

高炉渣合成 NaY 沸石及影响因素研究

黄 瑞, 车 帅*, 李雅侠, 张 谊, 孙世海, 刘彦超

(沈阳化工大学机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要:以高炉渣为硅源,利用碱融水热法并在导向剂的作用下合成 NaY 沸石分子筛。通过 XRD、SEM 和相对结晶度的计算等考察了 NaY 沸石合成过程中实验参数对沸石结晶效果的影响。结果表明,导向剂具有显著的诱导效果,晶化时间、晶化温度、晶化液中的硅铝摩尔比和碱度对相对结晶度都有显著影响。高炉渣合成 NaY 沸石分子筛的最佳条件为:晶化液中物质的摩尔比 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) : n(\text{SiO}_2) : n(\text{H}_2\text{O}) = 8 : 1 : 8 : 800$ 、晶化温度 100°C 、晶化时间 16 h、导向剂的质量分数 10% (导向剂与晶化液的质量比)、导向剂陈化时间 6 h。

关键词:高炉渣; NaY 型沸石; 碱融水热法; 废物利用; 结晶

中图分类号: TQ177.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)S1-0240-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S1.048

Synthesis of NaY zeolite from blast furnace slag and study on influencing factors

HUANG Rui, CHE Shuai*, LI Ya-xia, ZHANG Yi, SUN Shi-hai, LIU Yan-chao

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: Using blast furnace slag as the silicon source, NaY zeolite molecular sieve is synthesized via alkali melt hydrothermal method under the action of a guiding agent. The influence of experimental parameters on the crystallization effect of NaY zeolite during the synthesis process is investigated by means of XRD, SEM, and calculation of relative crystallinity. The results show that the guiding agent has a significant inducing effect. The crystallization time, crystallization temperature, the molar ratio of silicon to aluminum in the crystallization solution, and alkalinity all have a significant impact on the relative crystallinity. The optimal conditions for synthesizing NaY zeolite molecular sieve from blast furnace slag are as follows: $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) : n(\text{SiO}_2) : n(\text{H}_2\text{O}) = 8 : 1 : 8 : 800$ in the crystallization solution, the crystallization temperature is 100°C , the crystallization time is 16 hours, the mass ratio of the guiding agent to the crystallization solution is 10%, and the aging time of the guiding agent is 6 hours.

Key words: blast furnace slag; NaY zeolite; alkali melt hydrothermal method; wastes utilization; crystal

高炉渣占钢铁行业废弃物的一半,在国内每年产生量约为 3 亿 t^[1]。国内目前对高炉渣的主要利用方式为制备无机肥料、陶瓷材料、玻璃和水泥等^[2-5],其中用作水泥原料占 90%^[6]。国内高炉渣产量基数过大,每年仍然有大量的高炉渣因没有合理利用而作为固体废弃物造成环境污染,所以开发对高炉渣的新利用方式是有必要的。

高炉渣中含有一定量的硅铝元素,可以作为合成硅铝酸盐的原料。Duan 等^[7]和 Kuwahara 等^[8]用高炉渣酸洗的滤液制备水滑石,高炉渣酸洗之后剩下的是纯度较高的硅凝胶。硅凝胶可以作为硅源合成沸石,实现对高炉渣的合理利用。何茂成等^[9]利用高炉渣作硅源,用水热法合成 A 型沸石分子筛。Guo 等^[10]也以高炉渣为原料合成了 NaA 型沸石。牟彤彤^[11]以高炉渣为原材料制备出 X 型沸石分

子筛。

Y 型沸石分子筛为八面立方体结构,具有畅通的三维微孔孔道和良好的热稳定性。从结构上看, Y 型沸石具备吸附剂和催化剂的客观条件^[12]。Wang 等^[13]以 NaY 为材料制备了 Pb/NaY 催化剂,用来催化碳酸二甲酯。NaY 沸石作为吸附剂吸附温室气体的同时也可以作为离子吸附剂^[14-16]。将高炉渣用于制备 NaY 沸石的硅源,可以将废弃物高炉渣得到合理充分的利用,且 NaY 沸石分子筛在合成条件上比 A 型和 X 型宽泛。

笔者将高炉渣作为合成 NaY 沸石分子筛的硅源,考察了分子筛合成过程中导向剂的质量分数、导向剂陈化时间、晶化时间、晶化液中硅铝摩尔比、晶化温度和晶化液中的碱度对相对结晶度的影响,并确定了最适宜的晶化条件。

收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-06-24

基金项目: 辽宁省青年科技人才“育苗”项目(LQ2020016)

作者简介: 黄瑞(1995-),男,硕士研究生,研究方向为高炉渣的废物利用,13147135053@163.com; 车帅(1986-),男,博士,讲师,研究方向为矿产资源/工业废渣的资源化,通讯联系人,cesuai@163.com。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

主要实验材料如表 1 所示。

表 1 实验材料和生产厂家

药品名称	生产厂家
高炉渣	鞍山钢铁集团公司鲅鱼圈分厂
浓盐酸(36%~38%)	沈阳市派尔精细化工制品厂
硅溶胶[$\omega(\text{SiO}_2) > 30\%$]	广州穗欣化工有限公司
NaAlO_2 [$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3) > 45\%$]、 氢氧化钠[$\omega(\text{NaOH}) > 96\%$]	上海国药集团化学试剂有限公司

主要实验仪器如表 2 所示。

表 2 实验仪器及制造商

仪器名称	型号	生产厂家
箱式实验电炉	SXL-1700	中国科学院上海光学精密机械研究所
断水自控蒸馏水器	DZ-5L	北京中兴伟业世纪仪器有限公司
数显恒温磁力搅拌器	HJ-4A	常州荣华仪器制造有限公司
循环水真空泵	SHZ-D III	巩义市予华仪器有限责任公司
电热鼓风干燥箱	101-1ES	北京市永光明医疗仪器有限公司

1.2 实验步骤

1.2.1 导向剂的制备

将称量好的 NaAlO_2 、 NaOH 溶解于去离子水中。在剧烈搅拌下将 NaAlO_2 和 NaOH 水溶液缓慢加入经过稀释的硅溶胶,继续搅拌 30 min 后于室温进行陈化。按照母液物质摩尔比为 $n(\text{SiO}_2) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 15$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 22$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{H}_2\text{O}) = 11 : 160$ 配制导向剂。

1.2.2 合成步骤

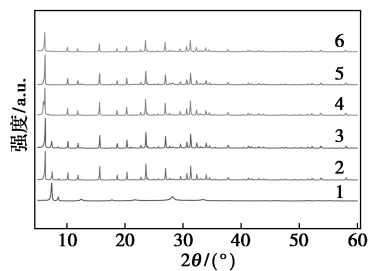
称取一定量磨至 200 目以下的高炉渣,加入盐酸在 60°C 下进行恒温水浴加热搅拌 2 h,得到硅凝胶。用真空泵将硅凝胶抽滤洗涤至中性,用干燥箱烘干,研磨至粉末。称取一定量的 NaOH 和干燥研磨后的硅凝胶粉末,混合均匀后放入坩埚,再送进高温炉中进行高温碱融。将碱融冷却之后的硅凝胶粉末和一定 NaAlO_2 分别溶于去离子水中,在 60°C 水浴加热条件下,让 2 种溶液相互混合,搅拌 30 min。搅拌完成后加入一定质量分数的导向剂,装入聚乙烯瓶放入 90°C 恒温箱中晶化 4~24 h 后,得到白色沉淀,经过滤、干燥、洗涤和烘干,即得到 Y 型沸石。其中晶化液中物质的摩尔比为 $n(\text{SiO}_2) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4 \sim 24$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4 \sim 12$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) :$

$n(\text{H}_2\text{O}) = 68 \sim 200$ 。

2 分析与讨论

2.1 导向剂质量分数的影响

晶化过程中所加入不同质量分数导向剂形成的 NaY 沸石的 XRD 图如图 1 所示,晶化液中物质的摩尔比为 $n(\text{SiO}_2) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 12$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{H}_2\text{O}) = 100$ 。导向剂质量分数与相对结晶度的关系如图 2 所示。从图 1 中可以看出,没有加入导向剂时,没有出现 NaY 沸石的特征衍射峰;有导向剂加入的实验组中,可以观察到 NaY 沸石的特征衍射峰,且从图 2 中可知,相对结晶度较高,说明导向剂在 NaY 沸石结晶的过程中充分发挥结构导向功能。与未加导向剂的对照组相比,加入质量分数为 2.5% 导向剂的实验组的相对结晶度迅速提高。因为加入的导向剂为 NaY 沸石的晶化提供了类似晶种功能的胶粒,加速了晶化速度,同时起到定向晶化的作用。从图 2 可知,当导向剂的质量分数为 10% 时,相对结晶度会达到峰值。之后相对结晶度会随着导向剂质量分数的继续增加出现下降趋势,对应于图 1 中 NaY 沸石的特征衍射峰强度减弱。主要是导向剂的使用比例增加,导致母液的整体碱度提高,碱度的提高会让硅铝酸盐聚合度降低,导致晶化速度加快。当碱度过高时,则降低了 Y 沸石的相对结晶度。



1—0%; 2—2.5%; 3—5%; 4—7.5%; 5—10%; 6—12.5%

图 1 加入不同质量分数导向剂 NaY 分子筛的 XRD 图

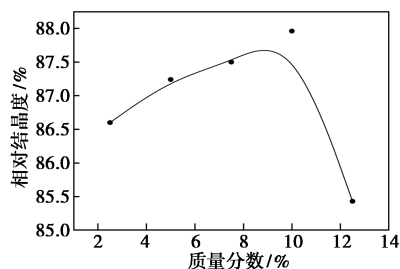
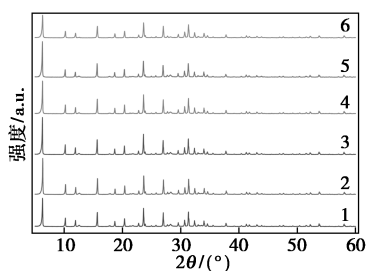


图 2 导向剂质量分数与相对结晶度的关系

2.2 导向剂陈化时间的影响

NaY 沸石分子筛的相对结晶度最高时,导向剂的质量分数为 10%。导向剂质量分数为 10%时,不同陈化时间的导向剂制备 NaY 沸石分子筛的 XRD 图谱如图 3 所示。由图 3 可知,陈化时间 3~24 h 范围内的导向剂都能在 XRD 中观察到 NaY 沸石分子筛的特征衍射峰。所以陈化时间在 3~24 h 的导向剂都具有对 NaY 型沸石分子筛结构的导向作用。在导向剂的铝硅酸盐体系中,真正起导向作用的是具有沸石骨架结构的胶粒,其以聚集的形式存在于导向剂中。这导致在刚生成的导向剂中会存在胶粒分布不均匀的情况,从而影响相对结晶度。随着陈化时间增加,以聚集形式存在的胶粒会进一步分散开来,具有初级沸石骨架结构的胶粒在整个导向剂中分散更均匀、结构更稳定,结构导向作用也会增强,导向剂也会从最开始的白色胶体向半透明的胶体转变。当陈化时间超过 18 h,NaY 沸石分子筛的衍射峰强度开始减弱,说明导向剂的结构导向作用明显地开始减弱,导向剂也会从半透明胶体状态转变为浑浊。原因是之前较为均匀地分散在胶体中的胶粒开始重新聚合,导致可作为晶核的胶粒数目较低,造成导向剂对 NaY 分子筛的导向作用开始降低。导向剂相对结晶度与陈化时间的关系如图 4 所示。从图 4 中可以看出,18 h 时相对结晶度和 6 h 的相对结晶度非常接近,考虑时间成本,最适宜的导向剂陈化时间为 6 h。



1—3 h;2—6 h;3—9 h;4—12 h;5—18 h;6—24 h

图 3 不同陈化时间导向剂制备的 NaY 分子筛的 XRD 图

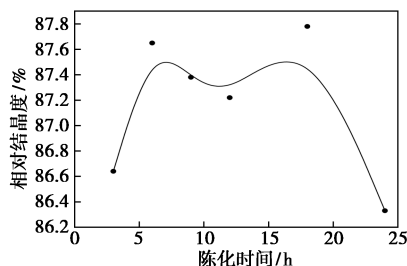
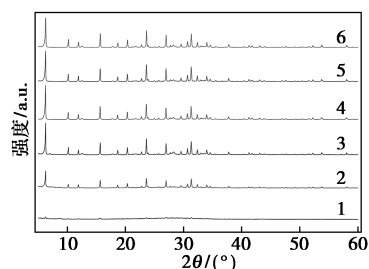


图 4 导向剂陈化时间与相对结晶度的关系

2.3 晶化时间的影响

质量分数为 10%、陈化时间 6 h 为导向剂的最合适使用条件。采用晶化液中物质的摩尔比为 $n(\text{SiO}_2) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 12$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{H}_2\text{O}) = 100$,考察不同晶化时间对导向剂相对结晶度的影响。不同晶化时间合成的 NaY 分子筛的 XRD 谱图如图 5 所示。从图 5 中可以看出,晶化时间为 4 h 时,没有 NaY 沸石分子筛的特征衍射峰出现;晶化时间为 8 h 时开始出现强度不高的特征衍射峰;在晶化时间为 12 h 之后,NaY 分子筛的特征衍射峰开始平稳且高强度出现。因此,0~8 h 是 NaY 分子筛的诱导期,12 h 之后是平稳期。8~24 h 晶化时间下的 NaY 分子筛的相对结晶度如图 6 所示。从图 6 中可以看出,相对结晶度随着晶化时间的延长而先升高后降低,这是由于出现了转晶和晶体溶蚀。Yuwen 等^[17]用纯试剂合成沸石时也出现过类似现象。因此最合适的晶化时间为 16 h。



1—4 h;2—8 h;3—12 h;4—16 h;5—20 h;6—24 h

图 5 不同晶化时间合成的 NaY 分子筛的 XRD 图

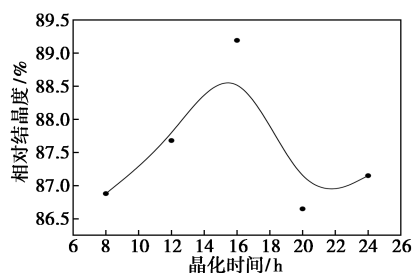
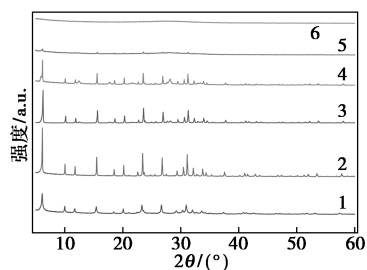


图 6 晶化时间与相对结晶度的关系

2.4 硅铝摩尔比的影响

固定导向剂质量分数为 3%、陈化时间为 6 h 以及晶化时间为 16 h,控制晶化液中的碱度, $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}) : n(\text{H}_2\text{O}) = 100$,不同 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 合成的 NaY 沸石分子筛的 XRD 图如图 7 所示。从图 7 中可以看出, $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 在 4~16 的范围内都能观察到 NaY 沸石的

特征衍射峰。在 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4$ 时开始出现 NaY 沸石的特征衍射峰。在 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 时特征衍射峰最明显,且相对结晶度最高。 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 范围为 8~16 时,NaY 沸石的分子筛的特征衍射峰强度依次减弱;当 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 20$ 时,NaY 沸石的特征衍射峰彻底消失。因为 NaY 沸石结晶过程中会受到晶化动力学的影响,当 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 过大,会降低晶化的速率常数,导致晶化难度增大。 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4$ 时,NaY 特征峰的衍射强度也偏弱,这是由于未参加晶化的硅铝凝胶存在于反应产物中导致相对结晶度低。故晶化液中最合适的 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 。晶化液中 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与相对结晶度的关系见图 8。



$n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$: 1—4; 2—8; 3—12; 4—16; 5—20; 6—24

图 7 不同 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 合成的 NaY 分子筛的 XRD 图

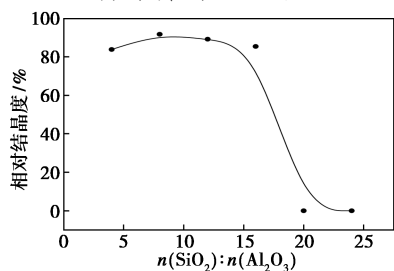
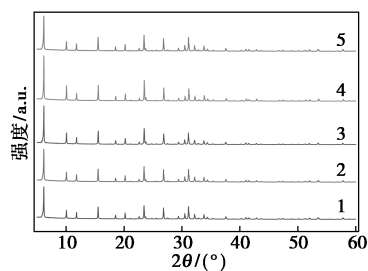


图 8 晶化液中 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与相对结晶度的关系

2.5 晶化温度的影响

在导向剂质量分数为 10%、陈化时间为 6 h、 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 以及晶化时间为 16 h 的条件下,通过控制不同结晶温度得到 NaY 沸石分子筛的 XRD 图如图 9 所示。从图 9 中可以看出,在 70~110℃ 温度区间内能明显观察到 NaY 沸石分子筛的特征峰。同时在 70~100℃ 区间内,沸石的特征衍射峰强度随着温度的提高而增强;在 100℃ 以后,特征峰强度开始减弱。晶化温度与相对结晶度的关系如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在 70~100℃ 范围内,NaY 沸石的相对结晶度也呈现上升的趋势,在

100℃ 时相对结晶度达到峰值后开始下降。在晶体学上,结晶温度越高可以在动力学上一定范围内增加结晶度,但温度过高会导致 P 型沸石的杂晶增加,导致 NaY 分子筛的结晶度降低。相对结晶度的变化趋势和 NaY 分子筛特征峰衍射强度相互佐证,用高炉渣合成 NaY 沸石分子筛的最佳晶化温度为 100℃。



1—70℃; 2—80℃; 3—90℃; 4—100℃; 5—110℃

图 9 不同结晶温度下得到的 NaY 分子筛的 XRD 图

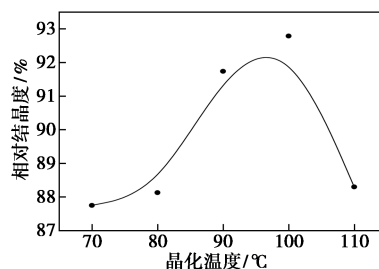
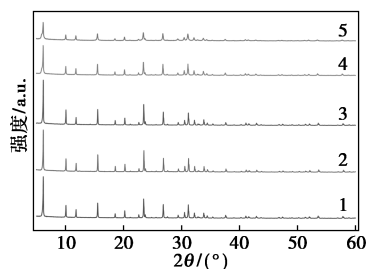


图 10 晶化温度与相对结晶度的关系

2.6 晶化碱度的影响

在导向剂质量分数为 10%、陈化时间为 6 h、晶化时间为 16 h、晶化温度为 100℃ 以及 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 条件下,不同碱度 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的条件下合成的 NaY 沸石分子筛的 XRD 图如图 11 所示。从图 11 中可以看出,当 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 在 4~8 的范围之内,特征峰的衍射强度随碱度的增加缓慢地增强;当 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) > 8$ 时,NaY 沸石分子筛的特征峰的衍射强度降低。晶化液中 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与相对结晶度的关系如图 12 所示。从图 12 中可以看出,相对结晶度随着碱度的增加呈现先增加后减小的趋势,与 XRD 图中 NaY 沸石分子筛特征衍射峰强度变化一致。在 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) < 8$ 时,相对结晶度随碱度的增加而增加,主要因为沸石分子筛的晶化过程需要碱性环境,当碱度低时,会增加晶化过程中 NaY 沸石分子筛的生长期,相同时间内的相对结晶度就会下降。在 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) > 8$ 时,相对结晶度随着碱度的增加而降低的原因是,高碱度会降低晶化液中胶体

的硅铝元素的聚合度,导致同段时间内高碱度的晶化液中 NaY 沸石分子筛的结晶度低。故最佳碱度为 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$ 。



1— $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4$; 2— $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 6$;
3— $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 8$; 4— $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 10$;
5— $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 12$

图 11 不同 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 得到的 NaY 分子筛的 XRD 图

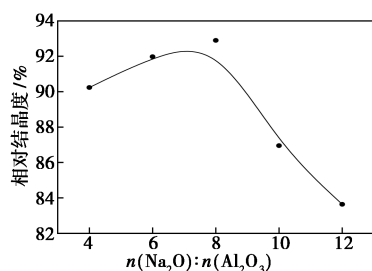


图 12 晶化液中 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与相对结晶度的关系

2.7 SEM 分析

最佳条件合成的 NaY 沸石的 SEM 图如图 13 所示。从图 13 中可以看出,在 5 000 倍下可以清楚地观察到,最佳合成条件下制备的 NaY 沸石分子筛颗粒尺寸均匀,且没有出现晶粒团聚的现象。10 000 倍的图片清晰地展现了 NaY 沸石分子筛的立方晶体结构,结晶情况良好,单个晶粒的边界清晰,没有杂质残留,表明该实验条件下 NaY 沸石分子筛合成情况理想。

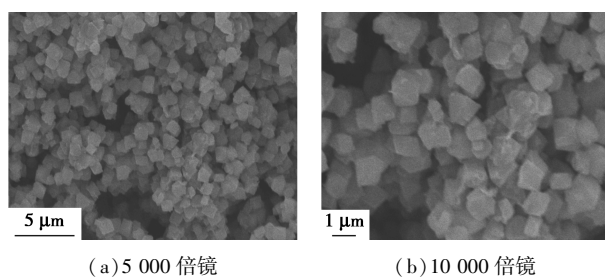


图 13 最佳条件合成的 NaY 沸石的 SEM 图

3 结论

在处理高炉渣废弃物的基础上,探究了高炉渣

合成 NaY 沸石的可行性和实验适宜条件。

以高炉渣为原材料,通过碱融水热法合成 NaY 沸石分子筛的最佳条件为:导向剂[物质摩尔比 $n(\text{SiO}_2):n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 15$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}):n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 22$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O}):n(\text{H}_2\text{O}) = 11:160$]最佳质量分数为 10%,最佳陈化时间为 6 h,最佳 NaY 沸石分子筛的摩尔比为 $n(\text{Na}_2\text{O}):n(\text{Al}_2\text{O}_3):n(\text{SiO}_2):n(\text{H}_2\text{O}) = 8:1:8:800$,最佳晶化时间为 16 h,最佳晶化温度为 100℃。

参考文献

- [1] 张立生,李慧,张汉鑫,等.高炉渣的综合利用及展望[J].热加工工艺,2018,47(19):20-24.
- [2] 汤鉴淮,于敬雨,马北越,等.高炉渣的高附加值利用研究现状[J].耐火与石灰,2022,47(4):24-29.
- [3] 王宝祥,侯艳娜,沈毅,等.利用高炉渣制备玻璃体的配方及熔融温度研究[J].当代化工研究,2022,(15):31-33.
- [4] 张明涛,谭克锋,赵敏.无熟料高炉矿渣水泥的物料配比与性能的关系[J].西南科技大学学报,2011,26(2):32-35.
- [5] Liu Y,Zhang C,Zong N.Green and high efficiency preparation of silicon fertilizer with blast furnace slags[J].Conservation and Utilization of Mineral Resources,2018,(5):126-130,138.
- [6] 朱广宇.钢铁渣处理的意义和综合利用[J].化学工程与装备,2015,(3):237-238.
- [7] Duan W,Li G,Wang Z,et al.Highly efficient production of hydro-talcite-like compounds from blast furnace slag[J].Applied Clay Science,2022,219:106441.
- [8] Kuwahara Y,Yamashita H.A new catalytic opportunity for waste materials:Application of waste slag based catalyst in CO₂ fixation reaction[J].Journal of CO₂ Utilization,2013,1:50-59.
- [9] 何茂成,张建良,国宏伟,等.高炉渣合成 NaA 沸石及影响因素[J].硅酸盐学报,2015,43(11):1617-1624.
- [10] Guo H,Tang L,Yan B,et al.NaA zeolite derived from blast furnace slag:Its application for ammonium removal[J].Water Science and Technology,2017,76(5):1140-1149.
- [11] 牟彤彤.高炉渣制备 13X 沸石分子筛及其吸附性能的研究[D].沈阳:东北大学冶金学院,2017.
- [12] Firouzjaie M H,Taghizadeh M.Synthesis procedure and industrial applications of NaY zeolite for various processes: A review[J].Mini-Reviews in Organic Chemistry,2020,17(7):795-804.
- [13] Wang C,Xu N,Liu T T,et al.Mechanical pressure-mediated Pd active sites formation in NaY zeolite catalysts for indirect oxidative carbonylation of methanol to dimethyl carbonate[J].Journal of Catalysis,2021,396:269-280.
- [14] 孙锋,王晨阳,罗聪,等.合成 NaY 型沸石的 CO₂ 吸附特性[J].洁净煤技术,2021,27(3):225-231.
- [15] Cheng T H,Sankaran R,Show P L,et al.Removal of protein wastes by cylinder-shaped NaY zeolite adsorbents decorated with heavy metal wastes [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2021,185:761-772.
- [16] Bu N,Liu X,Song S,et al.Synthesis of NaY zeolite from coal gangue and its characterization for lead removal from aqueous solution[J].Advanced Powder Technology,2020,31(7):2699-2710.
- [17] Yuwen L L,Zhu M F,Su H B,et al.Effects of synthesis parameters on hydrothermal synthesis of NaA zeolite[J].Adv Mater Res,2010,148/149:1444-1448. ■