

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 兩相互作用噴流之質傳效應的實驗研究及理論分析 Experimental and Theoretical Studies on Mass Transport of Interacting Slot Jets

計畫編號: NSC 89-2212-E-168-003

執行期限: 88年8月1日至89年7月31日

主持人: 侯順雄 崑山科技大學機械系副教授

共同主持人: 林大惠 國立成功大學機械系教授

### 中文摘要

本計畫旨在探討質傳效應對兩相互作用噴流的影響。實驗部分係利用可改變間距的兩直立矩形噴嘴，分析不同出口流速下單管噴流與併管噴流在濃度分佈上之差異、初始氣體混合比例和出口流速對單管噴流與併管噴流濃度場所產生的效應、以及雙管噴流間距對雙管噴流流場在質傳上所造成的影響。在理論分析部分係利用有限體積的數值方法，配合冪次法則 (Power law) 和SIMPLER的計算原理來分析兩相互作用噴流的質傳效應。實驗探討與理論分析之研究成果將作相互比較。本研究的完成有助於吾人對兩層流噴流擴散（或預混）火焰相互作用中，在質量、動量與能量傳輸效應上有更深入的認知與瞭解。

**關鍵詞:** 質量傳輸、兩相互作用噴流

### Abstract

The influence of mass transport on two slot interacting jets is aimed to be experimentally and theoretically studied in this proposal. Experimental system is composed of two ventilated rectangular jets in which compositions and injection velocities can be separately controlled. The separation distance between dual jets is adjustable and is recognized as an important parameter in this study. The concentration distributions of two slot interacting

jets are measured by using gas chromatography incorporated with off-line microprobe sampling and injection methods. Additionally, the finite-volume numerical method incorporated with the SIMPLER algorithm and the power-law scheme is employed to study the numerical solution including flow structure and concentration distributions of the two slot interacting jets. The numerical data therefore can be compared with the experimental results. This proposal provides a great help to further understand the influence on mass transport and interaction of multiple jet flows and flames.

**Keywords:** Mass Transport, Interacting Dual Jets

### 一、緣由與目的

多管噴流及噴流的匯流(merge)現象廣泛應用於許多工業領域與應用流體力學的研究，如噴射火箭中噴射噴嘴間的安排對於增加推力的發展、鍋爐燃燒腔中燃燒器噴嘴間距對燃燒效率的改善、垂直起降(VTOL)/短距離起降(STOL)飛行器的起降機構中噴嘴排列結構對衝壓增幅噴射的影響、與家用瓦斯爐的噴嘴排列能否達到燃燒最佳化等等。

一般工業用燃燒爐為了提供充分的熱源和相當大的加熱面積，常使用多管噴流擴散火焰；當改變兩噴流火焰之間距時，兩噴流間之空氣量因而改變，進而導致在

噴流出口處所帶入的空氣量改變，最後形成不同燃燒結構的部份預混火焰。因此兩噴流擴散火焰之間的相互作用，除了兩擴散火焰間及外界空氣和噴流間的相互作用會發生外，部份預混火焰間的相互作用也是值得深入研究的課題[1]。

為了產生廣大加熱面積和均勻加熱面，我們通常將燃燒器以陣列的形式排列，如家用瓦斯爐和熱水器。此時火焰面間必定因陣列的間距不同而產生不同程度的交互作用，而其間的二次空氣，也勢必對燃燒型態有舉足輕重的影響[2]。

從兩噴流擴散火焰[1]及兩噴流預混火焰[2]之相互作用的研究中，吾人深知兩噴流間的動量和質量傳輸效應及相互作用下兩火焰間的質量和能量傳輸現象，是影響整體燃燒特性的主要因素。因此在進行燃燒流場研究的同時，吾人有必要進一步剖析質傳效應對兩相互作用噴流的影響，藉此增進對兩相互作用噴流火焰以及相互作用多管噴流火焰燃燒流場的認知與瞭解。

截至目前為止，單管或多管噴流間交互作用的研究[3-8]，大多著重於兩紊流噴流間中心軸的縱向與橫向速度分佈、紊流強度、溫度分佈、動量傳遞、能量傳遞與噴流成長率等，至於層流噴流濃度場的變化、質量傳輸與動量傳輸交互作用的分析，則鮮有學者進行此一方向的研究，因此非常值得吾人進一步深入的研究和探討。本計畫之目的在於探討質傳效應對兩相互作用噴流的影響。

## 二、研究方法

本計畫利用兩開放式直立矩形噴嘴，產生兩相互作用的層流噴流，藉著改變噴流出口速度、初始濃度組成及兩噴嘴間距，探討相互作用下噴流場內的質傳效應。實驗設備包括噴流系統、局部氣體樣品取樣系統與氣體層析儀。實驗所使用的噴流系統係開放式直立矩形噴嘴為截面4cm × 1cm的長方形噴管(如圖1所示)。吾人在兩噴嘴

相臨接觸面，刻意將其削薄並利用出口外裝細目金屬網，藉以除去兩噴嘴接觸面下游處的迴流效應，亦即實驗中的併管噴流相當為具兩倍寬的單管噴流。噴嘴是以懸臂的方式固定在滑座上面，利用滑座來控制噴嘴間之間距(L)。

實驗使用的氣體為高壓鋼瓶裝高純度氧氣與氮氣(氧氣和氮氣之純度皆為99%)。所有氣體皆由已校正過的氣體流量計來控制其適當流量，再經由混合管路流入噴管。氣體層析儀採用SHIMADZU公司出產之GC-14B型。吾人利用氣體層析儀配合微細石英探針量測兩相互作用噴流流場的濃度分佈。

理論分析將利用有限體積的數值方法(finite volume numerical method)，配合冪次法則(power-law scheme)，以及SIMPLER原理來探討單管矩形噴嘴噴流場和雙管矩形噴嘴噴流場的流場結構和濃度分佈，尤重於兩相互作用噴流之間的交互作用和捲入(entrainment)的效應。

噴流場所對應的無因次統御方程式可用下列通式表示：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S_{\phi} \quad (1)$$

上式左邊第一和第二項為對流項，第三和第四項為擴散項，而右邊 $S_{\phi}$ 為源項。其中 $\phi$ 為物理變數， $\Gamma_{\phi}$ 為有效交換係數。在連續方程式、橫向及軸向動量方程式、和化學成分方程式所對應的意義分別說明於表1。此外混合氣的黏度預測是採用Buddenerg和Wilke[9]所提出的半經驗公式，而氮氧雙氣體系統(binary system)的擴散係數D則採用Slattery和Bird[10]所建立的預測公式。

## 三、結果與討論

### 單管噴流與併管噴流濃度場分析

圖2和圖3分別為單管與併管層流噴流於初始氮氧濃度為50%與50%時的氧氣濃度縱向分佈比較圖。當噴嘴出口流速越大，噴流氧氣濃度衰減至大氣氧氣濃度所需要的軸向距離就越大。這是因為較大的軸向動量可以延緩質量擴散現象的發生。不過，噴嘴出口流速對於氧氣濃度衰減曲線的斜率影響不大。這是因為影響噴流氧氣濃度的衰減曲線斜率，主要機制在於擴散效應而非動量傳遞，亦即控制在噴嘴出口與大氣間的濃度梯度。

此外，出口流速的增加會提高動量傳輸的能力，對於噴流而言，明顯出現於噴流邊界吸入作用的加強。此一向內吸入作用造成噴流邊界的混合效應，進一步減緩噴流中心軸與外界環境間之濃度梯度，而使得橫向質傳能力減弱。基本上動量傳輸的吸入和混合效應會抑制由噴流中心橫向往外的質量傳輸現象，換句話說噴流外圍的動量傳輸間接地保護噴流中心軸上的濃度分佈較遲緩地沿縱向遞減。此一特性會因為出口流速之增加而加強，或噴流寬度變小而加強，亦即單管噴流受此特性影響較為強烈。因此圖2顯示低出口流速時，單管和併管噴流中心軸濃度縱向分佈不受動量傳輸之影響；而圖3則顯示高出口流速時，單管噴流中心軸濃度縱向分佈，開始承受噴流外圍吸入和混合效應之保護，而使得濃度衰減起始點皆較為延後發生。

噴流外圍動量傳輸所產生的吸入及混合效應會抑制橫向質傳能力，使得中心軸上縱向濃度衰減起始點往下游移動，單管噴流橫向截面為併管噴流的一半，所以其影響程度較為顯著。具兩倍橫向截面的併管噴流，其中心軸上縱向濃度分佈較不易受到噴流外圍動量傳輸的影響，因此濃度衰減完全取決於噴嘴出口與大氣間的起始濃度梯度，其衰減程度顯然比受抑制的噴流外圍來得嚴重，最後形成鞍狀濃度分佈，如圖4所示。吾人相信噴管橫向截面的大小是形成鞍狀濃度分佈的重要參數，目前實驗已顯示其特性，值得未來進一步

深入研究。

初始條件對濃度場之影響可由圖5和圖6的結果來說明。當初始氮氧混合比例與外界空氣中之氮氧比例相差越大時，噴流曲線的衰減斜率越大(如圖5所示)；相反地，當初始氮氧混合比例與外界空氣中之氮氧比例相差越小時，噴流曲線的衰減斜率越小(如圖6所示)。

### 不同雙管噴流間距下的濃度場分析

圖7和圖8為雙管層流噴流流速 $V=0.06\text{m/s}$ 與 $0.18\text{m/s}$ ，在不同噴嘴間距下，初始氮氧濃度為50%與50%時的氧濃度縱向分佈圖。在圖7中，當雙管噴流的間距越大，兩噴流間中心軸原點的氧氣濃度越低。這是因為噴嘴間距越大，噴流中的氧氣成份越不容易擴散至兩噴流間中心軸原點處，所以氧氣成份較低。而在圖8中，噴嘴間距的變化對於兩噴流間中心軸原點處的濃度影響，就沒有那麼明顯，這是因為噴嘴出口流速的提高，動量傳輸所引發的吸入作用與混合效應，使得兩噴流間中心軸原點處的濃度組成很快就接近噴嘴出口噴流的濃度組成。

圖9和圖10分別為雙管層流噴流於速度 $V=0.06\text{m/s}$ 和 $0.18\text{m/s}$ ，在縱向高度 $y=12\text{mm}$ ，在不同間距下，初始氮氧濃度為50%與50%時的氧濃度橫向分佈圖。在圖9中，當噴嘴的間距越大，噴流間中心軸的氧氣濃度越低，這與吾人在縱向分析中所得到的結果相符。在圖10中發現噴流間中心軸上的氧氣濃度首先隨著噴嘴間距的增大而降低；而當間距大於 $20\text{mm}$ 時，噴流間中心軸上的氧氣濃度卻反而慢慢回升。針對此一特殊狀況吾人的推論是，當噴嘴出口流速 $V=0.06\text{m/s}$ 時，兩噴流間的吸入及混合效應尚不致於影響噴流間中心軸的濃度分佈；可是當噴嘴出口流速 $V=0.18\text{m/s}$ 時，兩噴流間的吸入及混合效應就會對噴流間中心軸的濃度分佈造成影響。而且匯流點上游的吸入混合效應較匯

流點下游的吸入混合效應還強，所以會有上述的現象存在。此外在圖10中，氧氣的W形濃度分佈，跟圖9中氧氣的V形濃度分佈，有著蠻明顯的差異。吾人推測當噴嘴出口流速 $V=0.18\text{m/s}$ 時，在量測縱向高度 $y=12\text{mm}$ 處，可能有對稱迴流的存在，有待爾後作進一步的探討。

#### 四、結論

- (1) 當噴嘴出口流速越大，噴流氧氣濃度衰減至大氣氧氣濃度所需要的軸向距離就越大。
- (2) 噴流外圍的動量傳輸間接地保護噴流中心軸上的濃度分佈較遲緩地沿縱向遞減。此一特性會因為出口流速之增加而加強，或噴流寬度變小而加強，亦即單管噴流受此特性影響較為強烈。
- (3) 具兩倍橫向截面的併管噴流，其中心軸上縱向濃度分佈較不易受到噴流外圍動量傳輸的影響，因此濃度衰減完全取決於噴嘴出口與大氣間的起始濃度梯度，其衰減程度顯然比受抑制的噴流外圍來得嚴重，最後橫向濃度形成鞍狀分佈。
- (4) 當初始氮氧混合比例與外界空氣中之氮氧比例相差越大(小)時，噴流曲線的衰減斜率越大(小)。
- (5) 當噴嘴出口流速較低時，噴嘴間距越大，噴流中的氧氣成份越不容易擴散至兩噴流間中心軸原點處，所以兩噴流間中心軸原點的氧氣濃度越低。但當噴嘴出口流速較高時，此一特性就沒有那麼明顯。

#### 五、參考文獻

1. 許正忠、陳榮洪和林大惠，”層流預混噴流火焰的相互作用，”第五屆燃燒科技應用研討會，pp.307-312.
2. 田思齊、陳榮洪和林大惠，”層流擴散火焰的相互作用，”第七屆燃燒科技應用研討會，pp.331-336.

3. Sforza, P.M., Steiger, M.H., and Trentacoste, N., " Studies on Three-Dimensional Viscous Jets, " AIAA J., Vol.4, pp.800-806, 1966.
4. Trentacoste, N. and Sforza, P., " Further Experimental Results for Three-Dimensional Free Jets, " AIAA J., Vol.5, pp.885-891, 1967.
5. Elbanna, H. and Gahin, S., " Investigation of Two Plane Parallel Jets, " AIAA J., Vol.21, pp.986-991, 1983.
6. Miller, D.R. and Comings, E.W., " Force-Momentum Fields in A Dual-Jet Flow, " J. Fluid Mech., Vol.7, pp.237-256, 1959.
7. Tanaka, E., " The Interference of Two-Dimensional Parallel Jets, 1st Report, Experiments on Dual Jet, " Bulletin of the JSME, Vol.13, pp.272-280, 1970.
8. Marsters, G.F., " Interaction of Two Plane, Parallel Jets, " AIAA J., Vol.15, pp.1756-1761, 1977.
9. Buddenberg J.W., and Wilke, C.R., " Calculation of gas mixture viscosities, " Ind. Engng Chem., Vol.41, pp.1345-1347, 1949.
10. Slattery, J.C., and Bird, R.B., " Calculation of the diffusion coefficient of dilute gases and self-diffusion coefficient of dense gases, " A.I.Ch.E. JI 4, pp.137-142, 1958.

表 1 兩相互作用層流噴流之統御方程式

$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
1	0	0
u	$\frac{\mu}{\text{Re}}$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial v}{\partial x} \right)$
v	$\frac{\mu}{\text{Re}}$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial u}{\partial y} \right)$
$Y_j$	$\frac{\rho D}{\text{ReSc}}$	0

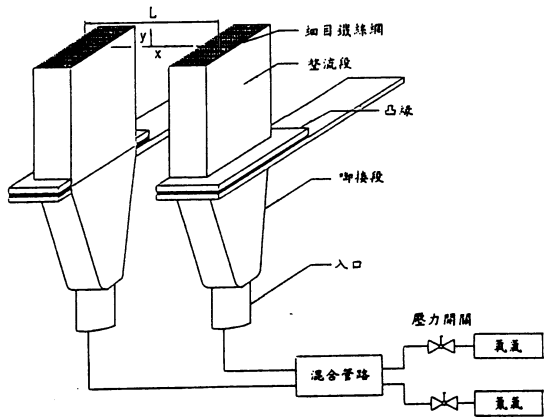


圖 1. 兩相互作用層流噴流之實驗設備圖

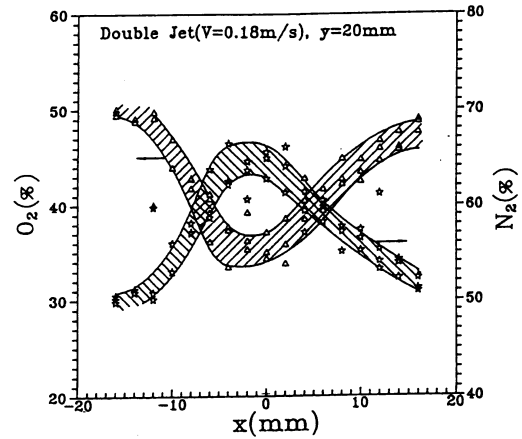


圖 4. 併管噴流於流速  $V=0.18\text{m/s}$ ，初始氮氧濃度為 50% 與 50% 時，在縱向高度 20mm 處的氮氧濃度橫向分佈圖

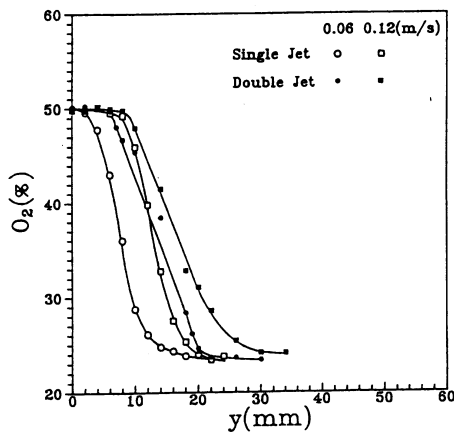


圖 2. 不同流速下初始氮氧濃度為 50% 與 50% 時，單管與併管層流噴流之氧氣濃度縱向分佈比較圖

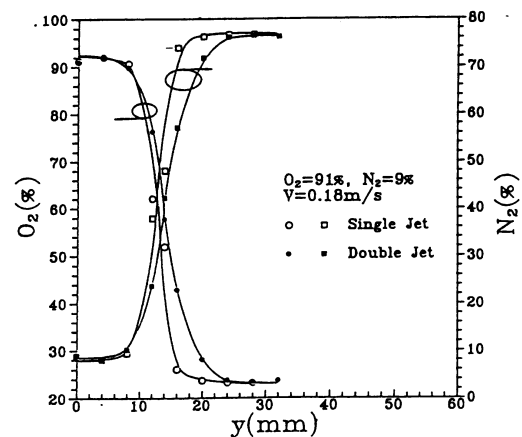


圖 5. 在流速為  $V=0.18\text{m/s}$ ，初始氮氧濃度為 9% 與 91% 時，單管和併管層流噴流的氮氧縱向濃度比較圖

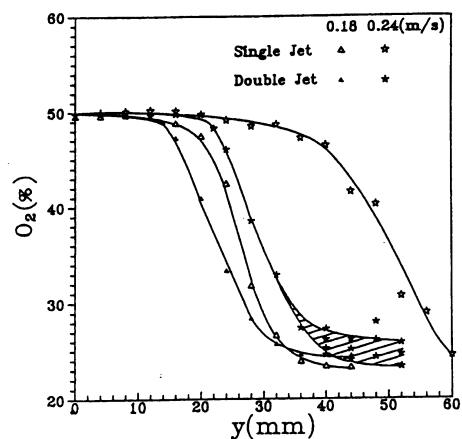


圖 3. 不同流速下初始氮氧濃度為 50% 與 50% 時，單管與併管噴流之氧氣濃度縱向分佈比較圖

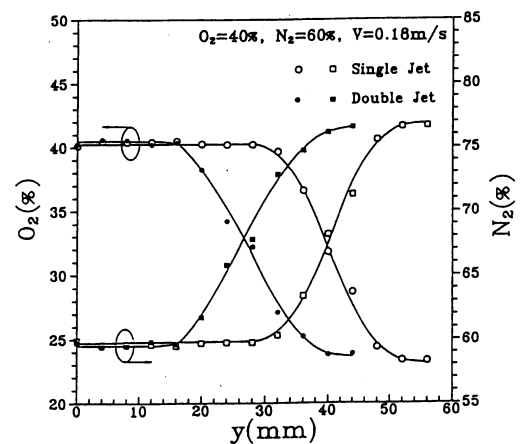


圖 6. 在流速為  $V=0.18\text{m/s}$ ，初始氮氧濃度為 60% 與 40% 時，單管和併管層流噴流的氮氧縱向濃度比較圖

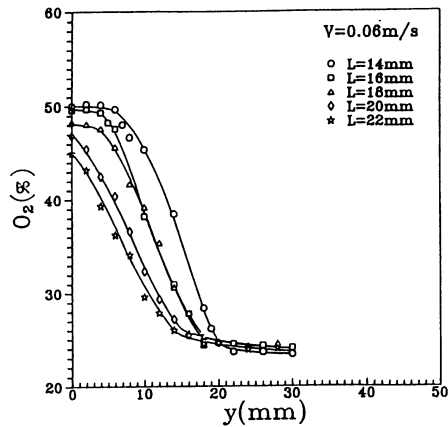


圖 7. 雙管層流噴流於流速為  $V=0.06\text{m/s}$ ，在不同間距下，初始氮氧濃度為 50% 與 50% 時的氧氣濃度縱向分佈圖

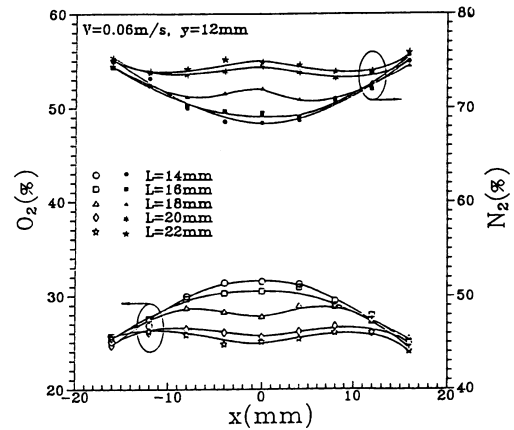


圖 9. 雙管層流噴流於速度  $V=0.06\text{m/s}$ ，縱向高度  $y=12\text{mm}$ ，在不同間距下，初始氮氧濃度為 50% 與 50% 時的氮氧濃度橫向分佈圖

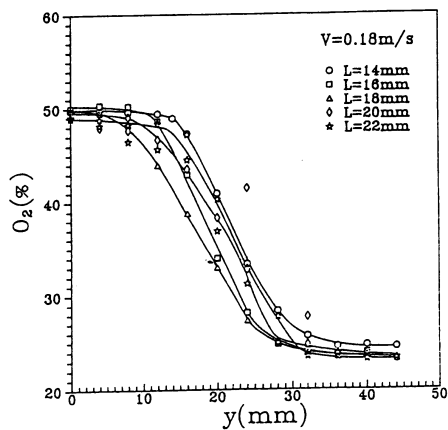


圖 8. 雙管層流噴流於流速為  $V=0.18\text{m/s}$ ，在不同間距下，初始氮氧濃度為 50% 與 50% 時的氧氣濃度縱向分佈圖

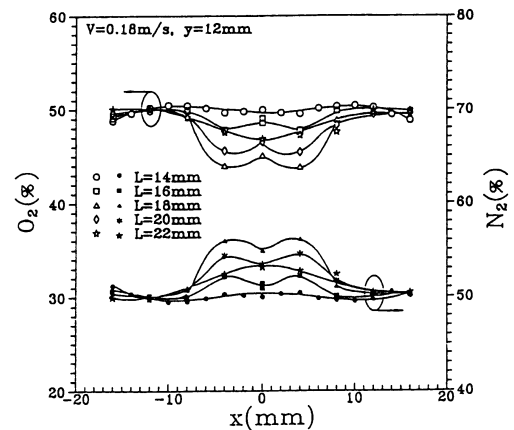


圖 10. 雙管層流噴流於流速為  $V=0.18\text{m/s}$ ，縱向高度  $y=12\text{mm}$ ，在不同間距下，初始氮氧濃度為 50% 與 50% 時的氮氧濃度橫向分佈圖