

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 火焰在周期性運動流場中傳播的研究 Study of Flame Propagation Through Periodic Flow Field

計畫編號: NSC 89-2212-E-002-135

執行期間: 89/8/1—90/7/31

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周期性震盪流對層流預混火焰傳播現象之影響。文中假設化學反應機制為單步驟反應且反應速度遵照 Arrhenius 定律。

數值計算的結果顯示周期性震盪流之振幅及周期對火焰整體的視火焰速度有很大的影響。較長周期或較大振幅會加大火焰面的拉伸而增大火焰面積，視火焰速度因而增加。較短周期或較小振幅的震盪流則因較易受黏滯力的作用而減弱，對火焰的影響小，視火焰速度的增加較少。結果亦指出 Lewis 數不僅影響局部層流火焰速度也會影響火焰的拉伸，Lewis 數大於 1 時，火焰的拉伸較小，視火焰速度較慢；反之，當 Lewis 數小於 1 時，火焰因會有局部性的熄滅，火焰的拉伸較大，火焰面積因而增大，且有些燃料會在未燃情況下通過火焰，造成視火焰速度增大。

關鍵詞: 火焰傳播，周期性震盪流

### Abstract

The effects of periodic oscillatory flow on the propagation of a premixed laminar flame are studied numerically in this study, in which a global one-step chemical reaction with reaction rate governed by Arrhenius law is assumed.

Numerical results show that the global apparent propagation speed of the premixed laminar flame is

greatly affected by the amplitude and period of periodic oscillatory flow. Longer period or larger amplitude induces more flame stretch, and increases the apparent flame speed. Since oscillatory flows with short periods and small amplitudes are more easily dissipated by viscosity, thus their effects on the flame become less, and does the increase of the apparent flame speed. It is also shown that Lewis number not only can affect the local laminar flame speed, it can also affect the flame stretch. The flame is stretched less as Le is greater than 1, so the apparent flame speed decreases; on the other hand, as Le is less than 1, the flame can be quenched locally, the flame is stretched more and the flame area increases, also the fuel can pass the flame unburned, so the apparent flame speed increases.

Keyword: Flame Propagation, Periodic oscillatory Flow

### 二、計畫緣由及目的

在成份固定的預混燃氣中，層流火焰有特定的火焰傳播速度  $S_L$ ，其為火焰沿火焰面法線方向往未燃氣傳播的速度。比照這個觀念，吾人通常也定義紊流預混火焰的視火焰速度 (apparent flame speed)  $S_T$  為“視紊流火焰面”沿著“視紊流火焰面”法線方向往未燃氣傳播的速度。但二者差異頗大，層流預混火焰的傳播速度只與燃氣本身的熱力及化學性質有關，而紊流預混火焰的傳播速度尚與燃氣的流動有關係，故要決定其傳播

速度相當不容易，是燃燒理論長久以來尚未解決的問題。

大部份的實用紊流火焰均落在 flamelet (薄火焰) 範疇內(Borghini[1])，在這範疇內的薄火焰面雖呈現彎曲狀態，可是其局部火焰的基本結構與層流火焰相似，有其局部的層流火焰傳播速度  $S_L$ 。估算紊流火焰傳播速度  $S_T$  的方法之一就是利用這樣的觀念，先估算 flamelet 的總面積  $A_T$ ，然後再依  $S_T/S_L = A_T/A_L$  的關係式來計算  $S_T$ ，式中  $A_L$  為“視紊流火焰面”的“視面積”。假設  $S_L$  已知的條件下，許多學者利用各種不同的統計方法去估算  $A_T$  [2,3]。在這些研究中，為了方便數學上的操作，大部份的學者皆假設流體的密度不變或變化非常小。此種假設忽略了因火焰放熱造成燃氣膨脹而改變火焰前流場結構的事實。另一項缺失是它們都假設  $S_L$  本身不受流場的影響。事實上變形火焰(strained flame)與正常火焰的性質是不一樣的。為了改善這一項缺失，許多的學者研究了火焰位於停滯點的行為[4,5]以了解變形火焰的行為。這些研究的成果被用來計算變形火焰在不同應變率(strain rate)下的火焰傳播速度及火焰結構。有了這種資料庫，目前幾乎所有的紊流燃燒模擬研究皆以紊流場的「局部視應變率」來估算變形火焰的傳播速度，並以此速度作為  $S_L$ 。如此雖將紊流場對火焰結構的影響考慮在內，改善了紊流火焰傳播速度的估算，但紊流場中的應變率不僅是位置的函數，而且還是時間的函數，故此種作法是否正確則有待評估。且對自由傳播的火焰而言，停滯點的火焰行為的研究成果未必能適用 [6,7]。為了改善這個局面並了解變形火焰的行為，本文模擬火焰在周期性運動的流場中傳播的情形，藉著改變運動的振幅、周期等變數，了解火焰在不同振幅、周期下傳播的狀況，以期對了解紊流場中火焰與不同尺寸渦漩的相互作用能有幫助。

### 三、結果與討論

本研究旨在探討停駐在二維周期性振盪流中之預混火焰的行為。如圖一所示，此周期性振盪流於  $x=0$  處以  $u = u_p + A_{mp} \cos(2\pi y/LY) \cos(2\pi t/T)$  及  $v=0$  流向正  $x$  方向，其中  $t$  為時間； $u$  為  $x$  方向速度； $v$  為  $y$  方向速度； $A_{mp}$  為周期性振盪流的速度振幅； $LY$  為其波長； $T$  為周期。 $u_p$  的選擇使得振盪火焰整體看起來在  $x$  軸上停駐，故  $u_p$  的火小可視為振盪火焰的“視火焰速度”。因振盪流在  $y$  方向是周期性的，故吾人假設所探討的流場對稱於  $y = nLY/2, n=1,2,3\dots$  (最大振幅處)。如此一來，吾人可將計算區域只侷限於  $y=0$  與  $y=LY/2$  之間，如圖一所示。因所要處理的流場與火焰交互作用相當複雜，故除了以上假設之外，本文尚作如下的假設：(a) 不考慮重力及熱輻射效應；(b) 各物種的定壓比熱相同且為常數；(c) 假設  $Pr$ =常數， $Le$ =常數；(d) 燃燒反應的模擬採用單一步驟之整體化學反應且反應率為二階的 Arrhenius 形式。數值分析採用控制容積法來離散偏微分方程組而建立差分方程組，並使用 SIMPLEC[8] 算法來處理速度與壓力耦合關係。為了降低數值計算上的困難，模擬所使用的可燃氣為甲烷與空氣的稀薄混合物，當量比為 0.5275。除物質擴散係數  $D$  外，其他相關之物理、化學性質取自參考資料 10。擴散係數  $D$  則基於  $Le$  數等於常數由熱傳導係數求得。 $Le$  數對一維絕熱火焰速度的影響列於表一，表一顯示一維絕熱火焰速度幾乎與  $Le$  數的平方根成正比，這與理論分析的結果相仿。

#### (a) 速度振動週期對視火焰速度的影響

$LY=100 \delta$  ( $\delta=2.1148 \times 10^{-4}m$ )、振幅為 0.315m/s 時，視火焰速度隨周期及  $Le$  數的變化列於表二。表二顯示在周期為 0.2 秒的周期流中視火焰速度隨  $Le$  數的增加而降低，可是在靜止流體中火焰傳播的速度卻是隨  $Le$  數的增加而增加(如表一所示)。圖二指出原因所在。圖二為入

口速度相位  $0.6\pi$  在不同 Le 數的等反應速度圖。因等反應速度圖的形狀可以代表火焰的形狀，圖二指出火焰面積隨 Le 數的降低而增大。火焰面凹向未燃氣的部份在 Le 小時(如=0.5)燃料擴散離開未燃氣的速度大於熱擴散進入的速度，使此部份的燃料濃度降低，反應速度隨之也降低，造成有部份火焰熄滅，可是火焰卻被拉伸長得很長。因視火焰速度不僅與局部火焰層流傳播速度有關也與火焰的實際面積有關。表一指出局部火焰層流傳播速度隨 Le 數的降低而降低，這也可由圖二可看出，圖二顯示隨 Le 數的降低火焰的厚度會增加(厚度與傳播速度成反比)。可是火焰面積的增加量比局部火焰層流傳播速度的減少量大，故隨 Le 數的降低，整體的視火焰速度卻反而增大。反之 Le 數大時由於熱擴散係數大於質量擴散係數，故使凹向未燃氣的部份反應速度因而提高，減少火焰面的拉伸，進而影響其視火焰速度。

當週期由 0.2 秒變成 0.05 秒時，視火焰速度  $u_p$  變小如表 2 所示。視火焰速度  $u_p$  雖然大體上隨 Le 數的增加而降低，然而 Le=2 的視火焰速度已微微超越 Le=1 的視火焰速度。圖三為速度相位  $0.6\pi$  在不同 Le 數的等反應速度圖。圖三顯示 Le=0.5 與 Le=1 時火焰面積相差不多，可是表二卻指出二者的視火焰速度卻相差很多，主要的原因是在 Le=0.5 時火焰(如前所述)有部份是熄滅的，通過這部份的燃料是到下游才燃燒的，火焰實質燒掉的燃料應該與 Le=1 時相去不遠，但是視火焰速度卻可以相差很多。Le=1 時的火焰面積雖比 Le=2 時大，可是局部火焰層流傳播速度卻比較小，造成二者的視火焰速度相差有限。

(b)速度振幅對視火焰速度的影響

速度振幅對視火焰速度的影響示於表三。表三顯示視火焰速度隨振幅的減少而降低。可是當振幅小(0.18m/s 及 0.09m/s)時，視火焰速度隨 Le 數的變化卻不像振幅大(=0.315m/s)時那樣單

調，Le=0.5 及 2 時的視火焰速度皆比 Le=1 時大。圖四為不同 Le 數在入口速度相位  $0.6\pi$ 、振幅為 0.09m/s 時的等反應速度圖。與振幅為 0.315m/s 的結果相比，火焰面的拉伸及彎曲均較緩和，這說明了視火焰速度為何會隨振幅的減少而降低。當 Le=0.5 時圖四顯示火焰凹向未燃氣的部份依然亦有熄滅的趨勢，但其火焰面積比 Le=1 及 2 時大很多。Le=1 及 2 時，火焰本身受到較少的擾動，火焰面較平，面積較小。Le=0.5 時，火焰局部傳播速度雖比 Le=1 時小，但有熄滅的部份，故其視火焰速度大。當 Le=2 時，火焰局部傳播速度比 Le=1 時大，又其火焰面積與 Le=1 時相當，因此其視火焰速度也比較大些。

四、計畫成果自評

本研究完全合乎計畫所規畫之範圍，計畫結果有部份在基礎燃燒理論上應該有價值。

五、參考文獻

[1] Borghi, R., in Recent Advances in Aeronautical Science, (Ed. C. Bruno, and C. Caseci), Pergamon, New York, 1984.  
 [2] Yakhot, V., CST, 60, pp191-214, 1988.  
 [3] Sivashinsky, G.I., in Dissipative Structures in Transport Processes and Combustion (Ed. Meinkohn D.) Springer Series in Synergetics, Vol.48, 1990.  
 [4] Sato, J. and Tsuji, H., CST, 33, p.193, 1983.  
 [5] Law, C.K., Twenty-second Sym. on Combustion, p.1381, 1988.  
 [6] Candel, S.M. and Poinot, T.J., CST, 70, p.1, 1990.  
 [7] Knio, O.M. and Najm, H.N., in Twenty-eighth Sym. on Combustion, 2000.  
 [8] Van Doormaat, J. P. and Raithby, G. D., Numerical Heat Transfer, Vol.7, p.147, 1984.  
 [9] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, 1980.  
 [10] 蔡建雄, "圓管內預混火焰傳播現象之研究", 國立臺灣大學機械工程學研究所博士論文 1994.

表一 一維絕熱火焰傳播速度

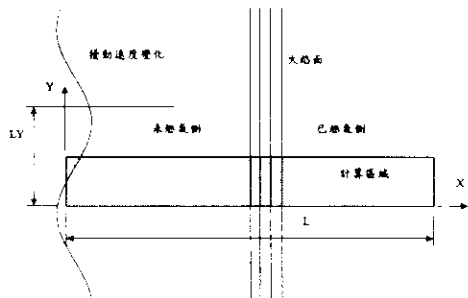
Le 數	一維絕熱火焰傳播速度
0.5	0.0491 m/s
1	0.0668 m/s
2	0.0912 m/s

表二 不同周期與 Le 數對視火焰速度 (m/s) 的影響，振幅 0.315m/s

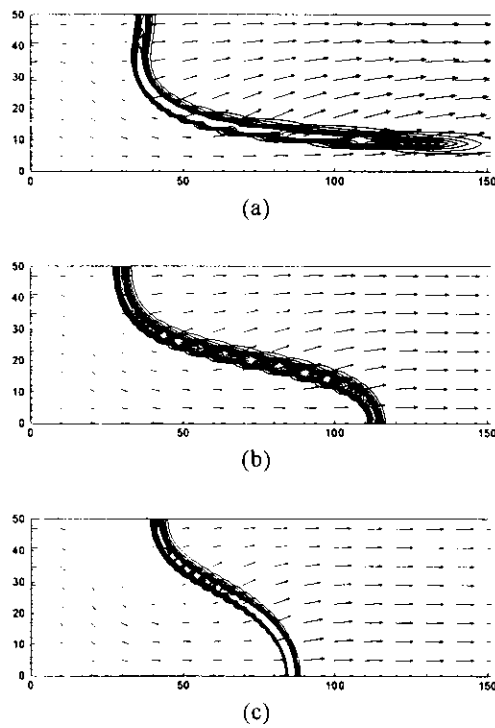
	Le=0.5	Le=1	Le=2
周期 0.2 秒	0.18	0.1255	0.119
周期 0.05 秒	0.1301	0.094	0.096

表三 不同振幅與 Le 數對視火焰速度 (m/s) 的影響，周期 0.2 秒

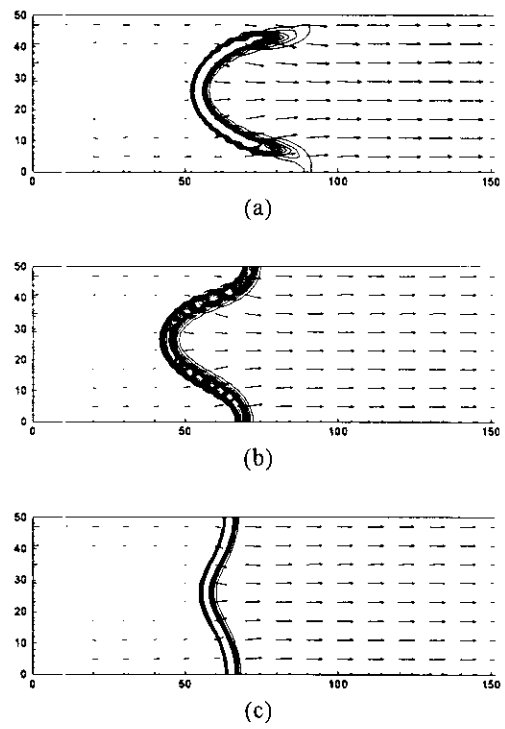
	Le=0.5	Le=1	Le=2
振幅 0.315m/s	0.18	0.125	0.119
振幅 0.18m/s	0.112	0.785	0.099
振幅 0.09m/s	0.0915	0.0675	0.092



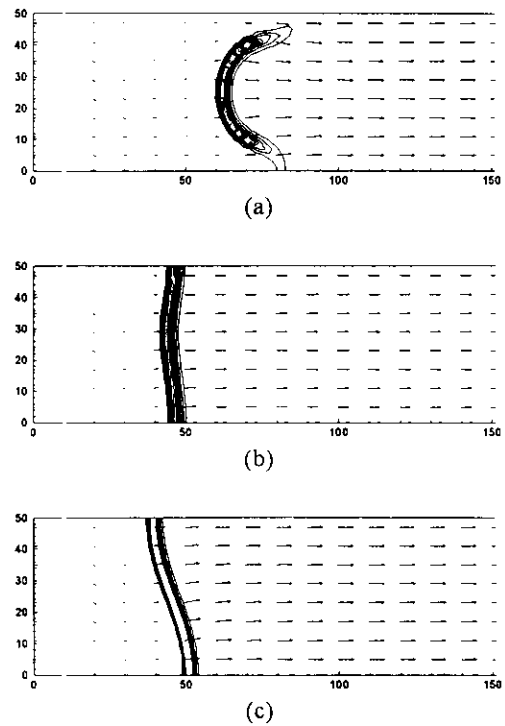
圖一 計算流場示意圖



圖二 週期 0.2 秒，振幅=0.315m/s，入口速度相位為  $0.6\pi$  之等反應速度線圖 (a)Le=0.5 (b)Le=1(c)Le=2



圖三 週期 0.05 秒，振幅=0.315m/s，入口速度相位為  $0.6\pi$  之等反應速度線圖 (a)Le=0.5 (b)Le=1(c)Le=2



圖四 週期 0.2 秒，振幅=0.09m/s，入口速度相位為  $0.6\pi$  之等反應速度線圖 (a)Le=0.5 (b)Le=1(c)Le=2