

燃燒季刊

Combustion Quarterly

第二十二卷 第一期

中華民國一百零二年二月出版

Vol. 22, No.1

February 2013

目錄

CONTENTS

編輯札記	1
	蔡健雄、陳維新
台塑麥寮廠台朔重工公司專題討論會後報導	2
	黃大松
燃燒技術在石化工業的節能應用簡介	5
	李以露、焦鴻文、魏增武
微渦輪引擎罐狀燃燒室應用氫氣/甲烷混合燃料之燃燒特性分析	19
	劉錡融、石心怡
鐵礦燒結之數值模擬研究	39
	許聖彥、黃以松、鄒穎
機車引擎怠速熄火之啟動特性研究	50
	吳東翰、尤富芃、邱韋丞、洪榮芳、蔡建雄、曾全佑
同向流式螺旋管加熱爐的性能分析	64
	姜庭隆、黃惟泰、羅詩傑
太陽能驅動散熱系統控制模組之製作	77
	顏堉安、曾全佑、梁智創
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，石化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。本期共刊登七篇專業論文，分別來自大專院校、中鋼與工研院單位之研究成果，中國鋼鐵公司黃大松報導產業技術委員會主辦的「風力發電與台朔重工流動床鍋爐」專題討論會之重要議題與成果；工業技術研究院綠能與環境研究所李以露研究員等人發表燃燒技術在石化工業的節能應用，其中空燃比、排氣含氧量、排氣溫度、負載變動等方法加以適當的控制與調整，對於石化工業是非常重要的提高能源效率與降低污染排放的技術方法；長庚大學石心怡教授等人以數值模擬的方式探討微渦輪引擎罐狀燃燒室應用氫氣/甲烷混合燃料之燃燒特性，包括燃燒室火焰結構、冷卻、溫度型樣(Pattern Factor)、以及汙染排放等問題，提供微渦輪引擎應用含氫燃料之改善方案；中山大學許聖彥教授與中國鋼鐵公司黃以松、鄒穎研究員以數值模擬方式研究鐵礦燒結中之燃燒反應、相變化、以及孔隙介質內的熱傳及質傳等現象，結果可提供燒結製程設計之參考；崑山科技大學洪榮芳教授等人研究機車引擎怠速熄火之啟動特性，透過燃燒室或歧管內預噴油，可以加快啟動，減少啟動油耗，使引擎快速達到穩定的轉速，此結果可供機車廠商之設計參考；屏東科技大學姜庭隆教授以數值方法將同向流式螺旋管加熱爐的性能作最佳化分析，結果可提供螺旋管設計之參考；屏東科技大學姜庭隆梁智創教授等人則製作一組控制器用於協助車廂通風。透過太陽能的使用，控制模組協助進行電池儲能與驅動風扇，且監控車廂溫度，進而切斷或開啟風扇，以避免不必要的能源浪費。

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，增進產業研發技術。

副總編輯 蔡健雄

總編輯 陳維新

「中華民國燃燒學會產業技術委員會」

台塑麥寮廠台朔重工公司專題討論會後報導

2012.12.17

黃大松¹

Ta-Sung Huang

中國鋼鐵公司

China Steel Corporation, Kaoshiung, Taiwan

中華民國燃燒學會產業技術委員會於民國 101 年 12 月 14 日在台塑麥寮廠台朔重工公司舉辦「風力發電與台朔重工流動床鍋爐」專題討論會，並安排參觀台朔重工機械廠及鍋爐廠。當天與會委員包含台朔重工邱谷川協理、台電公司綜合研究所蒯光陸副所長、中鋼公司能源環境事務推動辦公室歐正章專業工程師，連同台朔重工汽電處、台電公司綜合研究所、中鋼公司等單位共有 15 人參加。

專題討論會由歐正章委員代表張西龍主任委員主持，在邱谷川協理致歡迎詞後，隨即由台朔重工專業人員進行「風力發電」、「台朔重工流動床鍋爐」、「流動床鍋爐技術說明」等簡報，簡報後安排參觀機械廠及鍋爐廠。歐正章委員致詞時感謝邱協理熱心安排，並宣佈下次委員會議訂於 102.05.17 星期五假台灣經濟研究院舉行，將邀請台經院專家針對生質能進行專題演講，請各委員出席參加。

由風力發電簡報得知，台朔重工於 12 年前在經濟部經費贊助下，於台塑麥寮廠安裝 4 部 660 kW 丹麥 Vestas 陸域風力發電機組，運轉迄今，實際發電量約為裝置容量全發電之 27%，達成設定目標。主要維修問題為發電機絕緣劣化、增速齒輪穿裂、葉片孔蝕、塔架生銹等，設備前 4 年相當可靠，自運轉第 5 年開始，主要是發電機絕緣劣化造成維護費用驟升 3 倍。根據運轉統計數據，風力發電在尖峰時段之發電量僅為全部發電量之 3~5%，明顯偏低，無法提供穩定電力供應，雖可以儲能技術來解決，但儲能費用與風力發電機組相當，無經濟可行性。另每度電發電成本約為 2.7 元，略高於現行陸域風力發電設備躉購費率之 2.6258 元，台朔重工表示，站在經濟效益觀點，風力發電並不值得投資。

由流動床鍋爐簡報得知，台朔重工與國外先進鍋爐廠商(如 Alstom、Foster Wheeler、Mitsubishi 等公司)合作，已擁有流體化床鍋爐相當厚實的製造、運轉技術，可承接整廠 Turn Key 工作(每座鍋爐規模達 150 MW)。目前，流體化床鍋爐主要市場為菲律賓、印尼等環保標準較鬆之東南亞國家，因相較粉煤鍋爐較為便宜。台朔重工目前可提供參雜 5~10% 生質物之流體化床鍋爐，但未有 100% 燒生質物之設計，主因為穩定可靠之生質物料源取得困難，採 100% 燒生質物設計將面臨斷料之高度風險。

會後安排參觀台朔重工機械廠及鍋爐廠，瞭解機械廠主要從事煉油與石化製

¹ 中國鋼鐵公司，研究員，E-mail: 125427@mail.csc.com.tw

程設備(反應槽、塔槽、壓力容器、覆土式儲槽)之設計、製造、安裝及建造，單一設備製造能力超過直徑 10 公尺，長度 100 公尺，重量 1000 公噸；鍋爐廠主要從事汽電共生廠及發電廠設備之規劃、設計、製造、安裝及建造，汽電共生廠承造能力可達 150MW，獨立發電廠承造能力可達 600MW。

與會人員於參觀後進行充分討論溝通，咸認收穫豐碩，對於台朔重工公司在風力發電運轉維修及流體化床鍋爐設計製造之技術能力皆留下深刻印象，台電公司綜合研究所蒯光陸副所長亦歡迎台朔重工未來可就風力發電議題與台電展開交流。

會議照片：



專題討論會會場



與會人員合照

燃燒技術在石化工業的節能應用簡介

Introduction of the combustion technology on petrochemical industry

李以露¹、焦鴻文²、魏增武³

Yi-Yin Li, Hon-Wen Chiao, Tzeng-Wuu Wey

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratories, Industry Technology and Research Institute

摘要

本文討論燃燒技術在全球石化工業目前面臨的狀況，從石化工業節能技術涵蓋範圍包括：最佳可行性技術、熱電整合、製程增進與製程整合、資源再利用與能源回收四項目，或最佳實行技術涵蓋的蒸氣、進料、燃料等三項目，均與燃燒技術相關，且石化工業最重要的反應程序與分離程序，其中包括加熱、蒸餾、裂解、與分餾過程分別均需要鍋爐、燃燒爐、裂解爐、燃燒塔與蒸餾塔等設備，與燃燒技術息息相關，因此如何從空燃比、排氣含氧量、排氣溫度、負載變動等方法加以適當的控制與調整，對於石化工業是非常重要的提高能源效率與降低污染排放的技術方法。

關鍵字：石化工業、燃燒技術、最佳可行性技術

Abstract

This article discusses the combustion technology in the global petrochemical industry is currently facing the situation, from the coverage of the petrochemical industry energy-saving technologies, including: the best available technologies, thermoelectric integration process to enhance process integration, resource recycling and energy recovery of four items, or best to implement the technology covered by steam, feed, fuel, and other items are associated with the combustion technology, and the most important reactions of the petrochemical industry procedures and separation procedures, including heating, distillation, cracking, fractionation process requires boilers, furnaces, cracking furnace, burning towers and equipment distillation column, is closely related to the combustion technology related, so how to be proper

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

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，副工程師

control and adjust the air-fuel ratio, exhaust oxygen content of the exhaust gas temperature, load changes, the petrochemical industry is very important improve energy efficiency and reduce pollution emissions.

Keywords: Petrochemical industry, combustion technology, best available technologies

一、前言

石化工業是化學工業的基礎，為塑膠、橡膠、人造纖維等高分子產業重要的上游原料工業，亦是支援資訊、電子、航太、汽車、生技、半導體、面板等高科技產業需使用材料原料的來源，此化工原料供應產業不僅可帶動其他產業發展，亦為配合其他產業發展不可缺少的基礎工業，是致力經濟發展所必趨推動的關鍵性產業。在化工原料是以原油(petroleum)及天然氣(natural gas)為原料，所生產的石油化學品的產業與產值，高達整體化工原料產值的 90 % 以上[1]，石油化學工業是我國非常重要的兆元產業。石油化學工業範疇是指以石油或天然氣為原料製造化學品的工業，製成品稱為石油化學品(petrochemicals)，廣義的石化業涵蓋上游的基本原料、中游生產的中間原料、與下游包括高分子材料的加工應用。

1.1 石化工業定義與範疇

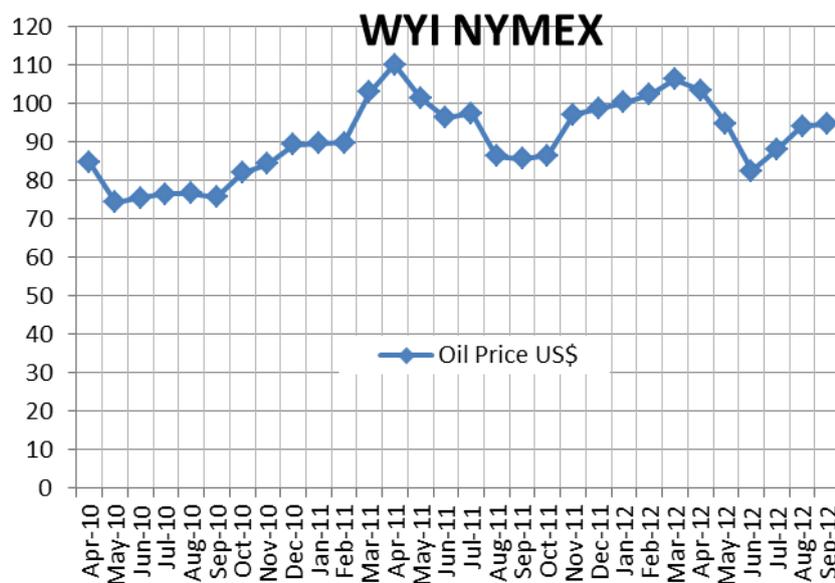
由於石化產品種類相當多且複雜，因此廣義的石化工業涵蓋生產石化產品(即石油化學品)，可區分為上游「基本原料」，基本原料再經由聚合(polymerization)、脂化(esterification)、烷化(alkylation)反應與其他化學反應，生成中游「中間原料」，而中間產物可在細分為四大類包括「塑膠原料」、「橡膠原料」、「人纖原料」、及「其他中間原料」，關於石化產業下游，主要是以中油生產的四大原料再製成各式食、衣、住、行使用的日常生活用品，例如油漆、清潔用品、人造纖維衣服、與輪胎等，而前述關於資訊、電子、汽車工業等精密產品如相關零件、外殼、輪胎、化學品等的硬體部分約 60 % 至 70 % 均來自於石化工業[1]。詳細上、中游石化產品內容如下表一石化產品分類所示：

表一 石化產品分類[1]

	項目	產品
上游	基本原料	乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯
中游	塑膠原料	LDPE(低密度聚乙烯)、HDPE(高密度聚乙烯)、PP(聚丙烯)、PVC(聚氯乙烯)、PS(聚苯乙烯)、ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯)
	橡膠原料	BR(聚丁二烯橡膠)、SBR(苯乙烯-丁二烯橡膠)、NBR(丙烯腈-丁二烯橡膠)、TPE(熱可塑性橡膠)
	人纖原料	PTA(純對苯二甲酸)、EG(乙二醇)、CPL(己內醯氨)、AN(丙烯腈)
	其他中間原料	VCM(聚乙烯單體)、SM(苯乙烯單體)、VAM(醋酸乙烯單體)、MMA(甲基丙烯酸甲酯)

1.2 國際石油價格

國際能源市場變化趨勢並不具有可持續性與穩定性，傳統能源如原油或天然氣的供給均集中於世界較不穩定的區域，顯示能源價格巨幅波動，能源供給緊張，產油國地緣政治風險增加，不利能源生產、運輸、基礎設施的建立與維護，威脅全球的能源安全。據國際原油價格，從 2010 年起在全球經濟復蘇基礎不穩定的情況下持續震盪，歐洲地區受財政緊縮計畫困擾，美國陷入二次衰退，美元匯率持續走跌，且美國原油庫存減少，導致國際原油價格大幅攀升，中國大陸加息對經濟增長帶來的負面影響。2010 年末至 2011 年初，北非突尼西亞發生茉莉花革命(Jasmine Revolution)，民眾示威及暴動行動擴散到葉門、約旦、和埃及，影響中東原油運輸，導致國際油價全面走高；並持續蔓延至利比亞導致該國陷入嚴重混亂，石油整體性停產，引發另一波油價上漲，此外，2011 年 3 月 11 日日本本州東北部仙台外海發生 9.0 級強烈地震，引發巨大海嘯，且造成福島核能發電廠反應爐冷卻失控與輻射外洩，全球恐慌，世界各國重新檢討能源政策與既有核電廠安全，圖一為 2010 年至 2012 年近期國際石油價格。

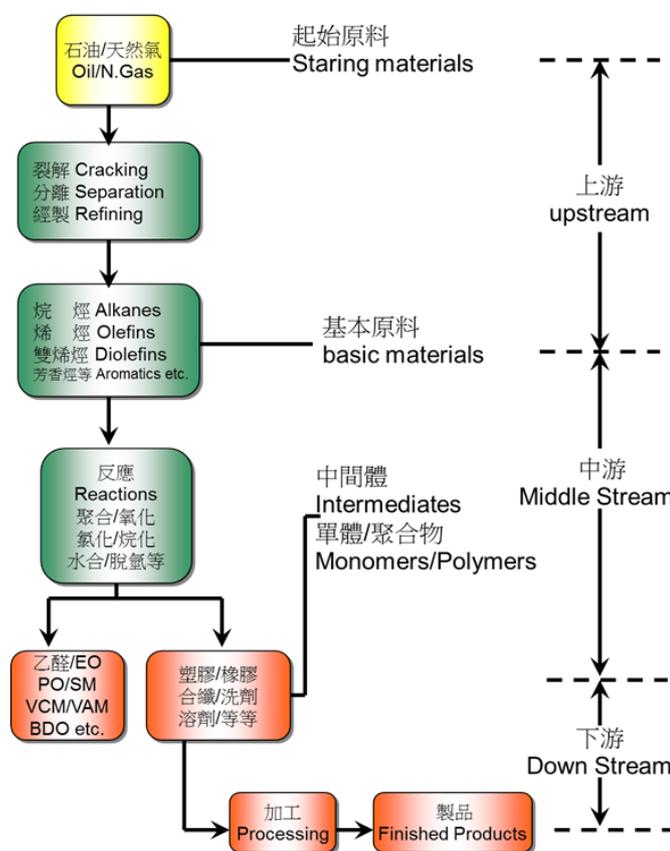


圖一、近期國際石油價格[2]

1.3 石化工業產品製程單位耗能

世界各國在評估石化工業的能源消耗可依據各個石化產品在原料(feedstock)階段能耗與製程(process)階段能耗的總和來計算[3]，由於石化產品的製程相當複雜，圖二顯示石化工業一般產品製程流程[1]，可直接檢視其中各項產品相互關係，如屬於原料(raw materials)、中間產物(intermediates)、或衍生物(derivatives)屬性。為避免重複計算(double-counting)，因此原料階段能耗定義範圍是由原油(fossil oil)至第一次轉換(first conversion)，例如苯、乙烯、丙烯等的石化產品，此產品做為其他石化產品的原料、中間產物、或衍生物；因此在計算產品製程單耗(即單位耗能)時需要仔細扣除中間產物與衍生物的能耗部分[3]。且此產品製程單

耗值在國際上僅能作為改善能源效率的建議參考值，提供石化工業節約能源的潛在能力，無法作為最終能耗設定指標或各國比較依據。表二顯示國際石化工業 57 項產品製程建議單耗現值，其中可涵蓋 66 項石化產品[3]，且亦將國內現有石化產品單位耗能指標同時也列入表二中比較[4,5]，此產品製程單耗值是依據國際上目前石化工業的最佳實行技術(best practice technology, BPT)，此最佳實行技術定義為經濟上具可行性的技術(economically viable)，表二以該產品製程所需要的電力、進料、燃料、與蒸氣等四大耗能項目，其中電力耗能僅有 1/3 可從石化製程的系統性分析來獲得，且電力耗能由短期至中期加以評估可具有 20 % 的節能潛力[3]。而產品製程單位耗能指標建立目的為取得生產單位產品所需消耗的能源量，作為既有石化生產工廠或新設石化工廠改善能源效率的參考依據[4]。



圖二、石化產品製程流程[1]

表二、石化產品製程單位耗能值[3, 5]

Process	Electric (GJ/t)	Feedstoc k (GJ/t)	Fuel (GJ/t)	Steam (GJ/t)	我國單耗建議值	
					(Mcal/t)	(GJ/t)
Acetic acid [醋酸]	1.2			4.6	1297.2	5.4
Acetone	0.5			10.9		
Rylonitrile (ACN)	2.1		0.3	-7.1		
Adipic acid	1.2		1.0	20.6		
Benzene (Steam cracking)	0.7	0	13.1	-1.5		
Benzene (Aromatics extraction)	0.1	45		2.2		
Butadiene (Steam cracking)	0.7	0	13.1	1.5		
Butadiene (C ₄ separation)	1.3	45		7.5		
Butylene	0.1	45		2.2		
Caprolactam	2.6		0.2	-3.6		
Cumene			2.1	-3.1		
Cyclohexane	0.2			-1.8		
Dimethyl terephthalate (DMT)			4.7			
Diphenymethane diisocyanate (MDI)	8			1		
Ethanol	2			23.1		
Ethylene [乙烯]	0.7	45	13.1	-1.5	5316.0	22.2
Ethylbenzene (EB)	0.2			3.6		
Ethylene dichloride (EDC)	0.6		4.4			
Ethylene glycol (EG) [乙二醇]	0.5		0.8	3.9	1100.6	4.6
Ethylene oxide (EO)	2		2.5			
Formaldehyde	1.9			-5.3		
Isopropyl alcohol (IPA)	0.2		5.2	6		
Maleic anhydride	0.3			2.2		
Melamine	4.7		7.9	4.3		
methacrylate	0.3			2.2		
Methanol (from natural gas)		20		9.4		
Methanol (from coal)		20		16.1		
Methyl butyl ether (MTBE) [甲基第三丁基醚]	0.1			0.9	276.1	1.2
Oxo alcohols	1			2.1		
Phenol [酚]	1.5			10.1	2905.8	12.2
Phthalic anhydride	1.8		20			
Propylene (Stream cracking)	0.7	45	13.1	-1.5		
Propylene (FCC)	0.1	45		2.2		

表二、石化產品製程單位耗能值 (續)

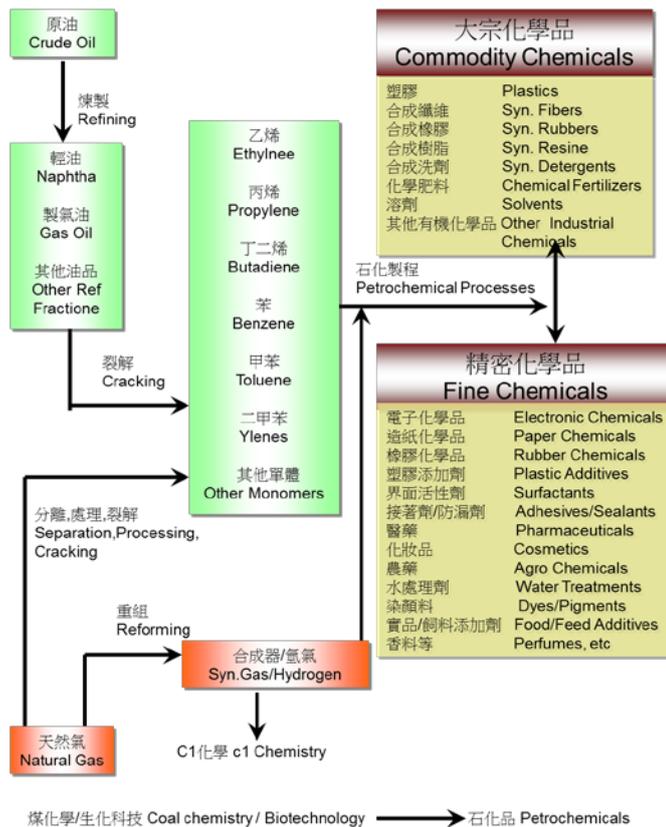
Process	Electric (GJ/t)	Feedstock (GJ/t)	Fuel (GJ/t)	Steam (GJ/t)	國內單耗 (Mcal/t)	國內單耗 (GJ/t)
Propylene oxide	2.1			15.8		
Purified terephthalic acid (PTA) [純對苯二甲酸]	0.8			2.5	1116	4.6
Styrene (SM) [苯乙烯]				8.6	1971	8.3
Toluene (aromatics extraction)	0.1	22.5		2.2		
Toluene diisocyanate (TDI)	7			24.1		
Xylene (aromatics extraction)	0.1	45		2.2		
p-Xylene	0.5		6.3	0.9		
Vinyl acetate monomer	7.5			3.1		
Urea	0.6			2.5		
Phenolic resins				11.1		
Polycarbonate (PC)				11.5	4134.2	17.3
Polyethylene, high density (HDPE) [高密度聚乙烯]	2.2			1.1	1079.1	4.5
Polyethylene, low density (LDPE) [低密度聚乙烯]	8.8			-2.4	2193.6	9.2
Polyethylene, linear LDPE (LLDPE)	1.1			1.8		
Polyethylene terephthalate (PET)	1.8		4.1			
Polypropylene (PP) [聚丙烯]	2.2			0.1	947	3.9
Polystyrene (PS)	1		0.5			
Polyvinyl chloride (PVC) [聚氯乙烯]	1.6		0.5	1.4	784.7	3.3
Urea formaldehyde (UF) and other resins and fibers	0.5			2.8		
Synthetic rubber and latex	6.2			22.1		
Ammonia from coal	9.3	20.7	17.3	-1.4		
Ammonia from oil	0.7	20.7	16.1	-1.7		
Carbon black	4.5	32.8				
chlorine	25			2.1		
Oxygen	1.6					
Soda ash				11.1		
Titanium dioxide	7		4.1	9.3		

1.4 石化工業結構與特性

石化產業結構如圖三所示[1]，而石化產業特性具有四種模式：「資本密集」、「技術密集」、「完整一貫作業體系」與「景氣循環」。越往上游設備投資金額越

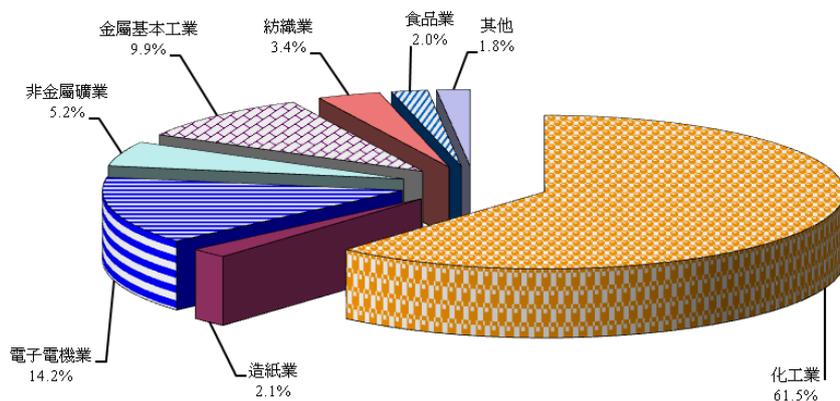
高，所需技術越高，回收年限越久，風險也越大；相反的，越往下游則投資金額越小，所需技術相對簡單，風險越小，回收年限也較短。整體而言，石化產業為高技術、高資本、與大規模經營模式，以下就石化業四個模式包括「資本密集」、「技術密集」、「完整一貫作業體系」、「景氣循環」等說明如後：

- (1) 資本密集模式，不論是製程技術取得與建廠工程均需要龐大的資金，投資金額與產能規模、範疇、廠址、原料供應、下游工業銜接、與工安及環保要求有關，自然形成進入障礙，限制廠商家數、市場上亦自然形成獨佔與寡佔的現象。以台塑六輕為例，產能規模設計在年產乙烯 450 千公噸與其下游計畫，投資金額高達台幣 560 億元，而六輕擴大計畫，年產量為 1350 千公噸與其下游計畫，其投資金額大幅提高達台幣 3600 億元，為我國經濟史上最大的民間投資計畫[1]。
- (2) 技術密集模式：石化工業製程需要長時間長期的研究開發，初步在實驗室內獲得可行的製程結果後，還需實際工廠試驗且逐步放大測試後，才形成可商業化的製程，關於石化廠興建的設計、建造、安裝、試車、與量產，所需的技術層面涵，蓋物理、化學、化工、機械、電機、自動控制、材料、公共安全、與環境保護等產業技術，因此石化工業屬於高度技術密集的產業特性。
- (3) 完整一貫作業體系：石化產業的上、中、下游分工相當清楚明確，越靠近上游產品的不易運輸性越高，越下游產品則越容易運輸，因此，石化業上游產業的投資傾向於接近區域供給與市場，下游產業的投資則傾向於在地資源競爭。
- (4) 景氣循環模式：石化工景氣循環現象源自於石化產品的供需狀況，當景氣於高峰期間時，產品供不應求廠商獲取大幅度的利潤大肆擴充後，吸引新的競爭廠商加入，但新石化廠需要二至四年期間建廠至投產，直至新產能投入市場後產品轉為供過於求，利潤獲利減少甚至於虧損，廠商開始減產或削減投資甚至退出市場，直至需求呈診大於供給成長後，景氣再緩慢的進入另一新的高峰期，因此石化產業景氣明顯呈現週期性循環。



圖三、石化工業產業結構[1]

根據經濟部能源局公佈資料顯示[6]，受全球經濟強勁復甦之影響，實質 GDP 成長 10.72 %，能源消費成長 6.40 %，能源消費中主要的貢獻來自於全國占比 53.81 % 的工業部門(不含能源部門)，能源消費量成長率為 8.99 %，工業部門能源消費占比稍有成長趨勢；能源密集度高低依序為化工業(含石油煉製與化材業)、非金屬礦業、造紙業、金屬基本工業、紡織業、食品業、電機電子業。能源密集度排名前 4 名者為石油煉製與化材業、金屬基本工業、非金屬礦業、及造紙業。如圖四主要耗能產業占工業部門耗能百分比所示[6,7]，以鋼鐵業(金屬基本工業，9.9%)、化工業(石化業 61.5%)、水泥業(非金屬礦業，5.2%)及造紙業(2.1%)等 4 項係產業耗能最大，若優先加強輔導能源密集工業耗能較大之能源用戶並依「能源管理法」規定，強制要求高耗能產業主要耗能設備之能源效率需符合政府公告之標準，以提高其能源使用效率，則可達成節能減碳的目標。



圖四、主要耗能產業占工業部門耗能百分比[7]

二、石化工業節能技術

全世界石化工業在節能領域由短期至中期的節能技術包括最佳可行性技術(best available technology, BAT)、熱電整合(combined heat and power, CHP)、製程增進與製程整合(process intensification / integration)、與資源再利用與能源回收(recycling and energy recovery)等四大項目，其中最佳可行性技術亦可再區分製程熱節能(process heat BAT)技術與電能節能(electricity BAT)技術[3,9]。

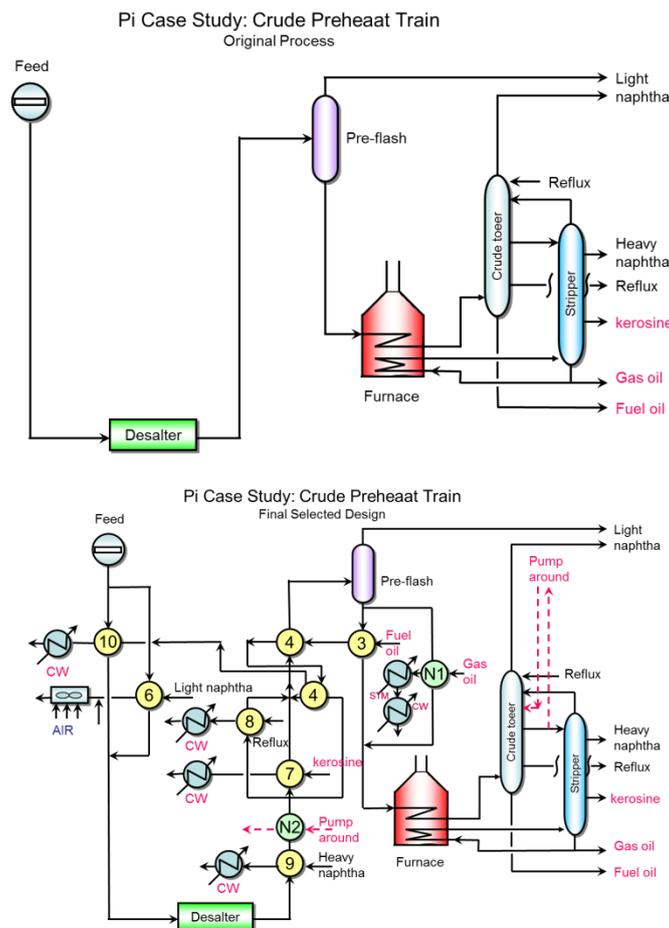
2.1 熱電整合

關於石化工業熱電整合方面，具有提升能源使用效率、降低污染排放、增進能源供應的安全性、與降低能源價格等優點；評估在國家層面的整體石化工業而言，具有可提升 20 % 至 40 % 的節能潛力；若以個別的石化工廠層面評估，在已開發國家以燃氣做提供電力基礎較新的石化工廠，透過熱電整合估計可節能約 4.5 %，而在開發中國家若以燃煤做為電力供應系統的石化工廠，評估可節能 5 約 10 %。全世界整體石化工業若能在整體電力供應利用熱電整合技術約可提供 10 % 至 25 % 的節節潛力[8]，但前提須要各國政府的協助與支持，目前熱電整合技術需要突破市場與政策的阻礙，例如污染排放較高的限制、較重的賦稅支出等，均不利於推展熱電整合[3]。

2.2 製程增進與製程整合

關於石化工業製程增進與整合方面，則包含製程範圍(process level)與整廠範圍(site level)二部分，其中的廢熱部分已經包含在最佳可行性技術的製程熱節能技術範圍內，因此更進一步的節能技術可透過瓶頸分析技術(pinch technology)的熱能串接(heat cascading)與製程整合的產品或副產品製程流程整合(如副產品做為另一產品的原料來源)，其中瓶頸分析技術如圖五所示[9]，可將如石化製程中常見的蒸餾塔、裂解爐、加熱爐、與反應器等設備，藉由製程流程中的流量與溫

度，解析其冷能與熱能利用情形，透過熱交換器等節能設備將加熱與冷卻等步驟，做完整與適切的節能措施；圖五是以常見的煉油廠為例，進行瓶頸分析，例如煉油工廠是一系列製程串聯而成，原油入料至產品需經許多單元分餾、精製而成，而各製程單元於原料進入反應器或蒸餾塔，均需經過預熱及加熱爐提溫以達到工作溫度，藉提升下游製程熱入料比例提高入料溫度可降低加熱爐熱負荷，減少燃料成本[5]。透過此製程整合方式評估具有約 5 % 至 10 % 節能潛力，評估能源效率在整廠範圍可再提升約 3 % [3,10,11]。



圖五、瓶頸分析[9]

2.3 資源再利用與能源回收

石化產品如塑膠材料利用至生命週期的最終，可採用機械再利用(mechanical recycling)方式、原料再利用(feedstock recycling)方式、與能源回收(energy recovery)方式等，其中以機械再利用較為普遍且廣泛使用的方式，例如以機械再利用方式回收高分子(polymer)材料約可節省 50 GJ/t 的能源；若以每年全世界塑膠的消耗量，扣除高分子材料應用，僅計算應用於塗層或接合劑，則每年使用達 245 Mt/yr，而塑膠垃圾量約 120 Mt，若可回收其中的 10 Mt 再利用產生高分子替代品，則每年約可節省 500 PJ 的能源；然而實際上可轉換高分子替代材料僅占全

世界 1/3 的塑膠垃圾，其餘 2/3 的塑膠垃圾可轉換為非高分子(non-polymer)替代材料需要額外再耗能源來處理，且每年約 30 Mt 的塑膠垃圾是以燃燒焚化處理。因此若以此資源再利用與能源回收方式每年約可節省 3 % 的石化工業耗能量，即約有 600 PJ 的能源可以再回收利用[3]。

三、燃燒技術於石化工業之應用

由前述 BPT 的最佳實行技術涵蓋的蒸氣、進料、與燃料等三大耗能項目；配合最佳可行性技術所涵蓋的熱電整合、製程增進與製程整合、資源再利用與能源回收等石化工業三大 BAT 節能技術[3]，可發現燃燒技術在其中扮演非常關鍵的節能技術，石化工業最重要的製程包括反應(reaction)程序與分離(separation)程序，其中的加熱、蒸餾、裂解、與分餾過程需要如常見的鍋爐、燃燒爐、裂解爐、燃燒塔與蒸餾塔等設備，均與燃燒技術相關，因此如何從空燃比、排氣含氧量、排氣溫度、負載變動等方法加以適當的控制與調整，對於石化工業是非常重要的提高能源效率與降低污染排放的技術方法，分別簡述如下：

3.1 鍋爐

鍋爐種類若以用途分類可區分為：工業鍋爐、船用鍋爐、汽電鍋爐、熱水鍋爐；其中工業鍋爐又可分為水管式鍋爐、火管式鍋爐、熱煤鍋爐、與貫流式鍋爐。水管式適用於高壓力蒸汽，如一般鍋爐及汽電鍋爐，效率較高，為石化工廠常見採用的鍋爐形式；火管式鍋爐因煙道熱氣走管內亦通稱為煙管式鍋爐，效率較水管式鍋爐為低；煙管式鍋爐的特性為在鍋爐中設有爐筒及煙管群，安裝及製造容易，操作及維修比水管容易，但噸數較小。其次若以鍋爐使用的燃燒器來分類亦可區分為：壓力霧化式燃燒機、蒸氣霧化燃燒機、旋轉式霧化燃燒機等的鍋爐種類[12]。石化業通常採用大型鍋爐來提供製程蒸汽，或由汽電廠抽汽供應製程使用，影響鍋爐效率的因素包括：(1)燃料種類與空燃比控制及排氣含氧量，通常使用燃料的種類會直接影響燃燒空燃比的控制與排氣含氧量的控制，例如採用燃料油或石油焦的鍋爐其排氣含氧量通常維持在 2.5 % 至 3.5 %；若為燃氣鍋爐則排氣含氧量控制在 1.8 % 至 2.5 %；而燃煤鍋爐(包括大型貫流式與大型水管式鍋爐)，其排氣含氧量可維持在 4.4 % 至 5.0 %；汽電鍋爐則排氣含氧量範圍更高，約 4.4 % 至 7.0 %；(2)設置容量與負載率，石化廠鍋爐設置容量通常均屬於大型鍋爐(一般為每小時 30 噸以上)，負載越高則鍋爐效率越高，負載直接與石化廠的產能設定及生產排程有關；(3)熱回收與熱交換，鍋爐設置廢熱回收裝置可節省能源與降低排氣溫度，操作鍋爐時避免水牆(水盤管)結垢導致降低熱交換效率，均可提升鍋爐效率。其中燃燒效率是指以燃燒器將燃料完全燃燒而言，不完全燃燒所產生的 CO 及因霧化不良而使燃料未反應皆會降低燃燒效率；熱效率係以鍋爐傳熱面積所能吸收燃燒的熱量，因此結垢即影響熱效率最為嚴重；鍋爐效率為鍋爐實際產生蒸汽的效率，包括燃燒效率及熱效率之結合及爐體幅射熱和對流熱損失。

3.2 燃燒爐

石化工業燃燒爐亦屬於通稱的加熱爐範圍，分類方式依據使用燃燒爐的形式、用途、燃料種類、操作條件、用途與加熱方式區分，台灣地區的燃燒爐普遍採用箱型或圓形燃燒爐為主，以煉油業與化學材料業使用為主，而影響加熱爐效率的因素包括：(1)燃料種類，包含液體燃料(如重油)或氣體燃料(如製程有機廢氣)，且使用種類會直接影響排氣的含氧量；(2)操作負載，如煉油業的燃燒爐經常依據每個批次購買的原油來源的不同而更換燃燒爐負載操作，在較低負載時會降低燃燒爐的效率，但在較高負載時消耗的燃料亦隨之提高，需隨實際操作狀況而調整燃燒爐負載條件；(3)廢熱回收裝置，在燃燒爐設置容量或負載較高時常設置廢熱回收裝置，若設置容量較低或負載較小的情況下會因經濟效益而未設置熱回收設備，且此廢熱回收亦直接影響排氣的溫度(約 100 °C 至 200 °C)與燃燒爐效率(約 4 % 至 10 %)；(4)爐壁保溫材料，由於石化業使用的燃燒爐體積較大，使用燃料量較高，因此爐壁內側有耐溫需求以提高使用壽命，外側有保溫的需求以降低熱損失，節省能源使用與降低操作成本。節能方法可包括煙道氣廢熱回收、過剩燃燒空氣量控制、與提升進氣或排氣的鼓風機馬達效率為主。

3.3 裂解爐

石化工業通稱的加熱爐可區分為燃燒爐與裂解爐，裂解爐與燃燒爐類似，但燃燒爐內加熱的工作流體(如原料或中間產物)不會產生化學變化，如應用在蒸餾或分餾製程的前段加熱程序；而裂解爐內被加熱的工作流體直接進行裂解反應(如長鏈的鍵結原料切斷成短鏈的鍵結中間產物或產物)，因此裂解爐的提升能源效率方式與前述燃燒爐非常類似。

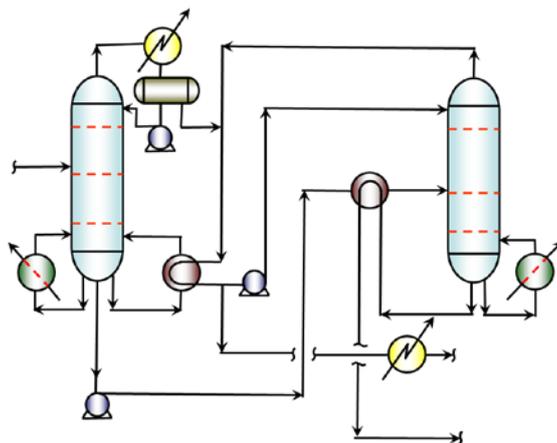
3.4 燃燒塔

燃燒塔是石化廠常見的安全設備，將可燃製程廢氣透過燃燒塔燃燒方式，避免廢氣對石化廠的工業安全影響，但目前由於能源價格日益高漲，與能源取得不易的狀況下，此製程可燃廢氣已無法經年累月藉由燃燒方式銷耗使用，因此國外石化先進國家均大量減少燃燒塔數量，僅保留少數安全考量的燃燒塔，大部分的製程可燃廢氣均已克服熱值與成分劇烈變動難以利用的技術困難點，可獲得極佳的節省能源降低 CO₂ 排放。

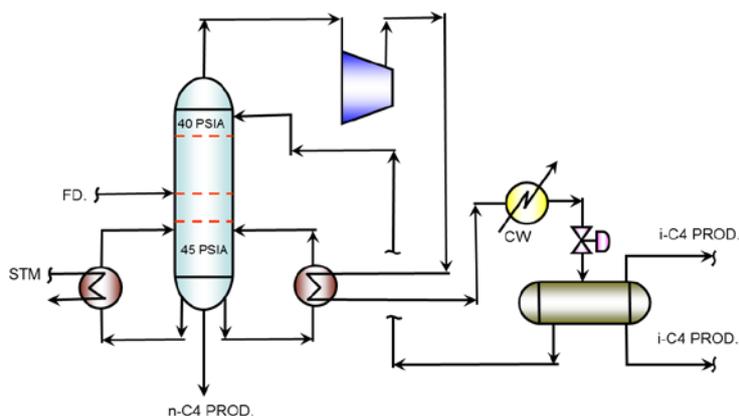
3.5 蒸餾塔

石化工廠內為分餾及精緻製產品皆有設置蒸餾塔，亦為石化廠耗能設備。底部有蒸汽再沸器，加熱塔底溫度，頂部往往用水冷卻器或空氣冷卻器將汽化產品冷凝為液體，幾乎底部加之熱量完全由頂部冷卻器移除，實為一大浪費；最有效可行方式為預熱本塔進料，或其他流體之預熱，唯需注意進料位置之調整，以免影響整體之平衡操作。塔頂餘熱應先予以回收至某一程度後再用水冷卻器或氣冷卻器冷凝至所須溫度。迴流溫度應以飽和溫度為佳以減少熱能無謂消耗。

蒸餾塔原本如圖六為在室溫的工作流體進入以燃燒器或蒸汽再沸器加熱的蒸餾塔底部吸收熱能，達到蒸餾的工作溫度後壓高溫的工作流體至塔頂流出，此時含餘熱的工作流體進入冷卻水冷卻或空氣冷卻至室溫，此一加熱冷卻的製程在燃料價格較低的過去是可接受的製程方式；但在目前能源價格高漲且與節能省碳的原則相違背，因此可以將塔頂餘熱利用機械蒸汽再壓縮系統先予以回收至某一程度後再用水冷卻器或氣冷卻器冷凝至所須溫度。且壓縮機需符合迴流溫度應以飽和溫度為佳以減少熱能無謂消耗，以及工作流體的可操作性，如圖七所示：



圖六、化工廠蒸餾塔系統[13]



圖七、化工廠蒸餾塔增加機械蒸汽再壓縮系統[13]

四、結論

本文探討燃燒技術在石化工業的應用範圍，從製程流程或能源使用分析，如全球石化工業節能技術涵蓋包括 BAT(最佳可行性技術)、熱電整合、製程增進與製程整合、與資源再利用與能源回收四大項目，或 BPT(最佳實行技術)涵蓋的蒸氣、進料、與燃料等三大耗能項目均與燃燒技術相關，且石化工業最重要的反應程序與分離程序，其中的加熱、蒸餾、裂解、與分餾過程需要鍋爐、燃燒爐、裂

解爐、燃燒塔與蒸餾塔等設備，均與燃燒技術相關，因此燃燒在石化工業的節約能源與降低污染方面扮演相當重要的關鍵技術。

五、致謝

本文承經濟部能源局提供研究經費，謹此誌謝。

六、參考文獻

1. 范振誠，石化產業年鑑，經濟部技術處，台北，2012。
2. <http://www.gasearch.com/onp.php>, WTI NYMEX Oil Prices.
3. Energy technology transitions for industry, *International Energy Agency*, pp. 105-134, 2009.
4. 吳榮華，產業節能技術手冊-石油化學業，經濟部能源局，台北，2006。
5. <http://emis.erl.itri.org.tw/>, 能源資訊網, 經濟部能源局。
6. <http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/home/Home.aspx>, 經濟部能源局，台北。
7. 詹益亮，工業部門能源查核管理與節能技術服務計畫，經濟部能源局，台北，2011。
8. IEA, Chemical and Petrochemical Sector-Potential of Best Practice Technology for Improving Energy Efficiency, *Information Paper on energy efficiency indicators*, OECD/IEA, Paris, 2009.
9. 陳誠亮，<http://pse.che.ntu.edu.tw/en/html/teaching.html>，Process System Engineering Lab。
10. N. Martin, E. Worrell, M. Ruth, L. Price, R. N. Elliott, A. Shipley, S. J. Thorpe, Emerging Energy-Efficient Industrial Technologies, *Lawrence Berkeley National Laboratory, Ref. LBNI-46990*, Berkeley, CA, October, 2000.
11. IEA, Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions, *OECD/International Energy Agency*, Paris, 2007.
12. 焦鴻文，小型鍋爐最適化調整與節能技術，鍋爐系統節能技術與應用，工研院南部學習中心，高雄，2012。
13. 簡國祥，石化業提升能源效率研討會，經濟部能源局，高雄，2012。

微渦輪引擎罐狀燃燒室應用氫氣/甲烷混合燃料之燃燒特性 分析

Analysis of Combustion Performance of Hydrogen/Methane Blended Fuels Applied in a Can Combustor for a Micro Gas Turbine

劉錡融¹、石心怡²

Chi-Rong Liu, Hsin-Yi Shih

長庚大學機械工程學系

Department of Mechanical Engineering Chang Gung University, Taoyuan, Taiwan

摘要

本研究以數值模擬的方式探討微渦輪引擎罐狀燃燒室應用氫氣/甲烷混合燃料之燃燒特性，此模型乃使用商用熱流分析軟體 STAR-CD，進行三維可壓縮 $k-\epsilon$ 紊流流場分析並搭配 PPDF (Presumed Probability Density Function) 化學反應模型。分析結果包括火焰結構、溫度分布、主要物種分布及其污染排放特性等。在參數研究方面，改變燃料噴嘴速度從 20 m/s 至 60 m/s，氫氣的比例從 0 % 至 90 % (Mole Fraction)。當固定燃料噴嘴速度及燃料質量流率時，整體當量比 (Equivalence Ratio) 及熱輸入 (Heat Input) 會隨氫氣在混合燃料中佔有之比例上升而增加，同時添加氫氣燃燒會使燃燒筒內溫度升高；且隨著氫氣在混合燃料中佔有之比例提高，高溫火焰會逐漸移動到燃燒筒中段，致使燃燒筒尾段溫度增加。若燃料質量流率隨氫含量增加而下降，其高溫火焰能在較低整體當量比下穩定駐焰且氮氧化物排放量降低。研究並分析相關燃燒室性能，包括燃燒室火焰結構、冷卻、溫度型樣 (Pattern Factor)、以及污染排放等問題，提供微渦輪引擎應用含氫燃料之改善方案。

關鍵字：氣渦輪引擎燃燒、氫氣/甲烷混合燃料、微渦輪引擎

Abstract

Due to the shortage of hydrocarbon fuels and the demands of greenhouse gas emission reduction, hydrogen or hydrogen/hydrocarbon blended fuel has been considered or used as one of the most promising clean fuels in the applications of engines. To better understand the combustion performance by using hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbine, the combustion

¹長庚大學機械工程學系，博士班研究生，E-mail: liuchihzong@gmail.com

²長庚大學機械工程學系，副教授

characteristics of a can type combustor has been modeled and the effects of hydrogen enrichment were investigated. The simulations were performed using the commercial code STAR-CD, in which the three-dimension compressible k- ϵ turbulent flow model and presumed probability density function for chemical reaction between methane/hydrogen/air mixtures were used. The results showed the detailed flame structures including the flow fields, distributions of flame temperature, major species and gas emissions. In the parametric studies, the injection velocities of hydrogen/methane blended fuel were varied from 60 m/s to 20 m/s, and the percentage of hydrogen was from 0% to 90% in mole fraction. At a constant fuel supply rate, equivalence ratio and heat input increase with fuel inlet velocity and hydrogen percentage. The combustion flame temperature and exit gas temperature increase, consequently the combustion efficiency. If the fuel supply rate decreases with the increase of hydrogen percentage, the flame could be stable at lean condition and NO_x emission would be decreased. Further investigations of the combustor performance were made, including pattern factor, hot spots at exit, poor cooling locations, and pollutant emissions, to improve the combustor design for the micro gas turbine engine with hydrogen/methane blended fuel as an alternative fuel.

Keywords: Gas turbine combustion, hydrogen/methane blended fuels, microturbine

一、前言

近年來，石化能源存量短缺、價格不斷飆升及環保意識抬頭，在溫室氣體排放減量的壓力下，尋求潔淨且有效率的替代能源，成為各先進國家努力的方向，但如何有效的利用日益減少的石化能源也是一大課題。目前世界上以石化能源為主之動力或電力系統仍佔將近 80% 以上，但也因此衍生了日趨嚴重的環保問題。除了需要減少石化能源的使用量及控管溫室氣體的排放外，急需積極開發潔淨的替代能源，如氫能源與再生能源等。而在國內的電源供應系統上，仍以火力燃煤發電為主；其衍生嚴重的溫室氣體排放問題，一直是讓人頗為詬病的一點。而台灣的水資源也已被開發殆盡，加上核能發電引發的核廢料後續處理問題。因此以燃油或燃氣為燃料的高熱效率、低排放汙染的氣渦輪機組就成為政府整體發電政策的一環。而其中又以小型渦輪發電機較其他種類的發電機具有較大的優勢。因此基於環保、經濟考量、分析購置成本及操作成本(包含燃油、維修及使用期限)，微型氣渦輪發電機頗具市場利基。美國能源部更在 2000 年起即啟動所謂的微渦輪引擎計劃(Microturbine) [1]，積極的鼓勵研發 30-100 kW 的產品，以分散式電

源或可攜式電源為發展方向。

以氫氣為燃料的能源應用，一直為各界努力的目標，氫燃燒之火焰傳播速度快、熱值高、引燃能量低、可燃極限範圍大等特性，是氫燃料的主要優點；但是相對的氫能的儲存與防火是很大的安全問題，也是它的缺點。同時氫的質量密度低、單位體積能量密度也低，在應用上不比傳統的天然氣或傳統汽油來的方便。然而使用氫能燃燒之最大優點在於燃燒後沒有二氧化碳的產生，唯一的可能的污染是來自氫氣與空氣反應所產生的氮氧化物(NO_x)，但若與純氧反應則無此問題，因此以氫氣本身做為燃料之優越性從早期的太空梭火箭推進系統應用氫氣作為燃料即可看出。但以純氫作為燃料使用現階段並不普遍，多以氫混合燃料應用，而含氫混合燃料主要分為三種方式：含氫合成氣體(Syngas)、氫氣與甲烷(天然氣)及氫與主要參考燃料(Primary Reference Fuels)。其中又以氫氣/甲烷混合燃料的研究為最多，主要是因為甲烷燃燒之後較一般石化燃料都還要來的潔淨，所以時常被用來作為發電系統及引擎動力的燃料。而往後氫氣運輸方式也可以藉由現存天然氣運送管線傳送，所以氫氣與甲烷混合燃料也被稱為 Hythane [2]。而藉由添加氫氣於甲烷之中混合燃燒可以減少氮氧化物的排放量，其主要的原因在於甲烷添加氫氣之後可使其火焰穩駐在較低的當量比下，使的整體燃燒溫度下降，達到降低氮氧化物排放量的目標。使用氫混合燃料並應用於先前提及的微型氣渦輪發電機的燃燒系統中，就如同使用汽油、甲烷或丙烷一樣，但其燃燒性質有所不同，燃燒之特性也有所不一樣。

近年有許多學者探討氫氣/甲烷混合燃料應用於內燃機引擎並作為車輛動力的來源，探討其燃燒特性，發現在貧油燃燒下使用氫氣/甲烷混合燃料燃燒會增加引擎的效能及輸出功率[3,4]。另也有學者探討使用氫氣/甲烷混合燃料燃燒之內燃機引擎其引擎污染排放特性，在貧油環境下添加氫氣燃燒，氮氧化物的排放量會跟著氫氣添加比例上升而增加[5]。而在探討內燃機引擎貧油燃燒的可燃極限上，也有學者應用氫氣/甲烷混合燃料燃燒，發現添加氫氣燃燒可以有效的延伸其可燃極限，且未燃燒完全的碳氫化合物也會隨著氫氣添加比例上升而下降[6]。

至於旋轉式引擎如氣渦輪機(Gas Turbine)方面，早已開始應用各種不同燃料以節省成本，如從早期的航空用油、燃油，到目前的天然氣，甚至利用煤碳氣化過程產生之中、低熱值的含氫合成氣與生質燃料，也多應用貧油預混燃燒的方式來降低污染，然而在貧油時火焰的穩定性不佳，因此許多研究探討使用氫氣/甲烷混合燃料之燃燒特性，發現混合氫氣燃燒可改善其在貧油燃燒的不穩定性[7-11]。而 Kim 等人也透過實驗的方式探討甲烷/氫氣/空氣混合燃料的火焰特性及污染物的排放，發現燃燒室內之渦流強度會影響高溫火焰之位置，進而影響氮

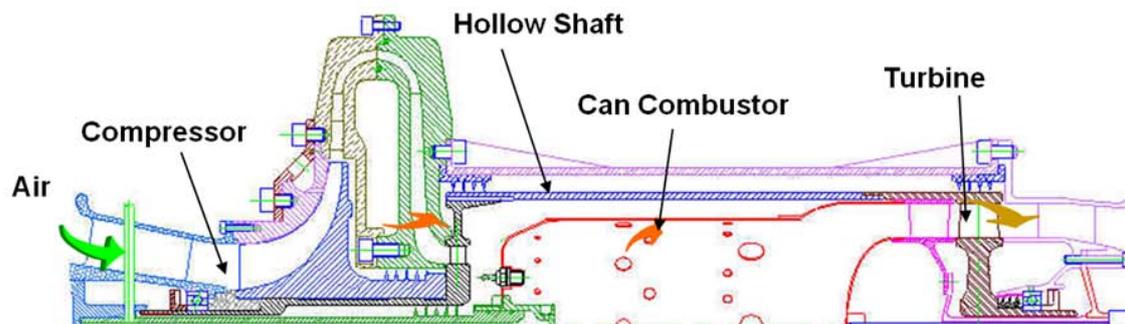
氧化物之生成量[12,13]。另 Ilbas 等人則透過商用熱流分析軟體探討氫氣/甲烷的燃燒及汙染排放特性，其結果顯示純氫燃燒產生的氮氧化物比純甲烷燃燒產生的氮氧化物多，而其主要生成途徑為 Zeldovich 反應機[14]。在基礎科學研究上也有學者以相向噴流擴散火焰探討甲烷/空氣擴散火焰添加氫氣之後其火焰及汙染排放之變化，發現添加少量的氫氣對於氮氧化物的生成影響不大[15]。另在紊流噴射火焰(Turbulent Jet Flame)的研究上也發現添加氫氣燃燒除了改變火焰的長度之外，其一氧化碳排放量會隨著氫氣比例增加而下降，氮氧化物則是隨氫氣比例上升而增加[16,17]。

綜合前面所述，氫混合燃料應用於微型氣渦輪機(Micro Gas Turbine)的研究較少，而微渦輪發電機因體積小、操作方便，除了是未來分散式電力之產品外，也是較佳的研發載具。適合使用含氫混合燃料，當氫含量不同時，燃燒與引擎的性能特徵也會以所不同，要如何有效的應用含氫燃料，增加燃燒效率與引擎效率，改進引擎性能，同時降低汙染，仍是氫能應用於動力引擎的一項挑戰。本研究主要是藉由商用熱流分析軟體 STAR-CD，建立一個三維氣渦輪引擎罐狀燃燒室模型，並進行數值模擬分析。針對氣渦輪引擎使用氫氣/甲烷混合燃料燃燒進行性能分析，包括其燃燒效率、駐焰、冷卻、溫度型樣(Pattern Factor)、以及汙染排放等問題，同時進行燃燒室性能設計分析，提供微渦輪引擎應用含氫燃料之改善方案。

二、模型建立與數值方法

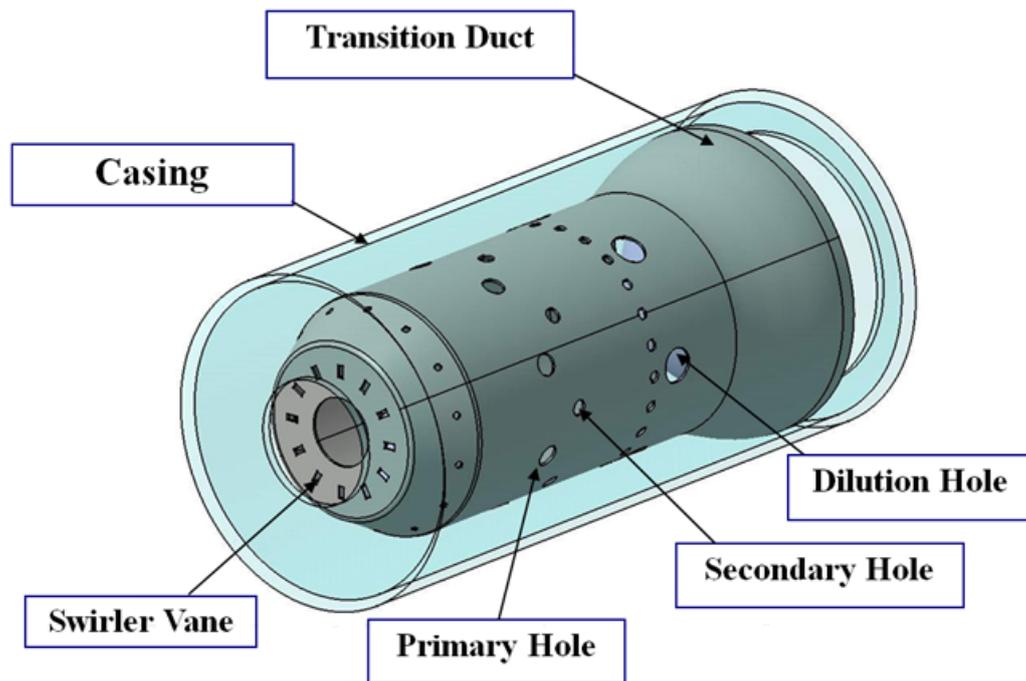
2.1 燃燒室模型建立

本研究乃針對一新型設計並具有專利之微渦輪引擎[18,19]進行使用氫氣/甲烷混合燃料燃燒之性能評估，其構型如圖一所示，主要零組件包括壓縮機、燃燒室、渦輪機和加大的空心軸。因為燃燒室直接嵌入加大的空心軸之中，與傳統相同輸出功率之氣渦輪引擎相比，該設計大大地減少了引擎中心轉子體積和重量，且因其燃燒室直接安置於轉軸內部，使得燃燒室完整包覆於轉軸內部減少熱散失，因此提高了熱效率。



圖一、微渦輪引擎構造示意圖

該微渦輪引擎額定輸出功率為 60 kW，壓縮機、燃燒室及渦輪機的額定效率為 0.81、0.9 及 0.84，壓縮比為 3.28，擴張比為 1.73，在沒有裝置任何熱回收系統且外筒轉速為 58000 rpm 時的熱效率為 12.8 %。圖二即為此微渦輪引擎燃燒室示意圖，燃燒室在不鏽鋼桶內，其主要燃燒區、第二燃燒區及稀釋燃燒區之進氣孔尺寸大小及氣孔數量請參考表一。依據其三個區域的位置設計氣孔位置與大小，目的是使空氣流經不鏽鋼桶和燃燒室之間距，而後由各空氣孔進入燃燒室內。



圖二、罐狀燃燒室模型

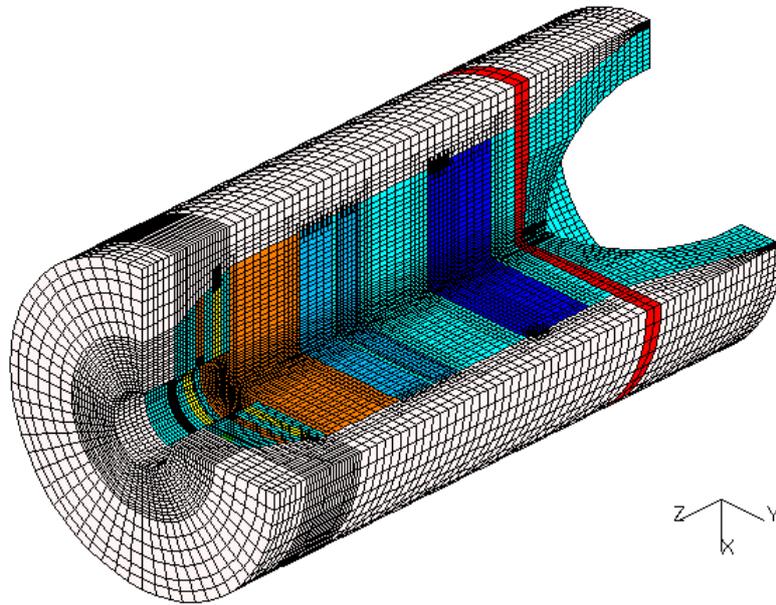
表一 燃燒筒尺寸大小及氣孔參數

	空氣孔直徑	空氣孔數
主要燃燒區	7 mm	8 個
次要燃燒區	5 mm	8 個
稀釋燃燒區	11 mm	6 個

※燃燒筒長度 180 mm、燃燒室直徑 75 mm、不鏽鋼外筒直徑 95 mm

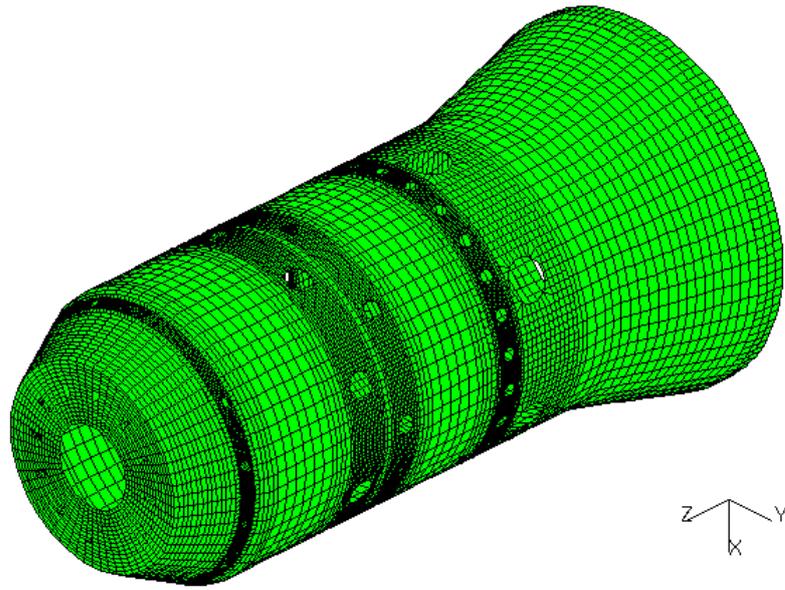
圖三為燃燒筒整體網格剖視圖，流體網格部分包括燃燒器內部以及與外環轉子之間的冷卻空氣區域(主要燃燒區空氣流道、次要燃燒區空氣流道、稀釋燃燒區空氣流道等)，利用多重區塊(multi-block)綴接方式逐一建構，燃燒器燃料噴射

孔及冷卻空氣注入孔則根據實際配置定位，沿圓孔環型排列處局部加密格點，再定義不同圓心座標完成圓形孔道，此種配置方式亦符合於實際物理性質變化較為劇烈處給予較密集格點之概念。



圖三、燃燒筒整體網格剖面圖

燃燒室實體部分則使用一層無厚度之隔板(baffle)來區隔內外筒的流體，如圖四，此隔板設定成光滑、固定且表面不滑動的情況，並設定熱阻計算穿過燃燒室襯套的熱傳量，模型整體網格數為 302139 個。此罐狀燃燒室原使用甲烷燃燒，並已進行外筒轉速對燃燒筒內燃燒特性影響之相關研究[20]，而目前使用氫氣/甲烷混合燃料燃燒之模型即是使用該燃燒筒模型，但更改其燃料混合比例並設定燃燒筒外筒為靜止。燃燒筒之空氣進口流量為 0.473 kg/s，溫度為 431 K，壓力為 3.25 atm，而燃料入口流量為 0.0096 kg/s，溫度為 298 K，整體當量比約為 0.35，雷諾數約為 3.4×10^5 。



圖四、燃燒筒內隔板(baffle)網格示意圖

2.2 數值模型與方法

本研究基於簡化模擬複雜性之考量，假設流場為三維定常(Steady-State)流，重力效應忽略不計，流體為可壓縮流，其密度變化為溫度與壓力之函數。統御方程式部分則採用 k-ε 紊流模式，以 SIMPLE 計算法則來解三維擾動流場統御方程式，並以有限體積法(Finite-Volume)疊代來解 Navier-Stokes 方程式求得流場。燃燒之化學反應方面，本研究採用擴散火焰 PPDF(Presumed Probability Density Function)化學模組模擬燃燒過程，此化學反應模組是用於模擬擴散火焰，並使用快速反應(Fast-Kinetics)假設，即燃料與氧化劑在極短時間即充分混合完畢進行燃燒。由於紊流流場性質、質量流率、混合物焓值的不同，因此在 PPDF 化學模組中其密度、溫度及物種濃度皆可用 $\bar{Q}(f)$ 表示，其表示式定義如下：

$$Q = \int \bar{Q}(f)P(f)df \quad (1)$$

平均混合分率的瞬時混合分率 $P(f)$ 在 Presumed PDF 中以 β function 的形式可表示為：

$$P_{\phi}(f) = \frac{f^{a-1}(1-f)^{b-1}}{\int_0^1 f^{a-1}(1-f)^{b-1} df} \quad (2)$$

$$a = \frac{\bar{f}}{g_f} [\bar{f}(1-\bar{f}) - g_f] \quad (3)$$

$$b = \frac{(1 - \bar{f})}{\bar{f}} a \quad (4)$$

$$f = \frac{m_f}{m_f + m_o} \quad (5)$$

f : mixture fraction

\bar{f} : mean mixture fraction

而 a 與 b 則是透過平均混合分率(mean mixture fraction) \bar{f} 及平均混和分率之改變量 g_f 來產生，而 g_f 定義為：

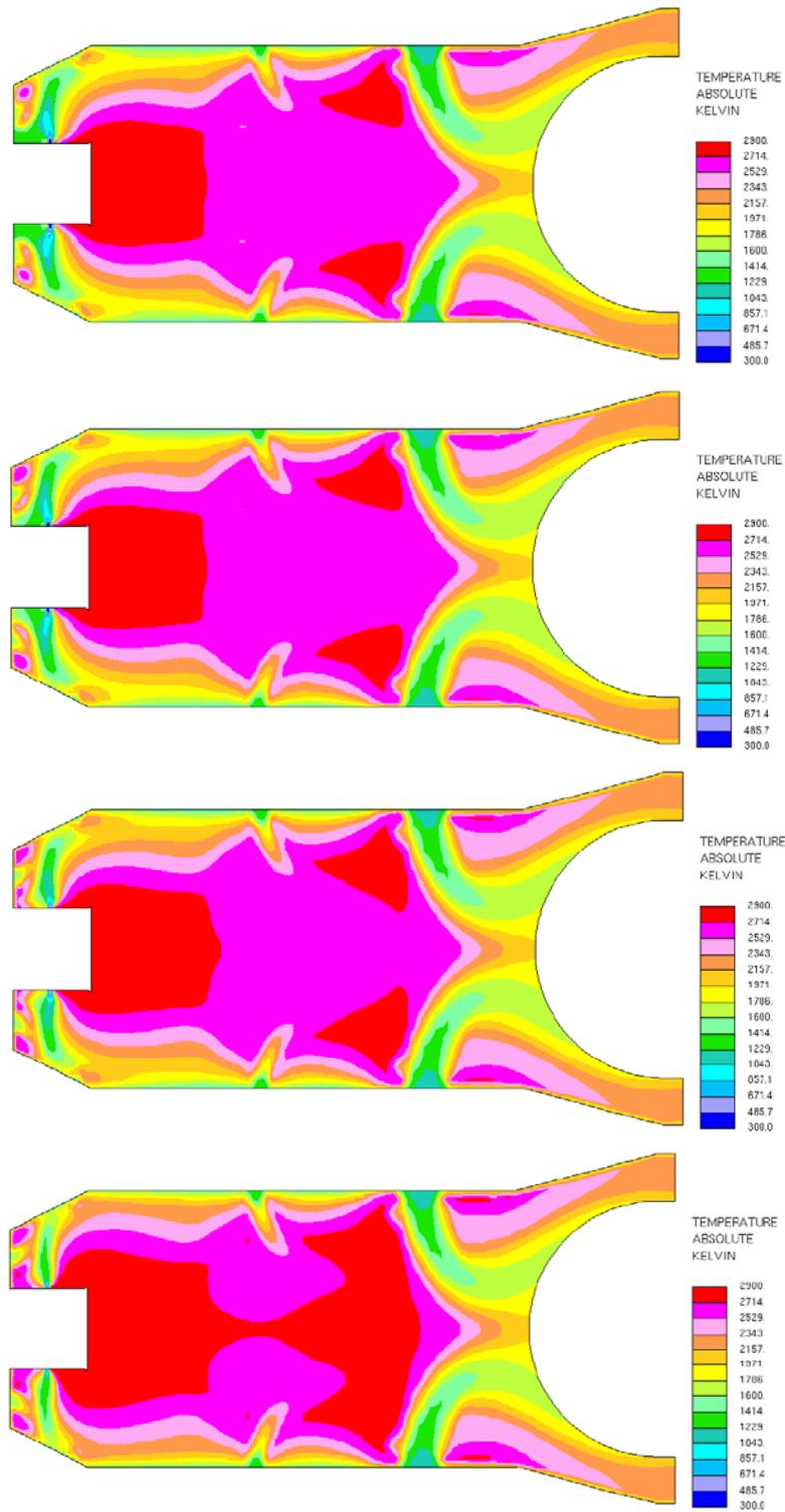
$$g_f = \overline{(f - \bar{f})^2} \quad (6)$$

在模擬化學反應時， $\hat{Q}(f)$ 會以多項式的方式展開計算，而後得到 Q 。所以在 PPDF 化學反應模組中，會先計算該處混合率，得到混合率之後即可得到該處密度、溫度及物種濃度。在 STAR-CD 中，多項式的計算則是以 CEA(Chemical Equilibrium Application)[21、22] 計算程式來計算反應物與生成物的平衡式，藉由給定之燃料、氧化劑與生成物之初始濃度與組成，計算出多項式的各個係數。本研究於分析時所使用之燃料分別為氫氣及甲烷，為更確切的了解其化學反應過程的生成物 H_2O 、 CO 、 N_2O 、 NO_2 及污染物 CO_2 、 NO 在燃燒室流場分佈的情形，因此在氫氣與甲烷相關化學反應式均做了 H_2O 、 CO_2 、 CO 、 NO 、 N_2O 、 NO_2 物種的設定。另外氮氧化物的生成是透過後處理(Post-Processing method)的方式計算[23]，由於氮氧化物的濃度通常很低且受流場的影響較小，所以氮氧化物的計算可以與主要反應流場分開計算，在本篇研究中，氮氧化物的生成機制是採用 Zeldovich 反應機制[24]與 Prompt NO_x 反應機制[25]。

三、結果與討論

3.1 不同氫氣含量的影響

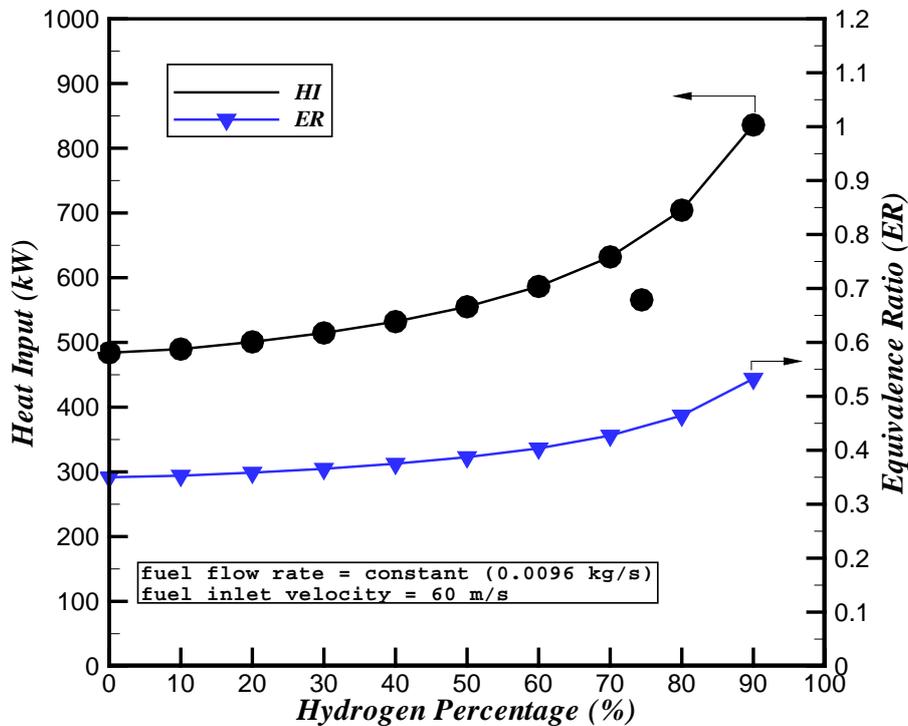
由於此燃燒室原使用甲烷燃燒，其燃料質量流率為 0.0096 kg/s，燃料噴嘴速度為 60 m/s，因此首先考量在同一燃料質量流率(0.0096 kg/s)與噴嘴速度(60 m/s)下，應用氫氣/甲烷混合燃料，並探討不同氫氣含量對燃燒特性的影響。圖五為不同氫氣含量(20%、40%、60%、80%)的火焰結構剖面，該火焰結構剖面是燃燒筒的軸向剖面，並切過主要進氣孔及稀釋進氣孔的中心點，從圖五可以看到，當混合燃料透過燃料噴嘴注入燃燒室之後與空氣進口的空氣混合、燃燒，且高溫火焰穩駐於主要燃燒區，在燃燒筒尾段的稀釋燃燒區因引進大量冷卻空氣，所以燃燒室尾段整體溫度下降。



圖五、固定燃料質量流率下(0.0096 kg/s)，不同氫氣含量(20%、40%、60%、80%)
火焰結構剖面(噴嘴速度 60 m/s)

氫氣含量上升時，火焰的高溫區域會逐漸擴大且燃燒室內火焰溫度增加，當氫氣含量增加至 80%時，可以發現火焰高溫區已擴張至第二燃燒區及稀釋燃燒區，燃燒室內整體溫度升高的主要原因可從圖六中看出，當固定燃料質量流率

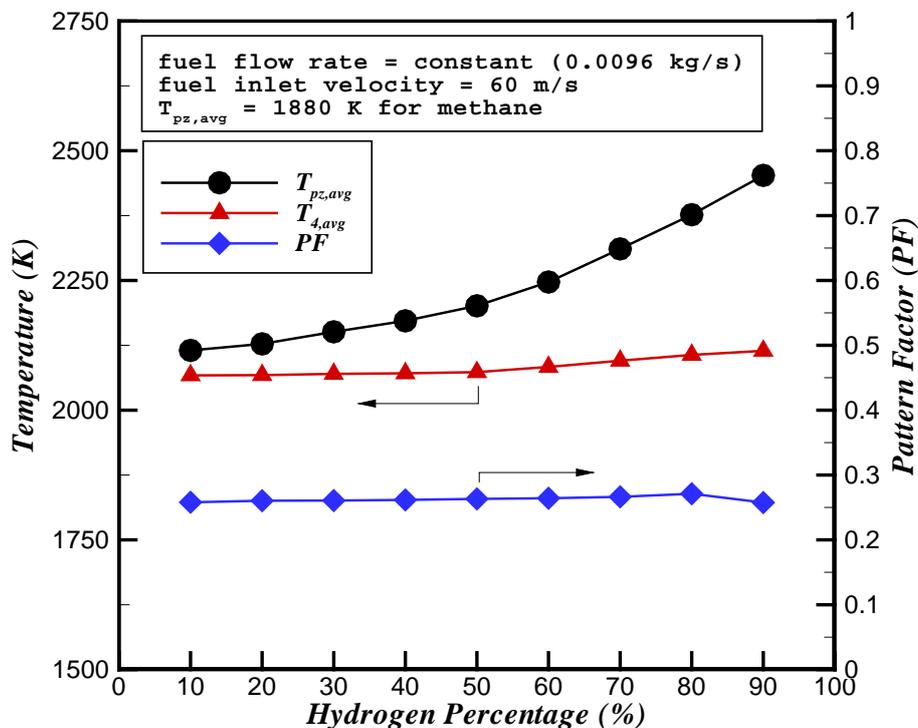
時,增加氫氣含量會使燃燒室熱輸入值(Heat Input)及整體當量比(Equivalence Ratio)增加,因而提高燃燒室內火焰燃燒溫度,另也因為單位質量氫氣熱值(120000 kJ/kg)較甲烷(50050 kJ/kg)高(約為 2.4 倍),所以當使用氫混合燃料時,可以較少燃料來達到溫度提升的效果,有效減少傳統石化燃料之使用量。



圖六、固定燃料質量流率下(0.0096 kg/s),不同氫氣含量對應之熱輸入值(Heat Input)及整體當量比(Equivalence Ratio)(噴嘴速度 60 m/s)

圖七為不同氫氣含量對應之主要燃燒區平均溫度($T_{pz, avg}$)、燃燒室出口平均溫度($T_{4, avg}$)及溫度型樣(Pattern Factor),計算主要燃燒區的平均溫度,可幫助我們了解不同混合比例之燃料,其燃燒產生之熱能釋放對主要燃燒區內溫度之影響從圖中可看出,當使用 10 % 氫氣與甲烷混合燃燒之後,主要燃燒區平均溫度增加約 300 K,這主要是氫氣具有較高熱值,使燃燒室內火焰溫度增加,當氫氣含量持續增加時,主要燃燒區平均溫度也會持續上升,這是因為當燃料質量流率固定時,氫氣/甲烷混合燃料中之氫氣比例增加,會提高燃燒室內的熱輸入,且整體當量比也會因氫氣含量增加而上升,故火焰溫度增加。另為使進入尾段渦輪進口的氣體達到穩定且均勻的溫度分布,我們利用燃燒室出口平均溫度($T_{4, avg}$)及溫度型樣(Pattern Factor)兩個參數來評估尾段渦輪進口溫度是否過高及有無劇烈溫度波動(temperature fluctuation),燃燒室出口平均溫度即代表尾段渦輪進口溫度,當尾段渦輪進口溫度越高,代表其輸出功率越高,但考量渦輪葉片材質限制,過高

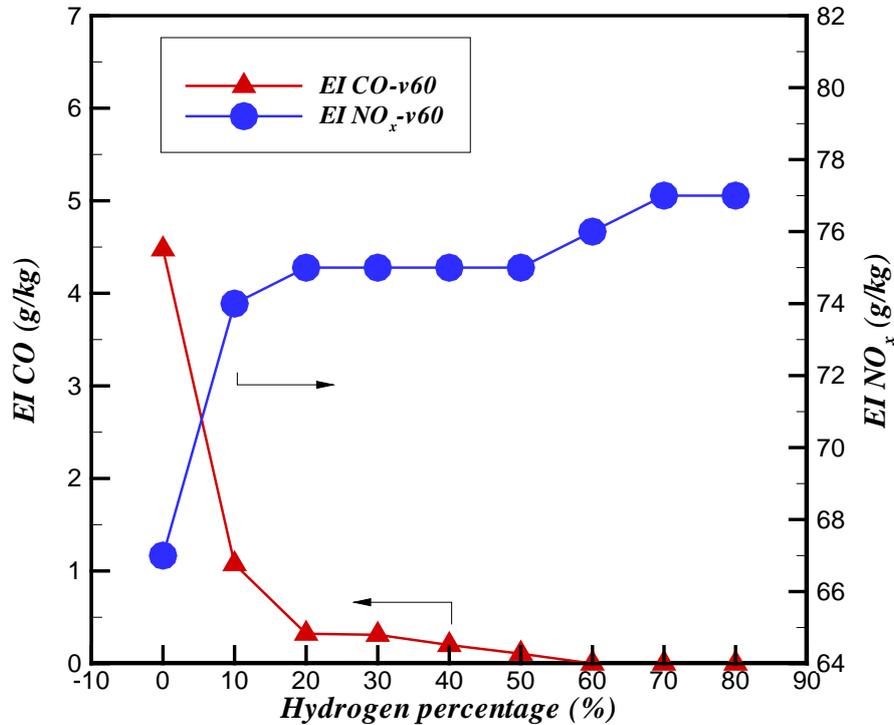
的進口溫度會影響渦輪葉片壽命，另尾段渦輪進口溫度若分布不均或溫度波動過大，也會讓渦輪葉片產生問題，所以透過溫度型樣來評估其尾段渦輪進口溫度分佈是否均勻及可能熱點的產生，而溫度型樣的定義為 $(T_{4,max} - T_{4,avg}) / (T_{4,avg} - T_3)$ 。在圖七中的燃燒室出口平均溫度分佈曲線可看出，燃燒室出口平均溫度會隨著氫氣含量增加而上升，從圖五火焰結構圖可發現，當氫氣含量增加時，主要燃燒區的高溫火焰會往後擴張至次要及稀釋燃燒區，進而增加了燃燒室出口平均溫度，另圖七中的燃燒室溫度型樣則未隨氫氣含量增加而呈現太大的變化，均維持在 0.3 左右，這是因為燃燒室出口平均溫度增加的關係，縮減了燃燒室出口最高溫度與平均溫度間的差值，故溫度型樣下降，這也顯示出混合氫氣燃燒會使燃燒室出口溫度分佈較為均勻，但其整體出口溫度仍太高(燃燒室出口額定溫度為 1200 K)。



圖七、固定燃料質量流率下(0.0096 kg/s)，不同氫氣含量對應之主要燃燒區平均溫度($T_{pz,avg}$)、燃燒室出口平均溫度($T_{4,avg}$)及溫度型樣(Pattern Factor)(噴嘴速度 60 m/s)

另燃燒室整體溫度改變也會影響其污染排放，在固定燃料噴嘴速度及燃料質量流率的條件下，圖八為不同氫氣含量對應氮氧化物及一氧化碳的排放量，在此我們利用污染排放指數(Emission Index)評估燃燒筒之污染排放，污染排放指數為每公斤燃料燃燒所產生的產物(g)，其定義為 $\dot{m}_k / \dot{m}_{fuel}$ ， \dot{m}_k 為生成物之質量流率，

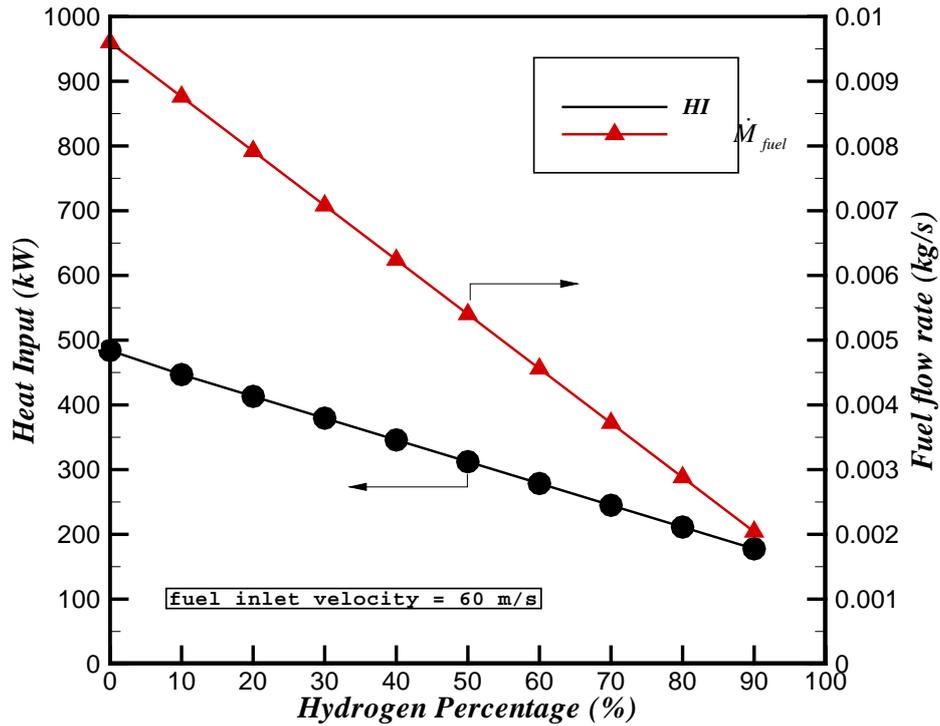
\dot{m}_{fuel} 為燃料總質量流率。當氫氣含量增加，氮氧化物排放量上升，造成氮氧化物排放量增加之原因為燃燒室溫度上升，經由 Zeldovich 反應途徑生成的氮氧化物增加，而一氧化碳則在混合 10% 的氫氣燃燒之後，有顯著的降低，當氫氣混合量持續增加，一氧化碳排放量改變不大。



圖八、固定燃料質量流率下(0.0096 kg/s)，不同氫氣含量對應氮氧化物及一氧化碳排放量(噴嘴速度 60 m/s)

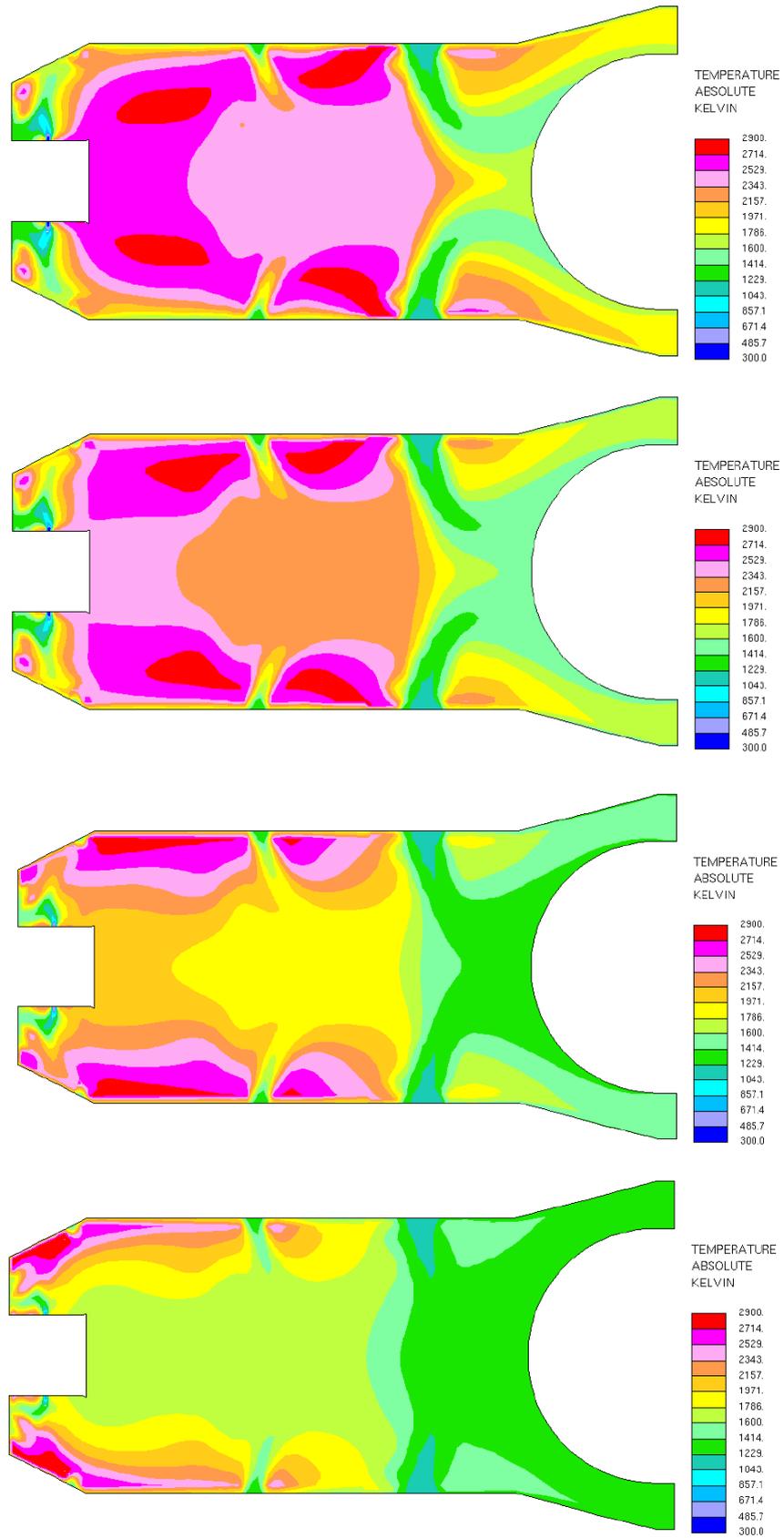
3.2 不同燃料質量流率的影響

從上述的結果可以發現，在固定相同之燃料噴嘴速度及燃料質量流率下，燃燒筒整體當量比及熱輸入值隨氫氣含量上升而增加，且燃燒室火焰溫度也呈現上升的趨勢。但在一般的情況下，因氫氣密度及質量較甲烷低，若以氫氣取代部分甲烷使用，氫氣/甲烷混合燃料之密度將小於單純使用甲烷之燃料密度，因此，混合燃料之質量流率會隨氫氣含量增加而減少，熱輸入亦隨氫含量增加而下降，如圖九所示，本節即探討固定燃料噴嘴速度下，混合燃料質量流率隨氫氣含量改變之結果。



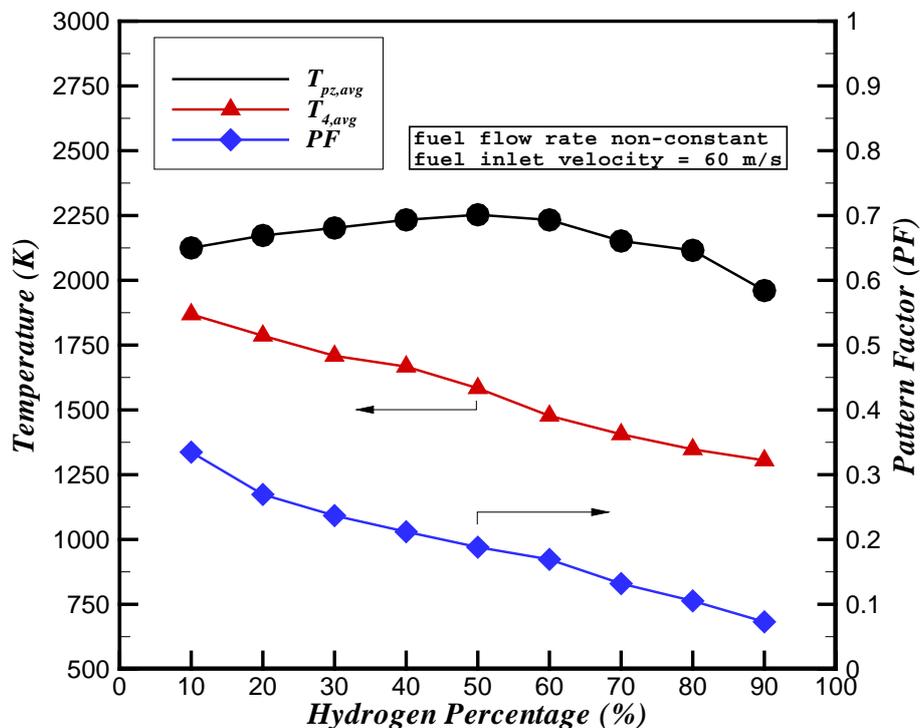
圖九、燃料質量流率隨氫含量改變下，不同氫氣含量對應之燃燒室熱輸入值及燃料質量流率(噴嘴速度 60 m/s)

首先為火焰結構之比較，圖十為同一噴嘴速度(60 m/s)下，不同氫氣含量(20%、40%、60%、80%)的火焰結構剖面，當氫氣含量為 20 % 時，主要燃燒區高溫駐焰往燃燒室兩側移動，且燃燒室整體溫度下降。當混合燃料中氫氣含量持續增加至 80 %，燃燒室內高溫火焰會沿著燃燒室兩側的壁面往主要燃燒區前段移動，且高溫火焰分布範圍也逐漸縮小，燃燒室整體溫度也持續下降，因為燃燒室之燃料質量流率及熱輸入隨氫氣含量增加而下降，導致燃燒室整體當量比朝愈貧油的環境發展，故燃燒室內火焰溫度越來越低而高溫火焰的範圍也越來越小。



圖十、燃料質量流率隨氫含量改變下，不同氫氣含量(20%、40%、60%、80%)
火焰結構剖面(噴嘴速度 60 m/s)

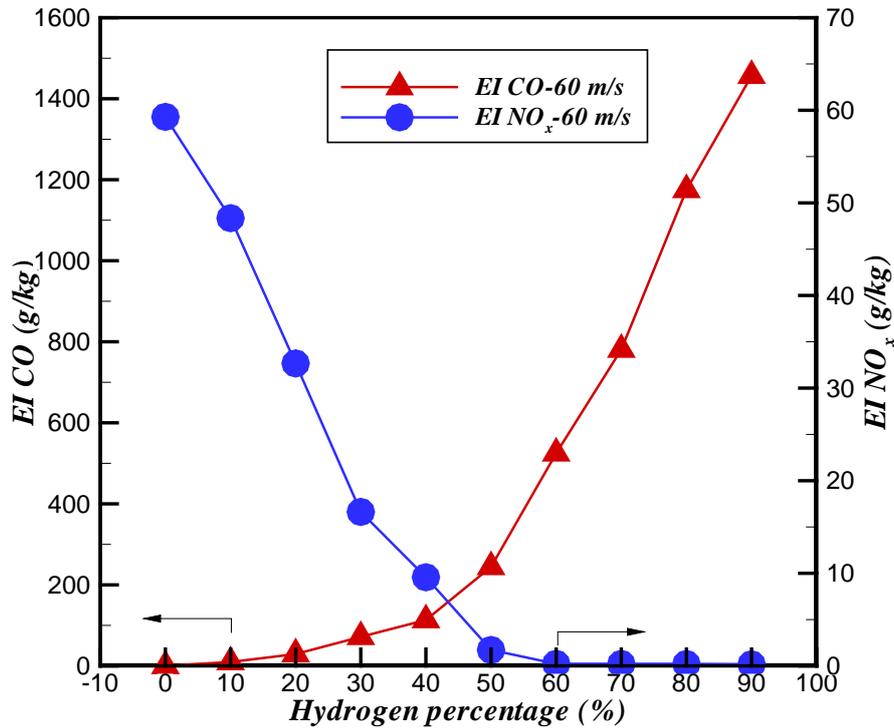
圖十一為同一噴嘴速度下(60 m/s)，不同氫氣含量(亦即不同燃料質量流率)對應之主要燃燒區平均溫度、燃燒室出口平均溫度及溫度型樣，可以發現混合少量氫氣於甲烷燃燒可提高火焰溫度約 300 K。隨著氫氣混合比例增加，溫度跟著上升，但當氫氣含量超過 50 % 之後即開始下降，這是因為當氫氣含量超過 50 % 時，其燃燒室內整體當量比已降至 0.2，導致燃燒室內火焰溫度下降，但也可得知，混合氫氣燃燒可在低當量比下生成高溫火焰並於主要燃燒區內燃燒。在燃燒室平均溫度及溫度型樣部分，從圖中可看出燃燒室出口平均溫度會隨氫氣含量增加而下降，即使氫氣含量增加至 90 % 時，燃燒室出口平均溫度仍高於額定出口溫度 1200 K 之上。燃燒室溫度型樣也跟燃燒室出口平均溫度呈現同樣的趨勢，當混合氫氣燃燒時，會提高燃燒室出口平均溫度，降低與燃燒室出口最高溫度之溫差，所以溫度型樣降低。



圖十一、燃料質量流率隨氫含量改變下，不同氫氣含量對應之主要燃燒區平均溫度($T_{pz, avg}$)、燃燒室出口平均溫度($T_{4,avg}$)及溫度型樣(Pattern Factor)

圖十二為燃料噴嘴速度 60 m/s 下，不同之氫氣含量對應氮氧化物及一氧化碳排放量，從圖中可以發現氮氧化物的生成隨著氫氣含量增加而持續下降，這是因為當氫氣含量增加，燃燒室內燃料熱輸入及質量流率比下降，導致燃燒室整體當量比下降，進而使燃燒室整體溫度下降，減少經由 Zeldovich 反應途徑生成的氮氧化物，而一氧化碳排放量則是隨氫氣含量增加而上升，類似的結果也在使用

其他石化燃料 (kerosene) 混合氫氣燃燒的實驗中發現[7]。



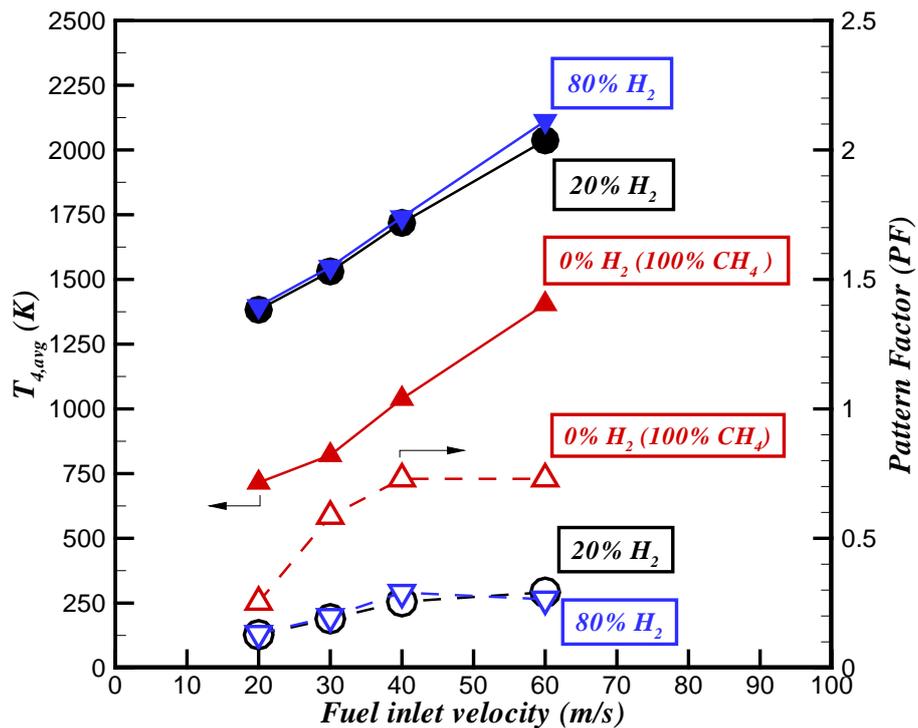
圖十二、燃料質量流率隨氫含量改變下，不同氫氣含量對應之氮氧化物及一氧化碳排放量(噴嘴速度 60 m/s)

3.3 改變燃料噴嘴速度

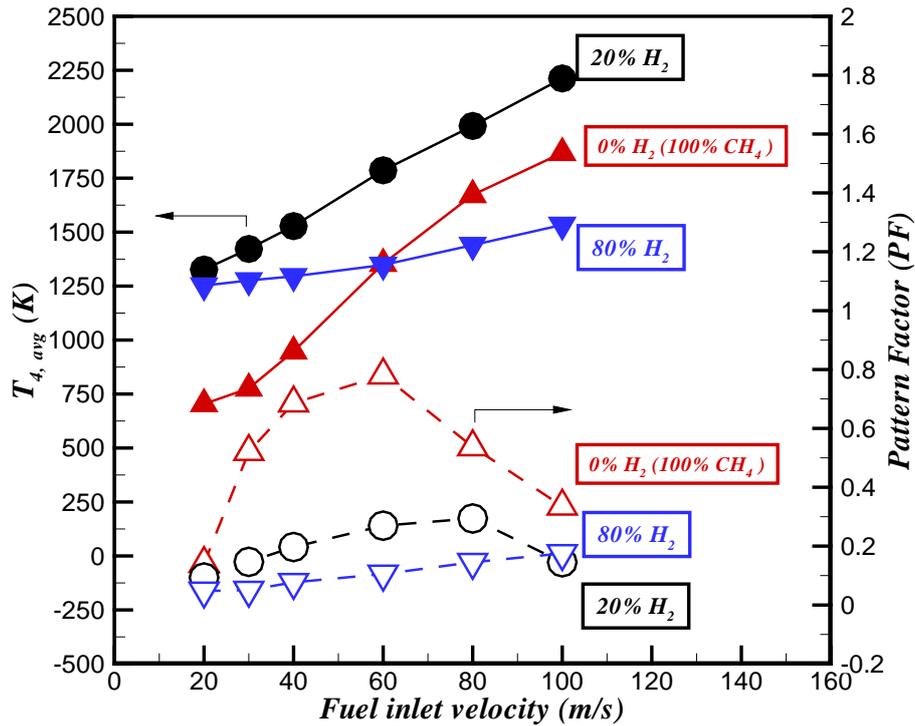
綜合上述結果，使用氫氣混合甲烷燃燒可在低當量比下產生高溫火焰，但為使燃料消耗量減低以達減量使用的目標，將燃料噴嘴速度從 60 m/s 調降至 20 m/s，探討改變燃料噴嘴速度對燃燒室出口溫度及溫度型樣之影響。

圖十三為固定燃料質量流率(0.0096 kg/s)，改變燃料噴嘴速度(20 m/s 至 60 m/s)及氫氣含量(0%、20%、80%)所對應之燃燒室出口平均溫度及溫度型樣分佈圖，從圖十三可以發現，在燃料噴嘴速度 60 m/s 時，甲烷燃燒之燃燒室出口平均溫度相當接近額定燃燒室出口溫度(1200 K)，在混合氫氣燃燒之後，燃燒室出口平均溫度皆較純甲烷燃燒來的高，但溫度型樣卻降低，這主要為燃燒室出口平均溫度增加，降低高溫熱點與出口平均溫度之間的溫差，故溫度型樣降低，但燃燒室出口溫度仍然過高。圖十四則是改變燃料質量流率、噴嘴速度(20 m/s ~ 100 m/s)與氫氣含量(0%、20%、80%)對應之燃燒室出口平均溫度及溫度型樣，可發現混合氫氣燃燒會增加燃燒室出口溫度，但當燃料噴嘴速度增加至 80 m/s 及 100 m/s 時，在使用較高氫氣含量之混合燃料時，其燃燒室出口平均溫度低於純甲烷燃燒，當燃料噴嘴速度降至 20 m/s 並混合氫氣燃燒時，燃燒室出口平均溫度均

達到額定燃燒室出口溫度 1200 K，這說明著可以使用較少的燃料達到我們所需的渦輪進口溫度，而在溫度型樣的部分可以看到皆較甲烷燃燒時低。故從圖十三、及圖十四可以發現，雖然混合氫氣燃燒可以降低溫度型樣並提高渦輪進口溫度，但在某些狀況下渦輪進口溫度仍然太高，這代表原本使用純甲烷燃燒之燃燒筒若要使用氫氣混合燃料燃燒，燃燒筒冷卻的方式勢必要修改以改善其冷卻效果。



圖十三、固定燃料質量流率，改變燃料噴嘴速度(20 m/s ~ 60 m/s)與氫氣含量(0%、20%、80%)對應之燃燒室出口平均溫度及溫度型樣



圖十四、燃料質量流率隨氫含量改變下，噴嘴速度(20 m/s ~ 60 m/s)與氫氣含量(0%、20%、80%)對應之燃燒室出口平均溫度及溫度型態

四、結論

本研究成功使用熱流分析軟體 STAR-CD 建立微渦輪引擎罐狀燃燒室數值模型，將氫氣/甲烷混合燃料以不同氫氣含量(0 %至 90 %)與燃料噴嘴速度(20 m/s 至 60 m/s)進行數值模擬，探討燃燒室火焰結構、燃燒特性及污染物排放特性。根據上述的研究結果訂定以下幾點結論：

1. 本研究成功建立一微型氣渦輪引擎數值模型，用以分析微型氣渦輪引擎使用氫氣/甲烷混合燃料燃燒之燃燒特性。
2. 使用少量氫氣混合甲烷燃燒可以有效的提高燃燒室整體溫度並使高溫火焰得以在較低當量比環境下產生。
3. 透過混合氫氣燃燒，可使用較低的燃料噴嘴速度來達到減少石化燃料的消耗與使用等目標。
4. 使用氫氣混合燃燒，除了使氣渦輪引擎可以在較低當量比下運作之外，也可以有效的利用其較低火焰溫度來達到降低氮氧化物排放的目標。
5. 燃燒室出口溫度過高的問題指出，目前稀釋燃燒區的進氣孔引進之冷卻空氣無法降低燃燒室尾段渦輪組件之溫度，這部分須透過修改及重新設計燃燒筒稀釋燃燒區之進氣孔尺寸及位置來改善。
6. 根據氫氣/甲烷混合燃料燃燒之火焰結構結果，燃燒筒之燃料噴嘴或燃料注

入燃燒室之方式須修改，以達到高溫火焰得以穩駐於主要燃燒區之目標。

五、參考文獻

1. A. D. Little, Opportunity of Micropower and Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications, *DOE Report*, No. 85X-TA009V, 2000.
2. Hythane is a registered trademark of Hydrogen Consultant Inc.
3. S. Orhan-Akansu, Z. Dulger, N. Kahraman, T. Nejat-Veziroglu, Internal Combustion Engine Fueled by Natural Gas-Hydrogen Mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 29, pp. 1527-1539, 2004.
4. T. D. Andrea, P. F. Henshaw, and D. S. Ting, The Addition of Hydrogen to A Gasoline-Fueled SI Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 29, pp. 1541-1552, 2004.
5. H. Li, and G. A. Karim, Exhaust Emissions from An SI Engine Operating on Gaseous Fuel Mixtures Containing Hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, pp. 1491-1499, 2005.
6. F. Ma, Y. Wang, H. Liu, Y. Li, J. Wang, S. Zhao, Experimental Study on Thermal Efficiency and Emission Characteristics of A Lean Burn Hydrogen Enriched Natural Gas Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 5067-5075, 2007.
7. J. P. Frenillot, G. Cabot, M. Cazalens, B. Renou, M. A. Boukhalfa, Impact of H₂ Addition on Flame Stability and Pollutant Emissions for An Atmospheric Kerosene/Air Swirled Flame of Laboratory Scaled Gas Turbine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 3930-3944, 2009.
8. D. A. Wicksall, A. K. Agrawal, R. W. Schefer, J. O. Keller, The Interaction of Flame and Flow Field in A Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustor Operated on H₂/CH₄/Air, *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2875-2883, 2005.
9. R. W. Schefer, Hydrogen Enrichment for Improved Lean Flame Stability, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 1131-1141, 2003.
10. H. S. Kim, V. K. Arghode, A. K. Gupta, Flame Characteristics of Hydrogen-Enriched Methane-Air Premixed Swirling Flames, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 1063-1073, 2009.
11. F. Cozzi, A. Coghe, Behavior of Hydrogen-Enriched Non-Premixed Swirled Natural Gas Flames, *Hydrogen Energy*, Vol. 31, pp. 669-677, 2006.
12. H. S. Kim, V. K. Arghode, A. K. Gupta, Flame Characteristics of Hydrogen-Enriched Methane-Air Premixed Swirling Flames, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 1063-1073, 2009.
13. H. S. Kim, V. K. Arghode, M. B. Linck, A. K. Gupta, Hydrogen Addition Effects in A Confined Swirl-Stabilized Methane-Air Flame, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 1054-1062, 2009.
14. M. Ilbas, I. Yilmaz, Y. Kaplan, Investigations of Hydrogen and Hydrogen-Hydrocarbon Composite Fuel Combustion and NO_x Emission Characteristics in A Model Combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, pp. 1139-1147, 2005.

15. H. Guo, and W. S. Neill, A numerical Study on the Effect of Hydrogen/Reformate Gas Addition on Flame Temperature and NO Formation in Strained Methane/Air Diffusion Flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 156, pp. 477-483, 2009.
16. R. Akansu, S. R. Choudhuri, Gollahalli, Characteristics of Hydrogen-Hydrocarbon Composite Fuel Turbulent Jet Flames, *Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 445-454, 2003.
17. H. Wu, W. Zhang, K. Mu, Y. Wang, Y. Xiao, Combustion Characteristics of Hydrogen-Methane Hybrid Fuels in Coflow Jet Diffusion Flames, Paper GT2008-50958, *ASME Turbo Expo*, 2008.
18. U.S. Patent No. US2003/0121270 A1, Jul. 3, 2003.
19. R.O.C. Patent No.00525708, Mar. 21, 2003.
20. H. Y. Shih, C. R. Liu, Combustion Characteristics of a Can Combustor with a Rotating Casing for an Innovative Micro Gas Turbine, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 131, No. 4, 04151, 2009.
21. S. Gordon, and B. J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, Part I. Analysis, *NASA Ref. Publ.*, 1311, NASA Lewis Research Center, 1994.
22. B. J. McBride, and S. Gordon, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, Part II. User's Manual and Program Description, *NASA Ref. Publ.*, 1311, NASA Lewis Research Center, 1996.
23. T. Faravelli, L. Bua, A. Frassoldati, A. Antifora, L. Tognotti, E. Ranzi, A New Procedure for Predicting NO_x Emission from Furnaces, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 25, pp. 613-618, 2001.
24. A. Caldeira-Pires, M. V. Heitor, J. A. Carvalho Jr, Characteristics of Nitric Oxide Formation Rates in Turbulent Non-premixed Jet Flames, *Combustion and Flame*, Vol. 120, pp. 382, 2000.
25. G. G. De Soete, Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen, 15th Symposium (International.) on Combustion, *The Combustion Institute*, pp. 1093-1102, 1975.

鐵礦燒結之數值模擬研究

Modeling of Ore Sintering Bed

許聖彥¹

Sheng-Yen Hsu

國立中山大學機械與機電工程學系

Department of Mechanical and Elector-Mechanical Engineering, National Sun
Yat-Sen University, Kaohsiung, Taiwan

黃以松²、鄒穎³

Yi-Sung Huang, Ying Tsou

中國鋼鐵公司 新材料研究發展處

Department of New Materials Research & Development, China Steel Corporation,
Kaohsiung, Taiwan

摘要

鐵礦燒結為煉鐵製程中重要的步驟之一，其包含了燃燒反應、相變化、以及孔隙介質內的熱傳及質傳等現象。本研究目的為建立一燒結數值模型，進一步了解燒結現象，以利於提升燒結技術。吾人使用一維非穩態孔隙介質模型，考慮燒結過程中重要的熱傳及質傳現象-水分的蒸發與凝結以及細焦炭的燃燒放熱。細焦炭燃燒放熱為燒結製程中的熱量來源，使燒結床達到燒結所需的溫度 (1300 °C~1400 °C)；而燒結床內的水分会於高溫區前緣吸熱蒸發，至下游低溫區後凝結放熱，該現象為燒結床內重要的質傳及熱傳現象。研究顯示此模型可成功地模擬細焦炭的燃燒放熱、水分的蒸發與凝結以及孔隙介質內高溫燒結區的移動等現象。模擬結果發現水分的相變化熱傳，會使燒結床下游區溫度很快地升至 60 °C 左右，燒結速度隨空氣流速及細焦炭含量增加而增加，但隨著燒結床水含量的增加而減少。現階段的模擬結果顯示此模型值得進一步提升，用以研究燒結現象及提供燒結製程設計之參考。

關鍵字：燒結製程、孔隙介質、數值模型

Abstract

A simple, one-dimensional, unsteady sintering model is established and tested. It considered two important heat and mass transfer phenomena between the gas phase and the condensed phase in the ore sintering beds – the coke combustion and the phase change of water. The coke combustion, releasing heat, is to achieve the

¹ 中山大學機械與機電工程學系，助理教授，E-mail: syhsu@mail.nsysu.edu.tw

² 中國鋼鐵公司，研究員

³ 中國鋼鐵公司，工程師

sintering temperature (1300 °C~1400 °C) and the phase change of water is an important heat and mass transfer phenomenon in the process.

In this study, it shows the model can successfully simulate the phase change of water, combustion heat release and the movement of the high-temperature sintering zone in the porous bed. The results show that the water vaporizing (absorbs heat) in front of the high-temperature zone and then condensing (releases heat) in the downstream (low temperature) increases the downstream temperature quickly to 60°C during the sintering process. The parametric study also shows the sintering rate increases with the inlet air flow velocity and the bulk density of coke but decrease with the water content in the sintering bed.

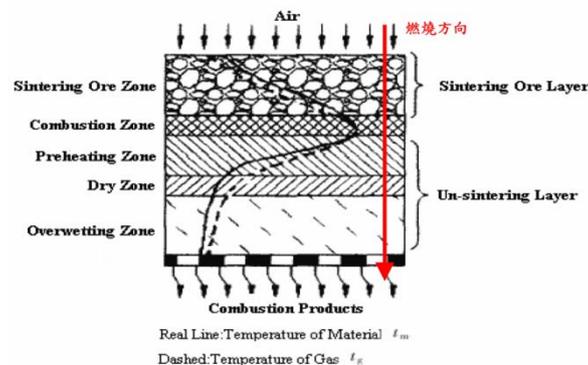
It is encouraging that the model is worth to be further developed to study the ore sintering phenomena and provide useful information for the design of sintering process.

Keywords: Sintering process, porous medium, numerical model

一、前言

燒結製程涉及燃燒、鐵礦的氧化還原、碳酸鈣分解、水分蒸發凝結、鐵礦熔化和凝結等物理現象及化學反應。這些都與料層溫度息息相關並決定燒結礦的品質。

燒結床內依據不同的物理化學性質大致可區分為五個區域[1]：燒結礦區(sintering ore zone)、燃燒區(combustion zone)、預熱區(preheat zone)、乾燥區(dry zone)及過濕區(over-wetting zone)，如圖一所示。若能掌控料層溫度，對於了解燒結理論及操作參數之設定有重要的意義。



圖一、燒結過程之溫度變化及區域示意圖[1]。

Hayashi 等人[2]利用電腦 2D 與 3D 模型模擬鐵礦燒結鑲嵌遷入過程(Mosaic Embedding Iron Ore Sintering, MEBIOS)，此過程乃基於多層共享空間(Multiply Shared Space, MUSES)的概念。他們模擬燒結生料顆粒的表面及內部溫度並與實驗量測比較。Kasia[3]等人則利用 X-rays CTS 探測鐵礦燒結鑲嵌遷入過程(MEBIOS)，探討燒結床在燒結過程中的孔隙結構變化，並利用電腦模擬鐵礦在燒結過程中聚集程度與間隙所造成之影響。

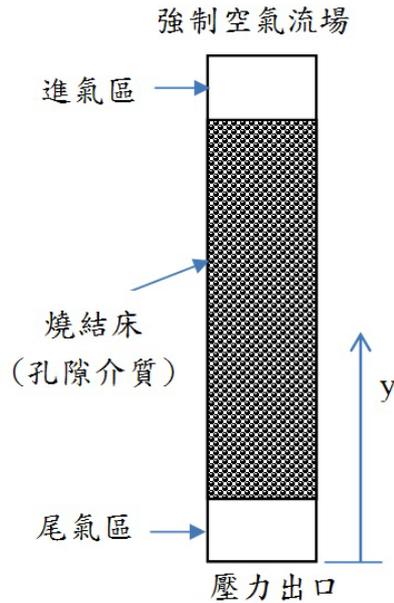
Hou 等人[4]為了在數值上準確地預測燒結床的過程，發展了擬似粒子(seudo particle)內的燃燒模型，擬似粒子內包含了鐵礦、細焦炭以及石灰石。他們利用單粒子燃燒模型來探討三種不同分布的擬似粒子，研究擬似粒子內溫度及氧氣濃度梯度對熱傳、質傳以及燃燒行為的影響。他們發現在擬似粒子內的溫度梯度並不明顯，但在氧氣濃度梯度上卻有明顯的變化，在他們研究中也有系統地分析如何依照燃料分布獲得最佳的燒結反應速率。最後發展之粒子內燃燒模型(Intra-Particle Combustion Model)也應用於燒結的數值模型中。

Yang 等人[5,6]考量燒結過程中物理現象及化學變化，建立一維的數值模型。他們的模型中大致分為固相與氣相模型，氣相模型中包含多種氣體組成(CO , H_2O , H_2 , CO_2 , O_2 , N_2)。在固相模型中，他們建立孔隙介質內各成份獨立的能量方程式，其固相物質包含水、細焦炭、石灰石、鐵礦、氧化鈣以及其他物質。其模型方程組之間的能量與質量轉換，則利用次模型來連結。除了熱傳導外，也使用了熱對流及熱輻射等模型。模型中模擬進入氣體的流速由實驗量測獲得，為時間的函數，所得之模型模擬結果也與實驗所量得之數據相符。然而他們的研究中，對於次模型的重要性以及參數影響並無深入地探討。

燒結現象為一個非常複雜的系統，若能根據數值模型分析燒結過程，將參數調整至最佳化，對燒結場的燒結礦品質與節能減碳上皆能有所助益。本研究欲建立簡化的燒結模型，以便逐步分析燒結現象中各模型的重要性，並探討各參數在燒結過程中的影響。

二、數學模型

圖二顯示本研究建立之一維燒結模型示意圖。中間部分為假設均勻孔隙介質之燒結床，在燒結床的上下有進氣區及尾氣區。



圖二、一維燒結模型示意圖。

在氣體模型上採用簡單的孔隙介質內流體流動模型，包含組分方程式。在能量方程式上，使用部分能量平衡 (local thermal equilibrium)，即單位體積內的氣體與孔隙介質的溫度一致。本研究建立之一維模型詳細描述如下：

2.1 數學模型

1. 連續方程式：

$$\frac{d(\gamma\rho)}{dt} + \frac{d(\gamma\rho v)}{dy} = \gamma \sum \dot{\omega}_i \quad (1)$$

2. 動量方程式：

$$\frac{d(\gamma\rho v)}{dy} + \frac{d(\gamma\rho v v)}{dy} = -\gamma \frac{dp}{dy} + \frac{d}{dy} \left[\gamma \left(\frac{-2}{3} \right) \mu \frac{dv}{dy} \right] \quad (2)$$

3. 組份守恆方程式

$$\frac{d(\gamma\rho Y_i)}{dt} + \frac{d(\gamma\rho v Y_i)}{dy} = \frac{d}{dy} \left(\gamma D_i \frac{dY_i}{dy} \right) + \gamma \dot{\omega}_i \quad (3)$$

其中 i 為各氣體組份-CO、O₂、CO₂、H₂O。N₂ 用於組份平衡計算。

4. 能量方程式：

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} (\gamma\rho E_f + (1-\gamma)\rho_s E_s) + \frac{d}{dy} (\gamma v (\rho E_f + p)) = \\ & \frac{d}{dy} \left\{ k_{eff} \frac{dT}{dy} - \left(\gamma \sum_i h_i D_i \frac{dY_i}{dy} \right) + \left[\gamma v \left(\frac{-2}{3} \right) \mu \frac{dv}{dy} \right] \right\} + \gamma S_f^h \end{aligned} \quad (4)$$

y 為座標方向、 t 為時間、 ρ 為氣體密度、 p 為壓力、 D_i 為組份之質量擴散係度(mass

diffusivity)、 Y_i 為 i 組份之質量分率、 $\dot{\omega}_i$ 為 i 組份之單位體積反應率、 E_f 為氣體總能、 E_s 為固(液)體介質總能 ($E = h - p / \rho + v^2 / 2$; $h = \sum Y_i h_i$)、 h_i 為 i 組份之焓、 γ 為介質孔隙度(假設為 0.4)、 $k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s$ 為介質的有效熱傳導係數 (effective thermal conductivity)、 k_s 為固體介質的熱傳導係數、 S_f^h 為氣體焓源項。本燒結模型在能量方程式中，在燒結區表面含有固體輻射熱散失機制。

氣體假設為不可壓縮之理想氣體，符合理想氣體方程式：

$$p = \rho R^0 T / \bar{M} \quad (5)$$

\bar{M} 為混合氣體的平均分子量， R^0 為萬有氣體常數。氣體黏滯係數 μ 假設為 1.72×10^{-5} kg/m s，氣體熱傳導係數 k_f 為 0.0454 W/m K，各組份的質量擴散係數 D_i 皆假設為 $5.86 \cdot 10^{-5} (T/1250)^{0.7}$ m²/s，各組份的熱容積(heat capacity)則使用參考文獻[7]。

固相孔隙介質部分，本模型將組份分成細焦炭、水以及其他物質(粉鐵礦、石灰石等)。細焦炭可燃燒放熱，水有相變化現象，其他物質不考慮相變化及化學反應。

在固(液)相與氣相的質傳互換上，細焦炭先氧化為氣相的一氧化碳，一氧化碳再與氧反應為二氧化碳。而水分在燒結過程中會被加熱蒸發且放熱凝結。其燃燒放熱反應與水分的相變化反應式如下：



細焦炭之氧化反應速率 I 採用文獻[8]之表示式：

$$\dot{\omega}_I = k_I [O_2]; \quad k_I = \frac{a}{\frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_m} \frac{a}{\rho_{bc}}} \quad (6)$$

k_I 為反應速率常數，反應速率常數中使用之參數分別為：

$$a = \frac{6}{\phi d_p} \left(\frac{\rho_{bc}^0}{1400} \right) \quad (7)$$

$$k_f = \frac{D_{O_2}}{\phi d_p} \cdot 1.5 \left(\frac{|v| d_p}{0.7 \cdot D_{O_2}} \right)^{0.55} \quad (8)$$

$$\rho_{bc} k_m = 4.571 \times 10^5 \cdot T^{0.5} \cdot e^{\left(\frac{-22140}{T} \right)} \quad (9)$$

ϕ 為形狀因子(0.72)， d_p 為細焦炭之直徑($1.6 \left(\frac{\rho_{bc}}{\rho_{bc}^0} \right)^{1/3}$ mm)， ρ_{bc}^0 為初始細焦炭之整體密度， v 為氣體流速。氣體化學反應中，一氧化碳之一步驟氧化反應速率 $\dot{\omega}_{\text{II}}$ 為：

$$\dot{\omega}_{\text{II}} = 1.3 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{15104.6}{T}\right) \cdot [\text{O}_2]^{0.5} [\text{CO}] [\text{H}_2\text{O}]^{0.5} \quad (10)$$

在水的蒸發與凝結上，模型假設達到准穩態飽和蒸汽壓(quasi-steady state)。即在模擬非穩態燒結過程中，水一直維持在飽和蒸氣壓狀態。其飽和水蒸氣密度與溫度的關係為：

$$VD = 6.335 + 0.6718T - 2.0887 \times 10^{-2} T^2 + 7.3095 \times 10^{-4} T^3 \text{ (單位: g/m}^3\text{)} \quad (11)$$

2.2 數值方法

本研究將把上述的數值模型建立在商業軟體 ANSYS FLUENT[9]上。研究中配合 UDF (user defined file) 檔案的使用，將 FLUENT 中未包含之模型加入模擬計算中。

吾人使用 FLUENT 二維空間計算模型(見圖二)，在模型上方邊界條件為固定空氣流速，從上方往下方流動，下方邊界條件為壓力出口邊界，並假設模型之左右兩邊為對稱邊界，因此本模型之模擬結果可視為一維。

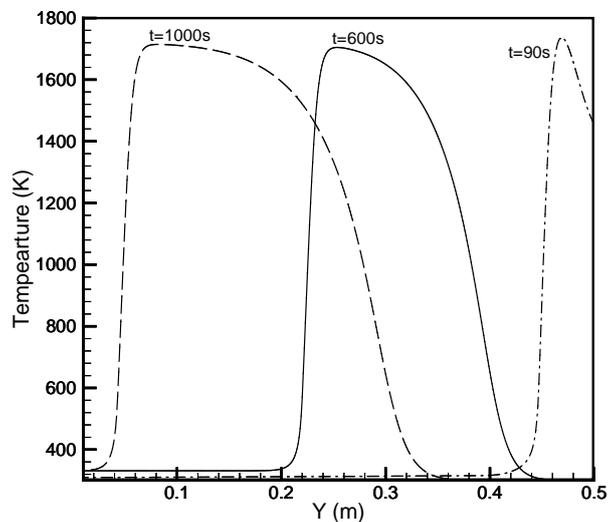
本文中非穩態燒結模擬研究，初始溫度假設為 300K，孔隙介質內的氣體為空氣，流速 v 為零。模擬初將於模型上方(見圖二) 給一熱源，點燃燒結床內之細焦炭產生高溫，熱源於 90 秒後移除。

三、結果與討論

本模擬中，燒結床的位置在 1 cm~51 cm；高度為 50 cm。在燒結床的參數使用上，假設單一孔隙率 0.4[6]，固體熱傳導係數 k_s 為 $3+3 \times 10^{-9} T^3$ (W/m K)，熱容量為 $850+0.545T$ (J/kg K)。燒結床內各物質的初始量整體密度(bulk density)分別為細焦炭 C(s) 57.7 kg/m^3 、水 $\text{H}_2\text{O}(l)$ 125 kg/m^3 以及其他物質 1603 kg/m^3 (細焦炭與水之重量百分比分別為 3.23 % 及 7.0 %)。點火裝置之模擬採用 Yang 等人[5,6]之模型及參數，於點火期間進氣溫度為 1400 K，流速為 4 m/s，點火熱源將在 90 秒後移除，入口流速將改變為 0.4m/s、溫度 300 K 之空氣進入燒結床內。本研究著重在燒結床點燃後高溫燒結區的傳播現象，對於點火裝置及熱功率等對燒結過程的影響，目前不在討論範圍。吾人以上述使用之參數作為參考案例(reference case)。

圖三顯示燒結過程中不同時間之溫度分布圖，圖中顯示燒結高溫區由圖之右方往左方移動(圖三左方為圖二模型上方)。t=90秒為點火器移開時刻，圖中顯示燒結區內最高溫度約 1740 K (~1467 °C) 位於 $y=0.47 \text{ m}$ (燒結床表面下 3 cm 處)，高於

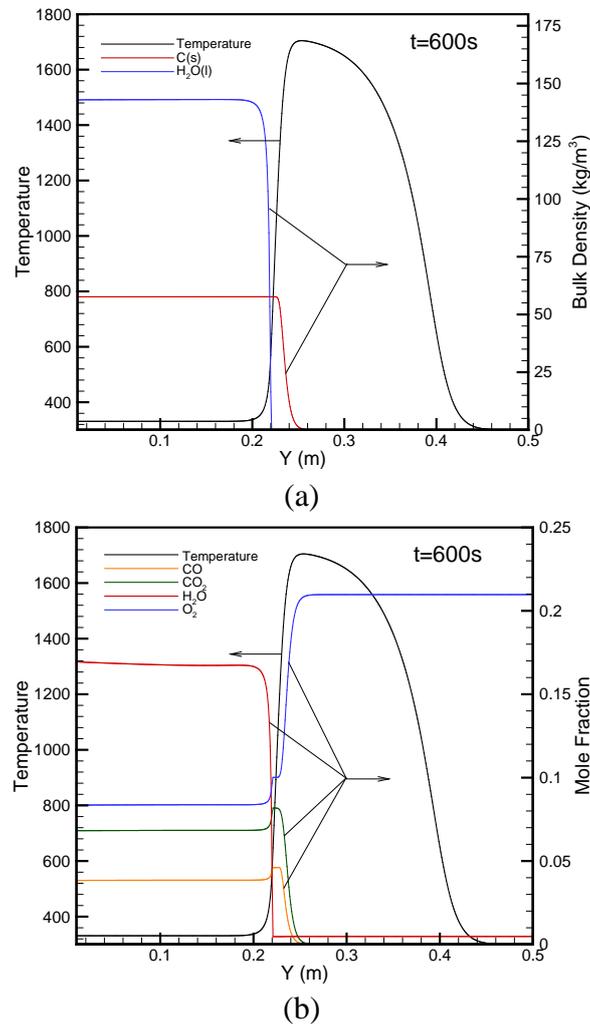
點火器溫度1400 K，可見燒結床內之細焦炭已被已經被點火器點燃。點火器移開後，入口流速及溫度分別變為0.4 m/s和300 K，且高溫固體表面會以輻射熱散失至環境中。燒結高溫區會持續加熱進入燒結床的低溫空氣，進入之空氣有助於將熱傳往下游區，而進入之空氣也持續提供細焦炭氧化燃燒所需的氧氣，促使燒結高溫區往下游區移動。當 $t=600$ 秒時(見圖三)，壁面燒結床之表面溫度已降至300 °C，燒結床高溫區已移動至下游且分布範圍變大，其最高溫約1700 K(~1427 K；接近真實燒結溫度)位在 $y=0.25$ m附近。圖中也可發現在 $t=600$ 秒後，燒結床下游區的溫度明顯上升至332K(~60 °C)左右(稍後說明)。當 $t=1000$ 秒時，最高溫度移動至0.08 m附近，且分布範圍更廣。



圖三、燒結區內不同時間之溫度分布圖。

圖四顯示時間在第600秒時，燒結區內部之氣體組成及凝相組成分布圖。圖四(a)顯示細焦炭及水在燒結高溫區前緣被燃燒或汽化而迅速減少。此模型中水的蒸發與凝結現象模擬中，假設燒結區內達到准穩態(quasi-steady state)飽和蒸氣壓。在一大氣壓下，水在溫度高於373 K(100 °C)會沸騰而迅速蒸發，導致燒結高溫區前緣的水分快速消失。蒸發後的水蒸氣往下游區流動，由於下游區的溫度低，水蒸氣達到飽和蒸氣壓而凝結，圖四(a)顯示下游區水的整體密度(bulk density of water) 升高至143 kg/m³。水蒸氣凝結釋放凝結熱，使下游區溫度上升至該溫度下的飽和蒸氣壓與與下游區水蒸氣分壓相當。模擬結果顯示燒結製程進行後不久，下游區之溫度會提升至約332 K(~60 °C)。對照圖四(a)中固體減少的位置，圖四(b)顯示細焦炭在高溫下氧化燃燒反應使氣體中之CO及CO₂迅速產生，並且由於水的沸騰蒸發，水蒸氣含量迅速上升，造成二氧化碳與一氧化碳莫耳分率瞬間降低。模擬結果也顯示CO、CO₂、H₂O及O₂在下游尾氣區之莫耳百分比分別為3.85

%、6.83 %、16.8 % 以及 8.37 %。



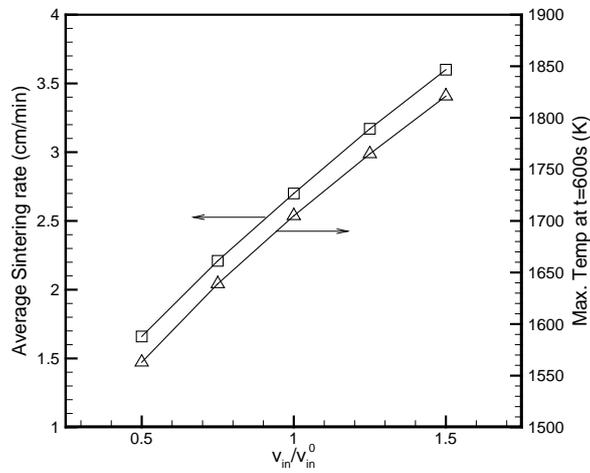
圖四、第600秒之燒結區分布圖。(a)凝相組成之整體密度(bulk density)分布(細焦炭及水)。(b)氣相組成之莫耳分率(mole fraction)分布(CO , CO_2 , H_2O , O_2)。

由圖三可發現燒結過程中，燒結高溫區移動的速度並非恆定，而是呈現越往下游區移動速度越快。因此為求得平均燒結速率，本文中定義當尾氣區之溫度達到最高溫度時即為燒結結束之時刻，可求得平均燒結速率為

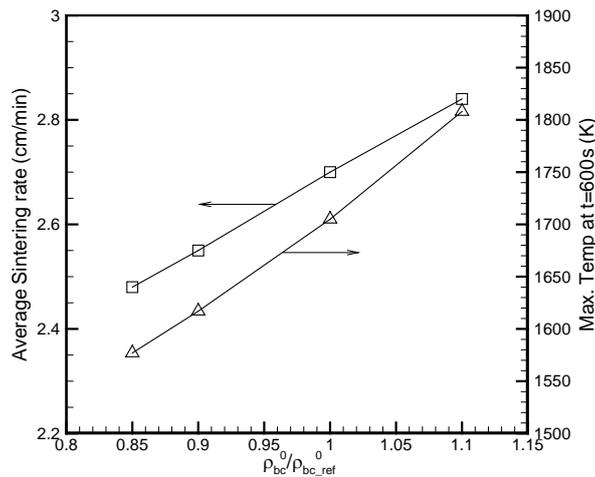
$$\frac{\text{燒結床之高度 (50cm)}}{\text{完成燒結之時間 (包含點火時間)}}。$$

圖五至七分別顯示空氣入口速度、細焦炭之整體密度以及水之整體密度對燒結過程之影響，顯示各參數變化與平均燒結速率及在最高溫度($t=600s$)之關係。空氣流速對於燒結床內細焦炭燃燒所需之氧氣以及熱傳播速率的影響很大，圖五顯示平均燒結速率及最高溫度隨著空氣流速加快而增加。細焦炭在燒結過程中的燃燒放熱量將決定燒結過程是否可以順利進行，其使用量越多代表總放熱量越大，圖六顯示平均燒結速率及最高溫度隨著細焦炭增加而增加。燒結過程中，高

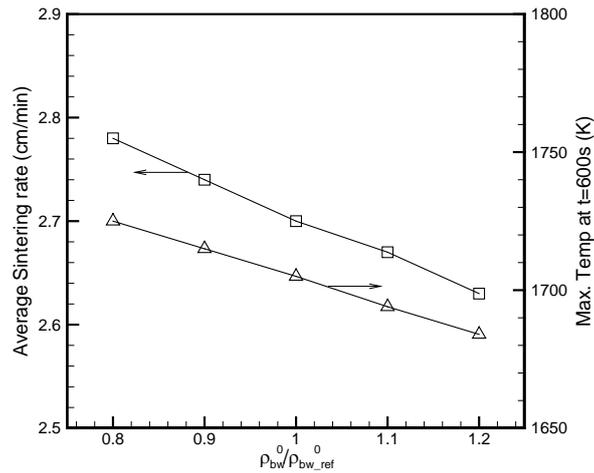
溫區前緣需將水分汽化後才可往下游區前進，並且水分會形成水蒸氣將熱帶走，圖七顯示平均燒結速率及最高溫度隨著燒結床內水分增加而降低。



圖五、空氣入口速度對平均燒結速率與燒結區最高溫度(t=600秒)之影響。
 $(v_{in_ref}^0 = 40 \text{ cm/s})$



圖六、細焦炭之整體密度對平均燒結速率與燒結區最高溫度(t=600秒)之影響。
 $(\rho_{bc_ref}^0 = 57.7 \text{ kg/m}^3)$



圖七、水之整體密度對平均燒結速率與燒結區最高溫度(t=600 秒)之影響。
 $(\rho_{bw_ref}^0 = 125 \text{ kg/m}^3)$

四、結論

本研究初步考慮燒結過程中，細焦炭的燃燒放熱以及水分的蒸發與凝結等現象。細焦炭燃燒放熱為燒結製程中的熱量來源，對燒結區的溫度有很大的影響；而燒結床內的水分会於高溫區前緣吸熱蒸發後，至下游低溫區凝結放熱，也是燒結床內重要的熱傳現象之一。

研究顯示此模型可成功地模擬細焦炭的燃燒放熱、水分的蒸發與凝結以及孔隙介質內高溫燒結區的移動現象。模擬結果指出水分經由相變化的熱傳，會使燒結床下游區溫度很快地升至60 °C左右，燒結速率隨著空氣流速及細焦炭增加而加快，但隨著燒結床的含水量增加而變慢。

模擬結果顯示本文所建立之一維燒結模型可成功地模擬燒結床內重要的熱傳與質傳現象。吾人認為在現階段模型中，加入其他重要的燒結現象(鐵礦粉末的熔化與固化及石灰石的熱裂解等)，並配合適當的參數，其模擬結果可提供燒結製程重要的參考資料。

五、致謝

感謝中鋼公司計畫編號RE101639。

六、參考文獻

1. J. Si, G. Lou, Z. Wen and X. Liu, Mathematical Model and Experimental Research of Heat Transfer Process in Sintering, *University of Science and Technology Beijing*, Beijing, China, 2008
2. N. Hayashi, S. V. Komarov and E. Kasai, Heat Transfer Analysis of Mosaic

- Embedding Iron Ore Sintering (MEBIOS) Process, *ISIF International*, Vol.49, pp.681-686, 2009.
3. E. Kasai, S. Komarov, K. Nushiro and M. Nakano, Design of Bed Structure Aiming the Control of Void Structure Formed in the Sinter Cake, *ISIJ International*, Vol.45, pp.538-543, 2005.
 4. P. Hou, S. Choi, W. Yang, and E. Choi, H. Kang, Application of Intra-Particle Combustion Model for Iron Ore Sintering Bed, *Materials Sciences and Applications*, Vol.2, pp.370-380, 2011.
 5. W. Yang, C. Ryu, S. Choi, E. Choi, D.W. Ri and W. Huh, Mathematical Model of Thermal Processes in an Iron Ore Sintering Bed, *Metals and Materials International*, Vol.10, pp.493-500, 2004.
 6. W. Yang, C. Ryu, S. Choi, E. Choi, D.W. Ri and W. Huh, Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple solid Phase, *ISIJ International*, Vol.44, pp.492-499, 2004.
 7. R. J. Kee, F.M. Rupley and J. A. Miller, *The CHEMKIN Thermodynamic Data Base*, SAND 87-8215B, 1987.
 8. M. Gu, N. Selvarasu, F. Huang, P. Chaubal and C. Zhou, Numerical Analysis on the Coke Combustion Inside Raceway, *AISTech Conference Proceedings*, 2007.
 9. *ANSYS FLUENT 14*, Lebanon, N.H., 2011.

機車引擎怠速熄火之啟動特性研究

Starting characteristics of a motorcycle engine with idle-stop strategy

吳東翰¹、尤富芄²、邱韋丞³、洪榮芳⁴

Dong-Han Wu, Fu-Peng Yu, Wei-Chen Chiu, Rong-Fang Horng

崑山科技大學機械工程系

Department of Mechanical Engineering, Kun Shan University, Tainan, Taiwan

蔡建雄⁵、曾全佑⁶

Chien-Hsiung Tsai, Chyuan-Yow Tseng

屏東科技大學車輛工程系

Department of Vehicle Engineering, Pingtung University of Science and Technology,
Pingtung, Taiwan

摘要

本研究針對機車「怠速熄火」之後，引擎的再啟動特性進行探討。目的在於縮短引擎啟動時間、降低啟動耗能、減少啟動過程的污染排放。研究方法為改變啟動器的齒比以改變啟動轉速，並實施噴油寬度的改變，以找出較佳的啟動特性。量測參數包括引擎轉速、引擎汽缸壓力，及啟動馬達所消耗電流等，並分別進行分析討論。由測試結果顯示，原車大約 3-4 個循環可啟動引擎；齒比由 26.8 改變至 19.1 時，在引擎熄火前，以 3ms 噴油寬度的燃料預先噴入燃燒室內，可得較佳的啟動特性，約 1-2 個循環即可成功啟動。

關鍵字：怠速熄火、快速啟動、污染排放。

Abstract

In this study, the re-starting characteristics of a motorcycle engine under idle-stop were investigated. The aim of this study is to shorten the engine start-up time, reduce energy consumption and pollution emissions during start-up. In the initial stage of the study, the gear ratio of the starter was changed, and the parameters of the engine speed and cylinder pressure and the starting current of motor were measured and analyzed. The results showed that supplying the fuel

¹ 崑山科技大學機械工程系，碩士班研究生

² 崑山科技大學機械工程系，碩士班研究生

³ 崑山科技大學機械工程系，博士班研究生

⁴ 崑山科技大學機械工程系，教授，E-mail: hfr733@mail.ksu.edu.tw

⁵ 屏東科技大學車輛工程系，教授

⁶ 屏東科技大學車輛工程系，教授

injection duration of 3 milliseconds into the combustion chamber before the engine was stopped would give the quicker restarting characteristics.

Keywords: Idle-Stop, quick start, exhaust emissions

一、前言

近年來隨著世界環保意識日漸抬頭及越來越受關注的環境問題，而台灣機車密度又是亞洲第一，節能及污染減量非常重要。為減少燃料消耗及二氧化碳排放，Sawai 等人[1]提出車輛停止時，自動熄火裝置可有效減少廢氣排放，並且可提高燃油效率。且在交通繁忙的機車等待區，機車騎士會吸入暴露在空氣中的廢氣，對於健康的風險非常高。Toriyama 等人[2]設計一套 50 c.c.機車怠速熄火裝置進行探討，藉由此裝置，當冷卻水溫度超過 50°C，機車完全停止時引擎即刻熄火；只要拉動節氣門，引擎即可立即再啟動。經研究測試結果，此怠速熄火系統使該車節省 5.1%的燃料消耗，減少 4.9%的 CO₂ 排放量，CO 排放量也減少 6.9%，HC 排放減少 3.2%。Zhou 等人[3]則模擬高速起動過程中噴射汽油引擎混合動力電動汽車(HEV)的瞬間污染排放，實驗結果發現，當起動轉速大於 1500rpm，將大幅增加在汽缸內的殘餘氣體，導致不完全燃燒或失火。並利用延遲點火，縮短三元觸媒的起燃時間，並且建議可將觸媒保溫在 300°C 以上，結果在起動過程，可使 HC 轉化效率高於 90%。Cowart 等人[4]改變引擎啟動溫度，分別為 0°C 及 90°C，並且利用快速火焰離子探測器(Fast flame ionization detector, FFID)進行量測，觀察氣道噴射式引擎啟動行程中燃料的質量變化。結果顯示，於冷啟動(0°C)時，後燃燒(post-combustion)的燃料蒸汽大致與預燃者(pre-combustion)相近；引擎熱起動時約可下降到三分之一。Matsuura 等人[5]研究紅綠燈停等時車輛怠速熄火油耗改善估計方程式，發現車輛怠速熄火超過 7 秒以上燃油消耗得以改善。Yanagisawa 等人[6]設計一套 125 c.c.機車怠速熄火裝置，引擎藉由 ACG 啟動裝置直接帶動引擎曲軸，當機車冷卻水溫度超過 60°C，系統將切換成怠速熄火模式，機車完全停止超過 3 秒鐘引擎立即停止運轉；只要打開節氣門，其引擎即可快速再啟動。經研究測試結果，此怠速熄火系統使該車在 EURO-3 控制模式下，燃油消耗改善 7.5%、CO₂ 排放量降低 7.0%。Gumus 等人[7]以相變化材料(Phase change material)應用於水冷式汽油引擎汽缸體以儲存熱能，於冷啟動及暖機期間釋放出來提供熱能給引擎維持溫度，並量測汽缸體溫度當參考。測試結果，熱效率可提升 57.5%，HC 及 CO 污染排放分別可改善 64% 及 15%。Davis 等人[8]以一部 1800 c.c.四行程歧管噴射(Port fuel injection, PFI)引擎，同時使用快速響應非分散式紅外線(Non-dispersive infrared, NDIR)儀器與廣

域含氧感知器(Wide band universal exhaust gas oxygen sensor, UEGO)於冷啟動及暖機期間量測空氣過剩率。測試結果，響應快的空氣過剩率數值，能有效的降低引擎冷車增濃補償期間，並且降低二氧化碳的排放。Yu 等人[9]測試一混成動力電動車，發現啟動轉速、啟動溫度、供油策略等將會影響引擎啟動。啟動轉速約在 1000 rpm 就可達到較快速的啟動；引擎溫度的升高，燃料導入也可下降。當提高起動速度，雖然可促進燃油霧化，利於形成可燃混合氣，卻由於進氣歧管的壓力的減少而影響燃料進料量，進而影響啟動。Zhang 等人[10]使用 3000 c.c. SI 引擎進行測試，發現以開迴路控制目標轉速引擎啟動時間約只需 1.5 秒，符合冷啟動規範。而改變空燃比及點火提前角，結果顯示，怠速時較好的空燃比能有較好的啟動性能，因仍須考慮引擎溫度及機油溫度等，但空燃比限制需要在更小的範圍。

綜觀上述，可以發現引擎於怠速之際，啟動過程污染排放及油耗不容忽略。所以本研究探討怠速自動熄火後，在啟動過程之初，燃料於噴入汽缸內之初的幾個循環可能都無法點著火、或啟動時的油氣增濃補償，都會造成 HC 的污染排放與耗油的現象。故本研究針對，改變啟動轉速、噴油方式等，以使引擎快速啟動，達到快速啟動、減少耗能、減少污染的目的。

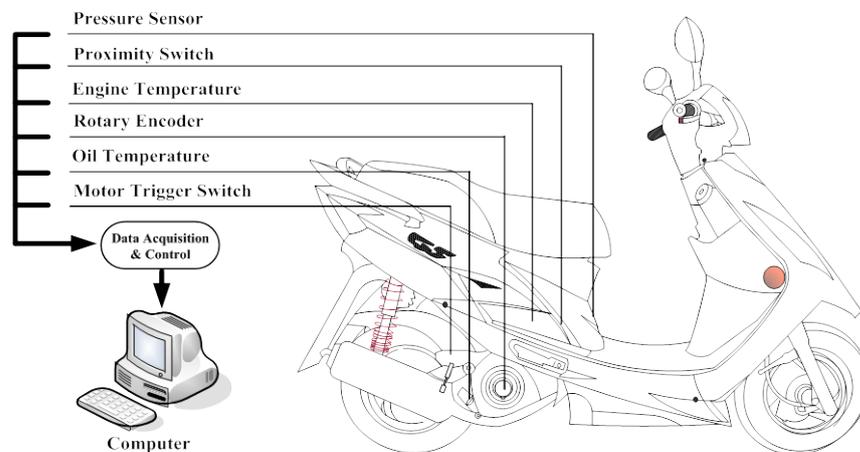
二、實驗設備及方法

2.1 實驗設備

本研究主體為 125 c.c.之噴射機車引擎，表一所示為本實驗機車之基本規格。實驗配置示意如圖一所示。以汽缸壓力感知器(Cylinder pressure sensor)量測引擎汽缸氣體壓力，並在引擎風扇葉側裝置旋轉編碼器(Rotary encoder)，來進一步量測曲軸轉速訊號以及引擎旋轉角度，啟動馬達正極串聯分流器，量測馬達啟動所消耗之電壓及電流。機車溫度量測部分為利用三支 K-type 熱電偶(Thermocouple)量測火星塞溫度、機油溫度及排氣管觸媒前溫度。數據擷取及控制系統是以 National Instruments 的 USB-6221 擷取卡，經由 Labview 軟體撰寫數據擷取及控制程式，並再另加裝突出物感應近接開關(Proximity switch)來感應活塞上死點位置，控制引擎熄火時機；熄火噴油驅動則以驅動電路並接原車噴油嘴電路。

表一 引擎規格

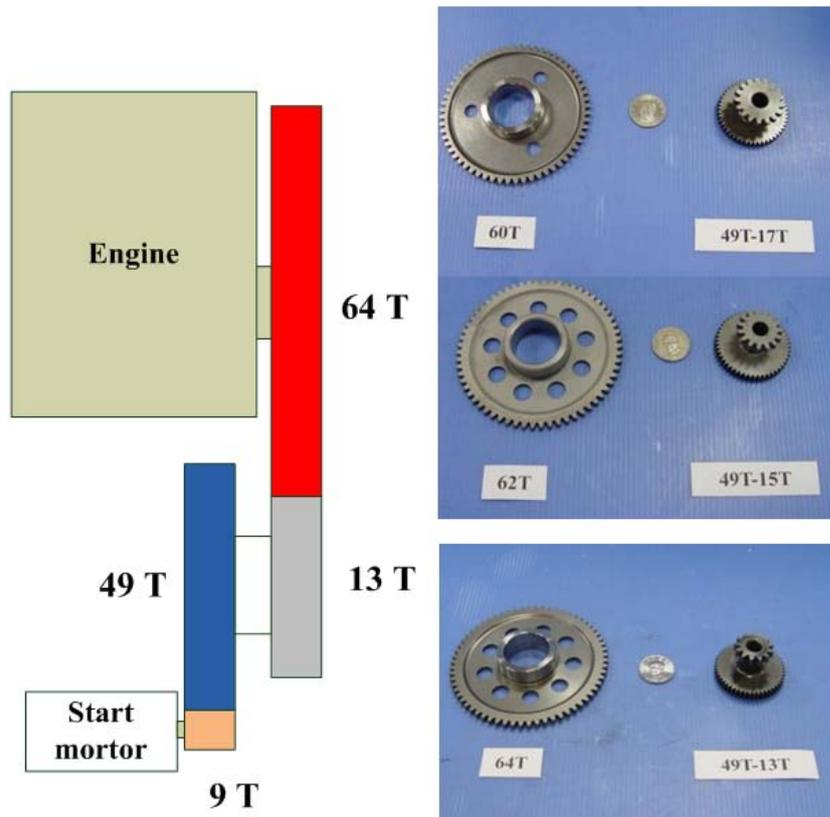
引擎形式: 單缸 4V 強制空冷式四行程引擎
缸徑: 54 mm 行程: 54.5 mm
移程容積: 124.8 cm ³
壓縮比: 10.8 : 1
壓縮壓力: 15/570 (kg/cm ² /rpm)
供油系統: 電子噴射
目標怠速: 1800 rpm
電瓶規格: 12/10 (V/AH)
燃料: 92 無鉛汽油



圖一、實驗設備示意圖

2.2 實驗方法與步驟

每次測試前啟動特性前，先使引擎以轉速 5000rpm 運轉 6 分鐘，確認引擎以及含氧感知器(O₂ Sensor)已達到工作溫度。以自行撰寫的程式控制引擎在壓縮上死點前熄火、並控制噴油，以確保引擎尚未完全停止時，可將燃料吸入燃燒室內。本實驗並改變啟動馬達齒輪比，齒輪相關示意如圖二所示。研究過程將比較原車齒比 26.8 與 19.2 的不同，來了解啟動時引擎轉速與汽缸氣體壓力、啟動馬達消耗電流等啟動特性差異。再選出較佳參數，在引擎熄火完全停止前，以 3 毫秒噴油寬度噴入進氣歧管、進而吸入汽缸內，以便於下次啟動時，減少啟動循環數，達到快速啟動的效果。

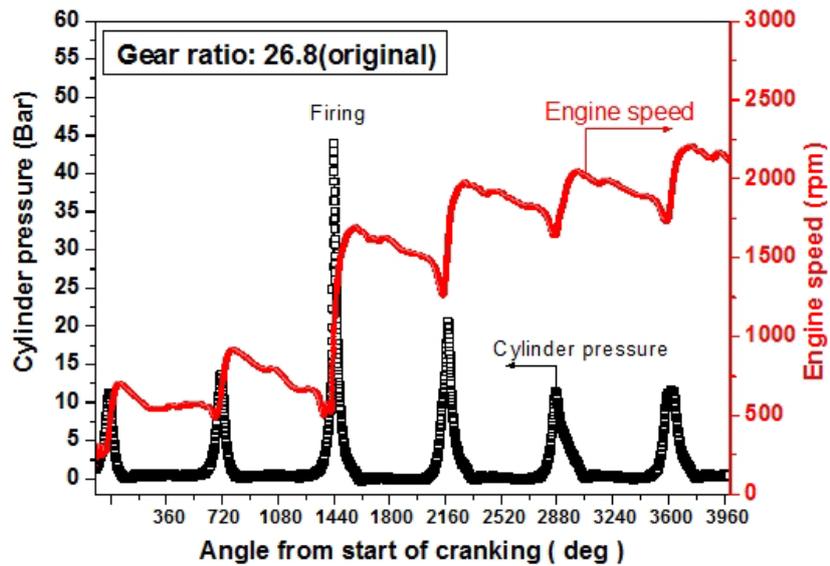


圖二、引擎啟動齒輪示意圖及齒輪實體圖

三、結果與討論

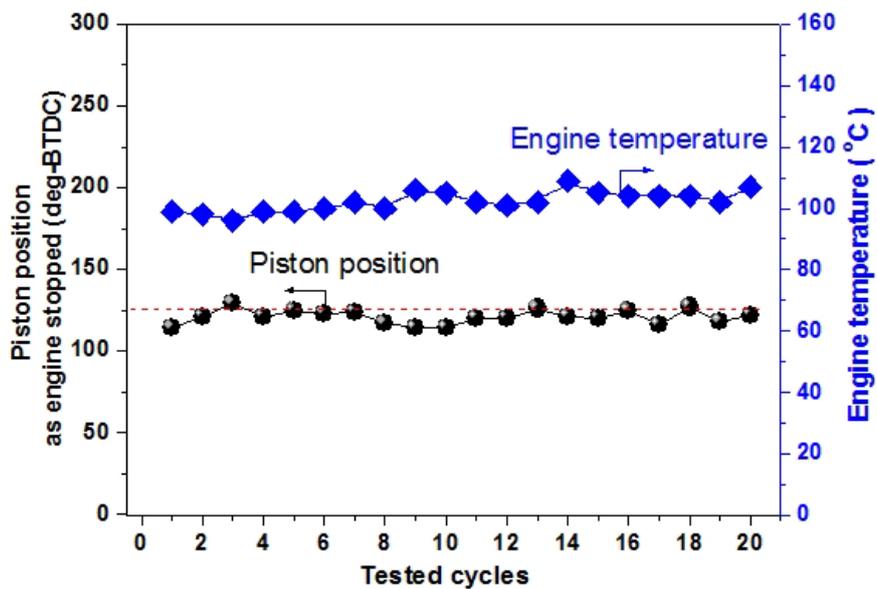
3.1 原機車引擎啟動測試

圖三為機車引擎再啟動之引擎汽缸壓力及啟動轉速的變化，由圖中可以看到啟動過程中，引擎經過三次進氣-壓縮-動力-排氣循環，在第三次循環時引擎才啟動。在第二個壓縮過程時轉速約在 800rpm，第三個壓縮循環，轉速有明顯上升至 1800rpm，此時確定引擎已經啟動。因此，往後在改變引擎啟動轉速和實施熄火預先噴油方法時，可以此做為參考依據。



圖三、啟動時汽缸壓力與轉速

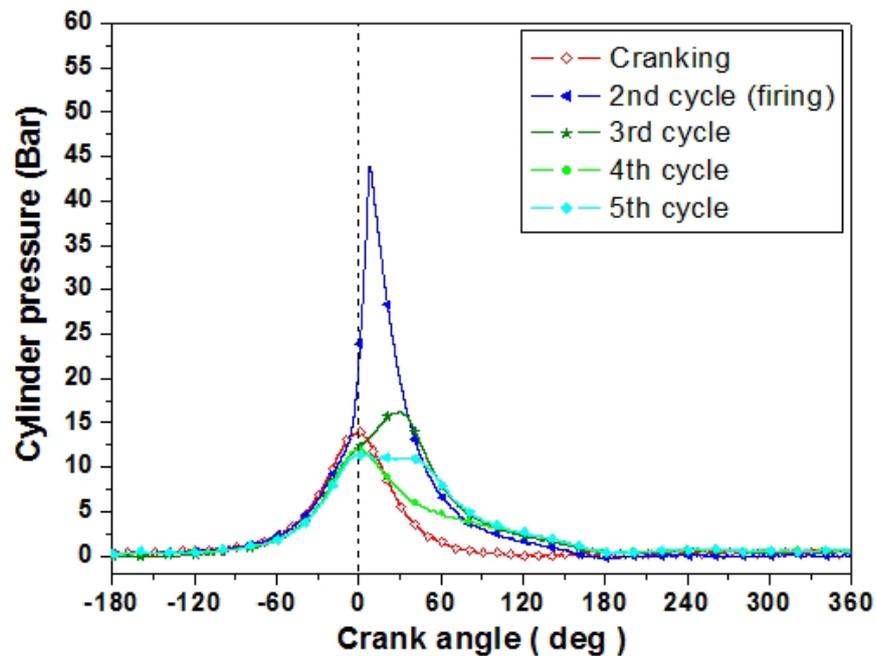
為瞭解每次引擎熄火後活塞停止位置，進行數次引擎啟動後活塞停止位置的測試，由圖四中可看出引擎熄火後，活塞大約停在壓縮上死點前 110~130° BTDC 的角度位置。



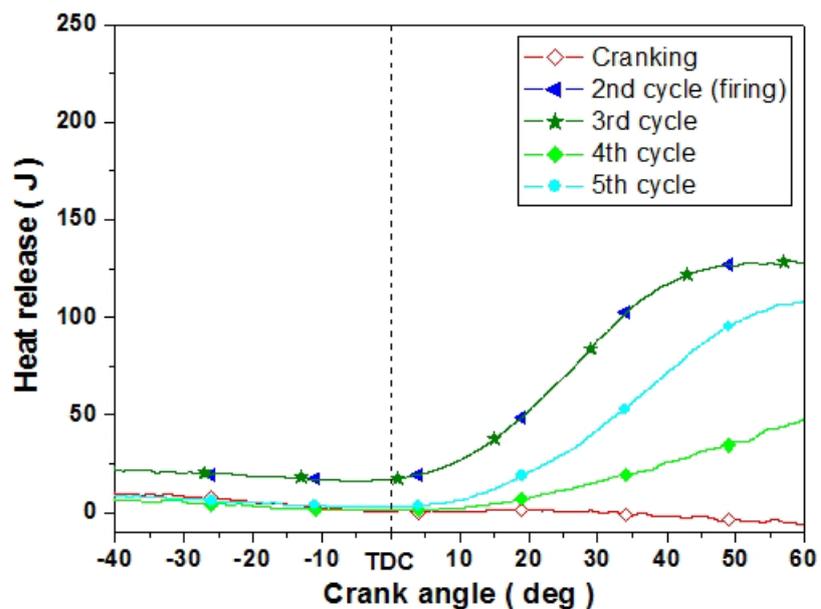
圖四、引擎熄火活塞停止位置

圖五為引擎啟動時之汽缸壓力變化，從圖中能發現當引擎成功點著火後，壓力峰值明顯上升，且其所處角度有往後移動的現象。搭配圖六為可以發現引擎啟

動之熱釋放，因引擎於壓縮行程時，活塞壓縮使混合氣壓力變大，在上死點附近時，引擎點火後燃料開始燃燒，並開始釋放出熱能。當曲軸角度到達 20° ATDC 時曲線上升較慢，之後隨著火焰的傳播，燃燒的燃料越來越多，釋放的熱量則增加。由此亦可得知，有熱釋放之循環，引擎確實已點著火。



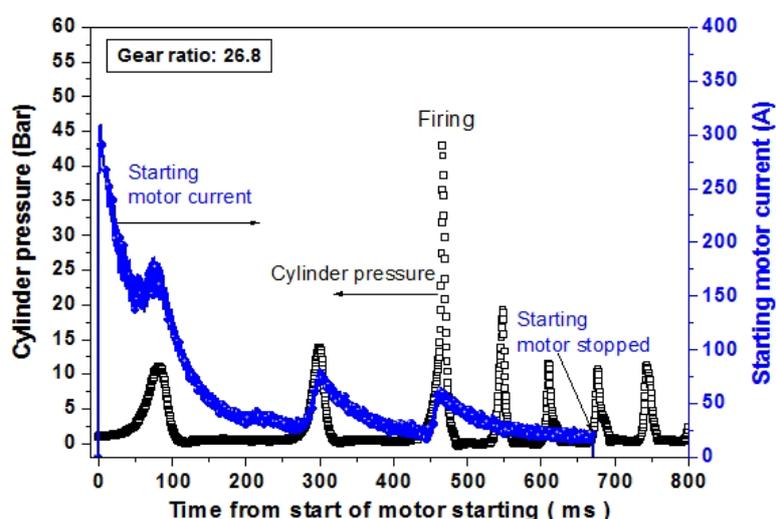
圖五、引擎啓動時之汽缸壓力



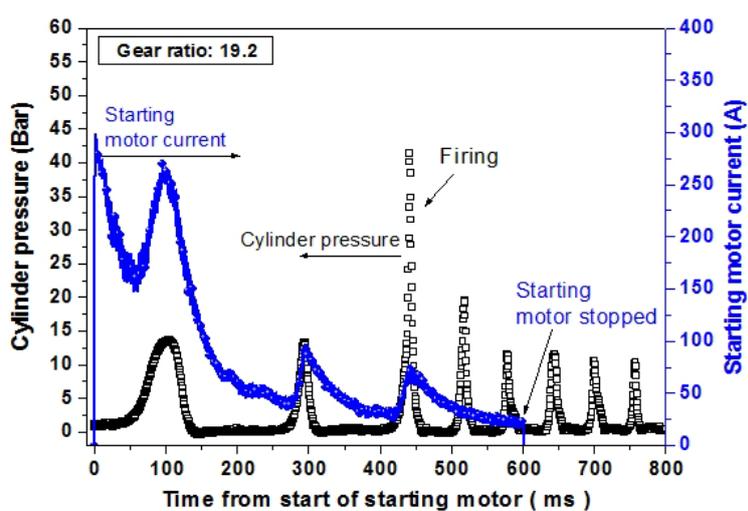
圖六、引擎啓動時熱釋放

3.2 齒比對引擎啟動轉速特性影響測試

圖七為原車與改齒比情況下的汽缸壓力與啟動馬達電流。從圖七(a)、(b)中可發現，原車第一個壓縮上死點電流約 180 安培；而齒比 19.2 者第一個壓縮上死點電流約 260 安培；相較於原車的第一個循環壓縮壓力，齒比為 19.2 者較原車高約 2 bar，這是因為在啟動轉速較高的情況下，引擎汽缸內壁與活塞環之間較不易漏氣，亦即較少洩漏氣(Blow-by gas)；但相對的壓縮功變大，故馬達搖轉引擎啟動阻抗變大，造成啟動馬達電流上升。而引擎啟動點著火所需的時間，也因引擎轉啟動轉速較高、汽缸壓力隨之提升，引擎啟動時間也從原本約 0.46 秒縮短至約 0.42 秒，改善約 8.6%。



(a)



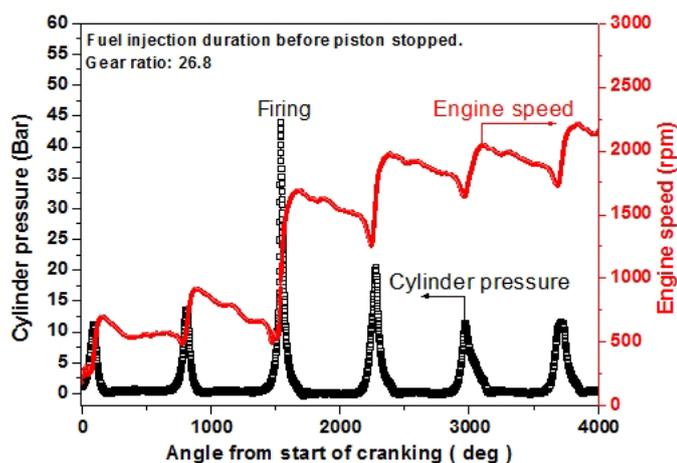
(b)

圖七、原車與改齒比燃燒壓力及啟動電流

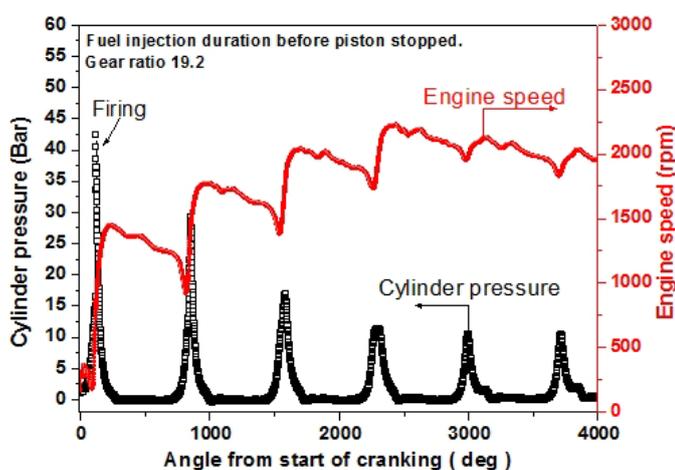
3.3 熄火前預先噴油使混合氣於燃燒室內預混合影響測試

由於需由搖轉引擎的方式來啟動引擎，使活塞在進氣行程產生負壓，並將混合氣吸入汽缸內，壓縮並點火產生動力。本測試於引擎熄火前，於引擎尚未停止前預先噴油於氣道，使混合氣於進氣行程時吸入燃燒室內混合，以增加燃料混合時間，使燃料於汽缸內揮發、預混，希望於引擎再啟動時，汽缸內的混合氣即可壓縮後點燃發動引擎。

圖八(a)為原齒比狀況下，熄火後、引擎尚未停止前預噴油，使混合氣於燃燒室預混合的汽缸壓力與引擎轉速關係。從圖中可發現，雖然引擎在熄火前，燃料預先於燃燒室混合，但在啟動時第一個及第二個循環都未點著火，直到第三個循環才成功點著火啟動。原因應該是已於汽缸內預混的混合氣並未完全留在汽缸內，或剛打啟動馬達，第一個循環引擎轉速不夠高、攪動氣流不夠強，無法點著火啟動；而於第二個循環才噴入的燃料尚未充分吸入混合，或當時混合氣尚未達到可燃空燃比，故使前兩個循環都未成功點燃。圖八(b)為齒比 19.2、熄火前混合氣於燃燒室預混合的狀況。



(a)

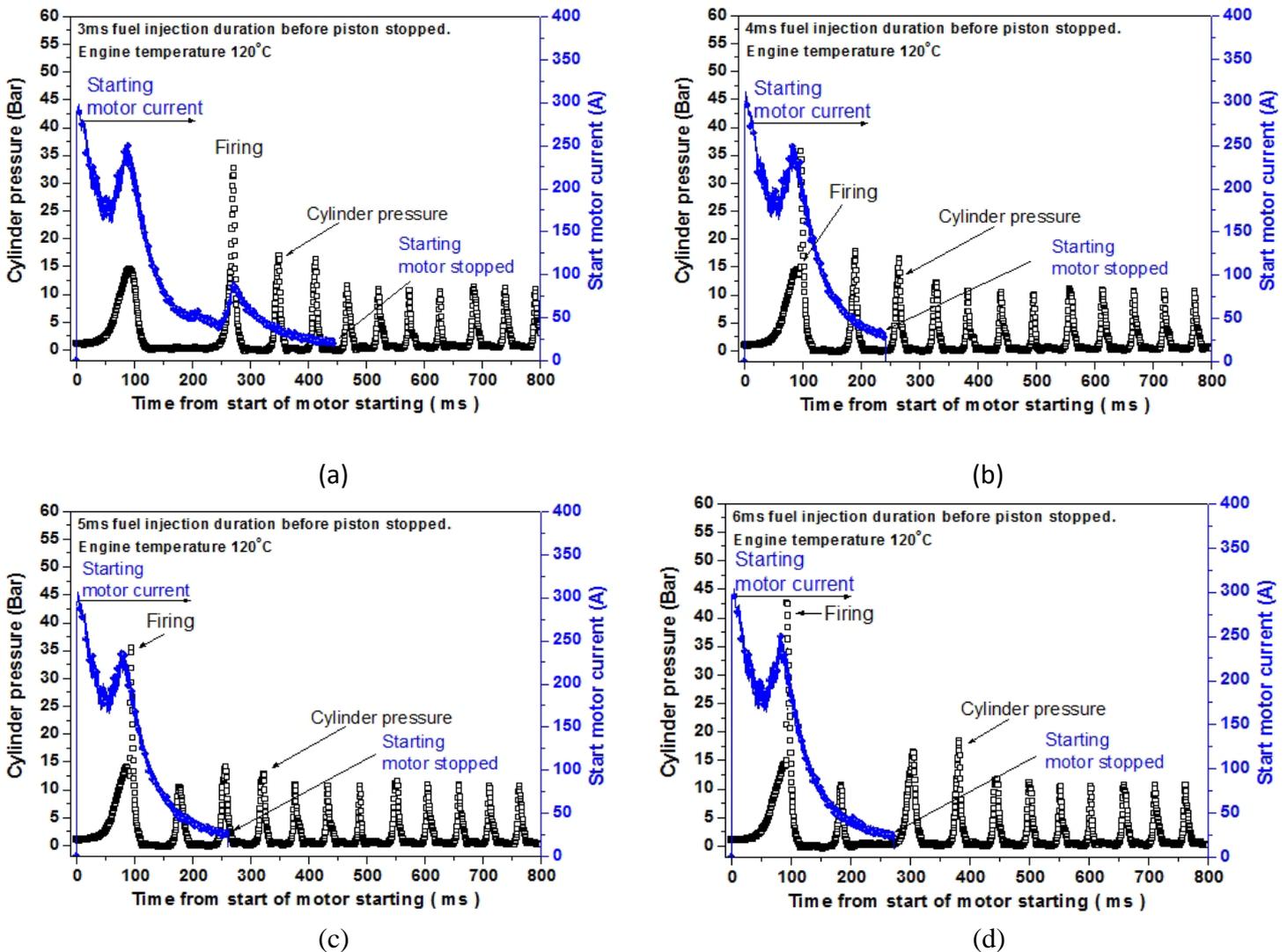


(b)

圖八、熄火前混合氣於燃燒室預混對汽缸壓力與引擎轉速之關係

從圖八(b)可看出，引擎在啟動後第一個循環時，已經有點著火啟動引擎之現象。這應該是因為燃料預先於燃燒室內混合，而且在此齒比下轉速也夠高、攪動氣流較強，故於再啟動時即可點燃。圖中曲軸旋轉角度經過約 300 度時，此時引擎轉速約上升至 1400rpm，到曲軸旋轉角度約 900 度時，轉速已經上升至 1700rpm，明顯看出引擎已經點著火啟動。

圖九(a)、(b)、(c)、(d)為齒比 19.2、引擎缸頭溫度 120°C，實施熄火前預先噴入不同噴油寬度於燃燒室預混合，其再啟動汽缸壓力與啟動電流的比較。由圖九(a)能發現引擎於第二個循環才點著火，可能因引擎熄火後部分已揮發燃料會沉積吸附於汽缸壁面，導致該次再啟動無法於第一個循環點著火。而由圖九(b)、(c)、(d)可發現，噴油寬度增加之後，引擎再啟動都能於第一個循環點著火啟動引擎；其啟動時間縮短至約 0.09 秒，改善率約 79.27%。



圖九、不同噴油寬度於燃燒室預混合對汽缸壓力與啟動電流之影響
(Gear ratio: 19.2, Engine temperature 120°C)

3.4 測試結果總整理

此節將針對引擎測試結果進一步整理。如表二所示，齒比由 26.8 降至 19.2，配合實施引擎熄火預噴油方式，引擎都可於第二循環成功啟動，而且啟動耗時於不同齒比分別降至 0.28 及 0.27 秒和 0.26 秒，啟動點著火改善率分別為 38.6%-43% 之間。但因齒比的降低、啟動扭矩增加，故使啟動電能相對增多；但在使用預噴油方式，啟動電能消耗亦都可降低。而在引擎熄火前實施預噴油，使燃料於燃燒室預混合，啟動耗時可於不同齒比時分別降至 0.26 秒及 0.087 秒，引擎點著火啟動時間改善率分別為 42.8% 及 81.21%；雖然齒比 19.2 啟動耗能較高，但於燃燒室預先混合方式能降低其電能消耗，並可有效提升啟動時間之改善率。

表二 引擎啟動測試結果之總整理*

採取方式	啟動點著火循環	啟動耗時(s)/ 改善率(%)	啟動電能消耗 (J)
原車(齒比 26.8)			
無預噴油	3	0.463/-	420
熄火時預噴油	2	0.284/38.6	365
齒比 22.5			
無預噴油	3	0.434/6.2	503
進氣道預混	2	0.273/40.3	390
燃燒室預混合	2-3**	0.265/42.8	383
齒比 19.2			
無預噴油	3	0.431/8.6	511
進氣道預混	2	0.263/43	440
燃燒室預混合	1-2**	0.087/81.21	336

註：*測試次數：10 次；**成功率如表 3 所示

引擎溫度 120°C，預噴油於燃燒室混合，啟動成功率如表三所示。由表三可知，齒比 22.5 時，於第二循環啟動成功率大致介於 60-90% 之間；齒比為 19.2，在第二循環之前啟動成功為 100%。另外，除預噴油寬度 3ms 無法於第一循環啟動外，其他預噴油寬度者於第一循環啟動成功率約介於 60-80% 之間。

表三 預噴油於燃燒室混合，於不同預噴油寬度下啟動成功率

齒比=22.5					
預噴油寬度		3	4	5	6
FID(ms)					
啟動成功率 (%)	第一循環	0	0	0	0
	第二循環	60	70	90	90
	第三循環	40	30	10	10
	合計	100	100	100	100
齒比=19.2					
預噴油寬度		3	4	5	6
FID(ms)					
啟動成功率 (%)	第一循環	0	60	70	80
	第二循環	90	40	30	20
	第三循環	10	0	0	0
	合計	100	100	100	100

註：引擎（汽缸頭）溫度 120°C；測試次數：10 次。

表四則為燃燒室內預混，預噴油快速啟動期間，從啟動開始至引擎轉速到達廠商規範怠速轉速的耗油量比較。由表中比較可知，以 3ms 預噴油，引擎可於第 2 循環啟動，與無預噴油者的比較，到達廠商規範怠速轉速的耗油量約為 10.17~12.01mg，改善率約介於 23.6~35.6%(平均 28.6%)之間。以 4ms 預噴油時，引擎可於第 1 循環啟動，到達廠商規範怠速轉速的耗油量約為 11.27~16.11mg，改善約介於-2.4~28.6%(平均 13.1%)之間。可見實施預噴油策略，引擎可以較快速啟動，快速到達怠速轉速，而且啟動期間的耗油量並沒有因為預噴油而增加，反而會有降低的現象。

表四 預噴油快速啟動噴油量改善比較

預噴油 (ms)	啟動循環	引擎轉速* (rpm)	總噴油量** (mg)	改善率(%)
0	3	1850~1950	15.73-15.79	---
3	2	1850~1950	10.17-12.01	23.6-35.6
4	1	1850~1950	11.27-16.11	-2.4-28.6

註：*到達廠商規範的怠速引擎轉速以上；**從開始啟動至到達怠速轉速的累計噴油量。測試次數：3 次；燃燒室預混，齒比=19.2，引擎（汽缸頭）溫度 120°C。

四、結論

本研究乃經由改變啟動轉數以及預噴油寬度針對機車引擎啟動影響及改善效果進行探討，由前述的實驗結果，可獲得下面幾項結論。

7. 原機車啟動過程中，引擎經過三次循環引擎才點著火啟動，其引擎點著火啟動所需要的時間約 0.46 秒。
8. 啟動齒比由 26.8 降至 19.2，配合引擎熄火後實施預噴油，使混合氣於進氣道預混，引擎都可於第二循環成功啟動，而且啟動耗時於不同齒比分別降至 0.28 秒、0.27 秒和 0.26 秒，改善率約在 38.6%-43%之間。
9. 引擎熄火前實施預噴油，使混合氣於燃燒室預混方式，啟動耗時於齒比為 19.2 時可降至 0.087 秒，啟動點著火改善率約 81.21%。雖齒比 19.2 啟動耗能較高，但於燃燒室預先混合方式能降低其電能消耗，有效增加啟動時間改善率。
10. 預噴油於燃燒室預混，以 3ms 預噴油，引擎可於第 2 循環啟動，啟動期間的耗油改善率約介於 23.6~35.6%之間。以 4ms 預噴油時，引擎可於第 1 循環啟動，耗油量的改善約介於-2.4~28.6%之間。

五、參考文獻

1. K. Sawai, T. Ohmae, H. Suwaki, M. Shiomi, S. Osumi, Idling-stop Vehicle Road Tests of Advanced Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Battery, *Journal of Power Sources*, Vol.174, pp. 54-60, 2007.
2. M. Toriyama, T. Iwadate, T. Yuhara, H. Shinmura, Development of Idling Stop System for Scooter. *Technical Notes/JSAE Review*, Vol.22, pp. 92-94, 2001.
3. J. H. Zhou, Y. N. Yuan, Calibration Experiments on Engine Emission Behaviour During The Stopping-and-Restarting Process in A Hybrid Electric Vehicle Application, Proc. IMech, *Journal of Automobile Engineering*, Vol.225, pp. 499-511, 2011.
4. J. S. Cowart, Post-Combustion in-Cylinder Vaporization during Cranking and Startup in A Port-Fuel-Injected Spark Ignition Engine, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.128, pp.397-402, 2006.
5. M. Matsuura, K. Korematsu, J. Tanaka, Fuel Consumption Cmpovement of Vehicles by Idling Stop, *SAE paper* No.2004-01-1896, 2004.
6. T. Yanagisawa, T. Yamanishi, K. Utsugi, T. Nagatsuyu, Development of Idling Stop System for 125cm³ Scooters with Fuel Injection, *SAE paper* No.2010-32-0121, 2010.

7. M. Gumus, Reducing Cold-Start Emission from Internal Combustion Engines by Means of Thermal Energy Storage System, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 652-660, 2009.
8. P. W. Davis, Measurement of Cycle-by-Cycle AFR Using A Fast Response NDIR Analyzer for Cold Start Fuelling Calibration Applications, *SAE paper* No.2006-01-1515, 2006.
9. S. Yu, L. G. Li, G. Y. Dong, X. S. Zhang, A Study of Control Strategies of PFI Engine during Cranking and Start for HEVs, Vehicular Electronics and Safety, 2006, ICVES 2006, *IEEE International Conference*, Beijing, pp.68-72, Dec. 13-15, 2006.
10. J. Y. Zhang, T. L. Shen, R. Marino, Model-Based Cold-Start Speed Control Scheme for Spark Ignition Engines, *Control Engineering Practice*, Vol.18, pp.1285-1294, 2010.

同向流式螺旋管加熱爐的性能分析

The Analysis of Performance for a Parallel Flow Type Combustion Furnace with Helically Coiled Tube

姜庭隆¹、黃惟泰²、羅詩傑³

Ting-Lung Chiang, Wei-Tai Huang, Shih-Chieh Lo

國立屏東科技大學機械工程系

Department of Mechanical Engineering, Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan

摘要

內部以螺旋式環管(helically coiled tube)做為液體預先加熱(或冷卻)的同向流式(parallel flow)加熱爐在化工與石油相關產業中是被廣泛運用的。因為此種熱交換爐可以使用煉製某種原料過程中所產生的多種可燃性氣體做為加熱目的使用，不須再付出額外的成本去購買燃料。此種將原須排除的副產品再回收、利用之做法除了有利環保，亦可增加經濟效益。然而此類加熱爐之傳統設計往往面臨的類似問題是：供應給環管之燃燒熱使用的效率不高，以致燃燒完後排出至大氣中之廢氣溫度過高，造成熱汙染。然而若要在這種高溫環境下，以實驗方式進行研究有其實際的困難度，且難以完整的了解加熱爐內發生的所有現象，因此本文之目的在於利用藉著電腦輔助設計中的計算流體力學方法(Computational Fluid Dynamics)去分析加熱爐內的熱流現象，找出問題所在，然後才有可能於未來提出改善的方法。為簡化分析，以二維軸對稱模型做為分析的模型。本研究使用 Gambit 軟體建構模型與網格，泛用型計算流體力學軟體 Fluent 模擬解析加熱爐內之火焰燃燒特性，以及熱與流場的詳細資料，包含輻射與對流兩種效應。分析的結果顯示藉著計算流體力學方法可以將爐體內部高溫燃氣的流動特性顯現出，達成所預期的目標。未來則有可能以此方法，將爐體幾何形狀依照火焰傳遞與高溫燃氣的流動特性加以適當的改善，就能達成增加給熱效率，同時降低排出廢氣溫度的目標。

關鍵字：螺旋式環管、加熱爐、火焰與高溫燃氣、計算流體力學方法

Abstract

Parallel flow type heat exchanger/furnace with helically coiled tube is frequently used in the traditional chemical engineering industries. In most of the times, it is

¹ 國立屏東科技大學機械工程系，副教授

² 國立屏東科技大學機械工程系，講師，E-mail: weitai@mail.npust.edu.tw

³ 國立屏東科技大學機械工程系，助理教授

used to pre-heat some fluid flowing in the coiled tube. Usually, the fuel burned in the furnace will be a by-product of a certain chemical operation. Therefore, the fuel is free and good for environmental reasons, and that is why this kind of furnace is so popular used today. However, a common problem of this furnace is its low efficiency and the exhaust gas temperature is too high, which creates the thermal pollution. Since it is difficult to solve the problem with experimental methods, it is quite nature to switch to the help of numerical methods. Computational fluid dynamics (CFD) methods is used in this research project, to demonstrate the flame propagation and combustion process inside the furnace. Both the flow field and thermal field can be revealed, and heat transferred to the fluid in the coiled tube can be calculated. A decoupled scheme is used to calculate the temperature increment in each section of the coiled tube. Commercial software Gambit is used to build the model and the following mesh system, and the thermal/ flow solution is acquired by apply the software Fluent. To simply the problem, a 2D/axisymmetric furnace model is adopted in the analysis.

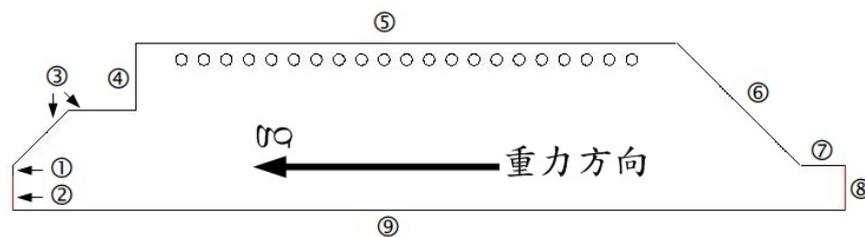
Keywords: Computational fluid dynamics, helically coiled tube, flame propagation

一、簡介

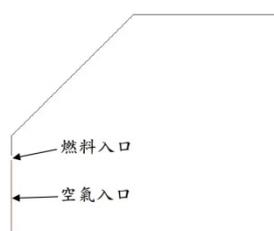
研發高效率的熱交換器與加熱爐，是產業界重要的目標，因為良好的熱交換設計不僅可節省能源，且可節省製造成本以及運轉成本，並且能減少對環境的污染。由於彎管流會有次流場之現象產生，所以比直管有更好的熱傳遞效果，因此螺旋狀之彎管(helically coiled tube)常被用於熱交換器或加熱爐中作為內管使用。當流體以層流形式在管內運動時，如果管的形狀是彎曲的而非直管，流體在彎曲處所產生的向心力(centrifugal force)效應使得位於管中心區域的流體會向管壁區域移動，同時迫使原先位於管壁區域的流體移向管中心區域。此種流動從彎管的橫截面觀看時，為兩個旋轉方向相反的迴流封閉曲線，形狀如同兩個捲動的細胞(roll-cells)。在 1927 年 Dean[1]成功的以數學理論方式解析此種流動之特性，故此種次流動(secondary flow)現象被稱之為 Dean 流(Dean flow)或是 Dean 旋渦流(Dean vortical flow)[2]，捲動的細胞被命名為 Dean 捲細胞(Dean roll-cells) [3]。姜庭隆[4]曾對 3D 的螺旋環管之流動現象與熱傳性能以計算流體力學的方式分析，並與實驗結果比較驗證，確認螺旋環管內的流體會產生明顯的 Dean 流動現象，使螺旋環管比直管有更好的熱傳遞效果。史碩俊[5]，Acharya[6]等學者亦對螺旋環管之熱傳性能分析與提升有所深入的探討。

本文中研究的對象即是以一個典型的具有 21 圈螺旋式環管的圓筒式垂直加熱爐，在環管內流動的被加熱液體是引擎機油。因為加熱爐爐體本身為以中央軸的對稱性結構，雖然在嚴格的定義下觀察環管並非是軸對稱的，然而管的水平斜度約只有 $1\sim 2^\circ$ ，故可以約略假設為軸對稱的。為縮短模擬所需之時間與減少複雜度，在分析中，取爐體之一半作為計算區域(computational domain)以降低網格元素(cell)與節點(node)數，同時因為計算流體力學軟體Fluent進行模擬軸對稱之物體時，是以水平軸(x軸)設定為中央軸，因此必須將加熱爐的模型水平放置，如圖一(建立的軸對稱加熱爐模型)所示。要注意的是因為分析時有考慮到自由對流的效應，故重力的方向是-x軸方向。爐的高度約為 7.4m，半徑 1.5m，環管的環半徑為 1.35m，相鄰環管的圓心間距(pitch)為 0.2m。使用的燃料為含有 40% 體積的甲烷(methane:CH₄)、60% 體積的氫氣(hydrogen:H₂)的混合氣體，由加熱爐底部標示為①的位置流入，空氣則由爐底部標示為②的位置流入，此部分因燃燒器尺寸較小，故將局部放大，如圖二所示。

燃燒器為包含由耐火材料製成的 45° 火焰擴散器，標示為③。④為爐底壁，⑤為主要的爐壁體，⑥為爐上蓋，⑦為燃燒後廢氣集結爐頸壁，⑧為燃燒廢氣出口，⑨為爐的對稱中央軸。



圖一、建立的軸對稱加熱爐模型



圖二、燃燒器周圍之局部放大：燃料(甲烷-氫氣)氣體、空氣入口

研究的內容是以分析加熱爐幾何外型對爐內之燃氣濃度分布與火焰燃燒情形，對螺旋環管管的熱傳性能之影響，作為爐體改造與提升加熱效率之設計參考建議，並建立此類熱交換爐的電腦輔助設計與分析技術做為後續類似工程之參考。研究使用 Gambit 軟體建構模型與網格，ANSYS 軟體內的泛用型計算流體力學軟體 Fluent 模擬加熱爐內之火焰燃燒特性，以及熱與流場的詳細資料，包含輻射與對流兩種效應。在熱場與流場的解收斂後，得到每一圈環管由燃氣吸到的熱能後，換算出在每圈管內引擎機油的溫度上升量。因此是使用非耦合(decoupled)的方法進行燃氣與引擎機油的溫度關係。

二、研究方法及步驟

2.1 使用的統御方程式

1. 質量守恆方程式(Continuity Equation)

其中包含 7 組氣體成分的化學反應傳輸方程式(Species Transport Equations)

2. X, Y 方向的動量守恆方程式(Momentum Equation)

3. 能量守恆方程式(Energy Equation)

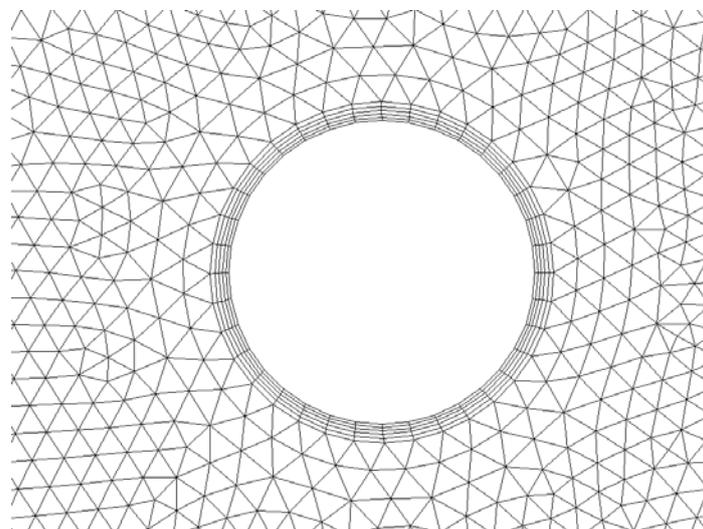
2.2 研究步驟

2.2.1 建構網格

模型與網格是使用 Gambit 軟體建構而成。計算區域被分為 5 個區塊，如圖三所示。其中主要爐體區與廢氣出口區的網格是以結構性(structured mesh)四邊形元素(quadrilateral cell)分割，以減少元素數量，增加分析的速度。其他區塊則以非結構性(unstructured mesh)三角形元素(triangular cell)分割。燃料流入口(熱爐底部標示為①的位置)元素的邊長為 0.2cm，空氣流入口(熱爐底部標示為②的位置)元素的邊長為 0.5cm。其他大部分區域中元素的邊長介於 1cm~1.5cm。為達到正確解析環管表面的溫度與速度的變化，亦即邊界層(boundary layer)內的流場與熱場性質，故環管表面有用較細的網格以正確的滿足解析度，環管表面的第一層四邊形元素與環管之間距為 0.1cm，如圖四所示。計算區域總共使用 114,401 個元素，70635 個節點(node)。



圖三、5 個計算區塊



圖四、環管的周圍網格放大(邊界層內的解析)

2.2.2 計算各項邊界條件之數值

計算燃料噴孔及空氣進入口之平均流速、燃料的氣體成分質量分率(mass fraction)、環管內引擎機油的平均流速、環管內的平均對流係數 h 、決定化學平衡式中各項反應物與生成物的化學係數。這些資料將是下一步中 Fluent 軟體所需輸入的邊界條件之數值。

2.2.3 進行 Fluent 中熱、流場的模型設定、求解方法與收斂參數

接著將(第一步：建構網格)中所產生的網格輸入給 Fluent 軟體，並進行：化學反應模型、輻射熱傳模型、亂流模型、邊界條件型態、各變數的收斂參數、各項微分方程式使用的計算差分的階次與方法…，逐項完成。最後進行熱、流場的求解。

2.3 化學反應模型

在反應流場模擬所需之燃燒模型方面，則基於一般非預混火焰(non-premixed combustion)當中，化學反應速率遠大於燃氣混合速率，因此使用“一般性的有限反應速率模型(generalized finite-rate model)”中的“紊流渦旋消散模型”(turbulent eddy-dissipation)去模擬燃料的穩定燃燒反應，也就是燃料的反應速率主要受紊流場燃氣混合速率主導：當燃料與氧化劑濃度到達當量比狀態下時，即發生燃燒反應，而形成高溫的火焰反應區。計算中藉由化學平衡反應式計算獲得格點內燃氣組成所對應之產物溫度與濃度分佈。

2.4 化學反應式

假設(甲烷 CH_4 -氫氣 H_2)、與空氣中的氧氣進行完全燃燒反應，生成 CO_2 及 H_2O ，於化學當量條件下可得下列化學平衡式：



2.5 輻射熱傳模型

因為氣體吸收並放出輻射熱，因此可採用參與性介質(participating media)模型中較常用的 P1 以及 DO 模型。目前採用較繁複但應用“光學厚度”較無限制的(範圍較大)的 DO 模型。在 DO 模型中，氣體的吸收係數的計算是使用軟體 Fluent 內建的以“灰色氣體吸收係數的加權總合法 WSGGM”模型(weighted-sum-of-gray-gases model)。

三、邊界條件設定

3.1 燃料入口及空氣入口

3.1.1 入口流速(velocity inlet)

首先設定燃料入口及空氣入口之平均流速，做為模擬設定入口邊界條件之依據(如表一、表二)。

表一 燃料(甲烷-氫氣)的氣體成分百分比

燃料的氣體成分	名稱	體積(莫爾)百分比	質量分率 Mass Fraction
H_2	氫氣	60%	0.158
CH_4	甲烷	40%	0.842

因為軟體 Fluent 內建的輸入是以質量分率(mass fraction)為主，故需將燃料的氣體成分體積百分比轉換為質量分率。

燃料(甲烷-氫氣)之操作數據:流量: $200 \text{ m}^3/\text{h}=0.0556 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\text{燃料之平均流速} = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} = \frac{0.0556}{\pi(0.32^2 - 0.3^2)} = 1.4273 \text{ m/s}$$

R_1 是空氣入口之半徑: 0.3m

R_1 與 R_2 之間是燃料之入口, 也就是環形燃燒器之區域, $R_2=0.32\text{m}$ 。

表一二 空氣成分百分比

空氣組成	體積(莫爾)百分比	質量分率 Mass Fraction
O ₂	21%	0.2331
N ₂	79%	0.7669

3.1.2 估算入口空氣流量之操作數據

由化學平衡式中空氣前之係數可知每單位體積燃料完全燃燒需空氣 5.238 單位體積, 為確保燃燒完全, 使用 1.3 倍理論所需空氣, 亦即流入之空氣量為燃料的 $0.0556 \text{ m}^3/\text{s} \times 5.238 \times 1.3 = 0.379 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\text{入口空氣平均流速} = \frac{Q}{\pi R_1^2} = \frac{0.379}{\pi 0.3^2} = 1.34 \text{ m/s}$$

3.2 加熱爐之壁面

3.2.1 絕熱壁面(adiabatic wall)

爐之壁面在模型中因為其厚度相對於爐體的尺寸太小, 不易設定網格, 同時考慮通常爐壁面之結構為鋼, 內壁則加耐火材料以防止高溫造成損毀, 並且減少熱量流失至外界。故可以簡化假設成為絕熱壁面(adiabatic wall), 也就是熱通量(heat flux)為 0。

3.3 加熱爐之對稱中央軸邊界條件

加熱爐之中央軸邊界條件設定為軸(axis)。

3.4 引擎機油環管

3.4.1 對流、輻射薄壁壁面(convection/radiation wall)

環管在模型中是以線段表示的薄壁, 因為其厚度相對於爐體的尺寸太小, 不易設定網格。邊界條件設定為壁面(wall), 在 Fluent 中環管的壁面分為內表面(inner surface)、外表面(outer surface)。外表面為環管和燃燒氣體相接觸的高溫對流面(包含吸收輻射熱), 內表面則為環管和引擎機油接觸, 進行對流的面。

熱條件由程式自動以 1D 固體熱傳導方程式模擬油管的薄壁(厚度 0.002m)，耦合(couple)外表面燃燒氣體流場的能量方程式，配合內表面的強制對流邊界條件，連立方程式求出油管內、外表面溫度。設定 21 根油管外表面之表面輻射吸收率(放射率emissivity)0.8，內表面的平均對流係數 $h=23.85 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。

計算環管平均對流係數 h 是十分繁雜的，因為要考慮相對粗糙度(relative roughness)、雷諾數(Renolds number)以計算管的摩擦因子(friction factor)等，但一般公式僅為分析直管，對於環管的分析公式多限制為層流，且須考慮環管螺形半徑(coil radius)與管直徑和螺形半徑比等參數[7][8][9]。

目前內表面的平均對流係數是假設管為平滑(smooth)，引擎機油溫度為 350K，求出雷諾數 $Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{853 \times 0.768 \times 0.096}{0.0356} = 1766$ ，為層流，配合以直管的層流公式求出紐塞數(Nusselt number) $Nu=12.9$ ，得直管內的平均對流係數 $h=18.99 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，再以環管的修正公式(等效直管對流係數倍率)

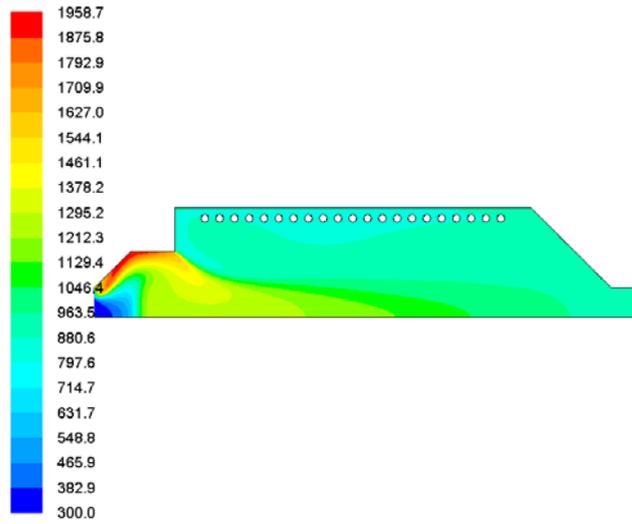
$Nu_{\text{helical}}/Nu_{\text{straight}}=1.262$ 得到的[10][11][12]。

在解收斂後，取得個別每一圈環管得到的熱能 Q_i 後，以換算出在每一圈管內引擎機油的溫度上升量 $\Delta T_i = \frac{Q_i}{TCR}$ ，然後由第二圈環管開始，依次將 ΔT_i 加上前一圈環管內的引擎機油的溫度，成為每圈環管內引擎機油的新溫度 T_i ， $T_i = T_{i-1} + \Delta T_i$ ， $i = 2, 21$ 。

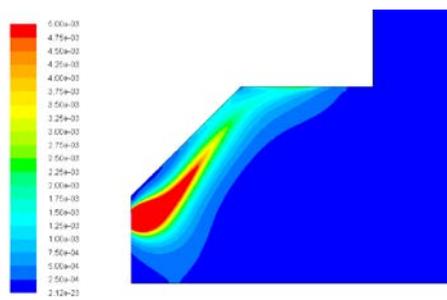
四、結果與討論

以前所敘述的軸對稱加熱爐模型(圖一)與各項操作數據與邊界條件，配合以紊流渦旋消散模型去模擬燃料的穩定燃燒化學反應，計算出 21 圈環管表面的總共吸熱量為 610190 watt，能使引擎機油溫度升高 60.8 °C，廢氣的排出平均溫度是 946K，主要的結果以下列圖形(圖五~圖十三)呈現。

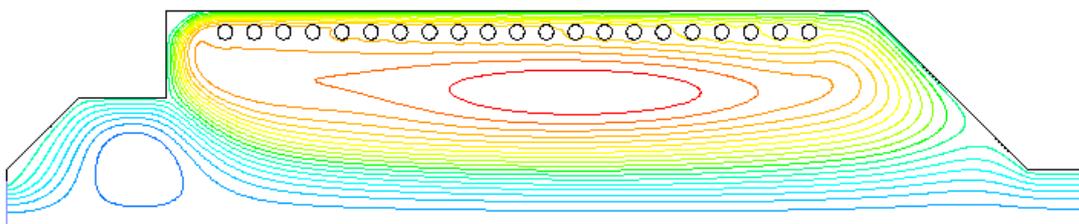
由圖五(熱爐內氣體溫度場)、圖六(燃燒器周圍之局部燃燒火焰的紊流化學反應速率)配合圖七(流場速度之流線函數分布)可看出:燃燒的火焰與高溫氣體會沿著燃燒器的 45°擴散器向外圍膨脹並前進，但到了擴散器上方的垂直段後受阻，於是偏轉，向爐體中心軸流動，然後以平行於中心軸的方向前進，於爐頂區匯集後由出口區離開。然而在此種情形下，一部分的燃燒氣體因受到環管內的低溫引擎機油吸熱而降溫，合併重力的影響、爐壁的侷限，而造成自然對流，在環管區內形成一個巨大的迴流(recirculation)區域。此迴流現象的確認，可由圖八(爐底附近環管區的燃燒氣體速度向量)，明確的看出。



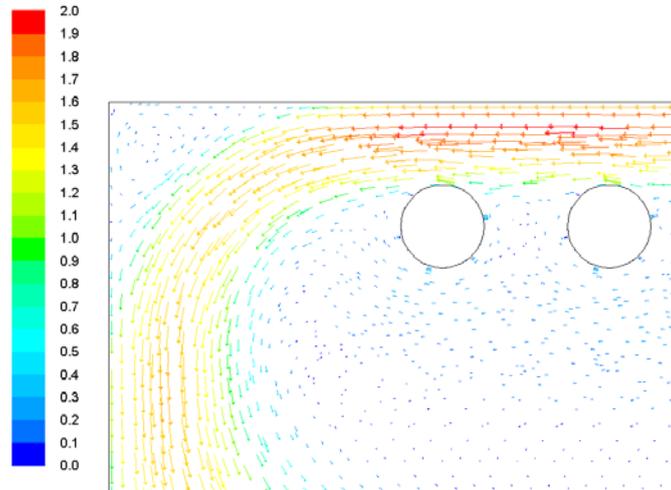
圖五、爐內溫度(單位 K)分佈圖 (DO 模型，環管表面放射率 0.8，有重力)



圖六、燃燒器周圍之局部燃燒火焰的紊流化學反應速率(單位為 $\text{Kg}\cdot\text{mol}/\text{m}^3\text{s}$)

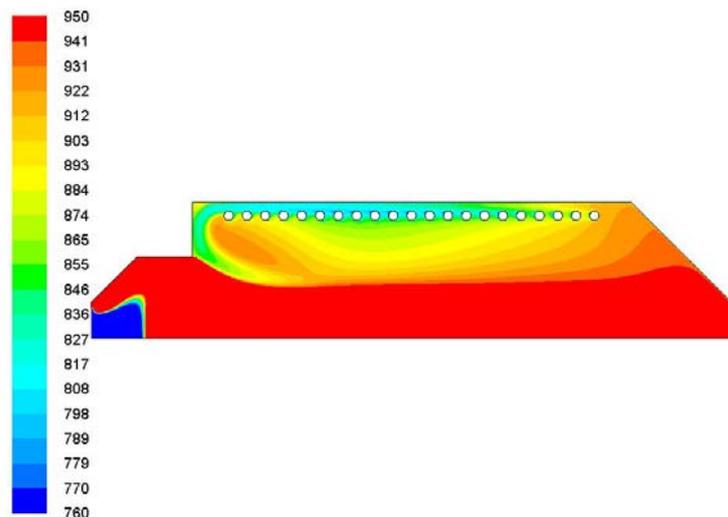


圖七、速度場之流線函數分布

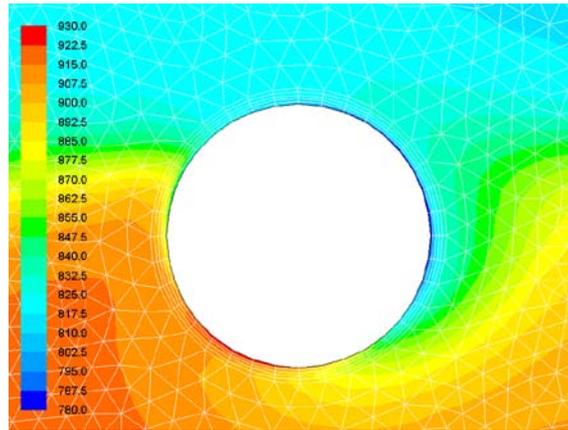


圖八、爐底附近環管區的燃燒氣體速度向量

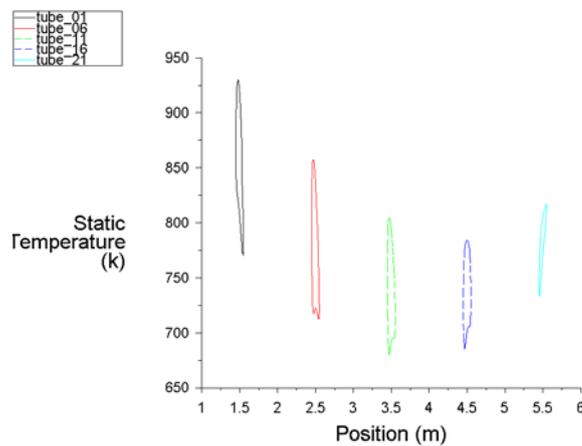
因為自然對流使得迴流現象更為劇烈，也使得環管上表面(面向爐壁)、下表面(面向爐體中心軸)的外部氣體溫度存在明顯的不對稱性，而且溫度差異很大，此由圖九(溫度範圍侷限於 760~950K 之爐內溫度分佈圖)可看出。整體而言，環管上表面的溫度會比較低、下表面的溫度會比較高。此由圖十(第一圈環管附近的热邊界層溫度分佈)可得到印證。迴流現象也造成環管的表面溫度沿爐體中心軸的分布有由高而低再回升的現象，此由圖十一(第 1、6、11、16、21 圈環管的表面溫度分佈)可看出。



圖九、溫度範圍侷限於 760~950K 之爐內溫度分佈圖



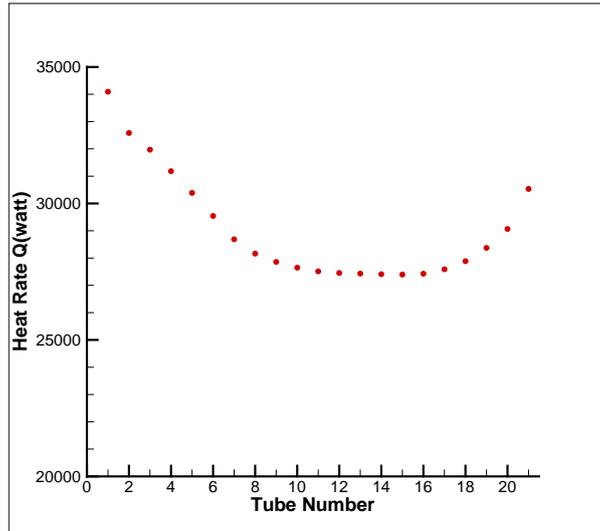
圖十、第一圈環管附近的熱邊界層溫度(單位 K)分佈



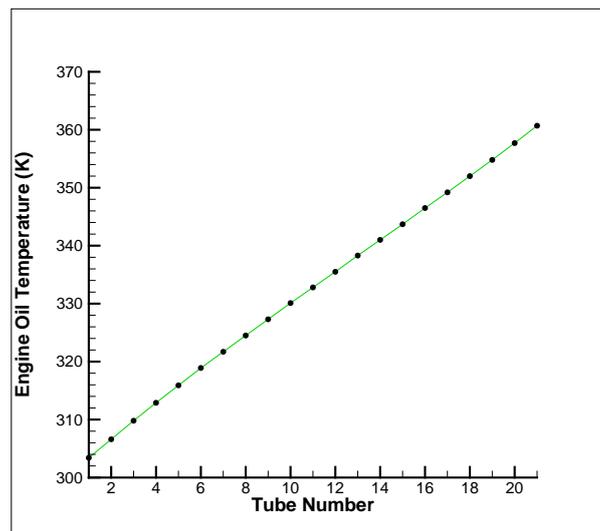
圖十一、第 1、6、11、16、21 圈環管的表面溫度(單位 K)分佈

由圖九~圖十一顯示的一個潛在的問題是：某些環管的表面溫度太高，可能會造成引擎機油在靠近管壁處受熱而產生某種化學反應(或解離)，致使造成永久性的變質。另外，環管的上表面、下表面溫度差異很大(圖十一顯示第 1 圈環管的溫度差異到達 140 °C)，是否會造成管材的熱應力與變形問題亦是需考慮的問題。

使用 Fluent 提供的後處理功能，可求出流入每圈環管表面的熱量(圖十二)，藉此計算出每圈引擎機油溫度上升的情形(圖十三)。



圖十二、環管每圈的吸熱量(watt)



圖十三、環管內引擎機油的平均溫度上升情形

五、結論

由以上結果可證明電腦數值模擬能提供螺旋式環管加熱爐體內部火焰與高溫燃氣的流動特性以及環管的吸熱量，藉此計算出每圈引擎機油溫度上升的情形與燃氣出口溫度，是一種可行的設計並用於預測加熱爐性能的方法。未來則有可能以此方法，將爐體幾何形狀依照火焰與高溫燃氣的流動特性加以適當的改善，就能達成增加給熱效率，同時降低排出廢氣溫度的目標。改善同時要注意於(1)適度的降低每根管的表面溫度，不要有某些環管的表面溫度太高，以免使得引擎機油在靠近管壁處受熱而產生某種化學反應，造成永久性的變質。(2) 避免環管

的局部過熱，造成上表面、下表面溫度差異很大，引致管材的熱應力與變形問題。

六、參考文獻

1. W. R. Dean, Note on the motion of fluid in a curved pipe, *Philos. Mag*, Vol.4, pp.208-223, 1927.
2. A. Y. Gelfgat, A. L. Yarin and P. Z. Bar-Yoseph, Dean vortices-induced enhancement of mass transfer through an interface separating two immiscible liquids, *Phys. Fluids*, Vol.15, pp.330-347, 2003.
3. C. Castelain, A. Mokrani and Y. L. Guer, Experimental study of chaotic advection regime in a twisted duct flow, *SAS*, Vol.20, pp.205-232, 2001.
4. 姜庭隆，比較殼管式熱交換器中混沌管與螺旋管之對流熱傳效率，*燃燒季刊*，第二十卷，第一期，中華民國一百年二月出版。
5. 史碩俊，螺旋管式熱交換器之效率提升分析，碩士論文，國立成功大學工程科學系，台南、台灣，1992。
6. N. Acharya, M. Sen and H. C. Chang, Analysis of heat transfer enhancement in coiled-tube heat exchangers, *Heat and Mass Transfer*, Vol.44, pp.3189-3199, 2001.
7. R. M. Bruce, F. Y. Donald and H. O. Theodore, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 3-rd edition.
8. M. W. Frank, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, Inc.
9. W. F. Robert, J. P. Philip, *Introduction to Fluid Mechanics*, 7-th edition.
10. K. Frank, S. B. Mark, *Principles of Heat Transfer*, 6-th edition.
11. D. Incropera, L. Bergmann, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6-th edition.
12. A. F. Mills, *Heat Transfer*, Prentice Hall, ISBN:0-13-947624-5.

太陽能驅動散熱系統控制模組之製作

Fabrication of the Control Module for a Solar Powered Cooling Device

顏堉安¹、曾全佑²、梁智創³

Yu-An Yan, Chyuan-Yow Tseng, Jik Chang Leong

屏東科技大學車輛工程系

Department of Vehicle Engineering, Pingtung University of Science and Technology,
Pingtung, Taiwan

摘要

本研究製作一組控制器用於協助車廂通風。透過太陽能的使用，控制模組協助進行電池儲能與驅動風扇，且監控車廂溫度，進而切斷或開啟風扇，以避免不必要的能源浪費。整組控制器採用類比運算放大器，並有警示裝置通知使用者。此研究之汽車模型對象為 KYMCO 的 UXV-500 沙灘車。雖然此型號之沙灘車車廂為非封閉車廂，日後其車廂可能改良為封閉型電動汽車。

關鍵字：太陽能、電動車、控制模組、鋰電池、風扇

Abstract

This work has fabricated a control module to assist a cooling device to be used in an electric car. Using the solar power, the module is responsible for recharging the battery, activating the fans, and monitoring the cabin temperature. The module relies on an analog amplifier and notifies the car users of its operation status. The subject of study is the UXV-500 of KYMCO. Its cabin is currently an open space, but is very likely to become an enclosure.

Keywords: Solar energy, electric car, control module, Lithium battery, fan

¹屏東科技大學車輛工程系，研究生

²屏東科技大學車輛工程系，教授

³屏東科技大學車輛工程系，教授，E-mail: jcleong@mail.npust.edu.tw

一、前言

近年能源危機意識高漲，許多產業紛紛投資綠色能源，以減少影響大自然災害為目的。自然資源，如：太陽能、風力、生質燃料、潮汐能與熱能等相關技術紛紛被廣泛開發與利用。綠色能源的使用，已成為未來發展的重要標的。

汽車所產生的廢氣危害，在國際間早是眾所注目，在 1873 年就已經有首輛電動車的產生。由於空氣汙染與溫室效應，汽車也引起國際間環保的重視。隨著環保意識抬頭，各國紛紛將投入相關關鍵技術，因此電動車快速發展，現今成為綠能指標之一。在電動車領域裡，續航力占重要一角，而電池電力密度是重要因素之一。電容量越多，相對的續航力就較高。其實，電動車也可利用太陽能增加電量，以提升其續航動力，更可利用太陽能輔助車上電力消耗器材，以減少車上電池的使用量。

封閉車廂於太陽底下曝曬將會產生高溫情形。太陽輻射照射至車廂內，導致車內迅速加溫，再加上車廂內裝潢多有隔熱的效果，迫使車廂內溫度急速升高。此外，更出現所謂的溫室效應之現象，較中波長的紅外線(3~4 μm)無法透射玻璃，因此能量會出現堆積的現象，成為車內高溫的主要元凶。根據 McLaren 等人的研究，在太陽下曝曬，車內高溫僅需 60 分鐘即可達至 57.2°C(135°F)，成為致命溫度[1]。曾經有人將抽風系統應用於車廂內抽風。根據 Chakroun 與 Al-Fahed 兩人的實驗[2]，太陽底下的車輛能有效地透過抽風扇來降低車廂溫度。本論文的研究對象為 UXV-500。在設定該車型為電動車的前提下，本論文將該車型改為一封閉車廂。所以，其車廂內溫度必定攀升。本研究為此設計一組以綠色能源輔助的抽風裝置以避免車廂內溫度過高，避免消耗電動車上動力系統的電力，維持電動車的續航力。此抽風裝置以太陽能為能量來源，因此不至於大幅度影響電動車輛的正常續航能力。

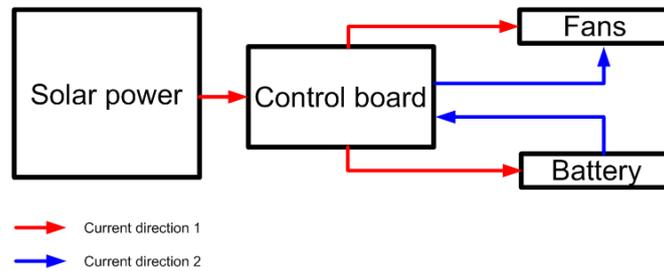
二、設計理念

本論文製作其控制模組，並搭配小型鋰電池來儲存過多能源以驅動風扇，並透過控制模組來達到智慧控制，以控制充放電，不但可增加鋰電池壽命外，也達到智慧溫控的效果。

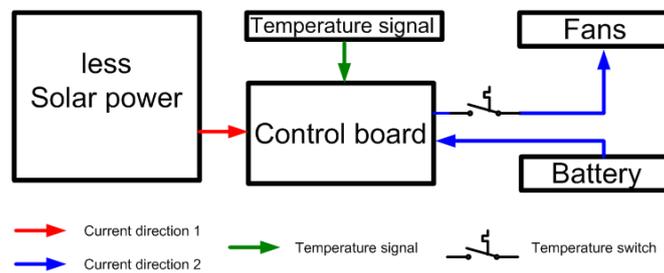
2.1 控制模組驅動概念

控制模組驅動概念主要是透過太陽能板供電給控制模組，進而驅動風扇與鋰電池充電。主要是降低駐車時因太陽輻射而產生的車廂高溫。電力輸送路徑如圖一所示。紅色電流走向即為陽光充足下電流的流動路線。當太陽能不足以供電給風扇時，電力由電池透過控制模組供給為風扇所使用。藍色路徑則為太陽能供電

不足時電流之路徑。其中電池透過控制器供給電力給風扇時，須透過車廂內的溫度的感知，並由控制器判定驅動與否，如圖二所示。



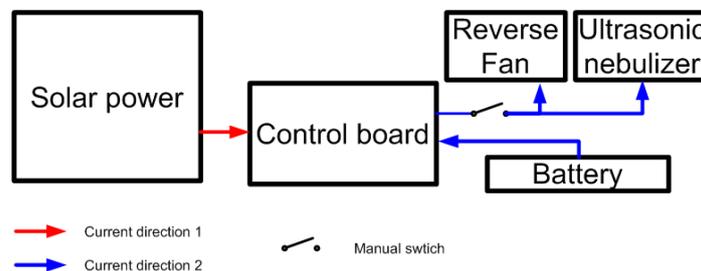
圖一、控制模組驅動概念圖



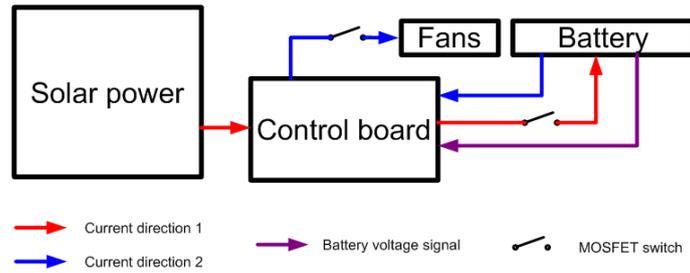
圖二、鋰電池輸出判定

本論文也搭載了超音波噴霧產生器與一反向導流風扇，控制車廂內濕度與氣流動向，藉此協助降低車廂內溫度，此功能為手動操作，如圖三所示。

電池以般都設有著過低電壓保護(Overdischarge Voltage)與過充保護(Overcharge Voltage)的設定[3]。透過控制模組給予一定的開關門檻，該開關為無接點開關(MOSFET)，鋰電池為3顆串連，當電壓低於 10.2V 時，限制電池放電，若充電電壓達到 12.6V 將關斷充電，如圖四所示。

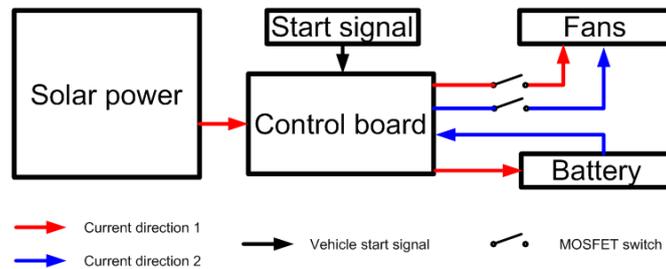


圖三、超音波噴霧開關



圖四、電池保護開關

當汽車啟動時，為了避免風扇於行車中運轉而產生的風扇馬達損壞情形，因此將整車驅動馬達的輸出電壓透過光耦合 OC(optical coupler)將訊號傳至控制器。此時若控制模組判斷汽車在行進中，將會立即停止風扇馬達運轉，避免風扇馬達承受汽車行進時氣動力所產生的扭力影響，如圖五所示。



圖五、啟動訊號關斷系統

三、原形介紹與測試

本研究之電動車為 KYMCO 的 UXV-500 沙灘車，是未封閉的車型，如圖六(a)所示。為了提高車上乘坐的舒適度，此車廂也可以設計成為封閉車廂，如圖六(b)所示。因此，利用抽風系統與噴霧可望加強車廂內的空氣循環與空氣濕度，進而提升整車的舒適程度。此系統之主要元件介紹如下：



(a) 實車照片



(b) 虛擬模型

圖六、以 UXV-500 沙灘車為藍本之電動車

(a) 導風管

空氣會因溫度上升而產生熱浮力，為了將熱氣抽出，設計一導風管，能有效地將熱空氣排出，熱空氣將會集中於車廂上部空間，因此製造此導風管來引導熱空氣從車廂上部排出，如圖七與圖八所示。



(a) 前視圖



(b) 後視圖

圖七、導風管原形



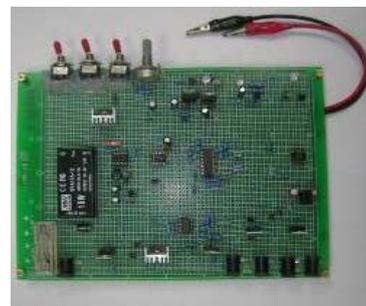
圖八、抽風扇安裝位置

(b) 其他

太陽能抽風裝置主要為太陽能板、控制模組、鋰電池與風扇等四個主要設備所組成。如圖九所示，整體設計架構是太陽能電力從太陽能板傳送至控制模組，再由控制模組將電力分配給鋰電池與風扇。



(a) 太陽能板



(b) 控制模組

圖九、主要設備照片



(c) 鋰電池



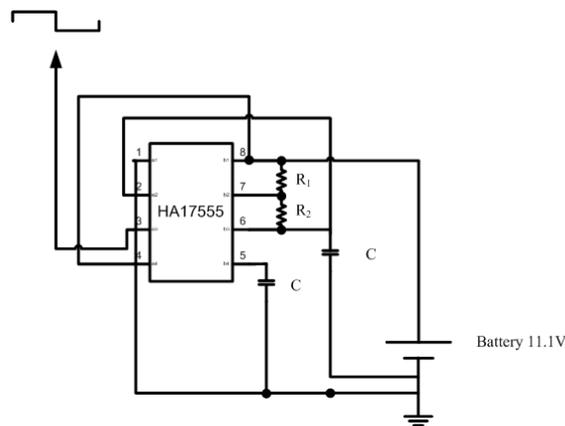
(d) 軸流風扇

圖九、主要設備照片(續)

(c) 控制模組介紹

控制模組分為 3 區，即能源處理區、充電區與訊號處理區。其能源處理區使用一穩壓的電源供應器，可將輸入電壓轉換成額定 12V 輸出並整流，使輸出能源較少雜訊。

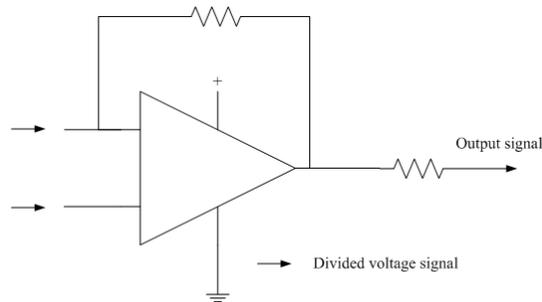
充電區則是搭配鋰電池最高充電電壓 4.2V。因本設計採用 3 顆串聯鋰電池，故電壓可達 12.6V。因此本論文須將控制模組充電系統的充電電壓控制於 12.6V 以下。本研究採用升壓 IC 提升電壓[4]，並給予充電，其中採用振盪器 HA17555[5]，透過脈波充電方式，可以減少電源供應器的負擔，降低熱量的產生。其電路圖如圖十所示。電池能源的類比訊號作開關會因電池電壓的降低或升高而產生誤差，甚至誤動作。故電池關斷作動訊號應採用數用訊號控制較為恰當。



圖十、HA17555 脈波產生器

訊號處理區則全採用類比 IC，使用 LM358[6]與 LM324[7]運算放大器 IC[8]。如圖十一所示，在此區除了接收回授訊號外，同時也控制 MOSFET 等開關並應用至充電、低電壓與斷電等警示訊號。MOSFET 驅動開關的觸動電壓沒高於驅動電壓，因此較易使 MOSFET 開關晶體過熱，建議採用升壓 IC 再給予觸發

MOSFET 開關。



圖十一、運算放大器-史密斯觸發器

太陽能板電力進入本研究所設計的控制模組即開始充電並同時驅動風扇。此時，充電藍色警示燈被觸發，而太陽能源紅色警示燈也同時被觸發。當太陽能電力不足，則改為鋰電池供電。此時警示燈為綠燈，如圖十二所示。當電池電壓低於 10.4V 時將會有低壓警示，此為橘色警示燈，如圖十三所示。

該控制模組是一測試模組，將其可變電阻當作是熱偶電阻，位置如圖十四所示，因溫度而產生的電壓變化，透過運算放大器判斷，可於 32°C 左右為驅動風扇門檻。故本研究透過可變電阻來調整電壓值，以便調整風扇電源的關斷門檻。

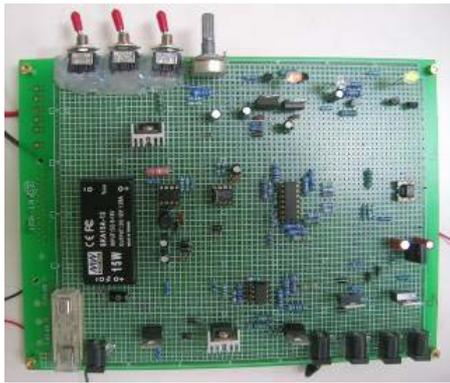


(a) 太陽能供電

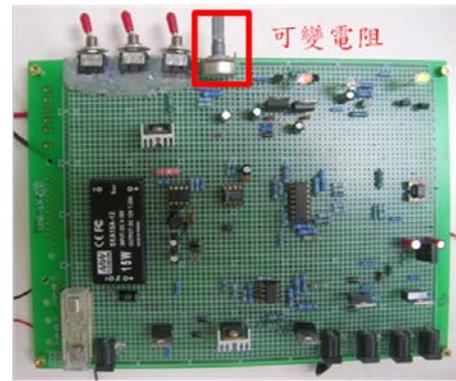


(b) 鋰電池供電

圖十二、控制模組驅動狀況



圖十三、電池低壓警示



圖十四、可變電阻位置

四、結論

本文成功研製太陽能通風系統，利用升壓電路與運算放大器組成的控制模組，其充電系統則採用定電壓充電。本模組採用 PWM 充電，能有效降低電源供應器的升溫情形，且較易將電池充至 12.6V。其充電系統中設有低電壓保護 (Overdischarge Voltage) 與過充保護 (Overcharge Voltage)，並建立警示燈系統以便了解運作情況。

此控制模組能協助儲存太陽能源與協助控制車廂散熱，同時進行電池儲電與驅動風扇，其中警示燈系統能告知其作動情形，監控車廂溫度，以判斷風扇運轉與否，避免不必要的能源浪費。整組控制器採用類比運算放大器，能簡易地透過電壓得知工作狀況，並採取相對動作，能應用於較簡單的 ON/OFF 等判斷，類比 IC 有相對較小的 SMD 的 IC，意味著該模組是可微小化整合製作。隨著日曬車廂溫度逐漸上升，車廂內將有熱空氣持續堆積。因熱浮力的影響，熱空氣將集中於車頂而導致車頂溫度不斷升高，故可將熱感應器位置設置於車廂上部。

五、致謝

本研究由國科會 NSC 99-2218-E-020-001-經費支持，在此謹誠致謝意。

六、參考文獻

1. C. McLaren, J. Null, J. Quinn, Heat Stress from Enclosed Vehicles: Moderate Ambient Temperatures Cause Significant Temperature Rise in Enclosed Vehicles, *Pediatrics*, Vol. 116, No.1, pp.e109-e112, 2005.
2. W. Chakroun and S. Al-Fahed, Thermal Comfort Analysis inside a Car, *International Journal of Energy Research*, Vol. 21, pp.327-340, 1997.
3. 林振華，林振富，*充電式鋰離子電池：材料與應用*，全華圖書，2001。
4. unknown, Datasheets: MC34063A: DC-DC Converter Control Circuits,

STMicroelectronics, 2000.

5. unknown, Datasheets: HA17555: Precision Timer, *Hitachi*, 2000.
6. unknown, Datasheets: HA17358: Dual Operational Amplifier, *Hitachi*, 2000.
7. unknown, Datasheets: LM324N: Low Power Quad Operational Amplifiers, *STMicroelectronics*, 2000.
8. 崗村迪夫，楊武智，*運算放大器電路設計*，全華圖書，1993。

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

【700 台南市中西區樹林街2段33號，綠色能源科技學系 陳維新教授 收
e-mail：vwhchen@gmail.com；Tel：(06) 2605031】

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：K. Owen and T. Coley, *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，卷期，頁數，年。
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：J. T. Kummer, Catalysts for Automobile Emission Control, *Progress
in Energy and Combustion Science*, Vol. 6, pp. 177-199, 1981.
- (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：C. K. Law, Dynamics of Stretched Flames, *Twenty-Second
Symposium (International) on Combustion*, The Combustion
Institute, pp. 1381-1402, 1988.

燃燒季刊 2013.2

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二月出版

局版台誌號第玖玖零捌號