez M. A., Martinez L., Segarra M., Garcia J.C., and Espiell F., "Behavior of Heavy Metals in the Combustion Gases of Urban Waste Incinerators", *Environmental Science & Technology*, 26(5), P.1040 (1992).
- 2.Hutchinson, T.C.; Meema, K.M., "Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment", John Wiley & Sons Company, (1987).

3. Morselli, L.; Zappoli, S.; Militemo, S., "The Presence and Distribution of Heavy Metals in Munciple Solid Waste Incinerators", *Toxicological and Environmental Chemistry*, 37, P.139(1993).
4. 孫世勤, "都市垃圾焚化廠廢氣中重金屬物質之控制方式", *中興工程*, 41, P.49(1993).
5. Peter J.K. and Peter W., "Application of Dry Flue Gas Scrubbing to Hazardous Waste Incineration", *Journal of Air Pollution Control Association*, 36(11), P.1258(1986).
6. 李怡萱, 陳明輝, 王厚傳, 謝長良, 陳旺, 黃志峰, "焚化爐廢氣半乾式處理系統之重金屬(鉛、鎘)去除研究", 第八屆燃燒科技應用研討會論文集, P.69(1998).
7. 林榮琳, 徐瑞東, "都市垃圾焚化廠廢氣處理流程的發展趨勢", 第十屆空氣污染控制技術研討會論文集, P523(1993).
8. Hann S.H., Jiann M W. and David L., "Development of Dry Control Technology for Emissions of Mercury in Flue Gas", *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, 13(1), P.107(1996).
9. Kristin L. Nebel and David M.W., "Mercury Control System-Tested and Ready to Go", *Solid Waste& Power*, P.40(1992).
10. Andersson, C. and B. Weimer, "Sodium Sulphide Dosing at the Hogdalen Plant in Stockholm", *Proceedings of the Second Annual International Conference on Municipal Waste Combustion*, Tampa, Florida, April (1991).
11. 陳志成, 魏銘彥, 劉玉芬, 蔣博欽, "焚化過程中重金屬動態吸附研究", 第十四屆空氣污染控制技術研討會論文集, P489(1997).
12. Uberoi M. and Shadman F., "Sorbents for Removal of Lead Compounds from Hot Flue Gases", *AIChE Journal*, 36(2), P.307(1990).
13. Mohit U. and Farhang S., "High-Temperature Removal of Cadmium Compounds Using Solid Sorbents", *Environmental Science & Technology*, 25, P.1285(1991).