

机载惰化系统中空纤维膜分离性能的实验研究

薛勇¹, 刘卫华¹, 高秀峰², 王赞社², 冯诗愚¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 210016, 南京; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用大气环境模拟舱和地面实验平台来模拟机载膜制氮装置的工作环境, 选择2种固定的出口质量流量, 通过模拟不同的飞行高度及调整进气压力和膜工作温度, 对机载膜制氮系统的分离性能进行了全面实验. 实验结果显示, 进气压力对分离性能的影响最大, 而飞行高度和膜工作温度对分离性能的影响较小, 此外, 不同的出口流量也对分离性能有一定的影响. 进气压力和温度增加均会使产品气的氧浓度降低, 分离效率下降, 且产品气的出口流量越大, 进气温度对两者的影响也越大. 当进气温度较高时, 飞行高度对分离效率的影响与产品气的出口流量有关: 当出口流量较小时, 飞行高度越高, 分离效率就越低, 而当出口流量较大时, 变化趋势则相反.

关键词: 机载制氮系统; 分离效率; 氧浓度; 中空纤维膜; 地面实验

中图分类号: V228; TQ021.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0107-05

Experimental Study on Separation Performance of Hollow Fiber Membrane for Onboard Inert Gas Generating System

XUE Yong¹, LIU Weihua¹, GAO Xiufeng², WANG Zanshe², FENG Shiyu¹

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

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An atmosphere environment simulation room and a ground-based experiment platform were adopted to simulate the working environment of onboard hollow fiber membrane separation device. Fixing the outlet mass flux, comprehensive experiments by simulating different heights and adjusting inlet gas pressure or working temperature of the membrane were conducted. The result shows that the inlet gas pressure strongly impacts separation performance, while the flight height and membrane working temperature have less influence, and different outlet flux also has some influence. Increasing the inlet gas pressure or the membrane working temperature reduces the oxygen concentration of the product and debase the separation efficiency, and both of the impacts caused by membrane temperature increase with the augment of the outlet flux. When the membrane temperature gets higher, the impact of flight height on separation efficiency is also influenced by the outlet flux; the separation efficiency rises with the flight height at lower outlet flux, but descends with the growth of flight height at higher outlet flux.

Keywords: onboard inert gas generating system; separation efficiency; oxygen concentration; hollow fiber membrane; ground-based experiment

用惰性气体通入飞机油箱的气层或液层从而降低油箱内的氧浓度, 是一种有效的飞机油箱防火防

爆方法, 称作机载油箱惰化技术^[1]. 惰化气体的选择及制备是机载油箱惰化技术中的关键环节. 过

收稿日期: 2010-07-02. 作者简介: 薛勇(1985-), 男, 博士生; 冯诗愚(联系人), 男, 博士, 副教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906066).

网络出版时间: 2010-12-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20101216.0007.000.html>

去曾使用哈龙 1301 或者利用钢瓶中存储的液氮作为惰化气^[2],但是哈龙 1301 对大气臭氧层有破坏作用,目前已被禁用,而液氮装置质量大,且钢瓶存在爆炸的隐患^[3].随着制膜技术的发展,机载膜分离制氮系统能够在飞行的情况下,经济地制取足够的氮气,以保证对飞机油箱进行实时有效的保护^[4-5].

分离膜按照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加膜接触的比表面积,且能承受较大的压力和压差^[6],有利于减小处理设备的体积和质量,故被机载制氮系统大量采用.但是,中空纤维膜的分离特性与气体的进气压力和温度、环境背压以及流量等参数直接相关^[7],虽然理论上可以用分离系数来描述中空纤维膜的分离性能,但是文献[8]的研究显示,气体分离膜的非理想现象极其严重,因此理论模拟与实际情况有很大差别,最为可靠的方式仍然是采用实验方法来研究机载制氮系统中中空纤维膜的分离特性.

有鉴于此,我们搭建了一个膜分离系统实验平台,并将膜分离装置放置在大气环境模拟舱中,以模拟中空纤维膜在不同条件下的分离特性.

1 中空纤维膜分离特性描述

一般常用分离系数来描述膜的分离性能.如图 1 所示,分离系数可表示为^[9]

$$\alpha = \frac{\varphi_{O_2, out} / \varphi_{N_2, out}}{\varphi_{O_2, in} / \varphi_{N_2, in}} \quad (1)$$

式中: φ 为某种气体的体积分数.

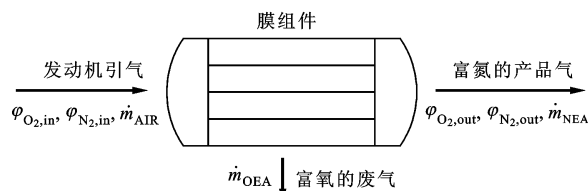


图1 膜分离示意图

由于机载制氮系统有其自身的特点,若忽略空气中的微量气体,入口气体的氧氮摩尔比是固定的,约为 21 : 79,因此产品气中的氧浓度(用氧的体积分数表示)与分离系数反映的信息是一致的.但是,仅有产品气的氧浓度不能完全获取膜的分离性能,因为在同样的产品气流量和氧浓度下,分离膜装置入口所需的气量可能是不同的,对于机载制氮系统而言,该入口气量就是发动机的引气量.故此,本文中定义膜的制氮效率如下

$$\eta = \frac{\dot{m}_{NEA}}{\dot{m}_{AIR}} = \frac{\dot{m}_{NEA}}{\dot{m}_{NEA} + \dot{m}_{OEA}} \quad (2)$$

式中: $\dot{m}$ 为质量流量.参数 η 反映发动机的引气量中可制取富氮气体的比例.反之,知道了惰化系统的富氮气体需求量,也可通过制氮效率反推出发动机的引气量.

2 实验系统介绍

2.1 膜组件参数及特点

本实验所采用的膜组件实验样件为 PPO 材料.原料空气输入到膜管的内侧,通过膜管内、外两侧压力差的作用,氧气等渗透速率较高的气体优先透过膜壁渗出并经收集后通入大气,而氮气等渗透速率较低的气体则在管内富集,形成富氮产品气并被收集输出.膜空气分离装置的基本结构参数如下:丝外径 0.55 mm;丝内径 0.45 mm;丝长 0.97 m;丝数量 2 400 根;壳体尺寸 40 mm×1 000 mm.

2.2 实验系统和实验方法

膜分离性能实验系统如图 2 所示,主要由大气环境模拟舱、机载制氮实验平台及相关的测量和调节仪器仪表组成.

大气环境模拟舱利用真空泵来调节压力,用加热器或冷却器来调节温度,以模拟高空低压低温的大气环境,使制氮装置工作在与实际情况类似的环境中.机载制氮实验平台由引气处理单元和膜组件单元构成.

输入膜组件的空气经压缩后存储在储气罐中,然后依次流过调压阀、孔板流量计、第一级冷却器、水分离器、过滤器、第二级冷却器、加热器等部件,调节阀 F1 和 F2 可控制供气流量,孔板流量计可测出供气流量.压缩空气经第一级冷却后,由水分离器分离出液态水滴,再经主路过滤器、油雾过滤器和微雾过滤器 3 级过滤后进入膜组件实验样件.

调节阀 F3、F4 用于调节输入空气温度,当需要加热时打开 F3,当需要冷却时打开 F4.调节阀 F5 与真空泵配合,可调节舱内压力(对应于飞行高度).调节阀 F8、F9 和 F10 用于调节环境温度,加热时可打开 F8,冷却时可打开 F9 和 F10,气体经 2 级冷却后供给环境舱.

膜装置输出产品气的流量控制是经减压阀稳压后,通过流量调节阀 F7 实现的,输出流量由转子流量计测量.同时,打开调节阀 F6,使少量输产品气流过氧分析仪,以此测量产品气的氧浓度.

通过温度传感器和压力传感器与计算机的配合,可对每次实验的输入空气温度、输产品气温

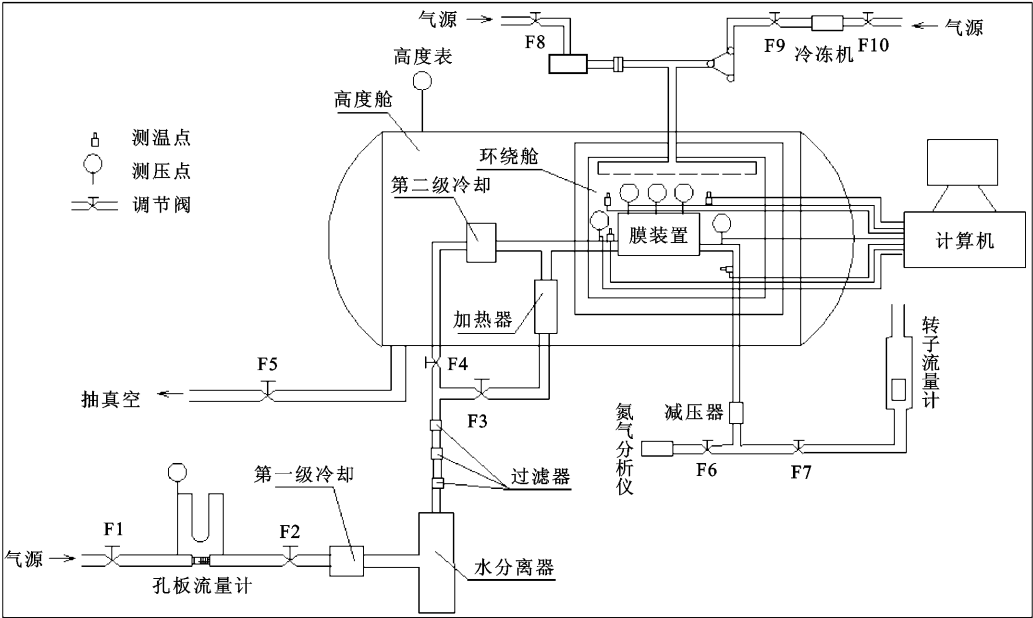


图2 膜分离性能实验系统结构图

度、环境舱温度、输入空气压力、输出产品气压力以及装置中减压阀的出口压力进行自动测量和记录。在本实验中,首先应使预定的输入输出参数和工作环境条件稳定并保持2~3 min,然后再观察输出产品气的氧浓度,待其读数基本稳定后,方可记录实验数据。

实验中温度测量采用 Pt100/A 级温度传感器,温度误差为 $\pm(0.15+0.002|t|)$;压力测量采用 GY103 高精度压力变送器,量程 S 为 $0\sim0.15$ MPa,精度为 $\pm0.1\%S$;氧浓度测量采用极谱式 KY-2型氧浓度检测仪,当氧气体积分数在 $0\sim30\%$ 之间时,测量精度为 $\pm0.2\%$ 。

考虑到实际的惰化系统常采用双流模式,即进入燃油箱的气体质量流量恒定,因此本实验也控制恒定的流量来考察浓度的变化,产品气的质量流量分别保持在 13 kg/h 和 23 kg/h。实验时飞行高度分别设置为 5、10、12 和 15 km,进气压力设置为 0.5、0.6、0.7 和 0.8 MPa,进气温度设置为 25、35 和 45 $^{\circ}\text{C}$ 。

3 实验结果及分析

3.1 进气温度对膜分离性能的影响

图3和图4是在不同进气压力和飞行高度下,改变膜组件进气温度对制氮效率和产品气氧浓度的影响。从图3中可见,随着温度升高,产品气氧浓度降低,特别是产品气流量增加后,氧浓度下降更加明

显,因此提高膜组件的进气温度对提高富氮气体的纯度是有利的。从图3中还可以发现,在其他条件相同的情况下,产品气的流量越大,所制取的富氮气体的纯度越低,这与国外的研究结果^[10]类似,也与实际的应用情况相符,即同一组膜组件在产品气流量较大时,富氮气体的纯度会有些许降低。

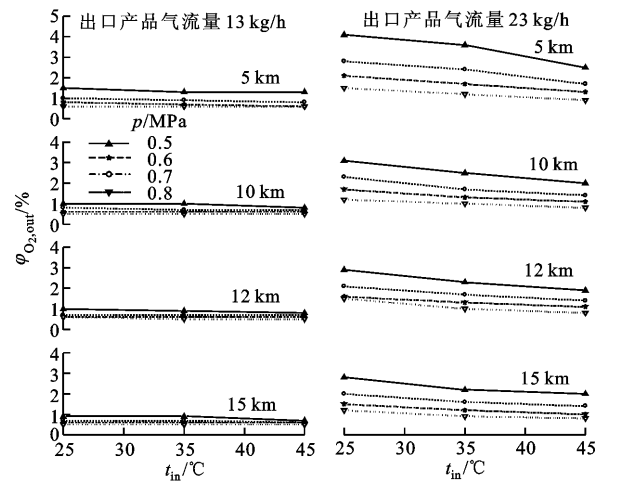


图3 不同高度、压力下产品气氧浓度随进气温度的变化

从图4中可以发现,除了在较低的飞行高度和产品气流量下之外,进气温度升高对制氮效率的影响是负面的,即随着进气温度增加,制氮效率下降,因此从发动机处所需的引气量增加。结合图3、图4还可以看出,产品气的流量越大,则制氮效率越高,富氮气纯度越低,但对发动机引气的利用率也越高。

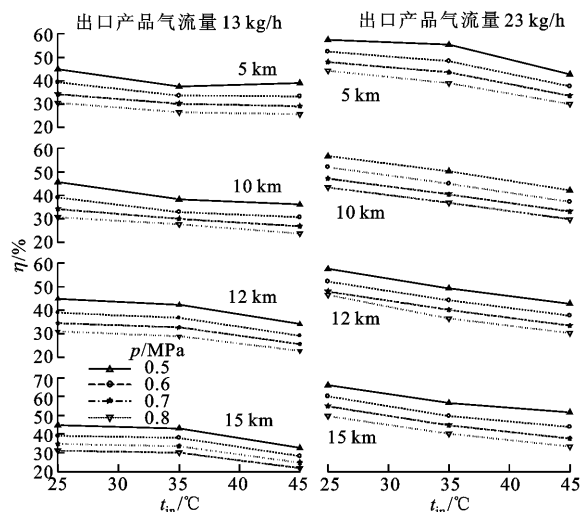


图4 不同高度、压力下制氮效率随进气温度的变化

3.2 飞行高度对膜分离性能的影响

从图5中可见,随着飞行高度增加,产品气的纯度略有上升,其原因在于飞行高度越高,则环境背压越低,膜壁两侧的压差越大,空气中的氧气比氮气越容易通过膜壁渗透出去^[10].但是,由于环境压力随高度增加的减小值越来越小,即其对膜壁两侧压差的贡献不断减小,因此其对产品气氧浓度的影响也随高度的增加而减小.

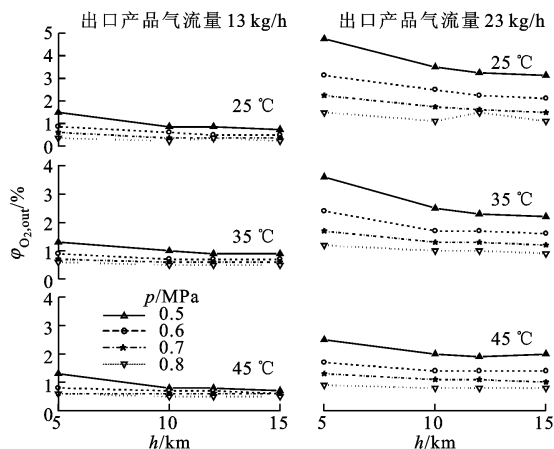


图5 不同温度、进气压力下产品气氧浓度随高度的变化

正是由于飞行高度对空气穿越膜壁的影响较小,因此轻微的实验误差就容易造成制氮效率的大幅度变化.从图6中可见,虽然总体而言,飞行高度对制氮效率的影响也很小,但在不同的入口温度和产品气流量下,制氮效率的变化趋势比较凌乱,有上升有下降,甚至出现交叉现象.

3.3 进气压力对膜分离性能的影响

从图7中可见,随着进气压力的增加,产品气的

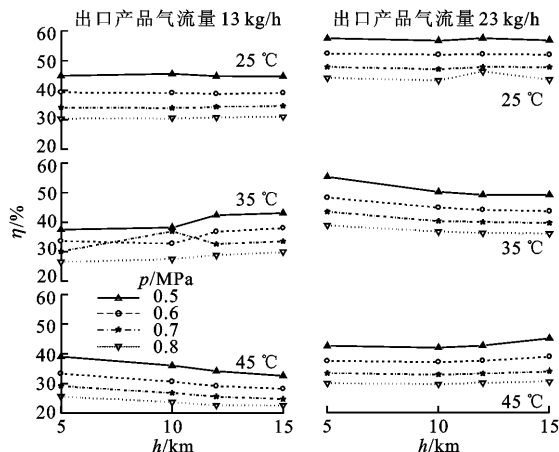


图6 不同温度、压力下制氮效率随高度的变化

氧浓度略有下降,原因也在于进气压力越高,膜壁两侧的压差就越大,从而增加了空气中的氮气对膜壁的渗透.对比图5、图6和图7的右半部分还能发现,在较大的产品气出口流量下,进气压力和氧浓度的相关性是最大的,即进气压力对产品气氧浓度的影响最大,原因在于进气压力的增大对膜壁两侧压差的贡献很大,使得空气中氮的渗透速率增加显著.然而,这一点在产品气出口流量较小时表现得不明显,原因是较小的出口产品气流量限制了进气压力的影响效果.

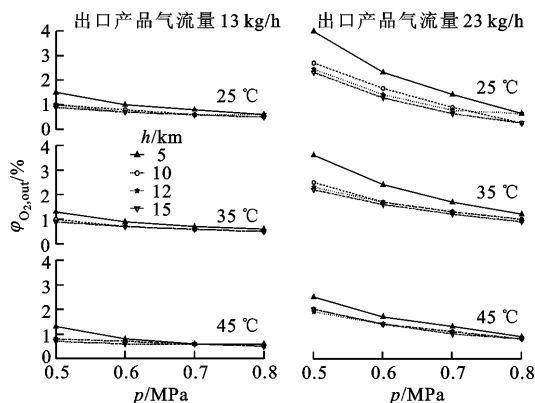


图7 不同温度、高度下产品气氧浓度随进气压力的变化

从图8中可以看出,随着进气压力的增加,产品气氧浓度和制氮效率显著下降,这和空客A320的实际飞行测试数据相吻合^[11].对比图4、图6和图8可以发现,进气压力对制氮效率的影响是最大的,而且这种影响在不同流量时表现出的一致性,是温度和高度影响所不具备的,其原因在于进气压力的增加使得膜壁两侧的压差增加明显,导致了更多的空气渗透到膜外侧,而产品气的流量则下降.

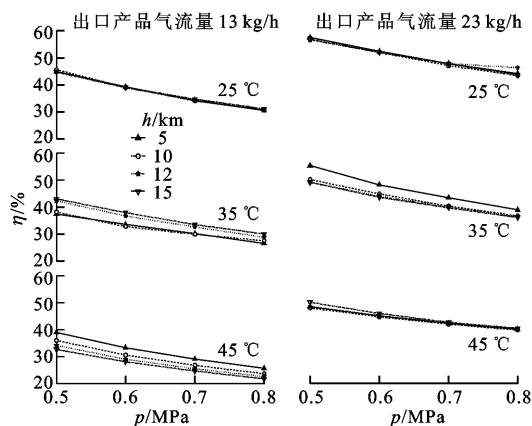


图8 不同温度、高度下制氮效率随进气压力的变化

4 结 论

本文通过实验方法,对机载制氮系统所用中空纤维膜的分离性能进行了研究,结果显示:

(1)进气压力对产品气氧浓度和制氮效率影响最大,进气压力越高,则所制取的富氮气体纯度也越高,但是制氮效率降低,即意味着要从发动机引入更多的气量;

(2)当产品气流量较小时,进气温度对分离性能的影响很小,但是随着产品气流量增加,进气温度对产品气氧浓度和膜制氮效率的影响则不能忽略;

(3)飞行高度对膜分离性能影响很小,因此在进行机载制氮系统研究时,基于地面实验数据就可基本满足惰化设计的要求;

(4)当膜组件制取小流量的富氮气体时,富氮气体的纯度较高而流量较低,即制氮效率较低,而当膜组件制取大流量的富氮气体时,富氮气体的纯度较低而流量较大,即制氮效率较高,因此双流模式可使膜分离装置满足飞机爬升惰化和下降增压的双重需求。

本研究仅对2个固定出口流量进行了实验,所获取的实验数据略显不足,因此在未来的工作中要展开更加深入的研究,并对实验数据进行数值拟合,从而获取进气压力、进气温度、产品气流量和纯度之间的经验公式,以方便地用于指导设计机载惰化系统。

参考文献:

- [1] 肖再华. 飞机燃油箱惰化[J]. 航空科学技术, 2005, 1(1): 31-32.
XIAO Zaihua. Inerting aircraft fuel tanks [J]. Aeronautical Science and Technology, 2005, 1(1): 31-32.
- [2] 刘小芳,刘卫华,钱国诚,等. 机载膜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.

- [3] 张辉,刘应书,李永玲,等. 机载制氮系统在油箱防火中的应用和研究进展[J]. 低温与特气, 2009, 27(4): 1-5.
ZHANG Hui, LI Yingshu, LI Yongling, et al. Applications and development tendencies of onboard oxygen generating system in aviation field [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2009, 27(4): 1-5.
- [4] DESMARAIS L A, YAGLE W J, GREINICH A F. On-board inert gas generator system(OBIGGS) studies, AFWAL-TR-85-2060 [R]. Seattle, USA: Boeing Military Airplane Company, 1985: 21-35.
- [5] BRAGG K R, KIMMEL C C, JONES P H. Nitrogen inerting of aircraft fuel tanks, AIAA-84-2480 [R]. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984: 118-127.
- [6] 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.
- [7] YAGLE W J, TOLLE F F. Performance tests of two inert gas generator concepts for airplane fuel tank inerting, AIAA-83-1140 [R]. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1983: 8-10.
- [8] 魏关锋. 气体膜分离中非理想现象的研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学化工学院, 2006.
- [9] 刘猛,王浚. 一种富氧中空纤维膜组件的温度特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3): 280-282.
LIU Meng, WANG Jun. Temperature characteristic of a kind of hollow fiber membrane module used for oxygen enrichment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(3): 280-282.
- [10] ABRAMOWITZ A, BORIS P. Characterization of an oxygen/nitrogen permeable membrane system, DOT/FAA/AR-95/91 [R]. Washington, USA: Office of Aviation Research, 1996: 6-15.
- [11] BURNS M, CAVAGE W M, HILL R, et al. Flight-testing of the FAA onboard inert gas generation system on an airbus A320, DOT/FAA/AR-03/58 [R]. Washington, USA: Office of Aviation Research, 2004: 11-22.

(编辑 葛赵青)