



复合材料在大型风电叶片上的应用与发展

李成良 杨超 倪爱清 王继辉 宋秋香

Application and development of composite materials in large-scale wind turbine blade

LI Chengliang, YANG Chao, NI Aiqing, WANG Jihui, SONG Qiuxiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220715.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GFRP风电叶片段结构强度三维有限元分析

Three-dimensional finite element analysis of the structural strength of GFRP wind turbine blade segment
复合材料学报. 2019, 36(8): 1864–1872 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181217.001>

大型风机柔性叶片摆振运动冲击对层间断裂韧性的影响

Effect of flexible blade lead-lag of large scale wind turbine on fracture toughness between skin layers
复合材料学报. 2018, 35(2): 282–290 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170609.005>

真空辅助树脂灌注法制备风电叶片树脂的渗透及缺陷

Resin penetration and defects of wind turbine blades prepared by vacuum assisted resin infusion method
复合材料学报. 2019, 36(12): 2779–2785 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190304.001>

GFRP复合材料叶片摆振运动表面位移与层间断裂韧性响应

Response of surface displacement and interlayer fracture toughness of GFRP composite blades shimmy
复合材料学报. 2018, 35(11): 3088–3096 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180716.002>

激光对碳纤维及碳纤维/环氧树脂复合材料性能影响

Effect of laser on properties of carbon fibre and carbon fibre/epoxy resin composites
复合材料学报. 2018, 35(11): 2979–2986 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180428.001>

基于导热板的碳纤维增强聚醚醚酮复合材料感应焊接温度调控

Temperature control for induction welding of carbon fiber reinforced polyetheretherketone (CF/PEEK) composite material via thermal conduction plate
复合材料学报. 2021, 38(8): 2625–2634 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201019.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料在大型风电叶片上的应用与发展



李成良^{1,2}, 杨超¹, 倪爱清³, 王继辉^{*1}, 宋秋香²

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 中材科技风电叶片股份有限公司, 北京 100192;

3. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

摘要:“30.60”双碳目标的提出,风电行业迎来新的发展机遇。随着中国风电进入平价时代,风电机组通过不断增加单机容量来降低度电成本,由此也对风电叶片长度提出了不断增加的要求。风电叶片面临着“大型化、轻量化与低成本”的矛盾,新材料和新工艺是推动叶片走向风电平价时代的重要手段。本文评述了风电叶片行业的发展与趋势,指出影响叶片性能和成本的关键原材料,系统性地分析了增强纤维、夹芯材料、基体树脂和结构胶4种材料在叶片上的应用现状和发展趋势;探讨了高质量和绿色环保条件下叶片大型化对工艺发展的新要求,新工艺中的预浸料和拉挤技术是未来大叶片应用发展的主要趋势。最后,文章对新材料和新工艺在叶片上的创新应用提出了一些思考与建议,为平价时代风电叶片的大型化发展提供了重要参考。

关键词:复合材料; 风电叶片; 大型化; 夹芯材料; 碳纤维

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)03-1274-11

Application and development of composite materials in large-scale wind turbine blade

LI Chengliang^{1,2}, YANG Chao¹, NI Aiqing³, WANG Jihui^{*1}, SONG Qiuxiang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Sinoma

Wind Power Blade CO., LTD., Beijing 100192, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Technology for Material

Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: With the proposal of "30.60" Double Carbon Project, the wind power industry has ushered in new development opportunities. As China's wind power enters the era of parity, the cost of power per kWh is reduced with the continuous increase of the single capacity of wind turbine system, which also leads to significant increase in the wind blade length. Wind blade is now facing the contradictory requirements of "large-scale, low-cost and light-weight". Both new material and innovative processing technology are of great importance to promote wind power to the parity era. On one hand, several key raw materials, including reinforcing fiber, matrix resin, core and structural adhesive, that affect the performance and cost of wind blade are systematically examined. On the other hand, high quality blades and green environmental protection are of great concern for the wind power industry, which indicates that new processing technology such as prepreg and pultrusion are playing more and more important role in future large scale blade manufacture. Thereafter, with systematic consideration of the materials and processing technologies in the development of wind blade, some suggestions are proposed on the introduction of these materials and technologies, in order to provide some reference for future large-scale wind blade development.

Keywords: composite material; wind turbine blade; large-scale; core material; carbon fiber

随着风电行业进入平价时代,度电成本降低
的最有效手段就是不断扩大风电机组的单机容量,

由此也带来风电叶片长度的不断增加^[1-3]。因此,
平价时代机组大型化是风电发展的必然趋势,开

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-06-14; 录用日期: 2022-07-03; 网络首发时间: 2022-07-15 12:13:28

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220715.001>

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项 (SBE2021080010); 中国建材集团关键核心技术攻关项目 (2021 HX1617)

Carbon Peak Carbon Neutralization Scientific Innovation Special Project of Jiangsu Province (SBE2021080010); Key Technological Tackling Project of China National Building Material Group CO., LTD. (2021HX1617)

通信作者: 王继辉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为聚合物基复合材料 E-mail: jhwang@whut.edu.cn

引用格式: 李成良, 杨超, 倪爱清, 等. 复合材料在大型风电叶片上的应用与发展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1274-1284.

LI Chengliang, YANG Chao, NI Aiqing, et al. Application and development of composite materials in large-scale wind turbine blade[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1274-1284(in Chinese).

发“大型化、轻量化和低成本”叶片是推动机组度电成本降低的最有效手段。复合材料由于其优异的力学性能和可设计性被广泛应用于航空航天、汽车和风电叶片^[4-6]，为实现功率更大、长度更长、重量更轻和成本更低，复合材料成为风电叶片唯一可选材料。作为决定叶片结构和成本的增强纤维、夹芯材料、基体树脂和结构胶，其应用和发展趋势对叶片行业未来的发展至关重要，特别是高性价比材料的技术进步决定了大叶片未来的发展方向。目前也有不少研究机构对复合材料的性能及其回收再利用进行了诸多研讨^[4, 7-9]，对其成型工艺做了许多研究^[10-13]，但仍缺少有关材料开发与成型工艺创新结合应用方面的研究。本文详细分析了增强纤维、夹芯材料和基体树脂在风电

叶片上的应用现状与存在的问题，指出增强纤维与预浸料和拉挤工艺相结合、高性能环保芯材替代轻木和开发可回收树脂是未来轻量化大叶片发展的主要方向。

1 风电行业发展的现状与趋势

近年来全球风电产业迅猛发展，根据全球风能理事会(GWEC)统计(图1)，2020年受中国风电抢装潮的影响，全球新增装机取得历史性突破，新增装机量高达95.3 GW；2021年虽然受到全球疫情影响，但新增装机量仍达到93.6 GW，为历史第二高。中国风电凭借国内巨大市场优势和内外“双循环”保持全球领先地位，为中国乃至全球的新能源应用做出了巨大贡献。

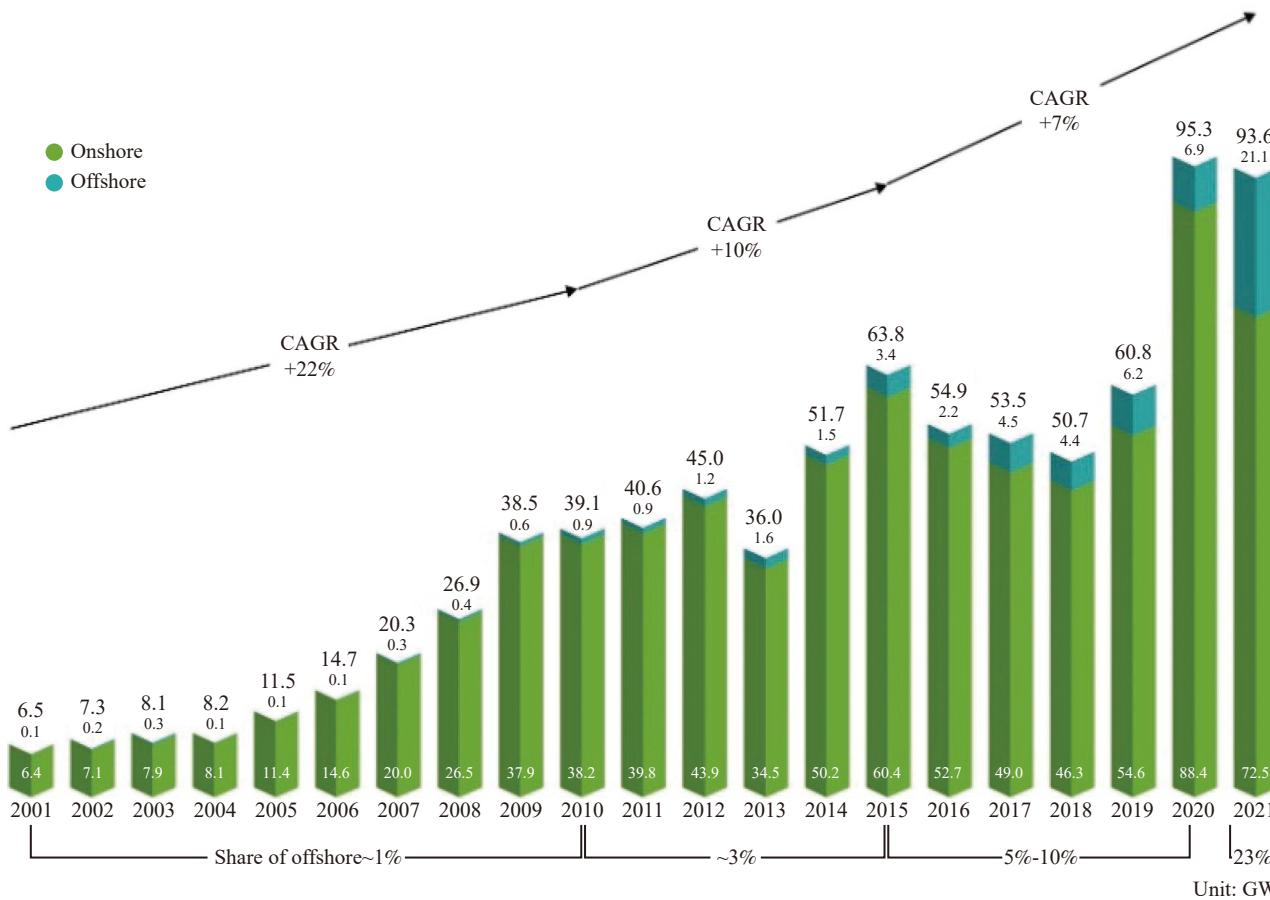


图1 2021年全球风电新增装机容量^[1]

Fig. 1 Global wind power capacity growth in 2021^[1]

根据全球风能理事会发布的《2022年全球风电报告》^[1]，预计未来5年全球风电市场将保持年均6.6%的增速(图2)。中国能源局基于“双碳”战略制定的十四五规划，风能将成为未来能源的主要形

式^[5, 14]，并将是中国能源结构转型的主力军。如图3所示，根据伍德麦肯兹预测，未来10年内全球风电复合增长率为4.3%，中国风电新增装机量将占全球45%，中国风电将继续引领全球风电的增长。

随着风电产业发展和风电技术进步，基于风资源使用效率持续提升和度电成本不断降低的要求，风电机组大型化已成为行业发展必然趋势^[1-3]，如图4所示。目前，陆上风电机组主流机型集中在4.0~5.0 MW的机组，6.0 MW以上的机型是未来

几年陆上的主打产品，而海上当前的成熟机型为6.0 MW左右，10 MW及以上的机组及其关键部件处于研发阶段。

叶片作为风电机组的核心部件，是风能转化的动力源泉，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，是推动机组大型化的关键环节。当前最新研发的更长更轻的陆上主流叶片长度都在90 m以上，海上主流叶片长度都在100 m以上，超大型机组及其轻量大叶片的进一步发展，使高性价比复合材料成为突破叶片“大型化、轻量化和高可靠性”的核心所在，增强纤维、夹芯材料和基体树脂等在叶片上发挥的作用也越来越大。

2 叶片材料的应用与发展

复合材料可满足叶片变截面、曲率大和结构铺层渐变等特征要求，纤维增强复合材料已成为大叶片的唯一可选材料^[4, 15]，这也使风电叶片成为世界上最大的复合材料单体部件。一般来说，材料选择在叶片结构设计定型时完成，但最新的叶片设计理念就是将材料前置，与气动、结构形成多目标一体化迭代，不断寻优叶片和主机匹配的最佳发电量、载荷与成本，目前陆上8.0 MW以下叶片设计都是玻璃纤维为主的材料体系，而海上12 MW以上叶片则须考虑应用碳纤维主梁进行设计。

风电叶片的典型结构如图5所示，其应用的原材料主要由增强纤维、树脂、芯材和结构胶等组成，叶片的主要成本构成如图6所示。从图6和图7中可以看出，原材料费用占叶片成本的75%，而在原材料成本中占比较大的主要是增强纤维、基体树脂、夹芯材料和结构胶，本文将对这4种主要材料的应用和发展趋势进行评述。

2.1 增强纤维

复合材料的增强纤维类别有很多，早期叶片上试用过天然的竹纤维，但由于性能偏低和供应不足问题不具备在大叶片批量应用的条件；玄武岩纤维近几年也是叶片应用研讨的热点，但因其密度大、成本高和产能有限，也不具备规模化应用的条件。因此，目前风电叶片主要应用的增强纤维还是玻璃纤维和碳纤维。

2.1.1 玻璃纤维

玻璃纤维是公认的优质风电叶片原材料，根据中国玻璃纤维协会的统计数据，风电用玻璃纤维占玻璃纤维总产能的20%~25%左右。

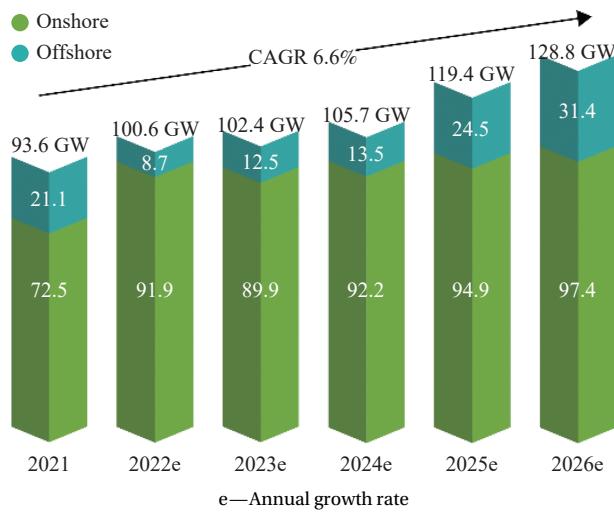


图2 2021~2026年全球新增风电预测^[1]

Fig. 2 Global wind power market forecast, 2021-2026^[1]

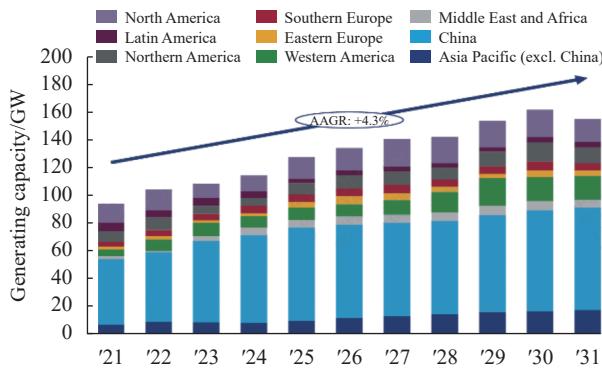


图3 2021~2031年全球新增风电预测^[3]

Fig. 3 Global wind power market forecast, 2021-2031^[3]

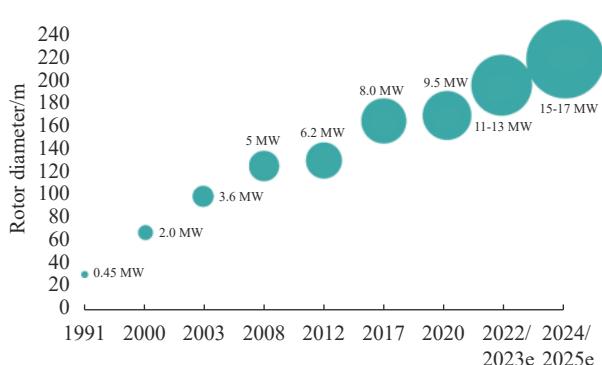
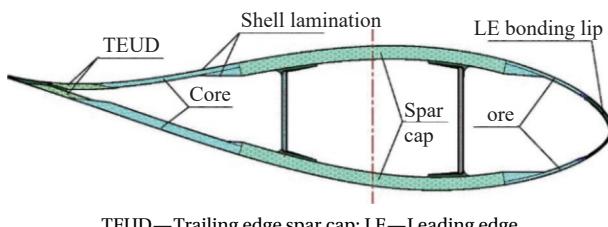


图4 风电机组单机功率大型化趋势^[2]

Fig. 4 Trend of large-scale wind turbine unit power^[2]



TEUD—Trailing edge spar cap; LE—Leading edge

图 5 典型风电叶片截面结构型式

Fig. 5 Typical structure of wind turbine blade section

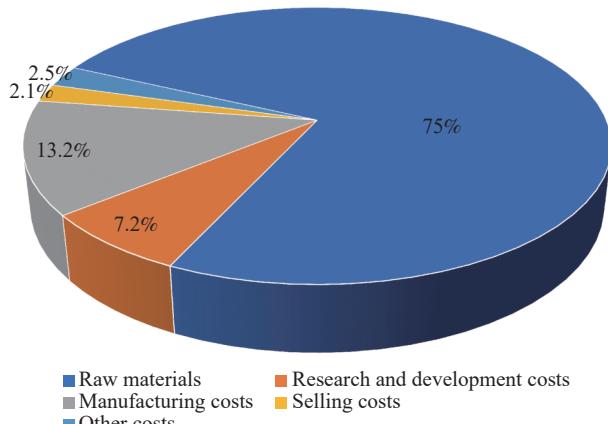


图 6 叶片成本占比情况

Fig. 6 Cost ratio of wind blade

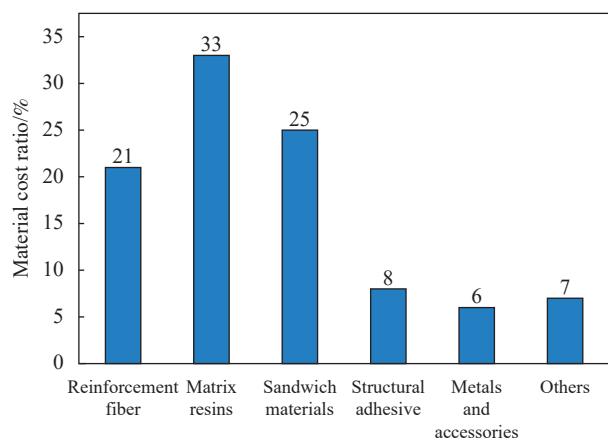


图 7 叶片主要材料成本占比

Fig. 7 Main materials cost ratio of wind blade

叶片越长整体柔性变形就越大，控制叶尖挠度变形可以确保叶片与塔架之间具有足够的安全距离，否则很容易发生扫塔事故。玻璃纤维的拉伸模量是影响叶片变形的关键因素之一，因此其模量的增加对叶片刚度的提升意义重大。近 10 年玻璃纤维企业持续不断的进行技术创新，图 8 为主要型号玻璃纤维的拉伸模量。可以看出，每一代玻璃纤维的模量都提升了 10% 左右，有力地促进了叶片大型化的发展，近年来叶片用玻璃纤维主要型号如表 1 所示。

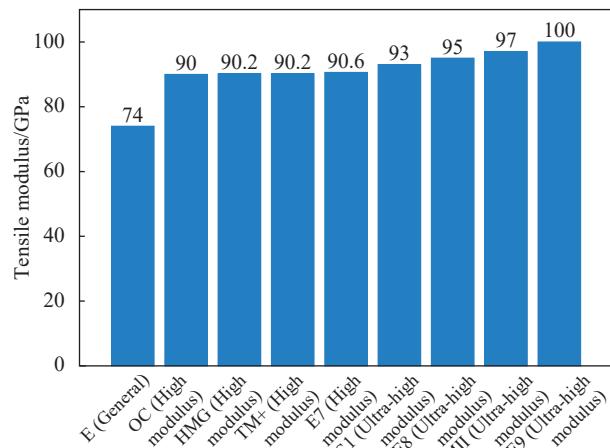


图 8 主要型号玻璃纤维的拉伸模量

Fig. 8 Tensile modulus of main types of glass fibers

表 1 叶片用玻璃纤维的主要型号

Table 1 Main types of glass fiber for wind blade

Manufacturer	First generation	Second generation	Third generation	Fourth generation
Jushi	E6	E7	E8	E9
CPIC	TM	TM+	TMII	—
CTG	TCR	HMG	S-1 HM	THM-1
OCV	WS2000	WS3000	WS4000	—

玻璃纤维在叶片的蒙皮、腹板和主梁上都有广泛的应用，不同部件采用的纤维布类型因承载需要而各有差异。虽然玻璃纤维经过近几十年的发展进步斐然，但对于适应更大更轻叶片需求，玻璃纤维性能提升的空间也越来越小，亟需新材料和新工艺等新技术来推动风电叶片的发展。

2.1.2 碳纤维

与玻璃纤维相比，碳纤维的比模量和比强度均大幅增加，其模量比玻璃纤维高 3~8 倍、比重约小 30%。随着叶片尺寸的增加，其重量也越来越大，全玻璃纤维叶片无法满足机组大型化和轻量化的要求^[15]，碳纤维将成为实现超大型叶片轻质高强要求的理想选择材料。碳纤维主要有 3K、12K、24K、48K 等规格，其中 1~24K(含)为小丝束产品，主要在航空航天和军品上应用，而 24K 以上为大丝束产品，主要应用于风电叶片和民用产品。

全球碳纤维产能集中于日本和欧美等地区，小丝束产能主要集中在日本，而大丝束产能主要集中于欧美国家。国际上碳纤维产能排名前 6 的公司分别是东丽、卓尔泰克、三菱、SGL、帝人与赫氏，日本东丽收购卓泰克后总产能达到 4.95

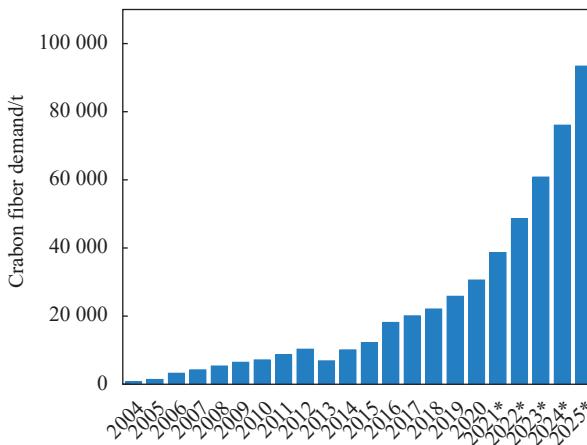
万吨，是名副其实的全球龙头企业。当前风电叶片应用的 24~50 K 碳纤维规格型号如表 2 所示。

表 2 叶片用碳纤维的主要型号

Table 2 Main type of carbon fiber used for blades

Manufacturer	TORAY	ZOLTEK	SGL	Formosa	ZFSY
Type	T720	PX35	CT50	TC35	SY45
Tows/K	36	50	50	48	24
Modulus/GPa	265	242	260	240	230

随着海上风电市场的不断扩大，碳纤维的应用势在必行。对于海上大叶片来说，通常会在其承载的关键部位主梁上应用碳纤维以提高叶片刚度和强度，以减少传递到主机和塔底的载荷，进而优化整机系统造价来降低度电成本。应用碳纤维主梁设计的叶片一般比全玻璃纤维叶片减重 20%~30%，虽然碳纤维叶片成本上升，但其带来的传动链上相关部件及塔筒的优化减重，使风电机组的整体成本降低 10% 以上。目前国内主流叶片厂开发长度 100 m 以上的叶片均考虑了碳纤维主梁的应用，林刚^[16]在《2020 全球碳纤维复合材料市场报告》中对未来 5 年的风电叶片碳纤维需求进行了预测，如图 9 所示。

图 9 风电行业碳纤维需求趋势^[16]Fig. 9 Carbon fiber demand trend in wind industry^[16]

为了进一步推动国产碳纤维在风电叶片上的应用，国内主流的碳纤维供应商在十四五期间开始提高碳纤维产能和批量化生产供应，并通过提升技术、改进设备和减少能耗来降低成本。预计到 2030 年中国碳纤维产能为 30 万吨，而风电市场的需求预计在 19~20 万吨。当前叶片上应用的碳纤维多选择 48~50 K 的大丝束，但随着叶片更长更轻的要求不断提升，未来将会考虑性能更好

的 24 K 及以下碳纤维应用于 150 m 长的叶片上。因此，推动叶片大型化和国产化碳纤维的应用需要风电产业链上下游共同努力，从选材、设计和验证等方面提前布局，为碳纤维和风电叶片行业的可持续发展奠定坚实基础。

2.2 夹芯材料

夹芯材料(简称芯材)是叶片的关键增强材料，通常应用在叶片的蒙皮与腹板上，作为夹层结构来提升结构刚度，防止局部失稳、提高整个叶片的抗载能力，叶片用芯材主要是 Balsawood(俗称轻木或巴沙木)和硬质泡沫，硬质泡沫主要有聚氯乙烯(PVC)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和高性能聚氨酯(HPE)等发泡材料。

2.2.1 轻木

轻木属木棉科热带速生树种，全球 90% 以上的轻木都是来自于厄瓜多尔。轻木密度小且生长迅速，常规密度是 135~176 kg/m³，4~7 年即可采伐，是提高风电叶片结构刚度的理想夹芯材料，轻木加工应用过程如图 10 所示。



图 10 轻木的加工与应用

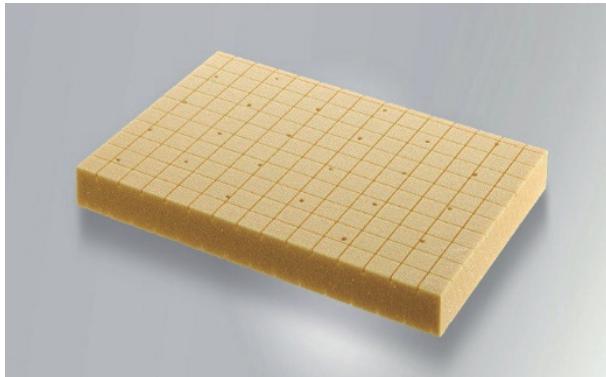
Fig. 10 Processing and application of balsa wood

由于轻木主要靠进口，树木的生产周期也限制了供应，对成本造成了较大的波动，特别是轻木的密度不均匀且吸胶量高于其他芯材，也促使在新叶片设计过程中尽量减少轻木应用，但轻木较高的压缩性能是硬质泡沫无法完全替代的，特

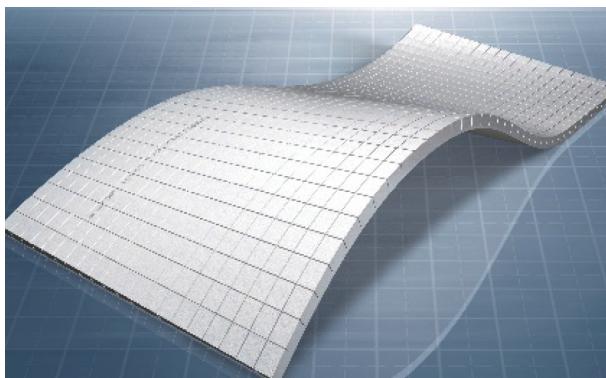
别是在百米级的海上大叶片中轻木的用量还会增加。为了更好地控制重量和减少缺陷，对轻木未来的需求应是分级应用，选择密度波动更小原木拼成套材，以确保叶片夹层结构的性能更加稳定。

2.2.2 泡沫芯材

PVC 因国外叶片技术转让从而进入国内市场，一直是风电叶片芯材的主流产品(图 11(a))，主要的国外供应商分别是瑞典戴铂(DIAB)、瑞士思瑞安(3A)和意大利 Maricell 等公司。十二五期间



(a) Blade core materials-PVC



(b) Blade core materials-PET



(c) Blade core materials-HPE

PVC—Polyvinyl chloride; PET—Polyethylene terephthalate; HPE—High performance polyurethane

图 11 风电叶片芯材的主流产品

Fig. 11 Main core materials of wind blade

PVC 受进口影响供应紧张，国产化 PVC 需求迅速增长。近几年维赛成为国产化 PVC 的主要供应商，思瑞安和戴铂也在国内实现进口技术本地化生产。由于 PVC 技术创新性不足，难以满足更大叶片对夹芯材料性能提升的需求，因此在设计叶片时开始使用 PET 和 HPE 替代 PVC。

PET 泡沫是近几年来替代 PVC 的主要芯材(图 11(b))，其吸胶量高，力学性能优于 PVC，因此除了在叶片局部可以替代 PVC 外，还能替代一部分轻木。随着新型发泡技术的发展，部分企业研发出了控制发泡孔尺寸及泡孔破损比例的新型发泡技术，大幅降低了 PET 芯材的树脂吸收率，降低了叶片的原材料成本和质量。

HPE 具有优越的耐高温性、耐候性，是联洋新材料开发出来新兴的替代 PVC 和轻木的芯材(图 11(c))，特别是其泡孔尺寸仅为 PVC 和 PET 的 20%(图 12)，使 HPE 的吸胶量更低，可有效降低叶片的整体质量，降低叶片综合成本。

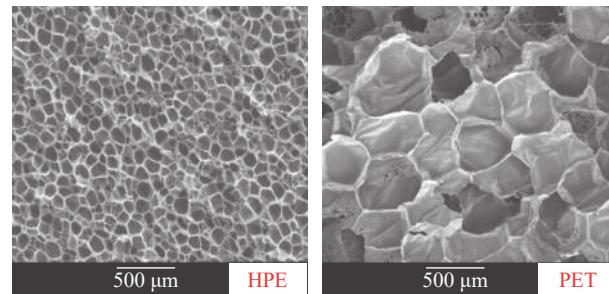


图 12 HPE 和 PET 的 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of HPE and PET structure

随着风电进入平价时代和叶片大型化，夹芯材料的应用对叶片的性能提升和成本降低有着重要的作用。轻木受产地影响供应不均衡且价格忽高忽低，PVC 虽然已实现国产化但成本仍比 PET 高 20%~30%，因此使用低密度的 PET 与 HPE 替代 PVC 和部分轻木已是大势所趋，而高密度的 PET 和 HPE 则有机会替代全部轻木，特别是聚氨酯在叶片上的应用更是要考虑去掉轻木。以某 73 m 叶片生产为例，采用不同芯材进行蒙皮和腹板的灌注对比，HPE 替代 PET 后综合重量下降 167 kg/支(下降 9%)，就对芯材与树脂两种材料的成本影响而言，综合成本可节省 31%；HPE 替代 PVC 后综合重量上升 77 kg/支(上升 5%)，综合成本可节省 34%，如图 13 和图 14 所示。

虽然夹芯材料的应用发展出现了重大变化趋

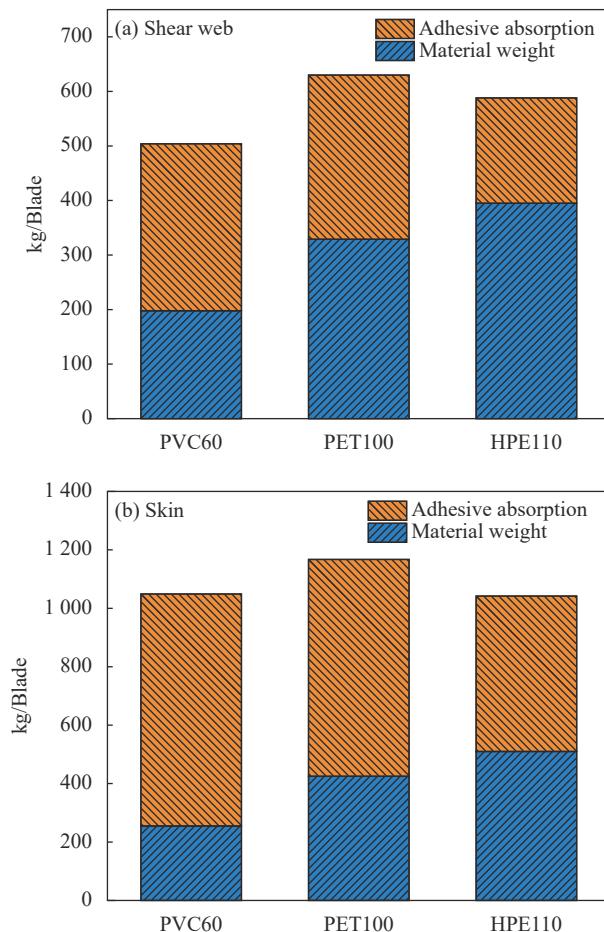


图 13 73 m 叶片腹板(a)和蒙皮(b)不同芯材吸胶量与质量变化

Fig. 13 Variation of resin absorption and weight of different core materials of 73 m blade shear-web (a) and blade skin (b)

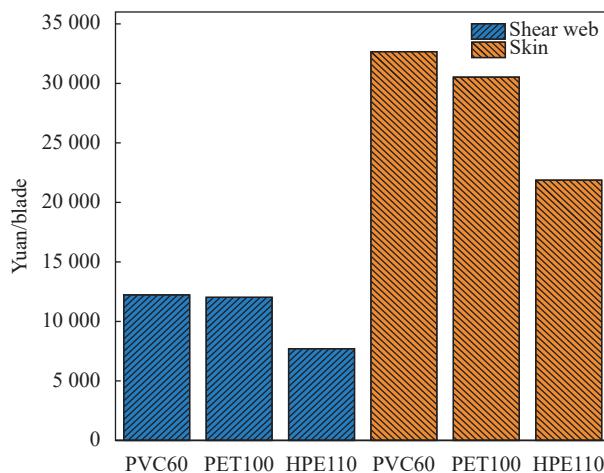


图 14 73 m 叶片应用 HPE 后综合成本的变化

Fig. 14 Changes in comprehensive cost of 73 m blade after HPE application

势，但目前叶片设计的基础仍是以轻木和 PVC 为主，采用 PET 和 HPE 替代 PVC 和轻木，需要一系列的材料实验和叶片全尺寸测试验证，同时也要

考虑叶片刚度和重量变化带来的机组载荷变化风险。特别要注意的是，高密度的 PET 和 HPE 应用技术成熟度不足，且价格比轻木略高，替代轻木时除了要完成原材料验证和认证外，还要考虑成本变化带来的影响。

2.3 基体树脂

树脂基体材料在复合材料中起着粘结、支持、保护增强材料和传递载荷的作用。风电用树脂主要是不饱和聚酯与环氧类的热固性树脂，目前只有艾尔姆(LM)公司和三菱公司采用不饱和聚酯树脂批量生产兆瓦级以上的叶片，更大型号的叶片则多采用环氧树脂，而国内叶片公司基本上都是批量使用环氧树脂。热塑性树脂作为风电叶片可回收的基本材料，多年来一直是行业研究的热点。

2.3.1 热固性树脂

风电叶片主要使用环氧灌注和手糊树脂。灌注树脂应用于叶片主要部件如腹板、主梁及壳体的真空灌注成型^[17-21]；手糊树脂在叶片制造中主要应用于叶片前后缘、腹板粘接区域补强及辅助件的粘接补强，主要成型工艺是手糊成型和手糊袋压工艺。基于行业对叶片提质增效的需求，不仅树脂对纤维织物要有更好的浸润性以提高灌注速度，也要根据升温曲线来减少固化时间。2021年，受上游原材料双酚 A 和环氧氯丙烷涨价的影响，叶片降本面临着巨大的压力，聚氨酯和双环戊二烯树脂(DCPD)逐渐成为行业内关注的热点。

聚氨酯具有黏度低、灌注和固化速度快等特点，灌注时间比环氧树脂缩短一半，在80℃的环境条件下固化时间小于4 h，成本方面比环氧树脂低15%~20%，是近几年叶片应用关注度最高树脂材料。由于聚氨酯对水分非常敏感，因此叶片设计时不能使用轻木，叶片生产过程中增强纤维和夹芯材料的烘干及灌注时对水的控制是聚氨酯批量应用的技术关键所在。

DCPD 树脂密度是环氧树脂的 90% 左右，成本比环氧树脂低了约 30%，是叶片减重、降低成本和提高灌注效率的理想材料。由于 DCPD 存在黏度低灌注流速过快的问题，且缺乏成熟配套材料体系(如纤维、油漆等)，因此需要进行配套材料体系开发、工艺实验和结构测试验证，才能保证在风电叶片上更好地推广应用。

2.3.2 热塑性树脂

随着叶片装机量的增大，越来越多的人开始研究废旧叶片的回收问题，比如叶片经粉碎后进

入水泥窑里高温灼烧后做骨料的技术^[8, 22-23]，但是当前的政策还不能支持规模化应用，因此退役后的复合材料叶片回收再利用是行业内面临的一个重大难题^[5, 7-8, 11, 22]。与热固性复合材料相比，热塑性复合材料具有可循环使用、废料可回收、产品可熔融再加工、可焊接等优点，也顺应绿色环保的发展要求，是未来风电叶片应用的重要方向。法国阿科玛(Arkema)公司一直致力于开发Elium系列热塑性树脂，Murray等^[11]的研究表明，与环氧树脂基复合材料叶片相比，采用Elium热塑性复合材料制作大叶片(61.5 m)，其整体成本能够降低4.7%，具有一定的成本优势^[7, 24]。因此风电行业对热塑性树脂在叶片上的成型工艺研究与批量化应用也充满了期待，希望能借此解决风电叶片材料的回收利用问题。

2.4 结构胶

结构胶作为叶片主材之一，作用是将叶片蒙皮与腹板粘接在一起形成主承力结构^[8]。结构胶在粘接固化时与树脂一样属于不可逆反应，如果出现缺胶或胶层厚度偏差大等缺陷，其粘接可靠性会直接影响到叶片的运行稳定性，因此结构胶也成为整个材料体系中风险最高的原材料之一。

结构胶类型主要有环氧型、聚氨酯型、乙烯基型及丙烯酸酯型等，目前在叶片合模用的结构胶主要是环氧型结构胶，由国内外有限的几家供应商提供。国外供应商主要有瀚森(Hexion)和欧林(OLIN)，其结构胶具有韧性好和固化收缩率低等优良性能，一度成为风电行业早期快速发展的主力军，但是过高的价格也与叶片的低成本化相矛盾。近几年来，国内康达、道生等供应商不断进行技术革新和生产优化，凭借相对均衡的性能和低成本的优势而不断扩大其市场份额。

风电叶片上应用结构胶重点是考虑其粘接性能和粘接工艺，粘接性能主要体现在剪切强度与剥离强度上^[25]，粘接工艺主要考虑涂胶和固化的问题。通过对康达化工WD3135/WD3137结构胶进行性能分析可知，结构胶的拉剪强度随着胶层厚度的增加而降低，剥离强度则随着胶层厚度的增加先增后降，如图15所示。

在叶片蒙皮粘接时，结构胶从混胶到涂胶与合模还需要一定的时间，因此结构胶的开放、施工和固化时间等工艺参数都会对合模粘接性能产生影响。如图16和图17所示，加热固化3 h后玻璃化转变温度 T_g 达到74℃，随着固化时间的增

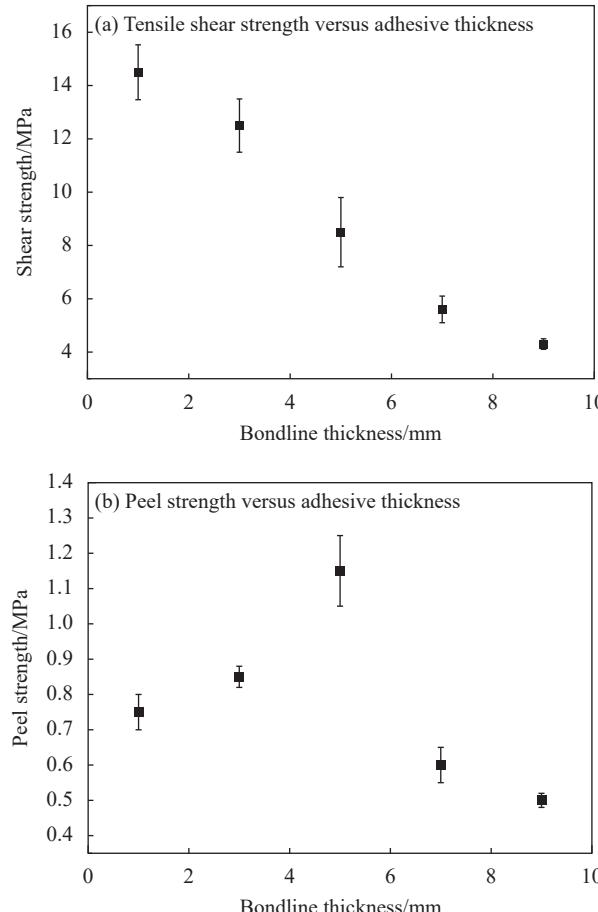


图 15 拉剪强度和剥离强度随胶层厚度变化

Fig. 15 Tensile shear strength and peel strength versus adhesive thickness

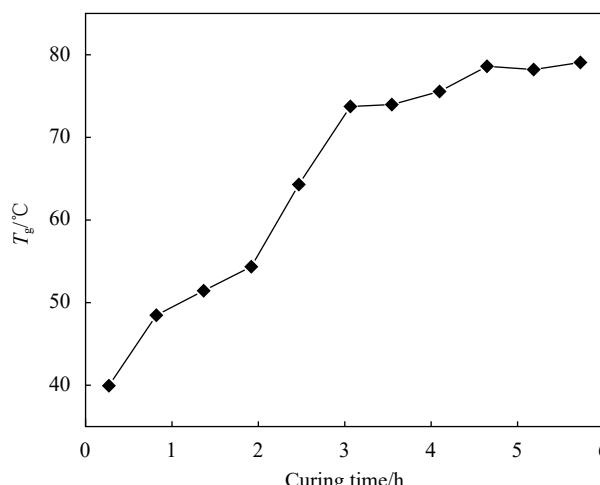


图 16 玻璃化转变温度 T_g 随固化时间的变化

Fig. 16 Change of glass transition temperature T_g with curing time

加 T_g 稳定在75~79℃，而拉剪强度也随着 T_g 的增加而趋于稳定。由于叶片合模时大多采用自动上胶机进行涂胶，而结构胶中含有用于提高强度及

韧性的纤维填料，不仅增加结构胶的密度且在涂胶中经常会堵塞管路，同时叶片越大需要涂胶的面积越大，涂胶的时间也就越长，因此开发低密度、低成本、宽施工时间和高韧性快固化的结构胶是推动风电叶片提质增效降本的新趋势。

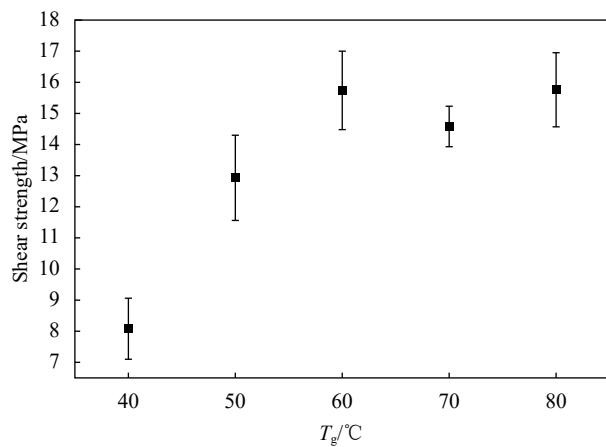


图 17 剪切强度随 T_g 的变化

Fig. 17 Change of shear strength with T_g

3 叶片新工艺发展

目前风电叶片的蒙皮成型主要采用真空灌注工艺，在前后缘及叶根补强区则多采用手糊工艺^[26-28]。随着叶片轻量化对材料性能提升的要求和绿色环保理念的不断深入，预浸料和拉挤成型工艺在叶片上的新应用越来越受到关注。

3.1 预浸料工艺

预浸料(Prepreg)是将纤维束或纤维布经过树脂浸润后形成的均匀预固化材料，可减轻对环境的污染，如图 18 所示。

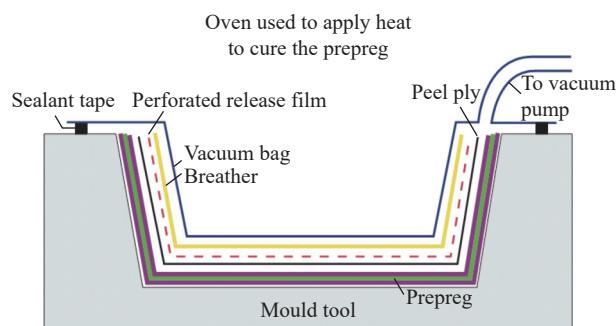


图 18 预浸料真空袋压工艺

Fig. 18 Vacuum bag process of prepeg

在叶片上使用预浸料主要是考虑实现蒙皮铺层自动化或碳纤维主梁预制成型，蒙皮自动铺带铺丝与结构设计有关，可以借鉴飞机机翼的自动

成型工艺来实施，但考虑其高昂的成本推广意义不大；目前叶片成熟应用预浸料工艺的是碳纤维主梁成型，相比碳纤维灌注成型，预浸料可以大幅度提升材料利用率和结构性能，特别是影响主梁设计的碳纤维复合材料关键性能，其拉伸模量和压缩强度可提升 15%~20%，这就显著减少了碳纤维的用量，降低了碳纤维叶片的成本^[29-30]。

随着绿色环保和高质量发展要求越来越高，叶片手糊工艺的缺点也越来越明显，材料利用率低且污染环境，因此采用玻璃纤维预浸料在前后缘和叶根补强被提上日程。中材叶片在行业内率先试用了中温固化玻璃纤维预浸料在前后缘区进行补强，开发的玻璃纤维预浸料体系的力学性能和固化工艺均能满足叶片的设计需求，部件级测试结果与手糊工艺相当。但现有的中温固化体系预浸料常温存储期较短，低温冷藏运输成本较高；因此需要开发一种适应于长存储期的低温固化玻璃纤维预浸料，减少叶片生产环境污染并提高成型效率。

3.2 拉挤成型工艺

拉挤成型工艺能充分发挥连续纤维的力学性能，具有更高的纤维含量，原材料利用率在 95% 以上，产品性能高且稳定可靠。从纤维增强复合材料发展来看，拉挤成型技术的应用已成为未来风电叶片发展的重要趋势。如图 19 所示，通过对实施拉挤工艺的同一规格玻璃纤维(S-1 HM)和碳纤维(TC35)的力学性能与灌注工艺对比，发现玻璃纤维拉挤板材的拉伸模量比灌注玻璃纤维提升了 15%，压缩强度提升超过 47%；碳纤维拉挤板材的拉伸模量比灌注碳纤维提升了 25%，压缩强

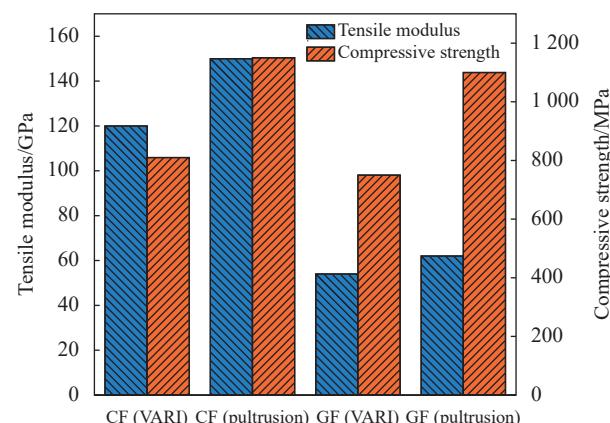


图 19 拉挤与灌注工艺复合材料力学性能的对比

Fig. 19 Comparison of mechanical properties of composite by pultrusion and infusion

度提升了42%。因此，拉挤主梁作为提升材料利用率最有效的结构型式，是提高叶片结构性能、降低成本和提高生产效率的最重要手段。以81 m级20吨的叶片为例，在保持主机性能前提下，采用玻璃纤维拉挤主梁替代灌注主梁后，单支叶片可减重0.6吨。

维斯塔斯(Vestas)在2014年开始推出拉挤碳梁叶片(如图20所示)，2020年碳纤维用量占风电总量的80%以上。西门子歌美飒(SGRE)在其新开发的SG-155和SG-170叶型开始应用碳纤维拉挤主梁设计；GE公司使用拉挤工艺进行了玻璃纤维拉挤板材主梁叶片的研究，新开发叶型GE75上应用了碳纤维拉挤主梁设计。

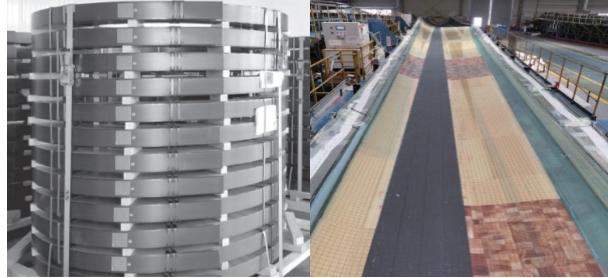


图20 碳纤维板材与拉挤主梁叶片

Fig. 20 Carbon fiber plate pultrusion spar cap blade

国内在这方面虽然起步晚，但推广应用很快，中材叶片于2019年开展玻璃纤维拉挤主梁技术开发，2021年该技术在Si76.5、Si85.8和Si90等多个系列叶片上批量应用；国内大部分主机厂和叶片厂也都开启了拉挤主梁叶片开发应用。考虑到叶片摆振方向结构性能的提升，后缘梁拉挤技术正在研究与验证中。在碳纤维拉挤方面，国内已经开始了尝试应用，如远景能源在EN161叶片上进行小批量应用，金风科技在GW184叶片上已经完成两套叶片的试用。随着国产化碳纤维的规模化应用，碳纤维原材料供应商也在积极开发国产化拉挤板材技术，在玻璃纤维拉挤技术和低成本碳纤维的推动下，碳纤维拉挤必将成为未来大型叶片主梁的首选成型工艺。

4 结论

复合材料技术的进步是推动风电叶片大型化、低成本和轻量化的重要手段，是实现风电平价上网的关键环节。通过对复合材料在大型风电叶片上的应用现状及发展趋势分析，得出了以下结论：

(1) 拉挤技术在叶片上的集成创新应用，可以

大幅提升材料利用率和结构效率，玻璃纤维拉挤在主梁和后缘梁上的应用将是未来高模和超高模玻璃纤维在叶片上的主要体现形式；

(2) 随着低成本国产化碳纤维规模化生产，结合玻璃纤维拉挤技术的开发与成熟应用，碳纤维拉挤主梁将成为未来超大叶片特别是海上风电叶片的首选结构型式。

(3) 随着生态文明发展和绿色环保要求的不断升级，环保型的高性能聚氨酯(HPE)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)逐渐替代轻木和聚氯乙烯(PVC)，可回收循环利用的热塑性树脂的应用研究越来越受到关注，叶片补强区的手糊工艺逐渐向预浸料工艺方向发展。

参考文献：

- [1] MORTEN D, BEN B. Global wind report 2022[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2021: 110-140.
- [2] ALASTAIR D, MARC B. Global offshore wind report 2021[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2021: 19-30.
- [3] WOOD M. Global wind power market outlook update: Q1 2022[R]. Global conclusions on Q1 forecast, 2022: 7-8.
- [4] REDDY S S P, SURESH R, HANAMANTRAYGPINDA M B, et al. Use of composite materials and hybrid composites in wind turbine blades[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 2827-2830.
- [5] AUBRYN C, ANNIKA E, ERIC L. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 168: 105439.
- [6] COGNE V, PONT S, DOBREV I, et al. Bioinspired turbine blades offer new perspectives for wind energy[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 473(2198): 20160726.S.
- [7] MURRAY R E, SCOTT J, DAVID S, et al. Techno-economic analysis of a megawatt-scale thermoplastic resin wind turbine blade[J]. *Renewable Energy*, 2019, 131: 111-119.
- [8] BATURKIN D, AHMAT H O, MASMOUDI R, et al. Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 174: 105807.
- [9] GABHALE R R, CHANDRA B D. Comprehensive study of composite materials used in wind turbine blade[J]. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2015, 6(2): 146-155.
- [10] PINTO T H L, GUL W, TORRES L A G, et al. Experimental

- and numerical comparison of impact behavior between thermoplastic and thermoset composite for wind turbine blades[J]. *Materials*, 2021, 14: 6377.
- [11] MURRAY R E, SWAN D, SNOWBERG D, et al. Manufacturing a 9-meter thermoplastic composite wind turbine blade[C]. ASC 32nd Technical Conference. West Lafayette: Purdue University, 2017.
- [12] PETTERSSON J. Analysis and design of an adhesive joint in wind turbine blades[D]. Sweden: Lund University, 2016.
- [13] ZHOU H F, DOU H Y, QIN L Z, et al. A review of full scale structural testing of wind turbine blades[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33(2): 177-187.
- [14] 李林致. 当议风力发电的发展现状及趋势[J]. *中国新通信*, 2018, 20(19): 203-204.
LI Linzhi. Discussion on the development status and trend of wind power generation[J]. *China New Communications*, 2018, 20(19): 203-204(in Chinese).
- [15] 张文毓. 风电叶片复合材料及其应用[J]. *上海电气技术*, 2017, 10(4): 55-57.
ZHANG Wenyu. Wind power blade composite material and its application[J]. *Shanghai Electric Technology*, 2017, 10(4): 55-57(in Chinese).
- [16] 林刚. 2020全球碳纤维复合材料市场报告[Z]. 2020: 25-26.
LIN Gang. 2020 Global carbon fiber composites market report[Z]. 2020: 25-26(in Chinese).
- [17] CRISTIAN L T, EDGAR E M, RODOLFO R B. Effects of the vacuum moulding process on the mechanical properties of cotton/epoxy composite[J]. *Fibres and Textile in Eastern Europe*, 2018, 26(3): 93-97.
- [18] JOAQUIM V, CARLOS G, JAVIER L. Fabric compaction and infiltration during vacuum-assisted resin infusion with and without distribution medium[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(5): 687-703.
- [19] MOHANT P, KANNY K. Mechanical properties and failure analysis of short kenaf fibre reinforced composites processed by resin casting and vacuum infusion methods[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2018, 26(2): 189-204.
- [20] 徐立波. VARI工艺影响因素简析[J]. 轻工科技, 2015, 31(6): 28-29.
XU Libo. Brief analysis of the factors affecting VARI process[J]. *Light Industry Technology*, 2015, 31(6): 28-29(in Chinese).
- [21] 潘利剑, 刘卫平, 陈萍, 等. 真空辅助成型工艺中预成型体的厚度变化与过流控制[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(5): 244-248.
PAN Lijian, LIU Weiping, CHEN Ping, et al. Thickness variation and overcurrent control of preforms in vacuum assisted forming process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(5): 244-248(in Chinese).
- [22] COUSINS D S, SUZUKI Y, MURRAY R E, et al. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 1252-1263.
- [23] 李书乡, 马全胜, 张顺. 中国高性能碳纤维产业的创新发展[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 73-80.
LI Shuxiang, MA Quansheng, ZHANG Shun. Development of high performance carbon fiber industry in China[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(19): 73-80(in Chinese).
- [24] 阮芳涛, 施建, 徐珍珍, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料的回收及其再利用研究进展[J]. *纺织学报*, 2019, 40(6): 152-157.
RUAN Fangtao, SHI Jian, XU Zhenzhen, et al. Research progress in recycling and reuse of carbon fiber reinforced resin in composites[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(6): 152-157(in Chinese).
- [25] ALEXANDER S, NATALIE R, LMAN T. Co-curing of CFRP-steel hybrid joints using the vacuum assisted resin infusion process[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(5): 1137-1149.
- [26] BUCUR I O, MALAEL I, BREBAN S. Horizontal-axis wind turbine blades manufacture with composite materials[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Iasi, 2020.
- [27] FRACASSIF T, DONADON M V. Simulation of vauum assisted resin transfer moling prcess through dynamics ys-temanalysis[J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(27): 3759-3771.
- [28] 邢丽英, 蒋诗才, 周正刚. 先进树脂基复合材料制造技术进展[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(2): 1-9.
XING Liying, JIANG Shicai, ZHOU Zhenggang. Progress of manufacturing technology development of advanced polymer matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(2): 1-9(in Chinese).
- [29] 罗益锋, 罗晰曼. 近期碳纤维及其复合材料的新发展[J]. *高科技纤维与应用*, 2014, 39(1): 1-9.
LUO Yifeng, LUO Ximin. New developments of recent carbon fiber and their composite materials[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2014, 39(1): 1-9(in Chinese).
- [30] 高奇. 新形势下我国碳纤维产业发展探讨[J]. *合成纤维工业*, 2019, 42(4): 58-63.
GAO Qi. Discussion on development of China carbon fiber industry under new situation[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2019, 42(4): 58-63(in Chinese).