

# 真空变压吸附分离含氧煤层气的 工艺参数实验研究

刘应书, 杨雄, 李永玲, 张传钊, 孟宇, 杨海军  
(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对真空变压吸附富集低浓度含氧煤层气, 对工艺参数和吸附塔结构进行了优化试验研究。实验结果表明, 在一定的时间内, 随着吸附时间的延长, 解吸气和排放气中甲烷体积分数逐渐增大, 而排放气中的氧气体积分数则小幅度降低; 反吹步骤可以降低排放气中甲烷和氧气的体积分数, 但反吹步骤也会降低解吸气中甲烷的体积分数; 保持吸附剂不变, 吸附塔高径比由 3.7 增大到 13.3, 解吸气中甲烷体积分数增大了 2.1%, 排放气中甲烷体积分数降低了 1%。可以为低浓度含氧煤层气富集的实际应用提供参考。

**关键词:** 煤层气; 氧气; 变压吸附; 高径比

**中图分类号:** O552.33; O641.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2011)01-0064-04

## Experiment study on process parameters of coal-bed gas separation by vacuum pressure swing adsorption

LIU Ying-shu, YANG Xiong, LI Yong-ling, ZHANG Chuan-zhao, MENG Yu, YANG Hai-jun  
(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Oxygen-containing coal-bed gas recovery using vacuum pressure swing adsorption processes is investigated experimentally, the optimization experiment on process parameters and the structure of adsorption tower is carried out. The results show that the methane concentration in effluent gas and adsorption gas increases with the increase of adsorption time within a certain time, but the oxygen concentration in effluent gas decreases appreciably. Purge step decreases the methane and oxygen concentration of the effluent gas, but the methane concentration of desorption gas decreases with the increase of purge time. When the length-to-diameter ratio from 3.7 increased to 13.3 with the adsorbent weight constant, the methane concentration in product increases by 2.1%, and the concentration of methane in effluent gas decreases by 1%. The results could provide reference for the industrial application in low concentration oxygen-containing coal-bed gas enrichment.

**Key words:** coal-bed gas; oxygen; pressure swing adsorption; length-to-diameter ratio

煤层气中的甲烷是造成温室效应的 3 种主要气体之一。我国每年因采煤排放的煤层气在 180 亿  $\text{m}^3$  以上, 占世界采煤排放煤层气总量的 1/3, 居世界第一<sup>[1]</sup>。我国煤层气利用率仅为美国的 55%<sup>[2]</sup>, 煤层气体积分数低是制约我国煤层气综合利用发展的主要因素之一。据统计, 2005 年全国煤层气至少 2/3 为甲烷体积分数低于 30% 的低浓度煤层气<sup>[3]</sup>, 这部分煤层气受《煤矿安全规程》的限定不能利用。这样不仅使得大量的优质能源不能利用, 而且造成了温室气体的排放。因此, 如何将甲烷体积分数 30% 以下的低浓度煤层气分离富集, 已成为煤层气开发利用的重要问题。变压吸附法是最受关注的煤层气分离富集的技术之一。

目前国内外针对煤层气的变压吸附分离进行了大量的研究<sup>[4-9]</sup>, 但是针对低浓度含氧煤层气的分离缺乏研究。这主要是由于含氧煤层气在吸附分离

过程中存在安全隐患。刘应书等<sup>[10]</sup>针对低浓度含氧煤层气吸附过程进行了安全性分析, 得出了一种安全的吸附分离方法, 以活性炭和碳分子筛的混合吸附剂进行吸附分离。为了对变压吸附分离过程和吸附器进行优化, 为该技术在实际的工程应用中打下基础, 笔者着重研究了一些工艺参数和吸附器结构对分离效果的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

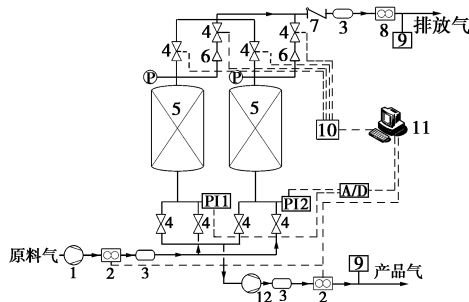
实验以甲烷与空气的混合气作为模拟煤层气, 模拟煤层气储存在气囊中, 其中甲烷体积分数为 20.0%, 氧气体积分数为 16.7%。根据实验研究取活性炭与碳分子筛 AC/CMS 质量之比为 0.3。图 1 为真空变压吸附分离模拟低浓度煤层气的实验原理图。该装置由压缩机、真空泵、吸附器、控制系统、

收稿日期: 2010-08-20

基金项目: 国家高技术发展计划(“863”)(2009AA063201)资助项目

作者简介: 刘应书(1960-), 男, 博士, 教授, 研究方向为气体分离及人工环境, yslu@ustb.edu.cn; 杨雄(1984-), 男, 博士生, 研究方向为煤层气分离, 通讯联系人, 010-62332751, yangxiong025688@yahoo.com.cn。

切换阀门、数据检测与采集等几个部件组成。该实验装置通过 PLC 控制电磁阀的开关,实现低浓度煤层气分离过程的循环连续进行。实验过程中甲烷和部分氧气被混合吸附剂吸附停留在吸附塔内,富氮气体从吸附塔的排气端排出。富甲烷的产品气运用抽真空的方法从吸附塔下端抽出,解吸压力约为 25 kPa。为使解吸气流量和体积分数稳定,在真空泵的出口设置了 1 个缓冲罐。原料气与解吸气流量由质量流量计测量。在解吸气和排放气出口分别设 2 个取气口,用于在线分析解吸气和排放气中甲烷和氧气体积分数。



1—压缩机;2—质量流量计;3—缓冲罐;4—电磁阀;  
5—吸附塔;6—节流子;7—单向阀;8—流量计;9—取气口;  
10—PLC;11—上位计算机;12—真空泵  
P—压力表;PI—压力传感器;A/D—采集卡

图 1 真空变压吸附分离低浓度爆气层系统

### 1.2 循环步骤

两塔真空变压吸附过程的循环时序如表 1 所示,每个吸附塔都要经历充压、吸附、均压降、抽真空、反吹、均压升 6 个工艺步骤。

表 1 循环时序表

塔 I	充压	吸附	均压降	抽真空	反吹	均压升
塔 II	抽真空	反吹	均压升	充压	吸附	均压降

### 1.3 实验内容

在节流孔直径为 0.3 mm 的情况下,研究了吸附时间、反吹时间、吸附塔高径比等对低浓煤层气变压吸附分离效果的影响,具体的实验条件如表 2 所示。

表 2 实验条件

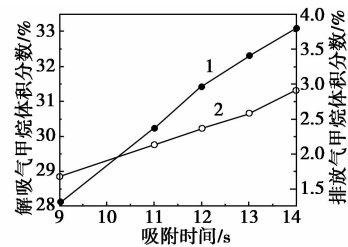
序号	吸附时间/s	反吹时间/s	吸附塔高径比
1	8.8	0	13.3
2	9.8	1	7.8
3	10.8	2	3.7
4	11.8	3	—
5	12.8	4	—
6	13.8	5	—
7		6	—

## 2 实验数据与分析

### 2.1 吸附时间的影响

变压吸附分离煤层气的过程中的吸附时间是 1 个十分重要的参数,吸附时间长可以提高解吸气中甲烷的体积分数,但吸附时间过长又会导致排放气中甲烷体积分数增大,因此选择合适的吸附时间对变压吸附分离煤层气有十分重要的意义。

图 2 为吸附时间对排放气和解吸气中甲烷体积分数的影响,实验过程中吸附塔高径比为 7.8。从图 2 中可以看出随着吸附时间的增加,解吸气中甲烷体积分数和排放气体积分数均逐渐增大,且解吸气甲烷体积分数的增加速率大于和排放气体积分数增加速率。当吸附时间为 8.8 s 时,解吸气中的甲烷体积分数为 28.1%,当吸附时间增大到 13.8 s 后,甲烷体积分数增大到了 33.1%。而对于排放气来说,吸附时间从 8.8 s 增大到 13.8 s 时,甲烷体积分数从 1.7% 增大到了 2.9%。



1—解吸气;2—排放气

图 2 吸附时间对甲烷体积分数的影响

随着吸附时间的增长,吸附传质区逐渐向吸附塔上端移动,因此吸附塔中甲烷的总量逐渐增多,而吸附塔中氮气的吸附量和吸附塔空隙中的氮气总量逐渐减少,因此解吸气中甲烷的体积分数增加;但随着吸附时间的增长,从吸附塔上端流出的甲烷量也增加,这就导致排放气中甲烷的体积分数随吸附时间的延长而增加。

图 3 为吸附时间对排放气中氧气体积分数的影响。由图 3 可知,随着吸附时间的增加排放气中氧气体积分数逐渐减小,但氧气体积分数的变化幅度

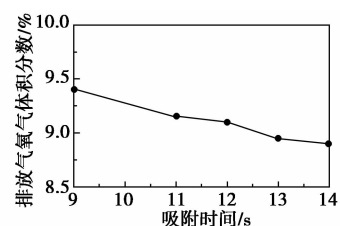


图 3 吸附时间对排放气中氧气体积分数的影响

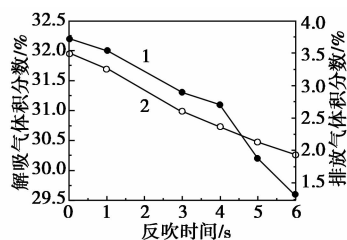
不大。吸附时间为 8.8 s 时排放气中氧气的体积分数为 9.4%；当吸附时间延长到 13.8 s 时，排放气中氧气体积分数降低到了 8.9%。

出现上述情况的原因是，碳分子筛是基于动力学分离效应的，在煤层气中碳分子筛对氧气的吸附速度最快，其次是氮气。碳分子筛对气体的吸附量随吸附时间的增加而增大，另外碳分子筛对气体的吸附量还随吸附压力的增加而增加。该实验中使用的碳分子筛为制氮用碳分子筛，对氧气的吸附平衡时间约为 30 s<sup>[11]</sup>，在制氮过程中吸附压力一般都在 0.6 MPa 以上。而该实验中吸附压力相对较低，切换时间短时，氧气还未来得及完全被吸附就已经流出吸附塔。随着吸附时间的增加，吸附塔内的压力增大，单位时间内氧气的吸附量增加，因此排放气中氧气体积分数降低。但当氧气体积分数降低到一定程度后氧气的体积分数将不再降低，而会逐渐增加。由以上实验结果和分析可知，在一定的时间范围内，随着吸附时间的增加排放气中氧气体积分数随吸附时间的增加而降低。

## 2.2 反吹过程的影响

反吹过程可以降低排放气中重组分甲烷和氧气的体积分数，同时反吹过程还可以提高甲烷的回收率，但反吹过程也会导致解吸气中甲烷体积分数降低。对反吹时间进行研究可以找出合适的反吹时间，在保证排放气氧气体积分数低的情况下，尽可能提高解吸气中甲烷的体积分数。

图 4 为反吹时间对排放气和解吸气中甲烷体积分数的影响，实验中吸附塔高径比为 7.8，吸附时间为 10.8 s。从图 4 中可以看出，随着反吹时间的延长，解吸气中甲烷体积分数和排放气中甲烷体积分数均降低。无反吹时解吸气中甲烷体积分数为 32.2%，而反吹时间为 6 s 时，解吸气中甲烷体积分数降低到了 29.6%，而排放气中甲烷体积分数从 3.5% 降低到 1.9%。



1—解吸气；2—排放气

图 4 反吹时间对甲烷体积分数的影响

的变化情况，从图 5 中可以看出，氧气体积分数随反吹时间的变化趋势与甲烷的情况一致，都是随反吹时间的增加而降低。当反吹时间从 0 s 增大到 6 s 时，排放气中氧气体积分数从 11.1% 降低到了 9.2%。

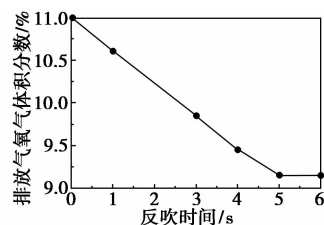


图 5 反吹时间对排放气氧气体积分数的影响

出现上述情况的原因是，抽真空结束后吸附塔内还有部分甲烷和氧气停留在吸附塔内，在下一周期吸附过程中这部分重组分气体从吸附塔排气端排出。反吹过程中这部分重组分气体的浓度波从吸附塔排气端向进气端移动<sup>[12]</sup>，反吹时间越长，则重组分气体的浓度波越接近吸附塔进气端，因此排放气中重组分气体甲烷和氧气的体积分数越小。对于解吸气来说，反吹过程中重组分气体体积分数比较低的气体混入解吸气，导致解吸气中氧气和甲烷体积分数降低，反吹时间越长，则解吸气中氧气和甲烷体积分数越低。由上述分析可知，反吹过程有利于降低排放气中甲烷和氧气的体积分数，反吹时间越长，则甲烷和氧气体积分数越低；而对于解吸气来说反吹时间越长，则甲烷体积分数越低。

## 2.3 高径比的影响

高径比是吸附器结构的 1 个重要参数，高径比是指吸附塔长度和内径的比值。文献[13-14]指出在制氧规模相同的情况下，高径比越大则氧气的纯度越高。对于变压吸附提浓煤层气的过程中，改变高径比会影响解吸气和排放气中甲烷和氧气的体积分数。通过对高径比的研究可以了解高径比对吸附分离效果的影响，可以为吸附器设计提供参考。

图 6 为吸附时间 10.8 s 循环时序都相同的情况下吸附塔高径比对甲烷体积分数的影响。从图 6 中可以看出，吸附塔高径比越大解吸气中甲烷体积分数越高。吸附塔高径比为 3.7 时，解吸气中甲烷体积分数为 28.9%，当吸附塔高径比增加到 13.3 时，解吸气中甲烷体积分数增大到 31.0%，增加了 2.1%。而对于排放气来说，吸附塔高径比越大则排放气中甲烷体积分数越小。当高径比从 3.7 增大到 13.3 时，排放气中甲烷体积分数由 2.5% 降低到 1.5%，降低了 1.0%。

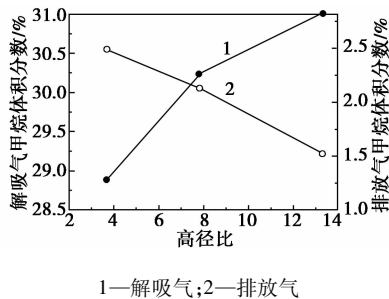


图6 高径比对甲烷体积分数的影响

通过对实验过程进行分析可知,当保持吸附塔内吸附剂质量不变时,高径比减小,则吸附塔内径增大,使得吸附塔上端和吸附塔下端的死空间体积增大,减少了吸附剂的利用率,导致了吸附剂的吸附量降低;此外,高径比增加,吸附塔高度会变大,吸附过程中传质区占整个吸附塔长度比例变小,因此高径比大时解吸气中甲烷体积分数略高,而排放气中甲烷体积分数略低。吸附塔高径比对解吸气和排放气中氧气体积分数的影响和甲烷的情况一致。

### 3 结论

在一定的时间内,随着吸附时间的增加解吸气中甲烷体积分数增大,排放气中甲烷体积分数也增大;排放气中氧气体积分数会随吸附时间的增加而略微降低,实验过程中吸附时间从 8.8 s 增加到 13.8 s 时,排放气中氧气体积分数由 9.4% 降低到了 8.9%。因此,在选择吸附时间时应该综合考虑,保证排放气甲烷和氧气的体积分数均在允许的范围以内。在循环步骤中设置反吹过程有利于降低排放气中甲烷和氧气的体积分数。反吹时间越长,排放气中甲烷和氧气体积分数越低;而对于解吸气,甲烷体积分数随反吹时间增加而降低。为了降低排放气中甲烷和氧气的体积分数,可以适当地对吸附塔进行反吹。在吸附剂质量一定时,高径比越大则越有

利于吸附,此时解吸气中重组气体分体积分数越大,排放气中重组分气体体积分数越小。在设计吸附塔时如果现场条件允许,应该尽可能增大吸附塔的高径比。

### 参考文献

- [1] 吴庆荣. 煤层气的大规模开发解决优质能源的重要途径[J]. 西部资源, 2006, 14(5): 11-14.
- [2] Ming Yang. Climate change and energy policies, coal and coalmine methane in China[J]. Energy Policy, 2009, 37: 2858-2869.
- [3] 郭东. 低浓度煤层气资源利用现状及效益分析[J]. 中国煤层气, 2008, 5(3): 42-48.
- [4] Vincent G Gomes. Coal seam methane recovery by vacuum swing adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2001, 24: 189-196.
- [5] 辜敏, 鲜学福, 张代均, 等. 变压吸附技术分离  $\text{CH}_4/\text{N}_2$  气体混合物[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 140-143.
- [6] 西南化工研究设计院. 变压吸附法富集煤矿瓦斯气中甲烷: 中国, 85103557[P]. 1986-10-29.
- [7] 辜敏, 鲜学福. 抽放煤层气变压吸附过程的数学模拟[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 140-143.
- [8] Olajossy A, Gawdzik A. Methane separation from coalmine methane gas by vacuum pressure swing adsorption[J]. Institution of Chemical Engineers, 2003, 81(4): 474-482.
- [9] Jayaraman A, Yang IL T. Tailored clinoptilolites for nitrogen/methane separation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44: 5184-5192.
- [10] 刘应书, 李永玲, 张辉, 等. 煤矿低浓度瓦斯及其分离富集技术[J]. 气体分离, 2010(1): 53-59.
- [11] 郭广栋. 变压吸附浓缩低浓度煤层气的实验研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2009.
- [12] Ruthven D M, Farooq S, Knaebel K S. Pressure swing adsorption[M]. New York: VCH Publishers, 1993.
- [13] 肖露, 张玉文, 吕阳. 变压吸附制氧过程数值模拟与分析[J]. 低温工程, 2009(3): 55-61.
- [14] 刘应书, 崔红社, 乐恺, 等. SARS 患者专用微型制氧机工艺参数实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(1): 110-116. ■

## 欢迎登陆中国精馏网

中国精馏网(www.distillation.net.cn)是由中国化工信息中心主办,服务于国内精馏行业的门户网站。专业报道与精馏单元操作相关的技术、设备、工程实例、国内外最新进展、精馏相关专利信息等内容;设置资讯中心、工程实例、文章荟萃、技术创新、专利信息、论坛、专家访谈、企业推荐、会员单位、专家库、企业库、《精馏》电子版等专栏。欢迎精馏行业从事生产、科研、贸易的单位及个人注册本站。联系方式:010-64444095;distillation@cheminfo.gov.cn。