

分子筛的结构表征及对痕量氙的动态吸附性能

常印忠^{1,2}, 张生栋^{1,*}, 陈占营², 刘蜀疆², 张仕学¹

1. 中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413;

2. 禁核试北京国家数据中心和北京放射性核素实验室, 北京 100085

摘要: 高效吸附剂是大气放射性氙取样分析系统的核心组成部分之一, 为提高探测灵敏度, 需获得对大气中痕量氙具有更高吸附性能的吸附剂。研究了 10 种分子筛对痕量氙的动态吸附性能, 利用氮气静态吸附对分子筛的孔结构进行表征, 分析了孔结构特征与分子筛动态吸附性能的关系。选择吸附量较高的分子筛, 进一步研究了原料气流量、吸附压力和氙浓度对动态吸附性能的影响。结果表明: 5A 分子筛具有较适合的孔径, 对氙的动态吸附性能优于 13X 分子筛; ZSM-5 分子筛可能因晶穴内极性较强和具有较适合的孔径, 对氙的吸附能力最强; 痕量氙在 ZSM-5 分子筛上的动态吸附系数随吸附压力的增加而线性增大, 随流量增大先下降而后趋于稳定, 氙浓度在 $7.6 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-8}$ mol/L 范围内对其无明显影响。

关键词: 分子筛; 孔结构; 痕量氙; 动态吸附

中图分类号: O647.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2021)02-0169-07

doi: 10.7538/hhx.2020.YX.2019078

Dynamic Adsorption Properties of Trace Xenon on Molecular Sieves and Their Structure Characterization

CHANG Yin-zhong^{1,2}, ZHANG Sheng-dong^{1,*}, CHEN Zhan-ying²,
LIU Shu-jiang², ZHANG Shi-xue¹

1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(126), Beijing 102413, China;

2. CTBT Beijing National Data Centre and Beijing Radionuclide Laboratory, Beijing 100085, China

Abstract: High performance adsorbents are one of the core components of an atmospheric radioxenon sampling and analysis system. In order to improve the detection sensitivity, it is necessary to obtain adsorbents with higher adsorption capacity for the trace xenon in the atmosphere. The dynamic adsorption properties of the trace xenon on 10 kinds of molecular sieves were investigated. The pore structure of molecular sieves was characterized by static nitrogen adsorption. The relationship between the pore structure and the dynamic adsorption properties of the molecular sieves was analyzed. The effect of flow rate of feed gas, pressure and xenon concentration on dynamic adsorption properties of molecular sieves with higher adsorption capacity was studied. The results show that the dynamic adsorption property of 5A molecular sieve is better than that of 13X molecular sieve because it has the suitable pore

收稿日期: 2019-10-31; **修订日期:** 2019-12-23

作者简介: 常印忠(1977—), 男, 辽宁绥中人, 博士研究生, 核燃料循环与材料专业, E-mail: yinzhong.chang@nrl.org.cn

*** 通信联系人:** 张生栋(1966—), 男, 甘肃白银人, 博士, 研究员, 从事核化学与放射化学研究, E-mail: zhangsd@ciae.ac.cn

size. ZSM-5 molecular sieve has the highest adsorption capacity for xenon because of suitable pore size and a strong polarity in the crystal hole. The dynamic adsorption coefficient of the trace xenon on ZSM-5 molecular sieve increases linearly with the increase of adsorption pressure, and the value will tend to be stable after decrease as the flow rate increases. When the xenon concentration is between 7.6×10^{-9} - 3.0×10^{-8} mol/L, the dynamic adsorption coefficient nearly keeps constant.

Key words: molecular sieve; pore structure; trace xenon; dynamic adsorption

自 1996 年 9 月联合国通过全面禁止核试验条约以来,全面禁止核试验条约组织临时技术秘书处一直在积极推进可监测全球范围核试验的国际监测系统(IMS)建设。其中,大气放射性氙取样分析系统是 IMS 的重要组成部分,对可疑核事件的定性具有重要作用^[1-2]。由于隐蔽核试验泄漏的氙同位素极少,大气放射性氙取样分析系统需具有极高的探测灵敏度才可实现有效监测。中、美、俄、法及瑞典等国在持续进行高灵敏度氙取样分析系统的研制工作,核心内容之一就是筛选和研制高性能吸附剂,以实现大气中的痕量氙高效吸附^[3-4]。

目前,常用的氙吸附剂主要有活性炭、活性碳纤维、碳分子筛及分子筛。活性炭孔隙发达、比表面积较大,是一种应用广泛的吸附剂,IMS 早期安装的氙取样分析系统及我国自主研制的固定式氙取样器均采用活性炭作为吸附剂^[1,5]。受比表面积及装填密度限制,活性炭吸附氙能力难有较大幅度的提高。与活性炭相比,活性碳纤维具有更发达的比表面积和较窄的孔径分布,对氙的吸附能力较强。但活性碳纤维装填密度明显小于活性炭,相同尺寸吸附柱的氙吸附量低于活性炭。碳分子筛微孔特征介于沸石分子筛和活性炭之间,但大部分对氙吸附能力很弱,少数碳分子筛的吸附性能优于活性炭^[6-7],可作为氙吸附剂。分子筛因比表面积和孔容较小,对氙的吸附能力较弱,国内在分子筛吸附氙方面的研究很少,国外 Watermann 等^[8]的研究表明,用银离子进行交换后,分子筛吸附氙的能力明显增强。

为提高实验室对大气放射性氙监测水平,在取样技术方面需开展高效吸附剂的筛选和研制工作,深入了解对氙的吸附机理。分子筛孔径分布窄、装填密度大,经过银离子交换可有效提高吸附能力,是一种有潜力的氙吸附剂。本工作拟选择 3 类 10 种分子筛进行结构表征和对氙的动态吸附研究,分析其孔结构与动态吸附能力的关系,筛

选出性能较好的分子筛,为进一步研制高性能氙吸附剂提供参考。在研究过程中,研究者多采用纯氙或较高浓度的氙混合气进行实验。大气中氙的浓度约为 3.9×10^{-9} mol/L,为研究实际应用条件下分子筛对氙的吸附性能,本工作采用痕量氙混合气作为动态吸附研究的吸附质。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

JW-BK200C 比表面及孔径分析仪,北京精微高博科学技术有限公司;CP255D 十万分之一电子天平,德国赛多利斯集团;7890A-5975C 气相色谱质谱联用仪(GC-MS),美国安捷伦科技有限公司;FL10-10 空压机,瑞典阿特拉斯·科普柯公司;C10F 中空纤维膜,日本宇部公司;质量流量控制器(MFC),北京堀场汇博隆精密仪器有限公司;高纯氦气(纯度 99.999%)、高纯氮气(纯度 99.999%),北京海普气体有限公司。实验用分子筛包括 5A、13X 及 ZSM-5 三种类型,相关信息列于表 1。其中,NK-1 硅铝比为 38,NK-2 硅铝比为 300。

表 1 实验选用的分子筛样品
Table 1 Molecular sieve samples used
in present experiment

样品	类型	粒度/mm	产地
GF-1	5A	2~3	天津
FQ	5A	0.4~0.8	河南
LXY-1	5A	1.6~2.5	河南
TL-1	5A	0.4~0.8	河南
TL-2	5A	0.4~0.8	河南
GF-2	13X	2~3	天津
LXY-2	13X	0.5~1.0	河南
LXY-3	13X	1.6~2.5	河南
NK-1	ZSM-5	2~3	天津
NK-2	ZSM-5	2~3	天津

1.2 分子筛的比表面积及孔结构分析

利用比表面及孔径分析仪分析分子筛的比表

面及孔结构特征。首先,称量一定量的分子筛,装入样品管进行预处理,预处理温度设定为 400 ℃,时间约 20 h。预处理完毕,在液氮温度下测量分子筛的氮气吸附等温线,并据此计算比表面积及孔结构数据。

1.3 分子筛动态吸附痕量氙性能研究

痕量氙动态吸附实验装置主要包括气源、质量流量控制器(MFC)、填充柱、气相色谱质谱联用仪和阀门管件,示意于图 1。气源由空压机和中空纤维膜等组成,其功能是去除空气中的水、二氧化碳及颗粒物等杂质,对空气中的氙进行浓缩,为实验提供不同浓度和压力的痕量氙原料气。减压阀和背压阀控制吸附过程中填充柱内的压力,MFC 控制吸附流量。填充柱尺寸为 $\phi 12.7\text{ mm} \times 1\text{ 000 mm}$,分别装填不同的分子筛进行动态吸附实验。调节原料气的压力和浓度,设定 MFC 的

流量,打开阀门进行吸附实验。调节背压阀,使填充柱内压力稳定在目标值。间隔一定时间取 1 次填充柱末端流出气体,利用气相色谱质谱联用仪分析氙浓度,实验在常温条件下进行。在对 10 种分子筛动态吸附性能进行研究后,选择吸附量较高的分子筛,按照前述方法,进行不同压力、流量和氙浓度条件下的动态吸附实验,研究吸附因素对动态吸附系数的影响。

2 结果与讨论

2.1 分子筛的孔结构特征

图 2(a—d)为 10 种分子筛的氮气吸附-脱附等温线。由图 2 可知,在相对压力(p/p_0)很低时,氮气吸附量 q 迅速增加,而经过拐点后增加缓慢,说明分子筛以微孔为主。吸附等温线与脱附等温线形成滞后环,说明分子筛含有一定的介

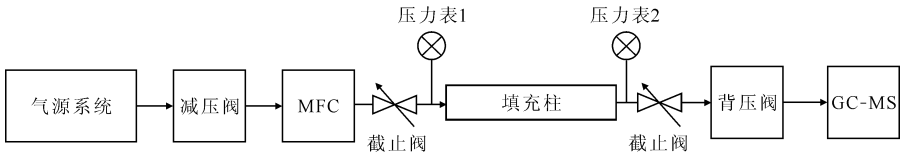


图 1 动态吸附实验装置示意图
Fig. 1 Diagram of dynamic adsorption experiment equipment

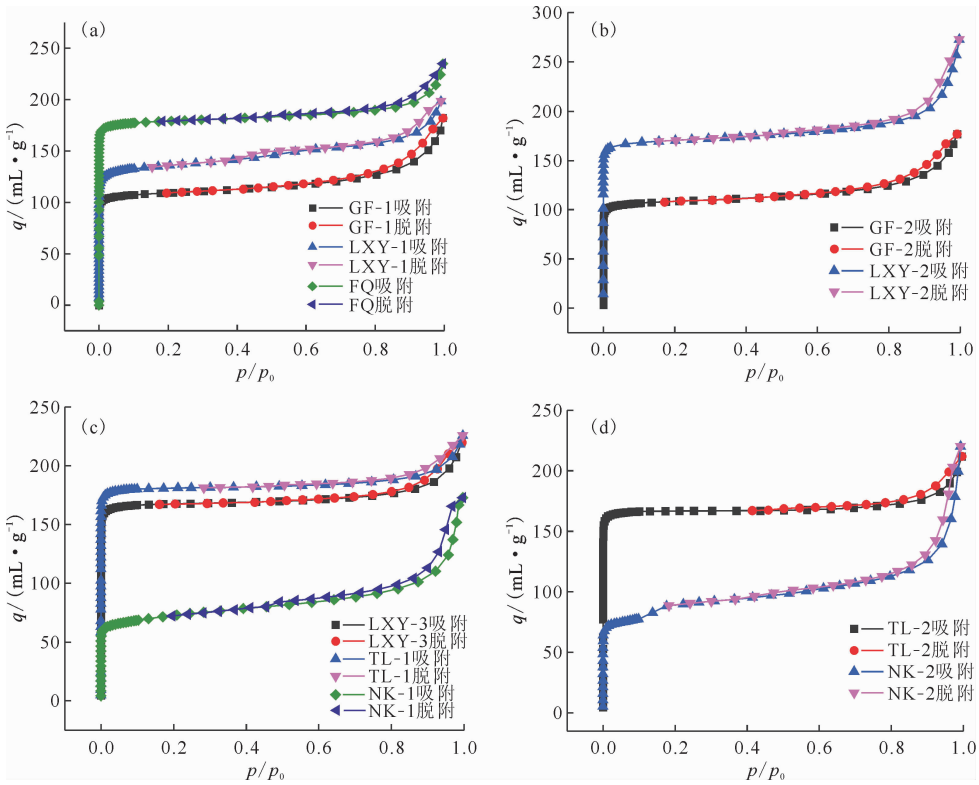


图 2 10 种分子筛氮气吸附-脱附等温线
Fig. 2 Nitrogen adsorption and desorption isotherm of 10 kinds of molecular sieve samples

孔或大孔。吸附-脱附等温线在接近饱和气压时比中压区有明显的上升,进一步说明吸附剂含有一定量大孔。ZSM-5 分子筛(NK-1、NK-2)的微孔吸附量最低,约为 75 mL/g,说明其微孔孔容最小。FQ 和 TL-1 的微孔吸附量最高,约为 180 mL/g。

分子筛的孔结构数据列于表 2。从表 2 可以看出,分子筛的比表面积及总孔容积较小,FQ 比表面积最大,仅为 693 m²/g,而性能较好的活性炭和活性碳纤维比表面积可达到 2 000 m²/g 左右^[9]。与此对应,分子筛的微孔比表面积和微孔容积也较小。宏观上,体现为单位质量分子筛的吸附能力低于活性炭和活性碳纤维。按照分子筛类型分析,5A 和 13X 分子筛比表面积及总孔容积较大,平均值分别为 574 m²/g 和 0.346 mL/g,两种 ZSM-5 分子筛的则较小,平均值分别为 279 m²/g 和 0.275 mL/g。根据表 2 中数据计算

可知,5A 和 13X 分子筛的微孔比表面积与比表面积之比为 85%~99%,微孔容积与总孔容积之比为 51%~76%。ZSM-5 微孔容积与总孔容积的比值在 40%左右,微孔比例较低。在总孔容积差距约 20%的情况下,ZSM-5 的比表面积仅为 5A 和 13X 分子筛的 50%左右,说明微孔对比表面积的贡献占主要地位,微孔容积越大,比表面积越大。除 GF-1 和 GF-2 的平均孔径在 3.0 nm 左右、ZSM-5 的孔径约为 4.0 nm 外,其余 6 种分子筛的平均孔径均在 2.01~2.35 nm 之间。5A 和 ZSM-5 分子筛的微孔平均孔径为 0.42~0.59 nm,13X 分子筛的微孔平均孔径为 0.80~0.85 nm。根据文献[10]报道,氙在多孔材料上的吸附主要为发生在微孔内的物理吸附,实验所用 10 种分子筛的微孔平均孔径均大于氙的分子直径(0.44 nm),可对氙进行有效吸附。

表 2 分子筛样品的孔结构参数
Table 2 Pore structure parameters of molecular sieve samples

样品	类型	比表面积	微孔比表面积	总孔容积	微孔容积	平均孔径	微孔平均孔径
		$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$S_{\text{micro}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$V_{\text{t}}/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	$V_{\text{micro}}/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	$\bar{D}_{\text{t}}/\text{nm}$	$\bar{D}_{\text{micro}}/\text{nm}$
GF-1	5A	407	346	0.320	0.162	3.15	0.49
FQ	5A	693	663	0.363	0.275	2.20	0.59
LXY-1	5A	504	430	0.287	0.200	2.28	0.53
TL-1	5A	576	568	0.351	0.252	2.21	0.42
TL-2	5A	653	648	0.377	0.286	2.01	0.55
GF-2	13X	499	462	0.355	0.206	2.85	0.85
LXY-2	13X	666	603	0.366	0.258	2.20	0.80
LXY-3	13X	596	557	0.347	0.221	2.35	0.83
NK-1	ZSM-5	285	225	0.282	0.112	4.01	0.52
NK-2	ZSM-5	270	196	0.261	0.109	3.87	0.51

图 3 为 6 种不同分子筛的微孔孔径分布图。由图 3 可知:LXY-1 分子筛的微孔孔径分布比较集中,主要分布在 0.3~0.7 nm 之间;FQ 分子筛的微孔孔径分布范围较宽,在 0.4~1.3 nm 之间;GF-2 分子筛的微孔孔径分布在 0.6~1.3 nm 之间;NK-1 和 NK-2 分子筛的微孔孔径分布基本相同,主要在 0.3~0.7 nm 之间,但分布曲线基本成单峰,表明孔径分布更集中;LXY-2 分子筛的微孔孔径主要分布在 0.8~1.0 nm 之间,平均孔径略小于 GF-2 分子筛。

2.2 痕量氙在分子筛上的动态吸附性能

1) 不同分子筛的动态吸附性能

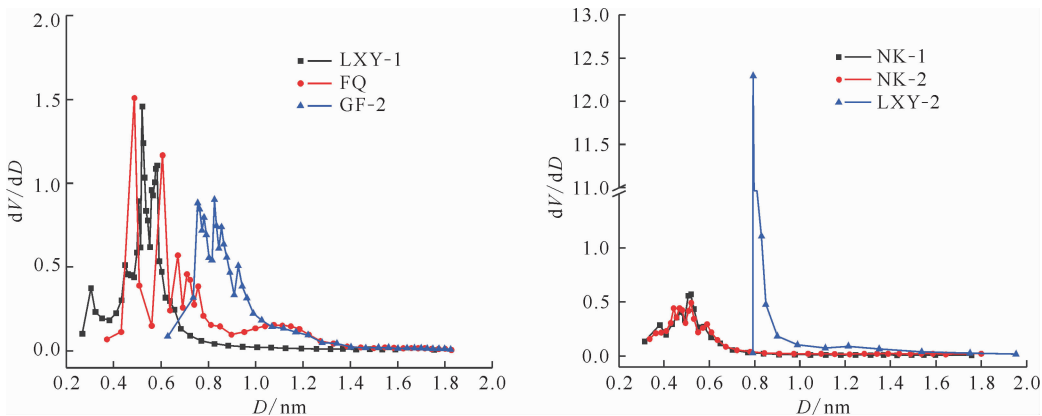
在气体动态吸附过程中,通常用动态吸附系数表征吸附剂动态吸附能力的大小。氙在分子筛

样品上的动态吸附系数计算公式如下:

$$k_d = Q t_{0.5} / m \tag{1}$$

式中: k_d 为动态吸附系数,mL/g; Q 为原料气流量,mL/min(标况); $t_{0.5}$ 为氙的半穿透时间,min; m 为分子筛质量,g。

实验之前,利用氮气吹扫、加热再生分子筛填充柱。再生后,将填充柱安装在实验装置中进行动态吸附实验。5A 和 13X 分子筛吸附时的原料气流量设定为 200 mL/min,ZSM-5 分子筛吸附时的原料气流量设定为 1 000 mL/min。减压阀调整至 3.4×10^5 Pa,背压阀调整至 3.0×10^5 Pa,保持吸附过程中填充柱内气体压力稳定,实验所用原料气中氙浓度($c(\text{Xe})$)约 1.2×10^{-8} mol/L。对 10 种分子筛进行动态吸附研究,计算动态吸附系数,结果示于图 4。



V 为微孔容积, D 为微孔孔径

图 3 分子筛微孔孔径分布

Fig. 3 Micropore size distribution of molecular sieve samples

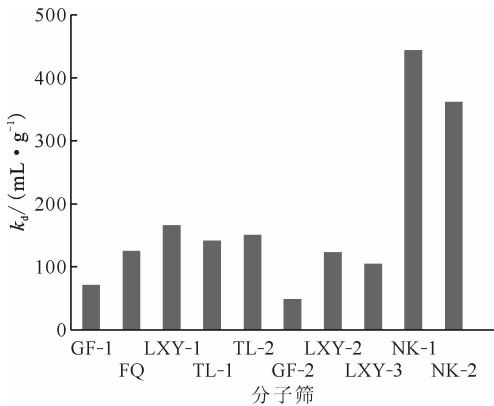


图 4 氙在分子筛上的动态吸附系数

Fig. 4 Dynamic adsorption coefficients of Xe in molecular sieves

由图 4 可知, NK-1 分子筛对氙的动态吸附系数最高, 达到 443 mL/g; 其次为 NK-2 分子筛。分析结果表明, ZSM-5 分子筛性能显著优于 5A 和 13X 分子筛, 虽然 ZSM-5 分子筛的微孔容积小于其余两类分子筛, 对氙的动态吸附系数却大数倍。5A 和 13X 分子筛对氙的动态吸附系数平均值约为 115 mL/g, 除 GF-1 和 GF-2 外, 其余 6 种分子筛的吸附性能差别较小, 说明这两种类型分子筛对氙吸附能力接近。对于同一系列分子筛, 如 GF-1 和 GF-2、LXY-1 和 LXY-2, 5A 分子筛的动态吸附系数均大于 13X 分子筛。

5 种 5A 分子筛微孔孔径的平均值约为 0.52 nm, 3 种 13X 分子筛的微孔孔径的平均值约为 0.83 nm。分析表 2 数据可知, 13X 分子筛的微孔比表面积和微孔容积均大于对应的 5A 分子筛, 但其对氙的动态吸附系数却小于 5A 分子筛, 说明

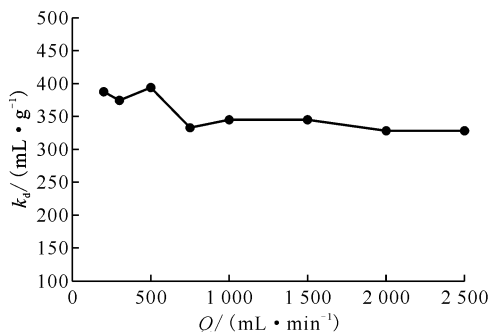
对氙的吸附能力不与微孔比表面积和微孔容积成正比关系, 即不是所有微孔对氙的吸附作用都相同。5A 分子筛的微孔容积平均值与 13X 分子筛的接近, 对氙的平均动态吸附系数却比其大 30%, 说明孔径为 0.52 nm 左右的微孔对氙的吸附能力更强。氙分子进入微孔时, 与组成吸附剂孔壁的原子通过范德华力发生吸附作用, 作用力与两者间的距离负相关。微孔孔径接近氙分子直径(0.44 nm), 微孔内的氙分子能有效接受四周微孔表面叠加的吸附力场, 更有利于氙的吸附^[9-10]。通过微孔吸附数据计算得到 LXY-1 分子筛和 FQ 分子筛在 0.45~0.65 nm 孔径范围内微孔的孔容分别为 0.10 mL/g 和 0.07 mL/g, 而动态吸附系数分别为 165 mL/g 和 124 mL/g。两者的微孔容积之比与动态吸附系数之比接近, 说明在此范围内的微孔对氙的吸附起主要作用, 微孔容积越大, 对氙的吸附能力越强。13X 分子筛的微孔主要集中在 0.83 nm 左右, 对氙的吸附作用较弱, 所以吸附能力低于 5A 分子筛。

ZSM-5 分子筛的微孔平均孔径约为 0.52 nm, 通过微孔吸附数据计算得到 NK-1 分子筛和 NK-2 分子筛在 0.45~0.65 nm 孔径范围内微孔的孔容分别为 0.08 mL/g 和 0.07 mL/g。ZSM-5 分子筛的微孔容积为 5A 分子筛的 50% 左右, 孔径在 0.45~0.65 nm 范围内的微孔的孔容却与之接近, 说明该分子筛具有更集中的孔径分布, 因而对氙进行有效吸附的微孔比例更大。根据孔径在 0.45~0.65 nm 范围内的微孔容积分析, ZSM-5 分子筛对氙的动态吸附系数应与 LXY-1 分子筛和 FQ 分子筛的动态吸附系数接

近,但实验结果显示前者可达后者的 2~3 倍,说明有其它因素对 ZSM-5 分子筛的吸附性能产生显著影响。沸石分子筛晶穴内有较强的极性,能通过诱导氙分子使其极化从而增强吸附作用。ZSM-5 分子筛对氙的动态吸附系数大于 5A 分子筛的,可能是由于其晶穴内的极性强于 5A 分子筛、对氙产生更强的诱导作用、增强了对氙的吸附能力所致。根据实验结果可知,在三类分子筛中,ZSM-5 更适合作为氙吸附剂。

2) 原料气流量对动态吸附能力的影响

原料气流量是氙动态吸附过程中的重要参数,流量增大,氙半穿透时间会减小。在其它因素与 2.2 节 1) 相同条件下,选择 NK-2 分子筛进行不同原料气流量下的动态吸附实验,研究原料气流量 Q 对动态吸附系数 k_d 和半穿透时间 $t_{0.5}$ 的影响,结果示于图 5 和图 6。由图 5 可知,当 $Q < 500$ mL/min 时,动态吸附系数变化较小,即原料气流量对动态吸附系数没有明显影响;当 $Q = 500 \sim 750$ mL/min 时,动态吸附系数迅速下降; $Q > 750$ mL/min,动态吸附系数趋于稳定。研究表明,动态吸附系数随原料气流量改变而发生规律性变化。Thallapally^[11]、冯淑娟等^[6]研究表明,在较低气体流速下,氙在活性炭上的动态吸附系数不受流速影响。本工作结果与文献[6,11]不一致的原因可能是由于原料气流量高时,气体经过吸附柱时间较短,氙分子向吸附剂微孔内扩散的量减少所致。由图 6 可知,氙的半穿透时间随原料气流量增大呈负指数下降,其拐点基本与动态吸附系数的下降区间对应。对实验数据进行拟合,得到流量与半穿透时间之间的函数。利用该函数,可计算得到某一流量对应的半穿透时间。



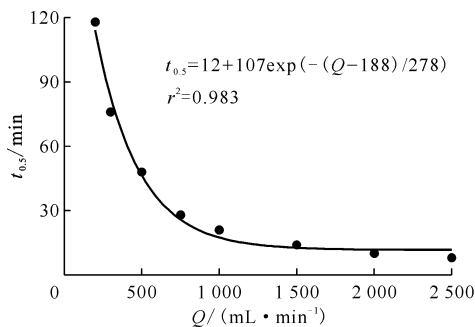
$c(\text{Xe}) \approx 1.2 \times 10^{-8}$ mol/L, NK-2 分子筛

图 5 氙的动态吸附系数随原料气流量的变化

Fig. 5 Variety of dynamic adsorption coefficients of Xe with flow rate of feed gas

3) 吸附压力(p)对动态吸附能力的影响

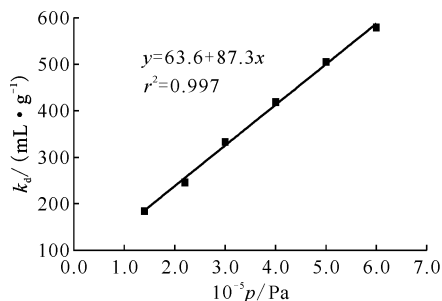
在原料气流量为 750 mL/min、原料气中氙浓度约 1.2×10^{-8} mol/L 条件下,研究 NK-2 分子筛在不同吸附压力下对氙的吸附行为规律,结果示于图 7。图 7 结果表明,在 $1.4 \times 10^5 \sim 6.0 \times 10^5$ Pa 范围内,氙在 NK-2 分子筛上的动态吸附系数随吸附压力增加而线性增大。吸附压力增加 3.3 倍时,动态吸附系数增加了 2.1 倍,说明提高吸附压力可以有效提高分子筛对氙的吸附能力。在实验过程中利用质量流量控制器控制流量,当吸附压力升高时,工况线流速相应降低。据图 5 可知,原料气流量为 750 mL/min 时,线流速降低可增大分子筛对氙的动态吸附系数。因此,吸附压力增大过程中,动态吸附系数的增加可能包括线流速降低的贡献。



$c(\text{Xe}) \approx 1.2 \times 10^{-8}$ mol/L, NK-2 分子筛

图 6 氙的半穿透时间随原料气流量的变化

Fig. 6 Variety of half breakthrough time of Xe with flow rate of feed gas



原料气流量 750 mL/min,

$c(\text{Xe}) \approx 1.2 \times 10^{-8}$ mol/L, NK-2 分子筛

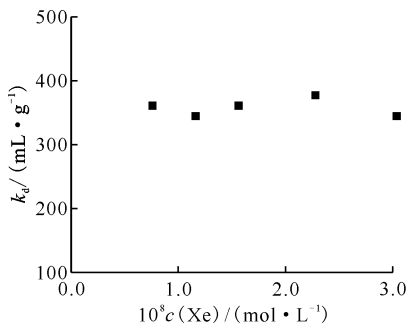
图 7 氙的动态吸附系数随吸附压力的变化

Fig. 7 Variety of dynamic adsorption coefficients of Xe with adsorption pressure

4) 原料气中氙浓度对动态吸附能力的影响

在原料气流量为 750 mL/min、压力为 $3 \times$

10^5 Pa条件下,研究原料气中氙浓度对氙在 NK-2 分子筛上动态吸附的影响,结果示于图 8。由图 8 可知,随着氙浓度增大,动态吸附系数仅在较小范围内波动,说明原料气中氙浓度在 $7.6 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-8}$ mol/L 之间变化时,分子筛对氙的动态吸附系数基本不受影响。王红侠等^[12]研究了氙在活性炭上的动态吸附,当氙浓度在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ mol/L 之间变化时,动态吸附系数也表现出一致性。上述结果表明,氙在不同吸附剂上吸附时,较低的氙浓度对吸附能力均无明显影响,其原因可能是两者的吸附机理相似。



原料气流量 750 mL/min,

吸附压力 3×10^5 Pa, NK-2 分子筛

图 8 氙的动态吸附系数随氙浓度的变化规律

Fig. 8 Variety of dynamic adsorption coefficients of Xe with concentration of Xe

3 结 论

(1) 对 3 类 10 种分子筛进行了孔结构特征分析,研究了不同分子筛对痕量氙的动态吸附性能,分析了动态吸附系数与孔结构的关系。ZSM-5 分子筛在三类分子筛中对氙的吸附能力最强,可能是因其晶穴内极性较强和具有较适当的孔径分布。

(2) 痕量氙在分子筛上的动态吸附系数随流量增大先下降而后趋于稳定;随吸附压力增加而线性增大;在 $7.6 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-8}$ mol/L 范围内,氙浓度对动态吸附系数无明显影响;通过增加吸附压力,可显著提高分子筛对氙的吸附能力。

(3) ZSM-5 分子筛对氙的吸附能力弱于性能较好的活性炭和碳分子筛。但其具有孔径分布范

围窄、装填密度大等优点,若经过银离子交换能够显著提高动态吸附能力,ZSM-5 可成为理想的氙吸附剂。

参考文献:

- [1] 张利兴. 禁核试核查中放射性气体的监测[J]. 核技术, 2004, 27(10): 771-778.
- [2] Fausto M, Bemd W, Tuomas V. Collection efficiency of particular and xenon sampling in the international monitoring system of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty[J]. Appl Radiat Isotopes, 2004, 61: 219-224.
- [3] Petit G, Cagniant A, Ggross P. SpalaxTM new generation: a sensitive and selective noble gas system for nuclear explosion monitoring[J]. Appl Radiat Isotopes, 2015, 103: 102-114.
- [4] 陈占营, 黑东炜, 王建龙. CTBT 大气放射性氙监测技术进展[J]. 现代应用物理, 2018, 9(3): 10-20.
- [5] 武山, 陈占营, 张昌云, 等. 固定式氙取样器的研制[C]. 第十三届全国核化学与放射化学学术研讨会, 大理: 中国核学会核化学与放射化学分会, 2014.
- [6] 冯淑娟, 周崇阳, 周国庆, 等. 氙在活性炭和碳分子筛上的动态吸附性能[J]. 核化学与放射化学, 2010, 32(5): 274-279.
- [7] 刘孟, 张莉, 王茜, 等. 碳分子筛和活性炭吸附氙气性能研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2015, 37(6): 27-34.
- [8] Watermann J, Boddenberg B. Isosteric heats of adsorption of xenon in silver-exchanged Y zeolites[J]. Zeolites, 1993, 13(6): 427-429.
- [9] 何国利, 易红宏, 唐晓龙, 等. 氙气吸附分离的研究现状及进展[J]. 材料导报, 2013, 27(7): 50-53.
- [10] 陈水挟, 金莹, 罗颖, 等. 几种活性碳纤维的结构及其吸氙性能研究[J]. 高技术通讯, 2002, 12(11): 67-72.
- [11] Thallapally P K, Grate J W, Motkuri R K, et al. Facile xenon capture and release at room temperature using a metal-organic framework: a comparison with activated charcoal[J]. Chem Commun, 2012, 48: 347-349.
- [12] 王红侠, 龚有进, 唐元明, 等. 常温下氙在椰壳活性炭上的吸附性能[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(12): 1091-1094.