

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040101

聲波激擾對噴流擴散特性與燃燒性能之影響

學校名稱：新北市立永平高級中學

作者： 高二 林界誼 高二 呂翔碩	指導老師： 盧培凱 沈文俊
-------------------------	---------------------

關鍵詞：噴流、燃燒火焰、聲波激擾

摘要

本研究以實驗方法觀察受聲波激擾的噴流之等溫流場特徵及燃燒火焰行為，探討聲波激擾對噴流的混合特性及燃燒性能之影響。使用熱線風速儀量測聲波激擾引致噴流出口速度振盪的特性；應用流場可視化技術，觀察噴流的流場特徵；藉著量測噴流之側向擴展寬度，比較噴流受聲波激擾之前與之後的混合與擴散特性。最後，丙烷作為噴流的流體，點燃噴流形成燃燒火焰。觀察燃燒火焰的顏色與外觀尺寸變化，探討聲波激擾對燃燒噴流的燃燒性能之改善。

結果發現聲波激擾噴流時，藉著「回吸預混」、「渦漩形成、演化、捲入、破碎」與「紊流增強」效應等物理機制，有效提升噴流與週遭空氣的混合與擴散特性，因此，在實際燃燒噴流的工業應用，可以明顯的提升燃燒效率。

公式表

$$u \quad \text{噴嘴出口速度} \quad u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

$$St \quad \text{史托數} \quad St = \frac{2\lambda}{D_p} \quad (2)$$

$$\lambda \quad \text{流體平均自由路徑} \quad \lambda = \frac{\mu}{0.499p\sqrt{\frac{8M}{\pi RT}}} \quad (3)$$

壹、研究動機

噴流經常被使用在工業與生活中，例如航空、燃燒、熱傳、化工、工業通風、冷凍空調等領域，噴射渦輪發動機、鍋爐、瓦斯爐具、熱交換器、散熱器及化學混合器中的流體噴射裝置。這些應用主要是著眼於流體(氣體或液體)由孔口或噴嘴射出時，能將週遭的流體「捲入」，並與噴流本身的流體「混合」。此混合的流體可以被使用在許多場合，例如：燃燒器、噴流製冷器及瓦斯爐具等等。但是，由一孔口或噴嘴射出之噴流，由於其軸向(即噴流方向)的動量遠大於側向的動量，也就是說：噴流由出口噴出而向下游發展時，不易藉著側向的速度與週遭的流體「混合」，而且因為並無「回流」或「逆流」，所以，不易與週遭流體產生快速的混合。

因此，在應用上常需要使用一些「控制」技巧，以增強「捲入」與「混合」的效能。從過去的研究文獻中[1-5]，發現許多控制噴流的技巧。主要的機制是透過一些特殊設計的方法，使噴流的射出速度產生振盪，對噴流造成明顯的速度擾動，如此能夠提升噴流的擴散與混合特性。常見的激擾方法如下：

- (1) 使用活塞的往復運動，推動噴流，使噴流出口形成周期性的速度振盪。
- (2) 使用壓電材料貼附於噴流出口處，擾動噴流出口的速度。
- (3) 藉由週期性地開關流量閥件，使得噴流出口的流量產生週期性變化。
- (4) 使用聲波激擾噴流，造成噴流出口的速度產生週期性振盪。

貳、研究目的

為了改善噴流射出後與週遭環境的氣體的混合特性，本實驗使用聲波激擾的方式，以揚聲器產生聲波，作為激擾噴流的機制，對噴流造成週期性的擾動。首先量測噴流受聲波激擾影響時，噴流出口速度的速度振盪特性。利用流場可視化的技術，觀察聲波對噴流造成的流動行為特徵，並探討這些特徵流動行為對噴流擴散特性的影響；噴流的擴散強弱係經由觀察噴流的流場特徵行為以及量測噴流的側向擴展寬度而判定。再針對噴流常見的應用例—燃燒，利用燃料作為工作流體並點燃噴流，觀察噴流火焰在受到聲波激擾之前與之後燃燒特性的變化，再進一步探討改善噴流的擴散特性時，對於噴流燃燒火焰的影響；噴流火焰燃燒性能的高低係經由觀察火焰的顏色與量測火焰的長度而判定。

利用實驗的方法，了解聲波對噴流造成的擾動特性。透過支配聲波造成的擾動特性，改善傳統噴流射出在週遭環境中的擴散與混合特性。藉由噴流擴散的基礎研究以及噴流燃燒火焰的應用研究，使我們對噴流混合的物理機制以及控制此一機制以達到增強混合效應與燃燒效能的方法有較多的理解。

參、研究設備及器材

一、實驗設備

圖 1 是實驗設備及相關儀器的配置示意圖。當進行噴流特性實驗時，工作流體為空氣。空氣由氣源(鼓風機)提供，高壓空氣藉由壓力調節器穩定供應壓力，以針閥調整流量，並以浮子式流量計測流量。流體接著流經產煙器，當需要煙霧以進行流場可視化實驗時，將產煙器的電源打開，煙霧即隨著氣流而流動；當不需要煙霧時，將產煙器的電源關閉。具有穩定壓力與流量的氣流接著被導入噴嘴機構，在噴嘴的出口處射出以形成一股噴流。噴嘴的出口是一直徑 $d = 5 \text{ mm}$ 的圓形孔，可據此計算出噴嘴出口圓孔的截面積。將浮子式流量計所量測到的流量除以噴嘴出口圓孔的截面積，可計算出噴流出口的平均速度(u_j)。為了以聲波對噴流產生激擾，將一揚聲器裝設在噴嘴內部的下方。藉由電子訊號產生器產生週期性的方波訊號，此訊號通過功率放大器將方波訊號放大至實驗所需求的電壓與電流，以此放大功率後之方波訊號來驅動揚聲器。訊號產生器及功率放大器分別控制實驗中的聲波激擾參數：激擾頻率(f_{exc})及激擾電壓(E_{exc})。座標系統如圖 1 右上角的小圖所示，座標原點置於噴嘴出口的中心，水平方向為 x 軸，沿著噴嘴軸心方向(噴流的流動方向)為 z 軸，垂直於紙面的方向為 y 軸。

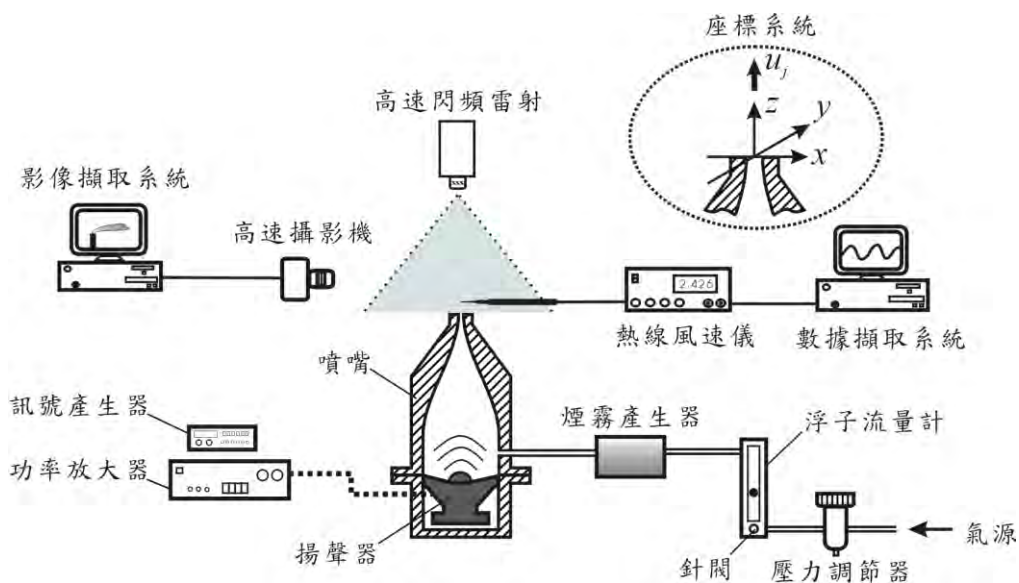


圖 1 實驗設備及相關儀器的配置示意圖

二、實驗儀器

(一) 噴流流量量測

浮子式流量計為量測噴流流量的設備，如圖 2 所示。當流體通過流量計時，浮子式流量計內的浮子會受到四個力的作用：浮子上下游壓力差所造成的推力、流體的黏滯性對浮子所造成的摩擦拖曳力、流體與浮子的密度差所造成的浮力、以及浮子所受到的重力。當這四個力達到平衡時，浮子會靜止在流量計的玻璃管某一流速指標上。浮子的高度與真實的流量並非成線性關係，因而需要對浮子之流量指標與真實流量作校正。浮子式流量計的校正是利用一個收縮比為 900 的噴嘴，使用連續方程式的關係可知噴流的進、出速度比為 1/900，因此噴嘴的入口速度所產生的動能效應可以忽略不計。噴嘴兩端的壓力差 ΔP 經由解析度為 0.001 mmAq 的壓力轉換器量得，再藉由柏努力方程式，得知噴嘴出口速度(u):

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

上式中，為 ρ 空氣的密度。藉由量測噴嘴兩端的壓力差與空氣密度，即可透過方程式(1)計算噴嘴出口之平均流速。因而流量計之流量可經由噴嘴出口面積乘上噴嘴出口速度求得，再和流量計的指標刻度相比較可得一校正曲線，校準後的精確度為全刻度的 1%。



圖 2 浮子流量計

(二) 噴流速度振盪量測

為了研究噴嘴出口噴流受聲波激擾所造成的速度振盪，採用 TSI 公司生產之一維定溫型熱線風速儀，偵測噴流出口速度訊號隨時間的變化。熱線探針如圖 3 所示。由電子方波測試法，調整熱線風速儀的頻率至大約 20 kHz。每次實驗前皆以皮托管校準熱線風速儀，並由速度與電壓的四次方曲線外差以獲得低風速區的資料。熱線風速儀量測的輸出訊號經由低通濾波器(low pass filter)過濾高頻電子雜訊後，導入高速資料擷取系統取得速度資料。高速資料擷取系統為 KEITHLEY 公司的產品，型號為 KUSB-3116。高速資料擷取系統在此實驗量測過程中的取樣率為 10,000 samples/sec，取樣時間為 5 s。



圖 3 熱線探針

(三) 流場可視化

使用雷射光頁(laser-light sheet)流場可視化技術，進行流場結構的觀察。雷射光頁流場可視化之技術原理，係以雷射光束透過光頁產生器展開成一面三角形的薄光頁，當煙霧質點通過雷射光頁時會產生散射現象，使用攝影機便可記錄由煙霧散射所形成之流場結構影像。實驗過程中，流場可視化所需的煙粒質點，係由一自製之產煙器提供，產煙器的外型如圖 4 所示。煙霧產生的方法是利用可調節電流大小的電熱線加熱白蠟油(kerosene)生，使白蠟油蒸發。當蒸發的白蠟油遇到較冷的空氣時，即凝結為細小的油滴，整體看起來就像白色的煙霧。藉由控制加熱電流的大小，可以改變煙霧的濃度與煙霧顆粒的尺寸。煙霧顆粒的尺寸必須大到足夠將雷射光漫射以

利流場觀察，但又不能太大，以免煙霧顆粒跟隨流體流動的特性不佳(亦即必須考慮顆粒質點是否良好的跟隨流體的運動)。依據 Flagan and Seinfeld [6]所提之理論，定義史托數(Stoke number)為

$$St = \frac{2\lambda}{D_p} \quad (2)$$

(2)式中， D_p 為質點粒徑， λ 為流體平均自由路徑，定義如下：

$$\lambda = \frac{\mu}{0.499p\sqrt{\frac{8M}{\pi RT}}} \quad (3)$$

(3)式中， p 是氣體壓力， μ 為動力黏性 1.876×10^{-5} N·s/m²， M 為分子量， R 為氣體常數， T 為氣體溫度。當流體中懸浮質點之史托克數遠小於 1 時，懸浮質點與流體運動之間的「滑移」可視為極小，亦即懸浮質點可以良好的跟隨流體運動。本實驗採用之流體為空氣，白蠟油煙霧的粒徑係使用 Malvern 公司所生產的 Malvern 2600C 粒徑分析儀進行量測之結果約為 $D_p = 4.79 \mu\text{m}$ 。據此計算出 $St = 3.044 \times 10^{-4}$ 至 7.616×10^{-5} 之間，遠小於 1。所以懸浮質點與流體之間運動的「滑移」可視為極小，也就是說，懸浮質點所呈現出的運動影像可以視為近似流體運動的影像。研究中流場可視化使用之雷射是由 Litron 公司所生產的高速脈衝雷射。型號為 LDY301，如圖 5 所示，可以產生波長 527 nm 之雷射光束。將光束導入光頁產生器形成雷射光頁，光頁厚度約為 0.5 mm。實驗中使用兩種不同的攝影機，分別擷取瞬時流場與長時間平均流場的照片。瞬時流場照片採用 IDT 公司所生產的 X-Stream XS-4 系列高速數位攝影機，如圖 6 所示。影像感測器採用 monochrome CMOS sensor，具有 512×512 像素。影像擷取速率 1050 fps (frame/sec，每秒擷取的照片數目)，曝光時間為 1/10,000 sec，影像記憶容量為 4GB。長時間平均流場照片的拍攝使用 CANON 公司生產的 EOS 450D 數位相機，影像解析度為 4272×2848 像素，如圖 7 所示，曝光時間為 2 sec。



圖 4 產煙器，自製。

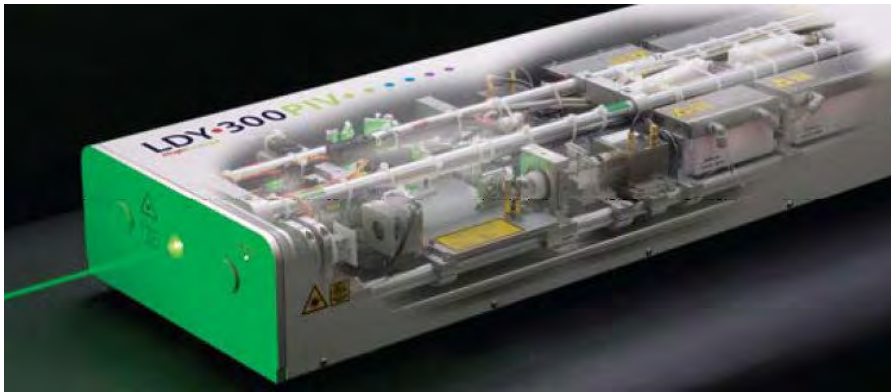


圖 5 高速脈衝雷射，Litron LDY301。



圖 6 高速數位攝影機，IDT X-Stream XS-4。



圖 7 數位相機，CANON EOS 450D。

(四) 燃燒火焰特徵觀察

在研究噴流應用於燃燒火焰的行為時，使用丙烷取代空氣作為燃燒火焰的噴流燃料。在噴嘴的出口位置將噴出的燃料點燃，使用直接攝影的方式，擷取燃燒火焰的瞬間及長時間曝光照片。影像擷取使用 CANON 公司生產的數位相機，型號 EOS 450D。瞬間照片與長時間曝光照片的曝光時間分別為 1/200 sec 及 2 sec。

肆、研究方法

本實驗針對從圓形孔口噴嘴射出之噴流，探討聲波激擾對噴流的流場特性與擴散效果之影響，進行等溫流場特徵及燃燒火焰行為的觀察及研究。實驗包括噴流混合特性及噴流燃燒火焰特徵兩個部份。

一、噴流混合特性

關於噴流的混合特性研究，使用空氣作為噴流之流體。利用熱線風速儀量測噴流出口處，聲波激擾對噴流形成的速度振盪特性。應用流場可視化方法，觀察噴流受聲波激擾時的流場特徵行為，並藉著量測噴流之側向擴展寬度，探討噴流受聲波激擾之前與之後的混合與擴散特性。

二、噴流燃燒火焰特徵

在噴流燃燒火焰特徵研究的部份，使用丙烷(C_3H_8)燃料作為噴流的流體，點燃丙烷氣體，進行燃燒火焰的研究。觀察燃燒火焰的行為，並量測火焰的長度，以火焰受聲波激擾時的行為特徵與火焰長度的變化作為噴流(在混合與擴散特性受聲波激擾之前與之後)燃燒性能良窳之判斷。

伍、研究結果

一、噴流出口速度振盪特性

為了研究噴流的速度振盪特性，將熱線風速儀放置在噴嘴孔口的出口 $(x/d, y/d, z/d) = (0, 0, 0.2)$ 處，使用高速數據擷取系統記錄噴流隨時間變化的速度特性。圖 8 顯示噴流出口平均速度 $u_j = 2.3$ m/s，在未受聲波激擾時，噴嘴出口處之瞬時速度(u)隨時間的變化。橫座標與縱座標分別為衍化時間 t 與噴流出口速度 u 。瞬時噴流速度 u 隨著時間幾乎維持在 2.3 m/s (亦即噴流出口平均速度 u_j)，沒有明顯的變動。

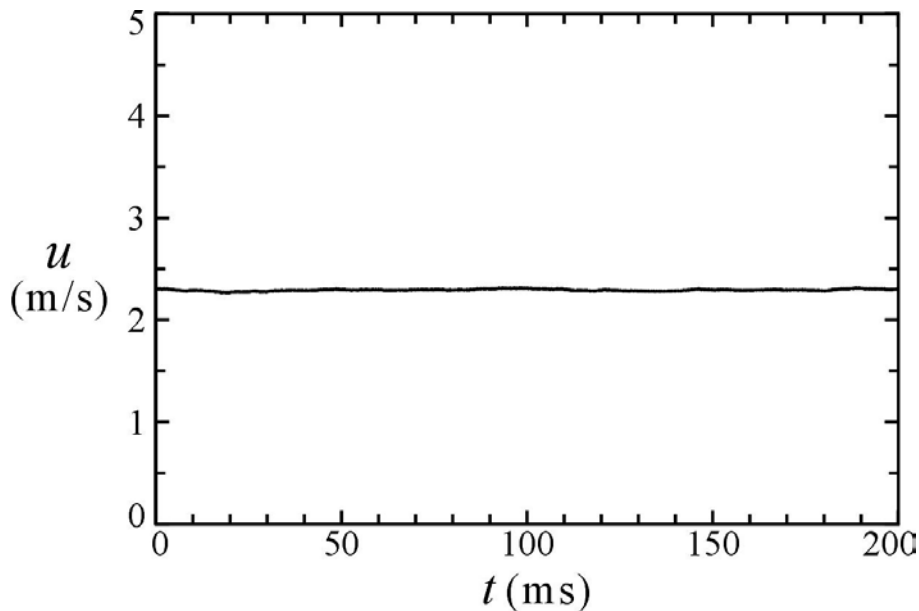


圖 8 噴流在噴嘴出口的速度時序訊號，噴流出口平均速度 $u_j = 2.3$ m/s。

圖 9 是噴流受到聲波激擾，在激擾頻率 $f_{exc} = 35$ Hz 及激擾電壓 $E_{exc} = 10$ V 時，噴嘴出口的瞬時速度 u 隨時間的變化。橫座標為無因次衍化時間 t^* ($t^* = t/T$, t 為衍化時間, T 為聲波激擾的週期)，一個單位的 t^* 代表一個聲波激擾的週期。縱座標為噴流出口速度 u 的無因次量 u/u_j (u_j 為噴流出口的平均速度)。由於使用一維的熱線風速儀探針量測噴流的出口速度，僅能夠偵測速度的大小，無法判別速度的方向；然而，實際上在噴流速度振盪時，在某段衍化時間速度是反向的，因此，造成速度下降至零速度(0 m/s)時，速度隨即

增加，在增加一段時間之後又往下降至零速度。在相鄰兩個零速度點的時間間隔中，將速度方向反向，即可變為真實的負方向速度(如圖 9 的虛線所示)。在描繪出真實的負方向速度之後，發現速度呈現類似正弦波的振盪速度訊號。噴流出口速度存在著負值，表示噴流在受到聲波激擾時，在此一負速度的期間內會有「回吸」的現象。當「回吸」現象產生時，被吸回噴嘴內的流體混雜著噴流流體以及周遭環境的空氣，他們藉著「回吸」的機制而在噴嘴內部產生「預混」的效應，再被「吐」出噴嘴，因此「回吸」現象對噴流的混合是有助益的。

選擇在速度最小值的時間點作為初始衍化時間($t = 0 \text{ sec}$)，速度的最大振盪幅度約為 7.5 m/s (大約由 -0.5 m/s 至 7.0 m/s)，速度振盪的週期與聲波激擾的週期相同。為了探討速度振盪特性，以速度振盪時序訊號的均方根值為速度振盪擾動量(u')，定義速度振盪強度為噴流速度擾動量 u' 除以噴流出口的平均速度 u_j ，以速度振盪強度作為速度振盪特性的參數。

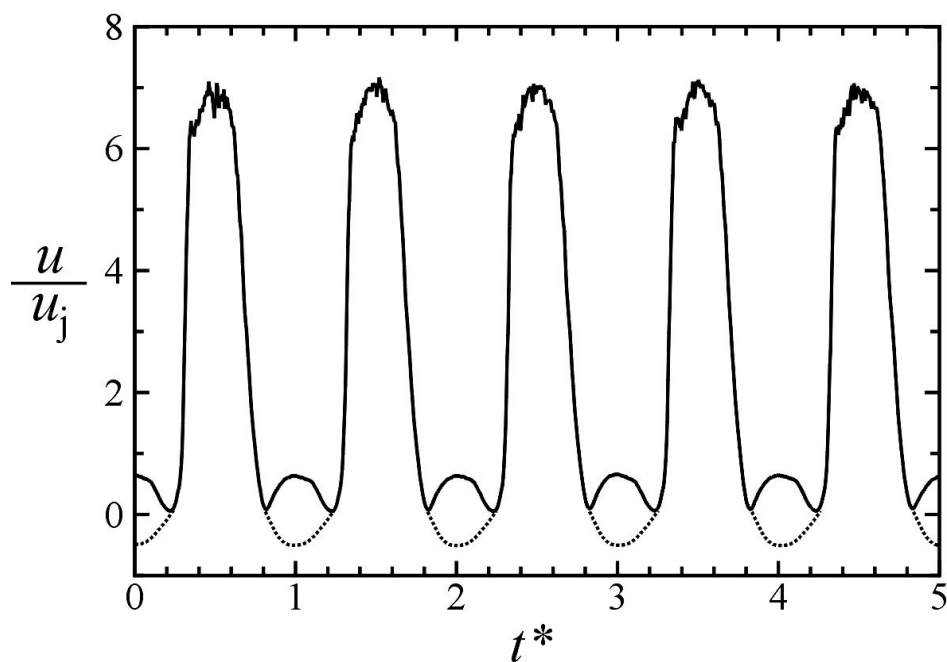


圖 9 噴流在噴嘴出口處的速度時序訊號，噴流速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ ，聲波激擾頻率 $f_{\text{exc}} = 35 \text{ Hz}$ ，聲波激擾電壓 $E_{\text{exc}} = 10 \text{ V}$ 。

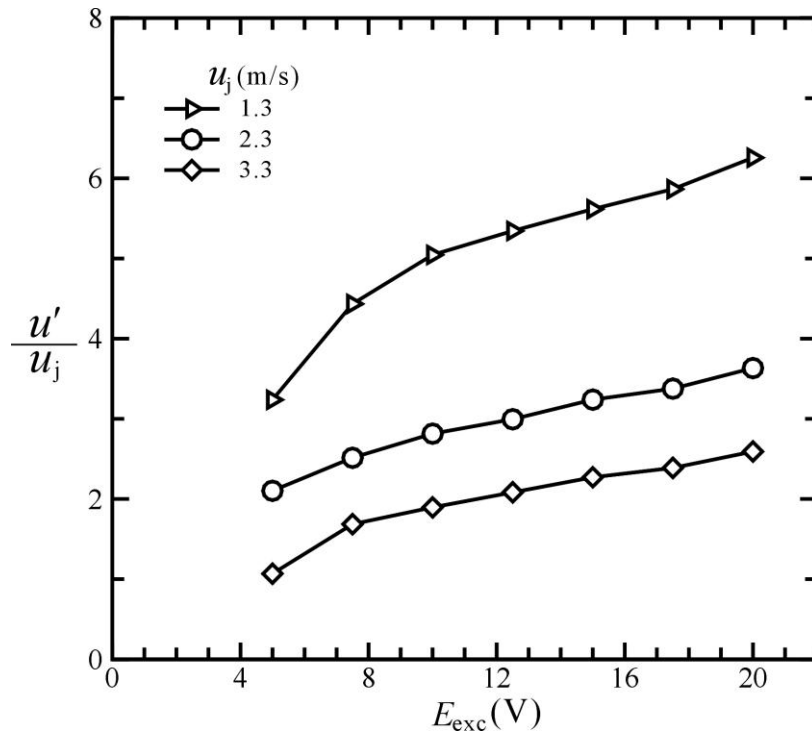


圖 10 不同的噴流速度時，速度振盪強度隨著聲波激擾電壓增加的變化情形。

圖 10 是在不同的噴流出口平均速度 $u_j = 1.3, 2.3, 3.3$ m/s 時，速度振盪強度 u'/u_j 隨著聲波激擾電壓 E_{exc} 增加的變化情形。在任一固定噴流速度，速度振盪強度隨著聲波激擾電壓增加而變大。在任一固定的聲波激擾電壓 E_{exc} ，低噴流速度明顯造成較大的速度振盪強度。在低噴流出口平均速度時有較大的速度振盪強度增加率。例如：在噴流出口平均速度 $u_j = 1.3$ m/s 時，當聲波激擾電壓 E_{exc} 由 5V 增加至 20V，速度振盪強度 u'/u_j 提升了約 3.0 (大約從 3.2 增加至 6.2)。而在噴流速度 $u_j = 3.3$ m/s 時，速度振盪強度 u'/u_j 提升了約 1.5 (大約由 1.0 增加至 2.5)。

二、流場特徵

圖 11 是在噴流中心垂直剖面的瞬時流場照片，顯示典型的未受聲波激擾之噴流的流動行為。噴流出口平均速度 $u_j = 2.3$ m/s，曝光時間為 1/10,000 sec。煙霧隨著噴流在噴嘴出口處往上射出，在經過大約 18 倍的噴嘴出口直徑之距離後，噴流氣柱的直徑幾乎維持固定而沒有往側向擴展。此一結果顯示，噴流軸向動量很強，而橫向的擴散很小。

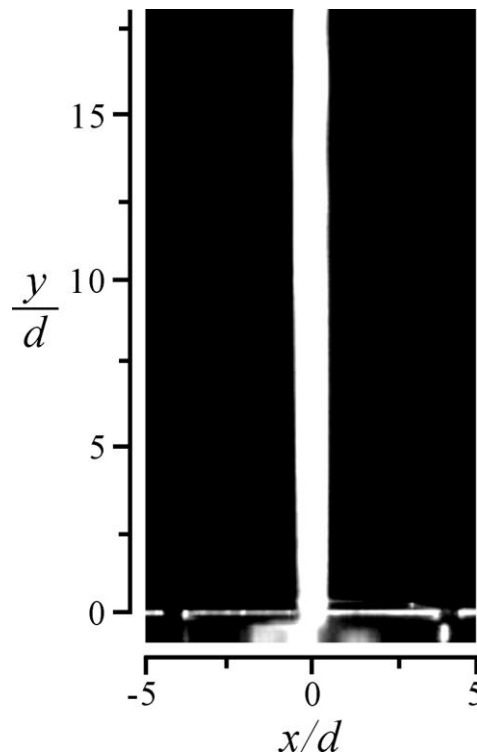


圖 11 噴流中心垂直剖面上典型的瞬時流場照片，曝光時間為 $1/10,000$ sec。噴流出口平均速度 $u_j = 2.3$ m/s。

圖 12 為噴流受聲波激擾後的典型流場型態，與圖 11(未受聲波激擾的噴流) 有很大的差異。噴流出口平均速度 $u_j = 2.3$ m/s，聲波激擾頻率 $f_{exc} = 35$ Hz，激擾電壓 $E_{exc} = 10$ V，是在噴流中心垂直剖面上的噴流影像。照片的取樣頻率為 1050 fps (frame/sec，每秒擷取的照片數目)，曝光時間為 $1/10,000$ sec。在 $t^* = 0$ 時，如圖 12(a)所示，因為噴流在噴嘴出口的速度很小(如圖 9 所示，約 0.8 m/s)，所以在噴嘴出口沒有看到明顯的煙霧。在 $t^* = 0.2$ 時，如圖 12(b)所示，噴流在噴嘴出口的速度迅速增加，噴流氣柱在噴嘴出口處形成一個香菇狀的渦旋結構。隨著時間衍化至 $t^* = 0.5$ 時，如圖 12(c)所示，速度增加到大約為振盪波的最大值(圖 9)，上一瞬間(圖 12(b))在噴嘴出口處形成的香菇狀渦旋結構往下游移動，並且呈現變形。在 $t^* = 0.7$ 時，如圖 12(d)所示，變形的香菇狀渦旋結構變形成類似泡芙狀的渦旋結構。當時間繼續衍化至 $t^* = 1.0$ 時，流場的行為回復至與圖 12(a)相同的特徵。聲波激擾的週期性使得此一程序重複的出現：香菇狀渦旋結構在噴嘴出口處形成→往下游流逸且變形→變形成泡芙狀的渦旋結構。在圖 12 的照片中可以觀察到，渦旋

結構往下游演化至大約 $y/d > 10$ 之後，即破碎而變淡，與圖 11 所顯示的未受激擾噴流之情形完全不同。受聲波激擾噴流的流體往側向擴展並與周遭空氣混合的能力顯然比未受激擾噴流強很多，而在激擾過程所形成的渦漩結構之捲入(當渦漩結構旋轉時，將周遭氣體捲入渦漩中)、變形、破碎等演變，應該是提升噴流與周遭空氣混合性能的主要物理機制。

另外，圖 12 中受聲波激擾噴流的流場明顯的比圖 11 中未受聲波激擾噴流的流場紊亂許多，顯示受聲波激擾噴流的流場含有強烈的「紊流」特性(turbulence)，表示流場中含有三維的細微紊動結構，這些三維的細微紊流結構對微觀的混合效有很大的助益[7]。

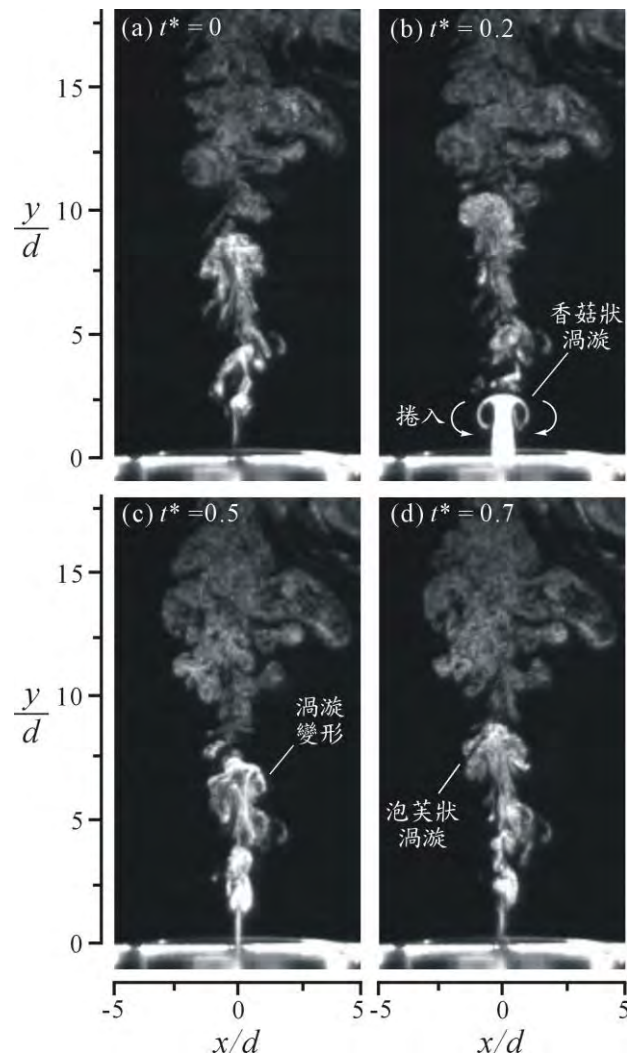


圖 12 噴流中心垂直剖面上典型的瞬時流場照片，曝光時間為 $1/10,000$ sec。噴流速度 $u_j = 2.3$ m/s，聲波激擾頻率 $f_{exc} = 35$ Hz，聲波激擾電壓 $E_{exc} = 10$ V。

藉由長時間曝光的照像技術，擷取噴流的平均流場，以觀察噴流從噴嘴出口射出後，往側向擴展的特性。圖 13(a)是未受聲波激擾噴流的長時間曝光照片，噴流出口平均速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ ，曝光時間為 2 sec。由於噴流從噴嘴出口射出後，往下游呈現固定的噴流氣柱直徑，因此長時間曝光照片與瞬時照片(圖 11)相同。圖 13(b)是噴流受到聲波激擾，在激擾頻率 $f_{\text{exc}} = 35 \text{ Hz}$ 及激擾電壓 $E_{\text{exc}} = 10 \text{ V}$ 時，噴流中心垂直剖面上典型的長時間曝光照片，曝光時間為 2 sec，噴流出口平均速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ 。如前所述，噴流受聲激擾的影響，噴流由噴嘴出口射出後，形成蕈狀的渦漩結構。蕈狀渦漩結構隨著時間衍化往下游移動後，逐漸變形成泡芙狀的渦漩結構，渦漩結構的形成、變形與捲入效應造成橫向擴散。因此，如圖 13(b)所示，長時間平均的噴流氣柱的寬度往下游逐漸變大，並且煙粒的密度逐漸變小(亦即在長時間曝光照片中，煙粒形成的白色影像逐漸變淡)。

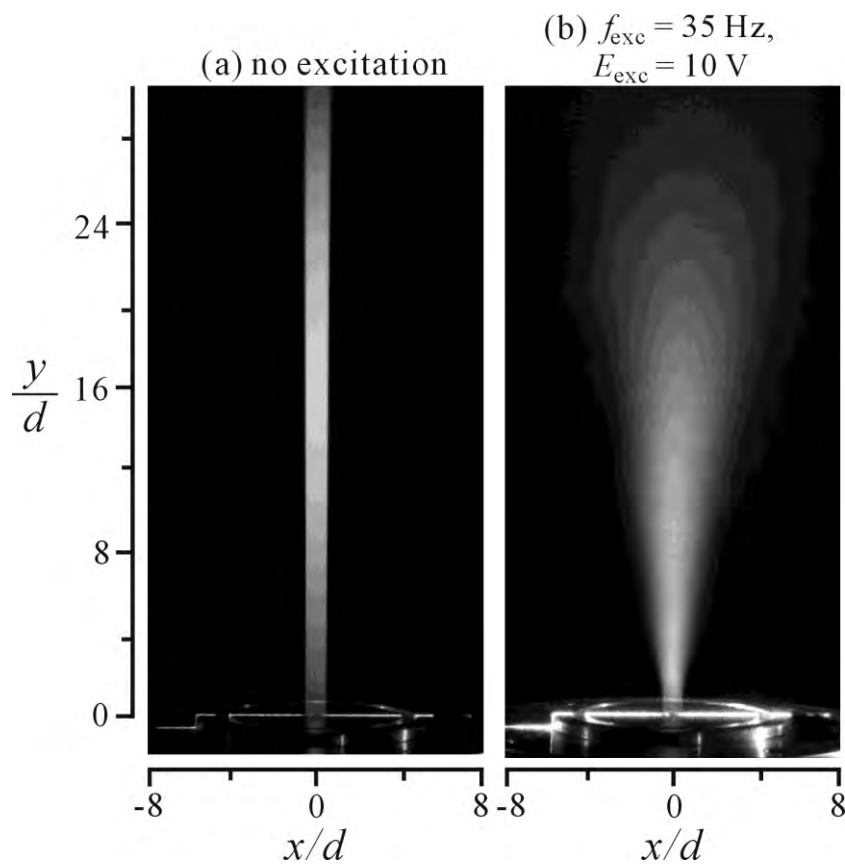


圖 13 在噴流中心垂直剖面上典型的長時間曝光照片，曝光時間為 2 sec。噴流速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ 。(a) 未受聲波激擾之噴流；(b) 受聲波激擾之噴流，聲波激擾頻率 $f_{\text{exc}} = 35 \text{ Hz}$ ，聲波激擾電壓 $E_{\text{exc}} = 10 \text{ V}$ 。

檢視瞬時與長時間曝光的照片，可以發現聲波激擾可以改善噴流的側向擴散特性。為了量化噴流受聲波激擾的擴散性能，使用影像處理技術，得到長時間曝光照片(圖 13)的噴流輪廓，並針對不同的軸向距離(y)量測噴流的擴散寬度(W)。圖 14 是噴流出口平均速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ ，未受聲波激擾與及受聲波激擾之噴流在不同的無因次軸向距離(y/d)時的無因次擴散寬度(W/d)。未受聲波激擾的噴流，當軸向距離由 $y/d = 3$ 增加至 $y/d = 12$ 時，噴流的寬度仍然維持在約 1 倍噴嘴出口直徑(d)；隨著軸向距離持續增加至 $y/d = 25$ ，噴流的寬度些微的增加至約 1.2 倍的噴嘴出口直徑(即 $W/d = 1.2$)。當噴流受到聲波激擾時，距離噴嘴出口 $y/d = 3$ 處，噴流的寬度為噴嘴出口直徑的 2.1 倍($W/d = 2.1$)。隨著軸向距離增加至 $y/d = 25$ ，噴流擴散至寬度約為噴嘴出口直徑的 12.5 倍($W/d = 12.5$)。很明顯的，當噴流受到聲波激擾時，其側向擴散在 25 個出口直徑的下游地方，已經達到未受聲波激擾噴流之 12.5 倍，聲波激擾的效果對噴流混合能力的增強非常的明顯。

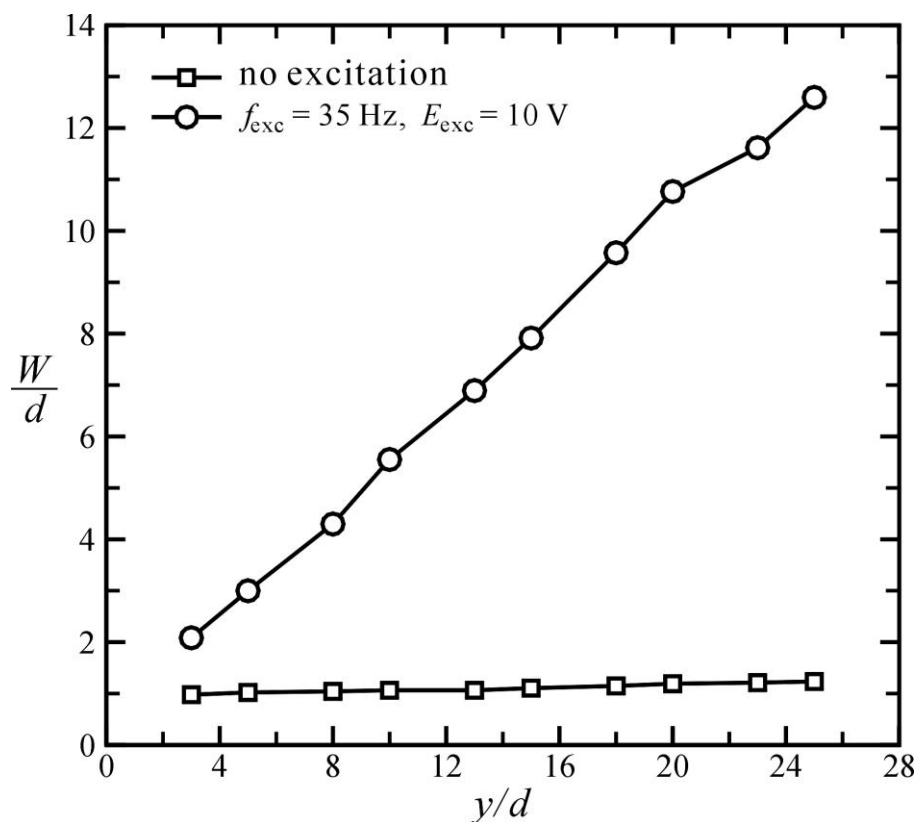


圖 14 噴流在不同軸向距離時的擴散寬度，噴流出口平均速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ 。

三、燃燒火焰特徵

如上所述，藉由觀察噴流的流場特徵行為與測量噴流的擴散寬度，發現噴流受到聲波激擾之後，能夠明顯地增強混合與擴散的性能。因此，使用噴流常見的應用例—燃燒，進一步探討改善噴流的混合與擴散性能對於燃燒火焰特性的影響。

本實驗利用丙烷作為噴流的流體，當丙焰在噴嘴出口射出後，使用點火器點燃噴嘴出口的燃料，在噴嘴出口處形成燃燒火焰。圖 15 是噴流出口平均速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ ，燃燒火焰的典型照片。

圖 15(a)是未受聲波激擾的燃燒火焰，此火焰是常見的噴流火焰。火焰本體幾乎全部是由橘黃色焰所形成，橘黃色火焰代表著燃燒不是很完全，以致炭粒太多(炭粒會發出橘黃色輝光)，火燄溫度也較低。在靠近噴嘴出口處，火焰直徑略大於噴嘴的出口直徑；在遠離噴嘴出口處 $y/d > 30$ 之後，火焰變寬並且開始形成不穩定的搖擺。圖 15(b)是受到聲波激擾的噴流燃燒火焰，火焰本體主要由藍色焰與橘色焰形成，在靠近噴嘴出口的火焰呈現藍色焰，形成的範圍由噴嘴出口至約 $y/d = 30$ 處，在藍色噴流火焰的下游為橘黃色焰。比較圖 15(a)與 15(b)的火焰外觀，聲波激擾使得噴流火焰在 $y/d < 30$ 的區域內明顯地形成大量的藍色焰，藍色焰的生成表示火焰的溫度的增高以及燃燒效率的增強。另外，圖 15(b)受到聲波激擾的噴流燃燒火焰的長度遠比圖 15(a)未受聲波激擾的燃燒火焰之長度短很多，顯示受聲波激擾的噴流燃料由噴嘴射出後，在較短的距離內即完成燃燒反應。

由於聲波激擾藉著以上所討論的「回吸」、「渦旋捲入、變形、破碎」與「紊流增強」等物理機制，大量增強了噴流射出噴嘴出口後的混合能力，加速燃料噴流的燃燒速率，使得燃燒快速的完成，因此受聲波激擾的噴流火焰長度明顯小於未受聲波激擾的噴流火焰長度，藍色火焰亦明顯的呈現，因此，聲波激擾能夠有效改善噴流火焰的燃燒性能。

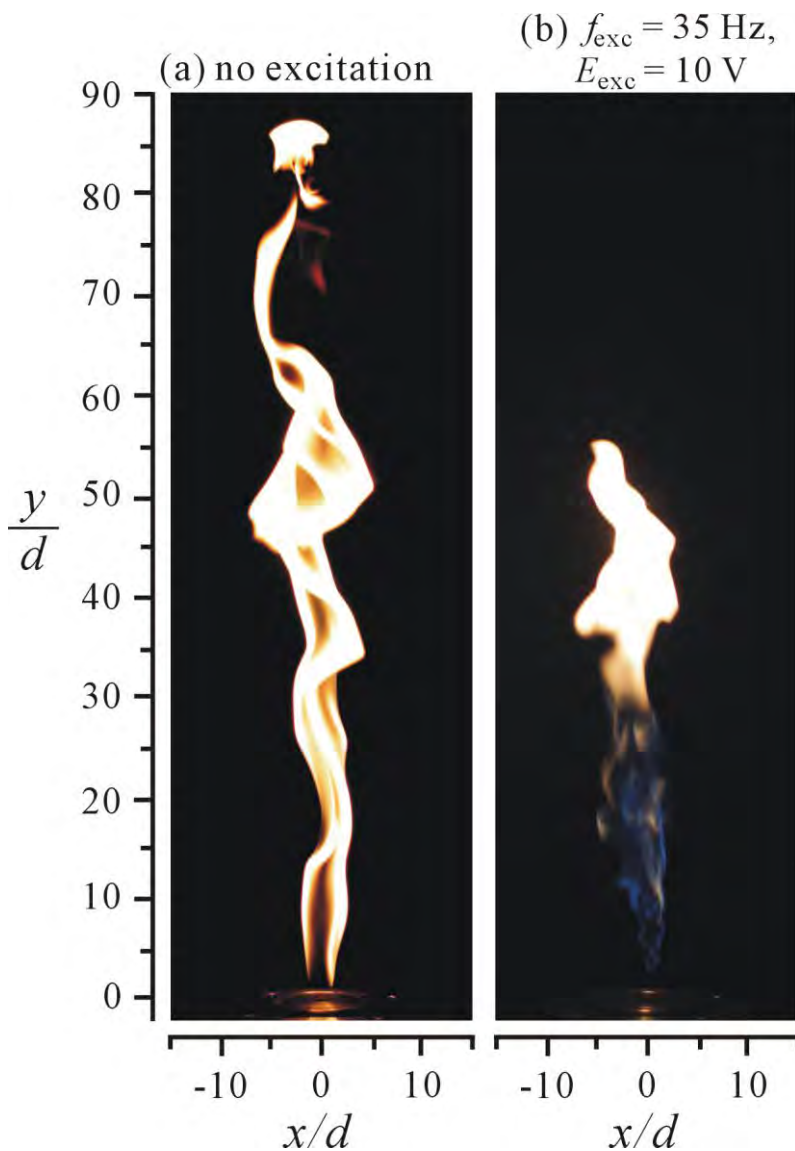


圖 15 噴流燃燒火焰的典型外觀照片，曝光時間為 1/200 sec。噴流出口平均速度 $u_j = 2.3$ m/s。(a) 未受聲波激擾之噴流火焰；(b) 受聲波激擾之噴流火焰，聲波激擾頻率 $f_{exc} = 35$ Hz，聲波激擾電壓 $E_{exc} = 10$ V。

使用長時間曝光的照像技術，拍攝噴流火焰的平均火焰影像。圖 16 是出口平均速度 $u_j = 2.3$ m/s 燃燒火焰的典型外觀照片。圖 16(a) 是未受聲波激擾的長時間平均燃燒火焰，火焰由噴嘴出口形成後，隨著軸向距離增加，火焰寬度逐漸變大。當軸向距離 $y/d > 30$ 時，因為噴流火焰開始產生不穩定的搖擺，因此時間平均的火焰寬度明顯地增大。圖 16(b) 是受聲波激擾的長時間平均燃燒火焰，相較於圖 16(a) 未受聲波激擾的噴流火焰，聲波激擾能夠明顯縮小噴流火焰的長度與寬度。

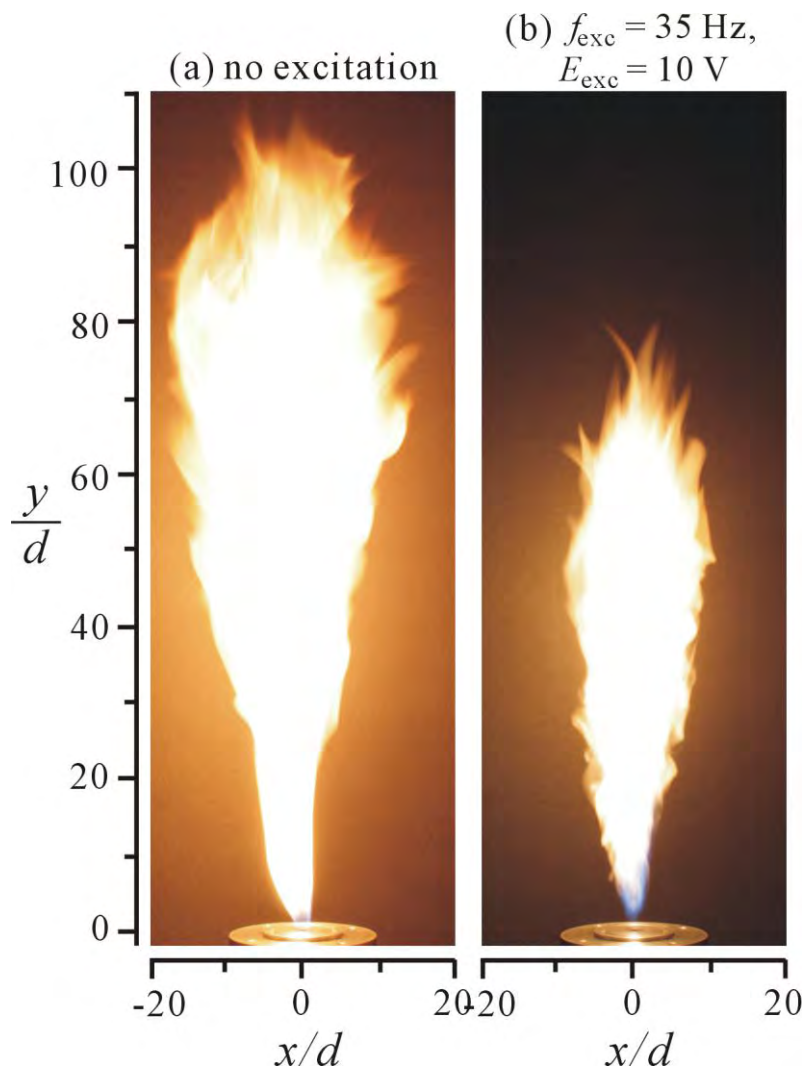


圖 16 未受聲波激擾與受聲波激擾之平均燃燒火焰的典型照片，曝光時間為 2 sec。噴流速度 $u_j = 2.3 \text{ m/s}$ 。(a) 未受聲波激擾之噴流；(b) 受聲波激擾之噴流，聲波激擾頻率 $f_{exc} = 35 \text{ Hz}$ ，聲波激擾電壓 $E_{exc} = 10 \text{ V}$ 。

透過觀察瞬時與長時間曝光的典型火焰照片，可知聲波激擾可以改善噴流火焰的燃燒特性。為了量化比較噴流火焰受聲波激擾之前與之後的燃燒性能變化，使用影像處理技術，取得長時間曝光的火焰照片(例如圖 16)的火焰輪廓，量測噴流火焰的長度(H_f)。圖 17 是未受聲波激擾以及受聲波激擾之噴流火焰，無因次火焰長度(H_f/d)隨著噴流出口平均速度(u_j)改變而變化的情形。未受聲波激擾以及受聲波激擾之噴流火焰的長度均隨著噴流速度的增加而變長，但是未受聲波激擾之噴流火焰的長度增長率比較大。在固定的噴流速度條件下，受聲波激擾的噴流火焰之長度比未受聲波激擾之噴流火焰短很多，大約短了超過 25%。

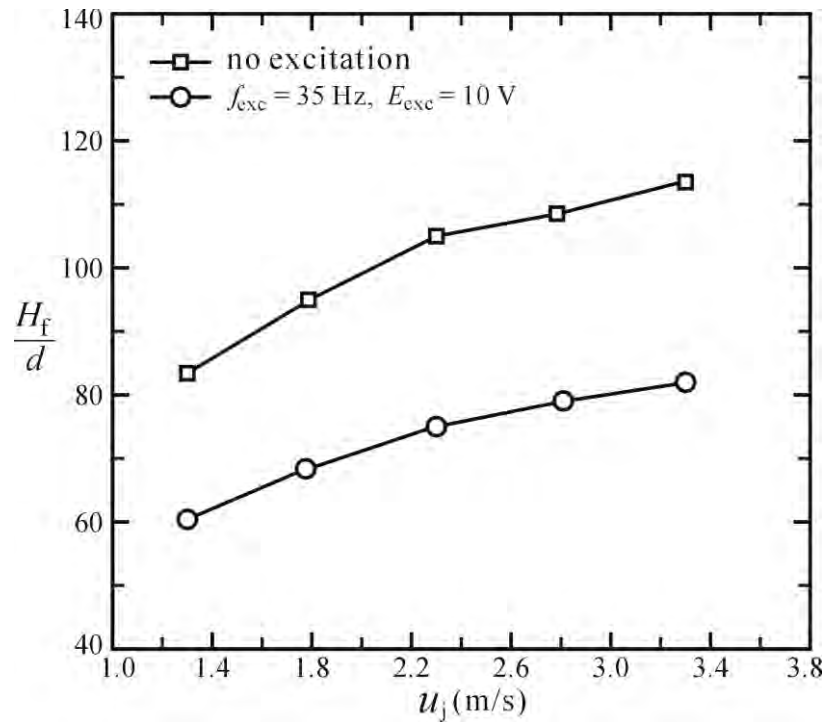


圖 17 未受聲波激擾與及受聲波激擾之噴流火焰，火焰長度隨著噴流速度增加的變化情形。

陸、討論

藉由分析噴流出口速度振盪特性的實驗結果，如圖 8 至圖 10 所示，聲波激擾使得噴流出口處，產生明顯的速度振盪，並且同時量測到負的速度訊號，表示噴流在受到聲波激擾時，在特定的瞬間，噴流出口發生「回吸」的現象，使得噴流出口週遭的流體被吸入噴嘴內部。速度振盪的強度隨著聲波激擾電壓的變大而增強，因此，可藉由聲波激擾電壓控制噴流出口速度振盪的強度(如圖 10 所示)。

典型的噴流流場特徵，如圖 11 所示，噴流在噴嘴出口處往上射出，噴流氣柱的直徑幾乎維持固定，沒有往側向擴展。此一結果顯示，噴流軸向動量很強，而橫向的擴散很小。當聲波對噴流形成大幅度的振盪激擾時，流場結構如圖 12 所示，噴流在噴嘴出口射出後，形成香菇狀的渦旋結構，結構變形並且演變成泡芙狀的渦旋結構，這些結構再往下游演化後，渦旋結構破碎而使得噴流的流體與週遭空氣快速混合。同時，噴流出口在特定的瞬時，噴嘴出口的週遭空氣回吸至噴嘴內部，產生噴流「回吸」的現象。檢視瞬時與長時間曝光的照片，可以發現聲波激擾可以改善噴流的側向擴散特性。當噴流受到聲波激擾時，其側向擴散在 25 個出口直徑的下游地方，已經達到未受聲波激擾噴流之 12.5 倍。聲波激擾的效果對噴流混合能力的增強非常的明顯。

傳統的噴流燃燒火焰，如圖 15(a)所示，火焰本體幾乎全部是由橘黃色焰所形成，橘黃色火焰代表著燃燒不是很完全，火燄溫度也較低。在靠近噴嘴出口處，火焰直徑略大於噴嘴的出口直徑；在遠離噴嘴出口處 $y/d > 30$ 之後，火焰變寬並且開始形成不穩定的搖擺。針對受到聲波激擾的燃料噴流火焰，如圖 15(b)所示，透過流場觀察發現聲波激擾改善噴流混合與擴散的特性，加速燃料燃燒的速度，增加火焰燃燒時的燃燒效率。因此，燃燒火焰的根部形成藍色焰，並且火焰長度比未受聲波激擾的火焰縮短了約 25%。

藉由以上的討論，使用聲波激擾的方法，提升了噴流射出噴嘴出口後的混合特性。在實際的燃燒應用上，明顯地提升噴流火焰的燃燒性能。

柒、結論

綜合以上的實驗結果與討論，歸納出以下的結論：

- (1) 使用聲波激擾的方法，可以造成噴流在噴嘴出口處形成週期性的大幅度速度振盪。此一速度振盪，夾有負向速度的時段，因此引致「回吸」的現象。「回吸」現象使得噴流流體與週遭空氣一起被倒吸入噴嘴內「預混」後再吐出，有助於混合的增強。
- (2) 週期性的大幅度出口速度振盪亦使得流場重複出現香菇狀渦漩結構、變形、演化成泡芙狀的渦漩結構。這些渦漩結構在往下游演化的過程，大量捲入週遭空氣，並產生很大的紊流，因此於大約 10 個噴嘴直徑遠即破碎而使得噴流的流體與週遭空氣快速的混合，其側向寬度變得很大，遠比未受激擾噴流之側向寬度大很多，聲波激擾的效果對噴流混合能力的增強非常的明顯。因此，週期性的大幅度速度振盪造成「回吸預混」、「渦漩形成、演化、捲入、破碎」與「紊流增強」效應，這些效應應該是提升噴流與週遭空氣混合能力的主要物理機制。
- (2) 當燃料噴流火焰受到聲波激擾時，由於流場中混合與紊流強度的增強，加速了燃燒速度，使得燃燒效率增強。火焰的下半部形成藍色焰(未受聲波激擾的火焰是不完全燃燒所形成的炭粒，呈現橘黃色)，並且火焰長度比未受聲波激擾的火焰縮短了約 25%。這些火焰特徵顯示，使用聲波激擾噴流的方法，在實際的燃燒應用上可以達到提升燃燒性能的目的。

捌、參考資料

- [1] Crow, S. C. and Champagne, F. H. (1971). Orderly structure in jet turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 48(3) 547-591.
- [2] Smith, B. and Glezer, A. (1998). The formation and evolution of synthetic jets. *Physics of Fluids*, 10 (9), 2281-2297.
- [3] Gogineni, S., Goss, L., and Roquemore, M. (1998). Manipulation of a jet in a cross flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16, 209-219.
- [4] Cater, J. E. and Soria, J. (2002). The evolution of round zero-net-mass-flux jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 472, 167-220.
- [5] Huang, R. F. and Hsu, C. M. (2012). Flow and mixing characteristics of an elevated pulsating transverse jet. *Physics of Fluids*, 24 (1), 015104.
- [6] Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H. (1988). *Fundamentals of Air Pollution Engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- [7] Tennekes, H. and Lumley, J. L. (1983). *A First Course in Turbulence*. Cambridge, MIT Press.

【評語】 040101

作品用心在測量技術，清晰且明確呈現所觀察到的物理現象。

若能加強實驗數據，強化改變物理量及相互物理模型之探討，則作品更完善。