

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

大管子內火焰傳播的數值研究

Numerical Study of Flame Propagation in a Large Tube

計畫編號: NSC 87-2212-E-002-029

執行期間: 87/8/1 -- 88/7/31

主持人: 李石頓 臺灣大學機械系

一、中文摘要

本研究的目的是在於探討絕熱大管子內火焰傳播的行為。因火焰的厚度與管子的特徵長度相比小得很多，故本研究假設火焰為一薄火焰面且使用G方程式來描述此一火焰面位置的變動。利用此一火焰面模式，本研究探討了管徑、管長對火焰發展的影響。又為了要了解火焰在旋轉管內的行為，本研究也探討轉速對火焰形狀及火焰傳播的影響。計算結果顯示鬱金香形火焰及蕈狀形火焰皆可存在於低轉速的大管子內，但當管子轉速增大後火焰最終會發展成蕈狀形火焰。

關鍵詞: 火焰傳播，數值研究，大管子

Abstract

In this study, the behavior of the flame propagation in big adiabatic tubes has been investigated. Because the flame thickness is much smaller than the characteristic length of the tube, it is assumed that the flame is a thin flame and is described by the G equation. This thin flame model has been used to study effects of the tube diameter and length on the evolution of the flames. Furthermore, in order to understand the flame behavior in the rotating tubes, the effects of the tube rotation speed on the flame speed and the flame propagation have also been studied. The calculation results show that tulip-shaped and

mushroom-shaped flames can both exist in large low rotating tubes, however, the mushroom-shaped flame will finally emerge, as the rotating speed becomes high enough.

Keyword: Flame Propagation, Numerical Study, Large Tube

二、計畫緣由及目的

火焰在空腔 (enclosure)內傳播現象的研究除了純燃燒科學的興趣外，它同時也深俱實用價值。火焰在空腔 (enclosure)內傳播較有系統的研究是由 Mallard和Le Chatelier [1]開始，他們觀察丙烷與空氣混合氣的火焰從圓管之開口端往閉口端傳播時，發現火焰以一凸向未燃氣的曲面(蕈狀火焰)往前傳播。後來 Uberoi [2]的實驗也指出管內火焰呈蕈類的形狀，他的流場觀測也指出當流線接近此火焰頂端(flame tip)時流線會往管壁偏折，爾後經過火焰面後再往中心軸內彎。Ellis [3]是最先發現鬱金香形火焰的研究者，他研究二端封閉之管內火焰傳播的現象，當燃氣在圓管中間點燃後，火焰最先以凸向未燃氣的形狀往圓管的二端傳播，在途中此蕈狀火焰卻漸漸地轉變成凹向未燃氣之鬱金香火焰。作者過去曾對小管徑圓管內的穩定傳播火焰[4, 5]以及由引燃發展至穩定傳播的暫態火焰 [6]做過仔細的數值分析。研究的結果發現不論鬱金香形火焰或蕈狀形火焰皆可穩定在圓管內傳播且氣體流動與火焰之交互作用對火

焰形狀有決定性的影響。過去的研究因計算機資源的限制故數值計算皆侷限在小管徑的圓管。由過去研究的經驗發覺火焰的形狀及其傳播速度除與管子的長徑比有關外，也與管徑之大小有關，因為火焰放熱所引發的流體流動在大管徑時有複雜化之跡象，此複雜的流體流動再與火焰交互作用後有可能產生多樣化的火焰形狀。

在大管子內，火焰的厚度與管子的特徵長度相比小得很多，故本研究將火焰模擬為一隔離未燃氣與已燃氣的無結構、無厚度之介面(也即薄火焰的假設)，並假設所有的化學能皆釋放在此介面上。在數值計算上，通常處理介面的方法是使用介面追蹤(interface-tracking)[7]的技術。這種方法準確度較差且在數值處理上較麻煩，故本研究採用G方程式[8]來描述火焰面的發展情形。G方程式是個描述一純量G隨時間、位置演變的方程式，該純量G為零(或某固定常數值)的面被用來代表火焰面，而 $G>0$ 與 $G<0$ 的區域則分別代表已燃氣的區域與未燃氣。G方程式可寫成如下式[8]：

$$\frac{\partial G}{\partial t} + V|_{0^-} \cdot \nabla G = S_f |\nabla G|$$

式中 $V|_{0^-}$ 代表 $G=0^-$ 處的未燃氣速度， S_f 為火焰速率。本研究把 S_f 設為常數。

三、結果與討論

本計畫旨在探討大管子內火焰傳播的現象，重點放在管徑、管長及管的旋轉速度對火焰形狀的影響。研究時假設流場為軸對稱且管壁絕熱，火焰(假設為不連續面)前、後的密度比 $\rho_u/\rho_b=5$ 且火焰面傳播的速度為常數($=0.4\text{m/s}$)。數值方法SIMPLEC[10]被使用來解統御流場的非線性的Navier-Stokes方程式：一個連續方程式、三個動量方程式(在處理非旋轉管子時僅需二個)。G方程式則以顯式控制容

積法來處理。火焰的初始形狀在中心軸略凹向未燃氣(如以下各圖中所示)。

圖一為管徑10cm，時間每隔0.02秒的火焰位置及形狀圖。圖一顯示火焰由初始形狀慢慢發展成鬱金香形的情形。由圖二可看出火焰前未燃氣的流動對火焰的發展影響很大。火焰前未燃氣因受燃氣膨脹產生的反作用力作用，最初往火焰前進方向流動，後因受阻再迴流到較靠中心軸的火焰面，使得該處的火焰面往燃氣方向凸出而造成了小尖點。隨著火焰的發展這迴流愈來愈靠近中心軸，因而尖點也往中心軸移動而發展成最終的鬱金香形火焰。

圖三及圖四分別為管徑20cm與5cm的火焰發展圖。與圖一相比，吾人可發現不論管徑的大小，最終火焰的形狀皆為鬱金香形火焰，差別僅在於發展速率的快慢而已。小管徑時，未燃氣迴流到中心軸的時間較短，鬱金香形火焰較易形成，形成之後也幾乎以穩定的速率傳播，反之在大管徑之下，圖四顯示0.1m的管長並不能讓鬱金香形火焰發展完全，如果將管長擴張至0.2m(圖五)則幾乎可發展完全。雖然計算的結果指出在大絕熱管中不論管徑的大小最終火焰的形狀皆為鬱金香形火焰，不過這實在與火焰的初始形狀有關，我們也將火焰的初始形狀改成較凸向未燃氣中心軸附近的火焰面，其他的條件完全一樣，計算所得到的火焰形狀則有可能變成蕈狀形火焰，故在大管徑的絕熱管中，鬱金香形火焰與蕈狀形火焰皆可存在於絕熱管中，端看火焰的初始形狀而定，只是形成鬱金香形火焰較容易而已。這與作者[4]以前處理小管徑時所得到的結論相一致，故我們可得到一結論：在層流限制下，鬱金香形火焰與蕈狀形火焰皆可存在於絕熱管中，除非管徑很小(此時只有鬱金香形火焰存在[4])。

隨著管旋轉速度的增加，未燃氣迴流到中心軸的強度越來越弱，所以鬱金香形火焰會隨著管旋轉速度逐漸變成蕈狀

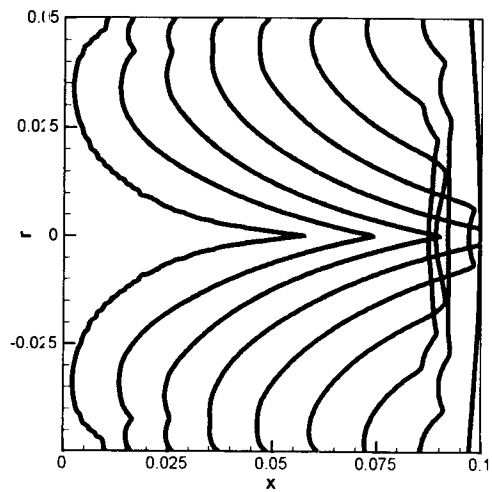
形火焰，如圖六所示。可是這並非是單調式的變化。管轉速6.25rps時火焰已轉變成蕈狀形火焰，可是在6.5rps時，火焰的形狀又變成接近鬱金香形的火焰，轉速再提升(如7.5rps以上)火焰的形狀又重新回到蕈狀形。鬱金香形火焰會隨著管旋轉速度逐漸變成蕈狀形火焰的原因是因為管的旋轉與密度非均勻的交互作用造成了一baroclinic矩，這種矩使得流體有由中心軸往管壁流動的傾向。依作者對旋轉小管徑內火焰傳播研究[11]的結論得知，除非轉速很快否則鬱金香形火焰與蕈狀形火焰皆可存在於管徑 $\approx 3\text{cm}$ 的絕熱管中，故可解釋非單調式轉變的原因。

四、計畫成果自評

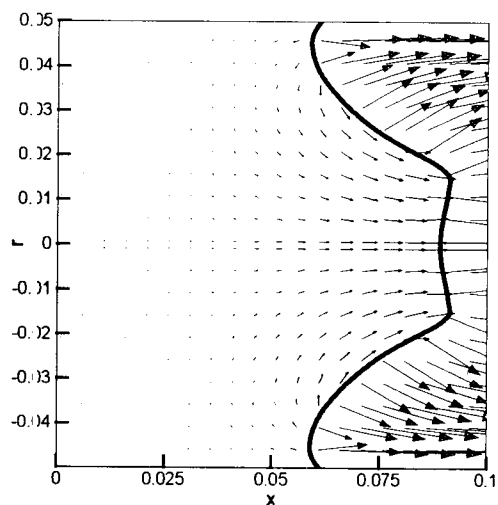
本計畫成果基本上與所提計畫相符。計畫所得的結果將火焰速度設為常數，雖然本研究也曾將其模擬為火焰曲率的函數，可是所得結果相差不多，是否如此，值得更深、更周全的研究，這是以後研究的目標。

五、參考文獻

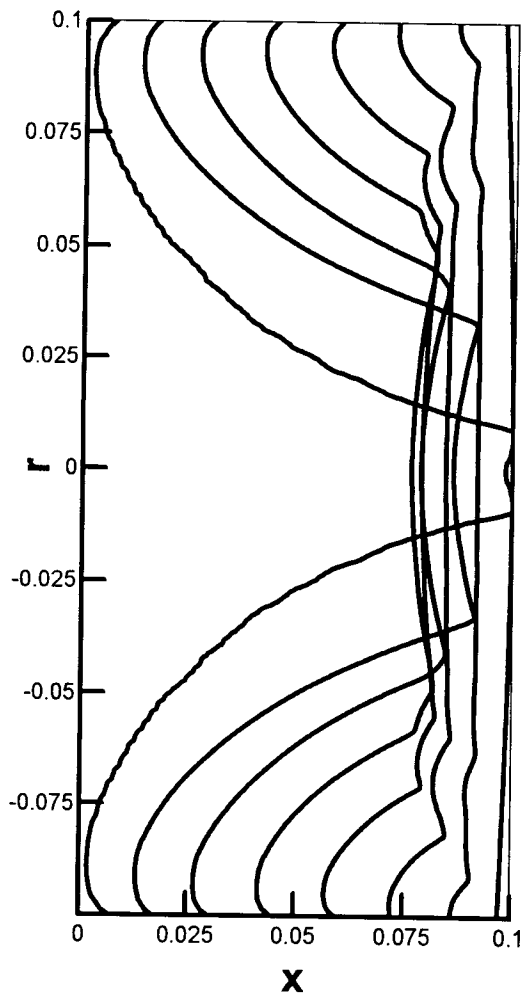
- [1] Mallard, E. and Le Chatelier, H. L., Ann. des Mines, 8, Ser. IV, pp. 274-568, (1883).
- [2] Uberoi, M. S., The Physics of Fluids, Vol.2, No. 1, pp.72-78, (1959).
- [3] Ellis, O. C. de C., Fuel in Science and Practice 7, 245, (1928).
- [4] Lee, S. T. and Tsai, C. H., Combust. Flame 99, pp.484-490, (1994).
- [5] 蔡建雄，李石頓，中國機械工程學會第13屆學術研討會，pp.302-308, (1996).
- [6] 劉建宏，林宜君，李石頓，中華民國第七屆燃燒科技應用研討會，(1997)
- [7] Chern, I-L., Glimm, O. McBryan, B. Plohr, and Yaniv, S., J. Comp. Phys. 62:83-110, (1986).
- [8] Williams, F. A., In The Mathematics of Combustion (Buckmaster J. D. ed.), SIAM, Philadelphia, p.97, (1985).
- [9] Williams, F. A., Combustion Theory, 2nd ed. (Benjamin-Cummings, Menlo Park, (1985).
- [10] van Doormaat, J. P., Raithby, G. D., Numer. Heat Transfer, 7, p.147, (1984).
- [11] Tsai, C. H., Lee, S. T. 將出現於中國工程學刊(2000).



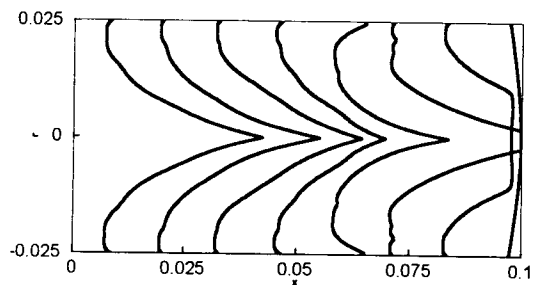
圖一 火焰發展圖，每個火焰面相距 0.02秒，管徑0.1m，x方向單位為m



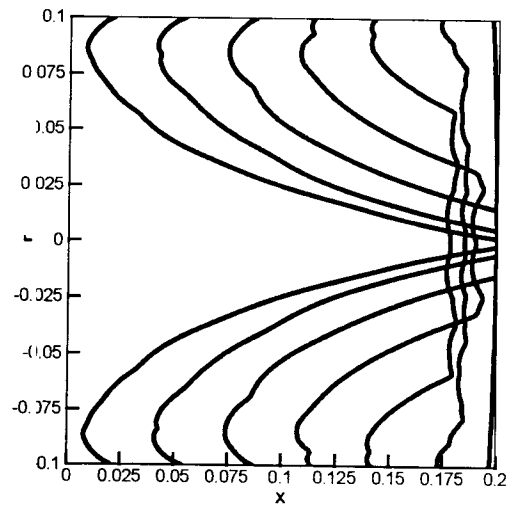
圖二 時間為0.06秒之火焰位置和流場速度圖(長度單位為m)，管徑為0.1m



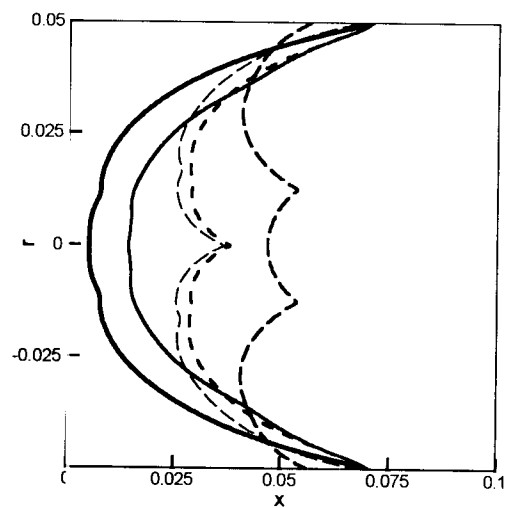
圖三 管徑0.2m之火焰位置每個火焰面相距0.02秒(長度單位m)



圖四 管徑0.05m之火焰位置每個火焰面相距0.02秒(長度單位m)



圖五 管徑0.2m之火焰位置每個火焰面相距0.02秒(長度單位m)



— 7.5rps - - - 5.75rps
 - - - 6.5rps - - - 5.5rps
 — 6.25rps

圖六 不同轉速下火焰於時間0.1之位置比較圖(長度單位m)管徑為0.1m