

高原环境温度对真空变压吸附制氧性能影响规律的实验研究

许富花¹ 沈红宝² 李爽^{*1,3} 史翊翔³ 王世锋⁴

(1.清华大学山西清洁能源研究院 山西太原 030032 2.北大先锋科技股份有限公司 北京 100088

3.清华大学能源与动力工程系 北京 100084 4.西藏大学理学院 西藏拉萨 850000)

摘要 该研究在西藏大学供氧研究院(海拔3 600 m)搭建低压解吸变压吸附制氧实验平台,通过连续实地测试,系统分析了高原环境温度对制氧性能的影响。结果表明:氧纯度与环境温度呈正相关关系,在温度上升时段(如09:00—15:30)氧纯度随之升高,并于15:30前后(日最高温时段)达到峰值;在温度下降时段(如00:00—09:00),氧纯度相应降低。分析表明,温度升高可加快氮气扩散速率,增强吸附塔内传质效率,缩短传质区长度并提高吸附剂利用率,从而改善氧氮分离效果。此外,设备性能还受温度历史累积效应的影响:相同瞬时温度条件下,经历长时间低温暴露的上午时段,其氧纯度较晚间低5.8%。基于上述结果提出高原制氧优化策略:优先选择高温时段(15:30前后)运行;避免长时间低温暴露;在低温环境下需加强设备保温或辅助加热。

关键词 高原环境;变压吸附;温度;氧纯度

DOI:10.16249/j.cnki.2096-4617.2026.03.008

中图分类号 TQ116.14

文献标识码 A

文章编号 2096-4617(2026)03-088-07

引言

我国高原地区平均海拔在4 000 m以上,构成了独特的地理屏障,并形成严酷的气候环境。随着海拔升高,大气压显著降低,导致空气中氧气含量远低于平原地区(通常仅为海平面的60%左右)。这种持续性环境缺氧,不仅对人类心肺功能构成严峻挑战,诱发急性高原反应、高原肺水肿、高原脑水肿等急慢性高原病,威胁着当地居民、驻守官兵、工程建设人员及游客的生命健康,也对高原生态系统的平衡与生物多样性产生深远影响。目前,针对缺氧引发的健康问题,尤其是急性高原病,临床上主要通过高压氧舱治疗和直接吸氧进行紧急救治与症状缓解^[1]。然而,传统的吸氧方式,特别是高压氧疗,往往受大型固定设

收稿日期:2026-05-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3813300);北京市高层次创新创业人才支持计划科技新星计划项目(20240484555)。

第一作者简介:许富花,女,汉族,山西太原人,清华大学山西清洁能源研究院工程师,主要研究方向为气体分离、氢能技术开发及应用。

通讯作者简介:李爽,男,汉族,江苏南京人,清华大学能源与动力工程系副研究员,主要研究方向为气体分离与污染物脱除、氢气制取及利用。

备、高昂成本和能源供应条件制约,难以在广袤、偏远的高原地区实现广泛覆盖和便捷应用^[2,3]。因此,发展高效、可靠、适应高原特殊环境且便于推广的供氧技术,已远非单纯的医疗健康需求,更是西藏乃至我国高原地区经济社会可持续发展的关键支撑。

当前制氧行业最主要的制氧方式有3种:深冷分离空气法制氧、膜分离法制氧、变压吸附分离空气法制氧^[4]。其中,深冷分离空气法设备复杂、投资大、能耗高,不适合在高原地区使用;膜分离法的分离膜寿命短、维护费用高、浓度低,综合费用高,难以满足高原地区较高的氧浓度需求;变压吸附制氧技术具有设备简单、投资小、能耗低等优点,有望为高海拔地区医疗卫生、军事防务、工业生产等领域提供支持保障^[5-8]。

在变压吸附法制氧中,环境温度是影响气体分离技术的重要因素之一^[9,10],尤其是在高原地区,其低气压和低氧浓度使温度变化对产氧量的影响更加显著。尽管国内外学者对该技术开展广泛研究,但多集中在平原地区或实验室条件下^[9,11-13]。针对高原环境的研究相对较少,且缺乏系统的理论分析^[14-16]。本研究搭建了真空变压吸附制氧(Vacuum Pressure Swing Adsorption, VPSA)实验台,在西藏大学供氧研究院(海拔约3 600 m,大气压 65.12 kPa)开展实验研究。通过实地监测和数据分析,研究高原地区 VPSA 过程中的温度变化与产氧量之间的规律,旨在为该领域的实际应用提供理论支持。

1 实验方法

1.1 实验装置

变压吸附制氧实验流程如图 1 所示。该装置配备可编辑逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)与组态王(Kingview)自动监控软件。装置运行时由 PLC 自动采集现场信号并驱动设备,由组态王提供人机互动界面完成时序输入、时序启动、实时趋势曲线观察和数据导出等操作,使装置具备无人/少人值守下的连续控制、联锁保护及远程管理能力。

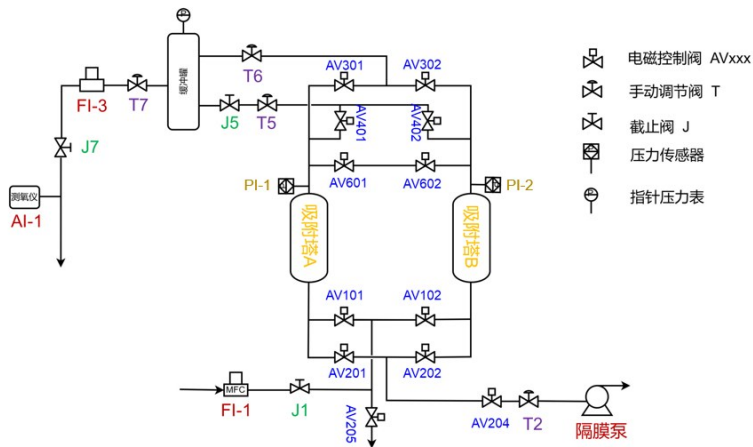


图1 变压吸附制氧实验流程图

Fig.1 Schematic flow diagram of the pressure swing adsorption oxygen-generation experimental system

本实验在西藏大学供氧研究院(海拔约3 600 m,大气压 65.12 kPa)开展,该实验地处于典型高原低氧、低气压环境。实验启动后,由 PLC 程序控制的电磁阀组按设定时序交替切换,将压缩空气依次通入吸附塔 A 与吸附塔 B,以实现连续稳定的氧气供给。富集后的氧气自吸附床顶部导出,进入产品气缓冲罐,经稳压后作为最终产品氧输出。与此同时,吸附阶段被碱土基吸附剂捕获的氮气,在床层降压解吸过程中释放并排入大气。实验过程中,可通过调节进气流路和管路调节阀,灵活改变进气流量、吸附压力、清

洗气量及产品气流量等关键操作参数,以适应不同工况下的制氧需求。实验台相关参数详见表1。

表1 真空变压吸附制氧实验台所用配件仪表列表
Table 1 Components and instruments used in the VPSA oxygen-generation test bench

类别	型号/规格	数量	功能	仪控位点编号
吸附塔	高:67.5 cm;内径:1.95 cm	2	吸附剂容器	—
缓冲罐	高:23.5 cm;外径:7.6 cm	1	产品气缓冲罐	—
质量流量控制器	5 L/min	1	控制原料气进气	FI-1
质量流量计	1 L/min	1	测量产品气流量	FI-3
隔膜泵	PengPu-G20BL DC24V	1	提供吸附剂的解吸负压	—
压力传感器	量程:0~2.5 MPaA;精度0.1%FS	2	测试塔顶压力	PI-1、PI-2
电磁阀	ASCO-8262H182		控制气路开与关	AVxxx
测氧仪	量程0~100%,精度1%FS	1	测试产品气纯度	AI-1

1.2 工艺流程

本研究制氧工艺循环包含均压、吸附、解吸、清洗、回氧、增压、产氧7个阶段。其中:①均压:高压吸附塔与低压吸附塔通过塔顶均压管线相连,高压塔向低压塔释放气体,以提升低压塔压力。②吸附:压缩空气自塔底进入装填碱土基制氧吸附剂的吸附塔,氮气被选择性吸附,氧气因不易吸附而被富集流出床层,从塔顶流出进入产品气缓冲罐。③解吸:吸附完成后,利用隔膜真空泵对吸附塔抽真空,营造负压环境,降低塔内压力,使被吸附的气体解吸并排出床层。④清洗:在抽真空再生后期,将少量高纯度产品氧气从塔顶引入正在解吸的吸附塔,以逆向冲洗吸附床层。⑤回氧:将产品气缓冲罐中的部分产品氧气回注至正在升压的吸附塔内,以提高塔压。⑥增压:向已完成回氧操作的塔内通入原料压缩空气,进一步提高塔压。⑦产氧:在吸附步骤进行期间,持续收集从塔顶流出的高浓度氧气,并将其储存至缓冲罐。

各步骤的时序安排如表2所示,每个周期内两个吸附塔交替完成吸附-解吸过程,并依次往复实现装置的连续运行。以吸附塔A先吸附后解吸为例描述不同时序中的各个步骤:S8时吸附塔A开始吸附步骤,从塔顶接收来自吸附塔B的均压气体,同时塔底通入压缩空气;S9时部分产品氧气从塔顶回注至吸附塔A内,与塔底进入的压缩空气共同为吸附塔A升压;S10时压缩空气从塔底进入吸附塔A继续为其增压;S11和S12时吸附塔A开始从塔顶流出高浓度氧气,产氧过程结束;之后回到时序S1,压缩空气持续进入吸附塔A,此时吸附塔A与吸附塔B顶部连通,将高压气体注入吸附塔B内,吸附过程结束;时序S2至S7,吸附塔A再次进入解吸过程,该过程中吸附塔A的塔底与隔膜真空泵连通。其中,S6时引入少量产品氧气从塔顶进入吸附塔A,对床层进行冲洗再生,S7时吸附塔A从塔顶接收来自吸附塔B的均压气体,至此解吸过程结束。

表2 真空变压吸附制氧实验台运行时序表
Table 2 Operating sequence of the VPSA oxygen-generation test bench

时序	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
时间(s)	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t1	t2	t3	t4	t5	t6
A	均压	均压		解吸		清洗	均压	均压	回氧	增压		产氧
	吸附									吸附		
B	均压	均压	回氧	增压	产氧		均压	均压			解吸	清洗
	解吸			吸附								

1.3 实验步骤

本实验采用固定床吸附塔,主要操作步骤如下:
(1)吸附剂装填与系统搭建:将碱土基分子筛吸附剂填充至吸附塔内,装填完毕后将吸附塔稳固安装于实验台架上,并依次连接气体管路、真空管路、阀门及测量仪表(压力表PI-1,PI-2等)。

(2)系统气密性检验:开启手动控制模式,打开电磁阀 AV101 和 AV102,向吸附塔内充入实验气体至预定压力,关闭充气阀门,使系统静置。密切监测压力表 PI-1 和 PI-2 的示数变化。若压力在设定时间内无明显下降,则判定系统气密性良好,可进行后续实验。若检测到泄漏,需排查并修复泄漏点后重新进行气密性测试。

(3)实验程序设定:在组态王监控系统的“时序设定”画面中,输入预先设计的实验运行控制时序。随后,在组态王的“流程图”操作界面中,将系统控制模式切换为“自动”。

(4)实验启动与运行:启动隔膜真空泵,在组态王“流程图”界面中点击“时序启动”按钮,系统即按预设时序自动执行吸附、脱附等循环操作,实验正式开始。

(5)实验终止:当预设的实验周期结束或需要手动终止实验时,在组态王“流程图”界面中点击“时序停止”按钮。系统将在完成当前正在执行的操作时序后,安全地停止所有运行的程序,实验结束。

(6)数据采集与处理:实验过程中,组态王系统自动记录压力、流量、时间等关键过程参数。实验结束后,通过组态王的数据报表或历史记录功能查看实验数据,并将所需数据供后续分析使用。

2 结果与讨论

2.1 氧纯度随温度一日内变化规律

按照实验方案,得到了 24 小时内环境温度的变换趋势以及实验台可连续运行一天内的氧纯度值,其测试结果如图 2 所示。由图 2A 可见,高原地区的氧纯度日变化趋势与其环境温度变化高度一致。具体表现为:在环境温度下降的时段(00:00 至 09:00 以及 15:30 至次日 00:00),氧纯度随之降低;而在环境温度上

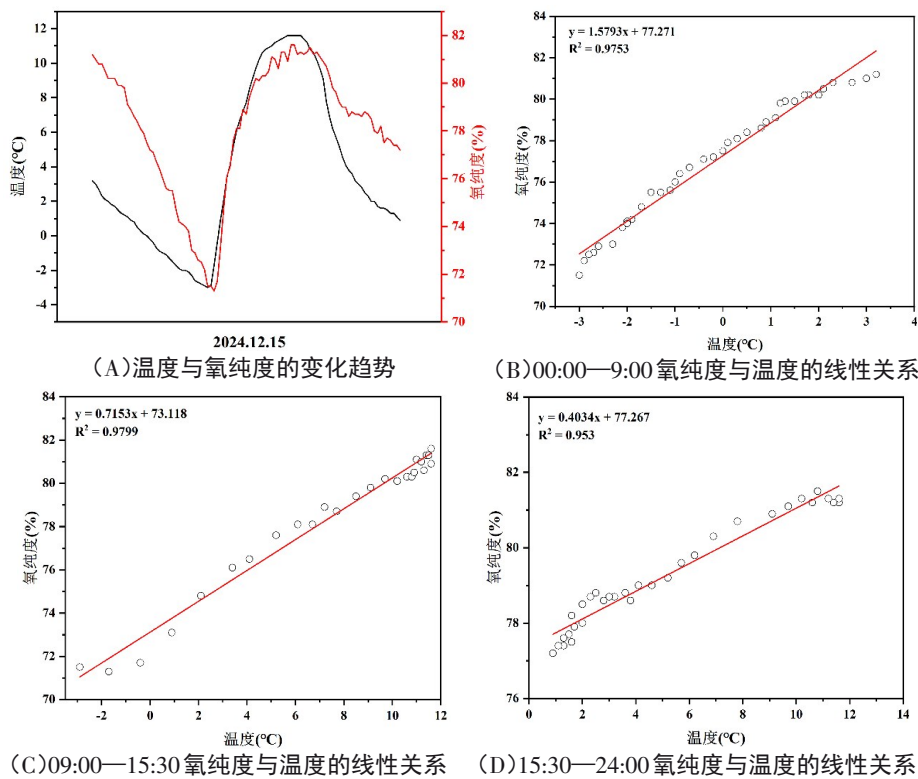


图2 2024年12月15日温度与氧纯度关系曲线

Fig.2 Variations in ambient temperature and oxygen purity on December 15, 2024

升时段(09:00至15:30),氧纯度则同步升高。图2B~2D是对高原地区同一天内3个不同时间段的氧纯度与环境温度关系进行了线性回归分析。分析结果显示,两者之间存在显著的正相关关系,即环境温度升高时,氧纯度增加,环境温度降低时,氧纯度则相应减少,表明了氧纯度与设备运行时的环境温度之间存在密切的关联。

为深入探究上述氧纯度与环境温度呈正相关的内在机理,本研究从气体传质动力学角度展开分析。根据斯托克斯-爱因斯坦扩散理论,氮气在空气中的扩散系数可表述为^[17,18]:

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)$$

(1)

式中, $D_0 = 0.144 \text{ cm}^2/\text{s}$ (273 K标准状态)。上式表明氮气扩散系数与温度呈幂律增长关系($D \propto T^{1.5}$)。

根据式(1)计算了该实验条件下不同温度的氮气扩散系数(表3)。由表3可知,温度升高使氮气在空气中的分子扩散系数显著增大。需要说明的是,该扩散系数描述的是氮气在气相中的分子迁移能力,并非直接决定变压吸附过程中传质速率的控制因素,后者主要取决于氮气在吸附剂微孔内的扩散及吸附动力学。然而,气相扩散系数与孔道内扩散系数均随温度升高呈增大趋势,二者在变化方向上具有一致性。因此,表3中扩散系数随温度的递增趋势,可作为“温度升高有利于强化与扩散相关的传质过程”这一判断的侧面佐证。基于此,可合理推断:环境温度升高导致进入吸附塔内的气体温度上升,一方面可能影响吸附平衡,另一方面能够加快氮气在吸附剂孔道内的实际扩散速率,从而强化传质过程^[19,20]。传质强化的具体表现为:①传质区长度缩短;②吸附剂利用率提高,即在相同床层高度下,参与有效吸附氮气的吸附剂比例增大。在上述作用的综合影响下,当原料气进气量与吸附周期保持不变时,氮气与氧气的分离效率得以提升,最终体现为产品气氧纯度的显著提高。

表3 不同温度的氮气扩散系数
Table 3 Nitrogen diffusion coefficients at different temperatures

温度(℃)	吸附分压(kPa)	解吸分压(kPa)	扩散系数(cm ² /s)
25	30.83	15.77	0.164
15	35.83	20.18	0.156
7.5	39.84	24.17	0.150
0	43.72	28.58	0.144
-7.5	47.79	33.60	0.138

2.2 氧纯度随温度一周内变化规律

图3展示了实验台在高原地区连续运行一周(2024年12月13日至22日)的环境温度与氧纯度变化趋势。如图所示,在此期间,氧纯度的日变化规律与环境温度波动持续呈现显著的正相关关系,有力验证了前文(基于日变化数据)得出的结论。进一步分析每日数据特征可以发现,氧纯度的峰值稳定地出现在每日下午的15:30前后(15:30—16:30),该时段恰好对应着高原地区12月冬季一天中环境温度的最高值。上述规律性的对应关系表明:为获取更高浓度的氧气产品,并将制氧设备的运行安排于此高温时段(15:30左右);相反,每日上午8:30至9:30左右通常为环境温度的低谷时段,而低温条件下产品气氧纯度相对较低,故建议在运行策略上尽量避开此低温时段进行产氧操作,以保障产品气的氧气浓度。

图4对比了24小时内相同环境温度(3℃)条件下氧纯度的差异。分析发现,尽管在每日上午(如10:00前)与晚间(如21:00—23:00)的某些时段,环境温度均维持在3℃左右,但其对应的氧纯度却存在明显差异,最高差值可达5.8%。结合图5进一步分析发现,上午时段(10:00前),环境温度处于持续下降阶段(通常集中在-3℃~3℃),表明设备经历了长时间的低温暴露。持续低温环境显著抑制了分子筛吸附塔内的传质效率(如前所述,低温会降低氮气扩散速率),进而导致整体制氧性能下降,表现为该时段相同温度点(3℃)下的氧纯度偏低。晚间时段(21:00—23:00),环境温度虽也呈下降趋势,但其前期(傍晚)温度相对

较高(集中在3℃~15℃),这意味着设备在达到3℃测试点前,经历了较长时间的相对温和(常温)环境运行。较高的前期运行温度有助于维持吸附剂床层较好的热状态和传质活性,因此即便温度降至相同的3℃,其氧纯度水平也显著高于经历长时间低温后的上午时段。这一关键对比说明了分子筛制氧机的性能不仅取决于瞬时环境温度,更受到前期运行温度历程的显著影响。设备在低温环境下的持续暴露会对其性能产生累积性负面影响。

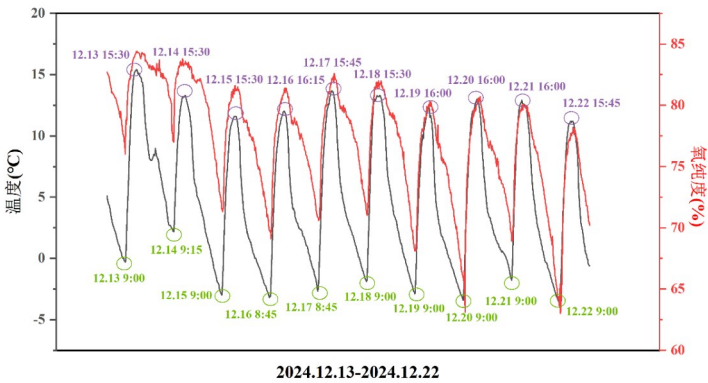


图3 2024年12月13日—12月22日
温度与氧纯度的变化趋势
Fig.3 Variations in ambient temperature
and oxygen purity from December 13 to 22, 2024

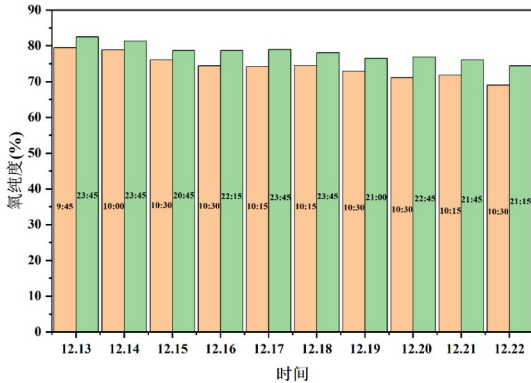


图4 24小时内相同环境温度(3℃)
下的氧纯度比较
Fig.4 Comparison of oxygen purity at the same
ambient temperature (3℃) at different times of day

3 结论

- (1)通过在西藏大学开展现场制氧实验,研究了高原环境下VPSA装置氧浓度随温度变化的规律,结果表明氧纯度与环境温度之间存在显著的正相关关系。
- (2)建议在高原地区进行制氧时,应尽可能将分子筛制氧机部署或运行在相对温和的常温环境中(例如温度在5℃~10℃),这是保障其制氧性能、获得高氧纯度的基本前提。若对氧气纯度有更高的要求,可选择在日间高温时段(15:30左右)进行制氧。
- (3)针对低温环境工况,建议采取主动保温措施以减少设备的热量散失(如加强设备隔热、减少通风散热)或辅助升温策略(如使用辅助加热装置),以减缓或抵消低温对传质过程的不利影响,从而提升制氧浓度。
- (4)通过将设备的工作环境温度主动维持在一个适宜的范围内,避免长时间低温暴露,可有效保证其制氧性能稳定可靠,满足实际应用需求。

参考文献

[1] 解放军总医院第六医学中心,西部战区总医院. 高压氧防治高原病专家共识[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志,2025,32(4):325-331.

[2] Zhang J, Guo S, Dou B, et al. High-altitude hypoxia injury: systemic mechanisms and intervention strategies on immune and inflammatory responses[J]. Antioxidants, 2025, 15(1): 36.

[3] Larcher F, Laforet P, Fraize S, et al. Severe HAPE in a remote high-altitude research station in antarctica[J]. Life, 2026,16(2): 313.

[4] 李勇,孟芳兵,陈远富,等. 西藏制氧技术发展及研究现状[J]. 低温与特气,2021,39(4):5-9+31.

[5] 张绍福. 变压吸附制氧系统分子筛吸附器的优化应用[J]. 冶金管理,2023(17):42-44.

- [6] Zhang Q, Wang S, Li S, et al. PSA oxygen generation: Process parameter optimization and improved oxygen production performance in plateau regions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 374: 133620.
- [7] Zhu X, Sun Y, Zhou S, et al. Comparative performance of industrial-scale oxygen production by pressure swing adsorption and vacuum pressure swing adsorption under plateau environment[J]. *Adsorption*, 2024, 30(7): 1539–1545.
- [8] Chin C, Kamin Z, Bahrn M H V, et al. The production of Industrial-Grade Oxygen from air by pressure swing adsorption[J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2023(1):2308227.
- [9] 赵智军,朱浩,张红.环境温度对分子筛制氧机制氧性能的影响研究[J]. *化工设计通讯*,2023,49(1):85–87.
- [10] 付耀国.高原环境下变压吸附制氧工艺与制氧分子筛性能研究[D].北京:北京科技大学,2021.
- [11] 张辉,刘应书,翟晖,等.气源温度与解吸过程对变压吸附制氧效果的影响[J]. *化工进展*,2009,28(4):574–578.
- [12] 王啸,马正飞,姚虎卿.真空变压吸附空分制氧等温与非等温过程模拟比较[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*,2003,25(4):49–54.
- [13] Chin C, Kamin Z, Bahrn M H V, et al. The production of Industrial-Grade Oxygen from air by pressure swing adsorption[J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2023(1):2308227.
- [14] 李毅,刘晓峰,崔淑洁,等.适应高海拔环境的分子筛制氧装置设计与实验研究[J]. *军事医学*,2024,48(11):848–852.
- [15] Fu Y, Liu Y, Yang X, et al. Thermodynamic analysis of molecular simulations of N₂ and O₂ adsorption on zeolites under plateau special conditions[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 480: 868–875.
- [16] Zhang Q, Wang S, Li S, et al. PSA oxygen generation: Process parameter optimization and improved oxygen production performance in plateau regions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025,374:133620.5
- [17] 汤德元,付亚男.加压下气体分子扩散系数计算方法比较[J]. *贵州工学院学报*,1984(4):108–123.
- [18] 陈昭宜,刘蕊梅.一个新的气体扩散系数计算公式[J]. *科学通报*,1989(11):878–879.
- [19] 丁兆阳,韩治洋,石文荣,等.快速变压吸附制氧动态传质系数模拟分析[J]. *化工学报*,2018,69(2):759–768.
- [20] 祝显强,孙媛,孙宪航.变压吸附制氧过程传质特性数值分析[J]. *常州大学学报(自然科学版)*,2024,36(1):60–68.

Effect of Ambient Temperature on Vacuum Pressure Swing Adsorption Oxygen-Generation Performance at High Altitude: An Experimental Study

XU Fuhua¹ SHEN Hongbao² LI Shuang^{*1,3} SHI Yixiang³ WANG Shifeng⁴

(1. Shanxi Research Institute for Clean Energy, Tsinghua University, Taiyuan 030032, China;

2. Peking University Pioneer Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China;

3. Department of Energy and Power Engineering, Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. College of Science, Xizang University, Lhasa 850000, China)

Abstract: A Vacuum Pressure Swing Adsorption (VPSA) oxygen-generation experimental platform was established at the Oxygen Supply Research Institute of Xizang University (altitude: approximately 3 600 m) to investigate the effect of ambient temperature on oxygen-generation performance under high-altitude conditions. Continuous field testing showed that oxygen purity was positively associated with ambient temperature. During periods of rising temperature (e.g., 09:00—15:30), oxygen purity increased and peaked at approximately 15:30, near the daily maximum ambient temperature; during periods of falling temperature (e.g., 00:00—09:00), oxygen purity decreased accordingly. Mechanistic analysis suggested that higher temperatures may accelerate nitrogen diffusion, enhance mass transfer within the adsorption columns, shorten the mass-transfer zone, and improve adsorbent utilization, thereby improving O₂/N₂ separation. System performance also exhibited a thermal-history effect: at the same instantaneous ambient temperature, morning oxygen purity after prolonged low-temperature exposure was 5.8% lower than evening oxygen purity. These findings suggest that high-altitude VPSA operation may be optimized by preferential operation during warmer periods, minimizing prolonged low-temperature exposure, and improving thermal insulation or providing auxiliary heating under cold conditions.

Keywords: high altitude, vacuum pressure swing adsorption, ambient temperature, oxygen purity

[责任编辑:索郎桑姆]