

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

Le數及差別擴散對圓管子內火焰形狀與傳播的影響

Effects of Le Number and Differential Diffusion on the Shape and the Propagation of flame in Circular Tubes

計畫編號: NSC 89-2212-E-002-046

執行期間: 88/8/1 -- 89/7/31

主持人: 李石頓 臺灣大學機械系

一、中文摘要

本文以數值方法研究Le數(D/α)對絕熱封閉圓管內層流預混火焰傳播的影響。數值結果顯示火焰的穩定性與Le數有密切關係。當 $Le>1$ 時，較易形成鬱金香形火焰；反之，當 $Le<1$ 時，則易形成蕈狀火焰。計算結果亦顯示管內火焰的厚度隨Le數之增大而增厚，局部火焰速度則變小。本文也探討燃料與氧氣的差別擴散係數對圓管內火焰發展的影響。計算結果指出：在貧火焰中，燃料擴散能力的改變對火焰形狀及傳播的影響較大。本文也探討管徑、管長、旋轉速度對所得結果的影響。

關鍵詞: Lewis數、火焰傳播

Abstract

In this study, numerical method is used to study the propagation of premixed laminar flames in adiabatic closed circular tubes. Results show that the stability of flame is closely related to Le number. As $Le>1$, it is easier to obtain tulip-shaped flame, on the other hand, as $Le<1$, mushroom-shaped flame is easily found instead. Calculation results also show that the flame thickness increases with the increase in the Le number, however, the local flame speed decreases. The effect on the flame development of the differential diffusion ability between fuel and oxygen is

also studied. Calculation results show that in the lean flame, the effect of the variation of the fuel diffusion coefficient on the flame shape and the propagation is greater. The effects on the results obtained of the tube diameter, tube length and rotational speed are also included.

Keyword: Lewis number, flame propagation

二、計畫緣由及目的

在燃燒科學的領域中，預混火焰在圓管或空腔內(channel)的傳播現象一直深具研究與實用的價值。圓管或空腔內火焰傳播的問題概可區分為二種情形：一類為火焰在兩端皆封閉的管內傳播，另一類為火焰從管子開口端往閉口端傳播的情形。回顧前人的研究[1,2,3,4]吾人發現，就管內火焰面的形狀而言，大體上可分為火焰面凹向未燃氣的鬱金香火焰(tulip flame)以及火焰面凸向未燃氣的蕈狀火焰(mushroom flame)。這二種管內的火焰各有其豐富的物理現象，也吸引了很多學者從事這方面的研究。不過大部份這樣的研究者皆假設燃料與氧氣的擴散係數相同且Le數為1，這種假設能減輕數值計算的所需的電腦資源，所得的結果也能讓吾人了解燃燒後的熱膨脹對火焰傳播的影響。因Le數為質擴散係數 D 與熱擴散係數 α 之比，其對火焰的傳播行為必然會有影響。由停滯點(stagnation point)附近平延展火焰(stretched flame)[5]及

本生火焰尖點(Bunsen flame tip)[6]的研究，吾人知燃料與氧氣差別擴散能力對燃燒亦有極大的影響。為使圓管中火焰傳播行為的模擬更合乎事實，並了解Le數與擴散係數的差異對火焰在圓管中傳播行為的影響，本文延伸以前的研究，探討Le數、燃料與氧氣的差別擴散係數對圓管中火焰傳播行為的影響。

三、結果與討論

本研究以數值方法探討可燃混合氣的Le數對絕熱封閉圓管內火焰傳播的影響。為了降低數值計算上的困難，所研究的火焰為速度較小、火焰較厚的貧燃火焰(lean flame)。模擬所使用的可燃氣為甲烷與空氣的混合物，其當量比為0.5275，其絕熱火焰溫度為1530K。燃氣的平均比熱 C_p 及Le數皆假設為常數，不過未燃氣的黏滯係數、熱傳導係數及擴散係數是溫度的函數。化學反應的模擬採用由反應物至生成物的單一步驟之整體反應模式。本研究採用的數值方法為在熱流應用上受到相當肯定的控制體積法及SIMPLE法，在計算時也假設管內流場為軸對稱。

因本研究所模擬的燃料為甲烷且熱擴散係數在貧混合氣中大體上為氮氣所支配，故本研究中燃料的Le數 Le_f 大於氧氣的Le數 Le_o 。不過本研究還是首先假設 $Le_f = Le_o = Le$ ，研究熱、質擴散係數的不同對火焰傳播的影響。接著再研究 $Le_f \neq Le_o$ 的情況以探討燃料與氧氣的差別擴散係數對結果的影響。

圖一、二與三分別為 $Le=2$ 、1以及0.75的火焰傳播圖。除了Le數外，三種情況的管長、管徑以及其他狀況皆一樣。當 $Le=1$ 時，吾人發現(除管壁附近外)火焰幾乎以管軸附近微微凹向未燃氣的平面往前傳播，愈接近管端時後凹的程度愈厲害。更進一步將管長加長一倍、五倍後，發現管軸附近微凹的現象是因管長太短火焰面受到管端影響所致。在長管中，火焰於管子中段是以凸向未燃氣的蕈狀火焰近似穩定

地往前傳播，至接近管端時才逐漸變成鬱金香形。由圖三可發現當Le數減至0.75時，軸附近的火焰變得更平一點。這是因當(相對於質擴散係數)熱擴散係數增加時，不論凹向或凸向未燃氣的火焰皆會變得更平一點。其理由為：當貧火焰凸向未燃氣時，火焰的強度隨Le數的減小而減弱因而火焰會變得平一點，反之當火焰凹向未燃氣，火焰隨Le數的減小，凹向未燃氣的程度就愈弱。當Le數增至2時，圖一指出火焰面在軸附近的微凹加劇而形成鬱金香形火焰。當管長加長時鬱金香形依然存在。

又由圖一、二與圖三可看出火焰的厚度隨著Le數的增加而變厚，其局部火焰面的傳播速度則變小。吾人亦可看出火焰厚度越接近管端會逐漸變薄，這是因為圓管內的平均壓力會隨時間的增加而上升，因絕熱壓縮的作用，使得未燃氣的溫度升高，導致火焰的速度變大，火焰厚度遂逐漸變薄。吾人亦觀察到當 $Le=2$ 時，火焰到達下游管端所需的時間愈短。整體火焰傳播速度之所以會比較快是因為鬱金香形火焰的面積比較大。故整個火焰每單位時間消耗的燃料較多之故。

圖四與五分別 $Le_f = 1.5$ ， $Le_o = 1$ 及 $Le_f = 1$ ， $Le_o = 1.5$ 時的火焰傳播圖。除Le數外，其他條件皆一樣。圖四與 $Le_f = 1.5$ ， $Le_o = 1.5$ 的情況(圖未示於本文中)差異性不大，圖五則顯示軸附近的火焰面凹向未燃氣的程度較淺，火焰的厚度也較薄。因模擬的混合氣為非常貧的混合氣，氧氣比燃料多得很多。當氧氣的擴散係數增大時，燃氣中的氧比較容易擴散出去但因燃氣的氧氣本來就很多，故 $Le_o = 1$ 與 $Le_o = 1.5$ 對燃氣當量比(equivalence ratio)的影響並不明顯。反之當燃料的擴散係數減小時其影響會較明顯，燃氣的當量比會變大，火焰的燃燒速度變大，故使得火焰面凹向未燃氣的程度較弱。

本研究亦考慮圓管轉速對火焰傳播的影響。結果發現當轉速低時火焰依然保有鬱金香形及蕈狀形火焰；可是當轉速大

(10rps 以上)時火焰最終皆以蕈狀形傳播，Le 愈大時，變成蕈狀形需要愈大的旋轉速度。

四、計畫成果自評

計畫成果符合計畫書的規劃，成果水準中等。

五、參考文獻

[1] 蔡建雄(1994)國立台灣大學機械工程學研究所博士論文

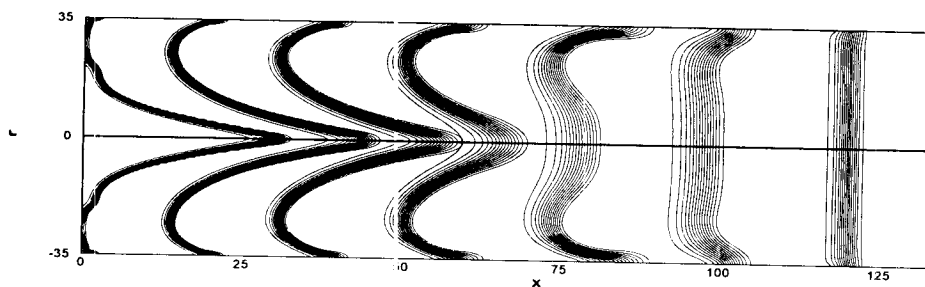
[2] . 林宜君(1995)國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文.

[3] Gonzalez, M., Borghi, R., Saouab, A.(1992) Combustion and Flame, 88, 201

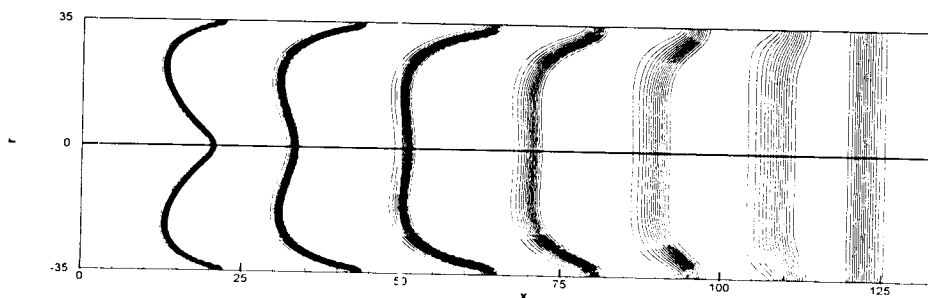
[4] Gue'noche, H. (1964) In Nonsteady Flame Propagation, Markstein, G.H. , ed. Pergamon Press N.Y.

[5] Williams, F.A. (1985) 2nd ed. Benjamin Cummings, Cal.

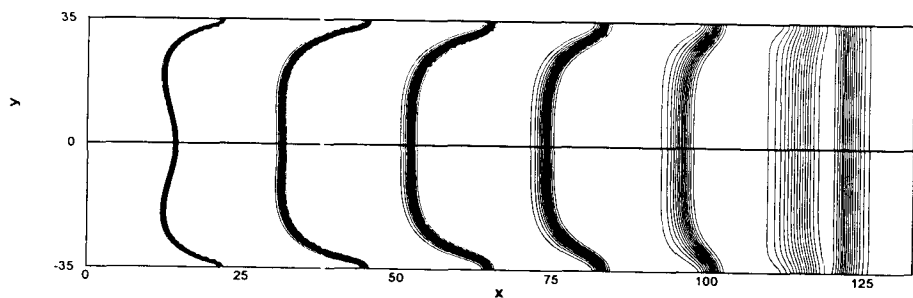
[6] Poinso T., Echekki T., Mungal M. G. (1992) Combustion Sci. and Tech. 81,45.



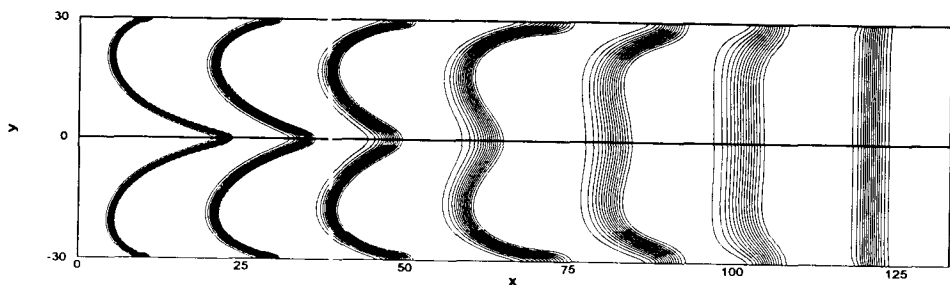
圖一 預混火焰在長 $133\delta (=2.115 \times 10^{-4} \text{ m})$ ，直徑 70δ 的封閉圓管內傳播的情況，由左至右圖中各火焰位置的時刻為 $t_1 = 10\Delta t (= 10^{-4} \text{ s})$, $t_n = (n-1)100\Delta t$, $n=2, \dots, 7$, $Le=2$ 。



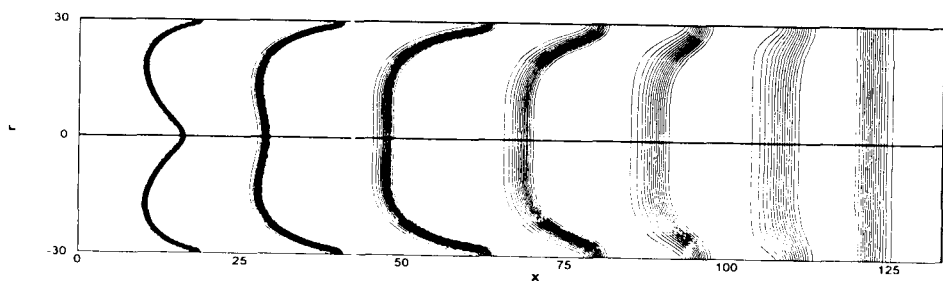
圖二 除 $Le=1$ 外，其餘如圖一所示。



圖三除 $Le=0.75$ 外，其餘如圖一所示。



圖四 預混火焰在長 $133\delta (=2.115 \times 10^{-4} \text{ m})$ ，直徑 60δ 的封閉圓管內傳播的情況，由左至右圖中各火焰位置的時刻為
 $t_1 = 10\Delta t (=10^{-4} \text{ s})$, $t_n = (n-1)100\Delta t$, $n=2, \dots, 7$, $Le_f=1.5$, $Le_0=1$ 。



圖五 除 $Le_f=1$, $Le_0=1.5$ ，其餘如圖四所示。