

燃燒季刊

Combustion Quarterly

第二十二卷 第三期 中華民國一百零二年八月出版

Vol. 22, No.3

Agu. 2013

目錄

CONTENTS

編輯札記	1
	江鴻龍、陳維新
本土化機車行車型態建構與氣態污染物排放研究	2
	廖士勛、蔡俊鴻、姚永真
奈米銀線核殼結構觸媒製備及應用	17
	吳信賢、周更生
生質能蒸汽系統	29
	鄭旭翔、賴慶智
薄膜式電滲透除濕技術	41
	張志彰、賴慶智、黃馨儀、吳信賢
添加廢棄蚶殼對於焚香燃煙中空氣毒性物質之特性分析	60
	柯子星、楊奇儒
單缸缸內直噴汽油-乙醇引擎點火正時之研究	74
	蔡欣倫
徵稿說明	86

編輯札記

自工業革命以來，機器大量取代人力，人類對能源的需求與耗用不斷地增加，對燃燒化石燃料以取得動力及電力的方式依賴甚深，燃燒的同時也排放鉅量的溫室氣體到大氣中，使得全球暖化進而產生氣候變遷的危機，此外，化石燃料於工業燃燒應用時亦伴隨著各種廢氣污染產生，對全球生態環境造成巨大災害，嚴重影響人類生態環境，使得開發再生能源及污染控制成為各國重要發展方向，故思考如何開發再生能源、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。本期共刊登六篇專業論文，分別來自大專院校、工研院等單位之研究成果，工業技術研究院綠能與環境研究所姚永真研究員與國立成功大學蔡俊鴻教授於於台南都會區六條主要道路實地進行平日及週末時段機車行車狀態調查，建置台南都會區兩種時段之機車行車型態再以車體動力計進行機車尾氣污染物(CO、THC與NOx)排放量測，於兩種台南行車型態與法定行車型態所致機車尾氣氣態污染物差異；工業技術研究院綠能與環境研究所吳信賢研究員設計了核殼結構觸媒的合成方法，並探討了奈米銀線觸媒活性以及核殼結構對奈米銀線的結構及活性的幫助程度；工業技術研究院綠能與環境研究所鄭旭翔與賴慶智研究員以生質能汽電共生系統搭配雙效式冰水機，可以穩定供應電力並滿足製程對蒸汽的變動需求，也可將過剩之蒸汽轉為冰水，以減少空調用電，進而達到平緩電力負載之目的；工業技術研究院綠能與環境研究所張志彰、賴慶智、黃馨儀及吳信賢研究員將目前國內外電滲透除濕相關技術的發展概況進行回顧及基礎學理介紹，分析發現影響除濕效能的主要因子有施加電壓、薄膜電流密度及電滲透拖曳係數；慈惠醫護管理專科學校觀光科暨通識教育中心柯子星副教授與嘉南藥理科技大學環境工程與科學系楊奇儒副教授為了改善拜香之燃燒效率，並減少空氣污染物之排放，於拜香中添加廢棄蚵殼對於焚香燃煙中空氣毒性物質之特性分析；高苑科技大學電子工程學蔡欣倫助理教授以數值模擬方式分析直噴式乙醇混摻燃油引擎性能，所得結果可供設計乙醇混摻燃料引擎及擬訂控制策略之參考依據。透過以上各個研究了解到能源效率及污染控制上有更進一步的發展，達成節能減碳的預期目標。

整體而言，本期的內容相當精彩及多元化，閱讀過程絕對是一場知的饗宴，也請本刊讀者繼續支持及踴躍投稿本期刊，共同推動燃燒與能源科技之知識分享及研究交流。

副總編輯 江鴻龍
總編輯 陳維新

本土化機車行車型態建構與氣態污染物排放研究

Development of Local Driving Cycle for Motorcycle Exhaust Estimation and Its Gaseous Pollutants Characterization

廖士勛¹、蔡俊鴻²、姚永真³

Syun-Shih Liao, Jiun-Horng Tsai, Yung-Chen Yao

國立成功大學環境工程學系

Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratory, Industrial Technology Research Institute

摘要

本研究利用固定追車法於台南都會區六條主要道路實地進行平日及週末時段機車行車狀態調查，以建置台南都會區兩種時段之機車行車型態。建立行車型態再以車體動力計進行機車尾氣污染物(CO、THC 與 NOx)排放量測，比較於兩種台南行車型態與法定行車型態所致機車尾氣氣態污染物差異。

行車型態代表性參數之結果顯示，台南都會區平日(TNN)及週末(TNNW)行車型態之平均車速分別為 21.7 及 22.5 km/hr，怠速、定速、加速及減速之時間分配比例分別為 28.3/27.9 %、13.2/13.2 %、29.3/28.4 %及 29.3/30.5 %，TNN 及 TNNW 之行駛特性差異性不大；與法定行車型態(ECE 及 WMTC)比較則呈現行駛速度較高、高速行駛速度分佈比例較大之行車特徵。尾氣排放結果顯示，以台南都會區行車型態測試所得機車尾氣 THC 及 NOx 排放係數以平日型態較高(THC: 0.8 g/km; NOx: 0.5 g/km)，CO 排放則於週末型態較高(4.3 g/km)，唯差異度並不大。與法定行車型態比較，CO、THC 及 NOx 排放係數依序皆為 TNN > TNNW > WMTC > ECE。分析不同行車型態 CO₂ 碳重佔總碳重比例顯示，TNN 及 TNNW 等型態所佔比例較低，顯示這二種行車型態引擎燃燒效率較不佳，推測與這二種行車型態於高速行駛分佈比例較高所致。

關鍵字：台南都會區、機車行車型態、平日/週末時段、氣態污染物

Abstract

The study had been conducted to develop the localized motorcycle driving cycle in weekday and weekend in the urban areas of Tainan. The exhaust emissions (CO, THC,

¹國立成功大學環境工程學系，碩士，E-mail：death823@gmail.com

²國立成功大學環境工程學系，教授

³工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

and NO_x) from motorcycles were tested on a chassis dynamometer by conducted the local driving cycles. On-road speed-time data were collected by a driving recorder which installed on the motorcycle along six selected routes located in Tainan city. The representative local driving cycles, i.e., TNN (represents weekday cycle) and TNNW (represents weekend cycle), were synthesized from the field driving record by matching the statistical requirements.

The characteristics of TNN type are similar to those of TNNW type which includes high travel speed, frequent acceleration-deceleration change, and less duration in cruising. Minor differences between these two driving cycles were observed. The average speed in TNN and TNNW types are 21.7 and 22.5 km/hr while the average running speed are 30.2 and 31.3 km/hr and the driving mode of idling are 28.3 % and 27.9 %; cruising is 13.2 %; acceleration are 29.3 % and 28.4 %; deceleration are 29.3 % and 30.5 %. Emission factors of criteria air pollutant from fuel-injection motorcycle had been derived by conducting the dynamometer test with two driving cycles (TNN and TNNW types), respectively. The emission factors of CO for TNN/TNNW types are 4.0/4.3 g/km. The factors (g/km) are 0.8/0.7 for THC, and 0.5/0.4 for NO_x, respectively. The emission factors did not change significantly between these two driving cycles. Compare with the international cycles (ECE and WMTC), the results showed that the emission factors of Tainan driving cycles are slightly higher than those of international cycles.

Keyword: Tainan urban areas, motorcycle driving pattern, weekday and weekend, criteria air pollutants

一、前言

台灣五大都會區(台北、新北、台中、台南及高雄)移動源主要排放污染物(一氧化碳、氮氧化物及非甲烷碳氫化合物)分別佔污染物總量比例為 62% (一氧化碳)、56% (非甲烷碳氫化合物)及 53% (氮氧化物);其中機車排放所致一氧化碳(CO)排放約佔台灣地區整體移動源排放量 25%、氮氧化物(NO_x)約佔 5%、總碳氫化合物(THC)約 47% [1]。由此可知，都會區機車所致污染問題不可小覷，這些污染物不僅影響空氣品質，也會直接影響民眾健康。

機車污染與其行駛狀態有極大關聯性，一般而言各污染物排放量變化為加速段>定速段>減速段>怠速段[2]。行車速度亦會影響污染物排放情況，相關研究顯示行車速度位於 10-120 km/hr 區間時，加速度對 THC 及 CO 排放有顯著正相關影響，NO_x 影響變化則較不明顯，但整體排放結果均為車速越高，排放率越高[3,4]。

此外，道路設施亦會影響車輛行駛狀態，都會區車輛 CO 及 HC 排放特徵多高於非都會地區，即是由於非都會與都會區道路設施設計明顯差別所致[5]。

為瞭解機車行駛特性及其污染排放狀況，通常可由行車型態測試獲得；行車型態定義為：「於一時間段及特定地區範圍內，獲得其單位時間內行車速度分布情形及駕駛特性(包含：怠速、定速、加速及減速)，此一連串地行車狀態可代表此地區或道路，某一特定車輛之行駛模式」[6,7]。建立一個真實世界的行車型態在交通與運輸管理、車輛污染物測量和控制、能源和燃料消耗的研究上是非常重要的[8,9]。行車型態可分為規則型及瞬時型兩種，前者具有固定加減速度，型態較具規則且有脈絡可循，較著名者有 ECE、日本 10 mode 及 10.15 mode 等；由於測試方法較為簡單，因此大多數國家皆採用規則型行車型態，作為車輛污染排放與油耗測試準則，然無法反應出車輛真實行駛方式[8]。瞬時型行車型態則是以真實駕車方式進行，型態較為複雜，但是較能夠代表真實行車狀況。我國目前採行之機車行車型態測定方法為 CNS11386，此行車型態即為歐洲經濟同盟(Economic Commission for Europe)發展之 ECE 行車型態，屬於規則型行車型態。

然 ECE 行車型態似乎不太適合像台灣這樣交通擁擠的地區，國內行車型態與法定型態於車輛行駛速度或不同行駛狀態比例具有差異，若進一步探討車輛污染排放結果必會有相當地疑慮。國內研究曾於台北及高雄等地區進行道路調查建置當地機車之行車型態[10-12]，結果顯示代表性參數與標準測試型態有明顯差異。為求能精準求得車輛排放係數及污染排放量，如何建立本土車輛行車型態及探討其排放量乃為重要議題。因此，本研究乃以台南都會區為目標，建構機車於平日及週末時段進行兩種行車型態，以瞭解機車於不同時段行車型態模擬氣態污染物排放之情況。

二、研究方法

1. 測試道路及時段規劃

測試路線主要以台南市區最具代表性道路為主，依據台南市區道路交通特性分析計畫，選擇六條具代表性道路，分別為中華東路(Road 01)、北門-大同路(Road 02)、小東-復興-大灣路(Road 03)、中華西-北路(Road 04)、東門-民權路(Road 05)及青年-民生-安平路(Road 06)。測試道路基本特性如表 1 所示。

測試時段則配合一般民眾生活作息時間規劃，區分為晨峰(7-9 時)、昏峰(17-19 時)及離峰(11-15 時)等三個時段。平日行車型態每條道路測試 4 次，總共獲得 72 筆數據；週末行車型態每條道路測試 4 次，總共獲得 36 筆數據。

2. 代表性評估參數

行車型態建構使用歸納統計法來建立台南都會區行車型態，此方法需要選訂

定基準評估參數，評估參數根據相關文獻擇定出 12 項國內外建置行車型態常見代表性參數，分別為：平均旅行速率(V_1)、平均行駛速率(V_2)、平均加速率(a)、平均減速率(d)、單一區段加減速率變換次數(M)、區段平均行駛時間(c)、怠速時間百分比(P_i)、定速時間百分比(P_c)、加速時間百分比(P_a)、減速時間百分比(P_d)、加速率均方根(RMS)、加速率動能(PKE)等[11,13,14]，各項代表性參數定義如表 2 所示。

3.行車型態建構

本研究以實際道路追車收集道路數據，採固定路線追車法，將所有蒐集到的旅次數以區段組合法組成機車行車型態，建置流程如圖 1 所示。於前述測試道路預先設定起、迄點，於道路上隨機選取一目標機車進行跟車，以獲得不同駕駛者之行車特性。速度數據收集乃於一部 125 c.c.機車上安裝數位行駛速度擷取系統，記錄其行車速度與總旅行時間，以得知車輛於車流中之瞬時運轉特性(加速、減速、怠速及定速)，直到跟隨至設定道路之終點後結束，即可獲得一筆完整追車數據。蒐集至一定數量後，即可進一步求得該地區具代表性之行車型態。若於追車途中因目標車輛駛離測試道路或不遵守交通規則，立即選擇最接近原先追逐對象行駛狀態之車輛，作為補救替代對象。

收集所得速度-時間數據依二種測試型態(平日 TNN 及週末 TNNW)分別計算出 12 個代表性參數，再求其平均值(稱為目標參數值)，隨後將所有旅次各區段分離(區段定義為怠速與怠速間之行駛)，即可得到區段資料庫，再從區段資料庫中隨機選取數個區段組合成候選行車型態(區段不重複選取)，以統計方法試算出每項參數值與目標參數值差異，若差異在 $\pm 5\%$ 以內則可算是一組成功的行車型態。依此方式可計算出多組候選行車型態，為從許多種合格候選行車型態中找出最佳者，可將各合格候選行車型態中每項參數與目標參數值誤差值加總，總誤差和最小者，即為本研究所選中最佳行車型態。

4.氣態污染物排放分析

建置所得台南都會區行車型態(TNN 及 TNNW)所致機車尾氣排放特徵係以車體動力計進行測試；車體動力計實驗室設備包括：動力計主體(HORIBA MEXA-8320)、駕駛輔助器、風場模擬系統、排氣稀釋系統、油耗測定系統、定容取樣系統(HORIBA CVS-51S)及 THC、CO 和 NO_x 廢氣分析儀器(ONO SOKKI)。透過廢氣分析儀即時分析得到法定污染物濃度值，再依據機車基本參數(排氣量、油耗及行駛里程數)，推算機車排氣中 CO、THC、NO_x 排放係數。法定機車行車型態(ECE 及 WMTC)亦一併測試，以瞭解本研究調查之機車行車型態與法定行車型態所致尾氣污染物排放差異。

表 1、本研究於台南都會區選擇測試道路之基本特性

道路編號	道路名稱	總長 (km)	道路分類	路寬 (m)	號誌數	車道數 (汽車/機車)
Road 01	中華東路	5.1	外環道路	30	30	4/2
Road 02	北門-大同路	5.2	主要道路	20	21	2/2
Road 03	小東-復興-大灣路	5.0	聯外道路	40	25	4/2
Road 04	中華西-中華北路	5.6	外環道路	30	17	4/2
Road 05	東門-民權路	4.6	聯外道路	21.8	21	2/2
Road 06	安平-民生-青年路	4.8	主要道路 次要道路	18.5	23	2/2

表 2、行車型態代表性參數表

評估參數	單位	參數定義說明
平均旅行速率(V_1)	Kph	每一旅次的平均行駛速率(包括怠速時間)
平均行駛速率(V_2)	Kph	每一旅次的平均行駛速率(不包括怠速時間)
平均加速率(a)	m/s^2	車輛速率變化率大於 $0.1m/s^2$ 者稱之
平均減速率(d)	m/s^2	車輛速率變化率小於 $-0.1m/s^2$ 者稱之
單一區段加減速率 變換次數(M)	次	單一行車型態全部加減速變換次數除以區段數
區段平均行駛時間 (c)	sec	單一行車型態所有區段行駛時間總和除以區段數
怠速時間百分比(P_i)	%	怠速總時間佔總測試時間之百分比
加速時間百分比(P_a)	%	加速率 $\geq 0.1m/s^2$ 的總時間佔總測試時間之百分比
減速時間百分比(P_d)	%	減速率 $\geq -0.1m/s^2$ 的總時間佔總測試時間之百分比
定速時間百分比(P_c)	%	總測試時間扣除怠、加、減速率所佔時間百分比
加速率均方根(RMS)	m/s^2	各加速率和之均方根
加速率動能(PKE)	m/s^2	$PKE = (\sum v_f^2 - v_i^2) / x$, v_f =末速度, v_i =初速度, x =總行駛距離

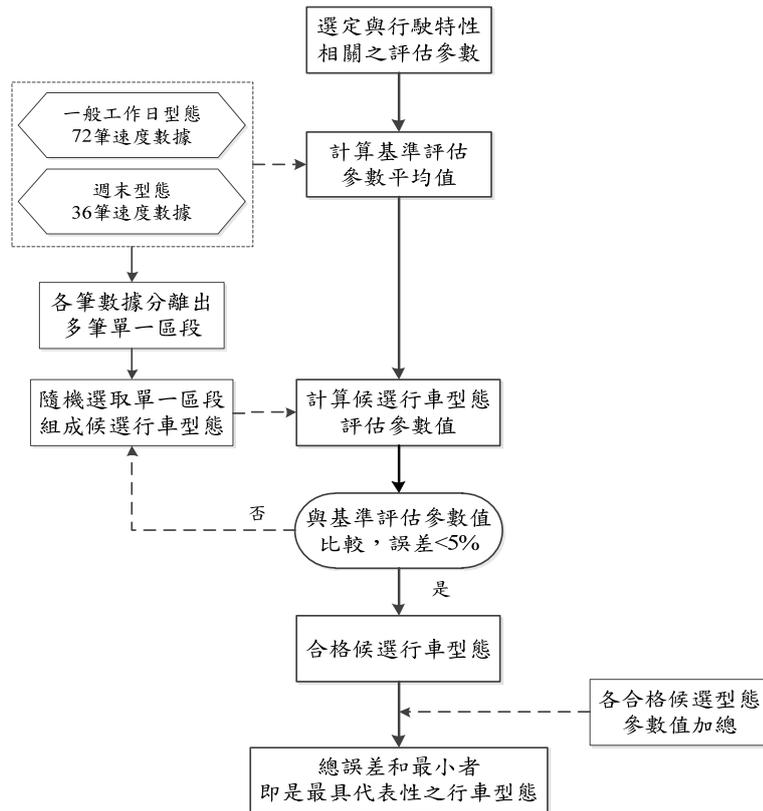


圖 1、本研究行車型態建構流程圖

三、結果與討論

1. 追車調查機車行車特性分析與比較

本研究進行之追車調查於平日及周末分別獲得 72 及 36 旅次機車行車數據。各道路機車調查樣本統計所得之六條測試道路機車行駛狀態參數，如表 3 所示。速度是駕駛人在行駛時的重要指標之一，速度快慢及加減速變換皆會影響到車輛污染物排放狀況。整體而言，平日時段所有測試道路平均旅行速度為 22.2 km/hr，以 Road 04 為最高(27.4 km/hr)，Road 05 最低(18.2 km/hr)，其餘測試道路平均旅行速度差異不大，位於 20~23 km/hr 之間；Road 04 號誌數及怠速比例較少可能為行駛速度較高之原因，Road 05 則可能因怠速比例較高使得車速較低。不同行駛狀態(怠速、定速、加速及減速)之比例在怠速、加速及減速部份相似，分別為 28.6%、29.2%、29.1%，定速比例則為 13.1%。

週末行車速度數據收集部分平均旅行速度以 Road 01 最高(23.6 km/hr)；Road 02 最低(19.9 km/hr)，台南週末時段所有測試道路平均旅行速度為 22.1 km/hr。不同行駛狀態以減速比例為最高(30.2%)，怠速與加速比例相似，分別為 28.0%、28.3%，定速比例則為 13.2%。

由前述表 1 所列測試道路基本特性，Road 02、05、06 車道數較少(2 汽車道+2 機車道)，道路寬度較窄(< 21.8 m)；Road 01、03、04 車道數較多(4 汽車道+2 機車

道)，道路寬度較寬(> 30 m)。由於這些因素，行駛於 Road 02、05、06 之非機車種類車輛會有與機車搶道之情況發生，實際現場觀察發現 Road 02、05 搶道行為特別嚴重，使得 Road 02、05、06 相對於 Road 01、03、04 有較低之行駛車速，尤其是昏峰下班時段，各種車輛往台南市區行駛比例較高，Road 02、05、06 行駛車速也有明顯降低。

表 3、台南都會區不同時段(平日/週末)各測試道路機車行駛速度及不同行駛狀態參數

時段	測試道路	旅行速度 V ₁ (kph)	行駛速度 V ₂ (kph)	怠速 Pi (%)	定速 Pc (%)	加速 Pa (%)	減速 Pd (%)
平日	Road 01	22.7	31.4	27.4%	13.0%	29.6%	30.0%
	Road 02	20.4	29.4	30.6%	11.2%	29.3%	28.8%
	Road 03	23.0	31.4	26.8%	14.8%	29.7%	28.7%
	Road 04	27.4	36.3	24.5%	15.8%	30.6%	29.1%
	Road 05	18.2	26.6	31.5%	11.3%	27.9%	29.3%
	Road 06	21.2	30.6	30.5%	12.4%	28.2%	28.9%
	整體平均值	22.2	30.9	28.6%	13.1%	29.2%	29.1%
週末	Road 01	23.6	34.8	27.3%	15.8%	27.5%	29.5%
	Road 02	19.9	27.6	29.7%	10.2%	29.2%	30.9%
	Road 03	23.0	32.0	27.1%	13.7%	28.2%	31.0%
	整體平均值	22.1	31.4	28.0%	13.2%	28.3%	30.5%

2.機車於不同峰時機車行駛狀態分析

表 4 為台南都會區不同測試時段(晨峰、離峰及昏峰)機車行車狀態之比較結果。兩種時段旅行速度(V₁)均於昏峰最低(20.0 km/hr 及 19.7 km/hr)，晨、離峰旅行速度則相近。不含怠速之行駛速度(V₂)亦同，其中，週末時段晨、離峰行駛速度差距較大，可推測民眾於週末中午過後活動才較頻繁，使得晨間車流量較少，車輛行駛速度較快所致。

兩種時段不同峰時之行駛狀態時間比例結果顯示，平日時段之離峰及昏峰為加速>減速>怠速>定速，晨峰時段則為怠速>加速>減速>定速；周末時段之離峰及昏峰為減速>加速>怠速>定速，晨峰時段為減速>怠速>加速>定速。

表 4、台南都會區不同時段(平日/週末)機車不同峰時機車行駛狀態參數

時段	峰時	旅行速度 V ₁ (kph)	行駛速度 V ₂ (kph)	怠速 P _i (%)	定速 P _c (%)	加速 P _a (%)	減速 P _d (%)
平日	晨	22.8	32.4	29.8%	12.8%	29.0%	28.5%
	離	23.7	32.2	26.6%	13.6%	30.1%	29.6%
	昏	20.0	28.2	29.3%	12.9%	28.5%	29.4%
週末	晨	23.3	33.5	29.7%	12.4%	28.1%	29.8%
	離	23.5	32.8	27.4%	11.5%	29.7%	31.4%
	昏	19.7	28.0	27.0%	15.8%	27.1%	30.1%

3. 建立台南都會區機車行車型態

本研究共組合出 10 種機車行車型態(平日及周末各 5 種)，各個行車型態之各項代表性參數皆符合統計要求($< \pm 5\%$)，均可採納作為代表行車型態；表 5 為兩種時段各五條候選行車型態(平日 WD01-05 及週末 WE01-05)之代表性參數誤差值。另為瞭解這些候選型態是否具有顯著差異，將各型態利用行車速度進行 T-test 檢定，結果顯示各候選型態彼此檢定結果 p 值均大於 0.05，表示各候選型態均無顯著差異；其中以 WD01 (平日)及 WE01 (週末)之各代表性參數誤差範圍較小，總誤差和亦最小(9.98 及 10.99%)，顯示該行車型態參數最為接近目標參數值(總樣本參數平均值)，因此，此二型態評選為本研究之台南都會區平日(TNN type)及週末(TNNW type)機車代表性行車型態。

行車型態各項參數值如表 6 所列。TNN type (平日)總行駛距離 6300.2 公尺，總旅行時間 1046 秒，平均旅行速率及行駛速率分別為 21.7 km/hr 及 30.2 km/hr，平均加減速率均為 0.7 m/s^2 ，區段加減變換次數 7.8 次，區段平均行駛時間 116.2 秒，怠速時間比例 28.3%，定速時間比例 13.2%，加速時間比例 29.3%，減速時間比例 29.3%，加速度均方根 0.9 m/s^2 ，加速率動能 0.5 m/s^2 。TNNW type (週末)總行駛距離 7007.8 公尺，總旅行時間 1119 秒，平均旅行速率及行駛速率分別為 22.5 km/hr 及 31.3 km/hr，平均加減速率均為 0.7 m/s^2 ，區段加減變換次數 7.8 次，區段平均行駛時間 111.9 秒，怠速時間比例 27.9%，定速時間比例 13.2%，加速時間比例 28.4%，減速時間比例 30.5%，加速度均方根 0.9 m/s^2 ，加速率動能 0.5 m/s^2 。綜合評估 TNN 與 TNNW 型態之平均加減速率、區段加減變換次數、怠速比例、定速比例、加速度均方根、加速率動能等參數相似，TNN 之區段平均行駛時間及加速比例略高，行車速度及減速比例略低。

表 5、台南都會區候選行車型態之代表性參數誤差值

時段	候選型態	代表性參數誤差值(%)											SUM	
		V ₁	V ₂	a	d	M	c	P _i	P _c	P _a	P _d	RMS		PKE
平日	WD 01	2.1	2.3	0.6	0.8	0.5	0.7	0.9	0.9	0.1	0.4	0.6	0.1	10.0
	WD 02	0.3	1.3	0.3	0.0	0.5	0.7	2.9	0.1	1.1	1.7	0.5	0.8	10.3
	WD 03	0.4	0.0	1.0	0.1	3.7	1.3	0.4	1.6	0.5	0.2	0.5	0.6	10.3
	WD 04	1.2	1.6	0.9	0.6	3.4	0.7	0.4	0.6	0.1	0.3	0.2	0.3	10.4
	WD 05	0.0	0.1	0.6	0.3	1.9	0.3	0.6	4.8	0.9	0.6	0.2	0.4	10.8
週末	WE 01	1.8	0.6	0.9	1.0	2.9	0.7	0.5	0.1	0.4	0.0	1.1	1.0	11.0
	WE 02	0.5	1.5	0.5	0.5	2.4	0.2	0.4	1.1	0.6	0.6	1.2	1.7	11.3
	WE 03	0.3	2.7	1.6	0.4	1.6	0.2	0.9	1.0	0.3	0.6	0.3	3.2	13.2
	WE 04	1.7	0.5	1.4	1.3	0.3	4.0	0.0	0.5	0.3	0.0	2.5	1.2	13.7
	WE 05	0.3	1.4	0.1	1.4	2.4	0.8	1.2	3.5	0.9	0.4	0.1	1.2	13.7

表 6、台南都會區代表性行車型態之參數值總表

行車型態	V ₁	V ₂	a	d	M	c	P _i	P _c	P _a	P _d	RMS	PKE
平日型態(TNN)	21.7	30.2	0.7	-0.7	7.8	116	28.3%	13.2%	29.3%	29.3%	0.9	0.5
週末型態(TNNW)	22.5	31.3	0.7	-0.7	7.8	112	27.9%	13.2%	28.4%	30.5%	0.9	0.5

4. 台南都會區態與法定機車行車型態比較

本研究所建置之台南都會區行車型態(TNN、TNNW)與法定機車行車型態(ECE 及 WMTC)之各項代表性參數值比較結果如表 7 所示。

表 7、台南行車型態與法定行車型態之代表參數值比較表

代表性參數	TNN	TNNW	ECE	WMTC
平均旅行速度	21.7	22.5	18.5	24.4
平均行駛速度	30.2	31.3	27.9	29.8
怠速時間比	28.3%	27.9%	33.8%	18.2%
定速時間比	13.2%	13.2%	29.2%	19.5%
加速時間比	29.3%	28.4%	20.0%	30.8%
減速時間比	29.3%	30.5%	16.9%	31.5%

(1)平均旅行速度：TNN、TNNW 平均旅行速度分別為 21.7 km/hr 及 22.5 km/hr，低於 WMTC (24.4 km/hr)，高於 ECE (18.5 km/hr)。此因 WMTC 於車輛行車速度為怠速或低定速行駛佔有比例較低所致，ECE 於怠速或低定速行駛比例則較高。

(2)平均行駛速度：TNN 不含怠速之車輛平均行駛速度為 30.2 km/hr，TNNW 為 31.3 km/hr，相對於瞬時型態 WMTC 行駛速度(29.8 km/hr)較快，但差距不大；而規則型態 ECE 平均行駛速度則較低(27.9 km/hr)，且與 TNN、TNNW 及 WMTC 有明顯差距。

(3)區段加減速率變換次數：兩種台南行車型態加減速度變換次數相似，均為 7.8 次，與 WMTC (9.5 次)較為接近；此三種型態均為瞬時型態，屬模擬實際道路行駛狀況，易受道路車流量影響，而有頻繁加減變換次數。而 ECE 屬規則型態，具有固定加、減及定速行駛狀況，故區段加減速變換次數較瞬時型態低，僅 2.0 次。

(4)區段行駛時間：TNN 及 TNNW 區段行駛時間分別是 116.2 秒及 111.9 秒，遠低於 ECE(130.0 秒)及 WMTC(150.0 秒)；顯示台南都會區交通號誌變換時間較短。

(5)不同行駛狀態時間比例

- 怠速時間比例：兩種台南行車型態不同行駛狀態之怠速時間比例均是 28%，低於 ECE(33.8%)，高於 WMTC(18.2%)。
- 定速時間比例：兩種台南行車型態定速比例均為 13.2%與兩種法定行車

型態(ECE 及 WMTC)相比，台南行車型態定速比例普遍較低。

- 加、減速時間比例：TNN 型態加減速度所佔比例相同(均佔 29.3 %)、TNNW 型態 (加速：28.4 %、減速：30.5%)，與 WMTC(30.8 %、31.5 %) 相似，與 ECE 相比具有明顯差異。

5. 行車型態對機車排放法定空氣污染物之影響

測試機車於 ECE、WMTC、TNN 與 TNNW 等不同行車型態下，使用市售 95 無鉛汽油之噴射機車尾氣法定污染物單位里程排放係數如表 8 所示。以 ECE 及 WMTC 行車型態為基準，將本土化行車型態測得空氣污染物排放係數與其比較，以瞭解法定行車型態對機車排放法定空氣污染物之影響。

表 8、不同行車型態測試所得機車尾氣法定污染物單位里程排放係數

排放係數(g/km)	TNN	TNNW	ECE	WMTC
CO	4.0	4.3	2.6	3.4
THC	0.8	0.7	0.6	0.5
NOx	0.5	0.4	0.3	0.4

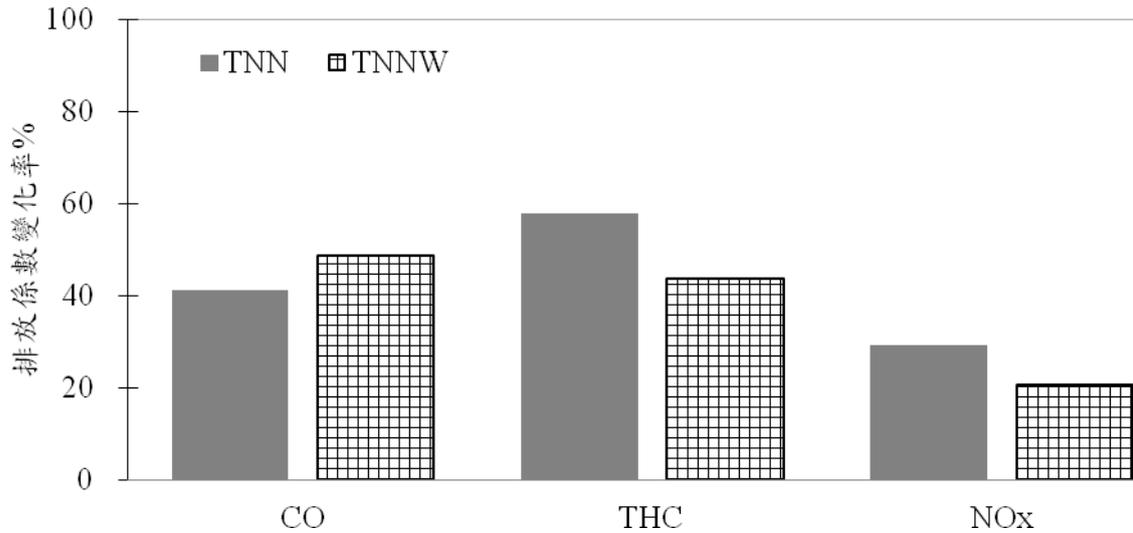
(1) ECE 型態為測試基準

都會區二行車型態之法定空氣污染物單位里程排放係數與 ECE 型態所得數值之差異如圖 2(a)所示；都會區二行車型態之 CO 排放係數明顯較 ECE 型態為高，TNNW 型態所得係數與 ECE 數值差異最大，高出約 49 %。THC 排放係數亦有相同情形，TNN 型態係數明顯高於 ECE 數值，差異達 58%。與 ECE 型態所得數值相較，都會區行車型態之 NOx 排放係數亦呈現較高情況，但排放係數變化率較小，TNN 及 TNNW 型態之變化率分別為 29%及 21%。

(2) 以 WMTC 型態為測試基準

都會區二行車型態之法定空氣污染物單位里程排放係數與 WMTC 型態所得數值之差異如圖 2(b)所示；都會區二行車型態之 CO 排放係數明顯較 WMTC 型態為高，TNN 及 TNNW 型態所得係數與 WMTC 數值相較約高出約 19%及 25%。TNN 及 TNNW 型態測得之 THC 係數明顯高於 WMTC 數值，差異達 80%及 64%。都會區行車型態之 NOx 排放係數亦較 WMTC 型態所得數值為高，但排放係數變化率較小，TNN 及 TNNW 型態之變化率分別為 23%及 16%。

(a) ECE



(b) WMTC

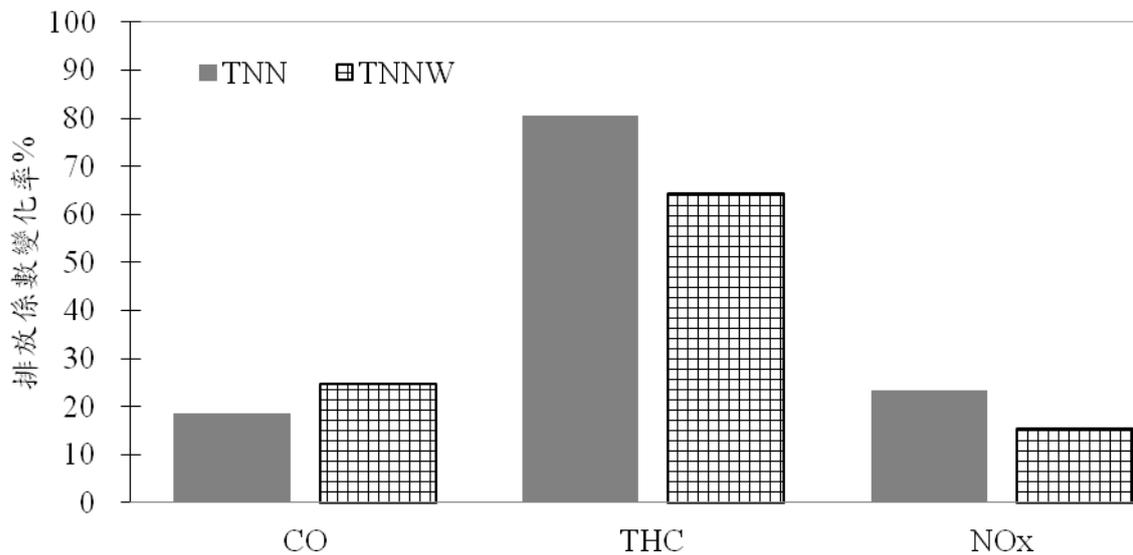


圖 2、台南都會區行車型態相對於法定行車型態排放係數變化率

6. 測試機車於不同行車型態之燃燒穩定性

為瞭解不同行車型態下測試機車之燃燒穩定性，本研究乃計算法車尾氣排放 CO₂ 碳重佔總碳重比例，結果如表 9 所示。由表可以看出 TNN 及 TNNW 型態之 CO₂ 碳重佔總碳重比例較 ECE 及 WMTC 二法定行車型態為低；ECE cycle 則有最高的 CO₂ 碳重比，TNN 及 TNNW types 與 ECE cycle 所得結果相差約 4.4-4.9%。由 CO₂ 碳重比結果可指出測試機車於台南都會區行車型態下燃燒較不完全，也可能因此造成較高之 CO 及 THC 排放(表 8)。

由行車型態分類探討，TNN 及 TNNW 型態與 WMTC 型態均為瞬時行車型態，ECE 型態則為規則型態。瞬時型態建置普遍是根據實際道路追車數據組建

得到，此種型態具有頻繁地車輛加、減速變化特徵，與規則型態穩定的加、減速變化有極大的差異；引擎也因加、減變化次數頻繁會影響燃燒不完全之情況。而 TNN、TNNW 與 WMTC 型態雖同為瞬時行車型態，但考量組建 WMTC 型態的測試道路是來自跟歐美、日本及中國等地，與台南地區道路實際狀況、駕駛人行車習慣不同，此點亦可能對引擎燃燒造成影響。由前述行車型態代表性參數比較結果顯示，台南都會區兩種時段行車型態(TNN 及 TNNW)之怠速時間比例較 WMTC 為高且定速比例較低，推測可能造成台南都會區機車行車型態機車引擎燃燒更為不完全。

表 9、不同行車型態含碳化合物比例

行車型態	碳重佔總碳重比例(%)		
	CO 碳重	THC 碳重	CO ₂ 碳重
TNN	9.6	3.6	86.8
TNNW	10.3	3.4	86.3
ECE	6.6	2.2	91.2
WMTC	8.6	2.3	89.1

四、結論

不同地區可能會因為當地的車道寬、車流量、地形、時段、騎乘習慣及其他種種原因，造成其行車型態有所差異，因此需根據當地狀況制定具代表行車型態以獲得較準確之排放資料。本研究評選之台南機車平日行車型態(TNN 型態)及週末行車型態(TNNW 型態)代表性參數與目標參數(總道路樣本)之誤差範圍較小且總誤差和亦最小，因此較能接近台南都會區道路行車特性。台南都會區兩種時段機車行車型態之行駛速度、高速行駛(>40 km/hr)比例較法定機車行車型態為高。不同行駛狀態之怠速、定、加減速時間分佈比例，TNN、TNNW 與 WMTC 瞬時型態相似，然與規則型態 ECE 差異較大。

於機車尾氣排放特徵之結果顯示，TNN、TNNW 之 CO、THC 與 NO_x 排放係數較其它行車型態 WMTC 及 ECE)為高。TNN、TNNW 型態之行駛特性差異性不大，高行駛速度分佈則比其它行車型態為高，導致台南行車型態所測得氣態污染物排放較高；以 CO₂ 碳重佔總碳重比例來看，TNN 及 TNNW 型態所佔比例較低，顯示此二種行車型態之行駛特性會造成引擎燃燒效率較不佳，造成 CO、THC 等污染物排放係數較高；若以法定機車行車型態所得污染物係數推估台南都會區空氣污染物排放量則有低估可能。

整體而言，本研究利用組合方法建置台南都會區機車行車型態，與國內現行法規行車型態(ECE)及未來擬推行之機車行車型態(WMTC)相比，較能代表台南

都會區機車行車型態，應可提供求得更符合現況之機車排放係數，以精確推估機車排放量、削減量與削減率，對研擬移動污染源對策應有相當程度之幫助。

五、參考文獻

1. 行政院環境保護署，空氣污染物排放清冊資料更新管理及排放量空間分佈查詢建置，EPA-97-FA11-03-A176，2009。
2. Frey HC, Roupail NM., Unal A, Colyar JD. Measurement of On-Road Tailpipe CO, NO, and HC Emissions Using a Portable Instrument. In Proceedings, Annual Meeting of the Air & Waste Management Association, Orlando, Florida, and published by A&WMA, Pittsburgh, PA , pp. 24-28, 2001.
3. Bailey JC, Schmidl B, Williams ML. Speciated Hydrocarbon Emissions from Vehicles Operated over the Normal Speed Range on the Road. Atmospheric Environment 1990;24:43-52.
4. Rakha H, Ahn K, Trani A. Development of VT-Micro Model for Estimating Hot Stabilized Light Duty Vehicle and Truck Emissions. Transportation Research Part D 2004;9:49-74.
5. 張瑋婷，機車排放氣態污染物區域性特徵與影響因素研究，國立成功大學環境工程研究所碩士論文，98年。
6. 行政院環境保護署，都會區機車行車型態與排放係數研究，EPA-90-FA13-03-B034，2001。
7. Nesamani KS, Subramanian KP. Development of a Driving cycle for Intra-City Buses in Chennai, India. Atmospheric Environment 2011;45:5469-5476.
8. Bata R, Yasser Y, Wang W, Lyons D, Gambino M, Rideout G. Heavy Duty Testing cycles: Survey and Comparison, SAE Technical Paper Series, No.942263, Washington, DC, 1994.
9. Andre M. Driving Cycle Development: Characterization of the Methods, SAE International Spring Fuels and Lubricants Meeting, SAE Paper 961112, Washington, DC, 1996.
10. Tzeng GH, Chen JJ. Developing a Taipei Motorcycle Driving cycle for Emissions and Fuel Economy. Transportation Research Part D 1998;3:19-27.
11. 黃萱琪，都會區機車行車型態與空氣污染物排放特性關聯性研究，國立成功大學環境工程研究所碩士論文，100年。
12. Tsai JH, Chiang HL, Hsu YC, Peng BJ, Hung RF. Development of a Local Real World Driving Cycle for Motorcycles. Atmospheric Environment 2005;39:6631-6641.
13. Tong HY, Hung WT, Cheung CS. Development of a Driving Cycle for Hong

- Kong. Atmospheric Environment 1999;33:2323-2335.
14. Hung WT, Tong HY, Lee CP, Ha K, Pao LY. Development of a Practical Driving cycle Construction Methodology: A Case Study in Hong Kong, Transportation Research Part D 2007;12:115-128.

奈米銀線核殼結構觸媒製備及應用

Preparation and characterization of silver nanowire catalyst for VOCs oxidation

吳信賢¹、周更生²

Hsin-Hsien Wu, 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

國立清華大學化學工程系

Department of Chemical Engineering, National Tsing Hua University

摘要

奈米銀線特殊結構吸引需多研究者投入，本研究證明其作為 VOCs 觸媒具有優於一般銀粒子的催化活性。為進一步增加催化活性，其本研究設計了核殼結構觸媒的合成方法，並探討了奈米銀線觸媒活性以及核殼結構對奈米銀線的結構及活性的幫助程度。研究結果顯示，以多元醇法披覆金屬氧化物殼層之方式讓奈米銀線的結構特徵在披覆金屬氧化物殼層後不會發生顯著變化。奈米銀線-氧化鈣核殼結構觸媒在 175°C 可以有 95% 的異丙醇轉化率，較奈米銀線可以降低 25°C。未來若要進一步增加觸媒活性，可以朝向控制殼層型態、增加孔隙來減少質傳阻力、增加活性。

關鍵字：揮發性有機物、奈米銀線、核殼結構、金屬氧化物

Abstract

For the development of effectively and economically VOCs control technology, we propose a polyol process to fabrication silver nanowire core and metal oxide shell nano-catalysts. These catalysts were then characterized and tested for the catalytic removal of IPA at different temperatures. The silver nanowire exhibited higher oxidation activities than that the polycrystalline silver particle. Moreover, the silver nanowire@CeOx core-shell particles showed the highest activity among the catalysts and could completely oxidize 125 ppm IPA at 175°C. Our results also indicated that

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，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

the nano-structure of silver wire would not change significantly after the core-shell structured prepared by the polyol process.

Keyword: volatile organic compounds, silver nanowire, core-shell structure, metal oxide

一、前言

奈米尺度材料具有的特殊性質，其中核-殼(core-shell)結構複合奈米粒子在近年來也引起研究者的關注。簡單的說，核-殼結構粒子可以是有機、無機、或金屬的固體內核，包覆以聚合物、無機物或生物大分子之外殼。然而在性質上，固體內殼表面的電荷、功能和反應性可能因外殼材料而改變甚至增強，同時也可以提高粒子穩定性和分散性[1, 2]。例如，ZnO 具有紫外光吸收能力，包覆的 SiO₂ 可阻絕光催化效果。研究發現在 PU 樹脂中添加 ZnO@SiO₂，可得到與市售紫外線吸收劑相當之耐黃變效果[3]。相較於 Au 奈米粒子或 Au 和 ZnO 物理混合的奈米粒子，Au@ZnO 具有高能源轉換效率[4]。

一般而言，均勻混合或分散的複合奈米粒子可以透過與單成份奈米粒子相似的製程製備得到，例如共沉澱或共還原。但是也可以利用金屬化合物不同的沉澱速率，將所需要各種成分之金屬鹽的水溶液與沉澱劑均勻混合之後，達到非同時沉澱的效果。先沉澱的金屬成為核心、後沉澱的金屬則披覆形成殼層而形成核殼結構。透過銀產生沉澱時間的控制，Carroll 等人成功合成出一種 Ag@Fe 及兩種 Fe@Ag，並得以進一步控制其光學及磁性特徵[5]。也可以以奈米粒子為核心，再被覆以奈米殼層也能夠形成核-殼結構複合奈米粒子。例如 Wang 等人[6]以銀粒子為核心與 titanium tetraisopropoxide (TTIP)溶液混合後，以水熱反應合成出 Ag@TiO₂ 奈米粒子。Lai 等人[7]則在多元醇法製備 Ag@Fe₃O₄ 奈米粒子時，首先將銀奈米粒子製備出來以後分散於己烷中，與另一為鐵離子、1,2-hexadecanediol、oleic acid、oleylamine 溶於 phenyl ether 的溶液混合反應產生。

近年來有許多針對核殼結構材料的觸媒應用研究。例如燃料電池使用核殼結構觸媒材料可以增進活性而減低 Pt 觸媒使用量。Mazumder et al. [8]製備 Pd@Pt-Fe 核殼結構觸媒，發現 5nm 核心及 1nm 殼層之觸媒比商用 Pt 觸媒增加 15 倍的活性。Mayrhofer et al. [9]則利用 Pt-Co 合金為核、Pt 為殼，發現活性比起 Pt-Co 合金觸媒增加 2.5 倍。以上研究也都指出控制殼層愈薄可減少質傳阻力增加活性。

化學工業經常使用銀當作甲醇部分氧化反應程序的觸媒。在反應溫度約 650~680°C、GHSV>100000h⁻¹、CH₃OH/O₂ 約 2.3~2.4 等反應條件下，電解銀觸媒

的甲醛轉化率約 90~92%。但是長時間高溫使用下，觸媒需要定期再生。Ag@SiO₂ 核殼結構觸媒材料外殼披覆之 SiO₂ 可以提高銀觸媒抗高溫燒結能力、保有奈米級活性[10]。將其應用於甲醇部份氧化時可得到 95%以上的甲醛選擇率，而且反應溫度比電解銀觸媒降低達 150°C 以上。

此外，還有許多研究試圖為銀披覆上不同的氧化物以增加其催化能力。外殼的材料例如研究光催化反應的 TiO₂ [6, 11]、ZnO[12, 13]；催化氧化反應的 Fe₂O₃[14,15,16]等。Chou 等人[16]藉由沉積沉澱法製備的 Ag@Fe₂O₃ 核殼結構觸媒，在外觀上由氧化鐵小粒子堆積形成的多孔殼層，可以抑制奈米銀粒子於高溫下的熔聚燒結現象，此外，也吸附反應物在銀催化下進行反應。因此適量的三氧化二鐵於觸媒中所佔重量比對氧化異丙醇有正面的效果，相較於銀，95%異丙醇去除效率的溫度可以從 310°C 降低到 295°C。

Christopher 等人[17]比較多晶奈米銀粒子跟奈米銀線做為乙烯環氧化觸媒的差異時發現，有較多的(100)晶面的奈米銀線相較於(111)晶面具有較高的選擇率。而 Pulido 等人[18]則從理論上發現並證實 Ag(100)表面比 Ag(111)更容易發生氧的解離吸附、增加活性。

由以上回顧發現，奈米銀線特殊晶面結構具有觸媒應用潛力。而披覆的氧化物殼層則可有效提升銀的氧化反應活性，同時避免高溫下的熔聚燒結問題。因此本研究將以奈米銀線為核心材料、探討披覆金屬氧化物殼層之核殼結構觸媒製備方法。此外，也將探討核殼結構觸媒對氧化反應之影響。希望能找到最佳的製程合成具有高催化性而穩定的奈米銀線-金屬氧化物核殼結構觸媒，並進而應用至揮發性有機氣體的全氧化上。

二、研究方法

2.1 奈米銀線及核殼結構觸媒合成

本研究將以沉積沉澱法(deposition-precipitation method)及多元醇法(Polyol process)製備銀絲-氧化鐵之核殼結構觸媒，並進行物性及化性鑑定來探討核殼結構材料應用。

兩種方法均先經過銀絲成長程序。多元醇法是典型的奈米銀單晶粒子合成方法。Wiley 等人的文章[19]提到其機制是利用乙二醇溶液為溶劑及還原劑將銀離子加熱還原為零價銀，進一步聚集形成的種子由結構可分成 single-crystal、single twinned、multiply twinned 等三種。奈米銀線屬於其中 multiply twinned 的 five fold twinned pentagonal wire。當銀原子長成 twinned 之十面體種子，溶劑中的 PVP 分子會在之後成長過程中吸附在(100)面，使得(100)面之成長受到限制而長成銀線形狀。合成方法例如 Lu 等人所述[20]，在 40mL EG 中溶解 0.255g 硝酸

銀 (B 溶液)，以 0.375mL/min 速度注入 A 溶液 (在 20mL EG 中溶解分子量 360000、與銀離子 molar ratio=1.5 的 PVP) 中，接著在 160°C 反應 60 分鐘。之後可以直接多元醇法合成氧化鐵殼層，或者冷卻至室溫、進行清洗純化後，將得到銀絲進行沉積沉澱法合成氧化鐵殼層。說明如下：

沉積沉澱法合成氧化鐵殼層

1. 取 0.5g $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 及 0.4g urea 加入 50 ml RO 水，攪拌至完全溶解。
2. 取 0.1g 銀絲分散於 50ml RO 水，保持在 90 度均勻攪拌。同時慢慢將步驟 1 溶液加入之後攪拌 16 小時，讓 Fe 離子沉積在 Ag。
3. 抽氣過濾，水洗 3 次，將觸媒前驅物置於 110°C 烘箱中乾燥 24 小時除去水分。
4. 將乾燥後的觸媒前驅物置於高溫爐中，在 400°C 下煅燒 5 小時。

多元醇法合成氧化鐵殼層

1. 取適量 $\text{Fe}(\text{acac})_3$ 加入 EG 中，攪拌至完全溶解。
2. 取適量 PVP 加入 EG 中，攪拌至完全溶解後保持在 433 K。加入 AgNO_3 ，攪拌 1h 合成銀絲
3. 將步驟 1 及步驟 2 溶液加入高壓釜中，在 433 K 進行水熱 2h。
4. 以丙酮清洗去除 PVP 及溶劑。

2.2 觸媒鑑定分析

本研究所進行的特性分析包括：使用 X-射線繞射分析(XRD)測定觸媒的晶型結構，以瞭解觸媒材料在製備過程結構的變化；用掃描式電子顯微鏡(SEM)、穿透式電子顯微鏡(TEM)觀察擔體和觸媒的表面形態。

觸媒活性則採用異丙醇完全氧化反應進行測試。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，計算異丙醇去除效率並記錄 95% 去除效率的溫度 (T_{95})。詳細步驟如下所示：

1. 在 400cpsi、1cmD*1.5cmH 蜂巢陶瓷上含浸擔載適當重量觸媒，裝填於 U 型石英管反應床中。
2. 以 100 ml/min 的流速，將異丙醇 (250 ppm; balance, air)攜帶至反應床中進行反應。
3. 以 GC/FID 分析反應後反應床氣體濃度，取樣分析頻率為 1 次/min。

三、結果與討論

3.1 奈米銀線及核殼結構觸媒物性分析

利用多元醇法合成的奈米銀線的 SEM 影像如圖 1，銀線直徑約 50-100nm 之間。將奈米銀線以沉積沉澱法及多元醇法披覆氧化鐵殼層的樣品如圖 2 及圖 3 所示。從張照片中可以看到沉積沉澱法或多元醇法都可以成功披覆氧化鐵殼層在銀線表面，但也有些沒有披覆在銀線表面、自己成核成長的粒子。沉積沉澱法出現大小、形狀不一的粒子。相反地，多元醇法合成的粒子具有尺寸均一且形狀規則的現象；而且無論是銀線表面形成的殼層或獨立成長的氧化鐵顆粒，都是由粒子大小均勻約為 10 nm 左右的顆粒堆積聚集而成。獨立的氧化鐵顆粒直徑大約 100nm，而銀線殼層厚度則數十 nm 以上。

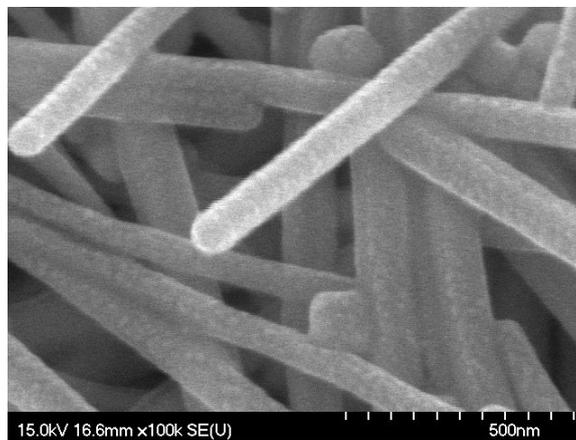


圖1 奈米銀線的SEM照片

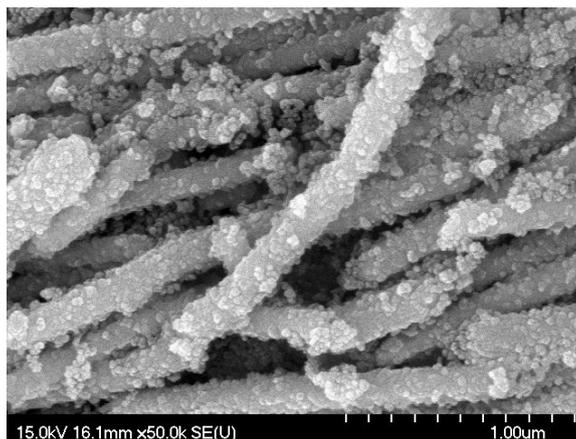
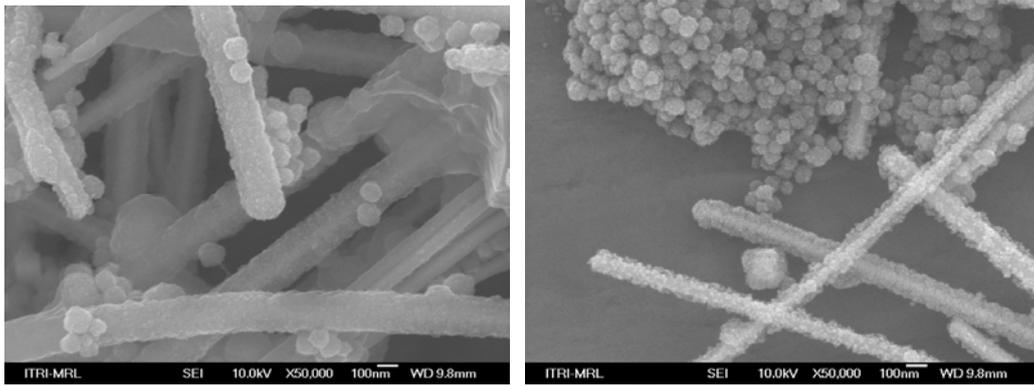


圖2 沉積沉澱法合成之奈米銀線-氧化鐵核殼結構材料的SEM照片



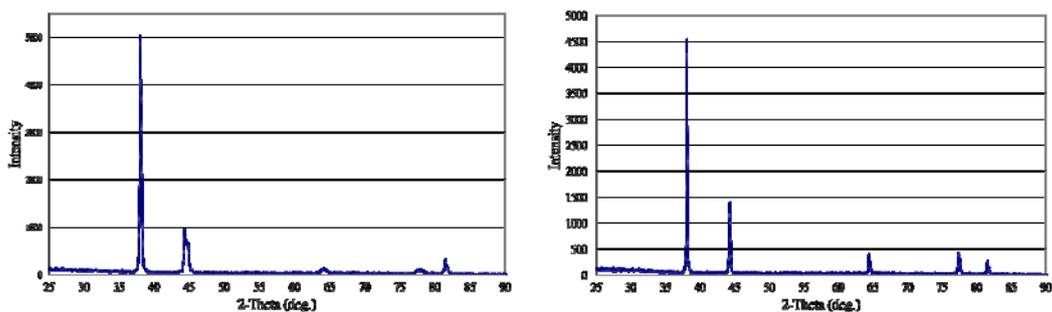
(a)

(b)

圖 3 多元醇法合成之奈米銀線-氧化鐵核殼結構材料的 SEM 照片

在多元醇法合成殼層的反應過程，增加 $\text{Fe}(\text{acac})_3$ 添加量並沒有讓殼層厚度增加的效果，而且 $\text{Fe}(\text{acac})_3$ 與銀線重量比例較高的樣品(圖 3.3b 為圖 3.3a 的 2 倍)自己成核成長的粒子數量明顯較多。若以 LaMer model 說明，同質成核反應發生所需的活化能高於異質成核。在較高溫度容易促使同質成核成長的發生。顯示控制溶質濃度可以抑制核生成現象。顯示如同圖 3.3 照片中沒有在銀線表面生長的大量氧化鐵顆粒，可能來自於高溫以及高前趨鹽濃度。

Zhu 等人[21]認為吸附在小粒子表面的 PVP 以及為了降低顆粒表面能量是導致堆積聚集成規則球型顆粒的原因，而且球型顆粒大小會隨著反應時間增長而再排列使顆粒尺寸更大。在圖 3.3 照片中可以發現銀線表面堆積聚集成形成的氧化鐵殼層也具有均一厚度及規則表面。銀線表面吸附有 PVP 是形成特定方向成長的原因，因此銀線表面吸附 PVP 也可以來解釋表面堆積聚集成形成氧化鐵殼層的原因。



(a)

(b)

圖 4 奈米銀線及沉積沉澱法披覆殼層後的 XRD 圖譜

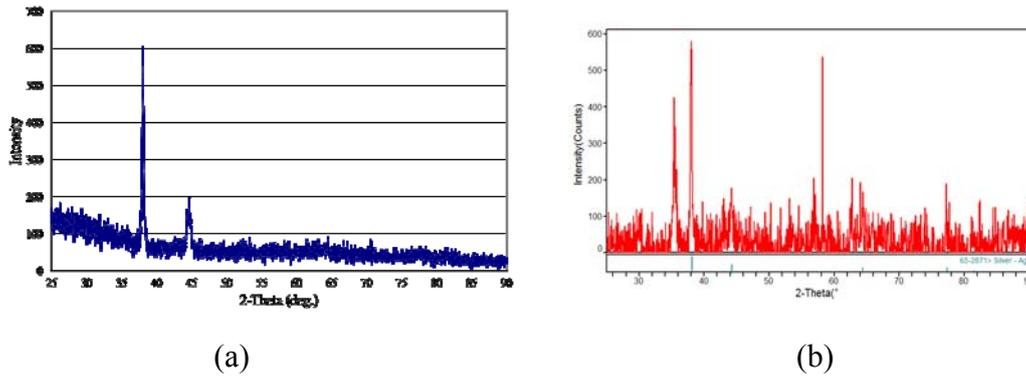


圖 5 多元醇法披覆氧化鐵後的 XRD 圖譜

奈米銀線以沉積沉澱法擔載氧化鐵前後的 XRD 圖譜如圖 4。擔載氧化鐵前(圖 4a)，奈米銀線在 (111)及(100) 的訊號特徵明顯，(111)及(100)訊號高度比值約為 5.5。此高度比值特徵在沉積沉澱法擔載氧化鐵後的 XRD 圖譜為 3.3(圖 4b)，接近於一般球狀多晶奈米銀顆粒。在沉積沉澱法合成過程中，酸性溶液以及之後持續數小時在 400°C 鍛燒可能是破壞銀絲表面結晶特徵的原因，而多元醇法則沒有前述兩個問題。圖 5a 多元醇法擔載氧化鐵樣品的(111)及(100)訊號高度比值仍約為 5.5，與擔載氧化鐵前奈米銀線訊號高度比值接近，顯示多元醇法可成功合成包覆金屬氧化物，在合成過程沒有破壞銀線表面結晶特徵，較沉積沉澱法有助於在披覆金屬氧化物過程中保留銀線結晶特徵。

此外，前趨鹽添加較少時，樣品的氧化鐵特徵峰不易辨識(圖 5a)。但在圖 5b 則可清楚辨識出殼層為 Fe_3O_4 ，如圖中 30.16°、35.7°、43.33°、53.6°、57.1°、62.8°。

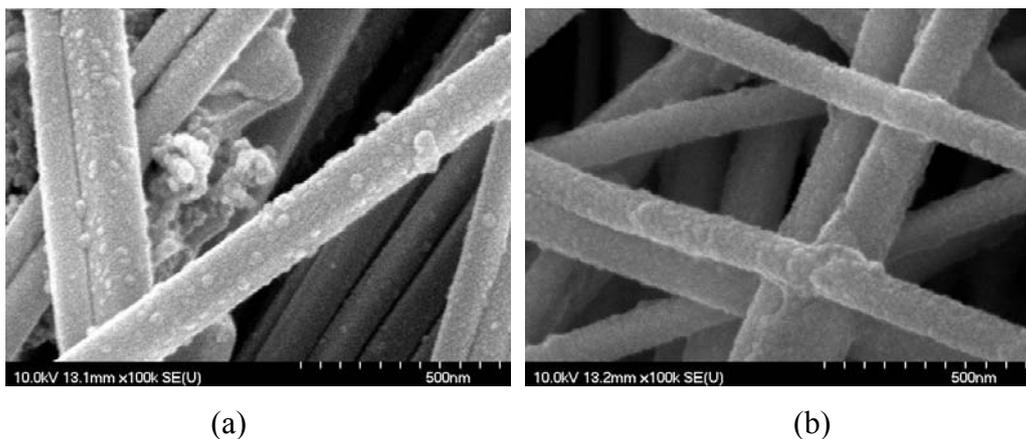


圖 6 多元醇法 Ag@CeOx、Ag@MnOx 的 SEM 照片

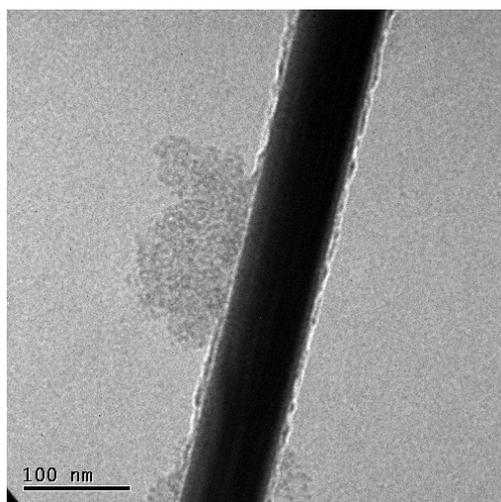


圖 7 多元醇法 Ag@MnO_x 的 TEM 照片

以上結果顯示利用多元醇法依序在乙二醇溶液中加入 PVP、AgNO₃、Fe(acac)₃，並依序經過適當溫度及時間進行反應可以得到奈米銀線-氧化鐵核殼結構材料。另外以相同作法加入氧化錳或氧化鈾的前驅物也能夠成功披覆氧化鈾或氧化錳殼層，如圖 6 所示。而且在圖 7 的 TEM 照片發現較低反應溫度(140°C)以及較低前趨物濃度下，銀線表面生長的氧化錳殼層可以控制到厚度約 10nm。

3.2 觸媒活性分析

奈米銀線及多晶銀粒子觸媒活性分析

奈米銀線表面主要晶面包括形成兩端五面體的(111)及側面的(100)，因此銀線長度越長、(100)晶面比例越高。如表 3.1 所示，代表觸媒活性之異丙醇 95% 去除效率(T₉₅) 在相同的單位重量空間流速(SV1)之下，奈米銀線(#2)為 200°C、多晶銀粒子(#1)為 310°C。但是在不相同尺寸效應的情形下，並不易直接比較單晶粒子的觸媒特性。從粒子尺寸估計兩種樣品的比表面積分別為 4.8、14.3 m²/g，顯示多晶銀粒子樣品(#1)表面原子之比例高於主要晶面為(100)的奈米銀線樣品(#2)。

以表面積代表表面原子數量，比較奈米銀線單位面積下的觸媒特性顯示，多晶銀粒子(#1)在觸媒特性上不如主要晶面為(100)之奈米銀線。亦即相較於多晶粒子，主要晶面為(100)的單晶粒子具有較高觸媒活性。以 Pulido 等人[18]提到 Ag(100)較 Ag(111)容易發生氧的解離吸附說明之，表示奈米銀線觸媒表面容易吸附大量的氧原子，並將異丙醇氧化成 CO₂。

表 3.1 奈米銀線與多晶銀粒子的 IPA 氧化反應結果

		尺寸 (nm)	比表面積 (m ² /g)	T ₉₅ (°C)	SV1	SV2
#1	多晶銀粒子	D=40	14.3	310	4000	280
#2	奈米銀線	D=80, L=10um	4.8	200	4000	840

SV1: ml*min⁻¹/g; SV2: ml*min⁻¹/m²

奈米銀線核殼材料觸媒活性分析

表 3.2 所規劃合成條件的重量比及反應溫度是為避開在高溫或高前趨物濃度的反應條件下、在銀線殼層之外生成過多的金屬氧化物顆粒。例如合成氧化錳、氧化鈾殼層之水熱溫度為 140°C（如圖 6），同時在低前趨物濃度下獲得較薄之殼層厚度（如圖 7 之厚度約 10nm）。

對銀觸媒而言，添加金屬氧化物具有可吸附氧以及提供氧給銀觸媒的功能 [22]。在此希望除前面章節的保護銀線結構的效果之外，以不同金屬氧化物為殼層材料進行異丙醇完全氧化，來幫助了解金屬氧化物以核殼結構型態作為助觸媒、對於異丙醇完全氧化的影響。

異丙醇的 T₉₅ 測試結果如表 3.2 所示。以氧化鐵、氧化錳、氧化鈾為銀線殼層的樣品進行 IPA 氧化反應 (#1、#2、#3) 之最佳 T₉₅ 分別約在 220°C、220°C 及 175°C。相較於奈米銀線(#4)的 T₉₅ 而言，氧化鈾殼層具有較氧化鐵、氧化錳殼層顯著的效果。從圖 6 看來，殼層雖然很薄但是結構並不像是小粒子堆積而成，之後的研究可以朝向控制殼層型態來減少質傳阻力增加活性。

表 3.2 奈米銀線核殼結構觸媒的 IPA 氧化反應結果

		T ₉₅ (°C)	SV	IPA (ppm)	銀線/殼層前驅物 重量比	反應溫度 (°C)
#1	Ag wire@Fe ₃ O ₄	220	3000	125	6/1	160
#2	Ag wire@MnO ₂	220	3000	125	6/1	140
#3	Ag wire@CeO ₂	175	3000	125	6/1	140
#4	Ag wire	200	4000	250	-	-

SV: ml*min⁻¹/g;

四、結論

本研究設計了核殼結構觸媒的合成方法，並探討了奈米銀線觸媒活性以及核殼結構對奈米銀線的結構及活性的幫助程度。

銀(100)晶面為主的奈米銀線在測試結果中顯現了優於銀粒子的異丙醇催化活性，奈米銀線在 200°C 可以有 95% 的異丙醇轉化率。若要進一步為銀線披覆殼層作為助觸媒來增加活性，則合成過程必須不能破壞其結構特徵。

在合成方法的部分，以多元醇法披覆金屬氧化物殼層之方式可以有效合成出銀線-金屬氧化物之核殼結構材料，從 XRD 圖譜分析可以證明奈米銀線的結構特徵在披覆金屬氧化物殼層前後，並不會像沉積沉澱法合成樣品般發生顯著變化。

最後，以氧化鐵、氧化錳、氧化鈾為殼層的奈米銀線-金屬氧化物核殼結構觸媒進行異丙醇氧化反應的結果發現，氧化鈾殼層增進活性的效果較其他兩種氧化物顯著，在 175°C 可以有 95% 的異丙醇轉化率。從電子顯微鏡觀察到的殼層表面形態推論，日後的研究可以朝向控制殼層型態、增加孔隙來減少質傳阻力、增加活性。

五、參考文獻

1. Caruso F. Nanoengineering of Particle Surfaces. *Advanced Materials*, 2001;13.
2. Reiss P, Protie`re M, Li L. Core/Shell Semiconductor Nanocrystals. *Small* 2009;5: 154-168.
3. 王惠通、賴慶智，以無機濕式法製備 ZnO 紫外線吸收劑，材料年會，2006。
4. Haldar KK, Sen T, Patra A. Au@ZnO Core-Shell Nanoparticles are Efficient Energy Acceptors with Organic Dye Donors. *Journal of Physical Chemistry* 2008;112:11650-11656.
5. Carroll KJ, Hudgins DM, Spurgeon S, Kemner KM, Mishra B, Boyanov MI, Brown III LW, Taheri ML, Carpenter EE. One-Pot Aqueous Synthesis of Fe and Ag Core/Shell Nanoparticles. *Chemistry of Materials* 2010;22.
6. Wang W, Zhang J, Chen F, He D, Anpo M. Preparation and photocatalytic properties of Fe³⁺-doped Ag@TiO₂ core-shell nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science* 2008;323:182-186.
7. Lai CH, Wu TF, Lan MD. Synthesis and Property of Core-Shell Ag@Fe₃O₄ Nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics* 2005;41:3397-3399.
8. Mazumder V, Chi M, More KL, Sun S, Am J. Core/shell Pd/FePt Nanoparticles as an Active and Durable Catalyst for the Oxygen Reduction Reaction. *Chemical Society*, 2010;132:7848-7849.
9. Mayrhofer KJJ, Juhart V, Hartl K, Hanzlik M, Arenz M. Adsorbate-Induced

- Surface Segregation for Core-Shell Nanocatalysts. *Angewandte Chemie International Edition* 2009;48:3529-3531.
10. Chou KS, Chen CC. Fabrication and Characterization of Silver Core and Porous Silica Shell Nanocomposite Particles. *Microporous and Mesoporous Materials* 2007;98:208-213.
 11. Cheng B, Le Y, Yu JG. Preparation and Enhanced Photocatalytic Activity of Ag@TiO₂ Core-Shell Nanocomposite Nanowires. *J. Hazard Mater* 2010;177:971-977.
 12. Zheng YH, Zheng LR, Zhan YG, Lin XY, Zheng Q, Wei KM. Ag/ZnO Heterostructure Nanocrystals: Synthesis, Characterization and Photocatalysis. *Inorganic Chemistry* 2007 ;46:6980-6986.
 13. Zheng YH, Chen CQ, Zhan YY, Lin XY, Zheng Q, Wei KM. Photocatalytic Activity of Ag/ZnO Heterostructure Nanocatalyst: Correlation between Structure and Property. *Journal of Physical Chemistry* 2008;12:10773-10777.
 14. Sun YY, Yang BH, Tien Y, Guo GH, Cai W, He MH. Facile Synthesis of Ag@Fe₂O₃ Core-Shell Composite Nanoparticles by an in Situ Method. *Micro Nano Letters* 2011;6:82-85.
 15. Wei ZH, Zhou ZJ, Yang M, Lin CH, Zhao ZH, Huang DT. Multifunctional Ag@Fe₂O₃ Yolk-Shell Nanoparticles for Simultaneous Capture, Kill, and Removal of Pathogen. *Journal of Materials Chemistry* 2011;21:16344-16348.
 16. Chou KS, Lin MY, Wu HH. Studies on the Removal of 2-propanol by Ag@Fe₂O₃ Core-Shell Structured Catalyst. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 2013;44:228-232.
 17. Phillip C, Suljo L. Engineering Selectivity in Heterogeneous Catalysis: Ag Nanowires as Selective Ethylene Epoxidation Catalysts. *The Journal of the American Chemical Society* 2008;130:11264-11265.
 18. Angeles P, Patricia C, Mercedes B, Avelino C. Aerobic Epoxidation of Propene over Silver (111) and (100) Facet Catalysts. *Journal of Catalysis* 2012;292:138-147.
 19. Wiley B, Sun Y, Mayers B, Xia Y. Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanostructures: The Case of Silver. *Chemistry a European Journal* 2005;11:454-463.
 20. Lu YC, Chou KS, Nogami M. Process Window for the Synthesis of Ag Wires through Polyol Process. *Materials Chemistry and Physics* 2009;16:1-5.
 21. Zhu Y, Zhao W, Chen H, Shi J. A Simple One-Pot Self-Assembly Route to Nanoporous and Monodispersed Fe₃O₄ Particles with Oriented Attachment

Structure and Magnetic Property. *Journal of Physical Chemistry* 2007;111:5281-5285.

22. Xia GG, Yin YG. Efficient Stable Catalysts for Low Temperature Carbon Monoxide Oxidation. *Journal of Catalysis* 1999;185:91-105.

生質能蒸汽系統

The biomass boiler system

鄭旭翔¹、賴慶智²

Ching-Chih Lai, Hsu-Hsiang Cheng

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

摘要

為了達到提高能源使用效率及減碳之目的，以生質能汽電共生系統取代以燃燒化石燃料之發電產汽系統是值得推展的。本文分別簡介生質能及生質能蒸汽系統，評估生質能汽電共生在經濟面之可行性，並介紹平衡蒸汽供需落差之緩衝技術。由評估結果可知，以生質能汽電共生系統搭配雙效式冰水機，可以穩定供應電力並滿足製程對蒸汽的變動需求，也可將過剩之蒸汽轉為冰水，以減少空調用電，進而達到平緩電力負載之目的。由評估結果可知該系統投資之回收年限約為2年半。

關鍵字：生質能、汽電共生、生質能鍋爐、海水淡化、冰水機

Abstract

In order to improve the energy efficiency and reduce the carbon dioxide emission of conventional fossil-fuel based power plant and boiler system, it is suggested that replacing the conventional system by biomass-based cogeneration systems for generating electricity and producing steam. The biomass and biomass boiler system were introduced in this article, and the economic feasibility of biomass-based cogeneration systems was also evaluated in this article. In addition, the steam compression system was introduced in this article, too. From the result of evaluation, the combination of biomass-based cogeneration and double-effect absorption chiller was suggested for providing stable electricity and steam for factories, and the steam that was not used by factories could be used by absorption chiller for producing the ice water. Hence, the electricity used by air conditioning system can be reduced, and

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深專案經理 E-mail:ching-chih_lai@itri.org.tw

the loading of power system can be reduced too. From the economic evaluation, the system payback period is about two and a half years.

Keyword: Biomass、Combined Heat and Power、Boiler、Desalination、Chiller

一、前言

減少二氧化碳排放以減緩氣候變遷已經是全球的重要議題。生質能屬於可再生能源，且燃燒生質能產生蒸汽屬成熟的技術，是理想的化石燃料替代方案。目前可行之生質能燃燒設備包括高效率木屑燃爐、都市固體廢棄物焚化爐、生質顆粒鍋爐和沼氣鍋爐等。在以生質能燃料取代傳統化石燃料時，提高燃料之能源使用效率也是必要的。一般而言，傳統電廠約有 2/3 的能源以低溫廢熱排出，因此若欲減少能源成本支出，提高能源使用效率有其必要性。

汽電共生之熱能轉換效率可達 70-90%，比單純發電或單純產熱更有效率。除了化石燃料之外，生質能燃料也能用於汽電共生。一般生質能汽電共生的原料是樹木、農業廢棄物或都市廢棄物為主之生質物，例如瑞典是將木料和木料廢棄物用於區域供熱的最大國家，其次是芬蘭和美國。丹麥、德國和瑞典則是將都市固體廢棄物焚化用於區域供熱的主要國家。不同汽電共生廠由於其對於蒸汽、電力之需求不同，因此彼此間產汽及發電量比例之差異頗大，且不同之設置地點也會導致彼此設備、投資、操作維護及燃料等成本之差異，但一般而言，生質能汽電共生廠之投資成本會較現有汽電共生為高，燃料成本則與現有燃氣汽電共生廠接近，熱效率也與傳統汽電共生廠相當。

圖 1 及表 1 是化石燃料與生質能燃料之減碳效益、成本、熱值之比較。



圖 1、化石燃料與生質能燃料之減碳效益及燃料成本比較

表 1、各種燃料之熱值及成本分析比較表

燃料名稱		天然氣	低 硫 燃 料 油	煤 炭	稻 梗 (RDF)	廢 木 屑	木 材 下 腳 料	
熱值		kcal/kg	10,500	9,400	5,000	3,800	2,500	3,000
至 澎 湖 金 門	售價(含海運)	新台幣 元/噸	19,000	22,600	3,600	4,500	6,000	3,000
	陸運成本 (港口至廠區)	新台幣 元/噸	須依儲 氣槽距 離計算	500	300	300	400	400
至 台 灣	售價(含海運)	新台幣 元/噸	19,000	22,600	3,000	3,500	900	3,000
	陸運成本 (100 公里)	新台幣 元/噸	須依倉 儲距離 計算	500	200	250	250	300

由圖表可知，相較於傳統化石燃料，生質能雖然較傳統化石燃料具有減碳效益，但就單位熱值之價格而言，生質能燃料之價格仍較煤炭之價格為高，且我國電價向來偏低，因此若欲以生質能汽電共生廠取代傳統燃煤之汽電共生廠或燃煤電廠在經濟上並不具誘因。在天然氣部分，天然氣之價格雖然較高，但天然氣較其他燃料乾淨，且以天然氣作為燃料具有可快速啟動/關閉設備之優點，也不易取代。因此若欲以生質燃料取代傳統化石燃料，應以使用重油、燃料油或柴油之設備做為對象，不但具有經濟效益，同時也具有減碳效益。例如澎湖及金門等以重油或柴油進行發電及產熱的方式，以生質能汽電共生廠進行發電及產熱就相對具有經濟可行性。此外，生質能燃料與煤炭同屬固體燃料，無法因應較大之蒸汽使用變化，因此若欲生質能汽電共生廠輸出穩定的電力，則必須考量如何將過剩蒸汽轉為他用，以免浪費蒸汽。可行之方法包含：(1)利用以熱製冷製造冰水以供空調之用；(2)利用蒸汽搭配多效蒸發或多級閃蒸進行海水淡化；(3)發展蒸汽壓縮系統以儲存過剩蒸汽等。

此外，發展生質能汽電共生以取代傳統化石燃料發電產熱之其他不確定因素還有：

1. 較高的前期投資成本，以及因化石燃料價格波動導致長期節省的成本效益未知。
2. 其他具經濟規模的再生能源或節能技術間之競爭關係。

3. 區域能源系統本身的發展瓶頸，例如儲能技術有待突破。智慧電網的應用目前大多正屬開發階段，也有待進一步拓展。
4. 市場開發意願與工業上應用比例有待提高，以及能源政策是否支持區域能源系統所需的基礎建設。

以下就生質能蒸汽系統、生質能汽電共生經濟可行性評估及蒸汽壓縮系統進行說明。

二、 生質能蒸汽系統

生質能就是利用生質物經轉換所獲得的電與熱等可用的能源，其中生質物泛指由生物產生的有機物質，例如木材與林業廢棄物如木屑等；農作物與農業廢棄物如黃豆莢、玉米穗軸、稻殼、蔗渣等；畜牧業廢棄物如動物屍體；廢水處理所產生的沼氣；都市垃圾與垃圾掩埋場與下水道污泥處理廠所產生的沼氣；工業有機廢棄物如有機污泥、廢塑橡膠、廢紙、造紙黑液等。生質能是我國目前最主要的再生能源，且以廢棄物能源為主，包括都市垃圾、一般事業廢棄物、石油焦、廢輪胎、廢溶劑、有機廢液、油泥、污泥、黑液、廢紙排渣、廢輪胎、蔗渣、稻殼、裂解油、石油焦、以及垃圾掩埋場與厭氧廢水處理廠的沼氣等。目前國內每年約生產六百萬噸的有機廢棄物[1]。

生質能是一種再生能源，與風能、太陽能一樣具有取之不盡、用之不竭的特性。與其他再生能源比較，生質能的優勢包括技術較成熟、有商業化運轉能力、經濟效益較高、且因使用材料為廢棄物，故兼具廢棄物的回收處理與能源生產的雙重效益。此外，生質能可併用在傳統能源供應的架構中，例如生質柴油可與市售柴油混合使用、氣化系統可與汽電共生或複循環發電系統結合等。

生質能利用的技術範圍相當廣泛，其轉換為能源的方式可概分為直接燃燒技術、物理轉換技術、熱轉換技術與化學／生物轉換技術。直接燃燒技術是把廢棄物直接燃燒以產生熱能與電力，例如現有的大型垃圾焚化廠，以焚化垃圾發電。物理轉換技術是把廢棄物經破碎、分選、乾燥、混合添加劑及成型等過程，製成易於運輸及儲存的固態衍生燃料，作為鍋爐、水泥窯的燃料，例如紙廠把廢棄物製成錠型的固態燃料，作為燃煤鍋爐的輔助燃料。熱轉換技術是指把廢棄物利用氣化與裂解（液化）等熱轉換程序產生合成燃油或燃氣（瓦斯），作為燃燒與發電設備的燃料。例如從廢保麗龍或廢塑膠可回收燃油作為鍋爐的燃料；又如稻殼、能源作物或廢紙渣可產製合成燃氣，進行燃氣發電。化學／生物轉換技術是指經醱酵、轉酯化等生物化學轉換程序以產生沼氣、酒精、生質柴油、氫氣等，作為引擎、發電機與燃料電池的燃料。例如垃圾掩埋場廢棄物、工業或畜牧廢水

經醱酵產生的沼氣可以發電；又如廢食用油經轉酯化反應可產製生質柴油，作為汽車的替代燃料等。將生質能轉化為類似煤、油、天然氣的衍生燃料，易於儲運並可提高能源效率，降低污染，同時可與資源回收系統結合，節省廢棄物處理成本，使生質能技術極具市場競爭力。

在眾多生質燃料中，廢棄物衍生燃料（RDF）是指由都市垃圾、一般事業廢棄物、農業廢棄物等廢棄物，利用物理或熱化學等方法所製成性質均一燃料。將廢棄物送入焚化爐焚化並做熱能回收，以發電效率而言，約為 10%~20%。但隨著分選、破碎、乾燥等物理程序的增加，廢棄物中不可燃或不適燃的物質逐漸減少，性質逐漸均一，最後壓製為固態的燃料棒。依據處理程序的增加，RDF 分成 RDF-1 至 RDF-7，數字愈大表示 RDF 燃料的熱值愈高，意即可由 RDF 回收的熱能也越高。在各等級的 RDF 當中，以 RDF-5 的形狀及發熱量都與煤炭及木屑類似，又都是固體燃料，因此容易混合燃燒。一般家庭垃圾製成之 RDF-5 熱值約 4,000~5,000 kcal/kg，而一般事業廢棄物所製之 RDF-5 熱值可高達 6,500 kcal/kg，相當於褐煤的熱值[2]。

目前全球生質物與廢棄物氣化系統的發展正由示範階段跨入完全商業運轉階段。現階段全球以氣化混燒發電為主要發展目標，較受矚目的示範廠共有四座，包括奧地利的 Zeltweg、芬蘭的 Lahti、荷蘭的 Amer 及美國的 Vermont。根據報導[3]，木材(Wood)是歐洲最主要的再生能源來源，例如在波蘭及芬蘭等地，木材在再生能源之佔比超過 80%，即使是在大力補助風電及太陽能的德國，也有 38%的非化石燃料消費中來自於木材。伐木以取得木材看似與低碳抵觸，但事實上若能有效管理森林並適當疏伐，發電廠所使用的木料所產生的碳排放是可透過新栽林木所增之碳捕集相抵。因此歐盟也以此將木材列入可再生能源，並使木材作為再生能源的情形大幅提升。

傳統火力發電廠只要少額投資，即可將煤與木材以 9 比 1 混燒，供電穩定度也遠勝風能及太陽能，而且不必淘汰傳統火力發電廠，大幅降低成本，與昂貴的風能及太陽能相較，混燒發電格外受電廠業者歡迎，木材也成為受環保人士、電業及歐洲政府一致支持的可再生能源，視之為最能符合各界利益、同時又能達成可再生能源佔 2020 年歐盟總能源消費 20%目標的作法，相當於 1,210 億度電 (TWh)。相反地，若採行風能(494TWh)及太陽能發電無法達成此一目標。這些木材的 80%將用於加熱，20%用於發電[4]。

根據歐洲最大碳交易公司 Roland Vetter 估計，歐洲政府補助將以市場電價的上限為計價基準，補助規模約為每千度電(MWh)45 英鎊(68 美元)。英國最大的 Drax 煤炭發電廠表示會將 6 個鍋爐中的其中 3 個由燃煤改為燃木，2016 年後每年可發電 1250 萬度電，並獲得 5.5 億英鎊補助，比 2012 年的稅前獲利 1.9 億英

鎊還多，因此可預期歐洲之木材消費將隨之增加。根據加拿大 International Wood Markets Group 研究，2012 年歐洲共消耗 1,300 萬噸木屑(Wood Pellets)，若依此趨勢，至 2020 年歐洲對木屑的需求將提高到每年 2,500 至 3,000 萬噸。由於光是 2010 年歐盟(EU)的木屑進口量便增加了 50%，且受到中國的影響及歐盟的需求帶動，木屑的國際貿易量將提高 5 至 6 倍，由每年 1,000 至 2,000 萬噸增加至 2020 年的 6,000 萬噸。由於需求倍增，因此根據 Argus Biomass Markets 的調查，木屑價格指數已經由 2010 年 8 月的每噸 116 英鎊(152 美元)上升至 2012 年底的 129 英鎊，而自從 2011 年底以來，加拿大西部的硬木(Hardwood)已經上漲 60%。因此未來若要採用進口木屑作為燃料，必須考量進口木屑價格可能上漲的問題。

生質能鍋爐蒸汽系統示意圖如圖 2 所示，由圖可知此系統包含輸送、燃燒、空汙處理、渣灰處理等設備。

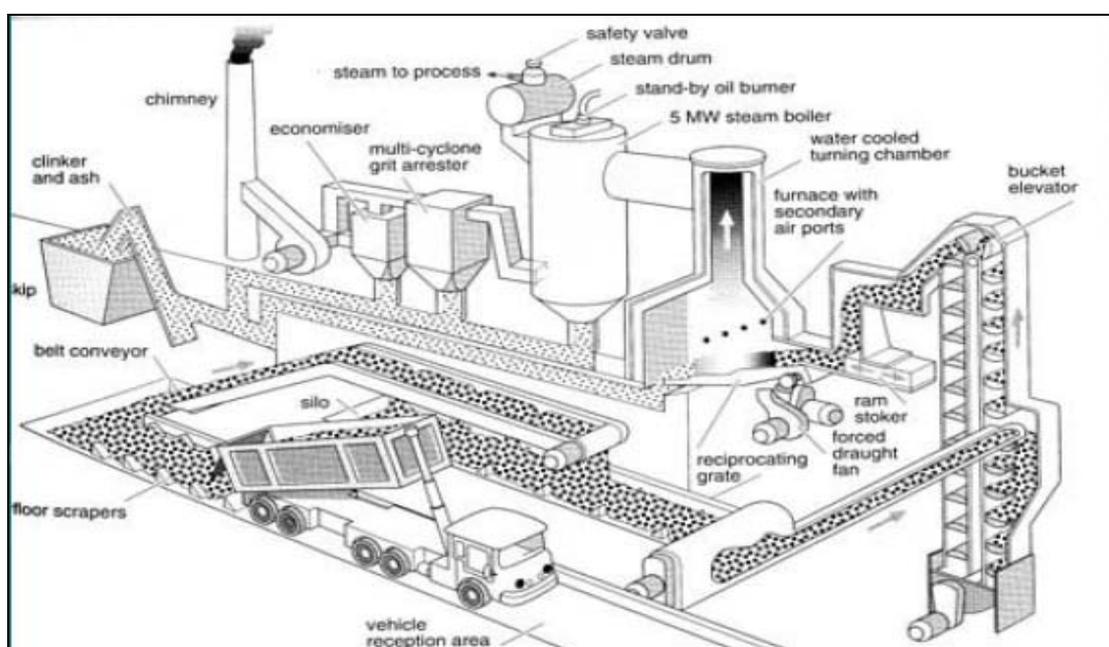


圖 2、生質能鍋爐蒸汽系統示意圖[5]

三、 生質能汽電共生經濟可行性評估

就汽電共生而言，穩定之蒸汽與穩定之電力密不可分，因此如果欲以生質能汽電共生系統取代當前以重油或柴油做為燃料之發電機組或蒸汽鍋爐，必須考量蒸汽與電力之供需協調。由於(1)一般工廠對於電能之需求仍多於蒸汽；(2)一般工廠對於蒸汽之需求可能是間歇性而非連續性；(3)來自於空調系統之電力需求一般而言並不低；(4)淡水缺乏且目前多採逆滲透法生產淡水等因素，因此可考慮將不為工廠使用之不穩定蒸汽作用於海水淡化或用於吸收式冰水機以製造空

調系統所需之冰水以平緩電力負載。換句話說，有兩種能源供應方式：(1)生質能汽電共生+海水淡化；或(2)生質能汽電共生+吸收式冰水機。

海水淡化是指將海水中之鹽類及礦物質去除以得到淡水的過程，主要用於生產民生、工業及農業用水。海水淡化是非常成熟之技術，且隨著技術不斷的進步，製水成本也持續下降。中東地區由於缺乏水源，對於海水淡化有極大之需求，光是沙烏地阿拉伯之海水淡化廠產量就佔全球海水淡化廠產量的 24%。除此之外，海水淡化也常用於小型島嶼及船舶等，例如核子動力航空母艦每天生產之淡水量可達 1,500 噸，相當於一座小型海水淡化廠之產能。當前海水淡化之主要方法有逆滲透(Reverse Osmosis, RO)、多效蒸發(Multi-Effect Distillation, MED)、多級閃蒸(Multi-Stage Flash, MSF)、機械蒸汽壓縮(Mechanical Vapor Compression, MVC)等方法。各種海水淡化法之能耗比較如表 2 所示。由該表可知，逆滲透法及機械蒸汽壓縮僅有電力需求而無熱能需求，且多效蒸發之電力消耗較多級閃蒸為低。值得一提的是，多效蒸發之熱能消耗雖然與多級閃蒸相近，但由於多級閃蒸之抽出(Extraction)蒸汽壓力較高，意即其末端蒸汽壓力較高，因此其熱能消耗等同之電力消耗較多效蒸發高。

表 2、不同海水淡化法之能耗比較[6]

海水淡化法	逆滲透	多效蒸發	多級閃蒸	機械蒸汽壓縮
電力消耗(kWh/m ³)	3-5.5	1.5-2.5	4-6	7-12
熱能消耗(kWh/m ³)	None	60-110	50-110	None
熱能消耗等同電力(kWh/m ³)	None	5-8.5	9.5-19.5	None
總相當電力消耗(kWh/m ³)	3-5.5	6.5-11	13.5-25.5	7-12

雖然經濟部水利署之資料顯示[7]目前台灣之海水淡水廠大多使用消耗電力但不消耗熱能之逆滲透技術，但若利用生質能汽電共生廠生產之過剩蒸汽生產淡水，一方面除可消耗多餘之不穩定蒸汽，二方面也能大幅減少該海水淡化廠之電力需求，這對於電力售價較生產成本為低的我國，尤其是電力生產成本極高之離島及外島地區是有經濟極大之誘因。因此考量(1)離島及外島之發電成本遠高於台灣本島、(2)離島及外島對於電力之需求高於蒸汽需求、(3)離島及外島對於

蒸汽之需求並不穩定等因素，因此採取使用熱能為主、電力為輔之多效蒸發或多級閃蒸可能是較逆滲透為佳之選擇。意即利用生質能汽電產生穩定之電力及蒸汽，並將過剩蒸汽用於海水淡化。

除了海水淡化之外，以冰水機利用過剩蒸汽製造空調用冰水也是可行的方案。吸收式冰水機是利用冷媒在蒸發器中與冰水進行熱交換，使冷媒蒸發為氣態，並於吸收器中為吸收劑(溴化鋰)所吸收。含有冷媒的吸收劑則經熱交換器進入發生器中並以蒸汽加熱之，使冷媒由吸收劑中蒸發出來，再經熱交換器重回到吸收器中並噴灑以吸收冷媒。冷媒在發生器中被蒸發後流入冷凝器中以冷卻水將之冷卻液化，再經膨脹閥於蒸發器中膨脹吸熱並完成一循環。雙效式冰水機與一般單效式冰水機不同之處在於雙效式冰水機使用較高壓力之蒸汽，意即溫度較高之蒸氣，故其蒸汽壓力仍可做為另一低溫發生器之熱源，因此可產生雙重效用。採用單效式或雙效式冰水機主要決定於使用蒸汽之壓力。由於汽電共生發電後之蒸汽壓力及溫度仍很高，因此可考慮採用雙效式冰水機製造冰水，以提高蒸汽使用效率。

由於在大部分情況下，一般工廠對於電力之需求會多於對蒸汽之需求，因此假設一座可產生溫度壓力為 $419.1\text{ }^{\circ}\text{C}@60\text{ kgf/cm}^2\text{g}$ 蒸汽、發電膨脹後蒸汽溫度壓力為 $160\text{ }^{\circ}\text{C}@4.76\text{ bar}$ 、每小時產汽達 50 噸、發電量達 6.39 MW 之汽電共生廠，其中產生之蒸汽有 2/3 為其他工廠所用，而其餘 1/3 則為剩餘且流量不穩定之蒸汽。並依此條件計算汽電共生廠之成本。各項計算及假設分別如下：

生質能燃料燃燒是假設生質能鍋爐及柴油/重油鍋爐之熱效率皆為 90%，燃料為熱值 3,800 kcal/kg、成本(含運費)4,800 元/公噸之廢棄物衍生燃料(Refuse Derived Fuel, RDF)。

海水淡化部分則假設採用多效蒸發系統且該系統為 5 效蒸發，因此可知計算該不穩定蒸汽每日可生產之淡水量，生產淡水所需之電力則以每立方米水需 2 度電計算。

製造冰水部分是假設不穩定蒸汽可提供 2,200 kJ/kg 之熱能予雙效式冰水機，且雙效式冰水機之性能係數(Coefficient of Performance, COP)為 1.2。換算電力部分，則假設冷媒壓縮式冰水機之 COP 為 5.0，並依此換算成冷媒壓縮式冰水機所需之電力。

電力、蒸汽及淡水售價部分，考量再生能源躉購費率及外島能源價格較高等因素，分別依電力躉購 2.4652 元/度[8]、蒸汽 2,000 元/噸及淡水 30 元/度計算。

建廠成本部分，生質能汽電共生廠之建廠成本是依表 3 計算，海水淡化廠建廠成本則參考經濟部水利署資料[9]，以 20 萬元/每公噸計算。雙效式冰水機是以性能為 3,200 冷凍噸之冰水機，每冷凍噸(RT) 350 美元(1 美元=30 台幣)計算[10]。

維護成本則為每冷凍噸 15 美元計算[11]。

表 3、美國生質能汽電廠資訊[12,13]

投資成本 (NTD/kW)	90,000 to 180,000
每年操作維護成本(NTD/kW)	3,000
燃料成本(NTD/MWh)	900-1,500
發電效率(%)	16-36
熱效率(%)	40-85 (總效率)
壽命(年)	20
產電成本(NTD/kWh)	3.0-3.9

表 4 為此能源供應中心投資評估與財務規劃表。由表可知此兩種方案之主要投資皆在生質能汽電共生廠，但海水淡化廠之建廠成本遠較吸收式冰水機為高且收益較低，因此導致方案 1 之回收年限較方案 2 為長。在收入部分，由於電力受限於再生能源躉購電力 2.4652 元/度之限制，因此蒸汽仍為該中心之主要收入。在不穩定蒸汽利用部分，雖然躉購電力較低，但不穩定蒸汽用於吸收式冰水機之效益仍高於海水淡化，且前者之設備成本及操作成本皆較低，因此採行方案 2 是遠較方案 1 為佳之作法。

此外，由各單元之收支觀之，海水淡化每年之收入較設備攤提及操作成本為低，因此海水淡化僅能消化不穩定之蒸汽，不如採行吸收式冰水機之方案。從投資回收年限觀之，方案 2 僅需 2 年半即可回收投資，但方案 1 則長達 4.34 年才能獲利，且方案 2 之總投資也較小，因此就各方面而言，方案 2 是較好之作法。

表 4、能源供應中心投資評估與財務規劃表

方案 項目	方案 1	方案 2
	生質能汽電共生 +海水淡化	生質能汽電共生 +吸收式冰水機
生質能汽電共生廠建廠成本(NTD)	862,650,000	862,650,000
海水淡化廠建廠成本(NTD)	400,000,000	
吸收式冰水機成本(NTD)		33,600,000
發電量(kWh/年)	55,976,400	55,976,400
供製程產汽(ton/年)	292,000	292,000
生質能汽電共生廠燃料量(ton/年)	74,445	74,445
製造淡水(ton/年)	730,000	
海水淡化耗電量(kWh/年)	1,460,000	
實際可用電力(kWh/年)	54,516,400	55,976,400
製造冰水相當電力(kWh/年)		21,413,333
電力銷售收入(NTD/年)	134,393,829	137,993,021
蒸汽銷售收入(NTD/年)	584,000,000	584,000,000
淡水銷售收入(NTD/年)	21,900,000	
冰水相當電力收入(NTD/年)		52,788,149
生質能汽電共生廠攤提(NTD/年)	43,132,500	43,132,500
生質能汽電共生燃料成本(NTD/年)	357,335,144	357,335,144
生質能汽電共生操作成本(NTD/年)	19,170,000	19,170,000
海水淡化廠攤提(NTD/年)	20,000,000	
海水淡化廠操作成本(NTD/年)	10,000,000	
吸收式冰水機攤提(NTD/年)		1,680,000
吸收式冰水機操作成本(NTD/年)		1,440,000
每年淨收支(NTD/年)	290,656,185	352,023,526
計畫總設費投資(NTD/年)	1,262,650,000	896,250,000
投資回收年(年)		

四、以蒸汽壓縮系統儲存過剩蒸汽

一般工廠製程的蒸汽需求量通常不太穩定，時多時少，或是循環式的尖離峰，因此在應用上常必須搭配燃油或燃氣鍋爐以彌補製程上瞬間大量的蒸汽需求以符合工廠變動的需求。為了克服生質能鍋爐供汽量不易改變而有過剩蒸汽的問題，除了燃油鍋爐之外，利用蓄熱裝置將鍋爐產生的多餘能量轉變為熱能儲存，

或利用蒸汽蓄儲槽加熱蒸汽蓄儲槽內的水，使水蒸發並提高蒸汽蓄儲槽中的壓力，也能達到儲能效果，且當鍋爐壓力與輸出蒸汽壓力之間的壓差越大時，蒸汽蓄儲槽儲蓄的熱量也越大。由於上述蒸汽蓄儲槽沒有外加壓力，儲槽壓力會介於鍋爐壓力與製程壓力之間，且由於汽電共生排放蒸汽之壓力很小，因此蒸汽儲存之密度也較低；除非儲槽壓力很大，否則儲存的蒸汽量很有限。基於上述原因，若能發展一套蒸汽壓縮系統，將過剩蒸汽壓縮儲存，除可作為因應蒸汽需求變動的解決方案之外，也可縮小該儲能系統之體積。

為了避免蒸汽凝結，因此壓縮蒸汽過程無法採用壓縮空氣過程採用之恆溫壓縮，而是採取絕熱壓縮，但由圖 3 可知，若採取絕熱壓縮，則需要可承受極高溫高壓之壓力容器，不但設備成本極高且壓縮過程耗能也會極大，因此如何適當的降溫就，意即使壓縮過程盡量沿著靠近氣液平衡線之 AC 曲線進行，但又不能跨越氣液平衡線以避免蒸汽凝結，即是沿著耗能最少的操作路徑進行壓縮，即是此技術之困難處。

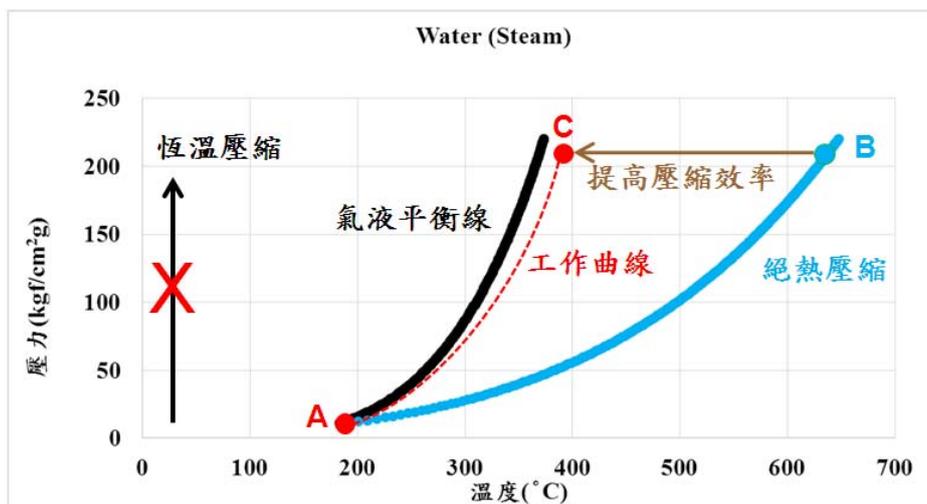


圖 3、蒸汽壓縮曲線

五、 結論

生質能汽電共生廠之初期投資成本雖然較傳統汽電共生廠為高，但由於採用生質燃料兼具經濟與減碳雙重效益，若政府能適度鼓勵民間業者投資經營，有機會形成一新興產業，不僅可妥善解決地方的廢棄物問題，更能將廢棄物轉換為可用的能源，對於降低我國所面臨的減碳壓力是有幫助，但生質能燃料之熱值較煤炭及重油為低，其勢必需要較大的空間以儲存與現有燃料相同熱值之生質燃料。由於我國地狹人稠，要尋找一塊面積夠大且完整之土地以作為生質能燃料製造廠之廠址並不容易，相關法令配套措施是必要的。此外，由本文之分析可知，以生

質能汽電共生廠搭配冰水機製造冰水，除具有減碳及經濟上之誘因之外，也可減少電力系統之負載，是一舉多得的方案，但生質能燃料之取得是關鍵因素。中國大陸雖有地緣優勢且福建、廣東等地之生質能豐富，但由於近年來該地區生質能技術發展迅速，因此由該地區取得生質能燃料並不容易，反而自東南亞進口生質燃料才是比較可行的選項。

六、 參考文獻

1. 「我國低碳排放發展策略研析規劃」專案工作計畫期末報告，行政院環境保護署，2013年6月。
2. 萬皓鵬、李宏台，廢棄物衍生燃料的使用，科學發展，450期，2010年6月。
3. Wood - The fuel of the future- Environmental lunacy in Europe, The Economist, April 6th, 2013.
4. Bonfire of the subsidies - Europe's wood subsidies show the folly of focusing green policy on "renewables", The Economist, April 6th, 2013.
5. 生質能汽電共生系統建廠規劃，工研院 101 年委託協昇能源科技公司案。
6. Energy Requirements of Desalination Processes, Encyclopedia of Desalination and Water Resources (DESWARE), Retrieved on 2013-06-24, <http://www.desware.net/desa4.aspx>
7. 國內現有海水淡化廠，經濟部水利署，
<http://www.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=22834&CtNode=5344>
8. 再生能源電能之躉購，無厭氧消化設備，
<http://info.taipower.com.tw/info59/main/purchase.html>
9. 國內現有海水淡化廠，經濟部水利署，
<http://www.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=22834&CtNode=5344>
10. http://www.anaheim.net/utilities/ea/PA_34.html
11. <http://www-old.me.gatech.edu/energy/beth/five.htm#D>
12. Energy Technology System Analysis Program, International Renewable Energy Agency, <http://www.iea-etsap.org/web/index.asp>
13. Midwest Clean Energy Application Center, U.S. Department of Energy, <http://www.midwestcleanenergy.org/>

薄膜式電滲透除濕技術

Membrane-based dehumidification technology using electro-osmosis

張志彰¹、賴慶智²、黃馨儀³、吳信賢⁴

Chih-Chang Chang, Ching-Chih Lai, Hsin-Hsien Wu, Hsin-Yi Huang

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

摘要

有別於傳統冷凝除濕技術，電滲透除濕為一等溫除濕技術，其藉由施加電壓於薄膜兩側多孔性電極，空氣中的水分子於薄膜陽極側發生水電解反應產生質子、電子及氧氣(氧化反應)，質子進而透過陽離子交換薄膜傳導至陰極側與電子、空氣中的氧氣反應產生水(還原反應)，即陽極側空氣中的水分被排至陰極側。此外，多孔性結構的薄膜因毛細凝結效應及水分子擴散效應而含有來自空氣中的水份，薄膜內質子的運動將會帶動這些水分子流動，順勢地將這些水帶至陰極側排出，此為所謂的電滲透效應。在水電解及電滲透效應同時作用下，陽極側空氣中的水份將可被有效地帶至陰極側排出，而達到降低陽極側空氣的濕度或含水量的目的，此為一除濕程序。反之，其增加了陰極側空氣的濕度，則可視為一加濕程序，也就是說此技術可應用於開發一兼具除濕及加濕裝置，其除濕及加濕方向可由施加電場方向來控制。本文將就目前國內外電滲透除濕相關技術的發展概況進行回顧及基礎學理介紹，分析發現影響除濕效能的主要因子有施加電壓、薄膜電流密度及電滲透拖曳係數。

關鍵字: 水電解、電滲透、陽離子交換薄膜、除濕、電滲透拖曳係數

Abstract

Unlike the conventional dehumidification technology using cooling condensation process, electroosmotic dehumidification (EOD) process is isothermal. When a

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: ccchang0803@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，正研究員

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，副研究員

⁴ 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員

voltage is applied to the porous electrodes of membrane, the electrolysis of water (redox reaction) occurs. The water vapor in the air of anode side is electrolyzed to produce proton, electron, and oxygen. Proton passes through the cation-exchange membrane and then reacts with the electron and oxygen to produce water on the cathode side. This implies the water vapor in the space facing the anode is delivered to the space facing the cathode. Besides, the water molecules in the nanoporous membrane due to the capillary condensation and the water vapor diffusion are dragged by the proton motion and then delivered to space facing the cathode, which is referred to as electroosmotic dewatering. Under the actions of water electrolysis and electroosmosis, the water vapor in the space facing the anode can be effectively delivered to the cathode side. In other words, this device can dehumidify the space facing the anode and humidify the space facing the cathode. The dehumidifying and humidifying processes are easily controlled by the electric field. In this article, we will review the current development of EOD-related technology in the world and introduce its fundamental transport theory. It was found that the dehumidifying performance is mainly affected by the applied voltage, electric current density and electro-osmotic drag coefficient.

Keyword: electrolysis 、 electro-osmosis 、 cation-exchange membrane 、 dehumidification 、 electro-osmotic drag coefficient

一、前言

根據中央氣象局氣候資料的統計(1981至2010年),台灣各地區的相對濕度年平均值高達80%左右[1],而如此潮濕的環境條件,利於黴菌及塵蟎生長而易造成物品發霉、變質,且金屬物品易發生氧化而使零件損壞,造成物品損失、維修及保養的困難。另外,人們身處於潮濕的生活環境,也易引發健康上的問題,例如關節炎、風濕症及氣喘等。為了避免上述問題或降低問題發生風險,相關研究指出環境相對濕度應控制在40-60%左右的舒適條件,因此環境溫濕度控制裝置已成為現今建築物或室內空間必備的設備,如大型建築物必備的暖通空調系統,以及家庭式的冷氣機、空氣清淨機、除濕機等。而隨著人們生活水準的提升,這些舒適環境調控設備也愈來愈普及於一般家庭。

一般而言,常見的降低空氣濕度的方式可分為下列幾種:壓縮式除濕、冷凝式除濕、固體乾燥劑(solid desiccant)吸附式除濕、除濕輪式除濕、液體乾燥劑吸收式除濕、熱電冷凝式除濕等。而目前應用最廣泛的除濕方式為冷凝除濕方式,其

工作原理與冷氣機循環系統相似，主要元件包含冷媒壓縮機、控制閥、冷凝器及蒸發器等，當潮濕空氣與吸熱作用的蒸發器接觸後，部分空氣溫度降至露點以下而使空氣中的水蒸氣凝結成水滴，除濕後的低溫低濕空氣再經由放熱作用的冷凝器加熱，使空氣溫度升至設定溫度並同時降低相對濕度，再將低濕的空氣排出。近年來，無需壓縮機設備之除濕輪式除濕逐漸受到矚目，其為一種固體乾燥劑(如矽膠)可再生之除濕方式，轉輪上之乾燥劑吸附水份後，再以加熱方式(如熱風)脫附固體乾燥劑內的水份，以保有連續式除濕的功能。最近，電滲透效應亦被應用於固體乾燥劑或吸濕材料的再生[2-5]，當吸濕膜兩端施加一電場，吸濕材料微孔洞中的電滲透效應將有助於除濕膜內水的快速脫附及排除，使得吸濕膜可持續地的吸附空氣中之水分，以達到持續性除濕的目的。

電滲透(electroosmosis, EO)現象的發現最早源自於土壤科學研究，至今約有120年的歷史，後來常見於地質科學、膠體科學及薄膜科學等研究領域。而電滲透除水技術(electroosmotic dewatering)最早是應用於土木及建築工程上，藉由電滲透效應將多孔性石材(如施工灌漿的混泥土及磚塊)中的水分去除以達快速乾燥固化的目的[6, 7]，相較於其他多孔性石材脫水乾燥技術，其具有較佳之能源效率，而常被使用於建築材料之除水上，也曾經用於廢污泥(waste sludge)的脫水[8-10]。

有別於透過水相變化進行除濕的原理，薄膜電滲透除濕(electroosmotic dehumidification, EOD)為一等溫除濕過程，其除濕元件由兩多孔性電極及一陽離子交換薄膜組成，元件結構類似於質子交換膜燃料電池，除濕機制包含了空氣中水的電解反應及薄膜內的電滲透效應。如圖 1 所示，水由陽極側送至陰極側排放，使得陽極側空間的空氣含水率降低(除濕)，而增加了陰極側的空氣含水率(加濕)，因此其除濕與加濕功能可由施加電場來控制。由於此技術之除濕元件非常輕薄且無水滴滴落問題(no-drain)，非常適合於薄型或微型除濕裝置的開發，將可應用精密電子設備、畫及藝術品等高值化物品之保存。另外，若將此除濕技術整合於空調系統，如圖 2 所示，系統中冷氣機只需負責降溫至設定溫度，無需將溫度降至露點，而以電滲透除濕取代傳統冷凝除濕的部分，因此可將顯熱(sensible heat)負載及潛熱(latent heat)負載個別分開處理，將有助於提升空調系統的整體能源效率[11]。由於薄膜電滲透除濕技術具有上述之優點，因此極具發展潛力，本文將就現今國內外電滲透除濕相關技術的發展概況進行回顧，以及介紹其基礎學理。

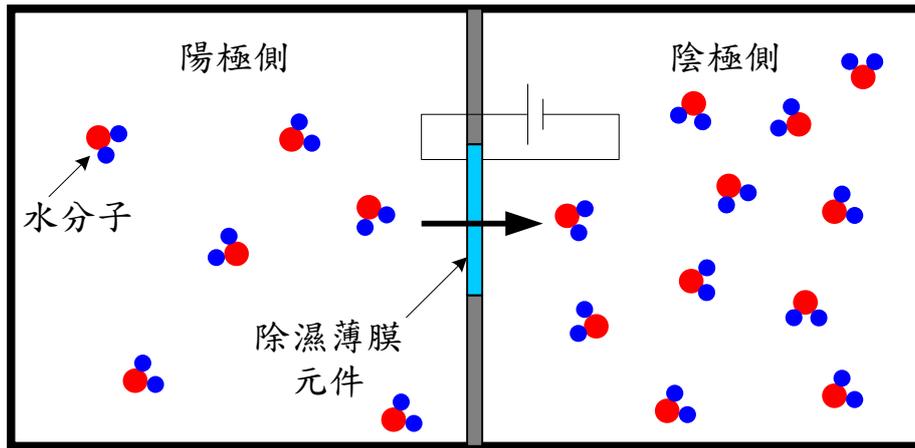


圖 1 電滲透除濕與加濕過程示意圖

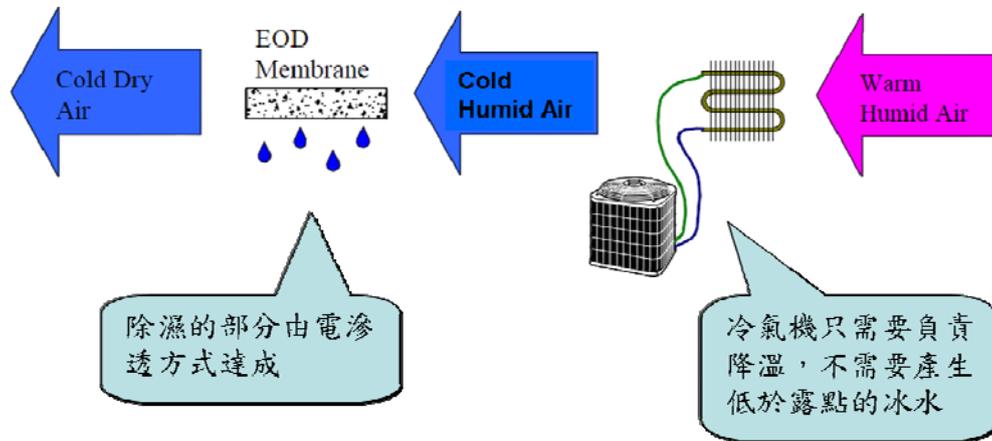


圖 2 電滲透除濕技術應用於空調系統之概念示意圖 [11]

二、薄膜電滲透除濕機制

薄膜電滲透元件主要是由一陽離子交換膜(或質子交換膜)及兩多孔性電極所組成，其除濕機制，如圖 2 所示，整體的除濕機制包含了:(1)電極上的水電解(氧化還原)反應，(2)薄膜內的電滲透效應。在薄膜之陽極側(除濕側)，空氣中之水分子(或水蒸氣)被電解成質子、氧氣及電子，為一氧化反應，反應如式(1)所示，而所產生之質子經由薄膜傳導至陰極側，並與氧氣、電子反應產生水，此為一還原反應，反應如式(2)所示，所產生之水排至陰極側之空氣中。以上的氧化還原反應過程，降低了陽極側之空氣水含量，增加了陰極側之水含量，即陽極側為除濕過程，陰極側為加濕過程。

陽極氧化反應:



陰極還原反應:

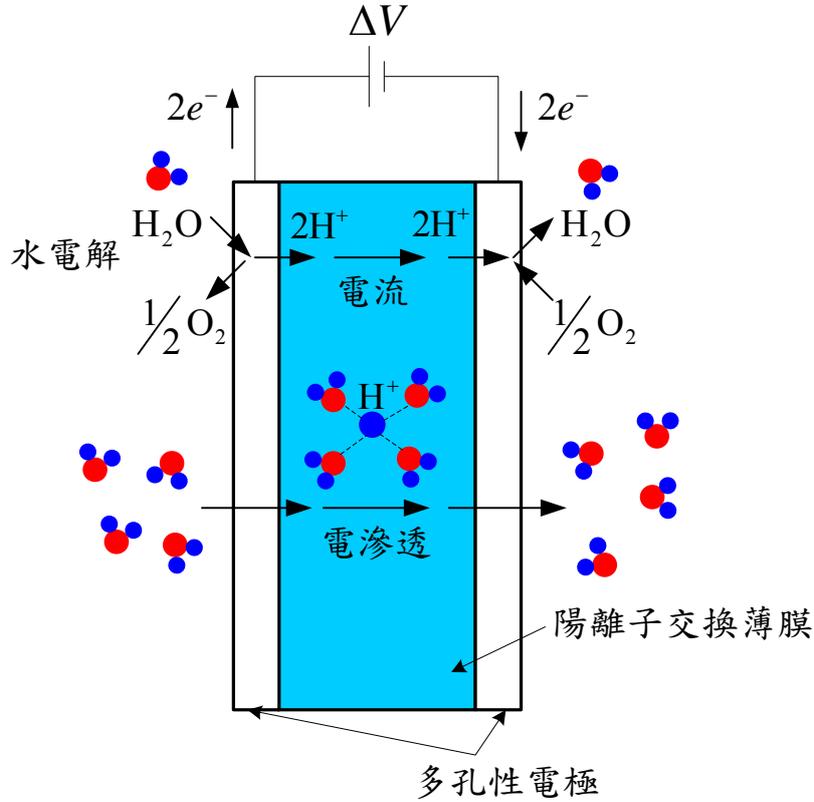


圖 3 電滲透除濕機制之示意圖

若未考慮電滲透效應，上述機制所產生之單位面積水質傳率($\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$)可表示為式(3):

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{2F} i \quad (3)$$

其中， $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 F 及 i 分別為水的分子量、法拉第常數及電流密度。

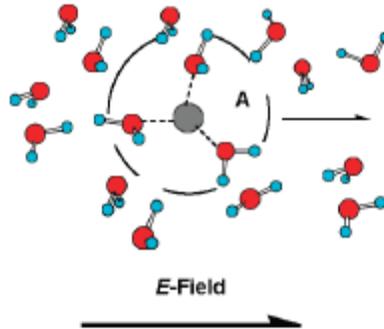
由於薄膜是一多孔性結構，奈米孔洞內勢必因毛細凝結效應及水分子擴散效應而含有水份，因此質子的移動勢必會帶動周遭的水分子運動，如圖 4 所示，稱之為電滲透效應，其帶動的水分子包含了內圍的質子水合層水分子及外圍因黏滯效應移動的水分子。同時考慮到水電解與電滲透效應，且一個質子可帶動 n_d 個水分子，單位面積水質傳率則可表示為式(4):

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{(2n_d + 1)M_{\text{H}_2\text{O}}}{2F} i \quad (4)$$

n_d 稱為電滲透拖曳係數(electroosmotic drag coefficient)。由式(4)可看出水質傳率與電滲透拖曳係數及電流密度成正比。其能源效率(energy efficiency, EE)可表示成式(5):

$$EE = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{i \times \Delta V} = \frac{(2n_d + 1)M_{H_2O}}{2F \times \Delta V} \quad (5)$$

此處 ΔV 為施加電壓，由式(5)可看出能源效率與施加電壓成反比。



圖四、質子帶動周遭水分子運動之示意圖

三、電滲透現象之基礎理論

當固體材料表面與水溶液接觸時，基材表面官能基(surface functional group)將因水合作用(hydration)而解離，使得基材表面帶有表面電荷，若表面官能基(AH)為一雙性官能基，其與水之解離反應式如下:



由以上式子，可看出氫離子可能從基材表面官能基解離釋放至水溶液中，而水溶液中之氫離子也可能與基材表面官能基互相鍵結。以廣泛被使用的矽基材料為例，其表面官能基為矽烷醇(silanol, 化學式:-SiOH)，屬於一弱酸基，其零電荷點(point of zero charge, PZC)落於 2.8 左右[12]，當水溶液 pH 值大於 2.8 時基材表面帶負電荷，而小於 2.8 時基材表面帶正電荷。知名的納菲翁(Nafion)質子交換膜之表面官能基則為較強酸之磺酸基(-SO₃H)。這些表面電荷的產生，將吸引水溶液中的異性離子(counter-ions)往基材表面附近移動，並同時排斥水溶液中同性離子(co-ions)遠離基材表面，以滿足整體電中性條件，當系統達熱力平衡狀態時，基材表面附近將形成一局部非電中性區域，如圖 5 所示，此非電中性區域主要分

為史坦層(Stern layer)與擴散層(diffuse layer)，離子於史坦層內不可移動，因此又稱為固定層(compact layer)，而擴散層中之離子將可自由移動，此兩層離子分布結構即稱為電雙層(electrical double layer, EDL)[13]。

在熱力平衡的假設下，任意空間位置之電-化學勢能梯度為零，因此擴散層內之離子電荷 $[c_i(\mathbf{r})]$ 呈現波茲曼分布(Boltzmann distribution):

$$c_i(\mathbf{r}) = c_i^\infty \exp\left[-\frac{z_i F}{RT} \psi(\mathbf{r})\right] \quad (8)$$

其中 $\psi(\mathbf{r})$ 為電雙層之電位勢分布， z_i 及 c_i^∞ 則分別為種類 i 離子的價數及種類 i 離子的莫耳濃度， R 、 T 分別為氣體常數及絕對溫度。根據靜電學之理論，電荷及電位勢分布可由波松方程式(Poisson equation)描述:

$$\nabla^2 \psi = -\frac{\rho_e}{\varepsilon_l \varepsilon_0} \quad (9)$$

其中 $\rho_e = F \sum_i z_i c_i$ 為淨電荷密度， ε_l 、 ε_0 分別為水溶液介電常數、真空中電容率。在波茲曼分布的假設下，將式(8)代入淨電荷密度的定義式，式(9)可改寫為:

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}) = -\frac{F}{\varepsilon_l \varepsilon_0} \sum_i z_i c_i^\infty \exp\left[-\frac{z_i F}{RT} \psi(\mathbf{r})\right] \quad (10)$$

式(10)稱為波松-波茲曼方程式(Poisson-Boltzmann equation)，用於描述電雙層中擴散層內離子電荷與電位勢之分布。電雙層內之電位勢變化如圖 5 所示，基材表面處之電位勢稱為表面電位(ψ_s)，而電位勢隨著遠離壁面之距離增加而下降，在史坦層與擴散層介面處之電位勢稱為介達電位(zeta potential, ζ)，因電雙層外呈現零淨電荷狀態，電位勢為零。

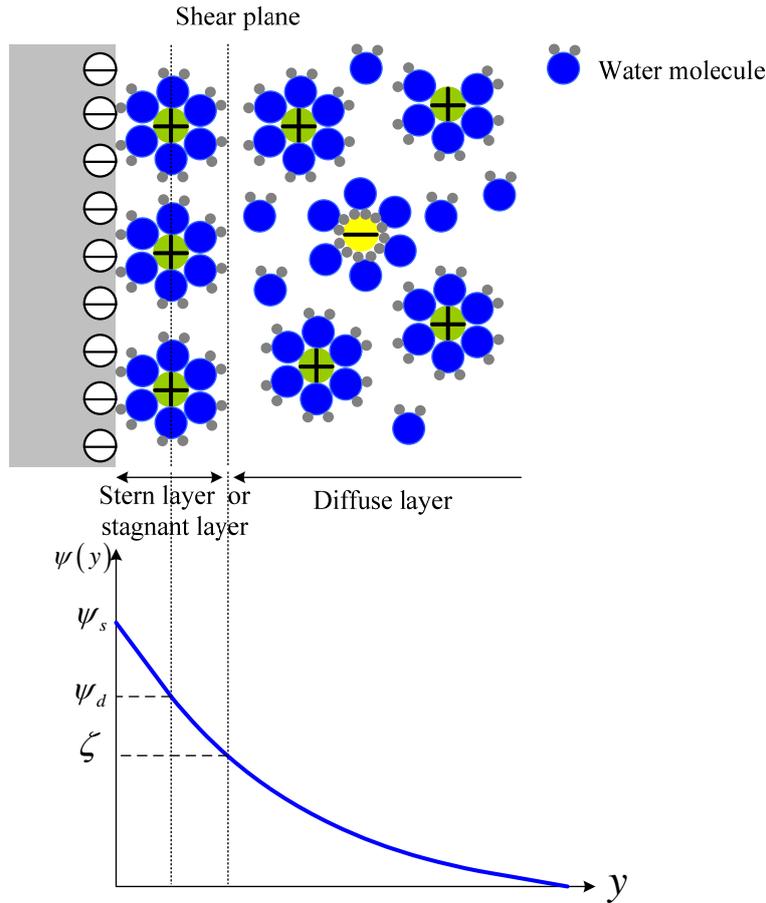


圖 5 電雙層及電位勢分布之示意圖。

當施加一電場(\mathbf{E})於帶電通道時，通道內離子電荷與電場交互作用產生庫倫力或電動力($\mathbf{F}_e = \rho_e \mathbf{E}$)，此時正電荷離子將往負極遷移，而負電荷離子往正極遷移，若通道表面帶負電，電雙層內之淨電荷量則為正值，淨電動力方向將朝向負極而驅動流體往負極流動，雖然電雙層外之淨電荷量為零，無淨電動力產生，但因液體本身的黏滯效應(黏滯力)，電雙層內之電動力可帶動電雙層外之流體運動，此流動稱之為電滲透流(electro-osmotic flow, EOF)，如圖六所示，其流場(\mathbf{u})可藉由史托克斯方程式(Stokes equation)來描述：

$$0 = \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_e \quad (11)$$

其中 η 為水溶液黏滯度，右邊第一項描述流體黏滯效應，第二項則是描述電動效應。在一直線型通道，施加一電場強度(E)，壁面非滑移條件下之電滲透流速度分布可由式(11)推導如下：

$$u_{eo}(r) = -\frac{\epsilon_l \epsilon_0 \zeta E}{\eta} \left[1 - \frac{\psi(r)}{\zeta} \right] \quad (12)$$

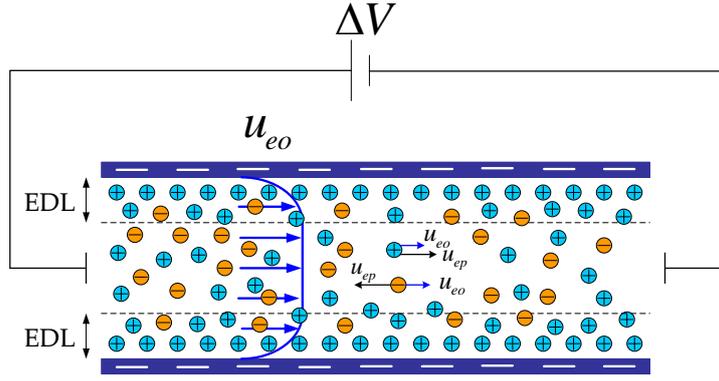
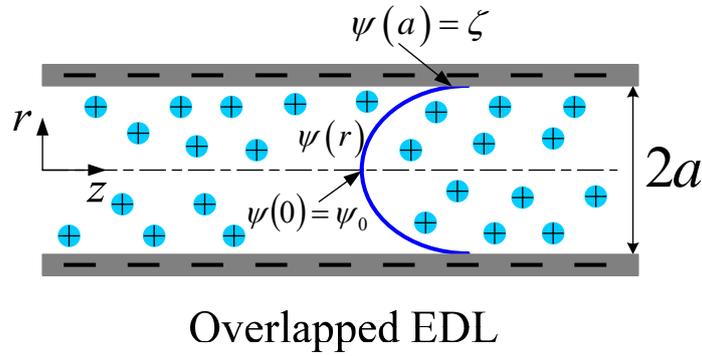


圖 6 電滲透流速度分布於直線型通道之示意圖



Overlapped EDL

圖 7 電雙層重疊下之離子選擇性奈米孔洞示意圖

一般來說，薄膜是由眾多奈米孔洞(nanopore)所組成，若在薄膜兩側皆充滿水溶液的假設條件下，我們將藉由上述電滲透理論估算出電滲透帶動薄膜內水流動之質傳量。當孔洞尺寸小至數十奈米，孔洞內將呈現單一離子狀態，如圖 7 所示，其電位勢及離子分布可由下式描述之：

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\psi}{dr} \right) = -\frac{\kappa^2}{2} \frac{RT}{zF} \exp\left(-\frac{zF\psi}{RT}\right) \quad (13)$$

其相對應邊界條件如下：

$$\left. \frac{d\psi}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad \psi(r=0) = \psi_0, \quad \left. \frac{d\psi}{dr} \right|_{r=a} = \frac{\sigma}{\epsilon_l \epsilon_0} \quad (14)$$

σ 為表面電荷密度。由式(13)及式(14)，我們可得奈米孔洞內電位勢分布之解析解：

$$\psi(r) = \psi_0 + \frac{RT}{zF} \ln \left(1 - \frac{\kappa^2 e^{-zF\psi_0/RT}}{16} r^2 \right)^2 \quad (15)$$

將式(15)代入式(12)即可得到奈米尺度孔洞電滲透流速度分布，而單一奈米孔洞之電滲透流量($Q_{eo} = 2\pi \int_0^a u_{eo}(r) r dr$)可表示成：

$$Q_{eo} = \frac{2\pi a^2}{\eta l} \left(\frac{\varepsilon_l \varepsilon_0 RT}{zF} \right) \left[\left(1 + \frac{2\lambda_{GC}}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{a}{2\lambda_{GC}} \right) - 1 \right] (\Delta V) \quad (16)$$

此處 $\lambda_{GC} = 2\varepsilon_l \varepsilon_0 RT / zF |\sigma|$ 。當 $a/\lambda_{GC} \ll 1$ 時，單一奈米孔洞之水質傳率 ($\dot{m}_{H_2O} = \rho_{H_2O} Q_{eo} / A_p$ ， ρ_{H_2O} 為水密度， A_p 為孔洞截面積)可表示成：

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\rho_{H_2O}}{4\eta} \times a |\sigma| \times \frac{\Delta V}{l} \quad (17)$$

假設有一具多孔性奈米孔洞的薄膜，其截面積為 A_m ，薄膜厚度為 l_m ，孔隙率 (porosity) 為 φ ，扭曲率 (tortuosity) 為 $\tau = l_p / l_m$ ，在薄膜兩側皆有水溶液的假設下，薄膜內電滲透效應所帶動的水質傳量 ($\dot{m}_{H_2O} = \varphi \rho_w Q_{eo} / \tau A_m$) 可由下式估算：

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\varphi}{\tau} \frac{2\pi a^2 \rho_{H_2O}}{\eta l_m} \left(\frac{\varepsilon_l \varepsilon_0 RT}{zF} \right) \left[\left(1 + \frac{2\lambda_{GC}}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{a}{2\lambda_{GC}} \right) - 1 \right] (\Delta V) \quad (18)$$

四、電滲透除濕技術發展概況

目前國外發展電滲透除濕相關技術的研究機構有中國科學院、美國 ARTI (Air-conditioning and Refrigeration Technology Institute) 及日本三菱電機公司等。

中國科學院 Qi 等人[4]採用沸石粉 (zeolite powder) 製作除濕膜 (截面積 100 cm²，厚度 1.5 cm)，其除濕實驗量測裝置設計如圖 8 所示，以加濕器控制腔室內相對濕度於 95%，

並以電子秤重方式估算電滲透除濕速度。其先將除濕膜靜置於相對濕度 95% 的腔室 15 小時，再施加一電場強度 17 V/cm，由結果可知除濕過程可區分為三個區段，Phase 2 除濕最為穩定，Phase 3 則因電極氧化腐蝕而使得除濕速度減緩，電流強度低於 2 毫安培。平均除濕速度約為 0.67 kg/m²hr，除濕能源效率約為 2.4 kg/kWh。為了避免電極腐蝕問題，Qi 等人[5]改採用間歇性 (ON/OFF) 電場進行除濕，在電場強度 11 V/cm 及 ON/OFF 時間 30s:0.8s 的條件下，除濕能源效率可被提升至 3.6 kg/kWh。

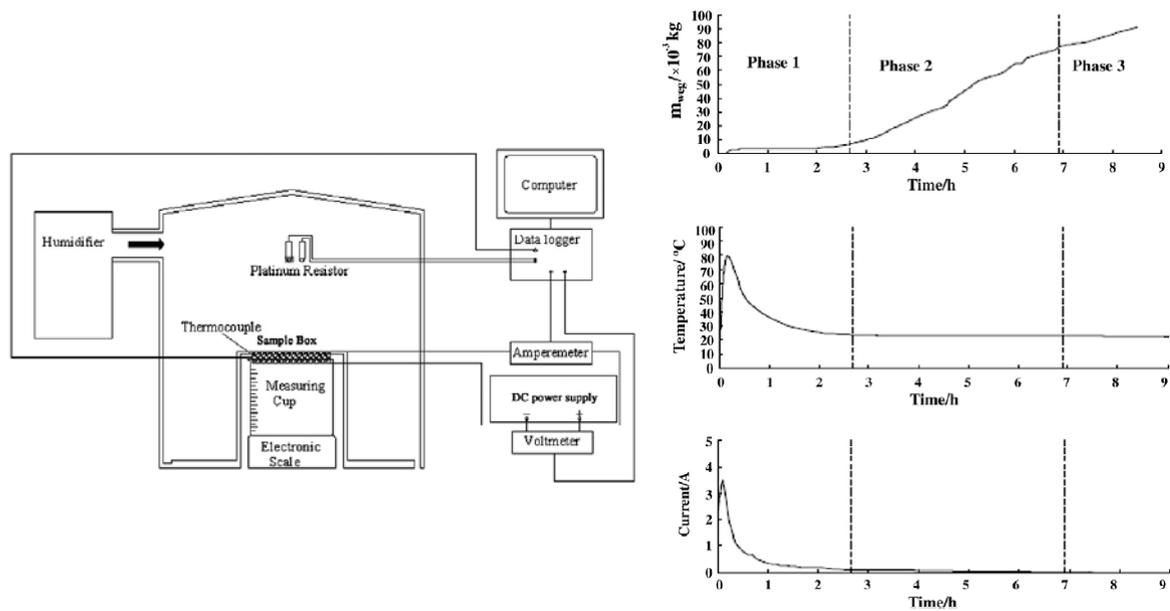


圖 8 中國科學院之實驗裝置設計與量測結果[4]

美國 ARTI 的 Gerlach[11]採用杜邦公司所製造的 Nafion 117 作為電滲透除濕膜(10cm x10cm)，其實驗裝置設計如圖 9 所示，其以飽和氯化鈉溶液控制腔室內的相對濕度於 75%左右，並分別以電流強度 2、3、5 及 10 安培進行電滲透除濕，圖九則為施加電流 3 安培(電流密度 30 mA/cm²)下之腔室內濕度變化情形，可看出當通電後，裝有飽和氯化鈉溶液腔室的濕度明顯上升，而另一腔室的濕度則下降，其除濕能源效率可高達 3.2 kg/kWh，但其除濕速度非常差，僅 0.0001 kg/m²hr。

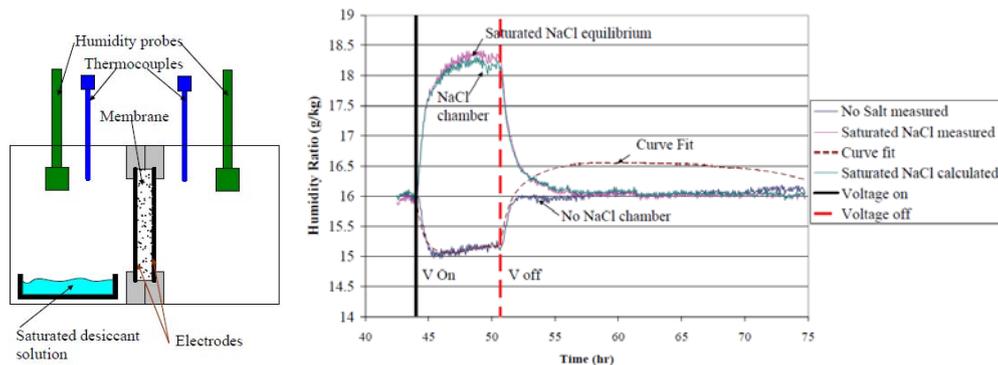


圖 9 美國 ARTI 之實驗裝置設計與濕度變化[11]

Onda 等人[15]採用質子燃料電池所使用之膜電極組(Nafion 117)作為除濕膜(10 cm²)，陽極觸媒為 Pt-Ir，陰極觸媒為 Pt，陽極電極材料為多孔性鈦纖維板，陰極電極材料為多孔性不鏽鋼纖維板，除濕實驗裝置如圖 10 所示，其探討了空氣流量及陰極氣體種類對除濕的影響。由結果估算當此除濕裝置應用於空調系統時，其 COP 值約為 0.1 及 0.21，遠小於目前已商品化空調系統的 5~7，若此除濕

技術若要達到此水準，電滲透拖曳係數 n_d 必需達到 5。

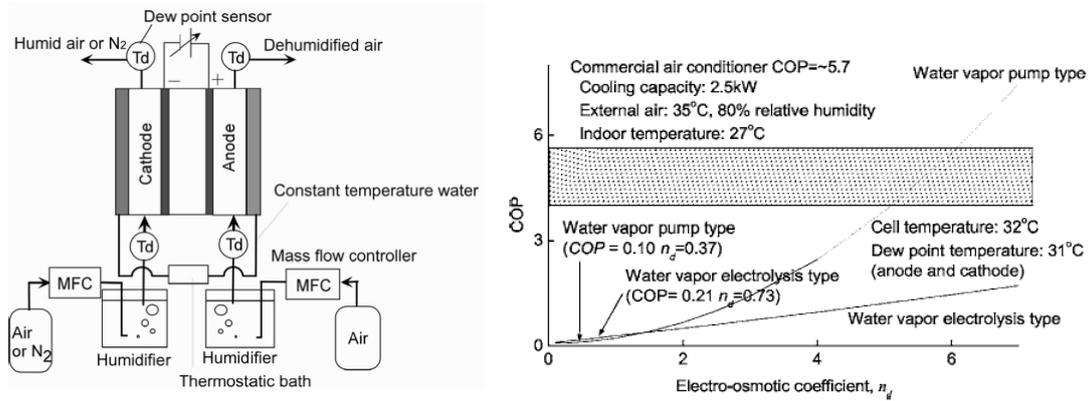


圖 10 Onda 等人之除濕實驗裝置及其應用於空調系統之 COP 分析[15]

日本三菱電機公司的 Yamauchi 及名古屋大學的 Sakuma 研究團隊[16-18]同樣採用杜邦公司所製造的 Nafion 117 作為除濕膜，陰陽極所使用的觸媒皆為 Pt，電極為多孔性的金屬網，除濕實驗量測設計及結果如圖 11 所示。其針對了室內空間中的 51 公升的密閉腔室進行除濕測試，在溫度 30°C 及相對濕度 60% 的條件下，100 分鐘內密閉腔室的相對濕度可快速地降至 10% 以下，200 分鐘可降至極度乾燥的條件 (~2%)。而相對濕度 60% 降至 50% 的平均除濕速度約為 0.14 kg/m²hr，平均電流密度約為 36 mA/cm²，能源效率約為 0.13 kg/kWh 左右。表一彙整了上述各研究團隊所發展的電滲透除濕相關技術之技術指標值。

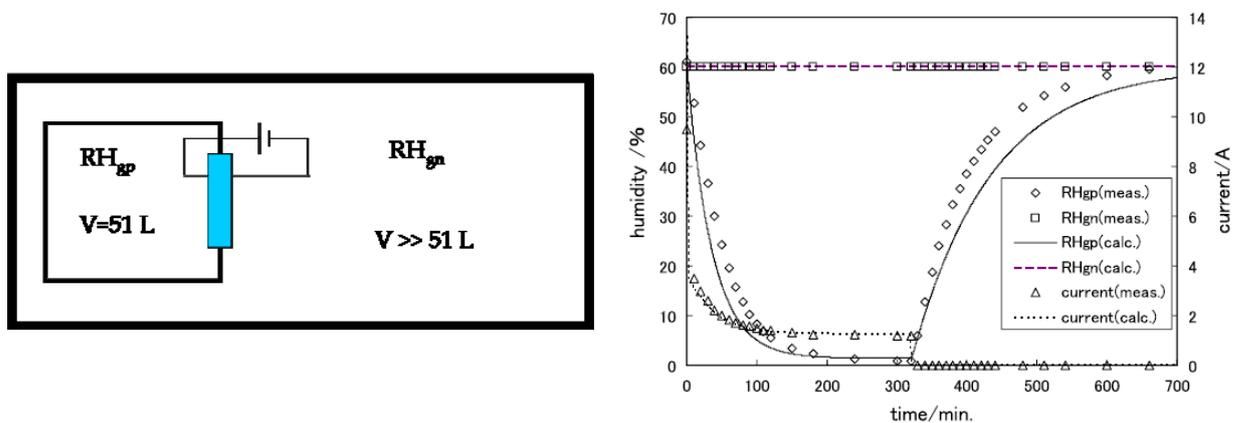


圖 11 日本三菱電機公司之除濕實驗量測系統及其除濕過程之濕度、電流變化[16]

表一、目前電滲透除濕技術之發展技術指標

	中國科學院 [4]	美國 ARTI [11]	日本三菱電機 [16]
薄膜材料	沸石	Nafion 117	Nafion 117 + Pt 觸媒
溫度/相對濕度	27°C/95%	27°C/75%	30°C/60%
電壓/電流密度	25V / 0.02mA/cm ²	30 mA/cm ²	3V / 36 mA/cm ²
除濕速度 (kg/m ² hr)	0.67	0.0001	0.14
能源效率 (kg/kWh)	2.4	3.2	0.13

五、結果與討論

在除濕技術上，我們關心的技術關鍵指標有(1)除濕速度及(2)除濕能源效率。在未考慮到水分子背向擴散效應(back diffusion)的假設下，由式(4)可看出除濕速度將隨著電流密度與電滲透拖曳係數增加而提升，如圖 11 所示，當電流密度過小時，即使電滲透拖曳係數 n_d 高達 10，電滲透除濕速度仍非常緩慢，因此在合理的 n_d 值範圍內(例如 Nafion 質子交換膜在飽和水蒸氣下，電滲透拖曳係數 n_d 約為 0.9~2.5[19])，電滲透除濕速度若要達到 0.1 kg/m²hr 以上的水準，電流密度需達到 5 mA/cm² 以上，若再考慮到水分子背向擴散效應，則所需電流密度值將更大，例如日本三菱電機公司(如表一)的薄膜電流密度高達 36 mA/cm²，除濕速度達 0.14 kg/m²hr。要求除濕速度達到 0.1 kg/m²hr 以上，主要是為了避免除濕設備體積過於龐大，而不具實用性。由圖 11，我們亦可看出若單純藉由水電解作用進行除濕，即 n_d 為零，除濕速度將難以達到 0.1 kg/m²hr 以上的水準，因此必須再加上電滲透效應的助益。

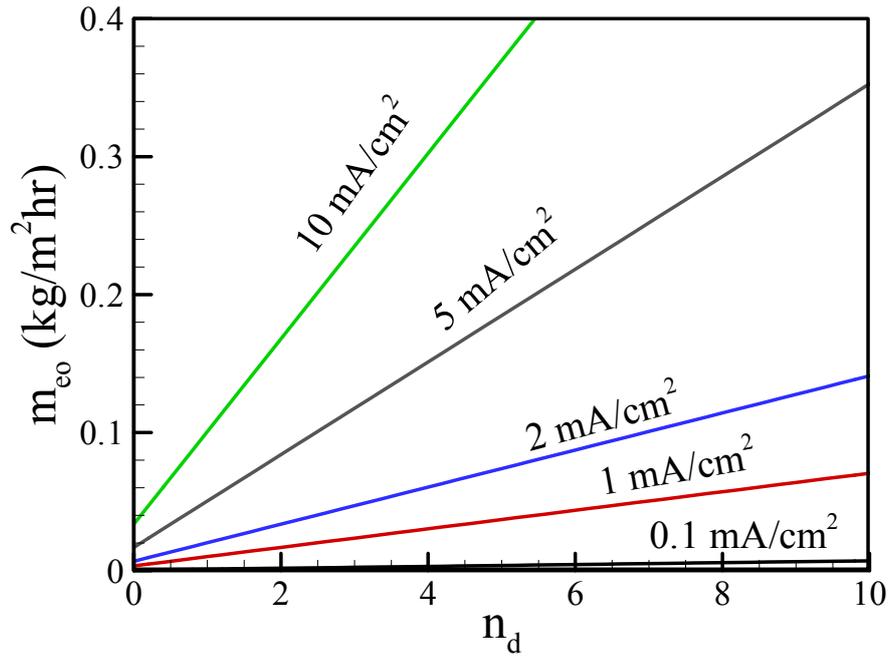


圖 11 電滲透除濕速度與電流密度(i)、電滲透拖曳係數(n_d)之關係

圖 12 為式(5)所估算的理論除濕能源效率，可看出能源效率隨施加電壓增加而下降，隨電滲透拖曳係數增加而上升。水電解之理論氧化還原電位約為 1.23 V，實際水電解反應之焓值約為 286 kJ/mol，由吉柏斯自由能(Gibbs free energy)理論估算($G = -nF\Delta V$)，未添加觸媒下水電解反應之電壓約為 1.48 V。在未考慮電滲透效應下(即 $n_d = 0$)，水電解除濕能源效率約為 0.227 kg/kWh，如圖 12 所示，若能添加觸媒有效降低水電解反應之電壓，將有助於提升除濕效率。在合理的 n_d 值範圍內，若要達到目前冷凝除濕能源效率的 1~2 kg/kWh，施加電壓必須小於 3 V。綜觀圖 11 及 12，若要達到高除濕速度及能源效率，除濕薄膜組需同時具備低電壓、高電流密度及高電滲透拖曳係數的特性。

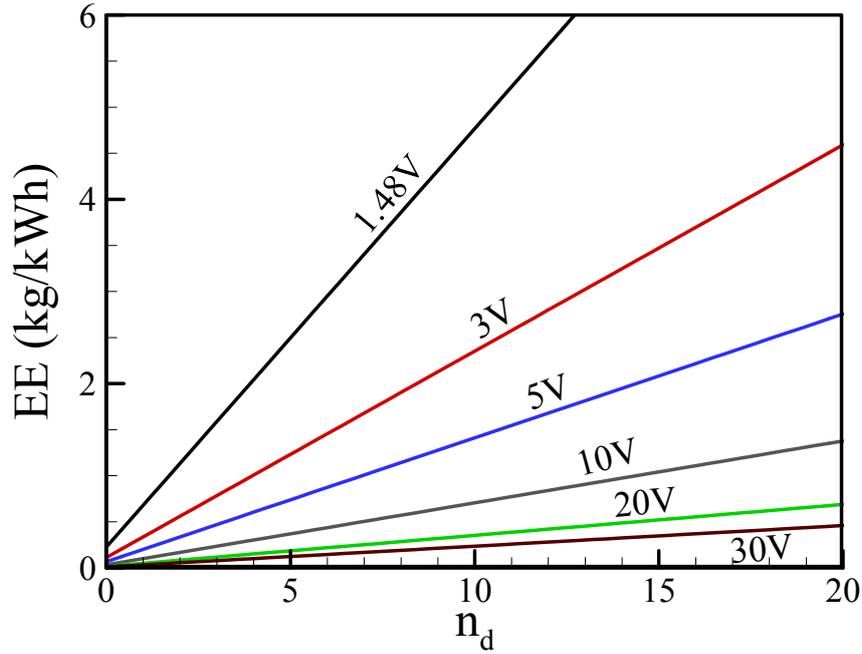


圖 12 除濕能源效率與電壓(ΔV)、電滲透拖曳係數(n_d)之關係

若在薄膜兩側皆為水溶液的假設下，以古典電滲透理論式(18)來估算陽離子(質子)交換薄膜的水質傳率，當施加電壓為 3V、孔隙率為 0.5、扭曲率為 2 及膜厚為 500 μm 時，其計算結果如圖 13 所示，而其對應之能源效率如圖 14 所示。由計算結果可看出電滲透的水質傳率隨孔徑(d)及表面電荷密度變小而遞減，當表面電荷密度過小($< 0.1 \text{ mC/m}^2$)及孔徑過小($< 2 \text{ nm}$)時，水質傳率將難以達到 $0.1 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ 。由圖 14 可知表面電荷密度對能源效率的影響並不顯著，主要影響因子為孔徑尺寸大小。當電荷密度與孔徑的乘積小時，電滲透的水質傳率可由式(17)來描述，而其能源效率可表示為：

$$EE = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} d^2}{32\eta m_{\text{H}^+} \Delta V} \quad (19)$$

其中， m_{H^+} 為質子的遷移率。由式(19)可發現能源效率主要與孔徑尺寸、施加電壓有關，此與圖 12 之結果類似，我們推論孔徑大小是影響電滲透拖曳係數的因素之一，將式(19)與式(5)中的電滲透部分互相類比，我們可得電滲透拖曳係數與孔徑之關係如下：

$$n_d = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} F}{32M_{\text{H}_2\text{O}} \eta m_{\text{H}^+}} \times d^2 \quad (20)$$

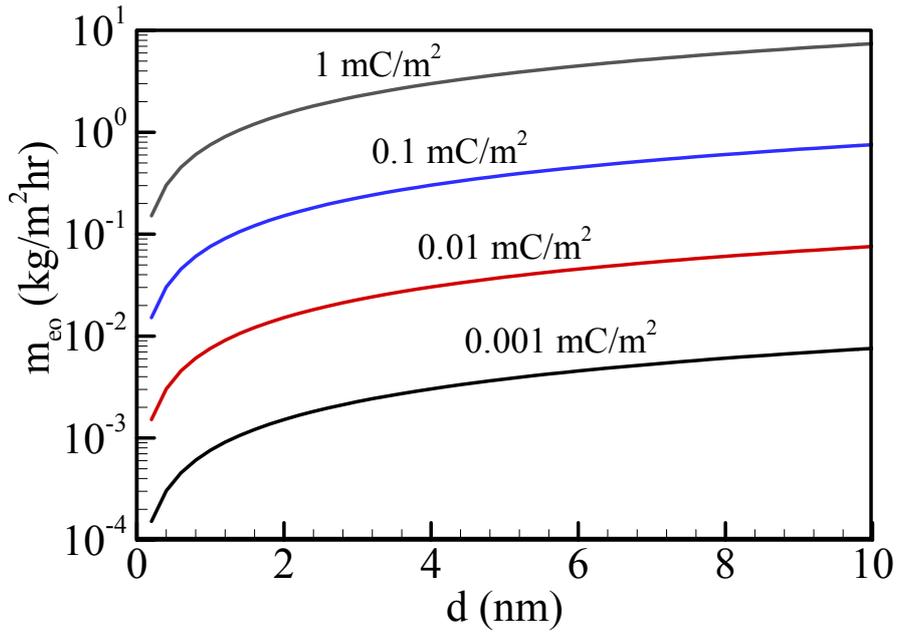


圖 13 電滲透水質傳率與薄膜表面電荷密度、孔洞孔徑之關係

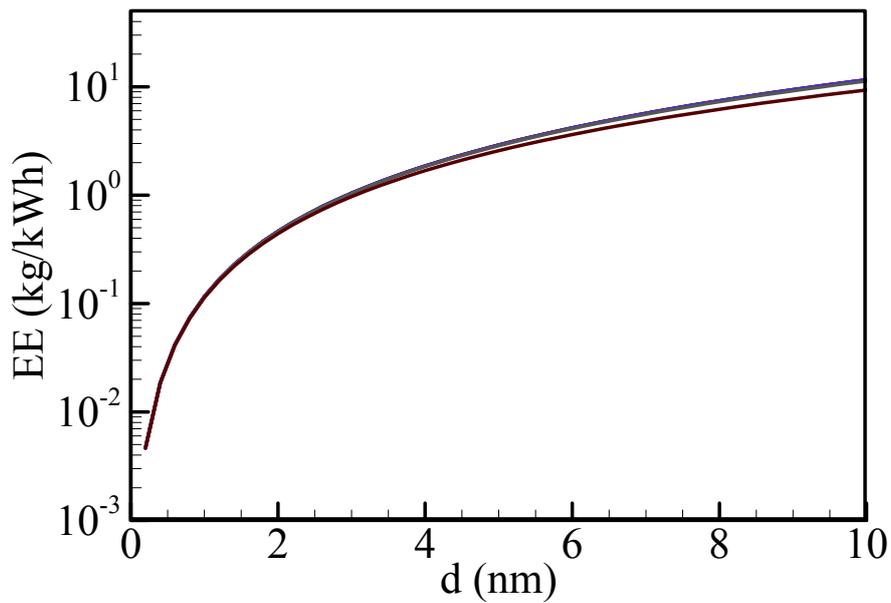


圖 14 電滲透能源效率與薄膜表面電荷密度、孔洞孔徑之關係

由式(20)及圖 15 可看出電滲透拖曳係數隨著孔洞縮小而顯著遞減，當孔徑小至 2 nm 時(約為 Nafion 孔洞尺寸)，電滲透拖曳係數 n_d 約為 2 左右，此與 Nafion 文獻的量測值相當。若要提升能源效率至 2 kg/kWh 以上，電滲透拖曳係數需大於 10，孔洞尺寸勢必要增大至 5 nm 以上。

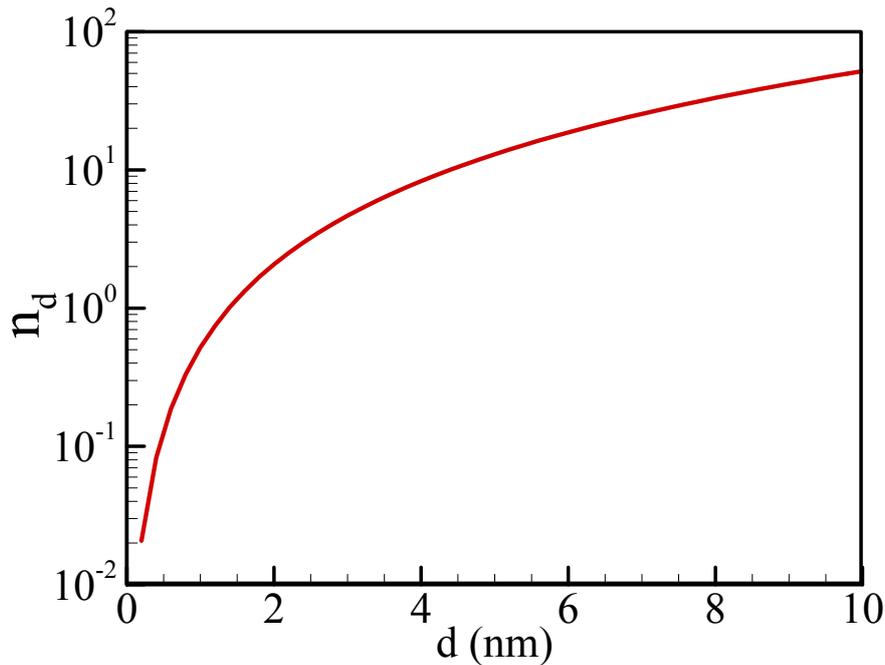


圖 15 電滲透拖曳係數與孔洞孔徑之關係

六、結論

電滲透除濕技術利用了(1)電極電解水及(2)薄膜內電滲透作用進行等溫除濕，其組成元件與質子交換膜燃料電池類似，非常輕薄，除濕過程中無水滴的產生。此除濕技術的關鍵包含了(1)電極材料、(2)金屬觸媒材料及(3)陽離子交換薄膜材料的開發。由以上結果的分析，我們可知影響除濕效能的關鍵技術指標包含(1)施加電壓、(2)薄膜電流密度及(3)薄膜電滲透拖曳係數，添加金屬觸媒材料可降低水電解所需的工作電壓，而為了擁有高電流密度則必須開發出質子傳導性佳薄膜材料，另外，推測電滲透拖曳係數除了受到薄膜含水率的影響，亦受到薄膜孔洞尺寸的影響，因此為了擁有高電滲透拖曳係數，孔徑不能過小，若能源效率要與冷凝除濕技術可相比擬，電滲透拖曳係數需高達 5 以上的水準，孔徑則需大於 3 nm。總而言之，未來若能開發出低工作電壓、高電流密度及高電滲透拖曳係數的除濕薄膜組，薄膜電滲透除濕技術將成為節能除濕技術之一。

七、參考文獻

1. http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyMean/Taiwan_rh.htm
2. Li B, Yan YY. Solid Desiccant Dehumidification Inspired from Natural Electroosmosis Phenomena. *Journal of Bionic Engineering* 2011;8:90-97.
3. Li B, Lin QY, Yan YY. Development of Solid Desiccant Dehumidification using

- Electro-osmosis Regeneration Method for HVAC Application, Building and Environment. 2012;48:128-134.
4. Qi R, Tian C, Shao S. Experimental Investigation on Possibility of Electro-osmotic Regeneration for Solid Desiccant. Applied Energy 2010;87:2266-2272.
 5. Qi R, Tian C, Shao S, Tang M, Lu L. Experimental Investigation on Performance Improvement of Electro-osmotic Regeneration for Solid Desiccant. Applied Energy 2011;88:2816-2823.
 6. Bertolini L, Coppola L, Gastaldi M, Redaelli E. Electroosmotic Transport in Porous Construction Materials and Dehumidification of Masonry, Construction and Building Materials. 2009;23:254-263.
 7. Shang JQ, Lo KY. Electrokinetic Dewatering of Phosphate Clay. Journal of Hazard Material 1997;55:117-133.
 8. Gingerich I, Neufeld RD, Thomas TA. Electroosmotically Enhanced Sludge Pressure Filtration. Water Environmental Research 1999;71:267-276.
 9. Raats MHM, Van Diemen AJG, Lavèn J, Stein HN. Full Scale Electrokinetic Dewatering of Waste Sludge, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2002;210:231-241.
 10. Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, Hoadley AFA. Electrical Field: A Historical Review of Its Application and Contributions in Wastewater Sludge Dewatering. Water Research 2010;44:2381-2407.
 11. Gerlach DW. Electro-osmosis for Dehumidification. ARTI Report, pp. 10090-10092, 2008.
 12. Behrens SH, Grier DG. The Charge of Glass and Silica Surfaces, Journal of Chemical Physics. 2001;115:6716-6721.
 13. Hunter RJ. Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications. Academic Press 1981.
 14. Probstein RF. Physicochemical Hydrodynamics: An Introduction, John Wiley & Sons, 1994.
 15. Onda K, Kyakuno T, Hattori K, Ikeda T, Araki T. Polymer Electrolyte Dehumidifying Cell and Its Application to Air Conditioners. Journal of Electrochemical Society 2005; 152:2369-2375.
 16. Sakuma S, Yamauchi S, Takai O. Water Transfer Simulation of An Electrolytic Dehumidifier. Journal of Applied Electrochemistry 2009;39:815-825.
 17. Sakuma S, Yamauchi S, Takai O. Estimation of Dehumidifying Performance of Solid Polymer Electrolytic Dehumidifier for Practical Application. Journal of

- Applied Electrochemistry 2010;40:2153-2160.
18. Sakuma S, Yamauchi S, Takai O. V-I Characteristics of Solid Polymer Electrolytic (SPE) Dehumidifier. *Journal of Applied Electrochemistry* 2010;40:2153-2160.
 19. Zawodzinski TA, Davey J, Valerio J, Gottesfeld S. The Water Content Dependence of Electro-osmotic Drag in Proton-conducting Polymer Electrolytes. *Electrochimica Acta* 1995;40:297-302.

添加廢棄蚶殼對於焚香燃煙中空氣毒性物質之特性分析

Development of less-polluting incense: addition of Oyster and Asiatic clam shells in incense preparation

柯子星¹、楊奇儒²

Tzu-Hsing Ko Chi-Ru Yang

慈惠醫護管理專科學校觀光科暨通識教育中心

Department of Tourism Affairs and Center for General Education, Tzu Hui Institute of Technology

嘉南藥理科技大學環境工程與科學系

Department of Environmental Engineering and Science, Chia Nan University of Pharmacy and Science

摘要

本研究為主動改善拜香中所添加之成分，選取國人最常用之新山香及老山香粉，利用機械油壓製香機以半手工方式製香，於拜香香粉中添加 1-30%之廢棄蚶殼，並分別比較不同添加量之拜香燃煙空氣汙染物特徵。研究結果顯示添加 30% 廢棄蚶殼 (Oyster shell) 之拜香，將使拜香燃煙中之懸浮微粒、多環芳香烴化合物(PAHs)及總毒性當量(Total-BaP_{eq})排放係數等分別降低達 35%、21%及 37%。可見利用廢棄蚶殼(主要成分為碳酸鈣)熱容較高溫度改變較慢，及在燃燒後累積在香頭上的隔熱效果，可增加物質之燃燒效率，並減少空氣汙染物之排放。本研究成果將可作為研發製造低汙染拜香之重要參考依據，有效減低民眾燃燒拜香時所造成之健康危害。此外並達到廢棄蚶殼回收資源化效用，對於環境衛生及廢棄物資源化等環保議題具有深遠正面的意義。

關鍵詞：拜香、廢棄蚶殼、懸浮微粒、多環芳香烴化合物、總毒性當量

Abstract

Particulate matter (PM) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emissions of burning incense have been investigated on the quality of surrounding air. However, the reduction of PM and PAHs from burning incense has received little attention. In the present study, two types of incense were made in the laboratory. Five to thirty percent of Oyster (OS) and Asiatic Clam Shells (ACS) was added to Sin-shan, Lao-shan, Liao and Chen wood flours, which are popular incense materials.

¹ 慈惠醫護管理專科學校觀光科暨通識教育中心，副教授，E-mail: hsingko@gmail.com

² 嘉南藥理科技大學環境工程與科學系，副教授

Experimental results indicate that the reduction of emissions of PM and PAHs from burning incense increased with increasing amount of OS and ACS additive. Mean PM reductions for 30.0% of OS and ACS were 35% and 34%, respectively. Mean PAH reductions were 21% and 20% for particle-phase PAHs, respectively, and 37% and 21% for benzo[a]pyrene equivalent concentration, respectively. These results may be attributed to OS and ACS acted as filler in the burning incense. OS and ACS was substituted for organic material in the incense reducing PM and PAHs emissions from the smolder. The findings of this study may serve as a guide to producing safer and less-polluting incense.

Keyword : Incense 、 Oyster Shell 、 Asiatic Clam Shell 、 PM 、 PAHs 、 benzo[a]pyrene equivalent concentration

一、前言

根據衛生署2010年國人死亡原因統計資料顯示，罹患惡性腫瘤導致死亡者仍高居台灣十大死亡原因之首位占死亡總人數27%，其中罹患肺癌者佔惡性腫瘤之20%，而與呼吸道疾病有關之鼻咽癌亦佔1.9%。在過去相關文獻得知室內環境中吸煙及燃燒拜香均為空氣中懸浮微粒之重要來源 (Brauer et al., 2000)。在東方國家拜香燃煙為主要室內空氣污染來源之一 (Kao and Lung, 2000)，燃燒拜香時所產生之煙霧當中含有懸浮微粒與多環芳香烴化合物 (PAHs)、芳香醛 (aromatic aldehydes) 以及脂肪族醛 (aliphatic aldehydes) (Mimi, 1990) 及 (Chen, 1987)，等人認為中國人鼻咽癌之得患率較高，燒香可能為致病因子之一。

由於室內空氣污染問題日趨受到重視，而燃拜香燃煙亦是台灣多數國人時常接觸的重要室內空氣污染物，在因風俗拜香的風俗仍相當盛行而難以有效管制的當今，有關於燃燒拜香所產生空氣污染物之防治工作及研究均顯得相當急迫且重要。而截至目前為止，有關拜香燃煙之研究多為針對既有拜香之燃燒特徵進行量測，或對於拜香燃煙進行後續處理的防治方法研究。

拜香之製造原料以竹材為拜香之骨幹，主要成分為天然木材粉末，在燃燒時由於燃燒不完全而導致會產生致突變之化合物。而木炭相對於木材原料中含有更高量之鹼金屬、鹼土金屬及其氧化物等燃燒之強化劑，並且有大比表面效應、高反應參與性和高發熱量等方面性質。此外，拜香燃燒方式為由上而下之熱傳導模式，燃燒特性較為特殊，尤其是摻配不同比例之添加物，其組成特性有較大差異時，可能導致成香不易、著火困難、燃燒不穩定、燃燒損失急劇增加，甚至有污染物排放量增加等問題，故藉由拜香、炭材交叉摻配，以了解拜香燃燒行為，尋

求拜香最佳燃燒效率、空氣污染物最低排放量。有鑑於此，本研究使用自組氣固相採樣模組模擬拜香燃燒試驗，並再增加熱分析試驗項目，根據不同拜香摻配不同炭材種類之變化，探討摻配炭材拜香比對原始拜香燃燒特性之影響，同時對提昇拜香燃燒效率及降低空氣污染物排放特性之可能因素進行探討。

台灣每年所產生的蚵殼數量相當龐大，若以在漁業署99年報中顯示牡蠣產量約為1萬公噸（漁業署年報，2010），殼肉比為7.5：1計算每年產生廢棄蚵殼重量高達7萬公噸以上，由於其附加價值並不高，且多半未經處理任意丟棄，影響環境的衛生，造成嚴重的環保問題，雖然有些業者將廢棄蚵殼經過加工再處理而利用，但對於廢棄蚵殼消耗量仍微乎其微，此基於環境保護與資源回收的概念，將廢棄牡蠣殼再利用，創造其應用價值，不但可解決環境衛生問題，還可替養殖戶增加額外收入。

本研究團隊在之前的研究中指出碳酸鈣及氧化鈣均具有高熱容與高熔點等性質，希望將廢棄漁產貝殼類經過適當處理後，期能有效地做為添加於拜香原料中使用，以達到廢棄漁產貝殼類回收資源化效用，對於環境衛生及廢棄物資源化等環保議題具有深遠正面的意義。

本研究探討在拜香製程中添加含廢棄蚵殼之香粉粉末，應用於直接在拜香製程中添加不同質量漁產貝殼類之可行性，作為此污染防治方式是否能推廣而讓燃香民眾接受之參考依據。

二、研究方法

研究架構與規劃

本研究利用機械由壓製香機以半手工方式製香，首先於製香前預處理拜香竹枝，秤重選取重量為 0.55 g，使用前置於恆溫箱調理濕度；接著把新山香粉及老山香粉及黏粉使用 50 號的篩網過篩。參考拜香製造流程進行拜香製作，添加方式將於粉狀蚵殼初步以混合後佔拜香粉重量之 5%、10%、20%及 30%，作為拜香製造過程中之拜香粉末而將漁產貝殼類添加於拜香上。拜香製造完成後均以 35°C 烘乾 1 小時後，置於溼度為 50% 之乾燥箱中使溼度與溫度平衡 8 小時以上備用，採樣前將拜香從乾燥箱中取出，並於具有空調裝置之恆溼室中稱重。拜香成品調理後挑選每支香重約在 1.00 公克，以盡量控制因拜香之物理特徵所產生之誤差。表 1 為不同添加量之廢棄蚵殼、拜香香粉（包含木粉及黏粉）及竹支之重量。

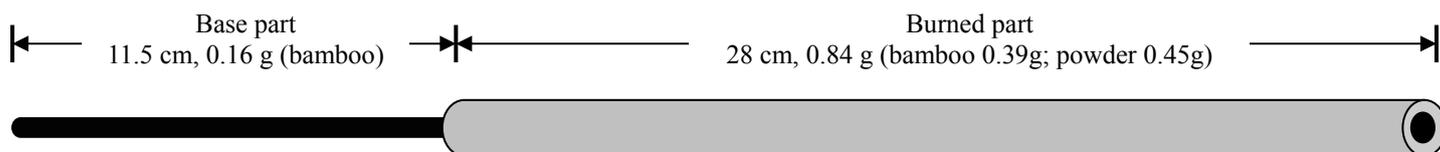


圖 1 為單一支拜香示意圖。

採樣

依循國人使用拜香之習慣，本研究實驗採樣一次點燃三根拜香，置於自行裝設的採樣器內，濾紙固定器部分為 PS-1 採樣器之固相模組(Dual Chamber Sampling Module)，後段加裝採樣幫浦抽氣，濾紙固定器裝設在玻璃管柱上方，玻璃管柱高度 50cm，內徑 10cm，外徑 11cm，拜香於管柱內燃燒，採樣器置放在鐵置固定架上將其騰空並以 30 L/min 之抽氣速度進行採樣。

萃取/淨化/濃縮

PAHs 為低極性化合物，易溶於弱極性或非極性有機溶劑中如：有機溶劑二氯甲烷、正己烷中。將鋁濾紙分別放入 80 mL 混合液(50 % 二氯甲烷+ 50 %正己烷)中進行超音波震盪萃取，萃取時間為兩小時，萃取時盡可能保持低水溫，由於半揮發性化合物有光解的特性，故應避免光線之照射。經萃取後之萃取液仍含有許多非 PAHs 之雜質，為減少這些雜質對 GC/MS 分析時之影響樣品需進一步層析分離樣品。故本實驗採用之淨化方法為管柱分離法，管柱內填充矽膠(Silica Gel)及無水硫酸鈉(Na_2SO_4) 淨化之後的萃取液再以真空旋轉濃縮機濃縮到約 10 mL，再以低流速氮氣吹拂定量濃縮到 1 mL。最後裝於褐色玻璃之密封 GC 小瓶內，存放於 -4°C 之冰箱中，避免光照並盡快以 GC/MS 作化學定性定量分析。

化學分析定性定量

為定性定量 16 種氣/固相 PAHs，本計畫使用之分析儀器之氣相層析質譜儀為 HP-5890/5972。氣相層析儀質譜儀內配置之管柱為 HP Ultra 2。GC/MS 所使用之攜帶氣體為氦氣(Helium, He)，流量為 1.1 mL/min，線性流速為 29.8 cm/sec。樣本注射口之溫度設定為 300°C ，而離子源(ion source)之溫度設定為 310°C 。

三、結果與討論

拜香原料與蚵殼之組成-元素分析(碳、氫、氧、氮)

表 1 顯示竹支、兩種拜香原料、黏粉、蚵殼及 CaCO_3 之成分分析結果。竹支的成分分別為碳 47.1%、氫 6.6%、氮 0.2%、氧 43.8%，而二種拜香（新山香與老山香）由於均為木材成分，四項元素之比例相似，平均含量分別為碳 $46.9 \pm 0.5\%$ 、氫 $7.2 \pm 0.1\%$ 、氮 $0.2 \pm 0.1\%$ 、氧 $43.3 \pm 1.1\%$ ，與先前研究顯示九種拜香的成分(碳為 $43.8 \pm 3.3\%$ 、氫為 $6.0 \pm 0.5\%$ 、氮為 $0.37 \pm 0.08\%$ 及氧為 $43.7 \pm 1.0\%$) 類似 (Yi_{Glass tube})，並與文獻中木材的成分(碳為 50%、氫為 6.0%、氮為 0.5% 及氧為 42%)(Roger, 1984)類似；黏粉(楠樹樹皮)的成分分別為氮 0.2%、碳 42.9%、氫 7.3%、氧 49.2%，上述四種物質之四項基本元素 (C、H、O 及 N) 之總含量均高達 9 成 5 以上。可見原始未含添加劑之新山香及老山香製成後，原料中主要成分差異不大，香粉雖為各種不同材質樹木但仍均以植物為主體所致。

蚵殼與 CaCO_3 之四項元素成分比例類似，碳元素分別為 11.8 及 12.1%、氫為元素分別為 1.2 及 0.9%、氮元素均極低約為 0.1%，而氧元素分別為 32.9 及 32.5%。可見蚵殼及 CaCO_3 之主要成分相當，與文獻指出蚵殼之碳酸鈣純度為 94.8% (李彥儒, 2007) 呼應。

表 1 五種拜香原料及碳酸鈣組成之元素分析

元素	五種拜香原料組成之元素分析(%)					
	竹支	新山香粉	老山香粉	黏粉	蚵殼	碳酸鈣
C	47.1	46.5	47.2	42.9	11.8	12.1
H	6.6	7.2	7.1	7.3	1.2	0.9
N	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
O	43.8	44.0	42.5	49.2	32.9	32.5
Subtotal	97.7	98.0	97.0	99.6	46.0	45.6
Other elements	2.3	2.0	3.0	0.4	54.0	54.4

註：不包含紅色香腳部分

圖 2 為本研究 4 種拜香原料及蚵殼粉之熱重分析圖，由圖顯示，4 種原料均約在 100°C 時有重量減輕，應為水分蒸發所致。而四種同為木材材質之拜香原料（新山香粉、老山香粉、黏粉及竹支）均約在 250°C 時開始燃燒分解，而約在 400°C

~500°C時燃燒殆盡，顯示一般未含添加劑之拜香，如果燃燒條件充分（時間、含氧量、熱量傳導等），木材材質絕大部約在 500°C 以上時燃燒。而蚵殼粉之水分相對較少（與碳酸鈣類似），開始燃燒分解之溫度相對於其他材質最高約為 600°C 時，且約在 820°C 時蚵殼內之碳酸鈣成分將分解成氧化鈣（熱重損失約 44.2 %）。此外，在熱重分析之最高溫約 880°C 時，四種木材材質之拜香原料（新山香粉、老山香粉、黏粉及竹支）及廢棄蚵殼之重量殘餘比例分別為 0.51、1.54、2.03、1.15 及 55.76%。

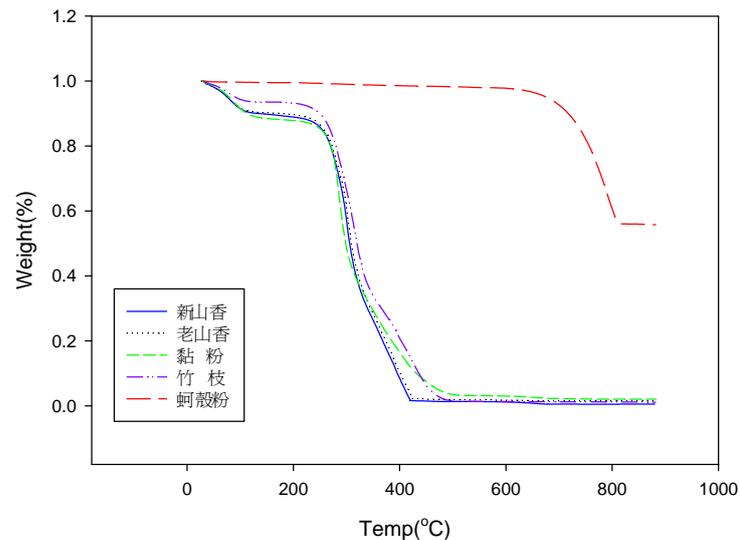


圖 2 不同拜香原料之熱重分析圖 (TGA)

熱流變化

圖 3 為本研究 4 種拜香原料及蚵殼粉之熱量差異分析圖，由圖顯示，四種同為木材材質之拜香原料（新山香粉、老山香粉、黏粉及竹支）均約在 100°C 時有吸收熱量情形，應為將含水分蒸發所致。之後均約在 250°C 時燃燒產生熱能，其中兩種木粉（新山香及老山香粉）約在 420°C 後即不再釋放熱能，而黏粉及竹支約在 500°C 後才燃燒殆盡，可能的原因為兩者均含有較不易燃燒之木質素所致（黏粉之主要為楠樹皮研磨而成）。此外，蚵殼粉約在 600°C 時，開始有吸熱情形（可能是結晶變化），並於 800°C 時達到吸收熱量之最高峰，最後約在 820°C 時達到穩定。上述熱能隨溫度之變化將會展現於拜香之悶燒溫度上。

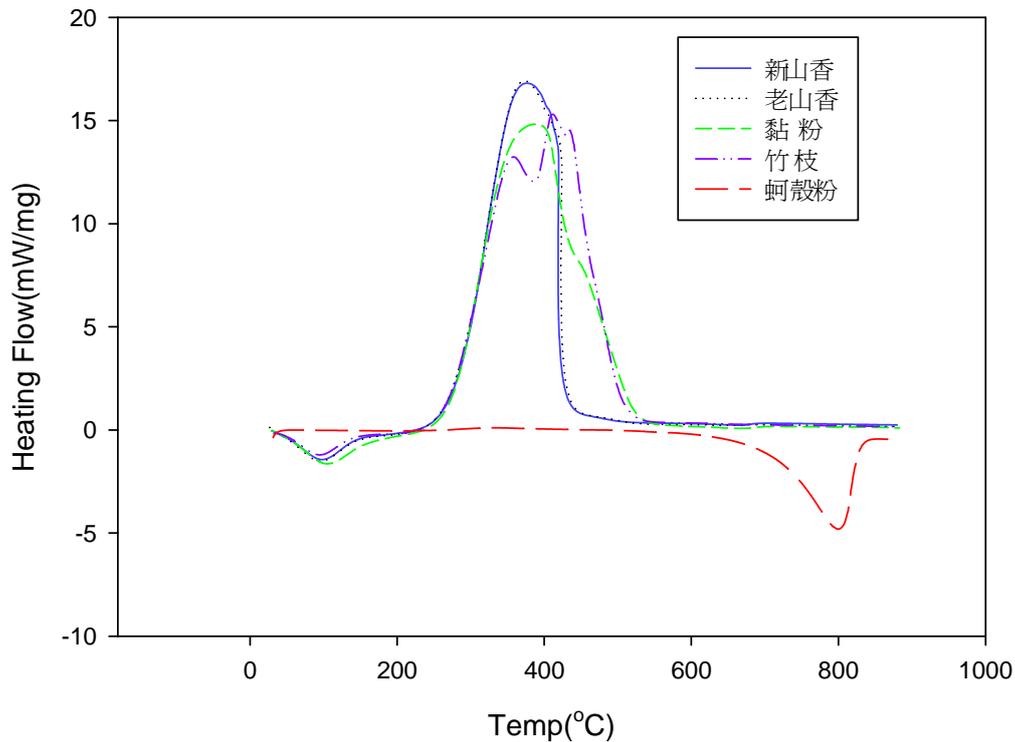


圖 3 不同拜香原料之熱量差異分析圖 (DSC)

燃燒時間、速率與溫度

添加廢棄蚵殼後新山香與老山香之拜香燃燒時間與燃燒速率如表 2 所示，原始新山香及老山香之燃燒時間分別為 92 及 91min，而在添加 5.0%、10.0%、20.0% 及 30% 於香粉後，新山香之燃燒時間減少 6.5%、15%、20% 及 26%，而老山香之燃燒時間減少 8.8%、15%、24% 及 31%。此外，由表 2 可知廢棄蚵殼僅佔被燃燒部分（包含被燃燒竹支）之 2.68%、5.36%、10.7% 及 16.1%，此結果顯示添加廢棄蚵殼後將可明顯降低拜香燃燒時間，且廢棄蚵殼含量越多燃燒時間越少。由於所有拜香重量相當，換言之，添加廢棄蚵殼後將明顯將增加拜香燃燒速率，新山香之燃燒速率增加 8.7%、16%、25% 及 34%，而老山香之燃燒速率增加 10%、18%、31% 及 43%。此結果可能的原因為碳酸鈣（廢棄蚵殼之主要成分）為不可燃物並具高熱容，在拜香燃燒後碳酸鈣將有一段時間累積在燃尖上，可避免因空氣流動使熱能逸散，累積熱能將增加拜香中較難燃燒部分（竹支）之燃燒效率，而減少燃燒時間與增加燃燒速率。一般而言，民眾認為廉價的拜香燃燒時間較短，故本研究將燃燒時間控制於 1 小時以上。

表 2 添加不同量之廢棄蚵對於拜香燃燒時間與燃燒速率之影響

Test incense	Oyster shell in burned part (%)	Burning time (min)		Burning rate (mg/min)		Temperature (°C)	
		Hsing Shan	Lao Shan	Hsing Shan	Lao Shan	Hsing Shan	Lao Shan
OS 00	0	92±1	91±2	28±1	28±1	691±26	696±18
OS 05	2.68	86±2	83±3	30±1	31±1	687±10	696±13
OS 10	5.36	78±4	77±4	32±0	33±2	686±18	692±9
OS 20	10.7	74±1	69±1	35±1	36±0	674±14	691±7
OS 30	16.1	68±2	63±1	37±1	40±1	651±17	676±9

N = 6 for each type of incense.

量測拜香添加廢棄蚵殼後悶燒之最高溫度，由表顯示，原始新山香最高溫度為 691°C，老山香最高溫度為 696°C。相較於前述熱重分析及熱流分析之溫度為高，可見雖然拜香原料（新山香粉、老山香粉、黏粉及竹支）均約在 250°C 時開始燃燒分解，而約在 400~500°C 時燃燒殆盡，但可能因為拜香悶燒時由於含氧量不足，使燃燒較為緩慢，並將熱量累積於一小尖點上，導致以各種木材原料所製成之拜香，其悶燒之溫度將高於可分別將各原料完全燃燒之溫度。

而在香粉中添加廢棄蚵殼後，新山香及老山香之最高溫度均隨添加量之增加而下降，其中添加 30% 廢棄蚵殼後則拜香燃燒之最高溫度分別下降 40°C 及 20°C，達 651°C 及 676°C。推測可能的原因為木材材質之拜香原料（新山香粉、老山香粉、黏粉及竹支）燃燒時，廢棄蚵殼在拜香燃燒過程中扮演填充物的角色，且由於燃燒溫度高於 600°C（蚵殼粉中之碳酸鈣部分開始轉變為氧化鈣），故蚵殼粉將吸收拜香燃燒之熱量使燃燒溫度降低。

圖 4 為製程中添加不同含量廢棄蚵殼後兩種拜香之懸浮微粒排放係數，由圖顯示，原始新山香及老山香之懸浮微粒排放係數分別為 59 及 61 mg/g-incense，而在添加 5.0%、10.0%、20.0% 及 30% 於香粉後，新山香之懸浮微粒排放係數減為 55 (6.8%)、50 (15%)、46 (22%) 及 40 (32%)，而老山香之懸浮微粒排放係數減少為 53 (13%)、51 (16%)、48 (21%) 及 38 (38%)。此外，兩拜香之平均懸浮微粒降低比例為 10%、16%、22% 及 35%，分別大於廢棄蚵殼僅佔被燃燒部分（包含被燃燒竹支）之 2.68%、5.36%、10.7% 及 16.1%。此外，將添加不同廢棄蚵殼含量於拜香香粉中比例與懸浮微粒排放係數進行迴歸分析，結果顯示添加廢棄蚵殼後將可降低懸浮微粒排放，且隨添加量之增加成效越明顯（其中新

山香 $r^2=0.99$ ， $p<0.01$ ，老山香 $r^2=0.99$ ， $p<0.01$)。

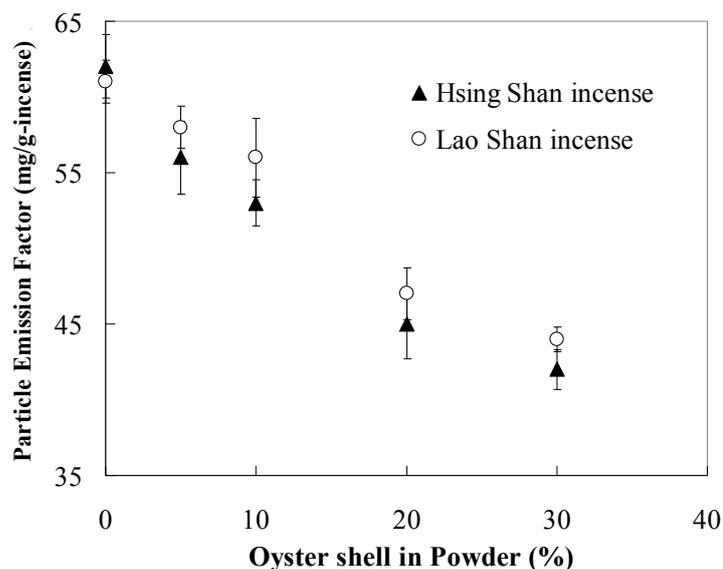


圖 4 添加廢棄蚶殼於香粉中之懸浮微粒排放係數

多環芳香烴化合物(PAHs) 及總毒性當量(Total-BaP_{eq})排放

圖 5 及表 3 為製程中添加不同含量廢棄蚶殼後兩種拜香之多環芳香烴化合物排放係數，由圖表顯示，原始新山香及老山香之多環芳香烴化合物排放係數分別為 9.1 及 8.8 $\mu\text{g/g-incense}$ ，兩者差距不大，可能原因為原料中（新山香及老山香木粉）主要成分僅有些許不同，香粉雖為各種不同材質樹木但仍均以植物為主體所致。

而在添加 5.0%、10.0%、20.0%及 30%於香粉後，新山香之多環芳香烴化合物排放係數降低為 9.4（增加 3.1%）、9.0（1.6%）、8.2（10%）及 7.7（16%），而老山香之多環芳香烴化合物排放係數減少 8.7（1.5%）、7.7（13%）、7.4（16%）及 6.5（26%）。兩拜香之平均多環芳香烴化合物降低比例為-0.8%（增加）、7.1%、13%及 21%，分別大於廢棄蚶殼僅佔被燃燒部分（包含被燃燒竹支）之 2.68%、5.36%、10.7%及 16.1%。此外，將添加不同廢棄蚶殼含量於拜香香粉中比例與多環芳香烴化合物排放係數進行迴歸分析，結果顯示添加廢棄蚶殼後將可降低多環芳香烴化合物排放，且隨添加量之增加成效越明顯（其中新山香 $r^2=0.91$ ， $p<0.01$ ，老山香 $r^2=0.95$ ， $p<0.01$ ）。

總毒性當量（BaP_{eq}）方面有相同的情形，由圖 6 顯示，原始新山香及老山香之總毒性當量分別為 1.92 及 1.74 $\mu\text{g/g-incense}$ ，在添加 5.0%、10.0%、20.0%及

30%於香粉後，新山香之總毒性當量排放係數降低為 1.74 (9.7%)、1.52 (21%)、1.29 (33%) 及 1.30 (38%)，而老山香之總毒性當量排放係數減少 1.71 (1.6%)、1.48 (15%)、1.28 (27%) 及 1.12 (36%)。兩拜香之平均總毒性當量降低比例為 5.6%、18%、30%及 37%，分別大於上述多環芳香烴化合物之降低比例，可能的原因為添加廢棄蚵殼後除可降低多環芳香烴化合物外，高分子量（具高毒性）多環芳香烴化合物之比例亦有下降趨勢。此外，將添加不同廢棄蚵殼含量於拜香香粉中比例與總毒性當量（BaP_{eq}）排放係數進行迴歸分析，結果顯示添加廢棄蚵殼後將可降低總毒性當量排放，且隨添加量之增加成效越明顯（其中新山香 $r^2=0.93$ ， $p<0.01$ ，老山香 $r^2=0.96$ ， $p<0.01$ ）。

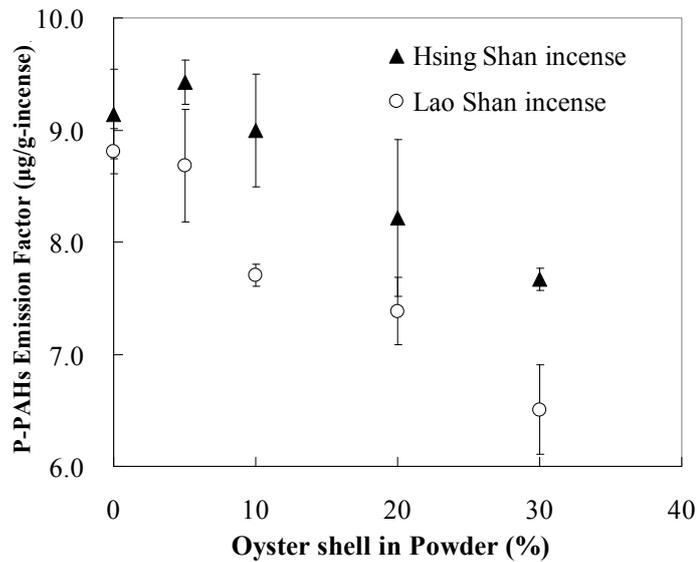


圖5 添加廢棄蚵殼於香粉中之粒狀多環芳香烴化合物（P-PAHs）排放係數

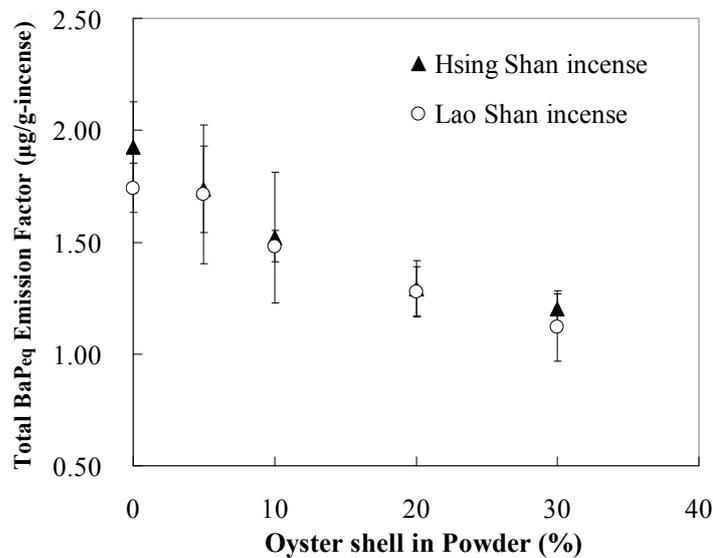


圖6 添加廢棄蚵殼於香粉中之總毒性當量（BaP_{eq}）排放係數

表 3 添加不同含量廢棄蚵殼後兩種拜香燃煙中各種多環芳香烴化合物排放濃度

P-PAHs ($\mu\text{g/g-incense}$)	Hsing Shan incense					Lao Shan incense				
	OS00	OS05	OS10	OS20	OS30	OS00	OS05	OS10	OS20	OS30
Nap	0.10	0.09	0.09	0.07	0.06	0.09	0.08	0.03	0.07	0.04
Acpy	0.12	0.35	0.27	0.14	0.12	0.30	0.37	0.19	0.21	0.20
Acp	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.08	0.09	0.09	0.12	0.04
Flu	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.17	0.22	0.22	0.31	0.09
Pa	0.59	0.46	0.67	0.43	0.49	0.58	0.48	0.52	0.46	0.45
Ant	0.38	0.26	0.26	0.40	0.25	0.38	0.32	0.33	0.29	0.23
Fl	0.54	0.52	0.64	0.68	0.65	0.49	0.33	0.49	0.55	0.56
Pyr	0.78	0.87	1.05	1.01	0.97	0.81	0.85	0.81	0.79	0.84
BaA	0.58	0.73	0.44	0.77	0.73	0.36	0.40	0.29	0.38	0.33
CHR	0.38	0.36	0.45	0.37	0.35	0.25	0.33	0.29	0.33	0.20
BbF	0.30	0.52	0.46	0.26	0.27	0.10	0.18	0.16	0.14	0.04
BkF	1.28	1.21	1.30	1.03	0.95	1.36	1.35	1.09	0.95	0.99
BaP	0.68	0.63	0.53	0.41	0.38	0.46	0.40	0.44	0.37	0.31
IND	1.25	1.41	1.17	0.92	0.85	1.30	1.21	1.17	1.05	0.94
DBA	0.88	0.70	0.64	0.56	0.52	0.95	0.98	0.75	0.64	0.57
BghiP	1.23	1.26	0.98	1.10	1.02	1.13	1.09	0.83	0.72	0.68
ΣLM-PAHs	1.24	1.21	1.36	1.10	0.97	1.59	1.56	1.38	1.46	1.06
(%)	(14)	(13)	(15)	(13)	(13)	(18)	(18)	(17)	(17)	(16)
ΣMM-PAHs	2.28	2.48	2.57	2.83	2.70	1.91	1.91	1.88	2.05	1.92
(%)	(25)	(26)	(29)	(34)	(35)	(22)	(22)	(24)	(28)	(30)
ΣHM-PAHs	5.62	5.74	5.07	4.29	4.00	5.31	5.21	4.44	3.87	3.53
(%)	(61)	(61)	(56)	(52)	(52)	(60)	(60)	(58)	(52)	(54)
Total PAHs	9.14	9.43	8.99	8.21	7.67	8.81	8.68	7.71	7.38	6.51
(%)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)

Note: P-PAHs: Particle-phase PAHs

LM-PAHs: Low Molecular Weight PAHs (2-3ring)

MM-PAHs: Median Molecular Weight PAHs (4rings)

HM-PAHs: High Molecular Weight PAHs (5-6rings)

本研究將 16 種多環芳香烴化合物以分子量高低區分為 3 大類:低分子量(2-3 個苯環)、中分子量 (4 個苯環) 及高分子量 (5-6 個苯環), 由表 4 顯示, 燃燒原始新山香之排放係數分別為 1.24、2.28、及 5.62 $\mu\text{g/g-incense}$, 分別佔總量 (粒狀多環芳香烴化合物) 之 14%、25%、及 61%, 而於添加不同濃度之廢棄蚵殼後,

低、中及高分子量之多環芳香烴化合物之排放係數分別為 0.97-1.36、2.48-2.83 及 4.00-5.74 $\mu\text{g/g-incense}$ ，分別佔總粒狀多環芳香烴化合物之 13-15%、26-35% 及 52-61%；而在老山香方面，燃燒原始老山香之排放係數分別為 1.59、1.91、及 5.31 $\mu\text{g/g-incense}$ ，分別佔總量（粒狀多環芳香烴化合物）之 18%、22%、及 60%，而於添加不同濃度之廢棄蚵殼後，低、中及高分子量之多環芳香烴化合物之排放係數分別為 1.06-1.56、1.88-2.05 及 3.53-4.44 $\mu\text{g/g-incense}$ ，分別佔總粒狀多環芳香烴化合物之 12-20%、41-43%及 40-45%。

燃燒兩種原始拜香所產生之 16 種多環芳香烴化合物比例分佈一致，與先前研究(Yang, 2006)呼應，而在添加廢棄蚵殼後雖然總多環芳香烴化合物排放量降低，但中分子量之多環芳香烴化合物甚至有增高情形，而低分子量（低毒性）及高分子量（高毒性）多環芳香烴化合物之降低較為趨勢明顯，亦同時削減總毒性當量（BaP_{eq}）之排放。

綜上所述，在拜香香粉中添加廢棄蚵殼粉末，由於其成分絕大多數為碳酸鈣，而由於碳酸鈣為高沸點之不可燃物，故在拜香燃燒時，廢棄蚵殼將先扮演填充物角色。在同質量的拜香燃燒時，添加廢棄蚵殼越多則相對的會有較少的有機物被燃燒，將減少因拜香悶燒所產生之空氣污染物（包含懸浮微粒及 PAHs）。此外，雖然添加廢棄蚵殼將降低拜香悶燒時之溫度，但仍高於將竹支及黏粉燃燒殆盡之溫度（690>500°C），且由於廢棄蚵殼在拜香燃燒後將有一段時間殘留於燃尖上，可將竹支及黏粉較完整的燃燒，此現象亦可能成為造成具高毒性之高分子量多環芳香烴化合物之有明顯削減情形之原因，整體而言亦削減總毒性當量（BaP_{eq}）排放。

臺灣燃燒拜香產生空氣污染物之推算與減量推估

以臺灣總共有 610 萬戶家庭中(Taiwan MOI, 2011)，每天燒香拜拜 2 次之家庭約佔 45%(Lung et al., 2007)，若假設每次燒香 3 支、每支香約 1 公克計算，臺灣家戶每年燃燒拜香約為 6120 公噸。再加上每年寺廟使用拜香約 4000 公噸(Hu et al.,2009)，則推算每年約有 10012 公噸拜香被燃燒。若以本研究團隊先前調查市面 9 種拜香之排放係數計算，平均懸浮微粒排放係數約為 35.1 mg/g-incense 、多環芳香烴化合物排放係數約為 5.96 $\mu\text{g/g-incens}$ 及總毒性當量排放係數約為 1.11 $\mu\text{g/g-incense}$ (楊奇儒, 2006)，進一步可推算臺灣全國每年因燃燒拜香所產生之空氣污染物排放量，其中懸浮微粒排放量約為 351 公噸/年、多環芳香烴化合物排放量約為 60 公斤/年及總毒性當量排放量數約為 11 公斤/年。

表 4 為添加廢棄蚵殼於拜香香粉中比例與燃燒時間、燃燒速率、懸浮微粒、多環芳香烴化合物 PAHs 與總毒性當量之迴歸分析結果，由表可知，添加 5-30% 之廢棄蚵殼於兩種拜香香粉中，各分析項目均與添加量均存在相關性，若以添加量為 10% 推算，將減少拜香燃燒時間 8.3 分鐘、燃燒速率增加 3.4 mg/min、懸浮微粒排放係數減少 6.4 mg/g-incense、多環芳香烴化合物 PAHs 與總毒性當量分別減少 0.67 $\mu\text{g/g-incense}$ 及 0.23 $\mu\text{g/g-incense}$ 。此外，進一步可推算若於拜香香粉中添加 10% 廢棄蚵殼推算，臺灣全國每年將可減少燃燒拜香產生懸浮微粒約為 640 公噸/年、多環芳香烴化合物約為 67 公斤/年及總毒性當量約為 23 公斤/年。

表 4 添加廢棄蚵殼對於拜香香粉之燃燒時間、燃燒速率、懸浮微粒、多環芳香烴化合物 PAHs 與總毒性當量之迴歸分析結果

	Hsing Shan		Lao Shan		Average
Burning time (min)	-7.6	(0.94) ^a	-9.0	(0.97)	-8.3
Burning rate (mg/min)	+3.0	(0.98)	+3.8	(0.99)	+3.4
Particle (mg/g-incense)	-6.1	(0.98)	-6.7	(0.93)	-6.4
P-PAHs ($\mu\text{g/g-incense}$)	-0.58	(0.91)	-0.77	(0.95)	-0.67
Total-BaP _{eq} ($\mu\text{g/g-incense}$)	-0.24	(0.93)	-0.22	(0.96)	-0.23

^a: r^2 value of linear regression analysis

四、結論與建議

本研究利用廢棄蚵殼添加於拜香中，將可使拜香燃煙中之懸浮微粒、多環芳香烴化合物(PAHs)及總毒性當量(Total-BaP_{eq})排放係數等降低，本研究結果將可作為研發製造低汙染拜香之重要參考依據。此外，雖然拜香燃煙空氣污染物之削減，對於台灣整體空氣品質改善效益不大，但由於拜香燃燒所產生之有害空氣污染物均相當接近人體生活空間，此研究發展後將有效減低民眾燃燒拜香時所造成之健康危害。本研究並達到廢棄蚵殼回收資源化效用，對於環境衛生及廢棄物資源化等環保議題具有深遠正面的意義。

五、參考文獻

1. Brauer M, Hirtle R, Lang B, Ott W. Assessment of Indoor Fine Aerosol Contributions from Environmental Tobacco Smoke and Cooking with Portable Nephelometer. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2000;10:136-144.
2. Chen CJ, Wang YF, Shieh T, Chen JY, Lin MY. Multi-Factorial Etiology of Nasopharyngeal Carcinoma. *Head and Neck Oncology Research Conference* 1987;10:469-476.
3. Huynh CK, Savolainen H, Vu-Due T, Guillemin M, Iseln F. Impact of Thermal Proofing of a Church on its Indoor Air Quality: The Combustion of Candles and Incense as a Source of Pollution. *The Science of the Total Environment* 1991;102:241-251.
4. Kao MC, Lung SC. Personal Particulate Exposures in Buddhist Temples. *Chinese Journal of Public Health* 2000;19:138-143.
5. Mimi CY, Garabran DH, Huan TB, Henderson BE. Occupational and other Nondietary Risk Factors for Nasopharyngeal Carcinoma in Guangzhou, China. *International Journal of Cancer* 1990;45:1033-1039.
6. Yang CR, Lin TC, Chang FH. Particle Size Distribution and PAH Concentrations of Incense Smoke in a Combustion Chamber. *Environmental Pollution* 2007;145:606-615.
7. 中央研究院生物多樣性研究中心，台灣貝類資料庫。
8. 內政部，內政統計資訊服務網，<http://www.moi.gov.tw/stat>.
9. 行政院農委會漁業署，<http://www.fa.gov.tw/chnn>.
10. 李彥儒，台灣主要經濟貝類廢棄殼研製珍珠粉之可行性研究，國立成功大學資源工程學系碩博士論文，96年。
11. 林嘉明，拜香原料然煙中多環芳香化合物之探討，國科會計畫報告，1996。
12. 胡竹君，拜香之煙及灰中多環芳香烴化合物之分析，國立清華大學原子科學研究所碩士論文，81年。
13. 楊奇儒，低污染拜香研發：拜香主要成分對拜香燃煙特徵之影響，國立成功大學環境工程系博士論文，95年。
14. 謝居憲，寺廟內部空氣中多環芳香化合物成分及特徵之研究，國立成功大學環境工程系碩士論文，85年。

單缸缸內直噴汽油-乙醇引擎點火正時之研究

Study on Ignition Timing for Single Cylinder Gasoline/Ethanol Direct Injection Engine

蔡欣倫

Hsin-Luen Tsai

高苑科技大學電子工程學系

先進潔淨節能引擎開發與測試服務中心

Department of Electronic Engineering, and Advanced Engine Research Center, Kao Yuan University

摘要

本研究採用一維引擎模擬軟體(GT-SUITE)進行直噴式乙醇混摻燃油引擎性能分析，比較不同火焰速度模型及燃油蒸發模型參數之差異，分析在不同汽油與乙醇混摻比例(E0, E25, E50, E75, E85 及 E100)下，發現兩組火焰速度模型之最佳化的點火正時有相同趨勢，隨著混摻比例提高則兩組模型逐漸接近。探討固定當量比時，提高乙醇混摻比將提高燃油消耗率，當節氣門開度提高時最佳燃油消耗率之點火提前角均逐漸減少，高轉速時純汽油及乙醇之點火正時角度所需修正角較大。分析所得最低的燃油消耗與最大扭力率所對應之點火正分佈圖，可供設計乙醇混摻燃料引擎及擬訂控制策略之參考依據。

關鍵字：乙醇、火焰速度、節氣門開度、點火正時、燃油消耗率、扭力

Abstract

The one-dimensional commercial engine simulation code was carried out to investigate the effects of gasoline-ethanol blending ratio on ignition timings and engine performance in a single cylinder direct injection engine. The numerical analysis is performed at fixed equivalence ratio, and under various gasoline-ethanol blending ratios (E0, E25, E50, E75, E85 and E100), engine speed and throttling by considering the fuel evaporation model. The recent laminar flame speed model was incorporated and comparable to the original model at optimal fuel injection timing at higher blending ratio. Increasing the ethanol blending ratio leads to increase the BSFC. The ignition timing at optimal BSFC recedes due to the increase in TPS. It was also found that the difference between gasoline and ethanol at higher engine

高苑科技大學電子工程系，助理教授，E-mail: hsinluen@gmail.com

speed is larger compared to the low engine speed case. The ignition timing map at optimal BSFC and torque is established for design the gasoline-ethanol blended fuel engine and the engine control strategies.

Keyword: Ethanol, Flame Speed, Throttling, Ignition timing, Brake Specific Fuel Consumption (BSFC), Torque

一、前言

目前業界正採用缸內直噴、進氣增壓及閥門控制等技術進行新引擎設計開發，以便能提高動力輸出及降低油耗及污染排放，近年來各國也陸續在新車上路需能使用混摻生質燃油（如：乙醇），若採用乙醇混摻汽油，由於其高辛烷值可抑制並改善爆震，可採用較高壓縮比設計，其較高蒸發潛熱造成蒸發冷卻效應，可以增進引擎動力輸出密度，更能降低排放污染。

汽油缸內直接噴射引擎具有很多的潛力與優點，如：燃油經濟性佳、高扭力輸出及低污染等等，此些正面性的特性吸引著汽車與機車引擎業者致力於發展此項技術。在汽油直接噴射引擎內混合油氣的配置在整體紊流燃燒過程中扮演相當重要的角色，在中高負載時，汽油直接噴射引擎會在當量比下或稀薄勻相燃燒模式操作，而在低負載時，端看是採用何種噴油配置技術（噴霧導引或活塞導引式），則是採用分層燃燒模式。在缸內直接噴油後，噴霧的動態特性，包含：注油、油柱破裂、燃油霧化及氣化等對於缸內可燃氣的 formed 與空間分配有著相當重大的影響。

Tsai 等人[2-4]曾透過數值分析程式採用機車廠商所提供實體引擎幾何，分析缸內直噴流場分析以便能清楚解析在缸內直噴的噴霧狀態，搭配實驗測試組的噴霧外型與噴油時機建議，以便提供測試組相關缸內噴霧流場概況，並找出最大允許油滴半徑與轉速互的關係約略與轉速成反比(1/RPM)[2]，該公式可以提供在設計引擎階段能選定比較能搭配的噴油嘴。由於透過三維 CFD 計算需要大量計算量與時間、成本，所能分析範圍有限，再者建立引擎控制參數策略亦需要花費大量的時間及成本，在成本考量下，業界採用一維引擎性能分析技術進行發動機研發與設計逐漸增加。先前研究[6, 7]使用引擎模擬軟體 GT-SUITE[8]針對引擎噴射正時及點火正時進行最佳化模擬，並且透過引擎驗證性能輸出，可以確立其計算模型建立的可行性。

本文以一具自行改裝的 500c.c.單缸缸內直噴汽油(Gasoline Direct Injection, GDI)引擎為實驗平台，以商用一維引擎模擬軟體 GT-SUITE 分析引擎在不同轉速穩態操作下進行模擬，延續先前研究[6, 7]，該分析模型已與實驗進氣效率及缸壓進行比較與確認，探討不同的引擎轉速及不同的汽油-乙醇混摻比例，將利用

模擬分析工具找出最佳點火時機及油耗(BSFC)等性能特性，相關資料將有助於輔助發展汽油-乙醇引擎最佳化控制方法與策略。

二、模擬分析工具及方法

GT-Suite為商用引擎性能分析軟體，承繼先前所建立之GT模型，已完成與實驗量測之容積效率驗證及缸內壓力變化之比較，均與實驗引擎量測數據相當吻合。圖 1為採用GT-SUITE所建立之單缸引擎分析模型，配合實驗引擎所需，除去空氣濾清器及排氣尾管設置，並使用實際引擎所量測之各部件幾何形狀所建立。表 1為此單缸缸內直噴引擎之規格，所使用乙醇與汽油之燃油性質表比較如表 2所示。

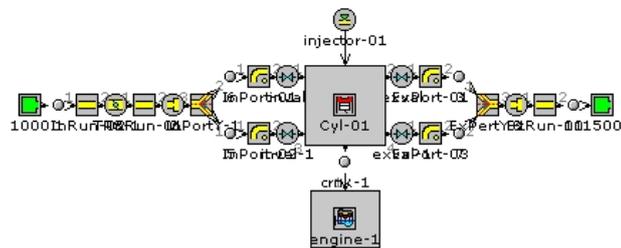


圖 1 GT-Suite引擎模擬分析模型架構圖

表 1 實驗引擎相關規格與參數

Bore	92 mm
Stroke	75 mm
Compressor Ratio	12.4
Displacement Volume	498 c.c.
Injection Timing	-230 (ATDC)
Throttle position	15~45 (deg.)
Engine Speed	2000~6000 (rpm)
Ethanol Mixing %vol.	0, 25, 50 75, 85, 100

表 2 燃油性質表

性質	單位	Gasoline	Ethanol
Density	Kg/m ³	720	790
Specific heat (Cp)	J/kg-K	2420	2470
Thermal conductivity	W/m-K	0.147	0.182
Viscosity	Kg/m-s	0.00054	0.0012
Molecular Weight	Kg/kmol	97	41
Latent heat	KJ/kg	306	855
Boiling Temperature	K	399	351
Low heating value	MJ/kg	44	26.9
Octane Number (ON)		87-95	115

探討乙醇摻雜比例分別為純汽油(E0)、25% (E25)、 50% (E50)、75% (E75)、85% (E85)及100% (E100)，摻雜後將會影響燃油潛熱、密度及辛烷值，探討引擎轉速由2000rpm至6000rpm，噴油時機採用先前最佳化角度為-230 CAD ATDC，試圖透過電腦模擬分析進行實驗引擎可操作控制條件之分析，探討最佳點火角控制參數，以建立出引擎操作控制相關數據。由於添加乙醇造成燃油組分改變，本分析所使用火焰速度模型及燃油蒸發模型，分段如下描述。

2.1 汽油及混摻乙醇之火焰速度模型

缸內火焰傳播速度為火焰傳入未燃氣的速率及燃燒時燃氣膨脹傳播速度，與缸內壓力、溫度具絕對關係，為探討缸內混合燃氣火焰傳播速度之影響，本分析採用兩種層流火焰速度經驗公式進行比較，第一種火焰速度模型(1)為軟體內建模式[8]，如下方程式(model A)：

$$S_L = (B_m + B_\phi (\phi - \phi_m)^2) \left(\frac{T_u}{T_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.06(Dilution)^{DEM - 0.77}) \quad (1)$$

其中 Φ 為缸內當量比、 Φ_m 為最大速度之當量比、 T_u 為未燃氣溫度、 $Dilution$ 為未燃區內殘餘燃氣之質量分率而 DEM 則為其指數參數，相關參數為 $B_m=0.350(m/s)$, $B_\phi=0.549(m/s)$, $\Phi_m=1.1$, $\alpha=2.4-0.271\Phi^{3.51}$, $\beta=-0.357+0.14\Phi^{2.77}$ 。

為了針對生質乙醇的燃燒模擬計算，參考文獻[9]增加火焰傳播速度方程式進行分析，火焰速度方程式(model B)，如下：

$$S_L(\phi, T, P) = S_{L,ref}(\phi) \left(\frac{T_r}{T_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.5\psi) \quad (2)$$

$$S_{L,ref}(\phi) = Z \cdot W \cdot \phi^\eta \cdot \exp[-\xi(\phi - 1.075)^2]$$

其中參考壓力 $P_{ref}=1\text{atm}$ 及溫度 $T_{ref}=300\text{K}$ ，相關參數如表 3所列。

表 3. 層流不同燃油火焰速度公式之相關經驗係數[9]

Fuel	Z	W(cm/s)	η	ξ	α	β
C_8H_{18}	1	46.58	-0.326	4.48	1.56	-0.22
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	1	46.50	0.250	6.34	1.75	$-0.17/\sqrt{\phi}$
$\text{C}_8\text{H}_{18}+\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$1+0.07 X_E^{0.35}$	46.58	-0.326	4.48	$1.56+0.23 X_E^{0.35}$	$X_G\beta_G^+$ $X_E\beta_E^*$

* X_E 代表乙醇在混合油所佔體積百分比率， X_G 代表汽油在混合油所佔體積百分比表示乙醇 β 值， β_G 表示汽油 β 值

2.2 燃油蒸發模式

燃油蒸發是燃燒反應前很重要的過程，蒸發的過程速度也會影響到缸內壓力及溫度的變化。本文中採用GT-POWER進行引擎性能模擬，程式內置採用的蒸發率計算式，如下所示：

$$R_{evp} = \frac{4.16 \times RPM_{ref}}{CA50} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{TMPEXP} \left(\frac{RPM}{RPM_{ref}} \right)^{RPMEXP} \quad (3)$$

其中CA50為燃料蒸發50%所需的時間(曲軸角度)，參考轉速(RPM_{ref})、溫度(T_{ref})分別為4000rpm及600K，RPMEXP及TMPEXP為其指數參數。

先前研究[2]機車引擎缸內直噴油滴尺寸最佳化時，除建立最大允許油滴大小與轉速關係外，亦發現在不同轉速下油滴蒸發隨曲軸角變化曲線沒有太大變化，因此在GT-SUITE考慮油滴蒸發模式時則不考慮轉速影響，故分析中的RPMEXP設定為0。

三、分析結果與討論

本研究採用的模擬條件如表 1 所示，探討不同的節氣門開度(TPS)及引擎轉速(RPM)下，及固定當量比為1，採用不同比例的汽油-乙醇混摻燃油，以進行分析最佳燃油消耗率(BSFC)的點火正時角度，以探討不同混摻比在最佳點火正時之差異性。

3.1 模型測試比較

首先乙醇的辛烷值較汽油來的高，其燃料性質與汽油不相同，因此在燃燒特性的差異應可在兩個不同的火焰速度方程式展現。由於尚無混摻燃油引擎實測數據比較，因此本採用上述兩種模型進行分析比較，圖 2 為引擎在3000RPM及乙醇混摻50%(E50)下使用兩個不同的方程式所計算出來的火焰速度及缸內正規化累積熱釋放率比較圖，可看出方程式(1)所計算之火焰速度較快，但缸內累積釋放率則沒有太大差異，後續分析則採用方程式(2)進行參數變異探討。

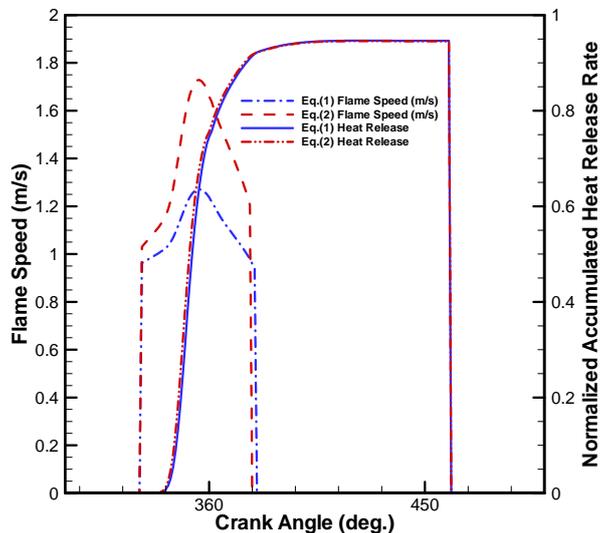


圖 2 不同層流火焰模型之火焰速度及正規化累積熱釋放率比較

再者，探討方程式(3)之CA50參數，以瞭解對燃料蒸發影響，分析未採用蒸發模式、採用蒸發模式時使用兩個不同的CA50角度(60及100度)比對蒸發過程變化比較，但比較氣/液態燃料結果(如圖 3所示)可看到不同的兩種蒸發率參數可以使缸內油氣的產生變化，對於缸內燃油蒸發有比較合理的描述，顯示出在燃料噴射開始(SOI=-230CA)時，隨著曲軸的前進而開始蒸發。如圖 4中所示，該分析工具採用不同的蒸發率參數對於引擎缸內壓力的變化並不明顯。目前尚未有引擎實驗用燃油蒸發之資料，日後取得後還需要修正相關參數方能比較合理描述油滴蒸發率。

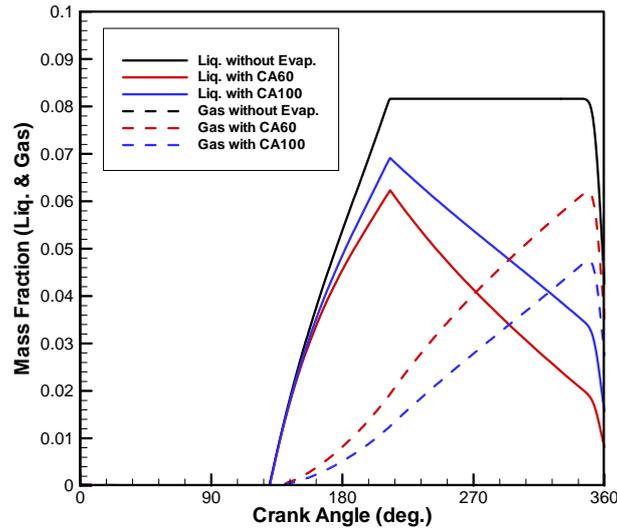


圖 3 未採用蒸發模式及不同蒸發 CA50 參數所計算出缸內氣/液態燃料比較圖

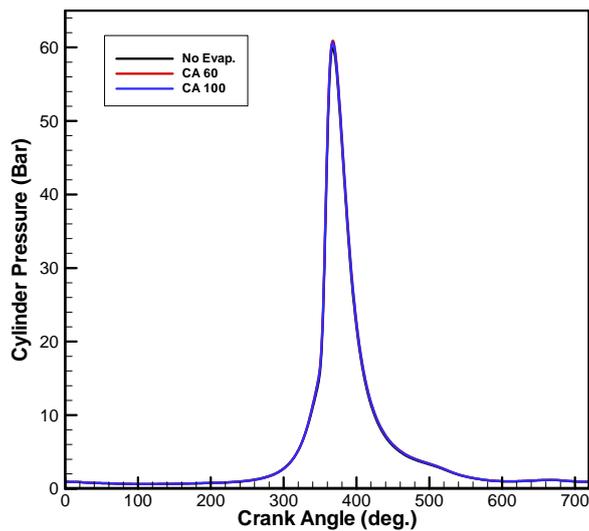


圖 4 未採用蒸發模式及不同蒸發 CA50 參數所計算出缸壓隨時間變化比較圖

根據先前研究結果[2]發現在所採用單孔噴嘴噴霧蒸發所需時間約為120度，因此後續分析中CA50參數採用120度，圖5為不同混摻燃油在噴入缸內後之整體燃油蒸發變化情況比較，由於本分析設定當量比為1，因此乙醇相對所佔比例高時則所噴入量略高，缸內液態燃料存量高，蒸發情況有一定比例差異變化，這蒸發過程計算則需配合未來的噴霧實驗量測及引擎實驗或透過CFD分析進行校驗。

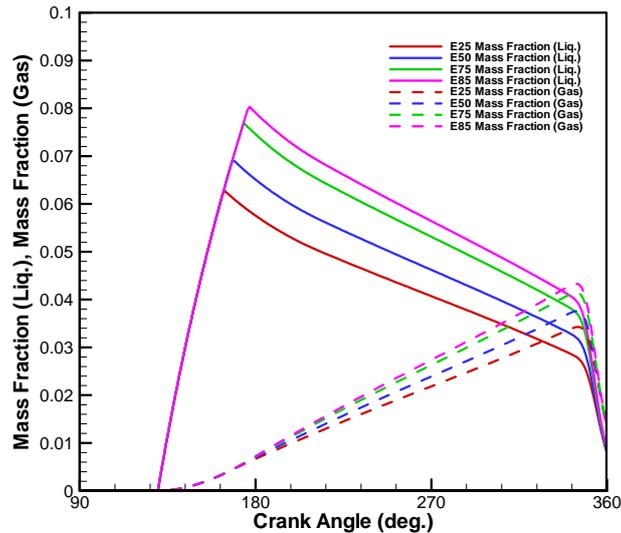


圖 5 不同乙醇混摻比所計算出氣/液態燃料隨時間

3.2 不同乙醇混摻比及TPS改變之影響

進行分析TPS改變及不同點火正時角度對BSFC之影響，綜整不同引擎轉速、節氣門開度及不同的乙醇混摻比例下，圖6顯示進行最低BSFC的點火正時分析結果，圖中顯示兩種不同火焰速度模型對於整體引擎性能之影響，當TPS上升時可以看到點火提前角均逐漸減少，這是進氣量提高而容積效率提升，使得燃燒速度上升所致之結果，因此較不需提前點火正時角。

再比較不同乙醇混摻比例之影響(E25, E50, E75, E85)，兩組火焰速度模型在較高濃度乙醇混摻比時的計算結果相當接近，除了低混摻比(如：E25)數據較大差異之外，其他混摻比則叫相近，在引擎轉速提升時，兩者所計算出的結果趨勢也相同，隨著引擎轉速的提高，點火正時相對地提前。上述比較顯示出不同火焰速度模型對於引擎性能影響，本研究將採用第二種模式及相關參數則採用內定值進行後續分析。

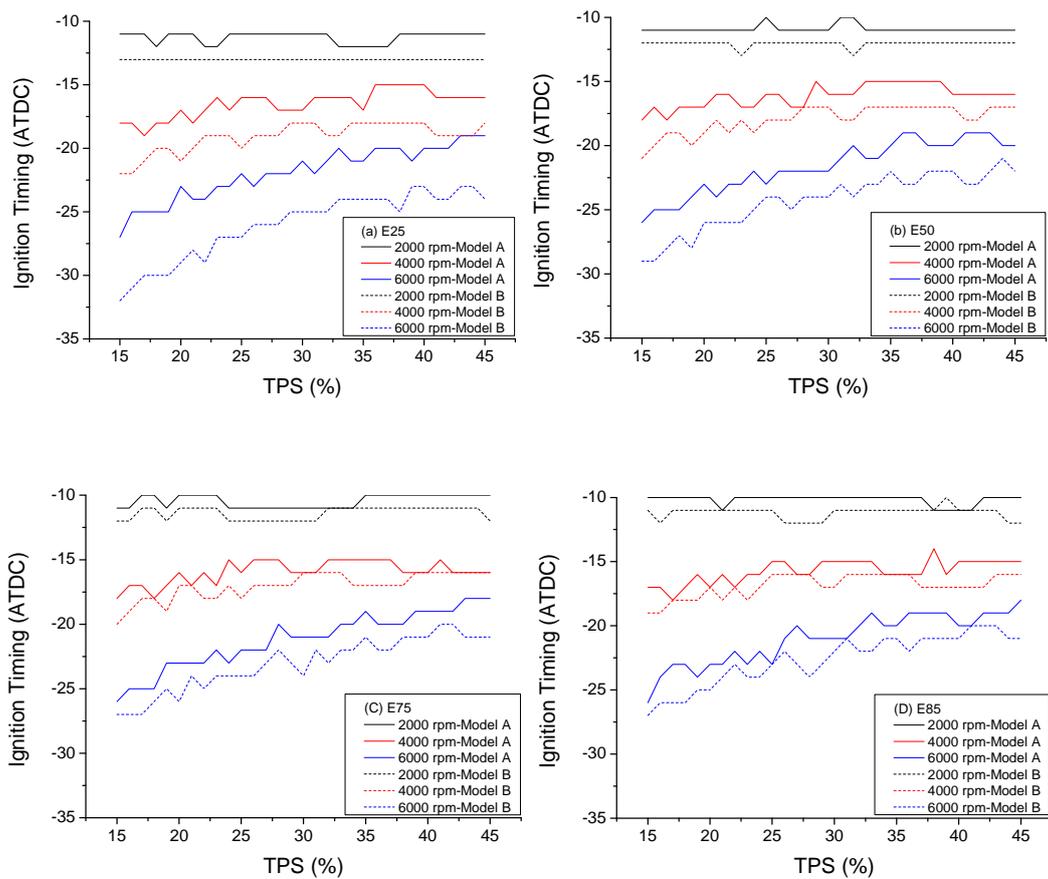


圖 6 不同乙醇混摻比下兩種火焰速度模型之最低 BSFC 時點火正時比較

3.3 最低油耗之點火正時

為探討引擎在不同轉速及點火正時下BSFC之變化，圖 7為在TPS=45%時，分析不同的乙醇混摻比例(E0, E25, E50, E75, E85, E100)之BSFC分佈圖，圖中黑實線代表最小BSFC之軌跡線，由於本研究固定當量比，乙醇混摻比例較低時可以得到較佳的BSFC，此表示比較省油，從圖中顯示BSFC隨著引擎轉速上升而增加，混摻比較高時點火正時提前角較小。

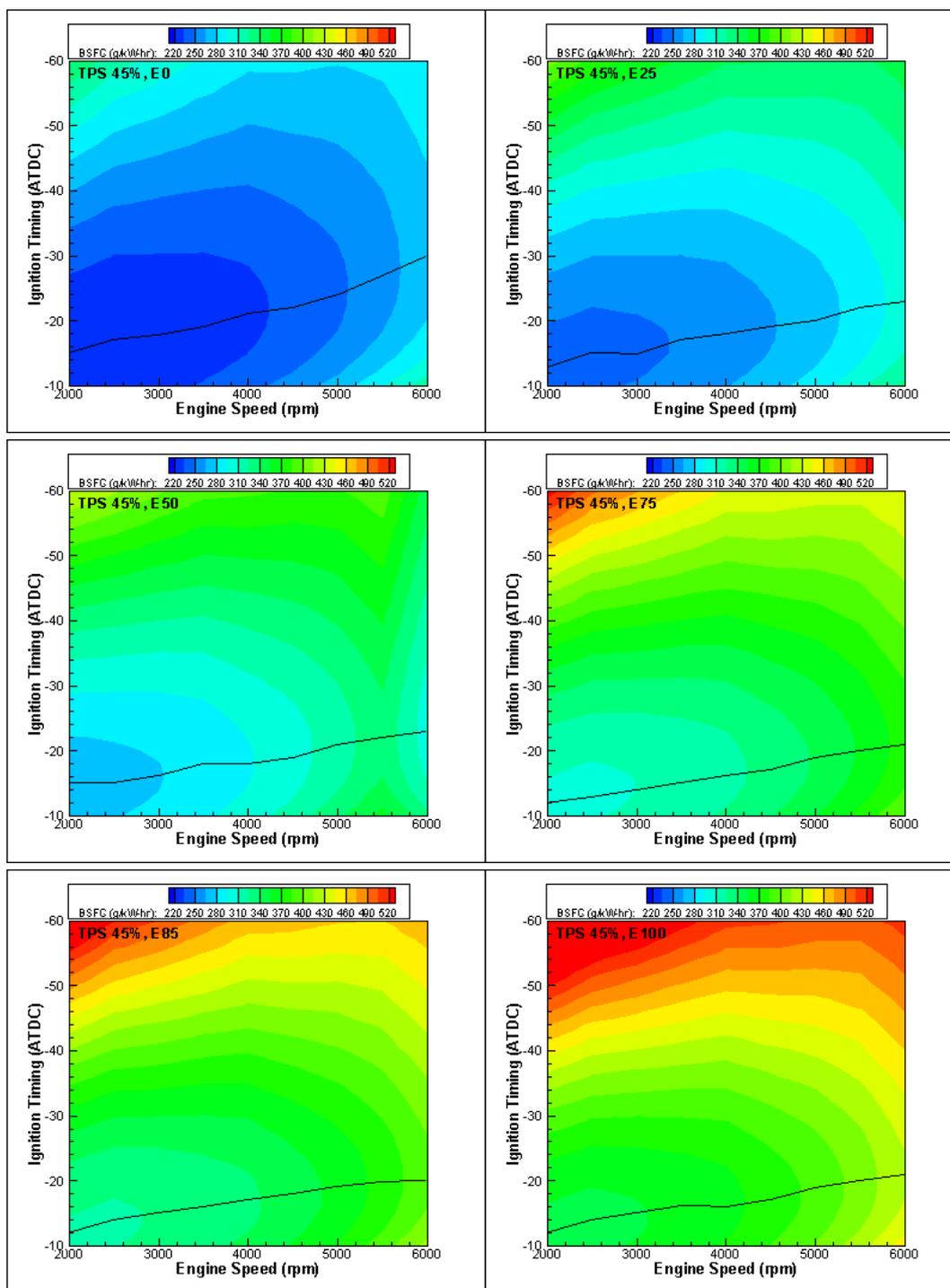


圖 7 不同乙醇混摻比例下 BSFC 輸出比較(節氣門角度 45 度)

圖8為引擎在TPS=45%時，不同轉速下使用不同乙醇混摻比例時的最佳點火正時角分佈圖，左圖為最低BSFC時之點火角，而右圖為最大扭力時之點火角。左右兩圖分佈相當近似，此因引擎操作於相同TPS及轉速時會得到幾乎相同的容積效率，由於本分析乃左右兩圖分析時設定固定空燃比下，左右兩圖在分析時不同混摻比之燃油噴射量約相同，在最大扭力點發生時不一定會有較好的BSFC輸

出，因此最佳的BSFC點會發生在最大扭力點附近，有時會幾乎在同一操作點火角下產生。

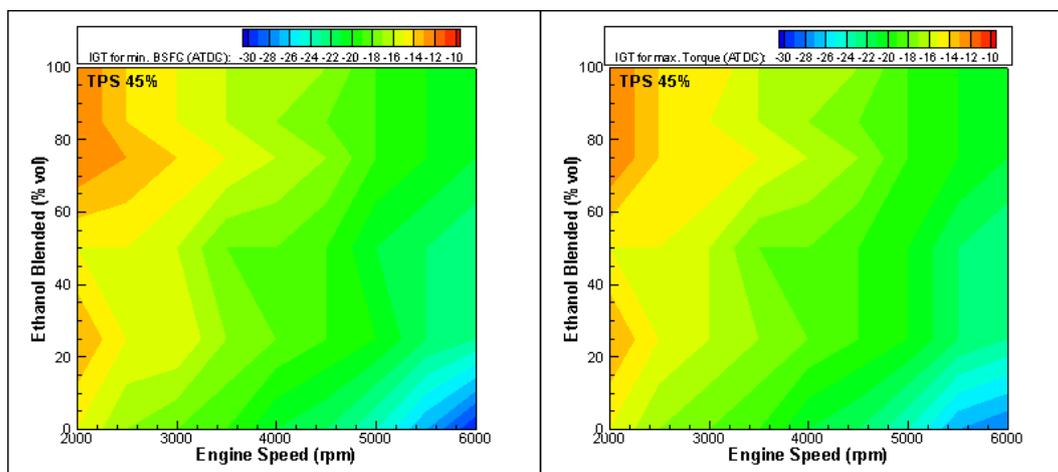


圖 8 不同乙醇混摻比下最低BSFC及最大扭力輸出之點火正時分佈圖(節氣門角度 45 度)

純汽油(E0)在高轉速(6000RPM)時點火正時角度約為-28oCA ATDC，但隨著乙醇混摻比增加至 E100 時，點火正時角則提前為約-20oCA ATDC，兩種油品相差約 8 度。在中轉速(4000RPM)時，則在 E0~E50 時為-19 oCA ATDC，而 E50~E100 時約為-16 oCA ATDC，兩區域相差約 3 度。在低轉速(2000RPM)時，E0 點火正時角約為-16 oCA ATDC，隨著混摻比提高至 E100，點火正時角約為-13 oCA ATDC，兩者相差約 3 度。

四、結論

本研究使用一維引擎性能模擬軟體(GT-SUITE)進行探討固定當量比時，不同比例乙醇混摻之引擎性能分析，完成不同火焰速度模型及燃油蒸發模型參數比較，兩組火焰速度模型之最佳化的點火正時有相同趨勢，隨著混摻比例提高，兩組模型則逐漸接近。

(一)、在不同的引擎轉速及節氣門開度下，當TPS提高時，最佳BSFC之點火提前角逐漸減少，提高乙醇混摻比例，將會提高BSFC。

(二)、最低的燃油消耗與最大扭力率所對應之點火正時角分佈圖相近，提高轉速時，採用不同混摻油品所需點火正時角修正值較大。

本研究所使用模型參數為內定值，故需實驗測試數據比對驗證，本研究結果提供設計與控制乙醇混摻燃料引擎時，擬訂引擎控制策略的重要參考依據。

五、致謝

感謝經濟部一般型學界科技專案計畫編號: 101-EC-17-A-16-S1-169之補助與華擎機械股份有限公司對於本專案之經費與技術支援，並感謝本中心同仁協助。

六、參考文獻

1. Bromberg et al. Calculations of knock suppression in highly turbocharged gasoline/ethanol engines using direct ethanol injection. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139, February 23, 2006.
2. Tsai HL, Chen JY. Estimate of Maximum Allowable Droplet Size for Motorcycle Gasoline Direct Injection Engines. 7th Asia-Pacific Conference on Combustion, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 24-27 May 2009.
3. 蔡欣倫、吳志勇、蔡文昌、陳志源，“缸內直噴引擎噴霧分析”，2010 中華民國燃燒學會第二十屆學術研討會論文集，台南台灣。
4. Tsai HL, Chen JY. Spray Analysis inside motorcycle gasoline direction injection engine. The 33rd International Symposium on Combustion, Tsinghua University, Beijing, China, 1-6 August 2010.
5. Tsai HL, Chen JY, Chin G. Spray Combustion Analysis in a Motorcycle Gasoline Direct Injection Engine. The 1st International Conference on Group Combustion of Droplets and Sprays, Tainan, Taiwan, 19-21 January, 2011.
6. 張學斌、蔡欣倫，“單缸缸內直噴汽油引擎點火正時之研究”，中華民國第十六屆車輛工程學術研討會，2011 年 11 月 11 日，台北，台灣。
7. 蔡欣倫，汽油缸內直噴 V 型雙缸增程引擎之研發，燃燒季刊，Vol. 21, No.2, pp. 2-13, May 2012。
8. GT-SUITE User Manual, Gama Technologies, 2009.
9. McAllister S, Chen JY, Fernandez-Pello AC. Fundamentals of Combustion Processes, Springer, New York, 2011.

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：vwchen@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 2013年八月

發行單位：中華民國燃燒學會

發行人：施聖洋

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、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：黃信閔

發行地址：32001桃園縣中壢市中大路300號

國立中央大學工學院能源研究中心

電話：(03) 4267354 ; 4267391

中華民國八十一年十二月創刊

中華民國一百零二年八月出版

局版台誌號第玖玖零捌號