

BET 流动法测固体比表面积实验的改进

王安鼎, 陈小娟, 朱远飞, 杨洋溢

(中山大学 材料科学与工程学院, 化学教学实验中心, 广州 510275)

摘要: 多层吸附(BET 吸附)理论作为本科实验课的固体比表面积测定原理,通常应用于流动法测固体样品比表面的实验。实验中,吸附剂的支撑材料——玻璃纤维使用过程中不可避免地产生大量的细微玻璃纤维在空气中飘浮,对师生健康产生严重危害;新型多功能材料——聚四氟乙烯具有良好的安全性、稳定性,及易加工、可重复利用等性能已被应用于一些特殊场合。基于对师生安全的考虑,选用了聚四氟乙烯塑料丝替代玻璃纤维作为吸附剂的支撑材料。实验结果表明,使用聚四氟乙烯的 BET 吸附实验数据稳定可靠,而且安全环保,测试方法简便,教学效果显著提高。

关键词: 聚四氟乙烯; BET 法测定比表面; 流动吸附法; 单点法

中图分类号: G 642.423; O 647.31 **文献标志码:** A

文章编号: 1006-7167(2023)06-0231-04



Improvement in Experiment to Measure Specific Surface Area of Solid by BET Flow Method

WANG Anding, CHEN Xiaojuan, ZHU Yuanfei, YANG Yangyi

(Chemistry Teaching and Experimental Center, School of Materials Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: BET adsorption theory provides the principle of solid specific surface area determination in undergraduate experimental courses, and is usually used in the specific surface area determination experiments of solid samples by flow adsorption instruments. The experiment is of great significance for students to understand the adsorption principle and improve their practical operation ability. However, the supporting material of the sample—glass fiber may inevitably produce lots of fibers and be spread widely in the air, causing serious harm to students' health. The new multifunctional plastic-polytetrafluoroethylene (PTFE) has good safety, stability, easy processing and reusability, and has been used in some special occasions. Based on safety considerations, we choose polytetrafluoroethylene plastic wire instead of glass fiber as the sample support material. The experimental results show that compared with the original experimental materials, the BET adsorption experimental data using PTFE is stable, reliable and environmentally friendly. The teaching effect is significantly improved with this simple method.

Key words: polytetrafluoroethylene plastic; BET method to measure specific surface; flow adsorption method; single point method

收稿日期:2022-04-27

作者简介: 王安鼎(1998-),男,安徽淮南人,硕士生,研究方向为材料物理化学。

Tel.: 15626104718; E-mail: kiruwa138@163.com

通信作者: 杨洋溢(1964-),男,海南乐东人,博士,教授,研究方向为物理化学。E-mail: cesyyy@mail.sysu.edu.cn

0 引言

固体表面作为固体和外界最直接接触的部分,在各种物理化学行为中往往具有决定性的影响,因此关于固体表面的性质一直都是研究的热点领域。事实

上,表面不均匀性是所有实际固体都存在的,所以对固体表面进行有效的测定非常重要。比表面指的是固体物质的单位质量所拥有的表面积的总和^[1]。它包含了固体外表面及固体因存在微/介孔、毛细管等而产生的内表面。比表面大小和孔径分布对物质的性质有很大的影响,如固体吸附剂、催化剂的评选,固体表面性质和电化学性质等^[2]。因此,比表面测定是高校本科教学的重要内容之一。

在比表面测定实验中使用流动法比表面测量装置,用聚四氟乙烯塑料丝代替玻璃纤维丝作为吸附剂的支撑材料。该材料的主要作用是铺设在样品管的筛板上,确保样品颗粒不被气流冲垮或脱落,因此该材料不仅要具备致密的结构防止吸附剂掉落到吸附管下方,而且不能吸水或者吸收气体增加额外的重量,对材料本身的理化性质要求较高^[3-4]。目前国内高校的本科实验教学中,普遍使用的是玻璃纤维丝材料,但是在长期的教学实践中发现,玻璃丝同样存在安全隐患。

由于玻璃丝本身质轻易断且纤维尺寸十分细微,不可避免地出现玻璃丝断裂造成细小纤维在空气中大量悬浮扩散,对学生的身体健康造成危害^[5]。实际上在实验教学中,学生也经常反映身体皮肤会发痒或有刺痛感,甚至会打喷嚏等,即使皮肤经过多次清洗仍然不能缓解刺痛的感觉,穿了实验服也不能够很好地将全身保护起来。除此之外,玻璃丝极性高,本实验所使用的吸附质——甲醇也具有较高的极性,在此吸附环境中,玻璃丝对甲醇的极性相互作用会影响吸附后总质量的测量,干扰实验结果。同时,在测定过程中,折断的细小玻璃丝也会随着惰性气流而流失,同样对实验结果产生影响。通过查阅相关文献及实际测量观察,考虑到聚四氟乙烯材料的非极性表面,及安全性、稳定性,易加工和可重复利用等性能,选用聚四氟乙烯塑料丝替代玻璃纤维丝作为本实验的吸附剂支撑材料^[6]。实验结果表明,为聚四氟乙烯塑料丝不仅杜绝了容易发生在学生身上的安全隐患,实验数据的可靠性也得到了较好的保证,此外聚四氟乙烯材料经过简单的清洗、干燥还可以循环使用,这些优点使聚四氟乙烯更加适合作为本教学实验的样品支撑材料。

聚四氟乙烯材料的应用不仅适用于本实验,其优异的化学惰性、非极性、不吸收多种气体及水蒸气等特点,使其在各类型的吸附实验中有良好的应用前景。此外,它易于加工、便于循环利用,更重要的是材料本身较高的安全性,使得聚四氟乙烯材料尤其适合于普通高校的本科教学实验课程。

1 实验相关知识

1.1 BET 比表面积测定的原理

在多层吸附(BET 吸附)理论诞生之前,普遍使用

的是朗缪尔(Langmuir)单分子层气体吸附理论。BET 吸附方程是由布鲁诺(Brunauer)、埃麦特(Emmet)和泰勒(Teller)3 位科学家在朗缪尔吸附理论的基础上,用于描述实际物体多分子层吸附理论的方程^[7]。BET 吸附理论基于如下 4 个基本假设:① 固体具备均匀的表面结构;② 吸附质、吸附剂及吸附质分子之间的作用力是范德华力(保证吸附不会因为单纯的物理吸附而只停留在单分子层),但吸附质分子在同一层并无相互作用;③ 吸附与解吸能形成动态平衡;④ 第二层及以上的各层分子间,吸附热等于气体的液化热^[8]。

根据以上假设,上述 3 位科学家导出了 BET 吸附方程:

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

式中: Γ 为气体吸附量; Γ_m 为单分子层饱和吸附量; p 为吸附质蒸气压; p_0 为吸附质在对应温度下的饱和蒸气压; C 为与温度、吸附热和气体液化热有关的常数^[9]。

根据式(1),将方程中的各参数定义为:

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{p/p_0}{\Gamma(1-p/p_0)}, & x &= \frac{p}{p_0} \\ A &= \frac{C-1}{\Gamma_m C}, & B &= \frac{1}{\Gamma_m C} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则可把吸附方程转化为 $x-y$ 的线性关系,以 A 为斜率, B 为截距,就可以方便地对吸附剂的比表面积进行计算。尽管 BET 理论的 4 个基本假设与实际情况有一定的出入,但这 4 个因素的组合往往使其缺点相互抵消,从而使 BET 公式计算值与实验结果有较好的一致性,这也是该公式目前被广泛应用的重要原因。

通过线性关系的测量,可以计算单分子层饱和吸附量

$$\Gamma_m = 1/(A+B) \quad (3)$$

进一步求出比表面积 S_g

$$S_g = N_A S \cdot \Gamma_m \quad (4)$$

式中: S_g 为比表面,常用单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; N_A 为阿伏伽德罗常量; S 为单个吸附质分子的截面积。本实验使用甲醇作为气体吸附质,这里甲醇的分子截面积是 0.25 nm^2 。

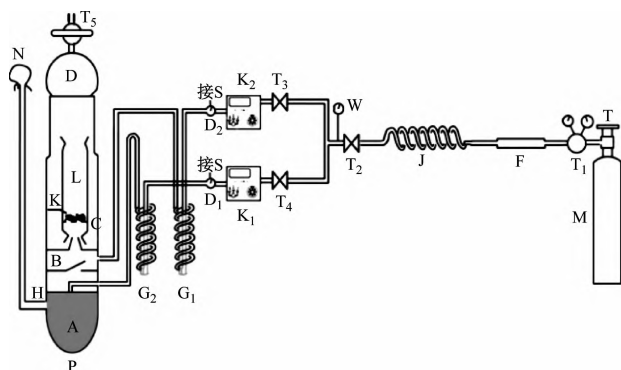
1.2 吸附量的计算方法——单点计算法

作为本科教学实验课,受实验时间和条件的限制,采用的是 BET 单点法。即只取一点进行测量,根据单分子层饱和吸附量计算得到吸附剂的比表面积。这是在比表面高于 $200 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 时能够使用的测定方法。具体来说,当 p/p_0 的数值在 $0.2 \sim 0.3$ 之间的情况下,取等温线上的一点与原点作一条直线,单层饱和吸附量 Γ_m 的值即为这条直线的斜率 A 的倒数。在缺乏低温高真空设备的实验室,多数实验采用的是单点法,本

教学实验以单点法测定活性炭的比表面积。

1.3 实验测定装置及工作原理

本实验使用我校物理化学实验组的流动法固体比表面测量装置见图1。



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 - 预热管; 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都需要处在恒温的水浴环境中,且水面高度要超过样品管中的样品); K - 聚四氟乙烯塑料丝^[10]

图1 流动吸附法测定固体比表面装置示意图

仪器的工作原理及计算方法:氮气从流量计K₁处以 v_1 的速度进入,饱和器A中的饱和甲醇蒸气被氮气带出,使通过气体的气流速度增加到 $v_1 + \Delta v$ 。此时混合气体中甲醇的摩尔分数等于 $\Delta v / (v_1 + \Delta v)$,也等于 p_0 / p_A (p_0 为相应温度下甲醇气体的饱和蒸气压, p_A 为实验室大气压)^[11],整理得:

$$\frac{\Delta v}{v_1 + \Delta v} = \frac{p_0}{p_A}, \quad \Delta v = \frac{p_0 v_1}{p_A - p_0} \quad (5)$$

来自流量计K₂的氮气以 v_2 的流速与离开饱和器A的气体在混合器B中汇合,于是混合气流的总流速 v 增加为 v_1 、 v_2 及 Δv 之和。令 $p_{\text{甲}}$ 为甲醇气体在混合气体中的分压(即建立吸附平衡时吸附质气体的分压),得出 $p_{\text{甲}}$ 与实验大气压 p_A 之比为^[11]

$$\frac{p_{\text{甲}}}{p_A} = \frac{\Delta v}{\Delta v + v_1 + v_2} = \frac{\Delta v}{v} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),整理后得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_{\text{甲}}}{p_0} &= \frac{v_1 + \Delta v}{v} = \frac{v - v_2}{v} \\ \frac{p_{\text{甲}}}{p_0} &= \frac{v_1}{v_1 + v_2 - v_2 \cdot p_0 / p_A} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:气体流速 v_1 和 v_2 由微量调节阀T₃和T₄调节和控制,并通过皂膜流速计准确测定,大气压 p_A 的数值由实验室内的气压计直接读出; p_0 为相应温度下甲醇气体的饱和蒸气压,可以通过以下经验公式计算出^[11]:

$$\lg p_0 = A - B / (C + t) \quad (8)$$

式中, A 、 B 、 C 为经验常数,在实验温度范围 $t = -20 \sim$

140 ℃内,分别取 $A = 7.878\ 63$, $B = 1\ 473.11$, $C = 230.0$ 。

1.4 聚四氟乙烯材料的应用

与玻璃丝相比,聚四氟乙烯^[12]丝物理形貌更加稳定,不会因受外力断裂而分散在空气中,对人体产生危害。对于本科教学实验课程来说,除了要让实验顺利完成,参加实验的学生的安全问题更是需要考虑的重要因素。玻璃纤维丝易脆断裂所造成的影响比想象的要严重得多,细小的玻璃纤维在空气中漂浮扩散,不管是吸入身体还是扎在皮肤上,都难以预防,而且后续还会造成更严重的危害,这是选用聚四氟乙烯材料的重要原因。同时聚四氟乙烯的非极性表面,弱的亲水亲油性对本实验的结果也有较好的提升。除此之外,由于聚四氟乙烯稳定的理化性质,需要重复使用时,只需对其进行清洗、干燥即可。

本实验所使用的聚四氟乙烯塑料丝为加工定制,规格为0.3 mm × 0.5 mm,长度15 cm的塑料丝用于20~40目的活性炭样品比较合适。

2 实验部分

2.1 仪器与试剂

(1) 实验仪器。分析天平(0.1 mg),秒表计时器,皂膜流速计,样品管,电子质量流量计,预热管,压力表,玻璃恒温水浴一套^[10]。

(2) 实验试剂。甲醇(A. R.,广州化学试剂厂);活性炭(20-40目,天津大茂化学试剂厂,实验前处理干燥备用)^[13]。

2.2 实验步骤

(1) 开启磨口塞N,向饱和器A中装入甲醇液体直到高度H为止(见图1),将恒温槽温度调节至高于室温2℃左右。

(2) 在确认减压阀处于关闭状态后,将氮气钢瓶总阀T缓缓打开,调节减压阀T₁使表压控制在150 kPa左右,旋转D₁和D₂(D₁和D₂合成一个双三通阀)连接到S位置(测流速,接皂膜流速计),先调节T₂的压力至70 kPa左右,再缓慢调节T₄、T₃至流速 v_1 、 v_2 分别为5、15 mL/min左右。氮气流速通过皂膜流速计S测定,每个流速平行测定3次并取最终平均值。流速调整完成后,将D₁、D₂切换至吸附档P。

(3) 将准备好的聚四氟乙烯塑料丝铺在样品管L的筛板上,盖好管塞后在分析天平上称量;准确称量0.4~0.5 g经过前处理的活性炭样品,装入样品管,盖好管塞后再次称量,并与前面数据对比计算得到样品质量。

(4) 将样品管放置在吸附仪中,在稳定的流速下通氮气60 min左右,取出样品瓶,在分析天平上称量,得到首次吸附的甲醇质量;之后将样品管再次置于吸

附仪中,通气 20 min 左右,再次取出称量,当 2 次称量的质量差小于 0.5 mg,即认为达到吸附饱和^[10]。

(5) 实验结束,关紧钢瓶总阀,排除管路气体压力,关闭其他仪器及装置,将样品管清洗干净,置于干燥器中。

3 实验数据及分析

随机选取了 10 组实验数据,实验条件与计算结果见表 1。其中 m_0 代表使用的吸附剂活性炭的质量; m 代表吸附质甲醇的质量; $p_{\text{甲}}/p_0$ 为甲醇的比压; Γ_m 为饱

和吸附量; S 为吸附剂的比表面积。

由表 1 可见, s 的平均值为 $316.5 \text{ m}^2/\text{g}$,总体标准偏差为 $54.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 。存在一定误差的原因为数据的选取较为随机,以及参加实验课的学生操作差别较大。在之前的工作中使用自动吸附仪进行了 6 次平行测定,得到的活性炭比表面的平均值为 $323.1 \text{ m}^2/\text{g}$ ^[10]。学生实验课测得的数据与仪器测试数据之间的相对偏差为 2.04%,较低的相对偏差说明,聚四氟乙烯材料应用后测得的活性炭比表面数据与自动吸附仪测得数据没有显著差别。

表 1 甲醇在活性炭上吸附的实验参数与测试结果

序号	$t/^\circ\text{C}$	$p_{\text{大气}}/\text{kPa}$	$v_1/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_2/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	m_0/g	m/g	$p_{\text{甲}}/p_0$	$\Gamma_m/(\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$S/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
1	28.0	101.32	6.50	17.50	0.440 1	0.045 0	0.294	2.256	339.6
2	28.4	101.95	6.29	17.12	0.441 8	0.041 1	0.314	1.989	299.3
3	30.0	103.39	5.10	15.20	0.443 2	0.048 9	0.298	2.413	364.2
4	27.6	100.65	6.40	17.00	0.461 0	0.054 2	0.319	2.499	376.1
5	26.0	102.70	5.62	17.19	0.486 6	0.055 0	0.283	2.529	380.6
6	28.0	101.67	5.54	17.05	0.462 2	0.046 3	0.287	2.229	335.5
7	26.6	102.90	4.83	15.99	0.517 5	0.030 7	0.270	1.352	203.5
8	26.5	102.21	5.13	15.45	0.449 6	0.043 9	0.288	2.171	326.7
9	28.0	102.10	4.99	15.87	0.442 7	0.038 3	0.280	1.944	292.5
10	28.2	102.47	4.86	16.23	0.413 1	0.029 8	0.270	1.644	247.4

4 结 语

利用本科教学的流动吸附装置,通过活性炭吸附剂吸附甲醇蒸汽进行比表面测定的教学研究^[14]。因为采用 BET 单点法进行计算,对待测固体的比表面积有一定要求,存在一定局限性。但相对于全自动吸附仪,本实验的各个流程学生都能够全程参与,直观明了,可以极大地加深学生对吸附理论的理解,及提高其实验动手的能力^[15]。所以对于本科物理化学实验教学,该实验的设置具有非常重要的意义。

在原实验基础上应用聚四氟乙烯塑料丝代替玻璃纤维丝作为吸附剂的支撑材料,不仅杜绝了断裂的细微玻璃纤维对学生健康造成的安全隐患,减小了由于玻璃纤维的流失可能导致的实验误差,同时聚四氟乙烯还可以循环使用,更加环保。聚四氟乙烯材料更加适合本教学实验。在此基础上,经过改进的实验方法已经在我校材料科学与工程学院的物理化学实验课程中进行了实践,取得了良好的教学效果;最重要的是再没有出现学生反映身体发痒等问题,在实验的安全性上取得了显著的成效。聚四氟乙烯塑料也可以运用在更多的实验教学中,其稳定及可重复使用的优良性能有望应用于多种实验。

参考文献(References):

[1] 边绍伟,张 帅,咸春颖,等. 固体比表面积测定实验的改进[J]. 大学化学, 2018, 33(12): 62-66.

[2] 李立清,顾庆伟,石 瑞,等. 热改性活性炭吸附有机气体的性能[J]. 化工学报, 2012, 63(6): 1749-1756.

[3] 张 志,杜 杰,朱宏志. 低温氮气吸附法研究海绵钯比表面积和孔径分布[J]. 稀有金属, 2011, 35(3): 411-416.

[4] 施海燕,毛 翎. 石棉的健康危害及安全使用研究进展[J]. 上海预防医学杂志, 2009, 21(3): 125-127.

[5] 曾天卷. 玻璃纤维、玻璃棉等人造矿物纤维与人体健康[J]. 玻璃纤维, 2002(4): 8-15.

[6] 谢苏江. 聚四氟乙烯的改性及应用[J]. 化工新型材料, 2002(11): 26-30.

[7] 李 垒,潘湛昌,胡光辉. 溶液吸附法测定比表面实验原理的讨论式教学[J]. 广东化工, 2021, 48(3): 196.

[8] 房俊卓,李媛媛,徐崇福. 物理吸附分析仪单点 BET 方法误差分析[J]. 中国测试技术, 2006(5): 42-44.

[9] 关 岳,孙钦廉,邹行彦,等. 比表面积和孔径分布测定与计算方法的改进[J]. 化学学报, 1990(5): 424-430.

[10] 陈小娟,张伟庆,余小岚,等. 适用于本科教学的 BET 比表面测定实验[J]. 大学化学, 2017, 32(7): 60-67.

[11] 陈六平,邹世春. 现代化学实验与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

- 117-124.
- [5] 钟伟金,李 佳,杨兴菊. 共词分析法研究(三)——共词聚类分析法的原理与特点[J]. 情报杂志,2008(7):118-120.
- [6] 刘涛新. 论语言实验室的建设[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版),1997(S1):184-186.
- [7] 李令达,蒋 丽,王催春. 传统语言实验室改造为多媒体语言教学系统的方案与实现[J]. 外语电化教学,2002(3):58-60.
- [8] 宋述强,陈基和,钟晓流. 数字化语言教学环境:系统组成、建设策略与运行模式[J]. 外语电化教学,2011(6):72-75.
- [9] 庄智象,黄 卫,王 乐. 我国多媒体外语教学的现状与展望[J]. 外语电化教学,2007(1):20-27.
- [10] 赵家驹. 语言实验室智能化发展问题与对策研究[J]. 信息记录材料,2021,22(1):41-42.
- [11] 储节旺,闫士涛. 知识管理学科体系研究(下)——聚类分析和多维尺度分析[J]. 情报理论与实践,2012(3):5-9.
- [12] 张晋兰,劳 利. 多媒体语言实验室的使用与高校外语教学中学生跨文化交际能力的培养[J]. 兰州大学学报,2000(S1):296-299.
- [13] 马建峰. 多媒体语言实验室的发展与管理模式创新研究[J]. 山西煤炭管理干部学院学报,2016,29(2):116-117.
- [14] 张媛军. 数字化语言实验室在独立学院大学英语听说教学中的作用实证研究[J]. 教育教学论坛,2018(21):279-280.
- [15] 方 艳,任 峥,杨 宏. 基于一体化软件的高校语言实验室教学实践改革[J]. 实验室研究与探索,2019,38(5):257-259.
- [16] 教育部办公厅. 教育部办公厅关于印发《大学英语课程教学要求》的通知[EB/OL] Retrieved from http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/200707/t20070710_110825.html,2007-07-10.
- [17] 刘艳晖. 基于多媒体语言实验室的专业英语写作教学模式[J]. 宁夏大学学报(人文社会科学版),2006(1):126-128.
- [18] 柯 岷. 基于数字化语言实验室的 ESP 语言实验教学体系研究[J]. 海外英语,2018(13):37-38.
- [19] 饶 坚,曾 玮. 外语语言实验室课程录播系统的设计与实现[J]. 实验室研究与探索,2018,37(6):264-267.
- [20] 覃幼莲,何衍招. 高校外语语言实验室管理模式创新[J]. 实验室研究与探索,2015,34(2):257-260.
- [21] 江 勇,张焕香,汪 茂. 基于 Phantosys 的高校数字语言实验室管理[J]. 实验室研究与探索,2014,33(4):251-254.
- [22] 杨会新. 数字化语言实验室环境下英语教学模式的应用研究[J]. 湖南科技学院学报,2018,39(12):153-156.
- [23] 陈坚林,马牧青. 信息化时代外语教学范式重构研究——理据与目标[J]. 外语电化教学,2019(1):12-17.
- [24] 李 征,周小勇. 近 20 年国内外外语教育技术研究评述与未来展望——基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. 中国电化教育,2018(6):91-96.
- [25] 常 伟. 大数据背景下的智慧型语言实验室的构建[J]. 信息与电脑(理论版),2019(1):93-95.
- [26] 周 晶. 浅析数字化语言实验室的管理与维护[J]. 现代职业教育,2016(31):108.
- [27] 孙 洁. 对大学英语教学当中网络语言实验室的应用[J]. 语文建设,2013(27):5-6.

(上接第 234 页)

- [12] 钱知勉. 聚四氟乙烯塑料的实用性[J]. 有机氟工业,2003(1):10-20.
- [13] 王如竹,戴 巍,周衡翔,等. 国产活性炭-甲醇吸附式制冷性能研究[J]. 太阳能学报,1995(2):155-161.
- [14] 许 岩,杨 欣,程雅文,等. 超大孔容中孔活性炭制备及吸附性能[J]. 实验技术与管理,2015,32(1):65-69.
- [15] 靳 明,王献玲,韦丽红,等. 基于本科生物科研创新能力的探究型实验设计与实践[J]. 实验技术与管理,2019,36(1):213-216.

(上接第 256 页)

- [2] 易建平. 扁平化管理的理论特征及应用[J]. 农村金融研究,2003(6):50-51.
- [3] 维弗雷多·帕累托. 省时省力的二八法则[M]. 太原:许多胜译. 山西教育出版社,2010.
- [4] 雷洪钧. 关键绩效指标(KPI)设计思想及实例[J]. 客车技术与研究,2006,28(6):54-56.
- [5] Robert R S, Norton D P. The balanced scorecard: measures that drive performance[J]. Harvard Business Review, 1992, 70(1):71-9.
- [6] 成 诚. KPI 绩效考核存在的问题及优化建议分析[J]. 中外企业家,2016(34):249.
- [7] 张浩亮. 国有大型制造企业 KPI 管理中的问题与对策[J]. 中国人力资源开发,2007(1):92-94.
- [8] 梁 美. 中小企业 KPI 绩效考核存在的问题及优化策略[J]. 财会通讯,2012(2):81-83.
- [9] MacGregor D. The human side of enterprise[M]. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [10] 陈德金. OKR,追求卓越的管理工具[J]. 清华管理评论,2015(12):78-83.
- [11] Drucker P F. The practice of management[M]. Routledge, 2012.
- [12] 童继龙. OKR 管理:让每个企业都成为谷歌[J]. 互联网经济,2015(8):20-25.
- [13] 于欣伟. 绩效考核之 KPI 与 OKR[J]. 科技与企业,2015(20):48-48.
- [14] 田五星,王海凤. 大数据时代的公共部门绩效管理模式创新——基于 KPI 与 OKR 比较的启示与借鉴[J]. 经济体制改革,2017(3):17-23.
- [15] 杨 涛,王亚坤,葛云峰,等. 生物医学计算平台的基于 KPI 的管理和运维[J]. 生物技术世界,2015(6):216-217.
- [16] Wodtke C R. Radical focus: Achieving your most important goals with objectives and key results[M]. [s. l.]: Boxes and Arrows, 2017.

(上接第 265 页)

- [12] 周 华,姜明文,尚静瑶. 引入后补助机制推动军工科研管理改革[J]. 国防科技工业,2017(2):40-43.
- [13] 魏 巍,张慧颖. 嵌入式服务理念下高校科研管理核心服务能力建设[J]. 科技管理研究,2017(22):122-127.
- [14] 汪婷婷,曲 巍. 基于动物实验引发的医学伦理问题及对策探究[J]. 锦州医科大学学报(社会科学版),2021,19(6):24-27.
- [15] 林清强,许文鑫,林凤屏,等. 地方高校科研仪器共享机制建设的实践与探索——以福建师范大学为例[J]. 实验技术与管理,2021,38(6):261-264.