

# 重叠步骤对真空变压吸附制氧性能的影响

杜雄伟,刘应书,侯庆文,刘文海,张德鑫

(北京科技大学机械工程学院 气体分离工程研究所,北京 100083)

**摘要:**建立了一套半工业性两塔真空变压吸附制氧试验装置,提出了2种循环操作时序,循环一的特征在于具有同时逆向抽真空与清洗、同时逆向抽真空与均压升2个重叠步骤;循环二具有同时逆向抽真空与清洗、同时进气升压与均压升2个重叠步骤。试验结果显示,采用13LiX沸石分子筛,2种循环流程获得体积分数为92.1%的氧气时,回收率分别达到58.9%和64.8%,氧气产率分别为 $80.9 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ 和 $86.3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ 。在较低压比的情况下,2种不同循环流程均能获得较好的制氧性能,吸附塔的最高吸附绝对压力分别约为148 kPa和149 kPa,最高压比分别为3.44和3.39。

**关键词:**变压吸附;氧气;真空;空气分离;重叠步骤

中图分类号:TQ028.15

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2008)02-0062-04

## Effects of overlap steps on oxygen production by vacuum pressure swing adsorption

DU Xiong-wei, LIU Ying-shu, HOU Qing-wen, LIU Wen-hai, ZHANG De-xin

(Institute of Gas Separation Engineering, School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A two-bed vacuum pressure swing adsorptive (VPSA) oxygen production pilot plant is built to investigate the effects of overlap steps on its performance. Two various cyclic sequences are proposed. The first cycle comprises the steps of simultaneous countercurrent evacuation and receiving purge, simultaneous countercurrent evacuation and pressure equalization rising. The second cycle consists of simultaneous countercurrent evacuation and receiving purge step, as well as simultaneous feed repressurization and pressure equalization rising. The experimental results show that  $\text{O}_2$  of 92.1% purity can be achieved by either cycle which employs 13LiX zeolite. The  $\text{O}_2$  recovery rate are 58.9% and 64.8%, respectively. The  $\text{O}_2$  yield are  $80.9 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$  and  $86.3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ , respectively. The relatively satisfied performance can be obtained when the pressure ratio of system is lower. The maximum absolute adsorptive pressure for the two cycles are about 148 kPa and 149 kPa, respectively. Correspondingly, the pressure ratio are 3.44 and 3.39, respectively.

**Key words:** pressure swing adsorption; oxygen; vacuum; air separation; overlap steps

真空变压吸附(Vacuum pressure swing adsorption, VPSA)是变压吸附制氧的主要流程,其系统的设计和优化目前可以借助比较精确的数学模型和商业模拟软件进行<sup>[1-4]</sup>。但是,由于系统的复杂性以及多组分气体吸附热力学和动力学等基础数据的缺乏,试验研究仍然是VPSA制氧系统设计和优化的主要手段<sup>[5]</sup>。在VPSA制氧过程中,主要的影响因素有分子筛类型、吸附塔结构、吸附时间、清洗时间、均压时间等,尤其是均压和清洗步骤对VPSA制氧过程的影响更为敏感。

Kumar等<sup>[6]</sup>、Haruna等<sup>[7]</sup>和Reiss<sup>[8]</sup>的研究发现,在VPSA制氧过程中采用同时均压降与逆放排空、同时均压升与进料气升压或同时进料气升压与产品气升压等重叠步骤(Overlap steps or Simultaneous steps),在保证产品氧气浓度的前提下,可以明显增

加床层使用效率和氧气回收率,目前很多大型的VPSA制氧系统已经引入了具有重叠步骤的制氧循环<sup>[9-10]</sup>。本文设计了2种循环操作时序,循环一的特征在于具有同时逆向抽真空与清洗、同时逆向抽真空与均压升2个重叠步骤;循环二具有同时逆向抽真空与清洗、同时进气升压与均压升2个重叠步骤,并在半工业性试验装置上进行了试验,以考察重叠步骤对VPSA制氧过程性能的影响。

## 1 试验

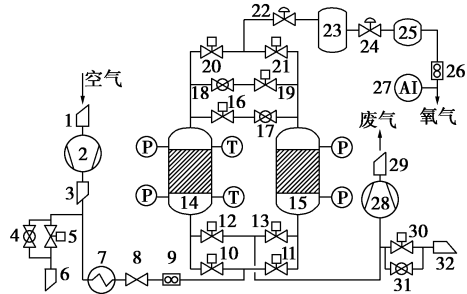
### 1.1 试验设备

建立的半工业性VPSA制氧试验流程如图1所示。空气经鼓风机加压后,被水冷却器处理到合适的吸附温度,进入A吸附塔,此时真空泵正对B塔进行真空解吸。随后,大部分氧气经过气动调节阀

收稿日期:2007-10-09

作者简介:杜雄伟(1980-),男,博士生,通讯联系人,010-62332751,duxiongwei@126.com;刘应书(1960-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高炉喷煤、变压吸附气体分离研究。

进入缓冲罐,直至产品罐;少部分气体则对 B 塔进行清洗。最后 2 塔均压,完成半个吸附周期。后半吸附周期内,交换 A、B 2 塔操作方式,进行相同的操作步骤。



1,3,6,29,32—消音器;2—鼓风机;7—冷却器;8—蝶阀;  
9,26—流量计;5,10,11,12,13,16,19,20,21,30—气动切换阀;  
4,17,18,31—手动球阀;22,24—气动调节阀;27—氧分析仪;14—吸  
附塔 A;15—吸附塔 B;23—缓冲罐;25—产品罐;28—真空泵

图 1 2 塔 VPSA 制氧试验流程

2 个吸附塔的操作状态通过设在进气管道、抽真空管道、清洗和均压管道以及氧气出口管道上的气动开关阀门的不同开关组合来实现。氧气出口管道上的气动调节阀(burkert 2702 型角座阀 + 1067 型侧部定位器)通过在吸附周期的不同时段设置不同的开度来控制氧气流量,用来优化氧气浓度和回收率。在吸附塔的上下进出口部位设置了压力变送器(Cerabar PMC133,精度 ± 0.2%)和温度传感器(JCJ100F,精度 ± 0.5%)用来跟踪吸附塔内压力和温度的波动。为了实现特定工艺流程以及鼓风机、真空泵安全启停的需要,在鼓风机排气主管道和真空泵进气主管道上设置了由气动开关阀和手动球阀组成的旁通管路以及满足设备连锁停机 and 报警的温度和压力传感器。进塔空气和产品氧气的流量由相应管道上的涡街流量计(LU-411 型,精度 ± 1%)测量,氧气浓度的测量采用 ZO-101T 型氧化锆氧量分析仪,测量精度为 ± 2% FS。

吸附塔进气由 RRC-80 型罗茨鼓风机提供,在进气压力为 101.3 kPa(ABS)、排气压力为 150.3 kPa(ABS)时的理论排气量为 262.8 m<sup>3</sup>/h,所配电机功率为 7.5 kW。真空泵为 ZSR3-100V 型干式罗茨真空泵,在进气压力为 41.3 kPa(ABS)、排气压力为 101.3 kPa(ABS)时的理论进口气量为 390.0 m<sup>3</sup>/h,所配电机功率为 15.0 kW。氧气缓冲罐和产品罐的容积分别为 1.5 m<sup>3</sup> 和 0.5 m<sup>3</sup>。单个吸附塔的相关参数见表 1。进塔空气首先经吸附塔底部的气流分布器分布均匀后,被装填在塔下部的高强度活性氧化铝干

燥,随后被装填在上部的分子筛吸附分离产生氧气。

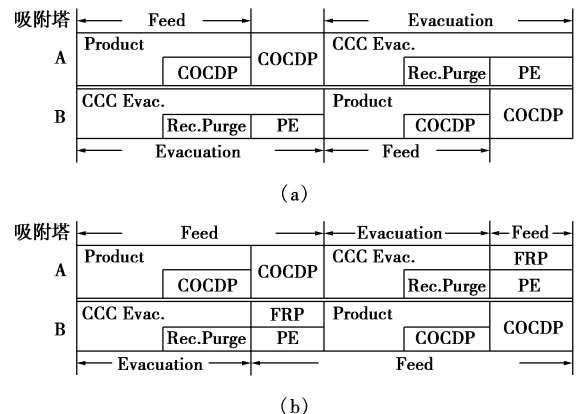
表 1 单个吸附塔相关参数

吸附器高度/m	吸附器内径/m	吸附剂类型	吸附剂用量/kg
2.4	0.55	13LiX	187.5
吸附剂密度/ kg·m <sup>-3</sup>	干燥剂类型	干燥剂质量/ kg	干燥剂密度/ kg·m <sup>-3</sup>
600 ~ 640	活性氧化铝	50	750

本套试验装置的启停、阀门系统的切换和调节均采用 HOLL YSYS PLC 自动控制,由 1 个 CPU 集成输入/输出模块 LM3107,1 个数字量输出模块 LM3223,2 个模拟量输入模块 LM3310 以及 1 个模拟量输出模块 LM3320 组成。试验过程中所有的温度、压力、流量和浓度等模拟量均通过 KPCI-821F 数据采集卡(转换时间 10 μs,系统测量精度 0.1%)输入到计算机中,通过采用 VB 语言编写的采集监控程序对系统运行状态进行实时监控和数据存储。

1.2 试验内容及方法

为了分析 VPSA 制氧过程中重叠步骤对系统制氧性能的影响,对 2 种制氧循环时序 a 和 b 进行了试验研究,分别如图 2(a)、(b)所示。



COCDP—顺向降压,CCC Evac.—逆向抽空,  
FRP—进气升压,PE—均压,Rec. Purge—清洗  
Feed—进气,Evacuation—抽真空,product—吸附产氧

图 2 2 种 VPSA 制氧循环过程

循环 a 中重叠步骤为同时逆向抽真空与清洗、同时逆向抽真空与均压升;流程 b 中重叠步骤为同时逆向抽真空与清洗、同时进气升压与均压升。试验研究了以上所述重叠步骤的时间对氧气浓度和回收率的影响。为了表述方便,将循环 a 或 b 中 2 个重叠步骤的时间分别简化为清洗时间和均压时间。试验中,当均压时间以间隔 1 s,从 1 s 增加到 6 s 时,清洗时间和半吸附周期分别为 4 s 和 33 s;当清洗时

间以间隔 1 s, 从 3 s 增加到 8 s 时, 均压时间和半吸附周期分别为 4 s 和 33 s。同时, 氧气出口管道上 2 个气动调节阀的开度在以上试验过程中分别按照一定的变化规律保持不变, 清洗和均压管道上的手动球阀保持全开, 吸附塔进气管道上的蝶阀固定开度为 60%, 旁通管道上的 2 个球阀也保持一定开度。在以上试验的基础上, 分别针对这 2 种循环, 通过调节各步骤的时间、清洗和均压阀门开度、进气蝶阀开度、气动调节阀开度、旁通球阀开度等, 获得装置优化的产氧性能。

每 1 组试验工况都在试验设备启动后, 待产品氧气浓度稳定后再运行 1 h。进塔空气流量、产品氧气流量和浓度以及各预设部位的压力和温度的瞬时值采集时间间隔为 1 s。气体流量的大小均换算为 20℃、101.3 kPa 状态下的数值。氧气回收率表示如下:

$$\text{氧气回收率} = (\text{氧气浓度} \times \text{氧气流量} \times 100\%) / (0.21 \times \text{进塔空气流量}) \quad (1)$$

公式(1)中的氧气浓度、流量和进塔空气流量采用设备运行稳定后 1 h 内瞬时浓度和流量的积分平均值。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 均压时间的影响

当清洗时间为 4 s, 半吸附周期为 33 s 时, 均压时间对 2 种循环 a 和 b 操作中氧气浓度和回收率的影响分别如图 3 所示。

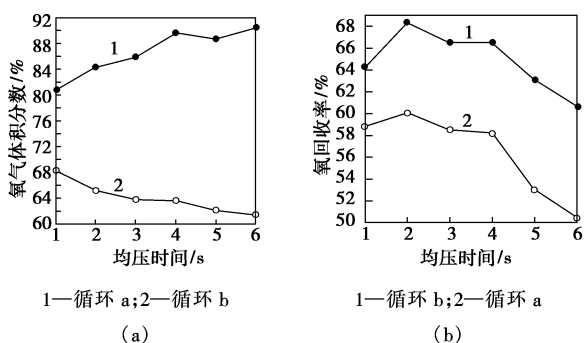


图 3 均压时间对氧气浓度和氧气回收率的影响

图 3 表明, 对于循环 a, 氧气浓度随均压时间的延长而增加, 且体积分数均在 80% 以上; 均压时间超过 2 s 后, 氧气回收率开始缓慢下降, 超过 4 s 后则迅速下降。从图 2(a) 可以看出, 由于有同时逆向抽真空与均压升这个步骤, 此时的均压步骤就起到真空清洗的作用, 均压时间的延长使得逆向清洗更加彻底, 同时也消耗更多的来自另一塔的较高浓度

的均压氧气。对于循环 b, 氧气浓度随均压时间的延长而降低, 且体积分数均在 70% 以下; 氧气回收率的变化趋势与循环 a 相似, 在整个均压时间范围内, 循环 b 的氧气回收率均大于 60%。由图 2(b) 可知, 由于同时进气升压与均压升步骤的存在, 延长均压时间, 更多的原料空气就会进入吸附塔, 导致在产氧步骤时吸附塔已经失去了部分吸附能力, 氧气浓度和回收率下降。因此, 为了获得较高的氧气浓度和回收率, 对于循环 a, 均压时间在 4 s 附近是适宜的; 对于循环 b, 均压时间应该更短比较合适。

### 2.2 清洗时间的影响

当均压时间为 4 s, 半吸附周期为 33 s 时, 清洗时间对 2 种循环 a 和 b 操作中氧气浓度和回收率的影响分别如图 4 所示。

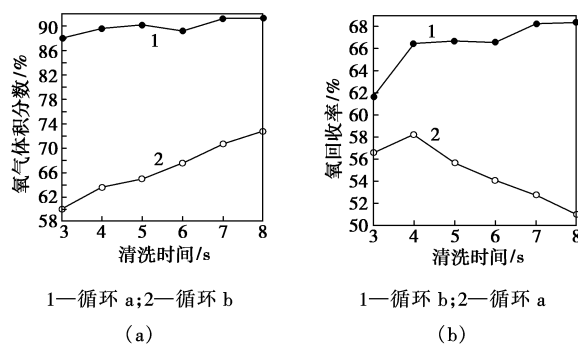


图 4 清洗时间对氧气浓度和氧气回收率的影响

从图 4(a) 可以看出, 随着清洗时间增加, 2 种循环操作下氧气浓度均升高, 且循环 b 的增幅较大, 循环 a 的氧气体积分数均大于 88%。由图 4(b) 可知, 对于循环 a, 当清洗时间超过 4 s, 氧气回收率迅速下降。对于循环 b, 在本试验范围内, 氧气回收率均升高, 这是因为氧气浓度的增加幅度要比由于清洗导致的氧气流量降低幅度要大。由图 4 分析可得, 为了获得较高的氧气浓度和回收率, 对于循环 a, 清洗时间在 4 s 左右是适宜的; 对于循环 b, 清洗时间要大于 4 s 比较合适。

### 2.3 2 种循环分离性能比较

在以上分析的基础上, 对上述 2 种循环时序下的操作参数进行了大量的优化调试, 获得结果如表 2 所示。

表 2 2 种循环分离性能比较

循环	清洗时间/s	均压时间/s	半周期/s	进气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	氧气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	氧体积分/%	氧回收率/%
a	4	4	33	226.95	30.35	92.1	58.9
b	8	1	30	220.00	32.37	92.1	64.8

调试过程包括改变旁通管路手动球阀(调节吸附压力、真空度)、清洗和均压管路的手动球阀(调节清洗和均压气量)、氧气管道上气动调节阀的开度(调节氧气流量)以及循环各步骤的时间等。由表2中清洗时间和均压时间的数据可知,前文有关分析符合表2的试验结果,循环a和b均能获得较高的氧气浓度和氧气回收率。当氧气体积分数为92.1%时,试验装置在循环a和b下的氧气产率(单位质量吸附剂所能获得的氧气流量)分别为 $80.9 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ 和 $86.3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ 。为了分析和比较2种循环a和b中吸附塔内压力的变化规律,实时采集了2吸附塔底部的压力数据,试验设备运行稳定后某一时间段内的压力曲线分别如图5(a)、(b)所示。

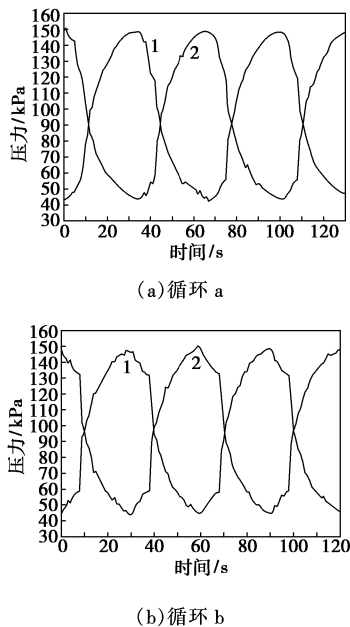


图5 优化工况下2吸附塔底部压力变化曲线

从图5可以得出,对于本文中2种不同的循环操作时序,尽管吸附塔的压力变化过程不同,但是获得表2所示分离效果所需要的最高吸附压力及最低解吸压力都比较接近。循环a的最高吸附绝对压力和最低解吸绝对压力分别约为148 kPa和43 kPa;对于循环b,则分别约为149 kPa和44 kPa。2种循环的最高压比(最高吸附绝对压力和最低解吸绝对压力之比)分别约为3.44和3.39,低于工业上常用的压比(4~5)<sup>[11]</sup>。压比的降低使得解吸压力可以更高,可以降低真空泵的投资和运行费用。因此,本文

提出的2种制氧循环流程在实际应用中应该更有优势,且由于循环b的循环时间更短,压比更低,氧产率和回收率更高,应予以优先选择。

### 3 结语

(1)建立了1套能够对流量、压力、温度、浓度等数据进行跟踪采集和对设备运行状态实时监控的半工业性真空变压吸附制氧试验装置。

(2)提出了2种循环操作时序,循环a的特征在于具有同时逆向抽真空与清洗、同时逆向抽真空与均压升2个重叠步骤;循环b具有同时逆向抽真空与清洗、同时进气升压与均压升2个重叠步骤,2种循环均能获得较好的制氧性能。

(3)具有重叠步骤的制氧循环可以缩短循环周期,提高分子筛利用率,同时可以有效降低分离过程压比。

### 参考文献

- [1] Ruthven D M, Farooq S, Knaebel K S. Pressure Swing Adsorption[M]. New York: VCH Publishers, Inc., 1994.
- [2] Kumar R, Fox V G, Hartzog D G, *et al.* A versatile process simulator for adsorptive separations[J]. Chem Eng Sci, 1994, 49(18): 3115 - 3125.
- [3] Zeng R, Guan J Y. Progress in pressure swing adsorption models during the recent 30 years[J]. Chinese J Chem Eng, 2002, 10(2): 228 - 235.
- [4] Biegler L T, Jiang L, Fox V G. Recent advances in simulation and optimal design of pressure swing adsorption systems[J]. Separation and Purification Reviews, 2004, 33(1): 1 - 39.
- [5] Sircar S. Pressure swing adsorption[J]. Ind Eng Chem Res, 2002, 41(6): 1389 - 1392.
- [6] Kumar R, Naheiri T, Watson C F. Adsorption process with mixed pressurization and purge/equalization: US, 5328503[P]. 1994 - 07 - 12.
- [7] Haruna K, Ueda K, Inoue M, *et al.* Process for recovering oxygen enriched gas: US, 4917710[P]. 1990 - 04 - 17.
- [8] Reiss G. Separation of gas mixture by vacuum swing adsorption(VSA) in a two-adsorber system: US, 5015271[P]. 1991 - 05 - 14.
- [9] Ackley M W, Smolarek J, Leavitt F W. Pressure swing adsorption gas separation method, using adsorbents with high intrinsic diffusivity and low pressure ratios: US, 6506234B1[P]. 2003 - 01 - 14.
- [10] Baksh M S A, Rosinski A. Pressure swing adsorption process for large capacity oxygen production: US, 2007/0095208A1[P]. 2007 - 05 - 03.
- [11] Rege S U, Yang R T. Limits for air separation by adsorption with LiX zeolite[J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 36(12): 5358 - 5365. ■