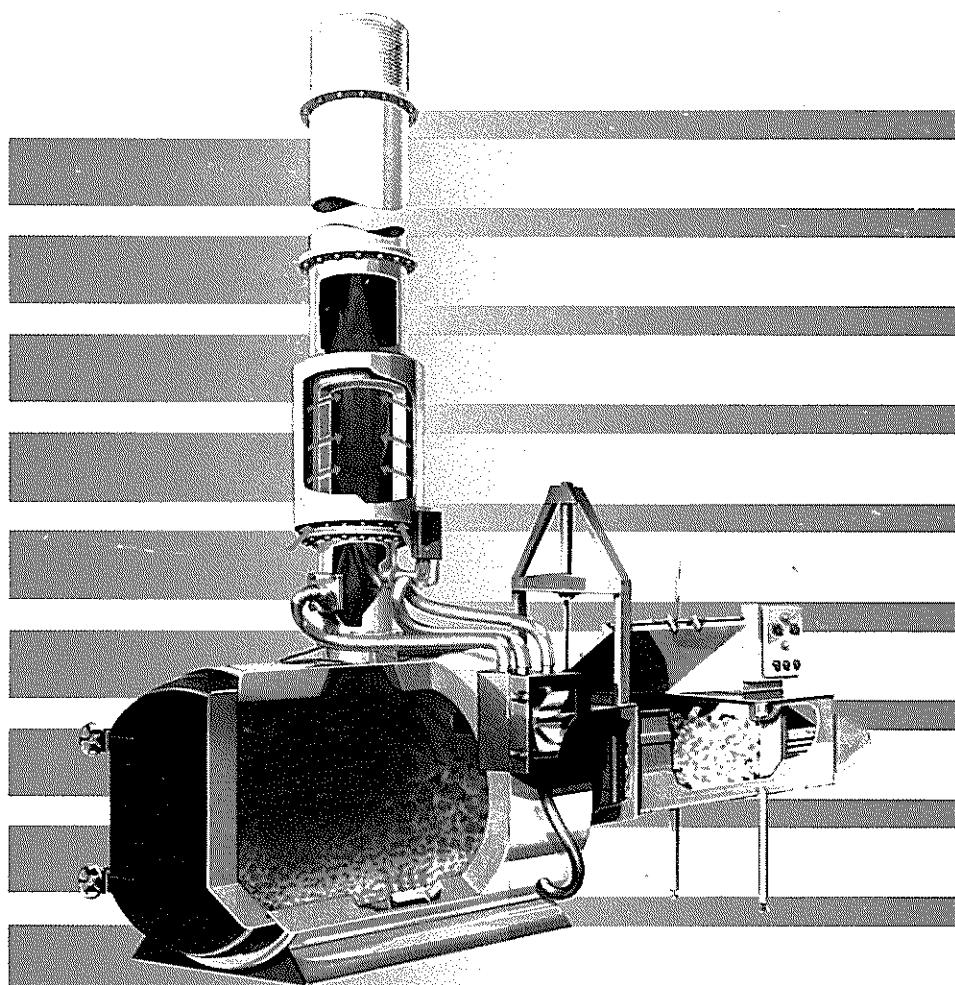


# 模具式焚化爐 操作維護手冊



# 序

環境保護與經濟發展兼籌並顧是政府當前的政策，也是全民追求的目標，服務團成立的宗旨即是為輔導國內工廠推行污染防治工作並提供技術諮詢。在輔導工作期間，本團深覺工業污染防治範疇內之技術資料相當缺乏，無法滿足工業界從事污染防治實務人員的需求；有鑑於此，自民國75年開始，本團即著手將各類處理技術分門別類，延聘國內知名專家學者配合本團工程師彙整之技術資料，編撰工業污染防治技術手冊，編印後免費提供相關業者參考，至今已完成30餘冊，深受業者歡迎，咸認為是極佳的參考資料。

目前國內許多工廠都已設置焚化系統處理其廢棄物，但這些使用中之小型焚化爐，常因操作不當導致燃燒不完全，影響空氣品質，或因維護不當致焚化爐相關機械設備材料極易損壞，而縮短焚化爐的使用壽命。因此本團於82年度成立專案小組，全力輔導小型事業廢棄物焚化爐之使用業者，做好焚化爐之操作維護工作，並廣泛地收集焚化爐設計、操作、維護與污染防治等相關資料，予以整理並編印成冊，其於內容上偏重實務，希望藉此提供各工廠對小型焚化爐之基本認識，且能做為購置焚化爐或現場操作維護之參考，以提昇國內小型焚化爐使用業者之操作維護能力。

感謝參與本書編寫的國立台北工專資源材料科王文生教授、中鼎公司余永成先生、及本團余騰耀、吳明政等諸位工程師之協助，從事資料蒐集、整理與撰寫，並承蒙逢甲大學環境科學系朱正先教授校核、修正，使本手冊得以順利出版，嘉惠各界，實務資料彙整不易，內容如有疏漏之處，尚祈不吝指正為荷。

工業污染防治技術服務團

楊勇發

中華民國八十二年十月



# 目 錄

	頁 次
第一章 前 言 .....	1
第二章 廢棄物特性分析 .....	3
2.1 焚化特性分析項目 .....	3
2.2 廢棄物分析方法 .....	3
2.2.1 物理性質 .....	3
2.2.2 化學組成分析 .....	6
2.2.3 元素分析 .....	10
2.2.4 廢棄物之熱值 .....	11
2.2.5 灰渣金屬成份分析 .....	13
2.2.6 灼燒減量 .....	13
2.2.7 毒性特性溶出試驗 .....	13
2.2.8 廢棄物分析資料表 .....	13
第三章 焚化爐之基本設計原理 .....	19
3.1 焚化爐之系統簡介 .....	19
3.2 燃燒原理與特性 .....	24
3.2.1 廢棄物之燃燒特性 .....	26
3.2.2 廢棄物焚化爐之燃燒方式 .....	29
3.2.3 焚化廢氣污染物形成機構 .....	31
3.3 焚化爐質能平衡計算 .....	37
3.3.1 焚化爐系統規劃程序 .....	37
3.3.2 質量平衡計算 .....	37
3.3.3 能量平衡計算 .....	44
3.3.4 廢氣停留時間 .....	53
3.3.5 燃燒室熱負荷 .....	54

	頁 次
<b>第四章 焚化爐附屬設備設計與選擇.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1 進料系統 .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.1 液態進料系統 .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.2 漿狀物與污泥進料系統 .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2 燃燒機 .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.1 油燃燒機 .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.2 瓦斯燃燒器 .....</b>	<b>82</b>
<b>4.3 送風機 .....</b>	<b>85</b>
<b>4.3.1 送風機之設計 .....</b>	<b>85</b>
<b>4.3.2 送風機之選擇 .....</b>	<b>92</b>
<b>4.4 耐火材料 .....</b>	<b>99</b>
<b>4.4.1 耐火材料之種類 .....</b>	<b>100</b>
<b>4.4.2 耐火材料之性質 .....</b>	<b>105</b>
<b>4.4.3 焚化爐耐火材料設計要點 .....</b>	<b>122</b>
<b>4.4.4 爐體結構 .....</b>	<b>124</b>
<b>4.4.5 熱傳導 .....</b>	<b>129</b>
<b>4.5 儀控系統 .....</b>	<b>139</b>
<b>4.5.1 儀控系統的功能 .....</b>	<b>139</b>
<b>4.5.2 基本儀控迴路 .....</b>	<b>139</b>
<b>4.5.3 儀控操作盤 .....</b>	<b>144</b>
<b>4.5.4 儀控設備的選擇 .....</b>	<b>146</b>
<b>4.5.5 儀控系統設計 .....</b>	<b>152</b>
<b>4.6 煙囪設計 .....</b>	<b>159</b>
<b>4.6.1 通風與通風裝置 .....</b>	<b>159</b>
<b>4.6.2 煙囪之實用計算 .....</b>	<b>160</b>
<b>4.6.3 排氣流動壓損計算 .....</b>	<b>162</b>
<b>4.6.4 煙囪之構造 .....</b>	<b>165</b>
<b>4.7 焚化爐設計要點 .....</b>	<b>166</b>

頁 次

第五章 焚化爐操作與維護 .....	175
5.1 操作 .....	175
5.1.1 焚化爐之操作注意要點 .....	175
5.1.2 影響焚化爐燃燒效率之因素 .....	176
5.2 維護 .....	176
參考文獻 .....	183
附錄一 可鑄性耐火水泥施工提要 .....	185
附錄二 耐火材料性質 .....	189
附錄三 各種量測設備之種類及其特性 .....	193
附錄四 工業儀器介紹 .....	197
附錄五 鋼鐵材料物性資料 .....	199
附錄六 氣體物性資料 .....	201
附錄七 定壓比熱與溫度之關係 .....	203



# 圖 目 錄

	頁 次
圖2.1 廢棄物焚化處理各單元之主要分析項目 .....	5
圖2.2 烘乾溫度與水分散失量之關係 .....	7
圖2.3 C、H元素分析設備 .....	10
圖2.4 元素分析儀分析原理 .....	11
圖2.5 絶熱式B型熱量計 .....	12
圖2.6 焚化殘渣之灼燒減量測定流程 .....	14
圖2.7 TCLP萃取及分析方法流程 .....	15
圖3.1 焚化爐系統流程示意圖 .....	19
圖3.2 各種破碎裝置 .....	20
圖3.3 分離裝置示意圖 .....	22
圖3.4 不同進料方式之爐門示意圖 .....	23
圖3.5 推灰桿式排灰裝置 .....	24
圖3.6 人工排灰式焚化爐(附排灰室) .....	25
圖3.7 燃燒反應與燃燒機構 .....	27
圖3.8 固體廢棄物受熱後之相變化 .....	28
圖3.9 碳顆粒形成途徑 .....	29
圖3.10 廢棄物之燃燒過程 .....	30
圖3.11 焚化爐規劃設計流程圖 .....	38
圖3.12 低溫度濕度圖 .....	45
圖3.13 旋風集塵機本體尺寸 .....	61
圖4.1 不同類型的廢液霧化裝置(I) .....	64
圖4.1 不同類型的廢液霧化裝置(II) .....	65
圖4.1 不同類型的廢液霧化裝置(III) .....	66
圖4.2 油品燃料與黏度關係圖 .....	67
圖4.3 廢液進料系統示意圖 .....	68
圖4.4 各種輸送器裝置(I) .....	68

頁 次

圖 4.4 各種輸送器裝置 (II) .....	69
圖 4.4 各種輸送器裝置 (III) .....	70
圖 4.5 漿狀物與泥狀物進料系統配置流程 .....	71
圖 4.6 二段式爐門進料器操作示意圖 .....	72
圖 4.7 燃燒機種類 .....	73
圖 4.8 典型重油燃燒機流程圖 .....	75
圖 4.9 回油型油壓式重油燃燒機 .....	75
圖 4.10 油壓式重油燃燒機配備示意圖 .....	76
圖 4.11 旋迴噴射機構說明圖 .....	77
圖 4.12 迴轉式燃燒器之構造 .....	78
圖 4.13 高壓氣流燃燒器 .....	79
圖 4.14 低壓空氣式燃燒器 (非連動型) .....	80
圖 4.15 低壓空氣式燃燒器 (連動型) .....	81
圖 4.16 擴散型燃燒機 .....	83
圖 4.17 完全預先混合型燃燒機 .....	84
圖 4.18 部份預先混合型燃燒機 .....	84
圖 4.19 靜壓 .....	88
圖 4.20 Pitot 管 .....	89
圖 4.21 送風機壓力說明圖 .....	90
圖 4.22 送風機比速度 $N_s$ 關係資料圖 .....	93
圖 4.23 離心式風扇機 (單吸式) .....	94
圖 4.24 軸流式送風機 (單段直管型) .....	94
圖 4.25 離心式送風機葉片斷面圖 .....	95
圖 4.26 輪葉型式 .....	95
圖 4.27 多翼型送風機示意圖 .....	96
圖 4.28 多翼型送風機特性曲線 .....	97
圖 4.29 徑向型送風機示意圖 .....	97
圖 4.30 徑向式送風機特性曲線圖 .....	97

## 頁 次

圖 4.31 輪機型送風機示意圖 .....	98
圖 4.32 輪機式送風機特性曲線 .....	98
圖 4.33 軸流式送風機 .....	99
圖 4.34 軸流風扇機的特性曲線例 .....	100
圖 4.35 構成耐火材料的氧化物及非氧化物 .....	104
圖 4.36 各種耐火磚荷重軟化曲線 .....	117
圖 4.37 各種耐火水泥錨釘固定型式 (I) .....	126
圖 4.37 各種耐火水泥錨釘固定型式 (II) .....	127
圖 4.38 積層平面板的穩定熱傳導 .....	131
圖 4.39 熱貫流溫度梯度 .....	133
圖 4.40 旋轉窯式燃燒室控制迴路圖 .....	140
圖 4.41 文氏洗滌塔控制示意圖 .....	142
圖 4.42 傳統式控制盤示意圖 .....	144
圖 4.43 小型數位控制系統組合 (DCS) 示意圖 .....	145
圖 4.44 各種流量計示意圖 (I) .....	147
圖 4.44 各種流量計示意圖 (II) .....	148
圖 4.45 壓力計示意圖 .....	149
圖 4.46 液位計示意圖 (I) .....	150
圖 4.46 液位計示意圖 (II) .....	151
圖 4.47 控制閥示意圖 .....	153
圖 4.48 儀器規範書標準格式 .....	154
圖 4.49 儀控迴路結線圖 .....	155
圖 4.50 儀控結線圖表 .....	156
圖 4.51 硬體邏輯電驛電路結線示意圖 .....	157
圖 4.52 可程式邏輯控制器階梯圖 .....	158
圖 4.53 人工通風 .....	160
圖 4.54 不同排氣溫氣下煙囪高度與通風力之關係圖 .....	161
圖 4.55 斷面積變化 .....	162
圖 4.56 損失係數 .....	163

頁 次

圖 4.57 圓形擴大管的擴大角係數.....	163
圖 4.58 相當直徑圖.....	164
圖 4.59 鋼製煙函的形式.....	165
圖 4.60 鍋爐排氣的 $\text{SO}_3$ 濃度的露點溫度.....	169
圖 4.61 金屬表面溫度與 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 凝縮溫度.....	169
圖 4.62 硫酸一水系氣液平衡狀態下，不同金屬材料腐蝕試驗 結果.....	170
圖 4.63 $\text{HCl}$ 液滴於不同溫度下之腐蝕率圖.....	171
圖 4.64 $\text{HCl}$ 腐蝕狀況與溫度狀況圖.....	172
圖 4.65 空氣比與爐溫關係圖.....	172
圖 5.1 焚化爐基本操作步驟與程序.....	176

## 圖 附 錄

### 頁 次

圖7.1 定壓比熱與溫度關係圖(25~t°C).....	203
圖7.2 定壓比熱與溫度關係圖(100~t°C).....	203
圖7.3 定壓比熱與溫度關係圖(200~t°C).....	204
圖7.4 定壓比熱與溫度關係圖(300~t°C).....	204
圖7.5 定壓比熱與溫度關係圖(400~t°C).....	205



# 表 目 錄

	頁 次
表2.1 廢棄物分析項目 .....	4
表2.2 美國溶出試驗污染物最大容許濃度 .....	16
表2.3 廢棄物分析細部結果之示例 .....	17
表3.1 焰色之近似溫度 .....	25
表3.2 重金屬及其化合物之揮發度 .....	36
表3.3 常見之廢棄物空氣比值 .....	39
表3.4 排氣組成計算表 .....	40
表3.5 乾、濕排氣百分組成計算式 .....	41
表3.6 $A_o$ 、 $G_o$ 與 $G_o'$ 概略經驗式 .....	43
表3.7 主要排氣 $0 \sim t^{\circ}\text{C}$ 間的平均定壓比熱 ( $C_p$ ) 值 .....	47
表3.8 各種燃燒氣體於 $0 \sim t^{\circ}\text{C}$ 間的平均定壓比熱 ( $C_p$ ) 值 .....	49
表3.9 高分子系各種燃燒排氣 $0 \sim t^{\circ}\text{C}$ 間平均定壓比熱 ( $C_p$ ) 值 .....	50
表3.10 廢塑膠燃燒氣體於 $0 \sim t^{\circ}\text{C}$ 間的平均定壓比熱 ( $C_p$ ) 值 .....	51
表3.11 燃燒室熱負荷參考值 .....	54
表4.1 各種霧化方式之適用範圍 .....	67
表4.2 油壓式油燃燒器各種噴霧器作用說明圖表 .....	77
表4.3 各種油燃燒機之特性 .....	81
表4.4 油燃燒機適合之黏度範圍 .....	82
表4.5 重油黏度之適當加熱溫度 .....	83
表4.6 蒸汽表 .....	87
表4.7 送風機的效率 .....	91
表4.8 耐火材料化學性質分類表 .....	101
表4.9 耐火材料的化學礦物組成分類 .....	102
表4.10 氧化物耐火材料之熔點 .....	105
表4.11 非氧化物耐火材料之熔點 .....	105
表4.12 氧化態複合礦物材料之熔點 .....	106

頁 次

表4.13 常見耐火材料的主晶相及主要成份.....	108
表4.14 塞格錐(SK)的成分與溫度表.....	113
表4.14 塞格錐(SK)的成分與溫度表(續).....	114
表4.15 塞格錐(SK)與歐吞錐(PCE)的比較.....	115
表4.15 塞格錐(SK)與歐吞錐(PCE)的比較(續).....	116
表4.16 耐火磚之耐熱濺裂特性資料表.....	118
表4.17 一般矽磚與鋁矽磚特性資料表.....	125
表4.18 不同物體之熱輻射率值參考表.....	136
表4.19 氣體體層之平均厚度.....	137
表4.20 常見耐火材料特性表.....	167
表4.21 鋼板試料之高溫腐蝕試驗.....	168
表5.1 焚化爐操作維護注意事項.....	179
表5.1 焚化爐操作維護注意事項(續).....	180
表5.2 油燃燒器故障原因與對策.....	181
表5.2 油燃燒器故障原因與對策(續).....	182

## 表 附 錄

	頁 次
表1.1 補強器材分類表 .....	187
表2.1 各種耐火磚之特性及主要用途 .....	189
表2.2 主要耐火磚之性質 .....	190
表2.3 不同耐火磚間之反應溫度 .....	190
表2.4 耐火斷熱磚之規格 .....	191
表2.5 耐火斷熱材料的種類及特性 .....	191
表2.6 陶瓷纖維之性質 .....	192
表3.1 溫度計之種類及其特性 .....	193
表3.2 流量計的種類 .....	194
表3.3 壓力計的種類及其特性 .....	194
表3.4 應用對象 .....	195
表5.1 各種鐵鋼材耐酸性最高使用溫度 .....	199
表5.2 代表的金屬的物性值 .....	200



# 第一章 前言

模具式焚化爐 (modular incinerator) 乃為將爐體預先於工廠內按規格製造，再運至工地裝配之焚化裝置。爐床多屬固定爐床式之小型焚化爐為主，由於是規格化之套裝設備，故其具有零組件之供應充裕與替換容易、現場施工期短、造價便宜及操作維護容易等優點，已廣泛為工業界所接受與應用。

就模具式焚化爐而言是整合機械、儀控、管線、材料、化工及環工等相關工程科學之綜合性產品，也是國內亟待研究發展之處理設備。隨著近年來，工業發展迅速，事業機構所產生廢料日益增加，相對於台灣地區地狹人稠，適當之事業廢棄物掩埋場址往往一地難求，因此廢棄物在進入掩埋場之前，必須充分做好減容與減量的工作，以延長掩埋場之使用壽命；據評估結果，焚化處理乃是最佳之廢棄物減容與減量方式，而成為了公營企業普遍選擇的處理方法。但隨著國內焚化爐之廢氣排放標準日趨嚴格，若未有妥善之規劃設計與正確的操作維護措施，不但無法達到應有之排放標準，且易遭受強烈的環保抗爭，使產業面臨巨大之衝擊，因此，為使各產業順利以焚化方式處理所產生之廢棄物，徹底做好污染物控制及操作維護工作乃是刻不容緩的重要課題。

工業污染防治技術服務團（以下或簡稱服務團）累積多年來工廠輔導之經驗，鑑於國內工廠使用焚化處理廢棄物之失敗案例不勝枚舉，究其因在於焚化爐製造商對於該廠所產生之廢棄物未作好詳細的檢驗分析，及妥善與完整的規劃工作。加上業者漠視廢棄物之處理工作，未依正確之操作維護程序，致使焚化爐機械設備材料嚴重損壞，使用壽命縮短，污染問題繼而層出不窮。因此，為提昇國內焚化爐之操作維護技術，特著手編纂本污染防治技術手冊，針對模具式焚化爐之燃燒理論、污染物形成機構、規劃設計與操作維護作完整性介紹，期盼焚化爐之使用者能在完整的概念下，正確的從事操作維護工作。



## 第二章 廢棄物特性分析

一般事業機構所產生之廢棄物型態以固體與液體為主，而在進行焚化處理之前必須針對廢棄物之物理與化學特性，充份掌握才能進行妥善之規劃工作，以下乃針對廢棄物焚化處理所需具備之分析項目與分析方法概略介紹之。

### 2.1 焚化特性分析項目

由於液態與固態廢棄物在進行焚化處理時，輸送與燃燒型態有顯著不同，因此在規劃焚化處理系統時，所須分析之項目也有所差異，以下乃針對液態與固態廢棄物所須分析之項目及方法列於表2.1。

除此之外，對於已設置焚化爐之使用工廠，應另進行灰燼之熱灼減量分析與溶出試驗以判定灰燼之燃燒狀況與是否殘餘有害物質成份。綜合上述整體廢棄物焚化處理各單元之主要分析項目見圖2.1所示。

### 2.2 廢棄物分析方法

廢棄物之分析方法主要可分為物理性質、化學組成、元素分析、熱值分析、灼燒減量分析及溶出試驗等六大類。

#### 2.2.1 物理性質

##### 1. 物理組成

物理組成 (physical composition) 也稱物理成分，了解廢棄物組成百分比、可燃性及不燃物之相對比例，進一步可作為資源回收利用及工程規劃設計之參考。

##### 2. 容積密度

容積密度 (bulk density) 也稱為單位容積重，其單位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，單位容積重量大者常多水分及無機物，單位容積重輕者，如紙、塑膠，熱值較大。

容積密度之測定方法為將樣品之重量除以樣品之外觀體積即為容積密度。若廢棄物置於容器中能用幾何方式算出容器之體積，則僅須測定樣品之重量即可得之，但廢棄物採樣時可能改變其外觀形態者需加以適度修正，才可測得較具代表性之容積密度。通常測定容積密度之實際做法是用一固定容積之容器盛裝樣品，再經由適當之壓實後稱重，最後以重量除以體積即為容積密度。

##### 3. 比重

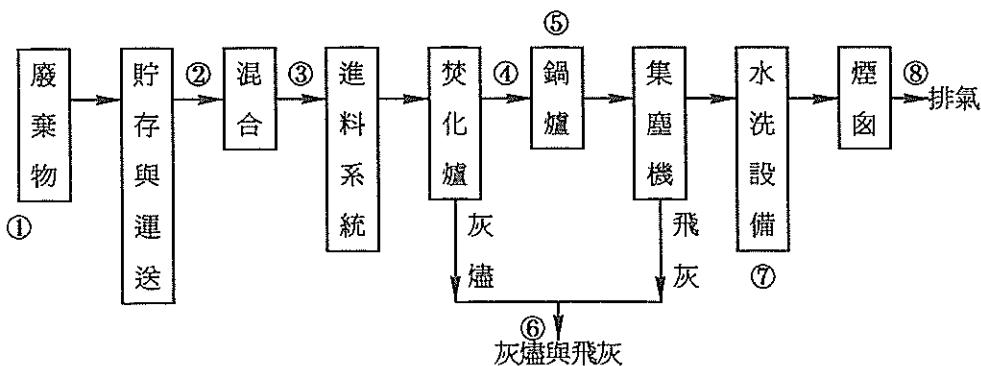
比重 (specific gravity) 之定義為標準狀況下 ( $1\text{atm}$ ,  $4^\circ\text{C}$ ) 物質與同體積純水之質量比，但實際運用於廢棄物特性分析時，大多採用假比重或單位容積重之方法來測定廢棄物之比重。假比重係指同體積廢棄物與純水之重量比，而

單位容積重則為單位容積廢棄物之重量，又稱容積密度(bulk density)。廢棄物之比重資料可做為重量與容積間之換算因子，另可由此資料大略推估廢棄物之發熱量及組成成分之特性。由於廢棄物之物理型態不同，所採用之比重測定方法亦不盡相同，以下介紹幾種常用之廢棄物比重測定方法。

表 2.1 廢棄物分析項目

廢棄物型態 項目		固態	液態	測定值	單位	分 析 方 法	
物 理	容積密度	○	×	小數點以下 2位數	kg/m <sup>3</sup>		
	比 重	○	○	小數點以下 2位數	-	比重瓶法、比重計法、API比重法	
	黏 度	×	○	小數點以下 2位數	Cst SSU Redwood(1秒)	轉動試法(Versatility Viscometer Method) 色博爾胡密特法(Saybolt Viscometer Method) 雷德烏德胡密特法(Re dwood Viscometer Method)	
特 性	閃火點	○	○	小數點以下 2位數	°C	彭馬氏開杯法(Pensky Marten Closed Cup method) Tag開杯法(Tag Closed Cup Method) 克氏開杯法(Cleveland Open Cup Method)	
	熱 值	○	○	小數點以下 2位數	kcal/kg	絕熱熱量計B型(Adiabatic bomb Calorimeter) 湯姆生熱量計(Thompson Calorimeter)	
	水 份	○	○	小數點以下 2位數	%	Karl Fisher法 乾燥(烘乾)稱重法(105±5°C) 蒸餾法	
工 業	灰 份	○	○	小數點以下 2位數	%	加熱稱重法(800±50°C)	
	可燃份	○	○	小數點以下 2位數	%	加熱稱重法	
	揮發份	○	○	小數點以下 2位數	%	加熱稱重法	
元 素 分 析		○	○	小數點以下 2位數	%	元素分析儀法 硫份 • Eschka法(JIS M8813-1976) • 燃燒容量法 • Lamp法(JIS K2542,K2262) • 燃燒管法(JIS K2541,2273) • Bomb法(JIS K2263) 氮份 • Kjeldahl法(JIS K8813-1976) • Semimicro Kjeldahl法 • Macro Kjeldahl法 • Micro Kjeldahl法 • 微量電量滴定法 • 自動Dumas法	

[註] ○：需分析 ×：不需分析



編號	分析種類	項 目
①	進 料	比重、單位容積重、閃火點、酸鹼值、反應性、著火性、相容性…等分析
②	相容性	相容性分析
③	廢棄物特性	黏度、粒度、熱值、水份、灰份、固定碳、揮發份、元素分析、重金屬分析、有害成份分析…等
④	排 氣	NOx、SOx、HCl、溫度、風量、粒狀物、透光率分析…等
⑤	蒸 氣	鍋爐出口氣體溫度、蒸氣流量、蒸氣壓力
⑥	灰燼與飛灰	熱灼減量、TCLP重金屬分析、重金屬總量分析
⑦	廢 水	pH值分析
⑧	煙囪排氣	水份、CO、CO <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> 、NOx、SOx、HCl、粒狀物、溫度、透光率、重金屬分析、有害成份分析

圖2.1 廢棄物焚化處理各單元之主要分析項目

### (1)比重瓶法

適用於液體可將廢棄物孔內空氣趕出者，多孔性廢棄物樣品則需先用真空泵抽真空後再加入液體，使用之樣品量視比重瓶大小而定。

### (2)排液體積法

已知重量之樣品放入液體中，液面上升增加之體積即為樣品之體積，樣品重除以上升之液體重即為比重。

### (3) 浮力原理法

固體在液體中所受之浮力等於固體排開液體體積之重量，故固體重除以排開液重即為比重。

### (4) 比重計法

均質液體可用已標定好之比重計測其比重，使將比重計比重置入液體中，由比重計在液面處之刻度讀出液體之比重。液體溫度對比重之影響可由精密溫度計測得後加以修正。

## 4. 黏度

黏度 (viscosity) 及固體顆粒含量為決定液體廢棄物焚化條件的重要因素。其數據除可供液體輸送動力需求之計算外，亦可供給噴注燃燒器之霧化器選用及操作時之依據。通常動黏度在 1,000 centistoke 以下者可用泵及管線輸送，如果動黏度 (dynamic viscosity) 過高時，則應考慮加熱（使黏度降低）或採用其他特殊之輸送方式。

### 2.2.2 化學組成分析

#### 1. 三成分分析

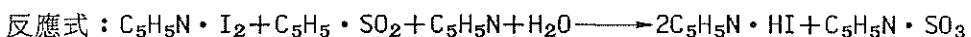
廢棄物之三成分係指水分、灰分及可燃分。在廢棄物焚化處理時，三成分為質量平衡計算中最基本的資料。但由於廢棄物之物理形態不同，三成分亦有複雜的變化，如水分亦可分成化合水、結晶水、吸附水和吸收水等，可燃分中含有揮發性物質和固定碳等，至於灰分則又有純灰和焚化殘渣等多種型態。

##### (1) 水分之測定

廢棄物中之水分型態可大致分成化合水、結晶水、吸收水和吸附水等四種；由於各種水分之分離方式不同，加上揮發性物質之干擾，使得絕對水分之測定非常困難。一般水分之測定分為下列二類：

###### ① 直接法 Karl Fischer 水份測定法

反應試劑：碘，二氧化硫，吡啶 (pyridine)，甲醇。



##### [優點]

- 對水分之測定非常敏銳。
- 極少量的水分存在，仍能測出。例如含有 10~50mg 水份之樣品為一般正常取樣之樣品，但據實驗之結果顯示即使水含量在 2~5mg 之間亦可精確測出。
- 操作迅速且正確，無揮發性物質之干擾。

[缺點]

- 試劑經常變化，常常要標定過才能適用。
- 整個操作系統要在密閉系統內以防止空氣中水氣之侵入。
- 需要設備，一般實驗室之能力難以購置。

②間接法

- 乾燥法：將定量樣品置於  $105^{\circ}\text{C}$  循環送風之乾燥箱內，在一定時間後，取出樣品測其損失之重，即為水分之重。適用於一般廢棄物水分之測定。  
(見圖2.2)

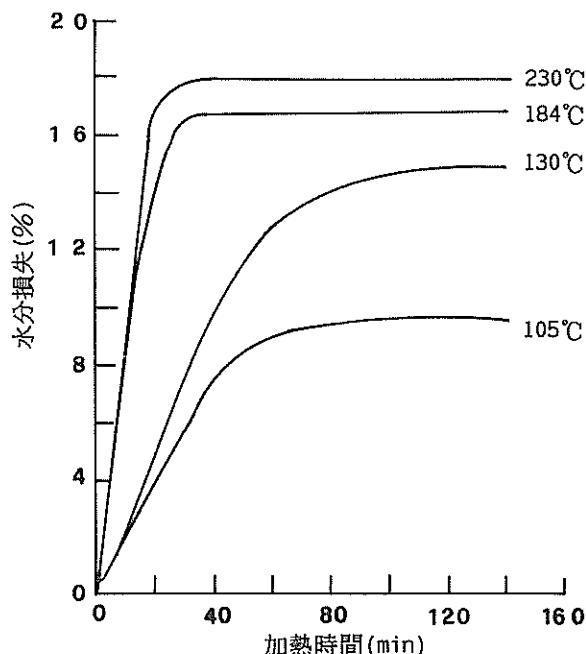


圖2.2 拘乾溫度與水分散失量之關係

[適用限制]

- 樣品在  $105^{\circ}\text{C}$  時不會揮發。
- 樣品在  $105^{\circ}\text{C}$  和固定時間內可烘出全部水分。
- 樣品在  $105^{\circ}\text{C}$  時不會發生化學變化而增、減重量。
- 一般作水份測定之拘乾溫度為  $105^{\circ}\text{C}$ ，但有時亦有特殊情形，例如  $\text{Na}_2\text{FSiO}_6$  設定乾燥之溫度在  $45^{\circ}\text{C}$ ，如超過時  $\text{Na}_2\text{FSiO}_6$  將會分解。

- 蒸餾法：將樣品置於密閉容器中加溫蒸餾，然後以容積法，Karl Fischer法或氣體層析儀測定蒸餾液之水分量。適用於植物性油、脂肪中水分之測定。

[適用限制]

- 蒸餾液之水分不與其他物質混合時，可用容積法或Karl Fischer法測水分量。
- 蒸餾液呈完全混合狀，則以氣體層析儀或Karl Fischer法測水分量。
- 蒸餾液為不完全混合狀，則用Karl Fischer法測水分量。

(2) 灰分測定

樣品烘乾後或使用原樣放置於坩堝中，以高溫灰化爐灰化，灰化溫度視分析需要而定。灰化爐需有強制通風設備，以確保樣品充分燃燒。理論上樣品通風狀態下，應可將可燃分完全燒掉，但由於灰分化溫度不夠或無法攪拌，灰化之灰分中含有可燃物質，此與焚化殘渣含有可燃分之情形相同，故樣品之灰化分析可分成灰分和焚化灰分兩種。灰分測定之灰化溫度最好在1,000 °C以上，並通入純氧，務必確定固定碳能完全燒掉，而焚化灰分則以焚化溫度通空氣灰化。其所需注意事項為：

- 為避免無機物飛灰飛散，坩堝最好加蓋。
- 灰化時會爆炸或飛濺之樣品，需前處理。
- 需注意灰分之熔解溫度，必要時調整灰化溫度。
- 每組灰分分析需加做空白試驗，以校正大氣濕度之誤差。

灰分可分為三種形態：非熔融性、熔融性、含有金屬成份。測定灰分可預估廢棄物焚化時可能產生的爐渣量及排氣中粒狀物之含量，並可依水份的形態類別，來選擇廢棄物適用的焚化爐，若含過多的金屬，則不宜焚化。爐渣通常含Na、K、Mg、P、S、Fe、Al、Ca、Si、O、N、C、H等，在焚化過程中，高溫氧化環境極易發生化學反應，而產生複雜的熔渣， $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaCl}$ …等，影響焚化爐的操作。如為單純之下列物質，其熔點(M.P.)如下：

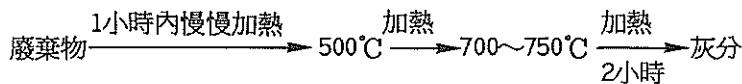
物 賴	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{NaCl}$
熔點(°C)	884	851	800

但以上物質，任兩種或三種在某些比例結合下，則可形成熔點較低的混合物，如：

物 賴	熔點(°C)
(47% $\text{Na}_2\text{SO}_4$ +53% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	844°C
(62% $\text{Na}_2\text{SO}_4$ +38% $\text{NaCl}$ )	633°C
(65% $\text{Na}_2\text{SO}_4$ +35% $\text{NaCl}$ )	623°C
( $\text{NaCl}$ + $\text{Na}_2\text{CO}_3$ + $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	612°C

若爐渣中含  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，而流體化床本身結合矽砂，則兩者作用可形成黏稠狀矽酸鈉玻璃，急速地降低流體化現象。

灰分分析方法如下，加熱前後的重量差百分比即灰分百分比。



### (3) 可燃分測定

通常可燃分不直接測定，而由樣品總量減去水分和灰分。可燃分可再細分為揮發性物質和固定碳，揮發性物質係將樣品置於無氧燃燒室加熱，使揮發性物質蒸發，一定時間後測其損失重量為揮發性物質含量。固定碳量可用樣品量減去水分，灰分和揮發性物質而得，亦可測揮發後剩餘殘渣之灰份，所損失之重量即為固定碳。

## 2. 近似成分分析

廢棄物之近似分析即指水分，可燃分，灰分及固定碳等 4項一般稱為近似分析 (proximate analysis) 即以簡單幾種特性分析，可作有價值之判斷，在評估固體棄物之處理方法及回收價值時，相當重要。譬如焚化處理廢棄物之含水量及灰分等即為重要之性質。

### (1) 水分

廢棄物之水分 (moisture content) 定義為：物體在  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  溫度下烘乾，所失去之水量，常以每單位重之樣品所含之水重量百分比表示之。水分計算之公式如下：

$$\text{水分}(\%) = \frac{\text{試樣之最初重量} - \text{烘乾後之試樣重量}}{\text{試樣之最初重量}} \times 100\%$$

### (2) 挥發性物質

揮發性物質 (volatile matter) 係物體在標準溫度試驗時，呈氣體或蒸氣而散失之量，可表示有機物之多少。ASTM之試驗法，係將定量樣品置於已知重量之白金坩堝，於無氧狀態下在燃燒室內加熱至  $950 \pm 20^\circ\text{C}$  經 7 分鐘所散失之量。

### (3) 固定碳

固定碳 (fixed carbon) 係樣品除去揮發性物質後之可燃燒物，其計算式如下：

$$\text{固定碳} [100 - (\text{含水量} + \text{灰分} + \text{揮發性物質})] \times 100\%$$

### (4) 灰分

樣品燃燒後之殘留物，即為灰分 (ashes)。廢棄物灰分可能含有有害物質尚需處理、處置，故此數據仍屬重要。ASTM法測定灰分含量，係將樣品在通

風良好之高溫電爐中加熱至大紅而得。

灰分需作元素分析，因灰燼可隨煙道廢氣逸入大氣造成空氣污染，亦可於水冷式熄滅灰燼操作中與水混合造成水污染。灰分可能含有重金屬，如Co、Pb、Zn、Cu、Fe、Cr、Mn、Ni、Hg、As等而造成土壤或地下水污染問題。

### 2.2.3 元素分析

利用各種元素分析法，求出垃圾中碳(C)，氮(N)，氫(H)，氧(O)，硫(S)，氯(Cl)，等各元素之百分比，以作為如下目的使用。

#### 1. 求理論空氣

理論空氣量係指燃燒廢棄物(kg)所必須之空氣量( $\text{Nm}^3$ )，為焚化設施設計之基礎資料。

#### 2. 求低位發熱量

每kg廢棄物低位發熱量為焚化設施設計之基礎資料。

#### 3. 求C/N比(碳氮比)

#### 4. 推測有害氣體之發生源

推測 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HCl}$ 等有害氣體之發生源及發生量。

元素分析設備可用傳統之燃燒管，其裝置如圖2.3 所示，此法可分析碳、氫元素，如將吸收管內之吸收劑改換為 $\text{H}_2\text{O}_2$ 也可用以硫、氯燃燒氣體之吸收，再用以滴定硫、氯。至於氮之分析，可用傳統之TKN水質檢驗方法，只是樣品非為水而改以廢棄物而已。

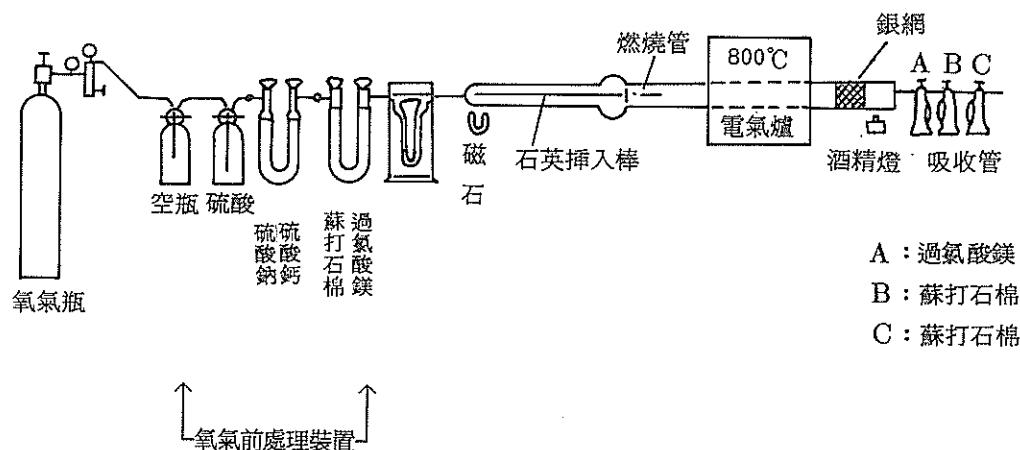
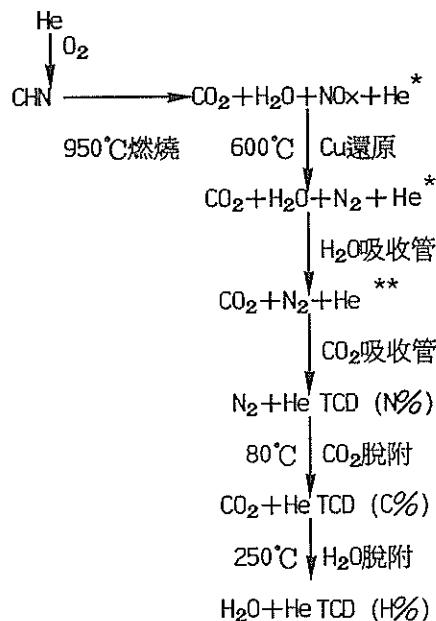


圖2.3 C、H元素分析設備

氧元素通常不作分析，一般可用濕基可燃分減去濕基之碳、氫、硫、氮及氯成分即得。元素之分析也可用元素分析儀為之，其分析之原理如圖 2.4，同可作碳氫氮元素之分析。



[圖註] \*：利用氮氣為載流氣體(carrier gas)

\*\*：包括載流氣體(carrier gas)與標準氣體(standard gas)

圖2.4 元素分析儀分析原理

#### 2.2.4 廢棄物之熱值

熱值對燃料而言，為一項重要之特性，如煤、燃料油等。此外，對以焚化為處理方法之廢棄物而言，熱值更為不可或缺之基本資料，測定熱值之目的如下：

1. 判定廢棄物是否適合焚化處理。
2. 決定焚化爐體之熱釋放率，作為爐體設計之依據。
3. 焚化處理時，初步決定所需添加輔助燃料之量，作為管理及爐體操作條件之憑藉。

熱值測定原理乃將內含氧氣彈筒水溶槽，置於恆溫且絕熱式之夾套中，點火燃燒後，物質所釋放之燃燒熱，由外圍水溶槽吸收記錄水溶槽上昇之溫度，乘上卡計熱當量，再除以燃料重量即可得其燃燒熱（參考圖2.5）。一般廢棄物之熱

值（濕基）可分為高位發熱量 (high calorific value,  $H_h$ ) 與低位發熱量 (lower calorific value,  $H_l$ ) 兩種。

編號 名稱

- 1 溫度計
- 2 溫度計托架
- 3 溫度計支撐墊圈
- 4 溫度計讀鏡
- 5 溫度計支撐桿
- 6 馬達軸輪 (115V 50/60Hz)
- 7 馬達皮帶
- 8 攪拌馬達皮帶
- 9 攪拌皮帶輪
- 10 攪拌承軸零件
- 11 點火線圈
- 12 攪拌軸與漿板
- 13 水槽
- 14 热卡計外殼
- 15 氧氣燃燒彈筒

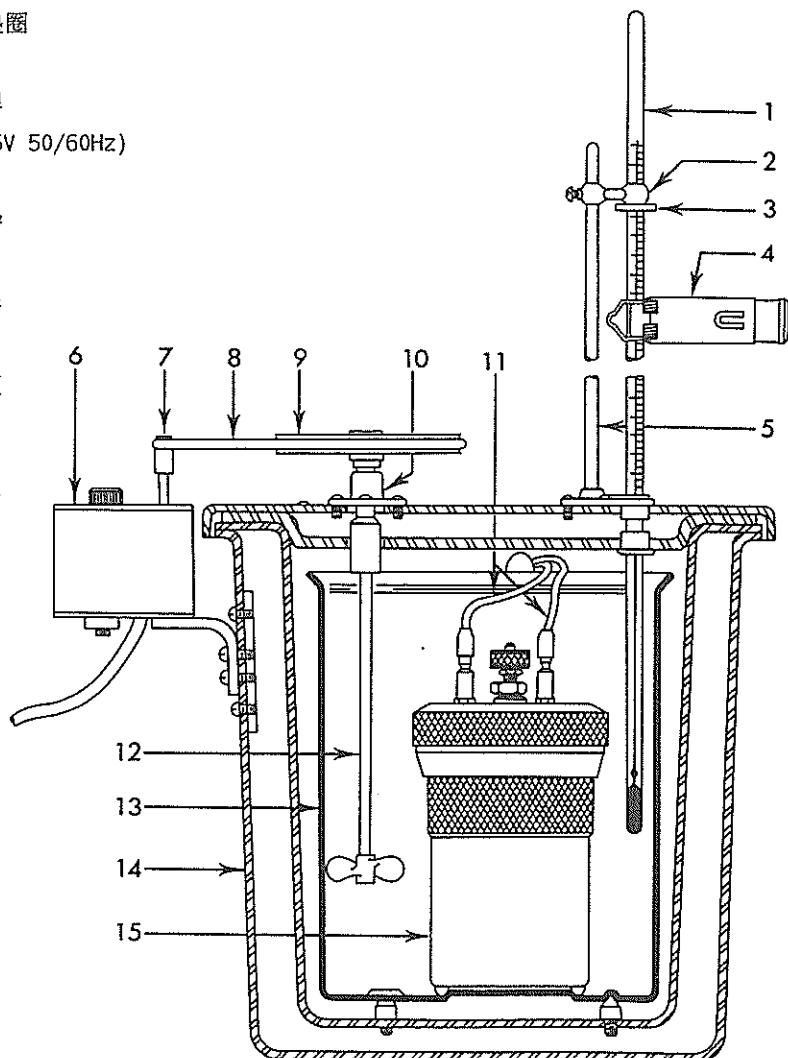


圖2.5 絶熱式B型熱量計

## 1. 濕基高位發熱量

濕基高位發熱量亦稱總發熱量(gross heat value)，或實測發熱量，包括廢棄物含水量及其他燃燒所產生之水分凝結熱。熱量之測定可用熱量計測定之，常用之單位為kcal/kg。

## 2. 濕基低位發熱量

濕基低位發熱量亦稱真(淨)發熱量(net heat value)，由高位數熱量扣除水氣之凝結熱而得之：

$$\begin{aligned} \text{濕基低位發熱量} &= \text{高位發熱量} - \text{凝結熱} \\ &= H_h - 600(9H + W) \end{aligned}$$

式中H及W分別為廢棄物之濕基氯含量及含水率，以小數表示。

## 2.2.5 灰渣金屬成份分析

廢棄物中若含有微量重金屬(As、Ba、Cd、Cr、Cu、Pb、Hg、Se、Ag等)，在焚化時需特別注意其含量及可能排放之濃度。通常焚化爐對廢棄物中重金屬之含量限制頗嚴。若焚化後之爐渣或飛灰中含過量之重金屬，將使得這些爐渣和飛灰成為有害廢棄物，而增加許多處置上的困擾。

## 2.2.6 灼燒減量

試料採樣地點隨燃燒方式或排灰設備方式而有所差異。例如：排灰設備是貯灰坑的方式時用吊車、抓斗採取試料。又，貯灰槽方式時，則在通往貯灰槽的灰渣輸送帶上採取。若是裝載在灰罐搬運車上時，亦可用四分法來採取試料。

焚化灰渣的特性隨垃圾在爐內的停留時間、燃燒溫度及爐內的攪拌等有顯著的變化，排出時只做一次的試料採樣是無法得到代表性的試料。因此，焚化灰渣排出時，是以在適當的時段內，一次採取1~2kg，1日4~5次，合計採取5~10kg之焚化灰渣作為試料。至於，回分燃燒方式的設施，其排灰設備是在早上和中午運轉2次時，則採取運轉時的2次亦可。

焚化灰渣灼燒減量之測定流程如圖2.6所示。

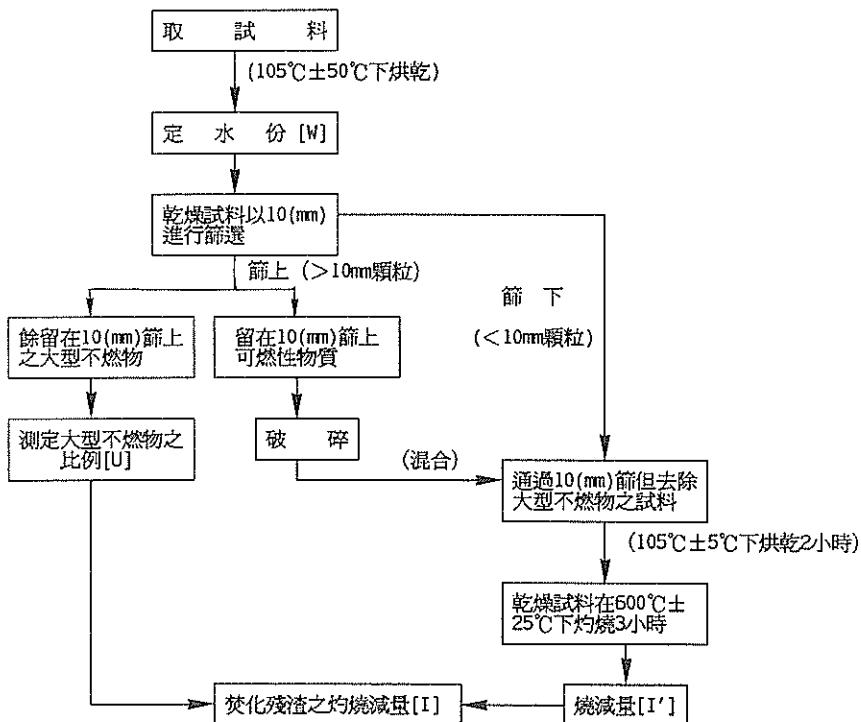
## 2.2.7 毒性特性溶出試驗

溶出試驗一般常用者有萃取毒性法(extraction procedure toxicity;EP)及毒性特出法(TCLP)。有相較之下，TCLP顯得周密且複雜，但整個萃取過程大致相同。由圖2.7可明白知道，仍先要判斷廢棄物樣品中固體物含量的多寡，以便決定是否需要進行萃取；萃取液之最容許濃度如表2.2所示。

## 2.2.8 廢棄物分析資料表

完整廢棄物分析資料表中，包括有廢棄物之含水率、灰份、可燃份、高位發

熱量、低位發熱量、元素分析等，可參考表2.3 所示，以作為焚化爐規劃設計參考之依據。



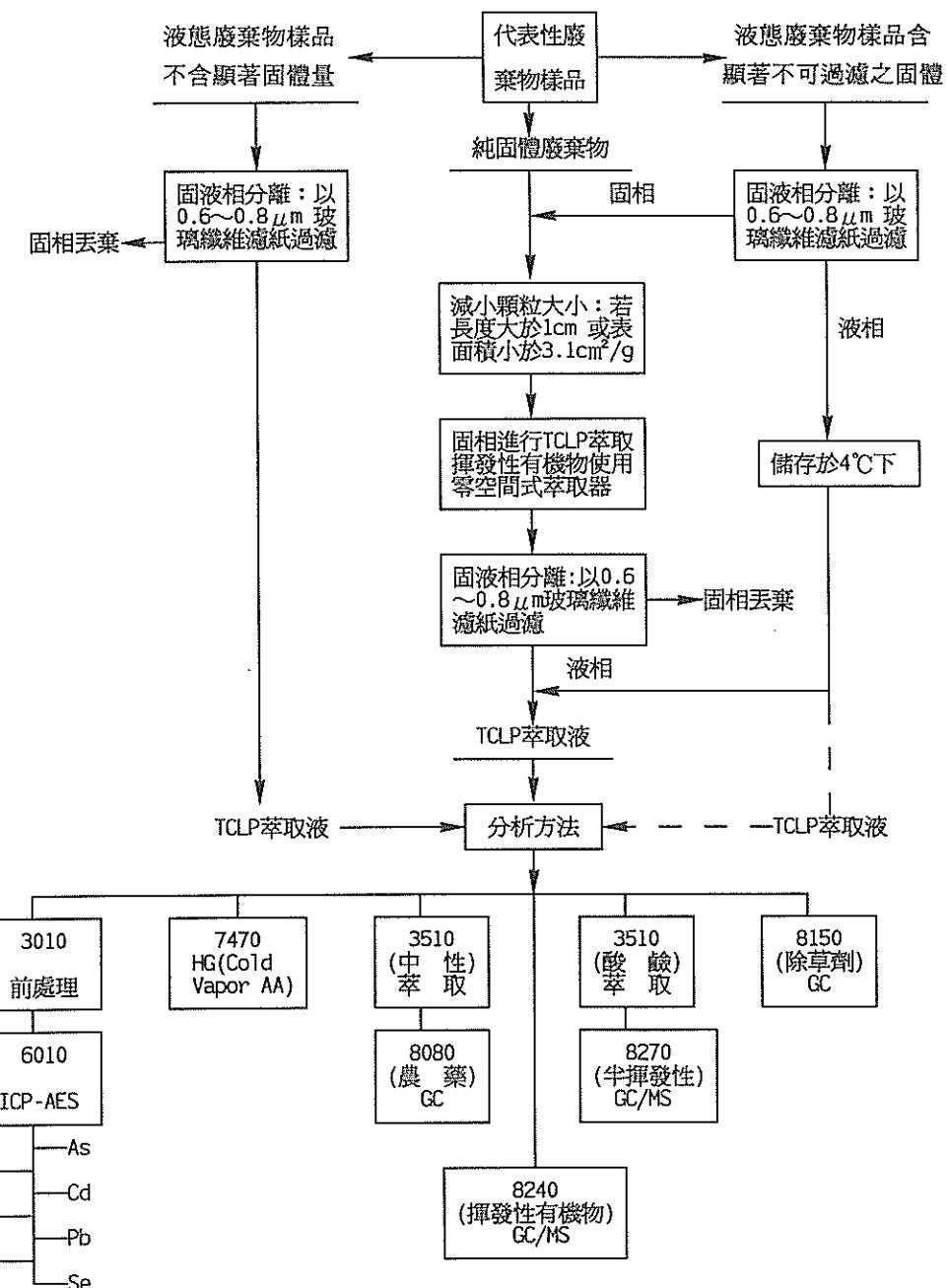
(註) 大型不燃物之比例[U] % =  $\frac{\text{不燃物之重量(kg)}}{\text{乾燥後之試料重量(kg)}} \times 100\%$

$$\text{灼燒減量}[I'] \% = \frac{\text{灼燒前之試料重量(g)} - \text{灼燒後之試料重量(g)}}{\text{灼燒前之試料重量(g)}} \times 100\%$$

$$\text{灼燒減量}[I] \% = I' \times \frac{100-U}{100} \times 100\%$$

$$\text{水份}[W] \% = \frac{\text{乾燥前試料重量(kg)} - \text{乾燥後試料重量(kg)}}{\text{乾燥前試料重量(kg)}} \times 100\%$$

圖2.6 焚化殘渣之灼燒減量測定流程



[圖註] 1. 依固體鹼性不同選用萃取液  
2. ——表示固液相分別分析

圖 2.7 TCLP萃取及分析方法流程

表2.2 美國溶出試驗污染物最大容許濃度

污染物(Contaminant)	最大濃度 (mg/L)	分析方法*
砷 (Arsenic)	5.0	7050, 7061
鋯 (Barium)	100.0	7080
鎘 (Cadmium)	1.0	7030, 7131
總鉻 (Total Chromium)	5.0	7190, 7191
六價鉻 (Hexavalent Chromium)	5.0	7195, 7196
鉛 (Lead)	5.0	7420, 7421
汞 (Mercury)	0.2	7470
硒 (Selenium)	1.0	7740, 7741
銀 (Silver)	5.0	7760
· 安特靈 ; C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> OCI <sub>6</sub> 1,2,3,4,10,10-六氯-6,7-環氧基-1,4,4a,5,6,7,8,8a- 八氯-1,4-內-5,8-二甲烷基苯。		
Endrin(1,2,3,4,10,-Hexahloro-1 7-epoxy-1,4,4a,5,6,7,8,8a-octahydro-1 4-endo,endo-5,8-dimethanonaph-thalene)	0.02	8080
· 麝丹 ; C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>6</sub> 1,2,3,4,5,6-六氯環己烷的γ型異構物 (Lindane, 1,2,3,4,5,6-Hexachlorocyclohexane, gamma isomer)	0.4	8080
· 甲氨基DDT ; Cl <sub>3</sub> CCH(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> OCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 1,1,1-三氯-2,2,一二 (對一甲基酚) 乙烷 (Methoxychlor, 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(p-methoxyphenyl) ethane)	10.0	8080
· 毒殺芬 ; C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> Cl <sub>10</sub> 工業用氯化樟腦精 (67-69% 氯含量) (Toxaphene, C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> Cl <sub>10</sub> , Technical Chlorinated camphene, 67-69% Chlorine)	0.5	8080
· 2,4-D 2,4-二氯苯氧基乙酸 [註] : * : U.S. EPA Method No., SW-846 (2,4-D(2,4-Dichlorophenoxyacetic acid))	10.0	8150
· 2,4,5-TP Silver; Cl <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>2</sub> OCH(CH <sub>3</sub> )COOH 2-(2,4,5,-三氯苯氧基)-丙酸 2,4,5-TP(Silver), (2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	1.0	8150

[註] \* : U.S. EPA SW-846 Method No. (編號)

表2.3 廢棄物分析細部結果之示例

		元素(濕基)									
		含水量					低位發熱量				
分析項目 垃圾項	物理組成 (濕基) (%)	乾基灰分		可燃分		乾基發熱量 (濕基) (kcal/kg)		碳 (%)		氫 (%)	
		(%)	(%)	(%)	(%)	(kcal/kg)	(kcal/kg)	(%)	(%)	(%)	(%)
可燃	紙 類	33.25	34.56	32.60	11.27	7.80	59.60	3752.12	2528.93	2163.00	28.07
燃	纖維 布 類	5.40	6.66	20.05	1.01	0.81	79.13	6120.31	1892.58	4860.69	52.02
燃	木竹、稻草、落葉類	5.52	6.87	19.30	2.56	2.07	78.53	4634.70	3740.20	3396.05	39.95
燃	腐 蝕 類	22.93	11.07	68.57	18.03	5.65	25.68	3905.44	1223.57	720.70	13.31
塑	膠 類	15.05	15.66	32.52	3.20	2.16	65.32	9967.69	6726.20	6076.32	54.23
皮	革、橡膠類	2.41	3.34	10.14	18.98	17.05	72.80	7124.89	6402.43	5996.40	58.30
物	其 它	3.23	3.91	21.62	21.35	16.73	61.65	1022.31	801.29	536.49	19.11
不	金 屬	8.65	12.72	4.65	100.0	95.35	0.00	0.00	0.00	—	—
燃	玻 璃	1.54	2.26	4.55	100.0	95.45	0.00	0.00	0.00	—	—
燃	陶 瓷	1.14	1.67	4.62	100.0	95.38	0.00	0.00	0.00	—	—
物	石頭及 5mm以上土砂	0.87	1.27	6.00	100.0	94.00	0.00	0.00	0.00	—	—
總	合 垃 圾	100.0	100.0	35.15	26.13	16.94	47.91	4293.97	2784.71	2392.17	27.58
								3.36	0.19	16.00	0.08
											0.68



### 第三章 焚化爐之基本設計原理

一座化焚化爐之設計過程中，必須對於燃燒特性原理、整體焚化系統與配備（燃燒系統、進料系統、排灰系統、空氣污染防治設備……）、質能平衡計算有所瞭解與認識，彼此之間各有其相互關聯性，其中若有設計不當之處，將使得焚化操作過程之品質受到影響，以下將針對上述部份，作初步的介紹。

#### 3.1 焚化爐之系統簡介

以小型焚化爐之處理設施，應具備之設備見圖 3.1，包括：計量、前處理設施、進料設施、爐體、輔助燃燒裝置、送風與排氣風扇裝置、排灰裝置等，以下僅就小型焚化爐之各單元設備做一簡單介紹。

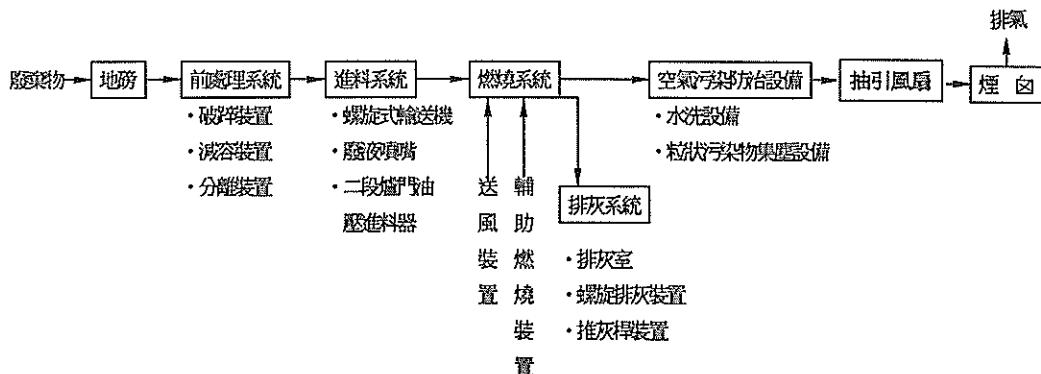


圖3.1 焚化爐系統流程示意圖

##### 1. 計量設備 (weighing scale)<sup>17</sup>

在進入焚化爐之前，前必須充份計量每次進料重量，以免超過焚化爐所負荷之燃燒量。計量設備之刻度應小於 1kg。

##### 2. 前處理設施

由於工廠製程所產生之廢料中，往往體積過於膨鬆、太大、含有金屬廢料…等，因此在進入焚化爐之前，必須先經過破碎、減容與分離之程序，以使進入爐體內之廢料有一定品質，能使廢料能與爐內空氣充份接觸，而穩定燃燒。一般常見之破碎、減容與分離裝置有以下幾類：

###### (1) 破碎裝置

一般常見之破碎裝置 (shredding) 有：粉碎 (crushing)、磨碎 (grinding)、切斷 (cutting)、剪碎 (shearing) 與絞碎 (shredding)，可參考圖 3.2 所示

◦除此之外，針對於韌性切碎之橡膠，也可採用冷凍破碎，於超低溫之情況下，利用低溫氮氣維持廢棄物在零下200°C狀態，變脆之性質來破碎。

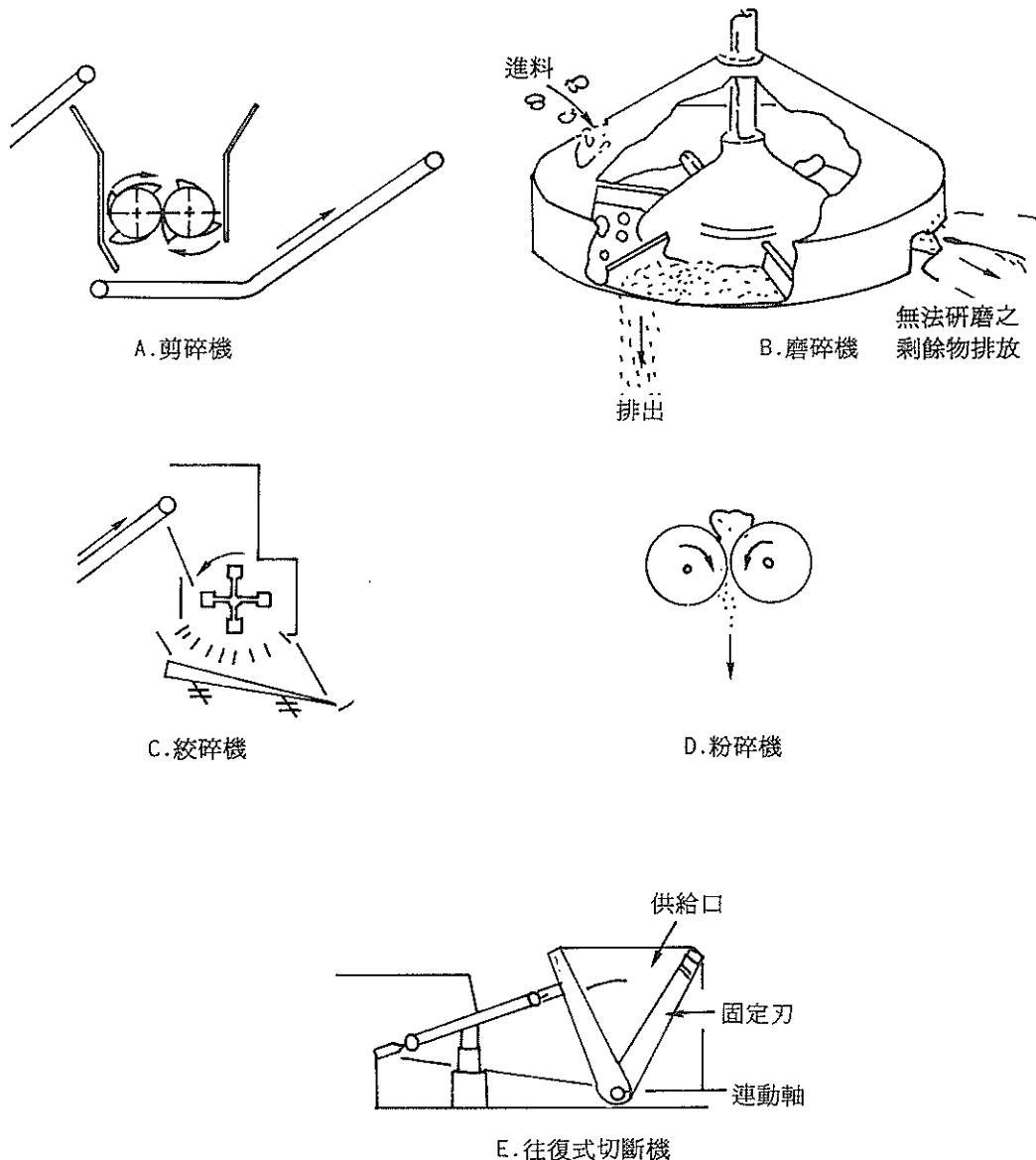


圖3.2 各種破碎裝置

## (2) 減容裝置

減容裝置主要是針對發泡塑膠為主，由於體積過於膨鬆，進入焚化爐內不易與空氣接觸燃燒，因此可利用壓縮、加熱軟化、脫泡將發泡體減積。可參考圖3.3所示。

## (3) 分離裝置

由於廢料中常含有不可燃之物質、金屬物質……等，可利用這些物質之比重大小或帶磁性與否將其分離，常見之分離法有風力分離、水體沉浮分離或磁選分離，可參考圖3.3 所示。

## 3. 進料設施

由於進過程中，很容易讓外界空氣洩入爐內，造成燃燒不穩定現象，因此常見之進料方式為二段式之進料推桿進料器(ram feeder)見圖 3.4所示，除此之外液體常利用噴霧(atomizing)進料見圖4.3所示。對於污泥可利用螺旋式輸送器(screw feeder)進料。

## 4. 爐體

一般焚化爐之爐體型式，大致分為水牆式爐體、耐火磚式爐體與耐火水泥式爐體，水牆式是以水夾套來降低內層鐵材之溫度，而耐火磚式爐體大致可分為耐火磚、斷熱材與鋼材三層。而耐火水泥式爐體是以可鑄性耐火水泥(castable cement)當作耐火材，並利用錨釘固定耐火材於外層鋼板上。

## 5. 輔助燃燒裝置

一般焚化爐大多裝置兩套輔助燃燒裝置，一套裝置在第一燃燒室內，主要目在啓爐昇溫、點火與維持第 1燃燒室之爐溫。另一套裝置可能裝置在第一燃燒室之出口處，也可能裝置在第 2燃燒室，目的在提昇至一定之爐溫以達到除煙脫臭之效果。

## 6. 送風與排氣扇裝置

送風之目的提供焚化爐燃燒所需要之空氣，排氣之目的在克服整體爐內壓損，而維持一定爐壓，使得爐內穩定燃燒，並排出爐內產生之燃燒氣體(flue gas)，因此才有送風扇(froced draft fan)與排氣風扇(induced draft fan)兩種。

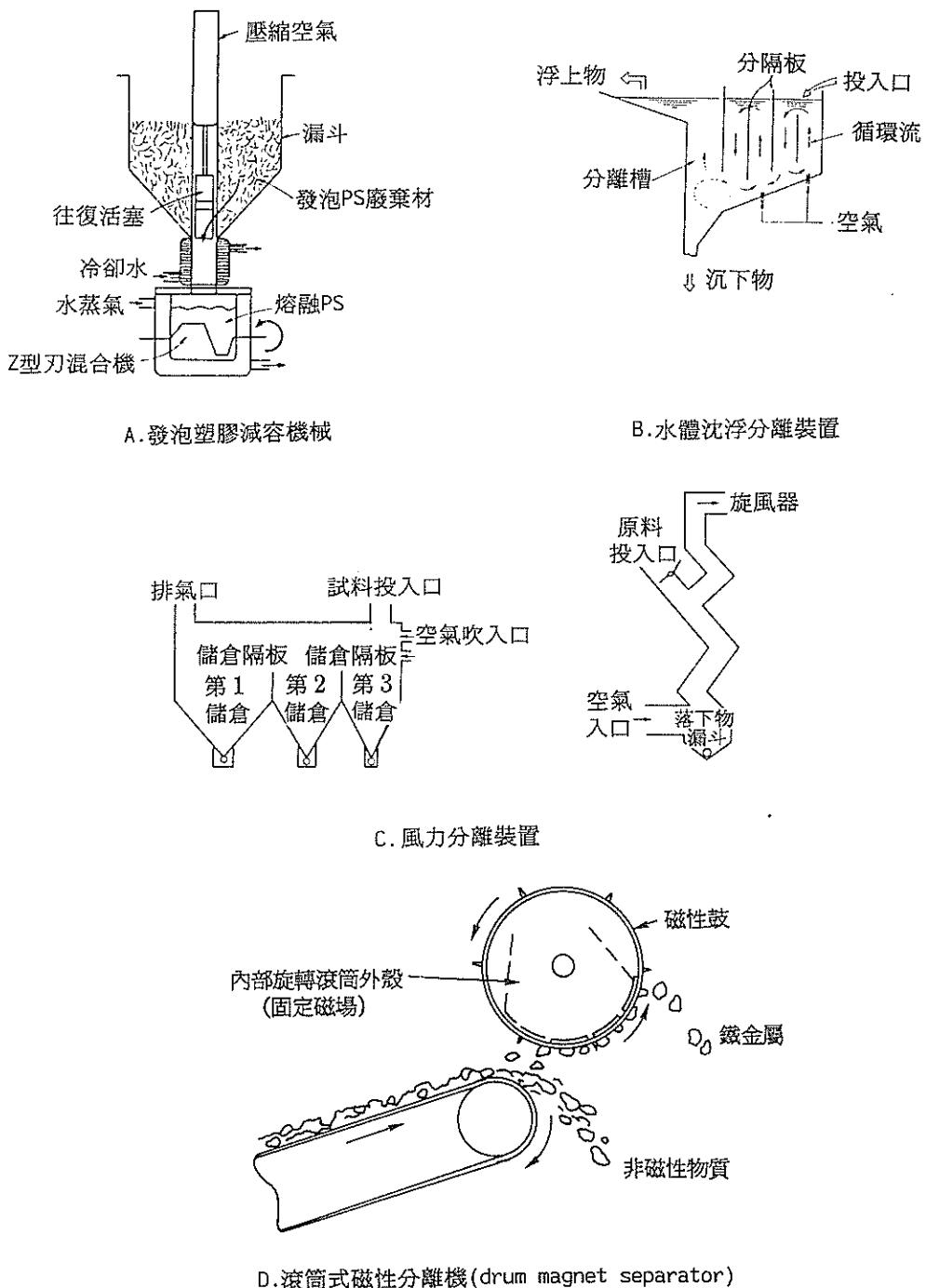


圖3.3 分離裝置示意圖

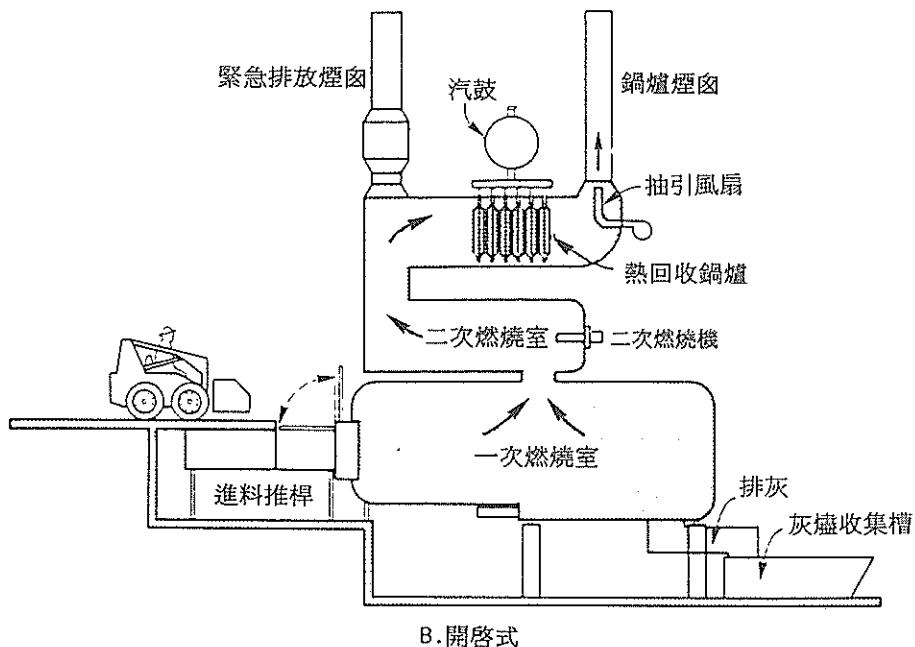
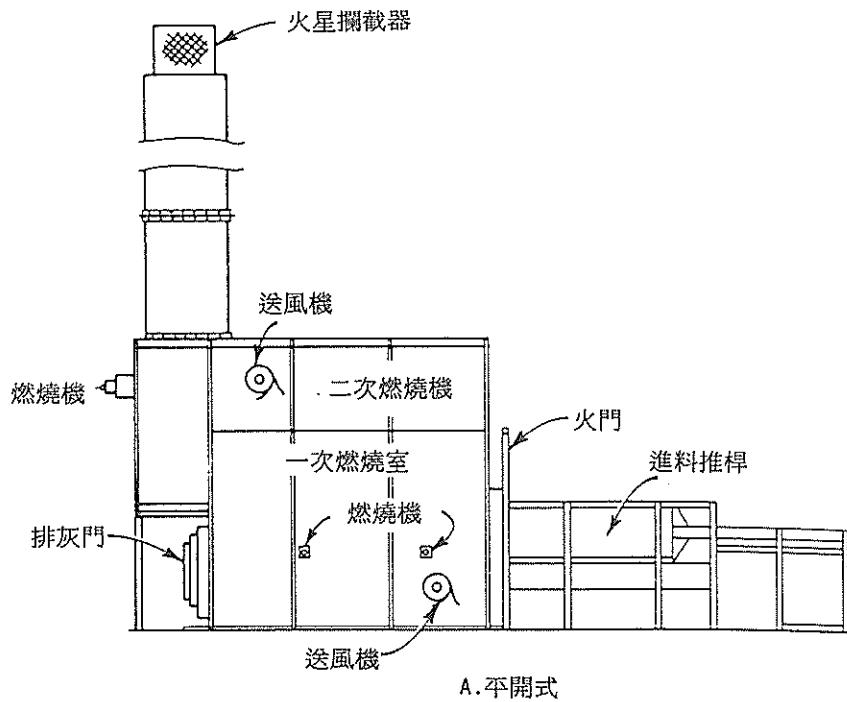


圖 3.4 不同進料方式之爐門示意圖

## 7. 排灰裝置

排灰裝置主要在排出爐內燃燒所剩下灰燼，避免因過度累積而被吹出爐內排至煙囪，造成粒狀物污染，一般常見之排灰裝置有人工清灰之排灰室方式，當爐床上之灰燼累積一定量後，自然重力落入排灰室，見圖3.5 所示。另一種採自動清灰裝置，利用推灰桿或螺旋排灰裝置，將灰燼排出爐內。見圖3.6 所示。不過一般推灰桿或螺旋排灰裝置處於高溫爐體內，因此常利用軸心冷卻空氣降低裝置內之溫度或利用保護耐火材作為掩體避免長時間受高溫火焰侵蝕破壞，並利用外圍送之冷空氣送風孔以降低推桿表面之溫度。

## 8. 其他（廢氣冷卻系統、廢熱交換裝置、空氣污染防治設備…等）。

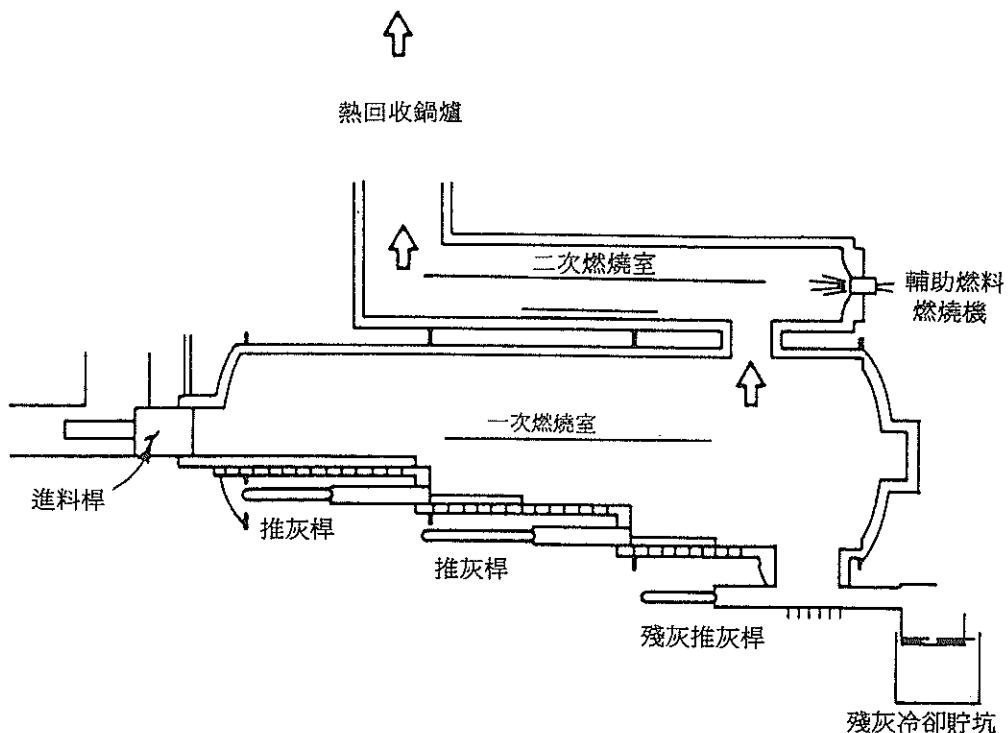


圖3.5 推灰桿式排灰裝置

## 3.2 燃燒原理與特性

燃燒是一種劇烈的氧化反應，常伴有光與熱之現象，即熱輻射，常伴有火焰 (flame) 現象。而火焰乃是燃燒放熱過程中能量急速釋放所致。若釋放之速度愈快，亦即火焰溫度愈高所產生之火焰顏色接近赤白色。而一般廢棄物之組成中絕

大多數為碳素，因此所產生之火焰顏色以黃色為主，因此可藉由燃燒過程之火焰顏色以判定爐溫狀況，可參考表3.1上所示。

表3.1 焰色之近似溫度<sup>6</sup>

焰 色	溫 度 (°C)
暗 色	500
暗 紅 色	700
橙 紅 色	900
橙 黃 色	1,000
白 色	1,300
赤 白 色	1,500

廢棄物之焚化及是燃燒型式中的一種型態。一座理想之焚化爐應具備有燃燒速率快，同時產生最大的能量，並且所產生之污染氣體與粉塵最少。因此必須對廢棄物之燃燒有充份之瞭解，並且有效的控制才能達到上述之理想。當然地，必須借助良好焚化爐設計與正確的操作。以下乃針對燃燒之特性、燃燒方式與空氣污染物形成原因介紹之。

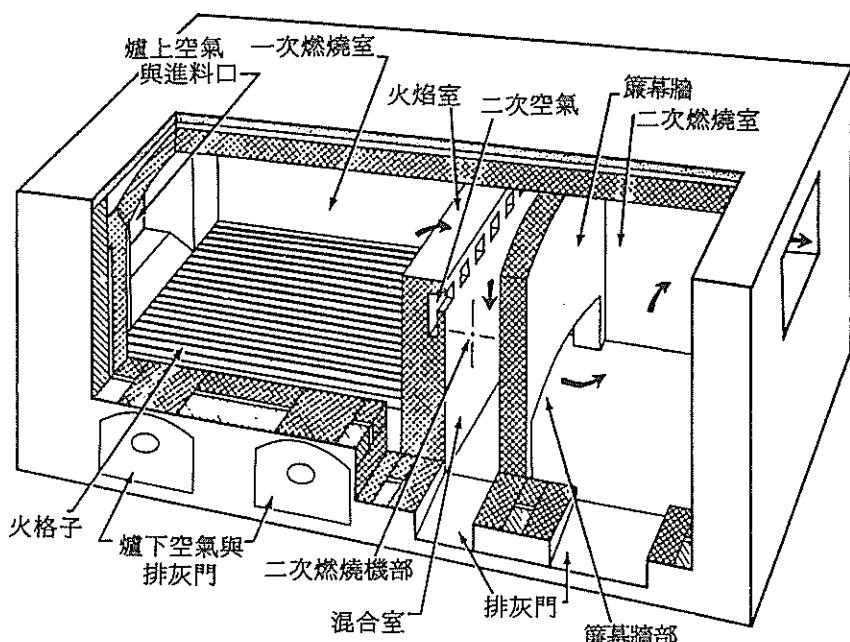


圖3.6 人工排灰式焚化爐(附排灰室)

### 3.2.1 廢棄物之燃燒特性

焚化是一種非常複雜的強烈氧化燃燒反應，內容包括熱化學、反應動力學與流體動力學…等，一個完全燃燒氧化之反應，可以下式為例：



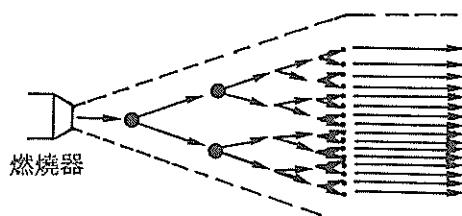
在反應過程中會形成 $CO_2$ 、 $HCl$ 、 $N_2$ 、 $SO_2$ 與 $H_2O$ 等產物，但事實上完全燃燒反應只是一種理論上之假說。因此在實際燃燒過程中面臨著廢棄物與氧氣混合之質傳問題，包括了流場及擴散現象，氧化物之生成是屬於化學反應，包括了溫度與熱傳現象，綜合上述一個有機廢棄物在燃燒過程中，有成千上萬種反應途徑，最終的反應產物不見得是上述之 $CO_2$ 、 $HCl$ 、 $N_2$ 、 $SO_2$ 與 $H_2O$ ，若燃燒控制不良可能產有毒之燃燒氣體，包括：戴奧辛(dioxine)、多環碳氫化合物(PAH)、醛類…等。不過仍不用太過悲觀，只要加入足夠的氧氣、溫度、反應停留時間與有計劃控制燃燒反應，仍可使燃燒反應趨近理論燃燒特性，不致產生有毒燃燒氣體。

一般而言，燃燒係為物質急劇氧化反應而產生熱與光之現象，其燃燒機構有蒸發燃燒、分解燃燒(裂解燃燒)、擴散燃燒與表面燃燒。其中蒸發燃燒、分解燃燒與擴散燃燒又稱火焰燃燒(flame combustion)。液體燃燒反應主要以蒸發燃燒(evaporation combustion)與分解燃燒為主。而氣體燃料燃燒以擴散燃燒為主。固體燃料燃燒包括：分解燃燒、蒸發燃燒、表面燃燒與擴散燃燒。

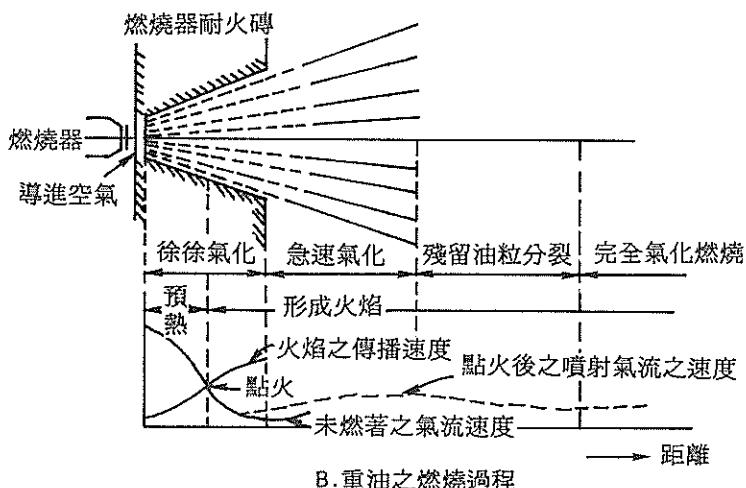
#### 1. 液態燃料燃燒

液態燃料燃燒，依其成份有其一定燃燒範圍，而在其範圍內進行燃燒，燃燒速度隨燃料與空氣量或氧氣量混合率而變，火焰燃燒一般的現象為火焰係在燃燒器出口噴射速度與燃燒速度平衡的地方著火形成的。一般液態燃料或廢液多採用霧化(atomizing)方式將其氣化(vaporizing)成氣態狀態的碳氫化合物，在氣化過程中，剛開始使其徐徐氣化，當達火焰傳播速度與未燃著時之氣流速度相同時，點火燃燒，待完全點火燃燒後，急速氣化燃燒，其後殘留油粒燃燒，最後完全氣化燃燒，完全變為火焰後，此時僅剩 $CO$ 之燃燒，為火焰溫度最高區域，此過程可參考圖3.7所示。

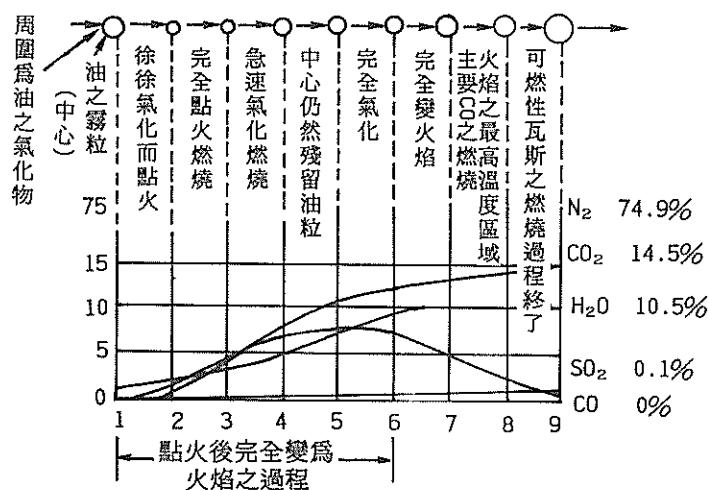
依燃燒與空氣比例之燃燒型態來分，可分為三類，當燃燒產物中不殘留氧氣與燃燒時，則稱之為完全燃燒或稱中性焰燃燒(neutrol flame combustion)。當空氣不足時，燃料過剩時，燃燒產物中殘留有燃料而產生黑煙(soot)，稱之為還原焰燃燒(reducing flame combustion)。當空氣過剩或燃料不足，且爐溫高而均勻混合，則燃燒產物中殘留有氧氣，稱之為氧化焰燃燒(oxidation



A. 噴霧油粒之分裂過程



B. 重油之燃燒過程



C. 噴霧之氧化與燃氣的生成過程

圖 3.7 燃燒反應與燃燒機構<sup>12</sup>

flame combustion)。一般而言，還原焰燃燒火焰長而帶黑煙，表示燃燒不完全，燃燒效率低，浪費燃料；氧化焰燃燒火焰短而清，過剩的空氣吸收熱量自煙函散失，一般重油燃燒空氣比僅要1.1~1.3，而廢液焚化爐之空氣比約1.4~1.7左右。

## 2. 固態燃料（廢棄物）燃燒<sup>5,2</sup>

火焰燃燒是氣相反應現象，焚化的時候，都是從固態狀態轉變為氣態狀之碳氫化合物，然後才與氧進行燃燒，但是固體廢棄物並不如液體燃料可直接揮發至氣相中燃燒，皆需先經過熱裂解，產生成份複雜之碳氫化合物，這些碳氫化合物繼而從廢棄物表面揮發，隨之與氧氣充份接觸，形成火焰，快速燃燒。一般在分解燃燒中，幾乎看不到火焰，或火焰顏色暗淡，只有充份揮發氣化後與氧氣接觸燃燒後，才發現有光耀火焰燃燒。因此裂解是一個非常重要的過程，也是有計劃控制燃燒反應之關鍵，因此才有控氣式焚化爐(controlled air incinerator)之出現。一般有機性固體廢棄物受熱燃燒之情形，可見圖3.8所示。

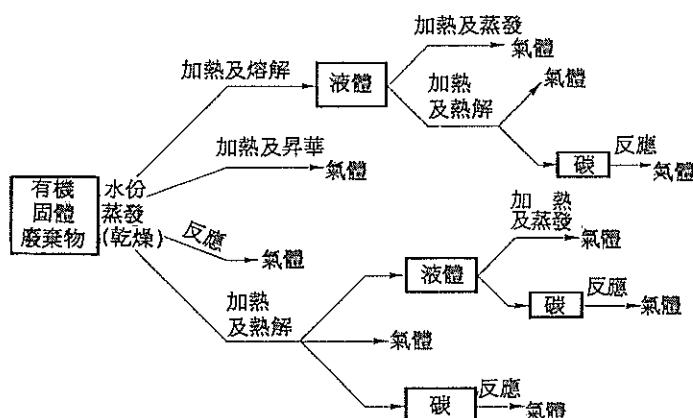


圖3.8 固體廢棄物受熱後之相變化

其中碳顆粒(soot)乃是黑煙生成之主要原因，其碳顆粒形成之主要途徑可以參考圖3.9。可分為直接凝縮反應(condensation reaction)與間接斷鍵反應(fragmentation reaction)而形成碳顆粒(soot)。一般經由凝縮反應形成之顆粒較大，類似石墨狀之結構，可經由撞擊或凝縮現象形成1,000~10,000個結晶體，每個結晶體含有5~20層碳粒子。若經由直鏈分子斷鍵所形成之碳顆粒，粒徑比上述凝縮反應形成之碳顆粒為小，約在0.01~0.1μm間。

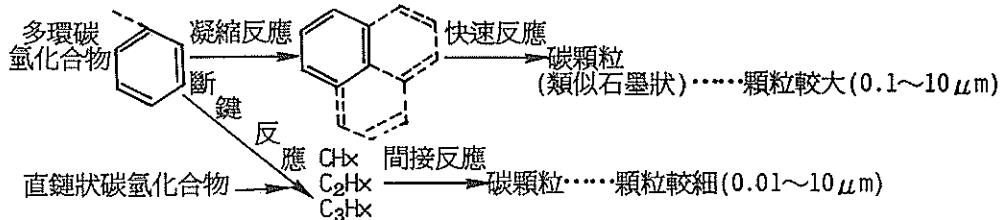


圖 3.9 碳顆粒形成途徑<sup>5</sup>

### 3.2.2 廢棄物焚化爐之燃燒方式

燃燒是一種氧化反應，因此在燃燒控制方面，不外乎3T控制，即爐溫 (temperature)、停留時間 (time) 與擾動現象 (turbulent)。一座理想之焚化爐，乃希望以最少空氣量能達到最高爐溫，並使廢棄物與燃燒空氣 (combustion air) 充分接觸、燃燒氣流 (flue gas) 與燃燒空氣 (combustion air) 充份擾動混合，達到污染物形成最少之目標。其中擾動方式乃是問題之關鍵，一般擾動方式可分為以下幾類：空氣氣流擾動方式、機械爐床擾動方式、砂床流體化擾動及旋轉窯式擾動。其中小型模製式焚化爐多數屬於固定爐床式，擾動方式多藉由氣流之流動產生，依據燃燒氣體之流動方向分類，大致可分為：反向流（逆送）、同向流（正送）、爐床下送風 (underfire air)、爐床上送風 (overfire air) 及旋渦流 (swirl flow) 等幾類。除此之外，依照燃燒加入空氣階段數分類，可分為：單段燃燒、多段燃燒。依照燃燒空氣供應量分類，可分為：過氧燃燒、缺氧燃燒（控氣式）熱解燃燒等方式，以下乃針對這幾類燃燒方式分類介紹之。

#### 1. 燃燒氣體流動方式分類<sup>6</sup>

##### (1) 反向流（逆送）

焚化爐之燃燒氣體與輔助燃料之燃燒氣體流動方向，與廢棄物流動方向相反之場合，適合難燃性、閃火點高之廢棄物燃燒。

##### (2) 同向流（正向）

焚化爐燃燒氣體流動方向與廢棄物移動方向相同之場合，適用於易燃性、閃火點低之廢棄物燃燒。

##### (3) 爐床下送風

空氣自爐床下送風，由廢棄物中之孔隙中竄出，這種擾動方式很容易將不可燃之底灰 (bottom ash) 或未燃碳顆粒 (soot) 隨氣流而被帶出，而形成粒狀物污染，其優點是由於廢棄物與空氣接觸機會大，熱灼燒減量較好，廢棄物燃燒較完全。

##### (4) 爐床上送風<sup>13</sup>

空氣是由爐床上方送風，當廢棄物進入爐內時，從廢棄物之表面開始燃

燒，其優點是形成之粒狀物較少，其缺點是熱灼燒減量效果較差。

#### (5) 旋渦流

造成爐內燃燒氣流之旋渦性，可使爐內氣流擾動性增大，所行走路徑長，故相對短流現象不易發生，廢氣停留時間長，而且燃燒氣體由爐周圍方向切線加入，氣流中間溫度非常高，氣流周圍溫度並不高，故燃燒較為完全。

### 2. 燃燒空氣加入段數分類

#### (1) 單段燃燒

由於廢棄物在燃燒過程中，開始是先將水份蒸發，因必須克服水份的潛熱後，溫度開始上升，故反應時間長。其次是廢棄物中之揮發份開始熱分解，成為揮發性碳氫化合物，進行蒸發燃燒(combustion by evaporation)，將在瞬間下迅速進行。最後才是碳顆粒之表面燃燒(surface combustion)，燃燒反應時間長，約需數秒至數十秒，才能完全燃燒完畢，上述燃燒過程可參考圖3.10之廢棄物燃燒過程。因此單段燃燒反應時，一般必須送入大量之空氣，即空氣比必須要大，且停留時間要長，才能將未燃完之碳顆粒完全燃燒。

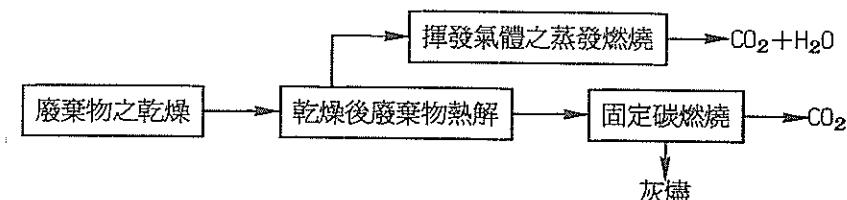


圖3.10 廢棄物之燃燒過程<sup>13</sup>

#### (2) 多段燃燒<sup>13</sup>

一次燃燒過程中，提供未充足之空氣量，使廢棄物進行蒸發、熱解燃燒反應，因此在反應過程中，將會產生大量碳顆粒(soot)、CO與碳氫化合物氣體，於第二次、三次燃燒過程，逐次進行氧化反應，其優點是逐次階段性反應，燃燒所必須供應之氣體量不需要太大，因在第一燃燒室內送風量小，不易將底灰帶出，故產生之粒狀物之可能性較少。

### 3. 依燃燒室空氣供給量分類

依第一燃燒室供給之空氣量分類，大致可分為以下三類型，第一種是過氧燃燒即是第一燃燒室供給充足之空氣量（即超過理論空氣量），第二種是缺氧(starve air)燃燒即是使第一燃燒室處於缺氧狀態，供給之空氣量約是理論空氣量的70~80%，使廢棄物在此室內裂解成較小分子之碳氫化合物氣體、CO與少量微細之碳顆粒(soot)，待第二燃燒室內再供給充份空氣使其氧化成安定之

氣體，由於藉由階段性之空氣供給，可使燃燒反應較趨於穩定，相對所產生污染物較少，且於第一燃燒室供給之空氣量少，相對地，所帶出之粒狀物質也較少，為目前焚化爐設計與操作較常使用之模式。第三種是熱解型燃燒，此種焚化爐適合處理高熱值之廢棄物，在設計原理與熱解爐相似，在控制上乃藉由燃燒機使爐體昇溫，並加入少量之空氣於燃燒室內，約是理論空氣量之20~30%，加速廢棄物裂解反應之進行，裂解後之排氣中僅有微量之粉塵與大量之碳氫化合物氣體與CO，加入充足之空氣使其迅速燃燒與放熱，由於燃燒所供應之空氣量可再降低，而部份可回收裂解油，再為利用，不過此燃燒型式使用技術並未十分成熟。

### 3.2.3 焚化廢氣污染形成機構<sup>2,5</sup>

在燃燒反應中，依廢棄物之組成與操作之條件，會形成HCl、HF、SO<sub>x</sub>等酸性氣體、氮氧化物及含鉛、汞等有害金屬或因燃燒不完全而產生的CO及有害性之碳氧化合物，諸如戴奧辛、呋喃等等，這些廢氣中的污染物，則成為焚化處理時，造成二污染的關鍵所在。

一般事業廢棄物焚化常見的空氣污染物包括：粒狀污染物、酸性氣體、氮氧化物、重金屬、一氧化碳與有機氯化物等等，以下乃分別敘述其焚化廢氣污染物形成機構。

#### 1. 粒狀污染物<sup>2</sup>

在焚化過程中所產生之粒狀污染物大致可分為三類：(1)廢棄物中之不可燃物，在焚化過程中（較大殘留物）成為底灰排出，而部份的粒狀物則隨廢氣而排出爐外成為飛灰(fly ash)，飛灰所佔的比例因爐子操作條件（送風量、爐溫…）、粒狀物尺寸、形狀與其密度而定，一般所產生之粒狀物粒徑大於10 μm，極易利用空氣污染防治設備去除，這些粒狀污染物主要成份為SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、微量金屬。(2)部份無機鹽類在高溫之下氯化而排出，於爐外遇冷而凝結成粒徑物，或二氧化硫氣體在低溫下遇水滴而形成硫酸鹽霧狀微粒等。(3)未燃燒完全所產生之碳顆粒與煤煙，通稱為"soot"，由於粒徑約在0.1~10 μm之間，由於所產生顆粒非常微細，很難用空氣污染防治設備去除，較好的處理方式，是利用高溫下氧化分解，其高溫氧化碳顆粒之經驗式，可利用下式計算之：

$$q = \frac{P_{O_2}}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_d}}$$

可推導出廢氣停留時間(sec)為：

$$t_b = \frac{1}{P_{O_2}} \left[ \frac{d_o}{\frac{35700}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{1600} \right)} + \frac{d_o^2}{5.04 \times 10^{-6} T^{0.75}} \right]$$

$P_{O_2}$  : 氧氣分壓 (atm)

$$k_d : \text{擴散速度常數} ; k_d = \frac{4.35 \times 10^{-6} T^{0.75}}{d}$$

R : 氣體常數  $1,986 \text{ kcal/kg} \cdot \text{mole} \cdot ^\circ\text{K}$

$$k_s : \text{反應速度常數} ; k_s = 0.13 \exp \left[ \left( -\frac{35,700}{R} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{1600} \right) \right]$$

T : 反應溫度 (K)

d<sub>o</sub> : soot 之粒徑 (cm)

q : 碳顆粒之消耗率 ( $\text{g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ )

[例] 假設  $P_{O_2} = 0.06 \text{ atm}$ ,  $T = 1273 \text{ K} = (1000^\circ\text{C})$ ,  $d_o = 20 \mu\text{m} = (20 \times 10^{-4} \text{ cm})$ ,  
 $R = 1.986 \text{ kcal/kg} \cdot \text{mole} \cdot ^\circ\text{K}$ ,  $t_b = 4.657 \text{ sec}$

即氧氣分壓在  $0.06 \text{ atm}$  下，爐溫  $1,000^\circ\text{C}$  之情況下，氧化  $20 \mu\text{m}$  之 soot，需廢氣停時間  $4.657 \text{ 秒}$ 。同理在  $P_{O_2} = 0.10 \text{ atm}$  下，爐溫  $1000^\circ\text{C}$  之情況下，可得到如下之情況。

soot 顆粒徑 ( $\mu\text{m}$ )	停留時間 (sec)
0.1	0.014
1.0	0.152
10	1.402
20	2.804

依據煤炭燃燒之研究結果，降低火焰高溫區溫度、增加過量空氣比，減少火焰與廢氣之溫降速率，而且加入添加物以促進冷凝核的形成等因素，都有助於減少小粒徑粒狀污染物之形成。

## 2. 一氧化碳

由於一氧化碳燃燒所需之活化能很高，它是燃燒不完全過程中之主要代表性產物。依據一氧化碳氧化之動力反應如下式：

$$-\frac{df_{CO}}{dt} = 12 \times 10^{10} \exp\left[-\frac{16,000}{RT}\right] f_{O_2}^{0.3} f_{CO} f_{H_2O}^{0.5} \left[\frac{P}{R'T}\right]^{1.8}$$

$f_{CO}$ 、 $f_{O_2}$ 、 $f_{H_2O}$ ：CO、O<sub>2</sub>與H<sub>2</sub>O的莫耳分率

R：氣體常數(1.986 kcal/kg·mole·K)

R'：氣體常數(82.06atm·cm<sup>3</sup>/g·mole·K)

$$\frac{(f_{CO})_t}{(f_{CO})_i} = \exp(-kt)$$

$$\text{破壞去除率} = \left(1 - \frac{(f_{CO})_t}{(f_{CO})_i}\right) \times 100\%$$

$(f_{CO})_i$ ：燃燒前CO之莫耳分率

$(f_{CO})_t$ ：燃燒後CO之莫耳分率

$$\text{而動力常數 } K = 12 \times 10^{10} \exp\left[-\frac{16000}{RT}\right] f_{O_2}^{0.3} f_{CO} f_{H_2O}^{0.5} \left[\frac{P}{R'T}\right]^{0.8}$$

若採取較保守之經驗式，可採用Morgan式，估計之：

$$-\frac{df_{CO}}{dt} = 1.8 \times 10^{13} f_{CO} f_{O_2}^{0.5} f_{H_2O}^{0.5} \left[\frac{P}{R'T}\right] \exp\left[-\frac{-25000}{RT}\right]$$

$$\text{動力常數 } K = 1.8 \times 10^{13} \exp\left[-\frac{25000}{RT}\right] f_{O_2}^{0.5} f_{H_2O}^{0.5} \left[\frac{P}{R'T}\right]$$

[例] 若假設某廢氣組成中H<sub>2</sub>O之莫耳分率0.05，O<sub>2</sub>之莫耳分率0.05，廢氣停留時間0.5秒，依據Morgan式可得到如下結果：

爐溫(K)	400	500	600	700	800	900	1000
破壞去除率(%)	0	0.013	0.70	11.41	63.41	99.41	100

[例] 若假設某廢氣組成中H<sub>2</sub>O之莫耳分率0.15，O<sub>2</sub>之莫耳分率0.15，廢氣停留時間0.5秒，依據Morgan式可得如下結果：

爐溫(K)	400	500	600	700	800	900	1000
破壞去除率(%)	0	0.038	2.10	30.52	95.10	99.99	100

由上式得知氧氣含量愈高時，愈有利於CO氧化成CO<sub>2</sub>。不過上式乃是理論式，事實上焚化過程中仍夾雜之碳顆粒(soot)，仍繼續燃燒反應進行仍可能產生CO，因此焚化爐之二次燃燒室最好設計爐溫在1,000°C(1,273K)，廢氣停留時間為1秒左右較為理想。

除此之外，若焚化爐有機性氯化物時，由於有機性氯化物化學性質，大多很安定，在燃燒反應進行時，常夾雜CO與中間性燃燒產物，而中間性燃燒產物（包括：Dioxine、PAH、呋喃…等）之廢氣分析上較為困難，因此常以CO之含量來判定燃燒反應之完全性與否。

### 3. 酸性氣體<sup>2,5</sup>

焚化所產生的酸性氣體，主要包括SO<sub>x</sub>、HCl與HF等，這些污染物都是直接由廢棄物中之S、Cl、F等元素，經焚化反應而形成，諸如含氯之PVC塑膠會形成HCl，含氟的塑膠會形成HF，而含硫的煤焦油則會產生SO<sub>2</sub>。據國外研究一般都市垃圾中硫含量為0.12%，其中約30~60%有轉化為SO<sub>2</sub>，其餘則殘留於底灰或被飛灰所吸收；除此之外廢棄物含CaO有將有助於脫硫效果，目前為止可利用之流體化動床式焚化爐內加入石灰石，將有助減少硫氧化物之產生。

### 4. 氮氧化物<sup>2,5</sup>

焚化所產生之NOx主要來源有二，一是高溫下，N<sub>2</sub>與O<sub>2</sub>反應形成熱氮氧化物(Thermal NOx)，其Thermal NOx之動力平衡公式

$$K_p = \frac{(NO)^2}{(N_2)(O_2)} = 21.9 \exp \left[ -\frac{43400}{RT} \right]$$

$$R = 1.986 \text{ kcal/kg} \cdot \text{mole} \cdot \text{K}$$

T = 絕對溫度 K

(NO)、(N<sub>2</sub>)、(O<sub>2</sub>)：為NO、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>之分壓(atm)

另一為廢棄物中之氮組成轉成NOx，稱為燃料氮形成之氮氧化物(Fuel NOx)

$$Y = \left[ \frac{2}{\frac{1}{Y} - \left( \frac{2500}{3150} \right) \exp \left( -\frac{2500}{T} \right) \left( \frac{N_{fo}}{O_2} \right)} \right] - 1$$

Y：為N轉化成NO之轉化率

T：絕對溫度

N<sub>fo</sub>：為N完全轉化成NO之濃度(gmole/cm<sup>3</sup>)

O<sub>2</sub>：為排氣中殘餘氧氣濃度(gmole/cm<sup>3</sup>)

$$\text{令 } A = \left[ \frac{2500}{3150} \right] \left[ \frac{N_{fo}}{O_2} \right] \exp \left( -\frac{2500}{T} \right)$$

$$Y = \left[ \frac{2}{\frac{1}{Y} - A} \right] - 1; Y = \frac{-(A+1) + \sqrt{(A+1)^2 + 4A}}{2A}$$

Fuel NOx濃度 =  $Y \times N_{f_0}$

假設  $O_2 = 8.416\% = 8.416 \times 10^4 \text{ ppm}$ ,  $N_{f_0} = 3649.88 \text{ ppm}$

$N_2 = 72.123\%$ ，可得下列之數據：

污染物 溫度(°C)	燃料氮形成 之氮氧化物 (ppm)	熱氮氧化合物 (ppm)	合 計 (ppm)
600	578.5	4.2	582.7
700	816.1	15.3	831.4
800	1056.7	43.6	1100.3
900	1288.0	103.8	1391.8
1000	1503.3	682.5	2185.8

## 5. 重金屬

廢棄物的無機物中，含有金屬元素，部份在爐中成為底灰外，另外則受熱氯化揮發而被爐氣帶走，接著因溫度降低而冷凝。其凝結可能成為很均勻的小粒狀物；也可能凝結於飛灰之粒狀物上；前者的粒徑都在  $1 \mu\text{m}$  以下，而後者也多凝結於小粒狀物上，因其單位重量有較大的表面積，因此小粒狀物上的金屬濃度將比大顆粒者為高。又因小顆粒之捕集不易，增加其困擾性，另外部份金屬物在爐中參與反應成氯化合物、硫化物或氧化物，這些化合物都比原金屬元素更易氯化揮發，同樣的它們也會再冷凝而成為小粒狀物。不過其轉化成為底灰之殘留物、飛灰或薰煙(fume)的流程受廢氣物組成、爐內溫度、空燃比與爐氣之流速等因素之影響。各種金屬及其化合物之揮發度如表3.2。其中，汞、砷等蒸汽壓均大於  $760 \text{ mmHg}$ ，故多以蒸氣狀態存在。

表3.2 重金屬及其化合物之揮發度<sup>9,22</sup>

名稱	沸點(°C)	蒸氣壓(mmHg)		類別
		760°C	980°C	
汞 (Hg)	357	—	—	揮發
砷 (As)	615	1,200	180,000	揮發
鎘 (Cd)	767	710	5,500	揮發
鋅 (Zn)	907	140	1,600	揮發
氯化鉛(PbCl <sub>2</sub> )	954	75	800	中度揮發
鉛 (Pb)	1,620	$3.5 \times 10^{-2}$	1.3	不揮發
鉻 (Cr)	2,200	$6.0 \times 10^{-3}$	$4.4 \times 10^{-5}$	不揮發
銅 (Cu)	2,300	$9.0 \times 10^{-3}$	$5.4 \times 10^{-5}$	不揮發
鎳 (Ni)	2,900	$5.6 \times 10^{-10}$	$1.1 \times 10^{-6}$	不揮發

## 6. 毒性有機性氯化物

一般焚化爐常會產生的毒性有機物主要指的是戴奧辛(dioxin)與呋喃(furan)；dioxin是指聚氯二苯—對—戴奧辛PCDDs(polychlorinated dibenzo-p-dioxins)是一族含有75個相關化合物的通稱，furan是指聚氯二苯呋喃PCDF (polychlorinated dibenzo-furans) 是一族含有135個相關化合物的通稱，其中又以三氯—對—二苯—對—戴奧辛 2,3,7,8-tetrachloro-p-dibenzo-p-dioxin 為毒性最强者之一。PCDD與PCDF形成的主要可能的機構包括：(1)廢棄物中既存毒性物的殘留。(2)從PCB 等相近結構氯化物分解或組合而形成。(3)有機物與氯化物用而成。(4)飛灰與氯化物在低溫下經觸媒反應而形成。高溫焚化是防治PCDD與PCDF最好的方法，估計在 925°C以上這些毒性有機物即開始被破壞，足夠的空氣與廢氣在高溫區的停留時間可以再降低其破壞溫度。

綜合上述，可歸納整理成以下兩點燃燒控制參數：

- 以固定床式焚化爐而言，空氣比約控制在2.0左右（排氣含氧量約 10%）情況下，焚化爐排氣中未燃燒完全之碳顆粒(soot)，粒徑約在0.1~10 μm間，若要完全破壞10 μm 之碳顆粒(soot)，依據理論經驗式計算，需要在廢氣溫度1,000°C，廢氣停時間1.4sec以上，才可能將此碳顆粒完全破壞。
- 依據理論經驗式計算，排氣中含氧量在10%左右，完全破壞一氧化碳之條件，廢氣停留時間0.5秒時，爐溫需要控制在700~800°C以上。

### 3.3 焚化爐質能平衡計算

焚化爐質能平衡計算乃是規劃設計過程中之一項重要步驟，在此之前必須先確定廢棄物之產生量與設計容量、物化特性。當確立上述特性之後，再進行質能平衡計算，以提供我們瞭解完全燃燒之排氣組成、爐溫之變化等基本資料，供後續之爐體大小、尺寸、送風機、燃燒機、耐火材料…等附屬設備設計參考之依據，以下章節乃針對焚化爐系統之規劃程序與質能平衡計算方式簡單介紹之。

#### 3.3.1 焚化爐系統規劃程序

就焚化爐整體系統之規劃工作，包括：廢棄物處理量與特性之確立、質能平衡計算、爐型與燃燒方式之選擇、爐體尺寸規格之計算、附屬設備與空氣污染防治設備之規劃設計和爐渣、粉塵之最終處置方式之考量。以下乃針對焚化爐系統規劃流程圖（見圖3.11）作概略性介紹。

#### 3.3.2 質量平衡計算

在焚化爐設計中，質量平衡計算是一種非常重要步驟，其目的大致有以下幾種功用：

- (1)瞭解進、排氣量資料，供後段鍋爐、空氣污染防治設備與抽、送風扇設計資料之參考。
- (2)瞭解排氣中空氣污染物組成 (SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、HCl...)，以選擇適當之空氣污染防治設備。
- (3)供能量平衡計算資料之用。
- (4)設計焚化爐週邊設施參考之用。
- (5)其他

以下為質量平衡計算之重要公式、操作參數。

#### 1. 理論燃燒空氣量<sup>6</sup>

理論燃燒空氣量之定義即是提供廢棄物（或燃料）完全燃燒時，所需要之最低空氣量，一般以 A 表示之。其計算方式是假設液體或固體廢棄物 1kg 中的碳、氫、氮、氧、硫、灰份以及水份之重量 (kg) 分別以 C、H、N、O、S、Ash 及 W 表示之，則理論燃燒空氣量為

$$A_o = \frac{22.4}{0.21} \left[ \frac{C}{12} + \frac{1}{4} \left( H - \frac{0}{8} \right) + \frac{S}{32} \right] \text{Nm}^3 \cdot \text{Air/kg} \cdot \text{Waste} \quad (\text{容積式})$$

$$A_o = \frac{32}{0.21} \left[ \frac{C}{12} + \frac{1}{4} \left( H - \frac{0}{8} \right) + \frac{S}{32} \right] \text{kg} \cdot \text{Air/kg} \cdot \text{Waste} \quad (\text{重量式})$$

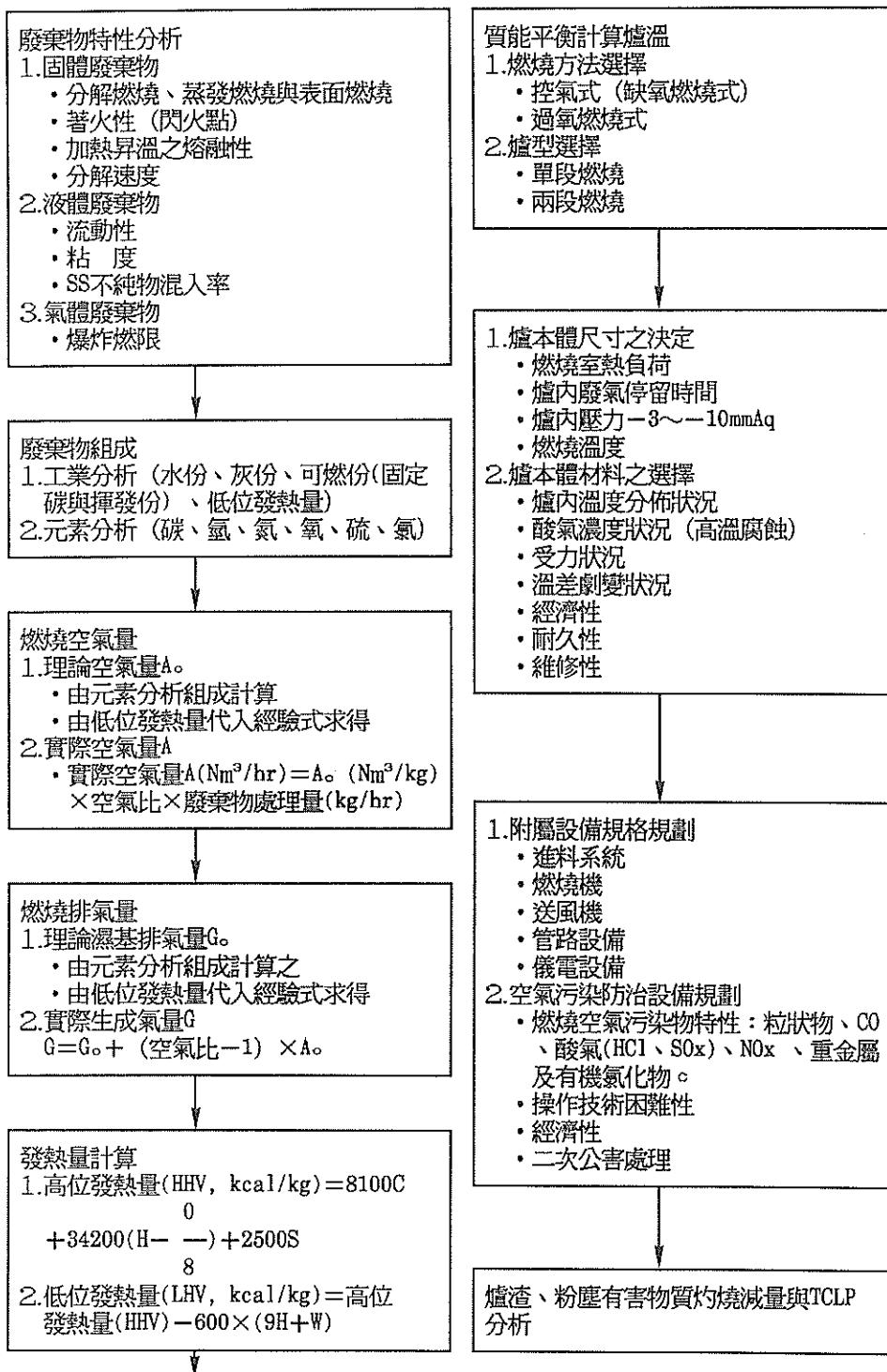


圖 3.11 焚化爐規劃設計流程圖

上式中的(H-0/8)稱之為有效氫，因為燃料中的氫是以結合水的狀態存在，由於這些與氧結合成水的氫無法利用於燃燒中，故需要將其從全氫中減去。

## 2. 空氣比

廢棄物在燃燒裝置中燃燒時，如果只供給理論空氣量是很難使其完全燃燒的，因此，在實際上通常必需要供給比理論空氣量更多的量才能夠使其完全燃燒。如果實際供給的空氣量以A來表示時，則A與A<sub>0</sub>之關係如下：

$$A = mA_0 \quad (m > 1.0)$$

在此，m 為空氣比，(m-1)×100% 則稱為過剩空氣率 (excess air ratio)

一般廢棄物焚化爐，所需要之空氣比約在1.5~2.0左右即可，可參見下表3.3 所示。

表3.3 常見廢棄物焚化之空氣比<sup>6</sup>

廢棄物種類	空氣比
汙泥	1.2~2.0
廢油或廢液	1.4~2.5
廚餘類	1.8~2.5
動物糞便	1.5~2.5
動物屍體	1.5~2.5
一般垃圾	2.0~2.5
木屑	2.0~2.5
廢塑膠 (水冷式爐)	1.6~2.0
廢塑膠 (耐火材料爐)	2.0~2.5
廢輪胎 (橡膠)	2.0~2.5
重油	1.15~1.35
柴油	1.15~1.3

## 3. 燃燒排氣組成

### (1) 理論燃燒排氣量

假定燃料以理論空氣量就完全燃燒時之燃燒排氣量稱之為理論燃燒氣體量。如果燃料組成為已知時，即可經由計算來求出。理論燃燒氣體量也可以分成潮濕氣體和乾燥氣體來考慮，如果分別以G<sub>0</sub>和G<sub>0'</sub>來表示，並且將實際

氣體量的潮濕氣體和乾燥氣體分別以G和G'來表示時，則其間之關係可由下列式子來表示。

$$G = G_0 + (m - 1)A_0$$

$$G' = G_0' + (m - 1)A_0$$

## (2) 排氣組成

固體或液體廢棄物燃燒排氣組成，可依下列表3.4所示方式計算之。

表3.4 排氣組成計算表

項目	成份	燃燒排氣生成量	
		容積 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ )	重量 ( $\text{kg/kg}$ )
濕基 排氣 組成	$\text{CO}_2$	1.867 C	3.67 C
	$\text{SO}_2$	0.7 S	2 S
	$\text{HCl}$	0.631 Cl	1.03 Cl
	$\text{O}_2$	$0.21(m-1)A_0$	$0.23(m-1)A_0$
	$\text{N}_2$	$0.8N + 0.79mA_0$	$N + 0.77mA_0$
	小計( $G'$ )	$(m-0.21)A_0 + 1.867C + 0.7S + 0.631Cl + 0.8N$	$(m-0.23)A_0 + 3.67C + 2S + 1.03Cl + N$
水 蒸 氣	結合水	11.2H'	9 H'
	附著水	1.244W	W
	計	$11.2H' + 1.244W$	$9H' + W$
總計(G)		$(m-0.21)A_0 + 1.867C + 11.2H' + 0.75 + 0.631Cl + 0.8N + 1.244W$	$(m-0.23)A_0 + 3.67C + 2S + 1.03Cl + N + W + 9H'$

$$[註] 1.H' = H - \frac{Cl}{35.5}$$

$$2.G = (m-0.21)A_0 + 1.867C + 11.2H' + 0.75 + 0.631Cl + 0.8N + 1.244W \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \text{容積式}$$

$$G = (m-0.23)A_0 + 3.67C + 9H' + 2S + 1.03Cl + N + W \quad \text{kg/kg} \text{重量式}$$

$$G' = (m-0.21)A_0 + 1.867C + 0.7S + 0.631Cl + 0.8N \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \text{容積式}$$

$$G' = (m-0.23)A_0 + 3.67C + 2S + 1.03Cl + N \quad \text{kg/kg} \text{重量式}$$

$$m=1 \text{時 } G=G_0 \text{ 與 } G'=G_0'$$

$$3.\text{Cl原子與O原子在競爭H過程中，H會先與Cl結合成HCl，故當} H - \frac{Cl}{35.3} < 0 \text{時，不會形成結合水，而過多之氯原子將形成Cl}_2\text{氣體，其濃度為}$$

$$\text{Cl}_2 = 11.2 \left( \frac{Cl}{35.5} - H \right) \dots \text{(容積式)} ; \text{Nm}^3/\text{kg}$$

$$C_{l_2} = 35.5 \left( \frac{C_1}{35.5} - H \right) \dots \dots \dots \text{(重量式)} ; \text{kg/kg}$$

而排氣百分組成，可由表3.5 所示。

4. C、H、N、O、S、Cl、W為單位廢棄物重量比(kg/kg)

表3.5 乾、濕排氣百分組成計算式

項目 排氣成份	體積百分組成		重量百分組成	
	濕排氣 $\frac{1.867C}{G}$	乾排氣 $\frac{1.867C}{G'}$	濕排氣 $\frac{3.67C}{G}$	乾排氣 $\frac{3.67C}{G'}$
CO <sub>2</sub>				
SO <sub>2</sub>	$\frac{0.7S}{G}$	$\frac{0.7S}{G'}$	$\frac{2S}{G}$	$\frac{2S}{G'}$
HCl	$\frac{0.631Cl}{G}$	$\frac{0.631Cl}{G'}$	$\frac{1.03Cl}{G}$	$\frac{1.03Cl}{G'}$
O <sub>2</sub>	$\frac{0.21(m-1)A_o}{G}$	$\frac{0.21(m-1)A_o}{G'}$	$\frac{0.23(m-1)A_o}{G}$	$\frac{0.23(m-1)A_o}{G'}$
N <sub>2</sub>	$\frac{0.8N+0.79mA_o}{G}$	$\frac{0.8N+0.79mA_o}{G'}$	$\frac{N+0.77mA_o}{G}$	$\frac{N+0.77mA_o}{G'}$
H <sub>2</sub> O	$\frac{11.21+1.24W}{G}$	—	$\frac{9H+W}{G}$	—

[註] 各計算式皆乘上百分比100%

#### 4. 由排氣組成決定空氣比

氣體分析值是以乾燥燃燒氣體中所含的組成成分之比例來表示的，其項目通常是包括二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )、氧( $\text{O}_2$ )以及氮( $\text{N}_2$ )等。在排氣分析所使用的奧塞特氏氣體分析裝置(Orsat's apparatus)中，由於 $\text{SO}_2$ 也會在吸收 $\text{CO}_2$ 時同時被吸收，因此，在表觀上是將之視同 $\text{CO}_2$ 。因此，在測定時只實測 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_2$ 三個項目，殘餘氣體則視爲 $\text{N}_2$ 。

$$\text{即 } (\text{CO}_2) + (\text{SO}_2) + (\text{CO}) + (\text{O}_2) + (\text{N}_2) = 100\% \cdots \cdots \cdots \text{乾基排氣}$$

由排氣分析中求得之排氣組成，可利用下式求得空氣比 $m$ 。

$$m = \frac{1}{1 - 3.76 \times \frac{(O_2) - 0.5(CO)}{(CO_2) + (SO_2)} - 0.8N \times \frac{(N_2)}{1.867C + 0.7S}}$$

不過，一般說來，由於液體及固體廢棄物中的N是少至可以忽視之程度，而SO<sub>2</sub>被計算入CO<sub>2</sub>內，因此上式可以改寫成

$$m = \frac{1}{1 + 3.76 \times \frac{(O_2) - 0.5(CO)}{(N_2)}} = \frac{21(N_2)}{21(N_2) - 79[(O_2) - 0.5(CO)]}$$

又，在完全燃燒的情況時 ( $[CO]=0$ )，上式又可以改寫成

$$m = \frac{21(N_2)}{21(N_2) - 79(O_2)}$$

如果是在完全燃燒的情況，而且「廢棄物中之氫的含量又極少時」，則  $(N_2) = 79\%$ ，故上式可再度改寫成

$$m = \frac{21}{21 - (O_2)}$$

由此式中即可得知  $m$  的概略值。

#### 5. $A_o$ 、 $G_o$ 與 $G_o'$ 經驗式

若廢棄物之元素分析不明時，可由廢棄物之低位發熱  $H_1$  (kcal/kg)，代入下列相關經驗式求得理論空氣量  $(A_o)$ 、理論濕排氣量  $(G_o)$  與理論乾排氣量  $(G_o')$

◦ 不過以下乃是針對各燃料特性所得之經驗式，因此若固體廢棄物之低位發熱量  $H_1$  低於 2000 kcal/kg 時，最好分析廢棄物之乾基低位發熱量  $H_1$ ，再帶入下列經驗式（見表 3.6 所示），而水份另外估計之。

一般廢棄物低位發熱量高於 2000 kcal/kg 時，使用 Rosin 式與元素分析之計算式所得之值，相差在 5% 以下。

#### 6. 質量平衡計算方式

在計算焚化爐進、出料質量平衡時，必須詳細列出進料與出料物質之項目與量，並繪製進出料物質流向圖，可參閱下圖，以充分掌握每筆進出量，其計算方式如下：

##### (1) 入料

① 廢棄物進料量 (kg/hr)：包括固體、液體廢棄物。

② 燃料（輔助燃料）進料量 (kg/hr)。

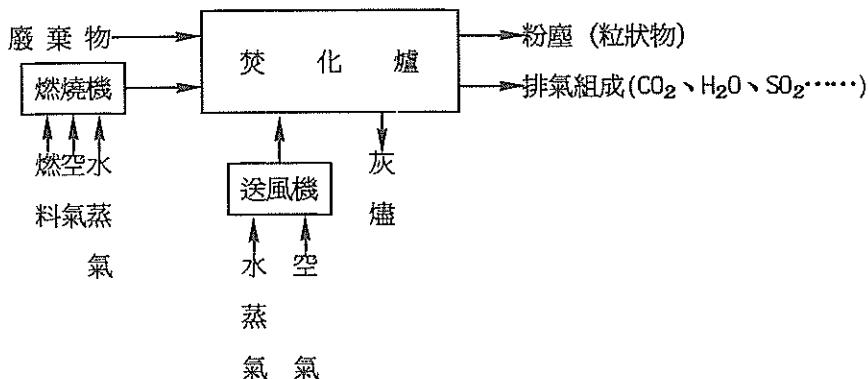


表3.6  $A_o$ 、 $G_o$ 與 $G_o'$ 概略經驗式<sup>6</sup>

文獻來源 燃料種類	項目	熱管理便覽	鍋爐便覽	Rosin 田中楠太 燃料與燃燒	石谷(固體) 設樂(液體)
固體燃料 (煤碳) ( $Nm^3/kg$ )	$A_o$	$1.09 \times \frac{H_i}{1000} - 0.09$ $1.07 \times \frac{H_i}{1000} - 0.2$	$1.012 \times \frac{H_i}{1000} + 0.5$	$1.01 \times \frac{H_i}{1000} + 0.5$	$1.05 \times \frac{H_i}{1000} + 0.1$
	$G_o$	$1.17 \times \frac{H_i}{1000} + 0.05$ $0.907 \times \frac{H_i}{1000} + 1.25$	$0.95 \times \frac{H_i}{1000} + 1.375$	$0.89 \times \frac{H_i}{1000} + 1.65$	$1.11 \times \frac{H_i}{1000} + 0.3$
固體燃料 (木材) ( $Nm^3/kg$ )	$A_o$	$1.04 \times \frac{H_i}{1000} + 0.27$	—	—	—
	$G_o$	$1.11 \times \frac{H_i}{1000} + 0.65$	—	—	—
固體燃料 (煤碳) ( $Nm^3/kg$ )	$G_o'$	$1.07 \times \frac{H_i}{1000} + 0.09$ $1.03 \times \frac{H_i}{1000} + 0.07$	—	—	—
			—	—	—
液體燃料 ( $Nm^3/kg$ )	$A_o$	$1.04 \times \frac{H_i}{1000} + 0.02$	$0.88 \times \frac{H_i}{1000} + 1.7$	$0.85 \times \frac{H_i}{1000} + 2$	$1.04 \times \frac{H_i}{1000} + 0.02$
	$G_o$	$1.11 \times \frac{H_i}{1000} + 0.04$	$1.11 \times \frac{H_i}{1000}$	$1.11 \times \frac{H_i}{1000}$	$1.11 \times \frac{H_i}{1000} + 0.04$
氣體燃料 ( $Nm^3/Nm^3$ )	$A_o$	$1.1 \times \frac{H_i}{1000} - 0.32$	$1.09 \times \frac{H_i}{1000} - 0.28$ ( $H_i = 500 \sim 3000$ )	$0.875 \times \frac{H_i}{1000}$	—
	$G_o$	$1.06 \times \frac{H_i}{1000} + 0.61$	$1.09 \times \frac{H_i}{1000} + 0.446$ ( $H_i = 500 \sim 3000$ )	$0.725 \times \frac{H_i}{1000} + 1$	—
氣體燃料 ( $Nm^3/Nm^3$ )	$A_o$	—	—	$1.09 \times \frac{H_i}{1000} - 0.25$ ( $H_i = 4000 \sim 7000$ )	—
	$G_o$	—	—	$1.14 \times \frac{H_i}{1000} + 0.25$ ( $H_i = 4000 \sim 7000$ )	—

[註] 1. 乾基發熱物低位發熱量(kcal/kg) = 濕基發熱物低位發熱量(kcal/kg) / (1 - 發熱物水份含量)

2.  $A_o$  : 理論空氣量  $G_o$  : 理論濕排氣量  $G_o'$  : 理論乾排氣量

③空氣進入量 (kg/hr) : 一般進入方式，可由送風機直接送入焚化爐與藉由燃燒機間接進入焚化爐。

④水蒸氣進入量 (kg/hr) : 由於一般大氣中或多或少都帶有少許水蒸氣，而水蒸氣量之多寡隨當時溫度、相對濕度而變。可由圖3.12所示求得每kg乾

空氣所含有之水蒸氣量 (kg · steam/kg · dry air), 再乘以當時空氣進入量 (kg · dry air/hr), 即是水蒸氣 (kg · steam/hr)。

⑤其他：如空氣滲入爐內量、儀表清洗空氣量…等。必須依個案加以計算考量。

## (2)出料

- ①灰燼排灰量 (kg/hr)
- ②排氣組成 (kg/hr)
- ③粉塵 (粒狀物) 帶出量 (kg/hr)

### 3.3.3 能量平衡計算

能量平衡是計算焚化爐之總熱輸入量及總熱輸出量之狀態之用，藉由能量平衡可求得焚化爐之燃燒溫度，以此判斷是否需要輔助燃料以及選擇溫度控制之方法。以下乃針對能量平衡計算所需要之公式介紹之。

#### 1. 發熱量計算<sup>6</sup>

常用發熱量之名稱，大致可分為乾基發熱量、高位發熱量與低位發熱量等三種。

##### (1)乾基發熱量

是廢棄物不包括含水份部份之實際發熱量，稱乾基發熱量 ( $H_d$ )。

##### (2)高位發熱量

依燃燒後的水份狀態，考慮 2 類發熱量，一為總發熱量（又稱高位發熱量），乃在定壓狀態下完全燃燒，燃料中水份燃燒生成的水凝縮成液體之場合。亦即熱量計測定此值，又稱高位發熱量 ( $H_h$ )。

##### (3)低位發熱量

考慮實際的燃燒時，燃燒氣體中的水份為蒸發狀態，蒸氣具有的凝縮潛熱及凝縮水的顯熱之和 600kcal/kg 無法利用，將之減去後成稱為低位發熱量或淨發熱量，也稱真發熱量 ( $H_1$ )。

故可得到三者之關係式如下：

$$H_d = \frac{H_h}{(1-W)}$$

$$H_1 = H_h - 600 \times (W)$$

W 為廢棄物之水份含量；小數點表示。

H 為廢棄物濕基元素氫組成之含量；小數點表示。

$H_d$  : 乾基發熱量 (kcal/kg)

$H_h$  : 高位發熱量 (kcal/kg)

$H_1$  : 低位發熱量 (kcal/kg)

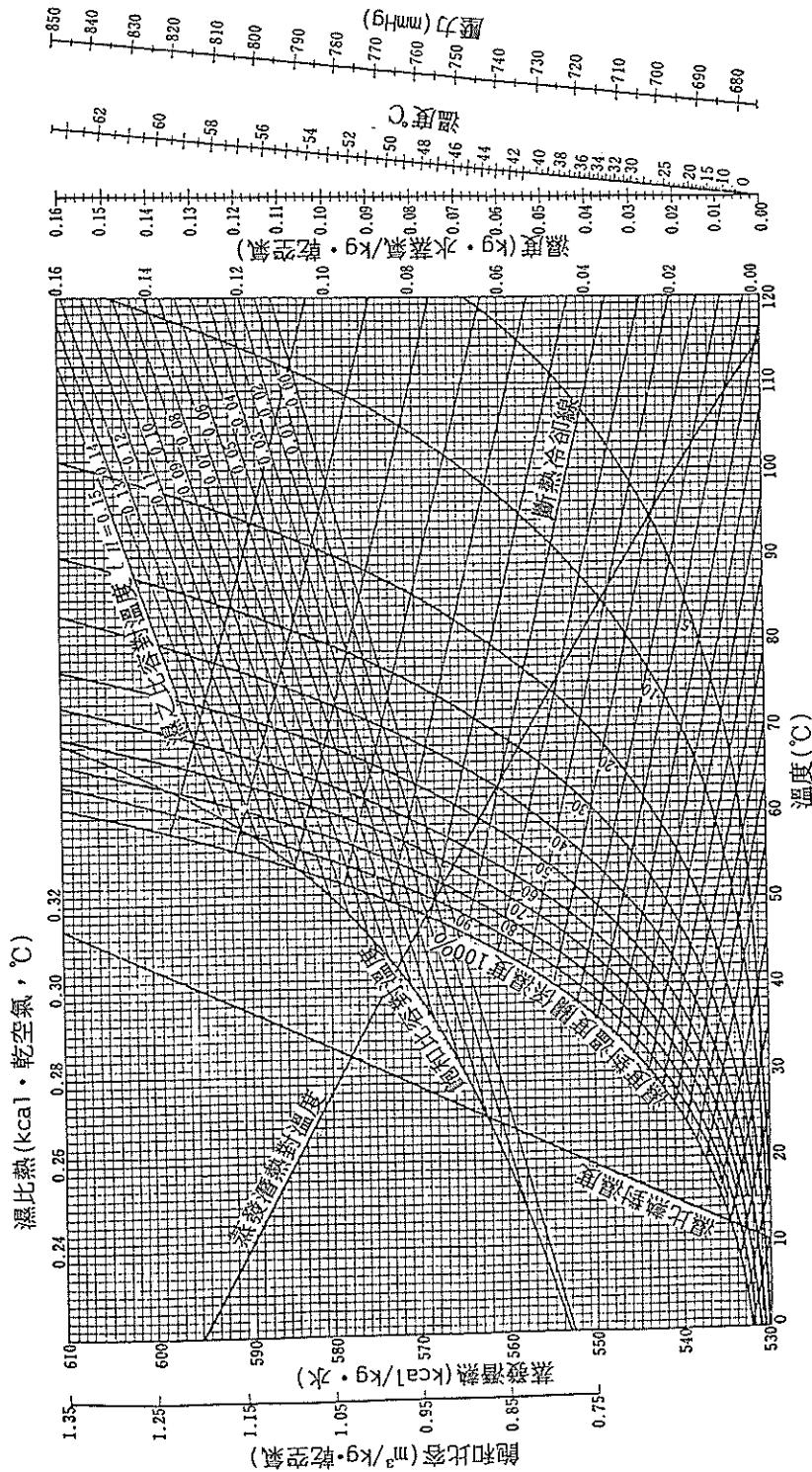


圖 3.12 低溫度濕度圖  
(760mmHg, 1kg dry air)

發熱量計算公式：

(1)Dulong式

$$H_h (\text{kcal/kg}) = 8100C + 34200(H - \frac{O}{8}) + 2500S$$

(2)Scheurer, Kestner 式

$$H_h (\text{kcal/kg}) = 8100(C - \frac{3}{4}O) + 34250H + 2250S + 5700 \times \frac{O}{4}$$

(3)Steuer 式

$$H_h (\text{kcal/kg}) = 8100(C - \frac{3}{8}O) + 5700 \times \frac{3}{8}O + 34500(H - \frac{O}{16}) + 2500S$$

(4)化學工學便覽公式

$$H_h (\text{kcal/kg}) = 8130C + 34200(H - \frac{O}{2}) + 2220S$$

$H_h$  = 廢棄物之高位發熱量 (kcal/kg)

C、H、O、S：廢棄物濕基元素分析組成。

$H_l$  = 廢棄物之低位發熱量 (kcal/kg)， $H_l = H_h - 600(9H + W)$

W = 廢棄物之水份組成。

## 2. 定壓比熱

各種氣體之定壓比熱可參考表 3.7 得之。

## 3. 燃燒生成氣體之顯熱； $Q_s$ (kcal/hr)

$$Q_s = \sum [\text{各種排氣生成量} (\text{Nm}^3/\text{kg}) \times \text{廢棄物進料量} (\text{kg/hr}) \times C_p (\text{kcal/Nm}^3 \cdot {}^\circ\text{C})] \times (\Delta t) {}^\circ\text{C}$$

## 4. 能量平衡計算方式

(1)入熱

• 廢棄物完全燃燒後生成之熱量，為廢棄物之乾基發熱量 (kcal/kg) × 廢棄

物之進料量 (kg/hr)

• 輔助燃料完全燃燒後生成之熱量，為輔助燃料之乾基發熱量 (kcal/kg) × 輔助燃料之消耗量 (kg/hr)

• 加入爐中總空氣之熱含量 (enthalpy)

• 廢棄物之熱含量

$$\text{廢棄物之熱含量} = W_g (\text{kg/hr}) \times C_{Pr_1} \text{ kcal/kg} \cdot {}^\circ\text{C} \times (t_1 - 0) {}^\circ\text{C} = W_g \cdot C_{Pr_1} \cdot t_1 (\text{kcal/hr})$$

$t_1$ ：為廢棄物之進料溫度 ({}^\circ\text{C})

$C_{Pr}$  : 廢棄物之定壓比熱 [kcal/kg · °C, (0~t, °C)]

$W_g$  : 廢棄物之進料量 (kg/hr)

表3.7 主要排氣0~t°C間的平均定壓比熱( $\bar{C}_p$ )值<sup>6</sup>

單位 : kcal/Nm³ · °C

t(°C)	O₂	N₂	CO₂	CO	NO	SO₂	水蒸氣	空氣	HCl	Cl₂
100	0.315	0.311	0.409	0.312	0.319	0.435	0.360	0.311	0.311	0.369
200	0.320	.312	.429	.313	.321	.454	.364	.313	.311	.374
300	.325	.313	.447	.316	.323	.470	.369	.315	.313	.379
400	.330	.316	.463	.319	.327	.483	.374	.318	.315	.382
500	.334	.319	.477	.322	.330	.495	.380	.321	.317	.384
600	.339	.321	.490	.326	.334	.506	.386	.325	.320	.386
700	.343	.325	.501	.329	.337	.515	.392	.328	.322	.388
800	.347	.329	.512	.332	.340	.523	.399	.331	.324	.389
900	.350	.331	.520	.335	.344	.530	.405	.334	.327	.391
1000	.354	.334	.529	.338	.346	.536	.412	.338	.329	.392
1100	.356	.338	.537	.341	.349	.542	.418	.340		.393
1200	.359	.340	.544	.344	.351	.546	.425	.343		.394
1300	.362	.342	.550	.346	.354	.550	.430	.345		
1400	.364	.345	.556	.348	.356	.554	.437	.348		
1500	.366	.347	.561	.351	.358	.557	.442	.350		
1600	.368	.350	.567	.353	.360	.560	.448	.353		
1700	.370	.351	.571	.355	.362	.563	.454	.354		
1800	.372	.353	.575	.356	.363	.566	.459	.356		
1900	.374	.354	.579	.358	.365	.567	.464	.358		
2000	.375	.356	.583	.359	.366	.570	.469	.359		
分子量	32.00	28.02	44.01	28	30	64.06	18.02	28.964	36.5	71
係數	0.7	0.8	0.509	0.8	0.747	0.35	1.244	0.772	0.615	0.315

[註]  $C_p(\text{kcal/kg} \cdot \text{°C}) = C_p (\text{kcal/Nm}^3 \cdot \text{°C}) \times \text{係數}$

## (2)出熱

- 燃燒生成氣體在燃燒溫度時之熱含量（顯熱）
- 廢棄物所含水份蒸發所需之熱量
- 排出爐灰之熱含量，即爐灰未燃成份、殘灰之熱量，一般為入熱量的10%估計。
- 爐體輻射熱散失量，一般大型爐約為入熱量之5%，小型爐約為入熱量之8~10%。
- 廢棄物昇溫所需要熱量 =  $W_g (\text{kg/hr}) \times C_{Pr_2} (\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \times (t_2 - 0)^\circ\text{C} = W_g \times C_{Pr_2} \times t_2 (\text{kcal/hr})$   
 $t_2$ ：為廢棄物之著火溫度( $^\circ\text{C}$ )  
 $C_{Pr_2}$ ：廢棄物之定壓比熱( $\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )( $0 \sim t_2$   $^\circ\text{C}$ )  
 $W_g$ ：廢棄物之進料量( $\text{kg/hr}$ )

關於各種廢棄物燃燒排氣之定壓比熱可查表3.8~3.10所示。

[例1] 某事業廢棄物在常溫20 $^\circ\text{C}$ 下燃燒，求其燃燒溫度？<sup>6</sup>

已知：

### 1. 排氣組成(vol.%)

$$\text{CO}_2 = 6.35\%, \text{SO}_2 = 0.006\%, \text{O}_2 = 7.52\%, \text{N}_2 = 56.64\%, \text{H}_2\text{O} = 29.43\%, \\ \text{HCl} = 0.057\%$$

### 2. 燃燒空氣特性

$$\text{理論空氣量} = 1.23 \text{Nm}^3/\text{kg}$$

$$\text{空氣比熱} = 0.311 \text{kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

### 3. 廢棄物特性

廢棄物著火溫度為200 $^\circ\text{C}$

$$\text{廢棄物之平均比熱} C_{Pr} = 0.33 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} (0 \sim 200^\circ\text{C})$$

廢棄物含水率65%，廢棄物之低位發熱量 = 702kcal/kg · waste

### 4. 排氣特性

$$\text{氣體排氣量} G = 3.43 \text{Nm}^3/\text{kg} (\text{空氣比} m = 2.0)$$

入熱之計算

#### • 廢棄物之低位發熱量

$$q_1 = 702 \text{kcal/kg} \cdot \text{waste}$$

#### • 燃燒用空氣之熱含量

$$q_2 = \text{空氣量} \times \text{空氣比熱} \times \text{溫度變化}$$

$$= (2 \times 1.23) \times (0.311) \times (20 - 0) = 15 \text{kcal/kg} \cdot \text{waste}$$

表3.8 各種燃燒氣體於0~t°C間的平均定壓比熱( $\bar{C}_p$ )值<sup>6</sup>  
單位:kcal/Nm<sup>3</sup>·°C

t(°C)	都市垃圾	乾污泥	乾污泥	燈油	A重油	輕油	木材	報紙	羊毛	絹
100	0.3272	0.323	0.3237	0.327	0.327	0.327	0.322	0.321	0.326	0.331
200	0.3305	0.326	0.3423	0.330	0.330	0.331	0.325	0.324	0.330	0.335
300	0.3338	0.330	0.3533	0.334	0.335	0.335	0.329	0.327	0.334	0.341
400	0.3383	0.333	0.3611	0.338	0.339	0.339	0.333	0.331	0.339	0.347
500	0.3427	0.337	0.3674	0.343	0.343	0.344	0.337	0.335	0.344	0.352
600	0.3464	0.341	0.3730	0.347	0.348	0.348	0.341	0.339	0.349	0.357
700	0.3513	0.346	0.3780	0.352	0.352	0.352	0.346	0.343	0.354	0.362
800	0.3563	0.349	0.3825	0.357	0.356	0.357	0.349	0.348	0.358	0.367
900	0.3596	0.353	0.3866	0.360	0.360	0.361	0.353	0.351	0.362	0.372
1000	0.3639	0.357	0.3904	0.364	0.364	0.364	0.357	0.355	0.366	0.376
1100	0.3683			0.368	0.368	0.368	0.360	0.359	0.370	0.380
1200	0.3716			0.371	0.371	0.371	0.363	0.361	0.373	0.384
1300	0.3746			0.374	0.374	0.375				
1400	0.3783			0.378	0.377	0.378				
1500	0.3811			0.381	0.380	0.381				
1600				0.384	0.383	0.383				
1700				0.386	0.385	0.386				
1800				0.389	0.388	0.388				
分子量M	27.83	29.6	29.1	28.8	28.9	29.21	29.3	29.5	28.4	29.06
係數	0.80	0.757	0.770	0.778	0.775	0.767	0.76	0.759	0.789	0.771

[註]  $C_p$  (kcal/kg·°C) =  $C_{pw}$  (kcal/Nm<sup>3</sup>·°C) × 係數

#### • 廢棄物之熱含量

$$\begin{aligned}
 q_3 &= C_{pw} \times (1 - \text{含水率}) \times \text{溫度變化} + \text{含水率} \times \text{水比熱} \times \text{溫度變化} \\
 &= 0.33 \times (1 - 0.65) \times (20 - 0) + 0.65 \times 1 \times (20 - 0) \\
 &= 15 \text{kcal/kg · waste}
 \end{aligned}$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 732 \text{kcal/kg · waste}$$

出熱之計算：

#### • 廢棄物燃燒氣體顯熱

$$q_1' = \text{排氣量} \times \text{燃燒排氣比熱} \times \text{溫度變化} = 3.43 \times C_{p_0} \times (t - 0)$$

$C_{p_0}$  : 氣體之平均比熱 [kcal/Nm<sup>3</sup>·°C, (0~t°C)]

t : 燃燒溫度 (°C)

表3.9 高分子系各種燃燒排氣0~t°C間平均定壓比熱( $\bar{C}_p$ )值<sup>6</sup>  
單位:kcal/Nm<sup>3</sup>·°C

高分子 t(°C)	合成橡膠	聚丁二 烯橡膠	廢輪胎	聚酯類	耐 龍	FRP	ABS	AS
100	0.3214	0.3218	0.3219	0.3209	0.3201	0.3196	0.3198	0.3198
200	0.3245	0.3247	0.3248	0.3237	0.3226	0.3227	0.3224	0.3224
300	0.3274	0.3283	0.3285	0.3272	0.3260	0.3265	0.3258	0.3258
400	0.3318	0.3321	0.3323	0.3309	0.3296	0.3303	0.3294	0.3295
500	0.3360	0.3361	0.3363	0.3348	0.3334	0.3343	0.3332	0.3333
600	0.3393	0.3402	0.3404	0.3388	0.3373	0.3384	0.3371	0.3372
700	0.3441	0.3441	0.3444	0.3427	0.3412	0.3423	0.3409	0.3411
800	0.3488	0.3479	0.3482	0.3465	0.3448	0.3461	0.3446	0.3447
900	0.3514	0.3516	0.3518	0.3501	0.3484	0.3497	0.3481	0.3483
1000	0.3552	0.3550	0.3553	0.3535	0.3518	0.3532	0.3515	0.3516
1100	0.3594		0.3586	0.3567	0.3550	0.3565	0.3547	0.3548
1200	0.3620		0.3617	0.3598	0.3580	0.3595	0.3577	0.3578
1300	0.3646		0.3647					
1400	0.3679		0.3674					
分子量M	29.40	29.35	29.343	29.12	28.89	29.13	29.15	29.22
係 數	0.762	0.763	0.763	0.769	0.775	0.769	0.768	0.767

• 廢棄物著火溫度為200°C時，昇溫所需要之熱量

$$q_2' = \text{廢棄物平均比熱} \times (1 - \text{含水率}) \times \text{溫度變化}$$

$$= 0.33 \times (1 - 0.65) \times 200$$

$$= 23.1 \text{kcal/kg} \cdot \text{waste}$$

• 爐體壁面之放熱損失

$$q_3' = \text{入熱量之} 5\%$$

$$= 732 \times 5\% = 37 \text{kcal/kg} \cdot \text{waste}$$

• 未燃，殘灰持出熱量

$$q_4' = \text{入熱量之} 10\%$$

$$= 732 \times 10\% = 73 \text{kcal/kg} \cdot \text{waste}$$

$$q_1' + q_2' + q_3' + q_4' = 133.1 + 3.43 C_{p_0} \times t_g \text{ kcal/kg} \cdot \text{waste}$$

$$\text{入熱} = \text{出熱時}$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = q_1' + q_2' + q_3' + q_4'$$

$$732 \text{kcal/kg} \cdot \text{waste} = 133.1 + 343 C_{p_0} \times t_g \text{ kcal/kg} \cdot \text{waste}$$

$$C_{P_0} \cdot t = 175.63 \text{ kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

採試誤法，假設  $t=400^\circ\text{C}$ ，查表 3.7。

表 3.10 廢塑膠燃燒氣體於  $0 \sim t^\circ\text{C}$  間的平均定壓比熱 ( $\bar{C}_p$ ) 值<sup>6</sup>  
單位 : kcal/Nm<sup>3</sup> • °C

$t^\circ\text{C}$	聚乙稀	聚丙稀	聚苯乙稀	聚氯乙稀	聚亞胺酯	聚碳酸酯	保麗龍
100	0.3195	0.3196	0.3196	0.3193	0.3211	0.3205	0.3198
200	0.3222	0.3221	0.3224	0.3221	0.3240	0.3233	0.3224
300	0.3248	0.3254	0.3259	0.3248	0.3268	0.3269	0.3258
400	0.3289	0.3289	0.3296	0.3290	0.3310	0.3306	0.3294
500	0.3328	0.3326	0.3334	0.3328	0.3350	0.3345	0.3331
600	0.3360	0.3365	0.3374	0.3361	0.3383	0.3385	0.3371
700	0.3405	0.3403	0.3412	0.3405	0.3429	0.3424	0.3409
800	0.3450	0.3440	0.3449	0.3450	0.3476	0.3462	0.3446
900	0.3477	0.3475	0.3485	0.3477	0.3504	0.3497	0.3481
1000	0.3513	0.3509	0.3518	0.3513	0.3541	0.3531	0.3514
1100	0.3554	0.3541	0.3550	0.3553			0.3556
1200	0.3581	0.3571	0.3580	0.3579			0.3582
1300							
1400							
分子量M	28.82	28.81	29.24	29.43	28.51	29.36	29.15
係數	0.777	0.778	0.766	0.761	0.786	0.763	0.768

[假設 1] 燃燒溫度 =  $400^\circ\text{C}$  時

項目	定壓比熱 <sup>(a)</sup> (kcal/Nm <sup>3</sup> • °C)	排氣組成 <sup>(b)</sup>	(a) × (b)
CO <sub>2</sub>	0.463	0.0635	0.0294
H <sub>2</sub> O	0.374	0.2943	0.1100
O <sub>2</sub>	0.330	0.0752	0.0248
N <sub>2</sub>	0.316	0.5664	0.1789
SO <sub>2</sub>	0.483	0.00006	0.00003
HCl	0.315	0.00057	0.0002
合計		$C_{P_0}$	0.3433

$$0.3433 \times t = 175.63$$

$$t = 512^\circ\text{C}$$

[假設 2 ] 燃燒溫度 = 500°C 時

項目	定壓比熱 <sup>(a)</sup> kcal/Nm <sup>3</sup> • °C	排氣組成 <sup>(b)</sup>	(a) × (b)
CO <sub>2</sub>	0.477	0.0635	0.0303
H <sub>2</sub> O	0.380	0.2943	0.1120
O <sub>2</sub>	0.334	0.0752	0.02512
N <sub>2</sub>	0.319	0.5664	0.1807
SO <sub>2</sub>	0.495	0.00006	0.00003
HCl	0.317	0.00057	0.0018
合 計		C <sub>Fo</sub>	0.34996

$$0.34996 \times t = 175.63$$

t=502°C 與假設燃燒溫度500°C相近

[例2] 某座焚化爐，每小時處理 1噸之廢橡膠，廢橡膠元素分析組成 (wt%)，C=78%，H=6.7%，O=1.9%，S=1.9%，N=1.1%，Ash=10.4%，試計算未添加任何輔助燃料情況下之爐溫？<sup>6</sup> (空氣比為2.2，室溫為0°C)

1. 發熱量依Dulong式

$$H_o = 8100 \times 0.78 + 34000 \left\{ 0.067 - \frac{0.019}{8} \right\} + 2500 \times 0.019 \\ = 8562 \text{ kcal/kg}$$

$$H_1 = 8562 - 600 \times 9 \times 0.067 = 8200 \text{ kcal/kg 橡膠}$$

2. 理論燃燒空氣量式 (5.15)

$$A_o = 8.89 \times 0.78 + 26.7 \times 0.067 - 3.33 \times 0.019 + 3.33 \times 0.019 = 8.72 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

3. 空氣量 (實際) A=mA<sub>o</sub>=8.72Nm<sup>3</sup>/kg×2.2=19.18Nm<sup>3</sup>/kg

4. 燃燒生成氣體量，可依照表3.4 得知

項目	體 積 式	重 量 式
CO <sub>2</sub>	1.456Nm <sup>3</sup> /kg(7.44%)	2.860 kg/kg(10.92%)
H <sub>2</sub> O	0.750Nm <sup>3</sup> /kg(3.83%)	0.728 kg/kg( 2.78%)
SO <sub>2</sub>	0.0133Nm <sup>3</sup> /kg(680ppm)	0.038 kg/kg( 0.15%)
O <sub>2</sub>	2.197Nm <sup>3</sup> /kg(11.22%)	3.174 kg/kg(12.11%)
N <sub>2</sub>	15.164Nm <sup>3</sup> /kg(77.45%)	19.394 kg/kg(74.04%)
G	19.58Nm <sup>3</sup> /kg	26.194 kg/kg

## 5. 入料乾基廢棄物

$$\text{入熱量} = 8200 \text{kcal/kg} \times 1000 \text{kg/hr} = 8.2 \times 10^6 \text{ kcal/hr}$$

出熱量：

(1) 爐體之放熱損失

$$= \text{入熱} \times 5\% = 8.2 \times 10^6 \times 5\% = 410000 \text{ kcal/hr}$$

(2) 廢棄物之未燃，殘灰持出熱量

$$= \text{入熱} \times 7\% = 8.2 \times 10^6 \times 7\% = 574000 \text{ kcal/hr}$$

(3) 廢棄物昇溫所需熱量

$$\text{著火溫度} = 300^\circ\text{C}, C_{Pr} = 0.35 \text{ kcal/kg} \cdot {}^\circ\text{C}$$

$$1000 \text{kg/hr} \times 0.35 \text{ kcal/kg} \cdot {}^\circ\text{C} \times (300 - 0) {}^\circ\text{C} = 105000 \text{ kcal/hr}$$

(4) 廢氣持出熱量（假設燃燒溫度800°C，定壓比熱查表3.7）

$$\begin{aligned} &= [(C_{pCO_2} \times CO_2) + C_{pH_2O} \times H_2O + C_{pSO_2} \times SO_2] \times C_{pO_2} \times O_2 + C_{pN_2} \\ &\quad (N_2)] (\text{kcal/kg} \cdot {}^\circ\text{C}) \times 1000 \text{kg/hr} \times (T - 0) {}^\circ\text{C} \\ &= [1.456 \times 0.512 + 0.750 \times 0.399 + 0.0133 \times 0.523 + 2.197 \times 0.347 + \\ &\quad 15.164 \times 0.329] \times 1000 \times (T - 0) = 6803T (\text{kcal/hr}) \end{aligned}$$

(5) 入熱 = 出熱

$$8.2 \times 10^6 - 410000 - 574000 - 105000 = 6803T$$

$$\therefore T = 1045^\circ\text{C}$$

\*取1000°C時C<sub>p</sub>值(C<sub>pCO<sub>2</sub></sub> = 0.529, C<sub>pH<sub>2</sub>O</sub> = 0.412, C<sub>pSO<sub>2</sub></sub> = 0.536, C<sub>pO<sub>2</sub></sub> = 0.354, C<sub>pN<sub>2</sub></sub> = 0.334)

$$\begin{aligned} \text{廢氣持出熱量} &= (1.456 \times 0.529 + 0.750 \times 0.412 + 0.0133 \times 0.536 + 2.197 \\ &\quad \times 0.347 + 15.164 \times 0.334) \times 1000 \times (T - 0) = 6913.5T \end{aligned}$$

入熱 = 出熱

$$8.2 \times 10^6 - 410000 - 574000 - 105000 = 6913.5T$$

$$T = 1028.59^\circ\text{C} \text{ (與原假定相近)}$$

### 3.3.4 廢氣停留時間

所謂停留時間(residence time)是指燃燒所生成之廢氣，在燃燒室內與空氣接觸時間，通常可以表示如下：

$$\theta = \int_0^V dV / q$$

$\theta$ ：氣體平均停留時間(sec)

V：燃燒室內容積(m<sup>3</sup>)

q：氣體之爐溫狀況下之風量(m<sup>3</sup>/sec)

### 3.3.5 燃燒室熱負荷

燃燒室熱負荷 (combustion chamber heat loading) 為燃燒室單位時間、容積所承受之熱量負荷，其單位為  $\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ ，以  $K$  表示之。一般數值可參考表 3.11 所示。

$$K = \frac{G_f \times H_{f1} + G_w \times [H_{w1} + AC_a(t_a - t_o)]}{V}$$

$G_f$  : 輔助燃料消耗量 ( $\text{kg}/\text{hr}$ )

$H_{f1}$  : 輔助燃料的低位發熱量 ( $\text{kcal}/\text{kg}$ )

$G_w$  : 廢棄物焚化量 ( $\text{kg}/\text{hr}$ )

$H_{w1}$  : 廢棄物的低位發熱量 ( $\text{kcal}/\text{kg}$ )

$A$  : 單位輔助燃料與廢棄物的空氣重量 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )

$C_a$  : 空氣的定壓比熱 ( $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$t_a, t_o$  : 分別為空氣的預熱溫度和大氣溫度 ( $^\circ\text{C}$ )

$V$  : 燃燒室內容積 ( $\text{m}^3$ )

表 3.11 燃燒室熱負荷參考值<sup>6</sup>

單位 :  $10^4 \text{ kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$

爐型 廢棄物	火格式	固定爐床式
一般垃圾	8~20	—
脫水污泥	—	15~45
廚餘	15~40	—
動物屍體	15~25	—
木屑	10~20	—
廢塑膠	—	60~70
廢橡膠	—	10~20

[例 3] 某座焚化爐，每天處理 900kg 之廢棄物，其操作條件、廢棄物成份及燃燒條件如下，試設計焚化爐尺寸及系統規格。

#### 1. 基本條件

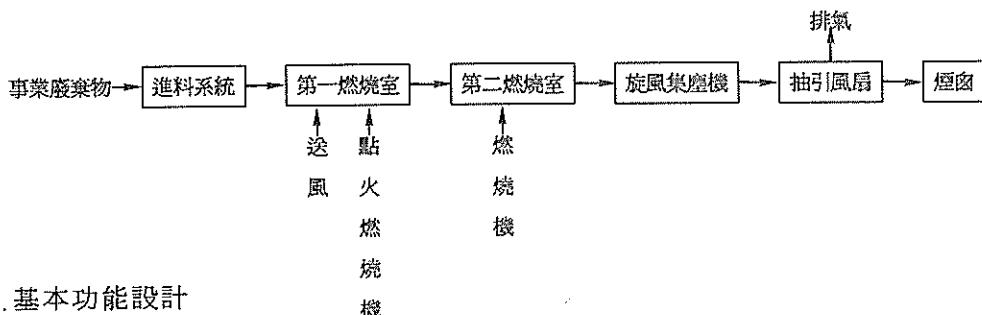
- (1) 廢棄物產量 : 900kg/d
- (2) 操作時數 : 8hr/d
- (3) 廢棄物分析組成 :

C : 42.01% , H : 5.00% , N : 6.00% , O : 23.00% , S : 1.20% , Cl : 0% ,  
 灰份 : 20.00% , 水份 : 2.79%

(4) 採用固定床式焚化爐

- (5) 第一燃燒室：採用一次過氧燃燒送風方式，空氣比定為 2.2 。設置點火燃燒機一台，作為維持爐溫與廢棄物點火之用，最低爐溫設限 800°C 。
- (6) 第二燃燒室：設定爐溫 1,000°C ，廢氣停留時間 1sce ，並設置燃燒機一台，供維持爐溫之用。

(7) 基本處理流程規劃說明如下：



## 2. 基本功能設計

(1) 設計焚化處理容量

$$W = \frac{900\text{kg}}{8\text{ hr}} = 112.5 \text{ kg/hr} \text{ 取 } 120 \text{ kg/hr}$$

(2) 热值計算採用 (du long 式)

$$\text{高位發熱量} = 8100C + 34200(H - \frac{O}{8}) + 2500S = 4159.56 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{低位發熱量} = 4159.56 - 600(9H + \text{水份}) = 3769.56 \text{ kcal/kg}$$

(3) 質量平衡計算

• 排氣組成計算（重量式）

項目 排氣組成	公 式	單位廢棄物排氣量 (kg/kg)	排 氣 量 (kg/hr)
CO <sub>2</sub>	3.67C	1.54037	184.844
H <sub>2</sub> O	9H + 水份 + mA × Wa	0.81193	97.4321
O <sub>2</sub>	0.23(m-1)A	1.56272	187.526
N <sub>2</sub>	N + 0.77mAo	9.65148	1158.18
SO <sub>2</sub>	2S	0.024	2.88
HC1	1.03Cl	0	0
ASh	灰份組成	0.0279	3.348
合 计		13.6184	1634.21

- [註]：1.理論空氣量 $A_o$
- $$A_o = \frac{32}{0.23} \left( \frac{C}{12} + \frac{1}{4} \left( H - \frac{0}{8} \right) + \frac{S}{32} \right) = 5.66203 \text{ kg/kg}$$
- 2.空氣比 $m=2.2$
- 3.空氣中水蒸氣量 $W_o = 0.013 \text{ kg} \cdot \text{steam/kg} \cdot \text{dry Air}$  (查圖3.12，室溫  
25°C，相對濕度70%)

• 進料

$$\text{空氣量} = 5.66203 \times 120 \times 2.2 = 1514.21 \text{ kg/hr}$$

$$\text{廢棄物} = 120 \text{ kg/hr}$$

$$\text{合計} = 1634.21 \text{ kg/hr}$$

• 出料

$$\text{灰燼重} = 3.348 \text{ kg/hr}$$

$$\text{排氣重} = 1630.86 \text{ kg/hr}$$

$$\text{合計} = 1634.21 \text{ kg/hr}$$

(4)爐溫計算：

測樣	定比熱 (25~936.213°C) $C_p(\text{kcal/kg} \cdot \text{K})$	廢棄物燃燒排氣組成 組成G (kg/hr)
H <sub>2</sub> O	0.50934	97.4321
SO <sub>2</sub>	0.18824	2.88
HC1	0.18691	0
CO <sub>2</sub>	0.26839	184.844
N <sub>2</sub>	0.26822	1158.18
O <sub>2</sub>	0.2468	187.526

[註] 仿例題2，採用試誤法並查閱附錄七之圖1 (25~t°C)，可得到定壓比熱如表所示

$$\sum C_p \times G = 456.709 \text{ kcal/hr} \cdot \text{K}$$

假設室溫25°C = 298K，則

$$\text{排氣顯熱} = \sum C_p \times G \times (\Delta t) = 456.709 \times (t - 298)$$

假設焚化爐熱損失，計為入熱量之8%

$$\text{入熱} = 120 \text{ kg/hr} \times 3769.56 \text{ kcal/kg} = 452347.2 \text{ kcal/hr}$$

$$\text{熱損失} = 452347.2 \text{ kcal/hr} \times 8\% = 36187.776 \text{ kcal/hr}$$

入熱 - 熱損失 = 排氣顯熱

$$452347.2 - 36187.776 = 456.709 \times (t - 298)$$

$$t = 1209.213^\circ\text{K} = 936.213^\circ\text{C}$$

(5) 估計燃燒室溫度  $1000^\circ\text{C}$ ，所需要之耗油量

假設油品組成 (C : 90%，H : 10%)，低位發熱量  $10170 \text{ kcal/kg}$ ，燃料熱損失 10%，空氣比為 1.2。

測樣	定壓比熱 ( $25 \sim 1,000^\circ\text{C}$ ) $C_p$ ( $\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{K}$ )	廢棄物燃燒排氣組成 G ( $\text{kg/hr}$ )	燃料排氣組成 G' ( $\text{kg/kg}$ )
H <sub>2</sub> O	0.2712	184.844	3.3
SO <sub>2</sub>	0.51434	97.4321	1.11704
HC1	0.18974	2.88	0
CO <sub>2</sub>	0.18669	0	0
N <sub>2</sub>	0.26905	1158.18	12.8557
O <sub>2</sub>	0.24819	187.526	0.64

[註]  $25 \sim 1,000^\circ\text{C}$  情況下之定壓比熱，可查閱附錄七之圖，( $25 \sim t^\circ\text{C}$ )之定壓比熱如表所示：

$$\text{廢棄物燃燒排氣顯熱} = \sum C_p \times G \times (1273 - 298) = 447469 \text{ kcal/hr}$$

$$\text{燃料燃燒排氣顯熱} = \sum C_p \times G' \times (1273 - 298) = 4960.02 \text{ kcal/hr}$$

$$\text{假設耗油量} = F \text{ kg/hr}$$

$$10170 \text{ kcal/kg} \times F \text{ kg/hr} \times (1 - 0.1) + 376.56 \text{ kcal/hr} \times 120 \text{ kg/hr} \times (1 - 0.08)$$

$$= 447469 \text{ kcal/hr} + 4960.02 F \text{ kcal/hr}$$

$$9153 F + 416159.424 = 447469 + 4960.02 F$$

$$4192.98 F = 31,309.576$$

$$F = 7.46724 \text{ kg/hr}$$

故求得耗油量為  $7.46724 \text{ kg/hr}$  (約  $76000 \text{ kcal/hr}$ ) 取  $3 \times 10^5 \text{ kcal/hr}$  柴油燃燒機 1 台

(6) 求得廢棄物與燃料質量平衡組成

項目 入出料組成		燃料質量平衡 (kg/hr)	廢棄物質量平衡 (kg/hr)	合計 (kg/hr)
入 料	入料物重	7.46724	120	127.46724
	空氣量	126.291	1514.21	1640.501
	小計	133.758	1634.21	1767.968
出 料	CO <sub>2</sub>	24.6419	184.844	209.4859
	H <sub>2</sub> O	8.34124	97.4321	105.77334
	HCl	0	0	0
	O <sub>2</sub>	4.77904	187.526	192.30504
	N <sub>2</sub>	95.9963	1158.18	1254.1763
	SO <sub>2</sub>	0	2.88	2.88
	灰燼重	0	3.348	3.348
	小計	133.758	1634.21	1767.968

(7) 送風量

燃料部份

$$A_o = \frac{22.4}{0.21} \left( \frac{C}{12} + \frac{1}{4} \left( H - \frac{0}{8} \right) + \frac{S}{32} \right) = 10.6667 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

總送風量 = m × A<sub>o</sub> × 耗油量

$$= 1.2 \times 10.6667 \times 7.46724$$

$$= 95.58 \text{ Nm}^3/\text{hr}(0^\circ\text{C})$$

$$= 1.5930 \text{ Nm}^3/\text{min}(0^\circ\text{C})$$

廢棄物部份

$$A_o = \frac{22.4}{0.21} \left( \frac{C}{12} + \frac{1}{4} \left( H - \frac{0}{8} \right) + \frac{S}{32} \right) = 4.34089 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

總送風量 = m × A × 廢棄物重量

$$= 2.2 \times 4.34089 \times 120$$

$$= 1145.99496 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

$$= 19.0999 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

$$= 20.849 \text{ Nm}^3/\text{min}(25^\circ\text{C})$$

室溫25°C，採強制送風機(forced draft fan)，一般壓差在100~200mmAq左右，取200mmAq，而送風機效率為75%，安全係數採1.2，故送風機動力為：

$$L = \frac{Q \times \Delta P}{6120 \times \eta} \times S = \frac{200 \times 20.849}{6120 \times 0.75} \times 1.2 \\ = 1.09 \text{Kw} \\ = 1.46 \text{ HP} \approx 1.5 \text{ HP}$$

#### (8) 排氣風量

##### ① 排氣組成計算 (體積式)

項目 排氣組成	公 式	廢棄物部份 (Nm³/kg)	燃 料 部 份 (Nm³/kg)
CO₂	1.867 C	0.78419	1.68
H₂O	11.2H + 1.244W + mA₀ × Wₐ	0.80389	1.12
O₂	0.21(m-1)A₀	1.0939	0.448
N₂	0.8 N + 0.79mA₀	7.59246	10.112
SO₂	0.7 S	0.0084	0
HCl	0.631 Cl	0	0
合 計		10.2828	13.36

[註] 1.水蒸氣量Wₐ=0.013kg·steam/kg·dry Air (查圖3.12，室溫25°C，

相對濕度70%)

2.燃料之理論空氣量A₀=10.6667 Nm³/kg

3.廢棄物之理論空氣量A₀=4.34089 Nm³/kg

4.燃料空氣比=1.2

5.廢棄物空氣比=2.2

故廢棄物總排氣量=G×廢棄物量

$$= 120 \text{ kg/hr} \times 10.2828 \text{ Nm}^3/\text{kg} \\ = 1233.936 \text{ Nm}^3/\text{hr} \\ = 20.5657 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

燃料總排氣量=耗油量×G

$$= 7.46724 \text{ kg/hr} \times 13.36 \text{ Nm}^3/\text{kg} \\ = 99.7623 \text{ Nm}^3/\text{hr} \\ = 1.66271 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

$$\text{總排氣量} = 20.5657 + 1.66271 = 22.22841 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

後段採用旋風集塵機，壓損為 150 mmAq，切線速度 20m/sec，假設系統壓損與旋風集塵機之壓損合計為 180 mmAq，排氣溫度 700°C，則送風機動力為

$$L = \frac{Q \times \Delta P}{6120 \times \eta} \times S = \frac{180 \times (22.22841 \times \frac{273+700}{273})}{6120 \times 0.75} \times 1.2$$

$$= 3.73 \text{ kW}$$

= 4.998HP 取 5.5HP 抽引風扇

#### (9) 燃燒室容積與尺寸計算

##### ① 第二燃燒室體積

廢氣停留時間為 1.0 秒 (1000°C)

$$V = Q \times t = 22.22841 \text{ Nm}^3/\text{min} \times \frac{273+1000}{273} \text{ m}^3/\text{Nm}^3 \times \frac{1}{60} \text{ min/sec} \times 1.0 \text{ sec} = 1.73 \text{ m}^3$$

$$\text{設 } D : L = 1 : 4, L = 4D, \frac{\pi D^2}{4} \times 4D = 1.73 \text{ m}^3$$

$$\rightarrow \pi D^3 = 1.73 \text{ m}^3$$

$$D = 0.82 \text{ m} \quad L = 3.3 \text{ m}$$

尺寸為 820mm φ × 3300mm L

##### ② 第一燃燒室體積

燃燒室熱負荷 K 為  $20 \times 10^4 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$

$$K = \frac{\text{第一燃燒室入熱量}}{V} = \frac{3769.56 \text{ kcal/kg} \times 120 \text{ kg/hr}}{V \text{ m}^3} = 20 \times 10^4 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$$

$$\text{求得 } V = 2.26 \text{ m}^3$$

一般圓型爐體

假設爐床燃燒率 G = 120kg/m<sup>2</sup> · hr

$$G = \frac{W}{A} = \frac{120 \text{ kg/hr}}{A}$$

$$A = 1 \text{ m}^2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 1.13 \text{ m} = 1130 \text{ mm} \phi$$

$$L = \frac{V}{A} = \frac{2.26 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^2} = 2.26 \text{ m} = 2260 \text{ mm}$$

尺寸為  $1130\text{mm}\phi \times 2260\text{mmL}$

#### (1) 旋風集塵機

##### ① 設計依據

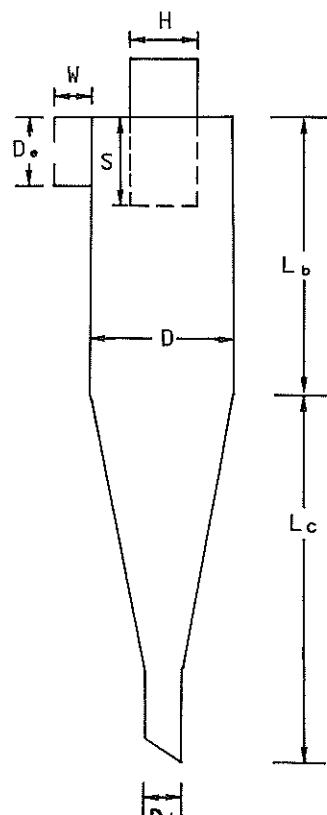
入口速度 :  $20\text{m/sec}$

採高效率型旋風集塵機 (參見圖3.13)。

##### ② 設計規格

假設旋風集塵機入口溫度為  $1,000^\circ\text{C}$ ，故旋風集塵機入口斷面積A為：

$$A = \frac{22.22841 \text{Nm}^3/\text{min} \times \frac{273+1000}{273} \times 1\text{min}}{20\text{m/sec}} \div 60\text{sec} = 0.0864\text{m}^2$$



##### • 旋風集塵機各部份尺寸

$$H \times W = 0.0864\text{m}^2$$

$$H = 2W$$

$$W = 21\text{cm} = 0.21\text{m}$$

$$H = 42\text{cm} = 0.42\text{m}$$

$$D = 2H = 0.84\text{m}$$

$$D_e = 0.5D = 0.42\text{m}$$

$$S = 0.625D = 0.525\text{m}$$

$$L_b = 2D = 1.68\text{m}$$

$$L_c = 2D = 1.68\text{m}$$

$$D_d = 0.25D = 0.21\text{m}$$

圖3.13 旋風集塵機本體尺寸



## 第四章 焚化爐附屬設備設計與選擇

以小型焚化爐而言，主要之附屬設備有進料系統、燃燒機、送風機、耐火材料、儀控系統與煙囪等，在選擇購買焚化爐之前或操作維護時，應對此方面有初步瞭解，以下乃針對這些相關附屬設備介紹之。

### 4.1 進料系統

以事業機構所產生之廢棄物型態，大致可分為液態、漿狀態(slurry)、污泥狀(sludge)與固態四種，此四種型態之廢棄物為顧及整體輸送與燃燒狀況，各有不同進料設計系統。

#### 4.1.1 液態進料系統<sup>8,19</sup>

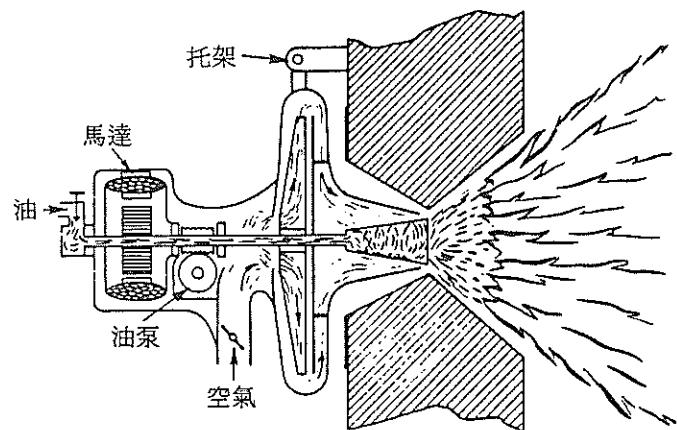
一般液態廢棄物主要之進料方式，是以噴霧進料方式為主，藉著霧化噴嘴(Nozzle)將液態廢棄物化成微細霧滴，增加與空氣接觸表面積。由爐內之熱輻射對流傳導，蒸發氣體化後，供給空氣以擴散混合，提高燃燒速度，相對燃燒效率高。一般常見之霧化裝置與輔助燃燒器類似，可分為加壓噴霧、回轉式噴霧、高壓2流體噴霧與低壓2流體噴霧四種，見圖4.1所示。由於在液態廢棄物進料過程牽涉到液態廢棄物之貯存槽、輸送管路與噴霧裝置。貯存槽應選擇與廢液能相容之材質，不得發生反應、腐蝕之現象。在輸送管路方面，則必須考慮廢液之黏滯性、流動性、固體物含量，避免造成輸送管路侵蝕(erosion)、腐蝕(corrosion)、阻塞，若黏滯性太高時，可藉由昇溫以降低黏滯性，其一般黏滯性在1,000CSt(或5,000SSU)才能夠輸送，可參考圖4.2所示。若廢液中可含固體顆粒時最好在噴霧噴射前利用過濾(filter)去除之，避免阻塞噴嘴(nozzle)。

由於各種噴嘴有其適合之霧化範圍，可參考表4.1所示。就整體廢液進料系統可參考圖4.3所示。

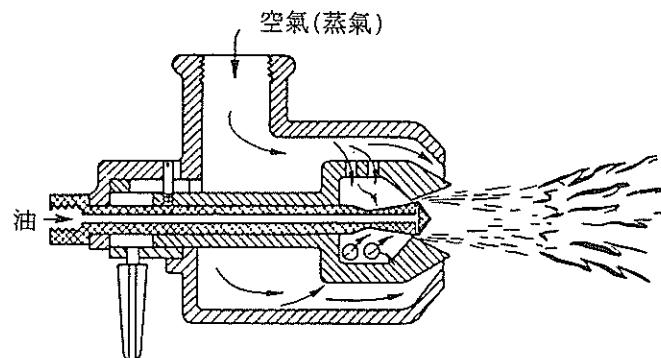
#### 4.1.2 漿狀物與污泥進料系統

對於漿狀物(slurry)與污泥(sludge)之進料設計時，應考慮漿狀物或污泥之熱值與含水率，若含水率高且熱值低，應考慮先將其乾燥，再進爐內焚化，若含水率低且熱值高，則可以直接進入爐內焚化。

其次是考慮輸送系統，對於含水率在85%以下之污泥，可使用輸送帶輸送，對於含水率在85%以上之漿狀物可使用螺旋式輸送機、離心式泵、級進式腔泵…等輸送器見圖4.4~4.5所示。並直接打入乾燥或焚化設施內。

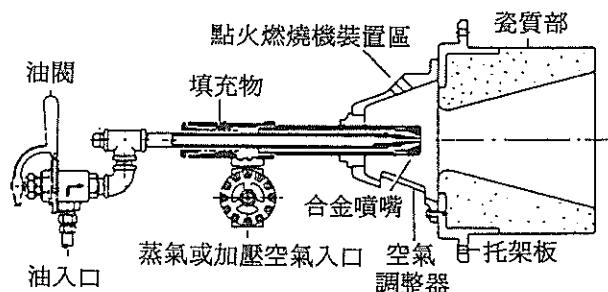


A.回轉杯燃燒器噴嘴

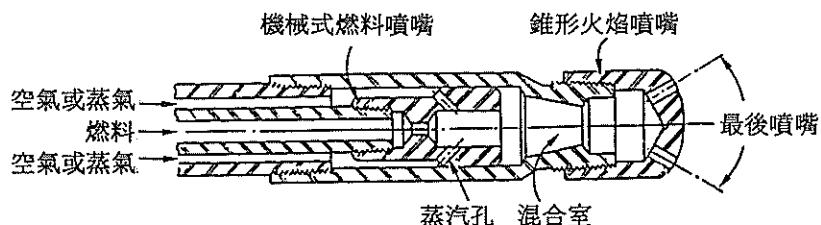


B.低壓 2流體燃燒器噴嘴（外部混合）

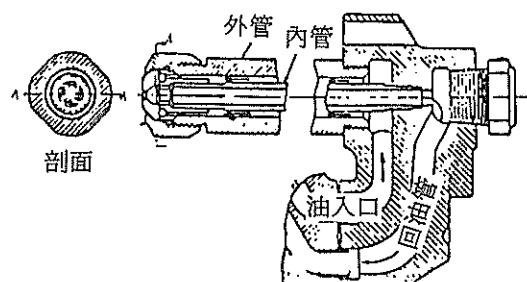
圖4.1 不同類型廢液霧化裝置(I)



C. 高壓 2流體燃燒器噴嘴（外部混合）

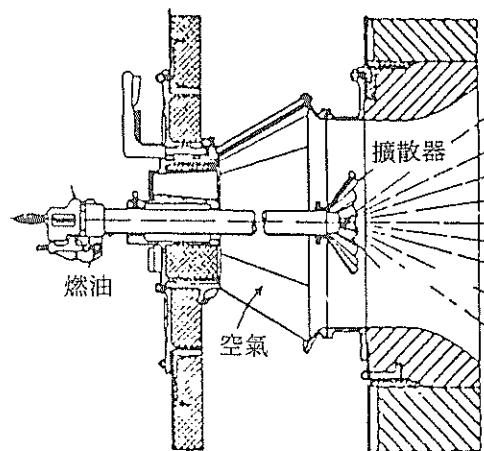


D. 高壓 2流體燃燒器噴嘴（內部混合）

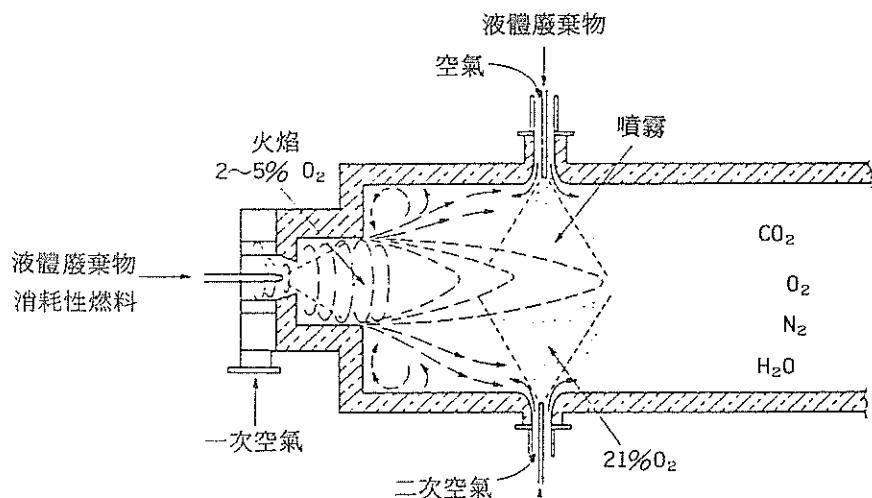


E. 油壓式燃燒器噴嘴（回油型）

圖4.1 不同類型廢液霧化裝置(II)



F. 加壓式燃燒器噴嘴（非回油型）



G. 廢液焚化爐

圖 4.1 不同類型廢液霧化裝置(Ⅲ)<sup>4,8,9</sup>

表4.1 各種霧化方式之適用範圍<sup>8</sup>

霧化方式	最高動力黏度 (SSU)	篩號	固體物含量 (%)
回轉式	130~175	35~100	20
加壓式	150	—	0
高壓 2流體式	(外壓空氣) 150~5,000	100~200	70
	(外壓蒸氣) 150~5,000	100~200	70
低壓 2流體式	(內壓空氣) 100	—	0
	(外壓空氣) 200~1,500	200	30

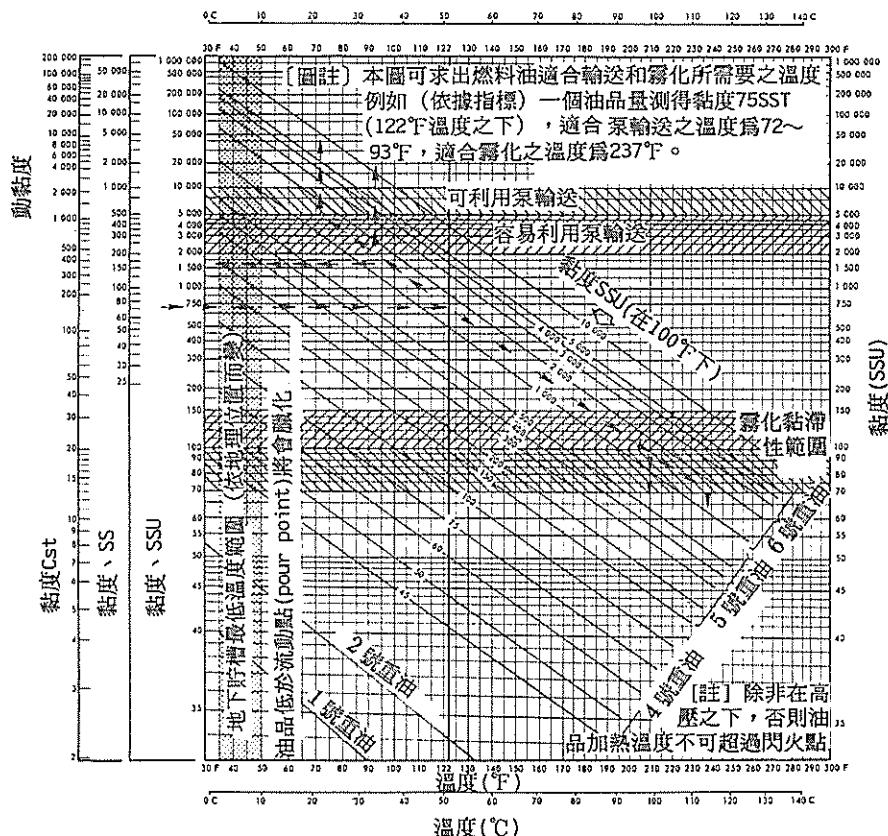


圖4.2 油品燃料與黏度關係圖<sup>1</sup>

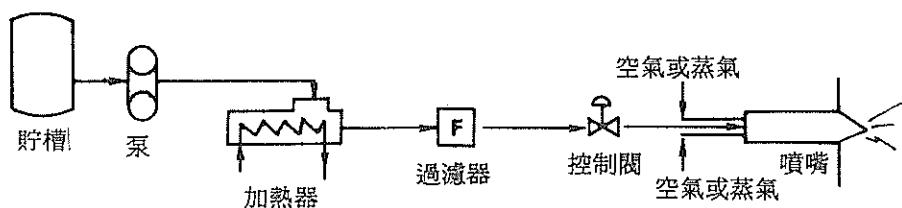
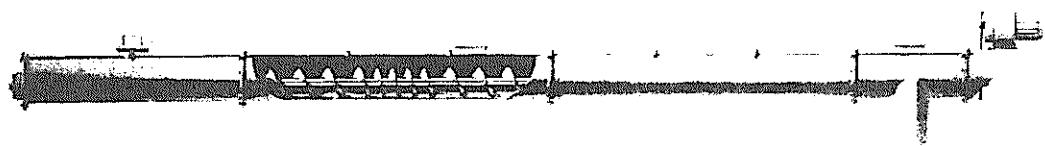
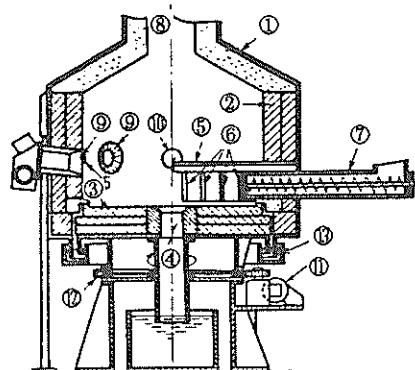


圖4.3 廢液進料系統示意圖<sup>1</sup>

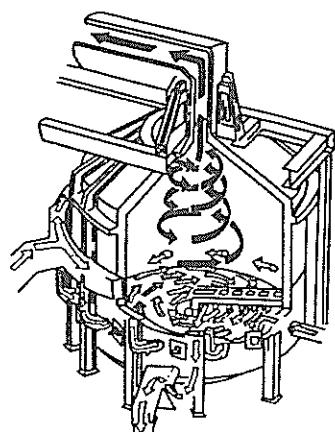


A.螺旋輸送機示意圖



- |           |         |
|-----------|---------|
| ①爐體外殼     | ⑧煙道     |
| ②爐體耐火絕熱內襯 | ⑨助燃燃燒器  |
| ③旋轉爐床     | ⑩空氣口    |
| ④灰盤滑槽     | ⑪爐床驅動馬達 |
| ⑤鋤支持器     | ⑫爐床軸承   |
| ⑥鋤        | ⑬爐床水封   |
| ⑦螺旋輸送機    |         |

構造圖

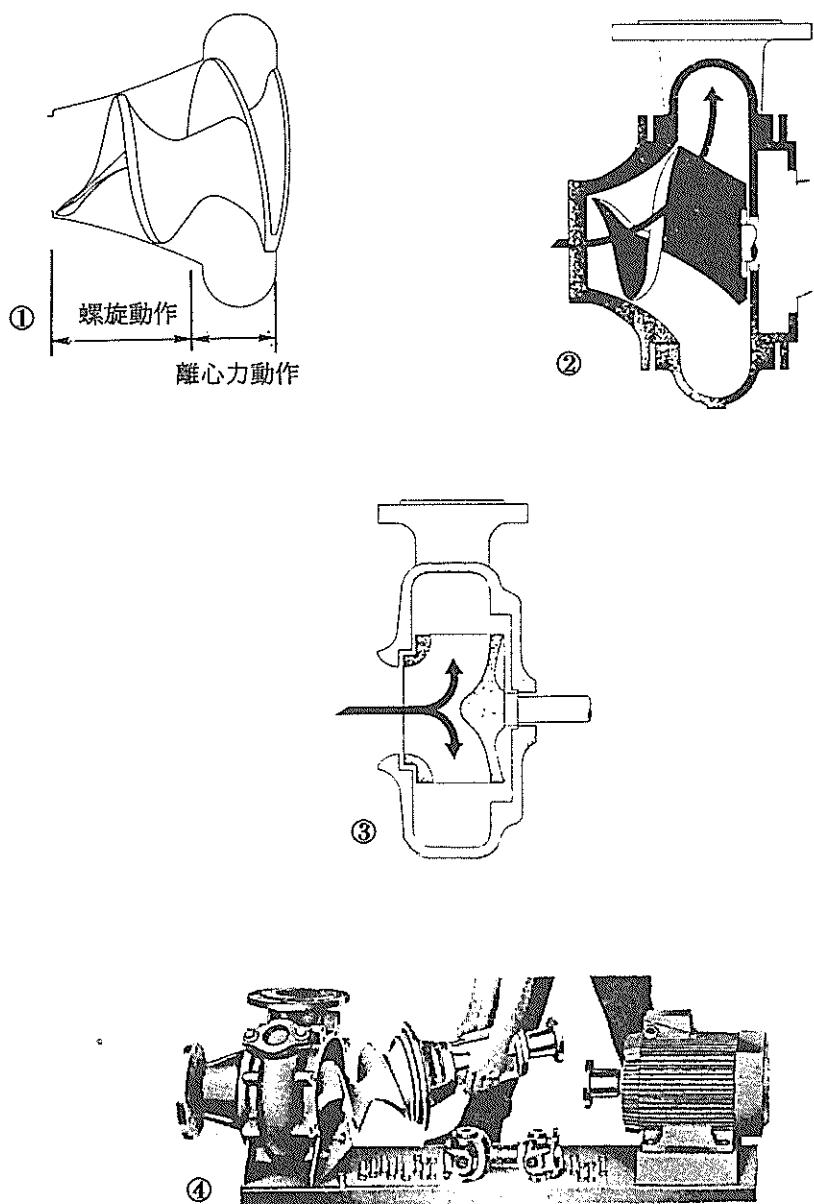


■ 空氣 ■ 燃燒氣體  
▨ 被燃物 □ 灰

物質流向示意圖

B. 旋轉式焚化爐與螺旋輸送機配置圖

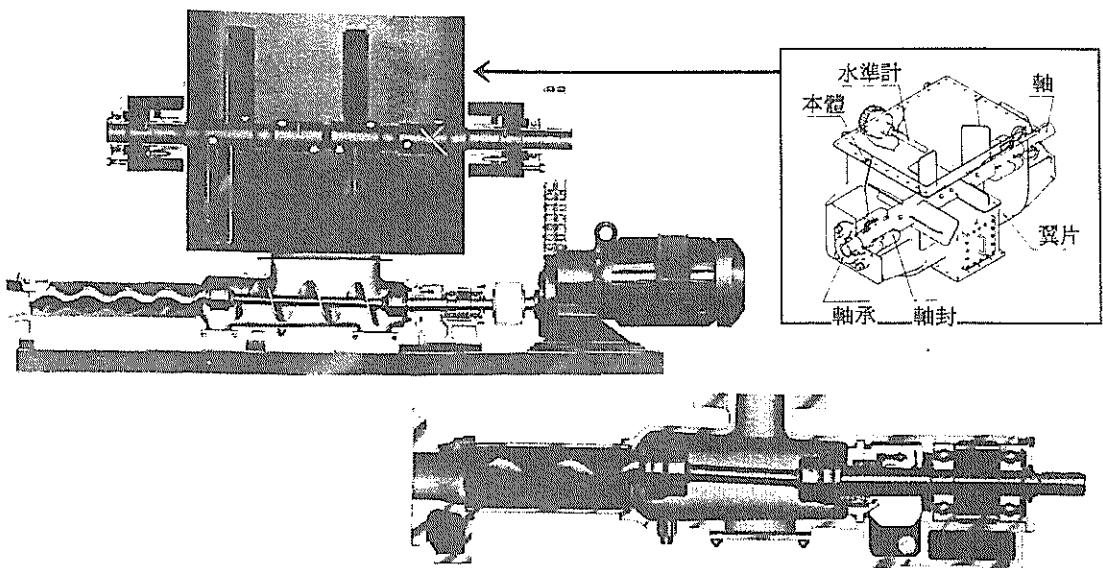
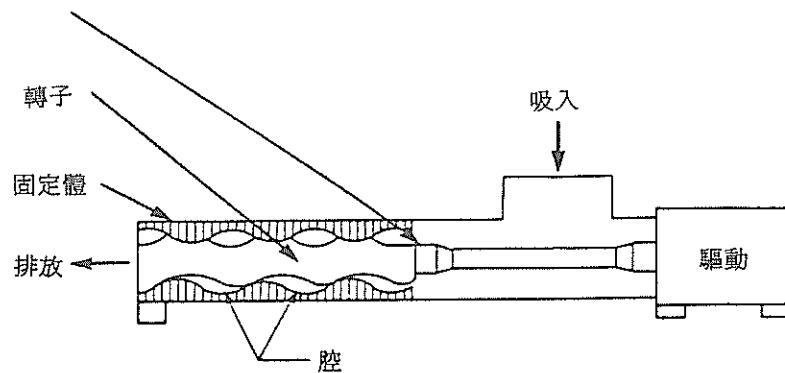
圖4.4 各種輸送器裝置(I)



C.離心式汚泥輸送泵(centrifugal pump)

圖4.4 各種輸送器裝置(Ⅱ)

萬向接頭（通用接頭）



E. 級進式腔泵 (progressive cavity pump)

圖 4.4 各種輸送器裝置 (III)

在污泥貯存槽方面，為避免污泥分層現象，可裝置攪拌裝置克服之。就整體進料系統配置方面，可參考圖4.5 所示。其中為節省污泥乾燥所耗費之燃料與能源，可利用燃燒室之高溫廢氣來乾燥污泥，乾燥後之污泥再送入第一燃燒室焚化，而乾燥設施所產之臭味氣體送入第二燃燒室高溫脫臭。另一種方法是將第二燃燒室所產生之高溫廢氣與新鮮空氣進行熱交換，以預熱冷空氣成熱空氣，來提昇第一燃燒室進入空氣，節省燃料之消耗<sup>19</sup>。

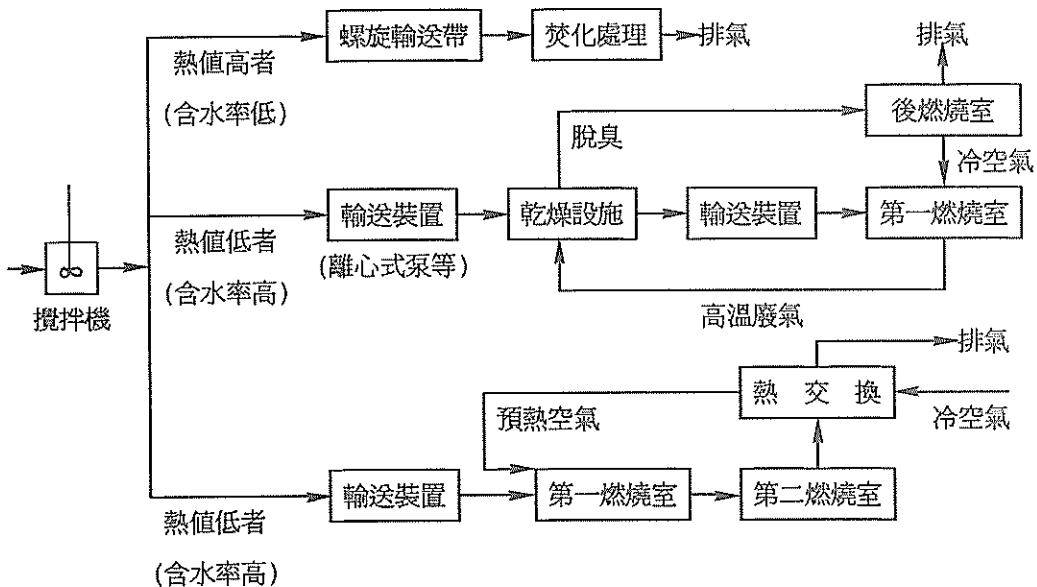


圖 4.5 賚狀物與泥狀物進料系統配置流程

### 3. 固體廢棄物進料系統

一般固體廢棄物之型態，又可分為粉狀、大塊狀、膨鬆狀、小塊狀，因此在進入焚化爐必須先經過破碎與減容成小塊狀，若為粉狀廢棄物可利用螺旋式輸送機送入爐內焚化，見圖4.4 所示。若已經經過破碎成小塊狀之廢棄物，可利用二段式進料門之進料推桿 (ram feeder)，此種裝置由於具備有氣密性，可減少進料時，大量空氣進入爐內，造成燃燒不穩定現象。

進料爐門有兩道，第一道為開啓門，第二道為閘門又稱火門 (fire door) 一般在進料時，開啓門打開，將廢棄物送入進料槽內，當進料結束時，關上開啓門，而後打開第二道閘門又稱火門，推桿將廢棄物推入爐內，而後閘門關閉，推桿還原，開啓門打開，開始進料，可參考圖4.6 所示。由於此種方式構造

單純，操作容易，而且可避免爐內產生正壓，迴火現象，傷及操作人員，廣泛用於小型焚化爐之進料系統。

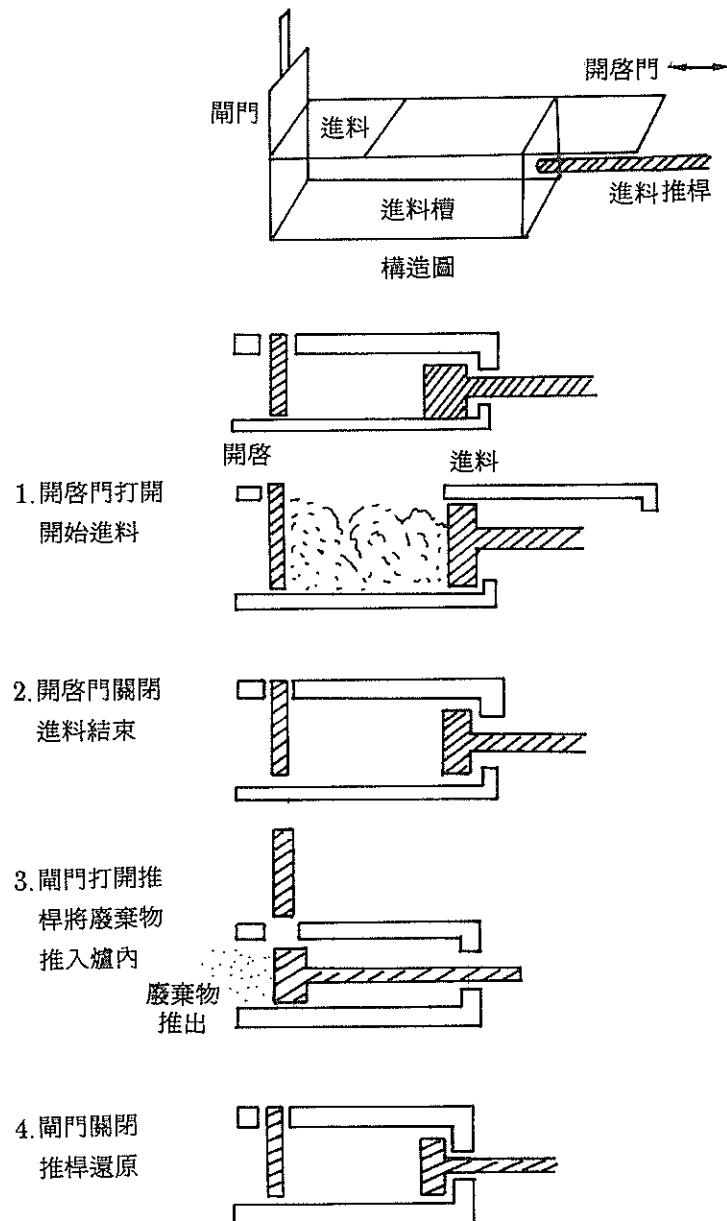


圖 4.6 二段式爐門進料器操作示意圖

## 4.2 燃燒機

依焚化爐所常用之燃燒機，大致可分為油燃燒機(oil burner)、瓦斯燃燒機(gas burner)兩種類型，而油燃燒機依燃料種類分類，可分為柴油燃燒機(light oil burner)與重油燃燒機(heavy oil burner)。主要差異在於兩種燃料油品黏滯性不同，為達到燃燒機之噴嘴能使油品充份霧化，重油燃燒機必須加裝加熱裝置，藉由加熱以降低重油之黏滯性。依霧化方式分類大致可分為油壓(噴霧)式、旋轉(噴霧)式、低壓空氣(噴霧)式、高壓氣流(噴霧)式等。而瓦斯燃燒機則依瓦斯與空氣混合方式之不同大致可分擴散型與預混型兩類，可參考圖4.8所示。預混合燃燒是預先混合瓦斯燃料與空氣成預混合氣，以燃燒器燃燒的方式。擴散燃燒是從噴嘴噴出氣體燃料，藉擴散混合空氣而燃燒。除上述兩種燃燒機外，因應多元性燃料燃燒系統，尚有雙燃料燃燒機(dual fuel burner)。因應低氮氧化物排放需求之低氮氧化物燃燒機(low NO<sub>x</sub> burner)。由於燃燒機之設計上，是一門專業之學問，設計理論相當複雜，而且市面上大多有規格化之產品，因此在焚化爐系統之應用，僅需瞭解各種燃燒機之型式、特徵、相關附屬配備，以確實吻合焚化爐系統容量(capacity)與各部位之適合燃燒之型態即可。以下乃針對各種燃燒機之型式、特徵與相關附屬配備，作簡單介紹之。

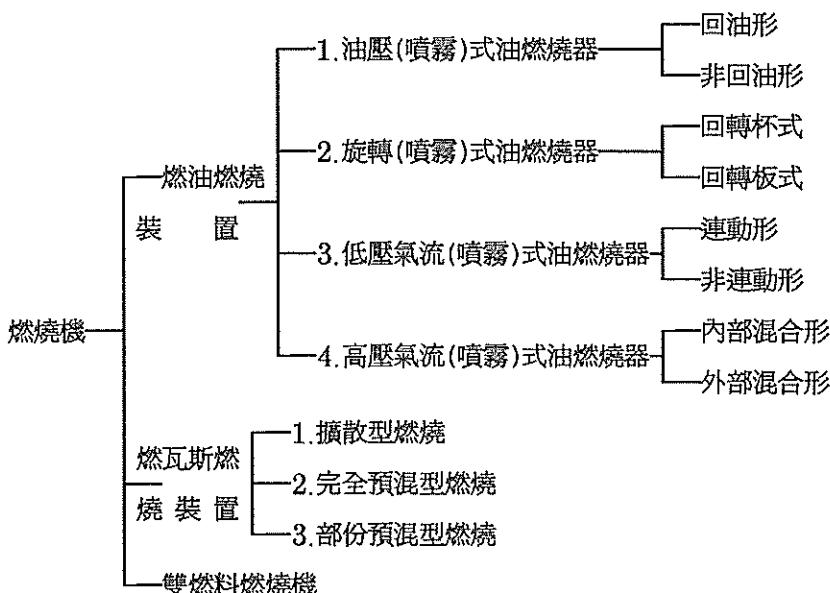


圖4.7 燃燒機種類

#### 4.2.1 油燃燒機

液體燃料主要是指石油系燃料，其中像汽油、燈油、輕油等蒸餾油是可以使之從液面產生蒸發燃燒。例如，家庭用的石油爐(stove)之燃燒即是使用蕊心的蒸發燃燒之例子。但是像重油那樣的殘留油，因含有許多熱分解溫度比油的沸點還要低的成分，因此，碳素會先行析出，要使之蒸發燃燒就比較困難了。在大多數的情況是先將油噴霧成微小的油滴群再使之燃燒，此稱之為噴霧燃燒。

燃料的噴霧是噴霧燃燒的前提，噴霧特性對其後的燃燒之影響很大。噴霧燃燒的過程是油滴先受到燃燒中的火焰和爐的內壁所放射出來的熱量之預熱，接著在氣化之同時吸引周圍的空氣而形成混合氣，然後此種混合氣再開始著火、燃燒。由於這些過程並不是獨立進行的，不論在時間上或者空間上都是重合進行著，而且油滴群也會互相干擾，因此，整個燃燒過程是非常複雜的。

而所謂油燃燒裝置是指燃料油完全燃燒與維護燃燒裝置使用安全之全部設備而言。一般包括：油燃燒機本體、給油槽、油過濾器、給油泵與油壓調整閥。而燃燒機本體則又包括：重油加熱器、油泵、鼓風機(blower)、點火變壓器、感應控制油閥(sensitrol oil valve)、空氣與燃料控制連桿(air and fuel control linkage)、UV火焰偵測器…等。見圖4.9與圖4.10所示。以下乃針對各種噴霧式之油燃燒機之種類、特徵與附屬裝置介紹之。

##### 1. 油壓式燃燒機

以油壓泵對油施加高壓，將之從噴嘴使油霧化，油壓通常為 $5\sim 20\text{ kg/cm}^2$ ，但大型的也有達 $100\text{ kg/cm}^2$ 以上者。噴霧粒徑約在 $50\sim 100\mu\text{m}$ 左右。噴霧角度約在 $40\sim 90^\circ$ 左右。

而一般為增加噴霧角度起見，噴射前對油賦予強力的旋迴運動，使在噴射後成為寬廣圓錐狀油膜，然後破碎成微粒而霧化<sup>6</sup> 見圖4.11所示為例。

而油壓式油燃燒器各種噴霧器作用，大致可分為回油型與非回油型兩種，回油型是充分對渦卷室給油，使噴射壓力保持一定，超過所需噴射量的油量回到油泵的吸入側，若改變回油的壓力時即可改變噴射油量，一般回油型油量調節範圍約在1:3.0左右；而非回油型即直接噴射型，是直接改變渦卷室之油壓而改調整噴射油量。而噴射量與油壓的平方根成正比，若要把噴射量降為 $1/2$ 油壓須降為 $1/4$ ，油壓低則霧化效果不良，故調整噴射量的範圍較小，而一般非，則回油型油量調節範圍約在1:1.5左右，若要換成適合的噴射量，則必須改變燃燒器之噴油嘴(burner tip)。其上述兩種油壓式燃燒器各種噴霧器作用說明，如表4.2所示。

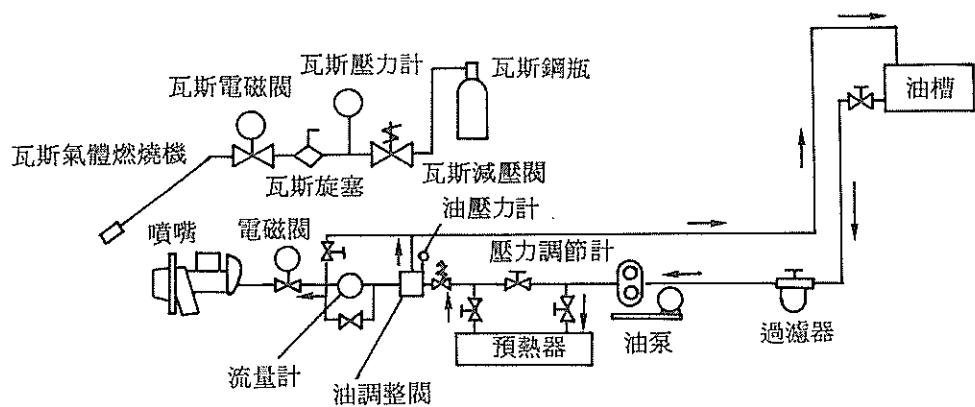


圖 4.8 典型重油燃燒機流程圖

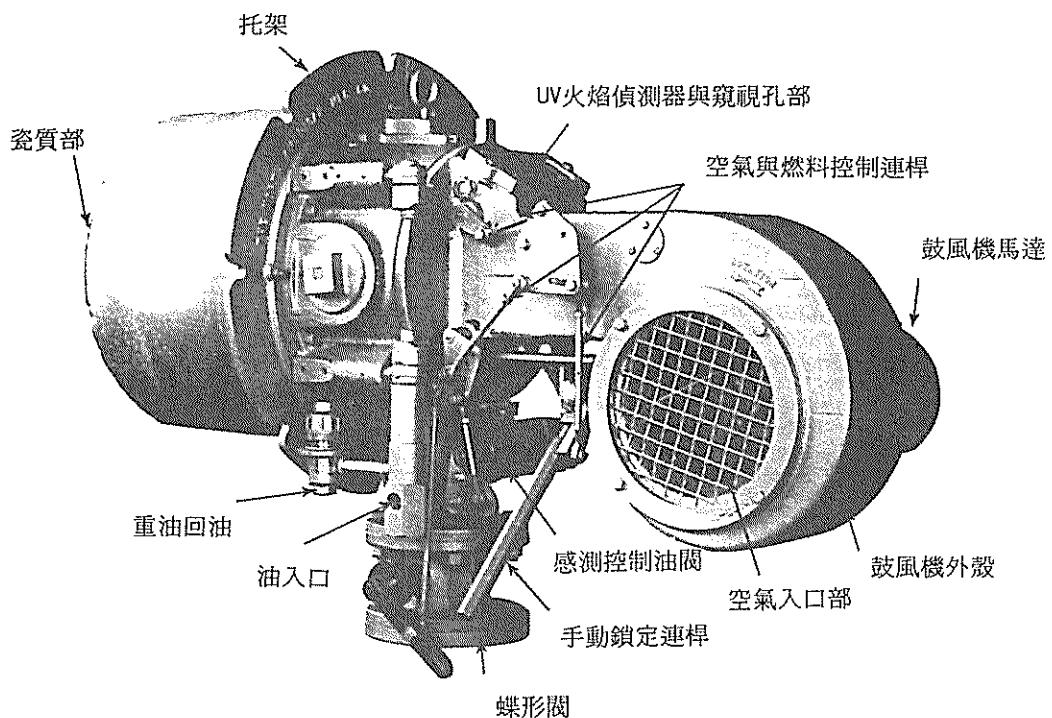
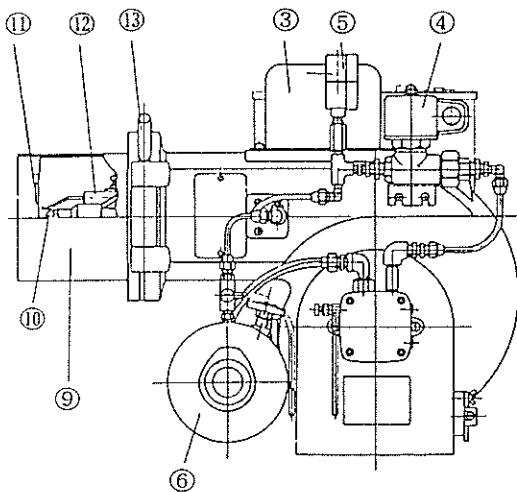
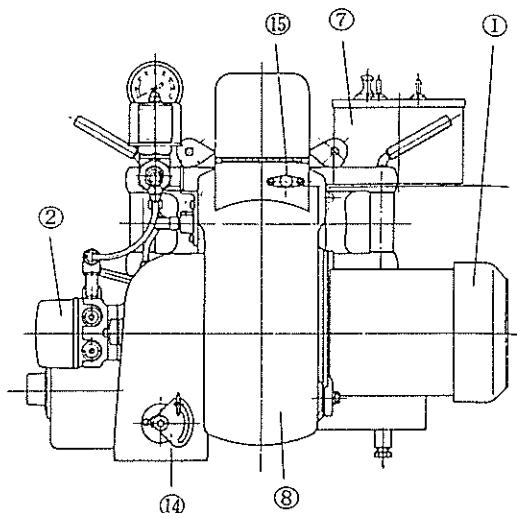


圖 4.9 回油型油壓式重油燃燒機



•正面圖

- ①馬達
- ②新月型幫浦
- ③點火變壓器
- ④重油電磁閥
- ⑤壓力計
- ⑥重油加熱器
- ⑦燃機控制箱
- ⑧機體（內部風鼓）
- ⑨火口管
- ⑩噴嘴
- ⑪風分散盤
- ⑫點火棒
- ⑬關門插鎖
- ⑭風門大小調整器
- ⑮電眼



•側面圖

圖 4.10 油壓式重油燃燒機配備示意圖

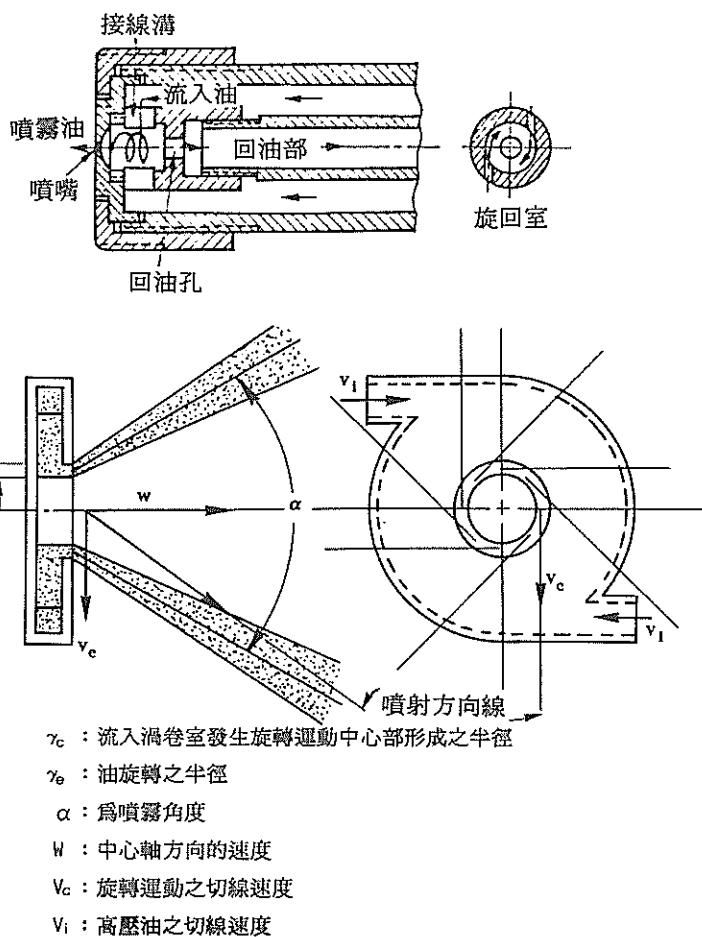


圖 4.11 旋迴噴射機構說明圖 6, 16

表 4.2 油壓式油燃燒器各種噴霧器作用說明圖表<sup>16</sup>

非回油形	回油形	
直接噴射形	內側回油形	外側回油形

## 2. 迴轉式燃燒器

此種燃燒器是使油在迴轉霧化筒的尖端因離心力之作用而飛散，然後再利用高速的空氣氣流來使油滴微粒化，一般軸心之旋轉速約在5,000~6,000rpm之程度，噴霧角度則在40~60°之間，平均油化霧滴約在50~150 μm，油量調整範圍約在1:5。一般油泵僅供給0.3kg/cm<sup>2</sup>之壓力即可，但對於油品之黏度較大時，則霧化效果較差，故只適用於輕油之霧化，若要使用重油時，則需加裝電器加熱裝置。而一般此種燃燒器具有一個轉動的杯形或板形裝置。旋杯轉動所產生的離心力可以將液體燃料拋擲至旋轉杯內表面上。由於表面張力的作用，液體成為顆粒狀。空氣由旋杯外圓進入，和霧化之液滴混合燃燒，旋杯的轉動，油泵及空氣的輸送所需的動力可由一部馬達提供，亦可分開提供<sup>6</sup>。可參考圖4.12所示。

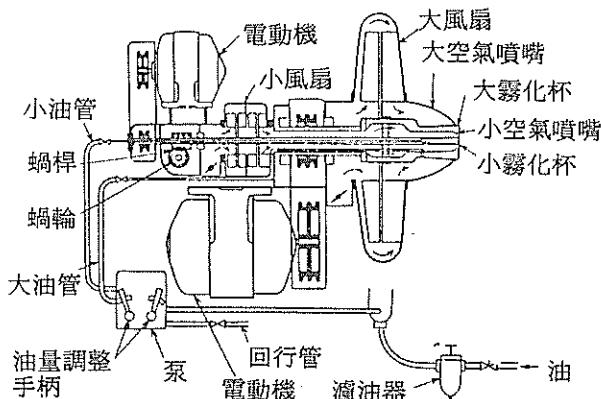


圖4.12 回轉式燃燒器之構造

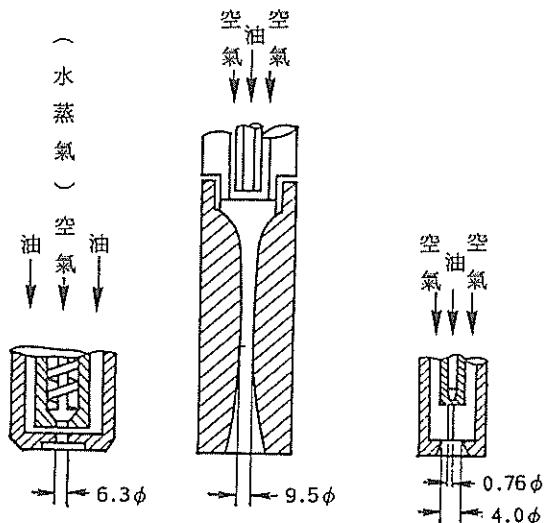
## 3. 二流體噴霧（空氣或水蒸氣）燃燒

一般二流體噴霧燃燒器，可分為高壓氣流燃燒器與低壓氣流燃燒器，以下乃針對此兩種燃燒器介紹之。

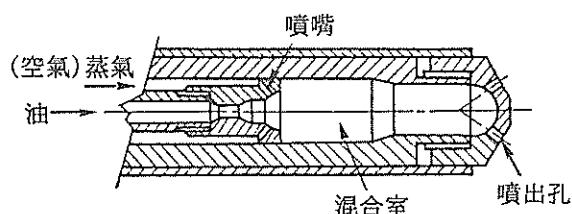
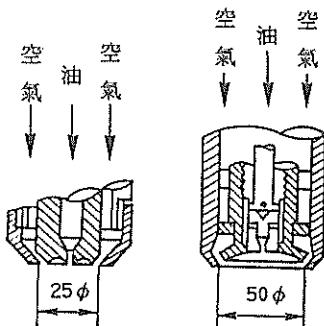
### (1) 高壓氣流式燃燒器

這種燃燒器是利用2~10kg/cm<sup>2</sup> gage程度的空氣或蒸氣以高速氣流將油霧化之。依油與噴霧氣流混合地點之不同，又可分成內部混合型與外部混合型兩種（見圖4.13所示）。不論是那一種型式之燃燒器，只要少量的高壓噴

霧媒體即可充份霧化。噴霧角度為 $20\sim30^\circ$  程度之狹角，火焰之焰心呈長炎型。油量的調節比為 $1:10$ 的程度。油霧滴平均粒徑約  $10\sim60 \mu m$ 。以下乃<sup>6</sup>針對內部混合型與外部混合型之燃燒機介紹之。



A. 油外部混合型高壓氣流燃燒器



B. 油內部混合型高壓氣流燃燒器

圖4.13 高壓氣流燃燒器<sup>6</sup>

**外部混合形**：這種燃燒器是在燃燒器外部以空氣或蒸氣將霧外之化，霧化用空氣或蒸氣的量及壓力則因燃燒器而頗有差異，一般而言，蒸氣時約為燃燒所需理論的2~7%，蒸氣時約為燃料油量的20~60%。

**內部混合**：乃在燃燒器之前端設混合室，預先使油與空氣或蒸氣混合，然後從混合室前端的噴嘴噴射而霧化，霧化用空氣或蒸氣的量及壓力約與外部混合形相同<sup>16</sup>。

## (2) 低壓空氣(噴霧)式油燃燒器

這是以較低壓(200~2,000mmAq)的空氣使油霧化燃燒器，在特徵上油壓範圍約在0.3~0.5kg/cm<sup>2</sup>左右，噴霧角度約30~60°，霧化用空氣量約是理論空氣量之30%左右，其餘當作二次空氣適當送入，油量的調節範圍約在1:5以上。在構造上大致可分為兩類，一類是非運動形，另一類是運動形。而非運動形是以油量調整柄控制噴油嘴之油量；噴霧用空氣的空氣一部份先從空氣噴嘴旋迴並噴射，把油噴嘴噴出的油粗粒化，其餘從另一空氣噴嘴，把油微粒化，由操作手柄，前進與後退，控制空氣噴嘴噴射量。

而運動形則是由燃燒器供給全空氣量，故可與油量運動而施行比例控制；以油量調整柄控制噴油量；從送風機送出的空氣一部份由空氣噴嘴噴射而把油噴嘴噴出的油粗粒化，其餘從另一空氣噴嘴把油微粒化；操作空氣量調整柄(運動桿)，控制油與空氣噴嘴，油氣與空氣噴嘴的間隙而調整空氣量；栓緊運動固定螺帽，使油量調整柄與空氣量調整柄固定，即可同時成正比例地調節油量與空氣量，可簡單進行範圍較廣的比例控制<sup>16</sup>。其圖形可參考圖4.14及圖4.15所示。

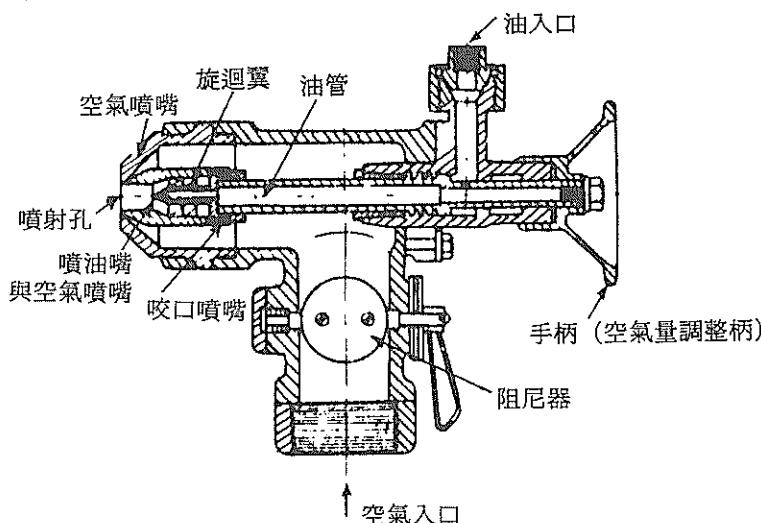


圖4.14 低壓空氣式燃燒器(非運動型)

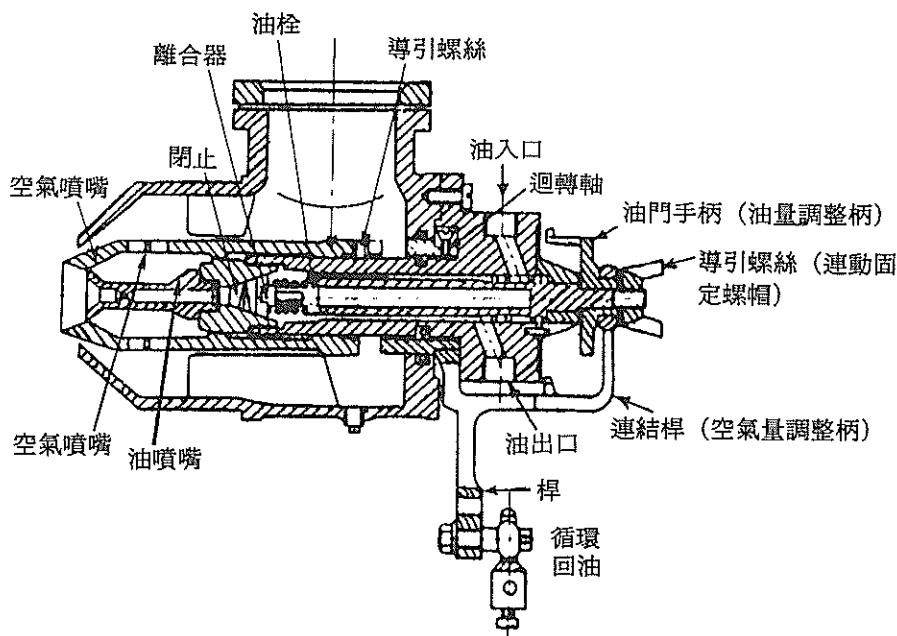


圖 4.15 低壓空氣式燃燒器（運動型）

綜合上述，各種燃燒機之特性，可參考表 4.3 所示。而對燃燒器本身有一定黏度之適用範圍，若黏度太大，則霧化效果變差，各種燃燒機適合之黏度範圍可參考表 4.4 所示。若對於黏度過大之油品，例如：重油，可適當加熱，以降低黏度，其適合加熱溫度，可參考表 4.5 所示。

表 4.3 各種油燃燒機之特性

燃燒機型式	容 量 (L/hr)	噴霧角範圍	噴霧平均粒徑 ( $\mu\text{m}$ )	油量調節範圍	效 率 (%)	火 焰 的 型 狽
油 壓 式	30~3,000	40~90°	50~100 $\mu\text{m}$	非回流式1:1.5 回流式1:3.0	5~20kg/cm <sup>2</sup> :80~85 >200kg/cm <sup>2</sup> :>95	是廣角火焰，其長度雖依空氣供給量而異，一般是比較短
迴 轉 式	5~1,000	40~60°	50~150 $\mu\text{m}$	1:5	80~85	是較為廣角，長度則依空氣的供給量而加以變化
高 壓 2 流體式	2~2,000	>30°	10~60 $\mu\text{m}$	1:10	85~90	是最為狹角，而形成長條的內部混氣式者則形成柔和的火焰
高 壓 3 流體式	30~3,000	45° 以下	—	1:10	>98(純氣型)	為短尖型
低 壓 2 流體式	2~300	30~60°	100~300 $\mu\text{m}$	1:5	80~90	為狹角型，長度也短，不過可利用二次空氣助燃變化

表4.4 油燃燒機適合之黏度範圍<sup>7</sup>

燃燒機種類	Redwood 1號 (sec)	CSt
油壓式(大型)	100~120	25~30
油壓式(小型)	60~70	15~18
蒸氣噴射式 (外部混合)	200~350	50~88
蒸氣噴射式 (內部混合)	300~500	75~125
低壓空氣噴霧式	100~150	25~38
中壓空氣噴霧式	150~200	38~50
迴轉式燃燒機	80~150	20~38

[註] CSt : Centi-Stoke =  $\frac{1}{100} \text{cm}^2/\text{sec}$

#### 4.2.2 瓦斯燃燒器(gas burner)

瓦斯燃燒器主要包括一組空氣調節器以及噴射裝置，空氣調節器主要之目的在調節空氣與瓦斯之混合比，並以穩定點火，一般瓦斯燃燒器可分為擴散燃燒式與預混合燃燒式兩大類。

所謂擴散燃燒式(diffusion combustion)是指瓦斯及空氣個別噴出，可以一邊擴散混合，另一邊燃燒，其特點操作範圍廣，逆火之危險性小，可參考圖4.16所示。

而預混合燃燒式(premixed combustion)，乃是指在燃燒以前空氣與瓦斯預先混合後再燃燒，其特性為燃燒負荷大，火焰溫度高，且具有回火之危險性，其形式可分為，完全預混合式(total premixing type)與部份預先混合式(partial premixing type)，完全預合式是預先使瓦斯與空氣在混合室內混合，在混合室內必需保持一定空燃比，避免熄火。而部份預混合式是瓦斯與燃燒用空氣一部份預先混合，再利用二次空氣混合燃燒<sup>11</sup>。其圖形可參考圖4.17及圖4.18所示。

而理論火焰溫度之計算，所謂理論火焰溫度是不考慮任何熱損失之火焰溫度，以瓦斯燃燒器之理論火焰溫度可依照下式計算之：

表 4.5 重油黏度之適當加熱溫度<sup>7</sup>

50 °C 重油黏度		重油之加熱溫度(°C)	
Redwood號 (sec)	動黏度 CSt	機械的霧化	蒸氣噴射霧化
250	62	54~83	36~54
300	74	58~88	39~58
350	86	62~93	43~62
391	97	65~96	45~65
441	109	68~99	47~68
527	130	72~102	50~72
610	151	75~105	54~75
700	173	78~108	55~78
791	196	80~110	58~80
892	220	82~112	59~82
1052	260	85~115	63~84
1226	302	87~118	66~87
1400	346	90~120	68~90
1577	389	92~121	70~92
1748	432	93~123	71~93

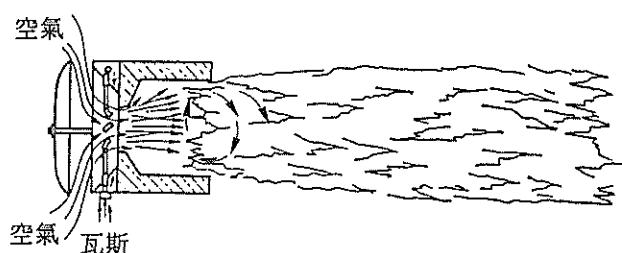


圖 4.16 擴散型燃燒機

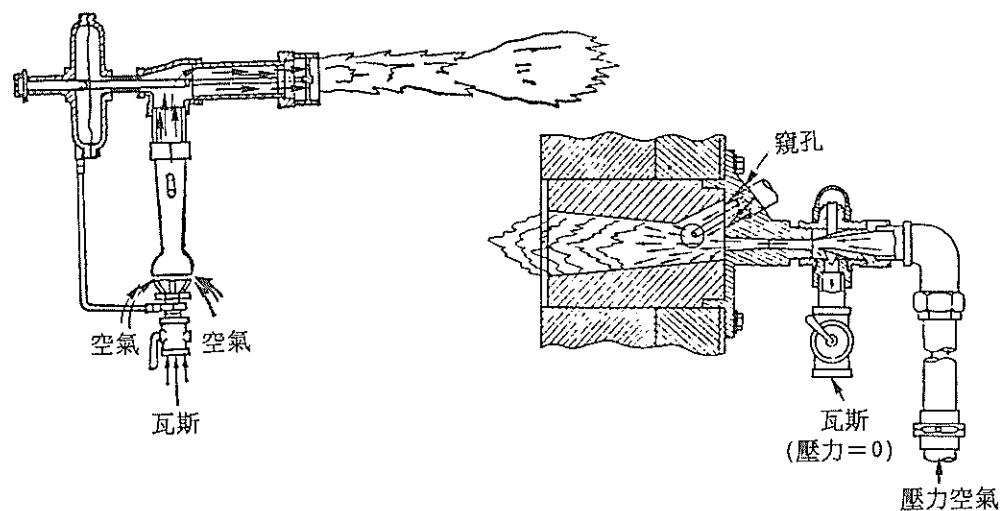


圖 4.17 完全預先混合型燃燒機

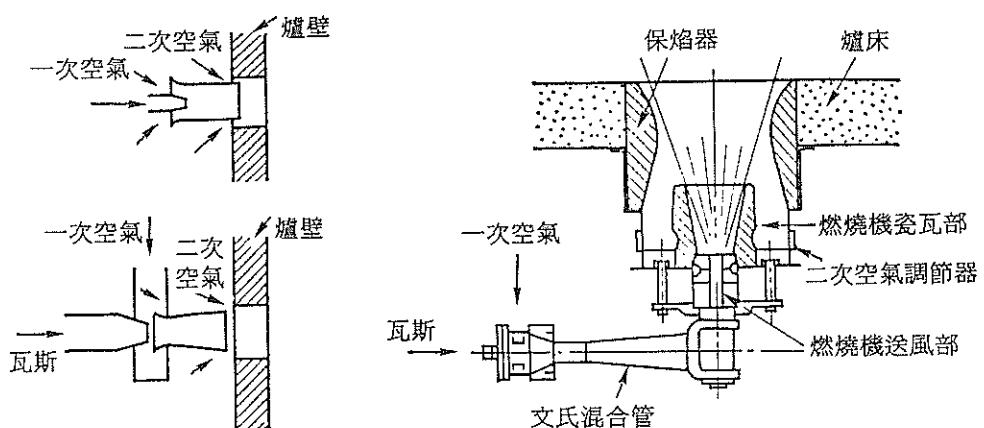


圖 4.18 部份預先混合型燃燒機

$$\text{理論火焰溫度} = \frac{H_f}{G \times C_{P_g}} + t_0$$

$H_f$  : 燃料的低位發熱量 ( $\text{kcal}/\text{Nm}^3$ )

$G$  : 理論燃燒氣體量 ( $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$ ) =  $(m - 1)A_0 + G_0$

$C_{P_g}$  : 燃燒氣體的定壓比熱 ( $\text{kcal}/\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$t_0$  : 大氣溫度

$m$  : 為空氣比

$G_0$  : 為  $m = 1$  時之理論燃燒氣體量 ( $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$ )

$A_0$  : 理論空氣量 ( $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$ )

普通實際火焰溫度約是理論火焰溫度之 80% 左右

綜合上述油燃燒器與瓦斯燃燒器之外，另需要有以下幾種附屬裝置，包括：保焰器、燃燒器之瓷質部、點火裝置、火焰偵測器。

保焰器之目的在使著火確實而火焰穩定，有旋迴器 (swirler) 方式與保焰板方式。而燃燒器之瓷質部，一般都是以耐火材料構成，以 90% 以上之  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之超高鋁質材料，以耐高溫，其目的在調整噴入爐內的燃料和空氣的速度分佈與流動方向，使油滴與空氣混合良好；也可在噴霧流與瓷質部間生成渦卷或低流速部份，防止把火焰吹熄。點火裝置，一般小型燃燒機大多採用電器式點火棒裝置。火焰偵測器在確定燃燒器是否確實點著，一般常用偵測器有紫外線偵測器與火焰桿 (flame rod) 兩種<sup>16</sup>。

### 4.3 送風機

送風機在焚化爐的使用上是一種重要的裝置，一般使用在強制送風 (force draft) 與抽引排氣過程。強制送風乃在提供燃燒所需要之空氣。抽引排氣乃抵抗壓損，而維持爐內固定負壓。以下乃針對焚化爐送風機之選擇與設計簡單介紹之。

#### 4.3.1 送風機之設計<sup>18</sup>

##### 1. 基本數值計算式

###### (1) 風量

風量為送風機在單位時間內所吸入的氣體流量稱之，或者稱為空氣量。一般由從送風機入口所排出去的流量，必需要換算成入口的溫度、壓力和濕度狀態的風量來表示才行。通常不一一說明入口風量，可是所謂風量卻是入口風量的意思；蓋因氣體的體積將會由於其壓力和溫度而大有不同的緣故。因氣體的體積將會由於其壓力和溫度而大有不同的緣故。

雖然也有不換算成爲入口狀態而將之換算成爲壓力760mmHg、溫度0°C、乾燥狀態，也就是基準狀態者，可是在這種情形之下卻要由 $Q$  ( $Nm^3/min$ )或 $Q$  ( $m^3/min(NTP)$ )來表示了。

若已知的風量爲 $Nm^3/min$ 時，則用換算成爲送風機實際入口之壓力、溫度和濕度狀態的風量，來進行決定送風機之動力和動葉輪尺寸的計算，當屬必要。

例如，雖然在已知處理空氣的送風機風量爲 $Q=800m^3/min$ 的情形下只要由800實際風量進行計算即可。可是若已知 $Q_0=800Nm^3/min$ 而入口條件又已知爲壓力 $P=750mmHg$ ，溫度 $t=24°C$ 和濕度 $\phi=0.7$ 時，就需要實施如下的換算來求實際送風機所吸入的風量了。

首先，求入口狀態的空氣比重 $\gamma_a$

$$\gamma_a = 0.465 \frac{P - 0.378\phi P_s}{T}$$

其中，

$\gamma_a$  : 入口空氣的比重量 ( $kg/m^3$ )

$P$  : 濕空氣的絕對壓力 ( $mmHg$ )

$\phi$  : 濕度

$P_s$  : 蒸汽壓力 ( $mmHg$ ) (可查閱表4.6)

$T$  : 絕對溫度 =  $273+t(^{\circ}C)$

$$\therefore \gamma_a = 0.465 \frac{750 - 0.378 \times 0.7 \times 22.38}{273 + 24} = 1.165 kg/m^3$$

$$Q = Q_0 \frac{\gamma_a}{\gamma}$$

其中，

$Q$  : 入口風量 ( $m^3/min$ )

$Q_0$  : 基準狀態的風量 ( $Nm^3/min$ )

$\gamma$  : 入口空氣的比重量 ( $kg/m^3$ )

$\gamma_0$  : 基準狀態下空氣的比重量 =  $1.293 kg/m^3$

現在，因爲 $Q_0=800Nm^3/min$

$$\gamma_a = 1.165 kg/m^3$$

$$\gamma_0 = 1.293 kg/m^3$$

$$\therefore Q = 800 \times \frac{1.293}{1.165} = 885 m^3/min$$

約增加了10%。

表4.6 蒸汽表

溫度 t (°C)	蒸 汽 壓 Ps		在 1m <sup>3</sup> 空氣中 水蒸氣的量 $\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	就乾空氣來說濕空 氣中的水蒸氣量 $X_s$ (kg/kg)
	(mmHg)	(kg/cm <sup>2</sup> )		
0	4.58	0.0062	0.0047	0.0037
4	6.09	0.0083	0.0064	0.0050
8	8.04	0.0109	0.0083	0.0066
10	9.21	0.0125	0.0094	0.0076
12	10.51	0.0143	0.0106	0.0087
16	13.61	0.0185	0.0135	0.0114
20	17.5	0.0238	0.0173	0.0147
24	22.38	0.0304	0.0216	0.0188
28	28.35	0.0385	0.0270	0.0241
30	31.8	0.0433	0.0304	0.0272
32	35.67	0.0485	0.0335	0.0306
36	44.57	0.0606	0.0418	0.0387
40	55.3	0.0752	0.0512	0.0490
50	92.5	0.126	0.0832	0.0868
60	149.5	0.203	0.1302	0.153
70	234	0.318	0.1982	0.278
80	355	0.483	0.2936	0.552
90	526	0.715	0.4219	1.411
100	760	1.033	—	—

以上為以大氣壓為基準的壓力，屬於壓力錶指示的壓力，故稱錶壓力(gauge pressure)。

絕對壓力 (absolute pressure) 是指錶壓力加上大氣壓者，亦即

$$P = p + P_a \quad (1.3)$$

其中

$P$  : 絶對壓力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \text{abs}$ ) 或 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{abs}$ )

$p$  : 錶壓力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot g$ ) 或 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot g$ ) (通常省略  $g$ )

$P_a$  : 大氣壓 (例如  $760\text{mmHg}$  時為  $1.033 \text{ kg}/\text{cm}^2 \text{abs}$ )

通常絕對壓力為大寫的  $P$ ，錶壓力用小寫的  $p$ 。

## (2) 壓力

如圖4.19所示，管中流通氣體時，從垂直管壁的孔，將壓力導到U形管，即可測定壓力  $P_s$ ，此壓力稱為靜壓(static pressure)，相對於管內速度  $v$  的壓力  $P_d$  稱為動壓(dynamic pressure)，以下式表示：

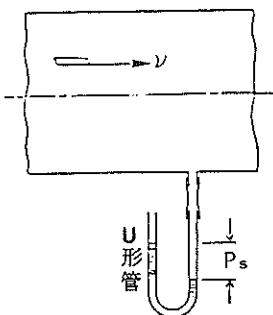


圖 4.19 靜壓

$$P_d (\text{mmAq}) = \frac{v^2}{2g} \gamma$$

其中，

$v$  : 管內的氣體速度 ( $\text{m}/\text{s}$ )

$\gamma$  : 管內氣體的比重 (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 ( $= 9.8\text{m}/\text{s}^2$ )

靜壓與動壓之和為全壓(total pressure)

$$P_t = P_s + P_d$$

用 Pitot 管可測定管內的動壓，圖4.19與圖4.20為其說明圖，由上式得  $P_d = P_t - P_s$ ，由全壓管的讀數減去靜壓管的讀數，即成動壓，可得

$$v = \sqrt{\frac{2gP_d}{\gamma}} \quad (\text{m/s})$$

送風機全壓乃送風機供給的全壓增加量，乃送風機吐出口與吸入口的全壓差，下標2表示吐出口，1表示吸入口，則得下式：

$$\text{送風機全壓 } P_T = P_{t_2} - P_{t_1}$$

$$\begin{aligned} &= (P_{s_2} + P_{d_2}) - (P_{s_1} + P_{d_1}) \\ &= (P_{s_2} - P_{s_1}) + (P_{d_2} - P_{d_1}) \end{aligned}$$

送風機靜壓乃從送風機全壓減去送風機吐出口動壓者

$$\text{送風機靜壓 } P_s = P_T - P_{d_2}$$

$$\begin{aligned} &= (P_{t_2} - P_{t_1}) - P_{d_2} \\ &= (P_{s_2} - P_{s_1}) - P_{d_1} \end{aligned}$$

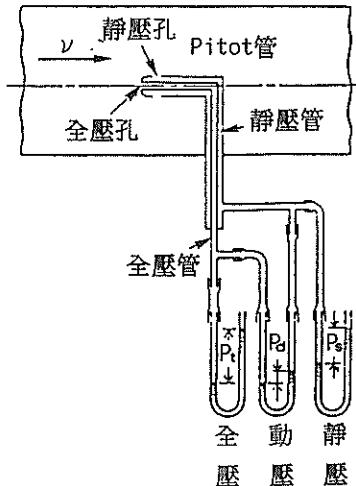


圖4.20 Pitot管

圖4.21為其說明圖，此時須注意在送風機的吸入側成為負壓，此圖是將管連結於送風機的吸入口及吐出口而通氣體時的壓力關係。

### (3)送風機動力

空氣動力是指送風機單位時間供給空氣的有效能量，送風機中的空氣為絕熱變化(adiabatic change)（又稱等entropy變化）時，空氣動力可表成下式：

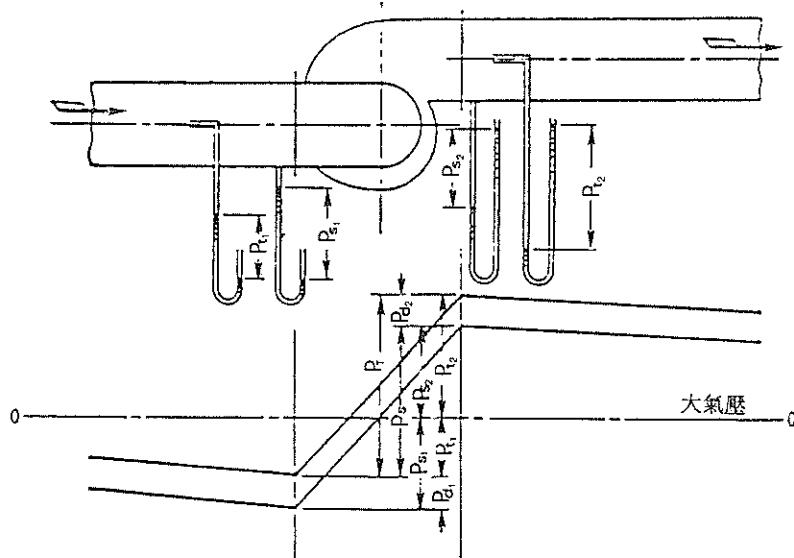


圖4.21 送風機壓力說明圖

$$L_{ad} = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P_{t_2}Q}{6120} \left[ \left( \frac{P_{t_2}}{P_{t_1}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

其中，

$L_{ad}$ ：空氣動力，又稱理論絕對空氣動力 (kW)

$P_{t_2}$ ：吐出絕對全壓 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{abs}$ )

$P_{t_1}$ ：吸入口絕對全壓 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{abs}$ )

$Q$ ：空氣量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$K$ ：比熱比 ( $= C_p/C_v$ )，空氣的  $K=1.4$ ，所以  $(K-1)/K=0.286$   
送風機全壓在  $300\text{mmAg}$  以下時，可用下式概估

$$L = \frac{Q}{6120\eta} (P_{t_2} - P_{t_1})$$

其中，

$L$ ：軸動力 (kw)

$Q$ ：風量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$P_{t_2}$ ：吐出絕對全壓 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{abs}$ )

$P_{t_1}$ ：吸入口絕對全壓 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{abs}$ )

$\eta$ ：效率

#### (4)送風機效率

送風機的效率 (efficiency)如下式所示，乃空氣動力與軸動力之比。

$$\eta_T = \frac{L_T}{L} \times 100 (\%)$$

$$\eta_{\text{ad}} = \frac{L_{\text{ad}}}{L} \times 100 (\%)$$

其中，

$\eta_T$  : 全壓效率 (%)

$\eta_{\text{ad}}$  : 全絕熱效率 (%)

$L_T$  : 空氣動力 (kw)

$L_{\text{ad}}$  : 理論絕對空氣動力 (kw)

$L$  : 軸動力 (kw)

送風機效率除上述兩種之外，另有多種，注意勿搞錯。送風機效率因機種、送風機大小、設計方法（比速度 $N_s$ ）而異，表4.7示其大概值，圖4.22例示七種 $N_s$ 的效率變化，得最高效率的 $N_s$ 值因機種而異。

表4.7 送風機的效率

種類	效率(%)	種類	效率(%)
多翼送風機	45~55	軸流送風機	75~85
徑向送風機	50~60	軸流(無響導輪葉)	45~60
渦輪送風機	55~75	斜流送風機	70~80
翼形送風機	75~85	橫流送風機	40~50

#### (5)比速度與葉輪的形狀

比速度 $N_s$  (specific speed)可用於選定送風機的特性、形式、葉輪的形狀或比較相同的送風機種。葉輪的比速度是考慮問題的外徑 $D$  葉輪與成幾何學相似的外徑 $D_s$ 葉輪，指滿足空氣量  $1\text{m}^3/\text{min}$ 、壓頭(head)1m時的葉輪 $D_s$ 之旋轉速度，以下式表示：

$$N_s = N \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

其中，

$N$  : 送風機的旋轉速度 (rpm)

$Q$  : 空氣量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) (有時以  $\text{m}^3/\text{s}$  表示，兩吸入葉輪時須為  $Q/2$ )

H : 壓頭(m)

其中壓頭在壓力比約1.03以下時，可計算如下：

$$H = \frac{P_t}{\gamma}$$

但壓力高時，以下式求絕熱壓頭(adiabatic head)。

$$H(m) = \frac{K}{K-1} \frac{P_{t_1}}{\gamma_1} \left[ \left( \frac{P_{t_2}}{P_{t_1}} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]$$

其中， $\gamma_1$ ：吸入氣體的比重 (kg/m³)

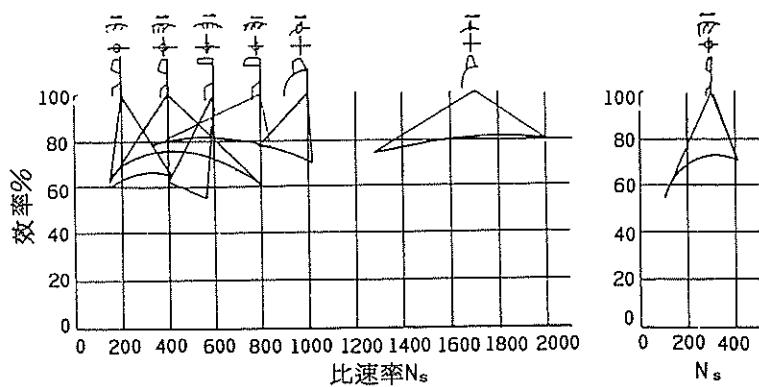
比速度  $N_s$  與  $N$  無直接關係，主要與空氣量  $Q$ 、壓頭  $H$  有關係，有實際旋轉速度  $N$  大而比速度  $N_s$  小的葉輪，也有旋轉速度  $N$  小而比速度  $N_s$  大的葉輪。但一般而言， $N_s$  大的葉輪為高速旋轉，葉輪外徑小而葉輪出口寬度大。 $N_s$  小的葉輪是旋轉速度低，葉輪外徑大而出口寬度小，圖 4.22 是以  $m^3/s$  表示空氣量時的比速度  $N_s$  概值與葉輪形狀，葉輪在某  $N_s$  值時的效率最好，圖中以  $N_s$  中間域有最高效率，因而設計葉輪時，為了使決定的機種成最適  $N_s$  值，要選擇使空氣量為單吸入或雙吸入，壓頭則依旋轉速度選擇單段或多段。

#### 4.3.2 送風機之選擇

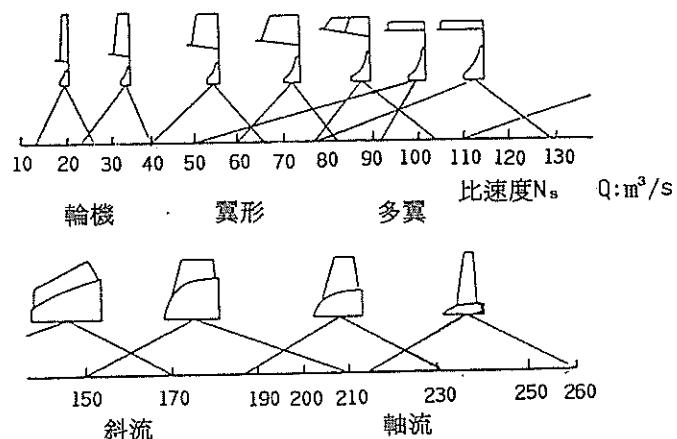
一般焚化爐使用送風機之目的有二：(1) 提供燃燒所用之空氣所使用之送風扇 (force draft fan)，另一是克服排氣壓差所使用抽引風扇 (induced draft fan)。其中抽引風扇是處理燃燒後之排氣，而一般焚化爐排氣常夾雜大量灰塵、酸氣等污染物，故在設計時須考慮摩耗、腐蝕、耐熱性與耐膨脹性等因素。

##### 1. 送風機之種類

一般小型焚化爐之爐內壓差範圍皆在  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  ( $1,000 \text{ mmAq}$ ) 以下，因此在設計送風機時，可不用考慮氣體之壓縮性及溫度之變化。在型式上大致可分為離心式與軸流式兩種。而離心式送風機（見圖 4.23 所示）主要是利用渦卷形外殼內之葉輪旋轉，而使氣體產生離心力，葉輪送出的氣體立即渦卷室而送風，送風壓力通常在  $200 \sim 800 \text{ mmAq}$  以下，依葉輪之型式分類，又可分為前傾式 (forward)、徑向式 (radial) 與後傾式 (backward) 三種。而軸流式送風機（見圖 4.24 所示）主要是使氣體沿軸方向進入葉輪，往軸方向流出。普通每一組動葉輪後設導流片一組或設在動葉輪之前，分別稱為動翼 (rotating blade) 與靜翼 (stator blade)。氣體流經此翼列時，有增壓與減速之效果。流出翼列後進入擴散器，動能轉變成壓力能<sup>14</sup>。氣體之靜壓得更進一步上升，藉此送風。以下乃針對上述不同類型之送風機介紹之。



A、各種Ns值之效率變化



B、Ns與葉輪的形狀

圖4.22 送風機比速度Ns關係資料圖

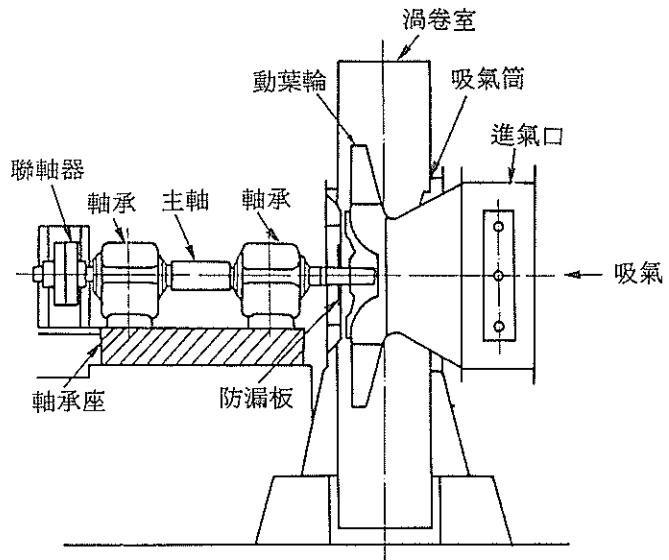


圖 4.23 離心式風扇機（單吸式）<sup>15</sup>

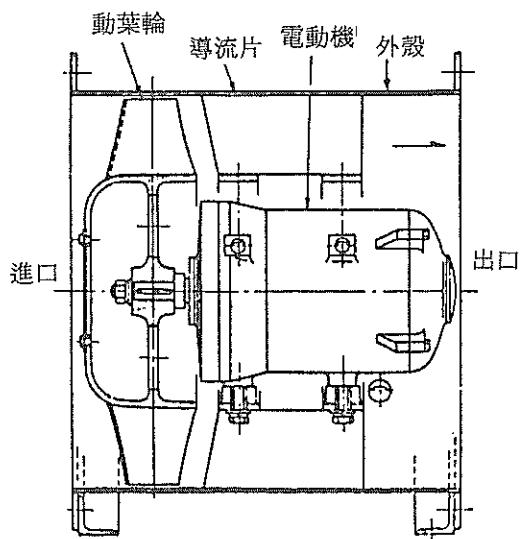


圖 4.24 軸流式送風機（單段直管型）<sup>15</sup>

### (1)離心式送風機

葉輪型式依葉輪片出口角與迴轉方向的切線夾角 $\beta_2$ （見圖4.25所示）的大小而分為前傾式葉輪(forward curve blade)、徑向式葉輪(radial curve blade)與後傾式葉輪(backward curved blade)三種， $\beta_2 > 90^\circ$ 為前傾式， $\beta_2 = 90^\circ$ 為徑向式， $\beta_2 < 90^\circ$ 者為後傾式（見圖4.26所示）。而實際上在一般實用上所稱之多翼形送風機(multi-blade fan)即前傾式葉輪之代表。徑向葉輪形送風機(radial-blade fan)為徑向式葉輪代表。而輪机型送風機即後傾式葉輪之代表<sup>14</sup>。以下乃針對此三種送風機之構造及特性分別介紹之。

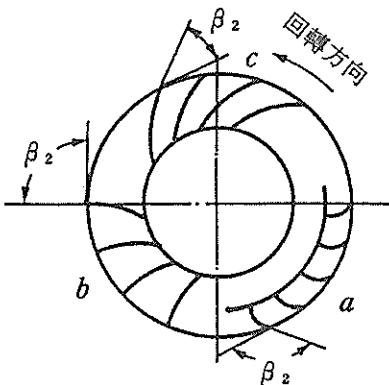


圖4.25 離心式送風機葉片斷面圖<sup>15</sup>

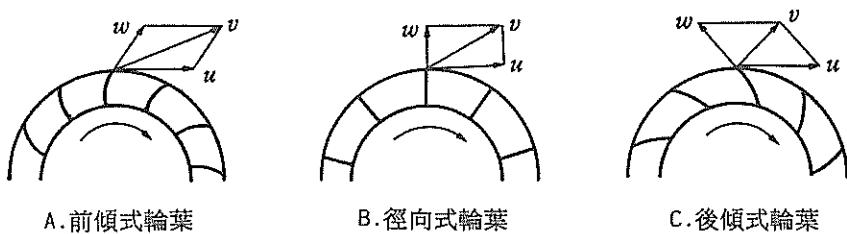
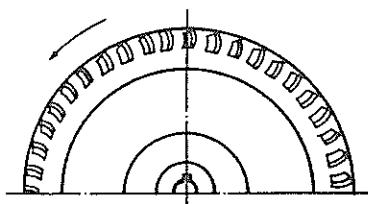


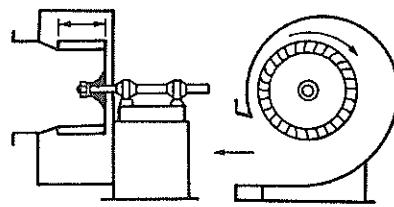
圖4.26 輪葉型式<sup>15</sup>

## ①多翼型送風機

前傾式葉輪(如圖4.27所示)之葉片沿回轉方向前傾，其葉片弦長(chord length)(幾為徑向)較短，葉片幅度(輪軸方向)較大，且動輪上之葉片數目多為其特徵。由最初出售此種風扇機之公司命名為希洛可送風機(sirocco fan)而知名。此種風扇機之性能上之特徵為，風量(對同一周速之其他風扇機而言)最大。由此特徵可知在同一風量(周速可比其他風扇機為小)下，其動葉輪外徑或回轉數可比他種風扇機為小。因此在強度之設計上較為簡單。多葉扇葉片狹長，有48~68片，葉片出口角度為 $120^\circ \sim 150^\circ$ 。



A. 多翼風扇( $\beta_2 > 90^\circ$ )翼幅



B. 多翼風扇機

圖4.27 多翼型送風機示意圖

一般而言，對同一風量、風壓而言，其多翼型送風機之葉輪直徑是在離心式送風機中最小，外殼也小，造價低廉之優點，但效率僅在45~55%左右，構造上稍脆弱，不適合併列運轉，只適合於低壓之場合，其特性曲線(百分數表示)見圖4.28所示<sup>15</sup>。

## ②徑向型送風機

徑向式葉輪(如圖4.29)之葉片為徑向，與多葉風扇機比較，其葉片弦長(此時為徑向長度)較長，葉片寬度(軸向)則較短。葉片數目則較其他風扇機為最少，因此構造上尺寸較大，但效率則較多葉風扇機為高。

徑向扇葉片數為12~16者，動葉輪內部相對速度很小，摩擦損耗小。裝設導流片可減少摩擦損耗。設計導流葉片時應注意換裝的容易性<sup>14</sup>。通常使用壓差在50~500mmAq左右，效率約50~60%，所需動力隨風量增加而約成直線增加。由於構造堅固而耐摩耗性大，葉輪的更換也容易；多用於多灰塵之燃燒排氣之送風機<sup>16</sup>，其特性曲線(百分數表示)見圖4.30所示。

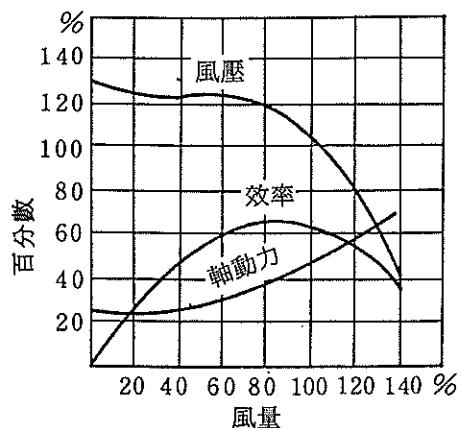


圖4.28 多翼型送風機特性曲線圖

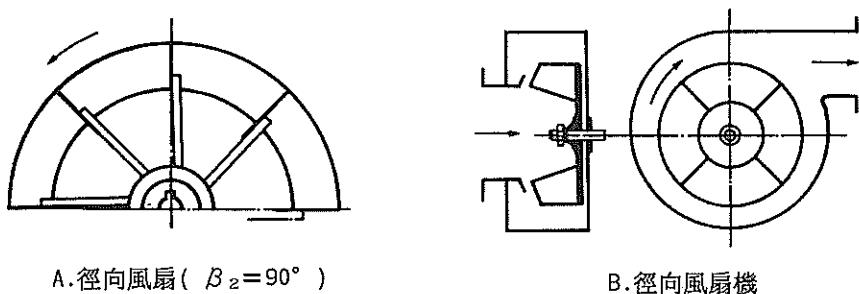


圖4.29 徑向型送風機示意圖

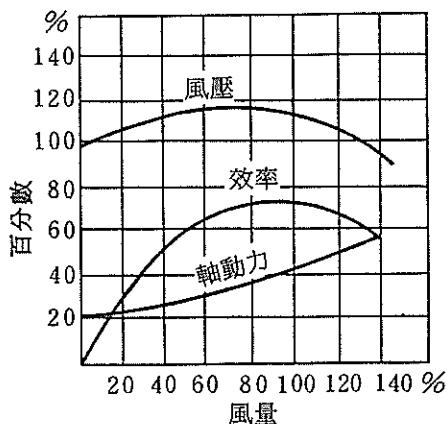
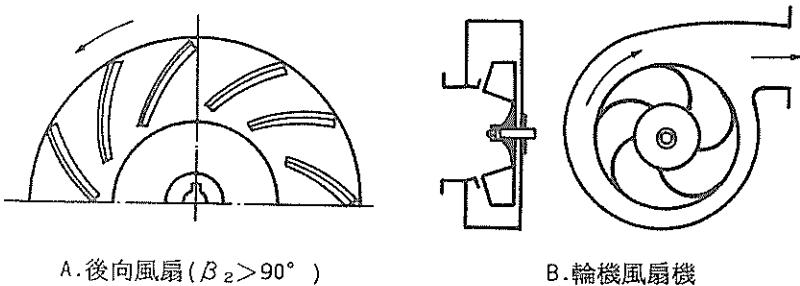


圖4.30 徑向式送風機特性曲線圖

### ③輪機型送風機

後傾式葉輪（見圖4.31所示）其葉片之傾向對回轉方向而言為後傾式，葉片弦長及葉片寬度大致與徑向風扇相同。葉片數目則居於多葉風扇機及徑向風扇機之中間值，構造上在各風扇機中為尺寸最大者，同時效率亦為各種風扇機中最高者。

輪機扇動葉輪出口角 $\beta_2$ 為 $35^\circ \sim 45^\circ$ ，葉數8~24。輪機扇內的流動甚為良好，效率又高，構造簡而結實，容易換裝，耐摩耗性亦佳，但重量、形狀大，設備費也大，常用在燃燒爐上，效率約在55~75%間，適用壓差範圍在200~800mmAq間，相對於風壓變動之風量變化較小，也適合併列運轉；所需動力隨風量的增加而增大。特性曲線（百分數表示）見圖4.32所示。



A. 後向風扇 ( $\beta_2 > 90^\circ$ )

B. 輪機風扇機

圖4.31 輪機型送風機示意圖

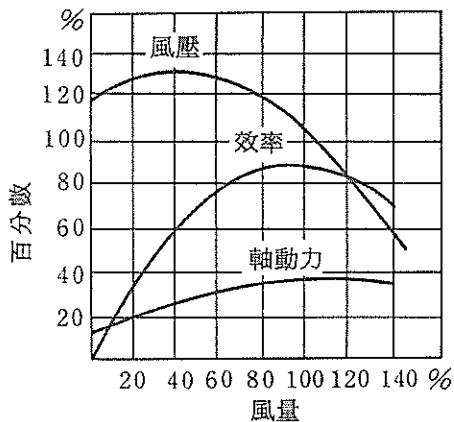


圖4.32 輪機式送風機特性曲線

## (2) 軸流式送風機

軸流式送風機一般可分為導風管軸流送風機(tube axial fan)及導葉軸流送風機(vane axial fan)。見圖4.33所示。

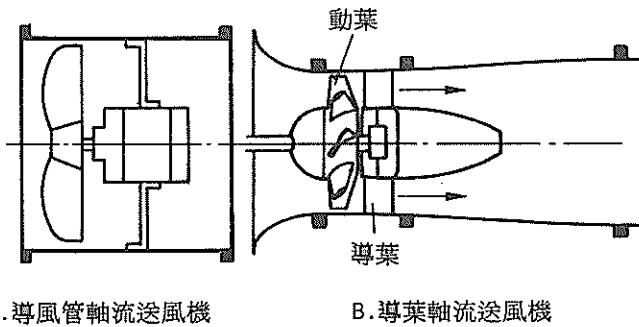


圖4.33 軸流式送風機

### ① 導風管軸流

導風管軸流風扇機，乃具有導風管者，構造較螺旋式完整，但在動葉輪後方亦會產生迴轉方向的分速度。

### ② 導葉軸流送風機

此種風扇機，因在導風管內有導葉之裝置，因此可使上述之迴轉方向之分速度動能回收而轉變為靜壓，因此效率亦隨之而增高<sup>15</sup>。

一般適用於高速運轉，特別適用於高壓差之場合，構造簡單小型，安裝面積小，容易安裝，電動機之旋轉數高，效率良好，運轉安定，故障少，缺點是噪音大，風壓在風量時 0 為最大，隨風量的增加而減少，所需動力在使用點附近較平坦，待閥門開放狀態下降，在開閉時增加，一般使用在燃燒爐之送風部份(force draft)之用，其特性曲線見圖4.34所示。

## 4.4 耐火材料

焚化爐使用耐火材料過程中，常會受到多種作用之破壞，如高溫下承受爐體及廢棄物之荷重；操作過程中之外界應力，例如：由溫度的急劇變化，受熱不均勻而產生之極大溫差，導致耐火材料本身產生內應力作用。各種高溫流體及爐渣、煙塵的侵蝕(erosion)；酸氣之酸侵(corrosion)；環境氣氛的轉變及作用等。

等。這些作用將導致耐火材料的熔融軟化、熔蝕、磨損和崩裂損壞。為保証焚化爐的穩定運轉，必須要求焚化爐耐火材料具備抵抗高溫（一般為 $1000\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 甚至更高）條件下發生的物理、化學、機械...等作用的能力，要求焚化爐耐火材料具有能適應於各種操作條件之性質。因此焚化爐之耐火材料選擇與設計之步驟格外重要，以下乃簡單針對此介紹之。

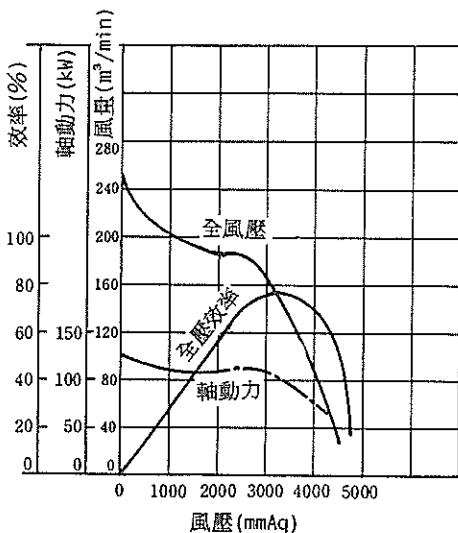


圖 4.34 軸流風扇機的特性曲線例

#### 4.4.1 耐火材料之種類

耐火材料種類繁多，用途複雜，其分類方法也多種多樣，通常按其化學特性、化學成分、礦物組成和耐火度分類；也可根據耐火材料製造方法和燒成方法進行分類。

##### 1. 按化學特性分類（參見表4.8所示）

按其化學特性耐火材料可分為三類：

###### (1) 酸性耐火材料

酸性耐火材料是以二氧化矽為主要成分的耐火材料，主要指矽磚和鋯英石磚。酸性耐火材料能耐酸性熔渣侵蝕。

表4.8 耐火材料化學性質分類表

類 別	材 質 特 徵	主 要 成 份	
酸性耐火材料	四價氧化物 (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 類)	SiO <sub>2</sub> 、ZrO <sub>2</sub> 等	矽砂、氧化鋯製品、半矽礦、黏土礦、鋯英石製品
偏酸性耐火材料	以三價氧化物為主 含有部份四價氧化物	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> 系 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> 系	高鋁礦 莫來石礦、鋯莫來石礦、鋯鋼玉礦
中性耐火材料	三價氧化物 (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 類) 原子鍵結晶礦物	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiC、C BC、BN Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	鋼玉礦、碳化矽 矽砂、碳化矽質耐火材料 氮化硼質耐火材料 氮化矽質耐火材料
偏鹼性耐火材料	以二價氧化物為主 含有部份三價氧化物 或是四價氧化物	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系 MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系 MgO-SiO <sub>2</sub>	鎂鋁礦、鎂鉻礦 鎂鎂礦、鉻礦 鎂鋁尖晶石礦 鎂橄欖石礦
鹼性耐火材料	二價氧化物 (R <sub>0</sub> 類)	MgO、CaO等	鎂質耐火材料 氧化鈣質耐火材料 白雲石質耐火材料

## (2) 鹼性耐火材料

鹼性耐火材料主要是指以氧化鎂、氧化鈣為主要成分的耐火材料，包括鎂磚、鎂鋁磚、白雲石磚等。鹼性耐火材料對鹼性渣有較強的抗侵蝕能力。

## (3) 中性耐火材料

中性耐火材料主要是指以三氧化二鋁、三氧化二鉻和碳為主要成分的耐火材料，如鋼玉磚、高鋁磚、碳磚等。其特性是對酸性渣和鹼性渣都具有抗蝕能力。

## 2. 按製品化學—礦物組成分類

按製品的化學—礦物組成耐火材料可分為六類（見表4.9所示）：

### (1) 矽質製品

矽質製品包括矽磚、熔融石英製品。

### (2) 矽酸鋁質製品

矽酸鋁質製品包括黏土磚、半矽磚、高鋁磚等。以氧化鋁和氧化矽為基本化學組成的耐火材料中，通常可以根據製品中氧化鋁和氧化矽含量多少分為：矽質製品（氧化矽大於93%），半矽質製品（氧化鋁佔15~30%）、黏土質製品（氧化鋁佔30~48%）、高鋁質製品（氧化鋁佔48~90%）和鋼玉磚（氧化鋁大於90%）。

表4.9 耐火材料的化學礦物組成分類

分類	類別	主要化學成分	主要礦物成分
矽質製品	矽磚	$\text{SiO}_2$	鱗石英、方石英
	石英玻璃	$\text{SiO}_2$	石英玻璃
矽酸鋁質製品	半矽磚	$\text{SiO}_2 \text{、} \text{Al}_2\text{O}_3$	莫來石、方石英
	黏土磚	$\text{SiO}_2 \text{、} \text{Al}_2\text{O}_3$	莫來石、方石英
	高鋁磚	$\text{SiO}_2 \text{、} \text{Al}_2\text{O}_3$	莫來石、剛玉
鎂質、白雲石質 、鉻質製品	鎂磚（方鎂石磚）	MgO	方鎂石
	鎂鋁磚	$\text{MgO} \text{、} \text{Al}_2\text{O}_3$	方鎂石、鎂鋁尖晶石
	鎂鉻磚	$\text{MgO} \text{、} \text{Cr}_2\text{O}_3$	方鎂石、鎂鉻尖晶石
	鎂橄欖石磚	$\text{MgO} \text{、} \text{SiO}_2$	鎂橄欖石、方鎂石
	鎂矽磚	$\text{MgO} \text{、} \text{SiO}_2$	方鎂石、鎂橄欖石
	鎂鈣磚	$\text{MgO} \text{、} \text{CaO} \text{、} \text{SiO}_2$	方鎂石、矽酸二鈣
	鎂白雲石磚	$\text{MgO} \text{、} \text{CaO}$	方鎂石、氧化鈣
	鎂碳磚	$\text{MgO} \text{、} \text{C}$	方鎂石、不定形碳（或石墨）
	白雲石磚	$\text{CaO} \text{、} \text{MgO}$	氧化鈣、方鎂石
	鉻磚	$\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{、} \text{FeO}$	鉻鐵礦
	鉻鎂磚	$\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{、} \text{MgO}$	鎂鉻尖晶石、方鎂石
碳質製品	碳磚	C	不定形碳（石墨）
	石墨製品	C	石墨
	碳化矽製品	SiC	碳化矽
鋯質製品	鋯英石製品	$\text{ZrO}_2 \text{、} \text{SiO}_2$	鋯英石
特殊製品	純氧化物製品	$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{、} \text{ZrO}_2$	剛玉、高溫型 $\text{ZrO}_2$
		CaO、MgO	氧化鈣、方鎂石
其他	碳化物		
	氮化物		
	矽化物		
	金屬—陶瓷等		

(3) 鎂質、鎂鋁質和白雲石質製品

鎂質、鎂鋁質和白雲石質製品包括鎂磚、鎂鋁磚、鎂鋸磚、白雲石磚等（即鎂質磚）。

(4) 碳質製品：碳質製品包括碳磚、石墨黏土製品等。

(5) 鋯質製品：鋯質製品包括鋯英石磚、鋯莫來石磚、鋯鋼玉磚等。

(6) 特殊耐火材料：特殊耐火材料是具有接近純化學物質的、熔點高於 $2000^{\circ}\text{C}$ ，化學穩定性和抗震性好，耐高溫強度大等特殊性能的耐火材料。如純氧化物、非氧化物、碳化物、氮化物、硼化物和金屬陶瓷等製品。

3. 按耐火材料的耐火度分類

按耐火度耐火材料可分為三類：

- 耐火度為 $1,580\sim 1,770^{\circ}\text{C}$ 的普通耐火材料
- 耐火度為 $1,770\sim 2,000^{\circ}\text{C}$ 的高級耐火材料
- 耐火度高於 $2,000^{\circ}\text{C}$ 的特級耐火材料

4. 按成型方法分類

按成型方法耐火材料可分為六類：

- 天然岩石
- 泥漿澆注成型耐火材料
- 可塑成型耐火材料
- 半乾成型耐火材料
- 捣固（包括機械搗固與人工搗固）成型耐火材料
- 熔鑄製品

5. 按燒製方法分類

按燒製方法可分為三類：

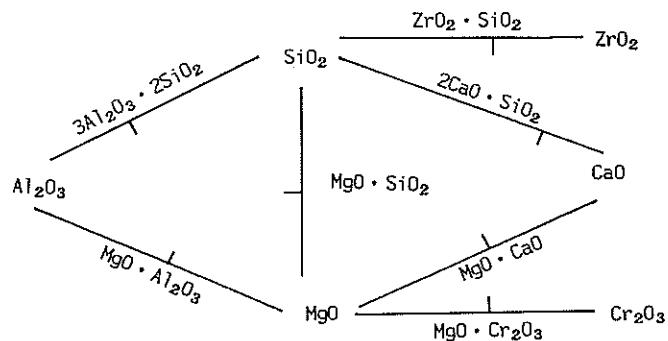
- 不燒磚
- 燒製磚
- 不定形耐火材料

6. 按氣孔率分類

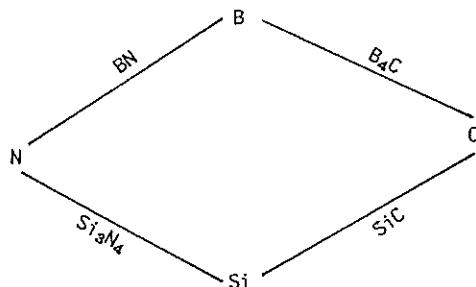
按氣孔率可分為七類：

- 氣孔率低於 3% 的特緻密製品
- 氣孔率為 3~10% 的高緻密製品
- 氣孔率為 10~16% 的緻密製品
- 氣孔率為 16~20% 的燒結製品
- 氣孔率為 20~30% 的普通製品
- 氣孔率為 45~85% 的輕質製品
- 氣孔率高於 85% 的超級輕質製品

### 7. 依構成材料分類（參見圖4.35所示）



常見耐火氧化物及其複合成的主要耐火礦物示意圖



常見非氧化物耐火材料組合示意圖

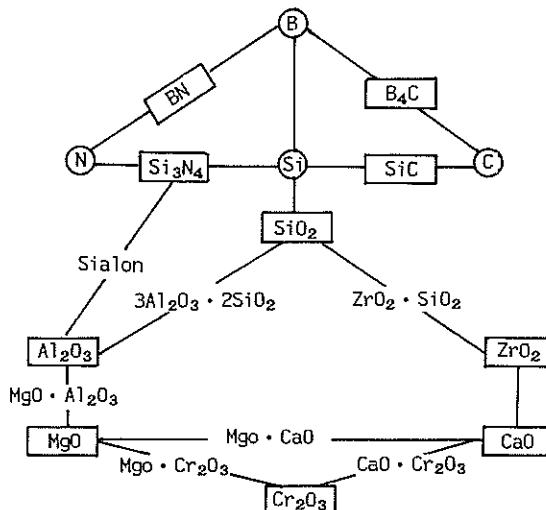


圖4.35 構成耐火材料的氧化物及非氧化物

依構成材料之性質，可分為氧化物、非氧化物與氧化態之複合耐火物三類：  
 (1) 氧化物耐火材料，主要是由  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  所構成之複合耐火礦物材料。其熔點可參見表 4.10 所示。

表 4.10 氧化物耐火材料之熔點

氧化物	熔點 (°C)	氧化物	熔點 (°C)
$\text{SiO}_2$	1,725	$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,050
$\text{MgO}$	2,800	$\text{CaO}$	2,570
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	2,435	$\text{ZrO}_2$	2,690

(2) 非氧化物耐火材料，主要是由 Si、N、B、C 所構成之耐火礦物材料。其熔點可參見表 4.11 所示。

表 4.11 非氧化物耐火材料之熔點

名稱	化學組成	熔點 (°C)
氮化硼	BN	3,000
碳化硼	BC	2,350
碳化矽	SiC	2,700
氮化矽	$\text{Si}_3\text{N}_4$	2,170
石墨	C	3,700

(3) 氧化態之複合耐火礦物材料之熔點可參見表 4.12 所示。

#### 4.4.2 耐火材料之性質

焚化爐耐火材料的性質包括一般性質與特殊性質兩種。其中一般性質包括：化學成份、礦物組成、組織結構、力學性質、熱學性質和高溫使用性質。而特殊性質主要是耐火材料在特定使用條件下所能滿足之特殊要求。如抗高溫蠕變性、高黏附著性及速硬性等。

表4.12 氧化態複合礦物材料之熔點

礦物名稱	化學組成	熔點(°C)
莫來石	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1,810
鎂鋁尖晶石	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	2,135
鎂鉻尖晶石	$\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	2,180
鋯英石	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	2,500
正矽酸鈣	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	2,130
鎂橄欖石	$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	1,890
白雲石	$\text{MgO} \cdot \text{CaO}$	2,300

### 1. 耐火材料的化學、礦物組成性質

耐火材料是由多種不同化學成分及不同結構礦物組成的非均質體，隨著焚化爐耐火材料使用條件的特殊化，其組成將更複雜。但是一般均可用兩種方式來分析及描述它們，即耐火材料的化學組成及礦物組成。

#### (1) 化學組成

化學組成即耐火材料的化學成分，它是耐火材料的基本特徵之一。耐火材料的主要功能是抵抗高溫作用，由此它由較高熔點的化合物所組成，在實際上應用較多的是元素週期表中第二週期Ⅲ～VI主族—硼、碳、氮、氧的化合物。其中最大量的是氧化物，所以又分為氧化物及非氧化物兩大類。由這些氧化物又能複合成許多耐火礦物。因耐火材料是非均質體，有主、副成份之分別。基本成分稱為主成分，而其它成分稱為副成分。副成分又按有意添加以提高製品某方面性能成分，或是無意或不得已帶入的無益或有害成分。分別稱為添加成分及雜質成分。

主成分通常是高熔點耐火氧化物或複合礦物或非氧化物的一種或幾種（一般情況下不超過兩種）。它是耐火材料的主體，直接決定了材料耐火性能的基礎條件。

添加成分則往往是為彌補主成分在使用性能或生產性能或作業性能某方面的不足而使用的，常被稱為結合劑、礦化劑、穩定劑、燒結劑、減水劑、抗水化劑、抗氧化劑、促凝劑、膨脹劑等等，它們可能是氧化物，也可能是非氧化物；可能是有機物，也可能是無機物，總之，種類繁多，是當前焚化爐用耐火材料研究的重點，但它們的共同特點是：加入量很少，甚至是極微；能明顯地改變耐火材料的某種功能或特性；對該材料的主性能無嚴重影響。

雜質成分則是指由於原料純度有限而被帶入或生產過程中混入的對耐火材料性能具有不良影響的部分。一般來說， $K_2O$ 、 $Na_2O$  及  $FeO$  或  $Fe_2O_3$  都是耐火材料中的有害雜質成分。另外鹼性耐火材料（ $RO$  為主成分的）中的酸性氧化物 ( $RO_2$ ) 及酸性耐火材料中的鹼性氧化物都被視為有害雜質，它們在高溫下具有強烈的熔劑作用。這種作用使得共熔液相生成溫度降低，生成的液相量增加，而且隨著溫度升高液相量增長的速度加快，從而嚴重影響了耐火材料的高溫性能。

## (2) 矽物組成

耐火材料在其化學成分固定的前提下，由於成分分佈的均質性及加工方法的不同，使製品組成中的矽物有種類、數量、晶粒大小、結合狀態的不同，這種微觀結構的不同，造成製品的性能差異。例如，二級高鋁製品與莫來石製品，在化學成分上基本相同，但其矽物組成不一樣，所以其製品的微觀結構，也是決定耐火材料性質的重要因素。

耐火材料的矽物組成一般可分為主晶相及基質相兩大類（參見表4.13所示）。主晶相是耐火材料結構的主體，除了要選擇熔點較高的化合物或單質外，還希望它們的晶體發育充分、完好，真正發揮出該晶相的耐火性能。

基質是耐火磚的主晶相之間填充的結晶矽物或玻璃相。其數量不大，但成分結構複雜，作用明顯，往往對耐火磚的某些性質有著決定性的影響，矽酸鋁系列的耐火材料其基質多以玻璃相的形式膠結主晶相的晶體顆粒；鹼性耐火材料的基質多以微細晶體的形式聯接主晶體。最近發展出來的直接結合磚，則基質已不作高溫結合相，它們存在於互相聯接的主晶相的小空隙中，只是在燒結前期發揮它們的熔劑作用。

## 2. 耐火材料的結構性質

耐火材料的宏觀組織結構是由固態物質和氣態孔共同組成的非均質體。氣孔是影響製品常溫及高溫使用性能的重要因素，特別是在高溫條件下，使耐火磚對外界侵蝕的抵抗能力大大降低。氣孔形成原因是：製品成型時物料中的空氣未完全排除；物料水分排除後留下空間；原料煅燒不充分，有些應分解的鹽類未完全分解，應灼燒的成分未完全灼燒；物料成分不均勻，高溫燒成時收縮不均勻等。

但在有些輕質隔熱材料製品中，人們還特定引進一些分布比較均勻的氣孔。氣孔的存在，直接影響了耐火材料的氣孔率、吸水率、體積密度、透氣度等。

表4.13 常見耐火材料的主晶相及主要成分

耐火材料類別	主 晶 相	主 要 化 學 成 分
矽 磚	鱗石英、方石英	$\text{SiO}_2 > 93\%$
半矽磚	莫來石、方石英	$\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
黏土質	莫來石、方石英	$\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Ⅲ等高鋁磚	莫來石、方石英	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
Ⅱ等高鋁磚	莫來石、方石英	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
I 等高鋁磚	莫來石、剛玉	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
莫來石磚	莫來石	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
剛玉磚	莫來石、剛玉	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
電熔剛玉磚	剛玉	$\text{Al}_2\text{O}_3$
鋁鎂磚	剛玉、鎂鋁尖晶石	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$
鎂 磚	方鎂石	$\text{MgO}$
鎂矽磚	方鎂石、鎂橄欖石	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$
鎂鋁磚	方鎂石、鎂鋁尖晶石	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
鎂鉻磚	方鎂石、鎂鉻尖晶石	$\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$
鎳鎂磚	鎳鉻尖晶石、方鎂石	$\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$
鎂橄欖石磚	鎂橄欖石、方鎂石	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$
鎂鈣磚	方鎂石、矽酸二鈣	$\text{MgO} \cdot \text{CaO}$
鎂白雲石磚	方鎂石、氧化鈣	$\text{MgO} \cdot \text{CaO}$
白雲石磚	氧化鈣、方鎂石	$\text{CaO} \cdot \text{MgO}$
鋯剛玉磚	剛玉、莫來石、斜鋯石	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$
鋯莫來石磚	莫來石、鋯英石	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{ZrO}_2$
鋯英石磚	鋯英石	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$
鎂碳磚	方鎂石、無定形碳（石墨）	$\text{MgO} \cdot \text{C}$
鋁碳磚	剛玉、莫來石、無定形碳（或石墨）	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{C}$

### (1) 氣孔率

耐火材料中的氣孔可分為三類：

- 封密氣孔：封密在製品中不與外界相通。
- 開口氣孔：一端封密，另一端與外界相通，能為流體填充。
- 貫通氣孔：貫通製品的兩面，能為流體通過。

由於開口氣孔和貫通氣孔占總氣孔體積的絕大部分，而且對製品的使用性能影響最大，又較易測定，因此在耐火材料的檢驗標準中，以顯氣孔率，即開口氣孔與貫通氣孔的體積之和佔製品總體積的百分率表示。

### (2) 吸水率

吸水率是製品中全部開口氣孔所吸收的水的重量與乾燥試樣的重量之比值。由於吸水率測定方法簡便，在生產中常用來鑑定原料的煅燒品質。原料煅燒得愈好，吸水率愈低。

### (3) 體積密度

體積密度即為製品乾重與總體積之比值，也稱為容積重量，用  $\text{g}/\text{cm}^3$  表示。

體積密度直觀地反映出了製品的緻密程度，它是耐火材料緻密製品品質的重要指標。但在輕質隔熱耐火材料中，為降低熱容和熱導率，又採用各種方法降低製品的體積密度。

### (4) 真比重

耐火材料真比重的定義是：乾燥材料的重量與其真體積（不包括氣孔體積）之比值。

耐火材料的真比重，可以反映材質的成分純度或晶型轉變的程度，比例等，由此亦可以推知在使用中可能產生的變化。

### (5) 透氣度

耐火材料透氣度的定義是：製品允許氣體在壓差下通過的性能。

因同一製品的透氣度隨氣體透過方向的不同而不同，所以測定時應注意其與成型加壓方向的關係。

製品的透氣度高，提高了具有侵蝕性流體通過的能力，極大地加快了爐體的侵蝕速度，縮短了爐體的使用壽命。另外透氣度高也使焚化爐的熱損失增大，為此在一般情況下，希望耐火磚的透氣度愈小愈好。

## 3. 耐火材料的熱學性質

由於耐火材料經常在加熱情況下使用，因此耐火材料的熱學性質成為其重要性質之一。

### (1) 热膨胀性

耐火材料的热膨胀是指耐火制品在加热过程中的长度或体积的变化。

耐火材料使用过程中常伴有极大的温度变化，会严重影响熔化炉体的尺寸精密程度和结构，甚至会使新熔化炉体破裂。此外，耐火材料的热膨胀情况还能反映出耐火砖受热后的热应力分布和大小，晶型转变及相变，微细裂纹的产生及抗热震稳定性等。

由于晶型转变，相变化等多种原因，耐火材料的热膨胀变化率在各个温度区间内，其数值经常是变化的，因此常用曲线来表示。

### (2) 热导率

耐火材料热导率的定义是在单位温度梯度条件下，通过材料单位面积的热流速率。

在窑炉设计中，需考虑热量通过耐火材料后的损失量，需要计算隔热耐火材料的保温效果，在有些隔焰加热炉，还需要耐火材料的隔墙具有较高的热导率，由此可见热导率在窑炉设计的重要性。

耐火砖中所含气孔对热导率影响最大。气孔内气体热导率低，因此气孔总是降低材料导热能力。在一定温度限度内，对一定范围的气孔率来说，气孔率愈大，则热导率愈小。另外，当气孔率总值相同时，气孔体积大的热导率大。

耐火砖材质的化学组成及晶体结构也对热导率有明显影响，碳质耐火制品即表现了极高的导热能力。

### (3) 比热容

耐火材料比热容的定义是常在加热1公斤样品使之升温1°C所需的热量。

耐火材料的热容，在设计和控制炉体的升温、冷却，特别是蓄热砖的蓄热能力计算中，具有重要意义。

耐火材料的热容是随着它的化学矿物组成和所处的温度条件而变化的。

## 4. 耐火材料的力学性质

耐火材料的力学性质是指耐火材料在各种条件下的强度等力学指标，该指标表明制品抵抗因外力作用而产生的各种应力形变而不被破坏的能力。无论是常温或是在使用条件下，耐火制品都因受到各种外界作用力如压缩力、拉伸力、弯曲力、剪切力、摩擦力或撞击力的作用而变形乃至损坏，因此检验不同温度条件下的耐火材料的力学性质，对于了解它抵抗破坏的能力，探讨它的损坏机制，寻求提高制品品质的途径、办法具有极重要的意义。耐火制品的力学性质包括耐压强度、抗拉强度、抗折强度、耐磨性、弹性模数和高温蠕变等等。但通常检验的是样品在不同温度条件下的耐压强度、抗折强度、粘结强度及高温蠕变速率等。

## (1)耐壓強度

### ①常溫耐壓強度

室溫下，耐火製品試樣單位面積上所能承受而不被破壞時的極限壓應力。

耐火製品的常溫耐壓強度對於該製品的生產、運輸、使用性能都有極大的影響，而且在多數情況下，也直接地影響到使用壽命，由此我們都希望耐火製品達到較高的耐壓強度值。

### ②高溫耐壓強度

在指定的高溫條件下，單位截面積所能承受而不被破壞的極限壓應力。

耐火製品的高溫耐壓強度決定了該製品的使用範圍，它是耐火材料應用選擇的重要依據之一。

高溫耐壓強度對不燒耐火製品和不定形耐火材料更具有重要意義。因為這些耐火材料一般都加入一定數量的結合劑或外加劑，其常溫的結合方式及強度隨著溫度的升高將產生變化，它們在工作溫度下能否滿足使用要求，需靠此項高溫耐壓強度的大小來驗證。

## (2)抗折強度

### ①常溫抗折強度

在室溫下，規定尺寸的長方體試樣在三點彎曲裝置上被壓彎而不折斷時所能承受的極限應力。一般說來常溫耐壓強度較高的耐火製品其常溫抗折性能也較好。

### ②高溫抗折強度

在規定的高溫條件下，單位截面所能承受的極限彎曲應力。

高溫抗折能力強的耐火材料，在使用的高溫條件下，對於廢棄物的撞擊、磨損、液態廢棄物的沖刷等，均有較好的抵抗能力。

### ③黏結強度

主要是指不定形耐火材料在各種溫度及特定條件下的強度。不定形耐火材料由於沒有外力作用下的強制成型排氣過程，它所具有的抗壓、抗折、抗剪等能力，均來自於其本身所具有的結合性能，這包括材料本身所具有的分子間力、氫鍵力、化學結合力、陶瓷結合力等。

### ④高溫蠕變性

耐火材料製品在使用中通常都是受到各種外界因素的同時作用。多種因素綜合作用的結果，往往使耐火材料製品較快發生變化甚至破壞，恆定溫度、恆定荷重（小於極限強度），長時間作用於耐火製品，必然使其產生塑性變形，並且其變形量將隨時間的延長而逐漸增加，高溫蠕變形即是指材料在上述條件作用下，其形變與時間的關係，一般用變形率與時間的

關係曲線或蠕變速率來表示，由於施加荷重的方式不同，可分為高溫壓縮蠕變、高溫拉伸蠕變、高溫抗折蠕變和高溫扭轉蠕變等，其中最常做的是高溫壓縮蠕變。

## 5.耐火材料的使用性質

在焚化爐用耐火材料使用過程中，由於焚化環境的多種差異，對耐火材料的性能提出了不同的要求，是否滿足這些要求的性能標準，成為耐火材料品質的主要質量標準，也是延長其使用壽命，提高使用價值的重要依據。

### (1)耐火度

耐火材料耐火度（見表4.14及表4.15所示）是材料在無荷重時抵抗高溫作用而不熔化的性能。其耐火度的意義與熔點不同。熔點是指純物質結晶相與其液相處於平衡狀態下的溫度。而一般耐火材料是由多種礦物組成的多相固體混合物，無統一的熔點，而是在一定溫度下開始產生液相，隨溫度升高液相比例不斷增大，到一固定溫度時固相才能全部熔融為液相。在這兩個固定溫度之間的一段溫度範圍內，都是液、固兩相同時存在的。

耐火材料的化學成分，礦物組成及其分佈狀態是影響耐火度的最基本因素。雜質成分特別是具有強熔劑作用的雜質，將嚴重降低耐火材料的耐火度。成分分佈不均勻，以致不能形成理想的高熔點礦物，將使製品的耐火度降低，由此而損壞製品的使用性能，但有一點值得注意，即耐火度並不表示它的使用溫度，因為耐火材料在使用中經受高溫作用的同時，通常還伴隨有荷重和外物的溶劑作用等等。實際容許使用溫度比耐火度低得多，但耐火度畢竟是合理選用耐火材料的重要參考依據之一。

### (2)荷重軟化溫度

耐火材料荷重軟化溫度（見圖4.36所示）也稱為高溫荷重變形溫度，其定義為耐火製品在持續升溫條件下，承受恆定載荷產生變形的溫度。它表示了耐火材料同時抵抗高溫和載荷兩方面作用的能力。

決定荷重軟化溫度的主要因素是耐火材料的化學—礦物組成，首先要具有高荷重軟化溫度的晶相或液相，較少有害雜質。但也與耐火磚的製造技術及方法有直接關係，如提高磚的成型密度以及良好的燒結，從而降低耐火磚的氣孔率和使耐火磚內的晶體發育良好等。有利於提高耐火磚的荷重軟化溫度。

### (3)重燒線變化

重燒線變化又稱為殘餘線變化，是指燒成耐火磚加熱至高溫後，其長度發生的不可逆變化。其具體定義是耐火磚試樣加熱到規定溫度，保溫一定時間，冷卻至室溫後其長度所產生的殘餘膨脹或收縮。

表4.14 塞格錐(SK)的成分與溫度表

SK 編號	化 學 成 分 (分子數)							耐 火 度	
	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(°C)	(°F)
022		0.05	0.25	0.50		2.00	1.00	600	1,112
					Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
021		0.05	0.25	0.25	0.02	1.04	1.00	650	1,202
020		0.05	0.25	0.25	0.04	1.08	1.00	670	1,238
019		0.05	0.25	0.25	0.08	1.16	1.00	690	1,274
018		0.05	0.25	0.25	0.13	1.26	1.00	710	1,310
017		0.05	0.25	0.25	0.20	1.40	1.00	730	1,346
016		0.05	0.25	0.25	0.31	1.62	1.00	750	1,382
015a		0.432	0.432	0.136	0.34	2.06	0.86	790	1,454
014a		0.385	0.385	0.230	0.34	1.92	0.77	815	1,490
013a		0.343	0.343	0.314	0.34	1.78	0.69	835	1,535
012a		0.345	0.341	0.314	0.365	2.04	0.68	855	1,571
011a		0.349	0.340	0.311	0.400	2.38	0.68	880	1,616
010a	0.011	0.338	0.338	0.313	0.423	2.626	0.675	900	1,652
09a	0.018	0.336	0.335	0.311	0.468	3.087	0.671	920	1,688
08a	0.038	0.279	0.369	0.314	0.543	2.691	0.559	940	1,724
07a	0.055	0.261	0.391	0.294	0.554	2.984	0.521	960	1,760
06a	0.069	0.247	0.407	0.277	0.561	3.194	0.493	980	1,769
05a	0.086	0.229	0.428	0.257	0.571	3.467	0.457	1,000	1,832
04a	0.109	0.204	0.458	0.229	0.586	3.860	0.407	1,020	1,868
03a	0.130	0.182	0.484	0.204	0.598	4.199	0.363	1,040	1,940
02a	0.153	0.157	0.513	0.177	0.611	4.572	0.314	1,060	1,904
01a	0.174	0.134	0.541	0.151	0.625	4.931	0.268	1,080	1,976
1a	0.198	0.109	0.571	0.122	0.639	5.320	0.217	1,100	2,012
2a	0.220	0.085	0.599	0.096	0.652	5.687	0.170	1,120	2,048
3a	0.240	0.059	0.630	0.067	0.667	6.083	0.119	1,140	2,084
4a	0.260	0.043	0.649	0.048	0.676	6.339	0.860	1,160	2,120
5a	0.274	0.028	0.666	0.032	0.684	6.565	0.056	1,180	2,156
6a	0.288	0.013	0.685	0.014	0.693	6.801	0.026	1,200	2,192

表4.14 塞格錐(SK)的成分與溫度表(續)

7	0.3		0.7		0.7	7		1,230	2,246
8	0.3		0.7		0.8	8		1,250	2,282
9	0.3		0.7		0.9	9		1,280	2,336
10	0.3		0.7		1.0	10		1,300	2,372
11	0.3		0.7		1.2	12		1,320	2,408
12	0.3		0.7		1.4	14		1,350	2,462
13	0.3		0.7		1.6	16		1,380	2,516
14	0.3		0.7		1.8	18		1,410	2,570
15	0.3		0.7		2.1	21		1,435	2,615
16	0.3		0.7		2.4	24		1,460	2,660
17	0.3		0.7		2.7	27		1,480	2,696
18	0.3		0.7		3.1	31		1,500	2,732
19	0.3		0.7		3.5	35		1,520	2,768
20	0.3		0.7		3.9	39		1,530	2,786
26	0.3		0.7		2.7	72		1,580	2,876
27	0.3		0.7		20	200		1,610	2,930
28					1	10		1,630	2,966
29					1	8		1,650	3,002
30					1	6		1,670	3,038
31					1	5		1,690	3,074
32					1	4		1,710	3,110
33					1	3		1,730	3,146
34					1	2.5		1,750	3,182
35					1	2.0		1,770	3,218
36					1	1.66		1,790	3,254
37					1	1.33		1,825	3,314
38					1	1.00		1,850	3,362
39					1	0.66		1,880	3,416
40					1	0.33		1,920	3,488
41					1	0.12		1,960	3,560
42					1			2,000	3,632

表4.15 塞格錐(SK)與歐吞錐(PCE)的比較

編號	SK		PCE		編 號	SK		PCE	
	(°C)	(°F)	(°C)	(°F)		(°C)	(°F)	(°C)	(°F)
022	600	1,112	605	1,121	3	1,140	2,084	1,170	2,138
021	650	1,202	615	1,139	4a	1,160	2,120		
020	670	1,233	650	1,202	4			1,190	2,174
019	690	1,274	660	1,220	5a	1,180	2,156		
018	710	1,310	720	1,328	5			1,205	2,200
017	730	1,346	770	1,418	6a	1,200	2,192		
016	750	1,382	795	1,463	6			1,230	2,246
015a	790	1,454			7	1,230	2,246	1,250	2,282
015			805	1,481	8	1,250	2,282	1,260	2,300
014a	815	1,490			9	1,280	2,336	1,285	2,345
014			830	1,526	10	1,300	2,372	1,305	2,381
013a	835	1,535			11	1,320	2,408	1,325	2,417
013			860	1,580	12	1,350	2,462	1,335	2,435
012a	855	1,571			13	1,380	2,516	1,350	2,462
012			875	1,607	14	1,410	2,570	1,400	2,552
011a	880	1,616			15	1,435	2,616	1,435	2,616
011			895	1,648	16	1,460	2,660	1,465	2,669
010a	900	1,652			17	1,480	2,696	1,475	2,687
010			905	1,660	18	1,500	2,732	1,490	2,716
09a	920	1,688			19	1,520	2,768	1,520	2,768
09			930	1,706	20	1,530	2,768	1,530	2,786
08a	940	1,724			23	—	—	1,580	2,876

表4.15 塞格錐(SK)與歐香錐(PCE)的比較(續)

編號	SK		PCE		編 號	SK		PCE	
	(°C)	(°F)	(°C)	(°F)		(°C)	(°F)	(°C)	(°F)
08			950	1,742	26	1,580	2,876	1,595	2,903
07a	960	1,760			27	1,610	2,930	1,605	2,291
07			990	1,814	28	1,630	2,966	1,615	2,939
06a	980	1,796			29	1,650	3,002	1,640	2,985
06			1,015	1,859	30	1,670	3,038	1,650	3,002
05a	1,000	1,832			31	1,690	3,074	1,680	3,056
05			1,040	1,904	32½	1,710	3,110	1,700	3,092
04a	1,020	1,868			32½	—	—	1,725	3,137
04			1,060	1,940	33	1,730	3,146	1,745	3,178
03a	1,040	1,904			34	1,750	3,182	1,760	3,200
03			1,115	2,039	35	1,770	3,218	1,785	3,245
02a	1,060	1,940			36	1,790	3,254	1,820	3,308
02			1,125	2,057	37	1,825	3,317	1,835	3,335
01a	1,080	1,976			38	1,850	3,362	1,835	3,335
01			1,145	2,099	39	1,880	3,416	1,865	3,389
1a	1,100	2,012			40	1,920	3,488	1,885	3,425
1			1,160	2,120	41	1,960	3,560	1,970	3,578
2a	1,120	2,040			42	2,000	3,632	2,015	3,659
2			1,165	2,129					

重燒線變化是評定耐火材料品質的一項重要標準，對於化學組成相同的製品重燒線變化的產生原因，主要是耐火磚在燒成過程中，由於溫度不均或時間不足等影響，使其燒成不充分，這種耐火磚在長期使用中，受高溫作用時，一些物理化學變化仍然會繼續進行，從而使製品的體積發生膨脹或收縮。這種變化對焚化爐體有極大的破壞作用，因此必須加強耐火磚製造中的燒成控制，使該項性質控制在標準之內甚至達到更小值。

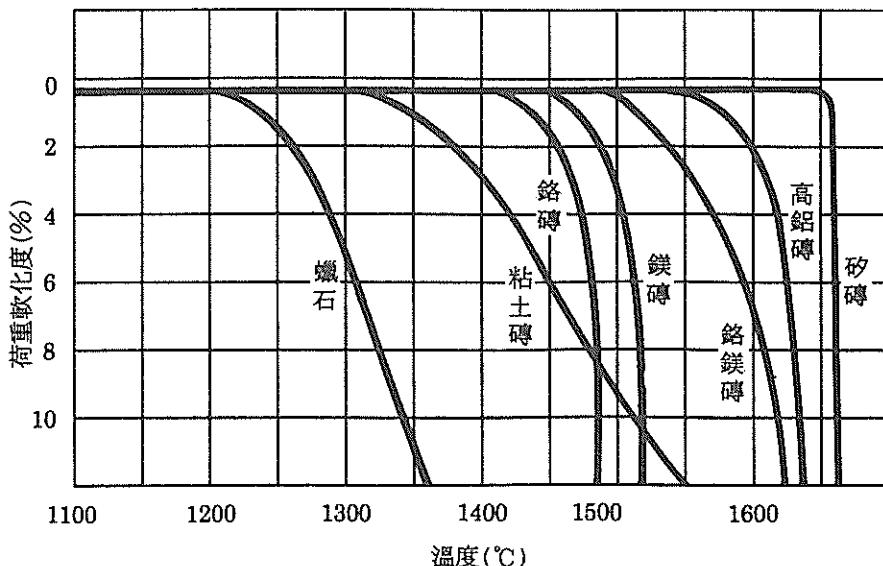


圖 4.36 各種耐火磚荷重軟化曲線<sup>20</sup>

#### (4) 抗熱震性 (thermal shock Resistance) 或熱濺裂性 (thermal spalling)

焚化爐在使用過程中，其環境溫度的變化是不可避免的，有時甚至是非常急劇的變化，例如操作中的加料、升溫、降溫時的爐溫變化等，最大的溫度變化可在一瞬間使磚的工作面溫升千度以上。耐火材料由此而產生的裂紋、剝落或崩損是焚化爐損毀的主要原因之一，可參閱表 4.16。

耐火材料抵抗溫度急劇變化而不被破壞的性能被稱為熱震穩定性。又叫做抗熱震性或溫度急變抵抗性。

影響耐火材料抗熱震性的主要原因是耐火材料的物理性質，如熱膨脹性、熱導率等。一般耐火材料的熱膨脹率越大，抗熱震性愈差；耐火材料的熱導率越高，抗熱震性就越好。此外，耐火材料的組織結構、顆粒組成和耐火磚形狀等均對抗熱震性有影響。增大某些耐火材料的物料顆粒，或是使在耐火材料中預製微裂紋，由此可減弱熱力，阻止已形成的裂紋擴展，對提高耐火材料的抗熱震性能均有一定作用，但影響耐火材料抗熱震性的因素很多，應綜合考慮多因素的影響。

#### (5) 抗渣性 (slag resistance)

熔渣侵蝕是耐火材料在使用過程中最常見的一種損壞形式。耐火材料在高溫下抵抗熔渣侵蝕作用而不被破壞的能力稱為抗渣性。

表4.16 耐火磚之耐熱濺裂特性資料表<sup>2</sup>

耐火磚種類	耐熱濺裂特性比較
<u>黏土質</u>	
超強度	
耐濺裂型	A
一般型	B
<u>高強度</u>	
耐濺裂型	C
一般型	D
半矽磚	C
<u>高鋁磚</u>	
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 to 60%)	A~C
$\text{Al}_2\text{O}_3 > 60\%$	B~D
<u>矽磚</u>	
一般特性	B
一般強度	E
耐濺裂型	D
<u>鹼性磚</u>	
鉻磚	D
鉻鎂磚	C~D
鎂磚	D
鎂磚	B
鎂鉻磚	$A^+ \sim B$
鎂鉻磚	$A^+ \sim A$
鎂磚(尖晶石鍵結)	A
鎂橄欖石磚	D

[註]  $A^+$  (特優) ~ E (劣)

所謂熔渣，包括高溫下與耐火材料相接觸的廢棄物爐渣、燃料灰分、飛塵、各種爐料及金屬液、各種氣態物質等。熔渣侵蝕過程主要是耐火材料在熔渣中的溶解過程和熔渣向耐火材料內部的侵入（滲透）過程。其中侵入速度最快的是通過氣孔侵入。因此提高耐火材料的緻密度，降低製品氣孔率是提高其抗渣性能的重要途徑。

耐火材料在熔渣中的溶解和溶渣向耐火材料內部的侵入都是以耐火材料與熔渣的接觸為前提的，首先是熔渣對耐火材料表面的潤濕作用。因此增大耐火材料與熔渣液相間的潤濕角，使其不易被潤濕則是提高其抗渣性能的重要手段。碳不易被溶渣潤濕，近來迅速發展的多種含碳耐火材料即是利用這一特性來提高抗渣性能的。

採用高純度耐火原料，改善耐火材料的化學礦物組成，盡量減少低熔物及雜質含量，使耐火材料中產生液相及與外界開始反應的溫度提高，也是提高耐火材料抗渣性能的有效方式。

注意選擇耐火材料的材質成分。盡量選用與渣的化學成分相近的耐火材料，減弱它們界面上的反應強度。

另外，耐火材料在使用中，還應該注意到所用材料之間應是化學特性相近，防止或減輕在高溫條件下的界面損毀反應。

#### (6) 抗氧化性

含碳耐火材料優良的抗渣及抗熱震性能使其在焚化爐行業上的應用相當廣泛。但碳若被氧化，則耐火磚的使用功能就不復存在了。提高含碳製品的抗氧化性能力，特別是高溫條件下的抗氧化能力，目前已被人們高度重視。當前經常採用的抗氧化方法是：

- ①選擇抗氧化能力強的碳素材料。不同微觀結構的碳抗氧化能力不同。雜質含量愈低，結晶發育愈好，其抗氧化能力愈強。由此在碳素材料中，高純鱗片狀石墨的抗氧化能力最強。
- ②改善製品的結構特徵。增強耐火材料的緻密程度，降低氣孔率，特別是要減少貫通氣孔的存在，以減少氧與碳的反應界面。
- ③使用微量添加劑。有些物質在高溫使用條件下，先於碳同氧反應在耐火材料工作表面上形成很薄但很緻密的反應層。它能阻止氧的深入從而阻礙了碳一氧反應。另外有些物質經高溫反應後產生體積微膨脹，可以填充或堵塞耐火材料內的氣孔，也使碳一氧反應減弱。選擇具有以上特性且本身或其反應物對耐火材料的高溫耐火性能無明顯影響的物質加到製品中以改善抗氧化性能。目前常用的這種添加成分有： $\text{Si}$ 、 $\text{Al}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Zr}$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{B}_4\text{C}$ 、和 $\text{BN}$ 等。

#### ④抗水化性

氧化鈣質耐火材料，在生產、保存及使用過程中，都有與環境中的水（氣態或液態水）發生反應而被喪失強度甚至粉化的現象，此即所謂水化反應。水化反應嚴重影響了某些耐火材料的生產、應用。

當前普遍採用的抗水化措施，一是提高原料的煅燒溫度，降低其化學反應活性。如白雲石的煅燒溫度在900~1,000°C時，在大氣中極易水化，當煅燒溫度提高到1,600°C時，置於大氣中2~3星期後才開始發生水化鬆散現象。鎂磚也是用提高煅燒溫度的方法來防止水化的。也有用加入少量添加劑來促進燒結防水化。

另一種方法即是採用有機的無水結合劑。還有採用浸漬處理。通過高溫浸煮，在製品表面覆蓋一層瀝青或石臘，隔絕空氣中水分與耐火材料的接觸。

另外，提高耐火材料的緻密度，降低氣孔率，也是提高抗水化反應的措施之一。

### 6. 耐火材料的作業性

檢驗耐火材料能否很方便地成型、生產、保管、運輸，施工的性能被稱為耐火材料的作業性。隨著耐火材料使用功能的專業化，耐火材料品種的發展，作業性愈益被人們所重視。

過去，耐火材料以定型製品為主，在現場施工時主要是砌築。但由於各種高溫窯爐發展的需要，噴塗料、澆注料、搗固料、投射料等的用量不斷增加，其施工的複雜程度都要難於定型磚。由此耐火材料的作業性成為人們研究的重要課題之一。

#### ①耐火材料的可塑性

從廣義上講，凡摻加了結合劑的耐火材料均具有一定的可塑性。但一般機壓半乾成型的物料可塑性極差，而耐火可塑料、搗固料、結合黏土或摻有某些結合劑的物料，才具有較明顯的可塑性質。可塑性即是物料與結合劑或稀釋劑調勻到標準稠度，通過揉搓成型後，承受外力雖改變原形狀而不開裂的性能。

提高耐火材料可塑性能的方法為：

- ①採用性能良好的膠結劑，如：黏土、水玻璃、磷酸鹽、硫酸鹽、有機結合劑等。另外還可添加有機酸、糊精、木質素磺酸鹽、紙漿、木糖漿等，進一步提高膠結劑的原有性能。同時還可改善保存期或施工期的可塑性能。
- ②加強物料生產過程的工程管理，使膠結劑的可塑性能得到充分的發揮。物料種類及用量，混練過程及時間必須嚴格掌握。

③混好的物料適當困置，促進物料中的反應，排除物料中的氣體，也能明顯增強可塑性能。

#### (2)耐火材料的黏結性

對於不定形耐火材料結合劑，黏結性是它們的重要性質之一。

焚化爐需要很多特定形狀的耐火磚砌築組合。這就需要在常溫及高溫都具有一定黏結能力的材料，通常使用耐火泥漿來達到目的。矽質、黏土質、高鋁質、鎂質耐火泥漿，在常溫下，通過分子間力，實現耐火製品之間的結合。在高溫使用過程中，由於燒結作用，則一般實現了陶瓷結合。為了在較低溫度下實現陶瓷結合，往往在泥漿中要加進一些促燒結劑使之提前燒結。

近來愈來愈多採用了複合黏結劑。其中包括提高常溫黏結強度的糊精，矽溶膠、水玻璃、鹵水、耐火水泥、瀝青、多種樹脂等，也包括在中溫或較高溫度下能促進化學或其它形式的結合，以提高強度的物質。除上面提到的材料大多具備此功能外，還有磷酸、多種磷酸鹽、聚磷酸鹽、偏磷酸鹽、硫酸鹽及各種超細粉等。

另外，有機結合劑也是當前愈益普遍使用的耐火材料黏結劑之一，它包括焦油、樹脂、瀝青等。這些黏結劑在常溫下具有較好的黏結強度，到高溫後又能形成碳結合。

複合結合劑由於具有各種性能的互補性，有機結合劑由於其殘碳有利於耐火材料的高溫使用性能，所以對它們的研究工作正在迅速擴大和深入。

#### (3)耐火材料的回彈性

耐火材料在進行噴塗施工時，將會出現因骨材顆粒的回彈脫落而造成耐火材料利用率下降，噴塗層顆粒級配不合理，體積密度下降，以至影響工作襯裡使用壽命等現象。

將噴塗料用結合劑混合後再施工的濕法噴塗，及伴以高溫火焰的火法噴塗，都因使物料具有一定可塑性而大大減少了回彈現象。

嚴格控制顆粒級配及極限顆粒，正確地調整噴塗設備的噴塗角度、距離和線速度，也是克服回彈現象的有效途徑。

將泥漿與乾料配合使用的混合噴塗法，先在受噴面上噴塗一層泥漿，再噴塗乾料，也可以解決回彈的一些問題。

#### (4)耐火材料的硬化性

在一定的外界環境條件下，耐火材料與結合劑之間發生物理化學變化後所建立的結構具有一定的機械強度，被稱之為硬化。

高溫燒成耐火材料，或是熱噴補的耐火材料，在溫度下降的過程中，原有液相玻璃化或是晶體活性降低而實現了硬化過程。

多種不定形耐火材料，在膠結劑的作用下，不需經過高溫燒結，只要滿足它的特定要求，即可實現化學或物理結合而達到耐火材料的硬化並具有較高的強度。

如各種類型的耐火水泥，當其與耐火骨料、粉料及水混合後，經過一段時間養生，逐漸完成了水化反應，材料隨著水化過程的進行，不斷硬化，強度不斷提高。

水玻璃是氣硬性結合劑，其硬化強度的實現需要乾燥空氣環境。

磷酸是熱硬性結合劑，其硬化強度需經一定溫度處理才能實現。

#### (5)稠度、泥漿

稠度用來表示耐火泥漿或流動耐火材料的可流動性能。稠度概念在耐火泥漿、某些濕法噴塗料，可塑料、澆灌料的製備及使用中被廣泛應用。正確掌握稠度標準，才能使焚化爐的耐火砌體達到預期的技術標準。

稠度的調節主要通過調整物料的粒度、顆粒級配及與結合劑或稀釋劑配比來實現。加入適量外加劑，如減水劑等也能調節稠度。

泛漿是指耐火混凝土施工過程中，由於振搗而在物料表面泛起一層較稀的漿液的現象。它主要是由於粗骨料顆粒不斷下沉而產生的。泛漿現象表示耐火澆注料經振搗已達到比較密實的程度，內部氣體大部分已被排除，孔隙大部分被小顆粒或流體所充填。但此種泛漿現象及上述效果，只有在稠度適宜的情況下才具有意義。因為若稠度太大，則物料極難泛漿；相反若稠度太低，雖然很快就能泛漿，但由於骨料及粉料顆料太少而不能達到緊密結合。同時上部很厚的泛漿根本無耐火骨料而不具有耐火性能。

當進行較大體積或厚度的多層耐火澆注料施工時，第一層料振搗完，應將泛漿層割破再加第二層料。因泛漿層的物料組成與其它層次不一樣，顆粒級配也是不合理的。另外泛漿層表面較光，也亦造成厚度分層（起層現象）。

#### 4.4.3 焚化爐耐火材料設計要點

由於工業生產的發展，隨之排放的廢水、廢物和廢氣等廢棄物，對環境的污染日趨嚴重，必將危害國民正常的生活與工作。為了保護環境，保障國民的身體健康，必須對工業廢棄物作適當的處理，以防止對大氣、水源、土壤和環境的污染。

工業生產中所產生的廢物大都是有害的。特別是化工生產中所排放的廢棄物其數量大，成分複雜，種類繁多，有些難以用物化與生化等方法進行處理，故常採用焚化方法。這種方法將有毒物質在高溫下使其氧化、分解，使燃燒後所排放的物質達到排放標準，以免造成對環境的污染。

焚化法是將工業廢棄物，投入焚化爐內，進行氧化燃燒。由於廢棄物內所含

有機物數量不同，因此採用的燃燒條件也不同。如對含有大量有機物廢物，則只需要很少量燃料點燃爐子，將爐溫升到一定溫度後，即可投入廢物，讓其自行燃燒。有的廢物只含有極少量可燃有機物，所以需補充大量燃料，才能維持爐膛高溫。工業廢棄物形態各不相同，有氣態、液態和固態，有的呈漿狀，其組成複雜多變，這些都給焚化爐的設計，造成困難，很難進行準確的設計計算。通常是針對某一工程廢物進行試驗，確定其焚化條件，在此試驗基礎上摸索選擇適宜的爐型。因為工業廢棄物種類繁多，所以焚化爐的種類亦很多。

### 1. 設計原則

- (1) 焚化的設計應盡可能採用定型設計和當地材料，以節省設計時間和工程投資費用。設計出來的爐子應具有較高的熱效率，最低的外形尺寸，最低的燃料消耗量和操作費用。同時應具有良好的操作條件和最小的建爐修爐時所耗費的材料及資金。
- (2) 要不斷採用新材料和新技術，以改進爐體結構。例如儘量採用新型耐火材料和絕熱材料，來改進爐子砌體結構，使爐牆熱損失少，升溫速度快。從而提高爐子熱效率。
- (3) 設計焚化爐時，對材料選用，設備選型，通用構件的規格尺寸的決定等，應儘可能全國通用，便於維修和備品備件。
- (4) 欲使焚化爐的設計合理，需要有理論基礎，且要充分掌握和分析爐體傳熱過程，同時也必須相應地組織爐內的燃料燃燒和煙氣流動，為熱交換的進行創造最有利的條件。

### 2. 設計原始資料

在設計焚化爐前一定要做好調查研究，收集原始資料，分析判斷工作，否則就會因為原始資料掌握不全，或分析研究不夠正確而造成設計的錯誤。在設計焚化爐之前，一般應該掌握下列設計條件：

- 焚化能力及其功用說明
- 廢棄物化學反應方程和熱平衡計算
- 廢棄物吸收或放出的總熱量和廢棄物物理化學性質
- 同類型焚化爐的燃料消耗量，焚化量，爐體各部分溫度和壓力，煙囪煙道的尺寸等實際數據和實際操作上存在的問題，並索取爐體平面圖作為參考
- 焚化爐設置位置的地下水位，室內外溫度和當地氣象資料
- 燃料種類及特性。

### 3. 設計中需要注意的事項

- (1) 爐型的選擇：各種爐型都各有其不同的優缺點，不同的選用範圍，所以不可對某種爐型採取完全肯定或完全否定的態度。焚化爐可以採用類似物料的爐型，經過試驗改進而去尋求合適的爐型和操作條件。

- (2) 設計方法：以現有的同類型的爐子作藍本，根據調查所得資料，經過分析研究，在進行技術經濟多方案比較的基礎上，決定所採用的爐子型式及送風排煙系統的主要尺寸和配置，繪出方案圖，進行詳細熱工計算、阻力計算和強度計算。熱工計算一般包括燃料燃燒計算、傳熱計算和散熱損失的計算。根據計算結果決定傳熱面積、爐膛、煙道、風道和煙囪的主要尺寸，決定鼓風機、引風機和燒嘴的型號，進行簡單爐子骨架和零部件的強度計算，決定其尺寸，選用爐子系統正常操作所需要的各種儀表。
- (3) 採取節省能源措施：如何降低排煙溫度，提高熱效率是設計中必須考慮的問題。
- (4) 輔助燃料的選擇：正確地選用燃料是設計焚化爐中的一個重要課題，需要充分的比較。當爐溫要求比較嚴格時，不宜採用固體輔助燃料。然而，不易取得氣體輔助燃料作為燃料時，一般採用重油作為輔助燃料。
- (5) 煙氣低溫硫酸腐蝕：降低爐子排煙溫度是提高爐子效率的最有效方法。但排煙溫度過低和管線金屬外表面溫度低於露點溫度時，煙氣中硫酸要冷凝在管線表面上，稀硫酸對鋼材腐蝕很快，因此採用含硫燃料時，排煙溫度不宜過低，爐子熱效率不能太高。
- (6) 焚化爐排氣中的酸性或鹼性成份，在某一溫度時會與耐火材料起化學反應，因而產生侵蝕破壞，表4.17中可得之各種耐火材料對酸氣抵抗性質。

#### 4.4.4 爐體結構

##### 1. 爐牆結構

爐牆是爐體中不可缺少的重要組成部分，用以構成一定形狀的爐膛和煙道，使煙氣、受熱面與外界隔絕，從而成爲燃料燃燒及熱量傳遞的工作空間，並且阻止熱量往外散失，使煙氣按指定的通道流動。

爐牆大致有三種基本結構形式，即磚結構、耐火混凝土結構及耐火纖維結構。

- (1) 耐火磚結構：耐火磚爐牆結構可分爲砌磚、掛磚和拉磚三種。砌磚結構是最古老最簡單的結構形成。由於它有不少優點，因此，至今仍有其使用價值。對於溫度較高或爐體較高，爐牆較薄的爐子採用掛磚結構，由於造價高、耗鋼量大，異型磚種類繁多，製造施工較麻煩，所以後來又發展了拉磚結構，克服了掛磚結構的缺點，不同笨重的掛磚架，結構簡單，基本上不同異型磚，施工亦方便，現在在大型焚化爐有採用此種結構的。
- (2) 耐火混凝土結構：耐火混凝土（或稱耐火澆注料）可分爲重質耐火混凝土和輕質耐火混凝土。它具有施工方便，可任意成型，適於特殊部位，便於築爐施工機械化，有縮短施工時間及降低成本等特點。

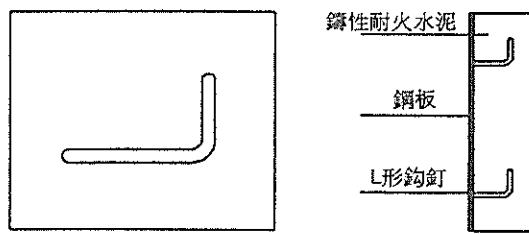
表4.17 一般砂磚與鋁砂磚特性資料表<sup>2</sup>

類 別	典 型 組 成	軟 化 溫 度	具 抵 抗 性	導 致劣化物 質
砂磚	95% SiO <sub>2</sub>	3,100	HCl, NH <sub>3</sub> 酸性爐渣	鹼性爐渣 Al, Na, Mg, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> (>2,550°F)
高強度黏土磚	54% SiO <sub>2</sub> , 40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,125	酸性爐渣	高鈣質、基性渣 在高溫時
超強度黏土磚	52% SiO <sub>2</sub> , 42% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,170	HCl, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , 大部份 酸性物質	基性渣 Na, Mg, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , (>2,550°F)
耐酸磚	59% SiO <sub>2</sub>	3,040	酸性及少量鹼性成分	HF, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
高鋁磚	50~85% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,200~3,400	HCl, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>	基性渣 Na, Mg, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> (>2,550°F)
超高鋁磚	90~99% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,000~3,650	HCl, HF, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub>	Na, F <sub>2</sub> (>1,800°F)
莫來石磚	71% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,290	HCl, SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>	Na, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> (>2,550°F)

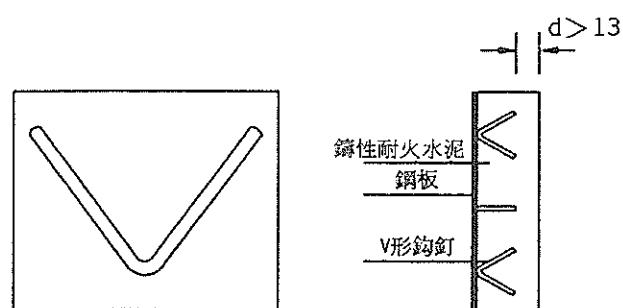
近年來耐火混凝土發展很快，品種甚多，範圍頗廣。襯裡的施工方法，有人工搗固和機械噴塗，也可以用機械搗製和機壓成型等。

耐火混凝土襯裡結構有以下幾種：(典型可鑄性耐火水泥錨定方式見圖4.37)

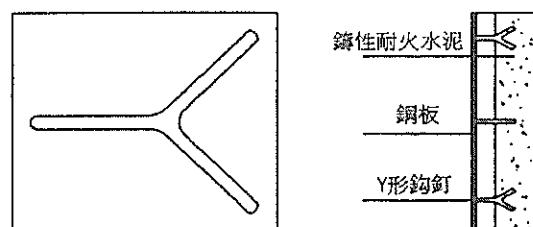
- 帶錨固釘的耐火混凝土結構
- 帶錨固釘並掛以金屬網耐火混凝土結構
- 帶波紋狀鐵絲網和鏈式鋼絲網結構
- 帶龜甲網的耐熱耐磨襯裡
- 做成預製塊堆砌
- 固定耐火混凝土的結構型式



A.L形鉤釘

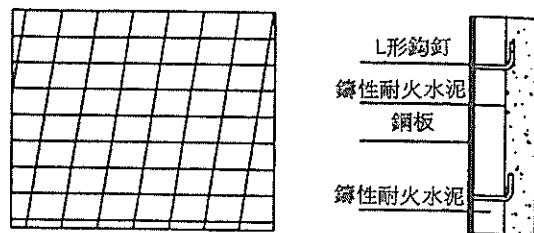


B.V形鉤釘

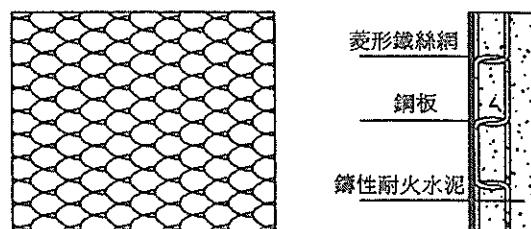


C.Y形鉤釘

圖 4.37 各種耐火水泥錨釘固定型式(I)<sup>21</sup>



D. 鐵絲網



E. 菱形鐵絲網

圖4.37 各種耐火水泥錨釘固定型式(Ⅱ)<sup>21</sup>

(3)耐火纖維結構：耐火纖維材料是近十多年來發展起來的一種新型耐火材料，它克服了耐火磚和不定型耐火材料所固有的脆性，因此，使用範圍很廣。

耐火纖維結構體所使用的粘貼劑應具備耐高溫、粘結力大、材質輕、常溫下能固化等性能。目前常用的粘貼劑種類有：

- 水玻璃：低漿廢液=1:1加10%粘土熟料粉與少量粘土粉。
- 硅酸鋁粘貼劑。
- 甲基纖維素。
- 磷酸鋁粘貼劑，磷酸：氯氧化鋁=8:1。

如在粘貼劑加上砌體粉，使其成糊狀，再加些MgO，可供其常溫強度更好。

除此之外，以耐火纖維之結構型式而言，可分為兩大類：一類是層襯式，另一類是疊砌式。

#### ①層襯式

層襯式通常有兩種型式，即用錨固釘固定法和貼面法。錨固釘固定法可採用雙層或多層耐火纖維毯的結構，在其與鋼殼間需襯隔熱材料，然後用耐熱鋼錨固件把耐火纖維毯與隔熱材料固定在殼體上。貼面法爐襯是用耐高溫的粘結劑將耐火纖維平貼在舊爐襯的磚牆上或新爐襯的內壁上。此結構用在舊爐改造上較多。其優點如下：

- 節省價格昂貴的耐熱金屬錨固件。
- 施工技術簡單、速度快。
- 減少金屬錨固件導熱損失，提高爐牆的絕熱效果。

#### ②疊砌式

層襯法施工簡便，但由於其纖維結構與爐內氣流方向平行，耐沖刷性能較差，一般僅允許氣流速度在13~15m/s之間；而疊砌式的爐襯纖維結構與爐內氣流方向垂直，耐沖刷性好，可允許氣流速度為15~20m/s。

其典型結構有以下幾種：

- 全纖維片狀結構。
- 串疊式纖維結構。
- 貼面疊砌式結構。

### 2. 爐頂結構

爐頂結構有磚結構和耐火混凝土結構，通常採用磚結構。磚結構通常可分為砌拱與吊掛兩種。

拱頂的厚度由跨度、工作溫度和磚的種類等條件確定。不同跨度，不同中心角，不同厚度拱頂的用磚量可依表查出其數量。砌築拱頂時，常採用錨縫砌築，錨縫砌磚首尾應儘量避免砍磚，可用相應的1½寬標準磚找平。

拉角磚應和拱的角度一致，拱腳磚可以與爐子內牆砌平，拱腳磚與拱腳磚樑之間用耐火磚砌滿。拱腳磚也可砌在拱腳樑內，用拱腳樑托住。

吊掛爐頂的有效厚度一般為200~250mm（不包括絕熱層），可以用標準磚砌築，也可用異型磚。常用有以下幾種型式：

- 通過吊磚架吊掛異型磚爐頂
- 用耐火磚做吊件的爐頂
- 串磚結構爐頂

### 3. 爐底結構

爐底材料、結構和砌築方法要適應爐底的工作條件。爐底可以支腳支承，也可直接座在實心基礎上。如果爐內溫度較高，必須考慮散熱，則要留出若干通風孔。一般爐底可用粘土磚和絕熱磚平砌。

### 4. 煙道結構

在排煙系統中，煙氣流速直接影響煙道截面的大小和系統阻力損失。在確定煙道斷面尺寸時，對含塵量大的，要適當加大煙道斷面尺寸，還要考慮砌築和清灰操作的方便。

煙道結構設計要考慮下列幾項：

- (1) 煙道常用的拱角為 $60^\circ$ 及 $120^\circ$ ，煙氣溫度較高，煙道斷面較大或受震動影響大的煙道，一般用 $120^\circ$ 拱頂，同樣煙道斷面積時， $60^\circ$ 拱頂的煙道高度可小些，但應注意防止因拱頂推力而使拱腳產生位移。
- (2) 煙道內襯粘土磚的厚度與煙氣溫有關，當煙氣溫度為500~800°C時，煙道內寬小於1m，一般用114mm厚粘土磚。大於1m用230mm厚粘土磚。煙氣溫度低於500°C時可用機製紅磚內襯，當煙道沒有混凝土外框時，外層用紅磚砌築，其厚度應能保證煙道結構的穩定。
- (3) 地下煙道處於地下水位線以下時，要採取防排水措施。一般用區域排水或防水套。由於受煙道內溫度影響，採用混凝土外框時往往會產生裂紋而造成滲水。有時地下水位線以上的煙道，地表水也會滲入，因此煙道底部一般要有排水坡度，並有排水設施。
- (4) 煙道長度較短，煙氣溫度低時，可以考慮不留設膨脹縫。當需要留設膨脹縫時，粘土磚內襯一般每隔3m左右留10~15mm的膨脹縫。煙道的內襯拱頂和外層拱頂之間放10~20mm鋸末或草袋，以避免內層拱頂受熱向上膨脹頂住外層拱頂而造成損壞。

#### 4.4.5 熱傳導

在某體系中有溫度差時，熱從高溫部傳往低溫部時，若欲使體系內溫度均勻化。熱的傳導方式大致有：熱傳導、對流傳導及輻射傳導三種形式。對流傳導又分為自然對流傳導、強制對流傳導。以下乃針對焚化爐之熱傳導現象介紹之。

## 1. 热傳導

### (1) Fourier定律<sup>11</sup>

熱傳導乃依循Fourier 定律，現在考慮物體內有溫度差之 2點，單位時間內通過垂直熱流斷面積之熱量  $q$  (熱流率,  $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ) 正比於溫度梯度。

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{t_2 - t_1}{\delta} = -\frac{t_2 - t_1}{\frac{\delta}{\lambda}}$$

$Q$  : 热流 ( $\text{kcal}/\text{hr}$ )

$t_1$ 、 $t_2$  : 2點位置之個別溫度 ( $^\circ\text{C}$ )

$\delta$  : 2點位置間之距離 ( $\text{m}$ )

$A$  : 垂直熱流之斷面積 ( $\text{m}^2$ )

$\lambda$  : 比例常數，熱傳導率 ( $\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{C}$ )

$\delta / \lambda$  : 傳熱阻抗

### (2) 平板間的穩定定熱傳導

右圖4.38中所示， $n$  枚平板完全密著之積層板，設各層厚度分別為  $\delta_1$ ， $\delta_2$ ， $\delta_3$ ，……， $\delta_n$ ，……熱傳導率分別為  $\lambda_1$ ， $\lambda_2$ ， $\lambda_3$ ， $\lambda_n$  ……，積層板表面的高溫部溫度為  $t_1$ ，低溫部溫度為  $t_2$ ，總面積  $A$ ，單位時間內所傳導熱量  $Q$  為

$$Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_1 - t') A = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t' - t'') A$$

消去  $t'$ ， $t''$ ，……， $Q$  可表示如下式

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} \times A = \frac{t_1 - t_2}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} A = U(t_1 - t_2) A$$

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)} \text{ 稱為熱質流率，單位為 } \text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot {^\circ}\text{C}$$

[例] 有厚度115mm之耐火磚( $\lambda_1 = 1.07 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot {^\circ}\text{C}$ )內層與厚230mm的普通磚( $\lambda_2 = 0.73 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot {^\circ}\text{C}$ )外層構成之爐壁，若是內層內面溫度760°C、外層外面溫度155°C，試求爐壁的熱損失及磚的邊界溫度。

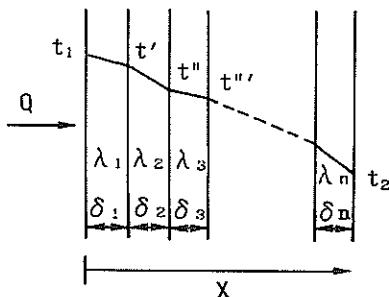


圖4.38 積層平面板的穩定熱傳導

[解]

(1) 热質流率爲

$$U = \frac{1}{\frac{0.115}{1.07} + \frac{0.23}{0.73}} = 2.37 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot {^\circ}\text{C}$$

(2) 壁表面 1m<sup>2</sup>的損失熱量爲

$$\begin{aligned} Q &= U(t_1 - t_2)A \\ &= 2.37 \times (760 - 155) \times 1 \\ &= 1434 \text{ kcal/hr} \end{aligned}$$

(3) 各層溫降正比於傳熱阻，所以耐火磚層的溫降爲

$$\Delta t = \frac{(760 - 155) \times \frac{0.115}{1.07}}{\frac{0.115 + 0.23}{1.07 + 0.73}} = 154^{\circ}\text{C}$$

因而邊界面的溫度為  $760 - 154 = 606^{\circ}\text{C}$

同理多層圓筒壁的穩定熱傳導為

$$Q = \frac{2\pi L}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln(\frac{\gamma_{i+1}}{\gamma_i})} (t_1 - t_2)$$

$$= U_L (t_1 - t_2) L$$

$$U_L = 2\pi / \sum_{i=1}^n (1/\lambda_i \ln \frac{\gamma_{i+1}}{\gamma_i}) \text{ 稱為多層圓筒壁之熱質流率 (kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C)}$$

$t_1$ ：內面溫度

$t_2$ ：外面溫度

$\gamma_n$ ：內半徑

$\gamma_{n+1}$ ：外半徑

$L$ ：圓筒壁長度

$\lambda_n$ ：熱傳導率

## 2. 對流傳導<sup>6</sup>

流體沿固體表面流動時，由於流體的粘性，接近固體表面的流速減慢，經一段距離後，可以不計算粘性之影響，假設固體表面有極薄的膜存在，此稱界膜，膜內無對流，流體與固體間移動須靠傳導，流體的熱傳導率非常小，此界膜有較大的傳熱阻抗，界膜厚度影響對流傳熱很大。

### (1) 全傳熱係數與界膜傳熱係數

熱從高溫流體固體物傳到低溫流體時，若知界膜厚度或交界溫度，可用下式求出熱流。若無法實測時，應對壁表面積  $A_1$  的高溫流體部，考慮如下定義的界膜熱傳係數  $\alpha_1$  (熱傳達係數)。

$$Q = \alpha_1 A_1 (t_1 - t_c)$$

$\alpha_1$  相當於  $\lambda / \delta$ ， $1/\alpha_1 A_1$  為高溫流體部的傳熱阻抗，同樣設低溫流體部的界膜傳熱係數  $\alpha_2$ ，熱傳面積為  $A_2$ ，金屬板厚度  $\delta$ ，金屬板的平均傳熱面積  $A_{av}$ ，熱傳導率  $\lambda$ ，則各傳熱阻為  $1/\alpha_2 A_2$ ， $\delta / \lambda A_{av}$ ，如下式，求得熱流。

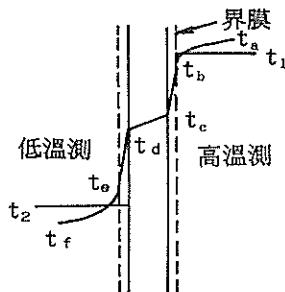


圖 4.39 热貫流溫度梯度

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha_1 A_1 + \delta/\lambda A_{av} + 1/\alpha_2 A_2}$$

分子、分母同乘  $A_1$

$$Q = \frac{A_1(t_1 - t_2)}{1/\alpha_1 + \delta A_1/\lambda A_{av} + A_1/\alpha_2 A_2}$$

設

$$U_1 = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta A_1/\lambda A_{av} + A_1/\alpha_2 A_2}$$

則

$$Q = U_1 A_1 \Delta t$$

$U_1$  稱為  $A_1$  基準面的全傳熱係數或熱貫流率，單位為  $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ ，基準面也可取低溫流體部，與  $U$  值不同。

## (2) 自然對流傳導之界膜係數

### ① 流體中單一水平圓筒之場合

$$1000 < (G_r P_r) \text{ 時}, \frac{\alpha_c D}{\lambda} = 0.525(G_r \cdot P_r)^{0.25}$$

$\lambda$ ：熱傳係數  $\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$

### ② 大氣自然對流傳熱

單一水平圓筒之場合

$$G_r \cdot P_r = 10^3 \sim 10^9 \text{ 時}, \alpha_c = 1.1 \left( \frac{\Delta t}{D} \right)^{0.25}, D: \text{外徑}(\text{m})$$

$$G_r \cdot P_r = 10^9 \sim 10^{12} \text{ 時}, \alpha_c = 1.1 (\Delta t)^{1/3}$$

垂直面的場合

$$G_r \cdot P_r = 10^4 \sim 10^9 \text{ 時}, \alpha_c = 1.2 \left( \frac{\Delta t}{H} \right)^{0.25}$$

$$G_r \cdot P_r = 10^9 \sim 10^{12} \text{ 時}, \alpha_c = 1.1 (\Delta t)^{1/3}$$

### (3) 管內強制流動時之界膜熱傳係數<sup>6</sup>

#### ① 層流的場合

流經管內的流體之 Reynolds 數 < 2300 時為層流，以上時為亂流。層流時的界膜傳熱係數 ( $\alpha_c$ )

$$\frac{\alpha_c d}{\lambda} = 1.65 \left( \frac{\omega C_p}{\lambda_1} \right)^{1/3} \left[ \left( \frac{\mu}{\mu_f} \right)^{1/3} (1 + 0.015 \sqrt[3]{G_r}) \right]$$

$\mu$ ：流體本身之粘度 (kg/m · hr)  $C_p$ ：定壓比熱 (kcal/kg · °C)

$\mu_f$ ：為界膜粘度，亦即流體本身溫度與壁溫之算術平均溫度的粘度。

$\omega$ ：管內流量 (kg/hr)  $G_r$ ：質量速度 (kg/m<sup>2</sup> · hr)

$l$ ：管長 (m)

$$G_r = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu}$$

$\beta$ ：流體膨脹係數 (1/°C)

$\nu$ ：流體動粘度 (m<sup>2</sup>/hr)

$g$ ：重力加速度 (m/hr<sup>2</sup>)

在高粘度流體時，可用下式計算之

$$\frac{\alpha_c d}{\lambda} = 2.02 \left( \frac{\omega C_p}{\lambda_1} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_m} \right)^{0.14}$$

$\mu_m$ ：為壁溫度之粘度

#### ② 管內亂流之場合 ( $10,000 \leq Re \leq 12 \times 10^4$ )

$$\frac{\alpha_c d}{\lambda} = 0.023 \left( \frac{dG}{\mu} \right)^{0.8} \left( \frac{C_p \mu}{\lambda} \right)^{0.4} = 0.023 (Re)^{0.8} (P_r)^{0.4}$$

$$\text{Reynolds 數 } Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{dG}{\mu} \quad (G: \text{質量流量} [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}], G = \rho u, u: \text{線速度} \text{m}/\text{hr})$$

Prandtl 數  $P_r = \nu \rho C_p / \lambda = C_p \mu / \lambda$ ， $\rho$ ：流體密度 kg/m<sup>3</sup>

### 3. 輻射能<sup>6,16</sup>

由於 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, 空氣等 2 原子氣體不是活性氣體，可視為不放射也不吸收之氣體，而 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 等 3 原子氣體或多原子氣體會發出相當於溫度之放射能。

而燃燒不完全時所產生的無數微細之碳顆粒(soot)，相同地，也會發出相當於其溫度的強放射能，稱為輝焰(luminous flame)。依據Schack之經驗式，將此三種輻射量關係表示如下：

$\text{CO}_2$  氣體之熱輻射量

$$q_{\text{CO}_2} = 35 \epsilon (P_{\text{CO}_2} L)^{1/3} \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^{3.5} - \left( \frac{T_w}{100} \right)^{3.5} \right] \text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$$

$\text{H}_2\text{O}$  氣體之熱輻射量

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 3.5 \epsilon P_{\text{H}_2\text{O}}^{0.8} L^{0.6} \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^3 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^3 \right] \text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$$

碳顆粒燃燒所產之輝炎的熱輻射量

$$q_{r-L} = 4.88 \times 0.1 \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$$

全熱輻射熱量  $\Sigma q_r = q_{\text{CO}_2} + q_{\text{H}_2\text{O}} + q_{r-L}$   $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$

$$\text{氣體之熱輻射係數 } \alpha_r = \frac{\Sigma q_r}{\Delta t_m}$$

$\epsilon$ ：黑度(熱輻射率)(參考表4.18所示)

$P_{\text{CO}_2}$ ： $\text{CO}_2$ 分壓(atm)

$P_{\text{H}_2\text{O}}$ ： $\text{H}_2\text{O}$ 分壓(atm)

$T_g$ ：氣體之絕對溫度(°K)

$T_w$ ：受熱面(被加熱物)溫度(°K)

$L$ ：氣體體層平均厚度(m)

$\Delta t_m$ ：氣體溫度與壁面溫度差(°C或°K)(參考表4.19所示)。

[例] 對象物為事業廢棄物，發熱量  $H_h = 3,349 \text{kcal/kg}$ ， $H_l = 3,014 \text{kcal/kg}$ ，理論空氣量  $3.47 \text{Nm}^3/\text{kg}$ ，空氣比 2，理論排氣量  $4.07 \text{Nm}^3/\text{kg}$ ，實排氣量  $7.54 \text{Nm}^3/\text{kg}$ ，處理量  $1,000 \text{kg/hr}$ ，爐床燃燒率  $190 \text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，生成氣體量  $7,540 \text{Nm}^3/\text{hr}$ ，氣體分子量 25.2，燃燒氣體溫度  $945^\circ\text{C}$ ，爐型式角型(立方體)，爐壁構造見下圖，爐內壓為  $-2 \sim -3 \text{mmAq}$ ，外氣溫度  $5^\circ\text{C}$ 。

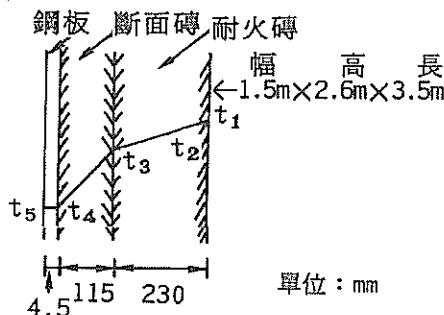


表4.18 不同物體之熱輻射率值參考表<sup>16</sup>

物體	表面狀態	熱輻射率 $\epsilon$	溫度(°C)
鋁	粗面板	0.055	25
黃銅	雲斑板面	0.22	50~350
銅	熔融狀態	0.13~0.16	1,100~1,300
銅	摩面	0.023	120
氧化銅		0.66~0.54	800~1,100
鐵	鑄鐵摩面	0.21	200
鐵	平滑的薄板	0.55~0.60	900~1,050
鐵	新研磨	0.242	20
氧化鐵		0.85~0.89	200~1,200
鋼	在593°C氧化	0.79	200~600
鋼	壓延板	0.657	20
鋼	熔融狀態	0.28	1,600~1,800
鋼(Cr-Ni)	18-8不鏽鋼(加熱的粗面)	0.44~0.36	215~490
鋼(Cr-Ni)	25-20不鏽鋼(使用中氧化)	0.90~0.97	215~525
紅磚	粗面	0.93	20
矽磚	未上釉的粗面	0.70	1,000
耐火磚		0.70~0.90	600~1,000
碳(油煙)	厚度0.003"以上	0.945	40~370
水		0.95~0.96	0~100

## 排氣組成(vol%)

CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
8.17	9.23	9.67	72.93

[解] 氣體通過斷面 =  $1.5\text{m} \times 3.5\text{m} = 5.25\text{m}^2$

$$\text{排氣流速平均} = \frac{7540}{3600} \times \frac{273+945}{273 \times 5.25} = 1.8\text{m/s}$$

表 4.19 氣體體層之平均厚度<sup>6</sup>

氣體體層之形狀	平均厚度 L (m)
球，直徑D，球面熱輻射	0.6D
無限長圓筒，直徑D，側面熱輻射	0.9D
無限長圓筒，直徑D，底面中心之熱輻射	0.9D
直徑D與長度相等之圓筒，底面中心之熱輻射	0.77D
直徑D與長度相等之圓筒，全表面之熱輻射	0.6D
斷面半圓筒，半徑r，平面側中心之熱輻射	1.25r
無限大之兩平板，面間距離δ，兩平板面之熱輻射	1.8δ
正六面體，一稜長S，任何一面之熱輻射	0.6S
1×2×6之長方體，最短稜長S	
2×6面之熱輻射，1×6面之熱輻射	1.06S
1×2面之熱輻射，全表面之熱輻射	

$$\text{質量速度} G = 1.8 \times 3600 \times \frac{273}{273+945} \times \frac{25.2}{22.4} = 1634 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

燃燒氣體組成如下，在945°C  $\mu_g = 4.7 \times 10^{-6} \text{ kg s/m}^2 = 0.166 \text{ kg/m} \cdot \text{hr}$

$$\text{同 } \lambda_g = 0.0689 \text{ kcal/m hr}^\circ\text{C}, C_p = 0.3936 \text{ kcal/Nm}^3\text{C} \times \frac{22.4 \text{ Nm}^3/\text{Kmole}}{25.2 \text{ kg/Kmole}} = 0.3499 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

其中，

$$D_e = \frac{4A}{U} = \frac{4 \times 5.25}{(1.5+3.5) \times 2} = 2.1 \text{ m}$$

$$R_e = \frac{DG}{\mu_g}, R_e = \frac{2.1 \times 1634}{0.166} = 20671$$

$$P_r = \frac{C_p \cdot \mu_g}{\lambda_g} = \frac{0.3499 \times 0.166}{0.0689} = 0.843$$

$$\text{對流界膜熱傳係數 } \alpha_c = \frac{0.0689}{2.1} \times 0.023 \times (20671)^{0.8} \times (0.843)^{0.4} = 2 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$$

壁內面熱輻射傳熱係數  $\alpha_r$

$$P_c = 0.0817 \text{ atm}, P_w = 0.0923 \text{ atm} (P_c = P_{CO_2}, P_w = P_{H_2O})$$

平行 2面間距離 = 1.5m 氣體體層厚為  $L = 1.8 \times 1.5 = 2.7\text{m}$

氣體溫度  $t_g = 945^\circ\text{C}$   $T_g = 1218\text{K}$

壁面溫度  $t_w = 935^\circ\text{C}$   $T_w = 1208\text{K}$ ,  $\epsilon = 0.75$

採用 Schack 式，得知

$$q_{CO_2} = 3.5 \times 0.75 (0.0817 \times 2.7)^{1/3} (12.18^{3.5} - 12.08^{3.5}) = 285 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$$

$$q_{H_2O} = 35 \times 0.75 \times 0.0923^{0.8} \times 2.7^{0.6} (12.18^3 - 12.08^3) = 313 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$$

$$q_{r-L} = 0.1 \times 4.88 (12.18^4 - 12.08^4) = 348 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$$

$$\therefore \sum q_r = 946 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}$$

$$\therefore \alpha_r = \frac{946}{945 - 935} = 94.6 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C} \quad \therefore \alpha_i = \alpha_c + \alpha_r = 97 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$$

$R$  : 全熱傳係數；

$R_1$  : 耐火磚之內表面界膜阻抗 =  $1/\alpha_1$

$R_2$  : 耐火磚之傳熱阻抗 =  $L_1/\lambda_1$ ,  $R_3$  : 斷熱磚之傳熱阻抗 =  $L_2/\lambda_2$

$R_4$  : 鋼板之傳熱阻抗 =  $L_3/\lambda_3$ ,  $R_5$  : 鋼板外表面界膜阻抗 =  $1/\alpha_2$

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$L_1 = 230\text{mm} = 0.23\text{m}, \lambda_1 = 1 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{C}$$

$$L_2 = 115\text{mm} = 0.115\text{m}, \lambda_2 = 0.14 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{C}$$

$$L_3 = 4.5\text{mm} = 0.0045\text{m}, \lambda_3 = 40 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{C}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{97} + \frac{0.23}{1} + \frac{0.115}{0.14} + \frac{0.0045}{40} + \frac{1}{9.4}} = 0.856 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{C}$$

$$\text{放熱量 } q = k \Delta t = 0.856 \times (945 - 5) = 804.6 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$$

$$\text{全放熱面積} = 40\text{m}^2, \text{全放散熱量} Q = 40\text{m}^2 \times 804.6 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} = 32185.35 \text{ kcal/hr}$$

$$q = \frac{\Delta t}{R_1}, 804.6 = \frac{945 - t_2}{\frac{1}{97}}, t_2 = 936.7^\circ\text{C}$$

$$q = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2}, 804.6 = \frac{945 - t_3}{\frac{1}{97} + \frac{0.23}{1}}, t_3 = 751.65^\circ\text{C}$$

$$q = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2 + R_3}, 804.6 = \frac{945 - t_4}{\frac{1}{97} + \frac{0.23}{1} + \frac{0.115}{0.14}}, t_4 = 90.73^\circ C$$

$$q = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}, 804.6 = \frac{945 - t_5}{\frac{1}{97} + \frac{0.23}{1} + \frac{0.115}{0.14} + \frac{0.0045}{40}}, t_5 = 90.64^\circ C$$

全入熱量 =  $3,014 \times 1,000 = 3,014,000 \text{ kcal/hr}$

$\therefore$  全放熱損失率 =  $(32,185.35 / 3,014,000) \times 100\% = 1.06\%$

## 4.5 儀控系統

### 4.5.1 儀控系統的功能

儀控系統提供充分之量測指示，控制及順序連鎖控制，使整個焚化流程在設計條件下安全地操作。通常，盤控的參數包括溫度、壓力、液面、流量、焚化及排煙控制，運轉狀態顯示，連鎖動作，緊急關斷保護系統等等。

#### 1. 操作控制

提供關鍵參數的自動控制，以及以手動調節，按扭等來操作動作機械、閥門等，以達成流程操作的目的。

#### 2. 連鎖系統

在於提供各種操作情況下，如開機、運轉、停機及現場維修等均能確保操作安全，並執行一部份連鎖動作。

#### 3. 停機控制

包含停止進料，停止燃燒，關閉輔助燃燒器，噴水降溫，打開緊急排放煙函等，使系統在任何異常下均能安全地停機。

#### 4. 廢氣盤測

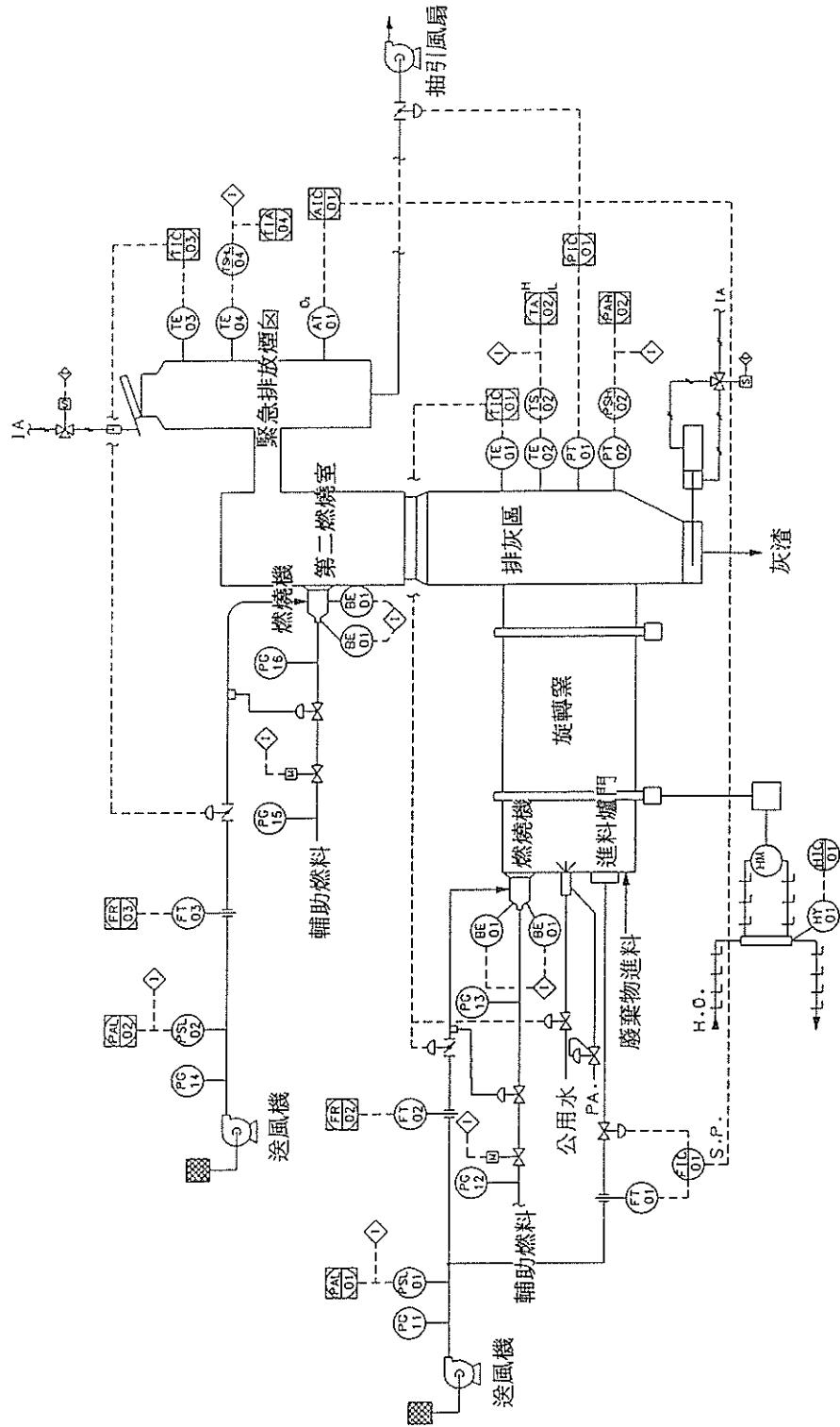
盤測排放氣中粉塵及有害成份的濃度，做為調整操作參數的參考，並檢視是否符合排放標準。

### 4.5.2 基本儀控迴路

一般模具式焚化爐的基本儀控迴路有：

#### 1. 爐體溫度控制

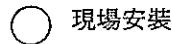
包含主燃燒室，後燃燒室的溫度控制，輔助燃燒器開啓溫度設定控制，請參考圖 4.40 所示。



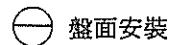
## [圖註]

### 1. 儀器符號

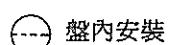
#### (1) 儀器位置



現場安裝



盤面安裝



盤內安裝



具多種功能或參數



共用螢幕顯示

#### (3) 輔助說明

對於線路符號圖，可加簡碼說明，內含供給源

AS 空氣供給	GS 氣體供給
SS 蒸氣供給	HS 液壓供給
ES 電氣供給	NS 氮氣供給
WS 水源供給	

### 2. 功能簡碼說明

字別	首 碼	從 屬 字 碼	字別	首 碼	從 屬 字 碼
碼別	變量度或參數	顯示或接收功能 輸出功能 訓譯意義	碼別	變量度或參數	顯示或接收功能 輸出功能 訓譯意義
A	組成、性狀、分析	警報	ORP	氧化還原電位	
B	燃燒、火焰		P	壓力或真空	
C	電導度		Q	數量、積算量	
D	濃度、密度或比重		R	放射量	記錄
DP	差壓		S	速率或頻率	操作開關
E	冠氣	感測元件	T	溫度	傳信器
F	流量		U	複合、多度數	多重功能
G	表量		V	黏度	閥門、開閉器
H	手動		W	重量、力量	
I	電流	指示計	X	未分類	
J	電力		Y	由使用者定義	繼電器或演算器
K	時間、時程		Z	位置	驅動裝置
L	液位、料位		PH	酸鹼值	
M	水分、溫度		DO	溶氧	
N	由使用者選定		MLSS	液中混合浮懸固體	
O	由使用者選定		-	-	-

## 2. 焚化系統溫度監視

- 含 • 主燃燒室溫度
  - 後燃燒室溫度
  - 火焰口溫度
  - 廢熱鍋爐入口水溫及出口蒸氣溫度
  - 廢熱鍋爐出口之廢氣溫度
  - 空氣濾淨設施出口之溫度
  - 煙囪出口排氣溫度

## 3. 壓力監視

- 含 • 含主燃燒室壓力監視
  - 後燃燒室壓力監視
  - 廢熱鍋爐蒸氣壓力監視
  - 洗滌設施進水水壓及差壓監視，見圖4.41所示

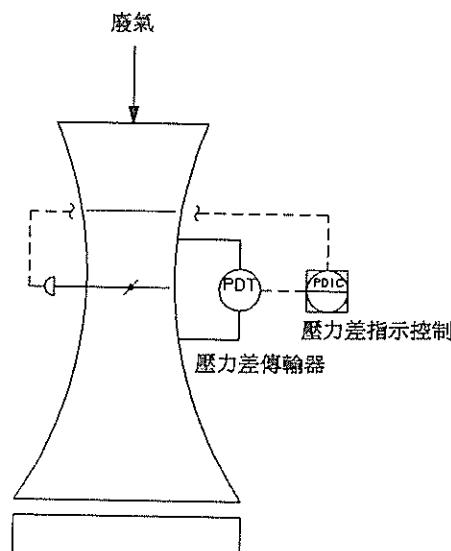


圖 4.41 文氏洗滌塔控制示意圖

- 文氏管差壓監視
- 公用供應管線（空氣、水、水蒸氣、油、燃氣…）壓力盤視

#### 4. 爐膛壓力及風量控制

- 爐膛壓力控制可藉調節抽引風機的抽氣量或鼓風機的送氣量達成。
- 鼓風機風量控制並接受爐溫控制設定之調節。

#### 5. 燃燒器控制

- 燃燒器之啓一閉連鎖控制
- 點火安全連鎖控制
- 空氣→燃燒比控制

#### 6. 含氧量控制

調節適當的過量空氣(excess air)以維持過氧燃燒，通常以調節燃燒空氣流量控制的設定點—即串級控制(cascade control)的方法進行。

#### 7. 自動停止進料連鎖控制

其條件至少包括：

- 燃燒室溫度高於設定點至多達20°C或低於維持溫度要求時
- 進料門未閉合至定位
- 焚化爐熄火時
- 推灰系統故障
- 緊急停機
- 其他

#### 8. 燃燒器自動停止連鎖控制

條件至少包括：

- 燃燒器系統故障時
- 燃燒室溫度高於低設定點溫度
- 進料門開啓時

連鎖控制和緊急停車必須是「異常下安全(fail safe)」設計，如停電停機或機件異常時，自動連鎖系統朝向使系統置於安全下的處置。

#### 9. 排煙自動監測

依據法令的要求，設置自動排煙監測儀器，一般的煙囪空氣污染連續監測器、監測項目包括二氧化硫(SO<sub>x</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、氧氣(O<sub>2</sub>)、不透光率(Opacity)，氯化氫(HCl)、流速(Velocity) 及溫度(Temperature)等，監測得的信號數據連線至主控制室紀錄集存。

#### 4.5.3 儀控操作盤

焚化爐的儀控系統，是以集中操作配合現場操作盤及操作開關並用的方式設計。

##### 1. 現場控制盤（圖4.42）

啟動及停機操作原則上在現場控制盤及現場開關進行。操作時可以同時注意到設備的實際狀況而做必要的處置，以避免無謂的事故發生。現場控制盤及現場開關必需位於設備附近，可目視設備狀況的範圍內，現場控制盤包括爐體盤視盤、燃燒器操作盤、排灰控制盤、廢氣洗滌設施控制盤等。

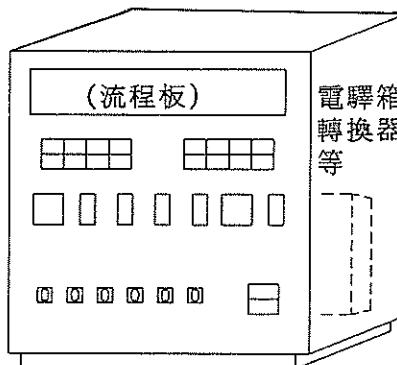


圖4.42 傳統式控制盤示意圖

##### 2. 主控制盤（圖4.43）

主控制盤置於控制室中，掌握全部焚化流程的全部程序控制迴路及順序連鎖控制、停機、緊急停機等，且將重要的操作資訊集中監視集存。

主控制盤內除含電驛箱或可程式控制器(PLC)外，盤面並裝設控制器、指示計、紀錄器，警報及運轉指示燈、以及相關之按扭選擇開關。

警報指示燈包括：

- 燃燒器異常無法操作
- 主後燃燒室溫度過高
- 進料門故障，未至定位
- 廢熱鍋爐蒸汽壓過高
- 廢熱鍋爐進水量過低
- 洗滌器進水水壓過低

- 洗滌器水泵異常
- 洗滌器儲藥桶液位過低
- 廢熱鍋爐出口廢氣溫度過高
- 爐膛壓力異常等等

處理順序連鎖控制及停機動作的邏輯控制線路，傳統上以電驛式系統處理，新型的則以可程式控制器(PLC)來執行，唯電驛式的可靠性較高，且能做Fail-Safe設計，緊急停機系統仍需以電驛式設計較為可靠。

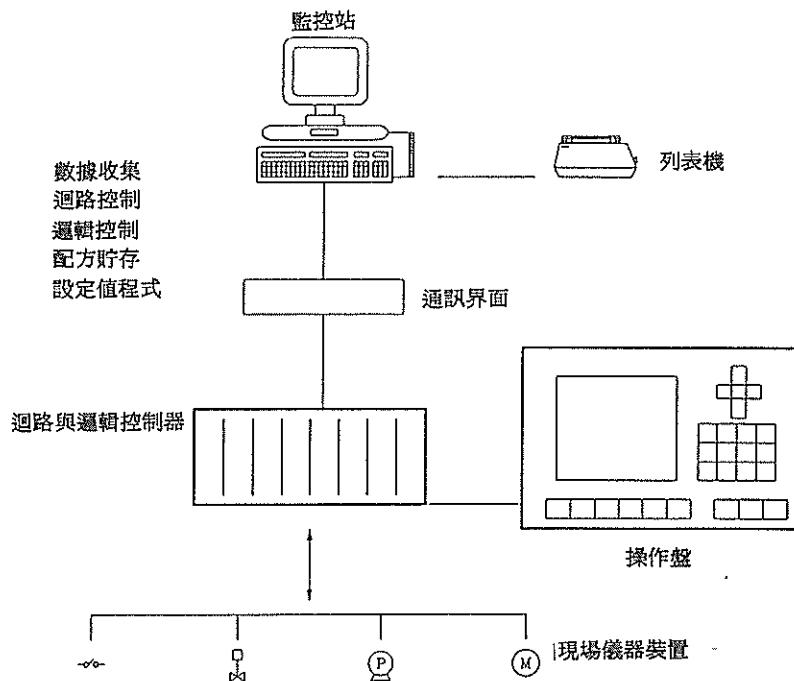


圖4.43 小型數位控制系統組合(DCS)示意圖

### 3. 電腦盤控設備

電腦盤控設備在控制室中，可以做資料收集、處理、集存及報表列印工作，以補足傳統式主控制盤之不足。也可以完全替代傳統控制盤，執行對全部焚化流程的操作控制的設計，透過人機界面隨時知悉廠區設備之運轉狀況，並藉列印報表及彩色螢幕分析顯示系統數據，以提高操作管理效益。

#### 4.5.4 儀控設備的選擇

焚化爐儀控設備與一般工業儀器相同，主要的資訊來源有：

- 儀錶工程師手冊 (Instrument Engineers Handbook, B'ELAG, LIPT'AK)
- Standard and Practices for Instrumentation (ISA美國儀錶協會編)
- 廠商型錄和技術資料
- 個人經驗的累積

焚化爐常用的儀器有以下幾種：

##### 1. 溫度量測

###### (1) 熱電偶

一般選用K型 (C-A TYPE)，適用溫度範圍0~1250°C，如用在更高溫度則選用R型或S型。

###### (2) 雙金屬溫度計 (bimetal thermometer) 使用於現場溫度指示，量測範圍500°C以下。

###### (3) 充填式溫度計

可以毛細管連接至一定之距離外，做現場指示。

##### 2. 流量偵測

可分為流率 (flow rate) 量測及流量積算二種，使用於流程之盤控及計量，計價上，參考圖4.44所示。

###### (1) 差壓式流量計

如流孔板，適用於空氣、蒸氣、瓦斯氣、乾淨水等之量測上。

###### (2) 電磁流量計

適用於酸、鹼等腐蝕性流體，以及含有顆粒、雜質、泥漿等之廢水或液體廢棄物等流率流量之偵測計量。

###### (3) 容積式流量計 (PD meter)

準確度很高，通常使用在燃料（油、氣）耗用的計量上。

###### (4) 透平式流量計 (turbine meter)

可使用於氣體和乾淨液體之量測，通常用在燃料耗用之計量上。

###### (5) 面積式流量計 (rotameter)

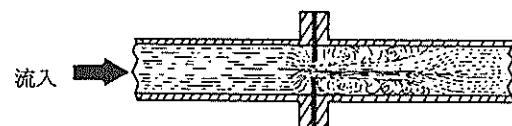
使用在小管徑小流量 (2吋以下) 做現場指示時使用。

###### (6) 超音波式

用於量測排放廢氣的排放量上，操作溫度約 250°C以下，如果廢氣的溫度太高，可採用差壓式或熱溫式 (thermal flowmeter)。

##### 3. 壓力偵測

焚化爐流程使用的壓力偵測儀器大致可分為現場壓力指示，產生壓力信號做盤控之用及壓力開關，做連鎖及安全保護之用，(參考圖4.45)。

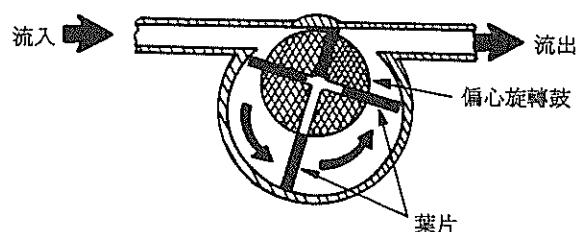


• 流孔板流量計示意圖

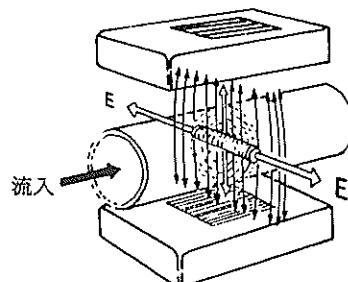


• 不同流孔板型狀

A. 差壓式流量計—流孔板流量計

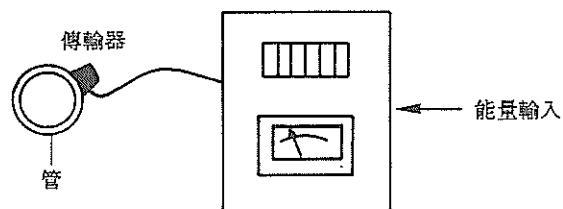


B. 容量式流量計

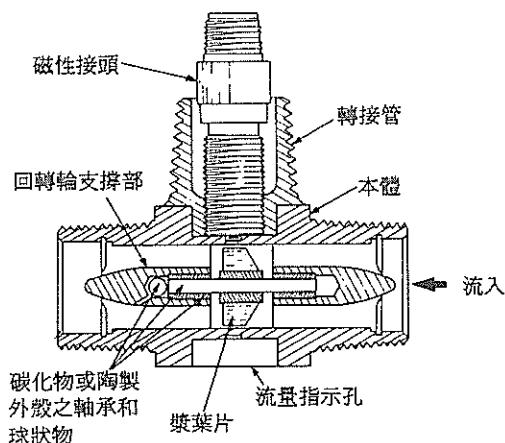


C. 電磁流量計

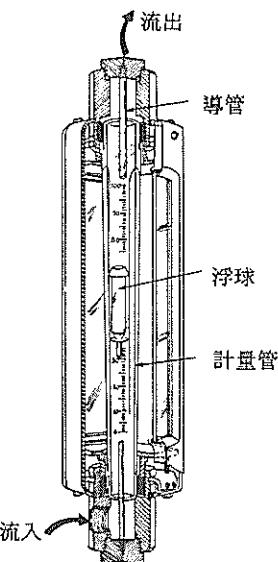
圖 4.44 各種流量計示意圖(I)



D.超音波式流量計

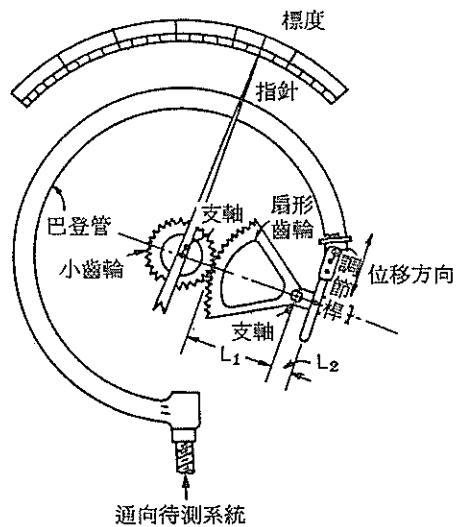
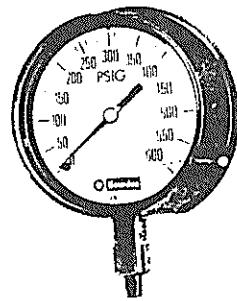


E.透平式流量計

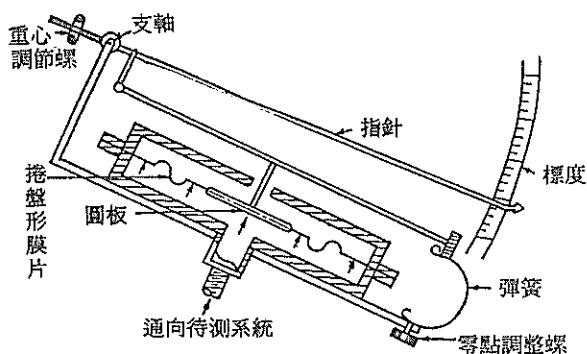
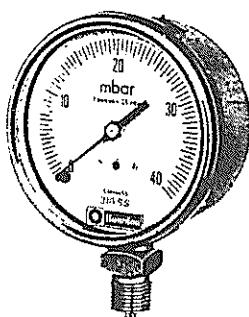


F.面積式流量計－浮球式流量計

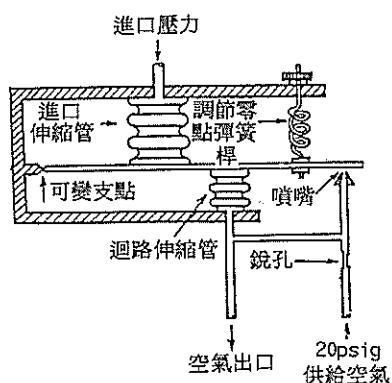
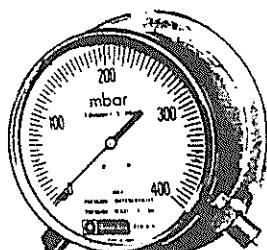
圖4.44 各種流量計示意圖(Ⅱ)



A.巴登管式壓力計



B.膜片式壓力計(低壓式)



C.差壓式壓力計

圖4.45 壓力計示意圖

### (1) 壓力表

壓力表做現場之壓力指示用，例如水、空氣、燃料、蒸氣等管線上之壓力表。使用在腐蝕性、凝固性，黏合性流體時，可採用隔膜密封式(diaphragm seal)，流體有脈動之場合則加振動阻尼器，使用於蒸氣則加吸虹管(syphon)以資保護。

### (2) 壓力開關

壓力開關多用於確認公共供應管線的可靠性，如冷卻水、空氣、燃料等，當供應的壓力過低，則啓動壓力開關警示操作人員或連鎖動作使停機，以策安全。

### (3) 電子式壓力儀器

利用壓電式壓力轉換器(piezoelectric pressure transducer)的原理，當感測儀器受壓時，壓力的變化導致電子性狀的變化，轉變成電子信號，傳送至盤控盤做盤視控制之用。

## 4. 液位偵測，詳見圖4.46所示

焚化爐系統中使用液位計的場合有(1)桶槽，如燃料油、酸鹼液、灰渣等的儲槽液面偵測(2)洗滌塔的液面偵測控制等。

常用的液面儀器有：壓力式或差壓式液位計、浮球式液位計(float type)、浮力式液位計(displacer type)、玻璃液面計及電容式面位計。

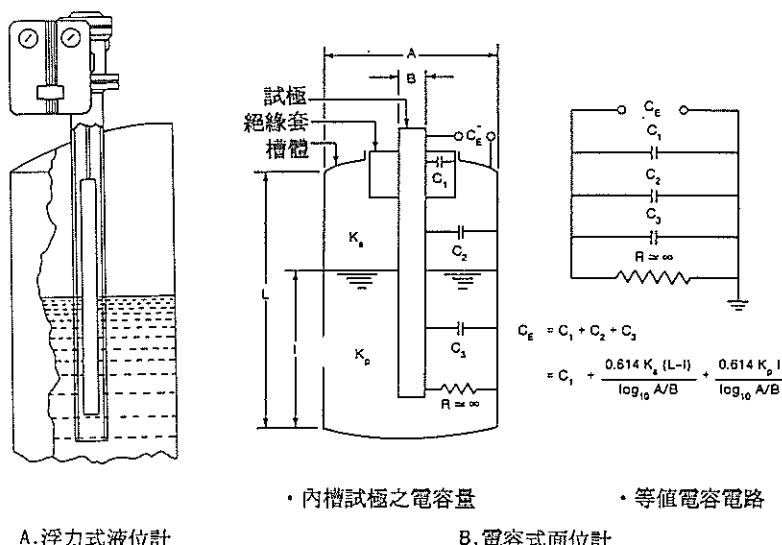
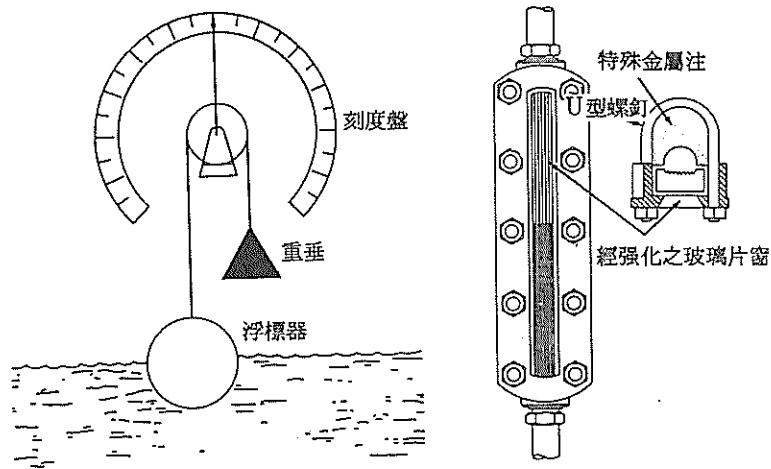
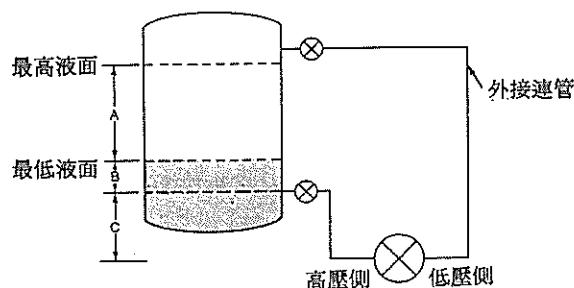


圖4.46 液位計示意圖(I)



C. 浮球式液面計

D. 玻璃液面計



A: 為量測範圍之跨度

B: 為最低液面與位置下壓力計接管兩者間之高度差

C: 為接管位置與更在下方壓力計本身間之高度差

E. 差壓式液位計

圖 4.46 液位計示意圖(II)

## 5. 分析儀器

焚化爐系統常用的分析儀器有酸鹼度(pH)計、含氧量( $O_2$ )分析儀以及煙囪  
排放監測儀器。

(1)pH計：用於酸鹼度中和之盤視控制用，以玻璃電極法感測酸鹼度，含①量測

電極②參考電極及③溫度補償電極。

(2)含氧量分析儀：氧化鋯探測棒最為常用，偵測溫度可高達700°C

(3)煙囪環境監測儀：

偵測煙道內之 $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、Opacity等，可區分為二大類。

①抽離式；又含傳統單點採樣棒及單點採樣稀釋棒二種。

②現場測式(in-situ type)，以UV或NDIR光被吸收之波長及強度原理偵測各項參數。

## 6. 控制閥，參考圖4.47所示

使用於水、空氣、燃料、廢氣排放、鹼液等的調節動作。其驅動方式有氣動式和電力式，閥體則依使用場合條件不同而有：

(1)球形閥(globe valve)

用於水、空氣、蒸氣、油等之節流控制，但流體中有顆粒雜物等時則不適用。

(2)蝶型閥(butterfly valve)

構造簡單，流通量大，壓力損失小，較適用於大管徑。

(3)球閥(ball valve)

適用於漿狀物之流體控制，如廢水、污泥等之管線上，差壓小高流通量，範圍度也大。

### 4.5.5 儀控系統設計

儀控系統的設計分為基本設計和細部設計兩大類，設計的原則和目標為操作自動化，情報集中化和情報處理自動化。

#### 1. 基本設計：

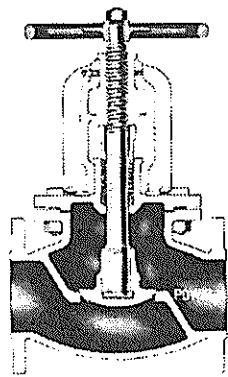
(1)流程監控設計：決定流程中必須量測的點和自動控制的變數和對象。必要時得做定量分析及系統模擬。

(2)監控系統設計：就集中化，自動化的程度，控制室控制盤的規劃，DCS與傳統儀控盤等的採行等做適當的規劃設計。

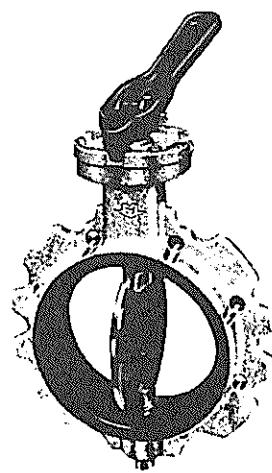
(3)儀控迴路設計：選擇適合於流程的儀器，就偵測控制及最後動作等元件組合設計成具體完整之儀控迴路。

#### 2. 詳細設計：參考圖4.48~4.52所示

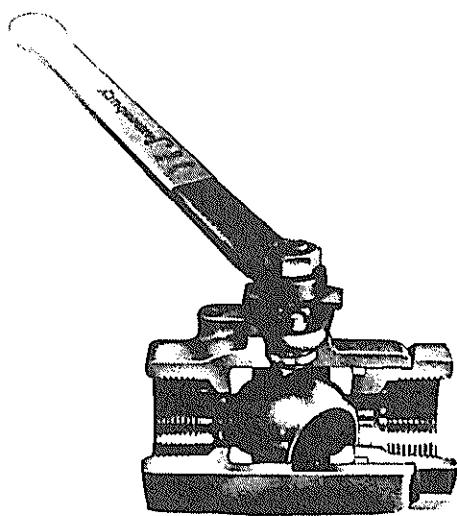
(1)儀控設備選定：包括儀控設備總表及儀控設備規範書。



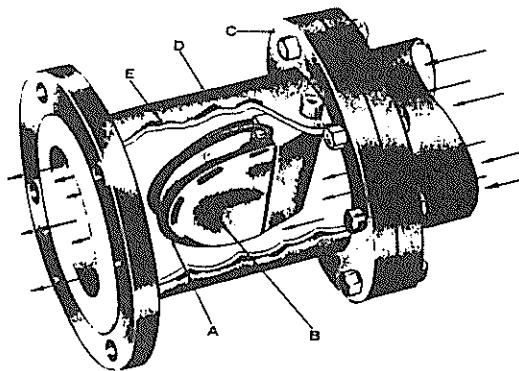
A.球形閥



B.蝶形閥



C.球閥



D.逆止閥

圖 4.47 控制閥示意圖

流程量測及控制儀器；一次元件及控制閥之規格表

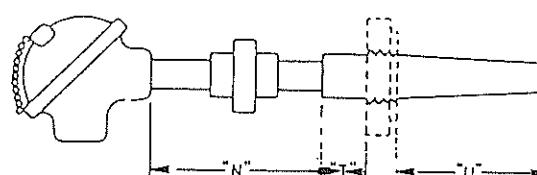
熱電偶和保護套管				頁次					
項次	設計者	日期	版次	規格編號		版次			
				契約編號		日期			
				需求採購編號					
					委託者	校核者			
					校准者				
1. 全套組合 <input type="checkbox"/> 其他 _____ 廠牌及型號 _____ 元件 廠牌型號編號 _____				7. 材質 _____ 電管接頭 _____ 8. 接線座：單座 <input type="checkbox"/> 雙座 <input type="checkbox"/> 套管					
2. ISA 型式 _____ 結線大小 _____ 3. 連接材質 _____ 曝露 <input type="checkbox"/> 接地 <input type="checkbox"/> 未接地 <input type="checkbox"/> 封閉 <input type="checkbox"/> 珠式絕緣 <input type="checkbox"/> 彈簧支撐 <input type="checkbox"/>				9. 材質 _____ 10. 構造：斜管 <input type="checkbox"/> 直管 <input type="checkbox"/> 鐵孔成型 <input type="checkbox"/> 焊接成型 <input type="checkbox"/> 管端封閉成型 <input type="checkbox"/>					
4. 連接管線尺寸 _____ "N" 大小 _____ 接合管 <input type="checkbox"/> 5. 套裝連接器 _____ 頭部 _____ 6. 螺旋帽和鍊條 <input type="checkbox"/> 其他 _____				11. 尺寸大小：廠商標準 內徑 _____ 外徑 _____ 12. 接頭：流程 _____ 內牙 (法蘭型) _____ 13. 其他規格： _____ 備註：					
									
版次	編號	套管尺寸		元件長度	單元 雙元	型式	規格	用 途	備 註
		"U"	"T"						
備註：									

圖 4.48 儀器規範書標準格式

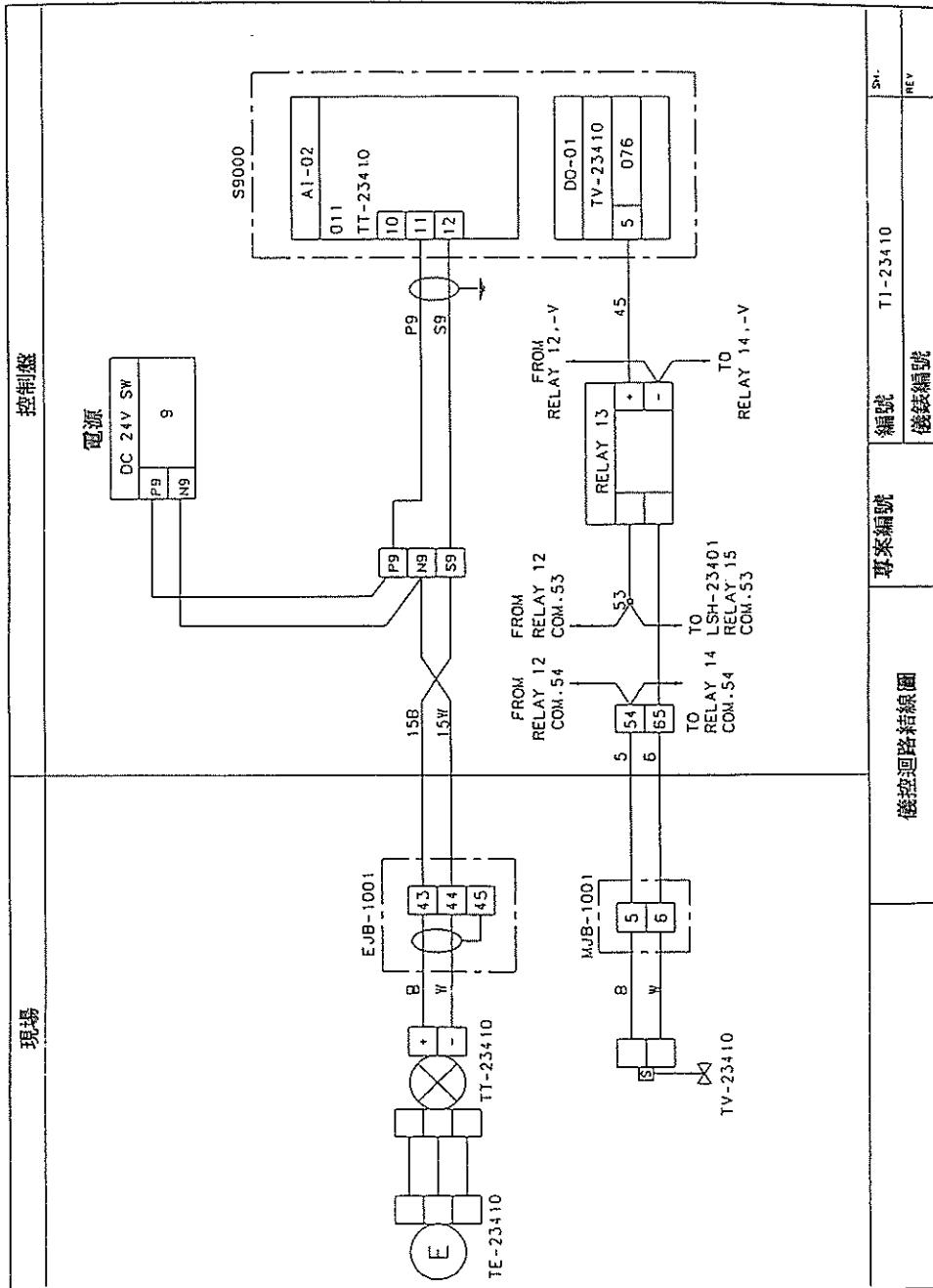


圖 4.49 磁控迴路結構圖

委託者 _____				專案編號 _____								
工廠名稱 _____				圖號 _____								
位置 _____				結線箱編號 _____								
設計者 _____				電纜編號 _____								
日期 _____				頁次 _____								
儀控結線表												
<input type="checkbox"/> 電子訊號 <input type="checkbox"/> 溫度 <input type="checkbox"/> 連鎖控制 <input type="checkbox"/> 氣體偵測		結線法										
		現場設備	---	結線箱	---	控制室	□	現場設備	---	控制室		
項 次	現 場 設 備	線 路	結 線 箱	線 路	控 制 室							
儀錶編號	接頭	線心	規 格	接續	接頭	線心	規 格	編 號	接 繼	線 端	備 註	
1	FT-21001	+ B - W S	#16 對 避 線 接	24 對 AWG (體與個避線)	+ 1 - 2 S 3 S + 4 2B - 5 2W S 6 S + 7 3B - 8 S 9 + 10 - 11 3W S 12 S + 13 4B - 14 S 15 + 16 - 17 4W S 18 S + 19 5B - 20 S 21 + 22 - 23 5W S 24 S + 25 1B - 26 6B S 27 + 28 - 29 6W S 30 S							
2	FT-21004A	+ B - W S										
3	FT-21041A	+ B - W S										
4	FI-21041A	+ B - W S										
5	FT-21041B	+ B - W S										
6	FI-21041B	+ B - W S										
7	FT-21041C	+ B - W S										
8	FI-21041C	+ B - W S										
9	FT-21041D	+ B - W S										
10	FT-21041D	+ B - W S										
---CONT---												
b: <input type="checkbox"/> 儀表板編號 <input type="checkbox"/> 接線座編號 <input type="checkbox"/> 裝置編號 <input type="checkbox"/> c: 線心編碼: B: 黑 R: 紅 W: 白 Y: 黃 C: 通訊 S: 避避												

[註] AWG : 美國結線規則

圖 4.50 儀控結線圖表

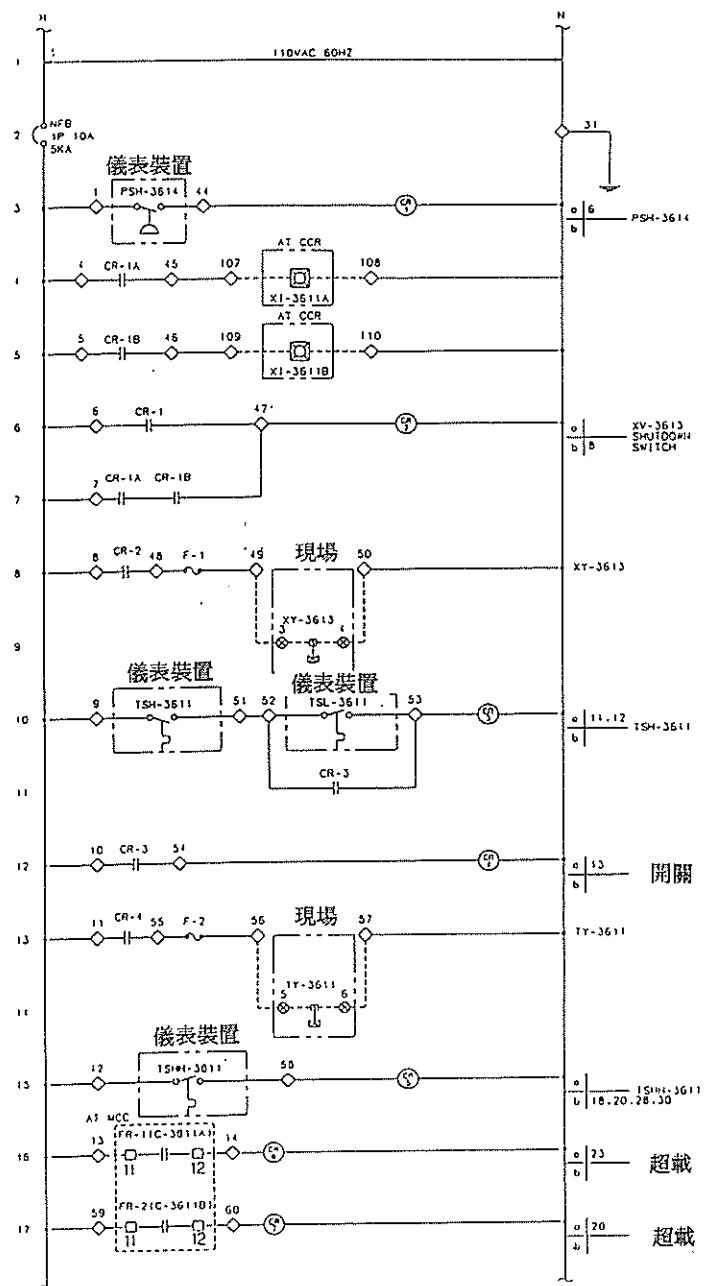


圖 4.51 硬體邏輯電驛電路結線示意圖

圖 4.52 可程式邏輯控制器階梯圖

(2) 儀控管線，線路及安裝設計；包括了繪製下列各圖：

- 儀器安裝詳圖
- 儀控迴路結線圖
- 儀控結線表
- 連鎖控制系統之「結線示意圖 (schematic wiring diagram)」或階梯圖 (ladder diaqram, 使用PLC 時)
- 配管配線平面圖

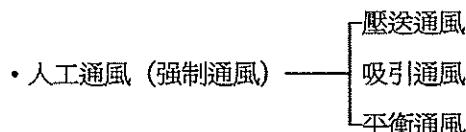
## 4.6 煙囪設計

在焚化爐之煙囪設計之過程中，所必須考慮之因素除通風力設計外，尚必須考慮環保法規之要求。以下乃針對以下兩因素介紹之。

### 4.6.1 通風與通風裝置

通風的方法可以分類如下：

- 自然通風（煙囪通風）



#### (1) 壓送通風 (forced draft)

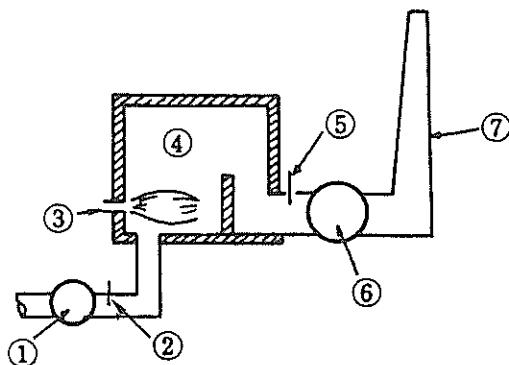
就如圖4.53所示，通風力是由壓送通風機①、阻尼器②⑤以及煙囪⑦來調節的，爐內壓力約在大氣壓或者稍微正壓之程度。在這種情況時，如果排氣溫度降低得太多，會使得爐內壓昇高而產生迴火的現象，因此，排氣溫度無法降至一定溫度以下乃是其缺點。

#### (2) 吸引通風 (induced draft)

就如圖4.53所示，這是利用吸引通風機⑥、氣閘⑤以及煙囪來吸引爐內氣體的，由於爐內是負壓的緣故，雖然會有冷空氣侵入，不過，即使將排氣溫度降低也沒有什麼關係，對通風機而言，排氣溫度毋寧說是越低越好。

#### (3) 平衡通風 (balanced draft)

就如圖4.53所示，這是備有通風機①和⑥、氣閘②和⑤而能夠自由調節爐內壓的通風方法，如果將爐內壓設定於大氣壓附近時，不但冷空氣不會侵入、火焰不會吹出，而且也可以因應負荷之變動，因此，可以說是最合理的一種方式，不過，設備費用則比較高。



①壓送通風機 ②、⑤阻尼器 ③燃燒器 ④燃燒室 ⑥吸引通風機 ⑦煙囗

圖4.53 人工通風

#### 4.6.2. 煙囗之實用計算

##### 1. 煙囗高度與通風力之計算公式

$$h = 355 \times H \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$h$ ：煙囗所產生之理論通風力 (mmAq; kg/m<sup>2</sup>)

$H$ ：煙囗高度 (m)

$T_1$  := 273 + 大氣溫度 (°C)

$T_2$  := 273 + 煙囗內排氣平均溫度 (°C)

如大氣溫度為 27°C，則

$h_1$  = 煙囗之有效通風力 (mmAq 高)

$$h_1 \approx 0.8 \times h$$

(水柱 1mm 高 = 1kg/m<sup>2</sup> = 0.0001kg/cm<sup>2</sup>)

##### 2. 煙囗頂部口徑 (D) 之決定

$$D(m) = \sqrt{\frac{4 \times F}{3.14}}$$

$$F(m^2) = \frac{Q \times T}{273 \times 3,600 \times V}$$

$F$  = 煙囗頂端內斷面積 (m<sup>2</sup>)

$Q$ =每小時生成燃燒排氣量 ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )

$T=273+ \text{煙囗出口之排氣溫度 } (\text{°C})$

$V= \text{煙囗出口之排氣流速 } (\text{m/sec})$

自然通風時  $V=4\sim 5\text{m/sec}$ , 強制通風時  $V=5\sim 6\text{m/sec}$

### 3. 煙囗頂部內口徑 ( $D$ ) 與基部內口徑 ( $D_d$ ) 之關係

$$D_d \text{ (m)} = D + (0.016\sim 0.02) \times H$$

$H$ =煙囗高度 (m)

### 4. 煙囗高度與通風力

在作通風力計算時，可由上述公式推算，亦可由圖 4.54 查閱得知。

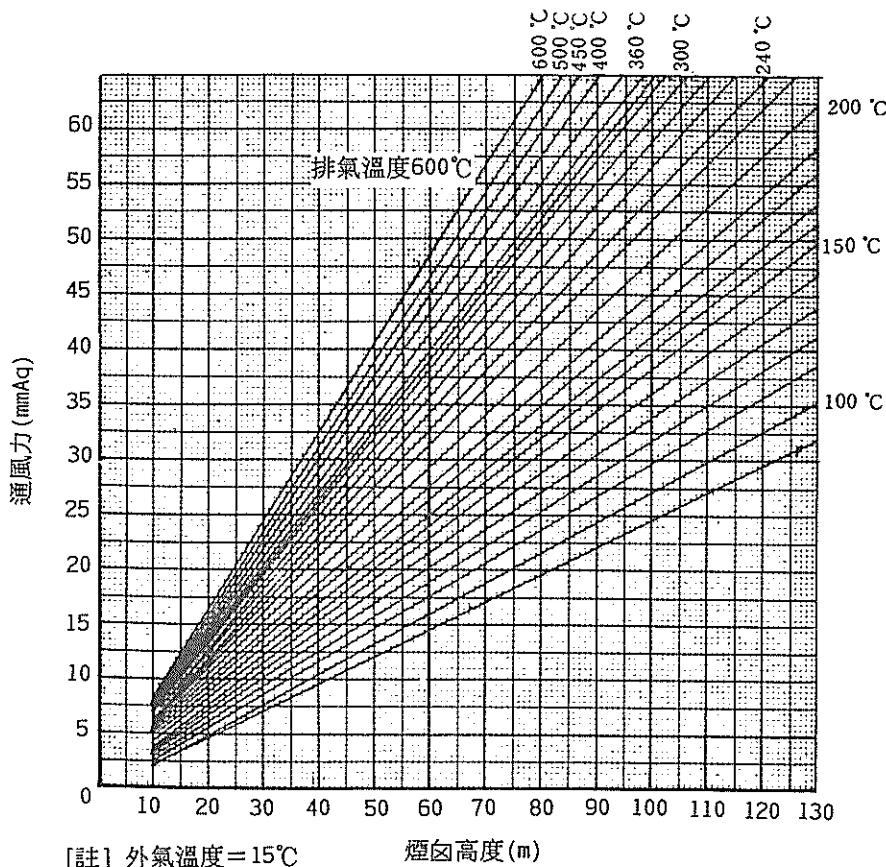


圖 4.54 不同排氣溫氣下煙囗高度與通風力之關係圖

### 4.6.3 排氣流動壓損計算

#### 1. 焚化爐爐內壓損 ( $h_{ch}$ )

在焚化爐操作過程中，為避免正壓操作，而造成迴火現象，使工作人員容易受傷，一般採負壓操作，爐內壓之壓損設計範圍約在  $-3 \sim -10 \text{ mmAq}$  之間。

#### 2. 流路轉向所造成之壓損 ( $ht, \text{mmAq}$ )

$$\text{彎曲 } 45^\circ \text{ 時 } ht = 0.25 \gamma_g (W_1^2 + W_3^2) / 2g$$

$$\text{彎曲 } 90^\circ \text{ 時 } ht = \gamma_g (W_1^2 + W_3^2) / 2g$$

$$\text{彎曲 } 180^\circ \text{ 時 } ht = \gamma_g (W_1^2 + W_2^2 + W_3^2) / 2g$$

$$\text{彎曲 } 30^\circ \text{ 時 } h_t = \text{以 } 90^\circ \text{ 彎曲時所作成之壓損} h_t \times \left( \frac{30}{90} \right)^2$$

$\gamma_g$  : 燃燒排氣比重 ( $\text{kg/m}^3$ )

$W_1$  : 排氣經管路彎曲初期之速度 ( $\text{m/sec}$ )

$W_2$  : 排氣經管路彎曲中央部之速度 ( $\text{m/sec}$ )

$W_3$  : 排氣彎曲終結處之速度 ( $\text{m/sec}$ )

$g$  : 重力加速度 ( $\text{m/sec}^2$ )

#### 3. 斷面積變化之壓損 ( $h_s$ )

(1)急激變化時 (圖 4.55.A) 設損失係數在擴大時為  $\xi_1$ ，在縮狹時為  $\xi_2$ ，則其與面積比  $A_1/A_2$  的關係如圖 4.56 所示，但此  $\omega$  為狹方一亦即斷面  $A_1$  的流速。

(2)緩慢變化時 (圖 4.55.B) 擴大時，擴大角  $\theta \leq 30 \sim 50^\circ$  時的損失係數小於 A 的場合， $\theta = 6 \sim 10^\circ$  時取最低值，約為  $\xi_1$  的  $1/5$ ；設在斷面  $A_1$  的流速為  $\omega_1$ ，則

$$h_s (\text{mmAq}) = \xi \gamma_g \omega_1^2 / 2g, \quad \xi = \xi [1 - (A_1/A_2)]^2$$

圓型擴大管的  $\xi$  實測例如圖 4.57 所示；縮狹時的損失係數小得很多，在  $\theta$  很小時，除了流體摩擦以外，幾不造成損失。

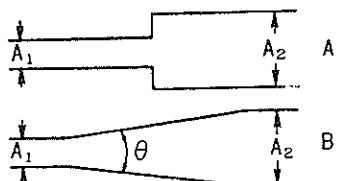


圖 4.55 斷面積變化

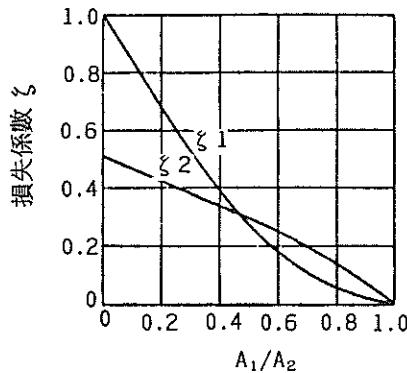


圖 4.56 損失係數

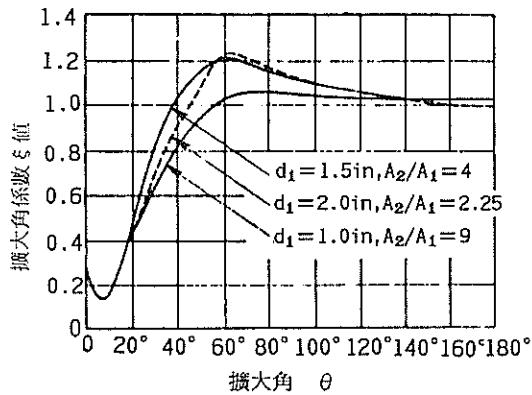


圖 4.57 圓形擴大管的擴大角係數

#### 4. 煙道及煙囪之摩擦損失 ( $h_f$ )

$$h_f (\text{mmAq}) = \lambda W^2 \gamma_g / 2gd$$

其中  $W$  : 排氣流速 (m/sec)

$\gamma_g$  : 燃燒排氣比重 ( $\text{kg/m}^3$ )

$l$  : 煙道的長度或煙囪高度 (m)

$d$  : 煙道或煙囪的直徑 (m)

若斷面不是圓形時可使用相當直徑  $d'$  (如圖 4.58) 方式計算之

$$d' = 4A/S$$

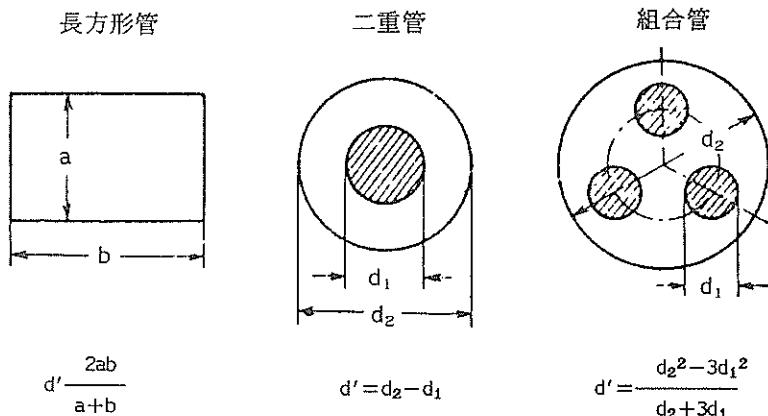


圖 4.58 相當直徑圖

$\lambda$ ：摩擦係數，磚或混凝土壁時  $\lambda = 0.05 \sim 0.08$ ，鐵板壁時  $\lambda = 0.03 \sim 0.04$ ，普通的煙道是每張 30m 的通風損失為  $2.5\text{mmAq}$ ，每 1直角彎曲處的通風損失為  $1.5\text{mmAq}$ 左右。

#### 5. 煙道昇降所致的壓差 ( $h_b$ )

$$h_b (\text{mmAq}) = H(1.2 - 365/T)$$

其中  $H$ 為煙道的昇降高度差 (m)， $T$ 為排氣的平均絕對溫度 (K)，假設外氣溫度為  $293\text{K}$ ，由上向下流時會增加通風損失。

#### 6. 旋迴流動部的近似壓損 ( $h_c$ , mmAq)

$$h_c = 0.155 \gamma_g W_2$$

$\gamma_g$ ：排氣的比重 (kg/m<sup>3</sup>)

$W_2$ ：旋迴速度 (m/sec)

#### 7. 煙囪的有效通風力 ( $Z_e$ , mmAq)

$$Z_e = Z_t - \sum \text{壓損} = Z_t - (h_t + h_s + h_b + h_f, \dots)$$

$Z_t$ ：總通風力 (mmAq)

$h_t$ ：流路轉向所造成之壓損 (mmAq)

$h_s$ ：斷面積變化之壓損 (mmAq)

$h_b$ ：煙道昇降所造成之壓損 (mmAq)

$h_f$ ：煙道與煙囪所造成之摩擦損失 (mmAq)

#### 4.6.4 煙囪之構造

一般小型焚化爐之煙囪皆在 60m 以下，在設計煙囪時，所必須考慮之因素，包括風壓、地震力與煙囪內外溫差所致的熱應力；風壓力雖受高度或地形條件之影響，一般設計值在  $200\sim 300 \text{kg/m}^2$ ，地震度約取 0.3 左右。

依其構造型式來分，有鋼製煙囪、鋼筋混凝土煙囪與磚造煙囪三種，但鋼筋混凝土煙囪與磚造煙囪易受熱、酸氣侵蝕破壞或龜裂，而且易因地震而折損與須現場建造施工期長等不良因素，故近年有逐漸淘汰之趨勢。而一般鋼製煙囪之構造上大致可分為單獨自立形、鐵塔形、多腳形三種型式，可參考圖 4.59 所示。於 100m 以下的煙囪很經濟，外觀與構造單純，占地不大，但易發生振動，裹襯的檢查，修補困難之缺點。鐵塔型的構造是以鋼管製鐵塔支持 1 支或數支筒身，為大型超高煙囪使用，鐵塔形式的各種設計可參考圖 4.59 所示，1 支筒身者適於高度 150m 以下的煙囪，某些數支筒身的集合形式者，適合使用在 120m 以上之煙囪，較為經濟。而多腳形是以筒身本體為構造體，為使用 3 支或 4 支筒身互相連結的立體框架結構，適用於超高中型煙囪。

自立圓筒形式		多腳形式				
圓筒形	防振形	四腳形	三腳形	三腳四筒形		
鐵塔形式						
四角鐵塔形	三角鐵塔形	籠形	鑽石形	四筒鐵塔形	三筒鐵塔形	雙筒鐵塔形

圖 4.59 鋼製煙囪的形式

## 4.7 焚化爐設計要點

影響焚化爐正常運作與否之根本問題。是設計因素，在焚化爐之建造之前或購置之前必須充分瞭解廢棄物之產生量、每日操作時數選定（24小時操作或8小時操作）、廢棄物之熱值、廢棄物之元素分析組成（C,H,N,O,S,Cl）是否會產生HCl、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等等。對材料影響之範圍、進料系統與排灰系統（人工投料、半自動進料或全自動進料），依據上述基本資料，可得之每日設計處理量、理論空氣量、輔助燃料量、酸氣含量範圍等，並加以選定爐型、進料與排灰方式、耐火材料之種類型式、金屬材質、送風方式、燃燒機之種類、爐溫與廢氣停留時間等。以下乃針對設計因素介紹之。

### 1. 爐型

在考慮爐型時，須考慮此類型爐的燃燒型態（控氣式或過氧燃燒式），是否適合廠內所有廢棄物性質。一般控氣式焚化爐（controlled air incinerator）較適合焚化易燃性廢棄物，（例如：塑膠、橡膠與高分子石化廢料等），過氧燃燒式焚化爐較適合焚化不易燃性廢棄物或廢棄物燃燒性較穩定者（例如：木屑、垃圾、紙類……等）。

除此之外，必須考慮送風方式，攪拌性質良否，是否會產生短流或容易擾動底灰等因素。

### 2. 進料與排灰系統

一般焚化爐在進料系統方面，應儘可能考慮氣密性，因焚化爐在操作系統中，大多採用負壓操作，若進料系統方面，採用開放式投料或密閉式進料中氣密性不佳，造成冷空氣滲入爐內，原本穩定性燃燒過程，冷空氣混入造成爐溫下降，燃燒之穩定性降低，CO與粒狀物濃度急速上升。

在排灰系統中，應採用自動排灰設備或具備有排灰室，否則容易造成燃燒過程中，因爐灰累積隨氣流之擾動而上揚，而增加粒狀物濃度。

### 3. 耐火材料之選擇與設計

一般耐火材料之設計時，所必需考慮耐火度、高溫荷重性、耐濺裂（spalling）、耐氧化、耐還原性、耐酸性礦渣、耐鹼性礦渣、機械性摩損、耐酸氣之腐蝕反應等，可參考表4.20所示。

### 4. 金屬材料之腐蝕

一般金屬材料之腐蝕性可分為高溫腐蝕與低溫腐蝕兩種，高溫腐蝕是高溫酸性氣體長時間與金屬材料接觸所造成之腐蝕，這類型酸性氣體包括：SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S、HCl…等。而低溫腐蝕是酸性氣體在露點以下時，酸性氣體與排氣中之水份凝縮成濃度較高之硫酸、亞硫酸、鹽酸…等液滴，與金屬材料接觸所造成之腐蝕。

表4.20 常見耐火材料特性表

測試特性	耐火度 高温 荷重	耐機裂 熱傳導	耐氧化	耐還原 礦渣	耐酸性 礦渣	抗礦渣 黏著	抗礦渣 浸透	抗機械 摩擦	抵抗 性
碳化物耐火材	2	1	1	3	1	1	3	1	1
高鋁質耐火材	2	2	4	2	1	1	2	4	1
鎂質耐火材	1	4	5	2	1	1	5	1	HCl, SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>
鎳質耐火材	2	4	5	3	1	4	1	4	—
耐火黏土質	3	4	2	4	1	1	4	2	大部份之酸
矽 磚	2	1	5	4	1	1	5	4	HCl, NH <sub>3</sub> , 及酸浴渣
鋁 磚	2	1	4	3	1	1	3	4	HCl, SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>

[註] 1.：非常好 2.：高 3.：中等 4.：低 5.：非常低

通常在高溫腐蝕方面，應避免使金屬材料表面溫度曝露在 400°C以上，而造成SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>酸氣腐蝕。可參考表4.21所示。

表4.21 鋼板試料之高溫腐蝕試驗

溫 度 (°C)	200	300	400	500	600	700
SO <sub>2</sub>	—	2	6	40	120	—
SO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	—	—	6	22	90	—
SO <sub>3</sub>	—	2	11	84	—	—
SO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O	—	—	11	50	—	—
H <sub>2</sub> S	—	—	6	18	44	68
H <sub>2</sub> S+H <sub>2</sub> O	1	3	6	18	60	130

[註] 鐵腐蝕量(g/m<sup>2</sup> · 4hr)：SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S之濃度皆為0.1 vol%而H<sub>2</sub>O為10 vol%

在低溫腐蝕方面，是由於燃燒排氣中之SO<sub>3</sub> 氣體與水蒸氣結合成硫酸，達到露點時，約會產生0.5 μm程度之極微細之硫酸霧滴，與金屬材料接觸造成腐蝕，SO<sub>3</sub> 濃度與露點關係圖，可參考圖4.60所示。依據Thurlow的實驗得知，鋼材表面溫度100~120°C (約露點以下15~40°C) 之酸氣凝縮量最小，腐蝕量也最小。可參考圖4.61與圖4.62所示。在HCl氣體腐蝕方面，由於HCl之沸點約在-85°C左右，一般而言在同樣濃度時，液溫上升時，金屬材料之侵蝕度急速增加，pH值急速下降，可參考圖4.63及圖4.64所示。其中針對水牆式焚化爐之金屬爐壁、耐火水泥式焚化爐之固定錨釘、排氣管線及金屬製煙囪等，尤需注意金屬材料之腐蝕問題。

### 5.送風方式

就單燃燒室焚化爐而言，燃燒用空氣之送風方式，可分為爐床上送風(overfire air)和爐床下送風(under fire air)兩種，一般加入超量空氣(excess air)100~300%，即空氣比2.0~4.0間，廢氣停留時間約0.5~1.0秒左右，並在氣道或煙囪中加裝後燃燒器(after burner)以減少空氣污染物之排放。

而二段式控氣焚化爐(controlled air incinerator)，在第一燃燒內加入70~80%理論空氣量於爐內，在第二燃燒室內補足空氣量至理論空氣量 140%至200%，詳見圖4.65所示。在第一燃燒室中因是缺氧(starved air)燃燒，故增加空氣流量則會提高燃燒溫度；但在第二燃燒室中因是超氧燃燒，增加空氣流量則會降低燃燒溫度。見圖4.65所示空氣比與爐溫關係圖。

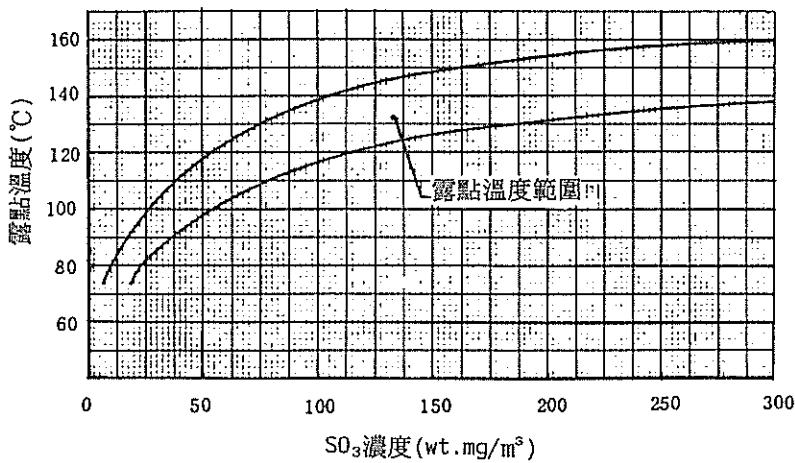


圖 4.60 鍋爐排氣的  $\text{SO}_3$  濃度的露點溫度

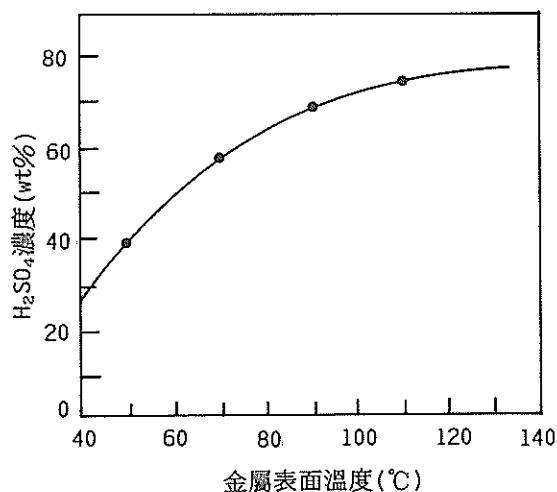


圖 4.61 金屬表面溫度與  $\text{H}_2\text{SO}_4$  凝縮溫度

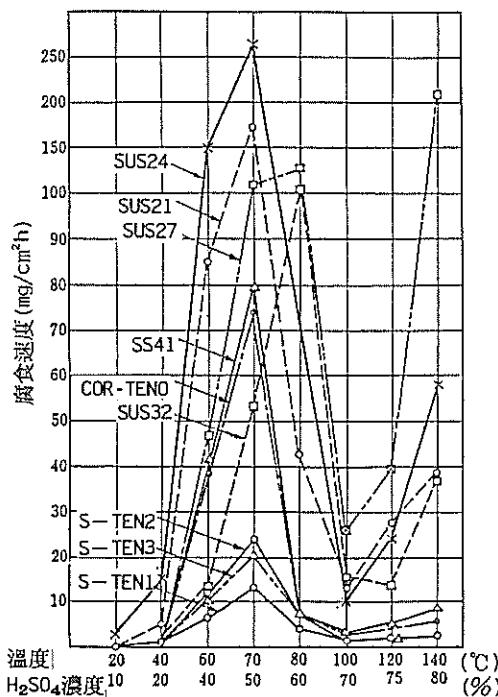


圖 4.62 硫酸一水系氣液平衡狀態下，不同金屬材料腐蝕試驗結果

[附註] 耐硫酸性試驗供試材成分

鋼種	化學成份(%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Sb	其他
SUS 21 (13% Cr)	0.102	0.38	0.46	0.019	0.012	0.12	0.19	12.53	—	—
SUS 24 (18% Cr)	0.067	0.51	0.34	0.041	0.006	0.11	0.27	17.29	—	—
SUS 27(18% Cr-8% Ni)	0.081	0.58	1.42	0.029	0.008	0.20	9.21	18.56	—	—
SUS 32(18Cr-12Ni-2Mo)	0.119	0.68	1.62	0.03	0.008	0.24	11.72	17.05	—	Mo 2.2
SS-41	0.16	0.03	0.23	0.008	0.013	0.08	—	—	—	—
S-TEN 1	0.086	0.35	0.42	0.019	0.022	0.34	—	—	0.098	—
S-TEN 2	0.10	0.21	0.75	0.014	0.012	0.36	—	0.63	—	Ti 0.04
S-TEN 3	0.08	0.33	0.63	0.008	0.005	0.30	—	0.88	0.06	—
COR-TEN0	0.09	0.46	0.38	0.11	0.017	0.32	0.30	0.52	—	—

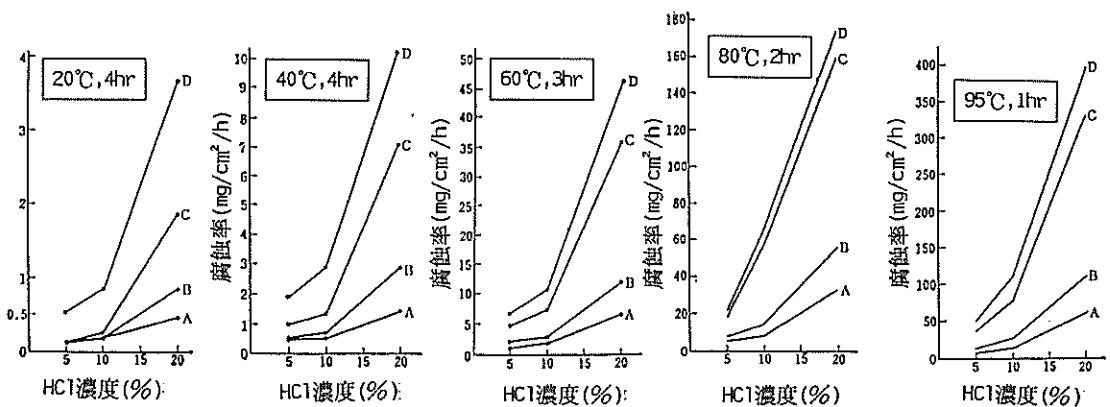


圖 4.63 HCl 液滴於不同溫度下之腐蝕率圖

[附註]耐鹽酸性試驗；供試材成分

試材	厚度 (mm)	化學成份(%)								
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Sb	Ni	Cr
A S-TEN 1	1	0.082	0.42	0.35	0.008	0.008	0.29	0.11	0.45	0.56
B S-TEN 2	1	0.094	0.82	0.35	0.009	0.010	0.29	0.052	—	—
C SS-41	1	0.18	0.03	0.66	0.012	0.011	0.11	—	0.05	0.03
D COR-TENO	3	0.09	0.45	0.31	0.109	0.015	0.30	—	0.37	0.57

## 6. 燃燒機之設計注意要點

在燃燒機之設計方面，應注意之要點有如下幾點：

- (1) 第一燃燒室之燃燒機主要之目的在啓爐點火與維持爐溫之用，第二燃燒室之燃燒機在維持足夠溫度，以破壞未燃之污染氣體。
- (2) 燃燒機之火焰長度不得超過爐長，直接撞擊爐壁，造成耐火材料之破壞。
- (3) 應配備有安全偵測系統，以偵測燃燒機順利點著，避免燃料外洩，當下一次點火時，造成爆炸之危險。
- (4) 廢棄物不得堵塞燃燒機火焰噴出口，造成火焰迴火或熄滅。

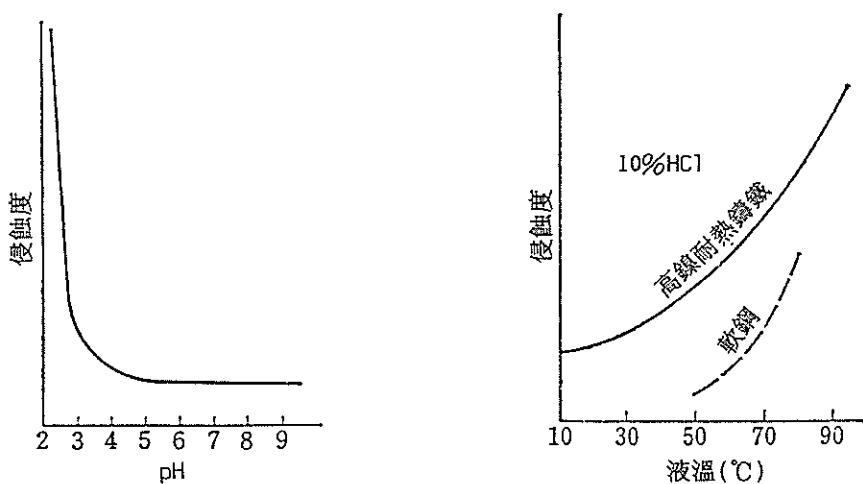


圖 4.64 HCl 腐蝕狀況與溫度狀況圖

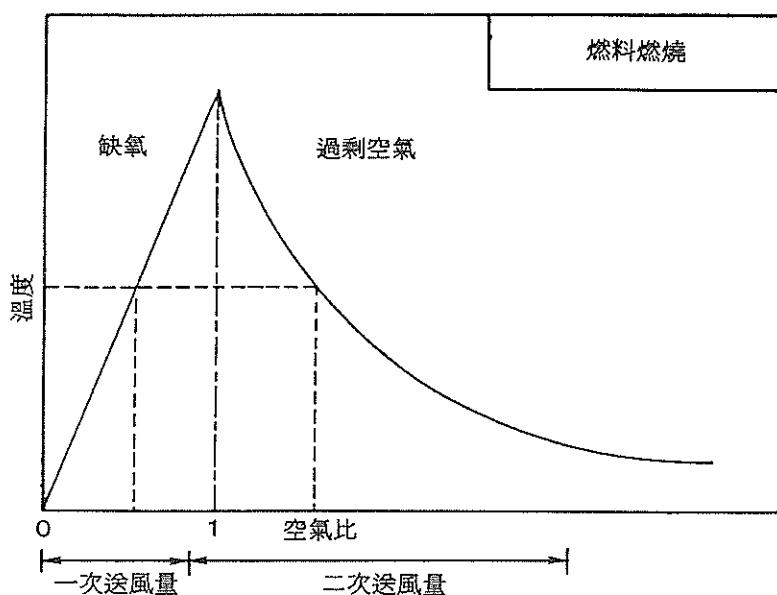


圖 4.65 空氣比與爐溫關係圖

## 7. 廢氣停留時間與爐溫之設計

一般廢氣停留時間與爐溫之設計，應考慮事業廢棄物之特性而定，若為有害性事業廢棄物或穩定性較高之有機性之氯化物之廢棄物，則廢氣停留時間需延長與爐溫應提高。若為易燃性或無害性事業廢棄物，則停留時間與爐溫在設計方面，可酌量降低。

不過一般而言，若要使CO充份破壞之理論值，停留時間在0.5秒以上，爐溫在700°C以上，但任何一座焚化爐不可能充份擾動擴散，或多或少皆有短流(short current)現象。而且未燃之碳顆粒(soot)部份仍會反應成CO，故在操作時，爐溫應維持1,000°C，而停留時間1秒以上為宜，若爐溫昇高時，停留時間可以降低，相對地，爐溫降低時，停留時間需要加長。



## 第五章 焚化爐操作與維護

### 5.1 操作

一般而言，影響焚化爐正常操作之因素，大致可分為設計不良之因素與操作不當之因素，兩者在搭配上缺一不可，其影響之範圍，包括：粒狀污染物排放量過高、一氧化碳排放濃度過高、耐火材料之破壞、金屬材料之腐蝕、機械設備（送風機、燃燒機）之損壞等，而設計因素的影響可參考4.7 節之介紹，以下乃針對操作程序及操作時需要注意之要點分別介紹。

#### 5.1.1 焚化爐之操作注意要點

以焚化爐之正常操作程序，不但要維持最佳之燃燒效率，並遵循正確之操作步驟，以使焚化爐有效率之運轉，以下乃針對焚化爐基本操作步驟與影響燃燒效率之因素各別探討之。

##### 1. 焚化爐基本操作步驟

就焚化爐之基本操作步驟而言（可參考圖5.1 所示），在焚化爐啓爐之前，必須先檢查各相關附屬設備有無異常，若有異常應立即排除，才可啓爐操作。在啓爐步驟中，應先啟動送風機，並打開全部的閥門、爐門、煙道，使其充分通風，並排除爐內剩餘之燃燒氣體，換氣時間約需數分鐘以上。

隨之燃燒點火啟動時，則燃油泵（燃燒器馬達）起動→送風機起動→點火用燃燒器或點火棒著火→主燃燒器著火之進行程序控制，自動著火；若裝置UV偵測器或火焰桿時，未正常著火時，會發生不著火警報，立即停止，只送風機在規定時間內旋轉，進行沖洗爐內之可燃氣，防止下一次點火時，因爐內充滿可燃氣，而發生爆炸之危險。若未裝置UV偵測器或火焰桿裝置時，應慎防火焰未正常點燃或熄火現象出現，若有異常時，必須維持送風機之運轉，待爐內可燃氣體完全排除後，才可進行下一次點火。

而後針對耐火材料式之焚化爐，必須進行烘爐程序，烘爐時必須先維持爐溫在 200°C左右，排出耐火材料上附著之水份，待水份完全排出耐火材料表面之後，才可開昇溫至正常之操作溫度，再開始進料。若水冷牆式焚化爐之操作方式較為容易，開爐後即可操作但需要注意水夾套內之水位是否正常，否則金屬壁面會因過熱而損壞。

於焚化完畢停止進料時，應維持送風狀態，以排除爐內之酸性氣體，避免造成爐內酸氣滯留，待爐溫降低至 100°C左右時，酸氣凝結成液滴，造成低溫腐蝕現象。

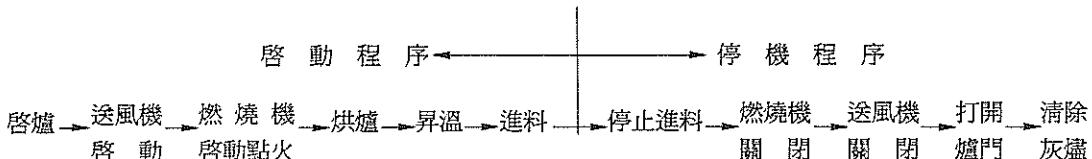


圖5.1 焚化爐基本操作步驟與程序

最後確定爐內氣體充份排出之後，再關閉送風機，打開爐門，充份與外界空氣通風，待爐內溫度充份降低後，清除爐內灰燼，即告完成。

### 5.1.2 影響焚化爐燃燒效率之因素

在焚化爐污染物之操作過程中，常遭遇之問題，包括粒狀物排放濃度過高，一氧化碳排放濃度過高與進料瞬間燃燒室熱負荷過大，易產生黑煙等問題，綜合上述問題，歸納成以下幾點影響焚化爐燃燒效率之因素：

#### 1. 爐溫與廢氣停留時不足

爐溫與廢氣停留時間不足，可能造成粒狀物濃度與一氧化碳濃度過高，一般二次燃燒室應控制爐溫在 $1,000^{\circ}\text{C}$ ，廢氣停留時間在1秒以上。

#### 2. 送風量過大

送風量過大時，爐溫隨之降低，廢氣停留時縮短，而且容易擾動爐底灰而排出爐外，造成粒狀物濃度與一氧化碳濃度過高之趨勢，一般空氣比約在1.6~2.0左右即可。

#### 3. 廢棄物體積過大，超過爐容積之70%

因廢棄物之體積過大，塞滿爐內容積，而空氣無法與廢棄物充份接觸，造成悶燒，隨之產生黑煙。

#### 4. 爐床下送風過大，造成爐底灰上揚，宜減少爐床下送風比例。

#### 5. 採用開放式人工投料時，由於爐內呈負壓狀態，外面空氣滲入爐內，造成燃燒不穩定，因此容易產生黑煙與一氧化碳。

#### 6. 高分系列之石化廢料產品，易產生瞬間分解，導致進料過程中，易產生熱負荷過大，因而產生黑煙，宜採用連續進料方式為宜。

#### 7. 廢棄物進料量過大，氧氣不足而且燃燒室熱負荷過大，因而產生黑煙。

## 5.2 維護

焚化爐是屬於高價之設備，其維護及操作是屬重要之工作。如維護及操作不當將使焚化爐蒙受損害，並且使檢修費用增加。同樣重要的是對各種設備要有定

期檢修之計畫，並按期執行。檢修所需要之備品(spare part)對供給商及存貨量皆應有詳盡之安排，應研究備品可否能自行製造，因備品或零件之價格往往超出原價數倍以上。

因此焚化爐之定期檢查與維護乃不可或缺之工作，以下乃針對定期檢查與維護工作介紹之。

## 1. 定期檢查工作

定期檢查工作項目，包括：送風機、燃燒機、耐火材料、管線系統…等。

送風機方面，於啓爐開動送風機時，必須先確定送風機運轉是否順暢或異常聲音，若有異常狀況時，先確定是否有異物阻塞送風機入口、葉片是否嚴重磨蝕，或阻塞管線系統，若不是時，應委託送風機維修商拆卸檢查，找出故障原因再送風運轉。

燃燒機方面，應由窺視孔中，得知火焰是否穩定燃燒，若有異常應檢查油預熱器溫度、送風裝置、油泵、燃燒器錐(burner cone)的形狀、擴散器(diffuser)、燃燒器噴嘴、濾油器…等，並定期作好檢查保養工作。

耐火材料方面，應檢查耐火材料是否有脫落或損壞狀況，若不易由外觀察得到之處，可利用表面溫度計，檢查外層鋼材之溫度是否過高，若過高時，表示耐火材料已有脫落或損壞現象，應立即修補，以免造成損壞處日益擴大。

管線系統方面，應定期檢查管線是否有壓損增大或風量降低之現象，若是有，則表示管線已有阻塞，並找出阻塞之處，加以排除。並時常檢查閥門開關是否正常，是否銹蝕而卡住開關，若有損壞應立即更換。除此之外水冷牆式焚化爐外層之水夾套水位是否正常，若水位不正常時，表示進水口可能阻塞、水夾套層銹蝕漏水或自動液位偵測器損壞…等因素，應立即修護。

儀錶系統方面，應定期觀察偵測讀值是否異常，若有異常應立即更換或維修。並定期拆卸檢修、清洗與校正，使其正常運作。

## 2. 焚化爐之維護

以焚化爐之維護項目，主要包括耐火材料之維護、爐床及爐壁之維護、送風機維護與儀錶之維護等。

### (1) 耐火材料之維護

常見之模具式焚化爐耐火材料之分類，大致可分為耐火磚式、可鑄性耐火水泥式與水牆式三種，耐火磚式焚化爐之外殼是由碳鋼(carbon steel)，最外層是耐火棉(kenwool)或是斷熱磚，最內層是由耐火磚(refractory brick)砌成。可鑄性耐火水泥式焚化爐體，是利用可鑄性耐火水泥與鋼外殼合成，並附錨釘固定，作為支撐。水牆式是利用鋼外殼打造，利用外層水夾套傳熱，降低鋼材表面溫度。

一般耐火磚式焚化爐，爐體外層之耐火磚，不能承受過度之溫度變化，易產生內應力而龜裂(cracking)，嚴重時則產生濺裂(spalling)。但耐火磚式焚化爐之優點是耐磨蝕。而耐火水泥式焚化爐，因內層全部是由可鑄性耐火水泥(castable cement)，較不能耐磨蝕，較易受粉塵或廢棄物磨損，而且錨釘表面溫度高，易受酸氣高溫或低溫腐蝕，而失去固定支撐之功能，最後造成耐火水泥崩塌，但其優點可現場鑄造，施工修補容易，除此之外，與耐火磚式焚化爐相似溫度變化不能太劇烈，否則仍會產生濺裂(spalling)現象。水牆式焚化爐之特點可不受溫差劇烈變化之破壞，但其缺點是易受高溫或低溫腐蝕。

在維護方面，應注意以下幾點：

- 耐火材料式焚化爐啓溫爐時，溫度不能變化太大，加熱速率最好不要超過 $150^{\circ}\text{C/hr}$ 。
- 為避免低溫腐蝕現象，於關爐前，應使送風機維持運轉30~60分鐘，充份排出爐內酸氣。
- 爐內局部溫度不得超過耐火材料之使用溫度，一般氧化鋁質耐火材料之使用溫度約是軟化溫度減 $200^{\circ}\text{C}$ 左右。

#### (2)爐床及爐壁之維護

在焚化爐中，爐床及爐壁部份易受到廢棄物中含低融點物質之黏結，易使爐床活動機構運轉不良，並且造成爐床及爐壁之局部過熱現象(hot spot)，嚴重時將損害爐床及爐壁之耐火材料以及金屬製成之爐格(grate)部份。一旦發現爐床及爐壁有大塊不燃物質之黏結，當須立即停工，以人工加以清除。

#### (3)送風機之維護

排氣送風機是維持爐中正常燃燒以及控制爐中溫度之主要設備。排氣送風機之底座須保持固定，以儘量減少送風機軸之震動。傳動馬達機軸及送風機軸之軸承(bearing)須保持滑潤，若有磨損須立即更換，並裝有機軸溫度指示計，機軸溫度不得超過 $80^{\circ}\text{C}$ ( $180^{\circ}\text{F}$ )。

#### (4)儀錶之維護

焚化爐中主要之儀錶控制設備，計有溫度之測定及控制、壓力之測定及控制、流速之測定及控制以及水位之測定及控制等。這些儀錶應經常換修及校正。如熱電偶保護管(thermocouple well)須經常清除管外之積灰以及檢修管壁受腐蝕之部份及侵蝕造成之穿孔。

#### (5)故障排除

綜合上述，可參考表5.1及5.2之間題與對策。

表5.1 焚化爐操作維護注意事項

現象	問題	改善對策		備註
		設計部份	操作部份	
粒狀物排放量過高	爐溫與停留時間不足	增加二次燃燒室之內容積與操作溫度。(一般以1,000°C, 停留時間1sec為宜)	增加二次燃燒室之操作溫度，或減少進料量並同時降低送風量	
	氣流短流現象嚴重	改變送風機之送風入口角度或位置，最好與氣流方向垂直。或增加擾流擋板或分隔壁		
	送風量過大，導致停留時間不足爐溫低之現象		減少送風量，控制含氧量在6~12%之間	
	爐床下送風量過大，導致底灰上揚	加裝集塵效率較高之集塵設備，一般加設式旋風集塵機，切線速度在20m/sec以上為宜	減少爐床下送風量	
	廢棄物進料量過大	增加二次燃燒室之操作溫度	減少廢棄物進料量	
	廢棄物進料體積過大，超過內容積之70%以上		應先將廢棄物破碎，減少鬆密度(bulk density)增加廢棄物與空氣接觸面積	
	送風不均勻，導致無法穩定燃燒	改善送風系統，採多點定量送風方式	燃燒過程中，爐門應緊閉，以減少外界空氣滲入	
	送風量不足		增加送風量，控制含氧量在6~12%	
	廢棄物燃分解速率過快，瞬間燃燒瞬間負荷大	採連續式進料系統	增加進料次數，並減少每次進料量	
	旋風集塵機切線入口速度過小，無法有效集塵	加裝誘引風扇，提高旋風集塵機入口切線速度至20m/sec以上，以有效集塵		
進料過程中容易冒黑煙	瞬間熱負荷過大，瞬間不完全燃燒，產生黑煙	採連續進料系統	增加二次燃燒室溫度，並增加批進料頻率，以減少每次進料量	
水洗設備後易產生白煙	水洗設備後排氣溫度過低，產生物白煙現象	在煙囪部，增加燃燒器或加熱器，再加溫至150°C以上	減少水洗設備之水量	
一氧化碳排放濃度超過法定標準	燃燒溫度不足與停留時間不足	增加二次燃燒室之容積	增加二次燃燒之操作溫度。並於第一燃燒室內加入100°C以上之霧化水蒸氣	
	氧氣含量不足		增加空氣供應量或於第一燃燒室內加入100°C以上霧化水蒸氣	
	氣流短流現象導致不完全燃燒氣流排出	採多點分階段式送風。可改善短流現象。增加擾流擋板，增加廢氣停留時間		
	廢棄物中含有穩定性高之有機氯化合物，容易產生CO	增加二次燃燒室容積與爐溫	增加二次燃燒室溫度	
	廢棄物進料量過大	同粒狀物項目	同粒狀物項目	
	廢棄物進料體積過大超過內容積之70%以上	同粒狀物項目	同粒狀物項目	

表5.1 焚化爐操作維護注意事項(續)

現 象	問 題	改 善 對 策		備 註
		設 計 部 份	操 作 部 份	
耐火磚易產生剝落現象	燃燒機火焰直接撞擊耐火壁面	更換燃燒機，採火焰長度短之型式。或採用特高鋁質緻密性耐火磚( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 90\%$ )		
	由於爐內溫度變化劇烈，內應力所產生之剝落現象	採用孔隙率較大之高鋁質耐火材料	啟爐昇溫速度不宜太快，每小時不宜超過150°C，最好使焚化爐24小時連續操作	
	由於廢棄物中水份直接濺溫爐床，使得爐床耐火材料溫度劇變	採用氣冷式金屬性爐條，而不使用陶瓷性耐火爐條	廢棄物進料時，應先破碎、擠壓以去除廢棄物中之自由水分子	
	由於低溫腐蝕破壞耐火材料		於關爐之前，多使送風機運轉30~60分鐘，排出爐內氣體，避免產生低溫酸氣	
	高溫碳顆粒與高鋁材質耐火材料起反應而產生剝落	不宜採用氧化鋁含太高之耐火材料		
耐火材料崩塌	施工不良，導致錨釘與耐火水泥脫離而崩塌	施工改良		
	因低溫酸氣腐蝕而造成錨釘銹蝕，耐火水泥崩塌	使用耐酸性金屬錨固釘	於關爐前，先使送風機運轉30~60分鐘，排出爐內酸氣，避免產生低溫腐蝕	
	高溫酸氣腐蝕，而造成錨釘銹蝕，而崩塌	使用耐酸性金屬錨固釘	避免錨固釘表面溫度高於400°C，以避免高溫腐蝕	
第一燃燒室 爐溫過高	過氧燃燒式焚化爐，送風量過少或進料量太多		增加送風量或減少進料量	
	缺氧燃燒式焚化爐，送風量過大		減少送風量	
送風機噪音 或異常聲音	發生激變脈動		降低阻抗	
	有異物吸入機內或附著粉塵，造成不平衡運轉現象	加強過濾裝置避免粉塵或異物吸入送風機內	在停機之前，使其運轉30分鐘排出機內粉塵	
	集輪磨蝕，乃是粉塵撞集輪所致	選擇集葉送風機藉由離心力排出粉塵		
	軸承損壞或不對心		軸承調整或更換	
送風量不足	入口堵塞		管線清除	
	三角皮帶輪轉速比錯誤或三角皮帶張力不足		三角皮帶或轉輪更換	

表5.2 油燃燒器故障原因與對策

故 障	原 因	對 策
無法點燃	無油	點火時確認重油流出
	管線內積存水份和淤渣致粘度過大	應裝設過濾器，油管與油槽應定期排放積水與淤泥
	引火點（閃火點）過高	採用點火燃燒器點燃重油
	燃燒器火口積堵	停爐時應清洗其燃燒器，點火時確認重油流出
	燃料加熱不足	依燃燒器所需粘度加熱，使易於霧化，並增高霧化壓力
	空氣量不足	確認通風門開啓或管路阻塞
	一次空氣壓力與流量過大	噴霧空氣與油粒之密度需合適
火焰明滅 不穩定	油中含有淤渣，水與其他雜物	裝設過濾器，油管與油槽定期排放
	油之粘度過高	增高加熱溫度與噴霧壓力
	燃燒器口孔過大	適當設計喉部火磚與利用其輻射熱
	空氣與重油壓力不穩定	安裝適當之減壓閥與釋壓閥
	油泵輸出油量不足	加大油泵容量，緊閉回流閥
	一次空氣壓力與流量過大	調節適當之一次空氣壓力與流量
	油管中殘留空氣	由油管高處通氣閥排出空氣
噴射霧化 與燃燒不 良	油之粘度太高	增高加熱溫度，增高一次空氣壓力
	燃料預熱溫度不足	提高油溫，使噴霧粒子微細化
	噴射或油壓過大或不足	保持燃燒器噴口原有尺寸與位置
	空氣不足	依通風力設計適當之空氣導入孔
	排氣口面積不足	依燃燒量檢討排氣量與通風力
燃料耗費 過大	重油過輕	容積較大且熱量不足，應適當調整加熱溫度
	重油發熱量降低	使用合適油料
	油中含有水分、雜物與空氣等	安裝油加熱器與過濾器，且調節適當之空氣量
	燃燒口過大	預防過剩空氣太多
	油加熱溫度過低	依重油性質，調整加熱溫度
逆火	閃火點（引火點）過低	更換合適燃燒器
	水與雜物	加裝過濾網，排放閥與通氣閥
	油壓過大（高）	注意油滴大小與噴出速度
	一次空氣壓力不足	絕對禁止未燃油滴噴出
	排氣孔（口）閉塞	開啓風門，確認其通風力
	油管中含有空氣	設計空氣排放處

表5.2 油燃燒器故障原因與對策(續)

故 障	原 因	對 策
燃燒器口 積聚碳渣	油粘度過大	儘量使噴霧油滴微細化
	噴射不良	使用適當之一次空氣
	油壓過大	使用合適噴霧壓力
	加熱溫度過高	依蒸汽母／油量調節
	油不安定性	釋壓閥保持一定壓力。依油粘度決定加熱溫度，注意油泵有無故障
	空氣量不足	增加一次送風量，並防止二次空氣於燃燒口產生渦流
	滅火後，燃燒器間漏油	熄火前應將燃燒器內殘油吹除燒盡
	油中含碳量高	增加一次空氣壓力與風量，且有足夠之吸引通風
	噴霧不均勻	注意噴嘴有無積碳或損傷
噴火口安裝不良		燃燒器應在其中心線上；且伸入長度亦需適當
爐壁積碳	油滴直接噴上	燃燒器噴射角度改狹，增大燃燒室寬度
	粘度過大	增高加熱溫度與一次空氣壓力
	粘度過小	降低噴射速度，降低加熱溫度
	油壓過高	一次空氣壓力與風量，未與油量配合而產生未燃物
	爐膛溫度過低	避免急速大量燃燒
	爐膛寬度狹小	設計時燃燒量與燃燒器之噴射角度應配合
燃燒器火 口堵塞	淤泥與異雜物	適當加熱溫度，完好過濾裝置
	火口積碳	停爐熄火時應清洗
排氣冒煙	灰分量過多	增加通風將其高溫燃燒
	燃燒不良	需適當完全之霧化
	油中之重質分	增高二次空氣將其高溫燃燒
	空氣量不足	增高空氣流量，減短火焰長度
	燃燒量過大	注意燃燒室熱負荷與油量之關係
	通風不良	加大排氣孔面積，增高通風力
過濾器堵 塞	淤泥、鐵分與異雜物等，粘度太高 ，加熱溫度太低	依重油性狀，採用合適過濾裝置
	管線堵塞	增大管線口徑，降低阻力，設置過濾裝置與保溫等
油泵無法 吸取		油溫過低，粘度過大，管線過濾器堵塞，吸取管洩漏， 油溫過高，油泵轉動皮帶滑動，淤泥
	混入水分	空氣中水分凝結，加熱管洩漏，油槽頂破漏，雨水混入
腐蝕		灰分中成分，油中之硫分與鹽水
火磚變色		硫分，鐵分，與其他灰分
異臭		預熱溫度過高，硫分，其他異雜物混入

## 參考文獻

- 1.North American Mfg Co., North American Combustion Handbook Vol I,1986.
- 2.Walter R. Niessen, Combustion and Incineration Processes, Marcel Dekker, INC., 1978.
- 3.Richard c.Flagan & John H, Seinfeld, Fundamentals of Air Pollution Engineering, Prentice - Hall, Inc., 1986.
- 4.D.J. Hucknall, Chemistry of Hydrocarbon Combustion, J. W. Arrowsmith Ltd, Bristol, 1985.
- 5.Joseph T, Zung, Evaporation -Combustion of Fuel, American Chemical Society, 1978.
- 6.大藤恆久著，廢棄物燒卻爐一計劃與設計，明現社株式會社，1982。
- 7.經濟部能源委員會編印，節約能源技術手冊；中華民國72年10月。
- 8.張一岑著，有害廢棄物焚化技術，聯經出版社；中華民國80年 6月。
- 9.工業污染防治技術服務團，事業廢棄物焚化爐操作維護管理研討會議議；中華民國82年 4月。
- 10謝錦松、黃正義編著，固體廢棄物處理，淑馨出版社，中華民國79年 4月。
- 11日本燃燒器研究學會編著（賴耿陽澤著），瓦斯燃燒裝置實務，復漢出版社，中華民國79年 4月。
- 12陳文能、黃秉鈞編著，汽電共生系統一理論與實務，聯經出版社；中華民國77年12月。
- 13經濟部工業局；事業廢棄物專業技術人員講訓班，朱正先教授著；焚化爐設計及操作維護管理；中華民國80年4月。
- 14依日光譯著，實用流體機械，復漢出版社印行；中華民國77年3月。
- 15林昭仁編著，流體機械，全華出版社印行；中華民國76年10月。
- 16賴耿陽譯著，實用鍋爐學，復漢出版社印行，中華民國79年2月。
- 17經濟部工業局，事業廢棄物專業技術人員講訓班，楊萬發教授著；事業廢棄物抽樣及檢驗技術；中華民國80年 4月。
- 18工業污染防治技術服務團，送風機之應用與操作維護講習班；王展南著，送風機之應用與操作維護；中華民國82年 3月。
- 19經濟部工業局，焚化技術進階課程訓練班講義，江彥雄著，焚化爐之進料系統，一次爐、二次爐設計、耐火磚選擇、灰爐清理；中華民國82年 3月。
- 20潘德華編著，耐火材料學，新文豐出版公司印行；中華民國80年 3月。
- 21經濟部工業局，焚化技術進階課程訓練班講義，黃自立著，焚化裝著之煙囪設

；中華民國82年 3月。

22經濟部工業局，事業廢棄物焚化爐操作維護管理研討會講義，蔡俊鴻教授，焚化爐之空氣污染防治設備設計；中華民國82年 4月。

23三石不成形耐火材料產品型錄－三石礦棉工業股份有限公司。

## 附錄一、可鑄性耐火水泥施工提要<sup>23</sup>

### 1. 預備

- 勿用附有水泥殘渣或其他油污物的攪拌槽、混合機(mixer)，並注意不會漏水的乾淨容器。
- 攪拌用水一定使用可飲用的水質，且最適用的水溫是10~20°C，水溫會影響鑄性火泥的日後強度，故先測水溫是為一項重要措施。
- 鑄性火泥的性質由使用水量的關係會發生顯著的差異，因此在事先必須參閱有關產品說明書以確認規定水量。又水量均以重量百分比計算。

### 2. 攪拌

- 先把鑄性火泥投進混合機或攪拌槽後，注入2/3的規定水量予攪拌一下，再將剩餘水量注入（即1/3的規定水量）給與充分攪拌。注意在加水時勿以一次就注入過多分量。
- 攪拌時間概以4-7分鐘為最合宜。如經過十分鐘以上的攪拌，攪料可能會起異常的膨脹，終使施工物會發生龜裂或構成多孔體，而顯著地削弱強度。
- 每一次的施工分量要在30分鐘內能用完的程度為宜，因經攪拌的攪料，如時間過久便會開始硬化，此時不但施工會有困難，也會使強度下降。
- 於攪拌作業中，勿將攪拌在半途放置或中止作業，攪拌分量、水量和時間，在同一作業中要維持施行同一條件，但攪拌水量有必要時是可以調整的。

### 3. 灌鑄

- 灌鑄的時候，為防止構造體內部發生氣孔，使用本棒（直徑約30~40mm）將攪料搗實，或使用震動機(vibrator)震動使之成為密度平均的構造體。但勿用重量的鐵槌(air-rammer)給予過度的震動，這會使火泥粒間組織分離強度下降，尤其是輕量鑄性火泥不予以震動反而能得到良好效果。
- Castable開始硬化時間是在攪拌後20~30分鐘，在此時間如給震動，將會妨害正要硬化的構造體。
- 在連接保溫物或火磚等易吸收水分的材料施工時，為防止攪料(castable)水分被吸收，應以防水紙或塑膠布類掩覆其表面，請注意，如果防水不全結合水量被吸去，構造體便會變成鬆軟。
- 寬大面積的施工，要予劃分1.0~1.5m<sup>2</sup>的範圍，並將規定的劃區構造體一次灌成為要。於作業中必要中止時，將已完成的施工物表面削成組紋狀使易銜接上一層之用。如續再作業時表面（銜接面）必予濕水。

- 切勿使用掉落地面或經過30分鐘以上的攬料，或削整厚度後的廢料。

#### 4. 塗裝作業

- 從底面約以施工厚度2/3的位置安裝鐵板網(expauded metal lath)，在塗抹攬料時，為防止內部形成氣孔，所以要細心地平均填塞，並將所規定厚度一次塗成，一旦經硬化的表面如再予補厚時遇熱會鼓脹或剝落。

#### 5. 噴漿

- 鑄性火泥Castable的噴漿，可用水泥噴漿機施工。整套的組成是噴嘴、拌合槽以及空氣壓縮機等。範圍廣大的施工最能發揮其作業功能，因其速度快、強度好密度又大等好處，但用量稍會增加。
- 噴漿厚度務必將設計厚度一次完成，例如100mm厚度如分二次施噴，恐會從相合處剝離，希避免為宜。

#### 6. 伸縮節縫

- Castable構造物的熱脹係數甚微，但必要按構造物大小或材質之如何而定，小形構造物也許不要，或僅設在角隅；幅度寬闊、厚度又大的大形構造物，必要設伸縮調節縫，藉以調和熱變化時防止毛病發生。
- 伸縮節縫的採設是從Castable壁面的水平、垂直各方向劃設 $1.0\text{m}^2$ 之區面，但劃線切勿交叉成十字形，要以錯開方式劃設為正確。伸縮節縫的深度不得超過支撐鈎釘(anchor support)的上端，此點要注意。

#### 7. 養強

- Castable構造物也和普通混凝土一樣要予噴水養強。施工經過3~5小時後就漸漸發生硬化而生出水和熱，為防止所含水分被蒸發過度，可使用棉布、PE布或紙張覆蓋表面，並每隔適度時間噴水一次，使構造物在24小時範圍內常保持濕潤狀態。
- 當水和熱開始消失時即停止噴水。輕量性Castable不要過度噴水，這點施工負責人要注意。

#### 8. 模型

- 模型材質概用木板或金屬板二種。木板易吸收水分，故內部要塗礦油、牛油(grease)或張貼油紙以防攬料水分被吸去，又金屬板同樣要塗牛油使易離模。
- 模型材料要能夠支撐Castable的重量與壓力，並要加強其構造力以防萬一。無論那一種模型，其接縫處必須緊密不漏水，尺寸要正確並具安全性。
- 拆模是在Castable施工後經過12小時就可以施行，於拆模時對施工物應避免強力的擊動。在拆模之前，再確認全體施工物是否已硬化。

## 9. 補強器材

- 使用補強器材支撐不成形耐火構造物，是一項不可或缺的重要措施。普通Castable用補強釘如熱面溫度在1,300°C以下者即用耐熱鋼，1,300°C以上高溫要用與耐火構造物同等材質的火磚anchor。
- 安裝補強器以錯開方式布設為宜，其間隔(pitch)概以300~500mm，又其埋沒在施工體內的深度約其厚度的2/3。補強器材種類及用法分別如下：

表1.1 補強器材分類表

溫度使用範圍	補強器材質料
500°C以下	SS-SC
500~650°C	13Cr-(不銹鋼420)
650~850°C	18Cr-8Ni(不銹鋼304)
850~1,000°C	25Cr-12Ni(不銹鋼310S)
1,000~1,300°C	25Cr-20Ni(耐熱合金)
1,300°C以上	高鋁質火黏土鈎磚

[註] 金屬類補強器材使用時必須包紮柏油紙或塗抹瀝青，以緩和兩者異質間的膨脹差，以防耐火構造物發生龜裂

## 10. 烘乾及燒固

- (1) 自然乾燥：拆模後的構造物隨即可以烘乾，但最好任其自然乾燥一段時間，時間越長脫水情形越好。自然乾燥的時間大略如下：
  - ① 施工厚度50mm時，自拆模後放置24小時以上。
  - ② 施工厚度每增加25mm，乾燥時間也隨之增加12小時以上。
- (2) 加熱乾燥：為使水分慢慢散發，昇溫以25~50°C/hr的速度逐漸提高至100°C時維持多久時間，則視構造物之大小而定。加熱基準時間概如下：
  - ① 施工厚度為50mm要6小時以上。
  - ② 施工厚度每增25mm則隨之增加6小時以上。至於烘乾用燃料概以柴火、木炭、瓦斯(gas)以及柴油類等。
- (3) 點火燒固：構造物的水分如完全消散後，即可點火燒固。加熱速度1hr以25°C~50°C繼續至600°C，但在100°C與300°C時必須暫保持數小時（視構造物大小而定），繼而漸次昇熱到操作溫度而給予有效的燒固，以此完成此項工程。

## 11儲備

Castable的包裝均用防濕紙包。在儲藏期間如不妥善保管仍會吸濕而有變質之可能，倘如儲藏得妥，自出廠日起四個月以內尚可使用。儲備最好場所是陰涼乾燥空氣不流通的地方。

## 附錄二 耐火材料性質<sup>7</sup>

表2.1 各種耐火磚之特性及主要用途

耐 火 磚 類 別	特    性
高鋁質耐火磚 (High-Alumina Bricks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 耐火度及荷重軟化溫度高</li> <li>• 耐侵蝕及剝落抵抗力強</li> <li>• 密度高，抗機械磨損性強</li> </ul>
黏土質耐火磚 (Fire-Clay Brick)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 熱間線膨脹率低</li> <li>• 热傳導率低</li> <li>• 性質廣且能依特殊要求強化之</li> <li>• 高溫時，耐壓強度低</li> </ul>
鎂磚 (Magnesia Bricks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 耐火度及荷重軟化溫度高</li> <li>• 在熔化金屬或鹼性礦石中抗侵蝕力強</li> <li>• 密度高</li> <li>• 難耐溫度遽變及水蒸氣</li> </ul>
鎂鉻磚 (Magnesite-Chrome Bricks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 具上述鎂磚(前三項)之特性</li> <li>• 耐溫度遽變性強</li> </ul>
鎔鎂磚 (Chrome-Magnesite Bricks)	
矽磚 (Silica Bricks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氧化鋁(<math>Al_2O_3</math>)含量低</li> <li>• 對高溫時抵抗溶渣侵蝕力強</li> <li>• 孔隙率低，強度高</li> <li>• 荷重軟化溫度高</li> <li>• 剝落抵抗力強</li> <li>• 高溫時膨脹變化小</li> </ul>
耐酸磚 (Acid Resisting Bricks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 瓷質緻密，吸水率小</li> <li>• 耐酸度強</li> <li>• 耐壓強度高</li> </ul>
鵝石質耐火磚 (Pyrophyllite Bricks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 孔隙率低</li> <li>• 在CO的氣體中，具高穩定性</li> </ul>
鋯磚 (Zirconium Bricks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 耐火度高</li> <li>• 密度高</li> <li>• 耐侵蝕性強</li> <li>• 耐溫度遽變性強</li> </ul>

表2.2 主要耐火磚之性質

性質	種類 耐火磚 (1種)	黏土質	砂 磚	高鋁質	鎳 磚 (1種1級)	鎔 鎳 磚	白雲石磚	
		耐火磚 (1種)	(1種)	耐火磚 (1種)		白雲石	安定石 白雲石	
化學 成 分 %	SiO <sub>2</sub>	50~70	>95	10~40	5~10	2~6	<7.0	3.6 13.0
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20~45	<0.7	>70	15~25	1~3	12~25	1.2 1.1
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5~3.5	<2.0	1~3	10~20	1~5	5~15	2.0 3.9
	TiO <sub>2</sub>	±1	—	1~3	—	—	—	—
	CaO	0.5~1.0	3~5	<1	0~3	1~3	0~3	32.6 35.1
	MgO				15~23	>85	>30	54.3 47.0
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	>27	—	15~30	—
耐火度 塞格維號碼		>34	>32	—	—	—	—	—
孔隙率(%)		>24	<20	—	<25	<26	<25	7.5 22
比重		<2.35 2.0	>2.8	>2.90	>2.70	>2.90	3.1	3.3
耐壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )							2.9	2.6
荷重軟化點 T <sub>2</sub> (°C)		>1,350	1,580	—	>1,450	>1,450	>1,500	T <sub>1</sub> 1580 1700
殘存線膨脹 收縮率(%)	+0.1~+0.5 (1,400°C)	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —

[註] 1kgf/cm<sup>2</sup>=0.098MPa

表2.3 不同耐火磚間之反應溫度

單位：°C

種類	砂 磚		火黏土耐火磚		高鋁磚		鎔 磚		鎂 磚	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
砂 磚 (Silica)	—	—	1500	*	1600	*	不反應		1500	1600
火黏土耐火磚 (Fireclay)	1500	*	—	—	不反應		1600	*	1400	1500
高鋁磚 (High Alumina)	1600	*	不反應		—	—	1600	*	1500	*
鎔 磚 (Chrome)	不反應		1600	*	1600	1600	—	—	不反應	
鎂 磚 (Magnesite)	1500	1600	1400	1500	1500	*	不反應		—	—

[註] A:開始反應之溫度

B:反應後開始損毀之溫度

\*:不損毀

表2.4 耐火斷熱磚之規格  
(JIS R2611)

物性 編號 類別		再加熱收縮率 不超過 2%溫度 (°C)	比 重	耐壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	熱 傳 導 率 (平均溫度350±10°C) (kcal/m·hr·°C)
A類	1	900	<0.50	>5	<0.13
	2	1000	0.50	5	0.14
	3	1100	0.50	5	0.15
	4	1200	0.55	8	0.16
	5	1300	0.60	8	0.17
	6	1400	0.70	10	0.20
	7	1500	0.75	10	0.22
B類	1	900	0.70	25	0.17
	2	1000	0.70	25	0.18
	3	1100	0.75	25	0.20
	4	1200	0.80	25	0.22
	5	1300	0.80	25	0.23
	6	1400	0.90	30	0.27
	7	1500	1.00	30	0.31
C類	1	1300	1.10	50	0.30
	2	1400	1.20	70	0.38
	3	1500	1.25	100	5.45

[註] 1kgf/cm<sup>2</sup>=0.098MPa ; 1MPa=1N/mm<sup>2</sup>

表2.5 耐火斷熱材料的種類及特性

種 類	比 重 (t/m <sup>3</sup> )	比 热 (kcal/m <sup>3</sup> ·°C)	熱 傳 導 率 (kcal/m·hr·°C)	安全使用溫度 (°C)
耐 火 磚 (SK32)	2.0~2.5	520~650	0.9~1.4	1300
耐 火 磚 (SK34)	2.1~2.4	550~620	0.8~1.1	1300
可 塑 性 耐 火 物 (SK32)	1.9~2.3	330~500	0.6~1.4	1300
耐 火 · 斷 热 磚 (B5)	0.7~0.8	160~200	0.2~0.4	1110
耐 火 · 斷 热 磚 (B1)	0.6~0.7	140~160	0.1~0.2	700
耐火·斷熱可鑄性耐火磚	1.0~1.3	240~300	0.2~0.4	1100
陶 磁 織 維	0.06~0.3	20~80	0.05~0.3	1100

表2.6 陶瓷纖維之性質

性質類別	A 公司 製 品		B 公司 製 品		C 公司 製 品		D 公司 製 品		E 公司 製 品	
	低溫用	標準品	高溫用	標準品	高溫用	短纖維	長纖維	高溫用纖維	長纖維	高溫用纖維
化學組成	SiO <sub>2</sub>	47.9	47.9	35.68	49.3	38.7	48	50	38	45~46
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49.1	51.8	64.12	50.1	60.2	52	45	62	52~53
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	0.1	0.02	0.1	0.2	—	—	—	0.1~0.15
學	TiO <sub>2</sub>	0.1	tr	—	0.1	0.2	—	—	—	0.1~0.15
	MgO	0.3	tr	—	tr	0.1	—	—	—	tr
組	CaO	0.3	tr	—	0.1	0.1	—	—	—	tr
	Na <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O	0.9	0.2	0.04	R <sub>2</sub> O	0.3	0.4	—	0.2
成	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	0.3
	ZrO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	tr
色調	白	白	白	白	白	白	白	白	白	白
纖維長 (mm)	250max	250max	200max	250max	平均	75	< 80	80~250	80	5~30
纖維徑 ( $\mu$ m)	5	2.6~3.0	2.6~3.0	2.8	2.9	3	6~15	3	3	30~80
比 重	2.70	2.73	—	2.56	3.10	—	—	—	—	2.5~3.0
粒子含有率 (+32mesh%)	< 8	< 3	< 3	65M	8	65M	10	—	—	—
使用溫度(°C)	< 1,100	< 1,300	< 1,500	1,260	1,400	1,260	1,260	1,430	1,260	1,260
熔融溫度(°C)	1,700	> 1,760	—	1,760	1,825	1,760	1,760	1,930	1,800	1,760
抗張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	—	—	—	133.6	—	—	—	—	80~100	—

### 附錄三 各種量測設備之種類及其特性<sup>7</sup>

表3.1 溫度計之種類及其特性

種類	常用溫度 (°C)	精確度 (°C)	反應 速率	價格	備註
<u>膨脹式</u>					
酒精溫度計	-76~60	±0.5	差	低廉	由於價格低廉，測低溫時可採用
水銀溫度計	-35~350	±0.5	差	多種	經檢定後，其精確度可達±0.05°C
加壓水銀溫度計	-35~750	±0.5	差	多種	
氣體膨脹溫度計	-100~550	±1.0	差	低廉	可用於距離在10m以內的溫度測定與控制
液體膨脹溫度計	-100~550	±1.0	差	低廉	
汽壓膨脹溫度計	-30~200	±1.0	差	低廉	測定範圍狹小
金屬膨脹溫度計	-70~500	±1.0	差	低廉	簡單的溫度控制多採用此種型式
<u>熱電偶</u>					
PR熱電偶	-50~1,400 (室溫)~1750	±0.3	良好	貴	耐高溫、耐腐蝕、精確度可達±0.05°C
CA熱電偶	-250~1250 (室溫)~1350	±0.3	良好	低廉	耐高溫、耐腐蝕
IC熱電偶	0~750	±0.3	良好	低廉	用於真空及還原氣體中
CC熱電偶	-180~350	±0.3	良好	低廉	線性感度
CPC熱電偶	-250~850	±0.3	良好	低廉	
<u>電阻式</u>					
白金電阻溫度計	-200~1100	±0.001		貴	精確度高
鎳電阻溫度計	-50~300	±0.3		低廉	
銅電阻溫度計	0~120	±0.3		低廉	感度曲線為線性
光學高溫式	800~3,500	±10	差	中等	大部份工業用爐採用此種型式
輻射式	-50以上	±0.5 ~±10	良好	貴	

表3.2 流量計的種類

種類	原理	流量計
體積式流量計	其原理乃把流體分成已知體積的量次，再次其總量次，而求得總量	振擺活塞式，轉動葉輪式，搖盤式，往復式活塞，葉輪式氣體流量計
風車式流速計	設計好之螺旋槳裝設於導管，葉槳轉動隨流速增加而增加	風車流速計，透平流速計
面積式流量計	保持差壓一定，流量與面積成正比	浮子流量計，常量落差計
速度落差式流量計	利用流體之速度落差轉換為壓力落差的原理求出流速	短引伸頸皮托管，長引伸頸皮托管，低壓皮托管
差壓式流率計	係於管線中加一流孔板，流體經此限制後會產生壓力差，由壓力差求出流量	銳氏流率計，文式流率計
渦漩流量計	使流體流經渦漩產生裝置，渦漩頻率與流量成正比，而渦漩使電熱調節器產生微小溫度變化，由此算出流量	渦漩流量計
熱線流速計	將金屬線安裝於欲測之管線中，由電流加熱。當氣體在管中流動，金屬溫度下降，測量時調節電流，使金屬線溫度保持一定，流速愈大，電流愈大	微風計，熱線流速計
超音波式流量計	利用流體流速的變化，使超音波亦產生變化的原理測出流量	超音波流量計
電磁式	利用法拉第電磁誘導的法則，求出流量，但流體必須導電	電磁流量計

表3.3 壓力計的種類及其特性

種類	型式	特徵	準確度範圍	用途
機械式壓力計	巴登管壓力計	測定範圍廣，操作簡單	最小讀數之 1/2 (1~2%) 0.5~5,000kg/cm <sup>2</sup>	車輛、船舶、泵浦、鍋爐之壓力指示
	膜片壓力計	受壓面積大，反應速率快，防爆破裂容易做到	0.5~2% 10mmHg~2kg/cm <sup>2</sup>	適用於腐蝕性流體，高黏度流體，含有固體粒子流體
	伸縮管壓力計	測定範圍較膜片為大溫度捕償容易	0.5~2% 10mmHg~10kg/cm <sup>2</sup>	用於測定微壓，低壓之測定，或差壓之測定，亦有用於自動控制系統
	空盒式壓力計	對微壓變化之敏感高，不適用於高壓測量	0.5~2% 10mmHg~1kg/cm <sup>2</sup>	用於微壓之測定，高壓計，氣體計
電力測量式	應變壓力計	反應速率快，適合作遠距離及多點之測定	1~2% 5~10,000kg/cm <sup>2</sup>	用於遠距離之測定，引導壓力指示器，脈動壓之檢出
	差測變壓器式	須與機械式壓力計配合使用	機械式壓力計之量程範圍都合用	適用於自動控制，及遠距離測定
	壓電式	反應速率快	1~2% 5~1,000kg/cm <sup>2</sup>	用於遠距離之測定，自動控制系統，脈動壓之檢出

表3.4 應用對象

測試項目	使用儀器				備註	
	名稱	型式	測試範圍	精確度(%)		
燃燒	排氣過剩空氣量	氧氣分析器	電化學式	0~25%	±1	攜帶型
			電磁偏轉式		±0.5	固定型
			觸煤燃燒式		±1	固定型
	氧氣監測器	二氧化鈷	0~25%	±1	固定型	
		紅外線式	0~21%	±1	固定或攜帶型	
	排氣成份	一氧化碳分析器	電化學式	0~1,000ppm	±2	固定或攜帶型
			紅外線式		±1	
			觸煤燃燒式		±1	
		二氧化硫分析器(SOx)	電化學式	0~5,000ppm	±2	固定或攜帶型
			紅外線式		±1	
		氧化氮分析器(NOx)	電化學式	0~5,000ppm	±2	固定或攜帶型
			紅外線式		±1	
	燃燒效率	燃燒效率分析器	電化學式	O <sub>2</sub> : 0~25% CO : 0~4,000ppm T : 0~850°C η : 0~99.9%	±1 ±2.5 ±0.5	攜帶型
熱傳與保溫	排氣溫度	溫度計	雙金屬 膨脹式 熱電偶	任意	±3 ±2 ±1	固定型 固定型 固定或攜帶型
	排氣露點溫度	露點溫度計		-20~460°C	±2°C	攜帶型
	熱損失量	熱流計		0~100,000kcal/m <sup>2</sup> ·hr -50~1,000°C	±3	攜帶型
熱能利用	表面溫度	表面溫度計	熱電偶	任意	±1	攜帶型
	物體溫度	高溫溫度計	紅外線	-30~1,350°C	±2	攜帶型
冷凝水法水器 蒸汽洩漏探測	音波測漏器	超音波				攜帶型
	蒸汽流量	差壓式流量計	孔口板式 文氏管式	任意	±3	固定型

測試項目	使用儀器				備註
	名稱	型式	測試範圍	精確度(%)	
熱能	蒸氣壓力	壓力計	巴登管式	任 意	±2 固定型
	流 量	燃料油流量計	體積式	0~107 L/h 0~20kg/cm <sup>2</sup> 0~200°C	±0.1~±2 固定型
			面積式	0~2,500m <sup>3</sup> /h 0~200°C 0~25kg/cm <sup>2</sup>	固定型
	瓦斯流量計	孔口板式	任 意	±2 固定型	
			-30~60°C 0~100kg/cm <sup>2</sup>	±1 固定型	
			任 意	±0.25 固定型	
	透平式	透平式	0~150°C 0~100kg/cm <sup>2</sup>	±0.25 固定型	
			任 意	±0.25 固定型	
			0~40m/s 0~500mmAq -10°C~500°C	±3 固定或攜帶型	
利 用	廢熱排氣量	風速計	0~40m/s 0~500mmAq -10°C~100°C	±3 固定或攜帶型	
			0~40m/s 0~500mmAq -10°C~100°C	±3 固定或攜帶型	
			0.4~40m/s -17°C~70°C	±1.5 攜帶型	
			0~28m/s 0~250mmAq	±0.5 固定或攜帶型	
	廢熱排氣條件	溫 度 計	膨脹式	±2 固定型	
			雙金屬 熱電偶	±3 固定型 ±1 固定或攜帶型	
	濕 度 計	低 濕 型	0~99.9%RH 0~60°C	±2 固定或攜帶型	
			0~99.9%RH 0~105°C	±2 固定或攜帶型	
	碳氫氣檢測器	火焰離子化	0~100%LEL 0~100%vol%	±2 固定或攜帶型	
管線壓力	壓 力 計	巴登管式	任 意	±2 固定型	
		伸縮管式	10mmAq~10kg/cm <sup>2</sup>	±0.5~±2 固定型	
	液柱型壓力計	單 管 式 U型管式	0~2,000mmAq 10~2,500mmAq	±0.01 固定或攜帶型	

## 附錄四 工業儀器介紹

儀	器
流量測定 流孔板 / 文氏管 / 皮氏管 體積式流量計 / 魯式流量計 質量流量計 / 粉粒體流量計 電磁流量計 / 超音波流量計 液體流量開關 / 粉粒體超音波流量開關 浮子流量計 / 面積式流量計 渦流流量計 / 旋姿流量計 開渠流量計 / 巴歇爾流量計 差壓發信器 / 流量發信器	氣體分析 紅外線氣體分析計 可燃性氣體分析計 二氧化碳氣體分析計 排煙濃度分析計 氧氣分析計 / 氮氣分析計 毒性氣體分析計 煙道氣體分析計 硫化物，氯化物氣體分析計
壓力測定 絕對壓力計 / 表壓壓力計 / 真空壓力計 差壓壓力計 / 微差壓壓力計 液體壓力計 / 粉粒體流量計 風壓計 / 加速度計	水質測定 溶氧度計 / 氧化還原計 酸鹼度計 / 鹼度計 電導度計 / 離子濃度計 油份濃度計 濁度計 / MLSS計 / SS計 生物需氧量 / 化學需氧量 / 總需氧量 鹽分濃度計 / 色度計 餘氯計 / 游離氯離子計 污泥界面計 / 污泥濃度計
溫度測定 白金電阻體 低溫熱電偶 高溫熱電偶 倉儲溫度監視系統 平均溫度監視系統 超小型溫度計 / 攜帶式溫度計 光高溫計 / 紅外線高溫度計 / 輻射高溫度計 熱流計 / 各種特殊保護管	水份分析 煙道水分計 粉粒體水份計 濕度計 乳酪水份計 露點計
重量測定 荷重檢出 / 應變檢出元件 台秤 / 斗秤 / 帶秤 張力計 / 配料系統 秤重系統 / 定量供料系統	受信儀器 圓型指示計 / 方型指示計 條型指示計 / 數字指示計 接點控制器 / 警報設定器 / 簡易控制器 比率控制器 / PID控制器 / 類比控制器 可程式控制器 / 順序控制器 圓型記錄計 / 方型記錄計 / 無墨水記錄計 多點型記錄計 / 數值記錄計 / 時間文字水記錄計 批量積算計 / 累加積算計 / 可設定積算計 類比積算計 / 接點積算計 / 數位積算計 警報訊誌板 / 警報電路 控制繼電器 / 輔助繼電器 / 特殊繼電器 避雷器 / 限時繼電器 流程標示板 / 文字顯示器 / 語音合成器 按鈕開關 / 旋轉開關
位面測定 浮筒式液位計 / 氣泡式液位計 壓力式液位計 / 壓力式料位計 超音波液位計 / 超音波料位計 放射線液位計 / 放射線料位計 重錘式料位計 / 鏈條式料位計 電阻式液位計 / 接地式料位計 靜電容液位計 / 靜電容料位計 紅外線液位計 / 紅外線料位計 音叉式液位計 / 音叉式料位計 以上各種型式之液位及粒位開關 旋翼式料位開關 / 振翼式料位開關 膜壓式料位開關 / 近接開關 光電式料位開關	信號處理 電阻溫度變換器 / 熱電偶溫度變換器 差壓流量傳送器 / 各種流量傳送器 壓力傳信器 / 差壓傳信器 / 風壓傳信器 液體位置傳信器 / 粉、粒體流量、料位傳信器 電壓、電流、交流、直流、信號轉換器 頻率、數位、脈波、D/A、A/D信號轉換器 空電—電空變換器 / 電油—油電變換器 加減、乘除、開方、積算、演算器 線性、斜率、程式、絕緣、處理器 警報、選擇、設定器
性狀分析 密度計 / 濃度計 / 紙漿濃度計 磁粉濃度計 / 粘度計 超音波濃度計 / 溶漿濃度計 超音波厚度計 / 紅外線厚度計 / 放射線厚度計 光學厚度計 / 背壓厚度計 薄膜厚度計 / 鋼板厚度計 / 管厚度計 測距計 / 位置檢出計	

傳 輪 設 備	
<u>順序控制</u> 製程順序控制器 / 配電盤順序控制器 配料順序控制器 / 機械組順序控制器 類比、數位信號處理機 步進、跳位及程式控制器 遠方傳信數據機結合裝置	<u>微計算機</u> 工業用微電腦 / 數值控制微電腦 製程控制微電腦 / 水處理微電腦 各種軟體製作 / 控制程式製作 類比微電腦 / 資料處理微電腦 工廠生產控制微電腦
<u>周邊裝置</u> 螢幕顯示器 / 電腦終端機 磁碟機 / 磁帶機 印字機 / 報表打字機 信號誌處理裝置 / 界面轉換裝置	<u>遙控裝置</u> 自設線路傳訊裝置 / 電話線路傳訊裝置 調幅數據機 / 調頻數據機 光纖通信 / 微波通信 / 雷射通信 單向傳輸裝置 / 雙向傳輸裝置

自 動 控 制 設 備	
<u>操作機械</u> 電動操作機 / 伺服操作機 油壓操作機 / 油壓馬達 電動線性驅動器 / 電磁閥 控制馬達 / 緊急遮斷閥 氣壓操作機 / 水力操作機 汽缸驅動器 / 油缸驅動器 閥門操作機 / 擋板操作機	<u>供料機械</u> 定量帶秤機 / 定量螺旋供料機 迴轉閥供料器 / 迴轉盤供料器 電磁振動供料器 / 往復供料器 減量秤飼機 / 儲斗秤飼機 精密型微量供料器
<u>定量泵浦</u> 可調速定量泵 / 可調衝程定量泵 自動或手動控制各式加藥泵 各種軟體製作 / 控制程式製作 瓣膜定量泵 / 比例定量泵 粉粒體定量泵	<u>控制閥門</u> 空氣控制閥 / 油壓控制閥 / 水力控制閥 電動控制閥 / 電磁控制閥 閥球心、蝶閥、閘閥、栓閥、雙座閥、 調壓閥、瓣膜閥…各種型式

## 附錄五 鋼鐵材料物性資料

表5.1 各種鐵鋼材耐酸性最高使用溫度<sup>6</sup>

種類	耐溫性 (°C)
碳鋼	550~600
耐熱鑄鋼	
SCH-11	1,040
SCH-12	870
SCH-13	1,150
SCH-15	1,150
鑄鐵 (SS41)	400~450
鉻鎳鋼 (Cr) (Ni)	
18 8	850~900
25 12	1,050~1,100
25 20	1,100~1,150
15 35	1,050~1,100

種類	耐溫性 (°C)
不鏽鋼	
SUS-304	800
SUS-310	1,050
SUS-321	800
鉻鋼類 (Cr) (Mo)	
0.5~1 0.1~0.5	550~600
2.25 1.0	600~650
5.0 0.5	650~700
13 —	750~800
17 —	850~900
28 —	1,050~1,100

表5.2 代表的金屬的物性值<sup>6</sup>

物 質 名	溫度 (°C)	比重量 $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	比 热 $C_p$ (kcal/kg°C)	熱傳導率 $\lambda$ (kcal/mh°C)	熱膨脹係數 $\beta$ (10 <sup>-6</sup> /°C)
鋁	20	2700	0.215	175	23.9
	100		0.225	177	
	300		0.248	198	31.5(600°C)
鑄 鐵 (4C以下)	20	7270	0.10	41	10.5
	100			44	
	300			39	
炭素鋼 (0.5C以下)	20	7830	0.11	46	12.8
炭素鋼 (1.0C)	20	7800	0.11	39	10.50
炭素鋼 (1.5C)	20	7750	0.11	31	10.1
鉻 鋼 (1Cr)	20	7870	0.11	52	11.3
鉻 鋼 (2Cr)	20	7870	0.11	45	
鉻 鋼 (5Cr)	20	7830	0.11	33	
鉻 鋼 (10Cr)	20	7790	0.11	27	10.19
鉻 鋼 (23Cr)	20	7680	0.11	19	9.5
鎳 鋼 (10Ni)	20	7950	0.11	22	
鎳 鋼 (20Ni)	20	7990	0.11	16	18.0
鎳 鋼 (30Ni)	20	8070	0.11	10	
鎳 鋼 (40Ni)	20	8170	0.11	9	
鎳 鋼 (50Ni)	20	8270	0.11	12	
鉻鎳鋼 (18—8)	20	7820	0.118	14	16.7
鉻鎳鋼 (20—15)	20	7850	0.11	13	
鉻鎳鋼 (25—20)	20	7860	0.11	11	14.4
鎳鎳鋼 (40—15)	20	8070	0.11	10	12.2
鎳鎳鋼 (80—15)	20	8520	0.11	15	13

## 附錄六 氣體物性資料<sup>6</sup>

物質	溫度 (°C)	比重 $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 $C_p$ (kcal/kg°C)	粘性係數 $\eta \times 10^{-6}$ (kg s/m <sup>2</sup> )	動粘性係數 $\nu \times 10^{-4}$ (m <sup>2</sup> /s)	熱傳導率 $\lambda$ (kcal/mh°C)	溫度傳導率 $\alpha$ (m <sup>2</sup> /h)	Prandtl數 Pr
空氣	0	1.251	0.240	1.76	0.138	0.0207	0.0689	0.72
	20	1.166	0.240	1.86	0.156	0.0221	0.0789	0.71
	40	1.091	0.241	1.95	0.175	0.0234	0.0892	0.71
	60	1.026	0.241	2.05	0.196	0.0247	0.100	0.71
	80	0.968	0.241	2.14	0.217	0.0260	0.111	0.70
	100	0.916	0.242	2.23	0.239	0.0272	0.123	0.70
	120	0.869	0.242	2.32	0.262	0.0285	0.135	0.70
	140	0.827	0.243	2.40	0.285	0.0297	0.148	0.69
	160	0.789	0.243	2.48	0.308	0.0309	0.161	0.69
	180	0.754	0.244	2.56	0.333	0.0320	0.174	0.69
	200	0.722	0.245	2.64	0.358	0.0332	0.188	0.69
	250	0.652	0.247	2.83	0.426	0.0359	0.223	0.69
(H <sub>2</sub> O)	300	0.596	0.250	3.01	0.495	0.0386	0.259	0.69
	350	0.548	0.253	3.18	0.569	0.0412	0.298	0.69
	400	0.508	0.255	3.34	0.645	0.0437	0.337	0.69
	100	0.578	0.501	1.28	0.217	0.0207	0.0715	1.09
	120	0.547	0.486	1.36	0.246	0.0219	0.0824	1.08
蒸氣	140	0.519	0.478	1.43	0.270	0.0232	0.0935	1.04
	160	0.494	0.474	1.50	0.298	0.0246	0.105	1.02
	180	0.472	0.472	1.58	0.328	0.0259	0.116	1.02
	200	0.451	0.472	1.66	0.361	0.0273	0.128	1.01
(N <sub>2</sub> )	220	0.433	0.473	1.73	0.392	0.0287	0.140	1.01
	240	0.416	0.475	1.81	0.426	0.0301	0.152	1.01
	260	0.400	0.476	1.89	0.463	0.0315	0.165	1.01
	300	0.372	0.481	2.04	0.537	0.0343	0.192	1.01
	0	1.211	0.249	1.70	0.138	0.0207	0.0687	0.72
二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	50	1.023	0.249	1.93	0.185	0.0240	0.0942	0.71
	100	0.887	0.249	2.15	0.238	0.0269	0.122	0.70
	150	0.782	0.250	2.35	0.295	0.0299	0.153	0.69
	200	0.699	0.252	2.53	0.355	0.0328	0.186	0.69
	250	0.631	0.253	2.72	0.423	0.0355	0.221	0.69
	300	0.577	0.256	2.89	0.491	0.0380	0.257	0.69
	0	1.912	0.198	1.41	0.072	0.0125	0.033	0.78
(O <sub>2</sub> )	50	1.616	0.209	1.65	0.100	0.0157	0.047	0.77
	100	1.400	0.220	1.87	0.131	0.0191	0.062	0.76
	150	1.235	0.229	2.08	0.165	0.0226	0.080	0.74
	200	1.103	0.238	2.28	0.203	0.0263	0.101	0.72
	250	0.996	0.246	2.47	0.243	0.0302	0.123	0.71
	300	0.911	0.254	2.65	0.285	0.0343	0.148	0.69
氮氣 (N <sub>2</sub> )	0	1.982	0.219	1.95	0.139	0.0197	0.065	0.77
	50	1.168	0.221	2.24	0.188	0.0231	0.089	0.76
	100	1.012	0.223	2.51	0.243	0.0261	0.116	0.76



## 附錄七 定壓比熱與溫度之關係

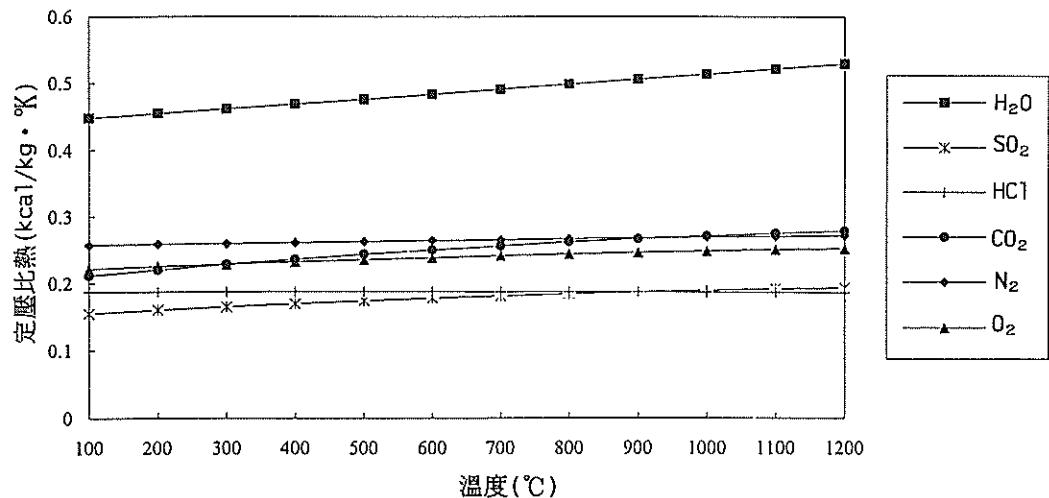


圖 7.1 定壓比熱與溫度關係圖 (25~t°C)

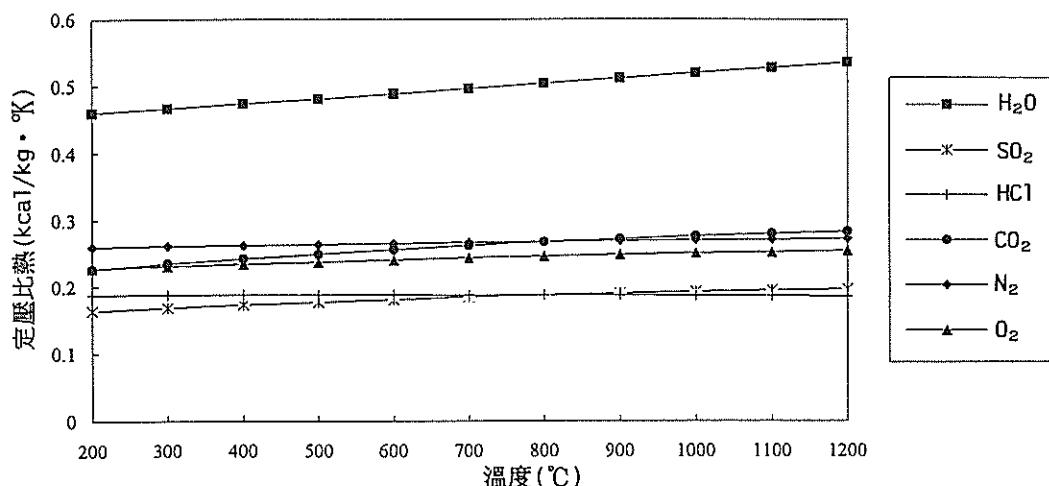


圖 7.2 定壓比熱與溫度關係圖 (100~t°C)

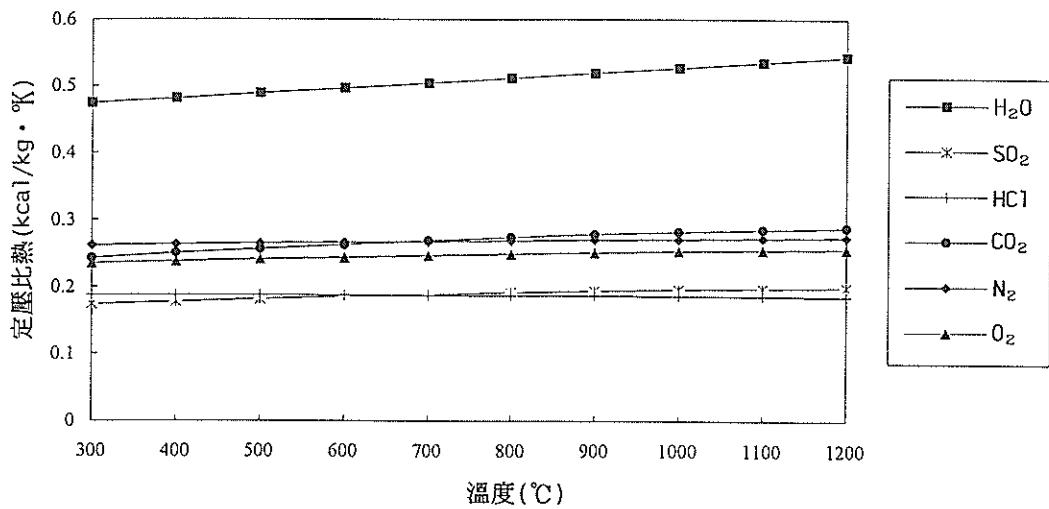


圖 7.3 定壓比熱與溫度關係圖 (200~t°C)

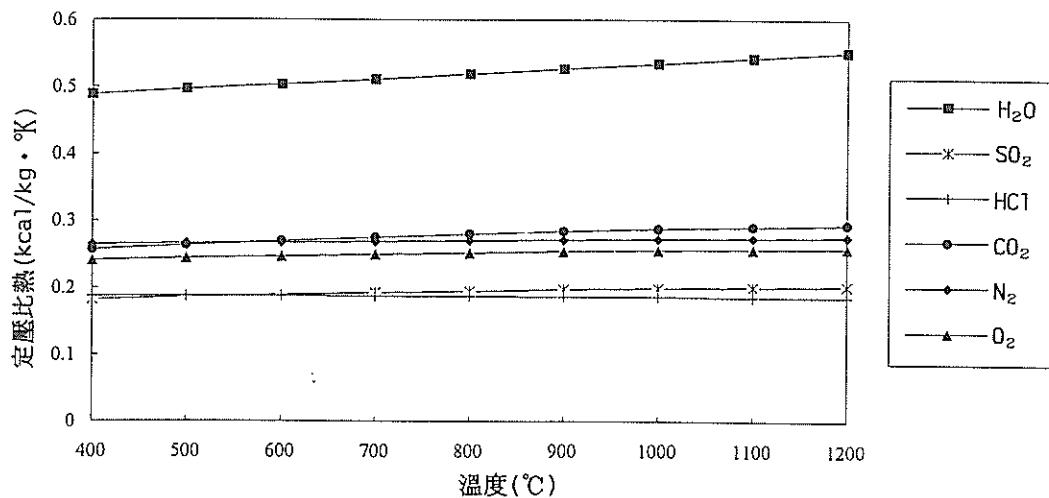


圖 7.4 定壓比熱與溫度關係圖 (300~t°C)

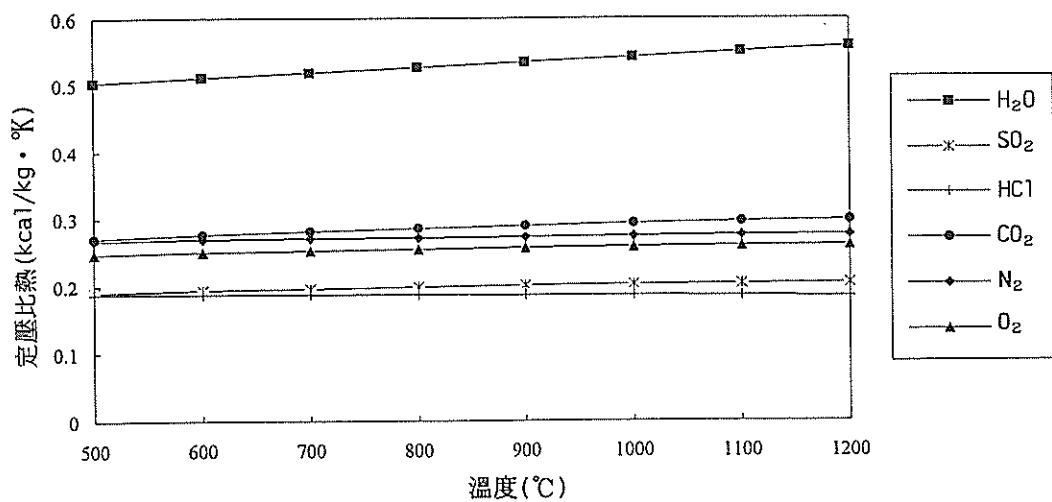


圖 7.5 定壓比熱與溫度關係圖 (400~t°C)



出版所／經濟部工業局工業污染防治技術服務團

出版日期／八十二年十月

總編輯／楊萬發

副總編輯／翁志聖

編輯顧問／林志森 高世錦 陳宗男

曾聰智 楊義榮 潘丁白

鄭清宗 鄭福田

(依姓氏筆劃排列)

主編／謝淑華

編著／工業污染防治技術服務團

