

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.04.019

流程对机载中空纤维膜装置分离性能的影响

耿雷铭^{1,2}, 江荣杰³, 付子祺¹, 冯诗愚¹

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 中航通飞华南飞机工业有限公司, 珠海 519090;
3. 中国船级社安庆办事处, 安庆 246003)

摘要: 中空纤维膜气体分离装置是根据混合气体中各组分在分压差的推动下通过膜的传质速率不同来分离不同组分气体, 其性能与流型、进气方式和所处的海拔高度有关。建立并验证了不同流程间通用的中空纤维膜数学模型, 得到了膜分离过程中产品氮气纯度、丝内压阻、渗透率等随高度的变化关系, 分析了不同流程对膜分离过程的影响。研究结果显示, 管侧进气逆流时的产品氮气纯度比顺流高, 两者差距随着高度上升先增大后减小; 逆流流型下管侧进气得到的产品氮气纯度比壳侧进气高, 分离效果更好。低空下流型对机载中空纤维膜装置性能的影响更大; 高空下进气模式对机载中空纤维膜装置性能的影响更大。

关键词: 流程; 中空纤维膜; 分离性能; 数学模型; 顺逆流; 管壳侧

中图分类号: V228.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)04-0769-06

Effect of Flow Path on Separation Performance of Hollow Fiber Membrane for On-board Inerting Gas Generating System

GENG Leiming^{1,2}, JIANG Rongjie³, FU Ziqi¹, FENG Shiyu¹

(1. College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC GA Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519090, China; 3. China Classification Society Anging Office, Anqing 246003, China)

Abstract: Hollow fiber membrane is to separate different component gases according to different mass transfer rates of each component in the mixed gas driven by the partial pressure difference through the membrane. Its separation performance is related to the flow pattern, gas feed mode and altitude. An all-purpose mathematical model of hollow fiber membrane was developed for different flow paths and experimentally verified. Then, the relationships of nitrogen purity, pressure resistance, permeability and so on with altitude were obtained in the process of membrane separation. Furthermore, the influence of different flow paths on the process of membrane separation was analyzed. Results show that, at bore-side gas feed mode, the nitrogen purity of counter-current flow is higher than that of co-current flow, while the difference between the two types increases first and then decreases with altitude. In counter-current flow, the nitrogen purity of bore side is higher than that of shell side and the separation performance is better. At low-altitude, the flow pattern has greater influence on the performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system; At high altitude, the gas feed mode has greater influence on the performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system.

Key words: flow path; hollow fiber membrane; separation performance; mathematical model; co-current and counter-current flow; bore-side and shell-side

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1933121); 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。

收稿日期: 2024-10-22; **修订日期:** 2025-05-19

通信作者: 冯诗愚, 男, 博士, 副教授, E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn。

引用格式: 耿雷铭, 江荣杰, 付子祺, 等. 流程对机载中空纤维膜装置分离性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(4): 769-774. GENG Leiming, JIANG Rongjie, FU Ziqi, et al. Effect of flow path on separation performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(4): 769-774.

飞机燃油箱发生燃爆会带来灾难性后果,而通过机载制氮来惰化油箱上部的气相空间,可有效阻止这一现象的发生^[1]。中空纤维膜装置在机载制氮领域得到了大量的应用,成为主流的飞机燃油箱惰化装置^[2]。气体膜分离技术的基本原理是混合气体中各组分气体在膜丝内外的分压差不同,通过膜的传质速率各有快慢,从而达到分离的目的^[3]。通常将分离膜同支撑材料结合起来制成中空纤维的形式,使其具有自支撑特性和较大的填充密度^[4]。中空纤维膜装置主要由壳体和中空纤维膜丝束构成,类似于壳管式换热器的结构^[5-6]。这类装置分离空气的过程是将空气输送到膜丝的内侧(或外侧),氧气和氮气分离,在产品气出口获得富氮气体,在渗透侧气流中产生富氧气体^[7]。而根据进气侧和渗透侧的气流流向又可分为顺流和逆流^[8]。

为了解顺逆流、管壳侧进气等流程下的膜分离性能,国外研究人员通过建立数学模型仿真和实验的方式来对中空纤维膜分离性能进行研究。1991年,美国曼哈顿学院化学工程系 Slater 等^[9]做了壳侧逆流的实验,分析了不同进气压力、流量等操作参数对膜分离性能的影响。同年,美国洛厄尔大学化学与核工程系 Giglia 等^[10]开发了数学模型,对壳侧进气下顺逆流的空气膜分离仿真后又进行了实验验证。1998年,北卡罗来纳州罗利州立大学化学工程系 Coker 等^[11]对管侧进气下的空气膜分离进行了模拟。但这些化工领域的中空纤维膜分离空气的研究,由于绝大部分应用场景都在地面上,并没有聚焦于高度变化会给膜装置的分离性能产生何种影响。所建立的数学模型也不能反映高度变化对分离性能的影响。

然而,飞机在不同高度飞行时,其外界环境的温度、压力是不断变化的,这对于机舱内中空纤维膜装置的性能将产生一定影响。薛勇等^[12]通过在大气环境模拟舱内的实验方法测得了4个高度下管侧进气的空气膜分离数据。冯诗愚等^[13]采用微元方法建立了管侧顺流数学模型,仿真并分析了中空纤维膜分离理想度随压比和温度的变化关系。邵垒等^[14]通过引入高度修正系数,重点研究了管侧顺流下富氮气体纯度同富氮气体流量之间的关系。蔡琰等^[15]建立了管侧逆流数学模型,分析了几种排气压力、丝长对膜分离性能的影响。这些研究所建立的数学模型虽然对不同高度下的膜分离性能有所关注,但并未考虑流程的影响。

本文建立了不同流程之间可以通用的数学模型,通过设置不同的边界条件,完成对顺逆流和管壳侧进气的模型配置。通过固定入口处进气流量,在多个进气压力下进行瞬态仿真,最终得到在宽泛

的高度范围内不同流程之间中空纤维膜装置分离性能的差异数据。伴随着膜制造工艺的进步^[16-17],本文仿真结果对基于新型膜制造工艺生产的机载中空纤维膜装置设计有借鉴作用。

1 中空纤维膜数学模型

所研究的中空纤维膜装置空气流程主要分为顺流和逆流;进气方式有壳侧(中空纤维膜膜丝外)进气和管侧(中空纤维膜膜丝内)进气。

为了简化计算,做如下假设:

- (1) 不考虑膜丝在压力下的形变;
- (2) 膜的渗透性仅与材料及结构参数有关;
- (3) 不考虑壳侧气流阻力;
- (4) 管侧气流阻力遵循哈根-泊肃叶方程;
- (5) 不考虑浓度极化现象;
- (6) 膜装置中的每根膜丝进气量均匀分布。

将一整段中空纤维膜丝分段,对单段膜丝单元进行模型构建。膜丝分成 n 段,编号为 $1, 2, \dots, k$ 。膜装置中主要有4种流程:壳侧顺流、壳侧逆流、管侧顺流、管侧逆流,单段膜丝单元的流型图如图1所示。

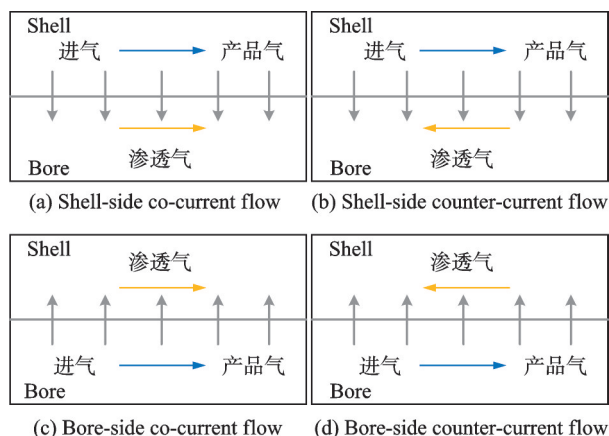


图1 4种流程下的中空纤维膜分离单元

Fig.1 Four types of flow path for hollow fiber membrane separation unit

每根膜丝的单段膜分离单元遵循如下关系式: 渗透关系式

$$\frac{Q_O}{dL} = \pi d_i J_O (p_f X_f - p_p X_p) \quad (1)$$

$$\frac{Q_N}{dL} = \pi d_i J_N [p_f (1 - X_f) - p_p (1 - X_p)] \quad (2)$$

式中: Q_O 和 Q_N 分别为氧气和氮气摩尔流量; L 为膜丝长度; d_i 为膜丝内径; J_O 和 J_N 分别为氧气和氮气的渗透系数; p_f 和 p_p 分别为进气侧和渗透侧压力; X_f 和 X_p 分别为进气侧和渗透侧体积分数。

膜分离系数

$$\alpha = J_O / J_N \quad (3)$$

质量守恒表达式

$$U_p = Q_O + Q_N \quad (4)$$

$$U_f + U_r + U_p = 0 \quad (5)$$

$$U_f X_f + U_r X_r + U_p X_p = 0 \quad (6)$$

式中: U_f 、 U_p 和 U_r 分别为进气侧、渗透侧和渗余侧的流量。

中空纤维膜丝内压降

$$\frac{dp}{dL} = \frac{128RT\mu}{\pi d_i^4 p} U_f \quad (7)$$

式中: T 为温度; μ 为运动黏度; R 为气体常数。

对于同一个中空纤维膜装置而言,基于装置中的每根膜丝进气量均匀分布这一假设下,无论壳侧进气还是管侧进气,每根膜丝的进气流量一致。第1段膜丝单元进气侧和渗透侧的气体流量边界条件分别为

$$U_{f|1} = U_{f,in} \quad (8)$$

$$U_{p|1} = 0 \quad (9)$$

式中 $U_{f,in}$ 为中空纤维膜装置引气的摩尔流量。

第1段膜丝单元进气侧入口的氧体积分数边界条件为

$$X_{f|1} = X_{f,in} \quad (10)$$

式中 $X_{f,in}$ 为中空纤维膜装置引气中氧气的体积分数。

顺流时,渗透侧的氧体积分数边界条件在第1段膜丝单元里设置为

$$\frac{X_{p|1}}{1 - X_{p|1}} = \alpha \frac{p_{f|1} \cdot X_{f|1} - p_{p|1} \cdot X_{p|1}}{p_{f|1} \cdot (1 - X_{f|1}) - p_{p|1} \cdot (1 - X_{p|1})} \quad (11)$$

逆流时,渗透侧的氧体积分数边界条件在第 k 段膜丝单元里设置为

$$\frac{X_{p|k}}{1 - X_{p|k}} = \alpha \frac{p_{f|k} \cdot X_{f|k} - p_{p|k} \cdot X_{p|k}}{p_{f|k} \cdot (1 - X_{f|k}) - p_{p|k} \cdot (1 - X_{p|k})} \quad (12)$$

通过联立式(1~6),以及式(8~12)中的边界条件即可求解。相较于其他数学模型,本模型可更方便地进行顺流或逆流、壳侧进气或管侧进气等模式的转换,目的是突出同一个中空纤维膜装置在不同流程下的膜分离性能对比。上述模型通过Python软件编程求解。

定义渗透率 θ 为渗透侧气体流量与进气气体流量之比。

顺流时为

$$\theta = \frac{U_{p|k}}{U_{f|1}} \quad (13)$$

逆流时为

$$\theta = \frac{U_{p|1}}{U_{f|1}} \quad (14)$$

此外,根据文献[13],20 km以下的大气压力满足如下关系

$$p = 101\,325 \times \left(1 - \frac{h}{4.43 \times 10^4}\right)^{5.256} \quad (15)$$

根据中华人民共和国航空工业部标准^[18],20 km以下的标准大气静温满足如下关系

$$\begin{cases} T = 288.15 - 0.65 \times h/100 & 0 \text{ m} \leq h \leq 11\,000 \text{ m} \\ T = 216.65 & 11\,000 \text{ m} < h \leq 20\,000 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

2 数学模型验证

文献[19]中的中空纤维膜装置参数为:壳侧逆流,装置内有10根膜丝,每根膜丝长1.07 m,膜丝外径450 μm ,有效膜面积151.2 cm^2 。膜的氧气渗透系数为 $7.03 \times 10^{-9} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,氮气渗透系数为 $1.21 \times 10^{-9} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。文献[19]研究了进气压力对气体分离性能的影响。入口处进气压力分别选择了100 psig和200 psig(1 psig=6.895 kPa);渗透侧气体出口连通大气,压力为101.325 kPa。此外,实验都在室温条件下进行。模型仿真时,保持与上述参数一致。

将模型计算结果与文献[19]的实验数据进行比较,产品气出口富氮气体纯度和流量的对比分别如图2和图3所示。

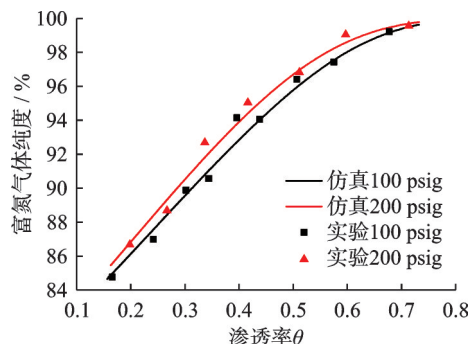


图2 两种进气压力下富氮气体纯度对比

Fig.2 Comparison of nitrogen-enriched gas purity under two inlet pressures

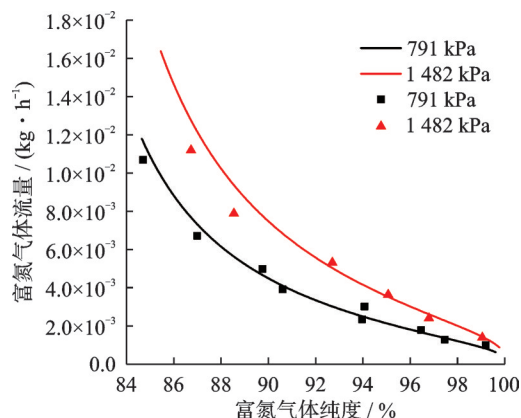


图3 两种进气压力下富氮气体流量对比

Fig.3 Comparison of nitrogen-enriched gas flux under two inlet pressures

验证结果显示,本文计算结果半数误差低于 5%,最大误差不超过 20%,验证了所建立的通用中空纤维膜计算模型的准确性。

3 流程对膜分离性能的影响仿真

为了探究不同流程下的中空纤维膜装置分离性能差异,改变中空纤维膜装置和膜丝的结构参数,如表 1 所示。

表 1 机载中空纤维膜装置结构参数

Table 1 Structural parameters of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system

参数	丝内径/mm	丝外径/mm	丝长/mm	膜丝数/万根
数值	0.15	0.17	600	30

操作参数:中空纤维膜装置的进气流量为 50.112 kg/h;氧气渗透系数和氮气渗透系数分别为 3.50×10^{-8} 和 5.833×10^{-9} mol/(m²·s·Pa);根据目前飞机分离膜装置设计时常选用的引气压力工况,计算 5 种进气压力,分别为 200、250、300、350 和 400 kPa。

3.1 顺/逆流型的膜分离性能对比

以管侧进气为计算对象,顺逆流对产品氮气纯度的影响如图 4 所示。可以看出,在给定进气流量和进气压力下,逆流流型下的产品氮气纯度始终比顺流流型高,其原因与换热器类似,逆流下,膜丝内外的传质推动力,即浓度差较顺流高,因此分离效果较好。随着入口处的进气压力增大,出口处氮气纯度的最大差值增加。在 400 kPa 的入口压力下,顺流和逆流的产品氮气纯度差异不断减小;在低于 350 kPa 的入口压力下,顺流和逆流的产品氮气纯度差异先增大后减小,且这种趋势会随着入口压力的减小而变得更加明显。

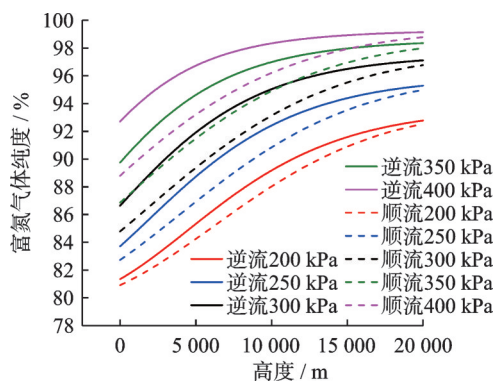


图 4 顺流和逆流下产品气出口富氮气体纯度随高度的变化
Fig.4 The purity of nitrogen-enriched gas in the product stream outlet as a function of altitude in co-current and counter-current flows

产品气出口富氮气体流量如图 5 所示。在给定进气流量和进气压力下,逆流流型下的产品气出

口处富氮气体流量比顺流流型稍小。随着入口处的进气压力增大,产品气出口处的富氮气体流量减小。但顺、逆流之间的富氮气体产量差距的变化趋势和富氮气体纯度差距的变化趋势是相同的,都是在较低的入口压力下先增大后减小,在较高的压力下不断减小。

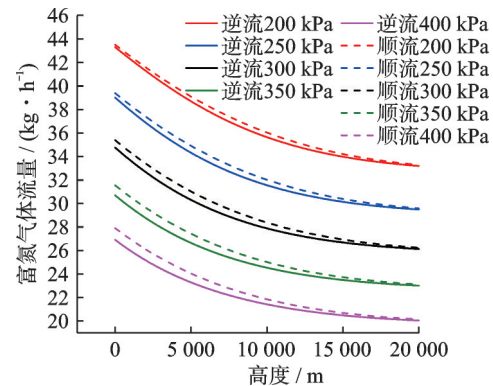


图 5 顺流和逆流下产品气出口富氮气体流量随高度的变化
Fig.5 The flux of nitrogen-enriched gas in product stream outlet as a function of altitude in co-current and counter-current flows

结合图 6,可以发现在渗透率上也出现了相似的趋势。这说明渗透率和富氮气体纯度是正向互相关联的。在相同的高度上,逆流比顺流的渗透率大,导致了逆流产品气出口的富氮气体纯度比顺流高。

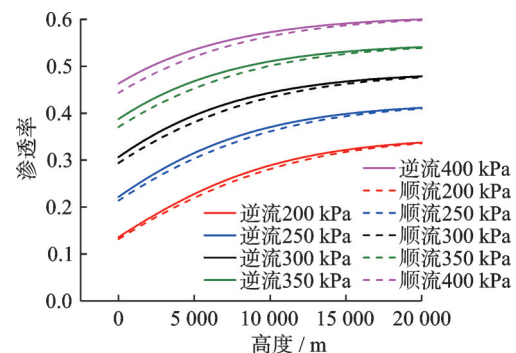


图 6 顺流和逆流下渗透率随高度的变化
Fig.6 Stage cut as a function of altitude in co-current and counter-current flows

综合来看,随着高度的上升,逆流流型相较于顺流流型所带来的膜分离性能提升会逐渐变小。

3.2 管侧/壳侧进气的膜分离性能对比

以逆流流型为计算对象,图 7 为产品气出口处富氮气体纯度随高度的变化关系。由图可知,富氮气体纯度变化曲线均趋于平缓。这是因为环境压力随着高度上升的变化率越来越小,从而使膜丝两侧的压力差值变化减小。

除了进气压力和高度较低时外,管侧进气均比壳侧进气下的分离效果好,出口氮气纯度高。且随着高度增加,管侧进气的氮气纯度越高,同时进气压力越低,两者纯度差异越大。

将两种进气方式下的膜丝内压阻进行对比,如图8所示。同一入口压力下,管侧进气时,膜丝内压降发生在进气侧,而膜丝外侧的压力基本不变,因为进气侧压力稳定,与高度无关,因此膜丝内压降较小,且高度增加后影响不大。而壳侧进气时,膜丝外侧基本无需考虑压降,膜丝内为渗余侧,其出口为环境压力,随高度有很大变化,因此膜丝内压降大,且随着高度增加而急剧上升。

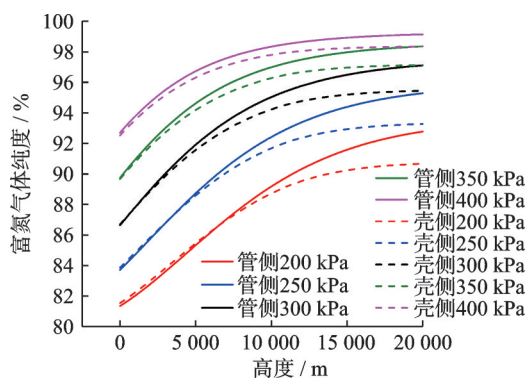


图7 管侧和壳侧进气下产品气出口富氮气体纯度随高度的变化

Fig.7 The purity of nitrogen-enriched gas in the product stream outlet as a function of altitude for tube-side and shell-side air intake

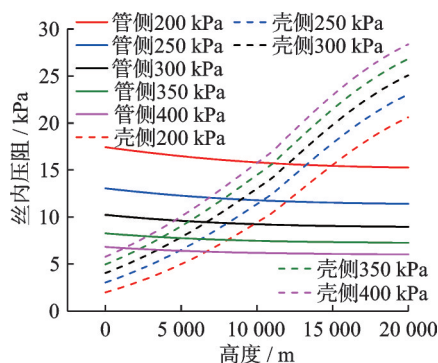


图8 丝内压阻随高度的变化

Fig.8 Variation of pressure resistance in fiber bore with altitude

因此壳侧进气和管侧进气的分离效果差异是由丝内压降不同引起的。当进口压力较小,且高度较低时,壳侧进气方式下,膜丝内外压差较壳侧进气方式大,因此气体纯度高。但随着高度增加及进气压力提升,由图8可知,壳侧进气的丝内压降高于管侧,因此分离性能迅速下降。

产品气出口富氮气体流量如图9所示。在较低的进气压力下,壳侧进气的产品气出口处富氮气体流量在低空比管侧进气小,在高空比管侧进气高。而在较高的进气压力下,壳侧进气的产品气出口处富氮气体流量始终比管侧进气高。

膜装置渗透率的变化如图10所示。总体来看,壳侧进气的渗透率比管侧进气高。随着高度上升,渗透率的差异也在不断增大。

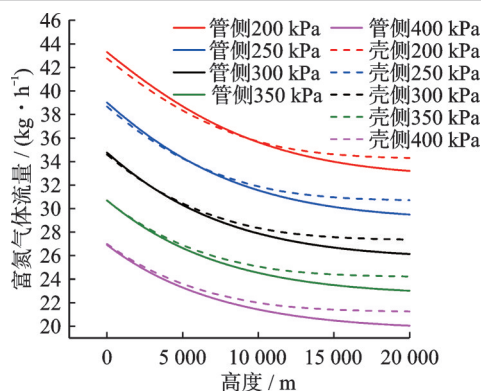


图9 管侧和壳侧进气下产品气出口富氮气体纯度随高度的变化

Fig.9 The purity of nitrogen-enriched gas in product stream outlet as a function of altitude for tube-side and shell-side air intake

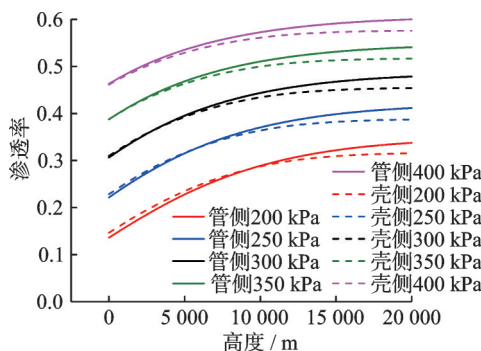


图10 管侧和壳侧进气下渗透率随高度的变化

Fig.10 Stage cut as a function of altitude for tube-side and shell-side air intake

综合来看,随着高度的上升,管侧进气相较于壳侧进气所带来的膜分离性能提升会逐渐变大。

管侧进气时,封头需要承受较高压力,壳体承受负压差,而壳侧进气时,封头承受负压差,而壳体承受正压差。在实际的工程应用中,在飞行高度和进气压力较低,且壳体直径较小,可承受较大内压时,采用壳侧进气方式可提高分离性能,例如在直升机惰化系统中。除此之外,应该选择管侧进气,从而减少壳体厚度,减轻整体重量。

4 结 论

在建立了不同流程通用的中空纤维膜数学模型的基础上,研究分析了流程对中空纤维膜装置性能的影响,结论如下:

(1) 壳侧进气时,逆流流型下的产品氮气纯度比顺流流型高,两者差距随着海拔高度的上升先增大后减小;且进气压力越大,顺逆流型下的差距最值也在提升。

(2) 逆流流型下,海拔10 000 m以上,管侧进气得到的产品氮气纯度比壳侧高,两者差距随着海拔高度的上升而增大。

(3) 在低空,流型(顺流和逆流)对机载中空纤

维膜装置性能的影响更大;在高空,进气模式(管侧进气和壳侧进气)对机载中空纤维膜装置性能的影响更大。

参考文献:

- [1] 邵垒. 飞机燃油箱耗氧型惰化技术理论与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
SHAO Lei. Theoretical and experimental study of oxygen consumed inerting technology for aircraft fuel tank [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [2] 冯诗愚, 刘冠男, 江荣杰, 等. 飞机燃油箱机载惰化技术研究现状与发展趋势[J]. 航空动力学报, 2021, 36(3): 616-625.
FENG Shiyu, LIU Guannan, JIANG Rongjie, et al. Research status and development trend of aircraft fuel tank on-board inerting technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(3): 616-625.
- [3] 章龙江, 汤林, 党延斋. 气体分离膜及其组合技术在石油化工领域的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- [4] 任建勋, 张信荣. 中空纤维式减压膜蒸馏组件的温度压力分布及通量特性研究[J]. 膜科学与技术, 2002, 22(1): 12-16.
REN Jianxun, ZHANG Xinrong. Study on temperature and pressure distribution and flux of vacuum membrane distillation[J]. Membrane Science and Technology, 2002, 22(1): 12-16.
- [5] 董天飞. 管壳式换热器结构设计及性能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
DONG Tianfei. Structure design and performance analysis of shell and tube heat exchanger[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [6] 韩鲁佳, 黄之栋, 崔引安. 中空纤维膜组件富氮特性的实验研究[J]. 北京农业工程大学学报, 1990, 10(1): 47-54.
HAN Lujia, HUANG Zhidong, CUI Yin'an. An investigation about the nitrogen enrichment characteristics of a hollow fiber membrane module[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1990, 10(1): 47-54.
- [7] 刘丽英, 沈美娟, 杜洪梅. 膜法富氮过程的分析与计算[J]. 华北工学院学报, 1996, 17(3): 54-59.
- [8] PAN C Y, HABGOOD H W. An analysis of the single-stage gaseous permeation process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1974, 13(4): 323-331.
- [9] SLATER C S, VEGA C, BOEGEL M. Experiments in gas permeation membrane[J]. International Engineering Education, 1991, 7(5): 368-374.
- [10] GIGLIA S, BIKSON B, PERRIN J E, et al. Mathematical and experimental analysis of gas separation by hollow fiber membranes[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1991, 30(6): 1239-1248.
- [11] COKER D T, FREEMAN B D, FLEMING G K. Modeling multicomponent gas separation using hollow-fiber membrane contactors[J]. AIChE Journal, 1998, 44(6): 1289-1302.
- [12] 薛勇, 刘卫华, 高秀峰, 等. 机载惰化系统中中空纤维膜分离性能的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 107-111.
XUE Yong, LIU Weihua, GAO Xiufeng, et al. Experimental study on separation performance of hollow fiber membrane for onboard inert gas generating system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 107-111.
- [13] 冯诗愚, 卢吉, 刘卫华, 等. 机载制氮系统中中空纤维膜分离特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1332-1339.
FENG Shiyu, LU Ji, LIU Weihua, et al. Separation performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1332-1339.
- [14] 邵垒, 刘卫华, 冯诗愚, 等. 机载空分装置富氮气体流量及影响因素[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 141-146.
SHAO Lei, LIU Weihua, FENG Shiyu, et al. Flow rate of nitrogen-rich air and influence factors for on-board air separation unit[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 141-146.
- [15] 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): 2100-2107.
CAI Yan, LIN Guiping, ZENG Yu, et al. Mathematical modeling analysis of hollow fiber membrane on-board inert gas generation system[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(9): 2100-2107.
- [16] 高立萍. 基于咪唑官能团的耐高温聚合物膜材料的制备与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
GAO Liping. Preparation and investigation of imidazole-containing high-temperature polymer membrane materials[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [17] 郭丝雨, 顾少轩, 乔昂, 等. ZIF 晶体-玻璃复合膜制备及其气体选择性研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11): 4208-4214.
GUO Siyu, GU Shaoxuan, QIAO Ang, et al. Preparation and gas selectivity of ZIF crystal-glass composite film[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(11): 4208-4214.
- [18] 中华人民共和国航空工业部. HB 6127—86: 飞行大气参数[S]. 北京: 中华人民共和国航空工业部, 1987: 7-20.
- [19] 陈思禄. 用于气体分离的膜材料制备与中空纤维膜过程评价[D]. 天津: 天津大学, 2017.
CHEN Silu. Fabrication of membranes and process evaluation of hollow fiber membranes for gas separation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.