

竹纤维复合材料在新能源领域的创新应用

张 毅

福建竹纤材料科技有限公司，福建 福州

收稿日期：2026年1月4日；录用日期：2026年1月27日；发布日期：2026年2月9日

摘 要

竹纤维具有长径比大、比强度高、比表面积大、密度低、价格低廉、可再生、可生物降解等优点，以竹纤维为增强体、可生物降解聚合物为基材，研制环境友好型可降解竹纤维复合材料成为新材料热点。竹纤维复合材料因其轻质高强、能耗低、耐腐蚀、环境友好等特点，具有广阔的应用前景。文章提出竹纤维复合材料为能源领域绿色转型提供新机遇，凭借其轻质高强、耐久抗疲劳、负碳环保等特性，在光伏发电、风力发电等新能源及海工装备制造领域，展现出独特优势。

关键词

复合材料，竹纤维，绿色，新能源

Innovative Applications of Bamboo Fiber Composite Materials in the New Energy Field

Yi Zhang

Fujian Bamboo Fiber Material Technology Co., Ltd., Fuzhou Fujian

Received: January 4, 2026; accepted: January 27, 2026; published: February 9, 2026

Abstract

Bamboo fibers have the advantages of a large aspect ratio, high specific strength, large specific surface area, low density, low cost, renewability, and biodegradability. By using bamboo fibers as the reinforcing material and biodegradable polymers as the base material, the development of environmentally friendly and degradable bamboo fiber composite materials has become a hot topic in the field of new materials. Bamboo fiber composite materials, due to their lightweight, high strength, low energy consumption, corrosion resistance, and environmental friendliness, have broad application prospects. The article proposes that bamboo fiber composite materials provide new opportunities for the green transformation of the energy sector. By virtue of their lightweight, high strength, durability,

anti-fatigue resistance, and negative carbon emission and environmental protection characteristics, they demonstrate unique advantages in the fields of new energy, such as photovoltaic power generation, wind power generation, and offshore equipment manufacturing.

Keywords

Composite Materials, Bamboo Fiber, Green, New Energy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球碳中和目标推进与绿色制造理念普及的背景下,天然纤维复合材料因其可再生性与环境友好特性,成为替代传统化石基材料的重要方向[1]。竹纤维作为创新性的天然植物纤维,凭借生长周期短(3~5年)、碳汇能力强及力学性能优异等天然优势,在新能源装备轻量化、低排放制造中展现出独特潜力[2]。本文将从多场景应用维度展开分析,系统梳理竹纤维复合材料的技术突破方向,并探讨其未来创新发展路径,为新能源产业绿色化升级提供理论依据与实践参考。

2. 以竹代塑: 竹纤维引领复合材料绿色发展

2022年11月7日,中国国家主席习近平在向国际竹藤组织成立二十五周年志庆暨第二届世界竹藤大会致贺信中指出,中国政府同国际竹藤组织携手落实全球发展倡议,共同发起“以竹代塑”倡议,推动各国减少塑料污染,应对气候变化,加快落实联合国2030年可持续发展议程衡量[3]。2023年10月12日,国家发展改革委等部门印发《加快“以竹代塑”发展三年行动计划》提出有效提升“以竹代塑”动能、产能、效能,推动“以竹代塑”高质量发展,为塑料污染治理提供创新解决方案。

2.1. 竹资源分布与生态价值

全球竹类植物共计1642种,分布于122个国家和地区,总覆盖面积达3500万公顷[4]。中国拥有竹类植物837种,2021年竹林总面积为756.27万公顷,且保持年均2.3%的增长速率[5]。竹子的生态优势主要体现在:单位面积碳吸收量达24.31吨/公顷,固碳能力分别为速生杉木的1.46倍、热带山地雨林的1.33倍[6];加工过程碳排放显著低于传统材料,每吨竹材碳排放仅为钢材的1/216、铝材的1/220、塑料的1/19,且全生命周期可实现碳封存[7]。

竹林的碳汇功能具有双重经济价值:一方面,其快速生长特性使其成为高效的二氧化碳吸收器;另一方面,竹林碳汇可通过碳交易市场转化为可量化的经济资产。竹林碳汇的双重价值已通过碳交易市场得到验证,成为绿色经济的重要增长点[8]。

2.2. 竹纤维: 新一代天然植物纤维增强材料

竹纤维(又称竹原纤维)是通过机械分丝、物理及生化脱胶、开松梳理相结合的工艺,直接从竹材中制取的天然植物纤维,完整保留了竹子的微观结构与物理特性。根据GB/T 41553-2022《竹纤维》的定义,竹纤维是指竹材经化学或机械加工制得的包含单个纤维细胞和多个纤维细胞集合体的束状、丝状或絮状单元[9]。竹纤维的基础性能参数如下:密度0.4~0.8 g/cm³,长径比200~500,比表面积1.2~3.5 m²/g,拉

伸强度 350~600 MPa，比强度 380~450 MPa [10]。

竹纤维具有长径比大、比强度高、比表面积大、密度低等特性，且具备价格低廉、可再生、可生物降解等优势。以竹纤维为增强相、树脂为基体制备的复合材料，已成为环境友好型新材料的研究热点。同时，因其质轻高强、绿色环保、低能耗等特点，可以替代玻璃纤维和聚合物纤维，是一种绿色可持续的纤维增强材料。

经检测，竹纤维的主要化学成分为：纤维素 45%~55%、半纤维素 20%~25%、木质素 18%~25%、灰分 1%~3%，其结晶度达 40%~50%，为复合材料提供了良好的力学支撑[11]。经改性处理的竹纤维复合材料在力学性能上表现优异，其弯曲强度、冲击韧性及弹性模量较传统玻璃纤维复合材料提升 15%~30%，且在成本、环保指标及密度方面具有显著优势。

3. 竹基光伏系统：轻量化与负碳化的协同创新

竹纤维复合材料在光伏领域的应用聚焦于结构减重与全生命周期碳管理，形成了对传统金属材料的替代方案。

3.1. 轻量化支撑结构创新

传统钢制光伏支架密度为 7.8 g/cm³，而改性竹纤维支架密度可降至 1.2 g/cm³ 以下，显著降低运输与安装成本，特别适用于屋顶分布式光伏系统[12]。竹材的光合固碳特性使支撑结构具备“负碳”属性，竹纤维复合材料制备的支架在 25 年生命周期内可实现每兆瓦装机容量减少 12 吨二氧化碳排放，为光伏产业碳足迹管控提供材料解决方案。

3.2. 耐候性边框与电气组件

竹纤维光伏边框经氙灯老化 1000 h 后，拉伸强度保留率达 92%，弯曲强度保留率达 88%，色差 $\Delta E \leq 2.0$ ，满足光伏组件 25 年使用寿命要求，其耐候性能优于传统铝合金边框，且有效避免了金属边框锈蚀导致的发电效率衰减。竹纤维接线盒采用纳米改性工艺，竹材含量 50%~70%，体积电阻率 $0.8 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ，在 -40℃ 至 85℃ 温域内电气性能波动 $\leq 5\%$ ，完全符合 IEC62790 国际标准[13]。

3.3. 关键技术突破方向

当前研发重点包括：开发竹纤维/碳纤维混杂增强技术，使支撑结构比强度突破 200 MPa/(g/cm³)；建立竹基边框耐候性分级标准体系，覆盖沿海高盐雾、高原强紫外等特殊环境；突破高导电性竹基接线盒制备技术，实现体积电阻率低于 $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ，推动光伏组件全链条绿色化。

4. 竹基风力叶片：超长尺寸与极端环境适应性突破

竹纤维独特的纤维排列结构与优异的力学性能，为风力叶片制造带来尺寸突破与环境适应性提升的双重革新。

4.1. 低风速区超长叶片开发

竹纤维复合材料的疲劳强度指数达 15，优于玻璃纤维(疲劳强度指数 12~13)，在循环载荷作用下力学性能稳定性显著提升[14]。2009 年，全球首支 1.5 兆瓦级、长度 82 米的竹纤维增强叶片通过 IEC61400-23、JB/T10194-2000 及德国劳埃德船级社认证，验证了其工业化应用可行性[15]。随着低风速资源开发成为行业趋势，竹纤维的高强韧特性为 90 米以上超长叶片研发提供了核心材料支撑。竹纤维复合材料叶片在保持轻量化(单位面积重量较玻璃纤维叶片降低 18%)的同时，抗疲劳性能提升 25%，特别适用于年平

均风速 6 m/s 以下的低风速区域。

4.2. 极端环境适应性提升

- 防冰性能: 经纳米 SiO_2 /氟碳复合改性的竹纤维叶片, 表面接触角达 $155^\circ \pm 3^\circ$, 冰雪附着力 $\leq 0.8 \text{ N/cm}^2$ (较未改性材料降低 80%), 在 -30°C 环境下可实现自主除冰, 无需额外除冰设备[16]。现场测试显示, 采用该技术的风电场年等效满发小时数提升 200~250 h;
- 低温韧性: 竹纤维复合材料在 -50°C 时的冲击强度达 18 kJ/m^2 , 较传统玻璃纤维复合材料(12.8 kJ/m^2)提升 40.6%, 有效解决了低温环境下叶片脆性断裂问题[17];
- 耐盐雾腐蚀: 通过表面氟碳涂层与偶联剂复合改性, 叶片在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 1000 h 后, 力学性能保留率达 85% 以上, 耐腐蚀等级达到 C5-M 级, 使用寿命延长至 25 年以上。

4.3. 研发及制造工艺创新

采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺制备竹纤维叶片, 树脂浸润速率达 $0.8\sim 1.2 \text{ mm/s}$, 纤维体积分数控制在 55%~60%, 叶片主体结构一次成型, 生产周期较传统工艺缩短 30%~40% [18]。针对 120 米级超长叶片, 研发了基于气动弹性设计的颤振抑制技术, 通过优化纤维铺层角度(主铺层角度 $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ/90^\circ$ 交替), 使叶片颤振临界风速提升至 75 m/s 以上。回收技术方面, 采用热解工艺(温度 $400^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$, 氮气氛围)处理废弃竹纤维叶片, 树脂分解率达 95% 以上, 回收竹纤维的力学性能保留率达 70%~80%, 可用于制备次级复合材料(如建筑模板、隔音材料), 形成绿色制造闭环。

5. 海洋新能源装备：绿色替代的材料革命

竹纤维复合材料凭借其轻质高强、耐腐蚀及环境友好等特性, 在水上光伏平台与海洋工程装备领域实现了“以竹代塑、以竹代钢”的突破性应用。

5.1. 海(水)上光伏系统的集成创新

竹纤维复合材料在海(水)上光伏系统中的应用主要包括水下支撑结构与水面浮体:

- 水下支撑结构采用竹纤维增强环氧树脂基复合材料, 密度 $1.2\sim 1.3 \text{ g/cm}^3$, 抗压强度 250~300 MPa, 在海水环境中浸泡 1000 h 后强度保留率达 88%, 生物降解率 $\leq 5\%$ (25 年周期) [19];
- 水面浮体通过竹纤维发泡工艺制备, 密度 0.6 g/cm^3 , 浮力系数 0.85, 较传统 HDPE 浮体减重 40%, 抗冲击强度达 25 kJ/m^2 , 可承受 $\pm 0.5 \text{ m}$ 的波浪冲击[20]。

某海上光伏示范项目(装机容量 10 MW)数据显示, 采用竹纤维复合材料的系统全生命周期碳排放为 $85 \text{ kg CO}_2\text{eq/kW}$, 较传统钢制 + HDPE 方案($243 \text{ kg CO}_2\text{eq/kW}$)降低 65%, 综合成本降低 18%~22%。

5.2. 海洋工程装备的创新应用

目前, 竹纤维海工装备已形成包含材料制备、结构与施工规范的完整技术体系。在海洋牧场与漂浮式风电平台中, 竹纤维复合材料展现出显著的性能优势:

- 竹基养殖网箱的框架结构密度 $1.1\sim 1.2 \text{ g/cm}^3$, 较钢制网箱减重 75%, 综合成本降低 35%, 且无金属腐蚀与微塑料污染风险。山东半岛某海洋牧场项目应用表明, 竹基网箱在 3 年运行期内无结构损坏, 养殖生物存活率提升 5%~8%;
- 漂浮式风电平台的竹纤维复合材料浮体, 浮力系数 0.85 (钢制结构 0.65), 耐海水腐蚀等级 C5-M, 使用寿命 ≥ 25 年, 在 6 级海况下结构稳定性优于铝合金浮体。

5.3. 新型“以竹代塑”海洋牧场装备及海工产品的开发

作为传统海洋牧场中钢材、塑料、混凝土等不可再生材料的替代品，竹纤维复合材料为减少海洋微塑料产生提供了解决方案。同时，为竹纤维复合材料在海洋领域实现代塑、代钢、代砼的应用场景探索与开发提供了示范。下阶段，开发石墨烯/竹纤维复合增强技术，使复合材料拉伸强度突破 300 MPa；优化生物基树脂体系，提升材料全生命周期生物降解率至 90% 以上；扩大竹纤维预处理与复合成型的规模化生产能力，降低材料成本。

6. 结语

竹纤维复合材料凭借其轻质高强、负碳环保及环境相容性等特性，在新能源领域的应用已取得阶段性成果，尤其在光伏支架、风力叶片及海工装备等场景实现了对传统材料的绿色替代。竹纤维复合材料在新能源装备中的创新应用，不仅实现了材料轻量化与碳排放降低的双重目标，更推动了竹产业向高附加值领域延伸。未来，随着“以竹代塑”战略的深入实施与跨学科技术融合，竹纤维复合材料有望成为新能源产业实现全生命周期绿色制造的核心材料，为全球能源转型提供中国方案与生态智慧。

参考文献

- [1] Nagaraja, S., Anand, P.B., K., M.K. and Ammarullah, M.I. (2024) Synergistic Advances in Natural Fibre Composites: A Comprehensive Review of the Eco-Friendly Bio-Composite Development, Its Characterization and Diverse Applications. *RSC Advances*, **14**, 17594-17611. <https://doi.org/10.1039/d4ra00149d>
- [2] 陈明, 李娟, 赵阳. 竹纤维增强同源生物油改性酚醛树脂复合材料的创制[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(8): 112-118.
- [3] 陆文明. 竹藤为全球可持续发展贡献绿色方案: 第二届世界竹藤大会亮点回顾与国际竹藤组织发展成就巡礼[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(6): 1-7.
- [4] Lin, Q. (2025) Technical Report: Remote Sensing-Based Bamboo Resource Inventory in the Republic of Malawi. *World Bamboo and Rattan*, **23**, 137-140.
- [5] 国家林业和草原局. 中国竹林资源调查报告(2021) [R]. 北京: 中国林业出版社, 2022.
- [6] 施拥军, 周国模, 杜华强, 等. 毛竹碳汇造林初期净碳汇量监测与不确定性分析[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(5): 783-790.
- [7] Zhang, M., Zhou, G. and Gu, L. (2025) Carbon Footprint and Climate Mitigation Potential of Bamboo Products in China. *Environmental Impact Assessment Review*, **114**, Article ID: 107958. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107958>
- [8] 刘小丽, 朱霖. 安吉竹林碳汇项目的实践、成效与启示[J]. 竹子学报, 2024, 43(3): 72-78.
- [9] 程海涛, 王戈, 等. GB/T41553-2022 竹纤维[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [10] 陈季荷, 顾少华, 李明鹏, 李文婷, 程海涛. 竹纤维增强聚合物基复合材料性能及应用[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(4): 18-23.
- [11] Li, Z., et al. (2022) Properties and Applications of Bamboo Fiber—A Current-State-Of-The-Art. *Polymers*, **14**, Article 3632.
- [12] 郭艺, 李良, 钱家忠, 徐枫巍. 落实“以竹代塑”倡议构建中国能源中央企业负碳能源、负碳生活、负碳科技“三位一体”绿色低碳电力体系新领先[J]. 世界竹藤通讯, 2025, 23(5): 1-7.
- [13] Ning, L.P., et al. (2020) Fabrication and Characterization of Bio-Based Shielding Material with Dissimilar Surface Resistivity Prepared by Electroless Ni-Fe-P Alloy Plating on Bamboo (*N. affinis*). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **30**, 21064-21078.
- [14] Platts, M.J. (2014) Strength, Fatigue Strength and Stiffness of High-Tech Bamboo/Epoxy Composites. *Agricultural Sciences*, **5**, 1281-1290. <https://doi.org/10.4236/as.2014.513136>
- [15] 张旺, 杜瑛卓, 雷蕾, 等. 竹基风力发电机叶片技术及其在竹材工业化中的应用前景[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(4): 11-17.
- [16] Shi, E., Liu, B.W., Zhao, B., Jiang, C.W. and Zhou, W.L. (2025) Preparation and Anti-Icing Characteristics of Durable Superhydrophobic Composite Coatings of Nano-Silica/Fluorocarbon Resin. *China Surface Engineering*, **38**, 244-254.

-
- [17] Xu, D., He, S., Leng, W., Chen, Y. and Wu, Z. (2023) Replacing Plastic with Bamboo: A Review of the Properties and Green Applications of Bamboo-Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Polymers*, **15**, Article 4276.
<https://doi.org/10.3390/polym15214276>
 - [18] Shi, J., Chen, H., Zhang, W. and Wu, J.Y. (2022) Effect of Fiber Content on the Properties of Bamboo Fiber/Epoxy Resin Composites Prepared by VARTM. *Acta Materiae Compositae Sinica*, **39**, 1249-1258.
 - [19] Zhang, W., Du, Y., Lei, L., *et al.* (2022) Bamboo-Based Wind Turbine Blade Technology and Its Application to Bamboo Timber Industrialization. *World Bamboo and Rattan*, **20**, 11-17.
 - [20] 翁赞, 李德江, 苏丽君, 等. “以竹代塑”产品在海洋领域新应用: 竹基海上光伏平台[J]. 世界竹藤通讯, 2023, 21(6): 51-54.