

聚乙烯/聚酯纤维复合材料制备及其抗老化性能研究

张腾腾, 曹美玉

(永城职业学院, 河南 永城 476600)

摘要: 聚乙烯(PE)材料在存储和使用过程中容易受到光、热、氧、微生物以及酸碱环境等因素的影响而发生一定程度的老化,引起材料力学性能的下降。采用聚酯纤维(PF)作为改性材料,将其引入PE制备PE/PF复合材料。结果表明:加入质量分数15% PF的PE/PF-3复合材料的拉伸强度、抗压强度和断裂伸长率达到最大值,分别可达23.8 MPa、18.7 MPa和388%。PE/PF-3具有最佳的热稳定性和较好的燃烧性能,PE/PF-3样品表现出最低的总热释放量以及热释放速率,分别为14.3 kJ/m²和220.1 kW/m²。此外,相比纯PE,加入PF后复合材料的反射率有所上升,PE/PF-3反射率最大,为92.5%,表明其具有良好的抗光热老化性能。抗强酸老化以及抗微生物老化实验表明,PE/PF-3的力学性能、质量损失率以及抗菌率均可达到最佳,体现出优异的抗老化性能。将PF与PE复合可以有效提高PE的力学性能以及抗老化性能,使其更好地应用于球网材料等户外体育器材领域。

关键词: 聚乙烯;聚酯纤维;抗老化性能;力学性能;拉伸强度;球网张力

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0062-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.012

Preparation of Polyethylene/Polyester Fiber Composites and Research on Their Anti-aging Properties

ZHANG Tengting, CAO Meiyu

(Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China)

Abstract: Polyethylene (PE) readily undergoes aging during storage and service because of light, heat, oxygen, microorganisms, and acidic or alkaline environments, leading to a pronounced drop in mechanical properties. Polyester fiber (PF) was therefore introduced as a modifier to prepare PE/PF composites. The results show that the PE/PF-3 composite containing 15% mass fraction of PF achieves the highest tensile strength (23.8 MPa), compressive strength (18.7 MPa) and elongation at break (388%). PE/PF-3 also exhibits the best thermal stability and combustion behavior, giving the lowest total heat release (14.3 kJ/m²) and peak heat-release rate (220.1 kW/m²). Moreover, compared with pure PE, composites with PF raise the reflectance, PE/PF-3 reaches a maximum of 92.5%, indicating improved resistance to photo-thermal aging. Accelerated strong-acid and microbial-aging tests further demonstrate that PE/PF-3 retains the best mechanical properties, the lowest mass loss and the highest antibacterial rate, underscoring its superior overall aging resistance. Compounding PF with PE can effectively enhance the mechanical properties and aging resistance of PE, enabling its broader application in outdoor sports equipment such as ball-net materials.

Keywords: Polyethylene; Polyester fiber; Anti-aging properties; Mechanical properties; Tensile strength; ball-net tension

聚乙烯(PE)是一种热塑性树脂,具有优良的力学性能以及耐久性能,被广泛应用于球网制造、运动器材以及日用品等领域^[1-2]。然而,PE材料在光热、微生物等环境下容

易造成材料内化学键断裂,从而导致力学性能下降;同时,其抗老化性能较差,可导致PE球网张力降低,发生断裂,影响其实际应用。因此,需要添加一定的改性材料用以改

收稿日期 Submitted date 2025-03-02; 修回日期 Revised date 2025-04-06; 录用日期 Accepted date 2025-05-10

联系人, 395781944@qq.com

引用本文: 张腾腾, 曹美玉. 聚乙烯/聚酯纤维复合材料制备及其抗老化性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 62-67.

Citation: ZHANG T T, CAO M Y. Preparation of polyethylene/polyester fiber composites and research on their anti-aging properties[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 62-67.

善其抗老化性能,拓宽其应用领域^[3-4]。

目前,研究人员探究许多改性策略来提高PE材料的抗老化性能,如在PE材料中添加抗氧化剂或者光稳定剂等^[5-6]。苏秉尧等^[7]为改善防霉网的抗老化性能,将纳米SiO₂粒子包覆在PE防霉网表面,研究改性后防霉网的抗紫外老化特性。结果表明:材料在经120 h紫外老化的防霉网的拉伸断裂强力达563 N;经240 h紫外老化后,防霉网内部纤维结构完好,其拉伸断裂强力仍保持老化前的83.6%,并展现出良好的抗冲击回弹性,可抵御冰雹冲击。蒋晨廷^[8]将PE与木质素混合制备复合塑料泡沫,并对其物理性能和阻燃性能等进行研究。结果表明:PE-20表现出最佳的物理性能以及阻燃性能,其弯曲强度、冲击强度、维卡软化温度、热释放速率峰值、平均燃烧时间以及烟密度分别为48.6 MPa、15.62 kJ/m²、86 °C、215 kW/m²、16 s和52%。同时,PE-20在腐蚀环境和抗老化处理下仍能保持较高的弯曲强度,因此可以有效应用于建筑材料中。

聚酯纤维(PF)是一种高强度、高模量以及耐老化的纤维材料^[9],由于PF的分子结构中含有较少的极性基团,纤维表面惰性比较强,不易与聚合物聚合,从而导致PE与PF的结合性低,影响复合材料的各项性能。目前对于利用PF对PE材料进行改性的研究较少,但已有研究表明经过预处理的PF能够显著增强其与聚合物的复合能力,且与纯聚合物进行复合可以显著提高其力学性能、阻燃性能以及抗老化能力^[10-11]。因此,本研究先对PF进行预处理,后将其作为改性材料制备PE/PF复合材料,并对复合材料的力学性能、阻燃性能以及抗老化性能进行研究。

1 实验部分

1.1 主要原料

PF, Dacron138, 美国杜邦公司; PE, 工业级, 沧州第三塑料有限公司; 抗氧化剂, 1010, 阿拉丁试剂(上海)有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机, Q600, 美国TA仪器公司; 万能试验机, WDW-500E, 时代试金(山东)科学仪器有限公司; 紫外老化箱, QUV/SPRAY, 美国Q-LAB公司; 红外辐射温度计, RLK-605, 合肥中科红外精密仪器有限公司; 热重分析仪(TG), DISCOVERY TGA, 美国TA仪器公司; 天平, EL202, 瑞士梅特勒托利多仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 原料预处理

将PF置于250 °C马弗炉内在氮气环境下进行预处理,除去材料表面的油剂以及其他杂质,以免对材料制备造成影响。

1.3.2 PE/PF复合材料的制备

表1为PE/PF复合材料的配方。根据表1配方将PE、PF以及抗氧化剂搅拌混合均匀,然后用双螺杆挤出机进行挤出。挤出设置条件:温度300 °C,工作时间18 s,螺杆转速

80 r/min,各物料在双螺杆挤出机的停留时间20 min。样品在室温干燥24 h,得到PE/PF复合材料。

表1 PE/PF复合材料的配方

Tab.1 Formula of PE/PF composites 单位:%

样品	W_{PE}	W_{PF}	$W_{\text{抗氧化剂1010}}$
PE/PF-0	90	0	10
PE/PF-1	85	5	10
PE/PF-2	80	10	10
PE/PF-3	75	15	10
PE/PF-4	70	20	10

1.4 性能测试与表征

力学性能测试:采用万能试验机进行力学性能测试,试样尺寸为200 mm×100 mm×4 mm。拉伸性能加载速率为2 mm/min,测试标准为ISO 527—1:2019。抗压强度加载速率为15 mm/min,测试标准为GB/T 1447—2005。断裂伸长率加载速率为10 mm/min,测试标准为GB/T 3923.1—2013。

阻燃性能测试:试样尺寸为200 mm×200 mm×5 mm,测试标准为GB/T 2408—2021。

质量损失率测试:采用热重分析仪进行测试,测试标准为GB/T 1634.1—2019。

反射率测试:利用红外辐射温度计进行反射率测试,试样尺寸为100 mm×100 mm×2 mm,测试标准为GB/T 18319—2019。

光老化测试:将试样放置于紫外老化箱中,温度设置为80 °C,老化96 h后将试样取出,测试其各项力学性能。

酸老化测试:试样放置于质量分数为5%的浓盐酸中,静置24 h后将试样取出,测试其各项力学性能。

微生物老化测试:将试样放置于霉菌培养皿中,静置24 h后取出,测试其抗菌率以及质量损失率。

2 结果与讨论

球网暴露在户外环境中,必须具备一定的辐射降温效果,减少辐射带来的自身损害^[12-13]。因此,测定不同PE/PF复合材料的在模拟太阳光下的反射率,图1为测试结果。从图1可以看出,纯PE材料(PE/PF-0)的反射率最低,仅为80.8%。和PE/PF-0材料相比,加入PF后,复合材料的反射率有一定程度的上升。可以发现,PE/PF-3复合材料的反射率最高,达到92.5%。这说明PF具有较强的耐光性,加入PE材料中能够增强材料的反射能力,可以减缓外界辐射带来的自身损害,有利于实际应用^[14-15]。

为了验证PF的加入对复合材料力学性能的影响,测试不同PE/PF复合材料的拉伸强度、抗压强度及断裂伸长率,图2为测试结果。从图2可以看出,复合材料的力学性能,即拉伸强度、抗压强度和断裂伸长率均得到了一定程度的提升。随着PF含量的增加,复合材料所测试的力学性能呈先增强后减弱的趋势。进一步可以发

现,PE/PF-3的拉伸强度、抗压强度和断裂伸长率均达到最大值,拉伸强度为23.8 MPa,抗压强度为18.7 MPa,断裂伸长率可达388%,分别为原始PE材料的1.43、1.53、1.19倍。这是由于PF具有断裂强度和弹性模量高的优点^[16-17],这些测试结果也进一步证明了PF的加入能够显著增强PE材料的力学性能,使复合材料能够更好地用作球网材料^[18]。

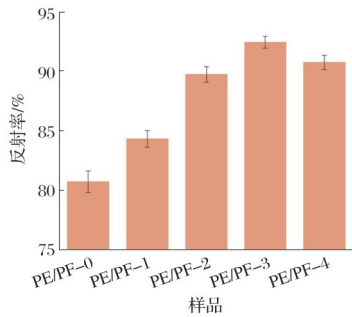
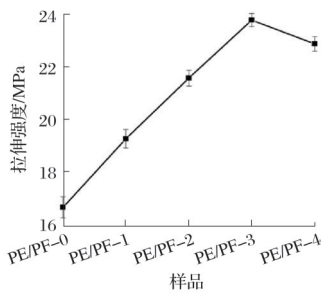
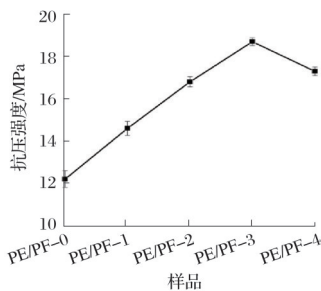


图1 不同PE/PF复合材料的反射率

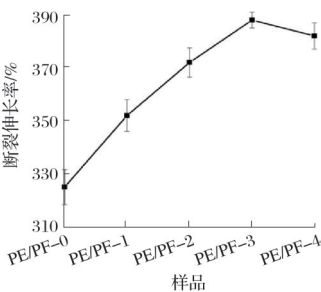
Fig.1 Reflectance of different PE/PF composites



(a) 拉伸强度



(b) 抗压强度



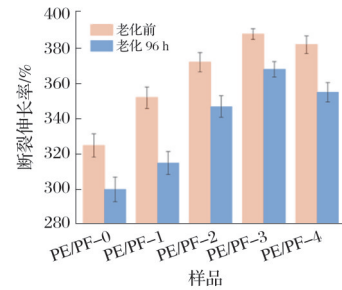
(c) 断裂伸长率

图2 不同PE/PF复合材料的拉伸强度、抗压强度及断裂伸长率

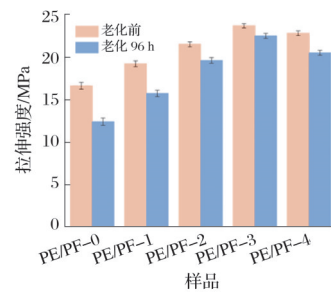
Fig.2 Tensile strength, compressive strength and elongation at break of different PE/PF composites

大量研究表明,太阳光中较短波长的紫外线具有较强的能量,太阳光的照射会导致PE材料的分子链发生断

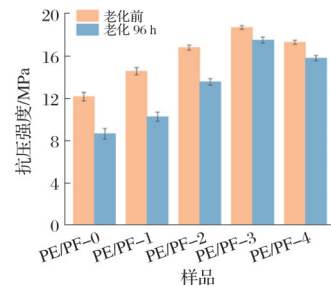
裂^[19-20]。当PE材料暴露在空气中时,氧气以及湿热的环境会造成材料发生热氧老化,加速材料的老化与降解^[21-22]。因此,需要对PE材料进行改性才能增强其抗老化性能并作为球网使用。为了评价复合材料的抗老化性能,进行了不同的老化实验。首先,将复合材料放置于光热老化箱中,进行老化96 h,重新测试其力学性能,并与老化前的性能进行对比。图3为不同PP/PF复合材料老化前后的断裂伸长率、拉伸强度、抗压强度和反射率。



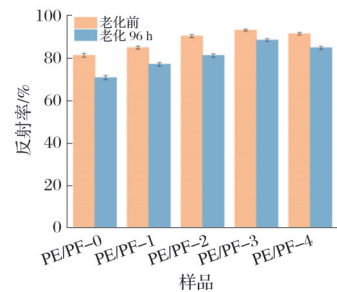
(a) 断裂伸长率



(b) 拉伸强度



(c) 抗压强度



(d) 反射率对比

图3 不同PE/PF复合材料老化前后的断裂伸长率、

拉伸强度、抗压强度和反射率

Fig.3 Elongation at break, tensile strength, compressive strength and reflectance of different PE/PF composites before and after aging

从图 3a~图 3c 可以看出,所有的复合材料在经过 96 h 的老化之后,其力学性能均发生了不同程度的下降。复合材料在经过 96 h 的老化后,材料的力学性能仍然随着 PF 的增加而呈先增大后减小的趋势。老化后,PE/PF-3 复合材料的断裂伸长率仍然最大,为 368%。而老化后的 PE/PF-3 复合材料的拉伸强度和抗压强度分别为 22.6 MPa 和 17.5 MPa。添加质量分数 15% PF 的复合材料力学性能下降幅度最小,这说明通过调控 PF 的含量可以使复合材料具有良好的力学稳定性,从而实现抗光热老化性能的提升。从图 3d 可以看出,老化前,所有的复合材料在老化 96 h 之后,反射率均存在一定程度的下降,但 PE/PF-3 复合材料的下降程度最低,仅为 4.9%,而未加入 PF 的 PP/PF-0 反射率下降程度最高,为 12.6%。因此,结合以上测试分析,添加质量分数 15% 的 PF 能够增强 PE/PF 复合材料的抗老化性能。

图 4 为不同 PE/PF 复合材料的 TG 曲线。从图 4 可以看出,对比 PP/PF-0,添加 PF 的复合材料的热分解温度较高。其中 PP/PF-3 材料的热分解温度最高,能够达到 455 °C 左右,比 PE 材料升高 55 °C,这表明 PF 可以有效改善 PE 材料的热稳定性。但是,当 PF 添加量进一步增大时,材料的热分解温度下降,这是因为 PF 与 PE 材料的结合变弱^[23]。从图 4 还可以看出,添加 PF 的 PP/PF 复合材料最终的质量保留率均比 PE 材料高,这说明 PF 的加入能够提高 PP/PF 复合材料的热稳定性。

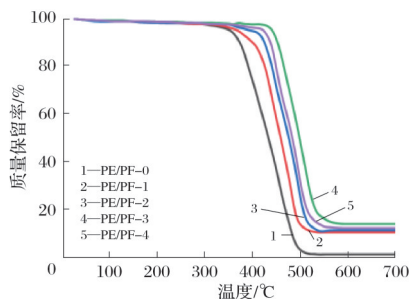
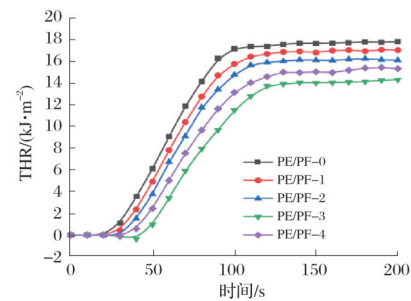


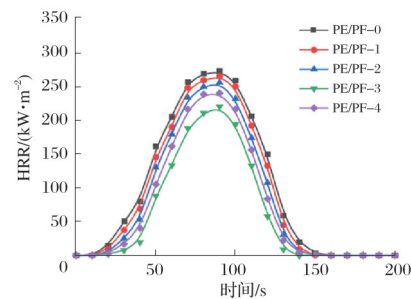
图 4 不同 PE/PF 复合材料的 TG 曲线
Fig.4 TG curves of different PE/PF composites

对复合材料的燃烧性能进行评估,图 5 为不同 PE/PF 复合材料的总热释放量(THR)和热释放速率(HRR)。从图 5 可以看出,随着 PF 添加量的增大,PE/PF 复合材料的 HRR 和 THR 均低于 PE 样品。主要是由于 PF 具有优异的耐高温性能,其在燃烧过程中能够吸收热量,使 PE/PF 复合材料的着火速率变慢,PE/PF 复合材料的 HRR 和 THR 有效降低,从而发挥阻燃作用。其中,PP/PF-3 样品表现出最低的 THR 以及 HRR,分别为 14.3 kJ/m² 和 220.1 kW/m²。从图 5 还可以看出,添加 PF 的 PE/PF 复合材料在测试中达到峰值的时间均有一定的延后,这也进一步表明 PF 的加入能够降低燃烧时的剧烈程度,提高材料的阻燃性能。而当 PF 的添加量进一步增加时,复合材料内部结合不均,燃烧过程中材料本身不稳定,从而使 PE/PF 复合材料的 THR

和 HRR 增大^[24]。



(a) THR



(b) HRR

图 5 不同 PE/PF 复合材料的 THR 和 HRR
Fig.5 THR and HRR of different PE/PF composites

为了进一步验证复合材料的抗酸老化性能,将材料置于强酸环境中进行抗酸侵蚀老化性能测试。图 6 为不同 PE/PF 复合材料经过强酸侵蚀前后的拉伸强度和抗压强度对比。从图 6 可以看出,经过强酸侵蚀实验之后,所有材料的拉伸强度和抗压强度均有所下降,但下降程度不同。从图 6a 可以发现,PP/PF-3 的拉伸性能在强酸侵蚀之后能够达到 21.8 MPa,下降程度仅为 8.4%。而 PE(PP/PF-0)材料的下降程度显著,为 23.4%。从图 6b 可以看出,当 PF 添加质量分数为 15% 时,即 PP/PF-3 复合材料的抗压强度最高,为 16.9 MPa。而未掺杂 PF 的 PE 材料抗压性能最低,为 6.6 MPa。以上实验结果表明,PE 材料长期处在强酸环境中力学性能会下降,这可能是其内部化学键的断裂导致的^[25-26]。而 PF 具有出色的耐酸碱性^[27],将适量的 PF 加入 PE 材料之后能够增强 PP/PF 复合材料耐酸侵蚀老化的能力,从而使其更好地适用于球网材料。

考虑到户外材料的实用性,对复合材料进行了抗微生物老化测试^[27-28]。将材料放置于菌群环境中,测试其质量损失率以及抗菌率。图 7 为不同 PE/PF 复合材料经过霉菌侵蚀后的质量损失率。从图 7 可以看出,经过霉菌侵蚀之后,材料质量有所下降。其中,未添加 PF 的 PE 材料质量损失率最高,为 5.4%。但随着 PF 含量的增加,在霉菌侵蚀后,复合材料的质量损失率呈现先下降后上升的趋势,在添加质量分数为 15% 时,PP/PF-3 达到最低的质量损失率,为 2.5%。

表 2 为不同 PE/PF 复合材料的抗菌效果。从表 2 可以发现,材料抗菌率的变化趋势与霉菌侵蚀质量损失率的趋

势一致。PP/PF-3的抗菌率最优,高达99.5%。从抗菌腐蚀的测试可以发现,PF具有很好的耐微生物腐蚀性,不容易被蛀虫或者霉菌侵蚀,是一种具备良好性能的纤维材料^[29]。因此,在PF材料添加质量分数为15%时,PE/PF-3复合材料能够达到最佳的抗菌腐蚀老化的效果。将其运用于球网材料时,也能达到最佳的抗老化效果。

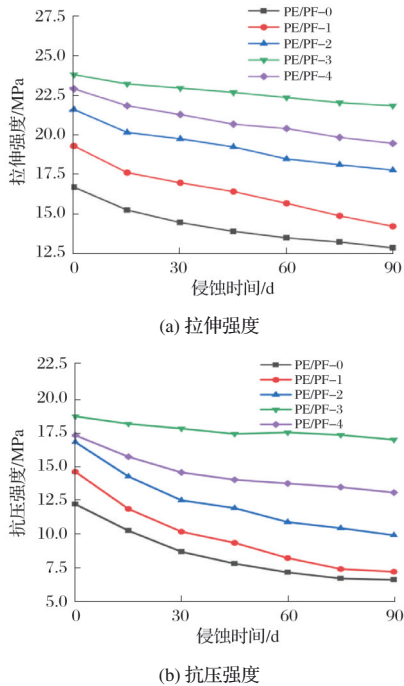


图6 不同PE/PF复合材料经过强酸侵蚀前后的拉伸强度和抗压强度对比

Fig.6 Comparison of tensile strength and compressive strength of different PE/PF composites before and after aging

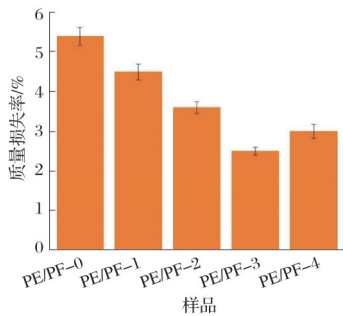


图7 不同PE/PF复合材料经过霉菌侵蚀后的质量损失率

Fig.7 Mass loss rate of different PE/PF composites after mold attack

表2 不同PE/PF复合材料的抗菌效果

Tab. 2 Antibacterial effects of different PE/PF composites单位:%

样品	抗菌率
PE/PF-0	93.3
PE/PF-1	94.5
PE/PF-2	95.7
PE/PF-3	99.5
PE/PF-4	97.8

3 结论

PF作为一种高强度、高模量的纤维材料,具有较好的耐酸碱性能以及抗微生物性能。本研究采用PF作为改性材料与PE结合制备具有显著抗老化能力的PE/PF复合材料。

添加质量分数15%PF的PE/PF-3复合材料拉伸强度、抗压强度和断裂伸长率达到最大值,最高拉伸强度和抗压强度分别可达23.8 MPa和18.7 MPa,断裂伸长率达到388%。PP/PF-3的样品表现出最低的THR以及HRR,分别为14.3 kJ/m²和220.1 kW/m²,在热重实验中也具有良好的质量保留率。此外,相比PE/PF-0,加入PF后,PE/PF复合材料的反射率有所上升,于PE/PF-3达到最大值,为92.5%,表明其具有良好的抗光热老化性能。

抗强酸老化以及抗微生物老化实验表明,PE/PF-3的力学性能、质量损失率以及抗菌率均可达到最佳,体现出优异的抗老化性能。因此,PF的加入可以有效增强PE材料的抗老化性能,使其能够更好地应用于球网材料的制备以及各种体育户外器材领域中。

参考文献

- 刘生鹏,张苗,胡昊泽,等. 聚乙烯改性研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2010(3): 31-36.
- KARAKI A, HAMMOUD A, MASAD E, et al. A review on material extrusion (MEX) of polyethylene-challenges, opportunities, and future prospects[J]. Polymer, 2024: 127333.
- SHIRVANIMOGHADDAM K, BALAJI K V, AHMADI M, et al. Strategies to resolve intrinsic conflicts between strength and toughness in polyethylene composites[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2024, 7(2): 151-181.
- OVALLI S, SANCAK E. Investigation of mechanical properties of jute fiber reinforced low density polyethylene composites[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(8): 3109-3126.
- SINGH A K, BEDI R, KAITH B S. Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties: A comprehensive review[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 219: 108928.
- PRASAD L, SINGH V, PATEL R V, et al. Physical and mechanical properties of rambans (agave) fiber reinforced with polyester composite materials[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(13): 6104-6118.
- 苏秉尧,侯林伟,王恒,等. 静电喷涂纳米SiO₂改性UHMWPE防电网的抗老化性能[J]. 合成纤维, 2023, 52(11): 28-32.
- 蒋晨廷. 聚乙烯/木质素复合材料的制备及其在建筑材料领域的应用[J]. 塑料科技, 2021, 49(1): 80-84.
- CHEN C C, WANG L Z, BU X T, et al. Construction of high-strength aligned bamboo fibre/high density polyethylene composites[J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105037.
- ZHOU H Y, LI W J, HAO X L, et al. Recycling end-of-life WPC products into ultra-high-filled, high-performance wood fiber/polyethylene composites: A sustainable strategy for clean and cyclic

- processing in the WPC industry[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 1-14.
- [11] NEWEHY M HEL, THAMER B M, ABDULHAMEED M M. Preparation of luminescent polyethylene plastic composite nano-reinforced with glass fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(14): e55189.
- [12] AOUNET M, AISSAT S. Climatic ageing of low density polyethylene in agricultural greenhouses[J]. *Advances in Materials Science*, 2024, 24 (1): 127-138.
- [13] ROTKOVICH A A, TISHKEVICH D I, RAZANAU I U, et al. Development and study of lightweight recycled composite materials based on linear low-density polyethylene and W for radiation application[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 1310-1318.
- [14] SUN B B, LIU Q, GAO Y X, et al. Preparation of carbon nanotube-reinforced polyethylene nanocomposites with better anti-scaling and corrosion-resistant properties[J]. *Industrial Chemistry & Materials*, 2024, 2: 154-164 .
- [15] SANTORO M, GORELLI F A, BINI R, et al. High-pressure synthesis of a polyethylene/zeolite nano-composite material[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1557.
- [16] HSISSOU R, SEGHIRI R, BENZEKRI Z, et al. Polymer composite materials: A comprehensive review[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113640.
- [17] EZQUERRA T A, KULESCZA M, CRUZ C S, et al. Charge transport in polyethylene-graphite composite materials[J]. *Advanced Materials*, 1990, 2(12): 597-600.
- [18] YANG H S, WOLCOTT M P, KIM H S, et al. Effect of different compatibilizing agents on the mechanical properties of lignocellulosic material filled polyethylene bio-composites[J]. *Composite Structures*, 2007, 79(3): 369-375.
- [19] TEISHEV A, INCARDONA S, MIGLIARESI C, et al. Polyethylene fibers-polyethylene matrix composites: Preparation and physical properties[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1993, 50(3): 503-512.
- [20] HERRMAN K, BAXTER L N, MISHRA K, et al. Mechanical characterization of polyethylene-based thermoplastic composite materials for radiation shielding[J]. *Composites Communications*, 2019, 13: 37-41.
- [21] COHEN Y, REIN D M, VAYKHANSKY L. A novel composite based on ultra-high-molecular-weight polyethylene[J]. *Composites Science and Technology*, 1997, 57(8): 1149-1154.
- [22] WU W Y, YEO G M D, WANG S, et al. Recent progress in polyethylene-enhanced organic phase change composite materials for energy management[J]. *Chemistry-An Asian Journal*, 2023, 18(14): e202300391.
- [23] MAKHLOUF A, BELAADI A, AMROUNE S, et al. Elaboration and characterization of flax fiber reinforced high density polyethylene biocomposite: Effect of the heating rate on thermo-mechanical properties[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2022, 19(10): 3928-3941.
- [24] ZHUKOV A M, SOLODILOV V I, TRETYAKOV I V, et al. The effect of the structure of iron-containing nanoparticles on the functional properties of composite materials based on high-density polyethylene [J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2022, 16(5): 926-932.
- [25] MOHD NASIR N H, USMAN F, SAGGAF A, et al. Development of composite material from recycled polyethylene terephthalate and fly ash: Four decades progress review[J]. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2022, 5: 100280.
- [26] XU L, ZHENG Y, YAN Z, et al. Preparation, tribological properties and biocompatibility of fluorinated graphene/ultrahigh molecular weight polyethylene composite materials[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 370: 201-208.
- [27] LUCIANO G, VIGNOLO M, BRUNENGO E, et al. Study of microwave-active composite materials to improve the polyethylene rotomolding process[J]. *Polymers*, 2023, 15(5): 1061.
- [28] KOLESNIK S A. Mechanical properties of polyethylene/Al₂O₃ nanoparticles composite material[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2021, DOI: 10.1063/5.0071384.
- [29] ZADOROZHNYI M Y, CHUKOV D I, CHURYUKANOVA M N, et al. Investigation of contact surfaces between polymer matrix and metallic glasses in composite materials based on high-density polyethylene[J]. *Materials & Design*, 2016, 92: 306-312.