

Cu(I) CeY 吸附剂的制备及脱硫性能研究

陈晓陆^{1*}, 高爽¹, 靳玲玲², 马志研¹

(1. 营口理工学院化学与材料工程系, 辽宁 营口 115000; 2. 沈阳工学院, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 利用超声辅助液相离子交换法制备 Cu(I)Y、CeY、Cu(I)CeY 吸附剂, 利用 XRD、BET、ICP 和 FT-IR 技术对吸附剂进行表征。考察了 Cu(I)CeY 吸附剂的制备条件及其对吸附脱硫性能的影响。Cu(I)CeY 吸附剂的最佳制备条件为: 离子交换 6 h, 焙烧温度为 500℃, Cu/Ce 物质的量比为 1:1。常温常压下 Cu(I)CeY 吸附剂与模拟油质量比为 1:30, 吸附时间为 6 h, Cu(I)CeY 吸附剂对噻吩的脱硫率高达 95.2%。通过考察芳烃存在下竞争吸附对脱硫性能的影响发现, Cu(I)CeY 吸附剂中 Cu、Ce 离子的协同作用使吸附剂兼具有高的吸附硫容和抗芳烃竞争吸附能力, 且 Cu(I)CeY 吸附剂具有良好的再生性能。

关键词: Cu(I)CeY; 超声辅助; 吸附脱硫; 噻吩

中图分类号: TQ424

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)06-0132-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.06.031

Preparation and desulfurization performance study of Cu(I) CeY adsorbent

CHEN Xiao-lu^{1*}, GAO Shuang¹, JIN Ling-ling², MA Zhi-yan¹

(1. Department of Chemical Engineering, Yingkou Institute of Technology, Yingkou 115000, China;

2. Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: Cu(I)Y, CeY and Cu(I)CeY adsorbents are prepared by liquid-phase ion-exchange method assisted with ultrasound. The prepared adsorbents are characterized by X-ray diffraction (XRD), N₂-adsorption specific surface area measurements (BET), inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy (ICP) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The preparation conditions of Cu(I)CeY adsorbent and their influences on desulfurization performance are investigated. The optimum preparation conditions of Cu(I)CeY include ion-exchange time of 6 h, Cu/Ce molar ratio of 1, and calcination temperature of 500℃. At room temperature and atmospheric pressure, when mass ratio between Cu(I)CeY adsorbent and simulated oil is 1:30 and the adsorption time is 6 h, then the desulfurization rate of Cu(I)CeY adsorbent against thiophene is up to 95.2%. The influence of competitive adsorption on the desulfurization performance of adsorbent is investigated in the presence of aromatics. It is found that the synergistic effect of Cu⁺ and Ce⁴⁺ makes this adsorbent have high sulfur adsorption capacity and ability of resistance to aromatics competitive adsorption. And Cu(I)CeY adsorbent has good regeneration performance.

Key words: Cu(I)CeY; ultrasound assisting; adsorptive desulfurization; thiophene

汽车尾气排放已成为日趋严重的社会问题, 各国对汽车尾气排放标准要求越来越苛刻。高品质燃油是实现汽车尾气排放高标准的决定性因素, 而硫质量分数的控制是实现高品质燃油中最突出的问题, 开发燃料油超低硫化技术变得日益紧迫^[1]。在各种脱硫工艺中, 选择性吸附脱硫具有操作条件温和, 脱硫效率高, 不改变油品性能, 可生产低硫或超低硫(<1 μg/g) 产品等优势, 被认为是一项极具潜力的脱硫技术。

Y 型分子筛具有较好的水热稳定性、尺寸合适的微孔孔径和优异的离子交换性能, 广泛用于吸附脱硫领域的研究^[2]。Yang 等^[3-8]考察了 NaY、Cu(I)Y、AgY、NiY、CeY 等多种吸附剂的吸附脱硫性能, 发现 Cu(I)Y 吸附剂具有高的吸附硫容, 脱硫效果优异。但 Cu(I)Y 吸附剂是以 π 络合的作用模式吸附硫化物, 当硫化物中含有芳烃时, Cu(I)Y 的脱硫效果受到很大影响。王洪国等^[9-10]发现 CeY 吸附剂具有很强的吸附选择性, 抗芳烃的竞争吸附

效果显著。苑丹丹等^[11]采用 Ag、Ce 双离子改性制备的 AgCeY 吸附剂具有良好的脱硫效果, 并且 Ag、Ce 双离子之间产生协同作用, 减弱了芳烃对脱硫效果的影响。笔者采用超声辅助液相离子交换法, 通过 Cu、Ce 双离子改性制备 Cu(I)CeY 吸附剂, 考察了吸附剂制备条件对 Cu(I)CeY 脱硫性能的影响, 研究了芳烃竞争吸附对吸附剂脱硫性能的影响。

1 实验部分

1.1 实验试剂

噻吩, 分析纯, 百灵威试剂(USA)公司生产; NaY 原粉[n(Si)/n(Al)=2.55], 南开大学催化剂厂生产; 硝酸铜、硝酸铈、正壬烷、苯, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司生产。

1.2 吸附剂的制备

利用超声辅助液相离子交换法制备吸附剂。超声辅助可以促进离子交换的进行, 使离子交换度能在短时间内达到一个较高的水平并不会破坏分子筛

的结构。将真空干燥后的 NaY 与 0.1 mol/L 硝酸铜溶液按一定的固液比混合后,置于微波、超声合成萃取反应仪中超声震荡 2 h,100℃ 常压回流 4 h,然后用大量去离子水冲洗,冲洗过滤后于 100℃ 烘干 12 h,再放入马弗炉内以 2℃/min 的速度程序升温至 500℃ 后恒温焙烧 4 h,得到 Cu(II)Y。将制得的 Cu(II)Y 在 N₂ 中以 2℃/min 的速度升温至 200℃,恒温 1 h 后以 2℃/min 的速度升温至 460℃,恒温 4 h,在 N₂ 中冷却至室温,得到苍白的浅蓝色固体,即 Cu(I)Y。用硝酸铈替代硝酸铜溶液与真空干燥后的 NaY 混合,重复 Cu(II)Y 制备过程,得到实验用 CeY 吸附剂。

双金属离子改性的交换顺序是根据分子筛对各种阳离子交换选择性的强弱依次交换,即先交换选择性高的阳离子,后交换选择性低的离子。而文献[12]中报道的 Ce 离子的离子交换选择性要高于 Cu 离子,故用已制好的 CeY 与 0.1 mol/L 硝酸铜溶液按上述方法制得 Cu(II)CeY,最后将 Cu(II)CeY 于 N₂ 氛围下 390℃ 还原 4 h 得到 Cu(I)CeY 吸附剂。

1.3 模拟油的配置

模拟油 1:用噻吩与正壬烷配制硫质量分数为 300 μg/g 的模型溶液,用 MO-1 表示。

模拟油 2:用噻吩、苯及正壬烷配制硫质量分数为 300 μg/g,苯体积分数为 0.03% 的模拟溶液,用 MO-2 表示。

1.4 表征方法

利用日本理学生产的 D/MAX-RB 型 X 射线衍射仪对吸附剂样品进行晶体结构分析(XRD);利用美国 Micromeritics ASAP 2000 型吸附仪测定吸附剂的比表面积和孔体积;利用美国热电(Thermo Elemental)生产的 ICP-MS X7 型电感耦合等离子体发射光谱仪测定金属离子含量;利用 WQF-510A 傅里叶变换红外光谱仪进行 FT-IR 测定,测定范围 4 000~400 cm⁻¹,扫描次数 16 次,分辨率为 4 cm⁻¹,KBr 制样。

1.5 静态脱硫实验

利用间歇静态法考察吸附剂吸附脱硫条件,实验前将吸附剂于 200℃ 预先焙烧 12 h,除去分子筛上吸附的水份。吸附剂与模拟油 1 按一定固液比混合,室温下磁力搅拌 4 h,将混合溶液离心后得到上层澄清液,利用 WK-2D 型微库仑综合分析仪对其硫质量分数进行分析。

1.6 动态脱硫实验

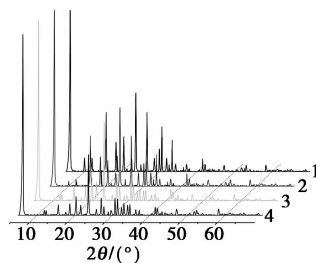
自制固定床反应装置主要由微量进样泵、管线、阀、流量计、反应器组成。吸附剂装填质量为 1 g,在实验前将吸附剂在线 200℃ 预先焙烧 2 h 以除去吸附剂上物理吸附的水。实验在常温、常压、空速为 5 h⁻¹ 的条件下进行,每 10 min 取 1 次样进行硫质量分数分析。流出液中硫质量分数大于 1 μg/g 时视为穿透。

2 结果与讨论

2.1 吸附剂的表征

2.1.1 XRD 表征

CeY、Cu(I)Y 和 Cu(I)CeY 吸附剂的 XRD 谱图如图 1 所示。



1—NaY;2—Cu(I)Y;3—CeY;4—Cu(I)CeY

图 1 不同吸附剂的 XRD 谱图

由图 1 可以看出,经液相离子交换法制得的吸附剂基本保留了原有的晶体结构,但发生了少许晶格塌陷而导致结晶度略有降低。Cu(I)CeY 的衍射峰强度较 Cu(I)Y 和 CeY 的弱,说明 Cu(I)CeY 的晶格塌陷较为明显。与 NaY 相比,CeY、Cu(I)Y 和 Cu(I)CeY 吸附剂的谱图上未观察到

oil[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2014,(24):3578-3584.

[12] 熊红红,陈巧霞,朱超,等.硼酸镧钙中三价铈离子的辐射跃迁参数[J].大连工业大学学报,2014,33(5):372-376.

[13] Gao X Y,Guo Y P,Tian Y M,et al.Synthesis and characterization of polyurethane/zinc borate nanocomposites[J].Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2011,384(1/2/3):2-8.

[14] 胡荣祖,史启祯.热分析动力学[M].北京:科学出版社,2001.■

(上接第 131 页)

[9] Nour F A,Heshiam A A,Mohamed A H.Synergistic study of carbon nanotubes, rice husk ash and flame retardant materials on the flammability of polystyrene nanocomposites [J]. Materials Today: Proceedings,2015,7(2):3998-4005.

[10] 薛林.新型硼酸盐纳米材料的制备及表征[D].西安:陕西师范大学,2008.

[11] Gu K C,Chen B S,Wang X M,et al.Preparation,friction and wear properties of hydrophobic lanthanum borate nanorods in rapeseed

新的特征峰,说明分子筛上没有金属氧化物产生,Cu 离子和 Ce 离子成功交换到了分子筛上。

2.1.2 BET 和 ICP 表征

制备的不同吸附剂的物理结构参数如表 1 所示。

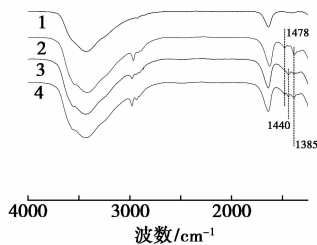
表 1 不同吸附剂的 BET 和 ICP 分析

样品	Na 离子 交换度/%	$A_{BET}/$ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	$\nu_p/$ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	$d_p/$ nm	$n(Si)/$ $n(Al)$
NaY	—	874.1	0.360	0.70	2.55
Cu(I)Y	66.5	724.3	0.336	0.69	2.54
CeY	73.2	642.3	0.315	0.68	2.54
Cu(I)CeY	89.8	583.5	0.283	0.67	2.50

由表 1 可以看出,经阳离子交换改性后,吸附剂的比表面积、孔容及孔径均有所下降。由于部分 Cu、Ce 离子与 NaY 分子筛交换时会进入 NaY 分子筛的孔内,造成孔道尺寸和体积变小。改性后分子筛的硅铝比有微小变化,物理结构参数没有显著的下降,说明分子筛的整体结构没有被破坏。ICP 分析表明,Cu 离子的交换度低于 Ce 离子,这与文献 [12] 的报道一致。Cu(I)CeY 的离子交换度达到 89.8%,说明一次焙烧后有更多的 Ce 离子进入分子筛内部,使分子筛表面空出吸附位可以吸附更多的 Cu 离子。

2.1.3 FT-IR 表征

CeY、Cu(I)Y 和 Cu(I)CeY 吸附剂吸附模拟油 MO-2 前、后的 FT-IR 谱图如图 2 所示。



1—Cu(I)CeY; 2—Cu(I)Y+MO-2; 3—CeY+MO-2; 4—Cu(I)CeY+MO-2

图 2 CeY、Cu(I)Y 和 Cu(I)CeY 吸附剂吸附模拟油 2 前、后的 FT-IR 谱图

由图 2 可以看出,Cu(I)Y+MO-2 和 Cu(I)CeY+MO-2 谱图中 1385 cm^{-1} 处特征峰归属于被吸附的噻吩分子结构环上 C=C 的对称伸缩振动^[13],由于噻吩环与吸附剂上金属离子发生了 π 络合作用,噻吩结构环上电子密度减少,导致此特征峰发生偏移,波数低于气相噻吩的噻吩分子结构环上 C=C 的对称伸缩振动,表明 Cu(I)Y 和 Cu(I)CeY

上存在 π 络合模式吸附脱硫。在 CeY 和 Cu(I)CeY 谱图上,1440 cm^{-1} 处的特征峰归属于噻吩环上 C=C—C=C 的伸缩振动^[14],当噻吩中硫原子与吸附剂上的金属离子直接作用时,会引起噻吩环上 C=C—C=C 电子云密度增加,导致此特征峰向高波数位移,因此 CeY 和 Cu(I)CeY 上存在 S—M 键模式吸附脱硫。综上可知,Cu(I)Y 吸附剂上硫化物以 π 电子络合方式与噻吩作用被脱除,而 CeY 吸附剂上硫化物以 S—M 键与 Ce 离子直接作用被脱除,只有 Cu(I)CeY 吸附剂上硫化物以 π 络合和 S—M 键作用 2 种方式共同作用达到吸附脱硫的目的。1478 cm^{-1} 处的特征峰归属于苯环骨架伸缩振动峰,表明苯通过 π 络合作用吸附在吸附剂上。由 1478 cm^{-1} 处吸收峰的面积可以看出苯的吸附量顺序为:Cu(I)Y>Cu(I)CeY>CeY,苯对 Cu(I)Y 吸附剂的吸附性能影响更大,引入 Ce 离子改性的吸附剂对含有芳烃的模拟油具有良好选择性。

2.2 制备条件的影响及工艺条件优化

2.2.1 剂油比对脱硫性能的影响

将 Cu(I)CeY 吸附剂与模拟油 1 按一定质量比(1:10、1:20、1:30、1:40)混合进行静态脱硫测评,结果如图 3 所示。

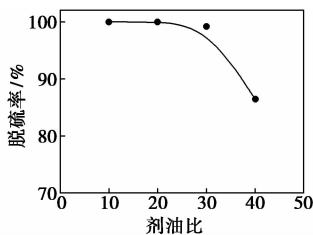
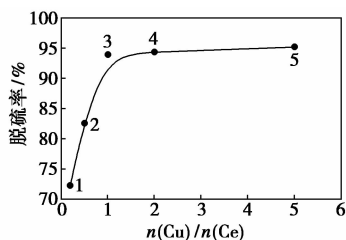


图 3 剂油比对 Cu(I)CeY 吸附剂脱硫性能的影响

由图 3 可以看出,当剂油质量比为 1:30 时,Cu(I)CeY 可将模拟油中硫的质量分数从 300 $\mu g/g$ 降到 1 $\mu g/g$,因此,Cu(I)CeY 具有深度脱硫能力。当油剂质量比为 1:40 时,脱硫率明显下降,此时 Cu(I)CeY 对模拟油已无法完成深度脱硫的任务。所以,在其他条件不变情况下,Cu(I)CeY 吸附剂与模拟油的剂油比选择为 1:30。

2.2.2 物质的量比对脱硫性能的影响

选取不同浓度的硝酸铈制成 CeY 吸附剂,然后将制备好的 CeY 吸附剂分别与浓度为 0.1 mol/L 硝酸铜混合,制备不同物质的量比的 Cu(I)CeY 吸附剂,考察 Cu/Ce 物质的量比对 Cu(I)CeY 吸附脱硫性能的影响,结果如图 4 所示。



1— $n(\text{Cu})/n(\text{Ce})=0.2$; 2— $n(\text{Cu})/n(\text{Ce})=0.5$;
3— $n(\text{Cu})/n(\text{Ce})=1.0$; 4— $n(\text{Cu})/n(\text{Ce})=2.0$;
5— $n(\text{Cu})/n(\text{Ce})=5.0$

图4 Cu/Ce 物质的量比对 Cu(I)CeY 吸附剂脱硫性能的影响

由图4可以看出,随着Cu/Ce物质的量比的增大,脱硫率逐渐上升,说明适量增加Cu离子有助于提高Cu(I)CeY吸附剂的脱硫活性。Cu/Ce物质的量比超过1后,脱硫性能提升缓慢,因此,选择制备Cu(I)CeY的Cu/Ce物质的量比为1。

2.2.3 焙烧温度对脱硫性能的影响

焙烧温度对Cu(I)CeY吸附剂脱硫性能的影响如图5所示。

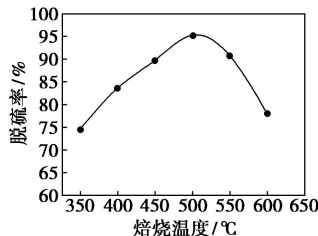


图5 焙烧温度对Cu(I)CeY吸附剂脱硫性能的影响

由图5可以看出,随着焙烧温度的升高,吸附剂脱硫性能先上升后降低,在500°C时脱硫率达到最大值,为95.2%。当焙烧温度小于500°C时,提高焙烧温度能提升吸附剂的脱硫性能;当焙烧温度超过500°C后,Cu(I)CeY吸附剂脱硫性能降低。

2.2.4 吸附时间对脱硫性能的影响

吸附时间对Cu(I)CeY吸附剂脱硫性能的影响如图6所示。

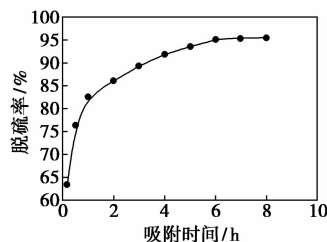


图6 吸附时间对Cu(I)CeY吸附剂脱硫性能的影响

由图6可以看出,Cu(I)CeY对模拟油1的脱硫率随时间的延长而升高,当吸附时间达到6h后,吸附过程达到平衡,Cu(I)CeY的吸附能力达到饱和。

2.3 竞争吸附对脱硫性能的影响

2.3.1 芳烃存在下静态吸附脱硫实验

芳烃存在条件下,模拟油1和模拟油2对吸附剂脱硫性能的影响如表2所示。

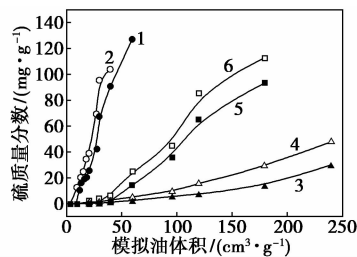
表2 模拟油1和模拟油2与不同吸附剂吸附后脱硫率数据分析

样品	脱硫率/%		
	Cu(I)Y	CeY	Cu(I)CeY
模拟油1	97.47	74.57	95.20
模拟油2	82.39	68.78	90.31

由表2可以看出,吸附模拟油1时,Cu(I)Y、Cu(I)CeY的脱硫率都很高且相差不多,说明改性Cu(I)CeY具有Cu(I)Y的高吸附硫容。吸附模拟油2时,Cu(I)Y脱硫率明显下降,虽然CeY、Cu(I)CeY脱硫率也有下降,但降低的不多。结合图2 FT-IR谱图分析,Ce离子主要通过S—M配位机理与硫化物上的硫原子直接作用,对噻吩具有很好的吸附选择性,受到芳烃影响较小。Cu离子是通过 π 络合机理与硫化物噻吩环上的 π 电子相互作用,形成 π 共轭体系,这与文献[1,15]报道的结果一致。而苯环上也具有 π 电子可以与Cu离子相互作用。这就使得噻吩和苯在CuY分子筛上产生竞争吸附,严重影响Cu(I)Y的脱硫效果。

2.3.2 芳烃存在下动态吸附脱硫的穿透曲线

依据吸附剂静态吸附脱硫实验,考察了芳烃存在下吸附剂的动态吸附脱硫性能,结果如图7所示。



1—CeY+MO-1; 2—CeY+MO-2; 3—Cu(I)Y+MO-1;
4—Cu(I)Y+MO-2; 5—Cu(I)CeY+MO-1;
6—Cu(I)CeY+MO-2

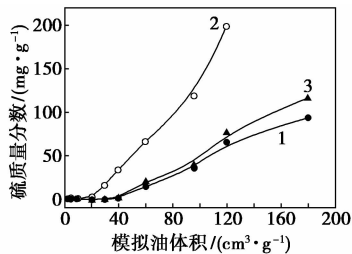
图7 不同吸附剂处理模拟油1和模拟油2的穿透曲线

从图7中可以看出,CeY吸附剂的穿透曲线比较陡,说明CeY吸附剂的吸附性能降低的较快。而

Cu(I)Y 吸附剂的穿透曲线斜率较小,说明 Cu(I)Y 穿透后仍具有一定吸附能力,将 Cu 离子引入改性的吸附剂,能增强吸附剂的脱硫活性。在吸附模拟油 1 时,Cu(I)Y 吸附剂穿透时的吸附硫容最高,Cu(I)CeY 也具有较好的吸附性能。在吸附模拟油 2 时,Cu(I)CeY 吸附剂穿透时的吸附硫容高于 Cu(I)Y 吸附剂。说明苯的存在使 Cu(I)Y 吸附剂的穿透硫容降低幅度较大,但其对 Cu(I)CeY 和 CeY 吸附剂的影响较小。这些都与静态脱硫实验的数据相吻合。与 Cu(I)Y、CeY 吸附剂相比,Cu、Ce 双离子制备的 Cu(I)CeY 吸附剂,既具有 Cu(I)Y 吸附剂的高吸附硫容,可以提高分子筛的吸附量;又具有 CeY 吸附剂的高吸附选择性,可以很好地降低芳烃对吸附脱硫效果的影响。

2.4 吸附剂的再生性能

采用室温条件下 N₂ 吹扫 Cu(I)CeY 吸附剂 2 h 后,在空气氛围中程序升温至 500℃ 焙烧 4 h(方法 A)。采用室温条件下 N₂ 吹扫 Cu(I)CeY 吸附剂 2 h,在空气氛围中程序升温至 500℃ 焙烧 2 h 后,改用 N₂ 氛围继续焙烧 2 h,N₂ 吹扫至室温(方法 B)。2 种方法再生的吸附剂吸附模拟油的脱硫效果如图 8 所示。由图 8 可以看出,方法 A 再生后的曲线很快穿透,吸附剂脱硫性能迅速下降。方法 B 再生的吸附剂脱硫性能为新鲜吸附剂的 88.84%,且再生后的曲线与新鲜吸附剂的穿透曲线差异不大,说明采用 B 法再生能够很好地恢复 Cu(I)CeY 吸附剂的脱硫性能。



1—新鲜吸附剂;2—方法 A 再生的吸附剂;
3—方法 B 再生的吸附剂

图 8 吸附剂再生方法对 Cu(I)CeY 吸附剂
脱硫性能的影响

3 结论

(1) 采用超声辅助的液相离子交换法制备了 Cu(I)Y、CeY、Cu(I)CeY 吸附剂,超声辅助节省了离子交换时间,提高了交换效率。

(2) 考察了 Cu(I)CeY 吸附剂的制备条件对

吸附脱硫性能的影响。Cu(I)CeY 吸附剂的最佳制备条件为:超声辅助离子交换 6 h,焙烧温度为 500℃ Cu/Ce 物质的量比为 1:1。常温常压下 Cu(I)CeY 吸附剂与模拟油质量比为 1:30,吸附时间为 6 h,对含噻吩的模拟油脱硫率高达 95.2%。且 Cu(I)CeY 吸附剂具有良好的再生能力。

(3) 考察了芳烃存在对不同吸附剂脱硫性能的影响,结果发现,与 Cu(I)Y、CeY 吸附剂相比,Cu(I)CeY 吸附剂中 Cu、Ce 离子的协同作用使 Cu(I)CeY 吸附剂兼具有 Cu 离子的高吸附硫容和 Ce 离子的高吸附选择性,可以很好地降低芳烃对吸附脱硫效果的影响。

参考文献

- [1] 陈晓陆,孙兆林,王洪国,等.基于分子模拟技术的 Cu(I)Y 分子筛对硫化物及烯烃选择性吸附行为的分析[J].石油学报(石油加工),2010,26(1):82-86.
- [2] 纪桂杰,沈建,杨丽娜,等.金属改性分子筛吸附脱硫研究新进展[J].应用化工,2014,43(11):2069-2075.
- [3] Yang R T. Adsorbents[M]. New York: Fundamentals and Applications, 2003: 95-125.
- [4] Yang R T. Desulfurization of transportation fuels with zeolites under ambient conditions[J]. Science, 2003, 301: 79-81.
- [5] Hernandez-Maldonado A J, Yang R T. Desulfurization of transportation fuels by adsorption[J]. Catalysis Reviews, 2004, 46(2): 111-150.
- [6] Hernandez-Maldonado A J, Yang R T. Desulfurization of commercial jet fuels by adsorption via π -complexation with vapor phase ion exchanged Cu(I)-Y zeolites[J]. Ind Eng Chem Res, 2004, 43: 6142-6149.
- [7] Hernandez-Maldonado A J, Yang R T. Desulfurization of liquid fuels by adsorption via π -complexation with Cu(I)-Y and Ag-Y zeolites[J]. Ind Eng Chem Res, 2003, 42: 123-129.
- [8] Hernandez-Maldonado A J, Yang R T. New sorbents for desulfurization of diesel fuel via π -complexation: Layered beds and regeneration[J]. Ind Eng Chem Res, 2004, 43: 769-776.
- [9] 王洪国,姜恒,徐静,等.苯和 1-辛烯对 Ce(IV)Y 分子筛选择性吸附脱硫的影响[J].物理化学学报,2008,24(09):1714-1718.
- [10] 靳玲玲,李秀奇,王洪国,等.影响 CeY 分子筛吸附脱硫性能的研究[J].工业催化,2008,16(10):71-74.
- [11] 苑丹丹,宋华林,崔雪涵,等.AgCeY 分子筛吸附剂的制备及性能研究[J].燃料化学学报,2015,43(5):621-627.
- [12] Shan J H, Liu X Q, Sun L B, et al. Cu-Ce bimetal ion-exchanged Y zeolites for selective adsorption of thiophenic sulfur[J]. Energy Fuels, 2008, 22(6): 3955-3959.
- [13] 宋丽娟,潘明雪,秦玉才,等.Ni Y 分子筛选择性吸附脱硫性能及作用机理[J].高等学校化学学报,2011,32(3):787-792.
- [14] 鞠秀芳,靳玲玲,马涛,等.1,5-己二烯和苯对 NiY 分子筛脱硫性能的影响[J].物理化学学报,2009,25(11):2256-2260.
- [15] 宋华,高慧杰,宋华林,等.Cu(I)-Ce(IV)-Y 吸附剂的制备及其脱硫性能研究[J].燃料化学学报,2014,42(12):1485-1492. ■