

# 兆瓦级复合材料风电叶片的设计与制备研究

肖加余<sup>1</sup>, 曾竟成<sup>1</sup>, 杨孚标<sup>1</sup>, 彭超义<sup>1</sup>, 杨军<sup>2</sup>, 唐先贺<sup>2</sup>, 潘艺<sup>2</sup>, 曾鸿平<sup>2</sup>

(1 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南长沙, 410073;

2 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南株洲天元区海天路)

风能是一种可大规模商业化应用的可再生能源, 在国际社会节能减排、保护环境和可持续发展的要求下, 许多国家把风能开发列为国家战略规划之一。全球风能理事会 GWEC 统计: 1995 年以来风电年均增长 28% 以上, 2008 年风电装机达 1.2 亿 KW, 每年发电约 2600 亿度, 并减少 CO<sub>2</sub> 排放量 1.58 亿吨。欧洲《风力 12》预测, 到 2020 年全球的风电装机将达 12.31 亿 KW, 风电将占全球发电总量的 12%。我国有关权威部门确定 2020 年达到 1 亿 KW 的风电装机目标, 并制定了一些促进风电发展的政策, 我国风电近几年以连年翻番的方式发展。

风电叶片是风电机组的核心部件之一, 是目前制约我国风电产业大力发展的瓶颈。风电叶片成本约占风电机组总成本的 1/5~1/4, 其气动效率决定了风电机组利用风能的能力。风电每千瓦时发电成本随风电机组单机功率增加而下降, 风电机组大型化已经成为风力发电的发展趋势。风电叶片从风中捕获的能量近似与叶片长度的平方成正比, 所以风电叶片也在向大型化方向发展。随着风电机组的发展, 目前变桨距叶片开始成为 MW 级风电叶片的主流。

为了描述风电叶片的气动性能, 国内外学者先后提出了动量理论、动量矩理论、叶素理论、动量-叶素理论四大理论。由于受旋转效应、塔影效应、叶尖损失等的影响, 国内外学者又提出了几种基于动量-叶素理论的修正方法。风在空间域和时间域上都是复杂多变的, 风电叶片的气动分析很难求解解析解, 多采用基于动量-叶素理论的 BLADED 软件进行数值分析。

动量理论假设风轮前后的气流是不可压缩的均匀定常流, 并假设风轮是一个理想的充满叶片的圆盘, 最后根据动量定理和能量守恒定理, 得出了风能利用的极限值为 0.593。动量矩理论考虑了叶轮转动时对气流的旋转作用, 通过计算气流单元体的旋转力矩, 并根据  $P = \int \omega dM$  求解功率, 基于动量定理和能量守恒, 得出风能利用效率。叶素理论把叶片沿展向分成许多微段, 这些微段就是叶素。它假设每个叶素上的流动互不干扰, 把作用在每个叶素上的力和力矩沿展向积分, 就可以求得作用在叶片上的力和力矩。动量叶素理论给出了轴向和环向诱导因子 a 和 b 的控制方程, 并通过普朗特修正、Wilson 修正、Glauert 修正等方法来对叶片模型进行修正, 从而可以求解出各个叶素上的力和力矩, 是目前最常用、最成熟的叶片设计方法。

以一款 40.3 米长的复合材料叶片为对象做气动分析, 包括: 基于 BLADED 的叶片气动模型、基于 BLADED 的风电机组风轮模型、基于 BLADED 的叶片气动功率结果分析、基于 BLADED 的叶片风能利用系数结果分析; 同时以此型叶片为对象做结构分析, 包括: 叶片几何模型、材料基本性能、模型网格划分、模型加载; 对叶片结构有限元结果进行了分析讨论, 包括: 叶片应力分布、叶根反力、叶尖挠度、模态等。

研究了复合材料风电叶片的制备工艺选定原则, 包括制备工艺路线的选择, 包括: 手糊工艺、预浸料工艺, 以及 LCM 工艺中的 VRIM (Vacuum Resin Infusion Molding)、VIMP (Vacuum Infiltration Molding Process)、RTM (Resin Transfer Molding)、VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 等; 研究复合材料风电叶片原材料, 包括: 增强材料、基体材料、结构胶黏剂、泡沫夹芯材料、涂层材料、制备原模的代木材料、高温胶衣树脂材料等; 研究了原模制备工艺、模具的制备工艺。重点研究了 VRIM、VIMP 和 VARTM 制备复合材料风电叶片的工艺, 包括: 工艺原理、工艺过程、工艺对基体树脂的要求、固化工艺以及高温后固化过程, 还有叶片的胶结组装。包括: 组装过程、组装工艺对结构胶黏剂的要求等。分析了复合材料叶片损伤原因, 以 50m 长叶片为对象分析了叶片的成本构成。指出: 大尺寸复合

材料风电叶片制备工艺技术的发展趋势是，一体化设计与整体制备技术。叶壳和大梁无需粘合，叶片结构整体一次成型；生产效率提高；工艺技术含量高；对树脂，纤维，芯材，模具及设备提出更高要求；目前世界上只有一两家掌握该技术，如 Bonus 公司采用 VARTM 工艺整体制备成的 52m 长的复合材料叶片。

研究了兆瓦级复合材料风电叶片的地面静力考核实验方法，并成功对 40.3 米长的叶片进行了考核，结果表明考核方法符合德国 GL 认证要求，同时该款叶片达到了设计要求，符合 GL 认证要求。