

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20220026

聚乳酸/聚己内酯涂布纸基透水材料的性能

欧章明, 窦文芳, 王 慧, 薛 奎, 刘泽华

(天津市制浆造纸重点实验室, 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 采用聚己内酯(PCL)对聚乳酸(PLA)进行共混改性后得到的 PLA/PCL 二元共混涂布液对以旧瓦楞纸箱为纤维原料的纸板基材表面进行喷雾涂布, 形成纸基复合材料, 即得到一种新型的纸基透水材料. 探究 PLA/PCL 涂布量对材料干、湿状态下的抗张指数, 拉伸伸长率, 疏水性, 水蒸气透过速率的影响. 结果表明: 经 PLA/PCL 涂布处理得到的复合材料的湿强度明显提高, 湿强度保留率从 32% 提高到 50.8%; 复合材料具有良好的疏水性能, 涂布量为 25 g/m² 时的接触角达到 104.3°, 涂布量达到 10 g/m² 以上时, 材料吸水量由原先的 50.8% 降低到 15.9% 以下; 喷雾涂布后, 复合材料的水蒸气透过速率降低, 在涂布量为 20 g/m² 时较未涂布纸板基材降低 25%; 涂布量为 25 g/m² 的材料可以低速率稳定透水 40 d 以上.

关键词: 聚乳酸/聚己内酯; 纸基透水材料; 高湿强度; 疏水性; 透湿性能

中图分类号: TS762.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2022)04-0030-07

Properties of Polylactic Acid/Polycaprolactone Coated Paper-Based Water Permeable Materials

OU Zhangming, DOU Wenfang, WANG Hui, XUE Kui, LIU Zehua

(Tianjin Key Laboratory of Pulping and Papermaking, College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Polylactic acid(PLA) was blended with polycaprolactone(PCL). The PLA/PCL binary blend coating solution was sprayed on the surface of the cardboard substrate made from the old corrugated carton to form paper-based composites. Thus a new type of paper-based permeable material was obtained. The effects of PLA/PCL coating amount on the dry and wet tensile strength, tensile elongation, hydrophobicity, and water vapor transmission rate of the materials were investigated in this study. The results showed that the wet strength of the composites coated with PLA/PCL was significantly improved, and the wet strength retention rate was increased from 32% to 50.8%. The composite material had good hydrophobic property, and the contact angle reached 104.3° when the coating amount was 25 g/m². When the coating amount was above 10 g/m², the water absorption of the material decreased from 50.8% to below 15.9%. After spray coating, the water vapor transmission rate of the composite material decreased, which was 25% lower than that of uncoated paper-based material when the coating amount was 20 g/m². The material with a coating amount of 25 g/m² could permeate steadily at a low rate for more than 40 days.

Key words: polylactic acid/polycaprolactone; paper-based water permeable material; high wet strength; hydrophobicity; moisture permeability

纸基透水材料是利用纸张固有的多孔性质, 通过调节材料的孔隙大小、孔隙率及其表面或内部的亲水性、疏水性等指标控制水分子透过的一种新型功能材

料. 纸基透水材料制成容器后, 可应用于水资源匮乏地区的绿化渗灌. 目前用于渗灌的纸基透水材料需要在浆内添加大量的防水剂, 否则对水分子的阻隔性

收稿日期: 2022-02-20; 修回日期: 2022-05-16

作者简介: 欧章明(1995—), 男, 广东韶关人, 硕士研究生; 通信作者: 刘泽华, 副研究员, zehual@tust.edu.cn

能较差,透水较快;并且,在高湿环境下,纸基透水材料的力学性能损失较大,不能满足干旱地区长期的用水要求^[1]。低透水速率的纸基透水材料和持续一个月以上的供水可以提高植株的存活率。为了提高纸基透水材料的力学性能以及对液体的阻隔性能,可在纸板基材表面涂布高分子化合物^[2]。现有的复合膜往往以不可生物降解的石油基聚合物(如聚乙烯、聚丙烯等)为原料,这些复合膜的使用不利于纸纤维的循环利用,还会造成白色污染,因此用可生物降解聚合物替代不可生物降解聚合物已成为大势所趋^[3]。

作为一种可生物降解的热塑性生物基高分子聚酯,聚乳酸(PLA)具有良好的机械强度、高透明度和高光泽度;并且,PLA分子链上存在的疏水基团—CH₃使连续PLA膜具有防水功能^[4-5]。纯PLA材料的刚性大、断裂时伸长率低,导致材料硬而脆,不利于单独加工成膜,往往需要进行共聚改性、交联改性、共混改性等^[6-7]增韧改性处理。聚己内酯(PCL)是一种半结晶可生物降解高分子聚合物,具有疏水性,同时具有优良的流变性能;PCL韧性好,可作为PLA的增塑剂^[8]。

本研究采用PCL对PLA进行溶液法共混改性,得到PLA/PCL二元共混涂布液。在实际应用过程中,面对纸浆模塑生产的异形产品,通过喷涂的方式加工可以简化生产流程。利用PLA/PCL二元共混涂布液对以旧瓦楞纸箱为纤维原料的纸板基材进行表面涂布,形成纸基复合材料,即得到一种新型的纸基透水材料。该材料在保持全材料的可生物降解性能的同时,其力学性能、抗水性能也得到提高,并利用高分子材料相对稳定的理化性质使其透水性能和透湿性能得以改善。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

旧瓦楞纸箱,山东某纸厂提供;聚酰胺环氧氯丙烷树脂(PAE),固含量12.5%,河南驻马店市白云纸业有限公司;PLA,相对分子质量 8×10^4 ,华创塑化有限公司;PCL,相对分子质量 8×10^4 ,山东腾旺化工有限公司;1,4-二氧六环,分析纯,天津渤化化学试剂有限公司。

No.2505型瓦利打浆机,日本KRK公司;M10097型标准纸页成型器,德国Karl Frank GmbH公司;LD23型电子万能试验机,力试(上海)科学仪

器有限公司;JSM-IT300LV型扫描电子显微镜,日本电子株式会社;PGX-50757型接触角测量仪,瑞典FIBRO System AB公司;61-67型自动可勃值测试仪,美国TMI公司;POROLUX 100 FM型毛细流孔径分析仪,比利时普罗美特公司。

1.2 实验方法

1.2.1 纤维原料的疏解

取相当于500g绝干浆的旧瓦楞纸箱,在10L(20±5)℃的水中浸泡4h,撕成约4cm×4cm的均匀小块,根据GB/T 24325—2009《纸浆 实验室打浆 瓦利(Valley)打浆机法》采用瓦利打浆机进行纸板的疏解,疏解至无小浆块为止。疏解时控制浆浓在2%为宜。

1.2.2 纸板基材的抄造

取一定量的湿浆加水稀释得到浆浓为1.5%的纤维悬浮液,并在浆料中加入质量为绝干浆质量的0.5%的湿强剂PAE,以满足高湿的使用环境。为保证材料在实际应用中有足够的强度,抄造高定量纸板基材以满足测试中支撑一定高度的水的要求。使用快速纸页成型器抄造定量为700g/m²的纸板基材,将抄造好的湿纸幅在100℃的条件下干燥,备用。

1.2.3 PLA/PCL二元共混涂布液的配制

称取8.5g PLA颗粒和1.5g PCL颗粒于烧瓶中,加入400mL 1,4-二氧六环,在80℃条件下搅拌2h,搅拌速率200r/min,直至无可见颗粒物,得到质量浓度为25g/L的澄清透明的PLA/PCL二元共混涂布液。

1.2.4 纸基透水材料的制备

将PLA/PCL二元共混涂布液通过雾化喷笔均匀喷涂在纸板基材表面,通过控制涂布液的用量控制涂布量^[9],涂布后在通风橱中自然风干6h,使涂布液中的PLA/PCL组分在纸板表面以及内部纤维表面沉积成膜,待有机溶剂挥发至安全范围后转移至60℃烘箱烘干4h,得到最大涂布量为25g/m²的纸基透水材料。将此纸基透水材料在相对湿度(50±2)%、温度(23±1)℃的标准恒温恒湿条件下平衡24h后进行相关性能检测。

1.2.5 力学性能测定

按照GB/T 12914—2018《纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(20mm/min)》中的规定,使用电子万能试验机测定纸基透水材料干、湿状态下的抗张强度。测试材料的宽度为15mm,初始标距为50mm,拉伸速率为20mm/min。测定材料湿抗张强

度时,需将其放入水中浸泡 2 h,用滤纸轻轻吸取材料表面的水,并快速将试样置于万能试验机进行测定,湿强度保留率按式(1)进行计算.

$$r = \frac{S_w}{S_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中: r 为湿强度保留率,%; S_w 、 S_d 分别为材料的湿抗张强度和干抗张强度,kN/m.

测定抗张强度时,记录材料的断裂时伸长量,计算得到材料的断裂时伸长率.

1.2.6 耐水性能测试

纸基透水材料的耐水性能用水动态接触角、可勃值以及湿抗张强度进行表征.使用接触角测量仪测定材料表面的水动态接触角,每隔 15 s 测定一次接触角,记录 120 s 内水滴在试样上接触角的变化.使用自动可勃值测试仪,根据 GB/T 1540—2002《纸和纸板吸水性的测定(可勃法)》测定材料在 45 min 内的吸水能力(可勃值),每隔 1 min 记录 1 次实验数据.可勃值表示一定温度和压力下,在规定时间内,单位面积的纸和纸板表面吸收的水的质量.随着测试时间的延长,可勃值增幅越大说明被测试材料的疏水性能越差^[10-11].

1.2.7 透湿性能测试

纸和纸板对水蒸气的阻隔性能用水蒸气透过系数进行评价,按照现行国家标准 GB/T 1037—2021《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》对试样的水蒸气透过系数进行测试,测试温度为 $(38.0 \pm 0.6)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(90 \pm 2)\%$.

1.2.8 材料透水性能的测定

自制的透水性能测定装置如图 1 所示,在该装置上模拟纸基透水材料的渗水过程.

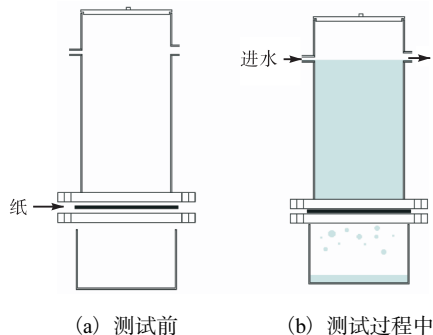


图 1 自制的透水性能测定装置图

Fig. 1 Diagram of a self-made water-permeability testing device

将制备好的试样安装在自制的透水速率测定装置上进行透水性能的测试,通过补水装置保持液面高

度不变,使测试过程中水压保持动态平衡.定时记下透过的水的体积并计算单位时间单位面积透过的水的体积,按式(2)计算试样的透水速率.

$$v = \frac{V}{At} \quad (2)$$

式中: v 为试样的透水速率, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; V 为透过试样的水的体积,L; A 为试样的有效透水面积, m^2 ; t 为透水时间,d.

1.2.9 材料孔径的测定及表面结构的表征

通过毛细流孔径分析仪对纸基透水材料的孔径进行表征,最终压力为 110 MPa;材料表面喷金处理后,通过扫描电子显微镜(SEM)对材料的表面形貌进行微观观察.

2 结果与讨论

2.1 PLA/PCL涂布量对材料力学性能的影响

使用万能试验机对所制备的材料进行力学性能测试,得到材料干、湿状态下的抗张指数,湿强度保留率和材料干、湿状态下的断裂时伸长率,结果如图 2、图 3 所示.

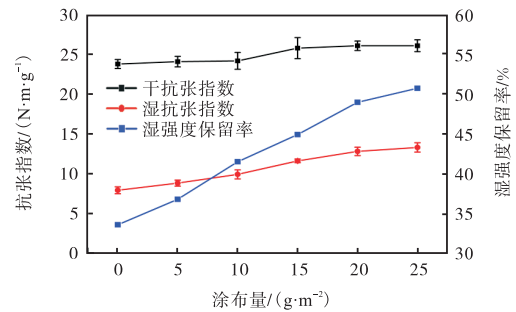


图 2 PLA/PCL 涂布量对材料干、湿抗张指数及湿强度保留率的影响

Fig. 2 Effect of PLA/PCL coating amount on dry and wet tensile index and wet strength retention rate

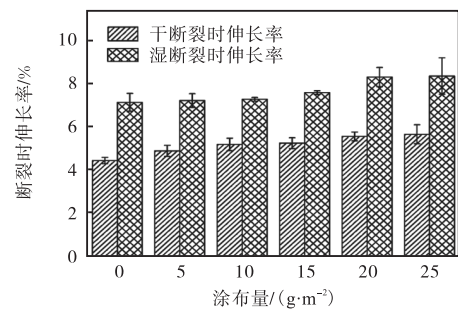


图 3 PLA/PCL涂布量对材料干、湿断裂时伸长率的影响

Fig. 3 Effect of PLA/PCL coating amount on dry and wet strain at break

结果表明,经 PLA/PCL 涂布后材料的干、湿强度均逐渐提高,湿强度提高十分明显,其中当涂布量达到 25 g/m^2 时湿强度保留率达到 50.8%,与未涂布的纸板基材相比增幅为 51.3%。材料干、湿状态下的断裂时伸长率随着涂布量的增加有所增大,涂布量为 25 g/m^2 时,试样干、湿状态下的断裂时伸长率分别从未涂布时的 4.44% 和 7.14% 提高到 5.66% 和 8.36%。材料的断裂时伸长率较低表明材料受力后形变程度较小,材料在湿润状态下仍然保持一定的机械强度,不易被破坏。

PLA/PCL 涂布液与纸板基材形成物理黏结的示意图如图 4 所示。

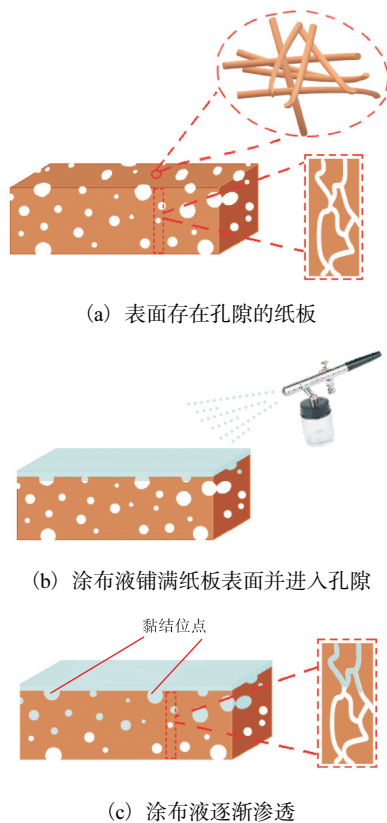


图 4 PLA/PCL 涂布液与纸板基材形成物理黏结的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of physical bonding between PLA/PCL coating solution and paper-based material

纸板基材的力学性能主要来源于纤维之间的氢键,旧瓦楞纸箱纤维的分丝帚化和细小组分可以提供更多的结合位点;湿强剂 PAE 能与纤维产生交联,在纤维间形成网状结构,使材料机械强度得到提高,同时保护纤维结合位点间的氢键,在与水接触后可以使材料保持较高的机械强度^[12]。虽然 PAE 可有效地提高纸板基材的湿强度,但不能阻止水向纤维层的渗透

和水对纤维的润胀。研究中发现,在 PLA/PCL 涂层的作用下,浸泡 2 h 后的试样仍未完全湿透,表明在涂布的一侧,涂层有效保护了附近的纤维不被水润湿。这是因为纸板基材表面并不平滑,且存在一定的孔隙,随着涂布液的进入,PLA/PCL 能在纤维表面形成包被结构的膜,同时在纸板表层形成疏水表面,在一定程度上阻止水分子进入纤维间孔隙,从而提高材料的湿强度。

2.2 PLA/PCL 涂布量对材料耐水性能的影响

纤维素的结构中存在大量的亲水基团,未经施胶或防水处理的纸和纸板表面具有很强的亲水性,纸和纸板在吸水后几乎会失去全部机械强度。材料若要在与水接触或高湿度的环境下正常使用,需要具备一定的耐水性能^[4]。

不同 PLA/PCL 涂布量试样在 0 时刻及 120 s 时的接触角以及接触角随时间变化曲线分别如图 5、图 6 所示。

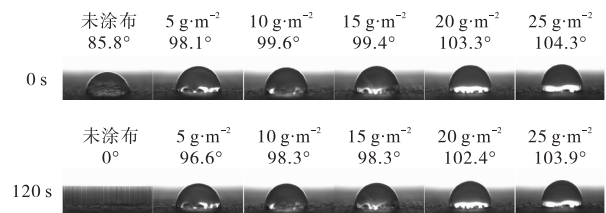


图 5 PLA/PCL 涂布量对材料表面的接触角的影响

Fig. 5 Effect of PLA/PCL coating amount on contact angle of material surface

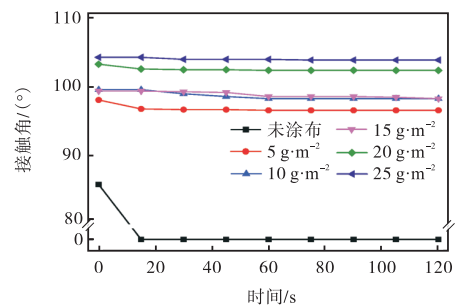


图 6 不同 PLA/PCL 涂布量试样接触角随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curve of contact angle of samples with different PLA/PCL coating amount with time

未涂布的纸板基材初始接触角小于 90° , 在 15 s 时水滴已被完全吸收, 而涂布后的试样接触角均大于 90° , 且随着涂布量的提高逐渐增大, 这说明涂布使材料形成了疏水表面。在 120 s 内试样表面接触角的变化也随着涂布量的增大而变小, 涂布量为 25 g/m^2 的试样接触角达到 104.3° , 且在 120 s 内的接触角变化仅为 0.4° 。这是因为 PLA/PCL 涂层本身具有疏水

性,随着涂布量的增大纸板基材表面的纤维逐渐被涂层覆盖,形成阻隔膜,材料的吸水量减少,从而使接触角得到保持^[13].

PLA/PCL 涂布量对可勃值的影响如图 7 所示. 未涂布的纸板基材在 1 min 内吸水就达到饱和,而经涂布的试样的可勃值明显降低. 经涂布的试样在 1 min 内有一个快速吸水的过程,之后吸水速率降低,这是因为材料表面仍然存在孔隙,与水接触时会产生毛细管效应,当这部分孔隙被水填充后,吸水速率变小并趋于稳定. 经过 45 min 的测试后,涂布量 10 g/m² 以上的试样可勃值仍处于较低水平,吸水率从未涂布试样的 50.8% 降低至 15.9% 以下. 通常认为,材料的吸水率越低疏水性能越强,涂布处理后样品的吸水率较低,说明 PLA/PCL 涂层可以有效阻止水进入纸板内部,涂层对材料湿强度的保留起到重要作用(图 2). 当水接触有涂层的一面时,需要相当长的时间才能将试样完全浸湿.

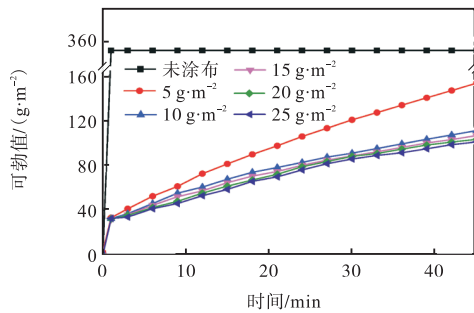


图 7 PLA/PCL 涂布量对可勃值的影响

Fig. 7 Effect of PLA/PCL coating amount on Cobb value

2.3 PLA/PCL 涂布量对材料透水性能的影响

为了进一步探究涂层对材料实际阻隔水效果的影响,在自制的透水速率测定装置上进行透水模拟测试,材料的透水速率曲线如图 8 所示. 由图 8 可知:在经 PLA/PCL 涂布的材料中,涂布量为 10 g/m² 的试样在第 7 天透水速率开始快速上升,涂布量为 15 g/m² 的试样在第 14 天出现了同样的趋势,涂布量为 20 g/m² 的试样在第 35 天透水速率开始上升,涂布量为 25 g/m² 的试样在相当长的时间内材料的透水速率都保持在一个较低的水平. 涂布量较大的试样的透水速率在实验前期较为稳定,透水速率波峰随着涂布量的增大而后移,这是由于材料涂布的高分子层的结构稳定,在一定的时间内不会因为与水的接触或润湿产生结构的变化,从而使材料拥有稳定的透水速率. 在实际应用中,在水容量相同的情况下,提高涂布量可以降低材料的透水速率并保持长时间的稳定,达到

延长供水时间的目的.

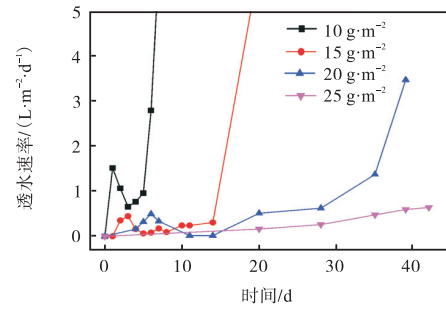


图 8 PLA/PCL 涂布量对材料透水性能的影响

Fig. 8 Effect of PLA/PCL coating amount on water permeability of materials

2.4 PLA/PCL 涂布量对材料透湿性能的影响

水蒸气透过系数是表征材料透湿性能的重要指标,材料在具备良好水阻隔性能的同时,还可以通过气态水的形式进行供水,保持土壤湿润,延长供水周期. 采用杯式增重与减重法测定在模拟的干燥环境下水蒸气的透过情况,结果如图 9 所示.

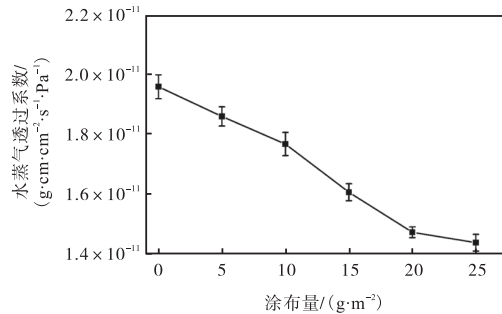


图 9 PLA/PCL 涂布量对材料的水蒸气透过系数的影响

Fig. 9 Effect of PLA/PCL coating amount on water vapor permeability of materials

由图 9 可知:随着 PLA/PCL 涂布量的提高,水蒸气透过系数呈下降趋势,涂布量为 20 g/m² 的试样比未涂布的纸板基材的水蒸气透过系数降低 25%,涂布量大于 20 g/m² 后下降趋势减缓. 这是因为 PLA/PCL 可以通过封闭和填充材料的孔隙来降低材料的水蒸气透过系数,材料亲水基团被涂层覆盖也会对形成透湿屏障起到一定的作用^[15-16].

透湿性能的主要影响因素为材料的孔隙率以及孔径大小,由于涂布对材料的孔隙率影响不大,因此材料孔道的孔径大小直接影响材料的透湿性能. 通过毛细流孔径分析仪对试样的孔径进行测定,结果见表 1. 由表 1 可知:PLA/PCL 涂层有效减小了材料的孔径,涂布量为 25 g/m² 时,平均孔径从未涂布试样的 7.24 μm 降低到 1.25 μm,降幅达 82.7%. 对比图 7

与表1可以发现,材料的可勃值与材料的平均孔径大小具有很强的相关性,这是因为随着涂布量的增加,材料表面的纤维逐渐被涂层覆盖.涂布后水分仅通过材料的孔隙进入内部,而未涂布的试样由于纤维素纤维的亲水性使水快速进入材料内部.另外,材料水蒸气透过系数(图9)与平均孔径变化趋势一致,这是因为在涂布过程中,在纤维上亲水基团被遮盖、孔径变小和通孔被封闭的共同作用下,水蒸气透过系数呈现出逐渐下降的趋势.

表1 PLA/PCL涂布量对材料孔径大小的影响

Tab.1 Effect of PLA/PCL coating amount on material pore size

涂布量/(g·m ⁻²)	最大孔径/μm	最小孔径/μm	平均孔径/μm
0	22.9	0.55	7.24
5	17.6	0.48	3.81
10	17.6	0.43	2.21
15	17.5	0.41	1.81
20	17.6	0.38	1.41
25	17.6	0.36	1.25

通过扫描电子显微镜对材料进行微观形貌观察,结果如图10所示.

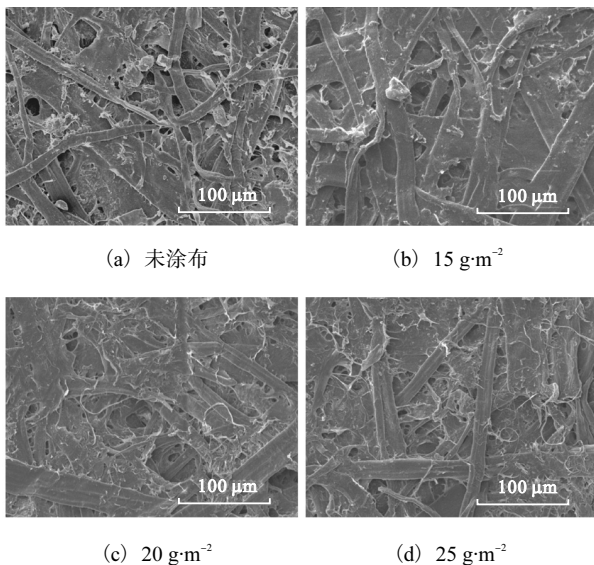


图10 不同PLA/PCL涂布量下材料表面的微观形貌
Fig.10 Micro-morphology of material surface under different coating amounts of PLA/PCL

图10(a)为未经涂布的试样,试样表面可见纤维与纤维之间交织连接形成的大量孔隙,纤维层叠之间界限分明.在涂布量为15 g/m²时,涂层覆盖在试样表面,纤维交织形成的孔隙被填充,使材料的孔径减小,阻碍了水蒸气的透过;部分纤维层叠的界限已不明显,说明表层纤维逐渐被疏水的PLA/PCL涂层覆盖包被,纤维间连接紧密而且不易被润湿,涂层通过

黏结作用和疏水性能使材料的干、湿强度得到提高.当涂布量达到20 g/m²和25 g/m²时,试样表面孔隙的尺寸进一步减小,表面覆盖更加完全,同时在纤维连接处和纤维表面出现了较多的丝状物,这可能是在涂层与纤维形成封闭结构后,额外的涂布液无法再继续渗透而使溶质在材料表面沉积,沉积后生成的这些丝状结构可以减少液滴与材料的接触,使材料获得更好的疏水性能^[17].

3 结论

采用PLA/PCL二元共混涂布液对纸板基材表面进行涂布,得到一种新型纸基透水材料,探究了PLA/PCL涂布量对材料耐水性能、透湿性能和透水性能的影响.

(1)涂布后材料的耐水性能提高,表现为湿强度、疏水性能的提高以及湿强度保留率的明显提高.PLA/PCL涂布量为25 g/m²时材料的湿强度保留率达到50.8%,与未涂布的纸板基材相比增幅为51.3%.

(2)随着涂布量的提高,材料的透水速率降低且透水速率波峰后移,涂布量为20 g/m²的材料可以保持35 d的稳定透水,涂布量为25 g/m²的材料可以保持40 d以上的稳定透水.

(3)随着涂布量的提高,材料的水蒸气透过系数逐渐降低,涂布量为20 g/m²时材料的水蒸气透过系数较未涂布的纸板基材降低25%.

(4)PLA/PCL的填充和覆盖作用减小了材料表面的孔隙,这是PLA/PCL涂布后材料性能改善的主要原因;同时,PLA/PCL涂层自身具备的疏水性能使材料形成了疏水表面,二者共同作用促使了材料各项性能的提高.

参考文献:

- [1] 池凯,欧章明,石爽,等.聚丙烯酸酯对植物纤维纸基透水材料性能的影响[J].中国造纸学报,2021,36(4):18-24.
- [2] MAES C, YUKI J G M, TENIERS C, et al. Ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH) as a functional barrier against surrogate components migrating from paper-board[J]. Journal of chemistry, 2019, 2019: 4180708.
- [3] GARTNER H, LI Y, ALMENAR E. Improved wettability and adhesion of polylactic acid/chitosan coating for bio-based multilayer film development[J]. Applied surface science, 2015, 332: 488-493.

- [4] RHIM J W, LEE J H, HONG S I. Increase in water resistance of paperboard by coating with poly(lactide) [J]. *Packaging technology and science: an international journal*, 2007, 20(6) : 393–402.
- [5] RHIM J W, KIM J H. Properties of poly(lactide)-coated paperboard for the use of 1-way paper cup [J]. *Journal of food science*, 2009, 74(2) : 105–111.
- [6] BARLETTA M, PUOPOLO M. Thermoforming of compostable PLA/PBS blends reinforced with highly hygroscopic calcium carbonate [J]. *Journal of manufacturing processes*, 2020, 56(8) : 1185–1192.
- [7] SUWANAMORNLER P, KERDDONFAG N, SANE A, et al. Poly(lactic acid)/poly(butylene-succinate-coadipate) (PLA/PBSA) blend films containing thymol as alternative to synthetic preservatives for active packaging of bread [J]. *Food packaging and shelf life*, 2020, 25(2) : 100515–100520.
- [8] DELGADO-AGUILAR M, PUIG R, SAZDOVSKI I, et al. Polylactic acid/polycaprolactone blends: on the path to circular economy, substituting single-use commodity plastic products [J]. *Materials*, 2020, 13(11) : 2655–2672.
- [9] MÜLLER K, BUGNICOURT E, LATORRE M, et al. Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields [J]. *Nanomaterials*, 2017, 7(4) : 74–120.
- [10] WU Y M, DUAN H D, YU Y Q, et al. Preparation and performance in paper coating of silicone-modified styrene-butyl acrylate copolymer latex [J]. *Journal of applied polymer science*, 2001, 79(2) : 333–336.
- [11] 彭鹏杰, 周小凡, 欧阳开桐, 等. 硅酸钠表面施胶改善纸张防水性能的机理探讨 [J]. *中国造纸学报*, 2020, 35(2) : 36–40.
- [12] 吴芳, 张秀梅, 何裔鑫, 等. PAE 树脂的制备及在废纸生产瓦楞原纸中的应用 [J]. *纸和造纸*, 2009, 28(12) : 39–43.
- [13] LI Z, RABNAWAZ M. Fabrication of food-safe water-resistant paper coatings using a melamine primer and polysiloxane outer layer [J]. *ACS Omega*, 2018, 3(9) : 11909–11916.
- [14] BORDENAVE N, GRELIER S, PICHAVANT F, et al. Water and moisture susceptibility of chitosan and paper-based materials: structure-property relationships [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2007, 55(23) : 9479–9488.
- [15] BORDENAVE N, GRELIER S, COMA V. Hydrophobization and antimicrobial activity of chitosan and paper-based packaging material [J]. *Biomacromolecules*, 2010, 11(1) : 88–96.
- [16] KOPACIC S, WALZL A, ZANKEL A, et al. Alginate and chitosan as a functional barrier for paper-based packaging materials [J]. *Coatings*, 2018, 8(7) : 235–249.
- [17] LI W L, ZONG Y K, LIU Q, et al. A highly stretchable and biodegradable superamphiphobic fluorinated polycaprolactone nanofibrous membrane for antifouling [J]. *Progress in organic coatings*, 2020, 147 : 105776–105781.

责任编辑: 周建军