

DOI:10.11918/202404053

# 工作参数对中空纤维膜式供氧系统用压缩机的影响

柴婷<sup>1</sup>, 台环宇<sup>1</sup>, 李超越<sup>2</sup>, 许爱民<sup>3</sup>, 钱杰<sup>4</sup>, 冯诗愚<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016; 2. 金陵科技学院 机电工程学院, 南京 210000;  
3. 南京中纬光电科技有限公司, 南京 211100; 4. 蓝城乐居建设管理集团有限公司, 杭州 310000)

**摘要:**为解决室内氧含量不足的问题,提出一种基于中空纤维膜的富氧供氧系统模型。采用微元方法建立中空纤维膜分离空气过程数学模型并与实验数据进行对比,结果显示其平均误差不超过15%,表明膜分离模型具有一定可靠性。然后设计一种含有中空纤维膜组件与空气压缩机的富氧供氧稳态系统,分析压缩机压比和房间管道回风氧体积分数的设定值对空气压缩机的功耗与体积的影响。结果表明:减小膜组件入口压力虽然可以减小压缩机的功耗,但是体积并不会减小,因此,需要选择功耗与体积都相对较小的膜组件入口压力,适宜压力为200 kPa;房间管道回风氧体积分数设定值的增加会使压缩机的功耗和体积均增大,当管道回风氧体积分数为21%时,压缩机功耗与体积最小。基于研究结果可以为供氧系统中中空纤维膜选择最优的工作参数。

**关键词:** 富氧供氧; 中空纤维膜; 富氧建筑; 膜分离; 制氧

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)05-0030-08

## Influence of working parameters on compressors for hollow fiber membrane oxygen supply systems

CHAI Ting<sup>1</sup>, TAI Huanyu<sup>1</sup>, LI Chaoyue<sup>2</sup>, XU Aimin<sup>3</sup>, QIAN Jie<sup>4</sup>, FENG Shiyu<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;

3. Nanjing Zhongwei Optoelectronic Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

4. Blue City Leju Construction Management Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** A model of an oxygen-rich supply system based on hollow fiber membrane is proposed to solve the problem of insufficient indoor oxygen content. A mathematical model of air separation process using hollow fiber membrane is established using the microelement method and compared with experimental data, showing an average error of less than 15%, indicating the reliability of the membrane separation model. Then, a steady-state oxygen-enriched supply system containing hollow fiber membrane components and an air compressor is designed to analyze the effects of compressor pressure ratio and room pipeline return air oxygen concentration setting values on the power consumption and volume of the air compressor. The results indicate that although reducing the inlet pressure of the membrane module can reduce the power consumption of the compressor; however, it does not reduce the volume. Therefore, it is necessary to select a membrane module inlet pressure with relatively low power consumption and volume, with the optimal pressure being 200 kPa. The increase in the target value of oxygen concentration in the room's pipeline return air will increase the power consumption and volume of the compressor. When the oxygen volume fraction of the room return air is set at 21%, the compressor exhibits the lowest power consumption and volume. Based on the research results, the optimal working parameters can be selected for hollow fiber membranes in oxygen supply systems.

**Keywords:** enriched oxygen supply; hollow fiber membrane; oxygen-rich buildings; membrane separation; oxygen production

目前,被广泛认可和应用的制氧技术主要有两种,即分子筛变压吸附技术和膜法分离技术<sup>[1]</sup>。分

子筛变压吸附技术基于空气中氮氧组分在分子筛材料上的吸附特性差异,通过压力循环变化对气体中

收稿日期: 2024-04-22; 录用日期: 2024-06-20; 网络首发日期: 2024-09-02

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240902.1051.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52372331); 中央高校基本科研业务费专项资金; 江苏高校优势学科建设工程; 南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划(xcxjh20230103)

作者简介: 柴婷(2000—),女,硕士研究生

通信作者: 冯诗愚, shiyuf@nuaa.edu.cn

的氧气进行吸附和释放,从而实现对氧气的制取<sup>[2]</sup>。膜分离制氧技术的基本原理是在压差作用下,根据气体中氮气和氧气通过中空纤维膜渗透速率的不同,实现分离氮气和氧气的目的,同时产生富氮气体 (nitrogen-enriched gas, NEA) 和富氧气体 (oxygen-enriched gas, OEA)<sup>[3]</sup>。目前,随着膜分离技术以及膜材料研究的发展,膜的分离效率高于分子筛技术。按照宏观结构对分离膜进行分类,可以分为平板式、管式、中空纤维膜、卷式等,其中,中空纤维膜结构的特殊性可以大大增加膜与气体的接触面积,并且能够承受较大膜丝内外压差,极大地提高了气体的分离效率。因此,目前的膜分离技术大多使用中空纤维膜这种结构形式<sup>[4]</sup>。

国内已经有将制氧技术用于改善空间氧体积分数的相关研究。张传钊等<sup>[5]</sup>搭建一套含有变压吸附制氧装置的密闭建筑空间室内供氧试验台,分析了送氧口数量、送氧口管径、送氧流量以及送氧方式的不同对建筑空间室内富氧特性及富氧效率的影响。王浩宇等<sup>[6]</sup>对增加新风量、变压吸附 (pressure swing adsorption, PSA) 制氧、膜分离制氧这3种补氧方式进行了简单综述,并对它们的经济性进行了分析。然而,针对制氧技术用于建筑供氧方向的研究还相对较少,且多数研究侧重于比较不同的补氧方法,并未对其进行参数化分析。

基于以上研究成果,提出一种富氧供氧系统模型,引入膜组件与空气压缩机,利用中空纤维膜组件装置制取富氧气体,富氧气体与室内空气混合形成

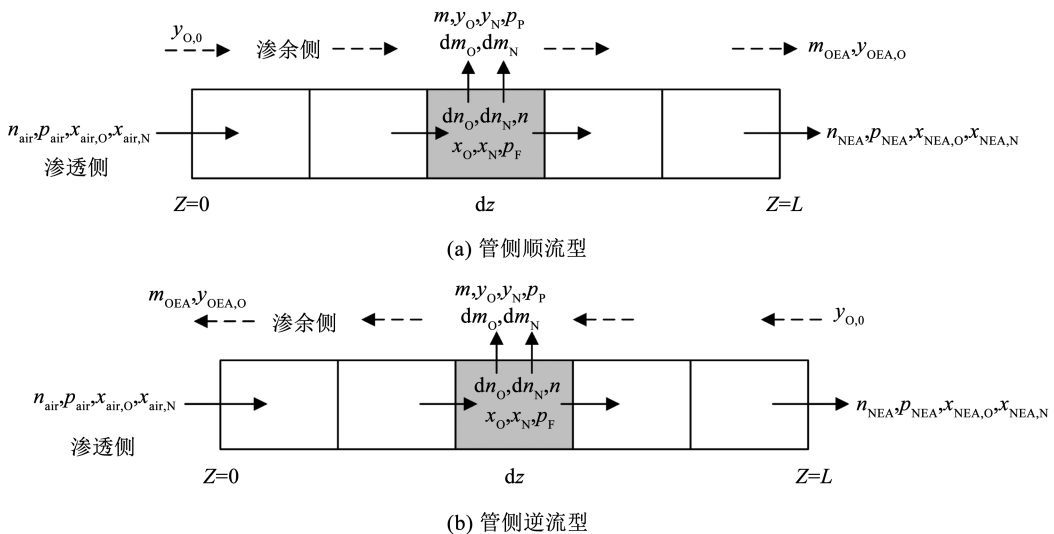
符合人体所需的氧体积分数气体再供入室内,满足提升人体氧舒适度的需要。并且在该模型的基础上研究中空纤维膜入口压力与设定的房间管道回风氧体积分数对压缩机的功耗和体积的影响,以期在实际工作中为用于建筑供氧系统的膜分离装置选择合适的工作参数。

## 1 中空纤维膜数学模型和验证

### 1.1 数学模型

在中空纤维膜分离装置中,原料空气进气方式主要有壳侧(中空纤维膜膜丝外)进气和管侧(中空纤维膜膜丝内)进气两种方式<sup>[7]</sup>。根据原料空气与渗透空气的相对流动方向可以分为顺流型、逆流型。根据分离装置中原料气管侧流动建立相关数学模型,为简化问题在计算中作如下假设:1)不考虑丝外气体压降;2)不考虑流动过程中温度的变化以及体积分数极化;3)中空纤维膜分离组件中气体流动近似轴向流动,气体径向速度为零;4)原料进气中空气组分仅有氮气与氧气,其中氧气体积分数为21%,氮气体积分数为79%。

气体通过膜的传质速度,可由气体的渗透系数、膜内外压差以及膜的结构参数决定<sup>[8]</sup>。其中,渗透系数大的称为快气,渗透系数小的称为慢气,本文中快气为氧,慢气为氮<sup>[9]</sup>。当原料空气从进气口进入中空纤维膜丝内,在一定压差作用下气体组分内氧气和氮气经过渗透,最终富氮气体从丝内排出,富氧气体在丝外排出,中空纤维膜分离示意如图1所示。



注: $n_{air}$ 为进气摩尔流量, mol/s;  $p_{air}$ 为进气压力, Pa;  $x_{air,O}$ 为进气的氧气体积分数, %;  $x_{air,N}$ 为进气的氮气体积分数, %;  $y_{O,0}$ 为丝外气体初始氧体积分数, %;  $m_O$ 为丝外气体氧气摩尔流量, mol/s;  $m_N$ 为丝外气体氮气摩尔流量, mol/s;  $m$ 为丝外气体摩尔流量, mol/s;  $p_P$ 为丝外气体压力, Pa;  $y_O$ 为丝外气体氧气体积分数, %;  $y_N$ 为丝外气体氮气体积分数, %;  $n_O$ 为丝内气体氧气摩尔流量, mol/s;  $n_N$ 为丝内气体氮气摩尔流量, mol/s;  $n$ 为丝内气体摩尔流量, mol/s;  $x_O$ 为丝内气体氧气体积分数, %;  $x_N$ 为丝内气体氮气体积分数, %;  $p_F$ 为丝内气体压力, Pa;  $n_{NEA}$ 为富氮气体摩尔流量, mol/s;  $p_{NEA}$ 为富氮气体压力, Pa;  $x_{NEA,O}$ 为丝内富氮气体氧气体积分数, %;  $x_{NEA,N}$ 为丝内富氮气体氮气体积分数, %;  $m_{OEA}$ 为丝外富氧气体的摩尔流量, mol/s;  $y_{OEA,O}$ 为丝外富氧气体氧气体积分数, %。

图1 中空纤维膜分离流型示意

Fig. 1 Schematic diagram of flow pattern for hollow fiber membrane separation

如图 1 所示,在分离装置中取一根膜丝,将膜丝沿着轴向取一段长度为  $dz$  的膜丝控制体进行研究。定义丝内外流量增加为正,减小为负,每根膜丝的单段膜分离单元遵循以下关系式。

渗透关系式:

$$\begin{cases} \frac{dn_o}{dz} = -J_o l (p_F x_o - p_P y_o) \\ \frac{dn_N}{dz} = -J_N l (p_F x_N - p_P y_N) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dn_o}{dz} = -\frac{dm_o}{dz} \\ \frac{dn_N}{dz} = -\frac{dm_N}{dz} \end{cases} \quad (2)$$

流量关系式为

$$\begin{cases} n = n_o + n_N \\ m = m_o + m_N \end{cases} \quad (3)$$

式中: $J_o$ 、 $J_N$  为氧、氮渗透系数, $x_o$ 、 $x_N$ 、 $y_o$ 、 $y_N$ 、 $n_o$ 、 $n_N$ 、 $m_o$ 、 $m_N$ 、 $p_F$ 、 $p_P$ 、 $n$ 、 $m$  的含义见图 1, $l$  为膜丝当量周长。

控制体渗透前后压降关系符合 Hagen-Poiseuille 方程<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dp_F}{dz} = -\frac{128RT\mu}{\pi d_i^4 p_F} n \\ \frac{dp_P}{dz} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R$  为理想气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ; $T$  为进气温度, $\text{K}$ ; $\mu$  为混合气体平均动力黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

体积分数关系式:

$$\begin{cases} x_o = \frac{n_o}{n_o + n_N} \\ y_o = \frac{m_o}{m_o + m_N} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_N = 1 - x_o \\ y_N = 1 - y_o \end{cases} \quad (6)$$

联立上述各式得到微分方程组。

## 1.2 边界条件

### 1.2.1 顺流型

当  $Z=0$  时,有

$$\begin{cases} x_o = x_{\text{air},0}, x_N = x_{\text{air},N}, n_o = -n_{\text{air}} x_{\text{air},0}, n_N = -n_{\text{air}} x_{\text{air},N}, p_F = p_{\text{air}} \\ y_o = y_{o,0}, y_N = 1 - y_{o,0}, m_o = 0, m_N = 0, p_P = p_{\text{OEA}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x_{\text{air},0} = 21\%$  为进气空气的氧体积分数, $x_{\text{air},N} = 79\%$  为进气空气的氮体积分数; $n_{\text{air}} = m_{\text{air}}/M_{\text{air}}$ ,其中, $m_{\text{air}}$  为进气质量流量, $M_{\text{air}}$  为空气的相对分子质量; $p_{\text{OEA}}$  与中空纤维膜分离器的工作环境有关,本文中中空纤维膜分离器在地面工作,因此, $p_{\text{OEA}} = 101\,325 \text{ Pa}$ 。

以上各式中,其他参数均已知,其中  $y_{o,0}$  需要根据渗透侧渗透出的氮氧建立体积分数平衡关系得出:

$$\begin{aligned} \frac{y_o}{y_N} = \frac{n_o}{n_N} \Big|_{z=0} \Rightarrow \frac{y_o}{1-y_o} = \frac{J_o l (p_F x_o - p_P y_o)}{J_N l (p_F x_N - p_P y_N)} \Big|_{z=0} \Rightarrow \\ \frac{y_{o,0}}{1-y_{o,0}} = \frac{\beta(p_{\text{air},0} - p_{\text{OEA}} y_{o,0})}{p_{\text{air},N} - p_{\text{OEA}} (1-y_{o,0})} \Rightarrow y_{o,0} = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4CE}}{2C} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\beta = J_o/J_N$  为分离系数, $C = p_{\text{OEA}}(1-\beta)$ , $D = p_{\text{air},N} + \beta p_{\text{air},0} - p_{\text{OEA}}(1-\beta)$ , $E = -\beta p_{\text{air},0}$ 。

根据以上初始条件,从  $Z=0$  处开始顺次求解至  $Z=L$  处,可得到出口处的富氮气体和富氧气体的体积分数和流量等结果,即

$$\begin{aligned} x_{\text{NEA},0} = x_o, n_{\text{NEA}} = n, p_{\text{NEA}} = p_F \Big|_{z=L} \\ y_{\text{OEA},0} = y_o, n_{\text{OEA}} = m, p_{\text{OEA}} = p_P \Big|_{z=L} \end{aligned} \quad (9)$$

在顺流型中需要注意的是,在计算中需要提前给定入口流量根据边界条件以便顺次计算得出富氧气体的体积分数与流量。

### 1.2.2 逆流型

当  $Z=0$  时,有

$$x_o = x_{\text{air},0}, x_N = x_{\text{air},N}, n = n_{\text{air}}, p_F = p_{\text{air}} \quad (10)$$

在逆流型的边界条件中, $Z=L$  处为富氮气体出口处以及富氧气体入口处,因此与顺流型不同, $Z=L$  处也被限定。在  $Z=L$  时

$$\begin{cases} x_o = x_{\text{NEA},0}, x_N = x_{\text{NEA},N}, n_o = -n_{\text{NEA}} x_o, n_N = -n_{\text{NEA}} x_N \\ y_o = y_{o,0}, y_N = 1 - y_{o,0}, m_o = 0, m_N = 0, p_P = p_{\text{OEA}} \end{cases} \quad (11)$$

$y_{o,0}$  的求法类似顺流型:

$$\begin{aligned} \frac{y_{o,0}}{1-y_{o,0}} = \frac{\beta(p_{\text{NEA},0} - p_{\text{OEA}} y_{o,0})}{p_{\text{NEA},N} - p_{\text{OEA}} (1-y_{o,0})} \Rightarrow \\ y_{o,0} = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4CE}}{2C} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\beta = J_o/J_N$  为分离系数, $C = p_{\text{OEA}}(1-\beta)$ , $D = p_{\text{NEA},N} + \beta p_{\text{NEA},0} - p_{\text{OEA}}(1-\beta)$ , $E = -\beta p_{\text{NEA},0}$ 。

逆流型中,膜丝的工作参数由初始条件与边界条件共同决定,属于隐式方程,无法得到解析解,可用迭代法进行求解。

在逆流型中,需先假设出口富氮气体体积分数,分别迭代修正压力与流量直到达到精度值,而在本文的模型中,可以直接控制富氧气体体积分数的逆流型更适用于制氧设备,故下文只考虑管侧逆流型的数据验证与计算。

### 1.3 数据验证

对建立数学模型的计算结果进行数据验证,计算中选取的膜组件结构参数如表 1 所示,与文献[11]中的实验组件完全相同,且进口空气压力为  $690 \text{ kPa}$ ,温度为  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

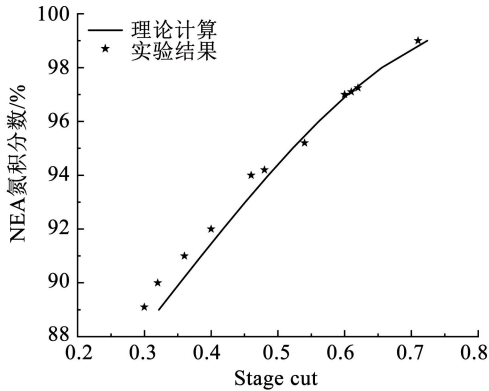
表1 空气分离膜结构参数

Tab.1 Structural parameters of air separation membrane

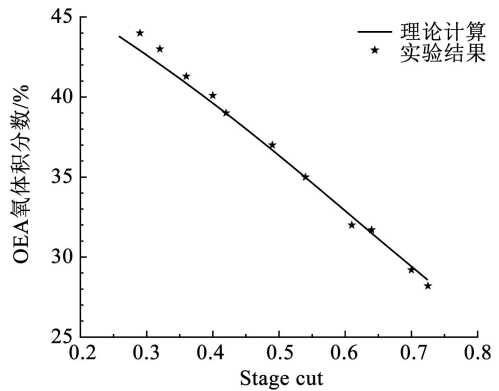
膜丝数	膜长度/m	膜外径/mm	有效渗透膜面积/cm <sup>2</sup>
368	0.25	0.16	462

将计算结果与文献[11]中的实验数据进行对比,如图2所示,生产率与回收率的定义与文献一致。产品回收率定义为作为产品回收的空气中氮气或氧气的比例,生产率定义为单位时间内单位膜面积的等效纯氮或氧气的产生量。可以看出,该模型计算结果与实验结果较为吻合,能较好地反映在逆流型结果中空纤维膜组件的分离效果。图2(a)、

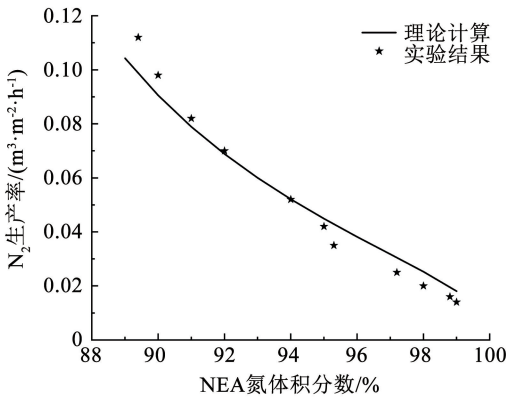
(b)分别为NEA氮体积分数、OEA氧体积分数与Stage cut的关系曲线,可以看出,NEA氮体积分数随着Stage cut的升高而升高,而OEA氧体积分数随着Stage cut的升高而降低。图2(c)、(d)与图2(e)、(f)分别给出了氮气、氧气生产率与回收率随着NEA氮体积分数、OEA氧体积分数变化的关系,可以看出:氮气的生产率随着其纯度的增加而降低,而富氧的情况正好相反;无论是富氧还是富氮,提高产品纯度都会降低产品回收率,且产品纯度越高,产品回收率的降低越明显。这意味着在产品回收率和纯度之间存在权衡关系,在膜法中可以获得高回收率或高纯度,但很少能同时获得高回收率和高纯度。



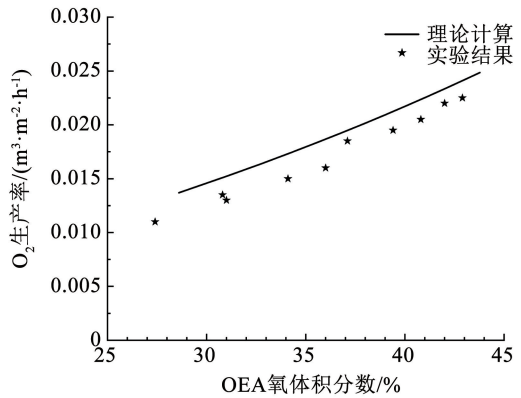
(a) NEA氮体积分数与Stage cut关系



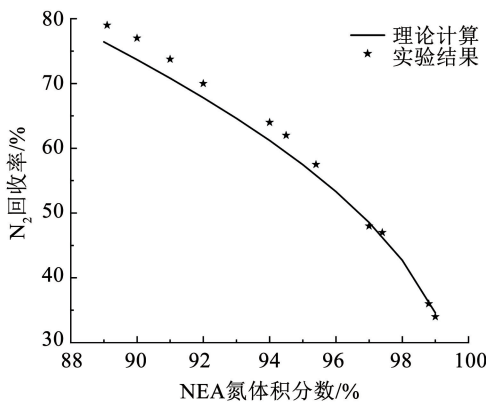
(b) OEA氧体积分数与Stage cut关系



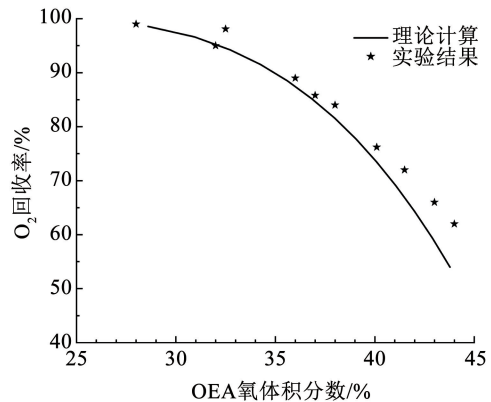
(c) N<sub>2</sub>生产率与NEA氮体积分数关系



(d) O<sub>2</sub>生产率与OEA氧体积分数关系



(e) N<sub>2</sub>回收率与NEA氮体积分数关系



(f) O<sub>2</sub>回收率与OEA氧体积分数关系

图2 模型计算结果与实验结果对比

Fig.2 Comparison between model calculation results and experimental results

图 3 给出了实验数据与模型仿真计算结果的误差图,模型计算结果与实验结果的平均误差不超过 15%。由于该模型没有考虑温度极化与体积分数极化的影响,对于出口 NEA 氮体积分数较低时的分离

过程误差较大,而对于出口 NEA 氮体积分数较高时的分离过程误差较小。总体来看,本模型可以较好地反映中空纤维膜的分离过程,基于本模型进行下文富氧供氧模型的计算具有可靠性。

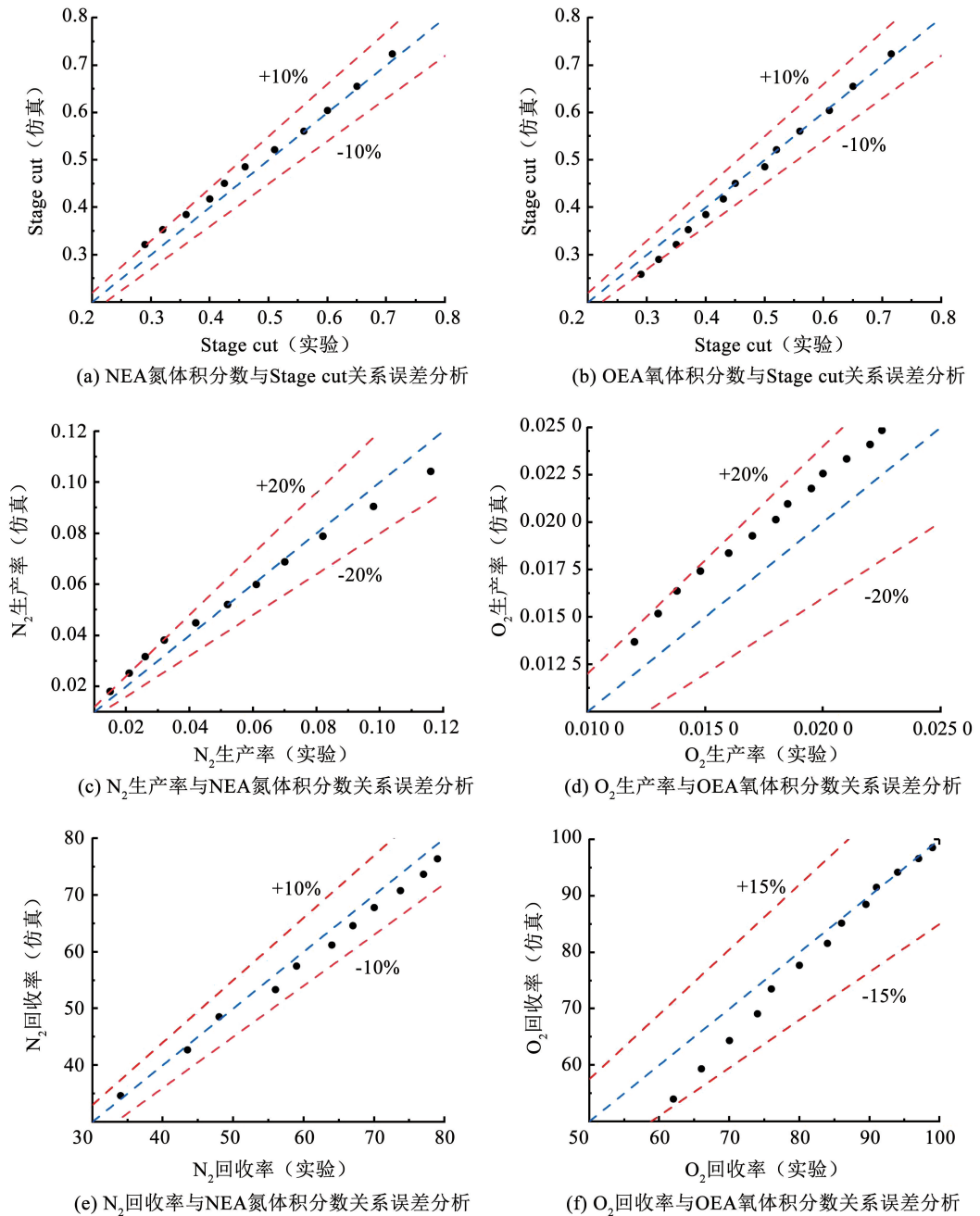


图 3 模型计算结果与实验结果误差分析

Fig. 3 Error analysis of model calculation results and experimental results

## 2 富氧供氧系统稳态模型和参数分析

### 2.1 富氧供氧系统稳态模型

膜法空气分离制氧流程如图 4 所示,空气从风机进入,经过过滤器除去杂质之后,被空气压缩机压缩,形成的高压高温气体经过中空纤维膜组件装置,在膜两侧产生压差,渗透出的富氧气体再与室内气

体混合重新送入房间,有效提高室内氧体积分数。分离过程在压差的作用下连续进行,设备简单,操作方便。

在膜法供氧系统中,可通过设定房间所需管道回风氧体积分数,改变中空纤维膜入口不同的空气压缩比,探究其对空气压缩机的功耗和体积的影响。通过压缩机的气体流量决定了压缩机体积,一般压

缩机的价格和设备重量等与压缩机体积排量有关,体积差异可以直观了解不同参数对整体设备尺寸重量的影响。通过压缩机的气体温升与流量决定了压缩机的功耗,功耗决定系统的运行成本,体积决定系统的设备占用空间与投资成本。

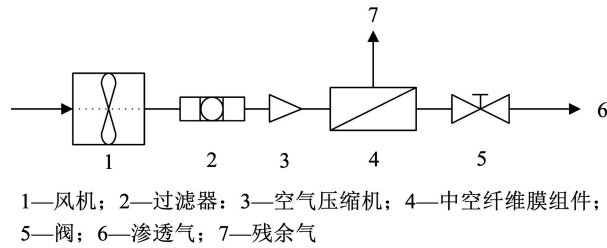


图4 膜法空气分离制氧流程

Fig.4 Process diagram of membrane air separation for oxygen production

下文计算中选取的膜组件结构参数如表2所示。

表2 空气分离膜结构参数

Tab.2 Structural parameters of air separation membrane

膜丝数	丝长/m	丝外径/mm	丝内径/mm
190 000	0.69	0.32	0.18

## 2.2 膜入口空气压力对压缩机的影响

刘应书等<sup>[11]</sup>对北京地区的典型空调房间内部的氧体积分数进行了实地测量,某宾馆会议室的氧气体积分数为17%,某商场1、商场2的氧气体积分数分别为18%和18.5%,某电子大厦的氧气体积分数为20%,某4人间学生宿舍的氧气体积分数为19.8%。所测量房间的氧气体积分数均小于空气氧气体积分数21%,出现“微缺氧”环境。宾馆会议室的面积与空间大小适中,且在密闭空间时氧气体积分数较低,对宾馆会议室进行补氧研究具有一定代表性。本文以宾馆会议室为例建立稳态模型,假设该会议室长8 m、宽6 m、高3 m,可容纳30人,空气流量为500 kg/h,空气中氧体积分数为17%,设定进入房间时的管道回风氧体积分数为22%。

### 2.2.1 房间管道回风氧体积分数

图5给出了当需要维持进入房间时的管道回风氧体积分数为22%时,在不同压力条件下空气压缩机的功耗及需要经过压缩机的气体流量与富氧气体氧体积分数的关系。在膜组件分离富氧空气时,要生产更高氧体积分数的富氧气体,需要更多的进气流量。所以,随着富氧气体氧体积分数的升高,为维持房间设定氧体积分数的恒定需要的富氧空气流量会减少,但是富氧空气氧体积分数的升高会导致进气空气流量增加,总体来看,需要更多的空气流量来支持空气分离。

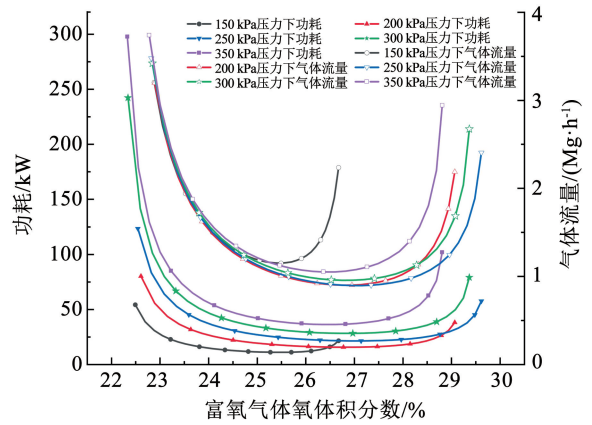


图5 不同压力下功耗与气体流量随富氧气体氧体积分数的变化关系

Fig.5 Relationship between power consumption and gas flow rate with oxygen concentration in oxygen rich gas under different pressures

由图5可以看出,随着富氧气体氧体积分数的增加,功耗与气体流量均呈现先显著下降后逐渐增加的趋势,并且当膜组件进口压力增加,压缩机的功耗增加。但这并不代表进口压力越低越好,当进气压力为150 kPa时,虽然功耗很低但是气体流量相对较大,即压缩机体积将会较大。当进气压力分别为200、250、300、350 kPa时,气体流量均在氧体积分数26%~27%达到最低,200 kPa时压缩机功耗最低,而200 kPa和250 kPa时的气体流量很接近。因此,中空纤维膜入口的空气压力为200 kPa,出口富氧气体氧体积分数为27%左右时,压缩机的功耗和体积都较小。

压缩机的功耗会随着膜组件进口压力的增加而增加,这是因为功耗与空气进入压缩机前后的温升呈正相关,压比越大,温升越大,功耗越大。

功耗与气体流量均呈现先显著下降后逐渐增加的趋势,这是因为在膜组件分离富氧空气时,要生产纯度更高的富氧气体需要更多的进气流量。随着富氧气体氧体积分数的升高,虽然需要的富氧空气流量会减少,但是富氧空气氧体积分数的升高会导致进气空气流量增加。所以,为维持进入房间时的管道回风氧体积分数的恒定,总体来看需要更多的空气流量来支持空气分离,而功耗也随之增加。

### 2.2.2 其他房间管道回风氧体积分数

图6给出了当房间管道回风氧体积分数设定为21%、23%、24%、25%时空气压缩机功耗与体积的变化曲线。可以看出,当房间管道回风氧体积分数设定为21%、23%、24%、25%时,压缩机的功耗和体积的变化趋势与22%基本一致。因此,最适宜的压力依旧为200 kPa,后续对比不同房间管道回风氧体积分数对压缩机的影响仅根据200 kPa研究。

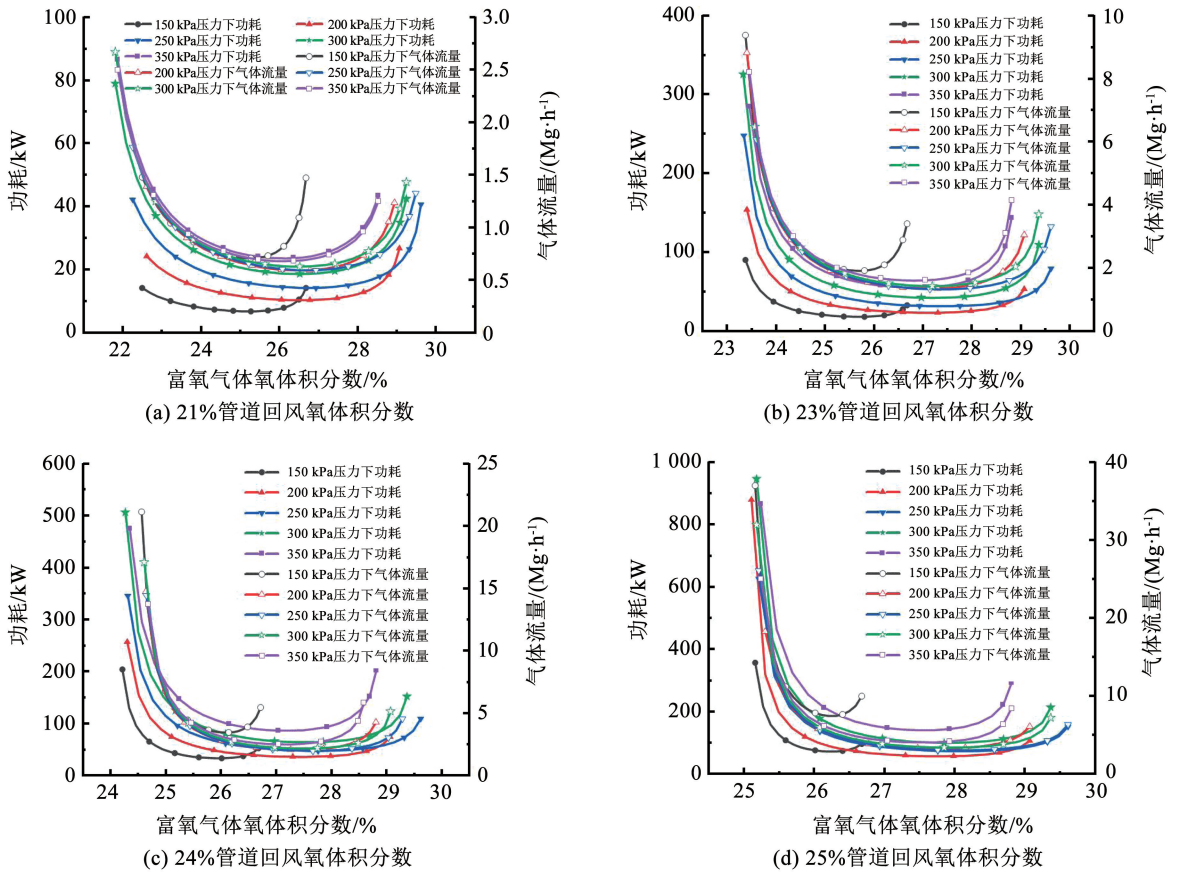


图 6 不同压力下功耗与气体流量随富氧气体氧体积分数的变化

Fig. 6 Variation of power consumption and gas flow rate with oxygen volume fraction of enriched gas at different pressures

### 2.3 不同房间管道回风氧体积分数的设定值对压缩机的影响

图 7 给出了在相同中空纤维膜入口压力 (200 kPa) 时, 改变房间设定的氧体积分数时压缩机的功耗与体积的变化曲线。

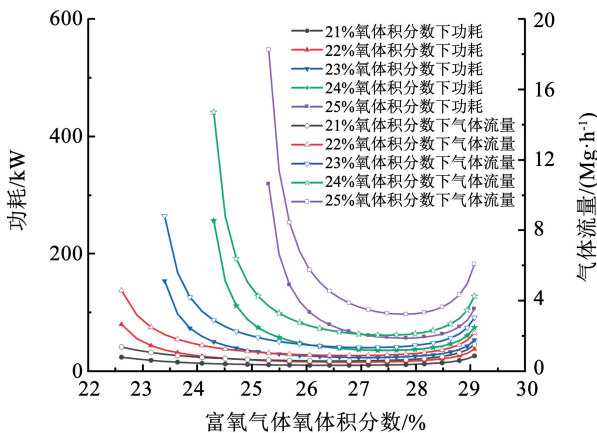


图 7 200 kPa 不同房间管道回风氧体积分数下功耗与气体流量随富氧气体氧体积分数的变化

Fig. 7 Variation of power consumption and gas flow rate with oxygen volume fraction of enriched gas at 200 kPa for different room return oxygen volume fractions

由图 7 可以看出, 在适宜压力条件 200 kPa 下, 改变房间管道回风氧体积分数的设定值, 管道回风

氧体积分数越低, 压缩机的功耗与体积越小, 当管道回风氧体积分数为 21% 时, 压缩机的功耗和体积都最小。这是因为在相同的工作压力下, 当管道回风氧体积分数增大, 为保持房间内恒定的氧体积分数需要的富氧空气以及空气流量会增大, 从而空气压缩机的功耗与体积也增大。

### 3 结论

1) 给定空气压缩机压比的条件下, 压缩机的功耗与体积均随着富氧气体氧体积分数的增加而先显著下降再增加。当富氧气体渗透气的氧体积分数为 27% ~ 28% 时, 压缩机的功耗与体积可以达到最低。

2) 改变空气压缩机压比, 即中空纤维膜进气压力, 当压比越小空气压缩机的功耗越小, 但空气流量随着压比的增大呈现先降低再增加的趋势。从房间设定氧体积分数为 21% ~ 25% 的综合结果来看, 压缩机的功耗与体积均较低时, 适宜的中空纤维膜工作压力为 200 kPa。

3) 管道回风氧体积分数设定值的增加会使压缩机的功耗与体积均增大, 因此, 当管道回风氧体积分数设定为 21% 时, 压缩机的功耗与体积最小, 可以满足人体正常工作和生活所需的氧气量。

## 参考文献

- [1]李超越,钱杰.制氧技术在富氧建筑中的应用及发展[J].科技创新与应用,2024,14(4):181  
LI Chaoyue, QIAN Jie. Application and development of oxygen production technology in oxygen rich buildings [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2024, 14(4): 181. DOI: 10.19981/j. CN23 - 1581/G3. 2024. 04. 042
- [2]张阳,王湛,纪树兰.富氧技术及其应用[M].北京:化学工业出版社,2005  
ZHANG Yang, WANG Zhan, JI Shulan. Oxygen enriched technology and its applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005
- [3]刘卫华,冯诗愚.飞机燃油箱惰化技术[M].北京:科学出版社,2018  
LIU Weihua, FENG Shiyu. Aircraft fuel tank inerting technology [M]. Beijing: Science Press, 2018
- [4]冯诗愚,卢吉,刘卫华,等.机载制氮系统中空纤维膜分离特性[J].航空动力学报,2012,27(6):1332  
FENG Shiyu, LU Ji, LIU Weihua, et al. Separation characteristics of hollow fiber membranes in airborne nitrogen production systems [J]. Journal of Aerodynamics, 2012, 27(6): 1332. DOI: 10.13224/j. cnki. jasp. 2012. 06. 003
- [5]张传钊,刘应书,王浩宇,等.密闭建筑空间缺氧环境下富氧特性研究[J].工程科学学报,2018,40(11):1380  
ZHANG Chuanshao, LIU Yingshu, WANG Haoyu, et al. Research on oxygen enrichment characteristics in anaerobic environments of enclosed building spaces[J]. Journal of Engineering Science, 2018, 40(11): 1380. DOI:10.13374/j. issn2095 - 9389. 2018. 11. 012
- [6]王浩宇,刘应书,张传钊,等.空调房间缺氧环境对人体的影响及补氧方案探讨[J].低温与特气,2018,36(5):10  
WANG Haoyu, LIU Yingshu, ZHANG Chuanshao, et al. The impact of hypoxic environment in air-conditioned rooms on the human body and exploration of oxygen supplementation schemes [J]. Low Temperature and Special Gas, 2018, 36(5): 10
- [7]蔡琰,林贵平,曾宇,等.中空纤维膜机载制氮装置的数学建模分析[J].航空动力学报,2015,30(9):2100  
CAI Yan, LIN Guiping, ZENG Yu, et al. Mathematical modeling analysis of hollow fiber membrane airborne nitrogen production equipment [J]. Journal of Aerodynamics, 2015, 30(9): 2100. DOI:10.13224/j. cnki. jasp. 2015. 09. 007
- [8]日本膜学会.膜分离过程设计法[M].王志魁,译.北京:科学技术文献出版社,1988  
Japanese Membrane Society. Membrane separation process design method [M]. WANG Zhikui, translate. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1988
- [9]贺高红,邹越,徐仁贤,等.中空纤维气体分离膜丝内压降规律的研究[J].膜科学与技术,1994(2):22  
HE Gaohong, ZOU Yue, XU Renxian, et al. Study on the pressure drop law inside hollow fiber gas separation membrane filaments [J]. Membrane Science and Technology, 1994(2): 22
- [10]FENG X S, IVOTY J, RAJAN V S V. Air separation by integrally asymmetric hollow-fiber membranes [J]. AIChE Journal, 1999, 45(10): 2142
- [11]刘应书,杜雄伟,赵华,等.富氧空调的可行性探讨[J].暖通空调,2006(4):38  
LIU Yingshu, DU Xiongwei, ZHAO Hua, et al. Feasibility study of oxygen enriched air conditioning [J]. Journal of HV & AC, 2006(4): 38

(编辑 刘 彤)

## 封面图片说明

封面图片来自本期论文“功能复合材料中微结构与本征热扩散耦合驱动的协同优化”,以分子模拟的微观视角,生动诠释了环氧树脂基复合材料中分子交联网络构建与热传导路径优化的核心机制。研究通过活性位点识别、动态键合距离阈值调控及多轮能量优化,构建了具有梯度交联度的三维网络结构。分子链的演变过程直观揭示了从初始松散结构逐步演化为有序交联网络,声子散射通道减少,既维持分子链调整能力,又构建连续声子传输路径,实现热导率的跃升。黄色高亮区域展示非键相互作用的热传导通路,印证了分子尺度有序排列与介观填料网络的跨尺度协同机制。凸显“拓扑设计-分子有序”策略的创新性,为高导热复合材料研发提供了理论基础。

(图文提供:刘向宇,刘梦,许家哲,艾青,帅永.哈尔滨工业大学能源学院)