

文章编号:1000-8055(2012)06-1332-08

机载制氮系统中空纤维膜分离特性

冯诗愚¹, 卢吉¹, 刘卫华¹, 蒋军昌², 刘苏彦²

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 中航工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘 要: 采用微元方法建立了机载制氮系统中空纤维膜数学模型, 并使用龙格-库塔法对其进行了数值计算, 与实验数据进行对比后显示, 误差不超过 10%。然后分析了单位膜面积进料量、膜丝(membrane fiber)内外压比和氧氮渗透比其对产品气氧体积分数和制氮效率的影响。结果表明: 增加单位膜面积进料量虽然可提高制氮效率的增加, 但是会显著降低产品气中氮的体积分数, 因此需要采用合适的流程设计以克服此缺点。压比和氧气渗透系数的增加均会使氧体积分数与制氮效率减小, 但是提高渗透比对制氮效率影响不大, 因此对于气体分离过程是有利的。通过计算模型及实验数据, 分析了中空纤维膜分离理想度随压比和温度的变化关系, 结果显示压力对理想度影响较大, 随着压力增加, 实际分离过程与理论值偏差趋大, 而温度对理想度影响较小。

关 键 词: 机载制氮; 中空纤维膜; 富氮气体; 油箱惰化; 分离系数

中图分类号: V228.6; TQ028.1

文献标志码: A

Separation performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system

FENG Shi-yu¹, LU Ji¹, LIU Wei-hua¹, JIANG Jun-chang², LIU Su-yan²

(1. College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. The First Aircraft Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: The mathematical model of the hollow fiber membrane of on-board inert gas generation system (OBIGGS) is set up in term of the differential method, and solved by the Runge-Kutta method. The comparison between calculating results and experimental data published in literature reveals that the deviation is within 10%. Furthermore, this theoretical model is employed to analyze the influence of the specific feed flux of membrane area, pressure ratio of membrane fiber, the separation factor and the permeability coefficient to the volume fraction of oxygen in production gas and the production efficiency of nitrogen. The study shows that though the increase of the specific feed flux of membrane area could positively promote the production efficiency of nitrogen, the volume fraction of oxygen reduces sharply. Hence, an appropriate process of OBIGGS should be designed to overcome the disadvantage mentioned above. The increase of the pressure ratio and the permeability coefficient of oxygen will decrease the production efficiency of nitrogen and the volume frac-

收稿日期: 2011-06-23

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120704.1152.201206.1332_019.html

基金项目: 国家自然科学基金(50906066); 南京航空航天大学引进人才科研基金(S1030-014)

作者简介: 冯诗愚(1974—), 男, 浙江绍兴人, 副教授、博士, 主要从事油箱惰化、机载制冷及膜蒸馏方面的研究。

tion of oxygen, but the influence of the permeability coefficient is slight. Therefore, the increase of the permeability coefficient of oxygen is beneficial to the separation performance. Based on the experimental data and the model, the change of the separation ideal level related to the temperature and pressure is analyzed, the result shows that the pressure ratio will make greater effect on the separation ideal level. When the pressure ratio increases, the actual separation process will deviate from the theoretical one gradually.

Key words: OBIGGS (on-board inert gas generation system); hollow fiber membrane; nitrogen enriched air; fuel tank inerting; separation factor

近50年的空难数据显示,飞机燃油箱的爆炸燃烧成为飞机失事的重要因素.从上世纪80年代开始,美国即着手进行燃油箱惰化的研究^[1-2],国内近年来也展开了大量燃油箱惰化过程的仿真和实验研究^[3-7].而在所有的惰化技术中,利用合适的分离方法直接从空气中得到高纯度的富氮气体用于降低油箱中气相和燃油相中氧气含量是一种最为经济的方式,也是未来的发展趋势^[8].

通常,可采用分子筛和膜法分离两种方法得到富氮气体,而随着膜技术的发展,目前在操作条件相同的情况下,分子筛技术的分离效率仅为15%~25%左右,而膜分离效率为35%~48%,因此膜分离方法具有更好的经济性^[9].

膜法气体分离的基本原理是根据混合气体中各组分在压力的推动下透过膜的传递速率不同,从而达到分离的目的^[10].按照现有膜材料制作工艺,将膜分离应用于氧氮分离过程时,当产生的富氮气体体积分数为95%时,对应的富氧气体体积分数约为35%左右.

分离膜按结构形式可分为平板膜、卷式膜、中空纤维膜等,其中中空纤维膜可以大大增加膜接触的比表面积,且能承受较大的压力和压差,因而现今的机载制氮系统中基本都采用中空纤维膜这种结构形式.

目前,国内外虽然已有很多涉及到氧氮分离中空纤维膜的研究,例如,杜雄伟等^[11]对变压膜空气分离制氧进行了实验研究,陈慕容^[10]对气体膜分离技术的机理进行了阐述,并比较各种高纯制氮技术的经济性和发展趋势,贺高红等^[12]对中空纤维膜丝内压降规律进行了系统分析.但是机载分离系统的操作工况更加复杂,不仅入口压力、流量等有较大变化,同时环境背压也会随着飞机的爬升和俯冲等发生很大的变化,因此目前国内外对于机载制氮系统的研究仍以实验为主,例如文献^[13]对中空纤维膜在不同入口压力、温度、飞行高度下的分离特性进行了实验研究,文献^[14]

中通过实验方法分析了机载分离膜分离过程中的非理想现象.

然而,对机载中空纤维膜分离性能进行相关实验需要采用大气环境模拟舱来模拟飞机在不同飞行高度下的外界环境条件,其费用大、周期长,具有很大的局限性.因此有必要建立中空纤维膜分离过程的数学模型,对其分离特性进行理论研究,进而为进行全流程惰化的仿真模拟奠定基础.

1 机载制氮系统中空纤维膜数学模型

膜分离装置中原料气可走丝内也可走丝外,此外依据原料气和渗透气体的相对流动方向还可将气体膜分离器中的流型分为顺流、逆流和错流3种不同方式^[15].本文采用的实验数据中分离装置原料气走丝内,且原料气和渗透气顺流流动,因此以此种情况建立相应地数学模型.为了使问题简化,做出以下假设:

- 1) 渗透气各组分渗透系数一定;
- 2) 不考虑温度变化及温度极化和浓度极化;
- 3) 丝内压降忽略不计;
- 4) 气体在丝内外的流动为柱塞流,且丝内外径向无浓度梯度;
- 5) 空气仅有氧气和氮气,其中氧气的体积分数为21%,氮气为79%.

气体透过膜的传质速度,可由气体的渗透系数、膜内外压差及膜的结构参数来决定^[16].其中渗透系数大的称之为快气,渗透系数小的称之为慢气,本文中快气为氧,慢气为氮,气体单位时间透过膜的物质的量,即摩尔流量可表示为

$$\dot{n} = \frac{AQ(p_i^\circ - p_o^\circ)}{\delta} \quad (1)$$

式中 Q 为气体中某种组分的渗透系数, $\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; A 为膜面积,单位为 m^2 ; δ 为膜厚度,单位为 m ; p_i° 和 p_o° 分别为膜内外侧对应气体的分压力,单位为 Pa .

如图 1 所示,将膜丝沿轴向分为若干个微元段,取微元段 dA , 其中

$$dA = s\pi D_m dz \quad (2)$$

式中 s 为膜丝数; z 为膜丝长度; D_m 为膜丝名义直径,可按下式计算,即

$$D_m = \frac{(D_o - D_i)}{\ln(D_o/D_i)} \quad (3)$$

其中 D_o 和 D_i 分别为膜丝的外径和内径。

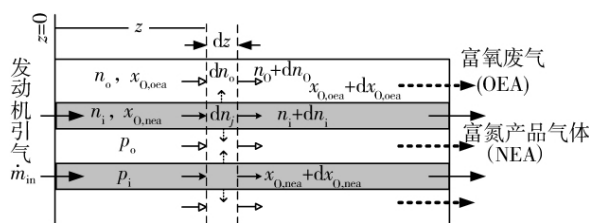


图 1 中空纤维膜分离模型示意图

Fig. 1 Scheme of separating process in the hollow fiber membrane

如果定义丝内外流量增加为正,减小为负,则根据渗透方程(1),膜丝微元段内外侧氧物质的量流量变化与其总物质的量流量及氧气体积分数相关,即

$$d\dot{n}_{O,i} = d(\dot{n}_i x_{O,nea}) = x_{O,nea} d\dot{n}_i + \dot{n}_i dx_{O,nea} = -\frac{Q_O}{\delta} (p_i x_{O,nea} - p_o x_{O,nea}) dA \quad (4)$$

$$d\dot{n}_{O,o} = d(\dot{n}_o x_{O,nea}) = x_{O,nea} d\dot{n}_o + \dot{n}_o dx_{O,nea} = \frac{Q_O}{\delta} (p_i x_{O,nea} - p_o x_{O,nea}) dA \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得到膜丝微元段内外侧气体中氧体积分数的变化量为

$$\frac{1}{\dot{n}_i} \left[-\frac{Q_O}{\delta} (p_i x_{O,nea} - p_o x_{O,nea}) dA - x_{O,nea} d\dot{n}_i \right] \quad (6)$$

$$\frac{1}{\dot{n}_o} \left[\frac{Q_O}{\delta} (p_i x_{O,nea} - p_o x_{O,nea}) dA - x_{O,nea} d\dot{n}_o \right] \quad (7)$$

膜丝微元段内外侧总的气体摩尔流量变化为

$$d\dot{n}_i = - \left[\frac{Q_O}{\delta} (p_i x_{O,nea} - p_o x_{O,nea}) + \frac{Q_N}{\delta} (p_i x_{N,nea} - p_o x_{N,nea}) \right] dA \quad (8)$$

$$d\dot{n}_o = \left[\frac{Q_O}{\delta} (p_i x_{O,nea} - p_o x_{O,nea}) + \frac{Q_N}{\delta} (p_i x_{N,nea} - p_o x_{N,nea}) \right] dA \quad (9)$$

显然根据式(8)和式(9)以及物料平衡关系可见,在微元段膜丝内外气体摩尔流量变化有如下关系

$$d\dot{n}_i = -d\dot{n}_o \quad (10)$$

以上各式中, Q_O , Q_N 为氧、氮渗透系数, p_i 和 p_o 是膜丝内外气体总压, $x_{O,nea}$ 和 $x_{N,nea}$ 为膜丝内侧富氮气体中氧氮体积分数, $x_{O,nea}$ 和 $x_{N,nea}$ 为膜丝外侧富氧气体中氧氮体积分数。

由于是顺流流动,因此当 $z=0$ 时,膜丝内外的气体流量为

$$\begin{cases} \dot{n}_i|_{z=0} = \dot{n}_{in} = \dot{m}_{in}/M_{air} \\ \dot{n}_o|_{z=0} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\dot{m}_{in}$ 是从发动机所引空气的质量流量, M_{air} 是空气的相对分子质量。

当 $z=0$ 时,膜丝内侧氧体积分数与所引空气一致,即

$$x_{O,nea}|_{z=0} = 0.21 \quad (12)$$

而膜丝外侧初始氧体积分数可根据渗透关系按照下式求解而得

$$\frac{x_{O,nea}|_{z=0}}{1 - x_{O,nea}|_{z=0}} = \frac{Q_O (p_i (x_{O,nea}|_{z=0} - p_o x_{O,nea}|_{z=0}))}{Q_N (p_i x_{N,nea}|_{z=0} - p_o x_{N,nea}|_{z=0})} \quad (13)$$

显然,联立由式(2)及式(4)~式(10)组成的微分方程组,及式(11)~式(13)所给出的初始条件,通过龙格-库塔法求解后,可得到膜丝内外气体摩尔流量及气体组分沿 z 方向的变化关系。

此外,定义产品气的制氮效率定义如下^[13]:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{nea}}{\dot{m}_{in}} = \frac{\dot{m}_{nea}}{\dot{m}_{nea} + \dot{m}_{nea}} \quad (14)$$

膜丝外侧压力为中空纤维膜分离器所处的环境背压,其与飞行高度有关,可按式计算

$$p_o = 101325 \times \left(1 - \frac{H}{4.43 \times 10^4} \right)^{5.256} \quad (15)$$

2 模型求解及实验验证

计算中选取的膜组件结构参数如表 1 所示,其与文献[13]中的实验组件完全相同,且产品气流量为 13 kg/h,温度为 25 °C,将计算结果与实验数据进行对比,如图 2 所示,制氮效率的定义与文献[13]一致。

从图 2 中可见,该模型计算结果与实验结果较为吻合,能较好地反映一定高度下产品气体体积分数与制氮效率的变化趋势,其计算值与实验值误差不超过 10%。由于该模型没有考虑丝内压降及浓差极化的影响,因此,对于计算出口富氮气体

表 1 空气分离膜结构参数

Table 1 Structural parameters of separation membrane

结构参数	丝外径/ mm	丝内径/ mm	丝长/ m	丝数/ 根	壳体尺寸/ mm×mm
参数值	0.55	0.45	0.97	2400	40×1000

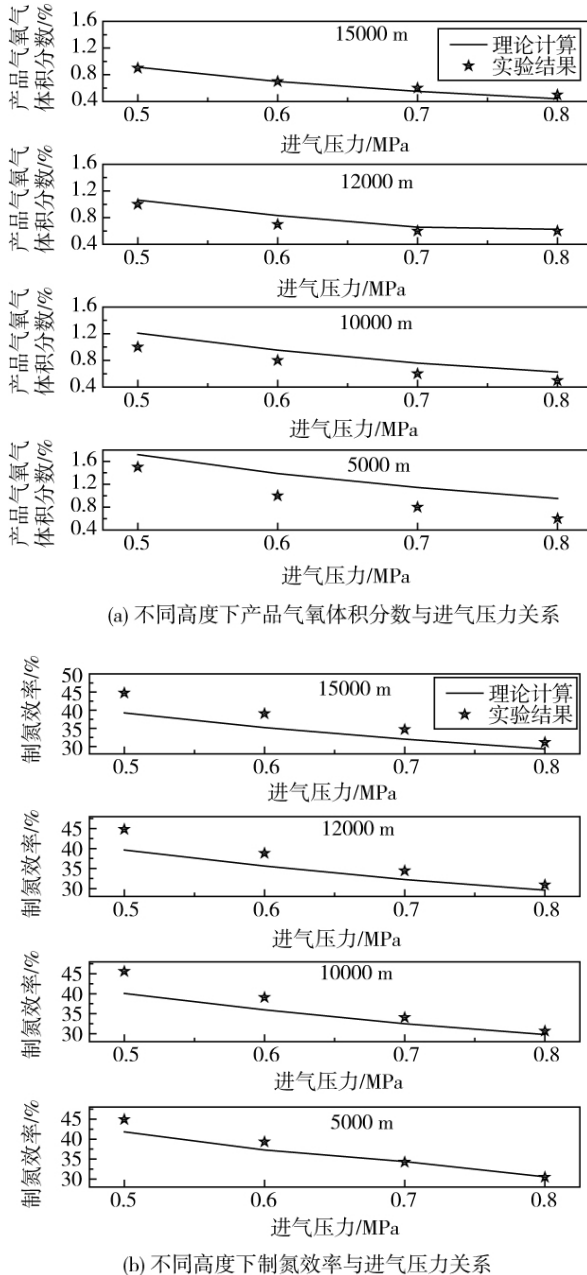


图 2 模型计算结果与实验结果比较

Fig. 2 Comparison between calculating results and experimental data

氧体积分数较低的分离过程误差较大,而对于出口富氮气体氧体积分数较高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

分离过程。

3 中空纤维膜影响因素与分析

为了使模型具有普遍性和对不同的膜进行普适性研究,定义单位膜面积进料量 $\bar{m} = \dot{m}_m / A$, 膜丝内外压比为 $\gamma = p_i / p_o$, 氧氮渗透比为 $\beta = Q_O / Q_N$ 。

3.1 单位膜面积进料量对中空纤维膜分离性能影响

图 3 给出了产品气氧体积分数及制氮效率与单位膜面积进料量的关系,从图中可以看出,随着单位膜面积进料量的增加,富氮气体氧体积分数和制氮效率都有显著的增加,尤其是制氮效率由大约 15% 增加至约 70%,而氧体积分数从 9.5% 增加至 16.3%,且随着单位膜面积进料量的持续增加,氧体积分数的增加速度逐渐趋缓。对于中空纤维膜来说,产品气氧体积分数与制氮效率存在矛盾,高纯度意味着较低的制氮效率,而较高的制氮效率又对应着较低的富氮气体纯度。

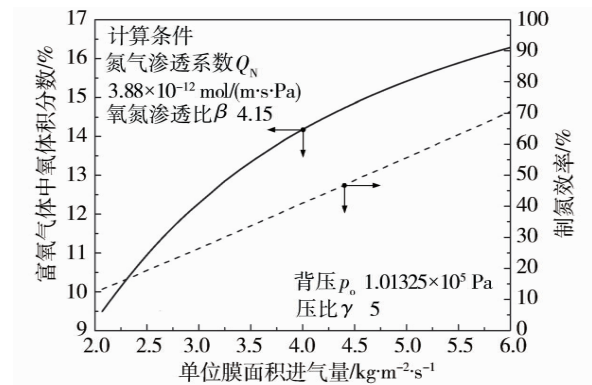


图 3 单位膜面积进料量与产品气氧体积分数及制氮效率关系

Fig. 3 Relationship among specific feed flux of membrane area, volume fraction of oxygen in production gas and production efficiency of nitrogen

因此,在中空纤维膜设计时应兼顾氧体积分数与制氮效率两方面的制约因素,选择适当的单位膜面积进料量,使产品气氧体积分数满足设计需求,而又具有较高制氮效率。通常,这一矛盾通过双流模式来解决,对于给定的飞行包线通过调整流量使富氮气体发生器工作在不同的流量下,优化其分离性能^[17],例如在爬升洗涤过程中需要较高的富氮气体纯度则使系统工作在低流量高纯度模式;而在俯冲增压过程中需要较高的富氮气体流量,而所需的富氮气体纯度只需满足维持燃

油箱气相空间氧体积分数的需求即可,则使系统工作在高流量低纯度模式,以满足不同阶段燃油箱惰化的需求。

3.2 压比对中空纤维膜分离性能影响

通过设置不同的压比得到产品气氧体积分数与制氮效率随压比的变化规律如图 4。从图中可以看出,随着压比的增加,制氮效率和富氮气体中氧体积分数均下降,其原因是由于膜两侧的压差增加,氧氮的渗透推动力增加,而氧的渗透系数比氮的渗透系数高,因而压差对于氧的渗透量的变化比氮气的渗透量的变化大,因而会引起渗透侧氧气的量的相对减少,氧体积分数下降,渗透侧的总的流量即富氮气体的产量也随着氧氮的渗透量的增加而减少。这与空客 A320 的实际飞行测试数据相吻合^[13]。

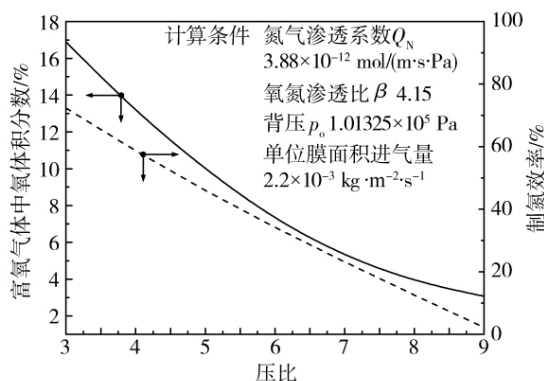


图 4 压比与产品气氧体积分数及制氮效率关系

Fig. 4 Relationship among volume fraction of oxygen in production gas, production efficiency of nitrogen and pressure ratio

膜丝内侧的压力对应于发动机的引气压力,而膜丝外侧压力则是飞行高度变化所带来的环境背压。对于大多数机载膜分离装置而言,进气压力的变化值远大于飞行所带来的环境背压变化,因此飞行高度对分离效果的影响较少,这与文献^[13]中的实验数据吻合。

3.3 氧氮渗透比对中空纤维膜分离性能影响

图 5 给出了不同渗透比下富氮气体氧体积分数和制氮效率的变化。从图中可以看出,渗透比较小时,随着渗透比的增加,富氮气体中氧体积分数降低得较快,而当渗透比大于 10 以后,氧体积分数的下降趋势变缓。而渗透比对于制氮效率的影响较小,仅从小于 50% 降低到大约 40%。因此,提高渗透比是提高产品气纯度的较为有效的方法。

当然,由于渗透比主要是由膜材料及制膜工艺决定的,因此图 5 虽然给出了渗透比变化对膜性能的影响,但是无法简单地通过改变操作条件或者设计膜分离器结构达到该目的。

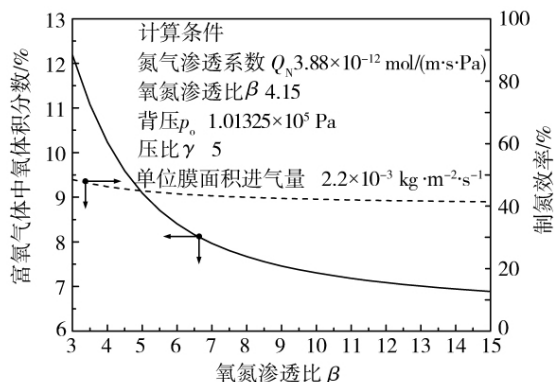


图 5 氧氮渗透比与产品气氧体积分数及制氮效率关系

Fig. 5 Relationship among ratio of permeability coefficient, volume fraction of oxygen in production gas and production efficiency of nitrogen

3.4 氧气渗透系数对中空纤维膜分离性能影响

在渗透比一定的情况下,图 6 给出了氧气的渗透系数与产品气氧体积分数与制氮效率的关系。从图中可以看出:随着氧气渗透系数的增加产品气氧体积分数和制氮效率都下降较为明显,而且对于制氮效率的影响更为显著。当氧气渗透系

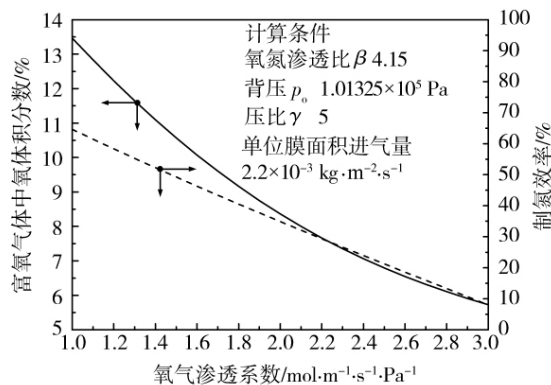


图 6 氧气渗透系数与产品气氧体积分数及制氮效率关系

Fig. 6 Relationship among volume fraction of oxygen in production gas, production efficiency of nitrogen and permeability coefficient of oxygen

数增加至 $2.2 \times 10^{-11} \text{ mol/m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$, 制氮效率仅有 30%。因此, 对于增加渗透系数来说, 对于提高产品气的纯度有利, 而对提高制氮效率不利。另外, 渗透系数较高的分离过程浓差极化现象较为严重, 因此, 对于较高渗透系数的分离过程来说, 应考虑浓差极化对氧体积分数的影响。

4 中空纤维膜理想度影响分析

假设膜丝外侧富氧气体中氧氮组分的体积分数分别为 y_O 和 y_N , 膜丝外侧富氮产品气中氧氮组分的体积分数分别为 x_O 、 x_N , 则该膜的氧氮分离系数为

$$\alpha = \frac{y_O/y_N}{x_O/x_N} = \frac{y_O \cdot x_N}{y_N \cdot x_O} \quad (16)$$

定义气体分离过程理想度 N_i 如下:

$$N_i = \alpha/\alpha_0 \quad (17)$$

式中 α_0 为理想分离系数^[18-19], 与膜的特性有关, α 为实际分离过程分离系数。

理想度 N_i 表示气体分离过程由于一些非理想因素, 例如膜分离过程中的浓度和温度极化、气体各组分在膜材料内的组分竞争、毛细冷凝现象等偏离理想分离状态的程度^[20], N_i 越接近 1, 表明分离过程越趋于完善。在实际分离过程中, 理想度 N_i 总小于 1^[21]。根据本文数学模型计算的理论值和文献[13]中的实验数据可以得到理想分离系数 α_0 和实际分离系数 α , 再代入式(11)可计算得到理想度 N_i 。

图 7 为理想度随压比的变化规律。从图中可以看出, 随着压比的增加, 中空纤维膜分离过程的理想度随之减小, 这是因为传质推动力的增加一方面提高单位时间氧气和氮气的渗透通量, 有利于分离过程的彻底进行; 而另一方面氧气在膜壁处堆积, 浓差极化现象随之严重, 对渗透作用产生不利影响, 阻碍了丝内氧气向丝外的渗透, 氧氮渗透竞争关系加剧, 分离效果变差。压比通过这两种作用对过程的非理想性产生的影响效果是相反的, 而浓差极化对分离过程的不利影响大于由于压比增加引起的通量的增加, 表现为理想度 N_i 减小, 越来越偏离理想分离过程。从图中可以看出, 当压比增加至 60 时, 理想度只有 20%, 因此, 在高压比的分离过程中, 浓差极化不容忽视。

此外从图 7 中还可看出, 当压比较小时, 温度对于分离过程理想度的影响较大, 且温度越高的分离过程理想度越高。这是因为温度升高时膜分子运动加快, 使气体渗透量有所增加, 改善了膜

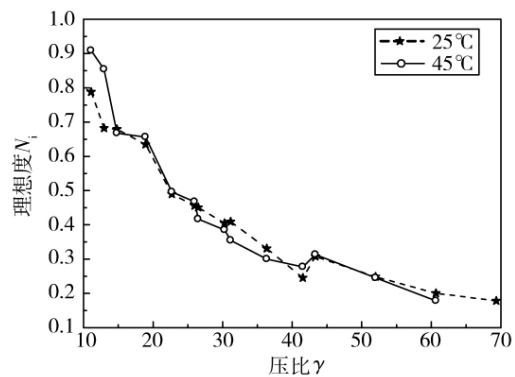


图 7 中空纤维膜理想度随温度的变化规律

Fig. 7 Variety regulation of separation ideal level related to temperature in hollow membrane

表面浓差极化产生的不利影响, 分离效果更好^[18,20]。而当压比增加到一定程度时, 温度增加所带来的对分离过程的有利影响已经不能抵消由于压比增加所带来的浓差极化的不利影响, 因此, 当分离过程操作压比较高时, 温度对于理想度的影响很小, 而压比产生的浓差极化对于理想度的影响占主导作用。图 7 的计算结果与文献中的趋势一致。

5 结 论

本文建立了机载制氮系统中中空纤维膜的数学模型并使用龙格-库塔法对其进行了数值求解, 并与实验结果进行了比较分析。结果显示:

- 1) 单位膜面积进料量的增加将会引起产品气氧体积分数的升高和制氮效率的增加, 选择适当的单位膜面积进料量对于富氮气体发生器的设计来说具有很重要的意义。
- 2) 压比的增加使产品气氧体积分数减小, 但其对制氮效率的影响也较大, 且会减小中空纤维膜的分离理想度。
- 3) 随着渗透比的增加, 产品气的氧体积分数减小, 而对制氮效率的影响较小, 因此提高渗透比是得到高纯度富氮气体的有效方式。
- 4) 氧气渗透系数的增加使产品气氧体积分数和制氮效率减小, 但本文未对高渗透系数分离过程的丝内压降影响进行分析, 因此, 对于中空纤维膜丝内压降的研究是下一阶段研究的重点。

本文尚未考虑温度和浓差极化现象对中空纤维膜分离过程的影响, 但是考虑到在富氮气体发生器工作前会进行暖机, 因此暖机之后可认为温度对中空纤维膜分离性能影响忽略不计。目前膜

材料渗透系数较低,因此分离过程中浓差极化的影响可忽略不计,但随着高渗透性膜材料的开发和超薄化制膜工艺的提高,及高通量高选择性的促进输送膜的不断完善,必须考虑浓差极化的作用^[22],这些工作将在未来的研究中继续深入考虑。

参考文献:

- [1] Yagle W J, Tolle F F. Performance tests of two inert gas generator concepts for airplane fuel tank inerting[R]. AIAA-83-1140, 1983.
- [2] Macdonald J A, Wyeth H W G. Fire and explosion protection of fuel tank ullage[R]. UK: Ministry of Aviation Supply, Engineering Physics Department, AFWAL-TR-85-2060, 1986.
- [3] 汪明明, 冯诗愚, 蒋军昌, 等. 飞机燃油箱冲洗与洗涤惰化技术比较分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(5): 615-619.
WANG Mingming, FENG Shiyu, JIANG Junchang, et al. Comparative analysis of fuel washing and scrubbing in aircraft fuel tank[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(5): 615-619. (in Chinese)
- [4] 冯诗愚, 鹿世华, 刘卫华, 等. 洗涤效率对分机燃油箱惰化过程的影响分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2458-2463.
FENG Shiyu, LU Shihua, LIU Weihua, et al. Analysis of inerting process influenced by scrubbing efficiency in aircraft fuel tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2458-2463. (in Chinese)
- [5] 高秀峰, 刘卫华, 熊斌, 等. 飞机燃油箱冲洗惰化过程的理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9): 16-20.
GAO Xiufeng, LIU Weihua, XIONG Bin, et al. Theoretical study of washing inerting process in aircraft fuel tank[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 25(11): 2458-2463. (in Chinese)
- [6] 刘小芳, 刘卫华, 钱国诚, 等. 燃油洗涤喷射器充氮性能实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 735-740.
LIU Xiaofang, LIU Weihua, QIAN Guocheng, et al. Experiment on nitrogen filling performance of fuel scrubbing ejector[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 735-740. (in Chinese)
- [7] 闫红敏, 江平, 高永庭. 军用飞机机载制氮系统研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2005, 22(5): 12-14.
YAN Hongmin, JIANG Ping, GAO Yongting. Study on the on-board inerting gas generator system of military aircraft[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2005, 22(5): 12-14. (in Chinese)
- [8] William M C. Developing a fuel tank inerting system[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-05/25, 2005.
- [9] 肖再华, 姜锐. 空气分离技术在飞机上的综合应用[J]. 国防科技, 2009, 30(5): 12-14.
- XIAO Zaihua, JIANG Rui. Application of air separation technology for aircraft[J]. National Defense Science & Technology, 2009, 30(5): 12-14. (in Chinese)
- [10] 陈慕容. 气体膜分离技术在高纯氮制取中的应用及其发展趋势[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2003, 8(1): 57-62.
CHEN Murong. The use of gas-membrane separation technology in producing high-purity nitrogen and its tendency [J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2003, 8(1): 57-62. (in Chinese)
- [11] 杜雄伟, 刘应书. 变压膜渗透空气分离制氧实验研究[J]. 低温与特气, 2006, 24(4): 21-25.
Du Xiongwei, LIU Yingshu. Experimental study on separation of oxygen from air by pressure swing membrane permeation[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2006, 24(4): 21-25. (in Chinese)
- [12] 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, 1993, 13(2): 22-28.
HE Gaohong, ZOU Yue, XU Renxian. A study on temperature drop in hollow-fiber membrane for gas separation [J]. Membrane Science and Technology, 1993, 13(2): 22-28. (in Chinese)
- [13] 薛勇, 刘卫华, 高秀峰, 等. 机载制氮系统中中空纤维膜分离性能实验研究[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 on-board inerting generating system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 107-111. (in Chinese)
- [14] 刘小芳, 刘卫华, 钱国诚, 等. 机载制氮系统中中空纤维膜分离性能实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 250-255.
LIU Xiaofang, LIU Weihua, QIAN Guocheng, et al. Separation characteristics in on-board membrane air separation module[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(2): 250-255. (in Chinese)
- [15] 张元秀, 李贝贝, 蔡培, 等. 气体膜分离数学模型建立及软件开发[J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(2): 137-140.
ZHANG Yuanxiu, LI Beibei, CAI Pei, et al. Model building and software development for gas membrane separation [J]. Computers and Applied Chemistry, 2008, 25(2): 137-140. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] Burns M, Cavage W M, Hill R, et al. Flight-testing of the FAA onboard inert gas generation system on an airbus A320[R]. Washington, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-03/58, 2004.
- [18] 陈华, 曹春, 蒋国梁. 边界层传质速率对气体膜分离器分离性能的影响[J]. 化工学报, 1996, 47(4): 387-393.
CHEN Hua, CAO Chun, JIANG Guoliang. Effects of boundary layer mass transfer resistance on the separation performance of membrane permeators [J]. Journal of

- Chemical Industry and Engineering, 1996, 47(4): 387-393. (in Chinese)
- [19] 陈华, 曹春, 徐连禄, 等. 中空纤维气体膜分离器丝外流速分布及其对分离性能的影响[J]. 化工学报, 1997, 48(5): 608-613.
- CHEN Hua, CAO Chun, XU Lianlu, et al. Effects of shell-side flow distribution on the separation performance of hollow fiber gas permeator[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1997, 48(5): 608-613. (in Chinese)
- [20] 刘成才, 高青, 马纯强, 等. 发动机可变组分进气系统膜气体分离特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(3): 625-629.
- LIU Chengcai, GAO Qing, MA Chunqiang, et al. Membrane gas separation behavior of engine intake system with variable gas composition[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(3): 625-629. (in Chinese)
- [21] 魏丕芳, 贺高红. 空气分离膜过程中非理想现象的研究[J]. 石油化工设计, 2003, 20(3): 54-58.
- WEI Peifang, HE Gao hong. Study of air membrane separation process[J]. Petrochemical Design, 2003, 20(3): 54-58. (in Chinese)
- [22] 冯献社, 蒋国良, 朱葆琳. 气体膜分离过程中浓差极化的影响[J]. 膜科学与技术, 1989, 9(2): 23-28.
- FENG Xianshe, JIANG Guoliang, ZHU Baolin. Effects of concentration polarization in membrane gas separation processes[J]. Membrane Science and Technology, 1989, 9(2): 23-28. (in Chinese)