

# 國立交通大學

機械工程系

碩士論文

玻璃火焰拋光之噴嘴的研究與設計



The nozzle design and investigate for glass  
scratchitti removal

研究生：林秉衍

指導教授：洪錫源 教授

中華民國九十四年七月

玻璃拋光之噴嘴研究與設計

The nozzle design and investigate for glass  
scratchitti removal

研究生：林秉衍

Student : Ben-Gein Lin

指導教授：洪錫源

Advisor : Shane Y. Hong

國立交通大學

機械工程學系



Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Mechanical Engineering

2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月

# 玻璃拋光之噴嘴研究與設計

學生：林秉衍

指導教授：洪錫源

國立交通大學機械工程學系研究所碩士班

## 中文摘要

為了修補破損玻璃而有火焰拋光術來將受損的玻璃進行處理，而此方式可以減少各方面的資源浪費，火焰拋光主要是將玻璃表面加熱熔融，玻璃自身的表面張力將受損的部位自行修補不需施加機械外力，但在加溫玻璃時，由於溫度分佈不均勻易於破裂，因此設計能讓火焰溫度均勻的噴嘴是火焰拋光成功的因子。

噴嘴設計流程是依照過去實驗的失敗結果訂出新一代的噴嘴需求，從需求中改良設計完成噴嘴，有了噴嘴後進行測試觀察，若達到需求則繼續搭配其他參數找出最佳拋光參數，若無法達到則必須回到功能需求繼續改進。

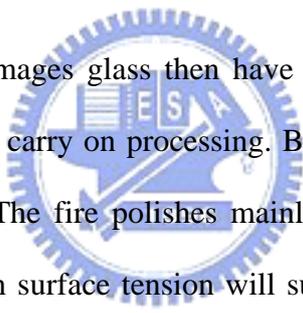
# The nozzle design and investigate for glass scratchitti removal

Student : Ben-Gein Lin

Advisor : Shane Y. Hong

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT



In order to patch the damages glass then have fire polish the glass which the technique will suffer injury to carry on processing. But this way may reduce various aspects the resources waste. The fire polishes mainly is heat the glass surface and fuses the glass. The glass own surface tension will suffer injury the spot voluntarily will patch does not have to exert the mechanical external force. But in heats up time the glass, Because the temperature distribution non-uniformity is easy to burst. So let the flame temperature distribution uniformity to design the nozzle which can success removed the scratchitti of glasses.

The nozzle design process is defers to the defeat result which the past tested to subscribe new goods come into the market a generation of spray nozzle demand. Improves the design from the demand to complete the spray nozzle. After had the nozzle to carry on the test observation. If achieved the demand continues to match other parameters to discover best polishes the parameter. If is unable to achieve the request must return to valve molybdenum to continue and improving.

## 誌 謝

本論文得以完成，首先要感謝恩師洪錫源教授在研究期間對論文方向的悉心指導以及文字的大力斧正；並感謝傅武雄、陳仁浩老師的建議指正，使論文更趨完備。

其次感謝湯岳儒學長、臺建庸學弟、邱勇潮學弟、胡靜翔學妹、邱楠庭學弟大力支援這個實驗計畫，另外感謝大學同學陳秉鴻指點與幫忙相關影像處理問題，使論文內容圖像更清晰。

最後感謝父親林永盛、母親陳瓊華二十多年的養育之恩，以及其他家人在我受挫折時給我的鼓勵與關懷，使我在求學的路上無後顧之憂，更是我一切動力的來源。



# 目 錄

中文摘要.....	iv
英文摘要.....	iv
誌謝.....	iv
目錄.....	iv
表目錄.....	iv
圖目錄.....	iv

## 一、 緒論

1-1 研究動機.....	1
1-2 燃燒器.....	2
1-3 文獻探討.....	4
1-4 、研究方向.....	9

## 二、 新噴嘴的要求與設計

2-1 引言.....	11
2-2 新式噴嘴的需求.....	11
2-3 新式噴嘴的設計對策.....	12
2-4 噴嘴設計的可能方案.....	16
2-5 燃料的種類選擇.....	17
2-6 燃料的需求估計.....	18
2-7 安全固定架的設計 .....	21
2-8 管線架構.....	22

## 三、 第二代噴嘴設計

3-1 積木式噴嘴.....	25
3-2 可疊接積木式噴嘴(改進).....	26
3-3 噴嘴細部設計及功能解說.....	27
3-4 分段燃燒孔列噴嘴.....	31
3-5 分段燃燒孔列噴嘴圖(改進).....	32
3-6、噴嘴的理論水冷效益.....	34

## 四、 第三代噴嘴設計

4-1 第三代噴嘴設計.....	40
------------------	----

4-2 火焰量測標準.....	42
4-3 噴嘴設計的優化.....	44
4-4 第三代噴嘴的詳細設計.....	48
五、 第三代噴嘴的鑑定及運用	
5-1 火焰的特性.....	54
5-2 冷卻系統.....	60
六、 參考文獻.....	62



# 表 目 錄

表 2.1 新式噴嘴需求與牽涉的關鍵.....	15
表 2.2 各氣體的特性（資料來源：聯華氣體、經濟部技術處、工業技術研究院 能源與資源所）.....	18
表 2.3 特定溫度下的比熱與須熱量.....	20
表 2.4 平均比熱定數之計算.....	21
表 4.1 不同材質表面加工的熱輻射.....	40
表 4.2 黃銅與銅合金特性比較 .....	48
表 5.1 燃燒過程水冷狀況.....	60



# 圖 目 錄

圖 1.1 各噴嘴所得的火燄形狀：(a)拋物線流；(b)噴嘴出口偏燄；(c)前端吹穿； (d)定速噴嘴火燄；(e)低速噴嘴火燄；(f)“帳篷形”火燄矩形噴嘴；(g) 狹縫式噴嘴；(h)反帳篷火燄噴嘴；(i)反圓錐形火燄.....	3
圖 1.2 (a)局部靠近噴嘴的丙烷氣體速度與燃燒速度；(b)有關火燄個種形狀 .....	3
圖 1.3 同軸噴嘴研究 flow-flame 間互相影響.....	4
圖 1.4 本生燈.....	4
圖 1.5 家庭或工業用燃燒器.....	4
圖 1.6 無冷卻系統之噴嘴.....	5
圖 1.7 火焰結構與角度、高度關係.....	7
圖 1.8 在不同條件下的熱效益.....	7
圖 1.9 噴嘴間的距離與 heat flux 分佈狀況 (a) $s/d=3$ (b) $s/d=2$ ( $s/d=1$ ) 註： $s/d$ 表示噴嘴間的距離/噴嘴出口直徑.....	8
圖 1.10 氧氣與天然氣混合焰衝擊在半圓試片上的總熱通量( $\epsilon$ ：熱輻射係數) .....	9
圖 1.11 噴嘴設計流程圖.....	11
圖 2.1 剛瓶推車固定架.....	22
圖 2.2 系統簡圖.....	23
圖 2.3 左邊兩支為不同的流量計，最右邊為流量計的構造.....	24
圖 3.1 積木式噴嘴組合圖.....	25
圖 3.2 積木式噴嘴(改進).....	27
圖 3.3 積木式噴嘴爆炸圖.....	28
圖 3.4 積木式組合功能示意圖.....	28
圖 3.5 可疊接狹縫式噴嘴的實際組合狀態.....	30
圖 3.6 可疊接狹縫式噴嘴的各部實圖.....	30
圖 3.7 舊式噴嘴.....	31
圖 3.8 分段燃燒孔列噴嘴圖.....	32
圖 3.9 分段燃燒孔列噴嘴分解圖.....	33
圖 3.10 分段燃燒孔列噴嘴組合圖.....	33
圖 3.11 孔列式噴嘴外接管路.....	34
圖 3.12 噴嘴模型圖.....	35
圖 3.13 水的流率與帶走熱的百分比.....	38
圖 4.1 噴嘴斜面氣流走向示意，斜線表示水冷部分.....	41
圖 4.2 預混火焰外流場區域概念圖.....	43

圖 4.3 實際預混火焰外流場區域圖.....	43
圖 4.4 各孔徑單孔上噴實驗：(a) 孔徑 0.7 mm 平頭噴嘴 (b) 孔徑 0.7 mm 錐頭噴嘴 (c) 孔徑 0.5 mm 平頭噴嘴 (d) 孔徑 0.5 mm 錐頭 (e) 孔徑 0.3 mm 平頭 (f) 孔徑 0.3 mm 錐頭.....	45
圖 4.5 各孔徑噴嘴水平噴實驗：(a) 孔徑 0.7 mm 平頭噴嘴 (b) 孔徑 0.7 mm 錐頭噴嘴 (c) 孔徑 0.5 mm 平頭噴嘴 (d) 孔徑 0.5 mm 錐頭噴嘴 (e) 孔徑 0.3 mm 平頭噴嘴 (f) 孔徑 0.3 mm 錐頭噴嘴.....	46
圖 4.6 噴嘴水冷進出管.....	49
圖 4.7 水冷銅管.....	49
圖 4.8 冷水進入與離開噴嘴本體的交接處.....	50
圖 4.9 噴嘴本體水冷流道.....	50
圖 4.10 噴嘴本體水冷連通道.....	51
圖 4.11 噴嘴不鏽鋼水冷蓋片爆炸側視圖.....	51
圖 4.12 噴嘴不鏽鋼水冷蓋等角視圖.....	52
圖 4.13 混合燃料均勻分佈裝置.....	53
圖 4.14 噴嘴內部氣體流動方向.....	53
圖 5.1 丙烷流量 2025 ml/min 的 (a) 火焰寬度 9 mm 與 (b) 火焰長度 57 mm....	54
圖 5.2 丙烷流量 3040 ml/min 的 (a) 火焰寬度 9.5 mm 與 (b) 火焰長度 66 mm.....	55
圖 5.3 丙烷流量 3545 ml/min 的 (a) 火焰寬度 10 mm 與 (b) 火焰長度 70 mm.....	56
圖 5.4 丙烷流量 4050 ml/min 的 (a) 火焰寬度 8 mm 與 (b) 火焰長度 75 mm.....	57
圖 5.5 丙烷流量 5040 ml/min 的 (a) 火焰寬度 8 mm 與 (b) 火焰長度 74 mm.....	58
圖 5.6 (a) 丙烷流量與火焰長度關係 (b) 丙烷流量與火焰寬度關係.....	59

# 第一章 緒論

## 1-1 研究動機

應用在噴火的噴嘴，主要是以氣體燃料提供所需的熱量，少數使用液態燃料霧化後在燃燒，到目前為止已經有各式各樣的產品在各領域上發揮其功用，例如在氣體焊接時所使用的噴嘴、CNC 火焰切割機所使用的噴嘴、瓦斯爐以及熱水器……等等，前述噴嘴用途都有相同的共通點就是用於燃燒，因此對於應用在各領域噴火的噴嘴，無法給予較制式的設計通則規範，可以確定的是，不論選擇或設計噴嘴，是以各種不同的使用環境狀況選擇適當材質與操作的條件為依據[1]。

從過去的拋光實驗中只能侷限於小試片，主要在嘗試火焰拋光的可行性，由於已經知道有成功的例子則將試片擴大研究，試片擴大的過程中伴隨著問題就增加，首先是噴嘴幾何尺寸的增加，這牽涉到加工上的問題，再來是火焰的溫度分佈均勻，這與內部混合燃料的均勻分佈、噴嘴孔距有關，為了讓噴嘴更能夠增加其使用壽命，把噴嘴所吸收的廢熱排除也是種考驗，因此再增加試片尺寸時，噴嘴也需要跟著做不同變化的設計。

火焰拋光實驗中所使用的是氣體燃料，市面上所賣的燃料氣體也很多，每種的氣體特性與燃燒時所產生的熱功也不同，所以在燃料的選擇需要考慮到燃燒時所能產生的發熱功率[2]，它之所以被如此廣泛運用是因其具有下列優點：一、燃燒方法比較簡單，且能達到較高溫的燃燒效率；二、燃燒過程中易於控制，氣體流量壓力依照比例燃燒；三、可對燃料實現高溫預熱，能達到較高的燃燒溫度；四、對純氣體燃料而言，其排放的煙氣之中幾乎無固定灰渣，這大大的降低了對環境的溫染；有關氣體特性與選用將在往後的章節做介紹，透過使用流量計的控制與計算推導，更進一步的對燃燒時的火焰溫度加以控制，因此在考慮流量、溫度、試片成敗間的最佳操作環境；火焰拋光時火焰形狀大小與溫度分布，這是實驗成敗的關鍵之一，因為從過去實驗的實驗結果得知，為了避免玻璃因為受熱面積大導致局部不均勻的加熱，讓玻璃減少受熱時彈性膨脹的熱應力面積，直接達到軟化點，不要在彈性膨脹的溫度範圍之內發生玻璃爆裂現象[3]，故火焰加熱面積要盡可能的小，噴嘴移動的速度需要依玻璃刮痕深度、混合氣體壓力、混合氣體流量來決定；因此在設計噴嘴的主要功能訴求中，希望火焰能夠達到截面積細薄、溫度上能達到 1800°C 以上、噴出的火焰穩定不受外界流場的干擾使得火焰搖擺不定、易於使用且安全，經過市場上的調查，並沒有任何噴嘴能完全符合上述的功能，因此在噴嘴設計上投入大量的心力，其中有趣的是用的方法不同、設計時的外形不同但所能達到的功能需求卻是一樣的。

## 1-2 燃燒器

用來熔融玻璃的方法很多，包括用電熔爐、雷射與傳統的燃料燃燒所產生高溫，在這麼多的方法中要達到熔融玻璃的溫度條件下，以燃燒的方式較為便宜，作為燃燒的燃料有很多種形式，大致分成固態、液態與氣態，之所以選擇氣態燃料的原因在前章節有提到，因此本實驗考慮以碳氫化合物的氣態燃料，氣態燃料的選擇可以有很多種選擇，本實驗要求火焰的溫度需求卻是相當高且均勻分佈，故現階段以使用上比較安全且能夠提供高溫的丙烷為主，有了這樣的需求則可衍生出各式各樣的噴嘴。

噴嘴出口的幾何形狀是影響火焰形狀的重要基本因素，每個設計者依照使用條件與環境的不同擁有自己特殊的設計，從 Lewis、von Elbe 和 Wohl 的研究討論可看出各種不同形狀變化的火燄(圖 1.1)[4]；從最基本的噴嘴只是一個開放的管子導引通過燃料並燃燒；而不同的氣體燃料燃料有不同的燃燒反應速度，不同的反應速度必須搭配不同的燃料輸送速度，從(圖 1.2)之丙烷的燃燒反應快慢，當然料的輸送速度比燃燒反應速度慢時，則會有逆火 flah back 的危險現象發生如圖上裡 1 的曲線，在實驗的過程中為了求安全都會在管路中裝上 1~2 個防逆火裝置；若氣體燃料輸送速度遠遠超過燃燒的反應速度，整個火焰根部完全跳離噴嘴而被吹熄如圖上裡 4 的曲線，輸送速度與燃燒反應速度達平衡時，整個火焰則呈現穩定狀態，如圖裡 2、3 的曲線。

某些特殊功能噴嘴所噴的火燄因為它們只能依附在邊界附近或一個點，所以常常容易受到周遭的流場干擾，讓最前端的火燄搖曳不穩定而且會有氣音產生，為了補償上述缺陷而發展出 Mach-Hebra 噴嘴提供相同平穩速度的火焰，他前端壓縮的邊界會降低氣體流出的穩定性，但可以使用外加側面導入氣體補償，再擴散至邊界層前來增加燃燒速度，比如說外加壓縮空氣導入或者與助燃氣體混合燃燒，因此會有固定的火焰在噴嘴的邊緣，一般來說氧氣最適合達到這樣的目的，這樣子火焰的結構更為紮實，不易受環境而飄動，(圖 1.3)為其中一種的噴嘴設計[5]。

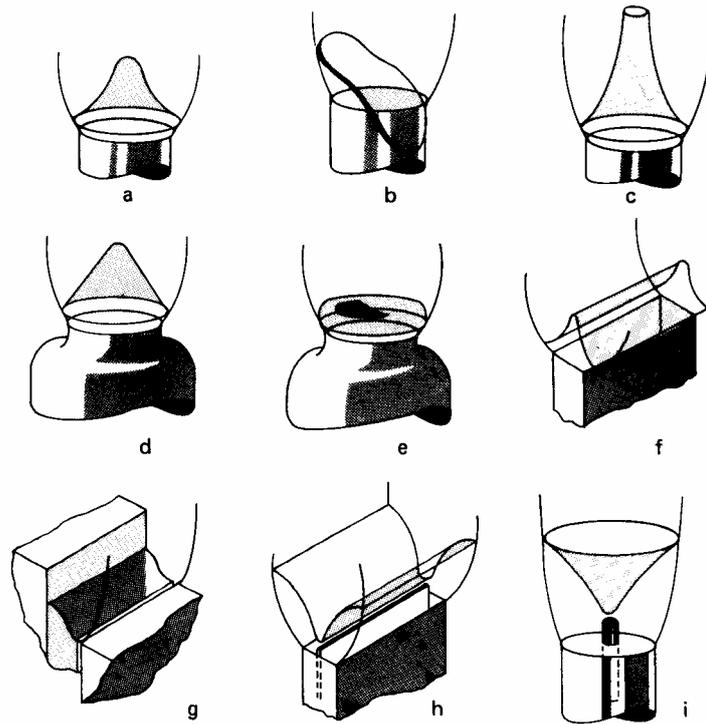


圖 1.1、各噴嘴所得的火燄形狀：(a)拋物線流；(b)噴嘴出口偏燄；(c)前端吹穿；(d)定速噴嘴火燄；(e)低速噴嘴火燄；(f)“帳篷形”火燄矩形噴嘴；(g)狹縫式噴嘴；(h)反帳篷火燄噴嘴；(i)反圓錐形火燄 [4]

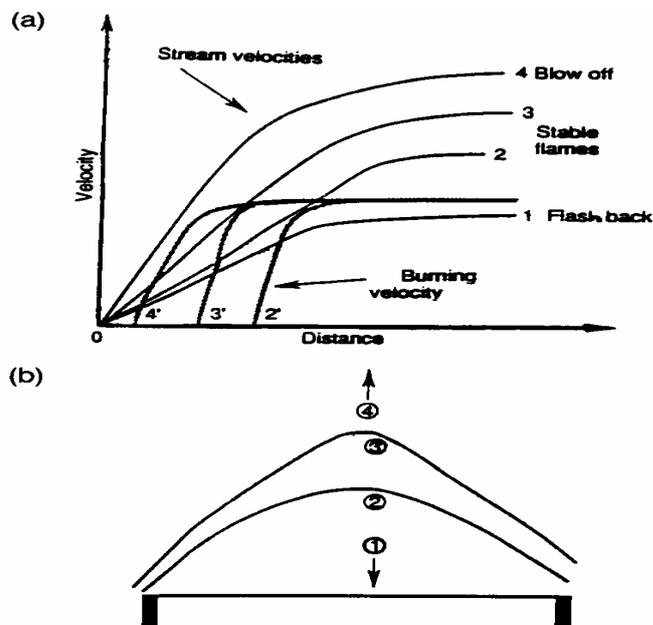


圖 1.2、(a)局部靠近噴嘴的丙烷氣體速度與燃燒速度；(b)有關火燄個種形狀[4]

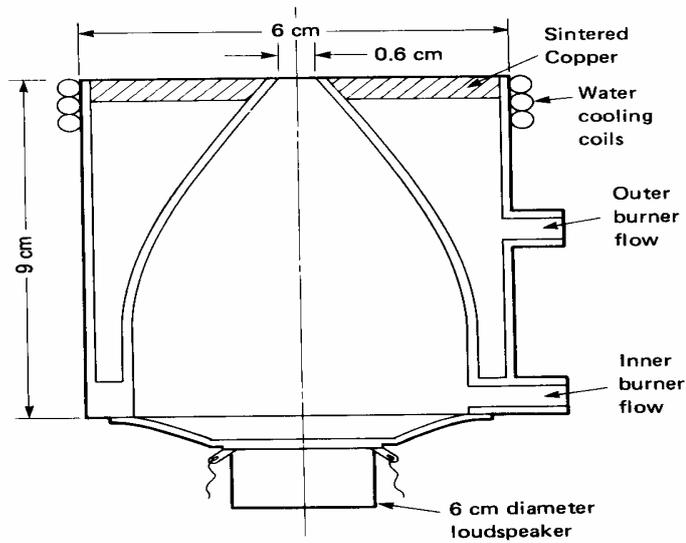


圖 1.3、同軸噴嘴研究 flow-flame 間互相影響[5]

### 1-3 文獻探討

噴嘴中以常見的本生燈為例(圖 1.4)，燃料氣體由底部基座噴出，然後再以另一入口注入空氣，兩氣體在管中因 Venturi 效應在管子中流動時預先混合；圖中內焰的部份是反應區是預混合火焰，外焰的部份屬於擴散火焰，因為本生燈的方式屬於燃料過剩的狀況，因此是不完全燃燒的狀況，為了改善不完全燃燒的情況，則可以加入氧氣的方式使其充分燃燒，但在有充足的助燃氣下燃燒反應相對增加，因此需要注意逆火的產生[6]。

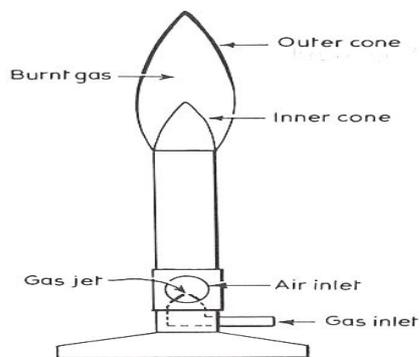


圖 1.4、本生燈 [6]

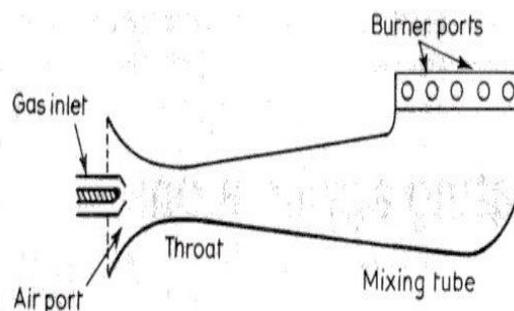


圖 1.5、家庭或工業用燃燒器[6]

而傳統家庭或工業所使用的燃燒器(圖 1.5)，噴嘴的大小、空氣口的大小與管路系統配置等等，都是需要知道所使用的環境條件、使用方式與所選用的燃料特性而做調整[6]。

在特殊用途的大型噴嘴設計上，出口面積上加大了許多，目的在於增加了燃料的出口流量為了讓溫度提高，由於溫度提高了許多，基於長時間使用與保護噴嘴的理由，故在大型的噴嘴中導入了冷卻系統的概念，這樣的一個設計提醒了我們不管是使用任何耐高溫材質作為噴嘴的材料，長期在高溫環境使用，會造成材料上的潛變破壞降低噴嘴的使用壽命，甚至有發生爆炸的危險；而在其他的相關文獻中發現[7]，為了嘗試各種讓火焰細薄的方法常常無法使溫度達到預定的要求而失敗，有些還因為預混合空間過大的問題而發生逆火；以往火焰拋光實驗的噴嘴雖然有試片成功的經驗[8]，但是礙於無冷卻的機構導致無法長時間連續加熱，如(圖 1.6)之噴嘴，每作完一次實驗都需要靜置待噴嘴冷卻才能再進行下一次的試驗，因此在新式噴嘴的功能上期望引入了冷卻的機構設計，在設計之前先以理論假設的方式找出帶走熱的最佳值。



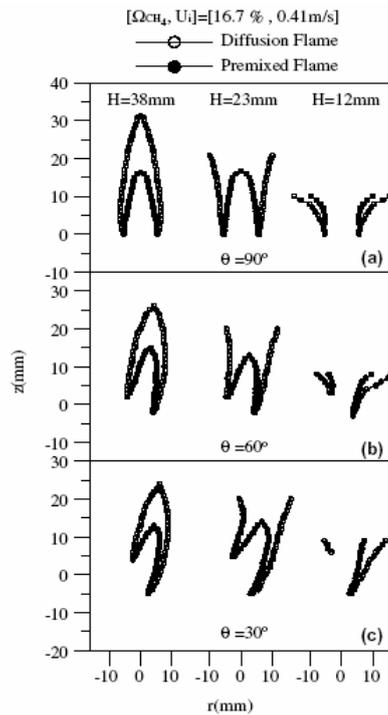
圖 1.6、無冷卻系統之噴嘴[8]

在有關噴嘴的文獻裡[9]，從噴嘴噴出的擴散面積作最佳化理論分析，以氣體的流速壓力等條件，再以一個目的函數求得氣體噴離噴出口最小的面積，此方法可以精確的得出火焰噴的截面積大約有多少，可是外在的因素如溼度、熱對流、與擾亂的氣流等等，都會干擾所呈現的現象，且無法得知火焰的溫度與穩定度。另外還有噴嘴型狀雖然是橢圓形的設計[10]，重點在於如何以最佳化的方式設計出比較合理的形狀，可以使得噴出的流體更能達到想要的目的。

燃料的流量影響著火焰，由於混合氣體濃度以及質量流率的不同，造成燃燒釋放的能量亦不同，從參考的文獻中[11]，以等比例的燃料與助燃氣體混合燃燒為基準，把燃料/氧氣的比當成 $\phi$ ，當 $\phi$ 大於1時表示燃料過多無法達到完全燃

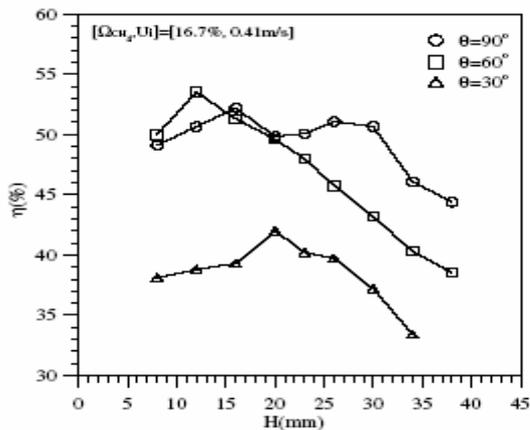
燒，當 $\phi$ 小於1時燃料的量不足以致於產生的溫度不夠高，而依照火焰的外觀與顏色可以判別其混合狀況，孫泊寧對一高負荷燃燒器的研究中[12]，可將火焰型態分為黃色火焰、焰尖黃、藍焰、紫焰、飄焰及火焰吹熄。黃色火焰是由於燃料過剩，預混氧氣不足，所以過剩的燃料在火焰上端和外界空氣形成擴散火焰。而後增加氧氣流量，火焰形成焰尖黃，此時底部已有預混和火焰的特徵，即錐狀火焰面的出現，但氧氣仍不夠，所以在頂端仍有黃色擴散火焰出現。隨著氧氣量的增加，火焰整體是藍色而明亮，此即為藍焰，此區域內完全為預混火焰，入繼續增加氧氣量，火焰面開始擴張拉伸，此時整個火焰變成紫色，且火焰高度比藍焰時短很多，紫色的火焰會隨著氧氣流量增加而變得黯淡不穩定。而氧氣增加到了某一個程度後，火焰開始跳脫，形成飄焰，最後火焰會被不斷增加的氧氣所吹熄，因此在玻璃的火焰拋光過程中燃料的控制關係著拋光結果的好壞。在使用噴嘴的過程中逆火現象也是不容忽視，尤其當噴嘴往下至某一特定角度時特別容易發生，除了人員操作上的安全也關係著噴嘴的使用壽命，從蔡文祥在研究噴流衝擊火焰結構文獻得知[13]，在相同的噴嘴角度之下，當噴嘴出口流速增加時，火焰向下游擴散長度及火焰之厚度會隨著增加，並且會產生火焰衝擊回談現象，火焰向下游擴散的長度會隨著角度的增大而縮短；向上回火的情形卻相反，與水平夾角越大，回火的情形越嚴重，這與我們現階段的火焰拋光系統是很大的打擊，新一代的系統將受損的玻璃水平放置在履帶上，噴嘴以傾角向下噴，所以在防回火的部分需加強。

而當火焰以一個角度衝擊一平面時，整個溫度場的分佈都不同，Shuhn-Shyurng Hou 與 Yung-Chang Ko 對火焰與受熱面的加熱高度還有與垂直高度成一角度時的熱效益[14]，火焰的結構不但與傾斜角有關且與加熱高度有關(圖 1.7)，而溫度的分佈與火焰結構有關，且熱效益並非在垂直燃燒的時候發生，是當傾角 60 度、加熱高度 12 mm 時有較高的熱效益(圖 1.8)，隨著加熱源與受熱面的減少，熱效益會由小漸增至極大在逐漸變小；傾斜角度從垂直至傾斜，熱效益也是漸增至極大後遞減。



Various flame structures as a function of oblique angle and heating height: (a)  $\theta = 90^\circ$ , (b)  $\theta = 60^\circ$  and (c)  $\theta = 30^\circ$

圖 1.7、火焰結構與角度、高度關係[14]



Thermal efficiency as a function of oblique angle and heating height.

圖 1.8、在不同條件下的熱效益[14]

L.C Kwork, C.W. Leung, C.S. Cheung [15] 主要是比較單孔與多孔狹縫火焰噴流的熱傳特性，並與圓孔噴嘴做比較。在多狹縫噴嘴實驗中(以三個狹縫噴嘴作代表)研究的重點在於狹縫間距與燃燒高度所表現的熱通量。隨著噴流間距加大與噴流與加熱面距離加大，則火焰彼此間的引響減少，heat flux 最小的地方並非發生在兩焰交會的地方，而是偏向外側的噴焰，反而兩焰之間的 heat flux 最大(圖 1.9)，這樣的資訊可以讓我們在改進噴嘴的設計時，可以注意到噴嘴與火焰加熱時的現象，讓新式的噴嘴在線加熱上能達到更均勻。

C. E. Baukal 與 B. Gebhart 以天然氣與氧氣預混和燃燒火焰打在不同材質與處理的金屬板子，其中有經過拋光過的金屬、未經處理的金屬與表面塗黑的金屬，做有關熱對流、熱輻射還有熱化學熱釋放[16]，結果可以看出經過拋光處理的金屬有最低的热通量（圖 1.10），由上述的結果對於熱輻射的影響很大，因此在選用材質時以容易切削材料作為基材，可以很精確的達到經度水準，在防止輻射熱的方面則在靠近火源的地方磨光或者塗上反輻射熱的材質，可以大大減少噴嘴對熱的吸收。

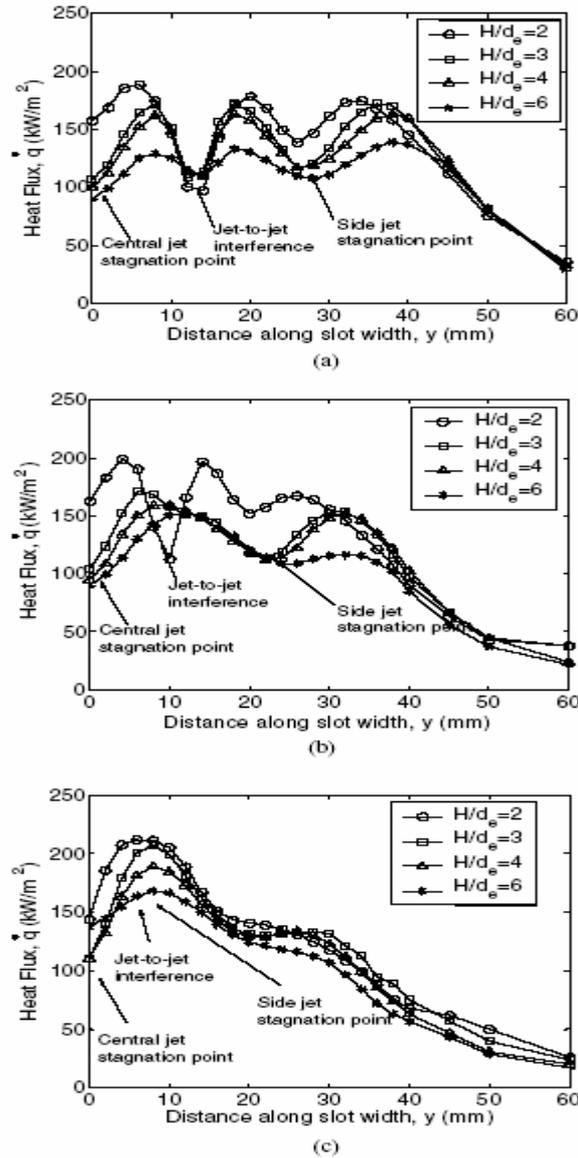


圖 1.9、噴嘴間的距離與 heat flux 分佈狀況 (a)  $s/d=3$  (b)  $s/d=2$  ( $s/d=1$ )  
 註： $s/d$  表示噴嘴間的距離/噴嘴出口直徑[15]

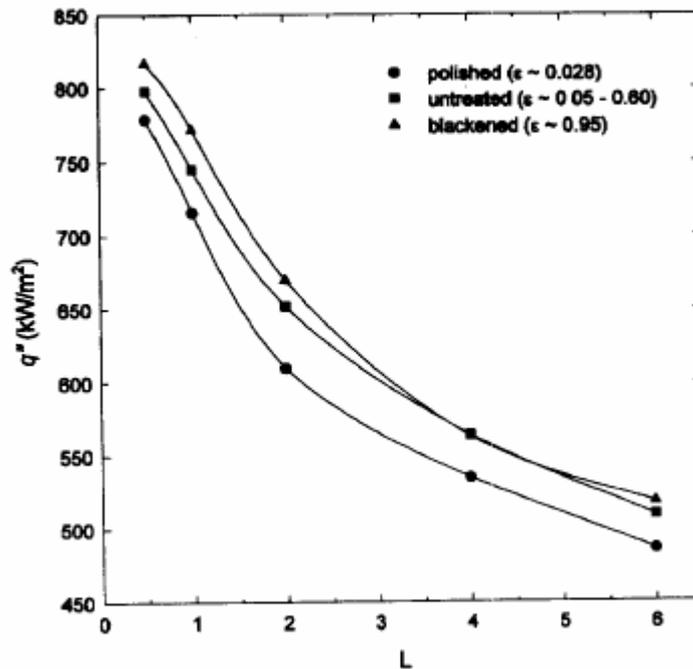


圖 1.10、氧氣與天然氣混合焰衝擊在半圓試片上的總熱通量  
( $\varepsilon$  : 熱輻射係數)[16]

## 1-4 、研究方向

經由前述的一些文獻上與技術上的缺陷，首先要了解火焰的特性，燃燒是件非常複雜的反應，氣體燃料在通過噴嘴的截面積到開放空間燃燒，因為噴出的速度、面積形狀、燃燒時的變化與氣流間的彼此干涉都對火焰的形狀控制有相當大的影響，以單排孔的噴嘴設計(圖 1.6)，孔與孔所噴出的火焰會有相互吸引現象，會導致火焰前端有如波浪一般的形狀，這樣的現象會導致加熱時的不均勻，火焰波峰的部分溫度較高，波股的溫度較低，兩者間的差距將近  $100^{\circ}\text{C}$  以上 [15]，一般的觀念認為波峰值會在出孔處，但經由前人的研究得知峰值卻是在兩孔之間，由此可見燃燒現象也有類似疊加的效果，所以要了解燃燒的現象才有辦法設計出想要火焰燃燒的方式。

新一代的火焰拋光系統，在噴嘴的效能、使用方式與尺寸上有所不同，期望能達到隨使用者需要的尺寸大小來任意增加或減少噴嘴的長度，而不需要再重新定做新的噴嘴，若能達到此目的，則在玻璃拋光業上的貢獻則可以讓業者省下許多成本在製做新的工具，且加入冷卻機構更能提高噴嘴的使用壽命，自動點火的功能使操作者遠離火焰，讓人員操作上更加安全，整體系統達到半自動化的生產功能；此外在學術上則可以提供整個系統的燃料流量、噴嘴的孔徑孔距之間的關係如何影響火焰的形狀，如何使得溫度的分布更加均勻。

在新的噴嘴功能能夠達到使整片玻璃重新局部熔融的狀況下，來修補玻璃表面部分所產生的刮痕且透明度不改變，進而把此技術應用在各式樣的玻璃，如此一來可以省下大量成本能源來重新製作玻璃；改善操作上的困度，讓需要用到大量玻璃的業者，能更快的將玻璃回到原有的透明度。

噴嘴是整個實驗重要的工具，因此設計規範的界定，乃按設計實際產品的屬性需求而定[17]，因此設計的架構是產品設計者構想考量的主要條件，依照規範則噴嘴設計流程如下

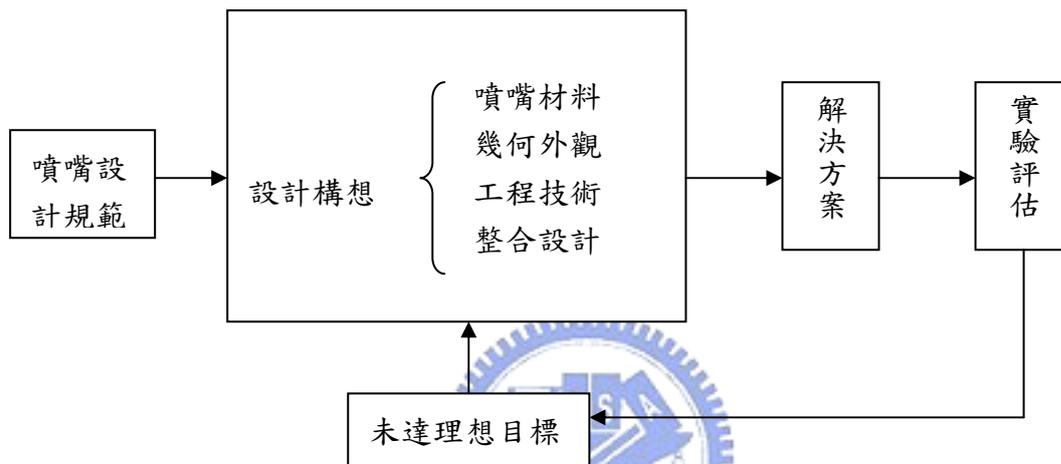


圖 1.11、噴嘴設計流程圖

## 第二章 新噴嘴的要求與設計

### 2-1 引言

噴嘴在火焰拋光的作用在於提供穩定的火焰，與溫度分佈均勻的火焰，想要得到符合需求的火焰形狀則需要對噴嘴、燃燒器有所了解，火焰的厚薄變化不但與壓力有關，且流體與噴嘴出口壁面的黏滯有關，因此研究火焰對玻璃刮痕消除的實驗需要先研究噴嘴、壓力量測元件、與流量量測元件，以上實驗設備都對火焰的結構有所關聯，尤其是流體在混和室裡的混和狀況和流體在流道的流體力學都是相當重要的因素。

過去的單孔圓形噴嘴實驗研究出[18]，火焰反應區厚度的最小尺度是噴嘴口徑半徑的3倍長度，在此區域的火焰較為穩定，但缺點溫度較低，而氧氣的加入增加了此區域的燃燒溫度；孔與孔噴射火焰之間的交互影響會降低熱傳率抑制燃燒，當噴孔與受熱面的距離很小且孔與孔之間的距離能夠讓火焰間的干涉減小時此干涉的狀況將會使燃燒狀況變強[19]。了解火焰的結構大致會發生什麼樣的改變，有助於噴嘴的外型設計。



### 2-2 新式噴嘴的需求

任何一種新產品的設計，需要經過產品設計流程進行，因此在設計新式的噴嘴時，需要瞭解實驗（市場）的需求然後再進行討論系統設計，進一步再對細部零件做設計，因此我們討論新式噴嘴訴求與牽涉的關鍵。

起出對拋光中玻璃破裂的原因並不確定，但後經由 ANSYS 軟體分析後得知在加熱不均勻的狀況下發生破裂，而直立式拋光的情形中由於熱對流的關係使得靠近上邊緣的火焰溫度較高，為了避免燃燒時的不均勻則在預混時就必須將混合氣體均勻分佈，且要防止內部壓力的不足。

已知拋光技術為可行性因此在實驗的玻璃尺寸必須加大，期望在未來的機台能真正處理市面上的受損玻璃，所以載噴嘴的加熱範圍就必須增加，在增加的過程中必須瞭解噴嘴製作的可行性，尤其噴孔是噴嘴整體的核心，若核心一失敗則火焰拋光就算失敗此外高溫的作業環境對噴嘴的使用壽命不利，所以要在短時間內降低噴嘴溫度勢必要的訴求。要達到能處理大量的玻璃，自動化的系統能夠快速安全的輸送氣體並完成點火是新一代噴嘴努力的目標，取代過去以點火槍的方式點火。

## 2-3 新式噴嘴的設計對策

### (1) 火焰溫度均勻

火焰溫度均勻與否為本實驗最主要之需求，若不均勻的加熱溫度，則施於玻璃上之熱源分佈不同，容易使加工之直線上溫度分佈不勻，內部產生差異很大之應力變形，造成玻璃破碎。分成以下七點來探討：

#### A. 噴嘴孔徑、孔距均勻

- 孔徑、孔距均勻，才能使噴出之氣體整體分佈均勻，火焰在同一時間平均分佈於欲處理的直線上，才不會有玻璃受力不均發生破裂之情況。

#### B. 狹縫式噴嘴

- 與小孔式的噴嘴相比，狹縫式噴嘴噴出之氣體較為均勻。而且若是狹縫內兩平面可分別加工再接合，可以產生非常平滑的兩個平面，較容易製造。欲使用陶瓷材料時，因其不易鑽孔加工，或要加工的工件尺寸過長，導致加工不易時，可選用此種設計。

#### C. 孔距細

- 孔距越細，則趨近於狹縫式噴嘴的樣式，能使火焰較為均勻。最佳的孔距需要進行實驗來求出，從前面文獻可知火焰之彼此的干涉會影響 heat flux 的分佈，所以從邏輯上推論只要噴孔彼此間的距離夠近，則火焰分佈的差異可以降至最低甚至抵銷。

#### D. 氣體混合均勻

- 氣體混合均勻後再從噴嘴噴出，才能讓火焰燃燒呈均勻分佈。可考慮設計讓氣體能足夠混合的空間，抑或是預先混合充足後再進入噴嘴，但預混和是回火的危險因子，安全設計上則需加強。

#### E. 氣體壓力、速度分佈平均

- 氣體壓力需保持固定，才能使氣體向外噴出之流速一定，且適當的流速壓力可以防止回火的現象，噴嘴和玻璃之間距離固定即可連續工作。對於整個噴嘴出口處，氣體壓力、速度也需要平均，才能達到施於玻璃上的整個直線部份的熱皆相同，因此內部流道加工粗糙度包括噴孔的大小一致性有很重要的影響。

#### F. 氣體噴出一段距離後會擴散，影響到火焰

- 孔徑細則可使得氣體流出後的形狀趨近直線，不容易以扇形擴散，使火焰能集中於欲工作的點上。雖然孔徑細可控制氣體較不易擴散，但噴出一段距離後，終究仍會散開，此現象亦需考慮。在放置噴嘴和玻璃時，讓玻璃放置在距離氣體會有明顯擴散的位置之內。

#### G. 減少垂直方向熱對流

- 因熱對流之現象，火焰會有向上移動的情況，使火焰不能集中固定在

所要工作的直線上，可能有以下幾種應變方式：

- a. 噴嘴朝上或朝下
- b. 對火焰進行導引
- c. 利用上下溫差阻止熱向上
- d. 控制氣體噴出速度
- e. 玻璃放置在熱對流變大之內的距離

## (2) 氣體速度加快

氣體噴出速度需大於火焰燃燒速度，以防止逆火，若逆火則可能導致爆炸。因此讓孔徑尺寸和氣體壓力相互配合，達到最佳之氣體流速。

### A. 噴嘴孔徑由大變小

讓氣體經噴嘴之後，能夠更進一步的加速。但可能會使噴出之氣體形狀呈扇形噴出，非理想中的直線。

### B. 最佳孔徑

確定所需氣體流速之後，配合氣體壓力計算出最佳孔徑。

### C. 可調整式孔徑、壓力

孔徑、壓力可依每次工作所需加以調整，以調整氣體流速。

## (3) 耐熱

防止材料因過熱而熔融變形。

### A. 使用耐高溫材料

鈦、Inconel、鎢、陶瓷材料……等熔點較高之材料。

### B. 冷卻系統

在噴嘴靠近火焰的地方，加上水冷設計以降溫。

### C. 氣體由下向上噴。

先前講過的原理，熱氣會向上升，若氣體為向上噴，則可或多或少減少熱氣和噴嘴的接觸。

### D. 反射輻射

將噴嘴前端靠近火源的部分拋光或者塗上一層反輻射材質減少噴嘴吸收輻射熱而增高溫度。

## (4) 防止逆火、爆炸

逆火為極需避免的問題，若燃燒反應速度大於氣體出口速度，火焰會進入噴嘴內，氣體在噴嘴內部燃燒，造成內部壓力升高，進而產生氣爆。基於安全的考量，應致力於防止火焰進入充滿混合氣體之空間內。

### A. 燃燒漫延速度及氣體流速

氣體速度需大於氣體燃燒漫延速度，避免燃燒過快產生逆火。

### B. 可控制爆裂設計、安全閥

若發生逆火，在噴嘴產生強烈爆炸之前，由某處些微爆裂排出噴嘴內部氣體，降低內部壓力，為安全之設計。

C. flame arrester 防止逆火器

氣體燃燒之火焰向前接觸到玻璃後，會有反射的現象，導致火的方向朝向噴嘴，防止逆火亦可減低逆火發生之機率。

D. 強固設計，絕不爆裂

與第 2 項相反之觀點，加強噴嘴之強度，就算內部壓力升高亦不會有爆炸的情況產生；抑或加入細密阻隔網，當火焰回燒遇到此網則無法再繼續延燒至。

E. Fuel/ O<sub>2</sub> 分離式設計

兩氣體混合時的狀態非常不穩定，使用分離式設計，氣體離開噴嘴後才進行混合，可避免火焰進入預混室產生爆炸。

(5) 噴嘴長度可調整

針對不同尺寸的玻璃，可彈性改變噴嘴長度，不需因為玻璃尺寸不一，而各別製造不同長度之噴嘴。

A. 積木式

各組件分別製造，中段部份為許多相同之小塊，視所需長度加上中間件調整噴嘴。

B. 可控制開關式

預先製造成較長之噴嘴，分成許多小段，由開關控制其是否進氣，視所需長度調整噴嘴。

C. 延伸式

可視所需長度伸長或縮短，可做細微的變化，沒有每段長度固定的缺點，但氣密性問題有待解決。

(6) 火焰細、火焰溫度高

A. 孔徑細與氣體流出量之配合

火焰溫度高所需氣體量較多，但火焰細則限制了氣體噴出量的多寡，因此兩者需做到最佳的配合。

B. 增加氣體噴出速度、壓力

若速度、壓力皆增加，則可解決火焰細造成之氣體噴出量太少而溫度不夠的問題。

(7) 防止孔洞內溫度升高

孔洞為最接近火焰之區域，也最容易吸收熱量使溫度升高，若孔洞內溫度若太高，可能造成噴嘴變形。

A. 隔熱設計

直接阻止熱源接近噴嘴，讓噴嘴溫度不會升高。

B. 反射輻射熱

將熱能反射出去，噴嘴不會加以吸收。

C. 塗隔熱材料

比如太空梭外面都貼上耐摩擦隔熱的材質，可防止熱傳導的熱量。

(8) 可製造

設計時需進行考慮，設計之噴嘴是否容易製造，尤其在細微的噴孔加工部分較為不易，此項亦為基本需求之一。

經整理簡述如下(表 2.1)

表 2.1、新式噴嘴需求與牽涉的關鍵

需求	相關問題與關間鍵
均勻的火燄	 <ul style="list-style-type: none"><li>(1)孔徑、孔距均勻</li><li>(2)孔與孔間的距離要適當的緊密</li><li>(3)以狹縫式的噴嘴呈現</li><li>(4)氣體混合均勻</li><li>(5)混和氣體壓力穩定與速度分佈</li><li>(6)避免氣體離開噴嘴時擴散紊流的問題</li><li>(7)減少火焰的熱對流</li></ul>
火燄速度	<ul style="list-style-type: none"><li>(1)燃燒速度【燃料的種類與助燃氣體的混合比】</li><li>(2)孔徑與壓力的搭配調整</li><li>(3)經由計算得出所須壓力、孔徑再將此寸規格定出</li><li>(4)考慮使用流量調節器的結構</li></ul>
耐高溫	<ul style="list-style-type: none"><li>(1)選用耐溫才材料【例如：陶瓷、鎳合金、鈦合金(不易加工)】</li><li>(2)加入冷卻液</li><li>(3)改變火燄的方向</li><li>(4)外部塗上隔熱材質(防止熱傳導)</li><li>(5)表面塗上反輻射的原料</li></ul>

<p style="text-align: center;">安全性</p>	<p>(1)引入安全閥的觀念或只准在特定方向爆裂</p> <p>(2)加入防逆火氣器</p> <p>(3)以單閥原理為依據</p> <p>(4)強固設計決不爆裂</p> <p>(5)燃料與助燃氣不預先混合燃燒</p>
<p style="text-align: center;">可自由改變噴嘴長短</p>	<p>(1)積木組合方式：各組件分別製造，中段部份為許多相同之小塊，視所需長度加上中間件調整噴嘴</p> <p>(2)延展伸縮方式：可視所需長度伸長或縮短，可做細微的變化，沒有每段長度固定的缺點</p> <p>(3)可控制開關式：預先製造成較長之噴嘴，分成許多小段，由開關控制其是否進氣，視所需長度調整噴嘴</p>
<p style="text-align: center;">可製造性</p>	<p>所選用的材料要能夠易於製造細微的內部流道</p>

## 2-4 噴嘴設計的可能方案

從前節的討論與製造可行性有下列方案

1. 積木式狹縫噴嘴：此噴嘴在加熱原方面可以達到線加熱方式，因此火焰的厚度方面可以變得更薄，使得拋光中的玻璃不易因為加熱不均而破損，且如此係密的狹縫在火焰逆火的過程中被阻擋；加入的水冷系統降低實驗過程中所吸收的溫度，當實驗室噴嘴模型拋光成功時，則可以增加噴嘴長度處理更大號的玻璃。
2. 分段控制開關噴嘴：此噴嘴較類似第一代噴嘴，以孔列方式製作，也因為類似第一代噴嘴，所以在火焰均勻度與溫度分佈上不需擔心太多，目的在於控制燃燒此吋的可行性；噴嘴也加入水冷，尤其在多段燃燒時所產生的熱量相當大必須藉由水來帶走溫度。
3. 延展伸縮式噴嘴：此噴嘴因為有自由伸縮性，故無法在本體上加入水冷必須在本體外加水冷，而此噴嘴最大的困難在於製造與安全，有了伸縮的功能在氣密上必定會發生問題，若能克服此問題族不需遷就是面上玻璃此寸另外設

計噴嘴。

## 2-5 燃料的種類選擇

在玻璃刮痕消除實驗中，選則不同的燃料做實驗，會使得時實驗的參數(玻璃與噴嘴間的距離、燃料的比例…等等)有所改變，其主要原因在於不同的燃料燃燒所產生的燃燒熱有所不同，隨著產生的溫度不同在噴嘴的設計上材料的選擇有所不同，燃料的價錢也會有所差異，因此在燃料的選則上要針對玻璃性質選則較合適的燃料，在下面的內容中從初始燃料產生的熱量做分析比較到燃料的選擇。

氣體燃料的燃燒中，由於燃料與氧化劑都屬於氣態，是屬於一種均相燃燒。根據燃料是否預先混合，又可以把均相氣體燃燒分為兩類：一為預混燃燒，其特點是將燃料與氧化劑照一定的比例先進行預混，形成可燃混合氣後再進行燃燒。另一類為非預混和燃燒，其特點是燃料與氧化劑在初始狀態時，是處於分離的狀態，並未預先混合，直到離開燃燒裝置後，才一邊進行擴散混合，一邊進行燃燒，此方式的燃燒較安全，不會有逆火的現象發生，但有混合不均的情況下就發生燃燒。無論是預混燃燒或擴散燃燒，其主要目的是希望從燃燒的過程中獲得能量，將這些能量來使受損玻璃表面拋光。

要進行玻璃表面刮痕消除首先要知道所要加工的玻璃材質，不同成分的玻璃軟化溫度也不同，進而知道要使玻璃表面熔融所需要的溫度，有了這些條件後針對較佳的燃料進行選用，而在實驗階段所使用的玻璃樣本屬於平板玻璃，平板玻璃的主成分矽砂  $\text{SiO}_2$  (70~73%)，其他則含有鹼  $\text{R}_2\text{O}$  (13~15%)、石灰石  $\text{CaO}$  (7~12%)，平板玻璃的軟化溫度在 720~730°C 間，但不同成分的玻璃其軟化溫度也有所不同；有了前面的介紹，因此對市面上常見販賣氣的特性進行分析如下(表 2.2) [20]：

表 2.2、各氣體的特性（資料來源：聯華氣體、經濟部技術處、工業技術研究院能源與資源所）[20]

氣體種類 物理性質	可燃含量 %(20°C， 101.325kPa )	與氧混合 燃燒時火 焰溫度 (°C)	與氧混合 燃燒時火 焰速度 (m/s)	與氧混合 燃燒時燃 燒熱 kJ/ m(高)
丙烷	2.2~95	2820	3.31	134228.8
甲烷	5~15	2810	3.9	39873.52
乙烷	3~12.4	2815	3.45	70542
氫	4~74.5	2830	14.36	12761
乙炔	1.7~11.7	2187	7.5	13000

本實驗所使用的方法是以燃料與助燃氣(氧)混合燃燒，其主要的目的在於使燃料能夠完全燃燒，能穩定的達到工作的溫度，並且越能夠使得火焰穩定輸出；由(表 2.2)中可以發現這些氣體皆可達到工作的溫度，其中氫氣、乙炔活性大且混合火燄速度過快流量不易控制，容易發生逆火，加上此類氣體若燃燒不完全時易產生 CO 氣體與大量的黑煙，因此暫時排除這些氣體的選擇；而剩下的烷類又以丙烷與氧混合產生較高的溫度，故目前以丙烷為本實驗的主要燃料。實驗用的氣體由聯華氣體所提供，丙烷以 20 公斤裝的鋼瓶規格，氧氣(純度 99.6%)以 135 kg/m<sup>2</sup>，40L 裝的氣樽規格。

## 2-6 燃料的需求估計

從過去的文獻資料參考 [21]，其壓力流量的數值，實驗過程中混合氣體在通過噴嘴的截面時，丙烷燃料的體積流率 6.0 L/min 而氧氣的流量約為 20.4 L/min，在室溫 25°C 的條件下混合比約為 1:3.4，由上述的資訊所量到的火焰最高溫度為 1750°C，而當時的燃料出瓶壓力 10 psi 氧氣的出瓶壓力設在 20 psi；要達到實驗目的流量並非只有一個固定的流量值，而是有一個合適的區間範圍，丙烷的流率範圍約為 1~8(升/min)、氧的流率範圍約 3~28(升/min)，從最佳的燃燒狀況而言，燃料與氧的混合比約 1:3~3.5，有了這些參考數據在可以讓

實驗有重複操作的可能性，可以免去嘗試錯誤的次數。

由於實驗設備的燃料系統與文獻上不同，因此在流量的範圍參考上需要做些變動，文獻中系統在流量計兩端並聯一個針閥，現今的實驗接法則不採用針閥，如此一來在流量的限制上就不可以使用較高流量，固在使用上丙烷的流量範圍 1~7(升/min)、氧的流率範圍約 3~21(升/min)，混合比例依然維持燃料與氧的混合比約 1:3~3.5 得的原則；目前實驗中始用的流量丙烷 2 升/min、氧氣 6 升/min 在這樣的流率下所產生的最高溫度約為 1550°C，這樣的溫度以經超過玻璃理論的軟化溫度，因此發生玻璃大區域軟化現象並非想要的理想(玻璃加熱表面約 0.05~0.1 mm 融溶)，若溫度不夠高(500~800°C)玻璃發生黏彈性值時，只要溫度分佈一不均勻，很容易使之發生裂，因此在加溫玻璃的溫度需在 900~1300°C 左右。

在溫度的須求預估上需要知道以下的條件

- 刮痕的平均深度  $d(\text{mm})$  : 0.127
- 熔化的厚度  $t(\text{mm})$  : 0.15
- 玻璃的密度  $r(\text{g}/\text{cm}^3)$  : 2.5

上述的條件大多為平均值，依每一次玻璃的括痕不同成份不同而有所差別；

在定壓得條件下比熱的公式表示如下 [22]

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p \quad (1)$$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (2)$$

其中  $h$  : 焓

$S$  : 熵

$c_p$  : 定壓下的比熱

因此在任意溫度玻璃比熱如下

$$c_{p,T} = \frac{0.00146T^2 \sum a_i p_i + 2T \sum a_i p_i + \sum c_i p_i}{(0.00146T + 1)^2} \quad (3)$$

$c_{p,T}$  : 特定溫度下的玻璃比熱

$T$  : 溫度

$a_i$ 、 $c_i$  : 玻璃成份常數

$p_i$  : 成份百分比

從室溫  $T_i$  上升至  $T$  所需的熱量  $dQ$  如下

$$dQ = mC(T_i - T) \quad (4)$$

從台玻璃公司所提供平板玻璃成份所知含有 75%SiO<sub>2</sub>、15%CaO、10%R<sub>2</sub>O，並參考(表 2.4)[23][24]則可得

$$\sum a_i p_i = 4.535 \times 10^{-4}$$

$$\sum C_i P_i = 0.167$$

與式(3)整理成比熱與熱量需求下(表 2.3)

表 2.3、特定溫度下的比熱與須熱量

溫度 T(°C)	比熱 C(J/K*g)	需熱量 dQ (J/m <sup>2</sup> )
500	4.705302549	146,625
600	5.058709271	162,333
700	5.338531348	174,525
800	5.563883764	184,179
900	5.748052701	191,954
1000	5.900505651	198,308
1100	6.028136852	203,567
1200	6.136063307	207,971
1300	6.228147634	211,694
1400	6.307349846	214,871
1500	6.375969183	217,604
1600	6.435813579	219,971
1700	6.488320503	222,036

表 2.4、平均比熱定數之計算

成份氧化物	$a_i$ 的值	$c_i$ 的值
SiO <sub>2</sub>	0.000468	0.1657
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.000453	0.1765
CaO	0.000410	0.1709
MgO	0.000514	0.2142
K <sub>2</sub> O	0.000335	0.2019
Na <sub>2</sub> O	0.000829	0.2229
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.000635	0.198
SO <sub>3</sub>	0.00083	0.189
PbO	0.000013	0.049

## 2-7 安全固定架的設計

有了實驗鋼瓶的建構，實驗室的安全是不可以忽略的，因此必須有能夠固定鋼瓶的器具使之不易傾倒，設計的首要工作是針對實驗的需求，故在設計鋼瓶的固定架上會有下列的要求。

- (1) 能夠很貼穩的將兩鋼瓶靠近擺置，不要使之搖晃或與隔壁氣平相撞。
- (2) 由於兩支鋼瓶的高矮不同，在以鏈條固定時不可過高或過低。
- (3) 輪子的大小要能夠承載所有剛瓶的重量，且輪子高低位置要適切，以利搬運時便利。
- (4) 整台推車的高度要符合人體工學，對不同身高的人來操作都要覺得便利安全省力。
- (5) 面板的大小位置要能夠方便隨時調整壓力與讀取數據。
- (6) 當上述要求功能都達到時再做些修改達到整體的美觀。

規格如下：

- 丙烷鋼瓶(20 公斤裝)：直徑 300mm，高 890mm
- 氧氣樽(40 公升裝)：直徑 220mm，高 1300mm

經過上述的功能需求與規格，而下(圖 2.1)是使用 solidwork 軟體所繪出的推車圖型

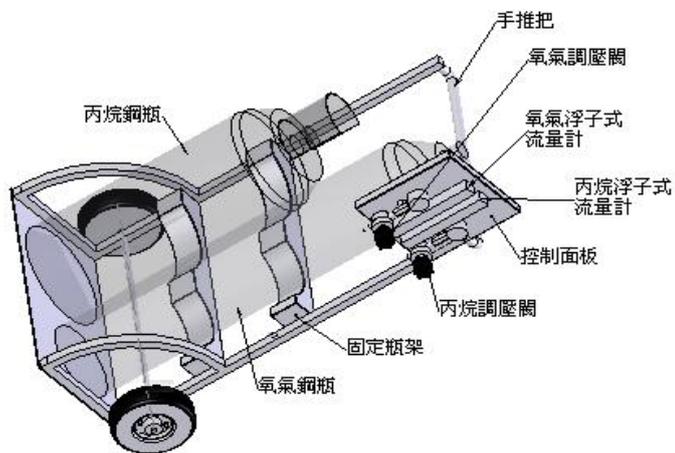


圖 2.1、剛瓶推車固定架

## 2-8 管線架構

氣體輸送的過程中管線的搭配也是一項重要的考量，每個環節都有他重要的意義在，在本實驗過程中由於所使用的壓力不大，噴嘴出口時丙烷所需壓力在約在 3~4 PSI，氧氣的壓力在 15~25 PSI 範圍，為了要達到此工作壓力因此需要有壓力計與流量計的配合。

從燃料瓶、與氧瓶出來所接的是第一次調壓閥，分別使用的是 LPG 錶出口壓可承受 0~40 PSI，MORES 電鍍雙錶進口壓 0~4500 PSI 出口壓 0~200 PSI；第二次調壓閥兩氣體都使用美製 VERIFLO 調整器、單段單錶使用壓力 1~100 PSI； $O_2$  與  $C_3H_8$  浮子式流量計皆使用美製 AALBORG，氧氣量測範圍 0~22 L/min 丙烷量測範圍 0~15 L/min；上數實驗儀器設備的系統簡圖如（圖 2.2）。

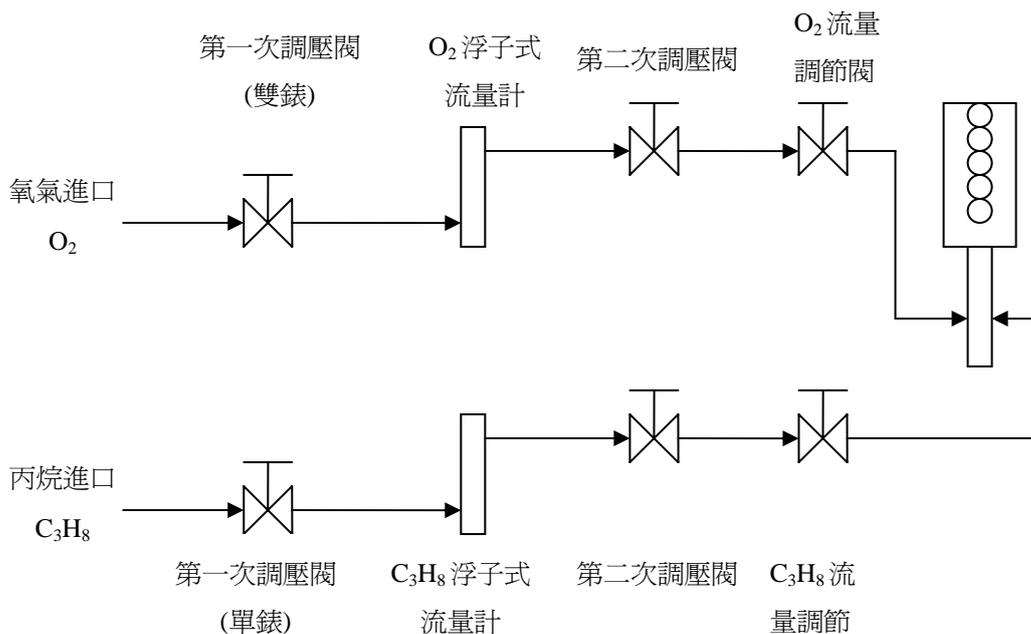


圖 2.2、系統簡圖

在實驗室裡最為廣泛用來量測氣體或液體的流率的設備就是浮子式流量計或可變面積式流量計，（圖 2.3）為兩種不同的流量計。

原理為：當氣體進入流量計，玻璃管內的浮子一直向上移動，直到氣體的浮力與浮球的重力平衡為止，當流率改變會使得流量計當的讀數不同，不管是哪一種浮子式流量計，其量測範圍最小從 1 ml/min 到最大 300 ft<sup>3</sup>/min 為有效精確量測[25]；在使用的環境上，壓力在 0.5~5atm 溫度從 0~150°C 都不算是不合理的使用條件，一般而言都是以室溫與常壓下經過校正，當然在特殊的實驗環境下多少還會有一點誤差可經由基本流量計計算方程式求得準確值[25]。

$$W = KD_f \sqrt{\frac{W_f(\rho_f - \rho)\rho}{\rho_f}} \quad (5)$$

W：重量流率

K：流量計參數（每支流量計照設計不同 K 值不同）

D<sub>f</sub>：浮子的直徑

W<sub>f</sub>：浮子重量

ρ<sub>f</sub>：浮子的密度

ρ：流體的密度

經由推導得到體積流率式子

$$Q = C \sqrt{\frac{\pi g}{2} \left( \frac{D_t^2 - D_f^2}{D_f} \right)} \sqrt{\frac{V_f (\rho_f - \rho)}{\rho}} \quad (6)$$

Q：體積流率

C：排出氣體係數（雷諾數與黏流關係式）

$D_t$ ：管子的直徑

$V_f$ ：流出的體積

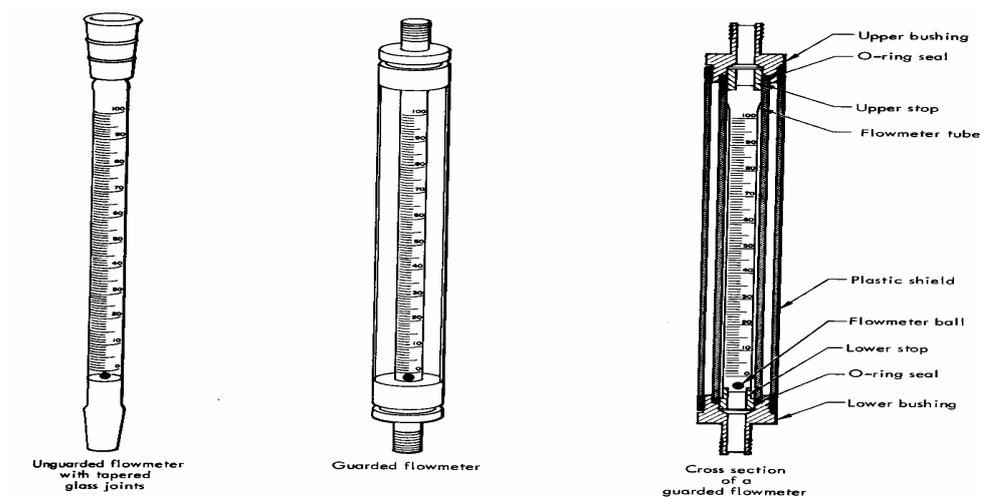


圖 2.3、左邊兩支為不同的流量計，最右邊為流量計的構造[24]

### 第三章 第二代噴嘴設計

#### 3-1 積木式噴嘴

考慮噴嘴基本需求加以設計，可視玻璃之大小改變其長度，前端為細長之狹縫，混合氣體由此處噴出，而後點火進行玻璃刮痕消除之工作，氣體於最後方兩邊分別進入空間內，進行混合，由於出口面積極小於進氣口面積，產生很大的壓縮比，使氣體加速，可防止火焰燃燒速度大於氣體速度，造成逆火，以免噴嘴有爆炸之危險。

後方空間中兩片擋板，欲使氣體產生較大的紊流，使丙烷和氧氣能更加充份的混合。上下兩組件互相扣住定位，避免發生滑移。組合方式構想(圖 3.1)，使用條狀板嵌入式固定，限制其左右之移動，上方亦使用壓塊加以固定，條狀板上每隔固定距離鑽孔，使每接一段長度，上方壓塊皆可對應到孔洞進行固定。圖示為連接上、下兩組件及中間組件兩件之組合圖。

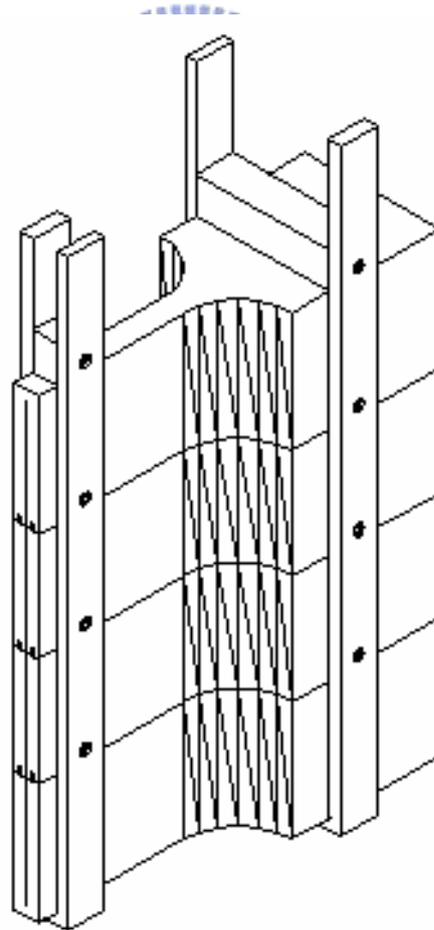


圖 3.1、積木式噴嘴組合圖

主要缺點：

1. 各部份零件製造不易，特別是噴孔的部分無法達到精度要求，且強度亦需考慮。
2. 後方氣體混合空間過大，若不慎真的發生逆火的情況，將導致很大的爆炸，非常不安全。
3. 組件接長之後，條狀板可能產生彎曲，無法精確定位，且容易向前、向後滑動。

### 3-2 可疊接積木式噴嘴(改進)

改善前面設計狹縫製造不易之設計，將中間部份組件分開來製造，磨成光滑表面後再加以接合減少加工上的困擾；而氣體改為預先混合後再進入噴嘴，進氣後之空間比前兩項設計小，減少混合氣體的量，避免發生逆火時爆炸力道過強，整個設計比前兩項設計安全許多。

而混合氣體空間縮小造成氣體進口出口之壓縮比較為降低，可能解決辦法為將氣體原先壓力調整到較大之值，如此則不需太大之氣體壓縮比即可達到防止逆火之成效。

狹縫長度縮短，參考已有之噴嘴其氣體出口細長孔長度，發覺前項設計之狹縫長度過長，為不必要之設計，因此加以縮短。噴嘴前端最靠近火焰，為防止溫度過高，挖孔加上冷卻系統，以水循環的方式進行冷卻；以上設計，為逐漸改進之設計，每一次新的設計皆盡力改前項之缺點，改變其中間件長度尺寸來符合進行實驗所使用的玻璃的寬度。（圖 3.2）

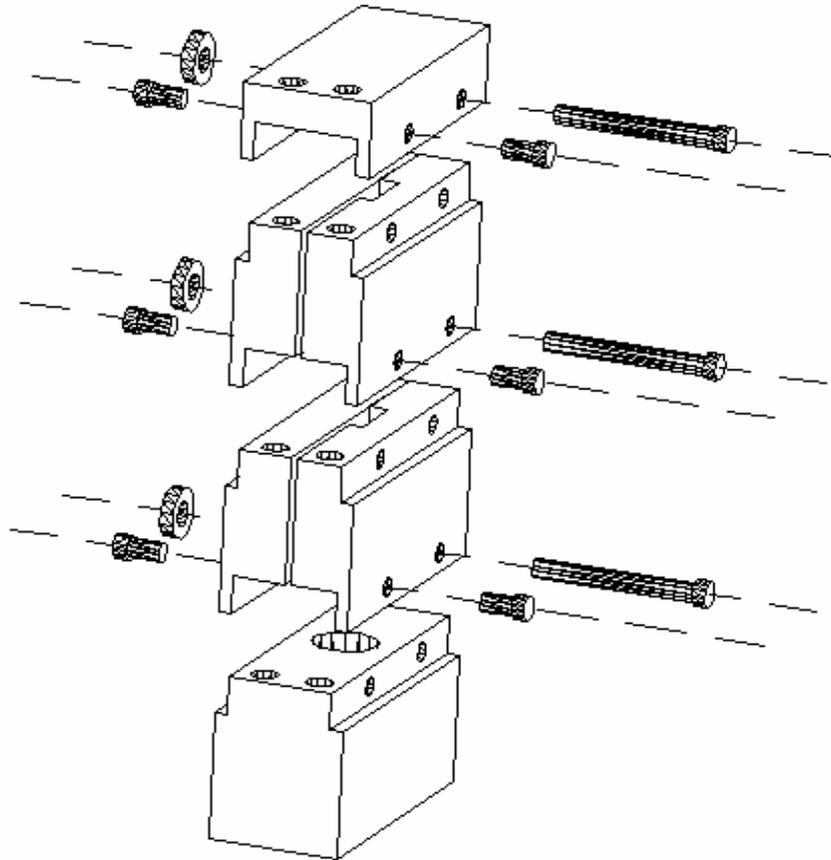


圖 3.2、積木式噴嘴(改進)

### 3-3 噴嘴細部設計及功能解說

最後根據選用的設計，來進行細部設計以及設計圖的繪製。此噴嘴在實驗的階段暫時以 3 塊基礎件構成，將中間件加長符合實驗室內進行實驗之玻璃厚度(3 cm 的)的兩倍，以利實驗之進行，待實驗成效較佳時再增加噴嘴長度。

如圖 3.3 所示，為整個噴嘴組件最少時的整體，僅使用一組中間件。整體由四組件所組成：上端件、中間件(1)、中間件(2)、下端件。上端件為最上方阻隔氣體之組件；中間件分成(1)、(2)兩部份，為配合製造容易之需求，中間件(2)朝內的面為一整個平面的設計，氣體進入之溝槽及噴出之狹縫於中間件(1)來達成(狹縫寬度 0.5 mm，長 60 mm)；下端件於噴嘴之最下方，中間挖通的較大孔為進氣口(半徑 5 mm)。

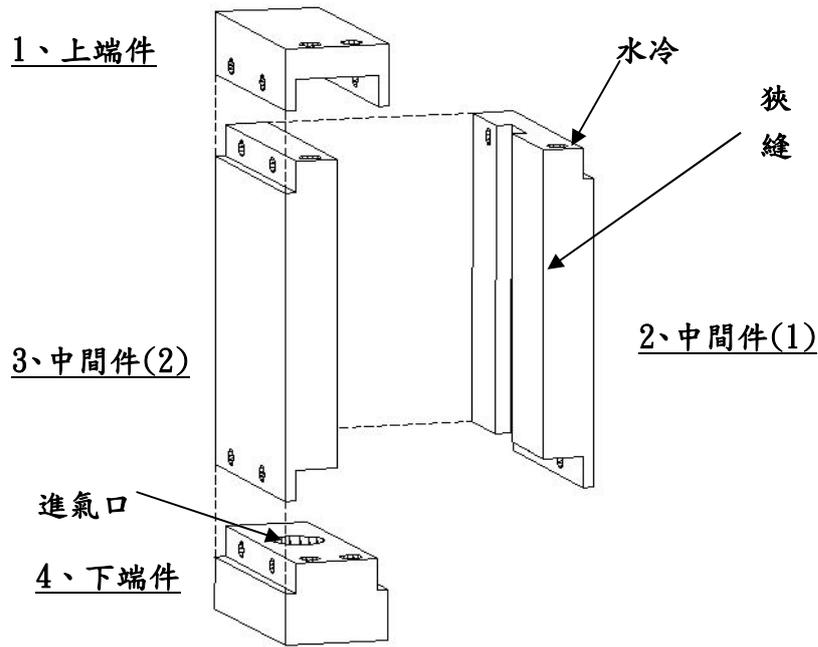


圖 3.3、積木式噴嘴爆炸圖

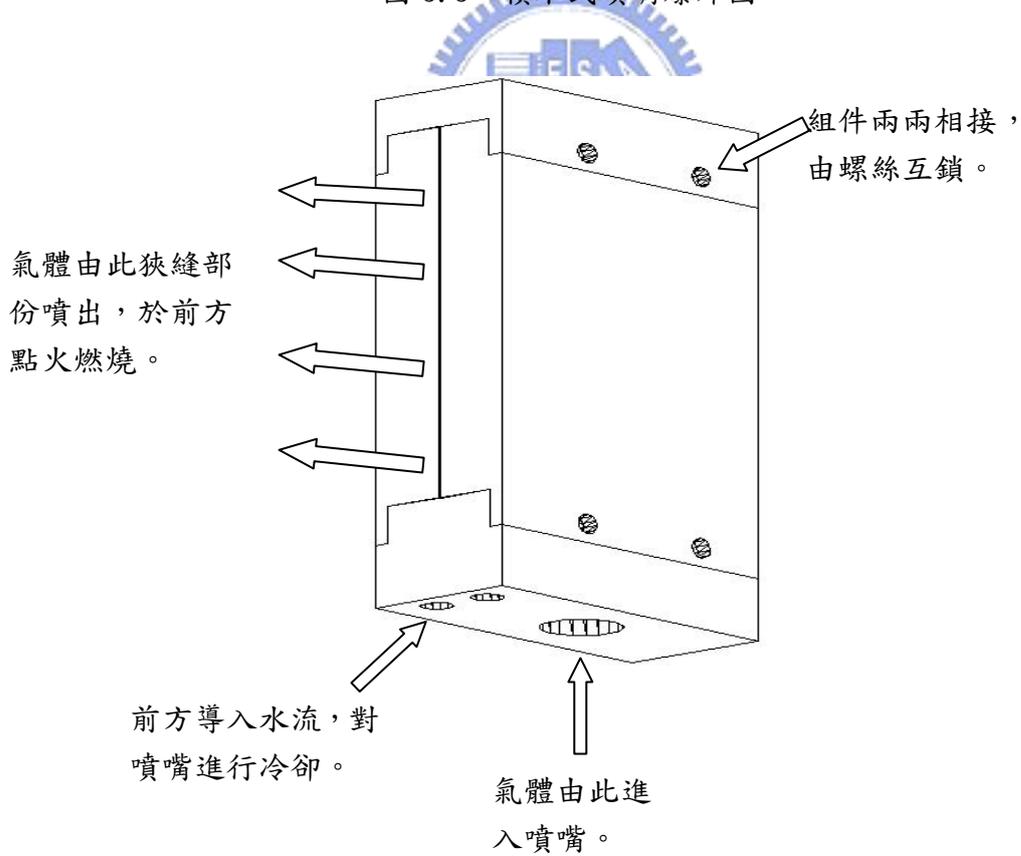


圖 3.4、積木式組合功能示意圖

每個組件相互由螺絲接合，噴嘴前方上下貫通，可通入水進行冷卻。進氣口面積需大於出口面積，以防氣體流速不足，經由以下之計算：

$$\text{進氣口面積} : \pi \times 5^2 = 78.53\text{mm}^2$$

$$\text{出口面積} : 0.5 \times 60 = 30\text{mm}^2$$

$$\frac{\text{出口面積}}{\text{進氣口面積}} = \frac{30\text{mm}^2}{78.53\text{mm}^2} = 0.38$$

經由上面的計算得進氣口面積大於出口面積，使得噴嘴內部壓力容易升高，所以在噴出的氣體方面流速與壓力有增加的效果，不會因為流速壓力的不足而發生逆火。

上圖 3.4 詳細繪出組合後之噴嘴整體，箭頭方向表示氣體進入噴嘴及向外噴出之方向，由於氣體體積受到壓縮，氣體能先充滿噴縫內部空間後由狹縫向外噴出，使噴出之氣體均勻並加快速度。另外並指出各組件相接之螺絲鎖點，組件兩兩相接加以鎖上。導入水流冷卻噴嘴之孔洞由上至下相通，使水流於噴嘴前方完整的流通，帶走熱量。

本實驗使玻璃熔融的是丙烷與氧混合氣體，其混合燃料的燃燒速度 3.31 m/s 與溫度 2820°C，混合氣的燃燒反應速度算是相當快溫度也足以使玻璃表面熔融，因此在實驗的過程中需要調整噴嘴或玻璃移動的速度，當燃燒功率高的所產生的熱量較高的燃料，單位時間所走的距離就需要增加，若不考慮移動速度與燃燒溫度間的控制問題，實驗過後的玻璃不是加熱過久軟化變形、加熱過快玻璃表面溫度不均勻導致破裂或者加熱溫度不夠讓玻璃表面刮痕更加明顯。

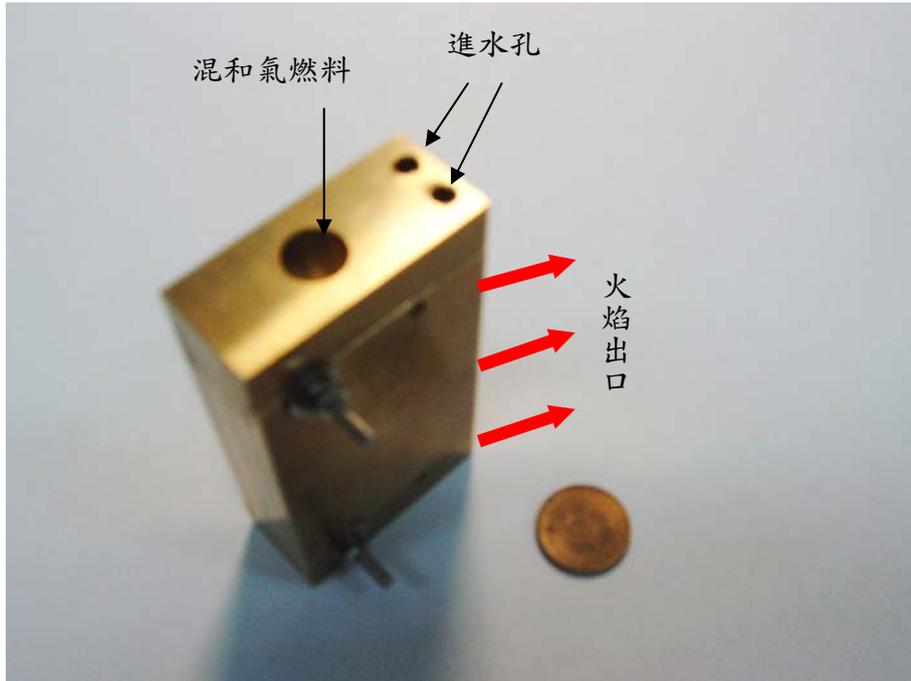


圖 3.5、可疊接狹縫式噴嘴的實際組合狀態

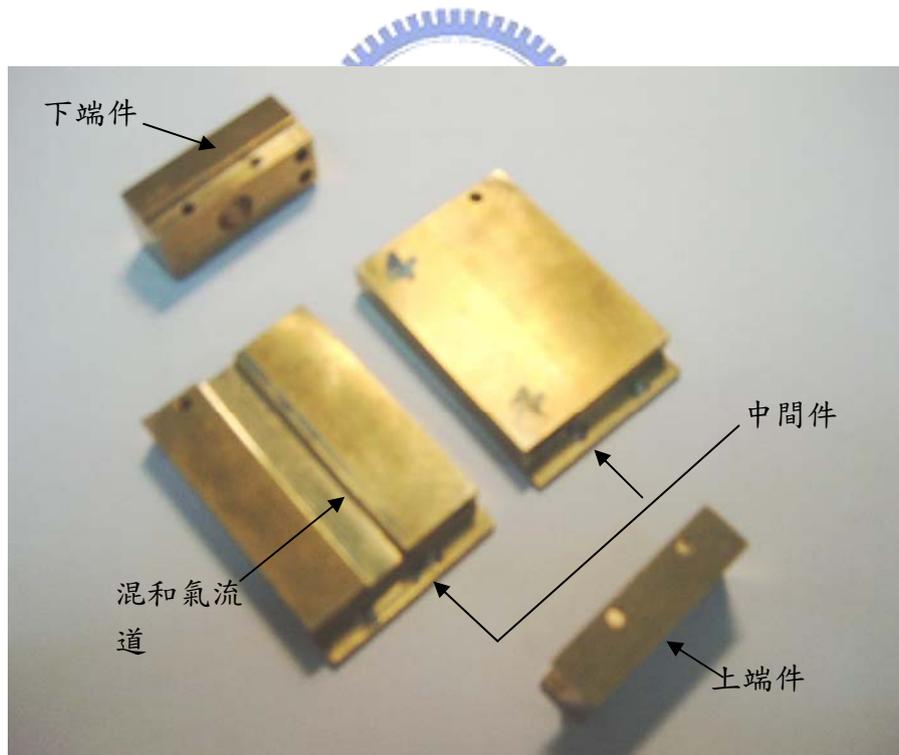


圖 3.6、可疊接狹縫式噴嘴的各部實圖

### 3-4 分段燃燒孔列噴嘴

由於舊式噴嘴(圖 3.7)[25]在實驗的部分上有容易加工優點在且也有實驗成功過，因此保留原有的特質，不過某些部分必須做些改良如 (a) 水冷的加入能夠讓實驗重複一再的進行，而舊式的噴嘴需要擔心過熱變形的危險所以考慮加入水冷的效果，(b) 過去的噴嘴著重在實驗的可行性等等問題，較適於小範圍的玻璃試片加熱，加入可調燃燒寬度、自動點火系統則有商業化的價值存在而不再是實驗室的原型理論。

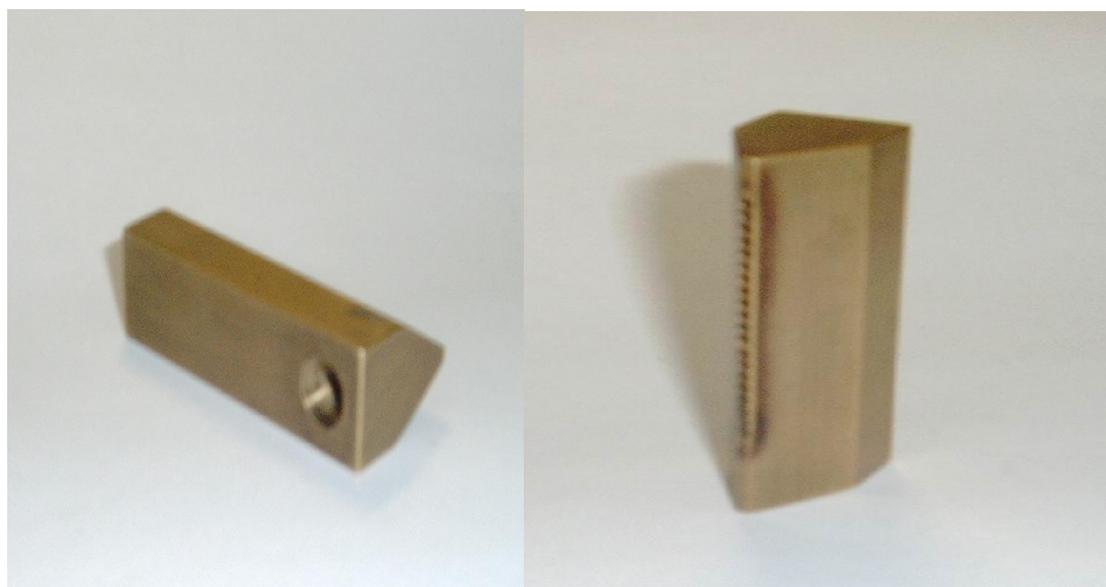


圖 3.7、舊式噴嘴[25]

改良後噴嘴主體前端有小孔讓混和氣體噴出，然後進行點火加熱玻璃消除刮痕，主體內部有兩個槽，其主要目的是將混合燃料能充分平均的從每個孔洞噴出的緩衝腔室，另外也是讓燃料與氧氣再一次的混合機會，防止混和氣在之前的部分沒有混合均勻，在進入腔室之前與針閥控制開關；每個腔室間彼此互不相通可以依照機台載具的大小設計不同大小的噴嘴，每個噴嘴以 5 公分為一個區域做開關。可以隨著玻璃尺寸的大小決定噴嘴後面針閥的開關數目。

由於噴嘴的孔使用直徑 1.0 mm 長 20.0 mm 的尺寸，因此先天上可以防止逆火的現象，這是參考過去的文獻資料[4]加以設計的尺寸；而水冷的部分則用 L 型版將邊緣焊接成形如(圖 3.8)。最後兩片主體用螺絲固定成一完整的噴嘴，在這之中兩接合面必須洗的很平滑，防止因為表面的粗糙所導致氣體的溢出。

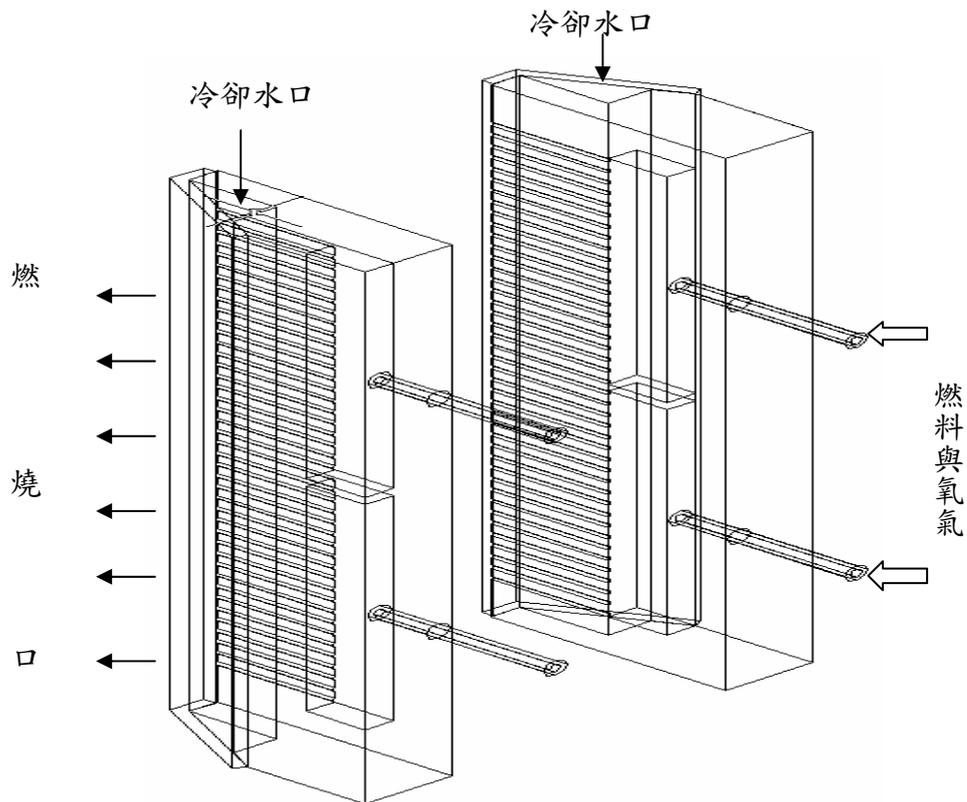


圖 3.8、分段燃燒孔列噴嘴圖

主要缺點：

1. 在製作噴嘴前端孔的部位相當困難，原因在於他的設計是兩片組裝，且孔壁也是兩片各半，因此在精度加工上並不容易，而噴孔又是重要的部分，因此需要改進。
2. 水冷的蓋片是以傾斜的方式焊接，而且沒有定位的位置，在高溫焊接上會導致變形甚至會產生缺陷，在加工上有很大的困難需要做一下改變。

### 3-5 分段燃燒孔列噴嘴圖(改進) (圖 3.9)

改進孔的加工模式，不再讓孔分成兩半，直接在其中一塊的金屬上加工，盡量保持孔的形狀尺寸，混合氣體腔室也一併設計在同一塊，可讓內部容積空間更能夠控制掌握。水冷的部分則讓原來有傾斜角的設計改成長方體的形狀，雖然會增加噴嘴的重量造成材料上的浪費，但另外一方面多出的面積可以增加吸熱的效果，在經由水冷的方式帶走多餘的熱量。經由改進的設計後，他的裝配方式依然

使用螺絲上緊，而接合面也比之前容易精準。

最後所決定噴嘴的樣式，以 $\phi 4\text{mm}$ 的燃料入口進入器室 $5 \times 10 \times 61\text{mm}^3$ 每個氣室再以 $\phi 1\text{mm}$ 長 $20\text{mm}$ 的細孔 $21$ 個讓燃料噴出因此

$$\text{進氣口面積} : \pi \times 4^2 = 50.265\text{mm}^2$$

$$\text{出口面積} : 0.5^2 \times \pi \times 21 = 16.493\text{mm}^2$$

$$\frac{\text{出口面積}}{\text{進氣口面積}} = \frac{16.493\text{mm}^2}{50.265\text{mm}^2} = 0.328$$

由上列式子可知氣體的出口流速壓力會有增加的效果，實際噴嘴完成如（圖 3.9）、（圖 3.10）

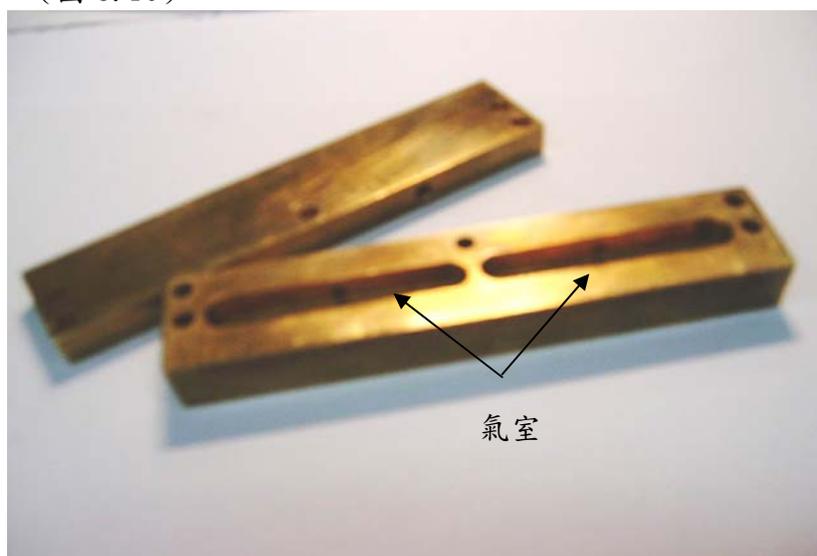


圖 3.9、分段燃燒孔列噴嘴分解圖

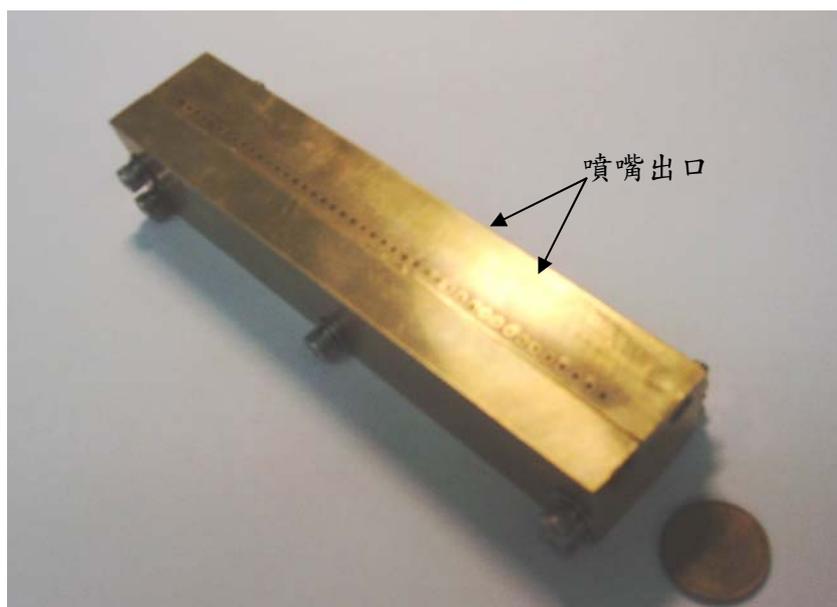


圖 3.10、分段燃燒孔列噴嘴組合圖

孔列式噴嘴為能與新的實驗機台搭配，且為了能使氣體平均流進兩腔室則將其外接管路如圖 3.11，當混合氣體流進一分為二的管路時，由於機會的關係讓氣體能平均的分配於兩線路，且此接法較不容易與新實驗機台的夾具有所干涉影響。

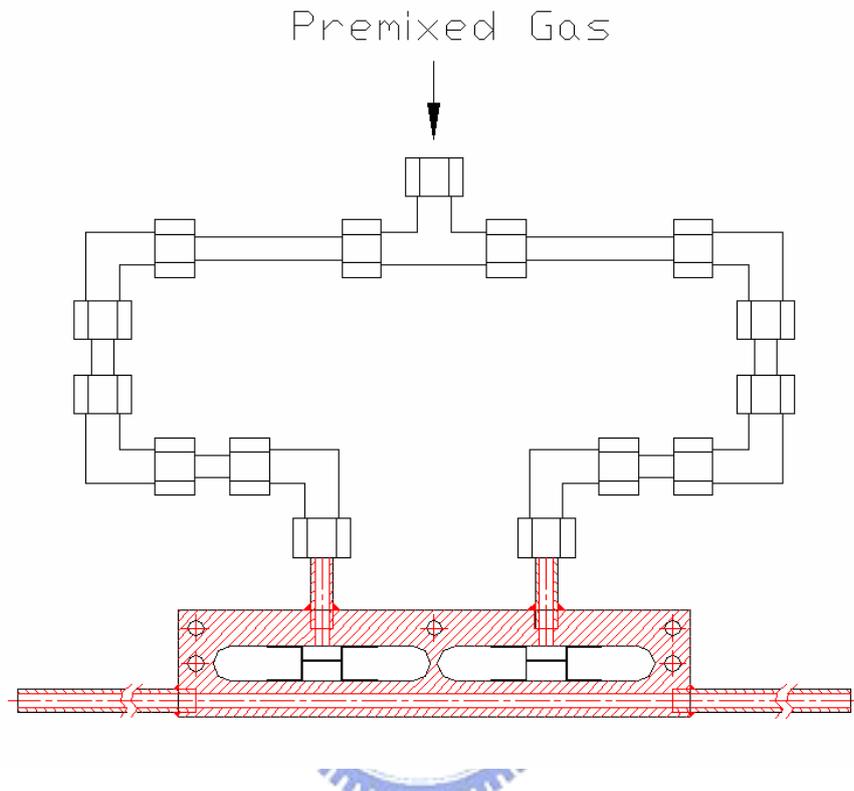


圖 3.11、孔列式噴嘴外接管路

進入腔室內的混合氣若不做分流的工作，則噴孔越靠近氣體入口的流量則越多離得越遠的則分配較少，這樣會讓燃燒的火焰形狀、溫度變得均勻，實驗容易失敗，因此在兩腔室內分別加裝檔版裝置，而不讓剛進入的混合氣體直接與噴出的孔衝擊。

### 3-6、噴嘴的理論水冷效益

在進行分析之前需把假設的環境參數數據定出與描述

1. 噴嘴與水定性
2. 穩態分析
3. 整塊系統的噴嘴
4. 冷卻水只在 x 軸上的溫度分佈
5. 水流的热傳導可以被忽略

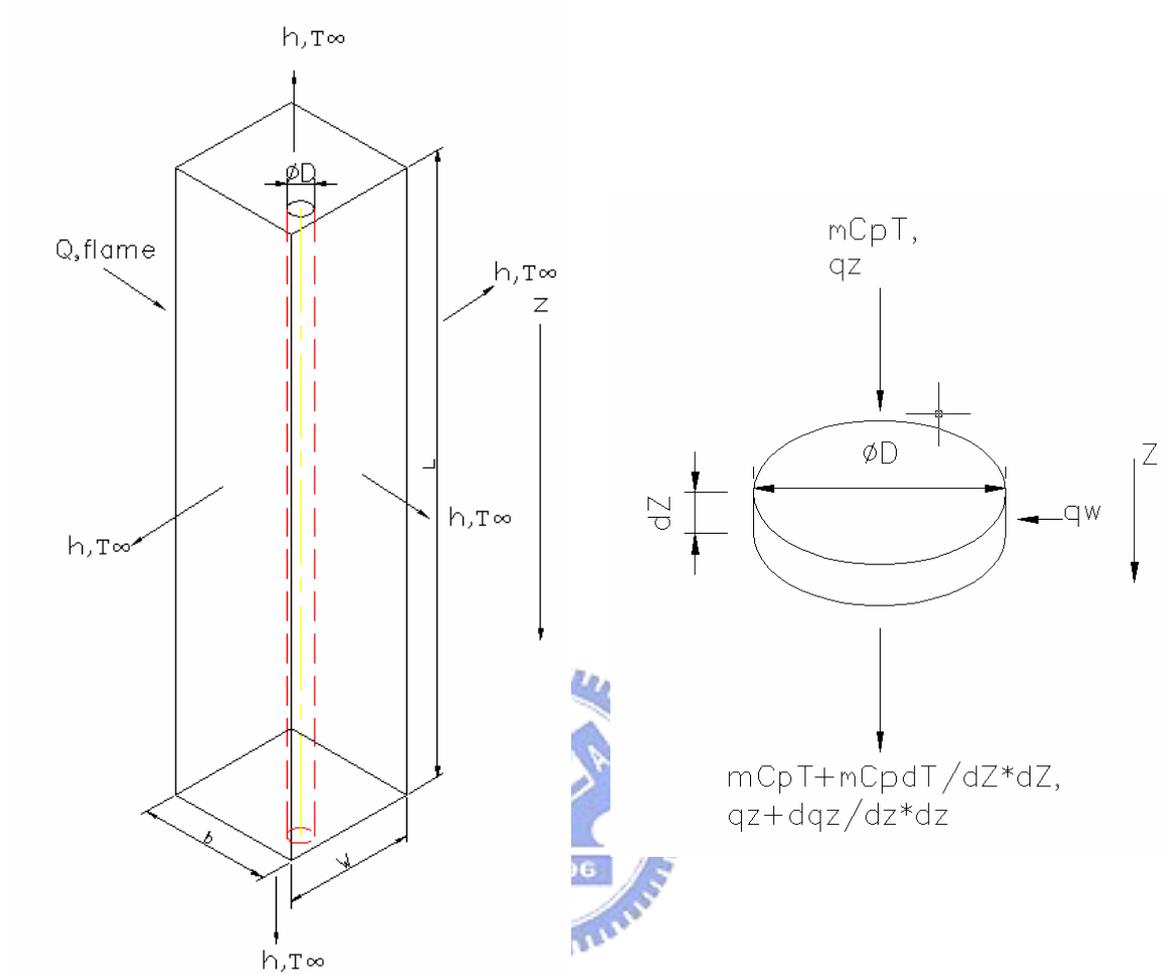


圖 3.12、噴嘴模型圖

變數設定

$$l = 142\text{mm} = 0.142\text{m}$$

$$w = 30\text{mm} = 0.03\text{m}$$

$$b = 30\text{mm} = 0.03\text{m}$$

$$d = 5\text{mm} = 0.005\text{m}$$

$$A_h = 2wl + 2wb + tl = 0.01458\text{m}^2 \text{ (HeatTransferArea)}$$

$$A_w = \frac{1}{4}\pi d^2 = 1.963 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{ (CrossSectionAreaOfWaterFlow)}$$

$$k = 0.3 \text{J} / \text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{k} \text{ (HeatConductionCoefficientOfWater)}$$

$$c_p = 4186.8 \text{J} / \text{Kg} \cdot \text{k} \text{ (HeatCapacityCoefficientOfWater)}$$

$$h = 25 \text{J} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k} \text{ (HeatTransferCoefficientOfAir)}$$



$$\theta = T - T_{\infty} (T_{\infty} = \text{Environmental Temperature})$$

$$\theta_s = T_s - T_{\infty} (T_s = \text{Steady State Of Temperature})$$

$$m = \rho V A_w (\text{Mass Flow Rate Of Water})$$

水流熱分析 [26]

$$q_w = \frac{m c_p}{P} \frac{d\theta}{dz} - \frac{k A_w}{P} \frac{d^2 \theta}{dz^2} \approx \frac{m c_p}{P} \frac{d\theta}{dz}$$

噴嘴的熱分析

$$\dot{Q}_{flame} = \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_w$$

$$= h \cdot \theta_s \cdot A_h + m \cdot c_p \cdot \theta_s - m \cdot c_p \cdot (\theta_s - \theta_e)$$

$$\dot{Q}_{flame} = \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_w$$

$$= h \cdot \theta_s \cdot A_h + m \cdot c_p \cdot \theta_s - m \cdot c_p \cdot (\theta_s - \theta_e)$$

$$\Rightarrow \theta_s = \frac{\dot{Q}_{flame}}{h \cdot A_h + m \cdot c_p}$$

$$\dot{Q}_{flame,0} = \dot{Q}_{air} = h \cdot \theta_{s,0} \cdot A_h$$

$$\Rightarrow \theta_{s,0} = \frac{\dot{Q}_{flame,0}}{h \cdot A_h}$$



$$\frac{\theta_s}{\theta_{s,0}} = \frac{\dot{Q}_{flame}}{\dot{Q}_{flame,0}} \frac{1}{[1 + \frac{m \cdot c_p}{h \cdot A_h}]}$$

$$\frac{\dot{Q}_{flame}}{\dot{Q}_{flame,0}} = \frac{m \cdot c_p}{h \cdot A_h + m \cdot c_p}$$

$$\frac{\theta_s}{\theta_{s,0}} = \frac{h \cdot A_h \cdot m \cdot c_p}{(h \cdot A_h + m \cdot c_p)^2}$$

經由 MATLAB 分析結果

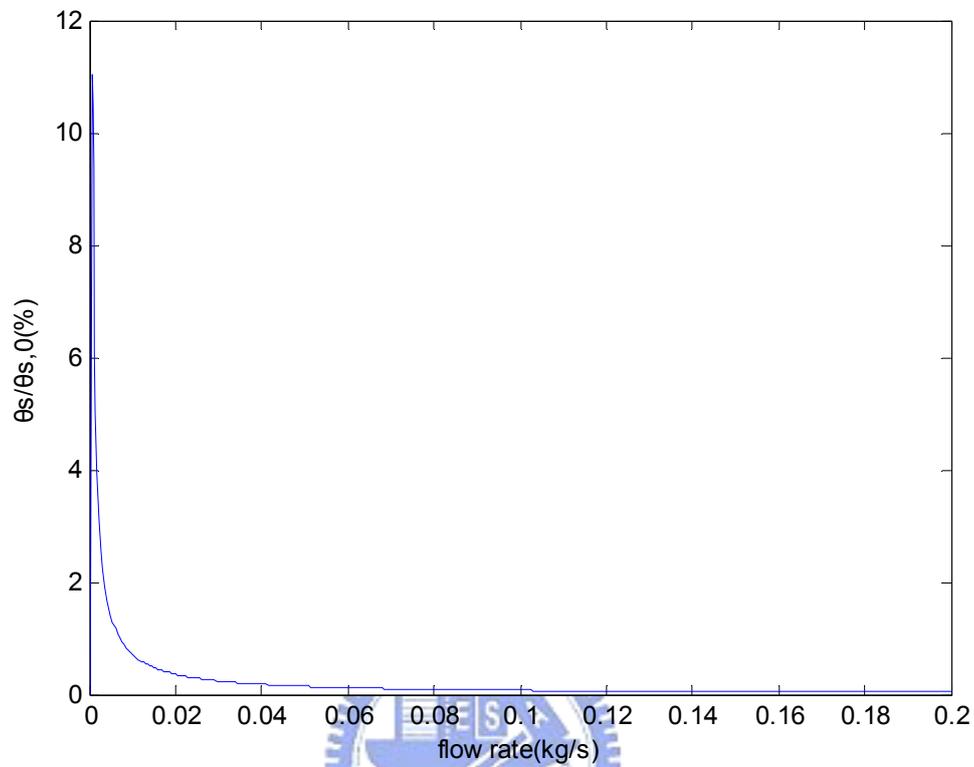


圖 3.13、水的流率與帶走熱的百分比

結論：

1. 由於水的 heat capacity( $C_p$ )大於空氣的熱傳係數( $h=25 \text{ J/sm}^2\text{k}$ )，因此水冷效益很大。
2. 在假設與邊界條件下我們假設，噴嘴的溫度能夠被帶走，且以  $0.2 \text{ kg/s}$  的水流量帶走。
3. 誤差的部分主要來自於邊界條件，在探討之時假設水在離開噴嘴時的溫度( $T_e=T_s$ )，但是在高溫下的噴嘴  $T_e$  的溫度因該要比  $T_s$  小很多，特別  $T_s$  大於  $100^\circ\text{C}$

附錄：

$C_p=4186.8;$

$A_h=0.01458;$

$h=25;$

$L=0.114;$

$k=0.3;$

$A_w=0.25*\pi*(0.005^2);$

$m=[0:0.0005:0.2];$

$R_1=h*A_h;$

$R_2=C_p.*m;$

$R=100.*(R_1.*R_2)./((R_1+R_2).^2);$

`plot(m, R)`

`xlabel(' flow rate(kg/s)')`

`ylabel('  $\theta_s/\theta_{s,0}(\%)$ ')`



## 第四章 第三代噴嘴設計

### 4-1 第三代噴嘴設計

火焰拋光第三代噴嘴延續前面兩代孔列式噴嘴的形式繼續研究，但在整個噴嘴上融入了許多觀念與前次的觀察與錯誤中學習，從火焰的形狀均勻且薄來說，這次的孔列以孔徑 0.5mm 間距 2mm 的方式呈現，由於孔徑窄小使得燃料在出口的阻力加大，因此有緩衝混合燃料平均分佈的效果在，另一方面由於混合氣進入噴嘴的面積為  $197.932 \text{ mm}^2$ ，離開噴嘴的 50 個小孔面積總和為  $9.8174 \text{ mm}^2$ ，兩者面積相差很大由  $A_{\text{進口}} V_{\text{進口}} = A_{\text{出口}} V_{\text{出口}}$  可得在出口的流速會增加約 20 倍左右，為了讓燃料均勻除了小出口孔徑有部分功能外，而在進口的位置加了擋板，不讓部分進口的混合氣直接從較近的出口孔流出，有此一裝置更能讓內部每一空間的燃料均勻的離開噴嘴。

由於實驗要求連續性因此在長時間的燃燒下使得噴嘴溫度快速上升，為了不讓噴嘴溫度升高則需要了解熱的傳遞方式，熱的傳遞方式不外乎傳導、對流、輻射這三種方式，故在每種的狀況下必須有所因應對策，首先討論是輻射熱的排除，燃燒反應除了產生無形的熱輻射還有可見的光，由於實驗環境周遭物體的輻射係數不同因此對熱的吸收量也不同，而噴嘴又離熱源最近，因此在噴嘴外表本體上需要做拋光加工，除了黃銅材質的噴嘴主體拋光外，連水冷蓋都以拋光的不鏽鋼鋼為材料。輻射係數如下（表 4.1）：

表 4.1、不同材質表面加工的熱輻射[27]

<i>Material</i>	<i>Condition</i>	<i>Temp. (°C)</i>	$\epsilon$
Brass	Highly polished	250	0.028
	rolled plate,	22	0.06
	natural surface		
Copper	dull plate	50	0.06
	oxidized by heating		0.60
Stainless steel	Polished	100	0.074
	Type 304, after heating	220	0.44
Lampblack	Coating		0.95

以黃銅為噴嘴材質的主要考量在於質地軟易於加工且為熱的良導體，可將吸收的熱快速傳到水冷系統把熱帶走，另外一個原因在於當黃銅表面拋光時熱輻射係數 0.028 比一般拋光純銅低，對熱吸收比較弱；在水冷槽外加的蓋子以拋光不鏽鋼為材質主要原因有二：

- 不鏽鋼傳熱效果差不益於吸收熱，因此水冷蓋吸收些微的熱量不容易傳到噴嘴本體，減少噴嘴本體的溫度。
- 拋光後的不鏽鋼其熱輻射係數為 0.074 也相當低，對熱的吸收效果也不大。以丙烷與氧混合產生較高的溫度，故目前以丙烷為本實驗的主要燃料。實驗用的氣體由聯華氣體所提供，丙烷以 20 公斤裝的鋼瓶規格，氧氣(純度 99.6%) 以 135 kg/m<sup>2</sup>，40L 裝的氣樽規格。

從對流的角度來看，由於噴嘴前端有錐角，燃燒時較冷氣流會順著斜面吸引如(圖 4.1)，可帶走不鏽鋼水冷蓋的溫度降低輻射熱所吸收的熱，靠近火焰面的噴嘴部分因為接觸面積比前一代的噴嘴小，對熱輻射的吸收也減少許多。

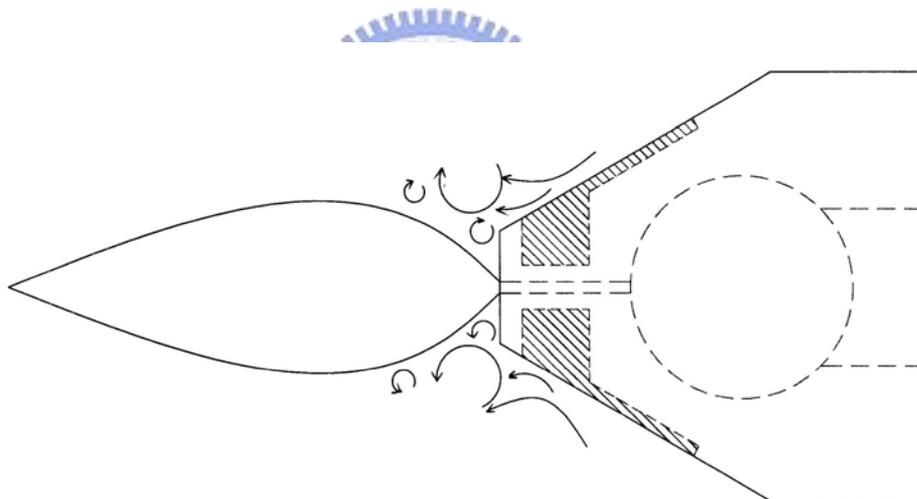


圖 4.1、噴嘴斜面氣流走向示意，斜線表示水冷部分

以傳導方面看噴嘴，由於黃銅是熱的良導體所以傳熱快，當熱從噴嘴的接觸面往內部腔室傳時，在經過 0.5 mm×8 mm 尾端流道時就已經被水冷的方式把熱迅速的帶離噴嘴，由下列基本熱傳公式可知，因為接觸面積越大則傳導越快的原因，所以在噴嘴表面銑一層薄薄的槽增加接觸面積槽增加接觸面積，一方面可帶走噴嘴主體的黃銅溫度，另一方面帶走不鏽鋼水冷蓋的溫度，可以大大減低噴嘴的溫度上升。

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$$

K：材料的熱傳導

dT：材料的溫差

dx：壁面厚度

第三代噴嘴孔徑比之前的還要小一半，主要是因為經由 ANSYS 模擬玻璃的加熱方式、溫度場分佈與應力分析，結果顯示越是能夠達到線熱源的條件，則拋光進行中的玻璃越不會因為小部分受熱面積急速膨脹產生應力而破碎，故第三代噴嘴盡量達到線熱源的要求；在內部壓力均勻分佈概念增加，使得火焰形狀與溫度更均勻；高溫加熱玻璃的同時也會造成噴嘴溫度的急遽升高，大大減低其使用壽命，所以也考慮從熱的傳導、對流與輻射三種方式來帶走噴嘴所吸收到的熱，此外第三代噴嘴不但是為了新的拋光系統的裝配而設計，也可在舊的原型機做測試，可以對新、舊火焰拋光機的效果作比對。

## 4-2 火焰量測標準

火焰的分類從視覺上的顏色與燃燒的狀況區分，所以在量測上要有所定性，圖 4.2 為預混火焰特性區分概念圖[25]，混合氣體燃料的火焰結構形狀隨著比例條件的不同而改變，因此必須定義出火焰拋光最適合的工作區域。

- (1) 區域 1 的火焰從噴嘴口延伸出來，此區域的火焰為密集燃燒區為整體火焰的焰心，從實驗的燃燒狀況可看出其顏色呈現為亮藍色，會隨著氧氣量的增加而縮短，當氧氣量不足時則此區域較不明顯。
- (2) 區域 2 的火焰寬度穩定，火焰寬度隨著噴口軸向速度的影響非常小不易察覺它的變化，且周圍只有小部分空氣被吸入此區域的流場，故此區域的火焰穩定不容易受外在的流場干擾，此區域沿放射方向有最高的溫度所以為火焰拋光的主要區域，若以丙烷與氧氣 1:3 的比例混合會使得火焰顏色呈現淡淡的藍色，整體流量加大比例維持不變並不影響火焰拋光的品質。
- (3) 區域 3 火焰稱為噴射形成區，此區域吸引更多周圍的空氣，比區域 2 的火焰還不穩，然而此區域找不到相對定值的溫度，因此溫度分佈較不均，火焰顏色呈現淡紫色但不時會有一些黃色不完全燃燒的現象發生。
- (4) 區域 4 為火焰強烈搖擺閃動區溫度因為閃動的原因無法達到高溫，此區域也可以稱為完全噴射區，而軸向氣流的速度變化不定可由燃燒時的火焰觀測，且紊流的程度比其他區域的火焰還嚴重，在這區域的火焰顏色是淺紫色轉於黃紅色。

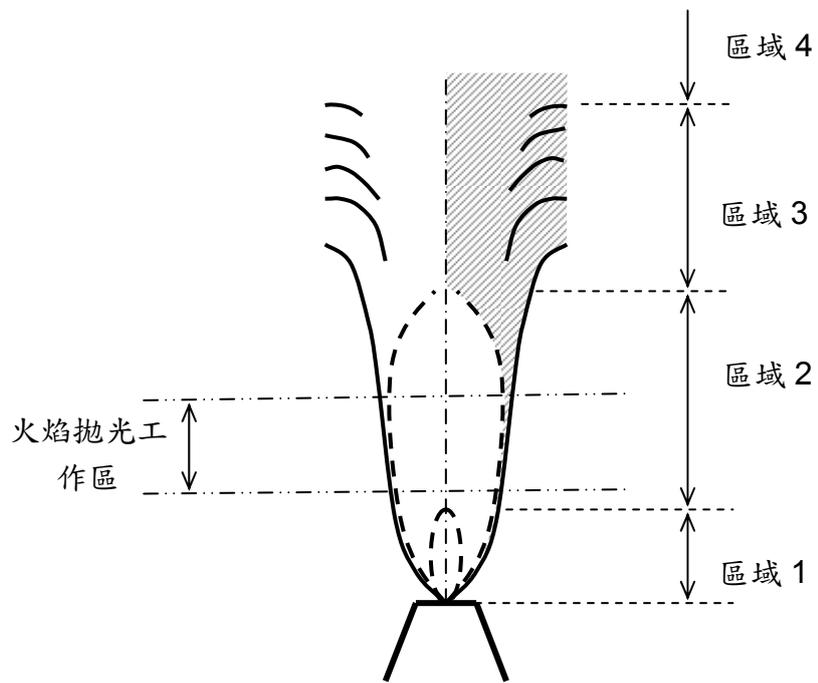


圖 4.2、預混火焰外流場區域概念圖[25]

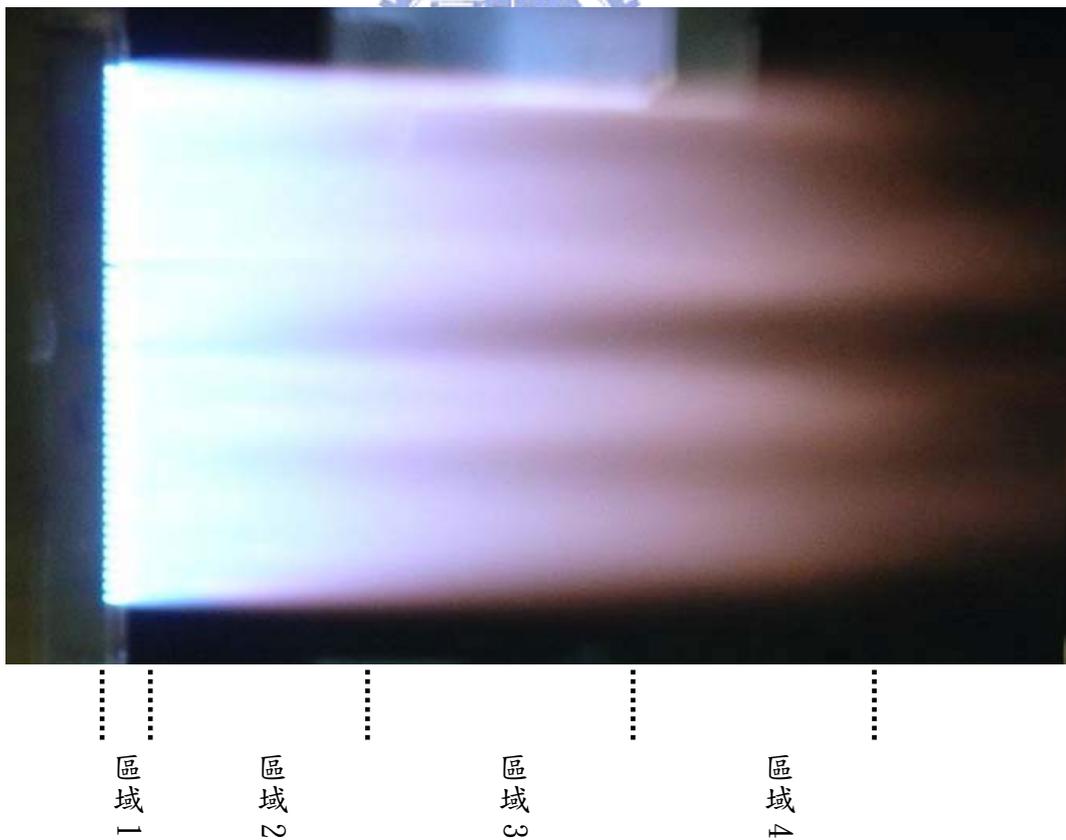
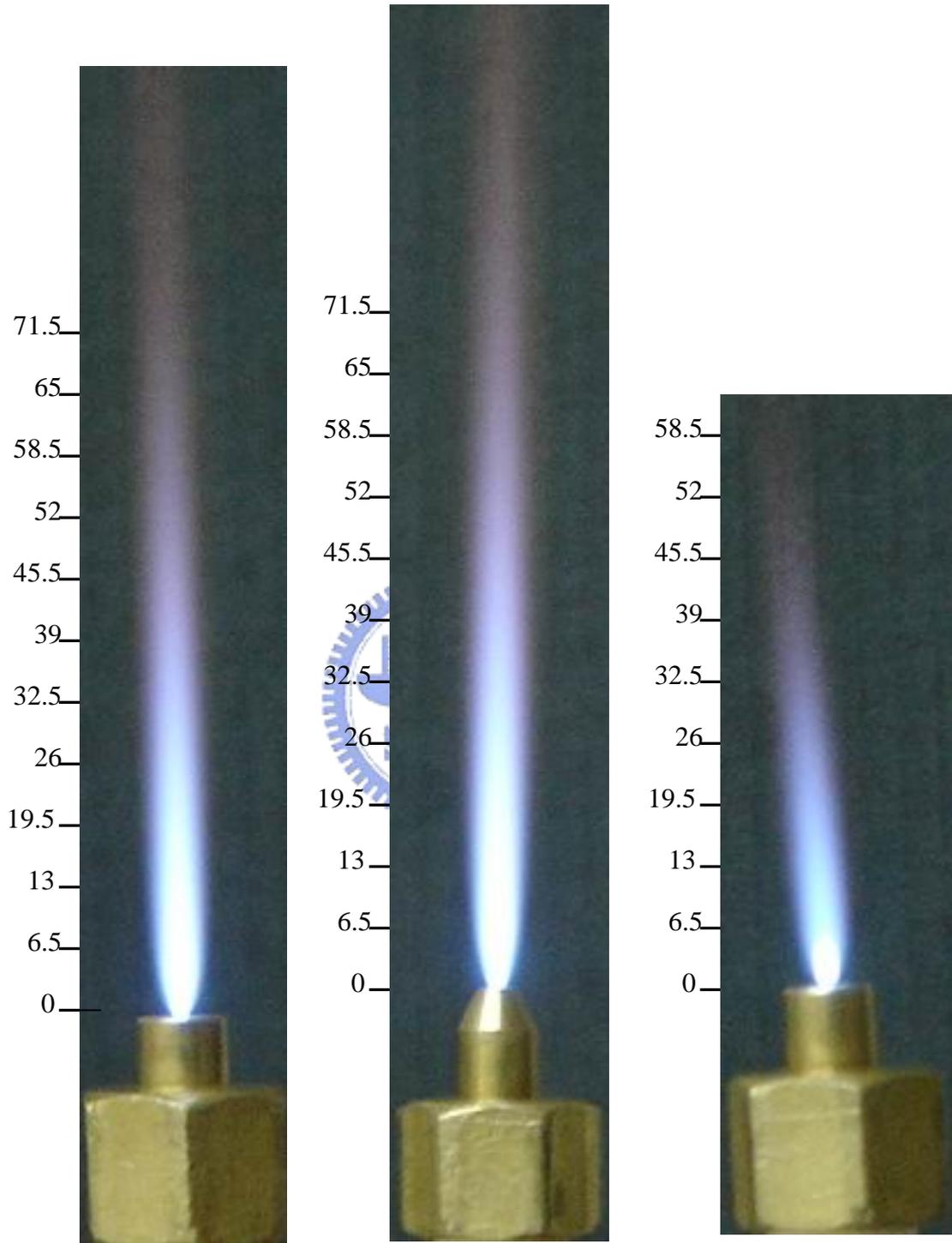


圖 4.3、實際預混火焰外流場區域圖

### 4-3 噴嘴設計的優化



(a)

(b)

(c)

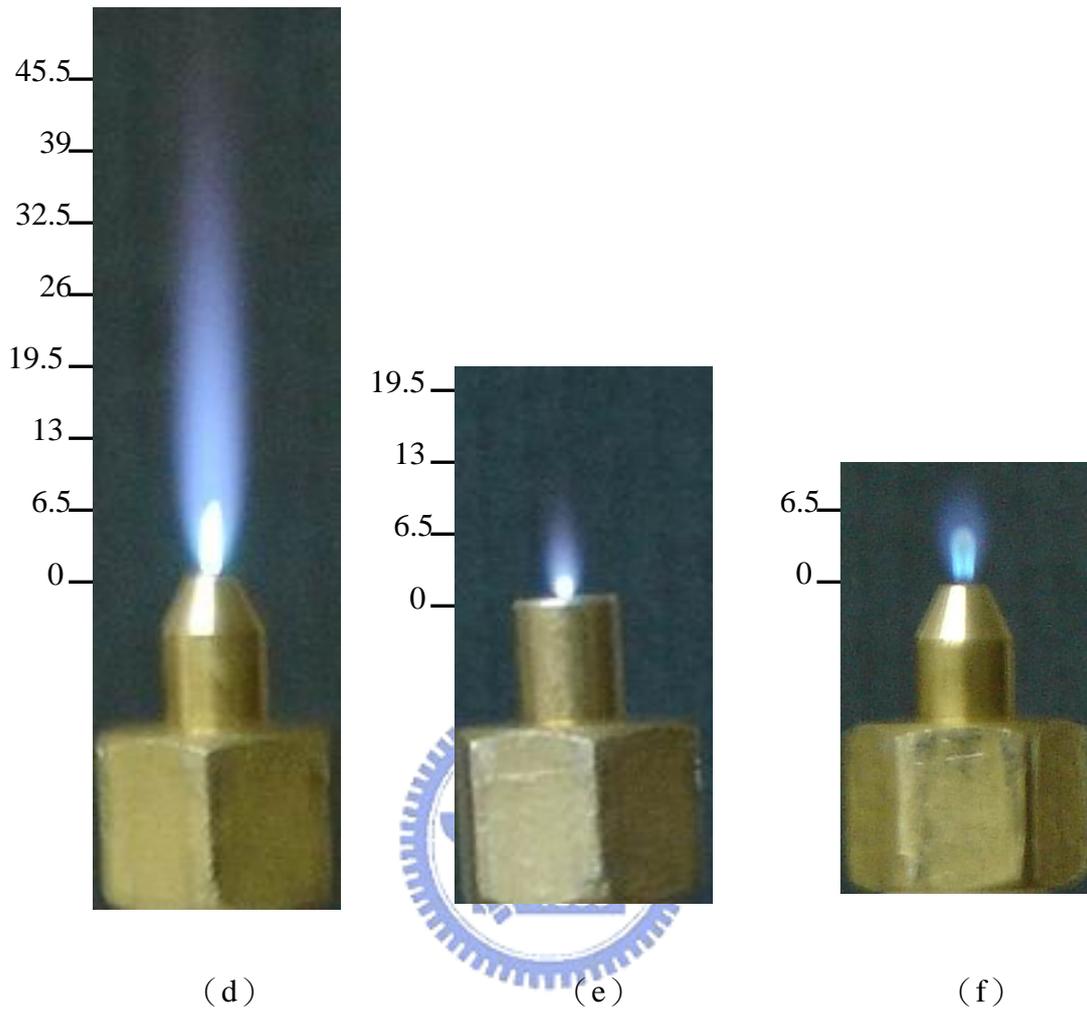


圖 4.4、各孔徑單孔上噴實驗：(a) 孔徑 0.7 mm 平頭噴嘴 (b) 孔徑 0.7 mm 錐頭噴嘴 (c) 孔徑 0.5 mm 平頭噴嘴 (d) 孔徑 0.5 mm 錐頭 (e) 孔徑 0.3 mm 平頭 (f) 孔徑 0.3 mm 錐頭。

從前兩代的噴嘴的設計成效結果不盡理想，火焰的不均勻是很大的致命傷，而第二代孔徑的大小是延續第一代成功的範本，但 1 mm 的孔徑在 42 孔噴嘴所噴出的火焰比第一代還不均勻，原因之一是孔加工時的精度問題導致噴出的火焰有所不均，另一個原因在於第二代噴嘴為了能處理更大片的玻璃而增加了孔數，相對內部的空間增長了使得氣體壓力無法均勻分佈；所以在第三代噴嘴的設計前，以單孔噴嘴先做實驗，先從單孔火焰所噴出的現象去設計第三代噴嘴，故做了如（圖 4.4）（圖 4.5）的單孔實驗。



65 58.5 52 45.5 39 32.5 26 19.5 13 6.5 0

(a)



65 58.5 52 45.5 39 32.5 26 19.5 13 6.5 0

(b)



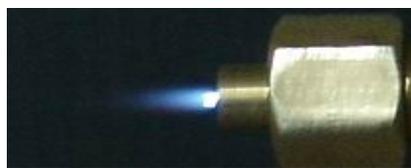
39 32.5 26 19.5 13 6.5 0

(c)



32.5 26 19.5 13 6.5 0

(d)



13 6.5 0

(e)



13 6.5 0

(f)

圖 4.5、各孔徑噴嘴水平噴實驗：(a) 孔徑 0.7 mm 平頭噴嘴 (b) 孔徑 0.7 mm 錐頭噴嘴 (c) 孔徑 0.5 mm 平頭噴嘴 (d) 孔徑 0.5 mm 錐頭噴嘴 (e) 孔徑 0.3 mm 平頭噴嘴 (f) 孔徑 0.3 mm 錐頭噴嘴。

在單孔實驗中由於孔徑都小於 1 mm，混合氣體在離開噴嘴的時會有很大的壓力差，所以不容易在一般的調壓閥下操作，只能靠針閥做更細微的變動，假使使用的壓力過大則會將火焰吹熄無法點著，在這樣的實驗情況下流量與壓力值無法讀取，所以實驗的條件並沒有紀錄，只單純觀測火焰形狀去分析，作為日後孔列噴嘴設計的參考依據。

不論是圖 4.4 向上噴火實驗或圖 4.4 水平噴火實驗，孔徑越小壓差越大且在點火調整的過程中越困難，火焰的長度也隨著減小，以 4-6 節量測火焰拋光工作區標準，在 0.7、0.5 mm 孔徑方面向上噴的火焰長度明顯比水平火焰來得長 13 mm，其原因在於燃燒的火焰處於高溫狀態密度較輕，因此向上的浮力將整體火焰拉伸了，而水平火焰因為壓力衝出的速度一部份由於浮力關係而減弱，這就是造成火焰長度的差異的主要原因；本實驗由於是丙烷與氧混合的緣故燃燒比較激烈，且孔徑小使得速度更快，所以水平火焰向上飄移的現象並不明顯，若仔細觀察水平火焰，則會發現火焰尾端上飄略明顯，偏移的角度約 0~10 度不等。

單孔噴嘴實驗的另外一個目的在於探討噴嘴前顛平頭與錐頭對火焰寬度與長度的影響，以 0.7 mm 的孔徑噴出的火焰寬度竟會大於 0.7 mm，原因之一是因為混合氣由拘束空間流至開放空間，且孔徑邊緣是一個尖的直角，所以氣體在這地方容易產生擾流使得火焰寬度比原孔徑還要大一些，另一個原因由於噴出的火焰在噴嘴外壁面吸引周遭氣流的同時因為壁面的牽引效果讓火焰的寬度有所增加。由實驗結果觀察得知噴嘴前端的幾何形狀對火焰寬度影響只有些微的差異，而意外的發現錐頭狀的噴嘴火焰總長度都比同一孔徑平頭噴嘴來得長一些，因此推論錐頭噴嘴因為容易將氣流牽引，使得火焰的流場更為流暢，而平頭噴嘴因面積較大且沒有平順的斜角讓氣流平順的引進所以火焰的總長度略短了些。

經由上述的實驗結果討論，在第三代噴嘴設計理念上能夠以斜面為依據，能夠達到更均勻平順的火焰，另外因為截面積的減少可以降低噴嘴對火焰的吸熱，噴嘴本體的溫度則不會一直處於高溫狀態。為了配合新的火焰拋光機台噴嘴預計要往下噴火，但從上述的實驗則可以放心向下點火而不會有逆火的現象發生。

#### 4-4 第三代噴嘴的詳細設計

第三代噴嘴主體從材料的選擇上以黃銅為主，其主要原因為材質軟容易加工，特別對小孔徑加工上特別重要，另外鋁才也屬於易切削材質，缺點在於高溫拋光的環境下，鋁材質的熔點 660~655°C，黃銅材質熔點在 898.89~1037.78°C之間，黃銅所能承受的溫度比鋁還高，故使用黃銅為噴嘴主體材料，黃銅的種類很多[28]，從下表看出第一個黃銅雖然熔點不高，可是在切屑難易方面確有很大的優勢，故以無添加其他金屬元素的黃銅，做為我們所使用的噴嘴本體素材。

表 4.2、黃銅與銅合金特性比較

材料特性 金屬材料	熔點 (°C)	膨脹係數 ( $\times 10^{-7}/^{\circ}\text{F}$ )	熱導性 (BTU/s · ft · °F)	切屑難易率
黃銅	898	114	67	100
摻鉛黃銅	941	115	48.5	80
摻鉛紅黃銅	1010	100	41.6	84
錳青銅	898	118	61	30
矽青銅	1026	100	21	30

資料來源：劉火欽，“金屬材料”，三民書局，民國 71 年 8 月[28]

而水冷蓋的部分選用不鏽鋼為材質，不鏽鋼對熱不易傳導，其熱傳導值約為 16 W/(m·°C)相較於其他金屬還不易傳熱，普通碳鋼的導熱係數為 45 W/(m·°C)，不鏽鋼吸收的微量熱則不容易把熱傳給噴嘴本體，另外不鏽鋼金屬表面拋光後光亮如鏡可對熱輻射的吸收降低許多，在第二章有提到表面拋光加工過的不鏽鋼黑體輻射值約 0.074，如此低的黑體輻射值可降低吸收在玻璃拋光時所產生輻射熱。

從噴嘴的水冷方面介紹（圖 4.6）（圖 4.7）當水管接上管徑 3.5 mm 的銅管進去噴嘴本體在從另外一個管子中流出，在進入噴嘴的過程間以 2 mm 銅管連接，此水冷管以銅銲在界處點與噴嘴本體接合，外接銅管因為有很大的塑性變形所以可以因應噴嘴架設的位置調整銅管位置，但缺點則是多次彎折會造成管子的應力破損，另外若過渡彎折也會使內部流道的堵塞，所以在彎折時要特別注意。為了外接銅管在焊接時能夠準確的定位，在噴嘴本體鑽一大於銅管的孔徑，好讓銅管能先放入部分長度，然後在管子周圍銲緊密（圖 4.8），此作法不但容易定位更能防止焊接後強度不夠而再度破損。

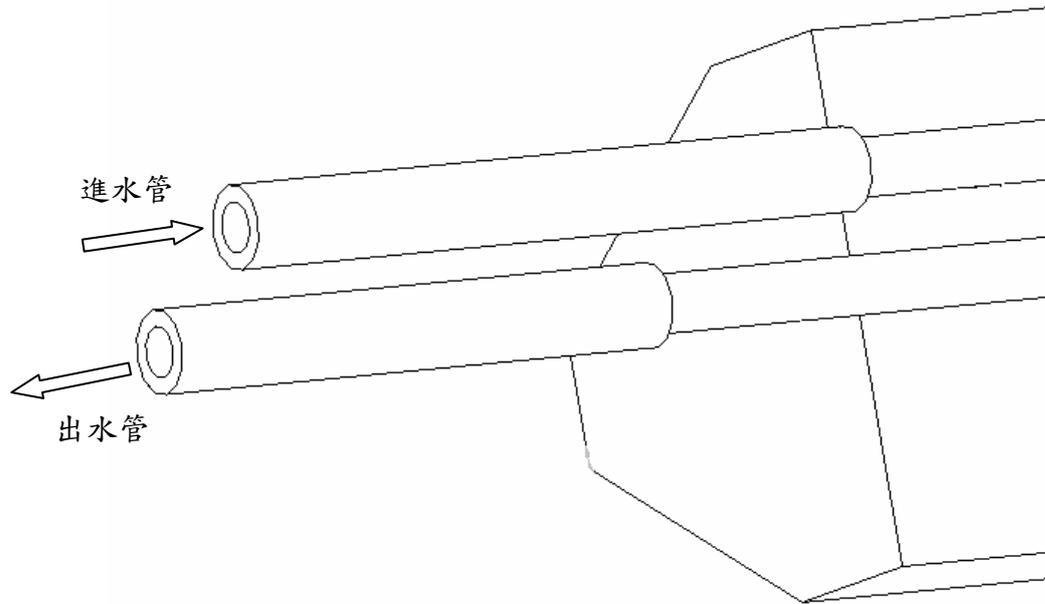


圖 4.6、噴嘴水冷進出管

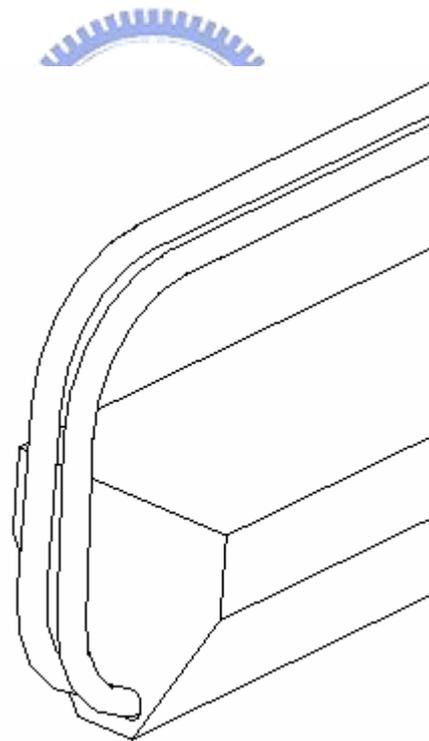


圖 4.7、水冷銅管

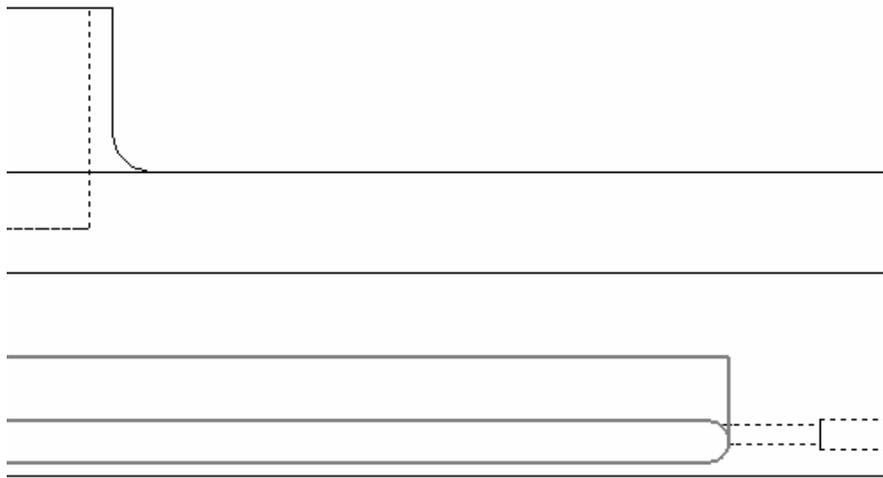


圖 4.8、冷水進入與離開噴嘴本體的交接處

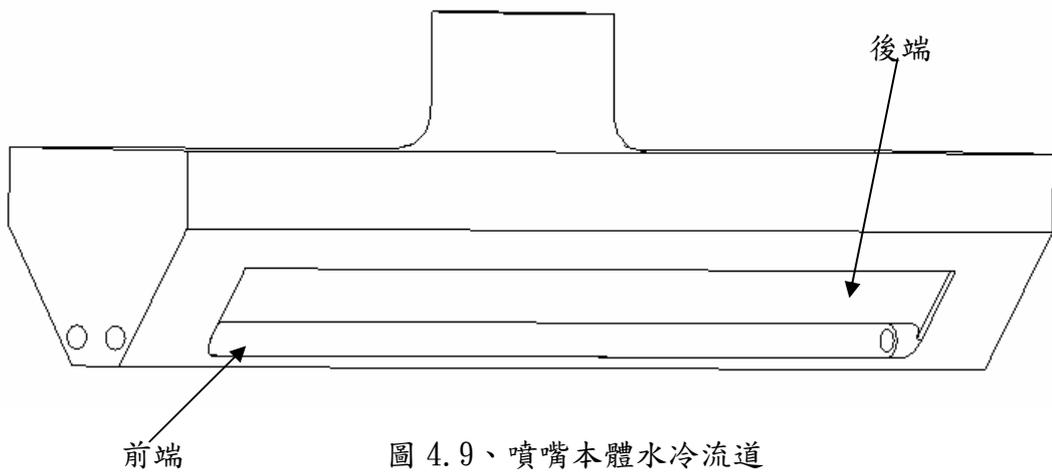


圖 4.9、噴嘴本體水冷流道

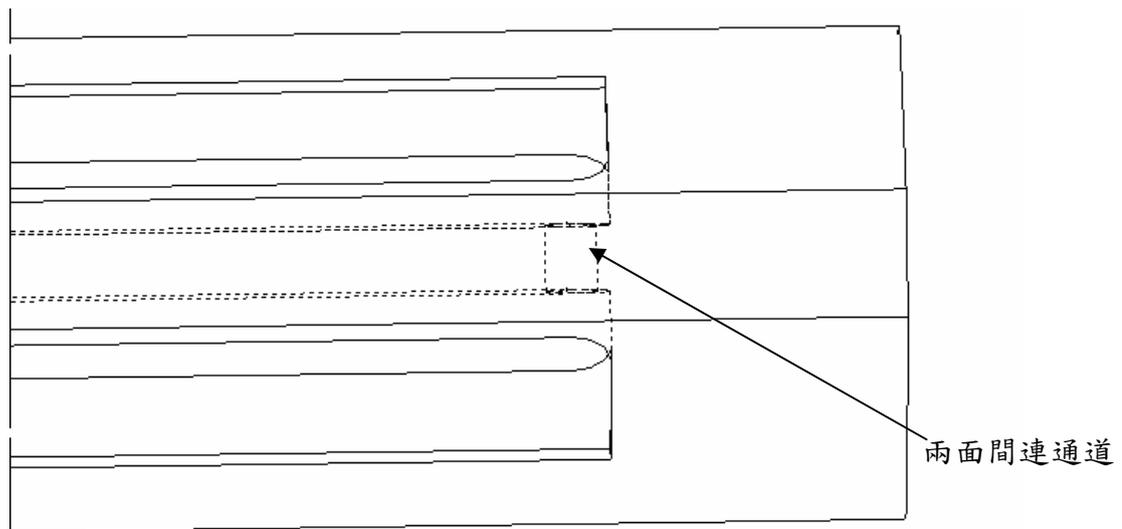


圖 4.10、噴嘴本體水冷連通道

在圖 4.9 中看到噴嘴水冷前端部分銑的比較深的槽，這個部分比較貼近噴嘴前端的氣流道，而燃燒時所吸收的熱由於此水槽兩端比較靠近熱源因此可以很快的將熱帶離噴嘴，為了有效的使噴嘴冷卻，噴嘴後端的部分另外銑 0.5 mm 的水冷槽，主要是增加冷卻水的接觸面積，可以更有效的將熱帶離，而水從進水管到噴嘴一面流過之後，在經由水冷管連通道將水引至另外一面之後在離開噴嘴本體。

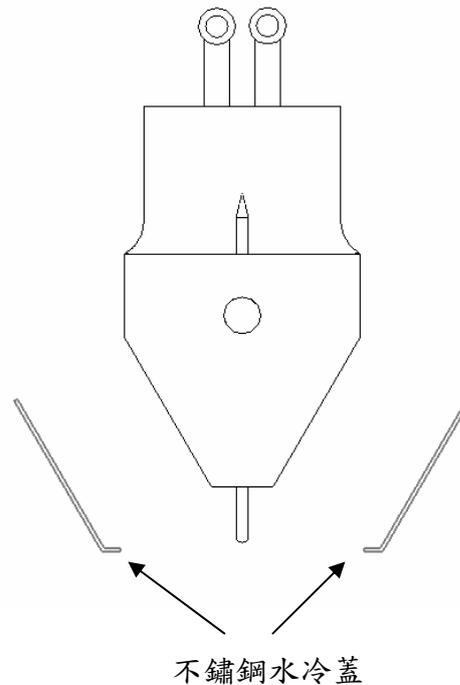


圖 4.11、噴嘴不鏽鋼水冷蓋片爆炸側視圖

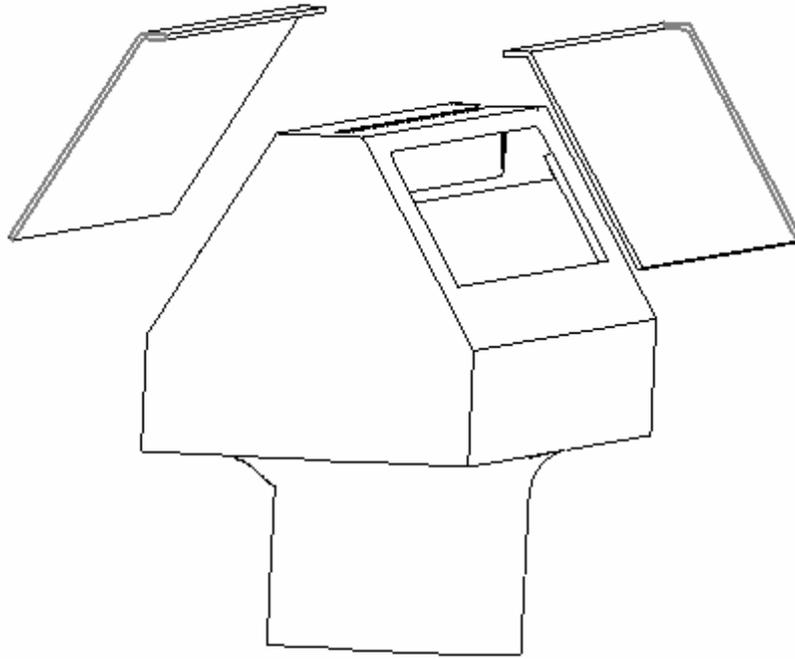


圖 4.12、噴嘴不鏽鋼水冷蓋等角視圖

在噴嘴水冷部分需要將他封上，才可以讓水在噴嘴內部發揮功用，所以從圖（4.11）（4.12）在水槽外面加上兩片不鏽鋼片，在鋼片周圍以銀焊將其封死，會用不鏽鋼為材質主要是因為他本身拋光後可以反輻射熱，且為熱的不良導體，可以阻止熱往噴嘴本體傳遞，但在噴嘴前端的銀焊並不容易，主要是因為它的受鐸面積小容易焊接不完全，所以若焊接不完全則會有水滲出，若水滴在拋光的玻璃上必定會造成爆裂，因此這水冷部分中較困難的部分。

噴最另一個設計的重點在於氣體的均勻分佈，當氣體在噴嘴內部腔室均勻的分佈時，混合氣體在離開噴嘴燃燒時的火焰溫度分佈將會均一，所以在第三代噴嘴的設計上我們多增加了類似檔板快速接頭（圖 4.13），來讓氣體進入的前半段時，因為遇到檔版而分流，由於此接頭的設計為對稱，所以氣體在分左右的概率是均等的，不會有特別一邊的量比較多，氣體遇到檔板時一部份往左右方向分流，另一部份則會繞過檔板繼續前進，理論上整個腔室內的混合氣是均勻的，從（圖 4.14）可以看出混合氣體流動的示意；快速接頭與噴嘴本體則是以銅焊焊密，另外一方面由於 50 個 0.5 mm 的出氣孔太小，他對氣體是以種阻擋，因此也有整流的功能，利用這些概念達到第二章噴嘴需求。

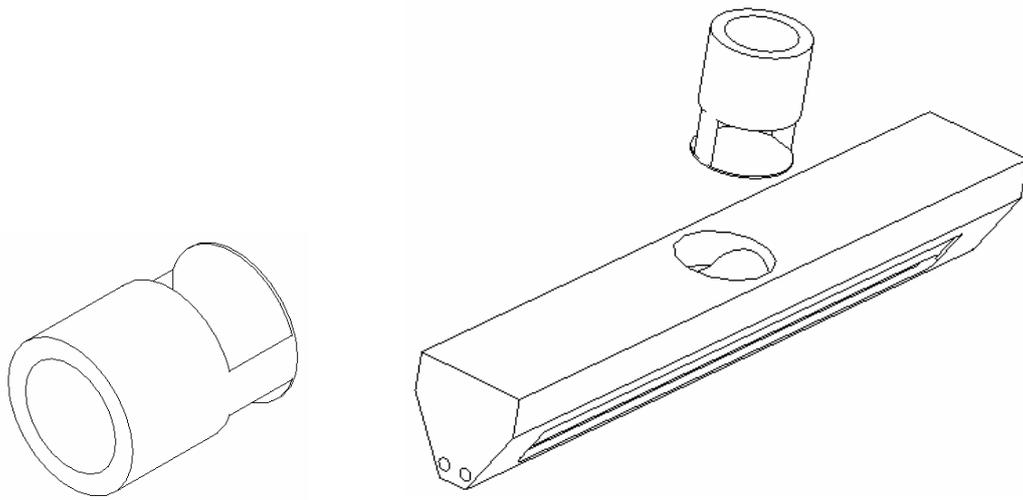


圖 4.13、混合燃料均勻分佈裝置

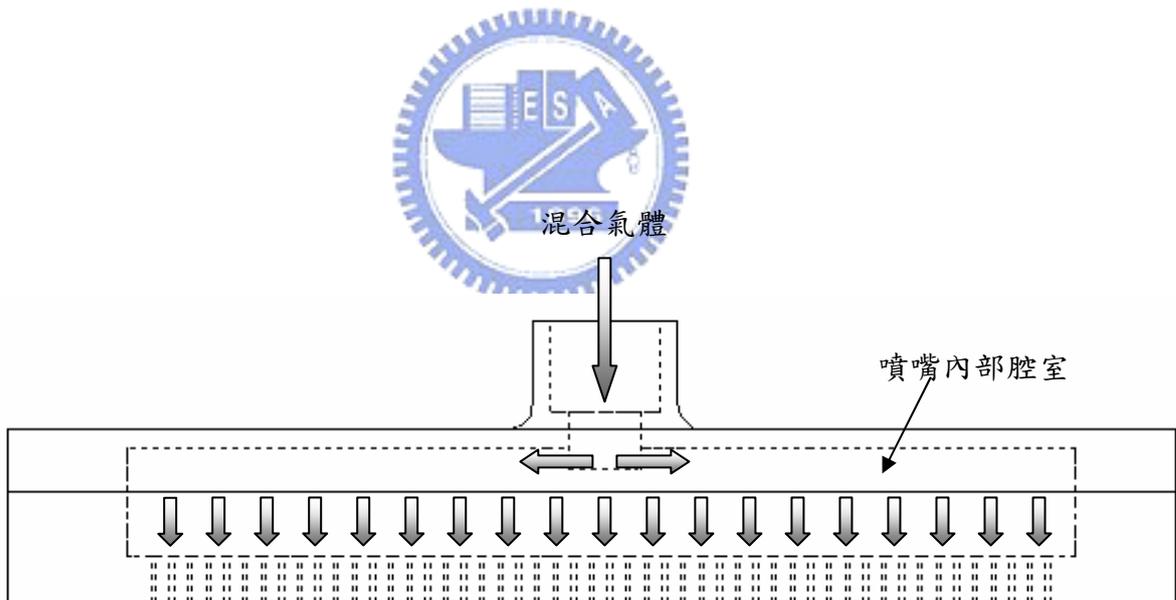


圖 4.14、噴嘴內部氣體流動方向

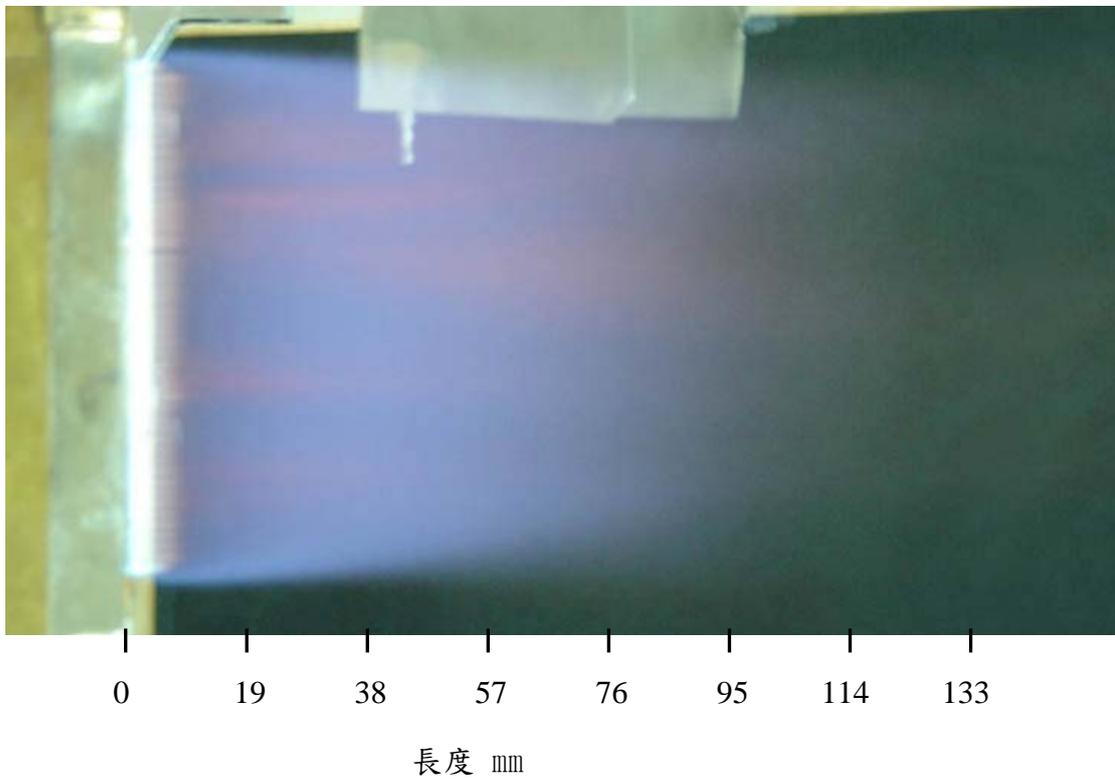
## 第五章 第三代噴嘴的鑑定及運用

### 5-1 火焰的特性

(1) 丙烷流量 20 mm (2025 ml/min) 氧氣流量 35 mm (6075 ml/min)  
火焰最高溫度 113°C (熱電耦距離噴口 3 cm)



(a)



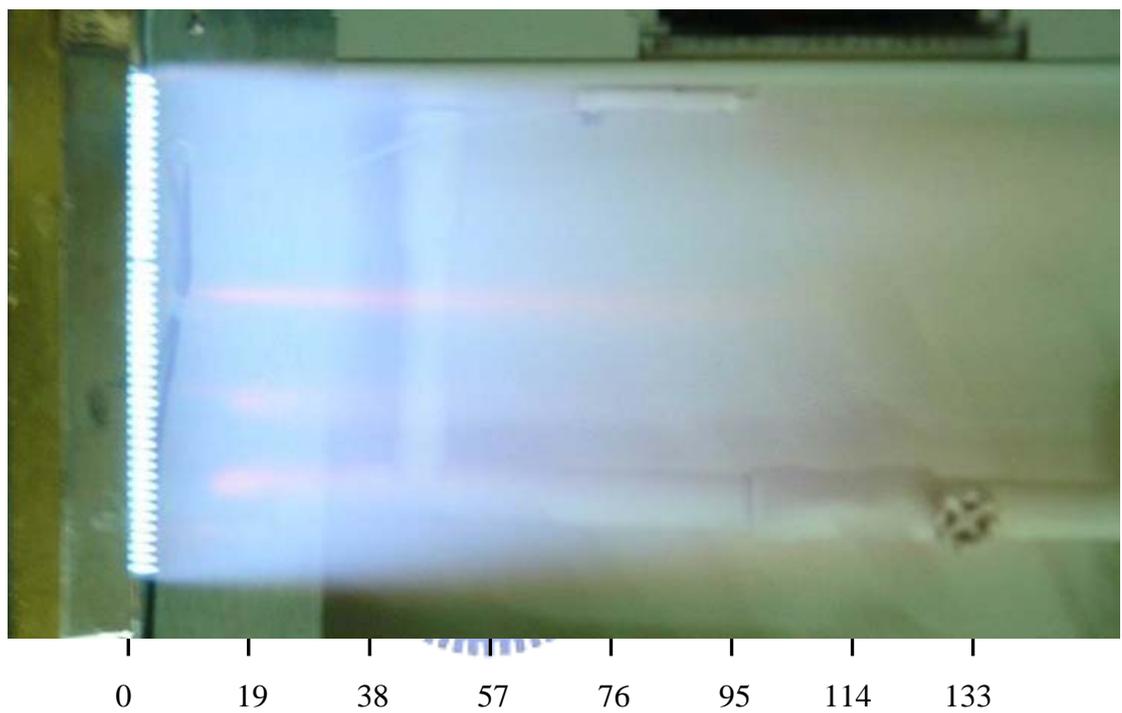
(b)

圖 5.1、丙烷流量 2025 ml/min 的 (a) 火焰寬度 9 mm 與 (b) 火焰長度 57 mm

(2) 丙烷流量 30 mm (3040 ml/min) 氧氣流量 55 mm (9120 ml/min)  
火焰最高溫度 621°C (熱電耦距離噴口 3 cm)



(a)



(b)

圖 5.2、丙烷流量 3040 ml/min 的 (a) 火焰寬度 9.5 mm 與 (b) 火焰長度 66 mm

(3) 丙烷流量 35 mm (3545 ml/min) 氧氣流量 60 mm (10635 ml/min)  
火焰最高溫度 776°C (熱電耦距離噴口 3 cm)

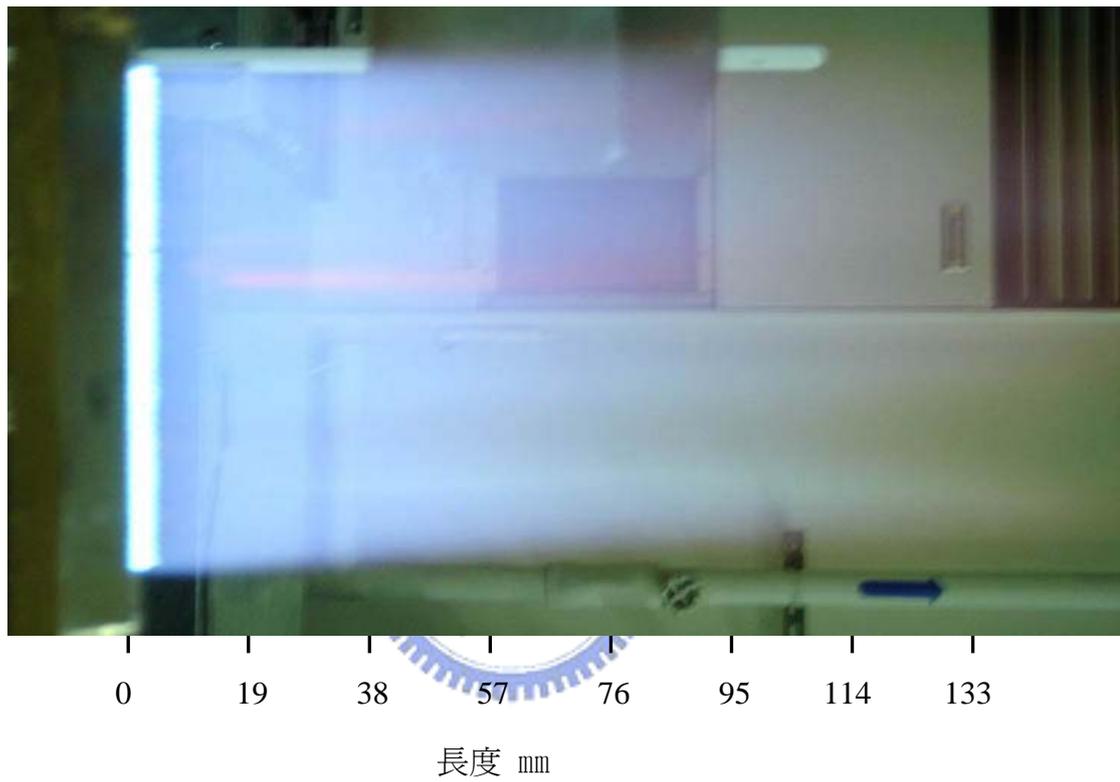
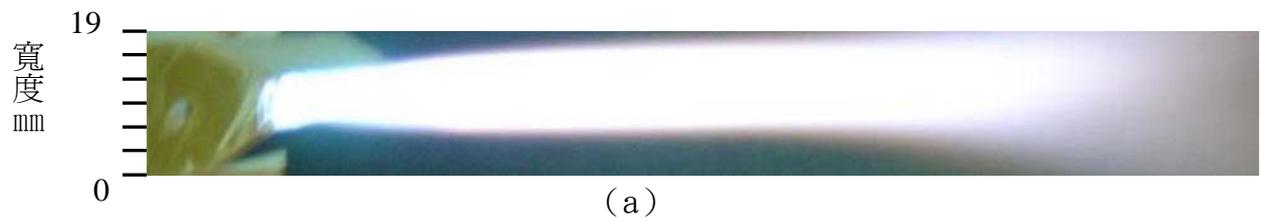
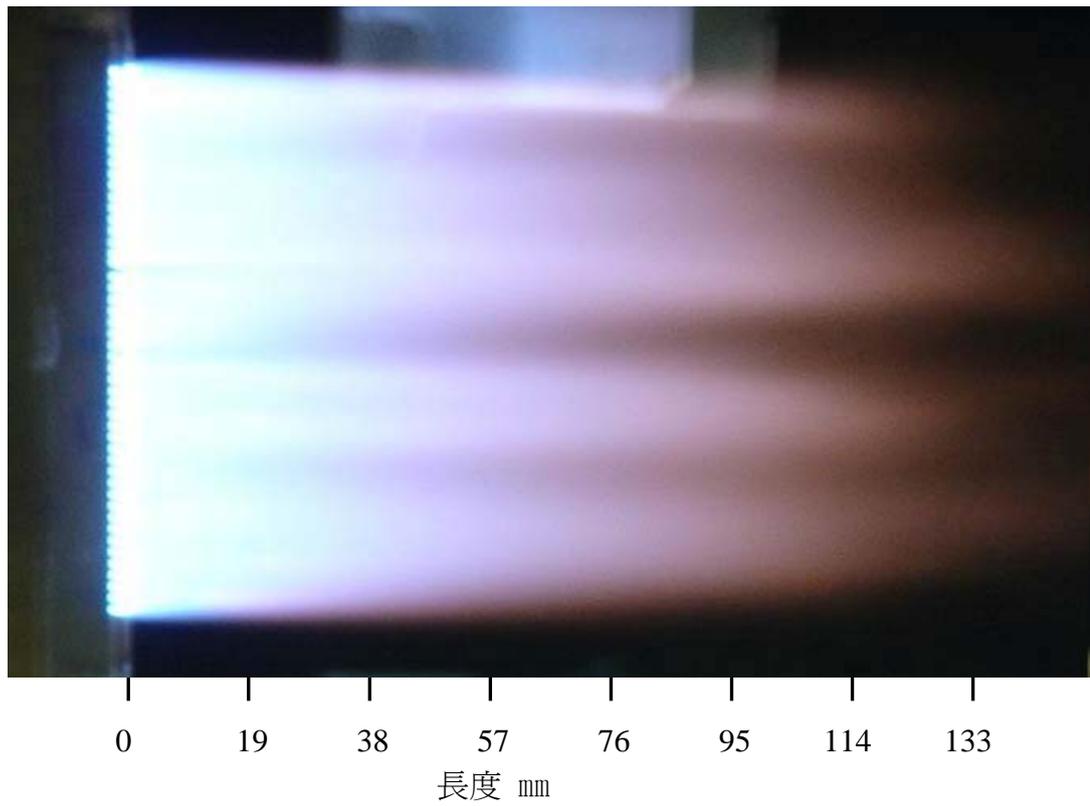


圖 5.3、丙烷流量 3545 ml/min 的 (a) 火焰寬度 10 mm 與 (b) 火焰長度 70 mm

(4) 丙烷流量 40 mm (4050 ml/min) 氧氣流量 60 mm (12150 ml/min)  
火焰最高溫度 1050°C (熱電耦距離噴口 3 cm)



(a)



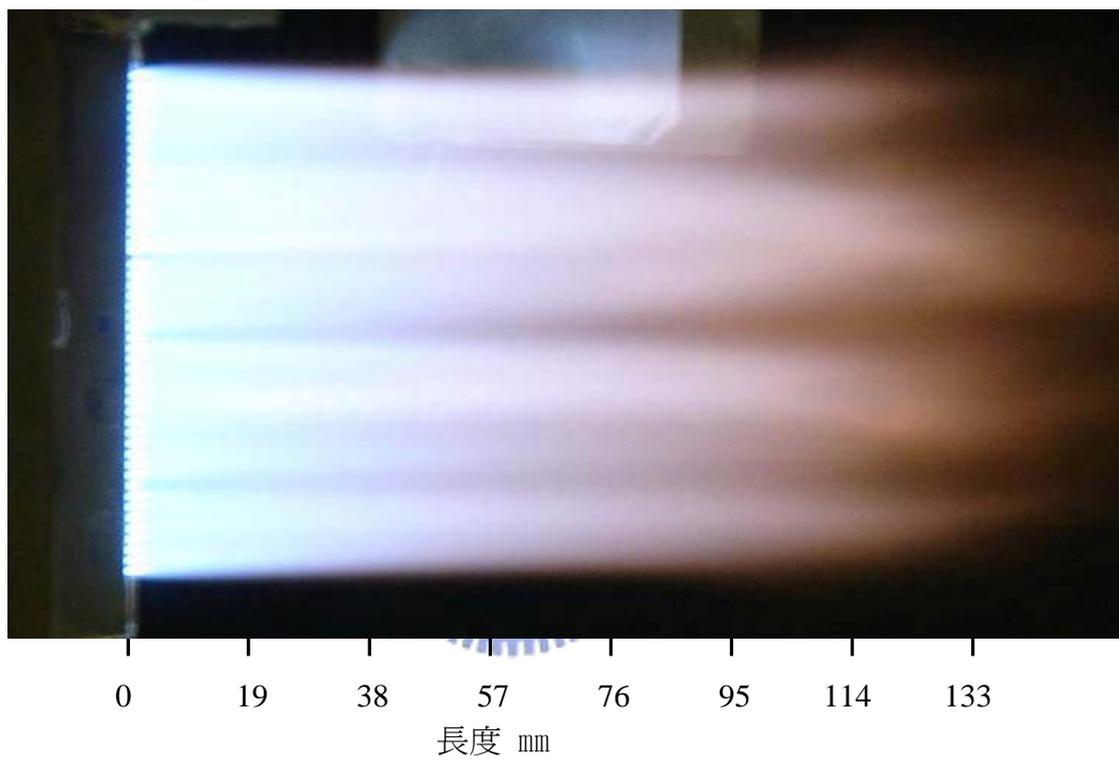
(b)

圖 5.4、丙烷流量 4050 ml/min 的 (a) 火焰寬度 8 mm 與 (b) 火焰長度 75 mm

(5) 丙烷流量 50 mm (5045 ml/min) 氧氣流量 60 mm (15135 ml/min)  
火焰最高溫度 1105°C (熱電耦距離噴口 3 cm)



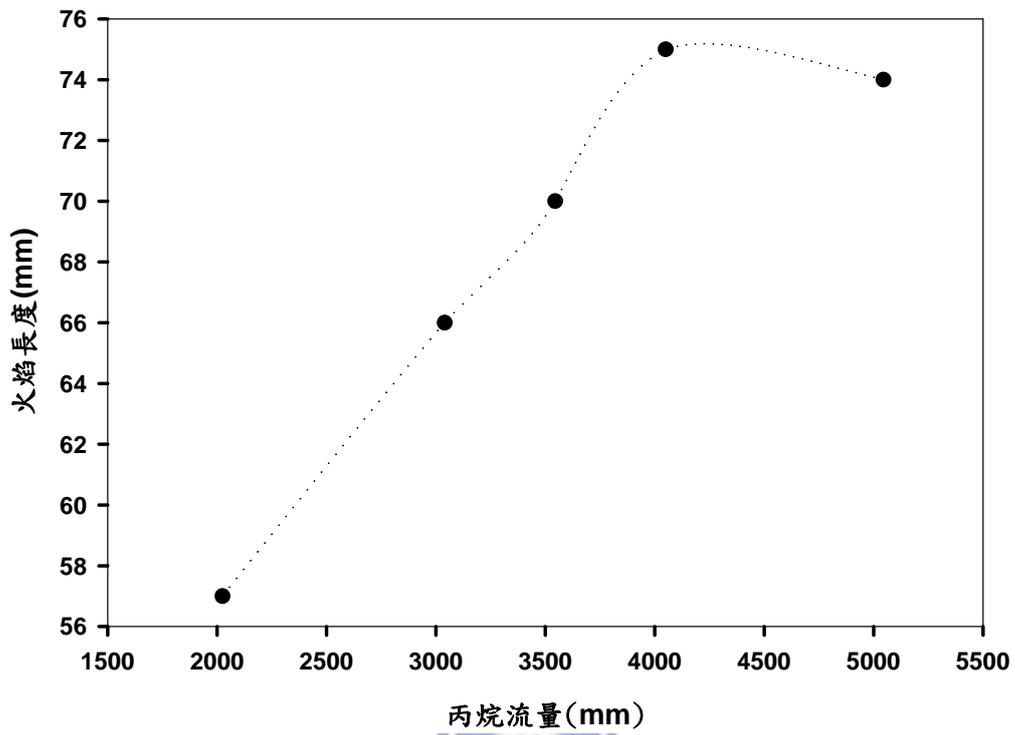
(a)



(b)

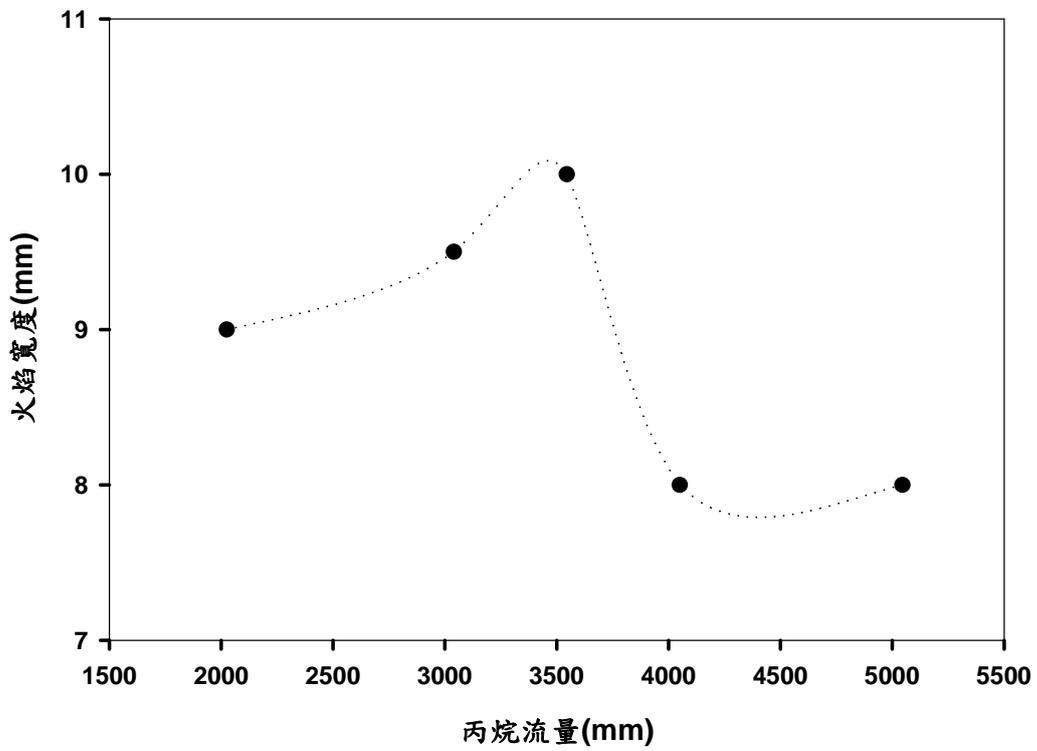
圖 5.5、丙烷流量 5040 ml/min 的 (a) 火焰寬度 8 mm 與 (b) 火焰長度 74 mm

丙烷流量與火焰長度關係



(a)

丙烷流量與火焰寬度關係



(b)

圖 5.6、(a) 丙烷流量與火焰長度關係 (b) 丙烷流量與火焰寬度關係

從丙烷流量與火焰長度關係圖（圖 5.6a）可以知道，當流量越大火焰長度越長，其中原因包括壓力變大與流量變多的關係，由於氣體在管內會因為幾何形狀的改變會有壓力降，所以若有足夠的壓力與流量可以將混合氣體在離開噴嘴的瞬間有足夠的速度；而火焰的長度並非無止盡的增加，當增加到某一定值會將火焰吹熄，而本實驗是在火焰未被吹熄前找出火焰的特性。

由於本實驗所使用的噴嘴口徑為 0.5 mm，但火焰寬度確有 7~9 mm 不等的厚度（圖 5.6b），理由在於當氣體進入未拘束的空間會有擴散的現象，而這樣的現象又與末端管路的長短、幾何形狀有關，末端管路越長則氣體有足夠的距離將紊流趨近穩流，在離開噴嘴時則可以更直順而不發散；而幾何形狀方面，若內部管路是以漸縮的方式設計，火焰寬度會更收斂，但由於本實驗用噴嘴不可拆解所以在加工上有所設限。從丙烷流量與火焰寬度圖可知，當流量加大火焰寬度的確是會變窄，但並非無止盡的便窄，而是會到達某一極限後則不在隨丙烷流量的改變而改變。

在量測火焰方面，因為拍攝技術關係使得有些影像模糊，且不同參數條件下的拍攝倍率也不同，當在估計火焰長度與寬度時是以噴嘴外觀的比例尺的倍數去估計，因此在數據上的精確度並非很高。



## 5-2 實際冷卻系統狀況

第三代噴嘴所加入的水冷與以往不同，在於內部水冷的流道靠近噴嘴孔，氣體經過噴嘴內部的情況下，混合氣不因為溫度過高而在內部自燃發生爆炸，尤其在往下噴的過程中因高溫空氣密度往上對流，如意增加噴嘴溫度，表 5.1 新噴嘴向上噴的水冷狀況。

表 5.1、燃燒過程水冷狀況

	進口溫度 ℃	出口溫度 ℃	溫差℃	水流量 ml	耗時 sec	水流率 ml/sec
丙烷流量 5045ml/min 氧氣流量 151335ml/min	25.2	34.4	9.2	2000	267	7.491
烷流量 4050ml/min 氧氣流量 12150ml/min	25.2	33.8	8.6	1000	126	7.937

從 5.1 表中看出在不同燃燒狀況下出口水溫維持在 30~40°C 之間，因此在連續性的加熱過程不必擔心噴嘴溫度急遽上升降低其壽命，另一方面由於不鏽鋼水冷蓋經過拋光後，對熱輻射的吸收減少。水冷方面比較擔心的部分在於往下噴火時，因先點丙烷再開氧氣助燃，即使這中間的過程再短也會因為丙烷不完全燃燒所產生的碳微粒依附在水冷蓋的表面，久而久之拋光面積一層黑色的碳，不但會增加噴嘴吸收的熱量而且也有可能會在噴嘴表面積碳發生燃燒。



## 參考文獻 (REFERENCE)

- [1] Greifzu, M., "Selection of nozzle for flame cutting and gas welding", Svetsaren, (1990), p16-19
- [2] 王若葦, 鄭詩隆, 林震編, "台灣氣體燃料", 台北市, 欣然, (民國 90 年)
- [3] 邱標麟 譯, "玻璃製造學", 發行者 吳主和, 復文書局, (2002), p2~6, p21~24
- [4] R. M. Fristrom, "Flame structure and processes", Oxford university press, Inc.(1995), p56,p64
- [5] Anderson, J. W. ,and Fein, R. S., "Normal burning velocities and Bunsen flame temperatures from stroboscopically illuminated particle tracks", JCP17,(1949)
- [6] J.A. Barnard, J.N. Bradley, "Flme and combustion", 2<sup>ed</sup>, LONDON NEW YORK, Chapman and Hall, (1984), p5,p256
- [7] V. Narayanan and J. Seyed-Yagoobi and R.H. Page, "An experimental study of fluid mechanics and heat transfer in an impinging slot jet flow", international journal of heat and mass transfer 47, (2004) 1827-1845
- [8] Seongchan Jun, "Controlled fire polishing for scratchitti removal and glass surface reconditioning", Ph.D.thesis, Columbia University, 2002/2, ch5
- [9] T. Yokomori, M. Mizomoto, "Flame temperatures along a laminar premixed flame with a non-uniform stretch rate", (2003.8.6)
- [10] Ajit R. Shenoy and Eugene M. Cliff, "Optimization techniques exploiting problem structure applications to aerodynamic design", Blackburg, Virginia , (1997.4)
- [11] X. Q. Xing , M. Damodaran, "Aerodynamic shape design of nozzles using a hybrid optimization method", (1996)

- [12] 孫泊寧, “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, (1997)
- [13] 蔡文祥, “噴流衝擊擴散火焰研究”, 私立元智大學機械系碩士論文, (1998)
- [14] Shuhn-Shyurng Hou and Yung-Chang Ko, “Influence of oblique angle and heating height on flame structure, temperature field and efficiency of an impinging laminar jet flame”, Energy conversion and management 46, (2005)941-958
- [15] L.C Kwork and C.W. Leung and C.S. Cheung, “Heat transfer characteristics of an array of impinging pre-mixed soot flame jet”, international journal of heat and mass transfer 48 (2005) 1727-1738
- [16] C.E. Baukal and B. Gebhart, “Surface condition effects on flame impingement heat transfer”, Experimental thermal and fluid science 15(1997) 323-335
- [17] M. Portillo, “Bridging process and structure through criteria”, (1994), p.43, p.404 - 405
- [18] R. M. Fristrom, “Flame structure and processes”, Oxford university press, Inc.(1995), p56, p64
- [19] L.L. Dong and C.W. Leung and C.S. Cheung, “Heat transfer of a row of three butane/air flame jets impinging on a flat plate”, International journal of heat and mass transfer 46 (2003) 113-125
- [20] 聯華氣體新竹分公司, 新竹市牛埔南路 219 號, 23-5380331
- [21] Baker, W.E. and Tang, M. J., 1991, “Gas, Dust and Hybrid Explosions”, Fundamental Studies in Engineering, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo
- [22] 邱標麟, “玻璃製造學”, 吳主和, 復文書局, (2002/5), p160
- [23] Kirillin, S. S., 1976, “Engineering Thermodynamics”, Mir Publisher, Moscow
- [24] Gary O. Nelson, “Gas mixtures : preparation and control”, LEWIS publishers, INC., 1992, p41

[25] SEONG-CHAN JUN , ” Controlled Fire Polishing For Scratchitti Removal And Glass Resurfacing ” , Columbia University , Ph.D. Thesis , Feb. 2002 .

[26] Vedat s. Arpact , “CONDUCTION HEAT TRANSFER”, Addison-Wesley Publishing Company Inc , (1972) , p38, p39

[27] B.Gebhart, “Heat Transfer”, McGraw-Hill, New York, 1971

[28] 劉火欽 , “金屬材料” , 三民書局, 民國 71 年 8 月, p60

