

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.001

高质量分数松木炭增强 PE-UHMW 复合材料的制备与性能

史康杰¹, 王海莹¹, 邓巧云¹, 张凤芹², 魏军山², 李瑞清², 安云鹏², 李大纲¹

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 南京 210037; 2. 山东绿森塑木复合材料有限公司, 山东临沂 276400)

摘要: 以松木炭、超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)为原料, 利用双螺杆挤出机制备了高质量分数松木炭增强 PE-UHMW 复合材料, 探究了松木炭在不同质量分数、不同粒径下对 PE-UHMW 的增强改性效果, 并对其性能进行分析。扫描电子显微镜表明松木炭具有丰富的孔隙结构和高比表面积, 高温下熔融的 PE-UHMW 贯穿于松木炭孔隙中, 形成良好的机械互锁结构和界面结合效果。力学试验表明 PE-UHMW/松木炭复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量均随着松木炭质量分数的增加而增大; 当松木炭粒径为 48~75 μm , 质量分数为 80% 时, 复合材料的拉伸强度高达 81.9 MPa, 拉伸弹性模量高达 3 908.2 MPa。随着松木炭粒径减小, 复合材料的拉伸强度基本呈现升高的趋势, 但拉伸弹性模量整体呈现减少的趋势。静态热机械分析显示, 随着松木炭比例提升, 复合材料的尺寸稳定性变好。热重分析显示该复合材料表现出优异的热稳定性能。研究成果可为减塑固碳、碳封存材料的开发提供新思路, 为农林废弃物高值化利用提供新途径; 拓展其在高强工程应用材料、高附加值功能性材料等领域的应用。

关键词: 松木炭; 超高分子量聚乙烯; 复合材料; 力学性能; 热稳定性能

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0001-06

Preparation and Properties of High Content Pine Charcoal Reinforced PE-UHMW Composites

Shi Kangjie¹, Wang Haiying¹, Deng Qiaoyun¹, Zhang Fengqin², Wei Junshan², Li Ruiqing², An Yunpeng², Li Dagang¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Shandong Lyusen Plastic-Wood Composites Co., Ltd., Linyi 276400, China.)

Abstract : The pine charcoal and ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) were used as raw materials to prepare high content pine charcoal reinforced PE-UHMW composites by a twin-screw extruder. The effect of pine charcoal on the enhancement and modification of PE-UHMW under different mass fractions and different particle sizes was investigated, and its performance was analyzed. Scanning electron microscopy observation shows that the carbonized pine charcoal has abundant pore structure and high specific surface area, and the melted PE-UHMW can easily penetrate into the pores of the pine charcoal at high temperature, and form a good mechanical interlock structure and interface bonding effect. Mechanical tests show that the tensile strength and elastic modulus of the PE-UHMW/pine charcoal composites increase with the increase of charcoal content. When the particle size of pine charcoal is 48-75 μm and the mass fraction is 80 wt.%, the extrusion molding effect of the composites is better, the tensile strength up to 81.9 MPa and the elastic modulus up to 3 908.2 MPa, respectively. With the decrease of pine charcoal particle sizes, the tensile strength of the composites basically increases, but the elastic modulus of the composites generally decrease. Static thermomechanical analysis shows that the dimensional stability of the composites improves obviously with the increasing content of pine charcoal. Thermogravimetric analysis shows that the composites exhibit excellent thermal stability properties. The research results can provide new ideas for the development of plastic reduction and carbon sequestration materials, as well as provide new ways for the high-value utilization of agricultural and forestry wastes. Furthermore, it can expand the application in the fields of high-strength engineering application materials and high-value-added functional materials.

Keywords : pine charcoal ; ultra-high molecular weight polyethylene ; composite ; mechanical property ; thermal stability property

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800488), 南京林业大学高层次人才科研启动基金项目(GXL001)

通信作者: 王海莹, 副教授, 主要从事生物质复合材料开发与研制工作

收稿日期: 2023-02-15

引用格式: 史康杰, 王海莹, 邓巧云, 等. 高质量分数松木炭增强 PE-UHMW 复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 1-6.

Shi Kangjie, Wang Haiying, Deng Qiaoyun, et al. Preparation and properties of high content pine charcoal reinforced PE-UHMW composites [J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 1-6.

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)一般是指相对分子质量在150万以上的线性结构的聚乙烯产品^[1]。与其它聚乙烯相比,PE-UHMW具有良好的抗冲击性能、耐磨性能、耐化学腐蚀性能、耐低温性能等,在航空航天、机械工业、医疗器件等方面有良好的应用^[2]。但由于PE-UHMW分子量巨大,导致其熔体黏度高,加工成型困难,且存在力学性能欠佳、热稳定性差等问题。研究人员通常利用填料改性PE-UHMW,如添加碳纳米管、石墨烯和玻纤等填料^[3]。笔者通过添加高质量分数的松木炭来增强改性PE-UHMW,松木炭可起到润滑剂的作用,将有效解决PE-UHMW加工成型困难等问题,提高其性能。

生物质炭是一种可再生资源,通过高温炭化处理,可得到孔隙大,高比表面积的生物炭^[4]。由于其多孔结构特性,在过去的几十年里,生物质炭在污水吸附、土壤改良、应对气候变化、炭封存等方面有很大的优势^[5]。生物炭具有丰富的孔隙结构,可用于增强塑料制得炭塑复合材料,因其具有良好的力学、热学、电磁屏蔽等性能,近年来受到越来越多学者的关注。Shanmugam等^[6]发现生物炭与聚合物复合后具有阻燃性能;此外炭材料的刚度随着炭处理温度的增加而增加。Kumar等^[7]利用100 μm 的生物炭来增强竹塑复合材料,结果表明复合材料的强度和热稳定性能均得到提升,且吸水率降低。张庆法等^[8]对稻壳粉进行炭化,将不同炭化温度下的稻壳炭加入到高密度聚乙烯中注塑成型,结果表明该复合材料具有良好的力学性能和热学性能。Zou等^[9]将聚乳酸与竹炭进行复合,结果表明添加40%的75 μm 竹炭后,该复合材料具有良好的阻燃性能。李文珠等^[10]利用竹炭增强聚氯乙烯的热学性能,实验表明加入竹炭后减少了聚氯乙烯燃烧时烟气的毒性,复合材料的热稳定性能得到了一定的提升。Aup-Ngoen等^[11]将果壳及废弃物残渣制成的生物炭添加到聚乳酸中,使得复合材料的力学性能和抗冲击性能得到了提升。此外,当生物炭在800 $^{\circ}\text{C}$ 炭化后可成为导体,可作为导电材料及电磁屏蔽材料^[12-13]。李穗奕^[14]用不同粒径的竹炭来增强塑料,实验表明竹炭粒径越小,复合材料的力学性能越高,且高温炭化后的竹炭/塑料复合材料可满足电磁屏蔽材料的要求。

我国是木材消费大国,而森林资源又十分短缺;同时我国农林废弃物的年产量上亿吨,利用焚

烧、堆积等方式处理会污染环境,因此减塑限塑必不可少^[15]。樟子松因其生长快、材质好、纹理较直,适用于家具、建筑等用材,但其废弃物一般被作为燃料使用^[16-17]。利用废弃的樟子松刨花制成松木炭,与PE-UHMW共混挤出制得PE-UHMW/松木炭复合材料,可使废弃物得到高值化利用,且大大减少塑料的用量,降低复合材料成本。目前研究人员对高含炭量和不同粒径的炭增强塑料复合材料的研究还有待进一步展开。以松木炭、PE-UHMW为原料,通过不同比例共混熔融挤出成型,探究松木炭在不同质量分数、不同粒径下对PE-UHMW的增强改性效果,并研究其形貌特征、化学结构及力学性能、尺寸稳定性、热降解性能。该研究结果将为减塑固碳、碳封存材料的开发和农林废弃物高值化利用提供新思路,为后续炭塑复合材料的研发和低成本生产提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

樟子松刨花:市售;

PE-UHMW:GUR型,分子量为800万,美国泰科纳公司。

1.2 仪器及设备

管式炉:OTF-1200X型,合肥科晶材料技术有限公司;

搅拌机:S55型,美国维他密斯公司;

电热恒温鼓风干燥箱:CMT-4000型,深圳新三思材料检测有限公司;

双螺杆挤出机:HAAKE Minilab II型,美国赛默飞世尔科技公司;

场发射扫描电子显微镜(FE-SEM):JSM-7300F型,日本电子公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS10型,美国赛默飞世尔科技公司;

万能力学试验机:CMT 4204型,深圳新三思检测技术有限公司;

静态热机械分析仪:TMA 402 F1型,德国耐驰公司;

热重(TG)分析仪:TG209型,德国耐驰公司。

1.3 试样制备

利用粉碎机将樟子松刨花打碎成木屑,将充分干燥的松木屑置于管式炉内高温炭化。管式炉参数设置如下:从室温升温到400 $^{\circ}\text{C}$,升温速率为

10 °C/min,保温 2 h;再以 10 °C/min 升温至 800 °C,保温 2 h,最后降至常温取出,完成炭化。利用粉碎机将炭化后的松木炭继续打碎,在放入挤出机前将松木炭置于 105 °C 烘箱内干燥 24 h 备用。复合材料的制备过程如下:(1)用分样筛筛分出 100,200,300,500,800,1 000 目(即粒径为 150,75,48,25,18,13 μm)的松木炭,将 PE-UHMW 分别与不同粒径的松木炭按 30:70 的质量比混合,加入双螺杆挤出机中,制备不同粒径的松木炭增强 PE-UHMW 复合材料。(2)将 PE-UHMW 与松木炭(粒径为 48~75 μm)分别按照 40:60,30:70,20:80 的比例共混后,利用双螺杆挤出机挤出成型,制得的复合材料试样分别记为:PE-UHMW/松木炭(40/60)、PE-UHMW/松木炭(30/70)和 PE-UHMW/松木炭(20/80)复合材料。挤出参数均设置为:挤出温度 190 °C,转速 20 r/min。

1.4 测试与表征

利用 FE-SEM 观察炭塑复合材料的拉伸断面微观形貌。测试样品进行喷金处理,喷金时间为 60 s,喷金电流为 10 mA。

利用 FTIR 进行结构分析。在 Smart ATR 模式下进行测试,分辨率为 4 cm^{-1} ,每个样品扫描 64 次,记录 650~4 000 cm^{-1} 波数扫描范围的数据。

利用万能力学试验机按照 GB/T1040.2-2006 进行拉伸力学性能的测试。传感器量程选用 1 kN,拉伸速度为 10 mm/min。记录样品的厚度、宽度及夹具的跨距。试样尺寸为 60 mm×3.8 mm×1 mm (长×宽×高),每组样品至少测试 5 次,取平均值。

利用静态热机械分析仪对材料的线性热膨胀系数(LCTE)进行表征。样品尺寸 20 mm×3.8 mm×1 mm (长×宽×高),采用拉伸模式,氮气氛围,测试温度范围为-30~80 °C,升温速率为 5 °C/min。

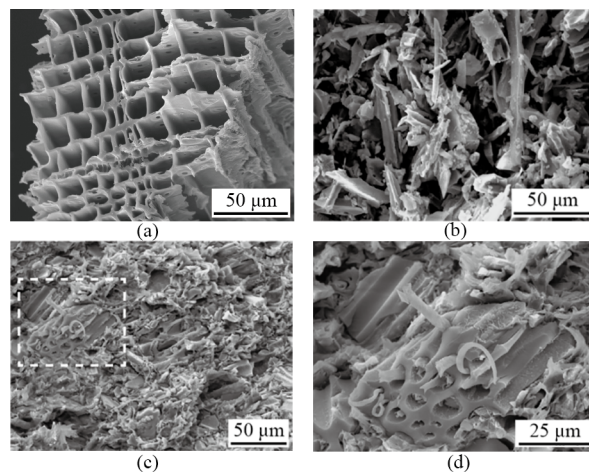
利用 TG 分析材料的热稳定性性能。将约 10 mg 的样品置于坩埚中,在氮气的氛围下,测试温度范围为 25~600 °C,升温速率为 10 °C/min,氮气的流速为 20 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌分析

图 1 是松木炭及 PE-UHMW/松木炭(30/70)复合材料的拉伸断面形貌图。如图 1a 可见,高温炭化后松木炭呈现出丰富的三维孔隙结构,该孔隙结构使得松木炭呈现高比表面积。如图 1b 所示,松木炭经进一步高速粉碎后,它的比表面积进一步增大,可

增加松木炭与塑料的界面结合效果。如图 1c 和图 1d,从 PE-UHMW/松木炭复合材料的拉伸断面形貌图中可见松木炭断裂面较为平整,部分高聚物受力被撕扯出;高温下熔融的 PE-UHMW 贯穿到松木炭孔隙中,并包裹在松木炭颗粒的表面,两相形成三维互穿及机械互锁结构,使得复合材料的整体结构更加牢固稳定,这将有助于提升炭塑复合材料的力学性能。

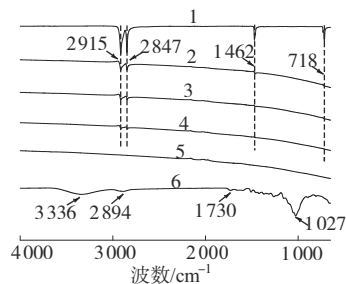


a—高温炭化后的松木炭;b—打碎后的松木炭;
c—放大 600 倍下的 PE-UHMW/松木炭复合材料;
d—放大 1 500 倍下的 PE-UHMW/松木炭复合材料

图 1 不同材料的断面形貌图

2.2 FTIR 分析

图 2 为 PE-UHMW/松木炭复合材料的 FTIR 图,松木粉、松木炭、PE-UHMW 作为对照组。由图 2 可见,松木粉在 3 336 cm^{-1} 处对应纤维素的—OH 伸缩振动峰,2 894 cm^{-1} 和 1 027 cm^{-1} 处对应—CH₂—和 C=O 拉伸振动峰,1 730 cm^{-1} 处对应半纤维素的乙酰基和羧基的 C=O 伸缩振动峰^[18]。而高温炭化后的松木炭亲水基团大大减少甚至消失,这有助于增强其与聚合物基体间的界面结合作用,从而提高复合



1—PE-UHMW; 2—PE-UHMW/松木炭(40/60);
3—PE-UHMW/(30/70); 4—PE-UHMW/松木炭(20/80);
5—松木炭; 6—松木粉

图 2 松木粉、松木炭、PE-UHMW、PE-UHMW/松木炭复合材料的 FTIR 图

材料的整体性能。PE-UHMW 和 PE-UHMW/松木炭复合材料在 $2\,915, 2\,847\text{ cm}^{-1}$ 处分别对应 $-\text{CH}_2-$ 不对称伸缩振动峰和 $-\text{CH}_2-$ 对称伸缩振动峰,在 $1\,462\text{ cm}^{-1}, 718\text{ cm}^{-1}$ 处分别对应 $-\text{CH}_2-$ 弯曲振动峰— CH_2 —面内摇摆振动峰^[19],这些非极性官能团使得 PE-UHMW 表现出非极性。其次,随着松木炭添加比例不断提升,PE-UHMW/松木炭复合材料的特征峰逐渐降低,但是特征峰的位置并没有发生偏移,这与 Zhang^[20]的研究结果相似。综上所述,经过高温炭化后的松木炭鲜有亲水基团,更易于与非极性的塑料复合,将有助于提升复合材料的力学性能。

2.3 力学性能分析

PE-UHMW/松木炭复合材料的拉伸性能和拉伸弹性模量如图3所示,纯 PE-UHMW 作为对照组。

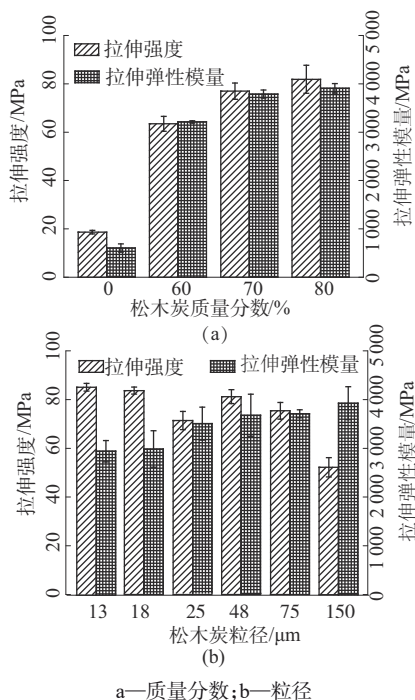


图3 不同质量分数和粒径下 PE-UHMW/松木炭复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量图

(1)不同含量松木炭对 PE-UHMW 的增强效果。

由图3a可见,纯 PE-UHMW 的拉伸强度和拉伸弹性模量分别为 18.7 MPa 和 605.1 MPa。通过加入不同比例粒径范围为 48~75 μm 的松木炭可显著增强 PE-UHMW 的力学性能;PE-UHMW/松木炭复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量均随着松木炭质量分数的增加而不断提高。当炭质量分数为 70% 时,拉伸强度高达 77.0 MPa,拉伸弹性模量高达 3

788.7 MPa。当松木炭质量分数达到 80% 时,复合材料的力学性能最好,拉伸强度和拉伸弹性模量高达 81.9 MPa 和 3 908.2 MPa,较纯 PE-UHMW 的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提升了 3.4 倍和 5.5 倍。

(2)不同粒径松木炭对 PE-UHMW 的增强效果。

由图3b可见,将 PE-UHMW 分别与 150 μm , 75 μm , 48 μm , 25 μm , 18 μm , 13 μm 的松木炭按照 3:7 的塑炭比复合,发现随着松木炭粒径的减小,复合材料的拉伸强度基本呈现增加的趋势;当松木炭粒径为 75 μm 和 48 μm 时,复合材料的拉伸强度分别达到 77.0 MPa 和 80.8 MPa;当松木炭粒径为 13 μm 时,复合材料的拉伸强度达到最大值 85.0 MPa,比 150 μm 的拉伸强度提升了 60%。其次,拉伸弹性模量随着松木炭粒径的减小,整体呈减小的趋势;这可能是由于经过进一步粉碎后,松木炭的一部分三维穿孔结构被破坏,松木炭的刚性作用发挥变小而引起的。由图3b可见,粒径为 75 和 48 μm 与粒径为 13 μm 的松木炭增强复合材料的力学性能差别并不明显,但在实际加工过程中,将松木炭粉碎到 13 μm 需要更大的能耗及成本,因而在工程应用中建议用 48~75 μm 的松木炭粉作为塑料的增强相。

2.4 LCTE 分析

LCTE 反映的是材料的热膨胀性能,其数值越低,材料的尺寸稳定性越好。热塑性塑料 PE-UHMW 不同于金属、陶瓷材料,随着温度的升高,其 LCTE 值明显升高,往往限制了其在工程材料的应用^[21]。通过添加一定比例的松木炭可有效降低材料的热膨胀系数。表1比较分析了不同比例的 PE-UHMW/松木炭复合材料的热膨胀性能。在 $-30 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个温度区间中,纯 PE-UHMW 的 LCTE 值分别为 $168.2 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, $296.8 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, $237.1 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$,远高于其它几种比例的复合材料的 LCTE,约高 3 倍。PE-UHMW/松木炭(20/80)复合材料的 LCTE 最小,在三个温度区间分别为 $47.2 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, $72.2 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, $64.5 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ 。这正是由于松木炭的加入,使得复合材料的 LCTE 值显著降低。随着松木炭比例的提升,PE-UHMW/

表1 PE-UHMW/松木炭复合材料在三个温度区间的 LCTE 值

编号	松木炭/PE-UHMW 质量比	LCTE/($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)		
		($-30 \sim 30$) $^{\circ}\text{C}$	($30 \sim 80$) $^{\circ}\text{C}$	($-30 \sim 80$) $^{\circ}\text{C}$
1	0/100	168.2	296.8	237.1
2	60/40	61.2	98.7	80.1
3	70/30	52.3	84.1	72.4
4	80/20	47.2	72.2	64.5

松木炭复合材料的尺寸稳定性越好。

2.5 TG分析

采用TG分析复合材料的热降解行为,对于研究复合材料的可加工性能及热稳定性能具有重要意义。图4为不同比例的松木炭增强PE-UHMW复合材料的TG曲线图,纯PE-UHMW作为对照组。图4中PE-UHMW/松木炭复合材料在100℃有少量的质量损失,这是由于材料的吸湿导致的;随着温度的升高,复合材料在450~520℃的温度范围内存在明显的热失重现象^[22]。纯PE-UHMW的起始分解温度为460℃;加入松木炭后,PE-UHMW/松木炭复合材料的起始分解温度提高到了472℃;这是由于松木炭具有良好的热稳定性,能够延缓复合材料的热分解进程。在600℃时,损失率逐渐达到平稳,纯PE-UHMW的残余量几乎为0;而加入60%,70%,80%松木炭的PE-UHMW/松木炭复合材料的质量保持率为51.5%,61.9%,71%,这主要是由于PE-UHMW质量的损失导致;此外松木炭中含有挥发分,高温下导致了炭含量的部分减少。综上所述,随着松木炭比例的不断提升,PE-UHMW/松木炭复合材料的质量损失率和热分解速率逐渐降低,热稳定性能也不断的提升,这是由于具有良好热稳定性的松木炭限制了PE-UHMW分子链之间的热量传递^[23]。

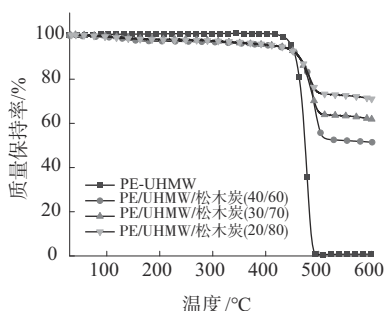


图4 PE-UHMW,PE-UHMW/松木炭复合材料的TG曲线图

3 结论

(1)采用松木炭增强改性PE-UHMW,克服了PE-UHMW加工成型困难、机械强度欠佳和热稳定性不足等缺陷;因高质量分数炭在挤出过程中起到润滑剂的作用,有效改善了PE-UHMW的加工成型性,可实现炭/PE-UHMW复合型材连续加工成型,具有广泛的应用空间和产业化前景。

(2)FE-SEM可观察到松木炭具有三维孔隙结构、高比表面积;高温下熔融的PE-UHMW贯穿于松木炭的孔隙结构中,形成机械互锁结构,增强了

复合材料的界面结合效果。力学测试表明PE-UHMW/松木炭复合材料拉伸强度和拉伸弹性模量均随着松木炭质量分数的增加而提升。当松木炭粒径为48~75 μm,质量分数为80%时,炭塑复合材料拉伸强度高达81.9 MPa,拉伸弹性模量高达3 908.2 MPa。随着松木炭粒径的减小,复合材料的拉伸强度基本呈现升高的趋势,但拉伸弹性模量整体呈现减少的趋势。静态热机械测试表明,松木炭的添加能有效提高材料的尺寸稳定性。TG分析显示该炭塑复合材料表现出优异的热稳定性能。

(3)本研究成果为提升PE-UHMW的加工成型性、力学性能和热学性能提供了理论依据,并可为减塑固碳、碳封存材料的开发提供新思路,为农林废弃物高值化利用提供新途径,同时可拓展炭塑复合材料在工程应用材料、高附加值功能性材料等领域的应用。

参考文献

- [1] 陈铭远,林海涛,阳辰峰,等.超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维改性研究进展[J].应用化工,2022,51(2):520-524.
Chen Mingyuan, Lin Haitao, Yang Chenfeng, et al. Research progress on modification of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(2): 520-524.
- [2] 王新威,张玉梅,孙勇飞,等.超高分子量聚乙烯材料的研究进展[J].化工进展,2020,39(9):3 403-3 420.
Wang Xinwei, Zhang Yumei, Sun Yongfei, et al. Research progress of ultra high molecular weight polyethylene[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9):3 403-3 420.
- [3] 负鹏.改性超高分子量聚乙烯复合材料的制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2021.
Yun Peng. Preparation and property of modified ultra-high molecular weight polyethylene composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [4] 丁思惠,方升佐,田野,等.不同热解温度下杨树各组分生物质炭的理化特性分析与评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(6):193-200.
Ding Sihui, Fang Shengzuo, Tian Ye, et al. Analysis and evaluation on physicochemical properties of poplar biochar at different pyrolysis temperatures[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(6):193-200.
- [5] 卞荣军,李恋卿.生物质废弃物处理与农业碳中和[J].科学,2021,73(6):22-26.
Bian Rongjun, Li Lianqing. Waste biomass treatment and carbon neutrality[J]. Science, 2021, 73(6):22-26.
- [6] Shanmugam V, Sreenivasan S N, Mensah R A, et al. A review on combustion and mechanical behaviour of pyrolysis biochar[J]. Materials Today Communications, 2022, 31. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103629.

- [7] Kumar R, Gunjal J, Chauhan S. Effect of carbonization temperature on properties of natural fiber and charcoal filled hybrid polymer composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 217(9). DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108846.
- [8] 张庆法, Muhammad Usman Khan, 张东红, 等. 不同炭化温度的稻壳炭对稻壳炭/高密度聚乙烯复合材料的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(7):67-72.
- Zhang Qingfa, Muhammad U K, Zhang Donghong, et al. Effect of rice husk biochar obtained at different carbonized temperatures on rice husk biochar/high density polyethylene composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(7):67-72.
- [9] Zou D F, Zheng X, Ye Y P, et al. Effect of different amounts of bamboo charcoal on properties of biodegradable bamboo charcoal/polylactic acid composites[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 216:456-464.
- [10] 李文珠, 章亮, 于子绚, 等. 竹炭/聚氯乙烯复合板材的性能[J]. *林业工程学报*, 2021, 6(1):50-57.
- Li Wenzhu, Zhang Liang, Yu Zixun, et al. Study on the performance of functional BC/PVC composites[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(1):50-57.
- [11] Aup-Ngoen K, Noipitak M. Effect of carbon-rich biochar on mechanical properties of PLA-biochar composites[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2020, 15. DOI:10.1016/j.scp.2019.100204.
- [12] 江文正. 电磁屏蔽用炭基复合材料的制备及其性能研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- Jiang Wenzheng. Study on the preparation and performance of carbon-based composite materials for electromagnetic shielding [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021.
- [13] 李小晴, 江文正, 李文珠, 等. 炭质量分数对竹炭/高密度聚乙烯复合材料电磁屏蔽和力学性能的影响[J]. *林业工程学报*, 2022, 7(1):130-136.
- Li Xiaoqing, Jiang Wenzheng, Li Wenzhu, et al. Effect of carbon content on shielding and mechanical properties of bamboo charcoal/HDPE composites[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, 7(1):130-136.
- [14] 李穗奕. 生物炭/超高分子量聚乙烯复合材料的制备及性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- Li Suiyi. Preparation and properties of biochar/ultra-high molecular weight polyethylene composites[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.
- [15] 张志礼, 王新婷, 李凤凤, 等. 废弃塑料实现木塑复合材料的制备及其性能探究[J]. *包装工程*, 2022, 43(11):24-30.
- Zhang Zhili, Wang Xinting, Li Fengfeng, et al. Preparation and properties of wood-plastic composites based on waste plastics[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(11):24-30.
- [16] 刘雅楠, 刘洋, 兰再平, 等. 不同灌溉方式对樟子松生长、光合特性及土壤水分运移的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(04):135-143.
- Liu Yanan, Liu Yang, Lan Zaiping, et al. Effects of different irrigation methods on growth, photosynthetic characteristics and soil water transport of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(4):135-143.
- [17] 张禹姝, 胡妙言, 高诗雨, 等. 樟子松基碳量子点的制备工艺优化[J]. *包装工程*, 2022, 43(21):40-49.
- Zhang Yushu, Hu Miaoyan, Gao Shiyu, et al. Optimization of preparation process of pinus sylvestris-based carbon quantum dots [J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(21):40-49.
- [18] Lou Z C, Wang Q Y, Sun W, et al. Regulating lignin content to obtain excellent bamboo-derived electromagnetic wave absorber with thermal stability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430. DOI:10.1016/j.cej.2021.133178.
- [19] 卜香婷, 史康杰, 王露臻, 等. 改性纳米纤维素/高密度聚乙烯高性能复合材料的制备与研究[J]. *塑料工业*, 2022, 50(5):108-113.
- Bu Xiangting, Shi Kangjie, Wang Luzhen, et al. Preparation and investigation of nanocellulose/high density polyethylene composites[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(5):108-113.
- [20] Zhang Q F, Lei H W, Cai H Z, et al. Improvement on the properties of microcrystalline cellulose/polylactic acid composites by using activated biochar[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119898.
- [21] 王海莹, 史康杰, 宋文瑜, 等. PE-UHMW/PE-HD/高质量分数稻秆炭复合材料制备[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(11):8-13.
- Wang Haiying, Shi Kangjie, Song Wenyu, et al. Preparation of PE-UHMW/PE-HD/highly filled rice straw charcoal composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(11):8-13.
- [22] Lin X N, Kong L S, Cai H Z, et al. Effects of alkali and alkaline earth metals on the co-pyrolysis of cellulose and high density polyethylene using TGA and Py-GC/MS[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 191:71-78.
- [23] Zhang Q F, Zhang D H, Lu W Y, et al. Production of high-density polyethylene biocomposites from rice husk biochar: Effects of varying pyrolysis temperature[J]. *Science of the total environment*, 2020, 738(2). DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139910.