

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160600

以功能化离子液体为溶剂的多酸脱硫性能

马云倩¹, 王睿¹, 于美青¹, Korchak Vladimir²

(¹ 山东大学环境科学与工程学院, 山东 济南 250199; ² 俄罗斯科学院西蒙诺夫化学物理研究所, 莫斯科 119991)

摘要: 合成了 5 种功能化离子液体([CPL][TBAB], [CPL]BF₄, [Bmim]HCO₃, [Bmim]OAc 和[Bmim]Im)以及含有相同阳离子的多酸离子液体 [CPL]₃PMo₁₂O₄₀ 和 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀, 构建了以功能化离子液体为溶剂的多酸液相氧化脱硫体系, 优选出最佳脱硫剂, 并考察了不同吸收温度、气体流量下最优脱硫剂的脱硫性能。结果表明 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃ 脱硫效率最高, 优化的吸收条件为温度高于 40℃、气体流量为 100 ml·min⁻¹; [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃ 可以简单地用空气再生。

关键词: 离子液体; 多酸; 液相氧化; H₂S; 溶剂; 合成; 吸收性能

中图分类号: O 621.25⁺4

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) S1—0302—05

Desulfurization performance of heteropolyacid with functionalized ionic liquids as solvents

MA Yunqian¹, WANG Rui¹, YU Meiqing¹, Korchak Vladimir²

(¹ School of Environmental Science & Engineering, Shandong University, Jinan 250199, Shandong, China;

² Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russian Federation)

Abstract: Five kinds of functionalized ionic liquids ([CPL][TBAB], [CPL]BF₄, [Bmim]HCO₃, [Bmim]OAc and [Bmim]Im) were synthesized, as well as heteropolyacid-ionic liquids ([CPL]₃PMo₁₂O₄₀ and [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀) which have the same cations. Wet desulfurization by heteropolyacid is established. The desulfurization performance of the selected optimal desulfurizer is investigated at different absorption temperature and gas flow. The results show that [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃ has large capacity on desulfurization, and the optimal absorption conditions are over 40℃ and gas flow of 100 ml·min⁻¹. [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃ can be simply regenerated by air.

Key words: ionic liquid; heteropolyacid; liquid-phase oxidation; H₂S; solvents; synthesis; absorption capacity

引 言

H₂S 作为一种有害杂质, 不仅对输运管路、设备等造成腐蚀, 影响后续加工过程 (如导致催化

剂中毒), 而且严重威胁人身安全, 属必须控制的环境污染物之一。在天然气、焦炉煤气和半水煤气等工业气体的开发利用过程中, 对其中的硫化物进行深度脱除, 无论是对于制备清洁燃料还是对于后

2016-05-09 收到初稿, 2016-05-19 收到修改稿。

联系人: 王睿。第一作者: 马云倩 (1986—), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21276144, 21511130021); 教育科技重点项目 (109094); 教育部博士点基金优先发展领域课题项目 (20110131130001)。

Received date: 2016-05-09.

Corresponding author: WANG Rui, wangrui@sdu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21276144, 21511130021), the Scientific Key Project from Chinese Ministry of Education (109094) and the Ph. D. Program Project for Priority Development Field from Chinese Ministry of Education (20110131130001).

续加工都是必然的要求^[1-3]。液相氧化脱硫工艺是以处于氧化态的吸收剂液相与气相中的还原态硫化物之间发生氧化-还原反应为基础的一类气体净化方法，能够将气体中的硫化物直接转化为单质硫，同时实现污染物的治理与硫资源的回收。该法工艺装置较为普通且投资远低于 Claus 装置，是一类较有发展前途的脱硫工艺^[4]。其中对煤气化产物的脱硫，由于迄今开发的液相氧化脱硫体系均是水溶液体系，无法在高温下运行，需要事先将待处理气体冷却到常温范围进行脱硫，从而造成不必要的能量损耗。因此，寻找稳定性好、适用于高温且脱硫效率高的液相氧化脱硫剂尤为关键。

近年来，离子液体（IL）作为环境友好型溶剂，在吸收、溶解 H₂S 等酸性气体方面引起人们的广泛关注。它具有一般脱硫剂无法比拟的优势：①蒸气压极小，避免了吸收剂挥发造成的损失和污染；②对无机和有机材料都表现出良好的溶解能力；③可以通过对阴阳离子的设计改变其取代基，从而使其性质能够满足实际需要^[5-8]。

本工作在以往杂多酸水溶液脱硫体系研究的基础上^[9]，选用磷钼杂多化合物，采用功能化离子液体作为溶剂，构建并优选出可再生液相氧化脱硫新体系，为实现天然气、焦炉煤气和半水煤气等工业气体的脱硫精制与硫资源回收奠定工业应用基础。

1 实验材料和方法

1.1 材料

己内酰胺（分析纯）、磷钼酸（H₃PMo₁₂O₄₀ · xH₂O，纯度为 99%）、碳酸氢钠（NaHCO₃）、氢氧化钠（NaOH）、乙酸、甲醇、乙醇、乙醚（分析纯），国药集团化学试剂有限公司提供。N-甲基咪唑、四丁基溴化铵、1-丁基-3-甲基咪唑溴盐（[Bmim]Br），购买于上海成捷离子液体有限公司。氮气（纯度为 99.999%）、硫化氢（纯度为 99.99%），购买于济南德洋特种气体有限公司。实验用水为去离子水。

1.2 分析测试仪器

气体质量流量计，D08-1D/ZM 型（N₂）和 D08-1F 型（H₂S），北京七星华创电子有限公司；H₂S 气体分析仪，TH-990S 型，武汉天虹仪器仪表有限公司；集热式恒温加热磁力搅拌器，DF-101S 型，河南予华仪器有限公司；傅里叶变换红外光谱仪（FT-IR），Avatar370 型，美国 Thermo

Nicolet 公司。

1.3 脱硫剂的合成

（1）己内酰胺四丁基溴化铵（[CPL][TBAB]）：等摩尔的己内酰胺和四丁基溴化铵在 50℃ 下混合搅拌 6 h，然后在 50℃ 下真空干燥 24 h，得到 [CPL][TBAB] 离子液体^[10]。

（2）己内酰胺四氟硼酸盐（[CPL]BF₄）：与 [Bmim]BF₄ 的合成方法类似^[11]。

（3）1-丁基-3-甲基咪唑碳酸氢盐（[Bmim]HCO₃）：称取 22 g（0.1 mol）[BMIM]Cl，溶于 20 ml 甲醇中，向其中加入 8.4 g（0.1 mol）NaHCO₃，在恒温磁力搅拌器上 40℃ 下搅拌 24 h，过滤后的清液经蒸馏除去甲醇，即得无色液体^[12]。

（4）1-丁基-3-甲基咪唑乙酸盐（[Bmim]OAc）：在异丙醇中加入 [Bmim]Br 和过量的 NH₄OAc，在 60℃ 下剧烈搅拌 6 h，将白色不溶物过滤，得到的滤液用活性炭和 5A 分子筛处理，真空去除溶剂后得到无色黏性液体，即为 [Bmim]OAc^[13]。

（5）1-丁基-3-甲基咪唑盐（[Bmim]Im）：将一定量的 N-甲基咪唑加到 NaOH 的甲醇溶液中，室温反应 30 min，然后加入等摩尔的 [Bmim]Br，在室温下磁力搅拌 3 h，之后加入适量无水乙醚，室温下继续搅拌 20 h，过滤除去 NaBr 得到滤液，旋转蒸发反应液，用无水乙醚多次洗涤，再旋转蒸发，得到淡黄色液体，即为 [Bmim]Im^[14]。

（6）脱硫剂的合成：将一定量的杂多酸离子液体溶解于 35 ml 含有相同阳离子的离子液体中，配制成浓度为 0.005 mol · L⁻¹ 杂多酸的离子液体溶液，并在水浴超声中放置 20 min 使其溶解充分，分别构建了多酸-功能化离子液体液相脱硫体系 [CPL]₃PMo₁₂O₄₀-[CPL][TBAB]、[CPL]₃PMo₁₂O₄₀-[CPL]BF₄、[Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃、[Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]OAc 和 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]Im。

1.4 H₂S 吸收性能的测定

本实验采用的含硫气体是由一定浓度的 H₂S 气体（高纯 H₂S 与高纯 N₂ 混合稀释而得）与高纯 N₂ 分别通过质量流量计控制流量混合得到的。其中，气体流量分别采用 100、200 和 300 ml · min⁻¹，气体浓度为 850 mg · m⁻³。将此气体通入装有 35 ml 上述合成的脱硫剂中进行吸收实验，温度控制在室温~120℃。采用 H₂S 气体分析仪对尾

气中 H_2S 气体浓度进行动态检测。实验装置如图 1 所示, 该装置由气瓶 (H_2S 和 N_2)、质量流量计、混合器、吸收部分、气体分析仪以及尾气处理等部分组成, 其中吸收装置为内径 1.0 cm 的含有微孔板的玻璃管式吸收器。

2 实验结果与讨论

2.1 离子液体的 FTIR 表征

图 2 为上述合成的 3 种功能化咪唑基离子液体的红外光谱图。可以看出 $[\text{Bmim}]\text{OAc}$ 和 $[\text{Bmim}]\text{Im}$ 的吸收峰比 $[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 强烈。从 $[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 离子液体的谱图上可以看出: 3421 cm^{-1} 对应的是缔合 $-\text{OH}$ 伸缩振动, 3149 cm^{-1} 和 3092 cm^{-1} 为芳环上的 $\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动, 2873 cm^{-1} 与 2963 cm^{-1} 为脂肪族的 $\text{C}-\text{H}$ 伸

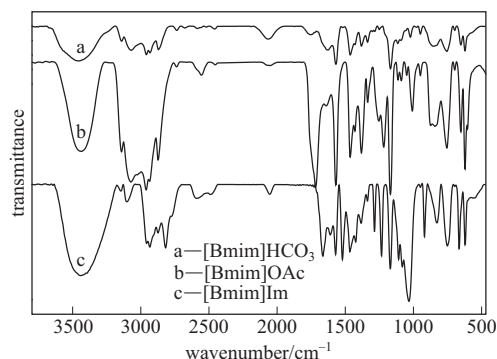


图 2 $[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 、 $[\text{Bmim}]\text{OAc}$ 和 $[\text{Bmim}]\text{Im}$ 离子液体的红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectra of $[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$, $[\text{Bmim}]\text{OAc}$ and $[\text{Bmim}]\text{Im}$

缩振动, 1638 cm^{-1} 为 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动, 1569 cm^{-1} 为芳环的骨架振动, 1465 cm^{-1} 和 1382 cm^{-1} 为甲基对称变形振动和弯曲伸缩振动, 1169 cm^{-1} 为芳环 $\text{C}-\text{H}$ 面内弯曲振动, 950 cm^{-1} 为 HCO_3^- 中 $\text{OH}\cdots\text{O}$ 之间的非平面弯曲振动, 表明合成产物具有 $[\text{Bmim}]^+$ 和 HCO_3^- 的结构特征^[15]; 从 $[\text{Bmim}]\text{OAc}$ 的谱图上可以看出, 1720 cm^{-1} 和 1380 cm^{-1} 为乙酸特有的吸收峰; 从 $[\text{Bmim}]\text{Im}$ 的谱图上可以看出, 3434 cm^{-1} 为水峰, 两个较小的峰 3146 cm^{-1} 和 3098 cm^{-1} 为芳环上的 $\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动。相比之下, 虽然阳离子同样为咪唑, 但 $[\text{Bmim}]\text{Im}$ 在 2873 cm^{-1} 和 2814 cm^{-1} 处脂肪族的 $\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动与 $[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 和 $[\text{Bmim}]\text{OAc}$ 有所不同。

2.2 以不同离子液体为溶剂的多酸体系脱硫性能比较

实验测定了 40°C 下多酸-功能化离子液体体系对 H_2S 的吸收性能, 如图 3 所示。脱硫性能顺序为: $[\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{HCO}_3 > [\text{CPL}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{CPL}][\text{TBAB}] > [\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{OAc} > [\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{Im} > [\text{CPL}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{CPL}]\text{BF}_4$ 。对于 $[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 、 $[\text{Bmim}]\text{OAc}$ 和 $[\text{Bmim}]\text{Im}$ 3 种碱性咪唑离子液体, 其碱性强弱顺序为: $[\text{Bmim}]\text{Im} > [\text{Bmim}]\text{OAc} > [\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 。理论上, 在相同实验条件下吸收酸性气体 H_2S 的效率应该遵循此规律, 但是实验得到的结果与之相反, 说明吸收 H_2S 的性能与作为溶剂的离子液体碱性强弱并无直接关系。此外, 有文献^[14]指出

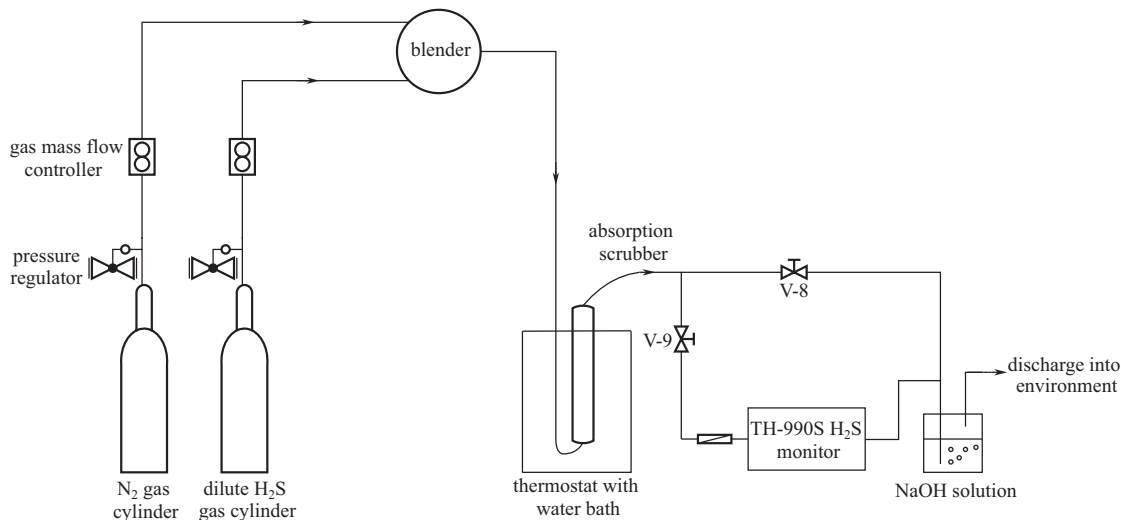


图 1 脱硫装置

Fig. 1 Desulfurization apparatus

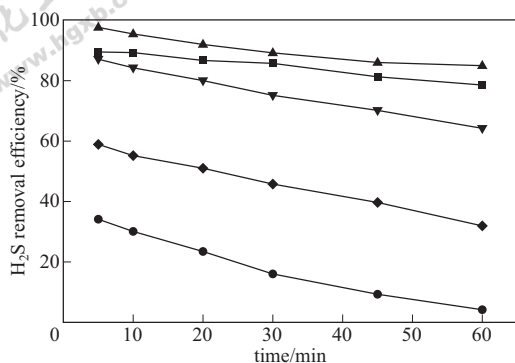


图3 不同多酸-离子液体脱硫体系的脱硫效率

Fig. 3 H₂S removal efficiency of different heteropolyacid-ionic liquid systems (concentration of PMo₁₂O₄₀³⁻: 0.005 mol · L⁻¹; concentration of H₂S: 850 mg · m⁻³; temperature: 40°C; gas flow: 100 ml · min⁻¹)

- [CPL]₃PMo₁₂O₄₀-[CPL] [TBAB];
- [CPL]₃PMo₁₂O₄₀-[CPL] BF₄;
- ▲ [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim] HCO₃;
- ▼ [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim] OAc;
- ◆ [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim] Im

[Bmim]Im 易溶于极性溶剂 (如水、乙醇), 不溶于非极性溶剂 (如乙醚), 而大量极性 H₂S 气体理论上与 [Bmim] Im 作用较为强烈, 但是 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]Im 体系的脱硫效果较差。在制备脱硫剂的过程中发现将 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀ 加到 [Bmim]Im 离子液体中后溶液立即变为蓝绿色, 这说明 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀ 与 [Bmim]Im 离子液体发生了反应, 使得 PMo₁₂O₄₀³⁻ 被还原为杂多蓝, 失去了一部分脱硫能力, 这也是 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]Im 体系脱硫效果差的原因。因此, 脱硫性能的主导因素应为多酸阴离子与 H₂S 的氧化还原反应, 即多酸在离子液体中的溶解情况以及 H₂S 在离子液体中的传质等。

Guo 等^[10] 研究了 H₂S 在 [CPL][TBAB] 离子液体中的吸收氧化, 结果得到 30°C 常压下 H₂S 在 [CPL][TBAB] 中的溶解度为 5.4%, 并且随温度升高急剧降低; 此离子液体吸收 H₂S 后通入空气可以将 H₂S 氧化成单质硫。可见, [CPL][TBAB] 离子液体对 H₂S 具有一定的溶解能力。本实验以 [CPL] [TBAB] 为溶剂溶解多酸, 对 H₂S 的吸收性能较高, 仅次于 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim] HCO₃ 体系。将 [CPL] [TBAB] 离子液体中的阴离子用常规离子

液体的阴离子 BF₄⁻ 取代, 吸收效率则非常低, 吸收 60 min 后吸收效率仅为 5%。

综上所述, 选择脱硫效果最好的 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim] HCO₃ 体系做进一步研究。

2.3 温度对 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃ 脱硫性能的影响

曾经研究了温度对 Dawson 结构磷钼钒酸水溶液脱硫性能的影响, 结果得到随温度升高脱硫效率降低, 这是因为杂多酸与 H₂S 的反应是一种放热反应, 温度升高不利于反应的进行^[9]。在本实验中, 针对脱硫性能优异的 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃ 体系考察了脱硫剂在不同温度下对 H₂S 的吸收性能, 如图 4 所示。20°C 时的脱硫效率低于 40、80 和 120°C, 是因为离子液体的黏度随温度升高而降低。在 20°C 时离子液体黏度较大, 不利于 H₂S 的吸收, 并且低温不利于 H₂S 在离子液体中的传质; 高于 40°C 时, 随着温度的升高, 吸收性能基本不变。

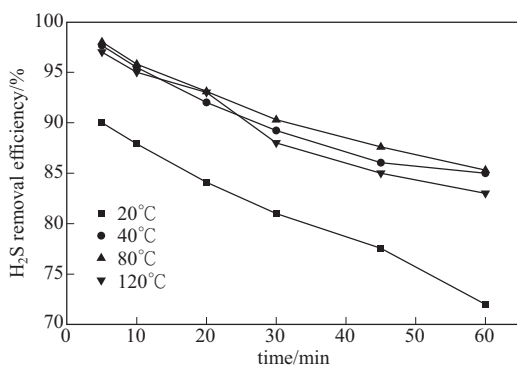
图4 吸收温度对脱硫剂吸收 H₂S 性能的影响

Fig. 4 Effect of temperature on H₂S absorption capacity by desulfurizer (concentration of PMo₁₂O₄₀³⁻: 0.005 mol · L⁻¹; concentration of H₂S: 850 mg · m⁻³; gas flow: 100 ml · min⁻¹)

2.4 气体流量对 [Bmim]₃PMo₁₂O₄₀-[Bmim]HCO₃ 脱硫性能的影响

实验考察了不同气体流量 100、200 和 300 ml · min⁻¹ 对脱硫体系吸收 H₂S 效率的影响, 如图 5 所示。气体流量越大, 脱硫效率越低。气体流量为 300 ml · min⁻¹ 时, 吸收最初 5 min 时的脱硫效率降为 88%, 说明在此气体流量下脱硫体系吸收 H₂S 不充分。因此选择较低气体流量 100 ml · min⁻¹。

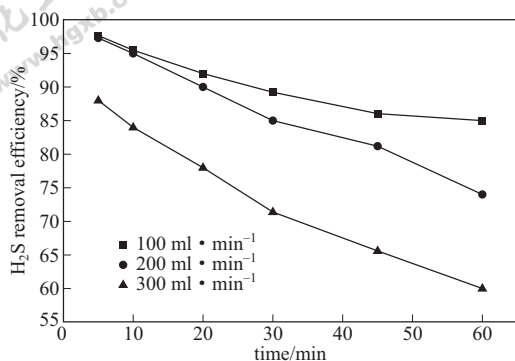


图 5 气体流量对脱硫剂吸收 H_2S 性能的影响

Fig. 5 Effect of gas flow on H_2S absorption capacity by desulfurizer (concentration of $\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}^{3-}$: $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; concentration of H_2S : $850 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; T : 40°C)

2.5 脱硫剂的再生

脱硫剂吸收 H_2S 之前为黄色, 与 H_2S 反应后变为蓝绿色, 这是因为杂多阴离子被还原为杂多蓝。在 40°C , 向吸收 H_2S 后的 $[\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 脱硫剂中通入 $100 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 的空气数小时, 进行再生实验, 结果再次吸收 H_2S 的效率基本达到初次吸收的效率, 但是脱硫剂的颜色并没有完全恢复。

3 结 论

(1) 多酸-功能化离子液体体系吸收 H_2S 性能高低顺序为: $[\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{HCO}_3 > [\text{CPL}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{CPL}][\text{TBAB}] > [\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{OAc} > [\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{Im} > [\text{CPL}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{CPL}]\text{BF}_4$ 。

(2) 低温不利于脱硫剂对 H_2S 的吸收, 在 40 、 80 和 120°C 下 $[\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 脱硫效率较高且彼此接近。

(3) 气体流量越低, 脱硫效率越高。最佳气体流量为 $100 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(4) 最优脱硫剂 $[\text{Bmim}]_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}-[\text{Bmim}]\text{HCO}_3$ 吸收 H_2S 后可以被空气再生。

References

[1] 朱光有, 戴金星, 张水昌, 等. 含硫化氢天然气的形成机制及分布规律研究 [J]. 天然气地球科学, 2004, **15**: 166-170.
ZHU G Y, DAI J X, ZHANG S C, *et al.* Generation mechanism and distribution characteristics of hydrogen sulfide bearing gas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, **15**: 166-170.
[2] SCHMIDT R, CROSS J B, LATIMER E G. Tail-gas cleanup by simultaneous SO_2 and H_2S removal [J]. Energy

& Fuels, 2009, **23**: 3612-3616.
[3] 张静娇, 宋华, 白冰, 等. 有机醇胺溶液中 H_2S 气体溶解性能评价 [J]. 化工进展, 2012, **31**: 1432-1436.
ZHANG J J, SONG H, BAI B, *et al.* Evaluation of dissolution of H_2S in aqueous solution of organic alkanolamine [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, **31**: 1432-1436.
[4] CADOURS R, ROQUET D, PERDU G. Competitive absorption-desorption of acid gas into water-DEA solutions [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2007, **46**: 233-241.
[5] TOKUDA H, HAYAMIZU K, ISHII K, *et al.* Physicochemical properties and structures of room temperature ionic liquids (1): Variation of anionic species [J]. J. Phys. Chem. B, 2004, **108**: 16593-16600.
[6] SHANG Y, LI H, ZHANG S, *et al.* Guanidinium-based ionic liquids for sulfur dioxide sorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **175**: 324-329.
[7] HUANG J, RIISAGER A, BERG R W, *et al.* Tuning ionic liquids for high gas solubility and reversible gas sorption [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2008, **279**: 170-176.
[8] GUTOWSKI K E, MAGINN E J. Amine-functionalized task-specific ionic liquids: a mechanistic explanation for the dramatic increase in viscosity upon complexation with CO_2 from molecular simulation [J]. J. Am. Chem. Soc., 2008, **130**: 14690-14704.
[9] 马云倩, 杨烽, 王睿. Dawson 磷钼钒酸的合成、脱硫与微波辅助空气再生 [J]. 无机化学学报, 2012, **28**: 2179-2185.
MA Y Q, YANG F, WANG R. Synthesis, desulfurization and microwave assisted air regeneration performance of Dawson-type molybdovanadophosphoric heteropolyacid [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2012, **28**: 2179-2185.
[10] GUO B, DUAN E, ZHONG Y, *et al.* Absorption and oxidation of H_2S in caprolactam tetrabutyl ammonium bromide ionic liquid [J]. Energy & Fuels, 2011, **25**: 159-161.
[11] REVELLI A L, MUTELET F, TURMINE M, *et al.* Activity coefficients at infinite dilution of organic compounds in 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate using inverse gas chromatography [J]. J. Chem. Eng. Data, 2009, **54**: 90-101.
[12] DENG Z, GUO J, QIU L, *et al.* Basic ionic liquids: a new type of ligand and catalyst for the AGET ATRP of methyl methacrylate [J]. Polym. Chem., 2012, **3**: 2436-2443.
[13] LIU Y, LI M, LU Y, *et al.* Simple, efficient and recyclable palladium catalytic system for Heck reaction in functionalized ionic liquid network [J]. Catalysis Communications, 2006, **7**: 985-989.
[14] 陈学伟, 李雪辉, 宋红兵, 等. 咪唑阴离子型碱性离子液体的合成及其催化 Knoevenagel 缩合反应 [J]. 催化学报, 2008, **29**: 957-959.
CHEN X W, LI X H, SONG H B, *et al.* Synthesis of a basic imidazolide ionic liquid and its application in catalyzing Knoevenagel condensation [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2008, **29**: 957-959.
[15] YUE Q F, WANG C X, ZHANG L N, *et al.* Glycolysis of poly (ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts [J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, **96**: 399-403.