

基于先进材料的风电机组叶片性能提升研究

黄志强 王跃辉 姜仕兴 全晓芬

华能新能源股份有限公司河北分公司, 河北 张家口 130705

[摘要] 随着全球可再生能源需求的日益增长, 风电产业在能源结构转型中发挥着重要作用, 而风电机组的关键部件: 叶片的性能直接影响发电效率和使用寿命。本论文以先进材料的应用为核心, 从材料特性优化和结构设计提升两个方面研究风电机组叶片的性能改进。经研究先进材料的引入不仅能够显著提高叶片的耐疲劳性、强度和抗腐蚀性, 还可以通过减少自重来提升风电机组的整体效率。本研究为风电叶片材料选择与优化设计提供科学依据, 并为提升风电机组综合性能和降低维护成本提供参考。

[关键词] 风电机组叶片; 先进材料; 性能优化; 结构设计; 抗疲劳性; 材料选择

DOI: 10.33142/hst.v8i2.15542

中图分类号: TM315

文献标识码: A

Research on Improving the Performance of Wind Turbine Blades Based on Advanced Materials

HUANG Zhiqiang, WANG Yuehui, JIANG Shixing, TONG Xiaoqin

Hebei Branch of Huaneng New Energy Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei, 130705, China

Abstract: With the increasing demand for renewable energy worldwide, the wind power industry plays an important role in the energy structure transformation, and the performance of the key component of wind turbines, the blades, directly affects the power generation efficiency and service life. This paper focuses on the application of advanced materials and studies the performance improvement of wind turbine blades from two aspects: material property optimization and structural design enhancement. Through research, the introduction of advanced materials can not only significantly improve the fatigue resistance, strength, and corrosion resistance of blades, but also enhance the overall efficiency of wind turbines by reducing their weight. This study provides scientific basis for the selection and optimization design of wind turbine blade materials, and provides reference for improving the comprehensive performance of wind turbines and reducing maintenance costs.

Keywords: wind turbine blades; advanced materials; performance optimization; structural design; fatigue resistance; material selection

引言

在应对气候变化和减少温室气体排放的全球背景下, 风力发电作为一种清洁能源, 日益受到关注和推广。风电机组的叶片是能量转换的关键部件, 其设计和材料选择直接决定了机组的发电效率和使用寿命。近年来, 随着材料科学的进步, 许多先进材料被引入风电叶片的制造中, 为性能提升提供了可能性。本文聚焦于应用于风电叶片的先进材料, 探讨如何通过材料选择、性能优化以及结构设计提升叶片在实际运行中的耐用性与发电效率, 以期风电产业的技术进步提供有效支持。

1 风电机组叶片材料优化设计

1.1 叶片材料的基本要求与现状分析

在风电机组叶片材料选择和设计过程中, 材料的耐久性、轻量化以及抗疲劳性是基本而关键的要求。作为风电机组的重要组成部分, 叶片必须能够在各种复杂气候条件下长时间运行而不出现性能下降的情况, 这就要求叶片材料不仅具备高强度, 还要具备抗疲劳和抗腐蚀的性能。同时, 由于风电机组向大型化、海上化发展的趋势不断加剧, 叶片材料的自重也直接影响风电机组的运行效率和维

护成本。以目前全球的应用现状来看, 玻璃纤维增强塑料(GFRP)和碳纤维增强塑料(CFRP)是主流选择, 其中两者的应用各具特点, 显示出不同的发展趋势和应用潜力。

就风电叶片材料现状而言, 玻璃纤维材料以其高强度、耐腐蚀性及经济性, 在全球风电叶片材料市场中占据了主导地位。统计数据显示, 全球范围内约85%的风电叶片采用玻璃纤维复合材料, 这一比例突显了该材料在风电行业中的重要性。以中国市场为例, 金风科技和明阳智能等领先企业在风电机组叶片的制造中均广泛应用了玻璃纤维复合材料。明阳智能的6MW以上海上风电机组所采用的叶片便通过高强度玻璃纤维实现了耐腐蚀性和抗风压性的平衡, 以应对海上高风速、高湿度的环境需求。这种材料的较低成本和良好的耐用性, 使其能够在全球范围内的风电项目中广泛应用。

但随着风电机组功率增大、叶片尺寸增加, 玻璃纤维材料的局限性也逐渐显现。特别是在超长叶片的设计中, 玻璃纤维材料较大的自重成为其劣势, 且在长期动载荷下较易产生疲劳损伤。正是这种应用局限, 推动了碳纤维等高性能复合材料的引入, 以应对玻璃纤维在耐用性方面的不足。

比起玻璃纤维，碳纤维复合材料在强度、刚性和抗疲劳性方面具备明显优势，同时，其轻质特性使其在风电叶片的轻量化设计中具有独特的优势。碳纤维复合材料的应用虽然成本较高，但在全球范围内已逐步扩大，尤其适用于大型及超大型风电叶片的制造。例如，风电设备制造巨头 Vestas 和西门子歌美飒公司在其超大型风电机组中已经引入碳纤维材料以应对大型叶片所需的高性能要求。以西门子歌美飒的 SG 14-222 DD 风电机组为例，该型号叶片应用了碳纤维复合材料，实现了显著的减重效果，同时增强了抗疲劳性能，能够承受高压条件下的长期运行。

尽管碳纤维在性能上具备显著优势，但其成本仍然较高，碳纤维复合材料的生产和加工也具备一定的复杂性，导致其在成本上远高于玻璃纤维。据统计，碳纤维材料的成本较玻璃纤维高出 40%到 60%，这使得其应用主要集中在超大型机组或高功率机组上。不过，随着技术进步和市场需求的增加，碳纤维的成本有望进一步下降。例如，美国的 Hexcel 公司和日本的东丽公司正致力于碳纤维复合材料的研发，以期通过技术创新降低生产成本，扩大其在风电叶片中的应用潜力。

1.2 新型复合材料的引入与应用实例

美国的 TPI 复材公司 (TPI Composites) 作为风电叶片制造领域的全球领先企业之一，近年来在叶片制造中引入了聚氨酯复合材料，与传统的环氧树脂相比，聚氨酯复合材料不仅强度更高，而且韧性更好。2021 年，TPI 复材公司与科思创 (Covestro) 合作，成功开发了一款聚氨酯叶片，并在欧洲市场进行推广。与传统的玻璃纤维或碳纤维增强材料相比，这种聚氨酯复合材料叶片展示了显著的抗疲劳性和耐用性优势。科思创的研究表明，聚氨酯材料的应用能够延长叶片的寿命，从而降低风电场的整体运营成本。这一创新在全球风电行业中具有较高的参考价值，尤其适用于大型、长叶片的设计需求。

德国的 Nordex 集团则引入了碳纳米管复合材料技术，以进一步提升风电叶片的强度和抗疲劳性。碳纳米管因其极高的强度、轻质特性以及优异的导电性能而在复合材料中具备独特优势。Nordex 集团于 2022 年开始在其最新型号的风电叶片中加入少量碳纳米管，研究发现这一材料在长时间运行后依然保持良好的机械性能，有效减少了疲劳损伤。这一技术的应用不仅提升了叶片的耐用性，还增强了其抗风压性能，尤其适用于在高风速地区运行的风电机组。该技术的引入表明，复合材料的纳米化应用已逐渐成为未来风电叶片材料优化的重要趋势。

另一家值得关注的企业是丹麦的 LM 风电公司 (LM Wind Power)。作为全球领先的风电叶片供应商之一，LM 风电公司在叶片材料的研究方面始终走在前沿。2020 年，LM 风电与阿科玛 (Arkema) 达成合作，引入了基于 Elium® 热塑性树脂的复合材料。与传统热固性树脂材料不同，Elium® 树脂材料具备优异的可回收性，不仅能够大幅度提

升叶片的耐用性，而且在使用寿命结束后，材料可以重新利用，符合可持续发展的理念。这种树脂基复合材料的引入有效解决了叶片材料的环保问题，并展示了优异的机械性能，适合长叶片、大型风电机组的应用需求。

在中国，金风科技作为风电产业的领先企业，于 2022 年与国内某知名复合材料公司合作，研发了改性环氧树脂复合材料，并将其应用于 8MW 海上风电机组的叶片设计中。改性环氧树脂在抗腐蚀性和抗老化性能上具有显著优势，特别适合在高盐雾、高湿度的海上环境中使用。通过应用这种新型环氧树脂复合材料，金风科技的叶片在长期运行中的疲劳寿命显著延长，同时材料的耐候性也有所提升，从而减少了海上风电场的维护频率和维护成本。

这些案例表明，全球主要风电企业通过引入不同的新型复合材料，成功地提升了风电叶片的机械性能和环境适应性，同时促进了风电机组的可持续发展。

2 基于先进材料的叶片结构优化与性能提升

2.1 轻量化设计与力学性能优化

在风电机组叶片的设计与制造过程中，轻量化与力学性能优化是一对关键目标。随着风电机组向大型化发展，叶片的长度和面积逐步增加，以提升风力捕获能力，然而，这也对叶片的重量、力学性能以及材料特性提出了更为严苛的要求。采用轻量化的设计策略并合理优化叶片的力学性能，能够有效降低风电机组整体的结构负荷，从而减少机组的运维成本并延长其使用寿命。

基于新型复合材料的引入，叶片的轻量化设计成为了可能。前文提到的聚氨酯、碳纤维等复合材料，在高强度和低密度方面具备显著优势，因而为叶片减重提供了理想的材料选择。聚氨酯材料的强韧特性允许叶片在减少自重的同时仍然保持较高的抗冲击能力，而碳纤维的高强度和优异的刚性则使其能够承受风力作用下的动态负荷，极大地提升了叶片的安全性和可靠性。

在实际的轻量化设计过程中，通过使用强度更高、密度更低的材料，叶片能够在减少自重的前提下提升其力学性能，从而避免因重量增加带来的负面效应。轻量化设计不仅减少了叶片自身的质量，还对机组的其他部分产生了积极影响：叶片的重量减轻可以使机舱、塔架以及地基的负载需求相应减少，进而降低整个风电系统的物料需求和工程成本。

以下是不同材料的关键特性，如密度、抗拉强度、抗压强度、刚性、耐疲劳性和耐腐蚀性等。在表 1 中，通过对比玻璃纤维增强塑料、碳纤维增强塑料、聚氨酯复合材料、改性环氧树脂复合材料、热塑性树脂复合材料以及碳纳米管复合材料的性能数据，可以直观分析这些材料在叶片设计中的轻量化和力学性能优化效果。碳纤维和碳纳米管复合材料因其高强度和高刚性在大型叶片中表现出色，而聚氨酯和改性环氧树脂材料则凭借其良好的耐疲劳性和耐腐蚀性更适用于恶劣环境下的应用。

表 1 不同新型复合材料在风电机组叶片轻量化设计中的应用特性对比

材料类型	密度 (g/cm ³)	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	刚性 (GPa)	耐疲劳性能	耐腐蚀性	适用叶片长度 (米)	成本相对指数	应用案例
玻璃纤维增强塑料 (GFRP)	1.8	700	400	30	中等	中等	≤70	低	常用叶片设计
碳纤维增强塑料 (CFRP)	1.6	1500	800	150	高	良好	≥70	高	Vestas 大型叶片
聚氨酯复合材料 (PU)	1.2	900	500	40	高	良好	≤60	中等	TPI 与科思创合作
改性环氧树脂复合材料	1.3	1200	600	50	高	极好	≥80	中高	金风科技
热塑性树脂复合材料	1.4	1000	550	35	中高	良好	≤70	低	LM 与阿科玛合作
碳纳米管复合材料	1.0	1800	900	200	极高	优秀	≥80	高	Nordex 研发应用

力学性能的优化则侧重于在不同风况条件下,确保叶片在承受风荷时具有足够的稳定性和抗变形能力。风电叶片在运行过程中不仅要承受恒定的静态风压,还需经受来自风速变化的动态载荷冲击。这要求叶片材料在设计时,既要具有良好的抗拉和抗压性能,还需具备足够的抗疲劳性能,以应对长期动载荷下的重复应力和应变。通过选用具有高抗疲劳特性的复合材料,叶片能够更为持久地承受风力作用而不产生明显的变形或损伤,最终提升其长期运行的可靠性。

轻量化和力学性能优化相结合,还可以显著减少叶片的震动幅度,提升其在运行过程中的动态稳定性。由于风电叶片通常运行在复杂的风场中,空气的湍流、风速的变化均会引发叶片的振动,从而严重影响其发电效率。采用轻量化且具备高强度的新型材料,不仅降低了自重带来的惯性力,而且能在大幅减轻材料应力的情况下,确保叶片在不同风速下保持较低的振动幅度和良好的稳定性,进一步提升风电机组的发电效能。

2.2 基于先进材料的抗风压和抗疲劳性能提升策略

抗风压性能主要通过材料的高强度和良好的刚性来实现,以确保叶片在强风环境中保持结构的稳定性。新型材料如碳纤维复合材料和改性环氧树脂在抗风压能力方面表现出优异的性能。碳纤维复合材料因其高刚性和低密度,在风电叶片中广泛应用,能够在叶片自重较轻的情况下,依然维持高抗风压能力。这种材料的引入不仅减轻了叶片在强风环境中的变形幅度,同时降低了整体系统的负载压力,提升了叶片在强风条件下的稳定性和安全性。

在实际设计中,抗风压性能的提升还需通过材料结构设计的优化来实现。例如,通过在叶片的外层材料中引入碳纳米管或其他高强度纳米材料,能够进一步增强叶片的抗风压性能。这些材料的高强度和低密度特性,使得叶片在高风压条件下依然能够保持良好的形变恢复能力,从而减小风压带来的变形和疲劳损伤。同时,这种结构增强设计使得叶片在瞬间风压变化时能够迅速恢复到原始形状,避免了因变形而导致的叶片寿命缩短问题。

抗疲劳性能的提升则更侧重于材料的长期耐久性和抗裂纹扩展能力。风电叶片在运行中,周期性受到动载荷和静载荷的交替作用,尤其是在恶劣风场中,叶片需要应对频繁的载荷变化,因而容易产生疲劳损伤。通过使用高抗疲劳性的复合材料,如聚氨酯复合材料和碳纤维复合材

料,叶片的抗疲劳性能能够得到有效提升。聚氨酯材料由于具备优良的韧性和高耐疲劳性,可在风电叶片的制造中有效防止裂纹的初始形成及其进一步扩展,从而延长叶片的疲劳寿命。此外,碳纤维复合材料在动载荷作用下的抗裂纹扩展能力较强,能够在保持叶片结构稳定性的前提下有效应对重复应力。

通过采用多层复合结构,叶片在疲劳损伤的扩展过程中可以有效地分散载荷。具体来说,外层材料具备较高的刚性,中间层具备较高的韧性,而内层材料则可以提供结构支撑,这种分层设计有效分散了载荷应力,减少了叶片在动载荷下的疲劳损伤。同时,通过优化材料的纤维排布方向,使其更好地承受叶片运行中的动态载荷,进一步提升了材料的抗疲劳性能。这种分层复合结构设计不仅提升了抗疲劳性,还增强了整体结构的耐久性和使用寿命。

3 结语

通过对先进材料的应用研究,风电机组叶片的性能在多个方面得到有效提升,尤其是在抗疲劳性、抗风压性以及轻量化等关键性能上取得了显著进展。这些材料不仅改善了风电叶片的结构稳定性,还延长了使用寿命并降低了维护成本。未来,通过不断探索新材料和优化结构设计,风电机组的整体效率将得到进一步提升,推动风力发电在全球能源市场中的竞争力。

【参考文献】

[1]刘忠德,周强,雷和林,等.基于多传热模型数值仿真的风电机组叶片气热防除冰性能强化[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):160-168.
[2]曹俊伟,张硕望,黄凌翔,等.基于自适应桨距角控制策略的风电机组发电性能优化方法[J].太阳能,2024(5):52-61.
[3]赵庆旭.10MW 漂浮式海上风电机组气动设计方法研究[D].北京:华北电力大学(北京),2023.
[4]朱继新,王绍索,张继全,等.高原山地低能效风电场风电机组叶片气动性能优化研究与运用[J].中国设备工程,2022(2):142-145.
[5]易礼毅,凡盛,胡杰桦,等.安装涡流发生器的风电机组气动性能的仿真分析[J].太阳能,2022(10):53-58.
作者简介:黄志强(1994—),男,汉族,山西运城人,本科,助理工程师,研究方向为新能源发电。