

逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究

**Influence of Heavy Metal Emissions in different particle size distribution
in Combustion of Coal Blends**

作者：郭百旗 汪昀昇

系級：環境四甲

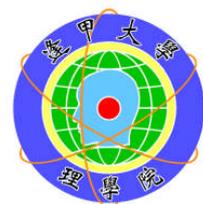
學號：D9163681 D9239281

開課老師：江康鈺 老師

課程名稱：畢業論文

開課系所：環境工程與科學系

開課學年：九十四學年度 第二學期



摘 要

本研究探討不同配比之混煤燃燒過程，粒徑分佈對微量重金屬排放特性之影響。針對不同等級(半無煙煤、高揮發性煙煤、環保煤)、摻配比例(10:90、30:70、50:50、70:30、90:10)及粒徑分佈(74 μm ~149 μm 及 149 μm ~420 μm)進行混煤燃燒之加成特性試驗及燃煤混燒對重金屬(Se、As、Cd、Hg、Pb、Zn、Cr、Cu)排放分佈特性之影響試驗。試驗結果顯示，以較高等級的半無煙煤混合高揮發性煙煤或環保煤，其元素 C、H 及 S 皆具加成特性，亦即利用單煤之元素組成及發熱量分析結果可做為混煤燃燒特性之元素組成及發熱量之預測分析依據。混煤燃燒對重金屬排放特性影響之結果顯示，混燒等級相近之燃煤(半無煙煤和高揮發性煙煤)，影響其重金屬排放特性在於燃燒溫度、重金屬之揮發性及燃燒特性所影響。混燒半無煙煤與環保煤試驗結果，小粒徑(74 μm ~149 μm)之混煤摻配隨著摻混環保煤的比例增加，將減少重金屬 Zn、Cr 及 Cu 於氣相中的分佈比例。高揮發性煙煤及環保煤試驗結果顯示，對於易揮發性重金屬 Hg 與中度揮發性重金屬 Pb 及 Zn 之排放特性而言，粒徑大小與排放特性之相關性不顯著。然而，就難揮發性重金屬 Cr 及 Cu 而言，在小粒徑(74 μm ~149 μm)試驗條件下，隨環保煤摻配比例增加而有降低 Cr 及 Cu 於氣相排放之比例，可見高揮發性煙煤摻混環保煤時，於小粒徑範圍有助於重金屬 Cr 及 Cu 之排放控制。飛灰及底灰中之重金屬 Cu，相態大多分佈於殘渣態，而飛灰中重金屬 Cr 不論粒徑大小都主要分佈於殘渣相態，顯示其於環境中之移動性趨於穩定。底灰中重金屬 Se 及 Pb 大多於在於氧化結合態，即在環境中之移動性較高。而隨著混燒環保煤之摻配比增加，重金屬 Zn 分佈於殘渣態之比例隨之減少，表示混燒環保煤無助於重金屬 Zn 之污染控制。

關鍵詞：混煤、重金屬、排放特性

目 錄

摘要.....	I
目錄.....	II
圖目錄.....	III
表目錄.....	V
第一章 前言.....	1
第二章 文獻回顧.....	3
2-1 煤的形成與分類.....	3
2-2 煤之成分與燃燒排放特性.....	5
2-3 燃煤系統之重金屬物化特性及分佈特性.....	10
第三章 實驗材料與方法.....	15
3-1 實驗材料與條件.....	15
3-1-1 實驗材料.....	15
3-1-2 實驗操作條件.....	16
3-2 研究設備及操作方法.....	18
3-3 分析方法.....	21
3-3-1 燃煤之基本性質分析.....	21
3-3-2 煤樣重金屬分析.....	22
3-3-3 化學序列萃取分析.....	26
第四章 結果與討論.....	28
4-1 煤樣等級區分及性質比較.....	28
4-2 混煤燃燒之加乘性.....	29
4-3 混煤燃燒過程重金屬排放特性之探討.....	36
4-4 底灰及飛灰中之重金屬相態分析.....	55
4-4-1 飛灰中之重金屬相態.....	55
4-4-2 底灰中之重金屬相態.....	60
第五章 結論及建議.....	55
5-1 結論.....	65
5-2 建議.....	66
第六章 參考文獻.....	67

圖 目 錄

圖 1-1	研究架構.....	2
圖 3-1	燃燒時間與燃煤質量殘餘率關係圖.....	17
圖 3-2	實驗管狀燃燒爐示意圖.....	18
圖 3-3	微粒收集設備.....	18
圖 3-4	實驗分析流程圖.....	24
圖 3-5	加成性實驗流程圖.....	25
圖 3-6	化學序列萃取分析流程.....	27
圖 4-1	混煤基本性質中碳含量及氫含量加成性之相關比較.....	33
圖 4-2	混煤基本性質中氮含量及硫含量加成性之相關比較.....	34
圖 4-3	混煤基本性質中發熱量加成性之相關比較.....	35
圖 4-4	重金屬 Hg 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性...	37
圖 4-5	重金屬 Hg 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性...	38
圖 4-6	重金屬 Pb 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性.....	40
圖 4-7	重金屬 Pb 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性...	41
圖 4-8	重金屬 Zn 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性.....	42
圖 4-9	重金屬 Zn 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性...	43
圖 4-10	重金屬 Cr 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性.....	46
圖 4-11	重金屬 Cr 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性...	47
圖 4-12	重金屬 Cu 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性...	48
圖 4-13	重金屬 Cu 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性...	49
圖 4-14	混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Pb 排放率之相關性..	51
圖 4-15	混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Zn 排放率之相關性..	52
圖 4-16	混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Cr 排放率之相關性..	53
圖 4-17	混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Cu 排放率之相關性..	54
圖 4-18	飛灰重金屬 Se 於粒徑 74 μ m~149 μ m 相態分佈特性	56
圖 4-19	飛灰重金屬 Se 於粒徑 149 μ m~420 μ m 相態分佈特性	56
圖 4-20	飛灰重金屬 As 於粒徑 74 μ m~149 μ m 相態分佈特性	56
圖 4-21	飛灰重金屬 As 於粒徑 149 μ m~420 μ m 相態分佈特性	56
圖 4-22	飛灰重金屬 Pb 於粒徑 74 μ m~149 μ m 相態分佈特性	57
圖 4-23	飛灰重金屬 Pb 於粒徑 149 μ m~420 μ m 相態分佈特性	57
圖 4-24	飛灰重金屬 Zn 於粒徑 74 μ m~149 μ m 相態分佈特性	57
圖 4-25	飛灰重金屬 Zn 於粒徑 149 μ m~420 μ m 相態分佈特性	57
圖 4-26	飛灰重金屬 Cr 於粒徑 74 μ m~149 μ m 相態分佈特性	59
圖 4-27	飛灰重金屬 Cr 於粒徑 149 μ m~420 μ m 相態分佈特性	59
圖 4-28	飛灰重金屬 Cu 於粒徑 74 μ m~149 μ m 相態分佈特性	59
圖 4-29	飛灰重金屬 Cu 於粒徑 149 μ m~420 μ m 相態分佈特性	59

圖 4-30	底灰重金屬 Se 於粒徑 74 μm ~149 μm 相態分佈特性	61
圖 4-31	底灰重金屬 Se 於粒徑 149 μm ~420 μm 相態分佈特性	61
圖 4-32	底灰重金屬 As 於粒徑 74 μm ~149 μm 相態分佈特性	61
圖 4-33	底灰重金屬 As 於粒徑 149 μm ~420 μm 相態分佈特性	61
圖 4-34	底灰重金屬 Pb 於粒徑 74 μm ~149 μm 相態分佈特性	62
圖 4-35	底灰重金屬 Pb 於粒徑 149 μm ~420 μm 相態分佈特性	62
圖 4-36	底灰重金屬 Zn 於粒徑 74 μm ~149 μm 相態分佈特性	62
圖 4-37	底灰重金屬 Zn 於粒徑 149 μm ~420 μm 相態分佈特性	62
圖 4-38	底灰重金屬 Cr 於粒徑 74 μm ~149 μm 相態分佈特性	64
圖 4-39	底灰重金屬 Cr 於粒徑 149 μm ~420 μm 相態分佈特性	64
圖 4-40	底灰重金屬 Cu 於粒徑 74 μm ~149 μm 相態分佈特性	64
圖 4-41	底灰重金屬 Cu 於粒徑 149 μm ~420 μm 相態分佈特性	64



表 目 錄

表 2-1	煤化序列分類表.....	4
表 2-2	近似公式.....	4
表 2-3	含氮量對金屬揮發溫度影響.....	11
表 2-4	燃煤過程元素分類表.....	12
表 3-1	混煤摻混比例代號表.....	15
表 3-2	實際供氣量之計算表.....	16
表 4-1	煤樣之近似分析、元素分析及熱值分析結果.....	28
表 4-2	混煤摻配比下元素及發熱量之理論計算值	31
表 4-3	混煤摻配比下元素及發熱量之實驗值	31



第一章 前言

根據經濟部能源局 2005 統計資料顯示，民國 73 年燃煤火力發電所產生的電量為 2505 千瓩，至民國 93 年所產生的電量則提升至 8100 千瓩，成長率為 6%，發電量不僅高於核能發電及水力發電，更遠遠超過燃油及燃氣發電。台灣地區現有火力發電廠十座，其中三分之二以煤作為燃料，燃煤火力發電雖建造成本較低廉且發電效率良好，然而，燃煤燃燒發電過程，因燃煤中所含之微量重金屬，會附著於飛灰、底渣中，或隨廢氣排放到環境中，造成不可回復之衝擊。因此，近年來燃煤的品質及減少污染物的排放，為各燃煤電廠迫切解決之環境課題。

一般而言，燃煤火力電廠基於經濟考量、燃料使用多元化、提升單一煤種之可用性等因素考量，大多採用混煤方式燃燒。然而，混煤雖有上述之優點，但由於混煤燃燒特性無法完全地藉由原煤來預測，使得混煤燃燒特性更顯複雜，再加上混煤之不均勻性且等級不一，在燃燒過程中可能造成污染物增加，降低燃燒效率以及燃燒損失急劇增加等問題。其中混煤燃燒過程微量重金屬之排放特性，除受燃燒操作條件影響外，亦受混煤等級、粒徑大小及含氮量等因素影響。有鑑於此，本研究利用實驗室之電熱式高溫管狀爐模擬混煤燃燒過程，藉由不同混煤配比、粒徑及煤樣等級，除探討混煤中元素組成及發熱量之加成性外，並分析燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性及灰渣中重金屬物種之型態特性，圖 1-1 為本研究之研究架構。

混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究

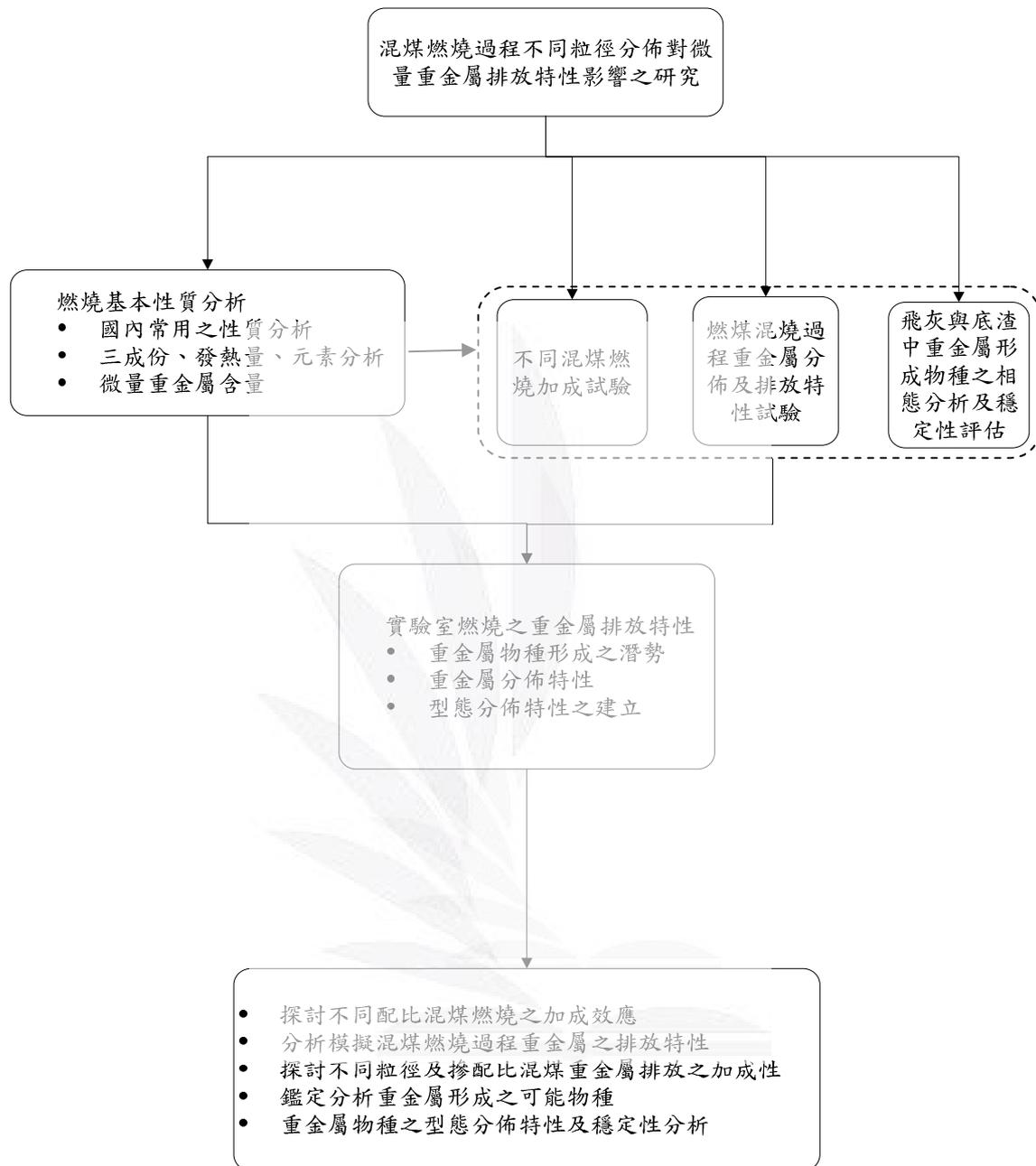


圖 1-1 實驗研究架構

第二章 文獻回顧

2-1 煤的形成與分類

煤是 100 萬年到 44 億年前植物死亡後殘骸分解逐漸形成的，因此常稱為化石燃料。形成煤的植物可能生長在沼澤地或河流三角洲。當它們死亡後，殘骸經過細菌腐化分解而轉變，逐漸在沼澤地下形成一厚層物質，這些物質硬化成泥煤。泥煤經長期沉積並加上地球的造山運動，使得泥煤層更深埋於地底，與礦物聚集在一起，經地熱和生化反應之作用，有些轉變成沙岩或頁岩，隨著岩層重量和其他覆蓋物增加，漸而將泥煤轉變成各種等級的煤。煤的形成，第一步先形成棕黑色的褐煤，它是由埋在地下的泥煤於巨大壓力之下而形成，壓力則來自上層覆蓋物的重量及地殼擠壓作用；隨著壓力的增加，褐煤逐漸轉變成等級較高的次煙煤，次煙煤又變成煙煤，最後形成等級最高的無煙煤，即無煙煤是最老的煤，褐煤則最為年輕。

燃煤之分類方法有許多種，其中 ASTM(American Society for Testing and Materials) D388 為目前最常用之分類方法，其依據煤化序列之先後順序，按照燃煤變質之煤化程度，分類成褐煤至無煙煤等種類，如表 2-1。煤化序列表中顯而易見的可以看出，煤化的等級隨固定碳的增加及水分、揮發份的減少而升級。ASTM 基本上是根據無礦物基準計算出來的固定碳和熱質作為分類的標準。在確定燃煤類別時，較低級的煤是以潮溼基準下的熱值來分類，然而較高級的煤熱值變化不大，故不用熱值來分類，而是以乾基下固定碳或揮發性物質來分類。當固定碳大於或等於 69% 時，不管其熱值多大，都必須根據固定碳含量來分類。黏結特性則是用來區分某些相鄰近的燃煤序化程度。表 2-2 為燃煤分類計算之近似公式，根據計算結果可初步判斷燃煤之等級。

表 2-1 煤化序列分類表 (蕭氏, 1997)

煤化序列分類表 (ASTM D388)							
類/組	固定碳 % (乾燥無礦物質基準)		揮發份 % (乾燥無礦物質基準)		熱值 Btu/lb (潮濕無礦物質基準)		黏結特性
	≥	<	>	≤	≥	<	
I. 無煙煤							
1.超無煙煤(石墨)	98	—	—	2	—	—	不黏結
2.無煙煤	92	98	2	8	—	—	不黏結
3.半無煙煤	86	92	8	14	—	—	不黏結
II. 煙煤							
1.低揮發份煙煤	78	86	14	22	—	—	一般黏結
2.中揮發份煙煤	69	78	22	31	—	—	一般黏結
3.高揮發份煙煤 A	—	69	31	—	14,000	—	一般黏結
4.高揮發份煙煤 B	—	—	—	—	13,000	14,000	一般黏結
5.高揮發份煙煤 C	—	—	—	—	11,500 10,500	13,000 11,500	一般黏結 黏結
III. 次煙煤							
1.次煙煤 A	—	—	—	—	10,500	11,500	不黏結
2.次煙煤 B	—	—	—	—	9,500	10,500	不黏結
3.次煙煤 C	—	—	—	—	8,300	9,500	不黏結
IV. 褐煤							
1.褐煤 A	—	—	—	—	6,300	8,300	不黏結
2.褐煤 B	—	—	—	—	—	6,300	不黏結

表 2-2 近似公式 (蕭氏, 1997)

近似公式(Approximation formulas)	
固定碳 % =	$\frac{FC}{100 - (M + 1.1A + 0.1S)} \times 100$ (乾燥、無礦物質)
揮發份 % =	100 - 固定碳(乾燥、無礦物質)
熱值 Btu/lb =	$\frac{Btu}{100 - (1.1A + 0.1S)} \times 100$
其中：FC 為固定碳，M：水分，A：灰份，S：硫，Btu：熱值	

對於燃煤分類的目的，主要是為了確定其最終之用途，同時提供選擇燃燒設備與燃煤處理設備，以及設計受熱面積所需的數據。對於不同燃煤的特性差異認識越多，越能設計出好的燃燒方式。例如：高級煤必須比低級煤研磨的更細，以確保燃燒完全。煤沒有特定的可研磨性，在實用性上是為了讓煤燃燒能轉換更低氮氧化物量的燃燒技術，伴隨排放的氮氧化物與未燃碳都可藉由煤的研磨性來減到最少。

2-2 煤之成分與燃燒排放特性

煤的主要成分是碳，其中也含氫、氧及少量的氮、硫或其他元素，因為植物結構中兩種最主要的物質纖維素和木質素都含有碳，氫和氧的高分子化合物。然而，硫是煤最被重視的成分之一，煤的燃燒生成物之中硫通常以硫化物的形式排放，為燃煤時主要的管制污染物之一，現今美國已設立規範管制硫化物之排放量。

紀氏(1995)針對燃煤燃燒反應之研究指出，在煤粒的燃燒反應過程中，粒子外層會包圍著揮發氣體，而其反應通常可分為兩大部份，一是煤的氣化反應(Devolatilization of the Coal)，此一過程為當粒子在燃燒室因受熱而變軟，粒子中的水份首先釋放出來，當溫度持續升高，整個煤粒子會分解，釋出揮發氣體，此過程釋出煤粒子大部分的質量(依煤樣等級及揮發份而不同)，而殘餘的煤粒子質量含碳量高，另含少許的氮、硫與許多礦物質，通稱為焦炭(char)粒子，因水份和揮發氣體的釋出，焦炭粒子表面有許多裂縫和孔隙。二為殘餘煤粒子的氧化反應(Oxidation of the Residual Char)，在高溫狀況下剩餘的煤粒子和氧氣進行非均相(heterogeneous)反應，氧氣擴散至粒子表面和內部孔隙進行反應，此一過程較氣化反應為慢，反應煤的速率隨粒子形式、環境溫度、壓力等而異。

煤燃燒後的固態殘餘物(solid residue)統稱煤灰。從鍋爐底部灰斗取出

的灰渣，稱為底灰(bottom ash)；利用微粒去除設備(如：濾袋集塵器、靜電集塵器)，從煙氣中捕集的微細粒狀物，稱為飛灰(fly ash)。曾氏(1996)指出飛灰及底灰的區別，物理型態上，飛灰大部分為微粒圓球狀，粒徑分佈在 $1\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ ；底灰則為不規則多角狀顆粒，粒徑分佈在 $0.1\text{cm} \sim 2\text{cm}$ 之間。化學型態上，飛灰的化學組成與一般黏土礦物類似，主要是由矽、鋁、鐵和鈣的氧化物所組成，其次是鎂、硫、鉀、鈉及鈦的氧化物，而飛灰中所含的未燃燒碳約佔飛灰總重的 5% 以下，除此之外尚含有 20~50 種微量元素，其含量比一般土壤高 10~100 倍。這些微量元素大多以硫酸鹽、碳酸鹽及氯化物的方式存在，其中鉛、鉍、銻、鎘、硒、砷、鋅、鎳、鉻、硫、鈾、錳、銅、鉍在較小的顆粒中有較高的濃度。底灰的化學組成與飛灰相似，不過鐵、鈣、硫等元素分佈於底灰的濃度通常比在飛灰中多。

李氏(2003)研究指出煤灰在燃燒時，會產生結渣與積垢特性。所謂結渣(Slagging)係指發生於爐膛或高溫過熱段具融溶或黏結性之液態沉積物；積垢(Fouling)則指發生於鍋爐對流區呈塵土狀之乾性沉積物，其形成原因為煤灰中鈉成份受高溫汽化而冷凝所致。下列諸項參數為評估煤灰特性必需考量要素：

1. 燃燒減量：又稱未燃碳(Unburned Carbon)，即固定碳經燃燒後殘餘之量，一般以 5% 為參考值，超過此值即表示燃燒效率不佳。
2. 灰中鹼酸比：一般而言，酸性氧化物可產生高的灰熔化溫度，鹼性氧化物則有降低灰熔點之作用，因此鹼酸比越大即表示容易產生低熔點氧化物與複合鹽，結渣傾向亦隨之增加。
3. 氧化鈉：氧化鈉含量通常被用來做為評估褐煤式積垢傾向之參數。氧化鈉另一特性為可降低飛灰之電阻係數。
4. Fe_2O_3 含量：飛灰中 Fe_2O_3 含量多則飛灰電阻係數降低。但 Fe_2O_3 燃燒氧化成 Fe_3O_4 後會使灰色變黑，將不利於飛灰資源化。
5. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比： $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值會影響煤灰之熔點。

孫氏等人(2001)將燃煤飛灰區分出矽鋁質、鐵質、鈣質和炭粒。矽鋁質顆粒是低鈣灰的主要組成部分，在單偏光下顏色較淺，多呈無色或淺棕色；在反光下，則多呈暗的圓形顆粒或玻璃基質，有時可見針狀莫來石晶體，其反射率較低，存在於玻璃基質中。X射線光譜分析證實，顆粒成分以 SiO_2 與 Al_2O_3 為主，其它氧化物的含量均小於10%。鈣質顆粒形態與內部結構類似於矽鋁質顆粒，但粒度較小。單偏光下，呈褐色、棕色至深棕色；反光下多呈暗色玻璃基質。X射線光譜分析證實，其成分以 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 為主， CaO 含量大於10%。鐵質顆粒單偏光下呈黑色、不透明，反光下色調最亮、反射色強，有時可見交織共生的磁鐵礦(較暗)和赤鐵礦(較亮)晶體。掃描式電子顯微鏡下，表面不光滑，常見顆粒樹枝狀、針狀或微粒狀磁鐵礦析晶以及黏連的細小灰球。X射線光譜分析證實，其成分以 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 為主， Fe_2O_3 含量大於10%。碳粒單偏光下，黑色，不透明，以不規則多孔狀顆粒為主；反光下，亮度介於矽鋁質與鐵質顆粒之間。光譜分析證實以有機成分為主。

Küçük 等人(2003)研究指出影響煤粒燃燒的因子有：煤的等級、空氣流動速率、粒徑大小、煤的含水量及空氣的溼度。一般而言，等級較低的煤，因為本身揮發份高且固定碳低，所以較易達完全燃燒，燃燒時間也較等級高的煤來的短。至於空氣流動速率之影響，在空氣速率低時，氧氣的含量可能不足以使煤樣產生氧化現象。相對的在高流率時，因為氧含量較高，氧化反應會較激烈，但也因為熱對流太快，導致熱能散失較快。此外，煤的氧化速率依其煤每單位體積有多少表面積而定，燃煤粒徑小，其表面積相對較大。燃煤依其粒徑大小、孔隙體積及結構而有不同的表面積；另一方面，不同大小的煤粒，其結構和組成的不同也會影響燃煤之燃燒特性，至於相同產地燃煤之表面積亦隨著粒徑大小而改變。而 Küçük (2003)研究亦發現混煤過程中，混合較粗粒徑之混煤燃燒，較混合較細小粒徑的混煤及單一煤樣容易燃燒，此係混煤燃燒過程煤床的孔隙體積會降低，空氣通

過粗大粒徑的速率會比細小粒徑來的慢，且粗大粒徑較細小粒徑易保留熱能，因此較易點燃。在混煤時，固體和氣體的接觸也較單一煤樣為佳。因此，混煤會因混樣粒徑的增加而更易燃燒。

煤的含水量亦是影響燃燒之重要因素，由於水分子具有很強的極性，水份中含氧的官能基會與煤中與氧氣結合一端的芳香族以氫鍵連結，因此，水在煤外層形成一層薄膜阻礙氧氣與煤產生燃燒反應。亦即含水量多寡影響煤的燃燒時間，然而，含水量的多寡又會受到粒徑大小的影響，一般而言，燃煤粒徑小，因表面積增加，故較易吸收水份，與氧氣接觸面積也較大，因此，含水量與粒徑大小均會影響燃煤之燃燒效率。燃燒用空氣之溼度亦會影響燃煤之燃燒效率，空氣濕度越大，燃煤越不易燃燒，此係空氣中水份較燃煤水份為多時，空氣中水分子會移向燃煤，並達到平衡狀態，因此，造成燃煤水份較高而不易燃燒(Küçük, 2003)。

Rubiera 等人(1999)指出煤炭的可研磨性(Grindability)為一種複雜的性質，與煤炭的硬度、強度、黏度，和裂口(fracture)有關。這些特性都受煤等級、岩相學、類形、礦物分類的影響。煤的可研磨性被用來做為決定燃煤火力發電廠研磨機負荷量的預測工具。沒有廣泛的方法可以預測混煤的HGI (Hardgrove Grindability Index)，因此其必須藉由多次實驗的結果才可得知，即難以事先預測混煤之可研磨性。混煤的研磨性在實際的用途上是為了使煤產生最少的氮氧化物及使飛灰中未燃碳比例降低。因此 Rubiera 等人以三種不同的研磨機 Raymond Mill(RM)、Rolls Crusher(RC)、Ball Mill(BM)研磨混煤，推論 Ball Mill(BM)的研磨方式對混煤燃燒特性最佳，可能是粒子型態造成的結果。煤的可研磨性是不能被預測的，需要不斷的試驗才能得到結果。然而，研磨粒徑越小，其自燃機率越高，因此燃煤電廠在儲存煤碳時要注意粒徑大小所造成的影響。

Rubiera 等人 (2002) 以 TGA(Thermal Gravimetric Analyzers) 和 EFR(Entrained Flow Reactor)來評估不同等級的煤和混煤之相關燃燒特

性。混煤在 TGA 中的燃燒特性與煤的等級和混煤中摻配比例有很大的影響。EFR 實驗結果指出，性質相似的煤樣混燒其燃盡程度和氮氧化物的排放成一線性關係。故 Rubiera 等人研究得知，混煤燃燒特性受煤樣等級及混煤摻配比影響。混煤燃燒過程，反應性較佳的煤因為揮發物質高，故燃燒初期多受反應性較佳的煤影響，燃燒後期則受固定碳多的煤所影響。當氧氣量增加後可以使混煤的燃燒效率增加。不同等級的煤混燒，氮氧化物的排放並不具加成特性。

高氏等(2000)利用熱重分析儀(Thermal Gravimetric Analyzers, TGA)探討混煤燃燒動力參數研究，結果顯示燃燒難以燃燒之無煙煤試驗，當摻混部份比例煙煤及褐煤時，隨煙煤或褐煤比例之增加，混煤之活化能有較大幅度之降低；若以較易燃燒之煙煤或褐煤為試驗條件，當以無煙煤摻混時，燃煤之活化能增加，但增加之幅度並不明顯。高氏等(2001)續對無煙煤及煙煤混煤燃燒性能進行探討，研究結果顯示混煤從開始放熱至燃盡(burnout)需更長之燃燒時間，混煤中易燃煤(褐煤)比例越大，混煤之著火與燃燒性能越良好，且當易燃煤比例大於50%，活化能隨易燃煤比例的增加，而下降幅度較小。

Arenillas等人(2004)研究一系列不同等級、不同摻配比之混煤的著火反應，利用TG/DTA(thermogravimetry and differential thermal analysis)並連接質量分光計來研究單煤和混煤的著火機制並分析燃燒時釋放的氣體。結果觀察到次煙煤和低揮發性煙煤的單煤燃燒是屬於heterogeneous ignition，而高揮發性煙煤的單煤燃燒是屬於homogeneous ignition。而當次煙煤與高揮發性煙煤混燒時，其混燒之著火機制屬heterogeneous ignition；且其中較低等級的煤(次煙煤)影響著混煤之著火溫度，而較高等級的煤(高揮發性煙煤)影響著混煤之燃盡溫度。另一混煤試驗，由次煙煤與低揮發性煙煤混燒時，其混燒之著火機制屬heterogeneous ignition，同樣的也是由較低等級的煤(次煙煤)影響著混煤之著火溫度，而較高等級的煤(低揮發性煙煤)影響著混煤之燃盡溫度。而低揮發性煙煤與高揮發性煙煤混燒時，隨著低揮發性

煙煤摻配比的增加，混煤的著火機制由homogeneous ignition轉變成heterogeneous ignition，且其混煤燃燒由DTA曲線證明是如同單煤燃燒一樣，只有一個放熱波峰。研究總結指出，揮發性物質含量會影響著火溫度而非著火機制，著火機制與煤化學分析所得代表性參數沒有相互關聯，且無法從單煤組成物去預測混煤的著火機制反應。

一般而言，混煤有幾項基本誘因，如經濟因素、降低污染物排放等，但混煤後的燃燒特性並不能夠完全地藉由母煤來預測。有許多研究認為混煤後，煤質特性具有加成性。根據Hass(2000)實驗結果，混煤中若含有褐煤，無論是揮發份的釋放或則是高揮發性物質的含量都不具有加成效應。同時也指出對混煤而言，不論是混合煙煤或是褐煤，其低位發熱量、揮發份、真密度、揮發性燃料氮的釋放、灰份和碳燃盡都是具有加成效應，除了視密度無法從其一研究中判定。李氏(2003)實驗得知，灰熔點基本上不具加成性，而氮含量則具加成性。

2-3 燃煤系統之重金屬物化特性及分佈特性

徐氏等人(1999)研究指出在整個燃煤系統中可能產生的有害空氣污染物(Hazardous Air Pollutants, HAPs)約有 67 種，包括有機物與無機物。無機性的 HAPs 是由原存在於燃煤中的成分，如 Hg、As、F、Cl 所產生而成；而有機類的 HAPs 則是因煤碳燃燒過程中的化學反應而生成。一般而言，因為燃煤發電鍋爐的燃料品質、操作條件都控制的相當穩定，有機性 HAPs 產生的很少。而無機性 HAPs，主要有 HF、HCl 及重金屬等。重金屬在燃燒系統內演變的過程相當複雜，它可能分佈在底灰或成為氣體與粉塵進入煙道系統，同時它也可能與其它成份進行化學反應形成氧化物或氯化物。這些演變皆會受到金屬本身性質、外在化學物成份、操作條件如溫度等因素的影響。燃煤中含有微量的毒性金屬，依其揮發性可概略分類如下：

- 難揮發性金屬：鈹(Be)、鉻(Cr)、錳(Mn)、鎳(Ni)
- 中度揮發性金屬：砷(As)、鎘(Cd)、鉛(Pb)

■ 易揮發性金屬：汞(Hg)

燃煤中之低揮性金屬在燃燒後多存於底灰中，易揮發性金屬在高溫的燃燒環境下大多揮發成氣體，中度揮發性金屬則有部分會揮發。揮發的金屬蒸氣會隨著煙氣流動進入鍋爐後端的污染防治設備，當煙氣離開爐膛後因溫度下降，金屬蒸氣會經由凝結形成霧滴，或由凝結附著在煙氣中原有的微塵表面。兩種凝結程序均使得金屬以小於微米(μm)的微粒形式存在於煙氣中。難揮發性的金屬也有可能與其它成份反應而形成一種易揮發性的金屬化合物。

徐氏等人(1999)研究觀察到金屬氯化物的揮發性較金屬氧化物高出許多，造成大量金屬蒸發為氣體，此種現象以汞與鉛最為明顯。表 2-4 列出氯含量對毒性金屬揮發溫度的影響。

表 2-3 含氯量對金屬揮發溫度影響(徐氏，1999，李氏，1999)

Metal	With 0% Chlorine		With 10% Chlorine	
	Volatility Temperature (°C)	Principal Species	Volatility Temperature (°C)	Principal Species
Cr	1613	CrO ₂ /CrO ₃	1610	CrO ₂ /CrO ₃
Ni	1210	Ni(OH) ₂	693	Ni(OH) ₂
Be	1054	Be(OH) ₂	1054	Be(OH) ₂
Ag	904	Ag	627	AgCl
Ba	849	Ba(OH) ₂	904	BaCl ₂
Tl	721	Tl ₂ O ₃	138	TlOH
Sb	660	Sb ₂ O ₃	660	Sb ₂ O ₃
Pb	627	PbO ₂	-15	PbCl ₄
Se	318	SeO ₂	318	SeO ₂
Cd	214	Cd	214	Cd
Os	41	OsO ₄	41	OsO ₄
As	32	As ₂ O ₃	32	As ₂ O ₃
Hg	14	Hg	14	Hg

儲氏(1996)研究亦提出提高溫度或增加氯含量可提升金屬之揮發性，促使金屬分佈由底灰轉至飛灰及煙氣中，其中以鉛最為明顯。提高燃燒溫

度會明顯造成鉻、鉛、鋅、砷在底灰中分佈減少、飛灰中分佈增加。而金屬在高氯含量條件下會冷凝成更小粒徑之顆粒或轉變成氣相，即於高氯含量條件下，金屬與氯離子形成揮發性較高的金屬氯化物。

Huang 等人(2004)研究觀察到大部分的微量元素傾向沉積於較小顆粒上，飛灰直徑越小，微量元素相對豐富度越高。但和其它微量元素相比，Mn 顯示相反的傾向，即飛灰直徑越小，Mn 相對豐富度越低。Huang 等人亦發現 Mn 存在於穩定且高熔點的粗糙相態中。而在燃燒過程金屬揮發，在後燃燒區再凝結，經由燃煤中主要元素的揮發和凝結過程，形成直徑在 $0.01\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ 範圍內的灰粒。當煙道氣體冷卻時，次微米煙霧的高表面積可以造成較高比例的氣態微量金屬沉積在次微米灰上。

Meij(1994)依據煤的燃燒過程中元素分佈情況，將元素分為三大類：Class I 元素，定義為燃燒過程中不揮發的元素；Class II 元素凝結在燃燒設備或收集設備中。Class II 再細分成三個等級 a、b、c，這些細分的等級與揮發性程度有關。Class III 元素全部或部分以氣態形式排放。

表 2-4 燃煤過程元素分類表 (Meij, 1993)

Class	I	Al, Ca, Ce, Cs, Eu, Fe, Hf, K, La, Mg, Sc, Sm, Si, Sr, Th and Ti
Class	II _c	Ba, Cr, Mn, Na and Rb
	II _b	Be, Co, Cu, Ni, P, U, V and W
	II _a	As, Cd, Ge, Mo, Pb, Sb, Tl and Zn
Class	III	B, Br, C, Cl, F, Hg, I, N, S and Se

Li 等人(2005)利用熱吸附作用(thermal desorption)來釋放飛灰和活性碳中的汞。研究發現到在熱吸附過程中，溫度和停留時間是重要的參數，隨著溫度越高、停留時間越長，汞移除量越多。研究也指出汞的排出偏好發生於高溫。

余氏等人(2004)利用熱力平衡分析法研究觀察到 Pb、Cd 和 Cr 三種元素在低溫下都以固態化合物存在，即屬於難揮發的元素，當煙氣溫度降低

時，其化合物冷凝速度快，大部分留在灰渣中。

徐氏等人(2002)指出靜電除塵器中飛灰重金屬元素濃度依序為 $Hg < Cd < Pb < Cu < Ni < Cr$ 。當鍋爐負荷升高會導致重金屬分佈有從底灰向飛灰、飛灰向煙氣變化的趨勢。流體化床燃燒時 Ca/S 比影響重金屬在飛灰中的分佈， Ca/S 比增大導致重金屬分佈有從底灰向飛灰、飛灰向煙氣變化的趨勢。

徐氏(2005)研究觀察到煤燃燒後，煤中的硒在除塵器飛灰和底渣中的含量較少，在細小飛灰中含量較多，尤其在 $19\mu m$ 以上的飛灰中，這與硒在燃燒過程中發生的揮發—冷凝—吸附作用有關，同時與顆粒的形態有關。硒易與有機物結合，造成除塵器飛灰和底渣中硒含量較少。硒隨有機物燃燒而揮發，飛灰中部分硒與有機物結合，由於具有機性的硒在燃燒過程中形成不易分解的物相以及低溫區凝結作用造成的。底渣中具有機性的硒很少。煤燃燒後有16.5%的硒會直接揮發隨煙氣排入大氣中，對環境的貢獻最大。細小飛灰中的硒含量很多，且直徑大於 $19\mu m$ 的飛灰中占了將近1/2；除塵器飛灰中的硒所占比例占煤中硒的2/3以上。

朱氏(2001)研究觀察到煤粉經高溫燃燒後，鉻、鉛大多累積在灰渣中，並以不同的比例分佈在底渣和飛灰中。由於元素及其化合物的物理化學特性差異，鉻易於累積在底渣中，鉛則在飛灰中的含量更高；鉻、鉛更易在細灰粒中累積，大部分存在於 $<0.125mm$ 粒級的灰中。充分燃燒，更有利於重金屬元素在燃燒產物中的累積。底渣和飛灰中的 Cr 、 Pb 均主要以穩定的殘渣態存在，這部分元素在環境中表現出高的穩定性，在電廠的沖灰過程中，它們仍以顆粒物的形式向土壤或底泥遷移；飛灰中的六價鉻、總鉻的水溶態、可交換態較原煤增加，環境穩定性降低，變得易於向環境中遷移。而鉛的水溶態、可交換態含量基本不變，環境穩定性較高。

周氏(2000)報告指出，在燃煤系統有害金屬元素排放控制研究中，目前最受重視的是汞的排放控制問題。美國環保署(EPA)已經提出建立合理

的收費準則，對發電廠鍋爐汞的大氣排放、污水排放和固體排放採取由大到小的收費辦法，以控制汞的排放及對環境的危害程度，促使電廠對汞排放採取必要的措施。汞排放控制的研究主要集中在燃燒前脫汞、燃燒後脫汞和汞形態轉化三個方面。燃燒前脫汞的主要手段是改進煤的洗選技術，採用先進的洗煤技術可脫除煤中30%以上的汞，但是洗煤並不能完全解決汞的排放控制問題。因此，燃燒後脫汞的研究仍然是十分必要的。燃燒後脫汞的研究主要為利用一些吸收劑(包括氣相添加劑)來吸附汞、改進燃煤電廠現有大氣汙染物控制設備，或是開發新的汞污染控制技術。汞形態轉化研究是利用添加劑和催化劑將Hg0 轉化為Hg²⁺，以便進一步脫除，因為Hg²⁺易溶於水中，在濕式煙氣脫硫系統中，可除去80%~95%的Hg²⁺。而濕式煙氣脫硫系統對Hg0沒有明顯的脫除。目前燃煤電廠還沒有一項成熟的、可應用的脫汞技術，最接近應用的技術是煙氣中噴入活性碳顆粒脫汞。

綜合上述之文獻，提供了本研究在選擇試驗材料時，可就 ASTM D388 燃煤等級之區分，將試驗材料做初步的分類；再進一步利用實驗室之模擬燃煤燃燒試驗，探討不同等級之試驗煤種經混燒後在氣相及固相中重金屬之分佈情形時，文獻中提及之影響重金屬排放特性之因素，如重金屬揮發性、燃燒室溫度、供給空氣量(含氧量)、燃燒處理之試驗材料種類、試驗材料之含氯量及元素加成特性，對實驗結果提供了探討之方向。在歐美、中國等國家對混煤燃燒特性及重金屬排放分佈特性已有完善的研究，反觀我國對混煤燃燒研究只於起步階段，期能經由本研究對不同等級、不同摻配比例及不同粒徑大小之試驗煤種，提供相關之燃燒特性資訊；並經由實驗室之模擬燃煤燃燒試驗中探討重金屬排放特性影響之因素，可供燃煤電廠進行混煤燃燒時，重金屬控制之參考依據。

第三章 實驗材料與方法

3-1 實驗材料與條件

為了因應日益嚴苛之環保排放要求，世界各國燃煤電廠漸有將煤樣混燒環保煤之趨勢以降低硫分之排放，因此本研究實驗特別選用了環保煤作為實驗煤樣之一。本實驗是採用三種不同等級之煤樣，分別為越南半無煙煤、澳洲高揮發性煙煤及印尼環保煤，並於實驗室以電熱式高溫管狀爐燃燒後，探討不同燃煤等級、粒徑及摻配比之混燒重金屬排放特性。

3-1-1 實驗材料

採用三種不同等級之煤樣，為越南半無煙煤、澳洲高揮發性煙煤及印尼環保煤。利用破碎機(馬力 820W、轉速 30000rpm)破碎，分別通過篩號 40(420 μ m)、100(149 μ m)及 200(74 μ m)，個別取二種粒徑介於 74 μ m~149 μ m 及 149 μ m~420 μ m。混煤方式採粒徑相同之煤樣，兩兩相混，混出 30 種不同配比之混煤。然而，在後續圖表之討論中，將半無煙煤、高揮發性煙煤及環保煤分別以代號為 A、B 及 E 代表之。而混煤代號如 A1E9 則表示為無煙煤摻混高揮發性煙煤之比例為 10%：90%，其他混煤之代號以此類推，詳細表示於表 3-1。

表 3-1 混煤摻混比例代號表

代號	摻配比例	代號	摻配比例	代號	摻配比例
A1E9	半無煙煤：環保煤 10：90	A1B9	半無煙煤：高揮發性煙煤 10：90	B1E9	高揮發性煙煤：環保煤 10：90
A3E7	半無煙煤：環保煤 30：70	A3B7	半無煙煤：高揮發性煙煤 30：70	B3E7	高揮發性煙煤：環保煤 30：70
A5E5	半無煙煤：環保煤 50：50	A5B5	半無煙煤：高揮發性煙煤 50：50	B5E5	高揮發性煙煤：環保煤 50：50
A7E3	半無煙煤：環保煤 70：30	A7B3	半無煙煤：高揮發性煙煤 70：30	B7E3	高揮發性煙煤：環保煤 70：30
A9E1	半無煙煤：環保煤 90：10	A9B1	半無煙煤：高揮發性煙煤 90：10	B9E1	高揮發性煙煤：環保煤 90：10

3-1-2 實驗操作條件

實驗之燃燒操作條件包括：燃燒時間、燃燒溫度及實際供氣量。

1. 燃燒時間及燃燒溫度之設定

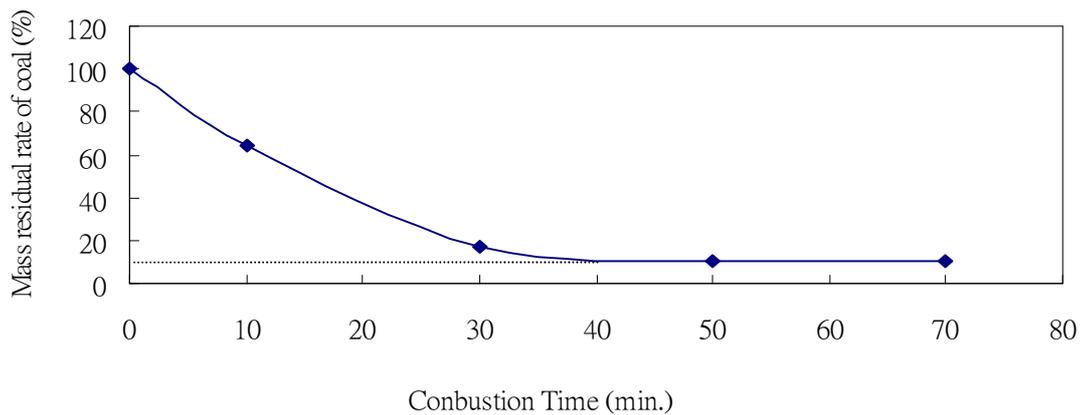
管狀爐燃燒室操作溫度為 1050°C，批次試驗之燃燒時間受燃燒室(石英管)負荷及燃燒速率之影響，本研究對於燃燒時間之決定，以實驗煤樣燃燒後，質量殘餘率低於 5%或達最低殘餘率作為是否達到完全燃燒之判定依據。然而實際燃燒半無煙煤及高揮發性煙煤，將燃燒時間從 50 分增加到 70 分鐘後，其質量殘餘率幾乎仍維持在 15%左右，因此推測已達最低殘餘率(依據圖 3-1 可知)，故半無煙煤及高揮發性煙煤之燃燒時間定為 50 分鐘，而環保煤則定為 30 分鐘。本試驗之燃燒時間為確定不同等級煤樣能達到完全燃燒，故訂為 50 分鐘。

2. 實際供氣量之計算

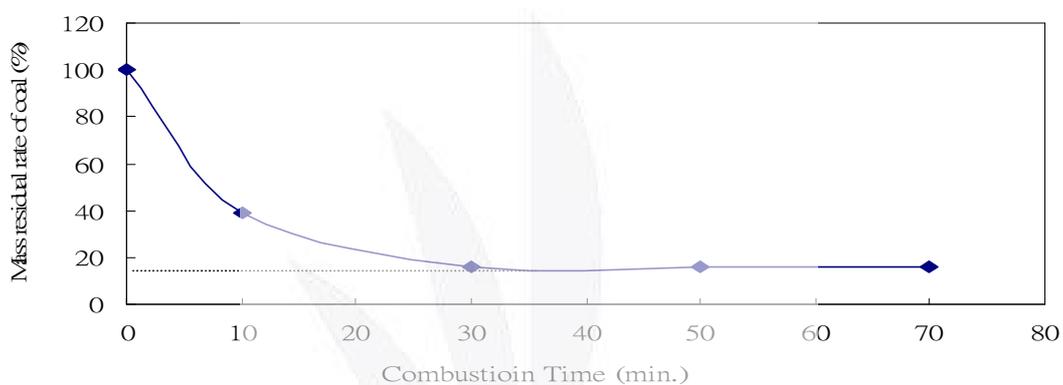
為提供燃燒初期完全燃燒之空氣量，所計算之空氣量(A_0)係依據元素分析結果為基準，並考量 25%之過剩空氣量，亦即實際空氣量(A)為理論空氣量的 1.25 倍，同時以燃燒前 5 分鐘作為主要供氣之計算基準，本實驗之實際供氣量依不同等級分別為半無煙煤：8.2123NL/min、高揮發性煙煤：9.2268 NL/min 及環保煤：7.5313 NL/min(由表 3-2 得知)。

表 3-2 實際供氣量之計算表

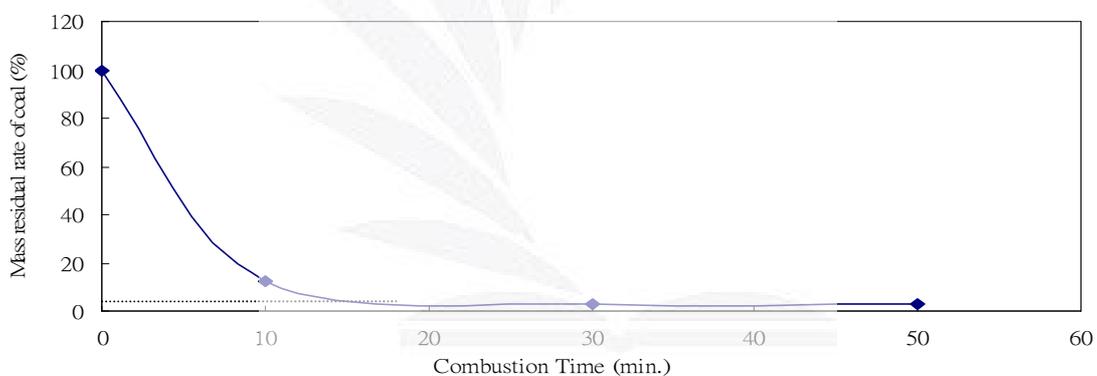
煤樣 \ 公示	理論空氣量(Nm ³ /kg)	實際空氣(Nm ³ /kg)	供給空氣流量(NL/min)
	$A_0 = 8.89C + 26.7H + 3.3S - 3.3O$	$A = A_0 \times 1.25$	$A \times 0.005 \text{kg} \times 1000 \text{L} / 5 \text{min}$
半無煙煤	$8.89 \times 57.67 + 26.7 \times 1.99 + 3.3 \times 0.88 - 3.3 \times 6.41 = 5.4773$	$5.4773 \times 1.25 = 6.8467$	$6.8467 \times 0.005 \times 1000 / 5 = 6.8467$
高揮發性煙煤	$8.89 \times 63.07 + 26.7 \times 3.87 + 3.3 \times 1.32 - 3.3 \times 16.12 = 6.1524$	$6.1524 \times 1.25 = 7.6905$	$7.6905 \times 0.005 \times 1000 / 5 = 7.6905$
環保煤	$8.89 \times 52.49 + 26.7 \times 4.03 + 3.3 \times 0.83 - 3.3 \times 22.67 = 5.0213$	$5.0213 \times 1.25 = 6.2766$	$6.2766 \times 0.005 \times 1000 / 5 = 6.2766$



(a) Semianthracite coal



(b) High volatile C bituminous coal



(c) Envirocoal

圖 3-1 在 1050°C 和 25% 過剩空氣量下燃燒時間與燃煤質量殘餘率關係圖

3-2 研究設備及操作方法

本研究利用實驗室之模擬燃煤燃燒試驗(如圖 3-2 所示),依據前述之燃煤種類半無煙煤、高揮發性煙煤及環保煤作為試驗材料,其各項設備及操作說明如下:

1. 實驗室電熱式高溫管狀爐:此設備包括高溫爐、石英管(燃燒管材質為石英,直徑 5.5cm,長度 85cm)、石英舟及空氣供給系統。

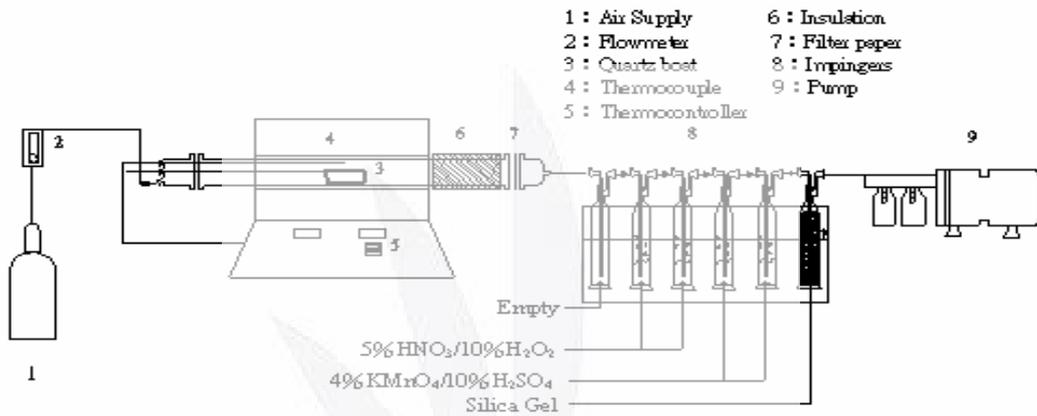


圖 3-2 實驗管狀燃燒爐示意圖

2. 微粒採集設備(含石英濾紙):微粒收集之材料為耐高溫之石英濾紙,其孔徑對 0.3 μ m 以上之微粒收集效率可達 99.97%。此外,為防止廢氣中微粒於收集過程因冷凝作用而凝附,因此,過濾設備除儘可能緊接於爐體之氣體排放口外,並在石英管外部以保溫棉維持溫度在 300 $^{\circ}$ C 左右。設備如圖 3-3 所示。

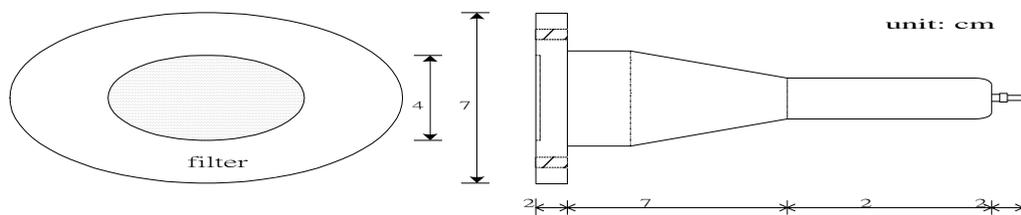


圖 3-3 粒狀物收集設備(簡氏, 1999)

3. 重金屬煙道採集設備：如圖 3-2 所示。廢氣以六個串聯之氣體吸收裝置收集。各氣體吸收裝置分別填充不同之吸收液，配置步驟如下所示：

第一瓶：空瓶。

第二、三瓶：150mL 的 5% HNO_3 /10% H_2O_2 。配置方法為緩慢加入 50mL 濃硝酸至約 500mL 蒸餾水的 1L 定量瓶中，再加入 333mL H_2O_2 (v/v)，最後以蒸餾水定量至 1L。

第四、五瓶：150mL 的 4% KMnO_4 /10% H_2SO_4 。配置方法為緩慢加入 100mL 濃硫酸至約 500mL 蒸餾水的 1L 定量瓶中，再加入 40g 之 KMnO_4 ，最後以蒸餾水定量至 1L。

第六瓶：矽膠。目的為了吸收水氣，以保護抽氣泵浦。

實驗之操作方法說明如下：

1. 開啟燃燒爐電源，先設定溫度至 500°C；待溫度達到 500°C 時，再將溫度設定至 1050°C。
2. 石英濾紙及石英舟烘乾至恆重並稱重。
3. 配置實驗之煤粉約 5g，紀錄重量，並且平鋪於石英舟內。
4. 重金屬吸收液配置及擺放依序為：(a) 第一瓶：空瓶、(b) 第二及三瓶：重金屬吸收瓶，150mL 的 5% HNO_3 /10% H_2O_2 、(c) 第四及五瓶：汞離子吸收瓶，150mL 的 4% KMnO_4 /10% H_2SO_4 、(d) 矽膠瓶，吸收水氣保護後續實驗設備。
5. 待溫度達 800°C~900°C 時，將放有煤樣之石英舟放至爐管前端預熱。
6. 待溫度達到 1050°C 時，打開空氣瓶安全閥至設定流量值，同時開啟抽氣泵浦。
7. 將石英舟推進燃燒室中心，於 1050°C 下燃燒 50min。
8. 反應時間結束後，將管狀爐降溫至 500°C。

9. 待溫度降至 500°C 時，取出石英舟，冷卻至室溫並秤重。
10. 將二瓶重金屬吸收液均勻混合後取 50mL 至消化瓶內，並貯存於 4°C 下，待後續分析；二瓶汞之吸收液重覆上述之步驟。
11. 待管狀爐溫度降至 500°C 時，取出石英濾紙烘乾並秤重；利用丙酮淋洗石英管且用塑膠刷子刷洗石英管壁。所收集之液體待揮發乾後秤重，此部分與石英濾紙上之固體物視為飛灰。



3-3 分析方法

3-3-1 燃煤之基本性質分析

為瞭解燃煤之基本性質，並提供燃煤之配置比例及實驗參數的設定，基本性質分析主要分為以下幾個項目：

1. 三成份分析：水份、灰份及可燃份分析。

(1)水份

水份分析參照中國國家標準 CNS 公告總號 10821，類號 M3140 之煤碳及焦碳之內含水份定量法，分別針對各煤樣進行水份分析。

(2)灰份

灰份分析參照中國國家標準 CNS 公告總號 10822，類號 M3141 之煤碳及焦碳之灰份定量法，分別針對各煤樣進行灰份分析。

(3)揮發份

揮發份分析參照中國國家標準 CNS 公告總號 10823，類號 M3142 之煤碳及焦碳之揮發份定量法，分別針對各煤樣進行揮發份分析。

(4)固定碳

揮發份分析參照中國國家標準 CNS 公告總號 10824，類號 M3143 之煤碳及焦碳之固定碳計算法，分別計算出各煤樣之固定碳。

2. 元素及重金屬分析：

分析煤樣中碳、氫、氧、氮、硫和氯元素組成及重金屬濃度分析。其分析目的為計算燃煤於完全燃燒所需之理論空氣量及實際空氣量；重金屬濃度分析之目的為瞭解煤樣內重金屬之含量且分析混樣後重金屬是否具有加成性。

(1) 碳、氫、氮和硫分析

利用元素分析儀(PERKIN ELEMER, PE 2400 Series II)進行分析，其分析原理係利用高溫氧化樣品中之碳、氮、氫和硫成分，在 950°C 高溫

下經燃燒生成 NO_x 、 CO_2 、 H_2O 和 SO_2 等氣體，再經還原管 550°C 還原為碳、氮、氫和硫元素，並經由儀器內之監測系統加以換算其於樣品中之重量百分比。分析步驟如下：

- a. 起動儀器並設定參數，並使儀器暖機 2.5 個小時以上，待其穩定。
- b. 先取 1.5~2.5 mg 樣品，將樣品填充於專用的小錫箔罐(vial)中，並加以壓密，最後置於自動填料盤中，使其自動進料分析。

(2) 樣品氯含量分析

氯之分析，取適量待測樣品置於管狀爐中，通入流量約 1.5 L/min 的氧氣，使樣品在操作溫度下燃燒，並使燃燒氣體通過各裝 150ml H_2O_2 溶液的兩個吸收瓶加以吸收，再將兩吸收瓶內溶液均勻混合。最後，取適量吸收液利用離子層析儀分析氯濃度。

(3) 樣品重金屬分析

煤樣中之重金屬分析方法參照環檢所公告之廢棄物總重金屬檢測方法 (NIEA R306.11C) 進行消化濃縮；氣相中重金屬先以 5% HNO_3 及 10% H_2O_2 之混合液收集後再進行液體消化，其方法參照環檢所公告之廢棄物總重金屬檢測方法 (NIEA R302.20T~NIEA R307.20T)，最後再利用感應耦合電漿光譜儀 (Inductively Coupled Plasma Optima Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) 進行分析。

3-3-2 煤樣重金屬分析

分析樣品主要分為底渣、飛灰及氣相三部分。由於飛灰及底渣均為排放管道中之粒狀物，因此分析方法是參照環檢所公告之排放管道中總重金屬檢測方法 (NIEA A302.72C) 進行消化濃縮；氣相中重金屬先以 5% HNO_3 及 10% H_2O_2 之混合液收集後再進行液體消化，其方法參照環檢所公告之廢棄物總重金屬檢測方法 (NIEA R302.20T~NIEA R307.20T)，最後再利用 ICP-OES 分析。

1. 底渣

燃燒實驗後，殘留在石英舟上的物質，即判定為底渣。另外，採樣方法為待爐溫降至 500°C，再將盛有底渣之石英舟取出，並置於乾燥箱中冷卻至室溫量，最後使用採樣袋(密封袋)密封貯存以待分析。

2. 飛灰

係指石英濾紙收集到的灰及黏附在石英管壁上的灰，都判定為飛灰。實驗之前，濾紙需先置於烘箱乾燥並秤重。燃燒實驗後，石英濾紙連同收集之飛灰置於烘箱乾燥至恆重後秤重並予以保存以待分析。石英濾紙需另檢測其背景重金屬。另附著於石英管壁之碳粒則用丙酮淋洗且以塑膠刷重複來回數次清刷，塑膠刷需再用丙酮淋洗。收集液以燒杯收集，待燒杯中丙酮揮發後，所殘餘之固態物質秤重後以固體消化處理，此部分亦視為飛灰。

3. 氣相

濾紙後端，無論是黏附在吸收瓶上或是被吸收液吸收，都判定為氣相。採樣方法為將二瓶重金屬吸收液均勻混合後取 50mL 至消化瓶內，並貯存於 4°C 下，以液體消化方式處理後以待分析待後續分析；二瓶汞之吸收液重覆上述之步驟。

混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究

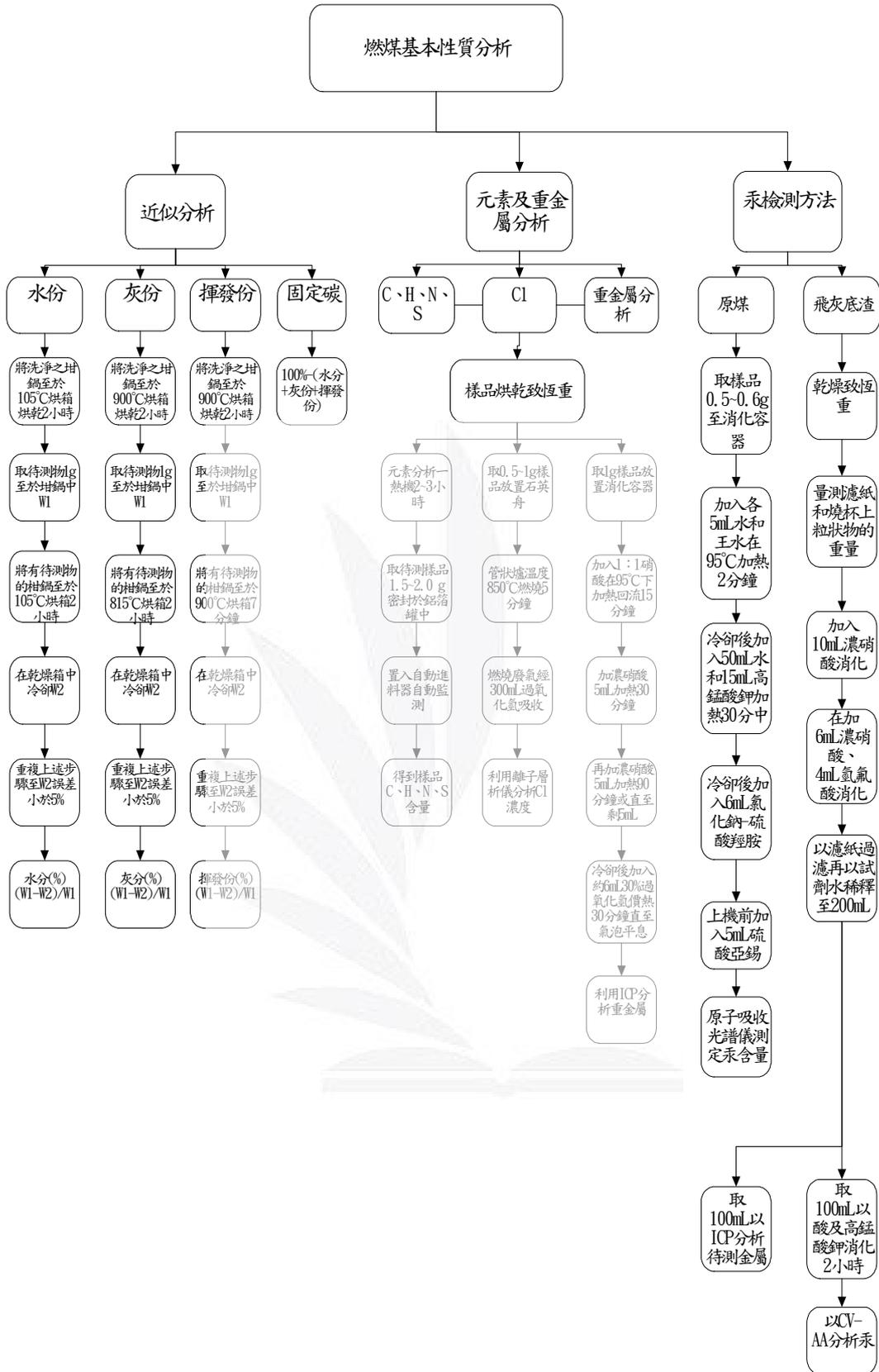


圖 3-4 實驗分析流程圖

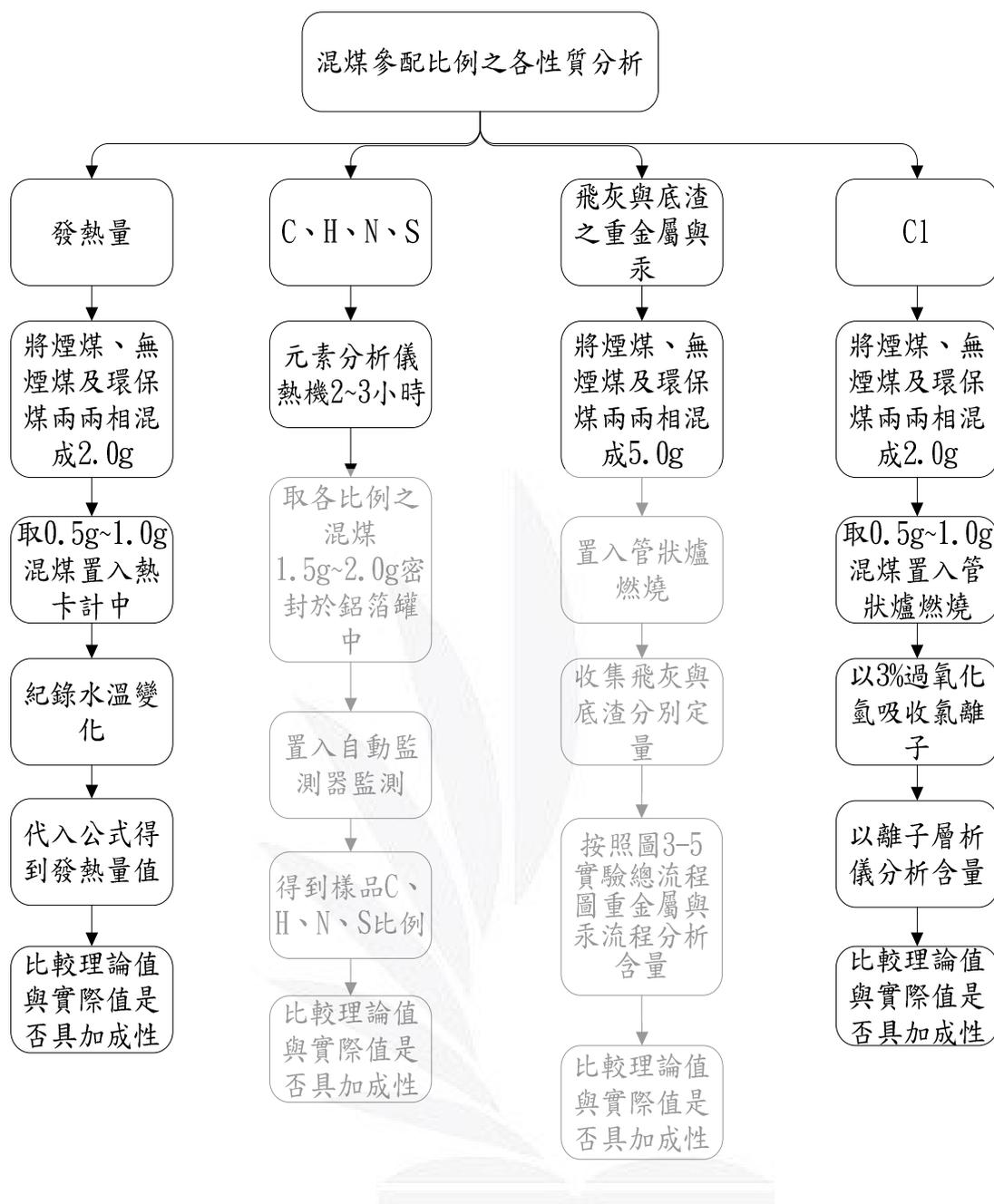


圖 3-5 加成性實驗流程圖

3-3-3 化學序列萃取(Chemical Sequential Extraction)分析

本實驗主要是利用化學序列萃取分析各混煤之底灰、飛灰中重金屬主要分佈在何種相態下。實驗方法為秤取 1.0g 樣品，置於 50ml 加蓋之 PVC 離心管中，依下列步驟進行各項重金屬之萃取。

1. 可交換相(Exchangeable)

- (1) 樣品加入 8mL 的 1.0M 的 $MgCl_2$ (pH=7.0)。
- (2) 在 25°C 下以 125rpm 水平振盪萃取 1 小時。

2. 碳酸鹽結合相(Carbonate bound)

- (1) 於可交換相之殘餘物加入 8mL 1M NaOAc(以醋酸調 pH=5.0)。
- (2) 在 25°C 下以 125rpm 水平往復振盪萃取 5 小時。

3. 氧化物結合相(Oxides bound)

- (1) 於碳酸鹽結合相之殘餘物加入 20ml 之 0.04M $NH_2OH \cdot HCl$ 與 HOAc 25% (v/v)所配置之藥劑。
- (2) 在 96°C 下振盪萃取 6 小時。

4. 有機物結合相(Organic bound)

- (1) 於氧化物結合相所得到的殘餘物加入 3mL 之 0.02M HNO_3 及 5mL 之 30% H_2O_2 (以 HNO_3 調整 pH=2.0)溶液，以錫箔密封離心管在錫箔紙上刺 2-3 孔 (以利氣體蒸出)；在 $85 \pm 2^\circ C$ 水浴，並且振盪 2 小時。
- (2) 樣品再加入 3mL 之 30% H_2O_2 (以 HNO_3 調整 pH=2.0)溶液，以錫箔紙密封後再次加熱到 85°C，間歇振盪 3 小時。
- (3) 冷卻後，加 5mL 3.2M NH_4OAc 在 20%(V/V) HNO_3 ，並定量至 20ml。
- (4) 連續振盪 30 分鐘。

5. 殘渣相(Residual)

- (1) 於有機物結合相所得到的殘餘物加入 10mL 10%HF 及 10mL H_2O_2 。
- (2) 在 25°C 下以 125rpm 水平往復振盪萃取 1 小時。

前四步驟所得之萃取液均以離心機以 10000rpm 離心 30 分鐘，上澄液再以裝置 0.45 μ m 濾紙之吸管吸出，儲存於 4 $^{\circ}$ C 以待分析。在進行下一萃取步驟前，殘渣先以 8mL 之去離子水振盪清洗 30 分鐘，離心後丟棄清洗液。



圖 3-6 化學序列萃取分析流程(Tessier, 1979)

第四章 結果與討論

4-1 煤樣等級區分及性質比較

試驗煤樣之實驗近似分析結果顯示固定碳含量分別介於 64.06% 及 90.02%，且其發熱量為 6785.90 ± 402.58 Kcal/kg 及 7570.30 ± 472.49 Kcal/kg，根據 ASTM D388 之分類基準，本試驗煤樣分別為半無煙煤及高揮發性煙煤。此外，本實驗中亦挑選環保煤進行試驗，分析結果如表 4-1 所示。

表 4-1 試驗燃煤之近似分析、元素分析及熱值分析結果

	Semianthracite coal	High volatile C bituminous coal	Envirocoal
Proximate analysis			
Moisture%	4.48±0.86	2.58±0.06	15.59±0.15
Ash% (db)	27.93±5.78	11.78±0.80	3.48±0.16
Volatile matter% (daf)	9.98	35.94	51.03
Fixed carbon% (daf)	90.02	64.06	48.97
Ultimate analysis			
C%	57.67±4.81	63.07±3.85	52.49±0.76
H%	1.99±0.22	3.87±0.29	4.03±0.11
N%	0.57±0.36	1.23±0.13	0.88±0.04
S%	0.88±0.13	1.32±0.04	0.83±0.04
Cl%	0.07±0.11	0.03±0.00	0.03±0.00
O%	6.41	16.12	22.67
Heating value (db) (Kcal/kg)	7570.30±472.49	6785.90±402.58	6471.07±290.86

db : dry basis ; daf : dry, ash-free basis

一般而言，揮發性物質含量高，顯示其燃燒反應為氣相之擴散燃燒，相較於固定碳燃燒容易。由近似分析結果可知，環保煤的揮發性物質 51.03%，遠高於無煙煤 9.98% 及煙煤 35.94%，可見環保煤的揮發性物質含量高，著火點較低且易燃性高。另從實驗過程中環保煤在尚未完全進入爐體中心前，便快速激烈的進行燃燒反應，此一現象亦說明揮發性物質含量對煤樣燃燒反應速率的影響。此外由燃燒時間與燃燒質量殘餘率關係圖亦可

知，環保煤在開始燃燒反應後，質量便快速遞減，反觀半無煙煤及高揮發性煙煤質量遞減速率均沒有環保煤快速，表示出揮發性物質會影響燃燒初期的燃燒速率(如圖 3-2)。然而揮發性物質含量高，亦即固定碳低，相對的燃盡時間也隨之減短，從灼燒減量實驗結果可知環保煤的質量殘餘率低於 5%，而半無煙煤及高揮發性煙煤均都高於 10%，亦說明環保煤之固定碳低且灰份量少之結果。雖然環保煤較易燃燒，但是所產生的熱值卻不如其它二種煤，因為固定碳少，熱值也相對較低。在本研究之試驗煤樣中，半無煙煤固定碳最多，所以熱值最高，其次分別為高揮發性煙煤及環保煤。固定碳是燃煤中除去揮發性物質之外的可燃物，為燃煤中以固態形式燃燒的部份，因此固定碳含量多，燃盡時間長，且不易達到完全燃燒。因此從燃燒時間與質量殘餘率變化可知半無煙煤及高揮發性煙煤的燃盡時間大約在 50 分鐘左右。

元素分析方面，結果顯示可燃份中碳含量比例以高揮發性煙煤 $63.07\pm 3.85\%$ 最高，半無煙煤 $57.67\pm 4.81\%$ 次之，環保煤 $52.49\pm 0.76\%$ 最少。其中半無煙煤雖然有最高的固定碳比例，但可燃分中碳含量比例卻不是最高，表示揮發份中也富含碳元素。而元素分析中，硫的含量會直接影響煤在燃燒過程中所排放硫化物含量，近年來燃煤電廠漸有混燒環保煤之需求，因環保煤本身具低灰、低硫特性，可以降低硫化物的產生量，從元素分析結果顯示，三種煤的硫含量由高至低分別為，環保煤、高揮發性煙煤及半無煙煤。環保煤的硫含量確實符合電廠所說的低灰低硫的特性。而一些文獻亦指出煤樣本身硫含量會影響重金屬排放特性，因此在後續章節也將針對硫的含量進行重金屬排放特性影響之探討。元素氫、氮及氧之含量如表 4-1 所示。

4-2 混煤燃燒之加成特性

混煤燃燒雖然具有經濟成本的降低、燃料使用多元化、提升單一煤種

之可用性等優點，但由於混煤之燃燒特性無法完全地藉由原煤來預測，使得混煤本身的燃燒特性更顯複雜，再加上煤本身為不均勻物質且等級不一，在燃燒過程可能造成污染物增加，降低燃燒效率以及燃燒損失急劇增加等種種問題。因此本研究利用半無煙煤、高揮發性煙煤以及環保煤分別進行混合，除進行混煤之基本性質分析外，亦研究不同混煤燃燒之化學性質加成特性，用以預測混煤燃燒性質，即探討實驗值與理論計算值的線性關係。

理論值計算公式 = 煤 A 元素含量 × 煤 A 之摻配比例 + 煤 B 元素含量 × 煤 B 之摻配比例

當相關性 $R^2 > 0.6$ 則表示不同等級及摻配比的混煤組成元素分析比例變化具有加成性。具有加成性則表示當進行混燒試驗時，若已知原煤之元素分析值則可依據摻配比計算出混煤之元素分析值，並利於推測後續燃燒所需之供氣量及預測燃燒後污染物排放量。表 4-1 及表 4-2 分別為各混煤摻配比下元素及發熱量之理論計算值與實驗值。

表 4-2 混煤摻配比下元素及發熱量之理論計算值

摻配比 項目	半無煙煤：高揮發性煙煤					環保煤：半無煙煤					環保煤：高揮發性煙煤				
	90:10	70:30	50:50.	30:70	10:90	90:10	70:30	50:50.	30:70	10:90	90:10	70:30	50:50.	30:70	10:90
C	71.82	71.58	71.34	71.11	70.87	66.76	67.91	69.06	70.21	71.36	66.64	67.55	68.47	69.38	70.29
H	3.55	3.81	4.07	4.33	4.58	4.50	4.26	4.02	3.78	3.54	4.63	4.65	4.67	4.69	4.70
N	1.39	1.49	1.59	1.69	1.80	1.07	1.13	1.19	1.25	1.31	1.12	1.28	1.44	1.60	1.77
S	0.87	0.89	0.90	0.92	0.94	0.90	0.89	0.88	0.88	0.87	0.91	0.92	0.92	0.93	0.94
Heating Value	7570.3	7491.86	7334.98	7178.10		7460.38	7240.53	7020.68	6800.84		6754.42	6691.45	6628.48	6565.52	

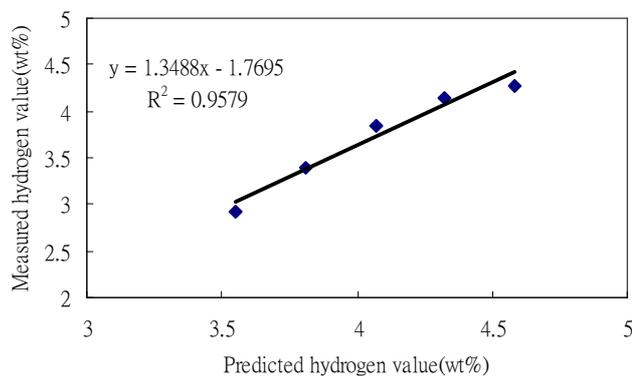
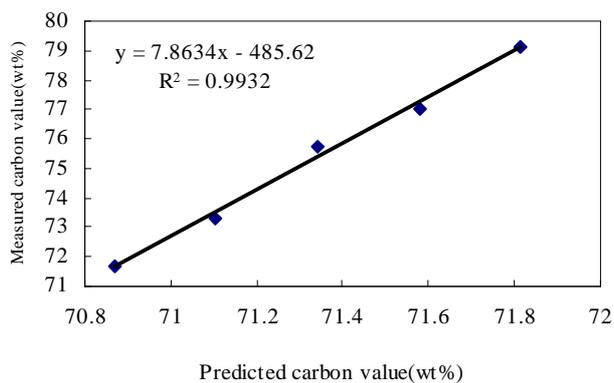
表 4-3 混煤摻配比下元素及發熱量之實驗值

摻配比 項目	半無煙煤：高揮發性煙煤					半無煙煤：環保煤					高揮發性煙煤：環保煤				
	90:10	70:30	50:50.	30:70	10:90	90:10	70:30	50:50.	30:70	10:90	90:10	70:30	50:50.	30:70	10:90
C	79.10	77.04	75.75	73.28	71.68	65.53	68.64	71.28	73.63	65.53	66.84	66.17	67.14	69.32	66.84
H	2.92	3.39	3.85	4.15	4.28	4.15	3.89	3.77	3.86	3.59	4.72	4.85	4.71	4.69	4.36
N	1.29	1.3	1.49	1.68	1.85	1.08	1.08	1.12	1.26	1.33	7.71	4.07	2.81	2.14	2.46
S	0.66	0.66	1.05	0.98	1.02	0.77	0.70	0.80	0.94	0.77	0.89	0.87	0.94	0.98	0.89
Heating Value	7418.17	6947.47	7102.56	6715.29		7607.96	7503.09	7438.29	7288.02		6751.31	6472.07	6662.27	6352.65	

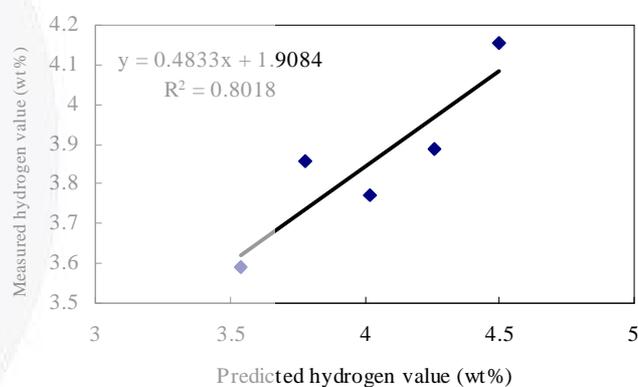
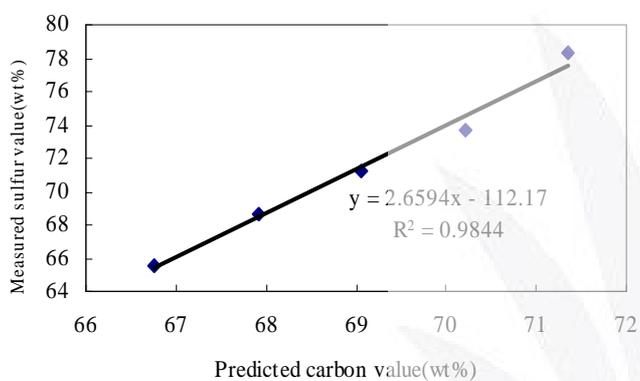
根據圖 4-1~圖 4-3 結果顯示，半無煙煤、高揮發性煙煤及環保煤混煤之 C、H、N、S 皆具有加成特性，其相關性 R^2 均大於 0.6986。高揮發性煙煤與環保煤混合在元素 H 之加成相關性較低，半無煙煤與高揮發性煙煤混合在元素 N 之加成相關性較低。推測可能因為分析混煤之元素分析所需取樣品克數(1.5~2.5mg)太微量，且煤樣相混後之均質性較差，才使得上述實驗結果沒有具加成性。因考量到混煤之元素分析具有加成作用，若進一步地考量 S 之加成作用，將經加成作用換算之 S 理論預測值，對重金屬排放率做相關性之探討，當相關性 $R^2 > 0.6$ ，表示可以在混煤燃燒試驗過程中，直接從原煤的 S 的含量中根據元素分析之加成性，推估出混煤之 S 的含量；配合僅分析原煤燃燒後重金屬之排放率，並利用經研究證實之 S 的含量對重金屬排放率具有相關性之結論，間接即可推估出混燒後不同配比下所產生重金屬之含量，此對於燃煤電廠後續之污染防治設備之設計相當具有幫助。

從實驗數據中觀察到半無煙煤混合高揮發性煙煤、半無煙煤混合環保煤其發熱量具有加成作用，與元素組成結果一致，代表混合等級差異性較大的煤，其熱值及元素組成都是可以經由個別原煤發熱量來推估。然而當兩種等級相近的煤相互混合，其不具加成作用。原因可能是低等級煤中所含揮發性物質之影響，由於低級煤含揮發物質較高，且揮發性物質依其型態不同而有不一樣的熱值，不同於固定碳可以放出穩定的熱值，因此造成混燒兩低等級煤的發熱量無法具有加成性質。

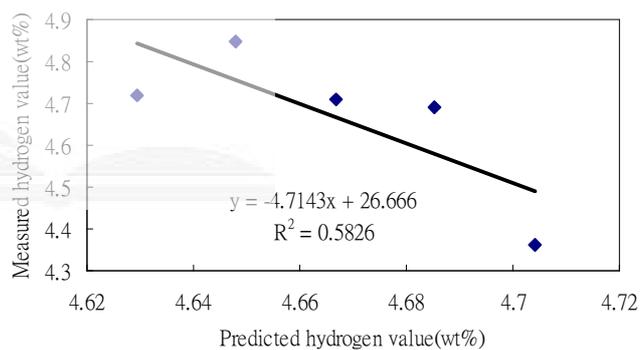
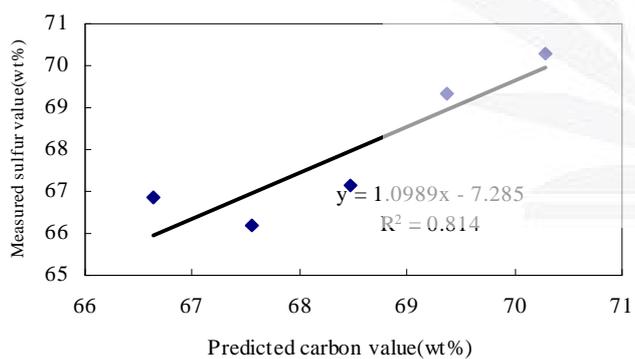
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal : High volatile C bituminous coals



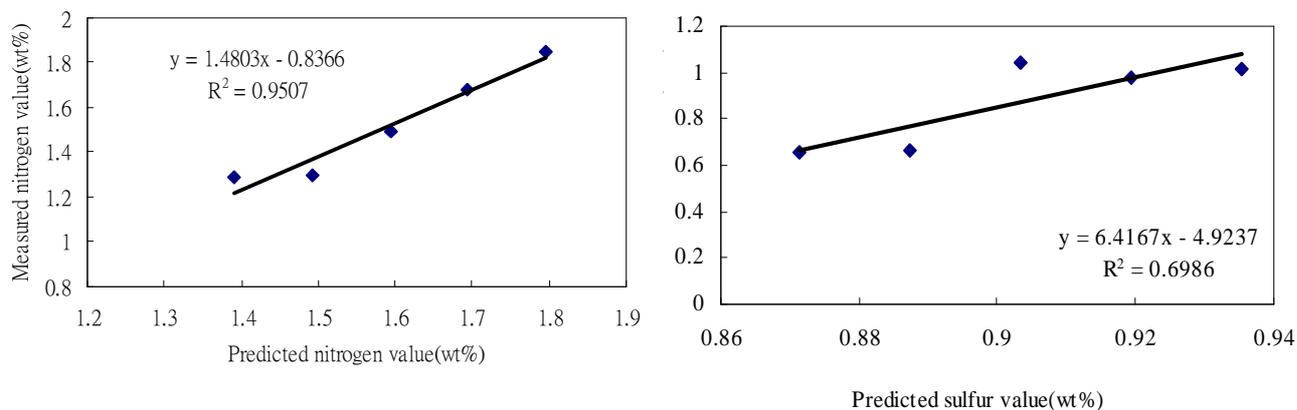
(b) semianthracite



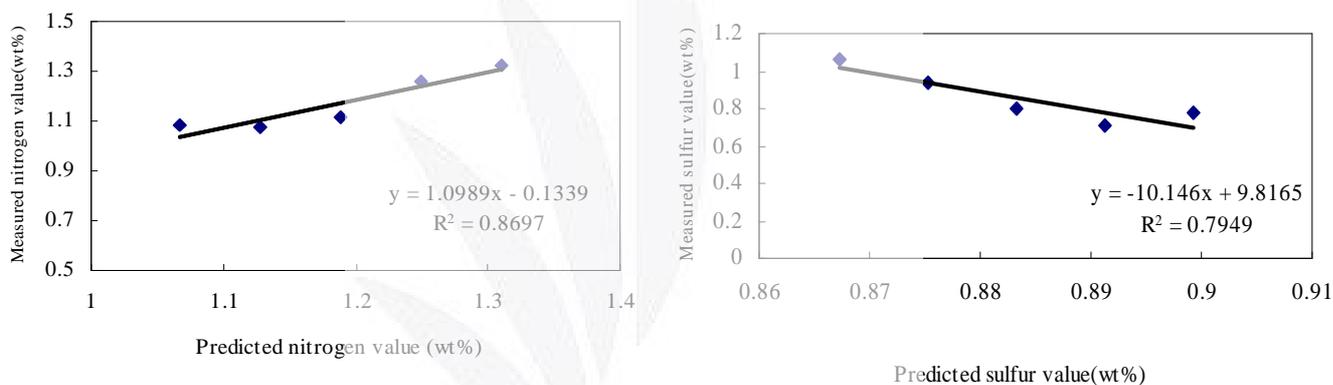
(c) High volatile C bituminous coals : Envirocoal

圖 4-1 混煤基本性質中碳含量及氫含量加成性之相關比較

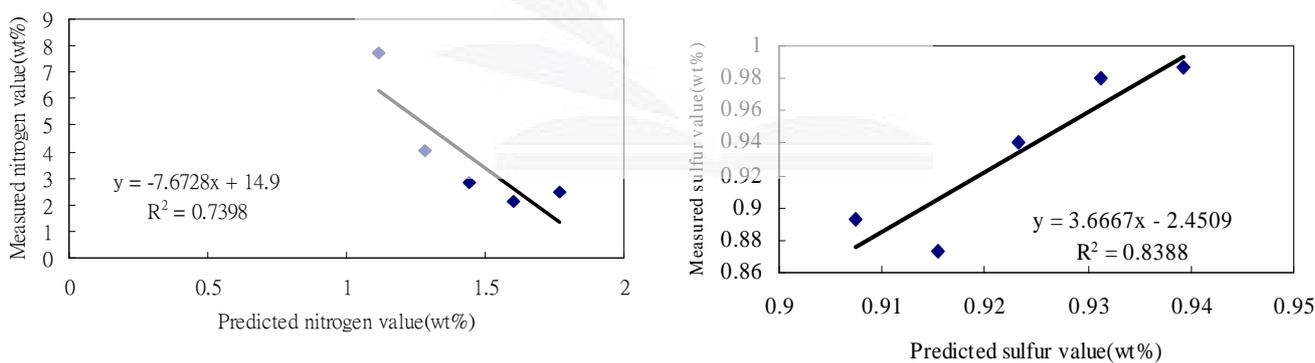
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal : High volatile C bituminous coals



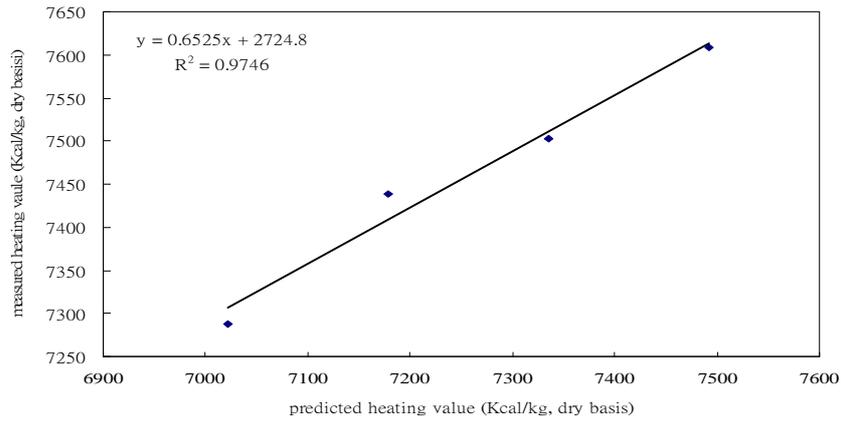
(b) semianthracite coal : Envirocoal



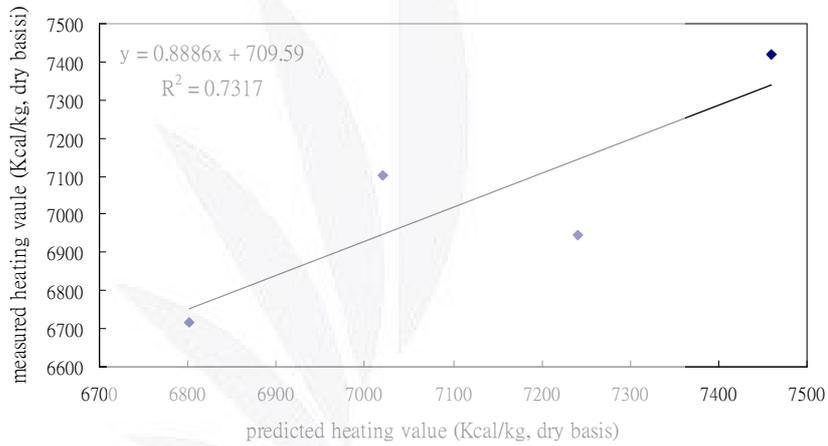
(c) High volatile C bituminous coals : Envirocoal

圖 4-2 混煤基本性質中氮含量及硫含量加成性之相關比較

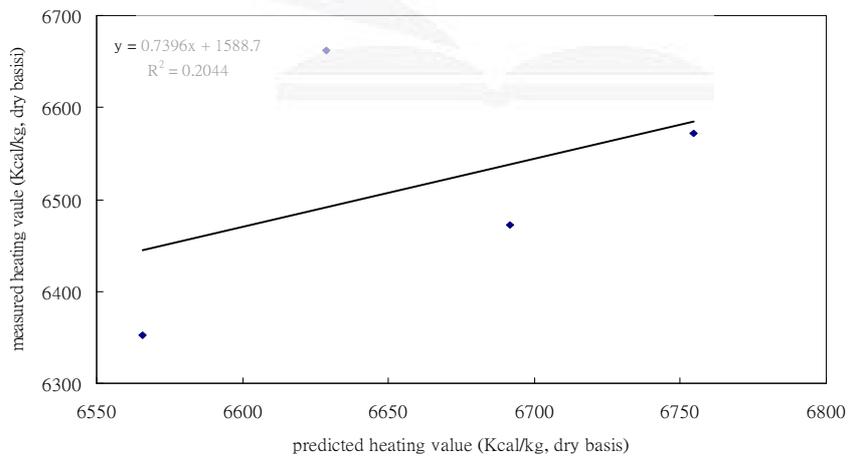
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite : High volatile C bituminous



(b) semianthracite : Envirocoal



(c) High volatile C bituminous coals : Envirocoal

圖 4-3 混煤基本性質中發熱量加成性之相關比較

4-3 混煤燃燒過程重金屬排放特性之探討

本研究針對半無煙煤、高揮發性煙煤及環保煤等三種煤樣，探討利用不同摻配比例及二種粒徑分佈(74 μm ~149 μm ；149 μm ~420 μm)進行混燒試驗，分析混燒後重金屬 Se、As、Cd、Hg、Cr、Cu、Pb、Zn 排放分佈於固相(底渣)及氣相(飛灰及排放氣體)中的比例。

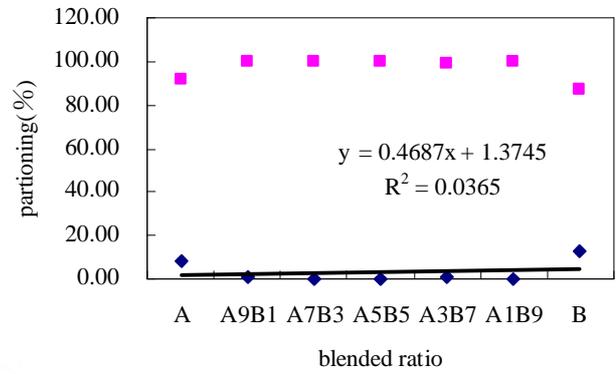
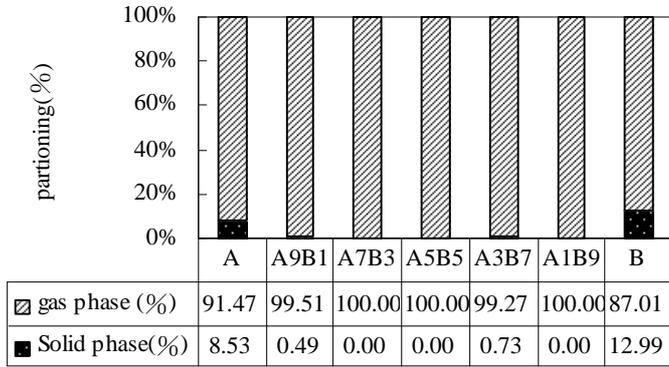
$$\text{固相比} = \frac{\text{底灰重金屬濃度}}{\text{煤樣重金屬濃度}} \times 100\%$$

$$\text{氣相比} = 100\% - \text{固相比}$$

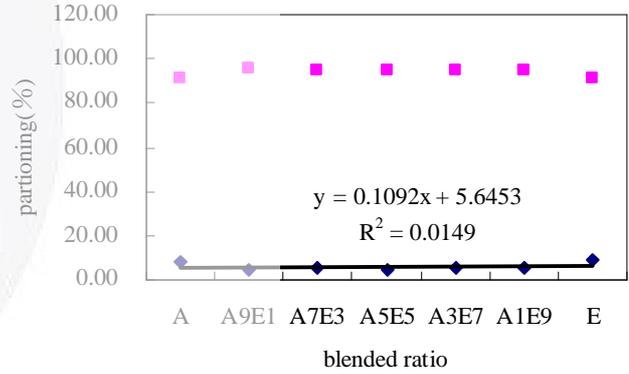
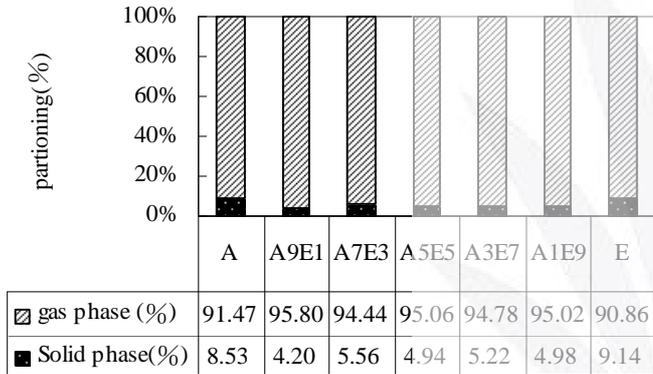
而其中 Se、As、Cd 之偵測值皆低於儀器偵測極限，故本節主要僅針對易揮發性金屬 Hg、中度揮發性金屬 Pb 及 Zn、難揮發性金屬 Cu 及 Cr 之排放特性進行探討。

1. 易揮發性金屬 Hg

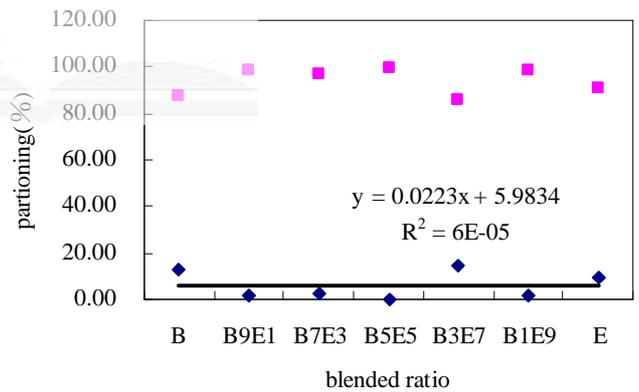
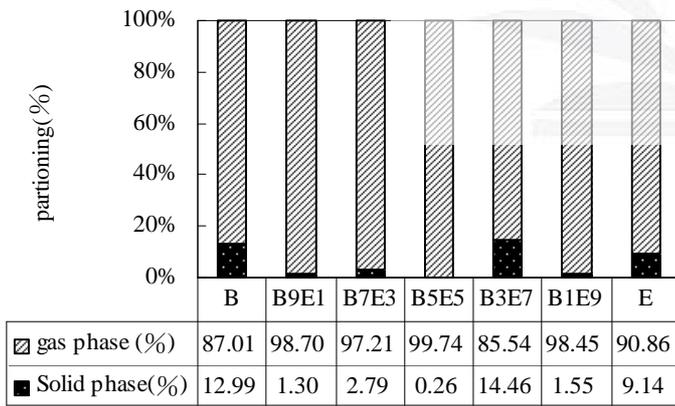
易揮發性金屬 Hg 之沸點為 365 $^{\circ}\text{C}$ ，且本實驗之燃燒操作溫度為 1050 $^{\circ}\text{C}$ ，故理論而言重金屬 Hg 之排放分佈應都存於氣相，而根據不同摻配比及粒徑大小之混煤燃燒試驗結果顯示，重金屬 Hg 皆趨向以氣相存在為主(約佔 85.54%~100%)，而混煤摻配比的的不同對於氣相中重金屬 Hg 之排放分佈特性變化趨勢並不明顯($R^2 < 0.3$)(如圖 4-4 (a)(b)(c)及圖 4-5 (a)(b)(c))。



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



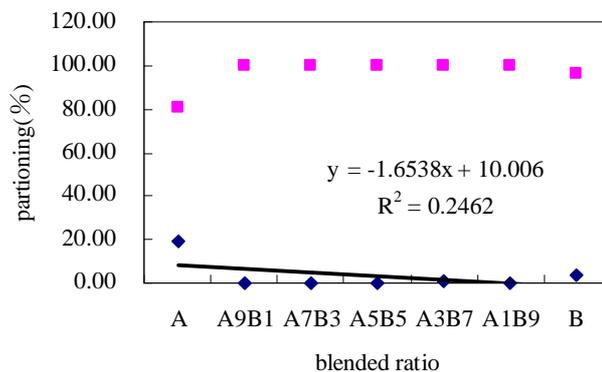
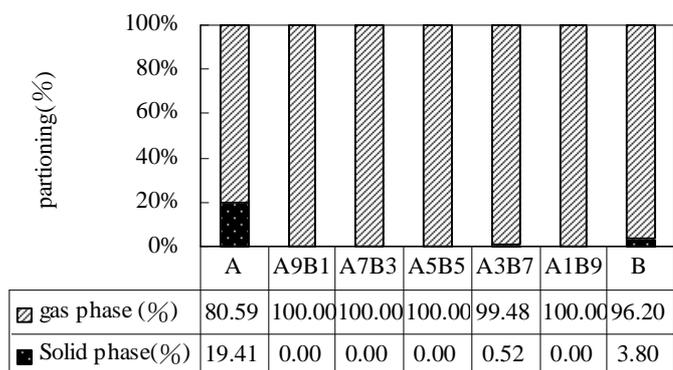
(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



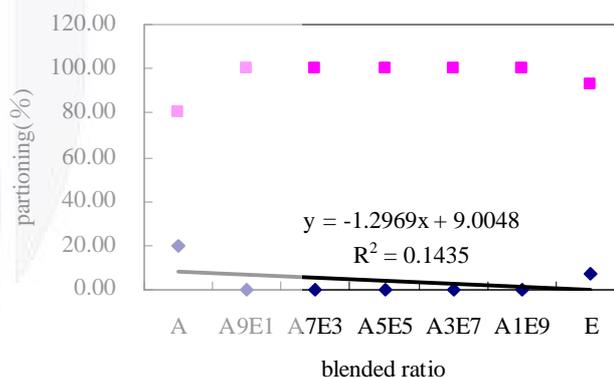
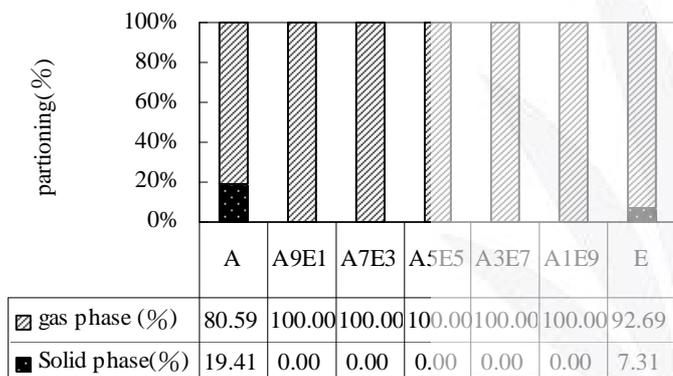
(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

圖 4-4 重金屬 Hg 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性

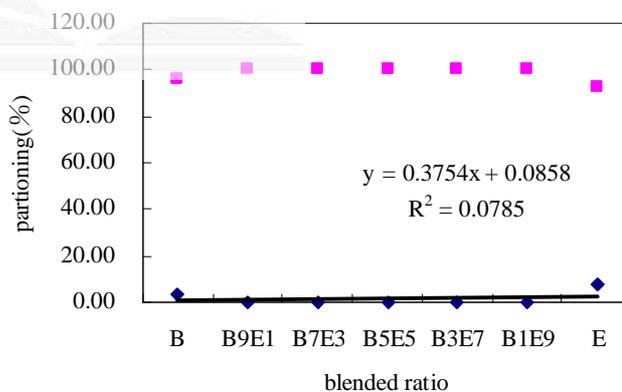
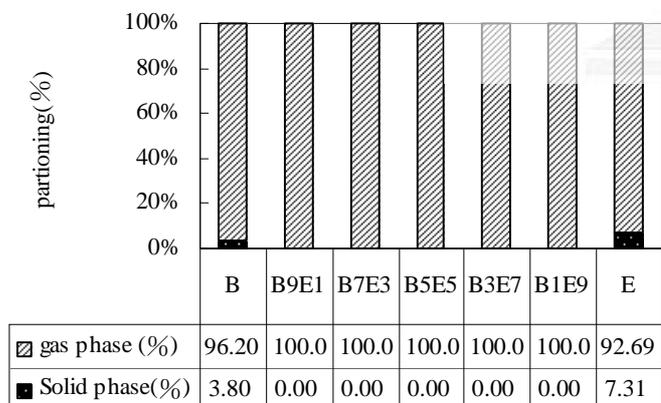
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



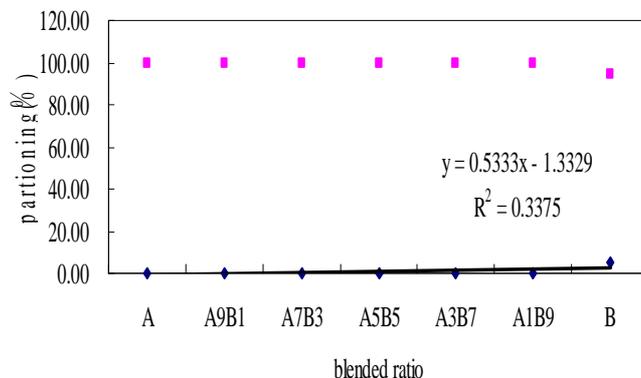
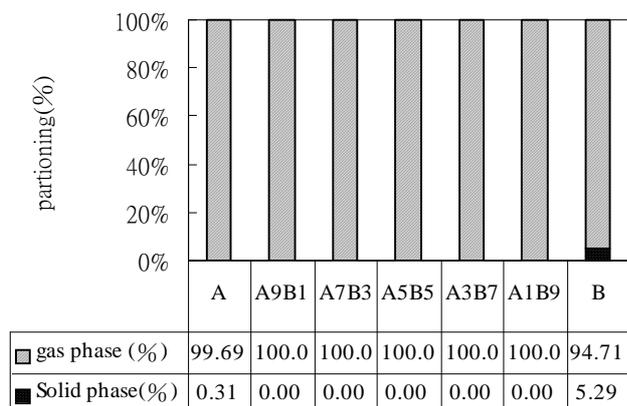
(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

圖 4-5 重金屬 Hg 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性

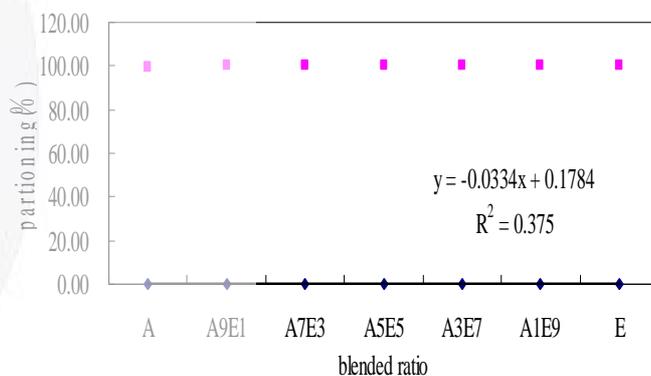
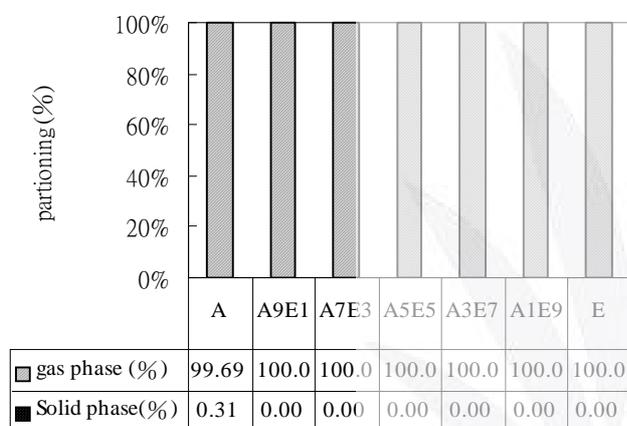
2. 中度揮發性金屬 Pb 及 Zn

中度揮發性重金屬 Pb 之排放分佈特性，由圖 4-6 (a)(b)(c)及圖 4-7(a)(b)(c)可知在三種等級試驗煤樣其不同粒徑及摻配比之混燒試驗中，因重金屬 Pb 及其化合物較易冷凝、濃縮並易附著於較小顆粒，故全都趨向以氣相存在為主(約佔 76.61%~100%)。三種試驗配比中，半煙煤與高揮發性煙煤混燒時，大粒徑試驗煤樣中(149 μ m~420 μ m)Pb 沉積於固相的比例普遍高於小粒徑(74 μ m~149 μ m)，另二種試驗配比，觀察到 Pb 的分佈並不受到粒徑大小影響。因此綜觀而言，Pb 之排放分佈特性與粒徑大小較無關係，而是與燃燒溫度及煤種特性有較大之關連性。因此隨著摻配比及粒徑大小的不同，氣相中重金屬 Pb 之排放分佈特性變化趨勢並不明顯($R^2 < 0.4$)。

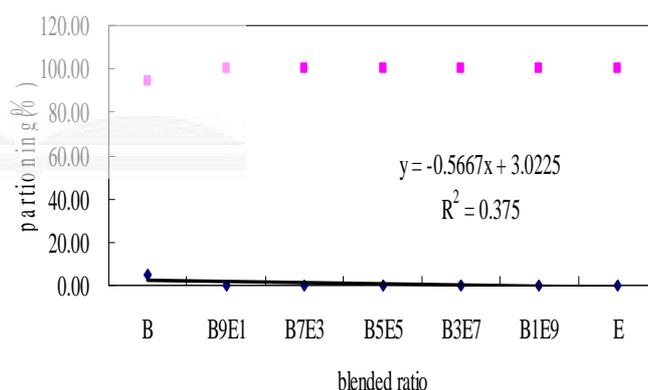
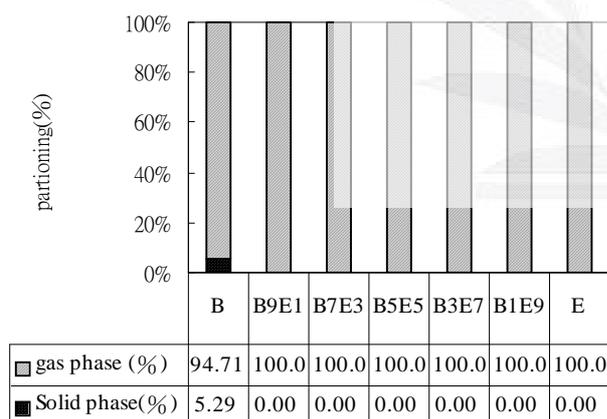
至於同屬中度揮發性重金屬 Zn 之排放特性，由於 Zn 之沸點為 907 $^{\circ}$ C，而本實驗之燃燒溫度為 1050 $^{\circ}$ C，故煤樣燃燒後其重金屬 Zn 推估應多以氣相分佈之比例居多，且實驗結果亦是如此，從圖 4-8 及圖 4-9 可明顯觀察到分佈於氣相比例大多高於 70%，除了純半無煙煤比例較低外(59.86%)。然而在混燒半無煙煤與高揮發性煙煤試驗中，大粒徑試驗煤樣中 Zn 分佈於固相中的比例(22.86%~30.25%)相對於小粒徑(8.09%~13.49%)，較多沉積於固相。當大粒徑試驗煤樣混燒環保煤時，Zn 分佈於固相比例(3.88%~17.79%)低於小粒徑試驗煤樣混燒環保煤(9.22%~31.90%)，推估原因可能如 Küçük(2003)提出大粒徑相混下，粒子間有較大空隙，使得粒子與空氣有較大之接觸面積，反而造成較佳之燃燒特性，進而提高 Zn 於氣相中的分佈比例。大粒徑試驗煤樣下，隨著摻配比不同 Zn 於氣相分佈比例改變不大($R^2 < 0.6$)；但在小粒徑試驗煤樣中，Zn 於氣相分佈隨著摻配環保煤比例之增加而有減少之趨勢。在大粒徑試驗煤樣中，純半無煙煤及純高揮發性煙煤 Zn 分佈於固相中的比例高於小粒徑；而純環保煤 Zn 分佈於固相中的比例卻低於小粒徑。



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)

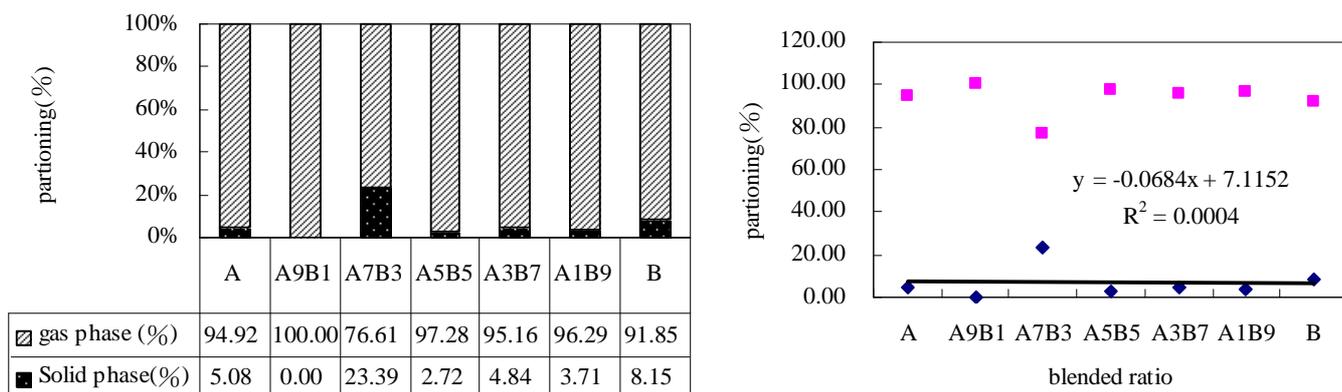


(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)

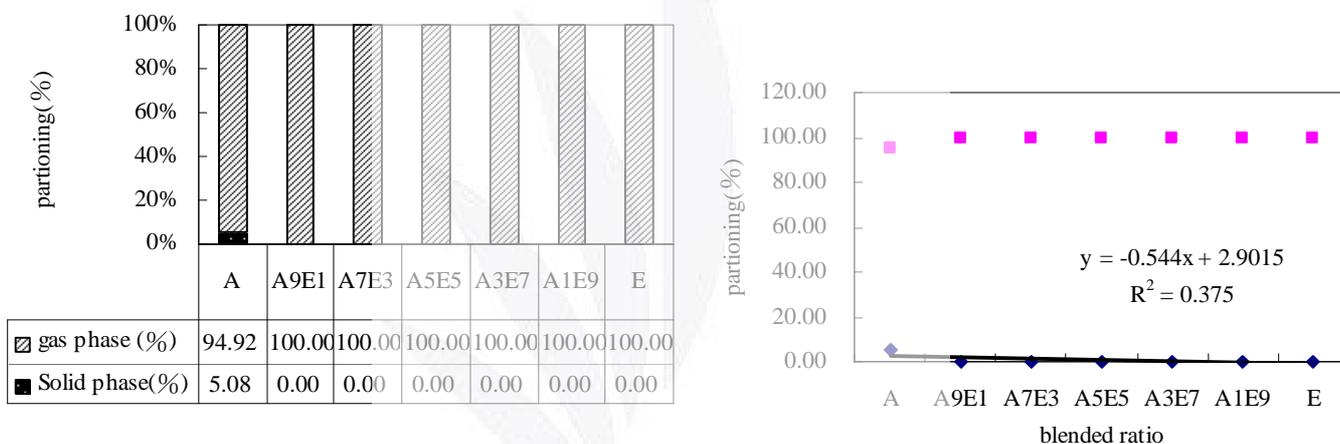


(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

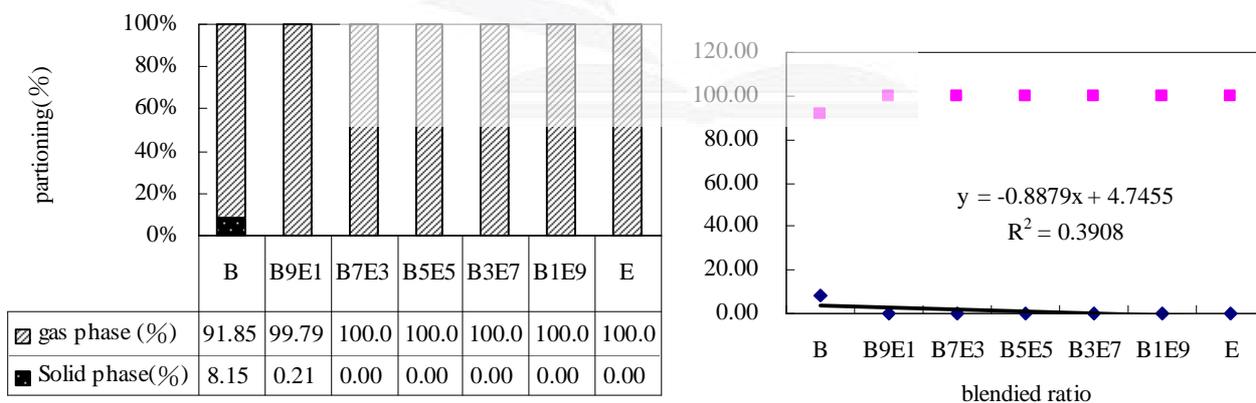
圖 4-6 重金屬 Pb 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



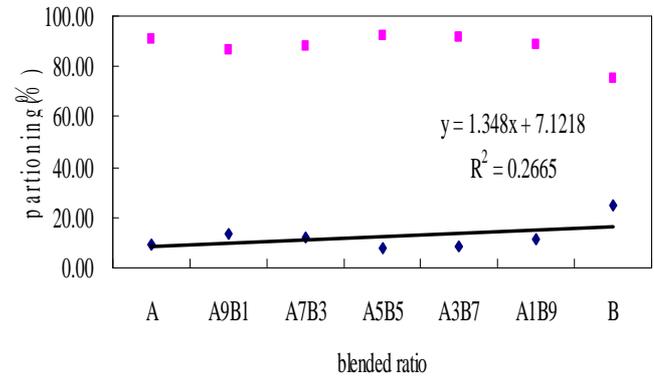
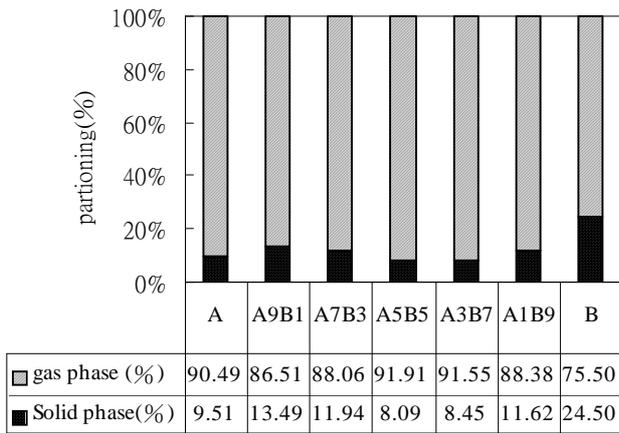
(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



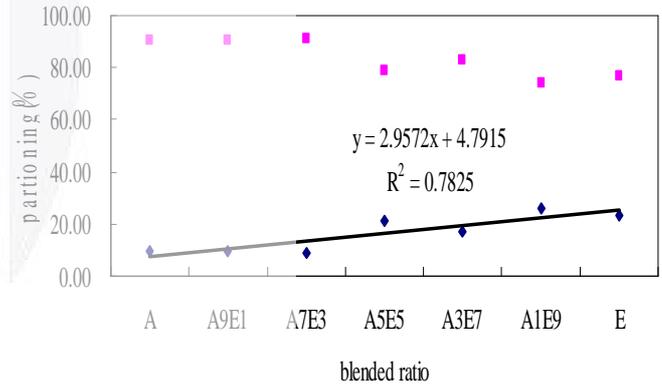
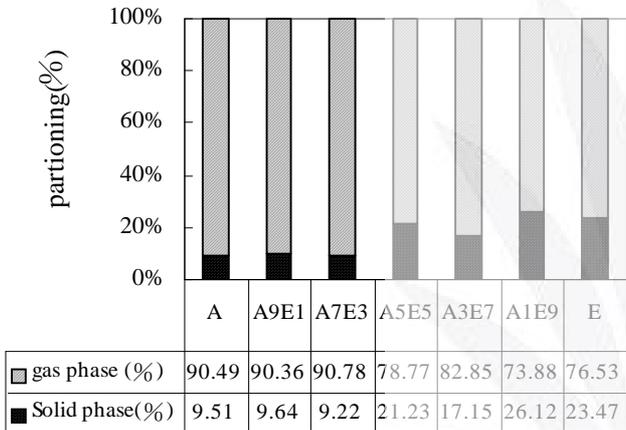
(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

圖 4-7 重金屬 Pb 於粒徑 149μm~420μm 混煤燃燒之分佈特性

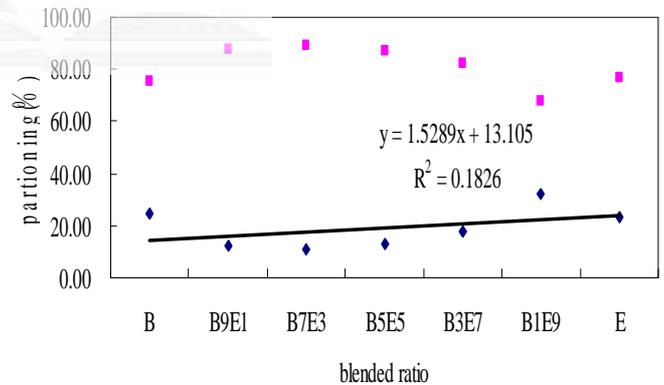
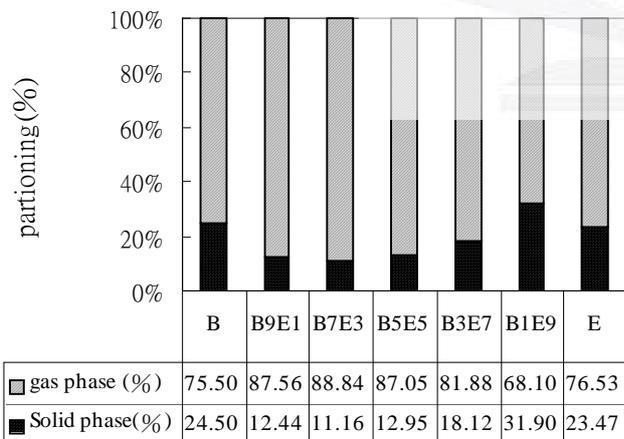
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



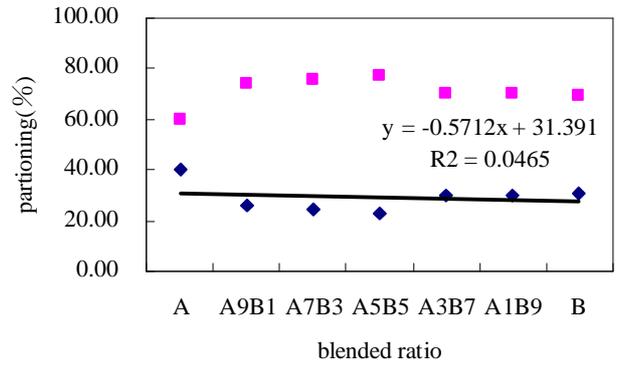
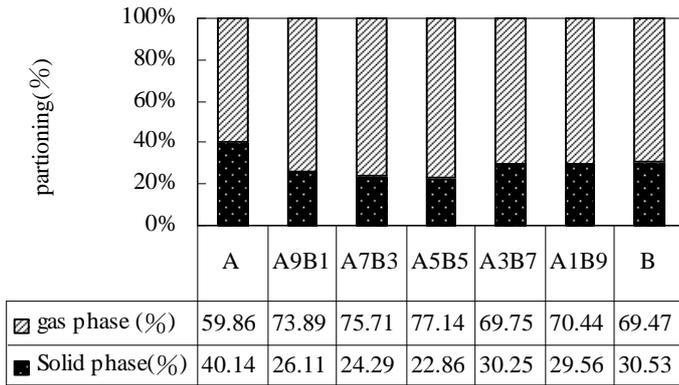
(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



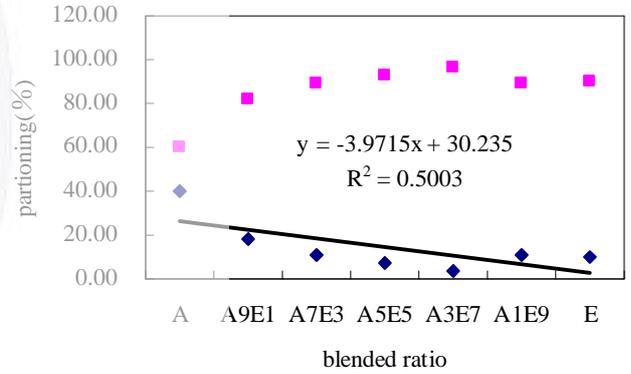
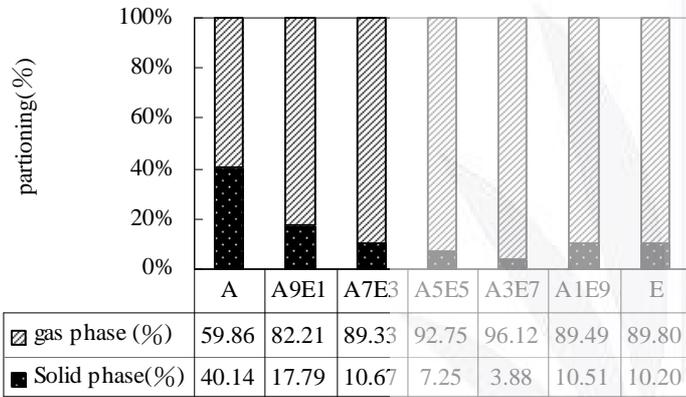
(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

圖 4-8 重金屬 Zn 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性

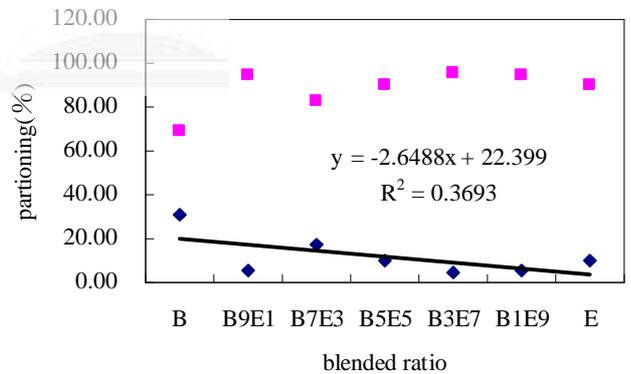
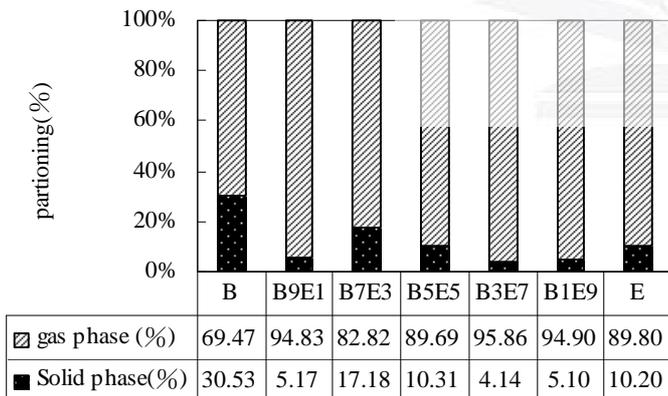
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

圖 4-9 重金屬 Zn 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性

2. 難揮發性金屬 Cr 及 Cu

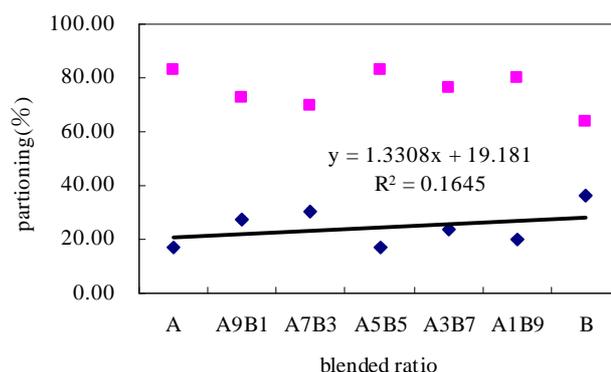
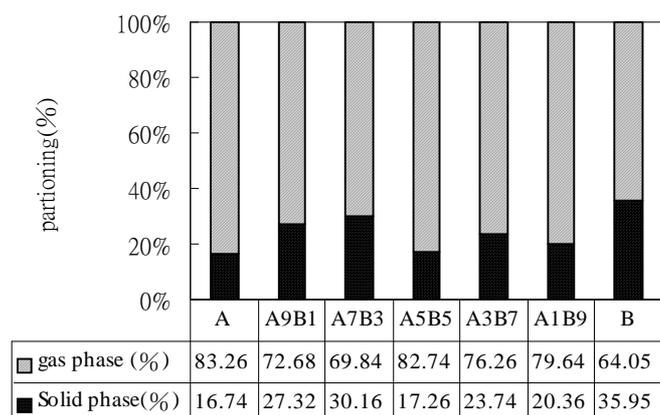
難揮發性金屬 Cr 之排放分佈特性結果顯示，燃燒純半無煙煤、純高揮發性煙煤及純環保煤產生之難揮發性金屬 Cr 分佈於氣相之比例，小粒徑試驗煤樣分別約佔 83.26%、64.05%及 0%，大粒徑試驗煤樣則分別約佔 22.86%、31.25%、25.61%，明顯觀察到大粒徑之純半無煙煤及純高揮發性煙煤多分佈於固相，反觀小粒徑則多分佈於氣相，但無論粒徑大小，純環保煤之 Cr 之排放分佈大多分佈於固相(>74.39)。混燒半無煙煤與高揮發性煙煤試驗中(如圖 4-10 (a)及圖 4-11(a))，隨著摻配比及粒徑大小不同，氣相分佈變化影響不大($R^2 < 0.1645$)；而大粒徑試驗煤樣 Cr 分佈於固相之比例約為小粒徑試驗煤樣二倍以上，即當等級相近之燃煤混燒，Cr 分佈於固相之比例隨著粒徑的增加而升高。另外二種混煤試驗，半無煙煤與環保煤混燒試驗及高揮發性煙煤與環保煤混燒試驗中，小粒徑之試驗煤樣，隨著摻混環保煤比例增加，重金屬 Cr 於氣相分佈比例有減少之趨勢($R^2 > 0.6697$)，推論可能是燃盡性能指數(H_F)的影響所導致。由江氏(2006)研究指出，隨著混煤中環保煤摻配比例增加，燃盡性能指數愈小，混燒之燃燒性能愈好、穩定性度愈高，難揮發性金屬之排放率愈小。即對於小粒徑而言，隨著環保煤摻配比例的增加，Cr 於氣相分佈比例隨之減少。

另一難揮發性 Cu 之排放分佈特性結果顯示，燃燒小粒徑純半無煙煤、純高揮發性煙煤及純環保煤產生之難揮發性金屬 Cu 分佈於氣相之比例，分別約佔 91.61%、83.65%及 34.96%；燃燒大粒徑純半無煙煤、純高揮發性煙煤及純環保煤產生之難揮發性金屬 Cu 分佈於固相之比例，分別約佔 60.60%、43.64%及 63.34%，其中可以觀察到燃燒小粒徑純半無煙煤、純高揮發性煙煤其 Cu 多分佈於氣相，約佔 91.61%、83.65%。混燒半無煙煤與高揮發性煙煤，大粒徑試驗煤樣之 Cu 相較於小粒徑試驗煤樣多分佈於固相(如圖 4-12 (a)及圖 4-13(a))。然而不論粒徑大小純環保煤之 Cu 的分佈比例大部分沉降於固相。小粒徑試驗煤樣混燒中，當摻混環保煤的

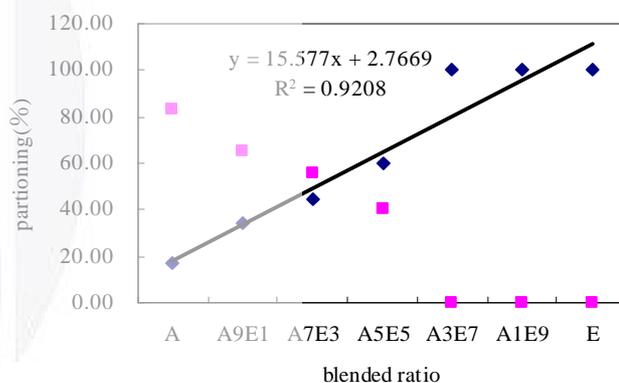
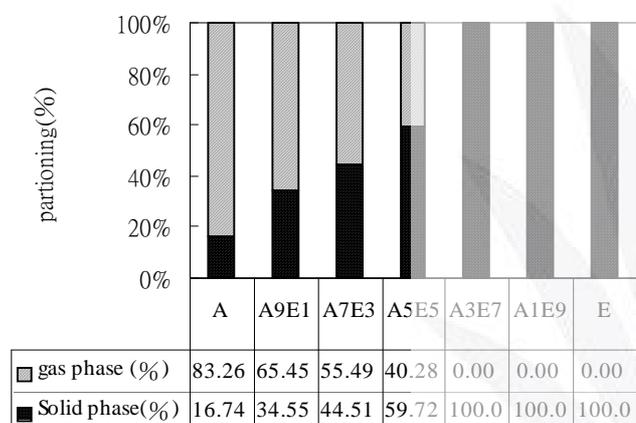
比例增加，則 Cu 分佈於固相之比例也隨之增加(如圖 4-12 (a)、(b))。半無煙煤與環保煤混燒試驗中，對小粒徑試而言，根據圖 4-12(b)隨摻混環保煤比例從 10%增加到 90%時，氣相中 Cu 之分佈比例從 82.29%減少至 34.00%，亦即重金屬 Cu 於氣相之分佈比例，隨摻配環保煤比例之增加而有減少之趨勢($R^2=0.9596$)；由圖 4-12(c)得知在高揮發性煙煤與環保煤混燒試驗中，隨摻混環保煤比例從 10%增加到 90%時，氣相中 Cu 之分佈比例從 87.35%減少至 51.92%，亦即重金屬 Cu 於固相之分佈比例，隨摻配環保煤比例之增加而有增加之趨勢($R^2=0.9127$)。大粒徑試驗煤樣混燒下，摻配比與粒徑大小對重金屬 Cu 於固相之分佈變化影響不大($R^2 < 0.3$)。

綜合前述之結果，在半無煙煤、高揮發性煙煤及環保煤之二種粒徑及不同摻配比混燒試驗結果，半無煙煤和高揮發性煙煤的混燒試驗，無論任何粒徑大小，摻配比對於重金屬 Hg、Pb、Zn、Cr 及 Cu 於氣相中的分佈比例無影響性，因此混燒等級相近之燃煤，影響其重金屬排放特性不在於粒徑大小，而是受燃燒溫度、重金屬之揮發性及煤種特性所影響。在半無煙煤和環保煤的混燒試驗中，小粒徑混煤之摻配比對重金屬 Zn、Cr 及 Cu 於氣相中的分佈比例相關性(R^2)分別為 0.7825、0.9208 及 0.9596，即以燃燒半無煙煤為考量時，隨著摻混環保煤的比例增加，將減少重金屬 Zn、Cr 及 Cu 於氣相中的分佈比例；但對於大粒徑而言，混煤之摻配比對重金屬 Hg、Pb、Zn、Cr 及 Cu 於氣相的分佈比例皆不具有相關性。另一高揮發性煙煤及環保煤之混燒試驗，摻配比對重金屬存於氣相中的分佈比例的影響，只於小粒徑之混燒試驗中的難揮發性金屬 Cr 及 Cu 有明顯之相關性(R^2 分別為 0.8722 及 0.9127)，即 Cr 及 Cu 皆隨摻混環保煤之比例增加而於氣相分佈有降低之趨勢；大粒徑之混燒試驗，無論易揮發性金屬 Hg、中度揮發性金屬 Pb 及 Zn 或是難揮發性金屬 Cr 及 Cu 於氣相中的分佈比例則和環保煤之摻混比例較無相關性。

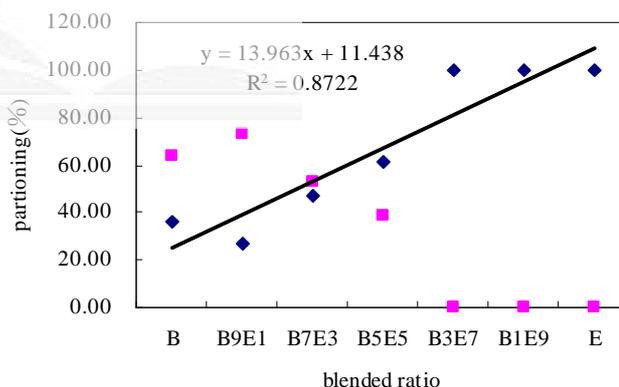
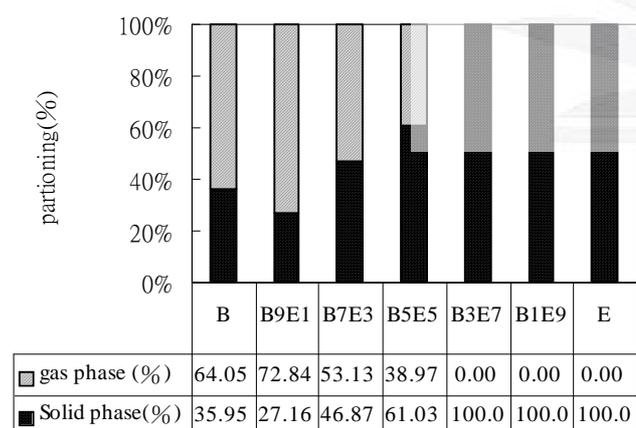
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)

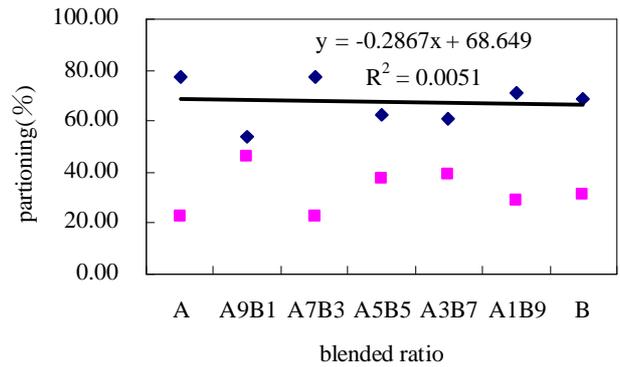
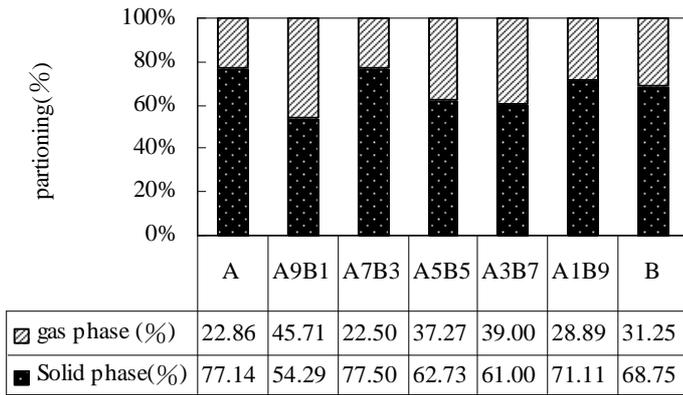


(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)

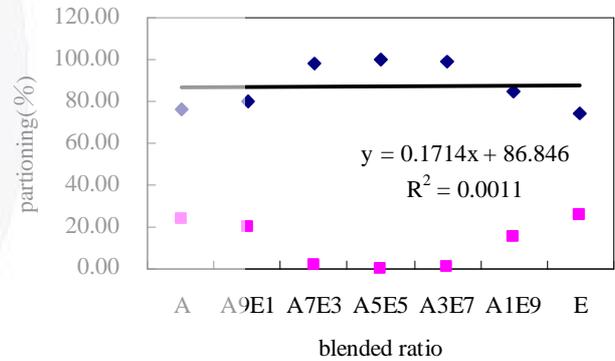
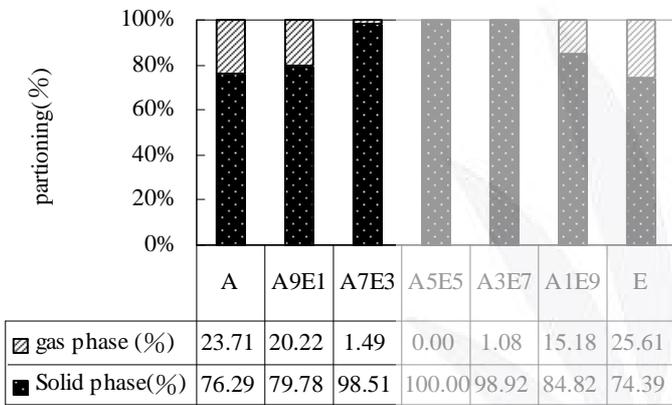


(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

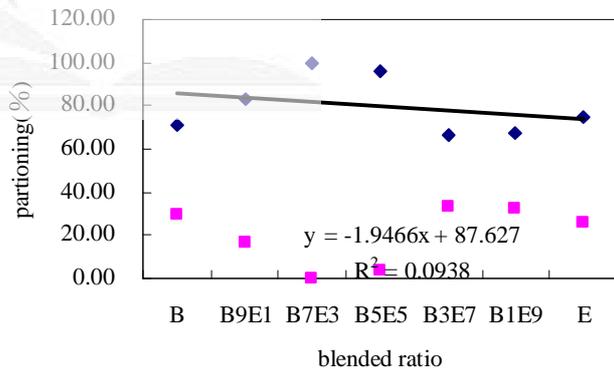
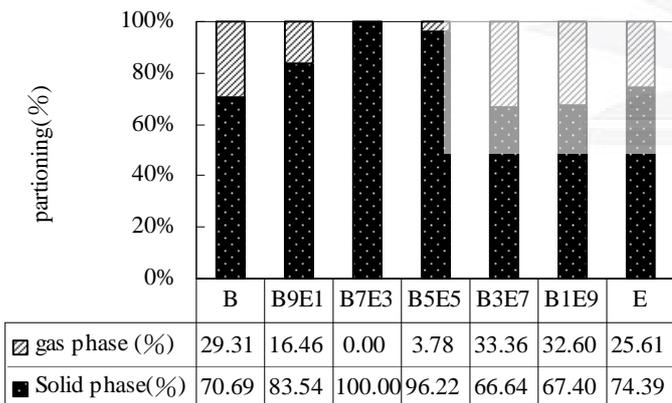
圖 4-10 重金屬 Cr 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)

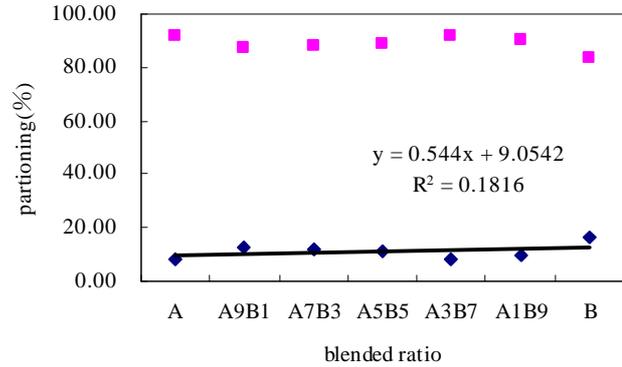
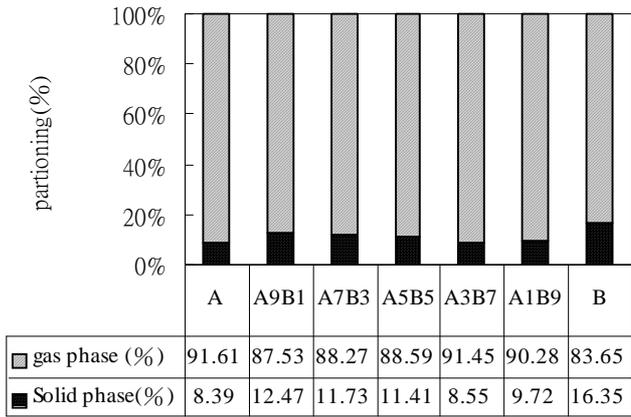


(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)

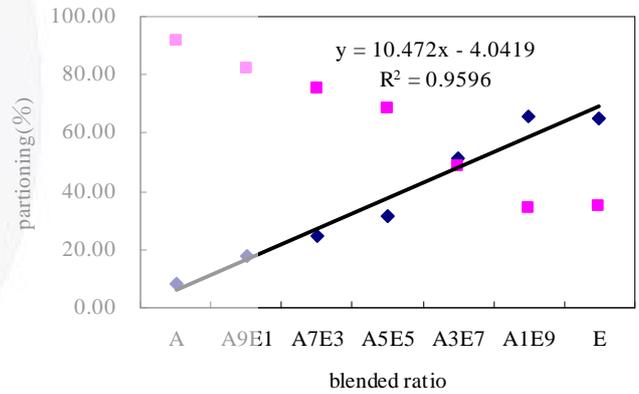
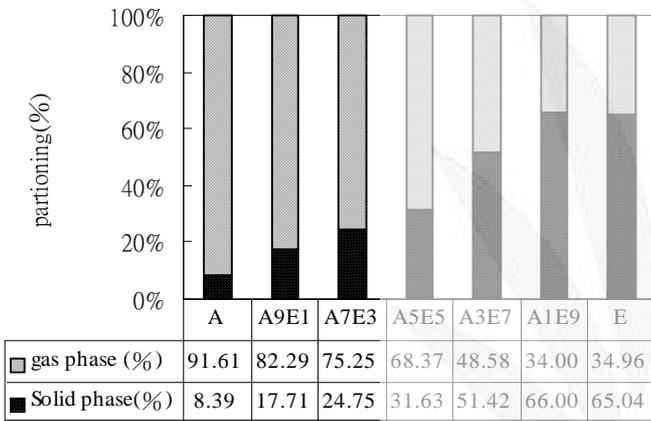


(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

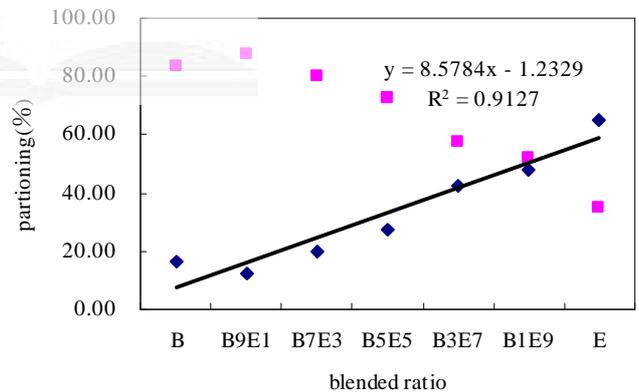
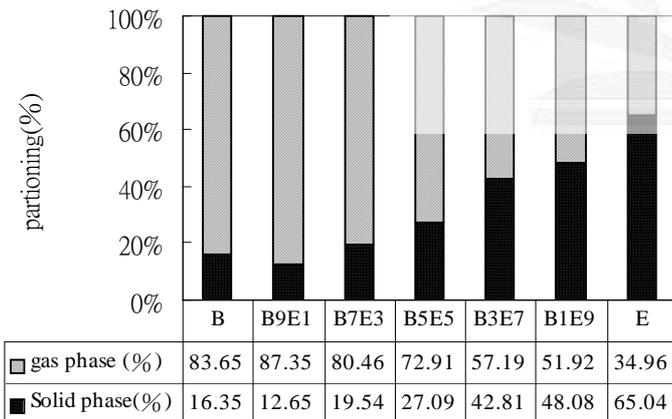
圖 4-11 重金屬 Cr 於粒徑 149μm~420μm 混煤燃燒之分佈特性



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)

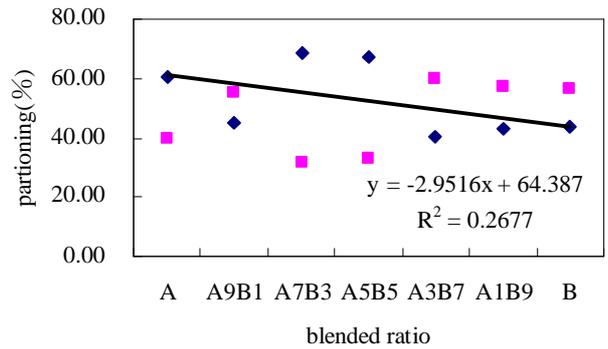
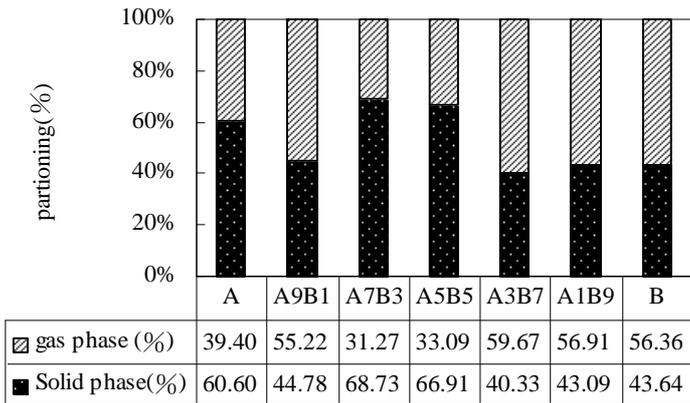


(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)

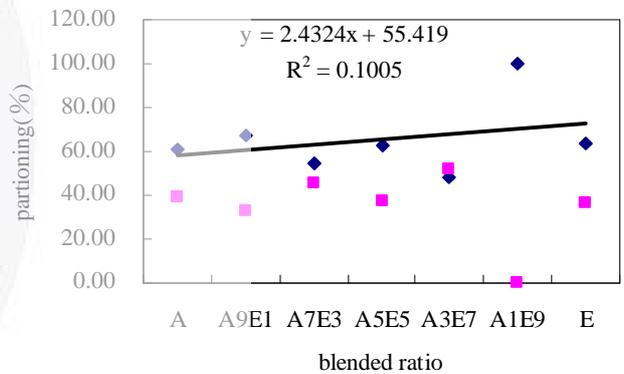
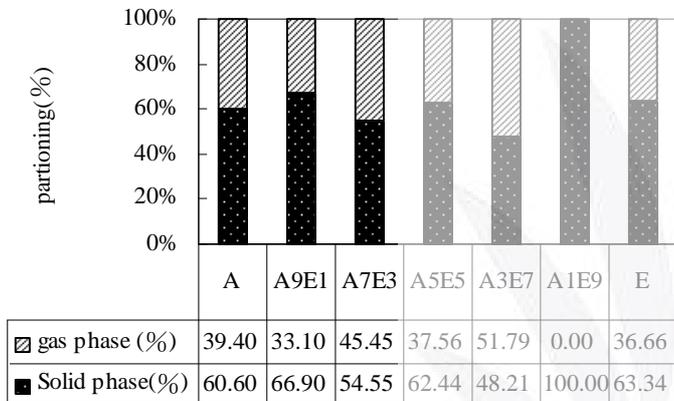


(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

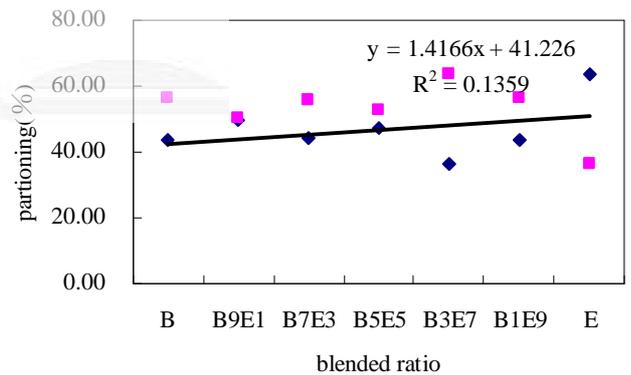
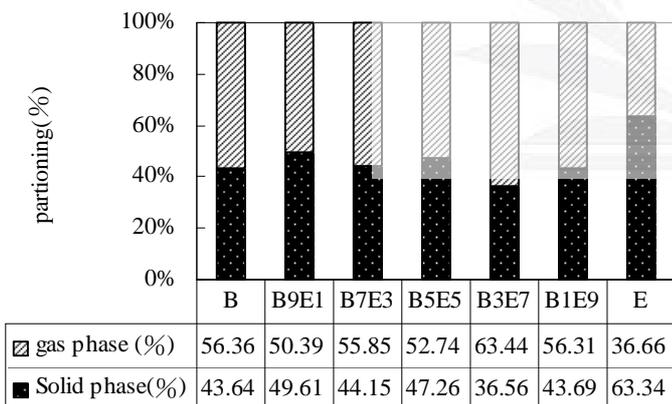
圖 4-12 重金屬 Cu 於粒徑 74 μ m~149 μ m 混煤燃燒之分佈特性



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

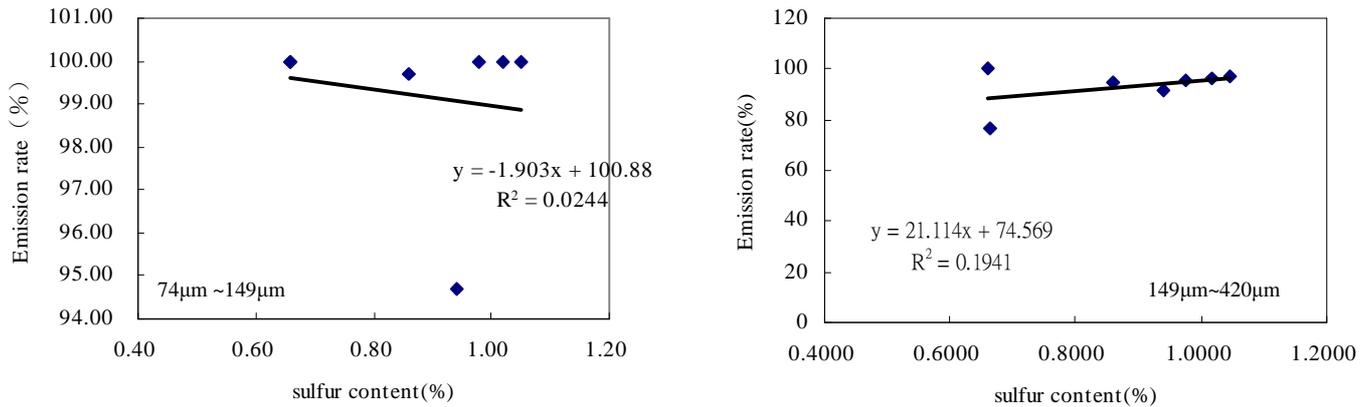
圖 4-13 重金屬 Cu 於粒徑 149 μ m~420 μ m 混煤燃燒之分佈特性

文獻研究中顯示，影響重金屬排放特性之主要因素有燃燒溫度、試驗材料之粒徑、進料量、供給空氣量、燃燒處理之試驗材料之種類、試驗材料之氯含量及試驗材料之硫含量等，而本研究控制燃燒溫度、進料量、供給空氣量等條件皆為固定值，主要變動的實驗參數為試驗材料之種類、試驗材料之粒徑及其摻配比；因此，本研究進一步探討混燒試驗中不同等級、粒徑及其摻配比之試驗燃煤中硫含量，對固相(底渣)及氣相(飛灰及重金屬吸收液)之 Pb、Zn、Cu 及 Cr 等重金屬排放分佈特性之影響。此外，文獻中對於重金屬排放率(emission rate)定義，則考量以底渣中重金屬濃度變化為基準，相關定義如下(Ching,1999)：

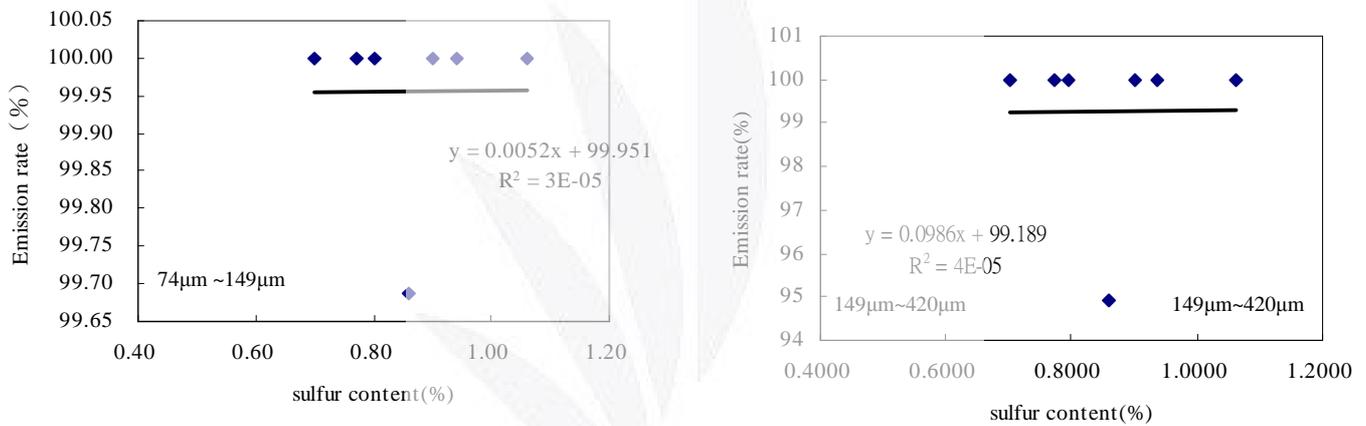
$$\text{排放率} = 1 - [\text{mg/kg bottom ash}] / [\text{mg/kg in feed}]$$

將不同等級、不同粒徑及不同摻配比之混燒試驗材料進行含硫量之實驗分析，並和實驗室模擬燃燒試驗中重金屬之排放率做相關性的比較圖，當試驗材料之實驗硫含量與重金屬之排放率之相關性 $R^2 > 0.6$ ，表示兩者之相關性良好。由圖 4-14(c)及圖 4-15(c)試驗材料中含硫量對於高揮發性煙煤與環保煤於小粒徑混燒後重金屬之排放率隨含硫量的增加，提高難揮發性金屬 Cr 及 Cu 之排放率(R^2 值分別為 0.8364 及 0.6521)，而對其他燃煤混燒試驗及粒徑大小重金屬排放率變動情形並不隨著含硫量而有影響。

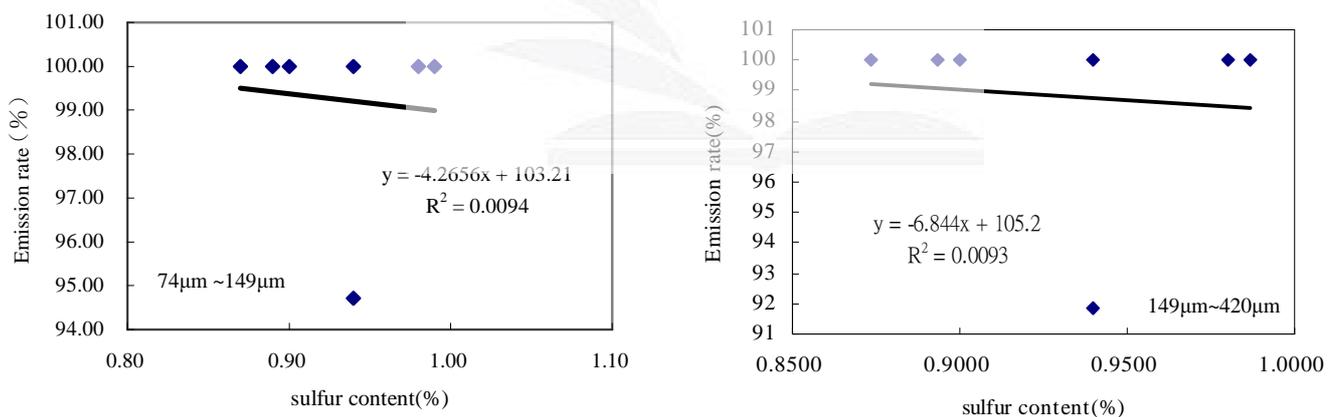
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



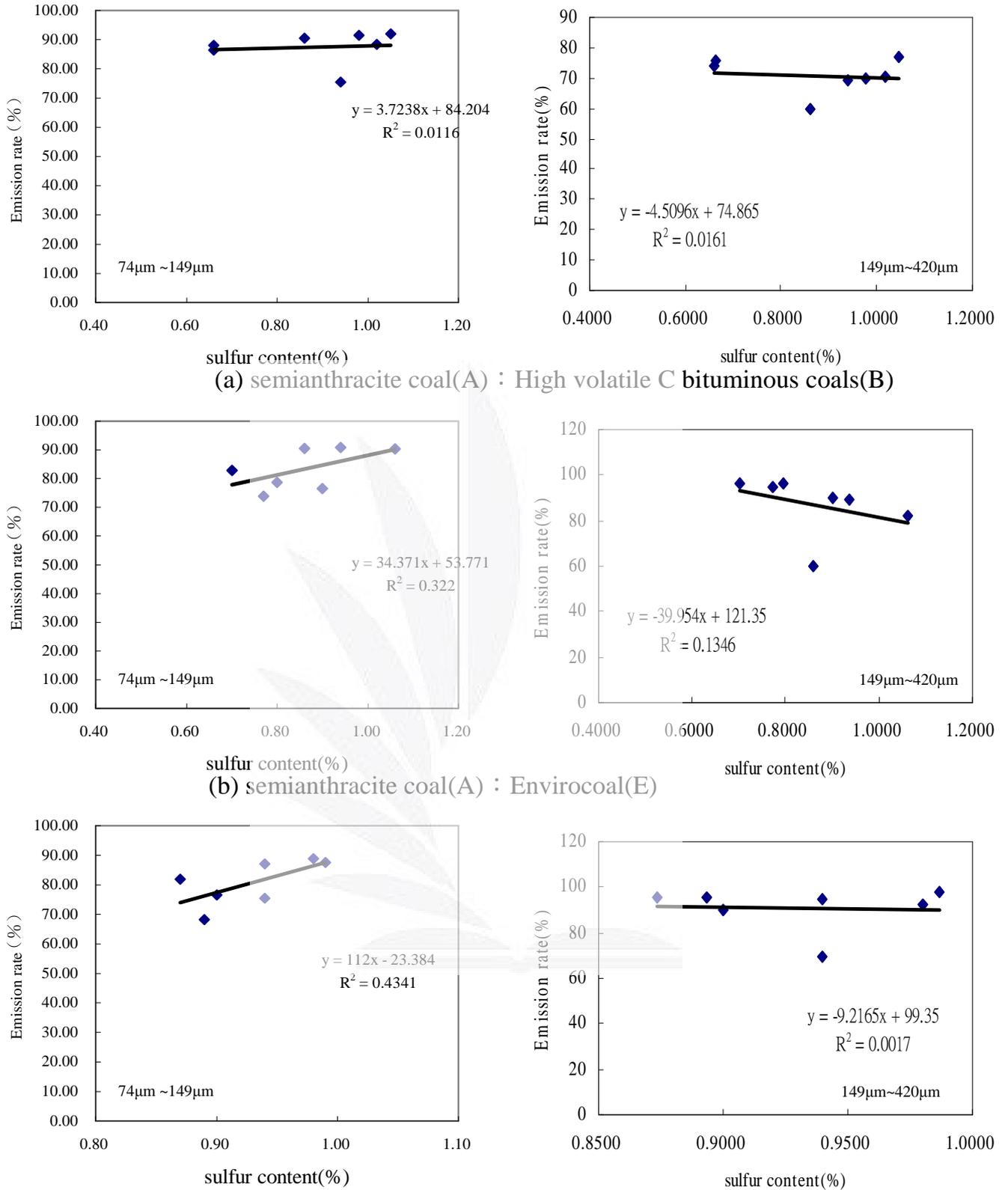
(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

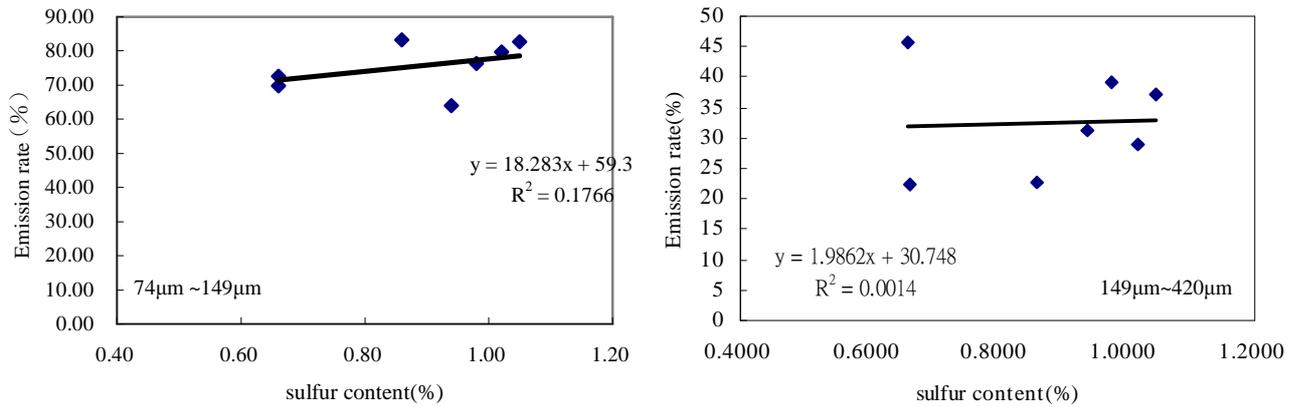
圖 4-14 混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Pb 排放率之相關性

混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究

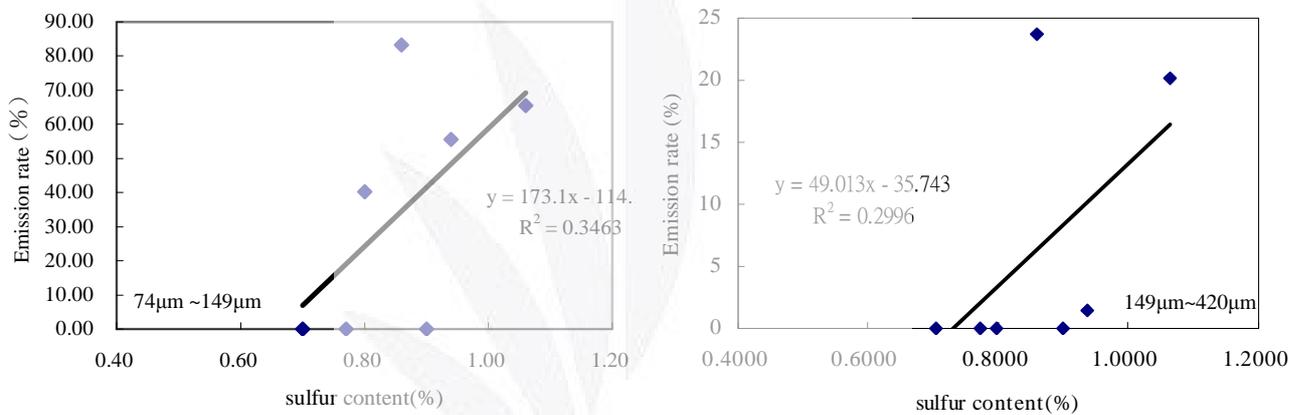


(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

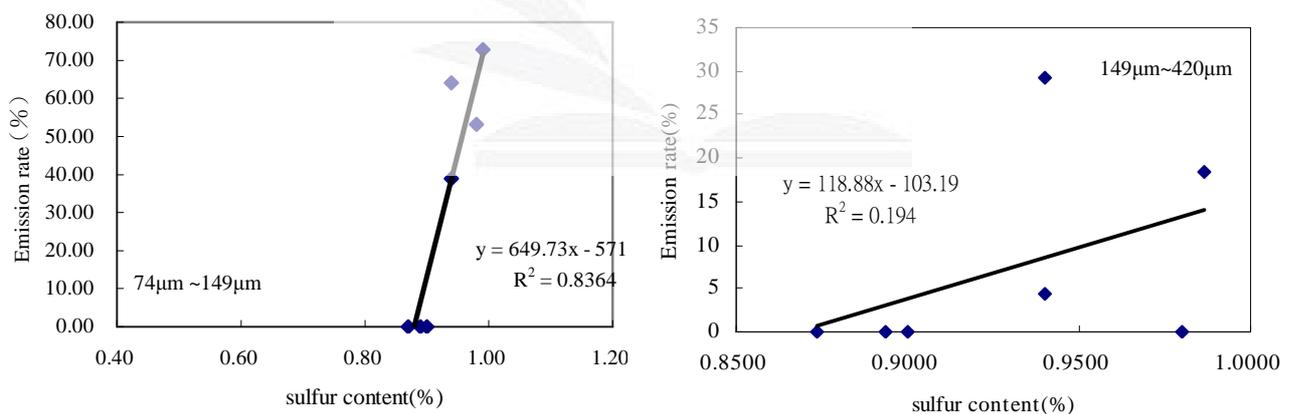
圖 4-15 混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Zn 排放率之相關性



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



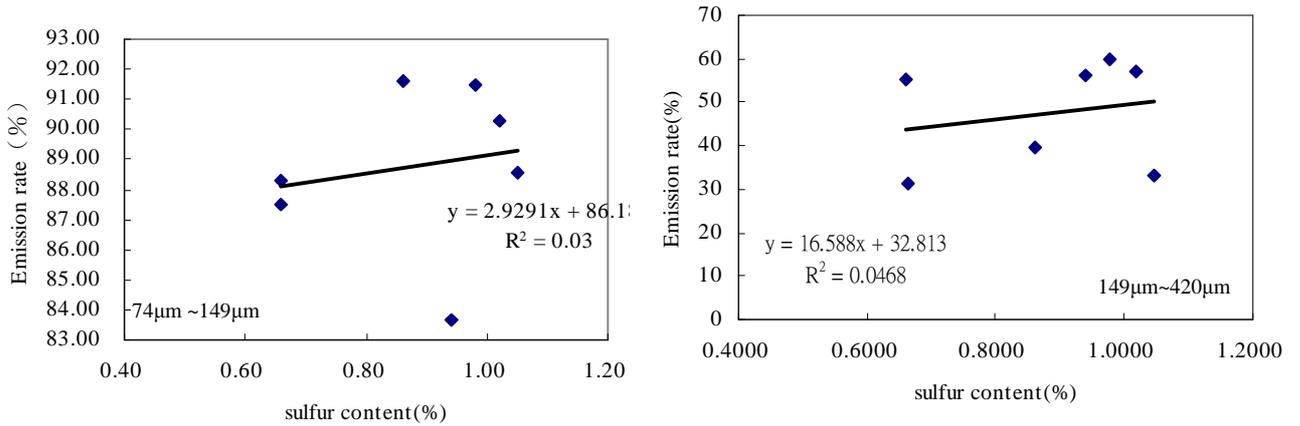
(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



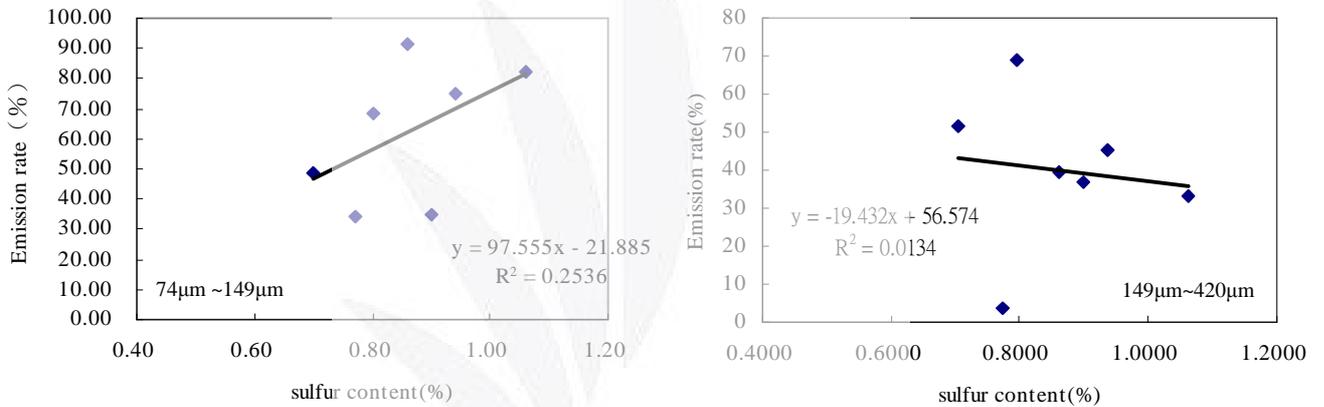
(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

圖 4-16 混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Cr 排放率之相關性

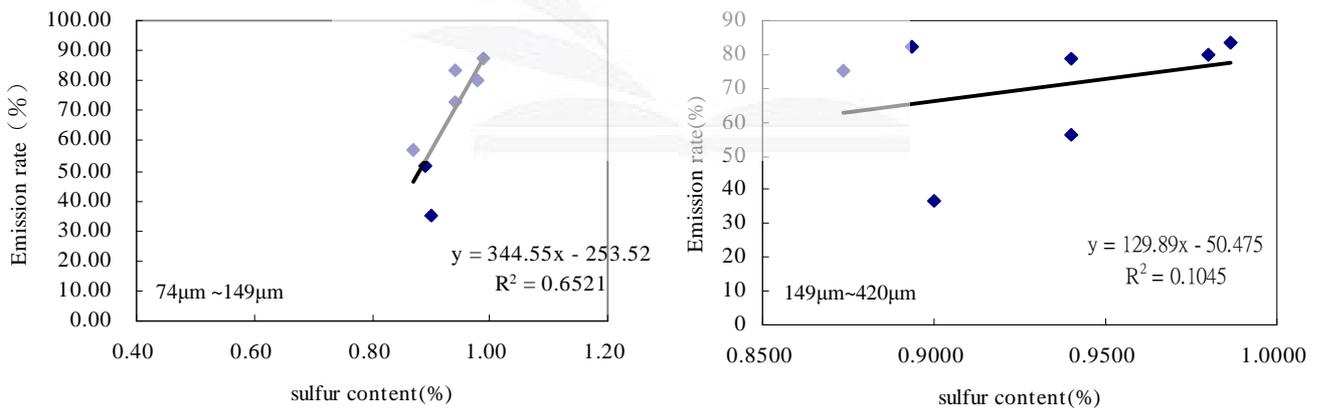
混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究



(a) semianthracite coal(A) : High volatile C bituminous coals(B)



(b) semianthracite coal(A) : Envirocoal(E)



(c) High volatile C bituminous coals(B) : Envirocoal(E)

圖 4-17 混煤燃燒中硫含量實驗值與重金屬 Cu 排放率之相關性

4-4 底灰及飛灰中之重金屬相態分析

重金屬排放特性依其揮發性之不同而異，依前節實驗結果可知混煤燃燒過程中，底灰及飛灰中之重金屬依其摻配比例和粒徑大小之不同，重金屬分佈比例會不同。然為了解底灰及飛灰於後續資源化或最終處理過程中，重金屬相態分佈對整體環境之衝擊，本節嘗試利用 Tessier(1979)化學序列萃取方式探討混煤燃燒過程中粒徑分佈對底灰及飛灰中重金屬相態分佈之影響。物種相態分析主要包括：可交換態(exchangeable)、碳酸鹽結合態(carbonate bound)、氧化結合態(oxides bound)、有機結合態(organic bound)、殘渣態(residual fraction)。

4-4-1 飛灰中之重金屬相態

1. 中度揮發性金屬 Se、As、Pb 及 Zn

中度揮發性重金屬 Se 於飛灰中之相態分佈如圖 4-18 及圖 4-19 所示。實驗結果顯示，其相態分佈並不受混煤摻配比及粒徑大小而有所影響。其中 64% 以上皆分佈於氧化結合態，且均不分佈於可交換態中。至於重金屬 As 於飛灰中之相態分佈(圖 4-20 及圖 4-21)，觀察到小粒徑試驗中，As 於飛灰中之相態分佈並不受混煤摻配比及粒徑大小而有所影響，87% 以上分佈於殘渣相態；然而，大粒徑試驗結果顯示，高揮發性煙煤混燒環保煤時，As 分佈於相態中之比例，不受摻配比影響。而不論粒徑大小，均不分佈於可交換態及氧化結合態中。而重金屬 Pb 小粒徑試驗結果顯示，摻配比例對於相態分佈並無顯注影響(圖 4-22)；然而，大粒徑試驗結果觀察得知，有 45% 以上分佈於氧化結合態，且不分佈於可交換態中(如圖 4-23)。至於重金屬 Zn 試驗，於小粒徑試驗結果中，次無煙煤混燒環保煤時，隨著環保煤摻混比例增加，分佈於殘渣相態比例隨之增加，且碳酸結合態之比例減小(圖 4-24 及圖 4-25)。

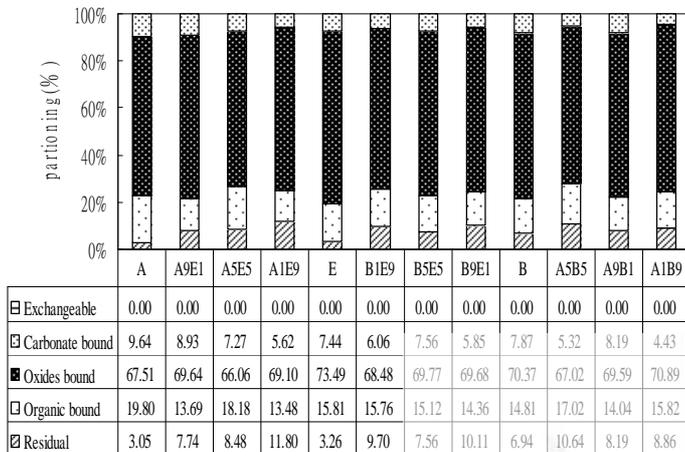


圖 4-18 飛灰重金屬 Se 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

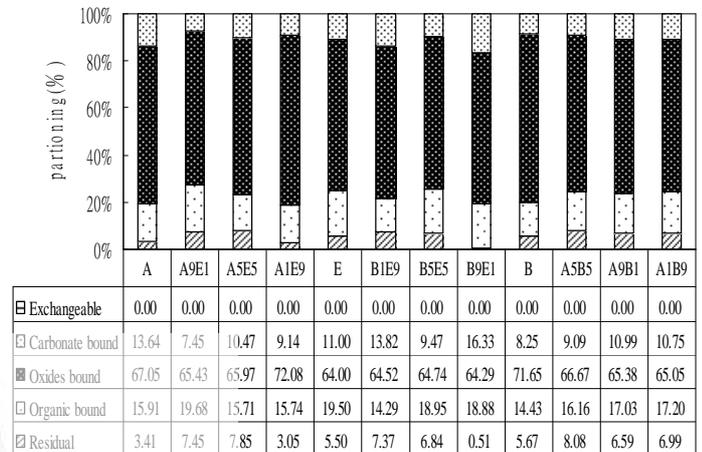


圖 4-19 飛灰重金屬 Se 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

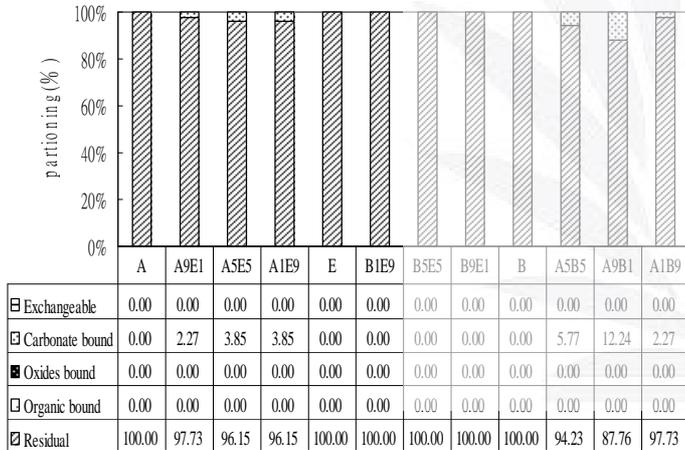


圖 4-20 飛灰重金屬 As 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

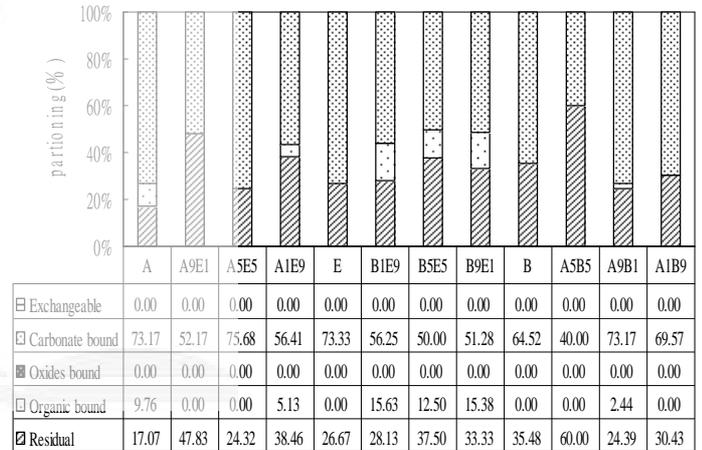


圖 4-21 飛灰重金屬 As 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

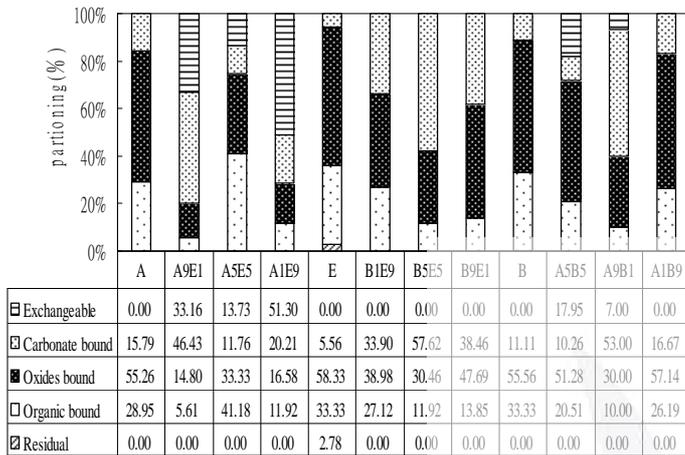


圖 4-22 飛灰重金屬 Pb 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

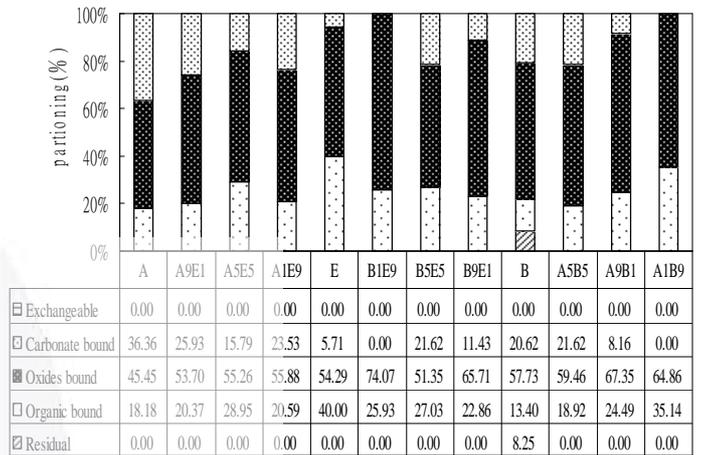


圖 4-23 飛灰重金屬 Pb 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

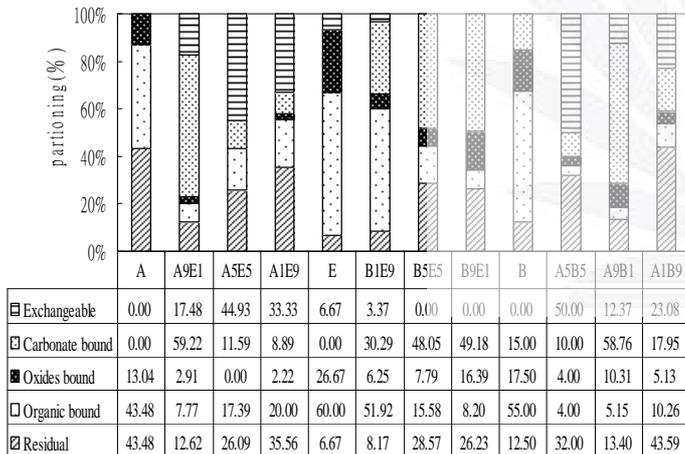


圖 4-24 飛灰重金屬 Zn 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

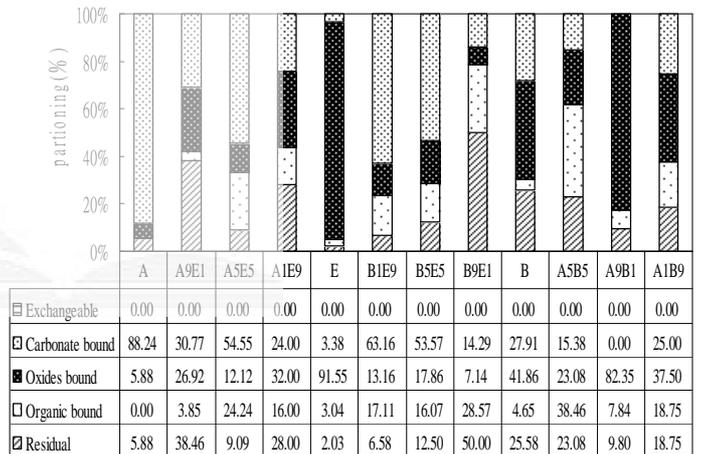


圖 4-25 飛灰重金屬 Zn 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

2. 難揮性重金屬 Cd、Cr 及 Cu

難揮性重金屬 Cd 於飛灰序列萃取試驗中，其偵測值低於儀器偵測極限，故本段主要僅針對 Cr 及 Cu 之相態分佈特性進行探討。重金屬 Cr 不論粒徑大小，多分佈於殘渣相態(圖 4-26 及圖 4-27)。至於重金屬 Cu 於小粒徑試驗結果中觀察到，摻配比例對相態分佈無顯注關係，大多分佈於殘渣相態；而大粒徑試驗顯示，大多分佈於有機結合態中(圖 4-28 及圖 4-29)。

綜觀上述飛灰序列萃取試驗，重金屬 As、Cu 於小粒徑試驗中，相態大多分佈於殘渣態，而 Cr 不論粒徑大小都主要分佈於殘渣相態，顯示其於環境中之移動性趨於穩定。而重金屬 Zn 相態分佈無規律性，即於環境中難以預測其移動特性。重金屬 Se 於環境中，大多以氧化態形式存在，表示移動特性佳。

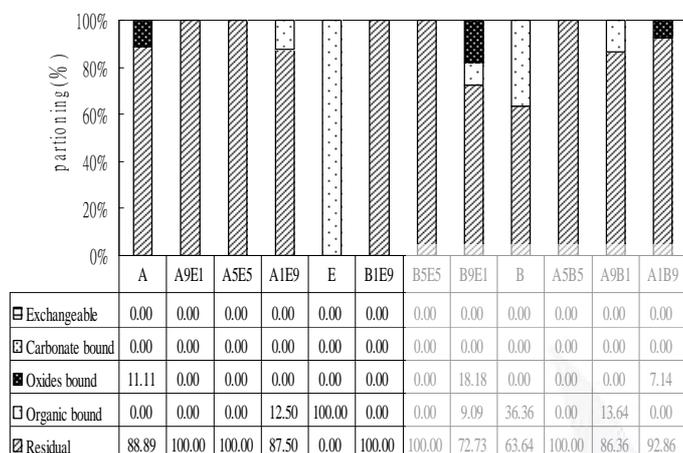


圖 4-26 飛灰重金屬 Cr 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

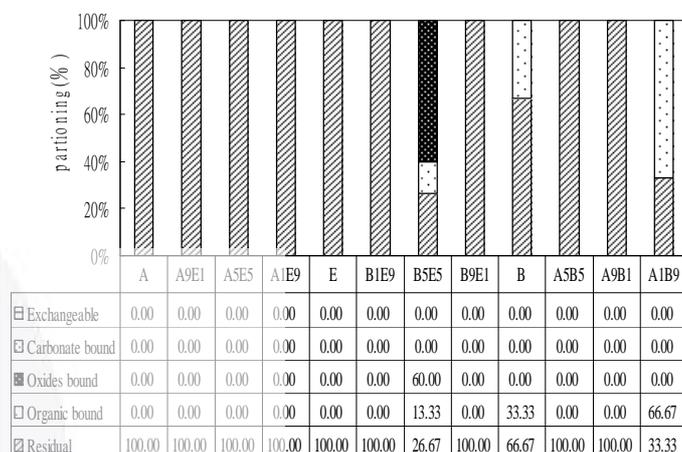


圖 4-27 飛灰重金屬 Cr 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

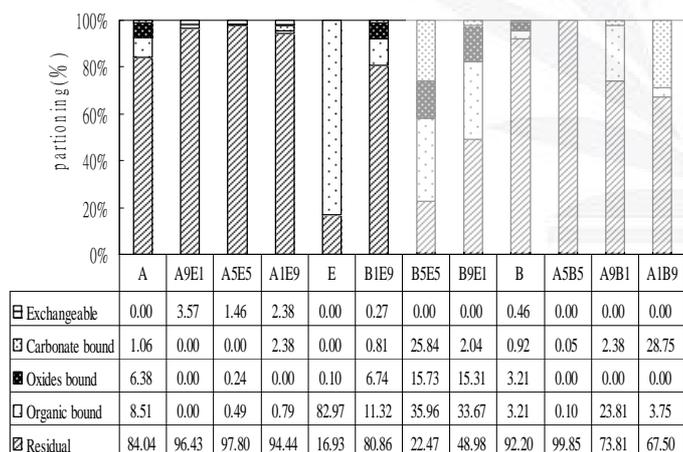


圖 4-28 飛灰重金屬 Cu 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

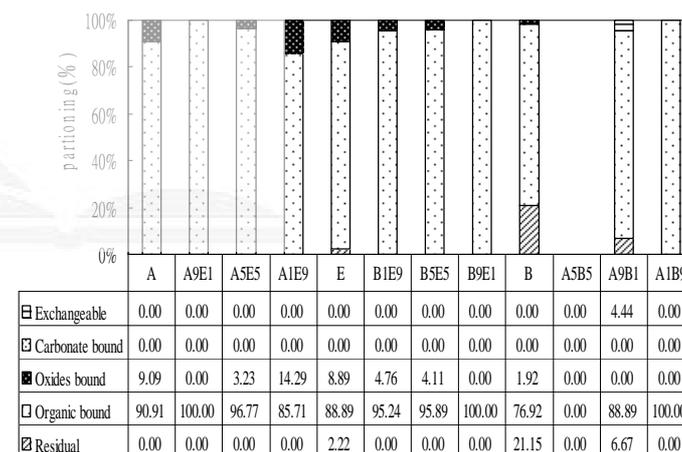


圖 4-29 飛灰重金屬 Cu 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

4-4-2 底灰中之重金屬相態

1. 中度揮發性金屬 Se、As、Pb 及 Zn

中度揮發性重金屬 Se 於底灰中之相態分佈實驗結果顯示，相態分佈並不受混煤摻配比及粒徑大小而有所影響。其中 56.13% 以上皆分佈於氧化結合態，且均不分佈於可交換態中(圖 4-30 及圖 4-31)。至於重金屬 As 於底灰中之相態分佈(圖 4-32 及圖 4-33)，觀察到大粒徑試驗主要分佈於碳酸鹽結合態及殘渣相態，而小粒徑則分佈於可交換態及殘渣相態。其中大粒徑試驗中，高揮發性煙煤摻混環保煤時，隨著環保煤摻混比例增加，分佈於碳酸鹽結合態比例也隨之增加；而小粒徑試驗中，主要分佈於可交換態及殘渣相態，分佈特性不受摻配比影響。而重金屬 Pb 相態分佈，小粒徑不受摻配比影響，大多分佈於氧化結合態；大粒徑試驗則分佈於碳酸鹽結合態、氧化結合態及有機結合態三種相態中，其中氧化結合態比態佔了 44% 以上。重金屬 Zn 相態分佈特性，不論粒徑大小，皆只分佈於氧化結合態及殘渣相態中，且隨著環保煤之摻配比例增加，其氧化結合態比例也隨之增加。

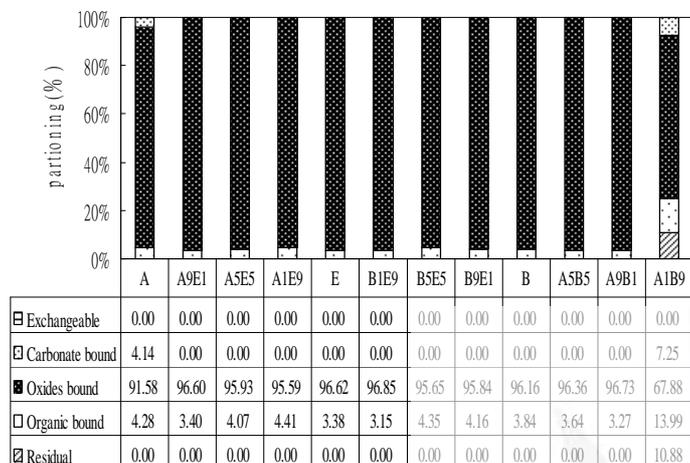


圖 4-30 底灰重金屬 Se 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

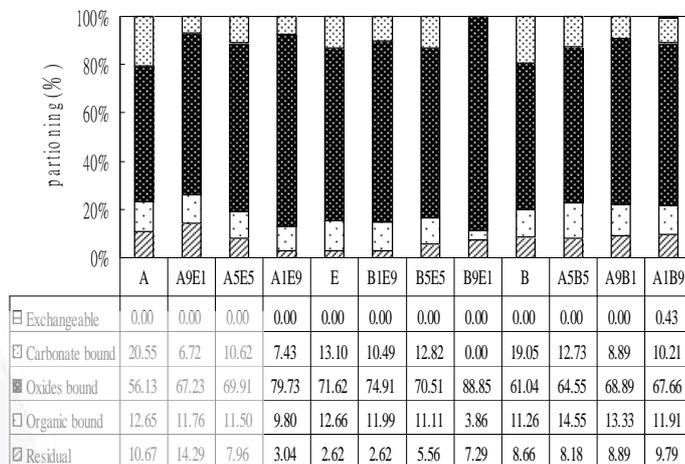


圖 4-31 底灰重金屬 Se 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

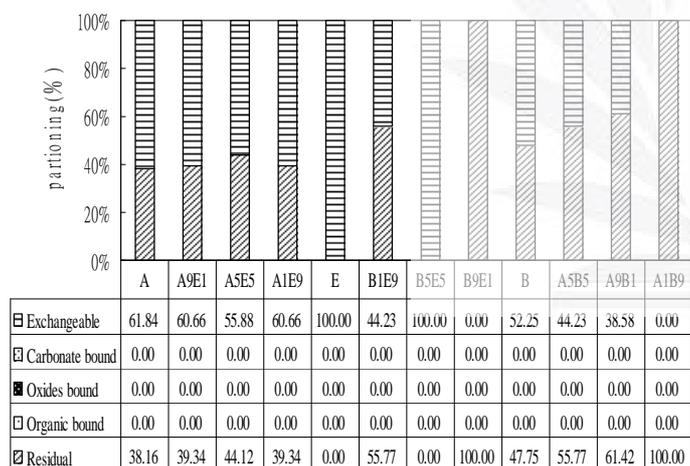


圖 4-32 底灰重金屬 As 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

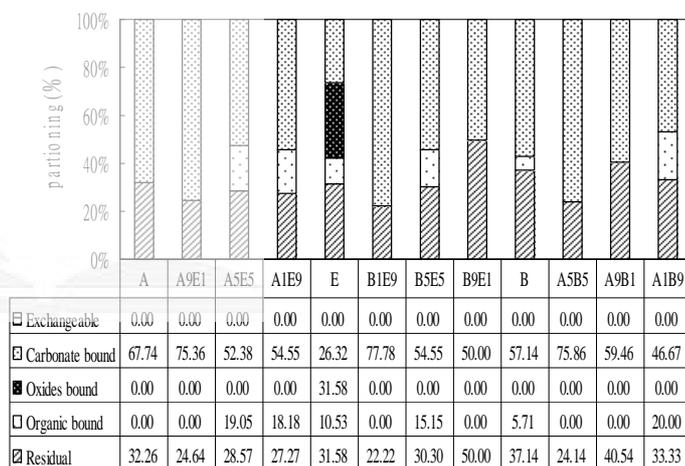


圖 4-33 底灰重金屬 As 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

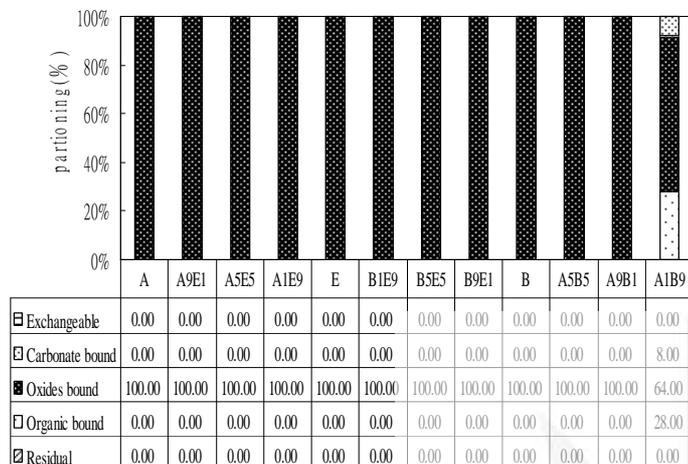


圖 4-34 底灰重金屬 Pb 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

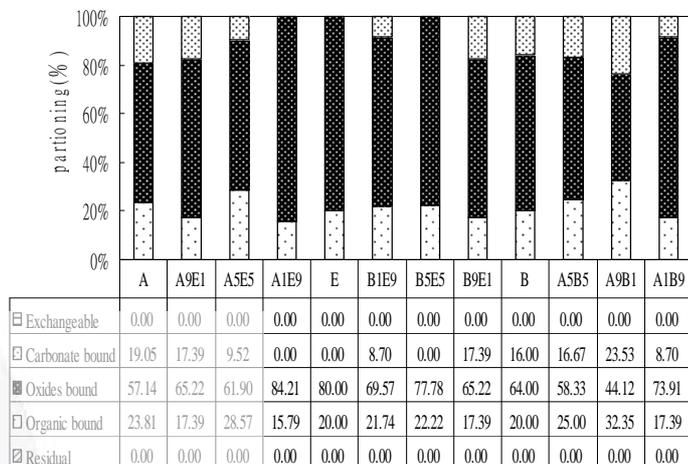


圖 4-35 底灰重金屬 Pb 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

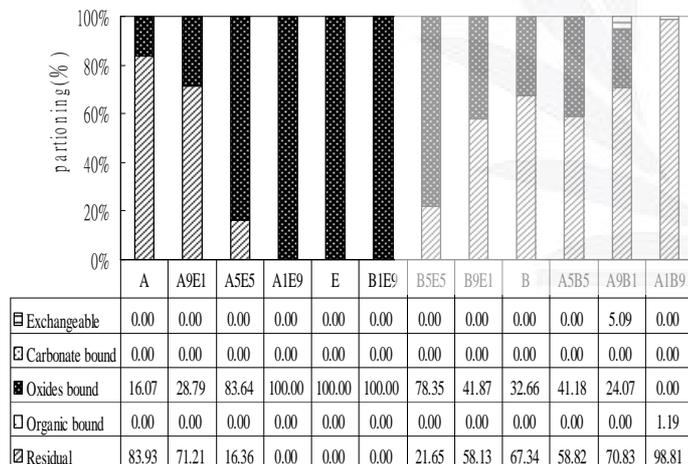


圖 4-36 底灰重金屬 Zn 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

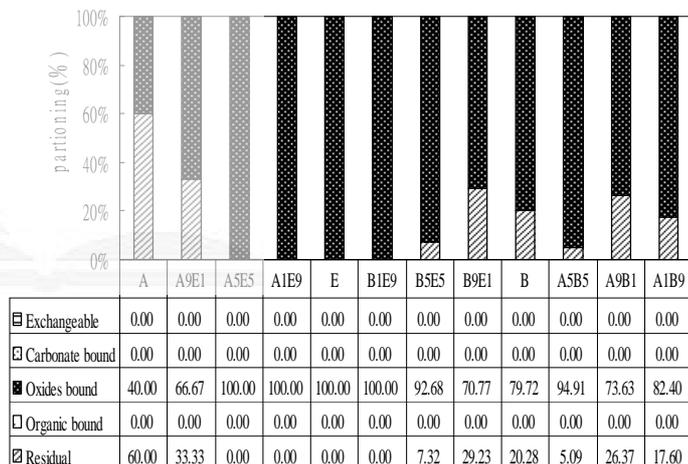


圖 4-37 底灰重金屬 Zn 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

2. 難揮性重金屬 Cd、Cr 及 Cu

難揮性重金屬 Cd 於底灰序列萃取試驗中，其偵測值低於儀器偵測極限，故本段主要僅針對 Cr 及 Cu 之相態分佈特性進行探討。重金屬 Cr 不論粒徑大小，其分佈主要於殘渣相態(圖 4-38 及圖 4-39)。至於重金屬 Cu 不論粒徑大小，大多存在於殘渣相態中(圖 4-40 及圖 4-41)；而於大粒徑試驗中，不分佈於可交換態及碳酸鹽結合態，且高揮發性煙煤混燒環保煤時，隨著環保煤比例增加，分佈於殘渣相態之比例隨之減少。

綜觀上述底灰序列萃取試驗結果，重金屬 Cr 及 Cu 相態主要分佈於殘渣態，表示其於環境中之穩定性高。重金屬 Se 及 Pb 大多於在於氧化結合態，即在環境中之移動性較高。混燒環保煤之摻配比增加，重金屬 Zn 其分佈於殘渣態之比例隨之減少。至於重金屬 As，易受粒徑大小影響，其小粒徑試驗中，主要分佈於可交換態；而大粒徑試驗中主要分佈於碳酸鹽結合態。

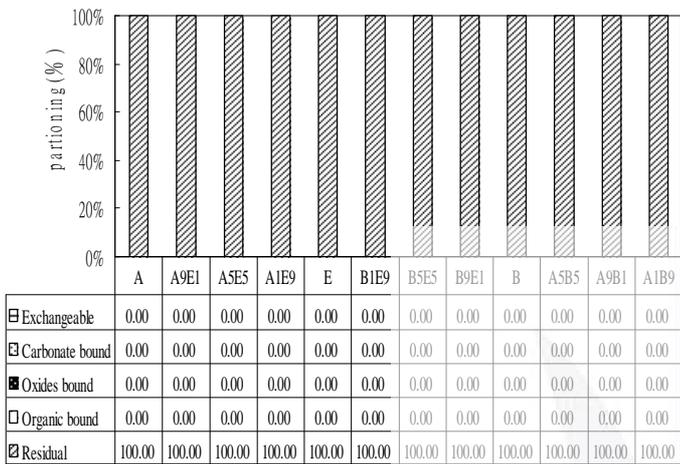


圖 4-40 底灰重金屬 Cr 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

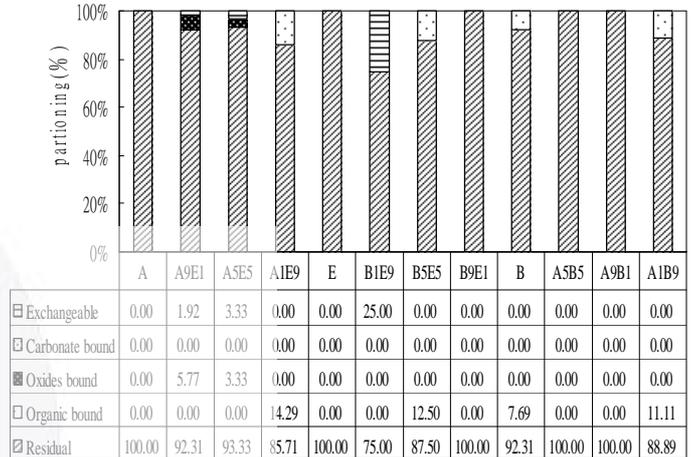


圖 4-41 底灰重金屬 Cr 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

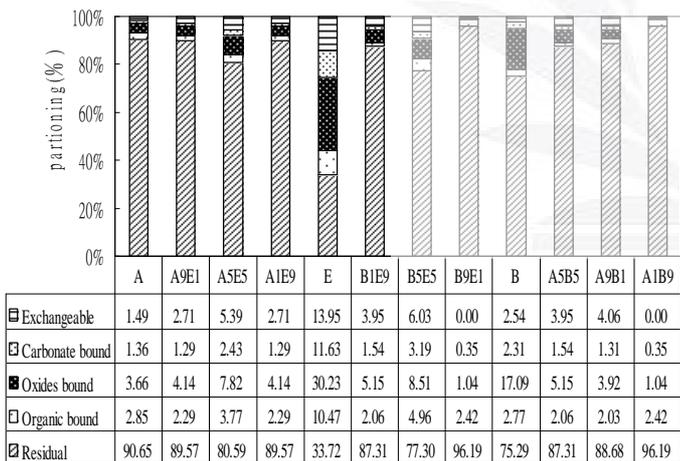


圖 4-40 底灰重金屬 Cu 於粒徑 74µm~149µm 相態分佈特性

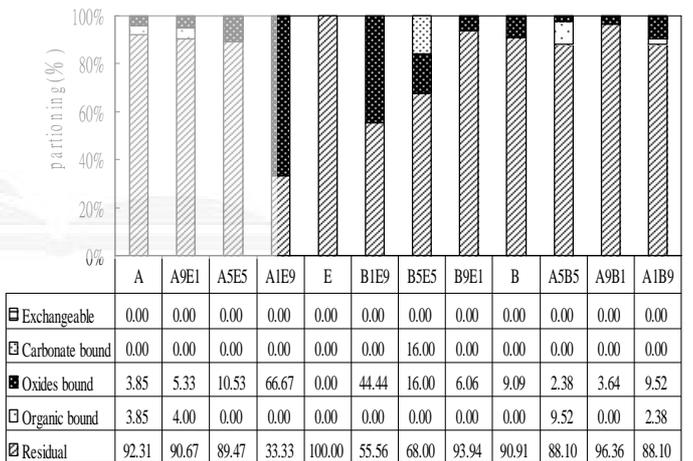


圖 4-41 底灰重金屬 Cu 於粒徑 149µm~420µm 相態分佈特性

第五章 結論與建議

5-1 結論

本研究探討不同配比之混煤燃燒過程，粒徑分佈對微量重金屬排放特性之影響，初步獲致之研究成果歸納如下。

1. 混煤燃燒過程元素組成及發熱量加成特性分析結果顯示，以較高等級的半無煙煤混合高揮發性煙或環保煤，其元素 C、H 及 S 皆具加成特性，相關係數 R^2 均大於 0.6986；至於發熱量之理論值與實驗值，相關係數 R^2 亦大於 0.7317，顯示混煤之發熱量亦具有加成特性。根據加成特性結果可知，利用單煤之元素組成及發熱量分析結果可做為混煤燃燒特性之元素組成及發熱量之預測分析依據。
2. 另根據高揮發性煙煤及環保煤混煤之熱值及元素 N、H 之加成分析結果，前述兩種煤樣之加成特性不明顯，此係煤樣本身不均質性所造成，因此混煤過程之不均質特性可能會導致污染物增加，降低燃燒效率以及燃燒損失急劇增加等問題。
3. 混煤燃燒對重金屬排放特性影響之結果顯示，混燒半無煙煤和高揮發性煙煤之試驗結果，無論試驗之粒徑大小範圍，摻配比對於重金屬 Pb、Zn、Cr 及 Cu 於氣相中的分佈比例無顯著之影響，亦即混燒等級相近之燃煤，影響其重金屬排放特性在於燃燒溫度、重金屬之揮發性及燃燒特性所影響。
4. 混燒半無煙煤與環保煤試驗結果，對於大粒徑(149 μm ~420 μm)而言，重金屬 Hg、Pb、Zn、Cr 及 Cu 於氣相的分佈比例，並不隨環保煤摻配比例增加而影響 (相關係數 $R^2 < 0.5$)；但小粒徑(74 μm ~149 μm)之混煤摻配隨著摻混環保煤的比例增加，將減少重金屬 Zn、Cr 及 Cu 於氣相中的分佈比例，相關係數 R^2 分別為 0.7825、0.9208 及 0.9596。
5. 高揮發性煙煤及環保煤試驗結果顯示，對於中度揮發性重金屬 Pb 及

Zn 之排放特性而言，粒徑大小與排放特性之相關性不顯著。然而，就難揮發性重金屬 Cr 及 Cu 而言，在小粒徑(74 μm ~149 μm)試驗條件下，隨環保煤摻配比例增加而有降低 Cr 及 Cu 於氣相排放之比例(R^2 分別為 0.8722 及 0.9127)，可見高揮發性煙煤摻混環保煤時，於小粒徑範圍有助於重金屬 Cr 及 Cu 之排放控制。

6. 飛灰序列萃取試驗，重金屬 As、Cu 於小粒徑試驗中，相態大多分佈於殘渣態，而 Cr 不論粒徑大小都主要分佈於殘渣相態，顯示其於環境中之移動性趨於穩定。而重金屬 Zn 相態分佈無規律性，即於環境中難以預測其移動特性。重金屬 Se 於環境中，大多以氧化態形式存在，表示移動特性佳。
7. 底灰序列萃取試驗結果，重金屬 Cr 及 Cu 相態主要分佈於殘渣態，表示其於環境中之穩定性高。重金屬 Se 及 Pb 大多於在於氧化結合態，即在環境中之移動性較高。混燒環保煤之摻配比增加，重金屬 Zn 分佈於殘渣態之比例隨之減少。至於重金屬 As 易受粒徑大小影響，其小粒徑試驗中，主要分佈於可交換態；而大粒徑試驗中主要分佈於碳酸鹽結合態。

5-2 建議

1. 無論使用任何等級或摻配煤樣做為能源使用，皆可能產生許多的不同來源之污染物，未來台灣地區能源開發與應用，將著眼於替代能源的使用。因此，本研究已初步建立不同煤種之混燒試驗，未來可更進一步研究生質燃料與燃煤混燒之燃燒與污染物排放之特性，以作為替代能源利用之參考依據。
2. 燃煤燃燒過程，許多重金屬會沉積於底渣中，因此，對於未來底渣資源化研究與應用時，宜再進一步探討底渣重金屬之穩定性。

第六章 參考文獻

- Arenillas, A., Rubiera, F., Arias, B., Faundez, J.M., Gordon, A.L., Garcia, X.A.,
“A TG/DTG study on the effect of coal blending on ignition behaviour”,
Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol.76, pp.603-614, 2004.
- Haas, J., Tamura, M., Weber, R., “Characterisation of coal blends for
pulverized fuel combustion”, Fuel, Vol. 80, pp. 1317-1323, 2000.
- Huang, Y., Jin, B., Zhong, Z., Xiao, R., Tang, Z., Ren, H., “Trace elements in
emissions from a pulverized coal boiler”, Fuel Processing Technology, Vol.
86, pp. 23-32, 2004.
- Küçük, A., Kadiog˘lu, Y., Gulabog˘luc, M.S., “A study of spontaneous
combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal,
humidity of air”, Combustion and Flame, Vol. 33, pp. 255-261, 2003.
- Li, J., Gao, X., “A Pilot Study of Mercury Liberation and Capture from
Coal-Fired Power Plant Fly Ash”, Air and Waste Management Association,
Vol. 55, pp. 258-264, 2005.
- Meij, R., “Trace element behavior in coal-fired power plants”, Fuel Processing,
Vol. 39, pp. 199-217, 1994.
- Rubiera, F., Arenillas, A., Arias, B., Jose, J. Pis., “Modification of combustion
behaviour and NO emissions by coal blending”, Fuel Processing Technology,
Vol. 77-78, pp. 111-117, 2002.
- Rubiera, F., Arenillas, A., Fuente, N., Miles, E., Jose, J. Pis., “Effect of the
grinding behaviour of coal blends on coal utilisation for Combustion”,
Powder Technology, Vol. 105, pp. 351–356, 1999.
- Chen, Y., Mori, S., Pan, W.P., “Studying the mechanisms of ignition of coal
particles by TG-DTG”, Thermochemica Acta, Vol. 275, pp.149-158, 1996.

混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究

江康鈺、黃淑貞、郭百旗、汪昀昇，「混煤燃燒對提昇燃燒效率改善重金屬排放特性之研究」，94 年度環保署/國科會空污防制科研研合作計劃報告書，2006。

朱莉娜，「煤燃燒過程中微量元素鉻、鉛的遷移轉化規律研究」，電力環境保護，Vol. 17，No. 4，pp. 27-53，2001。

余亮英、陸繼東、吳戈、馮偉、陳文、沈凱，「燃煤過程中微量重金屬的形態與分佈研究」，動力工程，Vol. 24，No. 5，pp. 640-645，2004。

李崇賓，「淺論煙煤與亞煙煤之應用」，台電發電處，Vol. 12，pp. 31-41，2003。

周一工，「燃煤電站有害金屬元素、細微顆粒及溫室氣體排放問題」，福建能源開發與節約，Vol. 4，pp. 39-42，2000。

紀慶嘉，「煤粉燃燒之研究：提議設計新燃燒爐」，行政院國家科學委員研究報告，台北，1995。

高正陽、方立華、葉學民、閻維平，「無煙煤與煙煤燃燒性能的熱重分析」，華北電力大學學報，Vol. 128，No.1，2001。

徐文東、曾榮樹、葉大年、Querol X.，「電廠煤燃燒後元素硒的分佈及對環境的貢獻」，環境科學，Vol. 26，No. 2，pp. 64-68，2005。

徐旭、嚴建華、葛俊、穀月玲、池湧、岑可法，「燃煤飛灰中重金屬元素分佈規律的試驗研究」，熱力發電，Vol. 1，pp. 51-54，2002。

徐恆文、李宏台，「燃煤電廠有害空氣污染物排放檢測及分析研究」，台電工程月刊，Vol. 614，pp. 39-51，1999。

孫俊民、韓德馨，「燃煤飛灰的顯微顆粒類型與顯微結構特徵」，電子顯微學報，北京，Vol. 20，No. 2，pp. 140-147，2001。

曾昭桓，「煤灰及垃圾焚化灰溶出液的金屬分析及金屬溶出行為研究」，行政院國家科學委員研究報告，台北，1996。

劉陽秋，「燒煤發電之先進技術」，台電工程月刊，Vol. 571，pp. 1-8，1996。

混煤燃燒過程不同粒徑分佈對微量重金屬排放特性影響之研究

蕭木村，「解讀燃煤規範」，台電工程月刊，Vol. 583，pp. 1-27，1997。

儲雯娣，王鯤生，「模擬都市垃圾焚化過程有機氣對金屬分佈及物種形成之研究」，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，1996。



附錄一、大粒徑試驗煤樣、飛灰及底灰重

單位：g

	半無煙煤 (A)	高揮發性煙煤 (B)	環保煤 (E)
煤樣重	5.0025	5.0525	5.0232
濾紙重	0.2575	0.2664	0.2511
燒杯	103.5413	101.7761	101.6353
燒杯+飛灰	103.8246	102.3067	101.9465
燒杯	104.6051	107.3428	91.3175
燒杯+底灰	105.1599	107.9985	91.4530
飛灰重	0.0258	0.2642	0.0601
底灰重	0.5548	0.6557	0.1355

單位：g

	無煙煤:煙煤=90:10	無煙煤:煙煤=70:30	無煙煤:煙煤=50:50	無煙煤:煙煤=30:70	無煙煤:煙煤=10:90
煤樣重	5.1121	5.1111	5.1538	5.0151	5.1006
濾紙重	0.2630	0.2585	0.2629	0.2539	0.2609
燒杯	94.7924	108.2600	86.8763	91.4052	83.3018
燒杯+飛灰	95.1089	108.6683	87.2329	91.8230	83.8307
燒杯	97.4889	104.5446	105.8784	100.2831	93.6659
燒杯+底灰	97.9635	105.0551	106.4144	100.8553	94.3045
飛灰重	0.0535	0.1498	0.0937	0.1639	0.2680
底灰重	0.4746	0.5105	0.5360	0.5722	0.6386

附錄一、大粒徑試驗煤樣、飛灰及底灰重(續)

單位：g

重金屬	無煙煤:環保煤=90:10	無煙煤:環保煤=70:30	無煙煤:環保煤=50:50	無煙煤:環保煤=30:70	無煙煤:環保煤=10:90
煤樣重	5.0374	5.0336	5.0550	5.1264	5.0281
濾紙重	0.2643	0.2614	0.2804	0.2654	0.2633
燒杯	94.5584	94.1549	104.1533	33.3018	102.7969
燒杯+飛灰	94.8462	94.4359	104.4997	66.6041	103.1344
燒杯	100.6918	101.0038	97.5650	103.1209	91.1686
燒杯+底灰	101.1286	101.3386	97.8531	103.3592	91.3233
飛灰重	0.0235	0.0196	0.0660	33.0369	0.0742
底灰重	0.4368	0.3348	0.2881	0.2383	0.1547

單位：g

重金屬	煙煤:環保煤=90:10	煙煤:環保煤=70:30	煙煤:環保煤=50:50	煙煤:環保煤=30:70	煙煤:環保煤=10:90
煤樣重	5.0892	5.0216	5.0151	5.0659	5.2532
濾紙重	0.2550	0.2565	0.2608	0.2628	0.2646
燒杯	93.2818	94.0314	88.6133	98.0487	102.9163
燒杯+飛灰	93.8187	94.5310	89.1094	99.4615	103.2708
燒杯	121.9663	106.5372	96.3632	105.3428	102.2214
燒杯+底灰	122.5717	107.0490	96.7673	105.6455	102.4592
飛灰重	0.2819	0.2431	0.2353	1.1500	0.0899
底灰重	0.6054	0.5118	0.4041	0.3027	0.2378

附錄二、小粒徑試驗煤樣、飛灰及底灰重

單位：g

	半無煙煤 (A)	高揮發性煙煤 (B)	環保煤 (E)
煤樣重	5.0241	5.0407	5.0310
濾紙重	0.2515	0.2975	0.2617
燒杯	93.6473	107.7481	97.5689
燒杯+飛灰	93.9245	108.1078	97.9781
燒杯	101.5628	100.2709	100.9962
燒杯+底灰	102.0577	100.8764	101.1745
飛灰重	0.0257	0.0622	0.1475
底灰重	0.4949	0.6055	0.1783

單位：g

	無煙煤:煙煤=90:10	無煙煤:煙煤=70:30	無煙煤:煙煤=50:50	無煙煤:煙煤=30:70	無煙煤:煙煤=10:90
煤樣重	5.1066	4.6963	5.2167	5.3782	4.9731
濾紙重	0.2532	0.2580	0.2552	0.2606	0.2616
燒杯	100.4208	100.7098	91.3980	92.2903	99.0779
燒杯+飛灰	100.7138	101.0856	91.8432	92.7946	99.4432
燒杯	92.1072	90.8396	100.4573	100.0291	92.4317
燒杯+底灰	92.6204	91.3483	101.0270	100.5980	93.0030
飛灰重	0.0398	0.1178	0.1900	0.2437	0.1037
底灰重	0.5132	0.5087	0.5697	0.5689	0.5713

附錄二、小粒徑試驗煤樣、飛灰及底灰重 (續)

單位：g

重金屬	無煙煤:環保煤=90:10	無煙煤:環保煤=70:30	無煙煤:環保煤=50:50	無煙煤:環保煤=30:70	無煙煤:環保煤=10:90
煤樣重	5.0270	5.1731	5.0561	5.0806	5.3018
濾紙重	0.2670	0.2731	0.2587	0.2618	0.2655
燒杯	111.1043	98.0740	103.7762	118.8085	94.1551
燒杯+飛灰	111.3876	98.4010	104.1079	119.1708	94.5110
燒杯	111.3775	105.6000	99.8361	92.1160	86.9201
燒杯+底灰	111.8319	105.9998	100.1830	92.3907	87.1522
飛灰重	0.0163	0.0539	0.0730	0.1005	0.0904
底灰重	0.4544	0.3998	0.3469	0.2747	0.2321

單位：g

重金屬	煙煤:環保煤=90:10	煙煤:環保煤=70:30	煙煤:環保煤=50:50	煙煤:環保煤=30:70	煙煤:環保煤=10:90
煤樣重	5.0178	5.0420	4.9591	5.0792	5.0004
濾紙重	0.2661	0.2535	0.2585	0.2599	0.2578
燒杯	94.0405	101.2716	103.5564	107.9411	102.8190
燒杯+飛灰	94.5457	101.6090	103.9735	108.2519	103.1431
燒杯	104.5556	95.2957	98.0375	105.3610	92.1500
燒杯+底灰	105.0954	95.7478	98.4234	105.6314	92.3580
飛灰重	0.2391	0.0839	0.1586	0.0509	0.0663
底灰重	0.5398	0.4521	0.3859	0.2704	0.2080

附錄三、大粒徑燃燒試驗重金屬 Hg 總量

樣品名稱	底灰		
	AA 分析數據(μg)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg/kg)
A	0.4426	0.5548	0.7978
B	0.1145	0.6557	0.1746
E	0.0665	0.1355	0.4908
A9B1	0	0.4746	0.0000
A7B3	0	0.5105	0.0000
A5B5	0	0.536	0.0000
A3B7	0.0145	0.5722	0.0253
A1B9	0	0.6386	0.0000
A9E1	0	0.4368	0.0000
A7E3	0	0.3348	0.0000
A5E5	0	0.2881	0.0000
A3E7	0	0.2383	0.0000
A1E9	0	0.1547	0.0000
B9E1	0	0.6054	0.0000
B7E3	0	0.5118	0.0000
B5E5	0	0.4041	0.0000
B3E7	0	0.3027	0.0000
B1E9	0	0.2378	0.0000

附錄三、大粒徑燃燒試驗重金屬 Hg 分佈比例

AB	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(μg)	0.443	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.115
Put in 換算濃度(μg)	2.2800	5.0620	2.4990	2.6450	2.7910	2.9370	3.0100
Solid phase(%)	19.41	0.00	0.00	0.00	0.52	0.00	3.80
gas phase (%)	80.59	100.00	100.00	100.00	99.48	100.00	96.20

AE	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(μg)	0.4426	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0665
Put in 換算濃度(μg)	2.280	2.962	1.869	1.595	1.321	1.047	0.910
Solid phase(%)	19.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.31
gas phase (%)	80.59	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	92.69

BE	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(μg)	0.115	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.067
Put in 換算濃度(μg)	3.0100	3.6190	2.3800	1.9600	1.5400	1.1200	0.9100
Solid phase(%)	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.31
gas phase (%)	96.20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	92.69

附錄四、大粒徑燃燒試驗重金屬 Pb 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(L)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg/kg)
A	0.019	0.05	0.5548	0.0010
B	0.028	0.05	0.6557	0.0014
E	0.000	0.05	0.1355	0.000
A9B1	0.4260	0.05	0.4746	0.0213
A7B3	0.087	0.05	0.5105	0.0044
A5B5	0.010	0.05	0.536	0.0005
A3B7	0.017	0.05	0.5722	0.0009
A1B9	0.013	0.05	0.6386	0.0007
A9E1	0.0000	0.05	0.4368	0.0000
A7E3	0.0000	0.05	0.3348	0.0000
A5E5	0.0000	0.05	0.2881	0.0000
A3E7	0.0000	0.05	0.2383	0.0000
A1E9	0.0000	0.05	0.1547	0.0000
B9E1	0.013	0.05	0.6054	0.0007
B7E3	0.0000	0.05	0.5118	0.0000
B5E5	0.0000	0.05	0.4041	0.0000
B3E7	0.0000	0.05	0.3027	0.0000
B1E9	0.0000	0.05	0.2378	0.0000

附錄五、大粒徑燃燒試驗重金屬 Pb 分佈比例

Pb	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.001	0.021	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001
Put in 換算濃度(mg)	0.0187	0.0189	0.0186	0.0184	0.0176	0.0175	0.0172
Solid phase(%)	5.08	0.00	23.39	2.72	4.84	3.71	8.15
gas phase (%)	94.92	100.00	76.61	97.28	95.16	96.29	91.85

Pb	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Put in 換算濃度(mg)	0.0187	0.0178	0.0157	0.0137	0.0119	0.0096	0.0085
Solid phase(%)	5.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
gas phase (%)	94.92	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Pb	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Put in 換算濃度(mg)	0.0172	0.0164	0.0145	0.0128	0.0112	0.0098	0.0085
Solid phase(%)	8.15	3.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
gas phase (%)	91.85	96.05	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

附錄六、大粒徑燃燒試驗重金屬 Zn 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(L)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg/kg)
A	0.245	0.05	0.5548	0.0123
B	0.236	0.05	0.6557	0.0118
E	0.312	0.05	0.1355	0.0156
A9B1	0.000	0.05	0.4746	0.000
A7B3	0.000	0.05	0.5105	0.000
A5B5	0.000	0.05	0.536	0.000
A3B7	0.000	0.05	0.5722	0.000
A1B9	0.000	0.05	0.6386	0.000
A9E1	0.0000	0.05	0.4368	0.0000
A7E3	0.0000	0.05	0.3348	0.0000
A5E5	0.0000	0.05	0.2881	0.0000
A3E7	0.0000	0.05	0.2383	0.0000
A1E9	0.0000	0.05	0.1547	0.0000
B9E1	0.0000	0.05	0.6054	0.0000
B7E3	0.0000	0.05	0.5118	0.0000
B5E5	0.0000	0.05	0.4041	0.0000
B3E7	0.0000	0.05	0.3027	0.0000
B1E9	0.0000	0.05	0.2378	0.0000

附錄七、大粒徑燃燒試驗重金屬 Zn 分佈比例

Zn	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.012	0.008	0.008	0.008	0.011	0.011	0.012
Put in 換算濃度(mg)	0.0305	0.0320	0.0336	0.0354	0.0360	0.0382	0.0387
Solid phase(%)	40.14	26.11	24.29	22.86	30.25	29.56	30.53
gas phase (%)	59.86	73.89	75.71	77.14	69.75	70.44	69.47

Zn	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.012	0.008	0.007	0.007	0.005	0.015	0.016
Put in 換算濃度(mg)	0.0305	0.0430	0.0675	0.0924	0.1187	0.1409	0.1530
Solid phase(%)	40.14	17.79	10.67	7.25	3.88	10.51	10.20
gas phase (%)	59.86	82.21	89.33	92.75	96.12	89.49	89.80

Zn	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.012	0.003	0.013	0.010	0.005	0.008	0.016
Put in 換算濃度(mg)	0.0387	0.0505	0.0728	0.0955	0.1196	0.1480	0.1530
Solid phase(%)	30.53	5.17	17.18	10.31	4.14	5.10	10.20
gas phase (%)	69.47	94.83	82.82	89.69	95.86	94.90	89.80

附錄八、大粒徑燃燒試驗重金屬 Cu 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(mL)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg)
A	0.174	50	0.5548	0.0087
B	0.142	50	0.6557	0.0071
E	0.273	50	0.1355	0.0140
A9B1	0.133	50	0.4746	0.0067
A7B3	0.209	50	0.5105	0.0105
A5B5	0.210	50	0.536	0.0105
A3B7	0.126	50	0.5722	0.0063
A1B9	0.140	50	0.6386	0.0070
A9E1	0.203	50	0.4368	0.0100
A7E3	0.181	50	0.3348	0.0090
A5E5	0.226	50	0.2881	0.0110
A3E7	0.191	50	0.2383	0.0100
A1E9	0.804	50	0.1547	0.0090
B9E1	0.168	50	0.6054	0.0067
B7E3	0.157	50	0.5118	0.0064
B5E5	0.178	50	0.4041	0.0083
B3E7	0.147	50	0.3027	0.0061
B1E9	0.192	50	0.2378	0.0066

附錄九、大粒徑燃燒試驗重金屬 Cu 分佈比例

AB	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.009	0.007	0.010	0.011	0.006	0.007	0.007
Put in 換算濃度(mg)	0.0144	0.0149	0.0152	0.0157	0.0156	0.0162	0.0163
Solid phase(%)	60.60	44.78	68.73	66.91	40.33	43.09	43.64
gas phase (%)	39.40	55.22	31.27	33.09	59.67	56.91	56.36

AE	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.009	0.010	0.009	0.011	0.010	0.040	0.014
Put in 換算濃度(mg)	0.0144	0.0152	0.0166	0.0181	0.0198	0.0209	0.0215
Solid phase(%)	60.60	66.90	54.55	62.44	48.21	100.00	63.34
gas phase (%)	39.40	33.10	45.45	37.56	51.79	0.00	36.66

BE	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.007	0.008	0.008	0.009	0.007	0.010	0.014
Put in 換算濃度(mg)	0.0163	0.0169	0.0178	0.0188	0.0201	0.0220	0.0215
Solid phase(%)	43.64	49.61	44.15	47.26	36.56	43.69	63.34
gas phase (%)	56.36	50.39	55.85	52.74	63.44	56.31	36.66

附錄十、大粒徑燃燒試驗重金屬 Cr 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(mL)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg)
A	0.216	50	0.5548	0.0108
B	0.110	50	0.6557	0.0055
E	0.142	50	0.1355	0.0071
A9B1	0.152	50	0.4746	0.0076
A7B3	0.185	50	0.5105	0.0093
A5B5	0.137	50	0.536	0.0069
A3B7	0.121	50	0.5722	0.0061
A1B9	0.128	50	0.6386	0.0064
A9E1	0.220	50	0.4368	0.0110
A7E3	0.253	50	0.3348	0.0130
A5E5	0.608	50	0.2881	0.0300
A3E7	0.221	50	0.2383	0.0110
A1E9	0.170	50	0.1547	0.0090
B9E1	0.134	50	0.6054	0.0067
B7E3	0.127	50	0.5118	0.0064
B5E5	0.166	50	0.4041	0.0083
B3E7	0.121	50	0.3027	0.0061
B1E9	0.132	50	0.2378	0.0066

附錄十一、大粒徑燃燒試驗重金屬 Cr 分佈比例

AB	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.011	0.008	0.009	0.007	0.006	0.006	0.006
Put in 換算濃度(mg)	0.014	0.014	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008
Solid phase(%)	77.14	54.29	77.50	62.73	61.00	71.11	68.75
gas phase (%)	22.86	45.71	22.50	37.27	39.00	28.89	31.25

AE	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.011	0.011	0.013	0.030	0.011	0.009	0.007
Put in 換算濃度(mg)	0.0142	0.0138	0.0128	0.0120	0.0112	0.0100	0.0095
Solid phase(%)	76.29	79.78	98.51	100.00	98.92	84.82	74.39
gas phase (%)	23.71	20.22	1.49	0.00	1.08	15.18	25.61

BE	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.006	0.007	0.006	0.008	0.006	0.007	0.007
Put in 換算濃度(mg)	0.0078	0.0080	0.0083	0.0086	0.0091	0.0098	0.0095
Solid phase(%)	70.69	83.54	100.00	96.22	66.64	67.40	74.39
gas phase (%)	29.31	16.46	0.00	3.78	33.36	32.60	25.61

附錄十二、小粒徑燃燒試驗重金屬 Hg 總量

樣品名稱	底灰				
	AA 分析數據(ppb)	消化底灰重(g)	定量體積(mL)	稀釋倍數	計算後濃度(mg/kg)
A	0.4238	0.4987	100	2	0.1700
B	0.2821	0.6055	100	2	0.0932
E	0.6506	0.1569	100	2	1.8429
A9B1	0.0234	0.5132	100	2	0.0091
A7B3	0	0.5087	100	2	0.0000
A5B5	0	0.5697	100	2	0.0000
A3B7	0.0234	0.5689	100	2	0.0082
A1B9	0	0.5713	100	2	0.0000
A9E1	0.2177	0.4661	100	2	0.0934
A7E3	0.3208	0.3858	100	2	0.1663
A5E5	0.3001	0.3684	100	2	0.1629
A3E7	0.3414	0.2870	100	2	0.2379
A1E9	0.362	0.2091	100	2	0.3462
B9E1	0.0346	0.5398	100	2	0.0128
B7E3	0.1021	0.4521	100	2	0.0452
B5E5	0.0121	0.3859	100	2	0.0063
B3E7	0.8221	0.2704	100	2	0.6081
B1E9	0.1021	0.208	100	2	0.0982

附錄十三、 小粒徑燃燒試驗重金屬 Hg 分佈比例

AB	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(μg)	0.085	0.005	0.000	0.000	0.005	0.000	0.056
Put in 換算濃度(μg)	0.9933	0.9527	0.7713	0.7404	0.6433	0.4839	0.4343
Solid phase(%)	8.53	0.49	0.00	0.00	0.73	0.00	12.99
gas phase (%)	91.47	99.51	100.00	100.00	99.27	100.00	87.01

AE	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(μg)	0.0848	0.0435	0.0642	0.0600	0.0683	0.0724	0.1301
Put in 換算濃度(μg)	0.9933	1.0367	1.1549	1.2149	1.3072	1.4544	1.4230
Solid phase(%)	8.53	4.20	5.56	4.94	5.22	4.98	9.14
gas phase (%)	91.47	95.80	94.44	95.06	94.78	95.02	90.86

BE	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(μg)	0.056	0.007	0.020	0.002	0.164	0.020	0.130
Put in 換算濃度(μg)	0.4343	0.5310	0.7319	0.9149	1.1369	1.3160	1.4230
Solid phase(%)	12.99	1.30	2.79	0.26	14.46	1.55	9.14
gas phase (%)	87.01	98.70	97.21	99.74	85.54	98.45	90.86

附錄十四、小粒徑燃燒試驗重金屬 Pb 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(L)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg/kg)
A	0.001	0.200	0.4987	0.0010
B	0.025	0.100	0.6055	0.0025
E	0.000	0.200	0.1569	0.000
A9B1	0.000	0.100	0.5132	0.000
A7B3	0.000	0.100	0.5087	0.000
A5B5	0.000	0.100	0.5697	0.000
A3B7	0.000	0.100	0.5689	0.000
A1B9	0.000	0.100	0.5713	0.000
A9E1	0.0000	0.200	0.4661	0.0000
A7E3	0.0000	0.200	0.3858	0.0000
A5E5	0.0000	0.200	0.3684	0.0000
A3E7	0.0000	0.200	0.2870	0.0000
A1E9	0.0000	0.200	0.2091	0.0000
B9E1	0.0000	0.100	0.5398	0.0000
B7E3	0.0000	0.100	0.4521	0.0000
B5E5	0.0000	0.100	0.3859	0.0000
B3E7	0.0000	0.100	0.2704	0.0000
B1E9	0.0000	0.100	0.208	0.0000

附錄十五、小粒徑燃燒試驗重金屬 Pb 分佈比例

Pb	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
Put in 換算濃度(mg)	0.0641	0.0634	0.0551	0.0577	0.0559	0.0483	0.0473
Solid phase(%)	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.29
gas phase (%)	99.69	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	94.71

Pb	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Put in 換算濃度(mg)	0.0641	0.0589	0.0500	0.0385	0.0282	0.0185	0.0124
Solid phase(%)	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
gas phase (%)	99.69	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Pb	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Put in 換算濃度(mg)	0.0473	0.0436	0.0368	0.0294	0.0231	0.0158	0.0124
Solid phase(%)	5.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
gas phase (%)	94.71	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

附錄十六、小粒徑燃燒試驗重金屬 Zn 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(L)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg/kg)
A	0.073	0.200	0.4987	0.015
B	0.331	0.100	0.6055	0.0331
E	0.033	0.200	0.1569	0.007
A9B1	0.208	0.100	0.5132	0.0208
A7B3	0.208	0.100	0.5087	0.0208
A5B5	0.121	0.100	0.5697	0.0121
A3B7	0.127	0.100	0.5689	0.0127
A1B9	0.157	0.100	0.5713	0.0157
A9E1	0.068	0.200	0.4661	0.014
A7E3	0.055	0.200	0.3858	0.011
A5E5	0.097	0.200	0.3684	0.019
A3E7	0.057	0.200	0.2870	0.011
A1E9	0.056	0.200	0.2091	0.011
B9E1	0.154	0.100	0.5398	0.0154
B7E3	0.115	0.100	0.4521	0.0115
B5E5	0.104	0.100	0.3859	0.0104
B3E7	0.110	0.100	0.2704	0.0110
B1E9	0.123	0.100	0.208	0.0123

附錄十七、小粒徑燃燒試驗重金屬 Zn 分佈比例

Zn	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.015	0.021	0.021	0.012	0.013	0.016	0.033
Put in 換算濃度(mg)	0.1536	0.1542	0.1382	0.1496	0.1502	0.1352	0.1351
Solid phase(%)	9.51	13.49	15.05	8.09	8.45	11.62	24.50
gas phase (%)	90.49	86.51	84.95	91.91	91.55	88.38	75.50

Zn	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.015	0.014	0.011	0.019	0.011	0.011	0.007
Put in 換算濃度(mg)	0.1536	0.1411	0.1193	0.0914	0.0665	0.0429	0.0281
Solid phase(%)	9.51	9.64	9.22	21.23	17.15	26.12	23.47
gas phase (%)	90.49	90.36	90.78	78.77	82.85	73.88	76.53

Zn	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.033	0.015	0.012	0.010	0.011	0.012	0.007
Put in 換算濃度(mg)	0.1351	0.1238	0.1030	0.0803	0.0607	0.0386	0.0281
Solid phase(%)	24.50	12.44	11.16	12.95	18.12	31.90	23.47
gas phase (%)	75.50	87.56	88.84	87.05	81.88	68.10	76.53

附錄十八、小粒徑燃燒試驗重金屬 Cu 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(mL)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg)
A	0.032	50	0.4987	0.0064
B	0.077	50	0.6055	0.0077
E	0.042	50	0.1569	0.0080
A9B1	0.093	50	0.5132	0.0093
A7B3	0.014	50	0.5087	0.0074
A5B5	0.073	50	0.5697	0.0073
A3B7	0.051	50	0.5689	0.0051
A1B9	0.048	50	0.5713	0.0048
A9E1	0.062	50	0.4661	0.0120
A7E3	0.073	50	0.3858	0.0150
A5E5	0.071	50	0.3684	0.0140
A3E7	0.083	50	0.2870	0.0170
A1E9	0.067	50	0.2091	0.0130
B9E1	0.055	50	0.5398	0.0055
B7E3	0.072	50	0.4521	0.0072
B5E5	0.080	50	0.3859	0.0080
B3E7	0.100	50	0.2704	0.0100
B1E9	0.078	50	0.208	0.0078

附錄十九、小粒徑燃燒試驗重金屬 Cu 分佈比例

AB	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.006	0.009	0.007	0.007	0.005	0.005	0.008
Put in 換算濃度(mg)	0.0763	0.0746	0.0631	0.0640	0.0597	0.0494	0.0471
Solid phase(%)	8.39	12.47	11.73	11.41	8.55	9.72	16.35
gas phase (%)	91.61	87.53	88.27	88.59	91.45	90.28	83.65

AE	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.006	0.012	0.015	0.014	0.017	0.013	0.008
Put in 換算濃度(mg)	0.0763	0.0700	0.0590	0.0449	0.0323	0.0203	0.0129
Solid phase(%)	8.39	17.71	24.75	31.63	51.42	66.00	65.04
gas phase (%)	91.61	82.29	75.25	68.37	48.58	34.00	34.96

BE	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.008	0.006	0.007	0.008	0.010	0.008	0.008
Put in 換算濃度(mg)	0.0471	0.0435	0.0369	0.0295	0.0234	0.0162	0.0129
Solid phase(%)	16.35	12.65	19.54	27.09	42.81	48.08	65.04
gas phase (%)	83.65	87.35	80.46	72.91	57.19	51.92	34.96

附錄二十、小粒徑燃燒試驗重金屬 Cr 總量

樣品名稱	底灰			
	ICP 分析數據(ppm)	定量體積(mL)	消化底灰重(g)	計算後濃度(mg)
A	0.058	50	0.4987	0.0116
B	0.193	50	0.6055	0.0193
E	0.480	50	0.1569	0.0960
A9B1	0.188	50	0.5132	0.0188
A7B3	0.182	50	0.5087	0.0182
A5B5	0.110	50	0.5697	0.0110
A3B7	0.148	50	0.5689	0.0148
A1B9	0.111	50	0.5713	0.0111
A9E1	0.108	50	0.4661	0.0220
A7E3	0.112	50	0.3858	0.0220
A5E5	0.106	50	0.3684	0.0210
A3E7	0.138	50	0.2870	0.0280
A1E9	0.095	50	0.2091	0.0190
B9E1	0.131	50	0.5398	0.0131
B7E3	0.178	50	0.4521	0.0178
B5E5	0.165	50	0.3859	0.0165
B3E7	0.195	50	0.2704	0.0195
B1E9	0.162	50	0.208	0.0162

附錄二十一、小粒徑燃燒試驗重金屬 Cr 分佈比例

AB	A	A9B1	A7B3	A5B5	A3B7	A1B9	B
底灰換算濃度(mg)	0.012	0.019	0.018	0.011	0.015	0.011	0.019
Put in 換算濃度(mg)	0.0693	0.0688	0.0603	0.0637	0.0623	0.0545	0.0537
Solid phase(%)	16.74	27.32	30.16	17.26	23.74	20.36	35.95
gas phase (%)	83.26	72.68	69.84	82.74	76.26	79.64	64.05

AE	A	A9E1	A7E3	A5E5	A3E7	A1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.012	0.022	0.022	0.021	0.028	0.019	0.096
Put in 換算濃度(mg)	0.0693	0.0625	0.0503	0.0355	0.0219	0.0085	0.0013
Solid phase(%)	16.74	34.55	44.51	59.72	100.00	100.00	100.00
gas phase (%)	83.26	65.45	55.49	40.28	0.00	0.00	0.00

BE	B	B9E1	B7E3	B5E5	B3E7	B1E9	E
底灰換算濃度(mg)	0.019	0.013	0.018	0.017	0.020	0.016	0.096
Put in 換算濃度(mg)	0.0537	0.0482	0.0380	0.0270	0.0171	0.0065	0.0013
Solid phase(%)	35.95	27.16	46.87	61.03	100.00	100.00	100.00
gas phase (%)	64.05	72.84	53.13	38.97	0.00	0.00	0.00

