

一种三元共聚物阴离子表面活性剂的 制备及在废纸脱墨中的应用

马燕,张昌辉,许淑婧

(陕西科技大学 教育部轻化工助剂化学与技术重点实验室,陕西 西安 710021)

摘要:以油酸钠(NaOL)、丙烯酸(AA)和甲基丙烯磺酸钠(SMAS)为原料进行水溶液自由基聚合,合成了NaOL-AA-SMAS型三元共聚物阴离子表面活性剂,并将其作为脱墨剂的化学成分用于废纸脱墨。以脱墨效果作为评判标准,考察NaOL-AA-SMAS的较佳合成工艺,并研究了其与非离子表面活性剂月桂醇聚氧乙烯醚(AEO₉)复配的脱墨效果。对NaOL-AA-SMAS进行结构表征和物理化学性能测试,并将自制及复配脱墨剂与市售脱墨剂的脱墨效果进行对比。结果表明:当 $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}):n(\text{AA})=1:1:3$,反应温度为85℃,反应时间为5h,引发剂过硫酸铵(APS)用量为单体总质量的2.5%时,其脱墨效果较好;将NaOL-AA-SMAS与AEO₉复配,当 $m(\text{NaOL-AA-SMAS}):m(\text{AEO}_9)=2:1$ 时,再生纸张白度可达71.9%,残余油墨量为42.3 mm²/m²。

关键词:脱墨剂;油酸钠;丙烯酸;甲基丙烯磺酸钠;共聚物;白度;残余油墨量

中图分类号:TQ423

文献标识码:A

文章编号:1001-1803(2017)01-0018-05

DOI:10.13218/j.cnki.csdc.2017.01.004

Synthesis of a kind of ternary copolymer anionic surfactant and its application in waste paper deinking agent

MA Yan, ZHANG Chang-hui, XU Shu-qiang

(Key Laboratory of Auxiliary Chemistry & Technology for Chemical Industry, Ministry of Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: A kind of ternary copolymer anionic surfactant NaOL-AA-SMAS was synthesized by aqueous solution free radical polymerization with sodium oleate (NaOL), acrylic acid (AA) and sodium methallyl sulfonate (SMAS) as starting materials. The product was applied as an ingredient of waste paper deinking agent. Optimization of conditions for the preparation of the product was conducted taking the deinking effect as criteria. Further, the product was blended with a nonionic surfactant polyethoxy lauryl ether (AEO₉) and the deinking efficacy of the blend was examined. Structure of the product was characterized by FT-IR; the molecular weight and its distribution of the product were measured by GPC; and the deinking efficacy of deinking agents containing the product or the blend, and purchased from market was tested and compared. Results showed that the synthesis process conditions, which shows the optimal deinking effect are as follows: $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}):n(\text{AA})=1:1:3$; reaction temperature, 85℃; reaction time, 5 h; $w(\text{APS})=2.5\%$ (the mass of total reactants). When the blended deinking agent is formulated in accordance with $m(\text{NaOL-AA-SMAS}):m(\text{AEO}_9)=2:1$, the brightness of the deinked waste paper can reach to 71.9% and the residual ink concentration is 42.3 mm²/m².

Key words: deinking agent; sodium oleate; acrylic acid; sodium methallyl sulfonate; copolymer; brightness; residual ink concentration

造纸产业面临着生态环保与资源危机的双重压力,通过废纸二次利用获得再生纸浆是节约森林资源

的最有效途径^[1]。脱墨剂的使用是废纸脱墨的关键,常用的脱墨剂有脂肪酸类阴离子型脱墨剂,烷基聚氧

收稿日期:2016-06-21;修回日期:2016-12-29

作者简介:马燕(1991-),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,电话:18700866846, E-mail:357638374@qq.com。

乙烯醚非离子型脱墨剂^[2]以及阳离子双酰胺类等。随着印刷技术的发展,一些常用的表面活性剂由于不能有效分散油墨^[3],已经不能满足市场需求,研究脱墨新工艺和发展高效能、低污染的脱墨剂是今后废纸脱墨技术发展的方向之一。

油酸钠(NaOL)是一种阴离子表面活性剂,具有优良的乳化、渗透和去污性能以及较低的表面张力^[4]。在废纸脱墨过程中,油墨的捕集需要较强的疏水基团,而 NaOL 的疏水基团能与油墨粒子相互作用,聚集排列并插嵌在气泡表面,发挥其捕集油墨颗粒的作用^[5,6]。本实验以 NaOL、丙烯酸(AA)和甲基丙烯磺酸钠(SMAS)为单体,采用水溶液自由基聚合法合成 NaOL-AA-SMAS 型三元共聚物阴离子表面活性剂,并将其作为脱墨剂的化学成分用于废纸脱墨,以再生纸张白度和残余油墨量为主要评价指标,综合考察其脱墨性能。

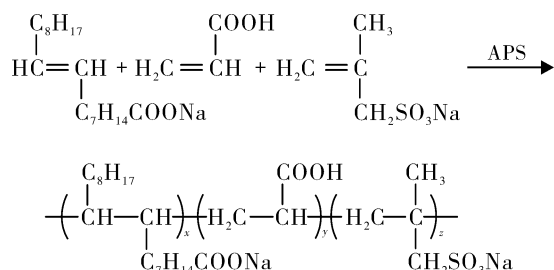
1 实验部分

1.1 主要试剂与仪器

NaOL 和月桂醇聚氧乙烯醚(AEO₉),均为工业品;AA、SMAS、过硫酸铵(APS)、NaOH 和 Na₂SiO₃,均为分析纯;存放 2 a 以上的废旧杂志。YQ-Z-48B 纸张白度测定仪,杭州轻通仪器开发公司;恒温可调碎浆机,上海标本模型厂;Scan Maker 残留油墨扫描仪,上海中晶科技有限公司;VECTOR-22 傅里叶红外光谱仪,德国 Bruker 公司;515-2414 凝胶渗透色谱分析仪,美国 Waters 公司;S-4800 扫描电镜,日本日立公司;DCAT21 表面界面张力仪,德国 Dataphysics 公司。

1.2 NaOL-AA-SMAS 的制备

以 APS 为引发剂,用 NaOL、AA 和 SMAS 进行聚合反应,制备 NaOL-AA-SMAS 型三元共聚物表面活性剂,反应式如下:



将一定量的 NaOL 先用去离子水溶解,过滤掉杂质,调节滤液 pH 至中性;在带有搅拌装置的三口烧瓶中按照相应比例加入 NaOL、AA 和 SMAS 混合溶液,水浴升温至 85 ℃,然后分批次(0, 1, 2 和 4 h 时)加入一

定量的 APS (APS 用量为单体总质量的 2.5%),恒温反应 5 h 左右,待聚合反应结束后,用 NaOH 溶液调节 pH=7,得到淡黄色透明液体,即为 NaOL-AA-SMAS 型三元共聚物阴离子表面活性剂。

1.3 产品的结构表征与性能测试

采用 VECTOR-22 傅里叶红外光谱仪,通过固体 KBr 压片法对产物结构进行表征;采用 515-2414 凝胶渗透色谱分析仪对样品的分子量及其分布进行测定;采用 DCAT21 表面界面张力仪测定产物溶液的表面张力,绘制表面张力等温线,进而求得产物的临界胶束浓度(cmc)和相应的表面张力(γ_{cmc});参照文献[7],将 20 mL 质量分数为 1% 的产物溶液置于带活塞的试管中,将其振荡 50 次,记录初始时泡沫的体积 V_0 ,然后静置 10 min,再次记录泡沫体积 V_{10} ,泡沫稳定性 $A = V_{10}/V_0 \times 100\%$ 。

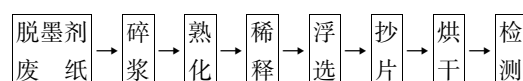
1.4 脱墨实验

1.4.1 脱墨剂的组成及脱墨工艺

自制脱墨剂组成:NaOH 用量 1%,Na₂SiO₃ 用量 3%,NaOL-AA-SMAS 用量 0.2%,均相对绝干废纸质量。

复配脱墨剂组成:NaOH 用量 1%,Na₂SiO₃ 用量 3%,NaOL-AA-SMAS 和 AEO₉ 总用量 0.2%,均相对绝干废纸质量。

脱墨工艺流程如下:



具体操作方法参考文献[8]。

1.4.2 脱墨效果的检测

白度:采用 YQ-Z-48B 纸张白度测定仪进行测定。

残余油墨量:基于 Scan Maker 残留油墨扫描仪扫描,同时结合 Auto Spec 软件测定纸张残余油墨量。

排除率 R : $R = \text{浮选时随泡沫除去的液体体积} / \text{浮选时的液体总体积} \times 100\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 NaOL-AA-SMAS 的合成条件对脱墨效果的影响

在 pH=7 的条件下,分别考察单体摩尔比、APS 用量、反应温度和反应时间 4 个因素对合成共聚物阴离子表面活性剂脱墨效果的影响。对废旧杂志纸进行脱墨,并测得纸张白度和残余油墨量,得出具有较好脱

墨效果的 NaOL - AA - SMAS 型共聚物的合成条件。

2.1.1 NaOL 与 SMAS 的摩尔比

在 $n(\text{NaOL}):n(\text{AA}) = 1:2$, APS 加入量为单体总质量的 1.0%, 反应温度 85 °C, 反应时间 5 h 的条件下, 考察 NaOL 与 SMAS 的摩尔比对脱墨效果的影响, 结果如表 1 所示。

表 1 NaOL 与 SMAS 的摩尔比对脱墨效果的影响
Tab.1 Effect of molar ratio of NaOL to SMAS on the deinking efficacy

$n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS})$	白度/%	残余油墨量/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$R/\%$
1:0	59.8	102.6	10.8
1:0.5	61.2	97.8	11.8
1:1	64.8	83.1	13.6
1:1.5	63.6	89.5	12.1
1:2	62.5	95.6	12.5

由表 1 可知, 随着 SMAS 加入量的增加, 脱墨后的纸张白度先上升后下降, 残余油墨量先下降后上升, 排除率相应地先增大后减小, 当 $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}) = 1:1$ 时, 脱墨效果较佳。这是因为 SMAS 的加入可提高聚合物的亲水性和抗硬水性, 聚合物中亲水基含量的增加可在一定程度上抑制聚合物大分子自身蜷曲, 使其保持舒展状态, 有利于提高表面活性^[9], 但 SMAS 加入量过多, 包含油墨粒子的聚合物会吸附于纤维表面, 降低纸张白度, 增加残余油墨量。

2.1.2 NaOL 与 AA 的摩尔比

在 $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}) = 1:1$, APS 加入量为单体总质量的 1.0%, 反应温度 85 °C, 反应时间 5 h 的条件下, 考察 NaOL 与 AA 的摩尔比对脱墨效果的影响, 结果如表 2 所示。

表 2 NaOL 与 AA 的摩尔比对脱墨效果的影响
Tab.2 Effect of molar ratio of NaOL to AA on the deinking efficacy

$n(\text{NaOL}):n(\text{AA})$	白度/%	残余油墨量/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$R/\%$
1:0	58.7	110.7	10.2
1:1	60.8	98.6	11.5
1:2	64.8	83.1	13.6
1:3	65.9	78.6	14.9
1:4	63.1	90.7	11.8

由表 2 可知, 随着 AA 加入量的增大, 脱墨后的纸张白度先上升后下降, 残余油墨量先下降后上升, 当 $n(\text{NaOL}):n(\text{AA}) = 1:3$ 时, 脱墨效果较优。这是因为在脱墨时, 油墨粒子上的阴离子基团和脂肪酸阴离子之间通过水中 Ca^{2+} 静电吸附形成钙桥, 使油墨粒子聚集, 从而通过浮选除去油墨粒子, 提高脱墨效率。当 AA 加入量较少时, 羧酸根离子与水中 Ca^{2+} 结合, 不足

以将油墨粒子聚集到一定粒度, 捕集效果差; 而 AA 加入过多时, 油墨粒子的疏水基团在脂肪酸的碳氢链上吸附较少, 脱墨效果较差。

2.1.3 APS 用量

在 $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}):n(\text{AA}) = 1:1:3$, 反应温度 85 °C, 反应时间 5 h 的条件下, 考察 APS 用量对脱墨效果的影响, 结果如表 3 所示。

表 3 APS 用量对脱墨效果的影响

Tab.3 Effect of dosage of APS on the deinking efficacy

APS 用量/%	白度/%	残余油墨量/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$R/\%$
1.0	65.6	78.9	13.6
1.5	66.4	72.3	14.5
2.0	67.2	69.7	15.6
2.5	68.1	66.5	16.4
3.0	67.0	68.4	13.8

由表 3 可知, APS 用量对脱墨效果有一定的影响。随着 APS 用量的增加, 脱墨后的纸张白度呈现先上升后下降的趋势, 而残余油墨量则先下降后上升, 排除率相应地先增大后减小, 当 APS 用量为单体总质量的 2.5% 时, 脱墨效果较优。这主要是因为 APS 用量会直接影响到产物分子链的长度及其分子量的大小。一般而言, 引发剂用量较少, 在反应开始时引发剂产生的自由基较少, 同时链终止速率较低, 形成较长的分子链, 使聚合物的乳化和分散性能较低, 发泡性能较差, 分散好的油墨可能再次聚集在纤维表面, 纸张的残余油墨量较高, 白度和排除率较低; APS 用量过多时, 聚合物产生支链, 并且链终止速率很快, 与此同时 AA 的自聚加快, 得到聚丙烯酸与 NaOL - AA - SMAS 的混合物, 影响产物脱墨效果。

2.1.4 反应温度

在 $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}):n(\text{AA}) = 1:1:3$, APS 加入量为单体总质量的 2.5%, 反应时间 5 h 的条件下, 考察反应温度对脱墨效果的影响, 结果如表 4 所示。

表 4 反应温度对脱墨效果的影响

Tab.4 Effect of reaction temperature on the deinking efficacy

$\theta/^\circ\text{C}$	白度/%	残余油墨量/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$R/\%$
70	66.1	75.4	13.6
75	66.9	71.5	14.2
80	67.3	68.5	15.7
85	68.1	66.5	16.4
90	67.8	68.0	14.7

由表 4 可知, 反应温度对脱墨效果有一定的影响。随着反应温度的升高, 脱墨后的纸张白度呈现先上升后下降的趋势, 而残余油墨量则先下降后上升, 当反应温度为 85 °C 时, 脱墨效果较优。这是因为当反应温度

较低时,反应速度较慢,使得聚合物的分子量较小,不能较好的分散油墨粒子,白度较低;而当反应温度过高时,反应速率加快,同时会伴随着副反应的发生,获得的产物不纯净,影响其脱墨效果。

2.1.5 反应时间

在 $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}):n(\text{AA})=1:1:3$, APS 加入量为单体总质量的 2.5%, 反应温度 85 °C 的条件下,考察反应时间对脱墨效果的影响,结果见表 5。

表 5 反应时间对脱墨效果的影响

Tab. 5 Effect of reaction time on the deinking efficacy

t/h	白度/%	残余油墨量/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$R/\%$
3	64.7	85.2	13.8
4	66.2	74.7	15.2
5	68.3	66.5	16.4
6	67.5	67.6	15.7
7	66.8	72.0	14.3

由表 5 可知,反应时间对脱墨效果有一定的影响。随着反应时间的增加,脱墨后的纸张白度先上升后下降,残余油墨量则先下降后上升,当反应时间为 5 h 时,脱墨效果较好。这是因为反应时间较短时,引发剂 APS 未充分发挥作用,使单体的转化效率较低,当时间适当增加,单体反应完全,得到产物的分散、乳化和渗透等性能均增强^[10];当时间继续增加时,聚合物的结构与性能基本不再发生变化,分子交联度增加,聚合体系单体发生副反应,影响产物纯度,此时脱墨后再生纸张白度降低。

综上所述,当 $n(\text{NaOL}):n(\text{SMAS}):n(\text{AA})=1:1:3$, APS 加入量为单体总质量的 2.5%, 反应温度 85 °C, 反应时间 5 h, $\text{pH}=7$ 时,合成的共聚物阴离子表面活性剂脱墨效果较佳。

2.2 产物的结构表征及其性能检测

2.2.1 FT-IR 表征

图 1 是 NaOL 和在前述较佳工艺条件下合成的 NaOL-AA-SMAS 型三元共聚物阴离子表面活性剂的红外吸收光谱图。在 NaOL 的谱图中, 3016 cm^{-1} 处为 $\text{C}=\text{C}$ 的特征吸收峰,而在 NaOL-AA-SMAS 的谱图中,此峰已基本消失,表明聚合物中 NaOL 的双键都参与了聚合反应。在 NaOL-AA-SMAS 的谱图中, 3438 cm^{-1} 处为羧基上 $-\text{OH}$ 和少量水分中 $-\text{OH}$ 发生缔合的特征吸收峰, 2935 和 2850 cm^{-1} 处分别为 $\text{C}-\text{H}$ 的反对称和对称伸缩振动吸收峰, 1548 和 1465 cm^{-1} 处分别为羧酸盐 $-\text{COO}^-$ 反对称和对称伸缩振动吸收峰, 1187 和 1079 cm^{-1} 处为磺酸基 $-\text{SO}_3^-$ 反对称伸缩振动吸收峰。综合分析表明,此表面活性

剂的分子结构中有羧基和磺酸基等,与预期合成的三元共聚物阴离子表面活性剂的结构基本一致。

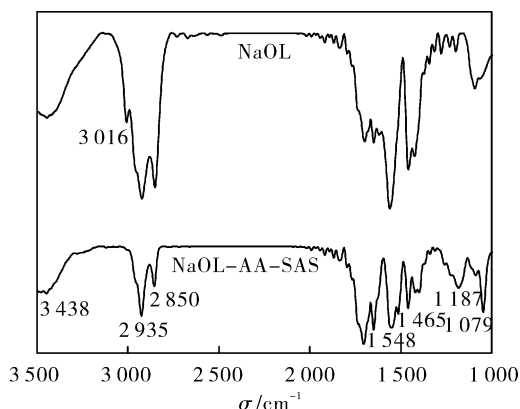


图 1 NaOL 和 NaOL-AA-SMAS 的 FT-IR 谱图

Fig. 1 FT-IR spectra of NaOL and NaOL-AA-SMAS

2.2.2 分子量及其分布

采用凝胶渗透色谱(GPC)测定合成的 NaOL-AA-SMAS 型三元共聚物阴离子表面活性剂样品的分子量及其分布,结果表明:其数均分子量 $M_n=7180$, 重均分子量 $M_w=7348$, 黏均分子量 $M_p=7570$, Z 均分子量 $M_z=7512$, $Z+1$ 均分子量 $M_{z+1}=7672$, 产物分子量分散系数 $M_w/M_n=1.02$ 。由分子量分散系数可知 NaOL-AA-SMAS 型阴离子表面活性剂的分子量分布较为均一,产物性能相对稳定。

2.2.3 物理化学性能

对 NaOL-AA-SMAS 型三元共聚物阴离子表面活性剂和 NaOL 进行部分物理化学性能测试,结果见表 6。由表 6 可知,NaOL-AA-SMAS 型聚合物表面活性剂与 NaOL 在表面化学性能方面相比,有一定优势。NaOL-AA-SMAS 型聚合物表面活性剂降低表面张力的能力较好,且产生的泡沫较稳定,有助于油墨粒子有效除去。因此,其用在废纸脱墨中可减少脱墨剂的使用量,降低成本。

表 6 NaOL 和 NaOL-AA-SMAS 的物理化学性能

Tab. 6 Physicochemical properties of NaOL and NaOL-AA-SMAS

表面活性剂	$\text{cmc}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\gamma_{\text{cmc}}/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$A/\%$
NaOL-AA-SMAS	0.149	24.32	90.2
NaOL	0.164	25.35	82.1

2.2.4 自制及复配脱墨剂与市售脱墨剂的脱墨效果对比

非离子表面活性剂具有良好的洗涤、乳化和捕集油墨的能力,当非离子表面活性剂与阴离子表面活性剂配合使用时,使水包油(O/W)的分散体系中胶粒带负电荷^[11],同电相斥,可以形成稳定的分散体系,有利于纸张纤维与油墨分离而除去^[12]。

将 NaOL - AA - SMAS 型三元共聚物阴离子表面活性剂与非离子表面活性剂 AEO₉ 按质量比 1:1, 1:2 和 2:1 进行复配, 进一步与 NaOH 和 Na₂SiO₃ 进行混合, 记作复配脱墨剂 1, 2 和 3 用于废纸脱墨, 并与市售的脱墨剂及自制脱墨剂的脱墨效果进行比较, 结果如表 7 所示。

表 7 各种脱墨剂的脱墨效果对比
Tab. 7 Comparison of deinking effect

脱墨剂	白度/%	残余油墨量/(mm ² ·m ⁻²)	R/%
—	56.7	176.3	10.9
自制脱墨剂	69.1	65.8	13.6
市售脱墨剂	66.8	76.3	15.7
复配脱墨剂 1	70.8	62.5	16.8
复配脱墨剂 2	70.3	61.3	18.8
复配脱墨剂 3	71.9	42.3	17.0

由表 7 可知, 对比白度及残余油墨量, 自制脱墨剂的脱墨效果优于市售脱墨剂, 自制脱墨剂的排除率仅为 13.6%, 可以节约二次纤维的再次流失。通过上述表面活性剂的复配, 在一定的比例下可提高脱墨效果, 当 $m(\text{NaOL} - \text{AA} - \text{SMAS}) : m(\text{AEO}_9) = 2:1$ 时, 再生纸张白度达 71.9%, 残余油墨量仅为 42.3 mm²/m², 优于自制脱墨剂剂和市售脱墨剂。

3 结论

1) 以 NaOL、AA 和 SMAS 为原料, 在 APS 作引发剂的条件下, 合成了 NaOL - AA - SMAS 型三元共聚物阴离子表面活性剂, 脱墨效果较佳的合成工艺条件为: $n(\text{NaOL}) : n(\text{SMAS}) : n(\text{AA}) = 1:1:3$, 反应温度 85 °C, 反应时间 5 h, APS 用量为单体总质量的 2.5%。在该条件下, 合成的 NaOL - AA - SMAS 用于脱墨剂脱墨效果较好, 其再生纸张白度达到 69.1%, 残余油墨

量为 65.8 mm²/m²。

2) 将合成的 NaOL - AA - SMAS 与 AEO₉ 进行复配, 当 $m(\text{NaOL} - \text{AA} - \text{SMAS}) : m(\text{AEO}_9) = 2:1$ 时, 复配脱墨剂的脱墨效果较好, 其再生纸张白度达 71.9%, 残余油墨量为 42.3 mm²/m², 与自制脱墨剂与市售脱墨剂相比, 复配脱墨剂脱墨的纸张白度有所提高, 残余油墨量有一定程度的下降。

参考文献:

[1] 贾璐航. 脂肪酸类衍生物的合成与在废纸脱墨中的应用[J]. 精细与专用化学品, 2013, 21(6): 28.

[2] 杨晓武, 沈一丁. 聚乙二醇单硬脂酸酯固体脱墨剂的制备及应用研究[J]. 湖南造纸, 2007(3): 22-24.

[3] 赖小娟. 高分子表面活性剂的合成及其应用[J]. 中国洗涤用品工业, 2007(1): 41-44.

[4] 费贵强, 沈一丁, 王海花. 阴离子高分子脱墨剂 P(AA - BE) 的制备及其脱墨性能研究[J]. 造纸化学品, 2008, 20(2): 3.

[5] Huang Dandan, Chen Xiao, Li Zhihong. Formation of pyrrolidinium fatty acid soap and its lyotropic liquid crystalline phase behavior [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 426(5): 55-62.

[6] Gargouri A, Caja G, Casals R, et al. Lactational evaluation of effects of calcium soap of fatty acids on dairy ewes [J]. Small Ruminant Research, 2006, 66(1): 1-10.

[7] 曹云峰, 张军, 张凤山. 脱墨剂的起泡性能及其泡沫稳定性[J]. 造纸化学品, 2006, 18(5): 38-40.

[8] 张昌辉, 马燕, 游群杰. 一种二元共聚物阴离子表面活性剂的制备及在废纸脱墨中的应用[J]. 日用化学工业, 2016, 46(7): 382-386.

[9] 徐昱. 新型脱墨剂开发和脱墨机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[10] 刘倩, 岳红, 江浩, 等. 杜仲胶/天然橡胶共混物的分子动力学模拟和耗散粒子动力学模拟[J]. 材料导报, 2012, 26(3): 141-145.

[11] 张昌辉, 李丹, 李强. IAS 型高分子表面活性剂的合成及应用[J]. 中国造纸, 2014, 33(12): 13-17.

[12] 王留成, 陈杰, 赵建宏, 等. 表面活性剂复配物用于中性脱墨[J]. 纸和造纸, 2008, 27(1): 35-37.

(编辑: 李保林)

(上接第 12 页)

[29] Rodríguez - Escontrela I, Rodríguez - Palmeiro I, Rodríguez O, et al. Phase behavior of the surfactant ionic liquid trihexyltetradecylphosphonium bis(2,4,4 - trimethylpentyl) phosphinate with water and dodecane [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2015, 480: 50-59.

[30] Zhu Wenshuai, Zhu Guopeng, Li Huaming, et al. Oxidative desulfurization of fuel catalyzed by metal - based surfactant - type ionic liquids [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2011, 347: 8-14.

[31] 李静静, 赵地顺, 胡晶晶. 氯化 1 - (三甲基硅甲基) - 3 - 癸基咪唑的合成及性能[J]. 精细化工, 2015, 32(12): 1360-1363.

[32] 刘国宇, 顾大明, 刘海燕, 等. 系列离子液体 Gemini 咪唑表面活性剂在水溶液中的分子动力学模拟[J]. 化学学报, 2012, 70(1): 6-14.

[33] 刘国宇, 顾大明, 刘海燕, 等. 离子液体双子咪唑表面活性剂的合成[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(7): 72-78.

[34] Adak S, Banerjee R. A green approach for starch modification; Esterification by lipase and novel imidazolium surfactant [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 150: 359-368.

[35] 张路. 离子液体型表面活性剂的合成及性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

[36] Chang Tao, He Leqin, Zhang Xiaojing, et al. Brønsted acid surfactant - combined dicationic ionic liquids as green catalysts for biodiesel synthesis from free fatty acids and alcohols [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2015, 36: 982-986.

[37] 谭景林, 肖梅红, 文军. Bola 型离子液体基有机硅表面活性剂的合成及表面活性[J]. 日用化学工业, 2015, 45(6): 315-318.

[38] 王军, 陈翔, 杨许召, 等. Bola 型非对称阳离子表面活性剂的合成及性能研究[J]. 日用化学工业, 2014, 41(12): 661-665.

(编辑: 李保林)