

快速真空变压吸附制氧的排放气充压过程研究

祝显强^{1, 2)}, 刘应书^{1, 3)}, 焦璐璐¹⁾, 杨雄¹⁾✉, 刘文海¹⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 江苏昊泰气体设备科技有限公司, 丹阳 212300

3) 北京科技大学冶金工业节能减排北京市重点实验室, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: kindy_yang@163.com

摘要 测试了微型制氧吸附剂的平衡吸附特性, 在此基础上选出适合快速真空变压吸附制氧的吸附剂. 针对传统的单塔两步快速变压吸附制氧含量低问题, 提出了提高产品气氧含量的单塔快速变压吸附制氧的排放气和原料气组合充压流程, 并对该流程进行实验研究. 结果表明: 在单塔快速真空变压吸附制氧过程中, 采用排放气和原料气组合充压流程可以有效提高产品气氧含量. 充压前排放气的压力和氧含量是影响产品气氧含量的关键参数, 采取合适的排放气压力和较高氧含量的排放气可获得更高的产品气氧含量. 在吸附和解吸压力分别为 240 kPa 和 60 kPa 时, 采用排放气和原料气组合充压的快速真空变压吸附流程可获得氧体积分数 90% 的产品气, 其产氧率为 $325.08 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$.

关键词 制氧; 快速变压吸附; 充压; 吸附剂

分类号 TQ028.1

Study on pressurization with raffinate in a rapid vacuum pressure swing adsorption process for producing oxygen

ZHU Xian-qiang^{1, 2)}, LIU Ying-shu^{1, 3)}, JIAO Lu-lu¹⁾, YANG Xiong¹⁾✉, LIU Wen-hai¹⁾

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Jiangsu Oxtex Air Equipment & Technology Co., Ltd., Danyang 212300, China

3) Beijing Key Laboratory for Energy Saving and Emission Reduction of Metallurgical Industry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: kindy_yang@163.com

ABSTRACT The equilibrium adsorption characteristics of nitrogen adsorbents were tested and a suitable nitrogen adsorbent was selected for producing oxygen by rapid vacuum pressure swing adsorption. Due to low oxygen concentration in the product obtained by traditional rapid pressure swing adsorption, an improved pressurization step with raffinate was developed and experimentally studied in a rapid vacuum pressure swing adsorption system for producing oxygen. The results show that combined pressurization with raffinate and feed gas can effectively improve the oxygen concentration in the product during the rapid vacuum pressure swing adsorption process. The pressure and oxygen concentration of raffinate for pressurizing are key parameters to influence the oxygen concentration in the product, and a higher concentration oxygen product can be obtained by taking an appropriate pressure and a higher oxygen concentration of raffinate. The 90% oxygen can be generated by combined pressurization with raffinate and feed gas during the rapid vacuum pressure swing adsorption process with an adsorption pressure of 240 kPa and a desorption pressure of 60 kPa, and the adsorbent productivity is $325.08 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$.

KEY WORDS oxygen generation; rapid pressure swing adsorption; pressurization; adsorbents

变压吸附分离技术是已在气体分离、提纯等领域获得广泛应用的技术。新型吸附剂^[1-3]、变压吸附工艺优化及开发^[4-7]和吸附塔结构改进^[8-9]是提高变压吸附装置性能的主要途径。应用变压吸附分离原理的微型制氧机具有氧含量高、价格便宜等优点,在家庭医疗保健制氧领域得到更广泛地应用,其中吸附塔和压缩机是决定微型制氧机体积和重量的最主要部件^[10]。快速变压吸附工艺(rapid pressure swing adsorption, RPSA)具有周期短、吸附剂生产率高等优点,为进一步降低微型制氧机体积和提高制氧性能提供新的思路。

单吸附塔快速变压吸附工艺最初是由 Kadlec 及其合作者^[11-12]提出的,循环是由具有相同时间长度的进料加压和排气两个步骤组成,循环时间特别短(低于 20 s),然而产品气回收率低至 10% 以下。为此, Keller 等^[13-15]提出采用短时间进料和长时间排气且带产品罐的快速变压吸附工艺,使吸附剂产率比传统变压吸附的产率高出 5 倍以上。Rao 等^[16]模拟了以 Ag-Li-X 吸附剂为基础的快速变压吸附制氧过程,结果表明快速变压吸附工艺通常需要较长的解吸时间;相对于 5A 分子筛,Ag-Li-X 吸附剂可获得较高回收率,但氧气含量相对较低。反吹清洗步骤也是快速变压吸附工艺中不可或缺的循环步骤,Chai 等^[17]基于数值模拟研究了快速变压吸附制氧反吹过程,结果表明吸附阻力、床层压降和非等温条件是影响反吹解吸效果最主要因素。小粒径的吸附剂使用使床层出现压降增大^[18]、吸附剂分布不均及粒子团聚^[18-19]等问题,而低高径比的吸附剂(通常高径比 $L/D < 1$)在这方面则有较大优势。Chai 等^[18]和 Rao 等^[19]模拟研究了低高径比吸附器的快速变压吸附制氧的反吹过程,提出表征床层解吸程度参数 F 和 β ,在低高径比吸附器内较小解吸时间可完成床层所需解吸比的解吸,但需要更大反吹流量,使 β 增大,获得 F 相对较小。缩短循环周期是减小变压吸附分离系统单位产氧量所用的吸附剂量(BSF, pounds of adsorbent in the PSA unit per ton of contained O_2 per day production rate)普遍所采用的方法。Kopaygorodsky 等^[20]研究了特快速变压吸附制氧过程,吸附床高度仅为 2 mm,循环周期小于 3 s,模拟结果表明在较低吸附压力(0.15 MPa)下能获得氧体积分数为 85% 的产品气,其回收率为 56%。然而,循环周期的缩小使气固间传输过程难以顺利完成时,可能会影响快速变压吸附工艺的性能。Chai 等^[21]深入研究了缩短循环周期对减小快速变压吸附制氧系统 BSF 的影响,结果表明由于有限传质速率、气固传热系数和床层压降,系统的 BSF 不能通过缩短循环周期的方法无限地减小。Rao 和 Farooq^[10]实验研究了超细颗粒吸附剂的两步快速变压吸附制氧过程,结果表明通过该

流程下仅可获得氧体积分数最高为 38.5% 的产品气。为了进一步提高产氧性能,Rao 等^[22-23]基于两种不同粒径 LiLSX 吸附剂,研究了产品气充压和原料气充压过程分别对快速变压吸附制氧性能的影响,结果表明采用产品气充压流程在吸附和解吸压力分别为 400 kPa 和 100 kPa 下可获得氧体积分数为 90% 的产品气,氧气回收率为 27%,但其吸附压力过高。综上所述,目前针对快速变压吸附制氧的研究集中于数值模拟方面,实验研究相对较少,且存在氧含量较低或吸附压力过高的问题。

充压步骤是变压吸附过程中极为重要的循环步骤,直接影响后续的吸附过程中分离效果。Ruthven 等^[24]指出对于变压吸附制氧过程,使用产品气从吸附塔上端来对吸附塔进行充压,有利于产品气氧含量的提高。Zheng 等^[25]深入地研究了变压吸附制氧的吸附塔内传质过程,结果表明采用原料气充压时,吸附塔内的传质区位置在充压步骤结束后已被推至吸附床过半的位置,且传质区长度约占吸附塔长度的 1/4,即采用原料气充压会导致吸附步骤中吸附床过早被氮气穿透。刘应书等^[26]研究了真空变压吸附提浓煤矿乏风瓦斯的排放气充压过程,结果表明采用排放气充压可以延长重组分甲烷的穿透时间,有效提高轻组分的含量,减少重组分甲烷的排放。张传钊等^[27]实验研究了真空变压吸附富集乏风瓦斯的轻组分充压过程,结果表明采用轻组分从吸附塔上端充压可以延长穿透时间。现阶段针对快速变压吸附制氧的研究,多数使用原料气或者产品气进行充压,对排放气充压缺乏深入的研究。

笔者搭建了组合排放气和原料气充压的单塔快速真空变压吸附制氧的装置,利用吸附塔上端的缓冲罐收集吸附步骤结束后的排放气,在进行原料气充压之前,将收集于缓冲罐内的排放气用于抽真空解吸后的吸附塔充压,之后进行原料气充压过程。在上述实验装置上,对比研究原料气充压与排放气和原料气组合充压流程对制氧效果的影响,以期对单塔快速真空变压吸附制氧技术进一步研究开发提供参考。

1 吸附剂的选择

吸附剂的选择是进行单塔快速变压吸附分离制氧的首要任务。本文选取了三种的微型制氧吸附剂,其中 1[#] 吸附剂为国外产制氧吸附剂,2[#] 和 3[#] 吸附剂为国产制氧吸附剂。表 1 给出了三种吸附剂的几何参数以及对氧气和氮气的分离系数等参数,表中数据由美国康塔公司生产的 Autosorb-1 型吸附仪测得吸附等温线,通过体积法^[28]计算得到选择系数 W 和分离因子 α 。由表可以看出,3[#] 吸附剂分离因子 α 最高,因此被选为本研究中制氧吸附剂。

表 1 三种微型制氧吸附剂的性能参数

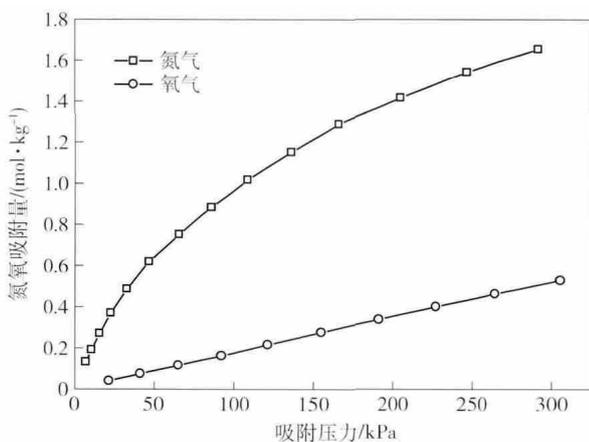
Table 1 Performance parameters of three nitrogen adsorbents

吸附剂	颗粒直径/mm	选择系数, W	分离因子, α
1 [#]	0.5	2.3189	2.9856
2 [#]	0.5	2.2646	3.1003
3 [#]	0.5	2.0487	8.7118

图 1 为自行研制高压静态吸附仪^[29]测得的 3[#] 吸附剂对氧气和氮气 291 K 下的吸附等温线。经分析可知, 氧气和氮气在 3[#] 吸附剂上的吸附符合 Langmuir 吸附等温线, 其方程为

$$q_i = q_{mi} \cdot \frac{B_i P_i}{1 + \sum_{j=1}^n B_j P_j} \quad (1)$$

式中 q_i 为组分 i 的平衡吸附量, q_{mi} 为组分 i 的饱和吸附量, B_i 为组分 i 的 Langmuir 常数, P_i 为组分 i 的分压, n 为混合气体中组分个数。291 K 时, 3[#] 吸附剂的 Langmuir 吸附等温常数: $q_{mN_2} = 2.5549 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$, $B_{N_2} = 7.7272 \text{ MPa}^{-1}$, $q_{mO_2} = 1.3462 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$, $B_{O_2} = 1.5601 \text{ MPa}^{-1}$ 。通过式 (1) 可计算出 3[#] 吸附剂在不同压力下对氧气和氮气的吸附量。

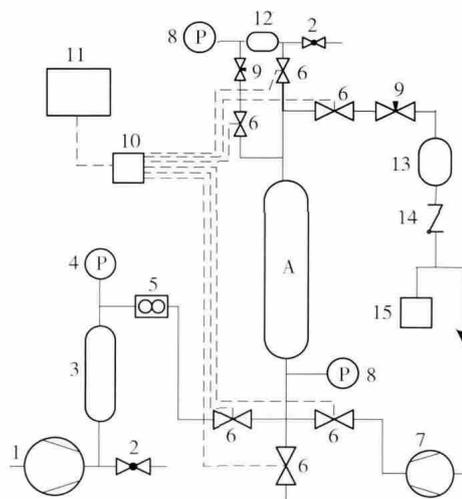
图 1 291 K 时 3[#] 吸附剂吸附等温线Fig. 1 Adsorption isotherms of 3[#] adsorbent at 291 K

2 单塔快速真空变压吸附制氧实验

2.1 实验装置

图 2 为具有排放气和原料气组合充压步骤单塔快速真空变压吸附制氧实验装置。原料气经压缩机压缩加压后, 通过由 PLC 控制的电磁阀分配, 进入装有细颗粒微型制氧吸附剂的单个吸附塔进行快速真空变压吸附分离, 分离后的产品气进入储气罐, 而氮气及其他组分在放空和抽真空解吸时排入大气。其中吸附塔直径为 30 mm, 高 300 mm, 装填吸附剂 120 g (其中 3[#] 制氧吸附剂 100 g, 三氧化二铝 20 g)。在吸附塔的上端, 设置有用于收集吸附步骤结束后

传统快速变压吸附循环中被直接放空的气体的排放气缓冲罐 12, 吸附床内由于吸附在轴向存在浓度梯度, 靠近产品端的放空气体具有较高的氧含量, 收集这些气体用于充压可提高吸附阶段的产品气氧含量。排放气缓冲罐 12 设有两个用作排放气收集和充压及检测的出口, 并设置两个电磁阀, 用于控制排放气的收集和充压时序, 同时进口端设置有节流阀, 用于调节排放气中氧含量。测量部分所用的仪器为北京英世智博测控技术有限公司 TY-3800 磁氧分析仪, 测量范围为 0 ~ 100%, 测量精度 $\leq 0.3\%$ FS, 分辨率为 0.01%; 上海自动化仪表股份有限公司精密压力表, 量程为 0 ~ 0.4 MPa, 精确度等级 0.4 级; 阳泉仪表有限责任公司精密真空表, 量程为 0 ~ -0.1 MPa, 精确度等级 0.4 级; 常州双环热工仪表有限公司 DK800-6F 型浮子流量计, 测量范围 0 ~ 2 m³·h⁻¹, 准确度为 2.5 级; 长春汽车滤清器有限责任公司 LML-2 湿式气体流量计, 额定流量 0.5 m³·h⁻¹, 额定流率时准确度为 $\pm 1\%$ 。



1—空气压缩机; 2—球阀; 3—原料气缓冲罐; 4—精密压力表; 5—浮子流量计; 6—电磁阀; 7—真空泵; 8—真空压力表; 9—节流阀; 10—PLC; 11—上位计算机; 12—排放气缓冲罐; 13—产品气缓冲罐; 14—单向阀; 15—湿式流量计

图 2 单塔真空变压吸附制氧实验系统

Fig. 2 Schematic diagram of the rapid vacuum pressure swing adsorption separation experimental unit

2.2 排放气和原料气组合充压的循环过程

组合排放气和原料气充压步骤的单塔快速真空变压吸附制氧循环过程如图 3 所示。制氧循环步骤包括原料气充压、吸附、均压、放空、抽真空及排放气充压步骤。吸附塔经历的循环过程与采用原料气充压的循环过程的区别在于利用吸附塔上端的缓冲罐收集吸附步骤结束后的排放气, 在进行原料气充压之前, 将收集于缓冲罐内的排放气用于抽真空解吸后的吸附塔充压, 之后再继续进行原料气充压过程。

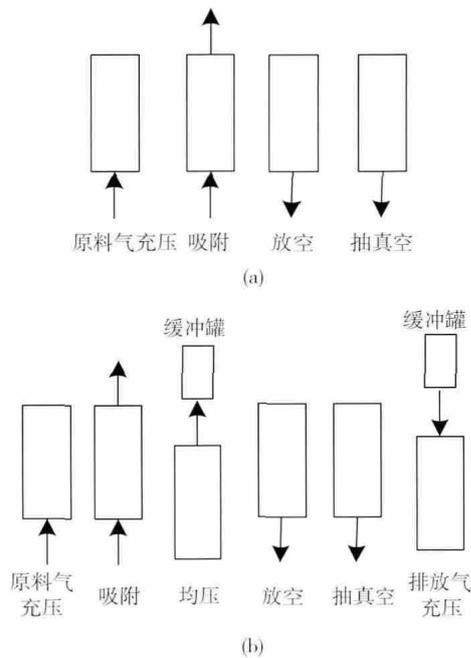


图3 两种循环方式的对比。(a) 原料气充压；(b) 原料气充压 + 排放气充压
 Fig.3 Comparison of two switching sequences: (a) feed gas pressurization ; (b) combined pressurization with raffinate and feed gas

2.3 研究内容

研究解吸压力对快速变压吸附制氧过程产品气氧含量的影响,并对比原料气充压与排放气和原料气组合充压对单塔快速变压吸附制氧效果的影响。单塔快速变压吸附制氧实验采用原料气充压与排放气和原料气组合充压的两种充压方式;解吸压力分别为 101.325、80.60 和 50 kPa;循环周期分别取 6.6、7.7、7.4、7.8、8.2 和 8.6 s;充压前排放气缓冲罐内气体压力分别为 180、165、150 和 130 kPa;充压前排放气缓冲罐内气体中氧体积分数分别为 70%、60%、55% 和 47%。

3 实验结果与讨论

3.1 解吸压力和充压过程对产品气氧含量的影响

3.1.1 解吸压力对产品气氧含量的影响

图 4 为解吸压力对产品气氧含量的影响。实验过程中采用原料气充压,维持节流阻力不变,吸附压力为 240 kPa。由图 4 可知,随着解吸压力的降低,产品气氧含量急剧提高。当解吸压力为 101.325 kPa 时产品气中氧体积分数仅为 33.8%,解吸压力为 60 kPa 时产品气中氧体积分数为 73.45%,比解吸压力为 101.325 kPa 时提高 39.65%。由吸附平衡理论可知,解吸压力越低,吸附剂解吸越彻底,吸附阶段的产品气氧含量也越高,但其能耗也相应的增加。随着解吸压力进一步降低,产品气氧含量提高幅度减小,为此在后续实验研究中解吸压力取为 60 kPa。由以上分析可知,单塔快速变压吸附制氧过程产品气氧含量较低的主要原因是吸附

床层解吸不彻底,降低解吸压力是提高单塔快速变压吸附制氧过程产品气氧含量的有效方法。

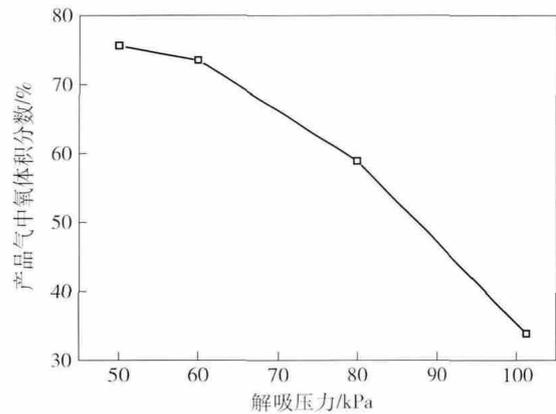


图 4 解吸压力对产品气氧含量的影响

Fig.4 Effect of desorption pressure on oxygen concentration in the product

3.1.2 充压过程对产品气氧含量的影响

图 5 为不同充压过程的产品气氧含量随循环周期的变化。其中吸附压力为 240 kPa,解吸压力为 60 kPa,维持充压时间不变,相当连续产氧流量为 $0.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用排放气充压时,充压前排放气缓冲罐内气体压力和氧体积分数分别为 165 kPa 和 70%。由图 5 可以看出,不管充压方式是原料气充压还是排放气和原料气组合充压,产品气氧含量均随循环周期的延长而呈现先增加后减小的变化趋势,存在最佳的循环周期,为 7.8 s。因为吸附时间较短时,为了获得相同的产氧量,瞬时的产氧量较大,部分原料气未得到吸附剂充分吸附即被排出,因此产品气氧含量较低。随着吸附时间的延长,原料气中更多的氮气被吸附剂吸附,吸附过程进行地更加充分,产品气氧含量逐渐升高,直到制氧吸附剂吸附氮气的量达到饱和,再增加吸附时间将导致吸附塔被重组分氮气穿透,使得产品气氧含量的下降,所以产品气氧含量会随循环周期的延长先增加而后减小,存在最佳值。

同时,由图 5 还可以看出,在具有相同循环周期的条件下,采用排放气和原料气组合充压流程的产品气氧含量是明显高于采用原料气充压流程中产品气氧含量。因此,在单塔快速真空变压吸附制氧过程中,采用排放气和原料气组合充压流程可以有效提高产品气中氧气含量。例如,当循环周期为 7.8 s 时,采用排放气和原料气组合充压的流程得到的产品气氧体积分数为 88.94%,而采用原料气充压流程则为 73.45%,比原料气充压流程提高 15.49%。因为当采用原料气充压流程时,在吸附塔抽真空解吸过程中,吸附塔内重组分氮气的传质区被拉长,在随后的原料气充压步骤中,吸附塔内重组分氮气的传质区又被压缩,且被推向吸附塔上端接近产品端,这将造成吸附过程中重组分氮气

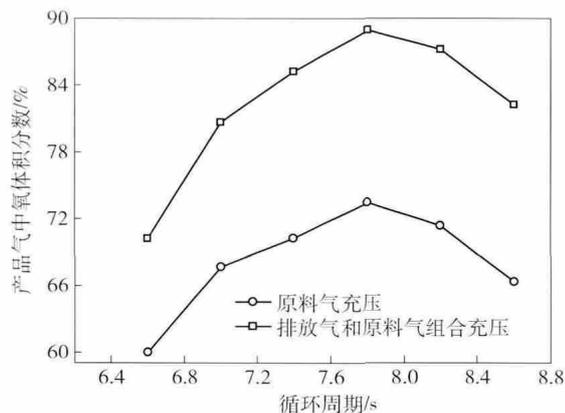


图5 循环周期对产品气氧含量的影响

Fig.5 Effect of cyclic time on oxygen concentration in the product

过早穿透而引起产品气氧含量下降。另外,通过充压步骤使吸附塔内气体的压力逐渐上升,而采用原料气充压会造成靠近吸附塔下端的制氧吸附剂较早地在较低的气体压力下与原料气接触,由于在较低的气体压力下吸附剂对氮气的吸附量较低,会造成氮气提前穿透吸附床层,降低吸附剂的利用效率^[26]。而采用排放气和原料气组合充压流程,先从吸附塔上端采用收集的排放气充压,由于排放气中氧含量较高,不仅可以将重组分氮气的传质区压缩并推回至吸附塔下端,而且起到对吸附床层的清洗效果,减弱了较低压力下吸附剂利用效率降低带来的不利影响。与原料气充压相比,排放气和原料气组合充压后吸附床层内氮气的吸附传质区更加远离产品端。当循环周期相同时,吸附步骤中氮气的吸附传质区移动的最终位置更加远离产氧端,故产品气中氧含量也较高。

3.1.3 充压前排放气缓冲罐气体压力和氧含量对产品气氧含量的影响

图6为充压前排放气缓冲罐内气体中氧体积分数为70%时,充压前不同排放气压力对产品气氧含量的影响。由图6可以看出,随着充压前排放气压力的降低,产品气氧含量先增大后减小,存在最大值。这可能是由于充压前排放气的压力较高时,充压过程气流速度很快,排放气与吸附剂接触时间较短,难以充分发挥对低压下吸附了氮气的吸附剂的清洗作用;充压前排放气的压力较低时,用于充压排放气量少,将传质区压缩并推回至吸附塔下端的距离较短,且充压过程气流速度很慢,对吸附剂的清洗作用不够。

图7为充压前排放气缓冲罐内气体压力为165 kPa时,排放气缓冲罐中气体中氧含量对产品气氧含量的影响。由图可以看出,随着充压前气体中氧含量降低,产品气氧含量也降低。这是由于充压前排放气缓冲罐中气体中氧含量越高,充压过程中更有利于降低靠近吸附塔上端床层中重组分氮气分压,将不纯的气体组分更多的推向吸附塔下端,远离产品端。综

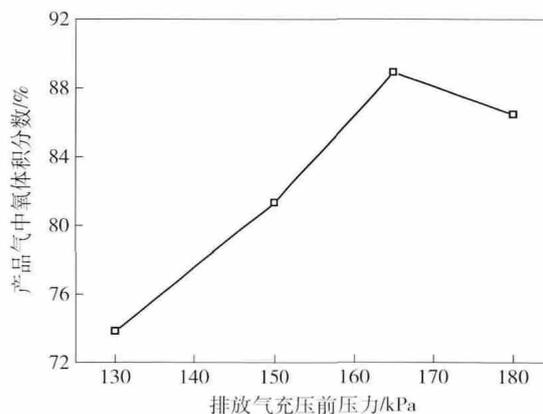


图6 充压前排放气压力对产品气氧含量的影响

Fig.6 Effect of raffinate pressure on oxygen concentration in the product

上所述,充压前排放气缓冲罐中气体压力和氧含量是影响提高组合充压的单塔快速真空变压吸附制氧过程产品气氧含量的关键参数。

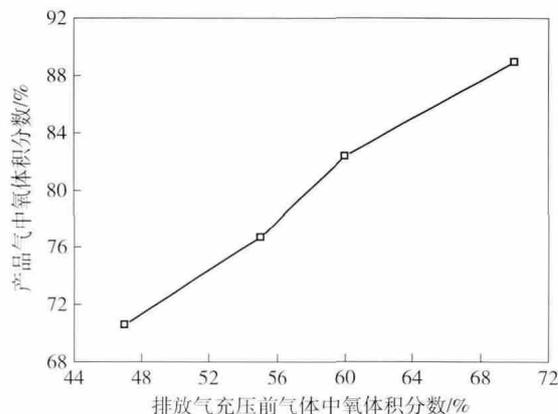


图7 充压前排放气中氧含量对产品气氧含量的影响

Fig.7 Effect oxygen concentration of raffinate on oxygen concentration in the product

3.2 基于排放气和原料气组合充压的单塔真空变压吸附循环性能

图8为吸附时间对产品气氧含量和氧气回收率的影响。由图可以看出:吸附时间为0.6 s时,产品气中氧体积分数最高可达90.3%,随着吸附时间的增加,产品气氧含量逐渐下降;而氧气回收率随着吸附时间的增加逐渐增加,当产品气中氧体积分数为最高90.3%时氧气回收率为29.41%,当产品气中氧体积分数大于80%时氧气回收率大于40%。这是由于吸附时间很短,吸附传质区还未到达吸附塔上端,产品气中氧含量较高,然而此时产氧量较小,因此氧气回收率较低。随着吸附时间的延长,吸附过程更加充分,虽然产品气中氧含量由于吸附传质区接近产品端而有所下降,但产气量增加,故氧气回收率逐渐增高。之后吸附时间进一步增加,使吸附床层穿透,产品气中氧含量下降较快,氧气回收率保持稳定。

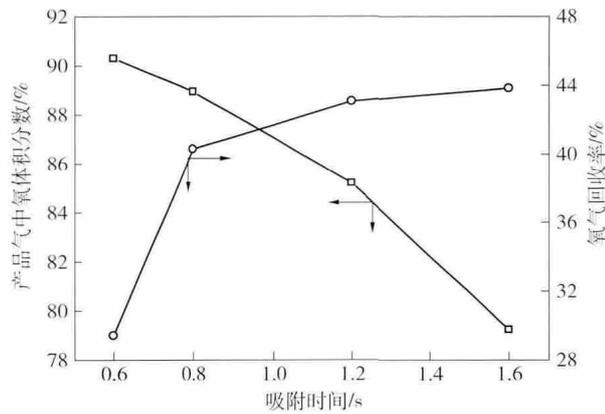


图 8 吸附时间对产品气氧含量和氧气回收率的影响

Fig. 8 Effect of adsorption time on oxygen concentration in the product and oxygen recovery

图 9 为吸附时间对吸附剂产氧率的影响. 吸附剂产氧率 $V(\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1})$ 可按式计算:

$$V = \frac{N \cdot \omega}{m} \quad (2)$$

式中 N 为循环产氧量 (L) ω 为循环频率 (s^{-1}) m 为吸附剂量 (kg). 由图 9 可以看出, 当吸附时间为 0.6 s 时, 吸附剂产氧率为 $325.08 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随着吸附时间的增长, 吸附剂的产氧率也随之增大, 而增大的幅度逐渐减小. 这是由于随着吸附时间的延长, 循环产氧量逐渐增大, 但循环频率却下降, 故吸附剂的产氧率随吸附时间增长而增大, 但增大的幅度逐渐减小.

现有的基于传统变压吸附循环的微型制氧机吸附剂产氧率约为 $100 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右, 而当产品气中氧体积分数为 90% 采用排放气和原料气组合充压的快速真空变压吸附流程时, 吸附剂产氧率为 $325.08 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为传统微型制氧机吸附剂产氧率的 3.25 倍, 这充分说明快速变压吸附工艺具有生产率高的优点.

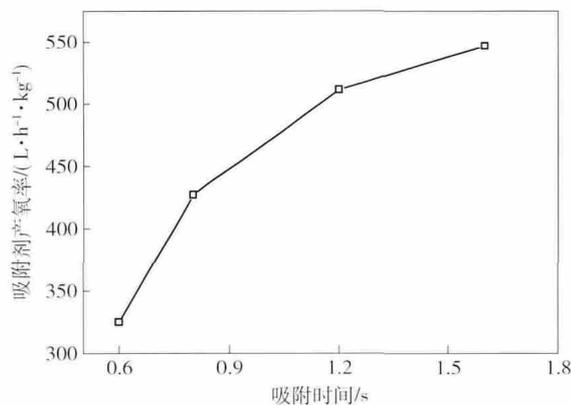


图 9 吸附时间对吸附剂产氧率的影响

Fig. 9 Effect of adsorption time on adsorbent productivity

4 结论

(1) 找到适合单塔快速真空变压吸附制氧的吸附

剂, 应用这种吸附剂在吸附和解吸压力分别为 240 kPa 和 60 kPa 时, 采用排放气和原料气组合充压的快速真空变压吸附流程可获得氧体积分数为 90% 的产品气.

(2) 采用排放气和原料气组合充压流程可以有效提高产品气氧含量, 当循环周期为 7.8 s 时, 原料气和排放气组合充压条件下得到的产品气中氧体积分数比原料气充压条件下提高 15.49%.

(3) 充压前排放气缓冲罐中气体压力和氧含量是影响组合充压的单塔快速真空变压吸附制氧过程中产品气氧含量的关键参数.

(4) 快速变压吸附工艺可有效提高吸附剂产氧率, 采用排放气和原料气组合充压的快速真空变压吸附流程的吸附剂产氧率为 $325.08 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为传统微型制氧机吸附剂产氧率的 3.25 倍.

参 考 文 献

- [1] Zhang D, Stephenson N A. Development of oxygen selective adsorbents for gas separation and purification. *Adsorption*, 2014, 20 (1): 137
- [2] Li H Y, Yin W M, Wei Y W, et al. Composition and performance evolution of high efficient LiLSX adsorbent for air separation and oxygen production. *Acta Pet Sin Pet Process Sect*, 2009, 25 (Suppl 2): 106
(李宏愿, 尹伟民, 魏渝伟, 等. 高效空分制氧吸附剂 LiLSX 的组成和性能评价. 石油学报: 石油加工, 2009, 25(增刊 2): 106)
- [3] Shi M, Kim J, Sawada J A, et al. Production of argon free oxygen by adsorptive air separation on Ag-ETS-10. *AIChE J*, 2012, 59 (3): 982
- [4] Mofarahi M, Towfighi J, Fathi L. Oxygen separation from air by four-bed pressure swing adsorption. *Ind Eng Chem Res*, 2009, 48 (11): 5439
- [5] Sivakumar S V, Rao D P. Modified Duplex PSA. 2. Sharp separation and process intensification for N_2 - O_2 -5A zeolite system. *Ind Eng Chem Res*, 2011, 50(6): 3437
- [6] Bhatt T S, Sliepcevich A, Storti G, et al. Experimental and modeling analysis of dual-reflux pressure swing adsorption process. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53(34): 13448
- [7] Zhu X Q, Liu Y S, Yang X, et al. Progress of modified adsorbent and pressure swing adsorption for oxygen production in China. *Chem Ind Eng Prog*, 2015, 34(1): 19
(祝显强, 刘应书, 杨雄, 等. 我国变压吸附制氧吸附剂及工艺研究进展. 化工进展, 2015, 34(1): 19)
- [8] Kim Y H, Lee D G, Moon D K, et al. Effect of bed void volume on pressure vacuum swing adsorption for air separation. *Korean J Chem Eng*, 2014, 31(1): 132
- [9] Ding L Q, Shu P C. Oxygen enrichment through mini-scale rotary six-bed pressure swing adsorption. *Adv Mater Res*, 2013, 726: 780
- [10] Rao V R, Farooq S. Experimental study of a pulsed pressure swing adsorption process with very small 5A zeolite particles for oxygen enrichment. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53(33): 13157

- [11] Turnock P H, Kadlec R H. Separation of nitrogen and methane via periodic adsorption. *AIChE J*, 1971, 17(2): 335
- [12] Kadlec R H, Kowler D E. The optimal control of a periodic adsorber. *AIChE J*, 1972, 18: 1207
- [13] Keller G E, Jones R L. A new process for adsorption separation of gas streams. *ACS Symp Ser*, 1980, 135: 275
- [14] Jones R L, Keller G E. Pressure swing parametric pumping—a new adsorption process. *J Sep Process Technol*, 1981, 2(3): 17
- [15] Jones R L, Keller G E, Wells R C. *Rapid Pressure Swing Adsorption Process with High Enrichment Factor*: US Patent, 4194892. 1980-03-25
- [16] Rao V R, Farooq S, Krantz W B. Design of a two-step pulsed pressure swing adsorption based oxygen concentrator. *AIChE J*, 2010, 56(2): 354
- [17] Chai S W, Kothare M V, Sircar S. Numerical study of nitrogen desorption by rapid oxygen purge for a medical oxygen concentrator. *Adsorption*, 2012, 18(2): 87
- [18] Chai S W, Kothare M V, Sircar S. Efficiency of nitrogen desorption from LiX zeolite by rapid oxygen purge in a pancake adsorber. *AIChE J*, 2013, 59(2): 365
- [19] Rao V R, Chai S W, Kothare M V, et al. Highlights of non-equilibrium, non-isobaric, non-isothermal desorption of nitrogen from a LiX zeolite column by rapid pressure reduction and rapid purge by oxygen. *Adsorption*, 2014, 20(2): 477
- [20] Kopyagorodsky E M, Gulians V V, Krantz W B. Predictive dynamic model of single-stage ultra-rapid pressure swing adsorption. *AIChE J*, 2004, 50(5): 953
- [21] Chai S W, Kothare M V, Sircar S. Rapid pressure swing adsorption for reduction of bed size factor of a medical oxygen concentrator. *Ind Eng Chem Res*, 2011, 50(14): 8703
- [22] Rao V R, Kothare M V, Sircar S. Novel design and performance of a medical oxygen concentrator using a rapid pressure swing adsorption concept. *AIChE J*, 2014, 60(9): 3330
- [23] Rao V R, Wu C W, Kothare M V, et al. Comparative performances of two commercial samples of LiLSX zeolite for production of 90% oxygen from air by a novel rapid pressure swing adsorption system. *Sep Sci Technol*, 2015, 50(10): 1447
- [24] Ruthven D M, Farooq S, Knaebel K S. *Pressure Swing Adsorption*. New York: VCH Publishers Inc., 1994
- [25] Zheng X G, Liu Y S, Liu W H. Two-dimensional modeling of the transport phenomena in the adsorber during pressure swing adsorption process. *Ind Eng Chem Res*, 2010, 49(22): 11814
- [26] Liu Y S, Zhang C Z, Li Y L, et al. Pressurization with raffinate in vacuum pressure swing adsorption for upgrading ventilation air methane. *J China Coal Soc*, 2013, 38(11): 1972
(刘应书, 张传钊, 李永玲, 等. 真空变压吸附提浓煤矿乏风瓦斯的排放气充压过程. *煤炭学报*, 2013, 38(11): 1972)
- [27] Zhang C Z, Liu Y S, Li Y L, et al. Experimental study on the improved VPSA process of pressurization with raffinate for VAM upgrading. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(4): 529
(张传钊, 刘应书, 李永玲, 等. 基于轻组分充压的改进型三塔真空变压吸附工艺富集煤矿乏风瓦斯的实验研究. *北京科技大学学报*, 2014, 36(4): 529)
- [28] Yang R T. *Adsorbents Fundamentals and Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2003
- [29] Li Z Y, Liu Y S, Zhang H, et al. An improved high-pressure static adsorption instrument and characteristics of adsorbents. *Mod Chem Ind*, 2014, 34(6): 162
(李子宜, 刘应书, 张辉, 等. 高压静态吸附仪的改进及吸附剂特性测试研究. *现代化工*, 2014, 34(6): 162)