

# 海軍艦艇運用複合纖維材料之設計發展

吳真一、單揚

提 要：

- 一、現代軍艦的結構設計與建造，由於各國複合纖維材料之技術提升與複合纖維材料本身之優勢，目前世界先進國家對於艦艇結構材料選用與建造上，已經持續增加複合纖維材料的運用範圍。
- 二、實際在艦艇結構設計的運用上，是依據各船艦艇任務的特性與需求，經過合適的材料與結構計算評估，得到各船型艦艇最適切與最大效益之結構設計。
- 三、本文以簡介的方式說明複合纖維材料之特性、種類與適用範圍說明，再介紹複合材結構設計程序步驟與方法，接著探討國內複合材之結構設計與施工能量後，延伸探討我國海軍艦艇可運用複合纖維材料之範圍，說明如何採用先進之複合纖維材料技術得到結構輕量化，並提高結構材料之運用性及性能，提供未來造艦設計之參考。

關鍵詞：結構設計、複合纖維材料

## 壹、前言

海軍艦艇的設計發展，結構設計與重量分布是整個載台設計之主要環節，目前除了獵雷艦之任務特性，其結構設計為複合纖維材料外，其他艦艇是採用鋼材及鋁合金材質為主，目前在複合材之運用比率偏低，因此增加對複合纖維材料之認識與運用是提升艦艇結構設計能量的一環。

現代各國之海軍艦艇在複合纖維材料應用已經趨向多樣化，因為該結構形成之積層材料强度高、重量輕、降低維護成本及對海洋環境具耐腐蝕之主要特性，加上先進材料

性能的提升，拓展了複合纖維材料的使用面，本文將探討複合纖維材料結構的設計的計算流程，並探討未來海軍艦艇的應用進展。目前各先進國家之複合纖維材料的應用非常廣泛，主要原因為可提高運用性能(如提高匿蹤性、穩定性和負載載重)，並可同時降低艦艇生命週期成本(如降低維護成本和油耗)。

本文將介紹採用複合纖維材料代替傳統造船材料如鋼和鋁合金的優缺點及其特性，探討新型複合纖維材料結構件在現階段的發展，並介紹應用這些結構件的海軍艦艇類型。另外目前複合纖維材料結構件在施工工法

與材料性能上還不斷的在進步，未來運用在海事船舶及其他領域將會有更大之空間與發展。

探討國外海軍複合纖維材料的應用方面，目前國外水面艦之運用，包括大型巡邏艇、獵雷艦和輕型巡洋艦，而大型戰艦(護衛艦、驅逐艦)的運用於上部結構、桅杆系統、艦艙壁、甲板…等，其他裝備運用為螺旋槳、推進軸及舵…等。同時目前在潛艦結構方面包括帆罩、外部甲板、聲納罩…等，在裝備運用方面，有螺旋槳、管道及升降桅系統…等。

## 貳、船用複合纖維材料之結構應用與特性

應用於船體結構之設計，除以纖維疊合而成之積層單板結構外，主要還有三明治結構及搭配結構樑之複合結構，兩者是屬於複合纖維材料分類中之積層型複合纖維材料，由剛性與強度均較高之面材與芯材組成，構

造用芯材大多採用密度較低者，以增加強度並同時減輕重量。另外一般金屬延展性較佳，可以變形到相當大的程度才會斷裂，然而複合纖維材料變形量不大，是其主要缺點之一。以下為複合纖維材料之特性：

### 一、比强度高、輕量化

一般結構材會希望材料能兼具剛性與強度，然依材料應用範圍不同，結構特性會有不同之需求。以船用材料而言，金屬材料如鋼(密度 $7.85\text{g/cm}^3$ )，強度與剛性均大，其重量亦大，對結構輕量化有負面之影響。複合纖維材料比強度8.23，較軟鋼5.2為高<sup>1</sup>，因此考量以比強度與比剛性做為量度輕量化材料之程度，故未來艦艇設計若考量輕量化，可利用複合纖維材料之特性作結構設計之評估。

尤其於上層結構輕量化方面，採用複合纖維材料可使船舶重心降低並提高穩度，這是使各國大型艦艇之上層結構想要採用複合纖維材料的重要原因之一(可參閱附表整理

附表

特性 \ 種類	一般軟鋼	鋁合金	玻璃纖維	碳纖維	克維拉纖維
密度( $\text{g/cm}^3$ )	7.85	2.6~2.8	2.4~2.8	1.6~2.18	1.44
抗拉強度(GPa)	0.4~0.49	0.085~0.145	3~4.6	3.6~4.9	3.4
重量比 (以鋼材為1)	1	約0.33~0.35	約0.31	約0.2	約0.18
成本(每公斤)	約15元	約50元	約150元	約640~960元	約800元

資料來源：1.備註：表列之重量比為單位密度重量之比重換算，由於複合纖維材料有多種組合方式，故未進一步由積層板強度特性<sup>2</sup>與其他材料作比較，另外由於複合纖維之比強度大於一般鋼材，故在作結構設計時，將減少設計厚度，加上現代之複材施工減輕重量技術之提升，實際之複合纖維材相對鋼材或鋁材之重量比將酌予調整。

2.作者研究整理。

註1：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁10。

註2：臺灣造船工會，〈輔導建立FRP船舶施工基準之研究〉，1989年6月，頁38。

之重量比)，另外在成本方面，由於實際完整成本應包含各種材料成本、施工成本及相關管理成本…等，因施工技術牽涉範圍太廣，故僅以纖維材料與金屬材料之成本作初步比較，請參閱附表。

## 二、彈性係數低

楊氏彈性係數與材料產生單位應變時所需要之應力相關，複合纖維材料結構雖有輕量化的優勢，但變形量過大將會對材料產生破壞，故需以結構材補強<sup>3</sup>，因此船型過長將更加重重量，故大型艦艇船殼結構不適用複合纖維材料進行設計。

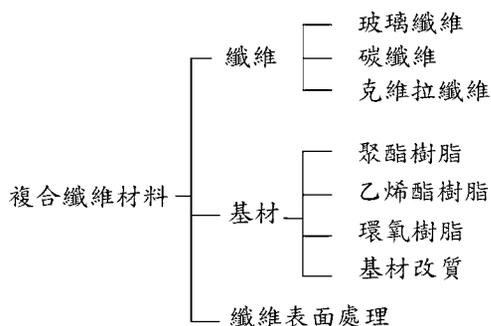
## 三、施工特性

複合纖維材料是由樹脂、纖維及芯材組成，在使纖維發揮材料特性之前，需將其在樹脂中含浸。在使用手積層工法實際積層時，樹脂含量多寡仰賴人工與作業環境甚重，往往會造成成品厚度不穩定，進而影響材料特性。但由於目前複合纖維材料技術與設備不斷在提升，加上品質管控能量逐漸改善，且目前國內大型複合纖維材料船廠，紛紛引進真空注入成型技術並提升作業環境控制能力，因此除大幅提升成品強度外，經調查真空注入成型工法與手積層工法相比，真空注入成型工法之成品可減輕約20%之重量，提高了運用複合纖維材料減輕重量之效益。

## 參、複合纖維材料種類與適用範圍

複合纖維材料是由纖維、基材及纖維表面處理三者組成，以下介紹其種類以及適用範圍。

### 一、纖維



常見的纖維有玻璃纖維、碳纖維、克維拉纖維等，其提供複合纖維材料強度及彈性係數，使複合纖維材料承受應力時不至於彎曲或被破壞。主要功能為承受負載、限制微裂紋延伸、提高材料的強度、剛性，並能改善材料抗疲勞、抗潛變之性能。

#### (一) 玻璃纖維

玻璃纖維具備低成本、壓縮强度高、衝擊强度高之優點，但相較其他纖維比重較大，抗拉強度、彈性較差、耐磨性小。玻璃纖維可以依需求製成不同形式的排列，稱為補強型式，常見的如切股氈、編紗束及針織螺紋氈。切股氈是將單絲纖維徑之紗股，切成約5公分長度後，不定向均勻的分佈於平面上，以黏著劑結合而成之氈狀物，其樹脂含量可較高、水密性較佳、含浸及積層間結合良好，積層物之表面效果良好(如圖一)。

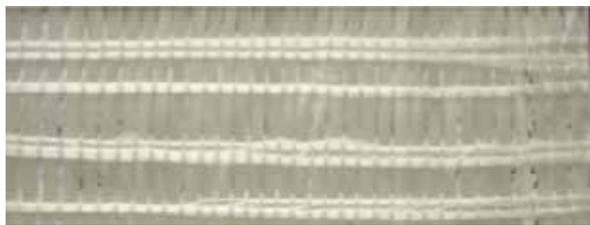
編紗束是將紗束以所需之織法織成布狀。依其織法可分成標準之平織、斜紋織、緞織，及其他數種不同之織法，其積層物抗拉強度及耐衝擊性特大，可與切股氈並用生產大體積且須高強度、高厚度、較均勻之船體、構件等，並可利用纏繞法，生產大口徑管

註3：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁11。



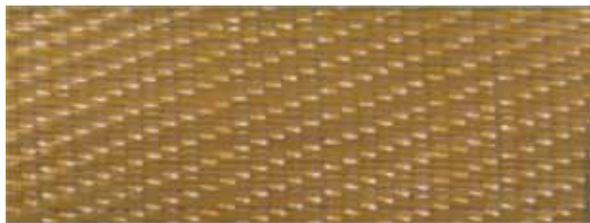
圖一 一切股氈

資料來源：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁5。



圖三 針織螺紋氈

資料來源：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁7。



圖五 克維拉纖維

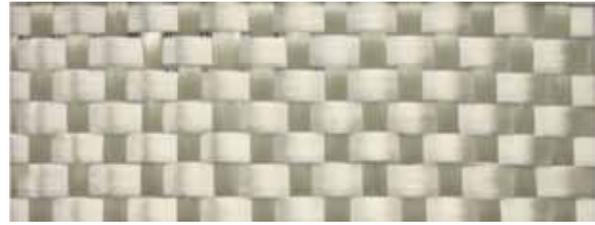
資料來源：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁6。

道(如圖二)。

針織纖維布乃由單向之長纖維股以針織的方式組成針織螺紋氈，其力學特性較佳、施工時樹脂用量較少。另依照針織型式又可分為單軸與多軸(Multi-Axial)螺紋纖維(如圖三)。

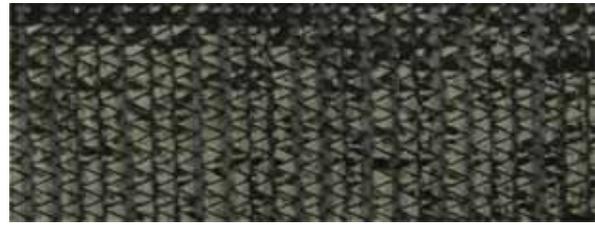
### (二) 碳纖維

碳纖維具備高硬度、高強度、重量輕、



圖二 平織之編紗束

資料來源：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁6。



圖四 碳纖維

資料來源：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁4。

高耐化學性，耐高溫 and 較低的熱膨脹係數。碳纖維能與其他材料結合成複合纖維材料，可大幅減輕重量並運用在船舶、航空太空、軍事等，但碳纖維成本較高，是在成本考量上之缺點(如圖四)。

### (三) 克維拉纖維

克維拉纖維耐高溫、抗拉強度與碳纖維相同、強硬度比鋼鐵高5倍，而質量比玻璃纖維還輕，但壓縮強度相對而言較差。它的用途除防彈背心外，常與玻璃纖維混合編織應用於船舶工業(如圖五)。

### 二、基材

常見的基材為聚酯樹脂、乙烯樹脂及環氧樹脂等，樹脂在複合纖維材料的用途為固定纖維位置、保護纖維避免暴露於外界中以及傳遞力量給纖維，另可藉由基材改質強化

樹脂之物理及化學特性。

### (一) 聚酯樹脂

聚酯樹脂分為飽和聚酯樹脂及不飽和聚酯樹脂，飽和聚酯樹脂常用於塗料上，不飽和聚酯樹脂常用於複合纖維材料上。不飽和聚酯樹脂具有較高的拉伸、彎曲、壓縮等強度，工藝性能十分優良，另外價格低廉適合大型複合纖維材料製品，缺點為固化時收縮率大、不耐酸鹼及容易腐蝕、保存期限較短<sup>4</sup>。

### (二) 乙烯酯樹脂

乙烯樹脂韌性較高且回復性較聚酯樹脂高，此外，乙烯酯分子所含之酯基較少，所以乙烯酯樹脂之耐水性及抗化學特性較聚脂樹脂為佳，故常應用在船體與水面接觸之區域<sup>5</sup>。

### (三) 環氧樹脂

環氧樹脂進行固化時需添加固化劑，藉由選用之固化劑，環氧樹脂可在0~100°C內進行固化作用。固化後的環氧樹脂具備硬度高、韌性佳之特性，對於金屬材料如鋁、鋼、鐵等及非金屬材料如玻璃、木材、混凝土等均有優異的黏接強度。環氧樹脂可與玻璃纖維及碳纖維搭配成具有極高抗拉強度之複合纖維材料，其收縮性低、耐酸、鹼、耐海水、介電性能良好，用途十分廣泛<sup>6</sup>。

### (四) 基材改質

基材改質是將基材中添加改質劑，以改變基材的物理及化學性質，使其能更加廣泛地運用。如環氧樹脂雖具備優良的機械強度

、耐熱及低收縮率，且與各種金屬、非金屬有良好的黏著效果，然而耐衝擊性能為其缺陷，無法全面滿足需求，故於環氧樹脂中滲入改質劑，如液態橡膠、熱塑性高分子等，以增加環氧樹脂韌性<sup>7</sup>。

### 三、纖維表面處理

纖維表面處理是利用表面處理劑對纖維表面進行塗覆，以增強纖維與基材之間的黏合，並保護纖維不受環境侵蝕，進而提高複合纖維材料強度，如表面膠殼塗佈、船底漆、PU漆等技術。

## 肆、複合纖維材料選擇與結構設計程序介紹

### 一、結構計算範圍說明

#### (一) 船體結構

主要有船體結構、船側結構、甲板、隔艙壁、上層結構等，而每個部位又分成板與補強材兩種主要構件，板依照積層組合可分為積層單板與三明治板，補強材則視佈設方向分為縱向材及橫向材兩種。

#### (二) 配件(局部)結構

主要有舵翼板、桅杆、大軸、俥葉、基座…等。

### 二、利用複合纖維材料進行船舶結構設計之相關流程進行如下

#### (一) 確認艦艇任務需求

首先，各型艦艇任務及船型大小是決定可否運用複合纖維材料做為結構材之起始條

註4：百度百科，wapbaike.baidu.com。

註5：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁3。

註6：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁4。

註7：張聖雄，〈醚醯胺化聚脂肪二酸增韌改質環氧樹脂之研究〉，2014年7月，頁18。

件，如確認執行任務時為近岸或是遠洋、是否需要抗爆震、低磁性、匿蹤等特殊需求；再來決定所要裝設結構負荷較大之裝備如大型武器、火炮、載具等，以計算結構最大負荷。

接著依照任務特性規劃區域、重量等需求，選擇合適規格與特性之複合纖維材料，例如為提升艦艇穩度及減輕重量，需降低重心，較好的方式為減輕上層結構重量，故可考慮運用碳纖維搭配耐海腐蝕性能較佳之聚乙烯樹脂做為結構設計之複合纖維材料，另外由於上層結構可能遭受來犯之敵砲火攻勢，需有良好之耐火性能，可添加耐火樹脂進行基材改質，以達到任務需求。

(二) 結構負荷計算與法規驗證

結構負荷計算之目的在於確認所設計之結構尺寸與積層能否通過法規之要求。船體於海上航行時，結構會承受各種形式之負荷，在負荷作用下，結構會因遭受應力而變形，當結構承受應力未超出容許應力，不會因負荷產生永久變形及破壞，方可認定該結構設計符合要求。

在計算流程中，首先要計算負荷，再將此負荷施加到結構材中，如各層甲板、船殼、上層甲板屋件、附屬構件(舵板、砲座…)等，經由結構負荷計算可得應力與變形量，再與複合纖維材料之設計值比較即可判斷該設計是否合法規需求。

另外所計算出之負荷會乘上一安全係數，以求複合纖維材料之設計值可確實大於容許值，以避免實際應用時遭遇突發狀況而產

生問題。

如下式以ISO法規(ISO/DIS 12215. 5. 2)船底積層單板尺寸計算為例，以板厚是否符合法規之要求做判斷，因此設計板厚需同時滿足強度與變形之需求，設計板厚需比較下列二式計算之結果，須滿足超過較大者為設計基準<sup>8</sup>。

$$t_1 = b \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{P \cdot k_2}{1000 \cdot \sigma_d}} \quad (\text{mm}) \quad t_1 \text{ 為符合材料彎曲強度之最小板厚}$$

$$t_2 = b \cdot f_k \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot k_3}{1000 \cdot k_1 \cdot E_f}} \quad (\text{mm}) \quad t_2 \text{ 為符合變形需求之最小板厚}$$

例如以法規之要求計算檢核船底板位置BP1及BP2，依照相關之公式、因子及參數計算得到t1及t2之厚度，並與結構積層設計厚度作比較，判斷是否符合該法規之設計需求。

下列圖表簡列為一開始輸入船舶之基本參數及所要檢核位置參數<sup>9</sup>。

1.Length of Hull	LH	21.000	(m)
2.Length of Waterline	LWL	19.520	(m)
3.Waterline Beam	BWL	5.620	(m)
4.Chine Beam ( at LCG or 0.4LWL)	BC	5.620	(m)
5.Draft of Canoe Body ( at LCG or 0.4LWL)	TC	1.060	(m)
6.Displacement Mass	Δ	40500	(kg)
7.Maximum Speed	V	24.0	(kts)
8.Running Trim at Maximum Speed	r	4.000	(deg)
9.Deadrise Angle At 0.4LWL	β	16	(deg)
10.Acceleration at LCG	acg	1.000	g0
11.Speed Length Ratio(V/Lw*0.5)		5.432	

所要計算之板如下：

部位編號	距船艏距離 (m)	傾角 (deg.)	構件寬度 (mm)	構件長度 (mm)
BP1	9.4	16	480	900
BP2	17.3	16	460	1022

下表為要檢核設計之積層厚度，組合板厚為：

$$t = 0.701 \times 3 + 1.309 \times 5 = 9.053 \text{ mm}$$

註8：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁41。  
 註9：聯合船舶設計發展中心 遊艇漁船組，〈船用複合材料簡介與結構計算〉，2006年9月，頁46。

其中0.701為M300毯之積層厚度，1.309為LT800/M225合成毯之積層厚度。

積層為 M300\*3+LT800/M225\*5

Item	Unit Weight (g/m <sup>2</sup> )	Fiber Content (%)	One ply Thickness (mm)	Ultimate Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Flexural Modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Flexural Strength (N/mm <sup>2</sup> )
M300	300	30	0.701	85.0	5206.0	152.0
LT800/M225	1035	50	1.390	220.0	10000.0	240.0

另外經調查目前FRP船廠已採用各型法規如ISO、ABS、BV、DNV、CE...等之法規要求，經由計算程式運用於結構計算驗證與設計依據之能量。惟如將結構設計運用於艦艇，尚須考量任務特性之需求作進一步之溝通，所得到之結構設計結果才能達到艦艇任務之目的。

## 伍、國內複合纖維材料之結構設計與施工能量

全球利用複合纖維材料製造船舶產業已有五十年以上之歷史，而早期臺灣FRP船廠非常蓬勃，目前主要以製造漁船、遊艇及小型公務船為主，另外複合纖維材料之戰系裝備以中科院發展為主。為迎合未來海軍任務需求，如輕量化之艦艇、高速、載台效能之提升，並達到降低重心、提高穩度等效果考量下，可藉由評估國內船廠之複合纖維材料結構設計及施工能量，並分析與其技術合作之效益，除可增加我國對複合纖維材料運用之廣度，更可提升國內造船產業參與國防事業的能量。

### 一、結構設計

在結構設計方面，經調查中科院、FRP船廠、船舶中心及部分開業之造船技師事務所，應都具備相關結構計算與設計能力，

大部分船廠也具備計算軟體與設計人才，並擁有其主要製造產品特性之專業技術，例如FRP船廠結構設計以其銷售之船舶為主，中科院以其戰系裝備為主，各自具備能量，且具有實際複材結構設計與施工之回饋能量。

### 二、施工能量

#### (一) 積層能量

在各型複合纖維材料的使用與取得方面，目前臺灣船廠已具備使用各型纖維之經驗，惟基材方面之基材改質經驗較為缺乏；在材料取得方面，臺灣已有生產碳纖維之能量，惟軍事武器用之特殊碳纖維取得，需待進一步確認。

在施工能量方面，現今FRP船廠大多採手積層法及真空注入成型法兩種，並交互運用。臺灣船廠真空注入成型技術，已可一體成型完成48公尺(長及寬)成品之能量，而手工積層法雖然無長度限制，但礙於廠房容積與作業環境，此點將是未來品質改善提升指標之一。

在作業環境管控及施工品質控制方面，已具備作業環境的溫溼度偵測與控制能力，但對作業環境粉塵或其他施工汙染之防治，目前是可進一步提升之目標；施工品質控管方面，經調查大部分FRP船廠，都具備自動切毯機、樹脂硬化劑自動混和塗佈機、抽真空設備...等，大量採用自動控制機械以提高品質控管，減少人為疏失，另外某些船廠更以光源檢測技術做成品異常檢查，提高品質管控(如圖六)。

#### (二) 修補接合與造模能量

FRP成品的修補與接合是FRP船廠必備之



圖六 真空注入成型法施工狀況

資料來源：財政部國稅局，〈98年度遊艇業原物料耗用通常水準調查報告〉，頁36。

能量，尤其以遊艇生產為例，客製化的產品必須應付多變的船型及新穎流線式的外型，因此各層甲板的增大及縮小或改變造型，都須做切割改造與修補接合工程，已具備線型放樣、製作簡易模具、一次模具的搭配複合纖維施工與接合能量。

纖維表面處理之修補整順方面，多年來我國FRP船舶造船能量，無論是漁船、公務船或遊艇製造，對於纖維表面之接合、整順及塗佈，都具備足夠的施工能量與技術，表面美觀與耐用更是遊艇產業之基本要求，因此表面處理之技術已具備能量，惟待觀察的是艦艇任務之需求，需依特性改變基材及表面塗佈塗料，將影響施工技術與環境條件，這點是未來應進一步發展之能量整合。

造模能量方面，船模製作之工藝在FRP船舶運用上，是FRP船舶早期必備的能量，主要目的是為了節省成本及維持船型性能，船模可說是FRP船廠的生財工具，一套船模在有訂單的狀況下，可一直快速生產成品，基本上大型FRP船廠都具備製造FRP模具能量。在造模方法上由於CNC技術的應用，縮短了造模的時程，近年來由於客製化的需求

更利用機械手臂與人造木材材料，製作僅可重複使用幾次或僅用一次的簡易模具，加快製模之時程與節省製模成本，提高客製化彈性，迎合世界各國客戶之需求。

另外，部分FRP船廠已具備複合纖維材料與鋁合金、鋼材之接合經驗，未來應進一步查證及確認其異材接合技術之成熟度。

## 陸、海軍艦艇可運用複合纖維材料之概況

### 一、國外艦艇複合纖維材料運用之概況

對於水面武器來說，複合纖維材料在軍艦結構之應用上越來越受到軍方的重視，由其是玻璃複合纖維材料、碳複合纖維材料，由於其質量輕、剛性高，相較於鋼材而且可以省下不少結構重量，進而提高船速、穩度及減少油耗成本。

#### (一)瑞典

目前採用複合纖維材料所製造最大的海軍艦艇是瑞典的輕巡洋艦VISBY<sup>10</sup>，該艦長72公尺、寬10.4公尺、滿載排水量720噸，全船採用碳纖維及玻璃纖維之三明治結構設計，雖然碳纖維價格為玻璃纖維的五倍以上，但VISBY之設計將全船重量減輕30%，且製造成本並未大幅上升；在上層結構的部分是採用酚樹脂之基材，可符合耐燃防火需求。該艦重量的減輕進而將性能大幅提高，使其更能執行巡洋、戰鬥、掃布雷及反潛作戰等功能。瑞典海軍認為採用複合纖維材料進行設計，比起採用一般鋼材、鋁合金等其他混合材料，更能滿足軍方對質量輕、強度高、

註10：莊達平、王正煥，〈武器用結構複合材料介紹〉，《新新季刊》，第42卷，第2期，2014年4月，頁31。



圖七 瑞典VISBY輕巡洋艦

資料來源：武漢理工大學複材結構課題組，〈應用於海軍艦艇和潛艇的先進複合材料結構綜述〉，〈複合材料結構〉，第53期，2001年。



圖八 美國DDG-1000之IDHA

資料來源：軍武狂人夢，www.mdc.idv.tw/mdc/navy/other-navy/indonesia-corvette.htm。



圖九 義大利P-493指揮官級巡防艦

資料來源：Jon Rosamond，〈NALYSIS - Winds of change? Energy warriors steer course to green fleets〉，〈Jane's Navy International〉，2015年4月。

耐水下衝擊、低雷達截面積(RCS)及磁性之需求(如圖七)<sup>11</sup>。

### (二)美國

美海軍在二次大戰結束後，開始將複合纖維材料應用於小型運輸艇上，實際運用時發現其強度高、耐用且易於維修，因此，複合纖維材料在美海軍應用大幅增加。近期美國於2008年將碳纖維、乙炔基樹脂以三明治結構及真空輔助樹脂轉注成型工法製成 Zumwalt Class 導彈驅逐艦(DDG-1000)之複合纖維材料上層結構IDHA(Integrated Composite Deckhouse and Assembly)。IDHA是一個一體成型的模組化結構，具備低雷達截面積(RCS)、重量輕、強度高優點，且內部各艙間因不同雷達及天線裝備需要不同頻率雷達波穿透功能，還可選用具備擇頻效果之複合纖維材料，以滿足其將戰系裝備置於上層結構裡以進行匿蹤之設計<sup>12</sup>(如圖八)。

### (三)義大利及其他國家

義大利的指揮官級巡防艦(Commandante class)前三艘艦艇艦體及上層結構採用鋼製，而於2002年下水之第四艘艦(Commandante Foscari, P-493)其上層結構、桅杆及伸縮式直升機機庫採用高強度玻璃纖維，使整體的結構重量減輕了40%<sup>13</sup>(如圖九)。

印尼的X3K巡邏艇Klewang於2012年下水，該艇採用高速穿浪型三體船之設計，船體部分採用碳纖維搭配乙炔基樹脂複合纖維材料，部分材料採用木材，艦長62.5公尺，船重僅130噸，船速可達35節以上，相較於同尺寸之鋁合金船體，結構重量省下30%<sup>14</sup>。然而該艦於同年9月28日毀於火災，暴露出

註11：武漢理工大學複材結構課題組，〈應用於海軍艦艇和潛艇的先進複合材料結構綜述〉，〈複合材料結構〉，第53期，2001年。

註12：孫士璋，〈複合材料在艦船上之應用〉，《新新季刊》，第42卷，第2期，2014年4月，頁59。

註13：軍武狂人夢，www.mdc.idv.tw/mdc/navy/othernavy/indonesia-corvette.htm。

註14：孫士璋，〈複合材料在艦船上之應用〉，《新新季刊》，第42卷，第2期，2014年4月，頁53。



圖十 印尼X3K巡邏艇Klewang

資料來源：Kelvin Wong，〈IndoDefence 2014: PT Lundin details evolved carbon composite technology for its naval trimarans〉，《Jane's International Defence Review》，2014年11月。

採用一般複合纖維材料在高溫燃燒下，結構容易損毀，因此在結構設計與材料之選用，應提升纖維及基材之耐火、耐高溫能力，避免採用助燃之材料(如木材)，以提升抑制災害擴散之能量(如圖十)。

掃獵雷艦因掃雷任務之需求，船體須具備低磁性、抗衝擊之材料，早期多採用木殼船，維修保養不易。自英國於1970年代採用玻璃複合纖維材料建造獵雷艦後，各個國家如義大利、法國、比利時…等國家均效法採用玻璃纖維建造，可見複合纖維材料應用於軍艦上已十分廣泛。

## 二、我國海軍目前已採用之現況

### (一) 康定級巡防艦

本軍於1996年自法國接回6艘康定級巡防艦，是法國初次採用複合纖維材料製造上層結構之大型軍艦<sup>15</sup>。本型艦自塔型桅杆、上層結構、直升機機庫等均是三明治結構，具備質量輕、價格便宜等優點。

### (二) 永靖級獵雷艦

本軍於2012年自美國接艦的永靖級獵雷艦，是美國以義大利拉瑞奇級為原始設計並加以改良製造之鶚級獵雷艦。獵雷艦因依任務需求須具備低磁性、抗衝擊之特性<sup>16</sup>。另外，近期由慶富造船公司得標之造艦專案，將引進歐洲使用複合纖維材料製作獵雷艦之核心技術至臺灣，提升臺灣產業以複合纖維材料運用於海軍艦艇之能量。

### (三) 魚雷、水雷

國家中山科學研究院致力於複合纖維材料之研究已數十餘年，近期也將複合纖維材料應用於水下武器中。水下武器因需具備防海水腐蝕、良好的介電性能及輕量化之需求，主結構及相關構件亦多採用複合纖維材料。由中科院五所複材電能組設計之魚雷，外殼結構均採用玻璃複合纖維材料，鰭片則採用碳複合纖維材料，以達輕量化之需求；水雷之主結構殼亦由該組以玻璃複合纖維材料進行研製，殼體可耐極大水壓，顯示中科院具備對複合纖維材料運用於武器裝備之技術<sup>17</sup>。

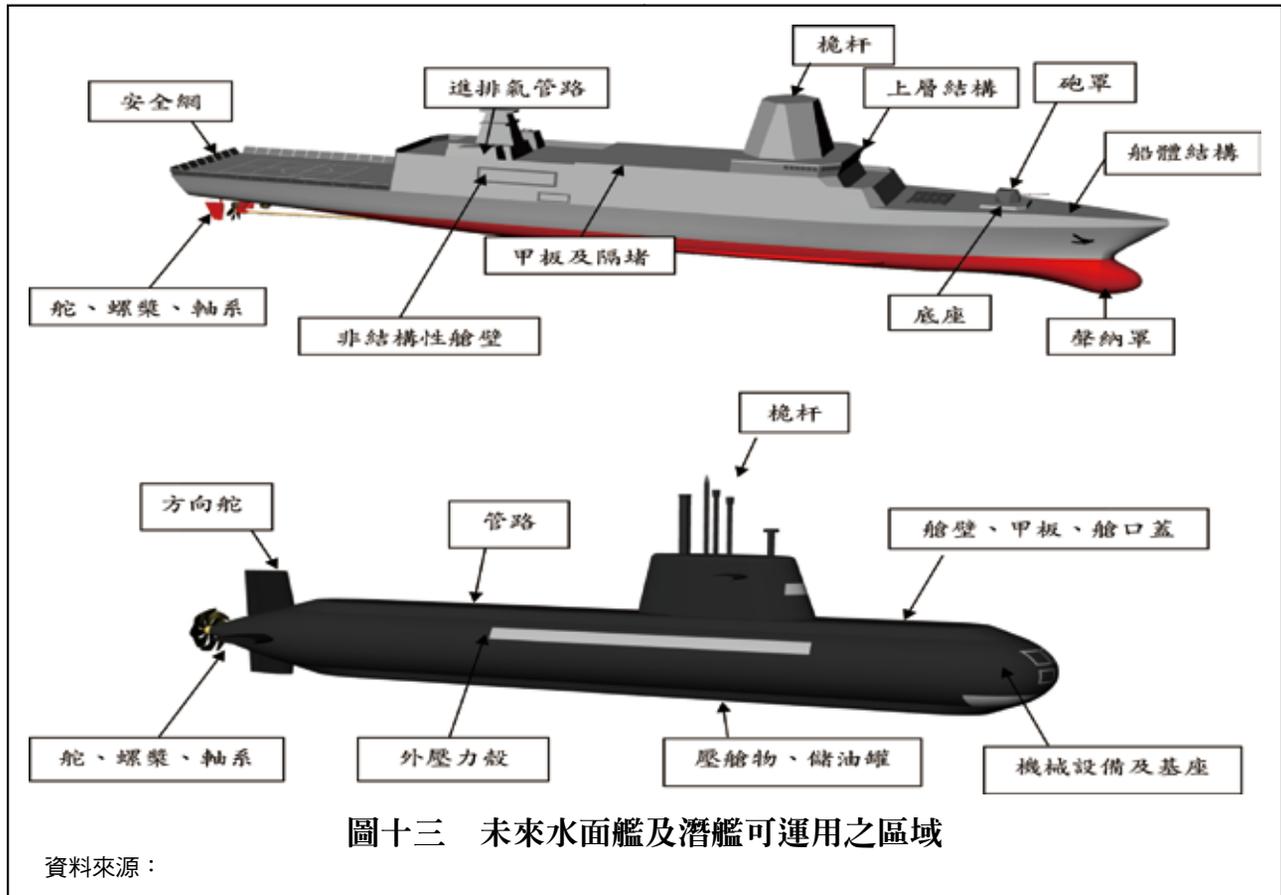
## 三、未來艦艇可運用之區域介紹

複合纖維材料可藉由不同纖維及基材之搭配應用於不同環境，如碳纖維、玻璃纖維及巴沙木芯材之三明治結構應用於上層結構中，可減少結構重量，進而減少耗油量，使航程增加；應用於封閉式桅杆中，如美國萊福德號驅逐艦之桅杆上半部採用擇頻複材，是以內外結構層板夾三層發泡芯材及二層擇頻面板製成，下半部採用內外結構層板夾碳

註15：武漢理工大學複材結構課題組，〈應用於海軍艦艇和潛艇的先進複合材料結構綜述〉，《複合材料結構》，第53期，2001年。

註16：軍武狂人夢，www.mdc.idv.tw/mdc/navy/usanavy/MHC51.htm。

註17：莊達平、王正煥，〈武器用結構複合材料介紹〉，《新新季刊》，第42卷，第2期，2014年4月，頁33。



纖維反射層板及巴沙木芯材製成，除了能減重之外還提供了良好的匿蹤效果(如圖十一)<sup>18</sup>。

亦可運用於各式護罩，包括砲罩、聲納



罩、潛艇帆罩、錐形尾罩、前端穹型護罩等，如美國維吉尼亞級潛艦採用複合纖維材料搭配環氧樹脂以真空注入法製作之前端穹型護罩，提供了良好的耐腐蝕、耐海水及良好

註18：孫士璋，〈複合材料在艦船上之應用〉，《新新季刊》，第42卷，第2期，2014年4月，頁55。

介電性能(如圖十二)<sup>19</sup>。

甚至是螺槳、軸系、舵、內部管路等，皆可運用複合纖維材料，如傳統金屬大軸容易遭受海水腐蝕，且其重量重的關係，震動時的噪音大，若以碳複合纖維材料製成大軸，重量僅為原金屬大軸之20%，且具有無磁性低震動等優點<sup>20</sup>。

經由上述國內外資料之蒐集，在整合與技術研發的精進的前提下，未來將可運用複合纖維材料之艦艇區域，初步整理(如圖十三)所示。

## 柒、結語與建議

現代艦艇之複合纖維材料運用範圍越來越廣，但由於其材料強度特性限制，不適用於中大型艦艇之主結構，僅適用於局部及上部結構，而小型及特殊需求之艦艇，則可搭

配適合之複合纖維材料結構進行設計。

我國目前船舶複合纖維材料之設計與施工技術發展，主要能量以中科院複材所及FRP船廠為主，中科院複材所之能量主要為戰鬥系統與複合式桅杆，船廠方面主要為生產船舶整體主構件及構件組裝能量，因此整合海軍需求及我國既有之能量，參與對複合纖維材料與結構特性之研究與發展，將提升利用複合纖維材料之優點於適合艦艇，提高艦艇結構設計與材料運用之彈性，達到現代艦艇輕量化之目標。

### 作者簡介：

吳真一先生，國立高雄海洋科技大學輪機工程研究所，現服務於海軍造船發展中心。單揚中尉，國防大學理工學院動力暨系統工程學系造船組102年班，現就讀於國防大學管理學院研究所碩士班。

註19：莊達平、王正煥，〈武器用結構複合材料介紹〉，《新新季刊》，第42卷，第2期，2014年4月，頁32。

註20：孫士璋，〈複合材料在艦船上之應用〉，《新新季刊》，第42卷，第2期，2014年4月，頁61。

## 老軍艦的故事

### 玉泉軍艦 AOG-303



玉泉軍艦係由美國Todd-Galveston造船廠承製，公元1944年1月10日下水，美軍命名為Wautanga，編號為AOG-22，為民國37年5月我國海軍赴菲律賓蘇比克灣接收的34艘美艦之一，成軍後命名為「玉泉」軍艦，編號303。隸屬海防第一艦隊，擔任油料及物資運送任務。民國41年9月又改隸後勤艦隊。該艦由於艦體老舊，機件損壞，於民國48年12月1日除役。(取材自老軍艦的故事)

### 韓江軍艦 PC-124

韓江軍艦係由美國為因應二次世界大戰的需要而委托George Lawly & Sons Co.公司所建造之巡邏艦，1943年在美國麻州的 Weponset下水完工，並於當年成軍服勤，當時命名為「Vandalia」，編號PC-1175，擔任近岸巡邏任務。

民國46年7月15日美國政府依據中美共同防禦協定，於美國西雅圖將該艦及另外4艘同型艦一併移交我國，我海軍於接收該艦後，立即成軍，命名為「韓江」軍艦，編號PC-124，隸屬巡防艦隊，開始正式服勤，擔任臺海巡弋、護航及外島駐防等任務，另韓江軍艦服役期間曾參加過多次重要戰役，八二三砲戰期間，該艦曾多次護送運補船團至金門運補，以執行「閃電計畫」及「轟雷計畫」，每次均能冒著中共密集的砲火，突破封鎖，達成任務。該艦於民國61年1月1日，在海軍服役15年後，由於艦體及機件均老舊，維修困難，且大部份裝備已不合現代戰爭需求，奉命除役。(取材自老軍艦的故事)

