

变压吸附实验装置的小型化、低成本化改进

李清骊, 行甜雨, 杨钰欣, 王卓鹏*

东北大学理学院化学系, 沈阳 110819

摘要: 目前的变压吸附实验中通常使用商品化设备, 存在尺寸大、成本高、气路复杂等问题, 不利于大规模开展本科实验教学。本文对变压吸附装置进行了小型化、低成本化改进, 学生可以使用实验室常见材料自行搭建变压吸附装置, 了解并掌握设备搭建、调试、运行的整个流程。以Li交换分子筛作为吸附剂, 该设备的制氧效果与商用制氧机相当, 出口氧气浓度可达95.8%。该装置具有安全性高、可反复拆装的特点, 搭建、调试过程具有一定趣味性, 适合用于应用化学、化学工程等本科专业的变压吸附实验教学, 有利于激发学生对创制实验装置的兴趣, 锻炼学生的动手能力, 提高学生理论结合实际解决问题的能力。

关键词: 变压吸附; 小型装置; 低成本; 制氧; 本科实验教学

中图分类号: G64; O6

Design of a Low-Cost Benchtop System for Pressure Swing Adsorption Experiments for Undergraduate Laboratory Teaching

Qingli Li, Tianyu Xing, Yuxin Yang, Zhuopeng Wang *

Department of Chemistry, College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Abstract: At present, commercial systems are usually used in pressure swing adsorption (PSA) experiments. However, the purchased equipment has disadvantages such as large size, complicated tubing design and high price, which are not conducive to undergraduate laboratory teaching. In this paper, a low-cost benchtop design of PSA system is proposed, with which students can build their own PSA equipment with common laboratory materials and conduct the testing and operation on their own. Using Li-exchanged zeolite as the adsorbent, the system can produce high-purity oxygen with a concentration up to 95.8%, which is comparable to that of commercial oxygen concentrator. The designed system can be disassembled and reassembled repeatedly and the process of building and testing is safe and fun. The proposed design can be used in the PSA experimental teaching for undergraduate students who major in applied chemistry, chemical engineering and other related subjects. We believe that students' interest in creating experimental equipment can be intrigued and their ability to solve practical problems can be improved during the build and testing process of the proposed PSA system.

Key Words: Pressure swing adsorption; Benchtop system; Low cost; Oxygen production; Undergraduate laboratory teaching

1 引言

变压吸附技术是一种分离、纯化气体混合物的技术, 与膜分离法、低温分离法相比, 该方法能耗低、效率高、安全性高、工艺简单、产品纯度高, 在冶金、化工、医疗等领域有重要的应用^[1-3]。

收稿: 2023-06-29; 录用: 2023-07-11; 网络发表: 2023-08-04

*通讯作者, Email: wangzhuopeng@mail.neu.edu.cn

基金资助: 东北大学基本科研业务费项目(N2105012)

为加深学生对变压吸附相关化学原理的理解,一些高校将变压吸附实验选入本科生基础实验课程。目前变压吸附实验中通常使用商品化的变压吸附装置,这些装置成本高、尺寸大、气路复杂、吸附剂装填量大^[4],难以大量采购用于基础实验教学。另一方面,由于商品化设备集成度和自动化程度较高,学生仅能通过仪表界面操作仪器,难以清楚了解装置的各部件基本结构以及其在变压吸附过程中的作用,往往教学效果并不理想。

针对上述问题,本文对现有变压吸附实验进行了改进,设计了搭建简单、操作容易且成本低、可置于实验台面的小型化设备,让学生可以从自行搭建变压吸附装置到调试、运行的全流程中深入理解装置的基本结构和变压吸附原理,激发学生对创制实验装置的兴趣,锻炼学生的动手能力,提高学生理论结合实际解决问题的能力。本实验所需材料易得、廉价,不依赖复杂、高级的实验仪器和表征仪器,安全性高,可用于本科阶段应用化学、化学工程等专业的实验教学。

2 实验部分

2.1 实验原理

2.1.1 变压吸附原理

在一定压强下,不同气体分子与吸附剂表面之间相互作用力大小不同,因而吸附剂对不同气体组分的吸附量存在差异,且吸附量随压强变化而变化。通过增大压强使强吸附组分气体完全吸附,则弱吸附组分由于未被完全吸附而可以被分离;当吸附剂达到饱和后再减小压强,强吸附组分脱附,从而实现吸附剂的再生。周期性地地进行上述变压操作可以实现气体混合物的分离和纯化。

2.1.2 沸石分子筛变压吸附制氧原理

利用变压吸附原理以沸石分子筛作为吸附剂可以从空气中分离、制取氧气。变压吸附制氧装置一般采用双吸附柱设计,原理^[5]如图1所示,空气经过加压后,通入装有分子筛的吸附柱,由于 N_2 分子的四极矩比 O_2 分子的四极矩大很多, N_2 分子优先被分子筛吸附,而大部分 O_2 分子和Ar未被吸附继续通过管路进入储气罐^[6,7]。当 N_2 吸附达到饱和后,通过切换阀使吸附柱连通大气,此时柱内压强减小, N_2 分子脱附,同时储气罐内 O_2 对分子筛柱进行反吹扫,使氮气彻底排出,重新恢复分子筛的吸附能力。双吸附柱通过切换阀控制交替进行变压吸附、脱附循环,即可将空气中的氧气与氮气分离得到较高纯度 O_2 ($\geq 93\%$)。仅以沸石分子筛为吸附剂无法分离 O_2 和Ar,可在沸石分子筛吸附床后串联碳分子筛吸附床以除掉Ar,最终可得到高纯度氧气($\geq 99.5\%$)^[8]。

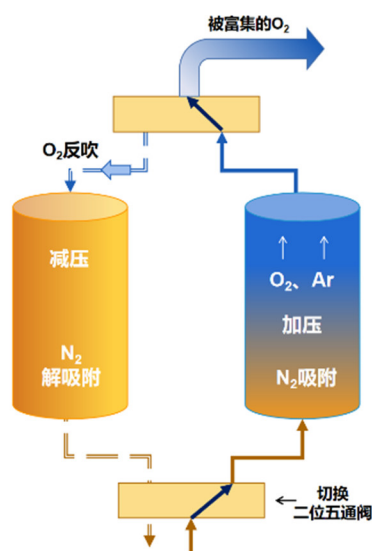


图1 分子筛变压吸附制氧原理示意图

2.2 实验材料

本实验搭建变压吸附实验装置所用零部件列于表1，总成本约1000元。

表1 搭建变压吸附装置所需零部件

仪器名称	型号	制造商	数量	单价/元
空气压缩机	DW80F-220V/50Hz	台州宝乾机电股份有限公司	1	238
气压表	AR2000-02	广陵区卓化气动元件批发中心	1	21
电磁阀控制器(含电源)	MT010	浦江县达峰电子	1	126
二位五通电磁阀	WA4V220-08-DC24V	山耐斯(宁波)科技集团有限公司	1	49
干燥管	小管: 30mm×180mm -8mm快插	南京科航实验仪器有限公司	4	63
	大管: 40mm×310mm-8mm快插(可选)		2	90
测氧仪	CY-12C	杭州佳长电子科技有限公司	1	325
节流阀	PE-8	广陵区卓化气动元件批发中心	3	5
三通接头	PE-8	广陵区卓化气动元件批发中心	1	0.59
聚氨酯(PU)软管	外径8mm	沈阳伟创电气	5 m	6.50
变色硅胶	粒度2.0-5.6mm	天津市大茂化学试剂厂	150 g	18
LiA分子筛	直径0.4-0.8mm	萍乡柏田新材料有限公司	300 g	143

2.3 实验步骤

2.3.1 变压吸附装置的搭建

本实验设计的变压吸附装置结构示意图如图2(a)所示，采用双吸附柱设计，通过二位五通电磁阀控制双吸附柱交替进行吸附与脱附。按图2(b)所示组装变压吸附制氧装置，气路使用PU软管和快插接头连接，直流电源、电磁阀控制器、二位五通阀之间采用电线连接。可根据实际情况选择合适尺寸的吸附柱，2支大干燥管需LiA分子筛270 g，2支小干燥管需LiA分子筛65 g，装填分子筛时要轻敲管壁使分子筛装填紧实。

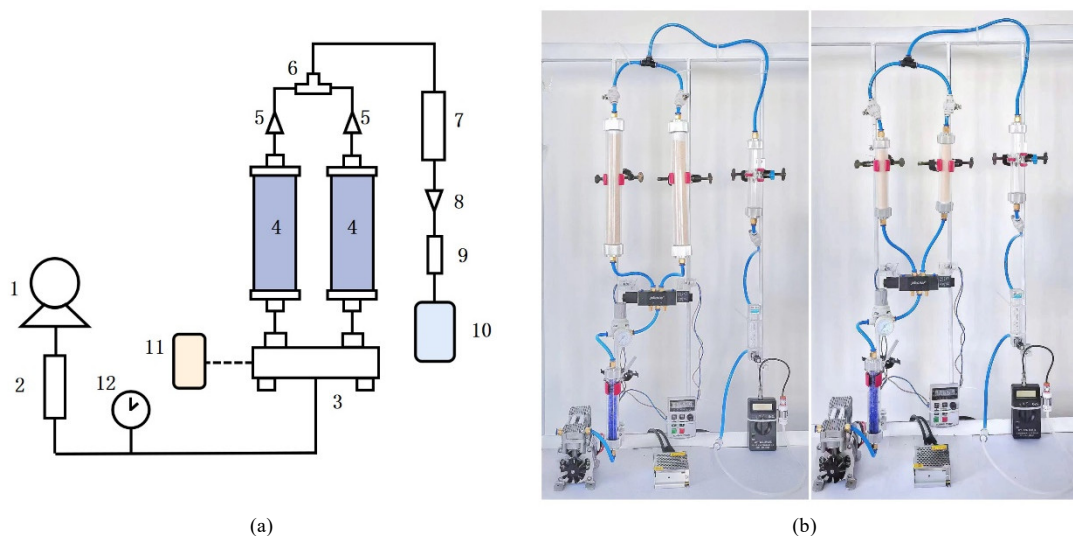


图2 (a) 分子筛变压吸附制氧装置示意图；(b) 搭建好的装置照片(左图使用大管，右图使用小管)

1.空气压缩机；2.装有变色硅胶的干燥管；3.电磁切换阀；4.吸附柱；5.节流阀；6.三通；7.储气罐；8.节流阀；9.转子流量计；10.氧含量分析仪；11.电磁阀控制器；12.压力表

2.3.2 装置的运行及调试

首先在电磁阀控制器上设定好切换阀的切换时间，然后打开空气压缩机，压缩空气首先通过装有变色硅胶的干燥管除去水分，然后通过二位五通阀进入其中一根吸附柱，部分气体被吸附剂吸附，未被吸附的气体进入储气罐，最后通过转子流量计后进入氧含量分析仪。适当调节吸附柱出口处和储气罐出口的节流阀使入口流量大于出口流量，以达到在吸附柱内和储气罐内累积压强的效果。为确保吸附柱减压解吸时实现储气罐中O₂反吹扫的效果，应调节节流阀使得储气罐内的压强高于吸附柱内的压强。切换阀控制双吸附柱交替进行吸附-脱附循环即可实现氧气的富集，改变阀切换时间可以调节吸附柱内压强以优化出口氧气含量。

3 结果与讨论

3.1 阀切换时间对柱压强及出口氧气含量的影响

通过控制切换阀的切换时间可以控制吸附柱内的压强，同时也会显著影响出口的氧气含量^[9]。图3是吸附柱内压强以及出口O₂含量随着阀切换时间的变化曲线，可以看出阀切换时间越长，吸附柱内累积的压强越大，切换时间越短，吸附柱中的压强越小。阀切换时间过短或过长都会导致出口O₂含量显著下降，这是因为若切换时间过短，吸附柱内压强过小，分子筛对N₂的吸附量减小，N₂不能被完全吸附，导致N₂流入储气罐；若切换时间过长，则分子筛对N₂吸附量达到饱和，导致N₂突破吸附柱进入储气罐。当使用较大容量吸附柱时(图3(a))最优切换时间为15 s，吸附柱压强范围为0.12–0.37 MPa，而使用较小体积吸附柱(图3(b))时，最优切换时间为2 s，柱压强范围为0.24–0.34 MPa。

如使用碳分子筛作为吸附剂，可使用本装置制取高纯N₂，并可很容易测得N₂穿透曲线。

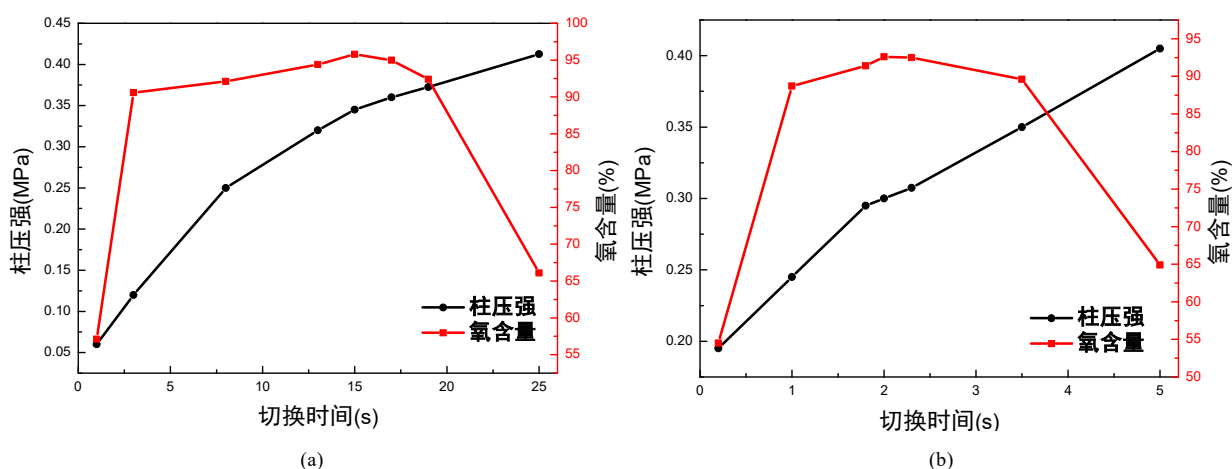


图3 吸附柱压强和出口氧气含量随阀切换时间的变化曲线

(a) 大管; (b) 小管

3.2 分子筛吸附剂装填量的影响

吸附剂的装填量对变压吸附分离的效果以及实验成本有较大的影响。表2列出了不同分子筛装填量对应的最优实验条件和最高氧气含量，可见分子筛装填量越大，出口氧气含量越高，对应的最佳切换时间越长，最优柱压强越大。值得注意的是，分子筛吸附剂用量由270 g大幅减小至65 g并未使出口氧气含量显著降低，氧气含量仍可达到92.6%，与家用制氧机的出氧浓度相当^[10]。因此，本实验设计的变压吸附装置可以在不影响制氧效果的情况下，大幅减小分子筛吸附剂装填量，可以显著降低实验成本。

表2 不同分子筛装填量对应的最佳实验条件和最高氧气含量

分子筛装填量/g	最佳切换时间/s	最优柱压强/MPa	最高氧气含量/%
270	15	0.34	95.8
65	2	0.30	92.6

4 结语

本文对变压吸附实验装置进行了小型化、低成本改进以适应大规模本科教学，与商用装置相比具有以下优势：

(1) 装置搭建成本低，材料易得，吸附剂用量少，运行成本低，装置小巧适用于普通实验室台面使用，适合以2-4人为小组开展实验；

(2) 装置组装简单，可反复拆装，安全性高，学生可自行搭建并调试变压吸附装置，有助于学生深入理解变压吸附原理；

(3) 通过动手搭建、调试变压吸附装置，可激发学生创制科研仪器的兴趣，锻炼学生的动手能力，提高学生运用理论知识解决实际问题的能力。

参 考 文 献

- [1] Ruthven, D. M.; Farooq, S.; Knaebel, K. S. *Pressure Swing Adsorption*; WileyVCH: New York, NY, USA, 1994.
- [2] 魏玺群, 陈健. 低温与特气, **2002**, *20*, 1.
- [3] Sircar, S. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2002**, *41*, 1389.
- [4] 马江权, 魏科年, 韶晖, 冷一欣. 化工原理实验. 第3版. 武汉: 华东理工大学出版社, 2016: 207-212.
- [5] 李勇, 王世锋, 吴琪, 赵董叶, 李鑫, 周倩玉. 现代化工, **2021**, *41* (8), 68.
- [6] 耿燕, 安生永, 王月英, 吴少帅. 河北省科学院学报, **2020**, *37* (1), 51.
- [7] Auerbach, S. M.; Carrado, K. A.; Dutta, P. K. *Handbook of Zeolite Science and Technology*, 1st ed.; Marcel Dekker Inc: Boca Raton, FL, USA, 2003, pp. 1287-1340.
- [8] Jee, J.-G.; Kim M.-B.; Lee, C.-H. *Chem. Eng. Sci.* **2005**, *60*, 869.
- [9] 卜令兵, 刘应书, 张德鑫, 刘云海. 化学工业与工程, **2007**, *24* (1), 60.
- [10] 楼百根, 李鹏, 杨春, 孙莉, 刘明文, 钱晶. 家电科技, **2021**, *3*, 38.