

空氣污染與噪音類

蓄熱式焚化爐 (RTO) 設備之氧化矽收集裝置應用

黃建良*、陳佳輝**

摘 要

蓄熱式焚化爐 (Regenerative Thermal Oxidizer, 簡稱 RTO) 為目前業界處理含揮發性有機化合物 (VOCs) 排氣設備最佳的選擇之一，主要因其具有極高的熱回收效能，藉由槽內蓄熱材的堆疊，可有效回收熱能，大幅降低設備運轉時的瓦斯用量減少能耗及碳排。蓄熱材主要為無機石材，可概分成有序及無序結構，一般而言有序結構蓄熱材之熱回收效果較佳，使用也較廣泛。當使用 RTO 系統處理含有有機矽化合物之廢氣時，由於有機矽化合物在高溫下會裂解氧化生成氧化矽微粒，而逐漸阻塞蓄熱材之通氣孔道，致使 RTO 設備操作壓力逐漸升高，最後超過負荷而無法操作。本文介紹可用於 RTO 系統內的氧化矽粉體收集裝置，可降低蓄熱磚阻塞的機率，延長蓄熱材清理的週期，同時此裝置具有可單獨清理的特性，可縮短 RTO 停機清理的時間。

【關鍵字】有機矽化合物、蓄熱式焚化爐、蓄熱材、氧化矽

* 傑智環境科技股份有限公司

** 傑智環境科技股份有限公司

副總經理

工程師

一、前言

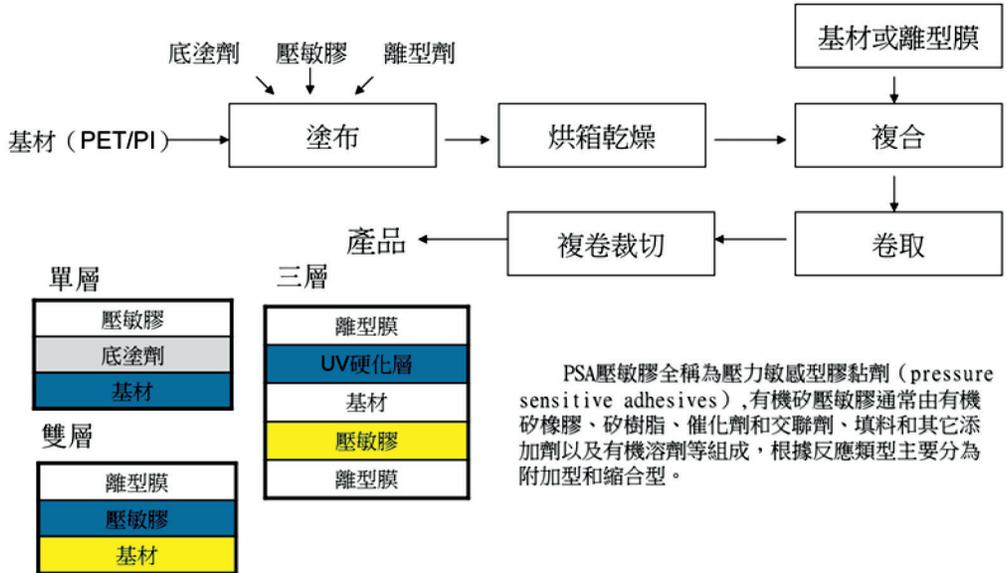
黏性膠帶業屬於包裝材料中游行業，係指在基材上塗佈黏著劑，藉由黏著劑之流動與被黏著體結合而產生黏著效果之產品。其種類相當繁多，產品包括雙面膠帶、電氣絕緣膠帶、泡棉膠帶、醫療膠帶、牛皮紙膠帶、電子膠帶等。依據台灣區黏性膠帶工業同業公會資料統計，近年來 OPP(二軸延伸聚丙烯)膠帶之銷售值最高，SPVC(軟質聚氯乙烯)膠帶列第二，各類商標膠帶列居第三；其中 OPP、SPVC 二大類膠帶占有總值 78%，且以外銷為主；目前台灣黏性製品大部份應用於包裝以及電氣絕緣用途，OPP 膠帶國內總產量僅次於美國、義大利及中國大陸。

台灣膠帶產業屬三次加工產業，已近一甲子生產歷史，全台約有 60 家膠帶廠，目前商品化之膠帶種類逾萬種。其可應用之產業範圍相當廣泛，諸如汽車業、電子業、機械製造業、建材業、印刷文具業、醫療器材業乃至國防、太空及至一般家庭消費等均有使用，更因黏性膠帶大量運用於包裝用途，故幾乎涵蓋所有行業，合計年產值大約 300 億元。近年來，隨著對於包裝材料的要求日益提高，膠帶產品部分因應國內電子資訊工業之快速成長，加上中國大陸膠帶業崛起，業者相繼推出電子類膠帶、工業用膠帶等，諸如變壓器線圈絕緣用、印刷電路板電鍍保護用、半導體晶圓切割、研磨及清磁線圈用等各式膠帶需求日益殷切，其中基於環保要求之 OPP 膠帶系列更漸成為市場主流。

膠帶係運用黏著劑塗佈於基材上而產生黏性，基材要求均勻，伸縮性小且對溶劑浸潤性好，包括：(1) 織物類的如棉布、玻璃布或無紡布等、(2) 塑料薄膜類如 PE、PP、PVC、PET 和聚酯薄膜等、(3) 紙類如牛皮紙、玻璃透明紙等，基材厚度在 0.1~0.5mm 之間，除基材外，其組成還包括背面處理、底膠、黏著劑及離型紙，膠帶若是以帶狀形式捲起來時，則離型層可塗在背面，以減小使用時的開卷拉力。

底膠的作用是增加黏著劑與基材間的黏附強度，以便揭除膠黏帶時不會導致黏著劑與基材脫開而污染被黏表面，並使膠黏帶具有復用性。常用的底膠是使用異氰酸酯部分硫化的氯丁橡膠或改性的氯化橡膠等；背面處理一般由聚丙烯酸酯、PVC、纖維

素衍生物或有機矽化合物 等材料配製而成的，可以達到隔離的作用，雙面膠帶則須加 1 層離型紙，如半硬 PVC 薄膜、PP 薄膜或牛皮紙等。



資料來源：吳文彥，Silicone 材料的未來與應用

圖 1 PSA 壓敏膠製品製備流程圖

具離型特性或壓敏性膠帶製程 (圖 1) 所排放的有機廢氣中常會含有氧化矽微粒或有機矽化合物，對於含有氧化矽微粒的排放源建議應以三級過濾器進行微粒去除，而有機矽化合物之有機廢氣經 RTO 高溫裂解後會轉化成氧化矽，並逐漸碰撞形成微粒，此微粒會阻塞 RTO 中的蜂巢式蓄熱磚通氣孔道，增加 RTO 系統的運轉壓損。隨著氧化矽粉體的量逐漸增加，壓損不斷上升終會超過系統壓力限制致使系統停機，必須停機降溫進行蓄熱磚清理作業並，以致延誤工廠生產排程。本文介紹可協助去除 RTO 系統中部分氧化矽粉體之裝置，可延長蓄熱磚清理週期，縮短清理時間，此裝置具有模組化及重複使用特性，可有效降低操作成本。

二、氧化矽收集裝置設計及驗證方法

本氧化矽收集裝置主要利用一多層次交錯耐高溫容器配置搭配氧化矽附著載體，構成可應用於 RTO 焚化系統中的氧化矽收集裝置。此裝置設計原理主要利用一種氧化矽粉體附著載體，此載體具有耐高溫之特性並可使氧化矽附著在其表面，當氧化矽附著量超過其最大附著量後部分氧化矽隨系統氣流被帶入收集單元，粉體收集單元為一多層次交錯耐高溫容器所組成，其容器以交錯型設計，盡可能降低裝置壓損，同時提高粉體收集效率。

將數個氧化矽收集裝置擺放於已運行且有氧化矽粉體阻塞問題的 RTO 設備中，隨系統運轉驗證裝置收集氧化矽粉體的能力，同時觀察裝置的在長時間高溫狀態下的形變狀況，以做為後續改進的參考。

三、氧化矽收集裝置測試結果

3.1 膠帶業廢氣製程及氧化矽累積蓄熱磚處理

圖 2 為依照膠帶製造廠商 K 公司之廢氣風量、VOCs 組成及特性所進行的處理流程規劃，其中 Line1~Line3 之廢氣組成較為接近且不需要進行過濾或洗滌前處理，故規劃在同一區，而 Line4 及規劃預留之產線 2 由於含有少量易燃性微粒及大量二氧化矽微粒及前驅物，故需要裝設濕式洗滌及高效微粒過濾器 (合併成高效次微米油霧過濾器)，經處理後之廢氣再進入主處理設備進行處理。主處理設備為 2 座 1,000 NCMM 的 RTO 爐，同時依廠商之生產排程估算最大及最小的單位時間溶劑使用量 (計入未來產線用量)，在操作過程中如果廢氣中溶劑量過高，使得 RTO 燃燒溫度超過預設值，則會開啟熱強排，釋放多餘的熱量加熱製程熱煤油以進行熱回收。2 座兩槽式蓄熱式焚化爐 (2T-RTO) 為方形設備，前處理設備包括高效次微米油霧過濾器及回溫控濕等設備則集中在左側部分，右側為水平式 PV 閥及維修通道。此套處理系統對膠帶業的廢氣處理具有良好的處理效果，經 K 公司委託檢測其入口 THC 濃度約為 3,000~5,000 ppm，經系統處理後排氣 THC 濃度約為 40~70 ppm，去除效率大於 98%。

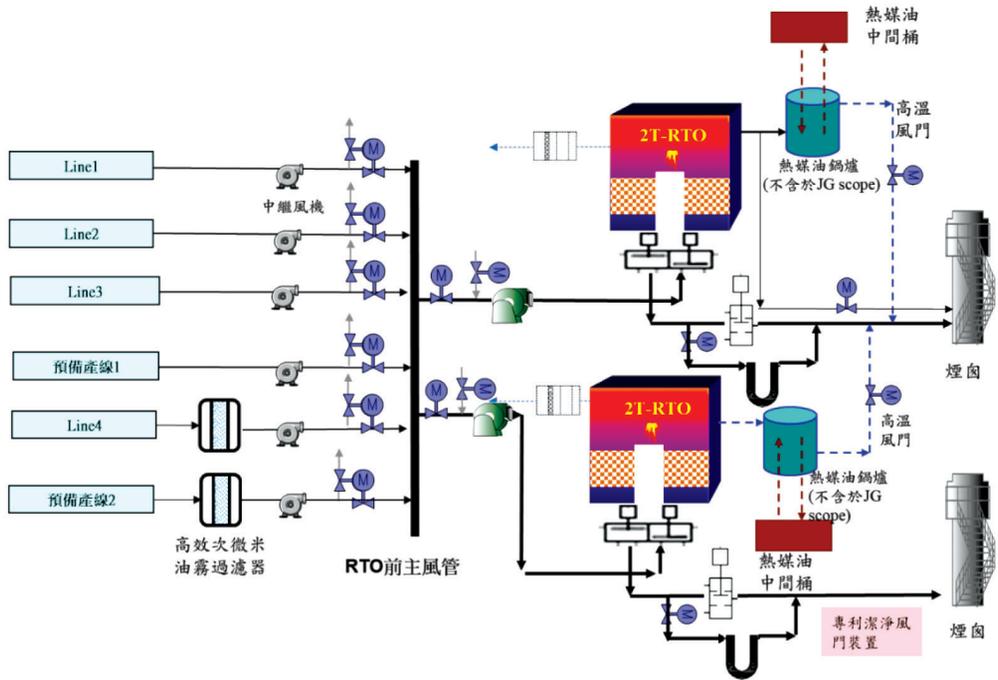


圖 2 K 公司膠帶廠之製程廢氣處理流程

另外在維護保養部分，K 公司之廢氣處理設備進行經過一段時間的操作後，由於 RTO 爐前後壓差已達到預設警告值，故暫停運轉進行維護保養作業，進行 RTO 爐底部之蓄熱材清理及更換。圖 3 是從 RTO 內清理出來的馬鞍型蓄熱材照片，從照片中可以看到蓄熱材表面已附著大量的二氧化矽粉體，同時有部分微粉已穿過馬鞍蓄熱層，附著於蜂巢式蓄熱磚表面，造成蓄熱磚的通氣孔洞阻塞 (圖 4)，系統壓降升高。由於蜂巢式蓄熱材為多層堆疊，在靠近上爐體的蓄熱磚已嚴重阻塞 (約 3 層)，無法進行逆吹清理，必須進行更換，下層蜂巢式蓄熱磚則未受到影響，可持續使用，而馬鞍型蓄熱材則是必須完全更換或清潔。更換或清潔蓄熱材對廠商而言不僅是一筆維護成本，且由於 RTO 系統的降溫停機與蓄熱磚清理更換約需 3~5 天，在旺季時有可能會排擠到生產的排程，造成公司營運上的損失，如何延長 RTO 爐清理周期及縮短蓄熱材之清理更換所需時間，對於排氣中含有機矽化合物的業者都是重要且迫切的課題。

6 蓄熱式焚化爐 (RTO) 設備之氧化矽收集裝置應用



圖 3 附著二氧化矽粉末的馬鞍型蓄熱材



圖 4 附著二氧化矽粉末的蓄熱磚

目前國內業者對於解決使用焚化技術處理有機矽化合物廢氣所導致的系統阻塞問題大部分採用定期更換的方式，由於 monolith 形式的蓄熱磚為整齊有序堆疊且其通氣通道為直通形式，一旦阻塞就無法通氣，而馬鞍型蓄熱材為無序堆疊，可創造出更多的通氣通道及空隙，可延長系統阻塞的時間，等到系統阻塞後就更換整批馬鞍型蓄熱磚。以更換馬鞍型蓄熱磚的方式來處理氧化矽粉體所造成的阻塞問題是目前簡便通用的方式，但仍需考慮以下的問題：

1. 雖然馬鞍型蓄熱磚價格較為便宜，但對應到大型 RTO 設備的更換費用包括機具、人工及材料等也相當可觀，且每年的更換次數可能多達 4~6 次 (依矽化合物使用量而定)，且有可觀的廢棄物需要處理，目前國內廢棄物處理的價格高昂。

2. 新設處理設備可選擇使用馬鞍型蓄熱磚來取代 monolith 蓄熱磚，但是在相同的熱回收效率下，馬鞍型蓄熱材體積約比 monolith 蓄熱磚多出 1/2 以上，也就是說採用馬鞍型蓄熱磚的 RTO 設備體積要加大，也會增加設備成本。
3. 目前國內有許多舊有的 RTO 處理設備因其原本設計的因素，也面臨到氧化矽阻塞但無法更換蓄熱材的困境，例如旋轉式 RTO 設備，因其爐體構造及蓄熱要求，故僅能沿用 monolith 型式蓄熱磚。
4. 氧化矽粉體基本上是一工業原料，氧化矽可添加應用於多種商業產品，例如磚塊、玻璃和陶瓷、石膏、花崗岩、混凝土、清潔劑等，如果可以不用更換或減少蓄熱材更換的次數，同時收集氧化矽粉體提供給製造商進行去化再利用，不僅可節約成本同時也達到減廢、資源再利用的效益，是一符合當前 ESG 綠色潮流的措施。

3.2 氧化矽收集模組性能及耐用性驗證

設計並製作 4 組氧化矽收集模組，並分別放置於 K 公司之 RTO 爐體的蓄熱磚頂部，其放置區域如圖 5 所示，分別放置於角落，側邊及中央區域，以觀察其收集粉體效果，測試期間為 109/12/09~110/02/17。系統停機維保時，進入爐內觀察裝置收集情況，發現靠爐邊 (2 號模組) 的模組之粉體收集量較多 (大約 8 成滿)，爐子中間 (3 號模組) 收集量較少 (大約 5 成滿)，合計 4 個模組的收集槽粉體共重 335 克，以回收率 90% 估算 (部分附著在收集裝置上)，4 個模組約 372 克，每一模組置放氧化矽附著載體重量約 20 公斤，以 SiO_2 附著量 0.5wt% 計算，每一模組載體上約附著 100 克氧化矽，4 箱共 400 克，估計 4 個模組約有 $400+372=772$ 克 SiO_2 粉體，估算單個模組的氧化矽收集量為 193 克。圖 6 為氧化矽收集模組周圍及下方之蓄熱磚情況，從照片中可以看到，未放置收集裝置的蓄熱磚表面累積大量的氧化矽粉體，通氣通道幾乎都被填滿，而收集裝置下方蓄熱磚表面的粉體量則是低很多，且依模組收集槽的排列有明顯深淺差異，蓄熱磚表面雖有累積氧化矽粉體，但目視尚未阻塞嚴實應該可以吸塵之方式去除。此次的模組放置時間約 2.5 個月，以此 RTO 爐體面積估算單槽約可擺放 80 個模組，雙槽共 160 個模組，以每個模組收集 193 克 SiO_2 估算，測試期間 RTO

8 蓄熱式焚化爐 (RTO) 設備之氧化矽收集裝置應用

爐內至少產生 $193 \times 160 / 1000 = 30.88$ 公斤氧化矽，如果以模組收集率 50% 估算，則氧化矽粉體產生量高達 60 公斤以上。氧化矽粉體為一低密度的膨鬆粉體，堆積密度大約為 0.23 g/ml ，以此 RTO 爐體面積 (32.6 m^2)，估算蜂巢槽狀蓄熱磚被氧化矽粉體阻塞情況，60 公斤氧化矽粉體體積約為 259 L，蜂巢槽狀蓄熱磚開孔率約為 70%，則空隙面積約為 22.8 m^2 ，假設將氧化矽全部均勻平鋪在蓄熱磚表面，則阻塞厚度可達 1.13 公分，嚴重影響 RTO 的氣流運行。

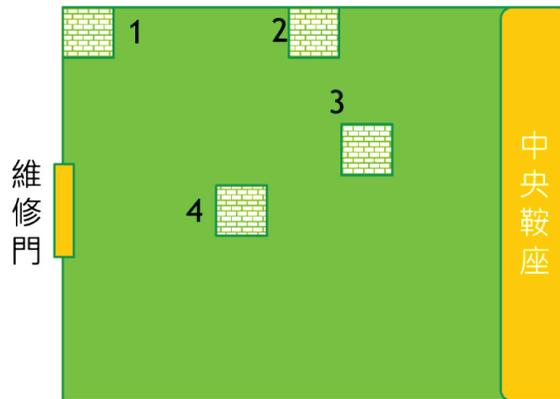


圖 5 氧化矽收集裝置擺放方位

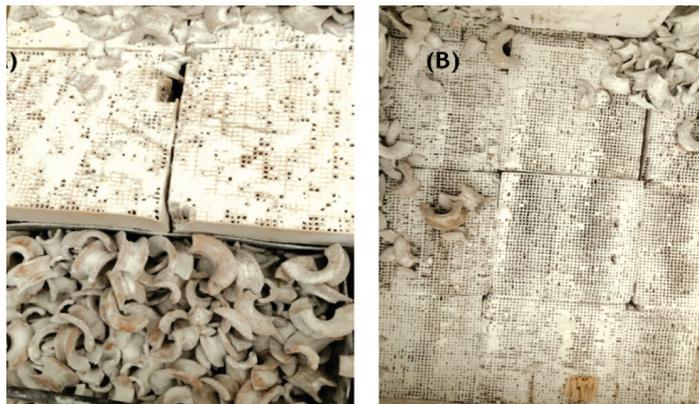


圖 6 氧化矽收集裝置周圍 (A) 和下方 (B) 之蓄熱磚情況

此次的氧化矽模組測試，雖成功驗證模組可有效收集氧化矽粉體，但也發現模組強度不足，在長時間的高溫狀態下，模組變形嚴重，部分鉸件變形脫開，

無法再次使用，故需針對收集裝置進行結構設計改善，以符合循環使用的目標設定。將更新設計後的二代氧化矽收集模組放置入 RTO 爐中 (如圖 7)，測試期間為 110/04/01~110/04/26，4 個模組的收集槽粉體共重 157.4 克，以收集率 90% 估算，4 個模組約 173 克，每一模組氧化矽附著載體重量約 6 公斤，以 SiO_2 附著量 0.5wt% 計算，每一箱約為 30 克，4 箱共 120 克，估計 4 個模組約有 $120+173=293$ 克 SiO_2 粉體，估算單個模組的氧化矽收集量為 73 克。此次氧化矽粉體目視產生量較低，爐體馬鞍磚表面粉體附著量少，但收集槽中的氧化矽附著載體表面粉體附著量多，收集模組之第 1 及第 2 層溝槽中部分未填滿，收集模組槽背面仍有粉體附著，顯示有機矽裂解成氧化矽的過程是在通過蜂巢蓄熱磚時就逐漸發生並一直持續到焚化爐的最高溫處。圖 8 為二代氧化矽收集裝置下方蓄熱磚情況及所收集的粉體，從照片中可以看到蓄熱磚表面的氧化矽並不多，主要是測試的時間較短，產生的氧化矽量也較少，經過重新設計後的收集裝置在此次的測試中幾乎沒有變形，後續將進行更長時間之測試。

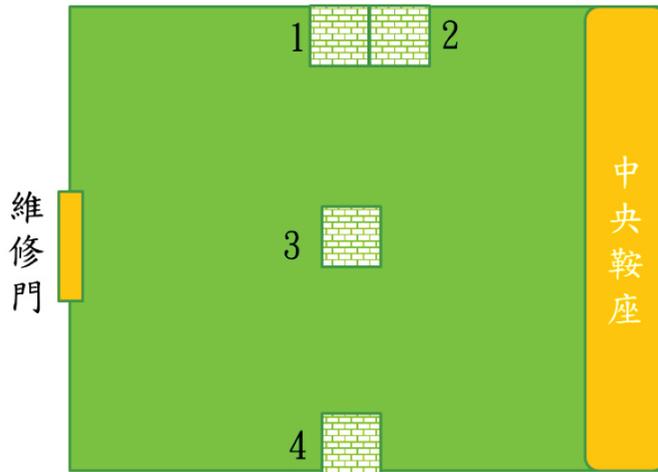


圖 7 二代氧化矽收集裝置擺放方位

10 蓄熱式焚化爐 (RTO) 設備之氧化矽收集裝置應用



圖 8 二代氧化矽收集裝置下方蓄熱磚情況及所收集的粉體

表 1 為氧化矽收集模組測試彙整，第一代氧化矽收集模組因強度不足，僅使用 1 次就因破損嚴重而無法再用，而 2 代裝置則經過約 5 個月的測試後雖有輕微變形，但並無破損脫開之狀況，故可重複使用。在收集量方面，二代裝置的最佳收集量約在 120 克左右，超過此量則收集效果變差，6~8 月的測試是將收集裝置上下重疊所收集的量，上層模組收量約 120 克而下層模組收量約 60 克，顯示若能多層次堆疊收集裝置，可有效提高氧化矽粉體之收集量。

表 1 氧化矽收集模組測試整理

氧化矽收集模組	收集週期	收集量 (g/ 模組)	推估 RTO 爐內氧化矽總量 (kg)	模組型變
第一代	109/12/09~ 110/02/17(年假)	193	30	嚴重，不堪使用
第二代	110/04/01~ 110/04/26	73	26	輕微，可重複再用
第二代	110/05/02~ 110/06/13	122	43	輕微，可重複再用
第二代	110/06/19~ 110/08/23	185.5 (上 + 下)	66.8	輕微，可重複再用

四、結論

膠帶相關產業製程中常會使用業除使用一般有機溶劑之外，常會使用含矽有機物，此類有機物經高溫氧化裂解後會形成氧化矽微粒，這類氧化矽微粒在 VOCs 焚化系統中常會阻塞蓄熱磚通氣通道，造成蓄熱磚阻塞，導致系統壓力上升，直致無法操作。設計可用於 RTO 系統內的氧化矽粉體收集裝置，經 6 個月以上的實場驗證，以原物料使用量估算，此氧化矽收集率約可達 50%，可減緩阻塞的嚴重度，簡化清理作業，同時降低蓄熱磚阻塞的機率，可延長蓄熱材清理的週期。由於此裝置具有可單獨異地清理的特性，可以置換的方式縮短 RTO 停機清理的時間，降低對工廠生產排程的干擾。

參考文獻

<http://www.credit.com.tw/NewCreditOnline/Epaper>。

吳文彥，Silicone 材料的未來與應用。

12 蓄熱式焚化爐 (RTO) 設備之氧化矽收集裝置應用