

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.027

# 基于三种可降解塑料的绿色复合材料研究进展

余佳明, 李祥瑞, 林宇, 刘明利, 李春风

(北华大学材料科学与工程学院, 吉林吉林 132000)

**摘要:** 基于当前木塑复合材料(WPC)最终产物难以降解的问题,对可降解WPC进行研究,围绕可降解WPC的合成、性质和改性进行了讨论。着重介绍了以环保型可降解塑料聚乳酸、聚碳酸亚丙酯和聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯为基体的可降解WPC存在的问题,综述了可降解WPC的改性方法,认为应从环保角度出发进行改性;提出对比传统WPC,可降解WPC可以在功能化材料方向大放异彩;共挤压技术和发泡技术可有效降低可降解WPC的成本;将3D打印技术应用于可降解WPC中,可提供个性化的设计和独特的外观。

**关键词:** 木塑复合材料;可降解塑料;聚乳酸;聚碳酸亚丙酯;聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯

**中图分类号:** TQ327.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0172-06

## Research Progress of Green Composites Based on Three Degradable Plastics

Yu Jiaming, Li Xiangrui, Lin Yu, Liu Mingli, Li Chunfeng

(School of Materials Science and Engineering, Beihua University, Jilin 132000, China)

**Abstract :** Based on the problem that the final products of wood-plastic composites (WPC) are difficult to degrade, the degradable WPC was studied, and the synthesis, properties and modification of degradable WPC were mainly discussed. The existing problems of degradable WPC based on environmentally friendly degradable plastics polylactic acid, poly (propylene carbonate) and poly (butylene adipate-co-terephthalate) were emphatically introduced. The modification methods of degradable WPC were reviewed. It was considered that the modification should be carried out from the perspective of environmental protection. Compared with traditional WPC, degradable WPC can shine in the direction of functional materials. Co-pressure technology and foaming technology can effectively reduce the cost of degradable WPC. The application of 3D printing technology in degradable WPC provides personalized design and unique appearance.

**Keywords :** wood plastic composite ; degradable plastics ; polylactic acid ; propylene carbonate ; poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate)

木塑复合材料(WPC)是近年来蓬勃发展的绿色产业,其基础原料为木质材料和塑料,较传统塑料具有更加优异的性能或某种功能。木质材料属于可再生资源,但在加工过程中难免会产生剩余物,木质原料包括木粉、稻壳和秸秆等<sup>[1]</sup>。塑料已经完全融入人们的生活之中,起到不可或缺的作用。聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)和聚丙烯(PP)等塑料已经与人们的生活息息相关。但塑料的使用情况和回收利用现状不尽如人意,白色污染已经成为当今环境面临的一大难题。并且由于塑料的难降解性,对其进行焚烧和填埋也会对环境造成二次污染。此外,用于制造塑料的原料——石油也面临消

耗殆尽的处境<sup>[2]</sup>。在此背景下,WPC应运而生。WPC可以将生产生活中产生的木质剩余材料和难以降解的塑料,通过添加一定的助剂,以模压、挤出和注塑等方式制造<sup>[3]</sup>。制得的WPC材料既保留了原有塑料的特性(如韧性),又具备了木质材料的硬度,还可以缓解木材资源紧缺的现状<sup>[4]</sup>。

传统的WPC在生活中的应用已经十分广泛,主要用于室内外装饰材料、包装运输和园林景观等领域;例如PVC基WPC具有良好的电绝缘性和耐化学药品腐蚀性,常常用于生产木塑托盘、货架和地板等<sup>[5]</sup>;PE基WPC有良好的化学稳定性、硬度高、耐冲击性能好,主要以室外园林建设为主,也

**基金项目:** 吉林省创新创业人才项目(2023QN44),吉林省重点科技攻关项目(20220202095NC),吉林省重点科技攻关项目(20220202092NC),吉林省科技发展创新平台(基地)和人才专项(20220508119RC),吉林省预算内基本建设资金(创新能力建设)项目(2022C039-4)

**通信作者:** 李春风,博士,教授,主要研究方向为生物质复合材料

**收稿日期:** 2023-05-05

**引用格式:** 余佳明,李祥瑞,林宇,等. 基于三种可降解塑料的绿色复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 172-177.

Yu Jiaming, Li Xiangrui, Lin Yu, et al. Research progress of green composites based on three degradable plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 172-177.

可用于外墙装饰,多用作户外景观桥、公园垃圾桶装饰、凉亭建筑材料<sup>[6]</sup>;PP基WPC表面硬度高、密度低、弯曲强度高,但其低温韧性差、性脆、易断,仅限于户外使用<sup>[7]</sup>。

常用于WPC的可降解塑料有聚乳酸(PLA)<sup>[8]</sup>、聚碳酸亚丙酯(PPC)<sup>[9]</sup>和聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)<sup>[10]</sup>等。聚丁二酸丁二酯(PBS)<sup>[11]</sup>和聚羟基脂肪酸酯(PHA)<sup>[12]</sup>因为价格原因未广泛应用于WPC。传统的WPC由于塑料基的复杂性,回收处理成本可能高于新WPC的生产成本,导致生产厂家不愿意进行回收,但可降解WPC可以有效地解决这一问题,将完全可降解变为可能。

现阶段,国内外诸多专家致力于WPC的研究,其中不乏以可降解塑料为原料的WPC。采用不同塑料与不同的木质纤维的组合可以产生不同的效果,然而可降解塑料的性能会存在某些缺陷(如力学性能差、热性能差和成本过高等)<sup>[13]</sup>。因此一些学者对可降解塑料进行改性,如力学性能、阻燃性能、防腐和抗老化等,以提升WPC的某些性能<sup>[14]</sup>,使其成为功能性材料。

由于木质材料本身和塑料的相容性较差,导致WPC性能较差。为了提高二者的相容性,研究者采用物理方式和化学方式改善其相容性<sup>[15]</sup>。此后WPC蓬勃发展,加工技术也迅速优化,挤出成型、注射成型、压缩成型<sup>[16]</sup>是当前比较成熟的制备方法。可降解WPC投入生产线的一大难题是其高昂的原材料价格,可降解塑料的价格远远高于传统塑料<sup>[17]</sup>。所以降低可降解塑料的生产成本也是需要研究的重点。

## 1 PLA基WPC

PLA是由乳酸单体(LA)聚合而成的可再生脂肪族聚酯,可以从自然植物中提取,如甘蔗、大米、小麦和玉米等<sup>[18]</sup>。由于其优异的生物相容性和降解性,引发研究热潮。然而PLA与传统石油基高分子聚合物相比,脆性大、造价高、难以大规模生产<sup>[19]</sup>,限制了其应用。PLA常见的合成方法有两种,一种是丙交酯开环聚合法(或称为两步法),另一种是乳酸(LA)直接缩聚法。丙交酯开环聚合法可以获得高分子量的PLA,但整个工艺流程较长,反应时间过长,从而使成本升高,限制了PLA的批量化生产<sup>[20]</sup>。直接缩聚法反应流程简单、成本低,但反应过程中存在着难以去除的游离LA、水、低聚物和丙交酯等,使得生成的PLA容易被反应中存在的水降解,导致反应过程受到抑制,只能得到分子量低的聚合物<sup>[21]</sup>。为了在PLA生产合成环节降低成本。可以优化LA直接缩聚法的催化体系,从而达到降低LA用量、增加反应效率的目的,最终得到低成本、高质量和可完全生物降解的PLA<sup>[22]</sup>。

### 1.1 物理改性

为提高PLA的韧性,还可以采用纳米级的材料作为填充剂,来提高复合材料的强度。祝惠一等<sup>[23]</sup>将纳米氧化铝加入PLA/纤维复合材料中,采用混炼法制成PLA/纤维/纳米二氧化硅复合材料;结果表明,添加纳米氧化铝后不会影响PLA的结晶行为和结构形态,复合材料的力学性能显著提高,耐高温性增强。纳米二氧化硅由于具有合适的尺寸和高

表面能,因此可改善复合材料性能。Ramachandran等<sup>[24]</sup>为了克服3D打印部件力学性能和摩擦学性能低的局限性,使用熔融沉积建模(FDM)制备了PLA/纳米二氧化硅生物纳米复合材料,发现纳米二氧化硅有效降低了生物纳米复合材料的摩擦系数和比磨损率。说明纳米二氧化硅增强了FDM打印部件,为FDM的广泛应用打下坚实基础。

与传统和最常用的无机纳米颗粒不同,还可以将多糖纳米晶体作为填充剂,多糖纳米晶体是可再生和可生物降解的。Roberto等<sup>[25]</sup>研究发现使用多糖纳米晶体作为纳米填料是一种扩展和改善PLA性能的有效途径,它可以在制备高性能PLA基纳米复合材料的同时,不影响聚合物基质的生物和环境优势,同时使用固体两亲性纳米界面可以增强纳米晶体与聚合物基体之间的界面相互作用。其中纤维素纳米晶体(CNC)和纳米纤维(CNF)对PLA的增强效果最佳。Mokhena等<sup>[26]</sup>将CNC作为PLA的天然填料,制备了功能化的PLA/CNC复合材料,发现在其中加入CNF能有效提升复合材料的相容性,这是由于复合材料的分散性与PLA基体间的相互作用得到改善。

PLA基WPC的性能还能通过加入其他材料来增强,金属凭借其良好的硬度可以用于改善PLA基WPC脆性过大的问题。Yang等<sup>[27]</sup>将铜锌合金颗粒加入PLA基WPC,结果表明,铜锌合金颗粒的加入显著提高了WPC的力学性能、热稳定性和抗菌性能。将WPC与3D打印技术相结合,可以轻松制造出形状复杂、木色复杂的零件,但功能单一限制了其应用,加入含有荧光粉的金属离子,在增强性能的同时还能丰富应用场景。Yang等<sup>[28]</sup>制备了聚乳酸/刨花板木粉/Dy<sup>3+</sup>荧光粉(PLA/PWF/SMSD)的3D打印复合材料,结果表明,3-氨基丙基三乙氧基硅烷(KH550)对SMSD荧光粉的改性效果最好,形成了致密的保护膜;加入KH550-SMSD荧光粉后,WPC的力学性能和热稳定性得到了显著改善;最后,基于PLA/PWF/SMSD复合材料和3D打印技术,制作了一个在黑暗中可以发出蓝光的安全警报模型和一个可以灵活摆动的小型恐龙艺术品。

纤维优秀的韧性也可对PLA进行增韧。Ferdinand等<sup>[29]</sup>以聚对苯二甲酸乙酯(PET)和聚乙烯醇(PVAL)纤维为抗冲击改性剂对PLA进行冲击改性,聚合物纤维显著改善了PLA较差的抗断裂性能,即使在低温(-20℃)下也能保持冲击改性的效率,这是传统方法无法实现的。PVAL纤维是最好的抗冲击改性剂,由剥离和纤维断裂引起的塑性变形消耗相当大的能量,阻碍了裂纹扩展,从而提高了冲击强度。石墨烯作为近年来的热门材料,其优良的力学性能和导热性也可以增强复合材料的性能。肖艳等<sup>[30]</sup>采用石墨烯和PLA复合制成PLA基WPC,发现改性后的WPC的力学性能和相容性增强,但是受热后更容易降解,热稳定性有所下降。

### 1.2 化学改性

PLA本身脆性太大,导致PLA基WPC的力学性能不佳,通常使用不同的改性剂来增强其力学性能。孙东宝等<sup>[31]</sup>选

用不同的改性剂研究对PLA基WPC的影响。通过热压成型的方法制得PLA基WPC,在原料中添加不同比例的壳聚糖、硅烷偶联剂和氢氧化钠,研究得出壳聚糖和硅烷偶联剂可以提升PLA基WPC的冲击强度、拉伸强度和弯曲强度。

增容剂常被用于改善复合材料界面相容性。余亚楠等<sup>[32]</sup>采用马来酸酐接枝聚丙烯(MAH-g-PP)为增容剂,制备了PLA/纸浆纤维复合材料。MAH-g-PP的加入改善了纸浆纤维和PLA的界面相容性,提升了拉伸性能和拉伸弹性模量。同时,纸浆的加工温度和PLA熔融温度相似,不会影响复合材料的热稳定性,但PLA基WPC机械耐久性有待提高。

此外,还可以用增塑剂来增强PLA的性能。Orue等<sup>[33]</sup>使用环氧和非环氧亚麻油和大豆油对PLA进行增塑,研究发现增塑剂的迁移率非常低,并且当使用环氧化油时,迁移率降低。这可能与植物油中的环氧基团与PLA官能团发生反应有关。亚麻籽油和大豆油的加入显著提高了PLA的断裂伸长率,而拉伸强度和拉伸弹性模量却降低。结果表明,与非环氧化油塑化PLA相比,环氧化油塑化PLA具有更高的拉伸性能和冲击性能。增塑剂的组成和环氧含量是调节PLA共混物形态的关键参数。

物理改性和化学改性都能在一定程度上改善PLA基WPC的某一方面性能,但又会使另一方面性能下降,可以两者结合使用,以求达到更好的改性效果。

## 2 PPC基WPC

PPC是由环氧丙烷与CO<sub>2</sub>在催化剂的催化下共聚而成的脂肪族混合物<sup>[34]</sup>。由于PPC具有完全降解性并且阻隔性能优异,因此常用于制备一次性用品和低温包装材料。此外,由于其热性能差,PPC也常被用作牺牲材料。在工业生产中,温度常高于160℃,但PPC在超过160℃时开始热降解,因此热性能差也限制了其应用<sup>[35]</sup>。PPC具有良好的熔体加工性和生物相容性,这为PPC改性提供了多种可能性;有研究者通过对PPC改性制备了各种WPC,使WPC的力学性能和热性能有所改善。

针对PPC基WPC改性,通常可以对原料PPC进行改性,对PPC进行改性的方式有很多种,比较常见的方式有物理改性和化学改性。

### 2.1 物理改性

物理改性选取互补材料通过熔融共混、溶液共混等方式制备复合材料,以提高PPC的热稳定性,使PPC在正常工业生产过程中能够保持稳定状态,并提升PPC的力学性能。将改性后的PPC与木质材料制备的WPC完全降解。在PPC基体中加入填料也可以改善性能。淀粉可以被用作填料,由于淀粉本身不具有热塑性,因此需要在淀粉中添加小分子塑化剂,使淀粉在热加工后成为热塑性淀粉。刘旭慧等<sup>[36]</sup>将处理后的热塑性玉米淀粉与PPC进行熔融共混,研究塑化剂N-二羟乙基甲酰胺对复合材料的影响。通过加入马来酸酐,改善了PPC/玉米淀粉共混材料在挤出过程中的热降解行为,使PPC的分子量减少量降低,从而增强了复合材料的拉

伸性能。在合适的木质材料添加比例下,改性后PPC复合材料WPC的拉伸性能应比纯PPC基WPC的拉伸性能高。将有机水滑石加入聚合物中,能有效提升聚合物的力学性能和热稳定性。马建心等<sup>[37]</sup>使用熔融共混挤出法制备了PPC/水滑石(LDH)/异氰尿酸三缩水甘油酯(TGIC)复合材料,为解决强极性的水滑石和弱极性的PPC相容性不佳的问题,采用KH550对LDH进行表面改性,改性后的PPC/KH550-LDH/TGIC复合材料的拉伸强度大大提高,同时具备良好的相容性。

除了有机高分子材料,无机填料也常被用来改善PPC性能。碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)是一种常见易得并且价格低廉的无机填料。朱敬阳等<sup>[38]</sup>使用木薯秸秆制备PPC/木薯秸秆复合材料,探究不同种类的CaCO<sub>3</sub>对WPC热稳定性和力学性能的影响。实验结果表明,由于CaCO<sub>3</sub>降解困难、膨胀系数低并且与PPC相容性较好,一定程度上阻碍了PPC的热降解。纳米CaCO<sub>3</sub>和活性CaCO<sub>3</sub>填料由于粒径较小、比表面积大等特点,改善了复合材料的拉伸强度和弯曲强度。

### 2.2 化学改性

相较于物理改性,对PPC进行化学改性的改性效果将更稳定。Han等<sup>[39]</sup>采用熔融共混法制备了PPC/PBS共混物,以端环氧基超支化聚合物(EHBP)为改性剂对PPC进行化学改性。加入EHBP后,EHBP中环氧基上的活性氧原子能与PPC/PBS中羟基和羧基上的活性氢原子形成强氢键,从而提高界面相容性。随着EHBP含量的增加,PPC/PBS共混物的断面变得粗糙,甚至出现粗大的丝状结构和细小的孔洞,进一步证明了EHBP对PPC/PBS具有优异的增韧作用。Wang等<sup>[40]</sup>采用熔融共混法,以环氧树脂ADR-4368为扩链剂对PPC进行化学改性。ADR-4368中的环氧基团与PPC中的末端羟基发生反应,显著提高了其力学性能、热稳定性以及对O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>的阻隔性能。Jiang等<sup>[41]</sup>采用熔融复合的方法,将商品木质素掺入到PPC中,制备完全可降解的生物质复合材料。为改善木质素在PPC基体中的分散性和相容性,对制浆造纸黑液木质素进行了羟丙基化改性。结果表明,改性后的羟丙基黑液木质素(HBL)表现为膜状聚集结构,具有较低的热转变温度和较高的熔体流动性,而未改性的木质素则表现为严重的球形聚集结构。化学和物理结构的变化使HBL在PPC基体中具有更好的相容性和分散性,PPC/HBL生物复合材料的拉伸性能、热稳定性和加工稳定性均有显著提高。水接触角和吸水试验表明,HBL提高了PPC/HBL生物复合材料的亲水性,从而加速了自然降解过程。

物理改性和化学改性都能一定程度上改善PPC的缺陷,从而增强PPC基WPC的某些性能。物理改性的改性效果可能不理想,而化学改性在改性过程中可能会带来一定的污染,有悖WPC开发初衷,因此需要寻求一种新的方式达到改性效果良好和环保的平衡点。

## 3 PBAT基WPC

PBAT属于生物降解塑料,是己二酸丁二酯和对苯二甲

酸丁二酯的共聚物,兼具聚丙烯酸丁酯(PBA)和聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)的特性,PBAT的性能取决于共聚物的分子量、分散性和结构<sup>[42]</sup>。PBAT有较好的延展性、断裂伸长率、耐热性和冲击性能,是生物降解塑料研究中最受欢迎的降解材料之一。

现阶段对于PBAT基WPC的研究一般聚焦于物理改性,即PBAT与其他材料进行共混改性<sup>[43]</sup>;化学改性主要是针对其界面相容性。

### 3.1 物理改性

PBAT的拉伸强度低,PLA拉伸强度高但其脆性大、冲击强度低和极易弯曲变形。因此将PBAT和PLA进行共混,能够在保持其降解性能的同时提高力学性能。此外两者在分子链段上有差距,分子链段上的形态对共混物的性能影响很大,如形态差距过大,共混物会出现相分离现象,其性能会大大下降。Wang等<sup>[44]</sup>为了加强PBAT和PLA的界面相容性,使用一种环氧端支化聚合物(ETBP)作为界面增容剂来提高共混物的性能,加入ETBP后,PBAT与PLA的玻璃化转变温度差异减小,PBAT和PLA共混物的断裂伸长率和冲击强度提高。同时随着ETBP含量的增加,分散的PBAT颗粒尺寸减小,说明ETBP作为改性剂可有效提高PBAT与PLA的界面相容性。Yan等<sup>[45]</sup>以纳米羟基磷灰石(n-HA)为核,加入微晶纤维素(MCC)以改善PLA/PBAT共混材料的性能,结果证明加入n-HA后,复合材料的结晶度和拉伸强度明显提高。

将PPC和PBAT共混,在保持良好生物降解性的同时,还可以提高复合材料的拉伸强度。Zhao等<sup>[46]</sup>采用PPC和有机改性蒙脱石(OMMT)两种阻隔材料制备PBAT/PPC/OMMT复合材料,并通过扩链剂(Joncryl® ADR 4468)提高力学性能。结果表明,添加质量分数为1%的扩链剂可使拉伸应力提高10%。OMMT优先分布在PBAT基体中,在吹膜中的取向度更加均匀,有利于气体阻隔性能的提高。最终,可以通过加工方式的调整以及PPC和OMMT的协同作用来调控PBAT薄膜的力学性能和透气性。

与传统的聚合物增容剂相比,纳米颗粒通过共混的方式可以很容易地掺入聚合物中。此外,纳米颗粒的掺入可以产生集合物共混物和纳米复合材料优点于一体的高性能材料。蒙脱土(MMT)已被许多研究人员用作非混相聚合物共混物的增容剂。He等<sup>[47]</sup>将MMT与PBAT和PLA共混,结果发现MMT更倾向于在PBAT和PLA的界面上定位。有机修饰的MMT与PLA/PBAT之间发生酯化反应。MMT增强了PLA和PBAT的相容性,加速了PLA和PBAT的结晶,提高了PLA和PBAT的热稳定性。此外,MMT对PLA和PBAT的拉伸强度有增强作用,尤其是对PBAT。Rennan F. S. B等<sup>[48]</sup>以乙酰化纤维素纳米结构(CNS)为补强剂,分别添加质量分数为1%,3%,5%,10%的改性和未改性纳米颗粒,通过溶剂铸造法制备了PBAT纳米复合材料。未改性的CNS表现出PBAT刚度的不连续增加,这是由于增强体与基体之间的相互作用较弱以及CNS的分散性较低。乙酰化CNS的效果最

好,这是由于乙酰基与聚合物链之间的分子间相互作用,乙酰基干扰了相对于基体官能团的原子振动,表明组分之间的相互作用和内部凝聚力的增强,从而增强了PBAT纳米复合材料的刚性。

用无机填料对可生物降解的PBAT塑料进行改性,是提高其综合性能、降低成本和扩大其应用范围的关键。 $\text{CaCO}_3$ 的活性很高,与聚合物有很强的界面相容性,通常作为填充物用在不同的聚合物里。Diao等<sup>[49]</sup>为了提高PBAT聚合物基质的相容性,使用聚乙二醇600(PEG-600)作为涂层剂来修饰 $\text{CaCO}_3$ 的表面;研究发现PEG-600的添加提高了基质和 $\text{CaCO}_3$ 填料之间的相容性,因为PEG的极性氢氧基团对 $\text{CaCO}_3$ 的极性表面具有较高的亲和力。此外,PEG-600的亲水性增加了水分子的扩散性,促进了PBAT的降解。 $\text{CaCO}_3$ 对PBAT的降解也会产生影响。Titone等<sup>[50]</sup>为了探究 $\text{CaCO}_3$ 对PBAT基纳米复合材料光氧化的影响,采用双螺杆挤出机制备PBAT/ $\text{CaCO}_3$ 纳米复合材料,结果表明纳米 $\text{CaCO}_3$ 的加入使复合材料的拉伸弹性模量和拉伸强度显著提高,但断裂伸长率基本保持不变;由于硬脂酸盐涂层的存在, $\text{CaCO}_3$ 的存在略微增加了基质的光氧化速率。无机填料的化学改性方法决定了PBAT复合材料的应用性能,气固流化方法是一种简单、高效、可扩展的化学改性 $\text{CaCO}_3$ 填料的方法。Shang等<sup>[51]</sup>将改性后的 $\text{CaCO}_3$ 填料与PBAT和熔融挤出物混合,制备出可生物降解的PBAT/ $\text{CaCO}_3$ 复合材料。表征结果表明,气固流化方法结合了传统湿法改性方法的优良改性效果和传统干法改性方法的可扩展性。比较了改性方法和 $\text{CaCO}_3$ 填充量对PBAT/ $\text{CaCO}_3$ 复合材料结晶度、力学性能和流变性能的影响。结果表明,含30%气固流化改性 $\text{CaCO}_3$ 的PBAT/ $\text{CaCO}_3$ 复合材料仍能保持优异的综合性能。

### 3.2 化学改性

PBAT的化学改性主要是解决复合材料界面相容性差的问题。Li等<sup>[52]</sup>为了开发高性能、低成本的PBAT复合材料,通过原位构建界面动态键,制备了具有增强拉伸强度的木质素改性PBAT生物复合材料。结果表明,添加界面改性剂的PBAT/木质素生物复合材料在木质素质量分数为5%时,拉伸强度达到36.7 MPa,断裂伸长率达到725.3%,在纯PBAT(34.9 MPa和717.6%)的基础上拉伸强度提高了5%。当木质素质量分数增加到10%时,添加界面改性剂的PBAT/木质素生物复合材料的拉伸强度为35.4 MPa,断裂伸长率为627.8%,分别比不添加界面改性剂的直接复合样品提高82%和31%。当木质素负载量增加到20%和30%时,添加改性剂仍能显著改善复合材料的力学性能。经过原位界面改性后,复合材料的疏水性也得到了改善。

为了提高PBAT基WPC的性能,对PBAT进行共混改性是一种切实可行的方法,在改善性能的同时大幅度降低了成本。在共混材料的选择上也应该更加多元化,PBAT基WPC的应用现在大都都停留在实验室阶段,找到与其相容性最适合材料很重要。

#### 4 应用

传统的WPC应用前景广阔,可用于建筑材料<sup>[53]</sup>、工业材料、文化体育业、运输及包装等领域。WPC在建筑材料领域最为广泛,可用于木塑吊顶、木塑地板、木塑装饰线条和板、木塑门窗和木塑墙板等<sup>[54]</sup>。可降解WPC在建筑模板、地板、家居、墙板等领域有着绿色应用。可降解WPC在室内环境保持良好的稳定性,并具有防虫蛀、无甲醛等优点,具有代替传统木地板的潜质<sup>[55]</sup>。可降解WPC也可以朝着功能化材料方向发展,如阻燃<sup>[56]</sup>、抗老化、防水、静音等方向。墙板材料是可降解WPC另一个应用比较广泛的方面。可向着安装简单、静音、阻燃、防潮、防虫蛀、保温<sup>[57]</sup>等方向发展。

可降解WPC应用最大的问题在于其高昂的成本,研究的重点是降低其成本,可降解塑料的生产工艺已经比较完善了,应该关注复合材料的制备工艺。共挤压技术<sup>[58]</sup>可以有效地解决问题,共挤复合材料(Co-WPC),它通过共挤在普通的WPC上一层保护壳层。Co-WPC的核壳结构提供了一种通过对复合材料表面进行特定修饰来克服WPC缺点的方法。这样就可以将可降解WPC放在壳层,核心层用价格低廉的材料进行填充,减少可降解塑料的使用,大大降低成本。发泡技术<sup>[59]</sup>也是一种有效的解决方法,通过在材料中引入微孔结构,保证了复合材料的密度降低和抗冲击性增强。同时,该方法不会引入新的物质破坏绿色复合材料的界面相容性。可降解WPC的密度一般都很大,发泡技术可以降低其密度,其孔隙结构会使可降解WPC有良好的热稳定性。制备出细胞结构好、力学强度高和成本低的轻质可降解WPC,用于建筑或汽车装饰材料,丰富了可降解WPC的应用场景。

随着人们生活水平的提高,对于家具的要求不再是简单的实用,大家越来越追求个性化的设计,因此3D打印技术应运而生。3D打印技术<sup>[60]</sup>具有方便、快捷和不受目标产品形状限制等优点。广泛应用于建筑、包装、医疗、交通运输、航空航天、军事等领域。熔融沉积成型工艺具有成本较低、材料来源广泛、后处理简单等优点。它是目前应用最广泛的3D打印技术之一,将可降解WPC和熔融沉积成型工艺相结合,可降解WPC的形状不再仅仅约束于板材,可往高端材料方向进军,有更高的商业附加值。

#### 5 结语

由于木质材料本身可被微生物降解,可降解塑料也可以通过光降解或生物降解逐步被切割成小分子,从而完全降解。以生物质材料和可降解塑料为原料制备WPC可以缓解白色污染,并且可以应对石油资源紧缺的状况。但可降解WPC本身的性能总有一定缺陷,提升可降解WPC性能可以从塑料、木质原料和添加剂(增塑剂、改性剂和其他材料等)三大方面进行考虑。常常通过物理、化学、共混改性来增强其可降解塑料本身的性能,从而达到增强可降解WPC性能的效果。

(1)可降解WPC可以使WPC完全降解成为现实。

(2)可降解WPC的高昂成本成为其无法投入工业化生产

的一大难题,解决这个问题可以通过熔融共混技术、共挤压技术、发泡技术和对可降解塑料生产工艺的优化。

(3)可降解WPC可以通过3D打印技术获得高附加值。

(4)在进行改性的同时,也应该注重环保性,如果一味追求性能好,就违背了一开始研究绿色复合材料的初衷。

#### 参考文献

- [1] 贺瑞,等.塑料科技,2021,49(5):108-110.  
He Rui, et al. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(5): 108-110.
- [2] 胡素云,等.石油实验地质,2020,42(5):813-823.  
Hu Suyun, et al. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 813-823.
- [3] 冯嫦,等.石化技术,2022,29(7):16-18.  
Feng Chang, et al. *Petrochemical Industry Technology*, 2022, 29(7): 16-18.
- [4] 刘建军,等.陕西林业科技,2006,(4):81-83.  
Liu Jianjun, et al. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2006, (4):81-83.
- [5] Li Jile, et al. *Frontiers in Materials*, 2022, 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.1018902.
- [6] Celia D, et al. *Polymers*, 2022, 14(1). DOI: 10.3390/polym14010138.
- [7] Philipp S, et al. *Polymers*, 2020, 12(9). DOI: 10.3390/polym12091933.
- [8] Sophie M G, et al. *Nature Chemistry*, 2022, 14(3):245-246.
- [9] Zeng Shulong, et al. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(11):4 580-4 589.
- [10] 朱亚凯,等.塑料包装,2021,31(3):19-21.  
Zhu Yakai, et al. *Plastics Packaging*, 2021, 31(3):19-21.
- [11] Naveenkumar R, et al. *Waste Management*, 2023, 156:168-176.
- [12] Victor P, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(20):7 701-7 709.
- [13] Yang Xuxu, et al. *Engineering*, 2021, 7(5):624-629.
- [14] 孟令宇,等.化工矿物与加工,2021,50(9):32-36.  
Meng Lingyu, et al. *Industrial Minerals & Processing*, 2021, 50(9): 32-36.
- [15] Lin Huiping, et al. *Cellulose*, 2020, 27:4 053-4 065.
- [16] 谢晖,等.云南化工,2019,46(4):152-153.  
Xie Hui, et al. *Yunnan Chemical Technology*, 2019, 46(4): 152-153.
- [17] 李雪,等.广东化工,2022,49(15):113-114.  
Li Xue, et al. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(15): 113-114.
- [18] Mosab K, et al. *Materials*, 2019, 12(21). DOI: 10.3390/ma12213586.
- [19] Farnoosh E, et al. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2022, 71(15):1 117-1 130.
- [20] Pieter V W, et al. *ChemSusChem*, 2016, 9(9):907-921.
- [21] Rafael A, et al. *Macromolecular Bioscience*, 2004, 4(9):835-864.
- [22] Angelin S, et al. *International Journal of Biological Macromol-*

- ecules, 2023. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123715.
- [23] 祝惠一,等. 化工新型材料, 2021, 49(S1):102–107, 112.  
Zhu Huiyi, et al. New Chemical Materials, 2021, 49(S1): 102–107, 112.
- [24] Ramachandran M, et al. Silicon, 2022, 14(2):703–709.
- [25] Roberto S, et al. Cellulose, 2017, 24(2):447–478.
- [26] Mokhena T C, et al. Polymers, 2018, 10(12) . DOI: 10.3390/polym10121363.
- [27] Yang Feiwen, et al. Polymers, 2020, 12(3) . DOI: 10.3390/polym12030621.
- [28] Yang Feiwen, et al. Polymer Composites, 2021, 42(6): 3 125 – 3 136.
- [29] Fedinand M, et al. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 277. DOI:10.1016/j.engfracmech.2022.108950.
- [30] 肖艳,等. 丝网印刷, 2022, (1):49–52.  
Xiao Yan, et al. Screen Printing, 2022, (1):49–52.
- [31] 孙东宝,等. 中国塑料, 2021, 35(6):80–84.  
Sun Dongbao, et al. China Plastics, 2021, 35(6):80–84.
- [32] 余亚楠,等. 复合材料学报, 2022, 39(10):4 856–4 867.  
She Yanan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4 856–4 867.
- [33] Orue A, et al. Industrial Crops and Products, 2018, 112:170–180.
- [34] 胡交利,等. 塑料工业, 2021, 49(10):1–4, 80.  
Hu Jiaoli, et al. China Plastics Industry, 2021, 49(10):1–4, 80.
- [35] 李祥瑞,等. 工程塑料应用, 2022, 50(3):164–169.  
Li Xiangrui, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3): 164–169.
- [36] 刘旭慧,等. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 79–85.  
Liu Xuhui, et al. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2017, 38(6):79–85.
- [37] 马建心,等. 塑料工业, 2022, 50(11):64–68.  
Ma Jianxin, et al. China Plastics Industry, 2022, 50(11):64–68.
- [38] 朱敬阳,等. 木材工业, 2020, 34(3):27–31.  
Zhu Jingyang, et al. China Wood Industry, 2020, 34(3):27–31.
- [39] Han Xiaolong, et al. Journal of Polymers and the Environment, 2022, 30(2):461–471.
- [40] Wang Xiyuan, et al. Polymer Testing, 2016, 54:301–307.
- [41] Jiang Can, et al. Polymer Testing, 2018, 72:348–356.
- [42] Ilya E, et al. Polymers, 2022, 14(9) . DOI: 10.3390/polym14091720.
- [43] 程鹏飞,等. 合成树脂及塑料, 2021, 38(1):97–102.  
Cheng Pengfei, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2021, 38(1):97–102.
- [44] Wang Bo, et al. e-Polymers, 2020, 20(1):39–54.
- [45] Yan Dongsheng, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5):11 895–11 904.
- [46] Zhao Yang, et al. Applied Clay Science, 2023, 234. DOI: 10.1016/j.clay.2023.106854.
- [47] He Hezhi, et al. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2022, 35(4):503–520.
- [48] Rennan F S B, et al. Polymer Composites, 2020, 41(7):2 841 – 2 854.
- [49] Diao Xiaoqian, et al. Polymers, 2022, 14(3) . DOI: 10.3390/polym14030484.
- [50] Titone V, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2020, 305(10). DOI:10.1002/mame.202000358.
- [51] Shang Jinzhi, et al. Frontiers in Chemistry, 2023, 10. DOI:10.3389/fchem.2022.1119978.
- [52] Li Wenfeng, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2022. DOI: 10.1002/app.52476.
- [53] 刘源,等. 住宅科技, 2015, 35(9):39–43.  
Liu Yuan, et al. Housing Science, 2015, 35(9):39–43.
- [54] 孙小虎,等. 合成材料老化与应用, 2022, 51(5):143–145.  
Sun Xiaohu, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(5):143–145.
- [55] 杨守禄,等. 工程塑料应用, 2018, 46(1):123–127.  
Yang Shoulu, et al. Engineering Plastics Application, 2018, 46(1): 123–127.
- [56] 龚迎春,等. 浙江农林大学学报, 2015, 32(3):410–414.  
Gong Yingchun, et al. Journal of Zhejiang A & F University, 2015, 32(3):410–414.
- [57] Jian Bingyu, et al. Polymers, 2022, 14(19) . DOI: 10.3390/polym14193942.
- [58] Wang Huanbo, et al. Polymer Composites, 2021, 42(9): 4 174 – 4 186.
- [59] Wang Baiwang, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 217:792–802.
- [60] Jiang Jie, et al. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 692(3) . DOI:10.1088/1755-1315/692/3/032004.