

FRP 在大型风力发电机叶片中的应用

王炳雷 李树虎 陈以蔚

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要 介绍树脂基复合材料在大型风力发电机叶片中的应用。玻璃纤维增强塑料(GFRP)一直是风力发电机叶片的主要材料,但随着对大功率、长叶片需求的不断增加,GFRP 风机叶片在强度和轻量化方面已经不能适应使用要求,因此采用强度比 GFRP 高几倍的碳纤维增强塑料(CFRP)可有效解决因长度增加引起的叶片质量增加的问题,使设计更加合理和安全。同时也分析了复合材料风机叶片制造工艺的发展过程和应用前景,另外还对该叶片的发展趋势等问题进行了探讨。

关键词 玻璃纤维增强塑料 碳纤维增强塑料 风力发电机 叶片 RTM 工艺

随着世界石油资源的日益匮乏,风能作为一种清洁的可再生能源而逐渐被人们重视。开发和利用风能资源不仅可以为 21 世纪寻找新的替代能源,而且有利于环境保护。

我国风电产业发展到现在经历了一个由小到大、由慢到快的过程。从 20 世纪 70 年代研制成功 1 kW 小型风力发电机组样机,到 1998 年的国家“乘风计划”揭开了大型风电机组国产化的序幕;从 1986 年我国第一个风电场在山东荣成并网发电,到 2006 年底建成了 91 个风电场;从 1999 年首批国产化 600 kW 风电机组在达坂城风电一场投入运行,到 2005 年研发 MW 级国产化风电机组样机;从 2004 年底总装机容量 76.4 万 kW 到 2006 年底总装机容量 258.9 万 kW,由此不难看出,我国风电产业在这 20 多年中逐渐发展、前进、壮大。

近年来,风电机组技术改进的主要方向是降低制造成本、提高单机容量、提高风能转换效率、实现自动控制等。目前主流风电机组的单机容量为 1.5 ~2.0 MW,容量越大,发电效率越高,技术难度越大。而国外正在开发、应用的机组单机容量为 3 ~5 MW。美国 NREL(国家可再生能源实验室)2004 年的报告认为在 2012 年之前,价格上有竞争力的风机产品,陆地为 2 ~5 MW,海上风电场(近海)为 5 MW 以上。2003 年德国 Enercon 公司安装了第一台 4.5 MW 的风电机组样机。

风力发电机叶片是接受风能的最主要部件,也是风力发电机中最基础和最关键的部件。其良好的设计、可靠的质量和优越的性能是保证机组正常稳定运行的决定因素。纤维增强塑料(FRP)以其轻质、耐腐蚀和高拉伸弹性模量一直是风力发电机叶片最常用的材料,是复合材料成功应用的典型大型构件。

1 制造风机叶片的主要材料

叶片是风力发电机组的重要构件。它将风能传递给发电机的转子,使之旋转切割磁力线而发电。为确保在野外极其恶劣环境中长期不停、安全地运行,对叶片材料的要求是:

① 密度小且具有最佳的疲劳强度和力学性能,能经受住极端恶劣条件和随机的负荷(如暴风等)的考验,确保安全运

转 20 年以上;② 成本(精确说为分摊到每度电的成本)低;③叶片的弹性、旋转时的惯性及其振动频率特性曲线都正常,传递给整个发电系统的负荷稳定性好;④耐腐蚀、耐紫外线(UV)照射和抗雷击性好;⑤维护费用低^[1]。

FRP 完全可以满足以上要求,是最佳的风力发电机叶片材料。

1.1 GFRP

目前商品化的大型风机叶片大多采用玻璃纤维增强塑料(GFRP)制造。GFRP 叶片的特点为:

①可根据风机叶片的受力特点来设计强度与刚度 风机叶片主要是纵向受力,即气动弯曲和离心力,气动弯曲载荷比离心力大得多,由剪切与扭转产生的剪应力不大。利用玻璃纤维(GF)受力为主的受力理论,可将主要 GF 布置在叶片的纵向,这样就可使叶片轻量化。

②翼型容易成型,可达到最大气动效率 为了达到最佳气动效果,利用叶片复杂的气动外形,在风轮的不同半径处设计不同的叶片弦长、厚度、扭角和翼型,如用金属制造则十分困难。同时 GFRP 叶片可实现批量生产。

③使用时间长达 20 年,能经受 10^8 次以上疲劳交变载荷 GFRP 疲劳强度较高,缺口敏感性低,内阻尼大,抗震性能较好。

④耐腐蚀性好 由于 GFRP 具有耐酸、碱、水汽的性能^[2],可将风机安装在户外,特别对于近年来大力发展的离岸风电场来说,能将风机安装在海上,使风力机组及其叶片经受各种气候环境的考验。

为了提高 GFRP 的性能,还可通过表面处理、上浆和涂覆等对 GF 进行改性。美国的研究表明,采用射电频率等离子体沉积去涂覆 E-GF,其拉伸及耐疲劳性可达到碳纤维(CF)的水平^[3]。

GFRP 的受力特点是在 GF 方向能承受很高的拉应力,而其它方向承受的力相对较小。图 1 是典型叶片的截面图。叶片由蒙皮和主梁组成,蒙皮采用夹芯结构,中间层是硬质

泡沫塑料或 Balsa 木,上下面层为 GFRP。面层由单向层和 $\pm 45^\circ$ 层组成。单向层可选用单向织物或单向 GF 铺设,一般用 7 1 或 4 1 GF 布,以承受由离心力和气动弯矩产生的轴向应力;为简化成型工艺,可不用 $\pm 45^\circ$ GF 布层,而采用 1 : 1 GF 布,均沿轴向铺设,以承受主要由扭矩产生的剪切应力,一般铺放在单向层外侧。梁的结构形式既可以是夹芯结构,也可以是实心 CFRP 结构。但是,在蒙皮与主梁的结合部位即梁帽处必须是实心 GFRP 结构。这是因为此部分梁与蒙皮相互作用,应力较大,必须保证蒙皮的强度和刚度。

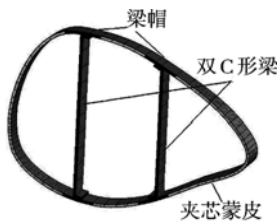


图 1 典型叶片截面图

1.2 CFRP

随着风机叶片设计技术的提高,风力发电向大功率、长叶片的方向发展。叶片长度增加势必增加叶片的质量。经对长度 10 ~60 m 的叶片进行的统计表明,叶片质量按长度的三次方增加。叶片轻量化对运行、疲劳寿命、能量输出有重要的影响。由于叶片运行时其重力产生交变载荷,使叶片本身及机组产生疲劳。叶片减重可相应减少轮毂、机舱、塔架等结构的质量。

对于大型叶片,刚度成为主要问题。为了保证在极端风载下叶尖不碰塔架,叶片必须具有足够的刚度。既要减轻叶片的质量,又要满足强度与刚度要求,有效的办法是采用碳纤维增强塑料(CFRP)。CFRP 的拉伸弹性模量是 GFRP 的 2 ~3 倍。大型叶片采用 CF 增强可充分发挥其高弹轻质的优点。据分析,采用 CF/GFRP 混杂增强的方案,叶片可减重 20% ~40%。据欧洲 E C 公司资助的研究计划中介绍,在 120 m 叶片转子中添加 CF 能有效减轻总体质量达 38%,另外亦可使其设计成本费用比 GF 减少 14%。另外一个类似的研究分析也指出,添加 CF 制得的风机叶片质量会比 GF 减轻约 32%^[4]。

目前世界上最大的 CF/GFRP 混杂风机叶片是 Nodex 公司为海上风电 5 MW 机组配套研制的长度 56 m 的叶片。Nodex 公司还开发了 43 m(9.6 t) 的 CF/GFRP 风机叶片,可用于陆上 2.5 MW 机组。Enercon 公司开发了供 4.5 MW 风机机组使用的 CFRP 叶片。对于大型叶片是否需用 CF 增强,目前尚有争议。一些人认为,在风能产业中引入 CF 工艺是“奇特”和昂贵的,如果可能应尽量避免。然而许多结构方面的工程师确信,自然的规模法则显示,当叶片长度增加时,质量的增加要快于能量的提取,因此采用 CF 或 CF/GF 混杂纤维对抑制质量的增大是必要的。同时为了降低风能的成本,发展具有足够刚性的更长叶片也是必要的^[3]。

能否在风机叶片上大量采用 CFRP 取决于 CF 的价格。

CFRP 的性能虽然远优于 GFRP,且不论叶片还是整个风力发电机组毫无疑问都是最轻量的,但价格也是最贵的。即使 CF 价格降到 11 美元/kg,用 CFRP 制备叶片的价格还是过高。因此现在正从原材料、工艺技术、质量控制等方面深入研究,以求降低 CFRP 的成本。

一般较小型的叶片(如长 22 m)选用量大价廉的 E-GFRP,树脂基体以不饱和聚酯为主,也可选用乙烯基酯树脂或环氧树脂。而较大型的叶片(如长 42 m 以上)一般采用 CFRP 或 CF/GFRP,树脂基体以环氧树脂为主^[5]。

2 FRP 叶片制造工艺

传统 FRP 风力发电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产品质量完全依赖于工人的操作熟练程度及环境条件,生产效率低且产品质量波动较大,产品的动静平衡保证性差,废品率高。叶片在使用过程中由于手糊工艺过程中的含胶量不均匀、纤维与树脂的浸润性不良或固化不完全而易出现裂纹、断裂和变形等问题。此外,手糊工艺过程伴有大量有害物质和溶剂的释放,存在环境污染问题。

目前已开发出多种较先进的工艺,如预浸料工艺、机械浸渍工艺、树脂传递模塑(RTM)工艺及真空辅助灌注工艺。

RTM 工艺是首先在模具型腔中铺放好按性能和结构要求设计的增强材料预成型体,采用注射设备将专用低粘度树脂体系注入封闭式型腔,由排气系统保证树脂流动顺畅,排出型腔内的全部气体和彻底浸润纤维,由模具的加热系统使树脂等加热固化而成型为 FRP 构件。RTM 工艺适宜于中小尺寸风机叶片的中等批量生产(5 000 ~30 000 片/年)^[6]。RTM 工艺属于半机械化的 FRP 成型工艺,特别适宜于一次整体成型的风力发电机叶片,无需二次粘接。与手糊工艺相比,这种工艺具有节约各种工装设备、生产效率高、生产成本低等优点。同时由于采用低粘度树脂浸润纤维以及加温固化工艺,复合材料质量高,且 RTM 工艺生产较少依赖工人的技术水平,工艺质量仅仅依赖于预先确定好的工艺参数,产品质量易于保证,废品率低。RTM 工艺的技术含量高,无论是模具设计和制造、增强材料的设计和铺放、树脂类型的选择与改性、工艺参数(如注塑压力、温度、树脂粘度等)的确定与实施,都需要在产品生产之前通过计算机模拟分析和实验验证来确定^[7]。模拟仿真作为 RTM 工艺的关键技术发展迅速,等温和非等温条件下一维、二维、三维的模拟仿真模型已经问世。江顺亮^[8]采用 RTM 工艺自主开发的软件系统,成功地实现了 RTM 工艺中树脂流动充模过程的模拟仿真。

真空辅助灌注成型工艺是近几年发展起来的一种改进的 RTM 工艺。真空辅助灌注技术是应用薄膜覆盖敞口模具,应用真空泵抽真空,借助于铺放在结构层表面的高渗透率的介质引导将树脂注入到结构层中。它多用于成型形状复杂的大型厚壁制品,在国外已用于成型大型的 GFRP 叶片。

大型风机叶片大多采用组装方式制造。在两个阴模上

分别成型叶片蒙皮,而主梁及其它 GFRP 部件分别在专用模具上成型,然后在主模具上把两个蒙皮、主梁及其它部件胶接组装在一起,合模加压固化后制成整体叶片。

以前,我国 GFRP 叶片的制造厂家由于受市场、技术、材料及资金等方面的影响,大多采用湿法手糊工艺,常温固化。工艺相对简单,不需要加温加压装置。但对于大型的 MW 级风力机叶片,由于叶片体形庞大,最宽处达 300 cm 左右,最高处大于 200 cm,传统的手糊成型工艺已不适用。真空辅助灌注技术是解决这一难题的新的成型工艺。

但是,用真空灌注工艺生产 CFRP 有一定的难度。CF 比 GF 更细,表面积更大,更难于有效浸渍,适用的树脂粘度更低。SP 公司的 SPRINT 工艺技术采用树脂膜交替夹在 CF 中,经加热和抽真空使树脂向外渗透,使树脂沿铺层的厚度方向浸渍,浸渍快且充分,同时采用抽真空加速树脂的流动。该工艺技术也适用于铺层较厚的叶片根部。另外,目前常用的 CF 主要是小丝束(24k 以下),价格较高。价格是制约 CF 在大型风机叶片应用的主要因素。大丝束 CF 的价格相对低廉,但其应用还存在一些技术问题。例如大丝束 CF 较粗,且不易展开,有粘连、断丝现象,使强度及刚度等性能受到影响,性能的分散性相应较大^[2]。

3 FRP 叶片的发展趋势

3.1 向大功率、长叶片方向发展

由于风力发电每千瓦成本随风力发电的单机功率的增大而降低,因此风力发电的单机功率一直在不断增长,叶片的长度也在不断增加。1992~1999 年,欧洲风力发电的单机功率从 200 kW 增加到 700 kW,叶片的长度则由 12 m 增加到 22 m。1999~2000 年,风力发电的单机功率平均增长到 900 kW。目前国内风力发电机单机功率为 1.5 MW 左右,叶片长度为 34~37 m;在国外,2.0~2.5 MW 的风机已经成功装机,长度为 50~60 m 的叶片已研制成功并准备大规模安装。世界上风力发电叶片最大的制造商 LM Glasfiber 公司关闭了一个位于丹麦 Jutland 的叶片生产厂,而该厂是专业生产长度小于 24 m 的风机叶片的厂家。宣布关闭厂房的原因是市场对风机叶片的需求已经不再是 24 m 以下的小叶片,而是大功率的叶片^[5]。更大型、性能更好的机组也已开发出来并投入生产运行,如丹麦新建的几个风电场,单机容量都在 2 MW 以上;摩洛哥在北方脱莱斯建造的风电场采用的风电机组功率达到 2.1 MW。

随着海上风电场的建设,需要单机容量更大的机组。预计 2010 年将开发出 10 MW 的风电机组。

3.2 FRP 叶片不断更新设计

由于风力发电向大功率、长叶片方向发展,除了要求提高材料的性能之外,叶片结构更要不断地更新设计。比如,为了保证叶片与塔柱的间隙,除了提高叶片材料的刚度外,从设计角度可以在风力作用的反方向将叶片设计成预弯曲外形,然后在风力作用下使预弯曲叶片变直。又如,在叶片结构设计中采用“弯曲-扭转”耦合效应,实现控制载荷和

应力,最终达到降低载荷峰值并减少疲劳破坏的目的。

目前市场上的风机叶片基本上是预扭结构,这样可以使叶片在工作时能使所有旋转部位都有较大的升阻比(升力系数与阻力系数之比)。同时为了工艺方便,基本上都是沿着叶片轴向铺设纤维。

“弯-扭”耦合是当今风力发电机 FRP 叶片结构设计的主要思想。为了提高叶片的性能,很多人提出了沿叶片长度方向偏置一定角度铺设单向 CF 层,称之为“偏轴 CF”,这样可以通过“弯-扭”耦合效应使结构的最大应力方向与 CF 的铺层方向一致,发挥 CF 拉伸强度高的优点,提高结构的安全性。但是这种结构设计也带来了一定问题:其一是偏轴纤维铺层比较困难;其二是偏轴纤维会在蒙皮的结合部位发生断层和扭曲,这会大大降低蒙皮粘合后结构的强度,很容易在铺设纤维时产生剪切,这可能会在树脂内产生附加应力,从而使疲劳极限载荷降低。

为了克服偏轴纤维的不利因素,在保留“弯-扭”耦合效应、避免纤维断层的基础上,M. Zuteck^[9]提出了一种新颖的叶片结构形式,采用“扫略式”的结构使叶片尖部在弦线方向有一定扭转角度,使叶片看起来像个“弯刀”状结构。这种结构可在工作时产生弯矩引起一定扭转,以实现控制载荷和应力,最终达到降低载荷峰值并减少疲劳破坏的目的。

最近,美国 Sandia 国家实验室与圣地亚哥 Knight & Carver 公司合作,研发设计出一种新型风机叶片。研究人员承诺这种设计将会比目前的设计更有效,而且可以大幅度降低低风速地区的风机能源成本。这种名为“STAR”的叶片的最大特点是叶尖逐渐弯曲。这不同于目前使用的大多数巨大的叶片,是专门为低风速地区设计的。这些低风速地区高空 10 m 处所测的年均风速约为 5.8 m/s。美国低风速地区很广,这些地区对风能的利用可使风能的可经济利用面积增加 20 倍。Sandia 国家实验室叶片设计研究负责人 Tom Ashwill 称,这种设计可以使叶片比传统设计更有弯曲度,从而减少飓风对叶片造成的损坏。

4 结语

FRP 以其轻质、耐腐蚀和高拉伸弹性模量一直是风力发电机叶片最理想的材料。近年来商业化生产的风机叶片尺寸增长迅速,这为风机从自然界中汲取更多能量提供更好的条件。随着风机叶片的大型化,势必寻求叶片的轻量化及长寿化,而 GFRP 在其强度等性能方面受到限制,因此在 GF 中加入性能更好的 CF 是必然趋势。随着全球对绿色能源的需求的不断提高,风电市场逐渐成熟和壮大,FRP 在风机叶片上的应用前景也会越来越广。

参考文献

- [1] 董永棋. 纤维复合材料, 2001(9): 46~49.
- [2] 陈宗来,等. 玻璃钢/复合材料, 2005(3): 53~56.
- [3] 罗益锋. 高科技纤维与应用, 2003, 28(5): 1~7.
- [4] 马振基,等. 高科技纤维与应用, 2005, 30(4): 5~8.
- [5] 刘万琨,等. 风能与风力发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

- [6] 赵秋艳. 航天返回与遥感, 1999, 20(1): 43-48.
- [7] 戴福洪, 等. 复合材料学报, 2004, 21(2): 87-91.
- [8] 江顺亮. 复合材料学报, 2002, 19(2): 13-17.

- [9] Zuteck M. Adaptive blade concept assessment: Curved planform induced twist investigation[R]. Texas: Sandia National Laboratories, 2002: 3-24.

APPLICATION OF FRP IN BLADE FOR LARGE WIND TURBINE

Wang Binglei, Li Shuhu, Chen Yiwei
(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

ABSTRACT The applications of resin matrix composite in the blade for large wind turbine are reviewed. Glass fiber reinforced plastics (GFRP) is the main material of blade for wind turbine. However, with the increase of demands for larger power and longer blade, there are questions in the balance of strength and weigh for blades made only in GFRP. Carbon fiber reinforced plastics (CFRP), whose modulus is times of that of GFRP, therefore are introduced to overcome the weigh problem. Such design makes the product more reasonable and safe. The developments and applications of fabrication process of blade are also reviewed. In addition, the developmental trend and testing problems of blade are discussed.

KEYWORDS GFRP, CFRP, wind turbine, blade, RTM process

优惠销售 2000 ~2007 年中国工程塑料加工应用技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国工程塑料工业协会加工应用专委会为了配合 2000 ~2007 年先后召开的中国工程塑料加工应用技术研讨会共编辑、出版了 8 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术,以及文献综述、评论等,尤其突出了我国工程塑料行业“十一五”发展规划、加入 WTO 的对策等行业规划、政策。现尚有部分《论文集》以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘,以优惠价格(含邮费)销售,欢迎订阅。

1. 《论文集》, 优惠价为 220 元/套, 单册价格如下:

《2007 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 343 页, 50 元/册;

《2006 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 346 页, 含中国工程塑料工业“十一五”发展规划, 45 元/册;

《2005 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 338 页, 40 元/册;

《2004 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 337 页, 35 元/册;

《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 105 篇, 正文 373 页, 30 元/册;

《2002 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 351 页, 25 元/册;

《2001 年中国工程塑料加工及模具技术研讨会论文集》, 论文 80 篇, 正文 270 页, 20 元/册;

《2000 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 339 页, 20 元/册。

2. 论文集光盘, 优惠价为 160 元/盘。

本光盘除收录上述 8 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 1600 人次的会议代表通讯录。

凡需购买《论文集》或论文集光盘的读者, 请尽快办理邮购手续。汇款时请注明“论文集”或“论文集光盘”。

邮局汇款

收款单位: 山东济南市 108 信箱杂志社 邮编: 250031
电话: (0531) 85878057 85878223 85878278
传真: (0531) 85947355 85878224

银行汇款

户名: 中国兵器工业集团第五三研究所
开户银行: 济南市工商银行经十一路支行
帐号: 1602001229014425546

网上订购 <http://www.epa1973.com>

抗菌产业进入标准化时代

据悉, 国际标准化组织已正式发布《ISO 22196-2007 塑料制品表面抗菌性能评价方法》和《ISO 20743-2007 抗菌整理纺织品的抗菌性能测定》两项 ISO 抗菌国际标准。上述标准的发布, 标志着国际抗菌标准化体系初步构建完成, 抗菌产业开始进入标准化时代。

近年来, 抗菌行业在全球范围内开始形成一个新兴产业, 经过短短 8 年的发展, 我国抗菌产业已经发展成为一个年产值达到 600 多亿元的新兴产业。随着抗菌产业的兴起, 许多国家都先后建立起了各自的抗菌标准体系。然而由于各国标准不尽相同, 产品检测方法和适用标准也不一致, 致使生产厂家无所适从, 在一定程度上影响了抗菌产品的国际

贸易。

此次发布的这两项标准分别是在日本《JIS Z 2801-00 抗菌加工制品——抗菌性试验和抗菌效果》标准和《JIS L 1902-98 纺织品的抗菌性能试验方法》标准的基础上历时 3 年制订完成的。

介绍, 《ISO 22196-2007 塑料制品表面抗菌性能评价方法》标准不仅适用于塑料抗菌制品, 还适用于包括塑料制品在内的硬质表面抗菌制品的抗菌性能表征; 而《ISO 20743-2007 抗菌整理纺织品的抗菌性能测定》标准不仅适用纺织品, 还适用于疏松多孔材料纺织品等的抗菌表征。

我国是 ISO 抗菌国际标准的重要参与国, 我国抗菌 ISO 工作组参与了 ISO 抗菌国际标准的制订工作。(中化报)