

纤维增强树脂基复合材料在风机叶片的应用研究

万 佳,钟智丽,张 肖,石若星

(天津工业大学 纺织学院,天津 300387)

摘 要:纤维增强复合材料逐渐成为风能新能源领域的研究焦点。介绍了风机叶片用材料的性能要求、传统材料和纤维增强复合材料在风机叶片中的应用,对比分析了玻纤、碳纤维和玄武岩纤维作为增强材料的优缺点,阐述了树脂基体材料、夹芯材料、涂料在复合材料中的应用,复合材料的成型工艺,展望了风机叶片材料的研发前景。

关键词:风机叶片;纤维;复合材料

中图分类号:TS102

文献标识码:A

文章编号:1673-0356(2018)01-0006-03

随着人口的增长,能源危机愈加严重,生态环境不断恶化。风能作为一种绿色环保可再生能源,极具开发潜力,风力发电作为一种绿色环保技术在开发可再生能源中倍受关注。风机叶片是风力发电系统中的核心部件,良好的设计、可靠的质量以及优越的性能是其保持正常稳定运转的关键,是获得更大经济效益的基础^[1]。我国对风机叶片的研究比发达国家起步晚,且进展缓慢,在叶片结构与生产技术方面与起步较早的国家存在一定差距。随着风能这种可再生清洁能源的开发,风机叶片的研发也开始引起关注和重视,并将复合材料风机叶片列入重点开发项目,怎样合理设计叶片结构以提高其机械性能和减轻质量已成为研究的热点。目前,世界上最大单机容量为7 MW的海上风电机组已建成并投入生产,其中,单机容量达到1.5 MW和2 MW的风电机组已经占据绝大部分市场^[2-3]。我国风电产业发展迟缓的原因在于大型风力发电机生产技术落后以及不能自主研发出高强、大尺寸的叶片^[4]。由于风电机组长期在极其恶劣的环境中运作,要求叶片材料具有高强度、耐疲劳、耐气候等特性。如何减轻其质量,增加抗疲劳强度和机械性能成为研究风机叶片的焦点。

1 风机叶片性能要求

目前大型风力发电机的叶片基本上是由复合材料构成,复合材料占比通常超过90%。

每台发电机一般有3支叶片,1.5 MW的发电机单支叶片使用复合材料达6 t,而3 MW以上的风机叶片单支重量在10 t以上。近20年来,风电发电在国内

迅猛发展,风机叶片作为风力发电的核心部件,其使用量逐年增长,由于风机单机装机容量越来越大,风机叶片的直径也在逐渐上升,因此对材料的要求很高。一般来讲,风机叶片材料需要满足以下性能要求:

- (1)材料要求密度小、质轻;
- (2)结构与受力要合理,稳定性好,要求其表面打磨光滑来减小阻力,同时防止叶片损坏;
- (3)具有优良的机械性能,叶片要有较强的抗拉抗压能力,在强风作用下不发生损坏;
- (4)耐腐蚀、抗紫外、耐气候变化能力强,叶片安装在户外,在极度恶劣的环境中还能保持良好的工作状态;
- (5)抗疲劳强度高,使用寿命达到20~30年,能承受1~10亿次循环负载,而且抗震性能要好;
- (6)易加工成型,生产成本低,维护方便。

2 风机叶片主要材料

风力发电技术是将风能转化成机械能,再由机械能转化成电能。而风机叶片则是风力发电系统中最为关键的部件之一,可用来制造加工风机叶片材料很多,如木材、铝材、钢材,但这些材料因为种种原因没有得到广泛应用^[5]。

2.1 传统材料

(1)木制叶片。早期小型发电系统采用木制叶片,一般在真空条件下用树脂将木材浸透后层压固化。其制品挠性和扭转性较好,但其加工形状单一,不易扭曲,且木制叶片耐腐蚀较差,强度低,耐疲劳能力差,寿命短,在强风作用下容易发生变形和破坏,不易在中大型风力发电系统中使用。

(2)铝合金叶片。铝合金密度较小,工艺简单,易成型,通常采用挤压成型生产等弦长叶片,还可进行扭曲加工。但是铝合金耐酸碱能力差,易被氧化,且抗疲

收稿日期:2017-09-15;修回日期:2017-11-22

作者简介:万 佳(1993-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为纺织复合材料,E-mail:13820573043@163.com。

劳性能较差^[6]。

(3)合金钢叶片。合金钢密度较大,采用钢材制造叶片通常在其内部填充泡沫以减轻重量,可加工成细长形状和翼型。但是,风机叶片设计结构复杂,对表面要求也比较高,这对于合金钢加工来说比较困难,其主要应用在大型风力机上。

2.2 纤维增强复合材料

复合材料是有两种或两种以上采用物理和化学手段得到的一种新材料。目前,风机叶片朝着质轻、大型化的方向发展,纤维增强复合材料成为风机叶片的主要材料,其材质包括增强体材料、树脂基体材料、夹芯材料、涂料等^[7]。

2.2.1 增强体材料

随着叶片的大型化,质轻量化,纤维增强复合材料逐渐取代传统材料,其中,玻纤增强复合材料质轻高强,易加工成型,具有较好的抗疲劳、耐腐蚀、耐气候性及维护方便等优点。碳纤维增强复合材料在新能源叶片材料加工中也有广泛应用。此外,玄武岩作为新型无机纤维,其耐酸碱腐蚀、耐高温性能优异,加之成本低廉,有望成为风机叶片生产的新型材料。各种纤维性能见表1。

表1 纤维性能比较

性能	E-玻纤	S-玻纤	碳纤维 HS	玄武岩纤维
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.55~2.62	2.46~2.49	1.78	2.65~3.05
弹性模量/GPa	76~78	88~91	230~240	79.3~93.1
拉伸强度/MPa	3 100~3 800	4 590~4 830	2 500~3 500	3 000~4 840
断裂伸长率/%	4.70	5.60	1.20	3.15
软化点/°C	850	1 056	--	960
热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C} \times 10^6$	5.4	2.9	--	6.5~8.0
耐化学性	耐碱一般	耐碱一般	不作用	耐酸耐碱
最高使用温度/°C	350	300	500	650

(1)玻璃纤维。E-玻璃纤维和S-玻璃纤维是生产风机叶片最常用的增强材料,由表1可知,S-玻璃纤维力学性能优于E-玻璃纤维,但是其价格较高,而E-玻璃纤维实用性较好,能与许多基体树脂搭配,且加工工艺成熟,被广泛应用在加工叶片的增强材料。当生产高强度、高刚度的风机叶片时,E-玻璃纤维不能满足要求,而S-玻璃纤维作为增强材料可极大地提高复合材料的性能,但因其造价较高,不能成为制造风机叶片的主要增强材料。

(2)碳纤维。碳纤维密度小,使风机叶片朝着质轻化的方向发展。碳纤维力学性能优于玻璃纤维,其刚度约为玻纤的3倍,是生产高强度、高刚度,承载能力强的大型叶片的首选材料,且导电性好,可有效避免雷击^[8]。但是碳纤维较脆,受力过大容易直接断裂,而且

造价较高,极大地限制了碳纤维在叶片中的使用。目前,国内外只是在某些关键部位使用碳纤维或碳/玻混杂纤维。

(3)玄武岩纤维。玄武岩力学性能与S-玻璃纤维相当,耐高温,能长期使用在高温环境中^[9],耐酸碱腐蚀性能好,化学性能稳定,有利于长期户外工作。玄武岩纤维作为风机叶片增强材料部分取代玻璃纤维和碳纤维,会使叶片性能更高,具有深远的研究意义。

2.2.2 树脂基体材料

风机叶片复合材料主要是由增强体与乙烯基酯树脂、环氧树脂、聚酯树脂等基体复合加工而成型。乙烯基树脂是由双酚A环氧树脂与甲基丙烯酸反应合成,兼具环氧树脂和不饱和聚酯的优点,具有较高的强度,较好的耐腐蚀性,室温下可固化。环氧树脂是分子中有两个或两个以上的环氧基团的一种有机化合物,由于其中的环氧基团较为活泼,因此机械和粘结性能较好。但是其耐气候性较差,柔韧性也不好,极大地限制其在风机叶片上的应用。聚氨酯改性环氧树脂不仅粘结强度好,同时还有较强的防腐性能和较好的柔韧性。聚酯是由多元酸和多元醇经过缩聚反应而得的一类聚合物,具有高强度高模高硬度、耐腐蚀耐疲劳抗蠕变等优良性能,可二次利用,但是不耐高温且刚性较差。

2.2.3 夹芯材料

风电机组在满足高发电效率和降低度电成本的前提下,其大型化已成为大势所趋,这就要求风机叶片的长度更长、扫风面积更大。同时,为了减轻叶片自身重量,增加叶片结构刚度,提高整个叶片抵抗载荷的能力,一般在风电叶片相关部位都会大量采用夹芯材料。夹芯材料是层压在复合材料中间的一个整体,通过固化成型,应满足高强度、高刚度、阻燃、优良的耐腐蚀性且与树脂能够良好地结合,其材料一般为泡沫或者木材^[10],目前市场上常用的夹芯材料主要是PVC结构泡沫和Balsa轻木,其中Balsa轻木主要应用于叶根部位,PVC结构泡沫则应用于叶片蒙皮和腹板部位。夹芯材料不仅要提高风机叶片的机械强度,还要有效地减轻叶片的质量。

2.2.4 涂料

涂料是为了使叶片获得更好的气动性能而使叶片变得更加光滑的一类材料,同时也能够防止沙尘、雨水对叶片的损害,有效地延长叶片的使用寿命。其常用材料有聚氨酯树脂、丙烯酸树脂、氟树脂、有机硅树脂和环氧树脂等^[11]。

聚氨酯树脂是风机叶片中使用最多的树脂,其耐磨性、柔韧性较好。丙烯酸树脂在汽车和航空领域均

有广泛应用,是由丙烯酸酯和甲基丙烯酸以及其他烯类单体共聚而制成,作为一种性能优异的户外材料,其耐候性较好,并具有保光保色的特性。氟树脂的分子结构中含有氟原子,属于热塑性树脂,具有优越的耐高温低温性、耐候性,化学性能相对比较稳定。有机硅树脂耐高温,也具有稳定的化学性能,但是其机械性能较差,粘结强度低,制备工艺复杂且生产成本较高。由于风机叶片长期在比较恶劣的环境中工作,经受雨水腐蚀、紫外照射、强风冲击、大气氧化等作用,为提高叶片的整体性能,需要对普通树脂进行改性,使得改性后树脂的综合性能得到改进,进而延长叶片使用寿命。

2.2.5 复合材料成型工艺

传统叶片多为手糊成型(又称湿法成型),该法主要是手工劳动,操作简单方便,成本较低,但是质量极不稳定,依赖工人操作熟练程度,生产效率低,不适用大型叶片的生产加工^[12]。

树脂传递模塑(RTM)是一种成本低、效率高,可生产精度高的尺寸和复杂的外形。其原理是将增强材料预制件在模具中铺放好,树脂通过注射设备流入封闭的模具浸渍增强体后加热固化成型,脱模后获得构件。其制品表面光滑度高、孔隙率低、生产周期短且生产过程对环境污染小,但是其模具设计复杂、加工困难。

真空辅助树脂传递模塑(VARTM)是对RTM工艺的一种改进,通过真空泵抽真空引导树脂流入薄膜包覆的模具中浸渍预制件^[13]。该方法可生产大型风机叶片,但要求工艺参数达到最优,树脂黏度最佳且流动性要好,模具设计合理,保证增强材料能够完全均匀浸渍树脂。

3 结语

未来风机叶片将朝着大型化、轻质化、重载化的方向发展。这不仅要求风机叶片具有高强高模,还要满足在更加恶劣的环境中正常工作。除了具有优良的机械性能外,还必须具有优越的耐疲劳、耐腐蚀性能,能

够面临环境的侵蚀并大大提高叶片的使用寿命。纤维增强复合材料比强度高,力学性能优良,具有耐气候、耐腐蚀、密度小、质轻等优点,在减轻叶片重量的同时具有足够的机械强度,目前我国虽然从国外引进先进制造技术,但仍然缺乏自主研发能力。大型叶片质轻量化,机械强度、抗疲劳性能的提升,结构设计,材料体系以及制造技术有待深入研究。

参考文献:

- [1] 周红丽,王红,罗振,等. 风力发电复合材料叶片的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(3):65-68.
- [2] 梁广. 浅谈复合材料风机叶片科技进展[J]. 中国建材, 2014, (9):94-97.
- [3] 徐林. 新型复合材料在风机叶片中的应用[J]. 科学时代, 2014, (2):18-21.
- [4] 吴涛. 复合材料风电叶片技术现状及趋向[J]. 中国新技术新产品, 2017, (10):44-45.
- [5] 尚宝月. 风机叶片用玄武岩纤维复合材料的改性研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2011.
- [6] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [7] 马祥林,任婷,徐卫平. 大型碳纤维复合材料风机叶片成型工艺与发展[J]. 纤维复合材料, 2011, (3):26-29.
- [8] 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.
- [9] 黄根来,孙志杰,王明超,等. 玄武岩纤维及其复合材料基本力学性能实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, (1):24-27.
- [10] 冯消冰,王伟. 2MW 风机复合材料叶片材料及工艺研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010, (4):84-88.
- [11] 王晓,王华进,赵薇,等. 风电叶片涂料用树脂研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(6):28-35.
- [12] 陈绍杰,申振华,徐鹤山. 复合材料与风力机叶片[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, 26(2):42-46.
- [13] 高会焕. 纤维增强材料风机叶片发展概述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009, 207(4):104-108.

Application of Fiber Reinforced Resin Matrix Composites in Fan Blade

WAN Jia, ZHONG Zhi-li, ZHANG Xiao, SHI Ruo-xing

(College of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Fiber reinforced composites have gradually become the focus of new energy field of wind energy. The performance requirements of fan blades material and applications of traditional materials and fiber reinforced composites in fan blades were introduced. The advantages and disadvantages of glass fiber, carbon fiber and basalt fiber as reinforcing materials were analyzed and compared. The application of resin matrix materials, sandwich materials and coatings in composite materials and the molding process of composite was elaborated. The research and development prospects of fan blade materials were prospected.

Key words: fan blade; fiber; composites