

廢棄物熱處理技術

目錄

壹、前言	1
貳、廢棄物熱處理相關法規	3
一、一般廢棄物回收清除處理辦法	3
二、事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準	4
三、「事業自行清除處理事業廢棄物許可管理辦法」其「處理」之定義範圍	5
參、熱處理之前處理技術	6
一、雜質分離	6
二、乾燥	7
肆、熱處理之分解與轉化技術	8
一、焚化主流技術及其分類與應用方式	8
二、其他熱化學轉化技術介紹	70
伍、結語	96
參考資料	97

廢棄物熱處理技術

表目錄

表 4.1、廢棄物焚化處理之設計步驟.....	9
表 4.2、典型的焚化爐操作狀況.....	12
表 4.3、各種廢棄物對不同焚化爐之使用情形.....	13
表 4.4、旋轉爐、液體噴注爐、流體化床爐及多爐床焚化爐之比較	14
表 4.5、適於旋轉窯焚化爐處理的廢棄物	33
表 4.6、都市廢棄物熱解生成物	79
表 4.7、廢棄物熱解資源化後組成成分比例.....	79
表 4.8、Zimpro 公司溼式氧化處理廢棄物種類.....	80
表 4.9、超臨界及次臨界流體深井氧化法設計準則之比較.....	87

廢棄物熱處理技術

圖目錄

圖 3.1、廢棄物前處理技術	6
圖 3.2、對流式直接加熱滾筒廢棄物乾燥機.....	7
圖 4.1、典型焚化爐操作最佳 3 成分範圍	10
圖 4.2、流體化床式焚化爐	23
圖 4.3、流體化床壓降與流體化速度之關係.....	26
圖 4.4、氣泡式流體化床焚化系統	27
圖 4.5、氣泡式流體化床爐體細部結構.....	28
圖 4.6、循環式流體化床焚化系統.....	30
圖 4.7、旋轉窯式焚化爐	31
圖 4.8、旋轉窯焚化爐處理系統.....	34
圖 4.9、液體噴注式焚化爐處理系統.....	41
圖 4.10、廢液管線系統	42
圖 4.11、水平式液體焚化爐的內部構造	43
圖 4.12、直立式液體焚化爐的內部構造	43
圖 4.13、多爐床焚化爐	46
圖 4.14、低量空氣焚化爐	48
圖 4.15、模具式焚化爐	48
圖 4.16、噴燒式焚化爐	49
圖 4.17、紅外線焚化系統流程	50
圖 4.18、流體化床式觸媒焚化系統.....	54
圖 4.19、觸媒反應機構	54
圖 4.20、機械爐床式焚化爐體剖面圖	56

圖 4.21、連續燃燒式焚化爐之燃燒過程	57
圖 4.22、連續燃燒式焚化爐基本流程及各項設備功能要求.....	58
圖 4.23、典型混燒式焚化爐處理廠剖面圖	59
圖 4.24、廢棄物之移動及燃燒模式	60
圖 4.25、各種爐床型式	61
圖 4.26、火爐中氣體流向型式	63
圖 4.27、管材溫度對腐蝕之影響	63
圖 4.28、連續式與批次式燃燒規模	65
圖 4.29、批次式焚化設備與選別流程	66
圖 4.30、連續式直接焚化設施之流程	67
圖 4.31、熱解廢棄物流程圖	71
圖 4.32、溫度與過剩空氣之關係	73
圖 4.33、單塔式熱解法流程示意圖	74
圖 4.34、雙塔式熱解法流體化床	75
圖 4.35、廢棄物資源回收熱解反應系統流程	78
圖 4.36、溼式氧化法流程	81
圖 4.37、溼式氧化技術操作區域	82
圖 4.38、不同濃度廢棄物之處理費用比較	83
圖 4.39、超臨界流體氧化系統	86
圖 4.40、高溫深井溼式氧化法	88
圖 4.41、典型的商業化氣化爐	90
圖 4.42、廢棄物蒸煮處理流程圖	92
圖 4.43、焙燒溫度與生質物反應之關係	94
圖 4.44、焙燒反應質量與能量平衡圖	95

壹、前言

事業廢棄物即事業單位所產生之廢棄物。事業廢棄物依其性質不同，可再分類為一般事業廢棄物及有害事業廢棄物。有害事業廢棄物之定義係指由事業所產生具有毒性、危險性，其濃度或數量足以影響人體健康或污染環境之廢棄物，當與身體接觸或被吸入時，會對身體產生傷害或致病，嚴重者將導致死亡。我國廢棄物清理法第1條即闡明廢棄物處理之宗旨：「為有效清除處理廢棄物，改善環境衛生，維護國民健康，特制定本法。」為了達成上述廢棄物處理之宗旨，廢棄物處理之具體目標為「無害化」、「安定化」、「減量化」及「資源化」。

一、無害化：廢棄物內常有許多生物或化學性的有害物質。廢棄物處理的目標，即在於以各種處理方法，將此等有害物質安全化或無害化。例如利用焚化處理之化學法，將微生物殺滅，將有毒物質氧化或分解。

二、安定化：廢棄物中所含之有機物質，每會繼續腐化分解，產生臭味或衍生有害微生物。故廢棄物處理之最終目標在使此等有機質能安定化，不再繼續起變化。

三、減量化：廢棄物一般多疏鬆膨脹、體積龐大，不但徒增搬運費用，且縮短掩埋處置場之使用年限。廢棄物處理即在於將其減量化。如或以焚化處理將廢棄物燒成灰燼，其體積可以縮小至十分之一以下，以利輸送或掩埋。

四、資源化：一般廢棄物中，如有可再用性之物料，可加以回收再用 (Reuse)。有時廢棄物中含有廢紙、廢金屬、玻璃等亦可回收重行煉製而予以再利用。又廢棄物在焚化處理過程中，產生高熱能供發電，可做能源回收 (Energy Recovery)。

熱處理技術是指事業廢棄物經高溫設備處理，以改變其物理、化學、生物或組成等性質，由於具有去毒性、資源回收、減少體積、技術可行性高、土地需求小、適用性廣泛等優點，已普遍應用於事業廢棄物。事業廢

棄物熱處理技術除了焚化處理技術外，熱解處理技術常見於廢塑膠、橡膠、輪胎及電路板等塑化廢棄物，以低溫熱裂解技術回收有價之燃料油，不僅能解決目前廢棄物處理之難題，所回收之燃油並可取代化石燃料，既環保又符合經濟效益。後面章節將先從環保法規瞭解事業廢棄物熱處理之相關規定，並介紹熱處理技術及熱處理技術應用於資源回收。

貳、廢棄物熱處理相關法規

一、一般廢棄物回收清除處理辦法

條號	條文內容
第 2 條	<p>本辦法專用名詞定義如下：</p> <p>十三、處理：指下列行為：</p> <p>(一) 中間處理：指一般廢棄物在最終處置或再利用前，以物理、化學、生物、熱處理、堆肥或其他處理方法，變更其物理、化學、生物特性或成分，達成分離、中和、減量、減積、去毒、無害化或安定之行為。</p> <p>(二) 最終處置：指將一般廢棄物以安定掩埋、衛生掩埋、封閉掩埋或海洋棄置之行為。</p> <p>(三) 再利用：指將一般廢棄物作為原料、材料、燃料、填土或其他經中央主管機關會商中央目的事業主管機關認定之用途行為。</p> <p>十五、熱處理法：</p> <p>(一) 焚化法：指利用高溫燃燒，將一般廢棄物轉變為安定之氣體或物質之處理方法。</p> <p>(二) 热解法：指將一般廢棄物置於無氧或少量氧氣之狀態下，利用熱能裂解使其分解成為氣體、液體或殘渣之處理方法。</p> <p>(三) 熔融法：指將一般廢棄物或灰渣加熱至熔流點以上，使其產生減量、減積、去毒、無害化及安定化之處理方法。</p> <p>(四) 其他熱處理法。</p>
第 19 條	<p>一般廢棄物之處理設施，應符合下列規定：</p> <p>一、具堅固之基礎結構。</p> <p>二、設施與廢棄物接觸之表面採抗蝕材料構築。</p> <p>三、周圍具防止地表水流入之設備。</p> <p>四、具污染防治設備及防蝕措施。</p> <p>五、其他經主管機關規定者。</p>
第 24 條	<p>一般廢棄物焚化處理設施及作業方式除應符合第 19 條規定外，並應符合下列規定：</p> <p>一、廢棄物進料設施須設置計量及檢查設備，並依主管機關規定，實施進廠檢查措施。</p> <p>二、廢棄物貯存槽及進料設施須設置消防及臭氣處理設備；貯存槽並應具備滲出水收集系統。</p> <p>三、二次空氣注入口下游或二次燃燒室出口之燃燒氣體溫度 1 小時平均值不得低於攝氏 850 度。</p> <p>四、焚化飛灰及底渣應分開貯存收集。</p> <p>五、焚化底渣之灼燒減量應符合下列規定：</p> <p>(一) 連續燃燒式焚化處理設施在百分之五以下。</p> <p>(二) 分批填料式焚化處理設施在百分之十以下。</p> <p>六、具備緊急應變處理裝置或措施。</p>

條號	條文內容
	七、其他經主管機關規定者。
第 25 條	一般廢棄物採焚化處理以外之熱處理法處理者，其設施應符合第 19 條及前條第 1 款、第 2 款、第 6 款、第 7 款之規定。

二、事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準

條號	條文內容
第 2 條	<p>本標準專用名詞定義如下：</p> <p>三、處理：指下列行為：</p> <ul style="list-style-type: none"> (一) 中間處理：指事業廢棄物在最終處置或再利用前，以物理、化學、生物、熱處理或其他處理方法，改變其物理、化學、生物特性或成分，達成分離、減積、去毒、固化或穩定之行為。 (三) 再利用：指事業產生之事業廢棄物自行、販賣、轉讓或委託作為原料、材料、燃料、填土或其他經中央目的事業主管機關認定之用途行為，並應符合其規定者。 <p>八、熱處理法：</p> <ul style="list-style-type: none"> (一) 焚化法：指利用高溫燃燒，將事業廢棄物轉變為安定之氣體或物質之處理方法。 (二) 熱解法：指將事業廢棄物置於無氧或少量氧氣之狀態下，利用熱能裂解使其分解成為氣體、液體或殘渣之處理方法。 (三) 熔融法：指將事業廢棄物加熱至熔流點以上，使其中所含有害有機物質進一步氧化或重金屬揮發，其餘有害物質則存留於熔渣中產生穩定化、固化作用之處理方法。 (四) 熔煉法：指將事業廢棄物併入金屬高溫冶煉製程中，合併進行高溫減量處理或金屬資源回收之處理方法。 (五) 其他熱處理法。
第 19 條	<p>下列一般事業廢棄物除再利用或中央主管機關另有規定外，應先經中間處理，其處理方法如下：</p> <p>一、可燃性之一般事業廢棄物：以熱處理法處理。</p> <p>二、廢變壓器其變壓器油含多氯聯苯重量含量在百萬分之二以上未達百萬分之五十者：</p> <ul style="list-style-type: none"> (一) 廢變壓器應先固液分離，其金屬殼體以回收或物理處理法處理。 (二) 變壓器油或液體，應以熱處理法處理。 (三) 其他非金屬之固體廢棄物，不可燃物以衛生掩埋法最終處置，可燃物以熱處理法處理。 <p>三、人體或動物使用之廢藥品：以熱處理法處理。</p> <p>四、製造二氯乙烯或氯乙烯單體之廢水處理污泥：以熱處理法處理。</p> <p>五、其他經中央主管機關公告之處理方法。</p>
第 23 條	事業廢棄物之中間處理設施，除中央主管機關另有規定外，應符合下列規定：

條號	條文內容
	<p>一、應有堅固之基礎結構。</p> <p>二、設施與廢棄物接觸之表面，採抗蝕及不透水材料構築。</p> <p>三、設施周圍應有防止地面水、雨水及地下水流入、滲透之設施或措施。</p> <p>四、應具有防止廢棄物飛散、流出、惡臭擴散及影響四周環境品質之必要措施。</p> <p>五、應有污染防治設備及防蝕措施。</p>
第 24 條	<p>有害事業廢棄物之焚化處理設施，除依前條規定外，並應符合下列規定：</p> <p>四、具有自動監測、燃燒條件自動監測及控制、燃燒室出口中心溫度連續記錄及緊急應變處理裝置。</p> <p>五、其他經中央主管機關公告之事項。</p>
第 26 條	<p>一般事業廢棄物之熱處理設施，應符合第 23 條及第 24 條第 1 項第 4 款、第 5 款之規定。</p>

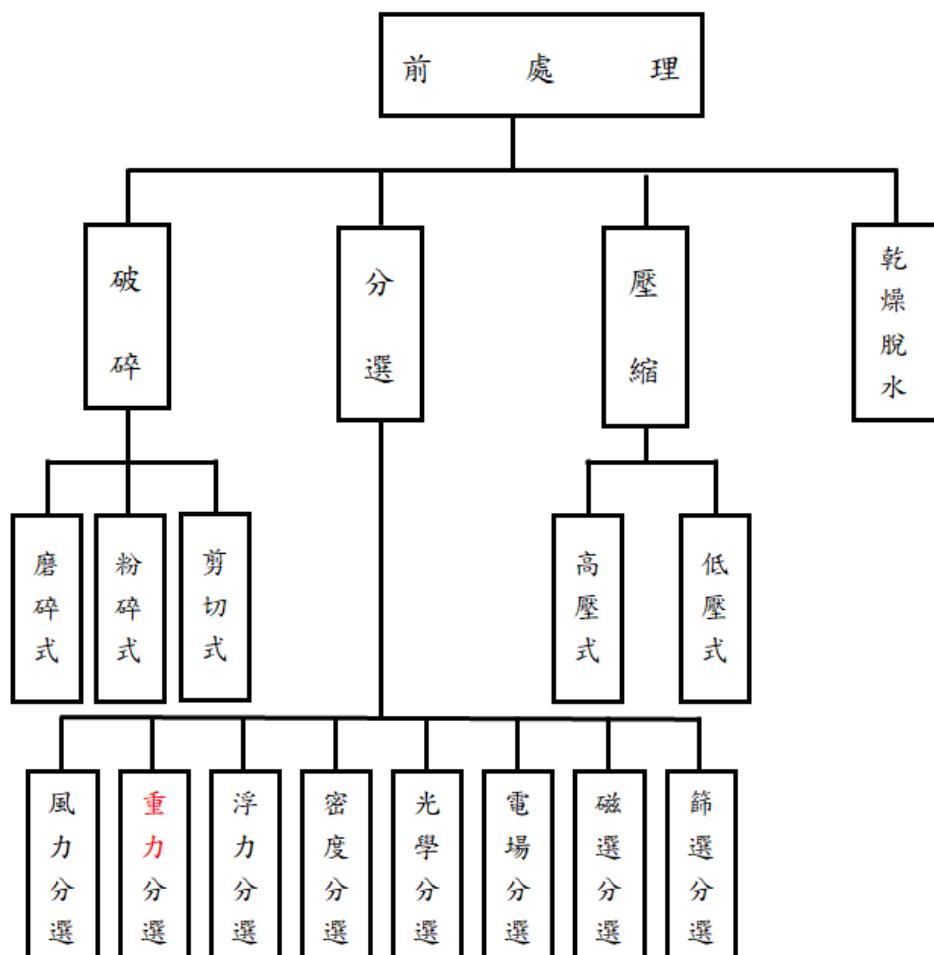
三、「事業自行清除處理事業廢棄物許可管理辦法」其「處理」之定義範圍

指「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」第 2 條規定熱處理法、掩埋法之處理行為。

參、熱處理之前處理技術

一、雜質分離

事業廢棄物在收集或處理等過程中，有時必須先將事業廢棄物加以分類、破碎、壓縮、篩選等前處理過程，以利後續之運輸、焚化、掩埋或再利用。事業廢棄物前處理的目的主要有3：(一)增進營運效率；(二)回收可用物質；(三)回收轉化物或能源。前處理技術則包括：(一)破碎(減小廢棄物的尺寸)；(二)壓縮(減小廢棄物的體積)；(三)分選(分類、篩選以利回收或處理)；(四)乾燥(減少水分以利燃燒)等，如圖3.1所示。事業廢棄物經前處理後可分離出無機性雜質，提高事業廢棄物之單位發熱量，以利後續熱處理階段，降低補助燃料之需求。



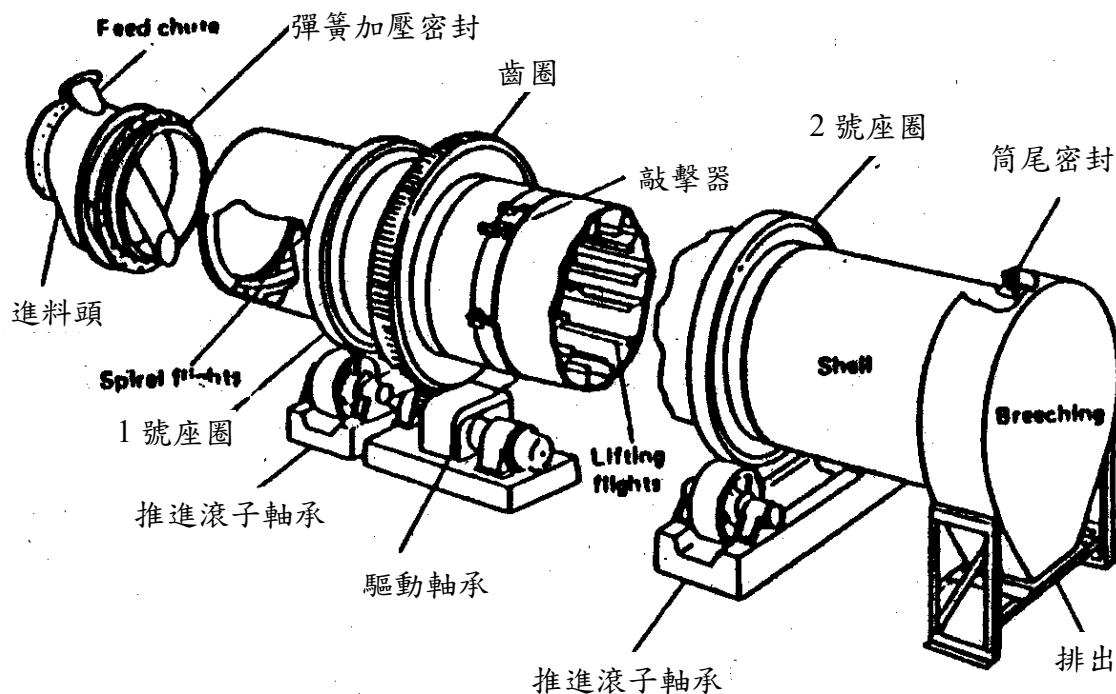
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國101年

圖3.1、廢棄物前處理技術

二、乾燥

事業廢棄物在進行熱處理前若先加以乾燥，可增加其發熱量以提升處理效率並降低處理成本。除了將廢棄物置於貯存區靜置風乾外，還可利用乾燥機具縮短所需時間。常用之乾燥型式有：(一) 乾燥轉盤 (Rotary Tray of Hearths)；(二) 迴轉帶 (Endless Belt)；(三) 滾筒 (Rotary Drum)；(四) 流體化床 (Fluidized Bed)；(五) 噴灑 (Spray)；(六) 閃瀉 (Flash) 等。事業廢棄物之加溫乾燥脫水方法有下列 3 種方式：

- (一) 對流 (Convection)：藉加熱介質（空氣或砂）直接與溼物接觸傳熱乾燥（如圖 3.2 所示）。
- (二) 傳導 (Conduction)：由加熱面與待乾燥廢棄物接觸，再傳導熱進入內部。
- (三) 輻射 (Radiation)：藉輻射方法將熱傳送至廢棄物上。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

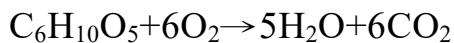
圖 3.2、對流式直接加熱滾筒廢棄物乾燥機

肆、熱處理之分解與轉化技術

一、焚化主流技術及其分類與應用方式

(一) 焚化處理概說

將廢棄物置於控制之高溫情況下，使可燃分氧化轉變為安定之氣體，不可燃分轉化為性質安定之無機物（灰燼），這種廢棄物處理方法稱為焚化處理。可燃分燃燒之化學反應式可以以下式表示之：



焚化處理在各種廢棄物處理方法中，減容（量）效果最好，且能使腐敗性有機物，因燃燒而成為無機性，病原性生物也因在焚化爐內之高溫下死滅殆盡。以廢棄物之安定化與無害化而言，焚化是最好的方法，所以成為近年來世界各國主要研究發展的處理方式。

焚化法不但兼具「減容」、「安定」、「無害」等廢棄物處理 3 要件，此外在燃燒反應下，尚有迅速處理廢棄物之優點；目前焚化爐技術之開發已臻相當可靠之地步，且作業安全，熱能又可回收利用。因此，在人口稠密，不易取得掩埋土地的都市，更具優越的評價。廢棄物焚化處理之設計步驟如表 4.1，典型焚化爐操作範圍如圖 4.1。

1. 焚化法之優點

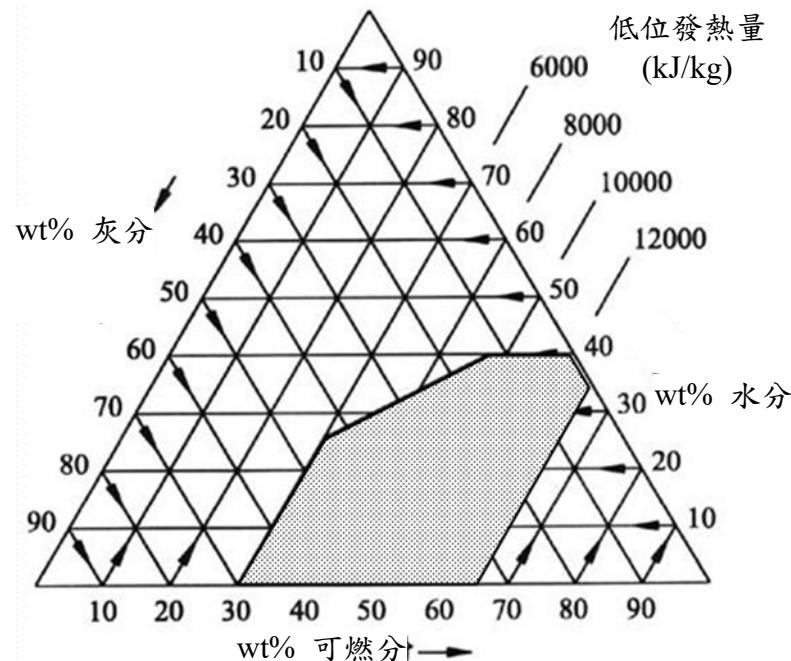
- (1) 所需土地面積較少。
- (2) 可選擇處理地點於市區內，減少搬運費。
- (3) 殘渣灰分變成無害化、有機物少，適於填地（減量化）。
- (4) 能處理各種不同廢棄物，有效之控制環境衛生及二次公害。
- (5) 氣候的影響較小。
- (6) 操作有彈性，處理量可在限度內做增減。

表 4.1、廢棄物焚化處理之設計步驟

計畫步驟	內容
(一) 確定廢棄物性質	1. 固體 (1) 分解燃燒、蒸發燃燒或表面燃燒；(2) 著火性之良否； (3) 加熱升溫時之熔融性；(4) 分解速度。 2. 液體 (1) 流動性；(2) 黏度；(3) 不純物混入率。 3. 氣體 爆炸界限。
(二) 瞭解廢棄物組成	1. 工業分析 水分、灰分、可燃分、低位發熱量。 2. 元素分析 C、H、O、N、Cl、S、其他。
(三) 計算燃燒空氣量	1. 理論空氣量 A_0 。 2. 實際空氣量 A 根據廢棄物組成、焚化爐型式構造，選擇過剩空氣比 m 值，計算實際空氣量 $A = A_0 \times m \times$ (單位時間處理量 kg) [Nm ³ /h]。
(四) 計算燃燒氣體量	1. 理論燃燒溼氣體量 G_0 。 2. 實際產生氣體量 G_n 。
(五) 計算發熱量	1. 由物理組成分析值求出。 2. 由元素分析值求出 (C：碳；H：氫；O：氧；S：硫；w：水分) (1) Dulong 式 (將 O 當做燃料之化合水考慮) $H_l = 81C + 342.5(H - \frac{O}{8}) + 22.5S - 6(9H + w)$ (2) Steuer 式 (O 之一半為 H ₂ O 形式，另一半為 CO 之形式) $H_l = 81(C - 3 \times \frac{O}{8}) + 57 \times 3 \times \frac{O}{8} + 345(H - \frac{O}{16}) + 25S - 6(9H + w)$ (3) Scheurer-Kestner 式 (將 O 全部假定為 CO 形式) $H_l = 81(C - 3 \times \frac{O}{4}) + 57 \times 3 \times \frac{O}{4} + 342.5H + 22.5S - 6(9H + w)$ (4) Dulong 修正式 $H_l = (\alpha_D + \beta)B - 6w$ 式中 α_D ：Dulong 式所得之可燃分低位發熱量 β ：熱量計求得之可燃分低位發熱量 (α) 與 α_D 間之差 ($\alpha - \alpha_D$) B：廢棄物中可燃成分百分率 3. 由熱量計實際求出。
(六) 計算比熱及燃燒溫度	

計畫步驟	內 容
(七) 選定燃燒方式	1. 燃燒氣體流動方式 (1)對流；(2)並流；(3)交流；(4)複流。 2. 燃燒過程 (1)一段；(2)多段。
(八) 選定爐體型式	1. 火格子燃燒方式焚化爐 (1)固定式；(2)階段式；(3)並列搖動式；(4)逆動式； (5)移動式；(6)迴轉圓桶式；(7)扇形迴轉式。 2. 爐床燃燒方式焚化爐 (1)固定床式；(2)迴轉窯式；(3)多層爐床式； (4)旋轉爐床式。 3. 流動層燃燒方式焚化爐 (1)Dorr-Oliver 式；(2)Rheinstahl 式；(3)Copeland 式； (4)三井－拉修卡式；(5)克拉伯式；(6)耶哈拉式； (7)IHI 式；(8)Lurgi 式。 4. 噴霧燃燒方式焚化爐 (1)加壓式；(2)二流體式；(3)迴轉式。 5. 浮遊燃燒方式焚化爐。 6. 高壓燃燒方式焚化爐 (1)管式；(2)攪拌槽式。
(九) 設定爐體、氣體流動過程之尺寸	1. 選定適當之燃燒室熱負荷、爐床燃燒率，以決定爐床面積及爐之燃燒室容積。 2. 由燃燒氣體量，決定氣體流程之尺寸。

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.1、典型焚化爐操作最佳 3 成分範圍

- (7) 焚化所產生之熱能可回收利用於火力發電廠或冷暖房等其他型態之能源。
- (8) 可迅速處理大量廢棄物，所有的害蟲、細菌均可燒死。
- (9) 減量效果佳，可將廢棄物體積減至 1/10-1/20。

2. 焚化法之缺點

- (1) 須要有較高的操作技術，設備費昂貴，須做較大的投資。
- (2) 操作、維持費較高。
- (3) 處理位置選擇困難，易遭民眾之反對（與衛生掩埋同）。
- (4) 非最終之處置辦法，因還有灰分及無機殘渣，未能解決。
- (5) 須有防塵、防毒設備（易產生惡臭、煙塵、有害氣體等，造成空氣污染）。
- (6) 建廠時間長，耽擱廢棄物之處理。

3. 焚化法可能引起之公害問題

- (1) 燃燒溫度控制不良時，易導致空氣污染問題。
- (2) 排煙中含有害的 HCl 氣體（低級塑膠品充斥市場）。
- (3) 會產生廢污水，而其中重金屬含量很高（飛灰填埋、遭滲出重金屬）之二次污染。
- (4) 運轉時會引起噪音問題。

並非所有廢棄物均可採用此法處理，如不燃性或熱值低含水量高的溶液及金屬等。然而，針對適合焚化處理的廢棄物，焚化處理之設計要項包括：

1. 溫度 (Temperature)

焚化溫度高低決定廢棄物燃燒是否完全，在焚化爐建造完成後，只有溫度一項可由焚化爐操作人員藉著調整焚化的廢棄物進料量和空氣量來加以控制。如果溫度太高（高於 1,300°C）則燃燒室內襯的耐火磚易受損；反之溫度太低（小於 700°C），則易導致不完全燃燒，產生有害的副產物。固態含碳化合物燃燒而不致產生黑煙的最低溫度是 760°C，而焚化爐的設計溫度一般在 700-1,600°C，如設計溫度高於 1,300°C，就需要特殊的耐火磚。

2. 滯留時間 (Residence Time)

滯留時間是指廢棄物（尤指燃燒廢氣）在燃燒室與空氣接觸的時間，設計的目的在於能夠達到完全燃燒，以避免產生有毒的中間產物，滯留時間的長短，視廢棄物本身的特性、燃燒溫度、燃料粒子大小以及攪動程度而定。表 4.2 為典型的焚化爐操作狀況。

表 4.2、典型的焚化爐操作狀況

種類	燃燒區溫度 (°C)	燃燒廢氣滯留時間 (秒)	過量空氣 (%)
液體噴注式	980-1,600	0.3-2.0	120-250
旋轉窯	650-1,250	2	50-250
二次燃燒室	1,100-1,350	1.0-3.0	120-200
熔爐床	1,200-1,600	>2	180-200
流體化床	550-1,100	1.0-3.0	100-150
多爐床式	750-950	0.1-2.0	100-200

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

3. 亂流/紊流 (Turbulence)

亂流的目的在促進空氣和補助燃料或廢棄物及其熱解產氣之混合，以期達到完全燃燒；設計上，常藉爐床攪拌（機械法）與控制助燃空氣及燃燒氣體之流速或流向（氣流動力法），以達到充分亂流的目的。

此外廢棄物的發熱量也是焚化處理必須特別考慮的特性之一。每單位物體燃燒所放出的熱量謂單位發熱量，其單位通常以 kcal/kg 表示之。

一般而言，固體廢棄物之發熱量，較液體或氣體為低。如果發熱量低，結果可能無法將燃燒室的溫度提高到碳完全氧化所需的最低溫度。對低發熱量廢棄物焚化處理，其補救方法有利用補助燃料、與高熱量廢棄物混合、預先將廢棄物加熱及將助燃空氣預先加熱等。

廢棄物所含之發熱量足以維持燃燒所需，而無需補助燃料之助者是所謂自燃 (Autogenous) 廢棄物。一般而言，自燃條件約 1,000 kcal/kg，要促使燃燒進行，而廢棄物必須每 kg 含有約 2,000 kcal 的熱量。但焚化有害廢棄物，一般將其與輔助燃料（例如重油）混合，使混合物之發熱量提高到 2,000 kcal/kg 以上，此相當於典型的可燃性之化學工廠廢棄物之發熱量。常用補助燃料之低位發熱量，天然瓦斯約 11,000 kcal/kg，重油約 9,600 kcal/kg。

旋轉窯、液體噴注式、流體化床及多爐式等 4 種為常用之焚化爐，有關此 4 種常用焚化爐對各種廢棄物之適用性及其基本特性比較，分別示如表 4.3 及表 4.4 所示。

表 4.3、各種廢棄物對不同焚化爐之使用情形

廢棄物種類	旋轉爐床	液體噴注式	流體化床	多爐床
固體物				
粒狀、均勻	O		O	O
不規則、大型	O		O	O
高熔點	O	O _a	O	O
含可熔灰分之有機化合物	O			
未切割之巨大物質	O			
氣體	O _b	O _b	O _b	O _b
有機揮發物				
液體	O _c	O	O	
高強度之有機廢棄物（常含有毒性）	O _c	O	O	
有機液體				
固體物/液體	O	O _d		
含有鹵素環狀化合物				
液體之有機污泥	O _e			

註：O 表示適用之焚化爐型

c 設置有輔助之液體噴射器

a 若廢棄物可被熔化及抽送

d 液體

b 適當的投入焚化爐

e 假設乾燥時不會變成黏性之廢棄物

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

表 4.4、旋轉爐、液體噴注爐、流體化床爐及多爐床焚化爐之比較

	旋轉爐 (Rotary Kiln)	液體噴注 (Liquid Injection)	流體化床 (Fluidized Bed)	多爐床 (Multiple Hearth)
優點	<ul style="list-style-type: none"> 1. 使用範圍較廣，對液體及固體具單獨或混合處理之能力，且物質係以熔解狀態燃燒之。 2. 可應用於桶裝及散裝之廣泛填料機設計。 3. 廢棄物可未經預熱、混合之準備而直接加入爐中，且對非揮發廢棄物處理之停留時間可以調整旋轉速度控制之，其轉速允許 50% 範圍之轉降率。 4. 對固體廢棄物處理，有好的攪動，接觸空氣，且能連續去除渣而不干擾廢棄物之氧化。 5. 可以在超過 1,370°C 之情況下操作，適於破壞不易分解之毒性物質。 	<ul style="list-style-type: none"> 1. 能燃燒廣範圍之液體廢棄物。 2. 所需維護費低，且不需有連續之除灰系統。 3. 具快速之溫度反應特性，且能承受相當高溫度轉降率。 	<ul style="list-style-type: none"> 1. 可用以處置可燃燒之固、液、氣體廢棄物，並可有負荷劇增之彈性，對較潮溼之物質能快速乾燥，並燃燒之。 2. 因流動效應增加反應接觸面積，故增加燃燒效率。另因爐床聚存大量熱能，故能承受量及組成上的變動。 3. 由於以單位體積之高熱值率設計 ($900,000\text{--}1,800,000 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^3$) 所以主要設備費較低。而亦具有較長之耐久性及較低之維護費。 4. 氣體溫度及多餘空氣量較低 NOx 較少，並爐床材質之適當選擇可抑制酸氣之產生，均能減少二次污染控制系統之費用。 	<ul style="list-style-type: none"> 1. 處理低揮發性物質多爐床比其他焚化爐具較長之停留時間反應，並能處理不同物、化性質之物質。 2. 可使用如天然瓦斯、再製瓦斯、油、廢油及溶劑等多種燃料。且其燃油效率較高，並可在任何爐床加裝燃油器以維持爐體溫度。
缺點	<ul style="list-style-type: none"> 1. 需較高之主要設備費。 2. 粒狀物負荷較高，且熱效率相當低。 3. 圓形或桶形物質可能於完全燃燒前即被滾送出爐體外，且懸浮微粒可能於完全燃燒前，即傳送出體外。 4. 需小心操作以防止耐火材料損壞，尤其溫度劇變衝擊，另爐架可能有熔態物質堵塞問題。 5. 有爐體兩末端封口漏氣，故需另補空氣及維修困難之問題。 	<ul style="list-style-type: none"> 1. 僅可被霧化的廢棄物才能燃燒，且燃燒器無法接受乾燥、餅狀的物質通過噴嘴。 2. 燃燒噴嘴易於堵塞（設計時，僅能接受特定粒徑；故粒徑尺寸設計，為成功操作之點參數）。 3. 須供給輔助燃料以維持適當點火及燃燒溫度。 	<ul style="list-style-type: none"> 1. 需要準備及維護工作，並特殊之操作程序以避免損壞爐床，所以其操作費相當高，尤其能源費。 2. 選擇避免導致爐床腐蝕及反應物質，所產生殘渣不易從爐床中去除。 3. 不適用於不規則一巨大之廢棄物、焦油固體物或含熔解性灰分之廢棄物，對較潮溼之物質，有其操作上之困難；而共融混合物之形成，尤為一嚴重問題。 4. 對有害廢棄物之處理尚未開發完成。 	<ul style="list-style-type: none"> 1. 由於較長之反應停留時間及較慢之溫度反應，則燃油器之調整會很慢，而且不易控制。 2. 需較高之維護費，且若用以在處理有害廢棄物時，需設計二燃燒室及對不同溫度之操作。 3. 對突增廢棄物輸入熱值很敏感。且可能因而縮短使用年限。 4. 不適用於含熔解性灰分之廢棄物及不規則巨型固體物。

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

表 4.4、旋轉爐、液體噴注爐、流體化床爐及多爐床焚化爐之比較（續）

	旋轉爐 (Rotary Kiln)	液體噴注 (Liquid Injection)	流體化床 (Fluidized Bed)	多爐床 (Multiple Hearth)
主要設備	1. 廢棄物填料系統。 2. 旋轉焚化爐體。 3. 輔助油料系統。 4. 後燃燒器。 5. 空氣污染控制系統。	1. 燃燒室。 2. 空氣補充系統。 3. 廢棄物燃燒系統。 4. 輔助燃料系統。 5. 空氣污染控制系統。	1. 流體化床反應爐體。 2. 流動空氣鼓風機。 3. 廢棄物填料系統。 4. 輔助燃料系統。 5. 空氣污染控制系統。	1. 爐體。 2. 輔助燃料系統。 3. 空氣污染控制系統。 4. 廢棄物加料系統。 5. 空氣補充系統。
概述	1. 爐體為一微傾斜圓型滾桶，典型尺寸為尺 15 m，直徑 3 m，溫度為 810-1,590°C，停留時間可由數秒(氣體)到數小時(固體物)。處理固體物之典型容積為 590-2,000 kg/hr。 2. 通常以批式填料，固體物以纖維桶裝或以輸送機填入爐，廢棄及污泥則泵入爐中。 3. 爐體全部以耐火材料裡襯，能於高溫下操作，且低腐蝕。 4. 通常配裝燃燒天然瓦斯，以供預熱、火焰穩定及為必要時之輔助燃料。 5. 廢氣通常以凡式濾塵器控制，並加石灰以中和之。	1. 廢液經燃燒噴嘴加入及霧化而進入燃燒室。 2. 經噴霧化顆粒具體大表面積能快速蒸發，形成可燃燒之廢氣混合物，而典型之液體填加率為 6 m ³ /hr。 3. 燃燒室由耐火材料裡襯，其停留時間及溫度範圍分別為 1.5-2 秒及 1,300-3,000°C，並可以擬輸入之空氣冷卻室外壁，使空氣預熱至 300-700°C。 4. 燃燒器通常設備燃燒室內，以免火焰直接噴擊壁。 5. 廢液放入進料槽後，應以加壓氮氣填充。	1. 典型爐體內徑 8 m，高 10 m，爐床停置時高度為 1 m 加入浮動空氣時，膨脹為 2 m。 2. 廢棄物及輔助燃料以輻射狀注入 450-1,600°C 爐床中反應，而爐體上部之溫度可達 980°C 處理液體有上部之停留時間 12-14 秒。 3. 釋熱率達 15 million kcal/hr；液體熱值為 5,550 kcal/hr 之進料率可達 1.3 m ³ /hr，熱值為 1,660 kcal/hr 時，進料率可達 7.6 m ³ /hr。 4. 爐體排出廢氣可用凡式濾塵器控制，並將其自 1,600°C 驟冷 80°C。	1. 具伸縮性，可用以處理市鎮污泥、渣、固、液、氣狀之廢棄物。最初源於 1934 年用以處理市鎮污泥，至 1986 年已有 125 座。 2. 爐體直徑 1.8-7.5 m，高 3.6-22.5 m，一般焚化最少需要 6 室。 3. 廢棄物自爐頂直接投入，灰渣由爐底排出。 4. 在研究中指出，處理殺蟲劑時，後燃燒室之溫度 760-950°C。
說明	是目前處理有害廢棄物之主要型式之焚化爐。	是目前處理有害廢棄物較普遍型式之焚化爐。	初步已用於市鎮及事業廢棄物處理，對有害廢棄物之處理極具潛力。	較少應用於有害廢棄物之處理。

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

(二) 基本燃燒計算

焚化爐所需之焚化設備大小及空氣量，將因火爐形式、操作方式的不同而異，其計算方法如下所述：

1. 焚化設備之計算

(1) 燃燒室熱負荷

$$Q = \frac{W \times H_l}{V \times h} \text{ (kcal/m}^3 \cdot \text{hr)}$$

H_l ：溼基低位發熱量 (kcal/kg)

W ：每日焚化處理廢棄物量 (kg/d)

h ：每日燃燒時間 (hr/d)

V ：燃燒室總容積 (m^3)

Q ：每 m^3 單位淨容積 1 小時燃燒產熱量 (kcal/ $m^3 \cdot \text{hr}$)

熱量通常以溼基低位發熱量 (H_l) 為準。

A. 燃燒室熱負荷之標準值為

$$Q = \begin{cases} \text{批次式} : 4-7 \times 10^4 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr} \\ \text{連續式} : 8-15 \times 10^4 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr} \end{cases}$$

B. 爐內正常壓力，以保持在負 1.0 至負 3.0 mm 水柱壓力為原則。

(2) 爐床 (Stoker) 燃燒速率 (負荷率) ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

A. 爐床每平方公尺每小時可以燃燒處理之廢棄物量 (kg) 稱為爐床燃燒速率。

B. 焚化底渣之灼燒減量應符合下列規定：

(A) 全連續式焚化處理設施：

a. 每日燃燒量 200 公噸以上者在 5%以下。

b. 每日燃燒量未達 200 公噸者在 7%以下。

(B) 準連續式焚化處理設施每日燃燒量 40 至 180 公噸者在 7% 以下。

(C) 分批填料式焚化處理設施在 10%以下。

C. 爐床燃燒速率 (G)

$$G = \frac{W}{h \times A} (\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}) , A = \frac{W}{h \times G}$$

A : 爐床面積 (m^2)

W : 每日之焚化量 (kg/d)

h : 每日燃燒時間 (hr/d)；批次式以 10 hr/d 計算

準連續式以 16 hr/d 計算

全連續式以 24 hr/d 計算

D. 發熱量 1,000 kcal/kg 之廢棄物焚化時，爐床燃燒速率之標準為：

(A) 連續燃燒式 : $G=200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$

a. 焚化能力 150 t/24 hr 爐。

b. 空氣預熱溫度 200°C。

c. 未燃分 7%。

(B) 準連續式 : $G=160 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$

a. 強制送風（或 20 mmHg 以上之自然通風）。

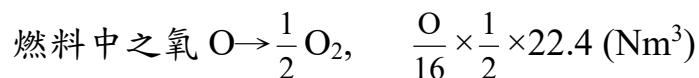
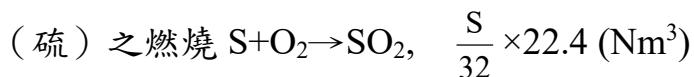
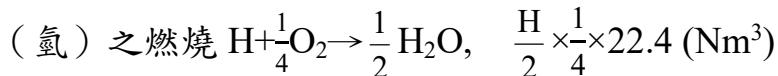
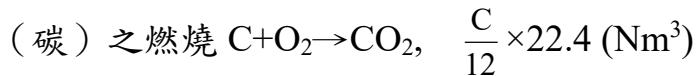
b. 未燃分 7%。

(C) 批次式 : $G=120 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ (自然通風，未燃分 10%)。

2. 空氣量計算

(1) 理論空氣量 (A_0)：可燃成分完全燃燒理論上所需空氣量。

A. 已知元素組成時



$$\text{理論氧氣量 } O_0 = \left\{ \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right\} \times 22.4 \text{ (Nm}^3/\text{kg}\text{)}$$

$$\begin{aligned} \text{理論空氣量 } A_0 &= \frac{O_0}{0.21} \text{ (Nm}^3/\text{kg}\text{)} \\ &= 8.89C + 26.7(H - \frac{O}{8}) + 3.3S \text{ (Nm}^3/\text{kg}\text{)} \end{aligned}$$

$$\text{若以重量表示 : } O_0 = \left\{ \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right\} \times 32 \text{ (kg/kg)}$$

$$A_0 = \frac{O_0}{0.232} \text{ (kg/kg)} \text{ (空氣比重 : 0.00121@20°C)}$$

B. Cellulose 置換法

將廢棄物之可燃分視為纖維素成分 (Cellulose, $C_6H_{10}O_5$) 以求
理論空氣量：

$$A_0 = a \times 3.95 \times \frac{B}{100} \text{ (Nm}^3/\text{kg}\text{)}$$

B : 可燃成分百分率

a : 廢棄物質之變化係數=1.15-1.5

(2) 燃燒空氣量 (A)—實際需要空氣量應足以供應一次及二次燃燒之需，並應足以供混合（廢棄物與空氣）之量：

$$\text{燃燒空氣量 } (A) = mA_0, m = \frac{0.21}{0.21 - (O_2)}$$

(O_2) ：燃燒後廢氣中 O_2 所占體積百分率

空氣比 (m)：1.7-2.5 (連續式爐床)

1.3-1.8 (流體化床)

$(m-1) \times 100\%$ ：超量空氣率或稱為過剩空氣百分比。

(3) Rosin 方法：

若無元素分析值，可由 Rosin 式估算之：

$$\text{假定 } \frac{A_0}{G_0} = f(H_l)$$

固體燃料：

$$G_0 = \frac{0.89}{1,000} H_l + 1.65 (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

$$A_0 = \frac{1.01}{1,000} H_l + 0.5 (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

燃燒氣體量 $Gv = mG_0$

必要空氣量 $A = mA_0$

例題 1：

設垃圾之低位發熱量 (H_l) 為：

最低值：800 kcal/kg

平均值：1,200 kcal/kg

最高值：2,000 kcal/kg

焚化處理廠處理量 W=100 t/day

方式：全連續式（24小時）

試求：(1) 焚化爐燃燒室所需容積？

(2) 爐床 (Stoker) 之必要面積？

(3) 必要空氣量？

(4) 燃燒氣體量？

解：(1) 假定燃燒室負荷率 $Q=10 \times 10^4 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$

(連續式 $Q=8-15 \times 10^4 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$)

$$\text{燃燒室容積 } V = \frac{W \times H\ell}{Q \times H} = \frac{100 \times 10^3 \times H\ell}{10 \times 10^4 \times 24} = \frac{H\ell}{24} = 83.33 \text{ m}^3$$

(2) 假定爐床燃燒率 $G=200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ (全連續式)

$$\text{爐床面積 } A = \frac{W}{G \times H} = \frac{100 \times 10^3 (\text{kg})}{200 \times 24} = 20.83 \text{ m}^2$$

(3) 假定空氣比 $m=2.0$

必要空氣量 $A=mA_0$ (Rosin 式)

$$= 2.0 \times \left(\frac{1.01}{1,000} \times 2,000 + 0.5 \right) \\ = 5.04 (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

(4) 燃燒氣體量 $Gv=mG_0$

$$= 2.0 \times \left(\frac{0.89}{1,000} \times 2,000 + 1.65 \right) \\ = 6.86 (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

資料來源：謝錦松、黃正義，固體廢棄物處理。

例題 2：

某都市垃圾組成如下表，試計算 (1) 垃圾之低位發熱量 (kcal/kg)
及 (2) 該垃圾燃燒之理論空氣量 (Nm³/kg)。

成分	含率 (%)
水分	49.97
可燃分	34.54
碳	18.89
氫	2.57
氧	12.11
氮	0.55
硫	0.04
氯	0.36

解：(1) 由 Dulong 公式

$$\begin{aligned} H_l (\text{低位發熱量}) &= 81C + 342.5(H - \frac{O}{8}) + 22.5S - 6(9H + w) \\ &= 81(18.89) + 342.5(2.57 - \frac{12.11}{8}) + 22.5(0.04) \\ &\quad - 6(9 \times 2.57 + 49.97) \\ &= 1,451 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2) \text{ 理論氧氣量 } O_0 &= \left\{ \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right\} \times 22.4 \\ &= \left(\frac{0.1889}{12} + \frac{0.0257}{4} + \frac{0.0004}{32} - \frac{0.1211}{32} \right) \times 22.4 \\ &= 0.412 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\text{理論空氣量 } A_0 = \frac{O_0}{0.21} = \frac{0.412}{0.21} = 1.96 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

資料來源：林建三、林建榮，固體廢棄物處理。

(三) 焚化爐種類與應用

以下介紹用於廢棄物處理的焚化技術，包括：機械爐床式焚化爐 (Mechanic-Grate Incinerator)；流體化床式焚化爐 (Fluidized-Bed Incinerator)；旋

轉窯式焚化爐 (Rotary Kiln Incinerator)；液體噴注式焚化爐；多爐床式焚化爐；低量空氣系統（燻式）焚化爐 (Controlled-Air Incinerator)；模具式焚化爐 (Modular Incinerator) 及噴燒式焚化爐 (Spreader Stoker Incinerator)；及其他焚化爐等。其中以機械爐床式焚化爐常用於一般廢棄物處理，將於下一個單元做更細部的介紹。

1. 流體化床式焚化爐 (Fluidized-Bed Incinerator)

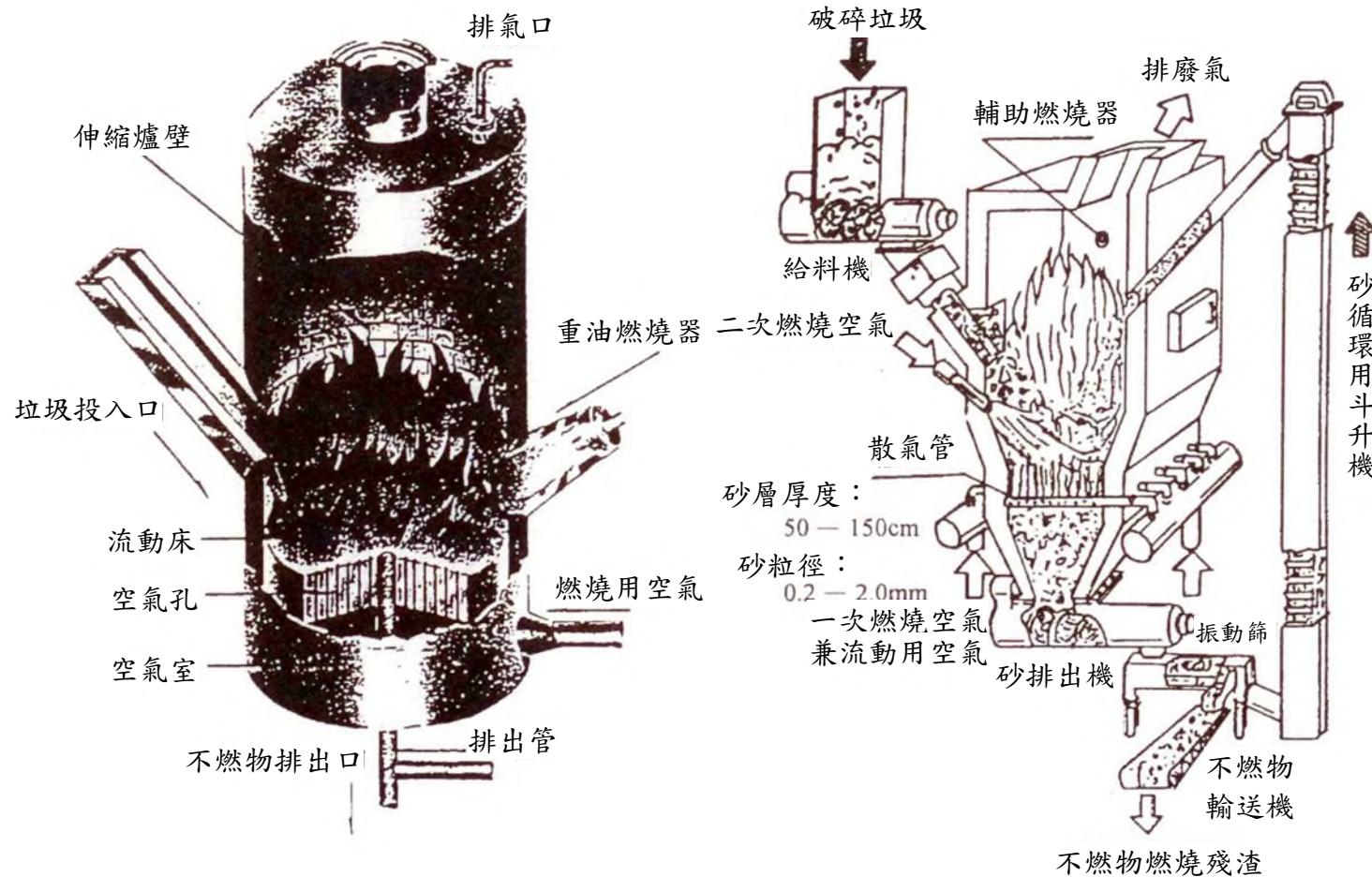
流體化床式焚化爐體為直立圓筒型，該焚化爐適合含水量高的廢棄物或污泥之焚化處理。其爐體剖面圖如圖 4.2 所示。

(1) 流體化床爐之特點

流體化床具有良好的氣固體接觸作用，易於控制溫度及滯留時間。故早期已成為煤炭氣化、重油裂解、礦石燒焙、鍛燒、乾燥、冷卻及燃燒等反應器；在廢棄物處理方面，則普遍為石油、紙漿造紙工業及都市環保機構用於處理有機廢液、黑液、木片及下水道淤泥等廢棄物。

A. 優點：

- (A) 高熱傳速率使燃燒迅速，燃燒室熱負荷為其他焚化爐的 5-10 倍。
- (B) 爐床攪動可防止固體成層現象。
- (C) 被加熱之顆粒（砂粒）儲存大量迅速可利用之熱，進料變化之影響小，溫度變化少。
- (D) 廢棄物中的鹵素及硫分可直接將鹼性中和劑噴入爐內中和。
- (E) 對有機物之燃燒破壞完全，排氣量少，氮氧化物含量低。
- (F) 構造簡單較少零件需求（減低維修費用）。
- (G) 有能力處理熱值變化較大的廢棄物。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.2、流體化床式焚化爐

- (H) 不易發生過高壓力的排放（由阻絕系統設計所造成）。
- (I) 減少熱點和冷點的產生（由爐床的高度擾動及混合所造成）。

B. 缺點：

- (A) 僅能處理液態、污泥或粒狀固體物，塊狀及大固體物必須經過前處理。
 - (B) 控制系統複雜，運轉時須小心維持爐壓、溫度之分配，灰渣排除及固體進料管道易受堵塞，運轉費用高。
 - (C) 尚未完全建立安全、有效的操作運轉步驟，故未普遍使用。
 - (D) 排氣中粉塵含量高。
 - (E) 共融混合物的形成，為操作上困難之問題。
- (2) 適用廢棄物種類

目前工業界常用以處理之廢棄物種類如後：

- A. 石油及化學工業：生物分解式廢水處理後產生的污泥，或儲槽沉積物、鹼性廢油。
- B. 金屬及礦業：廢切割潤滑油、油漆、潤滑油及鋼鐵工廠廢棄物。
- C. 紙漿及造紙工業：廢水處理中的沉澱池淤泥、剩餘活性污泥、黑液。
- D. 食品及製藥工業：蔗渣、茶及咖啡渣、生物式廢水處理產生之污泥、動物廢物及不合格原料及產品。
- E. 都市、鄉鎮等地方環保機構：都市固體廢棄物、廢水處理後的污泥。

一般而言，污泥、泥漿、廢液及土壤均適於以流體化床焚化爐處理。另外，塊狀廢棄物必須先經過分類、乾燥、破碎等前處理，至直徑小於 2-3 cm（約 1 in）為原則，才可送入爐床中。

其他廢棄物特性上之限制包括：

A. 廢棄物的熱值

在空氣未經預熱時，若廢棄物熱值達 1,260 kcal/kg 則不需輔助燃料。若流體化空氣先經熱廢氣預熱，廢棄物熱值即使低至 880 kcal/kg，仍會產生自燃現象。

B. 化合物在爐床上之凝聚現象

使用矽砂當爐床物質時，當操作溫度高過 900°C，會有熔融現象發生。若用壓碎耐火磚為爐床物質，其灰渣熔融溫度高達 1,300°C，可避免此種顧慮。廢棄物中若含低熔點性物質，亦會發生此種困擾；鹵化鹽的熔點亦低於 1,000°C。目前有許多方法可以用來防止爐床上所發生的凝聚現象，例如採用較低操作溫度，或以添加物和鹵性物質發生反應，以生成熔點高於 1,200°C 的化合物。廢棄物中含鈉重量在 1.7% 以內，亦可經由添加物之添加而順利地在 1,200°C 條件下操作。

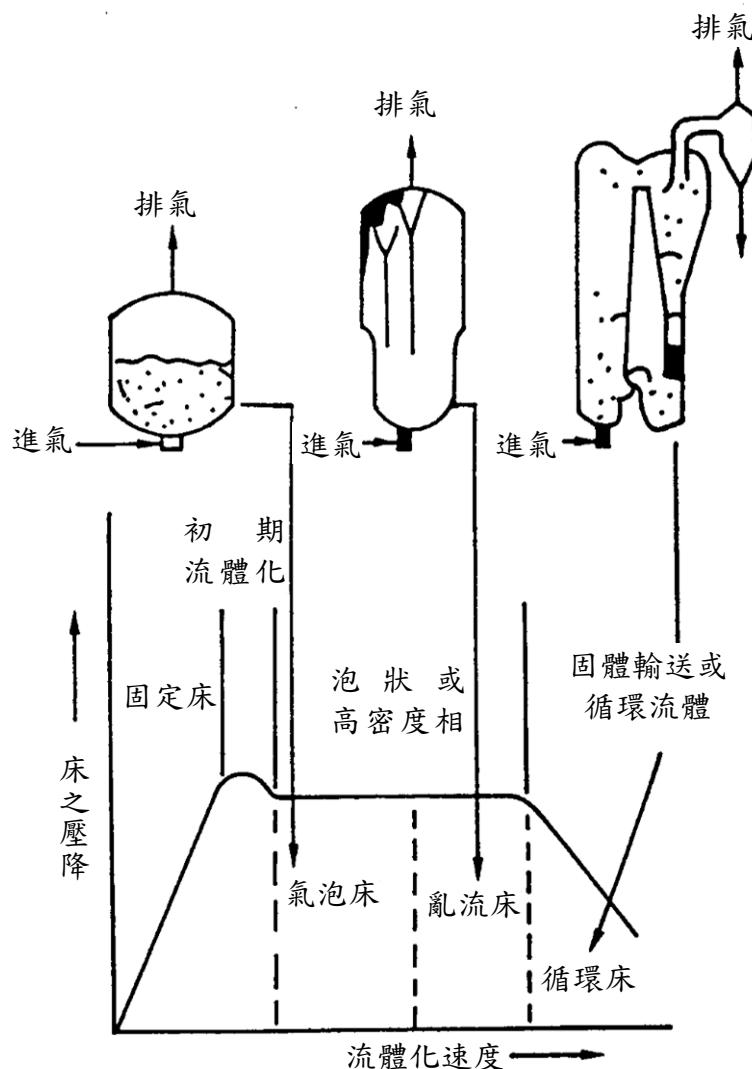
(3) 流體化床焚化系統及其操作特性

流體化床焚化系統，一般包括：流體化床反應爐體、流體化空氣分配系統及鼓風機、廢棄物進料系統、輔助燃料系統、空氣污染控制系統等。流體化床焚化爐的設計，依氣體及固體之流動型態不同，可分為氣泡式及循環式兩種。

A. 流體化原理

爐床區表面空氣的速度稱為流體化速度；其受到空氣流量固體承載物過多及最小流體化速度所限制。圖 4.3 說明形成流體化之速度與壓降之關係。最小流體化速度，乃爐床粒子受到氣流的向上浮力

剛好抵銷其自身的重量，在此時稱為初期流體化床。最小的流體化速度，因爐床物質粒子的大小、粒子的分布及粒子的密度等而定。



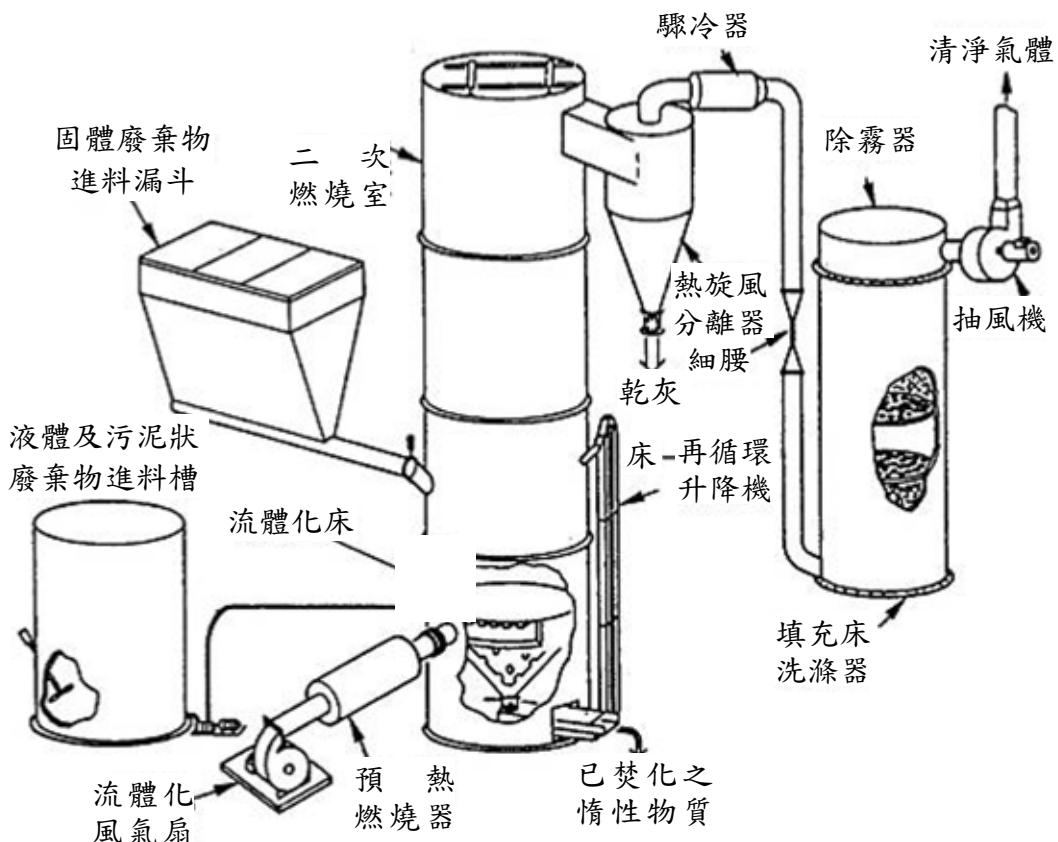
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.3、流體化床壓降與流體化速度之關係

當速度大於最小流體化速度時，爐床擾動會隨之增加，此操作區稱為氣泡式床或高密度式流體化床。對焚化廢棄物而言，氣泡式流體化的速度為最小流體化速度的 2-10 倍，以確保爐床物質的均勻懸浮。若再繼續增加流體化速度，則產生低密度式床，其固體的濾粒亦會增加，在爐床區及上部燃氣區已無明顯的界限；若將其燃氣中顆粒回收再噴入爐床，則形成循環式流體化床。

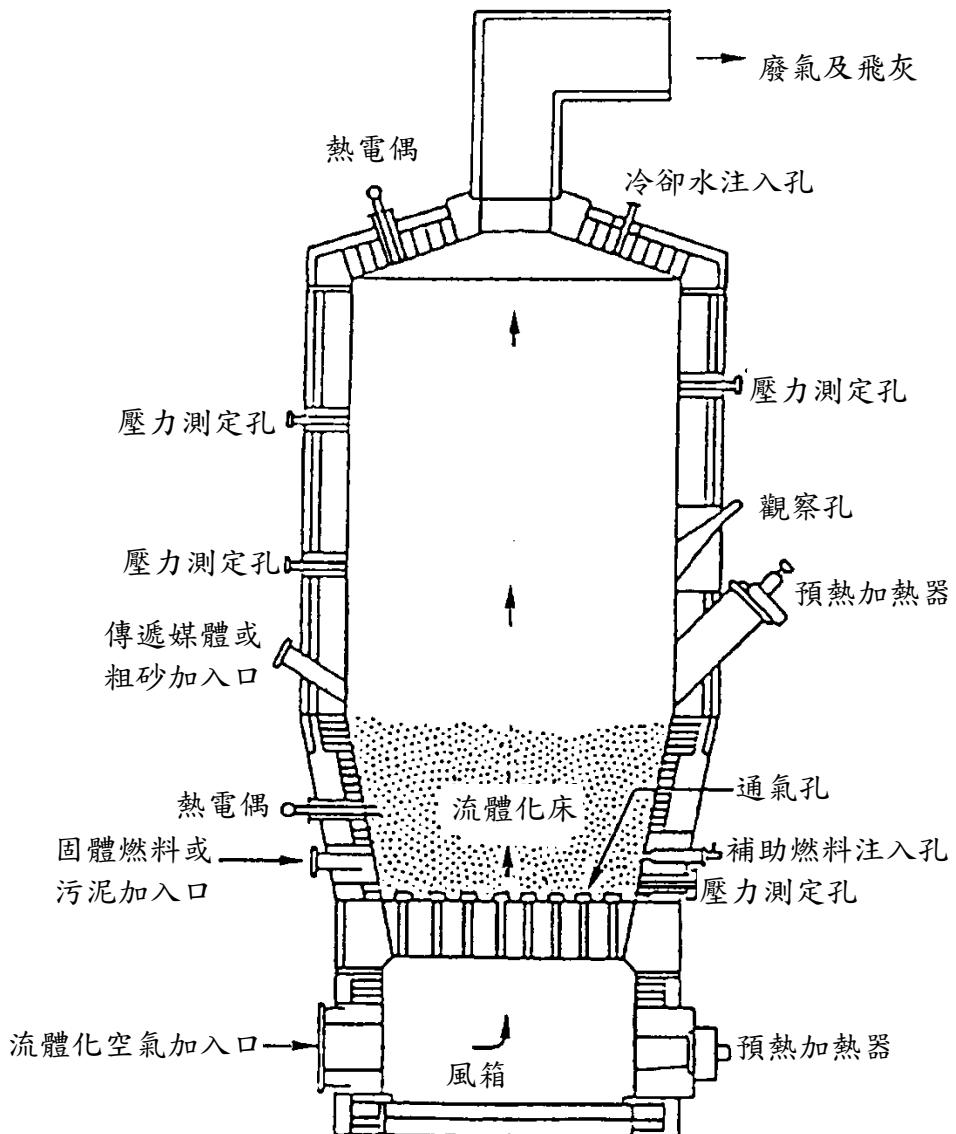
B. 氣泡式流體化床

氣泡式流體化床焚化系統及爐體細部結構，分別如圖 4.4 及圖 4.5。爐體為一直立長方型或圓筒型燃燒室，燃燒室內充滿粒狀惰性固體物，以作為傳熱介質並維持固體存量的穩定（矽砂為常用之介質）。空氣由床底的分配器均勻進入爐內，當空氣速度高於固體最低流動速度時，固體床會懸浮起來，由於空氣通過固體床時產生氣泡，所以此類設計被稱為氣泡床。粒狀固體受氣泡的上升、產生及破滅的影響，不停地翻滾，有如沸騰之液體。氣泡床之空氣速度多控制在最低流動速度 10 倍以上，速度愈高，氣體帶走之粉塵量愈高。氣體速度不可超出固體的平均飛離速度，否則整個固體床會被吹走。爐頂與爐床之間距離須妥善設計，以降低固體流失量。一般流體化床爐的固體流失量需控制在 5% 以內。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.4、氣泡式流體化床焚化系統



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.5、氣泡式流體化床爐體細部結構

床內固體存量的多少及高低，應視廢棄物焚化所需的滯留時間而定，床高度與氣體通過時需克服的阻力成正比，爐床過高易造成空氣分配不均，所以爐床一般維持在 0.6-1 公尺。

C. 循環式流體化床

循環式流體化床爐係利用高速氣體帶動固體物質在燃燒迴路中循環反應。氣流速度在 3.5-15 公尺/秒之間，在該速度下，幾乎所有粒狀固體物質皆可被氣體帶走。由於亂流程度高，空氣與固體

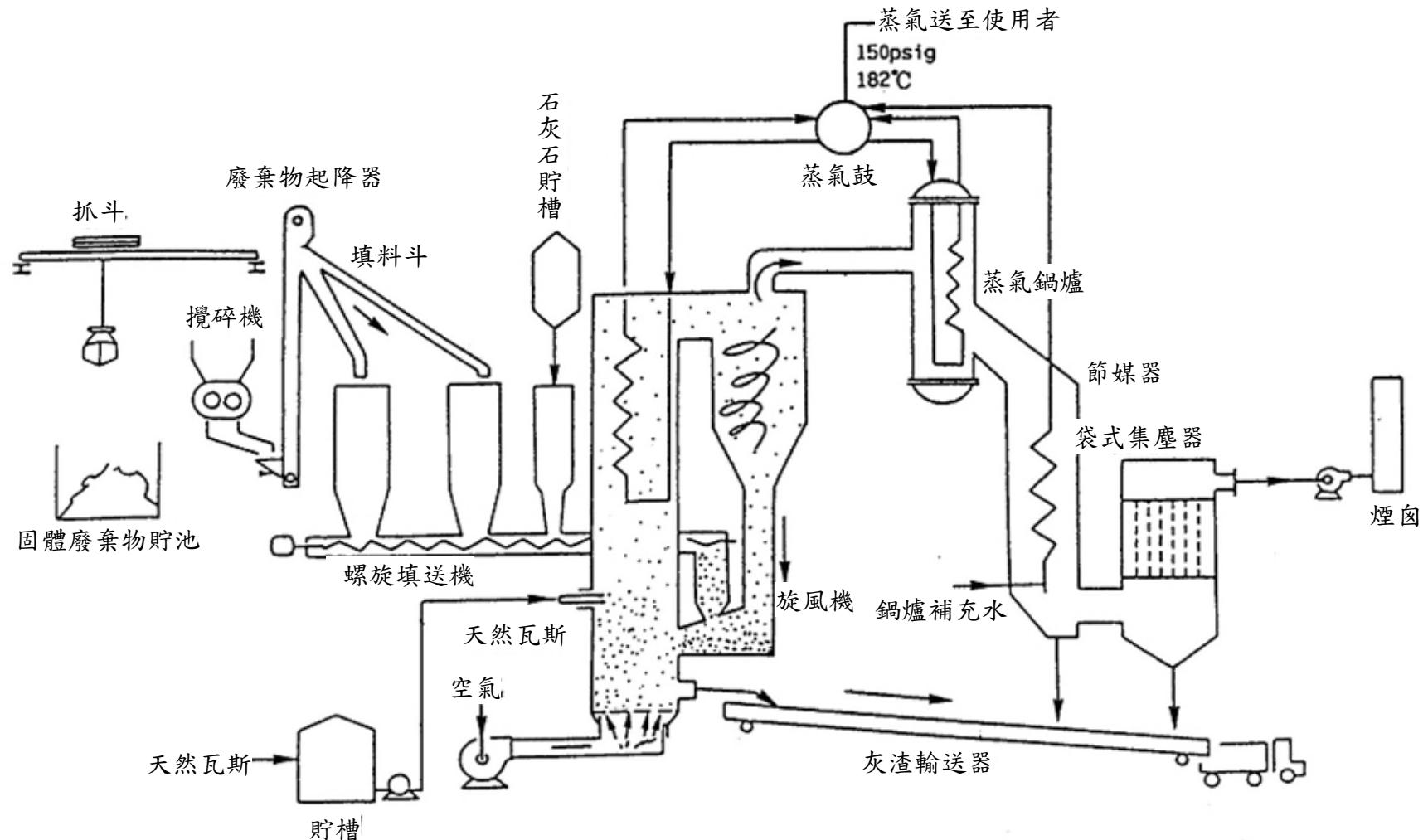
物質接觸面積大，相互混合程度佳，熱傳速率及燃燒速率較氣泡式爐快。循環床爐適於被有機物污染的土壤等粒狀物質的焚化。

圖 4.6 為循環式流體化床焚化系統流程，粒狀固體廢棄物由主燃燒室中部送入後，即被高速熱流帶出，經旋風塔與氣體分離後，再回流至主燃燒室。

粒狀固體附著的有害有機物在循環流動中加熱、蒸發產生燃燒。未被氣流帶走之惰性碳渣由爐底排出。固體在燃燒室的滯留時間約 30 分鐘，氣體滯留時間為 2 秒。排氣經冷卻、過濾（或其他除塵設備）等處理後排入大氣。由於爐內溫度分布平均（溫差在 30°C 之內），燃燒室沒有死角，不會發生局部過熱及灰渣熔融的情況，循環床爐之溫度在 $790\text{-}1,000^{\circ}\text{C}$ 之間。

焚化後產生的氯化氫、硫氧化物等酸氣可被直接注入爐中的石灰石中和，產生惰性的氯化鈣及硫化鈣。由於中和反應速率很快，排氣中不含酸氣物質，可省略酸氣去除系統的投資。二次空氣在不同高度的位置進入主燃燒室內，因此燃燒室內的反應呈階段性，可降低氮氧化物的產生。由於燃燒速率快，氣流亂流度高，循環床爐足以在較低的溫度 ($1,000^{\circ}\text{C}$ 以下) 達到 99.99% 以上的破壞去除效率。

循環式流體化床系統，使用石灰石與含鹵廢氣發生化學作用，產生乾鹽基化合物。由於會產生低熔點含鈣鹽的灰渣，若以循環式流體化床處理含高鹵素的廢棄物，其操作溫度必須限制在 772°C 以下。利用顆粒再循環提供較長的滯留時間，用以克服其較低的操作溫度，達到完全分解破壞有害廢棄物。

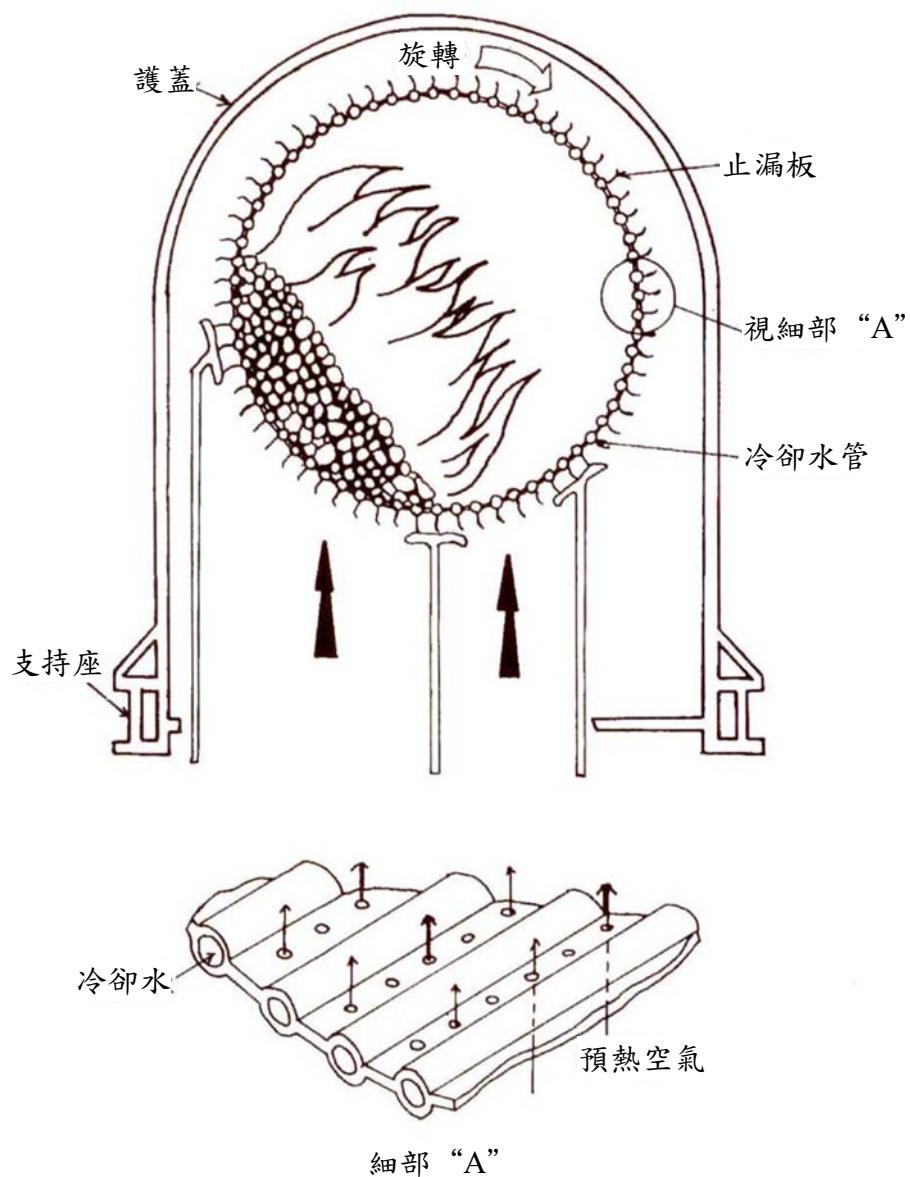


資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.6、循環式流體化床焚化系統

2. 旋轉窯式焚化爐 (Rotary Kiln Incinerator)

為稍微傾斜可連續運轉之圓筒形爐體如圖 4.7，常配合爐床式，作為乾燥或後燃燒之用。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.7、旋轉窯式焚化爐

(1) 旋轉窯焚化爐之特點

旋轉窯焚化爐是由一些微傾斜 (2-3%) 並內襯耐火材料之鋼製空心圓筒構成。由於可能高達 $1,200^{\circ}\text{C}$ 的操作溫度，向來應用於水泥、石灰、

黏土、磷酸鹽、鐵礦、砂石、煤、焦炭等固體與半固體原料的處理。旋轉窯焚化爐能有效處理固體、液體、污泥等各種不同形態的廢棄物，目前已普遍為工業界所採用。

A. 優點：

- (A) 可處理各種不同形狀的固液體廢棄物。
- (B) 可處理熔點低的物質。
- (C) 可接受固體及液體分別進料。
- (D) 可將桶裝或大形塊狀固體廢棄物直接送入窯內處理。
- (E) 窯內氣體亂流程度高，氣固體接觸良好。
- (F) 窯內無移動機械組件，保養容易。
- (G) 窯內固體滯留時間可調整轉速控制。
- (H) 溫度可達 1,200°C 以上，能有效摧毀任何有害物質。

B. 缺點：

- (A) 投資成本和操作費高。
- (B) 運轉時須小心，耐火磚維護費用高。
- (C) 球狀及筒狀物體可能會快速滾出窯外，無法完全焚化。
- (D) 過剩空氣需求高，排氣中粉塵含量高。
- (E) 熱效率低。
- (F) 須有足量的廢棄物，長時間下持續操作，以合乎經濟原則。

(2) 適用廢棄物種類

除了水、無機物或重金屬含量較高的不可燃廢棄物外，各種不同形態（固體、液體及污泥等）及形狀（桶狀、塊狀、粉狀、顆粒及稠狀）

的可燃性廢棄物皆可以旋轉窯焚化爐處理之。此類適於旋轉窯處理的廢棄物如表 4.5 所示。另外，許多毒性化學物質如化學戰劑、多氯聯苯及過期的軍火亦可以旋轉窯焚化爐予以有效的處理。

表 4.5、適於旋轉窯焚化爐處理的廢棄物

• 氯化有機溶劑（氯甲烷、氯仿、過氯乙烯）	• 藥廠廢物
• 氧化溶劑（丙酮、丁醇、乙基醋酸等）	• 下水道污泥
• 碳氫化合物溶劑（苯、己烷、甲苯等）	• 生物廢物
• 混合溶劑、廢油	• 過期之有機化合物
• 油/水分離槽之污泥	• 一般固液體有機化合物
• 殺蟲劑洗滌廢水	• 殺蟲劑、除草劑
• 廢殺蟲劑及含殺蟲劑之廢料	• 含 10%以上有機廢物的廢水
• 化學物儲槽之底部沉積物	• 含硫污泥
• 氯化有機物蒸餾後之底部沉積物	• 去除潤滑劑的溶劑污泥
• 一般蒸餾殘渣	• 油漆、紙漿及一般污泥
• 含多氯聯苯的廢棄物	• 光化合物及照相處理的液固體廢物
• 高分子聚合廢物及高分子聚合反應後之殘渣	• 受有害物質污染的土壤
• 黏著劑、乳膠及油渣	

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

(3) 旋轉窯焚化系統及其操作特性

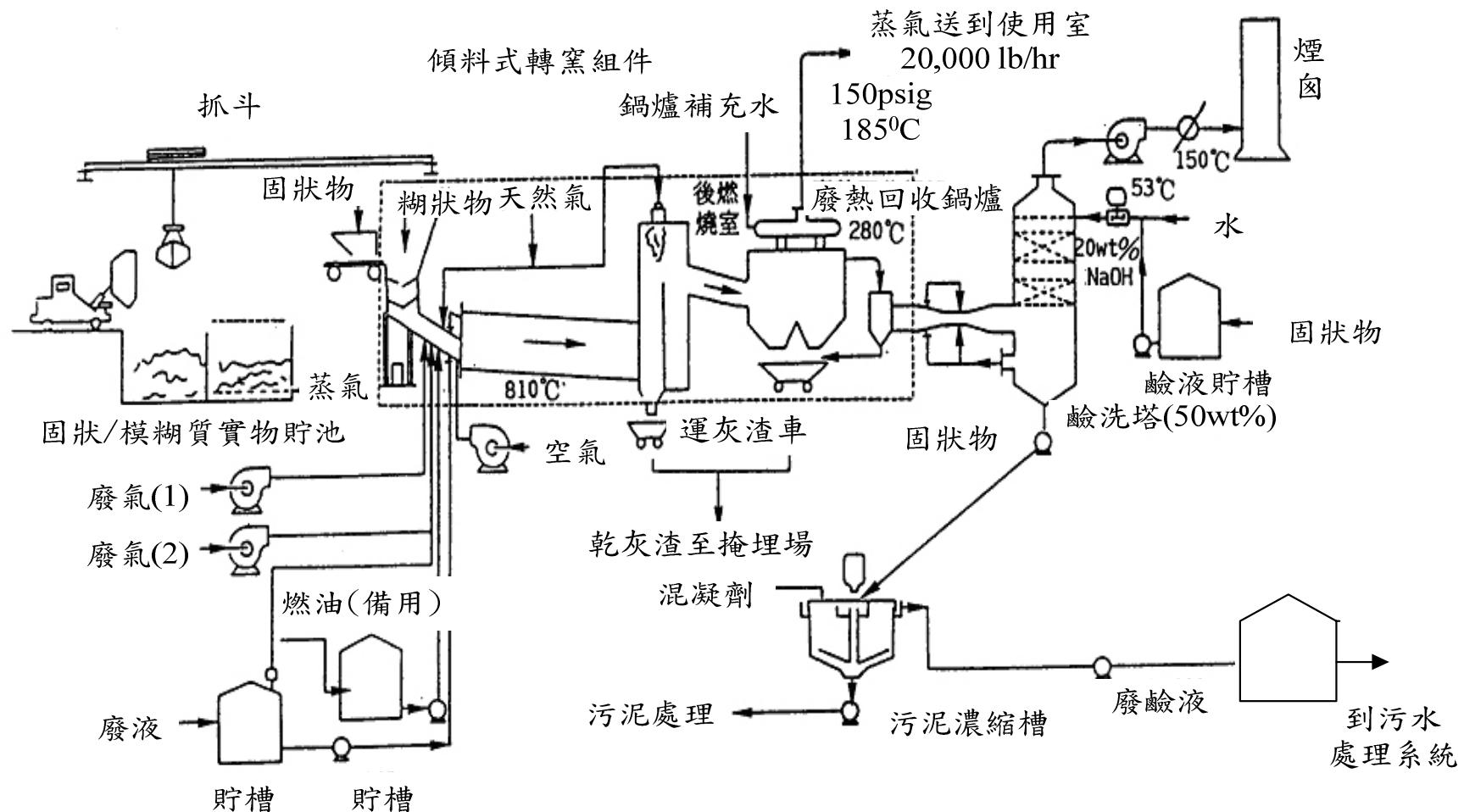
一般旋轉窯焚化系統，如圖 4.8 所示，包括：廢棄物進料系統、旋轉窯爐體、二次燃燒室、廢熱回收鍋爐及空氣污染控制設施等。

A. 形式分類

其分類可依廢氣流向與廢棄物流向之相對情形分為並流式與對流式；或依室內溫度分為乾灰式與熔渣式：

(A) 並流式

係指燃燒廢氣的流向與廢棄物的傳送均在同一方向，其主要功能在於將有機物質蒸發，並於後續廢氣流中分解，再進入爐體的燃燒端。藉此可獲得較長之廢氣滯留時間，更能有效利用有機物質釋出之熱能。因此，適用於熱值較高或具放熱反應之廢棄物。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.8、旋轉窯焚化爐處理系統

(B) 對流式

係指廢棄物的輸送方向與廢氣的方向正好相反；因此，可提供較佳的氣、固體混合及接觸，增加其燃燒速率，而節省輔助燃料的消耗。所以適用於含水量較多或具吸熱反應之廢棄物。但其廢氣中所帶出的粉塵較高。

(C) 乾灰式

窯內溫度低於 1,000°C，故廢棄物尚未熔融而仍為灰渣的形式。

(D) 熔渣式

窯內溫度高達於 1,200°C 以上，因此廢棄物中的惰性物質除高熔點的金屬及其化合物外，皆呈熔融狀態而獲較完全的焚化。同時凝結後的熔渣，形成較大顆粒而將重金屬化合物包容於其中，其透水性低，呈較穩定狀態。另外，熔渣會在爐窯內壁上形成一保護層，可延長耐火磚壽命。但是亦容易造成溫度控制不當，使爐體出口附著不同形狀之礦渣而造成阻塞。

B. 一般設計及操作準則

由於廢棄物種類及特性變化大，現有燃燒模式無法準確推測出實際燃燒情況，焚化爐的運轉及設計必須根據製造廠商過去累積的經驗，設計方法及準則趨於保守。主要影響焚化效率的因素：溫度、停留時間、含氧量及氣/固體混合程度。這些因素並非獨立變數，如過剩空氣量高可以加強燃燒速率及混合程度，但會降低燃燒溫度及氣體滯留時間。旋窯的轉速降低會增長固體的滯留時間，但是也會影響固、氣體的接觸，因此這幾個因素必須妥善調整，才能達到焚燒完全的最終目標。一般設計及操作準則如下：

(A) 溫度

乾灰式旋轉窯內的溫度通常維持在 850-1,000°C 之間，若溫度過高，窯內固體易於熔融，溫度太低，則反應速率慢，燃燒不易完全。熔渣式旋轉窯則控制於 1,200°C 以上，二次燃燒室氣體的溫度則維持於 1,100°C 以上，不宜超過 1,400°C，以免過量的氮氧化物 (NOx) 產生。

我國對於有害事業廢棄物焚化爐，規定其燃燒室之出口溫度應維持在 1,000°C 以上。

輔助燃料的熱能用以提高廢棄物溫度至操作溫度，作為水分的蒸發用與滿足吸熱反應所需之熱能；若為放熱反應及廢棄物可提供熱能，亦可降低輔助燃料的需求。另外爐體輻射能的損失及廢氣所帶走之熱，亦必須加以考慮。

(B) 氧含量

旋轉窯的廢液燃燒器的過剩空氣量是控制於 10-20% 之間。如果過剩空氣量太低，火焰易生黑煙，太高則火焰易被吹至噴嘴之外，可能導致火焰中斷。旋轉窯中之總過剩空氣量通常維持在 100-150% 之間，以促進固體可燃物與氧氣之接觸，部分旋轉窯甚至注入高溫度的氧氣。二次燃燒室過剩空氣量約為 80%。

(C) 固體停留時間

足夠的固體停留時間也是完全焚化的必要條件之一。紙盒僅需要 5 分鐘即可燒完，一般廢棄物約 15 分鐘，輪胎約半小時，而鐵軌使用的枕木則需 1 小時。固體在旋轉窯內的滯留時間可用下列公式估算：

$$\theta = 0.19 \left(\frac{L}{D} \right) \frac{F}{N \cdot S}$$

式中

θ ：固體滯留時間 (min)

L：旋轉窯長度 (m)

D：窯內直徑 (m)

N：每分鐘轉速 (rpm)

S：窯傾斜度 (m/m)

F：常數；爐未具攔阻壩等於 1，爐有攔阻壩則大於 1

旋轉窯焚化爐的進料量約占其內部總體積之 5-10%，其滯留時間很短（在 1 小時以下）。輕載量有利於熱傳效果，處理區之熱傳主要來自爐壁的輻射作用，進料愈少則爐壁對爐床的面積比會增大。另外，輕載亦有利於爐床翻轉與爐床的均熱。

傾斜度愈大愈有利於物質傳送。焚化爐所處理物質的單位體積愈小，則爐的傾斜度就必須愈陡。對輕載爐其轉動速度為 1-3 rpm，對重載爐則為 0.5-1.5 rpm。有許多種不同的長度與直徑比的組合，可達成設計滯留時間的要求；然而對處理有害廢棄物的旋轉窯而言，其直徑一般在 1 公尺以上，而長度與直徑之比 (L/D) 通常從 30 : 1-10 : 1。

(D) 氣體滯留時間

一般有機氣體在 870°C 以上的溫度下，僅需 1 秒以內就可以反應完全。有些含氯有機物則需在 1,100°C 溫度下反應 1 秒鐘以上才可完全破壞，因此一般旋轉窯的二次燃燒室體積是以 2 秒的氣體滯留時間為基準而設計的。

由於爐體內廢氣有旋刮作用，所以為避免細小的微粒被廢氣帶走，焚化廢氣有流速必須在 165-1,000 m/min，固體微粒愈小則流速就必須較低。爐的長度與直徑亦必須加以調整，以適合所設計的焚化廢氣流速。廢氣的流量決定於燃料的燃燒、蒸

發水氣及其他化學反應所產生的氣體。

(E) 旋轉窯內氣、固體的混合

旋轉窯轉速是決定氣、固體混合的主要因素。在旋轉時，爐內固體物的階梯面會掉下來而產生混合的效果。轉速增加時，離心力亦隨之增加，同時固體在炬窯內攪動及拋擲程度加大，固體和氧氣的接觸面及機率也隨之增加。反之，則下層的固體和氧氣之接觸機會小，反應速率及效率降低。轉速過大固然可加速焚化，但粉狀物、粉塵易被氣體帶出，排氣處理的設備容量負荷必須增加，投資費用也隨之增高。

(F) 二次燃燒室內的氣體混合

二次燃燒室內氧氣與可燃性有機蒸氣的混合程度取決於燃燒產物與二次空氣的相互流動方式及氣體的亂流程度。亂流的程度可由氣體的雷諾數決定，若雷諾數 (Reynolds Number) 低於 10,000 以下時，亂流與層狀流動同時存在，則混合程度僅靠氣體的擴散達成，效果不佳。雷諾數越高，亂流程度越高，混合越理想。一般來說，二次燃燒室之氣體速度在 3-7 公尺/秒之間。如果氣體流速太大，雖可增加混合度，但氣體在二次燃燒室的滯留時間卻因此降低，而不易反應完全。

3. 液體噴注式焚化爐

(1) 特點

凡是具流動性的廢液、泥漿及污泥皆可以予以破壞。含高熱值廢液可直接由燃燒器噴注爐內直接焚化，低熱值廢液及廢水則須以輔助燃料補充熱值，以維持適當溫度之最低熱量。為獲最佳焚化效果，可調整燃燒器噴出火焰及廢液噴出的位置及方向。

A. 優點：

- (A) 可以銷燬各種不同成分的液體有害廢棄物。
- (B) 處理量調整幅度大。
- (C) 溫度調節速率快。
- (D) 爐內中空，無移動的機械組件，維護費用低。
- (E) 投資費用低。
- (F) 操作所需之人工較少。
- (G) 對某些難焚化之廢液，可提供足夠的溫度和滯留時間。

B. 缺點：

- (A) 無法處理難以霧化的液體廢物，即動黏度宜小於 10,000 SSU (Saybolt Universal Second，賽氏通用黏度) 者。
- (B) 必須配置不同噴霧方式的燃燒器及噴霧器，以處理各種黏度及固體懸浮物含量不同的廢液。

(2) 適用廢棄物之物化特性

考慮廢棄物物化特性應包括：熱值、水分、鹵素成分、金屬鹽類、硫化物、環狀有機物及固體懸浮物等。依序詳述如下：

A. 热值

一般為了保持燃燒特性之穩定及節約燃料，將廢液熱值混合至 4,500-6,100 kcal/kg，但為安全考慮，會產生化學反應的廢液不可隨意混合。

B. 水分

水分含量超過 60%之廢液，除非其中含其他有害物質且無法經由一般廢水處理方法處理，否則應盡量避免以焚化方式處理。

C. 鹵素成分

氯、氟化合物燃燒會產生腐蝕性之氯化氫及氟化氫等氣體，必須使用適當之排氣處理系統，以免造成空氣污染。氟化氫甚至會造成耐火磚之腐蝕。溴、碘化合物燃燒後產生有色之溴、碘氣體。一般排氣處理系統甚至無法去除，因此必須先以混合方式將其成分降低。

D. 金屬鹽類

鹼性金屬（鈉、鉀）鹽類和其他金屬鹽類形成低熔點物質，而附著於爐壁造成結垢及附著於排氣管壁而腐蝕管壁。

E. 硫化物

硫化物經燃燒後產生硫酸鹽會造成管線腐蝕，且廢氣處理系統的設計亦應考慮硫化物的含量。

F. 環狀或多環有機物

一般環狀及多環有機物較為穩定不易分解，因此，含量較高時，必須提高焚化溫度及加長停留時間。

G. 固體懸浮物

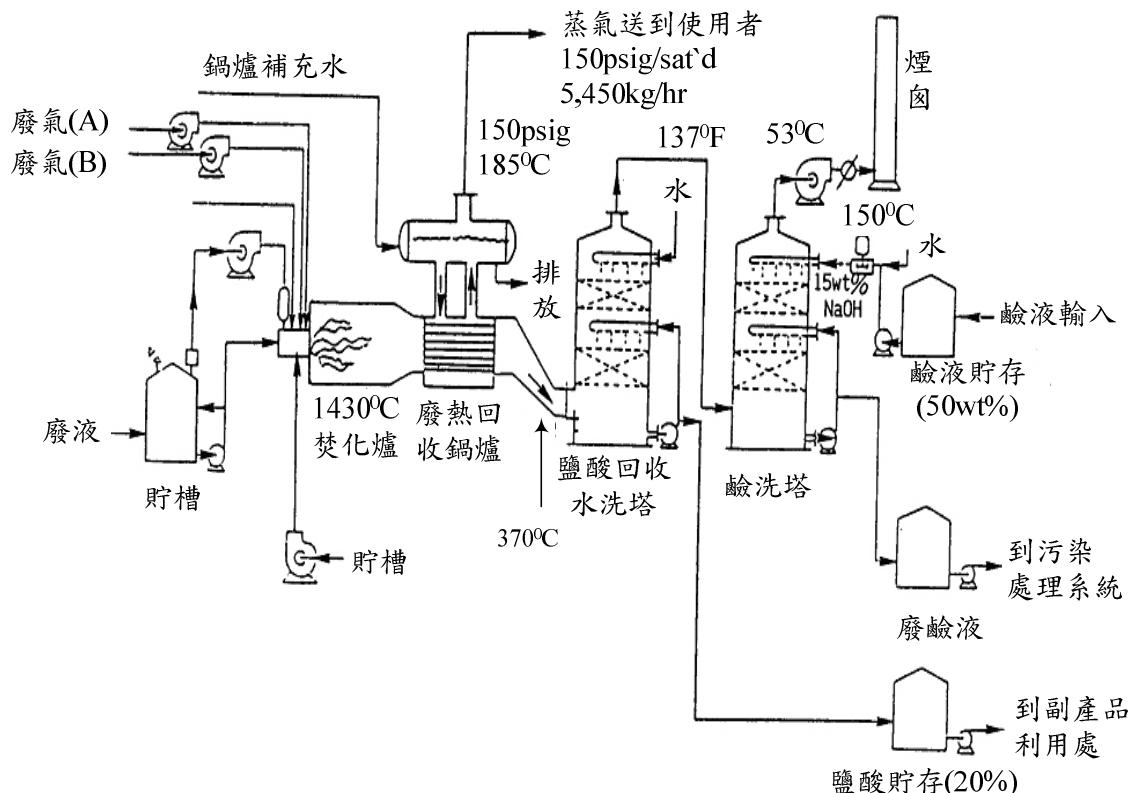
固體懸浮物應先經過濾處理，以免造成燃燒器內管路的堵塞、磨損及爐內灰渣的堆積。

(3) 液體噴注式焚化系統及其操作特性

液體噴注式焚化爐（圖 4.9）必須考慮全系統的處理能力，一般組成包括：

A. 廢液進料系統

廢液管路系統、霧化器、燃燒器。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.9、液體噴注式焚化爐處理系統

B. 燃燒爐體

含耐火材料。

C. 廢熱回收鍋爐。

D. 空氣污染控制設備

對含氣廢液則應包括鹽酸回收水洗塔、文氏洗滌塔。

E. 廢液進料管路系統

廢液進料管路系統，如圖 4.10 所示，包括：貯槽、泵、攪拌器、管線、閥等。

F. 燃燒器及霧化器

廢液噴入爐內，形成霧化狀之主要目的：

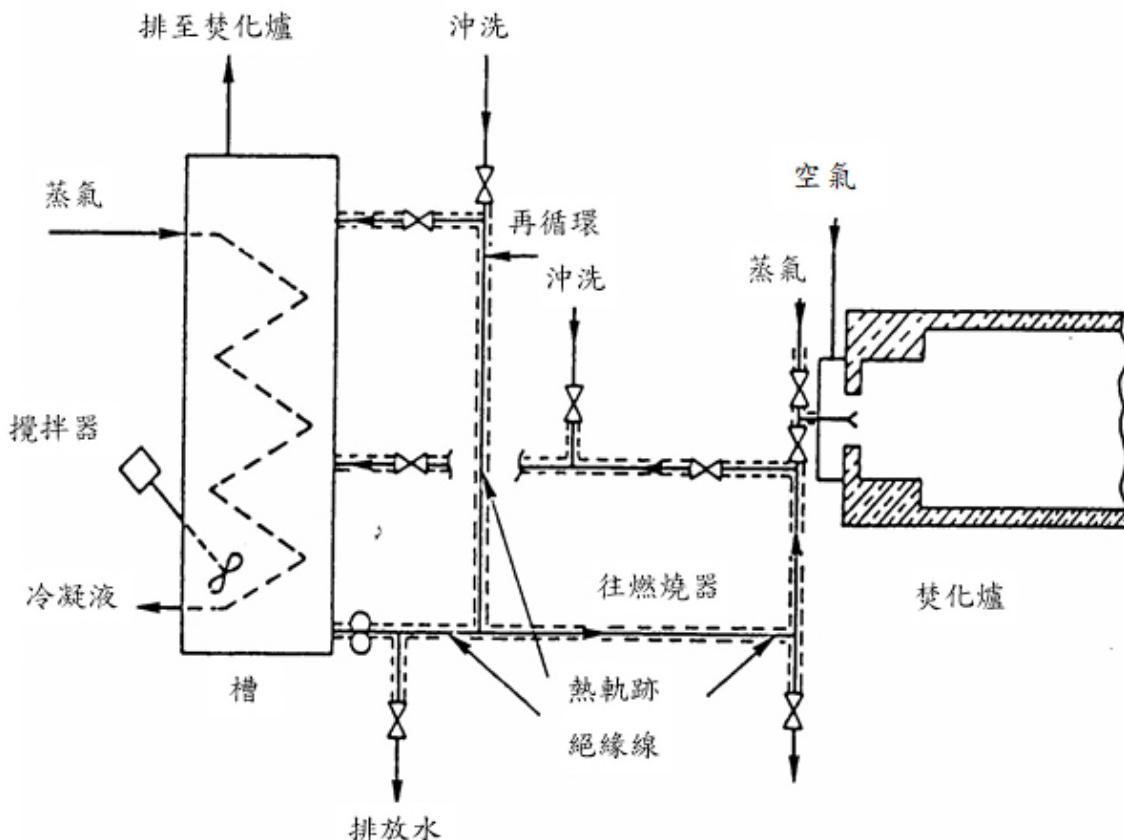
- (A) 將液體打散成較細的液滴。
- (B) 使微細的液滴成特定的圓錐式形狀，其具足夠的貫穿動能。
- (C) 並能控制廢液排放至噴嘴的流量。

G. 焚化爐體

最普遍之液體噴注式焚化爐有水平式及直立式兩種型式，其內部構造分別如圖 4.11 及圖 4.12 所示。

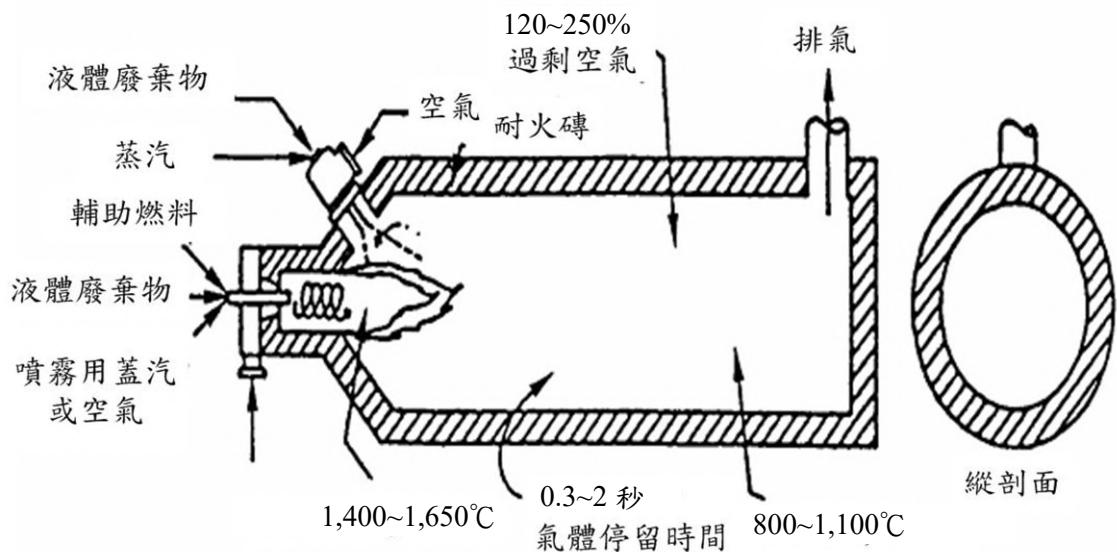
H. 其他設備

煙囪及緊急排放煙囪。



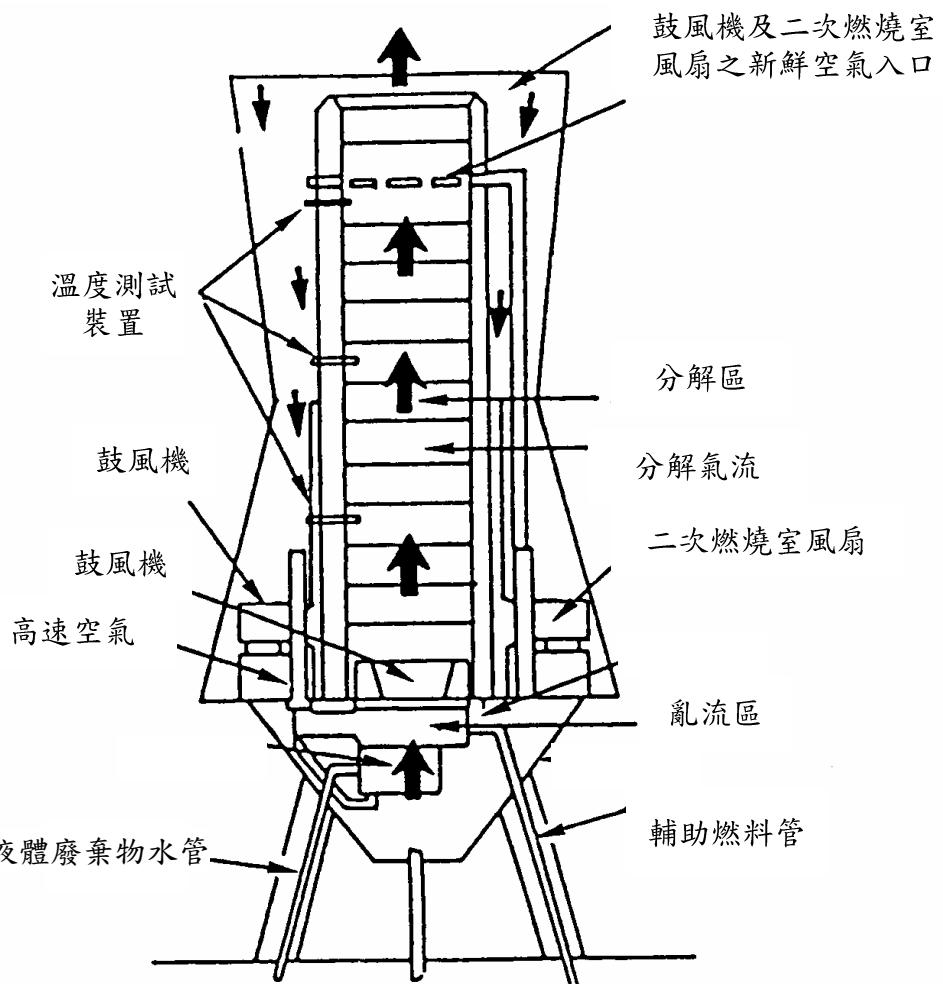
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.10、廢液管線系統



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.11、水平式液體焚化爐的內部構造



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.12、直立式液體焚化爐的內部構造

I. 水平式

適於處理熱值低、水分含量高及灰分含量低之廢液，但此爐體易於堆積灰渣而不易清除。

J. 直立式

適於處理無機鹽類含量高及懸浮固體物較多的污泥。

4. 多爐床式焚化爐

(1) 特點

多爐床式焚化爐由一豎直鋼桶構成，內有多層排列之爐床。桶內壁裡襯耐火材料，爐桶中間有一中空之旋轉軸，並附有轉臂，臂下附有推送耙。當轉動時，推送耙可以攪動廢棄物，以增加接觸面積的機會，同時可將廢棄物推落至下一層爐床，依此類推。

在早期多爐床式焚化爐已普遍為化學、金屬礦物工業用以乾燥化學品，鍛燒金屬礦石及耐火泥等。目前已逐漸應用於焦油、廢液、下水道污泥及各種可燃性事業廢棄物，包括固體、液體和氣體等廢棄物。

A. 優點：

- (A) 多層床焚化爐的固體滯留時間長，比其他焚化爐更適於處理揮發性低、燃燒速率慢或水分含量高的物質。
- (B) 可使用各種不同形態的燃料（天然氣、燃料油、液化天然氣、煤、焦炭）或高熱值廢氣、廢液或固體廢物輔助燃燒。
- (C) 由於爐床層數多，熱效率高，而且可在不同高度及處所安裝輔助燃燒器，以維持適當的溫度分配。
- (D) 可以有效處理不同熱值及化學特性之氣、液及固體廢棄物。
- (E) 運轉參數之控制及情況受廢物特性影響小，最低與最高處理量比例可低至 35%。

B. 缺點：

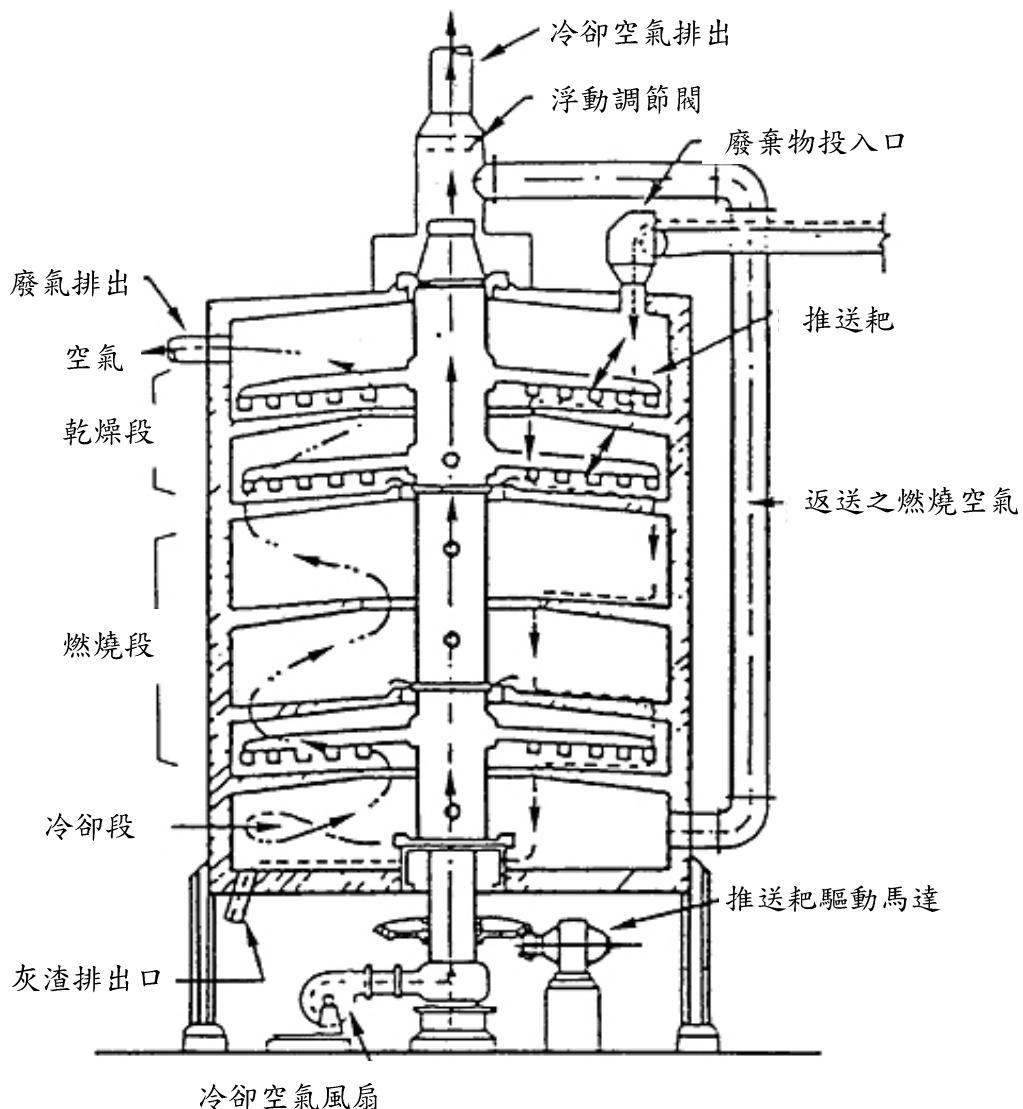
- (A) 由於固體滯留時間長，爐內溫度反應很慢，溫度調整需時較長。
- (B) 移動的主軸及攪拌桿易因磨擦、熱疲乏及腐蝕而損壞，出料口易被爐內形成的大塊物體堵塞，因此維護費用高。
- (C) 爐壁受間歇性進料及廢物中的水分所產生的熱震 (Thermal Shock) 影響，易於損壞，耐火磚更換頻繁。
- (D) 必須加裝二次燃燒室，以分解揮發性有機物質。
- (E) 不適於處理需高溫焚化的有機物（多氯聯苯等）或低熔點無機鹽類含量高的廢棄物。

(2) 適用廢棄物種類

含低熱值之有害物質及高水分的污泥最適合以多爐床焚化爐處理，一般煉油、化學及製藥工廠所產生的液態及半流動污泥均可由多爐床焚化爐處理。塊狀或大形固體必須先經磨碎處理後才可送入爐中，否則會造成堵塞及損害爐壁及推送耙。盡量避免處理低熔點之無機鹽類及金屬。由於多爐床焚化爐的溫度較低，故較不適於多氯聯苯或可能產生戴奧辛 (Dioxin) 的廢棄物之處理。

(3) 多爐床式焚化系統及其操作特性

多爐床式焚化爐的層次、直徑、高度與廢棄物的處理量、特性及處理方式有很大的關係。含水量高、低熱值或燃燒反應速率慢的廢棄物其所需的處理時間較長，所需的爐層數亦較高。固體廢棄物的停留時間可由主軸的轉動速度而控制，同時攪拌桿上推送耙的設計和固體的帶動量有關，也會影響固體廢棄物在爐床上的時間。多爐床廢棄物爐之結構組成如圖 4.13 所示。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.13、多爐床焚化爐

多爐床焚化爐的直徑自 1-7 公尺，高度約自 3-23 公尺，爐床數需自 6-18 層。整座焚化爐，因主要作用不同，可分為下列 3 段：

A. 乾燥段

提供適當的時間，以蒸發廢棄物中所含的水分和蒸餾或氧化揮發性成分，此段平均溫度在 $430\text{-}540^{\circ}\text{C}$ 。

B. 燃燒段

大部分已被蒸發，當溫度提高到 $760\text{-}980^{\circ}\text{C}$ 時，焚化快速進行。

C. 冷卻段

冷卻不可燃性之剩餘物（約為原廢棄物體積的 10%），此段溫度為 150-300°C，同時段亦可預冷空氣。

污泥及粒狀固體廢棄物由輸送帶或螺旋推進器自爐頂加入，然後由主軸上的攪拌桿及推送耙帶動及混拌，並通過爐床孔隙落入第二層，如此隨著主軸不斷的轉動，燃燒後的灰渣一層一層地掉到底部，最後經灰渣排除系統排出爐外。由於空氣和固體的流向相反，熱傳速率很高，再配合不時地攪動，因此，固體可充分接觸熱空氣而燃燒完全。有些設計還包括一個二次燃燒器以確保揮發性有機物之完全燃燒。此外，亦可將高熱值廢液從爐壁上的燃燒器或噴嘴注入爐中，以降低燃料費用。

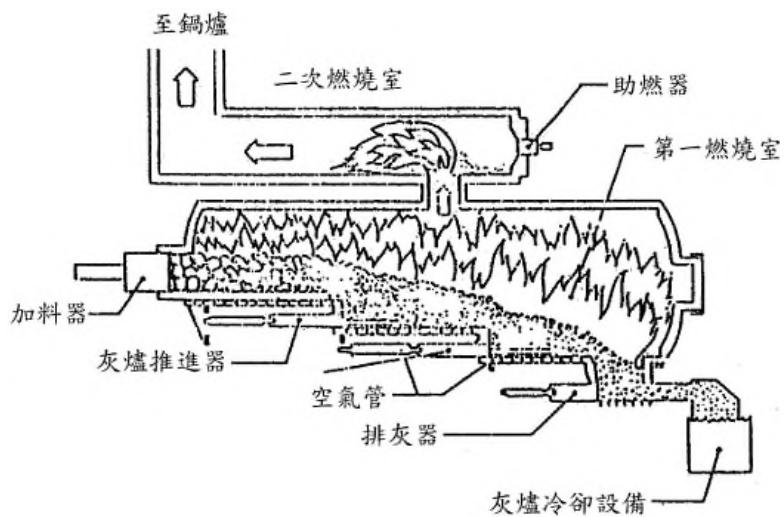
5. 低量空氣系統（燻式）焚化爐 (Controlled-Air Incinerator)

廢棄物以低於理論空氣量之空氣，於爐體內第一燃燒室 (Primary Combustion Chamber) 之機械式爐床上燃燒，使可燃分分解為可燃性氣體，殘渣由爐床下端排出，可燃性氣體再送至第二燃燒室 (Secondary Combustion Chamber) 並供應充分空氣使可燃性廢氣及有機性臭氣完全燃燒之裝置。燻式焚化爐，多為廠鑄標準型，亦為混燒式焚化爐之一種，進料方式與模具式焚化爐相同，每一爐之處理容量在每日 50 公噸以下，主要使用於小城鎮及社區之廢棄物處理。

優點為：(1)施工期短；(2)可彈性組合數組爐體；(3)操作較容易；(4)廢氣之含塵量低。此型在亞洲目前仍極少實例，爐體剖面示意圖如圖 4.14 所示。

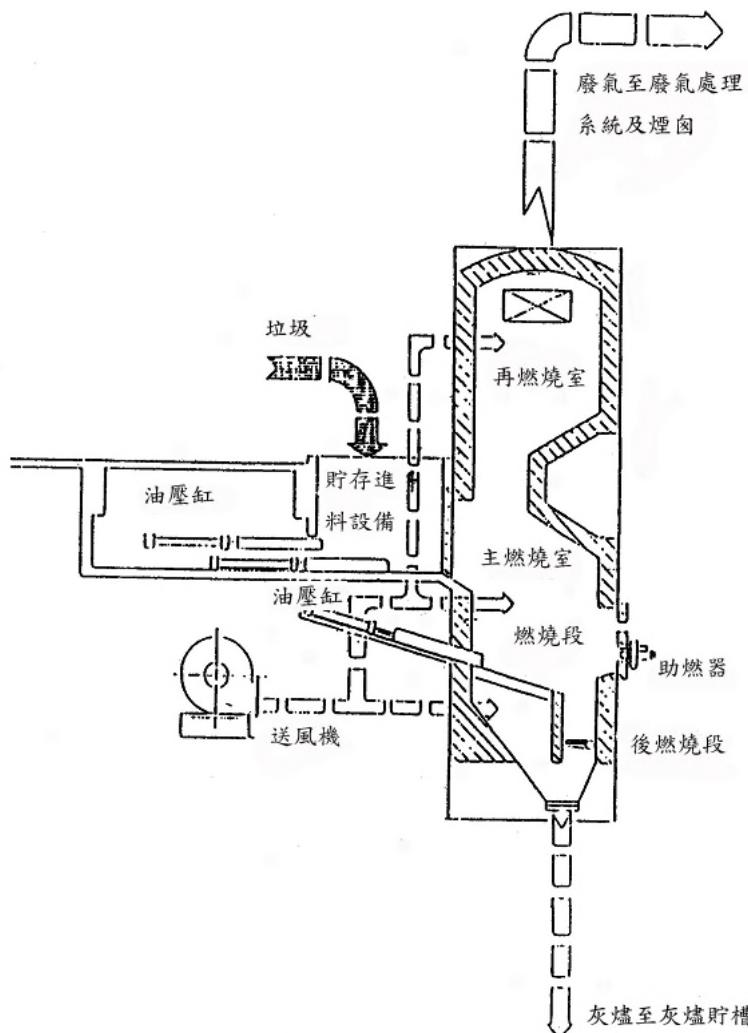
6. 模具式焚化爐 (Modular Incinerator)

爐體預先於工廠內按規模製造，再運至工地裝配之焚化裝置，其爐床多為固定式，爐體整體成型亦為其特徵，多應用於小型焚化爐。屬於混燒式焚化爐之一種，處理流程與混燒式焚化爐大致相同，但多採人工投入或橫式進料方式。燃燒室即分為第一、二燃燒室與低量空氣系統焚化爐同，如圖 4.15 所示。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.14、低量空氣焚化爐



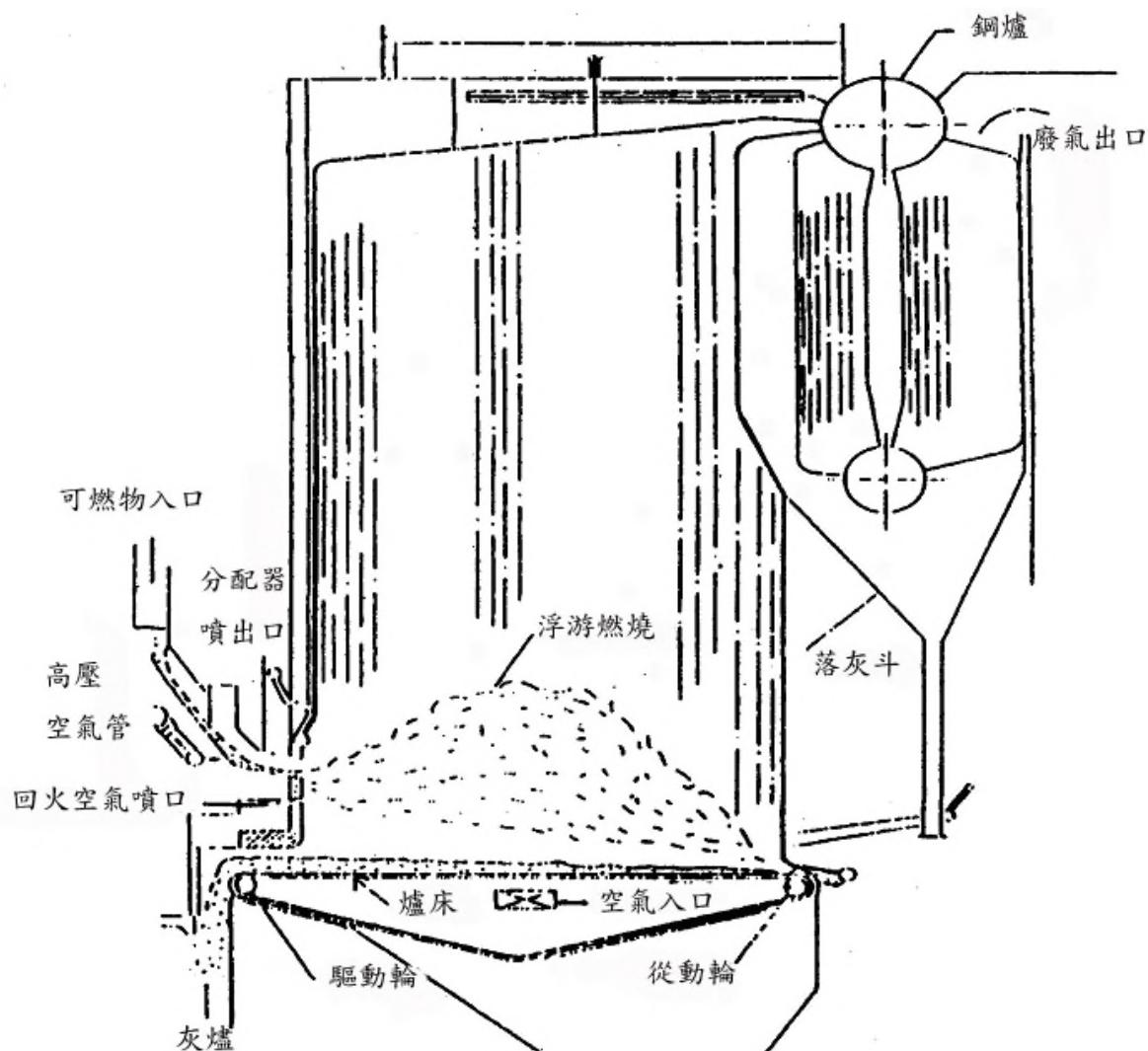
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.15、模具式焚化爐

7. 噴燒式焚化爐 (Spreader Stoker Incinerator)

將預經粉碎或分類之廢棄物，以高壓空氣噴入爐體內，並由爐底穿過爐床向上供應空氣至爐內助燃，廢棄物於下落途中，完成部分燃燒再落於履帶式爐床上後，隨爐床移動，繼續燃燒成為灰渣之裝置。

例如將廢棄物破碎至粒徑 10 cm 以下，再經分選、回收金屬、玻璃等不燃性物質，分類後之可燃性廢棄物即作成廢棄物衍生燃料 (Refuse Derived Fuel, RDF) 再藉高壓空氣噴入爐體內燃燒。剖面圖如圖 4.16 所示。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.16、噴燒式焚化爐

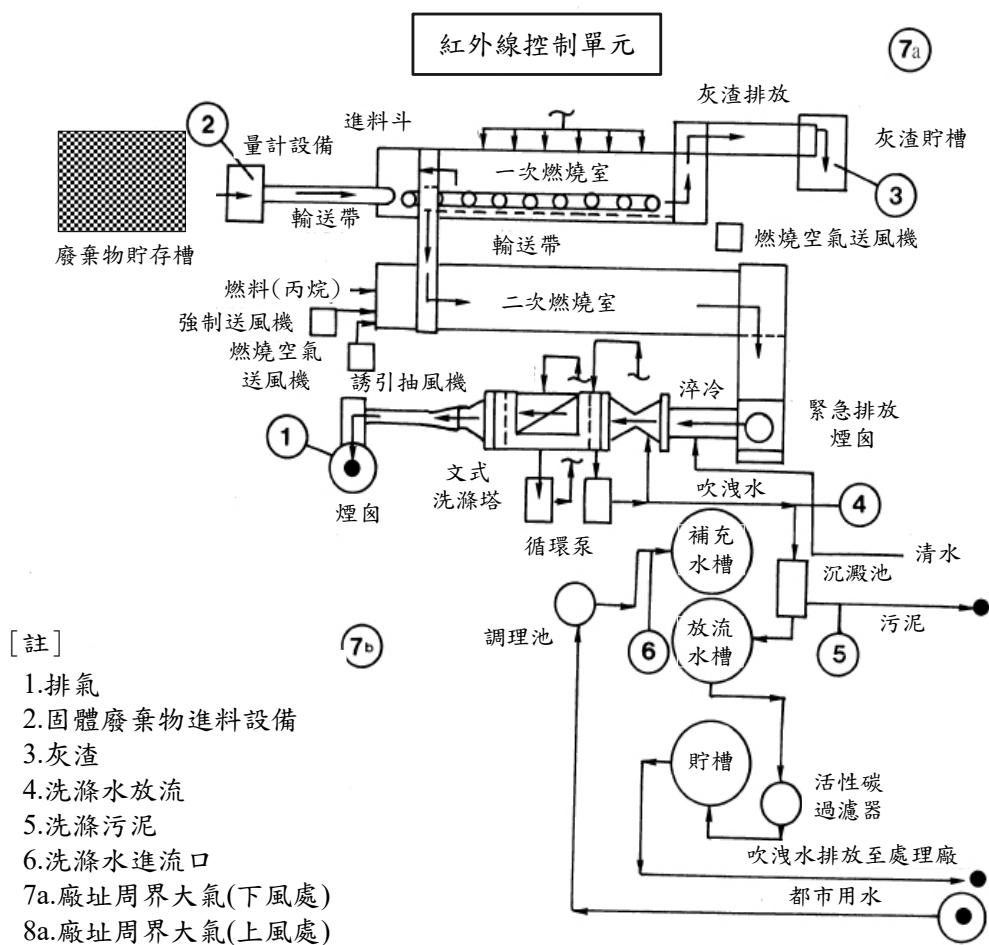
8. 其他焚化技術

(1) 紅外線焚化法

美國 Shirco 紅外線系統公司 (Shirco Infrared Systems) 利用紅外線加熱技術，發展一套移動式焚化系統，於 1970 年首先應用於市鎮污泥的處理，1984 年移動式示範處理系統應用於有害廢棄物的處理。更於 1986 年後陸續應用於受污染場址土壤之處理。

A. 主要設備組成

如圖 4.17 所示，Shirco 紅外線焚化系統流程，其設備構造，主要包括：廢棄物脫水及進料系統、主燃燒室、二次燃燒室、熱回收鍋爐、空氣預熱器、驟冷室、廢氣處理系統等。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.17、紅外線焚化系統流程

(A) 主燃燒室

主燃燒室為外殼由鋼材製的水平長方盒形之模組，其主要組件包括：

a. 加熱體

由碳化矽製成的紅外線燈管，裝置於爐頂並與廢棄物傳動方向相同的位置。利用電熱功率，使溫度控制於 275-1,000°C。

b. 廢棄物傳送履帶

由特殊合金鋼製成之履帶，可耐高溫，履帶的傳送速度可控制固體廢棄物在主燃燒室的停留時間，最長可達 3 小時。經處理後之惰性灰渣亦經由履帶送到爐尾排出。

c. 內襯絕熱材料

由輕質、絕熱效果佳的矽鋁陶瓷纖維製成的絕熱氈。可承受快速變異之溫度條件。

d. 燃燒空氣

由於熱源係來自電能，因此空氣需求量小；也可經由空氣輸入量多寡的調整，而控制爐內之燃燒氧化或缺氧裂解等反應。燃燒空氣的流向與廢棄物的傳輸方向相反。

(B) 二次燃燒室

廢棄物在主燃燒室經加熱、蒸發、燃燒或裂解等反應，轉換成有機性氣體，而進入二次燃燒室，其以約 1,300°C 溫度，2 秒氣體滯留時間予以完全燃燒。其主要組件包括：

a. 加熱體

4 支以天然氣丙烷之燃燒器或 1 組紅外線燈管。燈管的位置在燃燒器火焰出口後端，可增加燃燒氣體的亂流度。

b. 內襯絕熱材料

由質輕、絕熱效果佳的矽鋁陶瓷纖維製成的絕熱氈。可承受快速變異之溫度條件。

c. 緊急排放煙囪

利用誘引式抽風機將廢氣抽送排放，於 Shut down 情形下，由緊急排放煙囪排放。

d. 污染控制設備—文氏洗滌塔。

B. 操作特性及限制

顆粒狀固體廢棄物或受污染土壤適於以紅外線焚化爐處理之，廢液可直接霧化，予以噴入二次燃燒室處理。大型固體廢棄物則必須先脫水、破碎等前處理，才可送入爐內。

(A) 操作特性

- a. 模組化設計，可安裝於拖車上，易於運輸及快速組合設立。以 20-50 公斤/小時處理負荷之焚化系統可於 6 小時內裝設完成。較大的模組系統亦能以 9 位作業人員，於 7 天內設置操作。
- b. 滯留時間及溫度的控制準確。
- c. 爐體絕熱情況良好，主燃燒室外殼溫度僅 60°C (一般約達 200°C 以上)，不致影響操作安全。
- d. 以電能之紅外線燈管為熱源，易於調節、控制、操作效率高、成本低。
- e. 空氣需求量低，廢氣處理容量及投資亦相對降低。
- f. 有可能將重金屬固定於灰渣結構中。

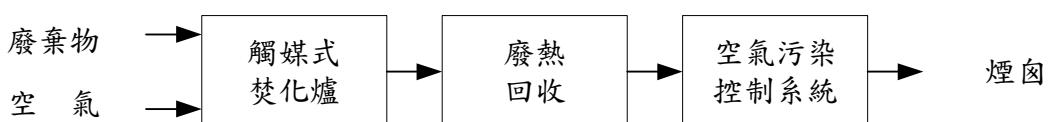
(B) 操作限制

- a. 履帶上的固體厚度不可超過 2-3 公分，以免底部受熱情況不佳。
- b. 不適於熱值超過 3,500 kcal/kg 或自燃性廢棄物，有可能會造成履帶局部過熱，而影響履帶壽命。
- c. 履帶上的廢棄物較難以均勻分配，而影響焚化效果。
- d. 限制廢棄物中氯、硫、鹽類之含量，以免腐蝕履帶。

(2) 觸媒焚化法

觸媒式焚化法乃利用觸媒促進廢棄物之低溫氧化速率，與傳統式焚化系統有所不同。觸媒式焚化法之溫度低於 537°C 與傳統式熱焚化法溫度高於 760°C 有所不同。觸媒式焚化反應的燃燒生成物與一般焚化生成物均相同；其所產生的熱亦與傳統型相同。觸媒焚化系統的特點在於操作溫度較低，比傳統式焚化系統消耗較少的輔助燃料，其建造材料亦較不苛求。其缺點是只能焚化處理液體廢棄物，而無法處理固體廢棄物；且觸媒劑會有老化、積垢污染、壓實等現象。

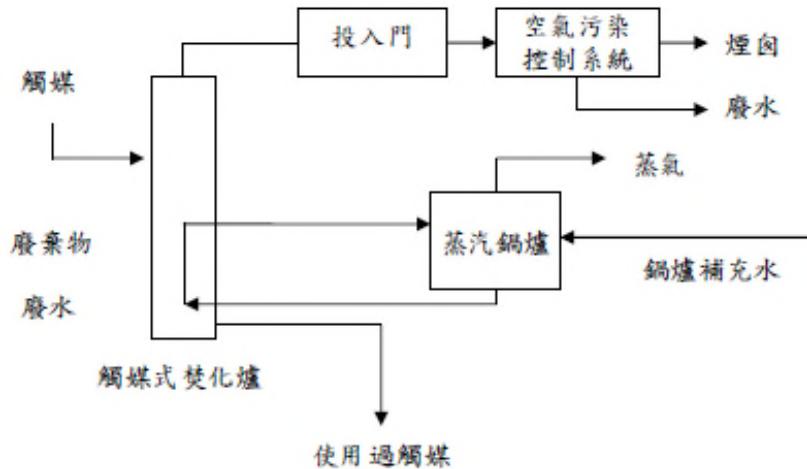
A. 固定爐床式焚化爐



B. 流體化床式焚化爐

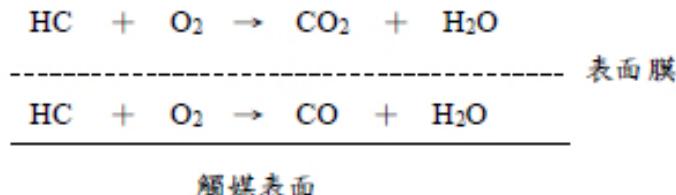
流體化床式觸媒焚化系統如圖 4.18 所示。廢棄物與燃燒用空氣一起被引入觸媒的爐床，並產生氧化反應。其系統設計，亦可包括有熱回收系統與空氣污染防治系統。

觸媒反應機構如圖 4.19 所示，包括下列步驟：



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.18、流體化床式觸媒焚化系統



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.19、觸媒反應機構

- A. 氣相反應物的熱與質量傳到觸媒劑的表面膜。
- B. 吸收的反應物在表面膜內擴散。
- C. 反應物間發生氧化反應。
- D. 反應生成物的擴散與放散。
- E. 氣相生成物的熱與質量傳離觸媒的表面。

大部分的氧化反應均極快速地進行，且主要發生在觸媒的表面。觸媒式焚化系統最重要的設計參數，包括有表面氣體速度、觸媒的使用、觸媒基材的形式（即觸媒元素的形狀）、觸媒床的厚度、廢棄物的種類及成分及其焚化溫度。觸媒一般由金屬或金屬化合物製成。觸媒式焚化系統的分解率，主要決定於觸媒的選擇。多數案例皆以白金為第一優先

選擇；另外，銠、鉑、鈮及金等貴重金屬，或其他貴重金屬合金，如銠—白金的合金等均可用於觸媒式焚化系統。

在正常操作下，大部分的觸媒會惡化或漸漸地喪失其活化性，此現象稱為活性衰減 (Deactivation)；造成觸媒活性衰減有下列幾個原因：

A. 過熱

過度的加熱，會使觸媒表面改變，並迅速地喪失其活性。

B. 热老化

熱老化為一正常的熱效應，它造成觸媒或承托物的再結晶，或者同時發生。再經結晶會造成觸媒表面積的改變，而使支撐物質擴散進去。此作用發生會影響觸媒的活性，並且此為不可逆的反應。

C. 中毒

觸媒中毒乃是觸媒與污染物發生化學反應而造成變質且失效。其反應亦為不可逆的。鉛、鎘、鎬、鋅、磷、砷及銅等物質，通常會造成觸媒的中毒現象。

D. 遮蔽

觸媒遮蔽乃污染物聚集在一起，而將觸媒包覆起來。此包覆膜會阻止或減緩反應物的擴散作用，使其不易找到尚未被占有的反應空間。會造成遮蔽的作用，乃是高分子量的有機物（有機液體或當加溫時維持在觸媒表面的冷凝焦質，因溫度太低無法進行觸媒的氧化作用）、平常空氣中的塵埃、當矽化合物氧化後餘留下來含二氧化矽的灰渣，及那些被列為對觸媒具有毒性的物質，即在熱的條件下，亦不利於其化學反應。

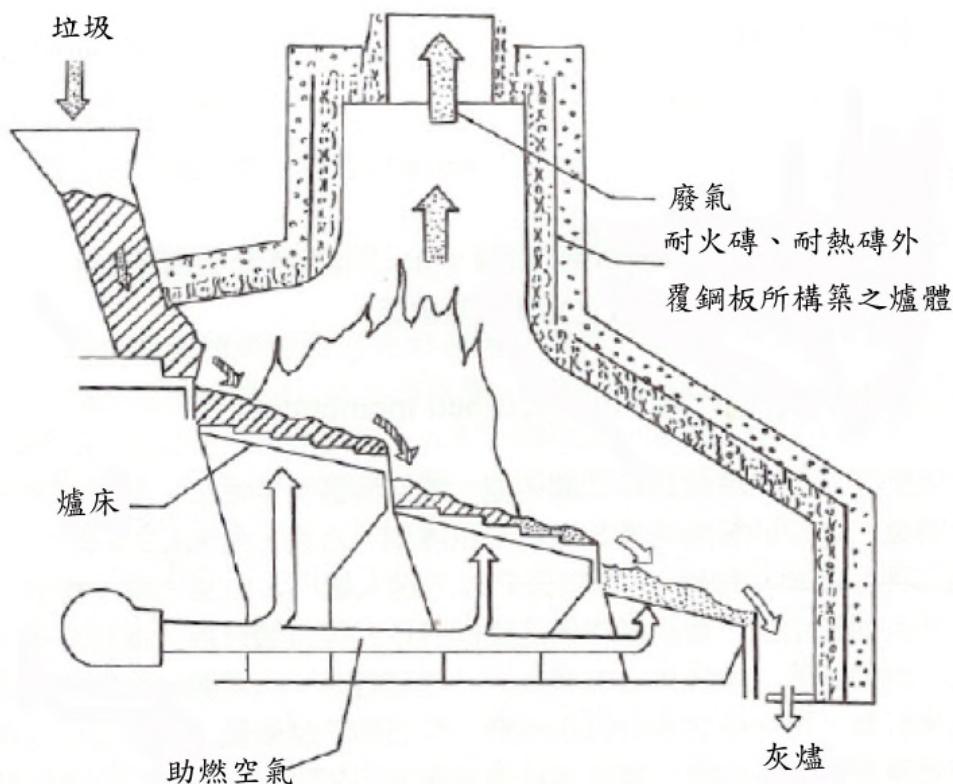
在觸媒活性衰減的 4 種反應機構中，只有遮蔽機構為可逆反應。若遮蔽是唯一的困擾，觸媒可以再生、再回復其活性。

(四) 機械爐床式焚化爐

機械爐床式焚化爐是利用爐條的前後或回轉的移動來輸送廢棄物，因可燃燒未經前處理之廢棄物，故亦稱混燒焚化爐 (Mass Burning Incinerator)。機械爐床式焚化爐剖面如圖 4.20 所示，其優點為：技術成熟、處理流程單純及二次公害可有效控制；其缺點為：與流體化床式焚化爐相較，單位面積爐床焚化率較低及混燒後，自灰爐中回收之金屬價值較低。

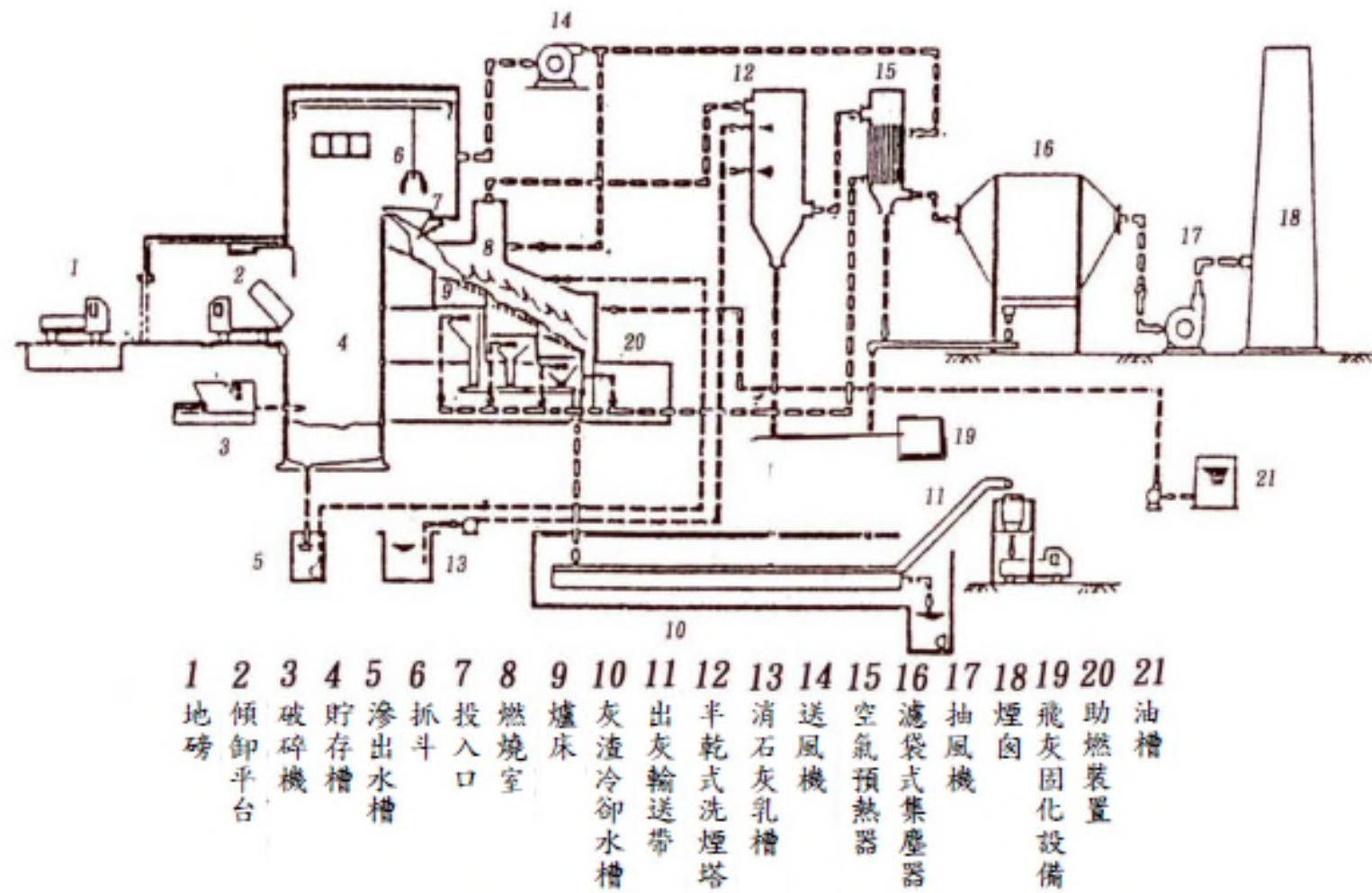
1. 連續燃燒式焚化爐之燃燒過程

連續燃燒式焚化爐之燃燒過程參考圖 4.21，其基本流程及各項設備功能要求示於圖 4.22，典型混燒式焚化爐處理廠剖面見圖 4.23。廢棄物在焚化爐內之爐床上移動及燃燒模式如圖 4.24 所示。



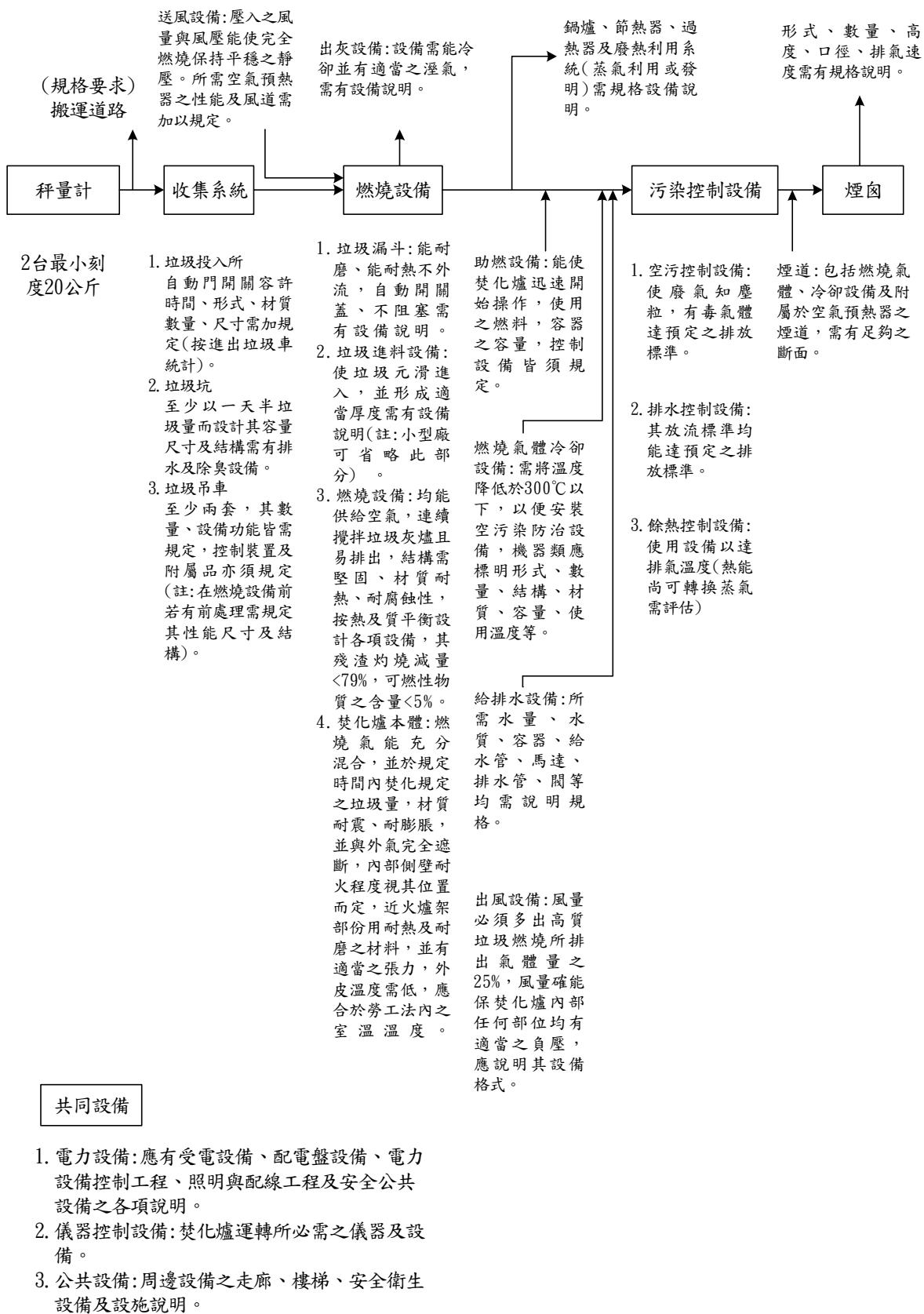
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.20、機械爐床式焚化爐體剖面圖



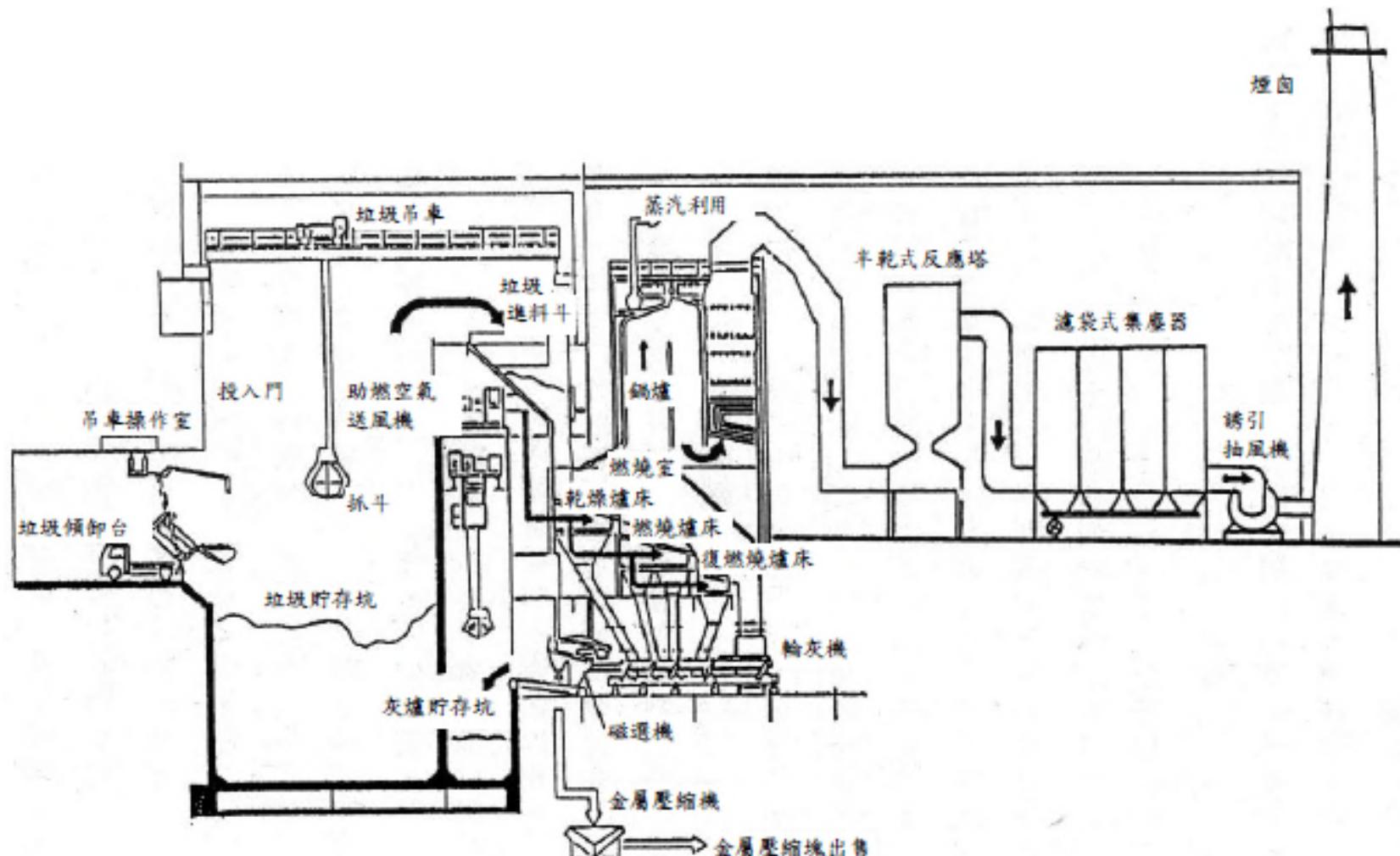
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.21、連續燃燒式焚化爐之燃燒過程



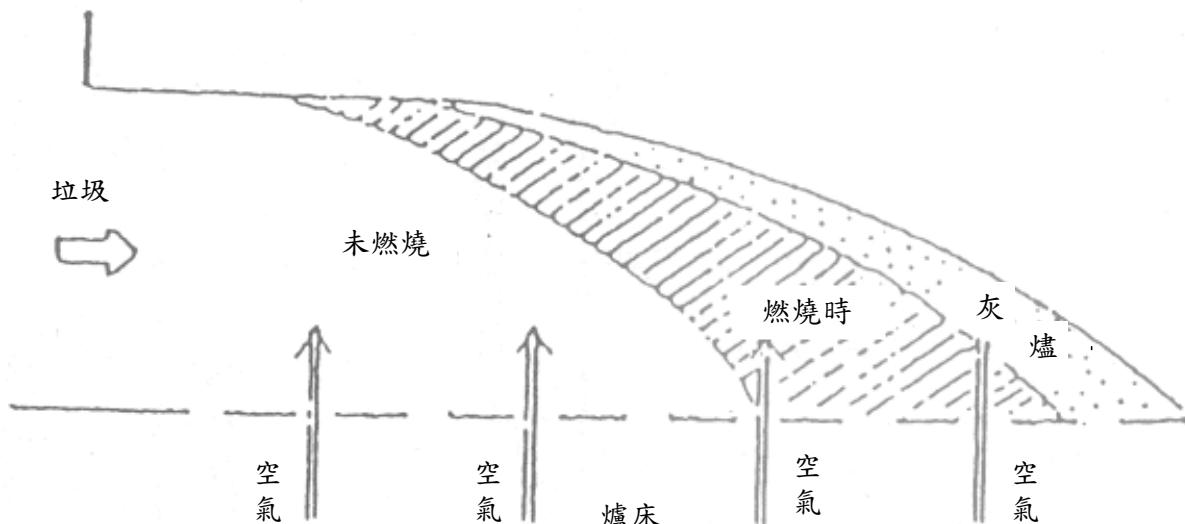
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.22、連續燃燒式焚化爐基本流程及各項設備功能要求



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.23、典型混燒式焚化爐處理廠剖面圖



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.24、廢棄物之移動及燃燒模式

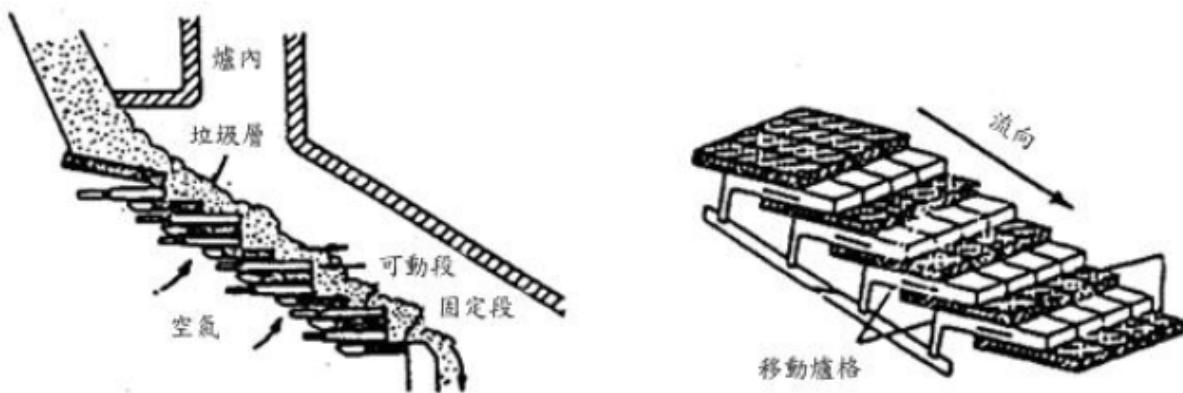
2. 爐床 (Stoker) 種類介紹

爐床 (Stoker) 之分類如圖 4.25 所示。

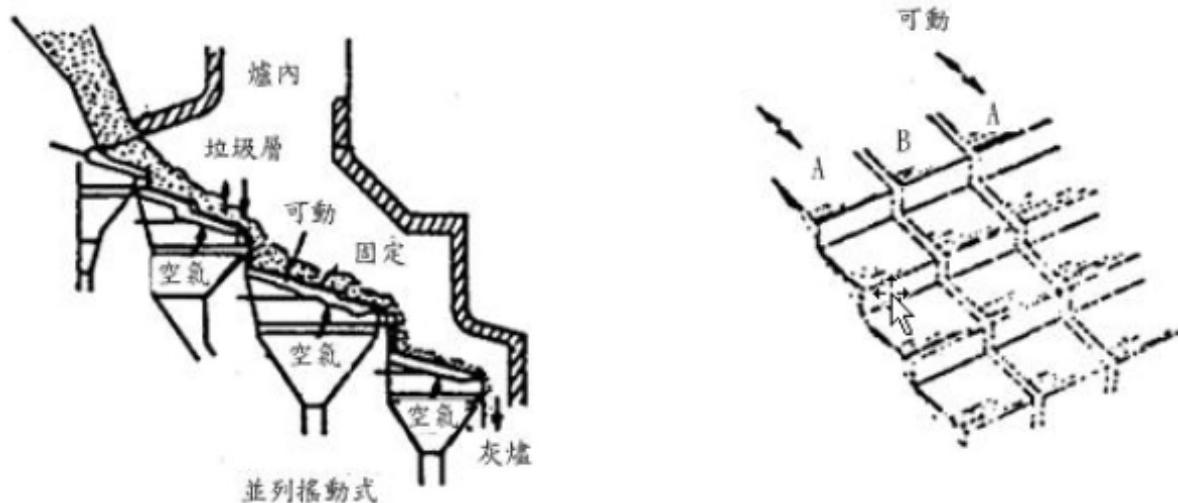
- (1) 階梯往復式 (Step-Feciprocating Grate)。
- (2) 並列搖動式 (Rows Forced-Feed Grate)。
- (3) 逆搖式（反向搖動式）(Reverse Acting Grate)。
- (4) 旋轉滾筒式 (Rotter Grate)。
- (5) 移動床式 (Traveling Grate)。
- (6) 搖滾式 (Rocking Grate)。

3. 爐的型式

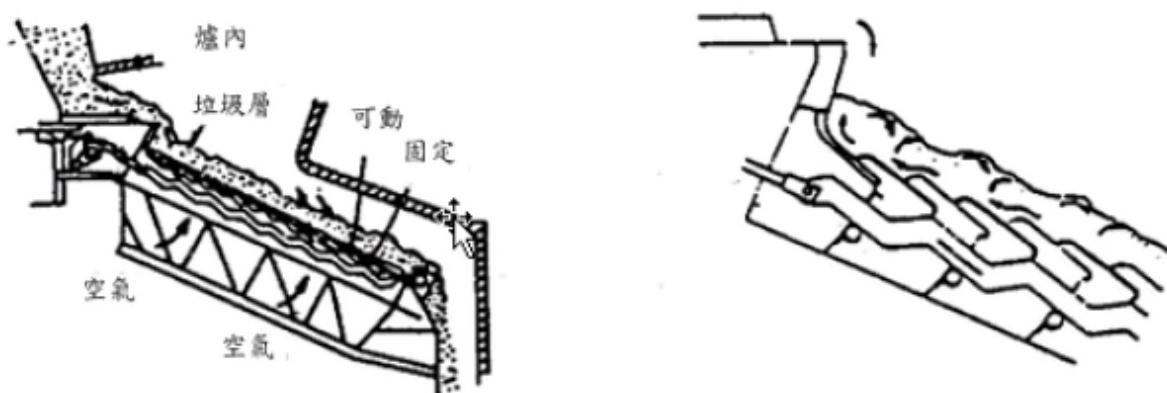
爐的型式依爐中廢棄物及燃燒廢氣流向之相對情形大致分為 4 種，如圖 4.26 所示。



(一) 階梯往復式



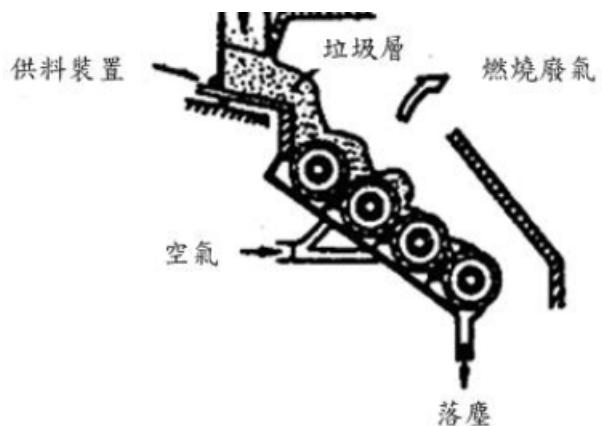
(二) 並列搖動式



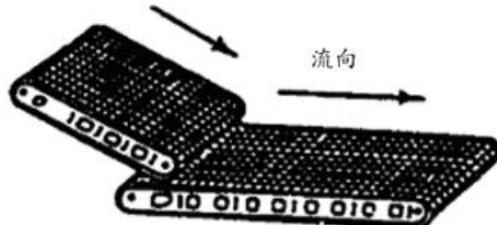
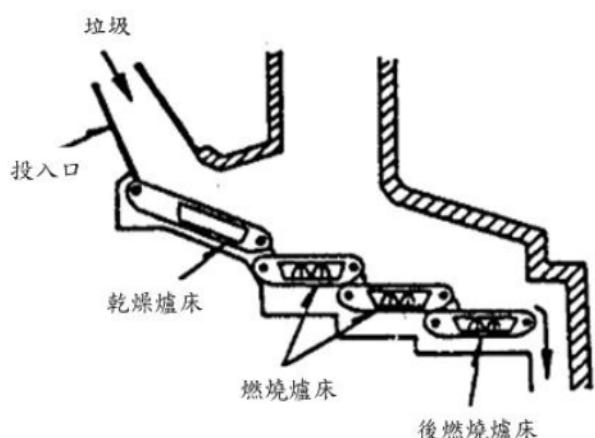
(三) 運搖動式

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

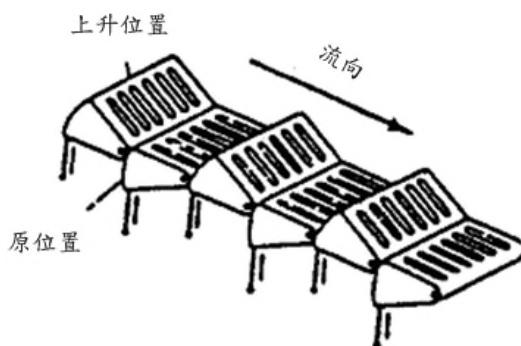
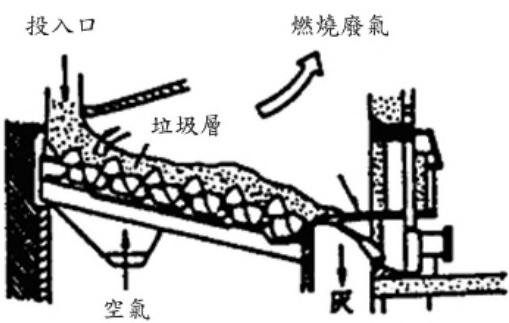
圖 4.25、各種爐床型式



(四) 旋轉圓筒式



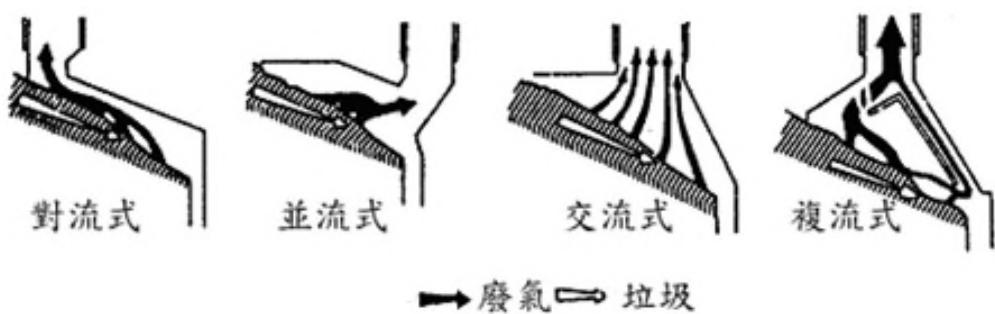
(五) 移動床式



(六) 搖滾式

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.25、各種爐床型式（續）



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

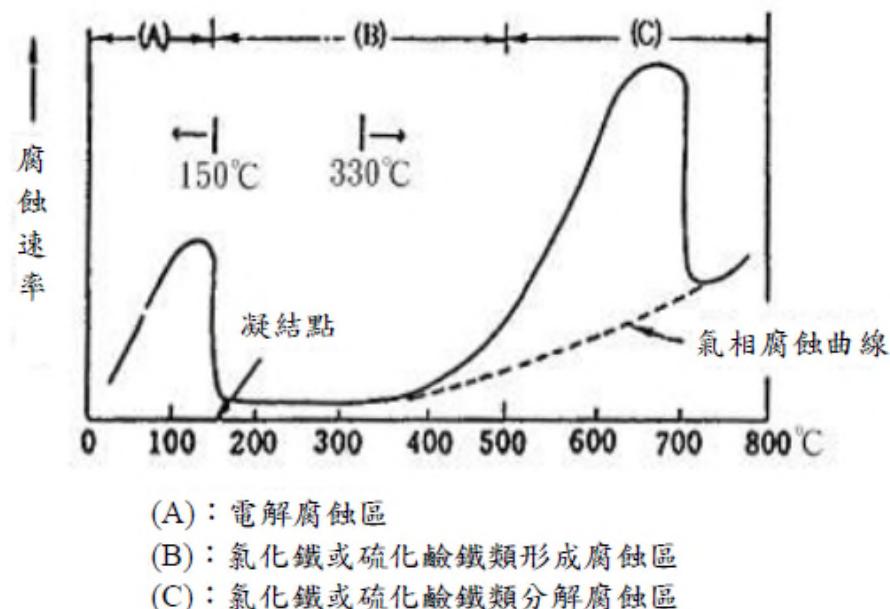
圖 4.26、火爐中氣體流向型式

4. 焚化過程溫度之控制

焚化過程溫度之控制主要有下列 3 部分：

- (1) 燃燒室溫度。
- (2) 爐之出口溫度。
- (3) 煙囪排煙溫度。

另外，焚化爐設備腐蝕問題亦為燃燒室溫度控制之重要因素，腐蝕情況因溫度高低而異，如圖 4.27。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.27、管材溫度對腐蝕之影響

各種爐燃燒室之溫度依其操作方式而有不同規定：

- (1) 具發電設備之焚化爐： $850 \pm 25^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 連續式焚化爐： $750\text{-}950^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 準連續式焚化爐： $700\text{-}950^{\circ}\text{C}$ 。
- (4) 批次式焚化爐： $400\text{-}950^{\circ}\text{C}$ 。

(五) 燃燒效率與破壞去除效率

焚化爐處理有機廢棄物效果的表示方法有兩種，燃燒效率 (Combustion Efficiency, CE) 和破壞與去除效率 (Destruction and Removal Efficiency, DRE)，前者是根據離開燃燒室之熱廢氣流中之 CO_2 和 CO 濃度而定，可以下式表示之：

$$\text{燃燒效率 } (\%) = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2} \times 100$$

DRE 是衡量廢棄物中，某特定成分經焚化爐（包括二級廢氣處理，例如洗滌器）焚化前後重量的變化，以表示燃燒過程有毒分子被破壞去除的比例，可以下式表示之：

$$\text{破壞去除率 } (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

式中

M_1 ：焚化前某特定成分之重量

M_2 ：焚化後該特定成分經過煙道排放的重量

焚化廠處理有害事業廢棄物時，為避免造成二次公害，處理後排放的廢氣、廢水、爐渣、飛灰等均須經處理至符合法規的標準方可排放。依「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」中，對於焚化處理功能之規定如下：

1. 焚化效率

有機氯化物破壞與去除效率 99.99%以上，多氯聯苯 (PCBs) 及 2,3,7,8 四氯戴奧辛 (2,3,7,8 TCDD)、2,3,7,8 四氯聯苯呋喃 (2,3,7,8 TCDF) 總破壞去除效率 99.999%以上，其他毒性化學物質破壞去除效率 99.9%以上。感染性事業廢棄物之燃燒效率在 99.9%以上。

2. 溫度及滯留時間

燃燒室出口中心溫度至少在 1,000°C 以上；燃燒氣體滯留時間感染性事業廢棄物在 1 秒以上，其他有害事業廢棄物在 2 秒以上。

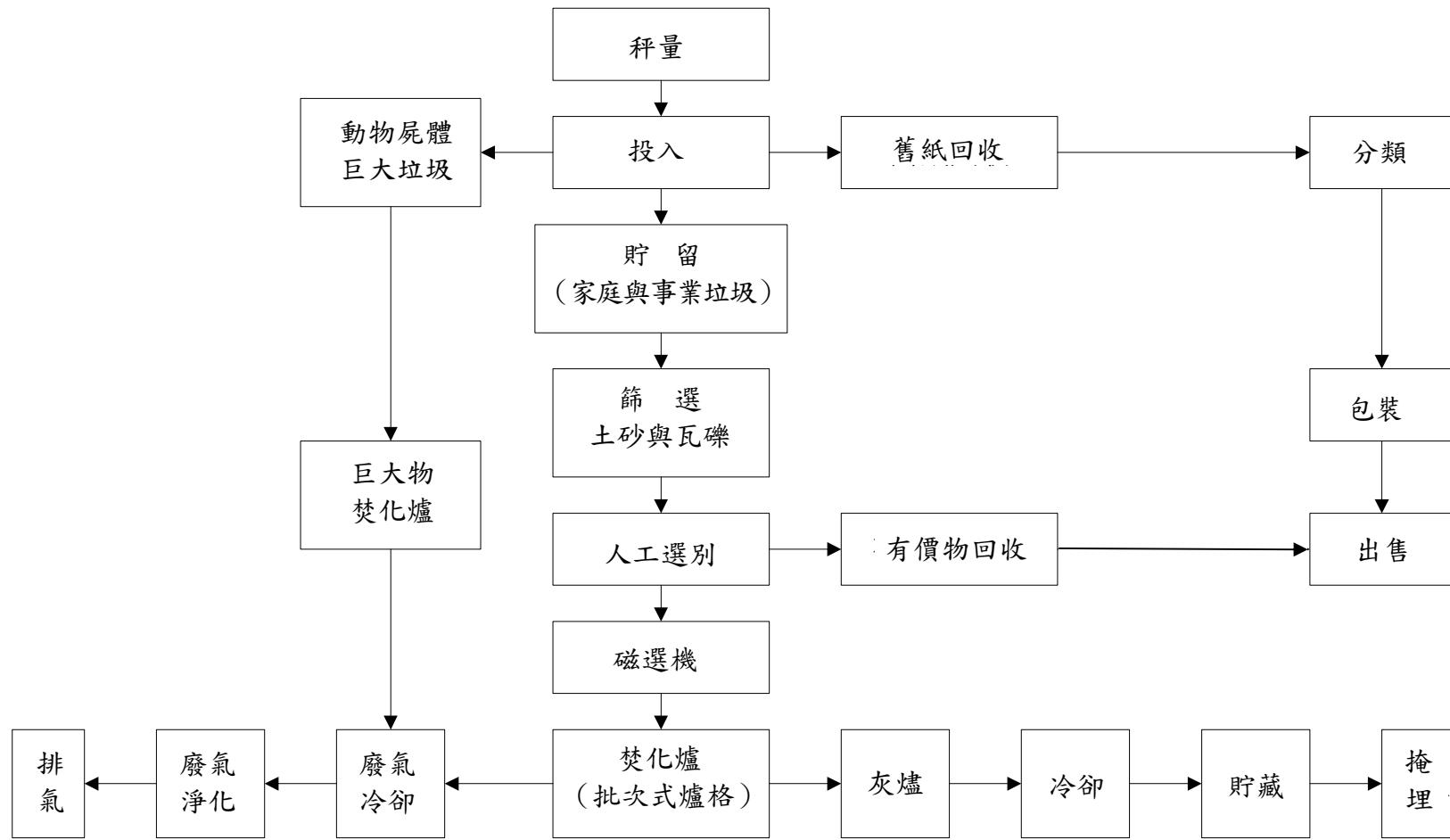
(六) 操作維護方式

焚化處理依操作方式，可分為批次式燃燒（分批填料式 Batch Type）及連續式燃燒 (Continuous Type) 兩種，如圖 4.28、圖 4.29 及圖 4.30 所示。

設施規模		20 t/d	50 t/d 60 t/d	100 t/d	150 t/d	200 t/d
爐型式	全連續					
連續 燃燒式	準連續					
	機械化批次式					
批次 燃燒式	固定批次式					

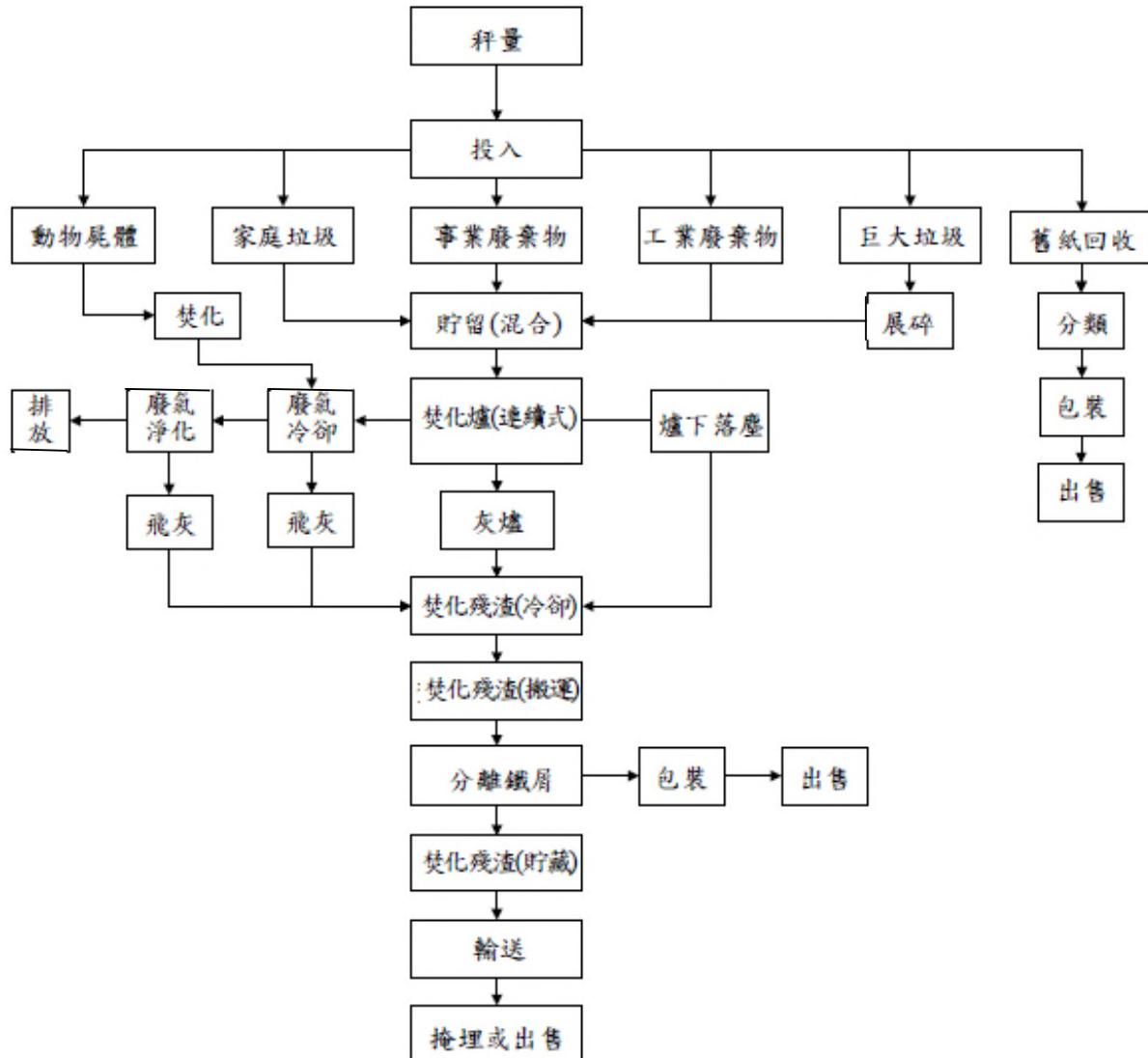
資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.28、連續式與批次式燃燒規模



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.29、批次式焚化設備與選別流程



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.30 連續式直接焚化設施之流程

分批式及連續式焚化處理設施之操作說明如下：

1. 分批填料式焚化處理設施：將廢棄物分批投入焚化爐本體內進行移動、攪拌、燃燒及殘渣排出等操作之整體設施。每日運轉時間以 8 小時為原則。此操作方式之焚化處理設施如爐床之攪拌及殘渣之排出等為機械化者，稱為「機械分批填料式焚化處理設施」，反之則稱為「固定分批填料式焚化處理設施」。
2. 連續式焚化處理設施：將廢棄物連續投入焚化爐本體內進行移動、攪拌、燃燒及殘渣排出等操作之整體設施。此操作方式之焚化處理設施，

如為每日 24 小時運轉者稱為「全連續式焚化處理設施」，每日 16 小時以上之間歇式運轉者稱為「準連續式焚化處理設施」。

連續燃燒式焚化爐的優缺點如下：

(1) 優點

- A. 可處理大量之廢棄物。
- B. 灰燼中未燃分少，幾乎已完全燃燒。
- C. 廢棄物燃燒可能產生之各種二次公害可較周全地加以防治。
- D. 熱利用之效率較高。
- E. 單位廢棄物處理量所需之人力少。
- F. 爐之損耗少。

(2) 缺點

- A. 建設工程費及維持費高。
- B. 需要較高度的操作技術。
- C. 長時間之操作，工作人員之勞動條件限制較大。
- D. 不適合小容量之廢棄物處理。

(七) 二次污染防治

焚化處理可能產生之污染問題有廢氣、廢水、灰渣、臭氣與噪音等，分別簡述如下：

1. 廢氣

- (1) 廢棄物焚化廢氣中可能含有粒狀污染物、氯化氫氣體、硫氧化物、氮氧化物、一氧化碳、重金屬物質及微量有機化合物等。廢氣產量約為 $3\text{--}8 \text{Nm}^3/\text{kg}$ ，因空氣供給量與廢棄物成分而異。

(2) 防止焚化爐廢氣引起空氣污染之對策：

- A. 去除廢棄物中不適合燃燒的物質，如塑膠、橡膠、皮革等。
- B. 點火時使用都市瓦斯，可減少硫氧化物之發生。
- C. 選定適當的燃燒條件，如進料量、溫度等。
- D. 裝置空氣污染防制設備。

(3) 常見的粒狀污染物處理設備有：

- A. 旋風集塵器。
 - B. 靜電集塵器。
 - C. 濾袋式集塵器。
- (4) 針對有害氣體（如氯化氫、硫氧化物、氮氧化物、一氧化碳、氟化物、戴奧辛等），調整燃燒條件以達到減量之效果，或裝置必要設備以進行防制。

2. 廢水

焚化廠廢水之主要來源有二：一為廢棄物貯存坑之滲出水，其有機質含量高，可抽送至焚化爐內予以焚燒；另一則為廢氣洗煙及灰燼冷卻過程所產生之廢水，可藉由化學處理方法進行處理。另有洗車廢水與員工生活廢水等。

3. 灰渣

廢棄物經焚化後所遺留之焚化殘渣，包括有爐床排出之焚化灰渣（底灰）以及集塵器所收集之飛灰。因底灰可能仍含有一些未燃有機物，後續經掩埋後可能會有滲出水污染的問題。而飛灰常含有較多的重金屬，故應經常檢測其重金屬溶出量。必要時，以水泥等固化劑進行固化處理，或與底灰混合後進行熔融處理。

4. 臭氣

廢棄物中的有機成分容易因腐敗導致臭味，為防止焚化廠臭氣外溢，廠內貯存坑（主要臭味來源）應維持在負壓。

5. 噪音

焚化廠的噪音主要來源計有鼓風機、廢氣抽送機、蒸汽凝結器、發電機、泵類、破碎及篩選等機械設備。噪音控制方法有：

- (1) 採用低噪音設備。
- (2) 降低設備之噪音，如裝置減震底座為獨立基礎等。
- (3) 裝置消音設備或使用隔音材料加以覆蓋。
- (4) 設置密閉隔離室，藉由建築物之隔絕以降低噪音。

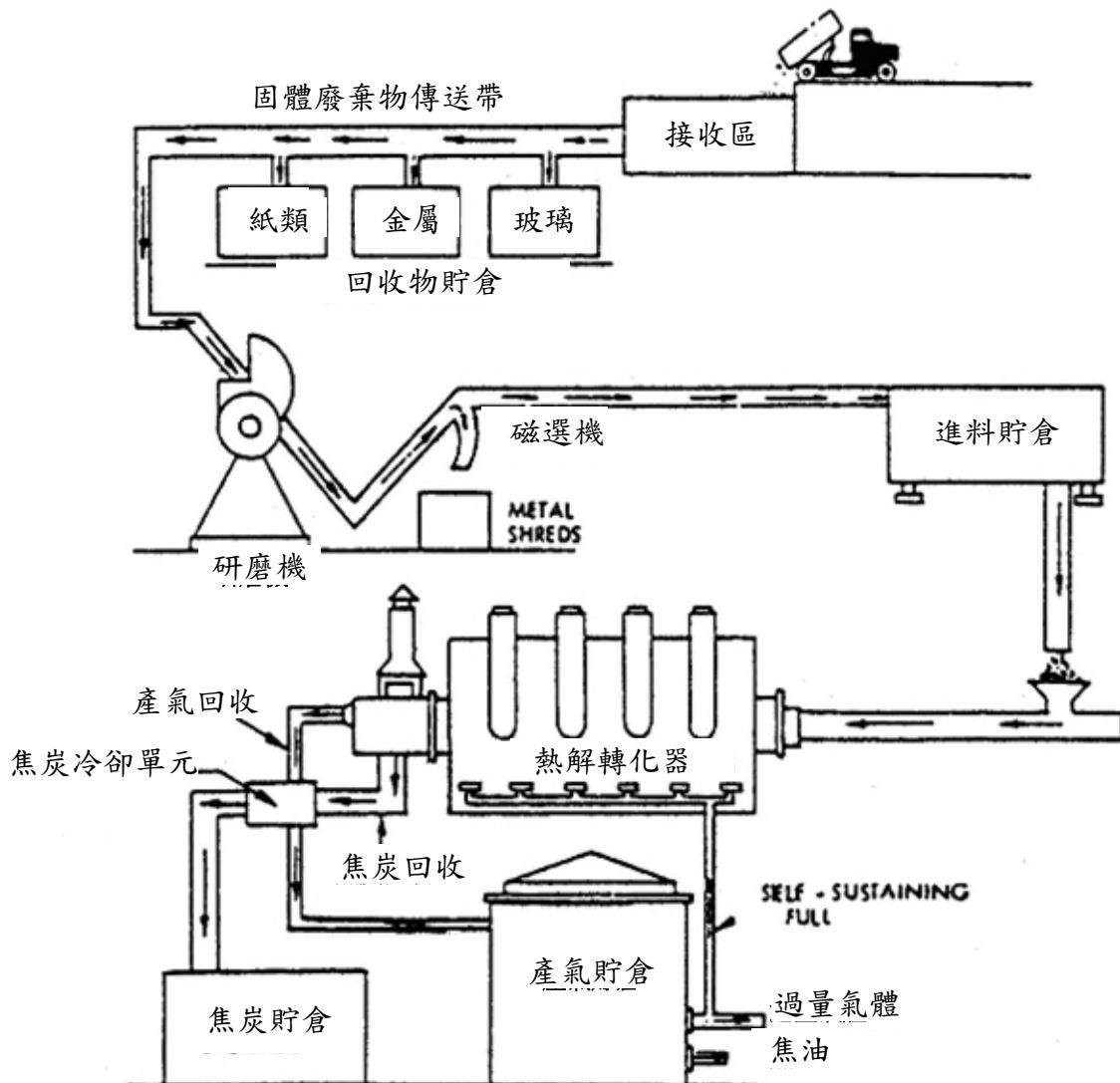
二、其他熱化學轉化技術介紹

(一) 热解法

廢棄物處理的目的在求達到安定化、減量化和無害化。目前發展的主流為焚化方式，但是近年來由於都市垃圾中的塑膠類大量增加，每造成爐體之容易損傷，並造成廢氣、廢水等二次公害問題。廢棄物熱解則是將廢棄物置於 350-900°C 的高溫與低空氣比狀況下，使廢棄物經熱分解而成燃料瓦斯，這些瓦斯可供燃燒產生蒸汽發電。熱分解之殘渣，已成為無害化，且達到減量化之目的，為廢棄物處理再資源化的新技術。

廢棄物熱解 (Pyrolysis) 是利用還原狀態，將廢棄物中之有機物加熱行化學分解之程序；有機物因加熱分解及凝縮反應 (Condensation Reaction) 形成氣態、液態與固態產物，含有高溫度之 HC、CO、H₂ 等可燃性氣體及油、焦炭 (Char) 等。此法是種吸熱程序，與焚化之放熱反應相反，因此有時又稱為乾餾或分解蒸餾 (Destructive Distillation)。

此一處理方法與傳統焚化處理比較，因不需要大量過剩空氣，使得處理廢氣之公害防制設備較為簡化且經濟。典型之熱解廢棄物流程如圖 4.31 所示。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.31、熱解廢棄物流程圖

1. 热解法特性

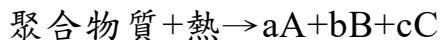
- (1) 殘渣量少，無重金屬溶出：熱分解殘渣在水中固化成粒狀，體積為廢棄物的 3%以下，且無重金屬溶出。

- (2) NOx 發生量少，廢氣量少：熱分解於還原狀態下進行，所需要的空氣量低於理論空氣量，所以 NOx 極少產生，廢氣量也很少。
- (3) 廢棄物可與塑膠、污泥等混合處理。
- (4) 爐體構造簡單，操作容易。
- (5) 可適應廢棄物質的變化，穩定操作。
- (6) 廢棄物中之能源，可做有效回收、利用。

2. 適用處理對象

- (1) 可燃性廢棄物。
- (2) 不適燃之可燃廢棄物（廢橡皮、塑膠、橡膠等）。
- (3) 可燃性事業廢棄物及污泥（污水、水肥、事業廢水處理等之污泥）。

廢棄物進行熱解時，長鏈之有機物於高溫下被分解：



式中

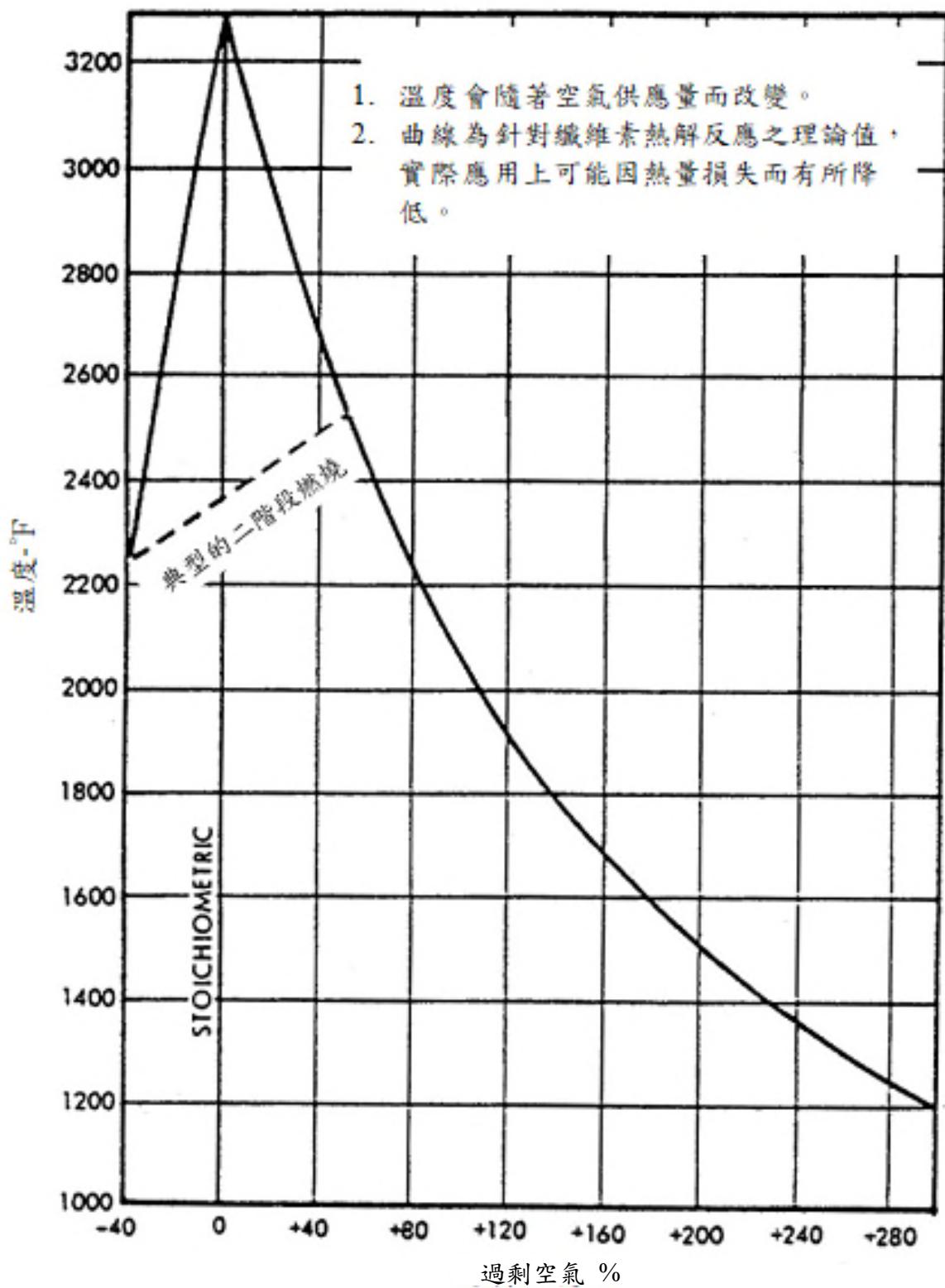
A：氣體，如 CO₂、CO、H₂、CH₄ 及飽和與未飽和烴

B：液體，如甲醇、乙醇、異丁醇、正戊醇、三級戊醇、醋酸、水

C：固體：各種固體殘渣，如碳及惰性物

在式中熱解時氣體、液體、固體之產生量 (a、b、c) 與下列因素有關：
廢棄物之化學構造、溫度、加熱速率及廢棄物之大小與形狀。

熱解系統 (Pyrolysis System) 嚴格說不屬於焚化爐，而是由缺氧或無氧
狀態下之熱分解過程 (Thermal Degradation)，溫度與過剩空氣之關係如圖
4.32。熱解法有 2 種技術，即：

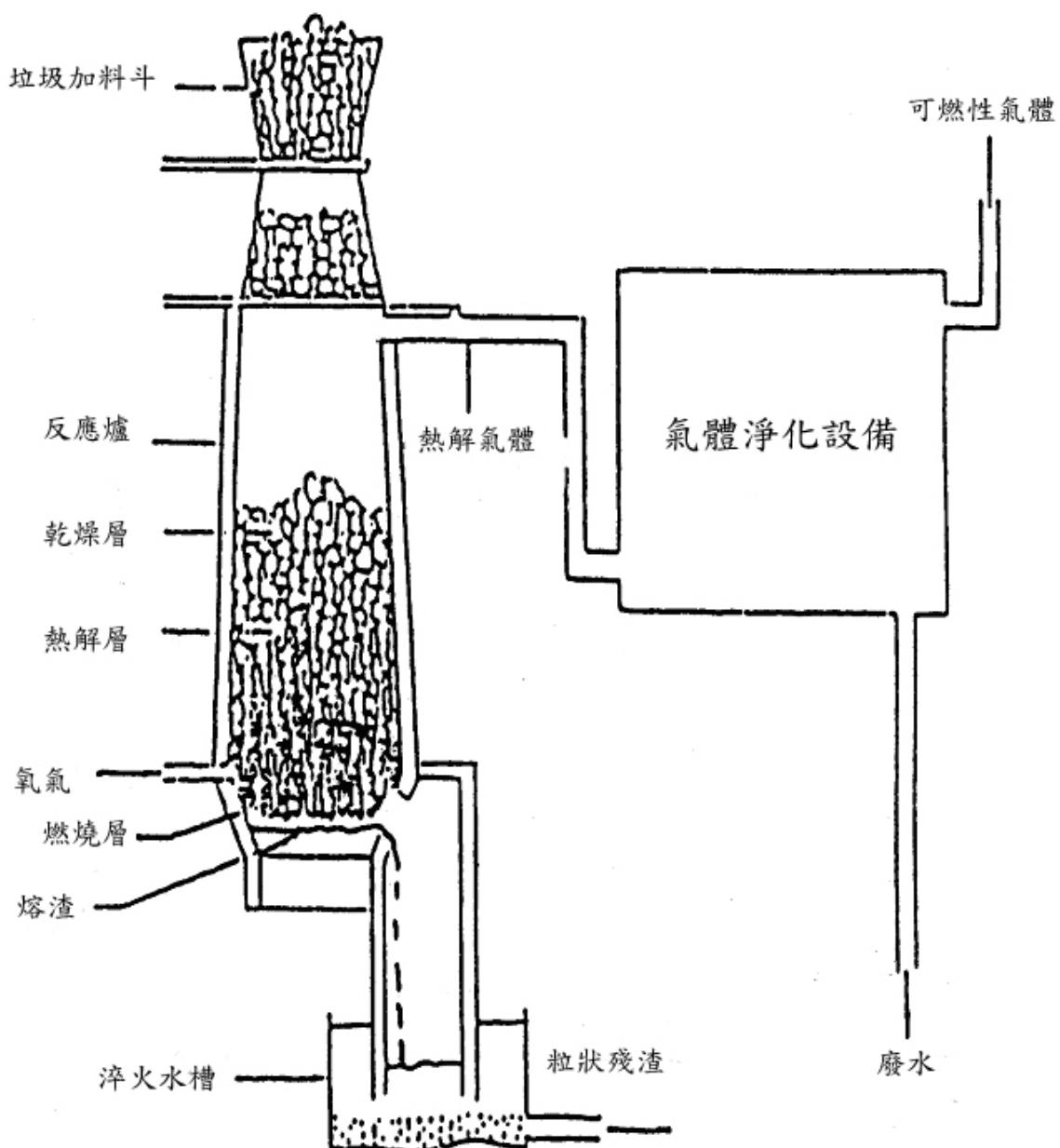


資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.32、溫度與過剩空氣之關係

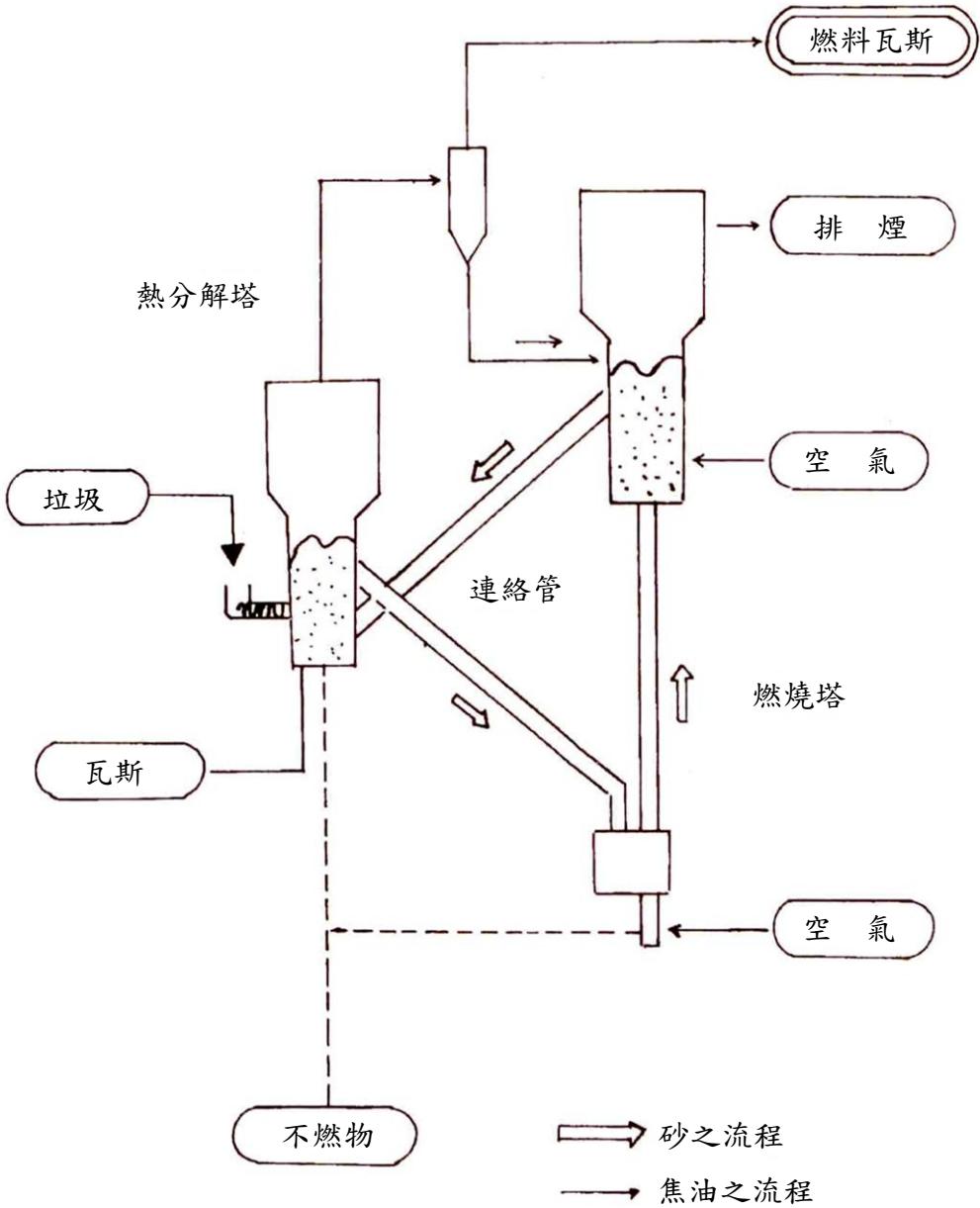
1. 不完全燃燒型：缺空氣下之燃燒。
2. 純熱解：無氧狀態過程產生中值之可燃氣。

熱分解法又可分為單塔式及雙塔式 2 種，將燃燒與分解同在一塔內進行者稱為單塔式如圖 4.33 所示，如分別於二塔內進行則稱為雙塔式如圖 4.34 所示。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.33、單塔式熱解法流程示意圖



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.34、雙塔式熱解法流體化床

單塔式系統概要如下：

1. 投入與貯留：廢棄物投入貯留坑後，再以抓斗送入投入口，內有供料設備，可將廢棄物均勻送入爐內。
2. 热分解瓦斯化：
 - (1) 乾燥層：利用下層（燃燒層）所產生的熱量乾燥上層廢棄物，而乾燥層有過濾下層（熱分解層）所發生之灰燼 (Dust) 之作用。

- (2) 热分解层：乾燥层的废弃物因自重向下移动，有机物在此层中将被热分解成 HC、CO、H₂。
- (3) 燃烧层：热分解后之不燃物与焦炭 (Char)，再向下移动。焦炭与由炉底供应之空气接触而燃烧，燃烧所产生之热，供给炉上层废弃物之干燥与热分解所须之热量。
- (4) 灰层：灰层为燃烧层完全燃烧后，从炉底之迴轉爐床和排灰裝置排至外部。

除以上基本功能外，热解资源回收处理设备应包含：

1. 原料储存系统：

一般为具有防止污染地面及地下水设施的混凝土铺面仓库或储存废油之密闭储槽，有机废弃物具有易燃的特性，故储存系统的消防设施需根据废弃物的种类而选定且必须符合消防法规。

2. 前处理系统

须将废弃物原料破碎成进料系统或裂解设备可接受之尺寸范围，若废油等液态废弃物最好能将水分去除以节省裂解时能源之消耗。前处理系统可提高裂解效率并减少设备当机的机会。

3. 进料系统

视批次或連續生產，最常見為螺旋式輸送料管或輸送帶，进料前一般会經過秤重以精確計算裂解處理能量。若为液体废弃物则採直接泵送方式进料並經過流量計以得知實際进料量。

4. 加热系统

因要維持裂解爐的設定裂解溫度，故需使用電氣加熱、熱煤油加熱或直接以燃料油燃燒加熱，加热系统經數位控制以達要求之升溫速率及溫度均匀性。

5. 裂解系統

各種裂解爐設計方式不盡相同，生產方式分為批次式及連續式，最常見為批次式加熱釜設計。工研院曾開發出一套旋轉窯式熱裂解設備，可連續式進料並適用各種不同性質之有機廢棄物。

6. 冷凝系統

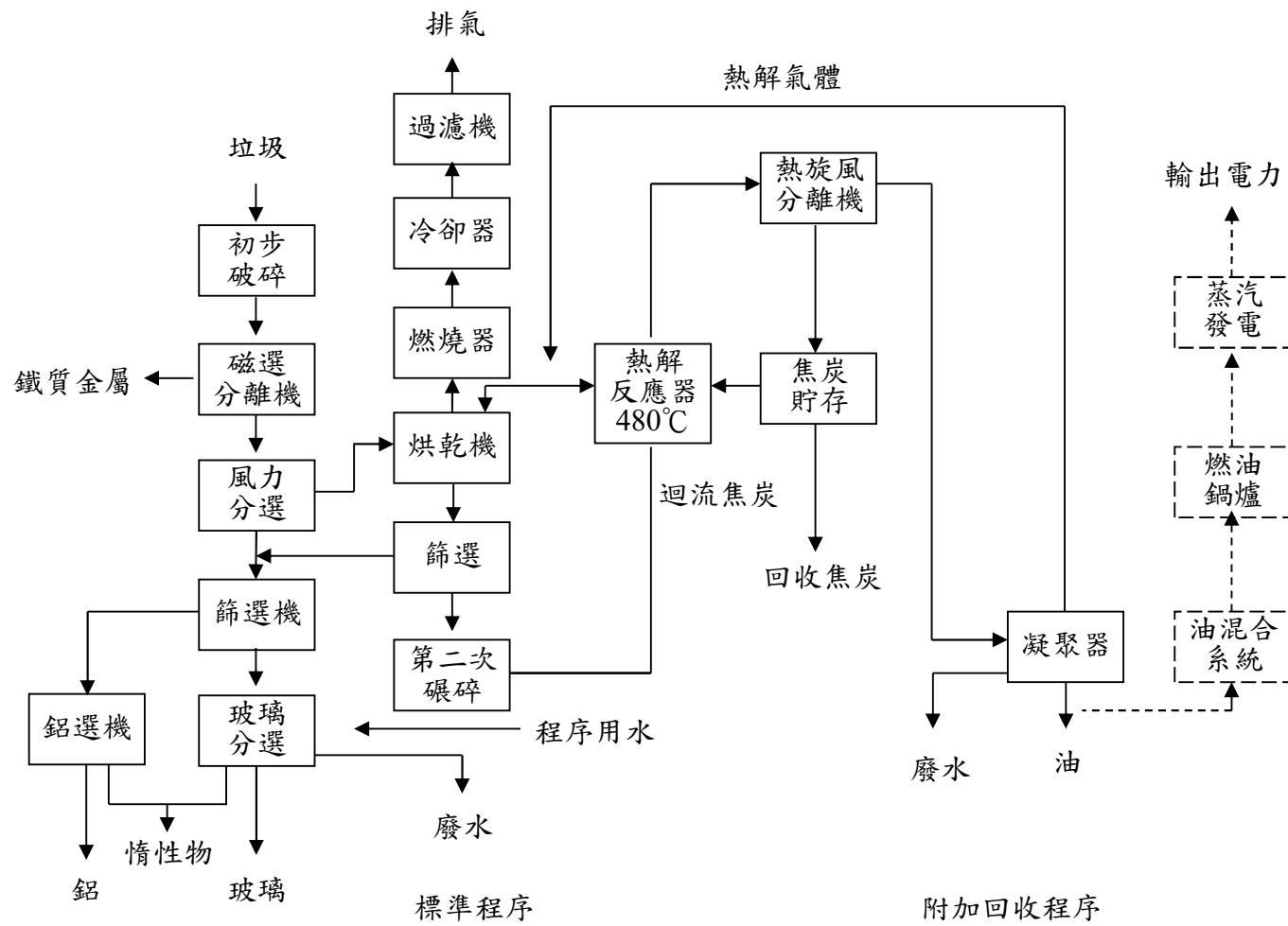
裂解產生之石油氣需經冷凝過程後得到輕質及重質燃油，冷凝及熱交換系統可採用機械強制空冷、水冷或用冰水提高冷凝效率。

7. 成品儲存系統

分別依副產品的特性予以妥善儲存，焦炭或碳黑因顆粒細微容易飛散需有粉塵捕捉裝置。輕質及重質燃油分別儲存於合乎工安、環保規範之密閉儲槽中。

有機物在高溫下較不穩定，在缺氧狀態下加熱，將產生裂解及凝聚反應 (Cracking and Condensation) 形成氣態、液態與固態產物，熱解（焦析）反應系統之流程如圖 4.35。廢棄物在高溫下熱解 (300°C 以上) 主要作用為 C—O 鍵之裂解，然在 200°C 以下主要為脫水作用，反應產物將因溫度及廢棄物性質不同而異，如表 4.6。

廢塑膠、橡膠、輪胎及電路板等塑化廢棄物經裂解後可以產生裂解石油氣、輕質燃油、重質燃油、焦炭及水分或鋼絲等再生及殘餘物質，其裂解後資源化物質組成分如表 4.7。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.35、廢棄物資源回收熱解反應系統流程

表 4.6、都市廢棄物熱解生成物

溫度 (°C)	廢棄物 ¹ (kg)	氣體 (kg)	木醋酸及焦油 ² (kg)	焦碳 (kg)	測得總重 (kg)
480	100	12.33	61.08	24.71	98.12
650	100	18.64	59.18	21.80	99.62
820	100	23.69	59.67	17.24	100.59
930	100	24.36	58.70	17.67	100.73

註：¹ 已去除金屬及玻璃

² 含 70-80%水

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

表 4.7、廢棄物熱解資源化後組成成分比例

	石油氣 (wt%)	輕質油 (wt%)	重質油 (wt%)	焦炭 (wt%)	其他 (wt%)
廢塑膠	15-25	25-35	40-50	5-10	0-5
廢橡膠	20-30	15-25	15-25	35-45	0-5
廢輪胎	15-20	10-20	10-20	30-40	15-25
電路板	10-20	15-25	15-25	20-30	20-30

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

熱解過程中所產生之副產品由不同管道回收，熱解石油氣可回收作為熱解爐加熱用熱源，若加熱爐使用電力或能源足夠導致石油氣過剩時須以燃燒塔將石油氣燃燒處理。輕質及重質燃油產生量依廢棄物類別而定，一般可達 30-80%。資源回收油可直接販售給鍋爐或汽電廠當燃料使用，惟部分重質燃油之硫含量較高必須先經脫硫程序方符合都會區燃料油硫含量(<0.5 wt%) 之標準。回收之資源油若再經過一套蒸餾回收系統則可得到高品質之汽、柴油，惟投資效益需進一步評估。廢輪胎及電路板之橡膠或樹脂經裂解碳化後之焦炭可以精製作為碳黑 (Carbon Black) 或活性碳 (Activated Carbon) 之原料，殘餘之鋼絲及銅箔可以售予金屬熔煉回收商。廢橡膠則因為組成分較複雜，熱解後之焦炭可取代煤炭作為鍋爐或汽電廠燃料。

(二) 溼式氧化法

溼式氧化法是一種持續在高壓下操作，並藉溫度之提高來促使水相中的溶解性或懸浮性有機物與溶氧反應分解的方法。完全氧化後的最終產物

是水蒸氣、氮氣、二氧化碳及灰分等安定物質。溼式氧化法亦可稱為「溼式燃燒」，故硫化物、氮化物、鹵化物皆截留於水相中而不會造成空氣污染，並且可回收熱能、占用空間不大、應用性廣大。

溼式氧化法於國外已有許多成功運轉的實例，僅美國 Zimpro 公司於 1985 年止，已在世界各地建造了 186 座溼式氧化法設備，而日本至 1989 年亦約有 80 座溼式氧化法在運轉中。表 4.8 列舉了 Zimpro 公司 1985 年止，於世界各地所裝設處理各種工業或都市廢水的溼式氧化法數量，可知溼式氧化法適用的廣泛性。

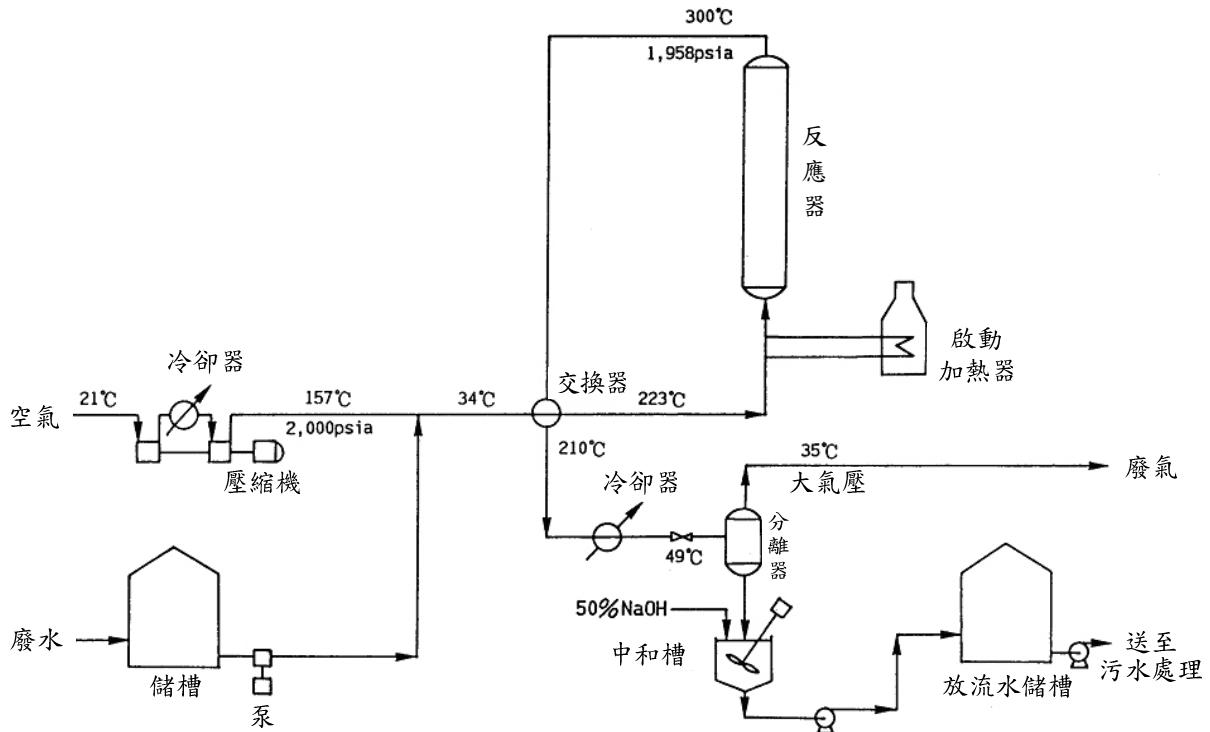
表 4.8、Zimpro 公司溼式氧化處理廢棄物種類

廢棄物型態	廠數	廢棄物型態	廠數
都市廢水處理廠污泥	109	有害廢棄物	2
水肥	29	紙廠污泥	1
活性碳再生	12	易爆炸 345-T 馬拉松	1
丙烯腈廢棄物	7	谷醯胺鈉	1
冶金焦炭	6	聚石橡膠廢棄物	1
石化廢棄物	6	紡織廠污泥	1
造紙填料	3	含鉻鞣皮革廢棄物	1
工業活性污泥	2	石油精煉廢棄物	1
紙漿廢液	2	其他工業污泥	1

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

1. 主要設備組成

圖 4.36 所示溼式氧化法之系統流程，其設備組成包括：高溫高壓反應槽、氣液分離槽、熱交換器、空氣壓縮機及廢液高壓泵等。欲氧化分解的廢水以高壓泵加壓打入熱交換器中預熱，使廢水的溫度提高到可自發反應的溫度再導入反應槽中，同時也以空氣壓縮機打入空氣或氧氣於高壓泵出口管與廢水混合，或直接打入反應槽中使用氧氣得以與有機物反應。在停留於反應槽期間，因溫度的提高、充足的氧氣與反應時間，有機物質或有害物質便被破壞而分解，達到處理目的，而反應後的液體一部分送到熱交換器以回收熱能，一部分到分離槽中使氣液分離，冷凝後之液體排放之。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.36、溼式氧化法流程

2. 溼式氧化理論

溼式氧化之典型理論，一般可由一階反應式表示：

$$\frac{dC}{dt} = -kC$$

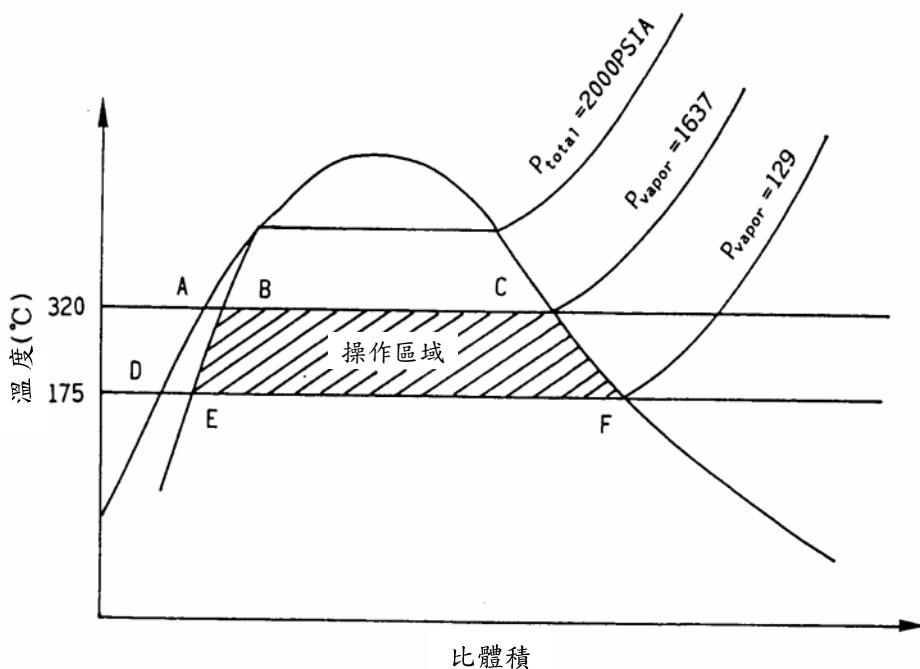
式中

C：可氧化之有機物濃度

t：反應時間

k：速率常數

如圖 4.37 所示為溼式氧化之溫度—體積相關圖，在 EBCF 範圍內係維持飽和狀態區域，其在總壓力 2,000 psi 時，溫度則在 175-320°C 之範圍間。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.37、溼式氧化技術操作區域

3. 操作條件

當溫度升高，空氣增加，則有機物氧化效果亦相對增加。氧化程度：

- (1) 150°C : 5-10% 氧化。
- (2) 320°C : 接近完全氧化。
- (3) 但溫度必須 < 374°C (水之臨界溫度)，以維持 H₂O 是液態。
- (4) 當氧化升高，壓力應增加 (避免水分蒸發)。

4. 優缺點

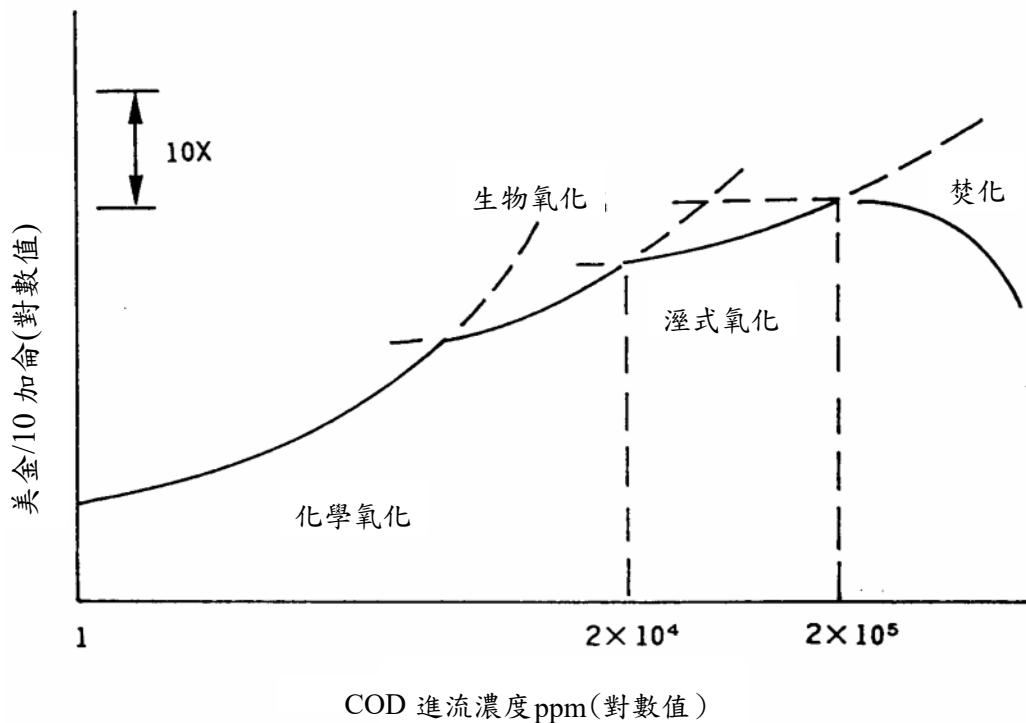
- (1) 優點：
 - A. 減少空氣污染 (無飛灰、二氧化硫、氮氧化物、金屬蒸氣和臭味形成)。
 - B. 能處理某些爆炸物質。
 - C. 能預測各程序之進行。

(2) 缺點：

- A. 需高投資費用（建築費材料，鋼/鎳材料）。
- B. 需有受高良好訓練之操作員（較高人事費用）。

5. 經濟適用性

溼式氧化法可處理難分解的廢液及對生物處理有毒性的廢液，如圖 4.38 所示，對於 COD 濃度於 20,000-200,000 mg/L 條件下，採用溼式氧化法屬經濟可行。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.38、不同濃度廢棄物之處理費用比較

6. 新溼式氧化技術

(1) 觸媒溼式氧化法

觸媒溼式氧化法是在連續攪拌的反應器中，以銅陽離子及硝酸和溴化物等陰離子在酸性溶液裡，用觸媒氧化有害有機物。與無觸媒溼式氧

化系統比較，觸媒系統用較低的反應溫度得到較高的氧化率和破壞效率。例如，一般溼式氧化法不能破壞頑強有毒的化合物（如多氯聯苯、戴奧辛）；但在適當的反應溫度、高觸媒濃度及長停留時間等情況下，這些化合物可被觸媒溼式氧化法破壞。硝基酚、氯酚、多氯聯苯、戴奧辛及三氯苯等化合物，在實際之實驗中，以反應溫度 165-250°C，反應壓力 175-900 psia 等之操作條件下可被觸媒氧化，破壞率大於 98%。此法之處理對象一般為含 1-5 wt% 之液體有機廢棄物或可用泵浦抽送的液體有機廢物，在前述反應溫度與壓力下，氣態物質之滯留時間約 0.5-200 分鐘，液（固）態則為 30-120 分鐘。添加觸媒可降低反應所需的溫度並增加氧化反應速率，同時可氧化高頑強抗性有機物。但是，添加觸媒會增加操作費，而且僅適合處理低濃度、高毒性之有機廢水。

(2) 超臨界液體氧化法

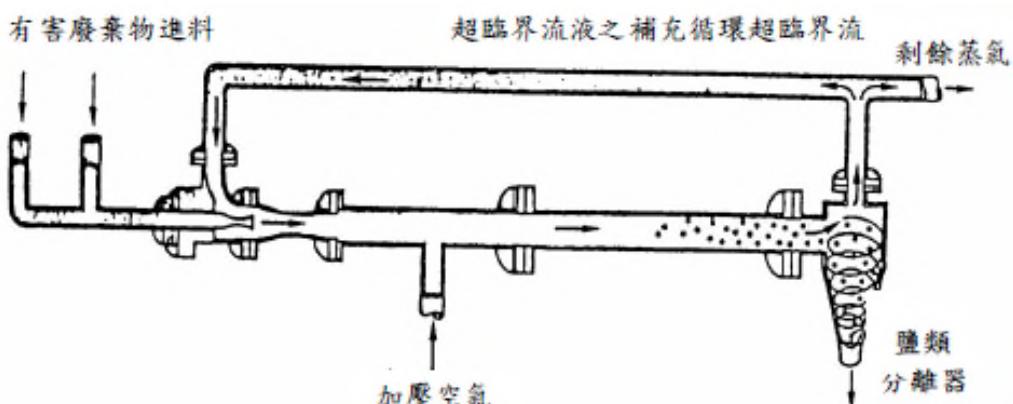
由於人類文明之進步及工業生產之迅速發展，常製造遠超過環境自身涵容及自淨能力之有害廢棄物，例如：含酚或是氯酚廢水、低放射性樹脂、印刷電路板、重金屬污泥、含鹵素、N、S 或重金屬之高分子材料、多環芳香碳氫化合物 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)、多氯聯苯 (Polychlorinated Biphenyls, PCBs)、有機農藥及毒性化學品等廢棄物。但此有害廢棄物焚化處理及空氣污染防治程序與設備，非常複雜而昂貴，且易造成二次污染。目前臺灣對此類有害物質之處理，採儲存處理方式，尚未有效予以處理。對其他未能納入管理的污染來源，更是無從追蹤與估計。又因此類有害物質數量過於龐大，且大多不具再利用價值。為此，研究開發更有效率、較無二次污染公害之處理及資源回收技術，是刻不容緩的任務與責任。

水為自然界中最重要的溶劑，許多化合物進行反應需水參與反應或作為介質。近年來，有許多研究是利用溫度或壓力控制，改變水的各種物化性質，例如黏滯性 (Viscosity)、密度、溶解度及介電係數 (Dielectric Constant) 等，特別是在超臨界狀態下，水具有類似氣體的擴散性及液體的溶解性之雙重性質。此特性除了可利用於較複雜有害化合物之萃取

分離外，也可作為化學物質氧化分解之介質，尤其是應用於有害廢棄物處理，更具污染防治之效用。由於超臨界溼式氧化 (Supercritical Water Oxidation, SCWO) 處理技術具有效氧化反應特性，較傳統式焚化處理法，更具有接觸反應時間短、破壞去除效率 (Destruction Removal Efficiency, DRE) 高、能量損耗低、無機鹽類在 SCWO 反應條件下易沉澱利於分離回收及空氣污染物排放量低等實質優點。故發展 SCWO 及無機鹽類分離回收技術，在實際有害廢棄物處理工程應用上具有相當的潛力。

這些有害廢棄物中，以高分子廢材最為普遍，通常採用焚燒處理。而高分子材料常加入添加劑如可塑劑（含 PCBs）、熱穩定劑（含 Fe、Pb、Cr、Ba、Cd 等）、抑燃劑（含 Sb、Br、Al 等）、著色劑（含 Cr、Cd、Pb、Zn 等各種有害重金屬元素）、熟化劑（含 N、S、Co、Pb、Mn）等。故處理過程中易產生含鹵素、N、S 或重金屬之毒性及腐蝕性化合物，造成系統設備腐蝕及空氣污染。含氯酚之廢水或高濃度廢液，因具較高毒性，不易使用生物處理法去除，而增加處理成本。PCBs 具備結構相當穩定、揮發性低、不易燃、含熱能力高、導電性差及高介電係數等性質，在工業上用途相當普遍，以電容器及變壓器應用最為廣泛，亦是棘手的環保難題。污泥亦是各工業易產生之廢棄物，其中常含高濃度有毒重金屬及有機化合物，使得處理過程中需增加很多設備及成本，而處理後之掩埋問題亦不易解決。廢印刷電路板為環境部明列之有害事業廢棄物，其基本材料通常是片狀強化塑膠層 (Reinforced Plastic Laminate)、板層 (PC Board Laminates)、包括隔熱基座 (Insulating Base) 以及 1 或 2 層之銅箔 (Copper Foils)。印刷電路板亦包括邏輯電路及零件，且含有機物質（酚類或環氧樹脂）及不定形無機物（例如：溴、電子元件、銅箔和貴重金屬 Ag、Au、Pd、Pt 及 Rh 等），屬難處理之固體廢棄物，但其中環氧樹脂之溴在 SCWO 反應中形成較無害之溴鹽而重金屬可分離回收。粉末狀低放射性污染如 Powdex 樹脂，因無法再生重複使用，且含高水分及硫量，亦屬難處理之有害固體廢棄物。

本處理系統是在水的臨界溫度與壓力上（ 374°C 及 218 atm ）操作。在此狀態下，液體廢棄物中的有機物和溶解氣體與水完全混合，其氧化率當然較低臨界氧化系統高。進流液體通常預熱至 400°C 左右，並加壓至 250 atm ，反應的熱能可將反應器溫度提高至 $600-650^{\circ}\text{C}$ ，流體於反應器滯留時間約 10 秒。碳氫化合物迅速被氧化成 CO_2 及 H_2O ，破壞率高達 99.999%，雜環分子被氧化成酸，可加鹼形成鹽類後去除。超臨界流體氧化系統如圖 4.39 所示。其中毒性/有害廢棄物及補充水經加壓自動進入處理系統，同時利用迴流之超臨界流體補充進料廢棄物，熱能使之至初反應溫度並調整進料濃度至 2-5%；另再添加高壓空氣後，進入反應槽予以快速氧化有機物質。處理後經過分離器，將鹽類物質與超臨界流體（蒸氣）予以分離，分離後有部分超臨界流體迴流再利用，另一部分排出。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.39、超臨界流體氧化系統

超臨界流體氧化法較優於溼式氧化法的因素如下：

- A. 增強氧氣及空氣在水中的溶解度，減少兩相流。
- B. 較快的氧化速度，可減少所需的停留時間。
- C. 可完全氧化有機物，而且可免去廢氣處理程序。
- D. 可回收高溫廢熱。

超臨界流體氧化系統設計時，應考慮重點包括如下：

- A. 材料結構：採用高鎳合金材料，具較佳的耐腐蝕特性，同時應考慮在高溫條件具適當的張力強度。
- B. 反應槽設計：通常設計之反應槽操作溫度為 400-650°C，若溫度低於 400°C，則需增加氧化反應滯留時間，因此，會影響反應槽尺寸大小。另外，若溫度高（大於 650°C）時，應注意材料承受壓力強度的限制。
- C. 热交換器設計：排出的高溫流體與欲吸收熱量之冷流體溫差較大時，可獲取較小之熱傳面積。同時，亦需注意廢液中所含鹽類之種類及濃度，對設備的影響。
- D. 氧化劑：以純氧或空氣應用於超臨界流體氧化系統，應分別就其經濟效率考慮其適用性。

有關超臨界及次臨界 (Supercritical and Subcritical) 流體氧化法之設計準則之比較如表 4.9 所示。其主要差異為，超臨界流體所需反應時間較短，因此所需之反應區域較短。另外超臨界流體之槽內流速較高，因此其水體動力考慮更甚於氧化機制。

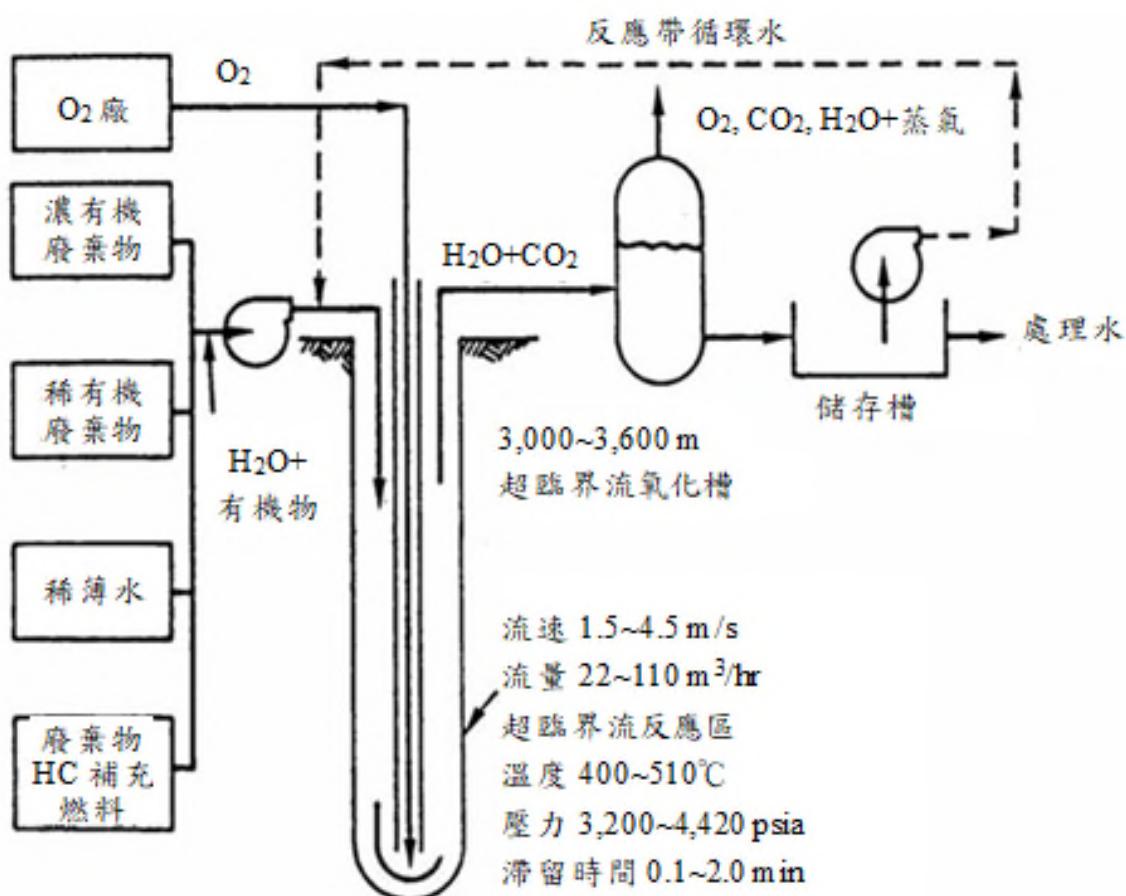
表 4.9、超臨界及次臨界流體深井氧化法設計準則之比較

參數	次臨界流	超臨界流
井深 (m)	1,200-1,700	2,400-3,058
溫度 (°C)	260-320	400-510
壓力 (psia)	1,500-2,300	3,200-4,500
滯留時間 (分)	30-40	0.1-2.0
COD 去除 (%)	80-85	100
氧化劑	氧氣	氧氣
注入點	低於 1/2 位置	低於 1/2 位置
流速 (m/s)	1.2-2.7	1.5-4.6
適用性	污泥、有機廢棄物及一些有害廢棄物	一切有機及有害廢棄物
DRE (%)	80-99.9	99.99+

資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

(3) 高溫深井溼式氧化法

如圖 4.40 所示，反應器包括兩支垂直深埋地下的同心管，其深度需使管內有足夠的水頭壓力，以保持管底壓力超過水的臨界點。廢液由內管打入，處理後的液體由兩管間流出；靠近反應器底部有電熱器，可供熱起動。起動溫度達 230°C 時，將廢水壓進內管，空氣在反應器入口用引入機導入液體中；此放熱反應將溫度提高至 400°C 以上，此時反應加速，可被氧化的廢棄物在數秒內被破壞。



資料來源：廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年

圖 4.40、高溫深井溼式氧化法

(三) 氣化法

氣化法 (Gasification) 是一種把煤炭、石油、生質物等含碳的原料，在控制氧氣量及高溫 (700°C 以上) 的條件下與水蒸氣進行反應，以轉換成一

氧化碳和氫氣的程序。氣化後的一氧化碳和氫氣混合產氣稱為合成氣 (Synthesis Gas 或 Syngas)，本身是一種燃料。氣化技術是一種具有多重效果的方法，可應用在許多不同類型的有機材料以取得能量。此外，氣化法是一種潔淨的技術，可以應用在廢棄物的處理上。氣化法的優點主要在於製造出比原始進料能源效率高的合成氣上，燃料中的化學能可以藉由氣化技術抽取而濃縮。另外，合成氣也可以用在內燃機中的直接燃燒、甲醇和氫氣的生產，或透過 Fischer-Tropsch Process 製成合成燃料或其他有機物質。氣化的原料可以是本來沒有多少用途的物質，例如農、林廢棄物或都市垃圾等有機廢棄物。

在氣化爐裡，含碳物質會經歷若干不同的反應及作用，以得到一氧化碳和氫氣的能源氣體。氣化法所包含的主要化學反應有下列 4 個階段：

1. 热解反應

當含碳廢棄物溫度夠高，會釋放出揮發物產生焦炭，就固相而言可造成約 70% 的重量損失。該作用與含碳材料的性質有關，更是決定後續接受氣化反應的焦炭結構與組成。

2. 燃燒反應

在燃燒反應中，揮發物及焦炭等與氧氣反應，形成二氧化碳和一氧化碳。這個氧化作用也提供了氣化反應所需要的熱能。

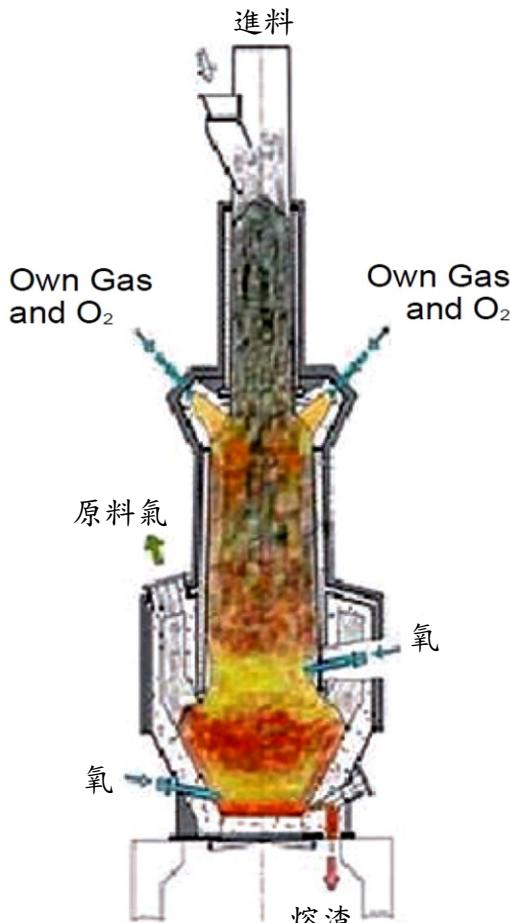
3. 焦炭重組反應

在氣化反應的第三階段裡，剩餘的焦炭與二氧化碳、水蒸氣反應，進而產生一氧化碳和氫氣。

4. 產物再反應

最後，在氣化爐高溫下，可逆的氣相水煤氣轉移反應 (Water-Gas Shift Reaction) 很快地達到平衡狀態，使得一氧化碳、水蒸氣、二氧化碳、氫氣等的濃度達到平衡。

典型的商業化氣化爐如圖 4.41 所示。目前已商業化的氣化爐主要有逆流式固定床、順流式固定床與流體化床式氣化爐等。



資料來源：呂錫民，氣化技術

圖 4.41、典型的商業化氣化爐

1. 逆流式固定床（上抽式）氣化爐

包含一煤炭或含碳生質物燃料的固定床。水蒸氣、氧氣、空氣等氣化媒介，以逆流方式流過固定床，灰燼則以乾式或熔渣形式移除。為了讓氣化爐溫度高於灰燼的熔點，需較高的水蒸氣對碳和氧氣對碳的比率。這種氣化爐的基本要求在於燃料必須具有高機械強度，且不結塊，以便形成「可穿透床」。雖然最近開發的氣化爐其操作條件，不再如此嚴苛，但該類型氣化爐的生產量（率）仍然相當低。此外，由於氣體排放溫度相當低，導致氣化爐熱效率非常高。表示在特定操作溫度下，焦油和甲烷的生產會特別

顯著。為此，在原料進入反應器處，所產出的氣體必須特別清理。

2. 順流式固定床（下抽式）氣化爐

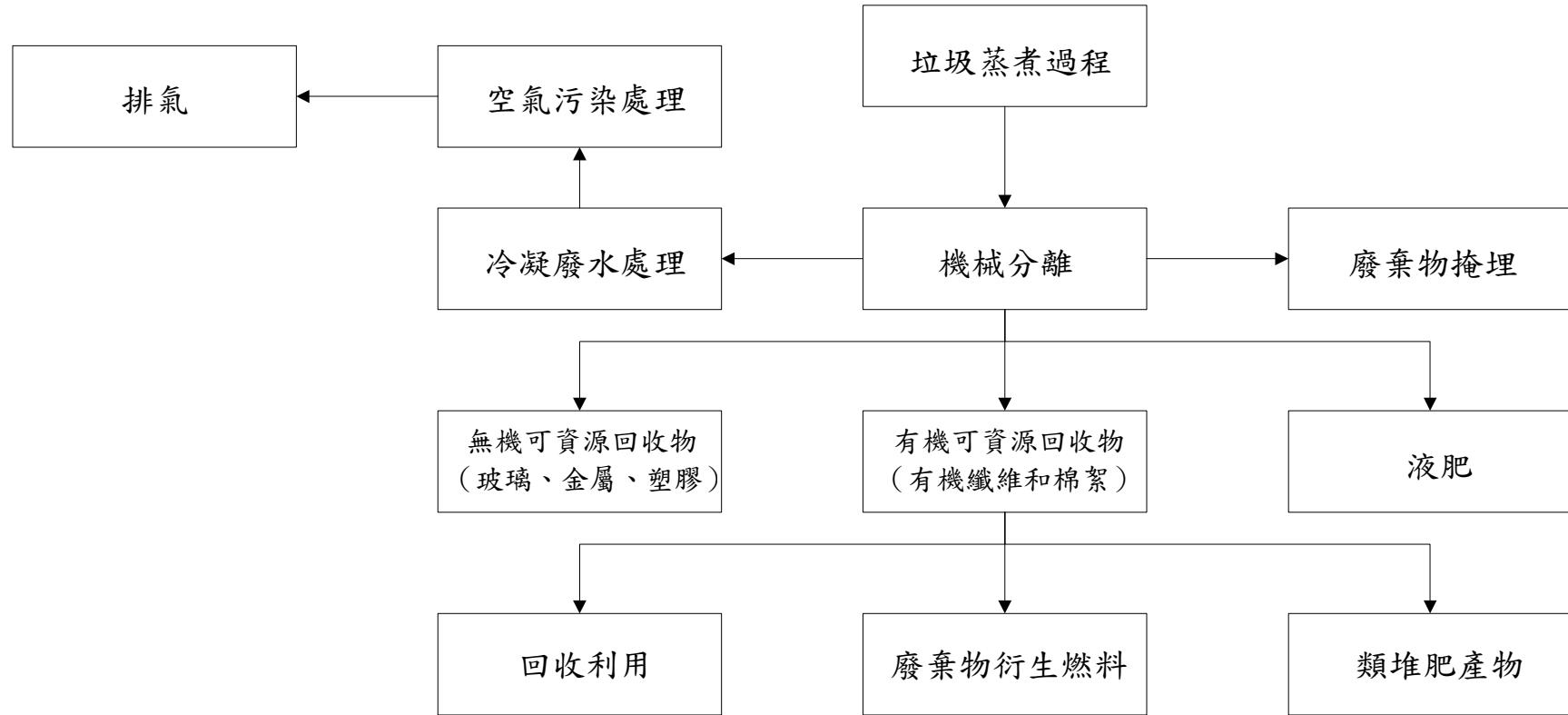
結構類似逆流式固定床的氣化爐，由於氣化媒介的氣體與燃料同方向流動（一起向下流動），因此命名為下抽式氣化爐。須藉少量燃料燃燒，或以外部熱源加熱床上部，所產生的高溫氣體離開氣化爐後，再把其中大部分熱能由床上方加入氣化媒介中。它的能源效率與逆向式氣化爐差不多在同一個水準。因為在順流的方式裡，所有的焦油必須通過熱焦炭床，因此焦油的生成量比逆流式低很多。

3. 流體化床式氣化爐

進料在氧氣、水蒸氣或空氣中被流體化，灰燼則以乾式或以無法被流體化的團塊方式移除。乾式灰燼氣化爐的溫度相當低，因此燃料必須具有高反應性，尤其是劣等煤特別地適合。氣體燃料的產量高於固定床式，但低於引流式氣化爐。由於含碳材料的淘析作用，氣化效率相當低。如果採取固體再循環或以隨後再燃燒的方式，則可以增加轉換率。流體化床式氣化爐特別適用在會形成腐蝕性灰燼的燃料上，因為腐蝕性灰燼若附著於爐體，將會傷害成渣氣化爐的爐壁。一般而言，生質燃料通常含有較高量的腐蝕性灰燼，因此適合用流體化床式氣化爐來處理。

（四）蒸煮法

廢棄物蒸煮分選技術屬於機械熱處理方法中的一種。其處理可運用常壓或高壓系統進行操作處理，其處理流程如圖 4.42 所示。廢棄物蒸煮處理程序具有除臭、消毒、滅菌、減少體積及易於再進行焙燒處理等效果，並對於後續之再分類具有便利性。金屬類與砂石類可在蒸煮之後採用磁選與密度分選等方式分離。廢棄物中之塑膠因受熱軟化蜷縮成粒，密度提高可以與含纖維素之生質物分離。含纖維素之生質物（含有機纖維和棉絮）在受熱之後會發生部分分解反應，形成膨鬆粉狀物質，有利於製作再生燃料時之造粒。所得含纖維素之生質物，也可與農林業資材進行焙燒來產製生質炭。



資料來源：張家驥等，新一代垃圾資源永續管理方案芻議與評析

圖 4.42、廢棄物蒸煮處理流程圖

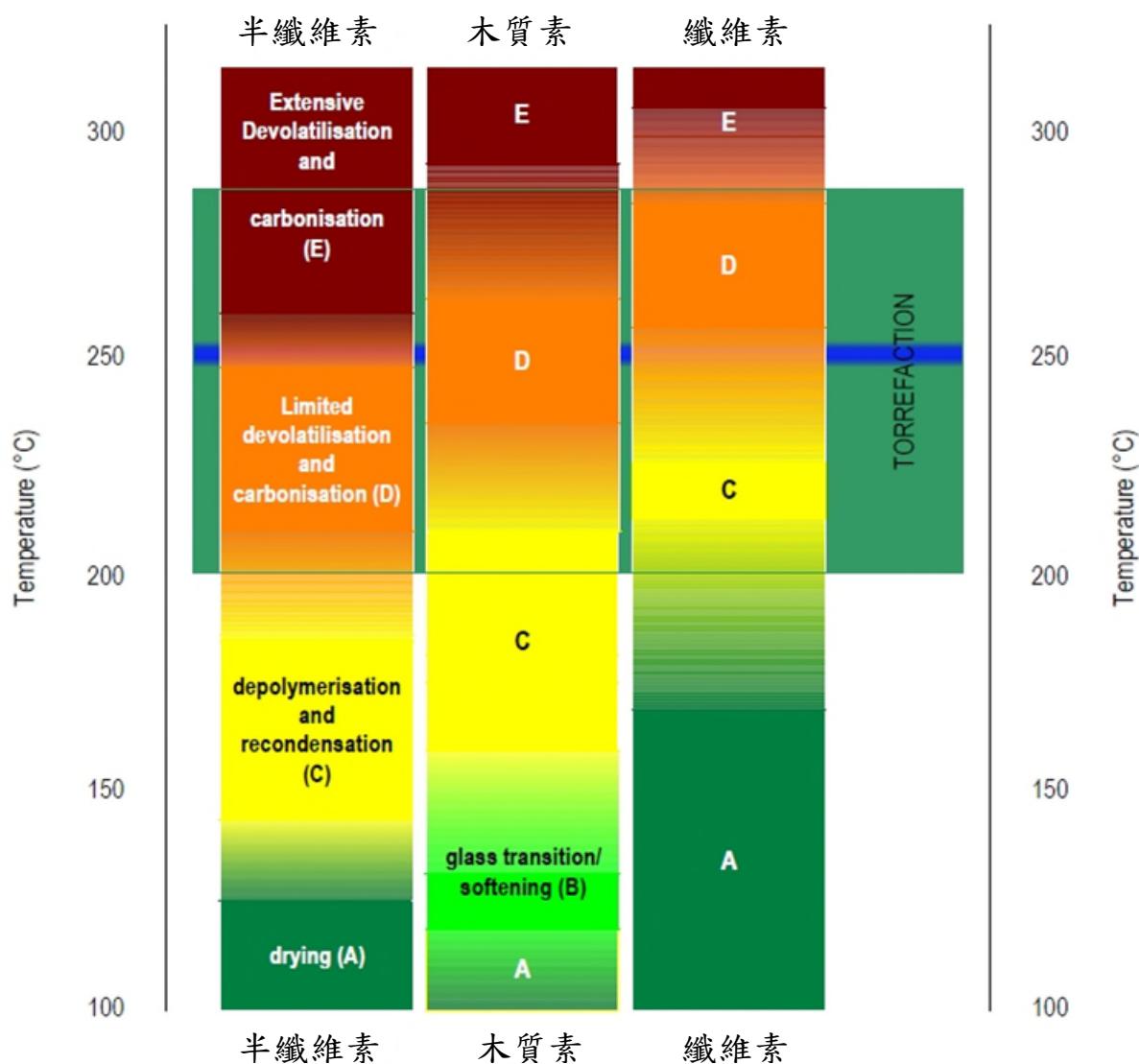
蒸煮法之優點如下：

1. 可脫臭及殺菌。
2. 使金屬或玻璃包裝容器上之其他物質脫落分離，達清潔之效果，有助於選別回收。
3. 可使塑膠類廢棄物軟化蜷縮成粒，有效減少廢棄物體積。
4. 可使纖維與其他廢棄物易於分開，方便後續進行纖維之分離。

文獻曾針對在約 152°C 過熱蒸汽於 5 Bar 下，對生活垃圾進行蒸煮試驗。結果顯示經蒸煮處理之物體其體積及重量皆明顯變小，其中體積最多可減少 50-90%。廚餘類經過蒸煮後可以達到改善味道及殺菌的效果。而生活垃圾經過蒸煮處理後，也可更容易從中篩分出資源物質。機械熱處理程序雖有上述多項優點，但仍有廢水、廢氣及噪音等問題須注意。此外其經濟效益、二氧化碳收支與能耗分析，其廢氣特性及液體產物（蒸煮液）特性還須進一步分析評估。

（五）焙燒法

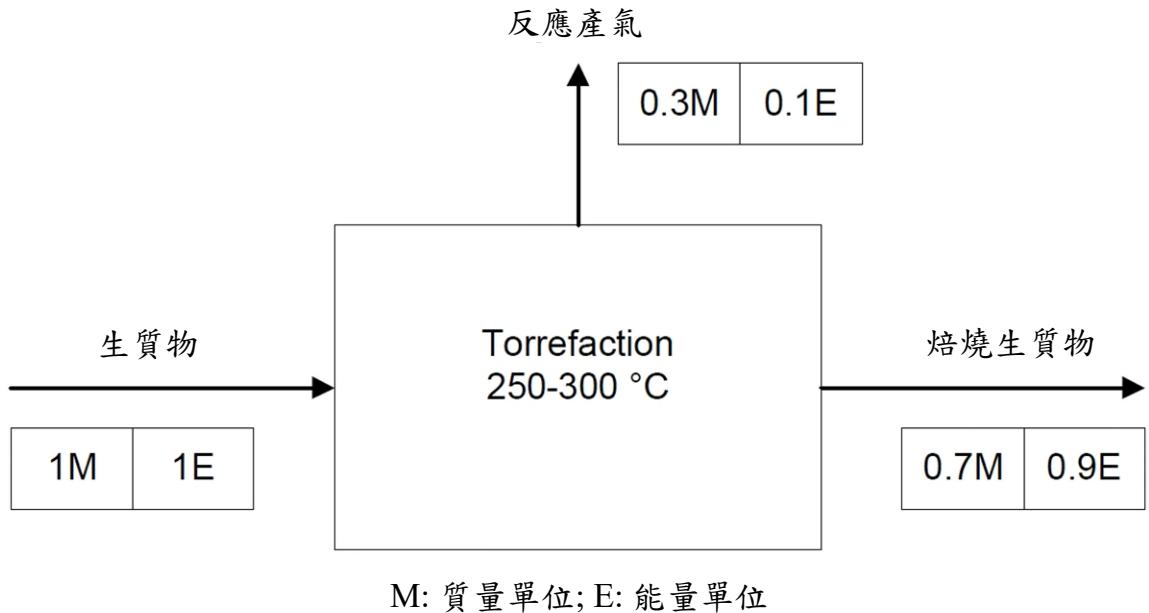
焙燒法 (Torrefaction) 於常壓、缺氧環境下操作進行之熱處理程序，其反應溫度較熱裂解及氣化程序為低，僅須 200-300°C。所得到的產物為固態焙燒物（生質炭）、液體產物（焦油及有機揮發物）及合成氣，生質炭是此製程之主要產物，其反應類似於熱解系統。焙燒主要作用機制為將半纖維素與部分木質素分解和液化。樹膠質為主之半纖維素會在 250-280°C 時分解。木質素則在 200°C 以上之溫度開始緩慢分解，如圖 4.43 所示。典型的焙燒反應質量與能量平衡茲如圖 4.44 所示，可知 1 質量單位 (M) 與 1 能量單位 (E) 的生質物，經焙燒反應後可生成 0.7 質量單位與 0.9 能量單位的生質炭與 0.3 質量單位與 0.1 能量單位的產氣。因此相較於原始生質物，生質炭的能源密集化 (Energy Densification) 程度可達 1.3 ($=0.9/0.7$)。



Drying: 乾燥; Glass Transition: 玻璃轉化; Softening: 軟化; Depolymerisation: 去聚合化; Recondenstaion: 再凝結; Devolatilisation: 去揮發性; Carbonisation: 碳化

資料來源：Bergman *et al.*, Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations

圖 4.43、焙燒溫度與生質物反應之關係



資料來源：Bergman et al., Torrefaction for Biomass Co-firing in Existing Coal-fired Power Stations

圖 4.44、焙燒反應質量與能量平衡圖

目前焙燒多用於林業廢棄物處理，不同於熱裂解系統，焙燒產品主要為固體相，獲得其焦炭殘餘物 (Char Residue)。此固體產物稱為焙燒木屑 (Torrefied Wood) 或焙燒生質物 (Torrefied Biomass)，其熱值較高。焙燒產物之組成以生質炭所占比例最大，其餘重要反應產物有 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 CH_3COOH 及 CH_3OH 等。與原料生質物燃燒相比較，生質炭的燃燒效率可有效提升。焙燒所得之所有非固體產物皆有較高含氧量。因此焙燒生質物中之氧/碳比例遠低於原料生質物，故焙燒所得之固體生質物的熱值較高。焙燒適用於生質廢棄物轉製為垃圾衍生燃料之前處理程序。將生活垃圾直接進行焙燒效果較差，若欲提升成效，須搭配蒸煮前處理。

伍、結語

本文主要針對一般及有害事業廢棄物之熱處理技術，可提供研習者學習一般及有害事業廢棄物之相關處理技術知識及處理概念。本文介紹了一般及有害事業廢棄物熱處理之相關法規與前處理技術，焚化法、熱解法、溼式氧化法、氣化法、蒸煮法、焙燒法、熔融法、燒結法、電漿熱解法及熔煉法等熱分解與轉化技術。倘若研習者能再研讀廢棄物處理之其他相關教材，包括有前處理、生物處理與最終處置技術等，相信對於一般及有害事業廢棄物之處理可有更完整而深入的瞭解。

參考資料

1. 國家環境研究院，廢棄物清理專業技術人員訓練教材，中華民國 101 年。
2. 謝錦松、黃正義，固體廢棄物處理，淑馨出版社，第 6 版，中華民國 92 年。
3. 章裕民，廢棄物處理，中華民國 89 年，文京出版社。
4. 鄧瑞琴、黃瑣玲、蔡啟明，有害污泥中間處理技術，工研院環安中心報告，中華民國 94 年。
5. 何春松，灰渣熔融技術之發展，國立臺灣大學「臺大工程」學刊 第 84 期，中華民國 91 年 2 月。
6. 環境部，有害事業廢棄物清理管制計畫-管制中心第二年，中華民國 87 年 6 月。
7. 蘇宗粲，國內推動廢塑膠資源化之現況，工業污染防治第 59 期，中華民國 85 年。
8. 楊義榮，化垃圾為能源垃圾衍生燃料 (RDF) 之製造及應用，工業污染防治第 21 期，中華民國 76 年。
9. 古清燻、金順志、周窈朱，事業廢棄物碳化資源化處理技術發展與應用，工業污染防治第 78 期，中華民國 90 年。
10. 曹申，提煉冶金技術與電爐集塵灰，工研院材料所 (www.e-safety.com.tw/1_main/103_learning/1037_news/ENS57/pdf/A2.pdf)。
11. Calvin R. Brunner, P.E., Incineration Systems-selection and Design, Van Nostrand Reinhold Company, 1984。
12. 張一岑，有害廢棄物焚化技術，聯經出版事業公司，中華民國 80 年。
13. 章裕民，焚化處理技術，文京圖書有限公司，中華民國 82 年。
14. 朱正先，氣泡式流體化床焚化爐之構造及焚化污泥之操作技術，工業污染防治，第 53 期，中華民國 84 年。

15. 黃文輝、蔡振球，溼式氧化法處理技術之應用，工業污染防治，第 40 期，中華民國 80 年。
16. 林錦松，2-氯酚之催化性超臨界溼式氧化之研究，博士論文，國立成功大學環境工程學系，中華民國 88 年。
17. Technical Documents of Deepwell Wet Oxidation Process, U.S. OXIDYNE INC., 1986。
18. Technical Documents of Shirco Infrared Hazardous Waste Thermal Processing System, U.S. Shirco Infrared System Inc.1986。
19. 江康鈺、張木彬、王鯤生，含戴奧辛廢棄物焚化處理技術之回顧與評析，工業污染防治，第 54 期，中華民國 84 年。
20. 呂錫民，氣化技術，科學發展，第 435 期，中華民國 98 年。
21. 張家驥、洪臧燮、何瓊芳、謝哲隆、李元陞、陳奕宏、洪文宗、張慶源，新一代垃圾資源永續管理方案芻議與評析，永續產業發展雙月刊，第 48 期，中華民國 99 年。
22. 郭春寶，都市生活垃圾蒸煮處理，國立中正大學機械工程學系研究報告，中華民國 98 年。
23. Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R., Kiel, J.H.A., 2005. Torrefaction for Biomass Co-firing in Existing Coal-fired Power Stations. ECN Report, ECN-C-05-013.
24. 鄭智和，廢印刷電路板及邊料資源化技術，經濟部工業局永續發展組環保產業專欄，第 16 期，中華民國 91 年。
25. 洪玠育，含銅污泥火法熔煉回收再利用簡介，財團法人臺灣綠色生產力基金會通訊，第 7 期，中華民國 96 年。
26. 張添晉，事業廢棄物減量與循環再利用，財團法人中技社，中華民國 95 年。