

文章编号:1674-2869(2017)05-0420-07

乙醇胺和 *N,N*-二甲基乙醇胺改性埃洛石对 CO₂ 的吸附行为

赵唯君¹, 张华丽^{1*}, 严春杰², 潘志权¹

1. 武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要:研究了煅烧和混和胺改性后的埃洛石对 CO₂ 的吸附研究. 分别考察了提纯、煅烧和混合胺改性对埃洛石比表面积的影响. 实验结果表明, 埃洛石提纯后比表面积为 30.11 m²/g; 埃洛石经过煅烧后的 X 射线衍射结果显示, 随着温度的增加衍射峰变尖锐, 但到 300 °C 以后反而下降, 因此选择的煅烧温度为 300 °C, 比表面积达到了 37.04 m²/g; 测得常温常压下吸附 CO₂ 的质量分数为 3.141%. 用混合胺对其改性, 红外光谱结果显示制备成功, 其比表面积下降至 33.09 m²/g; 常温常压下吸附 CO₂ 的质量分数为 17.21%, 远远高于仅煅烧的埃洛石吸附 CO₂ 的质量分数. 说明吸附二氧化碳在改性埃洛石上的行为主要是化学吸附.

关键词:埃洛石; 混和胺; 改性; CO₂ 吸附

中图分类号: TQ028.1*5 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2017.05.003

Adsorption Behavior of Carbon Dioxide with Halloysite Modified by Ethanol Amine and *N,N*-Dimethyl Ethanolamine

ZHAO Weijun¹, ZHANG Huali^{1*}, YAN Chunjie², PAN Zhiquan¹

1. School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Nano-Mineral Materials and Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The carbon dioxide adsorption capacities of halloysite after calcination and modified by amine were studied. The effects of purification, calcining temperature and mixed amine modification on the specific surface area were inspected. The results show that the specific surface area of purified halloysite is 30.11 m²/g. X-ray diffraction results demonstrate that the diffraction peaks become sharper with calcining temperature increasing. However, the diffraction peaks begin to decrease when the temperature is greater than 300 °C. As a result, the optimum calcining temperature is set as 300 °C and corresponding specific surface area is 37.04 m²/g. The mass fraction of carbon dioxide absorption on halloysite is 3.141% at ambient temperature and atmospheric pressure. After calcination at 300 °C, the halloysite was modified by mixed amine. The infrared spectra show that the modification is successful. The specific surface area decreases to 33.09 m²/g. On the contrary, the mass fraction of carbon dioxide absorption with modified halloysite is 17.21%, which is much higher than that of calcined halloysite, proving that carbon dioxide adsorption behavior on modified halloysite is mainly a chemical process.

Keywords: halloysite; mixed amine; modifying; CO₂ adsorption

收稿日期: 2017-03-17

作者简介: 赵唯君, 硕士研究生. E-mail: 592092222@qq.com

*通讯作者: 张华丽, 博士, 副教授. E-mail: zhiqpan@163.com

引文格式: 赵唯君, 张华丽, 严春杰, 等. 乙醇胺和 *N,N*-二甲基乙醇胺改性埃洛石对 CO₂ 的吸附行为[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(5): 420-426.

ZHAO W J, ZHANG H L, YAN C J, et al. Adsorption behavior of carbon dioxide with halloysite modified by ethanol amine and *N,N*-dimethyl ethanolamine[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(5): 420-426.

近年来由于大气中的CO₂浓度的增加,造成了不可逆转的气候变化^[1],而人类活动所造成的CO₂大规模排放是其中最主要的原因之一^[2]。

近年来,捕获分离CO₂的方法多种多样,例如膜分离法、吸附法、溶剂吸收法^[3-7]等。其中吸附法由于操作简洁,被认为具有极大应用前景的分离方法。目前,固体吸附剂主要有:沸石分子筛^[8]、金属有机框架材料(MOFs)^[9-12]、氨基修饰材料^[13]等。其中,沸石分子筛在常温下能保持较好的吸附量,但其吸附量会因微量水份存在而急剧下降;金属有机框架材料至今仍处于研究阶段,主要原因是制造成本较高;而氨基修饰材料因其操作过程简单,且在水份存在情况下仍具有较高的CO₂吸附性,近些年被广泛关注^[14-15]。

本实验以埃洛石提纯样为基础,先对其进行煅烧处理来增强其比表面积,然后选择乙醇胺和*N,N*-二甲基乙醇胺对煅烧后埃洛石进行表面改性制备出混合胺改性埃洛石样品。通过X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、比表面积(brunner-emmet-teller, BET)、傅里叶变换红外光谱学(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)、热重法(thermogravimetry, TG)等手段表征了不同阶段材料的物相、形貌、结构以及孔径分布,最后使用热重分析仪测定了混和胺改性材料对CO₂的吸附量。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

埃洛石取样于云南临沧的原矿,化学成分分析(质量分数,%)结果如下:Al₂O₃, 40.41; SiO₂, 58.91; P₂O₅, 0.14; TiO₂, 0.071; SO₃, 0.063; Cl, 0.039; Na₂O, 0.032; Fe₂O₃, 0.27; ZrO₂, 0.017; 烧失量, 13。无水乙醇、六偏磷酸钠、乙醇胺、*N,N*-二甲基乙醇胺均为天津市天力化学试剂公司的分析纯试剂。

1.2 埃洛石的提纯

埃洛石原矿中加水配制成质量分数15%固含量的料浆,高速分散机捣浆(转速8 000 r/min,时间1 h);将料浆均匀分散后再过孔径0.045 mm筛后进行湿法筛分;筛下浆料静置6 h,将上层的悬浮液离心分离后可得到沉淀物。95 ℃的条件下烘干12 h后用万能粉碎机打散后备用;取适量打散后得到的粉体配成一定浓度的悬浮液,调节其pH值,再加入适量分散剂,高速分散机上分散搅拌2 h;将所得的悬浮液于一定转速下离心分离,留取

上层物质,抛弃下层沉淀,将上层液再离心5 min,转速3 800 r/min;所得的沉淀在温度为95 ℃下保持12 h,研磨打散,得到的就是高纯度的0.7 nm埃洛石产品。

1.3 埃洛石的煅烧

取提纯后的埃洛石精矿,在一定温度下煅烧2 h。埃洛石的煅烧是通过高温加剧各微粒的热运动,达到破坏内部结合键的目的,埃洛石的硅氧四面体和铝氧八面体不能够充分地聚合而生成长链,最终生成玻璃相结构,生成具有活性的Al₂O₃和SiO₂。煅烧使埃洛石的微结构和相组成均有变化,部分基团断裂脱落,产生大量的自由端,从而达到实现活化的目的。

1.4 混合胺(乙醇胺和*N,N*-二甲基乙醇胺)改性埃洛石

在锥形瓶中加入100 mL的无水乙醇,加入2 mL乙醇胺和2 mL *N,N*-二甲基乙醇胺,将其超声分散20 min,再向该混合液中加入2 g煅烧后的埃洛石样品,于80 ℃水浴锅中搅拌回流3 h,用真空泵对该混合物进行抽滤,再将所得滤饼置于80 ℃烘箱中烘干得到产物。

1.5 CO₂的吸附性能测试

取一定量待测样品放入样品室。先通入惰性气体N₂吹扫60 min,气流量控制在50 mL/min;然后逐渐升温,升温速率为10 ℃/min,将样品加热到70 ℃~80 ℃后在真空中活化2 h,其中真空表显示40 kPa,降温,当系统温度降至室温后,开始注入CO₂,气流量为40 mL/min,当压力达标准大气压100 kPa时,真空表指示为0,停止通气,连续吸附2 h,吸收剂基本达到吸附饱和后结束吸附反应。设样品的原始质量为*m*,第1阶段(抽真空阶段)质量分数降低*a*,第2阶段(吸附CO₂阶段)质量分数增加*b*,则有:测试样品吸附CO₂的质量分数=吸附后的质量*m*×*b* / (吸附前的质量*m*×(1-*a*))=*b*/(1-*a*)×100%。

2 结果与讨论

2.1 埃洛石的提纯

对埃洛石原矿和提纯样做XRD对比(见图1),埃洛石原矿的图谱中除含埃洛石的特征峰之外,可见石英(部分特征峰为0.420 00 nm, 0.333 20 nm)、长石(部分特征峰0.377 46 nm, 0.346 62 nm, 0.421 69 nm)和三水铝石(部分特征峰0.483 40 nm, 0.356 20 nm)等杂质的衍射峰。经过提纯后得到了纯度大于98%的埃洛石,其特征峰为0.739 71 nm,

0.445 54 nm 和 0.364 29 nm 等位置,云南临沧地区埃洛石属于 0.7 nm 型埃洛石(0.725 nm~0.740 nm).

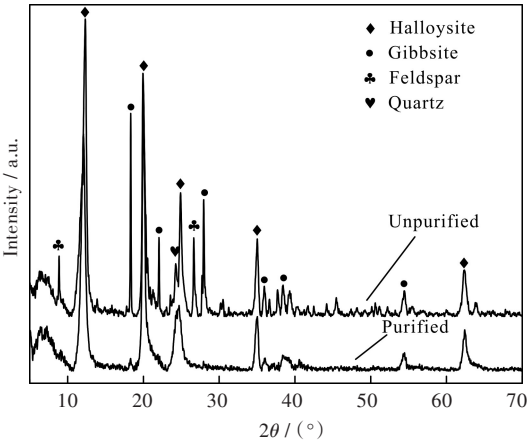


图 1 原矿和提纯后埃洛石的 XRD 图
Fig. 1 XRD patterns of raw and purified halloysite

图 2 为埃洛石原矿和提纯样的 SEM 和电场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscopy, FESEM)图片. 由图片观察可知,提纯前后埃洛石有很大的差别. 从图 2(a)可知,埃洛石原矿中存在着 2 μm 左右的六方片状的高岭石,细长的管状埃洛石集束、鳞片状的三水铝石和粒状的石英颗粒. 图 2(b)提纯后埃洛石呈多层卷曲的管状,其中管体完好,且中空管状结构清晰,管长主要集中在 200 nm~800 nm 范围内,它们的内径为 10 nm~20 nm,外径为 20 nm~80 nm,个别管长可达 1 nm~2 μm.

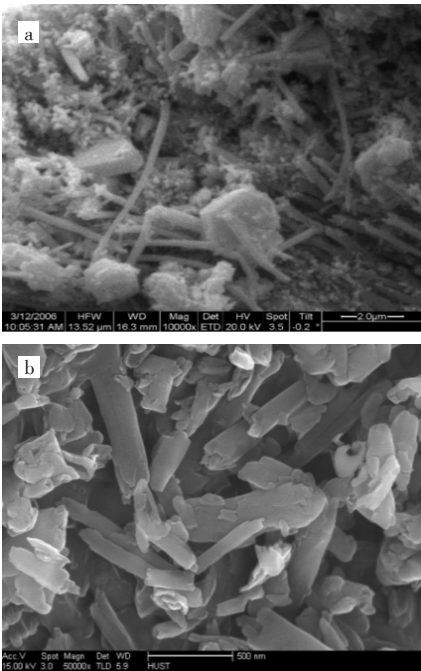


图 2(a)原矿和(b)提纯的埃洛石 SEM 和 FESEM 图
Fig. 2 SEM and FESEM images of (a) raw and (b)purified halloysite

2.2 埃洛石的煅烧

图 3 为埃洛石在不同温度下煅烧后的 XRD 图谱,其中 a 为提纯后的埃洛石 X 射线衍射图谱,b、c、d、e 分别为海泡石经 300 ℃、500 ℃、700 ℃、900 ℃煅烧 2 h 后的 X 射线衍射图谱.

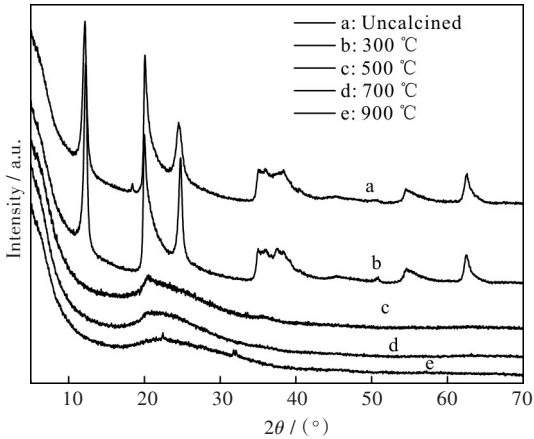


图 3 煅烧温度对埃洛石 XRD 图谱的影响
Fig. 3 Effects of calcination temperatures on XRD patterns of halloysite

从图 3 的 XRD 图谱可见,经过 300 ℃煅烧后,埃洛石中的吸附水逸出,其中的纳米孔道进一步疏通,结构变得紧密,使得晶体(001)和(002)面的衍射峰向高角度偏移,并且峰型变得尖锐,相对强度增加;当煅烧温度超过 500 ℃时,已无明显衍射峰,呈现非晶态. 因此后续试验选择 300 ℃为煅烧温度.

图 4 为提纯埃洛石及 300 ℃煅烧 2 h 后的埃洛石样品的 FESEM 图片,其中 a 为埃洛石提纯样的 FESEM 图片,b 为埃洛石经 300 ℃煅烧 2 h 后样品的 FESEM 图片.

由扫描电镜分析可知,埃洛石样的表面形貌主要为管状结构,管长 0.5 μm~2 μm;300 ℃煅烧时,埃洛石仅脱出吸附水和结晶水,而吸附水和结晶水的脱出不会影响埃洛石的基本结构,其微观形貌变化不大,仍保持管状结构,但管长变短为 0.3 μm~1 μm. 埃洛石管状结构的断裂导致孔体积以及比表面积增大,从而增强样品的吸附性能,有利于后续试验.

样品的比表面积及孔体积用 N₂ 吸附法测定. 如表 1 所示列出了提纯的埃洛石及其 300 ℃下煅烧 2 h 后样品的孔参数.

对比可知,提纯埃洛石的 BET 为 30.105 4 m²/g, 300 ℃煅烧 2 h 后埃洛石样品的 BET 增加为 37.037 0 m²/g. 精制埃洛石孔体积为 0.098 91 cm³/g,

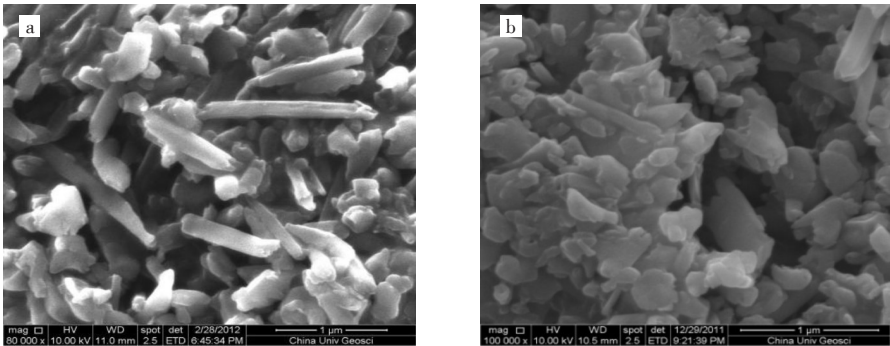


图4 (a)提纯的和(b)煅烧的埃洛石 FESEM 图

Fig. 4 FESEM images of (a) purified and (b) calcined halloy site

表1 提纯后及煅烧后的埃洛石孔参数

Tab. 1 Pole parameters of purified and calcined halloysite

样品名称 sample	BET / (m ² · g ⁻¹)	孔体积 pore volume/ (cm ³ · g ⁻¹)	孔径 pore size / nm	孔面积分布 pole area distribution / (m ² · g ⁻¹)		孔体积分布 pore volume distribution / (cm ³ · g ⁻¹)	
				0 nm~2 nm	2 nm~50 nm	0 nm~2 nm	2 nm~50 nm
提纯样	30.11	0.098 9	13.14	0.338 0	29.39	0.000 161 0	0.095 83
煅烧样	37.04	0.109 6	11.84	0.643 0	33.56	0.000 310 0	0.103 7

经过 300 ℃煅烧 2 h 后孔体积增加至 0.109 6 cm³/g. 埃洛石经煅烧后样品的比表面积和孔体积均增加,但是样品的孔径经煅烧后减小. 提纯埃洛石的孔径为 13.141 5 nm, 300 ℃煅烧 2 h 后孔径减至 11.843 2 nm. 结合煅烧后形貌分析,经煅烧后的埃洛石管状形貌断裂,形成更短的管状结构,因此增加了比表面积以及孔体积. 还可发现,煅烧样的微孔以及介孔的比表面积和孔体积较之未煅烧的均增加. 经煅烧后,在微孔 0 nm~2 nm 范围内,样品的孔面积从 0.338 0 m²/g 增至 0.643 0 m²/g,孔体积从

0.000 161 0 cm³/g 增加到 0.000 31 cm³/g; 在介孔 2 nm~50 nm 范围内,孔面积从 29.394 0 m²/g 增加到 33.561 0 m²/g,孔体积从 0.095 83 cm³/g 增加到 0.103 7 cm³/g. 纳米尺度范围内比表面积、孔体积及孔径均增加,为埃洛石有机改性用于吸附 CO₂ 气体提供了良好的条件.

2.3 混合胺改性埃洛石

图 5 所示为 300 ℃煅烧 2 h 后的埃洛石及其混合胺改性样品的 FESEM 图片. 由图可知,埃洛石经混合胺改性后样品形貌没有明显变化.

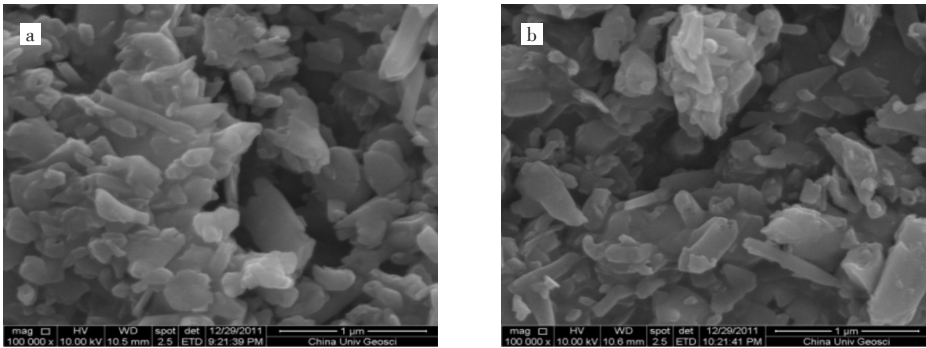


图5 (a)300 ℃下煅烧和(b)混合胺改性的埃洛石 FESEM 图片

Fig. 5 FESEM images of halloysite (a) calcined at 300 ℃ and (b) modified by mixed amine

图 6 为改性埃洛石红外光谱图,其中曲线 a、b、c、d 分别表示埃洛石 300 ℃煅烧 2 h 后、埃洛石 300 ℃煅烧 2 h 后经混合胺改性、乙醇胺和 *N,N*-二甲基乙醇胺的红外光谱图.

图 6 中的 c 谱线观察到在 3 500 cm⁻¹~3 150 cm⁻¹ 范围内的较宽吸收带为 HO(CH₂)₂NH₂ 结构中 —NH₂

的 N-H 伸缩振动吸收,在 1 650 cm⁻¹~1 500 cm⁻¹ 范围是 —NH₂ 的面外弯曲振动吸收峰,2 937 cm⁻¹、2 856 cm⁻¹ 为 —CH₂—CH₂— 中的 C—H 键的伸缩振动的吸收峰. 在图中的 d 线可知 2 850 cm⁻¹~2 700 cm⁻¹ 范围的吸收峰为 CH₃N(CH₂CH₂OH)₂ 结构中 —CH₂N= 中 —CH₂— 的振动吸收峰. 对比改性前

后样品的红外曲线 a 和 b 可知,埃洛石经混合胺改性后在 $3\,122\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,931\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,573\text{ cm}^{-1}$ 处增加了特征吸收峰. 其中 $3\,122\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是由胺基的 N—H 键的振动吸收峰, $2\,931\text{ cm}^{-1}$ 处的特征吸收峰是 $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ 中 C—H 键的伸缩振动的吸收峰, $1\,573\text{ cm}^{-1}$ 处为 NH_2 面内弯曲振动吸收峰. 图中改性剂的红外谱线 c、d 和改性样品的红外曲线 b, 可知, 改性后样品谱线中 C—H 振动的特征吸收峰与两种改性剂相比较, 都发生了一定程度上的偏移. 这些红外吸收峰波数的变化, 表明改性剂分子接枝到埃洛石表面后, 其存在形式或者分子间的排列分布状态与纯改性剂有所不同. 上述分析可以证明成功地制备了混合胺改性埃洛石样品.

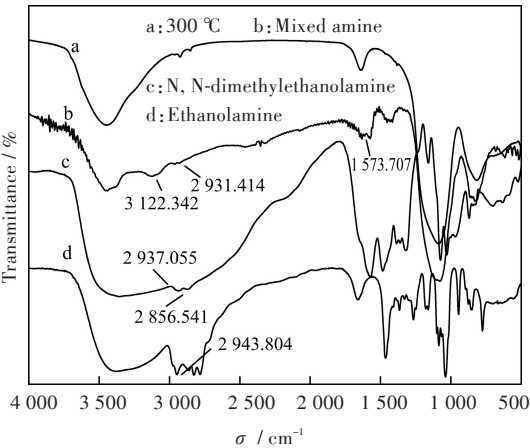


图 6 改性埃洛石的红外光谱图

Fig. 6 IR spectra of modified halloy site

表 2 列出了 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧 2 h 后埃洛石样及 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧 2 h 后埃洛石混合胺改性样的孔参数. 煅烧后经混和胺改性后的埃洛石样品的 BET 数据有所降低, 为 $33.09\text{ m}^2/\text{g}$, 对比混和胺改性前后样品的孔参数, 埃洛石处理后混合胺改性比表面积从 $37.01\text{ m}^2/\text{g}$ 减小到 $33.09\text{ m}^2/\text{g}$, 它的孔体积从 $0.109\,6\text{ cm}^3/\text{g}$ 减小到 $0.095\,37\text{ cm}^3/\text{g}$, 孔径大小从 11.84 nm 减小到 11.53 nm . 结合形貌分析, 由于煅烧后管状结构就已经断裂, 在此之上混和胺改性后也是如此. 在 $2\text{ nm}\sim 50\text{ nm}$ 的孔面积分布上从 $33.56\text{ m}^2/\text{g}$ 减小到 $30.75\text{ m}^2/\text{g}$, 但是在 $0\text{ nm}\sim 2\text{ nm}$ 的孔面积分布上从 $0.643\,0\text{ m}^2/\text{g}$ 增加到了 $2.300\text{ m}^2/\text{g}$, 增加了两倍以上, 可见混和胺的改性在介孔 $2\text{ nm}\sim 50\text{ nm}$ 范围内略有下降, 在对微孔 $0\text{ nm}\sim 2\text{ nm}$ 范围内有大幅的提升. 而在孔体积分布上, 在 $0\text{ nm}\sim 2\text{ nm}$ 范围内孔体积从 $0.000\,310\,0\text{ cm}^3/\text{g}$ 增加到 $0.001\,087\text{ cm}^3/\text{g}$, 增加了 2 倍以上, 而在 $2\text{ nm}\sim 50\text{ nm}$ 范围内的孔体积有略微的下降, 从 $0.103\,7\text{ cm}^3/\text{g}$ 下降到了 $0.091\,13\text{ cm}^3/\text{g}$. 混和胺改性后微孔上的孔面积分布和孔体积分布大幅度提升, 同时混合胺负载到煅烧后的埃洛石上后, 吸附 CO_2 的方式由物理吸附转为以化学吸附为主, 物理吸附为辅, 这就为提升 CO_2 的吸附效果提供了很好的条件.

表 2 埃洛石 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧后及混合胺改性后的孔参数

Tab. 2 Pole parameters of halloysite calcined at $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and modified by mixed amine

样品名称 sample	BET / ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔体积 pore volume / ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔径 pore size / nm	孔面积分布 pole area distribution / ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)		孔体积分布 pore volume distribution / ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	
				0 nm~2 nm	2 nm~50 nm	0 nm~2 nm	2 nm~50 nm
煅烧样	37.04	0.109 6	11.84	0.643 0	33.56	0.000 310 0	0.103 7
混合胺改性样	33.09	0.095 37	11.53	2.300	30.75	0.001 087	0.091 13

2.4 CO_2 的吸附性能测试

图 7 为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧 2 h 埃洛石样品在试验条件下的测试结果, 表示了测试过程中样品的质量变化情况. 从图中可以看出, 在测试过程的第一阶段, 埃洛石经过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧 2 h 后质量百分数下降至 95.49% ; 在第二阶段, 样品的质量百分数先是迅速增加到 98.49% , 此时是吸附 CO_2 的最大吸附量, 接下来又不断下降. 所以可以计算出 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧 2 h 后的埃洛石样在常温常压下吸附 CO_2 的质量分

数为:

$$\frac{98.49\% - 95.49\%}{95.49\%} = 3.142\%$$

图 8 所示为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧 2 h 埃洛石混合胺改性样吸附 CO_2 的热重变化曲线. 由图可见, 在抽真空阶段, 样品的质量下降到原始质量的 98.86% ; 在吸附 CO_2 阶段, 样品的质量剧烈上升, 质量百分数最高上升到 115.87% , 此时的 CO_2 吸附量达到最大值, 之后样品的质量又下降, 为先上升后下降再上升的动态变化趋势.

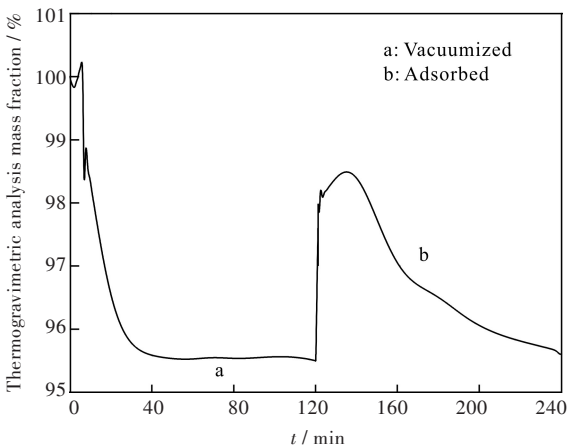


图7 300℃下煅烧的埃洛石CO₂吸附的热重曲线

Fig. 7 TG curve of CO₂ adsorption on halloysite calcined at 300 °C

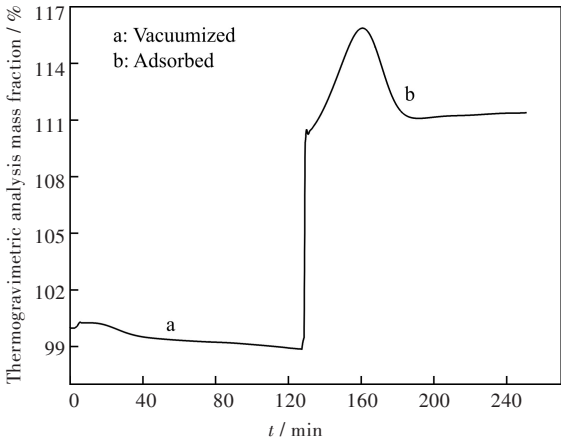


图8 混合胺改性埃洛石CO₂吸附的热重变化曲线

Fig. 8 TG curve of CO₂ adsorption on halloysite modified by mixed amine

可以计算出 300 ℃煅烧 2 h 埃洛石混合胺改性样在常温常压下吸附 CO₂ 的质量分数为:

$$\frac{115.9\% - 98.86\%}{98.86\%} = 17.21\%$$

3 结 语

本文将埃洛石原矿提纯后得到了纯度大于 98% 的埃洛石, BET 数据显示提纯后比表面积可达 30.11 m²/g. 测试不同的煅烧温度, 埃洛石在 300 ℃煅烧 2 h 后吸附水逸出, 纳米孔道进一步疏通, 相对峰强度增加; 当煅烧温度超过 500 ℃时, 已无明显衍射峰, 呈现非晶态. 300 ℃煅烧 2 h 的埃洛石样品的比表面积增加至 37.04 m²/g, 在常温常压下对 CO₂ 的吸附量测得为 3.142%.

BET 的测试结果证明, 采用乙醇胺和 *N,N*-二甲基乙醇胺能有效的对埃洛石进行改性, 改性后的埃洛石孔面积, 孔体积和孔径虽然都有所减小, 但是孔面积分布和孔体积分布都增大, 同时对 CO₂

的吸附性能明显优于改性前仅煅烧的埃洛石样品, 在常温常压下对 CO₂ 的吸附量达到 17.21%.

参考文献:

[1] FREDERICK W P. Sustainable infrastructure: climate changes and carbon dioxide [J]. American Journal of Civil Engineering, 2017, 5(5): 254-267.

[2] JACQUELYN H, DAVID R, MARTIN L, et al. Atmospheric monitoring and detection of fugitive emissions for Enhanced Oil Recovery [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 45: 1-8.

[3] MERKEL T C, LIN H, WEI X, et al. Power plant post-combustion carbon dioxide capture: an opportunity for membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 359(1/2): 126-139.

[4] WANG C, LUO H, JIANG D E, et al. Carbon dioxide capture by superbase-derived protic ionic liquids. [J]. Angewandte Chemie, 2010, 49(34): 5978.

[5] MANGALAPALLY H P, HASSE H. Pilot plant experiments for post combustion carbon dioxide capture by reactive absorption with novel solvents [J]. Energy Procedia, 2011, 4(1): 1-8.

[6] FREEMAN S A, DUGAS R, WAGENER D H V, et al. Carbon dioxide capture with concentrated, aqueous piperazine [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(2): 119-124.

[7] 汪铁林, 延斯·克劳斯. 二氧化碳捕集中 2-氨基-2-甲基-1-丙醇溶剂的热降解 [J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(10): 1-5.

WANG T L, JENS K. Thermal degradation of 2-Amino-2-methyl-1-propanol solvent for carbon dioxide capture [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(10): 1-5.

[8] HARDIE S M L, GARNETT M H, FALICK A E, et al. Carbon dioxide capture using a zeolite molecular sieve sampling system for isotopic (¹³C and ¹⁴C) studies of respiration [J]. Radiocarbon, 2005, 47(3): 441-451.

[9] SUMIDA K, ROGOW D L, MASON J A, et al. Carbon dioxide capture in metal-organic frameworks [J]. Chemical Reviews, 2012, 112(2): 724-781.

[10] LI J R, MA Y, MCCARTHY M C, et al. Carbon dioxide capture-related gas adsorption and separation in metal-organic frameworks [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2011, 255(15/16): 1791-1823.

[11] YAZAYDIN A Ö, SNURR R Q, PARK T H, et al. Screening of metal-organic frameworks for carbon dioxide capture from flue gas using a combined experimental and modeling approach [J]. Journal of

the American Chemical Society, 2009, 131 (51) : 18198.

[12] XIANG S, HE Y, ZHANG Z, et al. Microporous metal-organic framework with potential for carbon dioxide capture at ambient conditions [J]. Nature Communications, 2012, 3(1):954.

[13] WU L, XUE M, QIU S L, et al. Amino-modified MIL-68 (In) with enhanced hydrogen and carbon dioxide sorption enthalpy [J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2012, 157:75–81.

[14] MELLO M R, PHANON D, SILVEIRA G Q, et al. Amine-modified MCM-41 mesoporous silica for carbon dioxide capture [J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2011, 143(1):174–179.

[15] ZELENAK V, HALAMOVA D, GABEROVA L, et al. Amine-modified SBA-12 mesoporous silica for carbon dioxide capture: effect of amine basicity on sorption properties [J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2008, 116(1/2/3):358–364.

本文编辑:张 瑞



(上接第 419 页)

[7] 张巨松,孙蓬,鞠成,等.转晶剂对脱硫石膏制备 α -半水石膏形貌及强度的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(3):521–525.
ZHANG J S, SUN P, JU C, et al. Influence of crystal modifier on morphology and strength of α hemihydrate gypsum prepared by FGD gypsum [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2009, 25 (3):521–525.

[8] 李赵相,陈佳宁,刘彤,等.采用脱硫石膏利用轮窑余热联合制备 β -半水石膏技术的研究[J].砖瓦,2015 (2):23–26.
LI Z X, CHEN J N, LIU T, et al. Study on preparation of β -hemi-hydrated gypsum by the desulphurization gypsum and annular kiln waste heat[J]. Brick-Tile, 2015 (2):23–26.

[9] 陈勇. α -CaSO₃·0.5H₂O 制备及转晶机理研究[D].南京:南京工业大学,2015.

[10] 沈卓贤.脱硫石膏在常压盐溶液中制备 α -半水石膏的转晶剂作用研究[D].杭州:浙江大学,2008.

[11] 茹晓红,李海涛,张新爱,等.可溶磷对常压水热法制备高强 α -半水石膏的影响[J].化工学报, 2015, 66(5):1983–1988.
RU X H, LI H T, ZHANG X A, et al. Effect of soluble phosphorus on high-strength gypsum α -hemihydrate gypsum prepared by atmospheric hydrothermal method [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(5):1983–1988.

[12] 杨昌炎,潘玉,何康,等.天然石膏的改性[J].武汉工程大学学报,2014,36(10):1–6.
YANG C Y, PAN Y, HE K, et al. Modification of nature gypsum [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(10):1–6.

[13] 张康.改性剂—煅烧联合改性湿氟石膏制备建筑石膏粉的研究[D].长沙:中南大学,2013.

[14] 马宪法. α 半水石膏在氯化钾盐溶液中的稳定性 [D].杭州:浙江大学,2008.

[15] 胡海强,柯明,张卡,等.镁碱沸石结晶度及晶体形貌的影响因素[J].硅酸盐通报, 2017, 36(4): 1180–1186.
HU H Q, KE M, ZHAGN K, et al. Influence factors on the crystallinity and morphology of ferrierite [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(4): 1180–1186.

本文编辑:张 瑞