

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

氣力揚升式人工湧升流之研究(續)

Preparation of NSC Project Reports

計畫編號：NSC 88-2611-E-002-022

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：梁乃匡 國立臺灣大學海洋研究所

liangnk@ccms.ntu.edu.tw

摘要

本文作者曾探討利用氣泡與水的混合液較輕與氣泡浮升的動能帶動流體上昇的機制，將海中深層高營養鹽的海水揚升至表層，以提高海域基礎生產力，發現效率高，甚具實用價值，同時發現以功率平衡理論得到進氣量與揚升水量間之關係時，氣泡與液體間之滑移現象的影響不容忽視(1997,1998)，但實驗結果與氣力揚升理論比對發現仍有差異，表示另有影響因素，故繼續探討原因。先考慮沒有出流量與有出流量狀況時滑動摩擦速度分佈的差異，提出滑動摩擦修正係數以修正滑動摩擦損耗；再增加考慮表面張力影響水面抬升；又發現出水口水面隆升所需功率，對推算結果有重大影響；另外加入出水管口深度與海水垂直分層間密度差的效應，將氣力揚升理論推廣至能適用在海中以氣力揚升方式產生湧升流的情形，建立氣力揚升式人工湧升流理論。如人工湧升器安裝於基隆海谷，使用直徑 2M 管長 100M 的湧升管，將海水由海面下 110M 揚升至海面下 10M，僅需 0.011 cms 的進氣量，即可產生 1 cms 的出流量，湧升效率超過 90 倍，極具開發潛力。

關鍵詞：基礎生產力、氣力揚升、人工湧升流

ABSTRACT

The authors have studied the hydrodynamics of an air-liquid two-phase flow, which can upwell a huge amount of deep seawater rich in nutrients to the sea surface to generate high primary productivity. The preliminary study was promising and the upwelling efficiency was very high (1997,1998). However, the further study shows that the result between experiment and air-lift theory is not identical. It means there exist new factors to be considered. The factors include distribution of slip velocity, level raise due to surface tension and density decrease of air-water mixture, and depth of outlet. A formula of air-lift artificial upwelling is deduced by the aforementioned factors and stratification effect. By employing the formula, an estimate of 1cms upwelled seawater from 110M to 10M in depth below sea level can be induced by an air flow-rate of 0.011cms through a pipe of 2M in diameter and 100M in length. The application of air-lift artificial upwelling is in great potential.

Keywords: primary productivity, air-lift, artificial upwelling,

一、前言

1.1 研究目的

由於深層海水含有豐富的養分，如湧升至海表

層就成了滋養海洋生物的沃土，因此世界主要漁場大多分佈在湧升流充沛的海域。據估計如以 300cms 的抽水量，將硝酸鹽(nitrate)濃度為 20 μ M 的深海水抽到海表層，將可產生 10km $\times$ 10km 的湧升區

(梁,1996),依據對台灣附近黑潮及鄰近水團之溫度與營養鹽關係(Liu, et al.,1988)的研究,了解硝酸鹽與磷酸鹽(phosphate) 濃度皆與海水溫度呈負相關,也就是海溫愈低營養鹽含量愈高,因此可以海溫概估營養鹽的濃度,如依該文章對黑潮次表層海水所作調查資料的回歸結果,估計海溫約 10.7°C 的硝酸鹽濃度可達到 $20\mu\text{M}$ 。經歷年來海洋學家的調查,台灣附近海域有些地方有湧升流或是斜溫層較高的情況,如能善加利用,選取合適的海域輔以人工方式,把大量深層海水提升至海洋上層光線所到之處,配合二氧化碳及營養鹽,可行光合作用使浮游性植物增產,作為其它海洋生物的食物,即可提供魚類喜好的生態環境,使海洋生物群集並大量繁殖,將可創造新的魚場。

要達到將深層海水抽至海洋上層以產生漁場,所需抽水揚程很小,但抽水量需很充沛,且需考慮深海水壓、腐蝕與海上裝設等問題。一般幫浦的揚程高但抽水量不大,無法滿足需求。因此本研究依照這個目的,探討將氣力揚昇觀念應用於海中人工湧升流管中之物理機制與湧升效率(進氣量與出流量的比值)。

基本構想是以壓縮空氣充入垂直管中,利用氣泡與水之混合體較輕與氣泡浮昇動能帶動流體上昇之機制,將底層高營養鹽的海水抽昇至表層,以提高海域生產力,改善海域的環境條件,提供海洋增養殖一套可行的方法。

另外還有一些其他的價值,如能以有效又經濟的方式抽取深海冷水,再利用深層海水溫度較海面低的特性來發電,可提高溫差發電的效率;如能應用本法,將氣打入水庫下層水中,造成上下層水的流動,可避免水庫水質惡化,改善水庫生態環境;另外也可提供一種對於深海錳核等礦產的開採方法。

1.2 文獻回顧

對於人工湧升流的研究,梁(1978,1979,1983)曾經探討利用海流的力量產生湧升流,但會受流速與流向影響,不但出流量不穩定且抽水效率不高;劉(1995)提出仿照 Isaacs 的波力發電裝置,將管長加到 300 米,利用波浪造成的起伏運動將深層海水抽上來,但需使用數百公尺長的硬管當作湧升管,恐遭颱風巨浪破壞。梁(1996)應用 Rautenburg(1972)

對氣力揚升機制的研究至海中人工湧升流上,首度提出氣力揚升法產生人工湧流的構想,由於升潛比(揚升高程與進氣深度之比)為零,且忽略滑動摩擦損耗,發現效率很高;更由於氣泡在海水中的上升速度比淡水中慢(Beyersdorf,1997),更能有效的帶動液體,因此氣力揚升法的構想應用於海水中較淡水中效率更高,值得深入研究。

對於氣力揚升之研究,Smith(1975)曾以內徑 51mm 與 76mm 之 U 形管模擬氣力揚升幫浦,研究充氣方式與位置等對揚升效率之影響,並且發現充氣方式對效益影響很小,而位置愈低效益愈高。Kato(1975)曾研究應用在深海中抽取錳核的三相流(three-phase flow)機制,是以動量方程式處理平均流場,再配合單一粒子運動方程式求解,其中水頭損失是以單相流水頭損失與液體流量兩因數的經驗函數表示,他認為壓力損失量測不易,其誤差會影響估計,並表示進氣位置較深效率較高,但須考慮氣泡上升過程中膨脹的效應。Yoshinaga & Sato(1996)以實驗與動量觀念研究氣力揚昇幫浦的輸沙性能;Takeo & Takayuki (1996)以有限插分處理二相流之質量與動量方程式,探討進氣量與出流量由漸變之不穩定至穩定狀況下之時變率。Ohnuki(1996)以多孔射出與單孔噴嘴射出進行試驗研究不同的進氣方式,表示對進氣面的流場、軸向壓力分佈與徑向氣泡分佈都有極大影響,但經一段距離發展後差異就不明顯。雖然有以上學者對氣力揚升理論提出一些研究,但對於圓管中一群氣泡浮升推升液體的過程,仍以 Rautenburg(1972) 提出的氣力揚升理論最為完整,雖然對其中的氣泡變形、分裂、接和、氣泡尾流、回流、邊界效應、液體特性、雜質(impurity)效應及氣液間能量轉換等複雜問題,仍採用一些簡化的假設,考慮成穩定狀態下之平均流場,直接經由輸入壓縮氣泡能量扣除損失則為提升液體所需的能量,得到進氣量與出流量間的關係。Weber(1976)推廣 Rautenburg(1972)的理論至三相流,可估算水下抽砂效率,其中對進氣處壓力的改善較為合理,本文加以引用。由於氣力揚升理論清晰完整,因此以該理論為基礎研究推廣,建立氣力揚升式人工湧升流理論。

二、氣力揚升式人工湧升流理論

2.1 理論基本架構

本研究是以功率平衡的原理，分析氣力揚升方式產生海中人工湧升流之物理機制與特性，基本架構如圖1所示。

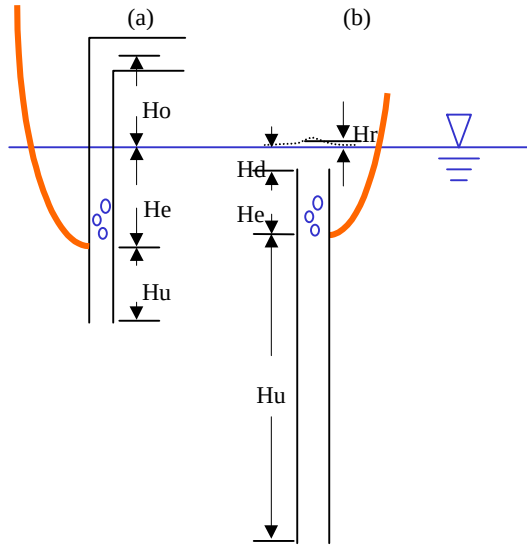


圖1 (a)氣力揚升幫浦與(b)氣力揚升式人工湧升流之基本架構圖

假設壓縮空氣輸入的功率分別由管中十項功率之消耗來平衡，其中前六項為一般氣力揚升機制中均需考量的損耗，大致與 Rautenberg(1972)提出的相同，但 Rautenberg 曾表示為簡化成第 6 項所作的假設有問題，本文將加以改善；而後四項為應用於海中湧升流需增加考慮的項目，列述如下：

1. 將水揚升高出靜水面，增加位能所需之功率 (N_p)；
2. 上管中氣液混合體因黏滯性於管內流動損耗的功率 (N_R)；
3. 下管中液體因黏滯性於管內流動損耗的功率 (N_{Ru})；
4. 氣液混合體運動所需的功率 (N_B)；
5. 管中次要損失：係由於管徑變化、管向變化、管內零星配件與入口損失等，但由於揚升管為平直長管，如採用管壁進氣方式，則只需考慮入口損失之功率 (N_E)與彎管損耗功率 (N_u)；
6. 氣液相對速度造成滑動摩擦損耗功率 (N_S)；
7. 出水管口與水表面齊平時，需考慮表面張力影響水面抬升 (H_s)對啟動空隙率 (e_0)的影響；

8. 管口在水面下時需加入出水管口深度 (H_d)之影響；

9. 水面隆升 (H_r)所需功率 (N_{rise})；

10. 海水垂直分層間密度差的效應 (N_h)；

整個功率平衡方程式可表示如下：

$$N_L = N_p + N_R + N_{Ru} + N_B + N_E + N_u + N_S + N_h + N_{rise} \quad (1)$$

其中進氣輸入的功率 (N_L) 為：

$$N_L = \int_{P_0}^{P_E} \dot{V}_L \cdot dP = \int_{P_0}^{P_E} \dot{V}_{L0} \cdot P_0 \cdot \frac{dP}{P} = P_0 \cdot \dot{V}_{L0} \cdot \ln\left(\frac{P_E}{P_0}\right) \quad (2)$$

P ：上管中某高程之氣壓；

P_0 ：標準一大氣壓力；

P_E ：進氣口氣壓；

$\dot{V}_L$ ：進氣量；

$\dot{V}_{L0}$ ：相當一大氣壓力下之進氣量；

進氣口氣壓 P_E (Weber, 1976) 為：

$$P_E = P_0 + H_E \cdot r_w \cdot g - (1 + X_E + l \cdot H_u / D) \cdot \frac{v_w^2 \cdot r_w}{2} \quad (3)$$

D ：管內直徑；

g ：重力加速度；

H_E ：上管管長；

H_u ：下管管長；

v_w ：下管水流平均速度；

r_w ：液體密度；

X_E ：入水口損耗係數；

l ：管摩擦係數；

2.2 一般性的損耗考量

一般氣力揚升機制中均需考量的損耗功率有

N_p 、 N_R 、 N_{Ru} 、 N_B 、 N_E 、 N_S 等項，依次討論如下：

將水揚升高出靜水面，增加位能所需之功率為：

$$N_p = H_0 \cdot r_w \cdot g \cdot \dot{V}_w \quad (4)$$

H_0 ：一般氣力揚升幫浦之揚升高程(m)

實際使用氣力揚升幫浦皆需將液體抽出數公尺高，其抽取效益主要由 H_0 決定，因此一般 N_p 是平衡方程式中最大的損耗項，但由於本研究的目的是將深海水抽至表層，不須抽出水面，故該項為零，使得原本一些被忽視的因素變得重要，此為本研究的重點。

上管中氣液混合體於管內流動損耗的功率為：

$$N_R = f \cdot \frac{r_W}{2} \cdot v_m^2 \cdot \frac{(H_0 + H_E)}{D} \cdot \dot{V}_W \quad (5)$$

v_m ：水氣混合體代表速度；

只有液體之單相流的下管段(H_u)功率損失為：

$$N_{Ru} = \dot{V}_W \cdot \left(f \cdot \frac{H_u \cdot v_W^2 \cdot r_W}{2 \cdot D} \right) = f \cdot \frac{H_u \cdot \dot{V}_W^3 \cdot r_W}{2 \cdot D \cdot A^2} \quad (6)$$

v_W ：下管液體平均流速；

上管(H_E)中氣液混合二相流運動所需的功率為：

$$N_B = \frac{r_W \cdot \dot{V}_W}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}_W + \dot{V}_{L0}}{A} \right)^2 \quad (7)$$

進水口損耗之功率為：

$$\begin{aligned} E &= W \cdot \Delta_E = W \cdot X_E \cdot \frac{r_W \cdot W}{2} \\ &= \frac{r_W \cdot X_E \cdot W}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

ΔP_E ：入口損耗造成之壓降；

彎管損耗功率為：

$$\text{—————} \quad (9)$$

：彎曲損耗係數；

氣泡與相鄰液體間相對運動所產生摩擦造成的滑動摩擦損耗，其定義為：

$$(10)$$

：單一氣泡的滑動速度；

：單一氣泡所受之阻力；

假設每個氣泡皆為大小相同的圓球型，其阻力依照 Morison 公式，則滑動摩擦損耗變為：

$$(11)$$

：氣泡之滑動分佈係數；

：平均氣泡直徑；

：氣泡個數；

：平均滑動速度，即平均氣液間的相對速度；

$$(12)$$

：單一氣泡體積；

：管內氣量；

帶入(11)式，得：

$$(13)$$

如管口與液面齊平時，依定義啟動空隙率() 為零，但經實驗觀測，發現當進氣量由零開始增加，水面因零星氣泡爆開而造成一些動盪，但並無液體流出管口；進氣量持續增加時，管內平均液面也在逐漸抬升，當超過某高程水才開始溢出，稱為表面張力影響之水面抬升()，計算 時加入 的影響，才合乎實際觀測。

水未流出管的狀況(符號上加')，此時進氣輸入的功率全用於滑動摩擦損耗，故

與(11)式比較，得：

$$(14)$$

假設

$$\text{—————}, \quad (16)$$

代入(15)式，整理後可得：

$$(17)$$

Rautenburg(1972)為簡化 假設未流出與有流出的滑動速度分佈相同，簡化得：

$$(18)$$

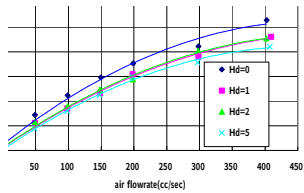
但實際上各個氣泡間的滑動摩擦速度並不相同，假設為平均滑動摩擦速度()乘分佈函數，其影響以氣泡之滑動分佈係數()表示：

$$(19)$$

：滑動摩擦速度分佈函數；

由(11)式，可知其關係為：

$$(20)$$



進氣未達最小啟動進氣量時，水流處於將要流出但尚未流出的臨界狀態，管內平均流量為零，假設平均有一半水流向上，速度為 v_{up} ；一半向下，速度為 v_{down} ；氣泡皆向上，速度為 v_{bubble} ；則滑動摩擦速度一半為 v_{up} ，另一半為 v_{down} 。可得滑動摩擦修正係數為：

(21)

假設氣泡速度為 30cm/s，水流速為 10cm/s，則 K_{sl} 為 1.33。

進氣超過最小啟動進氣量時，有水流流出湧升管，水流與氣流的速度皆向上，如氣泡尺寸分佈均勻，氣泡上升速度接近，滑動偏移速度將遠小於平均滑動摩擦速度，則 K_{sl} 就愈接近 1。

但液體處於將要流出但尚未流出時的滑動速度分佈較亂(較大)；而液體開始流出管口時的滑動速度分佈較一致(較小)，故實際上之滑動摩擦損耗功率應再乘以兩者之比值，即滑動摩擦修正係數：

(22)

：液體開始流出後的滑動分佈係數；
：液體處於將要流出但尚未流出時的滑動分佈係數；
：滑動摩擦修正係數；
將滑動摩擦損耗功率修改為：

(23)

(24)

2.3 估算海中湧升流需增加的損耗

過去研究氣力揚升機制時，因揚升高程()皆達數公尺，以至對於出流時管口水位會高出管口一些高度再流出的現象皆予以忽視，這高度稱水面隆升()，但如今出流時管口低於液面，需考慮水面

隆升的影響。

為了解該項的影響，設計一套氣力揚升實驗(圖 2)，同時量測進氣量、出流量以及水面隆升，由實驗發現在進氣量不超過最佳進氣量時，進氣增加出流量會增加，隆升高度也會增加(圖 3)，增加的高程將增加能量的消耗，但由於氣泡衝出液面時會造成水面很大的擾動，因此隆升高度變動很大，但平均水面隆升隨進氣量與出流量增加而升高；如果出流管口在液面下則水面隆升降低，管口愈深，隆升高程則愈小。

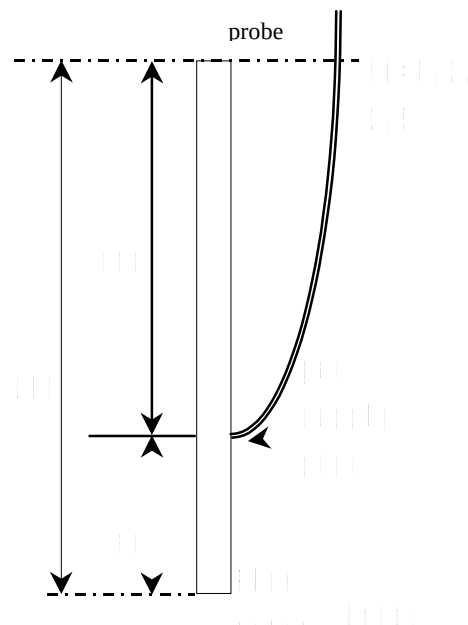
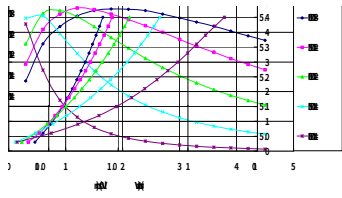


圖2 直立水槽氣力揚升實驗配置

圖3. 進氣量與隆升高程之關係
依連續方程式，管口之湧出水量應等於由下管入水口中抽起的流量()應等於上管口排出的流量：



$$\dot{V}_w = \int_0^{2\pi} \int_0^h v(h, q) \cdot R \cdot dh dq \quad (25)$$

R ：湧升管半徑；

q ：繞管軸心的角度；

h ：湧出水面的高度；

假設速度分佈對稱於管軸心，故只為高度的函數，假設水平流速為：

$$v(h) = \sqrt{2gh}, 0 \leq h \leq C_0 \cdot H_r \quad (26)$$

C_0 ：隆升調整係數

代入(25)式，得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_w &= \int_0^{2\pi} \int_0^{C_0 H_r} \sqrt{2gh} \cdot R \cdot dh dq \\ &= 2\pi R \cdot \sqrt{2g} \cdot \frac{2}{3} (C_0 \cdot H_r)^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (27)$$

$$C_0 \cdot H_r = \left(\frac{3 \cdot \dot{V}_w}{4\pi \cdot R \cdot \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}}, 0 < C_0 < 1 \quad (28)$$

如管口在液面下 H_d ，則假設速度分佈：

$$0 \leq h \leq H_r, \quad v(h) = \sqrt{2gh} \quad (29)$$

$$H_r \leq h \leq H_r + H_d, \quad v(h) = \sqrt{2gH_r} \quad (30)$$

帶入(25)式積分可得：

$$\dot{V}_w = 2\pi R \sqrt{2g} \left[\frac{H_r^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{2}} + H_d H_r \right] \quad (31)$$

由於 H_d 為已知，可先解出 H_r 與 $\dot{V}_w$ 之關係式，再帶入功率平衡式求解。由上式可知 $\dot{V}_w$ 愈大， H_r 就愈小，當 $\dot{V}_w \rightarrow 0$ 時，可用下式估計：

$$(32)$$

為實用需要，利用因次分析與實驗量測資料回歸，求得實用公式，較理論結果適用(圖 4)。

$$(33)$$

：管口深度係數；

：隆升係數；

隆升所需增加的功率為：

$$(34)$$

海水垂直分層間密度差所損耗的功率為：

$$(35)$$

：海水垂直分層因密度差造成之水頭(density difference head) (Liang,1978)；

需依現場調查之密度分佈剖面先行估算，再併入揚升高程考量，計算時之液體密度()取為進水口深度處之密度。

將各項功率帶入功率平衡方程式，可得進氣量與出流量之間的關係。

2.4 實例估算

如人工湧升器安裝於基隆海谷，依現場溫深分佈圖可知水深達 100m 之溫差已超過 10°C，假設湧升管的尺寸為管長 100 m；進氣位置距出口 50M 處，出口在海面下 10M 處；分別選用直徑為 1m、1.5m、2m、2.5m、3m 等 5 種湧升管管徑，先以該

圖5a 不同管徑之進氣量與出流量關係 (基隆海谷)

地點實測的海水密度分層，推算密度差所造成之水頭()，再依照氣力揚升式人工湧升流理論計算進氣量與出流量的關係與揚升效率。(圖 5a,b)

