

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高溫紊流場中烷類燃料之液滴蒸發現象研究(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-095-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：沈弘俊

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 1 日

高溫紊流場中烷類燃料之液滴蒸發現象研究(2/2)

Temperature and Turbulence Effects on Droplet Evaporation in Sprays(2/2)

計劃編號：NSC 92-2212-E-002-020

執行期限：92/08/01 ~ 93/07/31

執行機關：國立台灣大學應用力學研究所

主持人：沈弘俊

摘要

本計劃主要目的為量測噴霧液滴在均勻紊流，不同溫度的強勢對流下之蒸發速率之研究。本研究計劃測試的燃料，主要為高碳及低碳之烷類燃料，測試之溫度條件為中高溫度狀況，溫度範圍設定為 25°C-300°C，液滴雷諾數(Reynolds number)大約控制在 100-300 範圍，而此雷諾數乃以液滴的直徑與氣流之間的相對速度來定義，強勢對流場所含紊流強度範圍在 3.5% - 30%。從實驗結果顯示，高碳烷類燃料之蒸發速率確實會隨著強制對流風速的增加而加大，也會隨溫度的增高而顯著的增加，除此之外，本研究也探討流場在不同的紊流強度及特徵長度尺度下，對液滴蒸發速率的影響，並且引用 Vaporization Damköhler number (Da_v)，藉以描述液滴蒸發的相關物理機制，本實驗研究之成果所得之液滴蒸發的定量關係，將對學術及工業發展有實質上之助益。

關鍵詞：特徵長度尺度、液滴蒸發、丹克爾數(Damköhler number)

一. 前言

在國內外所發表的論文中都不難發現，真實的噴霧液滴流場之現象相當複雜，它不但結合了液滴與燃料蒸汽(Fuel vapor)之間的混合，更包含了流場溫度與流場之紊流特性的耦合。所以為了能夠瞭解影響液滴蒸發的主要因子，在過去通常都是將噴霧出來之液滴群簡化成是由一群單一液滴直徑所組成。如上所述，對於單一液滴之蒸發現象的瞭解便顯得相當重要，而同時亦是影響液滴引燃的一個相當重要機制。因此，在過去關於噴霧液滴之文章，皆是直接討論單一液滴之蒸發現象。然而，大部分的研究皆是針對在自然對流，或是處於層流狀態下的強制對流中做一系列的研究探討，甚少將強制對流下的紊流狀態與高溫影響考慮入內。

自從 1990 年之後開始有人對強制對流的紊流流場內之液滴蒸發速率影響進行實驗。Gökalp

et al. (1992)在冷流場中對正庚烷(n-heptane, C_7H_{16})與正癸烷(n-decane, $C_{10}H_{22}$)做蒸發速率的量測。當紊流的特徵完整長度尺度遠大於液滴之起始直徑，從結果可顯示出，紊流效應對於正庚烷的蒸發速率影響並不大，但對於正癸烷的影響則是相當大。此外也定義一個丹克爾數(Vaporization Damköhler Number, Da_v)，來描述液滴蒸發的相關物理機制。對於不同的燃料液滴皆會有不同之 Da_v 數存在，而且當 Da_v 數越大時，液滴蒸發速率較不受紊流效應影響。此外在論文中更發現，當液滴越小時，單純紊流效應能更有效提高蒸發速率。反之，當液滴越大時，單純紊流效應之影響將逐漸變小，而影響液滴蒸發之主要角色將換成強制對流效應。

Gökalp et al. (2000)在以植物油當作柴油引擎(Diesel Engine)的燃料之機制下，對油麻籽及向日葵等植物提煉而成的燃料，在各種溫度下

(473K~1020K)，特別是高溫下進行蒸發速率量測。從結果發現，其蒸發速率與一般液滴所呈現出的 d^2 -law模式之趨勢是一致的，但是和正烷類有相當的不同，因為上述兩種的植物燃料所擁有的比焓(Specific enthalpy)較正庚烷高出許多，所以呈現出的汽化速率較為低。在此液滴中，蒸發過程約可分成三個部分：膨脹段(Dilatation time)，此時液滴體積會有少許膨脹，而此段是正烷類所沒有的。等蒸發速率段與緩慢蒸發段(Vaporization with moderate rate)，並且在越高溫下，膨脹段時間會縮短且膨脹率會較小，而等蒸發速率之K值會變大。

Hiromitsu & Kawaguchi (1995)則以不同的石蠟系碳氫化合物、酒精及蒸餾水，將單一液滴置放在高溫、具紊流效應之風洞流場內，量測各種液滴蒸發的速率。結果顯示強制對流中的紊流強度對液滴蒸發有相當大的影響。同時也指出Gökalp et al. (1992)等人並無考慮強制對流流場的溫度效應，所以其結論不太恰當。Hiromitsu & Kawaguchi (1995)認為，當溫度升高達350°K或以上時(均已大於所列出之實驗物質的沸點)，不同燃料的 Da_v 值便會維持一個定值，不再有大幅度的變化。Hiromitsu & Kawaguchi (1995)並指出在紊流場中的最小尺度格摩拉夫微小尺度(Kolmogorov microscale)的大小，對液滴蒸發亦有影響，當格摩拉夫微小尺度愈小則愈是能提高液滴蒸發的速率。此外，更提出液滴之蒸氣邊界層 δ_m (vapor boundary thickness)的厚薄便是對液滴蒸發的快慢有所影響，當燃料液滴之蒸氣邊界層愈薄時，紊流場中的特徵尺寸尺度便愈容易帶走液滴表面的蒸氣分子，而當液滴表面的蒸氣分子被大量的帶走，使得液滴分子能更容易蒸發為蒸氣分子，再被下一道氣流帶走，故蒸氣邊界層的厚薄也是影響液滴蒸發的一個重要因素。然而Hiromitsu & Kawaguchi (1995)實驗的紊流流場溫度範圍並不廣泛，僅侷限在323-423K，與真實的噴霧燃燒環境有所差異，並且沒有詳細的探討燃料沸點和紊流流場溫度之間的關係，實為可惜。

本研究群已針對烷類液滴之蒸發現象進行約一年期之初步研究，於先期實驗中，我們已經建立一紊流產生設備，並針對烷類液滴於常溫條件下，不同紊流流況下之蒸發現象進行觀察，由於高溫紊流場更符合實際工程應用狀況，唯其現象亦更為複雜，目前之文獻對此之數據亦極其缺乏。本研究之成果將可於學理上之基礎研究有所貢獻，亦可對工程上實際燃燒室之設計有助益。

二、內容

2.1 實驗設備的架構

本實驗所需之儀器設備包含了一只垂直之直立式風洞的風洞架構、紊流產生器、影像擷取系統、雷射都卜勒量測(LDA)系統等四個主要的架構。

2.1.1 風洞架構

由於本實驗主要乃探討液滴在流場中之蒸發現象。為了在不同流場情況下的液滴蒸發，必須提供其一個可控制溫度且可改變不同紊流強度及各種不同特徵長度尺度的穩定流場，因此在考慮實驗的相關需求，吾人設計一小型開放式的垂直風洞 (Fig. 1)來作為提供實驗所需之流場環境。風洞主體包含一 5 匹馬力的鼓風機及變頻器，藉以控制風洞出口的速度，另外為了控制流體的溫度，在鼓風機之後裝置一的加熱器(Heater unit)。整體運作過程為將流體由鼓風機導入風洞中，經過加熱器及蜂巢網格(Honeycomb)後，由90°的彎管將水平氣流導向為垂直氣流，最後經由活動式收縮段(Removable contraction)將氣流導向至出口的測試段。

2.1.2 紊流產生器(孔口平板)

為了控制風洞出口之測試段具有不同的紊流強度，以探討紊流效應對液滴蒸發的影響，故考慮在風洞之收縮段後，加裝一片孔口平板(Orifice plate)，並套上一相同管徑的金屬管。其原理乃利用孔口平板不同圓孔孔徑的大小及排列的疏密度再加上不同管長的金屬管等三種參

數的相互配合下，則可在出口端得到實驗所需要的不同紊流強度。本實驗可控制的紊流強度範圍在 3.5%~30%之間。

2.1.3 雷射都卜勒量測系統

雷射都卜勒測速儀以下簡稱 LDA，是藉由感測其移動物體所散射出來的雷射光所產生的都卜勒偏移(Doppler shift)，利用前方散射光(Forward scatter)的接收方式，讓光電管接收訊號，進而求出物體移動的速度、方向。感測方式一般採用外插式(Heterodyne)，而外插感應方式一般又分為雙光束模式(Dual beam)、參考光模式(Reference beam)及雙散射光模式(Dual scatter)，而本實驗所採用是雙光束模式。

2.1.4 影像擷取系統

本實驗之液滴影像乃先透過數位式攝影機擷取，之後再進行影像分析。其他周邊設備方面有個人電腦、高解析度顯示器、高功率燈泡、鏡頭及蛇腹。實驗中所拍攝的影像，先以數位方式存於電腦之記憶體中，經由顯示器上做重複來回之播放、並且篩選可用之影像，再存於電腦硬碟中，以供往後液滴蒸發之分析。

2.2 實驗結果

本實驗成果主要分為兩部分，分別為風洞性質量測及液滴蒸發特性探討。本次實驗是以高碳烴類為主要測試燃料，包括正癸烷、正十二烷及正十六烷三種，所以流場溫度，液滴雷諾數及流場紊流強度，為主要的控制參數。

2.2.1 風洞性質量測

Fig2 表示風洞出口端在不同位置之軸向與徑向速度擾動剖面圖。從圖中可明顯的看出在特定長寬高約為 18mm 的範圍內，其流場軸向與徑向的平均速度，及速度擾動皆穩定，另外在最外側的流場因靠近邊界的關係而，而造成比較小的速度場，並且其速度擾動值也相對提昇。風洞出

口之量得的紊流強度約為 4 % 左右，此結果與 Laufer (1953)所量測結果相符。

2.2.2 液滴蒸發特性

為求有系統的分析流場中各種參數對燃油液滴蒸發速率的影響，我們必須將流場參數加以控制，才能有效的看出單一參數對蒸發速率之影響。在第一年的實驗中，所控制的參數包括流場之強制對流風速、流場之紊流強度、流場之紊流特徵尺度及燃油液滴本身性質，而在今年的實驗中，則加入流場的溫度，以探討溫度效應對整個液滴蒸發的影響。Fig. 3~Fig. 5 是正癸烷、正十二烷、以及正十六烷液滴在相對於液滴初始直徑下雷諾數為 100 時，不同之流場溫度下隨時間變化之蒸發變化圖。從圖中顯示出，不管是 298K、473K 及 573 K 的情況下，烴類液滴的蒸發速率會隨含碳量的減少而增加，另外當溫度增加時，這三種烴類燃料的蒸發速率都會隨之增大。Fig. 6~Fig. 8 則是討論紊流特徵尺度變化與雷諾數，紊流強度對液滴蒸發速率的影響。從圖中可發現，液滴的蒸發速率會隨雷諾數之增加而增加，也會隨溫度的提高而加大，另外也發現在固定一紊流特徵尺度下，紊流強度增強時，液滴之蒸發速率會有顯著的提升，然而從另外的實驗中也發現若將長度尺度增加時，則蒸發速率卻沒有明顯的上升，如同第一年報告中，流場中有一特定的特徵尺度，才會影響液滴的蒸發速率。

三、結論

綜合兩年來的成果，本研究所完成的工作及結果可以歸納成下列幾點：

1. 已建立可控溫與紊流強度的直立式風洞且經由風洞性質測試中可以得到一個良好範圍內之均勻風洞性質。
2. 關於紊流的變化情形對於液滴蒸發性質上，可以在特徵尺度上的不同看出，經由實驗結果得知，當 l/d 固定的情形下，紊流強度增加，液滴蒸發效率亦會有提升的現象。
3. 在 Da_v 數的探討上，從實驗結果中可以發現，在相同的溫度下，不論是在常溫下或是在 200°C 的狀況下， Da_v 數會隨含碳量的增加

而減小，當 Da_v 越大，代表是含碳量比較少的烷類燃料，而含碳量愈少，則愈易揮發，即其 T_v 越小，表示液滴的蒸發時間越快，所以速度擾動對燃油液滴的蒸發速率相對來說，影響就沒有那麼的大。

4. 對於溫度效應而言，最主要是影響液滴本身的性質，當溫度增加時，液滴本質上的質傳擴散性、液滴蒸氣的黏滯性及密度等都會隨之改變，進而影響到 Da_v 數的改變，對單一物種而言， Da_v 數會隨溫度的增加而加大，這意味著 T_v 越小，愈易揮發，所以當溫度效應加入後，紊流場所扮演的角色，就愈不顯著，所以對高碳烷類燃料以及在溫度愈低的情況下，紊流效應才會對蒸發速率的影響扮演一定的角色。

四、感謝詞

本計劃承國科會經費補助 (計劃編號：NSC 92-2212-E-002-020)。

五、參考文獻

- [1] Gökalp, I., Chauveau, C., Simon, O. and Chesneau, X., “ Mass Transfer from Liquid Fuel Droplets in Turbulent Flow”, *Combustion and Flame*, Vol. 89, pp. 286-298, 1992.
- [2] Hinze, J.O., “Turbulence”, 2nd edition, McGraw-Hill, 1975.
- [3] Hiromitsu, N. and Kawaguchi, O., “Influence of Flow Turbulence on the Evaporation Rate of a Suspended Droplet in a Hot Air Flow”, *Heat transfer – Japanese Research*, Vol. 24, No. 8, pp. 687-700, 1995.
- [4] Laufer, J. “The structure of turbulence in fully developed pipe flow”, *NACA Technology Note*. 2954, 1953.
- [5] Morin, C., Chauveau, C. And Gökalp, I., “Droplet vaporization characteristics of vegetable oil derived biofuels at high temperature”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, pp. 41-50, 2000.

- [6] Wu, J.S., Liu, Y.J.& Sheen, H.J., “Effects of ambient turbulence and fuel properties on the evaporation rate of single droplets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V. 44, pp. 4593~4603, (2001).
- [7] Yuen, M.C. and Chen, L.W., “On the drag of evaporating liquid droplets”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 14, pp 147-154, 1976.

六、圖表彙整

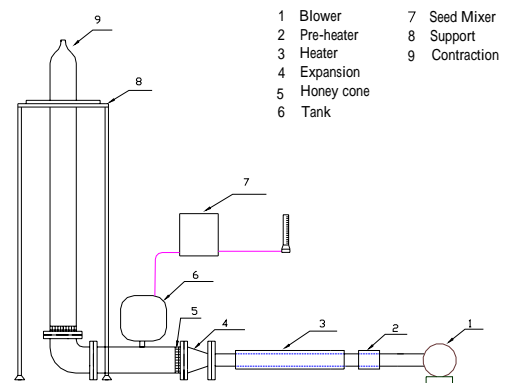


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel

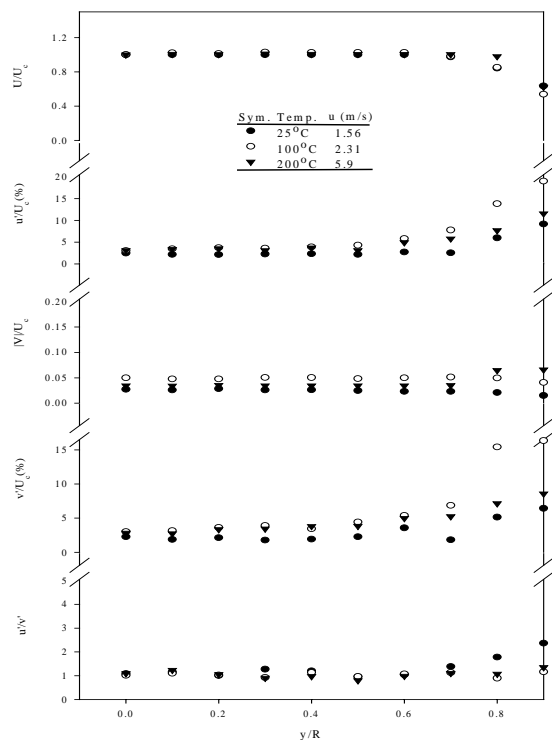


Fig. 2 LDA mean velocity and velocity fluctuation measurements of several locations for Pipe flow field

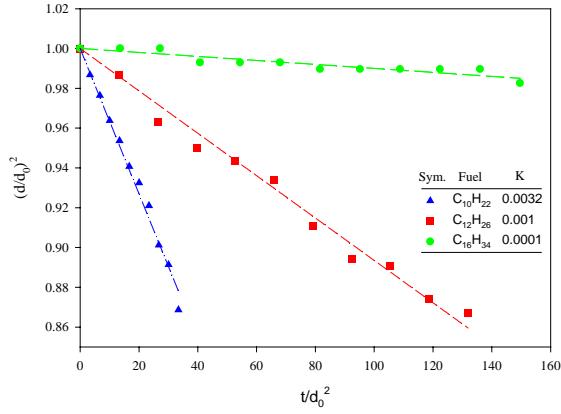


Fig. 3 Vaporization rate of heavy alkane fuel droplet at 298K.

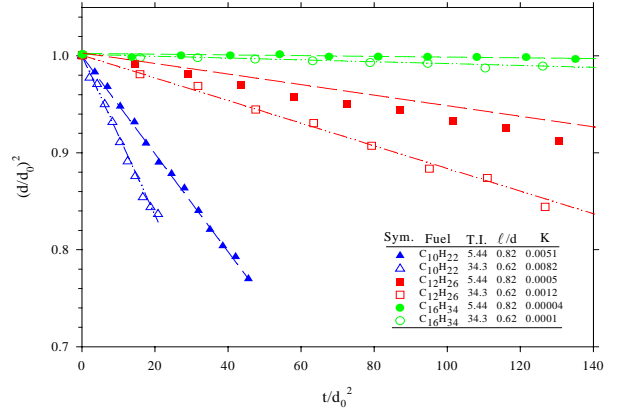


Fig. 6 Vaporization rate of heavy alkane fuel droplet at 298K for different flow field .

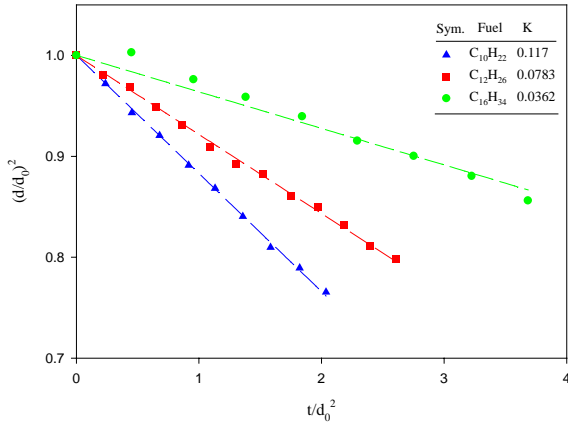


Fig. 4 Vaporization rate of heavy alkane fuel droplet at 473K.

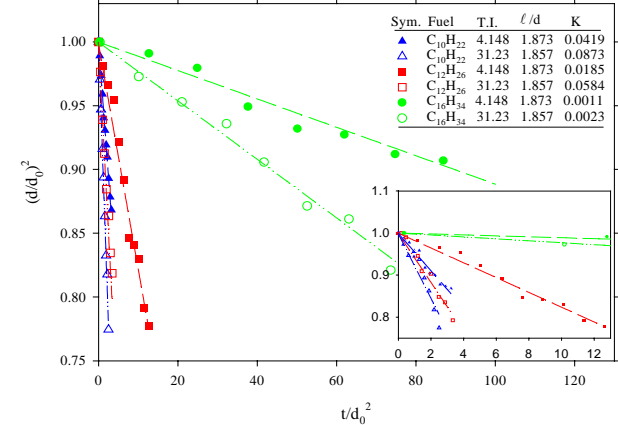


Fig. 7 Vaporization rate of heavy alkane fuel droplet at 473K for different flow field .

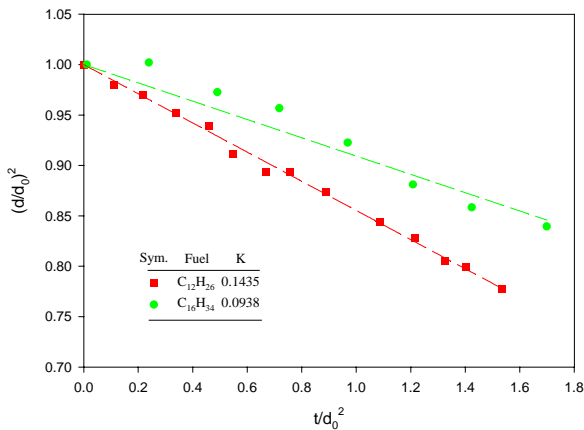


Fig. 5 Vaporization rate of heavy alkane fuel droplet at 573K.

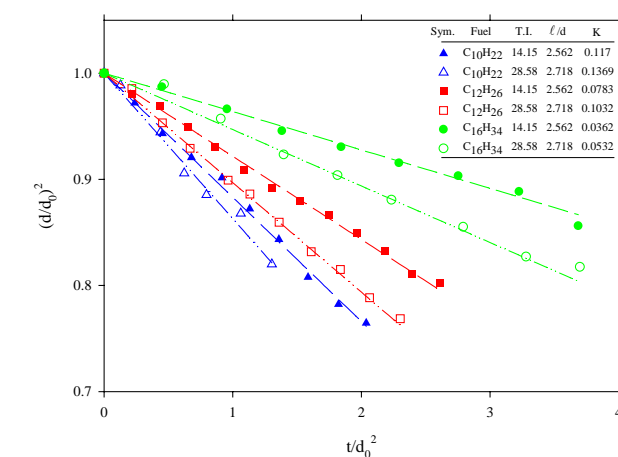


Fig. 8 Vaporization rate of heavy alkane fuel droplet at 473K for different flow field .