

富氧空调的可行性探讨

北京科技大学 刘应书[☆] 杜雄伟 赵 华
中外建工程设计与顾问公司 车晓葵

摘要 空调环境的氧含量普遍低于 20.9%，有必要采取措施补充空调环境消耗的氧气，改善室内空气质量。简要介绍了几种制氧方法，提出将变压吸附制氧或膜分离制氧用于空调环境增氧的思路，并且描述了这两种增氧系统。以某体育场馆为例，对两种增氧系统与传统的增大新风量增氧方式进行了比较，认为前者在设备初投资和运行成本上都具有优势，而且能够满足空调环境的增氧要求。

关键词 富氧空调 缺氧 制氧 变压吸附 膜分离

Feasibility of oxygen enriched air conditioning

By Liu Yingshu[★], Du Xiongwei, Zhao Hua and Che Xiaokui

Abstract The oxygen content in current air conditioned environment is usually below 20.9% and it is necessary to complement oxygen to maintain desirable indoor air quality. Briefly describes several oxygen generation methods and proposes a novel idea that integrates pressure swing adsorption (PSA) or membrane separation oxygen generation system with air conditioning system to keep the oxygen content level in air conditioned environment. Taking a gymnasium as an example, compares the two proposed oxygen complementing systems with the conventional one. The results show that the two proposed systems have some advantages in controlling the initial investment and operation costs and in meeting the requirements of air conditioned environment for oxygen.

Keywords oxygen enriched air conditioning, anoxia, oxygen generation, pressure swing adsorption, membrane separation

★ University of Science and Technology Beijing, Beijing, China

①

近年来，人们对室内空气污染物的来源、危害、物理化学性质等作了大量研究，开发出了多项室内空气净化技术，起到了较好的空气净化作用，而且还在不断研究新型净化材料、优化净化结构。然而，同样对人的身体产生危害的空调环境的长期缺氧状况却没有引起人们的足够重视。目前的空调系统主要通过增大新风量增加空调环境中的氧含量，由于增大新风量要增大空调系统的投资，增加运行能耗，因此有必要探索新思路来改善室内空气质量。富氧空调通过专用制氧设备产生氧气以增加空调环境中的氧含量，有望为改善室内空气质量提供一条新途径。

1 富氧空调的必要性

氧气是人体新陈代谢过程中的关键物质，是人

体生命运动的第一需要。对于一个体重 70 kg 的成年男子，平静时需要 14 L/h 氧气；轻度劳动时需氧量提高到 30 L/h 以上；剧烈运动时需氧量提高 20 倍，达到 280 L/h。只有保证人体在不同状态下的相应耗氧量，才能维持人体的正常生命活动和健康。

人类已经适应了氧含量 20.9% 的空气环境，如果处在一个氧含量低于 20.9% 的环境中，就会表现出不同程度的缺氧症状，称为氧饥饿，人体对

①☆ 刘应书，男，1960 年 8 月生，博士，教授
100083 北京科技大学机械工程学院气体分离工程研究所
(010) 62334210
E-mail: yslu@me.ustb.edu.cn
收稿日期：2005-08-04

短时氧饥饿或长期氧饥饿都会有反应^[1]。长期轻度氧饥饿的一般症状是乏力、头痛、眩晕、食欲不振、面色苍白等。而病态建筑综合症(sick building syndrome, SBS)的临床表现主要有呼吸道的炎症、粘膜或皮肤炎症、头痛、头晕、疲乏、注意力不集中等。比较可知, SBS 的诸多症状与长期氧饥饿的症状相似。因此, 可以认为, SBS 主要是由空调环境中缺氧导致的, 对空调环境增氧有助于改善室内空气质量, 降低 SBS 的发病率。

1.1 空调环境的氧气消耗及缺氧状况

空调环境内的氧气消耗主要包括以下三方面: 1) 人的呼吸耗氧。这是空调环境中氧气消耗的最主要方面。2) 室内材料或设备耗氧。3) 室内空气净化设备耗氧。目前, 空调系统为了清除空气中的污染物, 常在室内加装空气净化设备, 而有些净化设备在工作过程中会消耗氧气, 如光催化技术是利用光电转换中的氧化还原作用, 直接利用空气中的氧气做氧化剂, 将有机污染物分解, 最终分解产物为 CO_2 和 H_2O ^[2]; 此外, 使用静电净化和负离子净化方式时, 由于电场不均匀, 电场中的高能量电子能破坏氧气的分子结构, 使之生成臭氧, 这一过程也消耗了氧气。

由于空调环境的氧气不断被消耗, 空调系统的新风量又不足, 使得空调环境的氧含量逐渐降低, 表现为 CO_2 含量增加。Wai-Ming Li 等人对香港地区 9 个购物商场进行的调查研究显示, 有超过 40% 的商场里的 CO_2 含量超标, 最高达到 $2\,300 \times 10^{-6}$ (标准建议值为 $1\,000 \times 10^{-6}$)^[3]。Nyuk Hien Wong 和 Bernard Huang 调查研究了新加坡的 3 个居民点中卧室里的空气质量。他们对卧室采用了 4 种不同的空调方式, 结果显示, 室内 CO_2 含量最高可达 $1\,600 \times 10^{-6}$, 比自然通风要高得多; 而且有 SBS 表现的人数增加了 30%^[4]。笔者对某些建筑物内氧含量进行了实地测量, 结果见表 1。

表 1 典型建筑内空气中的氧含量实测结果

场 所	氧气体积分数/%
宾馆会议室	17
商场 1	18
商场 2	18.5
某电子大厦	20
4 人间学生宿舍	19.8

1.2 增大新风量增氧方式的不足

从补充氧气的角度看, 增大新风量的方式存在

以下不足。首先, 环境空气质量差, 氧含量低。调查显示, 我国很多大型城市由于工业发达、人员密集、车辆众多, 导致城市环境空气质量恶化、氧含量偏低。以 2000 年西部某城市为例, 燃煤耗氧 3 982 亿 t, 燃油耗氧 149 亿 t, 天然气耗氧 77 亿 t, 人呼吸耗氧 217 亿 t, 排泄物耗氧 11 亿 t, 共计耗氧 4 436 亿 t^[5]。在这种缺氧城市中增大新风量不仅不能完全补充氧气, 无法保证 20.9% 的舒适氧含量, 还会带进大量污染物, 恶化室内空气质量。其次, 空调系统能耗高。据调查, 空调过程中处理新风的能耗大致占总能耗的 25%~30%, 高级宾馆和办公建筑则可高达 40%^[6]。因此, 通过增大新风量增氧势必会增加空调系统的投资和能耗, 使得运行费用增加。

鉴于以上原因, 笔者建议在空调系统中增加专用制氧设备, 以适当的方式将制得的洁净氧气供入空调环境内, 以保证其氧含量在正常水平。

2 常用的制氧方式及特点

目前国内外采用的制氧方式主要有深冷法、化学反应法、水电解法、变压吸附法和膜分离法。

2.1 深冷法

深冷法是首先将空气压缩, 然后冷却使空气液化, 再利用氧气和氮气的沸点不同 (标准大气压下氧气的沸点为 90.17 K, 氮气为 77.35 K), 通过反复精馏达到氧氮分离的目的。深冷法制氧是目前工业制氧的主要方式, 主要由空气压缩机组 (包括过滤器、压缩机、供油系统等)、空气冷却系统 (空气冷却塔、水冷却塔、氟利昂制冷机组、水泵、水过滤器等)、分子筛净化系统 (净化器、加热器等)、透平膨胀机、分馏塔 (上塔、下塔、过冷器等)、换热器等组成。这种方式适合需氧量很大而且气体用量比较稳定的场合。

2.2 化学反应法

化学反应法是利用一些化合物能分解出氧气的性质来制取氧气, 主要包括氯酸盐氧烛制氧、超氧化物制氧及过碳酸钠制氧等^[7]。化学反应法制氧利用不可逆的化学反应, 氧源只能一次性使用, 制氧成本很高, 产氧量有限。以化学反应法为基础研制出的产氧器在煤矿、军事、航空航天以及日常的急救保健等方面得到广泛应用。

2.3 水电解法

水电解制氧技术是采用电化学反应中电解效

应,将水电解生成氢气和氧气,再对生成的氧气进行处理后得到所需的氧气。

水电解法设备体积小、产氧量稳定,但能耗较大,设备寿命短,主要应用于载人航天飞船、空间站等航天领域。

2.4 变压吸附法

变压吸附 (pressure swing adsorption, PSA) 制氧是利用吸附剂对空气中氧氮组分具有不同的吸附能力,且吸附量随被吸附组分分压的增加而增加的特性,通过压力变化完成吸附和解吸而实现空气分离制取氧气的。PSA 制氧机主要由鼓风机、多个吸附塔、缓冲罐、贮氧罐(真空泵)、专用阀门、自动控制系统等组成。

变压吸附空气分离制氧工艺具有操作方便、性能稳定、启停方便等优点,适用于中小规模的制氧场所,并不断向大型化发展。20 世纪 90 年代以来,随着新型吸附剂的研制成功,程控阀门和计算机控制系统的发展,PSA 法制氧的竞争力不断提高,装置规模也扩大到 $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$,而能耗却逐渐降低(20 世纪 80 年代为 $0.5\sim 0.55\text{ kWh/m}^3$,90 年代下降到 0.4 kWh/m^3 左右)^[8],制得的氧气体积分数可达 $90\%\sim 95\%$ 。

由于 PSA 法制氧技术的优越性,将该技术运用于富氧空调上作为专用制氧设备具有很大的潜力。目前,中国国家实用新型专利 97244119.0 和 96207263.X 已经提出了将 PSA 制氧技术和设备运用到普通空调上的方案,但尚未见有实际应用的报道。

2.5 膜分离法

膜法空气分离制氧的基本原理是根据空气中氧气和氮气在压力的推动下透过高分子聚合物膜的渗透速率不同,从而达到分离的目的。膜法制氧设备的核心部件是膜组件,通常有中空纤维式和螺旋卷式等形式,单位体积内的膜面积很大,因此非常适合气体的大容量分离。目前的膜材料都优先透过氧,氧氮的分离系数不高,一般为 $3\sim 5$,所以只能得到 $25\%\sim 40\%$ 的富氧空气。膜法制氧技术具有操作简单、装置紧凑、占地面积小、噪声低等优点,在制氧浓度较低、富氧空气流量小于 $6\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 的范围内,具有较强的竞争力。由于膜法制得的氧气浓度较低,而空调环境所需氧气浓度也不高,因此膜法分离出的富氧空气可以直接供入室内,这

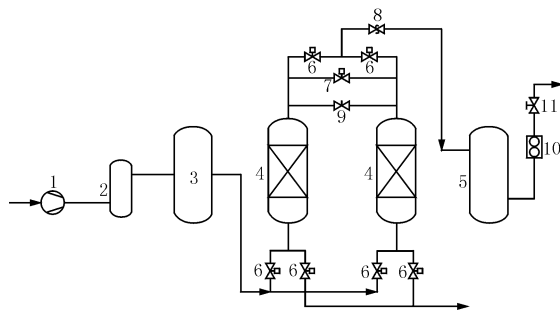
一特点使该技术比较适合于富氧空调。国内外不少专利中提出的富氧空调方案就是采用膜法制氧,如日本发明专利 JP5-99457A,中国发明专利 03126160.4,97234786.0,98237222.1,03121202.6 等。青岛海尔集团的发明专利已经形成产品推向了市场,主要用于家用普通空调,该装置向空调房间输入的空气中氧含量约为 30% 。

3 富氧空调技术方案

综上所述,PSA 制氧技术和膜分离富氧技术具有操作方便、启停迅速、安全、节能等优点,在富氧空调的设计中具有显著的优势。这里提出应用这两种技术的富氧空调的初步技术方案。

3.1 PSA 增氧系统

PSA 制氧采用加压吸附、常压解吸的方法实现空气分离。其基本流程如图 1 所示。



1 压缩机 2 空气冷却器 3 原料气储气罐 4 吸附塔
5 产品气储气罐 6 气动阀门 7 均压阀 8 减压阀
9 针型阀 10 流量计 11 流量调节阀

图 1 PSA 制氧流程图

空气经无油压缩机压缩后,进入空气冷却器冷却。冷却后的气体进入原料气储气罐。吸附塔内的吸附压力为 0.4 MPa 左右。在其中一个吸附塔中,原料气中的强吸附组分氮气被吸附床中的沸石分子筛吸附。原料气中的弱吸附组分氧气从吸附塔出口排出。其中一部分作为产品气经气动阀、减压阀进入产品气储气罐;另一部分氧气逆向进入另一吸附床,对处于解吸状态的分子筛反吹清洗。吸附塔解吸的废气直接排放到周围环境中。在吸附塔完成吸附和解吸再生之后,两个吸附塔连通进行均压。均压结束后,两个吸附塔交换角色重新开始吸附或解吸,从而完成一个变压吸附循环周期,连续产出富氧。产品气储气罐的作用是稳定吸附塔出口压力,降低环境压力对变压吸附过程的影响。根据实际需要,产品气的氧气浓度可以在 $80\%\sim 95\%$ 之间调节。变压吸附制氧装置可以制备符合

医用标准的氧气,并且具有设备简单、调节方便、自动化程度高等优点。

另外一种 VPSA 制氧技术,与 PSA 制氧技术不同的是,它是有压吸附、真空解吸,原料气由鼓风机供入,采用真空泵抽真空解吸,具体流程不再赘述。此种制氧技术在保证压差的同时降低了吸附压力,增加了分子筛的吸附量,具有噪声小、耗能低等特点,是一种较先进的制氧技术,在 PSA 制氧领域得到了广泛应用。VPSA 制氧技术通常用于需氧量较大的场合,而 PSA 则适用于中小规模制氧。

图 2 为将 PSA 制氧设备整合到空调设备中后的富氧空调系统示意图。

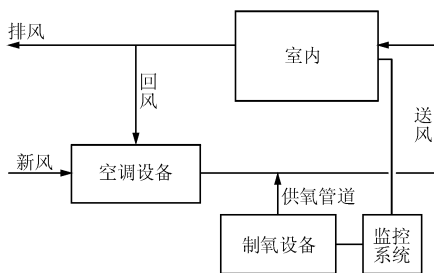


图 2 富氧空调系统示意图

如图 2 所示,制氧设备产生的氧气与空调送风混合进入室内,补充室内缺少的氧气。监控系统通过设置在室内的氧探测器,根据室内空气的氧含量自动控制制氧机的运行状态。同时,空调设备根据室内负荷变化调整送风参数,保证室内的舒适性。

3.2 膜增氧系统

考虑到设备噪声和制氧成本等因素,膜法空气分离制氧大多采用负压流程。如图 3 所示,空气由风机引入,经过过滤器除去油、水之后,进入膜分离器。在渗透侧利用真空泵抽真空,在膜两侧产生压差,这样氧气透过膜在渗透侧形成富氧气体,体积分数在 25%~40%之间。分离过程在压差的作用下连续进行,没有解吸切换过程,设备简单,操作方便。由于制得的氧气浓度较低,为保证空调室内氧

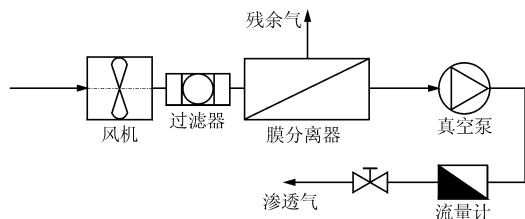


图 3 膜法空气分离制氧流程图

含量,膜组件的空气处理量比 PSA 要大,这样设备体积会增大;但是当氧气体积分数在 30%左右,空气处理量小于 15 000 m³/h 时,膜法富氧方式的投资、运行和维修成本与 PSA 法基本相当。膜分离设备与空调设备的整合方式与 PSA 类似。

4 能耗和经济性分析

在普通民用舒适性空调系统中,目前常用的补充氧气方法是增大新风量,但是通常情况下,空调系统的新风比只有 10%~20%,室内氧含量比室外低,约为 17%~20%。

4.1 某体育场馆的不同补氧方式比较

这里将空调系统中采用变压吸附增氧或膜分离增氧与通常的增大新风量增氧两种方法进行能耗及经济性比较,前提是两者的其他条件相同。

为了便于分析,现以一个能容纳 10 000 人、建筑面积为 10 000 m² 的体育馆为例,分析计算能耗及经济技术指标。

设体育馆内平均净高 10 m,空调系统总风量 600 000 m³/h。考虑到体育馆内绝大多数是观众,取轻度劳动人员的需氧量 30 L/(人·h),则总的需氧量为 300 m³/h(忽略其他耗氧)。根据《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003),体育场馆平均每人新风量 20 m³/h,则所需新风总量为 200 000 m³/h,折合新风比约为 33.3%。实际设计时为了降低设备负荷及费用,可取每人新风量 10 m³/h,则需新风总量为 100 000 m³/h,折合新风比约为 16.7%。空调系统运行 1 h 后,室内空气氧含量为 20.85%。由于新风量不能满足人们耗氧量的需求,场馆内氧气浓度会持续下降;同理,若新风比为 16.7% 时,场馆内氧气浓度下降速率更大。室内氧含量与空调系统运行时间的关系如图 4 所示。

设夏季室外空气参数为:温度 35 ℃,相对湿度

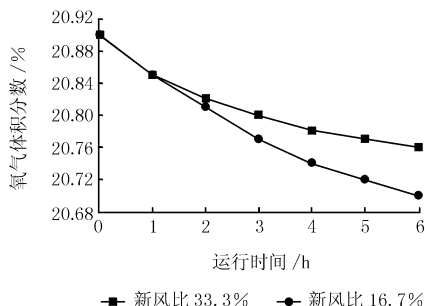


图 4 体育馆氧含量与时间的变化关系

54%, 比焓 84.8 kJ/kg; 室内空气参数为: 温度 23℃, 相对湿度 60%, 比焓 49.8 kJ/kg。新风负荷按下式计算:

$$Q_w = G_w(h_w - h_n) \quad (1)$$

式中 Q_w 为新风负荷, kW; G_w 为新风量, kg/s; h_w 为室外空气比焓, kJ/kg; h_n 为室内空气比焓, kJ/kg。

夏季工况, 新风总量 200 000 m³/h, 可换算为新风量 71.7 kg/s, 此时的新风负荷为 2 509.5 kW; 新风总量 100 000 m³/h, 可换算为新风量 35.8 kg/s, 此时的新风负荷为 1 253 kW。

这里以 100 000 m³/h 新风量为基准, 以变压吸附或膜分离增氧方式与增加 100 000 m³/h 新风量的方式进行比较。

1) 方案 1 采用增大新风量的方法增氧(新风比 33.3%)

当采用增大新风量的方法增氧时, 计算可知约需要增加新风量 100 000 m³/h。所需增加新风负荷为 1 253 kW, 相应的设备耗电折合为 1 300 kW 左右。

通过计算可得, 总计需增大初投资约 260 万元。设电费 0.5 元/(kWh), 则每 h 增加的运行费用为 650 元。以每天运行 10 h 计算, 则每天增加运行费用 6 500 元。设空调运行期共 40 天, 则多付出运行费用 26 万元。

2) 方案 2 采用变压吸附或膜分离技术增氧(新风比 16.7%, 增加氧气 300 m³/h)

若采用变压吸附或膜分离技术, 则 300 m³/h 制氧量的制氧设备投资约为 200 万元, 初投资是增大新风量方法的 77%。制氧电耗约为 0.5 kWh/m³, 则 1 h 产生氧气的总运行能耗约为 150 kWh (由于产品氧的相对湿度很低, 其冷负荷不大, 此处不考虑), 折合每 h 增加运行费用 75 元, 每年增加运行费用约为 30 000 元。与增大新风量方法相比, 运行费用节省约 23 万元, 仅为增大新风量方法的 12%。

4.2 不同补氧方式的比较结论

在上述设计条件下, 与通过增大新风量来增氧的方法相比, 采用变压吸附或膜分离制氧技术的设备初投资更低, 能耗大大减小, 因此, 变压吸附或膜分离制氧技术增氧方案无论在增氧效果上还是在经济性上都具有明显的优势。

5 结论

5.1 空调环境空气质量差, 氧含量降低, 有必要通过富氧空调增加氧含量。

5.2 变压吸附制氧和膜分离制氧技术能够满足空调环境的增氧要求, 与空调系统结合, 使富氧空调成为可能。

5.3 变压吸附制氧或膜分离制氧技术与增大新风量增氧方式相比, 在设备初投资和运行成本上都具有优势。

参考文献

- [1] 姚彭生. 氧气漫谈[J]. 世界科学, 2004(6): 30-31
- [2] 黄绳纪, 陈城基. 光触媒在空气净化中的应用[J]. 广州化工, 2004, 32(3): 17-19
- [3] Li W M, Lee S C, Lo Y C. Indoor air quality at nine shopping malls in Hong Kong[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 273(1): 27-40
- [4] Wong N H, Huang B. Comparative study of the indoor air quality of naturally ventilated and air-conditioned bedrooms of residential buildings in Singapore[J]. Building and Environment, 2004, 39(9): 1115-1123
- [5] 韩晓莉, 宋功明, 王军. 城市绿地系统的生态规划方法初探[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2003, 35(2): 127-130
- [6] 马最良, 姚杨. 民用建筑空调设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [7] 苏建勇. 化学产氧剂及其装置的研究现状[J]. 医疗卫生装备, 1995(3): 16-19
- [8] 耿云凤, 耿晨霞, 张文效. 变压吸附(PSA)空分制氧技术进展[J]. 煤化工, 2003(1): 33-36

· 简讯 ·

山东省《公共建筑节能设计标准》和 《居住建筑节能设计标准》 送审稿通过专家审查

2006 年 2 月下旬, 山东省工程建设标准定额站在济南组织召开了山东省工程建设标准《公共建筑节能设计标准》和《居住建筑节能设计标准》审查会, 有来自科研、教学、设计、施工、管理等方面的十几位专家参加。与会专家听取了标准编制组的工作汇报, 对两个标准的送审稿进行了逐字逐句认真审查。经过讨论, 专家们一致认为: 两个标准框架合理、逻辑性强、结构严谨、内容完整、数据准确, 节能技术先进可靠、经济合理、可操作性强, 符合国家建筑节能政策要求和山东省建筑节能工作实际。两个标准实施后, 将对山东省公共建筑和居住建筑的节能设计工作起到规范和指导作用, 将使山东省的公共建筑和居住建筑总体节能分别达到 50% 和 65% 的目标。

(本刊特约通讯员 于晓明)