

# 风力发电机叶片技术发展概述

潘 艺, 周鹏展, 王 进

(株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 简述国内外风力发电以及风机叶片技术的发展现状, 并对风机叶片技术在复合材料、结构设计、翼型和成型工艺等方面的发展情况进行了比较详细的论述, 指出我国丰富的风能资源及产业政策支持, 将给我国的风机叶片产业的发展带来机遇。

**关键词:** 风力发电; 风机叶片; 复合材料; 结构设计

**中图分类号:** TK89

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2007)03-0048-04

## Overview of the Technical Development for the Blade of Wind Power-Generation

Pan Yi, Zhou Pengzhan, Wang Jin

(Zhuzhou Times New Materials Technology Co. Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The current development of the wind power-generation and the technology of wind turbine blade at home and aboard is briefly introduced, then the composites, structural design, airfoil, and molding of the technology is also elaborated. Finally, the development trend will bring good opportunity to the development of wind turbine blade industry with support of industrial policy and the abundant wind resources.

**Key words:** wind power-generation; wind turbine blade; composites; structure design

## 1 概述

随着世界能源危机的日益严重, 以及公众对于改善生态环境要求的呼声日益高涨, 风能作为一种清洁的可再生能源日益受到各国政府的重视。目前, 全世界约有 50 个国家颁布了支持可再生能源发展的相关法律法规, 对风电发展起到了至关重要的作用, 风力发电产业正逐步发展成为初具规模的新兴产业<sup>[1,2]</sup>。目前, 各国正加快对风力发电机组的研究步伐, 不断推出新的技术装备。

风力发电机组是由叶片、传动系统、发电机、储能设备、塔架及电器系统等组成的发电装置。要获得较大的风力发电功率, 其关键在于要具有能轻快旋转的叶片。所以, 风力发电机叶片(简称风机叶片)技术是风力发电机组的核心技术, 叶片的翼型设计、结构形式, 直接影响风力发电装置的性能和功率, 是风力发电机中最核心的部分。由于风机叶片的尺寸大、

外形复杂, 并且要求精度高、表面粗糙度低、强度和刚度、质量分布均匀性好等, 使得叶片技术成为制约风力发电大力发展的瓶颈<sup>[3,4]</sup>。下面分别介绍风机叶片技术在材料、结构设计、翼型和成型工艺等方面的发展情况。

## 2 风机叶片材料的发展

风机叶片材料的强度和刚度是决定风力发电机组性能优劣的关键。目前, 风机叶片所用材料已由木质、帆布等发展为金属(铝合金)、玻璃纤维增强复合材料(玻璃钢)、碳纤维增强复合材料等, 其中新型玻璃钢叶片材料因为其重量轻、比强度高、可设计性强、价格比较便宜等因素, 开始成为大中型风机叶片材料的主流。然而, 随着风机叶片朝着超大型化和轻量化的方向发展, 玻璃钢复合材料也开始达到了其使用性能的极限, 碳纤维复合材料(CFRP)逐渐应用到超大型

收稿日期: 2007-04-31

作者简介: 潘 艺(1970-), 女, 江西余干人, 株洲时代新材料科技股份有限公司工程师, 主要从事投资规划工作。

风机叶片中。

具体而言, 由于应用场合的不同, 风机叶片材料的选择也会有所不同。一般较小型的叶片(如 22 m 以下)选用量大价廉的 E- 玻纤增强塑料(GFRP), 树脂基体以不饱和聚酯为主, 也可选用乙烯酯或环氧树脂; 而较大型的叶片(如 42 m 以上)一般采用 CFRP 或 CF 与 GF 混杂的复合材料, 树脂基体以环氧树脂为主。例如: LM 公司开发的应用于 5 MW 风力发电机上的 61.5 m 长的大型风机叶片, 其质量为 17.7 t, 在横梁和端部就使用了碳纤维增强材料。德国 Nordex Rotor 公司开发的 56 m 长的风机叶片也采用了碳纤维。而且他们认为, 当叶片尺寸大到一定程度时, 由于使用碳纤维增强, 玻纤和树脂的用量可以减少, 其综合成本可以做到不高于玻纤复合材料<sup>[4]</sup>。

为满足风机叶片的使用要求, 目前玻璃纤维也在发生技术革新。例如, 欧文斯科宁开发的 WindStrand 新一代增强型玻璃纤维, 可以在不增加叶片成本的情况下提高叶片的性能。据报道, WindStrand 可以提高叶片的硬度和强度, 使叶片具有良好的抗疲劳性能, 从而可以提高叶片的抗风性能, 增长叶片的寿命, 提高叶片的能量转换率。与传统的 E- 玻纤相比, 增强型 WindStrand 可以使叶片的重量降低 10%, 从而最终可以降低风电的成本。

风力发电机组在工作过程中, 风机叶片要承受强风载荷、砂粒冲刷、紫外线照射、大气氧化与腐蚀等外界因素的作用。为了提高复合材料叶片的承载能力、耐腐蚀和耐冲刷等性能, 必须对树脂基体系统进行精心设计和改进。例如, 采用性能优异的专用风能环氧树脂代替不饱和聚酯树脂, 可以改善玻璃纤维/树脂界面的粘结性能, 从而提高叶片的承载能力, 扩大玻璃纤维在大型叶片中的应用范围; 同时, 为了提高复合材料叶片在恶劣工作环境中长期使用性能, 还开发了耐紫外线辐射的新型环氧树脂系统<sup>[4-6]</sup>。

据报道, 爱尔兰 Gaoth 风能公司与日本三菱重工和美国 Cyclics 公司已开始探讨研制低成本热塑性复合材料叶片。在爱尔兰有关企业的资助下, Limerick 大学和 Galway 国立大学开展了热塑性复合材料的先进成型工艺的基础研究。为了解决热塑性复合材料叶片的纤维浸渍和大型热塑性复合材料结构件制造过程中的树脂流动问题, 美国的 Cyclics 公司开发出了一种低粘度的热塑性工程塑料基体材料——CBT 树脂。这种像水一样低粘度的热塑性工程塑料 CBT 树脂流动性好, 易于浸渍增强材料, 赋予复合材料良好的韧性, 同时可以充分发挥增强材料的性能, 提高叶片的耐冲击性能与抗振能力<sup>[4-6]</sup>。

与热固性复合材料相比, 热塑性复合材料具有重量轻、抗冲击性能好、生产周期短等一系列优异性能。

在相同的尺寸条件下, 热塑性复合材料由于密度低, 叶片的质量更轻, 随之带来安装塔座和发电机质量的减小。但是, 该类复合材料的制造工艺技术与传统的热固性复合材料成型工艺差异较大, 制造成本较高, 成为限制热塑性复合材料用于风力发电叶片的关键问题<sup>[4-7]</sup>之一。

### 3 风机叶片结构设计的发展

风机叶片结构设计的目的是要通过空气动力学分析, 充分利用复合材料的性能, 使大型叶片以最小的质量获得最大的扫风面积, 从而使叶片具有更高的捕风能力。随着风力发电机额定功率的增大, 风机叶片的质量和费用随着其长度的增加也迅速的增加。如何通过新的结构设计方案和提高材料的性能来降低叶片的质量便至关重要了。

在玻璃钢叶片的结构形式中, 叶片剖面及根端构造的设计最为重要。选择叶剖面及根端形式, 要考虑玻璃钢叶片的结构性能、材料性能及成型工艺。风机叶片要承受较大的载荷, 通常要考虑 50~60 m/s 的极端风载。为提高叶片的强度和刚度, 防止局部失稳, 玻璃钢叶片大都采用主梁加气动外壳的结构形式。主梁承担大部分弯曲载荷, 而外壳除满足气动性能外, 也承担部分弯曲载荷。主梁常用 D 型、O 型、矩形和双拼槽钢等形式<sup>[8,9]</sup>。

德国的 Enercon 公司对叶片结构设计进行了深入研究。发现当风机叶轮的旋转直径由 30 m 增加到 33 m 时, 由于叶片长度的增加, 叶片转动时扫风面积增大, 捕风能力大约提高 25%; 同时, 还对 33 m 叶片进行了空气动力实验, 经过精确的测定, 叶片的实际气动效率为 56%, 比 Betz 计算的最大气动效率低约 3~4 个百分点。为此, 该公司对大型叶片外形型面和结构都进行了必要的改进: 为抑制生成扰流和旋涡, 在叶片根部安装“小翼”; 为改善和提高涡轮发电机主舱附近的捕风能力, 对叶片根部进行重新改进, 缩小叶片的外形截面, 增加叶径长度; 对叶片顶部和根部之间的型面进行优化设计。在此基础上, Enercon 公司开发出了旋转直径 71 m 的 2 MW 风力发电机组, 并且在 4.5 MW 风力发电机设计中继续采用上述技术, 在旋转直径为 112 m 的叶片根部仍安装有倾斜“小翼”, 使得旋转直径为 112 m 的叶片的运行噪音小于旋转直径为 66 m 的叶片运行时所产生的噪音<sup>[4]</sup>。

丹麦的 LM 公司在 61.5 m 复合材料叶片样机的设计中对其叶片根部固定方案进行了改进, 尤其是固定螺栓与螺栓之间的周围区域。这样, 在保持现有根部直径的情况下, 能够支撑的叶片长度可比改进前大约增加 20%。另外, LM 公司的叶片预弯曲专有技术也可以进一步降低叶片重量和提高产能。

日本机械技术研究所利用杠杆原理开发的小型抗强风柔性结构风力发电机代表了一种新的设计理念。其叶片半径 7.5 m, 采用玻璃纤维增强塑料制造, 塔高 15 m、重 3.2 t。发电机组采用活络式转子, 允许桨叶、轮毂摇动, 能缓和空气动力负荷反复变动产生的冲击与振动, 提高玻璃钢叶片及轮毂的抗疲劳性能, 从而延长工作寿命。另外, 由于采用轴与叶片柔性连接的新结构, 使强风时加到叶片上的力可减少 50%; 而且随着风力增强, 该叶片的角度会自动变化, 使风在叶片后方自行消减, 自动维持 80 r/min 的转速, 风速为 8 m/s~25 m/s 时可稳定输出 15 kW 电力<sup>[4-6]</sup>。

## 4 风机叶片翼型的发展

风机叶片翼型气动性能的好坏, 直接决定了叶片风能转换效率的高低。低速风机叶片采用薄而略凹的翼型; 现代高速风机叶片都采用流线型叶片, 其翼型通常从 NACA 和 Göttingen 系列中选取, 这些翼型的特点是阻力小, 空气动力效率高, 而且雷诺数也足够大。

早期的水平轴风机叶片普遍采用航空翼型, 例如 NACA44xx 和 NACA230xx, 因为它们具有最大升力系数高、桨距动量低和最小阻力系数低等特点。

随着风机叶片技术的不断进步, 人们逐渐开始认识到传统的航空翼型并不适合设计高性能的叶片。美国、瑞典和丹麦等风能技术发达国家都在发展各自的翼型系列, 其中以瑞典的 FFA-W 系列翼型最具代表性。FFA-W 系列翼型的优点是在设计工况下具有较高的升力系数和升阻比, 并且在非设计工况下具有良好的失速性能。

目前, 世界上最大的风机叶片生产商——丹麦的 LM 公司已开始在大型风机叶片上采用 FFA-W 系列翼型。风力发电机专用翼型将在风机叶片设计中起着越来越重要的作用, 在叶片翼型的改进上也还有很大的发展空间。同时, 采用柔性叶片也是一个发展方向, 利用新型材料进行设计制造, 使其在风况变化时能够改变它们的空气动力型面, 从而改变空气动力特性和叶片的受力状况, 增加叶片运行的可靠性和对风的捕获能力。另外, 在开发新的空气动力装置上也进行了大量尝试, 如在风机叶端加一小翼。由 Aero Vironment 公司提出的 Aero Vironment 型小翼被实际用于水平轴风力发电机, 并成功地提高了风力发电机的输出功率<sup>[3-6]</sup>。

在国内, 风力发电机翼型的研究工作仍停留在普通航空翼型阶段, 最有代表性的是 NACA 系列, 对新翼型的研究很少。由于缺乏风力发电机专用新翼型的几何参数和气动性能参数, 直接影响了我国大型风力发电机气动设计水平。

## 5 风机叶片成型工艺的发展

随着风力发电机功率的不断提高, 安装发电机的塔座和捕捉风能的复合材料叶片做得越来越大。为了保证发电机运行平稳和塔座安全, 不仅要求叶片的质量轻, 还要求叶片的质量分布必须均匀、外形尺寸精度控制准确、长期使用性能可靠。若要满足上述要求, 需要有相应的成型工艺来保证。

传统复合材料风机叶片多采用手糊工艺制造。手糊工艺生产风机叶片的主要缺点是生产效率低、产品质量均匀性不好、产品的动静平衡保证性差, 废品率较高。特别是对高性能的复杂气动外形和夹芯结构叶片, 还往往需要粘接等二次加工, 生产工艺更加复杂和困难。由于手糊过程中含胶量不均匀、纤维/树脂浸润不良及固化不完全等, 常会引起风机叶片在使用中出现裂纹、断裂和变形等问题。因此, 目前国外的高质量复合材料风机叶片往往采用 RIM、RTM、缠绕及预浸料/热压工艺制造, 其中 RIM 工艺投资较大, 适宜中小尺寸风机叶片的大批量生产 (>50 000 片/年); RTM 工艺适宜中小尺寸风机叶片的中等批量的生产 (5 000~30 000 片/年); 缠绕及预浸料/热压工艺适宜大型风机叶片批量生产<sup>[4-6]</sup>。

RTM 工艺的主要原理: 在模腔中铺放好按性能和结构要求设计好的增强材料预成型体, 采用注射设备将专用低粘度注射树脂体系注入闭合模腔, 模具具有周边密封和紧固以及注射及排气系统, 以保证树脂流动顺畅并排出模腔中的全部气体和彻底浸润纤维, 并且模具有加热系统可进行加热固化而成型复合材料构件。由于 RTM 工艺具有叶片整体闭模成型, 产品尺寸和外形精度高; 初期投资小; 制品表面光洁度高; 成型效率高; 环境污染小等优点, 开始成为风机叶片的重要成型方法<sup>[8,10]</sup>。

大型风机叶片采用的工艺目前主要有 2 种: 开模手工铺层和闭模真空浸透。用预浸料开模手工铺层工艺是最简单、最原始的工艺, 不需要昂贵的工装设备, 但效率比较低, 质量不够稳定, 通常只用于生产叶片长度比较短和批量比较小的时候; 闭模真空浸透技术被认为效率高、成本低、质量好, 因此为很多生产单位所采用。采用闭模真空浸透工艺制备风机叶片时, 首先把增强材料铺覆在涂覆硅胶的模具上, 增强材料的外形和铺层数根据叶片设计规定, 在先进的现代化工厂, 采用专用的铺层机进行铺层, 然后用真空辅助浸透技术输入基体树脂, 真空可以保证树脂能很好地充满到增强材料和模具的每一个角落。真空辅助浸透技术制备风机叶片的关键有 3: 1) 优选浸透用的基体树脂, 特别要保证树脂的最佳粘度及其流动特殊性; 2) 模具设计必须合理, 特别对模具上树脂注入孔的位

置、流道分布更要注意, 确保基体树脂能均衡地充满任何一处; 3) 工艺参数要最佳化, 真空辅助浸透技术的工艺参数要事先进行实验研究, 保证达到最佳化。固化后的叶片由自动化操纵的设备运送到下一道工序, 进行打磨和抛光等。由于模具上涂有硅胶, 叶片不再需要油漆。此外还必须注意, 在工艺制造过程中, 尽可能减少复合材料的孔隙率, 保证增强纤维在铺放与成型过程中保持平直, 是获得良好力学性能的关键<sup>[7-9]</sup>。

## 6 风机叶片的发展前景

风力发电具有资源再生、容量巨大、无污染、综合治理成本低等优点, 是未来电力的先进生产力。而在风力发电设备中, 最核心的部分是叶片。按叶片造价在总机中占 1/4 成本计算, 未来 15 年中国风机叶片的国内市场规模将超过 500 亿元。“十一五”规划明确提出, 新建风电场的风机叶片等风电设备的国产化率必须达到 70 % 以上。可见, 国内风机叶片市场前景非常广阔。这必将给国内风机叶片制造业的发展带来巨大机遇。

目前国外风机叶片大量采用复合材料制造, 并向大型化、低成本、高性能、轻量化、多翼型、柔性化方向发展<sup>[4,6-8]</sup>。而国内的风机叶片尚处于起步阶段, 离高性能叶片的要求还相距甚远。现有制造并销售叶片的国内厂家主要是天津 LM、中复连众、无锡中航惠腾、上海玻璃钢研究所、北京万电公司等少数厂家, 远

远不能满足国内叶片市场发展的需求, 极大的依赖于进口。因此, 大力增加研究和开发技术上的投入, 大力培养风电人才, 突破风机叶片技术的瓶颈限制, 大力开发风电能源, 对于缓解我国将来的能源危机, 具有战略意义。

### 参考文献:

- [1] 郭太英, 黎发贵. 从国外风电发展探讨我国风电发展思路[J]. 水电勘测设计, 2006, 58 (2): 20-24.
- [2] 周鹤良. 我国风力发电产业发展前景与策略[J]. 交流与电力牵引, 2006 (2): 4-8, 38.
- [3] 盖晓玲, 田 德, 王海宽. 风力发电机叶片技术的发展概况与趋势[J]. 农村牧区机械化, 2006, 29 (4): 53-56.
- [4] 张晓明. 风力发电复合材料叶片的现状与未来[J]. 纤维复合材料, 2006, 60 (2): 60-63.
- [5] 赵稼祥. 复合材料在风力发电上的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28 (4): 1-4.
- [6] 罗益锋. 世界风能及其叶片材料发展概况与趋势[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28 (5): 1-7.
- [7] 谢晓芳, 卞子罕. 国外风机叶片材料的新进展[J]. 玻璃钢, 2006 (4): 21-25.
- [8] 邱冠雄, 刘良森, 姜亚明. 纺织复合材料与风力发电[J]. 纺织导报, 2006 (5): 56-61, 64.
- [9] 钟方国, 赵鸿汉. 风力发电发展现状及复合材料在风力发电上的应用[J]. 纤维复合材料, 2006 (3): 48-54.
- [10] 孙玉敏, 段跃新, 李 丹, 等. 风机叶片 RTM 工艺模拟分析及其优化[J]. 复合材料学报, 2005 (4): 23-29.

- .....
- (上接第 29 页)
- Scheme for implementing quantum dense coding in cavity QED[J]. Phys. Rev. A, 2005, 71: 034304-1~3.
- [8] Tan Jia, Fang Mao-Fa. Practical protocol for multi-party superdense coding by using multi-atom in cavity QED[J]. Chinese Phys, 2006, 15 (8): 1895-1699.
  - [9] Zheng Shi-Biao, Guo Guang-Can. Efficient Scheme for Two-Atom Entanglement and Quantum Information Processing in Cavity QED[J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 2392-2395.
  - [10] Zheng Shi-Biao, Guo Guang-Can. Entangling and cloning machine with increasing robustness against decoherence as the number of qubits increases[J]. Phys. Rev. A., 2005, 72: 064303-1~4.
  - [11] Zheng Xiao-Juan, Fang Mao-Fa, Cai Jian-Wu, Cao Shuai, Liao Xiang-Ping. Strong-driving-assisted generation of two-

- mode nonclassical states and swap gate operation in trapped-ion cavity QED[J]. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2006, 39 (20): 4701-4707.
- [12] Semiao F L, Vidiella-Barranco A, Roversi J A. Entanglement between motional states of a single trapped ion and light [J]. Phys. Rev. A., 2001, 64: 024305-1~3.
  - [13] Mundt A B, Kreuter A, Becher C, et al. Coupling a Single Atomic Quantum Bit to a High Finesse Optical Cavity[J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 103001-1~4.
  - [14] Kreuter A, Becher C, Lancaster G P T, et al. Experimental and theoretical study of the 3d 2D-level lifetimes of <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup>[J]. Phys. Rev. A, 2005, 71: 032504-1~12.
  - [15] Varcoe B T H, Brattke S, Weidinger M, Walther H. Preparing pure photon number states of the radiation field[J]. Nature, 2000, 403: 743-746.