

# 高压静态吸附仪的改进及吸附剂特性测试研究

李子宜<sup>1</sup>, 刘应书<sup>1,2</sup>, 张辉<sup>1,2</sup>, 杨雄<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学北京高校节能与环保工程研究中心, 北京 100083)

**摘要:**采用 518P 仪表与固态继电器调压模块组合温控技术及快装接头密封手段对原有高压静态吸附仪进行了改进, 推导了平衡吸附量计算公式, 并分别在 298、308、318 K 下测试了 2 种活性炭对 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub> 及 2 种沸石分子筛对 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的吸附等温线, 在低压段 (<100 kPa) 与美国康塔公司的 Autosorb-1 进行了对比。结果表明, 平均相对误差分别为 1.14% 和 2.47%, 表明改进后的高压静态吸附仪测量精度较高。同时计算出这 4 种吸附剂在不同温度下 Langmuir 特征参数  $q_m$  和 B 及对二元气的分离系数。研究结果可为高压静态吸附仪的应用、变压吸附浓缩煤层气或微型制氧系统的吸附剂选择提供参考。

**关键词:** 吸附仪; 静态吸附; 吸附等温线; 活性炭; 沸石分子筛; 分离因子

中图分类号: TQ056.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)06-0162-05

## An improved high-pressure static adsorption instrument and characteristics of adsorbents

LI Zi-yi<sup>1</sup>, LIU Ying-shu<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2</sup>, YANG Xiong<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering of University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Engineering Research Center for Energy Saving and Environmental Protection, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A high-pressure static adsorption instrument is improved by using a new temperature control method in combination with 518p meters and solid-state relay regulating module, as well as a method of sealing with the quick joint. The formula of the equilibrium adsorption amount is derived. The adsorption isotherms of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> on two sorts of activated carbon and N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> on two sorts of zeolite molecular sieve are measured in 298K, 308K, 318K, respectively, which are subsequently compared with those measured by Autosorb-1 (Quantachrome Instruments) within low-pressure range (<100 kPa). The average relative error is 1.14%, 2.47%, respectively, indicating the high precision and good performance of the improved adsorption instrument. The langmuir characteristic parameters  $q_m$ , B and the binary gas separation factor  $\alpha$  of the four adsorbents at different temperatures are calculated. The results can be meaningful for developing the high-pressure static adsorption instrument and selecting adsorbents for PSA coalbed methane enrichment as well as the miniature PSA oxygen system.

**Key words:** adsorption instrument; static adsorption; adsorption isotherm; activated carbon; zeolite molecular sieve; separation factor

近年来对吸附材料物性参数的测量越来越普遍, 其中吸附等温线是反映吸附剂性能及气固平衡特性的重要参数之一<sup>[1]</sup>。通过对静态吸附等温线类型的判断可得到该吸附剂在一定温度下对某种气体的饱和吸附量<sup>[2]</sup>。变压吸附法(PSA)的核心基础是吸附剂, 吸附剂的性能直接影响最终分离效果, 甚至影响工艺流程和使用寿命<sup>[3-4]</sup>。以典型的变压吸附浓缩煤层气系统和微型变压吸附制氧机应用技术为代表<sup>[8-11]</sup>, 分别通过活性炭和沸石分子筛浓缩在 CH<sub>4</sub>/空气、O<sub>2</sub>/空气体系中富集浓缩得到所需 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>2</sub>, 其分离效果主要取决于吸附剂性能, 因此选择合适的吸附剂对此 2 种 PSA 技术的应用至关重要。传统的静态吸附仪通常只能在低压条件下测量

吸附材料的物性参数, 而在实际变压吸附应用中常需参考高压状态下的物性参数<sup>[12-13]</sup>。

高压静态吸附仪的开发对装置密封及温控技术要求较高, 笔者以此为出发点, 对高压静态吸附装置进行了改进<sup>[5]</sup>, 保证气密性及控温精度的同时提高了操作便捷性, 缩短了吸附平衡时间, 并与 Autosorb-1 吸附仪在低压段所测数据对比分析, 验证改进后吸附仪的测试高效性及准确性。在此基础上分别在 298、308、318 K 下测试了 2 种活性炭对 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub> 及 2 种沸石分子筛对 N<sub>2</sub> 及 O<sub>2</sub> 的吸附等温线, 计算出 4 种吸附剂在不同温度下 Langmuir 特征参数  $q_m$  和 B 及对二元气的分离系数, 进而为变压吸附浓缩煤层气与微型制氧系统中吸附剂的选择提供参考。

收稿日期: 2014-02-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-SD-12-013A)

作者简介: 李子宜(1990-), 男, 博士生, 研究方向气体分离与人工环境, masterlazy@163.com。

## 1 实验部分

### 1.1 测量装置

改进后的高压静态吸附仪装置如图1所示。吸附仪主要由控温单元、测量单元、抽气单元构成。其主体包括储气室(容积为  $V_d$ ) 和样品室(填充样品后的体积为  $V_t - V_d$ ),通过间断进气并开闭二室之间的阀门,实现吸附柱内吸附剂在不同压力下对待测气体的吸附。

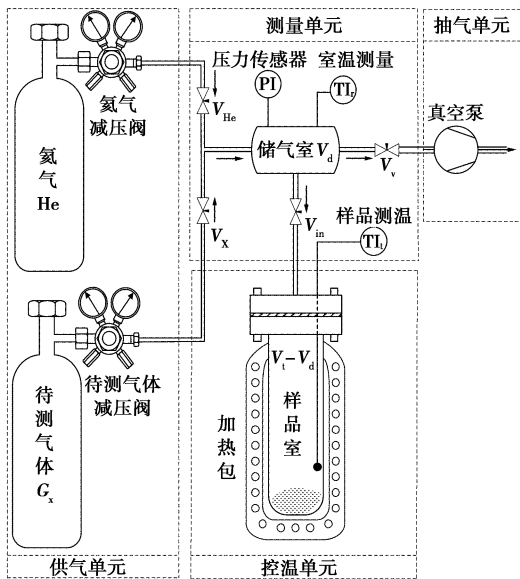


图1 高压静态吸附仪装置

(1) 温控单元。采用特制加热包外包吸附柱直接加热的方式,通过518P控制仪表与固态继电器调压模块组合,利用其对PID控制参数自整定的功能,实现对吸附柱内腔实时恒温的高精度控制。相比操作不便的水浴温控与精度不高的空气浴控温,该部分改进的关键技术在于固态继电器调压模块,其会根据吸附柱内实测温度与仪表设定温度的差值及实际加热条件,对仪表PID控制参数进行自整定,在温控精度和灵活性上都有很大提高。此外,加热包为特种耐高温、高导热(导热系数达到0.83)、绝缘性能佳、强度好的硅橡胶和耐高温的纤维增强材料以及金属发热膜电路集合而成的软性电加热元件,对恒温的实现亦至关重要。

(2) 吸附柱设计。为使吸附柱保持较好的气密性并同时方便更换样品,本吸附仪吸附柱的构造为:将不锈钢快装接头与钢管焊接(二者口径一致),并将钢管另一端用隔热材料密封,形成一个封闭内腔空间,如图2所示,相关尺寸如表1所示。经气密性测试后可知,采用快装接头封闭技术可承受至少2

MPa的内压,满足工业压力所需测量范围。

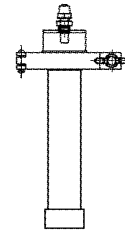


图2 吸附柱示意图

表1 吸附柱尺寸表

参数	外径(D)/ mm	内径(d)/ mm	高度(H)/ Mm	厚度(δ)/ mm	内部空间体积 ( $V_t$ )/mL
尺寸	25	22	150	1.5	70

### 1.2 测量原理

1.2.1 储气室及管路总体积  $V_d$  和总有效体积  $V_t$  的标定

将标准体积  $V_s$  与  $V_d$  通过阀门  $V_{in}$  相连,抽真空,向  $V_d$  内注入压力为  $p_1$  的氦气,后打开  $V_{in}$  阀门,压力平衡后测量气体压力  $p_2$ ,根据式(1)计算被测容积  $V_d$ 。后采用相同原理由已确定的  $V_d$  作为标准体积对  $V_t$  进行标定,随之确定出填充样品后样品室内腔有效体积( $V_t - V_d$ )。

$$p_1 \times V_d = (V_d + V_s) \times p_2 \quad (1)$$

1.2.2 平衡吸附量的计算

将管路、储气室、样品室抽真空后,测得压力为  $p_{d0}$ ;向储气室内通入待测气体,压力变为  $p_{d1B}$ ;打开储气室及样品室间的阀门  $V_{in}$ ,进行均压,平衡稳定后,测得压力为  $p_{d1E}$ 。根据打开阀门  $V_{in}$  前后的气体压力和体积,可计算得到吸附剂吸附气体的量,原理如图3所示。

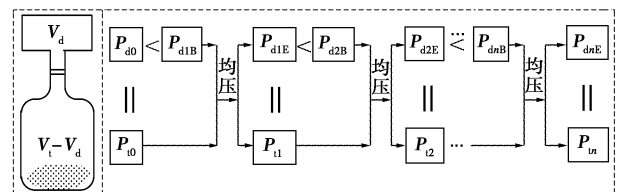


图3 吸附量测量原理示意图

反复向  $V_d$  内通入待测气体,不断与测量单元总空间  $V_t$  均压至  $p_{d2E}, p_{d3E}, \dots$ ,直至所要求压力测量点  $p_{dnE}$ 。根据每次打开阀门前后测得的压力值和已标定的体积值即可求出对应压力点气体的吸附量  $n$  (mol)、单位质量吸附量  $N_1 = n/m$  (mol/g),根据  $(p_{d1E}, N_1), (p_{d2E}, N_2), (p_{d3E}, N_3), (\dots, \dots), (p_{dnE}, N_n)$  有序实数对画图,得到吸附剂在  $T_t$  温度下的吸

附等温线。各点吸附量公式推导如下：

第 1 个压力点：

$$n_1 = P_{d0}V_d/RT_{d0} + [P_{d0}(V_t - V_d)]/RT_t + (P_{d1B}/T_{r1B} - P_{d0}/T_{d0})(V_d/R) - [P_{d1E}(V_t - V_d)/RT_t] - P_{d1E}V_d/RT_{r1E} \quad (2)$$

其中,  $T_r$  为储气室的温度(K),  $T_t$  为试样池的温度(K),  $R$  为理想气体常数(J/(mol·K))。

第 2 个压力点:继续向  $V_d$  内通入待测气体,稳定后测得  $V_d$  压力为  $p_{d2B}$ ;打开  $V_t$  与  $V_d$  间阀门  $V_{in}$  进行均压,平衡后,  $V_d$  和  $V_t$  内压力为  $p_{d2E}$ ,此时的吸附量  $n_2$  为:

$$n_2 = P_{d0}V_d/RT_{d0} + [P_{d0}(V_t - V_d)]/RT_t + (P_{d1B}/T_{r1B} - P_{d0}/T_{d0} + P_{d2B}/T_{r2B} - P_{d1E}/T_{r1E})(V_d/R) - [P_{d2E}(V_t - V_d)/RT_t] - P_{d2E}V_d/RT_{r2E} \quad (3)$$

第  $n$  个压力点:连续进行  $n$  次操作,在平衡压力  $p_{dnE}$  时的吸附量  $n_n$  为:

$$n_n = P_{d0}V_d/RT_{d0} + [P_{d0}(V_t - V_d)]/RT_t + (P_{d1B}/T_{r1B} - P_{d0}/T_{d0} + P_{d2B}/T_{r2B} - P_{d1E}/T_{r1E} + \dots + P_{dnB}/T_{rnB} - P_{d(n-1)E}/T_{r(n-1)E})(V_d/R) - [P_{dnE}(V_t - V_d)/RT_t] - P_{dnE}V_d/RT_{rnE} \quad (4)$$

### 1.3 特性测试

实验主要包括两方面内容:一是对改进后高压静态吸附仪的气密性、恒温温控及测量精度等仪器特性进行测试与对比分析;二是研究在不同温度下吸附剂的吸附性能,分别在 298、308、318 K 下测试了 2 种活性炭对  $CH_4$ 、 $N_2$  及 2 种沸石分子筛对  $O_2$  及  $N_2$  的吸附等温线,计算得到 4 种吸附剂在不同温度下 Langmuir 特征参数  $q_m$  和  $B$  及对二元气的分离因子  $\alpha$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气密性与温控情况分析

通过保压试验,在正压(2 MPa)及负压(2.5 kPa)下对装置进行了长达 12 h 的保压,压力几乎没有变化,说明装置的气密性达到了吸附实验的要求。

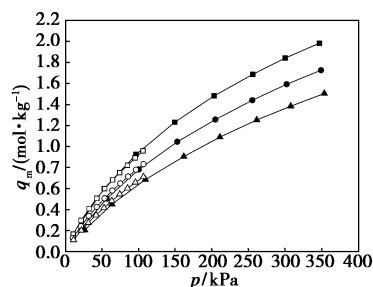
实验过程中设定吸附温度分别为 298、308、318 K。由活性炭 1 吸附  $CH_4$  实验过程中吸附柱内腔温度的变化曲线可以看出,每进行一个新的吸附平衡点的测量时,吸附柱内腔温度会有 0.2 ~ 2℃ 上升,随着实验的进行,上升的越来越小。这是因为吸附热会随着吸附的进行而产生,且吸附质分子总是优先占据较高能量的吸附位,即等量吸附热随着吸附量的增加而逐渐下降。在 3 组吸附实验中,吸附柱内腔温度除了在每次均压时会有短暂上升外,其他时间均稳定在设定温度  $\pm 0.1^\circ C$  范围内,为吸附实验提

供了较为理想的恒温条件。此外,吸附柱内腔温度在每次升高后能迅速恢复到设定温度,说明控温灵活性较高,有利于缩短吸附平衡时间,提高检测效率。

### 2.2 吸附等温线测量精度及误差分析

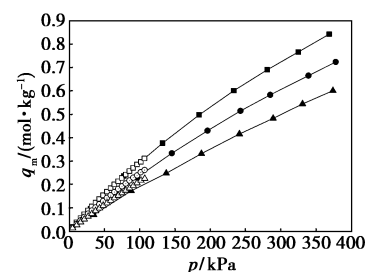
活性炭 1 (AC1) 在 298、308、318 K 下对  $CH_4$  和  $N_2$  的吸附等温线与用 Autosorb-1 吸附仪在低压段 (<0.1 MPa) 所测相同条件下的吸附等温线分别如图 4、图 5 所示。沸石分子筛 1 (ZMS1) 在 298、308、318 K 下对  $N_2$  和  $O_2$  的吸附等温线与用 Autosorb-1 吸附仪在低压段 (<0.1 MPa) 所测相同条件下的吸附等温线分别如图 6、图 7 所示。

从图 4、图 5 中可以看出,在低压段,本装置所测活性炭 1 在 298、308、318 K 下对  $CH_4$  和  $N_2$  的吸附等温线,与 Autosorb-1 吸附仪在相同条件下测得的吸附等温线有较好的吻合。改进吸附仪所测吸附量略小于 Autosorb-1 所测值; $CH_4$  和  $N_2$  在活性炭 1 上吸附等温线平均相对误差分别为 0.52%、1.13%、1.85% 和 0.11%、0.86%、2.35%。同理,



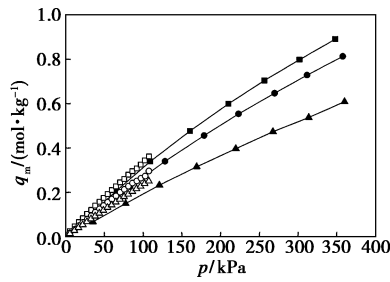
■—298 K  $CH_4$  (本装置); ●—308 K  $CH_4$  (本装置); ▲—318 K  $CH_4$  (本装置); □—298 K  $CH_4$  (Autosorb-1); ○—308 K  $CH_4$  (Autosorb-1); △—318 K  $CH_4$  (Autosorb-1)

图 4 活性炭 1 在 298、308、318 K 下对  $CH_4$  的吸附等温线



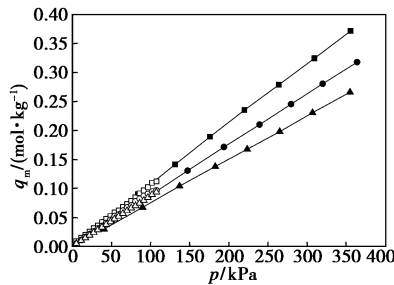
■—298 K  $N_2$  (本装置); ●—308 K  $N_2$  (本装置); ▲—318 K  $N_2$  (本装置); □—298 K  $N_2$  (Autosorb-1); ○—308 K  $N_2$  (Autosorb-1); △—318 K  $N_2$  (Autosorb-1)

图 5 活性炭 1 在 298、308、318 K 下对  $N_2$  的吸附等温线



■—298 K N<sub>2</sub> (本装置); ●—308 K N<sub>2</sub> (本装置);  
▲—318 K N<sub>2</sub> (本装置); □—298 K N<sub>2</sub> (Autosorb-1);  
○—308 K N<sub>2</sub> (Autosorb-1); △—318 K N<sub>2</sub> (Autosorb-1)

图6 沸石分子筛1在298、308、318 K下对O<sub>2</sub>的吸附等温线



■—298 K O<sub>2</sub> (本装置); ●—308 K O<sub>2</sub> (本装置);  
▲—318 K O<sub>2</sub> (本装置); □—298 K O<sub>2</sub> (Autosorb-1);  
○—308 K O<sub>2</sub> (Autosorb-1); △—318 K O<sub>2</sub> (Autosorb-1)

图7 沸石分子筛1在298、308、318 K下对O<sub>2</sub>的吸附等温线

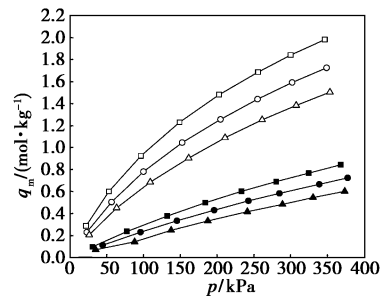
由图6、图7中可知,对于N<sub>2</sub>与O<sub>2</sub>在分子筛1上的吸附,在298、308 K下的等温线精度较高,在318 K下,误差有所增大;N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>在沸石分子筛1上的吸附等温线平均相对误差分别为0.92%、0.66%、4.71%和1.61%、0.55%、6.35%。活性炭1、沸石分子筛1吸附等温线总体平均相对误差分别为1.14%、2.47%,均在可接受范围(3%)内。

导致本装置吸附量略小于Autosorb-1吸附仪在同样条件下所测吸附量的原因,在装置气密性及吸附柱恒温控制都较为理想的前提下,很大程度上与吸附剂预处理抽真空过程中的解吸不充分相关。Autosorb-1吸附仪采用对吸附剂加热至200℃并同时抽真空的方法进行解吸,而本装置仅使用真空泵对内腔吸附剂进行解吸,二者对吸附剂的解吸程度存在一定差距。吸附剂解吸不完全会导致杂质气体残留,进而产生最终吸附量的测量误差。318 K下吸附等温线误差较大,这主要与较高温度下控温不稳定有关,温度的不稳定会导致压力的波动较大,平衡时间更长,在测试过程中常未等到吸附达到完全

平衡便结束一个吸附平衡点的测量,造成吸附量偏低的误差。

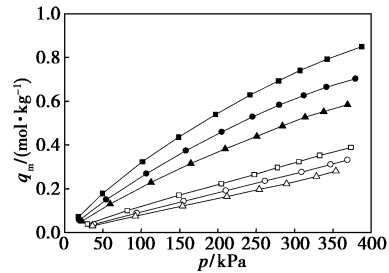
### 2.3 吸附剂特征参数的计算

活性炭2(AC2)、沸石分子筛2(ZMS2)在298、308、318 K下对CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的吸附等温线分别图8、图9所示。结合图4~图7可以看出,2种活性炭对CH<sub>4</sub>的吸附量均大于对N<sub>2</sub>的吸附量,2种沸石分子筛对于N<sub>2</sub>的吸附量均大于O<sub>2</sub>的吸附量;两类吸附剂的吸附量均随压力的升高而增大并逐渐趋于恒定,随温度的升高而降低,并且压力越大温度的影响越明显。



■—298 K CH<sub>4</sub>; ●—308 K CH<sub>4</sub>; ▲—318 K CH<sub>4</sub>;  
□—298 K N<sub>2</sub>; ○—308 K N<sub>2</sub>; △—318 K N<sub>2</sub>

图8 活性炭2在298、308、318 K下对CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>的吸附等温线



■—298 K O<sub>2</sub>; ●—308 K O<sub>2</sub>; ▲—318 K O<sub>2</sub>;  
□—298 K N<sub>2</sub>; ○—308 K N<sub>2</sub>; △—318 K N<sub>2</sub>

图9 沸石分子筛2在298、308、318 K下对O<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>的吸附等温线

根据图4~图9所示4种吸附剂样品所对应的吸附等温线来看,均属第I型吸附等温线,因此可用Langmuir吸附等温方程来描述:

$$q = q_m [BP / (1 + BP)] \quad (5)$$

其中,  $q_m$  为吸附剂的饱和吸附量,  $B$  为Langmuir吸附常数。将Langmuir方程化为直线形式,得:

$$1/q = 1/q_m + (1/Bq_m)(1/P) \quad (6)$$

将实验所测吸附等温线经此式处理后,线性度非常高,表明这些吸附等温线与Langmuir吸附方程符合得很好。此外,分离因子  $\alpha$  是选择吸附剂的1

个重要参数,  $\alpha$  偏离 1 越大, 组分分离的可能性就越大, 一般认为  $\alpha \geq 2$  则可进行变压吸附分离。对于满足 Langmuir 方程的双组分吸附体系, 分离因子  $\alpha$  可由下式得到<sup>[6]</sup>:

$$\alpha_{AB} = (x_A/y_A)/[(1-x_A)/(1-y_A)] = q_{m_A} B_A/q_{m_B} B_B \quad (7)$$

表 2 4 种吸附剂 Langmuir 吸附等温线特征参数  $q_m$  和  $B$  及分离因子  $\alpha$

吸附剂	气体	298 K			308 K			318 K		
		$q_m/(\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$B/\text{MPa}^{-1}$	$\alpha$	$q_m/(\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$B/\text{MPa}^{-1}$	$\alpha$	$q_m/(\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$B/\text{MPa}^{-1}$	$\alpha$
活性炭 1	CH <sub>4</sub>	3.410	3.817	3.955	3.198	3.199	3.925	3.108	2.568	3.921
	N <sub>2</sub>	2.734	1.204		2.703	0.964		2.424	0.840	
活性炭 2	CH <sub>4</sub>	3.487	4.655	4.579	3.305	3.763	4.290	3.303	2.824	3.874
	N <sub>2</sub>	2.947	1.202		2.834	1.023		2.724	0.884	
沸石	O <sub>2</sub>	2.115	0.509	3.123	1.625	0.545	2.981	1.097	0.683	2.759
分子筛 1	N <sub>2</sub>	3.934	0.854		3.462	0.763		3.232	0.640	
沸石	O <sub>2</sub>	1.513	0.862	2.806	1.350	0.859	2.650	1.239	0.787	2.418
分子筛 2	N <sub>2</sub>	2.334	1.568		2.058	1.493		1.735	1.359	

从表 2 中可以看出, 随着温度升高, 活性炭、沸石分子筛分别对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的饱和吸附量  $q_m$ , Langmuir 吸附常数  $B$  以及分离因子均在减小, 可以判断在较低温度下, 活性炭、沸石分子筛对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> 混合气、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 混合气的分离效果均较高温下好。从分离因子比较上看出, 活性炭 2 对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> 混合气的分离效果比活性炭 1 好, 更适用于变压吸附煤层气的浓缩; 沸石分子筛 1 对 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 混合气的分离效果比活性炭 2 好, 更适用于微型制氧机系统。

### 3 结论

(1) 采用 518P 仪表与固态继电器调压模块组成的温控系统, 通过特制加热包对吸附柱内腔进行恒温控制, 吸附平衡后柱内温度可稳定在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  范围内; 采用快装接头的封装方式, 在保证仪器操作便捷性的同时, 达到了良好气密性(2 MPa)。

(2) 测试了改进后高压静态吸附仪与 Autosorb-1 吸附仪所测活性炭、沸石分子筛分别在 298、308、318 K 下对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的吸附等温线, 对比得到其平均相对误差分别为 1.14% 和 2.47%, 均在可接受范围内, 精度较高。

(3) 在较低温度下, 活性炭、沸石分子筛分别对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> 混合气、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 混合气的分离效果均较高温下好。活性炭 2 对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> 混合气的分离效果比活性炭 1 好, 沸石分子筛 1 对 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 混合气的分离效果比活性炭 2 好。上述结果可分别为变压

通过式(6)拟合出的直线的截距和斜率即可得到各 Langmuir 吸附等温线的  $q_m$  和  $B$ , 进而通过式(7)分别计算得到活性炭 1、活性炭 2 对 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 以及沸石分子筛 1、沸石分子筛 2 对 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 的分离因子  $\alpha$ , 如表 2 所示。

吸附浓缩煤层气与微型制氧系统的吸附剂选择提供参考。

### 参考文献

- [1] 邓修, 吴俊生. 化工分离工程[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 5-29.
- [2] Seader J D, Ernest J Henley. 分离过程原理[M]. 朱开宏, 吴俊生译. 上海: 华东理工大学出版社, 2007: 46-49.
- [3] 辜敏, 鲜学福. 变压吸附技术的应用研究进展[J]. 广州化学, 2006, (31): 60-65.
- [4] Yang R T. Gas separation by adsorption processes[M]. Boston: Butterworths, 1987.
- [5] Siriwardanc, Shen, Fisher. Adsorption of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> on natural zeolites[J]. Energy & Fuels, 2002.
- [6] Yang X, Liu Y S, Li Y L. Study of adsorption characteristics on active carbon for ventilation air methane separation[J]. Advanced Materials Research, 2011, 391-392: 1253-1258.
- [7] Tang P, Yang X, Liu Y S. Active carbon for coal mine methane separation by pressure swing adsorption[J]. Advanced Materials Research, 2011, 236-238: 586-590.
- [8] 卜令兵, 刘应书, 刘文海, 等. 微型变压吸附分离空气制氧均压过程[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(10): 989-992.
- [9] 王楠, 刘应书, 刘文海, 等. 微型变压吸附制氧系统火用效率与氧气回收率研究[J]. 低温与特气, 2006, 24(6): 13-17.
- [10] 中国人民解放军防化研究所. 重量法静吸附仪: 中国, 931055417[P]. 1994-02-02.
- [11] 刘昂峰. 便携式吸附剂吸氧量测定仪: 中国, 20062016123813[P]. 2008-02-20.
- [12] 刘应书, 郭广栋, 杨雄, 等. 变压吸附浓缩煤层气吸附剂的选择实验[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(4): 4-7.
- [13] Douglas M. Ruthven, Shamsuzzaman Farooq, Kent S. Knaebel. Pressure Swing Adsorption. VCH Publishers, Inc. 1994. ■