

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.06.027

偶联剂对 PLA/竹粉复合材料的影响

夏宜,路琴,葛通,明丽,祁彦君

(南京农业大学工学院,南京 210031)

摘要:以竹粉、聚乳酸(PLA)为原材料,以模压成型的方法制备了 PLA/竹粉复合材料,结合力学性能、摩擦磨损性能、吸水性能测试和 XRD 分析来探究竹粉的含量以及偶联剂种类对复合材料性能的影响。综合实验结果,当竹粉质量分数为 30% 时,PLA/竹粉复合材料的综合力学性能最佳。竹粉含量越多会使 PLA 的耐摩擦磨损性能下降。偶联剂的添加能提高 PLA/竹粉复合材料的力学性能、吸水性能,在一定程度上提高 PLA/竹粉复合材料的耐摩擦磨损性能,降低 PLA/竹粉复合材料的损耗。

关键词:竹粉;聚乳酸;界面处理;吸水性;力学性能;摩擦磨损性能

中图分类号:TQ327.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2018)06-0131-07

Effect of Coupling Agent on PLA/Bamboo Powder Composites

Xia Yi, Lu Qin, Ge Tong, Ming Li, Qi Yanjun

(College of Engineering Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: With bamboo powder, polylactic acid (PLA) as raw materials, PLA/bamboo powder composite was prepared by moulding methods. The content of bamboo powder and the kinds of coupling agent on the properties of composites combined with the mechanical properties, friction and wear properties, water absorption performance test and XRD analysis were explored. According to the comprehensive experimental results, when the content of bamboo powder is 30%, the comprehensive mechanical properties of PLA/bamboo powder composites are the best. When the content of bamboo powder is higher the friction and wear resistance of the materials are reduced. Coupling agent added can improve the mechanical properties of materials, water absorption performance, to a certain extent, improve the PLA/bamboo powder composites of friction and wear resistance, so as to reduce the wastage of the PLA/bamboo powder composites.

Keywords: bamboo powder; polylactic acid; interface treatment; water absorption performance; mechanical property; friction and wear property

聚乳酸(PLA)是一种新型的可生物降解的热塑性树脂,最后分解产物为 CO₂ 和水,生物相容性优良^[1]。但是,亲水性差、耐热温度低、易脆、强度低等缺陷极大地限制了 PLA 的应用^[2]。天然竹纤维具有长径比大、比强度高、比表面积大、密度低、可再生以及可生物降解等优点,且竹子资源丰富,价廉,用竹纤维增强的聚合物基复合材料具有较良好的性能,于是受到很多环保爱好者的青睐。植物纤维极性基团数量较多,在制备复合材料时,竹纤维与疏水

性的 PLA 树脂之间,有着比较大的界面能差,界面相容性较差,且植物纤维表面羟基形成的分子内氢键也使植物纤维在塑料基体中易聚集成团,分散性不好,不能很好地传递界面上的应力,使材料的性能变差。提高木塑复合材料性能的关键在于如何增强其界面的粘合强度,从而提高界面的相互作用力以此来改善两相之间的相容性^[3-5]。

在植物纤维改性 PLA 方面,符彬等^[6]选择造纸用的蔗渣和 PLA 为原材料,探究了蔗渣纤维含量

基金项目: SRT 国创项目(201710307098),南京农业大学 SRT 项目(1730B04)

通讯作者: 路琴,副教授,主要从事新型工程材料及应用的研究 E-mail: luqin@njau.edu.cn

收稿日期: 2018-03-19

引用格式: 夏宜,路琴,葛通,等. 偶联剂对 PLA/竹粉复合材料的影响[J]. 工程塑料应用,2018,46(6):131-137.

Xia Yi, Lu Qin, Ge Tong, et al. Effect of coupling agent on PLA/bamboo powder composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):131-137.

对复合材料力学性能的影响,结果显示,蔗渣纤维含量为30%时,蔗渣纤维在PLA基体中分散较好,此时力学性能较好。张建等^[7]以稻秸秆、麦秸秆、稻壳三种植物纤维作为填充相,制备出PLA/植物纤维复合材料并进行性能测试。张莉等^[8]通过熔融共混法制备不同含量的改性PLA/椰纤维复合材料,发现复合材料的力学性能得到提高。竹纤维等植物纤维在与基体树脂复合之前,一般要进行表面改性处理,从而降低其吸水性,提高与低极性基体树脂的界面相容性和粘合性,此外,偶联剂的添加可以在一定程度上改善PLA的弹性模量^[9]。左迎峰等^[10]用马来酸酐和不同种类的硅烷偶联剂分别处理玻璃纤维,再与淀粉、PLA复合,结果发现,硅烷偶联剂处理玻璃纤维增强PLA/淀粉复合材料的界面结合最紧密。袁杰等^[11]研究了偶联剂处理对聚氯乙烯/稻壳木塑复合材料的力学性能和耐磨性的影响,结果表明选择恰当的偶联剂处理复合材料可以提高其力学性能和耐磨性。笔者主要探究竹纤维含量和不同界面处理对PLA/竹粉复合材料的力学性能、摩擦磨损性能和吸水性能的影响,并结合性能测试分析偶联剂的作用机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA:4023D,美国Nature Works公司;

无水乙醇:分析纯,南京化学试剂有限公司;

硅烷偶联剂KH-570、钛酸酯偶联剂:南京道宁化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

振动筛:ZS-100型,无锡市新标粉体机有限公司;

恒温鼓风干燥箱:DHG-9053A型,上海中友仪器设备有限公司;

电磁平板硫化机:XLB-0型,湖州顺力橡胶机械有限公司;

简支梁冲击试验机:XJJ-5型,承德市金建检测仪器有限公司;

塑料洛氏硬度计:XHR-150型,上海联尔实验设备有限公司;

粉碎机:LH-088型,新昌县城关红利数控制造厂;

食品加工机:3205型,博朗电器公司;

电子天平:FA1004型,上海恒平科技仪器有限公司;

磨损试验机:MM-200型,上海隆升仪器有限公司。

1.3 试样制备

按照表1配方,准确称量竹粉和PLA之后,将粉碎并筛细的竹粉、PLA粉末和硅烷偶联剂(硅烷和无水乙醇按1:4混合得到)在高速混合机内搅拌,然后放入电热恒温鼓风干燥箱,温度设置为120℃,烘干12h。烘干过程中不能打开烘干箱,防止复合材料烘不均匀,影响复合材料的性能。将烘干后的复合材料放入工装中,在平板硫化机上进行热压成型,压制阶段设置的参数为:温度160℃,压力5MPa,时间9min,冷却2h,将压制好的PLA/竹粉复合材料板取出。

表1 实验配方表

试样编号	竹粉	PLA	硅烷偶联剂/%
1 [#]	20	80	3
2 [#]	30	70	3
3 [#]	40	60	3
4 [#]	50	50	3
5 [#]	60	40	3

分别使用钛酸酯偶联剂和硅烷偶联剂进行处理,钛酸酯和硅烷偶联剂的质量分数均为3%。两种偶联剂分别与质量分数为50%的PLA和质量分数为50%的竹粉进行混合配制,得到PLA/竹粉复合材料。具体配方见表2。偶联剂和无水乙醇按照质量比1/4配成溶液后,将其与干燥过的竹粉、PLA粉末放入高速混合机内充分混合搅拌,然后将混合物在120℃的烘箱中烘烤12h,以保证偶联剂充分反应,乙醇完全挥发。最后将复合材料在平板硫化机上热压。压制工艺参数为:温度160℃,压力5MPa,时间9min,冷却2h,得到不同偶联剂处理后的压板。

表2 实验配方

试样编号	竹粉质量分数	PLA	偶联剂种类/%
6 [#]	50	50	无助剂
7 [#]	50	50	硅烷
8 [#]	50	50	钛酸酯

1.4 性能测试

(1) 硬度。

通过洛氏硬度计测量洛氏硬度,载荷为60kg,加载和卸载时间均为15s,载荷保持时间5s。

(2) 拉伸强度。

拉伸强度按GB/T 1040.4-2006测试,拉伸速率为2mm/min。

(3) 弯曲强度。

弯曲强度按GB/T 9341-2008测试,测试速率

为 2 mm/min。

(4) 缺口冲击强度。

缺口冲击强度按 GB/T 13525-1992 测试。

(5) 吸水性能。

吸水性能按 GB/T 1934.1-2009 测试复合材料 24 h 吸水率。

(6) 摩擦磨损性能。

在 50 N 和 100 N 两种载荷的压力进行 0.5 h 的摩擦磨损实验,根据实验前后的磨损质量差,计算出摩擦系数以及磨损量。

2 结果与讨论

2.1 竹粉用量对 PLA 木塑复合材料的影响

(1) 力学性能。

图 1 是不同竹粉用量时 PLA/竹粉复合材料的硬度。由图 1 可见,随着竹粉用量的增加,复合材料的洛氏硬度值逐渐增大。当竹粉的质量分数为 30% 时 (2# 试样),复合材料的硬度值达到了最大值 96.8,可能是因为竹粉质量分数小于 30% 时,PLA 能够完整地包裹住竹粉颗粒的表面,竹纤维与 PLA 的结合性比较好,所以硬度升高。当竹粉质量分数超过 30% 后,其洛氏硬度值变小。出现这种现象的原因可能是当竹粉质量分数超过 30% 时,主要相由 PLA 渐渐过渡到竹粉,这时复合体系各相之间的粘结作用将会减小,极易受到拉拔和剥夺,使复合材料的硬度变小。此外 PLA 塑料基体和纤维的界面结合情况变差,存在竹纤维对 PLA 的割裂破坏作用,使硬度降低。

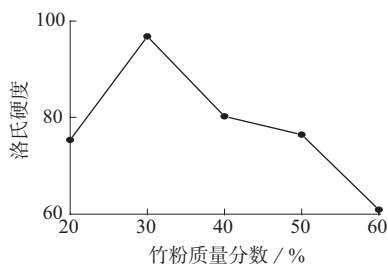


图 1 不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的洛氏硬度

图 2 为不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的弯曲强度。由图 2 可以看出,在竹粉质量分数为 30% 之前,随着竹粉含量的增加,试样的弯曲强度增大,当竹粉质量分数为 30% 时,弯曲强度达到最大为 34.64 MPa。当竹粉质量分数超过 30% 后,试样的弯曲强度降低。这是因为当竹纤维与 PLA 基体相融合后,竹纤维含量较低时,竹纤维在 PLA/竹粉复合材料中分散较为均匀,PLA/竹粉复合材料

的弯曲性能有所提高。当竹粉质量分数超过 30% 后,竹纤维与界面相容性较差,应力不能很好地在纤维之间传递,会产生应力集中和缺陷,最后逐渐趋于平缓。这些变化除了跟竹纤维和 PLA 两相的界面相容性有关外,还与纤维在 PLA 中的分散性、杂质成分等因素有关^[12]。

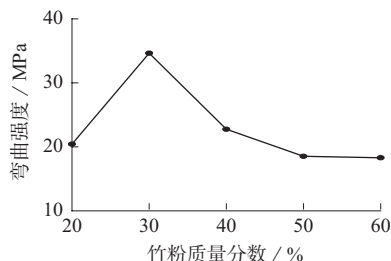


图 2 不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的弯曲强度

图 3 是不同竹粉含量时 PLA/竹粉复合材料的缺口冲击强度。由图 3 可以看出,随着竹粉质量分数的增加,试样的缺口冲击强度呈先增大后减小的趋势。当竹粉质量分数达到 50% 时,由于竹粉含量较低 PLA 的含量较高,PLA/竹粉复合材料可以有效缓冲和吸收冲击能量,这时 PLA/竹粉复合材料呈现出塑料特性,冲击性能比较优良。再加上竹粉和 PLA 之间的粘结性比较好,可以更好地结合,界面结合情况较好。从而提高复合材料的缺口冲击强度;PLA/竹粉复合材料的缺口冲击强度会达到最大值 13.4375 kJ/m²,当竹粉质量分数超过 50% 时,PLA/竹粉复合材料主要基体从 PLA 基过渡到竹纤维基,这时 PLA 与竹纤维的相容性变差,容易造成团聚,出现应力集中的情况,PLA 已经无法将竹粉完全裹覆,从而界面结合情况较差^[13]。缺口冲击强度随之降低。

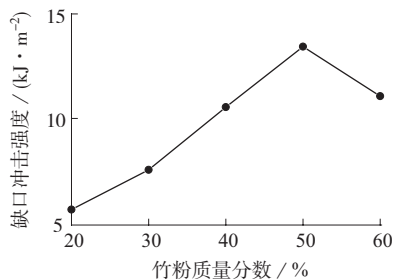


图 3 不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的缺口冲击强度

图 4 是不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的拉伸强度。从图 4 可以看出,当竹粉质量分数未超过 50% 时,PLA/竹粉复合材料的拉伸性能随着竹粉添加量的增加而增加,当竹粉质量分数为 50% 时,达到最大值为 12.76 MPa。随后 PLA/竹粉复

合材料的拉伸强度随着竹粉含量的增加而减少。拉伸性能的提高是因为竹纤维含量较少时,纤维均匀地分散在材料中,PLA作为竹纤维之间的粘合剂分布在竹纤维及其微纤维表面的空隙中,植物纤维之间会发生相互接触、交叉,以及缠结的情况,这会使力学性能得到相应提高。当竹粉质量分数超过50%以后,其在竹纤维中许多羟基的作用下产生团聚块,竹粉用量的增加会使团聚块变大,表面有效粘结会下降^[14]。

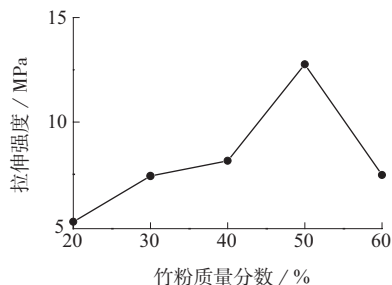


图4 不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的拉伸强度

综上所述,复合材料的力学性能主要与以下3种因素有关:竹纤维自身强度、PLA以及两者之间的界面结合情况。随着竹粉质量分数的增加,由于自身的刚性就很高,对分子链段运动起到阻碍作用,所以复合材料的强度就增大。与此同时,复合材料的拉伸、弯曲和缺口冲击强度会随着竹粉质量分数的增加而降低。复合材料的力学强度降低可能与以下因素相关:竹纤维中的氢键对纤维的聚集作用会使植物纤维在塑料基体中的分散性降低;竹纤维的亲水性会影响甚至减弱 PLA 和纤维的键合;增加植物纤维含量会在复合材料中纤维和聚合物之间产生界面缺陷,当承受外界拉伸或冲击载荷时,应力集中会发生在这些有界面缺陷的地方^[15]。

(2) 耐磨损性能。

不同竹粉含量的 PLA/竹粉复合材料的磨损量和摩擦系数如图5、图6所示。

由图5和图6可见,竹纤维含量对摩擦系数和磨损量的影响近似呈线性关系,随着竹粉含量的增加,在50N和100N作用下,复合材料的磨损量均呈现先减少后增多的趋势,且当竹粉质量分数为30%时,磨损量均达到最小值12.6mg和16.7mg。原因是这时的竹粉与PLA的界面相容性很好,可以形成较好的界面结合层,所以耐磨性能较好。随着竹粉含量的增加,摩擦系数也是先减小后增大。当竹纤维的质量分数为30%时,在50N和100N作用下,复合材料的摩擦系数最小,分别为0.08和

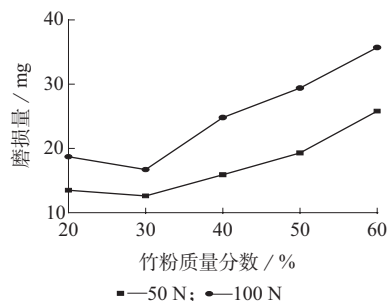


图5 不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的磨损量

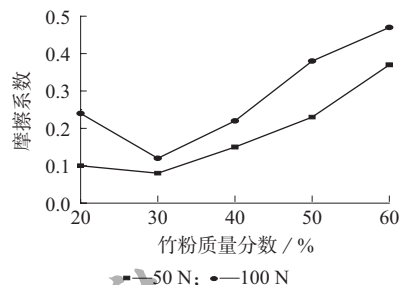


图6 不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的摩擦系数

0.12。摩擦系数的影响因素主要是 PLA/竹粉复合材料中各组分的含量、复合材料的表面质量、摩擦滚轮的表面粗糙度等。当竹纤维含量继续增加时,竹纤维受到的摩擦力也会随之增加,竹纤维对摩擦副的作用和阻碍也会越大,因此会导致摩擦系数的相应增加。

综上所述,竹粉质量分数小于30%时,PLA/竹粉复合材料的摩擦磨损性能逐渐提高,当其质量分数超过30%后,随着竹粉含量的增加,PLA/竹粉复合材料的耐磨损性能逐渐降低。竹纤维有良好的强度和刚度、热稳定性和耐化学腐蚀性,当其质量分数为30%时,不仅可提高 PLA/竹粉复合材料的力学性能,延长使用期限,还能在摩擦的过程中承担部分负荷,提高热稳定性和热传导性,进一步地提高 PLA/竹粉复合材料的耐摩擦磨损性能。

(3) 吸水性能。

图7为不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的吸水率。由图7可以看出,在竹粉质量分数为20%时,耐水性能最好。随着竹粉含量的增加,PLA/竹粉复合材料的吸水率也随之增加。复合材料的吸水途径主要有3个,即 PLA 本身吸水、竹纤维的吸水以及复合材料的孔隙吸水。PLA/竹粉复合材料的吸水性能又与植物纤维本身的吸水率、植物纤维和 PLA 界面的结合情况有关,植物纤维本身吸水性能和植物纤维中存在羟基的数量都有关系。此外,竹纤维与 PLA 界面结合情况也会影响复合材料的吸水率。当竹纤维加入量较少时,PLA/竹粉复合材

料的耐水性较优,竹粉在 PLA/竹粉复合材料中分散性好,这时竹纤维与 PLA 树脂两相界面相容性较好, PLA/竹粉复合材料的整体结构比较致密均匀,孔隙很小、数目较少,所占比例较多的 PLA 基本能将竹纤维完全包裹起来,因此减少了水分子进入木塑复合材料的内部以及与竹纤维接触概率。所以这时的 PLA/竹粉复合材料的耐水性很好。竹纤维本身具有亲水性,其所占质量分数增加后, PLA 就不能完全地把竹粉包裹起来,导致竹纤维在 PLA/竹粉复合材料中的分布均匀性降低,竹粉与 PLA 界面不能较好地相容, PLA/竹粉复合材料内部的孔隙变大、数目变多。水分能轻易通过材料表面的孔隙进入 PLA/竹粉复合材料内部的孔隙和竹纤维中。暴露在材料表面的羟基数量也会随之增加,水分更容易进入 PLA/竹粉复合材料内部,这时纤维与水分的接触面积也会增大,会使 PLA/竹粉复合材料中纤维的含水量增加。所以当竹纤维质量分数较大时,含量较少的 PLA 已经不能把处于主要相的竹纤维完全地包覆,导致复合材料的耐水性不好, PLA/竹粉复合材料的吸水率也会相应提高^[16]。

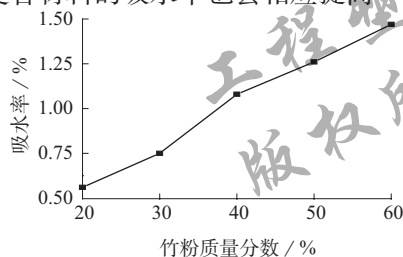


图7 不同含量竹粉的 PLA/竹粉复合材料的吸水率

2.2 偶联剂种类对 PLA/竹粉复合材料的影响

(1) 力学性能。

表4为不同偶联剂种类的 PLA/竹粉复合材料的力学性能。从表4可以看出,采用偶联剂处理 PLA/竹粉复合材料,能够提高弯曲强度、拉伸强度和缺口冲击强度。原因是,用硅烷 KH570 和钛酸酯偶联剂处理 PLA/竹粉复合材料能提高界面相容性,从而使竹纤维与 PLA 树脂形成了较强的化学键,使其在界面上紧密地结合。竹纤维和 PLA 两相之间的界面粘接性能得到显著地改善,破坏应力会从 PLA 基体过渡给竹纤维,避免了两相界面区因为竹纤维和 PLA 脱粘的情况发生,从而改善了性能。此外,偶联剂处理能让 PLA/竹粉复合材料被破坏前消耗大量的能量以此吸收冲击能,避免了 PLA 树脂脆性断裂,提高了缺口冲击强度。偶联剂改性处

理能够显著提高 PLA 木塑复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度。因为竹纤维的表面经过偶联剂的处理从而引入了长链烃基,这种长链烃基能和 PLA 分子链相容,因此改善了竹纤维和 PLA 基体的界面相容性,增强了 PLA/竹粉复合材料的力学性能。偶联剂界面处理对竹纤维的强度基本没有影响,只能降低竹纤维的极性,而影响复合材料力学性能的主要因素是 PLA 与竹纤维之间的界面结合情况^[17]。

表4 不同偶联剂的 PLA/竹粉复合材料的力学性能

偶联剂种类	洛氏硬度	弯曲强度 / MPa	拉伸强度 / MPa	缺口冲击强度 / MPa
未加偶联剂	88.3	16.38	11.68	12.97
硅烷	76.4	18.52	12.76	13.44
钛酸酯	94.6	17.72	11.72	13.65

(2) 耐磨损性能。

图8为不同偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的磨损量。图9为不同偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的摩擦系数。 PLA/竹粉复合材料的耐磨损性能的影响因素主要与材料的硬度、韧性及竹纤维与 PLA 两相结合面间的情况有关。采用偶联剂改性处理的 PLA/竹粉复合材料的磨损量要低于未添加偶联剂的复合材料的 PLA/竹粉复合材料,出现这种现象的原因是,偶联剂处理降低了摩擦过程中出现的竹纤维脱粘现象发生的几率,使竹纤维能

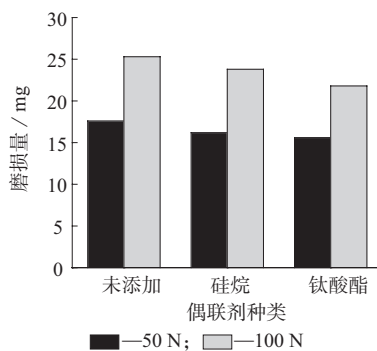


图8 不同偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的磨损量

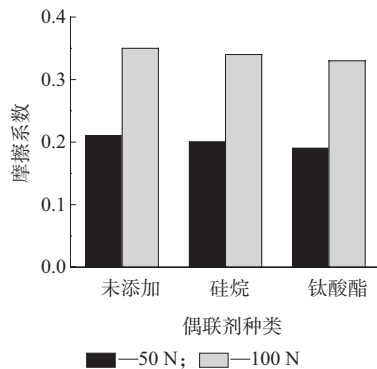


图9 不同偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的摩擦系数

够和 PLA 树脂更好地结合。同时,复合材料的摩擦接触表面会由于竹纤维对 PLA 基体的钉扎作用而降低了粘着磨损现象发生的可能性,从而提高了复合材料的耐磨性。未经过偶联剂处理的复合材料的磨损量要略高于经过偶联剂处理的复合材料,这是因为未经偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的热性能不好,在摩擦实验过程中产生热量使 PLA/竹粉复合材料的温度升高,导致竹纤维与 PLA 树脂两相结合面之间的相容性变差,材料的去除因而变得更加容易,因此 PLA/竹粉复合材料的耐磨性能较差。

(3) 吸水性能。

图 10 为不同偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的吸水率。

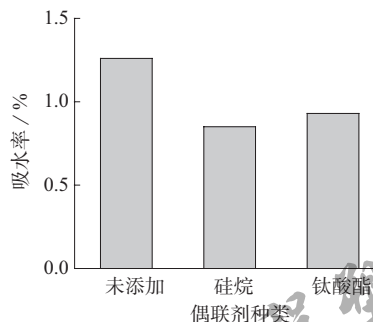


图 10 不同偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的吸水率

由图 10 可见,竹纤维具有较强的吸水性,含有大量羟基,非常容易与水分子结合形成氢键,当 PLA/竹粉复合材料完全浸入水中时,会吸收大量的水分。从图 10 看出,偶联剂的添加会使 PLA/竹粉复合材料的吸水率降低,出现这种现象的原因是,偶联剂的添加有效提高了竹纤维和 PLA 基体之间的界面相容性,由于竹纤维和 PLA 两相之间的界面粘结力的加强,水分子很难再通过扩散作用进入复合材料的内部,因此降低了复合材料的吸水率。从图中可以看出,硅烷偶联剂处理过的复合材料吸水率最低,耐水性较好,因为竹纤维表面的部分羟基会与硅烷偶联剂中的水解基团反应形成氢键,降低了竹纤维表面的羟基与水分子形成氢键的几率,硅烷改性处理的复合材料的界面结合情况最好,结合力最强。硅烷偶联剂会在竹纤维的表面形成憎水涂层,能够降低竹纤维的吸水速率,与钛酸酯偶联剂相比阻止水分子进入材料内部的效果更好^[18]。

3 结论

(1) PLA/竹粉复合材料的洛氏硬度和弯曲强度均随着竹粉用量的增大先增大后减小。当竹粉的质量分数为 30% 时, PLA/竹粉复合材料的洛氏硬

度和弯曲强度分别达到最大值 96.8 和 34.64 MPa。PLA/竹粉复合材料的缺口冲击强度和拉伸强度呈现先增大后减小的趋势。当竹粉的质量分数小于 50% 时, PLA/竹粉复合材料的缺口冲击强度和拉伸强度随着竹纤维用量的增大也随之增加,质量分数超过 50% 时随着竹粉用量的增加而减小。在其质量分数为 50% 时分别达到最大值 13.4375 kJ/m² 和 12.76 MPa。

(2) 当竹粉的质量分数小于 30% 时, PLA/竹粉复合材料的摩擦磨损性能逐渐提高,竹粉质量分数大于 30% 后,随着竹粉含量的增加, PLA/竹粉复合材料的耐磨损性能逐渐降低。摩擦系数最小为 0.08(50 N 载荷)和 0.12(100 N 载荷)。PLA/竹粉复合材料的耐磨损性能在竹粉质量分数为 30% 时为最佳,摩擦系数在 30% 时为最小。

(3) 随着竹粉质量分数的增加, PLA/竹粉复合材料的吸水率也随之增加, PLA/竹粉复合材料的吸水性逐渐增强。在竹纤维质量分数为 20% 时耐水性最佳。

(4) 不同界面处理提高了 PLA/竹粉复合材料的综合性能。其中,经过偶联剂处理的 PLA/竹粉复合材料的弯曲强度、拉伸强度和缺口冲击强度均有提高,硬度略有降低。

(5) 在摩擦学性能方面,硅烷和钛酸酯的加入均能减少 PLA/竹粉复合材料的磨耗,在一定程度上提高 PLA/竹粉复合材料的耐摩擦磨损性能。

(6) 偶联处理 PLA/竹粉复合材料的吸水率与未添加偶联剂的 PLA/竹粉复合材料相比有明显降低,从而提高了 PLA/竹粉复合材料的耐水性。

参考文献

- [1] 司丹鸽. 秸秆粉/聚乳酸木塑复合材料的制备及改性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
Si Dange. Study on preparation and modification of straw flour / poly(lactic acid) composite materials[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [2] 王成成, 李梦倩, 雷文, 等. 3D 打印用聚乳酸及其复合材料的研究进展[J]. 塑料科技, 2016, 44(6): 89-91.
Wang Chengcheng, Li Mengqian, Lei Wen, et al. Researches progress on 3D printing polylactic acid and its composites[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(6): 89-91.
- [3] Murariu M, Dubois P. PLA composites: from production to properties[J]. Adv Drug Deliv Rev, 2016, 107: 17-46.
- [4] 竺露萍. 苎麻/聚乳酸复合材料的制备、性能优化及热水老化研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
Zhu Luping. Studies on preparation, properties and hot water

- aging of ramie / polylactic acid composites[D]. Shanghai:Donghua University, 2016.
- [5] 杨琳强,金立维. 聚乳酸接枝硅烷偶联剂的制备及对聚乳酸 / 木粉复合材料的影响 [J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(7):125-130.
- Yang Linqiang, Jin Liwei. Preparation of poly(lactic acid) grafted with silane coupling agent and its influence on poly(lactic acid) / wood flour composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(7):125-130.
- [6] 符彬,郑霞,潘亚鸽,等. 蔗渣纤维增强聚乳酸复合材料的制备及性能分析 [J]. 中国造纸学报, 2015, 30(3):36-40.
- Fu Bin, Zheng Xia, Pan Yage, et al. Preparation and properties of bagasse pulp fiber-reinforced PLA composites[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2015, 30(3):36-40.
- [7] 张建,何春霞,唐辉,等. 三种植物纤维填充聚乳酸复合材料性能对比 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(11):12-17.
- Zhang Jian, He Chunxia, Tang Hui, et al. Performance comparison of three kinds of plant fibers modified polylactic acid composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(11):12-17.
- [8] 张莉,孙智慧,梁多平,等. 改性椰纤维增强聚乳酸复合材料力学性能 [J]. 包装工程, 2017, 38(7):69-73.
- Zhang Li, Sun Zhihui, Liang Duoping, et al. Mechanical properties of PLA composites reinforced with modified coir fibers[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7):69-73.
- [9] 谢振华. PLA-g-GMA 的制备及其对 PLA / 木粉复合材料性能的影响 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2015.
- Xie Zhenhua. Preparation of poly(lactic acid) grafted glycidyl methacrylate and its influence on poly(lactic acid) / wood flour composites[D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [10] 左迎峰,张彦华,顾继友,等. 偶联剂对玻璃纤维增强淀粉 / 聚乳酸复合材料性能的影响 [J]. 材料导报, 2016, 30(20):104-108.
- Zuo Yingfeng, Zhang Yanhua, Gu Jiyou, et al. Effect of coupling agent on the properties of glass fiber reinforced starch / polylactic acid composites[J]. Materials Review, 2016, 30(20):104-108.
- [11] 袁杰,路琴,唐健锋. GF 及偶联剂改性 PVC / 稻壳木塑复合材料 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(2):42-45, 55.
- Yuan Jie, Lu Qin, Tang Jianfeng. PVC / rice husk wood composites modified with glass fiber and coupling agent[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(2):42-45, 55.
- [12] 庞锦英,莫美忠,刘钰馨. 阻燃香蕉纤维增强聚乳酸复合材料的制备与表征 [J]. 化工进展, 2015, 34(4):1 050-1 054.
- Pang Jinying, Mo Xianzhong, Liu Yuxin. Preparation and characterization of flame retardant banana fiber reinforced PLA composites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(4):1 050-1 054.
- [13] 戴维福,高诚辉,何福善,等. 稻壳粉含量对树脂基复合材料摩擦学性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5):543-549.
- Dai Weifu, Gao Chenghui, He Fushan, et al. Tribological performance of resin-based composites filled with rice husk powder[J]. Tribology, 2015, 35(5):543-549.
- [14] 王春红,任子龙,刘胜凯,等. 回收塑料 / 稻壳粉木塑复合材料的制备及性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(2):39-43.
- Wang Chunhong, Ren Zilong, Liu Shengkai, et al. Study on the preparation and properties of recycled plastic / rice husk powder composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(2):39-43.
- [15] 左迎峰,李萍,刘文杰,等. 碱处理对竹纤维 / 聚乳酸可降解复合材料性能影响研究 [J]. 功能材料, 2018, 49(2):2 006-2 012.
- Zuo Yingfeng, Li Ping, Liu Wenjie, et al. Effect of alkaline treatment on the properties of bamboo fiber / polylactic acid biodegradable composite[J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(2):2 006-2 012.
- [16] 王博闻,路琴. 聚氯乙烯 / 秸秆粉木塑复合材料的性能研究 [J]. 中国塑料, 2017, 31(9):62-67.
- Wang Bowen, Lu Qin. Study on properties of poly(vinyl chloride) / wheat straw composites[J]. China Plastics, 2017, 31(9):62-67.
- [17] 张海龙. 聚氯乙烯 / 木粉复合材料的制备及性能的研究 [D]. 长春:长春工业大学, 2016.
- Zhang Hailong. Preparation and properties of PVC / wood powder composites[D]. Changchun:Changchun University of Technology, 2016.
- [18] 唐健锋,路琴,袁杰,等. 纳米 CaCO_3 及偶联剂对聚氯乙烯 / 稻壳木塑复合材料摩擦性能的影响 [J]. 化工新型材料, 2018, 46(1):210-213.
- Tang Jianfeng, Lu Qin, Yuan Jie, et al. Study on the influence of nano- CaCO_3 particle content and coupling agent on the property of PVC / rice husk wood-plastic composite[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(1):210-213.

(上接第 104 页)

- [12] Kanuga K. Degradation of polyester film exposed to accelerated indoor damp heat aging[C] // Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 2011 37th IEEE.New York:IEEE, 2011: 96-100.
- [13] 马玫,黄庆武,雷祖碧. PBT 的湿热老化性能研究 (一)[J]. 合成材料老化与应用, 2012, 41(4):5-8, 48.
- Ma Mei, Huang Qingwu, Lei Zubi. Study on humidity-heat aging of PBT(I).[J]. Synthetic Materials Ageing and Application. 2012, 41(4):5-8, 48.
- [14] 马玫,雷祖碧. PBT 的湿热老化性能研究 (二)[J]. 合成材料老化与应用, 2014, 43(3):10-12.
- Ma Mei, Lei Zubi. Study on humidity-heat aging of PBT(II) [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014, 43(3):10-12.
- [15] 肖迎红, Anne B, Marie-Pierre F. PET 的湿热老化性能研究 [J]. 塑料科技, 2001(4):22-24.
- Xiao Yinghong, Anne B, Marie-Pierre F. Study of the hygrothermal ageing behavior of PET[J]. Plastics Science and Technology, 2001(4):22-24.