

适用于本科教学的BET比表面测定实验

陈小娟 张伟庆 余小岚 李瑞英 陈六平*

(中山大学化学学院, 广州 510275)

摘要: 采用自组装的流动吸附仪建立了基于BET吸附原理的快速测定固体比表面积的方法(单点法), 对同一活性炭样品, 在多功能气体吸附系统上进行对照实验(多点法)。实验结果表明, 采用流动吸附仪测定比表面积方便易行, 数据稳定可靠, 实验教学效果良好。本文介绍这一特色实验, 希望对从事物理化学实验教学的同行有所助益。

关键词: BET; 比表面积; 流动吸附法; 自动吸附仪; 吸脱附等温线
中图分类号: G64; O6-339

Measuring BET Specific Surface Area: A New Experiment for Undergraduate Teaching

CHEN Xiao-Juan ZHANG Wei-Qing Yu Xiao-Lan LI Rui-Ying CHEN Liu-Ping*

(School of Chemistry, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, P. R. China)

Abstract: Using the home-made adsorption device, a method for quick measurement of solid specific surface area was established based on the BET adsorption theory. A contrast experiment designed by multipoint method was also carried out with the automatic adsorption apparatus. The experimental results show that the presented method is convenient. We hope that peers who devote in physical chemistry laboratory teaching can use this characteristic experiment.

Key Words: BET; Specific surface area; Flow adsorption method; Automatic adsorption apparatus; Adsorption/desorption isotherm

比表面积亦称比表面^[1], 是指单位质量(或单位体积)的固体物质所具有的总表面积, 包括内表面和外表面, 其数值与分散粒子的大小有关。任何固体物质的表面都是不均匀的, 存在凹凸、微孔、毛细管(孔)等, 其比表面大小和孔径分布情况取决于制备条件, 它们是评价多孔材料的反应活性、吸附、催化等多种性能及了解固体表面性质的重要参数。测定固体物质的比表面在催化剂、药品、陶瓷、活性炭、纳米碳管、粉体材料等的生产和研究方面都具有十分重要的意义。

本文介绍我院现代化学实验与技术课程之物理化学实验教学组研制的一种适用于本科教学实验的BET实验装置, 其同时可用于科研合成固体材料比表面的初步筛选。该法设备简单、操作方便、测定时间在2 h左右, 仍为一般缺乏低温高真空设备的实验室所能采用的一种方法, 尤其适合用于高校本科物理化学实验课程教学。

*通讯作者, Email: cesclp@mail.sysu.edu.cn

基金资助: 中山大学首批校级课程教学团队建设项目(2014); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程立项建设项目(2015)

1 实验背景

1.1 BET 比表面积的测定原理

若气体在 1 g 吸附剂的内、外表面形成完整的单分子吸附层就达到饱和, 那么只要将该饱和吸附量(吸附质分子数)乘以每个吸附质分子在吸附剂表面上占据的面积, 就可求得吸附剂的比表面。朗缪尔(Langmuir)于 1916 年提出的单分子层吸附理论就被应用于测定固体比表面。1938 年, 布龙瑙尔(Brunauer)、埃梅特(Emmett)及特勒(Teller)(简称 BET)三人将朗缪尔吸附理论推广到描述多分子层吸附现象, 进而建立了 BET 多分子层吸附理论^[2], 推导出 BET 公式如下:

$$\frac{p/p_0}{\Gamma(1 - p/p_0)} = \frac{1}{\Gamma_m \cdot C} + \frac{C - 1}{\Gamma_m \cdot C} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

式中: p 为平衡压力; p_0 为吸附平衡温度下吸附质的饱和蒸气压; Γ 为平衡时的吸附量; Γ_m 为每 kg 吸附剂表面上形成一个单分子层时的饱和吸附量; C 为与温度、吸附热和气体液化热有关的常数。当相对压力 p/p_0 在 0.05–0.35 的范围内, 吸附等温线通常是呈线性的, 通过实验测定一系列的 p 和 Γ 数据, 然后以 $\frac{p/p_0}{\Gamma(1 - p/p_0)}$ 对 p/p_0 作图可得一直线, 其斜率为 $m = \frac{C - 1}{\Gamma_m \cdot C}$, 截距为 $I = \frac{1}{\Gamma_m \cdot C}$, 从而可得:

$$\Gamma_m = \frac{1}{m + I} \quad (2)$$

进一步可求得固体的比表面 S 为:

$$S = \Gamma_m \times N_A \times A \quad (3)$$

式中, S 为比表面, 即每 1 kg 吸附剂具有的总面积, $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; N_A 为阿伏加德罗常量; A 为每个吸附质分子的截面积, nm^2 。

1.2 BET 比表面积的测定方法

基于 BET 多层吸附理论测定固体物质比表面的基本原理, 许多厂商研制了多种比表面测定仪并在科研和工业产品品质检测中获得了广泛应用^[3,4], 最常见的有容量法、重量法及气相色谱法。其中, 前两种为静态法, 最后一种为动态法。

BET 静态吸附法是一种经典的比表面测定方法, 目前已有大量商品化的自动吸附仪, 但其仪器装置复杂且价格昂贵、操作条件要求苛刻、测定周期较长, 这类仪器主要用于科研和高端制造工业, 很难应用于本科实验教学。而动态吸附法虽有快速、灵敏度高的优点, 但受实验过程多种因素制约, 在测定精度上有一定局限性^[5]。马波等^[6]对此法改进后使测定结果更为准确, 但仍需气相色谱仪及低温操作条件。为此, 商连弟等^[7-11]开发了不同吸附质的“干燥器”法, 将乙醇和二甘醇按照比例混合, 调节折光率以调节相对压力 p/p_0 的值, 置于真空干燥器内进行静态吸附, 测得试样的比表面结果和氮气吸附法测定比表面的结果能够较好地相符, 误差在 10% 之内。此法整个过程操作虽然简单, 但仍需要一定的真空条件, 且测量较为耗时, 一般需要 20 小时或更长时间才能达到吸附平衡。

1.3 吸附量的计算方法

1) 多点计算法。

经由上述式(1)–式(3)计算出比表面的过程称为多点法, 其需要测定多个不同的相对压力 p/p_0 下的吸附量, 测定过程十分耗时。

2) 单点计算法。

当已经确定某种材料的 BET 图是一条直线时, 可采用简化的方法, 当 p/p_0 在 0.2–0.3 范围内, 且 $C \gg 1$ 时, BET 图纵坐标上的截距 $I = 1/(\Gamma_m \cdot C)$ 可近似为 0, 则在等温线上只需测量一点, 式(1)可简化为 $\Gamma_m = \Gamma(1 - p/p_0)$, 此即单点法。实验证明, 单点法与多点法所得的比表面数值之差一般不超过 5%^[12], 在一般对比表面数据准确度要求不太高的情况下, 单点法可大大节省测定时间。

2 流动吸附法测定固体比表面积

本文采用自制的BET实验装置,调节载气(N_2)以一定的流速携带甲醇蒸气连续不断地流过活性炭表面,一段时间后,采用称重的方法确定甲醇的吸附量,最终由BET公式计算出活性炭的比表面积。

2.1 实验测定装置及原理

我院现代化学实验与技术课程物理化学实验教学组在多年的教学实践中,经多次改进,研制的简易型比表面测定装置示于图1。

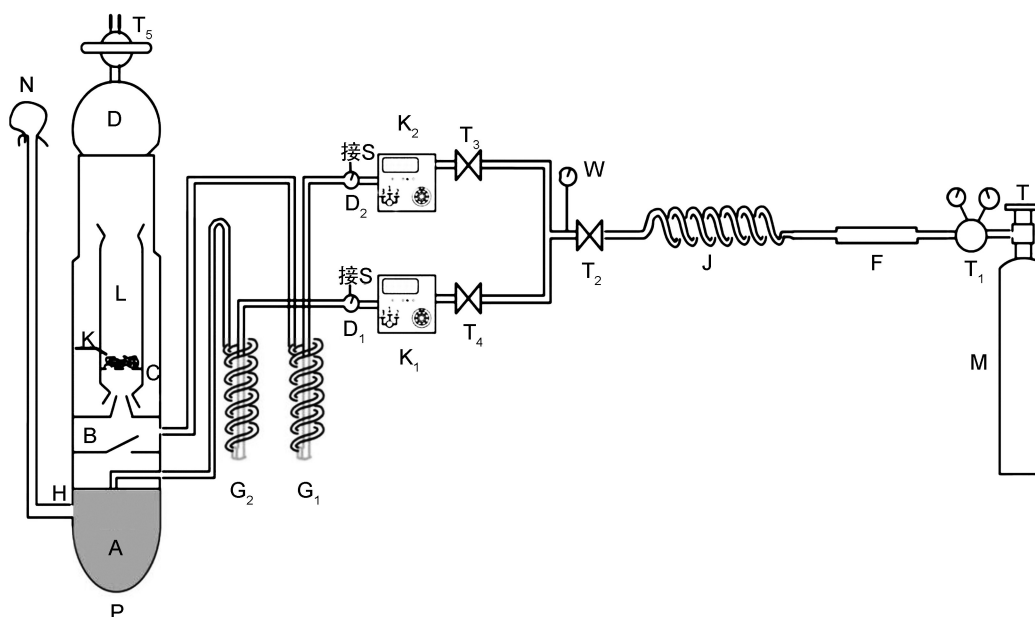


图1 流动吸附法测定固体比表面装置图

T. 钢瓶阀门; T₁. 减压阀; T₂. 调压阀; T₃、T₄. 微量调节阀; T₅. 活塞; M. 高压氮气瓶; F. 净化器; J. 稳流管; W. 压力表; K₁、K₂. D08-1F 流量显示仪; D₁、D₂. 三通阀; S. 皂膜流速计; G₁、G₂. 预热器; A. 饱和器; B. 混合器; L. 样品管; C. 筛板; N、D. 磨口塞; P. 吸附仪(G₁、G₂和P均置于恒温水浴中,水浴高度以水面高过样品管中的样品为准); K. 玻璃丝

按图1装置测定比表面积时,可由下法计算吸附质(如甲醇)的相对压力 $p_{\text{甲}}/p_0$ 。

N_2 以流速 v_1 从流量计K₁进入饱和器A,带走了饱和的甲醇蒸气,使气流速度由 v_1 增加到 $v_1 + \Delta v$,而 Δv 与 $v_1 + \Delta v$ 之比等于混合气体中甲醇的摩尔分数,又等于 p_0/p_A (p_0 为实验温度下甲醇的饱和蒸气压, p_A 为实验大气压),即:

$$\frac{\Delta v}{v_1 + \Delta v} = \frac{p_0}{p_A}$$

$$\Delta v = \frac{p_0 v_1}{p_A - p_0} \quad (4)$$

混合气体从饱和器A进入混合器B后,又被来自流量计K₂的 N_2 (流速为 v_2)所冲稀,这时混合气流的总速率 v 等于 v_1 、 v_2 及 Δv 之和,甲醇在混合气流中的分压为 $p_{\text{甲}}$ (即吸附平衡时吸附质的压力), $p_{\text{甲}}$ 与实验大气压 p_A 之比为:

$$\frac{p_{\text{甲}}}{p_A} = \frac{\Delta v}{v_1 + v_2 + \Delta v} = \frac{\Delta v}{v} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),整理后得:

$$\frac{p_{\text{甲}}}{p_0} = \frac{v_1 + \Delta v}{v} = \frac{v - v_2}{v}$$

$$\frac{p_{\text{甲}}}{p_0} = \frac{v_1}{v_1 + v_2 - v_2 \cdot \frac{p_0}{p_A}} \quad (6)$$

式中, v_1 和 v_2 用皂膜流速计直接测得, p_A 的值由实验室内气压计读出, p_0 为实验温度下甲醇的饱和蒸气压, 可由经验公式计算^[13]。本实验以甲醇为吸附质, 其分子截面积为 0.25 nm^2 。

在比表面不太小(不少于 $200 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)、截距不太大的情况下, 可采用上述的单点法来计算比表面, 本实验即采用此法, 即把截距 I 取为零, 在 $p_{\text{甲}}/p_0 \approx 0.3$ 处测得一点, 该点与原点连成一条直线(图2), 计算直线斜率, 代入式(2)算得 Γ_m , 再将 Γ_m 代入式(3)得到活性炭的比表面积。

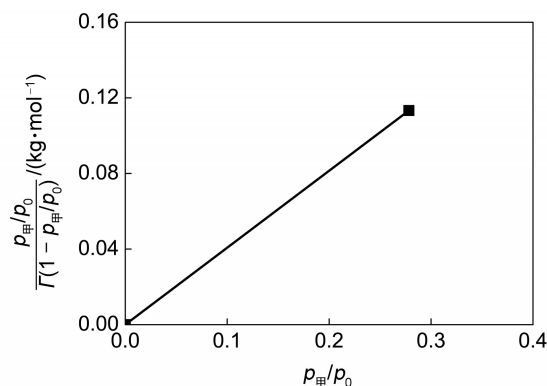


图2 甲醇在活性炭上吸附实验的 BET 图

2.2 实验测定

2.2.1 仪器试剂

仪器: 流动吸附法测定固体比表面装置一套, 由气源(N_2)、甲醇相对压力控制和吸附量的测定等三部分组成; 分析天平(0.1 mg)、秒表、皂膜流量计、吸附仪、样品管、电子质量流量计、预热管、压力表、玻璃恒温水浴一套; 其他仪器见图1。

试剂: 甲醇(A. R.); 活性炭(20–40目, 产品批次: #20150102, 天津福晨化学试剂厂, 在 300°C 左右通高纯 N_2 3 h, 以除去吸附的水分、有机杂质等; 停止加热, 冷却到室温后, 存放在干燥器中备用)。

2.2.2 实验安排

本实验作为现代化学实验与技术之物理化学实验的一个实验项目, 已经在中山大学化学学院开设15年, 目前经改进的仪器共有6套, 每次参与该项目学生为10–12人, 2人一组, 实验完成时间为90–120 min。实验中使用到氮气高压钢瓶, 可能涉及到氮气的泄露或钢瓶的倾倒等风险, 均已做好相应的防护措施。

2.2.3 实验步骤^[14]

- 1) 开启磨口塞N, 在饱和器A中装入适量甲醇(图1), 调节恒温槽温度高于室温 2°C 左右。
- 2) 打开气瓶总阀T, 调节减压阀 T_1 使表压在 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右, 旋转 D_1 和 D_2 (D_1 、 D_2 合成一个双三通阀)接S位置(流速档, 连接皂膜流速计), 先调节 T_2 的压力至 $0.7 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右, 再缓慢调节 T_4 、 T_3 , 使流速 v_1 、 v_2 分别为 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $15 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右, 以控制 $p_{\text{甲}}/p_0$ 在 0.2–0.3 之间。流速可在S上准确测定, 每个流速须平行测定3次, 最后取平均值。待流速调好后, 将 D_1 、 D_2 接至P(吸附档)。
- 3) 在样品管L的筛板上铺一薄层玻璃丝, 盖好管塞, 在分析天平上称量, 然后装入 $0.4\text{--}0.5 \text{ g}$ 已

处理好的活性炭，盖好管塞后称量，即得样品质量。

(4) 将样品管置于吸附仪中，在稳定的流速下通气 50 min 至 1 h 后，于分析天平上称重可得被吸附甲醇的质量，继续通气 15 min 左右，再取出称重……直至两次称重的质量差不大于 0.5 mg，则可认为达到吸附饱和。

(5) 实验完毕，将样品管洗净、干燥，并置于干燥器中。

2.2.4 实验数据及结果

本文收集了一学期内本科生测定的 65 组数据，示于表 1。其中， $t_{槽}$ 为恒温水浴温度，用于计算 p_0 。65 组学生测定的活性炭的比表面的平均值为 $309.36 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

表 1 甲醇在活性炭上等温吸附的实验数据及结果

序号	$t_{槽}/^{\circ}\text{C}$	$p_{\text{甲醇}}/\text{kPa}$	$p_{\text{大气压}}/\text{kPa}$	$m_{\text{活性炭}}/\text{g}$	$v_1/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_2/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	$m_{\text{甲醇}}/\text{g}$	p/p_0	$\Gamma_m/(\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$S/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
1	25.00	16.85	102.40	0.4080	4.770	15.74	0.0443	0.266	2.487	374.26
2	29.00	20.69	102.40	0.4709	5.014	15.37	0.0434	0.290	2.042	307.29
3	25.10	16.94	102.40	0.4590	5.210	16.29	0.0504	0.277	2.478	372.88
4	25.50	17.30	102.20	0.4810	4.878	15.40	0.0539	0.276	2.532	381.07
5	28.00	19.67	102.10	0.4813	4.900	15.41	0.0423	0.283	1.968	296.18
6	26.00	17.75	102.21	0.4469	5.310	15.27	0.0418	0.296	2.055	309.22
7	28.00	19.67	102.10	0.4427	4.986	15.87	0.0383	0.280	1.944	292.54
8	24.90	16.76	102.21	0.4597	4.870	15.14	0.0447	0.278	2.192	329.84
9	26.50	18.21	102.21	0.4496	5.130	15.45	0.0439	0.288	2.171	326.66
10	30.00	21.76	102.19	0.4156	5.260	16.04	0.0421	0.294	2.232	335.88
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
65	19.00	12.23	103.40	0.4615	5.430	15.95	0.0405	0.279	1.976	297.39

3 自动吸附仪测定比表面积的结果

利用多功能吸附系统(BELSORP-HP, 日本)，在液氮温度下测定了活性炭对氮气的吸(脱)附等温线，得到活性炭的比表面积^[15]，与自组装的流动吸附仪测定的比表面进行对比，同时对活性炭的孔径大小进行了分析。

a) 比表面积。

图 3 为一组实验中由多点法测定的活性炭的 BET 图，按式(1)进行直线拟合(式中的吸附量 Γ 、单层饱和吸附量 Γ_m 均可用平衡压力下试样所吸附的氮气体积 V_a 及单层吸附量 V_m 来表征， p 和 p_0 则分别表示吸附平衡压力和液氮温度下氮气的饱和蒸气压)，得其比表面为 $347.76 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

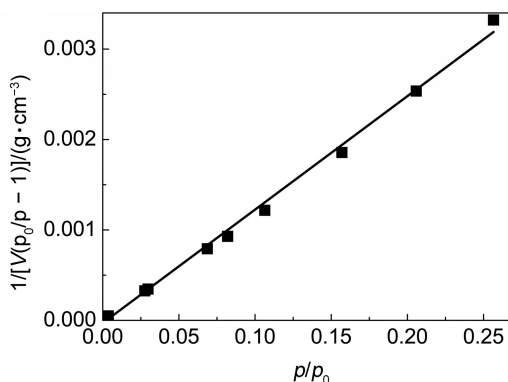


图 3 多点法测定的活性炭的 BET 图

采用相同步骤，进行了6组平行实验，测定的活性炭的比表面积分别为：336.21、347.76、315.68、312.56、316.31、310.25 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ，其平均值为323.13 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

b) 吸脱附等温线及孔径分析。

利用吸附等温线可以进行吸附质在吸附剂表面运动状态的研究，也可以进行吸附剂表面结构与性质的研究，还可以进行吸附质与吸附剂之间相互作用的研究。当吸附剂和吸附质达到平衡时，吸附剂固体吸附吸附质气体或蒸气的量与吸附剂质量成正比，平衡吸附量取决于吸附温度、气体或蒸气压力以及吸附剂和吸附质气体的性质。图4是在温度为77 K时测得的活性炭等温吸脱附曲线，该图符合第IV类的吸附等温线特征，在低 p/p_0 区，与II型等温线相似，曲线凸向上、有拐点，表明单分子层吸附的完成，可由BET方程解释。随着 p/p_0 的增大开始发生第二层吸附，吸附等温线平缓上升，渐渐接近饱和蒸气压($p/p_0 = 1$)，对于吸附等温线渐渐接近饱和蒸气压的情况，可认为是由于孔内吸附膜被吸附质液体润湿所引起的。由图4可知，吸附等温线和脱附等温线不重合，脱附等温线在吸附等温线的上方，可看到迟滞回线。迟滞回线的形状随吸附系统的不同而异。迟滞回线的产生通常与毛细管凝聚有关。

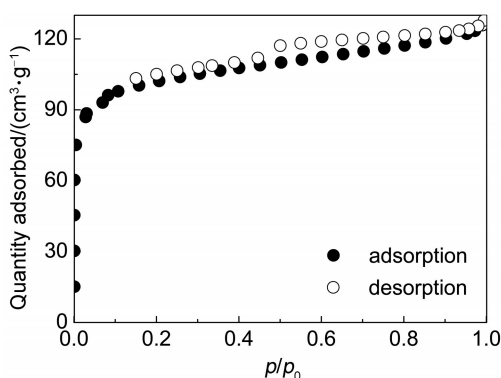


图4 活性炭的吸脱附等温线图(77 K)

根据IUPAC^[16]的分类法：孔宽度小于2 nm的为微孔，介于2–50 nm的为中孔，大于50 nm的为孔。这种分类法是按照每一类孔在吸附等温线上的特征吸附效应来划分的。通常将产生IV型吸附等温线的孔径范围分类为中孔。根据开尔文方程^[17]，若存在中孔和大孔，则固体表面一定会发生毛细管凝聚现象。实验中还选用BJH法对活性炭样品中的孔分布进行了计算(图5)，计算范围为1–100 nm。由图5可知，样品中含有大量中孔，峰值孔径为2.0 nm、4.0 nm左右。

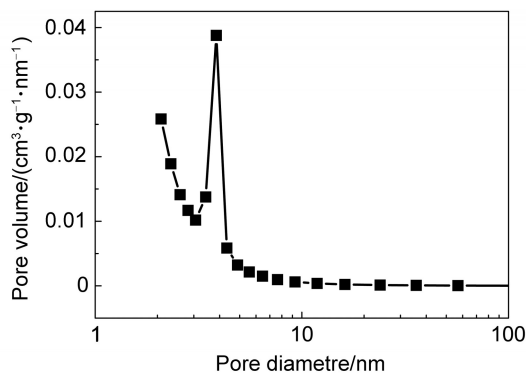


图5 BJH法计算的活性炭孔分布

4 实验结果比较与讨论

4.1 实验可靠性验证

利用自行组装的比表面测定装置开展本科教学实验, 本文采集了最近一学期的学生实验数据测定值, 共 65 组数据(表 1, 考虑到数据太多, 部分数据未列出), 全体数据的平均值为 $309.36 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。与此同时, 采用自动吸附仪进行了活性炭比表面的 6 次平行测定实验, 其实验结果的平均值为 $323.13 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。这两个平均值的相对偏差为 4.26%。

假定两种方法测定的活性炭比表面积数值均符合正态分布, 由 Minitab 软件^[18]利用双样本齐方差 t 检验法对两种方法测量结果做显著性检验(具体分析结果见表 2)。由分析结果可见, 假定置信水平为 95%, 计算其 P 值为 0.12。根据统计学原理^[19]可知, $P > 0.05$ 时, 不能否认无效假设(也叫 0 假设, 即“两种方法测定的比表面积的总体平均值相同”的假设)。由上述显著性检验结果可知, 采用自组装的流动吸附仪测定的活性炭的比表面数据与由自动吸附仪所测得的比表面数据相比没有显著的差别。

表 2 多点法与单点法的双样本 t 检验结果

方法	N	S 的平均值/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	标准差/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均值标准误差/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
多点法	6	323.13	15.2	6.2
单点法	65	309.36	45.0	5.6

差值 = $\mu(\text{reference}) - \mu(\text{experimental})$; 差值估计: 13.77; 差值的 95% 置信区间: $(-4.03, 31.57)$;

差值 = 0 (与 $\neq$) 的 t 检验: $t = 1.65$, $P = 0.12$, 自由度 = 15

4.2 误差分析与讨论

当相对压力在 0.05–0.35 之间时, BET 图有较好的直线关系, 其原因是由 BET 吸附原理的基本假设决定的。推导 BET 吸附方程的基本假定是多层物理吸附, 因此在相对压力小于 0.05 时, 因相对压力太小无法建立多层物理吸附平衡, 甚至单分子层吸附也远未完成, 表面的不均匀性就显得突出。而在相对压力大于 0.35 时, 因毛细管凝聚变得显著起来, 破坏了多分子层物理吸附平衡, 因此在实验中 p_{H}/p_0 要控制在 0.3 左右, 以保证实现多分子层吸附而又不会出现毛细管凝聚现象。

综上, 影响本实验准确性的因素有: ① 实验体系的稳定性, 如室内气压、氮气气压的稳定性等是影响相对压力的首要因素, 因此需要准确地调节系统的压力并保持稳定; ② 流速测定的准确度, 流速的准确测定是影响实验结果的重要因素, 本文要求相对压力 p_{H}/p_0 在 0.05–0.35 之间以满足 BET 方程的适用性, 而流速 v_1 、 v_2 的比值直接影响 p_{H}/p_0 的结果, 因此本实验的气体流速采用皂膜流量计准确标定, 且每个流速测定 3 次取平均值以减少实验系统误差; ③ 恒温槽控温的精度, 恒温槽须精确控温以保证吸附的热力学平衡, 同时要保证样品管完全浸没到恒温槽中, 若活性炭未完全浸入恒温体系则会导致甲醇蒸气在管壁上冷凝, 导致实验结果有偏差; ④ 吸附剂和吸附质之间的相互作用, 甲醇是极性分子, 容易与活性炭中的杂质相互作用引起极化, 会导致实验结果偏大, 因此在活性炭使用前须高温通氮气活化, 尽可能除去附着的有机杂质; ⑤ 实验操作引起的误差, 如在称量样品管过程中没有盖紧样品管两端, 从而导致活性炭吸水引起称量误差乃至吸附性能下降, 又如在装样品时样品管中玻璃丝之间有微小缝隙, 可能导致样品损失, 从而影响实验结果等等, 这些都是人为误差, 应尽量避免。

此外, 本实验采用的流动吸附法与氮气吸附法测定比表面相比, 前者的比表面积是将单个甲醇分子的截面积乘以饱和吸附量计算而得, 而后者是氮气分子在低温条件下的截面积与饱和吸附量的乘积, 所用吸附质不同, 这对实验结果也会有一定程度的影响。

本文使用自制的流动吸附装置, 同时采用一点法计算比表面积。本法仅对比表面积不小于 $200 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

的固体物质的测定较为适宜,这也是本实验的局限所在。本文以活性炭为吸附剂、甲醇作为吸附质进行研究,对其他物质并没有涉及,今后可尝试采用其他体系,如氧化铝、硅胶等作吸附剂,乙醇、乙二醇或其他有机物等作吸附质进行进一步探讨。

5 结 语

固体表面吸附是界面科学的重要内容。固体比表面作为表征各类材料性能的重要参数之一,其测定已成为化学、材料、物理、制药、化工、建材等学科和行业的常规实验。基于 BET 吸附原理开发的自动吸附仪更适用于系统地研究一定的固体体系,其操作条件高,测定时间长,经济成本大,是科研工作中明确固体形状及内部结构的有效手段之一。目前我院中心实验室、2 个教育部重点实验室、Lehn 功能材料研究所等部门共有进口的各种型号吸附仪 7 台,其全部用于科研实验,机时还显紧张,将其用于本科生教学实验不仅不现实,而且使用成本较高。

对本科教学实验来说,尽管流动吸附法不能如自动吸附仪那样,能得到详细的吸附等温线及孔径大小等信息,但此法测定固体比表面具有简便、经济、快速等优势,不仅让学生深入理解 BET 法测定比表面的基本原理、明确其测定流程,同时掌握气体流速的两种测定方法和技术,更好地理解由简易装置亦能获得与贵重仪器相同的测定效果的精髓,从而建立科学的思维方法。此法也可作为科研工作中初步筛选比表面大小的方法之一,具有高效率、低成本的特点。我院在大三化学类专业的本科生中开设“BET 流动吸附法测定比表面”实验已有数年,实验装置亦经过多次改进,取得了很好的教学效果,对其他兄弟院校具有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 赵振国. 吸附作用应用原理. 北京: 化学工业出版社, 2005: 53-64.
- [2] Brunaur, S.; Emmet, P.; Teller, E. *J. Am. chem. Soc.* **1938**, *60*, 309.
- [3] 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积. GB/T 19587-2004.
- [4] Stoeckli, F.; Centeno, T. A. *Carbon* **2005**, *43*, 1184.
- [5] 谈启明, 杨师鞠, 陈学信. 石油化工, **1977**, No. 5, 453.
- [6] 马 波, 赵长志. 光谱实验室, **1996**, No. 6, 45.
- [7] 商连弟. 石油化工, **1982**, No. 2, 125.
- [8] 商连弟, 李园园. 化学世界, **1986**, 27 (4), 164.
- [9] 商连弟, 李 晖, 朱文强. 化学世界, **1992**, 33 (8), 365.
- [10] 赵 虹, 商连弟, 刘 毅, 卢爱华, 张藏均. 无机盐工业, **2002**, 34 (3), 43.
- [11] 林庆文, 刘 瑾, 邓 盾. 石油化工, **2010**, 39 (5), 558.
- [12] 宋 军, 王 鉴, 汪 丽, 宋 刚, 赵 薇. 化学工程, **2011**, 39 (10), 19.
- [13] Jordan, T. E. *Vapor Pressure of Organic Compounds*; Interscience Publishers, Inc.: New York, 1954.
- [14] 陈六平, 戴 宗. 现代化学实验与技术. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2015: 205-206.
- [15] 煤炭颗粒活性炭实验方法. GB/T 7702.1~7702.00-1997.
- [16] Sing, S. W.; Everett, D. H.; Haul, R. A. W.; Moscou, L.; Plerotti, R. A.; Kouquerol, J.; Siemieniewska, T. *Pure & Appl. Chem.* **1985**, *57* (4), 603.
- [17] 近藤精一, 石川达雄, 安部郁夫. 吸附科学. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2015: 63-69.
- [18] Paul, G. M. *Design of Experiment with MINITAB*. Society for Quality; Quality Press: Wisconsin, Milwaukee, American, 2005; pp 9-17.
- [19] 甘健胜. 概率论与数理统计. 北京: 清华大学出版社、北京交通大学出版社, 2005: 184-187.