

空氣污染與噪音類

透過改善燃燒空氣供應系統達成節能減碳 與污染防治之探討

古家宇 ****、吳克敏 ***、徐洪陞 **、陳育群 *、陳昱志 ***

摘要

廢棄物完全燃燒需考量 3 個因子 - 溫度 (Temperature)、時間 (Time) 及擾流程度 (Turbulence)，對於國內某旋轉窯焚化爐 (以下簡稱本廠) 型式的焚化爐而言，擾流程度即是指送入之燃燒空氣需與廢棄物充分混合，並於高溫下有足夠的擾流程度才有好的燃燒效果；一般擾流強度越大，燃燒空氣與垃圾及焚化後廢氣的混合程度越好，可提升燃燒反應與效率。

本廠燃燒空氣原是經由燃燒空氣風機抽取垃圾貯坑空氣，再由前牆上固定盤上之風口與四周環狀方式送入旋轉窯內，因此燃燒空氣係以平均分散方式送入窯體內，其平均風速約 5.6 m/s，因送入風壓較低，燃燒空氣和垃圾無法充分接觸，且廢氣混合效果較低，故原設計必須持續依靠燃燒機噴燒柴油提供熱源才可符合設計的燃燒品質。

本改善案將原設計燃燒空氣由 1 股風供應增加至 3 股風供應，第一股風維持原設計前牆環狀四周空氣；第二股風為前牆上 10 個小風口，由經熱交換器熱能回收後之熱風提供；第三股風為燃燒機下方處增設一強力助燃空氣 (以下簡稱噴射風)，風壓約 500~600 mmH₂O，此改善主要是提高燃燒空氣溫度，以加速乾燥廢棄物，並改善風壓不足問題及增加空氣擾流度。

72 透過改善燃燒空氣供應系統達成節能減碳與污染防治之探討

改善後之旋轉窯燃燒空氣系統，因燃燒空氣溫度提高，可加速垃圾乾燥，外加風量不對稱分配，形成前牆左側風量大於右側，使得爐內風沿爐壁呈順時針螺旋狀運動，並與旋轉窯轉向相同，可充分將垃圾燃燒釋放出的熱能和未燃垃圾混合、攪拌，增加廢氣擾流度與停留時間，同時在垃圾主燃燒區，新增 1 股噴射風，增加燃燒空氣的貫穿力，進而改善空氣與垃圾的混合程度，加速垃圾的燃燒反應，使垃圾燃燒更完全，進而改善底渣灼燒減量、穩定廢氣排放品質、減少燃燒機使用的頻率與輔助燃料使用量，達到節能減碳的效果。

【關鍵字】旋轉窯焚化爐、燃燒空氣系統優化、節能減碳

* 信鼎技術服務股份有限公司	總經理特助
** 信鼎技術服務股份有限公司	經理
*** 信鼎技術服務股份有限公司	廠長
**** 信鼎技術服務股份有限公司	操作組長

一、緣由與目的

本廠採用旋轉窯基本資料摘要如表 1 所示。

表 1 本廠基本資料

項次	項目	相關資訊
1	焚化爐類型	旋轉窯焚化爐 + 二次燃燒室
2	焚化爐容量	60 公噸 / 天
3	尺寸規格	長度：9 m；內徑：2.2 m
4	廢氣處理系統	氮氧化物 噴入尿素溶液 (40%)
	酸性氣體及重金屬	消石灰 + 活性碳 + 袋式集塵器

改善燃燒空氣系統前，本廠處理每噸垃圾用油量相較於現行 24 座大型焚化廠高出許多，主因為燃燒空氣配置、燃燒空氣溫度、廢棄物熱值差異等，使得垃圾無法維持良好自燃的狀態，故本公司透過根因分析 (Root Cause) 方法學，試圖找出問題的所在並提出改善的措施，期能維持相同燃燒品質的情況下，進一步減少用油比例，達成節能減碳的目標。

二、文獻回顧

焚化廢棄物可達成垃圾減量化、無害化及穩定化的目標，而燃燒品質及效率可藉由 3T 控制來確保，所謂 3T 即溫度 (Temperature)、時間 (Time) 及擾流 (Turbulence)；一般焚化爐操作爐溫越高、廢棄物及廢氣於爐內停留時間長與擾流度大時，燃燒效率佳。以下將就 3T 進一步說明：

2.1 溫度 (Temperature)

為將廢棄物及廢氣燃燒完全，法規規定焚化爐操作溫度不得低於 850 °C，然而焚化爐爐溫穩定可提升焚化品質及燃燒效率如式 2-1 表示。

$$\text{Combustion Efficiency}(\%) = \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}] + [\text{CO}_2]} \times 100\% \quad (\text{式 2-1})$$

Girovich 等人將旋轉窯操作溫度控制於 870~1,200°C 之間，廢氣停留約 2.5 秒，分析其廢氣組成，發現其揮發性有機性氣體去除效率皆達 99%，重金屬及氮氧化物皆有良好去除效果，且廢氣組成結果顯示一氧化碳濃度僅 68 ppm，其燃燒效率亦達 99.88%(Girovich et al., 1989)。

依據燃燒效率公式，採用 110 年度煙道採樣檢測數據換算本廠燃燒效率為 96.15% 至 99.62%。

2.2 時間 (Time)

廢棄物於爐內停留時間過短時，可能使廢棄物燃燒不完全，將使底渣品質下降，而廢棄物停留時間受許多因素影響，如廢棄物種類(固體、液體)、顆粒大小，及爐內徑、爐長、傾斜度及爐體轉速，通常爐長愈長，且爐內徑、傾斜度及爐體轉速愈小，廢棄物停留時間長，反之則停留時間短。

廢棄物於旋轉窯中停留時間如式 2-2 所示，其中 C 為常數，其與廢棄物與爐壁摩擦力有關，亦即隨廢棄物幾何形狀及大小，和耐火磚性質而變異。

$$R_s = \frac{\beta}{2\pi NDS} \cdot \frac{L}{N} = C \frac{L}{NDS} \quad (\text{式 2-2})$$

其中， R_s ：固體停留時間 (sec)

N：旋轉窯轉速 (rpm)

D：旋轉窯爐徑 (m)

S：爐體斜率 (斜高 / 爐長)

β ：廢棄物於旋轉窯內最高時之弧度

一般而言，廢棄物於旋轉窯內滯留時間設計約為 0.5 至 2 小時 (李志萍, 2004)。若以本廠實際運轉參數代入，可得到理論固體停留時間約為 3.6 小時，實際將一耐火

磚投入旋轉窯內測試本廠廢棄物的滯留時間，發現其滯留時間約為 3.3 小時左右，與理論公式差異不大，顯示本廠旋轉窯設計及操作參數，可使廢棄物於高溫環境下有足夠停留時間，達本廠最佳狀態。

2.3 摾流 (Turbulence)

爐內擾流度越大可促使氧氣與廢棄物及廢氣充分接觸燃燒，如有足夠擾流度及迴流區，可使廢氣停留時間增加，故可提升廢氣燃燒效率與穩定廢氣品質，擾流可受許多因素而變，如過剩空氣量、一次及二次風比例 ... 等。

吳氏模擬焚化爐內流場及擾流分析，發現增加二次風風量可於燃燒室內可形成回流區，增加廢氣停留時間 (吳中興,1988)，且增加過剩空氣量可提高燃燒效率 (吳中興,2004)。

葉氏模擬旋轉窯燃燒木材時之流場，使用不同過量空氣比進行試驗，發現當增加過剩空氣時，其爐內溫度顯著下降，且因二次燃燒室體積固定，輸入空氣量增加時，會使氣體停留時間縮短，但卻可增加爐體內擾流程度 (葉永富,1998)。

林氏研究不同過量空氣及預熱一次風對旋轉窯操作之影響，發現過量空氣增加，可以提升旋轉窯內擾流度，且不影響燃燒效率，但燃燒室出口溫度會下降；而將一次風溫度提升後，其對流場擾流度及燃燒室出口溫度無顯著影響，但可增加旋轉窯爐內溫度。提高預熱溫度發現燃燒效率有提升之情形，並提升出口廢氣品質 (林玉川,1999)。

Salvador 等人嘗試增加燃燒室裡之擾流程度，燃燒室中置入 12 或 24 隻擾流管，並研究擾流管設置處與燃燒機之距離，對於 VOC、CO 及 NO_x 之影響。由結果發現，設置 12 支擾流管實驗組別，其 CO 濃度由 1,990 ppm 到 780 ppm；將擾流改為 24 支，增加燃燒室擾流度，可使 CO 濃度下降至 600 ppm，但對於 NO_x 排放濃度則無明顯變化 (Salvador et al.,2005)。

Sharifah 等人使用 XCN 公司發展之空氣注入旋轉窯系統制技術，此技術可使含水率高之垃圾於低過量空氣下燃燒，且二次燃燒室溫度達 800°C 時，垃圾可自燃且無

需使用燃燒機，根據其結果，垃圾燃燒釋放熱能，於自然輻射散失及下批次進料垃圾乾燥所吸收，爐溫有上升後下降之重複性結果。因垃圾成分變化大，故其廢氣分析結果中並無明顯趨勢變化，但程式模擬旋轉窯內流況結果，可發現任一時刻其擾流度很高，燃燒空氣與廢棄物有好的接觸，故有好的燃燒效率 (Sharifah et al.,2008)。

AVR 公司操作之旋轉窯，前牆進料口左右分別是污泥燃燒機及主燃燒機，而 Yang 等人以 3 種不同模式模擬其操作下，爐內流況與溫度分布。發現無論是何種模式下，其爐內流況都呈現高度不對襯，並以逆時鐘方向於旋窯內旋轉，而溫度則有分層現象，推論是因前牆燃燒機注射燃燒空氣量不同及其他因素所導致，故有好的擾流效果，但研究報告並未分析其燃燒效率及廢氣組成 (Yang et al.,1999)。

綜上，旋轉窯在調整一次風與二次風支配比及風溫，使爐內流場擾流度增加，可有效提升廢氣燃燒效率。

三、改善燃燒空氣系統案例說明

探討本廠熱能利用狀況，發現本廠燃燒空氣並未利用廠內既有熱能來提高溫度，因此必須持續使用燃燒機來提供垃圾乾燥所需熱源，為妥善利用廠內既有的熱能，且在不影響原規劃設計的前提下，本改善將引用本廠熱交換器熱風出口管線之廢熱，將熱風導引至前牆小風口，因此本工程須增加一熱風送風機，以便將熱風抽引至旋轉窯內，其熱風溫度約 250°C 左右。

為提高擾流度，將燃燒空氣重新配置並分成 3 部分 (詳圖 1)，說明如下：

原燃燒空氣鼓風機所供應的風是由前牆環狀四周進入旋窯爐內，其空氣通道面積約 0.216 m^2 ，平均風速為 $1.93\sim3.22\text{ m/sec}$ 。

將圖 1 右上方 4 個小風口盲封，其空氣通道面積將從原先 14 個風口約 0.087 m^2 ，減少到僅有 0.062 m^2 ，平均風速為 $13.44\sim17.92\text{ m/sec}$ 。

利用燃燒機鼓風機連接原污泥進料管進入旋窯爐內，此股風為具有噴射功能的燃燒空氣，空氣通道平常操作僅有 0.0029 m^2 ，平均風速為 $76.62\sim95.78\text{ m/sec}$ 。

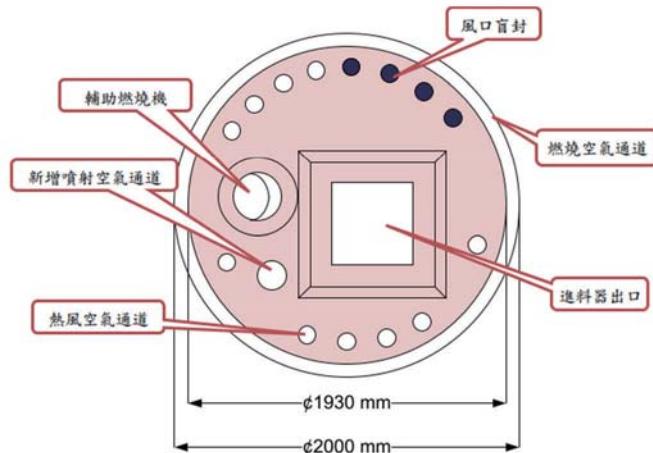


圖 1 前牆燃燒空氣配置示意圖

四、案例效益分析

經預熱燃燒空氣與配置改變，比較改善前後差異，其中每日用油量彙整如圖 2，從趨勢圖可明顯發現，改善後的確對於用油量有顯著的改善，符合預期的目標，而在廢氣排放與底渣品質部分，則維持與改善前相同。

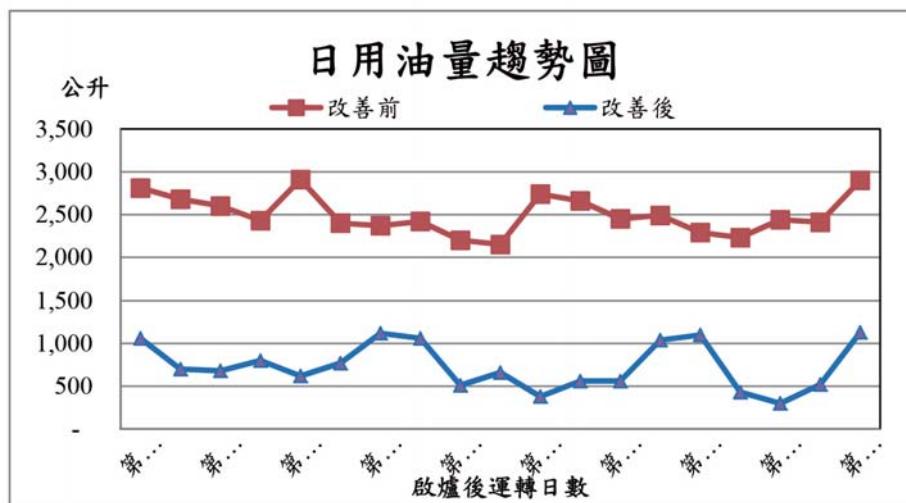


圖 2 改善前後連續運轉之日用油量趨勢圖

為進一步有系統分析本廠改善對於廢氣品質的影響，重新規劃以近似操作條件模擬燃燒環境，以利能更精確比較分析，其實驗規劃內容如下：

以固定總燃燒空氣量 ($5,500\sim6,500 \text{ Nm}^3/\text{hr}$)、垃圾與污泥投料配比 (20 : 1) 左右、旋轉窯轉速維持 0.1 rpm 與二次燃燒室爐溫維持在 $900\sim1,000^\circ\text{C}$ 左右之操作條件下，調整燃燒空氣配置差異，如下：

1. 改善前：燃燒空氣直接抽取垃圾貯坑空氣，燃燒空氣量設定為 $5,500\sim6,500 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ，燃燒空氣未預熱之狀況。
2. 改善後：燃燒空氣 ($1,500\sim2,000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$)、熱風 ($3,000\sim4,000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$) 與新增噴射風 ($1,000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$) 各自由獨立風機直接送入旋轉窯內的燃燒狀況。

上述燃燒空氣配置操作條件，分別連續運轉 4 小時，觀察與紀錄爐內燃燒火焰的位置、用油量、廢氣排放品質等結果，探討分析如下：

4.1 爐內燃燒火焰位置探討

改善後之熱風溫度約 250°C 左右，且出口位於進料器下方，能與垃圾直接接觸，因此乾燥效果佳，加上新增噴射風能夠有效與垃圾充分混和，提供垃圾層內足夠的燃燒空氣，使燃燒更加劇烈。另觀察改善後之空氣擾流強度增加，且主要風量配置都在左邊，形成前牆左側風量大於右側不平等之比例，自然使廢氣沿爐壁呈現順時針漩渦現象，加速垃圾乾燥與燃燒，在此情況下，即使停止燃燒機，垃圾自燃的情形仍可維持，火焰線可長時間維持在旋窯長度前 $1/3$ 的位置 (詳圖 3)，此結果也正好與文獻回顧中 Sharifah 等 (2008) 的研究成果類似。

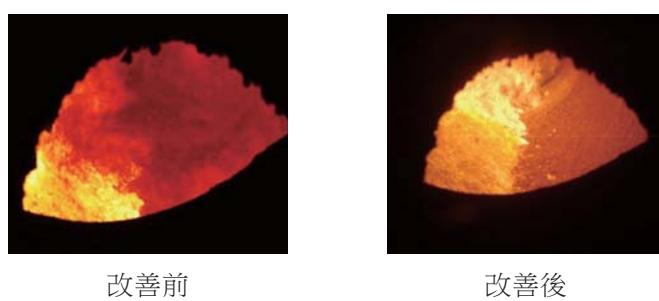


圖 3 改善前後垃圾燃燒火焰線位置圖

4.2 燃燒機用油量探討

燃燒機使用目的為維持爐溫大於 850 °C 與確保垃圾燃燒品質，因此本操作條件設定二次燃燒室出口溫度維持在 900~1,000 °C 的情況下（圖 4），投入性質相似的垃圾與垃圾量（1.5~1.6 噸 / 小時），探討改善對於燃油用量的影響，從圖 4 之燃油使用量趨勢圖中，可獲知改善後之燃油使用量明顯比改善前降低許多，其中改善前燃油使用最高約 90~110 L/hr，改善後用量則降到僅有 60~70 L/hr，另改善後使用燃燒機頻率也相對減少，證明提升燃燒空氣溫度與增加燃燒空氣擾流度，能夠維持爐溫並減少使用燃燒機的現象。

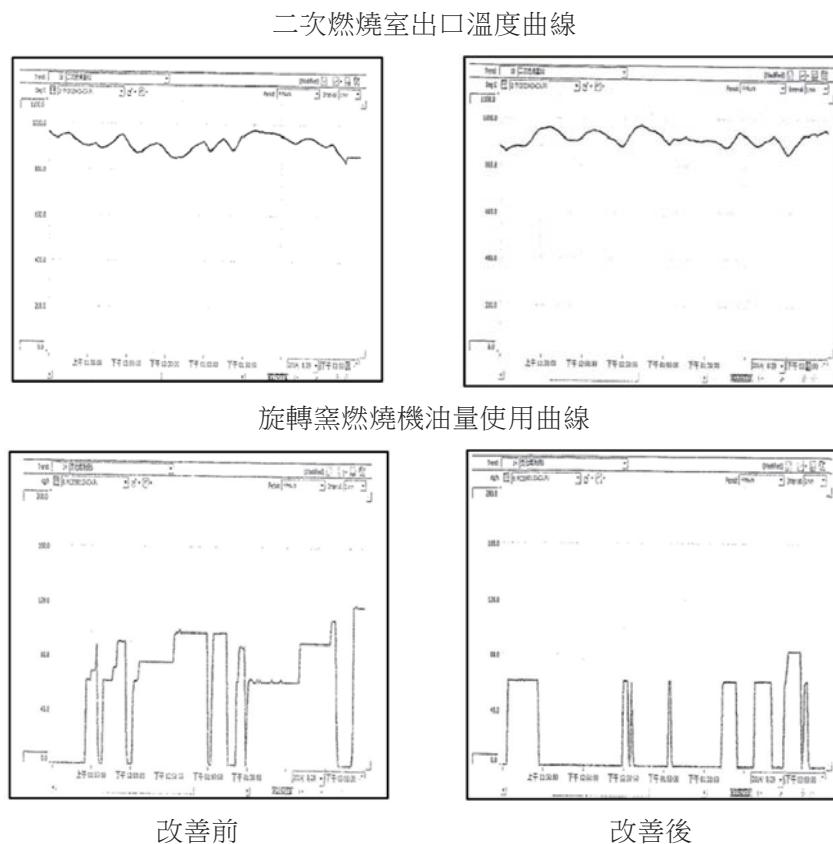


圖 4 爐溫與燃油使用量趨勢圖

改善案執行前每噸垃圾平均用油量為 86.74 L/ton，110 年時每噸垃圾用油量則降至 18.13 L/ton，以 IPCC 公告係數換算燃燒每公升之柴油排放約 2.61 kg-CO₂，本廠 110 年度總計處理 8,199 噸廢棄物，節省約 562.54 公秉之燃油（共減少 1,465.7 噸 CO₂）。

4.3 一氧化碳排放濃度的探討

一氧化碳可代表其當下燃燒情況的好壞，為確保本改善並不會因為減少用油量，而對燃燒品質會有很大的影響，在實驗過程中，透過煙囪所裝設之連續監測設施 (CEMS)，紀錄各階段即時的一氧化碳排放濃度（詳圖 5），並計算含氧校正 (11%) 後之小時平均數值彙整如表 2 所示，顯示不論從即時曲線圖或是小時平均值差異均不大（改善後 CO 的平均排放濃度略低於改善前）。

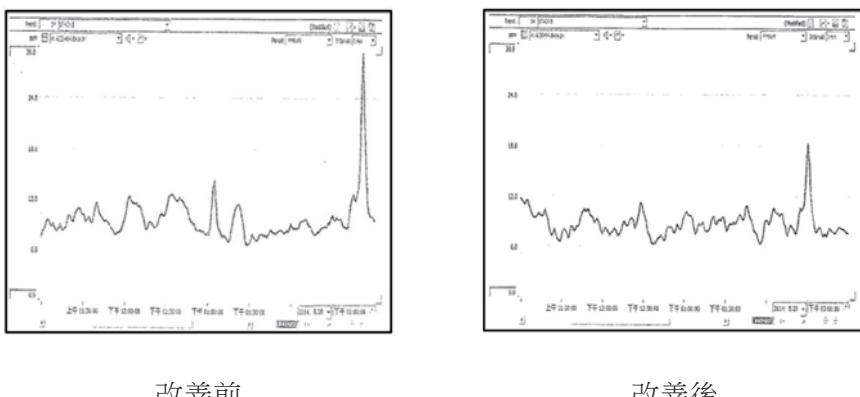


圖 5 改善前後煙囪一氧化碳即時排放原始濃度曲線圖

表 2 改善前後煙囗一氧化碳小時平均排放濃度彙整表

項次	改善前 (ppm)	改善後 (ppm)
第 1 小時	18.68	17.90
第 2 小時	21.88	14.54
第 3 小時	16.12	16.69
第 4 小時	23.17	17.92
平均值	19.96	16.76

註：法規排放標準值為 100 ppm。

本公司測試於固定用燃燒機用油量，比較改善前後爐溫與 CO 排放濃度差異，惟一次燃燒室出口爐溫超過 1,050 °C 將會手動置入減少用油或停止燃燒機，反之爐溫低於 870 °C 會加大油量。

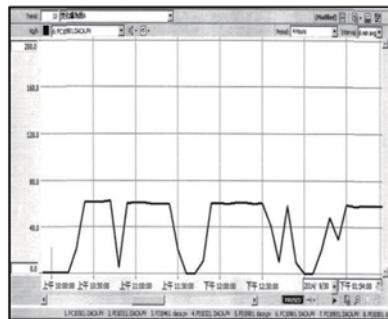
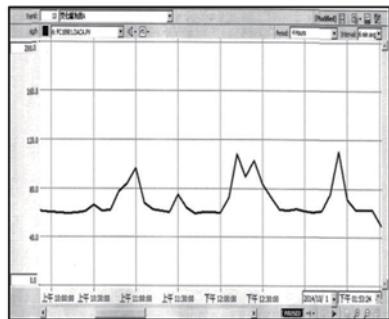
從圖 6 之趨勢圖可發現，在固定用油量的情況下，改善後平均爐溫 1,013 °C 大於改善前平均爐溫 927 °C，其表示改善能使垃圾產生較劇烈的燃燒反應，相對釋放較多的熱能。

另從圖 6 之 CO 排放趨勢圖及表 3 日報表小時平均值，可發現改善後小時平均濃度低於改善前，顯示在相對穩定的燃燒條件下，改善案能提升燃燒效率，降低 CO 排放濃度。

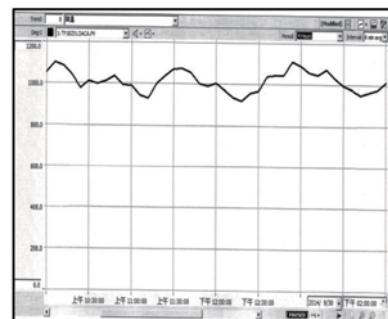
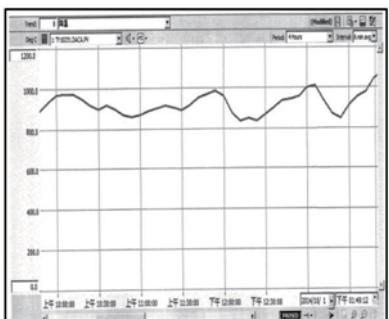
本次測試期間每小時採底渣樣品分析灼燒減量，分析結果數據如表 4 所示，可發現改善後之底渣平均灼燒減量 3.6%，小於改善前之底渣平均灼燒減量 5.7%，近 2 年委託第三方公正單位執行灼燒減量數據結果如表 5 平均值為 3.3%。

綜上之測試結果顯示，改善後可提供垃圾良好的燃燒反應環境，並能妥善利用垃圾自體燃燒所產生的熱能，讓下批次進料的垃圾達到自燃溫度，而不需外來火源，且能維持良好燃燒品質，可說是兼顧能源使用效率及燃燒效率，以達到污染減排及節能減碳之目標。

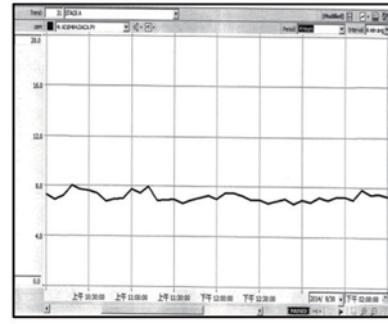
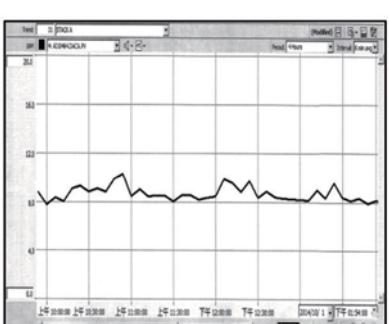
旋轉窯燃燒機油量使用曲線



二次燃燒室出口溫度曲線



一氧化碳即時排放原始濃度曲線圖



改善前

改善後

圖 6 爐溫與一氧化碳排放原始濃度趨勢圖

表 3 各階段煙囗一氧化碳小時平均排放濃度彙整表

項次	改善前 (ppm)	改善後 (ppm)
第 1 小時	27.57	17.58
第 2 小時	24.05	16.98
第 3 小時	26.25	16.76
第 4 小時	23.27	18.32
平均值	25.29	17.41

註：法規排放標準值為 100 ppm。

表 4 各階段底渣灼燒減量分析結果彙整表

項次	改善前 (%)	改善後 (%)
第 1 個樣品	5.0	3.7
第 2 個樣品	6.6	3.6
第 3 個樣品	5.6	3.4
平均值	5.7	3.6

註：本實驗日期為 103 年 9 月並依照環保署環境檢驗所公告之焚化灰渣之灼燒減量檢測方法 (R216.02C) 進行分析，法規排放標準值為 7%。

表 5 近 2 年底渣灼燒減量分析結果彙整表

時間	灼燒減量 (%)	時間	灼燒減量 (%)
109 年 Q1	4.2	110 年 Q1	4.7
109 年 Q2	0.9	110 年 Q2	3.0
109 年 Q3	3.5	110 年 Q3	3.6
109 年 Q4	3.4	110 年 Q4	3.3

五、結論

最佳的燃燒控制通常係指能夠使用較少的輔助燃料，又能降低污染排放的情況，因影響燃燒效率的因素眾多，因此如何有效穩定控制燃燒品質，本就是相當困難之課題，需隨時調整燃燒空氣的壓力、風量、溫度等，又因垃圾性質多變且無法預知的情況下，更增添其控制之困難度。

因此垃圾焚化操作是需依靠經驗累積，自垃圾攪拌與配比、燃燒空氣的分配、輔助燃燒機啟停時機及旋轉窯轉速等，都需要經過調適，並因應垃圾性質的改變做即時操作參數調整，始能確保較佳的燃燒品質，而這些參數的調整主要都是在確保能夠保持在良好的燃燒條件，本公司透過過往操作大型焚化爐之經驗，針對 3T 溫度 (Temperature)、時間 (Time) 及擾流 (Turbulence) 進行探討並施以改善，依實驗結果顯示本廠於提升燃燒空氣溫度及擾流度，使得燃燒空氣在旋轉窯內產生漩渦現象，並可利用垃圾燃燒過程所釋放的熱能，使下批次進料之垃圾足以乾燥並持續燃燒，在垃圾性質穩定且持續進料之情況，可有效減少燃燒機使用頻率、次數及用油量，且降低 CO 排放濃度及減少底渣灼燒減量，進而達到減少污染排放及節能減碳之目標。

六、參考文獻

吳中興 (1988)，國立台灣大學生物產業機電工程學系，玉米穗軸燃燒爐紊流分析，中國農業工程學報，第 34 卷，61 至 75 頁。

吳中興、李志萍 (2004)，國立台灣大學生物產業機電工程學系，使用旋轉窯焚化爐焚化稻殼之數值模擬分析，農業機械學刊第一期第 13 卷。

李志萍 (2004)，國立台灣大學生物產業機電工程學研究所，博士論文，旋轉窯焚化爐操作特性及應用於處理事業廢棄物之研究。

林玉川 (1999)，國立中山大學環境工程所，碩士論文，旋轉窯焚化爐三維紊流火焰結構及操作性能之研究。

葉永富 (1998)，國立台灣大學機械工程學系，碩士論文，旋轉窯焚化爐特性之分析。

- Du, J. C., Huang, Q. X., Yan, J. H.,(2012). Method for determining effective flame emissivity in a rotary kiln incinerator burning solid waste. Journal of Zhejiang University SCIENCE A 13.12, 969-978.
- Girovich, M. J., (1989). Performance of high-temperature slagging rotary kiln incinerator. JAPCA 39.6: 884-888.
- IPCC, (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2: Energy , Table 2.5.
- Lemieux, P. M., Pershing, D. W., (1989). Design and construction of a rotary kiln simulator for use in studying the incineration of hazardous waste. Review of scientific instruments, 60(8), 2768-2776.
- Salvador, S., Kara, Y., Crussol, J-M., (2005). Improving VOC recuperative incinerators performances by increasing turbulence levels inside the combustion chamber—experimental results. Applied Thermal Engineering. Volume 25, pp 1871-1881.
- Sharifah, A. S., Abidin, H. Z., Sulaiman, M. R., Khoo, K. H., Ali, H., (2008). Combustion characteristics of Malaysian municipal solid waste and predictions of air flow in a rotary kiln incinerator. Journal of Material Cycles and Waste Management. Volume 10, Issue 2, pp 116-123.
- Woodruff, P. H., Larson, G. P., (1968).Combustion Profile of a Grate-Rotary Kiln Incinerator. Proc. 1968 Nat. Incin. Conf., ASME.
- Yang, Y., Rakhorst, J., Reuter, M. A., Voncken, J. H. L., (1999). Analysis of gas flow and mixing in a rotary kiln waste incinerator. Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 6-8.

