

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.028

麻纤维处理技术及其增强复合材料应用研究进展

姜思维¹, 郭建兵², 明星星³, 秦舒浩², 熊一鸣², 艾吉祥², 龙雪彬²

(1. 重庆化工职业学院化学工程学院, 重庆 401228; 2. 贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550014;

3. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400021)

摘要: 从麻纤维的处理技术、麻纤维增强复合材料进展、麻纤维增强复合材料应用领域与产业化进展等方面系统阐述了麻纤维增强复合材料的技术及应用研究进展, 介绍了麻纤维刻蚀技术、偶联搭桥技术、二次修饰技术、自修饰技术以及对复合材料力学性能、热稳定性、键能和疲劳性能的影响, 重点阐述了麻纤维/聚烯烃复合材料、麻纤维/聚乳酸复合材料、麻纤维/环氧树脂复合材料的研究进展以及这些复合材料在汽车工业、建筑工艺、包装等应用领域的应用情况。此外, 对麻纤维增强聚合物复合材料的产业化进展、面临的挑战以及应对策略进行了综合分析, 并对麻纤维复合材料的发展趋势进行了展望。

关键词: 麻纤维增强复合材料; 麻纤维处理技术; 树脂改性; 应用领域; 产业化

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0221-08

Research progress on hemp fiber treatment technology and its application in reinforced composites

JIANG Siwei¹, GUO Jianbing², MING Xingxing³, QIN Shuhao², XIONG Yiming², AI Jixiang², LONG Xuebin²

(1. Chemical Engineering College of Chongqing Vocational College of Chemical Engineering, Chongqing 401228, China; 2. Guizhou Institute of Materials Industry Technology, Guiyang 550014, China; 3. Chongqing Changan Automobile Co., Ltd., Chongqing 400021, China)

Abstract : The technology and application research progress of hemp fiber reinforced composites were systematically expounded from the aspects of hemp fiber treatment technology, the progress of hemp fiber reinforced composites, the application field and industrialization progress of hemp fiber reinforced composites. The effects of hemp fiber etching technology, coupling bridging technology, secondary modification technology and self-modification technology on the mechanical properties, thermal stability, bond energy and fatigue properties of composites were introduced. The research progress of hemp fiber/polyolefin composites, hemp fiber/polylactate composites, hemp fiber/epoxy resin composites and the application of these composites in automobile industry, construction technology, packaging and other fields were mainly described. In addition, the industrialization progress, challenges and coping strategies of hemp fiber reinforced polymer composites were comprehensively analyzed, and the development trend of hemp fiber composites was prospected.

Keywords : hemp fiber reinforced composite ; hemp fiber processing technology ; resin modification ; application field ; industrialization

随着全球可持续发展战略不断深化和石化资源日益紧缺, 可再生材料资源具有实际工业应用价值且对环境影响小, 作为各类工业过程的潜在原料和合成材料的替代品, 推动行业实现更可持续发展。麻纤维凭借其可再生性、生物可降解性以及良好的力学性能备受瞩目。当前用于工业生产的麻纤维主要包括苕麻、亚麻、大麻等韧皮纤维以及剑麻叶纤维, 这些纤维的化学成分基本一致, 主要由纤维素、半纤维

素、木质素、果胶等成分组成, 其中纤维素的占比最高, 约为75%, 具有多层结构^[1], 可编织成不同形式的织物, 能够与多种树脂材料相结合得到树脂基-麻纤维复合材料, 在汽车制造、航空航天、建筑建材、包装、体育用品和线缆等领域展现出巨大的应用潜力^[2-4]。

近年来, 麻纤维处理技术、复合技术和工艺均获得了较大幅度的提升与发展, 笔者总结了麻纤维复合材料在国内外

基金项目: 贵州省科技成果应用及产业化项目(黔科合成果[2025]一般006), 贵州省科技创新人才团队项目(黔科合平台人才-CXTD[2023]012)

通信作者: 龙雪彬, 正高级工程师, 从事高分子复合材料的开发、表征及产业化应用

收稿日期: 2025-06-21

引用格式: 姜思维, 郭建兵, 明星星, 等. 麻纤维处理技术及其增强复合材料应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 221-228.

JIANG Siwei, GUO Jianbing, MING Xingxing, et al. Research progress on hemp fiber treatment technology and its application in reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 221-228.

的技术创新、发展和产业化等前沿进展,以期对未来麻纤维复合材料的研究工作和规模化应用起到启发与指导作用。

1 麻纤维处理技术

麻纤维复合材料的性能受到麻纤维品质、麻纤维处理技术以及复合材料制备技术的影响,麻纤维自麻类植物提取后,需要进行表面处理以提升麻纤维自身的性能来改进其在复合材料中的应用。研究发现,通过改善纤维素微原纤维的排列有序度可以提升纤维的力学和电学性能^[5];半纤维素的去除了纤维细度、解离度和吸湿性能有着显著的影响,能使纤维细度提高12倍,对改善其吸碘性和电阻特性也有积极的作用^[6];降低半纤维素含量会导致拉伸强度和初始模量降低,提高断裂伸长率^[7];降低木质素的含量可以增强纤维的塑性变形能力^[8]。麻纤维的表面处理技术主要是针对麻纤维本身表面特性,提升其与基体材料的结合效果和分散状态,主要采用以下策略和技术。

1.1 去除或刻蚀技术

该技术的核心在于进一步移除表层残留物以及植物细胞内纤维的木质素、半纤维素等亲水性物质,同时形成一定量的粗糙表面,以增强机械嵌合力,提升与基体材料的相容性,进而改善复合材料的性能。常见的处理方法有水热处理法、离子体处理法、碱^[9]和硅烷处理法、碳酸氢钠处理法等,不同的方法处理效果不同。水热处理法能够提升纤维素含量、降低酮和有机质纤维,水热处理后,动态蒸汽吸附时间可减少1~5 h,分解峰值温度可提高至375℃^[10]。离子体处理法能够刻蚀麻纤维表面的半纤维素和木质素,使纤维表面粗糙度增加,并且在纤维表面引入大量—COOH基团,与未处理的原始纤维相比,等离子体处理后的麻纤维润湿性提高了2~9倍^[11]。碱和硅烷处理法能够消除跨越纤维细胞壁的一定量的木质素、蜡和油,以及将一定量的 α 纤维素转化为 β 纤维素,纤维表面粗糙化,从而提高纤维-基体的界面黏合力。在最优处理条件下,纤维-聚氨酯复合材料的拉伸强度提高了39%,拉伸弹性模量提高了23%,热导率提高13.5%^[12]。碳酸氢钠处理法能够逐步去除植物纤维外表面的非晶态半纤维素、果胶和蜡以及其他杂质^[13]。 γ -戊内酯(GVL)处理使黄麻纤维表面粗糙化且形成大量的沟壑,长径比增大,GVL处理后的黄麻复合材料的拉伸强度从38.3 MPa上升到43.4 MPa,弯曲强度从32 MPa上升到44.5 MPa,拉伸弹性模量从408 MPa增加到1 365 MPa^[14]。

1.2 偶联搭桥技术

偶联搭桥技术的原理是构建麻纤维与基体间形成化学键力或偶联作用,提高复合材料的性能。常用的偶联剂有马来酸酐接枝物(MAPP)、硅烷偶联剂、MAPP和硅烷互配等。添加MAPP可以显著改善聚丙烯(PP)与麻纤维之间的界面黏结性,使基体更容易浸润纤维,提高其弯曲和拉伸性能,效果比碱处理效果好,当添加质量分数为5%的MAPP时,纤维质量分数为30%的复合材料的弯曲强度及模量、拉伸强度及模量分别提高了91%,132%,122%和297%^[15]。硅烷处理包

覆麻纤维可以促进纤维与环氧树脂(EP)基体^[16]、PP基体^[17]的黏合,提高复合材料的强度和刚性,并提高纤维的分散性和热稳定性。

研究者们也开发了一些新的偶联体系。Lawan等^[18]合成了一种新型的生物基处理剂——腰果酚基单体,发现腰果酚基单体处理汉麻纤维(C-ffa/AHF)与基体双酚A型苯并噁嗪产生化学交联,为复合体系提供了优越的纤维基质黏附作用,对基体的基本性能、比磨损率和磨损表面形貌产生了积极影响,显著提高了复合材料的力学性能和热稳定性,经处理升级麻纤维增强刹车片复合材料(BPC)性能与碳纤维复合材料增强的效果接近,可部分替代碳纤维的使用。腰果酚基处理剂具有廉价、丰富、可再生特点,而且反应条件温和、无溶剂,为实现可持续和生态友好的BPC提供了研究基础。何雍^[14]发现羧基与环氧大豆油(ESO)熔融共混反应在黄麻表面形成ESO层,提高纤维与PP的相容性,改性黄麻纤维/PP复合材料的韧性明显提高,冲击强度增加12.4 kJ/m²,增加了5倍,断裂伸长率从14%增加到225%,提高了15倍,表现出优良的增韧效果。Song等^[19]引入了一种环保且低成本的表面处理剂烷基烯酮二聚体(AKD),AKD处理麻纤维增强了纤维与砂浆的界面结合,有效提高了水泥复合材料的力学性能和韧性能力,改性纤维增强砂浆的抗压强度提高了28%,弯曲强度提高了24%。George等^[20]发现磺酸衍生物含有大体积苯环的酸残基可以接枝到纤维表面,表面羟基的覆盖和更紧密键合的刚性结构,有效地降低了大麻纤维的表面极性和提高了热性能。Oza等^[21]发现乙酸酐改性麻纤维得到更高的活化能(159~163 kJ/mol),比碱和硅烷改性复合材料的活化能高出10%~13%,具有更高的键能和热稳定性。木质素磺酸钠(SL)和碱木质素(AL)处理增加了黄麻纤维(JF)表面粗糙度,为JF与PP基体之间实现更好的物理啮合提供有利条件,同时改善了JF的表面化学特性,可作为“桥梁”使JF和PP之间产生化学相互作用,显著增强JF/PP复合材料的综合性能^[22]。

1.3 二次修饰技术

二次修饰技术的核心是提高纤维束的分散性,在纤维提取后,进行二次表面修饰处理,创造更多的结合位点。Panaitesca等^[23]研究表明: γ -氨基丙基三乙氧基硅烷(APS)、 γ -环氧丙基三甲氧基硅烷(GPS)和 γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(MPS)和高锰酸钾(KP)对麻纤维束的分裂和基本纤维的分离都有积极的作用,其中MPS和KP处理对HF束的分裂和基本纤维的分离效率最高,使复合材料具有更好的微纳米力学性能。与PP材料相比,PP/HF-MPS复合材料的拉伸弹性模量增加了67%,PP/HF-KP复合材料的拉伸弹性模量增加了69%,而PP/未处理纤维的拉伸弹性模量仅增加了30%。NaOH-聚氧乙烯(PEO)双重改性策略可使纤维保持良好的取向,具有良好的除颤和分散的作用,从纤维束中暴露更多的单一纤维,形成了更多的接触点,并促使纤维表面释放出更多可检测的羟基^[24]。

1.4 自修饰技术

自修饰技术的核心是从植物纤维中提取纤维素、木质纤维素酶等,再利用提取物处理植物纤维修补纤维的损伤和缺陷,在其表面形成尖锐凸点,或将提取物添加到基体中,增强基体的纤维的结合力。Dai等^[25]采用氧化-超声法从天然纤维中成功制备出平均尺寸为100~112 nm的纳米纤维素,再用纳米纤维素改性大麻纤维,改性后的大麻纤维拉伸强度显著提高,其拉伸弹性模量、拉伸应力和拉伸应变分别提高了36.13%,72.80%和67.89%,纤维的结晶度指数从55.17%增加到76.39%,显示出纳米纤维素与大麻纤维微结构层的良好渗透和相容性。Mahendran等^[26]从橡胶籽壳中提取纤维素经硅烷处理加入到丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)中,再经熔融3D打印制成ABS蜂窝板,ABS蜂窝板与松麻纤维复合制备三层结构板材。研究发现,ABS和硅烷处理的纤维素之间形成的强共价键,提高了纤维与树脂间的结合力,增强了热稳定性,分解温度高达541℃,与普通基质相比,力学性能有了显著改善,冲击能量提高了204%,外壁强度提高了111%。并提高了疲劳寿命。

2 麻纤维增强复合材料进展

2.1 麻纤维/聚烯烃复合材料

麻纤维/聚烯烃复合材料是一种由天然麻纤维与聚烯烃树脂组成的复合材料,具有轻质、高强度、可再生、环保等优点,广泛应用于建筑、汽车、航空、包装等领域。麻纤维具有多层级、多孔性结构,与聚烯烃树脂结合后,能够形成独特的多相界面结构。研究表明,麻纤维的长径比、纤维含量、取向张量分量值以及纤维空腔体积比是影响复合材料弹性模量的关键参数^[27]。此外,麻纤维的表面极性与聚烯烃树脂的非极性特性存在界面不相容性,导致界面结合力不足,影响复合材料的力学性能^[28]。因此,优化麻纤维的增强形式和成型工艺,提高其在基体中的分散性和界面结合力,是提升复合材料性能的关键。麻纤维/聚烯烃复合材料具有较高的比强度和比模量,尤其在亚麻、黄麻、苕麻等纤维增强体系中表现突出。研究表明^[29],经表面改性处理后,麻纤维的表面疏水性增强,与聚烯烃基体的界面相容性显著提高,从而提升了复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击韧性。麻纤维的加入则有助于提高复合材料的结晶温度和热变形温度。麻纤维/聚烯烃复合材料具有良好的阻燃性能,尤其在添加阻燃剂后,其阻燃等级可达到V-0级。此外,麻纤维本身具有天然的生物降解性,使得复合材料在使用后可循环再生,符合绿色发展的要求。然而,麻纤维的吸水性较强,容易导致复合材料在潮湿环境下的性能下降,因此需要通过表面改性或添加防水剂来改善其耐水性。成型工艺主要包括热压成型、挤出成型、真空辅助树脂传递模塑(VARTM)等。此外,刘雪强等^[30]通过固相共混热致聚合物基麻纤维复合材料技术,解决传统熔融共混导致的纤维断裂和挥发性有机化合物(VOC)释放问题,实现了低成本、高性能、低VOC的麻纤维复合材料的产业化生产,纤维保留长度提升50%以上,界面结合强

度提高30%。实现连续化生产,能耗降低20%。柳顺龙等^[31]通过撒粉层压的层压发泡复合工艺,在麻纤维毡中均匀分布发泡剂,实现轻质高强夹芯结构,密度 $<0.8\text{ g/cm}^3$ 。

麻纤维/聚烯烃复合材料在汽车工业中的应用前景广阔,尤其在汽车内饰件、车门内护板、行李舱饰件等轻量化部件中具有显著优势。研究表明,麻纤维增强聚丙烯复合材料的拉伸强度可达47.9 MPa,拉伸弹性模量为5.8 GPa,断裂伸长率为1.4%^[32]。此外,麻纤维复合材料的环保性能使其成为替代传统玻璃纤维增强复合材料的理想选择。在航空与航天领域的应用主要集中在轻量化结构件和内饰件中,麻纤维增强复合材料的比强度和比模量较高,适合用于飞机机身、机翼等结构件。此外,麻纤维复合材料的阻燃性能使其在航空内饰件中具有良好的应用前景。在包装与日用品领域的应用主要包括食品包装、日用品包装等。麻纤维复合材料具有良好的阻隔性能和环保性能,适合用于食品包装和日用品包装。

2.2 麻纤维/聚乳酸(PLA)复合材料

麻纤维/PLA复合材料是一种由天然麻纤维与PLA组成的复合材料,具有轻质、高强度、可降解、环保等优点,PLA基麻纤维复合材料的最突出的优点是生物全降解性以及改性PLA基体的脆性,展江湖等^[33]通过梳理、铺网等非织造技术制备麻纤维/PLA纤维混合预成型件,再经模压工艺实现致密化的工艺路线。该工艺保留麻纤维天然孔隙结构,提高了拉伸强度,吸声性能优异。董倩倩等^[34]在麻纤维/PLA 3D打印线材制备技术方面,采用熔融挤出拉丝成型技术,优化纤维长度与含量,控制纤维长度 $<200\text{ }\mu\text{m}$,质量分数为20%,复合材料的拉伸强度提升至65.46 MPa,较纯PLA提高了11.77%。并通过表面接枝改性(如马来酸酐),解决喷嘴堵塞问题,实现复杂结构件的直接打印。通过化学处理和物理处理法可以有效改善麻纤维与PLA基体的界面结合力,从而提高复合材料的力学性能^[35]。Bendourou等^[36]以蓝莓果渣为原料进行固态发酵制备木质纤维素酶,添加到麻纤维增强PLA材料,发现酶处理改变了纤维的微观结构和结晶度,减小了纤维尺寸,显著改善麻纤维与PLA基体之间的黏附性,复合材料的拉伸弹性模量达到 $(324.5\pm 3.1)\text{ MPa}$,冲击强度达 $(27.6\pm 2.9)\text{ kJ/m}^2$ 。所合成的生物复合材料为传统塑料提供了一种经济、环保的替代品。

麻纤维/PLA复合材料的制备方法主要包括热压成型、挤出成型等。广泛应用于建筑、汽车、包装、医疗等领域。但是存在热稳定性差、注射成型难的问题,另外,PLA原料价格是PP的2~3倍,并且在湿热环境下易水解,麻纤维的吸湿性会加速基体降解,限制了其在户外长期使用的可能性^[37]。

2.3 麻纤维/EP复合材料

麻纤维/EP复合材料是一种由天然麻纤维与EP组成的复合材料,具有轻质、高强度、环保等优点,制备方法主要包括热压成型、VARTM等,应用于汽车、航空、建筑等领域。麻纤维的加入可以显著提高EP复合材料的拉伸强度、弯曲强

度和冲击韧性。未热压处理的黄麻纤维增强EP复合材料的拉伸强度比纯EP提高了25.3%,拉伸弹性模量提高了52.9%;而经热压处理的黄麻纤维增强EP复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了51.2%和111.4%。此外,通过表面改性处理,如硅烷偶联剂、异氰酸酯处理,可以进一步改善麻纤维与EP的界面结合,从而显著提高复合材料的力学性能^[38]。麻纤维/EP复合材料的强度高,在声学方面也具备优势。王一冰等^[39]探讨了麻纤维增强改性EP复合材料的声学性能,发现黄麻、苧麻增强改性后的EP基复合材料声学性能各占优势,比一般枫木的力学性能更好。王倩^[40]通过对比发现碱处理可提高苧麻/EP复合材料的固有频率,提高声学振动效率,声阻抗在2.55 Pa·s/m到2.79 Pa·s/m,验证了苧麻/EP乐器复合材料具备良好的力学性能和声学性能,可作为一种绿色环保的乐器材料使用。天然纤维对水分的敏感性可能有利于改善生物复合材料的界面特性。Réquile等^[41]通过微观尺度上的表征研究了单根大麻纤维/EP界面的吸湿机械行为,发现天然纤维对水分的敏感性可能有利于改善生物复合材料的界面特性。在不同湿度下储存期间产生的残余吸湿应力被证明是在50%相对湿度(RH)下获得最佳界面性能的主要因素。介电势垒放电(DBD)等离子体处理可以提高大麻纤维/EP复合材料纤维表面粗糙度和界面结合,增强了纤维与EP基体之间的界面黏附力,从而改善了复合材料的力学性能、热性能和润湿性^[42]。EP基复合材料具有最高的强度和模量,耐湿热性和化学稳定性优异。通过添加石墨烯或者纳米黏土(如蒙脱土)等功填料,可以给予复合材料电导、吸波或阻隔功能^[43],扩大其在电磁屏蔽、智能传感等新领域的应用,但是这些材料价格昂贵、工艺较复杂,并且存在脆性和冲击性低的问题。

3 麻纤维增强复合材料应用领域与产业化进展

3.1 麻纤维增强复合材料的应用领域

工业麻的生产国主要分布在亚洲、北美洲、南美洲和欧洲,据2022年欧洲工业大麻协会发布的数据,中国、加拿大、美国和欧洲在全球麻产量中分别占比29.1%、35.0%、6.6%和17.9%,并且这些地区对麻产品的市场需求呈现系统性增长趋势。全球麻市场涉及超过2 500种应用,包括纺织、医疗、个人卫生、食品、农业、纸浆和纸张、汽车工业、土木工程、家具和其他行业在内的9个领域^[44]。2023年世界市场中工业大麻的占比统计数据显示,麻应用的最大份额用于纺织业,占比22.8%,其次是食品和个人卫生领域,占比分别为17.7%和19.7%,纸占比4.5%,汽车工业占比5.6%,建筑材料占7.0%,家具占3.8%,其他占比5.6%^[45]。在工业应用中,主要应用于汽车工业、建筑建材工业和食品与包装工业^[46]。

麻纤维增强复合材料的发展始于20世纪初期至二三十年代,美国进行的研究探索了天然纤维作为聚合物复合材料增强材料的应用,由此产生了可完全回收的复合材料,广泛应用于汽车工业的多个组件。到了二三十年代末期,在德国得克萨斯州的Zschopau Dampfkraftwagen (DKW)汽车公司

开始用于生产乘客汽车DKW F8,1955年德国VEB Automobilwerk Zwickau工厂基于DKW F8汽车的技术改进生产了AWZ P70汽车,以及之后生产的TRABANT P50^[47]。同时,在20世纪30年代末至40年代初的北美,在亨利·福特工厂,诞生了第一辆由大麻和大豆壳制成的汽车^[48]。

在汽车工业中,麻纤维复合材料具有轻量化、隔音减震、环保性的技术优势^[49],汽车行业已成为麻纤维复合材料最大的应用市场,全球年用量超过10万t。在节能减排和轻量化的大趋势下,麻纤维复合材料凭借其低密度和碳减排优势,且麻具有抗菌性,可以避免诸如腐烂、发霉、抑菌、异味等现象的发生,正逐步替代传统内饰材料,可以提供出色的隔音效果,并且比传统材料具有更高的强度和耐久性^[50]。在汽车行业中,沃尔沃、梅赛德斯-奔驰和宝马是最早认识到麻纤维复合材料的优势并率先应用的车企。沃尔沃XC60的门内饰板采用麻纤维/PP复合材料,实现零件减重30%,碳排放减少25%以上;梅赛德斯-奔驰和宝马使用剑麻纤维增强聚氨酯车门内板,进一步拓展了天然纤维在汽车内饰中的应用;梅赛德斯-奔驰A级的天窗支架以麻纤维/PP复合材料替代传统金属,减重幅度高达70%,碳排放降低60%以上;特斯拉全系车型的内饰板也采用麻纤维复合材料,总重量综合减重约25%,减碳20%以上;荷兰供应商为福特“Focus”汽车生产的黄麻纤维增强PP发动机护罩,该护罩重量比传统材料减轻30%,显著降低了发动机舱的重量,提高了燃油经济性;佛吉亚采用麻纤维增强PP材料制造仪表盘、中控台和车门镶板,减重20%~25%,应用于标致雪铁龙308量产车型,该材料不仅减轻了车身重量,还提升了内饰的舒适性和美观性。保时捷在全新718 Cayman GT4 Clubsport中使用天然纤维复合材料制造车身部件,展示了天然纤维在高性能汽车中的应用潜力;丰田纺织株式会社与科思创合作为丰田汽车公司全新电动概念车LQ开发新材料,用于汽车门板,该材料不仅具有轻量化优势,还符合电动化趋势下的环保要求;宝马X1的车门内板采用洋麻材料。2020年以来,随着中国汽车工业的新能源转型,比亚迪、奇瑞、长安、小米、上汽通用五菱等车企展开了整车电耗优化研究工作,其中,轻量化成为企业最为重要的研究方向。麻纤维复合材料逐渐在国内品牌汽车中使用。2024年上市发布的小米SU7车型上仪表板下本体和门内饰板应用了麻纤维/PP复合材料,减重比例达到30%,减碳20%以上。上汽通用五菱采用了模压注塑一体工艺制造了某车型表板装饰盖包覆件,通过简化流程降低生产成本30%以上,实现麻纤维/PP复合材料在汽车内饰中的低成本量产^[51]。目前麻纤维复合材料在汽车工业中的应用主要是替代传统玻璃纤维、金属材料和塑料,用于汽车内饰用复合材料、汽车底盘用复合材料、公共交通工具车体用复合材料、船舶内部构件、轨道车辆复合室内设计材料等^[52]。

在建筑业,对环保材料的旺盛需求,为麻纤维复合材料提供了广阔空间,麻纤维可应用于创造多种可持续建材产品,麻纤维建筑材料因其透气性展现出良好的改善室内环境

的效果^[53-54];这些材料也被报道在调节热能、湿度方面的良好作用,并且对地震和洪水等自然灾害具有抗灾能力;麻纤维/不饱和聚酯(UP)复合材料的密度为1.2~1.4 g/cm³,比木材轻20%^[55];大麻混凝土得益于其轻质性、热绝缘性、声学性能以及防潮性等特性^[53,56],非织造麻纤维/PLA复合材料用于音乐厅吸音墙板,声学性能接近枫木,近年来在建筑施工中越来越受欢迎,主要用于非承重墙、地板找平层、屋顶和窗隔热、路面、灰浆、抹灰以及填充材料等^[57-58],在混凝土中加入大麻纤维可以提高其弯曲和拉伸强度^[53]。据报道,墙面、幕墙和建筑外墙可以用增强的麻纤维复合三明治面板来代替^[59],以热压法结合木质素-酚-甲醛胶黏剂与短纤维大麻增强的木质层压板为基础的大麻基产品,可以加工成各种建筑产品,如墙面装饰、包覆材料、天花板和橱柜等^[60]。3D打印研究表明,麻的密度低至660 kg/m³时可打印,并具有足够的可构建性和抗压强度以单独构建墙体^[61]。

据报道,全球生产的约25%的亚麻纤维被用于汽车、航空航天、建筑、纺织或体育等行业的复合材料中^[62]。亚麻纤维增强的复合材料已被加工成用于汽车内饰衬垫、车门框架、座椅靠背、仪表板、后备箱盖、发动机盖、遮阳板、空气滤清器和备胎盖的产品^[63-64];用于行李箱、地毯、地板垫片、包装托盘、顶棚装饰件、储罐、浴缸管件、厕所座便器、土工布、隔热垫片和家具等产品^[65-66]以及其它消费品^[67-69]。在家具中可应用于切板、地板、复合家具材料、无纺布室内装饰面料以及室内装潢填充材料^[70],在食品与包装工业中,其技术亮点是全降解性和阻隔性能。麻纤维/PLA复合材料在堆肥条件下180天的降解率>90%,可替代一次性塑料餐具^[71]。麻纤维致密结构使氧气透过率降低40%,延长了食品保质期^[72],在食品与包装工业中被广泛应用于一次性餐具、包装袋、冷链物流箱等^[73]。亚麻还被用于高端产品中,包括防弹防护装备等应用领域(如防弹背心和头盔^[64,74])以及功能汽车部件。将大麻纤维纺成连续纱线并用于编织或非编织织物,可以作为预成型材料^[63]加工成生物复合材料。大麻还被用作生物纤维添加剂,取代玻璃纤维,应用于塑料休闲体育产品中,如滑雪板、雪橇、独木舟、自行车框架、网球拍以及矫形设备^[75-77]。此外,大麻填料已被添加到聚合物复合材料中用于假肢以减少细菌附着^[78]。

3.2 麻纤维增强复合材料的产业化进展

3.2.1 产业化进展

麻纤维在纺织品、纸张和绳索等传统领域已有广泛应用,20世纪,部分研究机构开始探索麻纤维在复合材料中的潜力,相关研究主要集中在麻纤维的提取、表面处理和与聚合物基体的结合。研究表明,麻纤维因具有良好的力学性能和环保特性,可成为纤维增强复合材料的重要研究对象^[79],特别是在增强聚合物基体中的应用逐渐受到关注,如与PP、聚酯、聚酰胺等树脂存在复合的可能^[80]。这一阶段的研究为后续的产业化奠定了基础。

21世纪初期,麻纤维复合材料技术得到进一步的发展,

麻类产业技术体系通过品种改良、脱胶技术、非织造材料、生物降解地膜等技术的研发和表面改性、界面处理和复合工艺的优化,使得麻纤维的提取效率和质量得到了显著提升,各种麻纤维复合材料的性能和功能也得到了开发,推动了麻纤维的绿色化和产业化发展。麻纤维复合材料因其轻质、廉价和环保特性,成为传统玻纤复材、木质复材的替代品。在汽车领域,福特公司使用大麻纤维增强PP材料制造发动机罩,减轻了30%的重量^[81]。统计显示,德国汽车工业在2005年使用了约18万t麻纤维增强复合材料,相当于每辆汽车消耗16公斤。此外,麻纤维复合材料也可在建筑领域用于防火隔音材料、装潢材料 and 水泥模板等制件^[81]。总的来说,在这一阶段,麻纤维复合材料的应用主要集中在非承力和次承力结构,如缓冲材料、隔音材料等。2005年至2010年期间,麻纤维复合材料使用量的年均增长率约为15%。

2010年以来,麻纤维复合材料进入规模化应用和市场拓展阶段,各科研机构与企业通过多学科交叉创新,在纤维改性、界面增强、功能化复合等方面取得了一系列突破性进展,为麻纤维复合材料的商业化应用奠定了坚实基础。化学处理法、物理处理法以及生物处理法技术的提升进一步增强了界面结合强度,纤维混杂、纳米改性和树脂基体优化等手段,使复合材料性能得到显著提升。工艺革新和装备技术进步,适应麻纤维特性的专用生产技术和自动化设备不断涌现,大幅提高了生产效率和产品一致性,降低了制造成本,为产业化提供了坚实支撑。麻纤维复合材料的成型工艺经历了从传统手工铺层到自动化成型的演进,各种适应不同应用需求的工艺路线已日趋成熟。模压成型工艺作为最成熟的量产技术,在汽车内饰件生产中占据重要地位;VARTM因其设备投入低、制品性能好,成为大尺寸麻纤维复合材料的首选工艺;长纤维增强热塑性塑料技术结合在线复合概念,为麻纤维复合材料注塑成型开辟了新途径,通过将麻纤维切断至5~25 mm的长度,与熔融态热塑性树脂直接混合后注入模具,实现了复杂形状制品的一次成型;三维编织结合VARTM的混合工艺在高性能复合材料制备中表现突出。

随着产学研合作平台、供应链整合和金融支持等多种协同模式的不断涌现,麻纤维复合材料在汽车、航空航天、建筑、包装、体育用品和风力发电叶片等领域的应用进一步扩大,商业化有了强大动力。奔驰S级轿车使用麻纤维制造了32种部件,总重达24.6公斤;在日本,汽车公司开始使用可全降解的麻纤维增强PLA复合材料制作汽车零部件,丰田汽车在“Raum”上采用了洋麻纤维增强PLA复合材料制造的备用轮胎罩和车垫^[81]。此外,麻纤维复合材料在航空领域也展现出潜力,有望减少对化石资源的依赖,开发新型轻质多功能复合材料。随着环保意识的增强,麻纤维复合材料向功能化、绿色化方向发展。麻纤维复合材料被用于开发具有阻燃、抗菌、吸声、抑菌、耐光热等功能的多功能复合材料。此外,麻纤维复合材料的生物降解性和可再生性使其在绿色可持续发展领域具有广阔前景^[82]。据统计数据显示,2022年仅

美国工业大麻及大麻消费品市场规模达到了13.6亿美元^[45]。

建筑业是麻纤维复合材料的主要应用领域。在亚太地区,特别是中国、印度和日本,由于建筑活动的增加,人们对麻纤维复合材料的需求迅速增长,预计将成为全球麻纤维复合材料的市场主导者。牛津经济研究院预测,全球建筑业规模预计在2020年至2030年间增长42%,达到15.2万亿美元,其中中国、印度、美国和印度尼西亚的需求量将占全球建筑业增长的58.3%。天然纤维增强复合材料在电子行业的应用也在增加,据印度品牌资产基金会(IBEAF)预测,到2025年,印度电子制造业的产值预计将达到5200亿美元。此外,汽车是天然纤维增强复合材料的主要消费者之一。印度的汽车工业是印度经济表现的重要指标,因为该行业在技术进步和宏观经济扩张中发挥着至关重要的作用。此外,印度政府还通过加快电动汽车的采用和制造计划创造了动力,该计划鼓励在某些领域强制采用电动汽车,计划到2030年达到30%的电动汽车普及率。政府设定的目标是,到2030年,印度销售的所有商用车70%、私家车30%、公共汽车40%以及两轮和三轮车80%为电动汽车^[83]。

目前,麻纤维复合材料在中低端应用已具备成本竞争力,在高端应用则依靠差异化特性获得市场。未来随着规模扩大、技术成熟和碳价上涨,其经济优势将进一步增强,推动更广泛的市场渗透。产业界需要针对不同应用领域制定有区别的成本优化和市场策略,以加速产业化进程。

3.2.2 产业化挑战

麻纤维复合材料作为可再生的天然绿色新材料,在“双碳”背景下有着广阔的产业化发展空间,但是在产业化过程中依然面临众多技术、产业链和市场难点。

首先是技术瓶颈,关键在于界面性能及加工过程制约。麻纤维自身羟基与非极性树脂之间结合不紧密,使得复合材料界面相容性较差,冲击韧性低。麻纤维多孔且易于吸附水分,界面稳定性降低,纤维分散性及均匀性差,传统熔融共混容易出现纤维断裂,纤维保留长度小于500 μm ,并出现纤维团聚的现象,导致拉伸强度波动幅度在20%左右。复杂结构成型方面,麻纤维高刚性和低可塑性难以通过注塑或者模压工艺制备成异形件,传统的麻纤维加工工艺的VOC大于200 ppm,因此也限制了麻纤维复合材料在汽车内饰领域等对环保要求较高的场景。

第二,环保和成本之间存在的矛盾限制产业化发展,目前采用化学脱胶技术的废水化学需氧量(COD)达3 000 mg/L以上,污染性重,环保技术采用生物脱胶技术导致成本上升了30%,尚未大范围普及。另外,麻纤维果胶及木质素降解的杂质也会带来复合材料的VOC超标,不能达到汽车内饰要求。

第三,产业链协同性差。我国麻纤维原料不稳定,原料自给率低,不足25%,亚麻原料80%依赖欧洲进口,且品质参差不齐,其纤维断裂强度波动值大于15%。麻纤维加工装备技术方面,麻纤维专用加工装备多为传统纺织装备改造,自

动化程度较低,生产效率仅为玻璃纤维生产线的50%,严重限制了规模化。

第四,缺乏标准和市场认可,使得产业化过程停滞。麻纤维复合材料尚且没有针对阻燃、耐候、耐久等测试标准,无法认证市场中的航空和汽车等高端市场。此外,市场对麻纤维复合材料的认同也不足,消费者对在航空结构件等高端市场的潜在应用不够了解,并且传统合成材料较麻纤维复合材料还具有20%左右的成本优势,导致麻纤维复合材料市场的竞争力不强。

3.2.3 产业化突破对策

要促进麻纤维复合材料的产业化,必须从提高技术创新能力和环保工艺技术、打造麻纤维复合材料的产业化产业链、拓展和发展市场等方面同时进行协同式发展。在技术创新方面,主要是开展界面优化和技术创新,其中在成型技术上,倡导固相共混热致技术不仅有利于纤维无损散开和低VOC的排放,还能大大降低生产成本;而在成型工艺上,真空辅助树脂传递模塑技术与模压注塑一体化工艺开发应用,为复杂结构件的成型提供新方案。

(1)产业化支撑。产业化方面应积极宣传复合酶制剂脱胶工艺,实现废水COD值大幅降低的同时实现木质素回收再生利用。围绕热裂解回收树脂基体建立闭环回收体系,推动麻纤维复合材料全生命周期绿色化。

(2)增强龙头企业对下游辐射力度,扩大其影响力,在前端对原料进行规模化生产与高效利用,并使原料纤维达到工业化标准,可通过原料基地、推广麻类种植技术、实施纤维分级和产业链标准等方式进行。同时利用技术手段如开发专用于麻类的牵切纺纱机,以连续化生产纤维状麻条的形式,使前道工序中的纤维条向产业化模式的工业原料进行转化,减少能量损耗;提高和推行行业标准,实施全过程信息化可追溯体系。

(3)积极引导市场培育,强化产学研协同与联合。如产业推广应用平台可基于与整车厂的合作开发路径,推动产业应用,在绿色建筑领域,推广以麻纤维/秸秆夹芯墙板替代可发性聚苯乙烯泡沫的绿色建材,助力推动建筑减碳。切实加强产学研协同需要以国家麻类产业技术体系建设,打造“种植-加工-应用”研发联合团队,重点突破生物除胶、纳米纤维素制备等领域,并以产业技术创新联合体为主体,申请项目设立产业创新基金,以支持行业企业与高校联合的中试基地建设,推动产业技术成果的转化,加速产业化进程。

4 结语与展望

近年来,麻纤维复合材料因其天然植物纤维的特性应用广泛。在麻纤维预处理技术方面,纤维酶法处理技术的研究突破将彻底改变麻纤维的现有制备体系,在提高纤维性能的同时,大大减少了环境污染;绿色预处理剂的研发及在制备中的广泛应用,将建立完善的绿色生产体系,从根本上保证材料的发展。将上述技术和纳米改性技术、智能工艺结合,使其满足性能提升、功能化需求,通过“多纤维复配、改善界

面”等手段,使麻纤维复合材料提升的性能能够超越目前材料的性能,满足航空航天、高端设备等严苛工程环境下材料的应用需求。在应用方面,对麻纤维复合材料将是前所未有的机会,麻纤维复合材料设计引入智能模式研发,在大数据分析和智能算法下,研发其高效性材料,以此满足未来对汽车工业、医疗器械、绿色建筑等一些领域的需求设计。同时,伴随多学科交融的发展,麻纤维复合材料在发展上有望为可持续材料领域开拓新的篇章。

参考文献

- [1] 李岩,等.植物纤维增强复合材料[M].北京:科学出版社,2021.
LI Yan, et al. Plant fiber reinforced composite[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] KUMAR R, et al. International Journal of Sustainable Engineering, 2019, 12(3):212–220.
- [3] CHANDGUDE S, et al. Polymer Composites, 2021, 42(6):2 678–2 703.
- [4] 何莉萍,等.复合材料学报,2023,40(4):2 038–2 048.
HE Liping, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2 038–2 048.
- [5] DASH C, et al. Biomacromolecules, 2023, 24(3):1 329–1 344.
- [6] KOSTIC M M, et al. Industrial Crops and Products, 2010, 32(2): 169–174.
- [7] VÄISÄNEN T, et al. Industrial Crops and Products, 2018, 111: 422–429.
- [8] MAZUMDER S, et al. Biomimetics, 2023, 8(2). DOI: 10.3390/biomimetics8020188.
- [9] 郝建秀.缠绕成型用竹、麻纤维增强聚丙烯预浸带的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
HAO Jianxiu. Study on bamboo and hemp fiber reinforced polypropylene prepreg tape for winding forming[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.
- [10] EZUGWU E K, et al. Industrial Crops and Products, 2023, 200. DOI:10.1016/j.indcrop.2023.116832.
- [11] PEJIĆ B M, et al. Carbohydrate Polymers, 2020, 236. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116000.
- [12] SAIR S, et al. Case Studies in Thermal Engineering, 2017, 10: 550–559.
- [13] ZEGAOU A, et al. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2019, 233(10):2 126–2 139.
- [14] 何雍.植物纤维/聚丙烯复合材料的制备与性能研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
HE Yong. Preparation and properties of plant fiber/polypropylene composites[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [15] SULLINS T, et al. Composites Part B: Engineering, 2017, 114: 15–22.
- [16] SEPE R, et al. Composites Part B: Engineering, 2018, 133: 210–217.
- [17] 洪钧,等.塑料科技,2012,40(2):45–47.
HONG Jun, et al. Plastics Science and Technology, 2012, 40(2): 45–47.
- [18] LAWAN I, et al. Tribology International, 2024, 193. DOI:10.1016/j.triboint.2024.109394.
- [19] SONG H L, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28:3 121–3 132.
- [20] GEORGE M, et al. Carbohydrate Polymers, 2015, 134:230–239.
- [21] OZA S, et al. Composites Part B: Engineering, 2014, 67:227–232.
- [22] 王建杰.改性黄麻纤维/聚丙烯复合材料的制备及性能研究[D].福州:福建工程学院,2019.
WANG Jianjie. Preparation and properties of modified jute fiber/polypropylene composites[D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2019.
- [23] PANAITESCU D M, et al. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 37:137–146.
- [24] SUN Y J, et al. Construction and Building Materials, 2024, 419. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.135521.
- [25] DAI D S, et al. Industrial Crops and Products, 2013, 44:192–199.
- [26] MAHENDRAN G, et al. Polymer Bulletin, 2024, 81(17):15 955–15 973.
- [27] 夏凡,等.复合材料学报,2025,42(5):2 518–2 527.
XIA Fan, et al. China Industrial Economics, 2025, 42(5): 2 518–2 527.
- [28] FUQUA M A, et al. Polymer Reviews, 2012, 52(3):259–320.
- [29] BOURMAUD A, et al. Progress in Materials Science, 2018, 97: 347–408.
- [30] 刘雪强,等.中国材料进展,2024,43(5):448–456.
LIU Xueqiang, et al. Materials China, 2024, 43(5):448–456.
- [31] 柳顺龙,等. CN101537713A[P]. 2009-09-23.
LIU Shunlong, et al. CN101537713A[P]. 2009-09-23.
- [32] MITAEVÁ Z, et al. TEM Journal, 2024:2 429–2 435.
- [33] 展江湖,等.工程科学学报,2021,43(7):952–959.
ZHAN Jianghu, et al. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7):952–959.
- [34] 董倩倩,等.2016年全国高分子材料科学与工程研讨会论文摘要集,桂林:桂林理工大学,2016.
DONG Qianqian, et al. Abstracts of the 2016 National Symposium on Polymer Materials Science and Engineering, Guilin: Guilin University of Technology, 2016.
- [35] 黄茂财,等.复合材料学报,2024,41(12):6 370–6 385.
HUANG Maocai, et al. China Industrial Economics, 2024, 41(12):6 370–6 385.
- [36] BENDOUROU F E, et al. Waste Management, 2021, 121: 237–247.
- [37] 杜德焰,等.广州化学,2019,44(4):69–75.
DU Deyan, et al. Guangzhou Chemistry, 2019, 44(4):69–75.
- [38] 李伟,等.湖南大学学报(自然科学版),2015,42(12):15–20.
LI Wei, et al. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(12):15–20.
- [39] 王一冰,等.造纸科学与技术,2024,43(5):52–55.
WANG Yibing, et al. Paper Science & Technology, 2024, 43(5): 52–55.

- [40] 王倩. 化学与粘合, 2024, 46(3):240–243, 268.
WANG Qian. Chemistry and Adhesion, 2024, 46(3):240–243, 268.
- [41] RÉQUILÉ S, et al. Composites Science and Technology, 2019, 181. DOI:10.1016/j.compscitech.2019.107694.
- [42] RACHTANAPUN P, et al. Polymers, 2024, 16(23). DOI:10.3390/polym16233394.
- [43] ISLAM M H, et al. Iscience, 2022, 25(1). DOI: 10.1016/j.isci.2021.103597.
- [44] JOHNSON R. Hemp as an Agricultural Commodity[N]. Accessed February, 2018, 25, 2021. <http://www.crs.gov>. RL32725.
- [45] SCHEIBE M, et al. Journal of Natural Fibers, 2023, 20(2). DOI: 10.1080/15440478.2023.2276715.
- [46] MORE A P. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(1):1–20.
- [47] SONNTAG W, et al. 4th international wood and natural fibre composites symposium. kassel germany: universität göttingen, institut für werkstofftechnik, kunststoff-und recyclingtechnik, 2002:1–27.
- [48] SUDELL B C, et al. Natural fiber composites in automotive applications[M]. Natural Fibers, Biopolymers and their Biocomposites, Mohanty AK, Misra M and Drzal LT (editors), CRC Press, Boca Raton FL, USA, 231 – 259.
- [49] 王盼, 等. 中国麻业科学, 2025, 47(3):159–167.
WANG Pan, et al. Plant Fiber Sciences in China, 2025, 47(3): 159–167.
- [50] DAHAL R K, et al. Journal of Composites Science, 2022, 6(12). DOI:10.3390/jcs6120373.
- [51] 施凯文, 等. 工程塑料应用, 2024, 52(3):112–118.
SHI Kaiwen, et al. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 112–118.
- [52] SCHEIBE M. Analysis of the applicability of natural fiber reinforced polymer composites for the construction of selected types of vessels[D]. Szczecin:Maritime University of Szczecin, 2022.
- [53] ELY K, et al. Cannabis/Hemp for Sustainable Agriculture and Materials. Singapore:Springer, 2022:59–87.
- [54] KIRBAS H, et al. Tekstilna Industrija, 2025, 73(1): 4–25. DOI: 10.5937/TEKSTIND2501004K.
- [55] 李燕立. 麻纤维增强复合材料将面对广泛的应用需求[C]. 中国产业用纺织品行业协会, 2011-12-21.
LI Yanli. Hemp fiber reinforced composites will face a wide range of application needs[C]. China Industrial Textile Industry Association, 2011-12-21.
- [56] PARVEZ A M, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141. DOI:10.1016/j.rser.2021.110784.
- [57] MALABADI R B, et al. Int J Res Sci Innov (IJRSI) 2023, 10:1–9.
- [58] JAIN P, et al. Problemy Ekorozwoju, 2021, 16(2):233–244.
- [59] BARBHUIYA S, et al. Construction and Building Materials, 2022, 341. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127857.
- [60] KARRI R, et al. Composites Part C:Open Access, 2022, 9. DOI: 10.1016/j.jcome.2022.100299.
- [61] YANO H, et al. Foods, 2023, 12(3). DOI:10.3390/foods12030651.
- [62] TANASĂ F, et al. Polymer Composites, 2020, 41(1):5–31.
- [63] DEYHOLOS M K, et al. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2014, 3(1):53–57.
- [64] DAS P P, et al. Cleaner Engineering and Technology, 2021, 4. DOI:10.1016/j.clet.2021.100182.
- [65] NAEEM M Y, et al. Processes, 2023, 11(3), 718. DOI:10.3390/pr11030718.
- [66] THOLIYA P, et al. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2021, 6(1):376–381.
- [67] SÁEZ-PÉREZ M P, et al. Journal of Building Engineering, 2020, 31. DOI:10.1016/j.job.2020.101323.
- [68] JAMI T, et al. Journal of Cleaner Production, 2019, 239. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117852.
- [69] SHAHZAD A. Journal of Composite Materials, 2012, 46(8): 973–986.
- [70] PROMHUAD K, et al. Polymers, 2022, 14(20). DOI: 10.3390/polym14204274.
- [71] 科技成果汇编[G]. 南京农业大学科学研究院. 2022-10, 100.
Compilation of scientific and technological achievements[G]. Scientific Research Institute of Nanjing Agricultural University. 2022-10, 100.
- [72] 李梦雅, 等. 塑料, 2025, 54(2):101–105, 116.
LI Mengya, et al. Plastics, 2025, 54(2):101–105, 116.
- [73] YOKESAHACHART C, et al. Cellulose, 2021, 28(9):5 513–5 530.
- [74] NAYAK S Y, et al. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(5):1 648–1 658.
- [75] AHMED A T M F, et al. Heliyon, 2022, 8(1). DOI:10.1016/j.heliyon.2022.e08753.
- [76] WIRAWAN R, et al. Research on cellulose-based polymer composites in southeast asia. in lignocellulosic polymer composites[M]. Thakur, V. K., Ed., John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2014; pp. 41–61.
- [77] NAMVAR F, et al. BioResources, 2014, 9(3):5 688–5 706.
- [78] KHAN B A, et al. BioResources, 2014, 9(2):3 642–3 659.
- [79] EDITOR S I. International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology, 2016, 17(1):18.1–18.5.
- [80] 曹勇, 等. 材料研究学报, 2008, 22(1):10–17.
CAO Yong, et al. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(1):10–17.
- [81] 中国复合材料学会. 复合材料学科方向预测及技术路线图[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2019.
Chinese Society of Composite Materials. Subject direction prediction and technology roadmap of composite materials [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2019.
- [82] 刘丽妍. 亚麻非织造织物增强复合材料的研究[D]. 天津:天津工业大学, 2004.
LIU Liyan. Study on flax nonwoven fabric reinforced composites [D]. Tianjin:Tianjin Polytechnic University, 2004.
- [83] Mordor Intelligenc. 天然纤维增强复合材料行业报告[R]. 2024.
Mordor Intelligenc. Natural Fiber Reinforced Composites Industry Report[R]. 2024.