

國立臺灣大學工學院機械工程研究所

博士論文



Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

層狀化燃燒流場之時空動態特性及穩焰機制研究  
Investigation on temperol-spatial dynamics and flame

stabilization of stratified combustion

陳靖瑋

Jing-Wei Chen

指導教授：楊鏡堂 博士

Advisor: Jing-Tang Yang, Ph.D.

中華民國 103 年 12 月

December, 2014

國立臺灣大學碩博士學位論文  
口試委員會審定書

層狀化燃燒流場之時空動態特性及穩焰機制研究

Investigation on temporal-spatial dynamics and flame  
stabilization of stratified combustion

本論文係陳靖瑋君（學號：D00522026）在國立臺灣大學機械工程學系完成之博士學位論文，於民國 103 年 12 月 2 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

楊鏡堂

（簽名）

（指導教授）  
黃培元

高君易

王興華

潘國隆

系主任

楊耀州

（簽名）

## 誌謝

非常感謝指導教授楊鏡堂博士的諄諄教誨，以及在研究和論文撰寫上提供寶貴意見和協助，使本論文在實驗、分析乃至攻讀碩士和博士學位期間之出國報告、比賽和投稿期刊方面皆得以更加完善，同時也讓我在過程中不論是在與人相處或是學術研究方面均獲益良多。感謝我碩士班戰友們：晏成、昇宏、偉軍、錚冷以及博班的同學健元和志斌，真的感到非常幸運能夠和你們一同走過這些日子，研究過程中必然有歡樂也有挫折，但我們都會為彼此加油打氣和熱情的提供協助，有你們出色的表現不斷地激勵著我，使我更加燃起幹勁地將論文研究做到最好。此外也感謝在研究所的日子中實驗室同伴帶給了我許多珍貴的回憶，所有的這些日子，和一路上幫助我的貴人們，都使我在研究路途上並不孤單。最後要感謝我親愛的家人和女朋友筱喬這一路的默默支持，總是在我最黑暗的時刻給予鼓勵並陪我度過難關。感謝國科會研究計畫編號: NSC 98-2623-E-002-010-ET、NSC 99-ET-E-002-010-ET 和 NSC 101-ET-E-002-482 006 -ET 之經費補助，使本研究得以順利進行。

## 摘要

本研究以層狀化燃燒器(stratified burner)為載具，建立包含化學螢光(chemiluminescence)和粒子影像測速儀(particle image velocimetry, PIV)之光學量測技術量測燃燒流場之火焰和流場暫態連續影像，並利用本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)處理，進行燃燒流場結構重組和時空動態特性分析。主題依序分別為進流數效應和其穩焰操控方法，以及應用生質合成氣(氫氣及一氧化碳)於衝擊燃燒流場之燃燒特性，探討包含火焰型態、平均燃燒流場特性、同調結構(coherent structure)、模態頻譜分析，最終歸納出不同層狀燃燒流場之結構特性和提出穩焰機制及應用方法。

進流數效應依據進流數分為單股、雙股和三股預混甲烷火焰探討，由平均燃燒流場分佈發現隨進流數增加會增強燃燒流場中紊流強度峰值，同時也會增加高紊流強度的分佈機率，證明剪流層區主導改變進流數時之燃燒流場結構。透過 POD 處理發現燃燒流場的第一模態均為主導模態，隨進流數增加低模態能量會分散至高模態的結構。在空間分佈方面，水平及垂直方向上擺動振盪隨增加進流數而加劇；在時間變化特性方面，進流數增加和細碎結構增加且生成、消散的轉變快速造成高階模態週期減小和反轉處不規則抖動的間歇特性。在進流數效應操控穩焰方法部分，首先是加入空氣共伴流(air co-flow)之單股貧油甲烷火焰，其燃燒流場的火焰型態可分為四類：錐焰、飄焰、近吹熄和熄滅。在飄焰內側加入空氣共伴流並無明顯的影響，然而當外側加入之共伴流超過特定流速閾值時，則會改變火焰結構至較穩定之類錐焰型態，其與 POD 分析所出現之分層結構相似，形成衝擊反轉流場結構減少垂直方向速度分量，並使高溫燃氣蓄集在共伴迴流區當中，因此火焰能向上游傳播而形成類錐焰結構，顯示共伴流效應強化火焰結構並使反應強度提升。第二，在三股預混丙烷燃氣進流具速度梯度差之層狀化燃燒時，由於迴流區改變尾流流場結構造成的混合及各股火焰間的預熱效果，壓縮渦對(compressive vortex pair)的形成可擴展操作區間至 $\phi=0.5$ 。壓縮渦對形成一股加速射流加強熱量和質量傳遞效應，具有提升火焰強度，達到幫助燃燒穩焰的功能。第三，三股預混丙烷燃氣在不同當量比( $\phi=0.6-1.6$ )可將火焰型態分為融合火焰、穩定中環火焰和焰尖開口火焰等三種類型。在貧油燃燒時火焰強度與紊流強度呈現正相關之趨勢；反之，

在富油燃燒時則呈現負相關之趨勢，透過 POD 處理後，在第一模態中， $\phi=0.6$  時由低頻大尺度結構主導，但在  $\phi=1.6$  則由出口處高頻小層流化結構主導。顯示在貧油和富油燃燒不同情況下，熱擴散不穩定性效應具有主導影響化學螢光強度和速度場分佈的特性。

V 型燃燒器具兩股  $45^\circ$  燃氣進流，在迴流區的衝擊流場中具有增強混合、預熱與蓄熱等特性，藉由強烈的火焰與流場交互作用顯著強化富油丙烷火焰操作區間及其穩定性。在含生質合成氣之貧油燃燒部分，固定丙烷流率的情況下添加不同比例之氫氣與一氧化碳之火焰可燃下限可分別拓展至 0.38 和 0.50，具有 M 型及丘型兩種火焰型態。在當量比 0.6 時，M 型的  $H_2/C_3H_8/air$  火焰溫度( $1435^\circ C$ )約為 1.37 倍丘型的  $CO/C_3H_8/air$  火焰( $1050^\circ C$ )，而此時  $C_3H_8/air$  火焰已經熄滅，廢氣排放量(一氧化碳)也隨之改變。結果闡明在衝擊燃燒流場中預混火焰添加氫氣及一氧化碳下，火焰和流場交互作用機制，包含火焰結構轉變、迴流低速流場特性及化學動力學影響。本研究建立 PIV 和化學螢光法結合 POD 之光學量測分析技術，探討層狀化燃燒器之平均燃燒流場特性、重組及動態特徵，並歸納出操控方法及其交互作用機制。本研究核心及貢獻在於：發展有效實用之燃燒流場光學量測實驗及分析方法、研究層狀化燃燒之交互作用機制、建立燃燒流場重組及動態特徵分析方法、分析層狀燃氣進流數效應並提出共伴流、壓縮渦對及熱擴散不穩定性對火焰和流場交互作用之穩焰效應，以及添加生質合成氣之衝擊燃燒流場穩焰機制。

**關鍵字：**層狀化燃燒、粒子影像測速、化學螢光、本征正交分解、時空動態特性、共伴流、壓縮渦對、熱擴散不穩定性、衝擊火焰、穩焰

## Abstract

An experimental method of PIV and chemiluminescence coupled with POD was constructed to capture transient images for both flames and flows with procession of the reconstruction, and temporal/spatial dynamic characteristics on a stratified burner. The issues in this study include the effects of inflows on the combustion characteristics with its mechanisms of flame stabilization, and application of syngas combustion on V-shaped burner.

The effects of inflows categorized with single, double and triple inflow mode were investigated for premixed methane flames, respectively. The increase of inflow number was found to enhance the peak value and broaden the higher level probability distribution function (PDF) for turbulence intensity, demonstrating that the presence of shear layer structure is the dominating factor. The mode 1 was found to be the dominant mode for all cases, but the energy-contained of low-rank mode was diverged to the high-rank mode. Both the horizontal and vertical oscillation was intensified with increase of inflow number; the presence of augmented oscillation and irregular vibration in turning point for high-rank mode was responsible for the fractalized structure. The effect of air co-flow on the single lean methane flame was investigated firstly. A variation of the position of co-flow injection shows that the inner one has no impact, whereas the outer one surpassing effective velocity ratios has a definite impact with flame configuration altered from a lift-off flame to a cone-like flame. This characteristic is similar with the presence of turning point the vertical oscillation because of a reversed flow with accumulated hot combustion products in the co-recirculation zone. It results in a lift-off flame propagating nearer the burner exit and demonstrates enhanced flame stabilization. Second, for stratified combustion of three premixed propane mixtures with velocity gradient, the operation region was expanded to  $\phi = 0.5$  with compressive vortex pair because of the enhanced preheating and mixing effects in the wake region. The compressive vortex pair structure effectively induces greater turbulent intensity to enhance the flame intensity, and thus achieves a salient performance of stabilization. Third, the flame intensity of the triple premixed propane flames with  $\phi = 0.6 - 1.6$  were found to correspond well with turbulence intensity in lean flames, but inversely in rich flames. With the mode 1 in POD analysis, the large scale vortex structures dominated in lean flames with low frequency, whereas the small stratified structures dominated in rich flames with high frequency. It

indicates that the combustion characteristics influenced by the lean and rich flames were dominated by the change of diffusion-thermal instability.

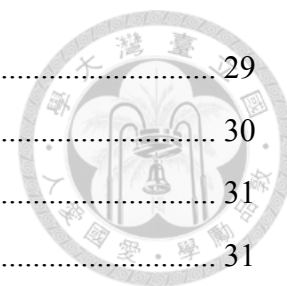
For the V-shaped burner the impinging region is capable of enhancing stabilization of rich propane flames due to benefits from the intense interaction between flame and recirculation. For the combustion characteristics with syngas addition the lean flammability of  $H_2/C_3H_8/air$  is expanded to 0.38 and that of  $CO/C_3H_8/air$  is expanded to 0.50 with M type and hill type flame configurations. At  $\phi = 0.6$ , the flame temperature of  $H_2/C_3H_8/air$  with M-type flame is 1.37 times that of  $CO/C_3H_8/air$  with hill type flame, while the  $C_3H_8/air$  flame is extinguished; the CO emissions also change. The mechanisms of flame/flow interaction including alternation of flame structures, characteristics of recirculating flow, and chemical kinetics for impinging flames with  $H_2$  and CO addition were revealed.

**Keywords** : Stratified combustion, PIV, chemiluminescence, POD, temporal/spatial dynamics, co-flow, compressive vortex pair, diffusion-thermal instability, impinging flames, flame stabilization

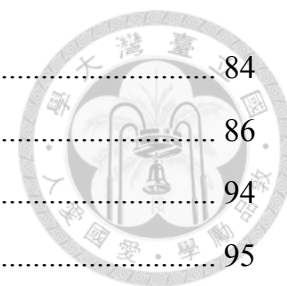


## 目錄

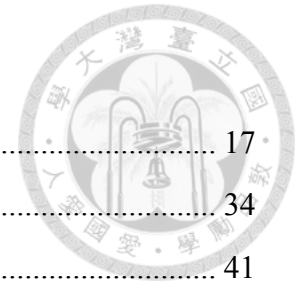
口試委員會審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
摘要 .....	iii
Abstract .....	v
目錄 .....	vii
圖表目錄 .....	x
符號說明 .....	xv
第一章 前言 .....	1
1-1 研究背景 .....	1
1-2 研究動機與願景 .....	2
第二章 文獻回顧 .....	4
2-1 燃燒強度變化性 .....	4
2-1-1 貧油燃燒及低熱值燃料之燃燒特性 .....	6
2-1-2 可燃極限 .....	9
2-1-3 化學動力學 .....	12
2-2 火焰/流場交互作用 .....	13
2-2-1 燃燒量測技術 .....	13
2-2-2 火焰與渦旋交互作用 .....	14
2-2-3 應變率與曲率 .....	15
2-2-4 火焰面和熱釋放率特性 .....	16
2-3 燃燒不穩定性 .....	19
2-3-1 熱量與質量擴散效應 .....	20
2-3-2 燃燒模態與振盪特性 .....	21
2-3-3 層狀化燃燒 .....	25
第三章 研究方法 .....	28
3-1 火焰型態 .....	28
3-1-1 燃燒模式 .....	29



3-1-2 燃料特性 .....	29
3-1-3 當量比 .....	30
3-1-4 實驗設備配置 .....	31
3-1-5 燃燒器構造 .....	31
3-1-6 流量控制系統 .....	32
3-1-7 火焰影像擷取系統 .....	33
3-1-8 火焰溫度擷取設備 .....	35
3-2 PIV 流場 .....	35
3-2-1 PIV 原理簡介 .....	35
3-2-2 PIV 實驗設備系統 .....	36
3-2-2-1 追蹤粒子 .....	37
3-2-2-2 雷射系統 .....	39
3-2-2-3 透鏡組 .....	40
3-2-2-4 高速攝影機與鏡頭 .....	40
3-2-3 PIV 影像流場處理 .....	42
3-3 化學螢光 .....	43
3-3-1 光學窄頻濾鏡 .....	43
3-3-2 影像訊號放大系統 .....	44
3-4 訊號處理方法 .....	46
第四章 層狀化燃燒：進流數效應 .....	47
4-1 火焰型態 .....	47
4-2 平均流場及燃燒場特性 .....	48
4-3 燃燒流場之 POD 分析處理 .....	61
4-3-1 層狀化燃燒流場觀測分析之困難點 .....	61
4-3-2 POD 原理及應用概念 .....	64
4-3-3 POD 之模態能量及重組 .....	68
4-3-4 基於 POD 處理之燃燒流場分析 .....	74
第五章 層狀化燃燒之穩焰機制 .....	84
5-1 空氣共伴流穩焰效應 .....	84



5-1-1 單股進流 .....	84
5-1-2 雙股進流 .....	86
5-2 壓縮渦對效應 .....	94
5-2-1 穩定操作區間 .....	95
5-2-2 貧、富油穩焰機制 .....	96
5-2-3 火焰/流場之交互作用 .....	98
5-3 熱擴散不穩定效應 .....	105
5-3-1 火焰型態 .....	105
5-3-2 平均燃燒流場特性 .....	106
5-3-3 基於 POD 處理之燃燒流場分析 .....	113
第六章 添加生質合成氣之衝擊燃燒流場 .....	117
6-1 衝擊燃燒流場特性 .....	117
6-2 添加生質合成氣之影響 .....	119
第七章 結論和未來展望 .....	129
7-1 結論 .....	129
7-2 貢獻與未來展望 .....	131
參考文獻 .....	133
作者簡歷 .....	145



## 圖表目錄

表 2-1 激發態自由基生成路徑和特徵波長.....	17
表 3-1 火焰型態拍攝使用相機規格.....	34
表 3-2 高速攝影機(PHANTOM V7.3)規格表.....	41
表 3-3 高速攝影機(PHANTOM V7.3)影像擷取速度與尺寸對照表.....	41
表 5-1 各燃氣出口流率及相對應流速.....	96
表 6-1 圖 5 火焰型態之氫氣及一氧化碳添加比例.....	122
表 6-2 圖 6 火焰型態之氫氣及一氧化碳添加比例.....	123
圖 2-1 文獻回顧架構圖.....	4
圖 3-1 研究流程圖.....	28
圖 3-2 層狀燃燒器幾何構造示意圖。(a)剖面圖，(b)上視圖，(c)出口結構側視圖， (d)層狀化燃燒器實體圖.....	32
圖 3-3 (a)質量流量計、(b)流量控制器.....	33
圖 3-4 R 型熱電偶及數位式溫度計.....	35
圖 3-5 PIV 實驗量測系統示意圖.....	37
圖 3-6 單股進流於中間出口形成火焰之 PIV 原始影像圖.....	38
圖 3-7 (a)氫離子雷射、(b)控制面板.....	39
圖 3-8 高速攝影機與鏡頭.....	40
圖 3-9 PIV 影像處理流程圖.....	43
圖 3-10 光學濾鏡組.....	44
圖 3-11 加裝訊號放大器之實驗配置示意圖.....	45
圖 3-12 訊號放大器之(a)波段響應分佈(b)感光度.....	46
圖 4-1 單股、雙股及三股甲烷火焰型態及燃氣注入示意圖(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7).....	48
圖 4-2 單股進流之平均速度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7).....	49
圖 4-3 雙股進流之平均速度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7).....	50
圖 4-4 三股進流之平均速度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7).....	50
圖 4-5 單股進流之平均渦度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7).....	51

圖 4-6 雙股進流之平均渦度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7).....	51
圖 4-7 三股進流之平均渦度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7).....	52
圖 4-8 單股、雙股及三股燃燒流場紊流強度 PDF 分佈圖 .....	54
圖 4-9 單股進流火焰平均燃燒場強度分佈(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7) .....	55
圖 4-10 雙股進流火焰平均燃燒場強度分佈(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7) .....	56
圖 4-11 三股進流火焰平均燃燒場強度分佈(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7) .....	56
圖 4-12 三股進流之 CH*螢光強度暫態分佈圖 .....	58
圖 4-13 三股進流之 CH*螢光強度暫態分佈圖(加裝訊號放大器).....	59
圖 4-14 三股進流之 CH*螢光強度平均分佈圖(加裝訊號放大器).....	60
圖 4-15 化學螢光之平均機率強度及紊流強度隨進流速變化分佈圖 .....	61
圖 4-16 PIV 與化學螢光法同步量測(a)實驗實景(b)示意圖 .....	63
圖 4-17 單股、雙股及三股進流之流場模態能量含量分佈 .....	69
圖 4-18 單股、雙股及三股進流之燃燒場模態能量含量分佈 .....	70
圖 4-19 單股渦度場重建分佈圖(a)累加至第一模態，(b)累加至第二模態，(c)累加至第三模態，(d)累加全部模態 .....	71
圖 4-20 雙股渦度場重建分佈圖(a)累加至第一模態，(b)累加至第二模態，(c)累加至第三模態，(d)累加全部模態 .....	72
圖 4-21 雙股渦度場重建分佈圖(a)累加至第一模態，(b)累加至第二模態，(c)累加至第三模態，(d)累加全部模態 .....	73
圖 4-22 單股進流之燃燒場(左)與渦度場(右)前三模態分佈圖 .....	76
圖 4-23 雙股進流之燃燒場(左)與渦度場(右)前三模態分佈圖 .....	77
圖 4-24 三股進流之燃燒場(左)與渦度場(右)前三模態分佈圖 .....	78
圖 4-25 三股進流時燃燒流場火焰及速度(a)原始，和(b)第一模態之週期分布圖 ..	80
圖 4-26 單股進流之前三模態時間係數變化(a)燃燒場，(b)流場 .....	81
圖 4-27 雙股進流之前三模態時間係數變化(a)燃燒場，(b)流場 .....	81
圖 4-28 三股進流之前三模態時間係數變化(a)燃燒場，(b)流場 .....	81

圖 4-29 燃燒場：單、雙及三股進流之前二模態時間係數變化和原始頻率分佈圖 .....	82
圖 4-30 流場：單、雙及三股進流之前二模態時間係數變化和原始頻率分佈圖 ..	83
圖 5-1 (a)火焰型態，(b)穩定操作區間分佈圖 .....	85
圖 5-2 當量比 0.85 之飄焰隨出口流速改變之火焰傾角 .....	86
圖 5-3 雙股進流時注入共伴流之火焰型態變化 .....	87
圖 5-4 由火焰影像疊加擬似線(pseudo lines)之流場可視化影像(a)注入內側共伴流， (b)注入外側共伴流 .....	87
圖 5-5 (a)外環有效空氣共伴流速度 $U_o^*$ 隨中環速度 $U_m$ 改變之分佈，(b)有效流速比 值 $\gamma(U_o/U_m)$ 隨中環速度 $U_m$ 改變之分佈(中環當量比 $\phi_m = 0.85$ ) .....	89
圖 5-6 中間飄焰隨共伴流速比變化之影響(a) $\gamma = 0$ ，(b) $\gamma = 0.6$ 和(c) $\gamma = 1.1$ .....	91
圖 5-7 空氣共伴流速度的燃燒流場中的 X 軸向速度分量 $U$ (中環至外環上方(a) 4.3 mm, (b) 8.2 mm ,and (c) 12.1 mm 橫截面處) .....	92
圖 5-8 飄焰與類錐焰底部外側的溫度分佈圖 .....	93
圖 5-9 中環飄焰( $\phi_m = 0.85$ ; $U_m = 1.0$ m/s)和注入共伴流流速比 0.33 下之 $CH^*$ 化學 螢光強度隨時間變化圖 .....	94
圖 5-10 層狀化燃燒器單股火焰(左)及三股火焰(右)操作區間分佈圖 .....	96
圖 5-11 不同燃氣流率和當量比之貧、富油燃燒火焰型態分佈圖 .....	97
圖 5-12 層狀化燃燒器中 $\phi = 1.5$ ， $Q_{total} = 20$ l/m 之火焰和流場渦對結構交互作用之 雷射斷層診斷影像圖 .....	99
圖 5-13 時序 6 ms 之 $\phi = 1.5$ ， $Q_{total} = 20$ l/m 燃燒流場連續速度場和渦度場分佈圖 .....	101
圖 5-14 $\phi = 1.5$ ， $Q_{total} = 20$ l/m 火焰之速度變化量/火焰傳播速度和紊流強度(無因次 化)之分佈以及壓縮渦對的位置，(a)沿中心軸之分佈與迴流區和浮力效應區 域，(b)不同 $Y = 5$ 、 $10$ 、 $15$ 和 $20$ mm 高度之徑向分佈。(CVP: 壓縮渦對) .....	104
圖 5-15 出口流速 $U_o = 1.5$ m/s 時，當量比( $\phi = 0.6 - 1.6$ )之火焰型態 .....	106
圖 5-16 出口流速 $U_o = 1.5$ m/s 和 $\phi = 0.6$ 之速度場和渦度場疊加分佈圖 .....	107
圖 5-17 出口流速 $U_o = 1.5$ m/s 和 $\phi = 0.8$ 之速度場和渦度場疊加分佈圖 .....	107

圖 5-18 出口流速 $U_o = 1.5 \text{ m/s}$ 和 $\phi = 1.6$ 之速度場和渦度場疊加分佈圖 .....	108
圖 5-19 出口流速 $U_o = 1.5 \text{ m/s}$ 和 $\phi = 0.6$ 之全域燃燒場強度分佈圖 .....	108
圖 5-20 出口流速 $U_o = 1.5 \text{ m/s}$ 和 $\phi = 0.8$ 之全域燃燒場強度分佈圖 .....	109
圖 5-21 出口流速 $U_o = 1.5 \text{ m/s}$ 和 $\phi = 1.6$ 之全域燃燒場強度分佈圖 .....	109
圖 5-22 $\text{CH}^*$ 螢光強度隨當量比和流速之分佈變化 .....	110
圖 5-23 (a) $\phi = 0.6$ , (b) $\phi = 0.8$ 及 (d) $\phi = 1.6$ 之化學螢光強度和紊流強度分佈圖 .....	112
圖 5-24 (a) $\phi = 0.6$ , (b) $\phi = 0.6$ 及 (c) $\phi = 1.6$ 之流場經由 POD 處理之前三模態能量 含量分佈。 .....	114
圖 5-25 (a) $\phi = 0.6$ , (b) $\phi = 0.8$ 及 (c) $\phi = 1.6$ 之流場經由 POD 處理之前三模態渦度 場分佈。 .....	115
圖 5-26 當量比 0.6、0.8 及 1.6 之流場前三模態時間係數變化和原始頻率分佈圖 .....	116
圖 6-1 (a) 衝擊燃燒器幾何結構示意圖, (b) 富油預混丙烷火焰型態分布圖 .....	118
圖 6-2 沿中心軸之水平方向速度分量 .....	119
圖 6-3 衝擊火焰溫度分布圖 .....	119
圖 6-4 平面燃燒器之 (a) $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰和 (b) $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰操作區間, 以及衝 擊燃燒器之 (c) $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰和 (d) $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰操作區間 .....	120
圖 6-5 不同當量比下 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 、 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 和 $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰型態分布圖 .....	122
圖 6-6 添加不同氫氣比例之當量比 0.5 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰和添加不同氫氣比例之當 量比 0.7 $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰型態分布圖 .....	123
圖 6-7 不同當量比 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ (上排)、 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ (中排) 和 $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ (下排) 火焰之 $\text{CH}^*$ 和 $\text{OH}^*$ 化學螢光分布圖 .....	125
圖 6-8 添加不同氫氣比例之當量比 0.5 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰和添加不同氫氣比例之當 量比 0.7 $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 其 $\text{CH}^*$ 和 $\text{OH}^*$ 化學螢光分布圖 .....	125
圖 6-9 (a) 不同當量比下 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 、 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 和 $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰, 和 (b) 添加不同 氫氣比例之當量比 0.5 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰和添加不同氫氣比例之當量比 0.7 $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 其溫度分布 .....	127
圖 6-10 (a) 不同當量比下 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 、 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 和 $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 火焰, 和 (b) 添加不同	

氫氣比例之當量比 0.5 $H_2/C_3H_8/air$ 火焰和添加不同氫氣比例之當量比 0.7 $CO/C_3H_8/air$ 其一氧化碳排放量 .....	128
圖 7-1 本研究之核心概念與貢獻 .....	132



## 符號說明

$A$	環口面積( $\text{cm}^2$ )	$\phi_{fg}(m, n)$	離散交相關係數
$C$	空間關係矩	$\phi_m$	基本函數
$D$	質傳係數	$d_p$	粒子直徑
$d$	燃燒器環型出口寬度	$U_{\text{var}}$	速度變化量
$f$	光圈	$U_o$	出口流速
$g$	燃燒器環間距	$S_L$	層流火焰傳播速度
$R$	燃燒器中央鈍體半徑		
$S$	純量矩陣		
$V$	速度矩陣		
$X$	橫軸		
$Y$	縱軸		
$Re$	雷諾數		
$Le$	路易斯數		
$\alpha$	熱擴散係數		
$\phi$	當量比		
$\rho$	密度		
$\tau$	留滯時間		
$\mu$	流體黏滯係數		
$\theta$	火焰傾角		
$\gamma$	流速比		
$Q_F$	燃料流量		
$Q_A$	空氣流量		





## 第一章 前言

### 1-1 研究背景


在工業革命後，科技的長足進步不斷提升文明水準，但追求快速發展以獲得更好的生活品質時，能源耗竭與生態環境汙染的問題也隨之而生。時至 21 世紀，由於社會的經濟活動及科技發展是建立在大量消耗化石燃料等不可再生能源的基礎上，這些燃料透過轉換而成可方便利用的電力，舉凡家庭生活、工業生產、科學研究乃至航太工程等皆須仰賴電力的供給，更加突顯能源對人類社會的重要性。然而人們恣意揮霍化石能源，地球有限的自然資源並無法負擔過度的消耗，加上溫室效應造成各種氣候異常的現象，種種自然環境的反撲讓許多人開始反思，長久以來所習慣的能源使用方式是否有調整的需要。近年來能源議題與環境友善的思潮開始影響社會的價值觀，進而了解到在利用能源發展科技為人類帶來便利的同時，也必須思考如何與環境友善共存。許多國家政府及全球論壇等官民組織已致力於散播正確利用能源的觀念，並迫使社會正視重新制定能源政策方向的必要性，諸如 1997 年的「京都議定書」與 2010 年的「哥本哈根會議」等，以挽救地球的生態浩劫，甚至是人類文明的存續。體認到科技發展必須和環境友善共存，各國的能源政策主要兩個方向：其一是如何更有效的利用能源以減低發電廠、內燃機乃至生活用的燃燒器具等有關燃燒的工具設備其碳排放及汙染物的生成；其二則是開發潔淨的再生能源技術以取代對化石燃料的倚賴性。根據預估在未來 20 年內人類所使用的能源 85 % 仍是從燃燒化石燃料而來，期望迅速改變現有化石能源的使用方式並不切實際，然而對新一代能源科技的研發也不能停頓，在前述兩個能源發展方向均不可偏廢的原則下，利用貧油燃燒、發展低熱質燃料之燃燒科技及強化燃燒穩定性則變成為極有潛力的方案。

燃燒科技的發展已有長遠的歷史，在前人戮力研究的努力之下人們已對燃燒及火焰有許多新的認知，然而燃燒反應是極為複雜的物理化學耦合的動態反應行

為，以往研究者受限於觀察的時間尺度而無法進一步窺知整體的樣貌。隨著量測技術的快速發展，高速燃燒量測技術為現今的研究人員掀開了全新的篇章，也帶領人們得以看到以往出現在想像中卻難得一見其真面目的許多重要現象。透過高速量測技術，迅速累積的大量資料有助於研究者深入探討現象背後的機制，然而龐大的資料量同時包含有用及無用的訊息，因此發展可去蕪存菁客觀地從中提取最重要且不失真的訊息進一步分析將是非常重要的處理方式。此外因為貧油燃燒及低熱質燃料之燃燒熱值、來源廣泛且成分也較工業上或家用燃料等常使用的能源方式來的複雜，造成進入實際應用階段的困難，因此透過新式量測技術與分析方法將有助於克服此一困難。在燃燒領域中，對於如何提升能源使用效率及降低污染物排放等問題已有許多探討，包括燃燒器的幾何設計、不同種類燃氣及調配比例，和加入觸媒及預熱燃氣等方式，而將此技術運用在生質合成氣燃燒的能源使用方式也越來越受到重視。本實驗室所開發之層狀化燃燒器和衝擊燃燒器因具有特殊的幾何結構設計能加強混合及預熱效果，在林泓瑋(2010)、和李志杰(2009)等人的研究中均提出燃燒器確實能達到如拓展操控範圍及降低污染物等節能效果的結論。本研究以層狀化燃燒器作為載具，探討層狀化預混火焰在不同進流數下其流場和燃燒場之交互作用影響。實驗方法上透過建立粒子影像測速儀以及化學螢光法之燃燒流場量測技術探討燃燒反應與流場特性的變化，並發展基於POD之數學分解方法分析連續暫態燃燒流場，從而歸納出共伴流渦旋結構操控機制、壓縮渦對穩焰機制，和貧、富油火焰和流場時空結構變化特性，期望最終能作為燃燒器設計的準則以及應用在燃燒系統的即時監測和反饋，並在未來能對燃燒科學的發展有所貢獻。

## 1-2 研究動機與願景

自普羅米休斯(Prometheus)取下第一把火，就註定人類與燃燒糾結的命運，如同傳承人類對科學永無止盡的探索一般，這把古老卻又神秘的火吸引眾人不斷探究本質的心，過去如此，未來也必然如此。



人類文明始於火的使用，燃燒在數千年歷史中更是一直扮演著重要的角色，自遠古時代的烹煮熟食至冶煉農耕器具，從鍛造戰爭武器到內燃機的發明，燃燒可說是照亮人類文明的一把熠熠火炬。雖然時至今日燃燒的應用已相當廣泛，但由於燃燒反應的過程極為複雜，除了本身的化學熱釋放反應之外，還牽涉到流場結構的影響，造成其熱傳及質傳系統複雜難解，因此燃燒領域仍有許多問題尚待深入的研究探討。鑽研燃燒科學不僅是滿足人類對火焰的好奇心，也是驅動燃燒科技幫助人類在能源使用上的關鍵。燃燒反應可大致分為火焰點燃(ignition)、火焰傳播(propagation)和火焰熄滅(quenching)等過程，每個部分都與火焰在現今的人類生活甚至是未來的發展息息相關，只有透過研究火焰反應機制來建構更加清晰的知識，才能幫助我們能以更安全、更有效率的方式與火焰共存。綜觀燃燒科學的發展，火為人類帶來便利但同時也具有危險，複雜的燃燒反應過程若缺乏精準的調控，不僅造成能源使用效率低落，更會產生許多有害物質，諸如 CO 與 NO<sub>x</sub> 等危害環境的污染物，因此燃燒技術勢必與時俱進不斷提升。此外燃燒科學在工業上的應用範圍非常廣泛，其中又以燃燒器與我們的生活最為相關。燃燒器在日常生活中使用量非常大，但其效率與安全的問題始終存在改進的空間，以往由於燃料取得相對廉價，造成社會大眾對其效率的問題較不重視，透過發展高速燃燒流場量測技術結合 POD 處理萃取主導特徵結構，研究燃燒器設計的影響、燃氣組成和火焰和流場間的交互作用，以至其時空動態反應特性，將有助於對整體燃燒系統在即時響應特性上有更深入且客觀的了解。本文探討層狀化燃燒的火焰和流場交互作用，由平均流場和火焰強度分布、POD 分解、重組及動態特徵，歸納其操作特性和燃燒反應機制，期望作為未來有效調控燃料使用方式和提升能源使用效率之基礎。



## 第二章 文獻回顧

燃燒科技是門綜合性強且具複雜的研究領域，雖然是建立在已具有悠久發展歷史的科學如熱力學、流體力學和熱傳學等基礎之上，但因為火焰具有極強耦合熱流特性而使其化學動力學中的反應機制和紊流燃燒等現象極為複雜，此外在低熱值燃料的燃燒中，成分比傳統石化燃料更為多元而出現以往較少探討的反應和現象；另一方面則是量測技術的發展，提供研究者一個可行的管道探討更為暫態和更微觀的交互作用特性。在燃燒科學的研究中仍有許多未知且極具挑戰性的領域，其所涵蓋的知識範疇廣大，歸納整理前人研究的目的有二：一方面可快速掌握燃燒科技的發展方向，了解目前研究趨勢為何；另一方面，在學習前人經驗與技術的同時，也能作為更深入探討的基礎，圖 2-1 為文獻回顧架構圖。

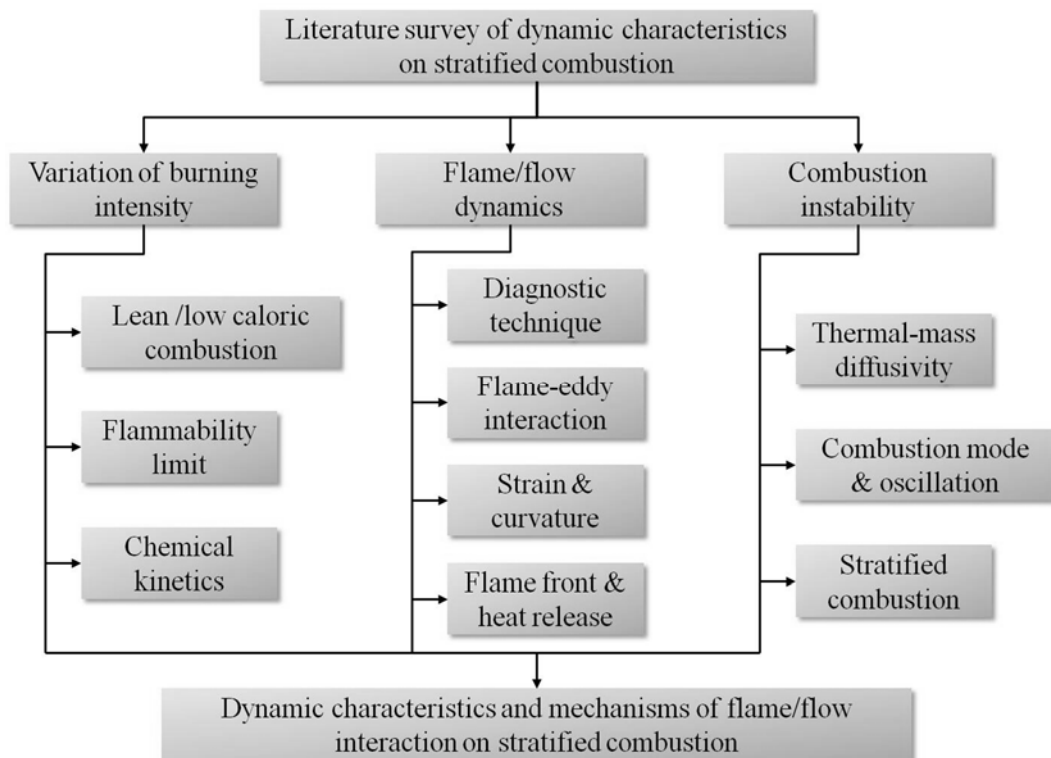


圖 2-1 文獻回顧架構圖



## 2-1 燃燒強度變化性

燃料是燃燒反應的能量來源，同時也決定燃燒反應的機制。基本上燃料可分為固態燃料、氣態燃料與液態燃料三類，而不同型態及不同成分之燃料特性及反應過程均有所不同。固態燃料具有高密度的特性，單位體積可釋放較大量的化學能，但其引燃及燃燒過程皆不易控制，因此除了國防用途外，於日常生活的應用並不廣泛；氣態及液態燃料方面，因為操作較易控制且燃燒反應較為穩定，故作為日常生活燃燒應用之燃料來源，如飛機、船艦、汽機車、瓦斯爐...等。常見的燃料主要有碳氫化合物(hydrocarbon)及氫氣(hydrogen)，其中碳氫燃料又可依其碳數多寡分為烷類(paraffin)、烯類(olefin)和炔類(acetylene)三種。日常生活中所使用的瓦斯爐或熱水器等大部分燃料來源為液化天然氣(liquefied natural gas; LNG)或是液化石油氣(liquefied petroleum gas; LPG)。天然氣又稱天然瓦斯，為遠古時代生物遺骸沉積於地層中慢慢轉化及變質裂解後產生的氣態碳氫化合物，主要成分包含甲烷和少許乙烷、丙烷、丁烷與少量不可燃性氣體，其熱值約為每立方公尺 36000 kJ 至 39540 kJ 之間，隨出產地及其純度而有所不同。而液化石油氣又稱桶裝瓦斯，為原油處理過程中所析出之產物，主要成分為丙烷及丁烷，在常溫常壓的環境下為氣態，經加壓後可被液化儲存以利運送，具有高熱值及低污染的特性，其熱值約為每立方公尺 92100 kJ 至 121400 kJ 之間。氣態燃料丙烷(propane,  $C_3H_8$ )較空氣為重，特性與同為碳氫化合物的甲烷(methane,  $CH_4$ )會有明顯不同，而兩者之化學反應機制常被作為研究標的，且都同為民生工業中常見的燃料，因此選用甲烷與丙烷作為燃料能同時兼顧實際工程應用與學術研究價值。

科學上對火的定義為：當燃料與氧化劑接觸並具有特定的比例關係，在達到著火溫度後會產生劇烈的反應而釋放出大量的光和熱，因此燃燒反應要進行必須滿足三個要素，分別是燃料、氧化劑及著火溫度，其中火焰燃燒模式與燃料和氧化劑有密切的關係。根據燃料與氧化劑在未燃前的混和狀態可分為擴散火焰(diffusion flame)與預混火焰(premixed flame)兩種(Turns, 2000)。擴散火焰在燃燒前並無預先

混合燃氣的過程，所以燃燒反應發生處位於燃料與氧化劑之介面上，故此時兩者的混合過程與化學反應過程是同時進行，蠟燭之燃燒方式即是最常見的擴散火焰。而發生燃燒反應的介面則稱為火焰面(理論上當量比為 1)，在燃料與氧化劑的混合過程中，相互進行不同尺度大小的擴散，而由於化學反應過程進行較快，因此燃燒速率主要受制於混合過程的快慢，易受外界干擾而影響火焰穩定性導致燃燒不完全，不符合節能減碳之需求。相對於擴散火焰，預混火焰為燃料與氧化劑在燃燒反應發生前以分子層級均勻混合，此種燃燒方式較為穩定且效率高，本生燈與內燃機之燃燒方式皆屬此類。燃料與氧化劑接觸時其比例關係存在三種狀況，均會影響燃燒反應。首先，是燃料比例過多，這種情形稱為富油(fuel-rich)，雖然是現有燃燒方式中最常見的，但同時存在燃料浪費及燃燒不完全的缺點。第二，是氧化劑比例過多，這種情形則稱為貧油(fuel-lean)，此時燃燒反應速率較慢且容易有跳脫火焰或局部熄滅的狀況，使火焰較為不穩定，但其污染物生成則較少。而在燃料與氧化劑比例剛好時則具有燃燒反應最快且完全的特性，使燃燒溫度升高，但同時也大幅增加 NO<sub>x</sub> 的產生。為了因應改變倚賴石化燃料為主要能源，使替代能源的比例逐漸提高，在現有的燃燒科技基礎之上如何使用低熱值燃料是另一極具潛力的方式，但其不易點燃及易熄滅的複雜燃燒特性等，則有待更多研究投入以深入了解這些燃燒現象的生成機制。

### 2-1-1 貧油燃燒及低熱值燃料之燃燒特性

環境保護和能源危機促使傳統能源使用方式開始改變，朝高效率低耗能的方向前進，且必須在更嚴苛的環境友善法令下仍然提供穩定舒適的能源。其中貧油燃燒，以及逐漸興起之低熱值燃料應用因為能降低燃料使用，且未燃盡的燃氣在伴隨較多的外界稀釋空氣下絕大部分能被反應殆盡而減低污染物(NO<sub>x</sub> 和 soot)排放，近年來廣泛被應用在像是渦輪引擎、鍋爐、熔爐和內燃機等工業應用，而被視為是一個重要且具發展性的燃燒科技。儘管貧油燃燒具有許多優點，但同時也具有低反應

速率、易淬熄、微弱的熱釋放率、燃燒不穩定性高和易受混合條件影響等問題，顯示仍有許多未知的特性待探討和工程上的問題尚待克服。對火焰燃燒的強度變化而言，燃氣在空間中的分布變化(局部當量比變化)、反應過程中火焰結構變化的影響和大、小不同尺度的擾動對局部流場紊流強度和化學反應交互作用的影響，以及不同燃燒器穩焰設計(鈍體結構、渦漩式結構和背向階梯等等)的影響，都必須釐清其反應特性和原因，才能在各種操作條件中取得最佳平衡以進一步利用並研究開發新一代能符合低耗能和低碳排需求的燃燒系統。

對燃燒器設計而言，貧油燃燒具有兩個極富挑戰性的問題，一是在需求的操作區間下能具有良好的燃燒穩定性，同時在燃料成分隨不同操作條件變化的特性下仍需維持其穩定性，以符合實際應用的需求，而這兩個特性皆與替代能源中之低熱值燃料燃燒時所會面臨的困難類似。對燃燒器的實際應用來說，穩定性是維持燃燒效率和強度的先決條件，而在評定燃燒器的功率穩定性方面，極限負荷比(turndown ratio)是代表其功率輸出峰值和峰谷的比值，對家用或是小型燃燒器而言，其不穩定性可透過開關調節間歇性(intermittency)，但對於大型發電站或噴射引擎等則無法用此類方式改善。為了維持燃燒穩定性，已有許多研究提出不同駐焰器的設計及其原理，像是利用燃燒器幾何構造產生迴流區，或是使用渦漩燃燒器(swirl burner)等等，所形成的迴流區都具有高度暫態特性(速度梯度變化、toroidal vortex core 和非等向性的紊流特性等)，因此雖然實驗證實這些設計確實可提升燃燒穩定性及效率，但其穩焰機制仍需更多研究才能釐清其中關鍵(Rankin, 2008)。

研究者已提出許多方法拓展貧油燃燒可燃極限和強化其穩定性，諸如加入觸媒輔助、添加活性氣體及透過火焰和流場交互作用預熱輔助(Lin *et al.*, 2009)；或是比較觸媒鉑及氧化鐵對貧油甲烷之反應效果，發現鉑使甲烷貧油反應範圍較為寬廣(Sazonov *et al.*, 1999)。Jackson *et al.* (2003)研究指出在燃氣當量比接近下可燃極限時，添加少許氫氣能讓燃燒現象大幅穩定和拓展可燃極限。Wu *et al.* (2009)則混入一氧化碳(CO)，結果發現火焰傳播速度有明顯的增快，使得貧油狀態下的甲



烷燃氣也能有良好的燃燒反應。

另一方面，對低熱值燃料中的生質合成氣(syngas)來說，由於來源廣泛，因此其成分也較工業上或家用燃料等常使用的能源方式來的複雜。生質合成氣來源可概略分為兩種方式。第一種是生質燃料及其處理後的產物，以往因為具有燃燒不易且熱值較低等不利使用的因素而廢棄不用的物質，在能源危機的迫使下使得人們逐漸正視此類能源來源的利用可行性。另一方面，在一般化學工業或是煤炭氣化的過程中，均會產生許多副產物，而此類副產物其成分可能包含氫氣、一氧化碳或水氣等等，雖具有利用價值，但其處理成本仍是無法與直接使用燃料相抗衡。

然而現今倚賴石化燃料為主的能源使用方式有其改善和尋找替代方案的必要性，近年來已有越來越多的研究探討如何有效利用以往忽略的生質合成氣，一方面降低對單一能源及石化燃料的依賴性，一方面也可將廢棄物或副產品等仍具潛在價值的燃料妥善利用，因此透過加速發展生質合成氣的燃燒科技研發將有助於克服目前所面臨的使用問題及能更有效的利用。此外，其他利用生質合成氣產生能源的方式也正在發展中，像是富氧燃燒、化學循環、燃料電池或混合式發電等等，都是極具發展潛力的未來科技(Casleton *et al.* , 2008)。

由於低熱值燃料之生質合成氣其組成複雜，一般含有氫氣、一氧化碳、少量的二氧化碳和氮氣以及水氣，其組成比例隨產生狀況而不一，因此造成生質合成氣具有點燃不易且熱釋放率低和不穩定的特性，生質合成氣之燃燒研究雖然歷程已有五十餘年，但所知仍少。為簡化生質合成氣研究的變數，通常是藉由氫氣和一氧化碳混合燃氣來進行。隨著其組成成份改變，燃燒特性包括火焰傳播速度、溫度、熱釋放率等均會改變(Lieuwen *et al.*, 2010)，除此之外，由於不同燃氣組成均具有各別特色，因此在反應過程中，特別是在化學動力學的部分也會受到影響。其中，氫氣由於具有反應性和擴散性高的特性，因此常在反應初始扮演自點燃(auto-ignition)的角色，而一氧化碳雖具有較高熱值但其反應性則較慢，因此在反應過程中，兩者相互影響則會使燃燒反應呈現較不穩定的情況，特別是反映在局部火焰面上則可觀察

到包含火焰面厚度和不同自由基(radical)與預熱區(preheat zone)和反應區(reaction zone)的相對關係皆有所不同。同時，在與流場交互作用的情況下，生質合成氣的火焰在受到拉伸作用時，對曲率(curvature)和應變率(strain rate)的反應也不同。另外水氣的加入也會影響合成氣的燃燒反應(Das *et al.*, 2011)，由於反應進行中 H<sub>2</sub>O 也扮演關鍵性的角色，因此水氣含量多寡將會決定此時合成氣的燃燒效率。探討一氧化碳在生質合成氣中扮演的角色方面，Chang and Chao (2011)改變加入甲烷燃氣的一氧化碳比例，發現其跳脫火焰的穩定位置會隨比例變動，且最大的火焰傳播速度約落在稍偏富油定當量點處。由於火焰傳播速度是探討燃燒特性的一項重要參數，已有許多關於不同比例生質合成氣對火焰傳播速度影響(Bouvet *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2008)，以及在不同燃燒器中穩焰機制改變的研究(Wilson and Lyons, 2008; Dam *et al.*, 2011)。

### 2-1-2 可燃極限

燃氣混合時其比例需在一定範圍內才可被引燃，稱為可燃極限(flammibility limit)，當未燃氣成功引燃後，火焰面會一層層往未燃氣方向移動，其位置將取決於火焰傳播速度及未燃氣供給速度，此種現象被稱為火焰傳播。若火焰傳播速度大於未燃氣供給速度，火焰燒回上游管內即產生回火(flash back)，不僅無法提供燃燒熱源，甚至可能產生爆炸，因此燃燒器設計須考量熄滅距離(quenching distance)以確保安全。相反地，若未燃氣供給速度大於火焰傳播速度，即產生跳脫(liftoff)現象，此時火焰被吹離燃燒器出口，其與燃燒器出口距離則稱為跳脫距離(liftoff distance)，未燃氣較易逸散，造成燃燒不完全及燃料浪費。若未燃氣供給速度持續增加，則會造成吹熄(blowout)，此時未燃氣未經燃燒反應而直接外洩至大氣。

在接近貧油可燃極限而吹熄時，火焰在趨近吹熄的過程中會有兩個主要的階段，首先是火焰產生明顯飄動(flapping)，若持續降低當量比則飄動現象加劇並增加振盪的幅度，最後導致火焰完全熄滅(Shanbhogue *et al.*, 2009)，此現象已在背向階

梯及鈍體燃燒器的燃燒反應中被證實。在接近火焰所能存在的極限條件的過程中，從火焰跳脫、飄動至吹熄等各個階段的轉變必有其關聯存在，並且影響各階段所出現的特徵，因此有必要針對火焰極限中的轉變現象加以探討。Pitts (1989)分別以理論解析和實驗驗證，探討跳脫火焰基部對火焰跳脫和吹熄的穩焰機制影響。而實驗結果顯示穩焰機制有許多可能因素，這些特徵包含像是部分預混火焰、緣火焰(edge flame)、局部熄滅、流線反轉和大尺度渦漩結構等等，都各自支持某一部分理論和實驗的推測。然而在各階段中火焰存有不同的穩焰機制和主導反應的因素，許多研究者認為以紊流火焰傳播速度為主的論述有待商榷，而提出諸如預混火焰理論、大尺度渦漩理論和邊緣火焰概念等穩焰理論。另外研究者也發現上述理論是互相關聯的，實驗也顯示複雜的穩焰機制並無法由單一理論或現象解釋，因此勢必需要綜合不同的理論和概念(Lyons, 2007; Lawn, 2009)。另一方面，量測技術的發展或許是幫助研究者觀察以往所無法發現的關鍵，例如高速同步量測速度場及濃度場的技术，可幫助了解在各個轉變過程中火焰反應區和流場相互影響的動態特性。

利用鈍體結構穩焰是處理火焰接近吹熄時特別重要的一個主題。Plee (1979)以鈍體燃燒器研究紊流火焰的特徵反應時間，發現在剪流層其流體停滯時間和化學反應時間兩者間的互相抗衡是發生貧油燃燒吹熄現象的關鍵。Radhakrishnan and Heywood (1981)則是以同調結構建立預混紊流火焰吹熄速度的模型。Yamaguchi (1985)探討桿型(rod)鈍體結構對吹熄的穩焰機制影響，發現在迴流區尾端的小尺度渦漩扮演啟動吹熄現象的角色，因此迴流區結構大小將影響吹熄的機制。Stwalley (1988)則是探討許多不規則形狀的鈍體結構對火焰吹熄的影響，並建立吹熄速度和阻力係數(drag coefficient)之間的關係，雖然不規則狀的鈍體結構會影響火焰穩定性，但駐焰結構的尺寸(blockage ratio, BR)相對於不規則形狀的鈍體結構仍有較大影響。在流體力學的領域中，關於鈍體結構後方流場特性的研究已是廣為人知的研究主軸，雖然非反應流場(non-reacting flow)和反應流場(reacting flow)必定存在差異，例如在反應流場中，流體由於加入「熱」的因素而具有黏滯性，因此紊流強度

和渦度強度相較於非反應流場會顯得相對較弱，但基於流體力學中所獲得的知識仍有助於進一步探討鈍體結構對燃燒反應的影響(Shanbhogue *et al.*, 2009; Renard *et al.*, 2000)。從二維的角度來看，鈍體後方的流場結構大致可分為三個區域：沿著鈍體後方發展的邊界層(boundary layer)、分離的剪流層(shear layer)和尾流(wake)區。這些區域有各自不同的特性，初始發展的剪流層來自於低維度的不穩定性(Kevin-Helmholz instability)，在稍微下游處，分離的剪流層將會由兩側向鈍體後方中間靠攏而形成一個相對自由流而言的低壓迴流區，此時受到流場不穩定性影響開始轉變為下游尾流區紊亂的大尺度渦旋結構。不同區域的擾動幅度和頻率各不相同，代表在不同區域裡主導不穩定性的因素皆不同。

對受到放熱性影響的剪流層而言，從實驗(Chaudhuri *et al.*, 2010)和模擬(Nottin *et al.*, 2000)的結果都發現鈍體後方分離而捲起的渦列(vortex sheet)所形成的流場具有較強的渦旋分布並且會將火焰包裹在裡面。此外由於放熱性的緣故，剪流層渦對和火焰引發的斜壓渦旋(baroclinic vorticity)彼此之間也會相互影響。因此在靠近鈍體結構的上游區和遠離的下游區具有分別由剪流層渦對和斜壓渦對主導流場的特性，換句話說，放熱性引發的氣體膨脹效應會使流場轉變而具有不同模式。而在尾流區的部分，此處鈍體兩側反向的渦列彼此的相互影響也因為放熱性而減弱，然而流體不穩定性仍然存在，並且影響尾流區流場結構捲入空氣(entrainment air)的動態特性。此外接近吹熄時反覆出現的局部熄滅和再點燃過程會受到引入空氣影響，然而與流體不穩定性和紊流尺度相關的高度暫態過程，並無法從平均流場得知細部的資訊，若要釐清動態過程的轉變和交互作用關係，則必須透過例如新式的量測技術解析和訊號分析等其他方法來探討(Kostka *et al.*, 2012)。在接近吹熄的過程中，火焰傳播速度通常會受到周遭流場速度強烈的影響而超過燃燒器所能承受的燃燒穩定性，因此吹熄將造成系統失效並須要重新啟動。另一方面，回火通常是紊流火焰傳播速度大過燃氣供給速度而好發在渦旋燃燒器或高度非均勻流場中，火焰向上燒進燃燒器進氣道將因為高溫對燃燒器造成損傷而危及安全性。探討在接近燃



燒極限時能夠穩定火焰的決定性因素對於燃燒器而言，不論是民生家用的燃燒器具、工業應用的發電站或是國防工業的噴射引擎等都是非常關鍵的研究主題。

### 2-1-3 化學動力學

低熱質燃料的成分複雜以致現有的燃燒理論無法完全合理解釋，此外因為含有多種成分且為低熱值，因此操作時如欲維持一定功率輸出，便須提高供給速率，但由於加入氫氣反應所產生的高溫會增加氮氧化物的生成以及產生回火現象，此外如一氧化碳需要較長的反應時間、加入惰性稀釋氣體對生質合成氣反應的影響等，各種成分間互相影響的特性造成燃燒反應的不穩定性和振盪特性都是不利燃燒氣穩定操作的因素，因此如何使用適當的低熱質燃料比例，更加凸顯燃燒控制的重要性。由於燃燒特性變異極大，代表燃燒器的設計必須向更大的操作區間忍受度發展，因此必須對使用低熱值燃料時各極限燃燒狀況現象具備基礎的知識，諸如回火、吹熄、自點燃和燃燒脈動(pulsating)等不穩定性，再進一步思考如何作為改善燃燒器的設計準則(Lieuwen *et al.*, 2008)。

由於低熱質燃料中含有少量氫氣，因此會產生  $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$  為主要反應。任何氧化物的活性取決於活化自由基的生成和連鎖傳遞(chain propagation)，對 CO 的氧化而言在沒有氫原子參與反應的情況下很難成功引起連鎖反應，相較之下極微量的氫原子參與反應(例如水氣)則會大幅加快 CO 的氧化速率。氮氣( $\text{N}_2$ )和二氧化碳( $\text{CO}_2$ )是燃燒研究中常使用的稀釋氣體，透過改變稀釋氣體在燃氣組成中的比例能模擬不同供給流率和熱值的生質合成氣，但這些加入的稀釋氣體對生質合成氣燃燒反應的影響為何則必須進一步以實驗(Wilson and Lyons, 2008; Williams *et al.*, 2007)和模擬(Ding *et al.*, 2011)的方式探討。在燃氣中加入氫氣稀釋會影響燃燒反應的熱釋放率和改變火焰傳播速度，造成達到跳脫火焰的速度變小(Wilson and Lyons, 2008)。另一方面，相較於以氮氣作為稀釋氣體，加入二氧化碳具有比較大的影響程度(Dam *et al.*, 2011)，原因是因為  $\text{CO}_2$  會參與 CO

+ OH = CO<sub>2</sub> + H 反應，進而影響火焰傳播速度(Liu *et al.*, 2003; Prathap *et al.*, 2012)。而相較於空氣，以二氧化碳作為稀釋氣體可在接近定當量點時減少燃燒過程中的氮氧化物產量，但是此時一氧化碳也會大幅增加(Williams *et al.*, 2007)。

## 2-2 火焰/流場交互作用

燃燒反應過程除了火焰本身條件的限制外，也會受到外界環境的影響，而當有第二股以上的火焰接近到特定範圍內，此時火焰與火焰間的相互影響便開始出現。燃燒反應時的質傳與熱傳現象，透過火焰間的相互影響會產生不同的火焰型態與燃燒模式，然而交互特性的量測、界定與分析也愈趨複雜，包括合適且高解析度之量測技術發展、影射交互作用特性的火焰間距、氣流方向、速度與溫度、濃度等參數，影響火焰結構、火焰傳播速度、熱釋放率、應變率與拉伸率等的反應機制。

### 2-2-1 燃燒量測技術

燃燒流場的觀測因燃燒反應快速且微小集中而難以量測，因此許多重要的燃燒流場特徵參數如速度場、濃度場、溫度場和反應粒子特性等資訊等並不容易取得，此外燃燒實驗具有易受環境影響的特性，導致傳統侵入性的量測方法容易造成實驗結果存有誤差。然而隨著非侵入式光學量測技術的發展，常見的燃燒流場實驗量測方法包含雷射都普勒測速儀(laser doppler velocimetry, LDV)、粒子影像測速法(particle image velocimetry, PIV)、雷射激發螢光法(laser induced fluorescence, LIF)、化學螢光法(chemiluminescence)和雷射激發白熾光法(laser induced incandescence, LII)等，使研究者得以一窺燃燒反應中流場和化學反應耦合的時間和空間分布特性(Barlow, 2007; Aldén *et al.*, 2011)。

雷射診斷技術是幫助研究者探討火焰和流場結構的一項重要工具，而近年來越來越多研究者應用 PIV 和 LIF 雷射診斷技術探討暫態火焰和流場的交互作用。例如擷取接近吹熄時的火焰反應特徵和流場結構，從形成火焰局部反應區熄滅產生的不連續處(hole)到潰散的尾流區和迴流區反應流場結構，探討接近吹熄時具有

高度非定常特性的火焰受拉伸而破碎以致熄滅和再點燃現象(Nair and Lieuwen, 2007; Chaudhuri *et al.*, 2010; Dawson *et al.*, 2011)。Bonaldo (2009)則是利用 PIV、LIRay (laser induced Rayleigh) 散射和 PLIF (planar laser induced fluorescence) 分別量測低渦漩數燃燒場中的速度、溫度和當量比分布，歸納出當量比梯度會使各處火焰傳播速度不同而使火焰產生皺摺與火焰面密度改變，進而影響此時的紊流火焰傳播速度。在紊流火焰的研究中則以 LDV、PIV、Rayleigh scattering 量測流場和溫度場分布歸納出預混火焰受流場的大尺度結構影響和剪切力所主導，進而使火焰傳播速度增快(Böhm *et al.*, 2011)。此外為了驗證理論分析所獲得之參數正確性，必須仰賴新式更精準的量測技術，例如 Petersson *et al.* (2007)所開發的同步 PIV/OH-PLIF 和 Rayleigh/OH-PLI 以及 stereo PIV，或是 Barlow (2009)所開發的系統，結合 Raman/Rayleigh/雷射激發螢光等雷射量測技術。上述量測系統有助於獲得更清晰的局部火焰結構數量值，如速度、溫度和當量比分布等資料庫，以修正理論分析的誤差及幫助數值模擬建立更精準的模型(Sweeney *et al.*, 2011; Xiouris and Koutmos, 2012)。總結而言，高速燃燒量測技術的長足發展有利於解析更細微空間及時間上的現象變化，提供計算模型更精準、且能預測更複雜的情況，並能依此作為發展更乾淨、更有效率之燃燒器的基礎。

### 2-2-2 火焰與渦旋交互作用

燃燒研究不僅包含火焰本身特性的變化，其流場結構更會因為浮力效應和第二股以上火焰的交互作用影響而更趨複雜。渦旋與流場間影響的研究領域則是專注在簡化實驗複雜性下，探討單純的渦與火焰間動態關係。Meyer *et al.* (2004)利用同步的 PLIF/PIV 量測系統研究渦與火焰的交互作用，建立火焰受渦影響而產生局部熄滅的連續影像，並以 OH\*的濃度以及渦度場分佈圖定義火焰面及計算沿火焰面及跨火焰面之應力，發現受渦碰撞後火焰最先產生熄滅處在渦的切線方向，其原因是此處具有最大應變力使火焰淬熄。另一種則是以對流型的燃氣型式產生的流

場進行研究，De Leo *et al.* (2007) 探討擴散火焰在逆置流流場中隨氧化劑濃度及應變率對其 OH\* 及 CH\* 的影響，發現隨氧化劑濃度增加，OH\* 濃度峰值明顯提升，而 CH\* 則相對穩定；另一方面，隨應變率增加，受流場速度增加影響，會使兩自由基之空間分布往峰值集中聚攏，同時火焰反應區受壓縮而使兩者的峰值分離距離會縮短並齊向停滯面靠近，因此透過量測反應區之 OH\* 及 CH\* 的濃度分布可做為定義此流場中非固定之火焰位置的指標。燃燒反應的進行與燃料和氧化劑間的混合關係息息相關，由於擴散火焰及預混火焰的特性存在極大的差異性，使火焰的燃燒模式充滿多樣性及複雜性。不僅如此，當兩股以上的火焰開始互相影響時特性更是複雜難解，要如何釐清其中交互作用的機制，仍是當前許多燃燒科技研究者亟欲探索的問題。

### 2-2-3 應變率與曲率

在火焰拉伸效應的研究中可分為應變率與曲率兩者，此二者在對火焰的傳播速度影響上有相似的作用。在層流燃燒時的火焰傳播速度是為人熟知的火焰特性，但在紊流燃燒時因為受到拉伸作用影響而變形的火焰面會使此時火焰傳播速度不再是一定值，如何量測及定義此時的火焰傳播速度是許多研究者探討的問題，其中應變率與曲率即是重要的研究指標之一。另外，燃燒反應中的重要特性如熱釋放率和溫度，其變化特性也會受紊流效應影響而改變。

當火焰受拉伸後，層流火焰傳播速度必須修正，加入曲率效應的影響。Driscoll *et al.* (2008) 提到火焰表面積會受紊流火焰間交互作用影響而產生變形，同時局部火焰表面特性也會改變而使燃燒速度及火焰面厚度受到影響，並建立紊流預混火焰的燃燒速度與其火焰結構及和紊流燃燒速度間的關係，由此便可說明火焰整體變化的特性受到反應物消耗率大小的影響，尤其是在高拉伸率時，火焰表面上易出現破洞而產生局部熄滅(*locally extinguish*)的現象。由於燃燒反應通常伴隨著流場的影響，造成火焰本身結構及反應過程的改變，因此探討火焰的拉伸現象，包含應變



及曲率等指標，有助於深入了解火焰與流場間密不可分的作用關係，以及了解火焰傳播速度、火焰表面積密度及火焰厚度等性質變化。

#### 2-2-4 火焰面和熱釋放率特性

燃燒是非常複雜的現象，特別是在火焰面存在的位置，不只有大量且快速的化學反應在此處進行，同時間火焰面上游的可燃氣(flammable gas)與下游的燃後氣體(burned gas)也會不停互相擴散影響，劇烈的質傳及熱傳變化會使火焰面位置具有動態變化的特性，而當可燃氣與燃後氣體達到平衡時，燃燒反應才會持續進行。對探討燃燒科學而言，其物理和化學現象可透過擷取燃燒流場之速度場、濃度場和溫度場資訊進行分析，而現在常見的實驗量測法包含了 PIV、LIF 以及化學螢光法等。其中化學螢光法因為操作原理單純，透過光學濾鏡取得燃燒流場中特定波長光譜的二維全域連續影像即可進行強度分析，因此近年來有快速發展的趨勢。

化學螢光法的原理建立在火焰光譜分佈特性上，依據火焰的光譜特性區分為兩種，其一是火焰的發射光，其二則是火焰所吸收光的波段，而火焰所發出的光波段又可分為自發性及受外在刺激兩種。火焰產生自發性的放射光包括來自於碳粒及焦碳的連續且具峰值的黑體光譜波段，以及化學反應時產生的自由基由激發態回復至基態時所釋放的光，也稱為化學螢光，此螢光分佈波段在 UV 光及可見光之間。當電子位處最低能階的狀態時，稱之為基態(ground state)，而當電子躍遷至較高能階的狀態時則稱為激發態(excited state)，通常這樣的電子能階躍遷現象會藉由吸收光或熱來進行，然而較高能階的激發態通常較不穩定，因此電子會藉由釋出能量自激發態返回基態，而此時釋放的能量通常會以光與熱的形式表現。

電子的濃度在火焰氣體中一般而言是非常低，具有可被激發作用的能量之電子數量更為稀少，因此對處於平衡狀態的已燃氣體而言，化學螢光將非常難以被觀測。然而對於火焰反應區而言，此處因為化學反應的快速進行而使電離程度大幅提升，所以此處可視為是化學螢光產生的主要區域。

激發態的自由基來源不只來自於受光或熱激發，也來自濃度高於平衡常數的化學反應的過程中。化學螢光的反應過程分為兩個部分：其一是來自於生成激發態自由基的生成物，其二則是自由基從激發態回復至基態時所產生的自發性發射光。



發射光的波段則取決於自由基的種類及其能階狀態，因此藉由分析不同自由基所發散的不同波段光譜，可以做為決定特定火焰其燃燒反應的特性。而由前人的研究可以歸納出(Ballester and Garcia-Armingol, 2010)火焰中主要的化學螢光來自碳氫基(OH\*)、氫氧基(CH\*)及雙碳基(C<sub>2</sub>\*)等三種自由基，它們的生成反應過程詳列如表 2-1。所列之自由基來自於燃燒反應的中間產物，而他們的濃度則由反應常數的級數大小決定。因此由(2-2)式可知，去激發態的反應過程具有與濃度成正比且反應時間極短的特性，進而可推論化學螢光產生的主要來源在極薄的反應區中。

表 2-1 激發態自由基生成路徑和特徵波長

Radical	Wavelength (nm)	Reactions
OH*	308.9	R1 : CH + O <sub>2</sub> = CO + OH* R2 : H + O + M = OH* + M R3 : OH + OH + H = OH* + H <sub>2</sub> O
CH*	431.4	R4 : C <sub>2</sub> H + O = CO + CH* R5 : C <sub>2</sub> H + O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + CH*
C <sub>2</sub> *	516.5	R6 : CH <sub>2</sub> + C = C <sub>2</sub> * + H <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> *	Continuous spectrum (350-600)	R7 : CO + O + M = CO <sub>2</sub> * + M

反應式雖為燃燒反應中具代表性的過程，但仍有許多尚待釐清的步驟，然而透過解讀此過程中的反應信號仍可作為研究燃燒反應的指標。由於這些反應過程中

的燃料、中間反應物及氧化物等都是燃燒反應中的重要參數，因此其散發的化學螢光可作為研究火焰性質的依據。在研究燃燒反應時會觀察的三種主要指標自由基分別是發射接近不可見光的  $\text{OH}^*$  及藍光的  $\text{CH}^*$ ，而  $\text{C}_2^*$  的發射光則分佈於綠光波段，在波長 350 至 600 奈米範圍中則存在由  $\text{CO}_2^*$  組成的連續波段。在此基礎之上，透過量測特定激發態自由基的發射光波長及其強度，可以定義出火焰所在的位置或是熱釋放率等特徵，進而分析局部火焰面和火焰結構的形成機制。

許多研究化學螢光強度變化與當量比和應變率間的文獻證實，特定的自由基如  $\text{OH}^*$ 、 $\text{CH}^*$  和  $\text{C}_2^*$  所產生的化學螢光可當作熱釋放的指標，另外，化學螢光同時也具有火焰反應區空間的不同分佈特性，代表其可以作為燃燒反應中特定程序的指標。Ikeda *et al.* (2000) 利用化學螢光法量測局部的  $\text{CH}^*$ 、 $\text{OH}^*$  以及  $\text{C}_2^*$  其強度 (Intensity) 峰值，發現激發態的氫氧基和碳氫基濃度會與化學螢光法量測到的強度相關，在當量比增加時  $\text{C}_2^*$  峰值強度隨之增強，然而同時  $\text{CH}^*$  之峰值下降，與貧油燃燒時呈藍色火焰為主與富油燃燒時呈黃焰為主吻合，並用以作為表達局部火焰面厚度的特徵。Kojima *et al.* (2000, 2005) 利用化學螢光法研究當量比 0.9 - 1.5 的層流預混火焰，發現反應區的  $\text{C}_2^*$  在三種自由基中厚度最薄，而  $\text{OH}^*$  雖有較多突出的分布，但其厚度仍較另二者為厚，透過  $\text{OH}^*/\text{CH}^*$ 、 $\text{C}_2^*/\text{CH}^*$ 、 $\text{C}_2^*/\text{OH}^*$  與當量比的關係可以定義局部火焰的當量比分佈；而後以化學螢光法量測二維的層流預混火焰其  $\text{OH}^*$ 、 $\text{CH}^*$  以及  $\text{C}_2^*$  在迴流區強度的空間分布，並輔以數值方法驗證在貧油燃燒時其形狀、峰值發生處、反應區厚度與實驗吻合，歸納出  $\text{OH}^*/\text{CH}^*$  強度比值與當量比的關係可較精準測定火焰中的定當量面位置。Jeong *et al.* (2006) 利用化學螢光法量測本生燈燃燒器其部分預混甲烷火焰中的  $\text{OH}^*$ 、 $\text{CH}^*$  和  $\text{C}_2^*$ ，在改變當量比從 0.79 到 9.52 的情況下空間分布及峰值大小與火焰型態的關係。而化學螢光強度分佈除了受當量比的影響，也會受流場速度大小、壓力變化及不同燃氣組成混合燃氣而改變。Azzoni *et al.* (1999) 研究發現三重火焰 (triple flame) 其  $\text{C}_2^*$  的強度分佈受到當量比與流速變化影響，當流速增快造成強度分佈變弱，顯示燃氣在火焰反應區

滯留時間縮短，進而使火焰反應受制。Higgins *et al.* (2001)歸納出壓力增大時，化學螢光強度峰值降低的變化特性。在氫氣與天然氣混合的燃氣中，隨著氫氣比例下降則會讓化學螢光的強度隨之降低(Ballester and Garcia-Armingol, 2010)。

由於各自由基的峰值分佈具有隨當量比改變的特性，因此適合用來定位燃燒流場中不同火焰類型所存在的位置。Kiefer *et al.* (2008)利用 PLIF 同步量測 CH\*及 OH\*在部分預混火焰中的局部結構及火焰表面密度，透過三種不同速度的中央空氣噴流，探討在燃燒流場中紊流強度對 CH\*及 OH\*的分布影響，發現在近燃燒器出口區會形成兩層反應區結構，其一是內層較為富油的預混火焰，主要由 CH\*所組成；而外層則由氧化劑與內層火焰燃燒後的中介物質等形成較為貧油的擴散火焰，主要由 OH\*所組成。Nogenmyr *et al.* (2010)利用 CH\*及 OH\*的強度峰值分布觀察雙重火焰結構(double flame structure)中預混火焰及擴散火焰的相對應位置，再輔以數值模擬探討火焰不穩定性。

### 2-3 燃燒不穩定性

不同燃料與氧化劑其混合型態及比例與流場條件皆會形成不同的火焰型態與流場特徵，因此在不同實驗操作條件下，實驗者可歸納出不同的火焰燃燒模式，透過合理分類有助於描述和了解實驗現象。而火焰燃燒模式受流場結構影響甚鉅，而流場結構又由燃燒器之幾何結構所主導，從前人研究中，火焰流場可由不同幾何參數之設計，分類為對衝型(counterflow)、共流型(coflow)、衝擊型(impinging)及其他型式，產生不同特性之火焰結構與流場特性。藉由觀察，研究者可以將火焰型態與燃燒流場加以分類，並由其特徵歸納出變化的規則，將有助於了解火焰的燃燒模式。而在燃燒模式的基礎之上，後人可進一步探討局部火焰其不同混合比例之燃氣燃燒反應特性，以及受到流場影響時熱量與質量的傳播機制，最終結合火焰拉伸效應(stretch effect)，釐清應變率和火焰曲率對紊流火焰局部特性的影響。



### 2-3-1 熱量與質量擴散效應

在火焰的燃燒反應過程中，熱量與質量擴散的機制，也就是所謂的熱擴散不穩定性(diffusion-thermal instability)一直是研究者想探索的問題，然而燃燒反應的變化過程極為快速，因此其中的擴散機制必定受到化學反應與流場反應兩尺度間交互作用影響。而擴散能力與反應物本身的物理化學特性有關，不同混合比例之燃氣所具有的特性差異極大，相同種類的燃氣在不同的當量比時也會有完全相反的特性存在。為了將此特性作有系統的比較，研究者定義出熱量與質量擴散效應這樣的分類方式，科學上稱為路易斯數(Lewis number,  $Le$ )。路易斯數的定義為熱擴散係數( $\alpha$ )與質傳係數( $D$ )的比值，即：

$$Le = \frac{\alpha}{D}$$

當  $Le > 1$  時代表熱擴散係數的影響主導反應區特性，此時火焰較為穩定；當  $Le < 1$  時則代表質傳係數的影響主導，此時火焰較易受影響，而呈現不穩定的狀態。而對不同燃氣而言，甲烷在富油和丙烷在貧油時都屬  $Le > 1$  的特性，因此火焰特性相對穩定(stable)，反之當甲烷為貧油和丙烷為富油時因為  $Le < 1$ ，此時火焰特性則較為活潑，屬於不穩定狀態(unstable)。Lee *et al.* (1993)研究丙烷預混火焰在不同路易斯數下的紊流燃燒特性，發現對於火焰皺摺(wrinkled flame)的邊緣長度而言， $Le < 1$  會較  $Le > 1$  的火焰增大將近 30%，證明不同熱擴散效應會讓火焰具有對流場產生不同反應變化的程度。而當火焰處於不穩定狀態時通常具有特殊結構，例如火焰頂端表面有特殊波浪狀、局部火焰會出現尖端開口(tip-opening)，以及火焰表面破裂皺摺，並受不同燃燒流場結構影響(Bouvet *et al.*, 2011; Ratna Kishore *et al.*, 2011; Shopoff *et al.*, 2011)。

在常見燃料如甲、丙烷等燃氣中加入氫氣等合成燃氣的成分易使  $Le < 1$ ，火焰不穩定性使火焰結構的皺褶更為明顯，紊流火焰傳播速度更較甲烷快近兩倍。Law and Kwon (2004)使用氫氣為主，碳氫燃料為輔的方式進行研究，發現氫氣在參雜碳

氫燃料的情況下不穩定性的狀況明顯下降，顯示不同燃料間除了本身的特性之外，其間的交互作用特性也存有雙向影響。在球狀傳播火焰中，氫氣的火焰表面具有極為明顯的不規則皺褶特性，而在本生燈火焰中(Bouvet *et al.*, 2011)也會出現尖端開口，此類特殊火焰的成因均來自於燃氣中不同成分的熱擴散不穩定性。多孔狀結構(cellular)也是火焰不穩定性的一項特徵，或許可說明火焰不穩定性對燃燒反應不完全是負面影響的證據，研究發現在對衝火焰中接近熄滅時，此結構具有展延熄滅極限的效應(Shopoff *et al.*, 2011)，另外火焰在接近吹熄時，具有不同穩定性之火焰其特徵也明顯不同(Dawson *et al.*, 2011)，然而這些不穩定性現象其成因非常複雜(Law, 2006)，目前仍未有完整的定論。

### 2-3-2 燃燒模態與振盪特性

不同燃料與氧化劑其混合型態及比例與流場條件皆會形成不同的火焰型態與流場特徵，因此在不同實驗操作條件下可歸納出火焰的燃燒模式，透過合理分類有助於描述和了解實驗現象。而火焰燃燒模式受流場結構影響甚鉅，而流場結構又由燃燒器之幾何結構所主導。利用鈍體結構強化駐焰效果來自於燃氣流體行進至出口時，因為受到鈍體結構影響而在鈍體後方產生分離而和流動方向逆轉的現象，因此使鈍體後方迴流區促進熱和質量的混合之外也具有蓄熱的效果。具迴流區的燃燒器設計被廣泛的應用在燃燒前充分混合燃料和空氣以及提供一個較長的留滯時間(residence time)達到較佳的燃燒穩焰效果。鈍體的幾何結構提供上述有利火焰反應的特性，使火焰能在與周遭流體交互作用的同時安駐(anchor)在燃燒器出口，在燃氣流向鈍體後方時，流場在側翼開始產生不穩定性(Kevin-Helmholz instability)特徵，愈往下游擾動愈劇烈，同時也將周圍氣流向內捲入。對擴散火焰而言，此流體交換過程有助於燃料和空氣的混合；而對預混火焰而言，則是燃氣和熱產物的混合。雖然鈍體結構對火焰燃燒特性的影響已被廣泛的研究，但仍存在許多挑戰和問題，像是火焰和流場間的交互作用、流場中不同尺度結構的渦漩對火焰結構的影響

和流場和火焰自身的不穩定性對燃燒反應(熱釋放率、燃燒後產物)等等。Wright *et al.* (1959)研究置於槽中的擋版其長寬比與流速對迴流區長度之影響，歸納出紊流時迴流區較短，反之層流時迴流區則較長，原因是位於迴流區後的混合區受紊流影響而加快擴散使迴流區受壓縮而變小，反之層流時混合不明顯而使迴流區增大。

圓形鈍體燃燒器已被廣泛應用在研究上，透過歸納火焰區特性，研究者可以此為基礎進一步釐清特定參數與火焰現象之間的關聯性。Maris and Bilger (1985)依中心噴流與環型噴流速度的關係將火焰分為中心噴流主宰、兩者流速相同及迴流區主宰三種。而 Li and Tankin (1987)在圓盤鈍體中心為燃料噴流的實驗中將火焰區分為接觸火焰(attached flame)、分離火焰(detached flame)及再接觸火焰(reattached flame)三種。Yang *et al.* (2002)則進一步調整燃料與空氣速度比值以改變流場結構，產生迴流、中心噴流、似噴流、部分吹熄及跳脫吹熄等五種不同型態。

在衝擊型燃燒器中，孫泊寧(1997)以高負荷燃燒器為載具，依據火焰的外型與顏色將火焰隨空燃比漸升分類為黃色火焰、焰尖黃、藍焰、紫焰、飄焰及吹熄。楊鏡堂與高智勇(1999)於中華民國專利中提出，對流衝擊型燃燒器利用出口後水平動量相互抵消造成局部低速區的原理使火焰面停滯，由於此處紊流強度增強有助於燃氣混合及預熱，能有效降低火焰高度並拓展火焰操作範圍。蔣淑卿(2002)針對矩形燃燒器與圓形燃燒器進行比較，發現對稱方式不同使圓形燃燒器之平衡性優於矩形燃燒器，有較佳的流場穩定度。藍斌豪(2004)以數值分析二向與三向斜衝型燃燒器，發現二向衝擊燃燒器中，凹槽開口內流場包含流場衝擊區與低速回流區，造成高溫產物因低速而堆積於此處加強預熱效果；三向燃燒器則因為加入第三向開口影響凹槽處之低速迴流區，增加整體向上之速度分布並使橫向速度分布較為平整。綜合上述研究成果，透過不同幾何形狀設計，使其所產生的尾流區渦漩結構具有穩定火焰的特性，且可增加流體在此區滯留的時間，幫助燃氣混合並使預熱的效果更加明顯，有利提升燃燒器性能與火焰穩定性。

另一方面，在化學反應的過程中，由碰撞理論可知溫度越高表示其分子平均動

能愈大，愈能加速化學反應進行。因此若是反應物之未燃氣溫度愈高，將有助於燃燒反應的進行，使反應速率提升保持熱釋放率並維持高溫的狀態，而利用反應所產生之熱能又可再預熱未燃氣，此循環作用將可提高燃燒反應速率及火焰穩定性。因此火焰傳播速度會隨未燃氣溫度提高而增加，同時火焰面溫度升高也會加速化學反應進行而使火焰傳播速度變快。此外未燃氣的混合情況也會影響反應速率的快慢，由於化學反應的進行與反應物分子間相互接觸比例有關，因此未燃氣間的混合及燃後氣體與外界二次空氣再次混合等，都會影響燃燒反應的進行。Weinberg *et al.* (1986)提出利用燃燒過後的高溫產物來加熱未燃氣之熱再循環概念，證明預熱效果確實能提升燃燒效能。黃木和藤生等人(1995)利用預混燃氣流道兩旁側槽的慢速燃氣形成加熱燃燒區根部的火焰，並發現預熱效果確實提高高空燃比時的火焰穩定性。Disimile *et al.* (1994)利用固定的夾角裝置使兩燃氣噴流相互衝擊，產生立體的混合區，提升此區的燃氣混合效果。大塚哲二(1995)利用中央部分濃混合室狹窄而淡混合室寬廣控制混合氣流動，使混合氣體能較均勻分布。Lin *et al.* (2009)指出透過改變兩平行貧油預混甲烷火焰間的距離探討其交互作用，將雙股火焰愈接近時轉變的過程分類為導引流區、迴流區以及反轉區。其中，在反轉區時對衝火焰會使燃氣在低速迴流區獲得較長的混合時間並拉長進行燃燒反應的時間，同時雙股火焰中間區域因預熱的效果使溫度升高而增加反應速率，進而影響火焰的穩定性。而對於實際的燃燒應用來說，更為複雜的多火焰和流場之間交互作用才是真正主導反應的關鍵，雖然火焰交互作用能促使燃燒反應在混合及預熱條件更好的情況下進行，但其產生的污染物如 NO<sub>x</sub> 會受溫度分佈改變以及因為燃氣當量比不同而產生振盪頻率差異(Sahu *et al.*, 2009)，因此探討細部火焰結構在多股火焰下的火焰傳播速度、拉伸效應和穩焰機制等，將有助於釐清多股火焰間交互作用的反應機制(Yamamoto *et al.*, 2011; Yokomori and Mizomoto, 2002)。

在燃燒反應過程中的高溫會產生污染物 NO<sub>x</sub>，其生成量視反應在高溫環境中的停滯時間，因此減少污染物生成的方法便是降低反應溫度，像是低熱質燃料中含

有些許水氣或是以低當量比的燃氣成分進行反應。然而不論是含水氣之燃料(生質合成氣)或是低當量比(貧油燃燒)，雖然能降低反應溫度，但相對也增加火焰燃燒反應過程中的不穩定性。貧油燃燒雖然有助於降低 NO<sub>x</sub> 的生成並且較能完全反應，但也存在許多與熱釋放率降低相關的問題必須克服，例如在接近吹熄時火焰高度非定常的狀態、熄滅-再點燃現象、具時變特性的熱聲振盪(thermal-acoustic)效應以及燃燒器本身所具有的自然頻率耦合特性產生的燃燒振盪。在燃燒振盪的過程中，熄滅-再點燃現象會反覆出現，成為低頻振盪的來源。此外振盪在接近貧油可燃極限時的特性也會和在定當量點附近不同(Bradley *et al.*, 1998; Emiris and Whitelaw, 2003)，顯示當量比變化也會影響燃燒振盪的特性，這樣的特性不利於燃燒器在貧油燃燒時拓展操作範圍。

在接近吹熄時火焰呈現高度非定常的狀態，肉眼可見火焰所具有的特徵如劇烈的搖晃、火焰邊緣皺摺、迴流區中火焰位置改變頻率增加和火焰亮度減弱且變化頻率增加等等，顯示此時火焰反應和熱釋放率與流場結構之間具有明顯非線性化的特徵。許多研究以聲音振盪的方式探討接近吹熄時火焰的變化，如聲音振盪頻率和振幅對不同駐焰器結構的影響(Nair and Lieuwen, 2005; Chaparro and Cetegen, 2006; Chaudhuri and Cetegen, 2009)等等。而在沒有外加頻率振盪時，接近吹熄時火焰具有不同階段的特徵變化，從形成火焰局部反應區熄滅產生的不連續處到潰散的尾流區和迴流區反應流場結構，說明接近吹熄時的火焰具有高度非定常特性且受到鈍體結構、火焰受拉伸而破碎進而產生熄滅和再點燃現象等因素影響。而在預混燃氣中自發性點燃的現象，不均勻的熱釋放率將造成壓力振盪損害燃燒器零件，或是使引擎產生點火失敗(misfire)的狀況。上述問題的困難之處在於火焰的特性受燃氣組成不同所影響，因此在各極限燃燒狀況下隨著路易斯數或紊流強度不同，火焰傳播速度變化將變得難以預測。



### 2-3-3 層狀化燃燒

為了改進傳統上在燃燒不穩定上的控制方法，同時作為應用至貧油或甚至是低熱質燃料等未來的替代能源燃燒用途上，便有研究者開始採用層狀流(stratified flow)的概念。起初，層狀流概念是在輸送燃氣管中加入另一同軸輸送通道，因此這兩個輸送通道將可個別調整空氣和燃料的比例，使最終出口處產生差異性質的層狀流場。層狀流場可影響燃燒反應的振盪行為，並且具有在全域當量比較低的狀況下依然能穩定操作的特性。研究結果發現在中心是富油，周圍是貧油的狀況下火焰能穩定存在，反之則否，顯示其中存有不同反應特性和穩焰機制。

火焰傳播過程中會經過不同成分、不同混合程度的混合物，此種層狀化燃燒的概念廣泛應用在實務系統中。許多應用在引擎和發電站的燃燒系統可概括的分成兩類：其一是反應面前緣傳播通過均質(homogeneous)的混合物，也就是預混火焰的模式；其二是火焰面前緣通過的是分離兩側不同成分的非預混狀態，也就是擴散火焰。對引擎而言，均質分布的貧油燃燒有助於達到高效的能源轉換率以及低污染排放量的目的，但也因為貧油燃燒時有可能會使當量比過低而超出可燃極限進而造成點火失敗，再者也有可能因為局部的當量比梯度差異造成的非均值分布而產生不穩定振盪的現象，上述特性均會影響整體燃燒反應進行的表現和效率。雖然透過設計燃燒器幾何形狀及其燃氣供應方式，層狀化燃燒可拓展全域的貧油極限和火焰穩定性，但其耦合的流場結構(不論是層流或紊流燃燒)和燃氣分布(當量比梯度)使局部火焰結構受影響而改變反應分布、特徵尺度以及熱釋放率。關於流場尺度和當量比變化個別對火焰的影響的研究不在少數，但由於在層狀化燃燒中此兩者互相耦合，其產生的影響難以由任一者評斷，因此必須探討層狀化燃燒反應中的耦合現象及其機制作為未來設計性能更好的燃燒器的基礎。

關於層狀化燃燒的研究，不論是實驗或數值模擬大致上可由層流和紊流燃燒這兩大類來區分。Galizzi and Escudié (2006)研究在層狀化流場中的層流 V 型火焰，發現局部的火焰傳播速度會受鄰近當量點的燃氣影響而加速。而在紊流燃燒場

中，Sweeney *et al.* (2011)以實驗探討低紊流強度時層狀化燃燒流場的特性，發現表面密度函數( $|\nabla c|$ )和消散率均增加，顯示層狀化燃燒流場中的預混火焰其火焰厚度會比相對的層流火焰明顯增加(37%)。Anselmo-Filho *et al.* (2009)則指出層狀化燃燒會影響紊流火焰傳播速度和火焰結構，造成火焰曲率的機率密度函數分布變廣以及火焰表面積密度和平均反應速率增加，並認為原因是層狀燃燒中貧油和富油燃氣分布介面上的傳播速度差異所引起。由於當量比梯度會使各處火焰傳播速度不同而使火焰產生皺摺與火焰面密度改變，進而影響此時的紊流火焰傳播速度。當量比梯度大的紊流火焰較能承受來自紊流場的小漩渦對火焰的拉伸效應，顯示它們更能藉由改變火焰面密度和火焰傳播速度等特性來適應紊流擾動的影響，因此改變和來流速度達成平衡的極限值(Bonaldo and Kelman, 2009)。除當量比梯度變化的影響外，層狀化燃燒流場的紊流預混火焰也受流場的大尺度結構和剪流層所影響(Seffrin *et al.*, 2010; Böhm *et al.*, 2011)。

在實驗和模擬探討貧油層狀化燃燒的研究成果中，可歸納出兩個特徵：第一個特徵是局部火焰傳播速度的改變，因為在貧油和富油交界處會形成近當量比的情況，因此火焰的傳播速度會加快，產生火焰由富油區加速往貧油區傳播的情況，進而點燃原本低於貧油可燃極限的燃氣；第二個特徵則是火焰厚度和火焰面密度改變，進而影響熱釋放率。然而層狀化燃燒流場中複雜的結構和動態變化仍然存在許多未解的問題，在層狀化燃燒場中，從局部定當量點傳播至貧油處的火焰傳播速度會加快，可能引起的原因像是化學反應熱釋放所產生的高溫或是局部熱-質量擴散不穩定性導致火焰結構變化和熱釋放率改變等，都需進一步探討。

## 文獻總結

綜合以上研究者所得之成果，可知影響燃燒反應的因素眾多，包括燃料選擇、燃燒器幾何參數設計和流場因子等，不僅影響火焰型態，更與燃氣混合、可操作範圍、熱釋放率及穩焰效果等息息相關。在不同流場與火焰結合的狀況下火焰間交互

作用機制更為複雜難解。為提高使用現今燃燒系統之火焰燃燒強度、利用較乾淨之貧油燃燒以及低熱質燃料之生質能源替代石化燃料的比例，現行燃燒系統勢必因為燃料成分及反應特性改變而面臨挑戰。然而這些新穎的燃燒科技同時伴隨燃燒不穩定性，加入混合燃料後燃燒特性大幅改變以及劇烈的動態反應變化趨使研究者必須更深入探討化學反應、流場和火焰結構變化。燃燒量測技術的發展使以往許多無法觀察的暫態特性變為可行，特別是在具有熱擴散不穩定性、火焰燃燒振盪特性和可燃極限狀態時，解析更細部的燃燒反應時序及空間特徵是解開許多特殊現象成因的關鍵。作為改善燃燒穩定性的方法之一，層流化燃燒的概念透過個別調整空氣和燃料的比例，使最終出口處產生差異性質的層狀化流場，可幫助提升穩焰效果，但其複雜的結構和動態變化也需要進一步探討。



### 第三章 研究方法

本文以層狀化燃燒器作為載具，具有三個獨立燃氣出口和鈍體結構，使其主要流場結構由多組渦對所組成，所形成之迴流低速區能增強此區燃氣預熱及質量傳輸效果，加強流場之時空動態變化特性，並提升穩焰效果及拓展操作範圍。本文之架構如圖 3-1 所示。

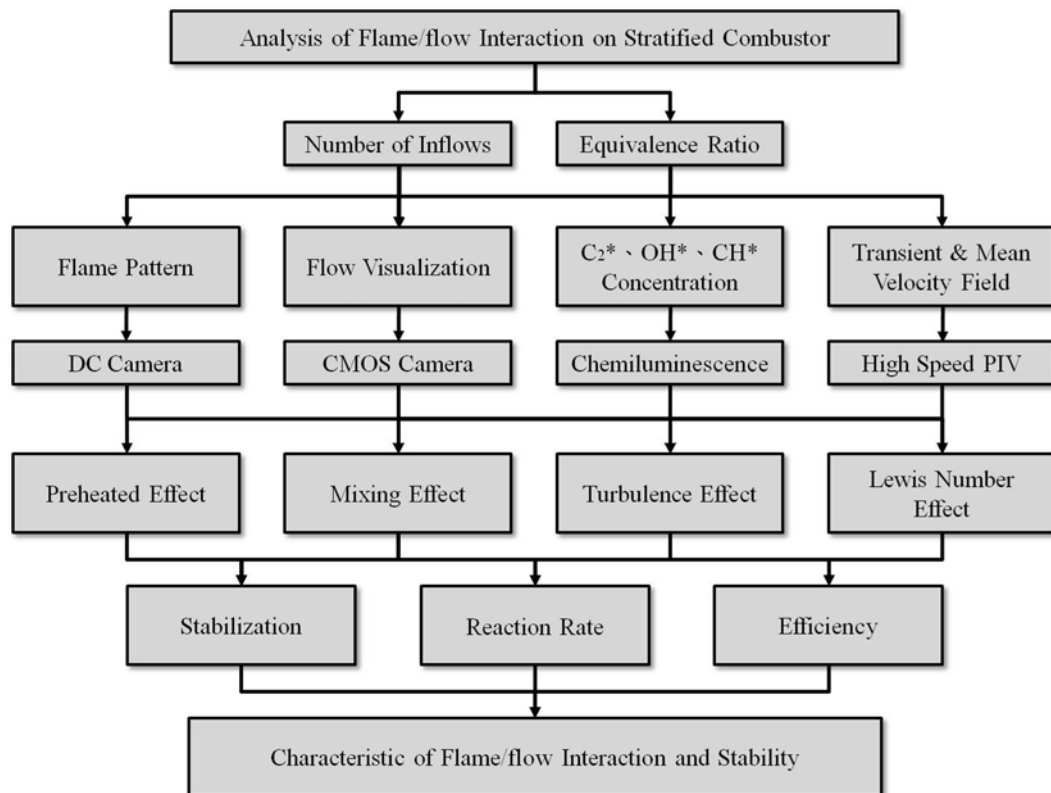


圖 3-1 研究流程圖

#### 3-1 火焰型態

火焰燃燒反應結合流場變化與化學反應使其機制複雜難解，其中流場受到不同空間及時間尺度影響並與其火焰自身之化學變化產生交互作用，使火焰模式多變而加深分析上的困難度。由於不同火焰型態可透過歸納分析其特徵，可直觀的瞭解最初步燃燒流場之異同處，因此觀察火焰型態分佈是為研究燃燒反應之基礎。



### 3-1-1 燃燒模式

燃燒器作為燃燒反應之載具，依據所使用之燃料種類及燃料與氧化劑混合之情況不同皆會產生不同型態的火焰。如文獻回顧中所提及，燃燒反應依燃料與氧化劑混合之狀況可分為預混火焰與擴散火焰，其外觀及特性會有極大的不同。預混火焰是指在燃燒反應前已將燃料與氧化劑作充分混合，而擴散火焰則是分別通入燃料與氧化劑，使燃燒反應過程發生在其接觸面上。

由於燃燒反應起因於反應物分子相互碰撞，反應物分子碰撞次數與溫度和均勻性相關，當有效碰撞頻率越高時代表其反應速率愈快，因此反應過程中速率快慢可說是取決於其混合狀態及化學反應特性。在固定溫度及分子種類的情況下，只能提高分子間分佈的均勻性來提高反應速率，而預混燃氣即具備這樣的特性，未燃氣在燃燒反應前已先行混合，因此相較於擴散燃燒具有較高的反應效率。然而由於未燃氣是已混合之狀態，較快速的燃燒反應可能會衍生出安全上的問題，因此過去在民生工業中所採取的方式多以擴散燃燒為主，但這樣的方式存在效率低落的問題，勢必要面臨修正。由於預混火焰具有燃燒效率高的優點，了解其特性有助於改善燃燒器的效率問題，此外由於未燃氣已預先混合，所呈現的火焰動態特性較多變化，為學界探討燃燒反應與流場間交互作用現象的重點，特別是對貧油燃燒及低熱質燃料燃燒中所存在的燃燒不穩定性和時空動態特性，因此本研究選用預混火焰作為探討之對象。

### 3-1-2 燃料特性

本研究所使用之燃料為甲烷( $\text{CH}_4$ )、丙烷( $\text{C}_3\text{H}_8$ )、氫氣( $\text{H}_2$ )及一氧化碳( $\text{CO}$ )，甲烷具有結構簡單，化學反應機構也最被廣為研究的特性，且為常用燃料天然氣之主要成份。丙烷常溫常壓下為氣態，是市售液化石油氣的主要成分，和天然氣不同處在於丙烷分子量 44 較空氣重約 1.5 倍，與其他烷烴類相同，燃燒後生成物為二氧化碳與水。氫氣與一氧化碳為生質合成氣的主要成分之一，氫氣分子量為 2，具有



良好的燃燒性能，也廣泛添加於燃料中，但其保存和使用須格外小心；而一氧化碳分子量為 28，燃燒後生成二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

本研究使用之燃料為填裝在加壓鋼瓶中 99.9%高純度甲烷和丙烷，氫氣和一氧化碳純度則為 99.99%；而氧化劑的部分則為填裝於氣瓶中之乾燥空氣，其內成分為 21%的氧氣(O<sub>2</sub>)與 79%的氮氣(N<sub>2</sub>)。

### 3-1-3 當量比

預混燃氣中，燃料與空氣的配比為燃燒反應中的關鍵參數，因此應先對其做出詳細定義。在燃燒反應進行時，若其化學反應處於完全平衡時，其狀態稱為化學當量比(stoichiometric ratio)，代表此時燃燒進行最完全反應，反應速率最快，其燃料與空氣之質量比例可由 $(Q_F/Q_A)_{\text{stoi}}$ 表示，其中 $Q_F$ 代表燃料， $Q_A$ 代表空氣。若通入之未燃氣其燃料或空氣任一方量值有所偏離，此時燃燒反應就會出現不同的現象。因此，以此概念做為基礎，定義定當量時 $(Q_F/Q_A)_{\text{stoi}}$ 與實際通入燃氣之 $Q_F/Q_A$ 的比值即為當量比(equivalence ratio)，當量比( $\phi$ )表示如下：

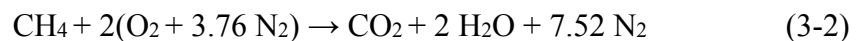
$$\phi = \frac{(Q_F/Q_A)}{(Q_F/Q_A)_{\text{stoi}}} \quad (3-1)$$

當 $\phi > 1$ 時，代表燃料多過定當量時所需。

當 $\phi = 1$ 時，為燃料與空氣之配比符合化學當量，是為最佳燃氣比例。

當 $\phi < 1$ 時，代表空氣多過定當量時所需。

甲烷與空氣在化學當量比下的平衡反應式為：



由此可知燃料與空氣的理論比值：

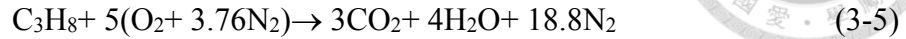
$$(Q_F/Q_A)_{\text{stoi}} = \frac{1}{2(1+3.76)} = \frac{1}{9.52} \quad (3-3)$$

將上式帶回當量比之定義可得：



$$\phi = 9.52(Q_F / Q_A) \quad (3-4)$$

丙烷與空氣在化學當量比下的平衡反應式為：



由此可知燃料與空氣的理論比值為：

$$(Q_F / Q_A)_{\text{stoi}} = \frac{1}{5(1+3.76)} = \frac{1}{23.8} \quad (3-6)$$

將上式帶回當量比之定義可得：

$$\phi = 23.8(Q_F / Q_A) \quad (3-7)$$

由於層狀化燃燒器具有三股獨立燃氣出口，本文為簡化層狀化燃燒反應過程中的參數複雜性，將實驗條件設定為單、雙和三股進流數以及三股進氣口皆為相同當量比及流速之情況。

### 3-1-4 實驗設備配置

燃料與空氣由加壓鋼瓶輸出後即分為三條管路以分別輸往控制內、中、外進氣口之質量流量計，經流量計後輸往層狀燃燒器之燃料與空氣將會分別匯流形成三管預混未燃氣，注入燃燒器之內、中、外進氣口，其中管路需維持一定長度以確保燃氣能充分預混。而透過流量計改變當量比及出口速度產生不同的火焰型態，可藉由數位相機擷取並進行初步分析。另外，在使用數位相機進行圖像擷取時若通入粒子並拉長曝光時間，即可獲取粒子受流場影響隨流而動之軌跡，經後製處理後之流場可視化示意圖將有助於初步的燃燒流場特性探討。

### 3-1-5 燃燒器構造

本文所使用之層狀化燃燒器如圖 3-2 所示，使用之材料為耐高溫不鏽鋼#310，外觀為圓柱型，由三個同心圓環所組成，下方為三個獨立進氣口，預混燃氣將由此注入並在燃燒器出口進行燃燒反應(羅允成, 2007; 阮文棋, 2009; 陳靖瑋, 2011)。其



特徵為中央處及內、中及外出口處的鈍體結構，其幾何尺寸分別為：內環內半徑  $R$  為 8 mm；各環出口寬度  $d$  為 3 mm；環間距  $g$  為 5 mm，其出口面積由內至外分別為 1.79 cm<sup>2</sup>、3.3 cm<sup>2</sup> 和 4.8 cm<sup>2</sup>。

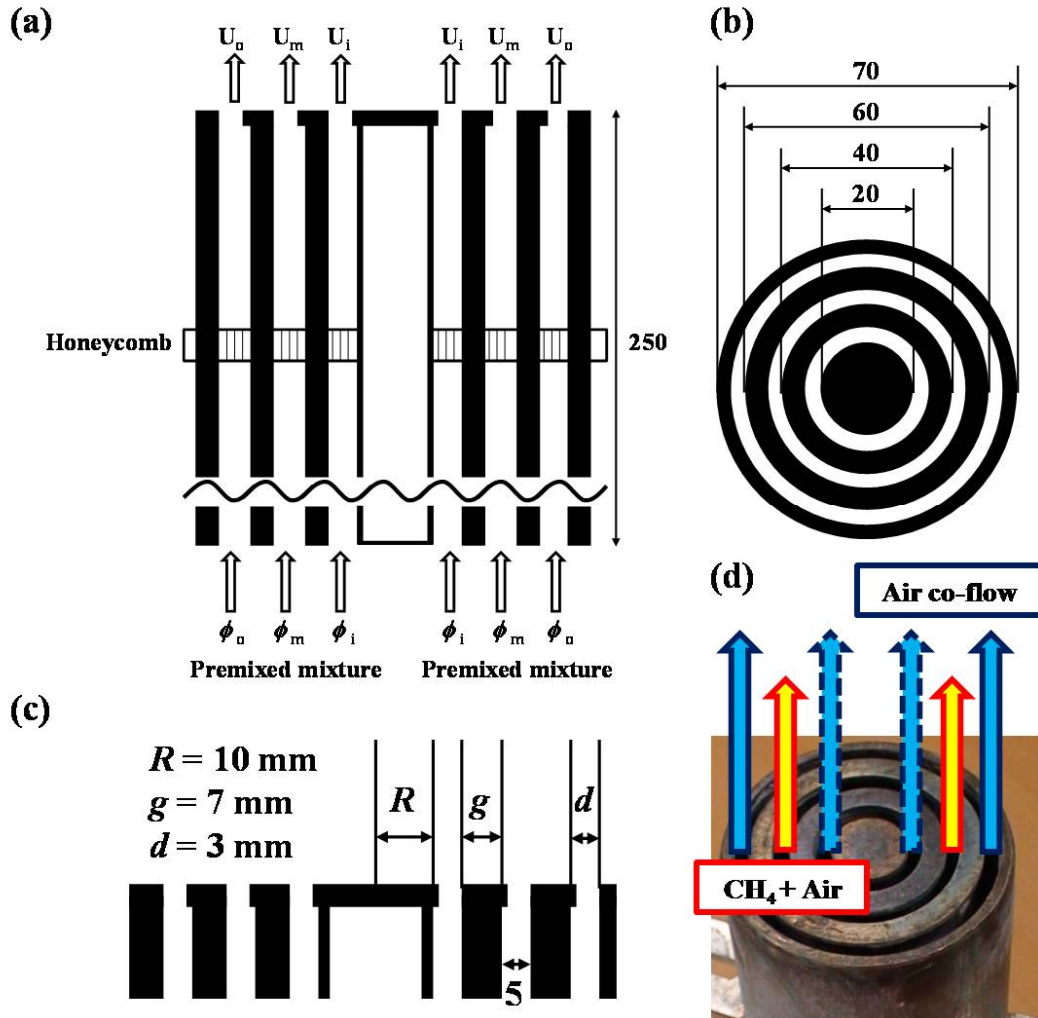


圖 3-2 層狀燃燒器幾何構造示意圖。(a)剖面圖，(b)上視圖，(c)出口結構側視圖，(d)層狀化燃燒器實體圖

### 3-1-6 流量控制系統

火焰型態受當量比及出口速度影響，而兩者間變動的關係可由流量計調控之燃氣流量決定。為確保實驗的準確性，注入之燃氣流量由 AALBORG 之電子式氣體質量流量計及流量控制器所調控，如圖 3-3a 及圖 3-3b 所示。其中，燃料流量計型號為 GFC37，可操作範圍為 0-10 LPM (l/m, liter per minute)，空氣流量計型號

為 GFC47，操作範圍 0-100 LPM，準確度為滿刻度之 $\pm 1.5\%$ 。流量計上之單位為流率，因此由定義可知設定之出口流速為  $U_o$ ，則需調控之燃料流率和空氣流量與出口截面積( $A$ )間存在：

$$U_o = \frac{Q_F + Q_A}{A} \quad (3-8)$$

的關係，其中燃料流率與空氣流率之單位皆為 l/m，出口截面積則為平方公分。



圖 3-3 (a)質量流量計，(b)流量控制器

### 3-1-7 火焰影像擷取系統

火焰型態不只在不同當量比及出口速度時其形狀與亮度差異極大，在同一火焰影像中，不同區域之結構及光影分佈皆有所不同，因此需要透過具有優異的色彩解析度及感光度之影像記錄系統才能真實呈現火焰特色。本研究所使用之影像擷取系統為實驗使用 Nikon D90 數位式相機作為火焰形態擷取系統，其具有  $23.6 \times$



15.8 mm CMOS 感光元件，最大空間解析度為 4288 × 2848 pixels，可辨別細部火焰結構，表 3-1 為相機詳細規格，能擷取更真實之火焰色彩，有助於擷取細部火焰影像及分析火焰結構。

表 3-1 火焰型態拍攝使用相機規格

Nikon D90 數位相機	
感應器	
尺寸/ 感應器畫素 / 有效畫素	23.6 × 15.8mm / 1290 萬畫素 / 1230 萬畫素
感光元件種類	CMOS
檔案內容	
解析度	4288 × 2848、3216 × 2136、2144 × 1424 pixels
檔案格式 靜態/動畫	JPEG (Exif 2.21)/AVI
動畫解析度(最高)	1280 × 720、640 × 424、320 × 216 Pixels
動態紀錄時間	不限只受記憶體限制 動態紀錄說明
儲存媒體/記憶體	SD、SDHC/MicroDevice 微形硬碟
體積重量	
重量	620 g (空機)
體積	132 × 103 × 77mm
鏡 頭	
鏡頭構成	9 組 12 片德國蔡司 VARIO-SONNAR T*鏡頭 可外接鏡頭(需接環)
焦距長度	28 mm ~ 200 mm(相當於在 35mm 相機)
光圈	F2.0-F2.8
變焦	14 x ( 7 x 光學 / 2 x 數位 )
對焦方式	( Muilt ) 多點
最近對焦距離(近拍)	2 cm
快門範圍	1 sec 到 1/3200 sec
重要拍攝模式	P / A / S / M
自動包圍曝光功能	± 2EV in 1/3EV
閃光燈	AUTO、 OFF、 ON、防紅眼、慢速同步閃光 支援外接閃燈(熱靴)
檢視裝置	
觀景窗	定眼平五稜鏡；內置屈光度調節 (-2.0 to +1.0m (-1)) 對焦屏：B 型光亮磨砂對焦屏 Mark II 連重疊式對焦區及按需而現顯示格線，光學觀景器的準確度為 96%

LCD 液晶螢幕	3.0 inch 低溫 TFT, 920,000 pixels 顯示屏連光度調控螢光幕
視訊輸出(TV OUT)	NTSC/PAN

### 3-1-8 火焰溫度擷取設備

本研究中使用 OMEGA 公司的 R 型熱電偶(焊點直徑 125  $\mu\text{m}$ )，搭配詠欣儀器公司的 YS-947D 數位式溫度計，如圖 3-4 所示，溫度量測範圍在 0 - 1700 $^{\circ}\text{C}$ ，解析度 1 $^{\circ}\text{C}$ ，誤差值為 $\pm(0.1\% \text{ reading} + 2^{\circ}\text{C})$ 。由於輻射修正受氧化鐵附著於熱電偶上影響很大(Kaskan, 1957)，因此每次實驗後皆處理附著的  $\text{Fe}(\text{CO})\text{s}$ 。



圖 3-4 R 型熱電偶及數位式溫度計

## 3-2 PIV 流場

### 3-2-1 PIV 原理簡介

在生活中，我們常能透過感覺得之周遭流場的變動，但是卻無法將其作更詳細的說明。而粒子影像測速儀的基本觀念就來自於透過將很小的粒子均勻散佈在流場中，讓粒子能隨流而動，並追蹤粒子的動向來獲取流場資訊。要使此流場可視化的技術順利運作包含許多要件，如適當的光源和追蹤粒子、光學鏡組、影像擷取系統及分析軟體，才能獲取全域的暫態流場影像，以進一步解析複雜的流場結構。而 PIV 的幾項特點整理如下：

1. 非侵入式之光學量測技術，避免干擾原始流場。



2. 所量得之流場資訊為追蹤粒子(tracing particle)速度，是為間接速度量測(indirect velocity measurement)。

3. 相較於傳統 LDV 所得之單點平均速度，PIV 量測所得為全域暫態速度場分佈。

4. 由於追蹤粒子大小會影響隨流性及反射光強度，一般而言速度愈快之流場必須選擇粒徑愈小之追蹤粒子，以提高速度量測之準確性。

5. 影像曝光時間需擷取足夠反射光，但時間過長則會使粒子模糊，因此在光源選擇上通常以具有高功率及固定波段之雷射為首選。

6. 影像曝光間隔需足夠反應粒子移動，但勿使粒子移出觀察區間，其粒子之移動距離為四分之一速度計算視窗(interrogation window)為最佳。

當粒子在流場中的分佈和所選之特性符合上述幾項特點，則量測粒子在一段時間內之位移即可知道粒子之速度，若平均分散在觀測區域中，則所得即為全域流場速度。暫態速度的定義如下：

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad (3-9)$$

在實際應用上因為無法取得無限小之時間間隔，因此加以修正為

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3-10)$$

其中  $\Delta x$  表粒子之移動距離， $\Delta t$  表粒子移動之間隔時間。PIV 之量測原理簡單且直觀，但在實際量測上，要獲取精準之速度場分佈仰賴許多細節的調控，任何一個環節稍有偏差都會影響準確度，所以必須先對 PIV 之各部組成有所了解，以建立完整量測系統之概念，以下將對實驗設備逐一介紹。

### 3-2-2 PIV 實驗設備系統

實驗設備系統如圖 3-5 所示，實驗所需之光源由雷射所供應，通過反射鏡組成之光路後，經過透鏡將光源散成厚度約 1 mm 之光頁(light-sheet)，由上而下垂直打向燃燒器出口以確保觀測區所得之光亮度為均勻分布。而通過觀測區之追蹤粒



子其反射之雷射光則由裝置特殊波段濾鏡之高速攝影機擷取，獲取流場影像，經 PIV 軟體處理後即可得到 PIV 流場分佈。

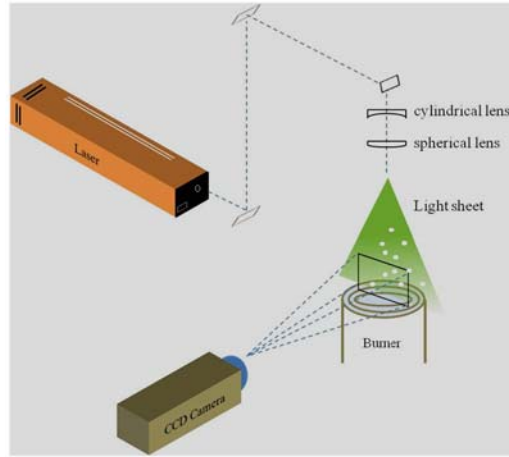


圖 3-5 PIV 實驗量測系統示意圖

### 3-2-2-1 追蹤粒子

PIV 量測技術建立在假設所得之粒子速度即為當點速度，因此粒子的選擇必須考慮是否能即時反應流場變化，並同時兼顧反射光的品質。為及時反應流場變化，粒子反應時間必須與流場反應時間相當，而影響的因素包含粒子材質、尺寸、流體性質與流速等，因此可知粒子之隨流性和粒子在流場中的反應時間相關，根據史托克拖曳定律(Stokes drag law)，圓形微粒在低雷諾數的加速流場中，因隨流性差異導致的速度差為：

$$U_s = U_p - U = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} a \quad (3-11)$$

其中  $U_p$  為粒子在流場中的隨流速度， $U$  為流場實際速度， $d_p$  為粒子直徑， $\mu$  為流體黏滯係數， $\rho_p$  為粒子密度， $\rho$  為流體密度， $a$  為流體加速度。而若粒子密度大於流體密度時，粒子隨時間推移的隨流性遵守指數定律：

$$U_p(t) = U \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \right] \quad (3-12)$$



其中  $\tau_s$  為粒子在流場中的留滯時間：

$$\tau_s = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu} \quad (3-13)$$

因此可以得到，粒子之直徑越小、粒子密度與流體密度差越小，或流體本身黏滯性越大，則粒子在流場中的反應時間將越小，也就越能真實呈現流場狀態。粒徑越小的粒子隨流性越佳，但相對其散射能力就會下降。此外還須考量在燃燒流場的情況下，粒子必須具備熔點高、不可燃且化學穩定性佳之特點。本實驗使用之氧化鋁粒子其外觀為白色粉末狀，密度為  $3.97 \text{ g/cm}^3$ ，熔點為  $2054 \text{ }^\circ\text{C}$ ，比多數燃料絕熱火焰溫度高，又兼具化學穩定性佳之特性，因此成為常用的燃燒流場示蹤粒子。以甲烷為例，在一大氣壓  $300 \text{ K}$  溫度環境下，甲烷的氣體黏滯係數為  $11.4 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，而乾燥空氣的黏滯係數則為  $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，因此若以黏滯係數較小的常溫常壓下的甲烷氣體估計示蹤粒子在其流場中的反應時間，根據式 3-13 其值大小為  $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}$ ，足以滿足本研究實驗條件。因此品質良好的示蹤粒子藉由在此均勻流場切面上之雷射光頁進行 PIV 流場速度量測，並以 Insight 3G (TSI) 進行 PIV 後處理計算 (Raffel *et al.*, 2007)，不準度約為  $\pm 3.5\%$ 。圖 3-6 為單股進流於中間出口形成火焰之 PIV 原始影像圖。

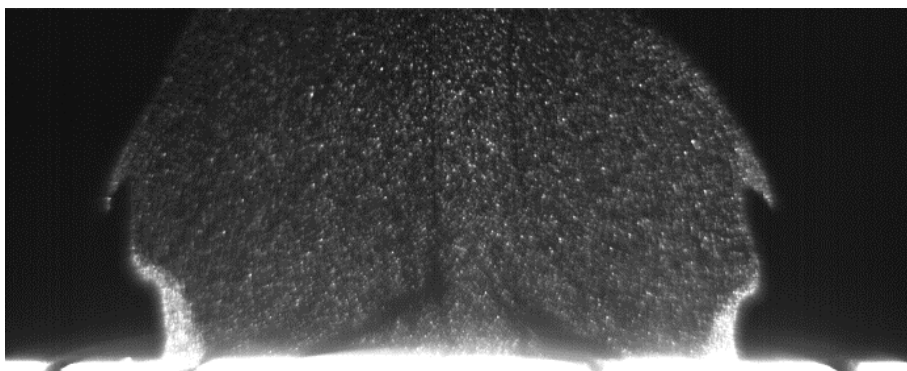


圖 3-6 單股進流於中間出口形成火焰之 PIV 原始影像圖

由於使用環境為燃燒流場，粒子必須具備不可燃性且耐高溫之特性。在多種條件限制之下，在此採用粒徑  $3 \mu\text{m}$  之氧化鋁 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 粒子，其外觀為白色粉末狀，其

高熔點之特性使其為常用的燃燒流場之追蹤粒子。氧化鋁粒子在空氣中易受潮，因此平時需置放於防潮箱中，而在實驗前則須經過烘烤以去除水氣，以防受潮粒子堆積在管路中影響實驗進行。

### 3-2-2-2 雷射系統

由於一般的光源強度不以供給追蹤粒子足夠的反射光，因此以具高能量集中性之雷射作為光源，而 PIV 常用之雷射有脈衝雷射(pulsed lasers)及連續波雷射(continuous wave laser, CW lasers)。本研究所採用之雷射系統為 6W COHERENT INNOVA 300 Series Argon Ion Laser 氬離子雷射，主要由電源供應器(power supply)、雷射頭(laser head)及控制面板(remote control panel)所組成，雷射本體與控制面板如圖 3-7a 和 b 所示，由於使用過程中會散發大量的熱，因此搭配一台冰水機形成冷卻循環系統，以防過熱而跳電降低使用壽命。

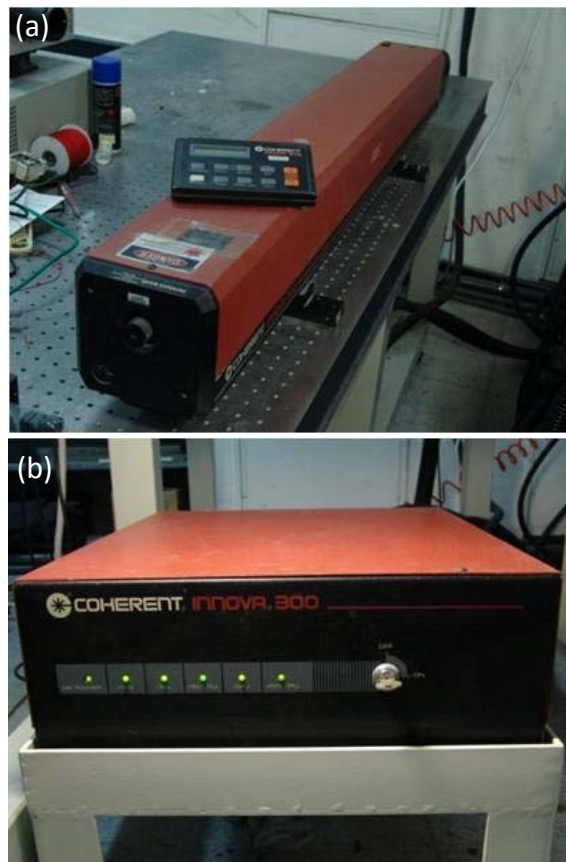


圖 3-7 (a)氬離子雷射、(b)控制面板



### 3-2-2-3 透鏡組

在 PIV 量測中，雷射光頁好壞決定觀測區及所得之影像品質，然而雷射系統為光束型式，因此必須透過透鏡組散射產生光頁。雷射光束將會先經過圓柱透鏡(cylindrical lens)散成光頁，再透過球面透鏡(spherical lens)收縮光頁使其聚焦變薄型成厚度約 1 mm 之光頁，垂直打向燃燒器出口之觀測區，並將最亮處集中於出口處，同時需兼顧均勻亮度與光頁厚度以確保實驗影像品質。

### 3-2-2-4 高速攝影機與鏡頭

擷取觀察區之影像需透過高速攝影機，本研究分別使用 Vision Research 高速攝影機(Phantom V7.3 High-speed CMOS camera)和 X-Stream XS-5 高速攝影機(Integrated Design Tools, Inc.)，最高解析度及擷取速度分別為 1280×1024 pixels 和 1000 fps (frame per second)紀錄燃燒流場影像，其最大空間解析度為 800 H ×600 V pixels，最大時間解析度為 190,000 fps (frame per second)，如表 3-2 和 3-3 所示。高速攝影機前所接之鏡頭為 NIKON 公司生產之 60 mm， $f=2.8D$  之微鏡頭，高速攝影機與所接之鏡頭如圖 3-8 所示。影像擷取透過 USB 2.0 與筆記型電腦連結，並利用軟體 Phantom camera control 之介面進行調整與拍攝。



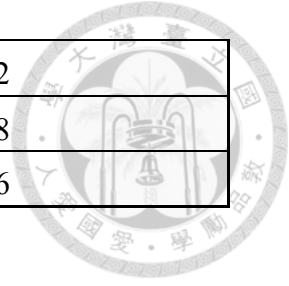
圖 3-8 高速攝影機與鏡頭

表 3-2 高速攝影機(PHANTOM V7.3)規格表

VISION RESEARCH™ PHANTOM V7.3HIGH SPEED CMOS CAMERA	
Resolution	800×600 pixels at 6,688 fps
Max. frame rate	190,000 fps
Sensitivity	4800 ISO/ASA monochrome
Exposure modes	Global, 2 μs exp, optional, 1 μs (standard mode)
Lens	60 mm Nikon micro lens
Lens mount	C-mount, F-mount (Nikon)
Sensor aspect ratio	4 : 3
Image depth	14 bit
Storage capacity	16 GB
Software	Phantom Camera Control, Dantec FlowManager, Tecplot 9.0

表 3-3 高速攝影機(PHANTOM V7.3)影像擷取速度與尺寸對照表

PHANTOM V7.3 (standard mode)	
Resolution	Frame rate
800×600	6,688
640×480	10,101
320×240	33,057
512×512	11,527
512×384	15,151
512×256	21,978
512×128	40,000
512×64	67,796
256×512	20,000
256×256	36,697
256×128	63,492
256×64	100,000
128×128	88,888



128 × 64	129,032
64 × 64	148,148
32 × 32	190,476

### 3-2-3 PIV 影像流場處理

在觀測區光頁上經由高速攝影機所得之影像，是由追蹤粒子的反射光所成之亮點與未被反射之黑色背景區域所組成，而透過擷取影像的間隔時間以及亮點移動之距離即可算出流場速度分佈。擷取影像的型態分為兩種，其一稱為自相關(auto-correlation)，為同一張影像上重複曝光兩次，由於是在同一張影像上重複曝光，所以無法看出粒子曝光時間之先後順序，因此只能獲得速度大小，而缺乏速度方向。其二則是交相關(cross-correlation)，為兩次分別曝光在不同影像上，由於曝光具有時間順序性，因此速度大小及方向皆可取得，為目前較多人使用之方式，而本研究也採交相關方式，以下將對交相關之原理做進一步介紹。

初始 PIV 影像由於畫素眾多因此必須經過切割分開處理，而切割之後的單元稱為計算視窗，在任一單元內， $f(m,n)$  為時間  $t$  之光強度分佈， $g(m,n)$  為時間  $t+\Delta t$  之光強度分佈， $m$  和  $n$  分別代表橫向及縱向參數，離散交相關函數(discrete cross-correlation function)  $\phi_{fg}(m,n)$  可表示為

$$\phi_{fg}(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k,l) \cdot g(k+m,l+n) \quad (3-14)$$

分析的原理來自統計比對兩單元中經數學運算轉換過後的粒子分佈型態，當比對出現相似機率最大值時，即視為可代表這個單元中的分佈速度，再經過還原運算後可得速度分佈資料，透過  $\phi_{fg}(m,n)$  求取速度橫向及縱向速度  $u$  及  $v$  之影像處理流程如圖 3-9 所示。

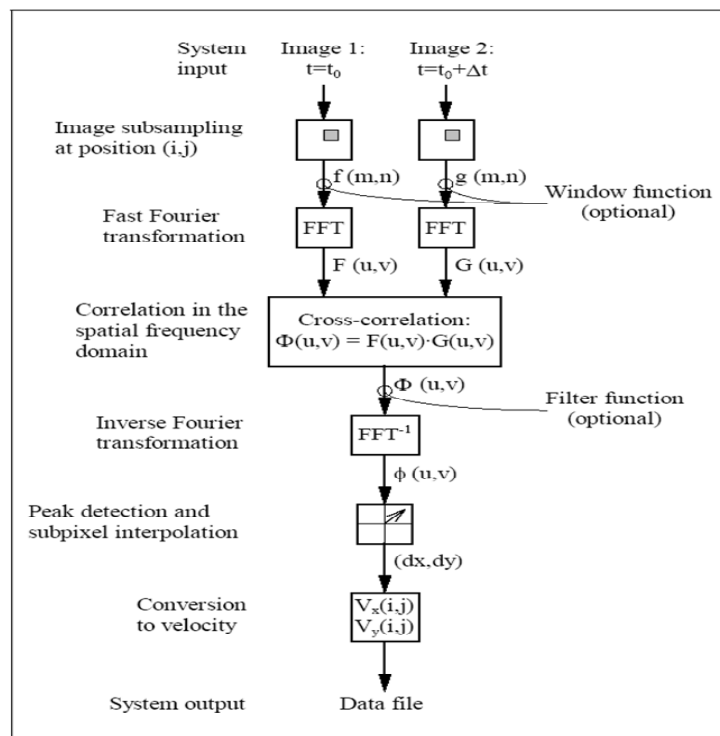


圖 3-9 PIV 影像處理流程圖

而一般在畫素的分割上，每一單元大小以  $16 \times 16$  pixels 最佳， $32 \times 32$  pixels 次之， $64 \times 64$  pixels 則不理想，愈大的畫素表示對流場的解析度愈低，無法真實呈現細部的流場分佈情形，另外為了確保比對的樣本充足，每單元中至少需要 5 顆以上之追蹤粒子。而當每個單元在處理時可能發生追蹤粒子跑出範圍，此時需透過重疊 (overlap) 的部分進行計算，因此流場的特徵速度也需納入考慮，而重疊的部分比例通常小於每個單元長度的 50%。

### 3-3 化學螢光

化學螢光法為量測火焰中之特殊自由基，由於其原理簡單及實驗操作便利的特性，近年來已被廣泛利用作定義燃燒反應流場中火焰位置之指標，而透過高速攝影機與窄頻光學濾鏡的組合，可以擷取高空間及高時間解析度之自由基分佈影像，並與火焰型態及 PIV 所得之速度場進行比較分析。

#### 3-3-1 光學窄頻濾鏡

本實驗利用高速攝影機前加掛光學窄頻濾鏡取得特定波段之火焰化學螢光，

所使用之高速攝影機與 PIV 系統相同，而加掛之濾鏡為 Andover Corporation 之 Optical Filter，其波段分別為 307.1 nm 之 OH\*，FWHM 為  $25 \pm 5$  nm，穿透率為 20 %；430 nm 之 CH\*，FWHM 為  $10 \pm 2$  nm，穿透率為 45 %；514.5 nm 之 C<sub>2</sub>\*，FWHM 為  $10 \pm 2$  nm，穿透率為 55 %，如圖 3-10 所示。拍攝 OH\* 時使用的 UV 鏡頭型號為 Nikon UV-105 multispectral lens (PF10545MF-UV)。

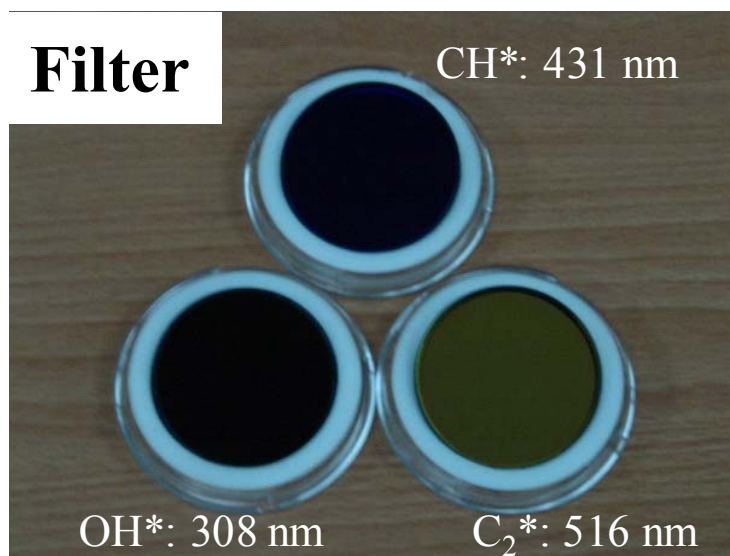


圖 3-10 光學濾鏡組

### 3-3-2 影像訊號放大系統

由於在高速量測時影像訊號強度受限於曝光時間而變得微弱，因此必要時須在攝影機前加裝訊號放大器(intensifier)，將訊號放大後在攝影機上成像。加裝訊號放大器為常見之影像擷取裝置，由其是對於高解析度之暫態非定常觀測對象而言，因此如 Intensified-CCD (ICCD) 已是常見之組合設備，而本研究自行組裝 CMOS 攝影機和訊號放大器來取得最佳的時間及空間解析度，取像觀測區集中於燃燒器出口之燃燒流場，利用在高速攝影機前加掛窄頻光學濾鏡，取得特定波段之化學螢光，並透過計算影像灰階強度分佈獲取火焰暫態反應強度的分佈圖，整體架構如圖 3-11 所示。由於放大倍率越大雖可放大訊號，但同時也會連同雜訊一起放大，因此一律將放大倍率固定在最小值(20000)，藉由調控開門時間至  $50 \mu\text{s}$ (註：開門時間必



須小於取樣率的最大曝光時間以免產生交疊)即可獲得穩定品質的影像。

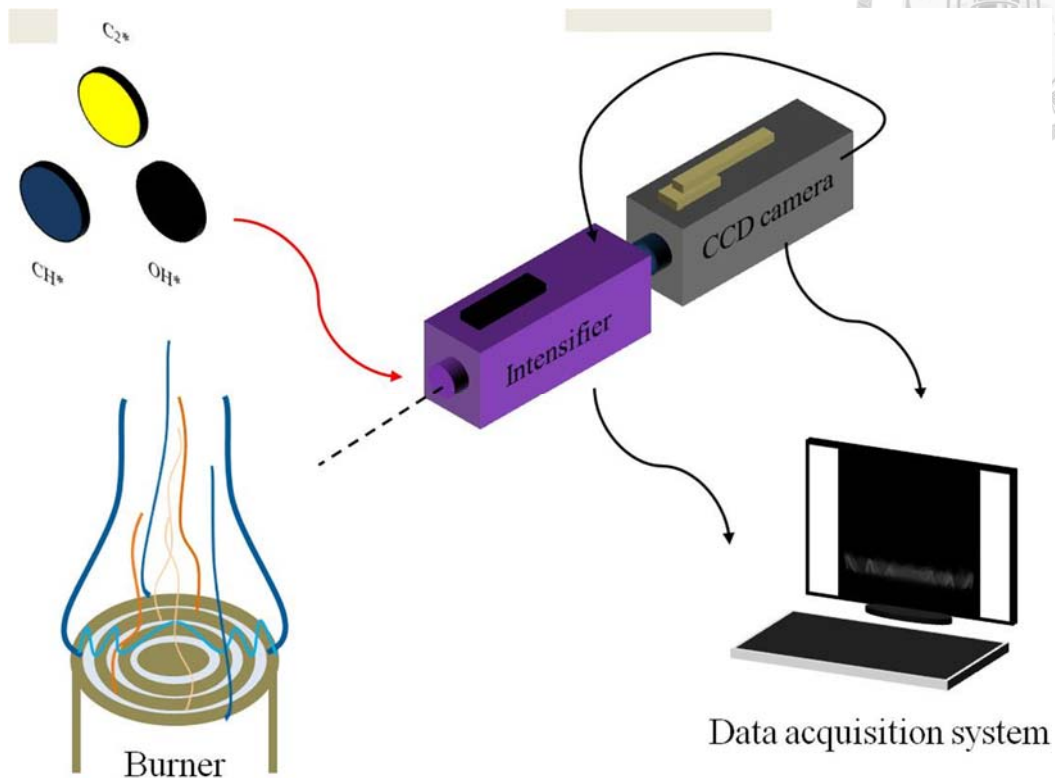


圖 3-2 加裝訊號放大器之實驗配置示意圖

本研究使用 VIDEO SCOPE INTERNATIONAL, LTD. 所製造之適用高速影像擷取(> 1000 fps), 型號 VS4-1845HS 訊號放大器, 此訊號放大器為 Generation II, 具備影像訊號放大單元 S-20 Photocathode, 其訊號放大波段特性分佈如圖 3-12 所示。主要擷取之化學螢光波段落在此訊號放大器之工作區段, 因此可提供最佳的影像訊號放大品質, 訊號放大器同步接收高速攝影機之拍攝訊號, 在高速攝影機曝光時間內放大影像訊號。訊號放大器可調控閘門時間(gate time)最小至 20 ns, 放大倍率(Gain)最大可至 300,000。

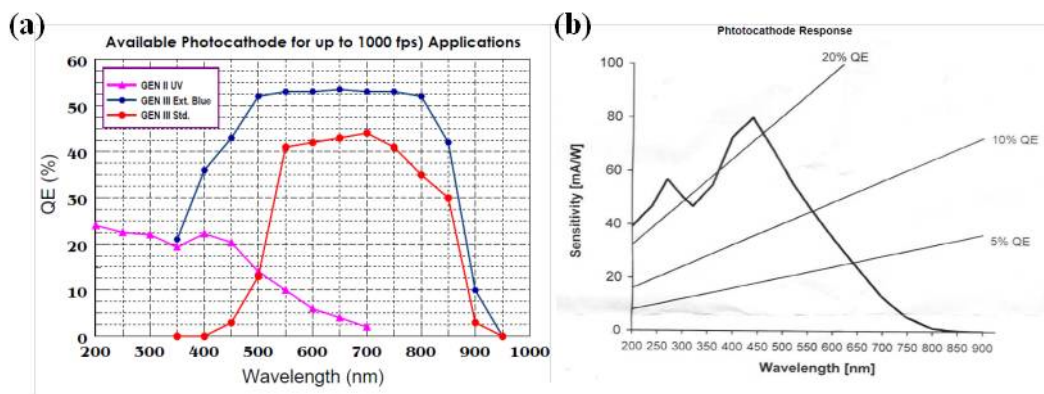


圖 3-3 訊號放大器之(a)波段響應分佈(b)感光度。(VIDEO SCOPE INTERNATIONAL, LTD.)

### 3-4 訊號處理方法

本研究擷取之二維燃燒流場訊號包含兩部分，在流場部分分為水平向量和垂直向量，代表流場速度分佈和結構在空間中分佈的特性；而燃燒場部分則為灰階強度由 0 至 255 的影像，灰階強度數值分布反映激發自由基在燃燒場中的分布情形，透露各自代表燃燒特性隨空間分布的情形。而由高速攝影設備擷取的連續影像，則又可組合成燃燒流場隨時間變化的狀況，因此藉由上述資訊便可同時進行空間與時間上的解析。本研究使用 Matlab 軟體自行撰寫讀取程式進行頻率分析，首先截取目標流場及燃燒場位置之數值，接著以連續迴圈紀錄隨時序變換之資料便可得到時間域變化情形。



## 第四章 層狀化燃燒：進流數效應

本章探討層狀化燃燒器之進流數效應對流場和燃燒場間交互作用的影響，由於流速梯度差引發不同頻率之建設性或破壞性振盪，會產生相對應之增幅或壓縮之特性(Kim *et al.*, 2010)，代表此時燃燒流場的火焰和流場是在極為複雜的交互作用下進行。進流數效應是以層狀化燃燒流場在固定各出口流速及當量比的條件下，分為單股(single inflow)、雙股(double inflow)和三股(triple inflow)分析其火焰型態、平均流場及燃燒場特性，火焰反應強度與紊流強度之作用特性，並利用 POD 模態分解分析燃燒流場之時間及空間動態變化特性。

### 4-1 火焰型態

在固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7 的條件下，分別注入單股、雙股及三股甲烷燃氣形成火焰型態，此時內側、中間及外側氣道之流速分別為 1 m/s、0.54 m/s 和 0.37 m/s，實驗利用 Nikon D90 記錄在不同進流數條件下之火焰型態。如圖 4-1 所示。首先在單股燃燒流場中(中間火焰)，外側受到燃燒器外圍及冷空氣被捲入的影響而吹昇形成飄焰(Lin *et al.*, 2009)；內側則因為鈍體形成低速迴流區而有聚熱的效果，進而幫助穩焰(BeeÂr and Chigier, 1983; Pan *et al.*, 2009)。在雙股燃燒流場的部分(中間火焰和外側火焰)，中間火焰受到外側火焰包覆降低外側環境的影響，加上兩股火焰之間的交互作用幫助而使中火焰形成錐焰。在三股燃燒流場時，加入的內火焰由於流速過快而接近吹熄造成火焰長度變長，連帶迫使中和外火焰之火焰高度被迫提升。火焰型態通常是反映燃燒流場特性最直觀的方式，藉由觀察火焰型態可得知火焰長度、火焰位置、反應區分佈範圍及火焰螢光等基本特性。在固定流率的層狀化燃燒流場下，可發現對於貧油火焰而言增加第二股火焰確實可幫助燃燒反應達到較穩定的火焰結構，而第三股火焰雖然高度增加，但火焰厚度及反應區面積較大應能有助於穩焰。對於層狀化燃燒流場而言，火焰和流場的交互



作用受到其結構強弱以及相對應位置，包括迴流區以及剪流層區在貧油預混火焰燃燒反應過程中的所產生的影響(Seffrin *et al.*, 2010; Böhm *et al.*, 2011)，因此必須透過 PIV 以及火焰螢光分佈進一步探討其特性。

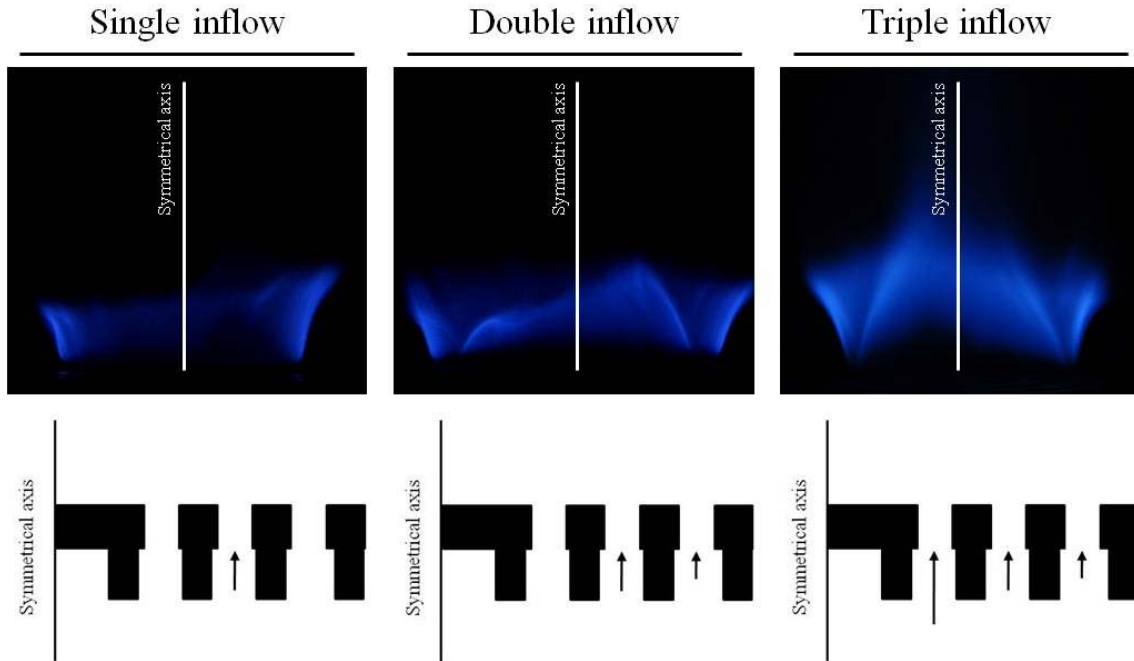


圖 4-4 單股、雙股及三股甲烷火焰型態及燃氣注入示意圖(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)。

#### 4-2 平均流場及燃燒場特性

利用光學診斷技術包含 PIV 和化學螢光影像探討層狀化燃燒流場的平均特性，單股、雙股及三股進流之進氣道開放配置如下：單股進流為中間出口，雙股進流為中間及外側出口，三股進流則為各進氣道全開，探討平均流場和燃燒場特性。由於層狀化燃燒器為對稱結構，因此皆以半側燃燒流場代表。PIV 之空間及時間解析度分別為  $1280 \times 1024$  pixels 和 1000 fps。化學螢光的部分分別以影像擷取率為 10 fps 和 4000 fps 擷取位於 431.5 nm 的  $\text{CH}^*$  自由基之螢光(Gaydon, 1974)。圖 4-2 至圖 4-4 所示分別為單股、雙股及三股進流之平均速度場，圖 4-5 至圖 4-7 所示分別為單股、雙股及三股進流之平均渦度場。由於受到出口鈍體的影響，燃燒流場在出口區均有明顯的迴流區結構生成。圖 4-5 顯示單股燃燒流場在出口處左側形成逆時鐘的

渦旋結構，右側則形成順時鐘渦旋結構；圖 4-6 顯示在雙股進流時，受到加入外側火焰的影響，兩股火焰中的鈍體結構因為互相擠壓形成另一渦對結構。圖 4-7 顯示在三股流場中，加入內側火焰因為流速較高，而在內側鈍體出現最為明顯的迴流結構。由於平均使特徵平滑化，只能看到主流方向的運動(Coats, 1996)，但混合通常發生在流速差的邊界上，因此須借助其他方式才能進一步解析。

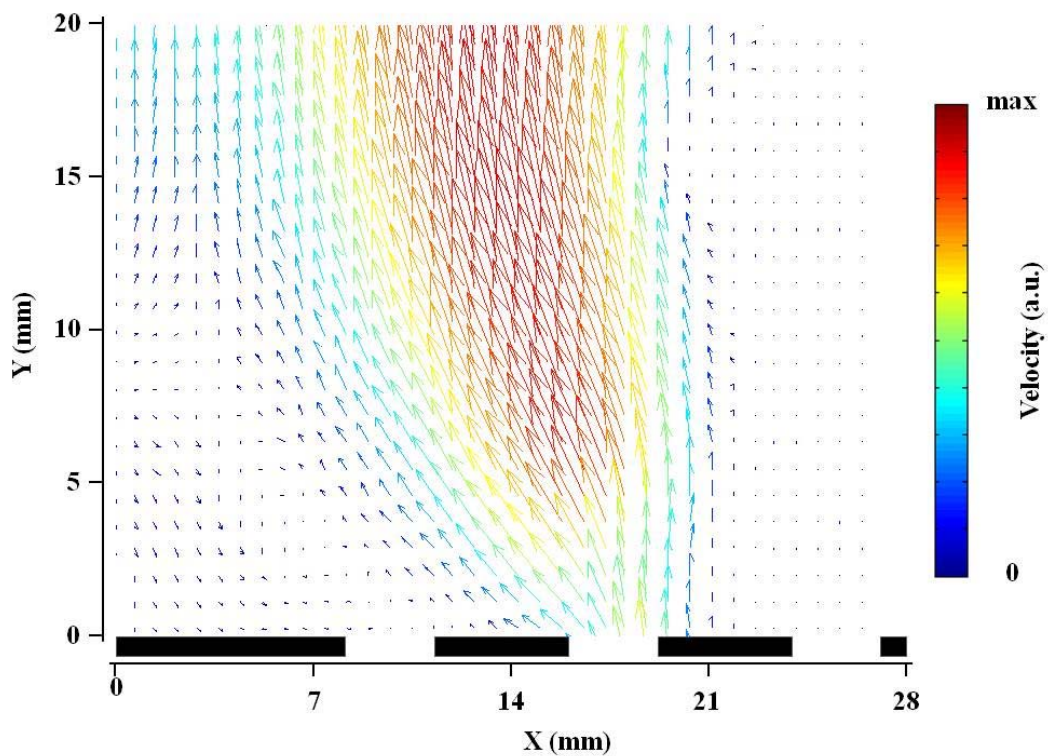


圖 4-2 單股進流之平均速度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)。

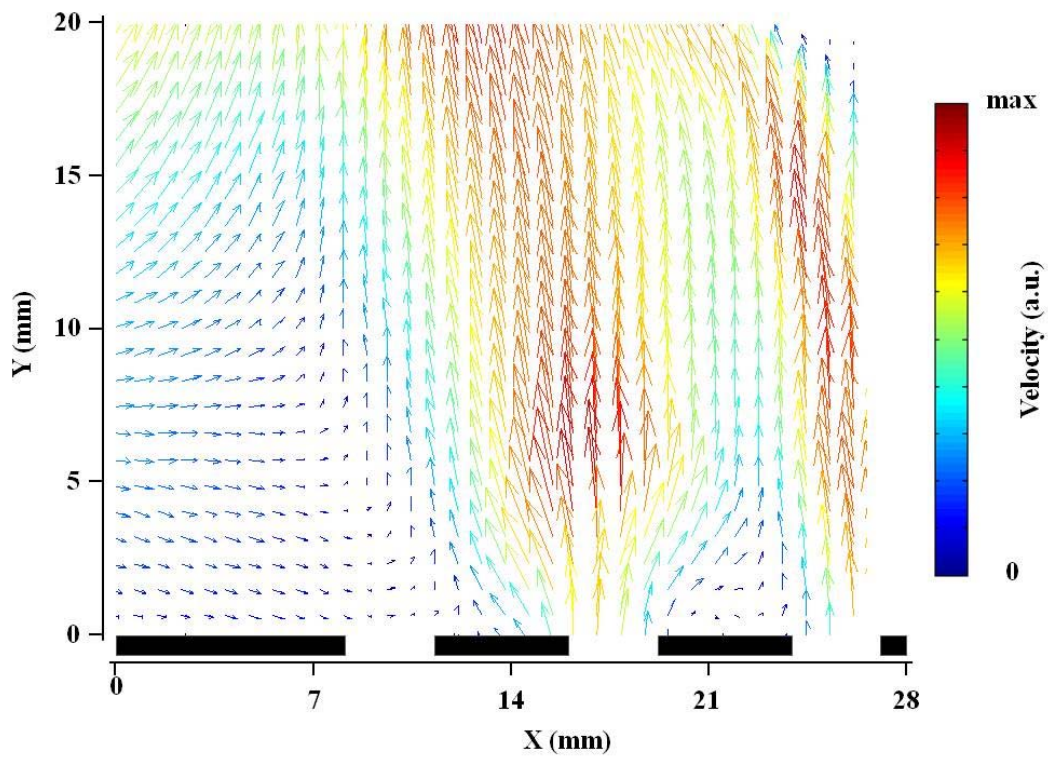
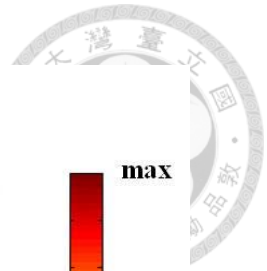


圖 4-3 雙股進流之平均速度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)。

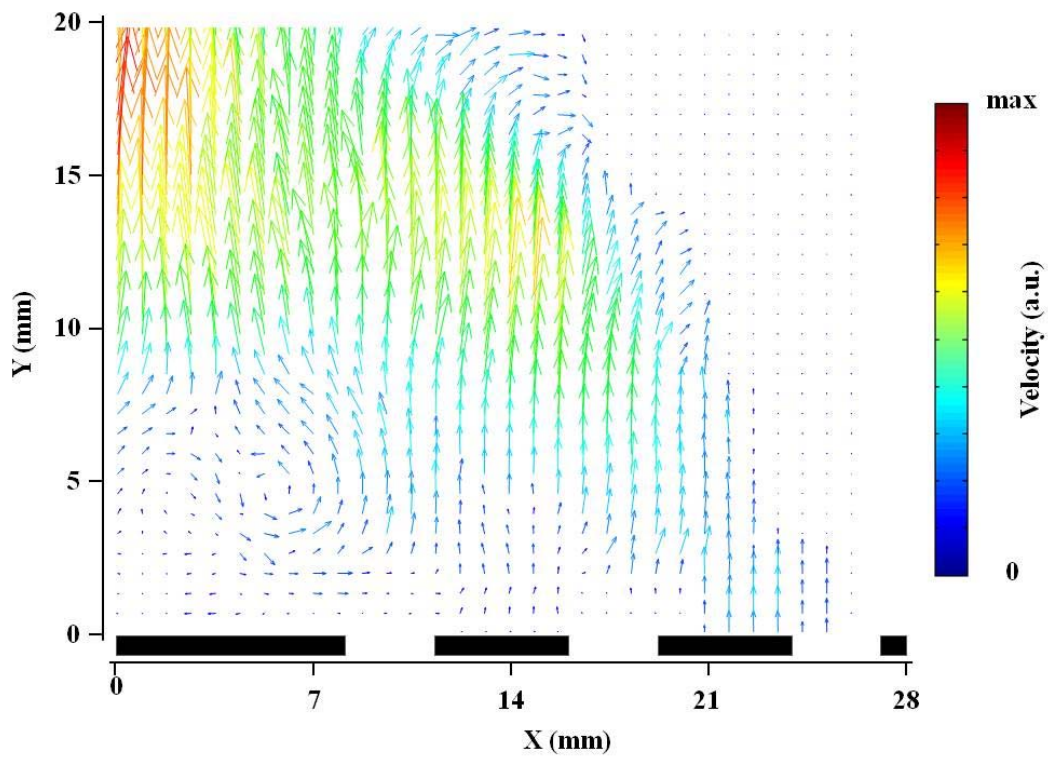


圖 4-4 三股進流之平均速度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)。

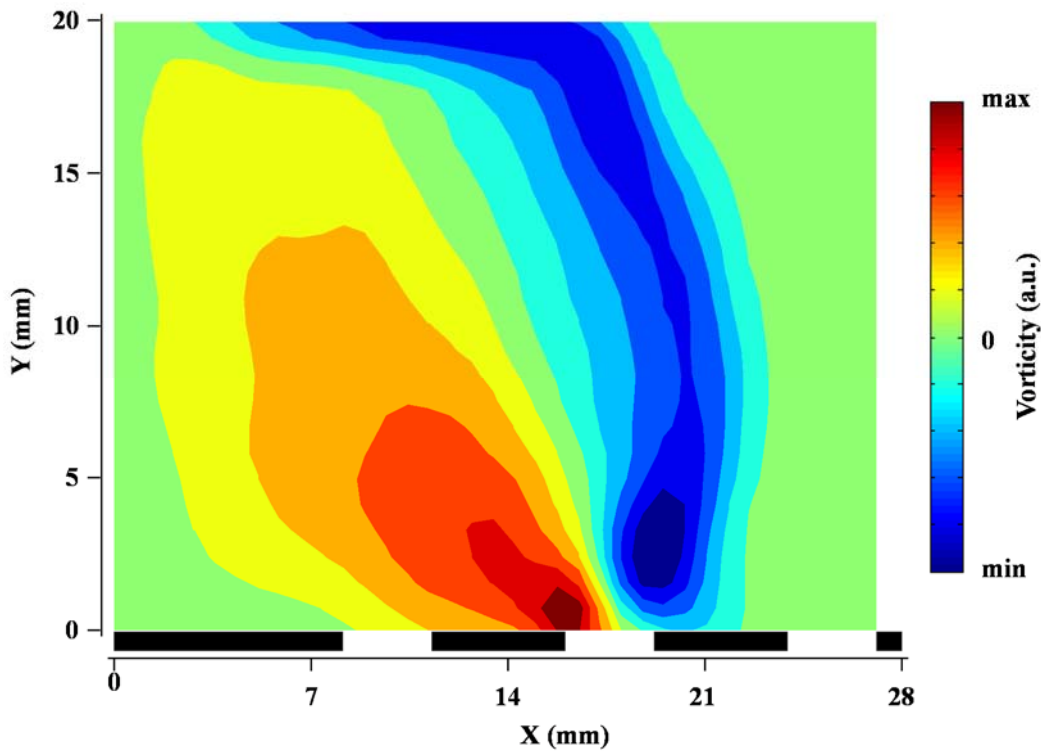
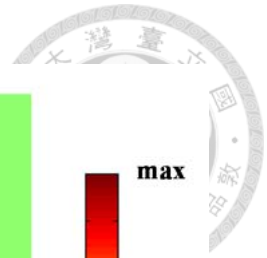


圖 4-5 單股進流之平均渦度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

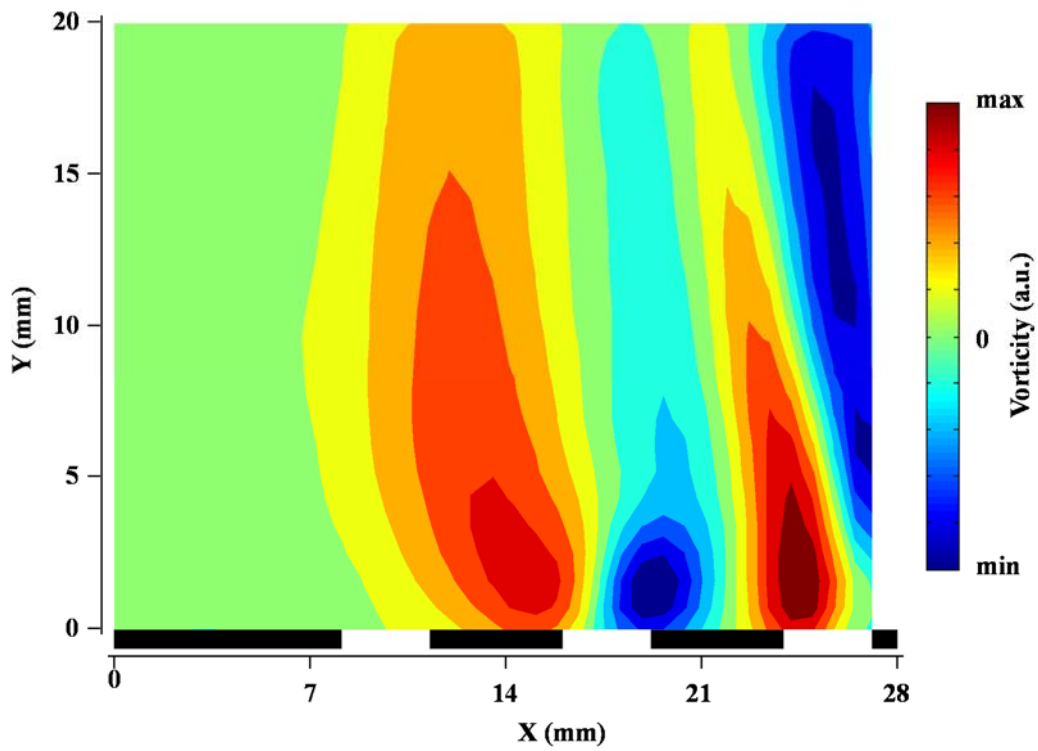


圖 4-6 雙股進流之平均渦度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

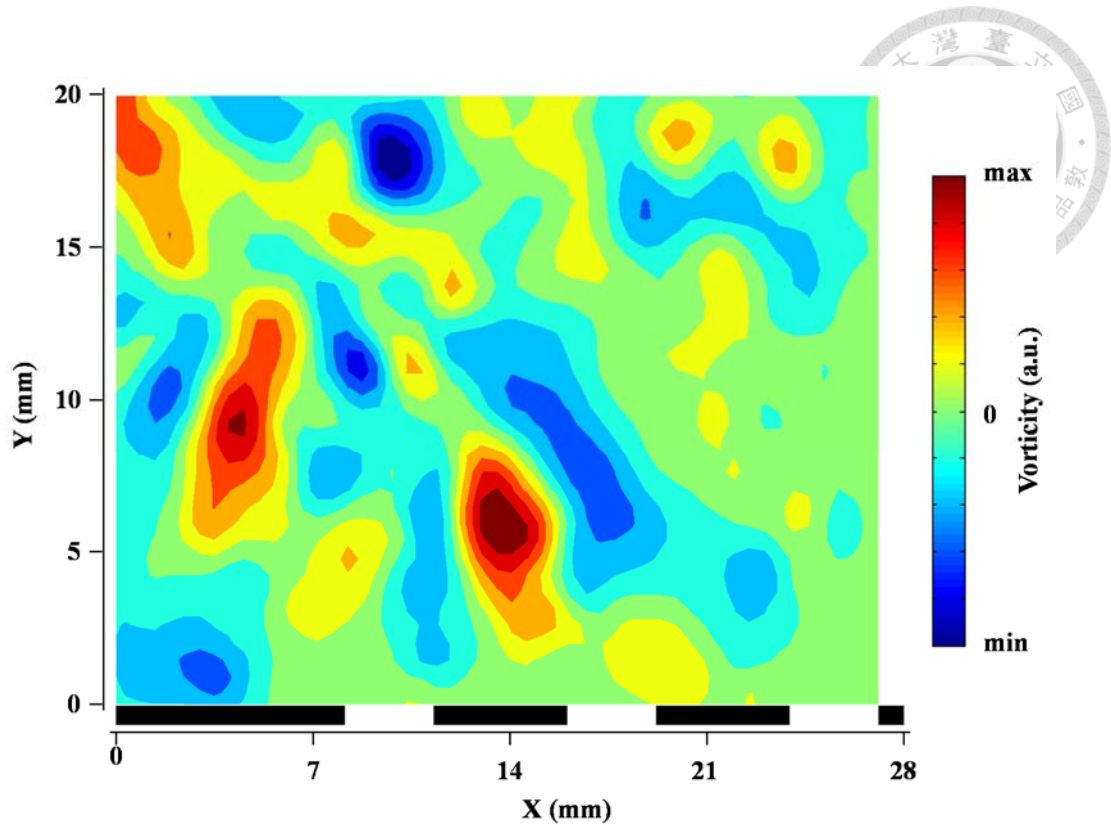


圖 4-7 三股進流之平均渦度場(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

藉由連續暫態反應流場速度分佈可進一步計算出  $x$  與  $y$  方向上的速度擾動量並將其轉換成紊流強度，因此將藉由探討紊流強度分佈(turbulence intensity)對火焰的影響，以瞭解全域燃燒流場中火焰和流場的交互作用特性。紊流強度資訊來源為 1000 張暫態速度場運算所得之數值，而紊流強度分布為流場速度擾動的程度，其定義如下：

$$\text{Turbulence intensity} = \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2)/2}}{U_o} \quad (4-1)$$

其中  $u'$  與  $v'$  分別為  $X$  與  $Y$  方向上的平均速度擾動量， $U_o$  則是平均出口流速(Yang *et al.*, 2002)。圖 4-8 為單股、雙股及三股燃燒流場之紊流強度除以最大紊流強度後得到的無因次化的 PDF 分佈圖，具有兩個明顯的特徵：

1. 隨著進流數增加，紊流強度 PDF 分佈的峰值逐漸增加，由於紊流強度代表燃燒流場中剪流層的強弱，因此峰值越大代表剪流層強度越強，說明進流數增加會

增強燃燒流場中紊流強度峰值增強。

2. 紊流強度峰值和進流數目成正比，然而高紊流強度的部分會逐漸增加使其峰值分佈所佔之比例會逐漸下降，分佈曲線特性由平順圓滑變為轉折彎曲，代表增加進流數不僅會提高峰值，也會增加部分高紊流強度的分佈。



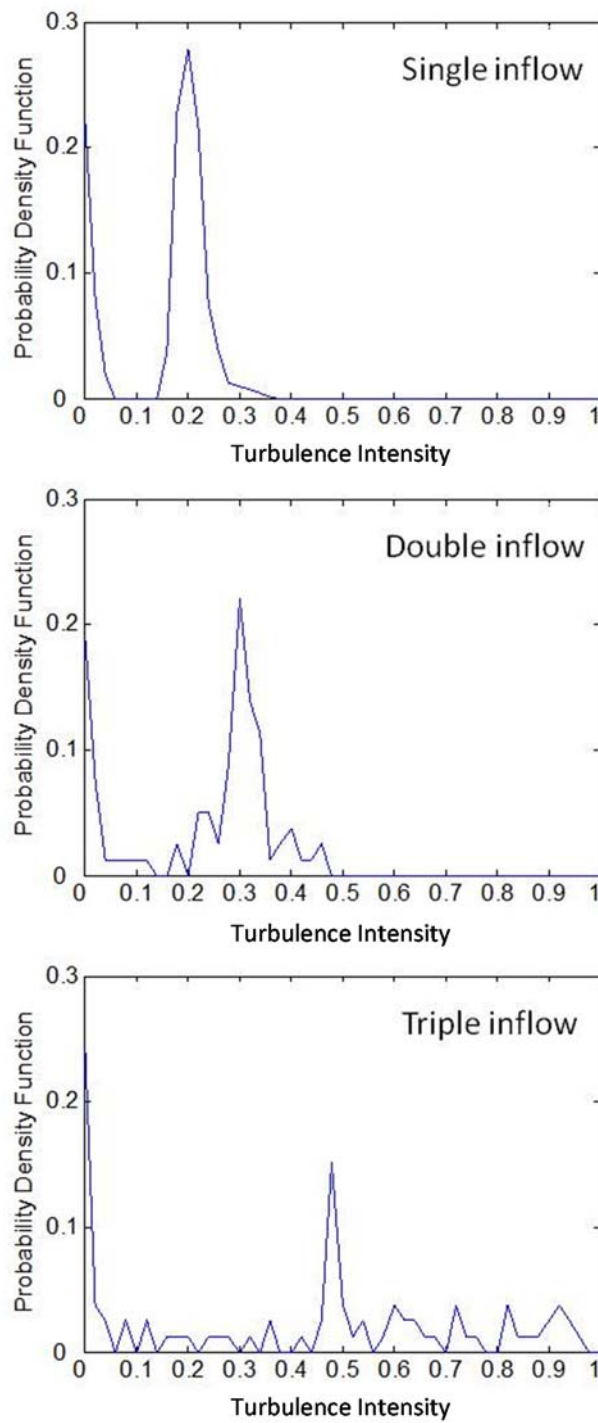


圖 4-8 單股、雙股及三股燃燒流場紊流強度 PDF 分佈圖

圖 4-9、4-10 和 4-11 分別為單股、雙股及三股進流之燃燒場分佈圖，由於化學螢光強度分布的比較易受到雜訊干擾，此定性的量測是根據個別的操作條件設定下的量測值，因此不能比較不同操作條件下的強度特性。首先在單股進流時，此時

單股貧油火焰非常微弱，被向上吹離燃燒器出口約 5 mm，也可發現整體火焰位置有向內偏移的趨勢，由於中央鈍體提供一可蓄熱的空間，因此使火焰較能持續在內保持反應熱能，類似以鈍體燃燒器穩焰之火焰接近吹熄時之特性(Dawson *et al.*, 2011)。當加入第二股進流時，出現外側飄焰，而中間火焰明顯受到外側火焰幫助而使火焰根部貼近燃燒器出口約 2 mm 處；當加入第三股進流時，整體火焰高度雖然向上提升至 5 mm 處，但是火焰強度分佈出現從內側迴流區往剪流層擴張的趨勢，代表加入第三股進流拉長火焰結構，但貧油火焰間的預熱和混合交互作用幫助仍使火焰強度增強。

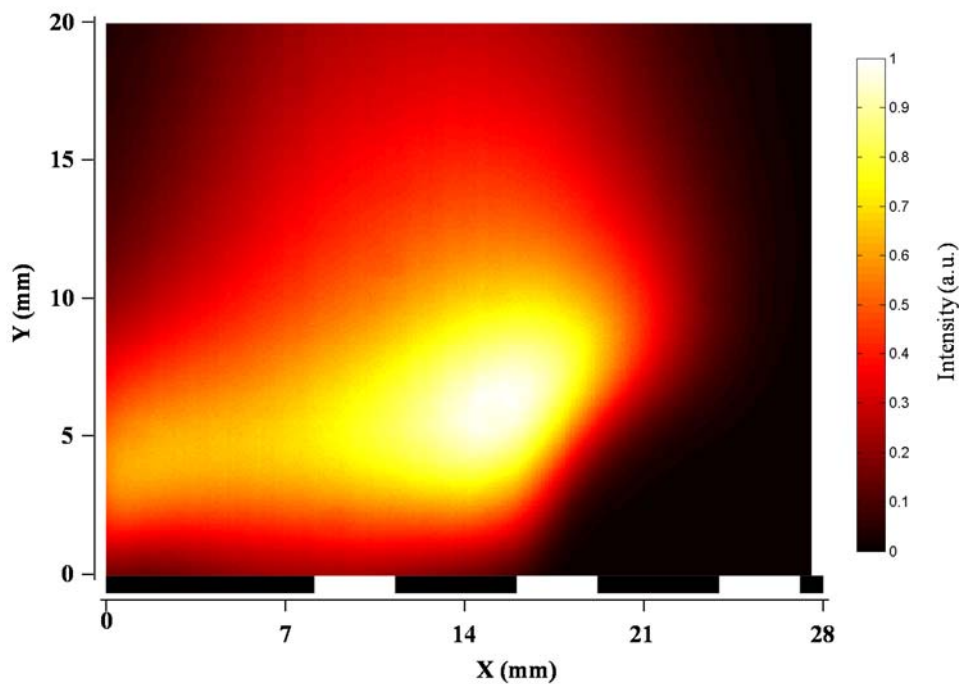


圖 4-9 單股進流火焰平均燃燒場強度分佈(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

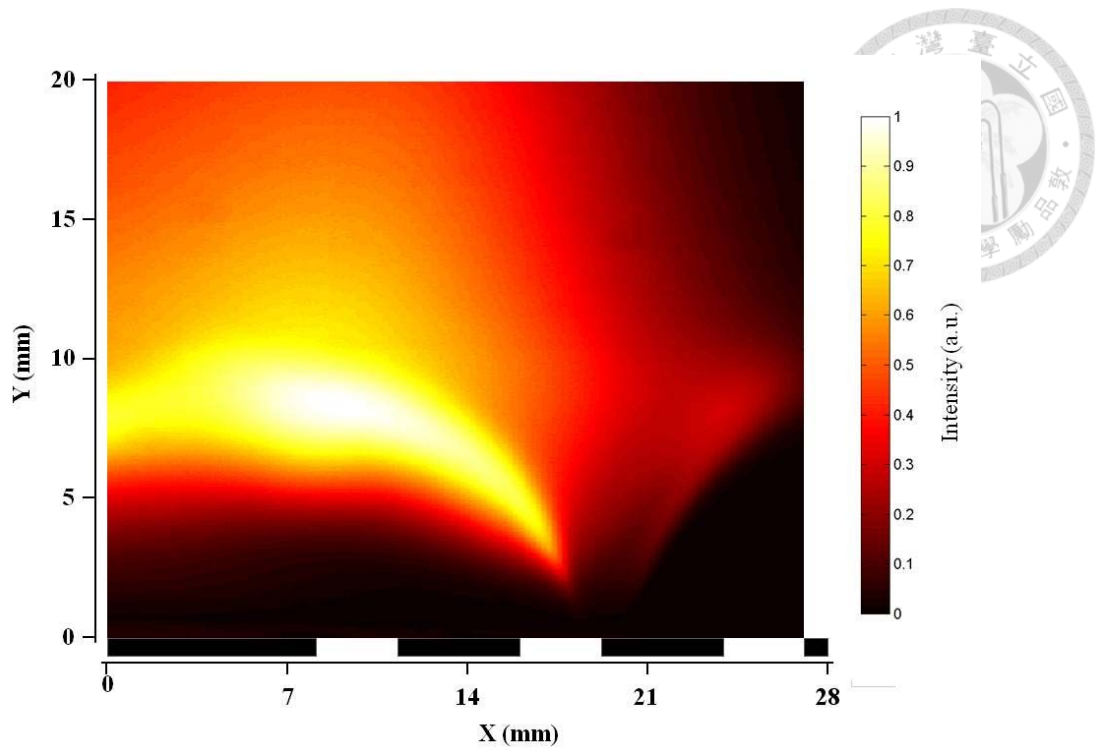


圖 4-10 雙股進流火焰平均燃燒場強度分佈(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

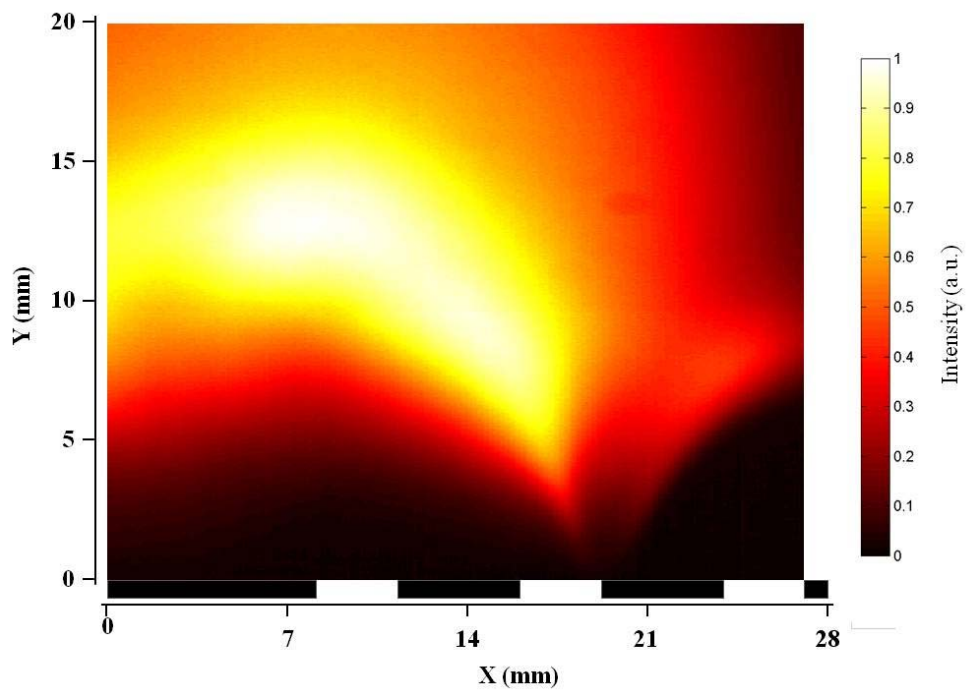


圖 4-11 三股進流火焰平均燃燒場強度分佈(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

圖 4-12 為使用高速攝影機在 10 fps 情況下擷取三股進流燃燒流場之  $\text{CH}^*$  原始影像時序圖，以及加裝訊號放大器後在 4000 fps 情況下擷取的原始影像時序圖(圖 4-13)和平均強度圖(圖 4-14)。在以高速攝影機直接擷取的情況下，由於  $\text{CH}^*$  在極貧油時強度非常微弱因此影像需要長曝光時間來收集足夠強度，造成有很明顯的火焰晃動形成的長軌跡(圖 4-12)。另一方面，加裝訊號放大器後即使在 4000 fps 情況下，也能捕捉到極為明顯的火焰螢光強度(圖 4-13)，但缺點即是訊號放大器放大火焰螢光強度訊號，同時也放大雜訊，因此造成影像不像以高速攝影機直接拍攝的銳利。然而在 4000 fps 高速拍攝下確實能捕捉到 10 fps 拍攝時所看不到的一些特徵，比較兩者之螢光強度在空間分佈上的差異，可發現高速拍攝下具有很明顯的擺盪幅度，特別是在剪流層上較明亮的火焰面有向中心鈍體內縮的趨勢(圖 4-14)，這些是在 10 fps 長曝光下所觀察不到的現象。此外由於當量比 0.7 之貧油火焰非常接近吹熄發生的臨界點，由高速影像可發現局部火焰熄滅，火焰被拉長厚度縮減，終至形成島狀火焰碎片而消散，此特性也與文獻上研究者所觀察到的趨勢相仿 (Shanbhogue *et al.*, 2009; Dawson *et al.*, 2011; Chaudhuri *et al.*, 2010)，在接近吹熄時雖然具有局部火焰熄滅的特性，此時燃燒流場主要的特徵仍是劇烈的飄動和振盪現象。

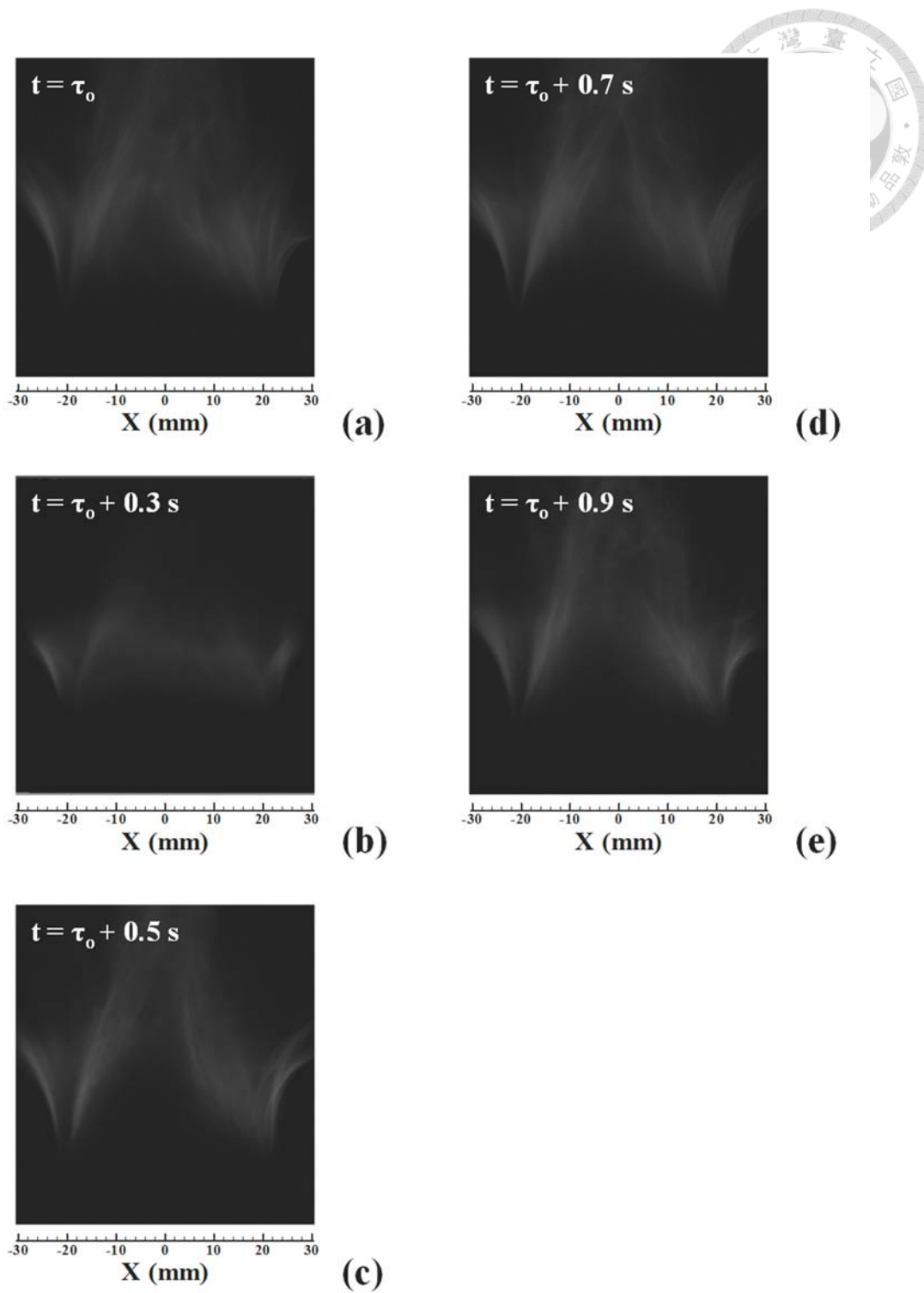


圖 4-12 三股進流之 CH\* 螢光強度暫態分佈圖

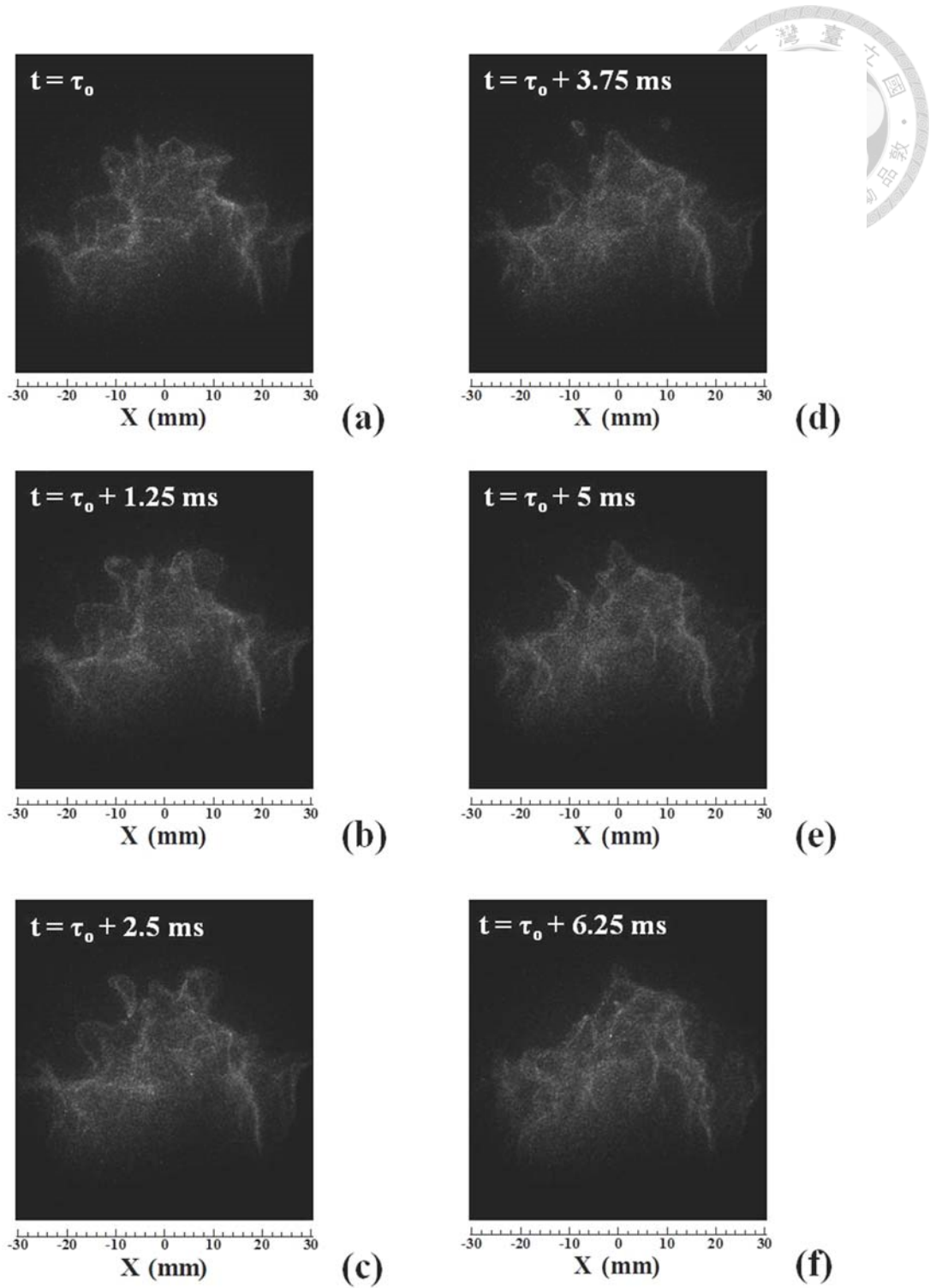


圖 4-13 三股進流之 CH\* 螢光強度暫態分佈圖(加裝訊號放大器)

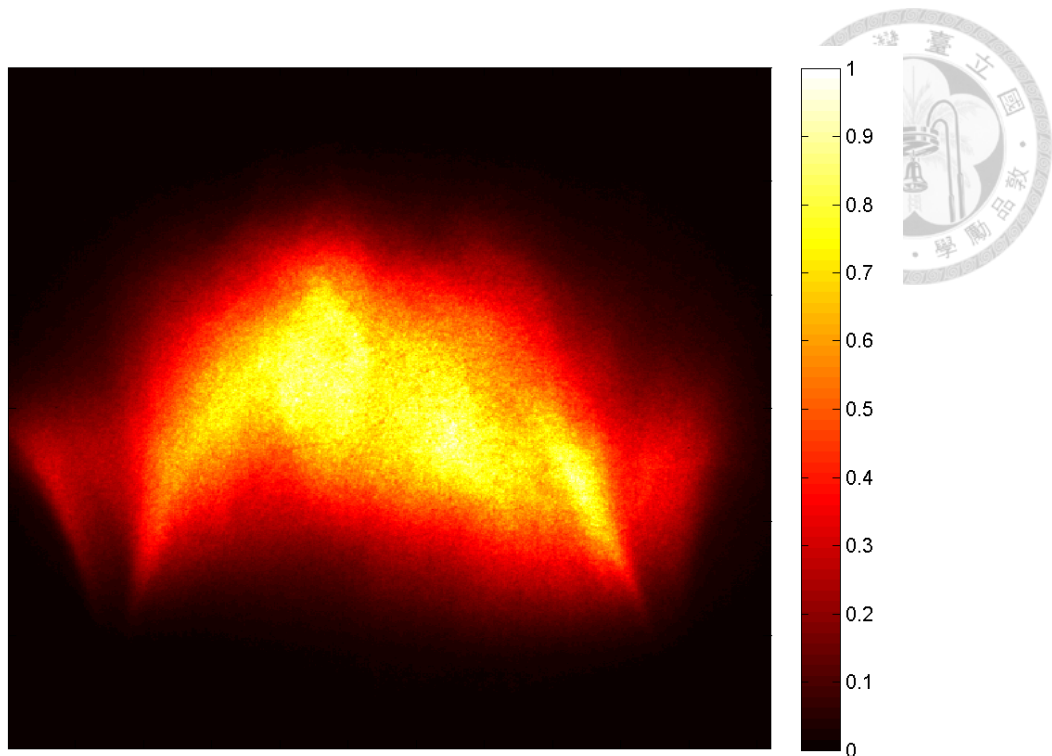


圖 4-14 加裝訊號放大器擷取之三股進流 CH\* 螢光強度平均分佈圖(固定出口流率  
均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

在燃燒流場中紊流強度和火焰強度是非線性耦合的交互作用，取決於兩者間相對的化學反應和紊流化的程度。化學反應帶來熱釋放和劇烈溫度梯度變化並隨之改變流體性質如密度、黏滯度和膨脹率(dilatation)等，這些變化同時也會反過來影響紊流化程度，影響這過程中反應物和生成物間質量、動量和能量傳遞特性以及火焰結構(Poinsot, 2012)。前人研究指出紊流強度增加會使火焰反應區變廣(Peters, 2000)，然而 Poludnenko and Oran (2010)則觀察到不受紊流強度影響之不同的現象。由化學螢光和紊流強度之 PDF 分佈分別計算其平均機率強度(mean probability intensity)而獲得一統計強度值，其定義如下：

$$\text{Mean probability intensity} = \sum_{\text{intensity} = 1}^{\text{intensity} = k} \text{probability} \times \text{intensity} \quad (4-2)$$

Intensity 代表化學螢光強度，Probability 則代表螢光強度出現之機率，因此兩者乘積可視為整體強度之指標，圖 4-15 即為化學螢光及紊流強度隨進流速變化分佈圖。隨進流數增加，化學螢光強度及紊流強度都隨之增加，但其增幅(斜率)變大

顯示火焰交互作用是非線性的影響(Balachandran *et al.*, 2005; Ayoolan *et al.*, 2006; Worth and Dawson, 2012)。此外由於紊流強度為剪流層區影響程度之統計指標，進流數增加使剪流層區的作用越趨明顯，對照流場和燃燒場的分佈也可發現此一特性，顯見在不同進流數下剪流層變化特性是主要影響的因素，但平均流場缺乏尺度結構和動態變化的特徵，因此需進一步透過 POD 處理由模態能量拆解的方式進一步分析。

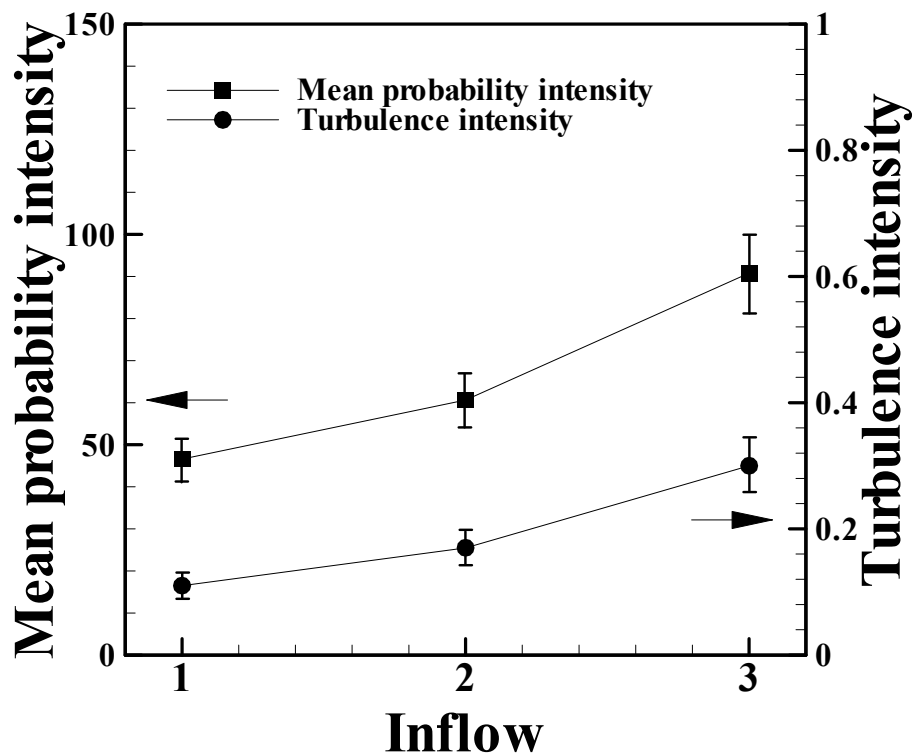


圖 4-15 化學螢光之平均機率強度及紊流強度隨進流速變化分佈圖

#### 4-3 燃燒流場之 POD 分析處理

##### 4-3-1 層狀化燃燒流場觀測分析之困難點

燃燒流場的觀測分析一直是很困難的量測領域，因燃燒反應快速且微小集中，且同時包含流場及燃燒化學反應的變化，造成其尺度效應涵蓋的範圍非常廣泛，流場的大小尺度渦流結構與燃燒反應區因火焰傳播速度改變而變化位置，都會受不同環境及量測方法很大的影響，因此燃燒流場的觀測及分析方法是極為重要的研

研究發展方向。在燃燒流場觀測中有三個重要的指標度量，分別為：速度、濃度和溫度，傳統上這些度量的量測方式多以侵入式量測為主，因此容易相互影響而無法同步獲取資訊；光學量測為非侵入式因此影響燃燒流場的程度最小而逐漸受到普遍使用。

本文使用層狀化燃燒器作為載具，代表初始燃燒流場具有非均勻分佈的特性，包括其速度及燃氣成分和濃度等，都具有可分別操控的特性而更能接近實際的燃燒情況，因此層狀化燃燒器的研究越趨受到重視。對於層狀化燃燒器而言，可操控性佳代表變數眾多，因此若能以傳統燃燒器角度出發降低變數，以之作為基礎進行研究較不易出現混亂。傳統燃燒器設計如鈍體結構、對衝流型、共伴流、衝擊型、漩渦燃燒器以及層狀化結構等(Cheng and Shepherd, 1991)，基於對燃燒流場所需的條件變化，其產生不同特性之火焰結構與流場特性蘊含許多值得探討的反應機制。傳統燃燒器以單噴流、對流衝擊或鈍體燃燒器為主流，以簡易的條件操控進行許多重要基礎的燃燒現象探討。本研究中所使用之層狀化燃燒器具有三個獨立環狀燃氣出口和鈍體結構，使其具有分別操控燃氣流速和當量比之特性，此外出口處的鈍體結構使主要流場結構可型成多組渦對及迴流低速區，因此能達到層狀化燃燒和增強燃氣預熱及質量傳輸效果等目的。然而對於層狀化燃燒流場而言，其耦合的流場結構(不論是層流或紊流燃燒)和燃氣分布(當量比梯度)使局部火焰結構受影響而改變反應分布、特徵尺度以及熱釋放率，因此欲進行層狀化燃燒流場觀測必須以此為基準，考量耦合燃燒流場尺度、火焰交互作用之不同反應區所涵蓋特徵波段。單一目的項的量測技術發展隨著影像擷取設備的進步而能觀察到以往所無法解析的燃燒流場特徵，特別是對於以單一燃料或一些基本幾何構造產生的流場而言，對驗證理論預測模型來說助益匪淺。然而層狀化燃燒流場中複雜的火焰和流場間交互作用對火焰結構和穩定性造成的影響，並無法從單一量測技術獲得足夠的資訊，因此建構並應用多種量測技術對於進一步了解燃燒的本質是非常重要的研究環節。對於火焰量測而言化學螢光為量測火焰中之特殊自由基散發的螢光，由

於其原理簡單和實驗操作便利的特性，近年來逐漸被重視和用作定義燃燒反應流場中火焰位置之指標，另一方面，因為具有可獲得連續暫態流場資料之特性，PIV 一直是燃燒流場量測技術中相當重要的工具之一。由於火焰的動態特性，在獲取化學螢光強度影像和 PIV 流場速度分佈方面必須兼顧兩方之儀器性能和時間與空間解析度，以確保實驗量測所獲得之燃燒流場資訊的精準度。本研究發展之光學診斷技術便是結合 PIV 和化學螢光，可同時量測燃燒流場中的速度及火焰螢光強度分佈，藉由高空間和高時間解析度之量測技術，可記錄下燃燒流場的暫態變化過程，提供燃燒研究上許多寶貴資料進行後續分析，量測系統架構如示意圖 4-16 所示。

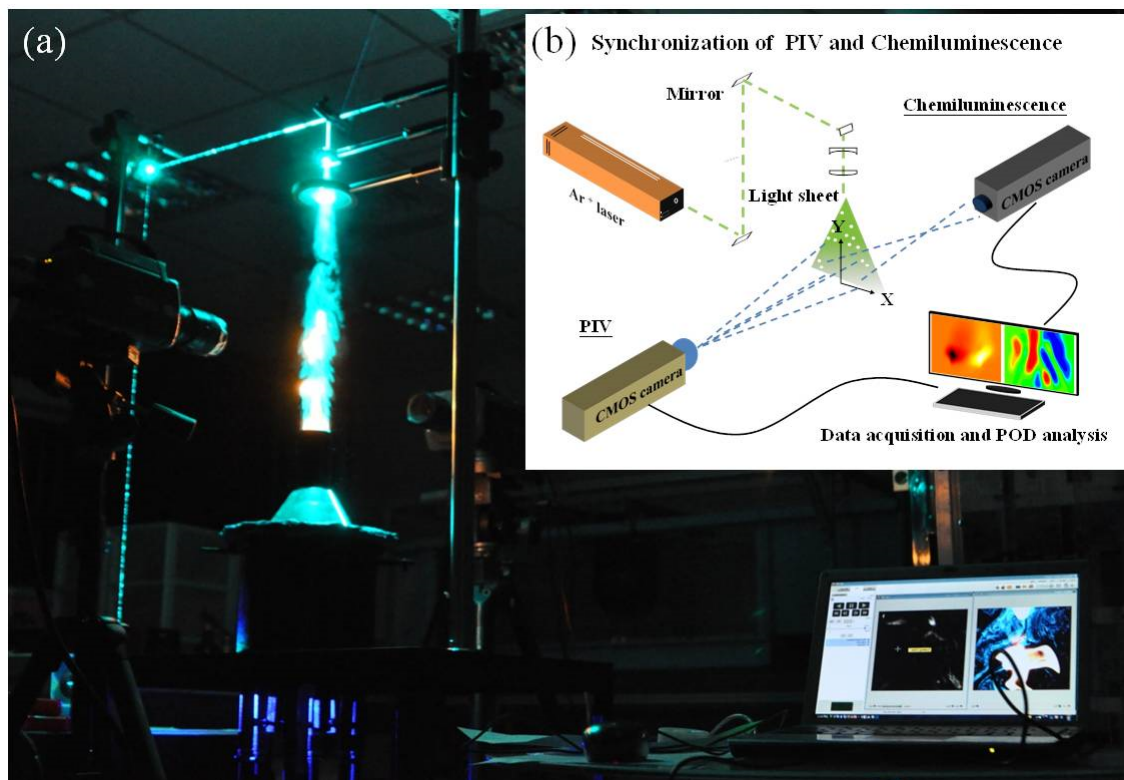


圖 4-16 PIV 與化學螢光法同步量測(a)實驗實景(b)示意圖

高空間及時間解析度的擷取條件下也造成所獲取的資料量極為龐大(或可稱為海量大數據資料)，因此造成攝影機影像擷取速度、暫存空間大小乃至傳輸時間長短等的問題，此外這些龐大的資料量雖可鉅細靡遺的保留最完整的資訊，然而對研究者而言如何從海量資料中以客觀而非主觀判斷的方式辨別出有用的資訊，如此

可降低在海量資料中尋找有用資訊的時間，且可降低無用資訊影響的比例。另一方面，燃燒流場的實驗量測及容易受到環境、實驗儀器操作或燃燒流場實驗特性等影響，對於層狀化燃燒流場而言，由於耦合的流場結構及當量比梯度變化造成的流場不穩定性、反應區塊位移、火焰傳播速度改變、火焰結構的拉伸及曲率變化，均會造成溫度、壓力、速度、反應濃度等量測及分析上的影響。受到層狀化燃燒器幾何形狀設計的影響，尾流區的大小尺度渦旋會一再重複的生成、對撞、融合及再成長，這些不穩定的燃燒流場結構將會大幅影響火焰和流場間的交互作用形態。如何將獲得實驗資料消去雜訊並保留較完整正確的量測結果，後處理分析的選擇及應用便是非常重要的一個環節。

#### 4-3-2 POD 原理及應用概念

關於燃燒流場的後處理分析技術，有許多研究者提出不同的方法，例如利用傅立葉轉換(Piero *et al.*, 2010)進行影像處理或降噪等等，藉由不同的基底函數逼近原始資訊，且能利用這些基底函數組成的特性辨別出燃燒流場的時空特性。然而傅立葉轉換是以固有基底函數的方式進行逼近因此會存有較大的誤差，因此選擇可隨量測對像改變而調整的處理方式來輔助光學診斷技術將可達到較佳的分析結果。POD 是一個為處理具多變量(multivariate)和非線性特性而發展的分析方法，其基礎原理是透過線性程序將所獲得的資訊創造出具有正交性的基礎解，類似概念可見於矩陣理論(matrix theory)中的特徵值問題，都是著眼於如何從為數眾多且看似無序的資料中定義出該資料所蘊含的最大特徵，換句話說即是找出最能代表該資料的高能能量分布(Chatterjee, 2000; Sirovich, 1987; Berkooz *et al.*, 1993)。而從數學的角度來看，POD 是將一給定的矩陣進行對角化(diagonalize)轉換，即是將此矩陣作奇異質分解(singular value decomposition, SVD)。

在流體力學的領域中，已有許多研究探討紊流流場的理論及分析方法，但是紊流流場問題困難之處在於些微的初始和邊界條件變化，都會使整個流場特性產生

劇烈的改變，也因為具有這些擾動發展和無序分布的特性，紊流流場同時具有隨時間變化和不同尺寸大小的渦旋結構，其特性變得非常複雜而難以分析，至今仍是待解的困難問題。這些不穩定性(instability)的來源有很多種，發展和變化的特性也不盡相同，如從剪流層發展出來(Kevin-Helmholtz instability)，或是從層流轉變為紊流過渡階段的多維度不穩定性，或是在鈍體後方尾流區中的渦列(vortex street)結構。紊流流場中的不穩定性不僅造成完全不同的流場結構，更會互相影響，使流體剪應力分布、動量改變、質量和能量傳輸特性變化趨向複雜化。但是研究者發現在這複雜的流場中會存在同調結構，此結構是紊亂流場中的高能量結構，因此利用 POD 找出複雜資訊中的特徵，或是做低秩近似(low-rank approximation)，成為分析紊流特性的關鍵處理技術(Berkooz *et al.*, 1993; Kourentis and Konstantinidis, 2012; Bernero and Fiedler, 2000; Meyer *et al.*, 2007; Kostas *et al.*, 2005)。Lumley (1967)證明此方法可用於紊流，分解流場空間結構，最大空間能量特徵值則可代表流場中大渦流(big eddies)。判定同調結構的重要性在於：從能量的觀點來看，同調結構在流場中具有相當的比例(20-25%)，同時，同調結構的動態變化會大幅影響流場的混合，因此了解流場中同調結構的影響有助於分析紊流流場特性。除了紊流分析之外，此技術也被廣泛應用於不同領域中，例如隨機變數分析、影像處理、資料壓縮、信號分析和系統最佳化等等(Holmes *et al.*, 1998)。

雖然已有許多研究運用 POD 技術來分析各領域的問題，但在燃燒領域中利用 POD 技術探討燃燒現象則稀少許多。燃燒是耦合流體力學和化學反應動力學的複雜反應過程，因此其高度紊亂的火焰動態特性和流場動態特性必須要適當處理後才能從中挖掘出可用的資訊(Duwig and Iudiciani, 2010)。目前在燃燒領域中運用 POD 進行分析的文獻主要集中於渦旋燃燒器(Dam *et al.*, 2011; Legrand *et al.*, 2010; Boxx *et al.*, 2012)和引擎(Bizon *et al.*, 2009; Bizon *et al.*, 2010)兩大類，原因是在這兩種情況下，火焰和流場均呈現高度紊亂且具有明顯的交互影響。Boxx (2012)利用化學螢光、PIV 和 PLIF 等量測技術探討貧油甲烷火焰在渦旋燃燒器中受到螺旋狀

攝動渦旋核心(precessing vortex core, PVC)結構的影響，再藉由 POD 技術分析熱聲振動影響的流場和火焰反應周期變化的特性。Duwig and Fuchs (2007)則是應用 POD 技術分析以大尺度渦流模擬法(large eddy simulation, LES)模擬渦旋燃燒器 PVC 結構和火焰間交互作用的影響。Chen *et al.* (2011, 2012)研究直噴引擎(direct injection engine)中成功燃燒和不點燃兩種狀態下 PIV 和 LIF 量測所得的速度和濃度分布，並以 POD 技術探討這兩種狀態火花點燃時，局部當量比和流場結構等差異性對點燃能否成功和引擎內部反應流場的影響。大部分研究成果是來自於以 POD 分析燃燒流場中的速度場、密度場和濃度場所蘊含的高能結構，然而就實際的燃燒應用而言，暫態的火焰和流場交互作用變化卻是關鍵所在，顯示對於火焰和流場的動態特性仍需要進一步研究探討。由於層狀化燃燒流場具有複雜的火焰和流場交互作用，除了需要利用高速光學診斷技術(PIV 和化學螢光法)擷取充足之流場及火焰螢光原始影像，更須透過 POD 處理獲得其模態能量分布，進行燃燒流場之重建並分析各模態中不同流場和火焰結構扮演的角色，改善傳統倚賴平均或暫態燃燒流場分佈的分析方式，一方面降低以暫態分佈為基礎的主觀評斷影響，另一方面也提升平均燃燒流場中被犧牲掉的資訊，最後達到以低維度資料保存主要燃燒流場結構特徵的分析目的。

POD 在實際應用上有古典法(Lumley, 1967)和快照法(Sirovich, 1987)兩種處理方式。古典法適用於利用雷射都普勒測速儀所獲得空間解析度較低的速度場分佈；快照法則適用於處理速度分佈的空間格點(grid nodes)大於快照張數的情況，對於現今空間和時間解析度大幅提昇的 PIV 技術而言，快照法能更有效率處理流場速度分佈。本研究使所用的即是快照法。

POD 的基本概念為將速度分佈  $V^{(k)} = (u, v)_{i,j}^{(k)}$  或是純量分佈  $S^{(k)} = (s)_{i,j}^{(k)}$  分解成為互相正交(orthogonal)的  $M$  個空間基本函數(POD modes,  $\varphi_m$ )及其相關係數  $c_m^{(k)}$  的



線性組合  $V^{(k)} = c_0 \varphi_0 + \sum_{m=1}^M c_m^{(k)} \varphi_m$ ，其中在每張單獨快照影像中， $i$ 、 $j$  分別為格點的索引值(index)， $k$  則是每張快照的索引時間，當使用快照法時，模態數( $M$ )會相等於快照數( $K$ )； $c_0 \varphi_0$  代表第 0 模態，也就是其平均。由速度分佈可得  $u$  和  $v$  的空間關係矩陣為  $C = \frac{1}{K} (UU^T + VV^T)$ ，對純量分佈而言則是  $C = \frac{1}{K} SS^T$ 。POD 方法的目的是在於找到出一系列代表‘Coherent structures’的正交基本函數  $\varphi_m$  (POD modes)，由式

$$\sum_{k=1}^K \left\| V^{(k)} - \sum_{m=1}^M c_m^{(k)} \varphi_m \right\|^2 \rightarrow \min \quad (\varphi_i, \varphi_j) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (4-3)$$

在受到限制下達到最小值的方式達成，其中  $\|\cdot\|$  是  $L^2$  norm，保證相較於其它的展開方法，它是以平方平均數(quadratic mean)的方式達到最佳化且最快的收斂。解析空間關係矩陣  $C$  的特徵值問題，也就是  $C\beta_m = \lambda_m \beta_m$ ，因此基本函數  $\varphi_m$  可由分別將  $u$  和  $v$  速度分佈矩陣投影至特徵向量  $\beta_m$  來獲得。這裡所獲得的基本函數代表的是擷取流場中結構含有能量的多寡，並不是反映真實所見之流場。各模態的係數可由將原始速度分佈投影至基本函數  $\varphi_m$  來獲得，其係數矩陣為

$$c_m^{(k)} = \begin{bmatrix} c_1^{(1)} & c_2^{(1)} & \dots & c_M^{(1)} \\ c_1^{(2)} & c_2^{(2)} & \dots & c_M^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_1^{(K)} & c_2^{(K)} & \dots & c_M^{(K)} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

也可透過各模態投影得到時間係數(time coefficient)。由於 POD 使用  $L^2$  norm，對於速度分佈而言，具有代表在  $k$  th 所以時間裡  $m$  th 模態能量含量的特性，以  $\frac{1}{2} (c_m^{(k)})^2$  表示，而其各模態其相關的能量分佈將自動由大至小排列，也就是當模態為 1 時具有最高能的結構分佈，若要重建完整的流場結構需將各模態加總起來



$$\langle V \rangle = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K V^{(k)} = \sum_{m=1}^M \langle c_m \rangle^K \varphi_m \quad (4-5)$$

本研究利用 Matlab 撰寫 POD 的計算程式，分別處理同步高速 PIV 和化學螢光量測所獲得之速度場分佈和火焰強度分佈。

#### 4-3-3 POD 之模態能量及重組

圖 4-17 和圖 4-18 分別為 1000 組流場和燃燒場影像利用 POD 處理後所獲得之單股、雙股和三股進流之模態能量含量分佈，考慮涵蓋燃燒流場週期因此選擇 500 組進行 POD 處理，而越高階項其能量含量越少，因此顯示前 40 項已足夠表達整體能量含量分佈。比較單股和雙股進流的能量含量分布可以發現其一、二模態占了絕大比例，顯示燃燒流場的特徵結構明顯，少有不穩定擾動的紊亂現象，但在增加第二股流場後可發現其第三模態的比例相對提高。在三股燃燒流場的情況下，其第一模態的比例快速減少，且模態成分比例相對延展許多，代表在越多股燃燒流場的情況下主結構能量會分散至低能量的結構，但仍具有明顯的能量比例差異，因此也會造成空間、時間上的不同分佈特性。在圖 4-18 火焰螢光的模態能量的部分，雖不像流場具有能量含量極高的第一模態，但能量比例仍呈現明顯的遞減趨勢。此外對於單股進流而言，第二、三模態比例較接近，而雙股及三股進流則是第一、二模態比例較接近。此外隨進流數增加，越高階模態所佔比例也隨之增加，和流場的模態能量分布具有相同特性。總結而言，速度場(Kourentis and Konstantinidis, 2012)和化學螢光(Kostka *et al.*, 2012; Poinso, 2012)兩者在 POD 分析後之能量分佈特性上，與前人在文獻中所觀察之趨勢相符，確立 POD 分析的能量分佈特性後，進一步探討各模態間能量和現象之間的關聯性。

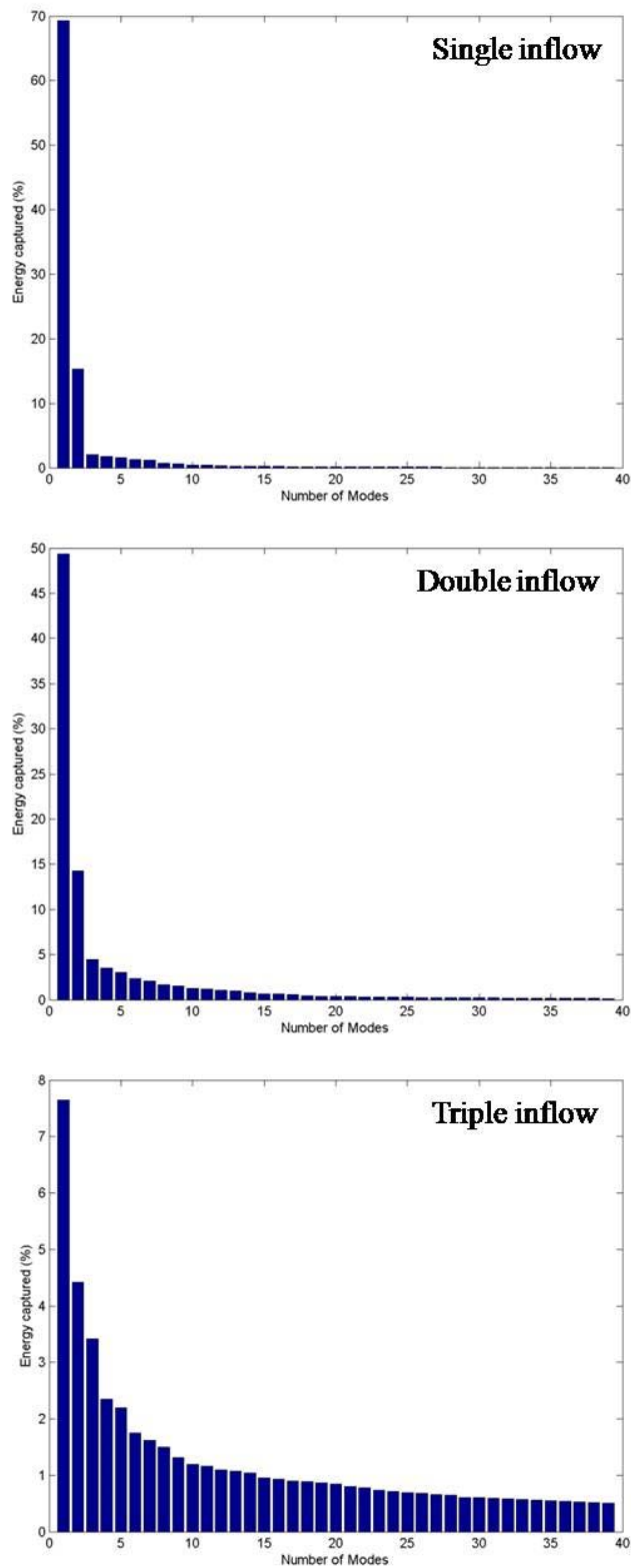


圖 4-17 單股、雙股及三股進流之流場模態能量含量分佈(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

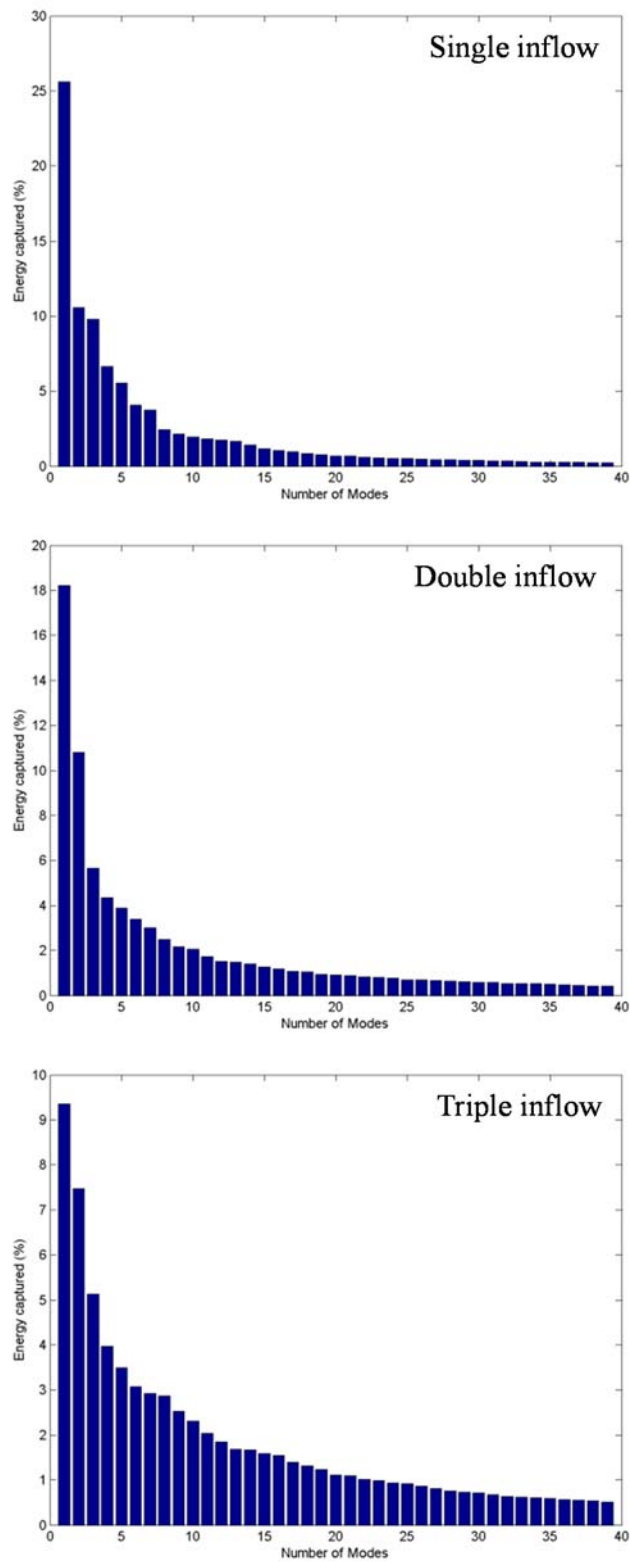


圖 4-18 單股、雙股及三股進流之燃燒場模態能量含量分佈(固定出口流率均為 13

l/m 及當量比均為 0.7)

藉由確認 POD 模態能量重組的情況可確保 POD 分析的正確性及顯示能量含量對流場結構空間上分布的影響。由於模態能量含量分佈顯示單股進流之燃燒流場的第一、二模態已占了近 95%之能量，又因第一模態占了幾乎 80%的能量，因此第一模態幾乎就已和原始渦度場相同，如圖 4-19 所示。加上第二模態後，則開始出現原始渦度場中結構產生分離的區域，並且隨相加模態增多而更趨近原始渦度場。

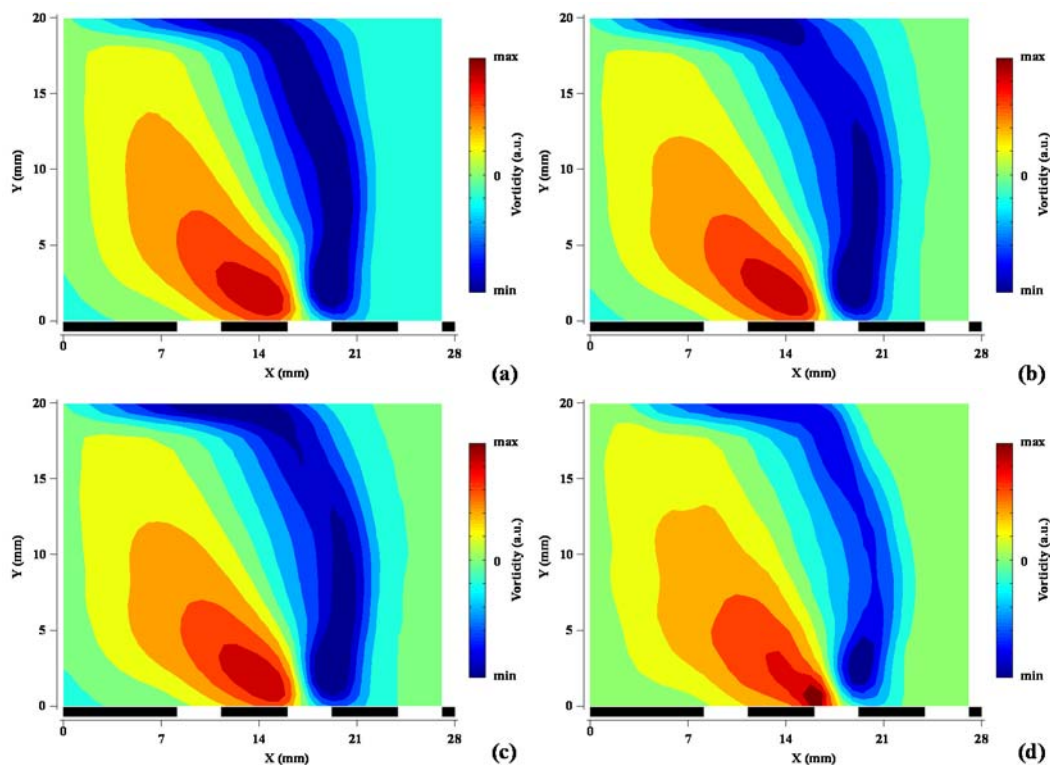


圖 4-19 單股渦度場重建分佈圖(a)累加至第一模態，(b)累加至第二模態，(c)累加至第三模態，(d)累加全部模態(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

雙股進流之渦度場重建分佈類似於單股進流，雖然加入第二股進流增加流場結構的變化性，但由模態能量分佈可知前一、二模態已決定流場結構特性，並隨著累加的模態增加而更趨近於原始的模態，如圖 4-20 所示。

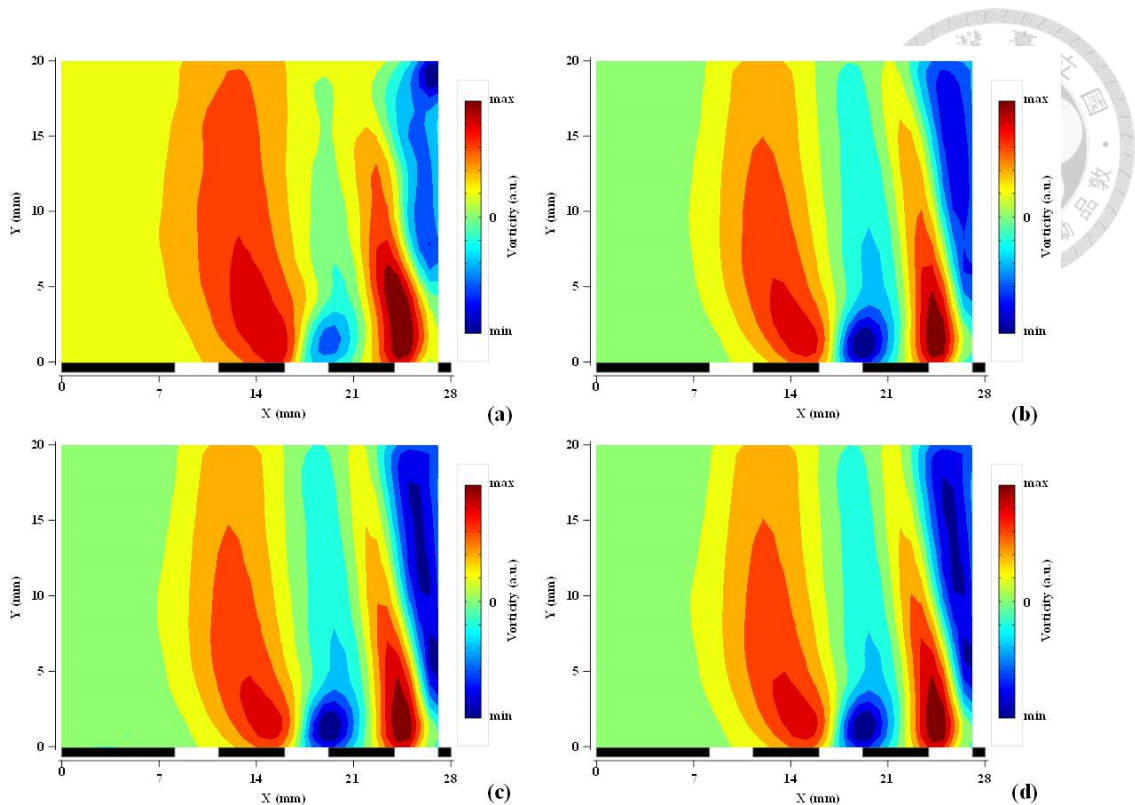


圖 4-20 雙股渦度場重建分佈圖(a)累加至第一模態，(b)累加至第二模態，(c)累加至第三模態，(d)累加全部模態(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

對於三股進流之渦度場重建，第一模態和平均流場最為相近，出現迴流區和剪流層區的大致結構；隨著模態累加，在累加到第 40 模態時幾乎已和原始渦度場相同，除了主要的回流區渦對結構外，還包含許多散落其中的小渦流結構，如圖 4-21 所示。若和單股或雙股進流之流場比較，可發現三股進流時由於包含大小不同尺度的渦旋結構，因此需要更多的模態累加才能重建原始流場。但是這也說明藉由分析不同模態可進一步辨別各特徵結構，包括在原始渦度場中具有的大小不同尺度渦旋結構，以及發展中剪流層的小渦對，其尺度效應在燃燒流場中扮演的角色。

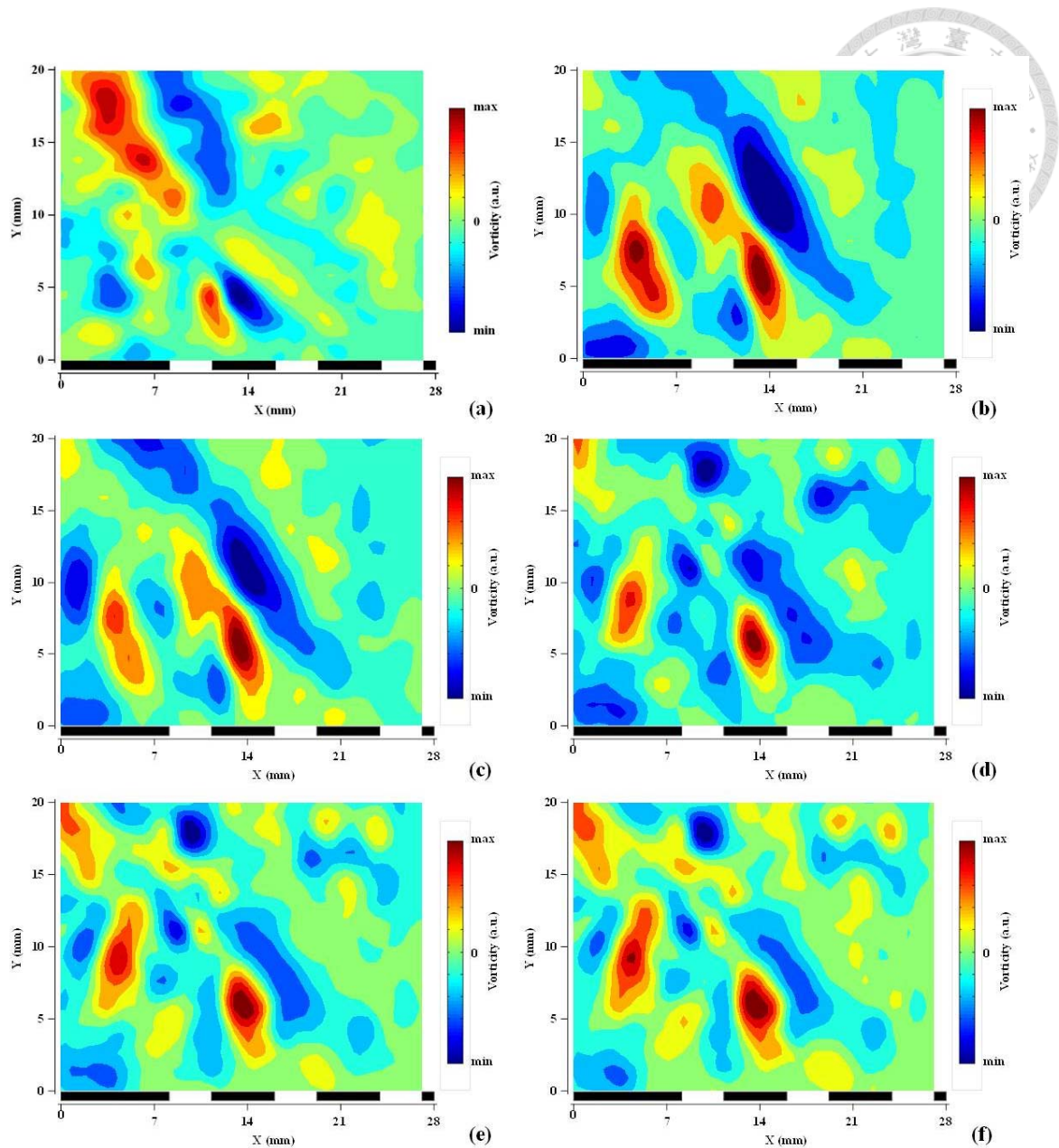


圖 4-21 雙股渦度場重建分佈圖(a)累加至第一模態，(b)累加至第二模態，(c)累加至第三模態，(d)累加全部模態(固定出口流率均為 13 l/m 及當量比均為 0.7)

有效降低資訊量且能萃取出最主要結構的方法對於火焰影像辨識、流場結構分解及模態變化特性非常重要(Kostka *et al.*, 2012)，而本節驗證拆解後的燃燒流場其模態及重組特性，證實透過 POD 處理後的燃燒流場，隨本身進流數增加而增加所需模態數來進行重組。原因是 POD 是由各含不同能量分佈的結構組合而成，全部累加之後最終能獲得原始流場。對於複雜的燃燒流場而言，主結構會相當近於平

均流場，但要重組回原始結構就必須要更多的模態相加才能完成分解出來的小結構產生的空間和時間的動態影響不同，可能具有出口渦對的震盪特性，或是剪流層渦對壓縮與擴張的特性，甚至是下游大尺度渦旋牽引之浮力效應。因此由重組的正確性可確立由 POD 處理後各模態的動態特性是可信賴的，因此可深入探討燃燒流場之空間結構分佈和特性，以及時間演變和頻率響應。

#### 4-3-4 基於 POD 處理之燃燒流場分析

由於層狀燃燒場隨進流數增加而強化紊流強度變化，透過 POD 處理可解析出燃燒流場特徵結構，並可進一步分析具複雜動量傳遞特性的含高能量的區域及其交互作用。圖 4-22、4-23 和 4-24 分別為單股、雙股和三股進流之燃燒流場經過 POD 處理的燃燒場(左)與渦度場(右)前三模態分佈圖。在燃燒場部分，單股進流火焰結構單純，各模態中渦旋結構集中於下游處左右往復擺盪。而雙股進流的燃燒場模態分佈則出現上、中、下游分層的結構，顯示加入第二股進流的火焰交互作用除了使火焰縮向中央鈍體，也會影響火焰結構擺盪的方式。而在三股進流時除與雙股進流出現類似的上、中、下游分層結構，在火焰區周圍也出現許多細碎結構，且中間火焰區擺盪幅度明顯大於雙股進流，顯見三股進流之燃燒流場其動量傳遞變化劇烈之區域涵蓋了垂直、水平兩個方向。

在渦度場部分，單股進流時為結構單一的穩定流場，在第三模態中，上游處開始從主要結構分離出現較小的渦旋結構，然而主要結構仍為明顯的剪流層區。在雙股進流時則出現分層結構，原因是加入的第二股進流會使上下游分層出現反轉結構加入原本的垂直分層流場，如第三模態所示。相較於單股進流的第三模態其擷取能量趨近於零，雙股進流之第三模態因雙股進流的影響而放大比例，此外從第三模態的空間分佈也可看到兩進流中間產生回流區結構。而在三股進流中，第一模態顯示在剪流層和大尺度渦旋結構間形成鞍點(Saddle point)，由鞍點結構造成靠內側熱的燃後氣體與靠外側冷的二次空氣產生一介面阻隔減弱混合(Sundaram *et al.*,

2012), 因此一方面將高溫的氣體包覆在燃燒器出口, 二方面二次空氣捲入及由迴流區向上引導的流場將幫助紊流擾動量使燃氣混合能力提升。第二模態的主要結構特徵位於剪流層之位置, 對應在燃燒流場的火焰區位置處, 代表層狀化流場梯度所造成之剪流層及其周遭的微小結構是火焰擺盪的關鍵。此外從模態分佈也可發現加入第三股進流後的流場結構細碎化(fractalize)程度較加入第二股進流時顯著提升許多, 驗證紊流強度機率密度分佈函數的偏移趨勢。若和平均燃燒流場相較, 可觀察出透過 POD 處理後, 燃燒流場中動量傳遞強的區域明顯被解析出來, 包含不同進流數間的大小及分佈位置, 呈現隨著進流數增加而渦對結構越小的趨勢, 且由大尺度渦旋的左右擺動振盪轉變為剪流層主導上下反轉的特性主導。

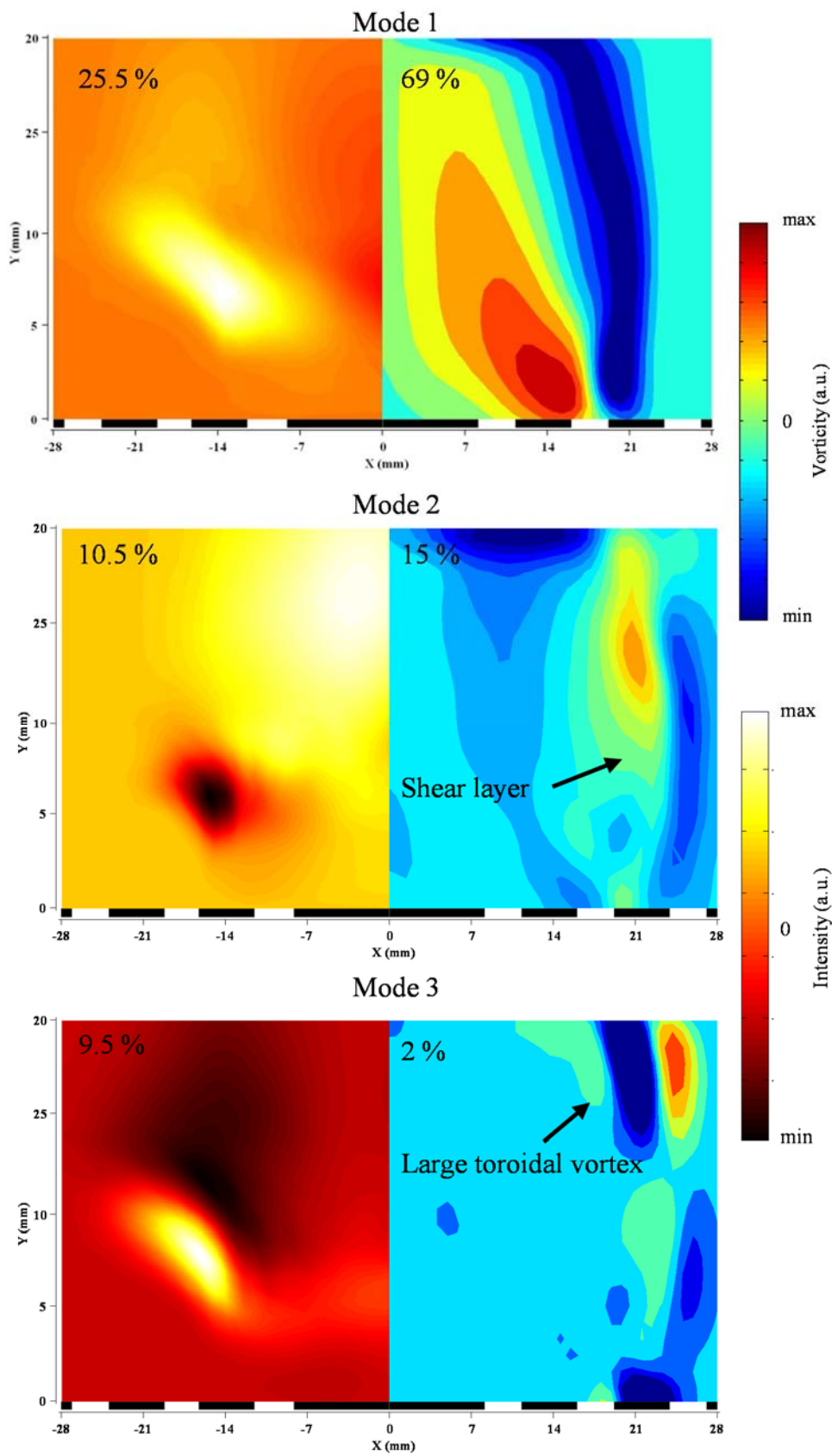


圖 4-22 單股進流之燃燒場(左)與渦度場(右)前三模態分佈圖

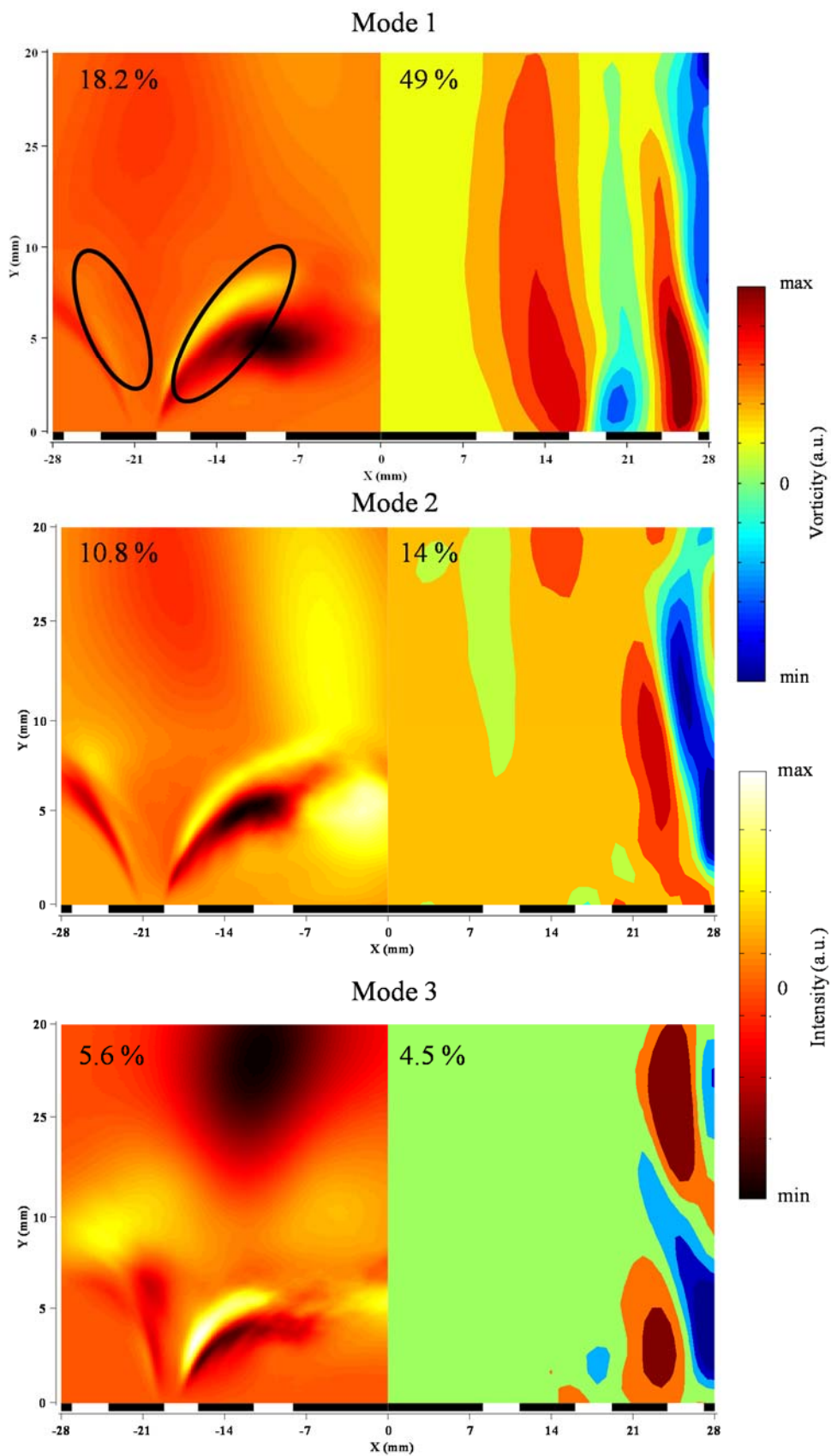
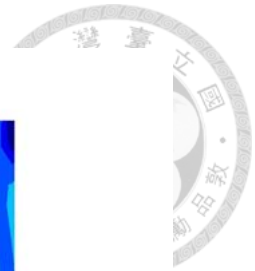


圖 4-23 雙股進流之燃燒場(左)與渦度場(右)前三模態分佈圖

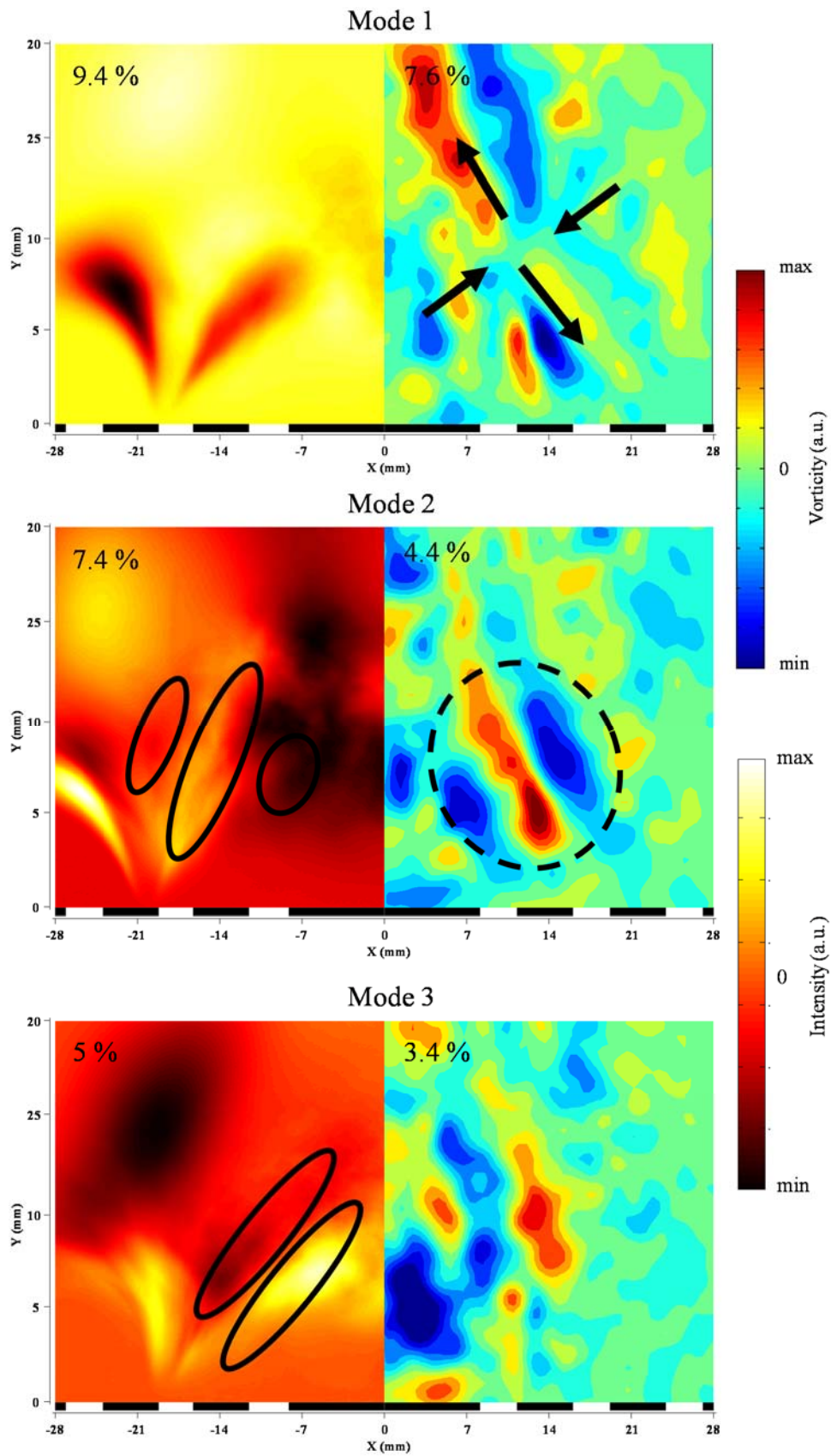


圖 4-24 三股進流之燃燒場(左)與渦度場(右)前三模態分佈圖

火焰和流場間的交互作用一直是研究者探討的焦點之一，然而由於燃燒流場高度非定常且耦合的特性，兩者之間的關係並無法直接觀察得之。經確認其重現性後，包含原始時序或 POD 分解後的時間係數均為由 4000 fps 紀錄達 8000 張影像擷取的原始序列的部分段落。圖 4-25 為三股進流時燃燒流場火焰及速度(a)原始，和(b)第一模態之週期分布，原始未經過處理的時間序列雜亂無章，而透過 POD 處理後的第一模態則出現較規律的變動模式。雖然 POD 處理在流體力學上已被用來確認同調、大尺度(large-scale)或準有序化(quasi-organized)等空間結構特性，但利用處理過程中所獲得之時間係數(time coefficient)來解析暫態特性則較少研究著墨 (Poludnenko and Oran, 2010)。時間係數的變化特性可有效解析複雜的螺旋攝動核心 (PVC)流場結構的動態行為，以及流場不穩定性程度，Druault *et al.* (2005)則指出時間係數隨流場動態行為變化的性質；Moreno *et al.* (2004)則指出第一及第二主導模態之間的時間係數發展差異特性，並轉為頻域分析驗證較高模態之影響確實可忽略，而從能量擷取的分佈結果來看，第一模態及第二模態確實佔絕大部分比例，因此為了比較主導模態及次要模態之特性差異，分別取燃燒場及流場之第一及第二模態時間係數進行分析。

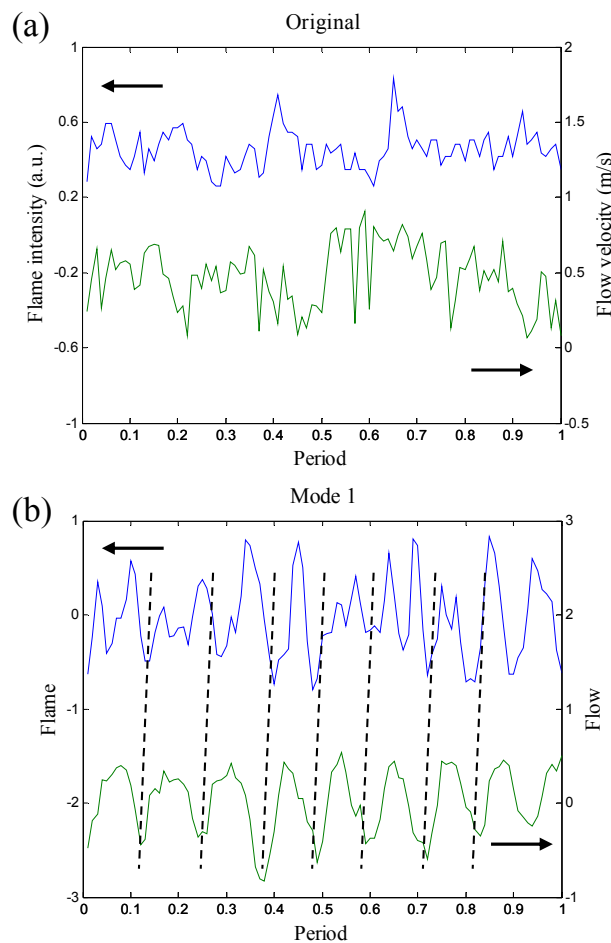


圖 4-25 三股進流時燃燒流場火焰及速度(a)原始，和(b)第一模態之週期分布圖

圖 4-26 至 4-28 為不同進流數下燃燒場及流場之時間係數分佈，。在燃燒場擺盪週期的部分，單股進流時，第二模態的相位領先第一模態；雙股進流時第一模態的相位領先第二模態；三股進流時則無明顯規律。對於各模態的時間係數分佈特性而言，在進流數增加後主流方向開始轉變並產生許多擾動，但同調結構在火焰完整厚實的迴流區外圍剪流層區域以及下游大尺度渦旋區域透過交互作用明顯成為主導結構。在流場部分振幅擺盪特性和燃燒場在高模態有不同的趨勢，隨進流數增加，此外週期也隨進流數增加而減小。相位影響方面，在單股流場和三股流場中第一模態和第二模態周期相同但存有相位差，第二模態先行可解釋空間分佈中第一模態的大尺度渦旋結構是由第二模態的剪流層捲上(roll-up)發展而來。觀察時間係數的變動可發現隨進流增加，在接近反轉處出現越明顯的不規則抖動，說明此時流



場の間歇性(intermittency)增強；由於時間係數的變動反映流體動態特性，因此從高階模態週期減小、反轉處不規則抖動的間歇特性可說明流場中進流數增加和細碎結構增加且生成、消散的轉變快速存在正相關關係。

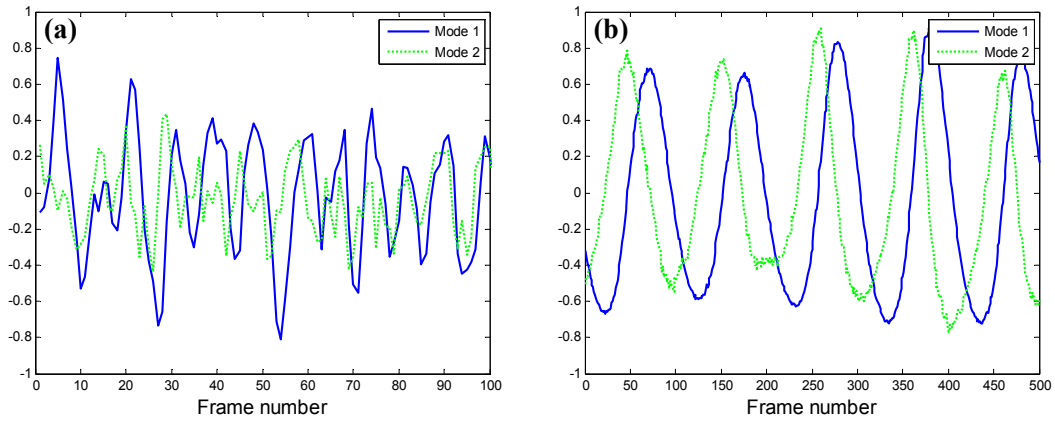


圖 4-26 單股進流之前三模態時間係數變化(a)燃燒場，(b)流場

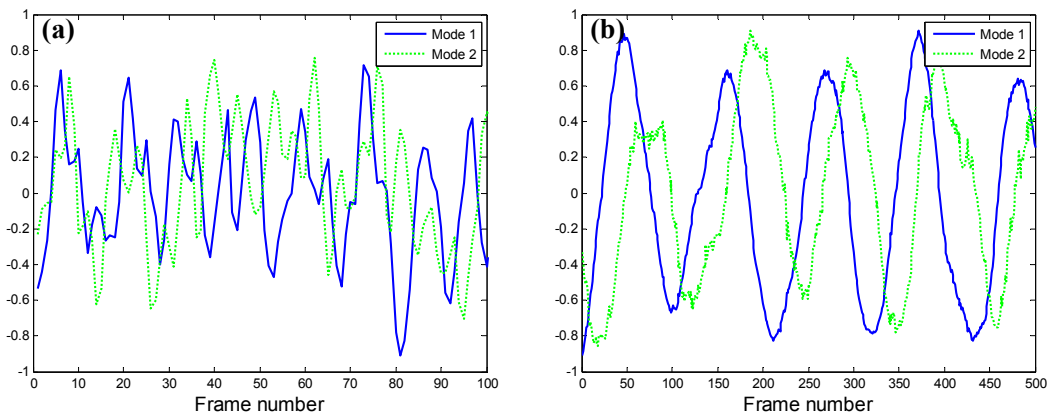


圖 4-27 雙股進流之前三模態時間係數變化(a)燃燒場，(b)流場

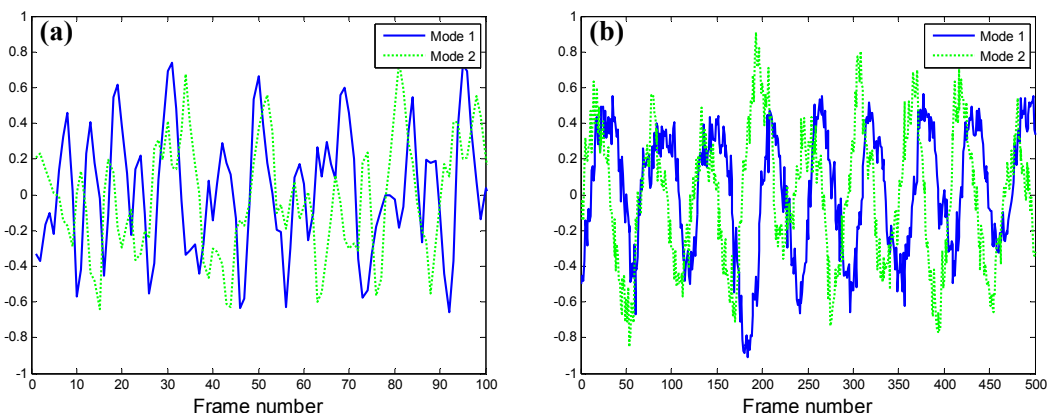


圖 4-28 三股進流之前三模態時間係數變化(a)燃燒場，(b)流場

圖 4-29 和 4-30 為在不同進流數條件下，燃燒場及流場之原始燃燒流場及 POD 處理的頻率分析圖，頻率分析透過快速傅立葉轉換得到。首先在燃燒場方面，頻率分佈呈現兩個特性：隨著進流數增加，次要頻率(sub-frequency)的分佈增加；另外第一模態的頻率峰值和原始燃燒流場相符合，而第二模態則出現較多次要頻率。次要頻率增加的部分主要來自於進流數增加而加劇紊流化程度，使火焰結構隨之擺盪且破碎再重組，然而不影響燃燒流場中特徵頻率的解析，因此頻率峰值的分佈相互吻合。在流場方面，POD 處理之模態頻率峰值皆和原始燃燒流場之峰值相吻合，並且隨進流數增加，次要峰值也有明顯增加的趨勢。值得一提的是，若將第一和第二模態之次要頻率峰值處累加則幾乎可還原回原始燃燒流場的頻率分佈特徵，顯見第一模態和第二模態具有時空動態特性互補的特性，這也證實透過 POD 進行燃燒流場重建為一可靠的後處理方式。

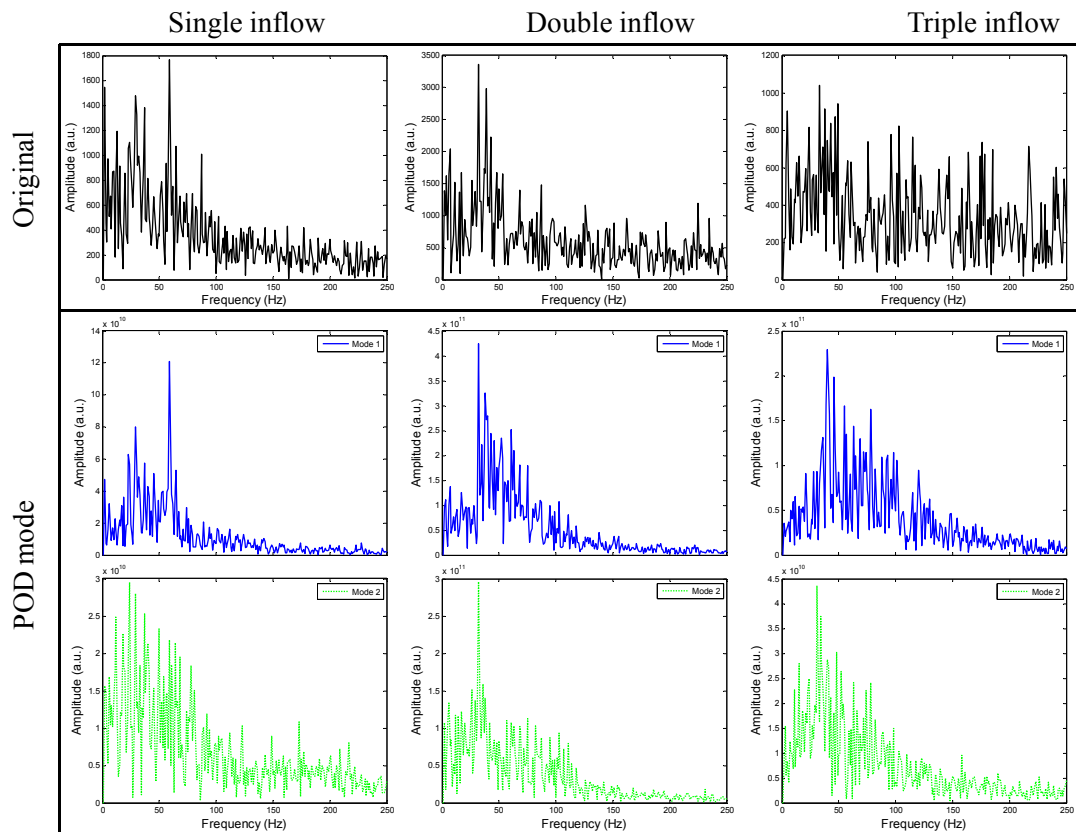


圖 4-29 燃燒場：單、雙及三股進流之前二模態時間係數變化和原始頻率分佈圖

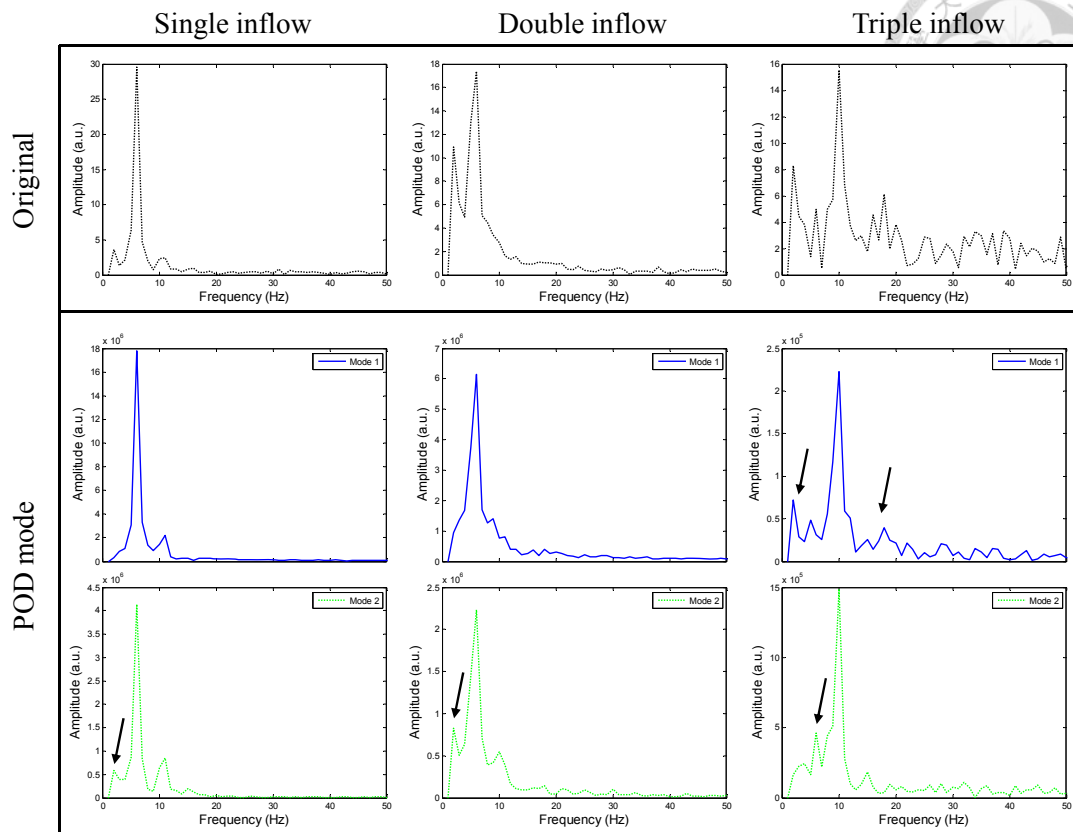


圖 4-30 流場：單、雙及三股進流之前二模態時間係數變化和原始頻率分佈圖

整體而言，以 POD 處理後的燃燒流場，在燃燒場及渦度場之時空動態上均解析出和平均燃燒流場不同的特徵。相較於以往由主觀的從空間去定義區域、以 POD 獲得之燃燒流場資訊同時判定區域的流場結構發展變化和其頻率特徵，可從客觀的角度上判別包含時間和空間兩者的資訊，提高對全域燃燒流場的分析準確性，另外由時空分佈和頻率可再次驗證重組的可行性與可靠性。此外因為火焰在剪流層會產生許多小渦旋結構影響燃燒流場(Sundaram *et al.*, 2012)，隨進流數增加而受火焰和流場間交互作用影響增加紊流強度和火焰強度，在不同模態空間分布上出現的小結構變多和時間係數的變動趨於劇烈，這些紊流化結構特徵也顯現在時間係數的頻域分析上，顯示燃燒流場越趨混沌且出現許多間歇現象，因此可證明藉由 POD 處理複雜的燃燒流場，能有效的解析其時空動態特性。



## 第五章 層狀化燃燒之穩焰機制

以 POD 分析單股、雙股至三股進流數影響之層狀化燃燒流場，有效獲得其時空動態特性，並歸納出進流數所形成之燃燒流場特性基於進流數和出口區鈍體結構耦合的特性，因此本章透過操控進流數效應提出三種層狀化燃燒之穩焰方法。首先探討單股甲烷貧油飄焰及加入空氣共伴流影響轉化為穩定之類錐焰型態等穩焰機制；其次探討隨著當量比變化，貧、富油時不同火焰型態和多渦漩結構交互作用對穩焰機制的影響，並歸納出壓縮渦對幫助穩焰的特性。第三則是應用層狀化燃燒之熱擴散不穩定性影響歸納出貧油由低頻大尺度結構主導，富油則由出口處高頻小層流化結構主導之火焰和流場交互作用關係。

### 5-1 空氣共伴流穩焰效應

#### 5-1-1 單股進流

圖 5-1a 和 b 分別為單股進流之中間火焰型態分佈圖以及其操作區間分佈圖，隨當量比逐漸接近定當量點 1，火焰型態由接近吹熄(near blowout)轉變為相對較穩定之飄焰(lift-off)，最後形成穩定之錐焰(cone flame)。操作區間的部分，貧油可燃極限可到 0.56，顯示層狀化燃燒器在開放空間下無須增加額外的輔助，即可達到良好的貧油燃燒效能。在流速低於 1 m/s 時，火焰在當量比 0.9 時發生熄滅，原因在於流速過低無法提供燃燒反應足夠的能量而熄滅。而在流速高於 1 m/s 時則是因為火焰傳播速度無法抗衡流速，最終導致吹熄(Shoshin *et al.*, 2013)。

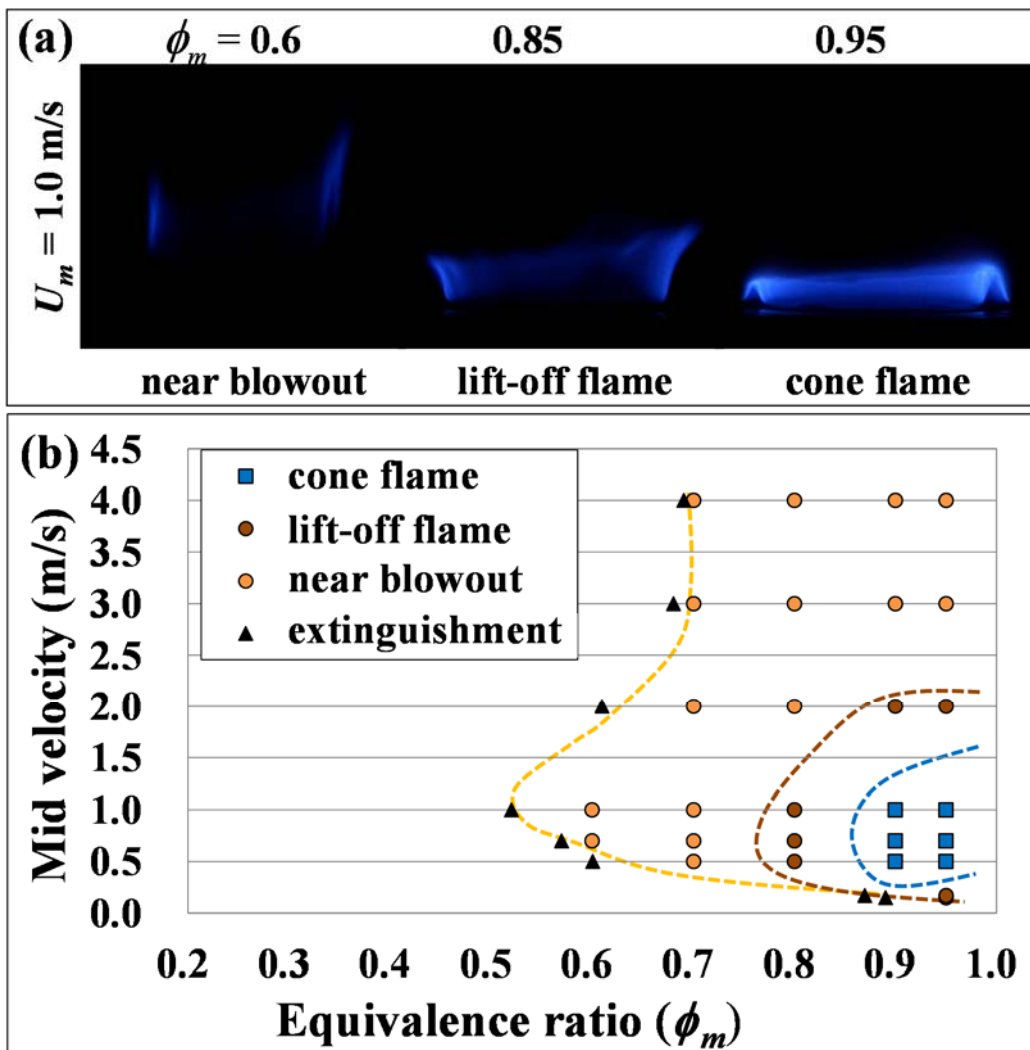


圖 5-1 (a)火焰型態，(b)穩定操作區間分佈圖

由於反應區會發生極大的密度變化，火焰和流場間的交互作用會強烈影響火焰幾何形狀，進而改變火焰傾角(oblique angle)，對飄焰的影響則更為明顯(Lawn, 2009)。由於在本研究中火焰型態可視為簡單的二維結構(如圖 5-1 所示)，因此傾角即為直接由照片量測火焰尖端與水平面之間的夾角。如圖 5-2 所示，火焰傾角在出口流速為 1 m/s 時降至最小值  $45.5^\circ$ ，由於角度越小代表火焰尖端越彎向上游和火焰傳播速度較快，這一特性也和穩定操作區間所獲得的分佈趨勢相同。

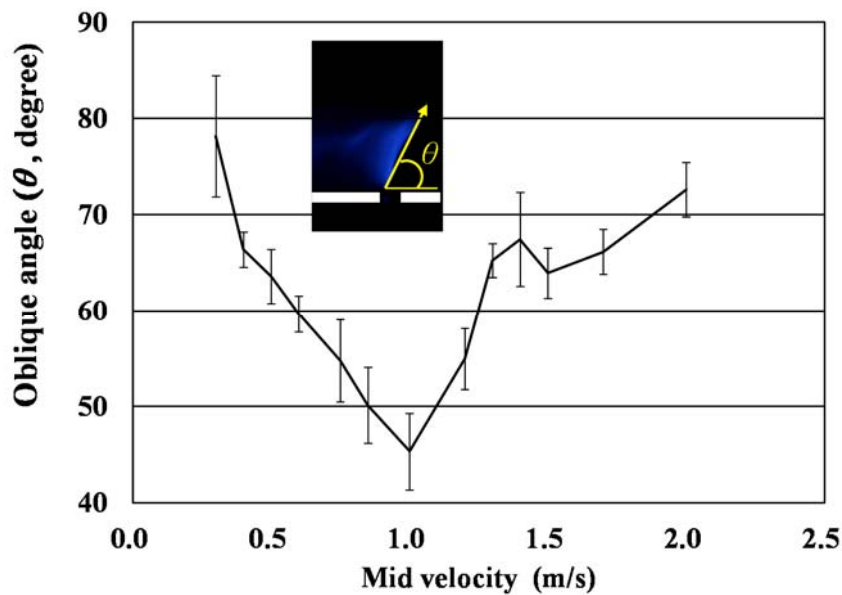
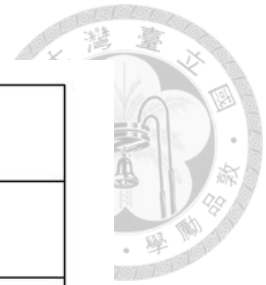


圖 5-2 當量比 0.85 之飄焰隨出口流速改變之火焰傾角

### 5-1-2 雙股進流

在注入空氣共伴流形成雙股進流模式之燃燒流場部分，藉由改變中間火焰燃氣之當量比( $\phi_m = 0.5-0.95$ )與出口流速( $U_m = 0.5-4.0$  m/s)，共伴流速比值  $\gamma(U_o/U_m)$  在 0.3-0.7 之間(依燃氣的出口速度而定)。結果顯示於內側注入共伴流對中間火焰並無影響，然而外側共伴流卻能改變中間火焰型態。經共伴流改善後飄焰結構轉變至較穩定之類錐焰(cone-like flame)結構，如圖 5-3 所示。以雷射斷層診斷法(laser tomography)進行之流場可視化實驗，其實驗方法與 PIV 相近，唯不同之處在於使用數位相機以拉長曝光時間之方式來取代高速攝影機之暫態影像，能初步觀察流場動態行為(Nishimura *et al.*, 1999)。比較內側和外側注入共伴流後的流場可視化影像，發現主因是中間火焰受空氣共伴流影響而於出口鈍體結構處強迫燃氣迴流至低壓區形成共伴迴流結構(co-recirculation zone)，進而促使火焰型態由飄焰轉變為類錐焰，因此將著眼在外側共伴流對中間火焰之影響及機制，如圖 5-4 所示。

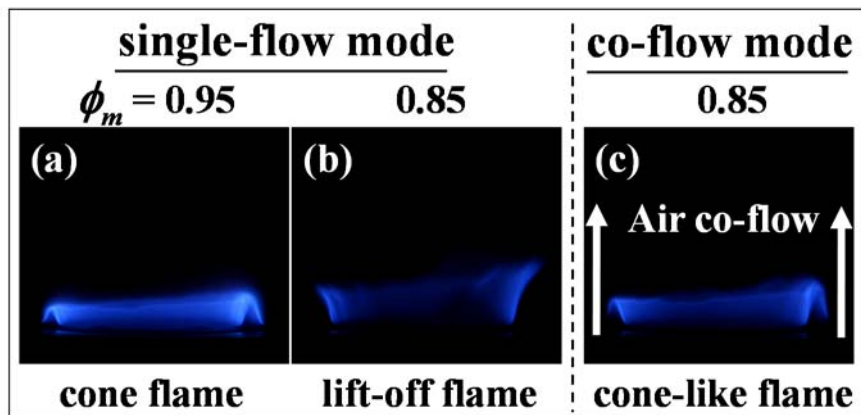


圖 5-3 雙股進流時注入共伴流之火焰型態變化

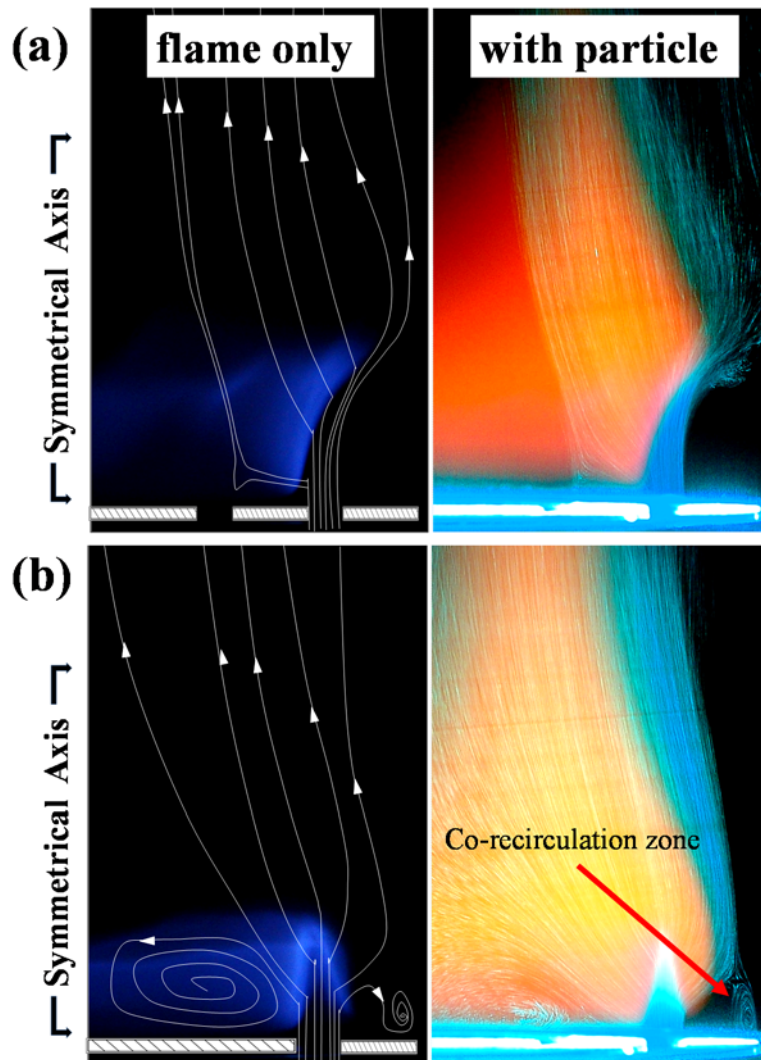


圖 5-4 由火焰影像疊加擬似線(pseudo lines)之流場可視化影像(a)注入內側共伴流，(b)注入外側共伴流

圖 5-5a 為固定燃氣當量比  $\phi_m = 0.85$ ，橫軸為中間火焰燃氣的出口流速  $U_m$  (範圍 0.1—2.0 m/s)；縱軸則為外環口空氣共伴流的速度  $U_o$ 。要產生類錐焰所需最低限度的空氣共伴流速度值，定義為有效空氣共伴流速度  $U_o^*$ ，實驗結果顯示有效空氣共伴流速度不是定值，而是隨著中間火焰的燃氣速度改變。此結果和許多關於飄焰注入共伴流影響之特性研究不同，Montgomery *et al.* (1998) 指出隨共伴流注入會增加飄焰長度，而 Muñiz and Mungal (1997) 也指出飄焰長度隨共伴流流速增加而增加。本文中共伴流對飄焰的影響來自火焰和共伴流流場引發之共伴迴流區結構之間的交互作用，由於火焰反應區所在位置為火焰傳播速度和燃氣流速相互平衡，鈍體結構所提供之低速迴流區可蓄積熱量而使火焰向更上游傳播。換句話說，由於迴流區的形成決定混合能力和火焰穩定性，因此流速比將是一個很重要的參數 (Esquivadano *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2002)。圖 5-5b 所示為隨中間火焰流速改變的流速比值，當  $U_m$  小於 0.5 m/s 時流速比需大於 1 才能改變飄焰，而當  $U_m$  大於 0.5 之後流速比值則快速減至小於 1。這是因為當中間火焰流速過小時不足以得到維持自身反應的能量，因此須靠更大的流速比來包覆反應後的高熱產物，類似於接近吹熄時之鈍體穩焰效果 (Dawson *et al.*, 2011)。而當  $U_m$  大於 0.5 之後由於火焰本身具有足夠反應能量而不須再倚靠包覆效果，所以此時共伴流之作用為提供隔絕及具備足夠動能之氣牆，使熱能蓄積在共伴迴流區當中。火焰型態轉變所需有效空氣共伴流速最小值發生在流速 1 m/s 可由火焰穩定操作區間特性來解釋，由於層狀化燃燒器操作區間在此流速下具有最大操作範圍，同時飄焰之傾角最小，此時火焰傳播速度為最快，代表火焰反應在此情況下最為強盛，因此只需最小的外在輔助及可達到穩焰的效果。

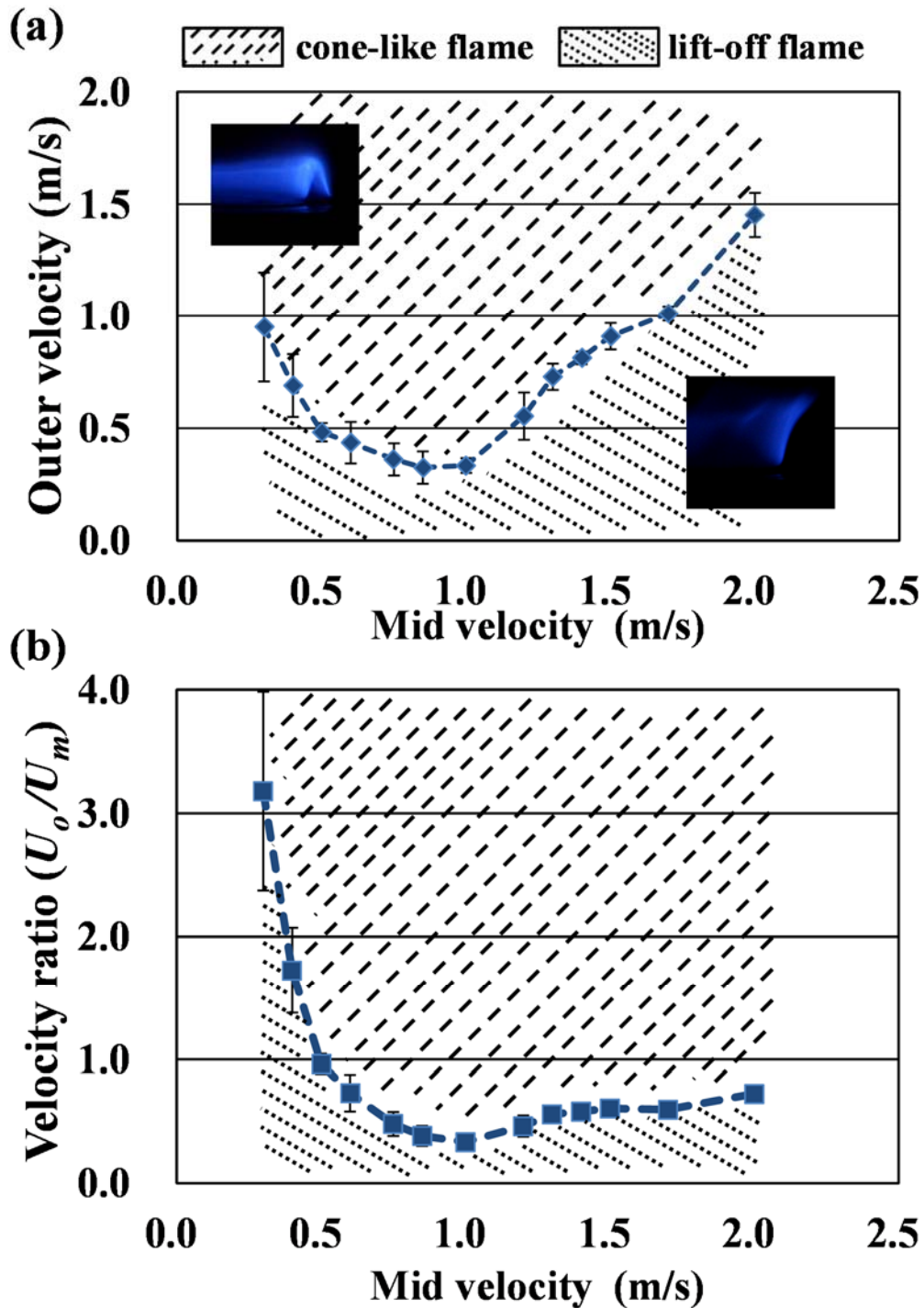


圖 5-5 (a)外環有效空氣共伴流速度  $U_o$  隨中環速度  $U_m$  改變之分佈, (b)有效流速比值  $\gamma(U_o/U_m)$  隨中環速度  $U_m$  改變之分佈(中環當量比  $\phi_m = 0.85$ )

以高速 PIV 量測中間飄焰( $\phi_m = 0.85$ ;  $U_m = 0.5$  m/s)在受到外環空氣共伴流的影響進而轉變成類錐焰結構的過程, 流速比值分別為  $\gamma = 0$ 、0.6 和 1.1, 影像擷取速

度為 2000 fps，解析度為 1280×480 pixels，因此空間解析度為 54  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，追蹤粒子影像經運算處理後得到平均速度向量與流線資料，取局部如圖 5-6 所示。圖 5-6a 在無空氣共伴流的情況下，中間火焰靠近外側的地方被吹昇而造成燃氣未反應即逸散至大氣中，造成燃料浪費並使燃燒反應強度降低。圖 5-6b 已加入空氣共伴流但仍小於有效空氣共伴流速，因此迴流結構滲透進入靠近飄焰底部，造成熱散失增加而無法使飄焰發生轉變。圖 5-6c 則是在空氣共伴流速超過有效空氣共伴流速後形成的類錐焰結構，此時外側空氣流速提升的結果使其噴出後筆直地朝下游離去，完全沒有空氣迴流，所以中外氣道之間的低壓區只能由中間火焰可燃氣迴流填補。由共伴迴流區中可觀察到在飄焰時的捲入外側氣流轉變至類錐焰時的衝擊反轉流場結構，使高溫燃氣蓄集在共伴迴流區當中。由於這個衝擊反轉流場結構類似於對流型燃燒流場，且受益於流體動力結構而強化穩焰並幫助拓展貧油可燃範圍(Dally *et al.*, 1998)。因此就像傳統上被歸類於停滯流場的側向衝擊結構，會直接改變火焰型態並且影響燃燒流場的主流運動方向和穩焰機制。圖 5-6a 和 c 中虛線所示之截面 A 為距離出口高度 4.3 mm 處，比較此處的水平速度分量( $U$ )可發現在超過有效空氣共伴流速後水平速度分量明顯增加許多(圖 5-7)，代表中間火焰燃燒後燃氣轉向進入共伴迴流區中達到蓄積熱源的效果；此外由圖 5-6 可見截面所在位置速度量值相近，因此水平速度分量增加意謂垂直方向速度分量減少，造成火焰能向上游傳播而形成類錐焰結構。

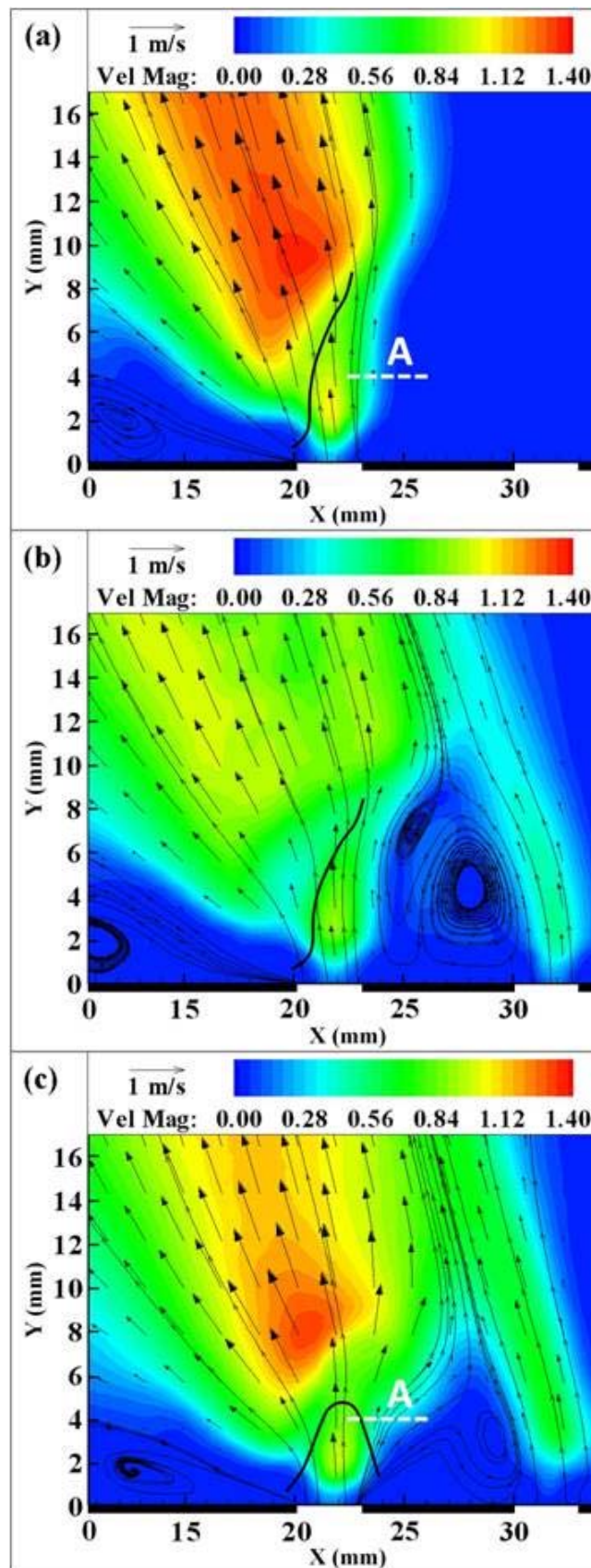


圖 5-6 中間飄焰隨共伴流速比變化之影響(a)  $\gamma = 0$  , (b)  $\gamma = 0.6$  和(c)  $\gamma = 1.1$

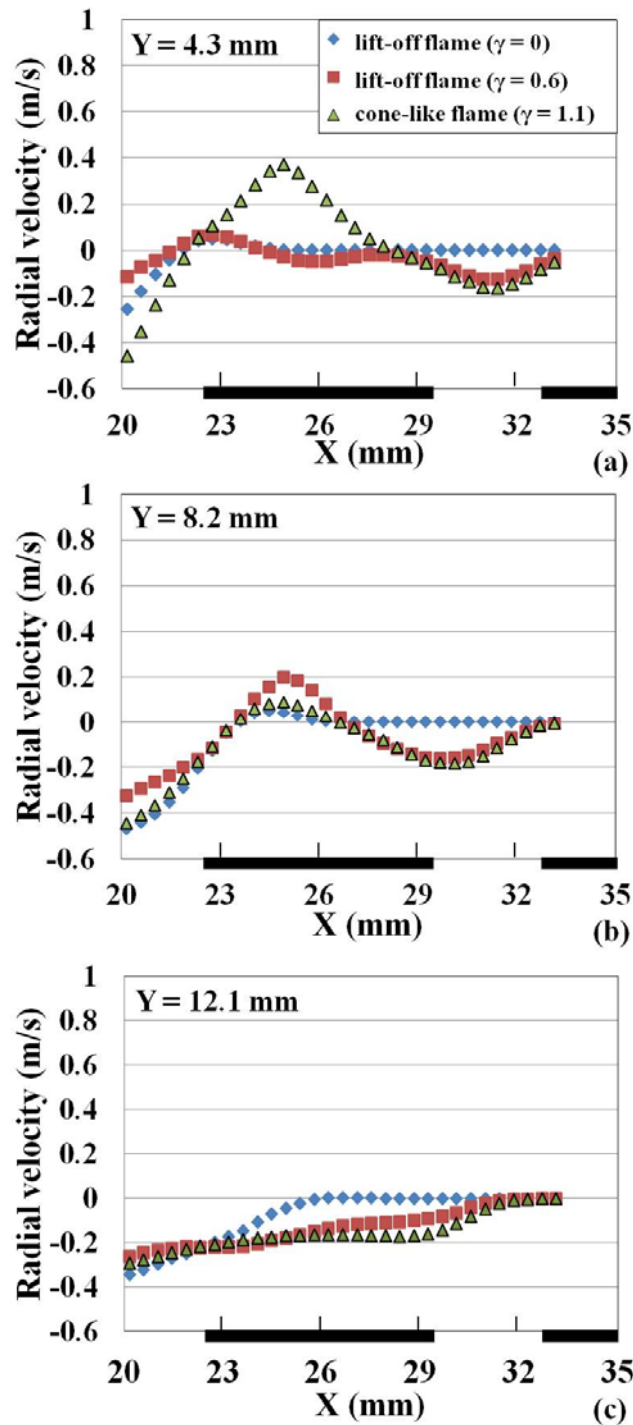


圖 5-7 空氣共伴流速度的燃燒流場中的 X 軸向速度分量  $U$  (中環至外環上方(a) 4.3 mm, (b) 8.2 mm ,and (c) 12.1 mm 橫截面處)

由於火焰與空氣共伴流交互作用的關鍵區域在中環與外環之間的共伴迴流區結構，所以利用數位式熱電偶量測此區域的溫度分布情形，沿著燃燒器表面上方 1

mm 高度由內至外每隔 2 mm 為溫度量取點，一共量測 3 個點，量測結果如圖 5-8，在飄焰的情況下，此區域的溫度約在 350 K，僅比室溫高出 50 K 左右，然而在類錐焰的情況下此區域有已燃氣體回流，最外側靠近外環空氣共伴流的一邊尚有 430 K，而靠近中環側的溫度則可高過 740 K。由空氣共伴流效應所產生的這個高溫共伴回流區可減低反應產生的熱量向外擴散逸失的速度，使中環類錐焰的火焰傳播速度加快而能夠持續穩定地燃燒。

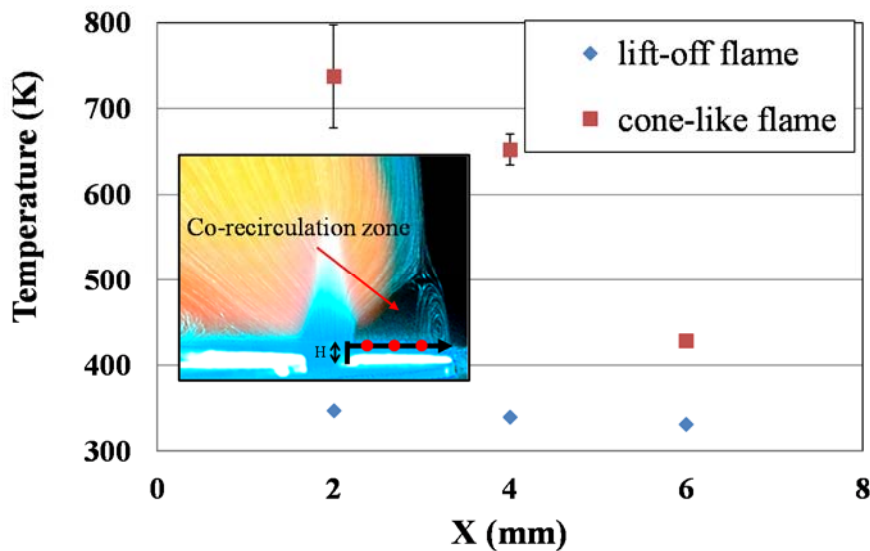


圖 5-8 飄焰與類錐焰底部外側的溫度分佈圖

為了比較有無注入空氣共伴流下的反應強度，本文進一步用總合固定面積內的化學螢光強度的方式作為火焰燃燒反應的相對強度指標，而由前人的文獻證實為一可行的比較燃燒反應強度的方式(Dawson *et al.*, 2011)。實驗以高速攝影機擷取條件為 100 fps 和解析度 800×504 pixels 之中間飄焰( $\phi_m = 0.85$ ;  $U_m = 1.0$  m/s)在不同空氣共伴流速下的碳氫基化學螢光影像。選取的面積集中在中間火焰的位置，以避免過多背景的螢光雜訊干擾中環火焰碳氫基化學螢光的強度值。

中間飄焰之  $\text{CH}^*$  化學螢光強度在不同空氣共伴流速比值( $\gamma = 0$  和 0.33)下隨時間變化如圖 5-9 所示，截取時間長度至少大於 700 ms，超過火焰的特徵週期以確保記錄的強度分布不會出現漏失的狀況。總合固定面積的  $\text{CH}^*$  強度在空氣共伴流

超過有效共伴流速(在此中間飄焰條件下為  $\gamma = 0.33$ )時明顯增強，且隨時間變化皆呈現穩定的分布趨勢，代表此時空氣共伴流效應幫助中間飄焰反應強度提升，以及強化火焰結構而減低火焰擺盪、局部熄滅等不穩定性現象產生的可能性。因此透過比較在超過有效空氣共伴流速度影響下的流場和火焰強度分析，可發現在鈍體結構後方的共伴迴流區部分所形成的減速區和其蓄積的熱量是增強貧油燃燒穩焰和燃燒效率的主要穩定機制。

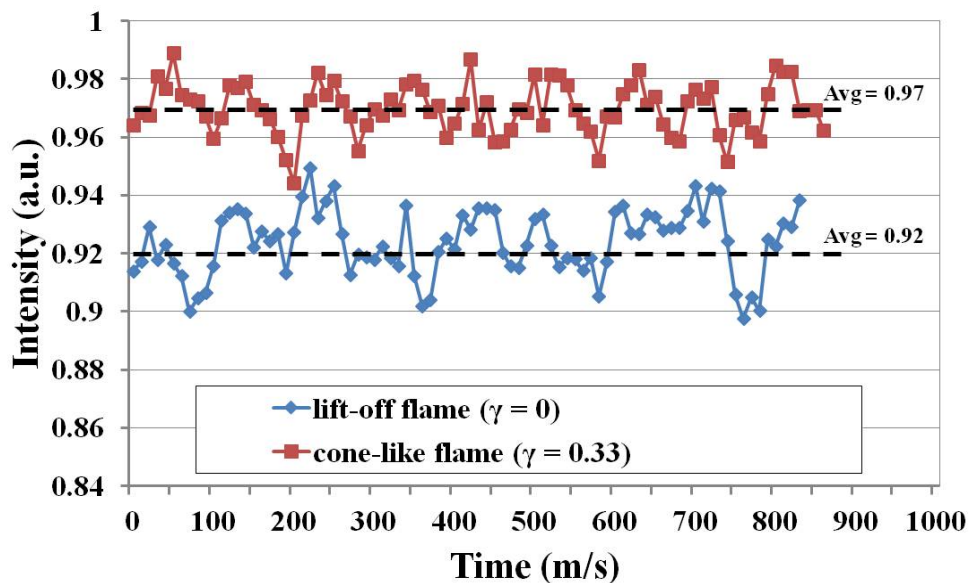


圖 5-9 中環飄焰( $\phi_m = 0.85$ ;  $U_m = 1.0$  m/s)和注入共伴流流速比 0.33 下之  $\text{CH}^*$  化學螢光強度隨時間變化圖

## 5-2 壓縮渦對效應

本文探討層狀化燃燒器所產生的壓縮渦對流場結構，可使燃燒器的穩定操作區間，在開放空間下擴展至  $\phi = 0.5$  之穩焰機制。同時探討火焰和流場間交互作用，特別是預熱和混合的效應如何影響穩焰效應。研究發現在貧油燃燒中由外環火焰所提供的預熱和阻隔效果形成穩定的高溫防護區，是幫助整體火焰穩定燃燒的關鍵。而在富油燃燒的部分，由於火焰傳播速度和燃氣流速是否達成平衡是火焰穩定存在的關鍵，故此時是由燃氣主導燃燒特性。在流場觀測部分，以 1000 fps 空間解析度達  $1280 \times 1024$  pixels 之流場可視化和高速 PIV 分析由位在內側氣道和中間氣



道的尾流渦對形成之壓縮渦對的流場特性。暫態流場發展和統計分析顯示壓縮渦對結構會造成強烈的紊流強度分佈而強化火焰強度，進而達到整體增強的穩焰效果，證明層狀化燃燒器的可操縱性和穩焰特性。

### 5-2-1 穩定操作區間

由於層狀化燃燒器三個出口面積不同，因此在三等份預混燃氣流率下出口流速皆不同，各出口流率及相對應流速如表 5-1 所示。燃氣當量比為 0.5—2.5，因此操作區間的測試包含極富油至極貧油。層狀化燃燒器穩定操作區間如圖 5-10 所示，包含穩定操作區間、吹熄和回火等邊界線，分別是以在各當量比量測點改變燃氣流率來決定。當燃氣流率變大，出口速度增加超過此時當量比之火焰傳播速度即造成火焰吹熄。相反地，當燃氣流率低於火焰傳播速度，則會使火焰向上由傳播燒進燃燒器，此外火焰傳播速度在接近定當量點( $\phi=1.0$ )時較快，因此回火邊界相對擴展許多。由於火焰傳播速度和燃氣流速必須達到平衡以避免發生火焰跳脫、局部熄滅和火焰不穩定性等不利穩焰的情況，而以改變流場結構的方式則能以促進熱和質量混合效率的方式來幫助穩焰。在開放空間下，層狀化燃燒器甲烷預混火焰之貧油極限可達 0.5 則可呼應這點(圖 5-1)。受益於層狀化燃燒器中鈍體結構形成的迴流區，主流場方向反轉減速而形成低速迴流區，同時因為三個不同燃氣流速形成的層狀化流場結構提供擾動加強供擾動加強此處熱量和質量交換，而能在不提高特徵流場雷諾數或其他外在控制方式影響下達到充足的混合傳遞效果。綜合以上特性，層狀化燃燒器具有兩個穩焰特性：其一是迴流區改變尾流流場結構造成的混合效果；其二是各股火焰間的預熱效果。

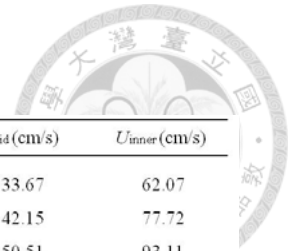


表 5-1 各燃氣出口流率及相對應流速

Mode	Reactants	$\phi$	$Q_{total}$ (L/min)	Power (W)	$U_{outer}$ (cm/s)	$U_{mid}$ (cm/s)	$U_{inner}$ (cm/s)
Lean combustion	Unstable methane-air	0.5	20.00	240	23.15	33.67	62.07
			25.04	300	28.98	42.15	77.72
			30.00	370	34.72	50.51	93.11
		0.6	16.87	240	19.53	28.4	52.36
			20.00	290	23.15	33.67	62.07
			30.00	430	34.72	50.51	93.11
Rich combustion	Stable methane-air	1.5	6.29	210	7.28	10.59	19.52
			20.00	660	23.15	33.67	62.07
			30.00	1000	34.72	50.51	93.11
		2.0	5.76	150	6.67	9.7	17.88
			20.00	850	23.15	33.67	62.07
			30.00	1270	34.72	50.51	93.11
		2.5	4.81	240	5.57	8.1	14.93
			20.00	1010	23.15	33.67	62.07
			30.00	1520	34.72	50.51	93.11

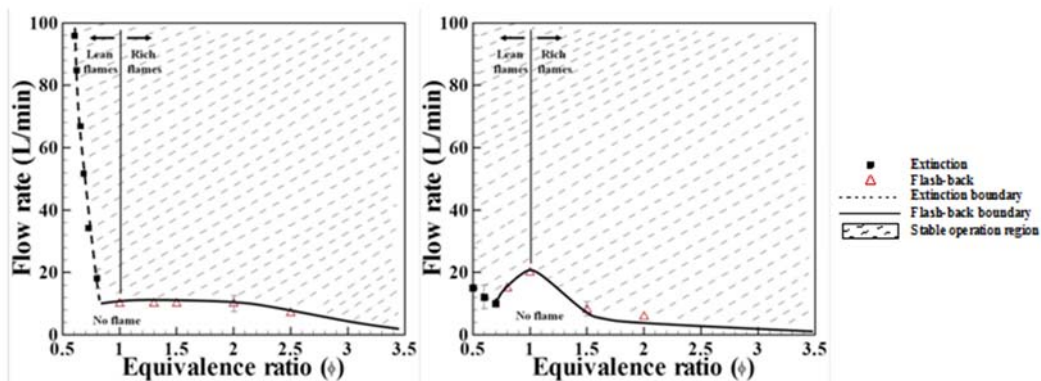


圖 5-10 層狀化燃燒器單股火焰(左)及三股火焰(右)操作區間分佈圖

### 5-2-2 貧、富油穩焰機制

圖 5-11 為內、中、外層狀化預混甲烷火焰的特徵火焰型態圖，將分貧油和富油燃燒兩部分討論。在貧油火焰的部分，可觀察到受到熱損失和外界冷空氣影響 (Lin *et al.*, 2009) 而明顯不穩定的外環飄焰結構；在富油火焰部分則是在不同流率下都具有內側為預混火焰和外側為擴散火焰之雙重火焰結構 (Nogenmyr *et al.*, 2010; Gil *et al.*, 1998)，此時火焰型態和特性也受雙重火焰結構主導。

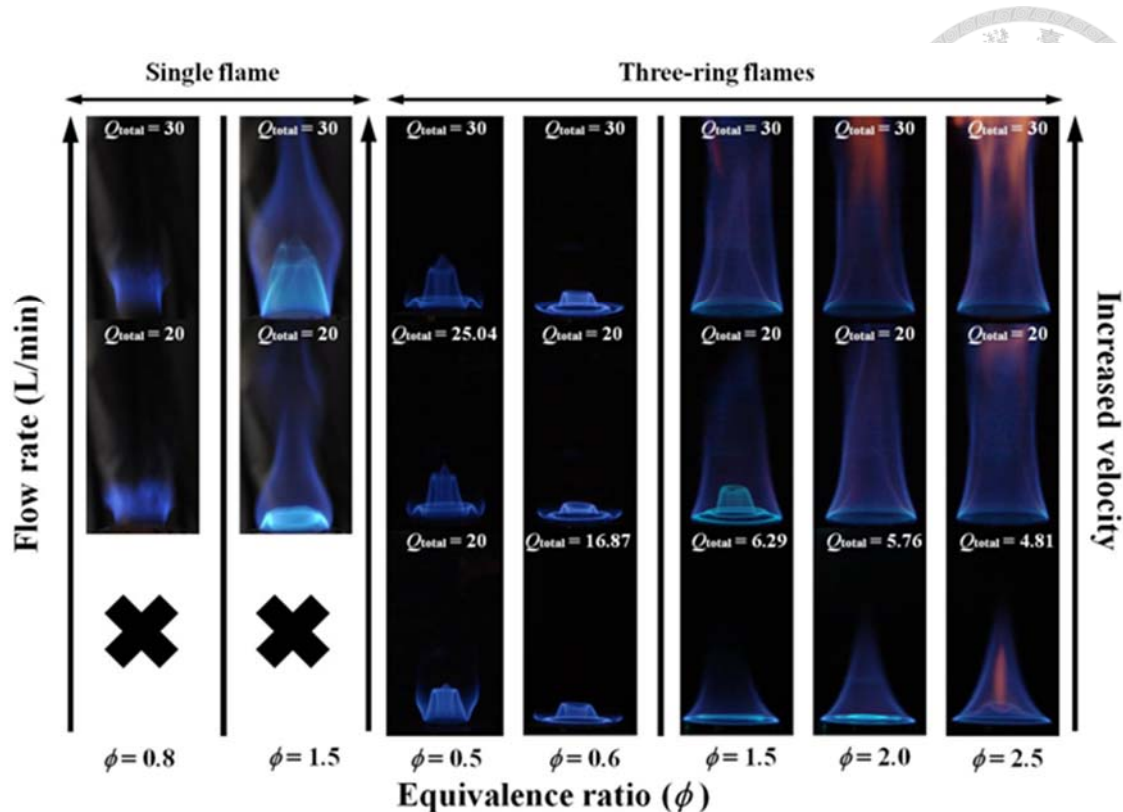


圖 5-11 不同燃氣流率和當量比之貧、富油燃燒火焰型態分佈圖

在貧油燃燒部分，實驗範圍是當量比 $\phi=0.5$ 和 $\phi=0.6$ ，對應的流率範圍從 $Q_{total} = 16.87$  l/m 到 $Q_{total} = 30$  l/m。文獻上的預混甲烷火焰可燃極限為 $0.6$  (Law, 2006)，代表火焰無法再低於此當量比的情況下存在，然而層狀化燃燒器具有鈍體結構和三股進氣道結構，因此可有效改善燃燒極限和其火焰穩定性。

在當量比 $\phi=0.5$ ，燃氣流率分別為 $Q_{total} = 30$  l/m 和 $Q_{total} = 25.04$  l/m 時，兩者具有相似的特徵，皆是外環為飄焰，內、中兩環為獨立的完整火焰結構。當燃氣流率從 $Q_{total} = 25.04$  l/m 降至 $Q_{total} = 20$  l/m 時外環火焰因為流率過低不足以提供足夠的反應能量而熄滅，此外冷空氣和邊壁效應都會使熱損失增加而讓火焰熄滅(Lin *et al.*, 2009)。在失去外環火焰的保護和預熱效果後，熱損失造成中環火焰傳播速度下降而使中環火焰轉變為飄焰。在當量比 $\phi = 0.6$  時在不同流率情況下會有相似的火焰型態，且此時外環火焰皆為高度較 $\phi = 0.5$  為低的飄焰。和 $\phi = 0.5$  在相同燃氣流率 $20$  l/m 的情況相比，外環火焰存在且中環火焰可包覆在燃燒器出口，代表來自外環火焰的預熱效果所形成的高溫區是幫助內、中環火焰穩定的關鍵。

富油燃燒部分實驗範圍則是在當量比為 $\phi = 1.5$ 、 $\phi = 2.0$ 和 $\phi = 2.5$ 情況下對應不同的燃氣流率，此部分火焰型態都具有很明顯的雙重火焰結構特徵。外側的擴散火焰結構是由內側未燃盡的燃氣與下游二次空氣混合後反應所產生，而預混火焰和擴散火焰具有共同的根部，都是在燃燒器出口處形成。在 $\phi = 1.5$ ， $Q_{\text{total}} = 30 \text{ l/m}$ 時，富油火焰下游螢光因為碳粒等未燃盡產物而些許偏黃。隨當量比增加這些未燃盡產物所涵蓋的區域遍布大部分的下游區域。另一方面在低燃氣流率時外側擴散火焰靠近內側的預混火焰並提供較強的預熱效果而使內側預混火焰高度降低而貼近燃燒器出口。值得一提的是外側的擴散火焰在當量比和流率增加時主導火焰結構，而內側的預混火焰則是在當量比和流率降低時主導火焰結構。火焰型態結構和特徵整理如下：首先外側擴散火焰所帶來的預熱效應可幫助內側預混火焰穩定；其次在雙重火焰結構中火焰和流場的交互作用則是受流速和火焰傳播速度的影響。

### 5-2-3 火焰/流場之交互作用

為了進一步分析層狀化燃燒器中多渦對和多股火焰間的交互作用，以高空間和高時間解析度之 PIV 量測暫態速度分析可進一步解析燃燒流場特徵結構 (Steinberg *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2011; Schmidt *et al.*, 2011)。圖 5-12 是流場可視化影像，其空間和時間解析度分別是  $1280 \times 1024 \text{ pixels}$  和  $1000 \text{ fps}$ 。圖 5-12b 到 e 為圖 5-12a 中紅色虛線框框的連續影像，此處集中於層狀化燃燒器出口處中間部分以利探討尾流區中的特徵流場結構，擬似線的箭頭則是指向流場的流動方向。在觀測區中可看到流體受外側捲入氣流影響而向中心處靠攏以及穩定的迴流區結構，此時流場暫態特性在火焰和流場交互作用中扮演影響燃燒穩定性的重要角色。在前人的文獻中有許多關於火焰和流場交互作用的流體動力學研究 (Mueller and Schefer, 1998; Filatyev *et al.*, 2005)，但是受限於燃燒診斷技術的發展暫態的變化過程則較為少見 (Meyer *et al.*, 2004; Steinberg *et al.*, 2008)。

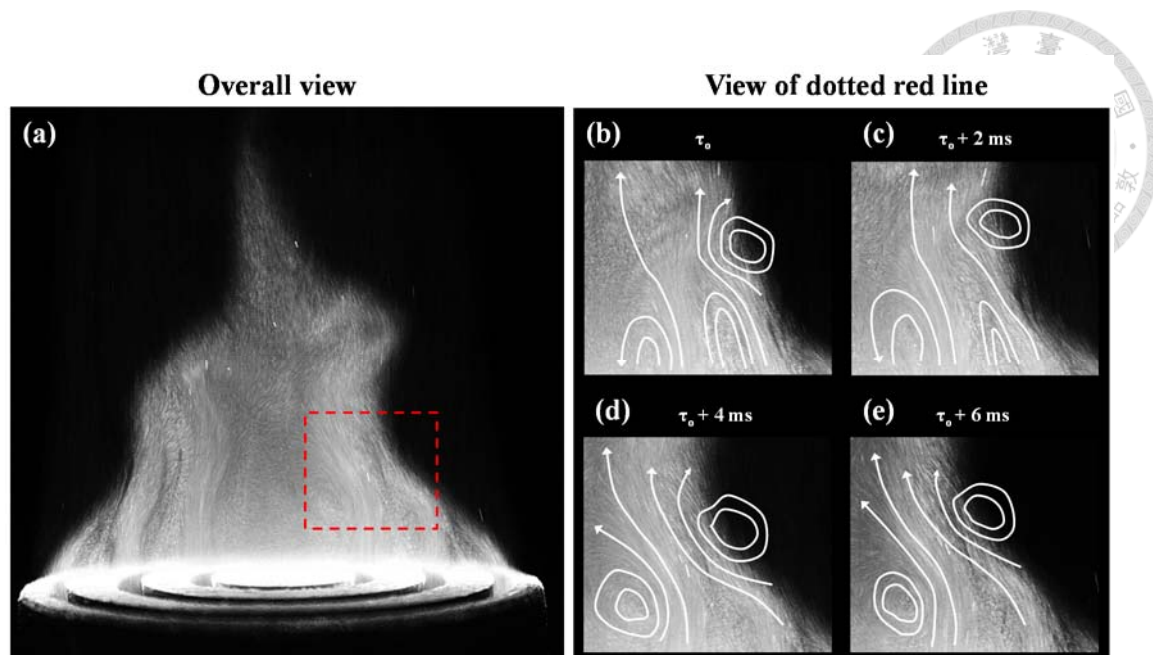


圖 5-12 層狀化燃燒器中  $\phi = 1.5$ ， $Q_{\text{total}} = 20 \text{ l/m}$  之火焰和流場渦對結構交互作用之雷射斷層診斷影像圖

圖 5-13 顯示當量比  $\phi = 1.5$  和燃氣流率  $Q_{\text{total}} = 20 \text{ l/m}$  之連續速度和渦度場分佈圖。流場分佈特徵分為兩部分：(i)受中央鈍體影響而在  $X = 4 \text{ mm}$  形成逆時鐘旋轉之渦旋結構，另一方面在  $X = 12 \text{ mm}$  處的渦旋結構則是受到外側空器捲入的影像向中心線靠攏，如圖 5-13(a-1)所示。黑色曲線的箭頭處指示兩個渦對結構成長並相撞的位置約在  $X = 7 \text{ mm}$  的地方。隨著渦對發展和互相移動靠近，熱量和質量的傳遞現象會受到流場壓縮和擾動影響而增加(Huang and Yen, 2008)。(ii)如圖 5-13(a-3)所示，可看到在  $X = 4 \text{ mm}$  處的逆時鐘方向渦旋和  $X = 12 \text{ mm}$  處的順時鐘方向渦旋組成一個明顯的壓縮渦對結構，由於兩個渦對的相對距離隨著時序發展而縮小，流體在兩渦對中的通道被擠壓而加快流動的速度。此外通過壓縮渦對而加速的流體會接續受到浮力效應所捲入的外側氣流影響而形成一股射流(jet)向下游加速移動，如同圖 5-13(a-4)所示，因此這股射流將會加速把流體向下游拉而明顯加強尾流區中火焰和流場交互作用時的熱量和質量傳遞效應，而使結合混合和預熱效應的壓縮渦對結構可幫助達到穩焰的效果。值得一提的是，此處是具有速度差異但沒有當量比差異之層狀化燃燒流場的條件，也能互相呼應圖 4-24，在進流數變化下 POD

處理後流場出現的主要模態結構(鞍點)，說明流場壓縮進而形成射流拉伸燃燒流場，同時扮演保護內側熱的燃後氣體不和冷的二次空氣混合，顯示在此情況下流場速度差異造成的結構確實可幫助燃燒反應。



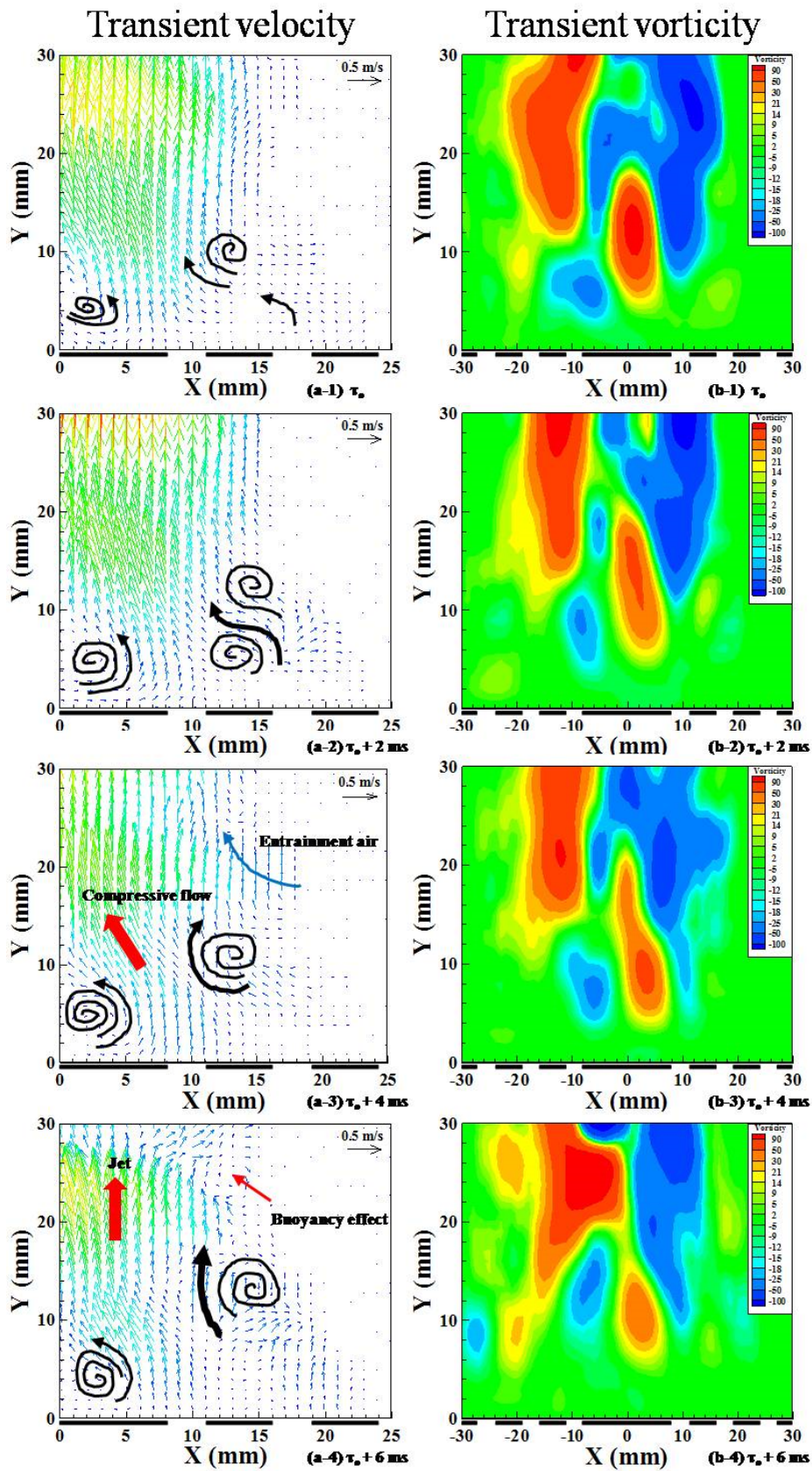
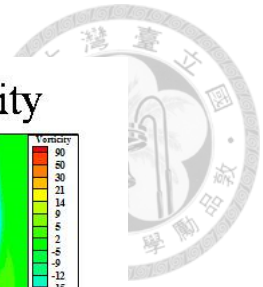


圖 5-13 時序 6 ms 之  $\phi = 1.5$ ,  $Q_{total} = 20$  l/m 燃燒流場連續速度場和渦度場分佈圖

在燃燒反應的過程中火焰溫度和火焰強度被視為反應熱釋放率的相對響應特徵，從而造成燃燒流場的速度分佈會受溫度梯度變化和熱浮力效應影響而增加變化量(Yokomori and Mizomoto, 2003)。因此為了解析受火焰影響而會相對響應的速度變化分佈( $U_{var}$ )和隨燃氣組成變化的層流火焰傳播速度( $S_L$ )，將速度變化和火焰傳播速度定義為一無因次化參數( $U_{var}/S_L$ )作為定性的火焰強度指標。透過統計分析的方式處理連續的流場速度分佈可得到速度變化量，而且因為速度變化量使擾動量在混亂無序的流場中更為明顯。速度變化量和紊流強度分佈皆是由 1000 組瞬時流場資料計算而得。 $U_{var}/S_L$  和紊流強度在燃燒器中心軸處軸向變化之分佈如圖 5-14a 所示，而在不同高度  $Y = 5 \text{ mm}$ 、 $Y = 10 \text{ mm}$ 、 $Y = 15 \text{ mm}$  和  $Y = 20 \text{ mm}$  之徑向分佈如圖 5-14b 所示。在圖 5-14a 中  $U_{var}/S_L$  和紊流強度分佈在上游  $Y = 0 \text{ mm}$  處隨高度增加緩慢變強，但隨著高度增加至下游處(迴流區後端)兩者量值皆明顯急遽增加。這表示上游流場結構受迴流區主導而使流場速度減慢並延長反應物滯留在此處的時間。但在比較下游的地方，強烈的熱浮力效應捲進較多的外側空氣而造成混亂的尾流結構。另一方面，在圖 5-14b 中  $U_{var}/S_L$  和紊流強度具有相似的分佈。在高度  $Y = 5 \text{ mm}$  處，流場結構受初始燃氣流速影響僅具有微量的擾動，此外較弱的燃燒反應和熱釋放率使此上游處的  $U_{var}/S_L$  量值較低。而在下游  $Y = 20 \text{ mm}$  處，受熱釋放和浮力效應影響捲入而造成混亂的流場結構，因此  $U_{var}/S_L$  和紊流強度峰值都有明顯的提昇，同時其峰值位置相較於在上游時向外側移動許多。將圖 7-14b 的  $U_{var}/S_L$  和紊流強度與圖 5-13 的速度場和渦度場分佈相比發現兩者流場分佈特性相互呼應，並且可以注意到徑向的紊流強度峰值位置( $Y = 20 \text{ mm}$ )也是壓縮渦對所在位置。如同前面在速度場和渦度場暫態分佈圖中所提到，壓縮渦對會引發紊流強度增加和流場擾動而增強熱量和質量的傳遞效應，因此作為火焰強度指標的  $U_{var}/S_L$  峰值和紊流強度峰值兩者吻合的位置特性顯示壓縮渦對具有幫助火焰穩焰的功能。總結來說，在層狀化燃燒器中，壓縮渦對在放大火焰和流場結構間的熱量和質量傳遞效應上確實扮演重要的角色。

層狀化燃燒器因為具有幾何結構和獨立進氣道設計，因此具有良好的穩焰特性和操控性。本文以層狀化燃燒器作為載具，以固定總燃氣流率之方式，使各燃燒器出口之燃燒流場條件具有相同當量比和出口流速的差異性，來實行預混甲烷燃氣之具速度差異性之燃燒流場特性研究。透過擷取火焰型態影像、流場可視化以及 PIV 速度分布和統計分析，探討層狀化燃燒器中火焰和流場交互作用和穩焰機制。受益於多股火焰和渦對結構間的預熱效應和混合效應，在開放空間下當量比可達到  $\phi = 0.5$ 。對貧油和富油燃燒而言，兩者在不同當量比和燃氣流率時具有不同穩焰機制。貧油燃燒時火焰型態相似，但外環火焰提供的預熱效應所形成的高溫區是幫助火焰穩定的關鍵。富油燃燒的部分均是具有雙重火焰結構的特性，且燃燒穩定性取決於火焰傳播速度和燃氣流速之間的交互影響。由流場可視化和暫態速度場分佈可發現壓縮渦對的形成來自於多股火焰和尾流渦對交互作用。由速度場分佈明顯看出在上游處流體受到擠壓而加速通過壓縮渦對結構中的通道並接續受到下游熱浮力效應影響，往更下游形成類似噴流的拉動特徵。壓縮渦對不僅幫助結合不同出口之燃氣，也幫助鄰近的高溫產物互相傳遞熱量，因此增強預熱和混合的效應而大幅改善火焰穩定性。火焰和流場交互影響的部分，引介  $U_{var}/S_L$  作為火焰強度的指標，在軸向變化量的分佈上， $U_{var}/S_L$  和紊流強度變化趨勢相似，都具有上游迴流區和下游熱浮力效應區主導的特性。另一方面在徑向分佈上， $U_{var}/S_L$  和紊流強度的峰值位置受壓縮渦對影響而對稱出現，因此由分佈特性可說明壓縮渦對結構引發紊流強度增加連帶使火焰強度和燃燒穩定性變佳。由此節成果可證實以層狀化燃燒器作為載具進行層狀化燃燒流場的情況下，燃燒穩定性會因為多股尾流渦對和多股火焰間的交互作用而增強，有利於整體火焰穩定性。

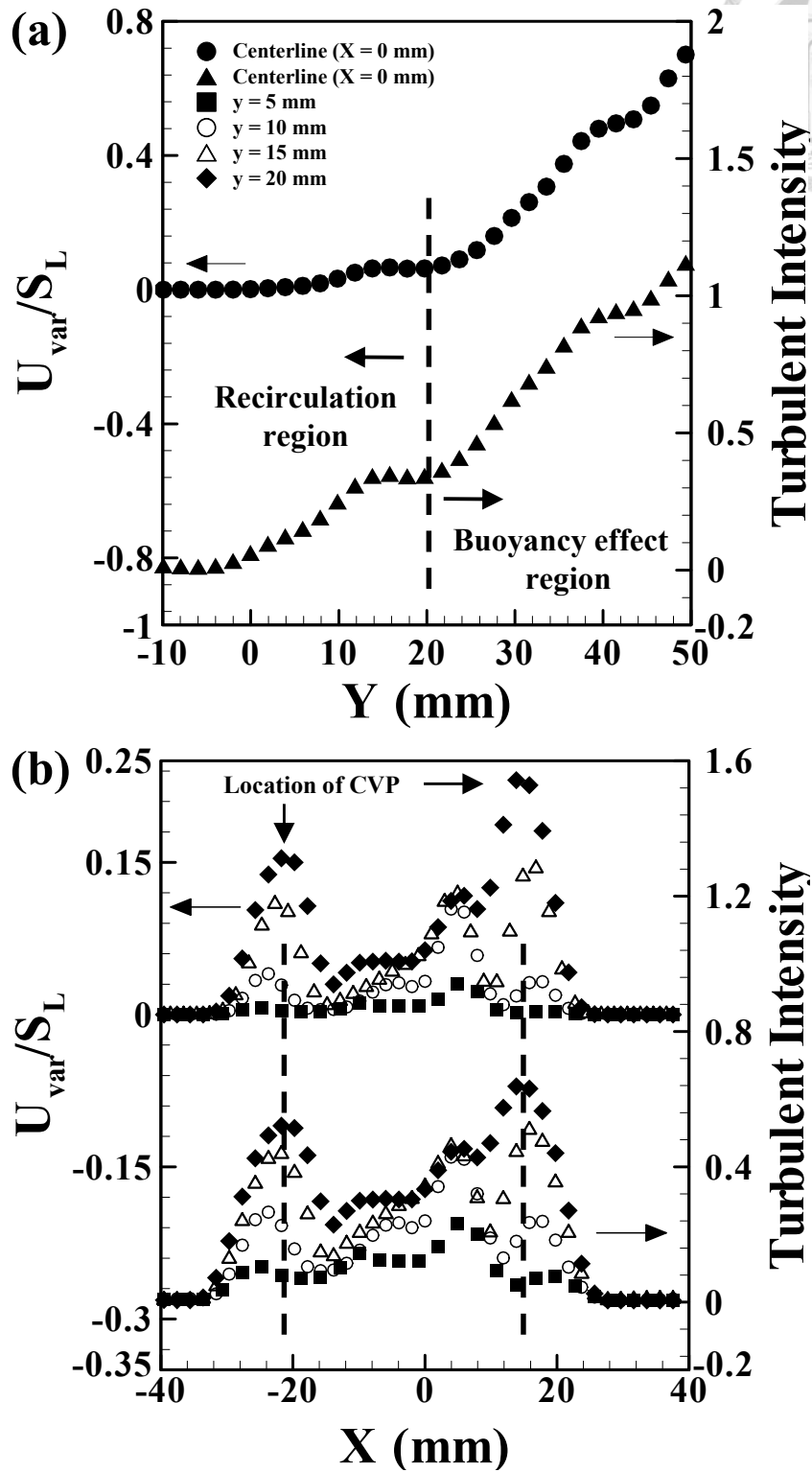


圖 5-14  $\phi = 1.5$ ,  $Q_{total} = 20$  l/m 火焰之速度變化量/火焰傳播速度和紊流強度 (無因次化) 之分佈以及壓縮渦對的位置, (a) 沿中心軸之分佈與迴流區和浮力效應區域, (b) 不同  $Y = 5$ 、 $10$ 、 $15$  和  $20$  mm 高度之徑向分佈。(CVP: 壓縮渦對)



### 5-3 熱擴散不穩定效應

#### 5-3-1 火焰型態

在熱擴散不穩定效應的部分，以三股進流探討不同當量比( $\phi$ )在固定出口流速( $U_o$ )下暫態燃燒流場速度和化學螢光強度的分佈，由於實驗變數眾多必須簡化，因此採固定燃氣之當量比和出口流速以關注燃燒流場之交互作用變化特性。圖 5-15 為出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$ ，當量比為 0.6、0.8 和 1.6 的火焰型態變化圖。當量比為 0.6 時火焰長度較高並呈現不穩定的飄盪狀態，外側火焰無法完整包覆於燃燒器出口而呈現半開放式的火焰型態，同時內側火焰被吹離至幾乎消失，只餘些許火焰與中間火焰融合，形成內側火焰與中間火燄結合之融合火焰(merged flame)，此時中間近外部火焰與外側火焰內部能較穩定存在於燃燒器出口。隨當量比增加至 0.8 時，內側火焰與外側火焰高度明顯下降，此時由於接近化學當量點，火焰傳播速度加快，有助於火焰對抗流場速度的影響在較接近燃燒器出口處進行反應。比較火焰高度可發現中間火焰最早成為錐焰完整包覆於燃燒器出口，故將此時火焰型態稱為穩定中間火焰(stable middle flame)。而在  $\phi = 1.6$  時，由於遠離化學當量點使火焰高度再度拉高，在極富油的條件下出現與尖端震盪火焰類似的不規則震盪行為，並形成焰尖開口火焰(tip-opening flame)。值得注意的是，在富油燃燒和貧油燃燒兩端，火焰類型具有明顯的差異，特別是在富油端由於  $Le < 1$  而成為不穩定火焰的狀態，換句話說，此時熱擴散不穩定效應，或稱路易斯數效應是影響火焰燃燒特性的主要因素。

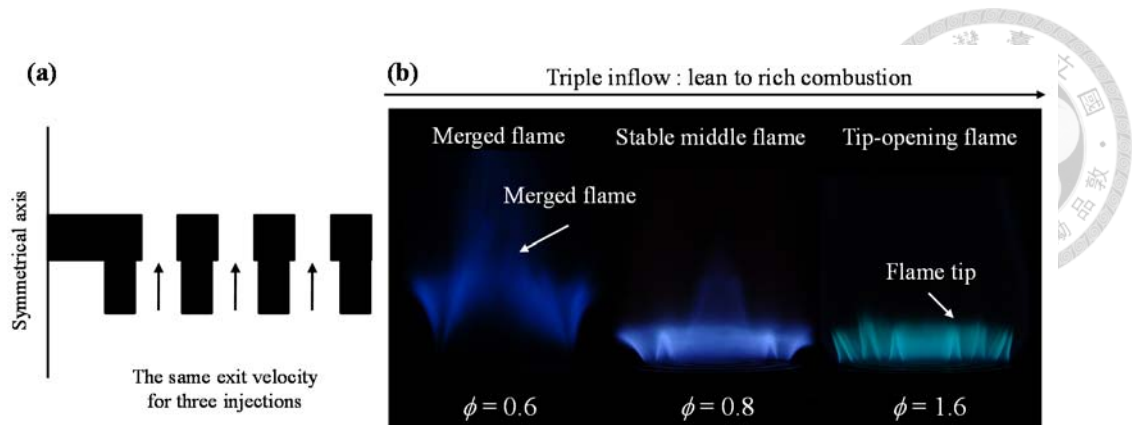


圖 5-15 出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$  時，當量比( $\phi = 0.6 - 1.6$ )之火焰型態

### 5-3-2 平均燃燒流場特性

圖 5-16 到 18 為當量比分別為 0.6、0.8 和 1.2 之火焰流場分佈，而圖 5-19 到 21 則為火焰強度分佈。火焰流場分佈顯示在靠近層狀化燃燒器出口有較明顯回流區流場結構變化，而下游尾流區只有些微受到浮力效應捲入空氣的影響。對於火焰強度分布而言， $\phi = 0.6$  時由於在靠近火焰根部之處幾無化學螢光分佈，代表此時屬抬昇火焰。於燃燒器表面一段高度時化學螢光分佈開始出現，代表此時位於融合火焰的根部，可證明被抬昇的火焰必須在此處才能獲得足夠的反應能量與流場抗衡並開始發展。在當量比為 0.8 時，較接近燃燒器出口處開始有化學螢光強度分佈，顯示此時火焰已開始能脫離抬昇的狀態並重新觸及燃燒器出口，中環與外環火焰已能在此條件下的流場較穩定的燃燒，唯獨內環火焰仍無化學螢光分佈，代表火焰仍是處於微弱狀態。在當量比為 1.6 時，此時火焰出現尖端開口現象，因此三股火焰處都具有明顯的兩個強度峰值。

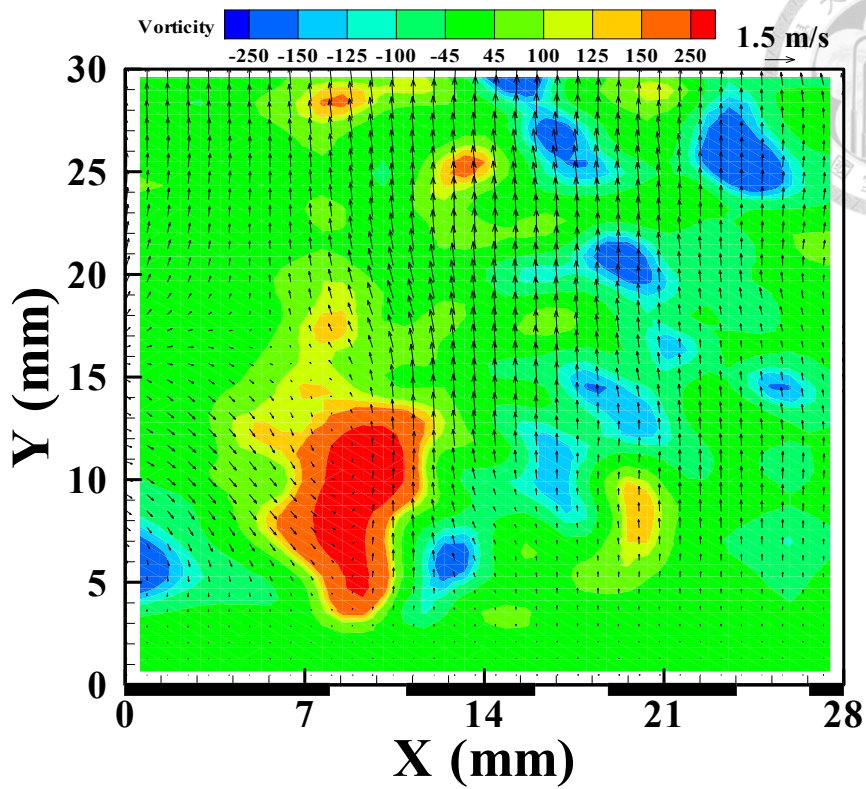
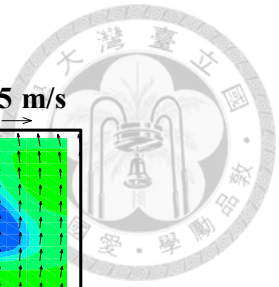


圖 5-16 出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$  和  $\phi = 0.6$  速度場和渦度場疊加分佈圖

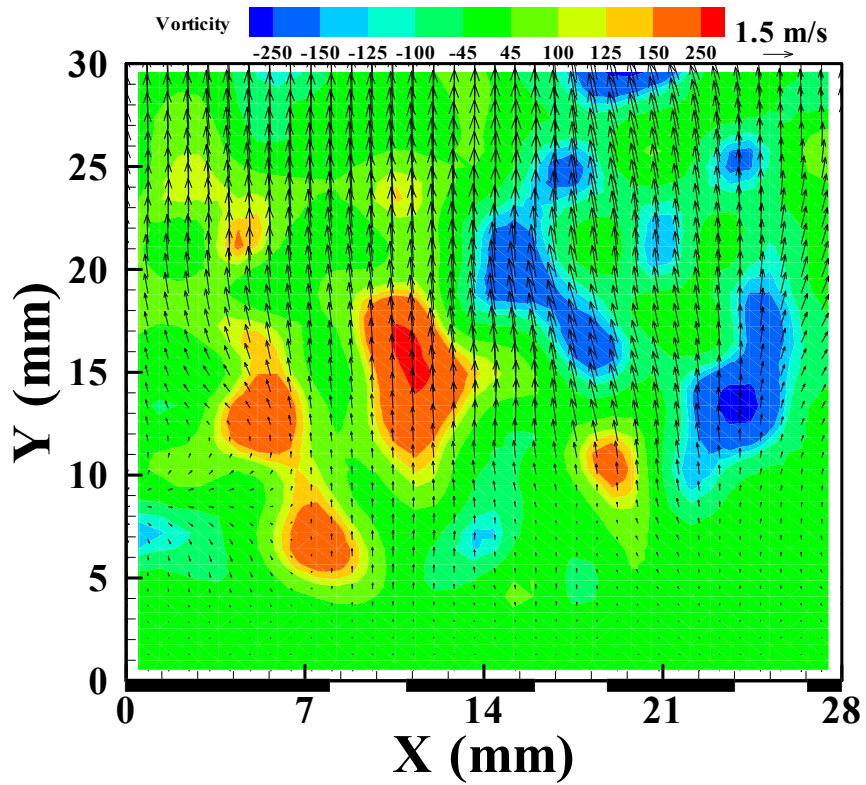


圖 5-17 出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$  和  $\phi = 0.8$  之速度場和渦度場疊加分佈圖

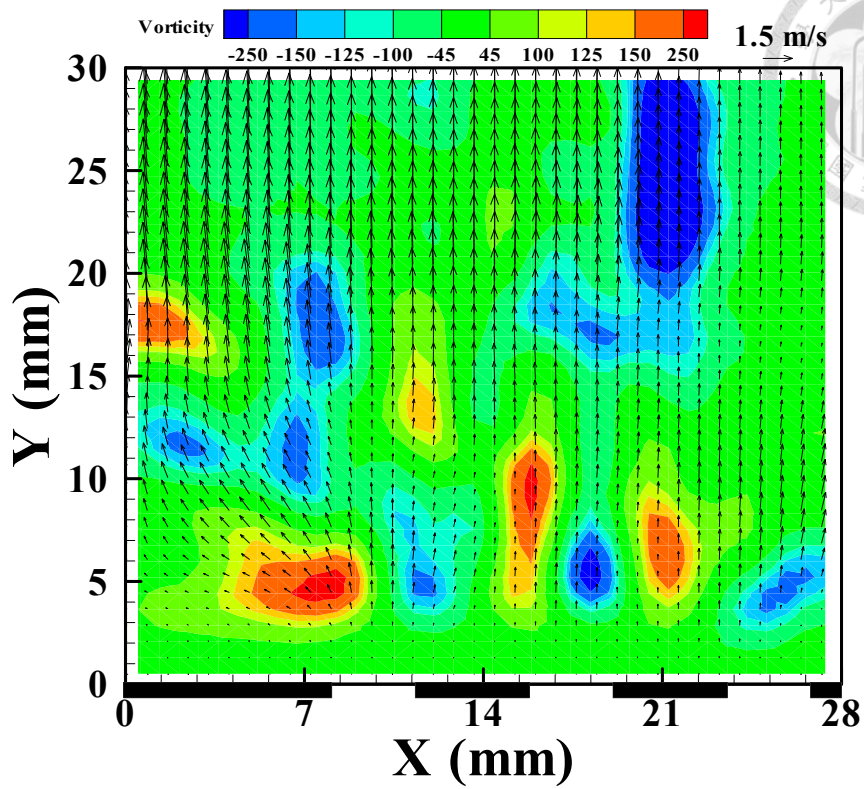
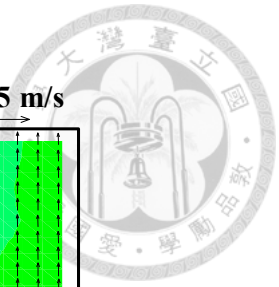


圖 5-18 出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$  和  $\phi = 1.6$  之速度場和渦度場疊加分佈圖

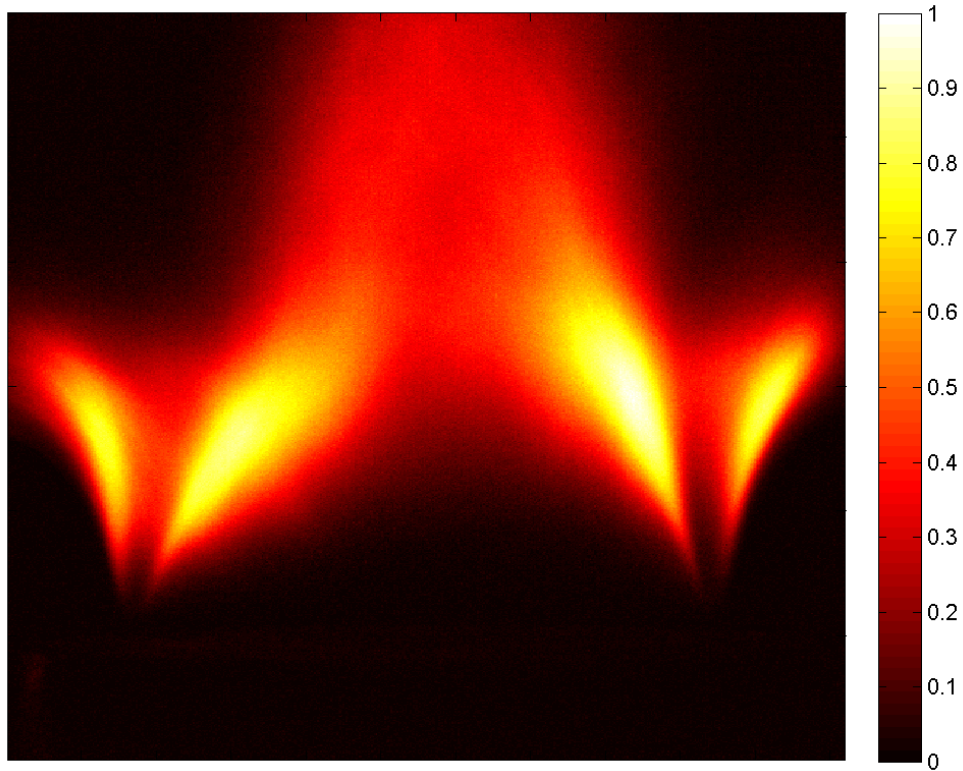


圖 5-19 出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$  和  $\phi = 0.6$  之全域燃燒場強度分佈圖

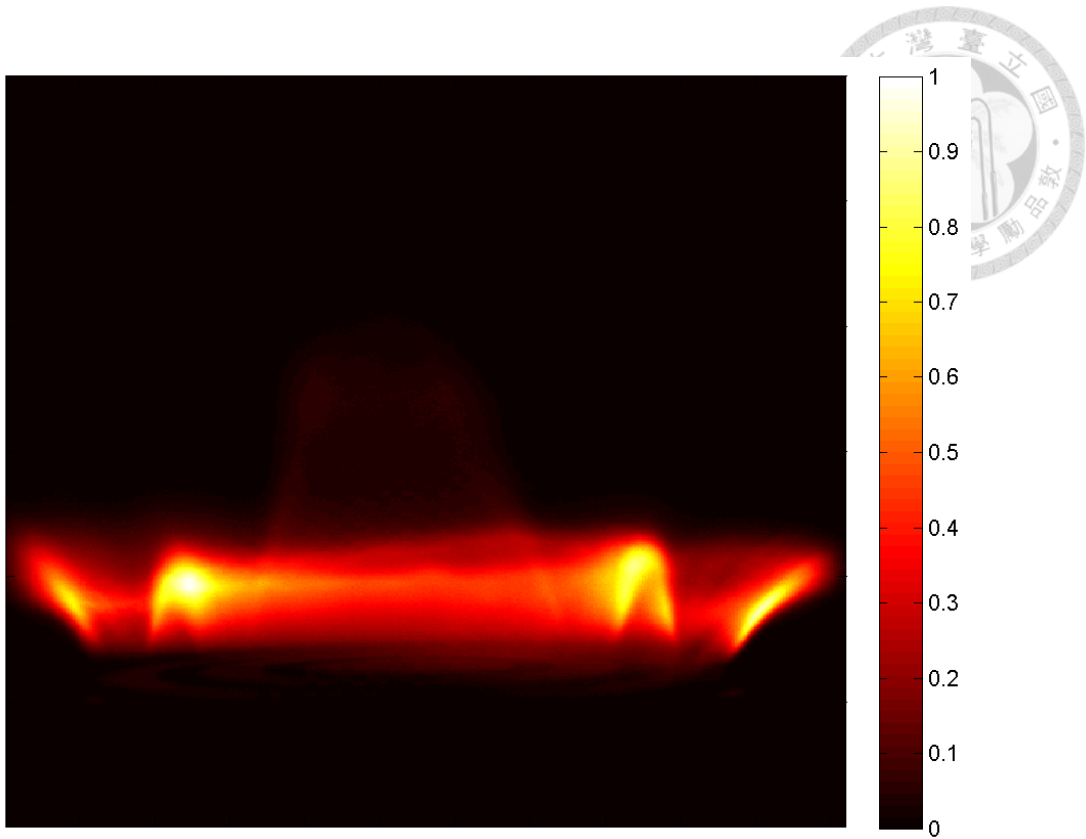


圖 5-20 出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$  和  $\phi = 0.8$  之全域燃燒場強度分佈圖

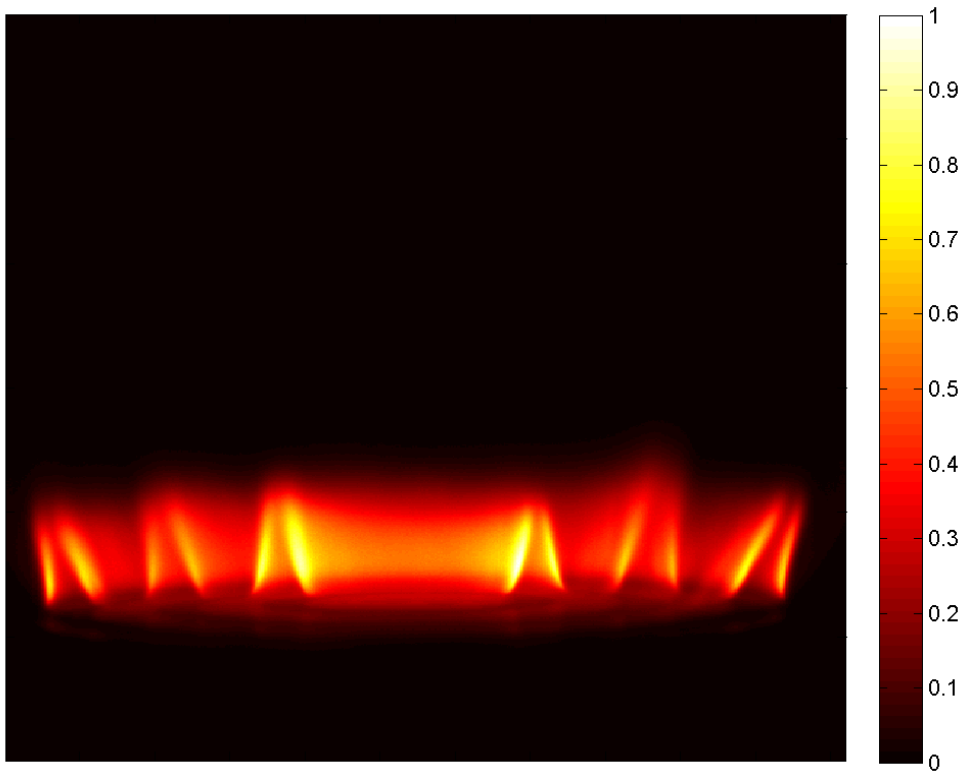


圖 5-21 出口流速  $U_o = 1.5 \text{ m/s}$  和  $\phi = 1.6$  之全域燃燒場強度分佈圖

圖 5-22 為 CH\* 化學螢光強度和其燃氣供給能量間的關係，三股進流全開、不同當量比和進流速度的螢光強度分佈經過正規化後變化趨勢，由圖可看出隨著流速增加，也就是燃氣供給量增加，其化學螢光強度也隨之增加，因此可知化學螢光強度確實與其反應能量成正比。

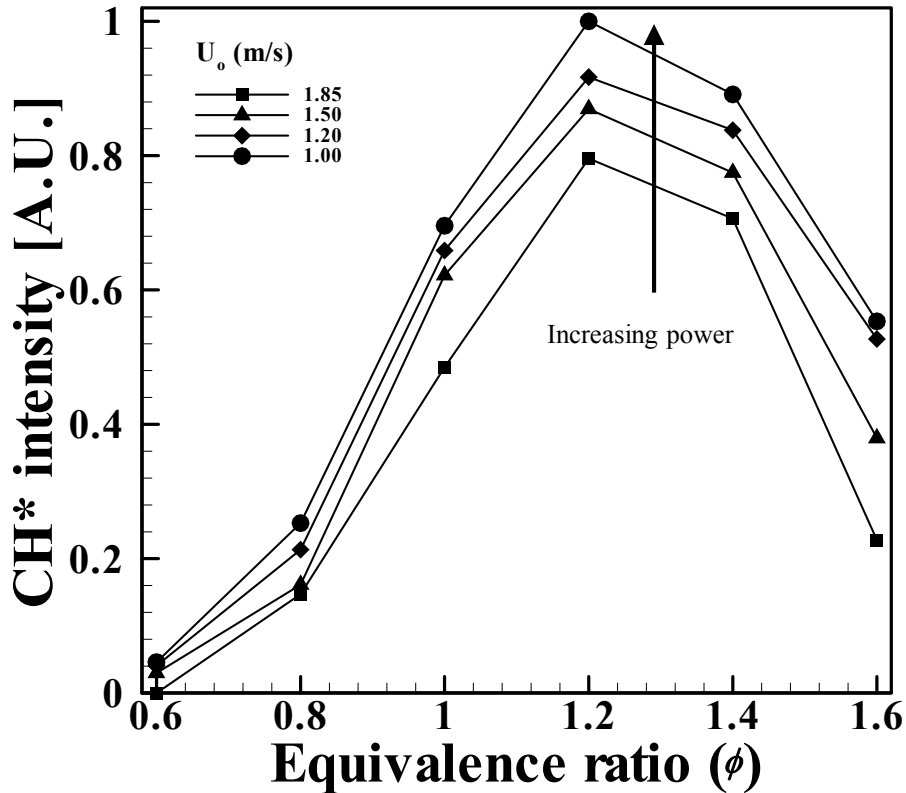


圖 5-22 CH\* 螢光強度隨當量比和流速之分佈變化

圖 5-23a 為  $\phi=0.6$  之正規化的火焰螢光強度(上半側)和紊流強度(下半側)分佈，由於此時火焰呈現飄焰狀態，化學螢光強度分佈在 4 mm 和 6 mm 處開始出現且強度峰值出現在徑向位置 20–23 mm 處，顯示此處為火焰所在之處，而對照紊流強度分佈圖可發現其峰值也同樣位在徑向位置 20–23 mm 處，由此可知在貧油燃燒 ( $Le > 1$ ) 的條件下，燃燒反應與流場紊流強度影響存在正相關的關係。圖 5-23b 為  $\phi = 0.8$  火焰，火焰的螢光強度分佈與代表流場的紊流強度分佈處於過渡區狀態，此時兩者關係位處轉換的階段，造成強度對應的趨勢較不明顯。圖 5-23c 為  $\phi = 1.6$  火

焰，在三個燃氣出口位置均具有相對應的螢光強度峰值。另一方面，三個紊流強度峰值的位置則出現在燃燒器中央原點和徑向位置 16–19 mm 處，約落在化學螢光強度的峰谷與較弱的中間火焰位置處，顯示在富油燃燒( $Le < 1$ )的條件下火焰反應與流場紊流強度呈負相關。綜合以上結果可知在預混丙烷火焰富油燃燒和貧油燃燒兩者不同條件下火焰螢光強度和紊流強度間存在不同的交互作用關係，代表富油和貧油時熱擴散不穩定效應主導會分別使屬於穩定的貧油火焰適應紊流效應較強的流場結構，以及讓不穩定的富油火焰不利於在較強的流場中進行反應。

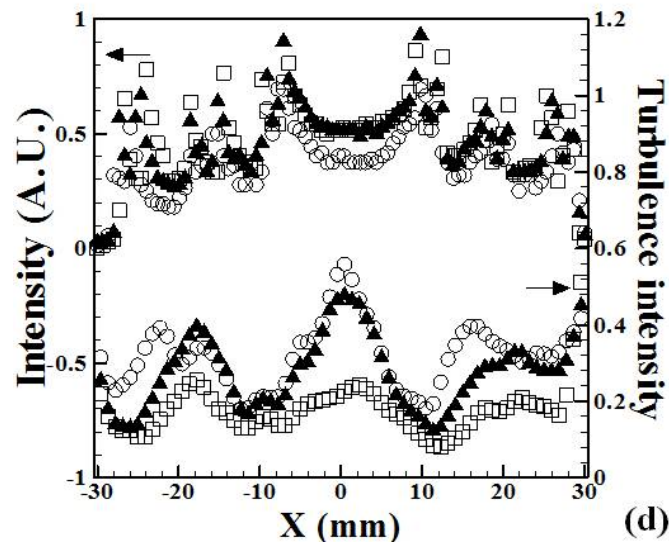
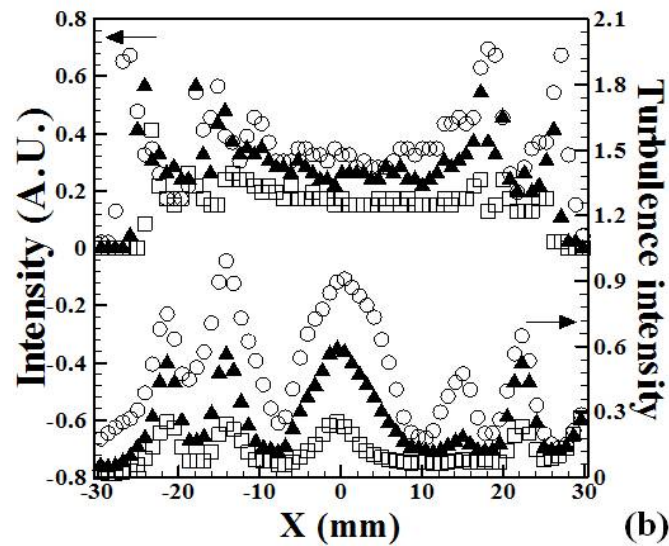
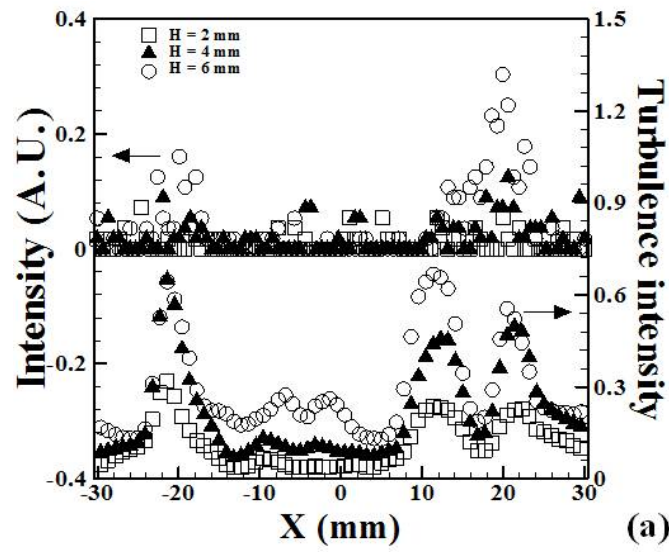


圖 5-23 (a)  $\phi = 0.6$  , (b)  $\phi = 0.8$  及 (c)  $\phi = 1.6$  之平均化學螢光強度和紊流強度分佈圖



### 5-3-3 基於 POD 處理之燃燒流場分析

圖 5-24a 到 c 分別為  $\phi = 0.6$ 、 $\phi = 0.8$  和  $\phi = 1.6$  之能量分佈圖，在當量比為 0.6 及 0.8 時，第一模態能量相近約為 14%，其後各模態能量快速減少；而在當量比 1.6 時，第一模態能量約為 36%，相較於當量比 0.6 及 0.8，所含能量為 2 倍以上。對照其平均流場結構特性，可明顯觀察到由於受到當量比影響之火焰燃燒特性改變，使流場減少許多紊流結構形成，造成能量集中分佈於第一模態。圖 5-25 為當量比為 0.6、0.8 和 1.6 之流場進行 POD 處理，並取第一至第三模態之渦度場分佈。在當量比為 0.6 時，第一模態具有大尺度渦旋結構，第二模態則可看到在燃燒器出口處開始出現大小不同尺度的渦旋結構，和平均流場相比則能明顯看出透過 POD 分析後可區分出大小不同尺度的流場結構。在當量比為 0.8 時，此時處於轉變過渡的區域，在各模態中大小尺度結構的分佈變化並不明顯。而在當量比為 1.6 時，第一模態在燃燒器出口處呈現許多小結構，第二模態則在中游約  $Y = 15 \text{ mm}$  處出現較大尺度的渦對結構。比較當量比 0.6 及 1.6 的分佈特徵，兩者呈現截然不同之模態結構分佈特性，這是因為對於當量比 0.6 而言，受到融合火焰向中心鈍體靠攏且被吹昇的影響而受大尺度結構主導；而對當量比 1.6 而言，由於尖端開口火焰近燃燒器出口，削弱燃燒層流化現象使下游擾動變小，而由出口處的小剪流層結構主導，顯示熱擴散不穩定效應除了影響火焰類型，也會影響主要燃燒流場特徵結構的變化。

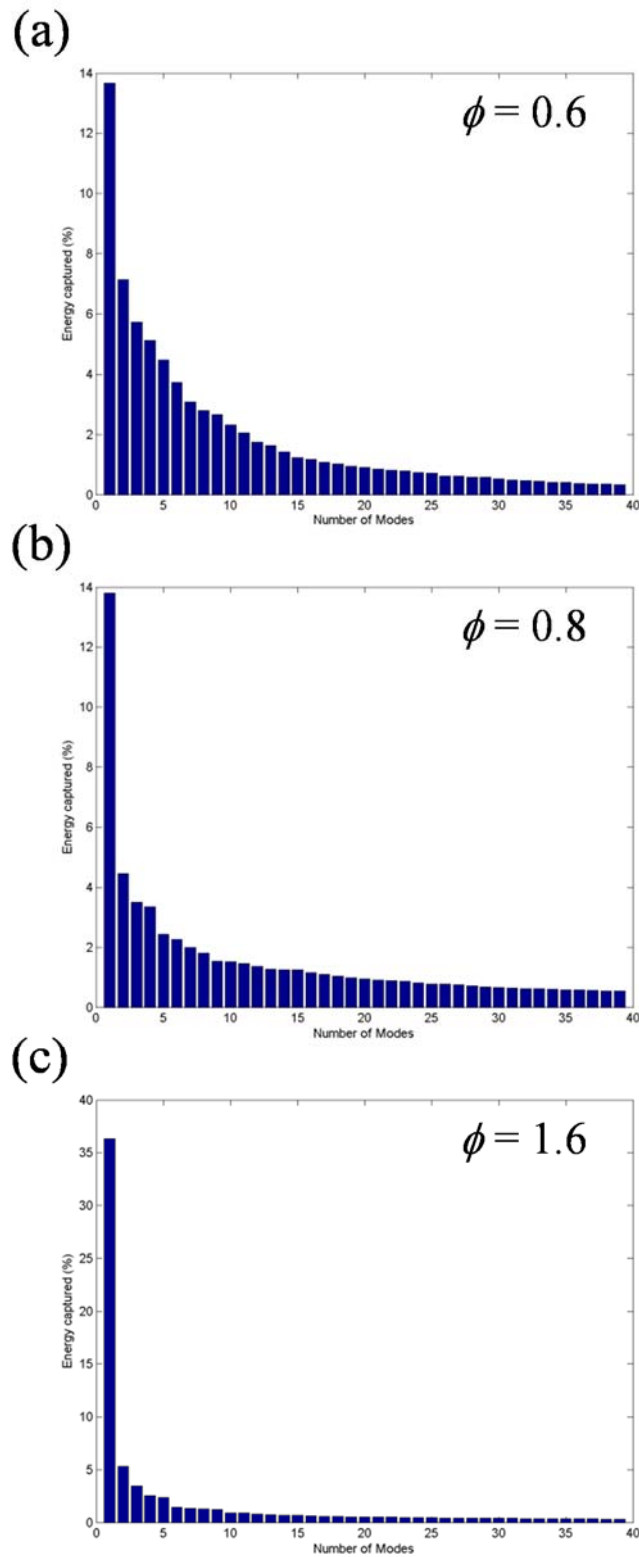


圖 5-24 (a)  $\phi = 0.6$  , (b)  $\phi = 0.8$  及(c)  $\phi = 1.6$  之流場經由 POD 處理之前三模態能量含量分佈。

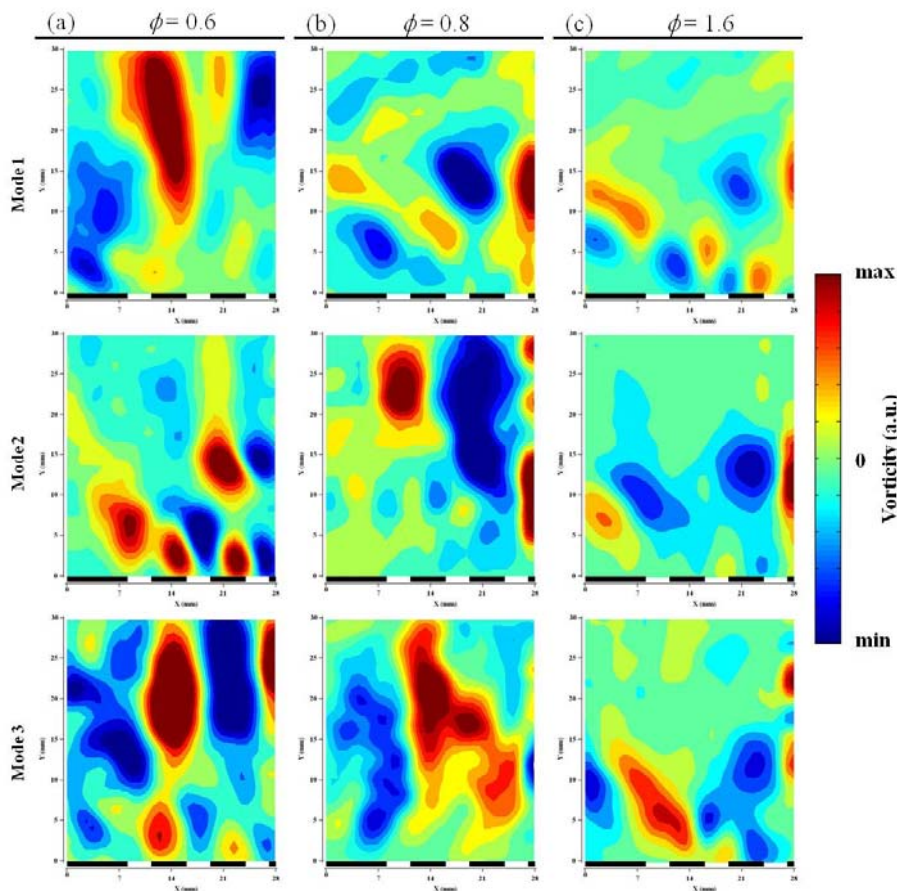


圖 5-25 (a)  $\phi=0.6$  , (b)  $\phi=0.8$  及(c)  $\phi=1.6$  之流場經由 POD 處理之前三模態渦度場分佈。

圖 5-26 為當量比 0.6、0.8 及 1.6 之流場前三模態時間係數變化和原始頻率分佈圖。在不同當量比時，原始流場之特徵頻率和在 POD 處理後的模態頻率分佈非常吻合，但特徵頻率峰值則隨當量比不同而改變。在當量比 0.6 時，第一模態之峰值頻率落在非常低頻的區域，且為單一峰值頻率，顯示大尺度渦旋結構之動態變化具有低頻特性；隨當量比增加至 1.6 時，頻率峰值逐漸改變為高頻，顯示此時小剪流結構具有高頻特性。此外相較於當量比 0.6 及 0.8 之固定頻率，在當量比為 1.6 時除了主要的峰值頻率也出現幾個次要峰值的頻率，由於剪流結構相對於大尺度渦旋具有更多渦旋相互撞擊、捲曲、消散和融合的機率，因此造成特徵頻率的變化，同時也證明當量比差異所具有的熱擴散不穩定效應影響流場之特徵結構和動態特性。

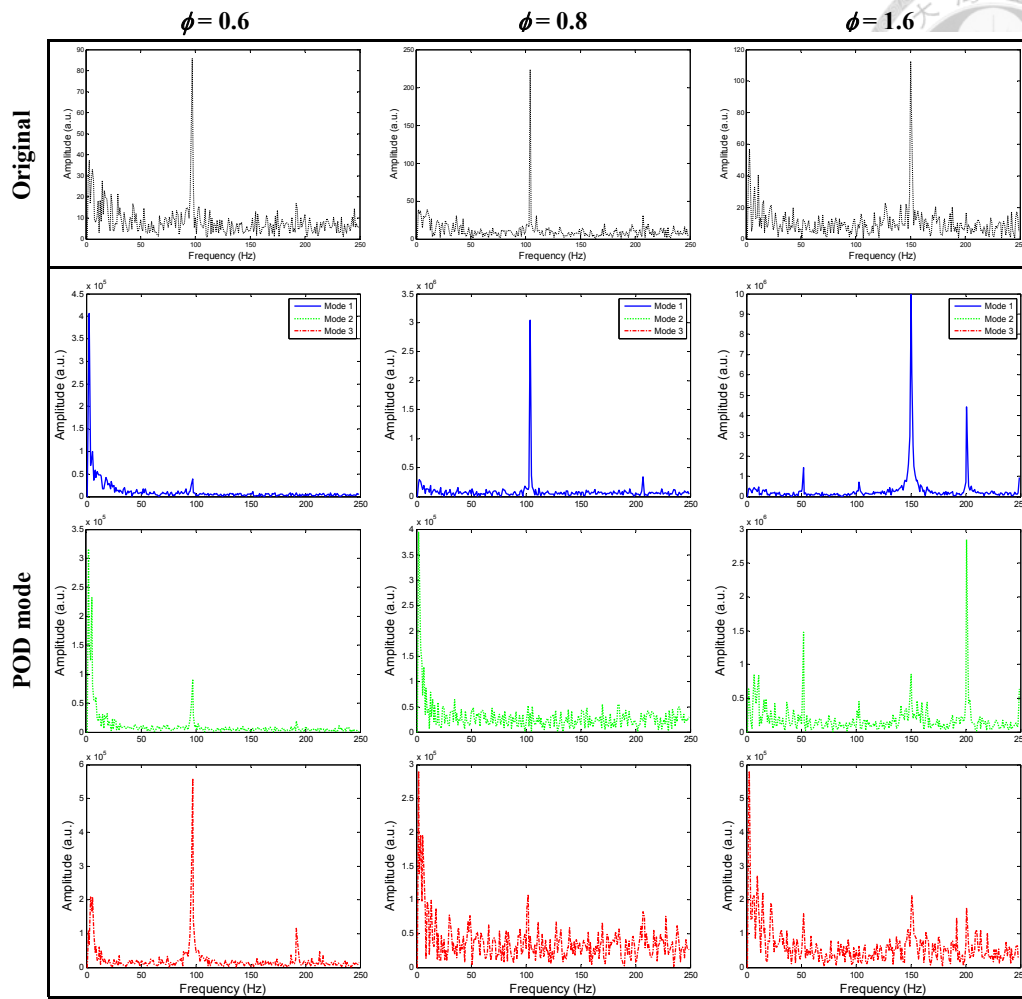


圖 5-26 當量比 0.6、0.8 及 1.6 之流場前三模態時間係數變化和原始頻率分佈圖

總結來說，隨當量比變化歸納融合火焰、穩定中間火焰及尖端開口火焰等火焰型態受熱擴散不穩定性影響，並從化學螢光和 PIV 獲得之平均燃燒流場分佈發現當量比變化造成火焰結構隨火焰結構不同而改變，但流場幾無變動。透過 POD 處理後則歸納出在時空動態特性上，渦度場的分佈明顯具有受當量比影響而使主導結構產生差異的特徵，進而造成特徵頻率峰值由貧油端的低頻響應轉移至富油端的高頻響應。因此對於受熱擴散不穩定效應影響之層狀化丙烷火焰而言，在貧油燃燒( $Le > 1$ )的條件下，燃燒反應與流場紊流強度影響存在正相關的關係且由低頻大尺度結構主導；而在富油燃燒( $Le < 1$ )的條件下火焰反應與流場紊流強度呈負相關則由高頻小層流化結構主導。



## 第六章 添加生質合成氣之衝擊燃燒流場

### 6-1 衝擊燃燒流場特性

生質合成氣燃料中的氫氣與一氧化碳成分比例會大幅影響火焰燃燒的物理化學特性，例如火焰穩定性、火焰和流場交互作用、汙染物和燃燒效率等等。氫氣因為高能量含量和低汙染物排放被視為乾淨能源，且添加氫氣燃燒可提高火焰傳播速度及火焰溫度(Zhen *et al.*, 2012; Troe, 1998; Tang, 2008)，但其低體積密度和引燃能量限制其應用方式。為了提高其穩定性，以加入些許碳氫燃料改變其化學反應機制是其中一種方式(Law and Kwon, 2004)。而一氧化碳作為許多反應過程的前導中介質，與常用的燃料如烷類與氫氣不同，碳與氧間的三鍵(Triple bond)大幅增加了CO的活化能(Law, 2006)，使CO不易燃燒。在生質合成氣的燃燒中少許的氫氣即可透過在反應過程中非常重要的反應式， $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$  大幅加速一氧化碳的氧化(Mueller *et al.*, 1999; Shih and Hsu, 2011; Davis *et al.*, 2005; Mira Martinez *et al.*, 2013)。隨著燃燒器改變的流場結構同樣也影響燃燒特性，V型燃燒器具有衝擊流場特性，具有提升燃燒效能之功效，因此將作為載具研究富油丙烷火焰及貧油丙烷火焰添加氫氣與一氧化碳，其穩焰特性、燃燒流場結構、溫度分布和汙染物排放等。

圖 6-1a 為 V 型衝擊燃燒器幾何構造示意圖、火焰位置及燃氣流向，其概念為應用兩具傾斜角(45°)之衝擊流互相撞擊，藉由相互衝擊的流場增強火焰燃氣混合進而強化火焰穩定性(Boushaski and Sautet, 2010; Mansour, 2003)，此外兩股相近的火焰之相互預熱與在 V 型溝處蓄積的熱相對減少逸散熱損失。兩向衝擊燃燒器的長度為 80 mm，寬度為 12 mm，凹槽深度為 6 mm，凹槽的夾角為 90 度，以不鏽鋼加工製造而成，當量比流率 2.0、1.8、1.5 和 1.1 之流率分別為 12 l/m、14.4 l/m、16.8 l/m 和 22.8 l/m。圖 6-1b 為平面燃燒器和衝擊燃燒器之富油丙烷火焰型態圖，均具有內部為預混火焰及外側對稱的非預混火焰結構，火焰型態受到火焰和流場交互作用改變質量和熱量傳遞的特性，隨著當量比變化而改變。所有的火焰其內部

預混反應區均維持穩定，而外側的非預混火焰則受大尺度渦旋發展規律擺盪，只有當流速超過火焰傳播速度時火焰才出現吹熄的不穩定現象。對於平面火焰及衝擊火焰而言，隨著當量比由 4.8 降至 1.9，外側擴散火焰藉由捲入外側二次空氣進行反應，並向中央靠攏提供預熱幫助中央預混火焰穩定。在當量比 1.8 和 1.7 時，預混火焰隨著火焰傳播速度增加而互相朝中心靠近融合為單股火焰，此時平面火焰與衝擊火焰型態出現差異，藉由 V 型結構而能相互影響、預熱及蓄熱之衝擊火焰促進火焰與流場的交互作用影響。隨著量比進一步降低至 1.5 和 1.1，此時流速達到 2.3 倍層流火焰傳播速度(Law, 2006)，衝擊燃燒器上的融合錐形火焰因為火焰與流場交互影響增加的預混火焰面擾動皺褶(Law, 1988)，使火焰傳播速度加快並轉變為凹向下的火焰型態。圖 6-2 為衝擊火焰在當量比 1.1、1.5、1.8 和 2.0 之徑向速度分量分別在高度 10 mm 處的分布，此時徑向速度由於受到迴流區衝擊流場影響，最大徑向速度只有 0.06 m/s，顯示 V 型燃燒器產生之衝擊流場急遽降低此處流速，因此提供一個可使火焰蓄積熱能之迴流區。圖 6-3 為不同當量比下之衝擊火焰溫度分布圖，高溫的分布與火焰位置吻合，在當量比 1.1 時，位於衝擊流場中的兩股火焰最為靠近，證明藉由強烈的火焰和流場交互作用下整體溫度分布明顯提高，因此增強預熱的效果並增加火焰傳播速度。

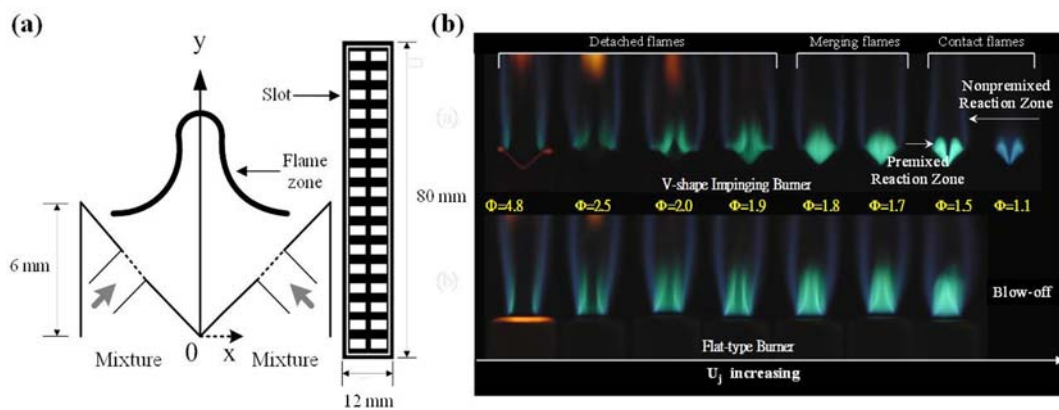


圖 6-1 (a) 衝擊燃燒器幾何結構示意圖，(b)富油預混丙烷火焰型態分布圖

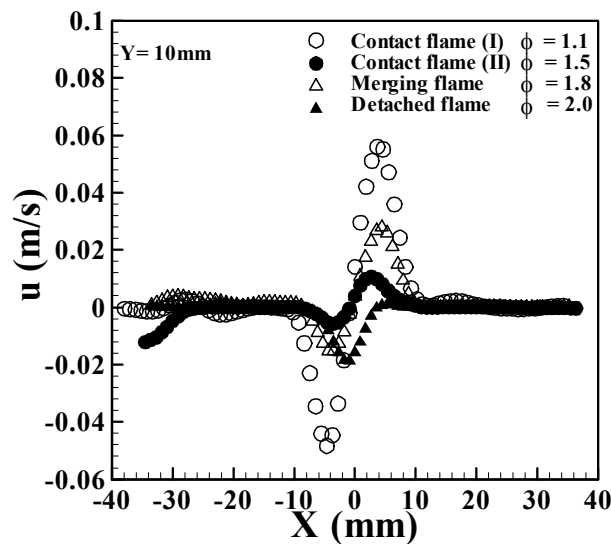


圖 6-2 沿中心軸之水平方向速度分量

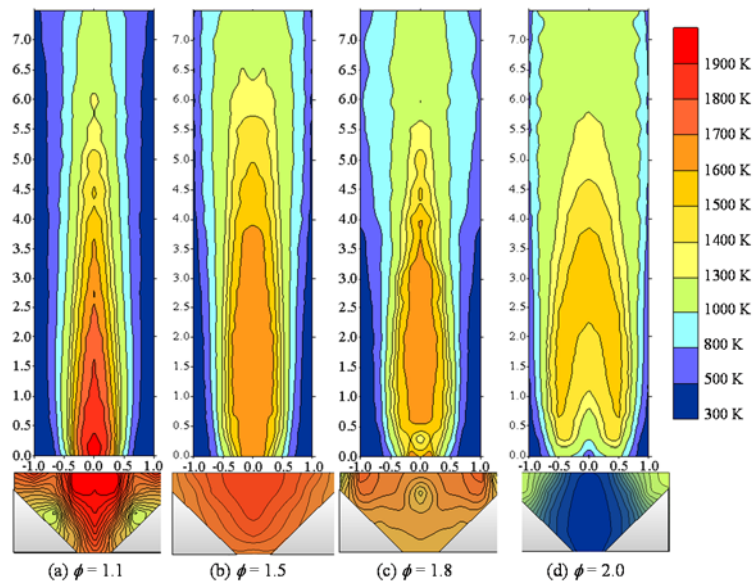


圖 6-3 衝擊火焰溫度分布圖

## 6-2 添加生質合成氣之影響

圖 6-4 為平面燃燒器和衝擊燃燒器上貧油丙烷火焰中混合不同比例之氫氣與一氧化碳燃料之燃燒操作區間分布。由於固定燃氣流率，因此在固定當量比下降低丙烷流率代表氫氣或一氧化碳在燃料中的比例增加；而在固定丙烷流率的情況下隨著當量比增加則代表在燃料中的氫氣或一氧化碳增加，如表 6-1 和 2 所示。隨著

增加氫氣或一氧化碳的添加量下可燃極限分別拓展至 0.38 和 0.5，均比預混丙烷火焰( $\phi = 0.62$ )表現為佳。由於氫氣具有引燃能量小、加快火焰傳播速度(Wu *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 1986; Schefer *et al.*, 2002)和增加對拉伸作用的抗性(Gauducheau *et al.*, 1998)，添加氫氣的火焰可燃極限較添加一氧化碳的火焰為佳。

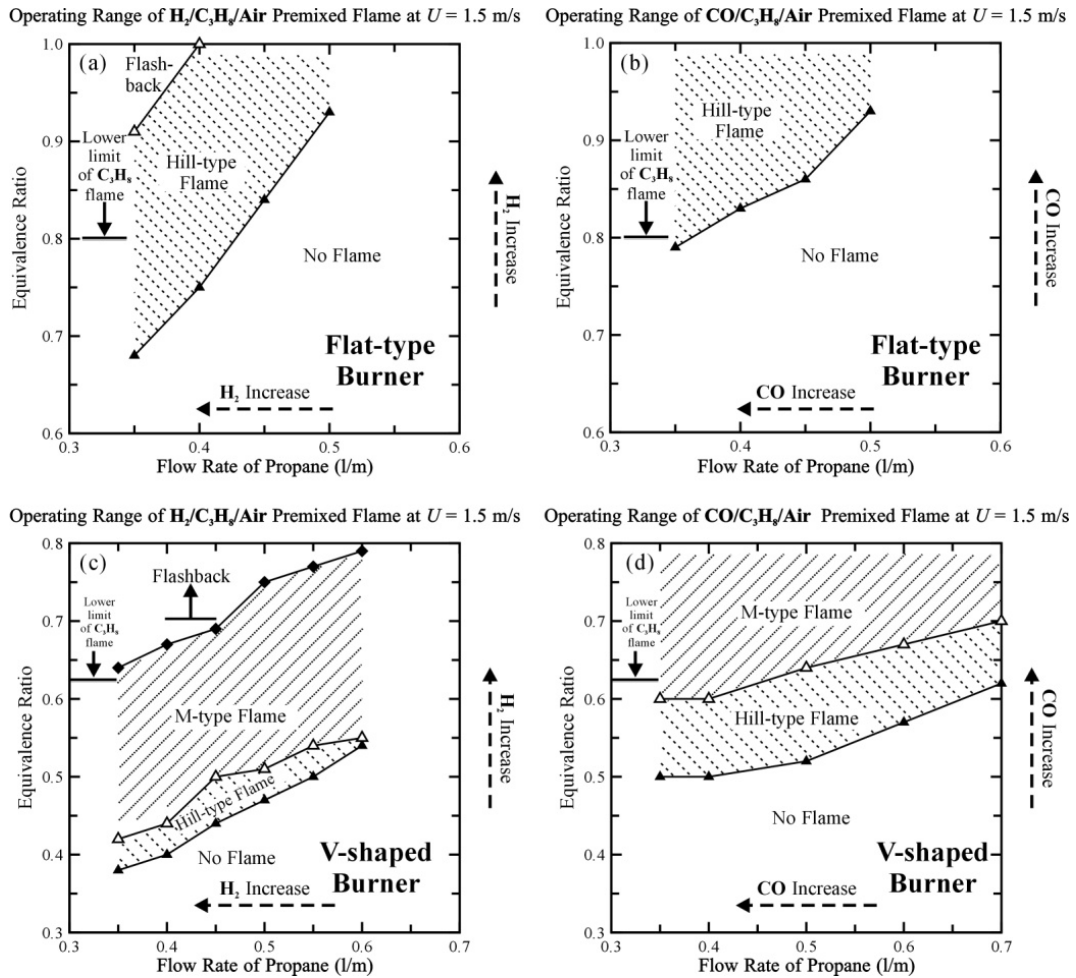


圖 6-4 平面燃燒器之(a)  $H_2/C_3H_8/air$  火焰和(b)  $CO/C_3H_8/air$  火焰操作區間，以及衝擊燃燒器上之(c)  $H_2/C_3H_8/air$  火焰和(d)  $CO/C_3H_8/air$  火焰操作區間

圖 6-5 為  $C_3H_8/air$ 、 $H_2/C_3H_8/air$  和  $CO/C_3H_8/air$  在當量比 1、0.8、0.7、0.6 和 0.5 時火焰型態分布圖，當固定丙烷流率在 0.35 l/m 時，在燃料中所添加的氫氣和一氧化碳含量隨著當量比改變，如表 6-1 所示。隨當量比下降，火焰速度增加使  $C_3H_8/air$  和  $CO/C_3H_8/air$  火焰高度下降； $H_2/C_3H_8/air$  火焰角度傾向垂直。此一依據火焰高度

判斷火焰速度趨勢之分析方式結果與文獻相符(Zhen *et al.*, 2014; Zhen *et al.*, 2014; Burbano *et al.*, 2008)。在當量比 0.6 時, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰已吹熄; 因為火焰速度加快, CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰呈丘型, 而 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰則呈 M 型。雖然丘型火焰因火焰速度減慢形成, 但迴流區中接近停滯面處由於衝擊效應減弱流速, 形成兩道小而微弱的對稱火焰面, 此特性與廣泛應用於基礎研究的對衝型火焰特性相似(Wu *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2004; Egolfopoulos *et al.*, 1989)。添加氫氣或一氧化碳的丙烷火焰改變了化學動力學特性, 在燃燒反應過程中造成快速的氧化反應以及產生更多氫原子(Ragland and Bryden, 2011)。為了觀察添加氫氣或一氧化碳比例對火焰結構的效應, 將選擇包含丘型及 M 型火焰的當量比區間深入探討。

圖 6-6 為 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰在當量比分別為 0.5 和 0.7 時, 不同氫氣和一氧化碳比例下的火焰型態分布, 在燃料中所添加的氫氣和一氧化碳含量隨著當量比改變, 如表 6-2 所示。隨著燃料中添加的氫氣或一氧化碳增加, 火焰高度縮短使火焰型態從丘型火焰轉變為 M 型火焰。由於氫原子的濃度增加增強反應式  $H + O_2 = O + OH$  (El-Sherif, 2000), 中介質 OH 主導關鍵的氧化步驟: 反應式  $H_2 + OH = H_2O + H$  和  $CO + OH = CO_2 + H$  (Fu *et al.*, 2013), 因此加速連鎖反應進行並增加熱釋放和加快火焰速度足以向更上游反應。

值得一提的是在高氫氣比例時火焰焰尖變得極為微弱, 這與燃氣的曲率效應對燃氣擴散不穩定性的影響相關, 促使焰尖開口的現象(Law, 2006; Bouvet *et al.*, 2011)。當火焰面凸向(convex to)未燃氣體, 此時曲率定義為正(positive curvature), 反之當火焰面凹向未燃氣體則定義為負(negative curvature)。火焰傳播速度在這兩個區域會隨路易斯數而有不同的動態變化, 當路易斯數小於 1 時, 正曲率處會因為火焰傳播速度加快而加速火焰面拉伸的情況, 最終導致火焰面皺摺而至破裂; 反之, 當路易斯數大於 1 時, 正曲率處火焰則會因為火焰傳播速度減慢而趨於平緩且穩定(Peters, 2000; Law, 2006; Sun *et al.*, 1999)。然而對於添加氫氣的碳氫燃料影響路易斯數而言相關的燃燒研究較少, H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的路易斯數通常隨添加的

氫氣比例接近 100% 減少 (Tang *et al.*, 2008; Tang *et al.*, 2009)。而本研究中  $H_2/C_3H_8/air$  火焰在添加比例超過 80% 時路易斯數減少至小於 1。在添加的氫氣比例超過 80% 時火焰型態圖中皆具有尖端開口的特性，焰尖開口處微弱的火焰強度在化學螢光分布圖中更為明顯。

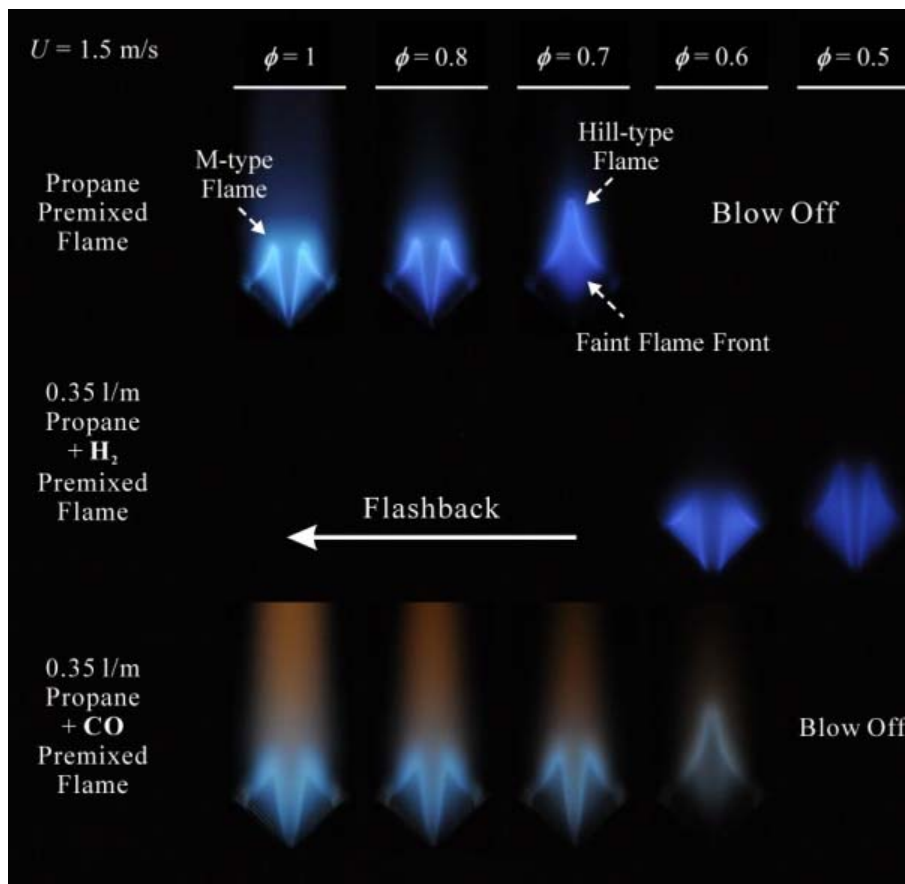


圖 6-5 不同當量比下  $C_3H_8/air$ 、 $H_2/C_3H_8/air$  和  $CO/C_3H_8/air$  火焰型態分布圖

表 6-1 圖 5 火焰型態之氫氣及一氧化碳添加比例

Air flow rate (l/m)	Propane flow rate (l/m)	$H_2$ flow rate (l/m)	Total flow rate (l/m)	$H_2$ concentration in fuel (%)	$\phi$	Velocity (m/s)	$Re$
25.10	0.35	3.35	28.80	90.5	0.65	1.5	448
25.52	0.35	2.93	28.80	89.3	0.60	1.5	453
25.95	0.35	2.50	28.80	87.7	0.55	1.5	459
26.40	0.35	2.05	28.80	85.4	0.50	1.5	465
27.35	0.35	1.10	28.80	75.9	0.40	1.5	478
Air flow rate (l/m)	Propane flow rate (l/m)	CO flow rate (l/m)	Total flow rate (l/m)	CO concentration in Fuel (%)	$\phi$	Velocity (m/s)	$Re$
22.50	0.35	5.95	28.80	94.4	1.0	1.5	489
23.91	0.35	4.54	28.80	92.8	0.8	1.5	490
24.69	0.35	3.76	28.80	91.5	0.7	1.5	490
25.52	0.35	2.93	28.80	89.3	0.6	1.5	491
26.40	0.35	2.05	28.80	85.4	0.5	1.5	491

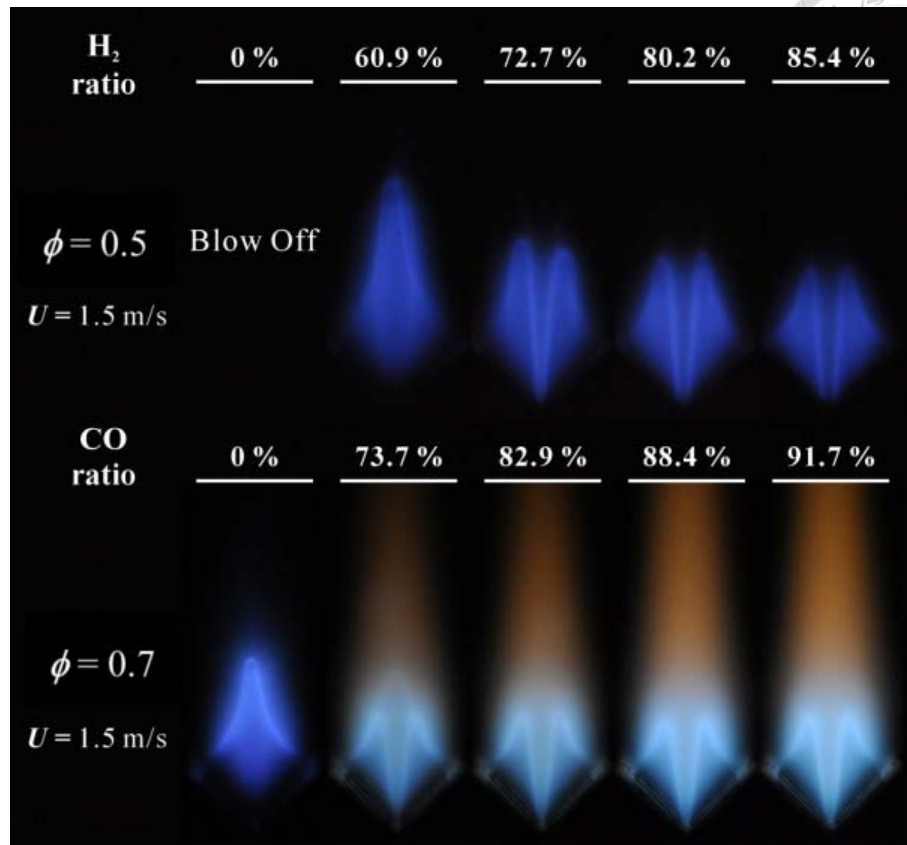


圖 6-6 添加不同氫氣比例之當量比 0.5 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰和添加不同氫氣比例之當量比 0.7 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰型態分布圖

表 6-2 圖 6 火焰型態之氫氣及一氧化碳添加比例

Air flow rate (l/m)	Propane flow rate (l/m)	H <sub>2</sub> flow rate (l/m)	Total flow rate (l/m)	H <sub>2</sub> concentration in fuel (%)	$\phi$	Velocity (m/s)	<i>Re</i>
27.89	0.55	0.36	28.80	39.6	0.5	1.5	493
27.52	0.50	0.78	28.80	60.9	0.5	1.5	486
27.15	0.45	1.20	28.80	72.7	0.5	1.5	479
26.78	0.40	1.62	28.80	80.2	0.5	1.5	472
26.40	0.35	2.05	28.80	85.4	0.5	1.5	465
Air flow rate (l/m)	Propane flow rate (l/m)	CO flow rate (l/m)	Total flow rate (l/m)	CO concentration in Fuel (%)	$\phi$	Velocity (m/s)	<i>Re</i>
27.96	0.82	0.02	28.80	2.4	0.7	1.5	506
27.12	0.70	0.98	28.80	58.3	0.7	1.5	502
26.43	0.60	1.77	28.80	74.7	0.7	1.5	498
25.73	0.50	2.57	28.80	83.7	0.7	1.5	495
25.04	0.40	3.36	28.80	89.4	0.7	1.5	492
24.69	0.35	3.76	28.80	91.5	0.7	1.5	491

圖 6-7 和圖 6-8 分別為不同當量比下 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air、H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰和不同氫氣或一氧化碳比例下 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰之 CH\* 螢光強度，以及 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰之 OH\* 螢光強度。C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的 CH\* 螢光強度以及 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的 OH\* 螢光強度隨著當量比降低而減弱，如圖 6-7 所示，

螢光強度增強顯示熱釋放率增強並加快火焰速度。圖 6-8 顯示 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的 CH\* 螢光強度隨添加的 CO 增加變強；H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的 OH\* 螢光強度則隨添加的氫氣增加變強。在當量比 1.0 時，雖然此時 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰均為 M 型，但 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的反應區較前者寬廣許多。C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰反應區幾乎與火焰型態相同，但 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的反應區較寬廣形成一扇形區域，原因是一氧化碳的碳和氧間的三鍵提高了反應所需的能量，使部分一氧化碳無法燃燒完全就通過火焰面。在衝擊燃燒器的迴流區中具有高溫及低流速的特性，因此可使未燃燒完全的一氧化碳再次反應而形成此扇形區域的 CH\* 螢光分布。相對地，H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的 OH\* 螢光強度分布中則是清晰的顯示出火焰型態中在迴流區內兩個微弱的火焰面，如圖 6-8 所示。總結而言，藉由螢光強度的分布結果顯示在衝擊流場中因高溫及延長的留滯時間而提供二次反應的條件。此外，對於 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰，CH\* 和 OH\* 螢光強度分布具有相反趨勢的特徵，由於大量的 OH 生成來自於添加氫氣供給反應式  $H + O_2 = O + OH$ ，進而加速化學螢光 OH\* 來源之一的反應式  $OH + OH + H = OH^* + H_2O$  加速生成 OH\* 螢光(Ballester and Garcia-Armingol, 2010)，而 CH\* 螢光強度則隨碳氫燃料含量減少而減弱。對照火焰型態圖中添加氫氣或一氧化碳之火焰色澤，可發現其變化受到燃燒反應中所產生不同的中介自由基散發的波段影響，其特性也與文獻符合(Fu *et al.*, 2013)。

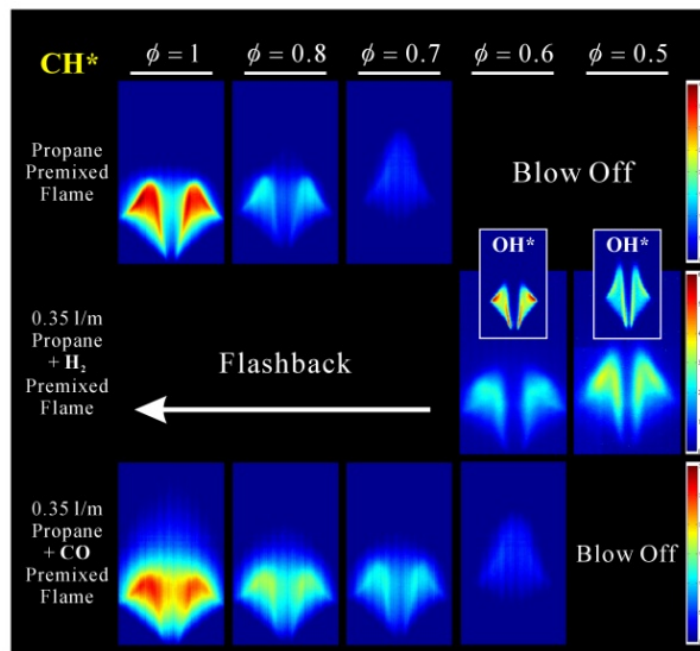
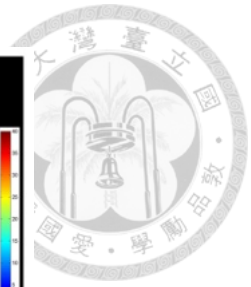


圖 6-7 不同當量比  $C_3H_8/air$  (上排)、 $H_2/C_3H_8/air$  (中排)和  $CO/C_3H_8/air$  (下排)火焰之  $CH^*$ 和  $OH^*$ 化學螢光分布圖

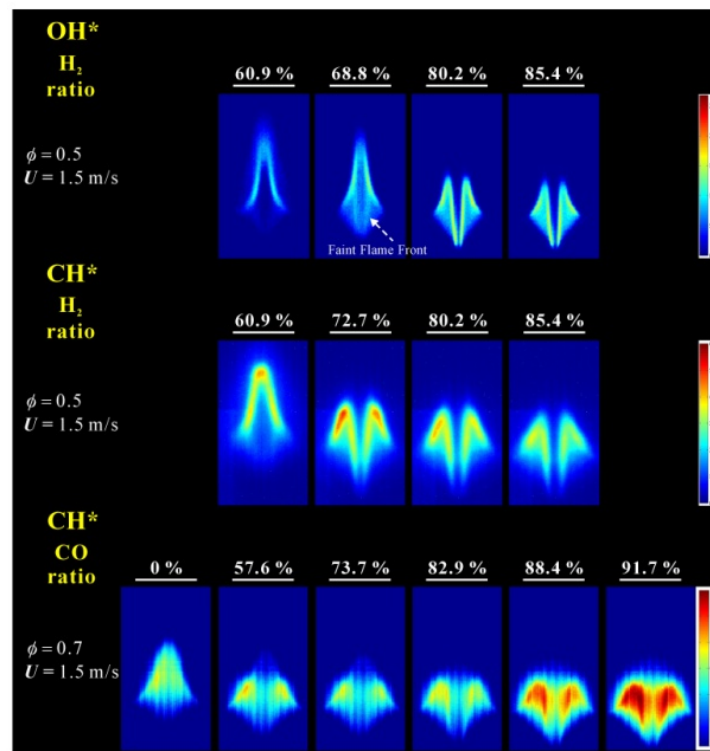


圖 6-8 添加不同氫氣比例之當量比 0.5  $H_2/C_3H_8/air$  火焰和添加不同氫氣比例之當量比 0.7  $CO/C_3H_8/air$  其  $CH^*$ 和  $OH^*$ 化學螢光分布圖

圖 6-9a 和 b 為對應火焰型態之最高溫度分布圖，M 型火焰的  $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  和  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰均大於  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰。 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  和  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰由於添加的氫氣和一氧化碳減少，自 M 型火焰轉變為丘型火焰並降低火焰溫度。在當量比 0.6 時，M 型的  $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰溫度(1435 °C)約為 1.37 倍丘型的  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰(1050 °C)，而此時  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰已經熄滅。在圖 6-9b 中，隨著  $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  和  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰中的氫氣或一氧化碳添加量增加，火焰溫度隨著 M 型轉變至丘型火焰而增加。對於火焰中不同添加量的氫氣與一氧化碳其量測所得之溫度與理論計算的差異來自三個因素。第一， $\text{CO}_2$  和碳粒(soot)的生成率隨火焰中添加的氫氣或一氧化碳越多、丙烷越少而降低，進而使火焰的輻射熱損失降低(Zhen *et al.*, 2012; Choudhuri and Gollahalli, 2004)，因此能提高火焰溫度。第二，由於氫氣較高的燃燒性以及一氧化碳在添加些許氫氣下提高的反應速率(Yetter and Dryer, 1992; Rightley and Williams, 1997)促進燃燒反應及大量熱釋放引發的快速空氣膨脹，放大迴流區的熱能效果(Kim *et al.*, 2009)，因此添加氫氣和一氧化碳使火焰反應區受迴流區流場影響能提高溫度。第三， $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  和  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰型態變化改變反應區位置，靠近停滯面的內側火焰反應區反向向外，顯示迴流區中氫氣的高擴散性(Choudhuri and Gollahalli, 2004)以及一氧化碳的再點燃特性增加燃氣來流及氧化物碰撞的機會而強化反應強度。

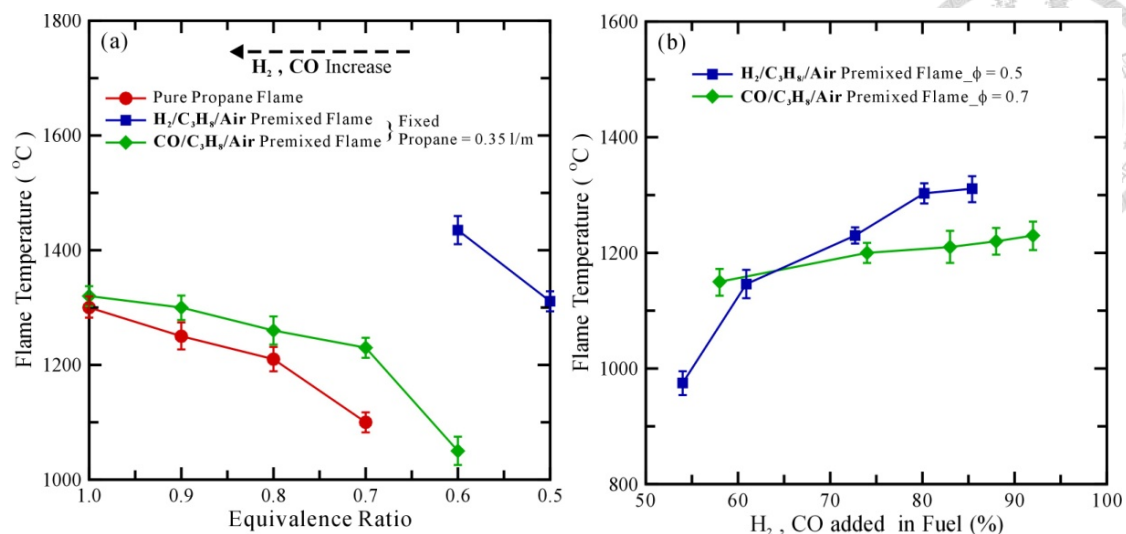


圖 6-9 (a) 不同當量比下 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air、H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰，和(b) 添加不同氫氣比例之當量比 0.5 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰和添加不同氫氣比例之當量比 0.7

#### CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 其溫度分布

當 V 型燃燒器上的衝擊火焰在相同當量比或燃氣流速下，廢氣排放的特性因為火焰結構、化學反應和流體力學特性改變會有所不同。圖 6-10a 顯示 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air、H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰在不同當量比下之一氧化碳排放量。H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰在降低當量比時(添加氫氣的含量降低)，相燃料中的碳含量相對增加而減低 OH 的生成，造成溫度降低及一氧化碳排放量增加。CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰的一氧化碳排放量會因 M 型轉變為丘型火焰的不完全燃燒而增加，即使此時在迴流區中存在兩個微弱火焰面仍不足以幫助一氧化碳完全燃燒。在 M 型火焰型態時，H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰兩者隨當量比降低的情況下，一氧化碳排放量仍可維持在 10 ppm 以下極低的狀態。當在丘型火焰型態時，H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰之一氧化碳排放量分別急遽增加至 90 ppm 和 322 ppm，證明對於 M 型火焰而言，由於迴流區中的高溫及延長的留滯時間幫助燃氣有效地完全燃燒，反應速率提高主要來自於自由基池(radical pool)，包含如 O、H 和 OH 等含量的增加(Phillips and Roby, 1999)。圖 6-10b 顯示在 H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 和 CO/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰之當量比分別固定 0.5 和 0.7 時，H<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air 火焰由於添加氫氣比例增加使碳含量相對減少，由於 OH 生成

增加且溫度提高而降低一氧化碳的排放量。對  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰而言，由於添加的一氧化碳增加時，一氧化碳排放量會先增加直到火焰型態由丘型轉變為 M 型火焰，當一氧化碳添加量大於 73.7 % 時一氧化碳排放量開始急速的降低。因此可說明經過火焰面而未燃燒完的一氧化碳透過衝擊流場中的二次燃燒反應能在具有高溫 and 延長的留滯時間的 M 型火焰的發揮作用。而  $\text{OH}$  的生成濃度增加透過  $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$  促進了完全的一氧化碳的氧化反應成為二氧化碳,也因此降低一氧化碳的排放量。

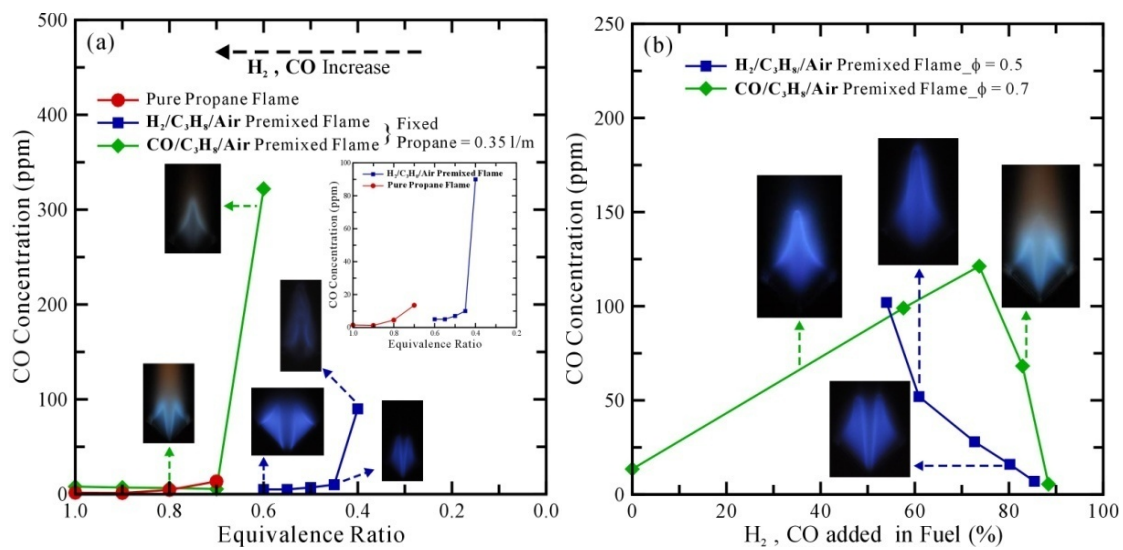


圖 6-10 (a)不同當量比下  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 、 $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  和  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰，和(b)添加不同氫氣比例之當量比 0.5  $\text{H}_2/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  火焰和添加不同氫氣比例之當量比 0.7  $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  其一氧化碳排放量



## 第七章 結論和未來展望

### 7-1 結論

本研究以層狀化燃燒器為載具，透過自行建立之光學診斷結合 POD 之量測技術，探討進流數效應對暫態火焰和流場的影響，包括火焰型態、平均燃燒流場特性、紊流強度和螢光強度交互作用特性及 PDF 分佈等，並透過 POD 處理進行燃燒流場結構重組、模態能量特性分析、時空動態分佈特性以及模態頻率響應特性。基於 POD 解析的層狀燃燒流場特性歸納三種操控穩焰方法，包含加入空氣共伴流穩焰、壓縮渦對穩焰以及利用熱擴散不穩定效應增幅或抑制燃燒流場特性等。另一方面，應用兩股  $45^\circ$  添加氫氣及一氧化碳之預混進流形成之衝擊燃燒流場，具有低速高溫迴流區可大幅提升燃燒穩定性、提高火焰溫度並降低一氧化碳排放量。

在不同進流數影響下，火焰長度和分佈範圍隨進流數增加而擴大，此外火焰位置集中於進流間的區域，顯示對於飄盪貧油火焰而言剪流層對交互作用具有關鍵影響。由 PIV 和化學螢光所獲得之平均燃燒流場分佈發現隨進流數增加會增強燃燒流場中紊流強度峰值，同時也會增加高紊流強度的分佈機率，證明剪流層區主導改變進流數時之燃燒流場結構；隨進流增加火焰高度雖然變高且分佈變廣，但仍集中於剪流層區，藉由指標平均機率強度則顯示火焰的交互作用影響增幅變大，並透過高速影像解析證實此時的貧油不穩定燃燒流場由剪流層區火焰主導。POD 處理後顯示第一模態均為主導模態，隨進流數增加主結構能量會分散但仍具有明顯的能量比例差異，因此對於燃燒流場重建而言，隨進流數增加則需越多模態相加來趨近原始燃燒流場。隨進流數增加，水平及垂直方向上擺動振盪加劇和高模態時出現細碎化結構。由於燃燒場在進流數增加後主流方向開始轉變，透過交互作用明顯使火焰在完整厚實的剪流層區域成為主導結構，造成這個以較微小的結構為主的局部區域振幅變小。此外流場部分由於出現高階模態週期減小和反轉處不規則抖動的間歇特性，證明進流數增加和細碎結構增加且生成、消散的轉變快速相關。模態

峰值頻率與原始燃燒流場特徵頻率相近，且隨進流數增加，次要峰值明顯增加，而累加一二模態幾與原始頻率分佈相同，因此驗證燃燒流場重組的可依賴性。

藉由 PIV 和化學螢光光學量測結合 POD 分析，本研究歸納三種層狀化燃燒之穩焰操控方法，分別探討加入空氣共伴流之影響、壓縮渦對之穩焰機制以及熱擴散不穩定性對火焰和流場交互作用之穩焰效應。在加入空氣共伴流的部分，單股貧油甲烷火焰之燃燒流場的火焰型態可分為四類：錐焰、飄焰、近吹熄和熄滅，藉由中央鈍體之迴流結構可拓展操作區間至當量比 0.56。空氣共伴流在飄焰內側加入空氣共伴流並無明顯的影響，然而當加入外側之空氣共伴流超過特定流速閾值時，則會改變火焰結構至較穩定之類錐焰型態，透過高速 PIV 發現共伴迴流區形成衝擊反轉流場結構，使高溫燃氣蓄集在共伴迴流區當中，因此火焰能向上游傳播而形成類錐焰結構，強化火焰穩定性。在壓縮渦對之穩焰部分，具速度梯度差之層狀化燃燒所產生的壓縮渦對使穩定操作區間在開放空間下擴展至  $\phi = 0.50$ ，由於尾流區中型成之壓縮渦對促使流體在兩渦漩中的通道被擠壓加速，加上受到浮力效應所捲入的外側氣流捲曲向下游拉伸，形成一股加速射流加強尾流區的熱量和質量傳遞效應。以作為火焰強度指標的  $U_{var}/S_L$  峰值和紊流強度峰值兩者比較，其位置特性與流場互相吻合，顯示壓縮渦對可提升火焰強度及穩焰。受熱擴散不穩定性影響下，不同丙烷預混火焰在當量比 ( $\phi = 0.6-1.6$ ) 時，富油火焰受到火焰前緣不穩定性主導，火焰尖端產生破裂並於焰尖開口兩側出現螢光強度峰值。由統計所得之紊流強度分析燃燒流場中火焰和流場的交互作用特性，發現在貧油燃燒時火焰強度與紊流強度呈現正相關之趨勢；反之，在富油燃燒時則呈現負相關之趨勢。透過 POD 處理後，富油端第一模態能量含量約為貧油端之兩倍，代表貧、富油兩端具不同程度之紊流化；而在燃燒流場空間分佈中具主導性的第一模態的特性方面， $\phi = 0.6$  時由低頻大尺度結構主導，但在  $\phi = 1.6$  則由出口處高頻小層流化結構主導，因此可藉由熱擴散不穩定性具有主導影響火焰和流場之特性進行增幅和抑制。

添加生質合成氣於衝擊燃燒流場的部分，首先探討富油丙烷火焰利用相互衝

擊的流場，兩股相近的火焰之相互預熱並在 V 型溝處因停滯面產生低流速區蓄積熱能相對減少逸散熱損失，因此強化火焰穩定性。比較  $C_3H_8/air$ 、 $H_2/C_3H_8/air$  和  $CO/C_3H_8/air$  火焰在不同當量比和不同氫氣或一氧化碳添加比例下的燃燒特性，添加氫氣或一氧化碳可分別擴展操作區間至 0.38 和 0.5，火焰長度隨添加氫氣或一氧化碳比例增加而縮短。由於添加氫氣和一氧化碳始化學動力學特性改變，由  $H_2 + OH = H_2O + H$  和  $CO + OH = CO_2 + H$  兩反應式主導火焰色澤的變化，使  $CH^*$  和  $OH^*$  呈現相反分布趨勢，此外火焰溫度因為碳氫燃料比例下降、衝擊低速回流區以及氫和一氧化碳反應特性而提升，並大幅降低一氧化碳排放量，顯示利用衝擊燃燒器可有效提升燃燒問焰特性。

## 7-2 自評與未來展望

本研究建立 PIV 和化學螢光法光學診斷結合 POD 之量測分析技術，探討層狀化燃燒流場特性，藉由平均分佈、紊流強度和火焰螢光強度、POD 分解、重組及時空動態特徵，歸納空氣共伴流、壓縮渦對效應以及熱擴散不穩定操控穩焰方法，並應用添加氫氣及一氧化碳之衝擊燃燒流場擴展燃燒穩定性、提升火焰溫度及降低一氧化碳排放量。核心及貢獻在於：發展有效實用之燃燒流場光學診斷結合 POD 之實驗分析方法、層狀化燃燒之火焰和流場交互作用機制、燃燒流場重組及時空動態特徵分析方法、歸納共伴流、壓縮渦對及熱擴散不穩定效應之穩焰機制、衝擊燃燒流場之混燒特性分析。研究核心概念與貢獻架構如圖 7-1 所示。

火焰穩定性與流場結構的交互作用特性或許是最美且最引人入勝的燃燒現象，人們若能對火焰有深入的了解，將使科學和工程更相緊密的結合。本文的量測結合分析技術之開發及研究發現不僅在學術研究上有所貢獻，也期望能在未來應用於民生工業、航空和國防等用途，以增進國家社會福祉，並保障人類生活健康和永續生存的生態環境。

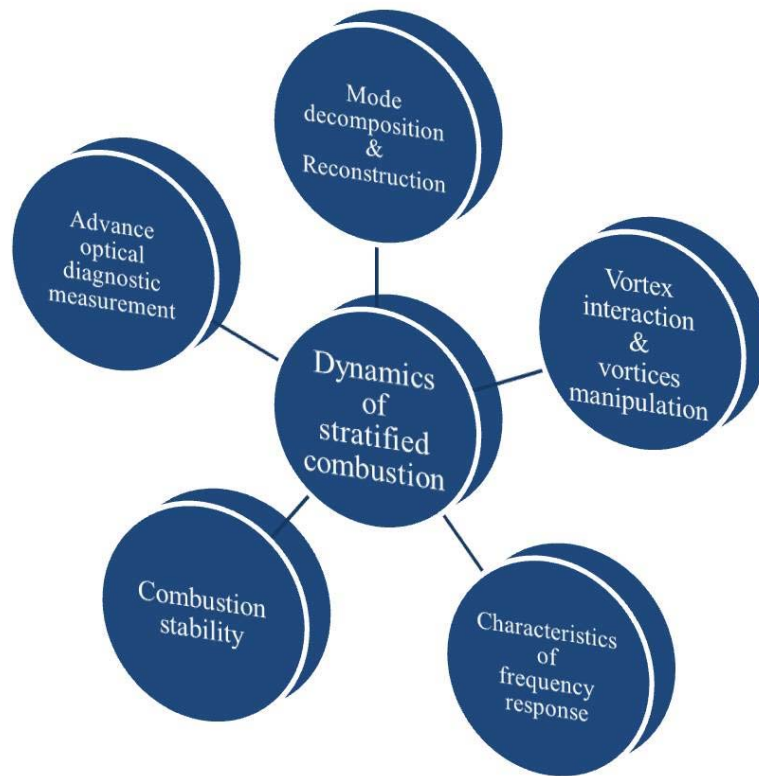
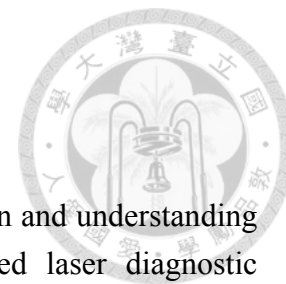


圖 7-5 本研究之核心概念與貢獻



## 參考文獻

- Aldén, M., Bood, J., Li, Z., and Richter, M. 2011. Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques. *Proceedings of the Combustion Institute*, **33**, 69.
- Anselmo-Filho, P., Hochgreb, S., Barlow, R. S., and Cant, R. S. 2009. Experimental measurements of geometric properties of turbulent stratified flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, **32**, 1763.
- Ayoolan, B. O., Balachandran, R., Frank, J. H., Mastorakos, E., and Kaminski, C. F. 2006. Spatially resolved heat release rate measurements in turbulent premixed flames. *Combustion and Flame*, **144**, 1.
- Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K., and Puri, I. K. 1999. The structure of triple flames stabilized on a slot burner. *Combustion and Flame*, **119**, 23.
- Böhm, B., Frank, J. H., and Dreizler, A. 2011. Temperature and mixing field measurements in stratified lean premixed turbulent flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, **33**, 1583.
- Balachandran, R., Ayoola, B. O., Kaminski, C. F., Dowling, A. P., and Mastorakos, E. 2005. Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations. *Combustion and Flame*, **143**, 37.
- Ballester, J., and Garcia-Armingol, T. 2010. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**, 375.
- Barlow, R. S. 2007. Laser diagnostics and their interplay with computations to understand turbulent combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, **31**, 49.
- Barlow, R. S., Wang, G. H., Anselmo-Filho, P., Sweeney, M. S., and Hochgreb, S. 2009. Application of Raman/Rayleigh/LIF diagnostics in turbulent stratified flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, **32**, 945.
- Boushaski, T., and Sautet, J. C. 2010. Characteristics of flow from an oxy-fuel burner with separated jets: Influence of jet injection angle. *Experiments in Fluids*, **48**, 1095.
- BeeÂr, J. M. and Chigier, N. A. 1983. *Combustion Aerodynamics*. FL, Robert E. Krieger Publishing Company.
- Berkooz, G., Homls, P., and Lumley, J. L. 1993. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **25**, 539.
- Bernero, S., and Fiedler, H. E. 2000. Application of particle image velocimetry and

proper orthogonal decomposition to the study of a jet in a counterflow. *Experiments in Fluids*, **29**, S274.

Bizon, K., Continillo, G., Leistner, K. C., Mancaruso, E., and Vaglieco, B. M. 2009. POD-based analysis of cycle-to-cycle variations in an optically accessible diesel engine. *Proceedings of the Combustion Institute*, **32**, 2809.

Bizon, K., Continillo, G., Mancaruso, E., Merola, S. S., and Vaglieco, B. M. 2010. POD-based analysis of combustion images in optically accessible engines. *Combustion and Flame*, **157**, 632.

Bonaldo, A., and Kelman, J. B. 2009. Experimental annular stratified flames characterisation stabilised by weak swirl. *Combustion and Flame*, **156**, 750.

Bouvet, N., Chauveau, C., Gokalp, I., Lee, S. Y., and Santoro, R. J. 2011. Characterization of syngas laminar flames using the Bunsen burner configuration. *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 992.

Boxx, I., Arndt, C., Carter, C., and Meier, W. 2012. High-speed laser diagnostics for the study of flame dynamics in a lean premixed gas turbine model combustor. *Experiments in Fluids*, **52**, 555.

Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M., and Scott, M. J. 1998. Premixed turbulent flame instability and NO formation in a lean-burn swirl burner. *Combustion and Flame*, **115**, 515.

Burbano, H. J., Amell, A. A., and García, J. M. 2008. Effects of hydrogen addition to methane on the flame structure and CO emissions in atmospheric burners. *International Journal of Hydrogen Energy*, **3**, 3410.

Casleton, K. H., Breault, R. W., and Richards, G. A. 2008. System issues and tradeoffs associated with syngas production and combustion. *Combustion Science and Technology*, **180**, 1013.

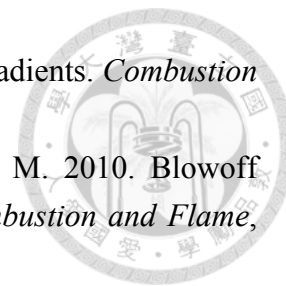
Chang, T. W., and Chao, Y. C. 2011. The stabilization characteristics of turbulent lifted diffusion flames of CH<sub>4</sub>/CO blended fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, **33**, 1655.

Chaparro, A. A., and Cetegen, B. M. 2006. Blowoff characteristics of bluff-body stabilized conical premixed flames under upstream velocity modulation. *Combustion and Flame*, **144**, 318.

Chatterjee, A. 2000. An introduction to the proper orthogonal decomposition. *Current Science*, **78**, 808.

Choudhuri, A. R., and Gollahalli, S. R. 2004. Intermediate radical concentrations in hydrogen–natural gas blended fuel jet flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, **29**, 1293.

Chaudhuri, S., and Cetegen, B. M. 2009. Response dynamics of bluff-body



stabilized conical premixed turbulent flames with spatial mixture gradients. *Combustion and Flame*, **156**, 706.

Chaudhuri, S., Kostka, S., Renfro, M. W., and Cetegen, B. M. 2010. Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames. *Combustion and Flame*, **157**, 790.

Cheng, R. K., and Shepherd, I. G. 1991. The influence of burner geometry on premixed turbulent flame propagation. *Combustion and Flame*, **85**, 7.

Chen, H., Reuss, D. L., and Sick, V. 2011. Analysis of misfire in a direct injection engine using proper orthogonal decomposition. *Experiments in Fluids*, **51**, 1139.

Chen, H., Reuss, D. L., Hung, D. L.S., and Sick, V. 2013. A practical guide for using proper orthogonal decomposition in engine research. *International Journal of Engine Research*, **14**, 307.

Coats, C. M. 1996. Coherent structures in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, **22**, 427.

Dally, B. B., Masri, A. R., Barlow, R. S., and Fiechtner, G. J. 1998. Instantaneous and mean compositional structure of bluff-body stabilized nonpremixed flames. *Combustion and Flame*, **114**, 119.

Dam, B., Corona, G., Hayder, M., and Choudhuri, A. 2011. Effects of syngas composition on combustion induced vortex breakdown (CIVB) flashback in a swirl stabilized combustor. *Fuel*, **90**, 3274.

Das, A. K., Kumar, K., and Sung, C. J. 2011. Laminar flame speeds of moist syngas mixtures. *Combustion and Flame*, **158**, 345.

Davis, S. G., Joshi, A. V., Wang, H., and Egolfopoulos, F. 2005. An optimized kinetic model of H<sub>2</sub>/CO combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, **30**, 1283.

Dawson, J. R., Gordon, R. L., Kariuki, J., Mastorakos, E., Masri, A. R., and Juddoo, M. 2011. Visualization of blow-off events in bluff-body stabilized turbulent premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, **33**, 1559.

De Leo, M., Saveliev, A., Kennedy, L. A., and Zelepouga, S. A. 2007. OH and CH luminescence in opposed flow methane oxy-flames. *Combustion and Flame*, **149**, 435.

Ding, N., Arora, R., Norconk, M., and Lee, S. Y. 2011. Numerical investigation of diluent influence on flame extinction limits and emission characteristic of lean-premixed H<sub>2</sub>-CO (syngas) flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 3222.

Disimile, P. J., Savory, E., and Toy, N. 1995. Mixing characteristics of twin impinging circular jets. *Journal of Propulsion and Power*, **11**, 1118.

Dong, C., Zhou, Q. L., Zhao, Q. X., Zhang, Y. Q., Xu, T. M., and Hui, S. 2009. Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures. *Fuel*, **88**, 1858.

Druault, P., Guibert, P., and Alizont, F. 2005. Use of proper orthogonal decomposition for time interpolation from PIV data, *Experiments in Fluids*, **39**, 1009.

Driscoll, J. F. 2008. Turbulent premixed combustion: Flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities. *Progress in Energy and Combustion Science*, **34**, 91.

Duwig, C., and Fuchs, L. 2007. Large eddy simulation of vortex breakdown/flame interaction. *Physics of Fluids*, **19**, 075103.

Duwig, C., and Iudiciani, P. 2010. Extended proper orthogonal decomposition for analysis of unsteady flames. *Flow Turbulence and Combustion*, **84**, 25.

Egolfopoulos, F. N., Cho, P., and Law, C. K. 1989. Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures. *Combustion and Flame*, **76**, 375.

El-Sherif, S. A. 2000. Control of emissions by gaseous additives in methane-air and carbon monoxide-air flames. *Fuel*, **79**, 567.

Emiris, I., and Whitelaw, J. H. 2003. Control of combustion oscillations. *Combustion Science and Technology*, **175**, 157.

Esquiva-Dano, I., Nguyen, H. T., and Escudie, D. 2001. Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames. *Combustion and Flame*, **127**, 2167.

Filatyevev, S. A., Driscoll, J. F., Carter, C. D., and Donbar, J. M. 2005. Measured properties of turbulent premixed flames for model assessment, including burning velocities, stretch rates, and surface densities. *Combustion and Flame*, **141**, 1.

Fu, J., Tang, C., Jin, W., Thi, L. D., Huang, Z., and Zhang, Y. 2013. Study on laminar flame speed and flame structure of syngas with varied compositions using OH-PLIF and spectrograph. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 1636.

Galizzi, C., and Escudié, D. 2006. Experimental analysis of an oblique laminar flame front propagating in a stratified flow. *Combustion and Flame*, **145**, 621.

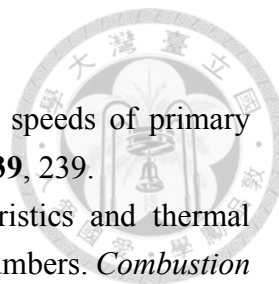
Gauducheau, J. L., Denet, B., and Searby, G. 1998. A numerical study of lean CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Air premixed flames at high pressure. *Combustion Science and Technology*, **137**, 81.

Gaydon, A. G. 1974. *The Spectroscopy of Flames*. London UK, Chapman and Hall.

Gil, Y. S., Jung, H. S., and Chung, S. H. 1998. Premixed flame stabilization in an axisymmetric curved-wall jet. *Combustion and Flame*, **113**, 348.

Higgins, B., Mcquay, M. Q., Lacas, F., and Candel, S. 2001. An experimental study on the effect of pressure and strain rate on CH chemiluminescence of premixed fuel-lean methane/air flames. *Fuel*, **80**, 1583.

Holmes, P., Lumley, J. L., and Berkooz, G. 1998. *Turbulence, Coherent Structures*,



*Dynamical Systems and Symmetry*, Cambridge University Press.

Huang, Y., Sung, C. J., and Eng, J. A. 2004. Laminar flame speeds of primary reference fuels and reformer gas mixtures. *Combustion and Flame*, **139**, 239.

Huang, R. F., and Yen, S. C. 2008. Aerodynamic characteristics and thermal structure of nonpremixed reacting swirling wakes at low Reynolds numbers. *Combustion and Flame*, **155**, 539.

Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F., and Katsuki, M. 2000. Measurement of the local flamefront structure of turbulent premixed flames by local chemiluminescence. *Proceedings of the Combustion Institute*, **28**, 343.

Jackson, G. S., Sai, R., Plaia, J. M., Boggs, C. M., and Kiger, K. T. 2003. Influence of H<sub>2</sub> on the response of lean premixed CH<sub>4</sub> flames to high strained flows. *Combustion and Flame*, **132**, 503.

Jeong, Y. K., Jeon, C. H., and Chang, Y. J. 2006. Evaluation of the equivalence ratio of the reacting mixture using intensity ratio of chemiluminescence in laminar partially premixed CH<sub>4</sub>-air flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **30**, 663.

Kaskan, W. E. 1987. The dependence of flame temperature on mass burning velocity. *Symposium (International) on Combustion*, **6**, 134.

Kiefer, J., Li, Z. S., Zetterberg, J., Bai, X. S., and Alden, M. 2008. Investigation of local flame structures and statistics in partially premixed turbulent jet flames using simultaneous single-shot CH and OH planar laser-induced fluorescence imaging. *Combustion and Flame*, **154**, 802.

Kim, H. S., Arghode, V. K., and Gupta, A. K. 2009. Flame characteristics of hydrogen-enriched methane-air premixed swirling flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 1063.

Kim, K. T., Lee, J. G., Quay, B. D., and Santavicca, D. A. 2010. Reconstruction of heat release response of partially premixed flames. *Combustion Science and Technology*, **183**, 122.

Kim, W., Do, H., and Mungal, M. 2011. The improvement of blowout limit in partially/fully premixed flames with geometrically modified bluffbody bases. *Experiments in Fluids*, **51**, 1315.

Kojima, J., Ikeda, Y., and Nakajima, T. 2000. Spatially resolved measurement of OH\*, CH\*, and C<sub>2</sub>\* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, **28**, 1757.

Kojima, J., Ikeda, Y., and Nakajima, T. 2005. Basic aspects of OH(A), CH(A), and C<sub>2</sub>(d) chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames. *Combustion and Flame*, **140**, 34.

Kostas, J., Soria, J., and Chong, M. S. 2005. A comparison between snapshot POD

analysis of PIV velocity and vorticity data. *Experiments in Fluids*, **38**, 146.

Kostka, S., Lynch, A. C., Huelskamp, B. C., Kiel, B. V., Gord, J. R., and Roy, S. 2012. Characterization of flame-shedding behavior behind a bluff-body using proper orthogonal decomposition. *Combustion and Flame*, **159**, 2872.

Kourentis, L., and Konstantinidis, E. 2012. Uncovering large-scale coherent structures in natural and forced turbulent wakes by combining PIV, POD, and FTLE. *Experiments in Fluids*, **52**, 749.

Law, C. K. 1988. Dynamics of stretched flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, **22**, 1381.

Law, C. K. 2006. *Combustion Physics*. New York, Cambridge University Press.

Law, C. K., and Kwon, O.C. 2004. Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen–air flame propagation. *International Journal of Hydrogen Energy*, **29**, 867.

Lawn, C. J. 2009. Lifted flames on fuel jets in co-flowing air. *Progress in Energy and Combustion Science*, **35**, 1.

Lee, T. W., North, G. L., and Santavicca, D. A. 1993. Surface-properties of turbulent premixed propane air flames at various Lewis numbers. *Combustion and Flame*, **93**, 445.

Legrand, M., Nogueira, J., Lecuona, A., Nauri, S., and Rodriguez, P. A. 2010. Atmospheric low swirl burner flow characterization with stereo PIV. *Experiments in Fluids*, **48**, 901.

Li, K., and Tankin, R. S. 1987. A study of cold and combusting flow around bluff-body combustors. *Combustion Science and Technology*, **52**, 173.

Lieuwen, T., McDonnell, V., Santavicca, D., and Sattelmayer, T. 2008. Burner development and operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors. *Combustion Science and Technology*, **180**, 1169.

Lieuwen, T. C., Yetter, R. A., and Yang, V. 2010. *Synthesis Gas Combustion: Fundamentals and Applications*, CRC Press.

Lin, H. C., Cheng, T. S., Chen, B. C., Ho, C. C., and Chao, Y. C. 2009. A comprehensive study of two interactive parallel premixed methane flames on lean combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, **32**, 995.

Liu, F., Guo, H., and Smallwood, G. J. 2003. The chemical effect of CO<sub>2</sub> replacement of N<sub>2</sub> in air on the burning velocity of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> premixed flames. *Combustion and Flame*, **133**, 495.

Lumley, J. L. 1967. *The Structure of Inhomogeneous Turbulence*. Moscow: Nauka.

Lyons, K. M. 2007. Toward an understanding of the stabilization mechanisms of lifted turbulent jet flames: Experiments. *Progress in Energy and Combustion Science*, **33**, 211.

Mansour, M. S. 2003. Stability characteristics of lifted turbulent partially premixed jet flames. *Combustion and Flame*, **133**, 263.

Masri, A. R., and Bilger, R. W. 1985. Turbulent diffusion flames of hydrocarbon fuels stabilized on a bluff body. *Symposium (International) on Combustion*, **20**, 319.

Meyer, K. E. E., Pedersen, J. M., and Ozcan, O. 2007. A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition. *Journal of Fluid Mechanics*, **583**, 199.

Meyer, T. R., Fiechtner, G. J., Gogineni, S. P., Rolon, J. C., Carter, C. D., and Gord, J. R. 2004. Simultaneous PLIF/PIV investigation of vortex-induced annular extinction in H<sub>2</sub>-air counterflow diffusion flames. *Experiments in Fluids*, **36**, 259.

Mira Martinez, D., Jiang, X., Moulinec, C., and Emerson, D. R. 2013. Numerical investigation of the effects of fuel variability on the dynamics of syngas impinging jet flames. *Fuel*, **103**, 646.

Montgomery, C. J., Kaplan, C. R., and Oran, E. S. 1998. The effect of coflow velocity on a lifted methane-air jet diffusion flame. AIAA-98-0805.

Moreno, D., Krothapalli, A., Alkisar, M. B., and Lourenco, L. M. 2004. Low-dimensional model of a supersonic rectangular jet. *Physical Review E*, **69**, 026304.

Muñiz, L., and Mungal, M. G. 1997. Instantaneous flame-stabilization velocities in lifted-jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, **111**, 16.

Mueller, C. J., and Schefer, R. W. 1998. Coupling of diffusion flame structure to an unsteady vortical flow-field. *Symposium (International) on Combustion*, **27**, 1105.

Mueller, M. A., Yetter, R. A., and Dryer, F. L. 1999. Flow reactor studies and kinetic modeling of the H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> and CO/H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> reactions. *International Journal of Chemical Kinetics*, **31**, 705.

Nair, S., and Lieuwen, T. 2005. Acoustic detection of blowout in premixed flames. *Journal of Propulsion and Power*, **21**, 32.

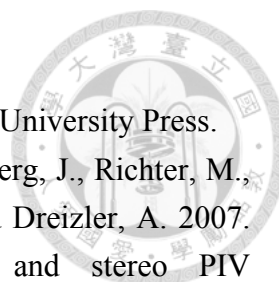
Nair, S., and Lieuwen, T. 2007. Near-blowoff dynamics of a bluff-body stabilized flame. *Journal of Propulsion and Power*, **23**, 421.

Nishimura, T., Kaga, T., Shirotani, K., and Kadowaki, J. 1999. Vortex structures and temperature fluctuations in a bluff-body burner. *Journal of Visualization*, **1**, 271.

Nogenmyr, K. J., Kiefer, J., Li, Z. S., Bai, X. S., and Alden, M. 2010. Numerical computations and optical diagnostics of unsteady partially premixed methane/air flames. *Combustion and Flame*, **157**, 915.

Nottin, C., Knikker, R., Boger, M., and Veynante, D. 2000. Large eddy simulations of an acoustically excited turbulent premixed flame. *Proceedings of the Combustion Institute*, **28**, 67.

Pan, K. L., Li, C. C., Juan, W. C., and Yang, J. T. 2009. Low-frequency oscillation of a non-premixed flame on a bluff-body burner. *Combustion Science and Technology*,



181, 1217.

Peters, N. 2000. *Turbulent Combustion*. New York, Cambridge University Press.

Petersson, P., Olofsson, J., Brackman, C., Seyfried, H., Zetterberg, J., Richter, M., Alden, M., Linne, M. A., Cheng, R. K., Nauert, A., Geyer, D., and Dreizler, A. 2007. Simultaneous PIV/PH-PLIF, Rayleigh thermometry/OH-PLIF and stereo PIV measurements in a low-swirl-flame. *Applied Optics*, **46**, 3928.

Piero, I., Christophe, D., Seyed, H., Robert, S., Laszlo, F., Ephraim, G., Andreas, L., Robert, C., and Marcus, A. 2010. Proper orthogonal decomposition for experimental investigation of swirling flame instabilities. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 584

Pitts, W. M. 1989. Assessment of theories for the behavior and blowout of lifted turbulent jet diffusion flames. *Symposium (International) on Combustion*, **22**, 809.

Phillips, J. N., and Roby, R. J. 1999. Enhanced gas turbine combustor performance using H<sub>2</sub>-enriched natural gas. ASME Paper 99-GT-115.

Plee, S. L., and Mellor, A. M. 1979. Characteristic time correlation for lean blowoff of bluff-body-stabilized flames. *Combustion and Flame*, **35**, 61.

Poinsot, T. V. D. 2012. *Theoretical and Numerical Combustion*, R.T. Edwards.

Poludnenko, A. Y., and Oran, E. S. 2010. The interaction of high-speed turbulence with flames: Global properties and internal flame structure. *Combustion and Flame*, **157**, 995.

Prathap, C., Ray, A., and Ravi, M. R. 2012. Effects of dilution with carbon dioxide on the laminar burning velocity and flame stability of H<sub>2</sub>-CO mixtures at atmospheric condition. *Combustion and Flame*, **159**, 482.

Radhakrishnan, K., and Heywood, J. B. 1981. Premixed turbulent flame blowoff velocity correlation based on coherent structures in turbulent flows. *Combustion and Flame*, **42**, 19.

Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., and Kompenhans, J. 2007. *Particle Image Velocimetry: a Practical Guide*. Berlin, Springer.

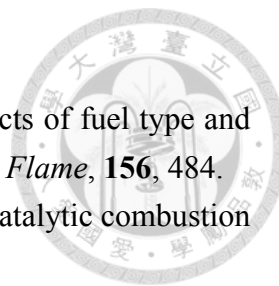
Ragland, K. W., and Bryden, K. M. 2011. *Combustion Engineering*. Boca Raton, CRC Press.

Rankin, D. D. 2008. *Lean Combustion Technology and Control*. London, Academic Press.

Ratna Kishore, V., Ravi, M. R., and Ray, A. 2011. Adiabatic burning velocity and cellular flame characteristics of H<sub>2</sub>-CO-CO<sub>2</sub>-air mixtures. *Combustion and Flame*, **158**, 2149.

Renard, P. H., Thevenin, D., Rolon, J. C., and Candel, S. 2000. Dynamics of flame/vortex interactions. *Progress in Energy and Combustion Science*, **26**, 225.

Rightley, M. L., and Williams, F. A. 1997. Burning velocities of CO flames.



*Combustion and Flame*, **110**, 285.

Sahu, K. B., Kundu, A., Ganguly, R., and Datta, A. 2009. Effects of fuel type and equivalence ratios on the flickering of triple flames. *Combustion and Flame*, **156**, 484.

Sazonov, V. A., Ismagilov, Z. R., and Prokudina, N. A. 1999. Catalytic combustion of lean methane–air mixtures. *Catalysis Today*, **47**, 149.

Schefer, R. W., Wicksall, D. M., and Agrawal, A. K. 2002. Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner. *Proceedings of the Combustion Institute*, **29**, 843.

Schmidt, J., Kostka, S., Lynch, A., and Ganguly, B. 2011. Simultaneous particle image velocimetry and chemiluminescence visualization of millisecond-pulsed current–voltage-induced perturbations of a premixed propane/air flame. *Experiments in Fluids*, **51**, 657.

Seffrin, F., Fuest, F., Geyer, D., and Dreizler, A. 2010. Flow field studies of a new series of turbulent premixed stratified flames. *Combustion and Flame*, **157**, 384.

Shanbhogue, S. J., Husain, S., and Lieuwen, T. 2009. Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics. *Progress in Energy and Combustion Science*, **35**, 98.

Shih, H. Y., and Hsu, J. R. 2011. A computational study of combustion and extinction of opposed-jet syngas diffusion flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 15868.

Shopoff, S. W., Wang, P., and Pitz, R. W. 2011. Experimental study of cellular instability and extinction of non-premixed opposed-flow tubular flames. *Combustion and Flame*, **158**, 2165.

Shoshin Y., Bastiaans, R. J. M., and de Goey, L. P. H. 2013. Anomalous blow-off behavior of laminar inverted flames of ultra-lean hydrogen–methane–air mixtures. *Combustion and Flame*, **160**, 565.

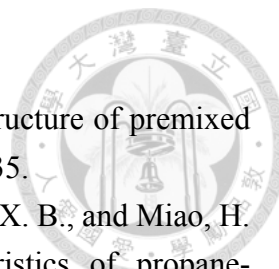
Sirovich, L. 1987. Turbulence and the dynamics of coherent structures .1. Coherent structures. *Quarterly of Applied Mathematics*, **45**, 561.

Steinberg, A., Driscoll, J. F., and Ceccio, S. 2008. Measurements of turbulent premixed flame dynamics using cinema stereoscopic PIV. *Experiments in Fluids*, **44**, 985.

Stwalley, R. M., and Lefebvre, A. H. 1988. Flame stabilization using large flameholders of irregular shape. *Journal of Propulsion and Power*, **4**, 4.

Sun, C. J., Sung, C. J., He, L., and Law, C. K. 1999. Dynamics of weakly stretched flames: quantitative description and extraction of global flame parameters. *Combustion and Flame*, **118**, 108.

Sundaram, S. S., Babu, V., Obulesu, C., and Sivakumar, R. 2012. Three-dimensional numerical simulations of turbulent, bluff-body stabilized, lean, premixed combustion.



*Combustion Science and Technology*, **184**, 351.

Sweeney, M. S., Hochgreb, S., and Barlow, R. S. 2011. The structure of premixed and stratified low turbulence flames. *Combustion and Flame*, **158**, 935.

Tang, C. L., Huang, Z. H., Jin, C., He, J. J., Wang, J. H., Wang, X. B., and Miao, H. Y. 2008. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, 4906.

Tang, C. L., Huang, Z., Wang, J. H., and Zheng, J. 2009. Effects of hydrogen addition on cellular instabilities of the spherically expanding propane flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 2483.

Troe, J. Modeling the temperature and pressure dependence of the reaction HO+CO to HOCO to H+CO<sub>2</sub>. 1998. *Symposium (International) on Combustion*, **27**, 167.

Turns, R. S. 2000. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications (2nd Ed.)*, McGraw Hill.

Weinberg, F. J. 1986. *Advanced Combustion Methods*, Academic Press.

Williams, T. C., Shaddix, C. R., and Schefer, R. W. 2007. Effect of syngas composition and CO<sub>2</sub>-diluted oxygen on performance of a premixed swirl-stabilized combustor. *Combustion Science and Technology*, **180**, 64.

Wilson, D. A., and Lyons, K. M. 2008. Effects of dilution and co-flow on the stability of lifted non-premixed biogas-like flames. *Fuel*, **87**, 405.

Worth, N. A., and Dawson, J. R. 2012. Cinematographic OH-PLIF measurements of two interacting turbulent premixed flames with and without acoustic forcing. *Combustion and Flame*, **159**, 1109.

Wright, F. H. 1959. Bluff-body flame stabilization: Blockage effects. *Combustion and Flame*, **3**, 319.

Wu, C. Y., Chao, Y. C., Cheng, T. S., Chen, C. P., and Ho, C. T. 2009. Effects of CO addition on the characteristics of laminar premixed CH<sub>4</sub>/air opposed-jet flames. *Combustion and Flame*, **156**, 362.

Xiouris, C. Z., and Koutmos, P. 2012. Fluid dynamics modeling of a stratified disk burner in swirl co-flow. *Applied Thermal Engineering*, **35**, 60.

Yamaguchi, S., Ohiwa, N., and Hasegawa, T. 1985. Structure and blow-off mechanism of rod-stabilized premixed flame. *Combustion and Flame*, **62**, 31.

Yamamoto, K., Kato, S., Isobe, Y., Hayashi, N., and Yamashita, H. 2011. Lifted flame structure of coannular jet flames in a triple port burner. *Proceedings of the Combustion Institute*, **33**, 1195.

Yang, J. T., Chang, C. C., and Pan, K. L. 2002. Flow structures and mixing mechanisms behind a disc stabilizer with a central fuel jet. *Combustion Science and Technology*, **174**, 93.

Yetter, R. A., and Dryer, F. L. 1992. Inhibition of moist carbon monoxide oxidation by trace amounts of hydrocarbons. *Symposium (International) on Combustion*, **24**, 757.

Yokomori, T., and Mizomoto, M. 2002. Interaction of adjacent flame surfaces on the formation of wrinkling laminar premixed flame. *Proceedings of the Combustion Institute*, **29**, 1511.

Yokomori, T., and Mizomoto, M. 2003. Flame temperatures along a laminar premixed flame with a non-uniform stretch rate. *Combustion and Flame*, **135**, 489.

Yu, G., Law, C. K., and Wu, C. K. 1986. Laminar flame speeds of hydrocarbon + air mixtures with hydrogen addition. *Combustion and Flame*, **63**, 339.

Zhen, H. S., Cheung, C. S., Leung, C. W., and Choy, Y. S. 2012. Effects of hydrogen concentration on the emission and heat transfer of a premixed LPG-hydrogen flame. *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**, 6097.

Zhen, H. S., Leung, C. W., and Cheung, C. S. 2014. A comparison of the heat transfer behaviors of biogas-H<sub>2</sub> diffusion and premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 1137.

Zhen, H. S., Leung, C. W., Cheung, C. S., and Huang, Z. H. 2014. Characterization of biogas-hydrogen premixed flames using Bunsen burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 13292.

大塚哲二，1995，濃淡燃燒裝置，日本國特許廳公開特許公報，特開平 7-253204。

黃木丈俊，藤生昭，1995，燃燒裝置，日本國特許廳公開特許公報，特開平7-151319。

楊鏡堂，高智勇，1999，對流衝擊型燃燒器，中華民國新型專利第 149086 號 (專利權期間:1999/7/21~2010/6/28,發證日期:88/12/06; 國科會專題研究計畫編號: NSC-87-2212-E-007-034)。

孫泊寧，1997，高負荷燃燒器之設計實作與火焰結構分析，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文。

蔣淑卿，2002，複合進氣道燃燒器之火焰結構研究中，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文。

藍斌豪，2004，多向斜衝燃燒器之衝擊效應數值分析，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文。

羅允成，2007，多環燃燒器中火焰交互作用及最佳性能設計，國立清華大學動

力機械工程學系碩士論文。

李志杰, 2009, 運用高速粒子影像測速技術探討火焰與流場動態交互作用, 國立清華大學動力機械工程學系博士論文。

阮文祺, 2009, 三環燃燒器搭配非單一當量比之貧油燃燒研究, 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文。

林泓瑋, 2010, 環形貧油火焰特性與注入空氣共伴流之影響, 國立台灣大學機械工程學系碩士論文。

陳靖瑋, 2011, 三環丙烷火焰暫態反應強度與流場之交互作用研究, 國立台灣大學機械工程學系碩士論文。





## 作者簡歷

### ☆ 個人資料 Personal Information

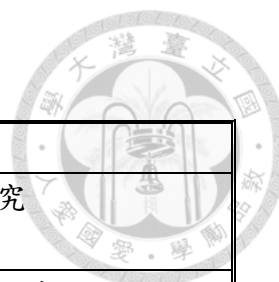
中文姓名	陳靖瑋	性別	男	
英文姓名	Chen, Jing-Wei	生日	76/03/17	
戶籍地址	高雄市左營區新庄仔路 435 號			
e-mail	chn398@gmail.com			
行動電話	0972502413			

### ☆ 求學背景 Education

教育	學校名稱	科別	修業期間
博士	國立台灣大學	機械工程研究所	2011.9~2014.12
碩士	國立台灣大學	機械工程研究所	2009.9~2011.6
學士	國立清華大學	動力機械工程學系	2005.9~2009.6

### ☆ 經歷 Experience

國立台灣大學機械系(所)楊鏡堂教授實驗室：研究助理 (2009.7~2014.12)
國科會研究計劃：生質合成氣體燃料於高效能貧油燃燒系統穩焰效益研究 (2012.1~2012.12)
台大機械系：熱傳學課程助教 (2012.9~2013.1)
中科院能源科專委託專題計畫：化學產氫系統設計 (2010.1~2010.12)
國科會研究計劃：三環燃燒器搭配非單一當量比之貧油燃燒研究 (2010.1~2010.12)
中科院能源科專委託專題計畫：產氫觸媒反應流床設計 (2009.7~2009.12)
國科會研究計劃：多環燃燒器中多重火焰交互作用於節能減碳之研究 (2009.7~2009.12)



☆ 專長及研究領域 Specialty

項目	內容
博士論文題目	層狀化燃燒流場之時空動態特性及穩焰機制研究 指導教授：楊鏡堂博士
碩士論文題目	三環丙烷火焰暫態反應強度與流場之交互作用研究 指導教授：楊鏡堂博士
修習課程	現代熱流量測技術、量測技術應用、流體力學、熱力學、熱傳學、燃燒學、數值流體力學、生物晶片實驗室、能源與環境工程、冷凍機械工程、心臟醫學工程
研究專長	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 燃燒實驗平台架設</li> <li>2. 雷射系統及光學鏡組架設</li> <li>3. 粒子影像分析擷取系統</li> <li>4. 光學方法擷取之螢光反應強度及分析</li> <li>5. MATLAB 語言電腦運算程式撰寫</li> <li>6. 壓電風扇於電子構裝冷卻之熱流分析</li> <li>7. 散熱效能最佳化設計</li> <li>8. 燃料電池產氫系統設計及效能分析</li> <li>9. Ansys - Fluent 熱流模擬</li> <li>10. Reaction Design - Chemkin 化學反應模擬</li> <li>11. 液態燃料燃燒分析</li> <li>12. 機械結構設計以及 2D 與 3D 工程繪圖</li> <li>13. 微生物反應器之設計與應用</li> <li>14. 生物力學與工程</li> </ol>
熟悉工程軟體	AutoCAD、Autodesk Inventor、Solid Work、MATLAB、TECPLOT

☆ 榮譽 Honor

項目	優良事蹟
語文能力	多益(TOEIC, listening and reading) : 915 分 (滿分 990) (2014)
課業表現	台灣大學機械所博士班推薦甄試第一名 (2011)
	台灣大學機械所碩士班熱學組推薦甄試第六名 (2009)
比賽	中華民國力學學會第 36 屆全國力學會議學生論文競賽第三名

	(2012)
	中國機械工程學會 100 年度碩士論文獎佳作
	(2011)
	中華民國燃燒學會第 21 屆學術研討會學生論文競賽第一名
	(2011)
	中華民國燃燒學會第 21 屆學術研討會圖片競賽第一名
	(2011)
	台灣大學光電所第二屆雷射暨微結構攝影競賽特優獎
	(2010)

☆ 著作 Publication

期刊論文	<b>J. W. Chen</b> , H. W. Lin, C. C. Li, and J. T. Yang,* 2014, "Effect of air co-flow on lean premixed flames in a stratified burner with bluff-body," <i>Combustion Science and Technology</i> (accepted).
	<b>J.W. Chen</b> , C. P. Chiu, S. H. Mo, and J. T. Yang,* 2014, "Combustion characteristics of a premixed propane flame with added H <sub>2</sub> and CO on a V-shaped impinging burner," <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> (in press).
	H. Y. Li, S. M. Chao, <b>J. W. Chen</b> , and J. T. Yang,* 2013, "Thermal performance of plate-fin heat sinks with piezoelectric cooling fan," <i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i> , Vol. 57, pp. 722-732.
	C. C. Li, <b>J. W. Chen</b> , and J. T. Yang,* 2012, "Stabilization of double flames interacting with recirculation in an intersecting flow using high-speed PIV," <i>Combustion Science and Technology</i> , Vol. 184, pp. 2117-2135.
	S. L. Ma, <b>J. W. Chen</b> , and J. T. Yang,* 2014, "Mechanism of heat transfer for plate-fin heat sinks with dual piezoelectric fans," <i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i> (under review).
	<b>J. W. Chen</b> , C. C. Li, and J. T. Yang,* 2013, "Enhanced stabilization of multiple premixed flames with a compressive vortex pair on a stratified burner," <i>Combustion Science and Technology</i> (in revision).
	<b>J. W. Chen</b> , and J. T. Yang,* 2014, "Temporal-spatial dynamics of flame/flow interaction for lean and rich flames on a stratified

	burner,” in preparation.
研討會論文 (國外)	<b>J.W. Chen</b> , and J. T. Yang, 2013, “Simultaneous PIV and chemiluminescence visualization on premixed and nonpremixed flames,” 9 <sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, Gyeongju, Korea.
	S. H. Mo, <b>J.W. Chen</b> , and J. T. Yang, 2013, “The effect of CO addition on combustion mechanisms of impinging propane flame,” 9 <sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, Gyeongju, Korea.
研討會論文 (國內)	馬聖倫, <b>陳靖瑋</b> , 楊鏡堂, 2014, “雙壓電風扇對板翅式散熱鰭片之熱傳機制探討,” 中華民國力學學會第 38 屆學術研討會, 台灣, 基隆.
	<b>陳靖瑋</b> , 林泓瑋, 楊鏡堂, 2012, “貧油預混火焰之注入空氣共伴流穩焰效益研究,” 中華民國力學學會第 36 屆學術研討會, 台灣, 桃園.
	陳傳昇, 莫尚軒, <b>陳靖瑋</b> , 楊鏡堂, 2012, “特徵流場結構與擴散火焰交互作用研究,” 中國機械工程學會第 29 屆學術研討會, 台灣, 高雄.
	<b>陳靖瑋</b> , 李志杰, 楊鏡堂, 2011, “三環丙烷火焰暫態反應強度與流場之交互作用研究,” 中華民國燃燒學會第 21 屆學術研討會, 台灣, 雲林.
	陳傳昇, <b>陳靖瑋</b> , 李志杰, 楊鏡堂, 2011, “應用同步高速粒子影像測速儀及化學螢光法量測於鈍體非預混火焰,” 中華民國燃燒學會第 21 屆學術研討會, 台灣, 雲林.
	<b>陳靖瑋</b> , 李志杰, 楊鏡堂, 2010, “三環預混火焰與尾流渦旋交互作用之燃燒特性研究,” 中華民國燃燒學會第 20 屆學術研討會, 台灣, 台南.