

## 艦用複合材料的應用展望

楊維漢

提 要：

- 一、複合材料係利用適當的物理或化學方法將二種或二種以上不相同的材質予以結合，利用不同材質特性加強整體結構的性能，具備高強度、高韌性、質量輕、耐腐蝕及抗磨耗的優異特性。
- 二、回顧人類歷史就是一部材料發展史，從石器、陶器、銅器、鐵器進展到現在的複合材料時代。複合材料挾其高強度重量比、抗腐蝕等優勢特性，正悄悄進行一次新的材料工業革命以滿足海軍作戰需求。

關鍵詞：LPD、AEM/S、RCS、ONR、ATD、FSS

### 壹、前言

2009年12月15日美國波音公司生產的波音787型夢幻客機（Boeing 787 Dreamliner）從西雅圖北郊埃弗雷特（Everett）的潘恩機場起飛，完成首次試飛。長57米的波音787型客機是波音公司自1995年以來推出的全新中型廣體雙引擎客機，強調環保省油、寬敞舒適，已吸引全球56家航空公司熱烈下單840架。它廣受歡迎的原因是輕量化設計，全機主結構有50%使用複合材料製造，包括35噸的碳纖維強化複合材，取代傳統鋁合金，大幅減輕重量，進而節省燃油消耗。波音公司表示夢幻客機較現有同級的客機省油20%，每年可省下數百萬的燃料費用支出。

利用取自911恐怖攻擊中崩塌的紐約世貿中心廢墟回收熔煉再製的7.5噸鋼鐵，製造艦艏端部分的兩棲船塢運輸艦紐約號，於2009年11月7日在紐約曼哈頓碼頭盛大舉行成軍典禮。艦徽設計別具意義，寫有「永難忘懷（NEVER FORGET）」字樣，格外顯得意義非凡〔註一、註二〕。紐約號（LPD-21 USS New York）是聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦系列中的第五艘，船長684呎（208.6米）、寬105呎（31.9米）、滿載24,900噸，採用4部柴油主機輸出軸馬力41600匹，配置雙軸雙舵，極速超過22節，2004年9月10日安放龍骨，2007年12月20日下水，2008年3月1日舉行命名，成為美海軍第6艘以紐約命名的軍艦。聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦是迄今美海軍中融入匿蹤設計特徵所建造的最大型軍艦〔註三、註四〕，以複合材料建構的角錐狀AEM/S桅為本文討論重點，探索艦用複合材料的發展應用。

### 貳、聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦

美海軍擁有LHA、LHD、LPD等大型兩棲作戰艦，兩棲戰力堅強，目前陣容中最新成員為聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦。1996年12月17日美海軍與諾斯洛普集團簽約，由旗下路易斯安納州紐奧良市的Avondale船廠負責建造首艦聖安東尼奧號（USS San Antonio, LPD-17），2000年12月9日安放龍骨，2003年7月12日下水，2003年7月19日舉行命名，2006年1月14日成軍服役。迄今已有USS New Orleans（LPD-18）、USS Mesa Verde（LPD-19）、USS Green Bay（LPD-20）等艦成軍服役。相較上一代奧斯汀級外觀上明顯進化，船體上層結構內傾的匿蹤設計降低雷達直接反射，如圖一，令人驚豔的是上層結構前後兩大角錐狀的桅杆結構物，重新定義桅桿構型，美海軍稱為AEM/S桅。聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦桅桿原始設計採用類似神盾驅逐艦的傾斜式鋁合金桅桿設計，1999年改採AEM/S桅設計，如圖二，係用複合材料打造先進全罩式桅桿，

將各型雷達、通訊天線與感測器等收納在桅桿內部。匿蹤設計的著墨努力大幅降低雷達截面積（RCS）反射信號，使得25000噸的聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦在雷達螢幕上顯示的信號大小如同一艘千噸級遠洋漁船〔註五〕。

參、AEM/S先進全罩式桅桿

AEM/S先進全罩式桅桿系統是美海軍艦艇乾舷上層設計的革命性進展。AEM/S桅以先進複合材料製作三明治結構組合而成，改善雷達信號控制與艦用天線系統效能。美國海軍研究辦公室（ONR）結合產官學界專家推動先進技術展示計畫（ATD），整合電磁學、信號縮減、結構、材料與製造等各領域技術，1995年發表全罩式桅桿AEM/S ATD構型的設計成果，如圖三。AEM/S桅上半部為雷達天線罩，在內外兩複合材料結構積層間填充三層泡沫芯材（Foam Core），並鑲嵌有二層FSS頻率選擇表面薄膜製作而成，可過濾電磁波允許本身特有頻率的雷達信號以極低的損耗衰減通過，並有效阻擋敵方雷達信號，再將桅桿塑型成內傾以減少雷達截面積信號；下半部複合材料結構在兩結構積層間填有巴爾沙木芯材（Balsa Core），在結構積層與芯材間鑲嵌有特殊的碳反射層（Carbon Reflective Layer）〔註六〕。

AEM/S全罩式桅桿系統的先進技術驗證，具有下列優點〔註七〕：

一、性能提升：AEM/S桅較傳統金屬桅桿減少阻礙遮蔽，有效改善艦用天線及感測器效能，提升艦艇作戰能力。

二、降低製造成本：採用創新的複合材料成型與接合技術，可在船廠生產製造以降低成本。

三、降低艦艇全壽期成本：AEM/S桅保護雷達天線免於暴露在嚴峻天候狀況下，阻絕風力、海水、煙囪排氣與外物的衝擊影響，大幅減少雷達故障與保養需求，進而降低全壽期成本，同時對於維修工作能提供較佳安全保護。

四、發展潛力大：艦用搜索雷達發展趨勢為採用平面相位陣列雷達設計，因為AEM/S桅獨特的多邊形構型，具備多平面的特性，使得AEM/S桅適合裝置平面相位陣列雷達天線。AEM/S桅除製成匿蹤構型有效降低雷達截面積信號外，採用複合材料製造可減輕上層結構重量，有助於降低重心高度，改善艦艇穩度。

美海軍擇定史普魯恩斯級驅逐艦拉德福號（USS Arthur W. Radford, DD-968）於1997年進入諾福克海軍造船廠實施大修，將後桅杆拆除，5月17日舉行AEM/S桅豎桅典禮，與鋁質上層結構相接合，如圖四，基座下方放置21枚一分錢硬幣，21 cents象徵領先邁入21世紀。AEM/S桅為六角形結構，高87呎，直徑35呎，上半部雷達天線罩區隔成上下兩個隔間，上隔間容納Mk-23 TAS天線，下隔間裝置SPS-40搜索雷達天線，如圖五，AEM/S桅下半部為底座結構，裝置導波管及通道〔註七、註八〕。改裝後拉德福號做為測試平台進行大規模海上測試，拉德福號服役至2003年3月18日除役。

美海軍從拉德福號測試獲得的寶貴資料進一步改良AEM/S桅設計，成功應用至聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦的桅杆設計，其AEM/S桅外型類似八角錐狀結構，外觀上不像拉德福號AEM/S桅明顯分成上下部分的構型。前桅高13.9米，基座寬9.472米；後桅高25.5米，基座寬13米，後AEM/S桅上半部內裝置大型AN/SPS-48E雷達天線，高波段通訊天線安裝在前桅內，低波段通訊天線安裝在後桅內，如圖六〔註九、註十〕。

美海軍研發新一代匿蹤驅逐艦DD（X），號稱擁有多項技術領先優勢，船型設計

大膽將AEM/S桅技術融入上層艙間結構設計，採用複合材料製作三明治輕量結構，打造大型上層艙間結構物以減輕重量改善現役水面主戰艦重心過高的問題，形成獨特的匿蹤構型，流露出簡約設計風格。2008年2月14日美海軍與諾斯洛普集團簽約建造首艘朱爾瓦特號匿蹤驅逐艦（DDG-1000，USS Zumwalt），2009年2月11日安放龍骨，預計2015年成軍服役，雖然其造價昂貴，美海軍決定刪減採購數量，但其技術發展已為驅逐艦樹立一個重要里程碑〔註十、註十一〕。

#### 肆、艦用複合材料

複合材料係利用適當的物理或化學方法，將二種或二種以上不相同的材質予以結合，利用不同材質特性加強整體結構的性能，具有高強度、高韌性、質量輕的優異機械性質，且抗腐蝕及耐磨耗，因此應用範圍廣泛。基材（Matrix）與強化材（Reinforcement）是基本組成單元，基材的功能是將負荷分散傳遞至強化材，並將強化材黏著固定，阻絕外界惡劣環境以保護強化材，強化材具有高剛性、高強度特性，作用為負責承受整體的外加負載。複合材料種類繁多，一般分類方式有兩種，一種是以基材種類來分類，可劃分為以高分子聚合物為基材的高分子基複合材料（Polymer Matrix Composites/PMC），以金屬或合金為基材的金屬基複合材料（Metal Matrix Composite/MMC），以及利用陶瓷為基材的陶瓷基複合材料（Ceramic Matrix Composites/CMC）。另一種分類則是將複合材料分類為微粒補強類、纖維補強類與結構類，如圖七〔註十二、註十三〕。

中大型船舶以鋼鐵建造，鋼鐵為低價高重量的材料，自從1950年以後小型苛求重量的船舶開始以鋁、FRP玻璃纖維強化塑膠（歐洲稱為GRP）複合材料等輕重量材質建造，減輕船舶重量以增加船舶航程或籌載量。一般船舶的結構重量約佔排水量的三分之一，結構減重帶來的實際效益非常顯著。複合材料結構較鋼鐵金屬結構擁有下列優點〔註十四〕：

一、複合材料結構重量輕，目前以E-glass玻璃纖維強化複合材製作的次要結構物，較鋼鐵結構重量可減少35%至50%。

二、複合材料結構元件較鋼鐵元件擁有較佳的尺寸穩定性，有助於船廠組裝，可有效降低裝配成本與尺寸誤差。

三、複合材料結構較鋼鐵金屬結構擁有較佳緩衝作用，噪音震動傳導性低。且複合材料熱傳導性較鋼鐵金屬低，複合材料結構內發生火災較易控制。

四、複合材料結構因應特殊需求設計的使用彈性較大，可依要求的強度與剛性設計製造複雜的曲面形狀。

五、複合材料結構的全壽期保養成本較鋼鐵金屬結構低，複合材料耐腐蝕的特性，使得結構件毋需執行繁複的油漆保養工作。

多年來複合材料用於小型船舶的主結構，其他諸如甲板、底座、艙門、貨艙蓋、機殼、甲板艙間、煙囪、桅杆等次要結構也應用複合材料製造。艦用複合材料多用於生產單一殼板、強化處理或三明治結構物件。複合材料種類繁多，應用最廣者當屬纖維補強類的高分子基複合材料，艦用複合材料廣泛採用的是FRP，其組成包括樹脂基材（Resin matrix）、纖維強化材（Fiber Reinforcement）與芯材（Core Material）〔註十四、註十五〕。

纖維補強類複合材料中基材的功能是傳送應力，保護並固定纖維，避免直接摩擦與侵蝕，通常基材選擇涉及複合材料的使用溫度、所需電氣特性、及使用環境侵蝕作用的大小等因素。常用的基材為高分子樹脂基材，依化學特性可分為熱塑性(Thermoplastic)及熱固性(Thermoset)兩大類，熱塑性樹脂加工成型後，若再受熱時會軟化，可重新塑造成型，冷卻後即可定型；熱固性樹脂加工成型後，即使再受熱也無法重新塑形。美海軍採用的樹脂基材為熱固性樹脂，有乙烯基酯(Vinyl-ester)、不飽和聚酯(Unsaturated polyester)、酚醛樹脂(Phenolic)、環氧樹脂(Epoxy)〔註十、註十六〕。

纖維強化材種類繁多，美海軍採用的纖維強化材有E-glass、S2-glass玻璃纖維與碳纖維。玻璃纖維主要成分為SiO<sub>2</sub>及其他無機氧化物；碳纖維比鋁還輕、比鋼還硬，比重為鐵的1/4，強度是鐵的10倍。碳纖維是由和鑽石同等材質的碳製成，化學組成上非常穩定，具有高抗腐蝕性，纖維含碳量在99%以上者稱為石墨纖維，含碳量在93%至95%之間則稱為碳纖維，如表一〔註十、註十七〕。

纖維製造過程中生產出的纖維型態有連續單纖維細絲稱為Filament，未經扭轉的連續纖維絲股束稱為紗束(Roving)，經扭轉的連續纖維絲股束稱為紗(Yarn)，在某些需求情況下連續的纖維絲被切成短長度。最為人熟悉的連續纖維型式是纖維布(Fabric)，以纖維紗編織而成；以不相同股數的纖維紗束在2個方向編織而成的稱為編紗束(Woven Roving)，在單一方向提供較大強度，此種單向性(Unidirectional)的編紗束常用於FRP疊層結構；此外也可做成纖維氈(Mat)型式，以接著劑將任意方向的短纖維鬆弛地固定在一起而成，製成不同重量、厚度、寬度的纖維氈出售，纖維氈毯可以裁剪成形做為粗加工的預先成型品(Preform)〔註十八〕。

疊層結構(Laminate)與三明治結構(Sandwich)是常見的複合材料結構物。疊層結構由單層(Lamina)複合材料進行堆疊積層加工而成。三明治結構則由上下的面材(Face Material)與芯材(Core Material)組成，面材的功用在承受負載及轉矩，因此面材的選擇以高強度、高勁度為主，可以是金屬合金、纖維複合材料等；芯材的功能則是增加上下面材的距離以及抵抗剪力，一般為了減輕整體結構的重量，芯材多採用輕質材料如木材、發泡高分子材料等，也有使用蜂巢狀(Honeycomb)結構物做為芯材，同時芯材也具有防火隔熱材功能，美海軍採用的芯材種類有巴爾沙輕質木材(Balsa)與發泡高分子素材(Foam)〔註十、註十二〕。

複合材料成型加工製造屬勞力技術密集產業，故成本相對較高，雖然施工工法種類繁多，但美海軍考量成品品質(如空洞率低、纖維含有量高)、模具開發成本與製作物件日益大型化等因素，採用的工法有真空輔助樹脂轉注成型法(VARTM/Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)、複合材料樹脂注入成型法(SCRIMP/Seeman Composite Resin Infusion Molding Process)、樹脂注入再循環成型法(RIRM/Resin Injection Recirculation Molding)及低溫預浸成型法(Low Temp Pre-preg)，採用紫外線方式以固化樹脂。拉德福號驅逐艦與聖安東尼奧級兩棲船塢運輸艦的AEM/S桅採用E-glass玻璃纖維、乙烯基酯樹脂、巴爾沙輕質木材與發泡高分子素材，以SCRIMP成型加工方式製作而成。近年來由於現代軍艦著重外型匿蹤設計，遂有生產大型寬闊平板物件之需求，有鑒於此美海軍採行拉擠成型法(Pultrusion)，可自動連續生產

一定截面積的大型複合材料結構物件，大幅降低生產人力成本並提升產量〔註十、註十九、註二十〕。

#### 伍、艦用複合材料的應用發展

美海軍自1946年起即著手展開複合材料的研發應用，多用於小型艦艇，其中最著名的當屬建造長188呎（57米）、寬36呎（11米）、排水量893噸的魚鷹級近岸獵雷艦（Osprey-class coastal minehunter）。船體採用E-glass玻璃纖維、不飽和聚酯樹脂製成的玻璃纖維強化複合材建造而成，搭載2部柴油機驅動2部VSP葉，專門執行濱海重要航道繫留雷與沉雷的清除任務。1993至1999年間建成12艘成軍服役（MHC-51～MHC-62），該型艦已於2006至2007年間除役並轉售盟國使用〔註二十、註二一〕。

1990年代掀起軍艦匿蹤設計風潮的法國海軍拉法葉級巡防艦，採用玻璃纖維、不飽和聚酯樹脂製成的複合材，搭配巴爾沙木芯材建造三明治結構物件用於部分上層結構艙間建造，如圖八，法國造艦局表示此種多層的巴爾沙木芯材三明治結構設計有助於火勢控制及避免結構崩塌與過度變形〔註二十〕。

2005年Kockums船廠交付瑞典海軍的Visby多用途護衛艦（K31，HMS Visby），集匿蹤科技大成於一身，設計強調降低光學、紅外線、噪音、電磁、雷達反射截面積訊號至最低程度，長72.7米、寬10.4米、滿載排水量640噸，搭載4部Honeywell TF-50A燃氣渦輪機（總輸出軸馬力16000kW）與2部MTU 16V 2000 N90型柴油機（總輸出馬力2600kW），採用CODAG配置方式驅動2部勞斯萊斯125S II型KaMeWa噴水推進器，極速超過35節。船體採用碳纖維與乙基酯製成的碳纖維強化複合材結合PVC泡沫芯材，以真空輔助樹脂轉注成型法（VARTM）製作三明治結構材所打造而成，瑞典海軍計畫採購5艘服役〔註二二、二三〕。

2006年11月美國時代雜誌評選出加州M型船舶公司（M Ship Co.）為美海軍研製的M80 Stiletto短劍特戰母艇為軍事類年度最佳創新發明之一，如圖九，短劍特戰母艇顛覆一般人對船舶的刻板印象，活像一艘馳騁於海面上的「蝙蝠船」。2003年美國海軍發表21世紀海權轉型計畫（Sea Power 21），計畫願景為戮力轉型成為具備全方位持久戰力以從事全球反恐戰爭的機動打擊武力。戰爭形態由藍海轉向陸地發展，如何加強濱海作戰能力是美海軍面臨轉型的重要挑戰，針對反恐作戰中不對稱作戰威脅傾全力發展近海作戰打擊能力，除積極打造濱海綠水海軍（Green Water Navy）實力之外，並重振以特戰部隊為主任務危險性極高的褐水海軍（Brown water Navy）。參酌越戰河岸巡邏作戰經驗及考量近岸作戰特性，美軍提出研發吃水淺、輕巧快捷、穩定可靠、低航跡、高酬載、平穩破浪降低重力加速度衝擊、高航速等作戰需求的特戰母艇以載運海豹突擊隊執行任務，獨特M型船體的軍事用途開發即為美軍尋求高速特戰母艇所做的努力。2006年1月31日短劍特戰母艇下水，從計畫簡報介紹到實際特戰母艇下水僅費時15個月，船體造價六百萬美元，長88.6呎（27米）、寬40呎（12米）、吃水2.5呎（0.8米）、滿載排水量60噸、艇內裝載面積1996平方呎（200平方米），搭載4部柴油機輸出1652匹馬力，透過減速齒輪驅動4具六葉片葉，巡航速率40節，極速達51節，艇身以碳纖維強化複合材打造，採雙M型船身設計，長寬比降至2.2。短劍特戰母艇由美國五角大廈軍隊轉型辦公室（Office of Force Transformation/OFT）出資專款打造，可搭載11名海豹突擊隊員，船艏設置一開放式斜坡道專供硬殼充氣快艇（Rigid

Hull Inflatable Boat/RHIB) 或水下無人載具釋放、回收與儲放。短劍特戰母艇的另一特色為可攜帶偵察用UAV無人空中載具於艇體上方飛行甲板發射、回收，執行戰場即時偵照任務，透過艇上強力電腦對海豹突擊小組傳送即時影像提供最新戰場情報，建構母艇與突擊小組間的情報交換網路〔註二四、二五〕。

海軍艦艇於海上服勤，惡劣的環境造成裝備金屬腐蝕一直是艦艇保養維修所面臨的棘手問題，由於複合材料的耐腐蝕特性，美海軍審慎思考艦艇的保修需求，試圖採用複合材料科技製造艦用物件朝低成本、低保養用途發展，以改善裝備腐蝕的保修問題，降低維修人力需求與艦艇維持成本。例如為降低入塢檢查大軸軸承與鋅板需求，大軸導流罩(Fairwater)改用複合材料製造以利潛水人員水下執行檢查作業；其他舉凡艦上的泵葉輪、通風管、電力盒外殼、水密門、甲板格柵板、支柱等均嘗試以複合材料製造，如表二〔註十、註二六、註二七〕。

美海軍積極推動多項複合材料應用以提升船艦性能，強化海軍實力：

一、美海軍研發DDG-51勃克級神盾驅逐艦時，特別記取1975年CG-26 Belknap號巡洋艦與甘迺迪號航空母艦於西西里外海演習時發生碰撞釀成Belknap號巡洋艦鋁質上層結構全數燒毀的嚴重意外，與1982年英阿福克蘭島戰役英軍雪菲爾號驅逐艦遭飛魚飛彈擊中引發大火融毀鋁質上層結構的慘痛教訓，揚棄鋁製上層結構改採全鋼構的上層結構（桅杆除外），雖然戰損存活性提升卻導致重心偏高，而需採用補償燃油壓載系統維持穩度恆定。神盾驅逐艦自DDG-79以後發展為Flight II A構型，增設鋼構直升機庫以容納2架SH-60直升機停放。美海軍針對神盾驅逐艦重心偏高問題，研究將艦橋上方的前照明雷達間及鋼構直升機庫改用複合材料建造減輕重量，以降低重心高度改善穩度〔註十、註二六、註二八〕。

二、為提升維吉尼亞級核子攻擊潛艦作戰能力，產生增加感測器搭載數量與收納空間的需求，規劃研發先進帆罩取代現有帆罩以滿足需求，利用複合材料易製成複雜曲面形狀且能符合要求的強度與剛性的特性，研究以複合材料製作大型先進帆罩〔註十、註二九〕。

三、建造新一代核子航空母艦福特號(CVN-78)，打造全新的艦島設計，計畫桅杆採用複合材料製造可減重20噸，2009年11月14日安放龍骨，預定2015年成軍服役以取代服役超過半世紀的CVN-65企業號航空母艦〔註二六、註三十、註三一〕。

四、推動複合材料高速艦艇(Composite High Speed Vessel/CHSV)研究計畫，研發以複合材料打造大型艦艇驗證技術可行性與接受度，計畫離型選定混合舉升體船型，設計目標除產生動態升力減少浸水面積增加船速外，並寄望利用在所有船速範圍內獲得高附加質量的緩衝作用(high added mass damping)以改善耐波性能，規劃以複合材料建造排水量1989噸、長90.6米、寬22.3米、航速40節的複合材料高速艦艇〔註十、註二六〕。

陸、結語

戰鬥機採用複合材料為時勢所驅，八〇年代F-15E打擊鷹戰鬥轟炸機使用複合材料的比重僅佔2%，九〇年代F-18E/F超級大黃蜂戰鬥機使用複合材料的比例已攀升至10%，目前最精銳的F-22猛禽式戰鬥機使用複合材料比例已達24%，未來聯合打擊戰鬥機F-35閃電二式出廠服役時使用複合材料比例將達50%〔註三二〕。

汽車、飛機的未來發展趨勢為大量採用複合材料科技進行輕量化設計以改善性能。這股風潮同樣延燒至軍艦設計，複合材料挾其高強度重量比、抗腐蝕等優勢特性，正進行一次新的材料工業革命以滿足海軍的作戰需求，實現低成本、高品質之建軍目標：

- 一、以複合材料取代鋼鐵金屬製造組件解決腐蝕問題。
- 二、以複合材料建造輕量結構增進艦艇載台性能。
- 三、以複合材料打造匿蹤構型，提升艦艇匿蹤性能增加作戰存活性。
- 四、改良製程降低成本，大量產製複雜結構組件。

目前鋼鐵為普遍、經濟的造艦用料，因應未來軍艦匿蹤與高速化的發展趨勢，複合材料科技發展受到高度重視，近年來由於奈米強化材技術逐漸成熟，為複合材料帶來一個嶄新的願景，此股方興未艾的發展趨勢值得我們密切關注。

註一：<http://www.navsource.org/archives/10/09/0921.htm>。

註二：<http://www.ussny.org/press-room/LPD21-Fact-Sheet.doc>。

註三：[http://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_New\\_York\\_\(LPD-21\)](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_New_York_(LPD-21))。

註四：<http://www.ussny.org/press-room/USSNY-ShipFlyer.pdf>。

註五：[http://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_San\\_Antonio\\_\(LPD-17\)](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_San_Antonio_(LPD-17))。

註六：<http://www.spawar.navy.mil/sti/publications/pubs/td/3117/230.pdf>。

註七：<http://www.navysite.de/dd/dd968.htm>。

註八：<http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/docs/aemspr.htm>。

註九：[http://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_Arthur\\_W.\\_Radford\\_\(DD-968\)](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Arthur_W._Radford_(DD-968))。

註十：[http://www.nsrp.org/Ship\\_Production\\_Panels/Product\\_Design\\_and\\_Materials/downloads/07-Rasmussen.pdf](http://www.nsrp.org/Ship_Production_Panels/Product_Design_and_Materials/downloads/07-Rasmussen.pdf)。

註十一：[http://en.wikipedia.org/wiki/Zumwalt\\_class\\_destroyer](http://en.wikipedia.org/wiki/Zumwalt_class_destroyer)。

註十二：<http://stam.org.tw/Newsletter/127/2009-6%E8%A4%87%E5%90%88%E6%9D%90%E6%96%99%E5%8A%9B%E5%AD%B8%E8%BF%91%E6%B3%81%E7%B0%A1%E4%BB%8B20090619MKYeh.pdf>。

註十三：<http://phys.thu.edu.tw/~hlhsiao/msel6.pdf>。

註十四：[http://www.ccdott.org/hss\\_volume2/07\\_loads,\\_materials\\_&\\_structures.pdf](http://www.ccdott.org/hss_volume2/07_loads,_materials_&_structures.pdf)。

註十五：[http://www.marinecomposites.com/PDF\\_Files/G\\_Composite\\_Materials.pdf](http://www.marinecomposites.com/PDF_Files/G_Composite_Materials.pdf)。

註十六：<http://www.iaa.ncku.edu.tw/~young/cccl/cha3.html>。

註十七：[http://fund.bot.com.tw/z/glossary/glexp\\_812.asp.htm](http://fund.bot.com.tw/z/glossary/glexp_812.asp.htm)。

註十八：<http://www.engineer.tamuk.edu/departments/ieen/faculty/DrLPeel/Courses/MEEN3349/ch15.ppt>。

註十九：[http://kazakcomposites.com/docs/SAMPE\\_Conf\\_2007.pdf](http://kazakcomposites.com/docs/SAMPE_Conf_2007.pdf)。

註二十：<http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompo>

sitos/compositematerials/c\_naval\_applications.pdf。

註二一：[http://en.wikipedia.org/wiki/Osprey\\_class\\_minehunter](http://en.wikipedia.org/wiki/Osprey_class_minehunter)。

註二二：<http://www.kockums.se/pdf/visby2006.pdf>。

註二三：[http://en.wikipedia.org/wiki/Visby\\_class\\_corvette](http://en.wikipedia.org/wiki/Visby_class_corvette)。

註二四：[http://en.wikipedia.org/wiki/M80\\_Stiletto](http://en.wikipedia.org/wiki/M80_Stiletto)。

註二五：[http://www.mshipco.com/military\\_m80.html](http://www.mshipco.com/military_m80.html)。

註 二 六 ： [http://www.ericgreeneassociates.com/images/Building\\_Composites\\_for\\_the\\_US\\_Navy.pdf](http://www.ericgreeneassociates.com/images/Building_Composites_for_the_US_Navy.pdf)。

註 二 七 ：  
[http://www.ericgreeneassociates.com/images/ACMA\\_Composites\\_2004\\_Course.pdf](http://www.ericgreeneassociates.com/images/ACMA_Composites_2004_Course.pdf)。

註 二 八 ：  
<http://files.harc.edu/Projects/BlueWater/CaseHistories/WeldableAluminumAllows.pdf>。

註 二 九 ：  
<http://www.jdmag.wpafb.af.mil/n%20navsea%20composite%20program%20overview.pdf>。

註三十：[http://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_Gerald\\_R.\\_Ford\\_\(CVN-78\)](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Gerald_R._Ford_(CVN-78))。

註三一：<http://machinedesign.com/article/uss-new-supercarrier-0607>。

註 三 二 ：  
<http://techcon.ncms.org/symposium2003/presentations/track2/0130%20Dana%20Granville.pdf>