

廢棄物於焚化爐熱焚化時之燃燒氣氛

李清祺*、王朝正*

The Burning Atmospheres of Waste Incinerators

Ching-Chi Lee and Chaur-Jeng Wang**

摘 要

高溫腐蝕的防治與耐高溫腐蝕及熱腐蝕材料的選擇，是建構廢棄物焚化爐時的重要相關技術。而焚化乃是藉由燃燒(combustion)、熱解(pyrolysis)、氣化(gasification)等反應機制達到分解廢棄物之目的。但其燃燒氣氛隨其組成成份之不同，亦將伴隨HCl, Cl₂, SO₂, SO₃, CO, CO₂, NO_x及粉塵等酸性氣體而侵蝕爐具，易造成材料內部孔洞。本研究經由熱焚化反應機制的探討及各類廢棄物燃燒生成氣氛的蒐集，藉此作為焚化爐相關設備材料選用與保固之參考。

關鍵詞：廢棄物焚化爐、燃燒氣氛、高溫腐蝕。

ABSTRACT

The prevention of the high temperature corrosion and materials selection are the main technologies to build up a waste incinerator. By ways of combustion, pyrolysis and gasification to treat refuse during incineration, the wastage can decompose to a safe condition for living environments. However, many corrosive flue gases such as HCl, Cl₂, SO₂, SO₃, CO, CO₂, NO_x and ashes produced by the combination of the refuse could result in severe corrosion problems of the incinerator. The purpose of this study is to review the reaction mechanism and the burning atmospheres during incinerating different kinds of wastage, and to provide a better reference for the design, material selection and maintenance of the incinerators.

Keyword: Waste incinerator, burning atmosphere, high temperature corrosion.

一、前言

隨著人類文明的進步，消費刺激生產的觀念造成了產品的過度包裝和浪費的消費習慣。雖然人們已警覺到地球資源日益枯竭及環境保護的重要性，然而社會的多元化，使垃圾廢棄物的來源趨於複雜，分類處理也日益困難。因此，因廢棄物處理不當而發生的災害時有所聞，例如 1950

~ 1965 年間日本中南部海岸數千名居民，因水銀及鎘的污染而導致半身不遂、骨骼受損或慢性死亡，以及 1983 年美國密蘇里州時報海灘鎮(time beach)的 2200 位居民，由於戴奧辛(Dioxin)的污染而被迫遷移的事件，最爲人所熟知而引以爲戒⁽¹⁾，也因此促使人們對廢棄物的處理技術有更殷切的期盼。廢棄物依其來源，一般可分爲民

*國立台灣工業技術學院機械工程研究所

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan Institute of Technology, Taipei, Taiwan, R.O.C

生廢棄物及事業廢棄物兩大類，為求資源回收之目的，廢棄物又分為可回收與不可回收，再將不可回收之廢棄物分為可燃和不可燃，然後依分類加以焚化或掩埋。

環境保護目前已是世界的趨勢，基於政府政策和民眾愛護鄉土的環保意識，尋找一個能處理廢棄物又無二次公害之虞的方法已經刻不容緩。其中，焚化處理可以同時達到「減量化」、「安全化」、「安定化」、「資源化」的四大目標，因而是一種較符合環保要求的選擇。由於焚化技術的建構，需要相關的數據來作為建立系統參數的依據，因此在設計焚化爐時，首先便需要考慮廢棄物之組成、燃燒氣氛和焚化爐體材料選擇間之關係。例如，據 Doyle 等指出⁽²⁾，醫院廢棄物之塑膠含量比都市固體廢棄物大約多出 5 倍，所以有可能產生更多的戴奧辛(Dioxin)和呋喃(Furans)。而以目前的情況而言，每噸的醫院廢棄物焚化時，大約會產生 4kg 的氯化氫(HCl)⁽³⁾，而這些強酸在高溫中將迅速地腐蝕焚化爐的設備。

民生廢棄物和事業廢棄物，其組成與燃燒氣氛差異很大。因此，焚化爐在高溫環境的爐條、燃燒室，將隨著不同的焚化物及其燃燒氣氛而發生不同型式的高溫腐蝕反應，故必須針對不同之腐蝕環境選擇適當的材料，才能滿足主體設備設計之要求。另一方面，焚化爐相關設施之材料選擇也必需考慮廢棄物之燃燒氣氛，例如，汽電共生設施之熱交換器過熱管，因其位處於高溫腐蝕之環境，材料須依其所處之特殊環境而做特別的選擇。為使有志於研究焚化處理系統之專家學者，於建構、設計系統或相關研究時得到詳細且正確的資料參考，得以在焚化爐體材料的選擇、燃燒爐氣的控制、廢氣的管理上皆能建立自主性的技術能力，本文將針對廢棄物之類型與組成、熱焚化之反應機制、有害生成物的形成以及廢棄

物之典型熱焚化之生成氣氛等四大項作一系統化之整理探討。

二、廢棄物的類型與組成

廢棄物大致可分為民生及事業廢棄物兩大類型，隨著地域、季節之不同，廢棄物之組成與成份也會有所差異。

在民生廢棄物方面，由於目前國人之垃圾分類尚未落實，因此垃圾組成物差異性極大，經常包括廚餘、紙張、金屬、木材、各種塑膠及樹脂、清潔劑、廢電池... 等，其燃燒氣氛及燃燒過程極難分析預測。所幸焚化之目的，主要在於使可燃或不安定的物質轉化為無害之氣體產物，因此只要將燃燒之 3T—時間(time)、溫度(temperature)及擾流(turbulence)控制得當，便能將其對於環境的危害降至最低。Brunner 指出⁽⁴⁾，只要提供可燃物足夠的氧氣和適當的混合，並使燃燒溫度高於 1000°C 以上且滯留時間大於兩秒，則戴奧辛、呋喃等難處理之含氯化合物都能處理到 99.99% 甚至更高達 99.9999% 以上之 DRE (Destruction removal efficiency)。雖然單一民生廢棄物的組成物性質有很大的差異性，但當垃圾廢棄物的採樣量非常大時，卻反而具有常規的一致性。表 1 為台灣及外國各大城市垃圾(民生垃圾類)之物理性質⁽⁵⁾，表 2 則是垃圾之化學組成⁽⁵⁾。由表 1、表 2 中可發現，在相同的文化與生活方式之國家領域內，民生垃圾之組成雖複雜但差異性卻不大。然而由表中亦可發現，在我國的家庭垃圾中，可燃物所含之塑膠類垃圾組成有逐年增加的趨勢，且含有率高居各城市之冠，所以可以預見本地的焚化設備將遭受到最嚴重的高溫腐蝕考驗。此外，垃圾分類的未能完全落實，抑或是銷毀毒品的年度大考，也使民生廢棄物混雜事業廢棄物或有害廢棄物，因而偏離原先之設計而傷害爐具。

表 1 垃圾物理組成(乾基)⁽⁵⁾
Table 1 The physical constituents of garbage (dry).⁽⁵⁾

都市別		台北市						板橋 中和 新莊	台中市		高雄市				日本 京都	日本 大阪	美國	歐美
		1968	1980	1983	1984	1985	1986	1981	1983	1985- 1986	1966	1977	1983	1985	1981		1971	
分析 項目	單位																	
	可燃 性 物 質	單位容積重 Kg/m ³																
紙類		7.6	22.9	22.4	17.9	23.27	23.36	16.05	18.28	17.59	9.1	7.82	13.4	17.8	23.4	25	44	39
纖維布類		3.2	7.28	12.3	7.0	6.64	6.29	18.30	7.24	0	8.2	3.81	4.3	6.0	2.8	5	2	4
木竹稻草類		3.9	3.25	3.5	3.8	3.75	3.72	3.16	3.80	1.82	8.4	5.15	10.9	10.9	5.7	10	14	13
廚餘類		27.8	30.70	24.3	25.3	28.46	30.81	33.48	36.26	40.62	39.3	63.90	25.1	20.8	43.4	9	15	18
塑膠類		3.2	9.46	12.5	12.6	12.86	15.45	7.67	12.85	16.92	1	3.25	15.7	18.0	12.6	12	3	4
皮革橡膠類		2.9	1.54	1.1	1.6	0.08	0.10	5.62	0.47	0	2	2.80	1.7	0.1	0.4		1	
小計	%	48.6	75.23	76.0	68.2	81.51	81.97	84.82	78.90	86.07	65.0	86.73	71.1	73.6	88.3	71	79	78
不可 燃 物 質	金屬類	2.3	3.45	5.0	5.0	5.23	9.27	3.84	4.42	3.78	2.3	0.26	3.5	1.7	4.9	4	9	11
	玻璃陶瓷類	3.0	13.74	14.5	12.8	5.29	4.58	9.02	6.98	7.89	6.8	1.99	7.1	3.4			8	
	石頭、5mm 以上砂土	46.1	7.58	2.1	6.3	4.97	4.18	1.79	3.19	2.26	25.9	11.52	6.6	10.8			4	
	其他類			2.4	7.7	2.63	2.25	11.07	6.51	9.12			2.2	10.5		25		11
	小計	%	51.4	24.77	24.0	31.8	18.49	18.03	15.72	21.10	13.93	35.0	13.27	28.9	26.4	11.7	29	21
總計		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表 2 垃圾化學組成 (濕基)⁽⁵⁾
Table 2 The chemical constituents of garbage(wet).⁽⁵⁾

都市別		台北市						台中市		高雄市			日本 京都 市	日本 大阪 市	美·密蘇里 州·路易士 城	美·賓 州·費 城	美·俄亥 俄州·克 利夫爾	美國	歐美
		1980	1983	1984	1985	1986	1983	1985-86	1977	1983	1985	1981		1972	1980	1980			
分析 項目	單位																		
	水份		60.70	56.3	55.2	55.30	56.50	59.77	97.64	47.8	56.2	56.8	48.00	43	19.69	31.33	17.2	28.16	25
灰份		16.78	16.6	18.9	14.52	14.11	11.98	14.45	19.3	19.3	16.9	17.60	19	9.43-26.83	29.0	28.3	20.82	20	
可燃份			27.1	25.9	30.18	29.39	28.25	27.91		24.6	25.9		38	36.76-56.24				55	
碳 C	%	14.60	13.29	14.60	16.43	14.04	13.90	14.52	2.66	11.77	13.57	16.40		23.45-33.47	26.8	26.3	25.62		
氫 H		2.06	1.78	2.23	2.43	2.04	2.28	2.68	13.2	2.34	2.20	2.20		3.38-4.72	3.5	3.5	3.45		
氧 O		11.17	10.96	8.37	10.77	12.83	11.48	10.05	0.08	6.45	9.46	14.90		15.37-31.90	22.9	21.0	21.21		
氮 N			0.56	0.46	0.42	0.36	0.45	0.47		0.12	0.32	0.10		0.19-0.37	0.4	0.5			
硫 S			0.23	0.16	0.09	0.07	0.11	0.18		0.41	0.06	0.08		0.19-0.33	0.2	0.1			
有機氯 Cl			0.27	0.07	0.04	0.04	0.03	0.01		0.17	0.23			0.13-0.32					
高位發熱 量		Kcal/Kg		1,579	1,437	1,753	1,705	1,464	1,588		1,292	1,380							
低位發熱 量			1,144	985	1,290	1,267	983	1,097		827	920	1,372	1,780	2,317-3,056				2,340	

事業廢棄物的來源與組成相較於民生垃圾則較為單純，以醫院為例^(2,7)，廢棄物包括注射針筒、毒性廢棄物、廢棄藥劑...等，其中固體組成物以塑膠及 PVC 製品居多，因此焚化時可

能產生高於 1000ppm 的 HCl 酸性氣體。於工業廢棄物方面，最常見的是廢水處理後之污泥或製造過程中產生之污泥，以紙廠污泥為例⁽⁷⁾，如表 3 之元素分析所見，其燃燒生成物必定含有酸性

廢棄物於焚化爐熱焚化時之燃燒氣氛

表 3 紙廠污泥性質⁽⁵⁾

Table 3 The sludge properties from the paper mills.⁽⁵⁾

外附水分		65.05%
物理分析	內附水份	2.43%
	揮發份	57.80%
	灰份	28.53%
	固定碳	11.24%
	熱值	3,277Kcal/Kg
元素分析 (乾基)	碳(C)	23.90%
	氫(H)	3.31%
	氮(N)	0.40%
	硫(S)	0.03%
	氧(O)	43.11%
	灰份	29.24%

表 4 典型焚化過程之反應機制

Table 4 The typical burning mechanism in the incinerating process.

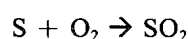
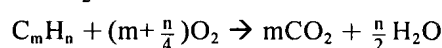
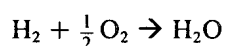
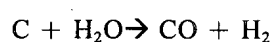
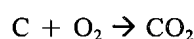
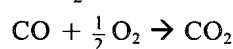
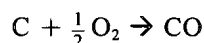
溫度範圍 (°C)	過程	反應機制
100	脫水乾燥	廢棄物受輻射熱及預熱助燃空氣之對流作用而使水份蒸發，再將蒸發之廢氣導入更高溫之後燃室燃燒。
250-600	傳熱、變形、熱解脫氣	廢棄物產生揮發性之乾餾氣體。高分子聚合體裂解為低分子量之組合。
~500	點燃	廢棄物之固定碳及揮發性有機成分點燃。
500-800	燃燒	乾廢棄物之燃燒。
~1000	熔燒	碳化生成物氣化及高溫燃燒。
1100~	燒化	在氧氣足夠的情況下，殘存之碳完全燃燒成為無機性之灰燼或氣體。

氣體之組成，所以爐體的材料需要能抵抗硫化物、氯化物之高溫腐蝕。而在材料的選用上究竟是以抗硫化為重的氧化鉻系生成合金⁽⁸⁾，或以抗氯化為重的氧化鋁系生成合金^(9, 10)，則須視該事業廢棄物之主要組成而定。

三、熱焚化之反應機制

焚化過程包含廢棄物固定碳的熱解(pyrolysis)、氣化(gasification)、燃燒(combustion)等化學過程。如表 4 所見，其受溫後之過程將可能產生具揮發性有機氣體、燃燒灰燼、粉塵、CO₂、H₂O、SO₂及 NO_x。理論上，焚化時若

能提供足夠的氧氣，則碳元素及其化合物之氣化及燃燒兩項機制可以下列反應式為代表：

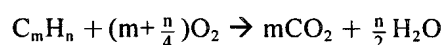


完全燃燒最終產物之含量須視廢棄物種類、配合使用之焚化系統、燃燒室造形、燃燒停留時間、供應空氣量…等條件而定。

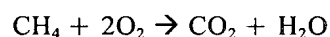
雖然有些廢棄物熱分解處理單獨利用熱解或氣化反應來達到分解廢棄物的目的，然而就一般廢棄物焚化系統而言，燃燒、熱解、氣化皆為焚化過程中可能之反應機制：

3.1 燃燒反應(combustion)

廢棄物之金屬組成物熔點較高，燃燒時較為穩定無害，因此廢棄物之燃燒與熱分解以碳氫化合物為主。其燃燒之典型化學反應式非常簡明，如碳氫化合物之燃燒反應式：



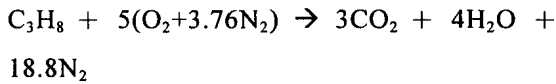
然而燃燒之反應過程卻相當複雜，包含著非常複雜的連鎖反應。以甲烷為例，其燃燒氧化反應式為：



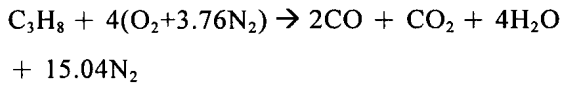
但其燃燒之連鎖反應卻包含 CH₃·、HCO·、OH·等自由根之連鎖反應。而一般的碳氫化合物燃燒反應過程雖較甲烷更為複雜，但其反應仍與甲烷相似，皆包括 CH₃·、HCO·、OH·等自由根。

燃燒可分為三種形式，其分野完全以系統中可供利用氧化劑量而定，以 C₃H₈ 為例：

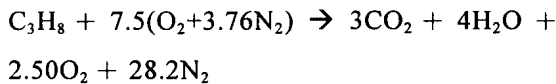
(1) 理論燃燒 (100%理論空氣)



(2) 缺氧燃燒 (以 80%理論空氣為例)

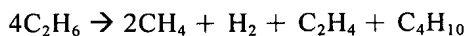


(3) 過氧燃燒 (以 150%理論空氣為例)



3.2 熱解(Pyrolysis)

熱解是指有機化合物在隔絕各項異質反應物(如氧)之氣氛下，加熱產生裂解及凝聚反應(cracking and condensation)，形成氣態、液態及固態產物。熱解反應一般為吸熱反應，可以在不同的溫度下產生，使碳氫化合物的組合鍵受到破壞，再由產生之小分子和自由根的重組或氫原子的去除，合成較大的分子及不飽和化合物。以乙烷熱解反應為例：



乙烷熱解可以產生丁烷，另外不飽和碳氫化合物(乙炔)在相互結合後又可形成丁烯，而後形成更複雜之苯環化合物。此一機制造成了芳香族化合物，於熱解時易產生具毒性物質及戴奧辛。

垃圾在高溫 (300°C 以上) 熱解主要反應為 C-O 鍵之裂解，而在 200°C 以下主要為脫水作用。典型含碳有機物之熱解連續過程如圖 1 所示。

3.3 氣化(gasification)

如表 1 ~ 表 3 所見，固體廢棄物中，碳元素佔有很大的比例。碳元素組成在高溫轉化成氣體可燃物之過程稱為氣化。氣化過程中亦可能發生乾燥、乾餾等熱解過程而產生自由碳。典型之氣化反應式如下：

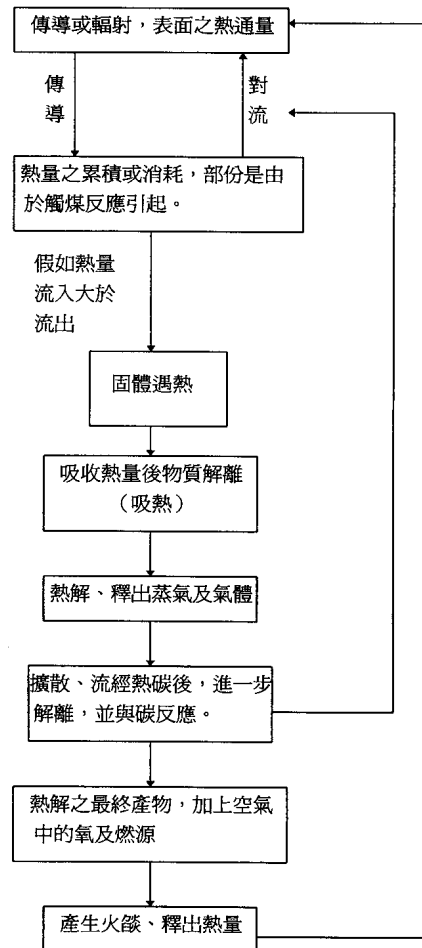
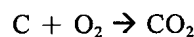
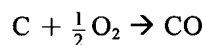
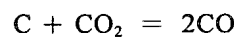


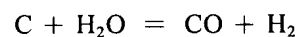
圖 1 含碳有機物典型熱解之連續過程⁽⁵⁾
Fig.1 Flow chart of the typical pyrolysis of organic materials containing carbon.⁽⁵⁾



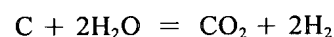
由於焚化時燃燒床體是在高溫狀態，因此二氧化碳經床體時會發生反應並與碳元素化合成為一氧化碳：



在高溫中，氣化過程若以 H₂O 作為氧化劑與碳元素進行反應，亦可形成 CO 和 H₂，反應式為：



在低溫區則形成 CO₂ 和 H₂：



依熱力平衡⁽¹¹⁾，於 1000°C 以上，CO 為

CO/CO₂之穩定氣氛，於 400°C 以下則為 CO₂，其間之溫度則為 CO、CO₂皆有之。

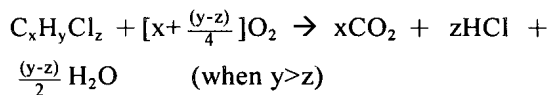
氯化過程最大的收益，是於高溫時產生大量之可燃氣體來產生自燃，間接地節省廢棄物處理成本。

四、熱焚化有害生成物的形成

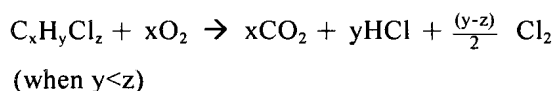
綜合前述的廢棄物燃燒、熱分解與各項生成物質氣氛之探討，焚化爐具將可能遭受到碳侵蝕(carbon attack)、氮侵蝕(nitrogen attack)、高溫氧化、氯化、硫化或熱腐蝕。其中，就高溫腐蝕之研究經驗而言^(8, 12)，由氯、硫引起的高溫腐蝕對爐具的傷害性最為強烈。就組成物之特性而言，氯化有機物是有害廢棄物的主要成分，它的生成物 HCl 和 Cl₂ 均是難處理的物質，HCl 是造成爐具腐蝕的主要原因，Cl₂ 則對人體、設備與環境危害甚大。而硫化物的燃燒亦會產生有害生成物，腐蝕爐體、污染環境。粉塵之附著於爐具則是造成爐具間接腐蝕的原因⁽⁸⁾。

4.1 含氯化物之廢棄物的燃燒

若以 C_xH_yCl_z 代表氯化有機物，當氫原子數多於氯原子數(y>z)時，燃燒產物為二氧化碳、水蒸氣及氯化氫：



當氫原子數低於氯原子數(y<z)時，則燃燒產生氯化氫與氯氣：



此外，如圖 2 之氯含量及燃燒熱值間的關係⁽¹⁾所見，有機廢棄物之氯含量愈高將導致燃燒熱值的減低。一般而言，為保持在燃燒溫度而不需噴油助燃而能自燃，則需有 900 ~ 1000Kcal/Kg 以上之發熱量^(13,14)。因此氯含量高之有機廢棄

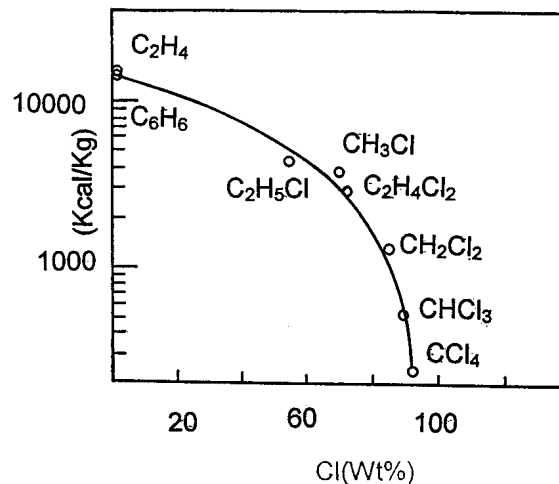
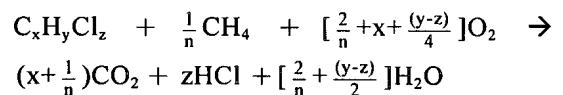


圖 2 氯含量與燃燒熱之關係(計算值)⁽¹⁾

Fig.2 The relationship between chlorine content and heat of combustion.(Calculation values)⁽¹⁾

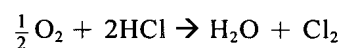
物，由於無法自燃須另以輔助燃料幫助燃燒，而燃料中之氫原子則將氯轉化為氯化氫及水蒸氣。以甲烷為例：



(反應式中的 n 為 C_xH_yCl_z 與 CH₄ 的分子比例)

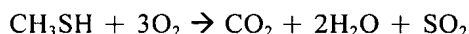
值得一提的是，乾燥的 HCl 和 Cl₂ 其腐蝕效應並不明顯⁽¹⁵⁾，但若遇到水份、氯化氫及水蒸氣結合，產生氯離子和氫離子後的結果，將大大地加速了金屬腐蝕反應的進行。

另一個焚化爐運作時必須考慮的問題是 POCH(有機有害物)和 PIC(不完全燃燒產物)的排放量。有機物質的熱破壞率強烈地依賴氧的需求量，破壞率隨氧需求量的增加而增加，依先前的文獻報告⁽¹⁶⁾，理論空氣一般以 130 ~ 150%間產生之 POCH(有機有害物)和 PIC(不完全燃燒產物)排放量最少。若理論空氣之供給量超過 150%，將導致 POCH 和 PIC 的快速增加，這是因為過量的氧氣，會氧化氯化氫而產生氯氣。



4.2 含硫化物之廢棄物的燃燒

雖然一般工業及民生廢棄物中之硫含量很低，但硫氧化物的排放卻是造成酸雨的主要原因，廢棄物中所含的有機或無機硫化物，在完全燃燒之情況下會產生穩定的二氧化硫(SO₂)和少量(約 2 ~ 4%)之 SO₃。以硫醇(Mercapan)為例，其氧化反應為



由於硫氧化物與可呼吸性之微粒物質結合時，對人們健康危害很大，而且會造成區域性之酸雨現象，因此焚化系統對於硫氧化物的排放要做適當的控制才能符合環保要求。在焚化系統裡，SO₃會與水蒸氣形成 H₂SO₄，為避免硫酸對爐具的腐蝕，焚化系統之排氣溫度應高於 H₂SO₄之露點一段安全值。

在焚化系統之高溫區，高溫硫化及低熔點硫化物之熱腐蝕則將對爐具產生危害。

4.3 粉塵之產生

廢棄物焚化有時為了完全摧毀有機化合物，需要較高之溫度，然而卻可能導致砷(As)、鎘(Cd)、汞(Hg)、鋅(Zn)、和鉛(Pb)等金屬或化合物揮發，根據 O'Connell 等⁽⁵⁾之估計，每焚化一公斤之垃圾，廢氣中排放之重金屬重量為：鉛 0.006g，汞 0.0032g，鎘 1.9×10^{-4} g，鉻 0.6×10^{-4} g，銅 1.9×10^{-4} g，鎳 2.9×10^{-5} g，鋅 0.9×10^{-2} g，砷 2.2×10^{-5} g。粉塵對爐體之影響並非直接之腐蝕，而是這些金屬或金屬化合物附著於爐體造成材料之共晶現象的影響⁽¹⁷⁾，這使得爐體材料在低於共晶溫度發生熔融而形成孔洞，間接地破壞爐具或累積其它腐蝕性物質。

五、廢棄物之典型熱焚化生成氣氛

當高熱值之廢棄物以間歇性的方式進料於焚化爐時，會產生噴氣(Puff)的現象，所謂噴氣現象就是廢料在瞬間燃燒時產生大量不穩定之

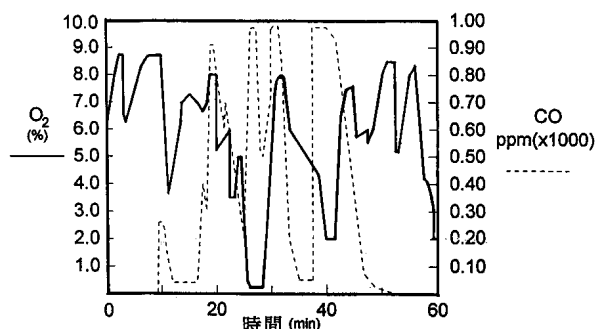


圖 3 燃燒爐氣⁽¹⁸⁾

Fig.3 The burning atmospheres in the waste incinerator.⁽¹⁸⁾

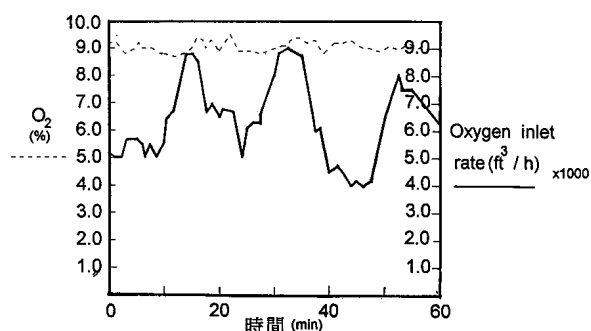


圖 4 氧氣控制的效果⁽¹⁸⁾

Fig.4 The result of the controlled oxygen inlet rate.⁽¹⁸⁾

排氣現象，造成了瞬間的缺氧，這種短暫的缺氧會造成 PIC(不完全燃燒產物)的釋放。圖 3⁽¹⁸⁾是美國環保署於 1981 建造之可移動式焚化系統(EPA'S mobile incineration system)，其燃燒位於密蘇里州馬克杜威的丹尼鎮農場受戴奧辛污染之塑膠廢棄物，燃燒爐氣變化情形如圖所示，在正常之操作過程中，雖然含過量之氧氣，但進料操作時亦發現有噴氣的現象，氧氣濃度迅速降低，一氧化碳濃度急速升高。在加裝林達富氧系統(Linde OCS)⁽¹⁸⁾後，利用自動噴水系統控制爐溫，並利用氧氣供給及回饋邏輯控制系統，精確地控制燃燒時之氧需求量，其氧氣控制效果如圖 4⁽¹⁸⁾所見，進入二次燃燒室之氧氣將由原先 4~9% 控制至 $9 \pm 1\%$ ，噴氣現象在偵測中沒有再發

廢棄物於焚化爐熱焚化時之燃燒氣氛

表 5 日本東京都會地區的市用垃圾焚化爐不同部位的氣體組成(量測值)⁽¹⁹⁾

Table 5 The atmosphere compositions in the different positions of the waste incinerator in Tokyo area. (measure values)⁽¹⁹⁾

	NO _x (ppm)	SO _x (ppm)	HCl (ppm)	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ O (%)	溫度 (°C)
第一乾燥室	59	162	532	7.2	15.7	1.3	39.5	746
燃燒室	66	162	506	3.1	17	1.3	40.4	1116
爐體出口	86	81	391	35(ppm)	9.9	10.0	29.6	928
煙囪	91	31	220	10	8.3	11.6	39	288

表 6 台北市木柵焚化廠之垃圾組成及其燃燒生成物及生成量(以 100Kg 為基底)⁽⁵⁾

Table 6 The garbage constituents, combustion products and product quantities in the Moo-Jar incinerator factory in Taipei, Taiwan. (100 Kg base)⁽⁵⁾

垃圾組成 (wt %)		完全燃燒 之需氧量 (Kg/mol)	生成物及生成量 (Kg/ mol)						
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	SO ₂	HCl	小計
C	16.43	1.37	1.37						1.37
H	2.43	0.16		1.22					1.22
O	10.77	0.34			0				0
N	0.42					0.015			0.015
S	0.09	0.0028					0.0028		0.0028
有機氯 (as Cl)	0.04							0.0011	0.0011
灰	14.52								
水	55.30			3.07					3.07
總計		1.64	1.37	4.29	0	0.015	0.0028	0.0011	5.68

現。爐氣之精確控制，必需基礎於對廢棄物的生成氣氛瞭解，藉此方得以求出氧氣控制相關參數以及爐具材料的應用與保固。為此，以下分別列出各類廢棄物典型之燃燒生成氣氛。

5.1 民生、都市固體廢棄物之燃燒氣氛

表 5 為日本東京都會地區的市用垃圾焚化爐不同部位的氣體組成⁽¹⁹⁾；表 6 為台北市木柵焚化廠各項化學成份之燃燒生成物及生成量⁽⁵⁾。由

表可見，HCl 和 H₂O 的組合必然發生，此舉將使得高溫腐蝕速率大大地增加。

表 7 為西德三處焚化廠廢氣之處理情形及排放量⁽⁵⁾，唯其廢氣處理前的排氣濃度，需視滌氣設備之處理能力而定。此外，經滌氣設備處理後仍然含有大量的 HCl 和 SO₂，因此焚化爐周邊設備勢必無法完全避免高溫腐蝕的環境因子。

5.2 事業廢棄物之燃燒生成氣氛

表 7 西德焚化廠廢氣處理流程及廢氣排放量⁽⁵⁾

Table 7 The exhausted treatment process and emission amounts in the several incinerator factories in West Germany.⁽⁵⁾

廠名	廢氣處理流程	廢氣排放量 (mg/Nm ³)
Stapelfeld	廢氣	HCl : 30 ~ 100
	→ 靜電集塵	SO ₂ : 50 ~ 100
	→ 濕式洗滌塔	HF : 0 ~ 1
	→ 溫度升高	NO _x : <200
	→ 排放	dust : <20
Bremerhaven	廢氣	HCl : 50 ~ 60
	→ 靜電集塵	F ⁻ : 1.5 ~ 2.5
	→ 濕式洗滌塔	SO ₂ : 80 ~ 200
	→ 排放	dust : 25 ~ 30
Wuppertal	廢氣	HCl : 500
	→ 靜電集塵	SO ₂ : 100 ~ 200
	→ 簡易噴水設施	NO ₂ : 150
	→ 排放	NO : 20
		HF : 5

表 8 紙廠污泥與煤混合燃燒之廢氣排放分析值⁽⁷⁾

Table 8 The analysis of exhausted emissions after combustion mixed the coal and the sludge from the paper mills.⁽⁷⁾

項目	煤/污泥混燃實驗
平均爐溫(°C)	830 ± 48
爐溫差*(°C)	5
過剩空氣	25%
SO ₂ (ppm)	9 ~ 46
NO _x (ppm)	85 ~ 120
CO (ppm)	214 ~ 598

*爐溫差：爐底部與頂部之溫度差

事業廢棄物常見的焚化處理是污泥、皮革...等。以紙廠污泥處理為例⁽⁷⁾，表 8 所示，紙廠污泥與煤在流體化床爐混合燃燒後，其產物主要為 CO、SO₂、NO_x。另外一個實例是酒廠酒粕之處理，利用流體化床爐，焚化高粱酒粕之測量結果列示於表 9⁽²⁰⁾，顯示燃燒氣氛對腐蝕的影響主要為硫化物的侵蝕。皮革、免洗餐具亦是常見之事業廢棄物，表 10 是以控氣式實驗用焚化爐研

表 9 高粱酒粕之焚化測試結果⁽²⁰⁾

Table 9 The test result for burning sorghum dregs.⁽²⁰⁾

爐溫度(°C)	
上乾舷區	841.1
下乾舷區	844.2
膨脹區	876.5
出口溫度	819.1
爐床壓降 (mm-H ₂ O)	200
燃燒效率(%)	99.7
煙氣排放(ppm)	
CO	75.3
NO _x	66.6
SO _x	23.1

表 10 焚化皮革碎皮及免洗餐具之廢氣排放監測物平均濃度(校正至 6%之 O₂)⁽²¹⁾

Table 10 The average concentration of the observations from the exhausted gases in the burning leather cantles and disposable dishes environment. (O₂ calibrated to 6%)⁽²¹⁾

監測物項目	皮革碎皮	免洗餐具
CO ₂	2.5%~3.7%	3.1%~5.1%
CO	350ppm~1000ppm	50ppm~250ppm
SO ₂	400ppm~500ppm	125ppm~175ppm
NO _x	125ppm~175ppm	50ppm~125ppm

究皮革碎皮、免洗餐具之批分式焚化情形⁽²¹⁾，其結果顯示 SO₂ 為非氧化之高溫腐蝕氣氛源。

5.3 含氯、硫廢棄物及其燃燒生成氣氛

綜合前述廢棄物組成之探討回顧，氯廣泛地存在於自來水、清潔劑、漂白水、消毒水以及塑膠等日常生活中甚少于以珍惜回收再使用的物

廢棄物於焚化爐熱焚化時之燃燒氣氛

表 11 在空氣中燃燒含氯塑膠所分解產生之有毒氣體濃度⁽⁵⁾

Table 11 The concentration of the poisonous gas decomposed from the burning plastics containing chlorine in air.⁽⁵⁾

	樣品重量 (公克)	溫度 (°C)	氣體濃度 (ppm)				
			HCl	Cl ₂	COCl ₂	CO	CO ₂
加氯聚甲基丙烯酸甲酯	0.55	350	6000	~ 0	3	未定	未定
(45 % C, 27 % Cl)	0.55	550	6000	~ 0	5	22000	26000
	0.55	950	15000	~ 0	未定	14000	60000
聚氯乙烯 (PVC), 不安定 (57 % Cl)	0.25	300	13000	~ 0	~ 0	5000	6000
	0.25	600	15000	~ 0	<1	7000	15000
	0.25	900	15000	~ 0	3	5000	29000
聚氯乙烯和偏二 氯乙烯共聚物, 不安定 (61 % Cl)	0.25	300	14000	~ 0	~ 0	2000	4000
	0.25	600	18000	~ 0	5	11000	21000
	0.25	900	17000	~ 0	10	5000	29000
PVC, 安定, 磷苯二(甲)酸 二辛酸 (33 % Cl)	0.25	300	5000	~ 0	~ 0	7000	8000
	0.25	600	7000	~ 0	~ 0	7000	24000
	0.25	900	8000	<1	<1	10000	30000
PVC, 安定, 磷苯二(甲)酸 二辛酸 (31 % Cl)	0.25	300	6000	~ 0	0	6000	6000
	0.25	600	7000	~ 0	0	6000	15000
	0.25	900	8000	<1	<1	9000	21000
PVC 織物	0.5	550	29000	未定	未定	4000	20000

品。其中，對焚化爐而言，PVC 塑膠為主要之氯氣源。PVC 製品除廣泛地使用於醫院醫療製品外，更運用於浪板、電話機、塑膠管、玩具、手提包等，典型之含碳量約為 38.44 %，氫 4.84 %，氯 56.76 %，其燃燒實驗數據如表 11⁽⁵⁾。一般而言，含氯量愈高者，生成之 HCl 量愈大；相同之含氯量時，燃燒溫度愈高，生成之 HCl 量愈高。

硫化物的形成主要來自於原油或重油的燃燒。且在最早發現之高溫腐蝕實例是船用鍋爐不銹鋼過熱器因硫酸鹽所引發之融熔鹽腐蝕，經檢

視發現在材料銹蝕之部份覆蓋著被證實為硫酸鈉 (Na₂SO₄) 之白色沈積物⁽²²⁾。因此焚化爐燃燒含油之廢棄物或噴油燃燒時，將因燃油中硫酸鈉的多寡而有不同的燃燒氣氛特性，表 12、表 13 為使用 Olympia 全自動柴油燃燒器燃燒柴油及柴油添加 300ppm 硫酸鈉⁽²³⁾。其測量位置分別距離噴嘴八個不同距離位置。由實驗數據的顯示，高濃度的 SO₂ 氣體排放將增加酸性燃氣侵蝕與破壞的機會。

六、結語

表 12 柴油未添加硫酸鈉燃燒之廢氣分析⁽²³⁾Table 12 The atmospheres of the combustion of the diesel fuel without sodium sulfate.⁽²³⁾

量測 項目	量 測 位 置							
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Temperature(°C)	790	746	715	676	640	609	557	505
CO(ppm)	47	34	28	26	26	25	24	23
CO ₂ (%)	11.8	12.1	12.2	12.3	12.5	12.6	12.7	12.9
NO _x (ppm)	69	68	67	66	66	65	64	63
SO ₂ (ppm)	39.9	39.5	38.7	37.8	37.1	36.5	36.4	35.2
O ₂ (%)	4.2	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	3.3	3.0
Excess air (%)	27	26	26	25	23	22	21	20
Efficiency (%)	61	63.2	64.1	65.6	66.6	67.1	69.8	72.3
Loss(%)	39	36.8	35.9	34.4	33.4	32.9	30.2	27.7

說明：#1~#8 為以間距 15CM，距離噴嘴不同距離之 8 個位置。

表 13 柴油添加 300ppm 硫酸鈉燃燒之廢氣分析⁽²³⁾Table 13 The atmospheres of the combustion of the diesel fuel with 300ppm sodium sulfate.⁽²³⁾

量測 項目	量 測 位 置							
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Temperature(°C)	679	654	628	611	569	548	512	473
CO(ppm)	121	93	90	83	79	75	73	72
CO ₂ (%)	9.1	9.3	9.5	10.0	10.3	10.6	10.8	11.0
NO _x (ppm)	60.5	60.0	58.8	57.5	55.0	55.0	53.5	52.0
SO ₂ (ppm)	64.0	58.4	58.0	57.6	56.4	55.5	54.5	52.0
O ₂ (%)	8.9	8.7	8.3	8.0	7.9	7.8	7.7	7.1
Excess air (%)	57	56	56	55	54	53	53	48
Efficiency (%)	59.2	60.1	62.1	62.6	63.4	65.5	66.8	69.3
Loss(%)	40.8	39.9	37.9	37.4	36.6	34.5	33.2	30.7

說明：#1~#8 為以間距 15CM，距離噴嘴不同距離之 8 個位置。

焚化爐體的材料選擇需廣泛地瞭解廢棄物燃燒生成氣氛及燃燒產物，其中以生成酸性氣體 HCl 及 H₂SO₄ 對於材料的腐蝕最值得重視，因此廢棄物中含有氯化物、硫化物者將可能產生 HCl 及 H₂SO₄，爐體材料有必要依其實際環境選擇適當材料。另外爐氣的控制也需瞭解燃燒生成氣氛以便做最佳之控制，達到完全燃燒摧毀的目標。在飛灰、粉塵方面，包含重金屬含量之細微顆粒將因附著於爐具，而於高溫環境中擴散至爐體材料內部，而在低於材料熔點之共晶溫度時便熔融，造成內部孔洞，間接地侵蝕焚化設備。

各焚化廠為避免引發政治性環保爭議，各類廢棄物之燃燒氣氛於文獻中並不多見，這使得在

資料之收集上倍感困難。因此本文之各類廢棄物的燃燒氣氛，僅取幾種較具代表性之種類，作為有志於研究焚化爐相關設計時之參考。

誌謝

本研究承國科會 NSC 86 -2216-E011- 022 經費援助，特此致謝。

參考文獻

1. 張一岑，in：有害廢棄物焚化技術，聯經出版事業公司，民國 80 年，p.105。
2. B. W. Doyle, D. A. Drum and J. D. Lauber, *Pollution engineering*, 16 (1985) 21.
3. 傅孟台、張榮興、曾廣台、姚久龍；工業污染與防治，第 28 期 (1988) 188。
4. C. R. Brunner, in: *Incineration System-Selection and Design*, Van Norstrand Reinhold Co. (1984).
5. 行政院環境保護署，焚化爐二次公害污染排放標準研訂，民 77。
6. R. J. Allen, G. R. Brenniman and C. Darling, *JAPCA*, 36 (1986) 829.
7. 陳美燕、何錦城、章裕民，工業污染防治，第 40 期 (1991) 69。
8. G. Y. Lai, in: *High-Temperature Corrosion of Engineering Alloys*, ASM, (1990) p.117.
9. 王朝正、涂宗漢，防蝕工程，9 (1995) 225。
10. Chaur-Jeng Wang,, Jyh-Wei Lee and Chin-Hai Kao, in: *proc.9th Asian-Pacific Corrosion Control Conf., Corrosion Prevention For Industrial Safety and Environmental control*, Kaohsiung, Taiwan, November 1995, ed. by S.L.I.Chan and W.T. Tsai (Taiwan,1995) p.141.
11. D. R. Gaskell, in: *Introduction to Metallurgical Thermodynamics*, 2nd ed. (1981) 291.

12. 日本腐蝕防蝕協會編 黃忠良譯著，in：金屬材料之高溫氧化與腐蝕，復漢出版社，民國 77 年 11 月，p.1。
13. 中興顧問公司，in：內湖垃圾焚化爐性能及經濟效益評估報告，台北市政府環境清潔處，民國 71 年 3 月，p5-1。
14. 黃宏維，in：環境保護與汙染防制，中國工程師學會出版委員會，民國 77 年，p.198。
15. 柯賢文，in：腐蝕與防制，(全華科技圖書公司，台北)，(1995)，p.211。
16. J. L. Tessitore, J. G. Pinion and E. D. Cresie, *Pollution engineering*, 3 (1990) 58.
17. 日本腐蝕防蝕協會編 黃忠良譯著，in:金屬材料之高溫氧化與腐蝕，復漢出版社，民國 77 年 11 月，p.208。
18. 林典岳、李春正，工業汙染防治，第 30 期 (1989) 121。
19. 蔡松雨，材料與社會，第 51 期 (1991) 43。
20. 詹益亮，能源、資源與環境，8 (1995) 34。
21. 李俊德、蔡俊宏，in：皮革廠碎皮、免洗餐具等焚化技術及廢氣成份分析研究，國立成功大學環境工程研究所—行政院環保署計畫報告，(民國 79，6 月)。
22. 蔡松雨，熱腐蝕簡介，防蝕工程，7 (1986) 66。
23. 潘正益，in：燃油中硫酸鈉成份對燃燒爐高溫腐蝕和燃氣特性的影響，國立台灣海洋大學航運技術研究所碩士論文(1996) p.59。