

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

管壁對管內火焰傳播及形狀之影響

Effects of Wall on Flame Propagation and Shape in Tubes

計畫編號: NSC 90-2212-E-002-208

執行期間: 90/8/1—91/7/31

主持人: 李石頓 臺灣大學機械系

一、中文摘要

以往以數值探討圓管內火焰傳播時，為簡單起見，管壁通常不是假設為絕熱，就是等溫。可是經由管壁傳導的熱會改變火焰前未燃氣的狀態，進而影響火焰的傳播及火焰的形狀，這種影響很重要，必須加以考慮。又以往的數值模擬經常假設為一步驟、單一的化學反應式。這樣過度簡化的化學動力機構僅模擬真正燃燒的放熱效果。事實上，管壁對於真正燃燒化學反應所需的自由基有影響，這對火焰的傳播及形狀應有相當的影響。本研究的目的是在於改善這二樣缺失。為此，本研究(一)考慮管壁的熱傳導，並(二)採用包括了自由基的生成與消滅的四步驟簡化動力機構來模擬真正的化學反應。

計算結果顯示，當管壁厚度、外管壁的熱傳係數、火焰與壁之相對速度與壁的熱傳導係數增大或壁的熱擴散係數變小時，都會降低內管壁的溫度及火焰傳播速度，也容易形成蕈狀火焰；反之，則管壁溫度升高，火焰傳播速度增加，傾向形成鬱金香火焰。又當管壁溫度越高時，管壁對活化基的作用對火焰的傳播越有影響。

關鍵詞：火焰傳播、熱傳導、簡化的化學動力機構

Abstract

In previous numerical investigations of flame propagation in circular tubes, for simplicity, the tube wall is assumed either adiabatic or isothermal. However, heat conduction through the tube wall can modify the thermodynamic state of the unburned gas ahead the flame, and hence affect the flame propagation and the flame shape. This effect is very important and needs to be considered. In addition, one-step global chemical reaction is also frequently assumed in the previous numerical modeling works. This over-simplified kinetic mechanism only models the effect of heat-release of real combustion. In fact, the wall can destroy radicals necessary in the real combustion reaction, and consequently depresses the chemical reaction. This has great effect on the flame propagation and its shape. The purpose of this study is to correct the above two shortcomings. For that purpose, in this study we (1) consider the heat conduction in the tube wall, and (2)

adopt 4-step reduced kinetic mechanism, which includes the radical initiation and destruction to model the real chemical reaction.

Computational results show that with the increase in the wall thickness, the heat transfer coefficient for the outer wall, the wall-flame relative velocity and the wall thermal conductivity, or with the decrease in the wall thermal diffusivity, the inner wall-temperature and the flame propagation speed tend to decrease. In addition, the mushroom flame is easily formed. Otherwise, the wall temperature and flame speed increase, and the tulip-flames tend to form. The computational results also show that the higher the wall-temperature, the stronger the effect on the flame propagation of the action of wall on the radical becomes.

Keywords: flame propagation, heat conduction, reduced kinetic mechanism

二、計畫緣由及目的

不論是開口管或封閉管，圓管內預混火焰的傳播現象在燃燒領域中是個很基礎問題。因其有豐富的物理現象，故自古至今吸引了很多人從事相關的研究。早在 1883 年，Mallard 和 Le Chatelier[1]就已以實驗從事開口管內火焰傳播的研究。他們研究丙烷-空氣火焰在一端開口他端閉口的圓管(管徑 1.25 英吋)內的傳播現象。當火焰從開口端往閉口端傳播時，他們發現火焰是以一個凸向未燃氣的曲面(稱為蕈狀火焰)傳播。Uberoi [2]的實驗也証實蕈狀火焰可在管內穩定地傳播。除實驗之外，也有很多研究者企圖以數值計算及理論分析去了解管內火焰傳播的現象。Ball [3]是最早以數值方法從事這方面研究的先驅者。假設火焰為一不連續面，他也能算出蕈狀的火焰形狀。Zel'dovich 等人[4]對這個問題曾做過理論性的分析，他們指出非線性的 Darrieus-Landau 不穩定機制是使平面火焰變成穩定的蕈狀火焰之主因。1980 年代以後，計算機及數值分析的技巧進展得非常快速，這促使研究者得以較完整的統御方程組來模擬管內傳播的火焰。Lee 和 Tien[5]最早採用了這種方法。為了使計算量能在合理的範圍內，他們還是以一步驟的化學動力機構來模擬複雜的化學反應。依此方式，Lee 與 Tsai[6]的計算結果首次指出除了蕈狀火焰外，鬱金香型火焰也可在管

中穩定傳播。Lee 等人不僅考慮等溫壁也考慮了絕熱壁，他們指出雖然鬱金香型火焰與蕈狀火焰可同時在大管子內穩定傳播，可是在小管子內，蕈狀火焰不能存在於絕熱壁的管子中，鬱金香型火焰不能存在於等溫壁的管子中。

以往使用數值模擬探討預混火焰在圓管內的傳播時，為簡化數值的處理以及節約電腦時間的花費起見，大部份的研究者對管壁的狀況以及化學反應皆做了大幅簡化。在管壁的狀況方面，研究者通常不是假設管壁為絕熱壁，就是等溫壁。這二種管壁條件在數值處理上相當方便，可以不用關心管壁內的热傳導，可是它們卻是不盡合乎事實的管壁條件。事實上，經由管壁往未燃氣方向傳導的热會改變火焰前未燃氣的熱力學狀態，進而影響了火焰傳播的速度及形狀。這種影響在小管徑的圓管時尤其明顯，如果不考慮管壁內的热傳導必然會對計算結果造成很大的影響。管壁除了本身的热傳導會影響火焰傳播及形狀之外，還會藉著破壞燃燒化學反應所需的自由基來影響燃燒化學反應，進而影響火焰傳播的速度及形狀。如以單一步驟的簡化化學反應式來模擬真實的化學反應並未能反應管壁的這種影響。過度簡化的一步驟動力機構僅模擬真正燃燒化學反應的放熱效果而已。本研究的目的在於延續以往的研究，改善這二樣缺失。為此，在本研究中吾人考慮了管壁的热傳導效應，以及管壁對自由基的影響，以便能改善我們對管內預混火焰的傳播速度及形狀的了解。

三、結果與討論

開口圓管內火焰在可燃氣流中穩定傳播的現象是本研究探討的對象，其圖式如圖一所示。於圖一中，吾人將坐標固定於穩定傳播的火焰上，相對此坐標圓管沿軸方向的速度為 v_w 。相對於圓管，新鮮的可燃氣是則以完全發展流的形態流向火焰。本研究僅考慮小管徑的圓管並假設 v_w 遠小於可燃氣的絕熱火焰傳播速度。管壁的厚薄、熱性質以及管壁對自由基的作用對火焰的影響是本研究的重點。

本研究數值模擬時採用當量比為 0.592 的甲烷與空氣的混合物，並採用 Peters 與 Williams[7] 的簡化四步驟化學反應機構來模擬它的真正化學反應。計算時假設各物種的定壓比熱相等且等於混合物的比熱。至於計算所需的热力學性質取自於參考資料 8，黏滯係數和熱傳導係數則取自於參考資料 9。質傳係數則由 Lewis 等於常數的假設定出。利用此模式所算出的一維絕熱火焰速度示於圖二。圖二顯示出此簡化的四步驟化學反應機構至少在貧燃氣的情況下表現得很好。

因吾人對管壁與自由基的作用相當不清楚，所以本研究在探討管壁與自由基的作用對火焰的影響時，考慮二個極端例子：(A) 管壁與自由基沒有任何作用，(B) 管壁對自由基的催化反應速率為無窮大，因而自由基在壁上的濃度為零。同時在做這方面探討時

吾人並不考慮管壁的狀況，只考慮了二種極端的狀況：絕熱壁與等溫壁(低溫)。計算結果顯示：於絕熱壁時，如管壁與自由基沒有任何作用，則自由基由管壁附近往未燃區擴散，具有引燃未燃氣的效果，較容易形成鬱金香型火焰，火焰傳播速度也較快；低溫壁時，因壁溫低，自由基在壁上的實質濃度為零，故不論管壁與自由基有無任何皆得到相同的結果。因考慮管壁熱傳導時內管壁的温度皆比絕熱壁時低得很多，故在以下所做的參數研究中吾人皆假設自由基在壁上的實質濃度為零。

圖三為火焰附近的等溫線、等相對壓力線以及速度向量的代表性分佈圖。圖三是內管(直)徑為 0.7cm，管壁為 0.001m 時的結果。圖中上半部為管壁及管內氣體温度的分佈圖，而下半部為管內氣體的相對壓力及速度向量的分佈圖。在如此的管徑及管壁下，圖三顯示經由管壁傳導至前方未燃氣的热量確實顯著地升高管壁附近未燃氣的温度，使管壁附近的未燃氣較容易反應，因而火焰呈現鬱金香型。當管徑變小時，已燃氣的温度下降快，因而經由管壁往下游已燃區傳導的热量隨之變大，往未燃氣的热量變少，使得火焰速度變慢，火焰形狀也較易形成蕈狀。

圖四為改變管壁厚度(0.5 mm、1mm、2mm 與 3mm)但固定 v_w ($=0.01\text{cm/s}$) 及管內徑 ($=0.6\text{cm}$) 所得的內管壁處的軸向温度分佈圖。管壁(本研究使用玻璃)傳熱較燃氣快，管壁越厚，可供熱傳往遠處的壁面積越大，因而傳往遠處的热量有可能較多。可是管壁的热容量(heat capacity)也跟著管壁的增加而變大，火焰傳入管壁的热量大部分用於升高管壁的温度，傳往未燃氣的量變小。圖四指出管壁越厚，管壁温度整體上越低，對未燃區的預熱效果也不好，火焰傳播速度也較小(圖五)，火焰形狀也較易形成蕈狀。圖四亦指出當管壁越厚，內管壁最高溫處往兩側温度下降也越慢，管壁內最高溫處越遠離火焰頂端。

管壁熱傳導性質好，管壁高溫區的热量較易傳往低溫區，也容易傳往下游補充外管壁因熱對流所損失的热量。圖六顯示不同管壁熱傳導係數(但熱擴散係數保持不變)對內管壁最高溫以及管內未燃氣流量的影響。因 v_w 固定，故未燃氣流量的大小可代表火焰的傳播速度的快慢。又因熱擴散係數相同，故提升管壁的温度之能力相同。圖六指出管壁熱傳係數越大，內管壁面的最高溫越低，管壁温度分布越平緩，對未燃區的預熱效果越不好。同時火焰的傳播速度越慢，火焰形狀也越傾向蕈狀。這種情況很接近等溫壁的情況。反之，如管壁熱傳係數越小，內管壁面的最高溫越高，對未燃區的預熱效果越好，火焰的傳播速度也越快，火焰形狀也越傾向鬱金香型。這種情況很接近絕熱壁的情況。

火焰相對壁的傳播速度 v_w 對於火焰傳播有

很大的影響。圖七為內管壁面的軸向溫度分佈圖。圖中顯示 v_w 越大，火焰傳入管壁的熱量消耗在提升管溫的比率越高，所以造成管壁整體溫度降低，熱不容易往未燃區傳遞，對未燃區的預熱效果不好。故 v_w 越大，內管壁溫度越低且內管壁面最高溫處越往下游遠離火焰面。由此可知，在模擬火焰在管內靜止未燃氣中傳播時，等溫壁的假設應該是較適當的。這也可解釋為何在實驗上鬱金香火焰不容易被發現的原因。管壁熱擴散係數扮演相反的角色，計算結果指出管壁熱擴散係數越大，內管壁面的溫度越高，對未燃區的預熱效果越好，管壁最高溫處越接近火焰頂端。實際上，這可由 v_w 與熱擴散係數構成 Fourier 數 ($= \alpha/v_w L_c$, L_c 為特徵長度) 可看出，在相同的 Fourier 數下，管壁熱擴散係數與 v_w 確實成反比關係。

本研究亦探討外管壁的熱對流係數對壁溫及火焰的影響。外管壁以熱對流方式將熱量帶走，管外熱對流係數越高，帶走管壁的熱量也就越多。研究結果顯示當外管壁的熱對流係數越大，已燃區燃氣溫度往下游下降的程度越激烈，火焰經由管壁傳到下游的熱量也越多，導致管壁溫度變低，對未燃區的預熱效果也越不好，管壁最高溫處越接近火焰頂端。

四、結論

本研究探討管壁熱傳及壁對於自由基之催化作用對火焰傳播、結構的影響。研究結果指出當管壁溫度越高時，壁對於自由基之催化作用對火焰傳播、結構的影響越顯著。管壁溫度低時則壁上自由基的實際濃度為零。

研究結果也發現，當管壁越厚、外管壁的熱對流係數越大、火焰與壁之相對速度越快、熱傳導係數越大或者熱擴散係數越小，都會使得管壁溫度降低，以至於預混氣體的體積流率降低，火焰頂端位在中心軸而形成蕈狀火焰；反之，則管壁溫度升高，預混氣體的體積流率增加，火焰頂端越靠近管壁處且突出越明顯而形成鬱金香火焰。

五、計畫成果自評

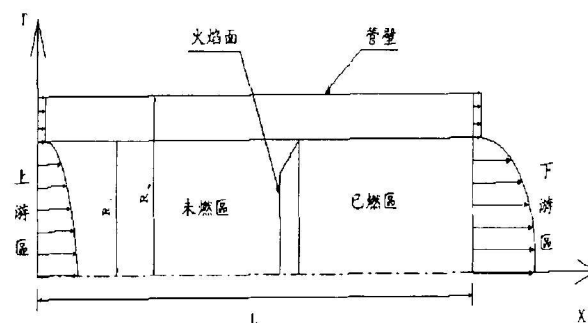
本研究內容完全符合計畫原先所擬定的工作項目。因目前在文獻上較少見到管壁對火焰傳播、結構的影響之文章，故本研究對這主題有創新性的貢獻。

六、參考文獻

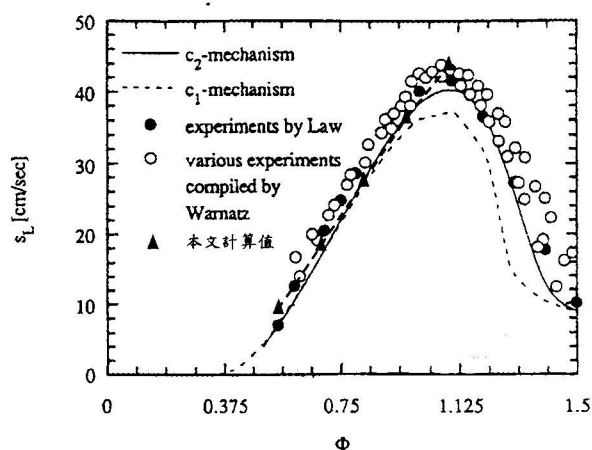
- [1] Mallard, E. and Le Chatelier, H. L., Ann. des Mines, 8, Ser. IV, p. 274, (1883).
- [2] Uberoi, M. S., The Physics of Fluids, 2, 1, p. 72,

(1959).

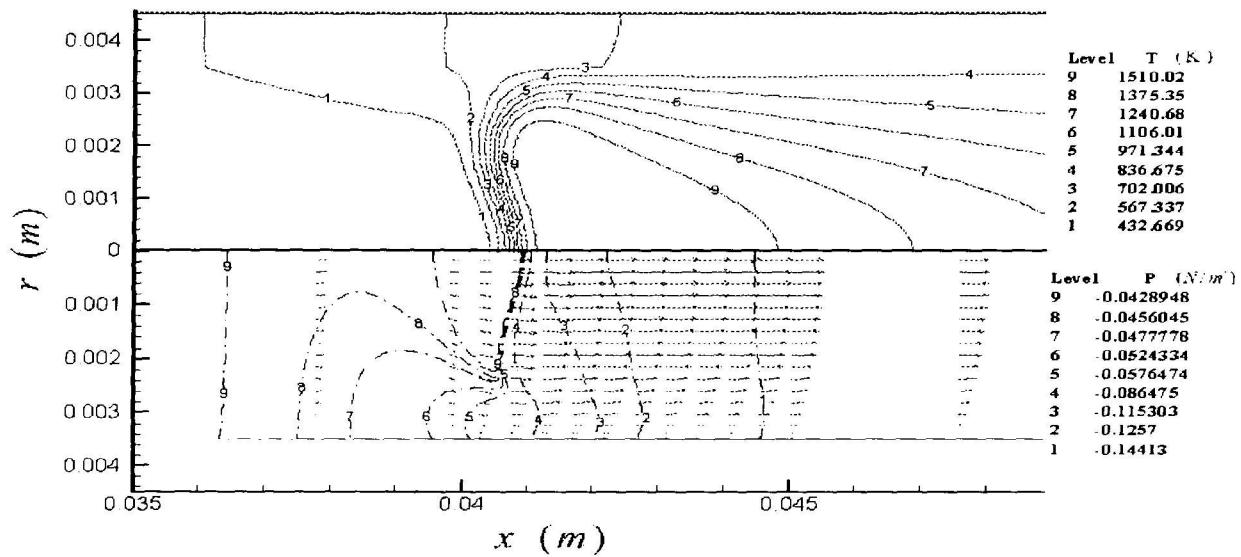
- [3] Ball, G. A., Harvard University, Department of Engineering Science and Applied Physics, (1951).
- [4] Zel'dovich, Y. B., Istratov, A. G., Kidin, N. I. and Librovich, V. B., Combust. Sci. Technol., 24, p. 1, (1980).
- [5] Lee, S. T. and T'ien, J. S., Combustion and Flame, 48, p. 273, (1982).
- [6] Lee, S. T. and Tsai, C. H., Combustion and Flame 99, p. 484, (1994).
- [7] Peters, N. and Williams, F. A., Combustion and Flame 68: 185-207, (1987).
- [8] Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., SAND 87-8215B, (1987)
- [9] Svehla, R. A., NASA Technical Memorandum 4647. (1995).



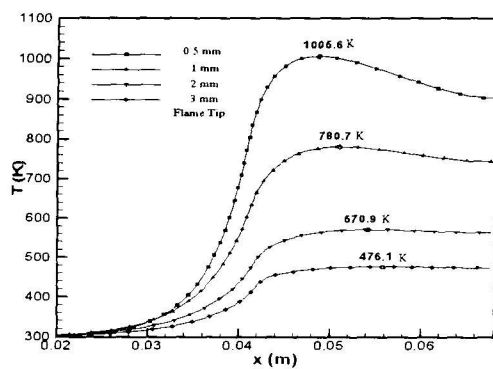
圖一 研究對象示意圖



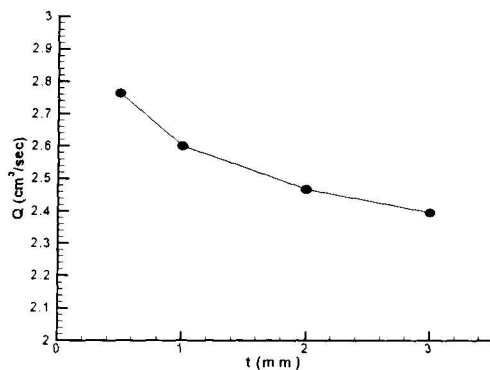
圖二 甲烷-空氣混合氣的一維絕熱火焰速度與燃氣濃度關係圖



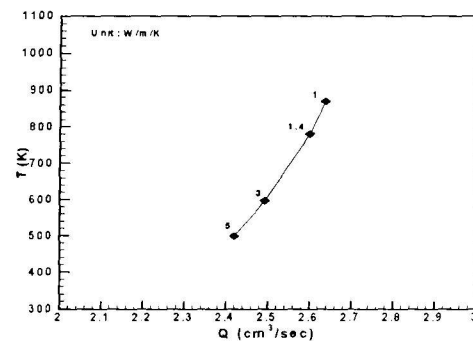
圖三 代表性的溫度、相對壓力及速度向量分佈圖(內管徑為0.7cm，管壁為0.001m。x為沿管軸方向的距離，r為半徑方向，因對稱關係，圖中上半部為溫度分佈圖，而下半部為壓力及速度向量分佈圖)



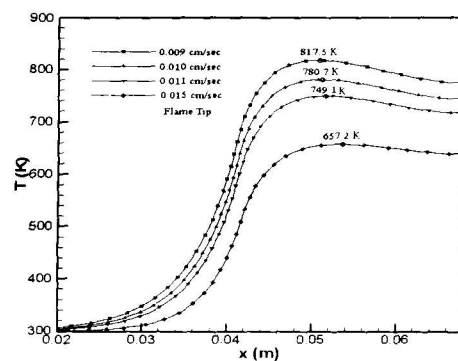
圖四 管壁厚度對內管壁面溫度分佈的影響(內管徑為0.6cm，圖中所標示的溫度代表該狀況下內管壁面的最高溫)



圖五 管壁厚度(t)對火焰傳播速度的影響(Q:管內燃氣的流量， $v_w=0.01\text{cm/s}$)



圖六 不同壁熱傳導係數下，內管壁最高溫與燃氣流量之關係(熱擴散係數為 $7.466 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$)



圖七 壁與火焰相對速度對內管壁面溫度分佈的影響(內管徑為0.6cm，圖中所標示的溫度代表該狀況下內管壁面的最高溫)