

园林景观用PE/稻壳粉/MAPE木塑复合材料的制备及性能研究

周巧凤¹, 剧秀梅²

(1. 运城职业技术大学, 山西 运城 044000; 2. 吉林工程职业学院, 吉林 四平 136001)

摘要: 为扩大聚乙烯(PE)基木塑复合材料在园林景观中的应用范围, 文章以PE为基体树脂, 以偶联剂预处理过的稻壳粉为木粉, 以马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)为相容剂, 制备PE/稻壳粉/MAPE的PE基木塑复合材料, 系统评估其力学性能、耐候性、吸水稳定性以及抗菌性。结果表明: 当PE、稻壳粉、MAPE的质量比为30:50:6时, 复合材料具备最优的综合性能, 其拉伸强度、冲击强度和弯曲强度分别为32.0 MPa、6.5 kJ/m²和41.0 MPa。在经历紫外线老化、干湿循环以及冻融循环后, 该复合材料表现出最优的抗老化性能。同时, 尺寸变化率和吸水率达到最低, 分别为3.0%和1.0%, 表现出最佳的尺寸稳定性和抗吸水性能。此外, 该配比下的复合材料具备最好的抗真菌性能, 28 d霉菌覆盖率只有35%。结果表明, 研究制备的PE基木塑复合材料有望成为优秀的园林景观用材料, 尤其是在环境适应方面展现出较大的优势。研究为园林景观材料的设计开发提供了重要借鉴。

关键词: 聚乙烯; 稻壳粉; 马来酸酐接枝聚乙烯; 园林景观

中图分类号: TB332; TQ325.12

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0110-07

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.020

Preparation and Performance Study of PE/Rice Husk Powder/MAPE Wood-plastic Composites for Garden Landscaping

ZHOU Qiaofeng¹, JU Xiumei²

(1. Yuncheng Vocational and Technical University, Yuncheng 044000, China;

2. Jilin Engineering Vocational College, Siping 136001, China)

Abstract: To expand the application scope of polyethylene (PE)-based wood-plastic composites in landscape architecture, PE was used as the matrix resin, rice husk powder pretreated with a coupling agent served as the wood component, and maleic-anhydride-grafted polyethylene (MAPE) was employed as a compatibilizer to prepare PE/rice husk powder/MAPE wood-plastic composites. The mechanical properties, weather resistance, water-absorption stability, and antimicrobial activity of the composites were systematically evaluated. The results show that the composite with the PE, rice husk powder, MAPE mass ratio of 30 : 50 : 6 exhibits the best overall performance, with tensile, impact and flexural strengths of 32.0 MPa, 6.5 kJ/m² and 41.0 MPa, respectively. After UV aging, wet-dry cycling, and freeze-thaw cycling, this formulation displays the highest aging resistance. Meanwhile, the dimensional change ratio and water-absorption rate reach minimum values of 3.0% and 1.0%, indicating optimal dimensional stability and water resistance. In addition, the composite with this formulation shows the best antifungal performance, with only 35% mold coverage after 28 days. The findings demonstrate that the developed PE-based WPC is a promising candidate for landscape applications, particularly owing to its superior environmental adaptability. The study provides valuable guidance for the design and development of landscape materials.

Keywords: PE; Rice husk powder; MAPE; Garden landscaping

收稿日期 Submitted date 2025-07-01; 修回日期 Revised date 2025-08-15; 录用日期 Accepted date 2025-09-30

联系人, 1101648096@qq.com

引用本文: 周巧凤, 剧秀梅. 园林景观用PE/稻壳粉/MAPE木塑复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 110-116.

Citation: ZHOU Q F, JU X M. Preparation and performance study of PE/rice husk powder/MAPE wood-plastic composites for garden landscaping[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 110-116.

在城市建设中,人工园林可为人们提供一个放松心情与休闲娱乐的绿色空间。人工园林要经受时间的考验,满足耐候、抗水、高强度和美观等性能需求^[1]。传统木材在园林建设中常因耐久性不足且大量消耗木材资源而难以满足需求^[2]。基于此,木塑复合材料(WPC)凭借其成本低、外观类似木材、易加工、环境耐受性好及可再利用等优点^[3-4],成为天然木材的理想替代品,近年来在园林建设中受到广泛关注^[5-6]。

徐俊杰等^[7]研究了WPC在园林场地铺装中的应用,发现以杨木纤维和聚丙烯(PP)制备的PP基WPC具有优异的力学性能、高低温尺寸稳定性和防水性。冯莉等^[8]对WPC在园林标识牌中的应用进行了探索,发现木粉对聚乙烯(PE)基WPC的蠕变性影响最大。ZHANG等^[9]利用园林绿化废弃物和聚乳酸(PLA)制备WPC,发现以生物炭为增强材料可以显著改善园林废弃物与PLA的界面相容性,提高复合材料的力学性能。杨凯等^[10]探讨PP/PE/聚氯乙烯(PVC)基WPC在园林围栏中的应用优势,认为其高抗冲击强度和可塑性可满足围栏材料的需求。此外,田先玲等^[11]和叶俊东^[12]分别研究WPC在观景桥和景观亭中的应用,认为其比传统木材具有更优异的耐候性。

在众多WPC中,PE基WPC复合材料兼具PE的耐水、防腐、耐疲劳性能以及木材的高强度,同时具有良好的可塑性和二次加工性,是户外应用最为广泛的一类WPC^[13]。然而,木粉的主要成分纤维素含有大量羟基,表现出强极性,而PE为非极性材料,这导致PE与木粉的界面相容性较差^[14]。研究发现,对木粉进行碱溶液浸泡^[15]或超声微波处理^[16]能够提高其拉伸强度并降低吸水率;添加聚异氰酸酯^[17]、钛酸酯^[18]和铝酸酯^[19]等偶联剂可有效减少纤维素表面的羟基含量,提升WPC的力学性能;而在WPC中直接加入官能化聚烯烃界面相容剂,如马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE),是最常见的界面改性方法^[20-21]。此外,针对WPC易燃^[22]和抗紫外线老化能力较弱^[23]的缺陷,研究人员分别添加阻燃剂和耐候剂以提升材料的综合性能。基于现有的WPC改性方法,本研究将价格低廉的稻壳粉和高密度聚乙烯(HDPE)按一定比例制备WPC,并添加相容剂、阻燃剂和耐候剂,对复合材料进行优化改性,探索这种新型PE基WPC复合材料在园林建设中的应用潜力。

1 实验部分

1.1 主要原料

基体树脂,再生高密度聚乙烯(rHDPE),熔体流动速率(MFR)0.8 g/10 min,中国石化上海石油化工股份有限公司;木粉,80目的稻壳粉,灰分 $\leq 8\%$,安徽丰原生物技术股份有限公司;相容剂,MAPE,接枝率1.5%,美国杜邦公司;阻燃剂,硼酸锌(ZnB), $D_{50}=3\ \mu\text{m}$,杭州朱养心药业有限公司;复合光稳定剂,苯并三唑+受阻胺,质量分数50%,德国巴斯夫公司;硅烷偶联剂, γ -氨基丙基三乙氧基硅烷,KH550,南京曙光化工集团有限公司。

1.2 仪器与设备

高速混合机,SHR-50A,张家港亿利机械有限公司;同向双螺杆挤出机,SHJ-36($L/D=40:1$),南京科亚化工成套装备;注塑机,CJ80M3V,震雄集团;电子万能试验机,Instron 5969,美国英斯特朗公司;摆锤冲击试验机,XJJ-5,承德金建检测仪器有限公司;氙灯老化试验箱,Q-SUN Xe-3-HSC,美国Q-Lab公司。

1.3 样品制备

1.3.1 稻壳粉预处理

首先将原始稻壳粉过80目筛,于80℃热风烘箱中干燥8 h,去除水分,防止挤出过程中挥发起泡。然后将KH550加入乙醇/水混合溶液(乙醇与水的体积比95:5)中,配制质量分数为2%的偶联剂溶液,用乙酸调pH值至4.5,磁力搅拌30 min,完成水解。最后将干燥后的稻壳粉浸入硅烷溶液(固液比1:10),60℃水浴搅拌2 h,浸泡结束后,将稻壳粉过滤,用去离子水冲洗残留药液,再次置于80℃烘箱中干燥至恒重,备用。

1.3.2 PE/稻壳粉/MAPE复合材料的制备

表1为PE/稻壳粉/MAPE复合材料的配方。首先对干料进行预混,按照表1的比例将预处理稻壳粉、rHDPE颗粒、相容剂MAPE、阻燃剂ZnB、耐候剂母粒投入高速混合机中,先以500 r/min转速进行预分散3 min,接着以1200 r/min高速混合7 min并升温至90℃,使MAPE包覆稻壳粉。然后将混合料送入双螺杆挤出机,其中温度设定在180~200℃,螺杆转速约60 r/min,经熔融挤出后水冷拉条,切粒,获得均匀的复合粒料。最后,使用标准注塑机,模温约40℃,注射温度190~200℃,将造粒样料注塑成标准测试样条。

表1 PE/稻壳粉/MAPE复合材料的配方

Tab.1 Formula of PE/rice husk powder/MAPE composites

样品	$W_{\text{rHDPE颗粒}}$	$W_{\text{稻壳粉}}$	$W_{\text{相容剂MAPE}}$	$W_{\text{阻燃剂ZnB}}$	$W_{\text{耐候剂}}$	$W_{\text{偶联剂}}$
W1	56	30	0	10	2	2
W2	46	40	0	10	2	2
W3	36	50	0	10	2	2
W4	26	60	0	10	2	2
W5	34	50	2	10	2	2
W6	32	50	4	10	2	2
W7	30	50	6	10	2	2
W8	28	50	8	10	2	2
W9	26	50	10	10	2	2

1.4 性能测试与表征

力学性能测试:依据GB/T 1040.2—2022,利用电子万能试验机进行拉伸强度、断裂伸长率的测试,其中拉伸速度为5 mm/min,室温(23 ± 2)℃,相对湿度($50\%\pm 5\%$),拉伸测试样条依据GB/T 1040.2—2022制备成哑铃形。依据

GB/T 9341—2008测试弯曲强度和弯曲模量,跨距64 mm,压头速度2 mm/min。使用简支梁冲击试验机,按照GB/T 1043.1—2008测试冲击强度。弯曲测试和冲击测试样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。

耐候性测试:依据GB/T 16422.3—2022,使用紫外加速老化试验箱测试试样的抗紫外线老化性能,包括颜色变化量、质量损失率以及力学性能下降率。采用UVB-313灯管,辐照周期8 h紫外光照+4 h冷凝,温度60 °C,时间500 h。依据GB/T 17657—2022测试干湿循环后的质量变化,其测试步骤为先浸水24 h,然后常温干燥24 h,这作为一个循环,分别记录2、4、8、16次循环后的质量变化率。依据ASTM D6662—22测试试样冻融后的质量损失率,具体步骤为先在-20 °C下冻结4 h,然后20 °C融化4 h,这作为一个循环,分别记录5、10、15、20、25次循环后的质量损失率。

吸水率和尺寸稳定性测试:依据GB/T 17657—2022将样条(40 mm×10 mm×4 mm)于室温下干燥至恒重,浸水24 h后取出,表面擦干称重,测量质量、厚度和长度的变化。

抗真菌(霉变)测试:选取黑曲霉和绳状青霉菌种,依据GB/T 18261—2013,在无菌条件下将试样放置于已接种霉菌的培养基表面,恒温培养28 °C,时间28 d,每7 d记录一次霉菌生长面积。

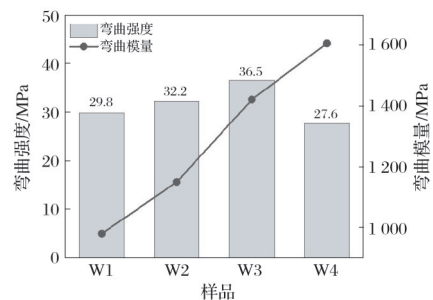
2 结果与讨论

2.1 最佳木塑比分析

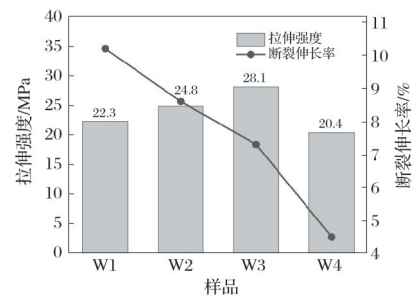
木塑比决定了WPC的基本性能^[24],本研究测试不同PE、稻米壳比例的PE基WPC复合材料的力学性能以及抗紫外线老化能力,评估最优的木塑比。

图1为复合材料的力学性能以及抗紫外线老化能力。从图1a和图1b可以看出,稻壳粉含量显著影响PE基木塑复合材料的力学性能。随着稻壳粉质量分数从30%提高至50%,材料的弯曲强度由29.8 MPa提升至36.5 MPa,拉伸强度由22.3 MPa提升至28.1 MPa,这表明适量稻壳粉能够增强基体的承载能力。这主要得益于稻壳粉在PE基体中均匀分散形成了有效的骨架结构,从而提升了材料的力学支撑效果^[25]。然而,当稻壳粉质量分数进一步提高至60%时,材料性能反而下降,弯曲强度降至27.6 MPa,拉伸强度降至20.4 MPa。这是由于高木粉含量导致基体与纤维界面结合不足,内部缺陷和孔隙增多,容易形成应力集中区域,削弱了材料整体性能^[25]。在刚性方面,材料弯曲模量随着稻壳粉含量的增加而增强,从W1样品的980 MPa提升至W4样品的1 605 MPa,表现出木质填料对复合材料刚性的显著增强作用。然而,刚性提升的同时也带来了韧性下降的趋势,断裂伸长率由W1样品的10.2%逐步下降至W4样品的4.5%。这说明随着木粉含量增加,材料在承受拉伸变形时的延展能力明显降低,脆性增强,不利于材料抵御冲击和变形破坏。综合以上力学性能,稻

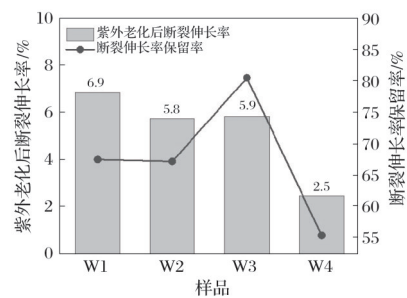
壳粉质量分数为50%的复合材料在力学性能、刚性与韧性之间达到平衡。



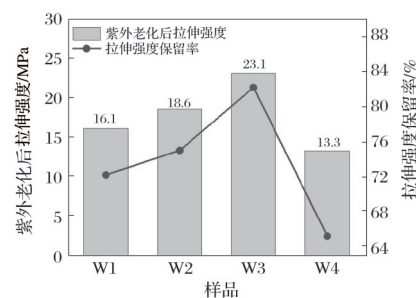
(a) 弯曲强度和弯曲模量



(b) 拉伸强度和断裂伸长率



(c) 紫外老化后断裂伸长率及其保留率



(d) 紫外老化后拉伸强度及其保留率

图1 复合材料的力学性能以及抗紫外线老化能力

Fig.1 Mechanical properties and UV aging resistance of composites

从图1c和图1d可以看出,PE基木塑复合材料在紫外辐射作用下力学性能均有所下降,但不同稻壳粉含量的样品下降幅度存在显著差异。随着稻壳粉质量分数从30%增加至50%,材料的紫外老化后拉伸强度和断裂伸长率保留率呈现上升趋势,W3样品表现最为优异。具体来看,W3样品在经过500 h紫外老化后,拉伸强度由初始的28.1 MPa下降至23.1 MPa,拉伸强度保留率达82.2%,断裂伸长率由7.3%下降至5.9%,断裂伸长率保留率为80.8%。

相比之下,稻壳粉含量较低的W1和W2样品紫外老化后拉伸强度保留率分别为72.2%和75.0%,断裂伸长率保留率均在67%左右。这表明适量稻壳粉的填充有助于改善材料在紫外老化条件下的力学性能保持能力。这可能归因于稻壳粉在基体中的均匀分散能够在一定程度上屏蔽紫外辐射对PE基体的直接破坏,减缓表面微裂纹的产生与扩展。当稻壳粉质量分数进一步增加至60%时,材料耐紫外老化性能显著下降。W4样品紫外老化后拉伸强度仅为13.3 MPa,拉伸强度保留率为65.2%,断裂伸长率下降至2.5%,断裂伸长率保留率仅为55.6%。过高的稻壳粉含量导致界面结合不良,木粉在基体中的分散均匀性下降,内部孔隙和缺陷增多,紫外老化过程中微观裂纹更易萌生并快速扩展,从而加剧力学性能的衰退。上述结果表明,稻壳粉含量对材料的耐候性能有显著影响,50%的稻壳粉添加比例能够在增强基体强度的同时实现最佳的耐紫外老化效果,是园林景观用PE基WPC复合材料较为理想的配比选择。

2.2 相容剂对复合材料性能的影响

2.2.1 力学性能

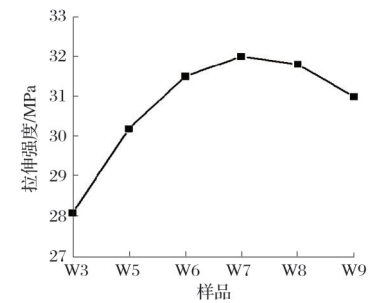
本研究中的复合材料在稻壳粉质量分数50%时具备最均衡的力学性能和抗紫外线老化能力。在此基础上,继续添加相容剂MAPE来优化复合材料的性能。

图2为MAPE含量对复合材料力学性能的影响。从图2可以看出,复合材料的拉伸强度从未添加相容剂时的28.1 MPa(W3)上升至32.0 MPa(W7),表明适量相容剂能够显著改善木粉与PE基体间的界面结合效果,增强材料在拉伸载荷下的承载能力。弯曲强度亦呈相同趋势,从W3样品的36.5 MPa增加至W7样品的41.0 MPa,进一步证明界面相容性的提升促进了木粉骨架结构在复合材料中的作用,使材料在弯曲作用下表现出更强的承载能力。

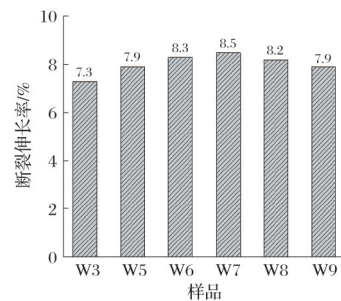
在刚性方面,复合材料的弯曲模量复合材料的1 420 MPa增至W7样品的1 500 MPa,表明界面结合增强不仅有助于强度提升,也在一定程度上提升了材料的刚性和尺寸稳定性。断裂伸长率由W3样品的7.3%提高至W7样品的8.5%,说明相容剂在增强界面黏结力的同时,有效提升了材料的韧性,使复合材料在拉伸变形时具有更好的延展能力,减少脆性断裂的风险。冲击强度的变化趋势与上述性能一致,从W3样品的5.2 kJ/m²提升至W7样品的6.5 kJ/m²,表现出更好的吸收冲击能量能力。这表明相容剂优化界面结合后,材料在受冲击载荷时能够更好地缓解应力集中,延缓裂纹萌生和扩展,从而提升冲击韧性。总体来看,适量的相容剂(W7样品的MAPE质量分数为6%)能够在提升强度、刚性和韧性的同时实现性能的协调优化,而当相容剂含量继续增加(W8和W9样品),各项性能略有下降,可能是过量的相容剂导致基体与增强相的过度润湿或分散均匀性降低,从而影响性能的进一步提升。

综上所述,6%相容剂添加质量分数下的复合材料在

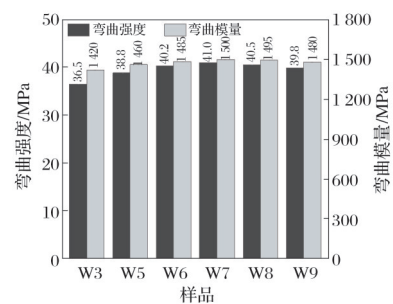
拉伸、弯曲及冲击性能等方面表现最佳,适用于园林景观中对力学性能要求较高的应用场景。



(a) 拉伸强度



(b) 断裂伸长率



(c) 弯曲强度和弯曲模量



(d) 冲击强度

图2 MAPE含量对复合材料力学性能的影响
Fig.2 Effect of MAPE content on mechanical properties of composites

2.2.2 耐候性能

园林景观用木塑基复合材料需要在各种气候下保持稳定,尤其是在持续紫外线暴露和干湿交替后的稳定性十分必要。此外,北方严寒地区的冻融循环也是园林景观材料需要经历的必要的环境考验。本研究测试了PE基WPC复合材料在经历紫外线老化、干湿循环以及冻融循环后的性能保持程度。

图3为MAPE含量对复合材料抗紫外线老化能力的影响。从图3可以看出,各样品的颜色变化量、质量损失率及力学性能下降幅度均随相容剂含量的变化呈现出一定规律。未添加相容剂的W3样品在紫外线下暴露500h后颜色变化最为明显,颜色变化量高达6.2,质量损失率为1.8%,拉伸强度和弯曲强度分别下降18%和17%,表明界面结合不良导致紫外老化过程中表层降解与微裂纹扩展较为严重。随着相容剂含量的增加,材料各项耐候性能显著提升,W5和W6样品的颜色变化量分别降至5.4和4.9,质量损失率分别降低至1.5%和1.3%,拉伸与弯曲强度下降率同步减小。这反映出界面相容性的增强有效抑制了材料表层降解和内部微观缺陷的发展^[26]。特别是在相容剂质量分数为6%的W7样品中,颜色变化量、质量损失率和拉伸强度和弯曲强度下降率均达到最优水平,分别仅为4.5、1.1%、10.0%和9.0%,说明其界面致密性和抗紫外老化能力最为突出。当相容剂质量分数继续增至8%和10%时,材料性能的进一步改善趋于平缓,甚至颜色变化量略有回升,这可能与相容剂添加过量导致的界面局部润湿过度或相容剂分布不均有关。总体来看,6%相容剂添加质量分数下的复合材料在紫外辐射环境下具备最优的耐候性能,能够有效延缓颜色变化、降低质量损失率,并保持较高的力学性能。

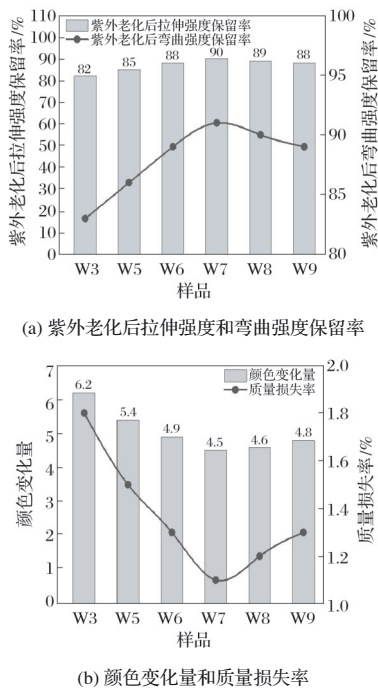


图3 MAPE含量对复合材料抗紫外线老化能力的影响

Fig.3 Effect of MAPE content on UV aging resistance of composites

图4为MAPE含量对复合材料干湿循环后质量变化率的影响。从图4可以看出,复合材料在经历多次循环后,其质量变化率随循环次数增加而逐步升高,各样品之间的性能差异主要体现在相容剂含量对材料耐湿稳定性的影响。未添加相容剂的W3样品在2、4、8、16次循环

后的质量变化率分别为0.8%、1.5%、2.5%和4.0%,表现出较高的吸湿性和质量波动,这与其界面结合较差、易于水分渗入和滞留有关。随着相容剂的引入,复合材料的质量变化率显著降低,W5和W6样品在16次循环后的质量变化率分别下降至3.2%和2.9%,说明界面结合增强抑制了水分在材料内部的迁移和累积效应。相容剂添加质量分数为6%的W7样品耐湿性能最优,在各阶段质量变化率均为最低(2次:0.4%;4次:0.9%;8次:1.6%;16次:2.5%),表明此时复合材料内部结构致密性最佳,有效阻隔了水分对材料性能的侵蚀。当相容剂质量分数进一步增加至8%和10%(W8和W9)时,质量变化率未进一步明显降低,且在高循环次数时略有回升,这可能与相容剂过量导致局部界面不均匀或界面润湿过度有关。综合来看,6%相容剂质量分数下的材料在干湿交替环境中表现出最优的尺寸和质量稳定性,能够满足园林景观等长期户外湿热环境的应用需求。

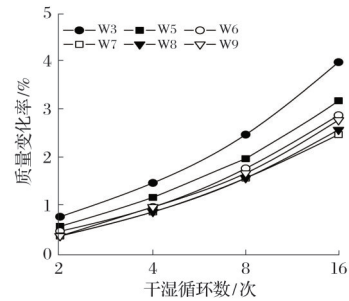


图4 MAPE含量对复合材料干湿循环后质量变化率的影响
Fig.4 Effect of MAPE content on mass change rate of composites after dry-wet cycles

图5为MAPE含量对复合材料冻融循环后质量损失率的影响。从图5可以看出,随着循环次数的增加,复合材料的质量损失率逐步升高,相容剂含量的变化对材料的冻融稳定性产生显著影响。未添加相容剂的W3样品在5、10、15、20、25次冻融循环后的质量损失率分别达到0.9%、1.8%、2.7%、3.6%和4.8%,显示出较明显的质量劣化趋势,表明其界面结合弱,水分渗透和冻结膨胀导致的结构破坏较为严重。随着相容剂含量的增加,材料的抗冻融能力明显提升,W5和W6样品在25次循环后的质量损失率分别降低至4.0%和3.6%。当相容剂添加质量分数达到6%时,材料表现出最佳的冻融稳定性,各循环阶段质量损失率均为最低(5次:0.5%;10次:1.2%;15次:1.8%;20次:2.5%;25次:3.4%),说明此时材料内部结构致密,界面结合良好,能够有效抑制冻融应力造成的微裂纹扩展和质量流失。相容剂质量分数进一步增加至8%和10%时(W8和W9样品),性能提升效果趋于平缓,甚至在高循环次数下质量损失率略高于W7样品,这可能与相容剂过量导致局部聚集或界面不均匀有关。

综上所述,6%相容剂质量分数的配方在冻融环境下综合性能最优,具有更高的尺寸和质量稳定性,能够用于

需要长期耐受冻融交替作用的园林景观构件。

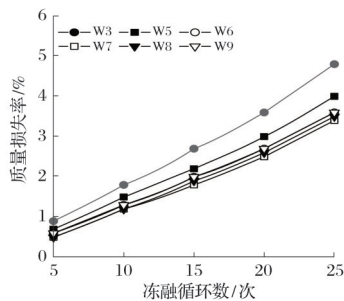


图5 MAPE含量对复合材料冻融循环后质量损失率的影响

Fig.5 Effect of MAPE content on mass loss rate of composites after freeze-thaw cycles

2.2.3 吸水稳定性

园林景观用PE基WPC复合材料长期暴露在自然条件下不可避免地会接触水分和湿气,如果材料吸水率高或尺寸稳定性差,易导致结构膨胀、翘曲、开裂,进而影响使用寿命和美观^[27]。因此,本研究系统测试吸水率和尺寸变化率,直观评估相容剂对材料界面结合质量和防水防潮能力的改善效果。

图6为MAPE含量对复合材料吸水稳定性的影响。从图6可以看出,未添加相容剂的W3样品24 h吸水率为4.5%,尺寸变化率为1.8%,反映出复合材料界面结合欠佳,水分较易沿木粉和基体间的微缺陷渗透,引起材料吸水膨胀和尺寸不稳定。随着相容剂含量的增加,材料的吸水率和尺寸变化率逐步降低。W5和W6样品的吸水率分别降低至3.6%和3.2%,尺寸变化率下降至1.4%和1.2%,说明相容剂的引入有效改善了木粉与PE基体之间的界面结合质量,减少了界面间的微孔隙和水分渗入通道。尤其是在相容剂质量分数为6%时(W7样品),复合材料的吸水率降至最低值3.0%,尺寸变化率降至1.0%,表现出最佳的尺寸稳定性和抗吸水性能。这表明适量的相容剂不仅提升了材料的力学强度,同时通过优化界面结构显著抑制了吸水膨胀效应。当相容剂质量分数进一步增加至8%和10%时,吸水率和尺寸变化率未继续显著降低(W8样品吸水率为3.1%,尺寸变化率为1.1%;W9样品吸水率为3.3%,尺寸变化率为1.2%),说明相容剂添加过量后,其对界面结构的优化作用趋于饱和,甚至可能因局部过润湿或相容剂分布不均而对界面密实性产生不利影响。

综上所述,6%相容剂质量分数下的复合材料吸水率和尺寸稳定性最佳,能够有效应对园林景观等复杂户外环境中因湿度变化导致的尺寸变形问题。

2.2.4 抗霉菌性能

园林景观用PE基WPC复合材料如果长期暴露在潮湿、高温或雨淋环境下,极易成为霉菌等微生物滋生的温床。稻壳粉含有纤维素、半纤维素和木质素等成分,这些都是霉菌潜在的营养来源。一旦材料表面或内部受到霉菌侵染,不仅会导致外观变色、污染和美观性下降,还可能

加速材料的老化、脆化,甚至影响其力学性能和使用寿命^[28]。本研究通过抗真菌测试系统评估不同相容剂对抑制霉菌生长的效果。

图7为MAPE含量对复合材料霉菌覆盖率的影响。从图7可以看出,各样品在恒温高湿环境下均存在不同程度的霉菌生长。未添加相容剂的W3样品表现出较差的防霉性能,7 d时霉菌覆盖面积已达12%,28 d时达到75%,表明其界面结构疏松、易为真菌孢子侵入。添加相容剂后,霉菌生长明显受抑。W5和W6样品的28 d霉菌覆盖率分别降至60%和50%,其中W6样品性能改善更为显著。这主要归因于相容剂的引入提高了基体与木粉之间的界面结合,减少了微孔隙的存在,从而削弱了霉菌生长所需的水分和养分滞留。W7样品表现最优,28 d霉菌面积仅为35%,且在各阶段测试中霉菌增长速率最低,表明该配方材料内部结构更致密,防霉能力更强。W8和W9样品的防霉性能与W7样品相近,28 d霉菌面积分别为34%和36%,但进一步提高相容剂含量未带来性能上的额外改善,可能是过量的相容剂引发界面饱和或局部不均,从而限制了防霉效能的提升。综合分析,添加质量分数6%相容剂的配方在抗真菌性能方面表现最佳,能够适用于高湿、易霉变的园林景观应用环境。

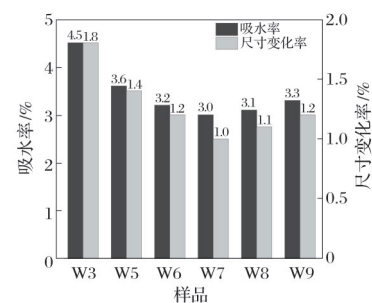


图6 MAPE含量对复合材料吸水稳定性的影响

Fig.6 Effect of MAPE content on water absorption stability of composites

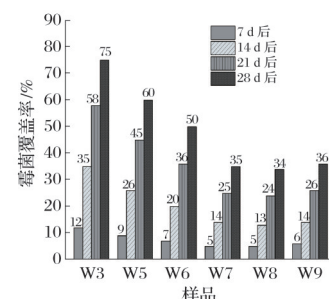


图7 MAPE含量对复合材料霉菌覆盖率的影响

Fig.7 Effect of MAPE content on mold coverage of composites

3 结论

本文提出一种新型的PE基木塑复合材料制备方案,将偶联剂预处理过的稻壳粉与PE树脂基体混杂,并添加MAPE作为相容剂,进一步优化木塑界面相容性,构建不同配比的PE/稻壳粉/MAPE木塑复合材料。对其进行系

统测试发现,当PE、稻壳粉、MAPE的质量比为30:50:6时,复合材料表现出最优的力学强度和耐候性,在经历紫外老化、干湿循环以及冻融循环后依旧保持较好的稳定性,同时具备最佳的吸水稳定性和最强的抗真菌性能。综上所述,本研究制备的PE/稻壳粉/MAPE木塑复合材料在园林景观材领域具有较大的应用潜力。

参考文献

- [1] 朱皓. 浅谈绿色建筑技术与技术在风景园林设计中的应用[J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(12): 182-184.
- [2] 竺云彪. 现代园林设计建设中木塑复合材料的应用研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(3): 80-82.
- [3] MITALOVÁ Z, MITAL D, BERLADIR K. A concise review of the components and properties of wood-plastic composites[J]. Polymers, 2024, 16(11): 1556.
- [4] 孙庆辉. 木塑复合材料在园林建设中的应用综述[J]. 山西建筑, 2023, 49(4): 169-171.
- [5] 孙小虎, 刘毫, 周子惠. 建筑装饰装修工程中的木塑复合材料及其应用[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(5): 143-145.
- [6] SHIH Y F, CHANG C W, HSU T H, et al. Application of sustainable wood-plastic composites in energy-efficient construction[J]. Buildings, 2024, 14(4): 958.
- [7] 徐俊杰, 郝笑龙, 周海洋, 等. 超高填充聚丙烯基木塑复合材料高低温性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 4106-4122.
- [8] 冯莉, 赵春雁. 聚乙烯基木塑复合材料蠕变影响因素分析[J]. 中国塑料, 2018, 32(4): 40-44.
- [9] ZHANG R Y, PENG H X, LI S H, et al. Effect of biochar content and particle size on mechanical and water absorption properties of landscaping waste/polylactic acid composites[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 223: 120163.
- [10] 杨凯, 曾国才. 探讨木塑复合材料在园林景观中的应用[J]. 绿色环保建材, 2019(2): 13.
- [11] 田先玲, 李大纲, 蒋永涛, 等. 不同加载方式下木塑复合材料蠕变性能的研究[J]. 塑料工业, 2008(10): 43-46.
- [12] 叶俊东. 木塑材料在现代建筑景观设计中的应用[J]. 绿色科技, 2018(19): 20-21.
- [13] BETLEJ I, BARLAK M, BORYSIK S, et al. Structural properties of PE-based wood-plastic composites depending on the share of lignocellulosic particles[J]. Crystals, 2025, 15(2): 196.
- [14] CHEN K, XIE Z X, CHU L Y, et al. Improving interfacial bonding strength between epoxy and PE-based wood plastic composites by micro-rievting[J]. Composites Science and Technology, 2024, 248: 110434.
- [15] MABUTO B, HLANGOTHI S P. Wood fiber alkalization effect on the thermal stability of meranti wood flour: A modification of the conventional method[J]. Wood Science and Technology, 2024, 58(1): 87-107.
- [16] FARSI M, MAASHI S F, EBADI M, et al. Effects of functionalized multi-walled carbon nanotubes on the performance of wood-plastic composites[J]. Fibers and Polymers, 2024, 25(1): 309-316.
- [17] SAMYN P. Challenges for wood-plastic composites: Increasing wood content and internal compatibility[J]. Environmental and Earth Sciences Proceedings, 2024, 31(1): 1.
- [18] SHARAFI Z S, FATHI B. Organo-titanates and zirconates coupling agents in polymer composites: A review[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2025, 57(6): 1072-1106.
- [19] 李凯夫, 戴东花, 谢雪甜, 等. 偶联剂对木塑复合材料界面相容性的影响[J]. 林产工业, 2005(3): 24-26.
- [20] YANG F, NIE M, CHEN N, et al. Amide wax-assisted interfacial compatibilization of maleic anhydride-grafted polyethylene for high-performance wood-plastic composites[J]. Wood Material Science & Engineering, 2025, 20(5): 959-967.
- [21] BAIG M, ALMESHARI B, AABID A, et al. The effect of maleic anhydride grafted polypropylene addition on the degradation in the mechanical properties of the PP/wood composites[J]. Heliyon, 2024, 10(9): e30510.
- [22] 陈航, 方海, 霍瑞丽. 木塑复合材料紫外耐老化性能研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 378-385.
- [23] 段芳勇, 于杰, 秦军, 等. HDPE/APP阻燃型复合材料性能的研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(2): 85-88.
- [24] 刘明月. 硅藻土粒径和含量对新型绿色环保PVC木塑复合材料性能的影响[J]. 橡塑资源利用, 2024(6): 25-30.
- [25] 刘俊, 路琴, 祁彦君, 等. 稻壳纤维/聚氯乙烯木塑复合材料性能研究[J]. 农业开发与装备, 2018(6): 95-98.
- [26] 张晓敏, 王欣, 胡建鹏. 木塑复合材料老化机理及耐老化性能提升研究进展[J]. 世界林业研究, 2023(4): 64-69.
- [27] RADOOR S, KARAYIL J, SHIVANNA J M, et al. Water absorption and swelling behaviour of wood plastic composites[M]//Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications. Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [28] 张程理, 杨万丽, 陈林, 等. 多酸抗菌剂接枝木塑材料表面抑菌性研究[J]. 广州化工, 2019, 47(13): 90-93.