

咪唑类离子液体脱除气体中有机硫化物的研究

郭玉超¹, 康洛铭¹, 李爱蓉^{1*}, 陆原²

(1.西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500; 2.中海油(天津)油田化工有限公司, 天津 300451)

摘要:以1-丁基-3-甲基咪唑为阳离子制备了[BMIM]Ac、[BMIM]HSO₄、[BMIM]DBP、[BMIM]SCN等4种脱有机硫咪唑类离子液体,通过FT-IR和¹HNMR等表征验证了其分子结构特征,考察了不同咪唑类离子液体对硫醇的脱除效果。结果表明,4种离子液体中[BMIM]Ac可与硫醇形成稳定的氢键,表现出较优的脱硫能力,常压下同含硫醇的原料气流量为100 mL/min时,吸收2 min后可脱除83%的甲硫醇和乙硫醇,丙硫醇的脱硫率可达到92%;另外,该离子液体脱硫性能稳定、再生循环性能优异,可推广用于天然气中有机硫的脱除。

关键词:脱硫;离子液体;[BMIM]Ac;硫醇;天然气

中图分类号:TQ028.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)07-0188-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.07.036

Study on removal of gaseous organic sulfides by imidazole ionic liquids

GUO Yu-chao¹, KANG Luo-ming¹, LI Ai-rong^{1*}, LU Yuan²

(1.College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.CNOOC EnerTech Oilfield Chemical Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract:Four kinds of imidazole ionic liquids with organic sulfur removal properties, such as [BMIM]Ac, [BMIM]HSO₄, [BMIM]DBP and [BMIM]SCN, are prepared by using 1-butyl-3-methylimidazole as cation. Their molecular structures are verified by FT-IR and¹HNMR, and their desulfurization effects are investigated. Experimental results show that [BMIM]Ac can form a stable hydrogen bond with mercaptan, and shows better desulfurization capacity than other three kinds of imidazole ionic liquids. Under atmospheric pressure, 83% of methyl mercaptan and ethyl mercaptan can be removed, and the removal rate of propyl mercaptan can reach 92% when the flow rate of mercaptan-containing feed gas is 100 mL·min⁻¹, and the feed gas has been absorbed by [BMIM]Ac for 2 minutes. In addition, it is found that [BMIM]Ac has stable desulfurization and regeneration performance, and can be used in removing organic sulfur in natural gas.

Key words:desulphurization; ionic liquids; [BMIM]Ac; mercaptan; natural gas

随着石油资源和煤炭资源的日渐紧缺,天然气作为一种具有高氢碳比、高热值的绿色低碳能源,广泛应用于居民生活和化工工业生产。然而,天然气中含有的CO₂、H₂S、硫醇等酸性组分不仅腐蚀管道设备、破坏生态环境,而且严重影响其下游生产环节^[1-3]。以砷胺法为主的传统天然气净化工艺能实现天然气中CO₂和H₂S的高效脱除,但很难实现有机硫类酸性组分的有效脱除。硫醇作为天然气有机硫主要成分之一,其脱除对天然气的净化有着重要意义。

离子液体具有挥发性低、热稳定好、可设计性强和易分离等优点^[4-5],可解决传统湿法脱硫工艺存在的重烃共吸率高、有机硫脱除精度低等问题^[3,6-7],在操作过程中也可以避免溶剂对气流的交叉污染带来的二次处理问题,已被广泛应用于硫化

物脱除领域。Martínez等^[8]发现[BMIM]FeCl₄、[BMIM]Ac等咪唑类离子液体可用于硫醇类有机硫化物的分离;Wang等^[9]的研究也验证了硫酸氢盐咪唑类离子液体在氧化脱硫过程中可促进—SH、—S—和噻吩氧化生成亚砷和砷的过程,有利于有机硫组分的脱除^[10]。很多相关研究进一步表明离子液体的阴离子端对于其脱硫能力的影响较大^[11-15]。

在已有咪唑类离子液体用于分离硫醇类化合物的研究基础上,笔者以1-丁基-3-甲基咪唑为阳离子,选用不同的阴离子合成了[BMIM]Ac、[BMIM]HSO₄、[BMIM]DBP、[BMIM]SCN等4种具有脱硫潜力的离子液体,同时考察了其对天然气中硫醇类有机硫化物的脱除效果,并对最佳脱硫效果的离子液体的脱硫和再生性能进行了重点研究。

收稿日期:2021-08-11;修回日期:2022-05-10

基金项目:2020年省级大学生创新创业训练计划项目(S202010615084);四川省科技创新苗子工程资助项目(2021104)

作者简介:郭玉超(1999-),女,硕士研究生,研究方向为气体分离,1269170502@qq.com;李爱蓉(1979-),女,博士,教授,研究方向为绿色化工与多相传递,通讯联系人,liarong@swpu.edu.cn。

1 实验部分

1.1 实验药品与仪器

制备不同离子液体过程中所使用的主要化学药品如表 1 所示。

表 1 实验药品

药品	纯度/%	供应厂商
1-丁基-3-甲基咪唑氯盐	98.00	阿拉丁
硫酸氢钠	99.00	成都市科隆化学品有限公司
乙酸钾	99.00	成都市科隆化学品有限公司
硫氰化钾	98.50	阿拉丁
乙硫醇	98.00	麦克林
甲醇	99.50	成都市科隆化学品有限公司
环丁砜	98.00	成都市科隆化学品有限公司
1-甲基咪唑	99.00	阿拉丁
磷酸三丁酯	98.50	成都市科隆化学品有限公司
甲苯	99.50	成都市科隆化学品有限公司
无水乙醚	99.50	成都市科隆化学品有限公司
二氯甲烷	99.50	成都市科隆化学品有限公司
丙酮	99.50	成都市科隆化学品有限公司
氮气	99.99	成都科源气体有限公司

所用原料气为氮气与硫醇的混合气体,其主要成分如表 2 所示。

表 2 原料气有机硫组成及质量浓度

组分	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
甲硫醇	307.6
乙硫醇	201.1
丙硫醇	149.9

制备不同离子液体过程中所使用的实验仪器如表 3 所示。

表 3 实验仪器

主要仪器	型号	仪器厂商
电子天平	HX-T	慈溪市天东衡器厂
磁力搅拌器	84-1A	上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司
集热式磁力加热搅拌器	DF-101S	金坛市医疗仪器厂
数显智能控温磁力搅拌器	SZCL-2A	巩义市予华仪器有限责任公司
循环水多用真空泵	SHB-3A	郑州杜甫仪器厂
旋转蒸发器	R1001-VN	郑州长城科工贸有限公司
红外光谱仪	WQF-520	成都恒瑞精密仪器
核磁共振仪	400 MHz	布鲁克
旋转式数字黏度计	DNJ-5S	上海佑科仪器仪表有限公司
气相色谱仪	SC-3000B-022	重庆川仪分析仪器有限公司

1.2 离子液体的制备与表征

按照文献 [6-9, 16] 报道的 [BMIM] Ac、[BMIM] HSO₄、[BMIM] DBP、[BMIM] SCN 4 种离子液体的制备和提纯方法进行实验。通过比重法和旋转式数字黏度计测定了常温下离子液体的基本物性,同时利用傅里叶红外光谱仪(FT-IR)和核磁共振仪(NMR)对离子液体的结构进行表征分析。其中,红外光谱仪为北京瑞利分析仪器有限公司生产的 WQF-520 型,分辨率为 0.5 cm^{-1} ,扫描波数为 400~4 000 cm^{-1} ,采用空白 KBr 压片点涂离子液体制样测定;核磁共振谱仪为布鲁克科技有限公司生产的 400 MHz 型,在 $\delta=0.0$ ppm 处测定了相对于内部 TMS 的 ¹H NMR 化学位移,并根据离子液体的性质不同,将不同的离子液体溶解于相应的氘代溶剂(氘代 CDCl₃、氘代 D₂O、氘代 DMSO)中进行核磁氢谱测定。

1.3 脱硫、再生性能测试

离子液体脱硫过程及所用装置如图 1 所示。

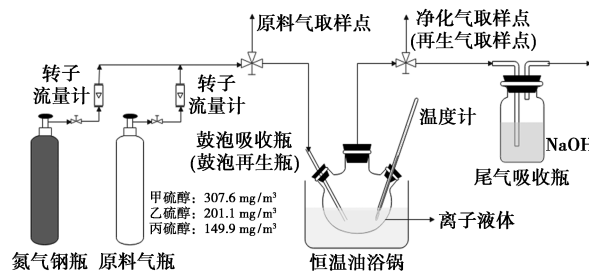


图 1 脱硫性能测试实验装置及流程

脱硫后的离子液体在高温下用氮气汽提的方式实现离子液体的再生。用气相色谱仪对实验过程中净化气、再生气中硫醇浓度进行检测,检测器为 FPD,检测器温度为 150℃,柱箱温度为 50℃,载气为高纯氮气。

2 结果与讨论

2.1 离子液体的表征

2.1.1 基础物性测定

4 种离子液体的密度和黏度测定结果如表 4 所示。由表 4 中可以看出,4 种离子液体密度均大于 1 g/cm^3 ,高的液体密度有利于提高单位体积脱硫液中的硫醇容量。而常温下 4 种离子液体的黏度差异较大,其中 [BMIM] DBP 的黏度最大,达到了 803 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,另外 3 个离子液体则表现出较低的黏度,特别是 [BMIM] SCN 的黏度仅有 35 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,而传

统有机硫脱除溶剂如环丁砜的黏度仅有 10.3 mPa·s (30℃), 离子液体的高黏度不仅降低了气液传质速率, 而且增加了吸收、溶解及运输过程的难度, 是限制其走向工业应用的重要难题之一。

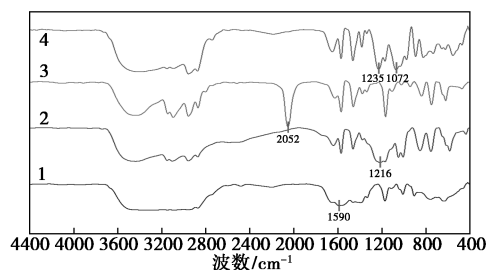
表 4 常温下不同阴离子咪唑基离子液体的密度与黏度

离子液体	密度/(g·cm ⁻³)	黏度/(mPa·s)
[BMIM]Ac	1.0650	242
[BMIM]HSO ₄	1.0401	145
[BMIM]DBP	1.0057	803
[BMIM]SCN	1.0708	35

2.1.2 红外光谱表征

对所合成的 4 种离子液体均进行了 FT-IR 表征, 结果如图 2 所示。由于其阳离子都是 1-丁基-3-甲基咪唑离子, 因此其阳离子的红外光谱振动频率基本一致, 由图 2 中可以看出, 3 700~3 200 cm⁻¹ 处的吸收谱带为—OH 的伸缩振动峰, 3 200~3 000 cm⁻¹ 为咪唑环上的 C—H 伸缩振动峰, 2 980~2 850 cm⁻¹ 为咪唑环取代基上 C—H 的伸缩振动峰, 1 650~1 450 cm⁻¹ 为咪唑环骨架的伸缩振动峰, 1 460、1 380 cm⁻¹ 附近为—CH₃ 和—CH₂—的特征吸收峰, 1 500~1 000 cm⁻¹ 为咪唑环 C—H 的面内弯曲振动峰, 900~650 cm⁻¹ 为咪唑环 C—H 的面外弯曲振动峰, 均与文献 [17] 中的结果相吻合。在 3 438 cm⁻¹ 处为缔合—OH 的伸缩振动峰, 在 1 600~1 550 cm⁻¹ 之间的较强峰为羧基的特征吸收峰^[18],

1 051 cm⁻¹ 处为硫酸氢根中 S=O 的特征吸收峰^[19], 2 052 cm⁻¹ 处为硫氢根的特征吸收峰^[20], 1 230、1 072 cm⁻¹ 处为 [DBP]⁻ 的特征吸收峰^[21], 说明 4 种离子液体均合成成功。



1—[BMIM]Ac; 2—[BMIM]HSO₄; 3—[BMIM]SCN; 4—[BMIM]DBP

图 2 不同阴离子咪唑基离子液体的红外光谱图

2.1.3 核磁共振表征

对所合成的 4 种离子液体进行 ¹H NMR 表征分析, 进一步确认其化学结构, 谱图数据如表 5 所示。由表 5 中可以看出, [BMIM]Ac 离子液体咪唑环上 H-a、H-b、H-c 的化学位移分别为 7.14、7.19 ppm 和 11.08 ppm, 与咪唑环直接相连的甲基的 H-d 和丁基的 H(H-e、H-f、H-g、H-h) 以及醋酸阴离子的 H-j 的化学位移均与文献 [22] 中的报道一致。同理, [BMIM]SCN、[BMIM]HSO₄、[BMIM]DBP 各位置氢所对应的化学位移也均与文献 [14, 23-26] 中报道的数值相符, 由此进一步说明 4 种离子液体均制备成功。

表 5 4 种离子液体的 ¹H NMR 化学位移 (δ/ppm)

		离子液体			
H 位置		[BMIM]Ac (氘代 CDCl ₃)	[BMIM]SCN (氘代 CDCl ₃)	[BMIM]HSO ₄ (氘代 D ₂ O)	[BMIM]DBP (氘代 DMSO)
H-a		7.14(d)	7.44(d)	7.39(d)	7.73(d)
H-b		7.19(d)	7.49(d)	7.44(d)	7.80(d)
H-c		11.08(s)	9.33(s)	8.67(s)	9.39(s)
H-d		4.02(s)	4.07(s)	3.86(s)	3.86(s)
H-e		4.26(t)	4.29(t)	4.16(t)	4.17(t)
H-f		1.83(m)	1.90(m)	1.81(m)	1.76(m)
H-g		1.34(m)	1.38(m)	1.28(m)	1.28(m)
H-h		0.93(t)	0.95(t)	0.89(t)	0.88(t)
H-j		1.94(s)	—	—	3.88(t)
H-k		—	—	—	1.42(m)
H-l		—	—	—	1.76(m)
H-m		—	—	—	0.88(q)

2.2 离子液体的脱硫性能考察

环丁砜作为一种优良的非质子极性溶剂,在天然气有机硫脱除中扮演着重要角色^[27]。因此,称取脱硫剂 10 g,控制原料气流量为 100 mL/min,吸收温度为 35℃,分别将 4 种离子液体与环丁砜按照 1.3 实验步骤进行脱硫性能比较,结果如图 3 所示。由图 3 中可以看出,4 种离子液体对气体中的硫醇均具有明显脱除能力,且随着吸收时间的推移,脱硫率均呈逐渐下降的趋势,但在实验考察时间范围内,仅有 [BMIM]Ac 的脱硫效果高于传统溶剂环丁砜,在实验开始 2 min 时,其对甲、乙、丙硫醇的脱除率可分别达到 84%、84%、93%,这是由于醋酸根离子液体中阴离子的 C=O 基团上的氧原子的电荷密度较大,是氢键形成的良好接受体,而硫醇分子中的 S—H 基团则是良好的氢键供体,硫醇分子可与 [BMIM]Ac 离子液体形成稳定的氢键^[21]。

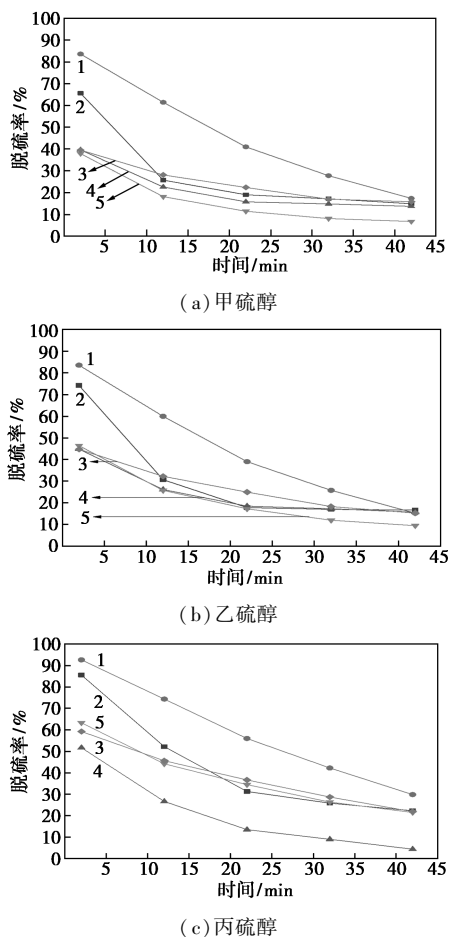


图3 不同咪唑离子液体的脱硫性能曲线

2.3 醋酸根离子液体的脱硫性能研究

2.3.1 吸收温度对脱硫效果的影响

分别取 10 g [BMIM]Ac 离子液体进行脱硫实

验,原料气流量为 50 mL/min,考察吸收温度对 [BMIM]Ac 脱硫效果的影响,结果如图 4 所示。由图 4 中可以看出,在同一温度条件下,[BMIM]Ac 的脱硫能力随吸收时间的增加而逐渐减小;当吸收时间一定时,吸收温度从 25℃ 上升到 55℃,[BMIM]Ac 离子液体对甲硫醇的脱硫率从 97% 下降到 91%,乙硫醇和丙硫醇的脱硫曲线也呈现相似的趋势,说明 [BMIM]Ac 的脱硫能力受吸收温度的影响明显。当吸收温度上升时,离子液体对于硫醇组分的溶解度变小,吸收推动力减小,脱硫率也减小,因此低温更有利于硫醇组分的吸收。

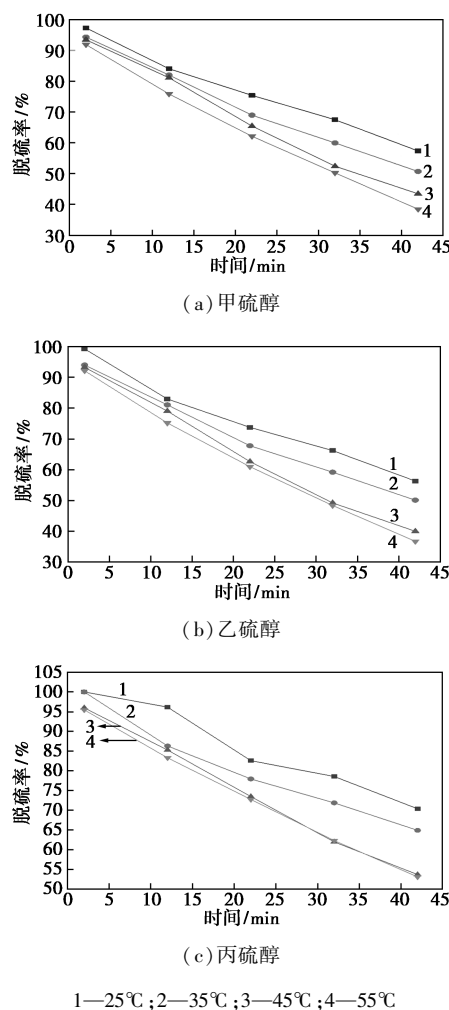
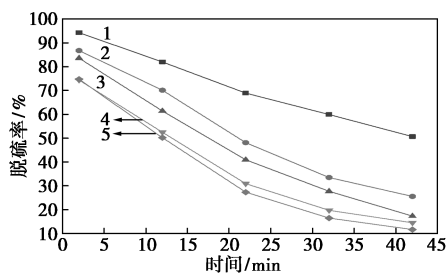


图4 吸收温度对 [BMIM]Ac 脱硫效果的影响

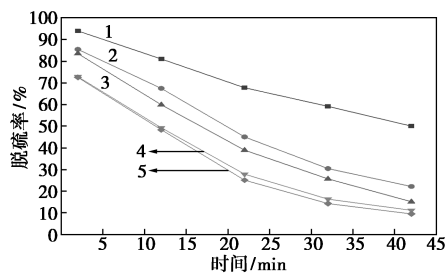
2.3.2 原料气流量对脱硫效果的影响

分别取 10 g [BMIM]Ac 离子液体进行脱硫实验,吸收温度为 35℃,考察原料气流量对 [BMIM]Ac 脱硫效果的影响,结果如图 5 所示。由图 5 中可以看出,当原料气流量相同时,[BMIM]Ac 的脱硫能力随吸收时间的增加而逐渐减小;当吸收时间一定时,原料气流量从 50 mL/min 上升到 150 mL/min,

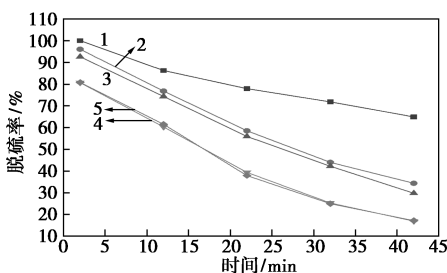
[BMIM]Ac 离子液体对甲硫醇的脱硫率从 94% 下降到 74%，乙硫醇和丙硫醇的脱硫曲线也呈现出相似的趋势。说明 [BMIM]Ac 的脱硫能力受原料气流量的影响明显，当原料气流量为 50 mL/min 时，在鼓泡吸收瓶中的停留时间较长，约为 0.3 min，能够与离子液体充分接触；当原料气流量增大到 150 mL/min 时，停留时间缩短为 0.1 min。因此，原料气流量增大，停留时间变短，不利于气液传质的充分进行。



(a) 甲硫醇



(b) 乙硫醇



(c) 丙硫醇

1—50 mL/min; 2—75 mL/min; 3—100 mL/min;
4—125 mL/min; 5—150 mL/min

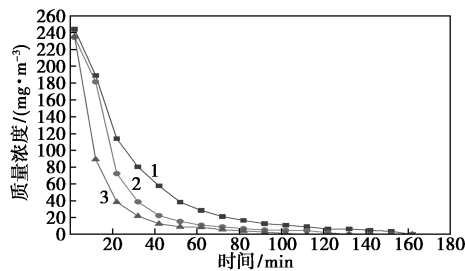
图 5 原料气流量对 [BMIM]Ac 脱硫效果的影响

2.4 醋酸根离子液体的再生性能研究

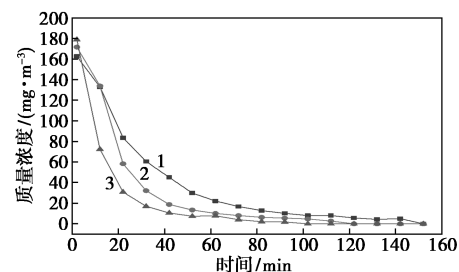
2.4.1 再生温度对脱硫效果的影响

再生气体氮气流量为 100 mL/min，分别在 60、80、100℃ 再生温度条件下进行氮气汽提离子液体再生实验。在再生过程中用气相色谱仪测定再生气中的硫醇浓度，直到再生气中不含硫醇时即为离子液体再生完全。再生温度对脱硫效果的影响如图 6 所示。由图 6 中可以看出，随着再生温度从 60℃ 上升

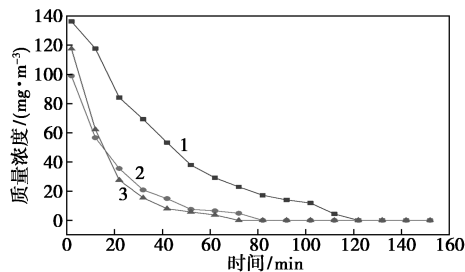
到 100℃，再生完全所需时间从 162 min 下降到 112 min，这是由于随着再生温度的升高，硫醇在离子液体中的溶解度降低，被离子液体中吸收的硫醇逐渐释放出来。同时，在高温条件下，离子液体的黏度降低，原料气与离子液体的传质效率增加，有利于硫醇的汽提脱除。



(a) 甲硫醇



(b) 乙硫醇

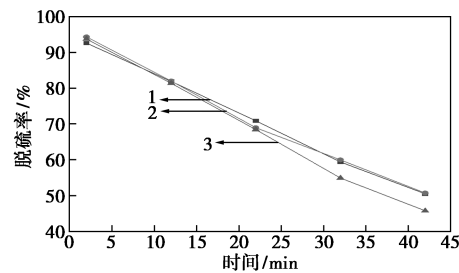


(c) 丙硫醇

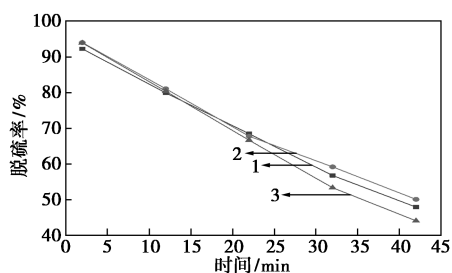
1—60℃; 2—80℃; 3—100℃

图 6 再生温度对再生气中硫醇质量浓度的影响

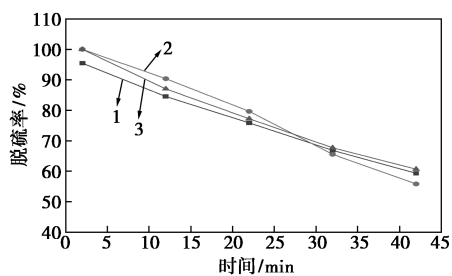
用不同温度下再生完全的离子液体分别进行脱硫实验，吸收温度为 35℃，原料气流量为 50 mL/min，再生温度对 [BMIM]Ac 脱硫效果的影响如图 7 所示。由图 7 中可以看出，不同温度条件下再生完全的 3 组离子液体脱硫实验结果几乎重合，均能达到



(a) 甲硫醇



(b) 乙硫醇



(c) 丙硫醇

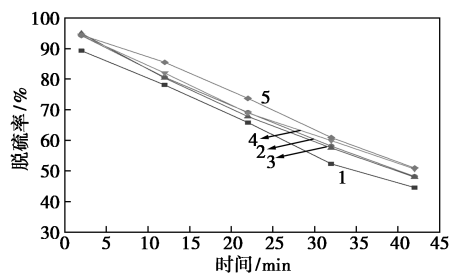
1—60℃;2—80℃;3—100℃

图7 再生温度对[BMIM]Ac 脱硫效果的影响

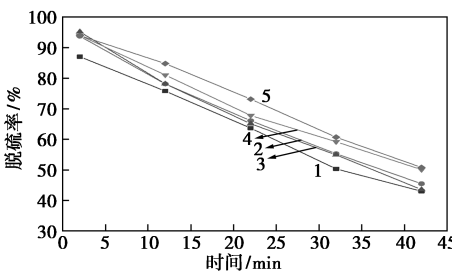
与新鲜溶剂相当的脱硫率,说明在实验再生温度范围内,均能使脱硫后的离子液体基本再生完全,且再生温度的改变基本不会影响再生后离子液体中的残余硫质量分数。

2.4.2 再生时间对脱硫效果的影响

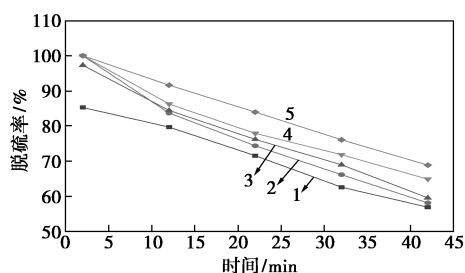
在氮气流量为 100 mL/min、再生温度为 80℃ 条件下考察不同再生时间的影响。吸收温度为 35℃、原料气流量为 50 mL/min 时,再生时间对[BMIM]Ac 脱硫效果的影响如图 8 所示。由图 8 中可以看出,随着再生时间从 0.5 h 增加到 2.5 h,甲硫醇的脱硫率由 89%增加至 94%,乙硫醇和丙硫醇的脱硫



(a) 甲硫醇



(b) 乙硫醇



(c) 丙硫醇

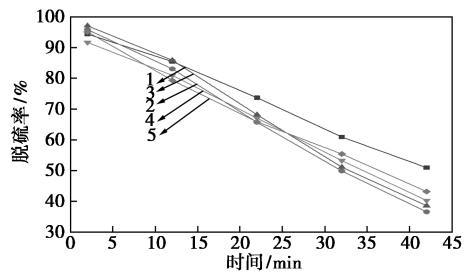
1—0.5 h;2—1.0 h;3—1.5 h;4—2.0 h;5—2.5 h

图8 再生时间对[BMIM]Ac 脱硫效果的影响

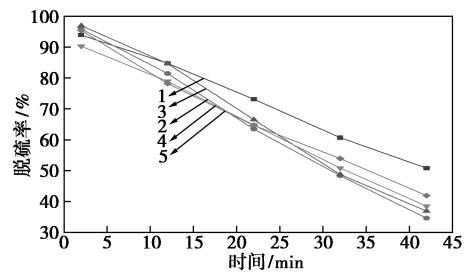
曲线也呈现出相同的趋势。随着再生时间的延长,脱硫后离子液体中剩余硫质量分数逐渐降低,有利于气体中有机硫的脱除。且再生 2.5 h 后,[BMIM]Ac 离子液体的脱硫性能与新鲜溶剂脱硫效果相当,说明离子液体中硫醇基本解吸完全。

2.4.3 再生次数对脱硫效果的影响

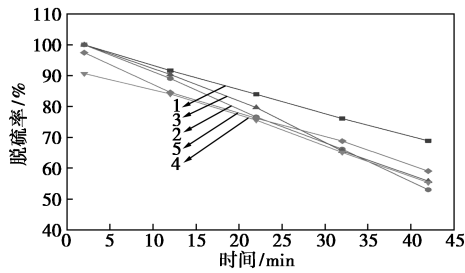
取 10 g [BMIM]Ac 离子液体进行吸收脱硫实验,在吸收温度为 35℃、原料气流量为 50 mL/min 时,重复进行 5 次脱硫实验,实验结果如图 9 所示。



(a) 甲硫醇



(b) 乙硫醇



(c) 丙硫醇

1—新鲜溶液;2—再生 1 次;3—再生 2 次;4—再生 3 次;5—再生 4 次

图9 [BMIM]Ac 的重复利用性能

由图 9 中可以看出,再生 4 次后的离子液体比新鲜的离子液体脱硫率有轻微下降,但再生后的离子液体的脱硫性能没有明显递降趋势。说明该离子液体性质稳定,脱硫后易于再生,可重复循环利用。

3 结论

(1) 实验成功制备了 [BMIM] Ac、[BMIM] HSO₄、[BMIM] DBP、[BMIM] SCN 等 4 种具有脱硫潜力的咪唑类离子液体,并从中优选出了 [BMIM] Ac 离子液体,具有较强的硫醇吸收能力。

(2) 在常压下当原料气流量为 100 mL/min 时, [BMIM] Ac 离子液体吸收 2 min 后仍可脱除 83% 的甲硫醇和乙硫醇,丙硫醇的脱除率可达到 92%。其脱硫效果随吸收温度的上升而下降,随原料气流量的上升而下降。

(3) [BMIM] Ac 离子液体物性稳定、易于再生,再生 4 次后脱硫效果无明显降低。脱硫效果随再生温度的变化影响较小,但再生温度越高,再生完全所需时间越短;当再生时间小于 1 h 时,脱硫效果明显下降,特别是对甲硫醇的脱除率从 94% 下降到 89%。

参考文献

- [1] 程新民. 吉林石化公司液化气脱硫醇工艺研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [2] 杨绪甲. 高酸性天然气中有机硫脱除技术的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [3] 王亚军, 李春虎, 薛真, 等. 溶剂法脱除天然气中有机硫的原理及发展趋势[J]. 天然气与石油, 2015, 33(3): 28-32, 8.
- [4] 张正敏. 负载化离子液体用于酸性气体的分离[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [5] 丁琪, 乐长高. 室温离子液体在萃取中的应用[J]. 化工时刊, 2006, 20(7): 64-67.
- [6] 全淑月, 王晓征, 公明明, 等. 湿法脱硫技术在天然气净化中的应用[J]. 石油化工, 2019, 48(10): 1070-1075.
- [7] 赵启龙. 含有机硫天然气的脱硫工艺研究[J]. 广州化工, 2020, 48(16): 32-33, 39.
- [8] Martínez-Magadán J M, Oviedo-Roa R, García P, et al. DFT study of the interaction between ethanethiol and Fe-containing ionic liquids for desulfuration of natural gasoline [J]. Fuel Processing Technology, 2012, 97: 24-29.
- [9] Wang X, Han M, Wan H, et al. Study on extraction of thiophene from model gasoline with brønsted acidic ionic liquids[J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2010, 5(1): 107-112.
- [10] 李梅, 孙功成, 程雪云, 等. 离子液体/H₂O₂ 体系脱硫实验研究[J]. 燃料化学学报, 2019, 47(9): 1042-1052.
- [11] 刘岩. 离子液体对混合 C₄ 碱液萃取脱硫过程强化的基础研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [12] Bosmann A, Datsevich L, Jess A, et al. Deep desulfurization of diesel fuel by extraction with ionic liquids [J]. Chem Commun (Camb), 2001, 23: 2494-2495.
- [13] Revelli A L, Mutelet F, Jaubert J N. Extraction of benzene or thiophene from n-heptane using ionic liquids. NMR and thermodynamic study [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2010, 114(13): 4600-4608.
- [14] 邵波波. 离子液体在燃料油脱硫中的应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [15] Nie Y, Li C, Sun A, et al. Extractive desulfurization of gasoline using imidazolium-based phosphoric ionic liquids [J]. Energy & Fuels, 2006, 20(5): 2083-2087.
- [16] 施玉琨. 离子液体液相催化氧化净化含磷化氢尾气的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [17] 宋红兵. 碱性离子液体的合成、表征及其在催化反应中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [18] Bogolitsyn K G, Skrebets T E, Makhova T A. Physicochemical properties of 1-butyl-3-methylimidazolium acetate [J]. Russian Journal of General Chemistry, 2009, 79(1): 125-128.
- [19] Wang L, Li Z, Jin G, et al. Effort of ionic liquids with [HSO₄]⁻ on oxidative desulphurization of coal [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2019, 97(S1): 1299-1306.
- [20] 张昆昆. 离子液体用作锌空气电池电解液的应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [21] 李想. 离子液体脱除轻质燃料中硫醇及醚后 C₄ 中甲醇的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [22] Jesus J D, Pires P, Mustafa R, et al. Experimental and theoretical studies on solvation in aqueous solutions of ionic liquids carrying different side chains: The n-butyl-group versus the methoxyethyl group [J]. RSC Advances, 2017, 7(26): 15952-15963.
- [23] 孙华. 酸性离子液体的合成及其催化制备生物柴油的应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [24] Harjani J R, Farrell J, Garcia M T, et al. Further investigation of the biodegradability of imidazolium ionic liquids [J]. Green Chemistry, 2009, 11(6): 821-829.
- [25] 王建龙. 离子液体在燃料油脱硫中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [26] Gonfa G, Bustam M A, Muhammad N, et al. Effect of task specific thiocyanate based ionic liquids on relative volatility of cyclohexane and benzene azeotropic mixture [J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 238: 208-214.
- [27] 石会龙. 中亚高有机硫天然气酸性气体脱除溶剂的研制[J]. 山东化工, 2017, 46(20): 16-18. ■