

【離岸風電系列專題】 離岸風力機的雙臂－葉片技術簡述

綠能科技產業推動中心技術發展組林曉琪副研究員

2019 年 9 月

壹、前言

葉片是風力機最主要的零組件之一，相較於其他風力機的組件，對於風力機葉片的測試或認證的規範，可稱得上最嚴格，不同風場環境，挑戰不同，歐洲風場在冬日極為寒冷時，葉片可能結凍而無法轉動，台灣風場則是在夏日颱風肆虐時，葉片可能轉動過快而造成熱損傷，無論那一種因素，一旦葉片停止運轉，風力機便無法擷取風能，如同人的頭腦，下了動作或指定，還須仰賴雙手操作。

以早期 Siemens Gamesa 的 3.6MW 與 MHI Vestas 的 3MW 風力機為例，葉片長度已超過 50 公尺，而至今不論是 Siemens Gamesa 的 8MW 或 MHI Vestas 的 9.5MW 風力機，葉片長度均已超過 80 公尺（如圖 1 與圖 2）；隨著技術升級與風力機單機裝置容量增加，葉片亦逐漸朝尺度更長、重量愈輕的方向發展，風量擷取多寡的核心技術是葉片，因此葉片的設計及選材亦是決定風力機的發電性能與功率的關鍵因素。



圖 1、MHI Vestas 9.5 MW 風力機葉片比擬圖

資料來源：取自 MHI Vestas Offshore Wind 官方網站影音



圖 2、MHI Vestas 9.5 MW 風力機葉片實體圖

資料來源：筆者於拍攝丹麥 Esbjerg 港口（2018 年 7 月）

貳、葉片製造—離岸風力機的雙臂，複合材料與細膩工法的隱形力量

葉片掃掠面積愈大，愈能擷取更多風能，伴隨風力機技術與製造愈加成熟，對於葉片的尺寸與輕量化亦愈加要求，舉例而言，相同形狀的葉片，葉片偏厚，受到的空氣阻力愈大，葉片偏重，旋轉過程中所要克服的機械摩擦阻力愈大，阻力愈大則不利帶動風力機的轉動；若愈提升風力機的轉速，則須達到葉片輕量化，因此葉片材料逐漸捨棄鋼材、鋁合金，而改採用複合材料(Composite Materials)。所謂複合材料，即是由金屬材料、陶瓷材料或高分子材料等兩種或兩種以上的材料，經過複合工藝製造，發揮材料綜效，例如碳纖維(Carbon Fiber)原本就屬質量輕的材料，與樹脂結合後，不影響其重量，還可展現非常高的強度與硬度。

過往葉片的主要材料為玻璃纖維(Fiberglass)，由樹脂（為環氧聚合物或聚脂）及纖維矩陣組成，鑒於碳纖維的成本較高，有些葉片製造商不以碳纖維取代玻璃纖維而是採用部分碳纖維置於葉片負載最重之處藉以強化葉片剛性，玻璃纖維與碳纖維的組成會比全玻璃纖維葉片約減輕兩成重量。葉片內部芯材，則是以巴爾沙木(Ochroma Pyramidale)與聚合物泡棉結構(Polyvinyl Chloride)增強葉片局部剛性，重量均會比使用樹脂及玻璃纖維輕；有些葉片製造前，是先於模具內上塗料，待葉片脫模後，再以聚氨酯(Polyurethane)瓷漆噴塗，以達到抗紫外線、抗濕度與抗磨損的功能。

大部分的葉片非一體成形，而是分為兩半製造，先將各半的玻璃纖維或碳纖維及樹脂混合的材料於葉片模型中灌模，待冷卻成形，再覆蓋上千片的玻璃纖維或碳纖維，最後再以結構膠將兩半接合，由於葉片處於整座風力機的最高處，大部份葉片均有不鏽鋼或鎢合金的避雷裝置以防止雷擊（如圖3）。

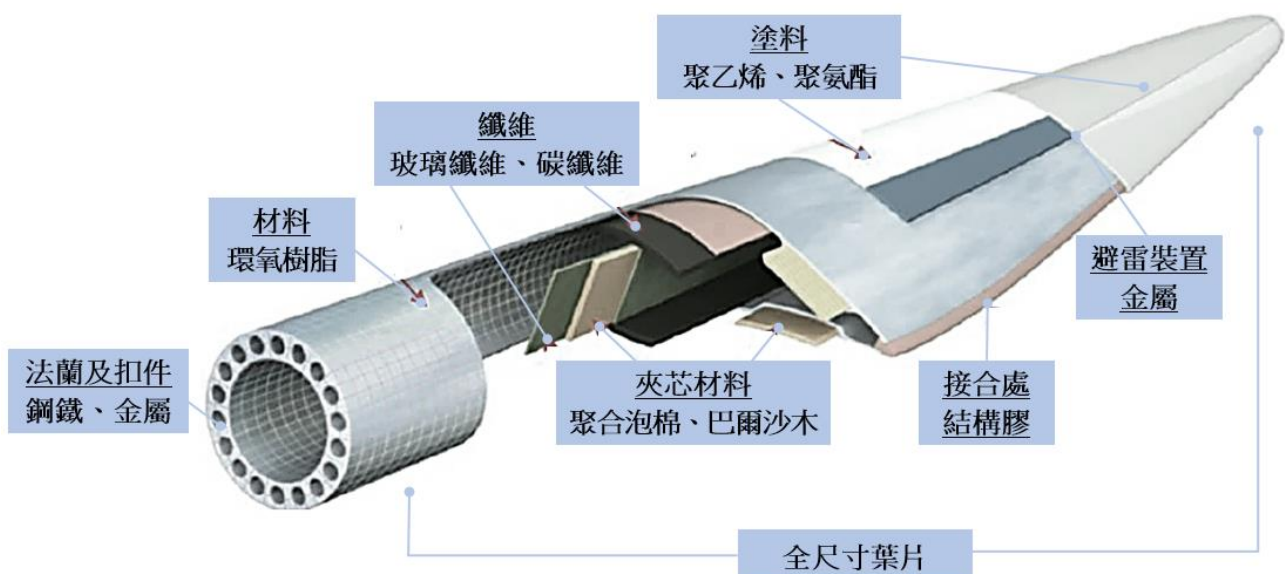


圖3、風力機葉片結構與材料示意圖

資料來源：Paul Dvorak(2010)、本研究繪製(2019)。

除了材料以外，葉片的成形技術可謂品質關鍵，目前較常見為「真空輔助樹脂 (Vacuum-assisted Resin Transfer Molding, VARTM)」與「預浸(Pre-preg)」兩種工法。

「真空輔助樹脂」成形法是以特製的真空袋輔助樹脂穿透玻璃纖維，樹脂與玻璃纖維為各自獨立的來源（如圖 4），在樹脂被玻璃纖維充分吸收後，葉片將經過加溫加壓的硬化程序，依不同長度，歷時約一至五日，再進行表面處理及塗漆；「預浸」成形法則是指樹脂已預先注入至玻璃纖維中，再捲成圓筒供貨（如圖 5），在室溫下為半固態，使用前以冷藏保存，若採用碳纖維來加強葉片的翼樑邊緣，通常以預浸方式成形，因碳纖維屬分子排列較緊密，一般真空注入方法的液態樹脂較無法完全滲透。

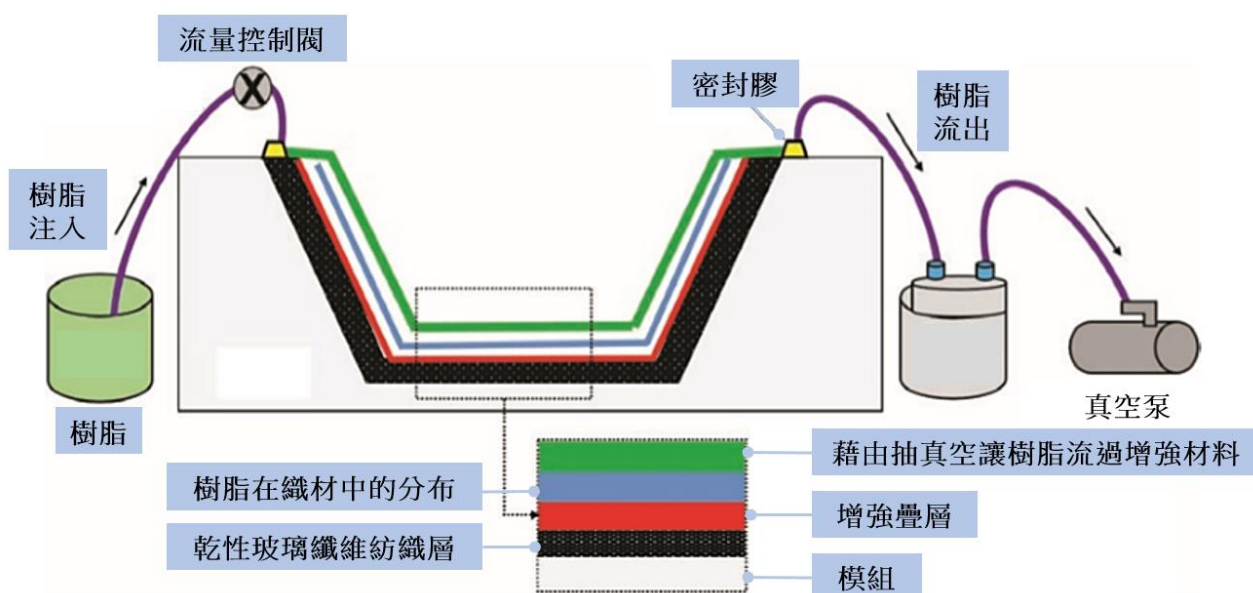


圖 4、真空輔助樹脂成形法示意圖

資料來源：Juliana de Almeida Yanaguizawa Lucena(2018)及本研究繪製(2019)



圖 5、預浸材料示意圖

資料來源：上緯(2019)。

預浸方法使材料鋪設於模具的過程容易，幾乎不會有樹脂未被玻璃纖維完全吸收的風險，因而適合自動化生產，但預浸材料的物料成本較高，即使採用加值化後的原

料，亦需加溫硬化，且模具與葉片均須加熱及冷卻，以至於生產葉片的時間長；相較於預浸方法，除了樹脂與玻璃纖維無須事前加工以外，真空灌注樹脂方法模具耐溫需求較低，雖然產業界普遍認為預浸製造方式較好，可藉此方法生產重量較輕、長度較長、強度較大的葉片，惟葉片製造商與風力機系統商會加以評估風力機整體成本後而選擇成形技術（葉片主要製造技術之優劣勢整理如表 1）。

表 1. 葉片主要製造技術之優劣比較表

成形方式	真空輔助樹脂	預浸
材料	玻璃/碳纖維	
樹脂	聚酯/環氧樹脂	環氧樹脂
表面處理	採用聚酯樹脂時模具內塗凝膠塗層，採用環氧樹脂時使用塗漆	模具內塗凝膠塗層與瓷漆
芯材核心結構	巴沙木與聚合泡棉	聚合泡棉
表面與腹板連結	黏接	
優勢	- 製程容易控制 - 大部分芯層結構可同時操作	- 材料供應商可準確制定樹脂、催化劑與纖維的含樹脂量 - 材料具有安全品質，製程不易弄髒環境 - 高效能樹脂具有優化的機械與熱性能 - 具有自動控制、節省勞動力的潛在優勢
劣勢	- 生產過程較為複雜 - 樹脂需黏度低方能滿足力學性能 - 可能產生未浸泡區域致使廢料出現	- 預浸織物昂貴 - 需要高壓固化材料 - 芯材需能承受高製程的溫度與壓力
採用廠商	丹麥：LM Wind Power 美國：TPI Composites, MFG 巴西：Tecsis, Aeris 德國：Enercon	西班牙：Siemens 丹麥：Vestas

資料來源：Jesse Broel and Bruce Hamilton(2014)、John Twidell and Gaetano Gaudiosi(2014)及本研究整理(2019)。

參、葉片的測試或驗證—無限多次的循環，確保運轉可靠性

葉片的高可靠性對於風力機的經濟效益至關重要，葉片測試及驗證的目的在於可大幅降低因設計或製造缺陷所帶來的風險，葉片生產前，材料供應商必須提供材料證明文件予葉片製作商，做為設計與製作品質經得起運轉環境考驗的第一層保證，待風力機系統商採購葉片後，會再進行葉片型式測試，做為準備裝機之葉片品質的第二層保證。

就葉片的測試而言，安裝於風力機的葉片運作長達二十年，壽命遠超過任何大型複合結構物的使用年限，必須仰賴特殊測試設備或系統方能測試，且測試原則須符合 IEC 61400-23 的規範，此一技術規範列出葉片的必要性測試，即靜態測試(static testing)與疲勞測試(fatigue testing)。

以疲勞測試為例（如圖 6），該項測試在避免葉片承受連續風力而逐漸破壞其結構或產生裂縫進而影響風力機的效能，故會在承受風力的翼端(flap)與邊角端(edge)進行測試，因不同負載程度調整測試頻率，平均可達 10^6 至 10^9 的測試次數，明確需測試的次數，則由測試人員依葉片製造商或設計者提出的數據，結合風力機其他相關數據後，再加以計算而決定。



圖 6、疲勞測試示意圖
資料來源：LM wind power 官網

一般而言，疲勞測試約莫需要半年，期間不包含臨時設備停機檢修或未知原因而造成的停機修復，風力機系統商若急於出貨可能無法接受長達半年以上的測試期，再者，當葉片尺寸因著風力機單機裝置容量增加而更長，產能效益更好的新機種不斷推陳出新時，風力機系統商對於風力機型式測試亦更為迫切，有鑑於此，不少國家已將汰換後的葉片提供予學研機構研究（如表 2），期學研機構可協助製造商或系統商縮短測試期程，例如以於 2017 年 9 月除役的丹麥風場 Vindeby，除了將其中一座風力機送至丹麥能源科學博物館展示以外，其餘由風力機上拆解的葉片已送至丹麥科技大學

(Technical University of Denmark, DTU)葉片實驗室供其作為研究材料，藉由分析物理特性及疲勞測試，以研擬可強化葉片剛性與強度的模式，相關分析與數據將提供予廠商參考。

表 2. 全球學術及研究機構及專業檢測公司之葉片實驗室概況列舉

區域	實驗室	性質	國家	可測試最大葉片長度(m)
歐洲	The National Renewable Energy Centre of Spain (CENER)	研究機構	西班牙	100
	BLAEST	專業檢測公司	丹麥	100
	Technical University of Denmark	學術單位	丹麥	45
	Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems	研究機構	德國	90
	Knowledge Centre WMC	研究機構	荷蘭	60
	Narec Distributed Energy	研究機構	英國	100
北美	MIT Wind Technology Testing Center	學術單位	美國	90
	The University of Maine's Advanced Structures and Composites Center	學術單位	美國	70
亞洲	SGS	專業檢測公司	中國	70

資料來源：本研究整理(2019)。

就葉片的驗證而言，從事葉片驗證的驗證機關或風力機的驗證機關（如表 3）同樣依據 IEC 61400-23，對葉片製造商或風力機系統商出具之報告加以驗證，驗證機關可自葉片製造商或風力機系統商採用的實驗室或另擇具有 ISO 17025（實驗室品質管理）認證的場域進行驗證，一旦葉片的製造改變，例如結構系統、動力外形、承受風載部分的材質及葉根處交界處與葉片設計圖有所差異，驗證機關均可要求葉片製造商或風力機系統商重新測試。

表 3. 全球葉片驗證機關概況列舉

區域	名稱	國家
歐洲	DNV GL	挪威
	Bureau Veritas	法國
	TÜV SÜD	德國

區域	名稱	國家
北美	UL	美國

資料來源：本研究整理(2019)。

某些如防雷擊(lightning)、防凍(freeze)、減噪(acoustic noise)或表面塗層(topcoat)等非必要性的測試項目，驗證機關為確保葉片品質，可依風力機欲裝設之區域，進一步要求葉片製造商或風力機系統商檢具相關的測試報告（見附錄二）。

肆、小結—落實產學研合作，建構上中下游產業鏈

早在發展離岸風電之前，複合材料產業在台灣已歷經三十多年，初期由業者自行研發配方，以玻璃纖維強化塑膠的工業為主，且以出口居多，在不斷引進新設備與國內學研機構投入改良研究的推波助瀾下，複合材料產業愈加成熟，除了一般民生用品以外，更已佈及交通建設、運動產業。

再者，複合材料的開發與應用，已成為世界各國關注課題，其中有關碳纖維的研究，頗受注目，如機身輕量化可使客機飛行時更加省油，而葉片輕量化則有助提高風力機的效能，然而，除了複合材料的使用以外，葉片尚涉及脫模劑、結構膠、塗料、扣件、避雷線路等項目，看好當前離岸風電商機，上緯成功打進 Siemens Gamesa 供應鏈的強心劑，凝聚國內相關業者的共識而成立離岸風電葉片產業鏈聯盟，透過建立葉片供應鏈體系，為相關業者開拓更多市場機會。

整體而言，葉片正呈現著全球複合材料產業的發展趨勢—以高技術、高規格或客製化的產品為目標，風力機葉片於設計、測試、製造、運輸及運維的生命週期中，橫跨空氣動力學、氣動彈性力學、複合材料結構學、複合材料化學、材料特性測試及海事工程等多項專業知識，落實產學研多方通力合作，不僅可培養更多優秀的設計或材料人才，於建構完整產業鏈亦具助益。

附錄一：本文相關材料簡介

1. 在碳纖維出現之前，最常被廣泛應用的為玻璃纖維，玻璃纖維的主要原料是二氧化矽、氧化鋁、氧化鈣、氧化硼、氧化鎂、氧化鈉等化學材料，經過加溫、加壓的工法形成，具有耐高溫、韌性亦強，但因易脆化、不耐磨，因此需要與其他材料結合來強化材料特性，常見用品如球拍、高爾夫球竿、汽車保險桿。
2. 碳纖維是由碳元素組成的纖維，不只輕，其分子鏈排序緊密，使其具有相當的韌性，製程費時是目前價格偏高的主要因素，因此多用以生產特殊規格產品，如腳

踏車、汽機車的車身，亦或是航空客機的機身，近年來已有廠商利用碳纖維開發出新產品，如行李箱或是醫療用的頭部固定器，期望藉由產品端的應用來降低製造成本。

3. 巴爾沙木又稱輕木，屬世界上最輕的木材，適合生長於高溫多雨區域，台灣南部已有人工引種，其重量比火柴還輕，常用做模型木材。
4. 聚酯原料加上發泡劑後，膨脹而凝固的個體即是泡棉，常見於床墊、沙發與座椅，也可用於隔音或清潔用品，差異在於泡棉成分或密度的不同，而聚合泡棉即是將泡棉再加工與黏著，以增加硬度與支撐性。

附錄二：本文相關 IEC 標準簡介

1. IEC 61400-23：轉子葉片全尺寸的結構試驗(Full-scale structural testing of rotor blades)，此一技術規範囊括葉片測試的步驟、參考方法、參數計算公式、靜態測試(static testing)、疲勞測試(fatigue testing)與如何評估測試結果等細節，包含葉片設計與實品在偏轉角度、硬度分佈、材料品質等因素改變下可能產生的差異。
2. IEC 61400-11：噪音的測量技術(Acoustic noise measurement techniques)，此一技術規範包含噪音測量程序與方法、檢測光譜設備與可接受的量測誤差值等內容。
3. IEC 61400-24：雷擊保護(Lightning protection)，此一技術規範係針對離岸風力機及其組件的雷擊規範，由於雷擊易導致電力短路而發生火災，因此本規範常與 IEC 60060、IEC 60364 與 IEC 62305 相互援引。
4. IEC 60060：高壓電測試技術(High-voltage test techniques)，此一技術規範包含直流與交流的高壓電測試內容。
5. IEC 60364：低壓電電氣裝置(Low-voltage electrical installations)，此一技術規範適用於所有類型的低壓電氣裝置的設計，架設與應驗證之內容。
6. IEC 62305：一般性的防雷擊保護(Lightning Protection)，此一技術規範係針對一般電力系統及訊號品質等與之相關的安裝與內容的一般性防雷電保護原則。

參考文獻

LM wind power 官方網站：

<https://www.lmwindpower.com/en/products-and-services/we-know-blades/innovation-is-the-root-of-the-future/testing/full-scale-testing>

MHI Vestas 官方網站：<http://www.mhivestasoffshore.com/>。

Jesse Broel and Bruce Hamilton, Supply Chain Assessment 2014 — Wind Energy, Navigant Research, 2014.

Juliana de Almeida Yanaguizawa Lucena and Klayton Ângelo Azevedo Lucena, Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line, pp1-16, Clean Energy, 2018.

Paul Dvorak, Wind Power Engineering & Development, 2010.

<https://www.windpowerengineering.com/mechanical/blades/building-a-better-turbine-blade/>

風機材料發展與國內產業鏈機會，驅動台灣風能產業鏈契機與願景研討會，上緯國際投資控股股份有限公司，2019 年 5 月 24 日。

離岸風力發電，John Twidell and Gaetano Gaudiosi 著，國立台灣大學工程科學及海洋工程系所（林輝政、江茂雄、吳元康、林博雄、黃心豪、蒯光陸、鄭錦榮）審定，新北市：世茂出版，2014 年。