

引用本文格式 梁小杰, 杨文涛, 游慧鹏, 等. 风电叶片用芯材应用进展[J]. 农业工程, 2023, 13(10): 56-59. DOI: [10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.10.010](https://doi.org/10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.10.010). LIANG Xiaojie, YANG Wentao, YOU Huipeng, et al. Progress on application of core materials for wind turbine blades[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(10): 56-59.

风电叶片用芯材应用进展

梁小杰, 杨文涛, 游慧鹏, 谢宇飞, 刘宏伟, 张朝锋, 郑 冰

(中车山东风电有限公司, 山东, 济南 250061)

摘 要: 芯材是风电叶片的关键材料之一, 主要用于风电叶片的壳体、腹板和叶根中, 为风电叶片提供刚度和抗剪切作用, 提高整个风电叶片的抗载荷能力。风电叶片作为大型构件, 其芯材需要具有良好的机械性能, 还需具有良好的工艺性能。针对目前国内外研究机构及制造商对风电叶片用芯材的应用研究, 着重综述了目前应用较多的 4 种风电叶片芯材(轻木、PVC 材料、PET 材料、SAN 材料)在材料性能方面和加工应用方面的研究进展。

关键词: 风电叶片; 芯材; SAN; PET; PVC; 轻木

中图分类号: S213 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-1795(2023)10-0056-04

DOI: [10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.10.010](https://doi.org/10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.10.010)

Progress on Application of Core Materials for Wind Turbine Blades

LIANG Xiaojie, YANG Wentao, YOU Huipeng, XIE Yufei, LIU Hongwei, ZHANG Chaofeng, ZHENG Bing

(CRRC Shandong Wind Power Co., Ltd., Jinan Shandong 250022, China)

Abstract: Core material is one of the key materials of wind turbine blades, which is mainly used in shell, web and blade root of wind turbine blades. The core materials mainly provide stiffness and shear resistance for blades, so core materials need good mechanical properties and mechnial properties. For the foam core materials currently used in wind turbine blades, domestic and foreign research institutions and manufacturers have been carried out many studies. The progress of four widely used wind turbine blade core materials (Balsa, PVC, PET, and SAN) in performance and processing application was reviewed.

Keywords: wind turbine blade, core material, SAN, PET, PVC, balsa

0 引言

人类社会不断发展, 对能源的需求越来越多, 煤炭和石油等传统的化石能源作为不可再生能源, 存储量越来越少, 并且对生态环境具有破坏性, 因此为了保护环境和缓解世界能源危机, 需要大量开发利用可再生能源。风能是一种对生态环境无污染的再生绿色能源, 在世界能源需求日益增长, 环境问题备受关注, 尤其在碳达峰、碳中和的背景下, 具有较大的经济价值和社会应用前景, 具有非常重要的战略意义^[1]。国际可再生能源署在《全球可再生能源展望》报告中指出, 预测到 2050 年海陆两地风能的有效利用将实现全球 90% 以上的减排量。21 世纪以来, 风电技术处于快速发展的状态, 风电装机容量增长迅速, 这促使风电产业成为了世界范围内快速增长的行业。近几年,

我国风电装机容量一直是世界占比第一的增长量, 并且已经是世界上累计装机容量最多的国家, 风电叶片作为风机的关键部件, 对风机的性能起到重要作用。风电叶片原材料主要由基体材料、增强材料和泡沫芯材等制成, 风电叶片的设计结构属于三明治夹芯结构, 泡沫芯材作为风电叶片的主要材料之一, 是重要的剪切载荷的承受者, 而上边表层的玻璃钢是弯曲刚性的承受者^[2-5]。目前风电叶片用的芯材主要有轻木、交联聚氯乙烯泡沫(PVC 泡沫)、丙烯腈-苯乙烯泡沫(SAN 泡沫)和聚对二甲酸乙二醇酯泡沫(PET 泡沫)4 种。

1 风电叶片用芯材分类

1.1 Balsa 轻木

轻木主要生长在南美地区, 结构为蜂窝结构, 是

一种天然植物,属于可再生资源,力学性能和加工性能都比较好,具有良好的抗疲劳性和高强度/质量比。真空灌注过程中,由于轻木的毛细管作用,会吸收大量的树脂,降低灌注效率,同时增加风电叶片的质量^[6]。但是相比于PVC、PET等其他泡沫材料,轻木具有更高的强度和刚度,因此一般用于抗剪切性能要求更高的叶根部分^[7]。除了上述特点,轻木还易吸水,在风电叶片的制备过程中轻木的含水率要求<12%,但是在长期储存和运输过程中非常容易导致含水率的超标,在树脂固化放热过程中存在的水分形成水蒸气,导致过多水分存在的区域形成缺陷,另外过多的水分会降低芯材与玻纤布的结合作用而降低风电叶片的质量,因此轻木在使用前需对含水率进行测量并处理。

国内的轻木主要依赖于进口,随着风机装机量的逐年增加和国际环境的影响,轻木的质量和数量很难保障,因此急需开发出可以替代轻木的泡沫材料,目前有风电叶片厂家尝试采用高密度的PET泡沫芯材代替轻木^[8]。

1.2 交联PVC泡沫

交联PVC泡沫塑料的历史可以追溯到20世纪30年代的德国,林德曼采用异氰酸酯改性PVC制得,50年代就有相关的专利,现在经过几十年的研究发展,国外很多厂家已经实现了交联PVC的商业化生产,代表厂家有瑞典Diab公司、瑞士Airex公司、固瑞特公司和日本JFC公司^[9]。我国在硬质交联PVC泡沫方面起步较晚,从20世纪90年代开始硬质PVC泡沫塑料的研制,目前保定维赛新材料科技股份有限公司和常州天晟新材料集团股份有限公司等厂家生产的低密度硬质PVC泡沫塑料已经商业化生产应用,是我国风电叶片用PVC芯材的主要供应商^[10-13]。

PVC泡沫是一种交联闭孔的热固性塑料,具有各向同性,质轻、性价比高、优良的静态和动态力学性能,利用热变形能力可制造曲面结构,不易吸水等优点,但是作为夹层结构剪切强度较低,不适合作为主承力结构,主要应用于风电叶片壳体部位^[14-16]。另外,PVC泡沫耐温最高80℃,在风电叶片制造过程中会出现由于环氧树脂固化放热温度过高(高至100℃)导致PVC泡沫变色或烧焦现象出现,这些会对风电叶片性能产生不好影响。江一杭等^[17]对PVC泡沫放置于70和100℃烘箱中处理6h,并对两种温度处理下的PVC泡沫剪切、压缩性能,以及层合板的剪切、压缩、剥离性能进行了对比,发现100℃处理的PVC泡沫和层合板的性能均低于70℃处理的PVC泡沫和层合板,但是仍高于设计值,为了进一步提高风电叶片的刚度需尽可能降低体系的温度。

由于PVC泡沫质轻、价格低、力学性能能够满足

风电叶片设计要求,因此目前风电叶片壳体和腹板上的夹芯泡沫材料主要是PVC泡沫,目前PVC泡沫国内只有几家生产和供应,全部产能也无法满足目前国内风电叶片市场的需求,因此仍需继续开发和研究可替代PVC泡沫的夹芯材料。

1.3 SAN泡沫

SAN泡沫是一种热固性泡沫,20世纪90年代加拿大ATC公司(已被固瑞特公司收购)开始SAN泡沫的生产。SAN泡沫与PVC泡沫性能相近,但是抗冲击性能和耐温性更高,可以在风电叶片中代替PVC泡沫材料。目前只有固瑞特公司能够生产SAN泡沫,由于产能受限,世界上仅有TPI公司采用SAN泡沫作为风电叶片的夹芯材料^[18]。

1.4 PET泡沫

PET泡沫发泡后制得的PET泡沫,属于闭孔热塑性塑料。PET泡沫尺寸稳定性好,耐热性高(可长期耐温130℃),不会由于温度过高而造成芯材变色或烧焦,降低风电叶片的性能。随着风电叶片装机量的增加,报废的风电叶片也会越来越多,报废风电叶片的回收处理需要考虑,PET泡沫作为热塑性材料,可以做到100%回收循环利用。PET泡沫的闭孔结构,可以降低风电叶片制造过程中树脂的吸胶量而降低风电叶片的质量从而降低风电叶片成本^[19-20]。凭借上述优势,PET泡沫已得到世界各大风电叶片制造商的关注,现在已经得到批量应用。张振聪等^[21]基于等效剪切刚度退化理论,建立了风电叶片PET200夹芯结构的指数型累计损伤模型,可以很好地描述该结构的损伤演化规律,为风电叶片结构设计提供了材料基础数据。刘艳霞等^[20]对风电叶片用芯材PET泡沫的性能进行了研究,发现PET泡沫的抗压强度、抗剪切强度和耐高温性能都要优于PVC泡沫,而吸胶量则低于PVC泡沫,因此风电叶片芯材采用PET泡沫在提高强度和降低成本方面具有较大的优势。低密度的PET泡沫可以替代风电叶片中的PVC泡沫,而高密度的PET泡沫可以替代风电叶片中的轻木。

上述4种泡沫夹芯材料都在风电叶片上得到应用,说明他们的性能都能满足风电叶片不同部位的设计要求。目前风电叶片制备过程中所采用的树脂仍是以环氧树脂为主,环氧树脂在固化过程中会放热,导致体系温度升高,可达100℃以上,而PVC泡沫的耐热温度80℃,因此在树脂灌注过程中可能会导致变形或放气。SAN泡沫耐热性较高,因此和环氧树脂的尺寸稳定性远高于PVC泡沫,这也使SAN泡沫有望可以成为PVC泡沫的替代品。近年来,PET泡沫因其可回收且在高加工温度下的稳定性而备受关注。然而,它需要更高的密度才能达到PVC泡沫或SAN泡沫提供的强

度,但这不影响风电叶片制造商对 PET 泡沫的关注。

2 芯材加工

由于轻木具有优异的机械性能,密度较其他夹芯材料要高,因此轻木主要应用于需要承受较大剪切力作用的叶根。PVC 泡沫和 SAN 泡沫的密度较低,因此在轻量化的领域比较常见,如风电叶片的外壳和腹板,但是与轻木相比他们的机械性能较差。因此为了保证风电叶片的性能和成本,两种材料会在风电叶片中共同使用^[22]。

风电叶片的制备主要采用真空辅助树脂灌注工艺,这是一种高性能、低成本的大型纤维复合材料部件的成型技术^[23-25]。为了环氧树脂能够在芯材中快速流动和充分浸润芯材,目前大部分风电叶片制造商在芯材表面上进行打孔和开槽^[26]。芯材表面的打孔和开槽方式,打孔的孔径、孔间距和开槽的数量、形状和间距等会影响树脂在芯材中的流动,另外还会影响芯材的吸胶量,因此需要合理设计布置孔和槽的数量和形状,既有利于树脂在芯材的快速流动,又有助于树脂充分流入层压板,尽量减少树脂的吸收量而不降低材料的性能,从而降低产品的质量。

吉林重通成飞新材料股份公司对相同打孔方式、有无开槽的腹板 SAN 泡沫进行了力学性能测试^[27]。发现开槽打孔的样品面积吸胶量、体积吸胶量和灌注后芯材密度分别比打孔样品高 43.1%、43.1% 和 16.9%,而打孔样品的剪切性能和压缩性能分别比开槽打孔样品下降 3.7% 和 1.5%,但是力学性能均在设计要求数值之上。该公司实际生产了多支 68 m 左右的腹板,打孔方式制作的腹板比开槽打孔方式制作的腹板质量要轻,对于风电叶片腹板轻量化具有重大意义。但是芯材表面开槽区域的树脂流速要快于无槽孔区域,表面开槽区域由于树脂流速过快,会导致树脂的流失,产生没有树脂的缝隙或导致局部区域的白斑缺陷,导致风电叶片在运行中由于芯材的抗剪切和抗压缩能力降低而失效产生事故。因此需要对芯材的开槽方式进行全方面的考虑,既要保证树脂的流速,又要保证材料的性能,还需要尽可能降低吸胶量。

由于模具具有一定的弧度,因此在具有弧度的区域,芯材之间会有间隙产生。天津明阳风电设备有限公司对不同间隙(2、5 和 7 mm) PVC 平压、剪切、剥离和四点弯曲板材的性能进行了研究,试验结果表明,PVC 泡沫芯材不同间隙吸胶后,随着芯材间隙的增大、吸胶量增加和密度增大,平压强度和模量、剪切强度和模量、四点弯曲芯子剪切强度、四点弯曲面板弯曲强度都提升,剥离能先增大后降低^[28]。目前在风电叶片的制备过程中,为了降低风电叶片的质量一

般平铺芯材的间隙尽可能的低,但是风电叶片间隙的增大,会提升风电叶片的力学性能,因此可以合理设计芯材间隙,既满足风电叶片力学性能的提升又满足风电叶片减质的目的。

3 结束语

2016 年,国家发展改革委和国家能源局联合发布《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》明确,将研发 100 m 级及以上风电叶片列入能源技术创新的重点任务中^[29]。风电叶片尺寸的增大会提升机组的发电量,同时也会导致载荷增加,因此长风电叶片的轻量化是风电叶片的重点研究方向,而材料是风电叶片轻量化的突破口。根据全球风能理事会的预测,全球装机量从 2019 的 60.4 GW 增长到 2024 年的 73.4 GW,年均增长率接近 4%,根据《巴黎协定》全球电力可再生能源比例从 2020 年的 24% 增长到 2050 年的 86%,这都促使风力发电在内的新能源具有广阔的发展空间,将来风火同价的市场环境下,要求在不降低风电叶片性能的前提下尽可能降低成本。我国 21 世纪以来开始加大风力发电速度,风电叶片的设计使用寿命为 20 年,随着风电叶片装机量的增加,需要报废的风电叶片也会越来越多,因此需要考虑风电叶片的可回收问题^[30]。基于风电叶片面临的以上问题,开发和用力学性能优异的可回收的热塑性泡沫芯材或天然泡沫芯材是一种趋势,预计接下来风电叶片制造商、风电叶片原材料供应商、风电叶片使用商会联合开发研究验证可回收的 PET 等性能优异的热塑性泡沫材料,逐渐替代热固性 PVC 等泡沫夹芯材料。

参考文献

- [1] 李林致. 刍议风力发电的发展现状及趋势[J]. 中国新通信, 2018, 20(19): 203-204.
- [2] 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. Composite materials for wind power blade and its application[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2017, 10(4): 55-57.
- [3] 刘魁. 风电叶片玻璃钢/复合材料夹层结构的泡沫芯材[J]. 塑料工业, 2011(11): 104-106.
LIU Kui. Foam core material of FRP/composites sandwich structure in wind blade[J]. China Plastics Industry, 2011(11): 104-106.
- [4] 王同光, 李慧, 陈程, 等. 风力机叶片结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [5] 王东生, 杨萍. 夹芯材料在风电叶片上的应用研究[J]. 玻璃钢, 2016(4): 1-6.
- [6] SILVA A D, KYRIAKIDES S. Compressive response and failure of balsa wood[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(25/26): 8 685-8 717.

- [7] OSEI-ANTWI M, CASTRO J D, VASSILOPOULOS A P, et al. Shear mechanical characterization of balsa wood as core material of composite sandwich panels[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 41: 231-238.
- [8] 万里, 刘伟庆, 周叮, 等. Balsa 芯材夹层梁的失效分析[J]. *工程力学*, 2011(2): 134-140.
WAN Li, LIU Weiqing, ZHOU Ting, et al. Failure analysis of sandwich beams with balsa core[J]. *Engineering Mechanics*, 2011(2): 134-140.
- [9] CARPENTIER P J. Method of producing light and resistant cellular bodier: US25276749[P]. 1951-11-27.
- [10] 张军, 许盖美. 硬质聚氯乙炔泡沫塑料配方设计及工艺[J]. *聚氯乙炔*, 1995(2): 27-30.
- [11] 史爱华, 张广成, 马忠雷, 等. 低密度交联硬质聚氯乙炔泡沫塑料的研究[J]. *应用化工*, 2011, 40(2): 287-290.
SHI Aihua, ZHANG Guangcheng, MA Zhonglei, et al. Study on crosslinked rigid polyvinyl chloride foam plastic with low density[J]. *Applied Chemical Industry*, 2011, 40(2): 287-290.
- [12] 王雁国, 汪艳, 张慧. 硬质交联 PVC 泡沫塑料的制备[J]. *工程塑料应用*, 2014, 42(6): 13-16.
WANG Yanguo, WANG Yan, ZHANG Hui. Preparation of rigid cross-linking PVC foam plastics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2014, 42(6): 13-16.
- [13] 方彩平, 郑逸良, 许春雷. 聚氯乙炔泡沫材料研究进展[J]. *塑料助剂*, 2021(2): 20-25.
FANG Caiping, ZHENG Yiliang, XU Chunlei, et al. Research progress of polyvinyl chloride (PVC) foam materials[J]. *Plastics Additives*, 2021(2): 20-25.
- [14] LIM G T, ALTSTADI V, RAMSTEINER F. Understanding the compressive behavior of linear and cross-linked poly(vinylchloride) foams[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2009, 53(3): 30-35.
- [15] BENNING C J, BENNING C J. Plastic foams: the physics and chemistry of product performance and process technology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 413-421.
- [16] 王锋, 陈坤. CG156-850KW 聚酯叶片设计与强度分析[R]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所, 2011.
- [17] 江一杭, 杨忠, 刘鲜红. 风电叶片 PVC 芯材的耐温性研究[J]. *天津科技*, 2021(7): 38-39, 42.
JIANG Yihang, YANG Zhong, LIU Xianhong. Study on temperature resistance of PVC core material for wind turbine blades[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2021(7): 38-39, 42.
- [18] 徐宇, 杨洋, 张淑丽. 风电叶片腹板选用不同芯材的可行性分析[J]. *风能*, 2022(9): 90-94.
- [19] 汪鹏, 王海珍, 刘宝锋, 等. PET 泡沫的性能评估及其在风机叶片上的应用探讨[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2016(7): 60-62, 37.
WANG Peng, WANG Haizhen, LIU Baofeng, et al. The evaluation of pet foam properties and study on its application prospects in wind turbine blades[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2016(7): 60-62, 37.
- [20] 刘艳霞, 仇艳龙, 杨忠, 等. 风电叶片用芯材 PET 的性能研究[J]. *天津科技*, 2020(7): 27-29.
LIU Yanxia, QIU Yanlong, YANG Zhong, et al. Study on properties of PET core material for wind turbine blades[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2020(7): 27-29.
- [21] 张振聪, 张旭, 黄辉秀, 等. 风电叶片夹芯结构的疲劳性能[J]. *塑料工业*, 2021(11): 79-84.
ZHANG Zhencong, ZHANG Xu, HUANG Huixiu, et al. Fatigue behavior of sandwich structure of wind turbine blade[J]. *China Plastics Industry*, 2021(11): 79-84.
- [22] 荆交通, 周鹏展. 大型水平轴式风电叶片结构设计[J]. *可再生能源*, 2009(2): 65-68.
JIN Jiaotong, ZHOU Pengzhan. The structure design of large-scale horizontal axis wind turbine blade[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009(2): 65-68.
- [23] 熊美蓉, 段跃欣, 董安琪, 等. 真空辅助树脂灌注工艺成型泡沫夹芯结构工艺设计与控制[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 28-34.
XIONG Meirong, DUAN Yuexin, Dong Anqi, et al. Process design and control of the VARI forming foam-core structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 28-34.
- [24] 武卫莉, 陈丰雨. 真空辅助树脂灌注法制备风电叶片树脂的渗透及缺陷[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(12): 2779-2785.
WU Weili, CHEN Fengyu. Resin penetration and defects of wind turbine blades prepared by vacuum assisted resin infusion method[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2779-2785.
- [25] 雷蕊英, 季三飞, 谭王景, 等. 真空辅助树脂传递模塑成型工艺研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2020(4): 159-163.
LEI Ruiying, JI Sanfei, TAN Wangjing, et al. Research progress on VARTM process[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020(4): 159-163.
- [26] 叶乔丹, 吴晓青. 真空灌注成型工艺导流网和夹层结构沟槽设计的模拟研究[J]. *纤维复合材料*, 2018(3): 25-32.
YE Qiaodan, WU Xiaoqing. Study of flow medium and groove design of sandwich structure VARTM process molding simulation[J]. *Fiber Composites*, 2018(3): 25-32.
- [27] 聂义, 熊杰, 王建东, 等. 风电叶片腹板芯材加工方式对设计和制造的影响[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(6): 102-105.
NIE Yi, XIONG Jie, WANG Jiandong, et al. The influence of the processing method of wind turbine blades shear webs on the design and manufacture[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(6): 102-105.
- [28] 刘龙龙, 李文斌, 王艳丽, 等. 风力发电叶片芯材间隙对夹心结构性能的影响[J]. *新技术新工艺*, 2021(12): 51-55.
LIU Longlong, LI Wenbin, WANG Yanli, et al. Influence of core material clearance on sandwich structure performance of wind power generation blade[J]. *New Technology & New Process*, 2021(12): 51-55.
- [29] 廖华, 向福州. 中国“十四五”能源需求预测与展望[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021(2): 1-8.
LIAO Hua, XIANG Fuzhou. Forecast and prospect of energy demand in China's "14th Five-year" plan period[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021(2): 1-8.
- [30] 许淳瑶, 葛立超, 冯红翠, 等. 风力发电现状及叶片组成与回收利用综述[J]. *热力发电*, 2022(9): 29-41.
XU Chunyao, GE Lichao, FENG Hongcui, et al. Review on status of wind power generation and composition and recycling of wind turbine blades[J]. *Thermal Power Generation*, 2022(9): 29-41.