

燃燒季刊

Combustion Quarterly

第二十三卷 第三期

中華民國一百零三年八月出版

Vol. 23, No.3

Aug. 2014

目錄

CONTENTS

編輯札記	2
	江鴻龍、陳維新
噴射引擎機車使用酒精汽油排放廢氣之觸媒轉化效率研究	3
	姚永真、蔡俊鴻、柯雅琍、黃慈閔、蔡維澤
丙烯腈氣體之觸媒氧化反應參數研究	18
	吳信賢、周更生
乙烯醋酸乙烯酯/蒙脫土奈米複合材料熱穩定性及耐燃性質之研究	27
	張銘坤、林佳穎、林學昌
30kWt 化學迴路新燃燒系統冷模試運轉研究報告	40
	沈政憲、陳建華、許介寅、彭鏡禹、邱炳嶽、黃國恩
徵稿說明	64

編輯札記

鑑於全球環境變遷對生態環境有極大影響，減少消耗能源及資源，將有助於減緩對環境生態衝擊，亦兼顧人類生活環境品質。因而有效提升能源應用效率之技術發展並建置最佳化之操作條件參數、替代傳統化石能源之開發如生質能、酒精燃料等、研發低污染對環境友善的材料，以期能減少能源使用與降低污染來改善生活環境品質並追求永續發展。

本期共刊登四篇專業論文，分別來自大專院校、工研院等單位之研究成果，工研院姚永真博士及成功大學蔡俊鴻教授將利用酒精汽油燃料於機車引擎燃燒，建置無觸媒排氣管、新觸媒以及高里程機車污染物排放特徵。工研院吳信賢經理及清華大學周更生教授說明丙烯腈揮發氣體於Ag/CeO₂MnO₂觸媒中進行燃燒之特性。雲科大張銘坤教授團隊發展具熱穩定性及耐燃性質之乙烯醋酸乙烯酯/蒙脫土奈米複合材料，應用於電線及高熱性質機械等之包覆。工研院綠能與環境研究所團隊利用化學迴路燃燒系統，建立完整操作程序及相關操作參數如系統操作輸送氣體氣量、氣送壓力、載氧體停留時間、旋轉閥轉速與進料量的搭配、反應器操作溫度等。以提昇燃燒之能源效率，降低二氧化碳排放。

整體而言，本期的內容豐富多元，提供讀者有關材料開發、能資源有效運用之新知，亦說明環境友善能源替代應用之契機，應是理論與實務應用並重之一期。亦請本刊讀者支持及踴躍投稿本期刊，共同推動燃燒、能源與環境科技知識分享及研究交流。

副總編輯 江鴻龍

總編輯 陳維新

噴射引擎機車使用酒精汽油排放廢氣之觸媒轉化效率研究

Catalytic Converter Efficiency of Air Pollutant by Integrated Strategy of Fuel Injection Motorcycle and Ethanol-gasoline Blend

姚永真¹、蔡俊鴻²、柯雅琍³、黃慈閔³、蔡維澤³

Yong-Zhen Yao Jun-Hong Cai Ya-Li Ke Ci-Min Huang Wei-Ze Cai

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratorie, Industrial Technology
Research Institute

國立成功大學環境工程學系

Department of Enviromental Engineering, National Cheng Kung University

摘 要

本研究以 2 部四行程噴射引擎機車為對象，以 E15 酒精汽油為測試油品，於怠速條件下比較酒精汽油於無觸媒排氣管、新觸媒以及高里程含觸媒排氣管所致法定空氣污染物(CO、THC、NO)量測結果。結果顯示，與市售油相較，使用 E15 酒精汽油所致 CO、THC 及 NO 排放濃度於新車或過保固里程機車皆顯示有較低濃度。法定空氣污染物以新機車搭配新觸媒之排放濃度最低，並隨累計里程增加而提高。E15 為燃料對過保固期機車之法定空氣污染物排放濃度仍較無觸媒機車為低，顯示觸媒轉化器仍對法定空氣污染物排放具有控制效果，惟控制效率不如新觸媒，觸媒轉化率僅有新觸媒之 63% (CO)、48% (THC)及 74% (NO)。觸媒之比表面積與表面結構分析結果顯示，過保固里程之觸媒有比表面積減少、平均孔徑變大、燒結情形顯著、表面有明顯被覆層等特性，使得表面積下降減少反應面積，為造成觸媒轉化效率下降主要原因。此外，不同組合(油品-機車-觸媒)之分析結果顯示，不同空氣污染物受觸媒及油品影響程度不同，尾氣排放 CO 受觸媒及油品影響，THC 除油品影響外，機車引擎條件劣化及觸媒老化亦對 THC 排放具有影響，NO 則受車輛及觸媒劣化影響較大。

關鍵字：怠速、法定空氣污染物、E15 酒精汽油、三元觸媒

¹工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: ycyao@itri.org.tw

²國立成功大學環境工程學系，教授

³國立成功大學環境工程學系，碩士

Abstract

In this study, two four-stroke motorcycles with fuel-injection engine were selected as target to investigate the catalyst converter efficiency of criteria air pollutants (CO, THC, and NO). Three types of tailpipe were installed in the test motorcycles, respectively, including new catalyst, in-use catalyst in odometer 16,000 km, and no-catalyst. Ethanol-gasoline blend which contains 15 % (v/v) ethanol in gasoline (E15) was used as test fuel. The motorcycles were tested on an idling mode and analyzed by exhaust analyzer. The result shows that the CO, THC, and NO concentrations are lower than those of commercial fuel while using E15 as fuel in both new and in-use motorcycle. The lowest concentration of criteria air pollutants was observed in new motorcycle with new catalyst tailpipe, and the concentration increased with the increasing cumulative odometer. The result also indicated catalytic converter still work for criteria air pollutants in the in-use motorcycle, but the control efficiency is only achieved by 63% (CO), 48% (THC) and 74% (NO) as compared to those of new catalysts. The analysis result of specific surface area and catalyst surface structure showed that the in-use catalyst has less specific surface area, larger pore size, and more sinter than the new catalyst. This may be the reason that caused low catalyst converter efficiency of in-use catalyst. In addition, with different fuel-motorcycle-catalyst scenario, the results showed that the catalyst and fuel may affect CO emissions, THC may influence by fuel, engine condition, and catalyst aging, and engine condition and catalyst aging may have impact on NO emissions.

Keywords: Idle model, criteria air pollutants, E15 ethanol-gasoline blend, three-way catalyst

一、前言

影響車輛排放空氣污染物之主要因素分為引擎類型(含車輛污染控制元件效能)、燃油品質及引擎操作型態等三類。污染控制元件之引進及發展主要係藉由日趨嚴格的排放標準來主導，透過引擎修正可改善新車之排氣狀況；如：配置觸媒轉化器、蒸發油氣再回收裝置等。而引擎設計改善亦須有相對優質之燃料油品配合，才能完全發揮其功效，燃料品質對所有車輛產生立即之影響。引擎操作型態(引擎負荷)造成燃燒條件不同，產生之空氣污染物特徵亦有所差異。

我國環保署對機車管制主要透過訂定日益嚴格之排放標準不斷提升機車引

擎技術，以達到污染排放管制目的。目前國內機車空氣污染物排放標準已訂定第五期標準(民國 97 年 7 月 1 日起實施)，自民國 98 年起所有銷售新車皆需符合五期標準。為符合五期標準，新機車全面使用噴射引擎；機車新車型審驗資料(排氣量低於 150cc 者)顯示，民國 98 年後合格引擎族皆為噴射引擎車款，國內機車市場已由化油器引擎機車轉變為以噴射引擎機車為主[1]。

觸媒轉化器為車輛後端污染控制設備，將引擎廢汽之 CO、HC、NO_x 轉化成無害氣體。許多研究顯示機車裝置觸媒轉化器對法定空氣污染物具有減量效益，新車使用觸媒轉化器，對基準污染物轉化效率可達 67% (CO)、80% (HC)及 41% (NO_x) [2]；二行程機車之三元觸媒對 CO、THC 及 NO_x 轉化率分別為 88、91 及 94% [3]。觸媒溫度為影響觸媒轉化器效率最主要因素，機車研究顯示引擎尾氣溫度於觸媒達到操作溫度後可使尾氣 CO 濃度驟降，引擎污染排放有明顯改善 [4-6]。

於車用油品策略上，因過去十年間石油短缺造成高油價時代來臨，使得酒精混合汽油(ethanol-gasoline blends)已廣於世界各國以清潔燃料或替代燃料導入燃油市場。推廣使用酒精混合汽油亦被視為空氣品質改善及溫室氣體管理措施之一。國內對酒精汽油之推廣，於民國 94 年全國能源會議結論訂定生質酒精發展目標，推動目標為生質酒精民國 99 年 100-300 萬公秉，民國 104 年 200-600 萬公秉，民國 119 年 300-900 萬公秉[7]。國際間以添加 10 vol% 乙醇之酒精汽油(稱為 E10)最為廣泛使用；使用 E10 時，車輛不須使用任何特殊規格之供油系統，亦即現有汽車供油系統或技術即可直接使用 E10 做為燃料[8]。乙醇含有氧原子，與汽油混合後，可配製成具有高含氧量且辛烷值之燃油，此特點勢必會影響車輛引擎燃燒效率，同時影響尾氣排放空氣污染物特徵。

國內已有多篇論文探討機車引擎於不同引擎型式(化油器/噴射)、不同油品(無鉛汽油、不同比例酒精汽油)等條件下所致廢氣排放特徵[9-14]；然組合噴射機車使用不同油品對觸媒轉化效率影響之討論則不多見。本篇文章乃以四行程噴射引擎機車為測試機車，於使用酒精汽油為燃料並配置不同里程觸媒之條件下，探討機車引擎尾氣排放污染物之差異，期能提供讀者於國內機車推動噴射引擎及酒精汽油政策可能造成之空氣污染排放特徵。

二、研究方法

本研究以四行程噴射引擎機車為對象，以添加 15 vol% 乙醇之 E15 酒精汽油為測試油品，於怠速條件下量測法定空氣污染物排放濃度，比較酒精汽油於無觸媒排氣管、新觸媒以及高里程含觸媒排氣管所致氣態污染物量測結果；量測項目包括：一氧化碳(CO)、碳氫化合物(THC)及氮氧化物(NO_x)等法定空氣污染物等。

1. 測試機車及觸媒排氣管

測試機車採四行程引擎及噴射供油系統，排氣量為 125 cm³；共有 2 部符合五期排放標準之同廠牌同車款機車進行尾氣排放測試，一部為新機車，編號 MC-1，里程數<1000 公里 2010 年出廠；另一部為超過保固里程之舊機車，編號 MC-2，里程數 16,200 公里，2008 年出廠。為使篩選測試車具代表性，本研究乃參考環保署機車新車型審驗資料及新車銷售數，選購前五名引擎族之車型。

測試機車所裝置之觸媒排氣管包括三類：(1)新觸媒排氣管；(2)過保固里程含觸媒排氣管；(3)無觸媒排氣管。前二項皆為三元觸媒排氣管，貴重金屬成分包括 Pt、Pd、Rh，觸媒構造為蜂巢型，尺寸為直徑 45 公分及長度為 130 公分，觸媒孔密度 100 cpsi。圖 1 及圖 2 分別為觸媒蜂巢式結構及觸媒剖面圖。

2. 測試油

本研究使用二支測試油，一支為添加酒精比例為 15 % 之汽油(E15)，所使用酒精純度為 99.5 % 以上之無水酒精；另一支為參照油(市售 95 無鉛汽油, G95)，做為測試比較基準。測試油品乃委請國內煉油業者協助配置，並由驗證合格油品成分分析實驗室依標準測試方法進行油品成份含量測試，分析項目包括辛烷值、密度、苯含量、含氧量、熱值等，測試油規格如表 1 所列。

3. 測試程序

為避免引擎操作條件造成影響，本實驗以怠速(idling)條件進行分析；參考國內機車標準行車型態 ECE cycle 行駛時間(共為 780 sec)為基準，啟動後 40 秒內之機車尾氣排放濃度數據不採計，並於啟動後第 41 秒開始記錄機車尾氣污染物排放濃度數據，機車怠速時間共計 820 秒(前 40 秒數據不採計)，怠速實驗測試裝備如圖 3 所示。

分析儀器為廢氣分析儀(HORIBA MEXA-584L)，CO 及 THC 之濃度測定以非發散型紅外線分析器(Non-dispersive Infrared Analyzer, NDIR)分析，NO 以電化

學法分析；參考環保署公告「機器腳踏車冷車行車型態排氣污染測試方法及程序」規定，每次測試前廢氣分析儀皆以標準氣體作校正，並以校正結果誤差值需於±2%內為準則。

4.觸媒特性分析實驗

完成測試後之原廠排氣管進行觸媒之特性分析，項目包含比表面積、表面結構及組成等，以瞭解觸媒特性之變化情形。觸媒比表面積係以 BET 比表面積儀量測；觸媒表面結構特性藉由使用掃描式電子顯微鏡(SEM-EDS)取得高倍率的影像，接上能量分散式光譜儀進行元素定性與半定量分析，解析觸媒微細孔洞結構、金屬顆粒尺寸，鑑定分析毒化物覆蓋層等；觸媒組成藉由 XRD 繞射圖譜鑑定分析觸媒結晶相配合 ICP-MS 使用予以鑑定。透過各項定性與定量分析結果以深入探討觸媒於使用過程表面特性與活性之變化情形。

表 1、測試油成份資料

油品成份	酒精汽油(E15)	95 無鉛汽油(G95)
辛烷值(Research Octane Number)	95.3	95.0
乙醇含量(vol%)	14.2	0
氧含量(wt%)	5.4	2.0 (MTBE)
芳香烴含量(vol%)	25.1	31.3
烷烴含量(vol%)	7.9	10.6
烯烴含量(vol%)	10.5	10.1
環烷烴含量(vol%)	5.5	7.0
苯含量(vol%)	0.4	0.6
淨熱值(J/g)	2390	2520

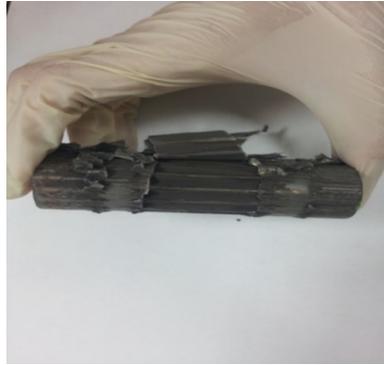


圖 1、觸媒蜂巢式結構

圖 2、觸媒解剖面

圖 3、怠速實驗測試圖

三、結果與討論

1. 法定空氣污染物排放量測結果

測試機車於怠速型態下使用 E15 酒精汽油為燃料，於不同累計里程觸媒之法定空氣污染物排放濃度如表 2 所示。

(1) CO

使用無觸媒排氣管時，E15 於新機車(MC-1)所致 CO 濃度為 1.38 %，使用新觸媒及高里程排氣管之 CO 濃度分別為 0.54 % 及 0.85 %，加裝觸媒排氣管之尾氣 CO 濃度皆較無觸媒排氣管為低。過保固里程機車(MC-2)亦呈現相同趨勢，惟 CO 濃度值較新車為高(0.58-1.45 %)，變化率約 5-7%。

(2) THC

使用無觸媒排氣管時，E15 於新機車(MC-1)所致 THC 濃度為 555 ppmv，使用新觸媒及過保固里程排氣管之 THC 濃度分別為 235 ppmv 及 400 ppmv，加裝觸媒排氣管之尾氣 THC 濃度皆較無觸媒排氣管為低。過保固里程機車(MC-2)亦呈現相同趨勢，惟 THC 濃度值較新車為高(320-600 ppmv)，變化率約 8-36%。新機車使用新觸媒排氣管所致 THC 排放濃度(235 ppmv)較過保固里程機車(320 ppmv)使用新觸媒排氣管低約 36%，顯示機車引擎條件劣化對 THC 排放影響較觸媒劣化為高。

(3) NO

使用無觸媒排氣管時，E15 於新機車(MC-1)所致 NO 濃度為 149 ppmv，使用新觸媒及過保固里程排氣管之 THC 濃度分別為 50 ppmv 及 76 ppmv，加裝觸媒排氣管之尾氣 NO 濃度皆較無觸媒排氣管為低。過保固里程機車(MC-2)亦呈現相同趨勢，惟 NO 濃度值較新車為高(56-194 ppmv)，變化率約 4-30%。值得注意的是，於無觸媒排氣管測試條件下，過保固里程機車 NO 濃度較新機車增加約 30%，顯示舊機車引擎燃燒條件變化有助於 NO 生成。

表 2、不同累計里程觸媒使用 E15 酒精汽油之法定空氣污染物排放濃度

測試機車	行駛里程	排氣管	排放濃度		
			CO (%)	THC (ppmv)	NO (ppmv)
MC-1	<1,000km	無觸媒排氣管	1.38	555	149
		新觸媒排氣管	0.54	235	50
		高里程含觸媒排氣管	0.85	400	76
MC-2	16,200 km	無觸媒排氣管	1.45	600	194
		新觸媒排氣管	0.58	320	56
		高里程含觸媒排氣管	0.91	465	79

2. 使用 E15 所致法定空氣污染物減量效果

(1) CO

E15 所致新車(MC-1) CO 排放濃度介於 0.54-1.38 % 間，市售油則為 0.80-1.75 % (表 3)，CO 濃度變化約為 21-35 %。過保固里程機車(MC-2)使用 E15 為燃料所致 CO 排放濃度亦較使用市售油時為低，CO 濃度變化約為 26-44 %；顯示於新車或過保固里程機車油品成分對 CO 排放具有影響。此外，無論有無觸媒排氣管，E15 酒精汽油所致 CO 排放濃度皆較市售油為低。

(2) THC

E15 所致新車(MC-1) THC 濃度(235-555 ppmv)較市售油(325-655 ppmv) (表

3)約低 15-28%；過保固里程機車(MC-2)使用 E15 為燃料所致 THC 排放濃度亦較使用市售油時為低，THC 濃度變化約為 9-13 %。無論有無觸媒排氣管，E15 酒精汽油所致 THC 排放濃度皆較市售油為低；過保固里程機車 THC 排放濃度較新車為高，且與市售油相較之減量變化較少，顯示除油品影響外，機車引擎條件劣化亦對 THC 排放具有影響。

(3) NO

E15 所致新車(MC-1) NO 排放濃度介於 50-149 ppmv 間，市售油則為 61-158 ppmv (表 3)，CO 濃度變化約為 6-20 %。過保固里程機車(MC-2)使用 E15 為燃料所致 NO 排放濃度亦較使用市售油時為低，NO 濃度變化約為 3-26 %；顯示於新車或過保固里程機車油品成分對 NO 排放具有影響。E15 於無觸媒排氣管之 NO 排放較同樣狀況但使用市售油時約降低 6% (新車)及 3%(過保固里程機車)，使用觸媒排氣管則有約 20%之減量，顯示觸媒對 NO 排放具有控制效果，油品對尾氣 NO 之影響不如觸媒所致影響。

表 3、不同累計里程觸媒使用市售 95 無鉛汽油(G95)之法定空氣污染物排放濃度

測試機車	行駛里程	排氣管	排放濃度		
			CO (%)	THC (ppmv)	NO (ppmv)
MC-1	<1,000km	無觸媒排氣管	1.75	655	158
		新觸媒排氣管	0.80	325	61
		高里程含觸媒排氣管	1.31	485	95
MC-2	16,200 km	無觸媒排氣管	1.96	690	201
		新觸媒排氣管	0.91	350	67
		高里程含觸媒排氣管	1.63	510	107

3. 觸媒轉化效率

於新機車以不同油品(E15 及 G95)測試獲得之不同累計里程觸媒排氣管(新觸媒與高里程觸媒)所致氣態污染物轉化率如圖 4 所示；觸媒轉化率係與相同油品之無觸媒量測數據比較。

(1) CO

使用 E15 時，以新機車搭配新觸媒排氣管對 CO 轉化效率為 61%，搭配高里

程含觸媒排氣管亦有 38%轉化效率，觸媒轉化率僅有新觸媒之 63%，觸媒對 CO 轉化效率隨累計里程增加而降低。若使用市售油(G95)，觸媒對 CO 轉換效率不如 E15 為高，新觸媒及高里程觸媒排氣管所致 CO 轉化率分別為 54%及 25%。

比較同一油品但使用不同觸媒(新/舊)所致 CO 轉化率，結果顯示使用 E15 時新觸媒(61%)對 CO 轉化率較舊觸媒(38%)高出約 23% (變化率為 37%)，使用 G95 時新觸媒轉化率(25%)亦較舊觸媒(17%)為佳。比較相同觸媒但使用不同油品時所致 CO 轉化率，結果顯示於高里程觸媒排氣管使用 E15 所致 CO 轉化率較 G95 高出約 13% (變化率為 35%)；新觸媒於 E15 之 CO 轉化率亦較 G95 為佳。對 CO 而言，觸媒及油品皆為影響排放之參數。

(2) THC

使用 E15 時，以新機車搭配新觸媒排氣管對 THC 轉化效率為 58%，搭配高里程含觸媒排氣管亦有 28%轉化效率，觸媒轉化率約為新觸媒之 48%；觸媒對 THC 轉化效率呈現隨累計里程增加而降低之趨勢。若使用市售油(G95)，觸媒對 THC 轉換效率不如 E15 為高，新觸媒及高里程觸媒排氣管所致 THC 轉化率分別為 50%及 26%。

比較同一油品但使用不同觸媒(新/舊)所致 THC 轉化率，結果顯示使用 E15 時新觸媒(58%)對 THC 轉化率較舊觸媒(28%)高出約 30% (變化率為 52%)，使用 G95 時新觸媒轉化率(50%)亦較舊觸媒(26%)為佳，轉化率變化比例約 48%。比較相同觸媒但使用不同油品時所致 THC 轉化率，結果顯示於新觸媒使用 E15 對 THC 轉化率最高，G95 亦有高轉化率；但在高里程觸媒排氣管使用不同油品之 THC 轉化率則差異不大，顯示觸媒老化對 THC 排放控制具有影響。

(3) NO

使用 E15 時，以新機車搭配新觸媒排氣管對 NO 轉化效率為 66%，搭配高里程含觸媒排氣管亦有 49%轉化效率，觸媒轉化率約為新觸媒之 74%。若使用市售油(G95)，觸媒對 NO 亦有高轉換效率，新觸媒及高里程觸媒排氣管所致 NO 轉化率分別為 61%及 40%。觸媒對 NO 轉化效率亦呈現隨累計里程增加而降低之趨勢。

比較同一油品但使用不同觸媒(新/舊)所致 NO 轉化率，結果顯示使用 E15 時新觸媒(66%)對 NO 轉化率較舊觸媒(49%)高出約 15% (變化率為 26%)，使用

G95 時新觸媒轉化率(61%)亦較舊觸媒(40%)為佳(變化率約 35%)。比較相同觸媒但使用不同油品時所致 NO 轉化率，結果顯示於新觸媒使用 E15 及 G95 皆有高轉化率，高里程觸媒排氣管使用 E15 及 G95 亦有超過 40%之 NO 轉化率；但油品變化所致觸媒轉化率之變化比例(<20%)不如新/舊觸媒大。顯示觸媒對 NO 排放具有控制效果，油品對尾氣 NO 之影響不如觸媒所致影響。

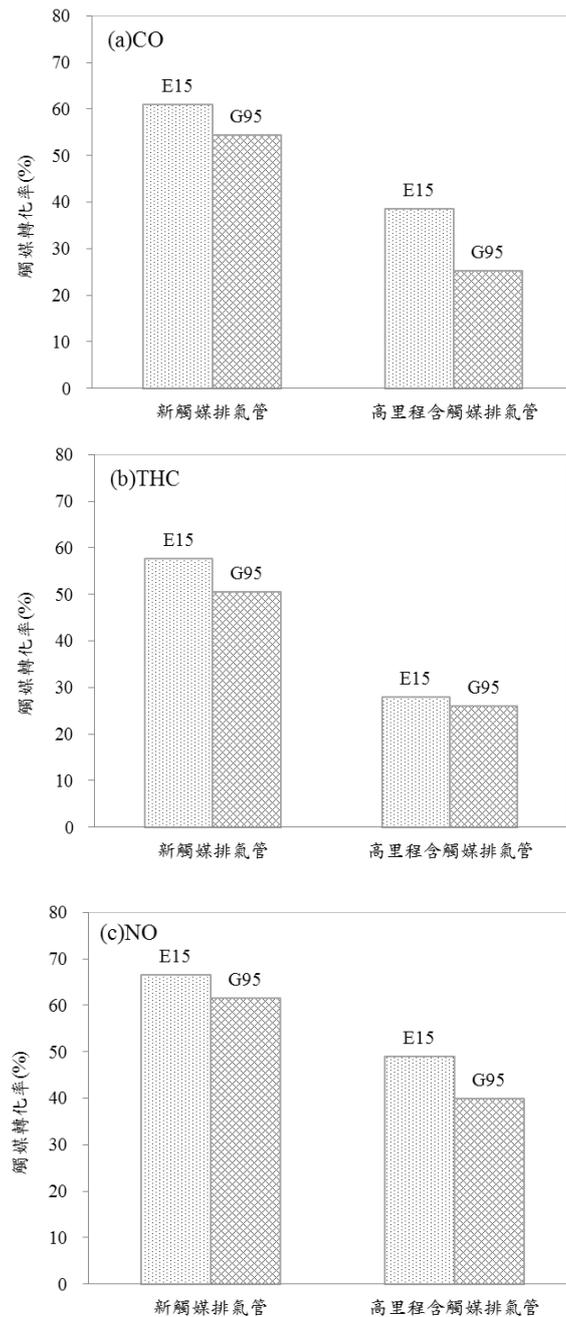


圖 4、不同累計里程觸媒排氣管所致氣態污染物轉化率(a)CO、(b)THC、(c)NO

4.觸媒特性分析

完成測試後之原廠排氣管進行觸媒之比表面積、表面結構及組成等特性分析，分析結果說明如下。

(1)比表面積變化

以 BET 分析不同累計里程觸媒之比表面積與平均孔徑如表 4。分析結果顯示，隨著里程數增加，比表面積有減少趨勢，平均孔徑則呈現變大趨勢。觸媒可能因熱劣化與毒化原因導致觸媒粉末燒結，減少表面積，同時也增加孔徑大小。表面積下降而減少反應面積，為造成觸媒轉化效率下降主要原因[15]。

(2)表面結構

圖 5(a)及(b)分別為新觸媒及高里程觸媒(里程<16000 公里)以電子掃描顯微鏡(SEM)放大 1,000 倍照片。由圖可觀察出新鮮觸媒結構較為細緻均勻，顆粒及孔隙較細；觸媒使用里程達到 16,000 公里時，觸媒粉末燒結情形更為顯著，顆粒及孔隙皆呈增大現象，表面亦有明顯被覆層覆蓋，因此，導致 CO、THC 轉化效率下降。

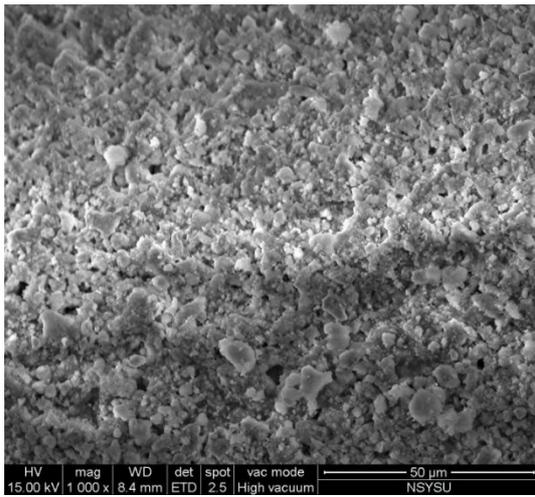
(3)表面組成

新觸媒及高里程觸媒表面元素定性及半定量結果可利用 SEM-EDS 所得之 EDS 圖譜解析，如圖 6(a)及(b)所示。分析結果顯示，機車觸媒所含元素有碳(C)、氧(O)、鎳(Ni)、鋁(Al)、磷(P)、硫(S)、銻(Rh)、鈀(Pd)、鈣(Ca)、鐳(La)、鈾(Ce)、鉻(Cr)、鐵(Fe)、鋅(Zn)、鉑(Pt)；含量以鋁及氧最高。

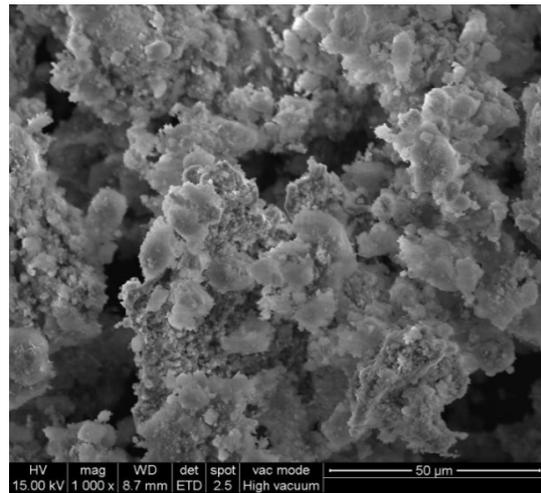
鋁、鎳、鐵是機車觸媒之基材；鉑、鈀、銻為貴金屬，做為觸媒活性物質；鐳與鈾是促進劑與擔體。元素磷、硫、鈣、鋅是屬於觸媒毒化物成分，硫來自於汽油，磷、鈣、鋅之主要來源為潤滑油[16]。分析結果顯示，磷、硫、鈣、鋅等四項元素於新觸媒及高里程觸媒之含量無明顯增加現象，因此，機車排放 CO、THC 轉化效率下降應非由觸媒受毒化效應之影響。

表 4、不同累計里程觸媒之比表面積與平均孔徑

觸媒劣化里程數(km)	比表面積(m ² /g)	平均孔徑(Å)
0 km	157.9	110.1
16200 km	60.0	251.2



(a)新觸媒



(b) 高里程觸媒(16,200km)

圖 5、不同累計里程之觸媒 SEM 圖

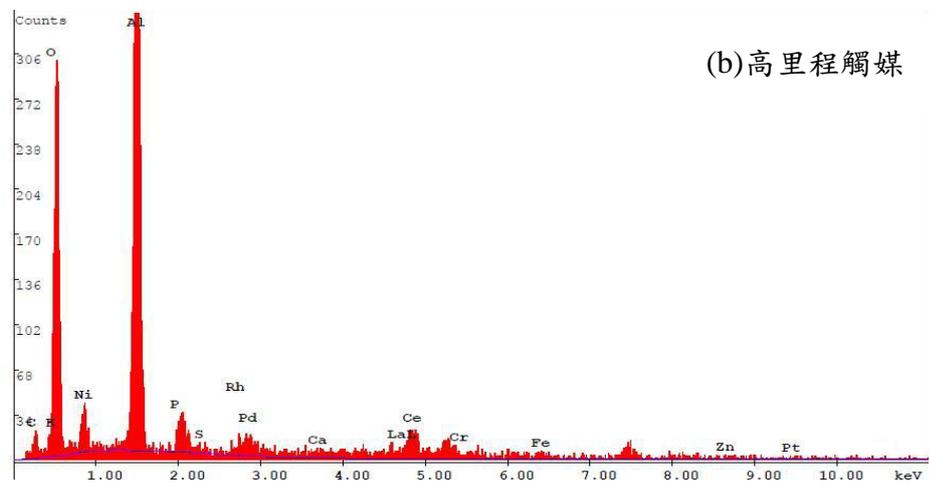
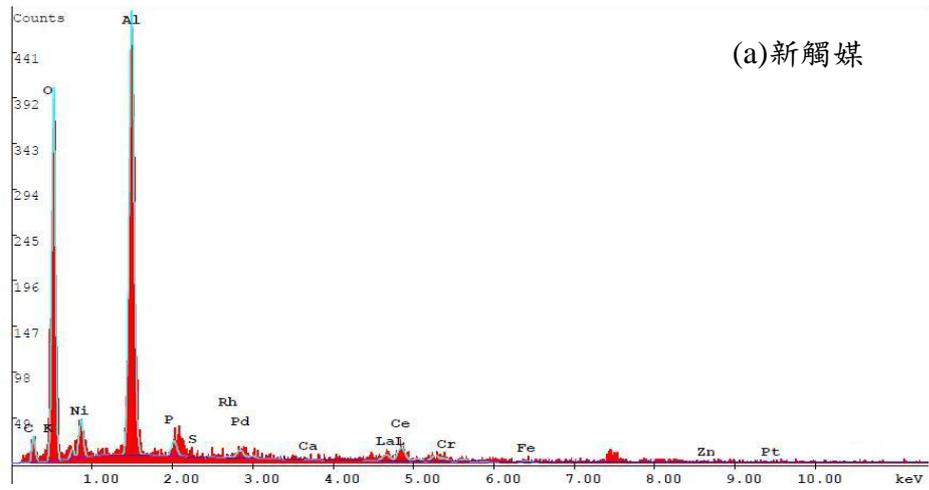


圖 6、不同累計里程觸媒表面成份 EDS 圖

四、結論

本研究以四行程噴射引擎機車為對象，以 E15 酒精汽油為測試油品，於怠速條件下比較酒精汽油於無觸媒排氣管、新觸媒以及高里程含觸媒排氣管所致法定空氣污染物(CO、THC、NO)量測結果。測試機車共有 2 部，分別為里程數<1000 公里之新機車及超過保固里程之使用中機車。測試機車所裝置之觸媒排氣管包括三類：(1)新觸媒排氣管；(2)過保固里程含觸媒排氣管；(3)無觸媒排氣管。

法定空氣污染物排放量測結果顯示，新機車搭配新觸媒之 CO、THC 及 NO 排氣濃度最低，使用中機車搭配高里程含觸媒排氣管之 3 項法定空氣污染物濃度亦較無觸媒者為低，顯示無論是酒精汽油或是市售油，機車加裝觸媒轉化器對法定空氣污染物排放仍具有控制效果，甚至對過保固期之機車亦具減量效果。若與市售油相較，使用 E15 酒精汽油所致 CO、THC 及 NO 排放濃度於新車或過保固里程機車皆顯示有較低濃度。

無論有無加裝觸媒轉化器，E15 所致 CO、THC 及 NO 排放濃度亦較市售油為低；顯示油品成分對法定空氣污染物具有影響。新機車搭配新觸媒排氣管對法定空氣污染物轉化效率最佳，分別可達 61% (CO)、58% (THC)及 66% (NO)；觸媒對法定空氣污染物轉化效率呈現隨累計里程增加而降低之趨勢。觸媒之比表面積分析結果顯示，隨著里程數增加，比表面積有減少趨勢，平均孔徑則呈現變大趨勢；以電子掃描顯微鏡(SEM)觀察到之觸媒表面結構亦顯示，過保固里程之觸媒燒結情形顯著，顆粒及孔隙皆呈增大現象，表面亦有明顯被覆層覆蓋，此觀察與比表面積所得結果一致，表面積下降減少反應面積，為造成觸媒轉化效率下降主要原因。

另測試結果顯示，過保固里程機車之 THC 排放濃度較新機車為高，顯示除油品影響外，機車引擎條件劣化亦對 THC 排放具有影響。而由無觸媒排氣管與使用觸媒排氣管之 NO 排放濃度比較結果顯示，觸媒對 NO 排放具有控制效果，油品對尾氣 NO 之影響不如觸媒所致影響。

整體而言，本研究探討噴射引擎、酒精汽油與加裝空氣污染防制設備(觸媒轉化器)等三項道路移動源政策對尾氣排放空氣污染物之影響。結果顯示不同空氣污染物受觸媒及油品影響程度不同，尾氣排放 CO 受觸媒及油品影響，THC 除油品影響外，機車引擎條件劣化及觸媒老化亦對 THC 排放具有影響，NO 則

受車輛及觸媒劣化影響較大，對推動移動源空氣污染物管制策略可提供相關資訊。

五、參考文獻

1. 行政院環境保護署移動污染源管制網，環保署機車合格政清冊，
http://mobile.epa.gov.tw/car_mQuery1.aspx
2. Jia L.W., Zhou W.L., Shen M.Q., Wang J., Lin, M.Q., The investigation of emission characteristics and carbon deposition over motorcycle monolith catalytic converter using different fuels. Atmospheric Environment Vol. 40, pp. 2002-2010, 2006.
3. Chan C.C., Nien C.K., Tasi C.Y., Her G.R., Comparison of tail pipe emissions from motorcycle and passenger cars. Journal of Air & Waste Management Association Vol. 45, pp. 116-124, 1995.
4. 洪榮芳，周煥銘，王國佑，周文河，蔡震華，陳健民，李宗龍，2001，觸媒轉化器對於機車引擎冷起動污染改善之研究，第六屆車輛工程學術研討會，pp.129-135.
5. Czerwinski, J., Wili Ph., Comte, P., Emission Factors and Influences on Particle Emissions of Modern 2-Stroke Scooters, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 2003.
6. Horng, R.F., Chou, H.M., Hsu, T.C., Effects of Heating Energy and Heating Position on the Conversion Characteristics of the Catalyst of a Four-Stroke Motorcycle Engine in Cold Start Conditions, Energy Conversion and Management Vol.45, pp. 2113-2126, 2004.
7. 經濟部，94 年全國能源會議結論執行成效與檢討，98 年全國能源會議資料，98.3.12
8. RFA. 2011 Ethanol Industry Outlook. Renewable Fuels Association, Washington, DC. 2011. The document available from http://ethanolrfa.3cdn.net/1ace47565fabba5d3f_ifm6iskwq.pdf.
9. Yao, Y.C., Tsai, J.H., and Chiang, H.L., Effects of Ethanol-blended Gasoline on Air Pollutant Emissions from Motorcycle, Science of the Total Environment, Vol. 407, pp. 5259-5264, 2009.
10. Yao, Y.C., Tsai, J.H., and Chiang, H.L., Emissions of Organic Air Toxics from a

- Four-stroke Motorcycle by Using Ethanol-blended Gasoline, *Environmental Engineering Science*, Vol. 28, pp. 147-158, 2011.
11. Yao, Y.C., Tsai, J.H., and Wang, I.T., Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol-gasoline blend, *Applied Energy* Vol. 102, pp. 93-100, 2013.
 12. 柯雅琳，四行程噴射引擎新機車使用酒精汽油於四種行車型態之氣態污染物排放特徵研究，國立成功大學環境工程學系碩士論文，2012。
 13. 王蕙婷，噴射引擎機車使用酒精汽油為燃料之氣態污染物排放特徵研究，國立成功大學環境工程學系碩士論文，2011。
 14. 張開駿，汽油含氧量及芳香烴含量對四行程機車排放氣態污染物之影響，國立成功大學環境工程學系碩士論文，2010。
 15. Angove, D.E. and Cant, N.W., Position dependent phenomena during deactivation of three-way catalytic converters on vehicles, *Catalysis Today* Vol. 63, pp. 371-378, 2000.
 16. Kishore-Nadkarni, R.A., Determination of sulfur in petroleum products and lubricants: A critical review of test performance, *American Laboratory* Vol. 32, pp. 16-25, 2000.

丙烯腈氣體之觸媒氧化反應參數研究

Parameters and effects of silver catalyst for Acrylonitrile oxidation

吳信賢¹、周更生²

Hsin-Hsien Wu and Kan-Sen Chou

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology

Research Institute, Hsinchu, Taiwan

國立清華大學化學工程系

Department of Chemical Engineering, National Tsing Hua University, Hsinchu,
Taiwan

摘 要

丙烯腈(Acrylonitrile)為製造壓克力纖維及 ABS 等塑膠產品的重要原料，其揮發氣體具有明顯氣味且具毒性，需要加以處理以維護空氣品質。本研究以含浸法製備 Ag/CeO₂MnO₂ 觸媒進行丙烯腈揮發氣體之完全氧化反應，探討待處理氣體丙烯腈濃度、含氧量及觸媒空間速度、反應溫度等參數對丙烯腈完全氧化反應的影響。發現丙烯腈轉化率在反應溫度 230 °C 時可達到 99 % 以上。為了解實際應用於工業廢氣處理可行性，在本研究中並且分析處理後尾氣中 NO_x 濃度發現，降低反應溫度有助於抑制 NO_x 生成。

關鍵字：丙烯腈、觸媒氧化、含氧量、氮氣選擇率

Abstract

Ag/CeO₂MnO₂ catalysts were prepared by incipient wetness impregnation method and used for Acrylonitrile oxidation reaction. The activity of Ag/CeO₂MnO₂ catalyst was compared with the reaction parameters, such as catalyst loading, oxygen concentration, space velocity and reaction temperature. The catalytic activity is found to be higher over the condition of high catalyst loading, high oxygen concentration and low flow rate. NO_x is one of the byproducts and can be well control in low temperature.

Keywords: Acrylonitrile, catalytic oxidation, oxygen concentration, nitrogen selectivity

¹ 工業技術研究院 綠色能源與環境研究所，資深研究員，
E-mail: cookwu@itri.org.tw

² 國立清華大學 化學工程系，教授

一、前言

丙烯腈(Acrylonitrile)分子式為 CH_2CHCN ，多半以 Sohio 法，使乙烯被氮氧化而製造成丙烯腈。丙烯腈是製造塑膠產品的重要單體，為國內已公告列管之第二類毒性化學物質。其具有包括易燃、具有刺鼻氣味和毒性、且被歸類為致癌物質等特性，因此無論是工業製程尾氣或儲槽排氣處理均需要妥善評估。

工業製程排放之丙烯腈廢氣通常以廢氣燃燒塔或焚化爐等直接焚化方式處理，氣體在焚化爐內停留時間可在 1 秒之內。然而高溫處理會有包括 thermal-NOx、fuel-NOx 及丙烯腈本身反應產生等氮氧化物排放問題。因此，也有其他技術被評估可行性。例如在高銘木的生物濾床研究中，利用豬糞堆肥生物濾床探討對丙烯腈廢氣之去除率。當丙烯腈進氣濃度為 1,500ppmv 時，去除率可達到 85%，其濾床的氣體停留時間需要 102 秒[1]。觸媒氧化程序及反應時間與直接焚化相近，由於反應溫度較直接高溫焚化低，燃料需求較低，因此有時候也會考量採用電熱加熱方式。換句話說，觸媒氧化方式處理可以排除上述高溫焚化因為溫度及燃料所衍生的氮氧化物排放問題。對丙烯腈廢氣而言，以觸媒氧化方式處理僅剩下來自丙烯腈本身反應生成的氮氧化物需要考量了。

觸媒氧化方式處理 VOCs 通常使用貴金屬如鉑、鈀等。有許多研究針對觸媒成分進行比較，希望進一步了解對於丙烯腈的處理能力。李淑蓮等人[2]比較了貴金屬 Pt、Pd 及非貴金屬 Cu-Mn 氧化物及沸石等催化劑對含-CN 有機物丙烯腈的氧化活性。結果發現以 Cu-Mn 為活性成分的觸媒對丙烯腈有較高的氧化活性。孫欣欣等人[3]製備了貴金屬、金屬氧化物、貴金屬的金屬氧化物三種類型的催化劑用於淨化含丙烯腈廢氣，並與負載貴金屬催化劑商品進行比較。實驗結果發現含銅錳氧化物的催化劑與貴金屬催化劑都有較好的催化活性。非貴金屬氧化物(Cu-Mn)有較高的催化氧化活性，在 260 °C 前就能完全氧化。貴金屬催化劑有很好的催化活性，但價格昂貴，而且完全燃燒溫度較高(約 430 °C)。非貴金屬氧化物催化劑與貴金屬催化劑相比價格低廉的多，因此值得進一步從活性、穩定性、工業催化劑物理設計等方面加以深入研究。

在我國固定污染源空氣污染物排放標準中規定，使用氣體燃料之燃燒設備的氮氧化物排放標準為 150ppm。因此對於丙烯腈而言，反應過程 N_2 產率也是重要議題。張潤鋒等人[4]製備了 5% Cu-ZSM-5 觸媒，在 0.3% 丙烯腈、8% 氧氣濃

度下，以空間速度 37000 h^{-1} 進行測試發現，對丙烯腈廢氣淨化的最佳操作溫度為 450°C ，此溫度下也得到最高的 N_2 選擇率。

由以上可知反應溫度及 N_2 產率都是丙烯腈廢氣淨化研究重點。此外，工廠以儲槽儲存丙烯腈時經常會進行氮封。以至於儲槽排氣處理時的氧氣濃度也是重要變因之一。本研究因此針對觸媒焚化過程丙烯腈濃度、氧氣濃度，以及觸媒空間速度、反應溫度進行評估，以了解處理丙烯腈之可行性。

二、研究方法

2.1 觸媒合成

本研究觸媒以 400 cpsi 之蜂巢陶瓷(圓柱狀，直徑 1 cm，高度 1.5 cm)為載體，製備擔載量分別為 0.1g、0.2g、0.3g 之觸媒。以初濕含浸法製備之 $\text{Ag/CeO}_2\text{MnO}_2$ 觸媒，進行 2000-3000 ppm 丙烯腈氣體之完全氧化反應。

詳細步驟如下所示：

1. 取適量硝酸銀、硝酸錳及硝酸鉍，加入適量 RO 水（蜂巢載體可吸收水量），攪拌至完全溶解。
2. 取蜂巢陶瓷載體，慢慢將步驟 1 溶液加入載體中。
3. 將上述含浸觸媒前驅物之蜂巢陶瓷置於 110°C 烘箱中乾燥 24 小時除去水分。
4. 將乾燥後的蜂巢陶瓷置於高溫爐中，在 300°C 下煅燒 5 小時。

2.2 觸媒活性鑑定分析

，丙烯腈氣體之氧化反應條件包括含氧量（5%、10.5%、21%）及氣體流量（100ml/min、200ml/min、400ml/min）。並且以製備擔載量分別為 0.1g、0.2g、0.3g 之觸媒探討丙烯腈氣體之轉化率。

在不同溫度下觸媒活性採用丙烯腈完全氧化反應進行測試。轉化率之計算公式為 $(1-C_{out}/C_{in}) * 100\%$ 。

反應裝置主要包括氣體進料系統、U 型石英反應管及控制反應溫度的管狀高溫爐等所組合而成。活性測試是在適當的溫度控制下進行，配合 GC/FID 進行反應物濃度分析。詳細步驟如下所示：

1. 以 0.1g、0.2g、0.3g 含浸擔載重量觸媒，裝填於 U 型石英管反應床中。
2. 以 100 ml/min、200 ml/min、400 ml/min 的流速，將不同含氧量丙烯腈氣體攜帶至反應床中進行反應。
3. 以 GC/FID 分析反應後丙烯腈氣體濃度，取樣分析頻率為 1 次/min。
4. 以檢知管分析反應後 NO_x 濃度。

三、結果與討論

3.1 觸媒擔載量影響

測試結果發現，丙烯腈轉化率可隨觸媒擔載量增加而提升。圖 3.1~3.3 為氣體流量 100 ml/min 時，三種氧氣濃度之下觸媒擔載量對丙烯腈轉化率的影響。以含氧量 21% 為例，觸媒擔載量 0.3 g 樣品之丙烯腈轉化率在反應溫度 230 °C 時可達 99%，當擔載量下降，0.2g 及 0.1g 樣品在 230 °C 時僅達到約 95%。當含氧量 10.5% 及 5% 時也有類似結果。含氧量 10.5% 時，擔載量 0.3 g 樣品在 230 °C 時之丙烯腈轉化率亦可達 99% 以上，但 0.2g 及 0.1g 樣品在 230 °C 時僅分別達到約 94% 及 93%。而含氧量 5% 時，擔載量 0.3 g 樣品在 230 °C 時之丙烯腈轉化率仍可達 99% 以上，但 0.2g 及 0.1g 樣品在 230 °C 時僅分別達到約 93% 及 91%。

觸媒擔載量 0.3 g 的樣品在 230 °C 時，不同含氧量下的轉化率皆可達 99%，但觸媒擔載量 0.2 g 及 0.1g 的樣品讓丙烯腈轉化率達 99% 的溫度則分別為 260°C、300°C。可以發現丙烯腈轉化率達 99% 的溫度也隨觸媒擔載量增加而降低。

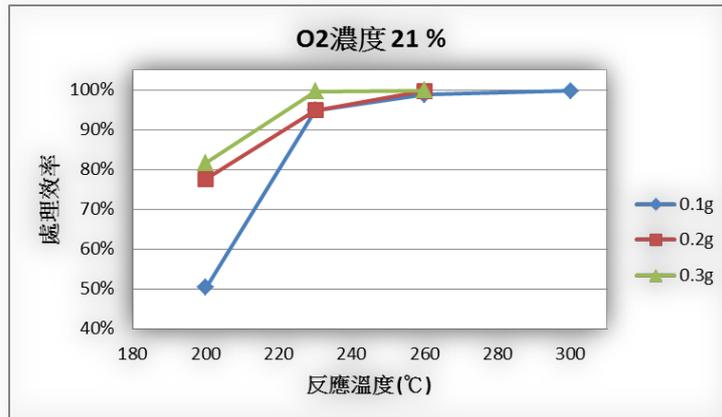


圖3.1 含氧量21%時觸媒擔載量對於丙烯腈轉化率影響

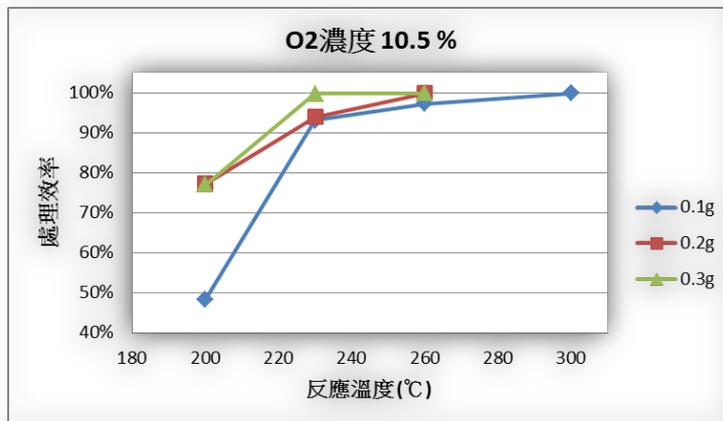


圖3.2 含氧量10.5%時觸媒擔載量對於丙烯腈轉化率影響

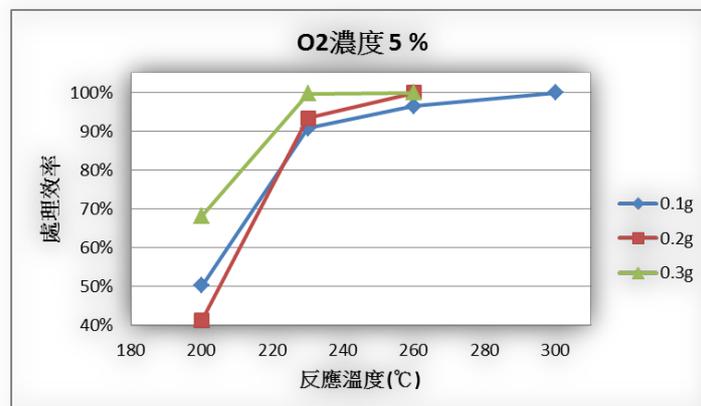


圖 3.3 含氧量 5%時觸媒擔載量對於丙烯腈轉化率影響

3.2 丙烯腈氣體中含氧量影響

圖 3.4~3.6 為氣體流量 100 ml/min 時，三種觸媒擔載量之下氧氣濃度對丙烯腈轉化率的影響。比較反應溫度 230 °C 時的數據，觸媒擔載量 0.3 g 時，樣品之丙烯腈轉化率在不同含氧量之下皆可達 99% 以上。當擔載量下降，0.2 g 樣品在 21%、10.5%、5% 含氧量之丙烯腈轉化率分別約為 95%、94%、93%，0.1 g 樣品之丙烯腈轉化率則分別約為 95%、93%、91%。由以上結果發現，丙烯腈轉化率可隨廢氣中含氧量降低而小幅度下降，而且觸媒擔載量越高轉化率下降幅度越小。

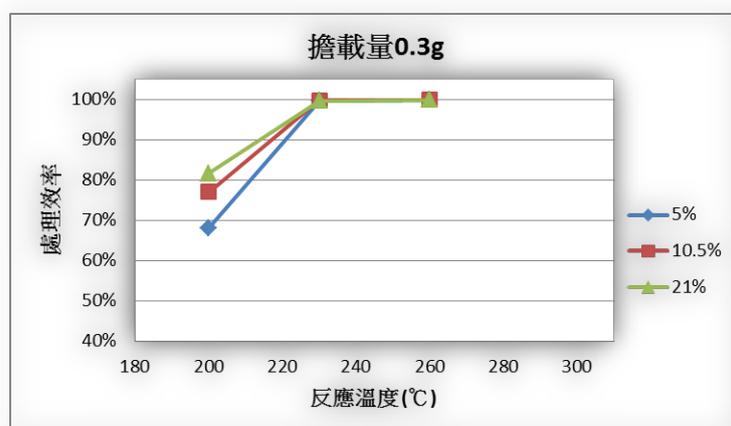


圖 3.4 觸媒擔載量 0.3 g 時含氧量對於丙烯腈轉化率影響

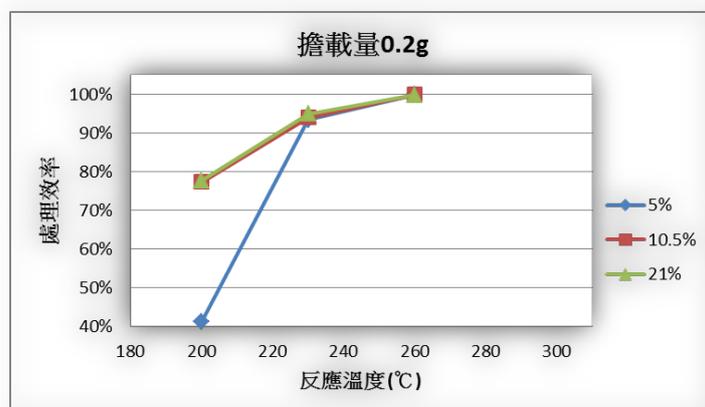


圖 3.5 觸媒擔載量 0.2 g 時含氧量對於丙烯腈轉化率影響

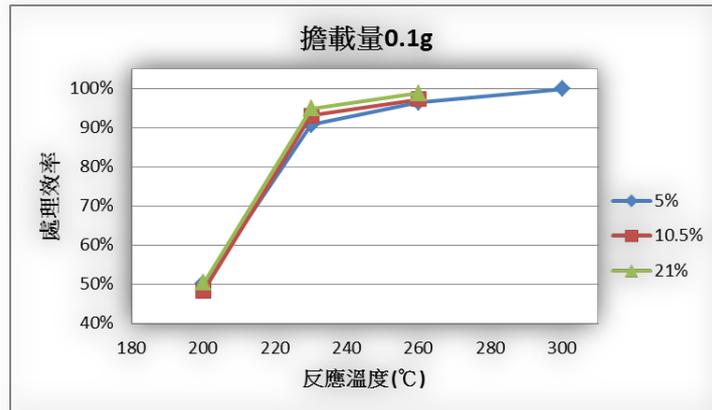


圖 3.6 觸媒擔載量 0.1 g 時含氧量對於丙烯腈轉化率影響

3.3 空間速度影響

當觸媒擔載量 0.2 g 時，100 ml/min、200 ml/min 兩種氣體流量之空間速度分別為 $30,000 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 及 $60,000 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 。圖 3.7~3.9 為三種含氧量之下空間速度對丙烯腈轉化率的影響。比較反應溫度 230 °C 時的數據，含氧量 21% 時，100 ml/min、200 ml/min 兩種氣體流量樣品之丙烯腈轉化率約為 95% 及 93.5%。含氧量 10.5% 及 5% 時，則分別約為 94%、90% 及 93%、79.5%。可以發現轉化率隨空間速度升高而降低。其影響在反應氣體含氧量越低時越明顯。

綜合以上述，當氣體含氧量低時，三種觸媒擔載量對於轉化率的影響較低，而空間速度對於轉化率的影響較高。

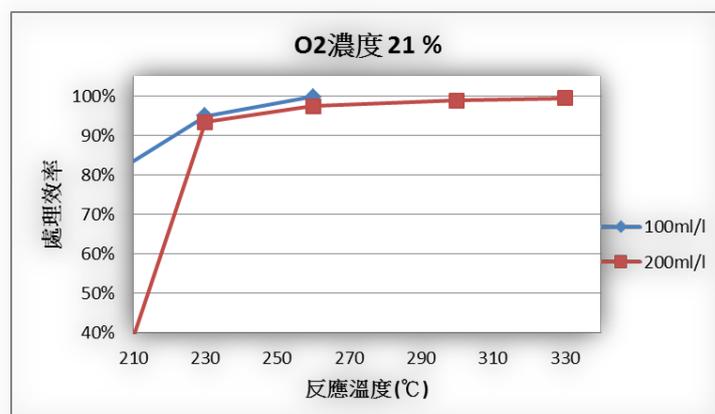


圖 3.7 含氧量 21% 時空間速度對於丙烯腈轉化率影響

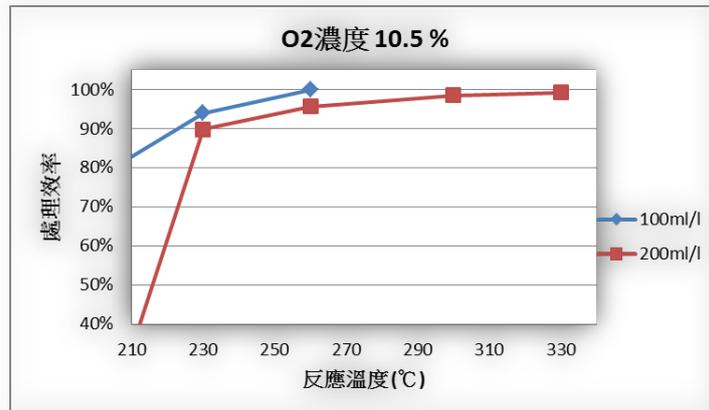


圖 3.8 含氧量 10.5% 時空間速度對於丙烯腈轉化率影響

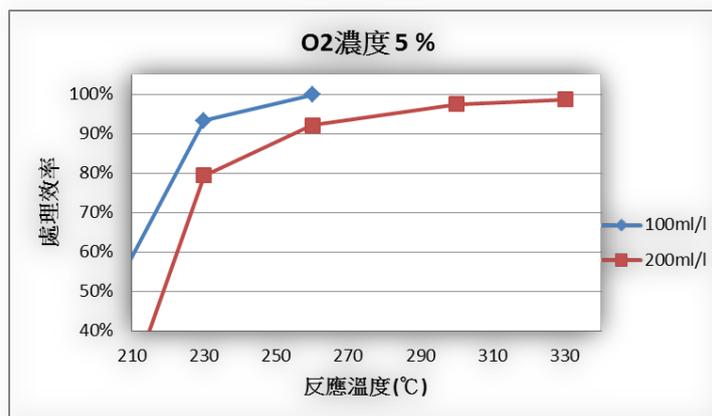


圖 3.9 含氧量 5% 時空間速度對於丙烯腈轉化率影響

3.4 氮氣選擇率

從 NO_x 分析數據發現，反應產生之 NO_x 濃度隨溫度、流量提高而增加。當觸媒擔載量 0.2 g，氣體流量 100 ml/min、反應溫度 230 °C 時，測得 NO_x 濃度皆在 40 ppm 以下，其氮氣選擇率可達 98 % 以上。然而氣體流量 200 ml/min、反應溫度 330 °C 時，測得 NO_x 濃度高達 160ppm，此時氮氣選擇率亦可達 92 % 以上。

四、結論

利用 Ag/CeO₂MnO₂ 觸媒進行丙烯腈氣體之低溫觸媒焚化，在觸媒擔載量 0.3 g、反應溫度 230°C、含氧量 5% 等條件下，丙烯腈轉化率可達到 99% 以上。若降低觸媒擔載量為 0.2 g，在空間速度 30,000 ml · h⁻¹ · g⁻¹ 時，丙烯腈轉化率亦可達到 93% 以上。同時其氮氣選擇率可達 98 % 以上，有效抑制 NO_x 生成。

此外，從研究結果也發現以下之操作參數影響趨勢：

1. 增加排氣含氧量有助於丙烯腈在低溫下進行完全氧化反應。
2. 增加觸媒擔載量讓丙烯腈轉化率在低溫下顯著提升。
3. 空間速度的影響在反應氣體含氧量越低時越明顯。
4. 降低反應溫度有助於抑制 NO_x 生成。

五、參考文獻

- [1] 高銘木，應用生物濾床法處理石化 ABS 樹脂聚合烯類排氣之研究(II)，1998
- [2] 李淑蓮等，淨化丙烯腈廢氣催化劑的研究，催化學報，1997.5
- [3] 孫欣欣、張金昌、李成岳，催化燃燒方法淨化丙烯腈廢氣的催化劑的實驗研究，北京化工大學學報，2004
- [4] 張潤鋒等，一種用於脫除丙烯腈廢氣的方法，中國專利 CN103212288A，2013.7

乙烯醋酸乙烯酯/蒙脫土奈米複合材料熱穩定性及耐燃性質 之研究

The study of thermal stability and fire retardant systems of ethylene-vinyl acetate copolymer/montmorillonitenanocomposites

張銘坤¹、林佳穎²、林學昌³

Ming-Kuen Chang, Chia-Ying Lin, Hsueh-Chang-Lin

國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系

Department & Graduate School of Safety Health & Environment Engineering,
National Yunlin University of Science and Technology

摘要

為了達到高分子材料本質化安全的目的，市面上之耐燃材料、電線電纜材料發展已趨向低煙、無鹵素耐燃技術，許多高分子耐燃材料，需要添加高比例的金屬水合物填料，填充量須高達 60% 以上，以達到良好的耐燃標準，但是可能導致其缺乏彈性、力學性質差之問題。本研究利用氫氧化鋁添加蒙脫土作為 EVA 的無鹵耐燃劑，依不同重量百分比乙烯醋酸乙烯酯／氫氧化鋁／蒙脫土（0、1、2、3 wt%）之材料配方製備奈米複合材料，透過 XRD 試驗、拉伸試驗、DSC 分析、TGA 分析、LOI 試驗與 FE-SEM 分析，探討添加有機黏土（OMMT）之層間距離的變化、熱性質、機械性質與耐燃性質之研究。經 XRD 檢測結果顯示，利用十八胺改質蒙脫土層間距離，由 1.27 nm 擴大到 1.96 nm，使得有機高分子更易插層至黏土層間。在拉伸試驗中，OMMT 含量為 3 wt% 時，有最佳的拉伸強度，所以，在無鹵素耐燃級 EVA 中，添加 3 wt% 的 OMMT，氫氧化鋁添加量於 47 wt% 時，有最佳的伸長率及耐燃性能（LOI 為 28），並能提高奈米複合材料之耐燃性能。

關鍵詞：蒙脫土、乙烯醋酸乙烯酯、耐燃劑、熱穩定性

¹張銘坤，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，副教授
E-mail：changmk@yuntech.edu.tw

²林佳穎，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士

³林學昌，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士班研究生

Abstract

To achieve the purpose of safety equipment and development of fire retardant and wire cable materials has trended to low smoke and halogen-free flame retardant technology in the business. However, many polymer flame retardant materials required a very high proportion of the metal hydrate filler within the polymer matrix (60 wt%) to achieve a suitable level of flame retardant, which may lead to a lack of flexibility, poor mechanical properties and problems during compounding. In this study, the aluminum hydroxide added montmorillonite (MMT) as the halogen-free flame retardant of EVA, according to the different EVA/ATH/MMT (0, 1, 2, 3 wt%) weight percentage of the preparation of nanocomposite material formulation. And through the XRD test, tensile test, DSC analysis, TGA analysis, LOI test and FE-SEM analysis to explore the addition of organic modified clay (OMMT) and researched the layer-distance, thermal properties, mechanical properties and flame retardant properties. In addition, use XRD to make the characterization analysis, it is found that increasing the polymers into the MMT, layer-distance increased from 1.27 nm to 1.96 nm when used the octadecylamine modified the MMT. For the tensile test, it is found that the montmorillonite weight percentage 3 wt% has the best tensile strength. In addition, the halogen-free flame retardant grade of EVA are added the OMMT in 3 wt%, the composition of nanocomposites was 47 wt% of the ATH filler has the best elongation and fire retardant (LOI was 28). Improvements in tensile and flame retardant properties were observed in nanocomposites.

Keywords: flame retardant、ethylene vinyl acetate、montmorillonite、thermal stability

一、前言

近年來，高分子材料廣泛應用於民生、國防及一般工業上，與人們日常生活息息相關。聚合物/蒙脫土奈米複合材料發展相當迅速，由於其在耐燃性、力學性、阻隔性能等及應用方面優於一般的聚合物材料，已成為當今聚合物材料基礎研究和應用開發的研究議題[1,2]。

高分子複合材料是在高分子材料中加入一些無機填充物作為填充材料或補強劑[3-5]，例如：黏土、玻璃纖維、碳黑、二氧化鈦和二氧化矽等[6,7]，這些填充材料的目的是降低成本和提升原材料之物理性質或化學性質[8,9]。聚合物/蒙脫土奈米複合材料之發展相當迅速，尤其在耐燃性、力學性、阻隔性能等應用方面，已成為現今聚合物材料基礎研究與應用開發的研究重點。根據研究指出，聚合物/層狀奈米複合材料具有耐燃特性與奈米結構和無機物的分散程度相關。在燃燒過程中奈米複合材料結構易被破壞[10]，材料表面在燃燒過程會形成多層矽

酸鹽奈米複合結構炭層，此炭層會產生屏障作用，並生成緊密的炭層結構形成炭化作用來提高其阻燃能力。例如：聚合物添加蒙脫土系統就是利用上述概念來藉此提升其耐燃性能[11,12]。

近年來，低煙無鹵素之難燃材料之產生，在產品的安全規範中，電子電器產品之耐燃材料已趨向符合環保低煙、無鹵耐燃技術等需求發展，而應用於電線電纜外層由原來PVC材料披覆材料逐漸改為環保型基材，例如：聚烯烴樹酯(EVA、PP、PE)等。例如：在低煙無毒性的材料中，聚合物之作用主要是增加電線電纜的柔軟性，一般常用的聚合物材料，例如：EVA(乙烯醋酸乙烯)、EEA(乙烯-丙烯酸乙酯)、EPDM(乙烯丙烯二烯共聚物)等[13]。

隨著科技的進步，環保意識的興起，人們對於生態及環境品質之要求也越來越高，在生活用品及作業場所中，耐燃的等級及材料選擇，也趨向無鹵素耐燃劑的方向發展，例如電子電器產品使用時安全性考量之下，設計上都必須符合耐燃之等級要求像 LOI、UL94 等標準。氫氧化鋁耐燃劑具有上述低煙無鹵素之優點，所以有些電子及電器產品改用添加耐燃之高分子材料，因此，本研究針對耐燃等級及複合材料性質來進行探討。

本研究利用熔融插層法製備乙烯醋酸乙烯酯共聚物/改質蒙脫土(EVA/OMMT)奈米複合材料[14-16]，探討奈米複合材料添加有機黏土(OMMT)之層間距離的變化與其影響[17-19]。奈米複合材料中也添加氫氧化鋁(ATH)耐燃劑，經過高溫型萬馬力機進行混煉與造粒，利用射出成型機射出啞鈴型試片來進行性質測試分析。並分析不同含量的有機蒙脫土及氫氧化鋁之摻雜量，對於奈米複合材料之耐燃特性、熱穩定性質和機械性質之影響[20]。

二、實驗

2.1 實驗材料

本研究使用之奈米複合材料之組成如表一所示，包含下列成分。

- (1) 乙烯/醋酸乙烯酯共聚物 (EVA, UE629, 台灣聚合化學品股份有限公司)
- (2) 十八烷基胺 (Octadecylamine, 98%, Alfa Aesar)
- (3) 氫氧化鋁 (Alumina Trihydrate, 極東貿易股份有限公司)
- (4) 蒙脫土 (Montmorillonite, 環綺國際貿易股份有限公司)

2.2 有機改質蒙脫土之製備

- (1) 取 20 g 蒙脫土 (CEC=92 meq/100g) 加入 1000 ml 去離子水中，室溫下攪拌 6 小時，稱為 A 溶液。
- (2) 取 4.96 g 之 Octadecylamine 溶於 50 ml 去離子水中，並加入適當鹽酸，攪拌三

小時，稱為 B 溶液。

(3)將 B 溶液倒入 A 溶液中，加熱至 80°C 並持續攪拌 3 小時。

(4)待反應完成後，以去離子水洗滌過濾，並以 AgNO₃ 滴定至無白色沉澱。

(5)真空乾燥 24 小時，研磨過篩，得到有機黏土。

2.3 乙烯醋酸乙烯酯-氫氧化鋁/黏土之混煉/射出

(1)依據不同的重量百分比乙烯醋酸乙烯酯／氫氧化鋁／蒙脫土（0wt %、1wt%、2 wt %、3 wt %）之材料配方。

(2)置於混煉機中進行混煉，溫度設定為 60-70 °C，攪拌時間為 20 分鐘。

(3)將複合材料熔融物質，由高溫型萬馬力機混練出，再經造粒機切粒後，即可得實驗所需 EVA-ATH/MMT 複合材料。

(4)先將已混煉之樣本加熱到所需溫度。

(5)啟動加熱器加熱並測試射出壓力、速度及冷卻時間之條件。

(6)射出成型，平均 1 分鐘可射出一片試片。

表一 奈米複合材料之組成

Sample formulation	Sample composition (wt%)			
	EVA	ATH	OMMT	MMT
neat EVA	100	0	0	0
EVA/ATH	40	60	0	0
EVA-ATH/OMMT-1	50	49	1	0
EVA-ATH/OMMT-2	50	48	2	0
EVA-ATH/OMMT-3	50	47	3	0
EVA-ATH/MMT-1	50	49	0	1
EVA-ATH/MMT-2	50	48	0	2
EVA-ATH/MMT-3	50	47	0	3

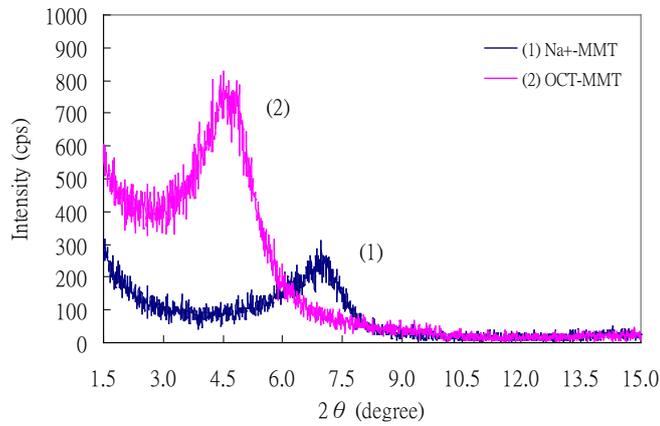
2.4 實驗分析

利用氫氧化鋁添加蒙脫土作為 EVA 的無鹵耐燃劑，依不同重量百分比乙烯醋酸乙烯酯／氫氧化鋁／蒙脫土（0、1、2、3 wt %）之材料配方製備奈米複合材料，透過 XRD 試驗（ $2\theta=1.5\sim15^\circ$ ）觀察蒙脫土層間距離之變化；並以拉伸試驗來測定材料之機械性質。使用 TGA 及 DSC 測試奈米複合材料之熱性質影響；實驗中也利用極限氧指數儀檢測材料之耐燃等級，並用 FE-SEM 觀察複合材料之分散情況。

三、結果與討論

3.1 有機黏土之 XRD 分析

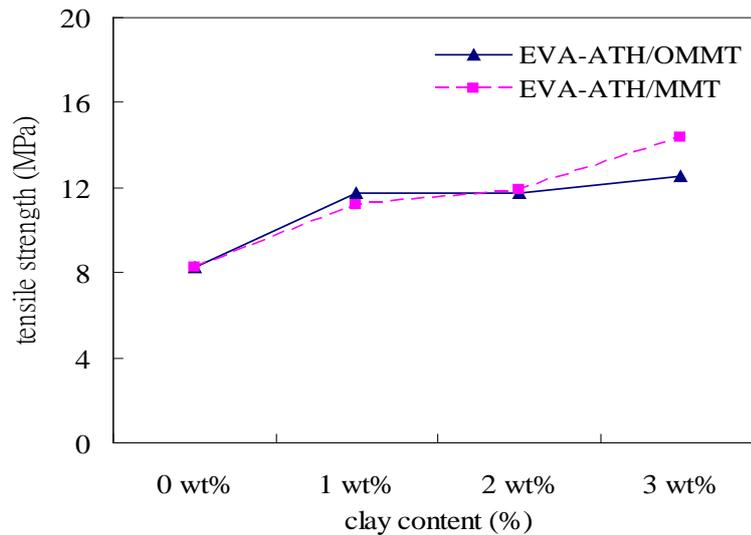
XRD 結果如圖一顯示，未改質蒙脫土，其矽酸鹽層 (001) 晶格繞射峰之 2θ 角為 6.97° 有 Peak 產生，經過布拉格公式求得層間距 (d-spacing) 為 12.7 \AA 。以改質劑十八烷基胺處理後之 MMT，其矽酸鹽層 (001) 晶格繞射峰之 2θ 角為 4.5° ，層間距 (d-spacing) 為 19.6 \AA ，改質前後相差 6.9 \AA 。由結果可知，改質劑十八胺的碳長鏈，確實能夠進入黏土矽酸鹽層與 Na^+ 進行交換反應，使得層間距離變大。經 X-Ray 結構分析，有效撐開層間距離由 1.27 nm 擴大到 1.96 nm ，可使有機高分子更易插層至黏土層間。



圖一、 Na^+ -MMT 與 Oct-MMT 之 XRD 圖

3.2 拉伸試驗

拉伸試驗結果 EVA-ATH/OMMT 與 EVA-ATH/MMT 複合材料與抗拉強度比較圖，由圖二得知，隨著蒙脫土添加量之增加，抗拉強度 (tensile strength) 呈現上升趨勢。對於 EVA 複合材料添加 3 wt% MMT 有最大的拉伸強度，為 12.58 MPa 及 14.26 MPa ，與純 EVA 的 8.23 MPa 相比，增加了 52.86 % 和 73.27%。

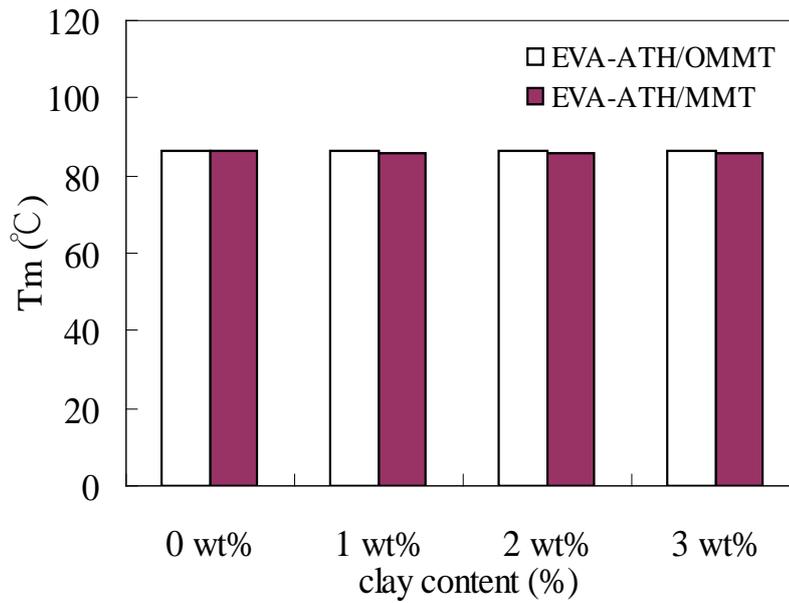


圖二、EVA-ATH/MMT組成之複合材料拉伸試驗圖

EVA-ATH / OMMT 與 EVA-ATH / MMT複合材料添加 1 wt %時，拉伸強度與伸長率相差不多。而以 MMT 合成的奈米複合材料比未添加 MMT 的強度改善程度稍顯提升，如表二所示；黏土的加入也進一步降低了其延展性，不同的添加量對EVA體系具有一定的影響力。

表二 奈米複合材料之機械性質

Sample	拉伸強度 (MPa)	伸長率 (%)
neat EVA	8.23	72.48
EVA/ATH	17.43	21.08
EVA/ATH/OMMT-1	11.65	60.62
EVA/ATH/OMMT-2	11.69	43.81
EVA/ATH/OMMT-3	12.58	42.20
EVA/ATH/MMT-1	11.36	60.72
EVA/ATH/MMT-2	11.86	53.09
EVA/ATH/MMT-3	14.26	42.20



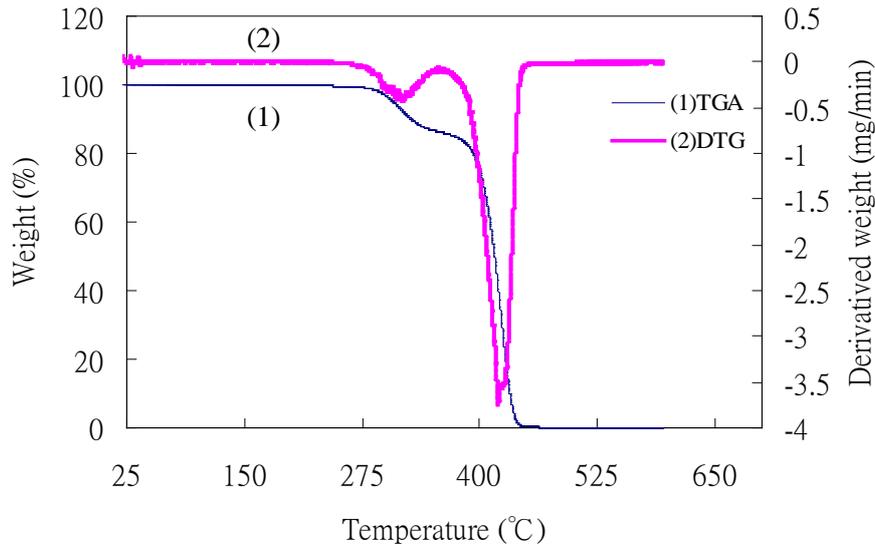
圖三、EVA-ATH/MMT 組成之奈米複合材料 DSC 試驗圖

3.3 DSC 試驗

DSC觀察EVA複合材料比較結果，圖三顯示熔點 (T_m) 並無明顯改變，表示添加蒙脫土並未能明顯將乙烯醋酸乙烯酯之 T_m 呈向後趨勢；而添加MMT及Oct-MMT，並未能明顯提升奈米複合材料的熔點。

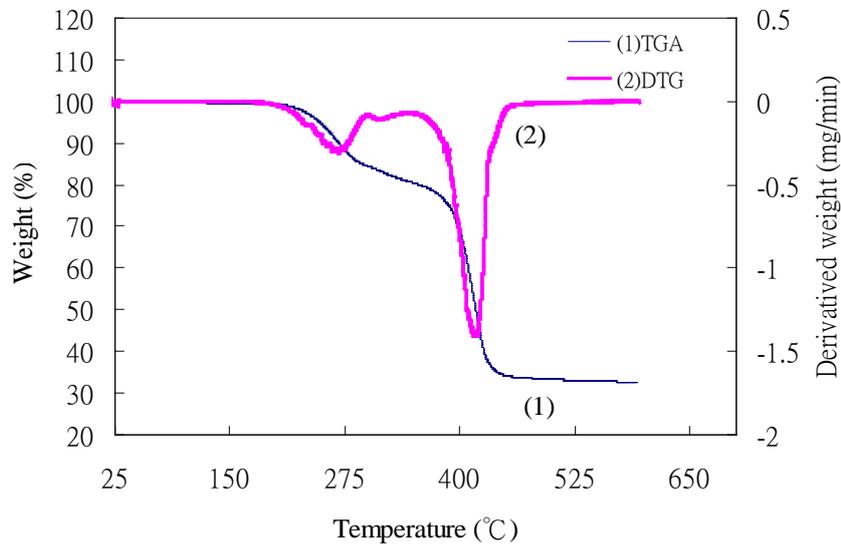
3.4 TGA 試驗

圖四為純乙烯醋酸乙烯酯 (EVA, 18%VA) 在氮氣環境下，在室溫下以每分鐘 10°C 的升溫速率至 700°C ，EVA的降解反應分為兩個連續的分解階段過程。第一階段降解溫度從 280°C 到 350°C ，降解生成acetic acid並形成雙鍵和交聯；而第二階段從 350°C 到 430°C ，會進一步產生自由基斷裂 (非氧化降解反應) 或受熱燃燒 (氧化降解反應)，導致主鏈的熱降解過程。



圖四、純乙基醋酸乙基酯之TGA-DTG圖

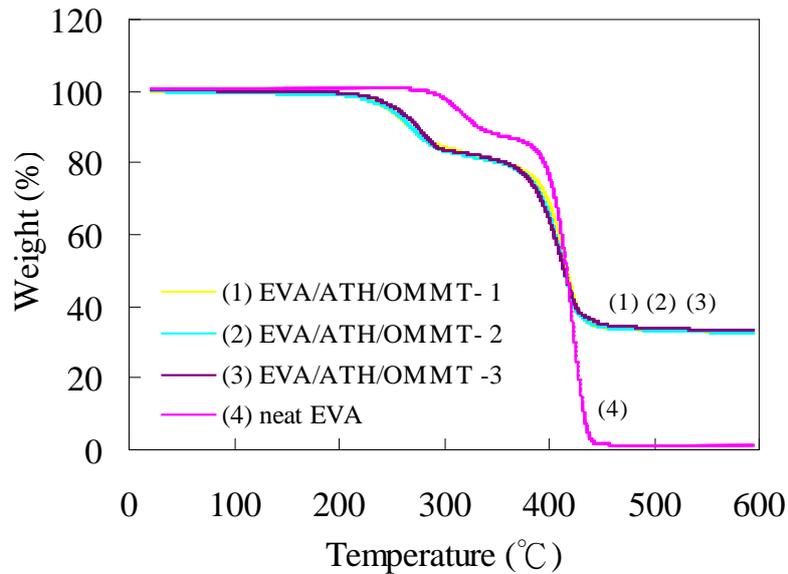
圖五為TGA觀察到EVA-ATH/OMMT-1有二個階段的热重損失。首先，第一階段降解溫度涉及氫氧化鋁的脫水反應，發生在240°C到340°C，實驗結果顯示脫乙酰化（損失醋酸）發生較早，比純EVA和第二個階段聚合物分解保持不變。而



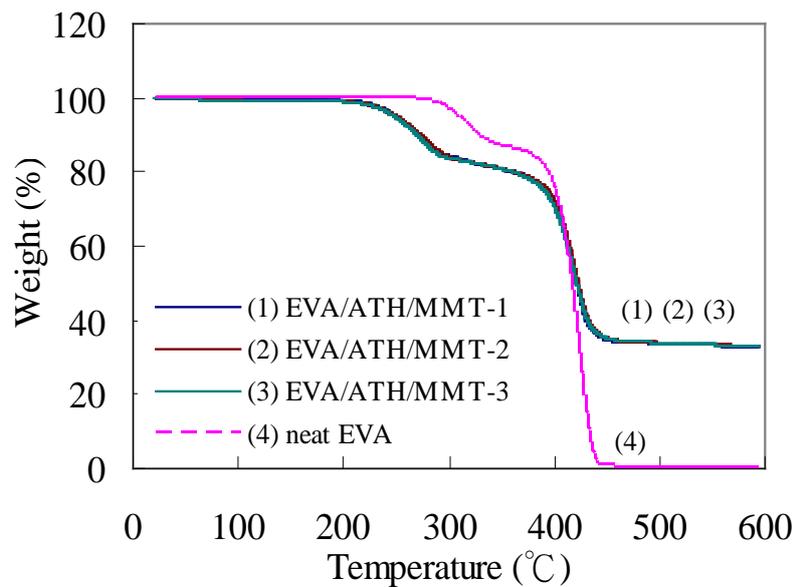
圖五、EVA-ATH//OMMT-1之TGA-DTG圖

這在較低溫度下第二個階段的分解為氫氧化鋁和EVA/-ATH/MMT奈米複合材料形成保護層間的關係。由此可發現，在降解過程中產生的氫氧化鋁分解所剩下的氧化鋁或水會形成阻止或破壞的保護層，而影響EVA/-ATH/MMT奈米複合材料的降解過程。

圖六與圖七分別是 EVA-ATH/OMMT 與 EVA-ATH/MMT 組成之奈米複合材料 TGA 曲線圖，實驗結果顯示，添加耐燃劑之作用為減緩材料的氧化分解，其耐燃功能是通過不可燃的成份覆蓋正在分解的材料，由 TGA 分析曲線圖得知，當含有耐燃劑的樣品燃燒後耐燃劑成功地撲滅尚未燃燒的樣品，並阻止其進一步氧化，耐燃劑添加高比例時，會導致 EVA-ATH/OMMT 與 EVA-ATH/MMT 組成之奈米複合材料熱穩定性下降。



圖六、EVA-ATH/OMMT 之 TGA 曲線圖



圖七、EVA-ATH/MMT 之 TGA 曲線圖

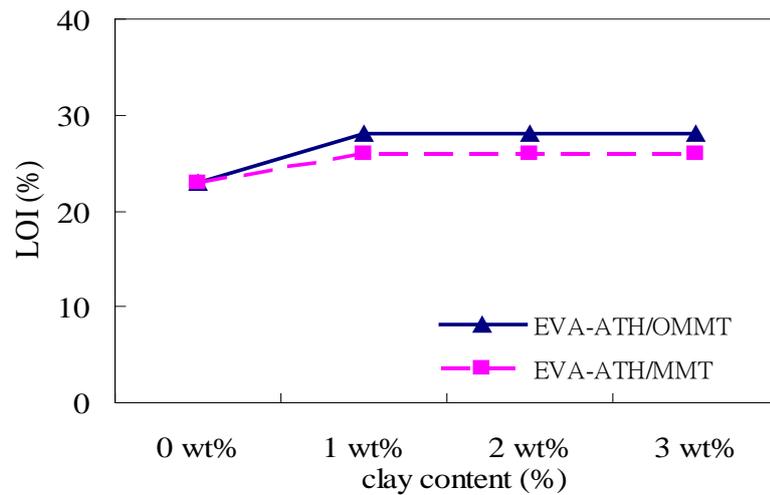
純的乙烯醋酸乙烯酯如前述圖四所示，初始裂解溫度為 307°C；由表三得知，蒙脫土與改質蒙脫土添加量為 1 wt%、2 wt%、3 wt% 時，初始裂解溫度則分別為 242°C、251°C 及 252°C 與 257°C、263°C 及 266°C。即添加蒙脫土並未能改變乙烯醋酸乙烯酯的初始裂解溫度 (T_d)。當溫度升高時，由於奈米複合材料之乙烯醋酸乙烯酯的基材裂解溫度小於蒙脫土，故溫度升高時，乙烯醋酸乙烯酯會比蒙脫土更快產生裂解現象。不管蒙脫土之添加量多寡，均未影響樹酯初始裂解溫度。

表三 各種組成奈米複合料之熱裂解溫度(T_d)

Sample	T_d (°C) for loss in nitrogen
neat EVA	307
EVA/ATH	291
EVA/ATH/OMMT-1	257
EVA/ATH/OMMT-2	263
EVA/ATH/OMMT-3	266
EVA/ATH/MMT-1	242
EVA/ATH/MMT-2	251
EVA/ATH/MMT-3	252

3.5 LOI 試驗

極限氧指數 (LOI) 為複合材料在氧、氮混合氣流中維持平穩燃燒所需之最低氧濃度，通常以氧在混合氣體中所占的體積比來表示。材料 LOI 值超過 21%，說明該材料具有耐燃性能，其 LOI 值越高表示其耐燃性能越好。由圖八可發現，在未添加耐燃劑及蒙脫土的純原料 EVA 的 LOI 值為 23，表示其較不易燃燒，然而在加入耐燃劑及改質蒙脫土後，可使得 LOI 值提升到 28，效果最為顯著，且 EVA 奈米複合材料組成之極限氧指數 (LOI)，依等級分類 ≥ 26 為達到難燃性。



圖八、EVA-ATH/MMT 之奈米複合材料 LOI 比較圖

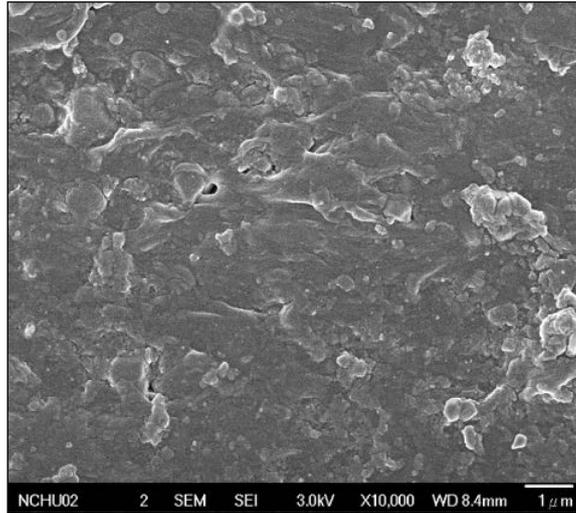
由表四可觀察到 100%EVA 與 40%EVA 加入 60%耐燃劑氫氧化鋁作比較，極限氧指數由 23 上升至 33，而添加改質蒙脫土 LOI 值比未改質蒙脫土提升高 2 個 LOI 等級。EVA-ATH/MMT 之 LOI 為 26，EVA-ATH/OMMT 之 LOI 為 28，可知一般電纜電線配方（40/60 wt%）比添加少量蒙脫土，其耐燃性效果較佳。並發現添加有機改質蒙脫土能明顯改善材料的耐燃性能。

表四 各種組成奈米複合料之極限氧指數(LOI)

Samples	EVA (wt %)	ATH (wt %)	O ₂ (%)
neat EVA	100	0	23
EVA/ATH	40	60	33
EVA/ATH/OMMT-1	50	49	28
EVA/ATH/OMMT-2	50	48	28
EVA/ATH/OMMT-3	50	47	28
EVA/ATH/MMT-1	50	49	26
EVA/ATH/MMT-2	50	48	26
EVA/ATH/MMT-3	50	47	26

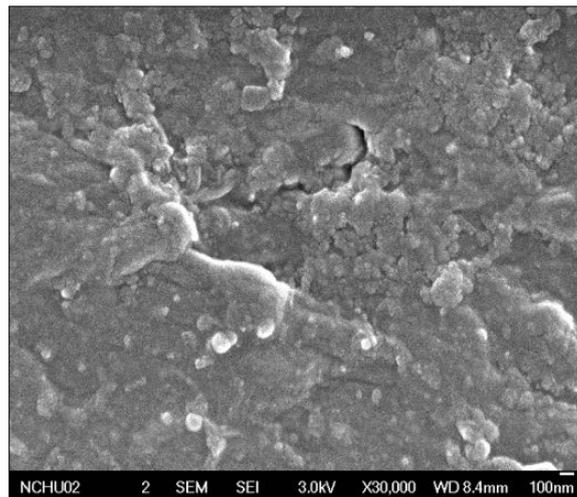
3.6 FE-SEM 觀察

本研究將EVA-ATH添加不同比例之OMMT(0、1、2、3 wt%)，經熱壓製成試片，



圖九、EVA-ATH/OMMT-1奈米複合材料之FE-SEM圖 (×10,000)

使用場發射掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)進行奈米複合材料的層狀結構的觀察與分析。由圖九為奈米複合材料試片放大至10,000，從顯微結構觀察複合材料呈現剝離狀，有如翻頁鬆散般的聚集。圖十為放大倍率至30,000相片，可觀察到奈米複合材料平滑緊密堆疊之層狀結構的表面，奈米複合材料中蒙脫土含量分別為1 wt%的FE-SEM分析圖，由此顯示，添加clay有提高分散的效果。



圖十、EVA-ATH/OMMT-1奈米複合材料之FE-SEM圖 (×30,000)

四、結論與建議

1. 以十八烷基胺 (Octadecylamine) 改質蒙脫土，使蒙脫土由親水性變成親油性，層間距離由1.27 nm擴大到1.96 nm，有效撐開層間距離，可使聚合物單體或有機高分子更易插層到蒙脫土層間。
2. 由XRD結果顯示，當EVA單體插層到有機改質蒙脫土層間，有機改質蒙脫土會被EVA所剝落，形成脫層型奈米複合材料。
3. 由拉伸試驗結果顯示，隨著蒙脫土添加量之增加，抗拉強度呈上升趨勢，使機械性質獲得改善，而在蒙脫土為3 wt%時，機械性質有較佳的趨勢，可見蒙脫土的加入，能提高EVA基材的力學性能。
4. EVA奈米複合材料在楊氏係數方面，鈉蒙脫土與有機改質蒙脫土，皆隨著蒙脫土含量的增加，楊氏係數都有增加的趨勢。添加無機材料來形成有機/無機高分子複合材料，藉以補強高分子材料機械強度不佳的缺點，讓材料變的較硬，所以，斷裂伸長率皆隨黏土添加量的增加而降低。
5. 在熱性質方面，以DSC量測結果得知其 T_m 並無明顯改變；TGA量測結果得知EVA-ATH/MMT組成之奈米複合材料，其裂解溫度並無隨著蒙脫土添加量的增加而有明顯上升的趨勢，溫度皆低於純EVA裂解溫度 (306.51°C)，顯然添加高比例之耐燃劑和降解過程，可能使複合材料熱性質呈下降趨勢。
6. 由極限氧指數分析結果得知，添加改質之蒙脫土LOI值比未改質高2個LOI等級。EVA-ATH/MMT之複合材料LOI為26，EVA-ATH/OMMT之複合材料LOI為28，效果最為顯著，且EVA奈米複合材料組成之極限氧指數 (LOI)，依等級分類 ≥ 26 為達到難燃性，可知改質過之蒙脫土能提升耐燃性。在無鹵耐燃級EVA中，添加3 wt%的蒙脫土，氫氧化鋁添加量於47 wt%時，有最佳的拉伸強度及耐燃性。
7. 場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM) 觀察有機改質蒙脫土微結構中，奈米複合材料平滑緊密堆疊之層狀結構表面，以片狀均勻分布在EVA基材中，EVA-ATH/OMMT-3比EVA-ATH/OMMT-1、EVA-ATH/OMMT-2縝密的排列結構，更容易讓MMT均勻分散並嵌入高分子中。
8. 蒙脫土的加入會降低其延展性，有機改質蒙脫土與ATH複合實用能夠提高EVA的耐燃性能，這有可能在不降低耐燃等級下，實現降低ATH的添加量，並能改善耐燃材料的物理機械性能及其他性能。另外，希望能進一步嘗試其他有機改質蒙脫土與其他常規耐燃添加劑的配合使用。

五、參考文獻

1. ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties ofPlastics.
2. Banhart F, Ajayan P M, “Nanotechnology in Carbon and Related Materials”,Nano-teC99 Conference, University of Sussex at Brighton,U.K,1999.9, pp. 8-10 (1999).
3. Okada K., Japanese Pat., pp.11-228748 (1999).
4. Brydson J.A.著，“塑膠材料”，范啟明譯，大中國圖書公司印行，國立編譯館主譯 (1999)。
5. 彭艷慧、尤建智、王郁銘，“聚乙烯／蒙脫土奈米複合材料之研究”，實務專題研究，雲林科技大學環境與安全衛生工程系 (2007)。
6. Laoutid F. et al., “Intumescent mineral fire retardant systems in ethylene-vinyl acetate copolymer:Effect of silica particles on char cohesion”,Polymer Degradation and Stability,91, pp. 2140-2145 (2006).
7. Kroto H W, Heath JR, O'Brien S C, et al. Nature,318, pp.162-163 (1985).
8. Paul Calvert., “Polymer/Clay Nanocomposite”，英國《自然》雜誌 Nature,Vol. 383.26:26 (1996).
9. 朱賢士，“聚丙烯/黏土奈米複合材料之製備與性質研究”，碩士論文，中國文化大學材料科學與奈米科技所 (2006)。
10. William D. Callister , Jr 著，“材料科學與工程”，簡仁德、楊子毅、張柳春譯，學銘圖書館有限公司與歐亞書局有限公司，第 213-215 頁，第 145-150 頁 (2006)。
11. Beyer G et al., “Flame retardant properties ofEVA-nanocomposites andimprovements by combination of nanofiller with aluminiumtrihydrate”, FireMater, 25, pp. 193–197 (2001).
12. Günter Beyer et al., Fire and Materials, 25, pp.193-197 (2001).
13. Thostenson E T, Ren Z, Chou T W. Compos. Sci.Technol.,61: pp.1899-1912 (2001).
14. 洪志揚，“EVA/ Clay 奈米複合材料對LLDPE 電線電纜披覆材熱性質之影響”，碩士論文，國立台北科技大學化工系 (2003)。
15. 林忠慶，“EVA/一般，奈米 Mg(OH)₂/蒙脫土奈米複合材料之性質研究”，碩士論文，國立台北科技大學有機高分子所 (2005)。
16. 漆宗能、尚文字，“聚合物／層狀矽酸鹽奈米複合材料”，五南圖書出版公司 (2004)。
17. Ca´rdenas M.A. et al.,“Mechanical and fire retardant properties of

EVA/clay/ATH nano- composites - Effect of particle size and surface treatment of ATH filler”, *Polymer Degradation and Stability*, 93, pp.2032–2037 (2008).

18. 巫雅惠，“以烷基鹽插層改質蒙脫石之攪磨剝層研究”，碩士論文，成功大學資源工程學系研究所 (2004)。
19. 葉孟恆，“添加劑對蒙脫土改質之影響”，博士論文，國立成功大學材料科學及工程學系 (2006)。
20. 羅次郎，“聚丙烯／蒙脫土奈米複合材料之製備”，碩士論文，國立雲林科技大學化學工程與材料工程系 (2006)。

30kWt 化學迴路新燃燒系統冷模試運轉研究報告

Studying of the 30kWt chemical looping process of new combustion bench scale

沈政憲¹、陳建華、許介寅、彭鏡禹、邱炳嶽、黃國恩

Zheng-Xian Shen Jian-Hua Chen Jie-Yin Xu Jing-Yu Peng Bing-Chin Qiu Guo-En
Huang

工業技術研究院 綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratorie, Industrial Technology
Research Institute

摘 要

放眼未來全球人類將同時面臨解決能源持續增加需求和二氧化碳排放所帶來環境劇烈變遷的問題，本文發展之化學迴路技術是一個能夠提高能源使用效率和同時進行二氧化碳捕獲的節能減碳技術。在經濟部能源局補助計畫經費支持下，自 2012 年起即積極導入此一技術的發展。

工研院在高雄楠梓院區已建立的 30kWt 化學迴路新燃燒系統，完成冷模測試操作，並且建立完整操作標準程序，也掌握相關重要操作參數，包括在整個系統操作上輸送氣體氣量、氣送壓力、載氧體停留時間、旋轉閥轉速與進料量的搭配、反應器操作溫度等。後續將會積極進入熱模運轉，進行高濃度 CO₂ 和氫氣的產出測試，並且以此測試平台進行相關載氧體開發與測試。

關鍵字：化學迴路、二氧化碳捕獲、載氧體、氫氣

Abstract

The future of global humanity will have to face while addressing energy demand and carbon dioxide emissions continue to increase environmental changes brought about problems. However, chemical looping technology can improve energy efficiency and simultaneously reduce carbon emissions of carbon dioxide capture technologies. Therefore, Ministry of Economic Affairs Bureau of Energy funding support, and actively develop this technology in Taiwan since 2012. This article will use the operation of 30kWt chemical looping process of new combustion bench scale in Kaohsiung Nanzih District of ITRI. And complete the establishment of a complete

工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員
E-mail: CHShen@itri.org.tw

operating standard procedures, but also master the important operating parameters, including the entire volume of gas transportation system operation, gas feeding pressure, oxygen carrier residence time, rotation speed and feed rate of the valve with the reactor operating temperature. Future experiments will actively test the hot model operation, proceeding high concentrations of CO₂ and hydrogen. And also provide a platform for this test related oxygen carrier.

Keyword : Chemical looping process, CO₂ capture, Oxygen carrier, Hydrogen

一、前言

能源的需求隨著經濟的發展息息相關，而人類對於經濟的發展亦是與日俱增，因此將二者結合為一所發展出的情境，即可以清楚地得到未來能源的需求與人口的增加應是正相關，這樣的結論與美國能源資料管理局(US Energy Information Administration)在 2008 所發布資料顯示[1]，全世界的總能源需求預計將從 2007 年的 495 兆 BTU 上升到 2035 年的 739 兆 BTU，而煤炭、石油、天然氣等化石燃料仍然是主要的燃料來源，若按照上述的結果推論人類的經濟需求的成長，未來仍將會繼續以化石能源作為最主要且大量的供應來源，然而化石能源燃燒應用後所產生的二氧化碳對於全球所造成的氣候劇烈變遷與影響，儼然已經成為全球經濟發展過程中所需同時解決的另一個重要課題。根據聯合國政府間氣候變遷小組 (IPCC) 2007 年各種情境分析報告之預測，如無法有效控制溫室氣體排放，除了可能造成全球暖化、氣候變遷，並將衍生水源、食物短缺、海岸侵蝕及生態破壞，進而造成物種之滅絕。面對此嚴峻之挑戰，世界各國莫不積極發展各種對策與技術，以降低二氧化碳之排放[2]。相關之減排對策包括：發展節能技術提升能源效率、採用低碳燃料及將所排放之二氧化碳捕獲封存。前兩項對策雖然可行，但減排效益有其極限，必須再藉助二氧化碳捕獲與封存技術才能機會有效達成減排目標。

依據我國溫室氣體適當減緩行動(NAMAs)推估[3]，CCS 減碳貢獻 2020 年佔 1.6%(~5 百萬噸)，2025 年將增加至 12%之 CO₂ 減量(~37 百萬噸)。其中火力電廠約佔我國 CO₂ 排放量的 65%，應列為優先處理 CO₂ 排放集中的大排放源，其中應以燃煤電廠為首要目標。另工業部門總排放量約佔全國總排放量的 16%，其中水泥、石化與鋼鐵業排放源較為集中，亦應列為優先處理對象。

然而在全力發展減碳技術中，商業行為是需要同時也是必要的方法之一，根據能源局資料預估在 2025 年市場潛力，電力部門將設置 4 座 800MWe 商轉廠(新電廠裝設，共捕獲 18 百萬噸 CO₂)，捕獲效率 90%，總投資成本 2,256 億元，每年

總操作成本 108 億元。工業界 CO₂ 減量，包含(1)既有水泥廠加裝乙座年捕獲量 3 百萬噸 CO₂ 之商轉廠，(2)既有鋼鐵廠加裝乙座年捕獲量 2 百萬噸 CO₂ 之商轉廠，(3)既有工業區燃煤鍋爐設置乙座年捕獲量 5 百萬噸 CO₂ 之商轉廠，捕獲效率 90% ，總投資成本 730 億元，每年總操作成本 45 億元[2]。

目前國際積極發展中之各類二氧化碳捕獲技術相當多，例如化學吸收、物理吸附、薄膜分離、純氧燃燒等，理論上均是可行的，然而設備成本及能源耗損量相當高，技術應用於二氧化碳捕獲，將會大幅增加發電成本，是目前亟需努力克服之瓶頸。新興的技術中，化學迴路技術兼具高能源效率、低污染排放及低成本二氧化碳捕獲之特性，如圖1所示[4]，依據美國能源部評估分析各種二氧化碳捕獲技術之成本效益，及技術實踐應用之預期時程。化學迴路是所有技術中成本與效率最具競爭力者，但也最需要長時間研發突破，因此視其為最具前瞻優勢與發展潛力的二氧化碳捕獲技術。因此化學迴路技術一旦發展成功，將具有相當高之市場競爭優勢，相當有機會成為未來主流的能源與二氧化碳捕獲系統。因此近年來，國外先進研究單位已投入大量的時間與資源，要在益趨激烈的國際化競爭市場取得一席之地。我國也正積極投入建立優勢技術。

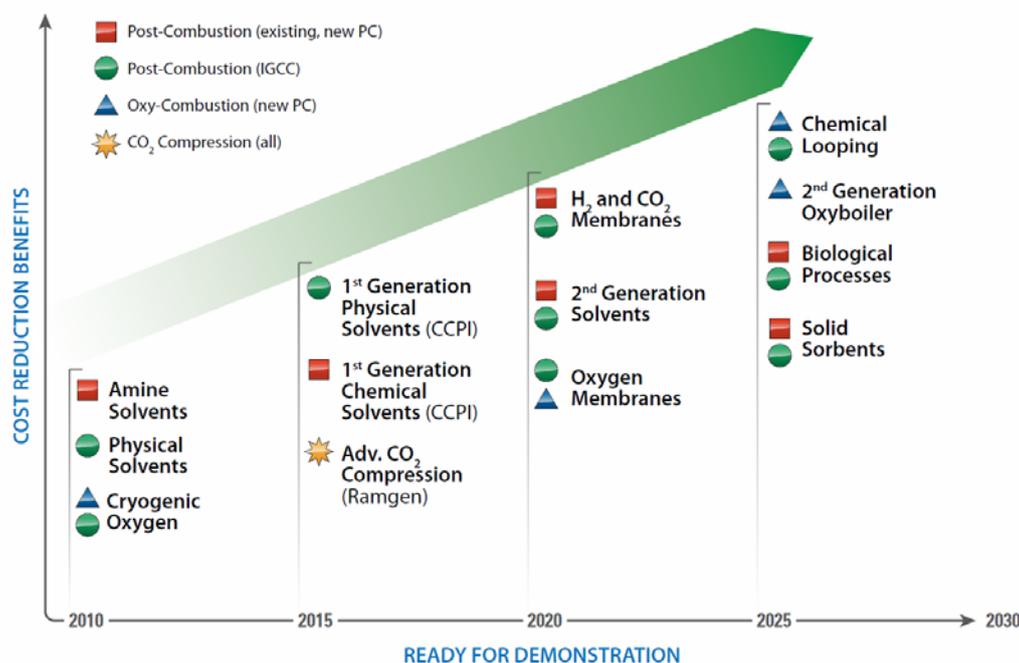
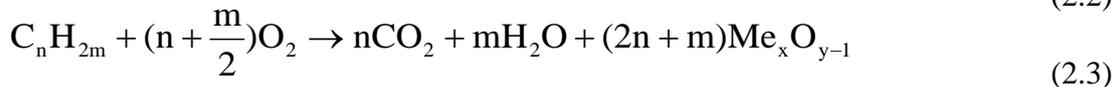
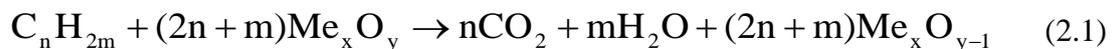


圖 1、美國能源部對各種二氧化碳捕獲技術之評估

二、化學迴路新燃燒系統原理與發展潛力

2.1 化學迴路新燃燒系統原理

化學迴路(Cheical Looping Process; CLP)泛指利用化學物質在不同反應器，發生不同的化學變化，當完成所有反應後，化學結構回到最初狀態的一種迴路，因此化學迴路是屬於一種無火焰燃燒技術，兼具高能源效率、低污染排放及低成本二氧化碳捕獲之特性，然而化學迴路程序雖為一項燃燒技術，與一般燃燒不同之處是將燃燒所需的氧來源，由空氣改為金屬氧化物中的氧原子，因此在化學迴路程序中金屬氧化物扮演了承載氧原子提供燃料進行燃燒的角色，故化學迴路技術既屬於燃燒前捕獲技術又具有純氧燃燒的特質[4]；故本程序中所使用之金屬氧化物亦稱作載氧體(Oxygen Carrier)。在進行燃燒反應時如式(2.1)所示，燃料(C_nH_m)對載氧體(Me_xO_y)與進行還原反應，使載氧體的金屬價數降低，同時燃料被載氧體氧化為二氧化碳與水蒸氣，再將水蒸氣冷凝後即可獲得 95~99%之二氧化碳。被還原後的載氧體(Me_xO_{y-1})以空氣進行氧化反應如式(2.2)所示，使載氧體回到最氧化態。載氧體的還原與氧化在工程上分別在燃料反應器(Fuel Reactor)與空氣反應器(Air Reactor)中進行反應如圖 2 所示，並透過固體輸送裝置使載氧體可在兩個反應器之間連續循環[5]。由於載氧體在燃料反應器的還原反應大部分為吸熱反應，而在空氣反應器所發生的氧化反應則為大量放熱反應，所以整體系統之熱平衡需仰賴載氧體自空氣反應器攜帶熱能至燃料反應器，使燃料反應器可維持 800-1000°C 的反應溫度。以整體化學迴路程序而言，載氧體在兩個反應器之間反覆地還原與氧化，即形成一個完整的迴路(Looping)，在燃料反應器可獲得高純度二氧化碳，而在空氣反應器可獲得熱能，並由總反應式(2.3)可知，化學迴路程序雖然改變燃燒反應所需的氧來源，但總反應仍是燃燒反應，可視為一種可捕獲二氧化碳的能源程序。



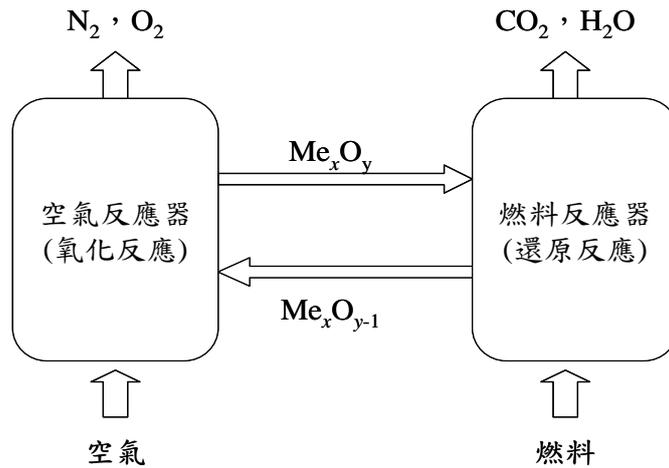


圖 2. 化學迴路燃燒程序示意圖

此外再進一步考量反應器的特性與載氧體被還原的程度，可以進一步的利用發展為三個反應器之系統，即所謂的在燃料與空氣兩個反應器之間增加一道「部分氧化器」，即形成所謂的燃料反應器(還原反應)-蒸氣反應器(部分氧化)-空氣反應器(氧化反應)，如圖 3 所示，一般而言這樣的反應器主要是以固定床形式為主，主要原因是載氧體在燃料反應器內可以與燃料停留時間反應較長約~5mins 之間，因此將可將被高度還原態的載氧體再與水蒸氣反應來生產氫氣，當然這當中載氧體的氧化還原特性與能力亦是一重要關鍵。因此系統操作可以保持彈性，將可以由原有產熱發電局部或全部轉變為生產氫氣，讓載氧體進行三反應器之迴路，所以三個反應器的設計將可以進行熱能與化學能的生產調配，將化學迴路技術特色清楚展現。由於燃料在全系統運轉過程中將不需與空氣直接接觸，而是與載氧體反應即可進行氧化與燃燒，除了產生氣體僅為 CO₂ 而無 N₂ 外，同時其反應溫度約在 1000°C 左右，所以亦減少了燃料型 (Fuel-) 與熱力型 (Thermal-) 的氮氧化物 (NO_x) 的產生，因此可視為一種「無火焰燃燒反應」。

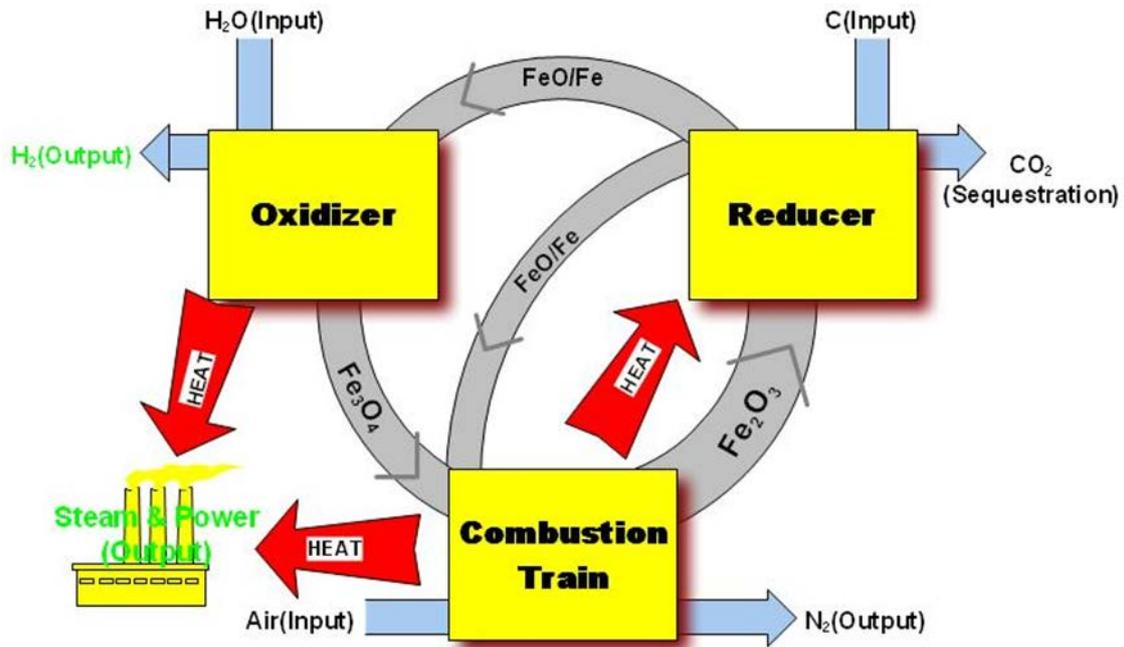


圖 3、OSU 化學迴路具生產氫能的三個反應器組合

目前國際化學迴路系統反應器技術發展之主流，主要分為流體化床及移動床兩種。根據評估，移動床技術相較於流體化床應用於化學迴路技術發展，具有相當多之優勢，整理如表 1。

表 1、移動床與流體化應用於化學迴路之評比分析

應用優勢	應用劣勢
高碳轉化率	載氧體移動速度不均
高二氧化碳捕獲濃度	載氧體反應率不均
高載氧體供氧能力	放大設計技術成熟度低
低載氧體循環量	發展改良方向
高系統裝置容量	移動床流場改良技術開發研究
系統流程簡單	反應器最佳化設計研究
低成本產製高純度氫氣	系統操作與控制流程設計研究

根據上述分析，採用移動床技術，在燃料碳轉化率、載氧體供氧量、系統裝置容量上限及系統設置成本等方面，均比採用流體化床技術為佳。本研究與美國俄亥俄州立大學(The Ohio State University; OSU)技術合作，並根據 OSU 提供的移動床系統技術資料作為基礎，進行計算後放大設計為 30 kWt 氣態燃料化學迴

路系統。因此本研究選擇移動床作為系統技術發展主軸，設計建立一套可連續運轉的 30kWt 化學迴路新燃燒系統示範場，以便建立技術測試平台，整合國內研發資源進行測試與開發研究，加速優質的化學迴路技術之發展。

2.2 化學迴路新燃燒技術的發展潛力

化學迴路技術由於具有高能源效率、低二氧化碳捕獲成本、低污染及高純度產二氧化碳與氫氣等優勢，未來的發展相當具有潛力，底下將就目前可以進行的多元應用發展，說明如下：

1. 工業製程熱、電及氫氣整合應用

燃料反應器操作溫度約在 900~1,000°C 之間，且不需提供助燃空氣，因此可以減少 NO_x 污染物的產生機會，空污氣體流量少，處理成本低。由於化學迴路技術具有 CO₂ 捕獲功能，而且化學迴路之熱電轉換效率仍可能在 40~45% 之間，高於「氣化系統+CCS」的 30~40%，因此未來有機會廣泛應用於工業製程，因此相當有機會應用化學迴路技術，在熱、電及氫氣之需求條件下，開發創新的整合應用製程。

2. 利用 CO₂ 再利用技術產製化學品

化學迴路技術除了將應用於能源及二氧化碳捕獲外，目前也有提出一些創新構想，主要是利用載氧體與燃料間之氧化還原反應，將燃料化學成份進行重組，同時可以利用化學迴路產氫特性，提供給未來 CO₂ 再利用技術轉換成化學品所需的廉價氫氣。

3. 搭配燃料電池，形成更高效率的能源系統

利用化學迴路系統可以產生高純度氫氣之特性，將氫氣引進到燃料電池系統發電，並且可以將燃料電池產物-水，再送回化學迴路中氧化器產氫氣再利用，可使燃料的能源利用效率大幅提高到 60~70%，利用提高能源效益間接達到減碳效益，再加上化學迴路自身可以達到捕獲 CO₂ 技術，因此可以達到更高節能減碳效果。

三、實驗設備

本研究設備30kWt化學迴路新燃燒系統目前座落於工研院高雄楠梓院區氣化廠區內，目前已陸續完成系統試車，以便未來進行測試研究、設計改良與操作

控制技術研究。相關工作方法與步驟說明如下：

如圖4所示，為30 kWt化學迴路新燃燒測試系統測試整體系統設計規劃內容，主要可分為：(1)主要反應器及(2)周邊裝置兩大類，說明如下：

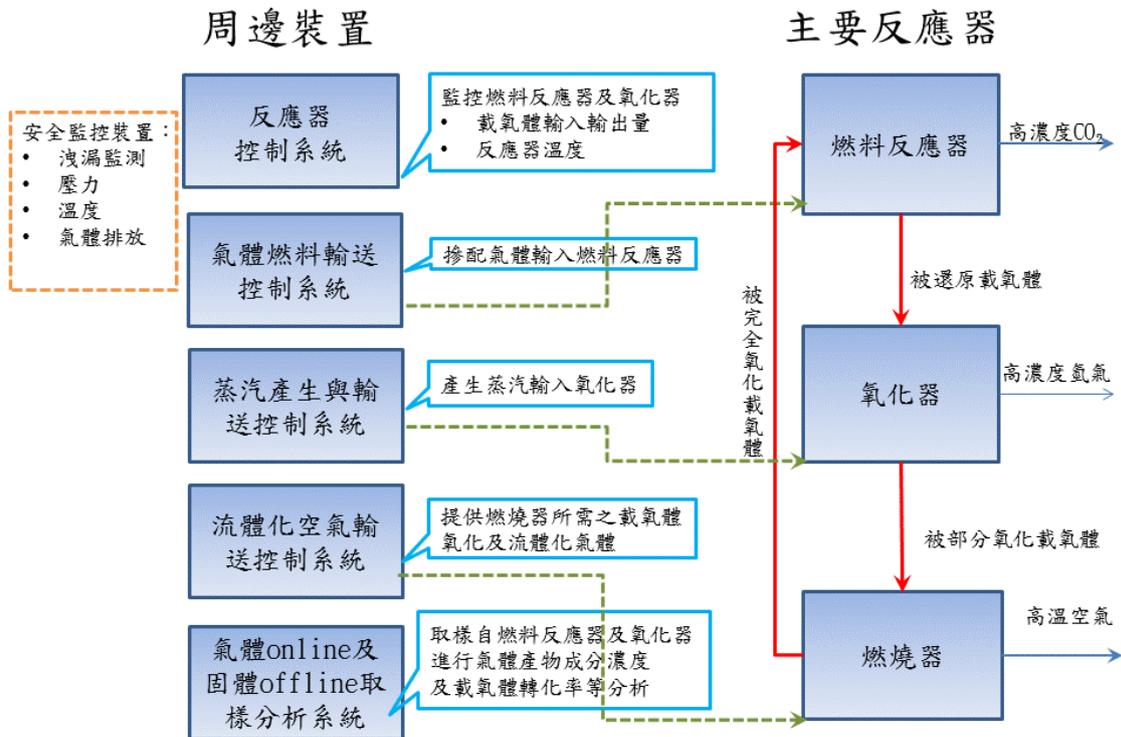


圖4、30 kWt化學迴路測試系統測試整體系統設計規劃內容

(1) 主要反應器

所設計之主要反應器設備包括：燃料反應器、氧化器及燃燒器，說明如下：

(a).燃料反應器：

提供載氧體與氣體燃料反應之環境，反應後氣體產物為高濃度的二氧化碳及水蒸氣，固體產物則為被還原的鐵系載氧體，由 Fe_2O_3 轉化成 FeO 及 Fe 型態之混合物。床體以移動床架構設計，反應器之體積及尺寸需根據 30 kWt 規模之還原反應速率，推算燃料轉化率、載氧體供氧量、載氧體需求裝置容量、滯留時間及移動速率等條件進行設計。操作溫度範圍控制在 $850\sim 950^\circ\text{C}$ 。

(b).氧化器：

提供被還原的載氧體與水蒸氣反應之環境，反應後氣體產物為高濃度的氫氣及水蒸氣，固體產物則為被部分氧化的鐵系載氧體，由 FeO 及 Fe 型態之混合物轉化成 Fe_3O_4 之型態。床體以移動床架構設計，反應器之體積及尺寸需根據 30 kWt 規模載氧體與水蒸氣之反應速率，推算水蒸汽流量、載氧體轉化率、裝置容量、滯留時間等條件而進行設計。操作溫度範圍控制在 850~950 °C。

(c).燃燒器：

提供被部分氧化的載氧體與空氣反應之環境，反應後氣體產物為高溫的氫氣及氧氣，固體產物則為完全被氧化的鐵系載氧體，由 Fe_3O_4 之型態轉化回到可作為燃料反應器原料的 Fe_2O_3 型態。為了能將載氧體送回燃料反應器之頂端，形成一組迴路，燃燒器設計為流體化床架構。反應器之體積及尺寸需根據 30 kWt 規模載氧體輸入量，推算氧氣需要量、所需滯留時間及流體化氣體流量等條件而進行設計。操作溫度範圍控制在 600~650°C。

將三個主要反應器系統組合後 30 kWt 化學迴路新燃燒系統主設備配置如圖 5 所示，為確認整體實驗系統功能正常，在建造完成主要反應器後，將進行各單元設備之洩漏測試。當系統整合組裝完成後則進行試車測試，內容包含：組合後連接點之洩漏測試、加熱設備之升溫測試、載氧體輸送控制單元之校正測試、載氧體在燃燒器內之流體化測試及上昇管控制氣速測量。



圖 5、30 kWt 化學迴路新燃燒系統

四、實驗測試結果分析

1. 30kWt 化學迴路新燃燒系統冷模試驗

30kWt化學迴路(Cheical Looping Process; CLP)測試系統主要目的為：1.利用載氧體與燃料反應後產生高濃度二氧化碳氣體，2.被還原載氧體與水蒸氣反應可產製氫氣。本研究利用在102年度已建立之測試系統進行主要元件測試與操控技術研究，系統流程如圖6所示，主要包括燃料供應單元、反應主體單元及公用設備供應單元三部分所組成。燃料供應單元主要提供系統反應所需燃料；反應主體單元包括：還原器(RED-305)、氧化器(OXI-317)、燃燒器(CBT-331)、旋轉下料閥(RV-314、RV-326)、旋風分離器(CYC-301)及控制下料時間的ON-OFF控制閥；公用設備供應單元則包括系統反應所需之蒸汽、空氣、煙道氣分析等設備。

燃料流率主要由質量流量控制器(MFC)控制，因載氧體在反應器內填充一定高度，形成進料阻力，本測試主要確認質量流量控制器操作流率與供給壓力之參數。旋轉下料閥主要負責還原器、氧化器及燃燒器內之載氧體的定量輸送，旋轉下料閥下料速率除了要能符合實驗需求外，當改變馬達轉速時，亦須具有良好的線性度。本測試主要確認載氧體在旋轉下料閥運轉過程中不會出現卡料或架橋之

現象，並且可以阻絕上下游反應器氣體的流通，同時須測試載氧體下料量是否夠線性，以滿足未來實驗操作需求。進行測試時將旋轉下料閥轉速分別設定為0.5~1.0(rpm)，共進行三次出料計量後取平均值進行迴歸分析，如表2所示，其中R平方值高達0.9995；迴歸曲線如圖7所示，實際下料量與預測下料量非常一致，顯示旋轉下料閥之載氧體輸送量相當穩定，具有相當理想的線性預測。

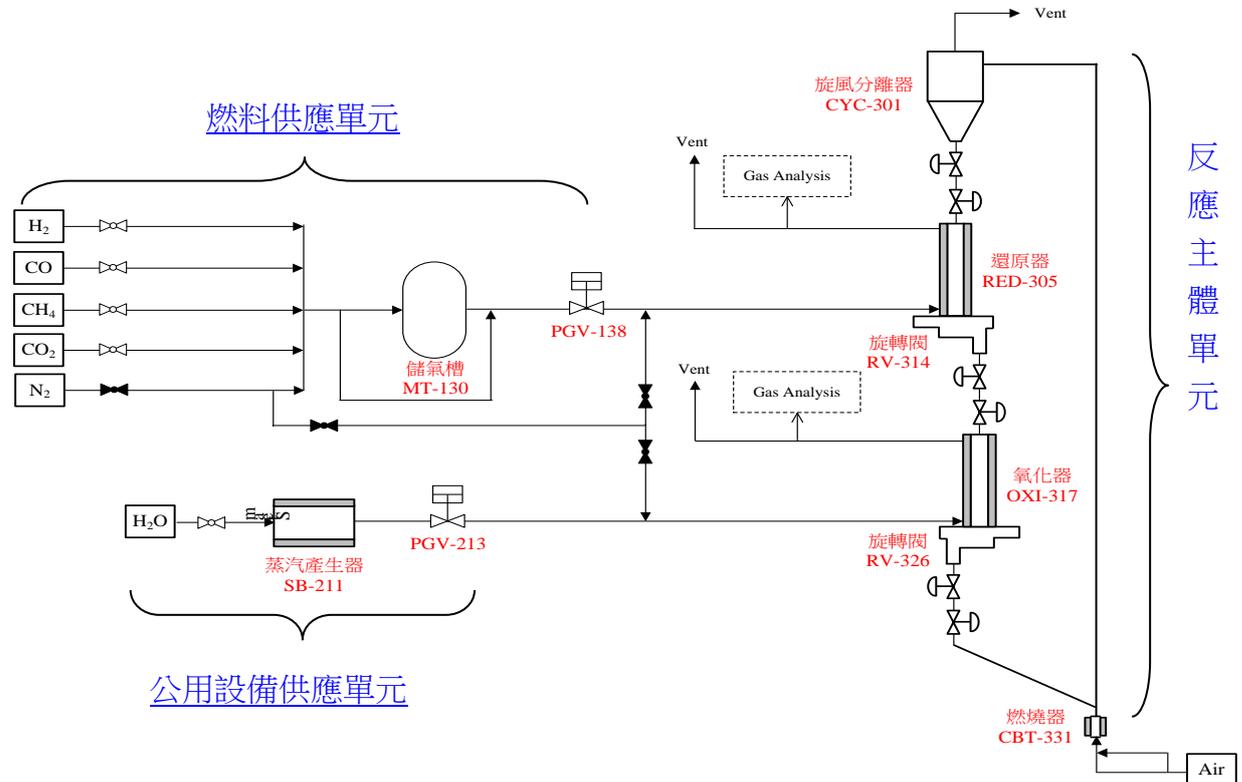


圖 6、30 kWt化學迴路新燃燒系統流程圖

表2、旋轉下料閥下料測試數據與統計分析

轉速(rpm)	下料測試-1	下料測試-2	下料測試-3	平均值(g)
0.5	1072.31	1084.66	1076.01	1077.66
0.6	1286.71	1294.91	1296.29	1292.64
0.7	1503.32	1509.19	1519.79	1510.77
0.8	1729.17	1736.61	1735.49	1733.76
0.9	1956.37	1944.44	1943.98	1948.26
1	2144.57	2143.34	2128.36	2138.76
<p>迴歸統計</p> <hr/> <p>R 的倍數 0.9998</p> <p>R 平方 0.9995</p> <p>調整的 R 平方 0.9994</p> <p>標準誤 10.078</p> <p>觀察值個數 6</p>				

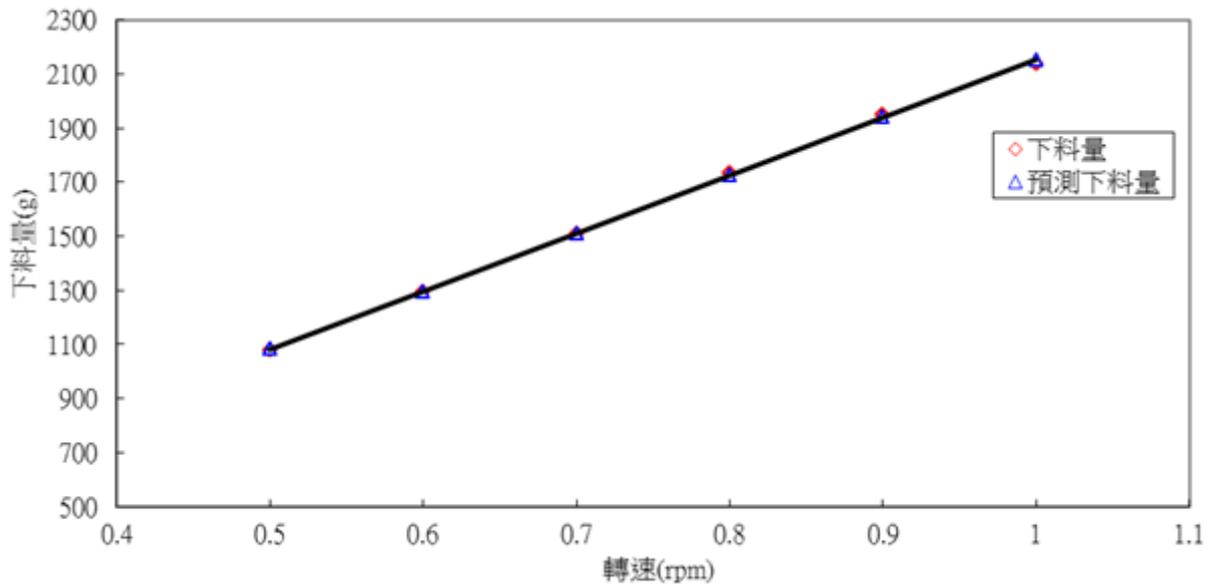


圖7、旋轉下料閥下料量迴歸曲線

載氧體經過氧化器後再送入燃燒器進行氧化，其中在氧化器中的載氧體先與少量空氣持續接觸完成再生反應後，再利用大量空氣輸送至還原器，表3為空氣壓力與載氧體輸送量測試結果，氣送壓力越高可輸送較多之載氧體至還原器；圖8為氣送壓力與載氧體輸送量迴歸曲線，其中R平方值高達0.9898，顯示氣送壓力與載氧體輸送量相當穩定。氣送壓力越高雖可輸送較多之載氧體至還原器，但過篩載氧體後發現，當氣送壓力較高時載氧體會受到較大衝擊而產生破損，如表4所示，例如：若以載氧體重量5公斤為例，氣送壓力 1.6 kg/cm^2 的破損率為氣送壓力 0.8 kg/cm^2 的3倍；氣送壓力較低雖可避免破損現象，但載氧體輸送量較少，因而會累積在燃燒器中。為避免載氧體破損量過大而影響系統運轉，另外進行較低氣送壓力下載氧體輸送測試，如表5所示；在相同氣送壓力下，當燃燒器中的載氧體累積較多時，其回收率較高。由於燃燒器的最大填充量為9kg，由測試結果表5中可知，當輸送壓力採 0.8 kg/cm^2 時回收率會較 0.6 kg/cm^2 高且穩定，因此本研究後續測試氣送壓力將採 0.8 kg/cm^2 作為操作壓力。

表3、氣送壓力與載氧體輸送量測試

壓力(kg/cm ²)	載氧體填充重量(kg)	載氧體回收重量(kg)
0.8	5	2.08
1.0	5	3.2
1.2	5	3.94
1.4	5	4.26
1.6	5	4.70
1.8	5	4.82

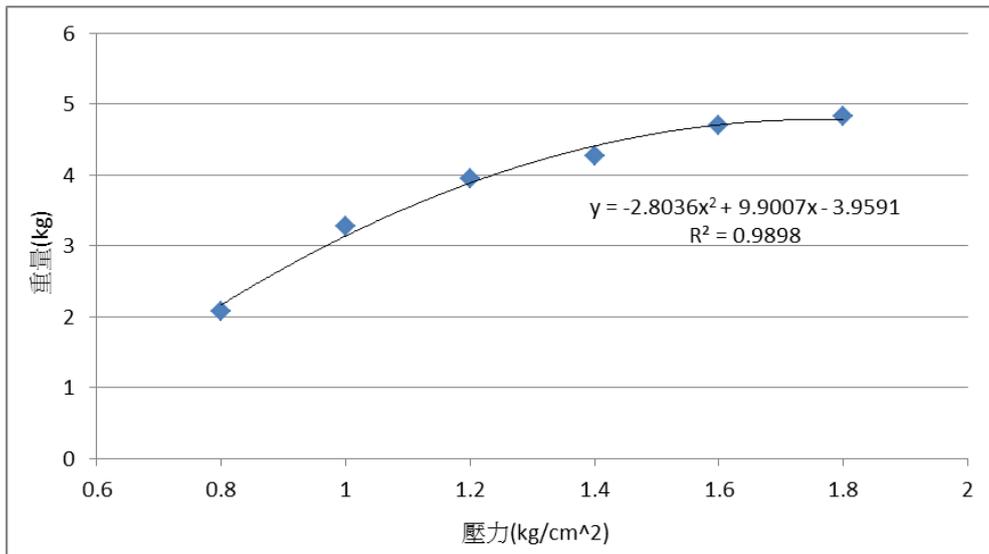


圖8、氣送壓力與載氧體輸送量迴歸曲線

表4、經氣送後載氧體過篩結果

送料壓力(kg/cm ²)	載氧體重量,(kg)	$\Phi \geq 2\text{mm},(\%)$	$\Phi < 2\text{mm},(\%)$
0.8	5.0	92.23	7.77
0.8	7.5	96.65	3.35
0.8	9.0	96.75	3.25
1.6	5	76.35	23.65
1.8	5	72.47	27.53

表5、氣送壓力與載氧體輸送量測試

氣送壓力(kg/cm ²)	載氧體初重(kg)	氧化風量(L/min.)	回收重(kg)	剩餘重(kg)	回收率(%)
0.6	2.5	350	0.64	1.86	25.60
	5	350	2.8	2.2	56.00
	7.5	350	4.46	3.04	59.47
	9	350	4.98	4.02	55.33
	9	350	5.28	3.72	58.67
	9	350	6.24	2.76	69.33
0.8	5	100	1.9	3.1	38.00
	5	100	2.08	2.92	41.60
	7.5	100	4.2	3.3	56.00
	7.5	100	6.44	1.06	85.87
	9	100	7.98	1.02	88.67
	9	100	7.58	1.42	84.22
	9	100	8.02	0.98	89.11

本研究在進行相關冷模測試之前，均依據實驗操作程序討論後訂定CLP標準操作程序(SOP)，該程序包括五大類：(1).CLP實驗前準備工作-訂定空氣/燃料/蒸汽/氮氣等周邊系統與進氣系統準備狀態確認程序、(2). CLP系統載氧體裝填與卸載程序-訂定化學迴路系統載氧體裝填與卸載程序。(3). CLP系統實驗操作SOP-訂定化學迴路系統由系統啟動到穩態之實驗操作程序、(4). CLP系統載氧體循環自動程序動作說明-訂定化學迴路連續與自動化標準程序與參數設定、(5). CLP系統實驗關機與復歸程序-訂定化學迴路系統關機與復歸程序。在建立所有測試前均有標準的操作程序可以依循，並符合相關系統操作條件與安全規定後，隨即進行系統八小時冷模連續運轉測試，本項目主要在測試全系統運轉之穩定度，同時測試載氧體在長時間運轉後之損耗率，進一步可做為未來載氧體開發之重要參考。在連續運轉過程中，ON-OFF氣動球閥及旋轉下料閥均運轉順暢，並未有出現卡料或故障跳機之現象。載氧體由燃燒器氣送至還原器時，磨耗後之粉塵先經過旋風分離器後再利用集塵袋收集，每氣送10次後記錄集塵袋重量，如表6所示。經氣送60次後，載氧體損失率3.68%，之後更換集塵袋持續進行測試，當氣送120次後，載氧體損失率4.72%。氣送60次及120次後分別取出反應器內載氧體進行粒徑分析，結果如表7所示，氣送60次後，大於2mm載氧體約佔80%，0.5~2mm約佔20%；當氣送120次後，大於2mm載氧體約佔60%，0.5~2mm約佔36%，顯示載氧體逐漸磨耗變小，其中以粒徑2mm作為分界主要是因為原先載氧體的粒徑均為2mm以上，經由上述化學迴路標準操作程序建立與連續操過八小時冷模測試後(每完成一次完整循環所需時間約250秒)，已經完成未來進入熱模實驗操作所需的實驗操作參數。

表6、冷模連續運轉測試

氣送次數	集塵袋重量(kg)	重量差(kg)	累計(kg)
0	2.52(初重)	0.00	0.00
10	2.88	0.36	0.36
20	3.32	0.44	0.80
30	3.68	0.36	1.16
40	4.06	0.38	1.54
50	4.46	0.4	1.94
60	4.9	0.44	2.38
氣送次數	濾袋重量(kg)	重量差(kg)	累計(kg)
60	3.32(初重)	0.00	0.00
70	3.78	0.46	0.46
80	4.22	0.44	0.90
90	4.64	0.42	1.32
100	5.1	0.46	1.78
110	5.58	0.48	2.26
120	6.08	0.5	2.76

表7、載氣體過篩結果

粒徑分佈氣 送次數(%)	≥2mm	<2mm, ≥0.5mm	<0.5mm
60 次	79.99	18.73	1.34
120 次	60.29	36.38	3.33

完成冷模連續運轉測試後隨即進行主要三個反應器加熱測試，以確保系統未來實際進料運轉時反應器溫度能符合實驗需求。圖8為系統反應器升溫測試量測點示意圖，由於還原器及氧化器長度較燃燒器為長，為維持其均溫性，分別於還原器及氧化器設置上段、中段、下段三個溫控點，燃燒器則設置一個溫控點。由於還原器及氧化器須能長時間持溫於900°C以上以利反應進行，同時反應溫度越高，反應速率越佳；但為避免載氣體溫度過高時發生燒結現象，一般維持在950°C左右；另外燃燒器則需於600°C以上才能有效啟動氧化反應。

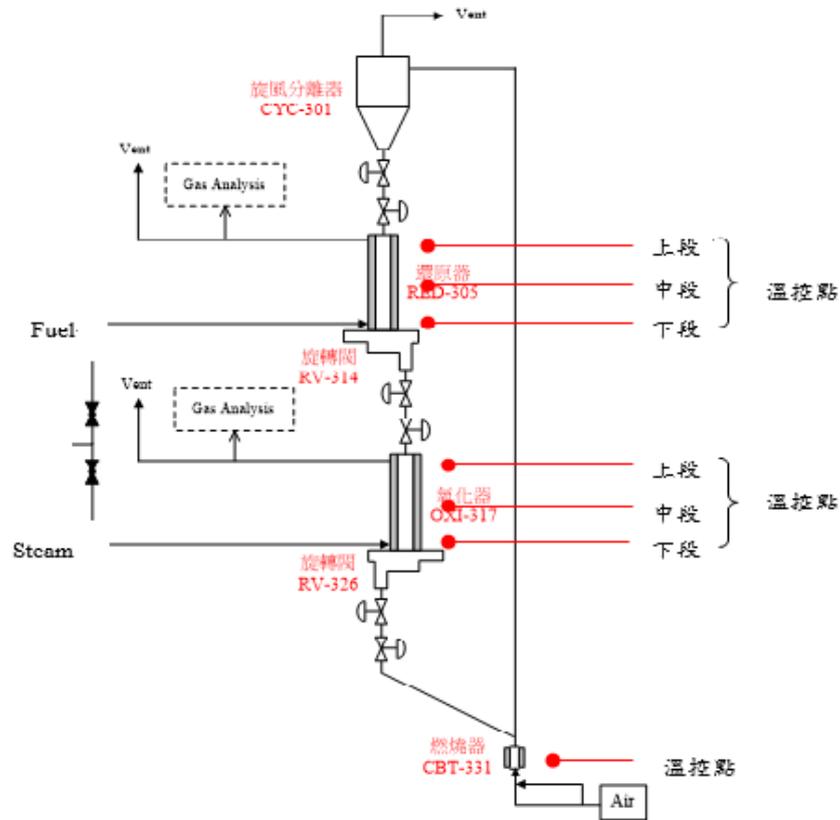


圖8、反應器升溫測試量測點示意圖

在進行反應器加熱測試時，還原器及氧化器設定持溫於950°C，燃燒器則設定持溫於800°C，並在反應器底部通入氮氣以維持反應器內部氣流順暢。圖9為還原器升溫持溫測試結果，經4小時後上段及中段溫控點快速升溫至800°C以上，之後升溫速率減緩，並於8小時後維持在950°C；下段溫控點因其位置靠近氮氣入口處，因此8小時後溫度維持在580°C左右，整體而言，還原器均可順利升溫至950°C並穩定持溫。圖10為氧化器升溫持溫測試結果，經3小時後上段及中段溫控點快速升溫至800°C以上，之後升溫速率減緩，並於7小時後維持在950°C；下段溫控點因其位置靠近氮氣入口處，因此8小時後溫度維持在580°C左右，整體而言，氧化器均可順利升溫至950°C並維持恆溫。圖11為燃燒器升溫持溫測試結果，經4小時後溫控點快速升溫至600°C以上，之後升溫速率減緩，並於8小時後維持在680°C，此溫度已達啟動氧化反應需求溫度。

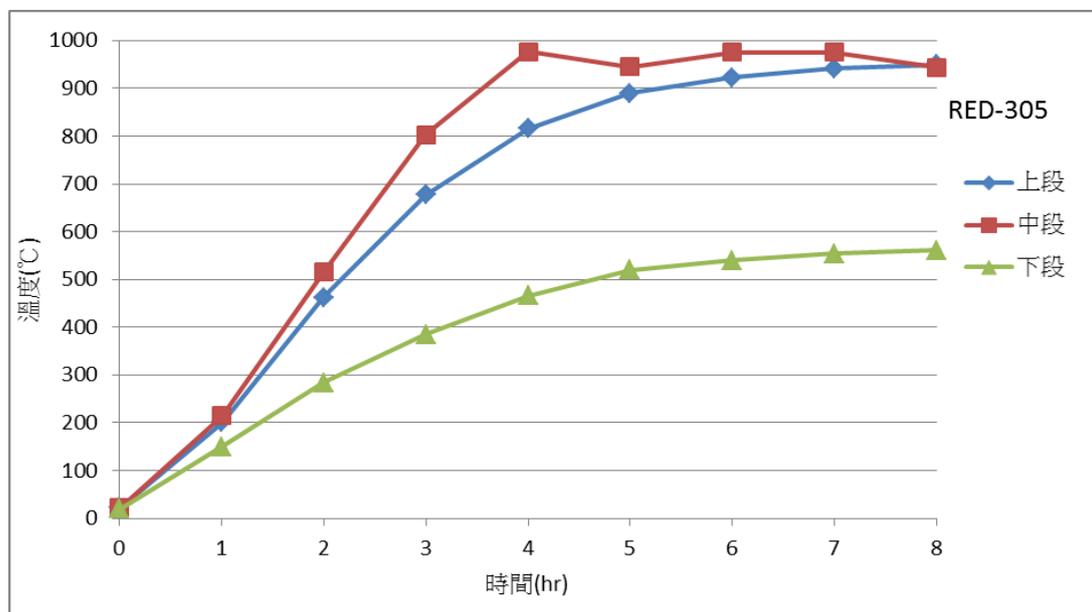


圖9、還原器升溫與持溫測試結果

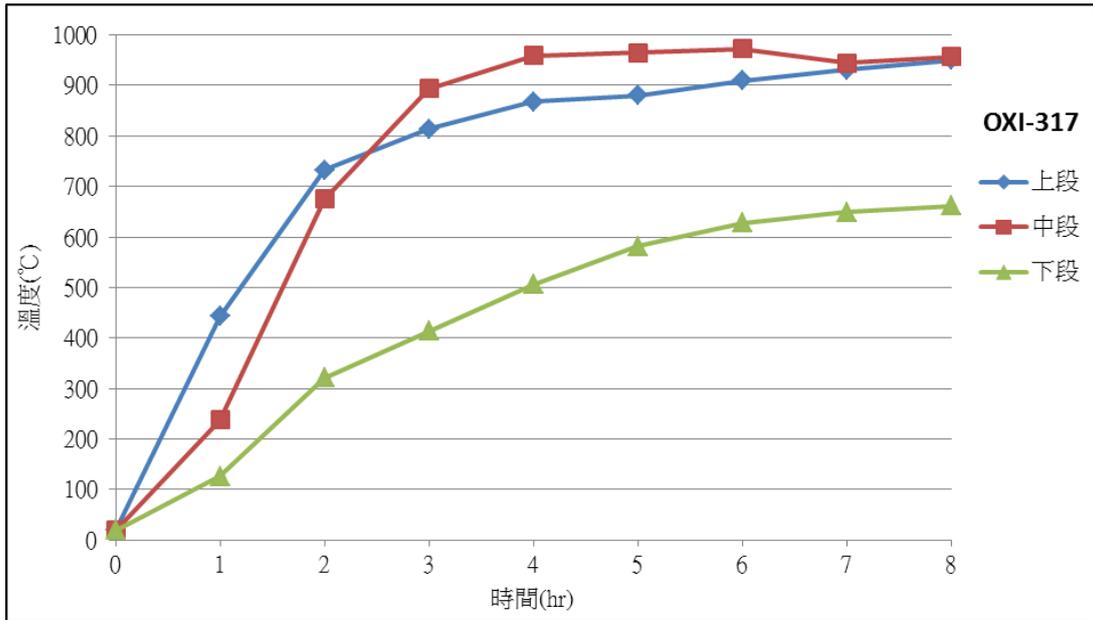


圖10、氧化器升溫與持溫測試結果

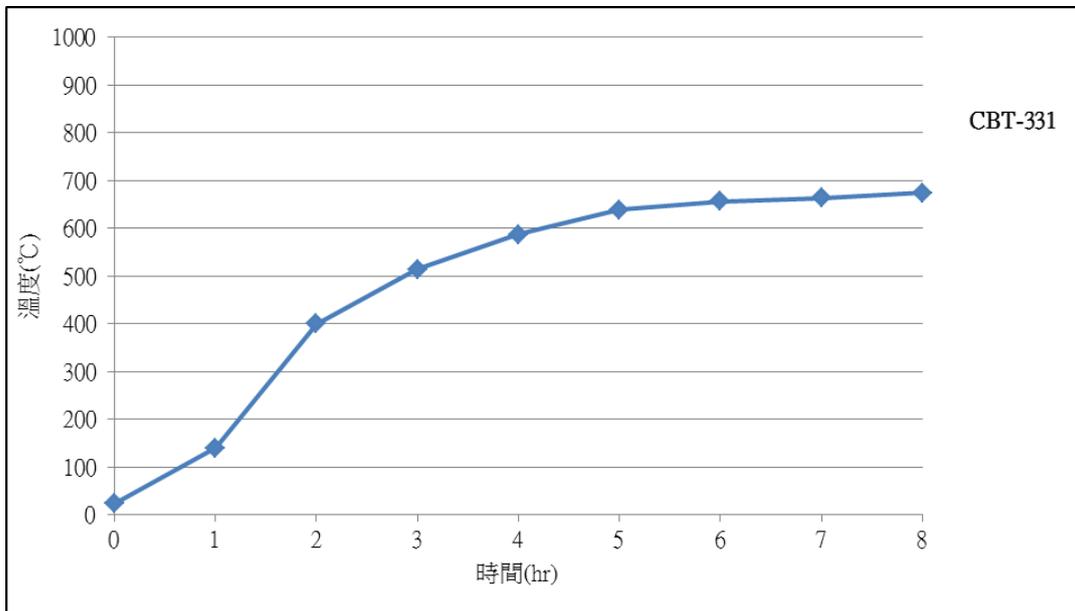


圖11、燃燒器升溫與持溫測試結果

五、結論

目前已初步完成 30kWt 化學迴路新燃燒系統相關冷模運轉與試車工作，並且建立完整操作標準程序，也掌握相關重要操作參數包括在整個系統操作上輸送氣體氣量、氣送壓力 0.8kg/cm^2 、載氧體停留時間約 5 分鐘、旋轉閥轉速與進料量的搭配、反應器操作溫度...等。為了加速化學迴路開發速度，相關鐵系載氧體的開發與製作成本與性能也將同步進行，方能配合整個技術開發，並且也將與國內產業界和學術界密切保持合作，未來將會積極進入熱模型式運轉，進行高濃度 CO_2 和氫氣的產出測試，並且能夠提供此測試平台進行相關載氧體測試。

六、致謝

本文感謝經濟部能源局能源科技專案支持”二氧化碳捕獲、封存與再利用技術發展計畫”和”二氧化碳捕獲及封存技術研發與示範計畫”，2011~2013, 2014

七、參考文獻

1. US Energy Information Administration. International Energy Outlook. Washington, DC: US Energy Information Administration, 2008
2. 經濟部研究機構能源科技專案, 102 年度執行細部計畫書, ”二氧化碳捕獲、封存與再利用技術發展計畫(1/4)”, 2013
3. 行政院環保署, ”我國溫室氣體適當減緩行動(NAMAs)成果展現暨後續規劃重點”, 2010
4. Advances in CO_2 capture technology – The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program,” International Journal of Greenhouse Gas Control 2, (2008) 9 ~ 20.
5. Chiu, P.C. and Y. Ku, “Chemical Looping Process-A Novel Technology for Inherent CO_2 Capture,” Aerosol Air Qual. Res., 12, 1421-1432, 2012

徵稿說明

下列專欄，歡迎大家耕耘：

1. 專題研究--分為五大方向，分別為「能源發展與應用」、「動力設施與燃燒」、「防火與消防」、「燃燒科技發展」、「空污控制與生物效應」。
2. 燃燒科技交流--燃燒應用技術、新技術或新產品介紹、疑難討論與經驗交流、國內外相關研究機構介紹、國內外相關學會、機構、團體之動態等，相關研討會論文摘要或全文、燃燒現象照片等。
3. 燃燒論壇--開放討論基本燃燒現象、基本燃燒原理及燃燒詞彙定義等。
4. 即時資訊--政府相關政策、國內外相關科技資訊、研討會或相關活動訊息等即時之動態資訊。能源委員會、環保署、國科會、消防署等相關機構委託執行計畫之研究成果介紹等。
5. 其他--讀者意見迴響交流與燃燒相關之其他任何訊息或稿件。

來稿請寄本會【[電子信箱](#)】或

【70101 台南市大學路1號，航空太空工程學系 陳維新 教授 收
E-mail：vwhchen@gmail.com；Tel：(06) 2757575 ext. 63600】

投稿須知

1. 文字：稿件應以中文或英文撰寫，中文文字之字型應為標楷體字，英文文字字型應為Times New Rome。
2. 題目：應力求簡潔且能充分表達論文之重要概念，請附中、英文題目各一式，英文題目請附於中文題目之後。
3. 作者：請附上中、英文之作者姓名、服務單位及職稱。作者之服務單位及職稱請以附註之方式書寫同一頁之末端，若作者為兩個人以上者，請以不同之符號標示之。
4. 摘要：以簡明扼要之方式表達論文之內容。無論以中文或英文撰寫，一律附上500字以內之中、英文摘要各一份。英文摘要請置於中文摘要之後。
5. 字型大小：題目以16pt 黑體字，摘要、前言、文章內容之標題請以14pt 黑體字，作者介紹及文章內容以12pt 標楷體字書寫之。
6. 關鍵字：中英對照關鍵字，最多以5個為限。
7. 圖表說明：圖說與表說應統一使用中文或英文，圖標題應在圖之下方；表標題應在表之上方。

8. 參考文獻：（列於正文之後，書寫時請依於文章中出現之先後順序排列）
Combustion Quarterly Vol. 52 17 No. 2 May 2008
- (1) 書籍：作者，書名，出版社，出版地，頁數，年。
中文如：柯清水，石油化學概論，正文書局，臺北，pp. 183-191，1992。
英文如：Owen K, Coley T. Automotive Fuel Reference Book, 2nd ed., Society of Automotive Engineers, pp. 551-587, 1997.
- (2) 期刊論文：作者，篇名，期刊名稱，年，卷期，頁數。
中文如：葉江榮，鍋爐高溫腐蝕，台電工程月刊，第276期，pp. 10-18，1979。
英文如：Kummer JT. Catalysts for Automobile Emission Control, Progress in Energy and Combustion Science. 1981;6:177-199.
- (3) 研討會：作者，篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。
中文如：萬皓鵬，汽電共生系統效率提升技術，2002 汽電共生系統技術研討會論文集，經濟部能源委員會，pp. 84-91，91年4月。
英文如：Law CK. Dynamics of Stretched Flames, Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1381-1402, 1988.

燃燒季刊 2014年八月

發行單位：中華民國燃燒學會

發行人：林大惠

總編輯：陳維新

副總編輯：江金龍、江鴻龍、侯順雄、蔡建雄（依姓氏筆畫排列）

編輯：石心怡、朱力民、吳志勇、吳明勳、吳耿東、李灝銘、林育立、洪榮芳、姜庭隆、郭振坤、黃俊賢、陳建中、梁智創、楊授印、楊進丁、管衍德、趙裕、蔡欣倫、劉昭忠、劉國基、蘇崇輝（依姓氏筆畫排列）

秘書：曾久珍

發行地址：701臺南市大學路1號

國立成功大學機械工程學系

電話：(06) 2369715

中華民國八十一年十二月創刊

中華民國一百零三年八月出版

局版台誌號第玖玖零捌號