

## 金屬鑄鍊廠殼模燒結爐廢氣處理改善實例

陳文星\* 王志賢\* 張贊淵\* 楊熾森\*

### 摘要

由於科技日新月異，精密鑄件在工業上扮演愈來愈重要之角色，尤其是航空器零件、渦輪增壓器葉輪及一般機械零件製造等。目前，台灣地區約有數百家之廠商從事精密鑄件之生產，對於國內之產業貢獻良多，有助於工業升級。而脫蠟程序是精密鑄件產製過程中關鍵之步驟，一般於殼模燒結爐內進行脫蠟，將殘蠟燒除，同時，殼模亦完成燒結。然而，國內業者對於污染防治知識及技術所知不多，致使殼模燒結爐操作運轉時，於起爐及升溫階段冒出黑煙，成為空氣污染源之一，又鑄造業者遍佈全省各地，其污染防治工作愈趨重要，否則將形成嚴重之環境污染。有鑑於此，工業技術研究院能源與資源研究所積極參與輔導業者，使其瞭解廠內污染源及污染特性，並提供具體可行之廢氣處理技術，以輔導業者徹底解決污染問題。

本文主要是說明工研院能資所深入輔導國內一家金屬鑄鍊廠，進行污染防治改善工作及獲致之成效。本案以簡單之後燃燒室完成廢氣處理，毋須考慮二次污染物之產生，且節省可觀之硬體費用。特於此效野人獻曝，以供相關業者參考。

### 【關鍵字】

- ①脫蠟序程 (lost wax procedure) ②粒狀污染物 (particulate)
- ③二次燃燒室 (secondary combustion chamber) ④自然曳引力 (natural draft)

### 一、前言

A股份有限公司金屬鑄鍊廠（以下簡稱A廠），位於高雄市楠梓區，為一設備齊全、服務品質優良之鑄造工廠，建廠迄今已有十餘年鑄造實務經驗，主要從事於鋼鐵及非鐵鑄件之研製，以及各種精密鑄造技術之研究。該廠於從事生產及研究發展之餘，為配合國家之環保政策，提昇廠區內之工作環境品質，故改善殼模燒結爐之硬體設備及加裝

\*工研院能資所廢棄物處理技術組焚化研究室研究員

廢氣處理設施，以解決模型蠟燃燒未完全，所形成之空氣污染問題。

A廠衍生之空氣污染來源為脫蠟程序使用之殼模燒結爐，而主要之空氣污染組成為黑煙，該廠排放之廢氣無法通過檢測人員之目測標準，亦無法符合固定污染源空氣排放標準，屢遭環保單位以煙囪冒黑煙為由，而加以罰鍰取締，故委託工業技術研究院能源與資源研究所協助其進行廢氣處理改善工程。能資所首先進行A廠之污染源特性瞭解，並提出各種可行性方案之初步規劃，俟比較其優劣點後，確定較經濟之處理方案。能資所除了進行基本規劃設計及細部設計外，並進行設備發包製造、監工、試車及處理效率檢測工作。本案成功地解決A廠之廢氣污染問題，並符合環保署公告之固定污染源排放標準，達到降低污染排放之目標，並為台灣地區數以百計衍生黑煙之工廠，提供了一簡單、經濟之廢氣處理典範。

## 二、製程簡介

A廠之產品主要為精密之金屬鑄件，其生產設備包含：模型機、射蠟機、沾漿室、脫蠟爐、燒結爐及射漿機。而產品之製造流程如圖1所示，包括金屬模成型、蠟樹成型、殼模成型、鑄件完成四個程序。

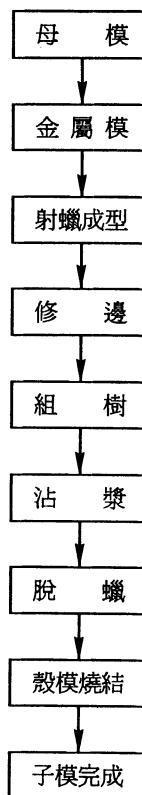


圖1 金屬鑄模之製造流程圖

依據客戶之要求，首先完成一個空心之金屬模，以射蠟機將模型蠟注入，鑄成一實心之蠟型，歷經修邊及組樹之過程，繼續進入沾漿之程序，以鋯砂及耐火材等材料沾於蠟樹表面，爾後，於脫蠟爐內，維持約75~85°C之溫度，進行初步脫蠟程序，使大部分之蠟呈熔融態流出殼模，再於殼模燒結爐內完成殼模燒結之步驟，此時殼模需緩慢升溫，直到850°C為止，把殘留於殼模表面上之餘蠟燒除，同時殼模亦經高溫燒結定型，最後，將金屬溶液注入殼模內，俟其凝固後，敲碎殼模即可獲得所需之鑄件。殼模燒結爐於整個製程中，扮演著舉足輕重之角色，若燒結溫度不夠，則殼模之硬度及強度無法合於所求。殼模燒結爐主要是利用台車來運輸含殘蠟之殼模，每爐次約一台車之載運量，需將台車推進爐內才能進行升溫步驟，而每爐次約需1~2小時，始能完成殼模燒結過程。

### 三、污染源及污染特性

#### 3.1 污染源

A廠主要之空氣污染來源為殼模燒結爐所排放之廢氣，起爐及燃燒殘蠟使用之輔助燃料為液石油氣(LPG)，廢氣乃為精密鑄件於脫蠟程序時所產生，經由爐體後側狹窄之煙道，藉由高溫氣體通過煙囪之曳引力，送至煙囪排出。因為爐門氣密性不佳，殼模燒結爐運轉操作時，有部份廢氣由爐門逸散出來，造成廠內之視線不明，空氣品質低劣，室溫提升，工作環境惡劣，因此廠區內之環境改善亦為亟待解決之問題。

#### 3.2 污染源特性

殼模燒結爐排放之廢氣中，其空氣污染物種類計有粒狀污染物、硫氧化物、氮氧化物及一氧化碳，其廢氣之檢測結果如表1所示，由此表顯示廢氣中一氧化碳及粒狀污染物之濃度高於環保排放標準(目測時則有黑煙產生)，殆為模型蠟燃燒不完全所致，而粒狀污染物之組成及濃度偏高之原因，則視殼模燒結爐操作運轉時，殼模材料與模型蠟之成分而定，A廠常使用之物料組成示於表2。

表1 A廠殼模燒結爐之煙囪排氣檢驗結果(改善前)

檢驗項目	實測平均值	6%氧氣校正值	環保法規排放標準
氮氧化物	10ppm	44ppm	150ppm
硫氧化物	10ppm	44ppm	500ppm
一氧化碳	580ppm	2,559ppm	2,000ppm
氧氣	17.6%	6%	—
二氧化碳	2.1%	10%	—
粒狀物	147mg/Nm <sup>3</sup>	649mg/Nm <sup>3</sup>	500mg/Nm <sup>3</sup>

表 2 賦模材料及模型蠟之基本組成表

種類組成(%)	模型蠟	鋯砂	耐火材(1)	耐火材(2)
碳氫化合物	99.0			
SiO <sub>2</sub>		32.8	50~60	20~40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.05	3~6	1~3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.2	20~30	10~20
ZrO <sub>2</sub>		65.0		40~50
TiO <sub>2</sub>		0.2	20~30	5~10
K <sub>2</sub> O				
其他				

#### 四、空氣污染現狀

A廠殼模燒結爐運轉時，每批殼模燒結之操作時間約為1小時餘。經工研院能資所派員赴現場勘查瞭解，觀察實際之操作情形以後，認為其硬體有如下之缺點：

1. 爐門及爐體氣密性不佳

- 操作運轉時，爐門因耐火棉脫落及支軸偏斜，故由爐門兩側產生嚴重溢散性物質排出及熱散失，影響現場工作環境。
- 台車與爐體之氣密性不良，亦造成爐氣外洩。

2. 空氣污染現象

台車上置放37個殼模(full load)，於爐內進行燒結步驟時，爐溫設定為850°C，俟溫度達到後，持續約15~30分鐘即完成燒結工作。然自室溫起爐約15分鐘內，爐門及煙囪皆有大量黑煙逸出，此時量測爐體及煙囪中間之煙道氣溫度，其值約為150~250°C。

3. 爐體系統內負壓不足

殼模燒結爐於程序升溫進行模殼燒結時，爐內呈微正壓現象，廢氣曳引不良，且煙道氣之溫度遠低於爐內溫度。

4. 燃燒不良

當燃燒機使用時，風量之供給已提昇至極值，觀察火焰之顏色，偏紅而不夠明亮，顯示燃燒時空氣供應不足。若將燃燒機之風門稍微關小，則燃燒機之火焰中有黑煙產生，亦顯示實際之空氣供應量不足。

## 五、污染改善規劃

### 5.1 基本設計依據

A廠殼模燒結爐原有設備中，除了利用煙囪之自然曳引力，及爐體之燃燒能力外，並沒有任何其他污染防治設施。因此，起爐階段，所排放之廢氣無法通過現行環保標準，工研院能資所派員實地勘察該設備之缺失（詳如前節所述），針對該廠廢氣之改善及防治措施，擬定可行之改善方案，而進行空氣污染防治系統規劃設計時，所依據之基本數據資料如表3所列。

表3 A廠規劃設計依據之基本資料

項次	項目	設計依據
1	廢氣量( $Nm^3/hr$ )	1,700(濕基)
2	廢氣溫度(°C)	620
3	廢氣煙道速度(m/s)	4.5
4	粒狀物濃度(mg/ $Nm^3$ )	700
5	含水率(%)	8
6	含氧率(%)	9
7	操作時間(hr/day)	8
8	設備安置地點	廠內
9	處理後預計粒狀物濃度(mg/ $Nm^3$ )	100

### 5.2 改善方案

依據表3所列之基本設計資料，擬定如下可行之改善方案：

綜合A廠排放之廢氣組成分析（見表1），顯然地，一氧化碳之濃度高於環保標準，意謂殼模燒結爐起爐時，模型蠟逐漸熔化而燒除，然而爐溫太低，模型蠟燃燒不完全，導致一氧化碳之形成。工研院能資所針對此項缺失，提出設置二次燃燒室之構想，以彌補殼模燒結爐剛起爐時，爐溫之不足。因殼模脫蠟燒結過程中，必須緩慢升溫才能獲得所需強度之產品，若先烘爐至高溫狀況再進行脫蠟程序，則殼模易脆裂。

A廠排放之廢氣中，粒狀物之濃度亦顯然偏高，而其處理方法，較常使用者為文氏洗滌塔、溼式靜電集塵器、旋風分離器及袋式集塵器。前二者會衍生廢水問題，因此暫不考慮採用。因粒狀物部份為未燃燒完成之灰燼，且煙道氣之溫度頗高，故袋式集塵器亦不予採用。而旋風分離器之分離機構為粒狀物之離心力，有賴於高速之氣體流速，然A廠殼模燒結爐原設備中，僅憑藉煙道之溫度及煙囪高度所產生之自然曳引力，來引導煙氣之排放，並沒有誘引風機，所產生之煙道氣流速不高，故旋風分離器亦暫不採用。

能資所進行 A 廠之改善工程茲分述如下：

1. 膜模燒結爐頂部與爐門接觸之拱形磚及耐火棉加以修改，且改善爐門滑道及支撐槽之角度，以提昇爐門之密合度，同時使用砂封之原理，改善爐體及台車之氣密度（原膜模燒結爐示於圖 2）。

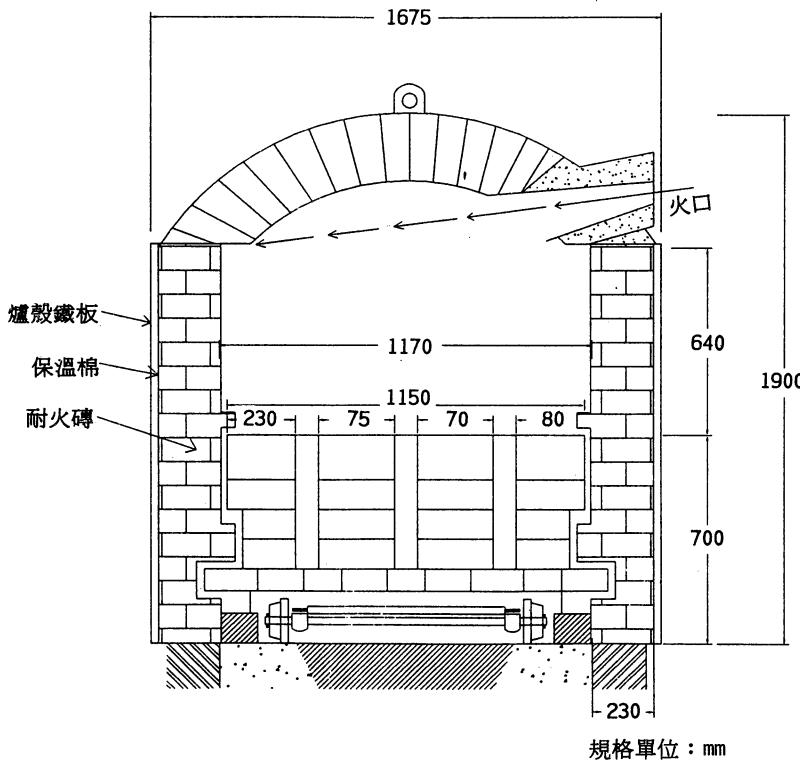


圖 2 膜模燒結爐 (正視圖)

- 將原膜模燒結爐頂部與爐門接觸之三排拱形磚重新加以砌磚，並以 L 型鉤釘固定耐火棉於爐門接觸部位之耐火磚上，增強爐體之氣密性。
  - 在支撐槽內添加斜板，使爐門滑道向內傾斜，避免爐門關閉時，因重心偏高而降低與爐體之氣密度。
  - 在台車移動之軌道上添加細砂，降低廢氣由此逸出之可能性。
2. 膜模燒結爐之廢氣出口處，裝設二次燃燒室，將未完全燃燒之碳粒加以燒除。
    - 採用二層耐火磚，內層為 SK34 耐火磚，厚度 230mm，外層為 B1 斷火磚，厚度 115mm。
    - 二次燃燒室之體積估算為  $0.768\text{m}^3$  (室內長 1.2m；寬 0.64m；高 1.0m)，總氣體流量估計為  $1,700\text{Nm}^3/\text{hr}$ ，因此，氣體之滯留時間為 0.66sec，燃燒溫度為  $1,000^\circ\text{C}$ 。

3. 重新設計煙囗及原殼模燒結爐之系統組合，增加自然曳引力，並預留氣體分析之取樣口。

#### －煙囗高度及自然曳引力之計算

公式如下：

$$h = 355 \times H (1/T_1 - 1/T_2)$$

式中， $h$ ：煙囗產生之自然曳引力 ( $- \text{mmH}_2\text{O}$ )

$H$ ：煙囗高度 = 10.5m

$T_1$  : 303K

$T_2$  : 723K

$$\therefore h = -7.1 \text{mmH}_2\text{O}$$

#### －煙囗口徑之計算

公式如下：

$$F = \frac{Q \times T}{273 \times 3,600 \times V}$$

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

式中， $V$ ：煙囗出口之排氣速度 = 4.5m/s

$T$ ：煙囗出口之排氣溫度 = 723K

$Q$ ：燃燒之排氣量 = 1,700Nm<sup>3</sup>/hr

$F$ ：煙囗之斷面積 (m<sup>2</sup>)

$D$ ：煙囗之口徑 (m)

$$\therefore F = 0.278 \text{m}^2$$

$$D = 0.6 \text{m}$$

4. 重新計重空氣及LPG之供給量，檢查鼓風機之送風量，使燃燒過程中空氣供給充足，即進行富氧燃燒。

－估算殼模燒結爐之LPG使用量 25.4Nm<sup>3</sup>/hr，而一單位體積之LPG 約需25單位體積之空氣供給量，再加上殘蠟之燃燒氣體體積，則氣體流量約為 700Nm<sup>3</sup>/hr。因LPG之發熱量為 27,860kcal/Nm<sup>3</sup>，其總釋熱率為  $7.0 \times 10^5$  kcal/hr，可提供足夠之熱量予以維持 850°C 之爐溫。

－估算二次燃燒室LPG使用量為 40Nm<sup>3</sup>/hr，氣體流量為 1,000Nm<sup>3</sup>/hr，再加上殼模燒結爐之排氣量，則總氣體流量為 1,700Nm<sup>3</sup>/hr，且LPG之釋熱率為  $1.11 \times 10^6$  kcal/Nm<sup>3</sup>，足以維持 1,000°C 之爐溫。

### 5.3 設備說明及操作條件

A廠之殼模燒結爐本為一長 1.54m、寬 1.675m、高 1.9m 之工業窯爐，配備二具燃燒機、其釋熱率皆為 300,000 kcal/hr，一具 5Hp 之鼓風機及一輛裝載殼模之台車，燃燒後

之廢氣則經由一高3.2m、內徑 0.35m之煙囪排放。關於本次改善工程所增之設備概要說明如表 4 所列。

A 廠之殼模燒結爐改善後之程序流程圖示於圖 3，而主要設備之操作條件則設定如下：

- 一次燃燒室之溫度：850°C
- 二次燃燒室之溫度：1,000°C
- 一次燃燒室之爐壓：維持約 -3mmH<sub>2</sub>O
- 二次燃燒室之爐壓：維持約 -7mmH<sub>2</sub>O
- LPG 操作壓力範圍：150～280mmH<sub>2</sub>O

表 4 A 廠改善工程所需之設備說明

項 目	設 備 細 節
二次燃燒室	材質：SS41，厚度：45mm 尺寸：1.89m×1.33m×1.73m 耐火磚：SK34 尺寸：230mm×115mm×65mm 保溫磚：B1 尺寸：230mm×115mm×65mm
二次燃燒室之燃燒機	數具：一具 熱容量：400,000kcal/hr 型式：槍型
煙囪	材質：SS41，厚度：45mm 尺寸：Φ0.64m×10.5m
採樣平台	材質：SS41，厚度：4mm 尺寸：1m×2m×1m 採樣孔：4"×2

殼模燒結爐進行脫蠟程序時，其操作步驟為：

1. 台車負載殼模進入爐內，關閉爐門。
2. 二次燃燒室之燃燒機啓動，預先加熱該室至 800°C 左右。

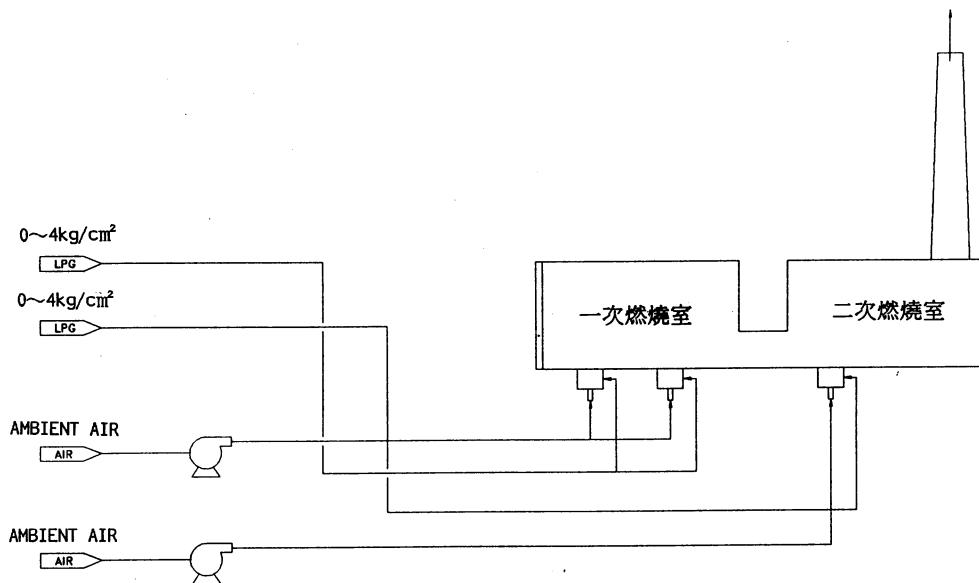


圖 3 A 廠殼模燒結爐之程序流程圖

3. 繼後進行殼模燒結爐之升溫步驟，啟動一次燃燒室之燃燒機，二次燃燒室則繼續升溫直到設定溫度。
4. 俟一次燃燒室之爐溫到達 850°C 後，約持續 15~20 分鐘。該室產生之未燃盡碳粒可藉由二次燃燒室予以焚化燒除。

## 六、改善結果

A 廠被環保單位告發後，委託工研院能資所進行廢氣污染改善工程。經過約二個月之工作天，完成初步廢氣樣品檢測、規劃設計、細部設計圖說、施工、試車、最終廢氣檢測及完成驗改等。使 A 廠之廢氣排放濃度遠低於現行之環保排放標準，無後顧之憂，其廢氣之檢測結果如表 5 所列。

表 5 A 廠殼模燒結爐之煙囗排氣檢驗結果（改善後）

檢驗項目	實測平均值	6% 氧氣校正值	環保法規排放標準
氮氧化物	46ppm	58ppm	150ppm
硫氧化物	7ppm	9ppm	500ppm
一氧化碳	81ppm	102ppm	2,000ppm
氧 氣	9.1%	6%	—
二氧化碳	7.9%	10%	—
粒 狀 物	17mg/Nm <sup>3</sup>	21.4mg/Nm <sup>3</sup>	500mg/Nm <sup>3</sup>

## 七、結 語

A廠無法符合現行之廢氣目測標準而被檢舉告發，然經工研院能資所分析其廢氣組成，大膽假設、細心求證下，判斷粒狀污染物及一氧化碳濃度偏高之原因为模型蠟（即碳氫化合物）未完全燒除所致。而單以二次燃燒室之設施畢其功於一役，完成A廠廢氣之污染改善，不僅節省了人力、物力及金錢，且縮短了該廠寶貴之停車時間。A廠排放黑煙之改善過程，值得相關業者參考及仿效。

## 八、參考文獻

1. 張一岑著有害廢棄物焚化技術，聯經出版事業公司，民國80年6月。
2. 司洪濤、賴祖許、潘建成、翁瑞舟，文氏洗滌塔設計與操作實務，工業污染防治季刊第47期，P.71~91，82年7月。
3. 中國技術服務社工業污染防治技術服務團，工業污染防治技術手冊之十六，工廠排放黑煙及白煙之控制，77年3月。
4. 黃正義編譯空氣污染源與防治，淑馨出版社，75年10月。
5. 司洪濤、賴祖許、潘建成、吳俊耀、余騰耀，磚窯業隧道窯廢氣處理效率提昇成功實例，工業污染防治季刊第49期，P145~160，83年1月。
6. 經濟部工業局人才培訓，污染防治技術人員講訓班，空氣污染防治設計操作訓練教材。
7. Paul,N.C.and Richard,A.Y., Air Pollution Control and Design Handbook, Marcel Dekker. Inc.1977.
8. Thielke,J.F. and Pilat, M.J., Plume Opacity Related to Particle Mass Concentration and Size Distribution, Atmospheric Environment, vol 12,P.2439~2447,1978.

- 9.Waid, D.W., Afterburners for Control of Gaseous Hydrocarbons and Odor. Am. Inst. Chem. Eng. Symposium Series No.137, Vol 70,1974.
10. Ensor, D.S. and Pilat M.J., Calculation of Smoke Plume Opacity from Particulate Air Pollutant Properties, JAPCA Vol. 21, P.496~501,1971.
- 11 Sten, A.C., Boubel, R.W., Turner, D.B. and Fox, D.L., Fundamentals of Air Pollution, Second Edition, Academic Press, Inc. 1984,5.
- 12 Barnes, R.H., Saxton, M.J., Barrett, R.E. and Levy. A., Chemical Aspects of Afterburner Systems, EPA-600/7-79096 April 1979.