

球型彈體垂直入水過程之實驗觀察

Experimental Observations of the Vertical Water Entry of Spherical Projectiles

江志煌¹ 許掙強²

Chih Huang Chiang¹ Cheng Chiang Hsu²

^{1,2} 空軍航空技術學院飛機工程系助理教授

^{1,2} Assistant Professor, Department of Aircraft Engineering, Air Force Institute of Technology

摘要

本研究觀察球型彈體入水過程中的空泡演變，以影像記錄不同初始速度條件下的入水情況。測速裝置使用光遮斷器作為感測器，實驗證明此裝置可以滿足速度測量之需求。實驗採用兩種不同初始速度，可以看到不同的空泡演變模式。在較低速度時，從水面向下延伸的空泡會發生捏合，形成包覆彈體的獨立封閉空泡。雖然空泡較短，且不斷自尾端分裂出小氣泡，但可以維持較長時間。以高速發射彈體時，形成較長的空泡，頂端先發生閉合成為封閉的空泡。介面仍會因壓力作用內縮成葫蘆形，但在發生捏合之前，空泡即潰散為成群的微小氣泡。使彈體突然減速。

關鍵詞：彈體入水、球型彈體、空泡生成、超空泡

ABSTRACT

In this study, we observed the evolution of cavities in the water entry processes of spherical projectiles under different impact speeds. The speed-measuring device is composed of two transmissive optical sensor modules. Experiments have shown that this device can meet the speed measurement requirements. Two different initial speeds were used in the experiment and different modes of cavity could be seen. At lower speeds, the cavity extends downward from the water surface, and the pinch-off occurs in the middle of the cavity. The closed cavity encapsulating the projectile is shorter, but endures for more time. When the projectile is fired at higher speed, a long cavity is formed, and it seals the top end to become a closed cavity. Before the pinch-off occurs, the cavity suddenly collapses and becomes a crowd of tiny bubbles.

Keywords: Water Entry of Projectile, Spherical Projectile, Cavity Formation, Supercavitation

一、前言

彈體入水現象在工業、自然科學及國防技術上，均有重大的應用價值。有系統探討物體與自由水面碰撞的研究，最早可追溯至1948年[1]。除了在軍事上應用於攻擊水下目標[2-4]，船舶與波浪的週期性衝擊[5-7]、太空船降落海面[8]等工程問題，甚至在生物學中，雙脊冠蜥的蹣水奔跑能力[9]、游泳與跳水選手的入水動作，都與彈體入水的物理現象有關。

彈體與水面碰撞後，會在水下形成氣體空腔或空泡(cavity)。形成空泡的機制可分為兩大類：空氣引入 (air entrainment) 及空化作用 (cavitation)。前者是在彈體與水面碰撞後，將水面上的空氣帶入水中，形成空泡；後者通常發生在較高衝擊速度時，彈體周邊壓力低於水的蒸氣壓，產生空化作用，使水蒸發為氣體，形成充滿空氣-水蒸氣混合物的空泡。在入水過程中產生的空泡若可以包住整個彈體，使其不接觸到水，則稱為超空化(supercavitation)。

影響入水現象的因素很多。以彈體而言，影響因素包括幾何外型、表面浸潤性(wettability)、密度(ρ_s)等。以衝擊時的條件而言，衝擊速度(U_0)、衝擊角度、彈體角速度等，都是影響因素。水或液體本身的性質也很重要，包括密度(ρ)、黏滯性(μ)、表面張力(γ)等因素。與這些因素相關的無因次參數有數個[10]，包括：

毛細數(capillary number)

$$Ca \equiv \frac{\mu U_0}{\gamma} \quad (1)$$

龐德數(Bond number)

$$Bo \equiv \frac{\rho g D^2}{\gamma} \quad (2)$$

偉博數(Weber number)

$$We \equiv \frac{\rho U_0^2 D}{\gamma} \quad (3)$$

弗洛德數(Froude number)

$$Fr \equiv \frac{U_0}{\sqrt{gD}} \quad (4)$$

雷諾數(Reynolds number)

$$Re \equiv \frac{\rho U_0 D}{\mu} \quad (5)$$

質量比(mass ratio)

$$m^* \equiv \frac{\rho_s}{\rho} \quad (6)$$

無因次轉速

$$S \equiv \frac{\Omega(D/2)}{U_0} \quad (7)$$

毛細數 Ca 代表黏滯力與表面張力的比率。 Ca 必須大於臨界值，才會形成空泡。對於球型彈體，臨界毛細數大約為0.1 [11]。龐德數 Bo 代表重力與表面張力的比率。大部分彈體入水的研究，都只考慮很大的 Bo 值。偉博數 We 是慣性力與表面張力的比率，與空泡的穩定有關。弗洛德數 Fr 是慣性力與重力的比率，與空泡的整體變化有關，通常介於1~100之間。雷諾數 Re 是慣性力與黏滯力的比率，對於未形成空泡的彈體阻力關係較大，但在空泡形成的問題中，影響較小。彈體與液體的質量比 m^* ，會影響彈體在液體中的速度變化。質量比較大時，彈體受力主要為氣體與液體的阻力；質量比較小時，浮力也會有明顯的影響。大部分彈體入水研究只考慮較大的質量比。

在衝擊速度較低的情況下，空化作用不會發生，空泡主要由空氣引入產生。彈體在進入液體時，由外部引入空氣而形成空泡。初期空泡與液

面上的大氣相通，然後在某一位置的液氣介面會逐漸緊縮，最後閉合而斷開，稱之為捏合(pinch-off)。在不同條件下，空泡捏合發生的位置與時間不同，可分成四種類型[12]：液面閉合(surface seal)、深閉合(deep seal)、淺閉合(shallow seal)及準靜態閉合(quasi-static seal)。

在衝擊速度較高的情況下，空泡的形成包含了空化作用。除了前述的影響參數，空化數(cavitation number)是與空化現象與空泡演變狀態有關的無因次參數，定義為

$$\sigma_v = \frac{p_r - p_v}{\Delta p} \quad (8)$$

其中 p_r 是參考壓力， p_v 是局部的蒸氣壓， Δp 是特徵壓差。在不同場合，參考壓力與特徵壓差的定義選擇也會有所不同。在考慮物體水下運動的問題時，參考壓力通常為自由流壓力 p_∞ ，特徵壓差則選擇動壓力。空化數為

$$\sigma_v = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (9)$$

如果物體是在液面下深度 h 之位置，則自由流壓力為液面氣壓 p_0 與液體深度造成的壓力之總和

$$p_\infty = p_0 + \rho gh \quad (10)$$

液體的蒸氣壓與溫度有關，所以空化數不只受到液面氣壓、液體密度、深度及速度的影響，溫度也是影響參數之一。

方程式(9)所定義的空化數並未考慮局部的速度、壓力等參數，所以無法直接作為是否發生空化的參考。如果以局部壓力代入，可定義為局部空化數

$$\sigma_{v,l} = \frac{p_l - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (11)$$

其中 p_l 為局部壓力。當局部壓力降低到等於蒸氣壓時，就會發生空化，即

$$(\sigma_{v,l})_{\text{cavitation}} = \frac{p_v - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} = 0 \quad (12)$$

當物體表面最低壓位置的局部空化數等於0時，對應的空化數即為發生空化的臨界值。

利用超空泡降低水下物體的阻力，是空化的重要應用之一。物體在流體中移動的阻力與流體密度成正比。所以，相同形狀的物體在水水中的阻力，大約為在空氣中阻力的800倍(水密度/空氣密度 = 1000/1.225 $\approx$ 800)。這也是船舶、潛艇等水中航行物體速度遠低於飛機的原因之一。如果

在物體表面形成超空泡，包覆所有或大部分的物體表面，接觸的流體介質由液體轉變為氣體，必然可以有效降低阻力。水中運行物體在表面形成超空泡時，所受阻力約下降90%左右，因此，最近世界各軍事大國均應用其水中減阻的特性，投入研發高速運動的超空泡水中武器[13]。

透過研究彈體入水的動態演變，可以探討超空泡的形成機制及研發高速入水的水下武器。本研究使用自行設計與開發之實驗平台，觀察球型彈體在不同速度入水的空泡發展情況，作為後續不同幾何形狀物體入水之比較，以及發展數值模擬方法的參考依據。

二、實驗設備

為觀察球體入水過程，建構之實驗設備架構如圖1。實驗設備可分為四部分：發射裝置、測速裝置、實驗水槽及影像擷取裝置。

本研究利用空氣槍作為發射裝置的動力來源。空氣槍使用一般市售之生存遊戲用電動空氣槍，以電動機驅動活塞產生高壓空氣來推動直徑6 mm之塑膠球型彈體。在發射過程中，首先以電動機驅動齒輪組，帶動活塞後移且壓縮彈簧；當活塞抵達最末端，即脫離齒輪限制，受彈簧回復力作用而快速向前移動，壓縮汽缸內的空氣注入槍管，使彈體射出。發射速度受到彈簧係數、汽缸容積、槍管長度及彈體質量影響。一般市售空氣短槍發射速度約為50 ~ 60 m/s，空氣長槍發射速度約為80 ~ 100 m/s。本研究選用之空氣槍為外型仿製T-91步槍之模型槍，發射速度可達到90 m/s以上，足以產生空泡。使用的塑膠球型彈體質量為0.2 g，密度為1768 kg/m³。水的密度在15~20°C範圍約為999 kg/m³，因此密度比為1.770。

測速裝置採用光學偵測方式，在發射器的射口上安裝兩組光遮斷器組成的感測器陣列，利用彈體通過時遮斷光線來產生訊號變化。比較兩組光遮斷器的訊號變化時間差，即可計算出彈體通過的速度。光感測器陣列外觀如圖2。

每一組光遮斷器由一個紅外線發光二極體(IR LED)模組及一個光電晶體(phototransistor)模組組成，安裝於彈體通道之兩側。發光二極體發出之紅外線，透過彈體通道側壁之直徑1 mm小孔，橫越通道後再經過另一側之小孔，照射至光電晶體。以小孔限制光線之發射與接收範圍，可避免因散射及反射而造成錯誤訊號。每一組光遮斷器之電路如圖3。光電晶體若接收到紅外線，集極(C)與射極(E)之間將形成通路，則比較器LM393

的非反相輸入端(+)電位低於反相端(-)之電位，造成輸出端為低電位。此時作為接收指示的發光二極體為順向偏壓，會導通而發光。當彈體通過時，遮斷發光二極體之光束，使光電晶體無法接收到紅外線，C、E極之間阻抗增加，LM393的非反相端電壓升高。當非反相端電壓高於反相端時，輸出端為高電位，接收指示發光二極體熄滅。反相端的電位由可變電阻VR1調整，可控制光束遮斷時的靈敏度。必須調整反相端電位幾乎等於未遮斷時的非反相端電位，使彈體一接觸到光束就能造成輸出電壓變化。

兩組光遮斷器的輸出訊號連接至Arduino微控制器模組，以計算彈體穿越兩組光束之時間差。光束間的距離 Δx 為已知常數，除以測量所得之時間差 Δt ，即可估算出彈體速度。

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (13)$$

在本研究中之光束間距為0.015 m，最短可測量之時間差為4 μ s，因此理論上可測量的最高速度為

$$V_{\max} = \frac{0.015}{4 \times 10^{-6}} = 3750 \text{ (m/s)} \quad (14)$$

此值遠高於實驗所需之速度，因此可提供足夠精確的速度測量值。

光感測器陣列與空氣槍連接之方式如圖4。在槍管末端先裝上轉接套，再將光感測器陣列與轉接套結合。

實驗水槽尺寸為0.6 × 0.6 × 1.0 m，如圖5。使用透明壓克力製作，使水槽中各位置均能由外部進行觀察。因目前實驗的物體初速度最高僅為100 m/s左右，入水深度遠小於水槽深度，且使用硬度較低的塑膠材質做為彈體，所以在底部尚不需設置緩衝墊。

影像紀錄採用攝影機記錄連續畫面。使用攝影機拍攝時，為使影像清晰，必須在預估物體入水軌跡所在位置，放入可供攝影機對焦的輔助物。照明用光源以柔光罩遮蔽，避免出現局部位置有反光亮點或亮度不均的情況。

三、結果與討論

本研究初步以空氣槍發射球型彈體，垂直射入水槽，觀察入水過程中的空泡生成、演變及潰散過程。以下之實驗觀察結果包括兩種不同大小的速度，分別產生不同的空泡演變過程。

3.1較低初速度之空泡演變

球型彈體初速度高於1 m/s以上時，即可觀察

到入水後有完整空泡包覆的情況。如果物體長徑比提高，可能需要較大的初速度才能產生完整包覆物體之超空泡。

圖6為典型的低速入水情況。在入水初期，可以明顯看到類似圓錐狀的空泡自水面向下延伸，並且完全將彈體包覆，如圖6(a)~(e)。當空泡拉長後，開始出現捏合現象(pinch off)，如圖6(f)及(g)，空泡的中段向內縮小，變為葫蘆狀外形。最後空泡介面碰觸在一起，將空泡截斷。在此同時，頂端也封閉起來，與大氣隔離，形成封閉的空泡，如圖6(h)。上半段空泡很快浮向水面，最後分散為許多小氣泡，消失於水面。下半段的空泡隨彈體持續向下沉降，維持近似於橢圓體之外形，但尾端會不斷分裂出小氣泡，使空泡尺寸逐漸縮短，最後消失。

在較低速情況下，入水生成之空泡可維持很長時間，但會因為水壓之作用，使介面形狀產生內縮，造成空泡斷裂而逐漸縮小。

3.2較高速度之空泡演變

以高於80 m/s之初速度，將直徑6 mm塑膠球型彈體垂直射入水中，形成空泡之過程與較低初速度時有明顯的不同。

圖7為初速度在100 m/s左右的入水情況。因為速度較高，而實驗使用之攝影機只能達到60 fps之速率，所以無法獲得完整的連續影像，必須重複多次實驗觀察，才能記錄到不同階段的超空泡發展過程。因此，圖7(a)~(j)不是單次實驗的觀察結果，而是不同次實驗結果的集合。

如同較低初速度之發展過程，在彈體入水初期，仍先發展出圓錐狀的空泡，頂端與大氣相通，空泡介面由水面向下延伸，完全包覆彈體，如圖7(a)及(b)。當空泡延伸較長後，同樣也會因水壓作用，使局部空泡介面出現波動，有部分介面向內縮，部分卻向外膨脹，使空泡變為葫蘆形，如圖7(d)。除了水面下的介面，在水面的空泡頂端也同時向內縮，然後封閉起來。封閉時，互相衝擊的水流產生了向上噴出的水柱。葫蘆形空泡隨後開始出現另一種模式的不穩定現象，如圖7(e)的空泡中段，在介面出現許多微小的氣泡。這種現象表示空泡中的氣體壓力無法持續支撐介面，開始進入潰散的過程。彈體持續向下沉降，空泡持續拉長，出現小氣泡的部分也越來越多，如圖7(f)。最後整個空泡會突然潰散，瞬間分裂為許多小氣泡，如圖7(g)~(j)。空泡潰散後，可觀察到彈體速度突然降低，然後緩慢沉入水槽底部；此現象代表當空泡潰散後，彈體不再有完整的空泡包

覆，與水直接接觸，所受的阻力大幅增加，所以才突然減速。由此現象也可以看出，超空泡可以大幅減少水下物體的阻力，使物體可以維持較高的移動速度。

水面噴起水柱的形成過程，如圖8。因水柱形成的速度較慢，延續時間較常，因此以30 fps的速率進行攝影。圖8(a)是空泡頂端剛封閉的時候，可以看到水流相互衝擊出現的細小水滴。當空泡潰散後，可看到水柱持續上升，並且伴隨附近水面向上凸起，如圖8(b)。水柱向上噴起後，開始落下，並且使附近的水面向下凹，如圖8(h)及(i)。再次凹下的水面會往下拉出一個氣泡，如圖8(j)及(k)。

四、結論

本研究觀察球型彈體入水過程中的空泡演變，完成建置實驗設備，並以攝影機記錄球狀彈體在不同初始速度條件下的入水情況。

測速裝置使用光遮斷器作為感測器，以兩組光遮斷器組合成固定間距之陣列，利用彈體遮斷紅外線光束來產生感測訊號，測量兩組感測訊號之時間差，來估算彈體之速度。實驗證明此裝置確實可以滿足速度測量之需求。在實驗過程中，由於彈體入水會產生向上噴出的水柱，使光感測器陣列浸濕，影響紅外線光束之光路，造成測速功能失效。後續改善除了提高防水的能力，也需解決殘存水滴對光束的影響。發射裝置採用電動空氣槍，可發射直徑6 mm之塑膠球型彈體。球型彈體可做為標準外形，作為不同彈體形狀研究的比較基準。

本研究以不同初始速度發射球型彈體，觀察入水過程中的空泡演變。由實驗結果可以看到兩種不同的演變模式。在較低速度時，從水面向下延伸的超空泡會因壓力作用而變為葫蘆形，然後從較細的位置產生斷裂，形成獨立的封閉超空泡，完整包覆住彈體，持續向下沉降。超空泡會不斷自尾端斷裂，形成小氣泡，但可以維持較長時間。以高速發射彈體時，同樣會先形成與大氣相通的入水空泡，然後頂端閉合而成為封閉的超空泡。介面仍會因壓力作用而內縮，變成葫蘆形。超空泡的介面不只會有波動變化，同時也會出現潰散的現象。初期只有局部的介面出現小氣泡，在某一瞬間整個空泡會突然潰散，變為成群的微小氣泡，彈體也會突然減速。

由實驗觀察可以看到初始速度對於超空泡的形成、發展與潰散有明顯的影響。高速與低速條

件下的空泡，除了尺寸不同，在生成之後的演變情況也大不相同。不同的速度條件對空泡演變模式的影響，需進一步研究。彈體形狀對空泡的影響，尤其是如何使空泡可維持較長壽命，來減少物體在水中的阻力，是在應用上值得關注之領域。

致謝

本研究經費由國防部106年度「補助軍事院校教師(官)從事學術研究」專案補助，特此致謝。

參考文獻

- May, A. and Woodhull, J. C., "Drag Coefficient of Steel Spheres Entering Water Vertically," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 12, p. 1109, 1948.
- Truscott, T. T., Beal, D. N., and Techet, A. H., "Shallow Angle Water Entry of Ballistic Projectiles," *Proceeding of the 7th International Symposium on Cavitation*, 2009.
- Shimamura, K. and Ootsuka, T., "Study of Water Entry of High-Speed Projectile," *The 12th Hypervelocity Impact Symposium, Precedia Engineering*, vol. 58, pp.232-239, 2013.
- Yao1, E., Wang, H., Pan, L., Wang, X., Woding, R., "Vertical Water-Entry of Bullet-Shaped Projectiles," *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 2, pp.323-334, 2014.
- Truong, T., Repalle, N., Pistani, F., and Thiagarajan, K., "An Experimental Study of Slamming Impact during Forced Water Entry," *The 17th Australian Fluid Mechanics Conference, New Zealand*, 2010.
- Ghadimi, P., Feize Chekab, M. A., and Dashtimanesh, A., "Numerical Simulation of Water Entry of Different Arbitrary Bow Section," *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, vol. 11, pp. 117-129, 2014.
- Swidan, A., Amin, W., Ranmuthugala, D., Thomas, G., and Penesis, I., "Numerical Prediction of Symmetric Water Impact Loads on Wedge Shaped Hull Form Using CFD," *World Journal of Mechanics*, 2013, no. 3, pp. 311-318, 2013.
- Seddon, C. M. and Moatamedi, M., "Review of water entry with applications to aerospace structures," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, no. 7, pp.1045-1067, 2006.
- Glasheen, J. W. and McMahon, T. A., "Vertical Water Entry of Disk at Low Froude Numbers," *Physics of Fluids*, vol. 8, p.2078, 1996.
- Truscott, T. T. and Epps, B. P., "Water Entry of Projectiles," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 46, pp.355-378, 2014.
- Duez, C., Ybert, C., Clanet, C., and Bocquet, L., "Making a Splash with Water Repellency," *Natural Physics*, vol. 3, pp.180-183, 2007.
- Aristoff, J. and Bush, J., "Water Entry of Small Hydrophobic Spheres," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 619, pp.45-78, 2009.
- Hrubes, J. D., "High-Speed Imaging of Supercavitating Underwater Projectiles," *Experiments in Fluids*, vol. 30, no. 1, pp.57-64, 2001.

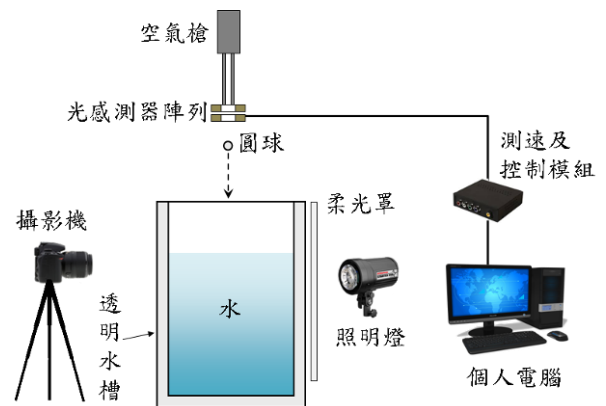


圖 1. 實驗設備架構

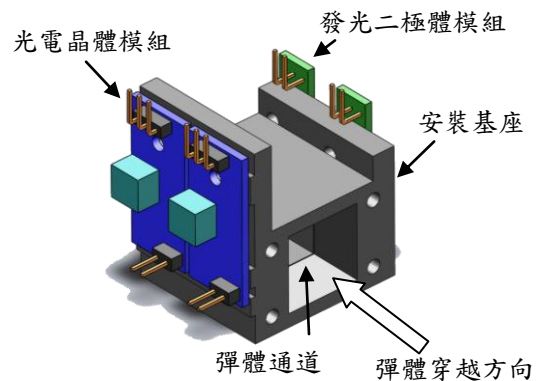


圖 2. 光感測器陣列

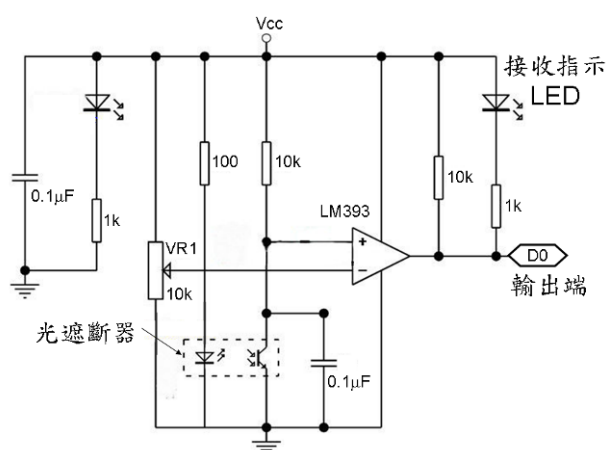


圖 3. 光遮斷器電路

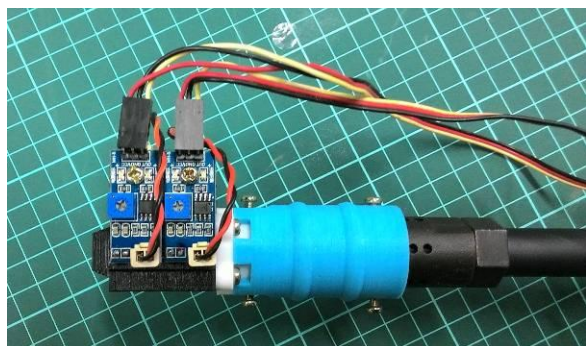


圖 4. 光感測器與空氣槍之結合

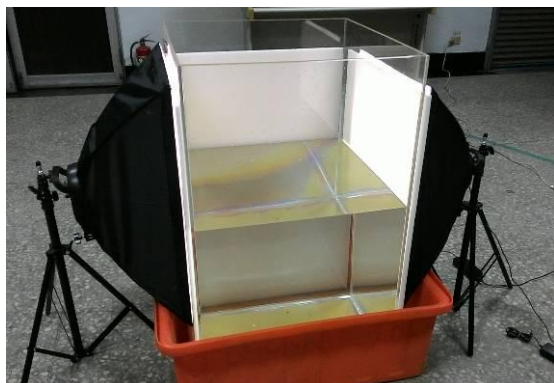


圖 5. 實驗水槽及照明燈

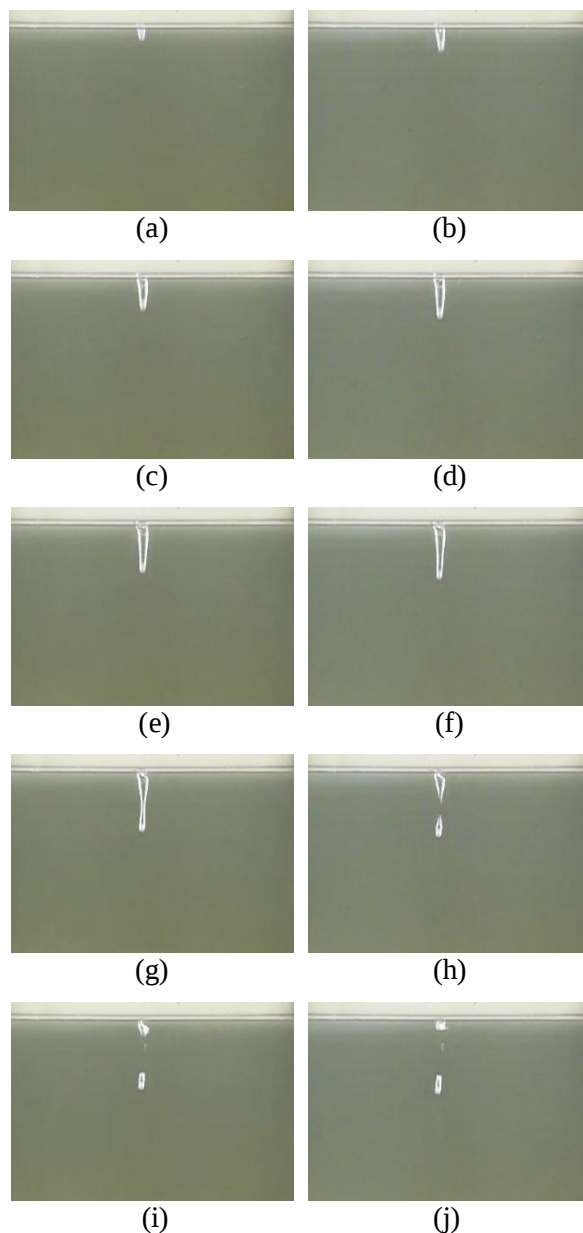


圖 6. 初速度 2 m/s 之空泡演變

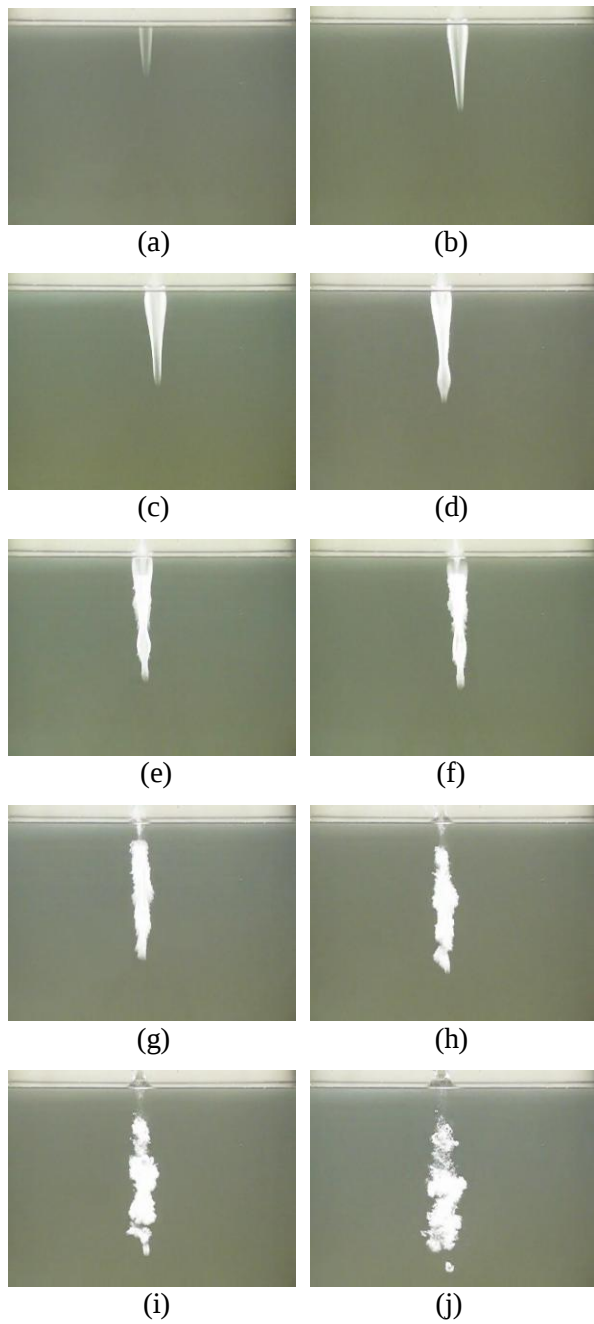


圖 7. 初速度高於 80 m/s 之入水情況

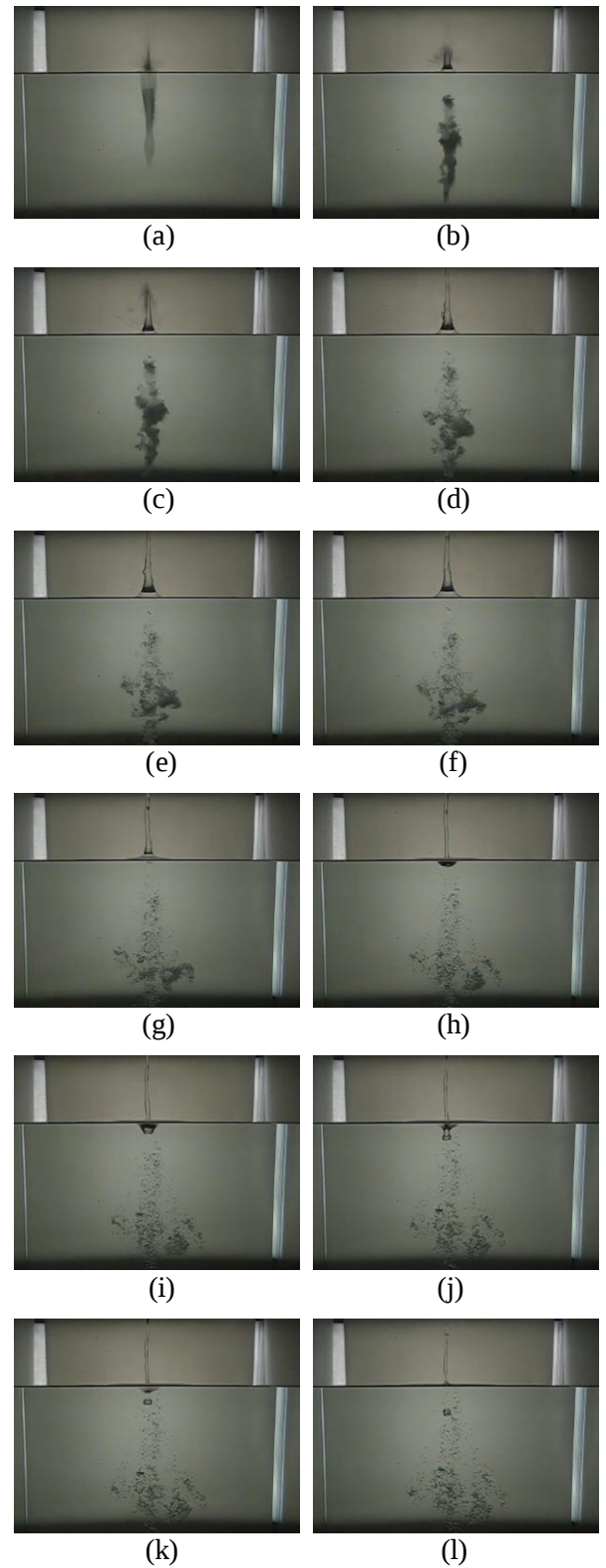


圖 8. 水面水柱之變化過程

