

“打破传统藩篱”——竹纤维复合材料的建筑征途

吕焰城 王玉涵 赵桢晴 罗艺 聂晓羽

四川文理学院

DOI:10.32629/btr.v8i9.4895

[摘要] 随着不可再生资源急剧消耗,构建绿色、低碳和循环经济体系成为各行业可持续发展关键。竹产业是我国一大特色产业,并且竹纤维作为新型天然绿色纤维,在“碳达峰、碳中和”双碳战略以及“禁塑令”的大力推动下,“以竹代塑”成为备受瞩目的研究热点。在概述竹纤维复合材料性能的基础上,对竹纤维复合材料在绿色建筑中的应用研究现状进行了梳理,并针对目前竹纤维的技术风险进行分析,为推动竹纤维复合材料在绿色建筑中的应用提供参考。

[关键词] 竹纤维; 复合材料; 改性; 绿色建筑; 以竹代塑

中图分类号: F765 文献标识码: A

Breaking the Barriers of Tradition: The Architectural Journey of Bamboo Fiber Composites

Yancheng Lv Yuhuan Wang Zhenqing Zhao Yi Luo Xiaoyu Nie

Sichuan University of Arts and Science

[Abstract] With the rapid depletion of non-renewable resources, the establishment of a green, low-carbon and circular economic system has become the key to the sustainable development of various industries. The bamboo industry is a major characteristic industry in China. As a new type of natural green fiber, bamboo fiber has become a high-profile research hotspot in the strategy of "substituting bamboo for plastic" under the strong promotion of the "carbon peaking and carbon neutrality" dual-carbon strategy and the "plastic ban". Based on summarizing the properties of bamboo fiber composites, this paper sorts out the current research status of their applications in green buildings, analyzes the technical risks of bamboo fiber at present, and provides a reference for promoting the application of bamboo fiber composites in green buildings.

[Key words] Bamboo Fiber; Composites; Modification; Green Building; Bamboo instead of Plastic

引言

全球工业化快速推进,不可再生资源的过度消耗,为人们提供健康、适用和高效的使用空间,与自然和谐共生的建筑迫在眉睫。但传统建筑材料(木材、塑料、钢材、水泥等)存在的环境污染、资源短缺问题日益严重,为推动建筑业的可持续发展,满足环境保护的需要,亟需发展健康、安全、环保的绿色建筑材料。竹纤维(Bamboo fiber,后文简称为BF)是由我国自主开发的一种新的绿色环保纤维。它强度高,韧性好,硬度大,力学性能优越,且可再生、可降解、价格低。被誉为“绿色纤维”和“天然玻璃纤维”。而竹纤维作为直接从原竹中提取出来的植物纤维,以BF为增强体与其他材料合成的复合材料具有基体和增强体的双重优点^[1],应用于绿色建筑既可提高竹材利用率,有助于落实“以竹代塑”倡议,践行“双碳”理念。

1 竹纤维内部结构及提取方法

1.1 竹纤维的内部结构

竹纤维为束状纤维,其在纵向方向近似圆柱形,尺寸比较均

匀,带有横向节纹,竹纤维的表面有凹槽,末端呈圆锥形,纤维横截面有中腔,壁厚且均匀。这些纤维束由若干个单纤维构成,且其横截面近似圆形,上面布满大大小小不规则的空隙,内有中腔,边沿分布着不均匀的锯齿状结构。这些锯齿状结构延续为表面无数的小沟壑和空隙,其横截面的高度“中空”,这样的结构使得竹纤维毛细管效应显著,具有瞬间吸收和蒸发水分的能力,故竹纤维被专家们誉为“会呼吸的纤维”。竹纤维的这些特征使其拥有抗菌、防腐、抗虫蛀的效果,因此使得其为部分建筑的理想选材。

纤维素是竹材力学性能的主要承担者,它赋予了竹纤维极高的顺纹抗拉强度^[2]。而起着胶黏剂作用的半纤维素和木质素将纤维细胞粘在一起,赋予了竹纤维较高的弯曲性能和抗压强度。竹纤维对混凝土综合力学性能的提升效果最为显著,包括抗弯性能、抗折性能、抗劈裂性能等。

在竹纤维制备的过程中,如果处理不当,将半纤维素和木质素去除的过多,竹纤维束就会变短变脆,使强度降低。竹纤维的

吸湿性也主要来源于其纤维素链分子中的游离羟基,还有一部分归功于半纤维素和胶质。而竹纤维由吸湿放湿引起的变形,也因其各向异性的特点,主要产生在纤维细胞的横向面。

1.2 竹纤维的提取方法

竹纤维提取方法有机械开纤法、蒸汽爆破法、碱处理法和酶处理法等^[3]。微波辅助提取技术是利用微波能提高提取效率的一种新技术,在降低加工所需能耗方面表现优异并具备均匀和选择性处理的能力,研究指出,相较于蒸汽爆破法,碱处理法制备的竹纤维抗拉强度和模量较高。所以选择采用微波辅助碱处理方法提取竹纤维,研究多种处理工艺参数对竹纤维拉伸性能及微观晶型变化的影响。

(1) 竹材预处理:将竹子去竹节后截成竹筒,切成100mm×20mm×4mm的竹条,用去离子水洗净、干燥,备用。

(2) 竹纤维提取:采用微波辅助碱预处理优化纤维分离,具体方法为:将一定量的竹条加入一定浓度的氢氧化钠溶液中,并将混合物置于微波反应器中,逐渐升高温度至60℃后,调节微波功率为100W,继续保持温度为60℃,并辅以微波处理加热1h后,去除溶液,添加新制备氢氧化钠溶液,继续重复3次。趁热取出竹子条置于热压机上,在2MPa压力下保压10min,然后用醋酸中和,去离子水多次清洗,真空干燥后进行手工分离,得到单根竹纤维。也可通过滚压、碾压等机械手段破坏竹材的维管束结构,分离纤维束。例如,江西省林业科学院提出的超声联合提取法中,采用滚压开松工艺,结合水洗去除碎屑与杂质。利用超声波的空化效应加速软化剂渗透,缩短处理时间。实验表明,超声处理可将软化时间减少30%以上,同时增加纤维表面粗糙度,有利于后续界面结合。

(3) 提取结果及分析:当竹材浸泡在碱液中,碱溶液中的Na⁺和OH⁻对竹材具有湿润、吸附、扩散和溶胀等作用,竹材中的半纤维素等化学成分溶解在碱液中,竹材软化脱胶,分离成单根竹纤维,随着处理温度从50℃增至70℃,竹纤维拉伸强度逐渐下降,断裂伸长率逐渐增加,当处理温度进一步增加时,竹纤维拉伸强度和断裂伸长率均减小,主要是因为随着温度的升高,竹中的半纤维素等化学组成在氢氧化钠溶液中的溶解度增大,使得竹纤维强度降低。

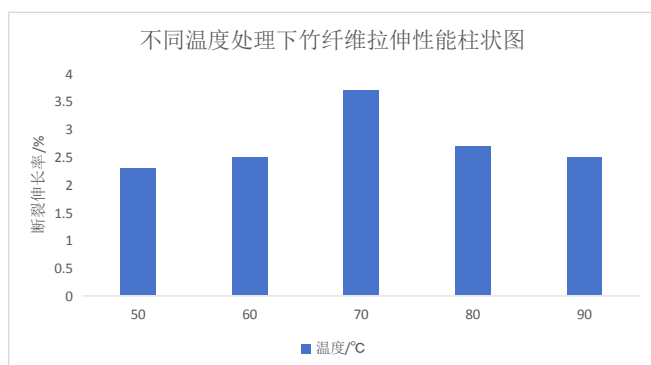


图1 不同温度处理下竹纤维拉伸性能

2 竹纤维复合材料的选择和优势

2.1 复合材料的选择

通过对五种基体材料有关界面结合技术,温度变形性等方面综合优势,选择聚乙烯(HDPE)基体:通过2.5MNaOH+0.4MNa₂SO₃溶液(pH14.4)在80℃下处理24小时,竹纤维表面粗糙度从6.98 μm提升至11.01 μm,结晶度提高,接触角增大(疏水性增强),HDPE基体的机械咬合和界面浸润性显著改善^[5]。未处理竹纤维与HDPE的界面存在明显间隙,而处理后竹纤维表面被HDPE均匀包裹,断口分析显示纤维拔出减少,应力传递效率提升。

无需复杂相容剂:HDPE与竹纤维的界面结合主要依赖物理作用(如粗糙度匹配),相比PP、尼龙等基体,无需添加高价相容剂(如马来酸酐接枝物),降低成本界面结合:强碱处理+钛酸酯偶联剂,实现高强度界面结合(拉伸强度38.2MPa,优于PP和PBSA)。

温度稳定性:热分解温度最高(286℃),加工安全窗口大,使用温度≤100℃满足多数需求。

由相关文献可知:聚乙烯(HDPE)基体在拉伸强度,弯曲模量,断裂伸长率,耐温性,与竹纤维的契合度最优,在界面结合性和温度变形性也高度匹配,综合性能均衡,是竹纤维复合材料的高性价比选择^[4]。

2.2 竹纤维复合材料的优势

2.2.1 力学性能与轻量化优势

竹纤维的加入可显著增强HDPE的拉伸强度与硬度。例如,竹纤维/可降解塑料复合材料的拉伸强度提升至267.04MPa,而HDPE本身强度较高(约20-30MPa),竹纤维的增强效应可能进一步优化其力学性能。同时,竹纤维复合材料密度较低(约8-10kN/m³),远低于钢材(78kN/m³),可减轻建筑结构自重,提升抗震性能。通过化学处理(如硫酸或氢氧化钠处理)破坏竹纤维表面结构并增加羟基含量,可改善其与HDPE的界面结合力,从而提升复合材料的断裂韧性和抗疲劳性能。

2.2.2 环保和可持续性优势

竹纤维/可降解塑料复合材料已实现部分生物降解,而HDPE与竹纤维结合后虽降解性受限,但可通过竹纤维的天然降解性减少废弃物总量。研究表明,竹纤维复合材料在掩埋条件下可逐步分解,降低环境负担。含有28.57%BF的复合材料薄膜在接种微生物前和35天后的SEM(扫描电镜)图降解前薄膜表面完整分散,有淀粉,树脂和竹纤维。而降解后,薄膜表面破碎不完整,表面有颗粒状突出,可能是菌体或其代谢无残留SEM图直观地表明接种微生物35天后,复合薄膜降解明显。

2.2.3 多功能性与应用拓展优势

竹纤维具有天然抗菌、防霉特性,与HDPE复合后可减少建筑材料的微生物侵蚀风险。例如,竹纤维复合材料的抗菌率可达99%,适用于潮湿环境下的墙体或管道材料。

竹纤维自身阻燃性优于木材,其复合材料经改性后阻燃性进一步提升。实验表明,竹纤维/塑料复合材料的氧指数可达28%以上,接近阻燃塑料标准,适用于防火要求较高的建筑场景。

2.2.4 经济性与产业链协同优势

竹材原料成本低(我国蓄竹量达6亿吨,年可利用量1.5亿吨),且竹纤维复合材料的加工设备损耗较小。例如,竹纤维增强聚乙烯复合材料的工业化生产成本已接近传统塑料,HDPE基复合材料有望通过规模化生产进一步降低成本。全国政协委员戴和根提出,应建立竹基复合材料产业园区,整合种植、加工到应用的闭环产业链。政府通过税收优惠和标准制定推动其应用,例如在建筑管道、市政设施中替代钢材和混凝土。

3 竹纤维技术风险及研究导向

3.1 竹纤维复合材料所遇挑战

(1) 纤维提取与处理难题: 竹纤维提取过程中,杂质去除与纤维分离难度较大,影响纤维质量与性能一致性。目前化学处理方法易造成环境污染,而机械处理效率较低,需研发高效、环保的提取与处理技术,满足工业化生产需求。

(2) 界面结合技术瓶颈: 竹纤维与基体材料的界面结合强度对复合材料性能至关重要,由于竹纤维极性较强,而聚合物基体为非极性,因此二者界面难以充分融合。且当前竹纤维与HDPE的界面结合仍存在不足,需通过纳米材料增强(如二氧化硅涂层)或共混改性剂(如马来酸酐接枝HDPE)提升相容性。研发新型偶联剂与表面改性技术,增强界面结合力,是提升产品质量的关键技术挑战。

(3) 标准化与规模化生产: 目前缺乏竹纤维/HDPE复合材料的国家标准,需加快制定力学性能、耐老化性等测试规范,并推动智能化生产设备(如AI质检系统)的应用,确保质量稳定性。

3.2 未来研究导向

(1) 副产物高值化利用不足: 脱胶过程中产生的木质素和半纤维素占竹材的40%-50%,目前仅5%用于制备低附加值燃料,其余被焚烧或填埋。如何将其转化为生物基材料(如木质素基碳纤维、半纤维素基凝胶)仍是空白。

(2) 高温环境下的纤维稳定性: 竹纤维在150℃以上会发生热降解,限制了其在汽车高温部件(如发动机罩)的应用。尽管表面改性可提升耐热性,但改性剂成本高且影响纤维可降解性。

(3) 标准化体系缺失: 现有国家标准仅规定了纺织用竹纤维的白度、强度等指标(GB/T24346-2021),而建筑、包装等领域的

专用标准尚未建立,导致不同工艺生产的纤维性能差异大。

4 结论与展望

竹纤维复合材料凭借可再生、高强度、环保等特性,在多领域应用前景广阔,尤其在建筑行业契合绿色发展需求,市场潜力巨大。然而,其发展面临材料技术、政策落实、企业运营等挑战,如纤维提取、界面结合难题,政策补贴滞后,企业资金与人才短缺等。

未来,应加大研发投入,突破技术瓶颈,提升产品性能;政府需优化政策实施,加强支持;企业要强化管理,降本增效,吸引人才。随着技术创新与市场拓展,竹纤维复合材料有望在建筑领域广泛应用,推动竹产业与绿色建筑发展,实现经济与环境效益双赢。

[基金项目]

四川文理学院省级大学生创新创业训练计划项目,项目号: S202510644096。

[项目名称]

“双碳”背景下竹纤维复合材料的建筑应用与性能研究。

[参考文献]

[1]陶永亮,曾成均.竹纤维增强聚丙烯复合材料研究与应用进展[J].世界竹藤通讯,2024,22(05):111-116.

[2]杨庆永,阮芳涛,付应平等.竹纤维/废弃聚乙烯复合材料力学性能研究[J].河南工程学院学(自然科学版),2022,34(2):1-5.

[3]国际竹藤组织出席联合国森林论坛第19届会议竹藤在实现联合国森林战略规划和全球森林目标中具有巨大潜力[J].世界竹藤通讯,2024,22(03):2.

[4]洪克非.竹子变“钢筋”的科技密码[N].中国青年报,2024-12-23(008).

[5]卢静,李钰朦.攀高逐新立潮头踏歌奋进向未来[N].益阳日报,2024-12-29(010).

作者简介:

吕焰城(2005--),女,汉族,四川德阳人,本科,单位:四川文理学院,研究方向:天然纤维建材。