

CMS-g-PAA 高吸水性复合材料的制备及性能研究*

许晓辉¹, 白波², 丁晨旭², 王洪伦², 索有瑞²

(1 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054; 2 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要 以废弃全棉面膜基布(CMS)和丙烯酸(AA)为原料,采用自由基溶液聚合法制备 CMS-g-PAA 复合高吸水性材料,并用红外光谱(FTIR)进行表征。研究了吸水性、保水性及反复吸放液性能,采用准一级、二级动力学模型对其吸水溶胀过程进行模拟研究。结果表明,全棉面膜基布和丙烯酸单体之间发生了接枝共聚反应,所合成的 CMS-g-PAA 复合材料在去离子水和 0.9%(质量分数)NaCl 溶液的吸水倍率分别可达 211.3 g/g 和 45.5 g/g,且溶胀过程符合准二级动力学吸附模型。在较高温度和一定压力下,CMS-g-PAA 均具有良好的保水性能。反复吸放液性能测试表明循环 8 次后,去离子水和 0.9%(质量分数)NaCl 溶液的吸水倍率分别保持了最大吸水倍率的 64.9% 和 44.4%。

关键词 全棉面膜基布 聚丙烯酸 高吸水性复合材料 保水性

中图分类号:S37 文献标识码:A DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2015.14.013

Synthesis and Properties of Cotton Mask Substrate Grafted PAA Superabsorbent Composites

XU Xiaohui¹, BAI Bo², DING Chenxu², WANG Honglun², SUO Yourui²

(1 College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054; 2 Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001)

Abstract CMS-g-PAA superabsorbent composite was synthesized through free-radical aqueous copolymerization, using waste cotton facial mask substrate (CMS) and acrylic acid (AA) as raw materials. Meanwhile, the microstructure of CMS-g-PAA was characterized by means of FTIR. The capacity of liquid absorption and water-retention properties and reusability of the superabsorbent composite were also studied, and the model of pseudo-first-order and pseudo-second-order swelling kinetic were used to simulate the kinetic swelling property of the polymers, respectively. The results indicate that the grafting copolymerization reaction occurred between CMS and acrylic acid monomer. The obtained CMS-g-PAA had the best absorbency of 211.3 g/g in distilled water and 45.5 g/g in 0.9 wt% NaCl solution, respectively. The pseudo-second-order kinetic equation is suitable for simulation of the adsorption processes. Moreover, the CMS-g-PAA showed excellent water retention capability under the condition of high temperature or high pressure. In addition, the absorbencies ability in distilled water and 0.9 wt% NaCl aqueous solution via eight cycles remained about 64.9% and 44.4% of the original maximum value.

Key words cotton mask substrate, poly (acrylic acid), superabsorbent composite, water retention capacity

0 引言

高吸水性树脂又称超强吸水剂,是一种含强亲水性基团并适度交联的功能高分子材料,具有极强的吸水性能和良好的保水性能,被广泛应用于农林园艺^[1]、生理用品^[2]、药物传输^[3]等领域。传统的高吸水性树脂几乎全都以石油副产品为合成单体,但石油属于不可再生资源,因此石油基高吸水性树脂存在生产成本低、降解困难等缺点。研究证实,利用天然多羟基化合物与亲水性功能单体接枝共聚,制备复合型高吸水性材料,可有效解决石油基高吸水性树脂的上述缺

点^[4]。如以自然界中广泛存在的纤维素^[5,6]、蛋白质^[7]和壳聚糖^[8]等为基体,均可获得吸水、保水性能较好的复合材料。

面膜具有软化角质层,防止水分蒸发,清除皮肤油脂,促进肌肤活力,使皮肤更加柔嫩的作用,因此面膜产品使用越来越广泛,已成为当今消费者“日常护肤必备”^[9,10]。当面膜中营养成分被皮肤吸收后,卸下来的载体,即面膜基布(Musk substrate, MS),通常被视为垃圾处理掉。面膜基布的材质有全棉、生物纤维、蚕丝等,其主要成分分别为纤维素和蛋白质,因而可成为制备复合高吸水性树脂的良好基体^[11-13]。但迄今采用面膜基布制备吸水性复合材料的技术

* 中国博士后特别资助项目(201104615);中央高校基本科研业务费专项资金(2013G2291015)

许晓辉:女,1989年生,硕士生,主要从事新型功能材料的研究 E-mail:1204119126@qq.com 白波:通讯作者,男,1972年生,博士,教授,主要从事纳米复合物的制备及应用 E-mail:baibochn@163.com

鲜有报道。

本实验以废弃的全棉面膜基布(Cotton musk substrate, CMS)为例,在引发剂(过硫酸钾)和交联剂(N,N'-亚甲基双丙烯酰胺)作用下,与丙烯酸单体进行接枝共聚反应,成功制备一种吸液速率快、保水性好、反复吸放液性能好的 CMS-g-PAA 复合吸水材料。为充分利用废弃面膜基布,拓展其应用领域,开发新的原料制备高吸水性树脂进行一定的尝试和探索。

1 实验

1.1 试剂与仪器

全棉面膜,深圳市年代秀化妆品有限公司;丙烯酸(AA),化学纯,天津市风船化学品有限公司生产;N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA),天津市福晨化学试剂厂生产;过硫酸钾(K₂S₂O₈),天津市风船化学品有限公司生产;氯化钠(NaCl)、氢氧化钠(NaOH),化学纯,西安化学试剂厂生产。实验仪器:LDZ4-1.2 型台式低速自动平衡离心机;101-2AB 型电热鼓风干燥箱;AL204 型电子天平;D-8401 型多功能搅拌器;DK-98-1 型电热恒温水浴锅;HY-2 型调速多用振荡器。

1.2 CMS-g-PAA 高吸水复合材料的制备及表征

CMS-g-PAA 的合成:取一片废弃全棉面膜基布(约 1.1 g),经烘干、粉碎后,加入装有机械搅拌器、温度计、氮气导管的 250 mL 三口烧瓶中,加入 10 mL 去离子水,水浴加热至 60 °C 并通氮气 10 min。不断搅拌下,依次加入 0.1 g 过硫酸钾和 8.0 g 中和度为 72% 的丙烯酸,恒温反应 10 min 后,缓慢加入 0.017 g N,N'-亚甲基双丙烯酰胺,于 80 °C 反应 2 h。反应结束后,将产物水洗 3 次并用乙醇洗后,烘干、粉碎后,

过 60 目筛备用。

产品结构分析:采用 Bio-Rad FTS135 傅里叶变换红外光谱仪(FTIR,德国 Bruker 公司),以 KBr 压片对样品进行测定,确定产品的分子结构。取少量产物于蒸馏水中,观察其吸水前后的表面形貌。

1.3 CMS-g-PAA 高吸水复合材料性能测定

吸水性能测定:准确称取 0.1 g CMS-g-PAA 于 100 目尼龙袋中,置于 500 mL 去离子水中,每隔一段时间,取出尼龙袋悬挂至无水滴落下后,称重并计算 CMS-g-PAA 在不同时刻的吸水倍率:

$$Q = \frac{m_2 - m_1 - 0.1}{0.1} \quad (1)$$

式中:Q 为吸液倍率(g/g);m₁ 为尼龙袋质量(g);m₂ 为饱和吸水后的质量(g)。

保水性能测定:将饱和吸水后的复合物一份在 4000 r/min 转速条件下离心,一份置于 80 °C 烘箱中,每隔一段时间称量 CMS-g-PAA 的剩余质量。保水率的计算公式为:

$$WR = \frac{M_t}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:WR 为保水率(%);M₀ 为饱和吸水后复合物的质量(g);M_t 为不同时刻复合物的质量(g)。

重复使用性能测定:称取 0.1 g CMS-g-PAA 置于足量液体中,吸水饱和后测定其吸水倍率,随后将其于 100 °C 烘干,重新吸水饱和后再次测吸水倍率,如此反复 8 次。

2 结果与讨论

2.1 CMS-g-PAA 的合成机理

CMS-g-PAA 的合成机理如图 1 所示。

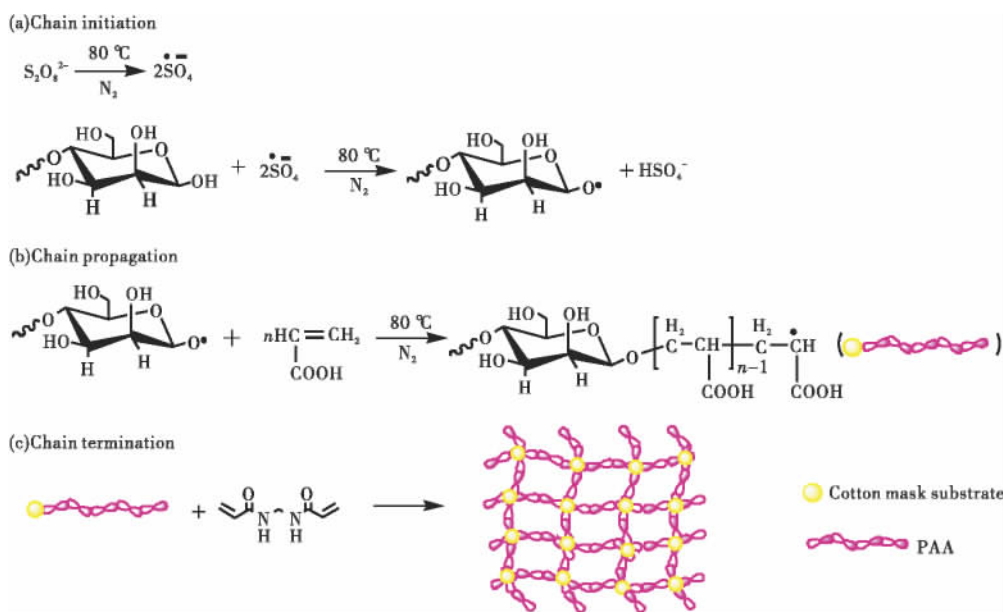


图 1 CMS-g-PAA 复合材料的反应机理

Fig. 1 Proposed reaction mechanism for the synthesis of CMS-g-PAA composite

从图 1 可看出,在加热及氮气保护条件下,引发剂 (K₂S₂O₈) 受热分解为硫酸根阴离子自由基,该自由基与全棉

面膜基布纤维素的羟基(-OH)作用,并夺取-OH 的氢原子,生成烷氧自由基^[14];在烷氧基自由基作用下,AA 单体接枝到面膜基布上,并将自由基传递给相邻的单体分子,引起链的增长^[15];加入 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺后,聚合物链与交联剂的乙烯基作用,形成交联的三维网络结构。通过接枝共聚反应,将更多亲水基团引入到面膜基布上,制得全棉面膜基布接枝聚丙烯酸高吸水性复合材料。

2.2 FTIR 分析

全棉面膜基布 CMS、空白样品 PAA 和 CMS-g-PAA 复合材料的红外光谱图如图 2 所示。

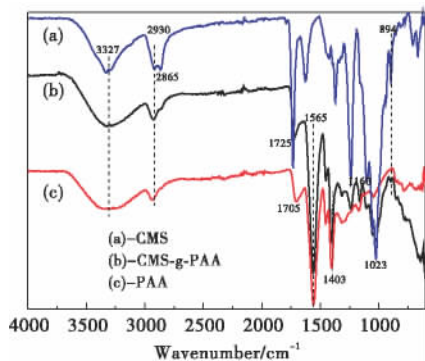


图 2 CMS、PAA 和 CMS-g-PAA 复合材料的红外光谱图
Fig. 2 FTIR spectra of CMS, CMS-g-PAA and PAA

在图 2(a)中,3327 cm^{-1} 为羟基 O-H 键的伸缩振动峰,2925 cm^{-1} 和 2865 cm^{-1} 处为甲基和亚甲基 C-H 伸缩振动吸收峰,1023 cm^{-1} 、894 cm^{-1} 为 β -1,4 糖苷键特征吸收峰,以上吸收峰为面膜基布纤维素结构的特征吸收^[16]。在 PAA 红外光谱图中(图 2(c)),1705 cm^{-1} 处为羧酸基团中 C=O 伸缩振动吸收峰。1565 cm^{-1} 、1403 cm^{-1} 为 -COO^- 反对称和对称吸收峰^[17]。与纤维原材面膜基布吸收峰相比,CMS-g-PAA 复合材料(图 2(b))在 1200~1000 cm^{-1} 吸收峰有所削弱,1565 cm^{-1} 和 1403 cm^{-1} 处出现了聚丙烯酸中 -COONa 特征吸收峰,1023 cm^{-1} 、894 cm^{-1} 处有面膜基布纤维素特征吸收峰,且在 1160 cm^{-1} 处出现了 C-O-C 吸收峰,这说明 CMS 上的 -OH 与 AA 单体发生接枝共聚反应,所制备的 CMS-g-PAA 是

CMS 与 PAA 的表面交联型复合材料。

2.3 CMS-g-PAA 的溶胀动力学

CMS-g-PAA 在去离子水和生理盐水中的吸水速率曲线如图 3 所示。由图 3 可见,CMS-g-PAA 表现出较大的吸液速率,在初始阶段的 16 min 内,该复合材料的吸水和吸盐水的倍率就分别达到 166.0 g/g 和 34.8 g/g,分别为平衡吸水倍率的 78.6% 和 77.3%。30 min 后吸水速率变慢,至 70 min 左右达吸附平衡,即最大吸水倍率分别为 211.3 g/g 和 45.5 g/g。CMS-g-PAA 的吸水性能主要由凝胶内外渗透压差决定,渗透压差越大,水渗透到复合材料内部的速率越快^[18]。在溶胀初期,水分子渗透进入凝胶内部,CMS-g-PAA 中 -COONa 基团逐渐电离,导致凝胶网络结构中 -COO^- 和 Na^+ 数量增加, -COO^- 之间的静电斥力使网络结构快速伸展, Na^+ 使网络内部渗透压逐渐增大,因此水分子向复合物内扩散的速率增加。随着更多水分子的进入,网络结构已充分伸展,凝胶内外渗透压差也逐渐降低,水分子扩散速率减小,表现为吸液速率缓慢减小,最终达到吸水平衡。

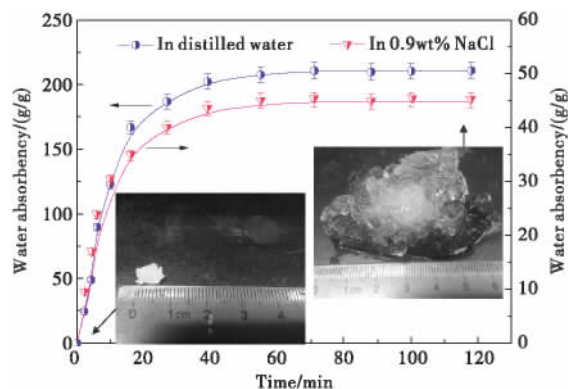


图 3 CMS-g-PAA 在去离子水和生理盐水中的吸水速率与时间的关系曲线
Fig. 3 Water absorption rate of CMS-g-PAA in distilled water and 0.9 wt% NaCl solution

为进一步研究 CMS-g-PAA 复合材料的吸水动力学机理,实验分别利用准一级动力学、准二级动力学模型来处理上述实验数据,线性拟合如图 4 所示,动力学参数及相关系数见表 1。

表 1 CMS-g-PAA 复合材料吸去离子水、生理盐水的动力学参数

Table 1 Kinetic parameters for water absorbency of CMS-g-PAA superabsorbent composite in distilled water and 0.9 wt% NaCl solution

模型	参数	去离子水	0.9 wt% NaCl
二级动力学	$k_2 (10^{-3} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	0.426	2.686
	$Q_{e, \text{calc}} / (\text{g/g})$	243.9	50.61
	$Q_{e, \text{exp}} / (\text{g/g})$	211.3	45.50
	R_2^2	0.998	0.999
	k_1 / min^{-1}	0.079	0.070
一级动力学	$\log(Q_e - Q_t) \rightarrow t$		
	$Q_{e, \text{calc}} / (\text{g/g})$	196.8	31.60
	$Q_{e, \text{exp}} / (\text{g/g})$	211.3	45.50
	R_1^2	0.981	0.980

准一级动力学模型: $\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t$ (3)

准二级动力学模型: $\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e}$ (4)

式中: Q_e 和 Q_t 分别表示单位吸附剂的平衡吸附量以及在 t 时间时的瞬时吸附量(g/g); k_1, k_2 分别是准一级和准二级动力学模型的速率常数, 分别由 $\ln(Q_e - Q_t)$ 对 t 以及 t/Q_t 对 t 作图得到。

由图 4 可见, CMS-g-PAA 于去离子水、生理盐水中的吸水动力学拟合效果图(b)明显优于图(a)。而表 1 中相关系数(R^2)的比较可知, 准二级动力学方程拟合的相关系数均高于准一级动力学方程。所以 CMS-g-PAA 对去离子水、生理盐水的吸附过程符合二级动力学模型。

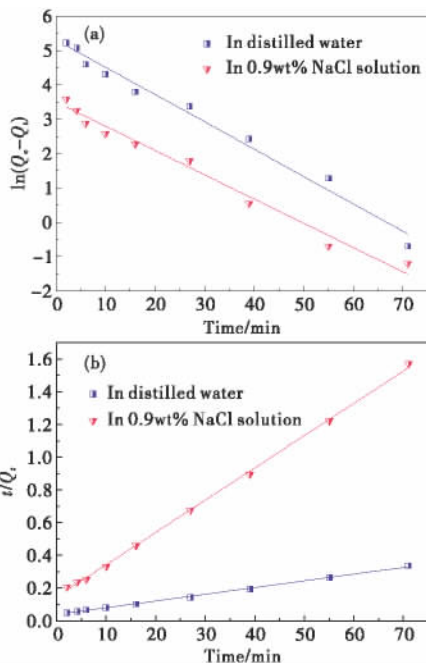


图 4 准一级动力学模型(a)及准二级动力学模型(b)
Fig. 4 Pseudo-first-order kinetic model (a) and pseudo-second-order kinetic model (b)

2.4 CMS-g-PAA 在盐溶液中的脱水动力学

图 5 为饱和和吸水后的 CMS-g-PAA 在不同浓度盐溶液中的脱水动力学曲线。

将溶胀后的复合材料置于 NaCl 溶液中后, 其保水率呈现出快速降低的趋势, 120 min 内达到脱水平衡。平衡时的保水率分别为 38.9% (0.02 mol/L NaCl)、29.5% (0.10 mol/L NaCl) 和 22.7% (0.50 mol/L NaCl)。随着盐溶液浓度的增加, CMS-g-PAA 脱水速率逐渐增加, 保水能力则逐渐降低。这是因为盐溶液浓度的增大将导致渗透压变大。在脱水过程中, 复合材料内的水分子易扩散到外部高浓度的盐溶液中, 导致水分释放速率增大, 保水率降低。同时, 外部溶液中 Na^+ 渗透进入凝胶内部, 并与网络结构中的亲水基团结合, 因此, 外界溶液浓度降低, 渗透压相应减小, 脱水速率趋于平衡。此外, 复合材料中的面膜基布也会截留部分水分子, 抑制水分子的释放。总之, 外界溶液的离子强度显著影响复合材料的吸水-保水性能。

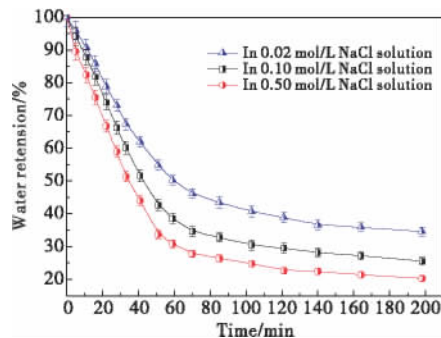


图 5 复合材料 CMS-g-PAA 在不同浓度盐溶液中的脱水动力学

Fig. 5 Deswelling kinetics of CMS-g-PAA in NaCl solutions of different concentrations

2.5 CMS-g-PAA 在一定温度或压力下的保水性能

分别在温度为 80 °C 和 4000 r/min 离心速率条件下测定 CMS-g-PAA 的保水率, 结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 随着时间的延长, CMS-g-PAA 在 80 °C 条件下的保水能力呈线性下降, 约 10 h 后, 保水率仍为 9.7%; 在 4000 r/min 转速下离心 50 min 后, 保水率仍保持在 31%。可见, 在较高温度和一定压力下, CMS-g-PAA 均表现出较高的保水率。这是因为保水能力是由凝胶与水分子间的氢键和范德华力决定的, 而 CMS-g-PAA 网络结构中大量的羧基增强了这种化学作用力, 因此该复合物的保水性能得到改善^[19]。从离心速率影响曲线可以看出, 在初始 15 min 内, 保水率减小幅度较大, 15 min 后, 曲线较为平缓。这是因为, 在初始阶段, 弱吸附水更易从溶胀的复合材料中释放出来, 随着离心时间的延长, 强吸附水比例增加, 脱水速率降低。与离心曲线相比, 温度对失水速率的影响并不十分明显, 这说明该吸水材料对压力更为敏感。

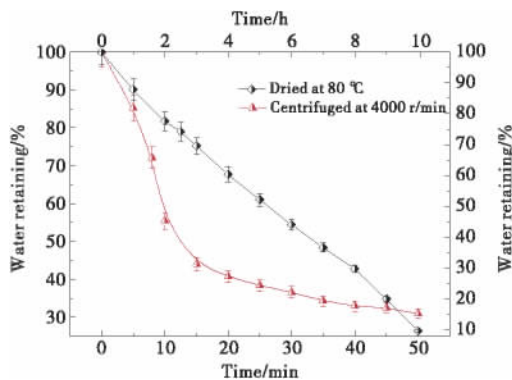


图 6 CMS-g-PAA 在 80 °C 和 4000 r/min 转速下的保水性能

Fig. 6 Water retention capacity of CMS-g-PAA at 80 °C and at 4000 r/min

2.6 CMS-g-PAA 的反复吸液性能

吸水材料不但要有高的吸水倍率, 而且应该具备良好的重复利用性能。CMS-g-PAA 复合材料和空白样品 PAA 树脂 8 次循环使用的吸水性能变化如图 7 所示。由图 7 可见,

随着循环次数的增加,样品的吸水倍率保持平稳下降的趋势。4 次重复使用后,CMS-g-PAA 和 PAA 对去离子水的吸水倍率分别降低了 9.1% 和 15.6%,8 次重复使用后,吸水倍率分别为饱和吸水率的 64.9% 和 44.4%。CMS-g-PAA 复合吸水材料对去离子水的重复使用性能优于生理盐水,这说明 CMS-g-PAA 是一种重复利用性能好的高吸水复合材料。

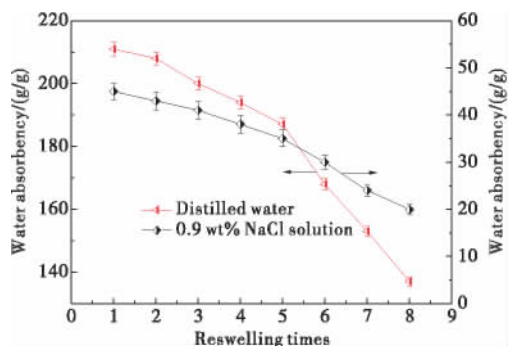


图 7 CMS-g-PAA 在去离子水和生理盐水中的反复吸放性能

Fig. 7 Reswelling capability of CMS-g-PAA in distilled water and 0.9 wt% NaCl solution

3 结论

(1) 本实验以废弃全棉面膜基布(CMS)为基体,丙烯酸(AA)为单体,过硫酸钾($K_2S_2O_8$)为引发剂, N,N' -亚甲基双丙烯酰胺(MBA)为交联剂,采用自由基溶液聚合法制备 CMS-g-PAA 复合高吸水性材料。FTIR 表明全棉面膜基布中的主要成分纤维素与丙烯酸单体之间发生接枝共聚反应,成功制备了 CMS-g-PAA 高吸水性复合材料。

(2) CMS-g-PAA 在去离子水和 0.9% (质量分数) NaCl 溶液中的吸水倍率分别可达 211.3 g/g 和 45.5 g/g,且溶胀过程符合准二级动力学模型。CMS-g-PAA 在 80 °C 下的保水能力呈线性下降,10 h 后,保水率仍为 9.7%;在 4000 r/min 转速下离心 50 min 后,保水率仍然保持在 31%。反复吸放液性能测试表明,循环 8 次后,对去离子水和生理盐水的吸水倍率仍能保持最大吸水倍率的 64.9% 和 44.4%。

(3) 将生活垃圾-废弃全棉面膜基布引入吸水材料中具有广阔应用前景,不仅实现了废弃资源的再利用,降低了生产成本,且所制备的 CMS-g-PAA 具有良好的吸水、保水能力和反复吸放液性能。

参考文献

- Islam M R, Hu Y, Mao S, et al. Effects of water-saving superabsorbent polymer on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in corn (*Zea mays* L.) under drought stress [J]. *J Sci Food Agric*, 2011, 91(5): 813
- Liu H, Zhang Y, Yao J. Preparation and properties of an eco-friendly superabsorbent based on flax yarn waste for sanitary napkin applications [J]. *Fibers Polym*, 2014, 15

- (1): 145
- Wu D Q, Wang T, Lu B, et al. Fabrication of supramolecular hydrogels for drug delivery and stem cell encapsulation [J]. *Langmuir*, 2008, 24(18): 10306
- Wang W B, Wang A Q. Nanocomposite of carboxymethyl cellulose and attapulgite as a novel pH-sensitive superabsorbent: Synthesis, characterization and properties [J]. *Carbohydrate Polym*, 2010, 82(1): 83
- Peng N N, Li Q, Gao B Y, et al. Synthesis and characterization of an ovelamphoteric superabsorbent resin based on corn straw [J]. *J Funct Mater*, 2013, 44(1): 79 (in Chinese)
- 彭娜娜, 李倩, 高宝玉, 等. 玉米秸秆基高吸水性树脂的合成及其性能的研究 [J]. *功能材料*, 2013, 44(1): 79
- Zhang M, Cheng Z, Liu M, et al. Synthesis and properties of a superabsorbent from an ultraviolet-irradiated waste nameko mushroom substrate and poly (acrylic acid) [J]. *J Appl Polym Sci*, 2014, 131(13): 40471
- Su Y, Liu J, Yue Q, et al. Adsorption of ammonium and phosphate by feather protein based semi-interpenetrating polymer networks hydrogel as a controlled-release fertilizer [J]. *Environ Technol*, 2014, 35(4): 446
- Rodrigues F H A, Fajardo A R, Pereira A G B, et al. Chitosan-graft-poly (acrylic acid)/rice husk ash based superabsorbent hydrogel composite: Preparation and characterization [J]. *J Polym Res*, 2012, 19(12): 1
- Peng F B, Jiao X N, Sha R. New spunlaced composite substrate for cosmetic mask [J]. *J Textile Res*, 2007, 28(12): 51 (in Chinese)
- 彭富兵, 焦晓宁, 莎仁. 新型水刺美容面膜基布 [J]. *纺织学报*, 2007, 28(12): 51
- Su T T, Yin B P. Analysis and performance evaluation of cosmetic mask base fabric [J]. *Shanghai Textile Sci Technol*, 2014(8): 32 (in Chinese)
- 苏婷婷, 殷保璞. 面膜基布材料分析与性能评价 [J]. *上海纺织科技*, 2014(8): 32
- Yuan J G, Wang P, Sun G Y. Preparation of wool keratin modified acrylic acid-acrylamide super absorbent resin [J]. *Chinese J Environ Eng*, 2013, 7(9): 3695 (in Chinese)
- 袁久刚, 王平, 孙桂岩. 羊毛角蛋白接枝聚丙烯酸-丙烯酰胺吸水树脂的制备 [J]. *环境工程学报*, 2013, 7(9): 3695
- Wu F, Zhang Y, Liu L, et al. Synthesis and characterization of a novel cellulose-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide) superabsorbent composite based on flax yarn waste [J]. *Carbohydrate Polym*, 2012, 87(4): 2519
- Huang Y, Sun D P. Bacterial cellulose whisker/poly (acrylic acid-co-acrylamide) superabsorbent composite resin [J]. *Acta Polymer Sinica*, 2013(9): 1183 (in Chinese)
- 黄洋, 孙东平. 细菌纤维素晶须/聚(丙烯酸-丙烯酰胺)复合高吸水性树脂 [J]. *高分子学报*, 2013(9): 1183

(下转第 76 页)

[J]. *Renewable Sustainable Energy Rev*,2011,15(3):1675

6 Wang Y, Xia T D, Feng H X. Research and development of heat storage using organic phase change materials[J]. *Mater Rev:Rev*,2011,25(2):66(in Chinese)
王毅,夏天东,冯辉霞. 有机相变储能材料的研究进展[J]. *材料导报:综述篇*,2011,25(2):66

7 Qureshi W A, Nair N C, Farid M M. Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management [J]. *Energy Conversion Manag*,2011,52(5):2110

8 Kuznik F, David D, Johannes K, et al. A review on phase change materials integrated in building walls[J]. *Renewable Sustainable Energy Rev*,2011,15(1):379

9 Ke H Z, Cai Y B, Wei Q F, et al. Effects of nano-SiO₂ on morphology and thermal energy storage of electrospun LA-PA/PET composite phase change fibers[J]. *J Funct Mater*, 2012,43(3):309(in Chinese)
柯惠珍,蔡以兵,魏取福,等. 纳米 SiO₂ 对静电纺 LA-PA/PET 复合相变纤维形态和热学性能的影响[J]. *功能材料*, 2012,43(3):309

10 Wang Y, Xia T D, Zheng H, et al. Stearic acid/silica fume composite as form-stable phase change material for thermal energy storage[J]. *Energy Building*,2011,43(9):2365

11 Fu L J, et al. Study on preparation and properties of capric-myristic acid /diatomite form-stable phase change energy storage materials[J]. *J Funct Mater*,2013,44(10):1465(in Chinese)
付路军,等. 癸酸-肉豆蔻酸/硅藻土定形相变储能材料制备及性能研究[J]. *功能材料*,2013,44(10):1465

12 Mei D D, Zhang B, Liu R C, et al. Preparation of capric acid/halloysite nanotube composite as form-stable phase change material for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Mater Solar Cells*,2011,95(10):2772

13 Bao Y H, Wang T W, Pan W. Microencapsulation of fatty acid as phase change material for latent heat storage[J]. *Fine Chem*,2011,28(4):324(in Chinese)
包艳华,王庭慰,潘伟. 潜热蓄热用微胶囊化脂肪酸相变材料[J]. *精细化工*,2011,28(4):324

14 Konuklu Y, Unal M, Paksoy H O. Microencapsulation of caprylic acid with different wall materials as phase change material for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Mater Solar Cells*,2014,120(S1):536

15 Wang Z, Wei T, Zheng B C. Thermal properties of capric acid and stearic acid molecular alloy[J]. *J East China University of Science and Technology:Nat Sci Ed*,2013,39(3):275(in Chinese)
王贞,魏婷,郑柏存. 癸酸-硬脂酸分子合金的热性能[J]. *华东理工大学学报:自然科学版*,2013,39(3):275

16 Guo J, Xiang H X, Xu D Z, et al. Binary multiple stearic acid/lauric acid phase change material[J]. *J Dalian Polytechnic University*,2012,31(1):60(in Chinese)
郭静,相恒学,徐德增,等. 硬脂酸-月桂酸二元复合相变材料[J]. *大连工业大学学报*,2012,31(1):60

17 Meng D. Preparation and building energy conservation application of form-stable phase change material [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2010(in Chinese)
孟多. 定形相变材料的制备与建筑节能应用[D]. 大连:大连理工大学,2010

18 Sun K, Zhang B N, Yan F M, et al. Preparation and characterization of microcapsule with paraffin phase change materials for energy storage[J]. *Chem Ind Eng Prog*,2011,30(12):2676(in Chinese)
孙凯,张步宁,晏凤梅,等. 石蜡微胶囊型相变储能材料制备及表征[J]. *化工进展*,2011,30(12):2676

19 Jiao C M, Ji B H, Fang D. Preparation and properties of lauric acid-stearic acid/expanded perlite composite as phase change materials for thermal energy storage [J]. *Mater Lett*,2012,67(1):352

20 Meng D, Wang L J. Preparation and thermal properties of fatty acid/inorganic nano-particle form-stable phase change material[J]. *J Building Mater*,2013,16(1):91(in Chinese)
孟多,王立久. 脂肪酸/无机纳米颗粒基定形相变材料的制备与热性能[J]. *建筑材料学报*,2013,16(1):91

21 Zhang H Z, et al. Silica encapsulation of noctadecane via sol-gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance[J]. *J Colloid Interface Sci*,2010,343(1):246
(责任编辑 余波)

(上接第 62 页)

14 Anirudhan T S, Tharun A R, Rejeena S R. Investigation on poly (methacrylic acid)-grafted cellulose/bentonite superabsorbent composite; Synthesis, characterization, and adsorption characteristics of bovine serum albumin[J]. *Ind Eng Chem Res*,2011,50(4):1866

15 Wan T, Huang R, Zhao Q, et al. Synthesis and swelling properties of corn stalk-composite superabsorbent [J]. *J Appl Polym Sci*,2013,130(1):698

16 Xie L H, Liu M Z, Ni B L, et al. New environment-friendly use of wheat straw in slow-release fertilizer formulations with the function of superabsorbent [J]. *Ind Eng Chem Res*,2012,51(10):3855

17 Zhang M, Cheng Z, Zhao T, et al. Synthesis, characterization, and swelling behaviors of salt-sensitive maize bran-poly(acrylic acid) superabsorbent hydrogel[J]. *J Agric Food Chem*,2014,62(35):8867

18 Patra T, Pal A, Dey J. A smart supramolecular hydrogel of N^ε-(4-n-alkyloxybenzoyl)-l-histidine exhibiting pH-modulated properties [J]. *Langmuir*,2010,26(11):7761

19 Li Q, Ma Z H, Yue Q Y, et al. Synthesis, characterization and swelling behavior of superabsorbent wheat straw graft copolymers [J]. *Bioresource Technol*,2012,118:204
(责任编辑 周媛媛)