

大型风机叶片材料的应用和发展

李成良¹, 王继辉¹, 薛忠民²

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 北京玻璃钢院复合材料有限公司, 北京 102101)

摘要: 本文介绍了目前风力发电的现状大型风机叶片材料的应用与发展, 并分析了叶片材料的发展趋势, 提出了一些相关的建议。

关键词: 风力发电; 叶片材料; 发展趋势

中图分类号: TK8; TM614 **文献相当规模码:** A **文章编号:** 1003-0999 (2008) 04-0049-04

1 概述

风能作为一种清洁的可再生能源, 其开发潜力已被世界各国所认可。到 2006 年底, 风电发展已涵盖世界各大洲, 装机容量已达 7422 万 kW, 比上年增长 1520 万 kW, 增长 25.6%, 并继续呈现快速增长趋势, 从图 1 中 2006 年世界新增装机容量的国家分布情况可见一斑。来自电力部门的数据显示, 截至 2006 年底, 我国风电装机总容量已达到 260 万 kW, 新增装机容量约 134 万 kW, 比 2005 年增长 105%。根据我国最新公布的《可再生能源中长期发展规划》(以下简称《规划》), 今后一个时期, 风能将成为我国可再生能源发展的重点之一, 到 2010 年, 全国风电总装机容量达到 500 万 kW, 到 2020 年, 全国风电总装机容量达到 3000 万 kW。按照《规划》, 未来 15 年间, 我国风电年均增速 1.52 倍。新能源政策的实施和风电行业的快速发展, 为我国风电事业的发展带来了机遇和挑战。

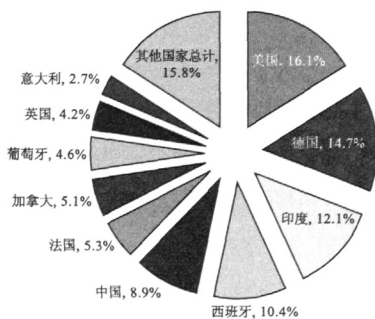


图 1 2006 年世界新增装机容量的国家分布作为风力发电装置最关键最核心的部件-叶片, 其设计与选材决定着风力发电装置的性能与功率, 是保证机组正常稳定运行的重要因素, 其成本也占到了

风机设备的 20~30%。因此, 提高叶片的综合性能、降低发电成本对叶片的设计和选材提出了更高的要求。本文就叶片的选材进行了探讨, 提出了叶片材料发展的相关建议。表 1 所示为国内外各主要风机厂叶片占风机设备成本的情况。

表 1 叶片占风机设备成本的比例

国外风机厂	丹麦 Vestas	西班牙 Gamesa	德国 Repower	印度 Suzlon
叶片占风机成本比例	20~25%	20~25%	23%	18%
国内风机厂	新疆金风	东方汽轮	华锐风电	浙江运达
叶片占风机成本比例	25%	20%	20%	25~30%

2 叶片材料的应用和发展

风力发电机组在恶劣的环境中长期不停运转, 不仅要承受强大的风载荷, 还要经受气体冲刷、砂石粒子冲击, 以及强烈的紫外线照射等外界侵蚀。在风力发电初期, 由于发电机功率小, 所需的叶片尺寸也小, 其质量分布的均匀性对发电机和塔座的影响并不明显。叶片的类型主要有木制叶片、布蒙皮叶片、钢梁玻璃纤维蒙皮叶片、铝合金等弦长挤压成型叶片等。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叶片也越做越大, 叶片的质量也越来越大, 对叶片的要求也越来越高: 质量轻且分布均匀, 外形尺寸精度控制准确; 具有最佳的疲劳强度和机械性能, 能经受暴风等极端恶劣条件和随机负荷的考验; 叶片旋转时的振动频率特性曲线正常, 传递给整个发电系统的负荷稳定性好; 耐腐蚀、抗紫外线照射和抗雷击的性能好; 发电成本较低, 维护费用最低^[7]。叶片材料越轻、强度和刚

收稿日期: 2007-11-26

基金项目: 2006BAA01A09

本文作者还有李军向和耿向明。

作者简介: 李成良, 男 (1981-), 硕士, 主要从事叶片结构校核设计研究。

度越高,叶片抵御载荷的能力就越强,叶片就可以做得越大,它的捕风能力也就越强。因此,轻质高强、耐蚀性好、具有可设计性的复合材料是目前大型风机叶片的首选材料。

2.1 玻璃纤维复合材料叶片

玻璃纤维增强聚酯树脂和玻璃纤维增强环氧树脂是目前制造风机叶片的主要材料,E-玻纤则是主要的增强材料。美国的研究表明,采用射频频率等离子体沉积去涂覆E-玻纤,可降低纤维间的微振磨损,其耐拉伸疲劳强度就可以达到碳纤维的水平。为了更好的发挥E-玻纤在结构中的强度和刚度作用,使其能与树脂进行良好匹配,目前已经开发了单向向、双向向、三轴向、四轴向甚至三维立体结构等编织形式,以满足不同的需要,使灵活的结构设计得到更好的体现。但是,E-玻纤密度较大,随着叶片长度的增加,叶片的质量也越来越重,如图2所示,完全依靠玻璃纤维复合材料作为叶片的材料已逐渐不能满足叶片发展的需要。例如,采用玻璃纤维增强聚酯树脂作为叶片用复合材料,当叶片长度为19m时,其质量为1.8t;长度增加到34m时,叶片质量为5.8t;如叶片长度达到52m,则其质量高达21t^[10]。叶片越重,对发电机和塔座要求就越高,同时也影响到发电机组的性能和效率,因此,需要寻找更好材料以适应大型叶片发展的要求。

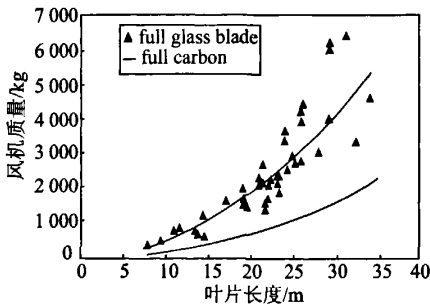


图2 风机叶片长度和质量关系图

2.2 碳纤维复合材料叶片

作为提高风能利用率和发电效益的有效途径,风力机单机容量不断向大型化发展,兆瓦级风力机已经成为风电市场的主流产品。目前,欧洲3.6MW机组已批量安装,4.2MW、4.5MW和5MW机组也已安装运行;美国已经成功研制7MW风力机;英国正在研制10MW的巨型风力机^[3]。风电机组沿着增大单机容量和提高风能转换效率的方向发展,对叶片提出了更高的要求,叶片长度的增加使得碳纤

维在风力发电上的应用不断扩大,研究表明,碳纤维(CF)复合材料叶片的刚度是玻璃纤维复合材料叶片的2~3倍,大型叶片采用碳纤维作为增强材料更能充分发挥其轻质高强的优点。丹麦Vestas的V-90型风力机容量为3.0MW,叶片长44m,其样品试验采用了碳纤维制造;西班牙Gamesa在其直径为90m叶轮的叶片制造中使用了碳纤维;丹麦NEG-Micon正在制造碳纤维增强环氧树脂的40m叶片。碳纤维叶片的性能优于玻璃纤维叶片,同样长度的碳纤维叶片比玻璃纤维叶片轻很多,如图2所示,但由于其价格昂贵,限制了它在风力发电上的大规模应用。因此,全球各大复合材料公司正在从原材料、工艺技术、质量控制等各方面进行深入研究,以求降低成本。美国Zoltek公司生产的PANEX33(48K)大丝束碳纤维具有良好的抗疲劳性能,可使叶片质量减轻40%,叶片成本降低14%,并使整个风力发电装置成本降低4.5%^[12]。现在碳纤维轴已广泛应用于转动叶片根部,因为制动时比相应的钢轴要轻得多,但在发展更大功率风力发电装置和更长转子叶片时,采用性能更好的碳纤维复合材料势在必行。

2.3 碳纤维/轻木/玻纤混杂复合材料叶片

由于碳纤维的价格是玻璃纤维的10倍左右,目前叶片增强材料仍以玻璃纤维为主。在制造大型叶片时,采用玻纤、轻木和PVC相结合的方法可以在保证刚度和强度的同时减轻叶片的质量。中材科技风电叶片股份有限公司研制的40m、1.5MW叶片的质量只有6t,在满足强度的情况下,质量大大降低。LM公司在《2004全球碳纤维展望》的报告中指出:在风力机叶片中采用碳纤维,应注意它和玻璃纤维混合时所增加的重量;其进一步开发的以玻璃钢为主的61m大型叶片,只在横梁和叶片端部选用少量碳纤维,以配套5MW的风力机^[7]。结构工程师认为,当叶片长度增加时,质量的增加要高于能量的取得,因此碳纤维或碳/玻混杂纤维的使用对抑制质量的增大是必要的。采用碳/玻混杂增强的方案,叶片可减重20~30%。德国Nodex公司为海上5MW风电机组配套研制的碳/玻混杂风机叶片长达56m,同时,Nodex公司还开发了43m(9.6t)碳/玻叶片,可用于陆上2.5MW机组。目前,碳纤维/玻璃纤维与轻木/PVC混杂使用制造复合材料叶片已被各大叶片公司所采用,轻木/PVC作为填充材料,不仅增加了叶片的结构刚度和承受载荷的能力,而且还最大程度地减轻了叶片的质量,为叶片向长且轻的方向

发展提供了有利的条件。

2.4 热塑性复合材料叶片

风能是清洁无污染的可再生能源,但退役后的风机叶片却是环境的一大杀手。目前叶片使用的复合材料主要是热固性复合材料,不易降解,而且叶片的使用寿命一般为20~30年,其废弃物处理的成本比较高,一般采用填埋或者燃烧等方法处理,基本上不再重新利用。面对日益突出的复合材料废弃物对环境造成的危害,一些制造商也开始探讨叶片的回收和再利用技术。随着人类环保意识的与日俱增,研究开发“绿色叶片”成为摆在人们面前的一大课题。所谓的“绿色叶片”,就是在叶片退役后,其废弃材料可以回收再利用,因此热塑性复合材料成为首选材料。与热固性复合材料相比,热塑性复合材料具有密度小、质量轻、抗冲击性能好、生产周期短等一系列优点,但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机叶片的关键问题。随着热塑性复合材料制造工艺技术研究工作的不断深入和相应的新型热塑性树脂的开发,制造热塑性复合材料叶片正在一步步地走向现实。

在“绿色叶片”研究的最初阶段,爱尔兰 Gaoth 公司负责 12.6m 长的热塑性复合材料叶片的制造,日本 Mitsubishi 公司负责在风力发电机上进行“绿色叶片的实验”,这项实验成功后,他们继续研究开发 30m 以上的热塑性复合材料标准叶片^[6]。为降低热塑性复合材料的成本,爱尔兰 Limerick 大学和国立 Galway 大学开展了热塑性复合材料的先进成型工艺技术的基础研究。为了解决热塑性复合材料叶片的纤维浸润和大型热塑性复合材料结构件制造过程的树脂流动性问题,美国 Cyclics 公司为此开发出一种低粘度的热塑性工程塑料基体材料-CBT 树脂,这种树脂粘度低、流动性好、易于浸润增强材料,可以更充分地发挥增强材料的性能和复合材料良好的韧性。与玻璃纤维/环氧树脂复合材料大型叶片相比较,如果采用热塑性复合材料叶片,每台大型风力发电机所用的叶片重量可降低 10% 左右,抗冲击性能大幅度提高,制造成本至少降低 1/4,制造周期至少降低 1/3,而且可以完全回收和再利用^[6]。美国 Cyclics 公司利用 CBT 树脂体系制作了全球首个 12.6m 可循环风力机叶片,该叶片退役后,平均每台风力发电机组可回收的叶片材料达 19t,此项开发更

有利于环境保护,其前景也将非常乐观。

3 展望

叶片尺寸的不断增大,使得材料也在不断改进,未来叶片材料的发展,应该从以下几个方面着手:

(1) 玻璃纤维中 S-玻纤的弹性模量比 E-玻纤高 18%,强度高 33%,在叶片应用上有很大空间,但由于其高昂的价格未能推广其在叶片上的应用,如果 S-玻纤的生产成本能降下来,那么其在风能市场上份额将不容忽视。目前美国 AGY 公司已决定加强 S-2 玻纤的生产规划和研发投入;

(2) 对碳纤维来说,价格同样是制约其大规模应用的关键因素。目前世界上宇航级小丝束碳纤维的生产主要被日本的东丽、东邦和三菱公司所垄断,但为了争夺碳纤维市场份额,很多单位以低于成本价倾销碳纤维,大丝束碳纤维和小丝束碳纤维互相争夺市场,这在一定程度上加快了制备碳纤维新技术的研究。为了降低碳纤维价格,研制低成本碳纤维,美国已建成了采用微波碳化的试验线,使制备碳纤维的成本降低约 20%;

(3) 加快发展热塑性叶片,降低热塑性复合材料的生产工艺成本,是当前叶片材料应用研究的一个热点。由于某些性能方面的不足,如耐热性和刚性较差,易于发生蠕变,且用胶粘剂胶接热塑性树脂基复合材料壳体较困难,GEC 公司认为它不适用于大型风机叶片的开发,但其可回收利用、利于环保的优点足以让更多的开发商热衷于对热塑性复合材料叶片进行开发研究;

(4) 纳米技术的进步,给叶片发展带来了新的机遇。法国 Nanoleedge Asia 公司在第十三届中国国际复合材料工业技术展览会的“技术创新与复合材料发展”专题高层研讨会上指出,Nanoleedge 碳纳米结构材料将引领复合材料领域的一场革命,纳米技术能够增加产品的抗冲击性、抗弯强度、防裂纹扩展性、导电性等多种功能,可以使新产品的发展成倍增加。碳纳米结构材料给叶片材料的发展提供了新的契机,为叶片的长度增加提供了更大空间。

参考文献

- [1] M. Jureczko, M. Pawlak, A. Mezyk. Optimization of wind turbine blade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, (6): 463-471.
- [2] Mr. Thibaud VAUGIEN. A revolution of composite field-Carbon Nanostructured materials with Nanoleedge[J]. Nanoleedge Asia, 12th September, 2007.
- [3] 太阳能光伏产业和风能发电仍是 2006 年最具投资价值产业. 能

源发展与研究, <http://www.chinase.gov.cn/> .

- [4] 赵稼祥. 世界碳纤维的现状与进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003, (02).
- [5] 刘清, 张军, 李桂菊. 2006年全球风电市场的发展状况[R]. 中国科学院武汉文献情报中心, 2007.
- [6] 中复连众. 复合材料风机叶片性能的现状与未来[R]. 2007.
- [7] 张蓓文. 风力发电机叶片材料的技术发展路线[R]. 上海情报服务平台, 2005.
- [8] 陈宗来. 大型玻风力机复合材料叶片技术及进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005, (03).
- [9] 张晓明. 风力发电复合材料叶片的现状和未来[J]. 纤维复合材料, 2006, (02).
- [10] 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, (03).
- [11] 马振基, 林育峰. 复合材料在风力发电上的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, (04).
- [12] 谢晓芳, 卞子罕. 国外风力机叶片的新进展[J]. 玻璃钢, 2006, (04).

APPLICATION AND DEVELOPMENT OF MATERIALS OF LARGE-SCALE WIND TURBINE BLADES

LI Cheng-liang¹, WANG Ji-hui¹, XUE Zhong-min²

(1. School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Beijing Composite Materials Co., Ltd., Beijing 102101, China)

Abstract: This paper presents the situation of wind power generation, the application and development of materials of large-scale wind turbine blades, and analyses are performed about the development trend of wind turbine blade materials, the correlative suggestion are put forward.

Key words: wind power generation; blade material; development trend

(上接第 21 页)

- [5] Tooru Kitagawa, Hirokiase, Kazuyuki Yabuki. Morphological Study on Poly-p-phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fiber [J]. J Polymer Sci; Part B: Polym Phy, 1998, 36(1):39-48.
- [6] G. M. Wu, C. H. Hung, J. H. You and S. J. Liu. Surface Modification of Reinforcement Fibers for Composites by Acid Treatments [J]. Journal of Polymer Research, 2004, 11:31-36.
- [7] Nowak Robert M, Walles William E. Process to Improve Adhesion of PBO and BPT Fiber in a Matrix resin [P]; Eur Dat Appl; EPO 500 046, 1992.
- [8] 吴国梅. 21世纪超高性能之PBO高分子纤维材料[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(3):15-18.
- [9] 刘丹丹, 周雪松等. 多聚磷酸/乙酸体系对PBO纤维表面改性的研究[J]. 化学应用与研究, 2006, 10(8):1171-1174.
- [10] 刘新东, 丘哲明, 王斌等. PBO纤维表面分析与表面偶联剂处理[J]. 固体火箭技术, 2002, 25(2):70-73.
- [11] 刘丹丹, 王宜等. PBO纤维表面等离子体改性及界面能[J]. 2006, 34(6):10-14.
- [12] 张春华, 黄玉东等. 辐射改性PBO纤维环氧树脂界面性能[J]. 纤维复合材料, 2003, 4(12):3-5.
- [13] 张春华, 黄玉东等. 用于辐照改性的PBO纤维复合材料的树脂体系配方设计及其性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005, 5(3):16-20.
- [14] Lei S Y, Young R J. Deformation of PBO/epoxy Plain Weave Fabric Laminace Followed Using Raman Spectroscopy [J]. Composites; Part A, 2001, 32(3):499-509.
- [15] Jieliang Wang, Guozheng Liang. Enzymatic surface modification of PBO fibres [J]. Surface & Coatings Technology, 2007: 4800-4804.

NEW PROGRESS IN SURFACE MODIFICATION OF PBO FIBER

SU Wu, HUANG Ying, WU Dao-wei

(Department of Applied Chemistry, School of Sciences,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper introduced the structure and function of the Poly-p-phenylene benzobisthoxazole (PBO) fiber, reviewed the research progress in surface modification technologies of PBO fiber including the acid treatment, treatment with coupling agent, plasma treatment and radiation treatment etc.

Key words: PBO fiber; surface modification; treatment with coupling agent; plasma treatment; radiation treatment