

# 矿化物增强木塑复合材料研究进展

胡建鹏<sup>1,2</sup>, 宋冠霖<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学材料科学与艺术设计学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 国家林业草原沙生灌木  
高效开发利用工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:** 矿化物凭借其优异的耐老化性、阻燃性及力学性能等特点, 已成为重要的化工原料。以矿化物增强的复合材料因其环境友好特性、资源集约化利用潜力及优异的综合性能, 已成为新型功能复合材料和绿色建筑材料领域的研究热点。文章从矿化物增强体种类、矿化物与基体材料的复合方式以及复合材料功能拓展性方面系统阐述矿化物增强木塑复合材料(WPC)在力学性能、耐老化性、耐水性及阻燃性等方面的研究进展与现状。针对矿化物增强复合材料在矿物种类开发、矿化物与木塑基体间的界面调控、复合材料功能性拓展等方面存在的问题, 展望矿化物增强WPC的发展趋势与应用前景, 旨在为该材料的进一步研发提供依据。

**关键词:** 矿化物; 木塑复合材料; 性能调控; 仿生矿化; 功能化拓展

中图分类号: S784; TQ321.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0190-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.034

## Research Progress on Mineral Reinforced Wood Plastic Composites

HU Jianpeng<sup>1,2</sup>, SONG Guanlin<sup>1</sup>

(1. College of Material Science and Art Design, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. National Forestry Grassland Engineering Technology Research Center for Efficient Development  
and Utilization of Sandy Shrubs, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** Owing to their outstanding aging resistance, flame retardancy, and mechanical performance, mineralized compounds had evolved into essential chemical raw materials. Mineral reinforced composites, celebrated for their eco-friendly character, potential for resource-conserving utilization, and superior overall properties, had emerged as a focal point of research in the field of novel functional composites and green building materials. The paper systematically reviewed the research progress and current status of mechanical behavior, aging resistance, water resistance, and flame retardancy of mineral reinforced wood plastic composites (WPC) from the aspects of the types of mineral reinforcements, the compounding strategies between minerals and the matrix, and the expandability of composite functionality. In view of the existing problems in mineral reinforced composites regarding the development of mineral types, interfacial regulation between minerals and wood-plastic matrix, and functional expansion of composite materials, future development trends and application prospects for mineral reinforced WPC were projected, aiming to provide a reference for further material development.

**Keywords:** Mineralized compounds; Wood plastic composites; Property modulation; Biomimetic mineralization; Functional expansion

木塑复合材料(WPC)由植物纤维与热塑性塑料复合而成, 兼具资源循环利用和环境友好特性, 已广泛应用于建筑、交通等领域<sup>[1-2]</sup>。为进一步优化其综合性能并拓展应

用领域, 矿化物增强体系成为研究人员关注的重点。矿化物资源丰富, 成本低廉, 性能优异, 凭借其耐老化性、阻燃性及力学性能优势, 特别是其固有的机械特性(如硬度、刚

收稿日期 Submitted date 2025-03-14; 修回日期 Revised date 2025-04-22; 录用日期 Accepted date 2025-05-20

基金项目: 内蒙古自然科学基金面上项目(2024LHMS03020); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费专项(BR220124)

联系人, jianpeng0101@126.com

引用本文: 胡建鹏, 宋冠霖. 矿化物增强木塑复合材料研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 190-195.

Citation: HU J P, SONG G L. Research progress on mineral reinforced wood plastic composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 190-195.

度等)对复合材料的界面调控及功能化拓展具有显著作用<sup>[3]</sup>,为WPC性能升级提供了新路径。引入矿化物作为增强相不仅能够显著提升复合材料的力学强度和耐环境性,还可通过填料替代策略降低原料成本,从而形成兼具功能性与生态效益的协同效应<sup>[4]</sup>。

目前,系统归纳矿化物增强WPC研究进展的文献鲜有报道。本文从矿化物增强体种类、矿化物与基体材料的复合方式以及复合材料功能拓展性3个方面系统阐述该领域的研究进展,旨在为矿化物增强WPC的研发提供依据。

## 1 矿化物增强体种类在WPC中的应用

矿化物包括金属矿化物及非金属矿化物两大类。非金属矿化物根据其化学成分和物理性质的不同,主要分为硅酸盐类矿物、碳酸盐类矿物等,可广泛应用于增强复合材料的阻燃性及耐候性<sup>[5-6]</sup>。金属矿物本身价值较高且化学性质稳定,通常作为填料增强复合材料的硬度与力学强度。

### 1.1 硅酸盐矿物

硅酸盐矿物为含氧酸盐矿物,其中蒙脱石(MMT)、云母(层状)、高岭石、硅灰石(链状)等典型矿物凭借良好的力学性能、热稳定性与界面活性,已成为化学催化、复合材料、环境修复等领域的关键化工原料。

#### 1.1.1 MMT

MMT是膨润土的主要矿物成分之一,具有良好的化学稳定性和热稳定性,被广泛应用于材料化工领域。MMT可通过无机和有机改性赋予其更多独特的性能。目前,有机蒙脱石(OMMT)和纳米蒙脱石(NMMT)是木塑复合材料领域的主要研究对象。

ZHAO等<sup>[7]</sup>研究OMMT对木粉/聚乙烯复合材料热稳定性的影响。结果表明,OMMT显著改善WPC的热性能,特别是熔化潜热和结晶潜热。当OMMT质量分数达到40%时,复合材料熔化潜热达47.53 J/g,较未添加组提高约400%。

LIU等<sup>[8]</sup>以木粉(WF)和聚丙烯(PP)为原料,添加OMMT,制备WF/PP/OMMT复合材料,研究OMMT对复合材料力学性能的影响。结果表明,添加OMMT后,复合材料弯曲强度显著提高,当OMMT质量分数为0.5%时,弯曲强度达36.22 MPa,拉伸强度达22.03 MPa,较未添加组分别提高22.5%和32.5%。

YANG等<sup>[9]</sup>制备含蒙脱石负载的锌-三聚氰胺-植酸复合物(MMT/ZnMPA)的木粉/PP复合材料,发现添加20%该添加剂后,拉伸和弯曲强度分别提升20.6%和15.2%,总热释放率峰值和总热释放率则分别降低28.1%和17.8%;材料热稳定性显著增强,50%失重温度( $t_{50\%}$ )呈上升趋势。

#### 1.1.2 云母

云母是一种具有硅氧四面体片层结构的无机填料,化学稳定性高、耐候性强。当前研究主要以云母作为增强材

料制备复合材料,可有效改善复合材料的韧性和力学性能。

苏宇<sup>[10]</sup>以PP为原料,以KH550为偶联剂,与十二烷基三甲基氯化铵(DTAC)插层改性云母共同填充制备竹粉/云母/PP复合材料。实验表明,改性云母添加质量分数为5%时,复合材料拉伸强度、弯曲强度及冲击强度较对照组分别提升24.7%、65.4%和162.3%,维卡软化点提高10.1℃。

RAMLII等<sup>[11]</sup>以剑麻木粉、再生聚乙烯(rPE)和原生聚乙烯(vPE)为原料,以马来酸酐聚乙烯为偶联剂,添加质量分数3%云母,制备剑麻/再生聚乙烯木塑复合材料(WrPC)。研究发现,云母的添加使WrPC的10%失重温度( $t_{10\%}$ )从303.5℃提高至311℃,表明云母增强复合材料的热稳定性得到提高;冲击强度较未添加组增加2.46 kJ/m<sup>2</sup>。

#### 1.1.3 高岭石

高岭土也称高岭土、瓷土,是一种以高岭石族黏土矿物为主的黏土岩,具有良好的可塑性和耐火性。目前,研究人员对高岭石的研究主要集中在改善复合材料的力学性能及阻燃性能等方面。

GYOUNG等<sup>[12]</sup>以木纤维和PP为原料,添加3%高岭土作为增强材料,制备复合材料。结果表明,复合材料的拉伸强度与弯曲强度较对照组分别提高11.4%和7.5%。这是由于高岭土粒径较小且表面高度亲水,提供更多与基体聚合物的接触点,改善复合材料的界面性能。

YIGA等<sup>[13]</sup>以聚乳酸(PLA)和农业废料纤维为原料,添加经氢氧化镁、氢氧化钠表面改性高岭土,制备复合材料。结果表明,与对照组相比,改性高岭土/PLA木塑复合材料燃烧峰值温度提高76.6℃。这表明高岭土可显著提升复合材料的热稳定性和阻燃性能。

#### 1.1.4 硅灰石

硅灰石是一种新型工业矿物,具有白度高、折射率高、化学稳定性优异和独特的针状结构等特点<sup>[14]</sup>。当前研究主要集中在增强材料力学强度方面。

HUUHILO等<sup>[15]</sup>以针叶木纤维和PP为原料,添加硅灰石制备空心板材。结果表明,相较于未添加硅灰石的复合材料,其密度增加13%~17%,布氏硬度和冲击强度分别提高19%和7%。

宋建强等<sup>[16]</sup>以木粉和聚乙烯为原料,添加硅灰石,利用挤出成型工艺制备复合材料。结果表明,当硅灰石粉添加量为15%时,复合材料弯曲强度最高,达29.2 MPa,较使用滑石粉填料的复合材料提升14.7%。

## 1.2 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物可通过物理混合方法填充于WPC中,在不牺牲材料加工性能的前提下,提升复合材料的力学性能、耐候性、热稳定性和环保性。

#### 1.2.1 方解石

方解石主要成分为碳酸钙,具有成本低、无毒和生物

相容性好等特点<sup>[17]</sup>。当前研究主要关注方解石增强WPC的力学性能和隔音性能。

CAI等<sup>[18]</sup>以杨木木粉和高密度聚乙烯(HDPE)为原料,添加方解石粉末,制备复合材料。结果表明,当方解石质量分数从0增至10%时,复合材料弯曲强度最大值达39.36 MPa。当质量分数增至15%时,断裂伸长率从对照组的3.94%增至6.26%。

CROITORU等<sup>[19]</sup>以云杉木粉和聚氯乙烯(PVC)为原料,添加无定形方解石粉制备复合材料。研究发现,复合材料的弯曲强度、摩擦系数和布氏硬度均得到改善;热导率较低,与软木、棉及镁氧矿绝缘材料相当。此外,复合材料隔音性能与聚苯乙烯、聚氨酯及混凝土相当,隔音性能随木粉含量的增加而提高。

### 1.2.2 白云石

白云石广泛分布于自然界,常用于建材、陶瓷、玻璃、耐火材料、化工及农业、环保、节能等领域。当前研究常将其作为耐火添加剂增强复合材料阻燃性。

ÖZDEMİR等<sup>[20]</sup>以PP和木粉为原料,添加白云石粉和石蜡,采用挤出工艺制备复合材料。结果表明,白云石粉的加入提高了复合材料的拉伸模量和弯曲模量,较对照组分别提升12 MPa和81 MPa,但拉伸强度和弯曲强度分别降低2.0 MPa和0.6 MPa;添加白云石粉后材料厚度膨胀和吸水率略有增加。

### 1.2.3 石灰岩

石灰岩的矿物成分主要为方解石,伴生白云石、菱镁矿和其他碳酸盐矿物,具有导热性、坚固性、吸水性、不透气性、隔音性、磨光性、良好的胶结性能及可加工性等优良特性。目前对石灰岩的研究主要集中在增强WPC的力学性能及耐候性方面。

KESKISAARI等<sup>[21]</sup>制备含石灰石粉的木纤维/PP复合材料,证实40%石灰石添加量使材料冲击强度和硬度分别提升3.77%与17.6%,吸水率降低80.7%。机理分析表明,CaCO<sub>3</sub>微粒在基体中均匀分散,促使孔隙致密化,同时通过阻断水分渗透路径协同实现力学强化与耐水性提升。

## 1.3 金属矿物

金属矿物是含有金属元素或其化合物的矿物。将金属矿物引入WPC中能够提高其力学性能、耐腐蚀性和热稳定性等。但目前金属矿物增强WPC的研究还比较少。

### 1.3.1 铝增强WPC

ZHAO等<sup>[22]</sup>以聚烯烃、木粉及15%碳酸钙为原料,挤出成型后将铝箔贴合表面,通过热压制备铝-碳酸钙/WPC。结果表明,复合材料的极限应力平均值为84.070 MPa,极限应变平均值为0.017,弹性模量平均值为24.51 GPa,断裂伸长率为6.17%,较对照组分别提高约395%、370%、403%和1 013%。

### 1.3.2 铁增强WPC

LIANG等<sup>[23]</sup>以聚苯乙烯和木粉为原料,加入铁粉和聚磷酸铵(APP),制备复合材料。研究发现,添加质量分数为40%铁粉后,复合材料热导率从0.338 W/(m·K)提升至0.629 W/(m·K)。经磁场处理后,电导率显著提高。这是由于磁场处理后,Fe粒子沿磁场方向在基体中重新排列,形成导电路径,这种有序排列有助于热能传递,从而提高热导率和电导率。

## 2 矿化物与基体材料的复合方式

矿化物与基体材料的复合方式主要分为物理掺杂、化学改性及仿生矿化3类。物理掺杂具有操作简便和环境友好的优势;化学改性通过增强界面相容性优化复合效果,该特性对调控亲水性植物纤维与疏水性高分子基体的界面结合尤为关键,直接影响复合材料的力学强度及综合性能<sup>[24]</sup>;仿生矿化可模拟生物矿化过程,对提升复合材料性能具有巨大潜力。

### 2.1 物理掺杂

MEJIA-GONZALEZ等<sup>[25]</sup>以沸石矿物为辅助填料,松木锯末粉和PP为原料,制备复合材料。结果表明,添加沸石矿物填料显著提高复合材料的拉伸和弯曲强度。特别是配方M7(34.375%木粉、55.875%PP、6.750%沸石和3.00%偶联剂)表现出最佳的力学性能,拉伸强度和弯曲强度分别较对照组提高约18.8%和31.5%。

李歆等<sup>[26]</sup>研究海泡石(SEP)改性木粉/PP复合材料,发现添加6%SEP使700℃残炭率提升至24.52%,添加2%SEP即可使总热释放率峰值和总热释放率分别下降49.3%和28.6%。机理研究表明,SEP诱导形成的膨胀炭层通过物理阻隔效应,协同提升炭层稳定性与阻燃效率。

### 2.2 化学改性

覃宇奔等<sup>[27]</sup>以造纸污泥(含木纤维、碳酸盐矿物和干污泥的混合物)和PVC为原料,采用热压成型技术制备复合材料,以 $\gamma$ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH560)为偶联剂进行界面改性。结果表明,当偶联剂质量分数为2%时,复合材料弯曲强度和拉伸强度较未添加偶联剂时分别提高53.6%和84.9%;继续增加偶联剂含量,过多的偶联剂覆盖于污泥表面,影响污泥中纤维与PVC的桥联,导致其力学性能下降。

### 2.3 仿生矿化

仿生矿化是通过模拟生物矿化过程,利用有机模板(如蛋白质、多糖)调控矿物晶体定向沉积的生物启发策略。现有研究多聚焦于构建实体木材多级矿物结构以实现疏水/增强改性<sup>[28-29]</sup>,而在WPC领域应用甚少。鉴于其跨尺度结构调控优势,该技术在改善木塑体系界面结合强度及构筑多功能协同效应方面具有显著潜力,或将成为高性能木塑材料开发的新方向。

#### 2.3.1 碳酸钙的仿生矿化

ZHANG等<sup>[30]</sup>采用海藻酸钠(SA)诱导碳酸钙仿生矿化

策略制备杨木复合材料,图1为海藻酸钠/氯化钙/木材复合材料的结构。结果表明,材料压缩强度和弯曲强度分别提升52.52%和37.66%,密度与质量分别提高23.26%和28.10%。该体系通过分子间交联(SA-纤维素网络)与细胞尺度梯度矿化(碳酸钙定向沉积)构建双效防护机制:前者抑制热解挥发物生成,后者形成“矿物装甲”层,协同实现热解气体阻隔(热稳定性提升)与燃烧自抑制效应(烟雾释放降低)。这种“化学键合-物理屏蔽”协同模式被证实为力学强化的结构基础。

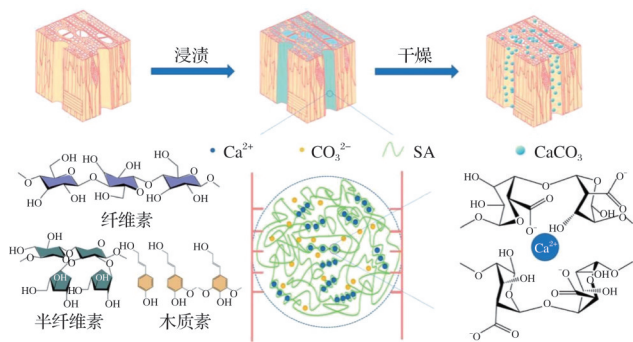


图1 海藻酸钠/氯化钙/木材复合材料的结构

Fig.1 Structure of sodium alginate/calcium chloride/wood composites

### 2.3.2 轻木氯化钙矿化

ZHANG等<sup>[31]</sup>以轻木为原材料,制备酸溶解离心矿化前驱体(A-CMP)溶液,使用仿生矿化思路制备氯化钙/轻木矿化木材复合材料,图2为单细胞及纤维素微纤维层面pH值响应策略的作用机制。研究表明,经处理后材料吸水率提高360%,横向与纵向邵D硬度分别增加3.15倍和28.4倍,且在10次干湿循环后仍保持95%的形状恢复率。机理研究表明:酸碱处理重构纤维素氢键网络(链内氢键增加、链间氢键减少),无定形磷酸钙(CDHA)选择性嵌入纤维素非晶区强化分子内键合;同步形成的湿稳态折叠通道在压缩时激活层间压缩空间,通过氢键动态重组与结构储能机制协同作用,最终实现95%的压缩回弹率和99%的形状记忆性能。

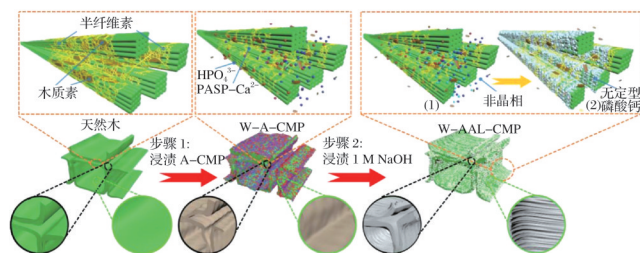


图2 单细胞及纤维素微纤维层面pH值响应策略的作用机制

Fig.2 Mechanism of pH value response strategies at single-cell and cellulose microfiber levels

## 3 复合材料的性能拓展性

功能型复合材料的研发对提升产品性能、拓宽应用途径具有重要意义,已成为材料科学领域的热点。基于矿化

物增强WPC的环保廉价特性,进一步拓展其功能性研发,能够使其具有更好的使用性能和广阔的应用前景。目前,矿化物增强WPC的功能化拓展主要集中在力学性能、老化性、耐水性及阻燃性能等方面。

### 3.1 力学性能

复合材料的力学性能受矿化物种类、添加物含量、复合方式及基体材料性能等多种因素影响。SRIVABUT等<sup>[32]</sup>对比不同矿物填料对橡胶木粉/PP复合材料力学性能的影响,发现质量分数为7%的碳酸钙使拉伸、弯曲强度达到最优(25.09、43.03 MPa),较未填充体系分别提升24.7%和22.6%;质量分数为7%的滑石可实现最高拉伸模量(1.26 GPa,提高20.0%);质量分数为5%的纳米黏土则实现最佳弯曲模量(2.91 GPa,提高18.8%)。该研究结果揭示了填料类型与含量对性能的差异化调控规律。

### 3.2 耐老化性

复合材料的耐老化研究是材料科学的核心方向之一,其耐候性评价主要围绕抗氧化、光照及紫外辐照等维度展开<sup>[33]</sup>。BUTYLINA等<sup>[34]</sup>考察矿化填料对云杉木粉/PP复合材料耐候性的影响,发现填充体系显著优于未填充体系,300 h即达光稳定态,而对照组50 h已下降23.6%并持续劣化至2 000 h;表面PP层降解减轻,仅填料颗粒裸露,无纤维暴露;木质素保留率提高18.4%;厚度膨胀率降低15.98%~65.16%。研究证实,矿物填料通过构建光屏蔽层与刚性支撑网络协同抑制光老化引发的化学降解与物理形变。

### 3.3 耐水性能

耐水性能是影响WPC加工利用的关键特性,与木塑料制品尺寸和形状的稳定密切相关<sup>[35]</sup>。添加疏水性的矿化物可有效增强复合材料的耐水性。HUUHIL等<sup>[36]</sup>以针叶树木粉和PP为原料,设置未填充、碳酸钙、硅灰石(两种晶型)、皂石及滑石6组试样,系统研究矿物填料对WPC耐水性的影响。经28 d水浸处理后,未填充组吸水率达33%、厚度膨胀率达10%,而矿物填充组吸水率均低于33%,其中皂石/滑石填充试样厚度膨胀率分别降至4.2%和4.6%。经3 w时间湿热循环后,空白组弯曲强度衰减超70%,矿物填充组仅衰减20%,滑石改性体系表现出最优的界面结合稳定性。

### 3.4 阻燃性能

在木塑材料体系中添加阻燃剂是提升木塑材料阻燃性能的主要途径<sup>[37]</sup>,而矿化物有较好的阻燃效果且对复合材料无副作用。

NIKOLAEVA等<sup>[38]</sup>以松木木粉和PP为原料,添加滑石,利用挤出成型工艺制备复合材料。实验表明,40%滑石改性组热释放速率峰值较未添加组的(444.2±10.7) kW/m<sup>2</sup>降低至(314.9±12.4) kW/m<sup>2</sup>,点燃时间由(21.6±1.1) s延长至(38.0±2.2) s,同时总热释放量和烟产量分别下降22%和16%。这证实高含量滑石填充可协同改善WPC的阻燃抑

烟性能。

TERZI 等<sup>[39]</sup>开发含 15% 硼钙石的云杉木粉/HDPE 复合材料,其热释放速率峰值降低 40%,极限氧指数提升 13%,接近商业氢氧化镁体系。同时,该复合材料弯曲强度保持稳定,弹性模量提升 49.4%。该研究证实硼钙石作为生态友好阻燃剂兼具力学性能维持与阻燃效能优化双重优势。

### 3.5 吸声性能

WPC 为多孔性材料,其除了具有饰面作用外,还可以有效吸收声能,以降低房间内的声压级别。添加高孔隙率的矿物填料能够进一步加强复合材料的吸声性能。

KORD 等<sup>[40]</sup>以 WF 和 PP 为原料,加入 OMMT,通过熔融共混制备复合材料。实验发现,OMMT 的引入显著改善材料声阻抗特性。声速传播时间与声能吸收系数随填充量增加分别提升,而传播速率相应降低。这是因为 OMMT 纳米层状结构迫使声波产生之字形传播路径,通过多重反射与散射延长有效传播距离,从而实现声能耗散增强。

## 4 结论

多元矿物可通过优化 WPC 的力学性能、耐候性、阻燃特性及声学性能实现材料的强化,其作为新型环保材料展现出巨大的研究潜力和广阔的应用前景。然而,现有研究在矿物种类开发、矿物与木塑基体间的界面调控、复合材料功能性拓展等方面仍存在体系化不足的问题。建议后续在以下几个方面开展深入研究:(1)突破矿物种类的局限性。当前研究多集中于硅酸盐、碳酸盐等少数矿物,对 6 000 余种天然矿物的多样性开发不足,且仿生矿化技术仍局限于医学领域的含钙化合物体系,木塑基矿化协同增效机制亟待探索。(2)聚焦填料-基体界面增强机制创新。矿化物的引入增加了复合材料多元界面体系的复杂程度,需要优化矿物、木粉纤维与塑料基体间的界面结合特性,深度解析界面结合机理,并强化矿物表面改性技术,通过化学接枝或物理修饰调控界面相互作用。(3)拓展复合材料多功能协同开发路径。现有研究对电磁屏蔽、抗菌催化等特种功能开发不足,应构建复合矿物填料的协同增效体系,同步提升力学与功能特性,提升矿物增强 WPC 的附加值,满足更广阔的应用需求。

### 参考文献

- [1] 林宇,余佳明,韩梦瑶,等. PP/玉米秸秆复合材料制备工艺及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(8): 89-94.
- [2] 胡建鹏,邢东,郭明辉. 植物纤维增强聚乳酸可生物降解复合材料研究动态[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(3): 180-188.
- [3] 孟令宇,李祥瑞,孟黎鹏,等. 矿质生物基木塑复合材料研究进展[J]. 塑料科技, 2022, 50(7): 105-109.
- [4] 李羽佳,王喜明,姚利宏,等. 无机质增强植物纤维高分子复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(1): 15-20.
- [5] 陈业中,龚德君,付学俊,等. 矿粉种类对PBAT/PLA共混物力学与散发性能的影响[J]. 塑料科技, 2025, 53(2): 97-102.
- [6] AKKUS M. Hybrid composite board produced from wood and mineral stone wool fibers[J]. BioResources, 2022, 17(4): 6245-6261.
- [7] ZHAO J Q, SUN J M, LI Y C, et al. Wood-plastic materials with organic-inorganic hybrid phase change thermal storage as novel green energy storage composites for building energy conservation[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(5): 3629-3644.
- [8] LIU R, SUN W J, CAO J Z, et al. Surface properties of *in situ* organo-montmorillonite modified wood flour and the influence on mechanical properties of composites with polypropylene[J]. Applied Surface Science, 2016, 361: 234-241.
- [9] YANG R F, FANG Y Q, FU Y Q, et al. High-performance wood-plastic composites based on self-assembly sandwich-like 2D/2D MMT/Zn<sup>2+</sup>-MEL-PA supramolecular structure: Enhanced mechanical and flame-retardant properties[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024, 12(24): 9101-9112.
- [10] 苏宁. 竹粉/云母/聚丙烯复合材料的制备及其性能研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [11] RAMLI R A, ZAKARIA N Z, RAHMAN U U A, et al. Effect of mineral fillers on mechanical, thermal and morphological properties of kenaf recycled polyethylene wood plastic composite[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(6): 1737-1743.
- [12] GYOUNG G J, LEE S Y, CHUN S J, et al. Physical and mechanical properties of wood-plastic composites hybridized with inorganic fillers [J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(3): 301-309.
- [13] YIGA V A, LUBWAMA M, OLUPOT P W. Thermal and alkali modification of Kaolin for potential utilization as filler material in fiber-reinforced polylactic acid composites[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(20): 11077-11091.
- [14] 李泽宇,王勇,王光硕,等. 硅灰石的表面改性及其应用研究进展[J]. 山东化工, 2024, 53(20): 94-95.
- [15] HUUHILO T, MARTIKKA O, BUTYLINA S, et al. Mineral fillers for wood-plastic composites[J]. Wood Material Science & Engineering, 2010, 5(1): 34-40.
- [16] 宋建强,彭鹤松,王光硕,等. 不同无机粉体在PE木塑复合材料中的应用研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(1): 70-74.
- [17] LI C Q, LIANG C, CHEN Z M, et al. Surface modification of calcium carbonate: A review of theories, methods and applications[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(9): 2589-2611.
- [18] CAI H, YANG K, YI W. Effects of calcium carbonate on preparation and mechanical properties of wood/plastic composite[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(1): 184-190.
- [19] CROITORU C, SPIRCHEZ C, CRISTEA D, et al. Calcium carbonate and wood reinforced hybrid PVC composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(22): 46317.
- [20] ÖZDEMİR F, AYRILMIS N, MENGELOGLU F. Effect of dolomite powder on combustion and technological properties of WPC and neat polypropylene[J]. Journal of the Chilean Chemical Society, 2017, 62

- (4): 3716-3720.
- [21] KESKISAARI A, KÄRKI T. Utilization of industrial wastes from mining and packaging industries in wood-plastic composites[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(4): 1504-1510.
- [22] ZHAO L L, XI F, WANG X R. Mechanical performance of aluminum reinforced wood plastic composites under axial tension: An experimental and numerical investigation[J]. *Journal of Wood Science*, 2021, 67(1): 54.
- [23] LIANG C W, YANG B, WANG D, et al. Investigation of the properties of polystyrene-based wood plastic composites: Effects of the flame retardant loading and magnetic fields[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2019, 39(8): 704-715.
- [24] 胡建鹏, 陈圆, 张琛立, 等. 硅烷化改性对沙柳/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. *塑料*, 2024, 53(2): 118-123.
- [25] MEJIA-GONZALEZ U, NEDELCO D, SALGADO J C, et al. Effect of zeolite mineral on the formulation of a wood-plastic composite[J]. *Materiale Plastice*, 2023, 60(3): 11-18.
- [26] 李歆, 贺茂勇, 李凯, 等. 海泡石和 APP 对 PP/WF 复合材料的阻燃抑烟作用[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(11): 128-133.
- [27] 覃宇奔, 郑云磊, 胡华宇, 等. 造纸污泥/PVC 木塑复合材料的制备工艺[J]. *包装工程*, 2014, 35(3): 10-15.
- [28] LI Q, WANG Y F, ZHANG G, et al. Biomimetic mineralization based on self-assembling peptides[J]. *Chemical Society Reviews*, 2023, 52(5): 1549-1590.
- [29] 邓泽斌, 刘静, 赖升晖, 等. 苯丙氨酸衍生物诱导 SiO<sub>2</sub> 矿化杉木复合材料的制备及性能研究[J]. *材料导报*, 2025, 39(4): 266-273.
- [30] ZHANG M Y, LI H, WANG C, et al. Performance enhancement of the poplar wood composites biomimetic mineralized by CaCO<sub>3</sub>[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(33): 29465-29474.
- [31] ZHANG N, LI S C, XIE C, et al. A biomimetic mineralized wood-based composite material with water-mediated reversible switching between dryness-rigidity and wetness-flexibility[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119839.
- [32] SRIVABUT C, RATANAWILAI T, HIZIROGLU S. Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 450-458.
- [33] 李雪丽, 李航, 解澍啸, 等. 功能性木塑复合材料的研究进展[J]. *天津造纸*, 2024, 46(1): 1-7.
- [34] BUTYLINA S, HYVÄRINEN M, KÄRKI T. Accelerated weathering of wood-polypropylene composites containing minerals[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(11): 2087-2094.
- [35] 殷方宇, 欧阳白, 蒋佳荔, 等. 木材多尺度结构的干缩湿胀研究进展[J]. *林业科学*, 2023, 59(7): 145-154.
- [36] HUUHILO T, MARTIKKA O, BUTYLINA S, et al. Impact of mineral fillers to the moisture resistance of wood-plastic composites[J]. *Baltic Forestry*, 2010, 16(1): 126-131.
- [37] 陈智扬, 吴远华, 邓恒升, 等. 次磷酸铝/三聚氰胺/聚磷酸铵协同阻燃竹粉/聚丙烯木塑复合材料的制备及性能研究[J]. *广州化工*, 2024, 52(21): 12-15.
- [38] NIKOLAEVA M, KÄRKI T. Influence of mineral fillers on the fire retardant properties of wood-polypropylene composites[J]. *Fire and Materials*, 2013, 37(8): 612-620.
- [39] TERZI E, KARTAL S N, PIŞKIN S, et al. Colemanite: A fire retardant candidate for wood plastic composites[J]. *BioResources*, 2017, 13(1): 1491-1509.
- [40] KORD B, TAJIK M. Effect of organomodified montmorillonite on acoustic properties of wood-plastic nanocomposites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2014, 27(6): 731-740.