文章编号:1008-1542(2020)02-0164-08

分子筛吸附VOCs与微波脱附性能研究

刘 倩[1],杜 昭[1,2,3],张美然[1]

(1.河北科技大学环境科学与工程学院,河北石家庄 050018;2.挥发性有机物与恶臭污染防治技术国家地方联合工程研究中心,河北石家庄 050018;3.河北省大气污染防治技术研究推广中心,河北石家庄 050018)

摘 要:为筛选适于吸附VOCs与微波脱附的分子筛,并研究其孔径、铝氧四面体、平衡阳离子等性能的影响因素,采用7种吸附剂(K-A,Na-A,Ca-A,Ca-X,Na-X,Na-Y和Na-ZSM5沸石分子筛)和3种VOCs吸附质(苯、甲醇、正己烷)进行了实验研究,利用BET,XRD表征方法对分子筛的孔径、比表面积、孔容和晶胞参数等进行了测试。结果表明:分子筛孔径较大、VOCs极性较大时,吸附量较高;采用不同铝氧四面体结构含量(Na-X,Na-Y,Na-A和Na-ZSM5)及不同平衡阳离子(K-A,Na-A,Ca-A和Ca-X,Na-X)分子筛进行微波脱附时,铝氧四面体结构含量高的分子筛更适用于微波脱附,平衡阳离子为Na^+的分子筛吸波能力强于K^+和Ca^{2+};经5次循环静态吸附、微波脱附,分子筛微波脱附的结构性能稳定。研究成果可为分子筛吸附VOCs与微波脱附新方法的工业化应用提供重要参考。

关键词:催化化学;吸附;分子筛;吸附质;微波脱附

中图分类号:X511 **文献标识码**:A **doi**:10.7535/hbkd.2020yx02006

Study on adsorption properties of zeolites for VOCs and microwave desorption

LIU Qian[1], DU Zhao[1,2,3], ZHANG Meiran[1]

(1.School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2.National Local Joint Engineering Research Center for Volatile Organic Compounds and Odorous Pollution Control Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3.Hebei Provience Air Pollution Prevention and Control Technology Resecrch and Extension Center, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to screen zeolites suitable for adsorption of VOCs and microwave desorption, and to study the performance influencing factors such as pore size, aluminum-oxygen tetrahedron, balanced cations, seven kinds of adsorbents (K-A, Na-A,

收稿日期:2020-01-08;修回日期:2020-03-27;责任编辑:王淑霞

基金项目:河北省科技厅重点研发计划项目(19273709D)

第一作者简介:刘 倩(1994—),女,山西临汾人,硕士研究生,主要从事大气污染控制工程方面的研究。

通讯作者:杜 昭副教授。E-mail: duzhao12@163.com

刘倩,杜昭,张美然.分子筛吸附VOCs与微波脱附性能研究[J].河北科技大学学报,2020,41(2):164-171.

LIU Qian, DU Zhao, ZHANG Meiran.Study on adsorption properties of zeolites for VOCs and microwave desorption[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2020,41(2):164-171.

Ca-A, Ca-X, Na-X, Na-Y and Na-ZSM5 zeolites) and three kinds of VOCs adsorbent (benzene, methanol, n-hexane) were experimentally studied, and the pore size, specific surface area, pore volume and cell parameters of the zeolite were tested by BET and XRD characterization methods. The results show that the adsorption capacity is higher when the pore size of the zeolite is larger and the polarity of the VOCs is larger; when different aluminum-oxygen tetrahedral structure content (Na-X, Na-Y, Na-A and Na-ZSM5) and different balanced cations (K-A, Na-A, Ca-A and Ca-X, Na-X) zeolites microwave desorption are used, the zeolites with a high content of aluminum-oxygen tetrahedron structure is more suitable for microwave desorption, and the zeolites with a balanced cation of Na^+ is stronger than with K^+ and Ca^{2+}, after 5 cycles of static adsorption and microwave desorption, the zeolites microwave desorption has stable structure and performance. The research results can provide important reference for the industrial application of the new method of zeolites adsorption of VOCs and microwave desorption.

Keywords: catalysis chemistry; adsorption; zeolites; adsorbate; microwave desorption

挥发性有机化合物(VOCs)是指常温下饱和蒸汽压大于 70 Pa、常压下沸点在 260 ℃ 以下的有机化合物。这类有机化合物一般具有特殊的气味和毒性，相当一部分还有致癌、易燃、易爆炸等特点，也是造成灰霾、光化学烟雾等大气环境问题的重要因素。总之，VOCs 的排放对人体健康、生态环境都造成了严重危害。因此，去除 VOCs 在环境保护中成为亟待解决的问题之一[1-2]。

吸附法处理 VOCs 因操作简单、技术成熟、去除效率高等特点而得到广泛应用，它是通过利用多孔性吸附剂来去除 VOCs 的。吸附剂的比表面积和孔径等物理性质不同，对 VOCs 的吸附效果也不同，其中沸石分子筛和活性炭是最常用的 VOCs 吸附剂[3-8]。吸附剂能否快速、高效脱附也是影响其工业化应用的关键。许多研究表明微波辐射因加热均匀、节能高效、选择性加热使其在吸附剂再生中具有独特优势[9-11]。李智等[12]从吸附温度、湿度、进气浓度和吸附质物理性质等方面进行了探讨，研究表明，Na-Y 分子筛对邻二甲苯、乙酸乙酯、丙酮等 VOCs 的吸附性能存在差异。FAYAZ 等[13]利用活性炭吸附质比较了微波脱附和热脱附的能耗和脱附效率，结果表明微波脱附性能优于热脱附。常仁芹等[14]的研究结果表明，Y 型分子筛可在较短时间内完成微波脱附酮类 VOCs，脱附效率达到 90%以上，且分子筛上 VOCs 残留量少。SHARIATY 等[15]研究了单价和二价阳离子(Li^+，K^+，Ca^{2+}，Cu^{2+} 和 Ba^{2+})对 ETS-10 分子筛进行离子交换后的微波脱附性能，结果表明，平衡阳离子为 Li^+ 的 Li-ETS-10 分子筛更适用于微波脱附。前人的研究已经初步证实了微波脱附是快速、高效、低能耗的，在吸附剂的脱附再生方面有很好的应用前景[16-19]。现有相关研究所用到的分子筛种类仍较少，且对吸附剂吸波能力的研究很少。本文采用静态吸附法[20]，比较了 A 型和 X 型分子筛(K-A，Na-A，Ca-A，Ca-X 和 Na-X)对 3 种不同极性 VOCs(苯、甲醇、正己烷)的吸附容量。采用微波脱附法研究了不同铝氧四面体结构含量分子筛(Na-X，Na-Y，Na-A，Na-ZSM5)、不同平衡阳离子的分子筛(Na-A，K-A，Ca-A 和 Na-X，Ca-X)及不同极性的 VOCs(苯、甲醇、正己烷)的脱附效果，进一步明确了影响吸附剂吸波能力的因素，为推动吸附剂微波再生工业化的发展提供重要数据参考。

1　实验部分

1.1　实验材料

实验用的有机溶剂及分子筛见表 1。

表 1　实验所用有机溶剂及分子筛

Tab.1　Organic solvents and zeolites used in the experiment

材料	纯度	生产厂家
苯	分析纯	天津永大化学试剂有限公司
甲醇	分析纯	天津永大化学试剂有限公司
正己烷	分析纯	天津永大化学试剂有限公司
K-A 分子筛	优级纯	河南巩义市腾龙水处理有限公司
Na-A 分子筛	优级纯	河南巩义市腾龙水处理有限公司
Ca-A 分子筛	优级纯	河南巩义市腾龙水处理有限公司
Ca-X 分子筛	优级纯	河南巩义市腾龙水处理有限公司
Na-X 分子筛	优级纯	河南巩义市腾龙水处理有限公司
Na-Y 分子筛	优级纯	天津津元立化工有限公司
Na-ZSM5 分子筛	优级纯	天津津元立化工有限公司

1.2 分子筛的表征

分子筛孔径、比表面积、孔容采用NOVA2000e比表面和孔径分布分析仪测定，比表面积采用BET法计算。XRD表征采用日本理学公司提供的D/MAX2500PC型X射线衍射仪，Cu Kα射线，管电压40 kV，管电流40 mA，扫描范围0°～50°。

1.3 静态吸附VOCs及微波脱附

分子筛的活化：将分子筛置于150 ℃的烘箱中活化4 h，去除分子筛表面吸附的杂质和水分。

VOCs的静态吸附：将3个200 mL烧杯分别称取150 mL苯、甲醇、正己烷，再分别将这3个烧杯放入干燥器(直径240 mm)中，待其充分挥发后将称取各5 g的K-A，Na-A，Ca-A，Ca-X和Na-X分子筛分别放入表面皿中，将盛有分子筛的表面皿分别放入含有VOCs的干燥器中。在不改变称重质量的情况下，每隔1 h对放有分子筛的表面皿称重。当称重的质量不再发生变化时说明分子筛的吸附达到饱和，此时取出分子筛，保存在密封袋密封。

用于分子筛微波脱附的微波样品处理系统(MD6C-8H)由北京盈安美诚科学仪器有限公司提供，分析天平由赛多利斯科学仪器(北京)有限公司提供。

微波脱附：对不同铝氧四面体含量(Na-X，Na-Y，Na-A，Na-ZSM5)及不同平衡阳离子(K-A，Na-A，Ca-A和Ca-X，Na-X)分子筛进行微波脱附，将吸附饱和的分子筛放入微波样品处理系统(频率2 450 MHz)，微波功率为1 200 W，由常温25 ℃开始加热。每1 min取出并称重，质量不再变化时，说明分子筛达到脱附平衡。分子筛的脱附效率通过式(1)计算得出：

$$R_i=\frac{m_{eq}-m_i}{m_{eq}-m_0}。\tag{1}$$

式中：R_i为i时刻下分子筛的脱附效率，%；m_{eq}为吸附饱和的分子筛的质量，g；m_0为吸附前分子筛的质量，g；m_i为经微波处理i min时分子筛的质量，g。

分子筛的脱附速率通过式(2)计算得出：

$$r_i=m_i-m_{(i-1)}。\tag{2}$$

式中：r_i为i时刻下分子筛的脱附速率，g/min；m_i为经微波处理i min时分子筛的质量，g；$m_{(i-1)}$为经微波处理$(i-1)$ min时分子筛的质量，g。

2 实验结果

2.1 分子筛表征和VOCs物性参数

分子筛孔径、比表面积和孔容等物性表征数据见表2，VOCs物性参数见表3。

表2 吸附剂物理性能参数

Tab.2 Physical property parameters of the adsorbent

分子筛	平均孔径/nm	比表面积/($m^2\cdot g^{-1}$)	孔容/($cm^3\cdot g^{-1}$)
K-A	0.32	437.1	0.175
Na-A	0.37	462.5	0.116
Ca-A	0.65	472.3	0.147
Ca-X	0.98	532.6	0.215
Na-X	1.01	568.3	0.232
Na-Y	0.74	502.4	0.190
Na-ZSM5	0.52	469.2	0.137

表3 VOCs物理性能参数

Tab.3 Physical property parameters of VOCs

VOCs	相对分子质量	沸点/℃	动力学直径/nm	极性
苯	78	80.1	0.53	3.00
甲醇	32	64.7	0.38	6.60
正己烷	86	69.0	0.49	0.06

2.2　分子筛的吸附性能

图 1、图 2、图 3 分别是 K-A，Na-A，Ca-A，Ca-X 和 Na-X 5 种分子筛对苯、甲醇、正己烷的静态吸附曲线。可以看出，Na-X，Ca-X，Ca-A 对苯、甲醇、正己烷 3 种 VOCs 的吸附量明显高于 Na-A 和 K-A。由表 2 和表 3 可知，Na-X，Ca-X，Ca-A 分子筛孔径大于苯、甲醇、正己烷 3 种 VOCs 分子动力学直径，Na-A 和 K-A 分子筛孔径小于这 3 种 VOCs 分子的动力学直径。分子筛的吸附性能与其规整的孔道结构密切相关，当 VOCs 的动力学直径小于分子筛孔径时，VOCs 分子容易进入分子筛的孔道内而被吸附。但是由于分子筛骨架存在超笼结构，因此一些直径较大的 VOCs 分子也可以进入分子筛孔道，只是吸附量会低于吸附直径小的 VOCs 分子[21]。

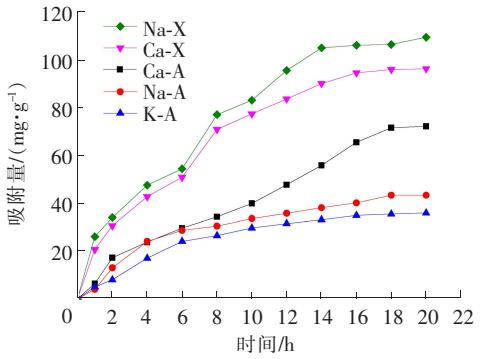


图 1　分子筛对苯的静态吸附曲线

Fig.1　Static adsorption curve of zeolites for benzene

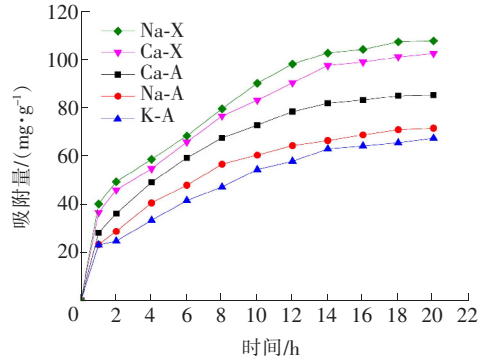


图 2　分子筛对甲醇的静态吸附曲线

Fig.2　Static adsorption curve of zeolites for methanol

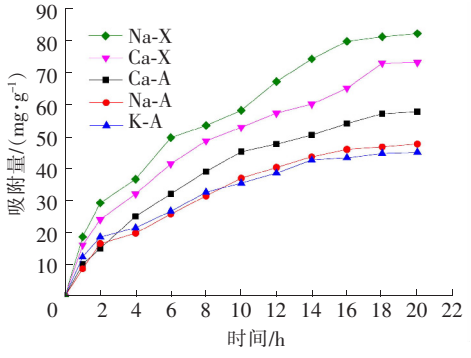


图 3　分子筛对正己烷的静态吸附曲线

Fig.3　Static adsorption curve of zeolites for *n*-hexane

表 4 为 Ca-A，Ca-X 和 Na-X 分子筛对 3 种 VOCs 的吸附性能。由表 4 可知，3 种分子筛对苯、甲醇、正己烷的吸附效果均是 Na-X＞Ca-X＞Ca-A，且 3 种分子筛均对极性大的 VOCs 吸附量高，VOCs 的极性顺序为甲醇＞苯＞正己烷，说明 VOCs 分子极性相对较大时，分子筛吸附量较大。虽然动力学直径小于分子筛孔径的 VOCs 分子都可以进入孔内，但由于分子极性不同，在分子筛孔道中的扩散效果也会不同，这是因为分子筛存在带电荷的骨架结构和平衡阳离子使其表面产生静电诱导作用，而易吸附极性较强的 VOCs 分子。所以，极性越强或者越易极化的 VOCs，越容易被吸附[22]。

综上所述，分子筛的吸附量与其孔径及 VOCs 极性有关。小于分子筛孔径的 VOCs 可以自由地进入分子筛孔道而被吸附，且 VOCs 的极性越大越容易被分子筛吸附。

表 4　3 种分子筛对 3 种 VOCs 的吸附性能

Tab.4　Adsorption of three kinds of zeolites on three kinds of VOCs

VOCs	分子筛	饱和吸附量/(mg·g^{-1})
甲醇	Ca-A	82.7
	Ca-X	101.7
	Na-X	109.8
苯	Ca-A	69.8
	Ca-X	94.2
	Na-X	102.9
正己烷	Ca-A	58.3
	Ca-X	72.6
	Na-X	81.6

2.3 分子筛铝氧四面体结构含量对微波脱附性能的影响

图4是在1 200 W功率下，4种分子筛Na-X，Na-Y，Na-A，Na-ZSM5的微波脱附效率及速率曲线。由图4可知，Na-X，Na-Y，Na-A分子筛脱附效率均可达到90%以上，而Na-ZSM5分子筛仅为85%左右。4种分子筛Na-X，Na-Y，Na-A和Na-ZSM5达到脱附平衡所需时间分别为10，13，15和17 min，脱附平衡时间长短顺序为Na-ZSM5＞Na-A＞Na-Y＞Na-X，脱附速率顺序为Na-ZSM5＜Na-A＜Na-Y＜Na-X。由此得知Na-X分子筛脱附速率及脱附效率均为最优。

分子筛脱附效率和脱附速率之所以不同是因为其介电性能的不同[23]。分子筛吸收微波场的电磁能并将其转化为热能，此能力取决于分子筛的介电特性(介电常数和介电损耗)[24]，而介电特性与其带负电荷的铝氧四面体结构和平衡阳离子有关，分子筛中铝氧四面体结构含量不同：Na-X($Na_{86}[(AlO_2)_{86}(SiO_2)_{106}]\cdot xH_2O$)＞Na-Y($Na_{56}[(AlO_2)_{56}(SiO_2)_{136}]\cdot xH_2O$)＞Na-A($Na_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]\cdot xH_2O$)＞Na-ZSM5($Na_3[(AlO_2)_3(SiO_2)_{93}]\cdot xH_2O$)，使其所带的负电荷及平衡阳离子在其结构中的数量不同，因分子筛介电性能的不同导致其与微波场的匹配能力也不同，因而决定了分子筛微波吸收能力的差异即微波脱附效果不同。

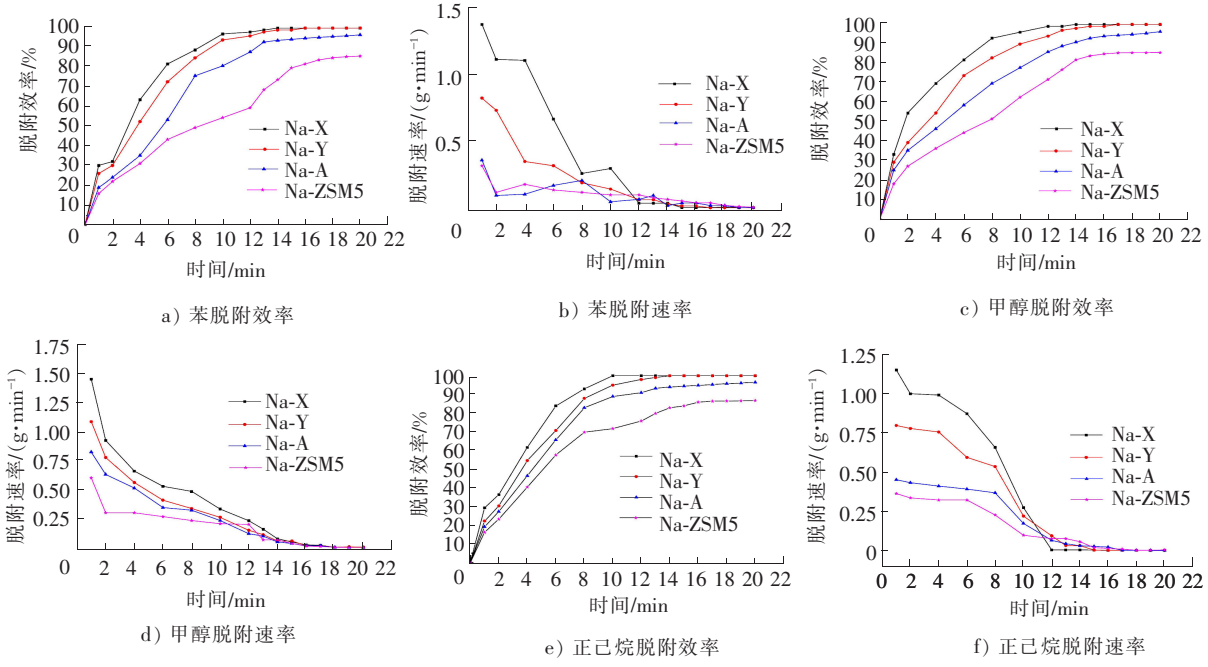


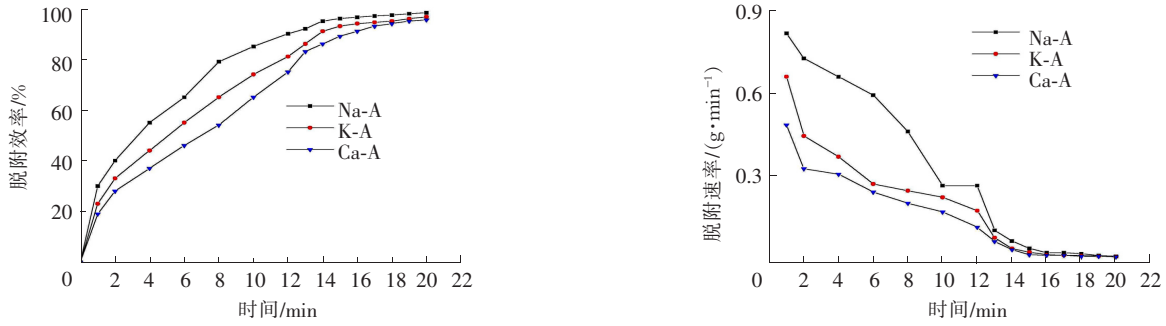
图4 不同分子筛的微波脱附效率及脱附速率曲线

Fig.4 Microwave desorption efficiency and desorption rate curves of different zeolites

2.4 分子筛平衡阳离子对微波脱附性能的影响

图5为3种A型分子筛K-A，Na-A，Ca-A的微波脱附效率及速率曲线。由图5可知，Na-A分子筛能更有效地吸收微波，而K-A和Ca-A吸收微波能力相对较弱。3种分子筛达到微波脱附平衡的时间依次为Na-A 15 min，K-A 17 min，Ca-A 19 min，脱附效率和速率顺序为Na-A＞K-A＞Ca-A。图6为2种X型分子筛Ca-X，Na-X微波脱附效率及速率曲线。由图6可知，Na-X的吸收微波能力强于Ca-X分子筛，2种分子筛达到脱附平衡的时间为Na-X 13 min，Ca-X 17 min，脱附效率和速率顺序为Na-X＞Ca-X。

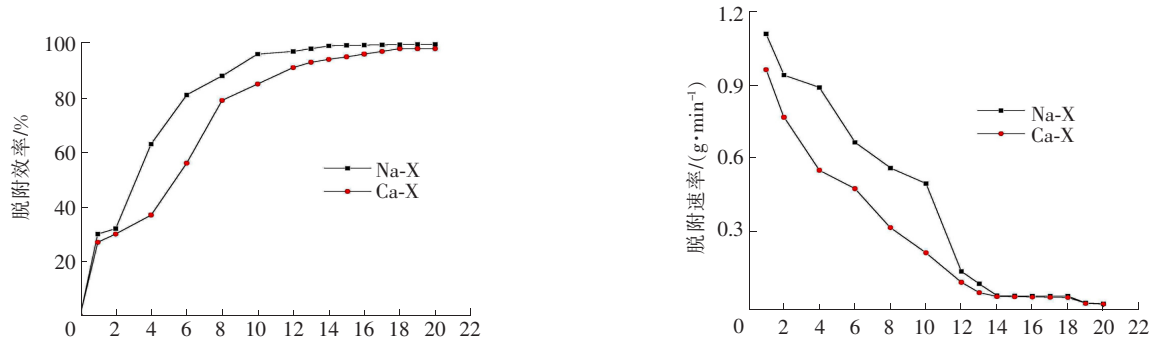
由上述同类型不同平衡阳离子的分子筛微波吸收能力可得出，分子筛平衡阳离子自身特性对其微波吸收能力有显著影响。分子筛平衡阳离子的价态和离子半径大小不同，其微波吸收效果也不同，主要是因为分子筛的孔结构对平衡阳离子有一定的束缚力。Na-X分子筛的脱附速率比Ca-X快，Na-A微波脱附速率比Ca-A快，是因为1个Ca^{2+}占据了2个Na^+的位置使得分子筛中用于平衡的阳离子数量减少，微波过程中参与偶合的极矩减少，微波作用减弱；对于同是一价的Na^+和K^+而言，K^+半径大于Na^+，使其不易在分子筛的空腔中转动，造成微波过程中偶极矩减少，微波作用减弱[23]。



a）脱附效率　　b）脱附速率

图 5　不同阳离子的 A 型分子筛微波脱附效率及脱附速率曲线

Fig.5　Microwave desorption efficiency and desorption rate curves of A-type zeolites with different cations



a）脱附效率　　b）脱附速率

图 6　不同阳离子的 X 型分子筛微波脱附效率及脱附速率曲线

Fig.6　Microwave desorption efficiency and desorption rate curves of X-type zeolites with different cations

2.5　VOCs 极性对微波脱附性能的影响

图 7、图 8 分别是 3 种不同吸波效果的分子筛 Na-X，K-A，Na-ZSM5 对苯、甲醇、正己烷不同极性 VOCs 的微波脱附效率和脱附速率。由图 7、图 8 可知，不同极性 VOCs 的微波脱附效率和脱附速率相差较小。其原因是在微波脱附中，分子筛本身的吸波能力强于 VOCs 的吸波能力[25]，由此证明了 VOCs 的极性对分子筛的微波脱附几乎没有影响。

2.6　微波脱附 Na-X 分子筛结构稳定性分析

Na-X 分子筛在 1 200 W 的高微波功率下再生，吸附再生循环 5 次。表 5 为循环 5 次的分子筛相对结晶度及晶胞参数，图 9 为分子筛的 XRD 谱图。由此可知，微波脱附时分子筛的相对结晶度、晶胞参数及 XRD 谱图基本没有变化，表明微波处理对分子筛的晶体结构没有影响[24]。由此得出结论，分子筛在 1 200 W功率下进行多次微波脱附，不会破坏分子筛的晶体结构。

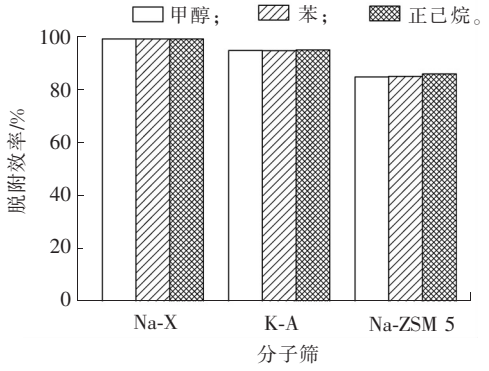


图 7　同一种分子筛吸附不同 VOCs 微波脱附效率

Fig.7　Desorption efficiency of the same zeolites in adsorbing different VOCs microwaves

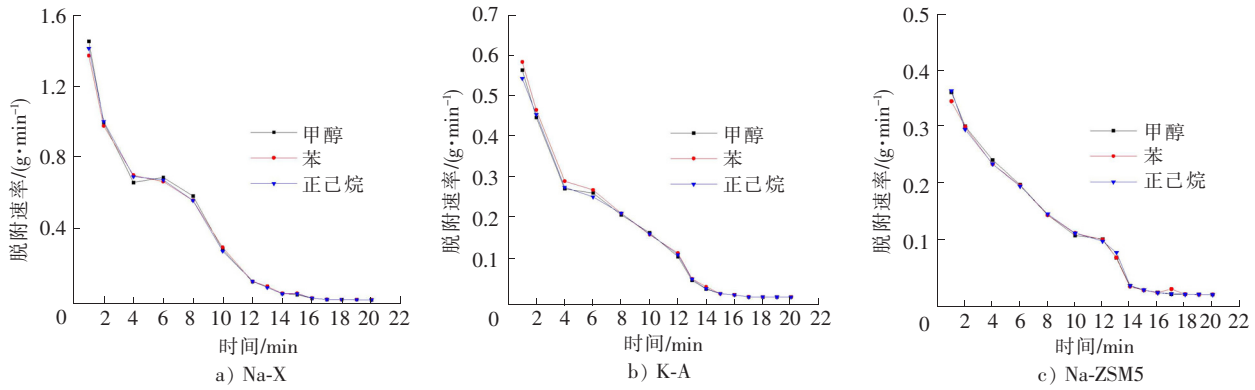


图 8 不同极性 VOCs 微波脱附速率曲线

Fig.8 Microwave desorption rate curves of VOCs with different polarities

表 5 Na-X 分子筛循环 5 次前后分子筛的结晶度及晶胞参数

Tab.5 Crystallinity and unit cell parameters of Na-X zeolite before and after 5 cycles

Na-X 分子筛再生循环次数	相对结晶度/%	晶胞参数		
		a/nm	b/nm	c/nm
1	75.25	2.491 40	2.491 40	2.491 40
2	75.67	2.49492	2.494 92	2.494 92
3	76.68	2.517 26	2.517 26	2.517 26
4	76.26	2.500 68	2.500 68	2.500 68
5	76.75	2.517 36	2.517 36	2.517 36

3 结 论

本文研究了不同分子筛对苯、甲醇、正己烷 3 种 VOCs 的吸附量和微波脱附效率，得出以下结论。

1)5 种分子筛 K-A，Na-A，Ca-A，Ca-X 和 Na-X 对 3 种 VOCs 静态吸附结果表明，分子筛孔径较大、VOCs 极性较大时，分子筛吸附量较高。

2)4 种分子筛 Na-X，Na-Y，Na-A，Na-ZSM5 的微波脱附结果表明，铝氧四面体结构含量高的分子筛微波脱附能力较强。

3)不同平衡阳离子分子筛 Na-A，K-A，Ca-A 及 Ca-X 和 Na-X 的微波脱附结果表明，分子筛平衡阳离子价态低、半径小的能更有效地吸收微波。

4)3 种不同吸波效果的分子筛 Na-X，K-A，Na-ZSM5对苯、甲醇、正己烷不同极性 VOCs 的微波脱附性能研究表明，VOCs 的极性对分子筛微波脱附性能几乎没有影响。

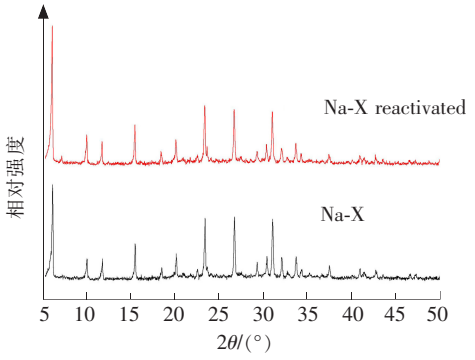


图 9 微波加热功率为 1 200 W 的 Na-X 分子筛循环 5 次前后的 XRD 图谱

Fig.9 XRD pattern of Na-X zeolite with microwave heating power of 1 200 W before and after 5 cycles

5)在 1 200 W 功率微波下，Na-X 分子筛经过多次微波脱附后，晶体结构未发生变化，说明 Na-X 分子筛微波脱附的结构性能稳定，可被多次循环使用。

分子筛吸附 VOCs 与微波脱附性能的研究成果可推动分子筛吸附 VOCs 与微波脱附新方法的工业化应用。今后可通过改变分子筛铝氧四面体的结构含量及交换平衡阳离子进行改性研究，使分子筛获得更优的介电特性，进一步提高微波脱附能力。

参考文献/References：

[1] 王慧，潘志俞，陈佳卉，等. 挥发性有机物治理技术的研究进展[J].节能，2019,38(6):90-91.

[2] 王铁宇，李奇锋，吕永龙. 我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究[J]. 环境科学,2013,34(12):4756-4763.
WANG Tieyu, LI Qifeng, LYU Yonglong. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China [J]. Environmental Science,2013,34(12):4756-4763.

[3] 杨健晖. 对活性炭吸附法脱除 VOCs 的研究进展综述[J]. 科学技术创新,2018(31):165-166.

[4] 吕双春，葛云丽，赵倩，等. 高硅分子筛的合成及其在 VOCs 吸附去除领域的应用[J]. 环境化学,2017,36(7):1492-1505.
LYU Shuangchun, GE Yunli, ZHAO Qian, et al. Synthesis of high silicon molecular sieves and its application in the field of VOCs adsorption and removal[J]. Environmental Chemistry,2017,36 (7):1492-1505.

[5] 黄海凤，戎文娟，顾勇义，等. ZSM-5 沸石分子筛吸附-脱附 VOCs 的性能研究[J]. 环境科学学报,2014,34(12):3144-3151.
HUANG Haifeng, RONG Wenjuan, GU Yongyi, et al. Adsorption and desorption of VOCs on the ZSM-5 zeolite[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2014,34(12):3144-3151.

[6] 王国庆，孙剑平，吴锋，等. 沸石分子筛对甲醛气体吸附性能的研究[J]. 北京理工大学学报,2006,26(7):643-646.
WANG Guoqing, SUN Jianping, WU Feng, et al. Adsorption behevior of formaldehyde on zeolites[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2006,26(7):643-646.

[7] 王桂香，马福秋，付家宽，等. 改性 5A 分子筛化学吸附低浓度 SO_2[J]. 哈尔滨工程大学学报,2018,39(7):1251-1256.
WANG Guixiang, MA Fuqiu, FU Jiakuan, et al. Chemisorption of low-concentration SO_2 on modified 5A-zeolite-supported triethanolamine[J]. Journal of Harbin Engineering University,2018,39(7):1251-1256.

[8] 李芮，施宇震，宁平，等. 改性活性炭吸附甲苯废气的研究进展[J]. 材料导报,2019,33(7):1133-1140.
LI Rui, SHI Yuzhen, NING Ping, et al. Toluene removal from waste gas by modified activated carbon: A review[J]. Material Reports, 2019,33 (7):1133-1140.

[9] 刘晓咏，欧阳平. 吸附材料微波辐射再生的研究进展[J]. 应用化工,2016,45(2):328-331.
LIU Xiaoyong, OUYANG Ping. Research progress on microwave radiation regeneration of adsorbing material[J]. Applied Chemical Industry,2016,45(2):328-331.

[10] 潘能婷，苏展军，蔡显英，等. 微波辐射强化再生技术:一种环保节能型吸附剂再生技术[J]. 广东化工,2010,37(4):3-5.
PAN Nengting, SU Zhanjun, CAI Xianying, et al. Regeneration enhanced by microwave radiation: A type of environmentally-friendly and energy-saving regeneration technology[J]. Guangdong Chemical Industry,2010,37(4):3-5.

[11] LEGRAS B, OLAERT I, THOMAS M, et al. About using microwave irradiation in competitive adsorption processes[J]. Applied Thermal Engineering,2013,57(1):164-171.

[12] 李智，王建英，王勇，等. NaY 沸石分子筛在 VOC 处理中的应用[J]. 环境工程学报,2020.doi:10.12030/j.cjee.201910071.
LI Zhi, WANG Jianying, WANG Yong, et al. Application of NaY zeolite molecular sieve in VOCs treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2020.doi:10.12030/j.cjee.201910071.

[13] FAYAZ M, SHARIATY P, ATKINSON J D, et al. Using microwave heating to improve the desorption efficiency of high molecular weight VOC from beaded activated carbon[J]. Environmental Science & Technology,2015,49(7):4536-4542.

[14] 常仁芹，周瑛，卢晗锋，等. 微波加热脱附回收 Y 分子筛吸附的酮类有机分子[J]. 环境工程学报,2014,8(12):5399-5405.
CHANG Renqin, ZHOU Ying, LU Hanfeng, et al. Desorption and recovery of ketone organic molecules on Y-zeolite adsorber under microwave irradiation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2014,8(12):5399-5405.

[15] SHARIATY P, JAHANDAR L M, HASHISHO Z, et al. Effect of ETS-10 ion exchange on its dielectric properties and adsorption/microwave regeneration[J]. Separation and Purification Technology,2017,179:420-427.

[16] KIM K, AHN H. The effect of pore structure of zeolite on the adsorption of VOCs and their desorption properties by microwave heating [J]. Microporous and Mesoporous Materials,2012,152:78-83.

[17] POLAERT I, ESTEL L, HUYGHE R, et al. Adsorbents regeneration under microwave irradiation for dehydration and volatile organic compounds gas treatment[J]. Chemical Engineering Journal,2010,162(3):941-948.

[18] KIM K J, KIM Y H, JEONG W J, et al. Adsorption-desorption characteristics of volatile organic compounds over various zeolites and their regeneration by microwave irradiation[J]. Studies in Surface Science and Catalysis,2007,165:223-226.

[19] KIM S, AIDA T, NIIYAMA H. Binary adsorption of very low concentration ethylene and water vapor on mordenites and desorption by microwave heating[J]. Separation and Purification Technology,2005,45(3):174-182.

[20] 李慧芳，徐海，赵勤，等. 几种分子筛对甲醛气体吸附性能的研究[J]. 硅酸盐通报,2014, 33(1):122-126.
LI Huifang, XU Hai, ZHAO Qin, et al. Adsorption performance of formaldehyde on molecular sieve[J]. Bulletin of The Chinese Ceamic Society,2014,33(1):122-126.

[21] 李鹏飞. X 型沸石分子筛吸附剂的制备及其吸附性能研究[D].太原：太原理工大学,2007.
LI Pengfei. Preparation and Adsorption Properties of X-type Zeolites Ddsorbents[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.

[22] 陈艳红，于庆军，许孝玲，等. 分子筛材料的合成及应用[M].北京:石油工业出版社,2018.

[23] 解丽丽. 微波加热沸石分子筛特性的研究[D]. 太原：太原理工大学,2002.
XIE Lili. Study on the Characteristics of Zeolites Heated by Microwave[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2002.

[24] 常仁芹. 微波适应型吸附剂表面有机分子微波脱附再生研究[D]. 杭州：浙江工业大学,2014.
CHANG Renqin. Study on the Microwave Desorption and Regeneration of Organic Molecules on the Surface of the Microwave Adaptive Adsorbent[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology,2014.

[25] CHERBANSKI R, KOMOROWSKA-DURKA M, STEFANIDIS G D, et al. Microwave swing regeneration vs temperature swing regeneration-comparison of desorption kinetics[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2011,50(14):8632-8644.