

# 利用高纯铝酸洗废渣制备大孔高比表面积拟薄水铝石研究<sup>①</sup>

袁辉<sup>1</sup>, 贺永东<sup>1</sup>, 赵亿坤<sup>1</sup>, 孙小涵<sup>2</sup>, 刘小龙<sup>3</sup>, 杜玉峰<sup>4</sup>, 白万全<sup>5</sup>, 陈守俊<sup>6</sup>

(1.新疆大学物理科学与技术学院,新疆乌鲁木齐 830046; 2.山东能源集团,山东济南 250100; 3.新疆天龙矿业股份有限公司,新疆阜康 831500; 4.新疆农六师铝业公司,新疆五家渠 831300; 5.天山铝业有限公司,新疆石河子 832061; 6.新疆盛安新材料股份有限公司,新疆哈密 839000)

**摘要:**以硫酸铝、氢氧化钠及高纯铝酸洗废渣为原料,采用双铝法制备拟薄水铝石,研究了pH值、反应温度及尿素添加量对拟薄水铝石的形成及结构的影响与合成条件对拟薄水铝石形成时的物相及结构性能的影响。结果表明,随着反应温度升高,拟薄水铝石比表面积和孔容增大,结晶度提高。pH值6.5~9.5时,可以得到明显的拟薄水铝石物相;pH值达到10.5时,会产生三水铝石相。添加尿素能显著增加拟薄水铝石的比表面积和孔径。

**关键词:**双铝法; 拟薄水铝石; 尿素; 孔径; 孔容; 比表面积

中图分类号: TB302

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.031

文章编号: 0253-6099(2024)02-0135-06

## Preparation of Pseudo-boehmite with Large Pore Size and High Specific Surface Area by Using High Aluminum Pickling Sludge

YUAN Hui<sup>1</sup>, HE Yongdong<sup>1</sup>, ZHAO Yikun<sup>1</sup>, SUN Xiaohan<sup>2</sup>, LIU Xiaolong<sup>3</sup>, DU Yufeng<sup>4</sup>, BAI Wanquan<sup>5</sup>, CHEN Shoujun<sup>6</sup>  
(1.School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2.Shandong Energy Group, Jinan 250100, Shandong, China; 3.Xinjiang Tianlong Mining Co Ltd, Fukang 831500, Xinjiang, China; 4.Xinjiang Nongliushi Aluminum Co Ltd, Wujiaqu 831300, Xinjiang, China; 5.Tianshan Aluminum Co Ltd, Shihezi 832061, Xinjiang, China; 6.Xinjiang Sheng'an New Materials Co Ltd, Hami 839000, Xinjiang, China)

**Abstract:** Aluminum sulfate, sodium hydroxide, and high-aluminum pickling sludge were used as raw materials to prepare pseudo-boehmite by adopting a dual aluminum source method. The effects of pH value, reaction temperature, and urea addition on the formation and structure of pseudo-boehmite, as well as the effects of synthesis conditions on the phase and structural properties of pseudo-boehmite were investigated. The results show that as the reaction temperature increases, the specific surface area and pore volume of pseudo-boehmite increase, and the crystallinity also increases. With pH value between 6.5 and 9.5, a clear pseudo-boehmite phase can be obtained; with pH value up to 10.5, a trihydrate alumina phase will be formed. The addition of urea can significantly increase the specific surface area and pore size of pseudo-boehmite.

**Key words:** dual aluminum source method; pseudo-boehmite; urea; aperture; pore volume; specific surface area

拟薄水铝石( $Al_2O_3 \cdot nH_2O, n = 1.4 \sim 2.0$ )又名假一水软铝石,是一种结晶不完全、从无序到有序、从弱晶态到晶态的产物,是制备活性氧化铝的重要前驱体,具有高比表面积和大孔容孔径<sup>[1]</sup>,主要用作催化剂及催化剂载体原料、吸附剂、干燥剂等,被广泛应用于石油化工、环境保护、陶瓷、涂层等行业<sup>[2-5]</sup>。目前我国在石油化工领域中不仅要求拟薄水铝石具有较大的孔

容、孔径,还要求其具有较低的生产成本<sup>[6]</sup>。因此,需要开发大孔容和大孔径拟薄水铝石的低成本制备方法。

拟薄水铝石的制备方法主要为中和法和有机醇铝法<sup>[7-8]</sup>。有机醇铝法制备的拟薄水铝石纯度高、结晶度好,但制备工艺复杂、原料成本较高,不易大规模生产<sup>[9-10]</sup>。目前,我国主要使用碳化中和法<sup>[11]</sup>与双铝中和法<sup>[12]</sup>制备拟薄水铝石,采用铝土矿溶出精炼后的

① 收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51861033); 新疆维吾尔自治区科技厅重点研发专项项目(2020B02007)

作者简介: 袁辉(1997—),男,安徽六安人,硕士,主要研究方向为材料化学。E-mail: 3167728812@qq.com

通信作者: 贺永东(1965—),男,湖北黄冈人,博士,教授,主要研究方向为有色金属、材料化学。E-mail: hydongq@126.com

$\text{NaAlO}_2$  溶液作为原料。碳化中和法是将  $\text{CO}_2$  气体通入  $\text{NaAlO}_2$  溶液水解得到结晶度较高的拟薄水铝石产品,由于是气液两相反应,反应过程不易控制,产物孔径不均匀,孔结构性能较差。双铝中和法是利用铝盐与  $\text{NaAlO}_2$  溶液发生中和反应得到结晶度不高但孔容、孔径较好的拟薄水铝石,此方法工艺简单且成本低廉。

本文采用高纯铝酸洗废渣作为原料,以双铝中和法制备拟薄水铝石,通过调控 pH 值与水解温度探究拟薄水铝石相和孔结构性能,选择适宜的制备工艺。以尿素为扩孔剂,对双铝中和法进行优化,探究适宜的尿素含量,从而制备具有高质量、大孔容、大孔径的拟薄水铝石产品。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验原料为高纯铝酸洗废渣(新疆众和股份有限公司);实验用水为去离子水;实验试剂包括  $\text{NaOH}$ (分析纯)、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (分析纯)和尿素(分析纯)。

原料呈白色颗粒状,粒度在 0.147 mm 以下,主要含有 O、Al、H、N、Na 等元素,主要元素含量如表 1 所示。由元素含量可推测原料的主要物相为  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  等。对原料进行水洗除杂,原料、原料处理后废液及固渣 XRD 分析结果如图 1 所示。由图 1 可知,未处理原料的主要特征衍射峰为  $\text{NaNO}_3$ ,并无其他特征衍射峰,经多次水洗后的废渣样品无明显特征峰,原料处理后留下的废液(干燥成粉末后检测)则以  $\text{NaNO}_3$  形式呈现。由此可见,水洗可以有效去除  $\text{NaNO}_3$ ,实现物相分离。

表 1 高纯铝酸洗废渣元素含量(质量分数) %

Al	O	H	N	Na	K
18.68	65.90	7.22	6.86	1.30	0.014
C	Ca	P	Si	Fe	S
0.013	0.004 1	0.003 3	0.002 9	0.001 7	0.001

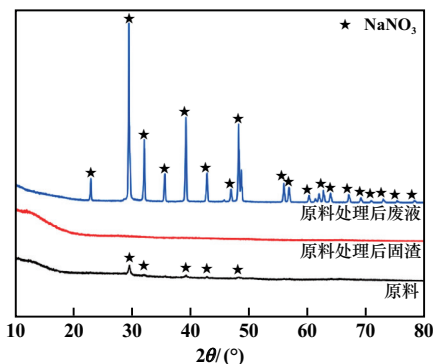


图 1 原料、原料处理后废液及固渣 XRD 图谱

将原料放入烧杯,在 60 °C 下水洗搅拌 5 h,之后将水洗后的废渣过滤放入干燥箱中烘干。称取 39 g 烘干废渣,配置 500 mL  $\text{NaOH}$  溶液(4%),将废渣加入  $\text{NaOH}$  溶液中,90 °C 下恒温水浴搅拌 1 h,利用离心机过滤得  $\text{NaAlO}_2$  溶液,其 XRD 图谱如图 2 所示。图中主要衍射峰为  $\text{NaAlO}_2$ ,并伴随少量  $\text{NaNO}_3$ ,其为洗涤后原料中的部分残留物。

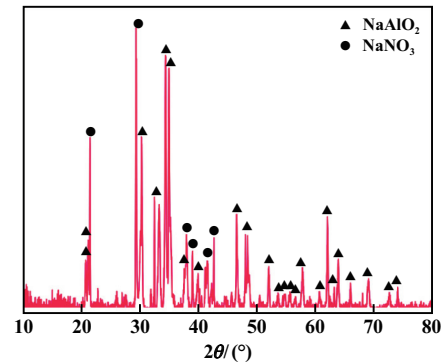


图 2 水洗废渣碱浸液 XRD 图谱

### 1.2 实验方案

配制  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液(10%),将  $\text{NaAlO}_2$  和  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液以流速 4 mL/min 流至装有 200 mL 去离子水的三颈烧瓶中,利用 pH 计观察滴定过程中溶液的 pH 值变化,恒温水浴搅拌 1 h,搅拌速率为 1 000 r/min,滴加适量的尿素,继续搅拌时效 1 h,将时效后的溶液放入抽滤瓶中进行抽滤,抽成滤饼后,反复洗涤过滤,最终将滤饼放入 80 °C 干燥箱中,干燥后破碎研磨成粉末,得到拟薄水铝石样品,工艺流程如图 3 所示。以(U)PB-X-Y-Z 命名样品:U 表示尿素,PB 表示拟薄水铝石,X 表示 pH 值,Y 表示温度,Z 表示尿素掺杂量。例如,UPB-8.5-80-8%是指在 80 °C、pH 值 8.5、使用质量分数 8%的尿素制备的拟薄水铝石。

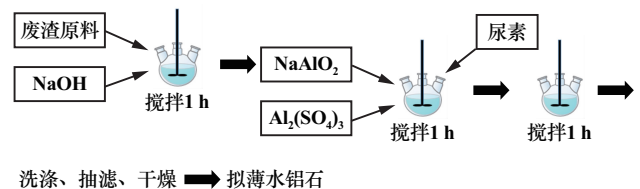


图 3 工艺流程

### 1.3 表征

使用 X 射线衍射仪(D8 advance)表征拟薄水铝石的物相。采用表面积分析仪(TriStar II 3020)进行  $\text{N}_2$  吸附脱附,测试温度 -195.8 °C;测试前,在 300 °C 下对样品脱气处理 5 h。分别使用 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 和 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 方法检测拟薄

水铝石的比表面积和孔容孔径。采用场发射电子扫描电镜(SU8010)表征拟薄水铝石的形貌。采用傅里叶红外光谱仪(VERTEX 70 RAMI)对实验样品的官能团进行红外光谱表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH 值对拟薄水铝石的影响

水解温度 80 ℃,不同 pH 值条件下制备的拟薄水铝石 XRD 图谱如图 4 所示。由图 4 可知,pH 值 6.5~9.5 时,可制得具有拟薄水铝石相的氧化铝样品;pH 值达到 10.5 时,样品中开始出现三水铝石衍射峰;pH 值升至 12 时,衍射峰发生变化,拟薄水铝石相大多转化为三水铝石相。

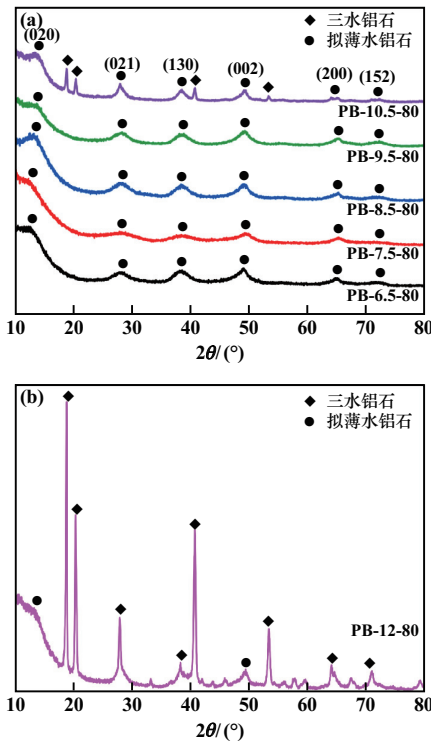
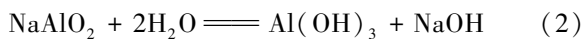
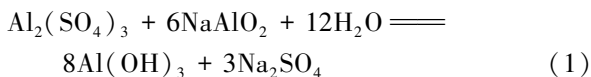


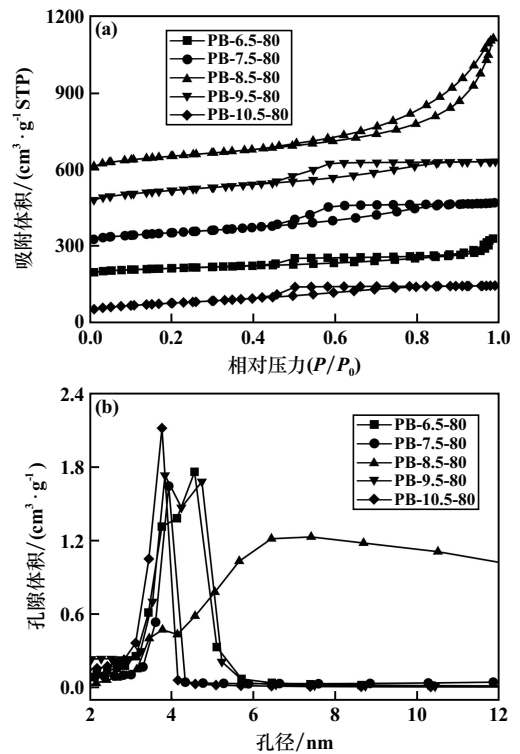
图 4 不同 pH 值下拟薄水铝石 XRD 图谱

水解 pH 值较低时,由于特定层错及正常层的旋转与位移,衍射峰朝右偏移<sup>[13]</sup>;pH 值超过 10.5 时,可以发现 18.5°处存在三水铝石相的衍射峰。在 NaAlO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 的反应体系中,二者并流时会发生式(1)所示的反应,形成无定形的 Al(OH)<sub>3</sub> 沉淀。随着 pH 值升高,溶液中残留的 NaAlO<sub>2</sub> 会水解形成三水铝石,如式(2)所示。



不同 pH 值条件下拟薄水铝石的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等

温线及孔径分布曲线见图 5。由图 5 可知,等温线均为典型 IV 型,伴随迟滞回线出现,表明有孔结构的存在<sup>[14-15]</sup>。同时,这些迟滞回线属于 H2 型和 H3 型复合物,表明样品与墨水瓶状孔隙具有一定的孔连通性。pH 值 6.5~9.5 范围内制备的样品环闭合点较高,表明孔隙较大,孔径分布范围很宽<sup>[16]</sup>。随着 pH 值升高,拟薄水铝石样品的迟滞回线升至较高的相对压力范围,表明孔容、孔径增大。除了 pH 值 8.5 时制备的拟薄水铝石孔径分布比较宽泛,其余 pH 值条件下制备的拟薄水铝石孔径基本分布在 2~7 nm 之间。



(a) 吸附-脱附等温线; (b) 孔径分布曲线

图 5 不同 pH 值条件下拟薄水铝石的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线及孔径分布曲线

不同 pH 值条件下制备的拟薄水铝石孔结构物理特性数据如表 2 所示。由表 2 可知,pH 值从 6.5 升至 8.5 时,样品比表面积从 155.2 m<sup>2</sup>/g 升至 381.6 m<sup>2</sup>/g;pH 值超过 8.5 后,拟薄水铝石样品结构发生变化,导致平均孔径、孔容变小。pH 值较高时,样品中存在可

表 2 不同 pH 值条件下拟薄水铝石孔结构物理特性

样品名称	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm
PB-6.5-80	155.2	0.24	4.01
PB-7.5-80	243.1	0.28	6.18
PB-8.5-80	381.6	0.86	10.31
PB-9.5-80	337.4	0.32	3.64
PB-10.5-80	216.2	0.19	3.35

溶性负电荷物质 $[Al_nO_m(OH)_p]^{(p+2m-3n)-}$ , 其会进入勃姆石晶格并促进晶粒生长<sup>[17-18]</sup>。在高 pH 值环境中,  $\beta_1$ -Al(OH)<sub>3</sub> 大晶粒的溶解和再沉淀会降低拟薄水铝石样品的比表面积。

## 2.2 温度对拟薄水铝石的影响

pH=8.5, 不同温度下制备的拟薄水铝石的 XRD 图谱见图 6。从图 6 可以看出, 样品的物相均为拟薄水铝石。随着温度升高, 样品衍射峰强度逐渐增强, 表明温度越高, 样品结晶度越高, 晶粒尺寸越大。温度低于 50 °C 时, 拟薄水铝石样品结晶度较差。较高的反应温度有利于促进胶体成核, 使样品具有较好的结晶度<sup>[16]</sup>。同时伴随着温度升高, 样品衍射峰没有发生明显偏移, 说明温度变化对样品晶体结构并无影响。

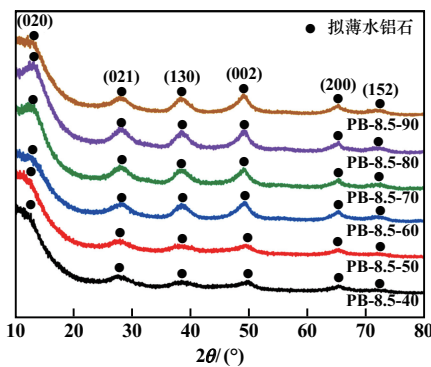


图 6 不同温度下拟薄水铝石的 XRD 图谱

pH=8.5, 不同温度下拟薄水铝石的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线及孔径分布曲线如图 7 所示。由图 7 可知, 所有样品的等温线均为典型 IV 型, 表明这些样品本质上是介孔材料。在相对压力 0.4~0.8 的中压区发生了毛细凝聚现象, 出现迟滞回线, 其介于 H2 型和 H3 型之间, 说明这些样品与通道状孔隙具有较好的连通性。样品 PB-8.5-70 和 PB-8.5-80 具有宽孔径分布, 样品 PB-8.5-40 和 PB-8.5-50 孔径主要分布于 5~20 nm 之间, 其余样品的孔径基本分布在 2~5 nm 之间。

不同温度下拟薄水铝石孔结构物理特性见表 3。由表 3 可知, 随着温度升高, 拟薄水铝石样品比表面积、孔容和孔径整体呈先增大后减小的趋势, 其中在 80 °C 下制备的样品比表面积、孔容分别为 381.6 m<sup>2</sup>/g、0.86 cm<sup>3</sup>/g。由此可得, 拟薄水铝石可以在不同温度下制备, 且在一定温度范围内随着温度升高, 其比表面积和孔容增大。

## 2.3 尿素添加量对拟薄水铝石的影响

80 °C、pH=8.5 时, 缓慢加入不同含量的尿素, 对样品进行水解, 不同尿素添加量下制备的拟薄水铝石 XRD 图谱见图 8。由图 8 可知, 掺杂后的样品中均存

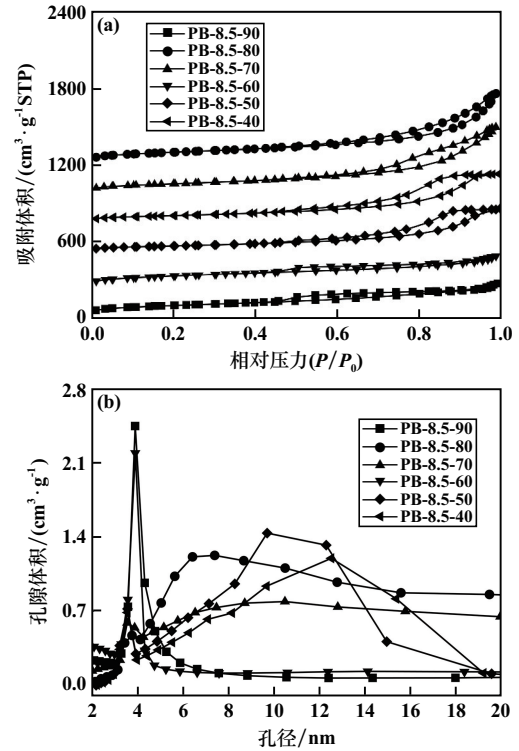


图 7 不同温度下拟薄水铝石的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线及孔径分布曲线

表 3 不同温度下拟薄水铝石孔结构物理特性

样品名称	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm
PB-8.5-40	194.1	0.59	7.87
PB-8.5-50	217.8	0.52	7.47
PB-8.5-60	369.8	0.40	4.43
PB-8.5-70	371.0	0.80	9.07
PB-8.5-80	381.6	0.86	10.31
PB-8.5-90	341.1	0.40	4.79

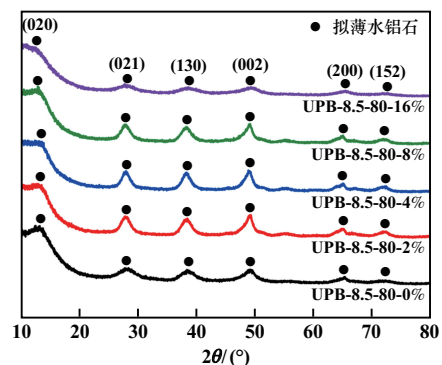


图 8 不同尿素添加量下拟薄水铝石 XRD 图谱

在拟薄水铝石相, 随着尿素添加量增加, 样品衍射峰强度增大, 半高宽减小; 尿素添加量达到 16% 时, 样品特征衍射峰强度开始减小, 说明尿素掺杂过量时, 可能会

阻碍晶粒的生长。

图 9 为不同尿素添加量下拟薄水铝石的红外光谱分析图。由图 9 可知,3 000~3 750  $\text{cm}^{-1}$  范围内存在明显的吸收峰,其与 1 639  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰均为拟薄水铝石表面吸附水的弯曲振动。482  $\text{cm}^{-1}$  与 613  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰属于 Al—O—Al 的伸缩振动;1 076  $\text{cm}^{-1}$  与 3 093  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰属于拟薄水铝石羟基的弯曲振动;756  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰属于拟薄水铝石羟基的面外弯曲振动。对比不同样品的红外光谱可以发现样品均为拟薄水铝石。尿素添加量 16% 时制备的样品在 3 093  $\text{cm}^{-1}$  及 1 076  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰不明显,说明此时样品结晶度不高,尿素添加量 2%~8% 范围内的吸收峰则较明显。

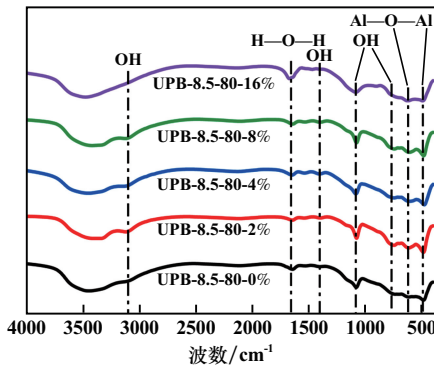


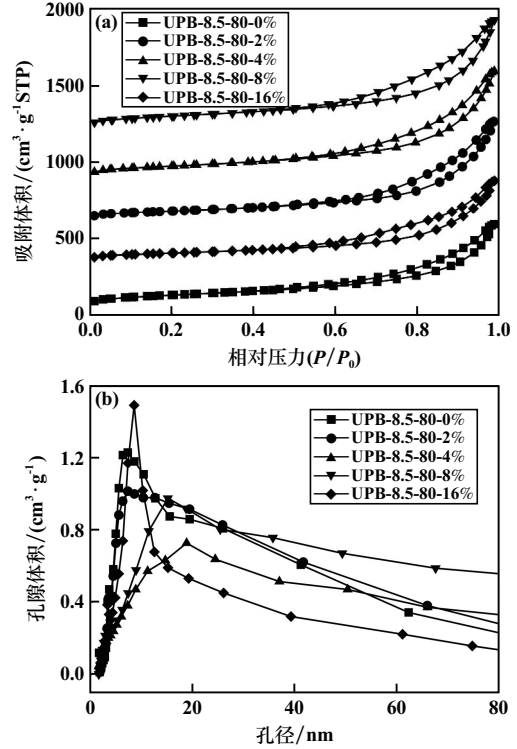
图 9 不同尿素添加量下拟薄水铝石的红外光谱分析图

图 10 为不同尿素添加量下拟薄水铝石的  $\text{N}_2$  吸附-脱附等温曲线和孔径分布曲线。由图 10 可知,所有样品等温线均为典型 IV 型,均存在中孔,与未掺杂尿素的拟薄水铝石 (PB-8.5-80) 相似。通过尿素改性后的样品迟滞回线为 H3 型,存在较宽的孔隙。与未掺杂尿素的样品相比,改性后的拟薄水铝石具有宽孔径分布,孔隙宽度明显增大,其中 UPB-8.5-80-4% 和 UPB-8.5-80-8% 样品孔径主要集中于 15.2 nm 左右,未添加尿素的样品孔径主要集中在 7.4 nm。由此可得,尿素能有效提高拟薄水铝石的孔径宽度。

图 11 为不同尿素添加量下拟薄水铝石的 SEM 图。由图 11 可知,拟薄水铝石样品形貌均为片状。加入尿素后的拟薄水铝石中出现了明显的大孔结构;尿素添加量 8% 时,样品中形成了较大的孔径,但当掺杂的尿素超过一定量时,孔径变小。可见添加尿素可以调整样品孔径大小、改变样品形态,达到扩孔的效果,但掺杂过多时,样品孔径会减小。

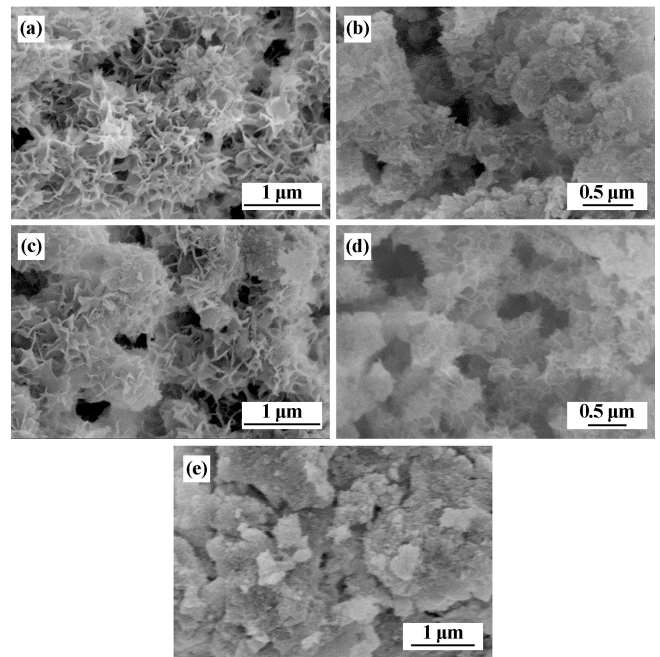
不同尿素添加量掺杂后拟薄水铝石孔结构物理特性如表 4 所示。由表 4 可知,随着尿素添加量增加,拟薄水铝石样品比表面积增大,但当尿素添加量超过 8% 后,比表面积随着尿素添加量增加而减小。通常比

表面积越大,孔径越小,但在本实验中,添加 8% 尿素制备得到了具有高比表面积和大孔结构的拟薄水铝石,其性能超过了传统工艺制备的拟薄水铝石。然而,尿素添加过量时,改性后样品比表面积可能会小于未掺杂尿素的样品。



(a) 吸附-脱附等温线; (b) 孔径分布曲线

图 10 不同尿素添加量下拟薄水铝石的  $\text{N}_2$  吸附-脱附等温曲线和孔径分布曲线



(a) 0; (b) 2%; (c) 4%; (d) 8%; (e) 16%

图 11 不同尿素添加量下拟薄水铝石的 SEM 图

表4 不同尿素添加量下拟薄水铝石孔结构物理特性

样品名称	比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	孔容/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/nm
UPB-8.5-80-0%	381.6	0.86	10.31
UPB-8.5-80-2%	401.4	1.01	10.79
UPB-8.5-80-4%	428.3	1.08	12.35
UPB-8.5-80-8%	452.8	1.11	13.57
UPB-8.5-80-16%	373.7	0.82	9.12

### 3 结 论

1) 在不同 pH 值下合成拟薄水铝石,随着 pH 值升高,样品物相发生变化,pH=10.5 时开始形成三水铝石相;pH=8.5 时拟薄水铝石具有较好的吸附能力。

2) 在不同温度下制备的样品均为拟薄水铝石,随着温度升高,拟薄水铝石相结晶度有所提高且样品孔结构大小呈先升高后降低的趋势,80 °C 时拟薄水铝石具有大孔径和高比表面积。

3) 为了进一步提高拟薄水铝石性能,在 pH=8.5、温度 80 °C 时掺杂尿素,随着尿素添加量增加,样品比表面积、孔容、平均孔径均有所增加,尿素添加量 8% 时,拟薄水铝石的改性条件适宜。

#### 参考文献:

- [1] 张 哲,白立光,沈 冲,等.拟薄水铝石孔结构调控的研究进展[J].化学推进剂与高分子材料,2020,18(4):30-35.
- [2] 吴锦添,范文青,刘长坤,等.拟薄水铝石对加氢裂化催化剂的影响[J].石油化工,2020,49(1):1-6.
- [3] Mohammadi M, Khodamorady M, Tahmasbi B, et al. Boehmitenanoparticles as versatile support for organic-inorganic hybrid materials: synthesis, functionalization, and applications in ecofriendly catalysis[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021,97:1-78.
- [4] Chávez G T, Rodríguez J C P, Medina J Z, et al. Reactions analysis-during the synthesis of pseudo-boehmite as precursor of gamma-alumina[J]. Catalysis Today, 2016,271:207-212.
- [5] 南 军,于 群,于海斌,等.拟薄水铝石新工艺研发及其在加氢精制催化剂中的应用[J].无机盐工业,2019,51(6):80-82.
- [6] 汪汉生.适应原油劣质化的催化裂化运行分析[J].炼油技术与工程,2021,51(7):18-21.
- [7] 左少卿,杜晓辉,熊晓云,等.拟薄水铝石制备方法的研究进展[J].应用化工,2017,46(9):1818-1821.
- [8] 张贺杰,陈 兴,邹 兴,等.废旧锂离子电池正极材料除铝技术研究进展[J].过程工程学报,2020,20(5):503-509.
- [9] 刘袁李.异丙醇铝水解制备催化用拟薄水铝石和氧化铝[D].大连:大连理工大学,2020.
- [10] 王程民.醇铝法特种拟薄水铝石的开发与应用[J].石化技术,2020,27(11):189-190.
- [11] 王晶晶,王永林,赵利民.连续碳化法制备拟薄水铝石[J].工业催化,2019,27(1):33-37.
- [12] 张 哲,李殿卿,白立光,等.双铝法拟薄水铝石的制备条件对其胶溶性能的影响[J].化学推进剂与高分子材料,2021,19(1):48-51.
- [13] ZHU H Y, GAO X P, SONG D Y, et al. Manipulating the size and morphology of aluminum hydrous oxide nanoparticles by soft-chemistry approaches[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2005,85(3):226-233.
- [14] Brunauer S, Deming L S, Deming W E, et al. On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases[J]. Journal of the American Chemical Society, 1940,62(7):1723-1732.
- [15] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report) [J]. Pure and Applied Chemistry, 2013,66(8):1739-1758.
- [16] CAI W, LI H, ZHANG Y. Influences of processing techniques of the  $\text{H}_2\text{O}_2$ -precipitated pseudoboehmite on the structural and textural properties of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007,295(1):185-192.
- [17] REN T Z, YUAN Z Y, SU B L. Microwave-assisted preparation of hierarchical mesoporous-macroporous boehmite  $\text{AlOOH}$  and gamma- $\text{Al}_2\text{O}_3$ [J]. Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids, 2004,20(4):1531-1534.
- [18] Paniais D, Krestou A. Effect of synthesis parameters on precipitation of nanocrystalline boehmite from aluminate solutions [J]. Powder Technology, 2007,175(3):163-173.
- 引用本文: 袁 辉,贺永东,赵亿坤,等.利用高纯铝酸洗废渣制备大孔高比表面积拟薄水铝石研究[J].矿冶工程,2024,44(2):135-140.
- [12] Kim K, Haghghat S, Nazarian M. Si, P vacancy-enriched  $\text{CoSi}_3\text{P}_3$  anode with exceptional Li storage performance[J]. Energy Storage Materials, 2021,36:229-241.
- [13] LI W, MA Q, SHEN P, et al. Yolk-shell structured  $\text{CuSi}_2\text{P}_3$ @ Graphene nanocomposite anode for long-life and high-rate lithium-ion batteries[J]. Nano Energy, 2021,80:105506.
- [14] 王苏媚,张福勤,童 汇,等. MOF 衍生碳包覆硅纳米颗粒限制于石墨烯复合负极材料的制备及性能研究[J].矿冶工程,2022,42(4):159-163.
- [15] CHEN M, ZHOU Q, ZAI J, et al. High power and stable P-doped yolk-shell structured  $\text{Si}@C$  anode simultaneously enhancing conductivity and  $\text{Li}^+$  diffusion kinetics[J]. Nano Research, 2021,14(4):1004-1011.
- 引用本文: 周 玉,侯晓川,王志杰,等.磷掺杂硅碳负极材料的制备及性能研究[J].矿冶工程,2024,44(2):131-134.

(上接第 134 页)