

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.008

紫外线屏蔽PDA/BC/PVB复合透明薄膜的制备及性能

晋玉霞¹,刘永超¹,任小逆¹,刘恒源¹,潘玮²

(1.郑州职业技术学院材料工程系,郑州 450121; 2.中原工学院材料与化工学院,郑州 450007)

摘要: 聚乙烯醇缩丁醛(PVB)薄膜制品在包装材料领域得到了广泛应用,然而PVB材料的光降解导致材料的应用价值降低,因此,设计防紫外线PVB复合材料被认为是实现其应用价值的必要条件。以盐酸多巴胺(DA)、细菌纤维素(BC)和PVB为原材料,首先基于DA的氧化自聚合,在BC表面原位沉积聚多巴胺(PDA)对BC改性,得到PDA/BC纳米复合材料,然后通过溶液共混和涂膜工艺将PDA/BC与PVB共混,制备了PDA/BC/PVB复合透明薄膜,并使用扫描电子显微镜(SEM)、紫外-可见红外分光光度计、万能材料试验机、傅里叶变换红外光谱以及X射线衍射仪研究了PDA/BC的添加量对PDA/BC/PVB复合薄膜结构与性能的影响。SEM表明,当DA的质量分数为0.1%时,反应得到的PDA可均匀覆盖在BC的表面,且制备的PDA/BC/PVB复合薄膜的截面致密;当PDA/BC质量分数小于1%时PDA/BC在PVB中分散均匀。紫外透过率结果表明,当加入质量分数为1%的PDA/BC时,PDA/BC/PVB复合材料在370 nm处紫外屏蔽效率达到98%,复合透明薄膜表现出优异的紫外线阻隔性能,材料的拉伸强度高达61.2 MPa,远高于原始PVB的强度(39.7 MPa)。光学照片显示PDA/BC的加入并未改变材料的透明性。

关键词: 聚乙烯醇缩丁醛;原位聚合;聚多巴胺;紫外线屏蔽;纤维增强

中图分类号: TQ317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)08-0052-06

Preparation and properties of UV-shielding PDA/BC/PVB composite transparent films

JIN Yuxia¹, LIU Yongchao¹, REN Xiaoni¹, LIU Hengyuan¹, PAN Wei²

(1. Department of Materials Engineering of Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450121, China;

2. School of Materials & Chemical Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Polyvinyl butyral (PVB) film products are widely used in the field of packaging materials, however, the photodegradation of polymeric materials leads to the reduction of the application value of the materials, therefore, the design of UV-protected PVB composites chanting is considered as a necessity to realise the value of their applications. Taking dopamine hydrochloride (DA), bacterial cellulose (BC) and PVB as raw materials, firstly, based on the self-oxidative polymerization of DA, poly (dopamine) (PDA)/BC nanocomposites were obtained by in-situ deposition of PDA on the surface of BC after the modification of BC, and then PDA/BC/PVB composite nano-films were prepared by co-mixing PDA/BC with PVB through solution blending and film-coating processes, and the effects of the addition of PDA/BC on the structure and properties of PDA/BC/PVB composite films were investigated by using scanning electron microscopy (SEM), ultraviolet-visible infrared (UV) spectrophotometer, universal materials testing machine, Fourier infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffractometer (XRD). The SEM analysis demonstrated that when the mass fraction of DA is 0.1%, the generated PDA could uniformly cover the surface of BC. Furthermore, the cross-section of the prepared PDA/BC/PVB composite film exhibite a dense structure, and PDA/BC is uniformly dispersed in PVB when the addition of PDA/BC is less than 1 %. The UV transmittance results show that the UV shielding efficiency of PDA/BC/PVB composites at 370 nm is more than 98% after the addition of PDA/BC in the amount of 1 %, and the composite transparent films show excellent UV-blocking performance. The tensile strength of the material at this time is as high as 61.2 MPa, much higher than that of the original PVB (39.7 MPa). Optical photographs showed that the addition of PDA/BC does not change the transparency of the material.

Keywords: polyvinyl butyral ; in-situ polymerization ; polydopamine ; UV shielding ; fiber reinforcement

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(24A430051)

通信作者:潘玮,教授,主要研究方向为功能高分子材料

收稿日期: 2024-06-08

引用格式: 晋玉霞,刘永超,任小逆,等.紫外线屏蔽PDA/BC/PVB复合透明薄膜的制备及性能[J].工程塑料应用,2024,52(8):52-57.

JIN Yuxia, LIU Yongchao, REN Xiaoni, et al. Preparation and properties of UV-shielding PDA/BC/PVB composite transparent films[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 52-57.

随着地球臭氧层的破坏,UVB区(280~320 nm)和UVA区(320~380 nm)的紫外光不能被臭氧大气充分过滤,导致越来越多的紫外线到达地表^[1-2]。过量的紫外线辐射会提高人体患皮肤癌和白内障的风险^[3]。同时过量的紫外线辐射也会导致塑料制品老化变脆、性能下降并造成材料使用寿命降低^[4-5]。而目前人们对聚乙烯醇缩丁醛(PVB)的使用需求很大,其在玻璃夹层、建材、医疗卫生、食品包装和汽车装饰材料中被广泛应用^[6-7]。因此,制备具有高紫外屏蔽性能和优异力学强度的PVB复合透明薄膜有着非常重要的意义。

目前常见的制造光学透明和紫外线屏蔽聚合物复合材料是在基体材料中添加有机或无机紫外线吸收剂来实现的。例如将无机纳米颗粒(如 SiO_2 , ZnO , TiO_2 , Al_2O_3)添加到聚合物中,制备紫外线屏蔽复合材料^[8-11]。Liu等^[12]设计了一种新型的生物分子肉桂酸功能化的氧化锌纳米粒子来增强PVB的紫外屏蔽性能,改性后的PVB薄膜表现出优异的紫外屏蔽性能。Smirnov等^[13]制备了基于 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 纳米粒子的光子晶体多层膜[聚二甲基硅氧烷(PDMS)/ $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$]。该膜表现出较好的紫外线屏蔽行为,但膜的透明度只有约60%,而无机纳米粒子固有的宽带隙也直接导致其紫外吸收并不完全。无机纳米粒子表现出固有的光催化效应,这可能导致聚合物基体的降解,另外,大量功能性填料的加入将会显著降低复合材料的力学性能^[14]。为了解决这些问题,最近的研究集中在制备同时具有抗紫外线和高力学性能的材料上。其中聚多巴胺(PDA)是由多巴胺合成的一种类黑色素聚合物,具有和天然黑色素类似的物理化学性质,且具有对长波段的紫外光吸收弱和对短波段紫外光吸收强的特点,这使其成为制备紫外屏蔽材料的首选添加剂^[15-16]。另外细菌纤维素(BC)由于具有生物可降解性、低细胞毒性、比表面积大和质量轻的特点,已经在包装材料上得到应用^[17-19]。例如,黄小芳等^[20]以BC和聚乙烯醇(PVAL)为基体材料,通过浸渍法制备了PVAL/BC高强度透明复合薄膜,结果表明,当PVAL质量分数为0.3%时,复合薄膜的拉伸强度可达244.9 MPa,在800 nm处光透射率高达90.3%,成功制备了具有高透明度的复合薄膜。而单一的纤维增强复合材料往往表现出较差的紫外线屏蔽性能。

笔者首先利用盐酸多巴胺(DA)的氧化自聚合,在BC表面原位沉积PDA,对BC进行表面改性,改善BC在PVB基体材料中的分散性能和紫外线屏蔽性能,然后将DA改性后的BC分散后和PVB经过溶液共混、涂膜工艺制备了PDA/BC/PVB纳米复合薄膜。研究了PDA/BC加入量对PVB的紫外线屏蔽性能、力学性能和透光性的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PVB:黏度为5 Pa·s,分子量为180 000~240 000,工业级,广东粤美化工有限公司;

BC:海南亿得食品有限公司;

DA:分子量为189.64,纯度98%,上海阿拉丁生物试剂有限公司;

无水乙醇:分析纯,天津市富于精细化工有限公司;

Tris-HCl缓冲液:PH9076,福州飞净生物科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

鼓风干燥箱:DZX-6050B,上海南荣实验室设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Regulus8100,日立科学仪器(北京)有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Tensor27/Hyperion,上海善福电子科技有限公司;

紫外-可见红外分光光度(UV)计:Lambda 950,北京世贸远东科学仪器有限公司;

X射线衍射(XRD)仪:D8 Advance,德国bruker公司;

万能拉力试验机:WDT-30,深圳市凯强利试验仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 BC的改性

首先将BC膜裁剪成一定尺寸,置于蒸馏水中6 h,去除表面杂质。其次,配置10 mmol/L的Tris-HCl缓冲液,并将0.2 g DA加入到Tris-HCl缓冲液中,同时将BC膜置于上述溶液中浸泡12 h,在BC表面原位沉积PDA,取出后冷冻干燥,得到不同质量分数DA改性的复合材料(PDA/BC)。其中DA的质量分数分别为0.025%,0.05%,0.1%,0.2%。

1.3.2 PDA/BC/PVB复合透明薄膜的制备

将PVB加入到无水乙醇中,搅拌2 h使PVB溶解;将1.3.1中制备的PDA/BC粉碎后加入到PVB的无水乙醇溶液中,搅拌3 h,消泡后涂膜,置于烘箱中60℃干燥24 h,得到PDA/BC/PVB复合薄膜。制备不同PDA/BC添加量的PDA/BC/PVB复合薄膜。其中PDA/BC质量分数分别为0.5%,1%,2%。

1.4 测试与表征

SEM分析:首先采用SEM拍摄PDA/BC表面形貌,观察PDA在BC上的分布;其次将PDA/BC/PVB复合薄膜在液氮中淬断,通过SEM观察PDA/BC在PVB中的分布情况。所有样品拍摄前用电子溅射仪在真空状态和10 mA的电流下进行点射20次喷金处理。

FTIR分析:取少量样品和溴化钾混合,在研钵中充分研磨,15 min干燥处理后在压片机下压成透明薄片后进行扫描。其中扫描波长范围4 000~500 cm^{-1} ,扫描速率为4 cm^{-1} 。

紫外透过率分析:采用UV计在800~200 nm 范围测试样品的紫外透过率。

XRD分析:用XRD仪表征材料的晶体结构,测试角度范围为 10° ~ 80° ,扫描速度为 $10^{\circ}/\text{min}$ 。

力学性能分析:根据GB/T 24218.3-2010,通过万能拉力试验机测试材料的力学性能。试样规格为5 mm×60 mm,每个试样测试5次,取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 改性BC的形貌分析

DA质量分数对BC形貌的影响如图1所示。由图1可知,纯BC杂乱无规则且纤维表面光滑。在碱性条件下原位沉积PDA后,纤维表面变得粗糙,当DA质量分数小于0.1%时,生成的PDA可均匀沉积在BC纤维的表面;随着DA含量的增加,PDA除了包覆在BC纳米纤维上之外,过量的PDA开始出现团聚,如图1e所示。以上结果表明,通过原位聚合成功将PDA沉积到BC纤维的表面,PDA在BC上的均匀分布有利于PDA/BC作为功能填料发挥作用。EDS结果表明,当DA质量分数为1%时,氮元素在BC表面均匀分布(图1f)。综合成本因素和SEM测试结果,在下面的研究选择质量分数为0.1%的DA改性BC。

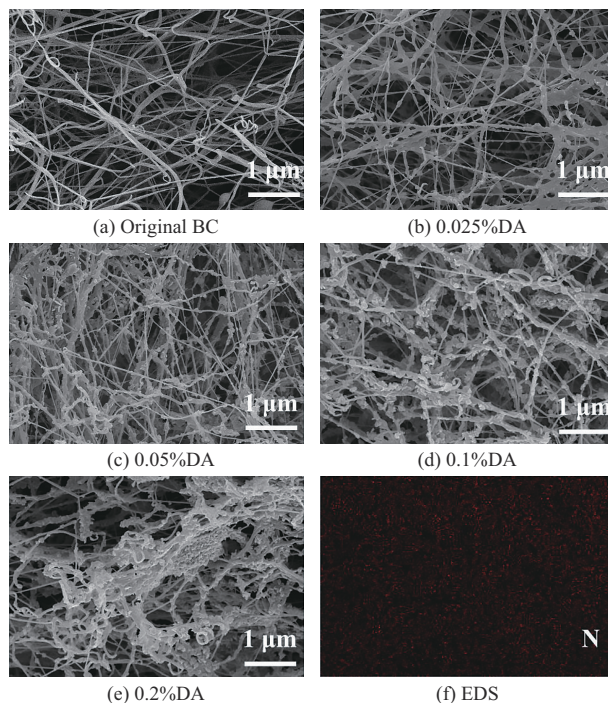


图1 不同质量分数的DA改性BC复合材料的SEM图及0.1% DA改性BC的EDS图

Fig. 1 SEM images of BC composites modified by DA with different mass fractions and EDS diagram of 0.1% DA modified BC

2.2 PDA/BC/PVB复合透明薄膜的形貌分析

图2为PVB复合透明薄膜的光学照片,由图2可知,随着PDA/BC加入量的增加,制备的复合薄膜的颜色逐渐加深,但复合薄膜的透明性并没有改变,这表明PDA改性后的BC在PVB中分散均匀,如图2b~2d所示。

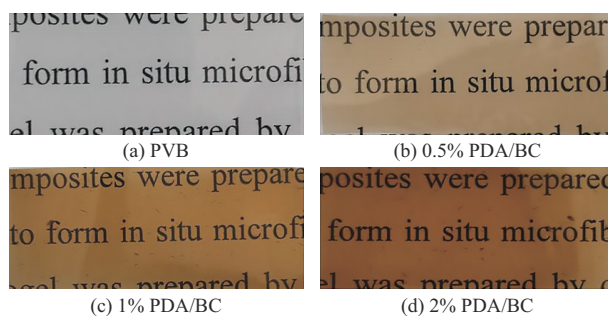


图2 PDA/BC改性PVB的光学照片

Fig. 2 Optical photos of PDA/BC modified PVB

图3为不同浓度PDA/BC对应的PDA/BC/PVB复合薄膜的SEM图。图3a表明,经过共混、涂膜工艺制备的原始PVB膜的断面光滑。将PVB和PDA/BC共混以后得到的复合透明薄膜表现出较为粗糙的断面结构,当PDA/BC质量分数小于1%时,PDA/BC在PVB基体中分布均匀,当PDA/BC质量分数为2%时,出现纤维的团聚现象。另外所有样品内

部均结合致密(图 3b~图 3d),这是复合材料保持透明性的关键。

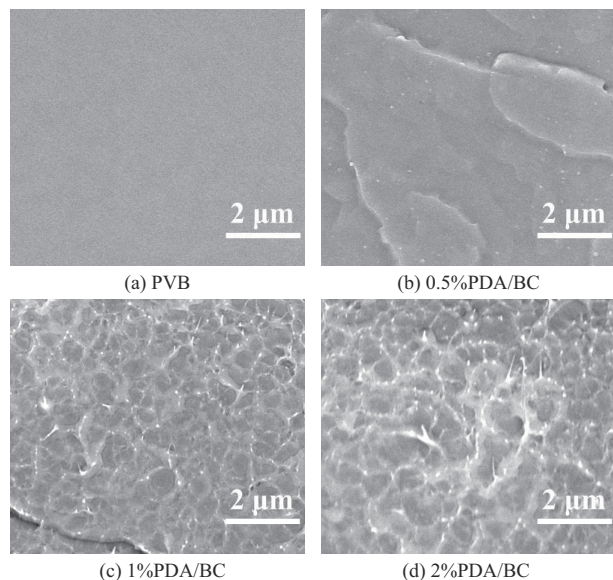
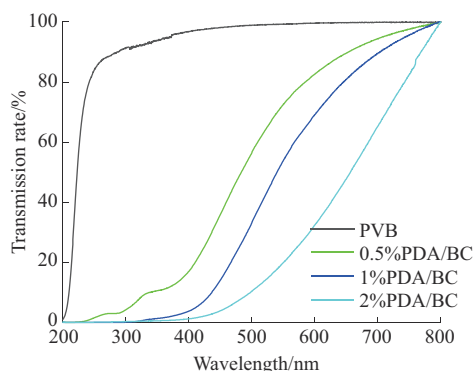


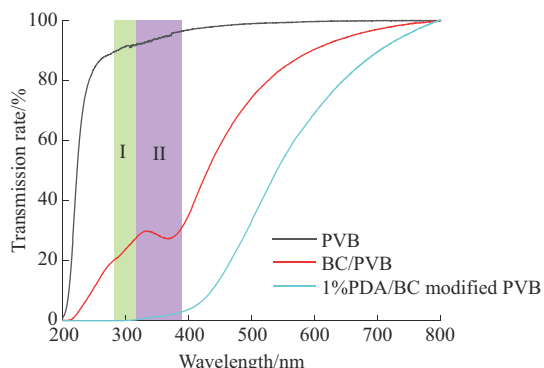
图3 PDA/BC不同质量分数时PDA/BC/PVB复合薄膜的SEM图
Fig. 3 SEM images of PDA/BC/PVB composite films corresponding to different mass fractions of PDA/BC

2.3 PDA/BC/PVB复合透明薄膜的光学性能分析

图4为PDA/BC改性PVB复合薄膜的紫外-可



(a) PVB and PVB modified by PDA/BC with different mass fractions



(b) PVB, BC/PVB and 1% PDA/BC modified PVB (I:UVB, II:UVA)

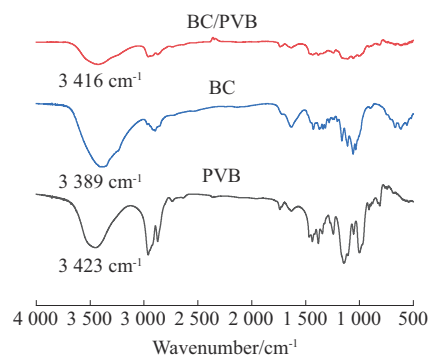
图4 PVB及改性PVB复合薄膜的紫外-可见光透过光谱图

Fig. 4 Ultraviolet-visible light transmission spectra of PVB and modified PVB composite films

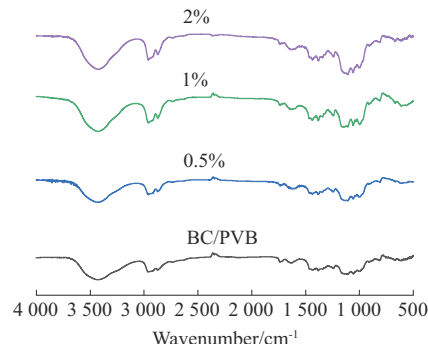
见光透过光谱图。如图4a所示,随着体系中PDA/BC添加比例的增加,复合膜的透光率逐渐降低,且紫外光和近红外光透过率明显降低。图4b为PVB、BC/PVB及质量分数1%的PDA/BC改性PVB的紫外透过率。结果表明,在紫外到可见光范围内,纯PVB的透过率高,而PDA/BC复合透明膜在紫外到可见光范围内的透过率明显降低,且PDA的加入可以进一步提高PDA/BC/PVB复合薄膜对紫外光和近红外光的阻隔性能。这是由于均匀分布在BC表面的PDA中含有大量的芳香族化合物,当紫外光线照射到PDA上时,这些芳香族化合物会吸收光能,并将其转化为其热量,从而提高PDA基复合材料的紫外线屏蔽性能。当PDA/BC加入质量分数为1%时,370 nm处紫外透屏蔽率达到98%以上,PDA/BC的加入显著提高了PVB的紫外屏蔽效果。

2.4 PDA/BC/PVB复合透明薄膜的红外光谱分析

图5为PVB膜,BC,BC/PVB复合薄膜以及PDA改性后的BC/PVB复合薄膜的FTIR谱图。根据谱图可知,PVB膜在 3423 cm^{-1} 处为—OH的伸缩振动峰, 2959 cm^{-1} 处为—CH₂—的对称伸缩振动吸收峰, 2870 cm^{-1} 处为—CH₃的弯曲振动吸收峰,



(a) FTIR of PVB, BC and PDA/BC



(b) FTIR of PVB modified by PDA/BC with different mass fractions

图5 PVB,BC及改性PVB复合薄膜的FTIR谱图

Fig. 5 FTIR spectroscopy of PVB,BC and modified PVB composite films

1 434 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2-$ 的弯曲振动吸收峰, 1 243 cm^{-1} 处为 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动吸收峰。BC/PVB 复合材料在 3 416 cm^{-1} 处出现 $-\text{OH}$ 的伸缩振动峰, 峰值向低波数处移动, 这是 BC 和 PDA 之间形成氢键的结果。PDA 改性后的 BC/PVB 复合材料的 $-\text{OH}$ 伸缩振动峰出现在 3 419 cm^{-1} 处, 这是由于 BC 和 PDA 内部的氨基和 PVB 基体内的羟基相互作用的结果。

2.5 PDA/BC/PVB 复合透明薄膜的 XRD 分析

进行 XRD 测试以分析改性 BC 的引入对 PVB 膜晶体结构的影响, 见图 6。由图 6 可知, 所有样品在 $2\theta=8^\circ$ 和 18° 出现衍射峰。然而, 对于 BC/PVB 复合薄膜, 在 $2\theta=14.3^\circ$ 和 22.5° 处是 BC 的特征峰, 分别对应于 BC 的 (110) 和 (200) 晶面^[21]。而 PDA/BC 改性后的 PDA/BC/PVB 复合薄膜并无新的衍射峰出现, 表明 PDA/BC 的引入并未改变 PVB 结构。

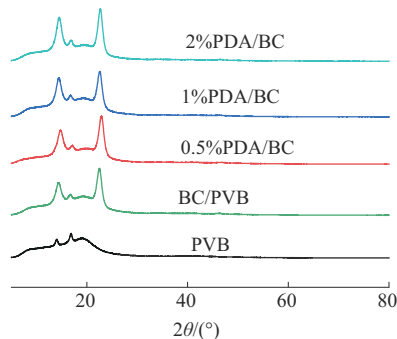
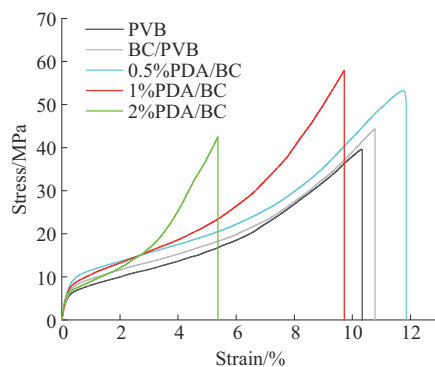


图6 PVB、BC/PVB 及不同 PDA/BC 质量分数时 PDA/BC/PVB 复合薄膜的 XRD 曲线

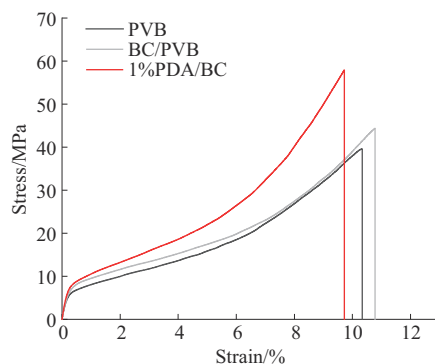
Fig. 6 XRD curves of PVB, BC/PVB and PDA/BC/PVB composite films with different PDA/BC mass fractions

2.6 PDA/BC/PVB 复合透明薄膜的力学性能分析

为研究 PVB 复合膜的力学性能, 进行了单轴拉伸试验。典型的应力-应变曲线如图 7 所示。纯 PVB 薄膜的断裂强度为 39.7 MPa, 断裂伸长率为 10.3%。PDA 改性以后, 复合薄膜的断裂强度随着 PDA 加入量的增加表现出先增加后减小的趋势, PDA/BC 质量分数为 1% 时, 复合薄膜的断裂强度达到 61.2 MPa, 与纯 PVB 膜相比提高了 54.2%, 此外, 与仅使用纯 BC 改性的 PVB 膜相比, 加入质量分数 0.5% 的 PDA/BC 的复合薄膜具有更高的断裂强度和断裂伸长率, 这可能是由于 PDA 的加入在 PVB 基体中引入大量羟基官能团, 这些官能团与 PVB 发生相互作用的结果^[22]。用质量分数 2% 的 PDA/BC 对 PVB 改性后, 复合薄膜的强度和断裂伸长率均下降, 这可能是由于过量的 PDA/BC 发生团聚使 PDA/BC/PVB 复合薄膜内存在更多的缺陷。



(a) Pure PVB and PDA/BC modified PVB



(b) PVB, BC/PVB and PDA/BC modified PVB

图7 PVB、BC/PVB 及不同质量分数 PDA/BC 改性 PVB 应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of PVB, BC/PVB and PDA/BC modified PVB with different mass fractions

3 结论

以 BC 为原材料, 通过原位沉积法在 BC 上沉积 PDA 层, 制备了 PDA/BC 复合材料; 以改性后的 BC (PDA/BC) 为功能相, PVB 为基体材料, 通过溶液共混、涂膜工艺成功制备了具有优异紫外屏蔽性能和良好透光性的复合薄膜, 并对复合薄膜的形貌、结构和性能进行了研究。

(1) SEM 结果表明, 当 DA 质量分数为 0.1% 时, PDA 在 BC 纤维表面分布均匀, 当 PDA/BC 的加入质量分数小于 1% 时, PDA/BC 在 PVB 基体材料中分布均匀。

(2) 光学性能测试结果表明, PDA/BC/PVB 复合薄膜具有良好的透光性和紫外线屏蔽性能, 当 PDA/BC 质量分数为 1% 时, PDA/BC/PVB 复合薄膜在 370 nm 处的紫外线屏蔽率高达 98%。

(3) 力学性能测试结果表明, 当 PDA/BC 质量分数为 1% 时, PDA/BC/PVB 复合薄膜的拉伸强度达到 61.2 MPa, 与未改性 PVB 相比, 复合薄膜的断裂强度提高了 54.2%, 适量 PDA/BC 纤维的加入可显著提高 PVB 透明薄膜的力学性能。

以上结果表明,成功制备了具有良好透明性的PDA/BC/PVB复合薄膜,实现了PVB兼具良好紫外线屏蔽和力学性能改良的特点,这项作为紫外屏蔽玻璃的生产提供了一种新的解决方案,预计使用PDA/BC/PVB复合膜代替传统的PVB薄膜来制造夹层玻璃可以更加有效隔绝紫外线。

参考文献

- [1] HUANG Junxian, CHEN Heng, HAO Beibei, et al. Copolymerization strategy to prepare polymethyl methacrylate-based copolymer with broad-band ultraviolet shielding and luminescent downshifting properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54: 14 624–14 633.
- [2] 罗丹, 苏雯皓, 舒璇, 等. 纳米纤维素基紫外屏蔽膜材料的研究进展[J]. *林产化学与工业*, 2023, 43(4):140–150.
LUO Dan, SU Wenhao, SHU Xuan, et al. The development of nanocellulose-based UV shielding film materials has advanced significantly in recent years[J]. *Chemistry & Industry of Forest Products*, 2023, 43(4):140–150.
- [3] IVANOV I V, MAPPE T, SCHAUPP P, et al. Ultraviolet radiation oxidative stress affects eye health[J]. *Journal of biophotonics*, 2018, 11(7). DOI:10.1002/jbio.201700377.
- [4] LDA R M, DEO L M C, DAC F, et al. Accelerated aging effects in composites used as repair for pipes in oil industry [J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(11):5 918–5 929.
- [5] VASYLIUS M, TADZIJEVAS A, ŠAPALAS D, et al. Degradation of mechanical properties of A-PET films after UV aging[J]. *Polymers*, 2023, 15(20). DOI:10.3390/polym15204166.
- [6] SAMIEIAN MA, CORMIE D, SMITH D, et al. On the bonding between glass and pvb in laminated glass[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 214:504–519.
- [7] 黄菊, 杨莹. 纳米ATO/PVB透明隔热涂料制备与性能研究[J]. *电镀与涂饰*, 2016, 35(2):58–62.
HUANG Ju, YANG Ying. Preparation and performance of nano ATO/PVB transparent thermal insulation coatings[J]. *Plating and Finishing*, 2016, 35(2):58–62.
- [8] ZHU Ying, WANG Tianhao, DAI Yanan, et al. Surface engineering of regenerated cellulose nanocomposite films with high strength, ultraviolet resistance, and a hydrophobic surface[J]. *Polymers*, 2023, 15(6). DOI:10.3390/polym15061427.
- [9] LI Xiaojuan, NATSUKI J, NATSUKI T. Eco-friendly synthesis of symmetrical pyramid structured zinc oxide nanoparticles and high temperature stable UV-shielding properties of zinc oxide/polyurethane composite membranes[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2021, 130. DOI: 10.1016/j.physe.2021.114677.
- [10] WANG Yanxin, WANG Shiwei, WAMG Tiantian, et al. A green nanocomposite membrane for concrete moisturizing, with excellent barrier properties and aging resistance[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35. DOI:10.1016/j.mtcomm.2023.105553.
- [11] ZHANG Xiongfeng, SONG Lian, WANG Zhongguo, et al. Highly transparent graphene oxide/cellulose composite film bearing ultraviolet shielding property[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 145:663–667.
- [12] LIU Huaqiang, HU Dechao, MA Wenshi. Cinnamic acid-functionalized ZnO nanoparticles for constructing UV-shielding and mechanically robust polyvinyl butyral composites[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 629. DOI:10.1016/j.colsurfa.2021.127438.
- [13] SMIRNOV J R C, CALVO M E, MIGUEZ H. Selective UV reflecting mirrors based on nanoparticle multilayers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(22):2 805–2 811..
- [14] LI Ruozhou, Hu Anming, BRIDGES D, et al. Robust Ag nanoplate ink for flexible electronics packaging[J]. *Nanoscale*, 2015, 7 (16):7 368–7 377.
- [15] YANG Jiangfeng, WANG Ruoyun, ZHANG Xinfen, et al. Self-roughened superhydrophobic polydopamine coating with excellent self-cleaning, anti-corrosion, and UV shielding performances [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(19). DOI: 10.1002/app.52114.
- [16] LI Qing, LIU Sheng, GUO Yujuan, et al. Mussel-inspired polydopamine-enhanced polyimide for ultrahigh toughness and ultraviolet shielding applications[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2021, 3(2):896–907..
- [17] 苏雯皓, 舒璇, 董茂林, 等. 纳米纤维素/木质素抗紫外膜的制备与性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(12):93–99.
SU Wenhao, SHU Xuan, DONG Maolin, et al. Preparation and properties of cellulose/lignin nanofilms with UV resistance[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2022, 38(12):93–99.
- [18] 李鹏辉, 张璐, 杨驰, 等. 木质素基生物质材料性能与应用的研究进展[J]. *中国造纸*, 2022, 41(7):95–102.
LI Penghui, ZHANG Lu, YANG Chi, et al. Research progress on the properties and applications of lignin-based biomass materials [J]. *China Paper*, 2022, 41(7):95–102.
- [19] 何英姿, 赵轩, 刘堂龙, 等. 高强, 高透明, 紫外屏蔽细菌纤维素复合膜的制备与性能[J]. *中国造纸*, 2023, 42(10):1–11.
HE Yingzi, ZHAO Xuan, LIU Tanglong, et al. Preparation and properties of highly transparent, UV-shielded bacterial cellulose composite films[J]. *China Paper*, 2023, 42(10):1–11.
- [20] 黄小芳, 赵轩, 何英姿, 等. 高强, 高透明, 高疏水细菌纤维素复合膜[J]. *造纸科学与技术* 2023, 42(3):1–7.
HUANG Xiaofang, ZHAO Xuan, HE Yingzi, et al. Bacterial cellulose composite membrane with high strength, transparency and hydrophobicity[J]. *Paper Science and Technology*, 2023, 42(3): 1–7.
- [21] HUO Yingjie, GUO Dan, YANG Jialu, et al. Multifunctional bacterial cellulose nanofibers/polypyrrole (PPy) composite films for joule heating and electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(5):2 552–2 560.
- [22] GEORGOPANOS P, EICHNER E, FILIZ V, et al. Improvement of mechanical properties by a polydopamine interface in highly filled hierarchical composites of titanium dioxide particles and poly (vinyl butyral) [J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 146:73–82.