

中空纤维膜机载制氮装置的 数学建模分析

蔡 琰¹, 林贵平¹, 曾 宇¹, 彭 珑¹, 申晓斌¹, 孙 兵^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团有限公司 中航资产管理有限公司, 北京 100712)

摘 要: 建立了考虑浓差极化现象的微分方程数学模型,并用正交配置法求解,对中空纤维膜机载制氮装置(OBIGGS)进行了分析,并对部分状态点的计算结果进行了实验验证.结果表明:富氮气体(NEA)中氧气的质量分数随着进气温度的升高而降低,在达到最小值后又呈上升趋势;在进气与排气压力差保持不变的情况下,随着中空纤维膜排气压力的下降,中空纤维膜的富氮气体质量流量逐渐增加;随着中空纤维膜丝长度的增加,丝内气体的压降和富氮气体质量流量均有所增加;中空纤维膜空气分离制得的富氮气体质量流量越大,则所需进气的质量流量越大,且富氮气体氧气质量分数越高.

关 键 词: 中空纤维膜; 微分方程数学模型; 进气温度; 进气与排气压力; 中空纤维膜丝长度

中图分类号: V228.1

文献标志码: A

Mathematical modeling analysis of hollow fiber membrane onboard inert gas generation system

CAI Yan¹, LIN Gui-ping¹, ZENG Yu¹, PENG Long¹,
SHEN Xiao-bin¹, SUN Bing^{1,2}

(1. School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. China Aviation Asset Management Corporation Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100712, China)

Abstract: Differential equations mathematical model was built up, and solved by orthogonal collocation method to study the onboard inert gas generation system (OBIGGS), some of the results were verified by experiments. Results show that, the nitrogen-enriched air (NEA) oxygen mass fraction decreases with increasing of feed air temperature, then increases when the NEA oxygen mass fraction to a minimum value; in condition of differential pressure between the feed air and exhaust gas is constant, the NEA mass flow rate of hollow fiber membrane increases gradually with decreasing of exhaust gas pressure; pressure drop of retentate gas and the NEA mass flow rate both increase with increasing of hollow fiber membrane length, mass flow rate of feed air and the NEA oxygen mass fraction are influenced by the NEA mass flow rate obtained from hollow fiber membrane air separation, when the NEA mass flow rate is larger, the mass flow rate of feed air and the NEA oxygen mass fraction of the both increase.

Key words: hollow fiber membrane; differential equations mathematical model;

feed air temperature; feed air and exhaust gas pressure;
hollow fiber membrane length

符号表

$q_{V,in}$	丝内气体标况体积流量, m^3/s	$p_{f,0}$	进气压力, Pa
$q_{V,out}$	丝外气体标况体积流量, m^3/s	$p_{f,1}$	富氮气体压力, Pa
$q_{V,f}$	进气标况体积流量, m^3/s	p_p	排气压力, Pa
$\varphi_{O_2,in}$	丝内气体氧气体积分数, %	R	理想气体常数, $J/mol \cdot K$
$\varphi_{O_2,out}$	丝外气体氧气体积分数, %	t	进气温度, $^{\circ}C$
$\varphi_{O_2,s}$	浓差极化边界层氧气体积分数, %	k	平均传质系数
α	中空纤维膜气体分离系数	μ	空气动力黏度, $Pa \cdot s$
J_1	氧气渗透速率, $m^3/m^2 \cdot Pa \cdot s$	N	中空纤维膜丝束数
J_2	氮气渗透速率, $m^3/m^2 \cdot Pa \cdot s$	d_{in}	中空纤维膜丝内径, m
$\varphi_{O_2,f}$	进气的氧气体积分数, %	d_{out}	中空纤维膜丝外径, m
φ_{O_2}	中空纤维膜富氮气体的氧气体积分数, %	p_f	丝内气体压力, Pa

飞机燃油箱内的燃油蒸汽和空气的混合物在飞机飞行过程中极易由于设备故障或外部攻击等原因而发生燃烧或爆炸^[1-3]。飞机燃油箱的防火抑爆技术主要有油箱内填充聚氨酯抑爆泡沫、液氮保护系统、Halon 1301 惰性化系统以及机载制氮系统等^[4]。抑爆泡沫存在增重大、载油量减少、有静电积聚危险和易于过早老化等问题^[5]；液氮系统后勤保障比较困难^[6]；Halon 1301 系统会对地球臭氧层造成破坏,因而被禁止使用^[7]。

机载制氮系统可以在飞机飞行的过程中从发动机引气制得富氮气体来进行飞机燃油箱的惰性化。空气分离一般可采用分子筛变压吸附或膜分离两种方法。在分离性能要求一定的情况下,膜分离系统所需引气量是分子筛的一半,且设备质量和体积比分子筛小,系统内无运动部件,寿命长,可靠性高。因此目前机载制氮系统主要采用膜分离法。

气体分离膜按结构形式可分为板框式、卷式、管式和中空纤维式等。其中,中空纤维膜可以增加气体与膜接触的比表面积,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这种结构形式的气体分离膜^[8]。

中空纤维膜的气体分离过程根据气流进气的途径可分为进气走中空纤维膜丝内(文中简称丝内)或中空纤维膜丝外(文中简称丝外)两种;按照气体分离器内部的气流流型又可分为并流型、错流型和逆流型等^[9]。为了从机理上更好得了解中空纤维膜的气体分离过程,并且预测中空纤维膜在不同工况下的气体分离性能,有必要对其进行数学建模分析。国外对中空纤维膜的数学建模研

究始于 1950 年, Weller 等针对错流二元气体分离过程建立了数学模型^[10]。1974 年, Pan 对高质量流量的非对称中空纤维膜进行了数值研究^[11], 采用微分法对对气体分离器进气走丝外的并流模型进行了数学建模分析, 研究对象主要是制氮工厂吹扫气体中的氢气回收过程。近年来, Marriott 等通过质量、动量和能量平衡定律提出了适用范围较广的分离膜组件的数学模型, 对该数学模型进行了比较详细的分析, 并提出了膜分离系统的优化设计方案^[12-14]。Feng 等对集成非对称中空纤维膜的空气分离过程进行了实验和计算研究, 针对进气走中空纤维膜丝内或丝外的情况分别进行了组件内气体流型为并流型和逆流型的研究, 得到的结论为, 进气走丝内且组件内气体流型为逆流型的情况下, 中空纤维膜空气分离性能最好^[15-16]。国内的学者中国科学院大连化学物理研究所的贺高红等以及郑辉东等提出了进气走丝外、气流为逆流流型的微分方程数学模型, 并与实验得到的数据进行了对比, 计算中未考虑浓差极化的影响^[17-18]。张元秀等使用 LabVIEW 软件建立模型模拟了进气走丝外、并流型的中空纤维膜空气分离过程^[19]。南京航空航天大学的薛勇等通过实验手段研究了中空纤维膜机载制氮装置在不同进气参数和环境条件下的空气分离性能^[20]。卢吉对机载空气分离装置中空纤维膜在定质量流量、变质量分数的条件下, 油箱气体空间氧气质量分数的变化规律建立了数学模型, 并对地面预洗涤过程进行了模拟分析^[21]。刘小芳等对某型号机载制氮装置的输入空气压力、输出富氮气体温度、海拔高度和温度等因素进行了理论和实验

分析^[22].

本文在之前研究成果的基础上,针对某型中空纤维膜机载制氮装置进行了管内流动分析,确定了与该机载制氮装置相符的流动模型,对该模型进行了数学分析并建立求解微分方程组.由于该流动模型对应的微分方程组无法求得解析解,并且边界条件属于比较难于直接求解的边值问题,因此采用正交配置法并配合求解非线性代数方程的迭代法对微分方程组进行求解.本文在建立数学模型的时候考虑了浓差极化对空气分离过程的影响,根据计算结果讨论了进气温度、排气压力、中空纤维膜丝长度(文中简称丝长)以及中空纤维膜富氮气体氧气质量分数对其空气分离过程的影响,并针对部分计算结果进行了实验验证.

1 数学模型

空气分离器内部流型根据进气入口、渗透气出口和渗余气出口的相对位置分为错流型、并流型和逆流型.这3种流型的示意图如图1所示.在错流型中,由于认为气体在渗透过程完成后才与渗透侧主体流动气体进行充分混合,在此之前渗透气是自由流流型,故渗透过程不受渗透侧气体流动方向影响.并流型膜两侧流体的流动方向相同,富氮气体和排气出口位于同侧,逆流型膜两侧

流体的流动方向相反,进气入口和排气出口位于同侧.

本文建立数学模型的时候采用图2所示中空纤维膜机载制氮装置相同的流型.由于压缩空气入口(进气入口)和富氧气体出口(排气出口)位于同侧,且进气入口和富氮气体出口位于丝长方向,排气出口位于中空纤维膜丝侧壁方向,判断此装置的内部流型为进气走丝内的逆流型.

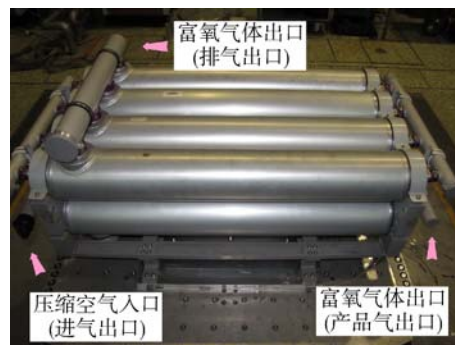


图2 中空纤维膜机载制氮装置外观

Fig. 2 Appearance of hollow fiber membrane OBIGGS

针对中空纤维膜机载制氮装置的物性参数,在计算中作如下假设:

- 1) 丝外的气体压降相比于丝内的气体压降可忽略不计;
- 2) 中空纤维膜丝内径极小,忽略丝内气体径向质量分数梯度;
- 3) 不考虑丝内外气体的纵向扩散.

逆流型的制氮装置内部的渗透及流动过程示意图如图1(c)所示.根据微元 dz 内的质量平衡方程和渗透方程建立微分方程组.

在微元段 dz 上不产生质量积累,流入微元段和流出微元段的气体质量相等,可以得到质量平衡方程

$$q_{V,in} + dq_{V,in} + q_{V,out} = q_{V,out} + dq_{V,out} + q_{V,in} \quad (1)$$

同样,流入微元段和流出微元段的氧气质量相等,氮气质量相等,由此可以得到质量平衡方程

$$(q_{V,in} + dq_{V,in})(\varphi_{O_2,in} + d\varphi_{O_2,in}) + q_{V,out}\varphi_{O_2,out} = (q_{V,out} + dq_{V,out})(\varphi_{O_2,out} + d\varphi_{O_2,out}) + q_{V,in}\varphi_{O_2,in} \quad (2)$$

$$(q_{V,in} + dq_{V,in})(1 - \varphi_{O_2,in} - d\varphi_{O_2,in}) + q_{V,out}(1 - \varphi_{O_2,out}) = (q_{V,out} + dq_{V,out}) \cdot$$

$$(1 - \varphi_{O_2,out} - d\varphi_{O_2,out}) + q_{V,in}(1 - \varphi_{O_2,in}) \quad (3)$$

浓差极化现象是指渗透系数大的气体通过膜

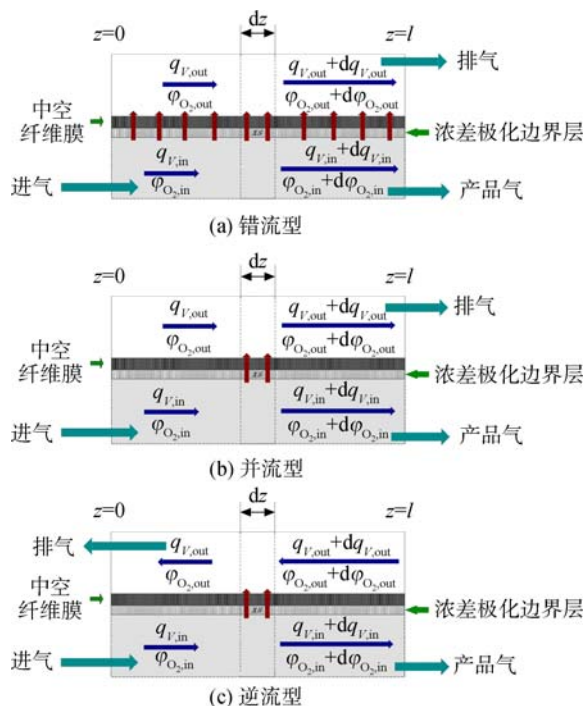


图1 中空纤维膜内部流型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of internal current models of hollow fiber membrane

之后,渗透系数小的气体在膜表面不断积累,使渗透系数大的气体渗透通量减小,渗透系数小的气体渗透通量增大,分离效果恶化.由于目前选择性好、渗透系数大的膜材料已经广泛应用,因而,气体膜分离过程中的浓差极化现象应该在数值计算的过程中予以考虑.

由图 1(c)中可以看出,由于氧气在中空纤维膜中的渗透系数较大,导致中空纤维膜丝内氮气富集,在丝内表面形成了浓差极化边界层.由于

$\varphi_{O_2,s}$ 低于 $\varphi_{O_2,in}$, 氧气透过膜的动力减弱,中空纤维膜空气分离效果变差.

由于在浓差极化边界层的微元段 dz 上不产生质量积累,可以得到质量平衡方程

$$d(q_{V,in} \varphi_{O_2,in}) = k(\varphi_{O_2,in} - \varphi_{O_2,s}) + \varphi_{O_2,in} dq_{V,in} \quad (4)$$

中空纤维膜上氧气和氮气的渗透方程为式(5)和式(6)

$$\frac{J_1(p_f \varphi_{O_2,s} - p_p \varphi_{O_2,out})Adz}{l} = -(q_{V,in} + dq_{V,in})(\varphi_{O_2,in} + d\varphi_{O_2,in}) + q_{V,in} \varphi_{O_2,in} \quad (5)$$

$$\frac{J_2[p_f(1 - \varphi_{O_2,s}) - p_p(1 - \varphi_{O_2,out})]Adz}{l} = -(q_{V,in} + dq_{V,in})(1 - \varphi_{O_2,in} - d\varphi_{O_2,in}) + q_{V,in}(1 - \varphi_{O_2,in}) \quad (6)$$

联立式(4)~式(6)解得 $\varphi_{O_2,s}$

$$\varphi_{O_2,s} = \frac{J_1 p_f \varphi_{O_2,out}(1 - \varphi_{O_2,in}) - J_2 p_p \varphi_{O_2,in}(1 - \varphi_{O_2,out}) + (k + J_2 p_p) \varphi_{O_2,in}}{k + J_2 p_p \varphi_{O_2,in} + J_1 p_p(1 - \varphi_{O_2,in})} \quad (7)$$

中空纤维膜丝内的气体压力会沿着丝长方向降低.中空纤维膜丝内的压降规律服从 Hagen-Poiseuille 方程^[23]

$$\frac{dp_f}{dz} = -\frac{128RT\mu q_{V,in}}{N\pi d_i^4 p_f} \quad (8)$$

联立式(1)、式(2)、式(5)、式(6)、式(8),并将式(7)代入得到微分方程组.

微分方程组的边界条件为

$z = 0$ 时

$$\varphi_{O_2,in} = \varphi_{O_2,f} \quad \frac{dy}{dz} = 0 \quad \frac{dq_{V,out}}{dz} = 0$$

$$q_{V,in} = q_{V,f} \quad p_f = p_{f,0}$$

$z = l$ 时

$$\frac{d\varphi_{O_2,in}}{dz} = 0 \quad q_{V,out} = 0 \quad \frac{dq_{V,in}}{dz} = 0 \quad \frac{dp_f}{dz} = 0$$

由中空纤维膜丝末端处氧气的渗透和质量平衡方程得到 $z=l$ 时 $\varphi_{O_2,out}$ 的边界条件

$$\varphi_{O_2,out} = \frac{\frac{p_{f,1}}{p_p} + (\alpha - 1) \left[\frac{p_{f,1}}{p_p} \varphi_{O_2} + 1 \right] - \left\{ \left[\frac{p_{f,1}}{p_p} + (\alpha - 1) \left[\frac{p_{f,1}}{p_p} \varphi_{O_2} + 1 \right] \right]^2 - 4\alpha(\alpha - 1) \frac{p_{f,1}}{p_p} \varphi_{O_2} \right\}^{\frac{1}{2}}}{2(\alpha - 1)} \quad (9)$$

由于中空纤维膜中的氧气和氮气的渗透速率随温度的变化符合 Arrhenius 关系^[24],因此氧气、氮气在中空纤维膜中的渗透速率可以表示为

$$J_1 = 1.81 \times 10^{-7} \times e^{\frac{19.3}{RT}} \quad (10)$$

$$J_2 = 8.76 \times 10^{-7} \times e^{\frac{27.6}{RT}} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{J_1}{J_2} = 0.2065 \times e^{\frac{8.3 \times 10^3}{RT}} \quad (12)$$

本模型是具有边值条件的 1 阶常微分方程组,无法得到解析解.

对微分方程组进行数值计算采用的方法是正交配置法.正交配置法是加权余项法的一种,可用来解决微分方程组的初值和边值问题.其主要思

想通过正交配置矩阵将微分方程组转化为非线性代数方程组后用迭代法求解.

正交配置矩阵的构造采用加权余项法进行计算,权函数 $\omega(x) = 1$ ^[25].

本文针对数学建模的部分计算结果进行了实验验证,实验系统示意图如图 3 所示.

进气温度由加热器和制冷系统调节,进气压力由进气路的压力调节阀调节,通过将中空纤维膜机载制氮装置置于真空舱内获得所需的排气压力.真空舱以及舱内的中空纤维膜机载制氮装置如图 4 所示.

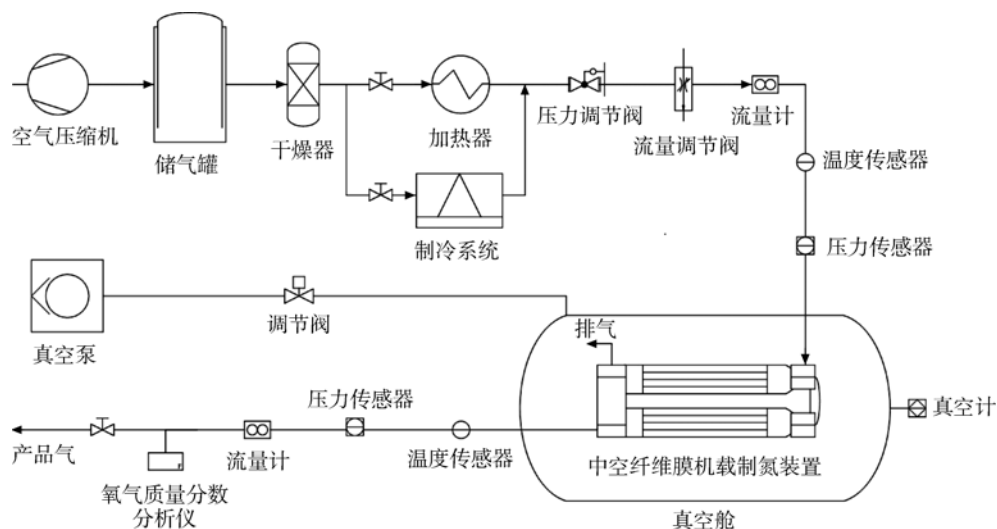


图3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system



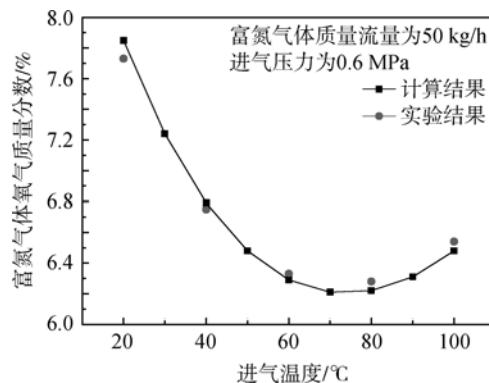
图4 真空舱及舱内中空纤维膜机载制氮装置

Fig. 4 Vacuum chamber and hollow fiber membrane
OBIGGS inside of chamber

2 计算结果及分析

在富氮气体质量流量为 50 kg/h、进气压力为 0.6 MPa 的工况下，富氮气体氧气质量分数随进气温度变化的计算结果如图 5 所示，图中还给出了对应的实验数据。

从图 5 中的计算结果可以看到，随着进气温度从 20℃ 上升且在到达 70℃ 之前，富氮气体氧气质量分数是逐渐降低的；从 70℃ 到 100℃，富氮气体氧气质量分数又随着进气温度的升高而增加。由此可以得出：较低或过高的进气温度都会对中空纤维膜制取富氮气体的纯度产生不利的影响。这与实验得到的数据是吻合的。从图中可以看到，根据计算结果，在该工况下大约 70℃ 的进气温度是中空纤维膜制取富氮气体氧气质量分数最低的条件；而从图中所示的实验结果可以看出，计算结果与实验结果吻合的很好。

图5 富氮气体氧气质量分数随进气温度变化的计算及
实验结果Fig. 5 Computational and experimental results of oxygen
mass fraction of NEA with feed air temperature

根据气体渗透方程，进气中的氧气和氮气在中空纤维膜中的渗透系数是随着进气温度的升高而增加的，且氮气随进气温度升高增加的速率大于氧气。在这种情况下，随着温度的上升，氧气和氮气通过中空纤维膜的渗透质量流量均会增大，但是氧气和氮气在渗透气中的比例则会减小，也就意味着富氧废气氧气质量分数会降低。但是如上所述，随着进气温度的升高，进气质量流量会增大，在富氮气体质量流量不变的情况下，富氧废气质量流量也会增加，而且氧气在富氧废气中占有相当大的比例，因此虽然氧气在富氧废气中的比例有所下降，但是由于富氧废气质量流量的增加还是带走了大量的氧气，使得氧气在富氮气体中的质量分数降低。而进气温度继续升高，氮气与氧气渗透系数的增幅差别越来越大，透过中空纤维膜的氮气也越来越多，因此富氮气体氧气质量

分数下降的速率逐渐变慢.可以预见到,如果再进一步提高进气温度,在某一温度点,富氮气体氧气质量分数会升高.

在富氮气体氧气质量分数为2%的情况下,保持进气温度不变的情况下,富氮气体质量流量随排气压力变化的计算结果与实验结果如图6所示.

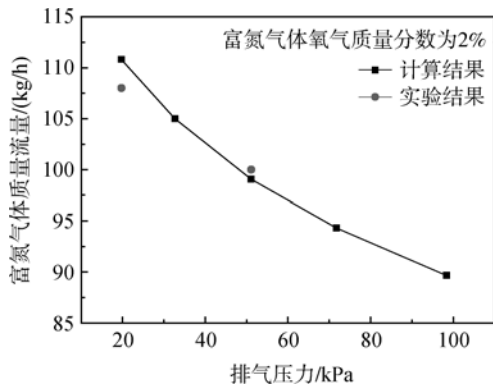
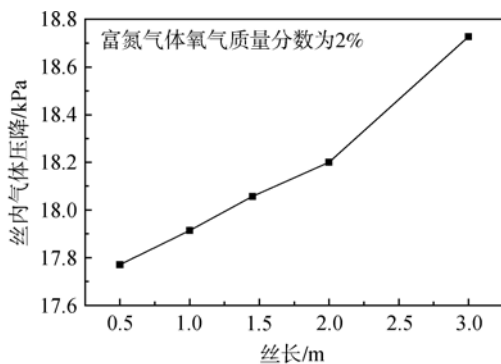


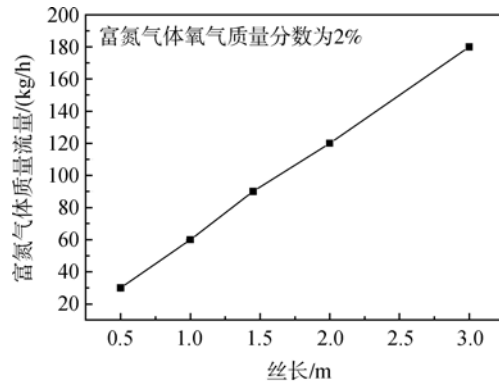
图6 富氮气体质量流量随排气压力的计算及实验结果
Fig. 6 Computational and experimental results of mass flow rate of NEA with exhaust gas pressure

在本文的计算过程中,设定在不同排气压力条件下,中空纤维膜的进气压力始终比相应的排气压力大0.3 MPa.计算得到,随着排气压力的降低,中空纤维膜的富氮气体质量流量呈线性增加.经过分析可以知道,随着排气压力的降低,丝内压力/丝外压力的比值逐渐增大,中空纤维膜丝内向丝外的传质动力逐渐加大,因此在出口氧气质量分数保持不变的情况下,富氮气体质量流量就会有所增大.

同样将富氮气体氧气质量分数保持为2%,保持进气压力、进气温度和排气压力不变,在不同中空纤维膜丝长情况下丝内气体压降和富氮气体质量流量的计算结果如图7所示.



(a) 丝长对丝内气体压降的影响



(b) 丝长对富氮气体质量流量的影响

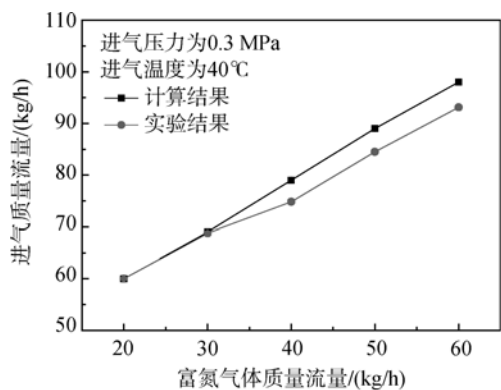
图7 丝长对丝内气体压降和富氮气体质量流量的影响
Fig. 7 Effect on pressure drop of retentate gas and mass flow rate of NEA of hollow fiber membrane length

从图7(a)中可以看出,丝内气体的压降随着丝长的增加而增加;然而在富氮气体氧气质量分数保持不变的情况下,随着丝长的增加,富氮气体的质量流量也相应增加,如图7(b)所示.因此,在设计中空纤维膜机载制氮装置的过程中,需要综合衡量丝内气体压降和富氮气体质量流量两个因素,并根据设计要求选取合适的丝长.

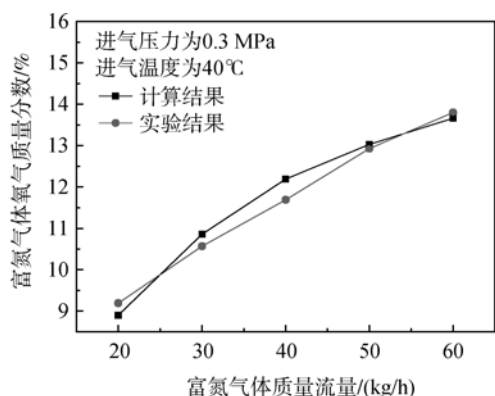
在进气温度为40℃、进气压力为0.3 MPa的情况下,进气质量流量随富氮气体质量流量变化的计算结果和实验结果如图8(a)所示.由图中可以看出,随着富氮气体质量流量的增加,所需的进气质量流量也逐渐增加.

在相同工况下,富氮气体氧气质量分数随富氮气体质量流量变化的计算结果和实验结果如图8(b)所示.由图中可以看出,随着富氮气体质量流量的增加,富氮气体氧气质量分数也逐渐升高.前文得到,随着富氮气体质量流量的增加,进气质量流量会增加,也就意味着氧气的总含量会升高.但同时从图8(b)中可以看到,进气质量流量增加的值较富氮气体质量流量增加的值小,也就是说随着富氮气体质量流量的增加,富氧废气质量流量会减小,虽然富氧废气氧气质量分数增大了,但由于进气中氧气含量的增加,富氮气体氧气质量分数也会增加.因此,当飞机油箱惰化所需要的富氮气体质量流量较大时,富氮气体中氧气含量会升高.这时,可以通过提高进气温度或进气压力来降低富氮气体氧气质量分数,但是还要考虑进气质量流量不要过大,以免给发动机造成过大负担.

另外,从图5、图6、图8所示的本文的计算结



(a) 进气质量流量随富氮气体质量流量的变化情况



(b) 富氮气体氧气质量分数随富氮气体质量流量变化情况

图8 进气质量流量和富氮气体氧气质量分数随富氮气体质量流量变化的计算结果及实验结果

Fig. 8 Computational and experimental results of variation of feed air mass flow rate and oxygen mass fraction of NEA with mass flow rate of NEA

果与实验结果对比,计算结果和实验结果相对误差最大为6.0%,平均相对误差为2.7%,认为计算结果比较可靠。

3 结 论

本文对中空纤维膜机载制氮装置进行了数学建模分析,并将部分计算结果和同工况下的实验结果进行了对比验证,数值计算结果和实验结果相对误差小于6%,可以认为计算结果可靠。在富氮气体氧气质量分数为2%的情况下,通过对计算结果的分析,得到了如下结论:

1) 低温工作对中空纤维膜空气分离性能会产生不利影响。在进气和排气压力保持不变的情况下,中空纤维膜温度和进气温度达到一致时,中空纤维膜的富氮气体氧气质量分数随着进气温度的升高而降低,在70℃时达到最小值,然后又随温度升高逐渐增加。

2) 在进气温度保持不变,中空纤维膜的进气压力始终比排气压力大0.3 MPa的情况下,随着排气压力的降低,中空纤维膜的富氮气体质量流量线性增加。

3) 在进气温度、进气和排气压力保持不变的情况下,随着中空纤维膜丝长的增加,丝内气体的压降和富氮气体质量流量均有所上升。

4) 在进气压力、排气压力、进气温度均保持不变,调节富氮气体质量流量时,中空纤维膜的进气质量流量和富氮气体氧气质量分数均随着出口氧气质量分数的增加而增加。

参考文献:

- [1] Vannice W L, Grenich A F. Fighter aircraft OBIGGS study [R]. Air Force Wright Aeronautical Laboratories, AFWAL-TR-87-2024, 1987.
- [2] National Transportation Safety Board. Aircraft accident report: in-flight breakup over the Atlantic ocean, trans world airlines flight 800 Boeing 747-131, N93119, near east Moriches, New York, July 17, 1996 [R]. National Transportation Safety Board, NTSB/AAR-00/03, 2000.
- [3] Cavage W M. Measuring oxygen concentration in a fuel tank ullage [R]. AIAA-2009-1743, 2009.
- [4] 王震. 飞机燃油箱防爆及抑爆材料应用技术 [J]. 航空科学技术, 2002(3): 33-35.
WANG Zhen. Explosion suppression for aircraft fuel tanks and application technology of suppression material [J]. Aeronautical Science and Technology, 2002(3): 33-35. (in Chinese)
- [5] Grenich A F, Tolle F F. Electrostatic safety with explosion suppressant foams [R]. Air Force Wright Aeronautical Laboratories, AFWAL-TR-83-2015, 1983.
- [6] 胡传东. 机载惰性气体产生系统 [J]. 直升机技术, 2002, 130(2): 47-50.
HU Chuandong. Onboard inerting gas generation system [J]. Helicopter Technique, 2002, 130(2): 47-50. (in Chinese)
- [7] 肖再华. 飞机燃油箱惰化 [J]. 航空科学技术, 2005(1): 31-32.
XIAO Zaihua. Inerting aircraft fuel tanks [J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(1): 31-32. (in Chinese)
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] Feng X, Ivory J. Development of hollow fiber membrane systems for nitrogen generation from combustion exhaust gas: Part I effects of module configurations [J]. Journal of

- Membrane Science, 2000, 176(2): 197-207.
- [10] Weller S, Steiner W A. Engineering aspects of separation of gases[J]. Chemical Engineering Progress, 1950(46): 585-590.
- [11] Pan C Y. Gas separation by high-flux, asymmetric hollow-fiber membrane[J]. AIChE Journal, 1986, 32(12): 2020-2027.
- [12] Marriott J, Sorenson E. A general approach to modeling membrane modules[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(22): 4975-4990.
- [13] Marriott J, Sorenson E, Bogle I D L. Detailed mathematical modeling of membrane modules[J]. Computers and Chemical Engineering, 2001, 25(4/5/6): 693-700.
- [14] Marriott J, Sorenson E. The optimal design of membrane systems[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(22): 4991-5004.
- [15] Feng X, Ivory J, Rajan V. Air separation by integrally asymmetric hollow fiber membranes[J]. AIChE Journal, 1999, 45(10): 2142-2152.
- [16] Ivory J, Feng X, Kovacik G. Development of hollow fiber membrane systems for nitrogen generation from combustion exhaust gas: Part 2 full-scale module test and membrane stability[J]. Journal of Membrane Science, 2002, 202(1/2): 195-204.
- [17] 贺高红, 徐仁贤, 朱葆琳. 中空纤维膜气体分离器的数学模型[J]. 化工学报, 1994, 45(2): 162-167.
- HE Gaohong, XU Renxian, ZHU Baolin. Mathematical model for hollow fiber membrane gas separation[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1994, 45(2): 162-167. (in Chinese)
- [18] 郑辉东, 赵素英, 王良恩. 用正交配置法求解中空纤维气体膜分离过程的数学模型[J]. 计算机与应用化学, 2005, 22(1): 69-72.
- ZHENG Huidong, ZHAO Suying, WANG Liangen. Solving mathematical model of gas separation in hollow fiber membrane by orthogonal collocation[J]. Computers and Applied Chemistry, 2005, 22(1): 69-72. (in Chinese)
- [19] 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. Modeling building and software development for gas membrane separation[J]. Computers and Applied Chemistry, 2008, 25(2): 137-140. (in Chinese)
- [20] 薛勇, 刘卫华, 高秀峰, 等. 机载惰化系统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 generation system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 107-111. (in Chinese)
- [21] 卢吉. 机载空分装置及惰化系统的理论研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LU Ji. Theoretical study of onboard air separation unit and inerting system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [22] 刘小芳, 刘卫华, 钱国诚, 等. 机载空气分离装置分离特性[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 and Astronautics, 2010, 42(2): 250-255. (in Chinese)
- [23] Thorman J M, Rhim H, Hwang S. Gas separation by diffusion through silicone rubber capillaries[J]. Chemical Engineering Science, 1975, 30(7): 751-754.
- [24] 丁晓莉, 曹义鸣, 王丽娜, 等. 聚酰亚胺 6FDA-mPDA 及其非对称中空纤维膜的气体渗透性能[J]. 高等学校化学学报, 2009, 30(6): 1240-1244.
- DING Xiaoli, CAO Yiming, WANG Lina, et al. Gas permeation property of 6FDA-mPDA and its asymmetric hollow fiber membranes[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2009, 20(6): 1240-1244. (in Chinese)
- [25] Villadsen J V, Stewart W E. Solution of boundary-value problems by orthogonal collocation[J]. Chemical Engineering Science, 1967, 22(11): 1483-1501.

(编辑: 王碧琚)