

第一章 緒論

1.1 引言

當火焰在引擎或火爐燃燒室中燃燒時，往往火焰面會觸及固體壁面，若固體壁面的溫度低於火焰燃燒時所需的化學反應溫度時，便會降低反應速率甚至造成局部熄滅(quenching)，而產生燃燒不完全的現象，此時不但會造成引擎或火爐的整體燃燒效率降低，而且燃燒不完全所產生的物質也會形成污染物，如碳氫化合物、一氧化碳和黑灰(soot)等，除對引擎或爐具本身造成影響，排放的污染物也對環境造成破壞，因此有需要針對低溫壁面對火焰的影響作研究。

現有相關文獻大多是選擇以甲烷或丙烷做燃料，其中的數值方法解析，由於甲烷與丙烷的詳細化學反應步驟太過複雜，因此常採用一步驟或是簡化的化學反應作數值模擬，然而火焰的冷卻效應常與中間詳細的化學反應機制有關，所以過度簡化的反應機制常無法充分描述實際的燃燒情況。至於實驗性研究，常以量測流場中的溫度分佈、燃氣進口速度和固體壁面的熱傳量為主，對於在冷卻壁附近火焰結構的研究則很少見。

故本研究將探討層流甲烷/空氣預混火焰在冷卻壁面附近的火焰結構。

1.2 文獻回顧

一般研究在處理火焰接觸低溫壁面產生的冷卻熄滅，採取兩個不同的類型，一類是當火焰的傳遞方向與冷溫壁面垂直，稱為正向壁火焰冷卻熄滅 (head-on (stagnation) flame quenching) [1-4]，而火焰方向與冷溫壁平行的稱為側壁火焰冷卻熄滅 (side-wall flame quenching) [5-8]，火焰在受到兩平行低溫側壁的冷卻效應影響時，若兩平行平板間距較寬時，火焰僅受到單側壁冷卻效應，平板間距漸減時，此時火焰受到兩側壁面冷卻影響，但當最小間距小於某一特定值時，火焰則無法穩定存在，此特定值定義為火焰熄滅間距 (quenching distance) [10]。

本實驗主要是探討火焰方向與冷溫壁平行的側壁火焰在冷卻壁面附近的火焰結構，故針對側壁火焰的相關文獻作一回顧：

Ellzey et al. [6] 採用一步驟的化學反應，以二維模式模擬兩平行板之間的冷卻效應對火焰傳播速度的影響。文中探討兩種不同傳播方式的火焰：一是在平板間靜止可燃氣中的火焰傳播，另一是在燃氣進口處給定一速度使火焰固定在某一位置。其結果指出：當平板的間距改變時會影響到火焰在燃燒時的形狀及火焰速度，當壁面的邊界條件限定在絕熱或等溫時，發現火焰形狀有明顯的改變。同時火焰在

絕熱的邊界條件下速度明顯的較快。造成兩板間火焰傳播速度增加的原因在於火焰反應面積增加。

Carrier et al. [7]用數值方法以一步驟化學反應機制模擬二維、等壓的狀況下，火焰在平板流中的冷卻效應，其中探討平板間距對溫度分佈的影響，以及燃料，氧氣的質量分率的分佈，同時也在該文中提到在固體冷卻壁的冷卻層（quenching layer）中因燃燒不完全所殘餘之未燃氣體會產生一擴散火焰，但由於該研究所使用的化學反應機制為一步驟反應，故不能詳細的顯示出擴散火焰的存在

Fairchild et al. [8]利用丙烷/空氣的混合氣體在不同的質量分率及不同的平板間距下(9.75mm、8.20mm、7.60mm、6.65mm、5.25mm)，選取不同的高度測試點，利用拉曼光學法(Raman Spectroscopy)來量測兩平行板間因冷卻效應而造成的溫度變化，由其實驗結果發現，當平行板間距離夠寬(>6.65mm)時，火焰相當於只被單邊的冷壁冷卻，而當平行板間距離較小時(<5.25mm)則火焰受到兩邊壁面冷卻溫度的影響，造成全區溫度均降低。此外，燃氣當量比越接近1時溫度分佈越高，且當測試點越接近火焰面時，溫度也越高。另外，火焰在低溫壁的冷卻效應比火焰在較高溫壁處來的強烈。

Yan and Holmstedt [9]用三維數值分析方法模擬火焰在兩垂直低溫壁間的熱傳狀況，改變兩低溫壁的間距及燃燒器的輸出熱量，模

擬出熱傳通量分佈情形。結果指出，在低溫壁被冷卻時的熱傳效果較熱壁佳，垂直壁的絕熱與否也影響了熱傳量。

Ezekoye et al. [11,12] 利用一引擎燃燒室觀察火焰冷卻熄滅效應現象對熱傳效果造成的影響，實驗上使用改變甲烷和丙烷的混合當量比與燃燒室的壁面溫度（298 K - 423 K），量測壁面溫度和熱傳量的變化，發現燃氣的混合當量比與熱傳量的影響並不明顯，而壁面溫度對熱傳量則有較大的影響，結果顯示當壁面溫度越高熱傳量就越低，而壁面溫度較低時，熱傳量便升高。文中也採用一步驟化學反應進行數值方法模擬。

胡耀仁 [13] 用數值方法模擬低溫壁面對均勻層流氫氧預混火焰之冷卻效應，將問題簡化為二維，其中氣相化學反應部分分別就一步驟與多步驟詳細化學反應來探討，由結果發現一步驟化學反應的結果與多步驟詳細反應並不相同，而多步驟詳細化學反應模擬時可明顯看出在冷溫壁面上有殘餘物質，而產生一類似二次火焰的次高溫反應區，一步驟反應的結果則無此現象。且以多步驟詳細化學反應模擬時也發現不同的燃氣進口速度會使火焰固定在不同的位置，不會因為進口速度大於火焰速度而使火焰吹熄，另外也得到當兩平行板間距小於某一個特定值之後，無論如何都無法點燃氣體。

2002 年 Andrae and Bjornbom[14]利用數值方法模擬在不同的大氣壓力、不同的低溫壁面溫度、不同的低溫壁面材質及不同的甲烷/空氣當量比情況下，低溫壁對預混火焰的影響，其結果指出當低溫壁面溫度低(600K)時，預混火焰受到低溫壁溫度的影響較低溫壁面材質的化學催化影響大，而當低溫壁溫度高(1200K)時，低溫壁面材質的化學催化效應的影響大於低溫壁溫度的效應。

此外，低溫壁面對於引燃機制的影響也相當重要，故亦針對此部分作扼要的文獻回顧：

1981 年 Trevino and Sen[15]以數值方法模擬分析二維暫態平板流從給定壁溫開始，經壁面絕熱到產生穩定火焰的引燃時間，其結果發現最高反應區會離開壁面，並往下游的方向傳遞，此時因為在壁面附近的冷卻效應很大，壁面的化學反應較弱，不會有火焰的產生。

Law [16] 於 1979 年以數學漸近理論，分析平板流邊界層的引燃現象，發現當活化能很大時，化學反應的邊界層可視為，由靠近壁面局部相似解之擴散-反應層及遠離壁面不具相似解之擴散-對流層所組成。

1999 年趙令鈞 [17] 以數值方法直接對暫態統御方程式進行模擬。藉由 Van't Hoff criterion，分析不同系統條件下（如不同壁面溫度、流場拉伸率及壁面質量流率等。），對引燃延遲及燃氣消耗

量的影響。並了解整個引燃過程的溫度分佈變化。結果發現由於燃燒反應的活化能很高，使得壁面溫度對引燃時間的關係非常敏感，約呈一指數下降關係。壁面的溫度愈高則所需要的引燃時間愈短。

1.3 研究目的

在胡耀仁[13]論文中以多步驟詳細化學反應機制模擬氫氧預混火焰在固定低溫壁下的冷卻效應，得知當火焰接觸到固體低溫壁時會產生冷卻熄滅的現象，而造成燃燒不完全，使得在低溫壁面上有未燃物質累積而再度發生次高溫反應區，形成一二次火焰，且在文中提到若兩平行固體冷溫壁的間距小於一特定值，無法形成穩定火焰。本研究將以甲烷/空氣混合氣，利用可見光及 schlieren 光學觀測方法在固定壁溫下，改變平行低溫壁的間距，以觀察在固體低溫壁面附近火焰的結構形狀。同時藉由 S-type 熱電偶在兩低溫壁間針對不同的當量比量測出溫度分佈，以供未來數值分析作比較。

第二章 實驗設備與方法

2.1 實驗設備

本實驗所使用之設備，請參見圖一、圖二及圖三之實驗配置示意圖和圖四之裝置照片圖，其主要內容包括下列部分：

1. 平面火焰爐部分
2. 低溫壁部分
3. 光學觀測及影像擷取部分
4. 溫度量測部分

以下就各部分分別加以介紹：

1. 平面火焰爐部分：

- (a)本實驗以一自行設計之長方體爐具(長 13cm、寬 8cm、高 8cm)(圖二)，燃燒甲烷/空氣之混合氣體，並使用多孔性爐面使火焰成均勻的平面火焰。爐面長度為 70 mm，寬度為 15mm、10mm 或 7mm，以配合相當的低溫壁間距。為了使外界流場的影響降到最小，在火焰面的前後放置兩塊透明石英板，以利光學觀察。
- (b)甲烷、空氣由高壓鋼瓶氣提供，按實驗需求混合出指定當量比之可燃混合氣。

(c)浮子流量計：控制甲烷及空氣的流量，使預先混合的燃氣達到所需的當量比。浮子流量計的校正乃預先採用 Shinagawa 濕式流量計(wet gas meter)作流量的校正工作。在實驗中，甲烷/空氣混合氣的進口速度控制在常溫下 0.2m/s 為上限，由經驗知當燃氣進口速度超過 0.2m/s 時，會產生皺摺火焰。

2. 低溫壁部分：

在本實驗之低溫壁為一上方開口之長方形紅銅槽(高 8cm、寬 2.5cm)之內側壁，壁面加工成平面，壁厚 3mm，槽中裝入沸水，由於實驗時火焰不斷提供熱量，使水保持沸騰狀態，乃達到壁面溫度保持恆溫的要求。因金屬壁之熱阻會造成小量溫差，經熱電偶量測得知其壁面溫度為 $390 \pm 10\text{K}$ 。

3. 光學觀測及影像擷取部分：

觀察甲烷/空氣預混火焰面在低溫壁面的火焰結構，採用可見光及 schlieren 觀測。後者之配置如圖一、圖三及圖四所示。在光源部分，以兩內部光滑均勻之半圓金屬，內置 50 瓦的燈泡，在外鑽一小孔使光線經均勻反射射出，形成一類似點光源，並置於凹面鏡焦距上。凹面鏡直徑為 10cm，焦距為 165cm。schlieren 觀測法乃利用火焰在燃燒時溫度梯度會造成周圍空氣密度的改變，使得平行光線在通過測試區時會因為密度不同的關係而造成折射，乃在一白色屏幕上造

成具亮度差異的影像，藉以觀察低溫壁附近的火焰結構形狀。可見光觀察則直接使用 V8 攝影機記錄實驗過程。

4. 溫度量測部分：

(a)熱電偶：利用線徑為 50 μm 、熱電偶頭直徑約為 110 μm 之 Pt/Pt-10%Rh(S-type)熱電偶及溫度擷取設備量測不同當量比之甲烷/空氣預混火焰在兩低溫壁之間不同的垂直及水平位置的溫度。因為本實驗在高溫下進行，為了避免熱電偶頭在高溫下被催化而產生過高的量測結果，需採用耐高溫的塗佈 (coating)，根據文獻[20]採用 BeO/Y₂O₃作為熱電偶頭之表面塗佈。塗佈後，熱電偶頭直徑約為 130 μm ，其表面放射係數為 0.6(Peterson 1981)。此外熱電偶頭的輻射效應，必須做溫度校正，利用能量守恆關係

$$T_g = T_j + \frac{e\mathbf{s}}{h}(T_j^4 - T_{sur}^4)$$

其中 T_g 為真實燃氣溫度、 T_j 為熱電偶測量溫度、 T_{sur} 為環境溫度，取壁面溫度 390K、 $e=0.6$ ； $\mathbf{s} = 5.67 * 10^{-8}$ ， h 為熱對流熱傳係數，根據估算本實驗 $Re_D \approx 0.5$ ，故由

$$Nu_D = 2 + (0.4Re_D^{1/2} + 0.06Re_D^{2/3})Pr^{0.4}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{1/4}$$

可以推估 $Nu_D \approx 2$ 。根據此一校正方法，在 $T_j=1000\text{K}$ 及 1500K 時，溫度校正量分別為 24K 及 122K。

(b)溫度擷取設備：使用 S-type 的溫度量測儀器 (OMEGA MODEL650) , 其量測誤差為 $\pm 0.5\%$ 。

2.2 實驗步驟

(1)平面均勻預混火焰的產生：

藉由浮子流量計調整甲烷/空氣進口流量，將室溫下的進口流速固定在 0.2m/s 並達到指定的當量比。再以火花點火槍在低溫壁出口上方點燃，點燃後火焰乃迅速回傳至測試區內並形成一平面火焰。

(2)保持低溫壁溫度：

採用沸水恆溫法，使低溫壁內的水不斷沸騰以達到恆溫的效果。

(3)schlieren 觀測：

實驗配置如前文說明，當實驗進行時以一點光源照射凹鏡面，在屏幕上觀察成像。

(4)溫度量測：

利用熱電偶水平垂直移動架，針對不同的垂直及水平位置做溫度的量測，並記錄之。

第三章 結果與討論

本研究是建立一平面火焰爐實驗裝置，在固定低溫壁溫度及甲烷/空氣混合氣的進口流速下，針對不同的平板間距和燃氣當量比，來探討甲烷/空氣預混火焰在低溫壁附近的冷卻效應。定性的觀察採用可見光直接拍攝及 schlieren 觀察法來觀察火焰結構；定量的觀察則以 S-type 熱電偶針對不同的當量比下量測出低溫壁間的溫度場。

3.1 邊界層效應

圖五(a)為本研究所使用的 schlieren 光學方法所觀測的蠟燭燭火成像，圖五(b)為圖五(a)經由數位方式轉換成負片，以加強黑白對比。在 schlieren 觀測法中在光線經第二面凹面鏡反射聚焦處，放置一刀片，使成像分成明暗兩區以強化對比，而造成圖五(a)中左右兩半有黑白差異。以下所採用的照片均為負片且均使用刀片以強化對比。圖六(a)為低溫壁在未反應時之 schlieren 影像，可以明顯看出兩低溫壁的邊界，但當有預混火焰時，其 schlieren 影像如圖七(b) ($F=1.0$) 圖八(b) ($F=0.7$) (以上兩低溫壁間距 W 均為 10mm) 及圖十一(b) ($F=1.0$) 圖十二(b) ($F=0.7$) (以上 W 均為 15mm)，以上 schlieren 影像顯示，當預混甲烷/空氣火焰發生時，在低溫壁附

近產生類似邊界層區域，但在垂直高度 $H=50\text{mm}$ 處之後，氣流開始發生擾動現象，屬於紊流區域，故不屬本文討論範圍。且根據觀察發現，當 $\phi=1.0\sim 0.6$ 時，靠近低溫壁類似邊界層區域大小並無明顯差異，但區域亮度隨當量比的降低而減弱。直到 $\phi=0.5$ 時才產生變化如圖九(b)及圖十三(b)所示。由於 schlieren 影像中顯著的明暗分界乃因為介質的折射率有明顯的變化，在本例中，可能受到低溫壁附近的溫度邊界層以及低溫壁附近的未燃物質形成的折射率變化所造成，對於此現象還需要在做進一步的探討與研究。

3.2 當量比對冷卻效應的影響

3.2.1 schlieren 與可見光觀測：

本研究中針對不同甲烷/空氣的當量比 (F) 下分別以可見光直接觀測及 schlieren 觀察燃燒情形。從圖七(a) ($F=1.0$, $W=10\text{mm}$)、圖八(a) ($F=0.7$, $W=10\text{mm}$)及圖九(a) ($F=0.5$, $W=10\text{mm}$)的可見光火焰影像圖中，我們發現在 $W=10\text{mm}$ 時，當量比減小，爐面上方的主要火焰的厚度也就減小，同時受到兩低溫壁的影響效果也愈顯著，火焰明顯的受兩低溫壁影響而沿壁面產生拉伸現象，且拉伸現象隨 ϕ 減少而增強。上述火焰可見光成像的對稱性並不理想，乃是低溫壁的壁厚略有差異所致，將來會針對此加以改進。再者，透過 schlieren 影像可

以看出在圖七(b)以及圖八(b)並無太大的不同，事實上，當改變甲烷/空氣的當量比從 $F=1.0$ 至 $F=0.6$ 過程中，schlieren 影像形狀並沒有改變，只是成像區顏色變淺，亮度減弱，直到 $F=0.5$ 及 0.45 時，火焰開始沿壁面呈現強烈拉伸(圖九(a)、圖十(a))，此時之 schlieren 影像與較大的 F 值時有顯著的不同(圖九(b)、圖十(b))。當略小於 0.45 時，預混火焰無法穩定而產生激烈抖動現象，而逐漸往低溫壁上方震盪上移，直至熄滅。

此外，在實驗的過程中，發現在當量比從 $F=1.0$ 降至 $F=0.8$ 的過程中，在靠近低溫壁的上段處的可見光影像中可以看見有二次火焰的產生，其位置始於 $H\sim 30\text{mm}$ 處，在圖六(b)中僅顯示出低溫壁下游的火焰，在壁內部的火焰不易顯示出來。當 F 減小時火焰便越不明顯，當 $F<0.8$ 時則無此二次火焰，此現象應是在當量比(F)較大時，由於預混火焰受到低溫壁冷卻效應的影響，有一些未完全反應的燃料或殘餘物質，直到低溫壁的上段附近，即下游處才獲得足夠的引燃條件，進而產生二次火焰，而在當量比較小時，火焰為貧油火焰，殘餘未燃物較少，無法產生二次火焰。

胡耀仁 [13] 曾以數值方法分析多步驟詳細化學反應模擬低溫壁面對穩態層流氫氣/氧氣預混火焰的冷卻效應，結果指出在低溫壁面，靠近下游的位置附近有二次火焰的產生，本研究選用層流甲烷

/空氣預混火焰，證實其預測，目前除了 Carrier et al.[7]的推測性敘述外，尚沒有任何文獻對此現象提出直接證據。以上之二次火焰在 schlieren 影像中並未造成明顯差異(見圖七(b))。

3.2.2 溫度分佈

由於可見光觀察發現，低溫壁的冷卻效應會影響壁面附近的火焰形狀，為取得定量的溫度分佈，本研究也利用 S-type 熱電偶，針對不同的當量比在 $W=10\text{mm}$ 下之兩低溫壁間做溫度場的量測。

在量測 $\phi=1.0$ 時，在垂直高度 $H=2\text{mm}$ 處，熱電偶在進行量測時被燒熔破壞，白金熔點為 2042K ，推估此區溫度應大於 2000K 以上，因此在 $F=1.0$ 時(圖十五)，無垂直高度 2mm 之實驗數據。由圖十四之等溫線圖可看出，當 $\phi=1.0$ 時的預混火焰在低溫壁面附近的溫度分佈有二次火焰，亦即在 $H=30\text{mm}$ 附近，有一局部增溫的區域。圖十五進一步可看出，此處溫度約達 1000K ，比上游 $H=25\text{mm}$ 處的溫度高約 200K 。此項結果配合前面所述，當 ϕ 從 1.0 到 0.8 時，在低溫壁面附近應是受到低溫壁冷卻效應的影響，使得上游未完全反應的部分未燃物，在較下游的地方，才達到引燃條件，進而產生二次火焰，這與胡耀仁〔13〕以多步驟模擬氫氣/氧氣混合氣燃燒時，在固體冷卻壁的冷卻層 (quenched layer) 中因燃燒不完全所殘餘之未燃物會

產生二次火焰的結果相符合。此二次火焰在 $\phi=0.9$ 及 0.8 時均存在 (未圖示)。當 $\phi=0.7$ 時的等溫線分佈圖(圖十六)及在各個垂直高度的橫向溫度分佈(圖十七)中,均無次高溫區存在。圖中, $H=25\text{mm}$ 處,顯示在兩低溫壁間,溫度分佈的對稱性並不理想,同前所述,乃是低溫壁的壁厚差異所致。整體而言,距離火焰面愈遠時(即愈下游)溫度愈低,且在靠近低溫壁面附近處均有明顯的溫度下降,乃因受到低溫壁冷卻效應的影響。

當 $\phi=0.5$, $W=10\text{mm}$ 時,預混火焰會沿著壁面有激烈的拉伸現象(圖九(a)),且其類似邊界層在接近燃氣出口處的 schlieren 影像(圖九(b))也與較大當量比時有明顯的不同,配合定量的溫度分佈(圖十九)在垂直高度 $H=2\text{mm}$ 處靠近低溫壁面附近的溫度較 $H=5\text{mm}$ 處低,應是當預混火焰的當量比降到 $\phi=0.5$ 時,由前述的可見光及 schlieren 觀察現象可知,預混火焰會受到冷卻效應而沿低溫壁面產生一拉伸火焰,故在靠近低溫壁面附近的位置因無火焰,屬於低溫區(參見圖十八),而延遲至較下游處才有火焰出現。

3.3 兩低溫壁間距對冷卻效應的影響

本研究也針對了不同的低溫壁間距做現象觀察與探討,比較圖七(a)、圖八(a)、圖九(a)($W=10\text{mm}$)及圖十一(a)、圖十二(a)、圖十三

(a) ($W=15\text{mm}$)，可發現在同樣的當量比下，兩低溫壁の間距較小者，預混火焰沿壁面拉伸的現象較為強烈。這與文獻〔8〕中討論到的當兩低溫壁間距較大時，預混火焰只相當於被單邊的低溫壁產生冷卻效應，而當兩低溫壁間距夠小時，預混火焰受到兩邊低溫壁的冷卻效應的趨勢相符合。在 $\phi=0.5$ ， $W=15\text{mm}$ 時，在可見光影像(圖十三(a))中預混火焰成皺褶狀(縱向火焰產生位置有差異，因採二維觀測，故火焰有重疊現象，產生類似兩層火焰)應是此時的火焰速度小於燃氣進口速度，火焰乃增加反應面積，以增大燃氣的消耗率所致。此時的 schlieren 影像(圖十三(b))也受到影響而改變。而在 $\phi=0.5$ ， $W=10\text{mm}$ 時(圖九(a)、(b))，皺褶火焰現象被拉伸火焰取代，應是拉伸的火焰面積已大致足以消耗所供應的可燃氣，故未在中央區域形成皺褶。

3.4 引燃極限與最小熄滅間距

本實驗發現當兩低溫壁間距為 10mm ，甲烷/空氣預混氣體的室溫下進口速度為 0.2m/s 時，當量比降到 0.45 以下火焰便會熄滅，此項結果與文獻〔10〕中所提到的點燃極限 $\phi=0.46$ 的結果相符合。

此外，在 $W=7\text{mm}$ 時，預混火焰在較大當量比時(1.0)，點燃後，火焰會回傳至燃氣進口區，產生約 1~2 秒的震動火焰，接著發生聲

響而迅速熄滅。在文獻[10]中指出甲烷在 $W=1.0$ 時，熄滅間距為 2.5 mm。與本實驗比較，兩者的差異在於實驗設備不同所致，一般採用圓管火焰，進行熄滅間距的觀察，在本實驗中採用平面火焰爐，火焰雖已傳回爐面，但因不穩定性，而發生震盪及瞬間膨脹，進而導致熄滅。由於兩者間產生熄滅的機制不同，以致在數值上有差異。在未來，也將針對 $W=8\text{mm}$ 、 9mm 繼續做觀察。以找出正確的熄滅間距。

第四章 結論

本研究主要目的是觀察探討層流甲烷/空氣預混火焰在低溫壁面附近的火焰結構。實驗工作包括建立一層流平面火焰爐，並在固定低溫壁溫度，及甲烷/空氣混合氣進口速度下，針對不同的燃氣當量比和平板間距，定性上以可見光及 schlieren 方法觀察火焰結構，定量上利用了熱電偶針對不同的當量比在兩低溫壁間做溫度場的量測。所得結論如下：

- (1) 在兩低溫壁之間，層流預混火焰在燃燒時形成的 schlieren 影像中會存在類似邊界層區域，此區域形成之原因仍須繼續研究探討。
- (2) 在 $\phi = 1.0 \sim 0.8$ 之間受到低溫壁面冷卻效應的影響，主要火焰在低溫壁面旁有些微拉伸，並在垂直低溫壁上段有二次火焰的發生。此與胡耀仁[13]的數值分析結果相符，在現有文獻中並無類似此實驗結果。當 $\phi = 0.5 \sim 0.45$ ， $W=10\text{mm}$ 時，沿著低溫壁面有強烈拉伸火焰的產生，此外在 ϕ 略小於 0.45 時火焰會發生震盪並迅速熄滅。
- (3) 兩低溫壁的間距較小時，層流預混火焰受到兩邊低溫壁的冷卻效應影響較大。而在可見光影像中，在低溫壁旁呈現較強烈的火焰拉伸現象。

(4)在 $W=7\text{mm}$ 時火焰無法產生穩定平面火焰，會發出聲響而快速熄滅，對於存在穩定火焰的最小間距，仍須再觀察 $W=8\text{mm}$ 、 9mm 才能作進一步的確認。

參考文獻

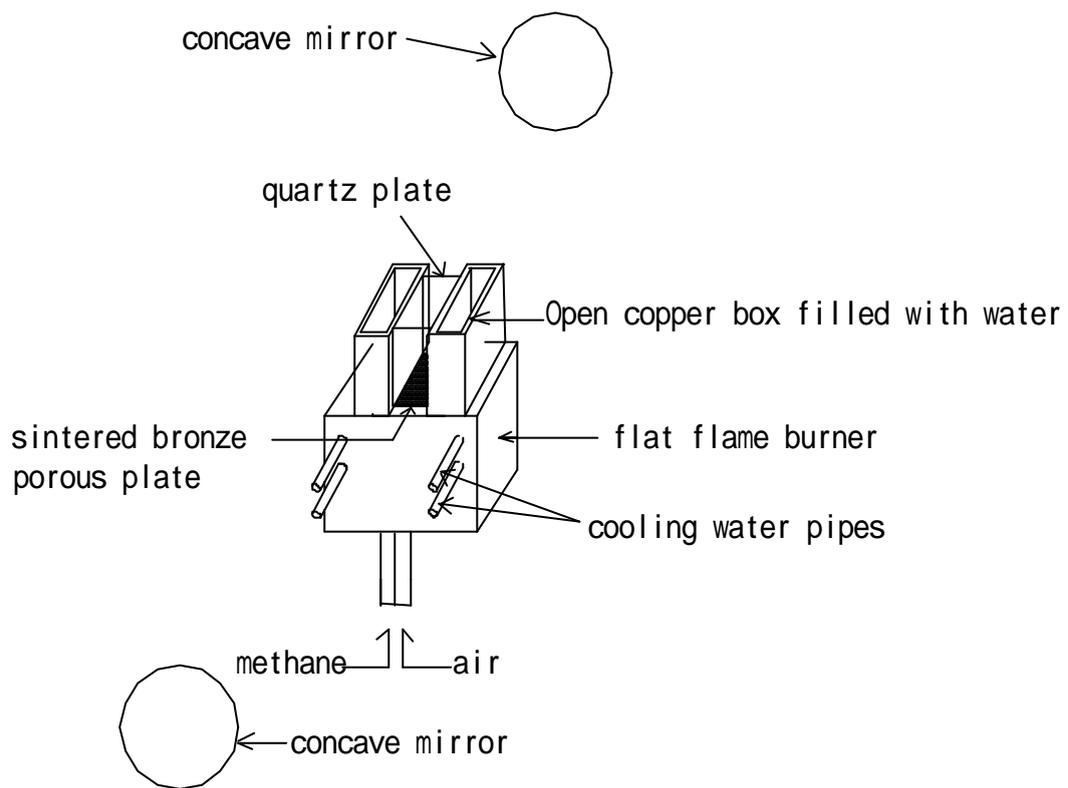
- [1] Wichman, I.S. and Bruneaux, G., “Head-On Quenching of a Premixed Flame by a Cold Wall,” *Combustion and Flame* 103: 296-310 (1995).
- [2] Kim, H.M., Lee, S.R. and Chung, S.H., “Numerical Study on the Structure and Extinction of Stretched Lean H₂/Air Premixed Flames,” *Transport Phenomena in Thermal Engineering* 74: pp.643-647 (1993).
- [3] Westbrook, C.K., “A Numerical Study of Laminar Wall Quenching,” *Combustion and Flame* 40:81-99 (1981).
- [4] Vlachos, D.G., Schmidt, L.D., and Aris, R., “Ignition and Extinction of Flames Near Surfaces: Combustion of H₂ in Air,” *Combustion and Flame* “ 95:313-335(1993).
- [5] Poinot, T. J., Haworth, D.C. and Bruneaux, G., “Direct Simulation and Modeling of Flame-Wall Interaction for Premixed Turbulent Combustion,” *Combustion and Flame* 95:118-132 (1993).
- [6] Hackert, C.L., Ellzey, J.L., and Ezekoye, O.A., “Effects of Thermal Boundary Conditions on Flame Shape and Quenching in Ducts,” *Combustion and Flame* 112:73-84(1998).
- [7] Carrier, G.F., Fendell, F.E., and Feldman, P.S., “Laminar Flame Propagation/Quench for a Parallel-Wall Duct,” *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1984, pp.67-74.
- [8] Fairchild, P.W., Fleeter, R.D., and Fendell, F.E., “Raman Spectroscopy Measurements of Flame Quenching in a Duct-Type Crevice,” *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1984, pp.85-90.

- [9] Yan Z., and Holmstedt G. “Three-dimensional Computation of Heat Transfer from Flame Between Vertical Parallel Walls,” *Combustion and Flame* 117:574-588(1999).
- [10] Turns, S.R., “An Introduction to Combustion,” McGraw-Hill, Inc.1996.
- [11] Ezekoye, O., Greif, R., and Sawyer, R.F., “Increased Surface Temperature Effects on Wall Heat Transfer during Unsteady Flame Quenching,” *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1992, pp. 1465-1472.
- [12] Ezekoye, O.A., “Heat Transfer Modeling during Knock and Flame Quenching In an Engine Chamber,” *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, *The Combustion Institute*, 1996, pp. 2661-2668.
- [13] 胡耀仁 “The Quenching Effect of Cold Walls on Steady Laminar Premixed H₂/O₂ Flame,”國立清華大學動力機械工程學系碩士論文(2000).
- [14] Andrae J. and Bjornbom P. “Numerical Studies of Wall Effects with Laminar Methane Flames” *combustion and Flame* 128:165-180(2002).
- [15] Trevino, C. and Sen, M. Transient Phenomena in Boundary Layer Ignition With Finite Plate Thermal Resistance, *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, p.1781 (1981).
- [16] Law, C.K and Law, H.K., “Thermal-ignition Analysis in Boundary-Layer Flows.” *J. Fluid Mech.*, 92:97(1979).
- [17] 趙令鈞 ” Ignition Analysis of Combustible Stagnation-Point Flow” 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文(1999).
- [18] Eckert E.R.G and Goldstein R.J “Measurements in Heat Transfer,” McGraw-Hill, Inc.1976.
- [19] Egolfopoulos F.N., Zhang H. and Zhang Z. ”Wall Effect on the Propagation and Extinction of Steady, Strained, Laminar Premixed Flames” *Combustion and*

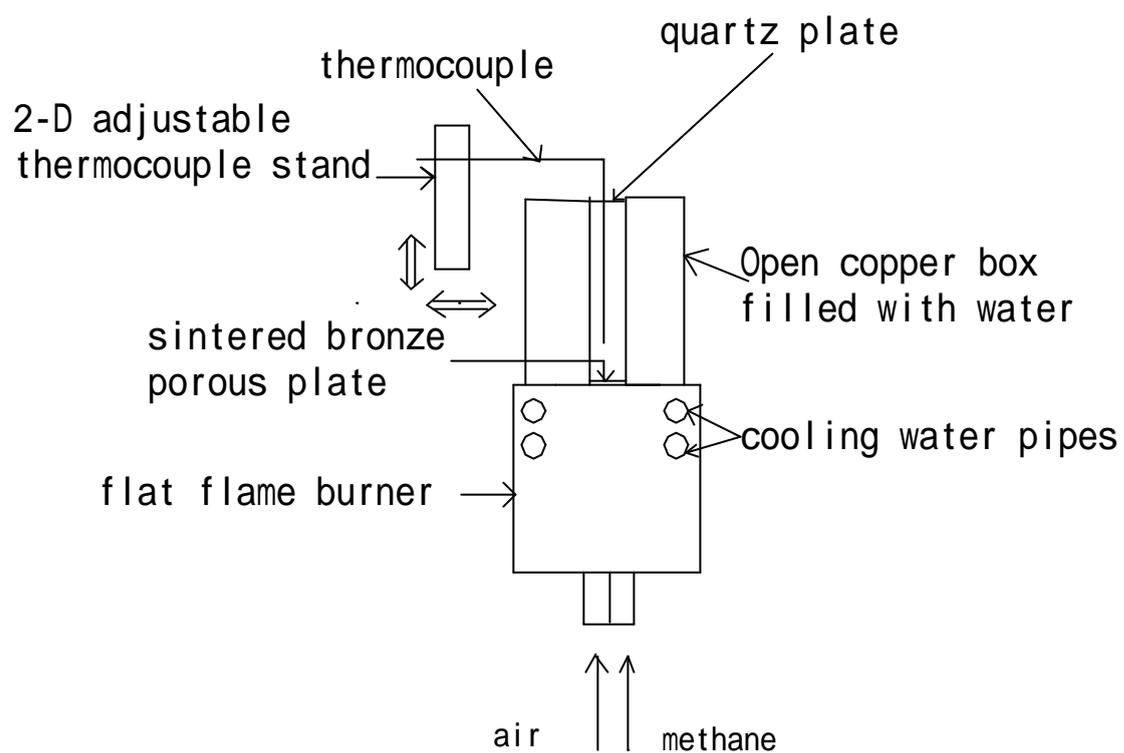
Flame 109:237-252(1997).

[20] Kent, A."A Noncatalytic Coating for Platinum-Rhodium Thermocouples,"

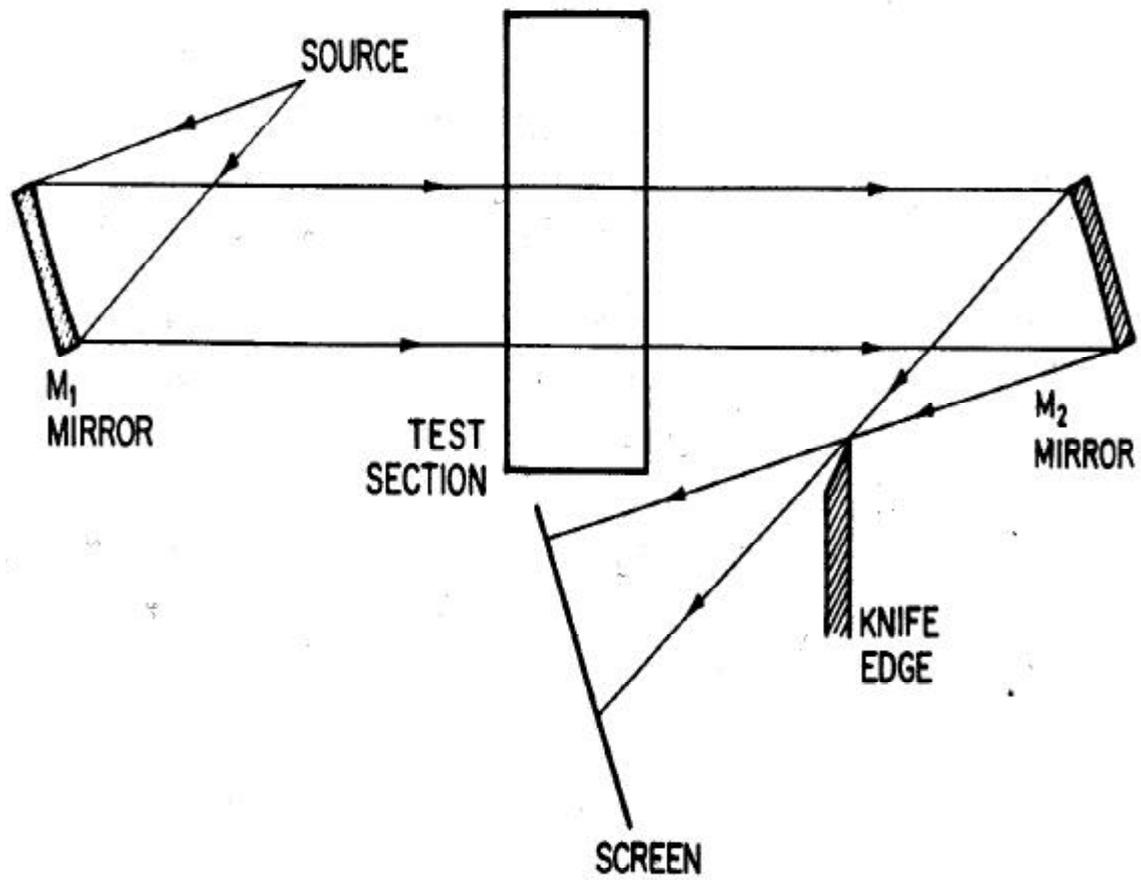
Combustion and Flame 14:279-282(1970).



圖一、實驗裝置示意圖

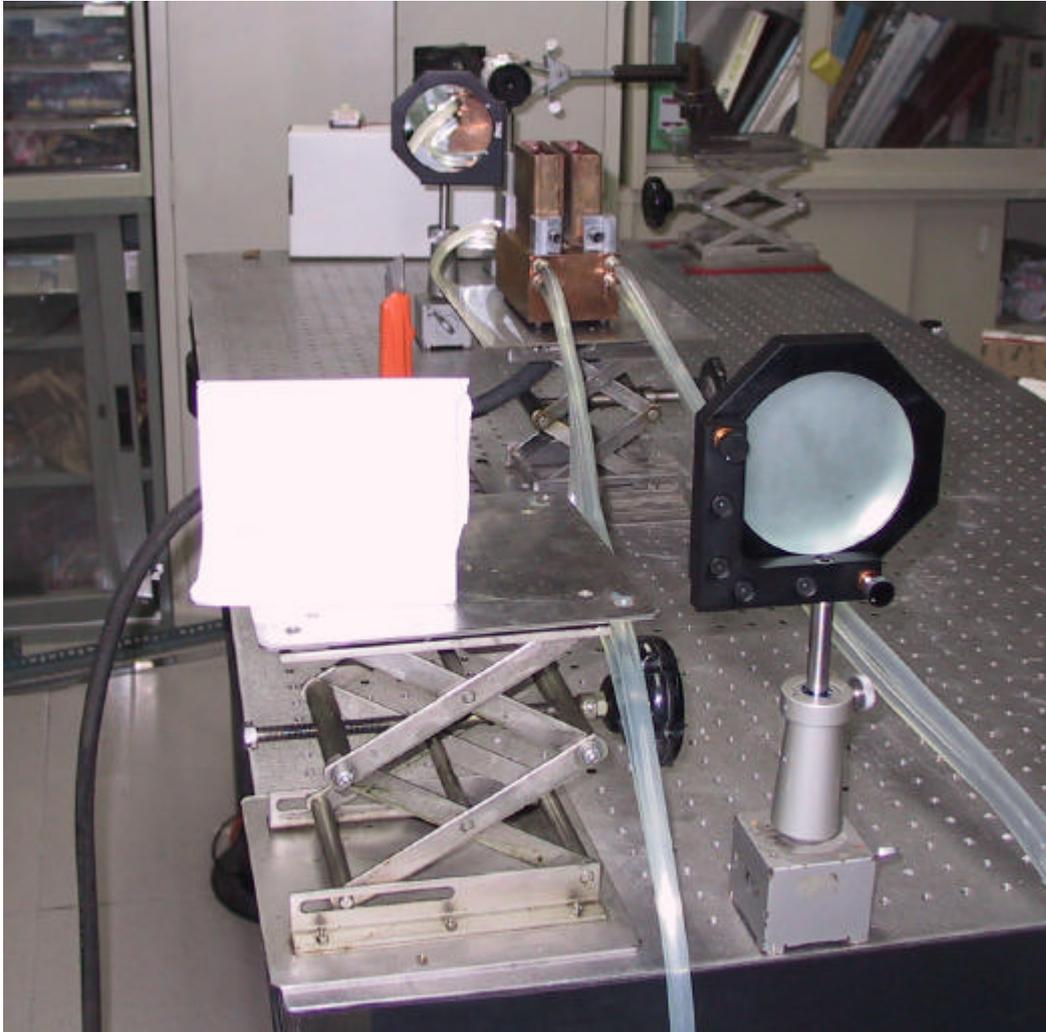


圖二、平面火焰爐裝置示意圖



圖三、schlieren 光學觀測架設方式示意圖

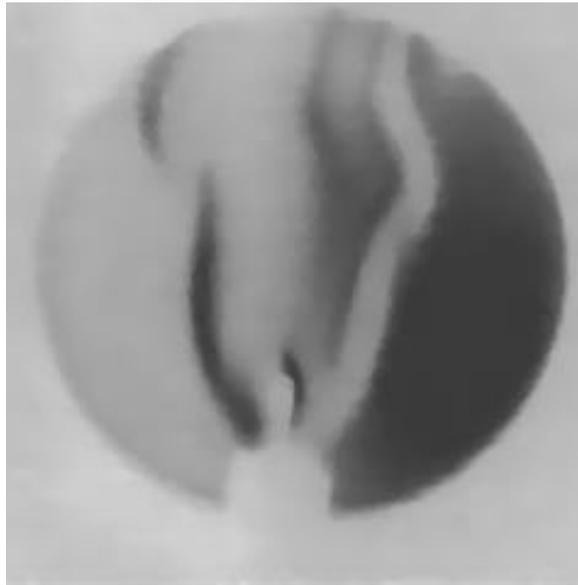
(取自 Eckert E.R.G and Goldstein R.J [18])



圖四、 實驗裝置照片圖



(a)

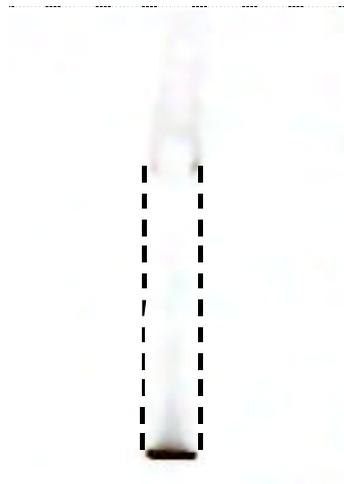


(b)

圖五、(a)schlieren 光學觀測之燭火的成像情形
(b)以負片表示上圖



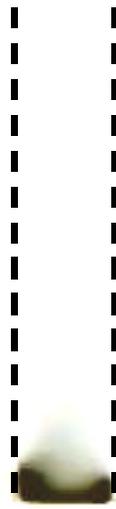
(a)



(b)

圖六、(a)無火焰時低溫壁間的 schlieren 影像

(b)在 $\phi = 1.0 \sim 0.8$ 產生的上方火焰(可見光影像)



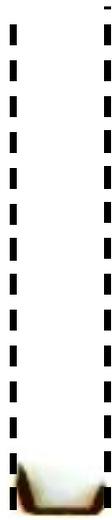
(a)



(b)

圖七、 $M=1.0(W=10\text{mm})$ 時(a)可見光影像

(b)schlieren 影像



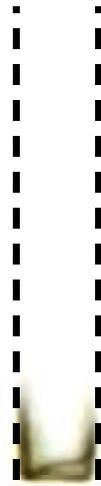
(a)



(b)

圖八、 $\beta = 0.7 (W = 10\text{mm})$ 時(a)可見光影像

(b)schlieren 影像



(a)



(b)

圖九、 $\beta = 0.5 (W = 10\text{mm})$ 時(a)可見光影像

(b)schlieren 影像



(a)



(b)

圖十、 0.45($W=10\text{mm}$)時(a)可見光影像

(b)schlieren 影像



(a)



(b)

圖十一、 $\lambda = 1.0$ ($W = 15\text{mm}$)時(a)可見光影像

(b)schlieren 影像



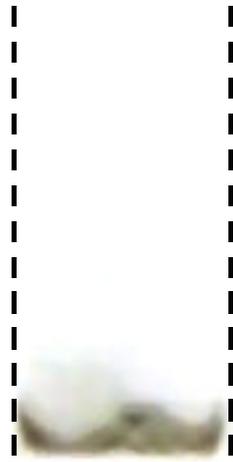
(a)



(b)

圖十二、 $\beta = 0.7$ ($W = 15\text{mm}$)時(a)可見光影像

(b)schlieren 影像

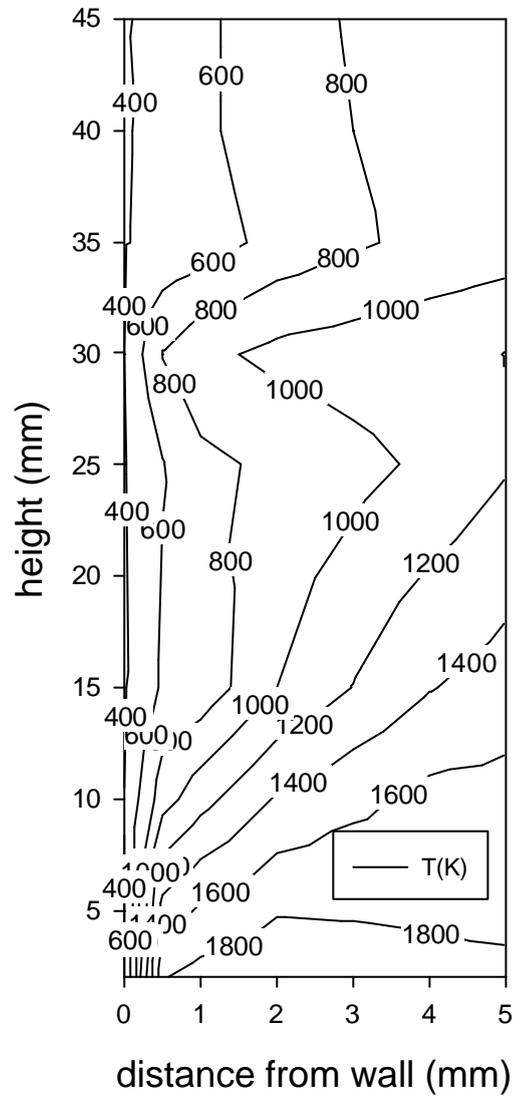


(a)



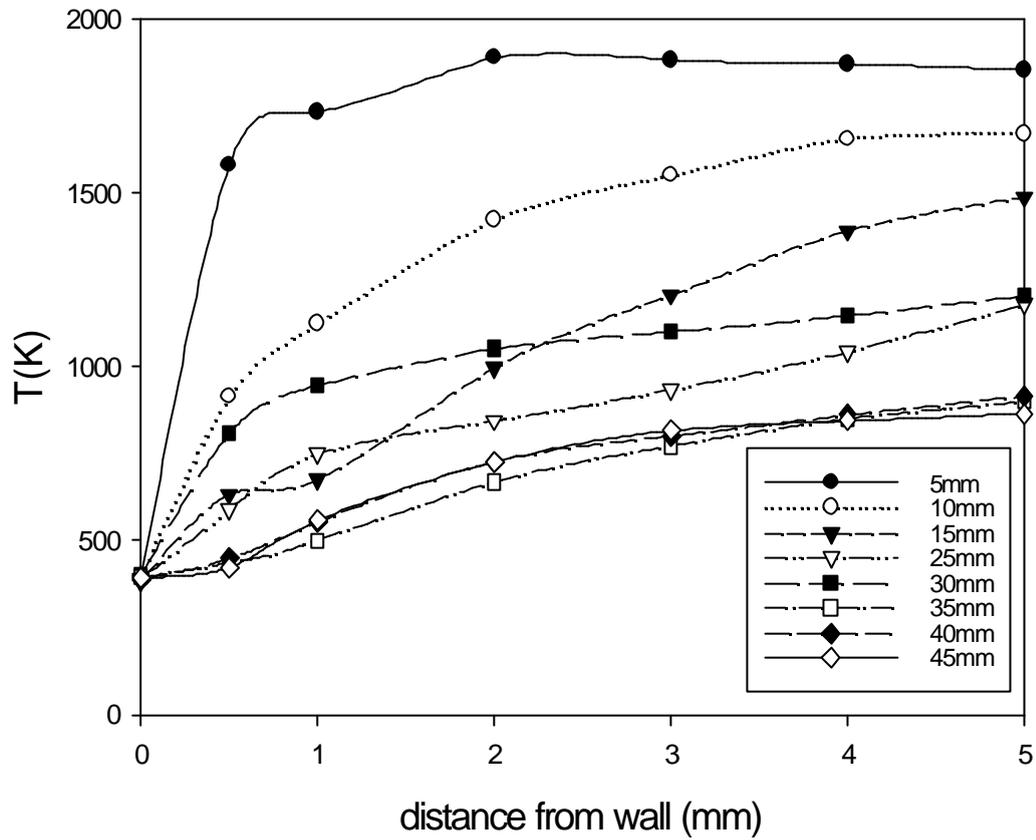
(b)

圖十三、 $\beta = 0.5 (W = 15\text{mm})$ 時(a)可見光影像
(b)schlieren 影像

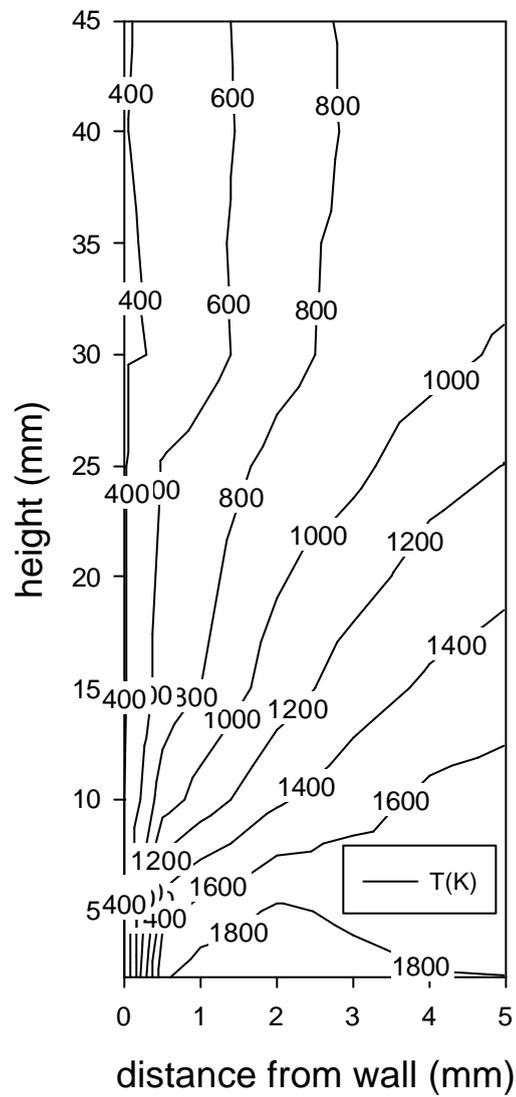


圖十四、預混火焰在兩低溫壁間形成的等溫線圖

($\phi = 1.0$, $W=10\text{mm}$)

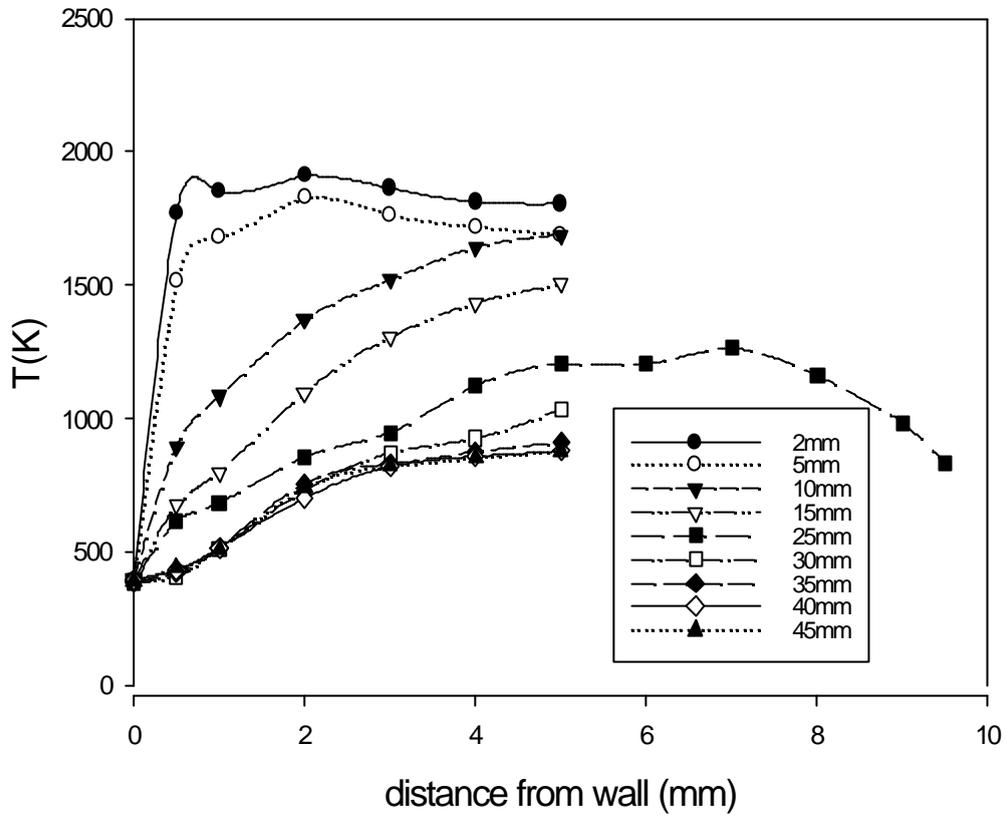


圖十五、各特定高度下兩低溫壁距沿水平距離的溫度分佈($\gamma = 1.0$, $W = 10\text{mm}$)

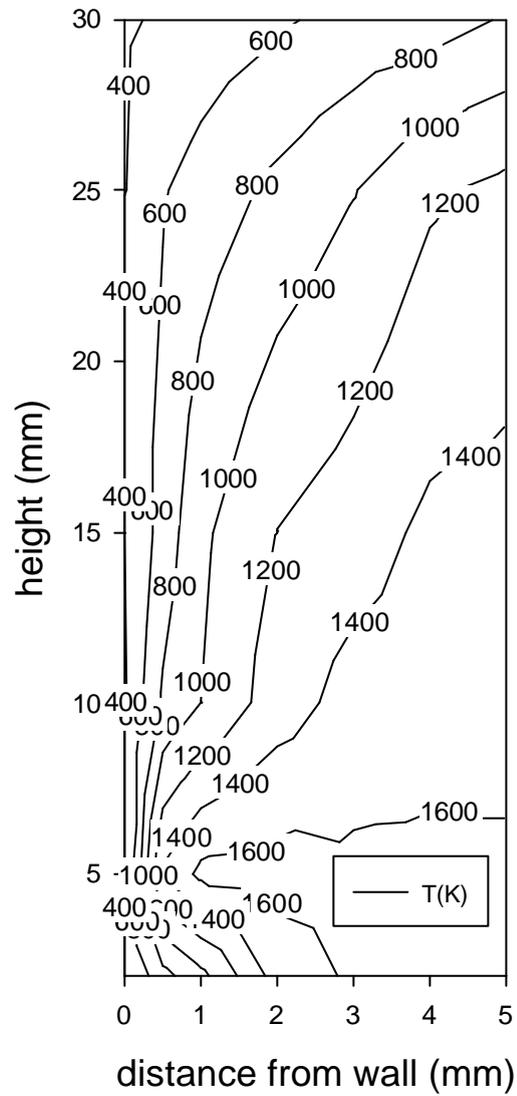


圖十六、預混火焰在兩低溫壁間形成的等溫線圖

($\phi = 0.7$, $W = 10\text{mm}$)

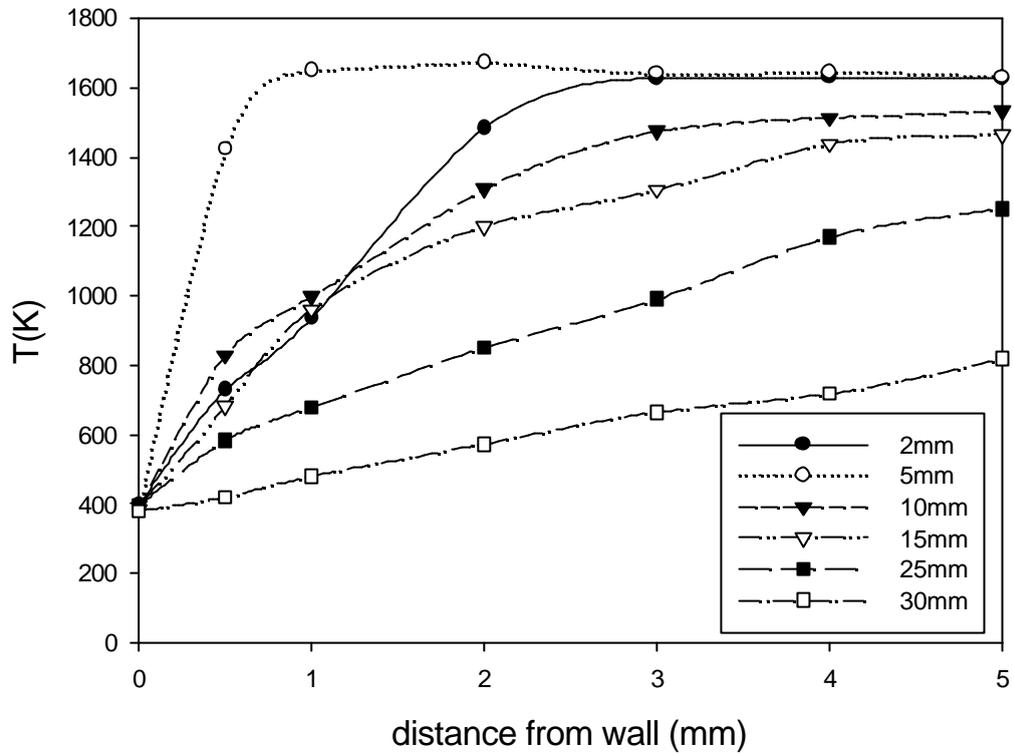


圖十七、各特定高度下兩低溫壁距沿水平距離的溫度分佈($\epsilon=0.7$, $W=10\text{mm}$)



圖十八、預混火焰在兩低溫壁間形成的等溫線圖

($\phi = 0.5$, $W = 10\text{mm}$)



圖十九、各特定高度下兩低溫壁距沿水平距離的溫度分佈($\phi = 0.5$, $W = 10\text{mm}$)