

親水性與疏水性塗料對水下潛體減阻研究

吳聖儒* 許政行** 林聰得**

*國防大學中正理工學院造船工程學系

**中原大學機械工程學系

摘 要

本研究利用表面塗裝減阻的方式，針對一幾何外形流線之軸對稱體以作為水下潛體模型，並施以各種高分子減阻塗料，其中高分子減阻塗料可區分為親水性與疏水性兩類，以不同的流速去量測及分析其阻力間的差異，探討塗層之表面特徵及其減阻機制與成效，可供實際應用上之參考。實驗中流場速度由 0.5m/s 至 1.9m/s 的範圍內($Re=0.66\times 10^6\sim 2.5\times 10^6$)，各項塗料的試驗結果顯示皆有其減阻成效，在此流場速度範圍內疏水性減阻塗料表現較優於親水性減阻塗料；但我們在此預測，當流速很高時，親水性的塗料應該會有很好的減阻效果。

關鍵字：水下潛體，表面摩擦阻力，塗裝減阻，親水性，疏水性，高分子塗料

Drag Reduction on Submerged Body Coated With Hydrophilic and Hydrophobic Paints

Sheng-Ju Wu*, Cheng-Hsing Hsu**, and Tsung-Te Lin**

**Department of Naval Architecture and Marine Engineering,
Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

*** Department of mechanical Engineering, Chung Yuan Christian University*

ABSTRACT

In the present study, a streamlined and axis-symmetry model coated with various polymeric coatings was used to test the efficacy of drag reduction underwater. Polymeric coatings can be divided into two kinds: Hydrophilic and Hydrophobic. The resistances of submerged model coated with various polymeric coatings were measured on different flow speeds; these results were provided for studying the difference of efficacy among various polymeric coatings on the drag reduction of submerged body. The feature of drag reduction of hydrophobic coatings is better than that of hydrophilic coatings within measured flow speeds; but we predict that maybe there will be high performance of drag reduction for hydrophilic coatings as flow speed is very fast.

Keywords: submerged body, skin-friction resistance, drag reduction by coating, hydrophilic, hydrophobic, polymeric coatings

一、前言

地球自十八世紀末期工業革命以後，石油漸漸成為不可缺少的主要能源，然而經由各國不斷地開發利用，石油產能預估大約僅剩下 50 年的產期，現今各國無不以開發替代能源為主要研究重點，然而新興能源開發不易，在未能有效研發新型替代能源的情況下，如何有效的節省能源的耗用，以延續能源開發期程，就成為現今各研究族群重視的要點。

交通載具是目前地球耗損能源的主要來源，若能有效降低各式運動載具之阻力，將可有效減低能源的損耗，同時具有提升載具操縱性能及抑制噪音生成的優點，是故各型載具減阻效能研究已成為當前各國重視的研究要點。

由於水的黏滯性相對於空氣而言較高，故載具在水下運動所需負擔的能量損耗亦較大。因此，各種水下潛體之基本要求必須能夠克服阻力以達其運動與推進之性能，載具減少阻力之最直接貢獻即是可增加運動速度及其操縱性的提高。為了克服阻力，達到水下潛體對運動性能之要求，通常以增加推力為著眼，藉著加大馬力輸出來克服阻力之限制；但以此方式將造成能源與經費的耗損。今若是能以流線化之外型，將水下潛體形狀阻力降至最低，再以經濟可靠之方式降低表面摩擦阻力，便可使水下潛體之總阻力有效地降低，而達到減少能源的損耗，並提升水下潛體之運動速度及操縱性能。

在自然界中，生物因生存環境所演化出的各項要件，常成為人類科技發展的重要概念及應用。生物在不同環境下生存，皆有為適應生存環境所演進而成的特殊生理構造，而生物的每一器官也為了發揮其功能而演進出各自的外形或運作方式；而人類科技進步的許多概念，

也正是來自於生物為適應環境所演化出的特殊生理條件為著眼，引發出人類科技的文明。

以鯊魚皮膚表面構造所引發之概念被實際運用於人類的減阻工程，NASA 研究出的微壕溝 (Riblets) 技術，除應用於飛機或船舶，減少了大量能源消耗，此技術甚至被應用於運動競速方面，例如游泳選手穿的泳衣、帆船、手划船的船體。而鯊魚或海豚的流線外形及其表皮之型態更成為人類發展水下載具最佳的研究參考對象[1]。

以水下潛體為例，水下潛體在水中所受到的阻力主要由三部分所組成：摩擦阻力、黏性壓差阻力(Viscous Pressure Resistance)或稱為形狀阻力及臨近自由液面時之伯努利丘 (Bernoulli Hump) 效應；其中阻力最大之來源來自摩擦阻力，約佔總阻力之 80%至 90%[2]，故若能採有效措施，大幅度的減少摩擦阻力，將是阻力減少之關鍵。要降低潛體之摩擦阻力，必須減少其外形的突出或凹陷，並降低表面粗糙度，使表面保持光滑。降低表面摩擦的方式有許多種，例如：微壕溝 (Riblets)、微噴流 (Micro-Blowing)、微氣泡 (Micro-Bubbles)、表面減阻塗料或使用奈米技術等方式。

上述的減阻方法，皆需要很精密的加工技術及精確的噴流量控制，並且會增加水下潛體外殼設計的困難及製造成本，故本研究考量使用高分子(Polymer)塗料塗佈在水下潛體表面，以降低表面摩擦阻力。

魚類表面具有黏膜，此黏膜證實具有減阻之功效，故近年來科學家們把此概念運用於水中載具之減阻及管內流減阻。Thurston [3]以流線形之潛體模型，在鼻端的停滯區(Stagnation region)塗抹具減阻功能之高分子量、長鏈狀分佈之高分子材料，藉彈頭加熱鼻端溶解高分子，使模型於運動時，表面能被具非牛頓力流體特性之高分子所覆蓋。經實驗證明，在淡水

中能減低總阻力18%之功效，在海水中則有16%，在模型之摩擦阻力上，淡水中可降低30%，海水中則可降低27%。

Jia Ou等人[4]曾在微流道中進行具疏水性表面特性之研究，他們發現當物體表面具有疏水特性時可有效抑制流動阻力，實驗中發現約有30%的減阻效果。

Koeltzsch[5]曾在Couette流動實驗中，使用表面活性劑來抑制表面摩擦阻力，其發現在雷諾數 $7 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$ 範圍中，有70%的減阻效能，而在雷諾數 $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ 間的紊流轉換區內，平均約有20%的減阻效能。

Reed [6]以具減阻效能之高分子塗料，釋放到等高、等深之微壕溝之研究，將兩者具有減阻功效的技術結合運用，此方法主要是以最佳化(等高、等深)之微壕溝，加上微釋放高分子塗料之技術，以最少量之減阻高分子散失，防止紊流狀態所產生的高摩擦阻力，可達到最佳之減阻效果，先將減阻高分子塗料由微壕溝之底部釋放，當減阻高分子擴散至微壕溝頂端進入靠近表面之邊界層時，減阻高分子將有效減少因紊流所產生之摩擦阻力。在以一長鏈狀高分子(Long chain polymer)塗料實驗中發現，在理想狀態下，減阻效能可達80%。

由於高分子減阻塗料的分子特質，可以改變潛體的剛性邊界，使其邊界層內壁上的流體速度梯度降低，從而降低流體對物體表面上的剪力，達到減阻目的，且高分子塗料使用簡易，不需改變水下潛體既有外型與結構，亦不需任何其他重大改裝，使用彈性高，經濟效益佳。

二、研究內容與方法

從實際的經驗上可瞭解只要固體與其所浸沈之流體間有相對運動(relative motion)，則該固體必因流體之作用而承受一淨力(net

force) \vec{F} 。一般而言，作用於潛體表面一微小平面元素上之極小作用力 $d\vec{F}$ ，即不垂直亦不平行該小平面元素。假若物體於黏性流體內移動，則有剪應力(shear)與壓力(pressure)作用於潛體上，即

$$\vec{F} = \int_{\text{body surface}} d\vec{F}_{\text{shear}} + \int_{\text{body surface}} d\vec{F}_{\text{pressure}} \quad (1)$$

$$\text{此處 } d\vec{F}_{\text{shear}} = \vec{\tau}_w dA \quad ; \quad d\vec{F}_{\text{pressure}} = -Pd\vec{A}.$$

而合力 \vec{F} 可分成平行與垂直於潛體運動方向之分力。平行於潛體運動方向之分力稱為拖曳阻力 F_D (drag force)，此即本文所關注的重要之物理量；另外垂直於潛體運動方向之分力稱為升力 F_L (lift force)；所以，由前述得知總拖曳阻力實為摩擦拖曳阻力(friction drag)和壓力拖曳阻力(pressure drag)之和。

大多數的情況，總拖曳阻力皆需要經由實驗結果而求得，主要是因為潛體後段逆向壓力梯度(adverse pressure gradient)的存在，常會導致流動分離(flow separation)，而此分離效應使得我們無法完全以解析的方式來求解潛體上之作用力。因此，對絕大多數的潛體而言，都必須利用水槽(water channel)或水洞(water tunnel)來進行實驗，以求得計算升力或拖曳阻力時所對應的各個係數。

改變水下載具外形是最基本的減阻方式，將水下載具外形流線化可以降低其形狀阻力，水下載具外形愈流線其形狀阻力愈小，當載具經充分流線化後，甚至可使形狀阻力低於50%以下。此時，由流體黏性所引起之摩擦阻力則較為顯著，並成為阻力之主要因素。

本研究以一幾何形狀流線之軸對稱魚雷彈體模型作為試驗模型，故其阻力之來源主要是表面的摩擦阻力，考慮在一固定深度 $H/d=4.58$ (此深度必須使彈體模型在阻力量測實

驗的過程中，不受自由液面及槽壁效應的影響) 狀況下，於表面施以各種高分子減阻塗料，並以不同的流速去量測及分析其阻力變化的差異，探討塗層於水下之表面特徵及其減阻機制與成效。此外，亦考慮選取最佳的減阻塗料，在吃水深度比 $H/d=2$ 受到自由液面效應下，對減阻成效的影響。

2.1 表面塗裝減阻技術

使用各式減阻塗料塗裝於潛體表面，以降低水下載具表面的摩擦阻力，此種方法加工程序簡易且經濟，且不必對潛體構造做任何改變，從經濟及技術的觀點來看，均是現有減阻方式中最簡單可行的方法。

在自然界中有許多實際鮮明的例證，如許多魚類會在其表面分泌出黏滑液體，這些黏滑液體即能協助魚類於水中運動時降低阻力，增加魚類運動速度並減少能量消耗。魚類所分泌之黏滑液體屬多醣類高分子(Biopolymers)，為天然之高分子聚合物。

近年來，許多多醣類高分子都被證實擁有減阻功效，它們分別由植物、細菌或海藻中被提煉出來，廣泛應用於相關運動載具之活動中。一般而言，高分子減阻塗料可區分成疏水性及親水性減阻塗料兩種。疏水性減阻塗料主要是使水下載具表面變的更光滑，能有效降低其表面粗糙度，以延緩紊流邊界層之產生，進而降低載具運動阻力，其應用於水面船艦之阻力實驗中，減阻效率最高可到達 15%[7]。

親水性(例如：長鏈狀高分子塗料)減阻塗料作用原理是使載具表面呈現擬塑性狀態，使載具表面形成擬似滑動條件(Pseudo-Slip Condition)，以降低載具表面速度梯度，進而減少表面摩擦阻力，根據相關實驗數據指出，該類型減阻塗料在高速載具運動狀況下才具減阻效果，其減阻效率可達 30% 左右；使用親水性

減阻塗料的缺點是塗層會隨著載具在水中運動的時間增加，有逐漸散失的特性，而親水性減阻塗料的散失率，會隨各種不同高分子材料性質、外流場流體特性、載具浸水時間及運動速度等參數而異。故親水性減阻塗料較適用在短時程、施工簡易或特殊任務需求之載具，例如：水下武器、水面競賽快艇或軍用船艦之減阻運用。

2.2 實驗塗料減阻原理

高分子聚合物(Polymer)，乃是由無數的分子(Molecules)，以長鏈狀態形成的物質，而高分子聚合物的物理及化學特性即是由此一重複單元所決定，例如：聚乙烯(C_2H_4)_n 高分子聚合物的重複單元即為乙烯(C_2H_4)。因為，高分子聚合物屬於非牛頓流體(Non-Newtonian Soluble Fluid)，當其受到剪應力(Shear Stress)作用時，其剪應變率(Shear Strain Rate)係呈非線性關係，亦即其黏性係 μ (Viscosity)不為常數，而呈現為薄剪力(Shear Thinning)的特性，即其表觀黏度(Apparent Viscosity)將隨著變形率的增加而減少，具有擬塑性(Pseudo Plasticity)，因此高分子聚合物具有易延伸及融合的特性，當受到外力作用時，高分子聚合物會產生連續變形現象，其長度會隨時間而被拉長，此即「潛變(Creeping)」現象，此種與時間相依的特性，為高分子聚合物之重要特色。此行為乃肇因於高分子聚合物之分子鏈受外力之作用時，重新排列所致，也可稱為是高分子聚合物在受剪應力下的一種流動現象[8]。

高分子聚合物減阻塗料除了在物體表面隨時保持一層高分子聚合物薄膜外，更將高分子聚合物之粒子經由流體的剪應力作用傳遞至鄰近液面，此時高分子聚合物塗料之分子將在紊流層中形成大小尺寸不同之紊流相互作用，利用高分子聚合物由物體表面擴散至靠近壁區

(Wall Region)之邊界層時,高分子聚合物減阻塗料開始作用,使得水下潛體表面由無滑差狀態(No-Slip Condition),經由高分子聚合物減阻塗料使水下潛體表面產生擬似滑移現象,而使鄰近表面的速度梯度降低,造成摩擦阻力減少的效果,如此,可有效的減少表面摩擦阻力,並避免流體之紊流作用。

本研究實驗所使用之塗料共計有七種,依照其屬性分類分別為親水性塗料與疏水性塗料今分別將各塗料特性介紹如下:

2.2.1 親水性高分子塗料

- (i) HYSPEEDKOTE 塗料 (簡稱 HK): HK 塗料為親水性塗料,該產品以液態噴霧罐裝方式包裝,使用時直接噴塗於清潔過之工作表面即可,施工方式甚為簡易,依廠商說明如正確使用下,一罐塗料(14oz)可噴塗約 200 平方呎,此塗料遇水後會產生濕滑現象,如此可以降低水下潛體表面摩擦阻力,並達到減阻的目的。
- (ii) Quick Craft 塗料 (簡稱 QC): 為親水性高分子減阻塗料,為膠狀黏性透明液體,塗敷方式簡易,僅須以毛刷或滾筒塗刷於工作表面即可,經四至五小時乾燥後成為透明薄膜,但當其浸水後即如微細海綿吸水狀態,並在船底形成一薄薄水膜,使得表面非常光滑而達到減阻目的,塗料成分含氨基鉀酸酯故易於塗敷於船底或清潔船底。一般而言,該塗料為膠狀較為厚重,且所需乾燥時間較長,因其受表面張力影響之故,可獲得較為均勻之表面。
- (iii) SEASLIDE 塗料 (簡稱 SS): 屬於親水性高分子減阻塗料,其施工方式與 QC 塗料相同,具有遇水會吸水而產生濕滑現象;經由本實驗室測試該塗料減阻效果,發現該塗料若塗層太厚狀況時,則於浸水後將於

潛體模型後段產生塗料堆疊現象,使得彈體阻力不降反升。

2.2.2 疏水性高分子塗料

- (i) Marine Skin 2 塗料 (簡稱 MS2): 為疏水性高分子減阻塗料,其為黃色稠狀液體,類似汽車水蠟,使用時將該塗料以乾淨的布或打臘棉於工作表面上塗抹均勻,等待三十分鐘俟塗料乾燥後,再使用纖維較細之軟布予拋光抹亮,並以同樣程序塗敷第二層,施工程序如同打蠟般甚為簡易,遇水後則表面非常平滑,降低表面粗糙度而減阻,其價格相對於其他塗料而言則較低。
- (ii) Marine Skin 塗料 (簡稱 MS1): 此種塗料與 MS2 塗料為同一家公司產品,其包裝形式、使用方法、顏色等特徵均與 MS2 塗料相同,但 MS1 塗料主要功能為防止海生物增長,並非一般以改變流體邊界層結構或速度分佈之減阻塗料,其減阻是以防止海生物於船體附著、生長為手段,使船體表面相對於有海生物附著之船體為光滑,表面粗糙度低,因而達到減阻的目的。
- (iii) KISSCOTE 有機矽類高分子臘質塗料 (簡稱 KC): 此塗料亦屬疏水性高分子減阻塗料,為水狀液體,單價較其他塗料為高,它的基本分子是二甲基矽氧烷(Dimethyl Siloxane),為矽(Silicone)類物質,具有矽之耐高溫、耐激烈環境變化、不易沾附雜質、水份之特性,且該種高分子物質甚為穩定,不易於一般環境狀態下反應,對環境之衝擊性較小;此塗料亦已改變以往矽類物質不易施工塗敷於其他物體表面之缺點,可輕易地施工,並可直接塗敷於其他漆料上使用,以增加其減阻性能,但因該塗料為液狀,塗抹於工作表面後塗料厚度甚薄,經由實際測試經驗,建議塗層亦不需太厚,以免影響使用效果。

(iv)奈米塗料 (簡稱 N 塗料): 本研究所使用之 N 塗料為低溫硬化之壓克力-氟素-矽酮共聚物低溫架橋機能性樹脂。原理是利用樹脂中所含氟素樹脂與矽酮在低溫(60°C)成膜時, 因與壓克力相容性不佳及比重低的特性, 使含氟素之長側鏈與矽酮浮出樹脂表面形成一低表面張力的氟-矽酮表層。此表層因而具有抗污、防水及平滑之效果。氟素樹脂與矽烷基另一端之壓克力結合, 經由壓克力與架橋劑共架橋形成 3D 立體結構可增進密度、硬度、韌性及耐化性。

三、實驗設備及量測分析方法

本研究於國防大學中正理工學院之大型環流水槽中進行, 工作流體皆為經過濾淨化之淡水, 測試模型為一流線化的潛體模型, 由於測試模型完全沒入水中, 故所受之總阻力僅為摩擦阻力及形狀阻力二者, 實驗過程採用高精密度阻力計, 可反映出不同流場速度下之彈體模型總阻力, 由於本實驗量測之不同塗料之減阻效能評估, 是採用與一參考塗料間作相對性的比較, 故可獲得不同高分子塗料之減阻效能, 相關使用實驗儀器如下所述:

3.1 水平式循環水槽

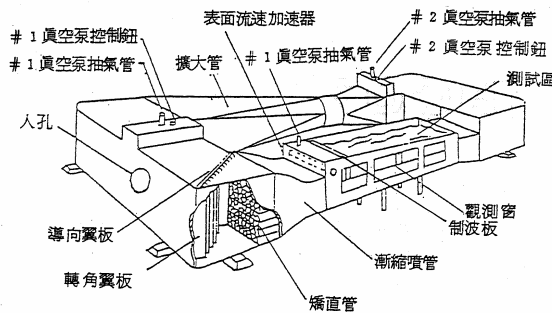


圖 1. 水平式環流水槽平面示意圖。

本實驗主要實驗平台為水平式環流水槽 (Horizontal Circulating Water Channel) 水槽平

面示意圖, 如圖 1 所示。水槽外緣長 14 公尺、寬 5.325 公尺、高 2.2 公尺、水容量為 80 立方公尺, 供實驗觀察與量測區域長為 5.5 公尺、寬為 1.5 公尺、水深 1.1 公尺, 水槽水流速度藉調整主馬達轉速來調變, 設計流速自 0.2m/s 至 2.0m/s。環流水槽係利用相對運動之原理, 將潛體模型固定於測試區段, 藉由調整水槽主馬達速度改變水流速度後, 利用相對運動原理, 來模擬實際的潛體在水中運動之各種運動狀況, 其優點是能長時間觀察及量測穩定狀態下潛體模型在水中之各種物理量及流場特性。

3.2 實驗彈體模型

本實驗量測對象之潛體模型為一全長 1.325 公尺、直徑 0.12 公尺之鋁合金流線形魚雷彈體模型, 於表面分別塗佈各式不同高分子減阻塗料, 並針對各種減阻塗料分別進行阻力量測實驗, 如圖 2 所示。



圖 2. 實驗潛體模型圖。

在實際水流狀況時, 真實彈體除鼻端一極小範圍外, 幾乎均為紊流狀況, 但因彈體模型實驗時, 因其雷諾數不高, 在穩定之流速及水流狀況下, 圍繞彈體模型之水流狀況除尾端一極小區域外, 應多屬層流或轉渡範圍的情況, 如要藉水槽加速使雷諾數增加, 使彈體模型周圍之層流狀況轉變成紊流將甚為困難, 且彈體模型之長度與速度均無法使彈體模型之雷諾數與實體相同, 亦即在鄰近彈體模型表面的邊界層內, 難以做到完全的動力相似; 為彌補此一差異, 使彈體模型實驗更接近實際狀況, 本實

驗於彈體模型全長 5% 之前端加裝激紊裝置，使通過彈體模型表面處之水流狀況變成紊流狀態，以模擬實體於真實環境之流動狀況。

3.3 實驗量測方法

實驗前需先完成阻力計校準工作，並於每次實驗前重複校準，以確保阻力計量測值精確無誤。阻力計型式為 Load Cell，額定負載最高為 5000g，在開機後 10 至 15 分鐘，待電壓達到穩定狀態後，將阻力顯示器確實歸零，以平衡環 (Gimbals) 掛於拖曳架之兩端，先作歸零調整，再分別以標準的砝碼放置於平衡環之一端由 0 至 2000g，每次 100g 依序增加，再依序遞減，適當地調整放大器的增益 (Gain)，以及擷取器軟體上的參數設定，每次確實觀察顯示器之讀數是否線性，待完成此校準工作後才開始做阻力量測實驗。

環流水槽為一封閉式系統，執行阻力量測實驗時，彈體模型以專用支架固定於水槽測試區上方，固定架之兩側設計有軌道式滑動架，

在水平方向位移，圖 3 所示。

當水槽中之水流動時，彈體模型受到水流之沖力，即可平順地沿著流向被帶動，並將阻力反應於阻力計 (Load Cell) 上，而所量測之阻力值則經由高取樣率之數據擷取系統記錄及分析。實驗水槽中水流速度控制是由主推進馬達及表面加速馬達之轉速同步操控，由 300rpm 至 1100rpm，每 100rpm 做一次阻力量測記錄，計有 9 個實驗流速，在此段馬達設定轉速範圍內水流速度範圍約為 0.5 m/s 至 1.9m/s。

在彈體模型實驗時，係以一扁橢圓形支撐桿，末端支撐彈體模型，上端連接至軌道式滑動架，將彈體模型支撐於水槽測試段。但此狀況下所量得之阻力值，除彈體模型之阻力外，亦包括支撐桿之阻力，必須扣除支撐桿之阻力，以估算彈體模型之真實阻力。在實驗中所採用之彈體模型外形已流線化，故形狀阻力已大幅降低，其總阻力大部分為彈體模型之表面摩擦阻力與支撐之阻力。

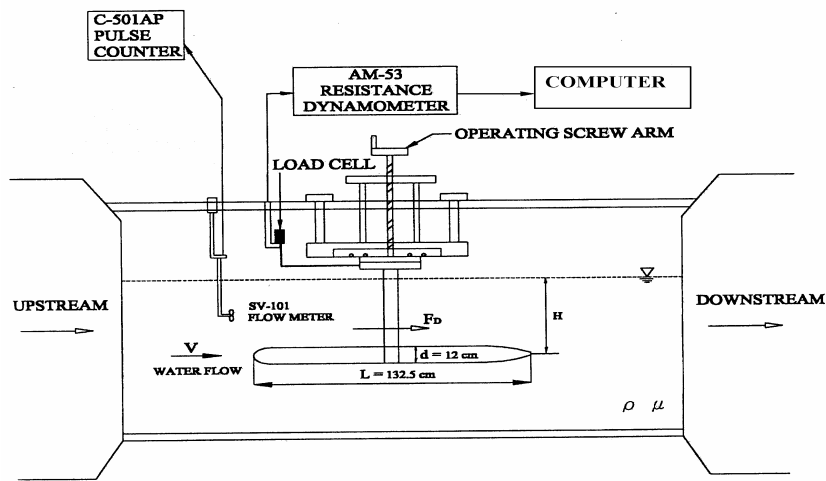


圖 3. 實驗架具配置示意圖。

實驗首先量測在一固定深度 $H/d=4.58$ ，在此深度下，做彈體模型阻力量測實驗的過程中，可避免自由液面及槽壁效應的影響，為了在定量及定性上能有效地量測及比較不同條件下的減阻效能，本實驗先行在潛體模型表面，施以半光環氧漆作為面漆，於環流水槽中進行阻力量測試驗，得到不同流速下的參考基準的阻力值，再將各式高分子塗料分別塗佈於彈體模型表面，在同一深度下量測施以塗料後彈體模型之總阻力。並精確地扣除支撐的阻力來作分析與比較，以了解各項塗料之減阻效果。

當完成前項測試後，篩檢出減阻效果最佳之高分子塗料，將潛體模型浸水深度比調整至 $H/d=2$ 之臨近自由液面狀態下，重複前項實驗做阻力量測，藉以探討自由液面效應對塗料減阻效果之影響。

在支撐桿之阻力估算時，先製作一長度至彈體上緣邊界之同形，且下端削平之桿做阻力量測。直覺上，若扣除此桿的阻力值，應就可得到其支撐彈體之真實阻力，但因此桿之底部為削平狀，當水流通過底部時，會有渦流產生，此末端效應(End Effect)將增加此桿的阻力，故與真正支撐彈體之支撐桿阻力比較，此用來估算支撐桿阻力的單獨桿所量得之阻力，可能會因其末端效應的影響，而稍微高估了支撐桿之阻力；故在實驗估測單獨支撐桿的阻力時，仍然在支撐桿下端約 2mm 的間距處加上實驗的彈體外型，以降低單獨支撐桿的末端效應。

3.4 實驗參數的分析

本實驗的研究是在探討利用各種不同高分子聚合物塗料之配方，對彈體模型表面減阻效應之量測與分析，主要在探討彈體模型之阻力值(R_t)，而與其相關之參數則有與流體特性有關的物理量，如流體密度(ρ)、流體黏滯性(μ)、流體速度(V)，另與彈體有關的則有彈體最大截面

直徑(d)、彈體模型長度(L)，以及實驗時潛體模型浸水深度(H)等，共有七項參數。

$$R_t = f(\rho, \mu, V, d, L, H) \quad (2)$$

在本研究中，考慮的參考面積為潛體模型整體之浸水面積(A_w)，同時亦考量會造成彈體表面粗糙度差異的塗裝情況 (Coating Condition)。

經選擇 ρ 、 V 、 d 三項為重複參數，再使用白金漢 π 定理(Buckingham π Theorem)推導，可得到無因次的阻力係數函數關係。

$$C_t = f(Re, \frac{H}{d}) \quad (3)$$

3.5 不準確度分析

藉由前述對本實驗所推導出的無因次參數 C_t 及 Re 之定義，可利用和方根法(Root-Sum-Square)估算其相對不準確度(Relative Uncertainty)如下：

$$u_{C_t} = \frac{\delta C_t}{C_t} = \left[\left(\frac{\delta R_t}{R_t} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_w}{A_w} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$u_{Re} = \frac{\delta Re}{Re} = \left[\left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

其中各有因次量的可信賴區間(Confidence Intervals)，例如： δR_t 、 δV ...等，係利用 Student 的 t 分佈方式，取 95% 的可信度，故所提出的實驗不準確度之可靠機率(Odds)為 21 比 1。有關標準偏差量的估算方法如(3-5)式：

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

此處 n 為實際量測的次數， x_i 為各次量測的有因次之物理量， x_m 係平均值，其定義為 $x_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)$ ，故依照 Student 的 t 分佈，可估

算出可信賴區間 $\Delta = t\sigma/\sqrt{n}$ [9]。

將相關參數相對不準確度代入方程式(4)及(5)後分別求得到阻力係數 C_t 值之不準確度為 $\pm 0.96\%$ ，雷諾數 Re 之不準確度為 $\pm 1.28\%$ 。

四、結果與討論

在實驗過程中，共使用了七種不同種類之高分子減阻塗料進行量測，相對參考基準的塗料為半光環氧底漆，各種塗料相對於不同流場速度之總阻力關係，區分成親水性塗料及疏水性塗料，在扣除固定彈體模型之支撐桿的阻力後，得到彈體模型之淨阻力值，如圖 4 及圖 5 所示。

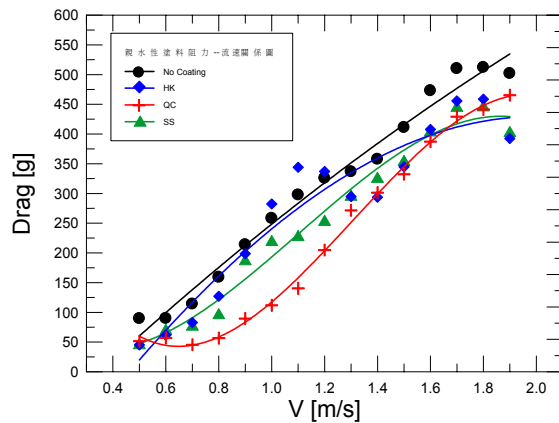


圖 4. 親水性塗料阻力與流速關係圖。

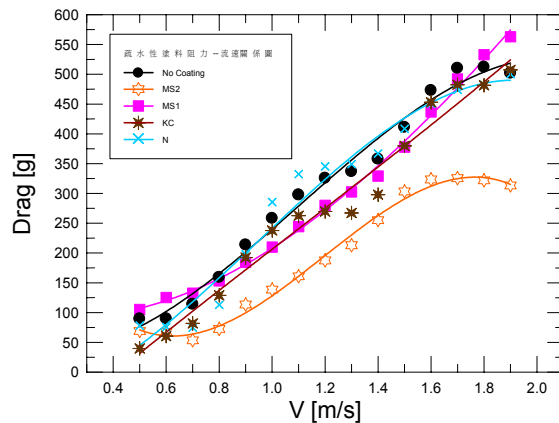


圖 5. 疏水性塗料阻力與流速關係圖。

由圖 4 及圖 5 可發現，七種高分子減阻塗料皆有不同程度的減阻效果。MS2 塗料在實驗流場速度 0.5m/s 至 1.9m/s ($Re=0.66 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^6$) 均有優越的減阻表現。HK 塗料在流場速度為 1.2m/s ($Re=1.58 \times 10^6$) 以上時才能顯示出其減阻效能，而 QC、KC 及 MS1 塗料在中、低速流場中有較高的減阻效果，此三種減阻塗料呈現減阻性能趨勢相似，其中以 QC 塗料減阻效率最佳，但 QC 塗料會隨流速的增加，造成彈體模型塗佈層產生剝蝕現象，使得減阻效果有降低的趨勢。

SS 塗料在整體實驗流速範圍內減阻效能表現亦屬優異，且由圖 4 中可觀察到，其隨流場速度增加，減阻效果有隨之提升的趨勢。N 塗料為目前最尖端之奈米科技製作產生之奈米塗料，發現其阻力曲線與未施加高分子塗料之參考基準半光環氧底漆性能曲線相近，故在圖 5 中並無法明顯看出其減阻效能，僅有在高速時有些微減阻效果產生。

由於本研究的阻力量測誤差範圍為 $\pm 0.1\%$ ，因此，經由阻力曲線表現來觀察七種減阻塗料，皆有減阻效果，在 MS2 塗料中最高可減少阻力約 200g 左右之阻力值。此結果說明了流場速度範圍在 1.9m/s ($Re=2.5 \times 10^6$) 以下時，疏水性塗料減阻效果優於親水性塗料；對一流線型水下潛體而言，因大部分的阻力來自邊界層內的表面摩擦阻力，故降低表面摩擦阻力是我們欲達到減阻的有效途徑。

圖 6 及圖 7 呈現出各種塗料在不同雷諾數狀態下之阻力係數關係圖，利用阻力係數(C_t)相對於雷諾數(Re)之對應曲線，來展示各式塗料減阻效果。就 QC 與 SS 兩種塗裝而言，此兩項塗料所應用的減阻機制相近，皆是利用塗料遇水後產生擬塑性表面，造成擬滑移(Pseudo-Slip Condition)現象，以降低邊界層內之速度梯度，進而達到減阻效果。在實驗過程中，雖然都有

減阻效果產生，但由圖 6 中的減阻趨勢卻呈現完全相反的現象，QC 塗料是在低雷諾數狀況下減阻效能較高，而 SS 塗料是在高雷諾數狀態下，才可顯露出較佳之減阻效果，此可能是因為 QC 塗料在高速流場環境中，會有較明顯之剝蝕現象產生緣故，使得在高雷諾數狀態下，其減阻效能會有下滑趨勢展現。

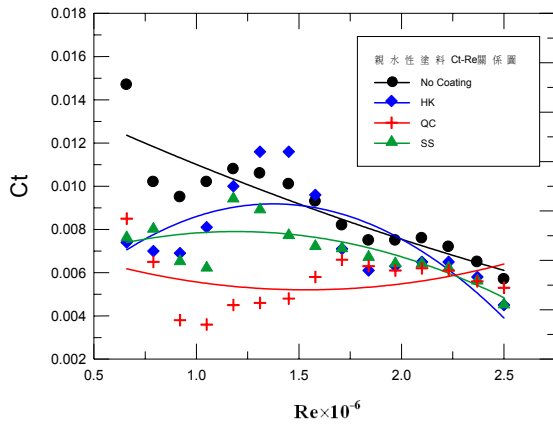


圖 6. 親水性塗料 Re-C_t 關係圖。

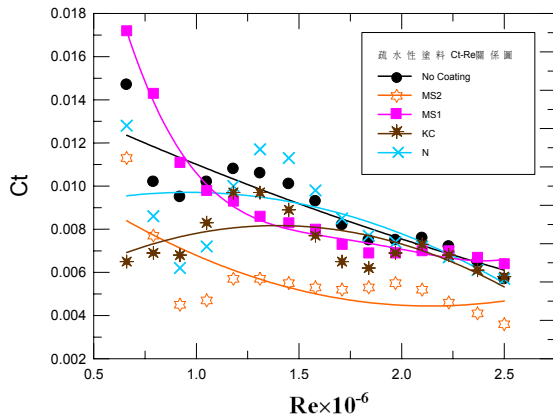


圖 7. 疏水性塗料 Re-C_t 關係圖。

在高雷諾數狀態下之阻力係數可分成兩種趨勢探討。MS1、MS2 及 QC 三種塗料在高雷諾數狀態，阻力係數會有向上提升趨勢，顯示出該塗料較適用於低速流場，MS1 由於著重防污損性能，故減阻效能較不彰顯，而改良後之

MS2 塗料雖然在減阻效能方面已有大量改善，但仍較不適用於高速運動流場。

KC、SS、HK 及 N 塗料則是在高雷諾速流場中有減阻反應遞增的趨勢，尤其以 HK 塗料在高雷諾速流場中，有很陡峭的阻力係數下降趨勢，這都顯示出這四種塗料，在高速狀態下才能展現出其減阻效能。

圖 8 顯示七種減阻塗料隨著雷諾數變化之減阻效能趨勢圖，此處減阻比定義為：

$$\text{Drag reduction Ratio (DR)} = (D_0 - D) / D_0 \quad (7)$$

式中 D_0 係指參考基準底漆的阻力值，而 D 係各種減阻塗料所量測的阻力值。

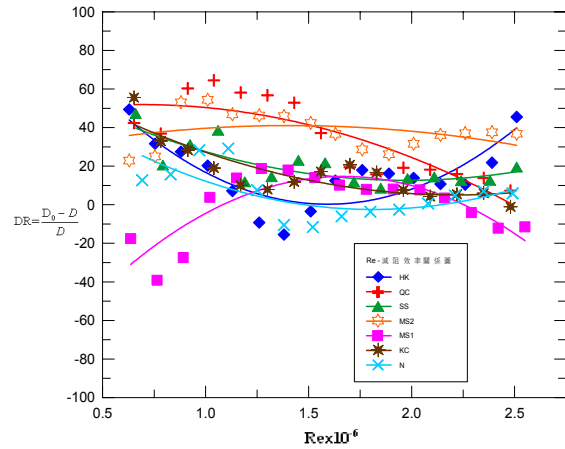


圖 8. 各種塗料在不同雷諾數下之減阻比圖。

圖 8 中發現 MS2 塗料皆維持約 40% 的減阻效能，在實驗流速範圍內為最佳的減阻塗料。QC 塗料在低、中雷諾數狀況下減阻效能亦佳，但其在高速運動狀態下會因剝蝕現象產生，而降低減阻效能。另外 HK、SS 及 N 塗料在高雷諾數流況下，都有減阻效率向上提升的趨勢，此顯示出這三種塗料可能在高速流場下，會有較佳之減阻表現發揮。MS1 及 MS2 這兩種作用功能不同的塗料，在其在減阻反應上有很大的差異性，此現象說明，為了同時擁有較佳的防污損性能，可能會抑制了減阻性能的需求，是故如何同時兼具減阻及防污損性能之減阻塗

料，亦將是未來可供研發探討的課題。

在潛體遠離自由液面之塗料減阻實驗中，發現 MS2 塗料為實驗流場速度範圍內減阻效果最優異的塗料。為了瞭解塗料受到自由液面效應影響下之減阻趨勢，將塗佈 MS2 塗料潛體模型置於浸水深度比 $H/d=2$ 之流場環境中施行阻力實驗，探討 MS2 塗料受自由液面效應影響狀況下之減阻效能變化情形。

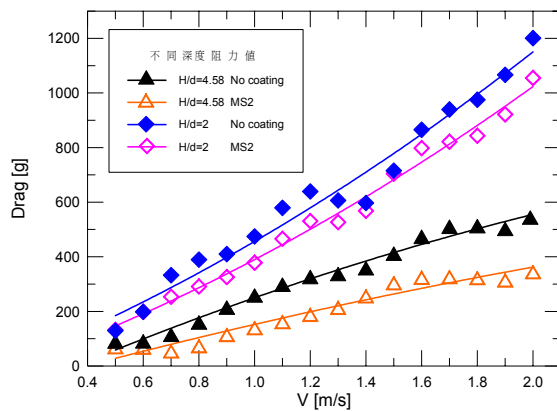


圖 9. 不同浸水深度之阻力與流速關係圖。

實驗中，可發現潛體受到自由液面的影響下，阻力有明顯上升的趨勢，而 MS2 塗料的減阻效果亦受到影響。在圖 9 中可明顯看到 MS2 塗料受自由液面效應影響下，在流場流速 0.5m/s 至 1.9m/s 範圍內 ($Re=0.66 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^6$)，皆有呈現減阻效能，但是其減阻效果低於不受自由液面影響狀況之成果，由圖 9 中可看到當潛體受自由液面效應影響時，由於在潛體上方產生伯努利丘(Bernoulli Hump)效應，使得阻力會有明顯上升趨勢，這會讓塗佈 MS2 塗料所產生之減阻效能有明顯下降的現象，此乃是因為 MS2 塗料僅可降低潛體模型表面摩擦阻力，並無法降低伯努利丘效應所形成之剩餘阻力，惟圖 9 中，仍可發現在該實驗流速範圍內，在臨近自由液面狀況下，MS2 高分子塗料仍有一定的減阻成果。

五、結論

由實驗結果可得知，親水性高分子塗料在高速時大多能有良好的減阻表現(如：HK 及 SS 塗料)，但因塗料配方的不同，發現親水性高分子塗料在高速時易有剝蝕及堆疊之現象，而影響減阻效果；而疏水性高分子塗料在高速流場實驗中，減阻效果並不顯著，只有 MS2 塗料經配方改良過後，能有優異的減阻表現，減阻效果平均在 40% 左右，在所有測試塗料中，屬最佳之塗料。

實驗中發現 HK、KC、QC 及 SS 塗料在一次塗佈後的數次實驗中，阻力值有平移上升的現象，同時發現實驗結束後，觀察 QC 及 SS 塗料塗層表面，有高分子塗料剝蝕的現象，其中，只有 KC 塗料為疏水性塗料，其餘皆為親水性塗料，此表示親水性塗料較疏水性塗料容易耗損，但於短時間內仍有相當的減阻效果，所以較適用在短時程、施工簡易之載具或不計成本之運動載具，例如：水下潛體、高速快艇等之減阻。

高分子減阻塗料未來的發展，應考量塗料在各種流場速度下使用之適用性及持久性，或同時與其他降低表面摩擦阻力之方法搭配，以達到更可靠且有效的減阻方式。

符號說明

- A_w 潛體浸水面積(Wetted area), [m²]
- C_t 阻力係數, $C_t = R_t / 0.5\rho V^2 A_w$
- d 潛體模型之直徑, [m]
- F_D 阻力值, [g]
- H 自由液面至潛體模型中心線之浸水深度, [m]
- L 潛體模型之長度, [m]
- Re 雷諾數, $Re = VL/\nu$

R_t 彈體淨阻力值, [g]
 V 流場平均速度, [m/sec]
 μ 絕對黏度, [N-sec/m²]
 ρ 密度, [kg/m³]
 ν 運動黏性, [m²/sec]
 σ 標準偏差量

參考文獻

- [1] 吳聖儒, 莊佳璋, 潛體表面塗裝對減阻效應之量測與分析, 國推會合作研究計畫成果報告, 民國八十八年六月三十日。
- [2] Irving H. S., Mechanics of Fluids, Second Edition, Chap. 10, pp. 488, Central Book Company, Taipei, Taiwan 1983.
- [3] Thurston, S. and Jones, R. D. "Experimental Model Studies of Non-Newtonian Soluble Coatings for Drag Reduction," *Journal of Aircraft*, Vol. 2, No.1, pp35-48, Apr. 1965.
- [4] Ou, J., Perot, B. & Rothstein, J. P. "Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces," *Phys. Fluids*, Vol. 16, pp. 4635-4643. 2004.
- [5] K. Koeltzsch, Y. Qi, R. S. Brodkey, and J. L. Zakin "Drag reduction using surfactants in a rotating cylinder geometry," *Experiments in Fluids* Vol. 34, No.4, pp.515-530, April 2003.
- [6] Reed, Jason C. and Bushnell, Dennis M., "Polymer/Riblet Combination for Hydrodynamic Skin Friction Reduction," United States Patent, Patent Number: US5445095, Aug. 1995.
- [7] Hoyt, J. W. and Fabula, A. G., "Effect of Polymer Additives on Fluid Friction, ONR-Shipmodelltaken," Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen, Norway, September, 12, 1964.
- [8] 劉士榮, 高分子流變學, 第一章, 1-33 頁, 中華民國八十五年五月, 洪秀婉出版, 台北市, ISBN 957-97087-8-9。
- [9] Holman, J. P., Experimental Methods for Engineers, 7th Edition, Chap. 13, pp. 99-106, McGraw-Hill Book Company, New York, 2001.