

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.007

PMMA/棉花纤维素复合薄膜的制备及性能

孙浩炯,尚蒙娅,贾冬晴,孙铭,安蒙恩,唐哲

(河南工业大学材料科学与工程学院,郑州 450001)

摘要:为改善聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的热性能和力学性能,以经过预处理的棉花纤维素为增强体,将PMMA与棉花纤维素溶液按不同比例混合,利用溶液浇铸法制备PMMA/棉花纤维素复合薄膜,并利用热重分析、透光性分析以及拉伸性能测试研究了不同棉花纤维素含量的PMMA/棉花纤维素复合薄膜的性能。结果表明,与PMMA薄膜相比,PMMA/纤维素复合薄膜的热稳定性和力学性能均有所提升,PMMA/纤维素复合薄膜的热分解温度提高8.3%;随着棉花纤维素含量从0增加到15%,拉伸强度从10.53 MPa提升到55.95 MPa,最高提升了431%。此外,复合薄膜的光透过率随着棉花纤维素含量的增加而降低。当棉花纤维素含量为7.5%时,复合薄膜不仅具有良好的力学性能,而且具有较高的透光率,综合性能较好。

关键词:聚甲基丙烯酸甲酯;棉花纤维素;复合薄膜;热性能;力学性能

中图分类号: TQ327.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0034-06

Preparation and Properties of PMMA/Cotton Cellulose Composite Films

Sun Haojiong, Shang Mengya, Jia Dongqing, Sun Ming, An Meng'en, Tang Zhe

(School of Material Science & Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the thermal and mechanical properties of polymethyl methacrylate (PMMA), PMMA/cotton cellulose composite films were prepared by solution casting method with PMMA as substrate and pretreated cotton cellulose as reinforcement. The properties of PMMA/cotton cellulose composite films with different contents of cotton cellulose were studied by thermogravimetric analysis, transmittance analysis and tensile test. The results show that compared with pure PMMA film, the thermal stability and mechanical properties of PMMA/cellulose composite film are improved. The thermal decomposition temperature of PMMA/cellulose composite film increases by 8.3%. With the content of cotton cellulose increasing from 0 to 15%, the tensile strength increases from 10.53 MPa to 55.95 MPa, and the strength increases by 431% when the content is 15%. In addition, the light transmittance of the composite film decreases with the increasement of the content of cotton cellulose. When the content of the cotton cellulose is 7.5%, the composite film not only has good mechanical properties, but also has high transmittance, which shows a good comprehensive performance.

Keywords: polymethyl methacrylate; cotton cellulose; composite film; thermal property; mechanical property

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)俗称有机玻璃,具有良好的耐候性、电绝缘性^[1-3],但耐热性、力学强度等较差^[4-5],为了改善其热学、力学性能,需要加入填充剂进行改良^[6-8]。纤维素是自然界中分布最广、储量最为丰富的一类天然高分子可再生资源,并且有着优异的性质^[9-12]。与人工合成的高分子材料相比,纤维素具有无毒、无污染,可降解、易改性等特点

^[13-14]。在实验中纤维素常用作改良材料以提升基体的力学性能^[15]。因此,纤维素是对PMMA进行改性的优良材料,且PMMA/纤维素复合材料也是一种环境友好型材料^[16-17]。

笔者采用氢氧化钠与亚硫酸钠的化学预处理和物理机械研磨相结合的方法,制备出棉花纤维素微粒。然后以甲基丙烯酸甲酯(MMA)为单体,以

基金项目: 河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2019BS010),河南工业大学创新基金支持计划专项项目(2020ZKCJ07)

通信作者: 尚蒙娅,讲师,研究方向为聚合物改性和光热转换材料 E-mail: mengyashang@haut.edu.cn

收稿日期: 2020-11-05

引用格式: 孙浩炯,尚蒙娅,贾冬晴,等. PMMA/棉花纤维素复合薄膜的制备及性能[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):34-39.

Sun Haojiong, Shang Mengya, Jia Dongqing, et al. Preparation and properties of PMMA/cotton cellulose composite films[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):34-39.

偶氮二异丁腈(AIBN)为引发剂,以碱式碳酸镁和氢氧化钠为分散剂,制备了PMMA颗粒。之后,以纤维素和PMMA为原料,利用溶液浇铸法制备出PMMA/棉花纤维素复合材料。并采用结构分析、热性能分析、透光性分析以及力学性能分析等方法,对复合薄膜的结构与性能进行研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

脱脂棉(医用)、氢氧化钠(分析纯)、亚硫酸钠(分析纯)、MMA(分析纯)、碱式碳酸镁(分析纯)、聚乙烯醇(分析纯)、AIBN(分析纯)、微孔滤膜(0.22 μm)、丙酮(分析纯):上海国药化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101S型,上海力辰邦西有限公司;

超微粉碎机:MKCA6-2型,台杏贸易有限公司;

光学显微镜:XP-213型,上海长方有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Inspectf50型,美国FEI公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IRPrestige-21型,日本岛津公司;

微机差热天平:WCT-2C型,北京光学仪器厂;

紫外-可见分光光度计:UV2550型,日本岛津公司;

万能力学试验机:WUW-50H型,济南华兴有限公司。

1.3 试样制备

(1) PMMA颗粒的制备。

首先在三口瓶中依次加入碱式碳酸镁0.28 g、氢氧化钠0.22 g、蒸馏水40 mL,加热并搅拌,加热温度控制在40~50℃,搅拌速度为300 r/min,反应5 min,然后加入12 mL溶有引发剂的单体MMA,升温至78℃,反应2 h后升温至80℃,并降低搅拌速度,反应30 min后停止反应,冷却,抽滤,并用稀硫酸洗涤产物,之后用水反复洗涤几次,将所得产物放入鼓风干燥箱中进行烘干,温度为50℃,时间为1 h。

(2) 棉花纤维素的制备。

首先对脱脂棉进行化学预处理。称取脱脂棉5 g,将其处理成细小块状,用1%的氢氧化钠、1%的亚硫酸钠混合溶液处理原料,然后利用集热式恒

温加热磁力搅拌器进行机械搅拌,保持温度为90℃,转速为350 r/min,反应时间1.5 h。反应结束后对其进行真空抽滤并洗涤至pH呈中性,将所得固体存放在70℃烘箱中干燥12 h。

其次进行机械处理。取上述产物5 g,加入350 mL蒸馏水混合,在常温下润胀24 h后用超微粉碎机进行15次研磨处理,设置转速为1800 r/min,即得棉花纤维素微粒。

(3) PMMA薄膜的制备。

称取3 g PMMA,将其溶解在50 mL的丙酮中,然后将该溶液倒入直径为10 cm的培养皿中,室温下干燥24 h,即得PMMA薄膜。

(4) 复合薄膜的制备。

称取一定量的纤维素,加入3 g PMMA,溶解于40 mL丙酮中,配成不同纤维素含量(0,2.5%,5%,7.5%,10%,15%)的溶液,然后分别倒入直径10 cm的培养皿中,室温下干燥24 h,即得PMMA/纤维素复合薄膜。

1.4 性能测试与结构表征

(1) 形貌分析。

将未处理的脱脂棉、经过预处理的脱脂棉和机械法处理的脱脂棉作为样品,在光学显微镜下观察其形貌。

为进一步观察纤维素的形貌,对棉花纤维素和PMMA/纤维素复合材料用SEM进行分析。

(2) FTIR分析。

在对脱脂棉处理的各个阶段,留取少量样品用FTIR仪进行分析,分析化学预处理引起的脱脂棉化学成分的变化。并对PMMA和PMMA/纤维素复合材料进行红外分析,波数范围为4000~400 cm^{-1} 。

(3) 热重(TG)分析。

用微机差热天平分析PMMA及PMMA/纤维素复合薄膜的热稳定性。初始温度为50℃,终止温度为800℃,采样间隔为1 s,稳定时间为2 s,升温速率为10℃/min。

(4) 光学性能测试。

用紫外-可见分光光度计对PMMA薄膜及PMMA/纤维素复合薄膜进行透光率测试。测定的波长范围是200~1000 nm,扫描速度设定为中速,采样间隔1 nm,光谱带宽4 nm,测定温度25℃,灵敏度100%。

(5) 力学性能测试。

利用万能力学试验机进行拉伸性能测试。将样品切成 $10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的长方形样条,进行拉伸性能测试,拉伸加载速度为 1 mm/min ,将样条夹在两个夹具之间,使其测试跨距为 25 mm 。保留被拉断后的样条。

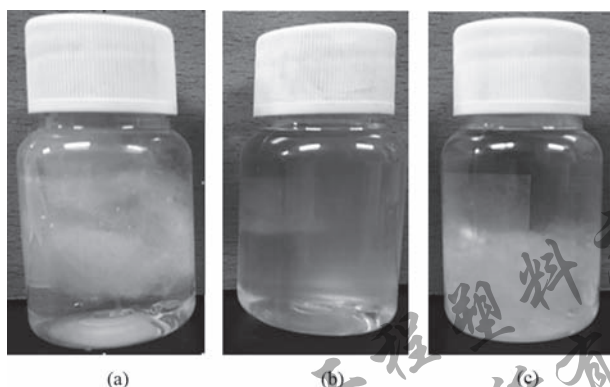
2 结果及分析

2.1 复合薄膜的表征与测试

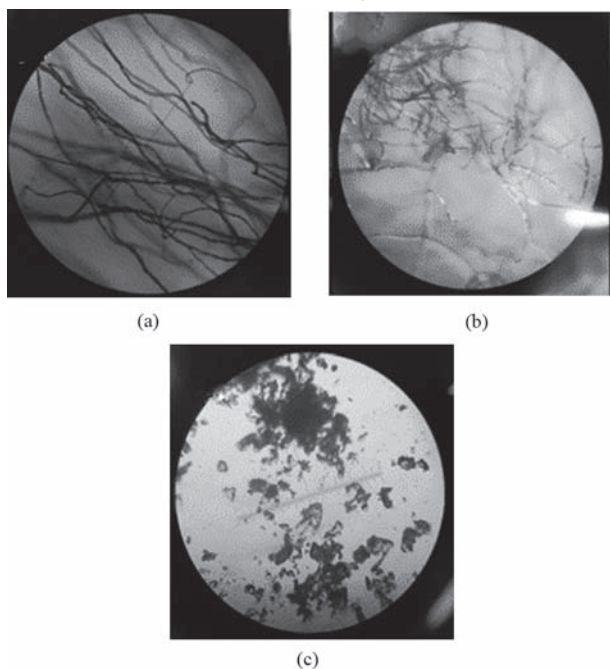
制备过程中悬浮液及纤维形态的变化如图1、图2所示。由图1可以看出,脱脂棉未经化学处理时,由于吸水的缘故而浸入水中,但未沉降,而经过预处理的脱脂棉形态上并未发生明显变化,但由于吸水充分而沉降到瓶子底部,说明简单的化学预处理无

法改变脱脂棉形貌,只能去除其某些成分。由图2可以看出,未处理时棉花纤维较长,而经过化学预处理的纤维形态并没有发生明显变化。这是由于棉花纤维中的木质素和半纤维素含量较少的缘故。经过机械研磨后,可以明显看出纤维形态发生了变化,这与图1的结果一致。因为棉花纤维在机械研磨过程中受到的高剪切力导致纤维间的氢键断裂,从而使纤维纳米化。

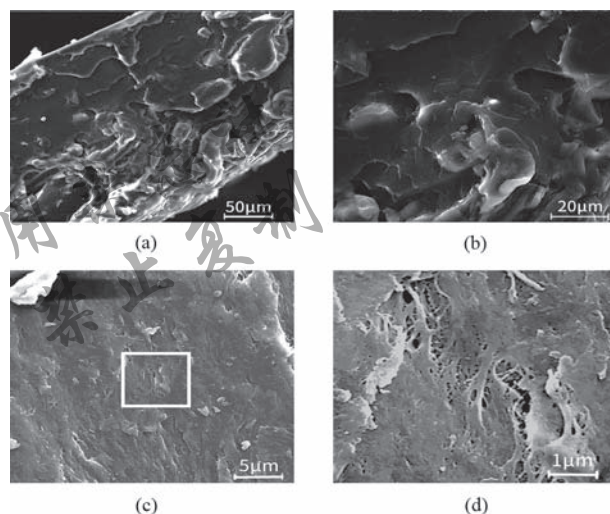
图3为PMMA/纤维素复合材料断面微观SEM照片。由图3可知,PMMA与纤维素复合情况良好,棉花纤维素有丝状的纤丝出现,且较好地分布于PMMA基体中。



a—未处理; b—化学预处理; c—机械处理
图1 棉花纤维素制备过程中水悬浮液的形态变化



a—未处理; b—化学预处理; c—机械处理
图2 棉花纤维素制备过程中纤维的形态变化



a—放大1000倍; b—放大3000倍;
c—放大10000倍; d—c图局部放大5倍
图3 PMMA/纤维素复合薄膜微观断面

对化学处理前后的棉花纤维素进行FTIR分析,研究其化学成分的变化,结果如图4和表1所示。可以看出, $3600 \sim 3200\text{ cm}^{-1}$ 处显示出纤维素中羟基—OH的伸缩振动, 2900 cm^{-1} 处显示出—CH伸缩振动, 1420 cm^{-1} 附近显示出—CH₂—和—OCH面内弯曲振动以及 880 cm^{-1} 处显示出异头碳(C1)

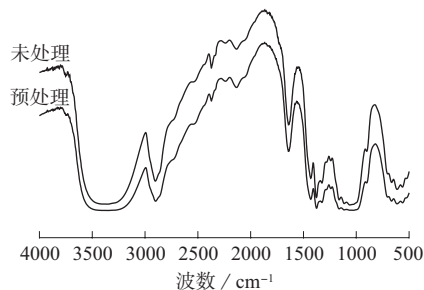


图4 棉花纤维素处理过程中的红外谱图

表 1 红外光谱基团吸收区域

成分	波数 / cm^{-1}	功能基团
纤维素	4 000 ~ 3 000	羟基—OH 伸缩振动
	2 900	—CH 伸缩振动
	1 420	—CH ₂ —和—OCH 面内弯曲振动
	1 375	—CH 变形振动
木质素	880	异头碳 (C1) 振动
	4 000 ~ 3 000	羟基—OH 伸缩振动
	2 900	—CH 伸缩振动
半纤维素	1 640	侧链—C=O 伸缩振动
	4 000 ~ 3 000	羟基—OH 伸缩振动
	2 900	—CH 伸缩振动
	1 737	木聚糖—C=O 伸缩振动

的吸收峰,除此之外,1 640 cm^{-1} 处也显示出木质素侧链上—C=O 伸缩振动。上述特征吸收峰显示,与未处理时相比,经过化学预处理后红外光谱图没有发生明显变化,各个吸收峰的位置基本吻合,吸收强度也相近。

对 PMMA 薄膜和 PMMA / 纤维素复合薄膜进行 FTIR 分析,研究其化学组分的变化,结果如图 5 所示。可以看出,3 628 ~ 3 439 cm^{-1} 处为—OH 伸缩振动和 C=O 泛频伸缩振动,2 997 ~ 2 949 cm^{-1} 处为—CH 伸缩振动,1 726 cm^{-1} 处为 C=O 伸缩振动,1 452 cm^{-1} 处为饱和 C—H 弯曲振动,1 373 cm^{-1} 处为 C—H 对称弯曲振动,1 249 ~ 1 161 cm^{-1} 处为 C—O 伸缩振动,976 ~ 754 cm^{-1} 处为—CH₃ 面内变形振动。FTIR 结果表明,添加纤维素并没有对 PMMA 基体造成影响,二者的结合在本质上是物理的,而非化学的。

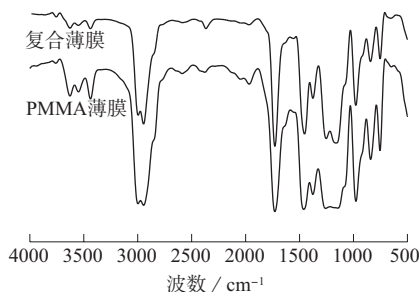


图 5 PMMA 薄膜及 PMMA / 纤维素复合薄膜的红外谱图

2.2 复合薄膜的热性能

图 6 为 PMMA 薄膜及含 7.5% 纤维素的 PMMA / 纤维素复合薄膜的 TG 曲线。从图 6 可以看出, PMMA 薄膜的初始分解温度为 240℃ 左右,终止分解温度为 400℃ 左右;复合薄膜的初始分解温度为 260℃ 左右,比 PMMA 薄膜提高了 8.3%,终止分解温度为 450℃ 左右,比 PMMA 薄膜提高了 12.5%。PMMA 薄膜的分解速率较为恒定,复合薄

膜的分解速率为先快后慢,分解速率先后发生了三次变化。纤维素的初始分解温度和终止分解温度几乎一样,均为 600℃ 左右,且分解速率很快。从初始分解温度、终止分解温度以及分解速率看,纤维素的复合提升了 PMMA 材料的热性能。

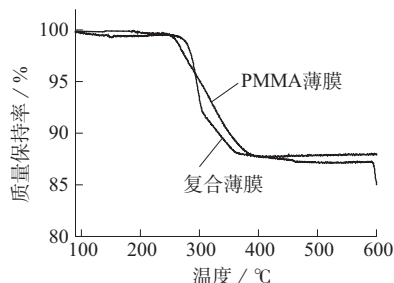


图 6 PMMA 薄膜及 PMMA / 纤维素复合薄膜的 TG 曲线

2.3 复合薄膜的光学性能

图 7 为不同纤维素含量复合薄膜的透射率曲线,图 8 为复合薄膜的光学照片。从图 7 可以明显看出,随着纤维素含量的增加,复合膜的透射率降低。PMMA 薄膜在 200 ~ 1 000 nm 区间内的透射率达到了 90% 以上。纤维素含量为 2.5% 的复合薄膜透射率最高接近 90%;当纤维素含量增加到 5% 时,透射率最高为 80%;但当纤维素含量增加到 7.5% 时,复合薄膜的透明度整体急剧下降,在 1 000 nm 处的透射率最高为 80%;当纤维素含量增加到 15% 时,复合薄膜的透明度进一步下降,在 1 000 nm 处的透射率最高为 32%。随着纤维素含量的增加,复合薄膜的透明度逐渐下降,这与图 8 中的光学照片所呈现的结果一致。透光性下降的原因可能是组成复合薄膜的棉花纤维素并没有完全达到纳米级别,复合薄膜因此不可避免地有不同程度的散色,进而呈现半透明状态^[18]。

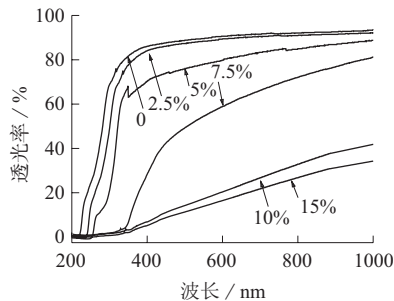
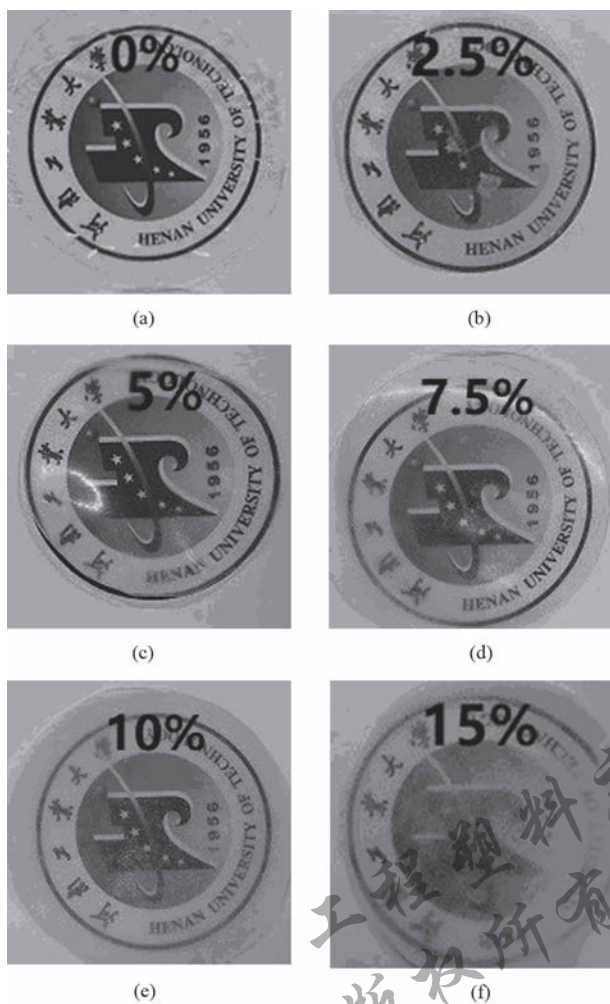


图 7 不同纤维素含量复合薄膜的透射率曲线

2.4 复合薄膜的力学性能

图 9 为不同纤维素含量 PMMA / 纤维素复合薄膜的拉伸强度。从图 9 可以看出,随着纤维素含量的增加, PMMA / 纤维素复合薄膜的拉伸强度也



纤维素含量: a—0; b—2.5%; c—5%; d—7.5%; e—10%; f—15%

图8 不同纤维素含量复合薄膜的光学照片

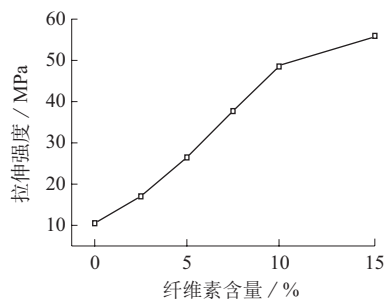


图9 不同纤维素含量的 PMMA/纤维素复合薄膜的拉伸强度

随之增加。当纤维素含量为 2.5%、5%、7.5% 和 15% 时,复合薄膜的拉伸强度分别达 17.05、26.48、37.72、55.95 MPa,比纯 PMMA 的拉伸强度 (10.53 MPa) 提高 61.8%、151%、258%、431%。这是因为纤维素具有很好的拉伸性能^[19],所以不论含量高低,其复合材料的拉伸性能均高于 PMMA。

3 结论

(1) 复合材料的热稳定性比 PMMA 材料有所提

高,与 PMMA 薄膜相比,PMMA/纤维素复合薄膜的热分解温度提高 8.3%。

(2) 复合材料的透光性均低于 PMMA,且随着纤维素含量的增加,复合薄膜的透光性逐渐降低。

(3) PMMA/纤维素复合薄膜的拉伸强度均高于 PMMA 薄膜,且随着纤维素含量的增加,拉伸强度逐步增大,当纤维素含量为 2.5% 时,拉伸强度提高 61.8%,当含量为 15% 时,拉伸强度提升了 431%,表明纤维素的加入对 PMMA 薄膜具有良好的增强作用。

(4) 综合来看,当棉花纤维素含量为 7.5% 时,复合薄膜的拉伸强度为 37.72 MPa,透光率最大可达到 80%,复合薄膜兼有较好的力学性能及光学性能。可以在制作 PMMA 材料时加入棉花纤维素以增强 PMMA 材料的强度,进而拓展材料应用领域。

参考文献

- [1] Jiang Saihua, Zhu Yulu, Hu Yuan, et al. In situ synthesis of a novel transparent poly (methyl methacrylate) resin with markedly enhanced flame retardancy[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2016, 27(2):266–272.
- [2] 朱晓艳,丁万庆,杨飞,等. PVDF-g-PMMA/POSS 纳米纤维膜的制备与表征 [J]. *天津工业大学学报*, 2015, 34(1):12–16.
Song Xiaoyan, Ding Wanqing, Yang Fei, et al. Preparation and characterization of PVDF-g-PMMA/POSS nanofiber membrane[J]. *Journal of Tiangong University*, 2015, 34(1):12–16.
- [3] Jiang Saihua, Yang Hongyu, Qian Xiaodong. A novel transparent cross-linked poly(methyl methacrylate)-based copolymer with enhanced mechanical, thermal, and flame-retardant properties[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(10): 3880–3887.
- [4] 胡生丽. 甲基丙烯酸甲酯的制备工艺及市场前景 [J]. *广东化工*, 2018, 45(14):170–172.
Hu Shengli. Preparation process and market prospect of MMA[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(14):170–172.
- [5] 张琳,贾竞夫,王武聪,等. 原位聚合制备聚甲基丙烯酸甲酯/石墨烯复合材料 [J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(4):11–15.
Zhang Lin, Jia Jingfu, Wang Wucong, et al. Preparation of PMMA / graphene composites by in situ polymerization[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(4):11–15.
- [6] Banerjee M, Sain S, Mukhopadhyay A, et al. Surface treatment of cellulose fibers situ-polymerized PMMA / cellulose composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 131(2):1–8.
- [7] Deng Fei, Ge Xin, Zhang Yinhang, et al. Synthesis and characterization of microcrystalline cellulose-graft-poly(methyl methacrylate) copolymers and their application as rubber reinforcements[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015,

- 132(41):42 666.
- [8] 刘晓辉,张延光,宋姿萍,等. 新型甲基丙烯酸甲酯功能聚合物的制备及性能[J]. 天津工业大学学报,2018,37(3):31-35.
- Liu Xiaohui, Zhang Yanguang, Song Ziping, et al. Preparation and properties of novel functional polymer of methyl methacrylate[J]. Journal of Tiangong University, 2018, 37(3):31-35.
- [9] 程增会,张代晖,王基夫,等. 接枝改性 CNF 增强聚丙烯酸酯复合膜制备及性能[J]. 工程塑料应用,2020,48(10):7-12,28.
- Cheng Zenghui, Zhang Daihui, Wang Jifu, et al. Preparation and properties of polyacrylate composite membranes reinforced by graft-modified cellulose nanofibrils[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10):7-12, 28.
- [10] Theivasanthi T, Christma FLA, Toyin A J, et al. Synthesis and characterization of cotton fiber-based nanocellulose[J]. International Journal of Biological Macromolecules:Structure, Function and Interactions, 2018, 109:832-836.
- [11] Nechyporchuk O, Belgacem M, Bras J. Production of cellulose nanofibrils:A review of recent advances[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 93:2-25.
- [12] 吴清林,梅长彤,韩景泉,等. 纳米纤维素制备技术及产业化现状[J]. 林业工程学报,2018,3(1):1-9.
- Wu Qinglin, Mei Changtong, Han Jingquan, et al. Preparation technology and industrialization status of nanocellulose[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(1):1-9.
- [13] 王海莹,李大纲. PVAL/纳米纤维素复合膜的制备及丝光处理对其性能的影响[J]. 工程塑料应用,2014,42(3):13-16.
- Wang Haiying, Li Dagang. Preparation of composite gilm of PVAL / CNF and effect of mercerization on its properties[J]. Engineering Plastics Application 2014, 42(3):13-16.
- [14] 吕工兵. 聚甲基丙烯酸甲酯/竹纤维复合材料的制备研究[J]. 橡塑技术与装备,2017,43(10):42-47.
- Lyu Gongbing. Study on the preparation of PMMA / bamboo fiber composites[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment, 2017, 43(10):42-47.
- [15] 刘如,曹金珍,彭尧. 木粉组分对木塑复合材料性能的影响研究进展[J]. 化工进展,2014,33(8):2072-2083.
- Liu Ru, Cao Jinzhen, Peng Yao. Influences of wood components on the property of wood-plastic composites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(8):2 072-2 083.
- [16] 林凤采,卢麒麟,卢贝丽,等. 纳米纤维素及其聚合物纳米复合材料的进展[J]. 化工进展,2018,37(9):3 454-3 470.
- Lin Fengcai, Lu Qilin, Lu Beili, et al. Research progress of nanocellulose and its polymer nanocomposites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(9):3 454-3 470.
- [17] 李鑫,邓立高,俸斌,等. 纳米纤维素的制备工艺及其研究进展[J]. 纸和造纸,2018,37(4):11-16.
- Li Xin, Deng Ligao, Feng Bin, et al. Preparation process and development of nanocellulose[J]. Paper and Paper Making, 2018, 37(4):11-16.
- [18] 陈振东. 纤维素纳米纤维/聚甲基丙烯酸甲酯的制备与性能研究[D]. 南京:南京林业大学,2012.
- Chen Zhendong. Fabrication and properties of cellulose nanofiber / polymethylmethacrylate nanocomposites[D]. Nanjing:Nanjing Forestry University, 2012.
- [19] 陈红艳,宋苏,李青青,等. 竹纤维素增强复合膜的制备及性能[J]. 中国农业大学学报,2019,24(12):121-127.
- Chen Hongyan, Song Su, Li Qingqing, et al. Preparation and properties of bamboo cellulose reinforced composite membrane[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(12):121-127.

(上接第 33 页)

- [11] 闫东广,张远,周昱,等. 一步法制备聚酰胺聚醚弹性体及其在抗静电 ABS 材料中的应用[J]. 高分子材料科学与工程,2020,36(2):160-165.
- Yan Dongguang, Zhang Yuan, Zhou Yu, et al. Preparation of polyamide-block-polyether copolymer based on one-step method and its application in permanent antistatic ABS[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2020, 36(2):160-165.
- [12] 金小汉. 煤矿用聚合物制品安全性能评价方法的探讨[J]. 矿业安全与环保,2008,35(2):59-61.
- Jin Xiaohan. Discussion on safety performance evaluation method of polymer products used in coal mine[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2008, 35(2):59-61.
- [13] Yang K, Xu M J, Li B. Synthesis of N-ethyl triazinepiperazine copolymer and flame retardancy and water resistance of intumescent flame retardant polypropylene[J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(7):1 397-1 406.
- [14] 肖雄. 聚磷酸脲对 PA6 燃烧及热稳定性能的影响[J]. 上海塑料,2018(4):15-21.
- Xiao Xiong. Fire and thermal stability properties of polyamide 6 with piperazine polypyrophosphate[J]. Shanghai Plastic, 2018(4):15-21.
- [15] 叶淑英. 几种无卤膨胀型阻燃剂对聚丙烯性能的影响[J]. 塑料工业,2017,45(7):120-123.
- Ye Shuying. The influence of several halogen-free intumescent flame retardants on properties of polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7):120-123.
- [16] 高军,吴贵岚,徐晓聊,等. 高分子型抗静电剂的发展状况[J]. 科技创新与应用,2015(2):49.
- Gao Jun, Wu Guilan, Xu Xiaoliao, et al. The development of polymer antistatic agents[J]. Scientific and Technological Innovation and Application, 2015(2):49.