

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.002

PE-UHMW/PE-HD/高含量稻秆炭复合材料制备

王海莹,史康杰,宋文瑜,张磊,李大纲

(南京林业大学材料科学与工程学院,南京 210037)

摘要:以稻秆炭、超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)和高密度聚乙烯(PE-HD)为原料,利用双螺杆挤出机成功制备了高含量稻秆炭增强复合材料,并对其性能进行了对比分析。场发射扫描电镜观察表明高温熔融状态下,聚合物基体易贯穿于稻秆炭的孔隙结构中,两者界面结合效果良好。拉伸测试表明稻秆炭对聚合物基体有显著的增强作用,PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭(质量比20/10/70)的拉伸强度和断裂伸长率分别为48.5 MPa和16.3%;质量比30/0/70的拉伸性能达到最佳,拉伸强度和弹性模量分别高达77.8 MPa和3 512.2 MPa。静态热机械分析显示,PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭复合材料的热膨胀系数随着稻秆炭的加入而显著降低,其热稳定性得到大大改善。动态热机械分析表明,对比于纯PE-UHMW,稻秆炭的添加有效提高了复合材料的刚性,使得储能模量显著提高,损耗因子显著下降。研究成果可为农林废弃生物质资源化利用提供新的思路,为提出以节约高聚物树脂为目标的复合材料制备技术提供理论指导。

关键词:稻秆炭;超高分子量聚乙烯;高密度聚乙烯;炭塑复合材料;性能分析

中图分类号:TQ325.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2020)11-0008-06

Preparation of PE-UHMW/PE-HD/Highly Filled Rice Straw Charcoal Composites

Wang Haiying, Shi Kangjie, Song Wenyu, Zhang Lei, Li Dagang

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract : The rice straw charcoal, ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) and high density polyethylene (PE-HD) were used as raw materials to prepare rice straw charcoal reinforced composites by twin-screw extruder. Field emission scanning electron microscopy observation show that the polymer matrix is easy to penetrate into the pore structure of charcoal powder at high temperature, and the interface bonding effect is good. The tensile test show that the rice straw charcoal has a significant reinforcement effect on polymer matrix. The tensile strength and elongation at break of PE-UHMW / PE-HD / rice straw charcoal (mass ratio 20 / 10 / 70) are 48.5 MPa and 16.3%, respectively. For the mass ratio of 30 / 0 / 70, the tensile strength and Young' s modulus are 77.8 MPa and 3 512.2 MPa respectively. Static thermal mechanical analysis reveal that the thermal expansion coefficient of PE-UHMW / PE-HD / rice straw charcoal composite decrease significantly with the addition of rice straw charcoal. The thermal stability of the composite is greatly improved. Dynamic thermal mechanical analysis show that compared with pure PE-UHMW, the addition of rice straw charcoal effectively improve the rigidity of the composite, significantly increase the storage modulus and decrease the loss factor. The results of this study can provide new ideas for the resource utilization of agricultural and forestry waste biomass, and provide theoretical guidance for the manufacturing process of composite materials aiming at saving polymer resin.

Keywords : rice straw charcoal ; ultra-high molecular weight polyethylene ; high density polyethylene ; charcoal-plastic composite ; performance analysis

基金项目:国家自然科学基金项目(31800488),南京林业大学青年科技创新基金项目(CX2017003)

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 E-mail: betterbest_2008@163.com

收稿日期:2020-09-08

引用格式:王海莹,史康杰,宋文瑜,等. PE-UHMW/PE-HD/高含量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.

近年来以生物质纤维为材料增强相,以塑料为基体制备复合材料是生物质资源再生利用的一项重要科研成果^[1-2]。生物质纤维复合材料一般是由生物质纤维与热塑性塑料通过挤出、注射或热压成型得到的一种绿色环保复合材料^[3-4]。然而该复合材料的研究和应用仍存在缺陷和不足,如生物质纤维含大量羟基,与塑料界面相容性差,需要助剂进行改性处理;不耐高温,高温下易释放不稳定的化学物质,影响其加工性;当纤维填充量较高时,易造成复合材料成型加工困难等^[1,5]。鉴于上述问题,考虑用生物炭替代生物质纤维用作复合材料的增强相成为一种有效手段。

生物炭是炭化技术的产物,即在缺氧条件下,由植物纤维废弃物(如废木屑、稻秆、落叶和玉米秸秆等)在高温下分解生成^[6-8]。我国作为一个农业大国,每年的稻秆产量巨大,但大部分都没能利用甚至焚烧,造成环境污染和资源浪费^[9]。将稻秆炭化,与塑料复合制备高强材料,使稻秆炭在高值化新材料领域找到了突破点,具备以下优势:稻秆经高温炭化过后,亲水基团大量减少甚至消失,与塑料相容性好;稻秆炭作为增强相,填充量高达70%~80%,可起到润滑剂的作用,无需助剂,降低成本;稻秆炭耐高温,不受加工温度限制;当炭化温度高于700℃,具备一定的导电性。

作为生物质复合材料基体,聚乙烯是应用最广泛的热塑性塑料之一。与常见聚乙烯相比,超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)相对分子量极高,分子链极易相互缠绕,在很多方面远优于普通塑料的特性,如优良的力学性能、高冲击性,高耐磨性,耐化学性,高自润滑性,生物相容性好^[10-11]。但由于PE-UHMW分子量巨大,使得该聚合物的熔体黏度极高,加工时易出现熔体破裂情况,最常见的改性方式为填料改性,如碳纳米管、石墨烯、羟磷灰石等^[10]。

为了扩大生物质复合材料的应用范围,研发更多高强度工程材料,利用生物炭替代生物质纤维制备高强炭塑复合材料引起了研究学者的关注。Das教授团队^[12-13]、Aup-Ngoen^[14]团队等都采用生物炭和塑料进行共混,制得了炭塑复合材料;实验表明,与纯的塑料相比,炭塑复合材料的弹性模量和冲击能得到显著提高,热稳定性也得到了提高。张庆法等^[15-16]采用挤出法制备高密度聚乙烯(PE-HD)/稻壳和PE-HD/稻壳炭复合材料;结果表明,稻壳、PE-HD之间的结合方式与稻壳炭、PE-HD之间的结

合方式存在差异,PE-HD/稻壳炭复合材料的力学强度和刚性都大于PE-HD/稻壳复合材料。在导电、电磁屏蔽性能方面,生物炭复合材料也表现出了优势;如竹炭/超高分子量聚乙烯复合材料^[10]、咖啡炭/环氧树脂复合材料^[17]均具备一定的导电性,竹炭/石墨/环氧树脂复合材料可作为电磁屏蔽材料^[18]。Mohanty教授等在《Science》发表的综述中^[19],将生物炭作为生物基材料增强体的一类单独列出,这表明生物炭/塑料复合材料的研究具有重要意义^[15]。笔者所在课题组近年来一直致力于高强度炭塑复合材料的研究;但对于稻秆炭作为增强相的研究甚少,还未探究高含量稻秆炭共混PE-UHMW/PE-HD复合材料的性能;笔者研究了PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭复合材料的制备及性能,为农林废弃稻秆资源化利用提供新的思路,提出以节约高聚物树脂为目标的复合材料制备方法,拓展稻秆炭在高附加值的功能性复合材料领域的应用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

稻秆炭:粒径约为20~50μm,自制;

PE-UHMW:GUR,分子量为800万,美国泰科纳公司;

PE-HD:中国石油化工股份有限公司茂名分公司。

1.2 主要仪器与设备

炭化炉:OTF-1200X型,合肥科晶材料技术有限公司;

双螺杆挤出机:HAAKE Minilab II型,德国赛默飞世尔有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9070A型,上海精密实验设备有限公司;

场发射扫描电镜(FESEM):JSM-7600F型,日本电子株式会社;

万能力学试验机:CMT4204型,深圳市新三思材料检测有限公司;

静态热机械分析仪:TMA 402型,耐驰机械仪器有限公司;

动态热机械分析(DMA)仪:DMA 242D型,耐驰机械仪器有限公司。

1.3 试样制备

利用微型植物粉碎机将稻秆打碎成粉,随后将充分干燥的稻秆粉置于炭化炉内炭化。设置升温速率为10℃/min;从室温开始升温到400℃,保温

2 h;接着继续升温到 700℃,保温 2 h;最后降温到 50℃,完成炭化。再将制得的稻秆炭粉继续用粉碎机打碎至粒径约为 20~50 μm。然后将稻秆炭、PE-UHMW 及 PE-HD 粉末放入烘箱内充分干燥。将干燥后的 PE-UHMW、PE-HD、稻秆炭分别按照 30/0/70,20/10/70,10/20/70,0/30/70 的质量比混合,不添加助剂(试样编号分别为 1[#],2[#],3[#],4[#]),置于高速搅拌机中混合均匀,将所得混料加入到双螺杆挤出机制备出不同配比 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭复合材料。螺杆转动方向设置为同向,温度设置为 190℃,转速为 20 r/min。采用相同工艺制备纯 PE-UHMW 型材(编号为 5[#]),作为对照组。

1.4 性能测试

利用 FESEM 观察炭塑复合材料拉伸断面的微观形貌。将拉伸断面样品进行喷金处理,喷金时间为 40 s,喷金电流为 10 mA。

利用万能力学试验机进行拉伸性能的测试。传感器量程选用 1 kN,拉伸速度为 10 mm/min。从挤出样条中截取 50 mm×3.8 mm×1 mm 的试样,测量并记录样品的厚度和宽度。每组样品至少测试 5 组有效数据,取其平均值。

采用静态热机械分析仪测试材料的线性热膨胀系数,氮气氛围,采用拉伸模式,试样长度为 20 mm;温度范围为 -30~80℃,升温速率为 5℃/min。

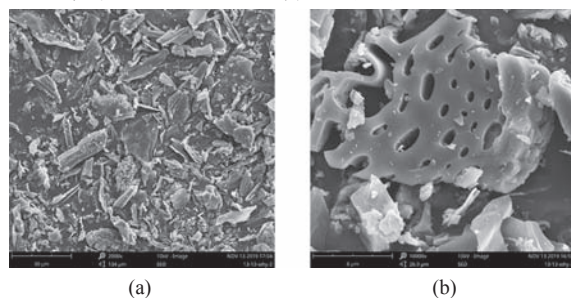
采用 DMA 仪进行动态机械性能分析。从挤出样条中截取样品尺寸为 40 mm×3.8 mm×1 mm,采用三点弯曲模式,温度 -150~150℃,预升温速率为 5℃/min,测试频率为 1 Hz,测试材料的储能模量和损耗因子等黏弹性的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 FESEM 分析

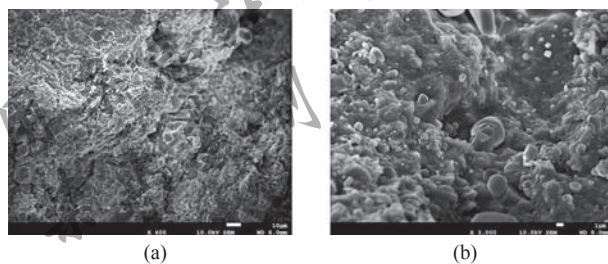
图 1 是稻秆炭粉的微观形貌,经高速粉碎后,稻秆炭尺寸大小约为 20~50 μm;从图 1b 放大图中可见,高温炭化后的稻秆炭具有三维孔隙结构,使得其比表面积增大,将有助于增加稻秆炭与塑料的界面结合。图 2 是 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭质量比为 20/10/70(2[#])时复合材料的断面,可见稻秆炭和聚合物基体之间共混较均匀,稻秆炭与基体之间复合效果良好。图 3 是 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭质量比为 30/0/70(1[#])时复合材料的断面,可观察到稻秆炭与 PE-UHMW 之间界面结合较好;从

图 3b 放大图中清晰可见,PE-UHMW 基体贯穿于稻秆炭的孔隙结构中,与其紧密结合,说明在高温挤出加工过程中熔融的聚合物树脂在双螺杆的作用下易流入稻秆炭孔洞结构中;部分丝状 PE-UHMW 受力被撕扯出,稻秆炭和 PE-UHMW 基体间形成了机械互锁,将有助于提升复合材料的力学性能。



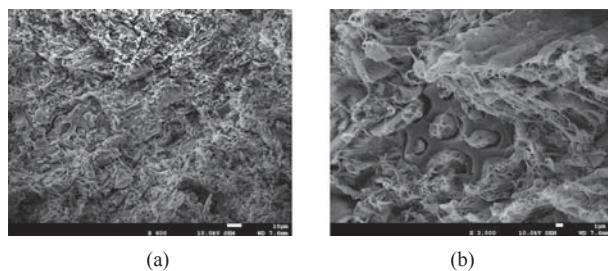
放大倍数: a—×2000; b—×10000

图 1 稻秆炭粉的微观形貌 FESEM 图



放大倍数: a—×600; b—×3000

图 2 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭(2[#])复合材料拉伸断面图



放大倍数: a—×600; b—×3000

图 3 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭(1[#])复合材料拉伸断面图

2.2 拉伸性能分析

PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭复合材料和纯 PE-UHMW 的拉伸性能如图 4 和表 1 所示。由图 4、表 1 可见,稻秆炭对聚合物基体有显著的增强作用。作为对照组,纯 PE-UHMW 的拉伸强度和弹性模量分别为 18.6 MPa 和 605.1 MPa;PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭(0/30/70,即 4[#])的拉伸强度为 32.8 MPa,拉伸弹性模量为 2035.5 MPa,断裂伸长率为 6.2%。在添加稻秆炭、PE-HD 的基础上,同时添加 PE-UHMW,PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭(20/10/70)的拉伸强度和断裂伸长率分别增加到 48.5 MPa 和 16.3%,较 4[#]材料分别提升

了 47.9% 和 162.9%。当 PE-UHMW 含量达到 30% 时, PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭 (30/0/70) 的拉伸性能达到最佳, 拉伸强度和弹性模量分别高达 77.8 MPa 和 3 512.2 MPa, 较纯 PE-UHMW 分别提升了 318.3% 和 480.4%。这与扫描电镜结果相符合, 经过高温炭化后的稻秆炭表面亲水基团大量减少甚至消失^[15], 有效改善了与聚合物共混的界面结合效果; 且稻秆炭具有三维多孔结构, 比表面积大, 可实现稻秆炭在聚合物中高分散、高填充 (70%), 降低生产成本。稻秆炭和聚合物两相混炼塑化均匀, 高温下熔融聚合物分子链易穿入稻秆炭的多孔结构中, 形成三维互穿结构, 界面结合强度大大提高。此外, 在挤出过程中, 发现纯 PE-UHMW 的挤出压力比较大, 添加了 70% 稻秆炭后起到较好润滑作用, 改善了可加工性, 挤出试样表观光滑, 成型效果较好。

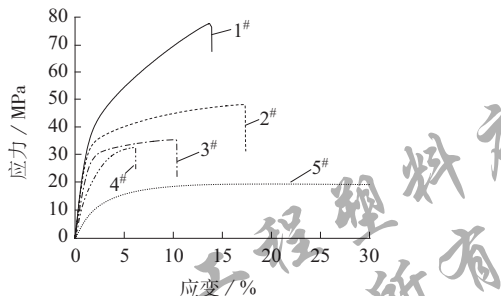


图 4 PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料的拉伸应力-应变曲线

表 1 PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料的拉伸性能

试样编号	拉伸强度 /MPa	拉伸弹性模量 /MPa	断裂伸长率 /%
1 [#] (30/0/70)	77.8 (4.7 σ)	3 512.2 (228.1 σ)	15.6 (2.3 σ)
2 [#] (20/10/70)	48.5 (4.5 σ)	3 265.9 (156.8 σ)	16.3 (1.5 σ)
3 [#] (10/20/70)	35.7 (1.8 σ)	2 267.9 (143.8 σ)	10.4 (1.3 σ)
4 [#] (0/30/70)	32.8 (1.9 σ)	2 035.5 (78.0 σ)	6.2 (1.1 σ)
5 [#] (100/0/0)	18.6 (1.2 σ)	605.1 (81.2 σ)	300.3 (21.9 σ)

注: σ 表示标准差。

2.3 线性热膨胀系数 (LCTE) 分析

与玻璃、金属等无机材料相比, 因热塑性塑料的热膨胀系数大、成型收缩率大等缺点, 限制了其在某些领域的应用。因稻秆炭具有三维孔隙结构, 与聚合物基体界面结合良好, 用其充当聚合物的增强材料, 为提高复合材料的尺寸稳定性、降低热膨胀系数提供了可能。表 2 为不同比例下 PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料的线性热膨胀系数 (LCTE)。试验中选择了 3 个温度区间 (-30 ~ 30℃; 30 ~ 80℃; -30 ~ 80℃)。对于纯 PE-UHMW, 在 3 个温度区间的 LCTE 均远大于复合材料, 约为复合材料 LCTE 值的 2 ~ 3 倍。添加稻秆炭后, 复合材料的 LCTE 大大降低。例如, 在温度区间 -30 ~ 30℃,

表 2 PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料的 LCTE 值 10⁻⁶/K

试样编号	-30 ~ 30℃	30 ~ 80℃	-30 ~ 80℃
1 [#]	53.7	85.2	73.4
2 [#]	54.7	95.1	73.5
3 [#]	60.0	125.2	89.7
5 [#]	168.2	296.8	237.1

PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料 (1[#], 2[#], 3[#]) 的 LCTE 值 分别为 53.7 × 10⁻⁶/K, 54.7 × 10⁻⁶/K 和 60.0 × 10⁻⁶/K, 远低于纯 PE-UHMW (168.2 × 10⁻⁶/K)。复合材料的热稳定性随着稻秆炭的加入得到大大改善。对于稻秆炭填充量都为 70% 的炭塑复合材料, 当 PE-UHMW 含量为 30% 时, 复合材料的 LCTE 值达到最低, 热膨胀性能最佳, 在 3 个温度区间分别为 53.7 × 10⁻⁶/K, 85.2 × 10⁻⁶/K 和 73.4 × 10⁻⁶/K。总的来说, 随着稻秆炭的加入, 复合材料的热膨胀系数显著降低, 原因是聚合物基体流动的阻力随着稻秆炭的加入而变大, 聚合物分子链发生形变被进一步限制; 同时聚合物基体与稻秆炭相互缠绕, 彼此相互作用也限制了炭塑复合材料的热膨胀。因此用于降低聚合物的热膨胀系数, 稻秆炭是一种良好的填料。

2.4 DMA 分析

DMA 分析是研究材料粘弹性和相态转变的重要手段^[20], 高聚物及其复合材料是典型的粘弹性材料。测试得到了 PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料在 1 Hz 条件下的储能模量 E'、损耗因子 tanδ 随温度 (-150 ~ 150℃) 的变化关系图, 分别见图 5 和图 6 所示。

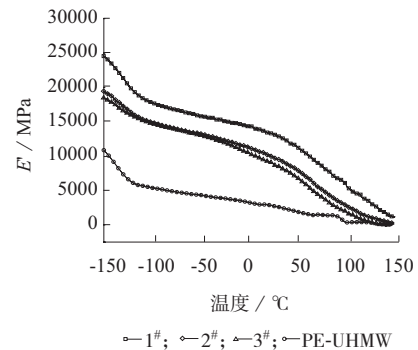


图 5 PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料的 E' 随温度变化图

复合材料的动态热力学特性与纯 PE-UHMW 材料存在较大的差异。由图 5 可见, 在 -150℃ 时, 纯 PE-UHMW 的 E' 为 10.8 GPa; PE-UHMW/PE-HD/ 稻秆炭复合材料 (1[#], 2[#], 3[#]) 的 E' 分别为 24.7, 19.7, 18.3 GPa, 远高于纯 PE-UHMW。由此可见, 当添加了稻秆炭为增强材料后, 复合材料的

E' 明显提高,不过随着温度的升高,聚合物基体开始软化并伴有松弛, E' 不断降低。此外,随着 PE-UHMW 含量的提高,复合材料的 E' 越大,刚性越好,这与拉伸力学测试的结果一致。结果表明,稻秆炭的添加提高了复合材料的刚性,使得储能模量 (E') 显著提高。这是由于当炭/塑复合材料承受负载时,在稻秆炭和聚合物的界面上,稻秆炭能有效承担载荷,吸收大部分应力,使得复合材料的刚性增加,储能模量增大^[16]。三种复合材料中,当 PE-UHMW 的含量为 30% 时, E' 最大,表明该复合材料的界面结合最佳。

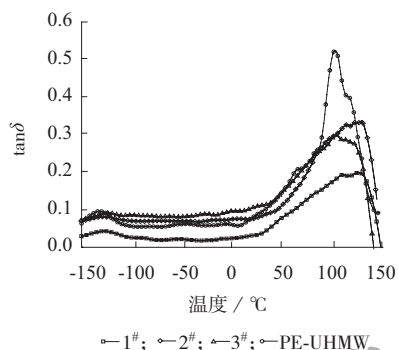


图6 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭复合材料的 $\tan\delta$ 随温度变化图

损耗因子 $\tan\delta$ 是损耗模量和储能模量的比值,可反映材料的刚性或柔韧性。由图 6 可见,纯 PE-UHMW 的 $\tan\delta$ 明显高于其复合材料,表现出更多的柔性特征。当加入 70% 稻秆炭后,复合材料 $\tan\delta$ 显著下降,这是由于稻秆炭加入后与聚合物基体相互缠绕并交互作用,对聚乙烯分子链的转动和滑移起到了限制作用。能量损耗主要发生在复合材料的基体和界面上,界面结合强度越好,稻秆炭吸收的能量越多,能量损耗越小,从而 $\tan\delta$ 的值越小^[21]。

3 结论

(1) 利用双螺杆挤出机成功制备了 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭复合材料,稻秆炭含量高达 70%。扫描电镜观察表明在高温挤出过程中, PE-UHMW 基体易贯穿于稻秆炭的孔隙结构中,两者间可形成机械互锁结构,界面结合效果良好。

(2) 稻秆炭对聚合物基体有显著的增强作用, PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭 (20/10/70) 的拉伸强度和断裂伸长率可达 48.5 MPa 和 16.3%,较 0/30/70 时分别提升了 47.9% 和 162.9%。1#(30/0/70) 复合材料的拉伸性能达到最佳,拉伸强度和弹性模量分别高达 77.8 MPa 和 3 512.2 MPa。

(3) 静态热机械分析表明, PE-UHMW/PE-HD

/稻秆炭复合材料的热膨胀系数随着稻秆炭的加入而显著降低,其热稳定性得到大大改善。动态热力学分析表明,当以稻秆炭为增强材料添加到聚合物基体中时,稻秆炭与基体相互作用,限制了聚合物分子量的滑移和转动,从而显著增加了 PE-UHMW/PE-HD/稻秆炭复合材料的储能模量,降低了复合材料的损耗因子,改善了复合材料的刚性和热力学性能。

(4) 本研究成果可为农林废弃生物质资源化利用提供新的思路,为提出以节约高聚物树脂为目标的复合材料制备技术提供理论指导,同时为拓展稻秆炭在工程材料中的应用领域提供科学依据。

参考文献

- [1] 江太君,徐成,陈磊,等.木塑复合包装材料在线挤出计量及计量误差研究[J].包装工程,2018,39(11):133-136.
Jiang Taijun, Xu Cheng, Chen Lei, et al. Research on on-line extrusion measurement and measurement error of WPC packaging materials[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11):133-136.
- [2] 王希,郭露,冯前,等.聚乙烯醇/纳米纤维素/石墨烯复合薄膜的制备与性能[J].林业工程学报,2018,3(5):84-90.
Wang Xi, Guo Lu, Feng Qian, et al. Preparation and properties of polyvinyl alcohol / cellulose nanofiber / graphene composite films[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(5):84-90.
- [3] 潘明珠,丁春香,张帅,等.木塑复合材料阻燃研究新进展[J].林业工程学报,2020,5(5):28-39.
Pan Mingzhu, Ding Chunxiang, Zhang Shuai, et al. New progress in flame retardant research of wood-plastic composites[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(5):28-39.
- [4] 魏占锋,郭玉花,原泽坤,等.微胶囊红磷阻燃木塑复合材料的性能研究[J].包装工程,2020,41(3):133-137.
Wei Zhanfeng, Guo Yuhua, Yuan Zekun, et al. Study on properties of micro-capsule red Phosphorus flame retardant WPC composites[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3):133-137.
- [5] 徐朝阳,李健昱,苏文迪,等.玄武岩纤维增强橡胶木粉/回收 HDPE 复合材料性能的研究[J].塑料工业,2016,44(3):128-130+160.
Xu Zhaoyang, Li Jianyu, Su Wendi, et al. Study on properties of basalt fiber reinforced rubber powder / reclaimed HDPE composite[J]. China Plast Ind, 2016, 44(3):128-130+160.
- [6] Giorcelli M, Khan A, Pugno N M. et al. Biochar as a cheap and environmental friendly filler able to improve polymer mechanical properties[J]. Biomass and Bioenergy, 2019, 120:219-223.
- [7] 丁思惠,方升佐,田野,等.不同热解温度下杨树各组分生物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):1-12.
Ding Sihui, Fang Shengzuo, Tian Ye, et al. Analysis and evaluation of physicochemical properties of biochar of poplar at different

- pyrolysis temperatures[J]. Journal of Nanjing Forestry University : Natural Sciences Edition:1-12.
- [8] 王国兵,王瑞,徐瑾,等. 生物炭对杨树人工林土壤微生物生物量碳、氮、磷及其化学计量特征的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2019,43(2):1-6.
- Wang Guobing, Wang Rui, Xu Jin, et al. Effects of biochar on charcoal, nitrogen, phosphorus and stoichiometric characteristics of soil microbial biomass in poplar plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition,2019,43(2):1-6.
- [9] 杨蕊,周定国,兰平,等. 秸秆基气凝胶制备工艺与网络结构研究[J]. 木材加工机械,2017,28(6):19-23.
- Yang Rui, Zhou Dingguo, Lan Ping, et al. Study on preparation technology and network structure of straw-based aerogel[J]. Wood Processing Machinery,2017,28(6):19-23.
- [10] Li Suiyi, Wang Haiying, Chen Chuchu, et al. Mechanical, electrical, and thermal properties of highly filled bamboo charcoal / ultra - high molecular weight polyethylene composites[J]. Polymer Composites,2018,39(S3):1 858-1 866.
- [11] 卢辉,高传伟,倪海鹰,等. 高导热石墨/SEBS/超高分子量聚乙烯三元复合材料的制备与研究[J]. 塑料工业,2019,47(1):112-116.
- Lu Hui, Gao Chuanwei, Ni Haiying, et al. Preparation and study of high thermal conductivity graphite / SEBS / ULTRA high molecular weight polyethylene ternary composite[J]. China Plast Ind,2019,47(1):112-116.
- [12] Das O, Bhattacharyya D, Hui D, et al. Mechanical and flammability characterisations of biochar / polypropylene biocomposites [J]. Composites Part B:2016,106:120-128.
- [13] Das O, Hedenqvist M S, Prakash C, et al. Nanoindentation and flammability characterisation of five rice husk biomasses for biocomposites applications[J]. Composites Part A:2019.doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105566.
- [14] Aup-Ngoen K, Noipitak M. Effect of carbon-rich biochar on mechanical properties of PLA-biochar composites[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy,2019.doi: 10.1016/j.scp.2019.100204.
- [15] 张庆法,杨科研,蔡红珍,等. 稻壳/高密度聚乙烯复合材料与稻壳炭/高密度聚乙烯复合材料性能对比[J]. 复合材料学报,2018,35(11):3 044-3 050.
- Zhang Qingfa, Yang Keyan, Cai Hongzhen, et al. Comparison of properties between rice hull / HDPE composite and rice hull charcoal / HDPE composite[J]. Library Theory and Practice, 2018,35(11):3 044-3 050.
- [16] Zhang Qingfa, Cai Hongzhen, Ren Xueyong, et al. The dynamic mechanical analysis of highly filled rice husk biochar / high-density polyethylene composites[J]. Polymers,2017,9(11):1-10.
- [17] Giorcelli M, Bartoli M. Development of coffee biochar filler for the production of electrical conductive reinforced plastic[J]. Polymers,2019,11(12):1-17.
- [18] 杨文斌,文月琴,宋剑斌. 竹炭/石墨/环氧树脂电磁屏蔽复合材料性能研究[J]. 林业工程学报,2018,3(1):65-70.
- Yang Wenbin, Wen Yueqin, Song Jianbin. Study on properties of bamboo charcoal / graphite / epoxy resin electromagnetic shielding composite[J]. Journal of Forestry Engineering,2018,3(1):65-70.
- [19] Mohanty A K, Vivekanandhan S, Pin J M, et al. Composites from renewable and sustainable resources:challenges and innovations[J]. Science,2018,362:536-542.
- [20] 詹天翼,吕建雄,张海洋,等. 水分解吸过程中杉木黏弹行为的经时变化规律及其频率依存性[J]. 林业科学,2017,53(8):155-162.
- Zhan Tianyi, Lyu Jianxiong, Zhang Haiyang, et al. Changes of time dependent viscoelasticity of chinese fir wood and its frequency-dependency during moisture desorption processes[J]. Scientia Silvae Sinicae,2017,53(8):155-162.
- [21] Mohanty S, Nayak S K. Interfacial, dynamic mechanical, and thermal fiber reinforced behavior of MAPE treated sisal fiber reinforced HDPE composites[J]. J Appl Polym Sci,2006,102:3 306-3 315.

欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42,24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志,订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊,大 16 开本,每月 10 日出版,2021 年定价 20 元/期,全年 240 元。《化学分析计量》为月刊,大 16 开本,每月 20 日出版,2021 年定价 20 元/期,全年 240 元。

电话:(0531)85878223 85878057 传真:(0531)85947355