

## 渦漩流之渦漩崩潰現象實驗研究

### An experimental study on the vortex-breakdown phenomena of a swirling flow

計畫編號：NSC 89-2112-M-002-018

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

主持人：沈弘俊 台灣大學應用力學研究所

#### 一、中文摘要

本計畫以實驗方法探討環形渦漩噴流(annular swirling jet)在自由邊界下之迴流泡與渦漩崩潰之動態效應。在定性分析上，利用煙霧產生器產生煙霧，配合雷射切頁顯影技術，定性觀察流場型態，並透過攝影機記錄整個流場隨時間變化過程。在定量量測上，應用雷射都卜勒測速儀，進行速度隨時間與空間位置變化的量測，獲取流場速度結構和速度頻譜特性。由實驗結果，發現雷諾數範圍在 300 到 420 之間，流場出現螺旋形渦漩崩潰與泡狀渦漩崩潰，兩種渦漩崩潰形式會隨機變換，不具有週期性。渦漩崩潰流場速度分佈一直呈類似尾流形式。渦流核心直徑以漸近方式擴張，而渦漩崩潰的形成與徑向速度梯度有關。渦漩崩潰發生的位置，根據不同雷諾數範圍，分析出與渦漩數、雷諾數的相關性。渦漩崩潰頻率之史卓赫數(Strouhal number)呈現一個定值，與雷諾數和渦漩數無關。

**關鍵詞：**環形渦漩噴流、渦漩崩潰、流場結構、不穩定現象

#### Abstract

This project studied the dynamic phenomenon of vortex breakdown and its interactions with the recirculation bubble for an annular swirling jet flow. The flow instability phenomenon of the swirling flow was also investigated. Qualitative study uses smoke generator and laser light sheet for visual observation. Quantitative study uses thermal anemometry and LDV for further investigation of the dynamic behaviors of the vortex breakdown. The flow conditions for the spiral breakdown and bubble-type breakdown are

studied in detail. The velocity distributions around the breakdown are measured which was never investigated. The dynamic behaviors of the vortex core are studied. The mechanism concerning the formation of vortex breakdown and its relation with the azimuthal velocity are studied. The position of the vortex breakdown and its relationship with the swirl number and the Reynolds number are also investigated.

**Keywords:** Swirling flow, vortex breakdown, flow pattern, flow instability

#### 二、緣由與目的

在無限制邊界下，Chigier & Chervinsky (1967)積分渦漩噴流出口下游軸向通量之角動量和軸向動量發現在不同截面之間具有保守性。他們同時指出存在於高渦漩強度的封閉式環渦流(closed toroidal vortex)強度與長度會隨渦漩數增加而增加。關於渦漩噴流受到限制邊界的影響，Rhode et al. (1983)探討渦漩流受到限制邊界突張角度改變的流場變化。他們增加導流葉片的偏向角可以誘發(provoke)中心迴流區的形成，而改變邊界的突張角度只能輕微影響迴流區的長度。至於中心迴流區形成的機制為何？Escudier & Keller (1985)實驗具中心垂直圓柱體之環形入口突張管渦漩流場，流場觀察發現增加渦漩數到一個臨界值，中心擋體下游會產生一個孤立的迴流區。所謂的孤立迴流區就是渦漩崩潰(vortex breakdown)的位置，代表渦流流場(vortex flow)在軸向速度方面產生突然且激烈的變化。

對於渦漩崩潰的特徵，一般所觀察到的現象是在中心軸形成停滯點，使得渦流核心(vortex core)突然變寬，再緊接著一個迴

流區域。根據前人的觀察有兩種比較顯著的渦漩崩潰形式分為：(1) 泡狀(bubble)渦漩崩潰，一般視為軸對稱，和(2) 螺旋(spiral)形式渦漩崩潰，一般又稱為非軸對稱式。而這兩種形式的渦漩崩潰最早被發現在具攻角之三角翼流場上，前緣(leading edge)所捲出的渦漩流場。Lambourne & Bryer (1961)即對於此一現象提出定性的觀察來描述。接著一連串對於渦漩崩潰的研究，利用上游導流葉片使渦漩流進入圓管或漸擴管中，根據此一流場容易控制且變化條件的特性來探討渦漩崩潰的機制，例如 Harvey (1962)、Lambourne (1965)、Cassidy & Falvey (1970)、Sarpkaya (1971a, b, 1974, 1995)、Faler & Leibovich (1977, 1978)、Escudier & Zehnder (1982)和 Shtern et. al. (1997)等等。Escudier et al. (1980)和 Faler & Leibovich (1978)利用雷射都卜勒測速儀對渦漩崩潰流場詳細的進行量測使吾人更進一步了解渦漩崩潰流場架構。

近代在紊流範圍探討不同燃燒器內渦漩流速度特性有 Gouldin et al. (1985)、So et al. (1985)、Heitor & Moreira (1992)以及 Shi & Chehroudi (1994)。上述文獻明白指出渦漩應用在燃燒上，中心迴流區駐焰能力及紊流混合特性無庸置疑。綜合應用中心擋體和渦漩流之效應，發現對穩定火焰和增加燃氣混合率有類似的機制，Chen et al. (1990)實驗比較這兩種方法，研究發現中心燃料噴流之動量和環流量對燃燒流場有類似的貢獻。

### 三、結果與討論

#### 3.1 流場觀察(Flow Visualization)

一般而言，渦漩崩潰造成在中心軸的流體被減速形成一個自由停滯點(free stagnation point)，再緊接著一個孤立的停滯區或迴流區，而迴流區後方就如同一般固體物(solid object)後方之尾流場。尾流場內的渦流核心(vortex core)比迴流區上游還要寬，軸向速度分佈存在有缺陷(defect)。假如上游為層流，經過渦漩崩潰之後會過渡變成紊流。

在本實驗中，利用流場觀測可發現二種一般形式的渦漩崩潰。這二種形式的渦漩崩潰在 Sarpkaya (1972)、Faler & Leibovich (1977)和 Escudier & Zehnder (1982)等人的報告也有發現過。第一種是所謂的泡狀(bubble-like)渦漩崩潰約發生在雷諾數範圍 300 到 410 之間。第二種為螺旋形(spiral)渦漩崩潰，發生的雷諾數和渦漩數範圍很廣，只要發生渦漩崩潰，就可能出現螺旋形渦漩崩潰。螺旋形渦漩崩潰如同 Escudier & Keller (1985)所提到的，是界於迴流停滯區和外圍旋轉自由流區之間的不穩定(instability)結構捲出(roll-up)的一個螺旋形式(helix)。同一個流場狀況下發生的螺旋形渦漩崩潰。經過相當的時間之後，螺旋形渦漩崩潰有時會自發性的變成泡狀渦漩崩潰。

圖 1 為  $Re=660$  時隨不同渦漩數之顯影照片。同樣的渦漩崩潰的位置隨著渦漩數的增加而向上游移動，而渦流核心(vortex core)明顯可見。在渦漩崩潰點之前保持一直線，崩潰點(停滯點)之後，則呈現螺旋形(spiral)式。而崩潰下游的環形噴流場外圍不再維持穩定的渦漩流，取而代之是類似軸對稱且有條理(coherent)的渦流結構(vortex structure)。在停滯區後方有一孤立的迴流區(isolated recirculation zone)，此一迴流區捲入(entrainment)方向與軸對稱的渦流結構捲出(roll-up)方向恰好相反。由於捲動方向不同，流場動量傳遞因此增大。本文也觀察到一個特殊現象，發現渦漩崩潰點之近前，通常存在一個收縮喉部(throat, 流場截面積變小)，然後再伴隨著渦漩崩潰的發生，流場擴張並且變得紊亂，由流場煙霧的顯影可以充分證明。

#### 3.2 流場速度特性(Velocity Measurements)

為了瞭解不同流場模式的流場狀態與渦漩崩潰的關係，本研究針對穿透、渦漩崩潰和接觸流場模式，利用 LDA 進行不同軸向位置，軸向和徑向(切向)平均速度在徑向方向分佈的量測。圖 2 為穿透流場模式中典型的軸向和徑向速度分佈。從不同軸

向位置的速度分佈結果來看，迴流泡往下游漸縮，而且迴流泡內徑向速度漸漸被外圍旋轉的自由流加速，出了迴流泡末端之後，軸向速度分佈因中心擋體的阻擋使得在中心部的速度分佈份造成缺陷(defect)，呈現出尾流場的速度分佈特性，一直到  $x/D=2.63$  仍然維持這樣的的速度分佈。徑向速度分佈在出了迴流泡之後，中心渦流核心縮小，並在  $x/D$  大於 1.5 之後維持一定的直徑。渦流核心直徑是以剛體旋轉(rigid body rotation)徑向速度分佈的範圍來定義，也就是徑向速度隨徑向位置變化呈線性關係的分佈區域。 $x/D$  大於 1.5 之後的徑向速度分佈類似修正的柏格斯分佈，徑向速度分佈基本上是結合核心內部的強制渦流(forced vortex)和外部自由渦流(free vortex)所造成的結果。

圖 3 是渦漩崩潰流場模式的速度分佈圖。迴流泡中心正向流速度相當突出，而且徑向速度明顯比穿透模式要高。出了迴流泡之後，更多的流體捲入中心軸，使得軸向速度分佈中心缺陷部份被填滿，再往下游，中心部份速度分佈有突起的現象。由  $x/D=0.42$  和  $0.71$  的徑向速度分佈顯示在渦漩崩潰之前，渦流核心變得相當的細。接近渦漩崩潰的位置時，渦流核心直徑變大，同時中心軸之軸向速度分佈出現缺陷。渦漩崩潰發生在  $x/D=1.21$  的位置，渦流核心繼續擴張，其中心位置之軸向速度接近零，顯示此一軸向位置為渦漩崩潰發生的停滯點，同時渦流核心持續擴張。停滯點後方，軸向位置  $x/D=1.32$  和  $1.54$  的軸向和徑向速度分佈與停滯點的軸向位置類似，表示渦流核心不再擴張。從  $x/D=1.99$  軸向位置的徑向速度分佈來看渦流核心甚至有收縮的現象。在渦漩崩潰的流場模式中，渦漩崩潰發生的軸向位置附近，渦流核心有膨脹的跡象。但再往下游又呈現收縮的趨勢。

#### 四、結論

根據渦漩崩潰前後之渦流核心狀態，將

渦漩崩潰模式定義為弱渦漩崩潰，即下游擾動不會向上游傳遞，此時上游為穩定的超臨界流。上游至下游的速度分佈則一直呈類似尾流形式。接觸流場模式定義為強渦漩崩潰，下游因崩潰點產生的擾動會影響到上游的次臨界流，誘發變成一個紊亂、發散和不穩定的紊流狀態。渦流核心直徑以漸進方式擴張，而渦漩崩潰的形成與徑向速度梯度有關。渦漩崩潰的位置與渦漩數的平方倒數成正比，在層流和過渡雷諾數範圍( $Re \leq 2,200$ )之關係式為： $L_b/d = 2.4 Re^{-0.4} S^{-2}$ ，在紊流雷諾數範圍( $Re > 2,200$ )為： $L_b/d = 0.4 Re^{-0.2} S^{-2}$ 。這表示除了渦漩數以外，渦流核心之黏滯效應也同樣影響到渦漩崩潰的位置。

在渦漩崩潰模式範圍，螺旋形式渦漩崩潰在停滯區和自由流區之間的剪層會產生不穩定的擾動，由速度隨時間變化的量測，證明在層流雷諾數範圍之速度擾動存在一特徵頻率，相關的史卓赫數在雷諾數變化的範圍維持一個定值為 0.52。因此在渦漩崩潰模式下，渦漩崩潰頻率和流場的旋轉效應與黏滯效應無關。

#### 五、參考文獻

- Escudier, M. P. (1988) "Vortex breakdown: observations and explanations," Prog. Aerospace Sci. 25, pp. 189-229.
- Faler, J. H. & Leibovich, S. (1978) "An experimental map of the internal structure of a vortex breakdown," J. Fluid Mech. 86, pp. 313.
- Harvey, J. K. (1962) "Some observations of the vortex breakdown phenomenon," J. Fluid Mech. 14, pp. 585-592.
- Sarpkaya, T. (1971a) "On stationary and travelling vortex breakdowns," J. Fluid Mech. 45, pp. 545.
- Sarpkaya, T. (1971b) "Vortex breakdown in swirling conical flows," AIAA Journal 9, No. 9, pp. 1792-1799.
- Sheen, H. J., Chen, W. J. & Jeng, S. Y. (1996b) "Recirculation zones of unconfined and confined annular swirling jets," AIAA J. 34, No. 3, pp. 572-579.

## 六、附圖

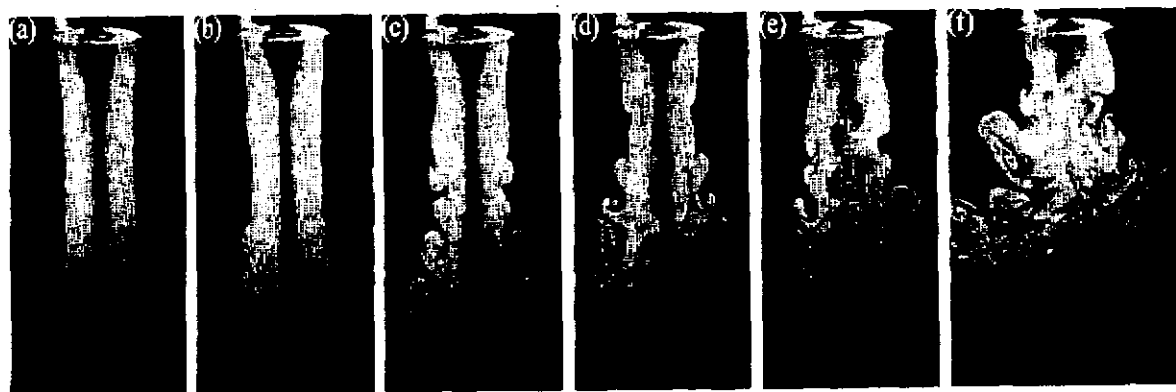


Fig. 1. Video images of the annular swirling flow for  $Re=660$ ,  
(a)  $S=0.097$ , pre-penetration; (b)  $S=0.15$ , penetration; (c)  $S=0.184$ , vortex-breakdown;  
(d)  $S=0.225$ , vortex breakdown; (e)  $S=0.276$  vortex breakdown; (f)  $S=0.448$  attachment.

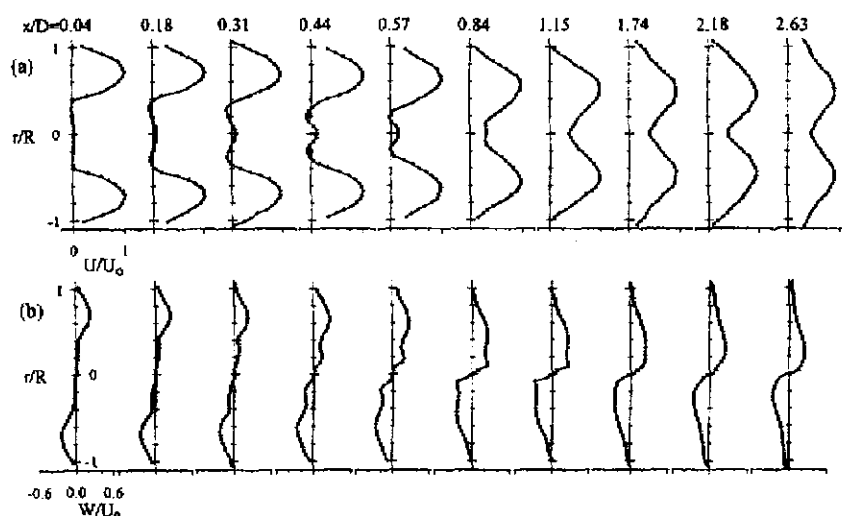


Fig. 2. Velocity profiles at various sections for free annular swirling flow in the penetration region ( $Re=1160$ ,  $S=0.12$ ). (a). axial velocity profiles; (b) azimuthal velocity profiles.

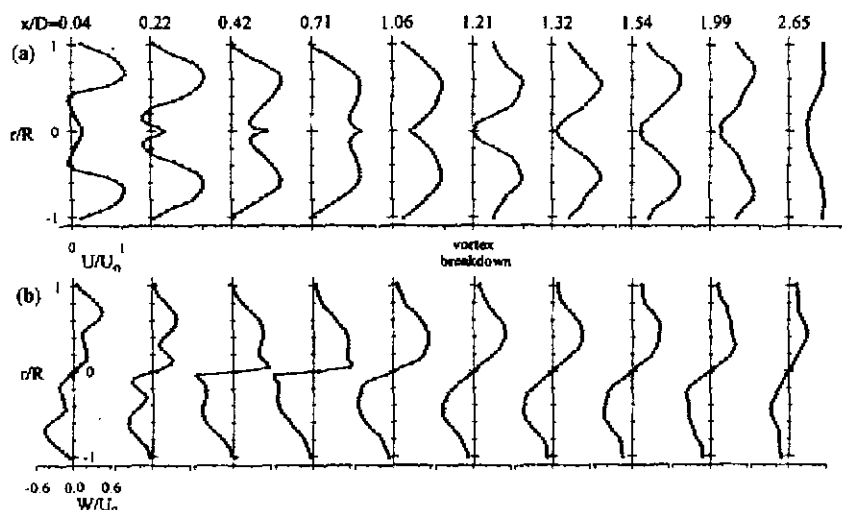


Fig. 3. Velocity profiles at various sections for free annular swirling flow in the penetration region ( $Re=1160$ ,  $S=0.23$ ). (a). axial velocity profiles; (b) azimuthal velocity profiles.