

钾霞石制备体系碱性滤液的利用技术

路华龙, 霍光祥, 段永华, 勾明雷, 刘军娜, 刘晨

(河南科技大学 化学化工学院, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为处理钾长石水热制备钾霞石所产生的碱性滤液, 本文采用水热法, 考察了氢氧化铝溶解时间、晶化时间、晶化温度、水碱比对钾霞石产率和白度的影响, 并对合成钾霞石物相进行了表征。结果表明, 合成钾霞石的最佳条件为, 氢氧化铝溶解时间为 1.5 h, 晶化时间为 4 h, 晶化温度 280°C, 水碱比为 1.8。XRD 结果表明, 产物为钾霞石粉体。傅里叶变换红外光谱表明, Al(OH)₃ 中的 Al 在水热条件下进入到 Si—O 骨架中形成了 Si—O—Al 官能团, 从而印证了钾霞石的合成。差热分析结果表明, 合成钾霞石具有良好的热稳定性。氮气吸附结果表明, 合成钾霞石比表面积为 5.18 m²/g, 平均孔径为 32.98 nm。实现了钾长石水热制备钾霞石所剩碱性滤液的资源化利用, 并为钾长石水热制备钾霞石提供了一种母液循环的思路, 使水热制备钾霞石工业化成为一种可能。

关键词: 钾霞石; 水热法; 氢氧化铝

中图分类号: TQ170.9; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)01-0125-06

Utilization technology of alkaline filtrate in kaliophilite preparation system

LU Hua-long, HUO Guang-xiang, DUAN Yong-hua, GOU Ming-lei, LIU Jun-na and LIU Chen

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to produce alkaline filtrate from potassium feldspar hydrothermal preparation of potassium nepheline, the effects of dissolution time, crystallization time, crystallization temperature and water-alkali ratio on the yield and whiteness of potassium nepheline were investigated by hydrothermal method. The results show that the optimum conditions for the synthesis of potassium nepheline are as follows: the dissolution time of alumina hydroxide is 1.5 hours, the crystallization time is 4 hours, the crystallization temperature is 280°C, and the water-alkali ratio is 1.8. XRD spectrum shows the product is kaliophilite powder. FTIR spectrum shows that Al in Al(OH)₃ enters the Si—O framework to form Si—O—Al functional groups under hydrothermal conditions, thus confirming the synthesis of kaliophilite. The result of DTG indicates that the kaliophilite synthesized has good thermal stability. Isotherm indicates that the surface area of synthetic kaliophilite is 5.18 m²/g and the average pore size is 32.98 nm. The alkaline filtrate produced by hydrothermal preparation of potassium nepheline by potassium feldspar was realized as resource utilization, and a kind of mother liquor circulation idea was provided for hydrothermal preparation of potassium nepheline by potassium feldspar. The industrialization of hydrothermal preparation of potassium nepheline has become a possibility.

Key words: kaliophilite; hydrothermal process; aluminum hydroxide

Fund support: Key Project of Henan Province (212102210601)

收稿日期: 2023-06-19; 接受日期: 2023-10-24; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 河南省重点攻关项目(212102210601)

作者简介: 路华龙(1997-), 男, 汉族, 硕士研究生, 化学工程专业, 1455571732@qq.com; 通讯作者: 段永华(1978-), 男, 汉族, 博士, 从事工业固体废物二次资源高值化利用技术方面的科研工作, E-mail: paper_haust@163.com.

钾霞石是一种架状硅酸盐(郑骥等, 2006; 韩辰婧等, 2014), 具有强度大、热膨胀系数高、抗积碳性能强、发光性能稳定的性质, 常被用作石油工业中的催化剂和助催化剂、玻璃陶瓷原料和荧光材料(Wen and Yan, 2011; Yantake *et al.*, 2020; Sabaliauskiene *et al.*, 2020; Brooks, 2021; Gupta *et al.*, 2021; Luo *et al.*, 2022; Yantake *et al.*, 2023)。钾霞石也被用作合成高岭石的前驱体、制备莫来石晶和农用硫酸钾的原料(苏双青等, 2011a; 马鸿文等, 2017; 茹广川等, 2020)。

水热法是以钾长石、高岭石、黑云母为原料, 在强碱溶液中反应制备钾霞石的方法, 其反应原理是钾长石中过量的硅在强碱性溶液中被溶出, 钾长石 $[(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4]$ 四面体组成的微斜层转化为具有六方结构的钾霞石(Becerro *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2020; Fu *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022)。水热法制备钾霞石操作简单、原料价格低廉、制备周期短、具有良好的工业化前景, 但水热法制备钾霞石过程中会产生大量碱性滤液, 碱性滤液的循环是水热制备钾霞石实现工业化的难题(茹广川等, 2017; 苏双青等, 2011b, 2012; 俞子俭, 2019)。

本文以钾长石水热制备钾霞石过程中所产生的碱性滤液为原料, 采用水热法, 考察了氢氧化铝溶解时间、晶化时间、晶化温度、水碱比对产物产率和白度的影响, 并对产物的物相结构进行了表征。

1 实验

1.1 实验原料

实验采用钾长石水热制备钾霞石过程中所产生的碱性滤液为原料, 其有效成分含量为 SiO_2 5.44%、 K_2O 35.69%、 Al_2O_3 0.24%、 H_2O 58.44%, 其他成分含量为0.19%, 总量为100%。氢氧化铝由洛阳中超新材料股份有限公司提供, 纯度 $\geq 99.8\%$, 平均粒径 $10\ \mu\text{m}$, 去离子水为实验室自制。

1.2 实验方法

氢氧化钾和去离子水以2:3的质量比配制碱液, 碱液转移至耐高温高压反应釜, 开启搅拌, 以钾长石:碱液=1:5的质量比加入钾长石, $280\ \text{C}$ 下反应3 h, 降温后收集碱性滤液。取一定的碱性滤液, 向其中加入一定量的去离子水, 升温至 $90\ \text{C}$, 在持续搅拌的情况下, 加入一定量的 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 待其完全溶解后, 转移至聚四氟水热反应釜中, 在一定温度下

晶化一段时间, 晶化结束后自然降至室温, 抽滤, 将沉淀物洗涤至中性, 在 $150\ \text{C}$ 下干燥10 h, 得钾霞石产品。考察了氢氧化铝溶解时间($t_1=0\sim 2\ \text{h}$)、晶化时间($t_2=2.5\sim 4.5\ \text{h}$)、晶化温度($t=220\sim 300\ \text{C}$)、水碱比($\text{H}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.8\sim 7.4$)对钾霞石产率和白度的影响, 并对钾霞石物相结构进行了表征。

1.3 分析方法

物相分析采用日本 RigakuD/max-2200PCX 射线衍射仪分析, Cu 靶, 扫描速度 $10^\circ/\text{min}$; 热分析采用梅特勒-托利多 TG/DSCI 分析仪; 氮气吸附采用美国 ASAP2405 吸附仪。以上分析在科学指南针实验服务中心完成。形貌分析采用日本 FlexSEM-1000 扫描电子显微镜进行, 样品化学基团变化采用傅里叶变换红外光谱 IRTracer-100 表征, KBr 压片; 白度分析采用 WSB-2 台式白度仪完成; 成分分析采用电感耦合等离子体光谱仪(ICPE-9820)完成。以上分析在河南科技大学进行。

2 结果与表征

2.1 晶化条件优化

图1为不同晶化时间下的扫描电镜图。实验结果表明, 随着晶化时间的延长, 氢氧化铝先和碱性滤液团聚为块体; 晶化1.5 h时, 团聚体上出现了棱柱状晶体; 晶化2 h时, 团聚体转化为无定形结构的晶体; 晶化2.5 h时, 出现了钾霞石片状晶体; 晶化3 h时, 晶体逐渐向具有六方结构的棱柱状晶体转化; 晶化3.5 h, 形成了具有正六方结构的柱状晶体。这是由于随着晶化时间的增加, Al 逐渐进入了 Si—O 骨架结构中, 形成了形成 Si—O—Al 官能团, 生成了钾霞石晶体。

表1为碱性滤液制备钾霞石单因素实验结果, 图2为不同反应条件下产率变化曲线。由图2可知, 随着 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶解时间的增加, 钾霞石产率逐渐增加, 溶解时间达到1.5 h后, 产率基本不变, 这是由于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在滤液中溶解更充分。随着晶化时间的增加, 钾霞石产率增高, 达到4 h后产率最高, 这是由于更多的铝进入到了 Si—O 骨架结构中, 生成了钾霞石。随着反应温度的增加, 钾霞石产率逐渐增加, 晶化温度达到 $280\ \text{C}$ 时, 产率达到稳定, 这是由于晶化速率随着晶化温度的升高而升高, 温度越高晶化反应越完全。随着水碱比的增加, 钾霞石产率逐渐下降, 这是由于反应体系中钾含量降低, 不利于合成钾

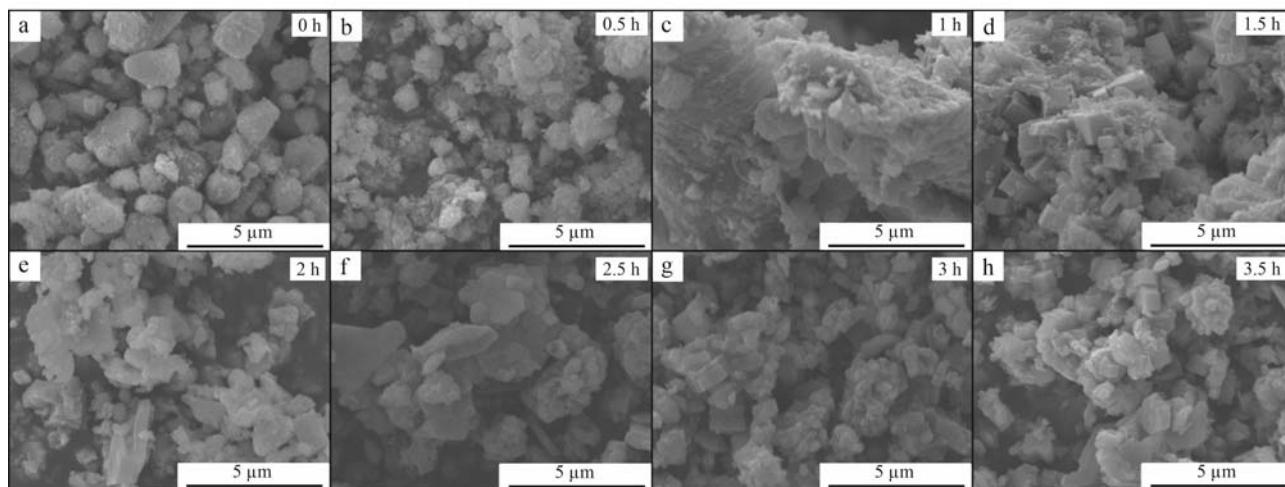


图 1 不同晶化时间下合成产物的微观结构图

Fig. 1 SEM photos of synthesized products at different crystallization times

表 1 合成钾霞石单因素实验结果

Table 1 Single-factor experimental results for synthetic kaliophillite

实验编号	溶解时间/h	晶化时间/h	反应温度/℃	水碱比	产率/%	白度
1	0	3	280	3.2	81.77	92.4
2	0.5	3	280	3.2	82.25	92.5
3	1	3	280	3.2	84.68	93.5
4	1.5	3	280	3.2	86.41	93.6
5	2	3	280	3.2	86.66	93.7
6	1	2.5	280	3.2	80.08	93.9
7	1	3	280	3.2	84.21	93.8
8	1	3.5	280	3.2	84.24	93.9
9	1	4	280	3.2	89.11	94.3
10	1	4.5	280	3.2	89.01	94.4
11	1	3	220	3.2	76.55	94.4
12	1	3	240	3.2	81.21	99.2
13	1	3	260	3.2	83.56	93.9
14	1	3	280	3.2	87.68	94.2
15	1	3	300	3.2	87.82	94.4
16	1	3	280	1.8	86.61	93.0
17	1	3	280	3.2	85.28	94.5
18	1	3	280	4.6	84.68	93.5
19	1	3	280	6.0	81.08	92.4
20	1	3	280	7.4	72.88	92.2

霞石(尹建军等, 2012; 薛紫尹, 2021)。晶化条件对合成钾霞石白度影响不大,以产率为标准,合成钾霞石的最佳条件为: $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶解时间为 1.5 h,晶化时长为 4 h,反应温度 280 ℃,水碱比为 1.8。

2.2 产物表征

合成钾霞石的主要化学成分为 SiO_2 36.12%、 Al_2O_3 32.34%、 K_2O 26.50%、 Na_2O 1.72%,总和为

96.68%,其余为少量吸附水以及原料中引入的杂质(CaO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 Rb_2O)。以氧原子计算法获得其阳离子系数($O=4$),进而得到合成钾霞石的化学式为 $(\text{K}_{0.919}\text{Na}_{0.091})\text{Al}_{1.037}\text{Si}_{0.982}\text{O}_4$, $(\text{K}+\text{Na})/(\text{Al}+\text{Si})=0.50$,与理论值一致。

对合成钾霞石进行了 X 射线衍射分析,其结果与 PDF 卡片 11-0313 相对应, 20.81° 、 28.74° 、 34.58° 、 40.73° 、 42.41° 处衍射峰对应钾霞石的(002)、(332)、(900)、(1010)、(004)晶面,结果证实了晶化所得产物为钾霞石,且衍射峰峰形尖锐,钾霞石结晶度高(图 3a)。在合成钾霞石的 IR 图谱(图 3b)中, 983 、 692 和 468 cm^{-1} 为钾霞石的伸缩振动吸收峰, 983 cm^{-1} 处的伸缩振动吸收峰属于 $\text{Si}(\text{Al})-\text{O}$ 的反对称伸缩振动, 692 cm^{-1} 处的伸缩振动吸收峰为 $\text{Si}(\text{Al})-\text{O}$ 骨架的对称伸缩振动, 468 cm^{-1} 处伸缩振动吸收峰属于 $\text{Si}(\text{Al})-\text{O}$ 弯曲振动。结果表明 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 中的 Al 进入到了 $\text{Si}-\text{O}$ 骨架结构中,形成 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 官能团,从而印证了钾霞石的合成,且合成钾霞石不存在单独的铝相或富铝相(郑骥等, 2006; Liu *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022)。 607 cm^{-1} 和 555 cm^{-1} 处的伸缩振动吸收峰是由于废液中少量钠离子取代了钾霞石中少量钾离子所致(Dimitrijevic and Dondur, 1995)。

因此,碱性滤液和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 合成钾霞石的反应机理为,在强碱性溶液中, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 转化为 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$,而硅则发生水解反应,以 $[\text{SiO}_4]^-$ 四面体的形式存在,当温度达到 280 ℃时, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 与 $[\text{SiO}_4]^-$

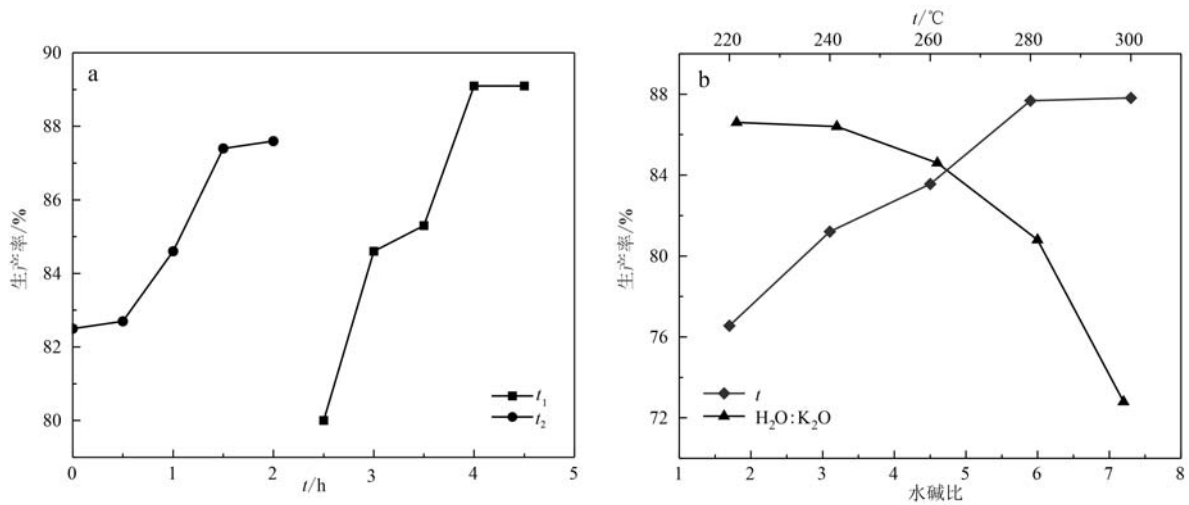


图2 不同反应条件下产率变化曲线

Fig. 2 Changes of yield under different reaction conditions

- 产率随晶化时间的变化曲线；●—产率随 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶解时长的变化曲线；▲—产率随水碱比的变化曲线；
◆—产率随温度的变化曲线
■—the yield changes with the crystallization time curve; ●—the yield changes with dissolution time of $\text{Al}(\text{OH})_3$;
▲—the yield changes with the water-alkali ratio curve; ◆—the yield changes with the temperature curve

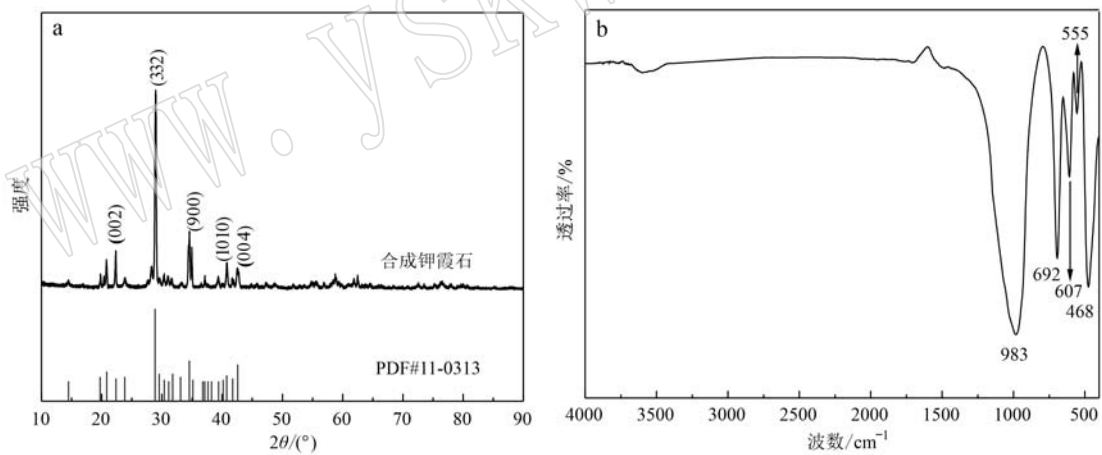


图3 合成钾霞石的XRD(a)和IR(b)图谱

Fig. 3 XRD(a) and IR(b) spectra of synthesized kaliophilite

发生符合五配位中间体机理的反应,生成了 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 官能团,之后在 K^+ 的引导下生成 $\text{K}[\text{AlSiO}_4]$ (郑骥等, 2007)。

热分析结果表明,合成钾霞石在 $30 \sim 1\,000^\circ\text{C}$ 之间没有明显的质量损失,表明钾霞石具有良好的热稳定性,白度分析结果表明,合成钾霞石白度为 95.2%,高白度的钾霞石有利于提高陶瓷制品的白度和透光性,合成钾霞石具有白度高,热稳定性好的特点,适合用作高档精细陶瓷(朱文, 2016)。

氮气吸附和孔径测试结果表明,合成钾霞石为介孔材料,比表面积为 $5.18 \text{ m}^2/\text{g}$,平均孔径为 32.98 nm 。图4为合成钾霞石粉体的氮气吸附-脱附等温线和孔径分布曲线。吸附曲线在饱和蒸汽压处陡起,脱附曲线在饱和蒸汽压处陡降,吸附曲线与脱附曲线出现较小的滞后环,表明合成钾霞石粉体带有介孔。合成钾霞石孔径分布曲线出现多个峰,表明钾霞石孔径分布不集中,孔隙的尺寸跨度较大(龚德才等, 2023)。

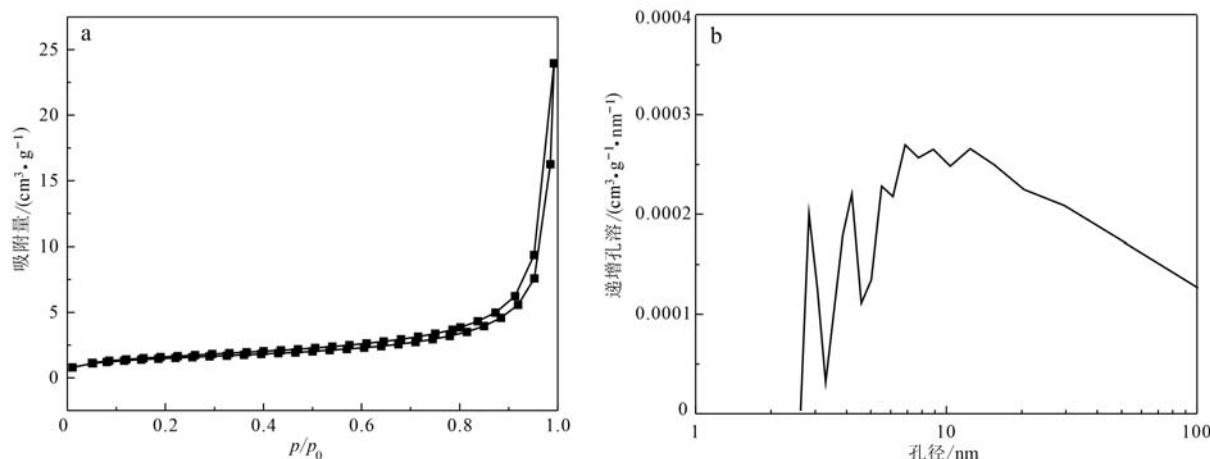


图 4 合成钾霞石粉体的氮气吸附/脱附等温线(a)和孔径分布曲线(b)

Fig. 4 Nitrogen adsorption /desorption isotherms(a) and pore size distribution curves(b) of synthetic kaliophilite

3 结论

本研究利用钾长石水热合成钾霞石所产碱性滤液和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 制备出了钾霞石。结果表明,最佳制备条件为 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶解时间为 1.5 h,晶化时间为 4 h,反应温度 280°C ,水碱比为 1.8,在此条件下制备的钾霞石白度高,热稳定性好,比表面积为 $5.18 \text{ m}^2/\text{g}^{-1}$,平均孔径为 32.98 nm 。

钾长石水热制备钾霞石所得碱性滤液和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 反应制备钾霞石,为钾长石水热制备钾霞石提供了一种改进思路,即向水热体系中补加 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 提高钾长石中 Si 的利用率,剩余滤液作为母液循环,使钾长石水热制备钾霞石工业化成为一种可能。

References

- Becerro A I, Escudero A and Mantovani M. 2009. The hydrothermal conversion of kaolinite to kalsilite: Influence of time, temperature, and pH[J]. *American Mineralogist*, 94(11~12): 1 672~1 678.
- Brooks K. 2021. Minerals explained 60[J]. *Geology Today*, 7(4): 153~158.
- Chen X, Chen J, Li M, *et al.* 2022. Synthesis of kaliophilite from high calcium fly ash: Effect of alkali concentration[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 17: e01542.
- Dimitrijevic R and Dondur V. 1995. Synthesis and characterization of KAlSiO_4 polymorphs on the SiO_2 - KAlO_4 join[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 115(1): 214~224.
- Fu J, Zhao Y, Chen J, *et al.* 2021. Study on the integrated roasting process of kalsilite ore- CaCl_2 - $2\text{H}_2\text{O}$ system[J]. *Minerals Engineering*, 172: 106996.
- Gong Decai and Wu Yue. 2023. Study method of ancient silk nanopores based on nitrogen adsorption[J]. *Conservation and Archaeological Science*, 35(1): 17~27(in Chinese with English abstract).
- Gupta P, Dwivedi S, van Duin A C T, *et al.* 2021. Coke resistant catalyst for hydrogen production in a versatile, multi-fuel, reformer[J]. *Journal of Catalysis*, 402: 177~193.
- Han Chenjing and Wang Yamei. 2014. Study on genesis of nephelinite-bearing jadeite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 581~590(in Chinese with English abstract).
- Liu X, Jiang J, Zhang H, Li M, *et al.* 2020. Thermal stability and microstructure of metakaolin-based geopolymer blended with rice husk ash[J]. *Applied Clay Science*, 196: 105769.
- Luo G, Chen J, Zou X, *et al.* 2022. Eu^{3+} doped $\text{K}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass ceramics containing KAlSiO_4 crystalline phase: Realizing red emission and high thermal stability[J]. *Optik*, 267: 169766.
- Ma Hongwen, Shen Jixue, Yang Jing, *et al.* 2017. Kaliophilite acidolysis hydrothermal crystallization of nano kaolinite[J]. *Journal of Silicates*, 45(5): 722~728(in Chinese with English abstract).
- Ru Guangchuan, Oyang Haibo, Zhou Zhenfeng, *et al.* 2020. A method for synthesizing mullite whiskers using kaliophilite as raw material: CN201810157513.1[P]. 2020-09-22(in Chinese with English abstract).
- Ru Guangchuan, Yi Songtao, Yu Fan, *et al.* 2017. Study on preparation of acid-soluble aluminum potassium silicate rod-like particles from po-

- tassium feldspar by hydrothermal method [J]. *Material Sciences*, 7(7): 666~673 (in Chinese with English abstract)
- Sabalaiuskiene A, Beganskiene A, Ishikawa K, *et al.* 2020. Lanthanide-doping effects on the formation of leucite KAlSi_2O_6 [J]. *Silicon*, 12(5): 1 213~1 223.
- Su Shuangqing, Cai Biya, Ma Hongwen, *et al.* 2011a. A Process for Preparing Agricultural Potassium Sulfate Using Kaliophilite Powder: CN102167365A [P]. 2011-08-31 (in Chinese with English abstract).
- Su Shuangqing, Ma Hongwen, Yang Jing, *et al.* 2011b. Method for hydrothermal synthesis of hexagonal kaliophilite using potassium feldspar powder: CN102030338A [P]. 2011-04-27 (in Chinese with English abstract).
- Su Shuangqing, Ma Hongwen, Yang Jing, *et al.* 2012. Hydrothermal synthesis and characterization of hexagonal kaliophilite from microcline powder [J]. *Journal of Silicates*, 40(1): 145~148 (in Chinese with English abstract).
- Wen G and Yan Z F. 2011. Kalsilite based biodiesel heterogeneous catalyst [J]. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 241.
- Wu Y, Liu X, Wang Y, *et al.* 2022. Decomposition of K-feldspar by potassium hydroxide solution in the hydrothermal system [J]. *Minerals Engineering*, 178: 107392.
- Xue Ziyin. 2021. Synthesis and Scale-up Study of High Crystallinity ZSM-22 Molecular Sieve [D]. Shanxi: Shanxi University (in Chinese with English abstract).
- Yantake R, Aierken P, Yusufu T, *et al.* 2023. Preparation of novel $\text{KAlSiO}_4: \text{Ce}^{3+}$ broadband cyan-emitting phosphors via partial cation substitution for applications in white-light LEDs [J]. *Ceramics International*, 49(10): 16 019~16 028.
- Yantake R, Sidike A and Yusufu T. 2020. Effect of Eu^{3+} doping on luminescence properties of a $\text{KAlSiO}_4: \text{Sm}^{3+}$ phosphor [J]. *Journal of Rare Earths*, 40(3): 390~397.
- Yin Jianjun, Xing Weijing, Li Yubo, *et al.* 2012. Factors affecting the crystallinity and grain size of ZSM-5 molecular sieve [J]. *Molecular Catalysis*, 26(2): 162~168 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zijian. 2019. Preparation method and soil conditioner: CN110330975A [P]. 2019-10-15 (in Chinese with English abstract)
- Yuan J Y, Ma H W, Luo Z, *et al.* 2020. Synthesis of KAlSiO_4 by hydrothermal processing on biotite syenite and dissolution reaction kinetics [J]. *Minerals*, 11(1): 36.
- Zheng Ji and Ma Hongwen. 2006. Preparation and characterization of kaliophilite by rapid sol-gel method [J]. *Journal of Rock Mineralogy*, 25(4): 341~344 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Ji and Ma Hongwen. 2007. Preparation of kaliophilite by rapid sol-gel method and its reaction mechanism [J]. *Journal of Beijing University of Science and Technology*, 29(1): 55~58 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Wen. 2016. Discussion on the characteristics and industrial application of Indian potassium feldspar [J]. *Foshan Ceramics*, 26(2): 32~36 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 龚德才, 吴玥. 2023. 基于氮气吸附法的古代丝织品纳米孔隙研究方法初探 [J]. *文物保护与考古科学*, 35(1): 17~27.
- 韩辰婧, 王雅玫. 2014. 含霞石翡翠的成因研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 33(3): 581~590.
- 马鸿文, 申继学, 杨静, 等. 2017. 钾霞石酸解-水热晶化纳米高岭石 [J]. *硅酸盐学报*, 45(5): 722~728.
- 茹广川, 欧阳海波, 周镇峰, 等. 2020. 一种以钾霞石为原料合成莫来石晶须的方法: CN1201810157513. 1 [P]. 2020-09-22.
- 茹广川, 伊松涛, 喻璠, 等. 2017. 水热法钾长石制取酸性硅酸铝棒状粒子的研究 [J]. *材料科学*, 7(7): 666~673.
- 苏双青, 蔡比亚, 马鸿文, 等. 2011a. 一种利用钾霞石粉体制取农用硫酸钾的工艺: CN102167365A [P]. 2011-08-31.
- 苏双青, 马鸿文, 杨静, 等. 2011b. 利用钾长石粉体水热合成六方钾霞石的方法: CN102030338A [P]. 2011-04-27.
- 苏双青, 马鸿文, 杨静, 等. 2012. 微斜长石粉体水热合成六方钾霞石及其表征 (英文) [J]. *硅酸盐学报*, 40(1): 145~148.
- 薛紫尹. 2021. 高结晶度 ZSM-22 分子筛的合成及放大研究 [D]. 山西: 山西大学.
- 尹建军, 邢伟静, 李玉波, 等. 2012. ZSM-5 分子筛结晶度及晶粒大小的影响因素 [J]. *分子催化*, 26(2): 162~168.
- 俞子俭. 2019. 一种土壤调理剂的制备方法和土壤调理剂: CN110330975A [P]. 2019-10-15.
- 郑骥, 马鸿文. 2006. 钾霞石快速溶胶-凝胶法制备及表征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 25(4): 341~344.
- 郑骥, 马鸿文. 2007. 快速溶胶凝胶法制备钾霞石及其反应机理 [J]. *北京科技大学学报*, 29(1): 55~58.
- 朱文. 2016. 浅谈印度钾长石的特性及其工业应用 [J]. *佛山陶瓷*, 26(2): 32~36.