

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(二)科

第三名

052401

用燃燒救地球-微波誘發電漿與穩駐貧油火焰

學校名稱：國立臺南女子高級中學

作者： 高二 李思妤 高二 李元真	指導老師： 郭怡君
---------------------------------	------------------

關鍵詞：能源、燃燒、電漿

摘要

燃燒過程中定義燃料與空氣混和比例為「當量比 ϕ 」。 $\phi < 1$ 為貧油燃燒，否則為富油燃燒。貧油雖節省能量，但常因為燃料過少而無法穩定反應。因此，本研究主要探討如何在貧油時穩駐燃燒。實驗第一階段先觀察火焰，得知高度與速度呈負相關，在 $\phi = 1$ 時達到速度最高點；第二階段則為實驗重點，加入額外能量在貧油時穩駐火焰，利用微波產生裝置在火焰中心生成能延伸「可燃極限」的高密度電漿，使火焰在貧油時穩定燃燒。由光譜圖分析電漿中心的各波段粒子強度，觀察由電漿產出對燃燒有幫助的粒子 O^* 、 OH^* 。發現當微波能量最低為 50 瓦時，能將貧油燃燒的臨界點 $\phi = 0.9$ 消除，使燃燒效率達到 100%。而在 $\phi > 0.29$ 時得到的淨能量為正值，因此加入微波後 $\phi = 0.29 \sim 1.0$ 皆能有效節省能源。

壹、前言

用火的歷史與人類的文明史擁有密不可分的關係。二十一世紀的今天，各項燃燒加熱設備，像是民生用瓦斯爐具、熱水器及各種工業鍋爐，和產生動力設備，如車輛、發動機等，無不使用燃燒。

「燃燒」的構成要素有三：氧化劑、燃料、燃點，依據燃料和氧化劑的事先混和與否可將燃燒分為預混火焰和擴散火焰兩大類。顧名思義，預混火焰代表著燃料分子和氧化物分子必須在燃燒反應之前預先混合，因此兩者同時存在並均勻混合於預混火焰上游。反之，擴散火焰藉著火焰面本身將燃料和氧化物隔開，兩類分子只有在火焰面彼此相遇、碰撞而進行燃燒反應。一般燃燒大都使用預混火焰，外界空氣被吸入並且和燃料均勻混合。

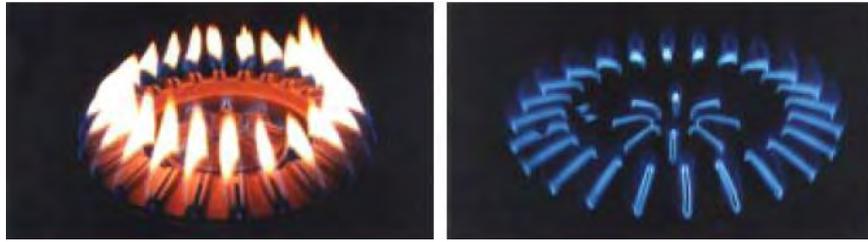


圖 1 使用液化石油氣為燃料，在缺氧、燃料過多時會產生黃色火焰，在氧氣充足、燃料適中時則形成藍色火焰

以實驗室常用的本生燈(Bunsen burner)來加以闡述如圖 2 預混火焰的燃燒特性。本生燈的基本構造係由簡易的圓管燃燒器和圓管底部的可調節式空氣吸入口所組成。氣態燃料由圓管底部流入燃燒器，經過空氣吸入口時，吸入外界空氣並彼此混合。燃料和空氣的預混流隨之噴出燃燒器，經點火而在管口產生錐面狀的預混火焰。

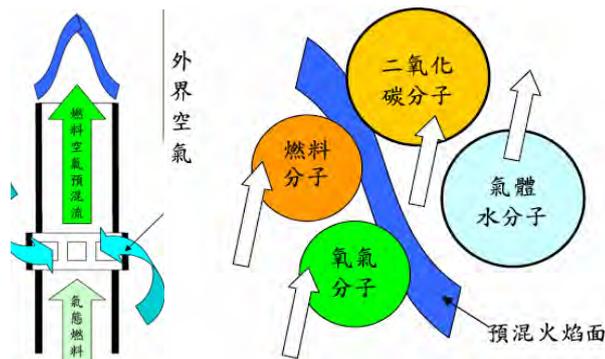


圖 2 本生燈燃燒器構造與火焰示意

在燃燒過程中燃料與空氣混和比例的參數為「當量比 ϕ 」。最佳的燃燒化學反應是把燃料和氧化物通通燒光，轉變成二氧化碳和水，此時的燃料和氧化物混合比定義當量比為 1，當量比 >1 為富油；相對地，當量比 <1 則為貧油。

一般而言，預混火焰的燃燒反應被限制在可燃極限範圍內，燃料超過富油燃料上限，過多的燃料在燃燒反應中會同時吸熱斷開化學鍵，但卻無法找到氧化物以形成穩定的生成物且放出燃燒熱，因此造成內部能量損失。同理，低於貧燃料下限，燃料太少且氧化物過多，也不可能形成預混火焰。

近年來對於貧油預混火焰的穩駐火焰機制與延展貧油燃燒之可燃極限的研究可謂接踵而生，我們歸納出目前成功增加貧油燃燒之可燃極限方法有下列幾種方式：

一、 改變流體型態 二、 增加流場之溫度與壓力 三、 改變化學特性。

其中，提供強氧化力的活性基(radical)於反應流場中可有效改變化學特性促進氧化反應，OH 基(OH radical)擁有僅次於氟的強氧化力，但 OH*的高活性使之無法在常溫下存在。因此一般為了產生足夠的高活性自由基，常使用微波加熱方式來增加火焰中的活性基。其原理是以微波加熱火焰之電子層，使受激電子將所增加的能量傳遞至火焰中反應物粒子，激發了反應物粒子的電子，使其躍遷至高振動能階，這些受激後具強氧化力的反應物粒子增加火焰的反應率。藉由微波輻射所增加的反應速率遠大於一般傳統加熱所增加的反應速率。

貳、 動機

近幾年在環保意識抬頭與能源危機的雙重衝擊下，新能源的研發與應用是有其迫切的需求，肇因於全球的能源供應仍有百分之七十以上仰賴燃燒方式進行，因此研發高效率燃燒器兼具降低燃燒造成的污染為現階段最迫切且可行的策略之一。為了安全起見，現今在日常中及工業上使用的都是能穩定反應的富油燃燒，但是卻會使燃料的用量較多，無謂的浪費能量，因此能高效率燃燒且降低污染的貧油燃燒(lean combustion)。但是貧油燃燒容易遭遇到火焰不穩定的問題，因此如何控制火焰型態與其燃燒穩駐機制的議題勢必成為這世紀的研發重點。

參、 研究目的

本研究主要的目的有以下三點：

- 一、量測火焰的基本特性，驗證本燃燒器符合不同 ϕ 值火焰高度和速度呈負相關的理論。
- 二、根據微波與電漿對貧油預混火焰的駐焰效果為出發點，設計一可降低燃氣條件至次極限貧油條件之燃燒器，以達到節約燃油使用量。
- 三、針對微波電漿穩駐貧油燃燒火焰之增強機制加以分析，利用數值分析與光學實驗方法加以驗證，並對其總體效率進行估算，對此種應用方式之可行性進行探討與研究，以未來節能動力來源的運用為本研究終極目標。

肆、 研究設備及器材

一、研究設備

- (一) 創新微波誘發電漿燃燒器
- (二) 氣體供給系統
- (三) 微波放電與微波設備
- (四) 自然螢光量測（濾鏡）
- (五) 光譜量測系統

二、 圖片及數據處理軟體

- (一) Image J
- (二) Microsoft Office Excel
- (三) Grapher
- (四) CHEMKIN collection

本研究包含微波誘發電漿穩駐燃燒器，其設計依據相關微波導波共振腔設計、電磁波理論與火焰燃燒流場以及電漿化學反應等，因此本節將分別討論其使用之理論、實驗設備、量測儀器與數值分析方法。

(一) 創新微波誘發電漿燃燒器

電磁能或非穩定性電漿(plasma)的高效率熱能轉換特性，可應用於加強點燃、火焰穩定和延伸可燃極限等領域，許多研究顯示電磁波影響火焰化學反應可分為幾項：

1. 預先解離燃料並由電子碰撞產生大量活性基

2. 輻射能導致電子躍遷
3. 電阻歐姆加熱效應增加火焰溫度
4. 增加高能粒子、離子和電子。

微波本身的電場只會對火焰面當中的帶電粒子如 CH_3O^+ 或 H_3O^+ 等離子和電子等有影響，其餘能量則大部分轉變成熟損失掉，因此為了提高微波加強火焰穩駐的效率，本實驗室採用微波集中燃燒器，如圖 3 所示。此燃燒器可將微波能量集中於火焰面周圍以大幅提高火焰吸收微波的效率，進而幫助火焰穩駐及擴展可燃極限。依據微波導入共振腔的模擬電場分佈強度結果得知金屬電極會產生如同天線的效果將微波能量集中於尖端附近。

圖 4a、4b 為本實驗使用之創新微波誘發電漿燃燒器，正中心安置一尖端頂端為圓錐形狀之圓柱，材質為鈦鎢合金，圓管材質為石英玻璃，以避免金屬材質在微波中產生電極或不當放電，其內徑尺寸為 10mm。



圖 3 燃燒器設計之天線

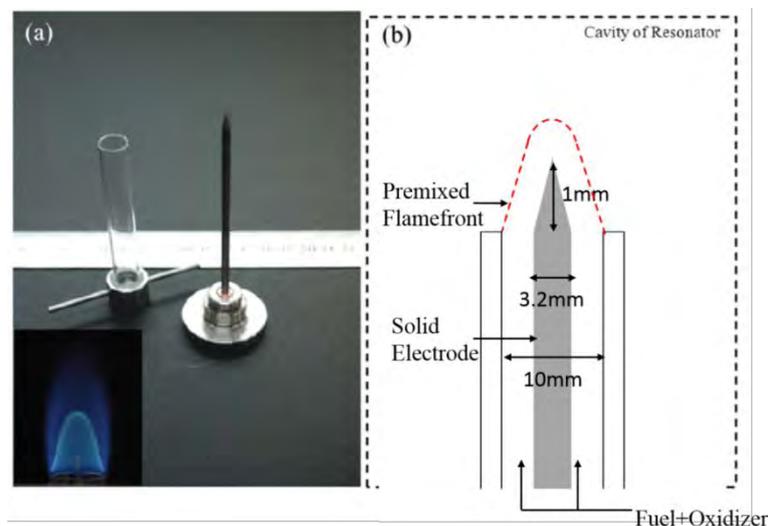


圖 4 (a)實際燃燒器與實際層流預混火焰。(b)燃燒器示意圖

(二) 氣體供給系統

實驗所需之氣體由高壓鋼瓶提供，藉由流量控制器調整流量後送至燃燒器。高壓鋼瓶提供之氣體分別為燃料與空氣，實驗所使用之氣體流量控制器電子式流量計，並以皂泡流量校正器進行校正，確保流量誤差均在 2% 以下。

(三) 微波放電與微波設備

微波放電生成電漿的原理係利用微波產生裝置(microwave generator)，將輸入電力轉換為微波能量，並經由導波管(waveguide)，將能量傳導入腔體(chamber)內並加速氣體中的粒子進行電離反應(ionization reaction)，並藉由微波天線(antenna)與導波管來傳遞能量。

此外，微波為一電磁波，可以低耗損型式穿透適當材質，例如石英玻璃，因此可將產生高溫電漿的區域以適當材料作隔離，可避免腔體內各元件與高溫電漿直接接觸，大幅延長元件壽命。

本實驗為了集中微波以增進對火焰燃燒的效果，將一尖端金屬電極置入共振腔中以扮演天線的角色，電極頂端會產生高強度的微波電場，而產生極高溫度的電漿，因此電極需選擇高熔點材料，例如鈦鎢合金。我們先由模擬軟體了解共振腔內微波電場分佈，如圖 5 所示，由模擬結果看出在天線頂端產生一高強度微波電場，得以驗證該設計確實可行並有效。

圖 6 為本實驗所使用之微波產生設備，實驗微波系統除微波產生器之外，其波導與共振設計由三個部件組合而成：

1. 隔離器(isolator)
2. 調諧管(tuner)
3. 共振腔本體(waveguide cavity of resonator)

量測設備主要以非侵入式光學量測為主，採用輻射光譜分析電漿內的活性基種類。

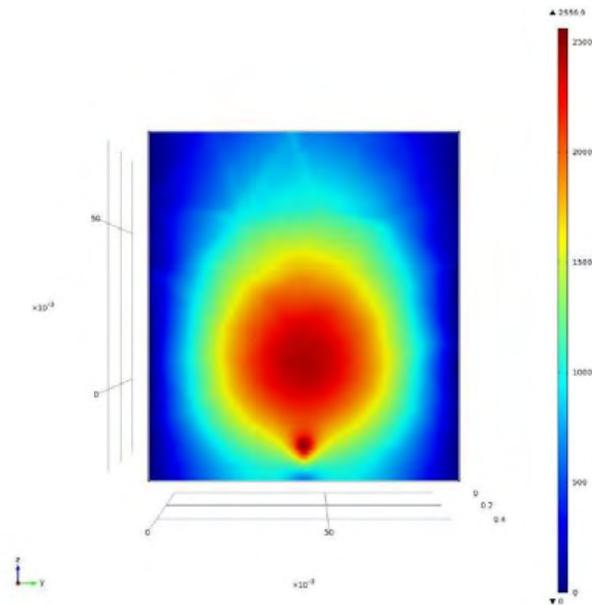


圖 5 模擬微波共振腔體微波電場分布

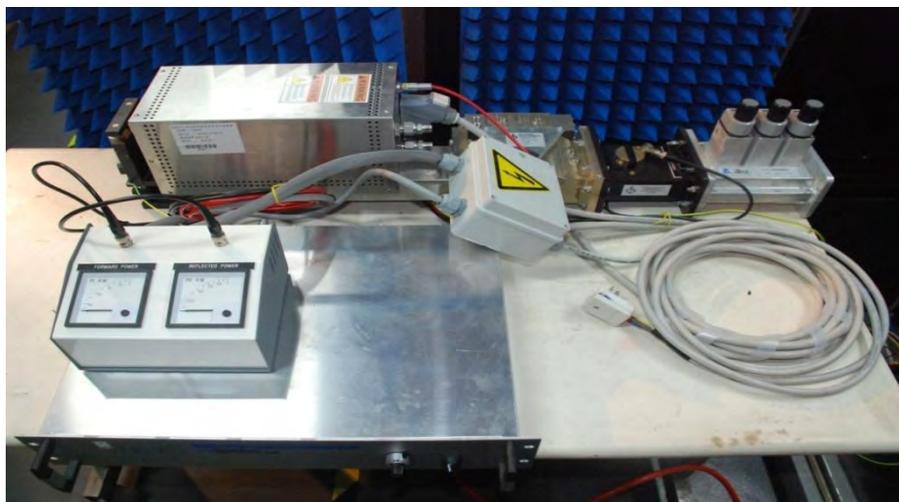


圖 6 微波設備。

(四) 自然螢光量測

在火焰燃燒過程中，火焰面產生一系列的化學反應，當物質粒子因吸收能量而躍遷至較高能階，再返回基態或較低能階的過程稱為鬆弛(relaxation)，而在返回基態時並同時釋放出能量且發出相應的光譜，稱之為自然螢光(Chemiluminescence)。

圖 7 為火焰自然螢光量測設備圖，自然螢光攝影系統由窄波通濾鏡、影像增強器與 CCD 所組成，其中窄波通濾鏡可記錄的頻譜範圍為 290nm~1100nm，影像增強器之前加裝一焦距為 75mm 之鏡頭，拍攝時將焦距固定於火焰中心，同一系列火焰影像皆在相同曝光時間下進行攝影。在高速攝影機前擺設一 CH* 濾光片，用處使高速攝影機收集光源為 CH* 之輻射，拍攝待

測物才不會被其他光源影響結果，進而得知火焰面位置，再進行後續處理，將影像中不同強度利用圖表呈現。

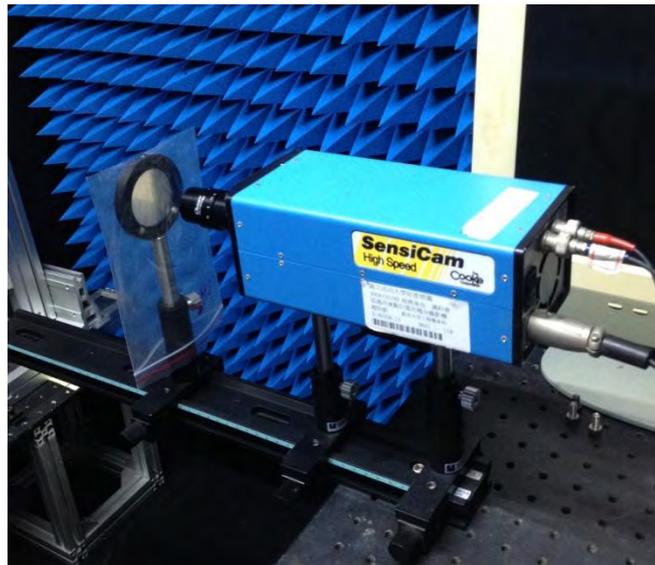


圖 7 火焰自然螢光量測設備

(五) 光譜量測系統

本研究為了找出化學反應路徑與機制，使用了輻射光譜技術(Optical emission spectroscopy, OES)，可用來量測電漿裡受激態的粒子種類。由光纖(Optic fiber)連接至光譜儀 (Ocean Optics USB400) 後，再利用電腦接收光譜訊號用於分析。

實驗利用光纖當作電漿輻射光譜與光譜儀之間傳遞光線的橋梁，圖 8 為光纖實際照片，所使用的光纖在波長範圍 200nm 到 900nm，而本研究量測到之波長在 200nm 到 800nm 之間。



圖 8 光纖實際照片



圖 9 光譜儀(USB400)內部示意圖

伍、 研究方法

我們採用火焰自然螢光(使用濾鏡)過濾掉雜訊，得 CH^* 分布位置，也就是火焰面前端的真實位置。

當出口流量與火焰速度乘以火焰表面積互相平衡時，火焰速度可以由圓錐角度以及噴流速度求得

$$S_u = U_u \sin \alpha$$

其中 S_u 為火焰燃燒速度， U_u 為噴流出口速度。

一、 實驗設置

流量、 ϕ 值

- (一) 我們所使用的燃燒器，其空氣的流量上限為 3000c.c.，燃料(甲烷)為 500c.c.。
- (二) 燃燒的穩定度與氣體總流量成正比。
- (三) 在常溫常壓下， ϕ 值低於 0.9 的貧油火焰無法穩定燃燒。
- (四) 火焰的高度趨勢以 $\phi = 1.0$ 為最低點， $\phi > 1$ 時高度隨當量比的增加而提升； $\phi < 1$ 高度則隨當量比的減少而上升。

因此，我們從總流量 3000c.c. 往下以 100c.c. 為單位， $\phi = 1.2 \sim 0.9$ 以 0.1 為單位做測試。

最後，我們選取總流量 2980c.c. 作為實驗的控制變因。

二、火焰自然螢光理論(濾鏡)

本研究首先將對火焰進行相關的基本實驗光學量測，再搭配數值模擬的協助探討不同當量比下的火焰化學反應機制。

常見層流預混火焰為一藍亮面，係由於化學反應產生大量活性分子，如 CO^* 、 OH^* 、 CH^* 等，因而表現出亮藍偏紫的顏色，可表示火焰出現在最高溫前緣。最高溫的形成是因為多步驟化學反應完成後，釋放出燃燒熱所致，因此，肉眼所見之可視區並非火焰最高溫的正確位置。在火焰燃燒過程，火焰面產生了一系列的化學反應，當物質粒子因吸收能量而躍遷至較高能階，在返回基態或較低能階的過程，會同時釋放出能量且發出相對應的光譜，稱為火焰自然螢光。在碳氫火焰中，三個較為明顯的受激態分子所釋放出的對應光譜圖，分別為 OH^* 、 CH^* 以及 C_2^* 。其對應波長如表 1 所示。

Excited radicals observed in typical industrial flames [183]

Radical	Transition	λ (nm)
OH^*	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(\Delta\nu = 1)$	282.9 (Q2)
OH^*	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(\Delta\nu = 0)$	308.9 (Q2)
CH^*	$B^2\Sigma^- \rightarrow X^2\Pi$	387.1
CH^*	$A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$	431.4
C_2^*	$A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_u(\text{Swan})$	516.5
CO_2^*	Continuum	350 \rightarrow 500

Radical	λ (nm)
N_2	298
N_2	317
N_2	337
N_2	353
N_2	357
N_2	375
N_2	379
N_2	394
N_2	399
N_2	406
N_2	434

表 1 碳氫燃料受激態分子之自然螢光光譜分布

其中 OH^* 代表火焰區域的指標， OH^* 濃度可以用來規範火焰區域的所在位置，並且能計算火焰的燃燒熱釋放率。 CH^* 為火焰前緣的重要中間產物，可以用來標示火焰前緣的位置，淡火焰中 CH^* 出現的量甚少，而在當量火焰或者富油火焰的火焰前緣中比較多。

本研究將以 CH^* 火焰自然螢光輔助判讀火焰面位置，並用其資料進行後續相關火焰速度和火焰強度分析。層流火焰速度是表現個別火焰特徵的一個重要參數，層流火焰速度代表火

焰系統強度、傳播的快慢能力，它只與熱傳(質傳擴散)係數以及反應速率有關，任何影響反應速率與熱傳系數的參數都會影響火焰速度，包括燃料組成、混合濃度、溫度、壓力等。一般烷類火焰速度大都在40cm/sec。

一般而言，局部火焰面的燃燒速度可由該局部火焰面預熱區前緣之流體速度，取其火焰面正向分量來決定，如圖10所示。在二維平火焰穩駐機制最單純是局部火焰速度與預混燃料空氣流速的匹配，但是考慮噴流圓錐火焰如圖10，可以發現當出口流量與火焰速度乘以火焰表面積互相平衡時，火焰速度可以由圓錐角度以及噴流速度求得。

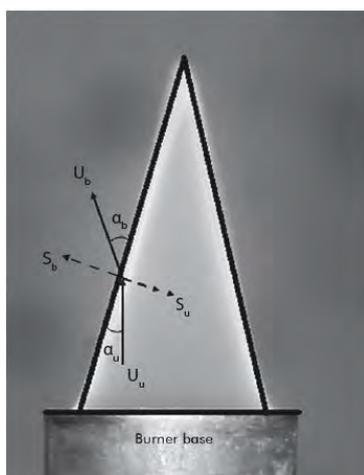


圖 10 火焰速度與噴流速度之匹配

三、 數值分析方法

本研究為瞭解不同當量比在甲烷火焰中的影響，藉由數值分析的方法進行計算，分析甲烷火焰的基本特性，如絕熱火焰溫度、層流火焰速度、物種靈敏度分析。本研究利用 CHEMKIN collection 進行數值計算，以下為本研究所使用的計算程式與化學反應機構：

Equil-code

此程式可計算絕熱火焰溫度，利用等壓與等焓的原理進行計算。

Premix-code

此程式以穩態的條件下模擬一維層流預混火焰，以能量守恆的觀點對溫度進行預測。

化學反應機構

本研究中使用數值模擬來討論燃料混合的火焰狀態，在數值方法中所使用的化學反應機構(mechanism)為 GRI-mech 3.0(Bowman 1995)，適用於以甲烷為主的燃燒反應，總共有 53 反應物，325 反應步驟，並搭配亞瑞尼士關係式(Arrhenius Law)進行計算。

$$k = AT^b \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right)$$

k 為反應速率常數，Ea 為反應所需之活化能，A 和 b 為相關反應常數。

陸、 研究過程

一、純火焰量測

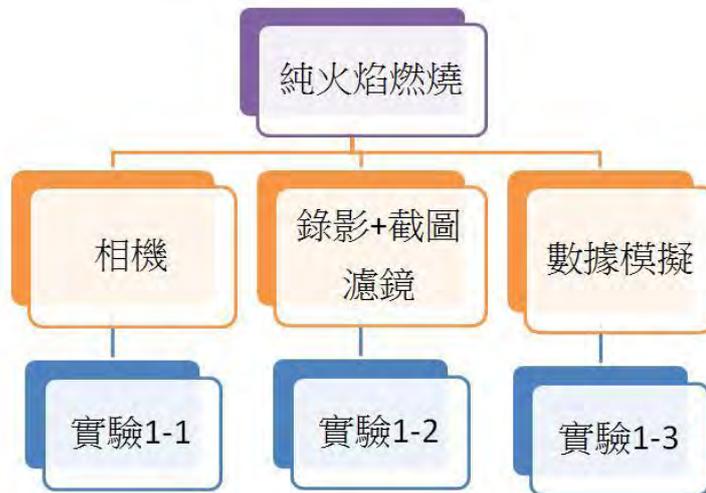


表 2 實驗一

實驗 1-1

(一) 使用相機手動調整焦距及光圈，使其聚焦在火焰尖端。在總流量 2980sccm 下，拍攝 $\phi = 0.9 \sim 1.2$ 的火焰照片。(圖 11)

(二) 使用繪圖軟體 Image J 量測火焰尖端角度及高度(圖 12、13)，並將數據紀錄至 Microsoft Office Excel(表 4)。

(三) 利用 $S_u = U_u \sin \alpha$ 及 $U_u = AU_0$ ，算出火焰燃燒速度 S_u 。

其中 U_u 為噴流出口速度， U_0 為出口總流量(2980sccm)，A 為燃燒器之出口面積($0.25 \pi \text{ cm}^2$)

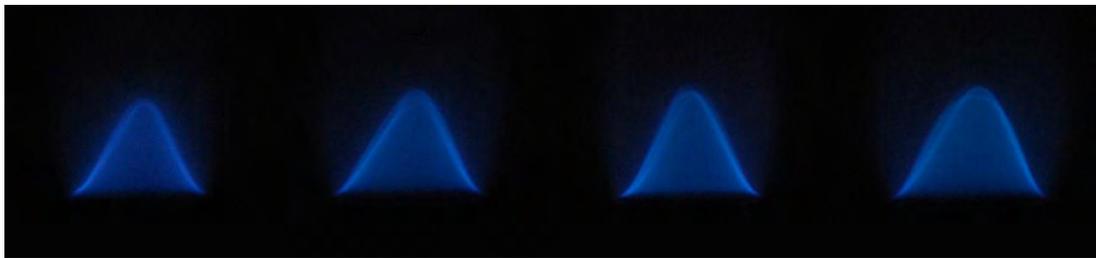
(四) 使用製圖軟體 Grapher 將各 ϕ 值之燃燒速度與高度做成趨勢圖對比。(圖 14)



$\phi = 0.9$

$\phi = 0.95$

$\phi = 1.0$



$\phi = 1.05$

$\phi = 1.1$

$\phi = 1.15$

$\phi = 1.2$

圖 11 未加濾鏡之火焰照片

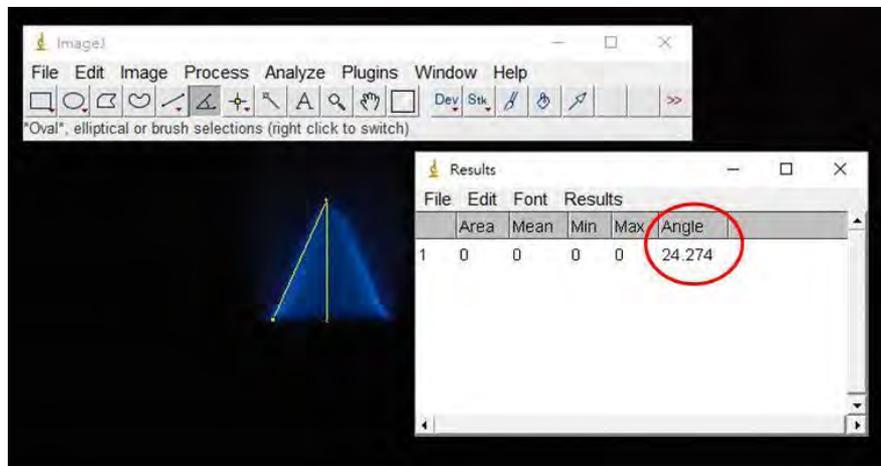


圖 12 使用 Image J 量測火焰角度

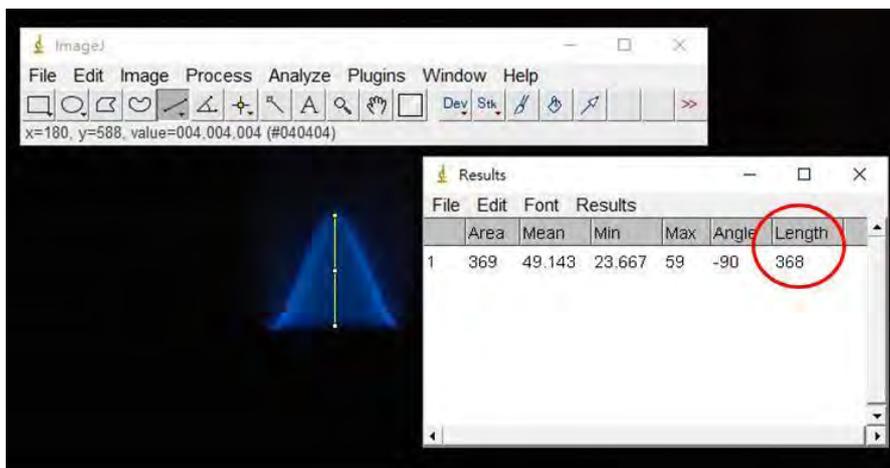


圖 13 使用 Image J 量測火焰高度

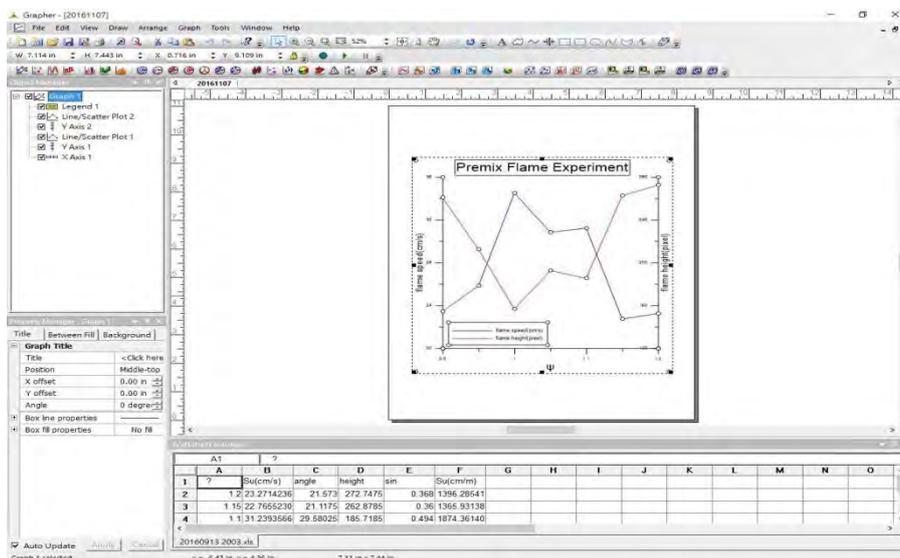


圖 14 使用 Grapher 繪出火焰高度與速度之關係圖

實驗 1-2

- (一) 使用攝影機錄製火焰燃燒情況，並透過濾鏡在影像中去除不必要之外圍光線，將火焰邊界精準化。(圖 15)
- (二) 將影片截圖，得較實驗 1-1 手動拍攝穩定精確的火焰照片。
- (三) 同上述量測運算之步驟製成 excel 檔(表 5)及 Grapher，得第二次實驗各 ϕ 值之燃燒速度與高度的趨勢圖對比。

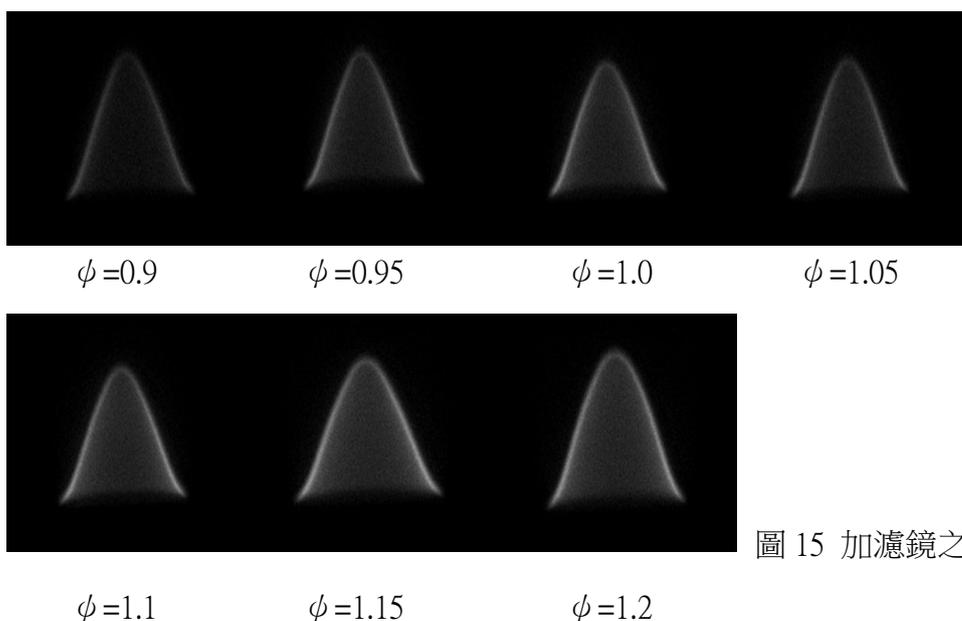


圖 15 加濾鏡之火焰照片

實驗 1-3

→在實驗的變因都與上述(實驗 1-2)相同的情況下，使用數據模擬軟體 CHEMKIN collection 進行運算。(表 6)

二、加入微波產生裝置，在燃燒器之鈦鎢天線點起電漿，協助火焰在貧油時燃燒



表 3 實驗二

實驗 2-1

使用濾鏡和攝影機錄製火焰燃燒情況並截圖，得到電漿在火焰中心燃燒情形。(圖 16)

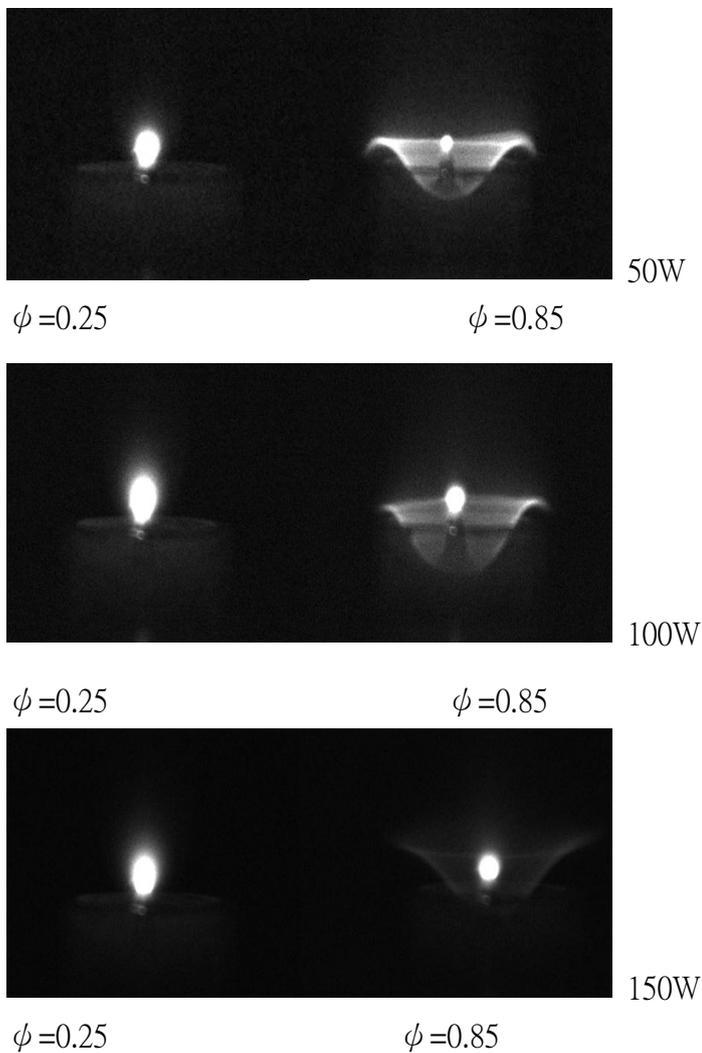


圖 16 使用濾鏡之電漿照片

實驗 2-2

前述實驗無法由單純圖像得知其實際燃燒情形，因此在此實驗中加入光纖，觀察電漿中各波長之強度。我們所使用的微波功率為 50W。

柒、 研究結果

一、

(一) 實驗 1-1

→純火焰速度與高度的關係(未加濾鏡、電漿)(圖 17)

ϕ	Su(cm/s)	angle	height
1.2	23.27142	21.573	272.7475
1.15	22.76552	21.1175	262.8785
1.1	31.23936	29.58025	185.7185
1.05	30.85993	29.20475	192.8975
1	34.52771	33.09925	157.0095
0.95	25.86416	24.1175	212.6355
0.9	23.46114	21.76825	261.084

表 4 火焰相關數據

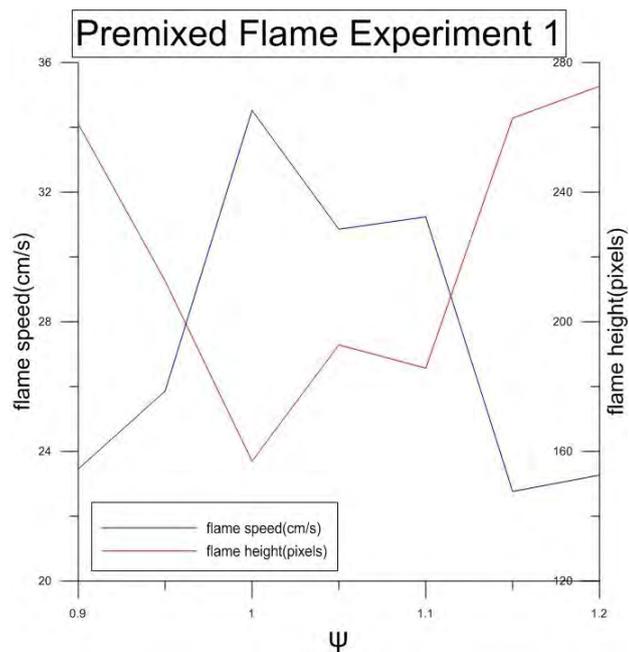


圖 17 火焰高度與速度之關係圖

(二) 實驗 1-2

→純火焰速度與高度的關係(未加電漿)+濾鏡 (圖 18)

ψ	Su(cm/s)	angle	height
0.9	31.2779	29.644	25600
0.95	33.066	31.526	24579
1	33.94307	32.463	23893
1.05	33.30182	31.777	24234
1.1	31.91844	30.314	24917
1.15	30.84817	29.197	25491
1.2	29.40623	27.711	27648

表 5 火焰相關數據

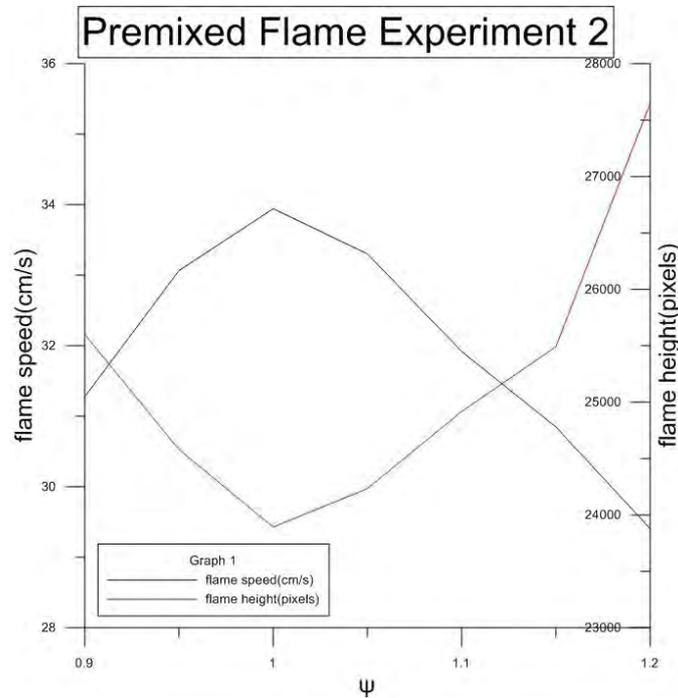


圖 18 火焰高度與速度之關係圖

研究結果顯示， ϕ 值和火焰速度密切相關，而速度又直接影響到火焰高度。高度隨內管燃料出口流速的提升而變低變小，當 $\phi = 1$ 時，火焰的速度達到最快，高度也最低； $\phi > 1$ 時速度隨當量比的增加而下降； $\phi < 1$ 速度則隨當量比的減少而下降。

其中，實驗 1-2 由於加了濾鏡，曲線更為平滑，實驗誤差較小。

(三) 實驗 1-3

→CHEMKIN collection 數據模擬

Flame Speed Velocity Calculation (CHEMKIN and GRI3.0) with Methane and Air, ER from 0.8 to 1.7, unit:0.05					
	1		2		
ER	CH4 (1)	N2 (3.76*2)	O2 (2)		Flame Speed (cm/sec)
0.80	0.80	7.52	2		28.04799
0.85	0.85	7.52	2		31.81357
0.90	0.90	7.52	2		35.14201
0.95	0.95	7.52	2		37.74825
1.00	1.00	7.52	2		39.67758
1.05	1.05	7.52	2		40.27979
1.10	1.10	7.52	2		40.04609
1.15	1.15	7.52	2		38.23057
1.20	1.20	7.52	2		34.86750
1.25	1.25	7.52	2		29.85717
1.30	1.30	7.52	2		24.41406
1.35	1.35	7.52	2		18.76681
1.40	1.40	7.52	2		14.23728
1.41	1.41	7.52	2		13.72796
1.45	1.45	7.52	2		-
1.50	1.50	7.52	2		-
1.55	1.55	7.52	2		-
1.60	1.60	7.52	2		-
1.65	1.65	7.52	2		-
1.70	1.70	7.52	2		-

表 6 數據模擬

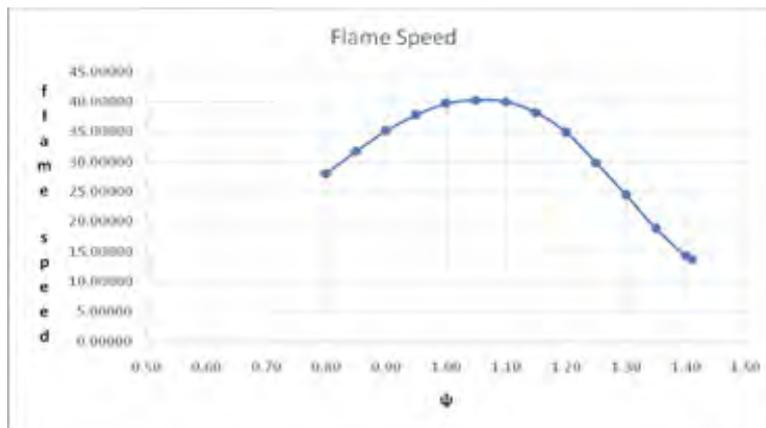


圖 19 數據模擬各 ϕ 值之流速

ψ	computer	Su1	誤差1	Su2	誤差2
1.2	35.14201	23.27142	0.337789	31.1779	0.11280
1.15	37.74825	22.76552	0.396912	33.066	0.12404
1.1	39.67758	31.23936	0.21267	33.94307	0.14453
1.05	40.27979	30.85993	0.233861	33.30182	0.17324
1	40.04609	34.52771	0.137801	31.91844	0.20296
0.95	38.23057	25.86416	0.323469	30.84817	0.19310
0.9	34.86750	23.46114	0.327134	29.40623	0.15663

表 7 實驗結果與理論之誤差值

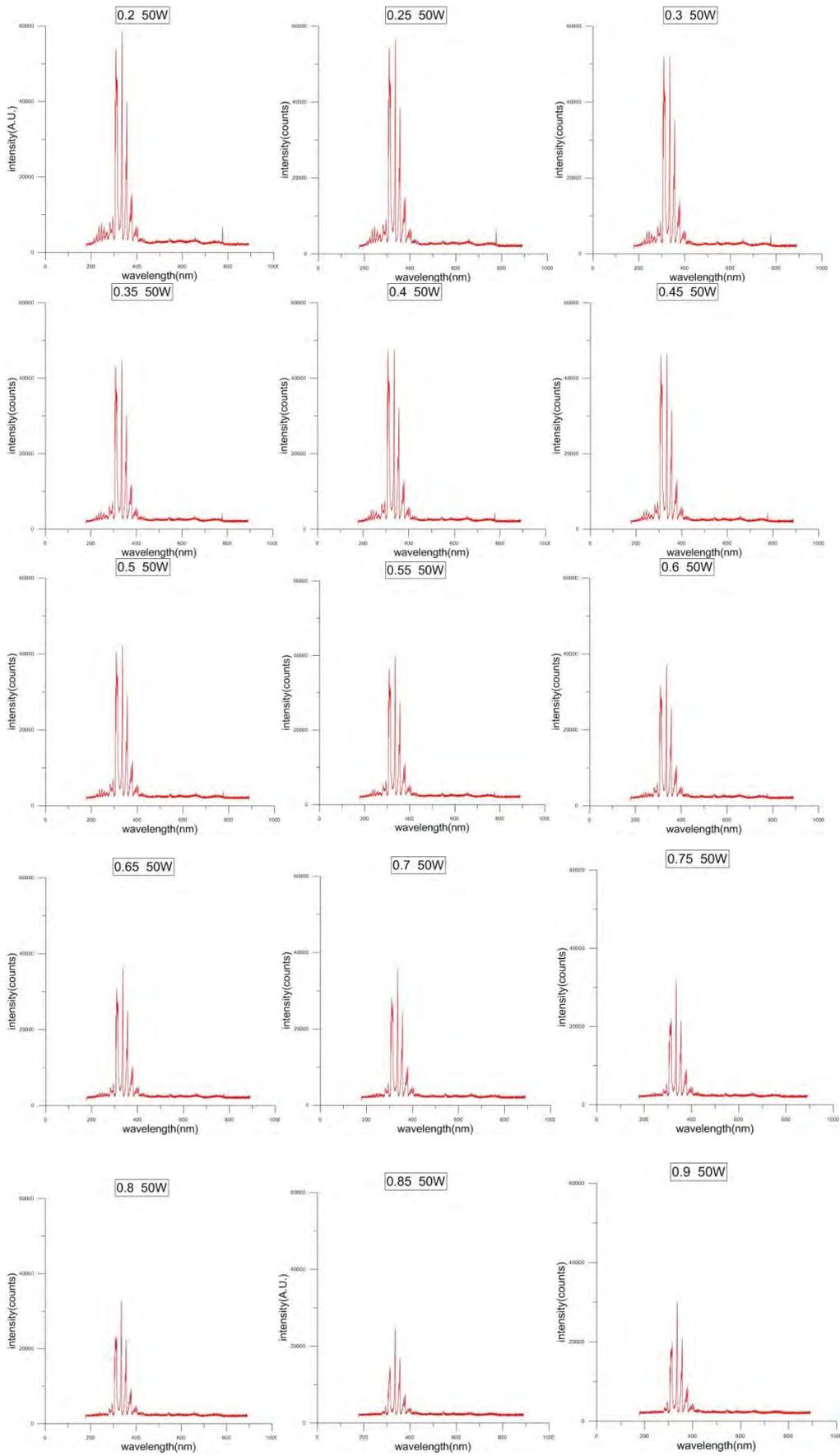
(誤差 1 為實驗 1-1，誤差 2 為使用濾鏡之實驗 1-2)

由表 7 可知，加入濾鏡使整體誤差值大幅降低。

二、實驗二

(一) 下列(圖 20)為固定電漿功率下(50W)，不同當量比之光譜強度比較
(光纖量測)

→其中橫軸為波長(nm)，縱軸為能量強度(A.U arbitrary unit)



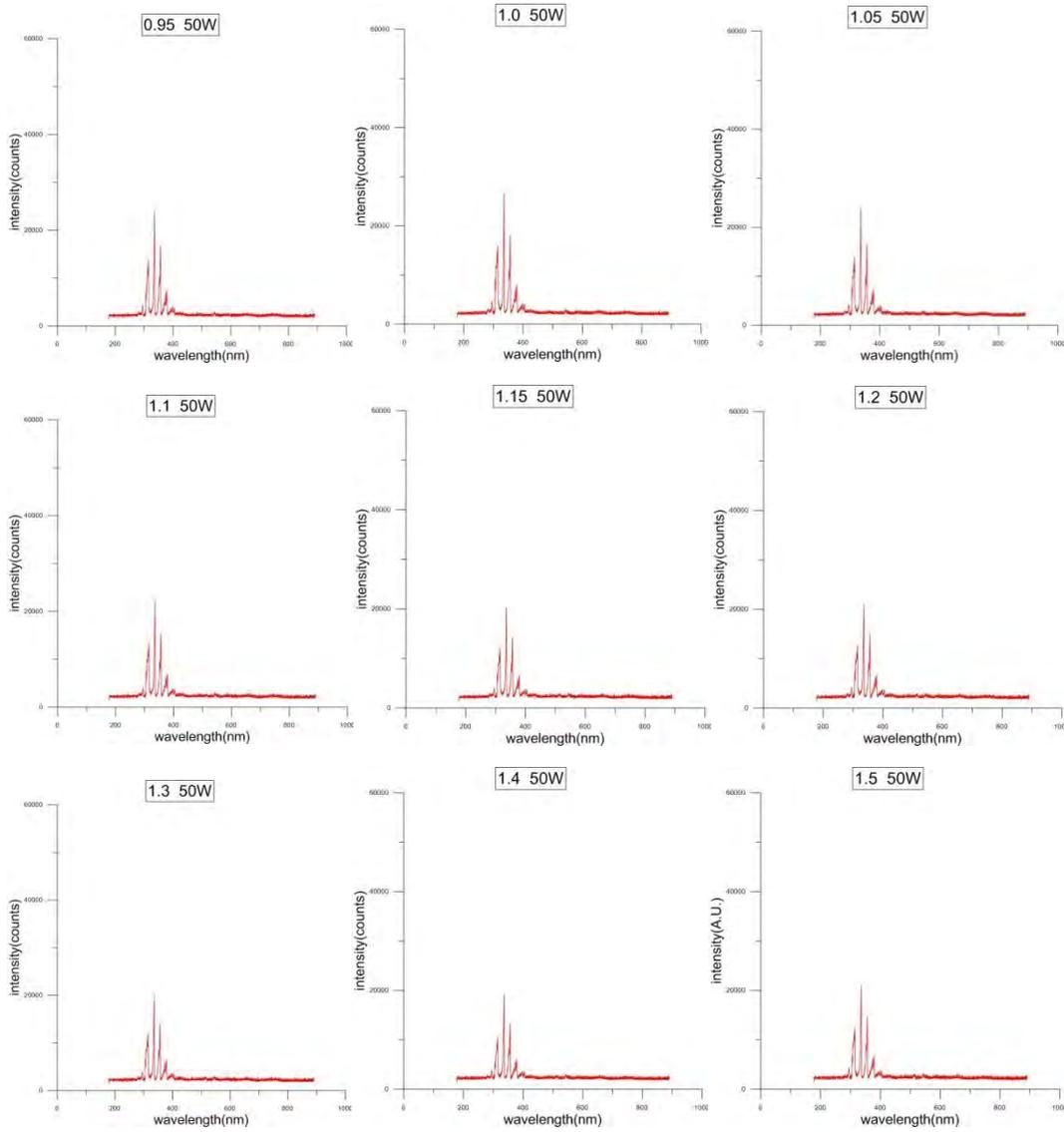


圖 20 $\phi=0.2-1.5$ 光譜分析

(一) 由上圖可知在某些波長段有能量高峰，因此我們進一步放大對本燃燒有較大影響的粒子出現的波段。(圖 21~圖 23)

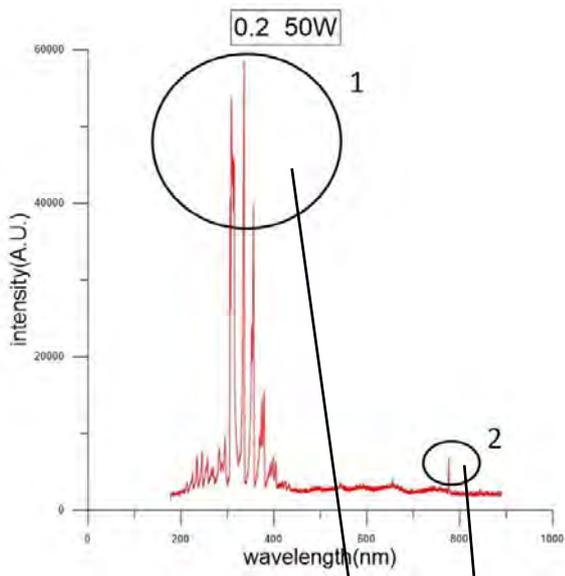


圖 21 $\phi=0.2$ 微波功率 50W

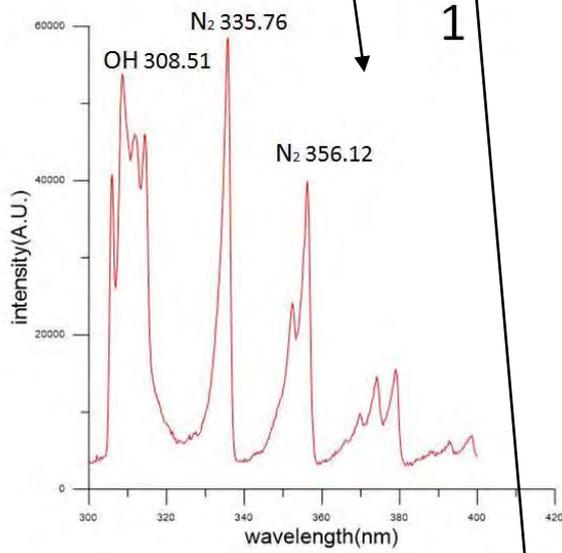


圖 21-1

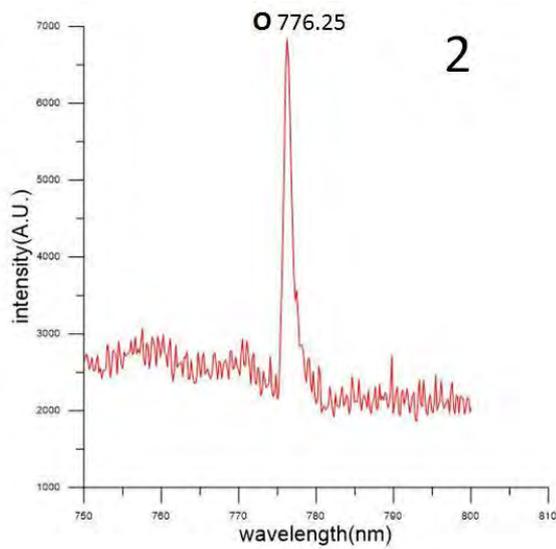


圖 21-2

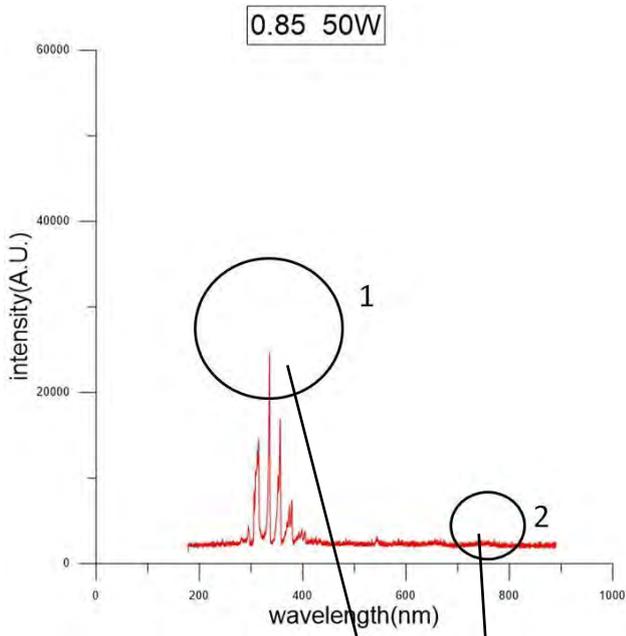


圖 22 $\phi = 0.85$ 微波功率 50W

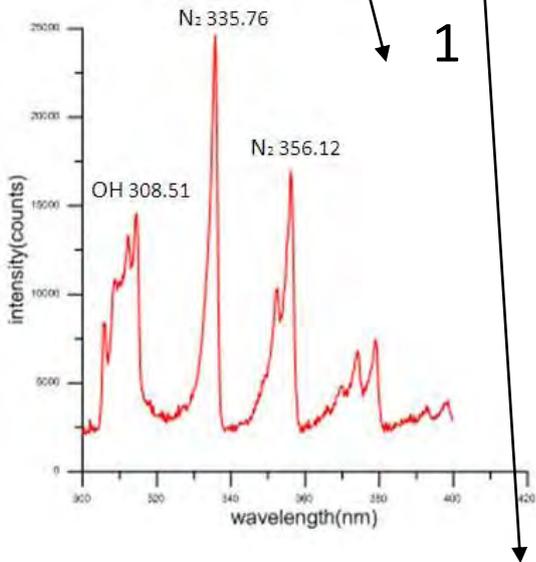


圖 22-1

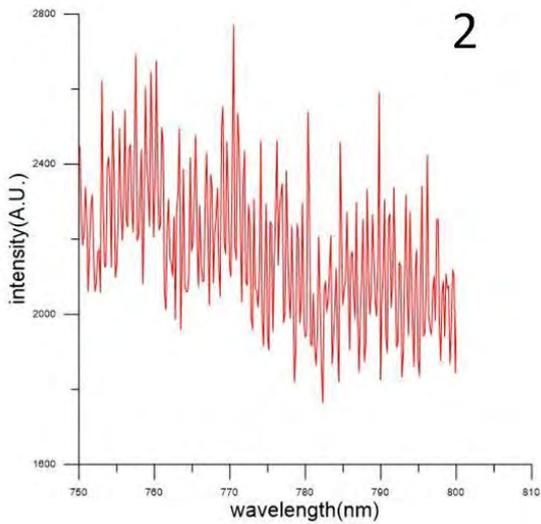


圖 22-2

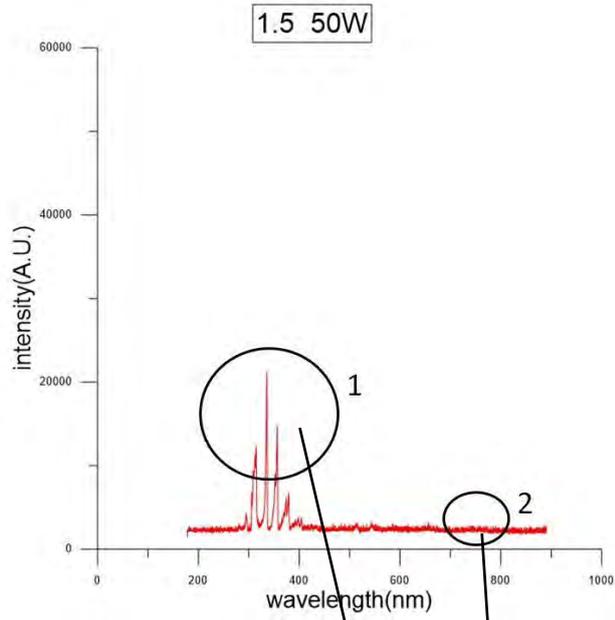


圖 23 $\phi=1.5$ 微波功率 50W

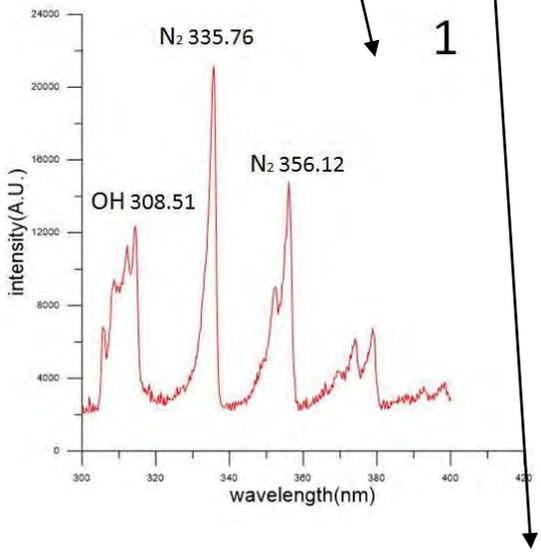


圖 23-1

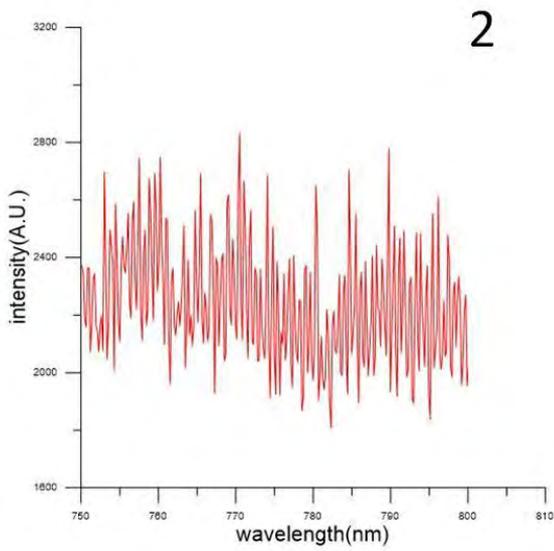


圖 23-2

觀察各 ϕ 值的光譜圖，可發現在趨勢中存在一些特別的高峰部分，由查閱可得知，其中有些是對燃燒影響較大的粒子在光譜圖中所顯示的波段。我們將之對應到 $\phi=0.2$ 、 0.85 、 1.5 這些較具指標性的當量比值，圈出 $300\sim 400\text{nm}$ 及 $750\sim 800\text{nm}$ 的波長段分別放大(圖 21~圖 23)。

1. 波長 $300\sim 400\text{nm}$ ， N_2 (波長 335.76nm)在各 ϕ 值皆為能量最高峰
2. 在 $\phi \geq 0.85$ 時 N_2 (波長 356.12nm)的能量超越 OH (波長 308.51nm)

→在後面的討論二「燃燒化學反應機制」中可得知， OH^* 可在貧油時幫助燃燒反應的進行，因此由實驗結果分析可進一步驗證，由電漿產生、能穩駐火焰的 OH^* 越往貧油就越多，也越能幫助燃燒。

3. 波長 $750\sim 800$ 在較貧油的火焰中可以觀察到 O^* (波長 776.25nm)的一個高峰，但越往富油這個高峰就漸漸消失

→經由查閱得知 O^* 可幫助燃燒，因此我們能更進一步驗證電漿在極貧油火焰中能最大程度的幫助燃燒。

而由實驗 2-1 各 ϕ 值的比較中也可觀察到， ϕ 值越小的火焰其電漿越亮，甚至出現如圖 24 $\phi=0.2$ 但功率過高造成的爆表現象。實驗 2-2 的光譜圖(圖 20)也可看出 ϕ 值越低其總趨勢越高，高峯值能量也越高。這是因為空氣的電離能相較於燃料(甲烷)來說較低，而在 ϕ 值越小的貧油火焰中，空氣比例越高，電漿中的活性基濃度越高，由光纖測得的能量也越高。



圖24 $\phi=0.2$

捌、討論

一、火焰速度量測誤差來源

由實驗一結果發現，火焰速度理論計算和本實驗結果有著 15-20%左右的誤差。主要原因為本實驗所使用的本生燈火焰為三維結構，所以會在出口處形成一圓錐狀火焰，火焰頂端因為拉伸的關係，在火焰前緣會產生一曲率部分，此部分因為接觸面積增加，火焰前緣的熱傳導也隨之增加，導致頂端的燃燒速度和邊緣不一致，因而造成圓錐角的判讀困難。將來為了減少誤差，可藉由設計良好的二維燃燒器降低頂端的拉伸率，如圖 25 所示，可有效提高尖端

角度判別的準確性。

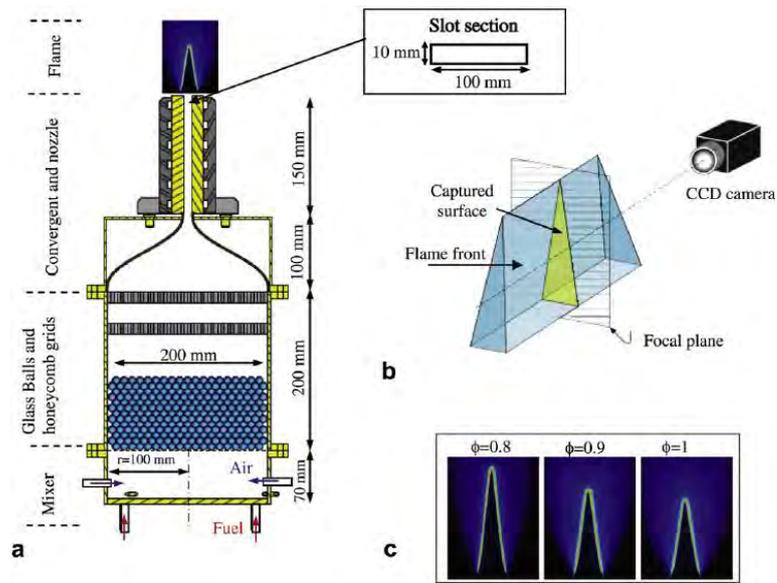


圖 25 二維火焰燃燒器示意圖

二、 燃燒化學反應機制

烷類的碳氫燃料其氧化過程通常起源於自由基H、O或OH的攻擊，接著熱解成較小自由基，此步驟持續進行直到比較穩定的自由基CH₃形成，因此烷類碳氫氧化可以簡化到CH₃自由基之氧化。CH₃氧化主要是與氧原子形成甲醛，然後形成CHO，再經由氫原子酸鹼步驟(Habstraction)，CHO會熱解形成CO與H原子，而進入CO與H的氧化步驟，最終形成CO₂，整個化學反應的流程可由圖26來表示。

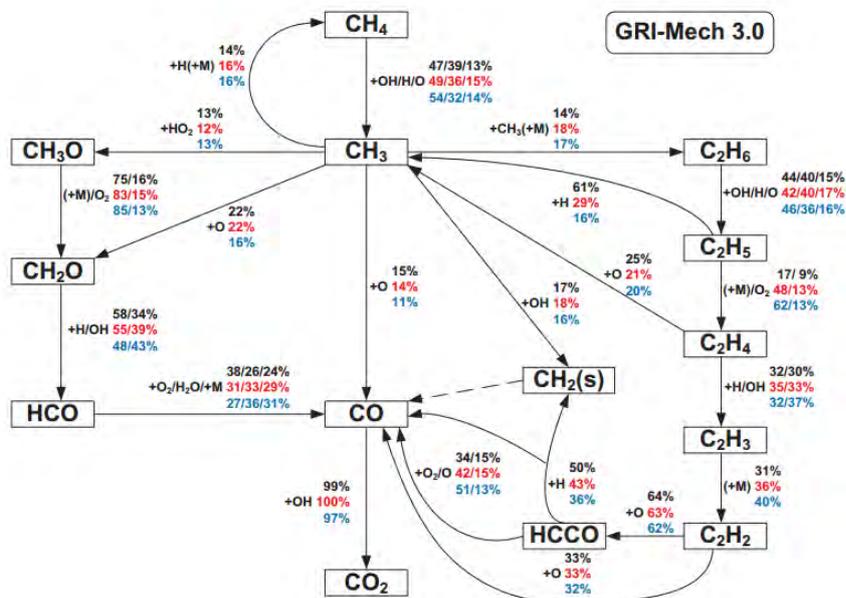
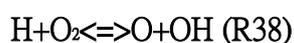


圖 26 當量比為 1 時(理想狀態之完全燃燒)之甲烷氧化反應流程圖 (GRI-3.0)

為了瞭解不同當量比對物種反應速率的影響，我們利用數值模擬軟體(Chemkin) 重點計算 OH、H、O、CH₄ 這些物種在貧油時(取當量比 0.8)的反應速率並討論物種消耗與生成的關係。

圖 27 為當量比 0.8 時的甲烷主要反應路徑和靈敏度分析。往左邊代表消耗，反之往右邊則代表生成。靈敏度分析代表哪個反應式對目標物種的生成與消耗影響最大。由圖中可知道影響甲烷最重要的反應也是自由基 OH 生成反應步驟：



接著自由基 H、O 以及 OH 提供甲烷進行氧化反應其主要反應步驟為：



由結果顯示在貧油燃燒時，反應步驟(R98)和(R50)的消耗大幅增強，(R38)反應生成 OH 這步驟將對 CH₄的消耗成為關鍵步驟。而隨著當量比繼續下降，上述之反應步驟也隨之增強。

由軟體靈敏度分析，配合先前電漿激發光譜討論得到的結果，表示在貧油條件下，電漿中將大量生成 OH 和 O 等活性基，而產生的活性基可幫助甲烷的消耗，進而提升火焰燃燒強度，可更有效在極貧油條件下穩駐火焰。

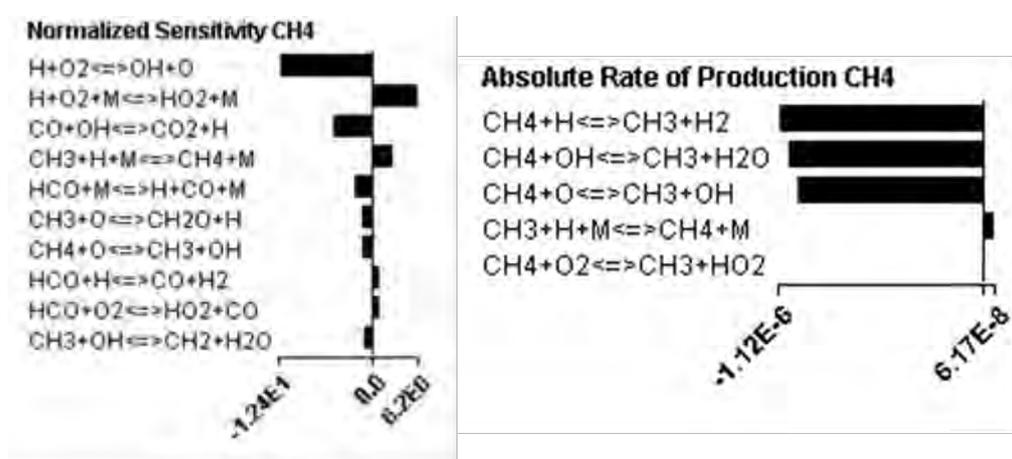


圖 27 當量比 0.8 時，甲烷主要消耗步驟和靈敏度分析

三、 功率

將來若能將此理論實用，若固定總流量，則在**貧油**狀態下燃料成為反應中的限量試劑，所以其「實際釋放的能量」和「理論的燃燒熱」的比值(也就是燃燒效率)能接近 100%。

當燃料和空氣的比例提升到一定程度，較為富油時，燃料雖然較貧油時多但燃燒熱卻無法符合比例的提升，也就是說加入的燃料無法完全釋放其燃燒熱。這點我們由圖 28 也可以明顯發現，在 $\phi > 1$ 後燃料繼續增多，但燃燒熱值線卻不升反降。所以為了**提高燃燒效率**，我們須盡量降低當量比，盡可能的在貧油時燃燒。

在觀察同一燃燒器、固定總流量的狀態下，我們所需的能量為定值。平時燃燒必須使用富油燃燒的原因有二：

1. 貧油時無法順利燃燒
2. 由於燃料無法完全釋放燃燒熱，我們需要加入更多的燃料以得到需要的能量。

但若如本研究在火焰中加入**微波產生電漿**，可使**貧油火焰穩定燃燒**，富油時也可使燃料完全反應，釋放全部燃燒熱。此時若仍在相同的富油條件下燃燒，我們得到的能量就會遠超出原本所需的，同樣造成能量浪費。這時便可利用貧油燃燒，大大節省能源和燃料，但得到的能量可以和原本所需相同。因此若欲使用本方法節能，只需討論貧油時的能量得失情形。

而且由實驗二光譜圖的分析可得知，加入固定功率的微波產生電漿，也就是給予固定能量，在越往貧油的狀況下越能更大程度的穩駐燃燒，使預混火焰穩定釋放燃燒熱；但若極貧油時燃料過少，將使放出的燃燒熱低於給予的能量，也不符合效率。

因此我們能藉由作圖，畫出在貧油時各 ϕ 值下燃料釋放的燃燒熱值與給予的能量兩條線，求出這兩條線的交點(圖 29)，在當量比 0.29。也就是說，加入了 50W 的能量，能將貧油時的穩定燃燒臨界點 $\phi = 0.9$ 消除，使燃燒效率達到 100%；而在 $\phi > 0.29$ 時所得的能量，也就是燃料釋放的燃燒熱，仍比輸入的能量 50W 多(如圖 30 為淨得到能量值)，因此加入微波後在 $\phi = 0.29 \sim 1.0$ 時皆能有效節省能源，即達到本實驗的最終目的。

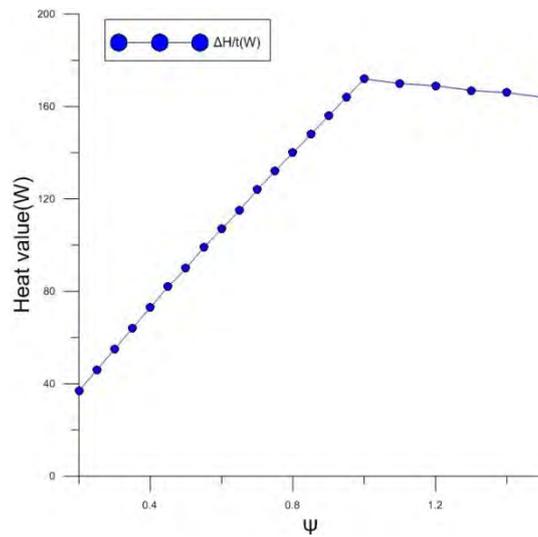


圖 28 實際釋放的燃燒熱值

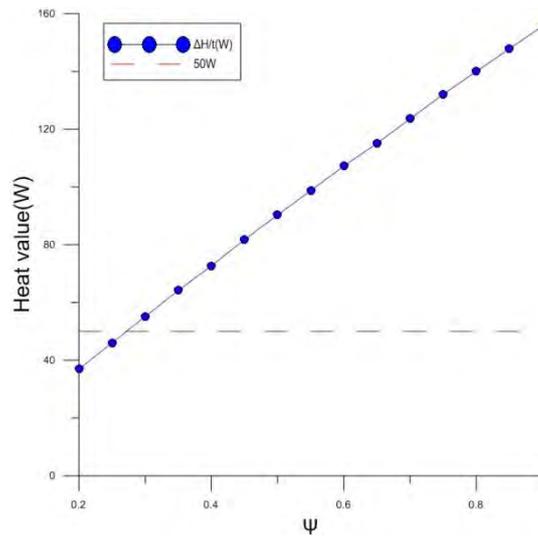


圖 29 釋放的能量(藍)、給予的能量(紅)

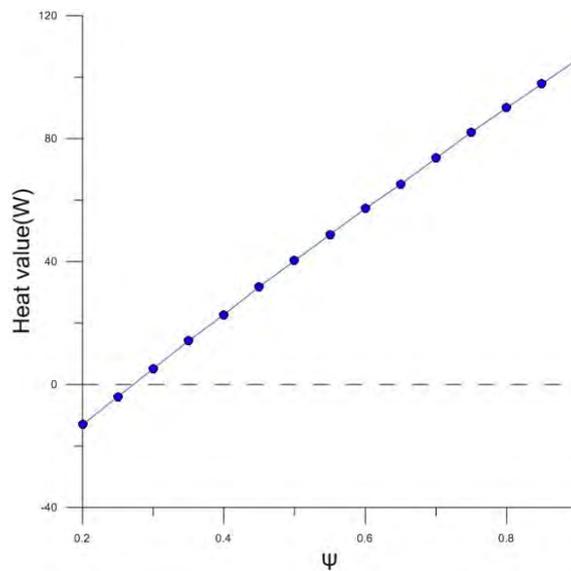


圖 30 燃燒得到的熱值和給予能量的差值(得到的淨能量)

玖、 結論

一、實驗一純火焰的基本量測可知，火焰高度隨內管燃料出口流速的提升而變低變小，當 $\phi = 1$ 時，火焰的速度達到最快，高度也最低。

此外，由實驗 1-1 及 1-2 的比較誤差可發現，使用自然螢光量測系統，也就是加入濾鏡，得出 CH^* 的分布範圍，為真正火焰前緣邊界，較未加濾鏡精準許多。



二、由數據模擬軟體 Chemkin 的靈敏度分析得知， $H+O_2 \rightleftharpoons O+OH$ 是 CH_4 消耗的關鍵步驟。隨著當量比下降，此反應步驟也隨之增強。再配合先前電漿激發光譜討論得到的結果，表示在貧油條件下，電漿中大量生成的 OH 和 O 活性基可以幫助甲烷的消耗，進而提升火焰燃燒強度，能更有效在極貧油條件下穩駐火焰。

三、不同 ϕ 值燃料在理想狀態下釋放的燃燒熱值線和給予的能量線(50 瓦)，交點在 $\phi = 0.29$ 。在貧油狀態下，能使燃燒效率到達 100%；而當 $\phi > 0.29$ 時，得到的淨能量為正值，因此加入微波能量 50 瓦後，在 $\phi = 0.29 \sim 1.0$ 皆能有效節省能源，即為本實驗之最終目的。

壹拾、 參考資料及其他

一、中文部分

【學位論文】

李後毅(民 99)。先導型電弧火箭系統之自主研發 Indigenous Technology Development of a Prototype Arcjet System。國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文，台南市。

楊超榮(民 99)。機械與機電工程研究所介電質常壓電漿產生器之開發及其於質譜分析之應用 Development of a DBD Plasma Generator and the Applications for Mass Spectrometry。國立中山大學，台南市。

【國科會報告】

趙怡欽(民 98)。行政院國家科學委員會傑出學者專題研究計畫申請書。微波/電漿穩駐之

次極限貧油火焰於氣渦輪貧油燃燒應用之研發。國立成功大學航空太空工程學系，台南市。

二、英文部分

【學位論文】

Julie Buffam & Kevin Cox(April 23, 2008).Measurement of Laminar Burning Velocity of Methane-Air Mixtures Using a Slot and Bunsen Burner.

【期刊文章】

Y Ju, W Sun(2015). Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry .*Progress in Energy and Combustion Science* 48, 21-83

Takao Ito* Yoshio Otani and Norikazu Namiki (2004).Electrostatic Separation of Carbon Dioxide by Ionization in Bifurcation Flow. *It o et al., Aerosol and Air Quality Research, Vol. 4, No. 1,* 91-104.

【評語】 052401

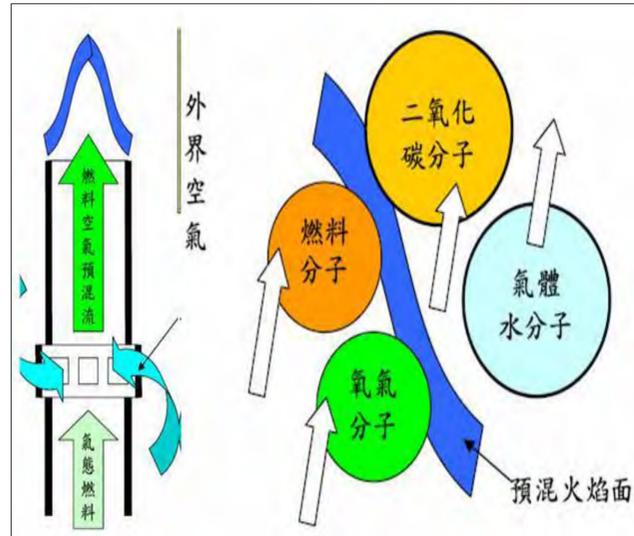
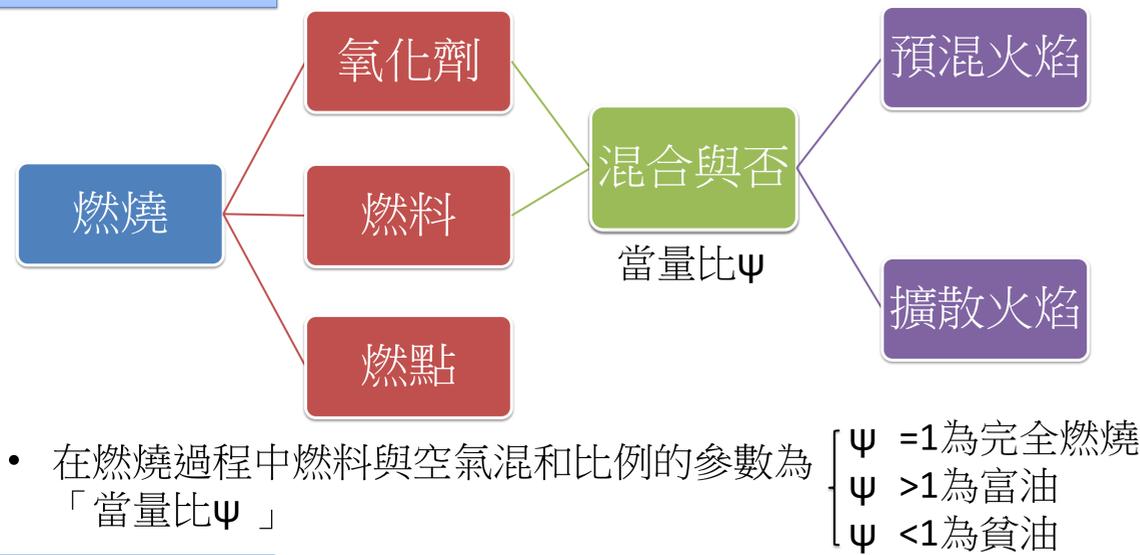
利用微波誘發（高密度）電漿提升貧油（空氣莫耳數超過燃料莫耳數）的可燃極限。再利用數值分析（CHEMKIN COLLECTION）驗證可燃極限，並利用光譜分析發現 OH 可助燃。本作品排版、數據處理及原理解釋都非常清楚，具有節省能源之功效。宜多瞭解電腦模擬軟體的原理與操作。

作品海報

摘要

- 貧油節省能量，但因為燃料過少而無法穩定反應。因此，本研究主要探討如何在**貧油時穩駐燃燒**。
- 第一階段先觀察火焰，得知**高度與速度呈負相關**，在 $\psi = 1$ 時達到速度最高點。
- 第二階段為實驗重點，加入額外能量在貧油時穩駐火焰，利用**微波產生裝置**在火焰中心生成能延伸「可燃極限」的高密度電漿，並產出對燃燒有幫助的粒子 O^* 、 OH^* ，使火焰在**貧油時穩定燃燒**。
- 當微波能量最低為50瓦時，能將貧油燃燒的臨界點 $\psi = 0.9$ 消除，使燃燒效率達到100%。而在 $\psi > 0.29$ 時得到的淨能量為正值，因此加入微波後 $\psi = 0.29 \sim 1.0$ 皆能有效節省能源。

前言



本生燈燃燒器構造與火焰示意圖

研究動機

全球的能源供應仍有百分之七十以上仰賴燃燒方式進行，因此研發高效率燃燒器兼具降低燃燒造成的污染為現階段最迫切且可行的策略之一，尤其**貧油燃燒**更是受到普遍的重視。但是貧油燃燒容易遭遇到**火焰不穩定**的問題，因此如何進行**火焰燃燒穩駐機制**的議題成為我們的研究重點。

研究目的

1. 量測火焰的基本特性，驗證本燃燒器符合不同 ψ 值**火焰高度和速度呈負相關**的理論。
2. 利用**微波誘發電漿穩駐貧油火焰**，設計一個可以操作在貧油狀態下的燃燒器。
3. 針對電漿穩駐貧油燃燒的增強機制進行分析，估算其總體效益，探討此種應用方式的可行性。

設備及器材



微波電漿燃燒器

微波電場分布

微波設備

自然螢光量測

光譜量測系統

研究方法

一. 實驗設置

1. 燃燒的穩定度與氣體總流量成正比
2. 常溫常壓下， ψ 值低於0.9的貧油火焰無法穩定燃燒
→ 選取總流量2980sccm作為實驗的控制變因

二. 火焰速度

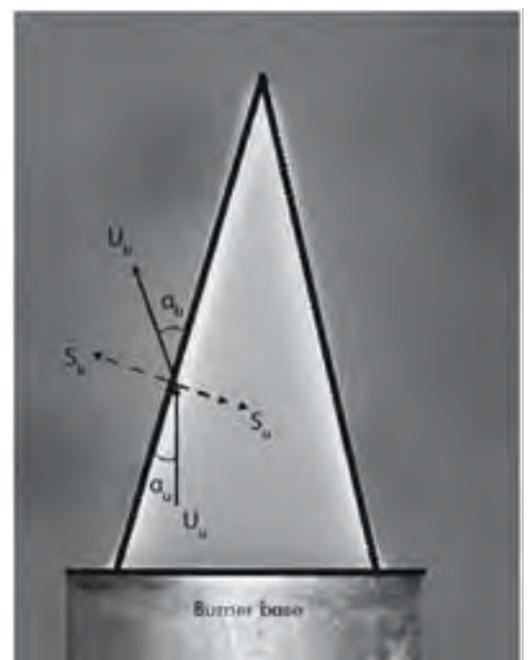
$$\begin{cases} \text{火焰燃燒速度} = \text{噴流出口速度} * \sin\alpha \\ \text{噴流出口速度} = \text{氣體總流量} * \text{管口截面積} \end{cases}$$

三. 火焰自然螢光

以 CH^* 火焰自然螢光輔助判讀火焰面位置。

四. 數值分析方法

本研究中使用數值模擬CHEMKIN來討論燃料混合的火焰狀態。在數值方法中使用的化學反應機構為GRI-3.0，適用於以甲烷為主的燃燒反應。

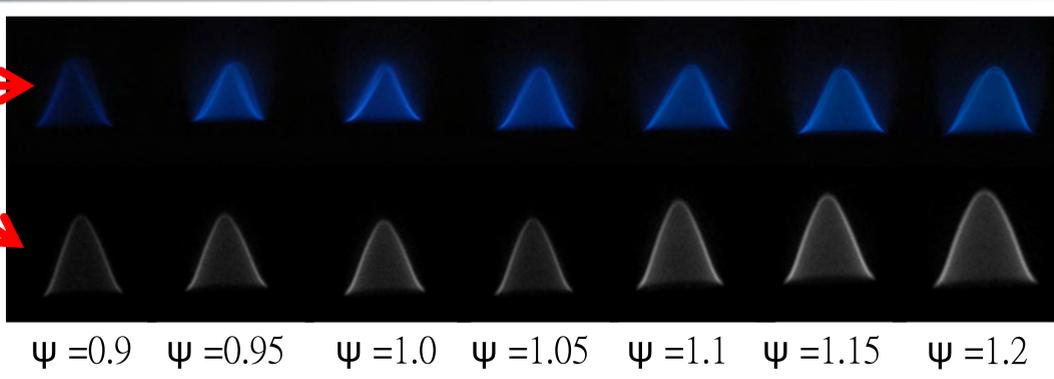
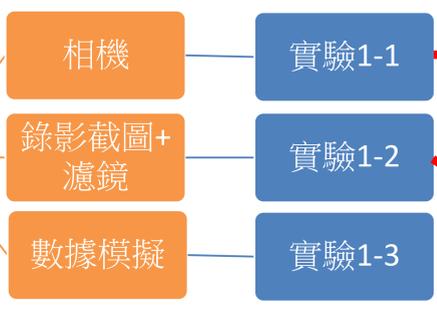


火焰速度與噴流速度

實驗過程及結果

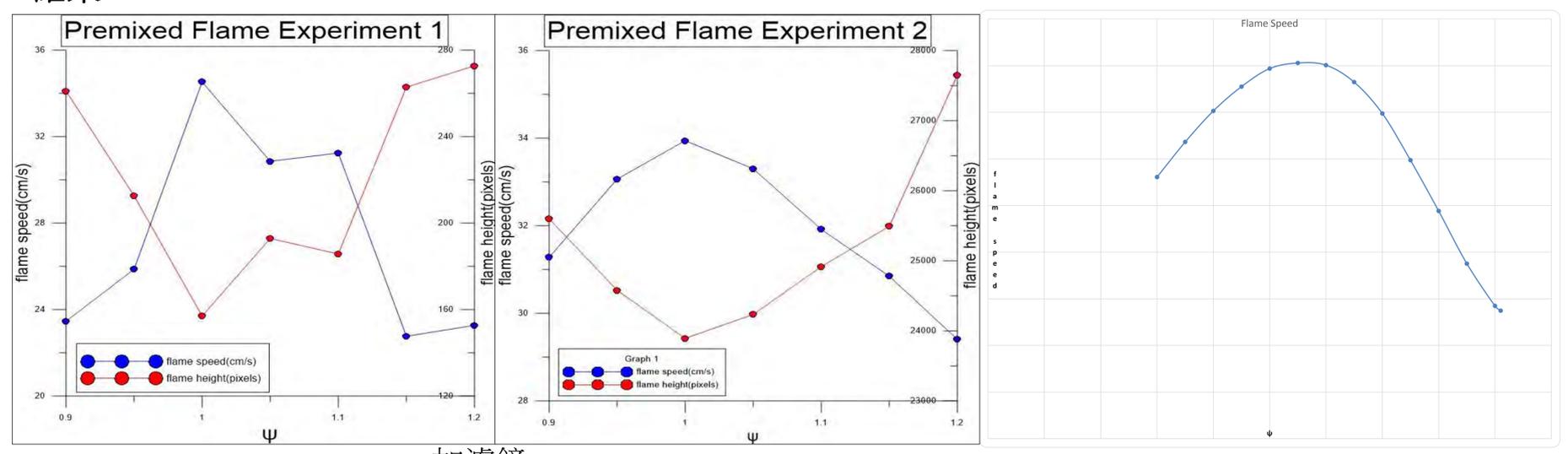
實驗一

純火焰燃燒



$\psi = 0.9$ $\psi = 0.95$ $\psi = 1.0$ $\psi = 1.05$ $\psi = 1.1$ $\psi = 1.15$ $\psi = 1.2$

結果



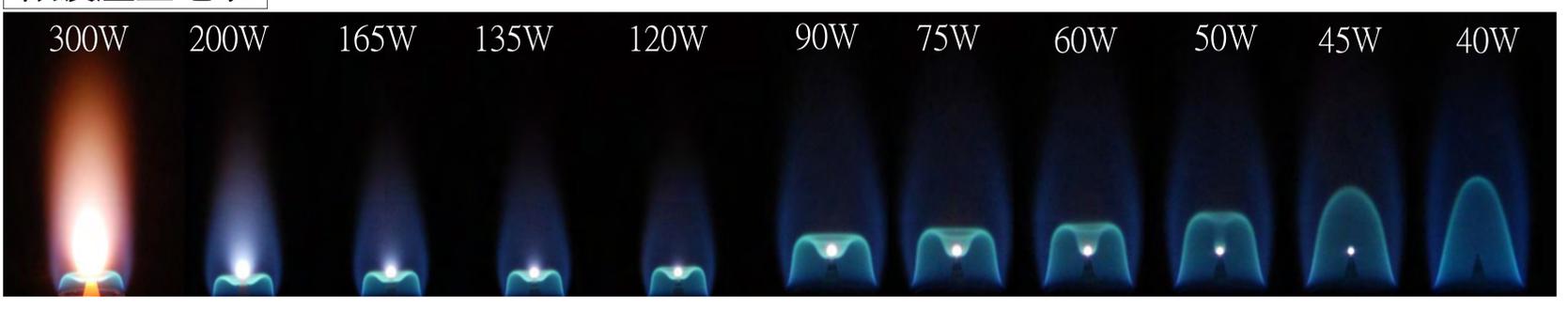
實驗1-1 $\xrightarrow{\text{加濾鏡}}$ 實驗1-2 $\xrightarrow{\text{數據模擬軟體計算之火焰流速}}$

1. 火焰的 ψ 值與出口流速密切相關， $\psi \approx 1$ 時火焰速度最快，而 ψ 值的增大或減小流速也隨之下降。
2. 火焰的高度與流速成負相關，高度趨勢以 $\psi = 1.0$ 為最低點， $\psi > 1$ 時高度隨當量比提升； $\psi < 1$ 高度則隨當量比的減少而下降
3. 實驗1-2使用了濾鏡過濾雜訊，因此整體誤差值較未使用濾鏡的實驗1-1小，曲線較為平滑。

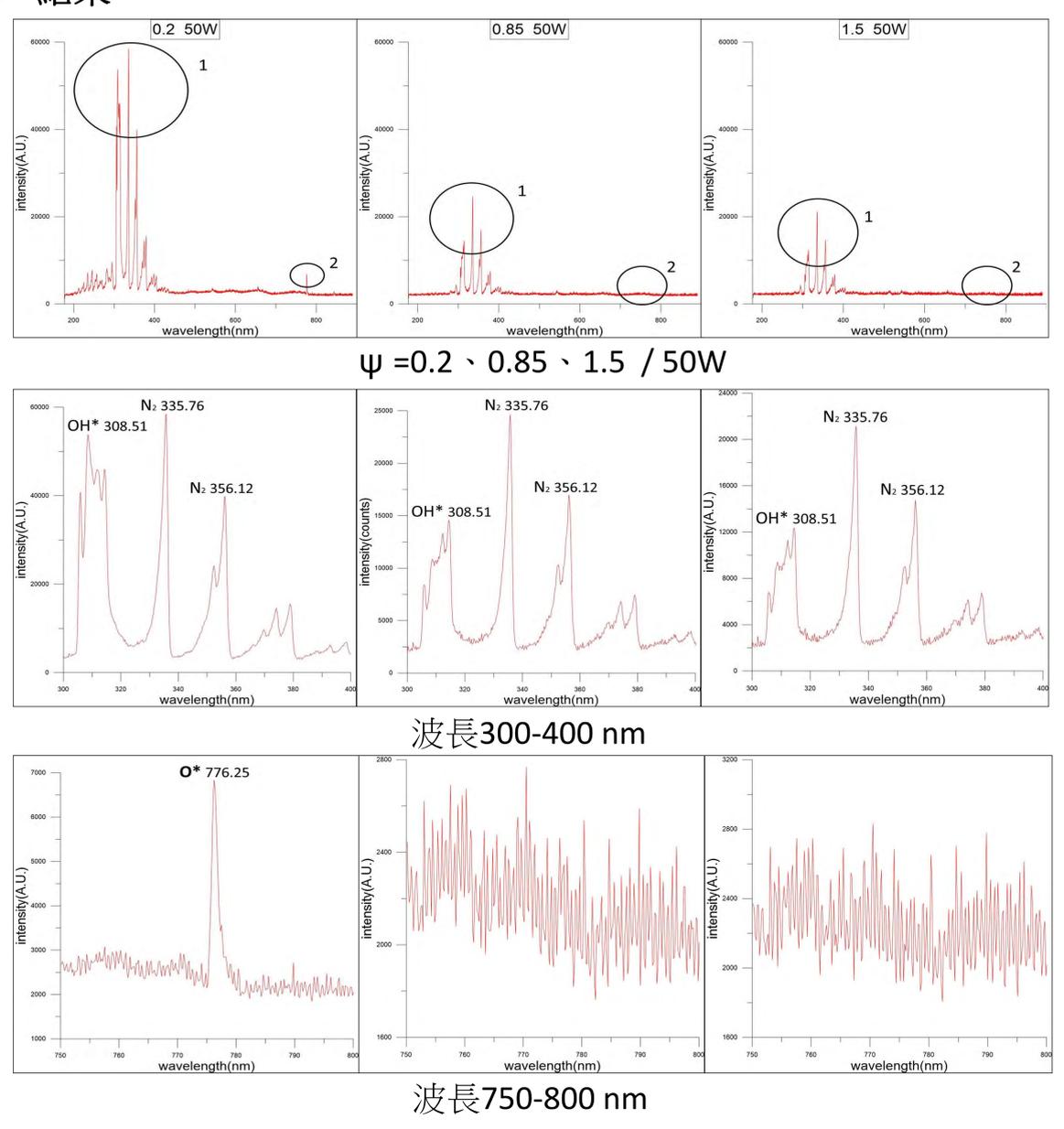
實驗二



微波產生電漿



結果



1. 由圖可知，在某些波段有能量高峰，因此我們進一步放大對本燃燒有較大影響的粒子出現的波段，如300-400nm和750-800nm。
 - a. 波長300-400nm， N_2 (波長335.76nm)在各 ψ 值皆為能量最高峰。
 - b. 在 $\psi \geq 0.85$ 時 N_2 (波長356.12nm)的能量超越OH(波長308.51nm)。
 → 討論二「燃燒化學反應機制」中可得知由電漿產生、能穩駐火焰的OH越往貧油越多，也越能幫助燃燒。
 - c. 波長750-800nm，可以觀察到 O^* (波長776.25nm)在較貧油的火焰中有一個高峰，但越往富油這個高峰就漸漸消失。
 → 經由查閱得知 O^* 可幫助燃燒，因此我們能更進一步驗證電漿在貧油火焰中能最大程度的幫助燃燒。
2. 空氣的電離能較甲烷低，而在 ψ 值較小的貧油火焰中，空氣比例較高。因此在左圖可看出，越貧油的火焰，電漿中的活性基濃度越高，由光纖測得的能量也越高。

討論

一. 火焰速度量測誤差來源

- 本實驗所使用的**本生燈火焰為三維結構**
→ 在出口處形成一圓錐狀火焰
- 火焰頂端因為拉伸，會產生曲率
→ 火焰尖端角度判讀困難
→ 造成15~20%左右的誤差

二. 燃燒化學反應機制

- 自由基H、O以及OH提供甲烷進行氧化反應主要反應步驟：



- 影響甲烷最重要的反應是自由基OH生成反應步驟：



- 貧油條件下，電漿中將大量生成OH和O等活性基，幫助甲烷的消耗，進而提升火焰燃燒強度，可以更有效在貧油條件下**穩駐火焰**。

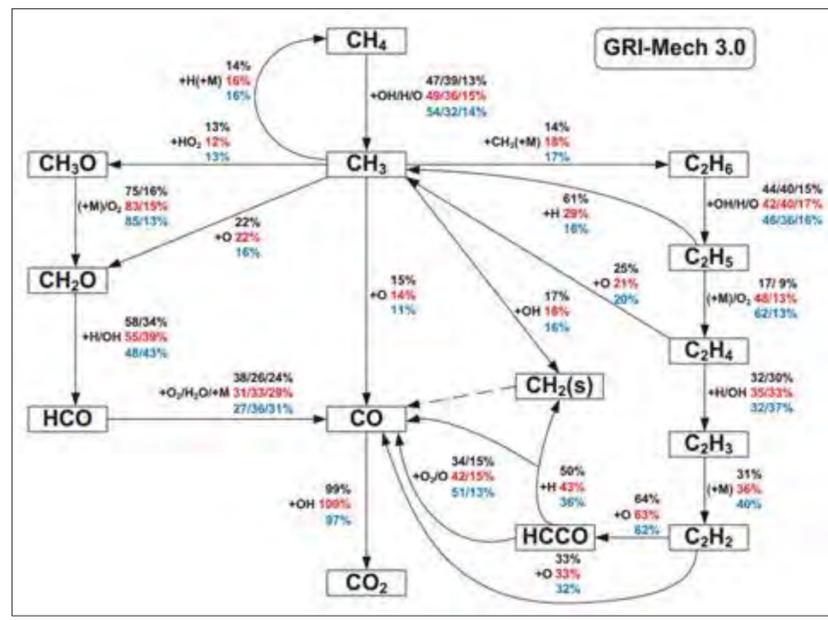
三. 功率

- 固定總流量，在貧油狀態下**燃料**成為反應中的**限量試劑**，燃燒效率較能接近100%。
→ 為了提高燃燒效率，我們須盡量降低當量比，盡可能的在貧油時燃燒
- 在火焰中加入微波產生電漿，可使貧油火焰穩定燃燒，節省能源和燃料：

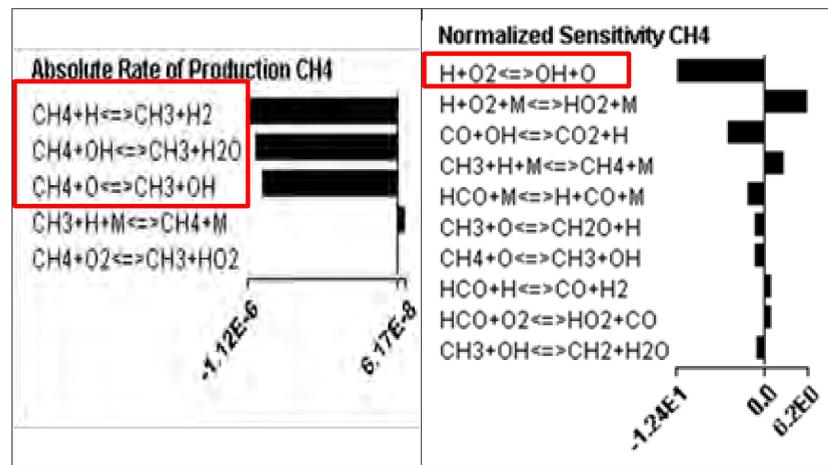
藉由作圖，畫出在貧油時，各 ψ 值下燃料釋放的燃燒熱值與給予的能量兩條線

交點的當量比為0.29

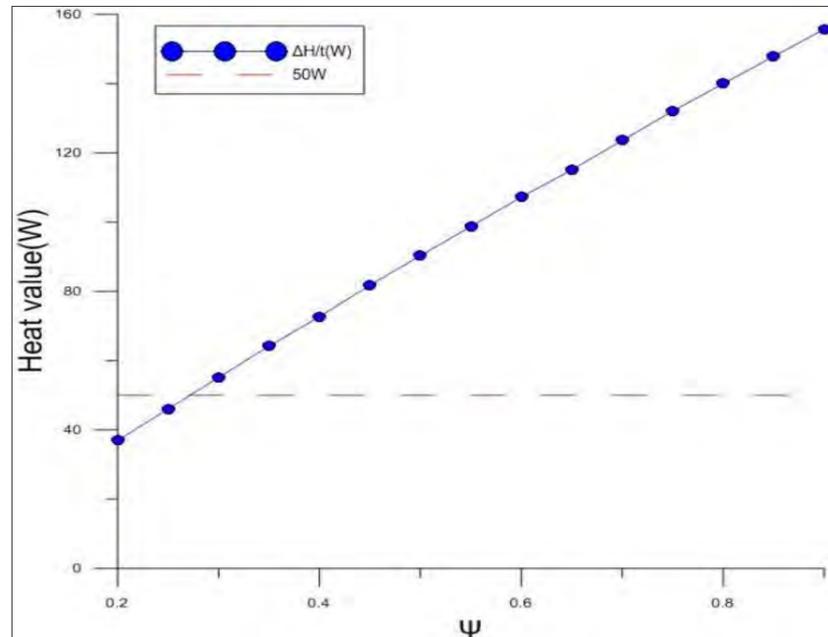
加入了50W的能量，能將貧油時的穩定燃燒臨界點 $\psi = 0.9$ 消除，使燃燒效率達到100%



$\psi = 1$ 時甲烷氧化反應流程圖 (GRI-3.0)



$\psi = 0.8$ 時甲烷主要消耗步驟和靈敏度分析



釋放的能量(藍)、給予的能量(紅)

結論

1. 火焰高度隨內管燃料出口流速的提升而變低變小，當 $\psi = 1$ 時，火焰的速度達到最快，高度也最低。使用自然螢光量測系統(濾鏡)，得到的CH*分布範圍，是火焰真正的前緣邊界。



2. $H+O_2 \rightleftharpoons O+OH$ 是甲烷消耗的關鍵步驟，而在貧油條件下此反應步驟強度增加，會大量生成O和OH活性基，可以幫助甲烷消耗，能更有效地穩駐火焰。
3. 燃料在理想狀態下釋放的燃燒熱值線和給予的能量線(50瓦)，交點在 $\psi = 0.29$ 。在貧油狀態下，能使燃燒效率到達100%；而當 $\psi > 0.29$ 時，得到的淨能量為正值。因此加入微波能量50瓦後，在 $\psi = 0.29 \sim 1.0$ 皆能有效節省能源，達到實驗的最終目的。

參考文獻

[1] 趙怡欽(民98)。行政院國家科學委員會傑出學者專題研究計畫申請書。微波/電漿穩駐之次極限貧油火焰於氣渦輪貧油燃燒應用之研發。國立成功大學航空太空工程學系，台南市。

[2] Julie Buffam & Kevin Cox(April 23, 2008).Measurement of Laminar Burning Velocity of Methane-Air Mixtures Using a Slot and Bunsen Burner.

[3] Takao Ito* Yoshio Otani and Norikazu Namiki (2004).Electrostatic Separation of Carbon Dioxide by Ionization in Bifurcation Flow. It o et al., Aerosol and Air Quality Research, Vol. 4, No. 1 , 91-104.