

# 高吸油量煅烧高岭土的制备与性能表征

石国亮<sup>1,2</sup>, 李晓兰<sup>1</sup>, 侯春月<sup>1</sup>, 刘建红<sup>1</sup>, 吕存琴<sup>1</sup>, 赵玉英<sup>1,2</sup>, 郭雨<sup>3\*</sup>, 张乾伟<sup>4</sup>, 韩陈西<sup>1</sup>, 常宏丽<sup>1</sup>  
(1. 太原科技大学化学工程与技术学院, 煤矸石高值利用山西省重点实验室, 山西太原 030024;  
2. 山西晋鑫煤焦化有限责任公司, 山西临汾 042500; 3. 安徽科技学院化学与材料工程学院,  
安徽蚌埠 233100; 4. 浮法玻璃新技术国家重点实验室, 安徽蚌埠 233100)

**摘要:**通过插层剂二甲亚砜、接枝剂甲醇和剥离剂十六烷基三甲基溴化铵协同超声震荡辅助作用, 将层状煤系高岭土剥离为超细片状煤系高岭土。通过X射线衍射(XRD)、傅里叶红外(FT-IR)、N<sub>2</sub>吸附-脱附及扫描电镜(SEM)与能谱分析(EDS)等技术手段对煤系高岭土进行表征。结果表明, 其层间距由层状煤系高岭土的0.708 nm扩大到片状煤系高岭土的1.12 nm, 内部孔隙增加, 形成了裂隙形状的介孔且孔径分布均匀。煅烧高岭土较煤系高岭土的吸油性能大幅提升, 其吸油量从60~73 g/100 g煤系高岭土增至70~79 g/100 g煅烧高岭土。整个制备工艺流程中无引入强酸强碱等腐蚀性物质, 提供了一种环境友好型煅烧高岭土制备技术。

**关键词:**煤矸石; 煅烧高岭土; 吸油性能; 制备; 空隙率

**中图分类号:** TQ174.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2024)06-0129-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.06.026

## Preparation and characterization of calcinated kaolin clay with high oil absorption capacity

SHI Guo-liang<sup>1,2</sup>, LI Xiao-lan<sup>1</sup>, HOU Chun-yue<sup>1</sup>, LIU Jian-hong<sup>1</sup>, LV Cun-qin<sup>1</sup>,  
ZHAO Yu-ying<sup>1,2</sup>, GUO Yu<sup>3\*</sup>, ZHANG Qian-wei<sup>4</sup>, HAN Chen-xi<sup>1</sup>, CHANG Hong-li<sup>1</sup>

(1. Shanxi Provincial Key Laboratory for High Value Utilization of Coal Gangue, School of Chemical Engineering and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Shanxi Linxin Coal Coking Co., Ltd., Linfen 042500, China; 3. College of Chemistry and Materials Engineering, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233100, China;  
4. State Key Laboratory of Advanced Technology for Float Glass, Bengbu 233100, China)

**Abstract:** Layered coal-series kaolin can be stripped into ultra-fine flake kaolin through the synergistic effect of dimethyl sulfoxide as intercalating agent, methanol as grafting agent, and cetyltrimethylammonium bromide as stripping reagent with the assistance of ultrasonic vibration. All samples are characterized by means of XRD, FT-IR, N<sub>2</sub> adsorption-desorption, SEM and EDS. The results indicate that after stripping and calcination, the inter-layer distance of kaolin is enlarged from 0.708 nm to 1.12 nm, and the porosity in the kaolin increases. Moreover, the mesopores with crack shapes are formed in uniform pore size distribution. The oil absorption capacity of calcinated kaolin clay increases to 70–79 g/(100 g), which is greater than 60–73 g/(100 g) of coal-series kaolin clay. No strong acid or base or other corrosive substances are needed in the whole synthesis process, representing an environmental-friendly preparation method for calcinated kaolin clay.

**Key words:** coal gangue; calcinated kaolin clay; oil absorption performance; preparation; void rate

煤矸石(又名煤系高岭土)作为煤炭开采过程中的伴生固体废弃物, 不仅占用大量耕地、污染环境、诱发滑坡等地质灾害, 而且造成固废资源的严重浪费。因此, 推动煤矸石固废资源化利用是当今煤炭行业发展循环生态经济的有效途径<sup>[1]</sup>。煤系高岭土经煅烧后具有很高的白度和良好的油墨吸收性能及覆盖性能, 可作为一种重要的无机矿物原料应用于造纸、涂料等领域<sup>[2]</sup>。近年来, 随着铜版纸、热敏纸等高档造纸业的迅速发展, 对煅烧高岭土的吸油性能提出了更高的质量要求, 具有较低吸油值

[52~70 g/(100 g)]的普通煅烧高岭土已无法满足高档造纸行业的发展需求, 因此研究开发高吸油量的优质煅烧高岭土具有重要的研究意义和潜在价值。

目前, 研究者通过多种技术手段开展了对煤系高岭土的吸油量的提升研究工作。孙涛等<sup>[3-4]</sup>通过调控煅烧温度对煤系高岭土进行脱羟基和铝活化, 促使其由晶态的高岭石转变为非晶态的偏高岭石, 从而增加其内部表面孔隙度, 以期实现吸油量的提升。研究发现, 750℃煅烧的高岭土吸油值达到最高

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2024-04-10

基金项目: 山西省重点研发计划项目(202102090301026); 浮法玻璃新技术国家重点实验室开放基金(2020KF09)

作者简介: 石国亮(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为多级孔纳米材料的设计合成及其应用, glshi@tyust.edu.cn; 郭雨(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无机材料制备及其应用, 通讯联系人, guoyu4468@126.com。

值 80 g/(100 g);但当煅烧温度超过 800℃后,吸油值降低,这与更高的煅烧温度造成其内部孔隙的闭塞密切相关。而且,传统的高温煅烧主要依靠热传导、热对流和热辐射等方式传递热量,其传热过程为由煤矸石表面至内部主体传递热量,基于煤矸石层间结构的紧密特点,期间必然存在较大的热阻,从而产生更大的能耗。王玉飞等<sup>[5]</sup>在煅烧改性高岭土的基础上,通过强碱改性煅烧高岭土,并且研究了碱浓度、碱加入量、反应温度和时间等条件对碱改性高岭土吸油性能的影响,获得了 92 g/(100 g)的高吸油量效果,将其归因于碱改性高岭土的平均孔径增大与孔径分布更为集中。酸改性则是将具有活性的八面体铝与酸反应而被浸出,从而使煅烧高岭土表面形成部分孔隙,进而达到提高产品的吸油量<sup>[6]</sup>。然而,传统的酸碱改性煅烧高岭土,虽提升了煅烧高岭土的吸油值,但也常常带来了对设备的腐蚀。近年来,有研究者利用微波法能量转换的优势代替传统的加热方法对煤矸石热处理,使煤矸石内部温度分布更加均匀,其吸油值最高达到 74 g/(100 g)<sup>[7]</sup>。也有研究者借助超声波的强大空化作用或超声联合酸浸手段快速地将具有紧密层间距结构的煤矸石剥离为薄片的细小颗粒高岭土,增加了产品的内部孔隙和比表面积<sup>[8-9]</sup>。但利用超声手段研究煤系高岭土在提升吸油性能方面的报道则较少。

笔者通过简单的插层反应与取代反应结合超声波振荡对层状煤系高岭土进行改性处理,研究了超声波频率对插层改性后的片状煤系高岭土煅烧前后的结构、形貌及其吸油性能的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

煤系高岭土取自山西朔州,主要化学组成为:SiO<sub>2</sub> 质量分数为 43.50%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数为 37.20%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数为 0.39%, TiO<sub>2</sub> 质量分数为 0.62%, LOI 质量分数为 16.56%。十六烷基三甲基氯化铵(分析纯)、二甲基亚砜(分析纯)、甲醇(分析纯)、乙醇(分析纯);去离子水,实验室自制;精制蓖麻油(分析纯)。

### 1.2 测试仪器与表征

利用 Dmax2500 型 X 射线衍射仪(XRD)分析样品的晶体结构。利用 FT-IR 8400 型红外光谱仪(FT-IR)测定分析样品经插层超声震荡处理前后的特征官能团变化。利用 ASAP2020 型物理吸附仪进行比表面积和孔结构的测定。利用日立 HITACHI S-

4800 型扫描电子显微镜(SEM)分析样品的表面形貌。利用能谱仪(EDS)对样品中所含元素及其含量进行分析测定。

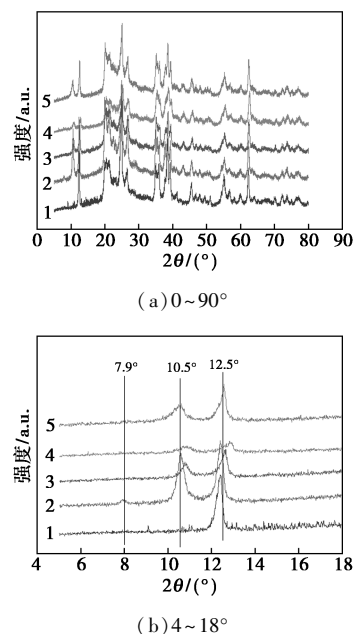
### 1.3 高吸油量煅烧高岭土的制备

称取 490 mL 的二甲基亚砜和 49 mL 的蒸馏水于烧杯中,常温下搅拌混溶。称量 70 g 的细粉煤系高岭土加入到上述溶液中,于 80℃下连续搅拌 24 h 制得混合溶液。将该混合溶液进行离心过滤,并用无水乙醇洗涤 2 次,在 60℃下干燥 12 h,即可得到高岭土/二甲基亚砜中间产品。再将其用无水甲醇浸泡 5 次,每次持续 20 min,静置,离心过滤、干燥,得高岭土/甲醇中间物。再称取 5 g 中间物,加入到预先配置的 1 mol/L 十六烷基三甲基氯化铵+甲醇溶液中,室温下连续搅拌 48 h,分别在 280、350 W 和 420 W 的功率下超声震荡处理 18、30 h,离心过滤,蒸馏水和甲醇洗涤各 2 次,烘箱内 60℃干燥,再在 650℃下煅烧 2 h,获得高吸油量煅烧高岭土产品。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

层状煤系高岭土处理前后的 XRD 图谱如图 1 所示。



1—层状煤系高岭土;2—280 W 处理 18 h;3—280 W 处理 30 h;  
4—350 W 处理 18 h;5—350 W 处理 30 h

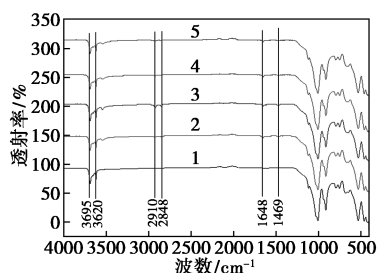
图 1 层状煤系高岭土处理前后的 XRD 图谱

从图 1(a)中可以看出,层状煤系高岭土经插层超声震荡处理前后,其结晶度均较高。从图 1(b)中

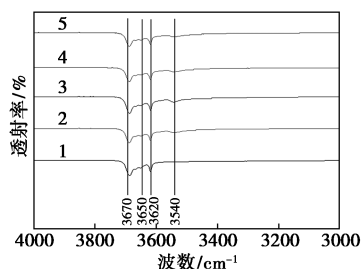
可以看出,插层超声震荡处理前,原高岭土(001)晶面的衍射峰出现在 $2\theta = 12.5^\circ$ ,对应的层间距为0.708 nm,这一结果与文献[10]的报道一致。经插层超声震荡处理后 d001 晶面的衍射峰均向低角度移动,在 $2\theta = 10.5^\circ$ 出现新的衍射峰对应的层间距扩大到0.85 nm,其中280 W 的超声震荡处理 18 h 和 350 W 超声震荡处理 30 h 的样品的衍射峰强度最明显,同时随着超声功率频率及时间的增加,原有(001)晶面的衍射峰向高角度偏移,表明在扩大层间距的同时也造成了不同程度层间距的缩小。此外,所有样品在 $12.5^\circ$ 处的衍射峰强度均减小,证明部分二甲基亚砷分子已成功插入高岭土层间,造成了高岭石的结晶度下降。值得注意的是,280 W 超声震荡处理 18 h 的样品在 $2\theta = 7.9^\circ$ 处出现较为明显的新的特征衍射峰,对应的层间距进一步扩大到1.12 nm,说明甲醇与十六烷基三甲基氯化铵已经取代插层到高岭土层间的二甲基亚砷。

## 2.2 FT-IR 分析

层状煤系高岭土处理前后的红外光谱图如图2所示。



(a) 400~4 000  $\text{cm}^{-1}$



(b) 3 000~4 000  $\text{cm}^{-1}$

1—层状煤系高岭土;2—280 W 处理 18 h;3—280 W 处理 30 h;  
4—350 W 处理 18 h;5—350 W 处理 30 h

图2 层状煤系高岭土处理前后的 FT-IR 图谱

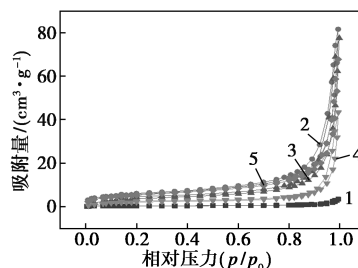
从图2(a)中可以看出,3 695  $\text{cm}^{-1}$ 处的特征红外吸收峰为煤系高岭土铝氧八面体层外表面的内表面羟基基团的拉伸振动,其易与相邻基本结构单元层硅氧四面体层中的氧原子形成氢键。3 620  $\text{cm}^{-1}$ 处的特征红外吸收峰为层状煤系高岭土基本结构单

元层中铝氧八面体层和硅氧四面体层顶氧共享面内的内羟基伸缩振动,其质子端指向四面体的复三方孔洞<sup>[11]</sup>。其中3 670  $\text{cm}^{-1}$ 和3 650  $\text{cm}^{-1}$ 处隐约可见的特征吸收峰归因于内表面羟基基团,表明所选层状煤系高岭土原料中高岭石的结晶度较高,而且经过插层与超声震荡处理后的样品在此处的特征吸收峰强度相比于原料而言均呈现不同程度的减小,表明其结晶度有所下降,这与 XRD 测定的结果相一致。值得注意的是,相比于原料而言,在3 540  $\text{cm}^{-1}$ 处出现新的特征吸收峰,但其吸收峰强度较弱,表明层状煤系高岭土原料中硅铝基本结构单元层间的氢键被破坏后,其内表面羟基首先与二甲基亚砷的 S=O 键结合形成新的氢键,然后再经甲醇取代插层后的结果。同时,在2 910  $\text{cm}^{-1}$ 和2 848  $\text{cm}^{-1}$ 处出现2个新的吸收峰,归属于甲基或亚甲基基团的 C—H 键,反映了十六烷基三甲基氯化铵与层状煤系高岭土表面基团发生了插层反应<sup>[11-12]</sup>,表明在超声波的高频振荡下,十六烷基三甲基氯化铵已成功带入层间取代甲醇形成氢键,并进一步扩大了层间距形成内部更大的空隙,这由 XRD 表征中向低角度偏移的现象得到验证。在1 648  $\text{cm}^{-1}$ 和1 469  $\text{cm}^{-1}$ 处微弱的2个吸收峰分别归属于十六烷基氯化铵分子结构中 N—H 和 C—N 的弯曲振动峰,进一步证明了十六烷基氯化铵表面活性剂成功嵌入到层状煤系高岭土层间内。在低频段 530  $\text{cm}^{-1}$ 和458  $\text{cm}^{-1}$ 处的特征吸收峰位为高岭土层间内的 Si—O 键和 Al—O 键<sup>[13]</sup>。显然,通过二甲基亚砷插层剂、甲醇取代剂与十六烷基三甲基氯化铵的联合使用,结合超声波的高频振荡的协同效应对扩大层状煤系高岭土的层间距与形成内部孔隙起到了至关重要的作用。

## 2.3 孔结构分析

层状煤系高岭土处理前后的氮气吸附-脱附等温线及其孔径分布如图3所示。样品的比表面积数值如表1所示。

从图3(a)中可以看出,所有处理后的样品的等温线的特征均向相对压力轴凹陷,而且吸附曲线与脱附曲线不一致,即存在迟滞回线或滞后环且 $p/p_0$



(a) 氮气吸附-脱附等温线

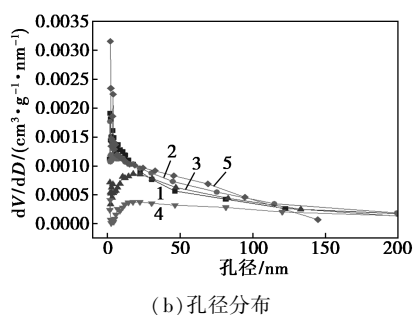


图 3 层状煤系高岭土处理前后的氮气吸附-脱附等温线及其孔径分布  
1—层状煤系高岭土;2—280 W 处理 18 h;3—280 W 处理 30 h;  
4—350 W 处理 18 h;5—350 W 处理 30 h

图 3 层状煤系高岭土处理前后的氮气吸附-脱附等温线及其孔径分布

表 1 所有样品的比表面积数值

样品	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均孔径/nm
原高岭土	25.5	3.2
280 W 处理 18 h 高岭土	20.3	8.2
280 W 处理 30 h 高岭土	14.1	18.6
350 W 处理 18 h 高岭土	8.1	13.8
350 W 处理 30 h 高岭土	19.4	4.2

值均出现在 0.4~0.99 之间,属于典型的 IV 型等温线伴随 H3 型滞后环特征<sup>[13]</sup>。这些等温线特征也反映了在插层超声震荡处理后的片状煤系高岭土内部形成了裂隙形状的介孔,这与层状煤系高岭土自身特殊的层状结构相吻合。相较于处理后的样品,层状煤系高岭土基本看不出迟滞环,说明经插层震荡处理进一步扩大了层状煤系高岭土紧密的层间距,这与上述 XRD 表征结构相一致。

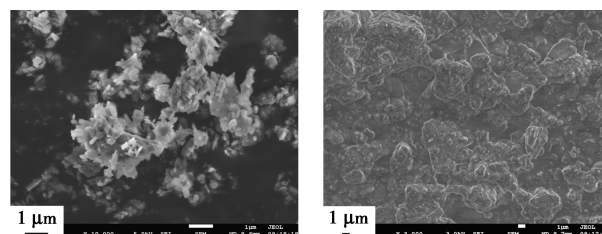
从图 3(b)、表 1 中可以看出,经过处理后的所有样品的孔径分布均宽于层状煤系高岭土的孔径分布,表明经处理后扩大了层状煤系高岭土的层间距。其次,随着超声功率的增加和震荡时间的延长孔径分布呈现先变宽后变窄,而且其平均孔径大小也出现了先增加后减小的趋势,即由 3.2 nm 增加至 18.6 nm,再减小至 4.2 nm,其中超声功率 280 W 下处理 30 h 的样品的平均孔径最大,充分表明超声处理对扩孔的影响至关重要。

另外,经过插层处理的样品的比表面积均低于层状煤系高岭土的比表面积,这是由于有机物插层改性后占据层状煤系高岭土内部部分孔道所致,与文献[11]报道的结果相近。此外,增加超声功率和延长超声时间使得样品呈现出比表面积数值先降低后增加,说明延长超声时间可使十六烷基三甲基氯化铵向层状煤系高岭土内部孔道深处延伸,从而扩大了层间距,其内部孔隙增加。当增加功率至 350 W

时,其平均孔径从 18.6 nm 略微下降至 13.8 nm,这是由于有机物长链分子在高功率下超声几乎充满了整个层间内部空间,使得其平均孔径略减小;然而在此高功率下延长超声时间却使其比表面积又出现较大幅度地升高,从 8.1  $\text{m}^2/\text{g}$  升高至 19.4  $\text{m}^2/\text{g}$ ,平均孔径也迅速下降,从 13.8 nm 降至 4.2 nm,这是由于有机物分子链在片状煤系高岭土内部出现变形弯曲,导致其层间缝隙有所增大,但其孔道直径却因被弯曲变形的有机物分子所占据而迅速变窄。

## 2.4 SEM 与 EDS 分析

层状煤系高岭土及 350 W 超声处理 30 h 的扫描电镜(SEM)图如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,未经处理的层状煤系高岭土呈现出较厚的层状结构,并且层间紧密堆积、结晶度良好,与 XRD 表征结果相一致。从图 4(b)中可以看出,处理过的片状煤系高岭土的颗粒明显减小,片层厚度相应变薄。这主要是因为经二甲基亚砷插层后的高岭土层间距扩大,层间作用力减弱,再经甲醇取代,部分二甲基亚砷从层间内部脱嵌,从而使其内部发生层间剥离,导致层状煤系高岭土颗粒厚度减小<sup>[14]</sup>,这与 XRD 衍射峰宽化相吻合。其次,具有长链结构的十六烷基三甲基氯化铵大分子在层状煤系高岭土内部层间的嵌入也起到了一定的膨胀剥离作用。



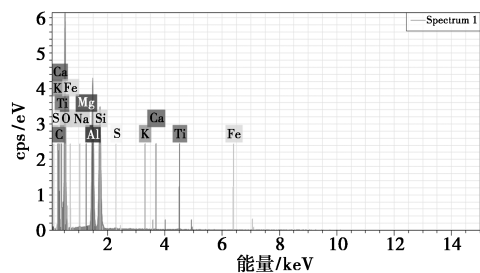
(a) 层状煤系高岭土

(b) 经插层与 350 W 超声处理 30 h 的片状煤系高岭土

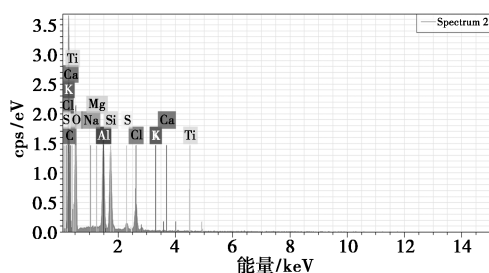
图 4 层状煤系高岭土及 350 W 超声处理 30 h 的片状煤系高岭土的 SEM 图

紧密堆积层状结构的层状煤系高岭土原料和经超声功率 350 W 处理 30 h 后剥离为细小颗粒的样品的表面 EDS 能谱图如图 5 所示。从图 5 中可以看出,C 元素质量分数大幅增加,S 元素质量分数增幅较小,Cl 元素从无到有,说明二甲基亚砷成功嵌入层状煤系高岭土层间后被甲醇取代大部分,又成功引入十六烷基三甲基氯化铵大分子于层状煤系高岭土的层间,这与红外光谱图相一致。其次,Fe 元素消失,Ti 元素质量分数与 Al 元素质量分数减少,表明经插层超声震荡处理后,不仅扩大了层状煤系高岭土的层间距,同时也脱除了层间游离态的杂质

元素以及八面体结构中的少量铝元素。



(a) 层状煤系高岭土



(b) 超声功率 350 W 处理 30 h 后样品

图 5 煤系高岭土和 350 W 处理 30 h 后片状煤系高岭土的 EDS 能谱图

## 2.5 吸油性能分析

煅烧前后的煤系高岭土与经插层超声处理后的所有样品的吸油性能测试结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,煅烧后所有样品的吸油量均高于未经煅烧样品的吸油值,特别是当超声功率 350 W 处理时,其吸油量增幅尤其明显。与低功率超声处理样品相比,用高功率超声震荡处理层状煤系高岭土容易使插层有机物弯曲变形,并进一步扩大层状煤系高岭土层间距,进而促进插层有机物向层状煤系高岭土层间内部孔道延伸,从而造成孔道的堵塞。当高温煅烧处理后,随着插层有机物的脱除,被堵塞的孔道得以畅通,同时其孔径分布变窄,从而能够大幅提升其对蓖麻油的吸附量。这可以从吸油量从 70 g/(100 g) 增至 79 g/(100 g) 得到证实。由此可知,较低超声功率(280 W)处理的样品主要表现为片状煤系高岭土的外表面吸附有机物,并未造成片状煤系高岭土大部分孔道的堵塞,但同时大大增加了层状煤系高岭土的层间距,其吸油值从 60 g/(100 g) 增加至 73 g/(100 g),这与表 1 中的比表面积数值相吻合,因此煅烧前后其吸油量相差不大。值得注意的是,对于未经任何处理的层状煤系高岭土,煅烧后的吸油值明显高于煅烧前,这是由于层状煤系高岭土中的挥发物质如碳在煅烧过程中,从紧密的层间结构中挥发的同时导致其层间距的扩大,从而增大了其吸油量。

表 2 煅烧前后所有样品的吸油性能分析

样品	煅烧前吸油量/ [g·(100 g) <sup>-1</sup> ]	煅烧后吸油量/ [g·(100 g) <sup>-1</sup> ]
原煤系高岭土	60	70
280 W 处理 18 h	73	74
280 W 处理 30 h	72	75
350 W 处理 18 h	67	77
350 W 处理 30 h	64	79

## 3 结论

以层状煤系高岭土为原料,通过联合插层剂二甲基亚砷、接枝剂甲醇和剥离试剂十六烷基三甲基溴化铵并结合超声震荡的辅助作用,成功将层状煤系高岭土剥离为超薄片状煤系高岭土。XRD 表征结果表明层间距由原料的 0.708 nm 扩大到 1.12 nm。FT-IR 分析结果表明,插层剂、接枝剂与剥离试剂的联合使用协同超声波高频振荡对扩大层状煤系高岭土的层间距与形成内部孔隙起到了至关重要的作用。N<sub>2</sub> 吸附-脱附测试表明,经协同处理后的片状煤系高岭土内部形成了裂隙形状的介孔且孔径分布均匀。SEM 与 EDS 能谱分析结果表明,超薄片状煤系高岭土颗粒的形成以及层间游离态杂质元素的成功脱除。层状煤系高岭土经改性与煅烧前后的吸油性能均存在显著差异,表明改性及高温处理可使其内部层间距扩大且孔道增加,吸油量大幅提升,从 50~70 g/(100 g) 增至 70~79 g/(100 g),而且整个制备工艺流程中无强酸强碱等腐蚀性物质引入,突显了环境友好的处理优势,提供了一种新的煅烧高岭土制备技术。

## 参考文献

- [1] 李浩林,曾德恢,郑光亚,等.低温中和-加压酸浸提取煤矸石中铅铁[J].化工进展,2021,40(7):46-48.
- [2] 李海英,杨文才.煤矸石的综合利用研究[J].环境工程,2002,20(5):46-48.
- [3] 孙涛,周春宇,陈洁渝,等.煤系煅烧高岭土吸油值的影响因素[J].岩石矿物学杂志,2013,32(2):232-238.
- [4] 孙涛,陈洁渝,周春宇等.煅烧高岭土的比表面积与吸油性能[J].硅酸盐学报,2013,41(5):685-690.
- [5] 王玉飞.碱改性高岭土的吸油性能研究[J].榆林学院学报,2011,21(4):82-86.
- [6] Stuedel A, Batenburg L F, Fischer H R, et al. Alteration of non-swelling clay minerals and magadiite by acid activation[J]. Applied Clay Science, 2009, 44: 95-104.

(下转第 139 页)

## 参考文献

- [1] Granger P, Parvulescu V I. Catalytic  $\text{NO}_x$  abatement systems for mobile sources: From three-way to lean burn after-treatment technologies [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(5): 3155–3207.
- [2] 刘经纬, 孟杰, 朱伟, 等. 低温 SCR 烟气脱硝催化剂的研究进展 [J]. *现代化工*, 2023, 43(6): 98–102.
- [3] Zhang R, Liu N, Lei Z, *et al.* Selective transformation of various nitrogen-containing exhaust gases toward  $\text{N}_2$  over zeolite catalysts [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(6): 3658–3721.
- [4] Liu Y, Gao F, Yi H, *et al.* Recent advances in selective catalytic oxidation of nitric oxide (NO-SCO) in emissions with excess oxygen: A review on catalysts and mechanisms [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(3): 2549–2571.
- [5] Ghafari M, Atkinson J D. Catalytic NO oxidation in the presence of moisture using porous polymers and activated carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(10): 5189–5196.
- [6] Mochida I, Kawabuchi Y, Kawano S, *et al.* High catalytic activity of pitch-based activated carbon fibres of moderate surface area for oxidation of NO to  $\text{NO}_2$  at room temperature [J]. *Fuel*, 1997, 76(6): 543–548.
- [7] Chen L, Wang X, Cong Q, *et al.* Design of a hierarchical Fe-ZSM-5@ $\text{CeO}_2$  catalyst and the enhanced performances for the selective catalytic reduction of NO with  $\text{NH}_3$  [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 369(8): 957–967.
- [8] Zhao Y, Feng J, Chen Y, *et al.* Thermal process and NO emission reduction characteristics of a new-type coke oven regenerator coupled with SNCR process [J]. *Fuel*, 2021, 305: 121510–121521.
- [9] You F T, Yu G W, Xing Z J, *et al.* Enhancement of NO catalytic oxidation on activated carbon at room temperature by nitric acid hydrothermal treatment [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 471: 633–644.
- [10] Zhe H, Wang Z, Li X B. Catalytic oxidation of nitric oxide (NO) over different catalysts: An overview [J]. *Catalysis Science and Technology*, 2017, 7: 3440–3452.
- [11] Liu W M, Xu J, Feng D P, *et al.* The research status and prospect of synthetic lubricating oils [J]. *Tribology*, 2013, 33(1): 91–104.
- [12] 童志权. 工业废气净化与利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 301–302.
- [13] Nakatsuji T, Kunishige M, Li J, *et al.* Effect of  $\text{CeO}_2$  addition into Pd/Zr-Pr mixed oxide on three-way catalysis and thermal durability [J]. *Catalysis Communications*, 2013, 35: 88–94.
- [14] 何人广, 李秋瑾, 赵光全, 等. 焙烧温度对  $\text{MgO}/\text{ZrO}_2$  固体碱低温催化氧化 NO 性能的影响 [J]. *现代化工*, 2023, 43(6): 118–121, 128.
- [15] 李维勇, 陈曦, 赵月昌, 等. 汽车尾气催化剂用稀土储氧材料的研究进 [J]. *稀土*, 2010, 31(3): 75–81.
- [16] Chen L, Xu Z W, He C, *et al.* Gas-phase total oxidation of nitric oxide using hydrogen peroxide vapor over Pt/ $\text{TiO}_2$  [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 457: 821–830.
- [17] Cheng X X, Bi X T. A review of recent advances in selective catalytic  $\text{NO}_x$  reduction reactor technologies [J]. *Particuology*, 2014, 16: 1–18.
- [18] 郭亚飞, 赵佳祎, 姚曦, 等. 模板剂辅助水热合成 CuO 催化剂及其  $\text{CO}_2$  电化学还原性能 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(8): 50–58.
- [19] 王梦雪, 王丽, 王颖, 等. 多级孔  $\text{La}_{(0.9)}\text{Ce}_{(0.1)}\text{Fe}_{(1-x)}\text{Co}_x\text{O}_3$  的制备、表征及对 CO+NO 的催化活性 [J]. *中国稀土学报*, 2020, 38: 451–459.
- [20] Yao Y Q, Ying Y F, Luo M F, *et al.* Mesoporous structure of praseodymium-stabilized zirconia [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(1): 192–195.
- [21] 薛用芳. 固体催化剂的研究方法: 分析电子显微镜 (下) [J]. *石油化工*, 2000, 12: 303–314.
- [22] Wu X, Feng Y, Du Y, *et al.* Enhancing  $\text{DeNO}_x$  performance of Co-Mn-Al mixed metal oxides in low-temperature  $\text{NH}_3$ -SCR by optimizing layered double hydroxides (LDHs) precursor template [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 467–468(11): 802–810.
- [23] Jiang H, Wang J, Zhou J, *et al.* Effect of promoters on the catalytic performance and  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{O}$  resistance of  $\alpha$ - $\text{MnO}_2$  catalysts for low temperature  $\text{NH}_3$ -SCR [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(4): 1760–1768.
- [24] Barbara H S. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications* [M]. Wiley: Chichester, 2004. ■
- [11] Mgbemena C O, Iiekwe N O, Ukumar R, *et al.* Characterization of kaolin intercalates of oleochemicals derived from rubber seed (*Hevea brasiliensis*) and tea seed (*Camelia sinensis*) oils [J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2013, 25: 149–155.
- [12] Shilova S V, Romanova K A, Galyametdinov Y G, *et al.* Characteristics of the complexing of chitosan with sodium dodecyl sulfate, according to IR spectroscopy data and quantum-chemical calculations [J]. *Russ J Phys Chem A*, 2016, 90: 1181–1184.
- [13] Yuan S, Li Y, Han Y, *et al.* Effects of carbonaceous matter additives on kinetics, phase and structure evolution of coal-series kaolin during calcination [J]. *Appl Clay Sci*, 2018, 165: 124–134.
- [14] Valaskova M, Rieder M, Matejka V, *et al.* Exfoliation/delamination of kaolinite by low-temperature washing of kaolinite-urea intercalates [J]. *Appl Clay Sci*, 2007, 35: 108–118. ■

(上接第 133 页)

- [7] 闫雷, 张涛, 黎佳全, 等. 微波辐照煤系高岭土及其吸油性能 [J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(2): 527–533.
- [8] Heidarian M, Shishesaz M R, Kassiriha S M, *et al.* Characterization of structure and corrosion resistivity of polyurethane/organic lay nanocomposite coatings prepared through an ultrasonication assisted process [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2010, 68(3): 180–188.
- [9] 徐中, 刘金钊. 超声波振荡法制备高岭土/DMSO 插层复合物 [J]. *表面技术*, 2012, 3: 16–18, 50.
- [10] Wang Y J, Luo S, Chen A W, *et al.* Environmentally friendly kaolin-coated meshes with superhydrophilicity and underwater superoleophobicity for oil/water separation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 239: 116541.