

研究论文

离子液体聚合物 CO₂ 吸附性能研究

郭辰辰^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;
3. 煤基节能环保炭材料北京市重点实验室,北京 100013)

摘要:为提高离子液体吸附 CO₂ 的性能,通过自由基聚合制备了季铵盐类离子液体聚合物,采用两步种子溶胀法使该聚合物形成多孔结构,并通过扫描电子显微镜和差热-热重分析法对其形貌和热稳定性进行表征。研究了4种溶胀剂制备的多孔聚合物吸附 CO₂ 的性能,试验结果表明:制备的多孔聚合物具有发达的微孔结构,孔径在0.4~0.8 nm内连续分布,且较集中于0.5~0.6 nm,达到38%以上;溶胀剂的种类对孔径分布及累计孔容有显著的影响,可归因于溶胀剂与聚合物的溶解度差异,采用混合溶胀剂得到的孔径分布更加均匀,而采用环乙烷溶胀剂得到的累计孔容明显减少;多孔聚合物的 CO₂ 吸附量主要受累计孔容的影响,累计孔容相当的聚合物吸附 CO₂ 的量也近似,在273 K、0.101 MPa条件下,约为1.1%。

关键词:离子液体;聚合物;孔径分布;溶胀剂;CO₂ 吸附

中图分类号:X701 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2017)04-0114-05

Investigation of the CO₂ adsorption performance of ionic liquid polymer

Guo Chenchen^{1,2,3}

(1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, Coal Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. Beijing Key Laboratory of Coal Based Carbon Materials, Beijing 100013, China)

Abstract:To improve the CO₂ adsorptive capacities of ionic liquid, the quaternary ammonium salt ionic liquid polymers were synthesized by free radical polymerization. Additionally, the porous ionic liquid polymers were achieved by two-staged seeded swelling polymerization. The characteristics of the polymers were tested by SEM and DSC-TG. Adsorption isotherms of CO₂ on the polymers, which were synthesized by four different kinds of swelling agents, were investigated. The main findings are summarized as follows: the porous ionic liquid polymers have highly developed micro pore structure, and the pore widths have continuous distribution in the range of 0.4~0.8 nm. The pore widths mainly distribute in the range of 0.5~0.6 nm, which is up to 38%. The swelling agents had effect on pore size distribution and the cumulative pore volume, which is attributed to the difference of the solubility between the swelling agents and polymers. The pore size distribution of polymers is more uniform when using the mixed swelling agents. The cumulative pore volume decreases obviously when using the cyclic ethane swelling agents. The CO₂ adsorptive capacity is mainly affected by the cumulative pore volume. The polymers with equivalent cumulative pore volume have the similar CO₂ adsorptive capacity, which is about 1.1% at 273 K and 0.101 MPa.

Key words:ionic liquids; polymers; pore size distribution; swelling agents; CO₂ adsorption

0 引言

随着人类对化石燃料的利用,大量 CO₂ 排放造

成全球气候变暖,成为人类面临的重大环境问题。因此,CO₂ 捕集技术吸引了国内外大量学者的关注^[1-3]。其中,离子液体作为一种新型绿色溶剂,在

收稿日期:2017-05-16;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.018

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600402)

作者简介:郭辰辰(1988—),女,江苏徐州人,助理研究员,博士,从事煤气化相关工作。E-mail:guochen9779@163.com

引用格式:郭辰辰.离子液体聚合物 CO₂ 吸附性能研究[J].洁净煤技术,2017,23(4):114-118,122.

Guo Chenchen. Investigation of the CO₂ adsorption performance of ionic liquid polymer[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 114-118, 122.

CO₂ 的固定转化方面具有特殊的吸收和催化性能^[4-5],是一种极具潜力的 CO₂ 吸收剂和膜材料。

离子液体是室温离子液体的简称,就是完全由正负离子组成的室温下为液体的盐,阴阳离子的数目相等,整体上显电中性^[6-8]。根据离子液体的结构特征和 CO₂ 的固定机理,离子液体固定 CO₂ 可以分为常规离子液体固定、功能化离子液体固定和离子液体固定转化。功能化离子液体固定 CO₂ 为化学作用过程,在固定的同时又实现了 CO₂ 从工业废气直接到有用化学品的转变^[9]。陈卓等^[10]用密度泛函理论对功能化离子液体 [NH₂p-bim]BF₄ 吸收 CO₂ 的作用机制进行了理论研究,结果表明,离子液体 [NH₂p-bim]BF₄ 吸收 CO₂ 主要是通过离子液体的阳离子 [NH₂p-bim]⁺ 自偶解离的 [NHp-bim] 与 CO₂ 分子结合生成 [O₂C-NHp-bim]。蒋晶等^[11]、Blasig Andre 等^[12] 的研究表明,以离子液体为单体的聚合物吸收 CO₂ 的能力要比离子液体单体的吸收效果好,最重要的是离子液体聚合物对 CO₂ 的吸收和解吸都比离子液体单体要快得多,而且该过程完全可逆。窦荣坦等^[13]、贺建勋等^[14]、邵媛等^[15] 对季铵盐类和咪唑类^[16] 离子液体聚合物进行了研究,其中聚苄乙基三甲基四氟硼酸盐 (P[VBTMA]BF₄) 离子液体 CO₂ 吸附能力是咪唑类离子液体 [Bmim]BF₄ 的 7.6 倍,且与其他季铵盐类离子液体聚合物相比,也具有较弱的 CO₂ 吸附能力^[17]。Tang 等^[18] 研究发现季铵盐-聚合物类离子液体与常规的咪唑-聚合物类离子液体相比,具有很强的吸收 CO₂ 的能力,而且与氮气和氧气相比,对 CO₂ 具有较高的选择性。因此,季铵盐类离子液体聚合物是极具潜力的 CO₂ 气体吸收分离材料。

鉴于此,本研究合成了季铵盐类离子液体聚合物,采用种子溶胀法将聚合物制备成具有多孔结构的材料,并测定其 CO₂ 的平衡吸附量,研究多孔聚合物溶胀剂用量对孔道特征的影响,以及孔道特征对 CO₂ 吸附量的影响,为研发高效 CO₂ 季铵盐类离子液体聚合物吸附材料的分子设计和合成优化提供试验依据和理论指导。

1 试 验

1.1 试验原料和试验仪器

试验原料:乙腈、乙醚、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、苄乙基三甲基氯化铵、四氟硼酸钠、2,2'-

偶氮二异丁腈(AIBN)、十二烷基硫酸钠、正庚烷、邻苯二甲酸二丁酯、甲苯、环己烷、过氧化苯甲酰胺、聚乙烯醇。

试验仪器:DF-3 集热式磁力搅拌器、SHZ-D(III)循环水式真空泵、DZF-6021 型真空干燥箱、PS-20 超声波清洗机、Thermo Scientific Nicolet 380 型 FTIR 红外光谱仪、S-3000N 型扫描电子显微镜、NETZSCH-STA409C 型差热-热重综合分析仪。

1.2 试验方法

制备苄乙基三甲基铵四氟硼酸的过程如下:将 13.0 g 苄乙基三甲基氯化铵和 8.3 g 四氟硼酸钠加入到烧瓶中,再加入 150 mL 的乙腈,搅拌反应 35 h。将沉淀过滤除去,向滤液中加入约 750 mL 乙醚,有白色针状结晶生成。过滤得到白色沉淀,在室温下真空干燥 10 h。

聚合反应采用 AIBN 作为引发剂,步骤为:将 4 g [VBTMA]BF₄ 和 0.05 g 的 AIBN 加入到烧杯中,再加入 15 mL 的 DMF,搅拌使固体全部溶解,得到无色透明液体,移至真空反应管中,抽真空,在 60 °C 的水浴中加热 10 h。过滤得到白色沉淀物,在 60 °C 下真空干燥 10 h。

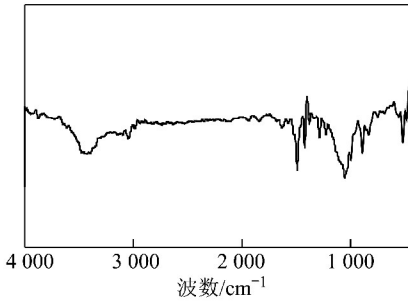
采用两部溶胀法制备单分散多孔聚合物微球的过程如下:称取 0.4 g 聚合物加入到 150 mL 十二烷基硫酸钠溶液中,再加入适量溶胀剂,经超声分散处理后,在 30 °C 水浴中溶胀 10 h;向反应后的溶液中加入 3 g [VBTMA]BF₄ 和 0.1 g 过氧化苯甲酰(BPO),继续在 30 °C 水浴中溶胀 10 h;最后加入质量分数为 5.0% 的聚乙烯醇(22 mL/1.05 g)升温至 70 °C 进行聚合反应 10 h;所制备的多孔聚合物用甲醇反复洗涤,并用超声波分散,除去剩余的溶胀剂,真空干燥 10 h。

2 结果与讨论

2.1 离子液体 [VBTMA]BF₄ 的表征

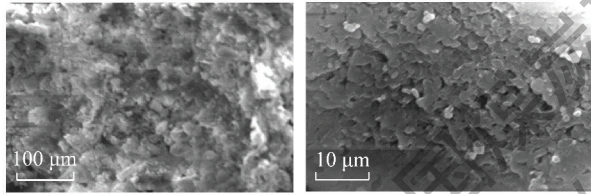
2.1.1 红外表征

离子液体 [VBTMA]BF₄ 的红外光谱如图 1 所示,在 3 420 cm⁻¹ 处是铵基 N—H 键的伸缩震动特征峰,在 3 030 cm⁻¹ 处是苯环 C—H 键的伸缩震动特征峰,在 1 492、1 420 cm⁻¹ 处是苯环 C=C 键的伸缩震动特征峰,1 050 cm⁻¹ 处是 B—F 的伸缩振动特征峰,829 cm⁻¹ 处是对位取代苯 C—H 弯曲振动特征峰。上述结构特点与 [VBTMA]BF₄ 的结构相符,说明合成的物质是目标产物。

图1 离子液体[VBTMA]BF₄的红外光谱图Fig. 1 Infrared spectrogram of ionic liquids[VBTMA]BF₄

2.1.2 粒子液体聚合物 SEM 表征

图2为多孔离子液体聚合物扫描电子显微镜微观形貌,分别是针对同一多孔离子液体聚合物放大500倍和4000倍的图像。从图2(a)可以看出,该多孔聚合物具有疏松的结构,比表面积较大,而从图2(b)可以明显看到该多孔聚合物的表面具有发达的微孔结构。SEM的结果表明通过两步种子溶胀法聚合制备的离子液体聚合物颗粒呈现多孔结构。

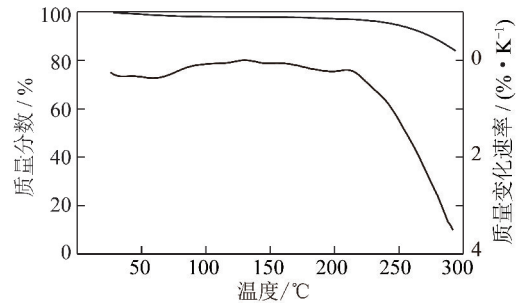


(a) 放大500倍 (b) 放大4000倍

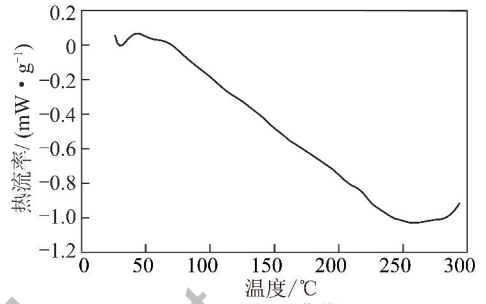
图2 多孔聚合物 P[VBTMA]BF₄ 颗粒的形态Fig. 2 Particle morphology of the porous polymers P[VBTMA]BF₄

2.1.3 差热-热重分析

为考察合成的多孔离子液体聚合物 P[VBTMA]BF₄ 的热稳定性,分别采用热重和差示扫描量热法进行分析,如图3所示。由TG曲线分析表明,该聚合物的热解过程分为3个阶段。第1个阶段温度区间为室温至106℃,主要是脱水阶段,失重率为2%;第2个阶段为温度区间为106~212℃,失重率保持稳定;第3个阶段温度区间为212~300℃,这个区间的失重率为17.1%。由上述3个阶段可以看出,该多孔离子液体聚合物吸附水的量非常少;多孔聚合物在温度上升到300℃左右时,开始变黑,失重速度急速增加,推测该离子液体聚合物在此温度下开始分解,该结果与文献[19]报道的离子液体分解温度在300℃左右相符。



(a) TG和DTG曲线



(b) DSC曲线

图3 多孔聚合物 P[VBTMA]BF₄ 的 TG、DTG 和 DSC 曲线

Fig. 3 TG, DTG and DSC curves of the porous polymers

P[VBTMA]BF₄

通过DSC曲线可得出该多孔离子液体聚合物的玻璃化转变温度为258℃,而无孔聚合物玻璃化转变温度的文献值为235℃^[20],可以看出经过溶胀反应后离子液体聚合物的热稳定性有所提高。

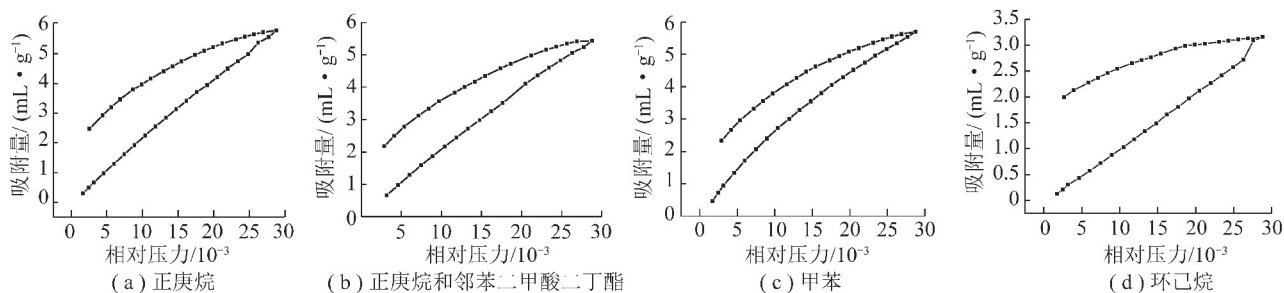
2.2 多孔季铵盐类离子液体聚合物 CO₂ 吸附性能

2.2.1 CO₂ 在多孔聚合物上的吸附/脱附等温线

本试验合成了以正庚烷、正庚烷和邻苯二甲酸二丁酯混合物、甲苯、环己烷为溶胀剂的4种多孔[VBTMA]BF₄聚合物,分别测定了各样品对CO₂纯组分的吸附/脱附数据,如图4所示。

由图4可以看出样品的CO₂吸附等温线均呈现出I型吸附等温线的特点,I型吸附等温线是微孔吸附剂的特征,说明样品的孔径与吸附质CO₂分子的大小属同一数量级。此外,样品的脱附线与吸附线即使在很低的相对压力下也无法闭合,推测是由于微孔的比例过多,导致脱附迟滞。

密度函数法(density functional theory, DFT)可以得到多孔材料吸附等温线及孔结构分析,优点是不需校正,可适用全等温线范围,对相对压力或孔尺寸范围没有限制,是可以提供微孔材料全吸附等温线与孔分布的2种方法之一。在本研究中引入DFT法来计算样品的孔径分布,结果见表1。采用DFT法计算出多孔聚合物的累积孔容见表2。

图 4 CO₂ 在多孔聚合物上的吸附/脱附等温线Fig. 4 Adsorption/desorption isotherms of CO₂ on the porous polymers表 1 不同多孔聚合物的孔径分布和 CO₂ 吸附量Table 1 Pore size distribution and the CO₂ adsorption capacity of different porous polymers

样品	孔径分布/nm				CO ₂ 体积分数/%
	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	
正庚烷	9.47%	50.51%	24.70%	15.32%	1.15
正庚烷+邻苯二甲酸二丁酯	11.76%	38.76%	23.58%	25.90%	1.07
甲苯	19.27%	46.65%	19.51%	14.56%	1.13
环乙烷	7.70%	48.99%	29.22%	14.10%	0.62

表 2 不同多孔聚合物基于 CO₂ 吸附等温线的 DFT 孔结构参数Table 2 Pore structure parameters based on DFT model for CO₂ adsorption of different porous polymers

样品	累积孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)
正庚烷	0.010 77
正庚烷+邻苯二甲酸二丁酯	0.011 74
甲苯	0.012 04
环乙烷	0.004 72

2.2.2 溶胀剂种类对离子液体聚合物孔道结构的影响

从上述测试结果可以看出多孔聚合物具有发达的微孔结构,在 0.4~0.8 nm 有连续分布,且孔径较集中于 0.5~0.6 nm。研究表明溶胀剂的种类对孔径分布及累积孔容有显著的影响,溶胀的速度和程度主要取决于溶胀剂液滴的大小。要获得发达的微孔结构,溶胀剂与的乳化剂水溶液必须能够形成分散均匀的乳浊液,且分散的液滴较小,本研究用到的溶胀剂都能与十二烷基硫酸钠的水溶液形成分散均匀的乳浊液。

比较表 1 中的数据可知,相同量的 3 种溶胀剂得到的多孔聚合物的孔径分布存在一定的差异。以正庚烷和环己烷为溶胀剂,合成的聚合物孔径分布

差别较小;采用甲苯溶胀剂,得到的聚合物孔径在 0.4~0.5 nm 的分布显著增加,至 19.27%;而采用正庚烷和邻苯二甲酸二丁酯混合溶胀剂,得到的聚合物的孔径分布更均匀。

理论上来说,两步溶胀后得到的多孔微球的粒径可以达到种子微球粒径的 4~17 倍,但实际上很难使溶胀单体完全溶胀到种子微球中。目前种子溶胀法制备多孔聚合物颗粒主要集中于聚苯乙烯颗粒,王东莎等^[21]指出溶胀剂与聚合物种球溶解度之差是影响微孔大小的主要因素,二者溶解度越接近,种球对溶胀剂的吸收越好,则形成的孔径越小。本试验采用的溶胀剂除环己烷以外,皆为极性溶剂,而离子液体聚合物 P[VB-TMA]BF₄ 也为极性,根据相似相溶的原理,采用极性溶胀剂制备的多孔聚合物微孔结构较为发达。采用环己烷作为溶胀剂时,得到的多孔聚合物不是具有黏性的絮状物,而是较致密的白色固体沉淀。虽然从孔径分布上来看,该多孔聚合物与其他溶胀剂制备的多孔聚合物没有明显的区别,但其累计孔容明显减小,仅为正庚烷溶胀剂制备的多孔聚合物的 43.8%。

2.2.3 多孔离子液体聚合物孔道结构对吸附 CO₂ 性能的影响

传统的 CO₂ 吸附材料,如分子筛、硅胶和活性炭等,所具有的微孔与 CO₂ 分子直径接近,对 CO₂ 具

有较好的吸附效果。虽然本试验制备的4种多孔聚合物的孔径分布存在一定的差异,但其微孔的孔径主要集中在0.5~0.6 nm之间,表明孔径在此范围内的微孔对CO₂具有较好的吸附作用。

通过比较表1与表2,可以看出多孔离子液体聚合物对CO₂的吸附量与其微孔的孔径分布之间无明显的规律,主要受累积孔容的影响。以正庚烷、甲苯,以及正庚烷和邻苯二甲酸二丁酯混合物为溶胀剂,得到多孔离子液体聚合物的累计孔容相差不大,其CO₂的吸附量也十分接近,在1.1%左右。而以环己烷为溶胀剂制备的多孔聚合物累积孔容最小,其CO₂吸附量亦最小。

3 结 论

1) 采用二步种子溶胀法制备的多孔聚合物具有发达的微孔结构,孔径在0.4~0.8 nm范围以内连续分布,且较集中于0.5~0.6 nm,达到38%以上。

2) 溶胀剂的种类对孔径分布及累积孔容有显著的影响,主要与溶胀剂与离子液体聚合物的相容性有关,相容性越好,得到的微孔结构越发达。采用混合溶胀剂得到的孔径分布更加均匀,而采用环己烷溶胀剂得到的累计孔容明显减少。

3) 多孔聚合物的孔径分布与CO₂吸附量无明显的关系,孔径在0.5~0.6 nm范围内的孔对CO₂都具有较好的吸附作用。

4) 累积孔容对CO₂的吸附量有较大的影响,累积孔容相当的聚合物吸附CO₂的量也近似,累积孔容明显减小的聚合物吸附CO₂的量也显著减少。但是CO₂吸附量并不是随着累积孔容的增加而线性增加,具体的关系有待进一步的试验研究。

参考文献 (References):

[1] 汪家铭. CO₂ 捕集与利用技术研究进展[J]. 石油化工技术与经济, 2012, 28(6): 43-47.
Wang Jiaming. Study advance of CO₂ trapping and utilization technology[J]. Technology & Economics in Petrochemicals, 2012, 28(6): 43-47.

[2] Li Ping, Pan Shuyuan, Pei Silu, et al. Challenges and perspectives on carbon fixation and utilization technologies: an overview. Aerosol and Air Quality Research, 2017, 16(6): 1327-1344.

[3] 李洪, 赵淑芳, 刘长岩, 等. CO₂ 捕集技术的研究进展[J]. 天津化工, 2011, 25(1): 1-3, 36.

[4] 姚淑梅, 王晓刚, 张辉, 等. 离子液体固定利用 CO₂ 研究进展[J]. 化工进展, 2008, 27(5): 640-647.

Yao Shumei, Wang Xiaogang, Zhanghui, et al. Progress of fixation and utilization of CO₂ using ionic liquids[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(5): 640-647.

[5] 吴永良, 焦真, 王冠楠, 等. 用于 CO₂ 吸收的离子液体的合成、表征及吸收性能[J]. 精细化工, 2007, 24(4): 325-340.
Wu Yongliang, Jiao Zhen, Wang Guannan, et al. Synthesis characterization and absorption efficiency of an Ionic liquid for the absorption of CO₂[J]. Fine Chemicals, 2007, 24(4): 325-340.

[6] 邓友全. 离子液体——性质、制备与应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.

[7] 张锁江, 吕兴梅. 离子液体——从基础研究到工业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[8] 张锁江, 徐春明, 吕兴梅, 等. 离子液体与绿色化学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[9] 袁晓亮, 张延强, 兰玲, 等. 离子液体固定 CO₂ 及其转化利用的研究进展[J]. 过程工程报, 2008, 8(2): 409-416.
Yuan Xiaoliang, Zhang Yanqiang, Lan Ling, et al. Research progress in fixation and transformation of CO₂ using ionic liquids[J]. The Chinese Journal of Progress Engineering, 2008, 8(2): 409-416.

[10] 陈卓, 谢辉, 胡长刚. 功能离子液体 [NH₂p-bim][BF₄] 吸收 CO₂ 的密度泛函计算[J]. 化学研究与应用, 2007, 19(12): 1322-1326.
Chen Zhuo, Xie Hui, Hu Changgang. DFT investigation on the CO₂ capture by the task-specific ionic liquid of [NH₂p-bim]BF₄ [J]. Chemical Research and Application, 2007, 19(12): 1322-1326.

[11] 蒋晶, 苏光耀. 离子液体聚合物电解质的研究进展[J]. 电池, 2005, 35(6): 474-476.
Jiang Jing, Su Guangyao. Research progress in ionic liquid-polymer electrolytes[J]. Battery Bimonthly, 2005, 35(6): 474-476.

[12] Blasig Andre, Jianbin Tang, Xudong Hu, et al. Magnetic suspension balance study of carbon dioxide solubility in ammonium-based polymerized ionic liquids: Poly(p-vinylbenzyltrimethyl ammonium tetrafluoroborate) and poly([2-(Methacryloyloxy) ethyl]trimethyl ammonium tetrafluoroborate) [J]. Fluid Phase Equilibria, 2007, 256(1): 75-80.

[13] 窦荣坦, 王大喜, 高金森, 等. 氯化烷基季铵盐离子液体结构性质的密度泛函计算[J]. 中国石油大学学报, 2007, 31(5): 104-118.
Dou Rongtan, Wang Daxi, Gao Jinsen, et al. Calculation of structure of alkylamine chloroaluminates molten salts by density function theory[J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(5): 104-118.

[14] 贺建勋, 杜宏德, 张超, 等. AlCl₃ 型季铵盐离子液体的微波法合成[J]. 广州化工, 2009, 37(2): 74-76.
He Jianxun, Du Hongde, Zhang Chao, et al. Microwave-assisted preparation of quaternary ammonium salt AlCl₃ ionic liquids[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2009, 37(2): 74-76.

(下转第122页)

- efficiency of the Cape Grim Baseline Air Pollution Station 10 m sampling inlet [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, 34 (11): 1523-1537.
- [9] Prashant Kumar, Paul Fennell, Jonathan Symonds, et al. Treatment of losses of ultrafine aerosol particles in long sampling tubes during ambient measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (38): 8819-8826.
- [10] Zhao Guan, Chen Yenyu, Thomas M. Holsen, Suresh Dhaniyala. Numerical simulations of the sampling performance of a large particle inlet [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2015, 90: 63-76.
- [11] 岳玎利, 周炎, 钟流举, 等. 大气颗粒物理化特性在线监测技术 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(5): 64-69.
Yue Dingli, Zhou Yan, Zhong Liuju, et al. Continuous online monitoring techniques for physical and chemical properties of atmospheric aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(5): 64-69.
- [12] Heyder J, Gebhart J. Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1977, 8(4): 289-295.
- [13] Schwendiman L C, Stegen G E, Glissmeyer J A. Report BNWL-SA-5138 [R]. Richland; Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1975: 1-5.
- [14] 赵磊, 周洪光. 超低排放燃煤火电机湿式电除尘器细颗粒物脱除分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2): 468-473.
Zhao Lei, Zhou Hongguang. Particle removal efficiency analysis of WESP in an ultra low emission coal-fired power plant [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2016, 36(2): 468-473.
- [15] 王志轩, 张建宇, 潘荔, 等. 中国电力减排政策分析与展望 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 5.
- [16] 邵媛, 胡杰, 邓宇. 微波辐射下烷基吡啶季铵盐类离子液体的制备 [J]. *化工中间体*, 2006(8): 20-23.
Shao Yuan, Hu Jie, Deng Yu. Synthesis of the ionic liquid of alkyl quaternary ammonium based on pyridinium cation by microwave radiation [J]. *Chemical Intermediate*, 2006(8): 20-23.
- [17] 王军, 杨许召, 李刚森, 等. N-甲基咪唑季铵化反应动力学研究 [J]. *日用化学工业*, 2007, 37(4): 235-237.
Wang Jun, Yang Xuzhao, Li Gangsen, et al. A kinetic study of quaternization of N-methyl imidazole [J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2007, 37(4): 235-237.
- [18] Tang Jianbin, Sun Weilin, Tang Huadong, et al. Enhanced CO₂ absorption of poly(ionic liquid)s [J]. *Macromolecules*, 2005, 38 (6): 2037-2039.
- [19] 孙亚飞, 林金清, 左霜, 等. 功能化季铵盐离子液体在制备生物柴油中的应用 [J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2011, 32 (6): 657-662.
Sun Yafei, Lin Jinqing, Zuo Shuang, et al. Application of synthesis biodiesel by functional quaternary ammonium ionic liquid [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2011, 32(6): 657-662.
- [20] 蒋晶. 凝胶型离子液体/聚合物电解质的制备及其性能研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2006: 21-28.
- [21] 王东莎, 刘彦军. 种子溶胀法制备单分散高交联聚苯乙烯微球 [J]. *应用化学*, 2007, 24(11): 1289-1294.
Wang Dongsha, Liu Yanjun. Mono-dispersed cross-linked polystyrene microspheres prepared by seed swelling polymerization method [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2007, 24 (11): 1289-1294.

(上接第 118 页)