

美國陸域風力發電用金屬材料發展現況與展望

金屬中心產業研究組 蔣禮霞

出版日期：2013.09.09

一、美國陸域風力發電現況

美國風力發電年產量已從 2000 年的 25 億瓦增加至 2009 年的 350 億瓦，年均增長率約為 23%，並於 2008 年及 2009 年分別佔美國總發電量的 1.3% 及 1.8%，而下一階段則是以 2030 年美國總發電的 20% 為目標。在風力發電成長歷程中，蒐集原材料、運輸組件、架設風力渦輪機、實際運行、退役及回收等為必經的五個階段。其中，原材料每年平均約需要 6.8 百萬公噸的混凝土、1.5 百萬公噸的鋼材、31 萬公噸的鑄鐵、4 萬公噸的銅、及 380 公噸的稀土釹元素。而部件的部分則以直驅式永磁發電機(direct-drive permanent magnet generators)為主要發展，去除齒輪箱的直驅式永磁發電機可於低風速時具有高效率、低噪音、高壽命、減小機組體積、降低運行維護成本等諸多優點。至於運輸及安裝成本則會因為陸域風力渦輪機設於偏遠地區而相當昂貴，並且讓日常維護和不定期的維修成本相當高。所以，努力開發低成本且便於運輸和安裝的發電塔裝置為目前的首要任務。

二、風力發電主要部件

機艙(Nacelle)

機艙佔風力渦輪機 25% 到 40% 的重量且包含許多能量轉換與生成的設備，譬如傳動系部件(軸承、聯軸器、齒輪、發電機、與軸柄)以及分析和輔助設備(風速計、制動器、控制器、轉換器、冷卻系統、傳感器、與偏航驅動器系統)，這些部件及設備皆需使用鋁、鑄鐵、銅、塑料、不銹鋼、鋼合金等材料。現階段的能量轉換與生成是透過增速的齒輪箱及發電機將蒐集到的能量轉換為電能。目前，許多美國的公共事業使用三階齒輪箱的風力渦輪機，將發電機所得到的高轉速、低扭矩轉換為低轉速、高扭矩，藉以獲得較多的能量。然而，扭矩增加的速度並沒有比增加轉子直徑所產生的能量來得快，而增加轉子直徑又會增加齒輪的壓力及齒輪箱的維護費用，所以，若要以大型渦輪機為趨勢的話，則變速箱的價格將會越來越昂貴。因此，不需要齒輪箱的風力發電機也大幅增加其使用量，譬如多台發電傳動配置系統的風力發電機及直驅式風力發電機。不需要齒輪箱的風力發電機可以使用較少的部件，也可降低維護及營運成本。為了要滿足 2030 年有 20% 供應電力來自風力發電的目標，2010 年至 2030 年之間，商用風力渦輪機產業將需要 36 至 44 百萬公噸的鑄鐵及鋼鐵，平均每年 1.8 百萬公噸，此需求量佔 2008 年美國總

消費量不到 2%。另外，因為風力發電廠往往較偏離市區，所以風力渦輪機也需要大量的銅線作為電源連接，2010 年至 2030 年之間，風力渦輪機將需要 37 至 75 萬公噸的銅線及電纜，平均每年 1.5 至 4 萬公噸，此需求量佔 2008 年美國精煉銅之消費量不到 2%。

2006 年起，GE Energy、Siemens AG、及 Vestas Wind Systems A/S (Vestas)等製造商開始使用永磁發電機系統，傳統以銅線纏繞電磁鐵的作法已被永久磁鐵使用在轉子中所取代，如此一來，不僅可減少銅線纏繞和定子線圈的重量，也可減低使電磁鐵產生作用所需要的能量。將永久磁鐵使用在電源轉換器上可提供較為彈性、靈活、且變速的能量控制，但電源轉換過程中的能量損失將導致成本增加為其缺點。因此，可用性、成本、及效率為三項主要考量的重點。製作永磁發電機所需要的稀土元素大多來自中國大陸，2009 年，全球約有 96%的稀土元素為中國大陸所生產。隨著中國大陸漸漸增加其稀土元素的使用量，當局宣布 2010 年下半年稀土氧化物的出口配額將減少至 77%，此限制稀土出口的措施一出將直接影響全球稀土元素的供應。以 2030 年的目標為例，約需要 560 公噸的釹或 650 公噸的氧化釹，而在中國大陸當局的政策之下，若要滿足 2030 年的目標，原料的競爭與搶奪將是未來的隱憂。

轉子(Rotor)

轉子通常佔風力發電機組 10%至 14%的重量，主要包含葉片、葉片延伸桿、旋翼葉轂、槳距驅動系統等部分。葉片主要由環氧樹脂粘合的玻璃纖維增強塑料及輕質芯材所構成。截至 2009 年，葉片設計以增加複合材料的使用為趨勢，如碳纖維增強塑料，這些塑料可以在重量減輕的同時使葉片硬度增加並提高抗疲勞性能。此外，葉片的設計與配置則可因風的特性不同而因地制宜，在風速較低的地方，可以使用較長的葉片以增加能量的捕獲。另外，轉子的可變槳距驅動系統則可藉由槳距自動調整的同時來改變風的模式、減少刀片的壓力、並讓葉片轉速保持在設計的範圍裡。為了要滿足 2030 年有 20%供應電力來自風力發電的目標，2010 年至 2030 年之間約需要 2.3 至 2.7 百萬噸的玻璃纖維，平均每年需要 11 至 11.5 萬公噸的玻璃纖維，以及 1.4 萬公噸的複合材料，而這些估計約佔 2008 年玻璃纖維使用量的 14%。

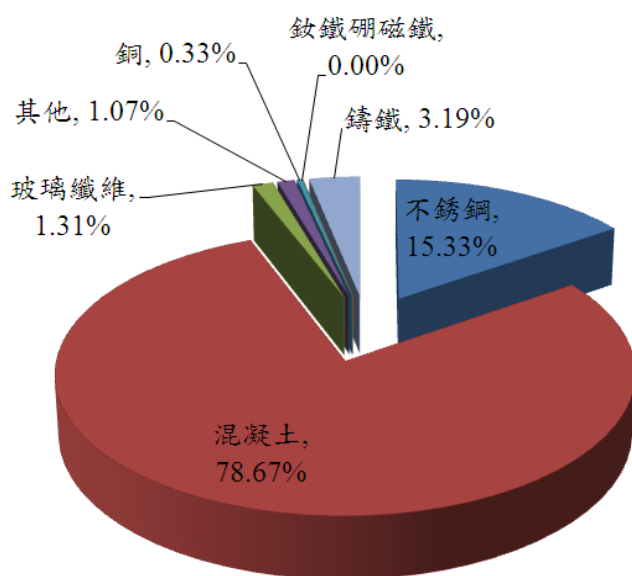
塔架(Tower)

塔架以混凝土基座為主，通常佔風力發電機組總重量的 30%到 65%，除了做為渦輪機葉片和機艙的支撐系統之外，也是電氣和電子傳輸接地的導管，在美國最廣泛使用的塔式配置包括客製化設計的型鋼混凝土基底。為了要滿足 2030 年有 20%供應電力來自風力發電的目標，據估計，未來將需要 1.35 至 6.15 億公噸的混

凝土，平均每年需要 6.8 百萬公噸至 2.6 千萬公噸的混凝土，而此估計不到美國 2008 混凝土使用量的 2%。

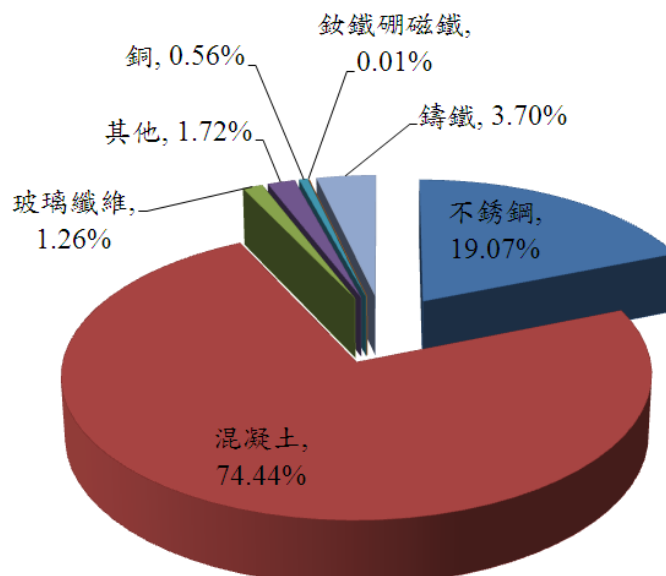
三、風力發電未來材料使用

2000 年至 2008 年，GE Energy 和 Vestas 所生產的渦輪機約佔美國風力渦輪機總產量的 52%，因此，這些製造商所生產的風力渦輪機便成為現今美國使用風力渦輪機之代表。不過，製造商們持續突破現今的技術與使用的材料，大型風力渦輪機的發展將成為下一代風力渦輪機代表。針對現今 1.5MW 的陸上風力渦輪機及新一代 3.0MW 的陸上風力渦輪機，美國地質調查局利用相關的公開資訊及主要製造商們所提供之相關訊息，整理出兩代渦輪機所需要的材料清單及數量。



圖一：現今 1.5MW 陸上風力渦輪機材料用量比重

資料來源：Wind Energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry From 2010 through 2030, David R. Wilburn /金屬中心產業研究組整理



圖二：新一代 3.0MW 陸上風力渦輪機材料用量比重

資料來源：Wind Energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry From 2010 through 2030, David R. Wilburn /金屬中心產業研究組整理

雖然新一代 3.0MW 陸上風力渦輪機的轉子葉片將會增加尺寸，但因為技術的改良，每片葉片所需要的玻璃纖維和碳纖維的預估用量卻較現今 1.5MW 陸上風力渦輪機的用量減少。同樣在新一代渦輪機材料使用上也將減少的材料還有鋼鐵和混凝土，兩代的風力發電機都需要大量的鋼鐵和混凝土，唯新一代塔材料在條塊分割和強度的進步，使塔基設計可更具效能且塔內構件可更輕巧，因此，鋼鐵和混凝土較前一代減少。另外，現今所使用的風力渦輪機通常沒有使用永久磁鐵，

所以在釹鐵硼磁鐵的部分是沒有需求的，但對於新一代 3.0MW 陸上風力渦輪機來說，估計將會有 20%使用永磁發電機，因此釹鐵硼磁鐵的使用比重將會增加。

四、總結

風力發電具有豐富、可再生、環保、具經濟競爭力等優點的同時，也有不少缺點值得被討論，譬如初期投資成本較高、材料供應面臨短缺的問題、大面積的土地需求、及鳥害或噪音等對於環境的影響。其中，在材料的部分，若要朝向 2030 年風力發電佔美國發電量 20%此目標，則每年平均約需消耗 6.8 百萬公噸的混凝土、1.5 百萬公噸的鋼材、31 萬公噸的鑄鐵、4 萬公噸的銅、以及 380 公噸的稀土釹元素。這些材料裡，除了稀土釹元素之外，其他的材料需求僅佔美國 2008 年消費量不到 3%。

中國大陸是稀土元素主要的供應國家，隨著經濟發展及產業需求，中國大陸的稀土元素內需市場也逐漸成長以致需要控制出口量。於是，中國大陸在兩年前開始調漲稀土元素的價格，不論這是中國大陸的政治工具還是保護國內經濟的手段，美國都需要想辦法來確保稀土元素的供應不致短缺。為了避免未來可能的風險，美國地質調查局和能源部已於全國展開搜索稀土元素的行動，並在美國西部早年淘金熱時期遺留下來的廢土和石塊找尋著可能存在的稀土元素。美國地質調查局的科學家 Alan Koenig 也指出，希望可以在這些廢土石塊中，取出珍貴的稀土元素。

不論未來美國是否能順利達成 2030 年風力發電佔總發電 20%的目標，目前能確定的是在這發展過程中，仍會持續地需要大量的鋼鐵、混凝土、銅、玻璃纖維、稀土元素等材料。在達到 2030 年的目標之前，仍有許多問題尚待解決，譬如地點的選擇是否會被當地居民或環保團體反對、電路該如何配置、組件的成本提升、以及昂貴的運輸費用等等，此外，政治、經濟、及相關技術條件也與未來的發展息息相關。