

文章编号:1000-8055(2012)05-0975-06

机载中空纤维膜富氮性能实验

刘小芳^{1,2}, 刘卫华¹, 钱国诚³, 赵宏韬³

- (1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;
2. 安徽工业大学 冶金与资源学院, 安徽 马鞍山 243002;
3. 江淮航空供氧制冷设备有限公司 技术中心, 合肥 230035)

摘 要: 通过建立机载中空纤维膜环境模拟性能实验平台, 对与国内某技术中心合作研制的机载中空纤维膜进行了系统的环境模拟性能实验及分析. 实验结果显示: ① 渗余富氮空气氧体积分数随输入空气压力的上升而下降, 随输入流量的上升而上升, 而与输入空气温度基本无关; ② 渗余富氮空气氧体积分数随富氮空气流量的上升而上升, 且输入空气压力低时明显; ③ 海拔高度对机载中空纤维膜富氮性能基本不影响, 仅启动时渗余富氮空气氧体积分数略有下降. 通过采用多元回归方法, 得到有一定普遍意义的机载膜富氮性能公式.

关 键 词: 机载中空纤维膜; 富氮性能; 飞机燃油系统惰化; 氧体积分数; 回收率

中图分类号: V228.1

文献标志码: A

Experimentation on nitrogen-enriched characteristics of on-board hollow fibre membrane

LIU Xiao-fang^{1,2}, LIU Wei-hua¹, QIAN Guo-cheng³, ZHAO Hong-tao³

- (1. College of Aerospace Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. College of Metallurgy & Resources,
Anhui University of Technology, Ma'anshan Anhui 243002, China;
3. Technology Center, Jianghuai Aviation Oxygen Supply and Refrigeration
Equipment Corporation Limited Company, Hefei 230035, China)

Abstract: The experimentation and analysis of on-board hollow fibre membrane, which were jointly designed by a technic center, were systemically implemented by ground condition simulation. Results show that: (1) the oxygen concentration descends with input pressure increasing, ascends with input flux arising, and then is basically independent of the temperature of input air; (2) the oxygen concentration increases with the output flux gained, especially under the low pressure of input air; (3) the effect of height above sea level on the nitrogen-enriched performance of the membrane is light. The formula of nitrogen-enriched performance was found by multielement regression and validated by the comparison of experimental results.

Key words: on-board hollow fibre membrane; nitrogen-enriched characteristics; aircraft fuel tank inerting; oxygen fraction; reclaiming ratio

收稿日期: 2011-06-22; **网络出版地址:** www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.975_003.html

基金项目: “十一五”工业和信息化部民机预研项目(GA89267); 国家自然科学基金(50906066);

安徽省高等学校优秀青年人才基金(2009SQRZ79)

作者简介: 刘小芳(1976—), 男, 福建三明人, 讲师, 博士生, 主要从事研究方向为油箱惰性化、污水处理、电子散热等。

燃油系统是现代飞机安全保障的重要环节,一旦发生危险,便有机毁人亡的可能.国外自上世纪 60 年代起,就开始对飞机燃油系统的防火抑爆进行广泛的研究,发展有填充聚氨酯泡沫和铝箔网等抑爆材料抑爆、液氮惰化、Halon 1301 惰化、燃油催化、机载分子筛吸附富氮惰化、机载深冷空分富氮惰化和机载中空纤维膜分离富氮惰化等防火抑爆技术^[1-6].其中机载中空纤维膜分离富氮惰化,无论在质量、体积,还是在引气量、全寿命周期费用等方面,均具有明显优势,已有取代其他技术的趋势^[7-8].目前,该技术已经应用于美国的 F-22, B787 等飞机,同时美国 FAA (Federal Aviation Administration) 也将其纳入建设性适航标准^[9-10],所以我国在国产大飞机研制中,为了与国际接轨及未来的适航取证,也已将机载中空纤维膜分离富氮惰化作为关键技术之一.

机载中空纤维膜分离富氮惰化指的是将引自飞机发动机或环控系统的压缩空气,经过滤及调温调压后,通入中空纤维膜分离得到富氮气体,利用富氮气体来惰化飞机燃油系统.然而,目前关于机载中空纤维膜分离富氮惰化的飞机油箱可燃性研究报道较多,建立有中央油箱和机翼油箱的可燃性数学模型,并在环境模拟舱和风洞中进行了大量相关实验.如文献^[11]建立了 1998 年失事的 TWA800 航班的中央油箱燃烧爆炸模型,模拟了其失事爆炸过程;文献^[12]研究了波音 747-100 飞机机翼油箱的可燃性;文献^[13]则利用环境模拟舱研究了低温对飞机油箱上部气相空间中可燃性油蒸气体积分数的影响,但机载中空纤维膜分离富氮性能本身,由于技术、资料保密等原因,仅南京航空航天大学油箱惰化课题组对此有两篇不全面报道.

有鉴于此,本文针对机载中空纤维膜分离富氮特点,就与国内某技术中心合作研制的机载中空纤维膜在环境模拟舱内进行了系统的富氮性能实验,并分析回归得到了其富氮性能公式.

1 机载中空纤维膜分离富氮原理

机载中空纤维膜分离富氮原理可以用溶解-扩散原理来解释,一般要经历以下 5 个过程^[14]: ①气体分子由高压侧气相主体向高压侧膜表面扩散;②气体分子在高压侧膜表面溶解;③气体分子由高压侧膜表面向低压侧膜表面扩散;④气体分子在低压侧膜表面解析;⑤气体分子由低压侧膜表面向低压侧气相主体扩散.具体过程如图 1 微

观放大图所示.

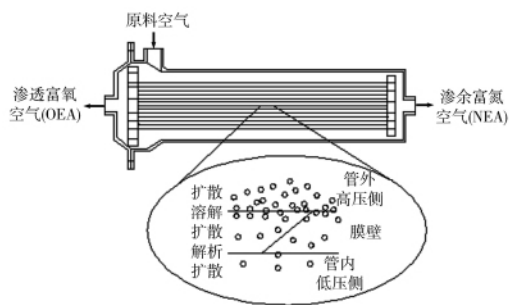


图 1 机载中空纤维膜示意图

Fig. 1 Sketch of on-board hollow fibre membrane

机载中空纤维膜通常是聚砜类非对称膜,其核心是中空纤维膜管,一般由成百上千根小膜管装填在壳体内,两端进行封装处理,形成了管侧和壳侧两种流动空间,如同一列管换热器.根据其气体流道和流动方向,其操作方式可分为内压式和外压式^[15].图 1 是典型的外压式,这也是实际操作中常采用的方式,即原料空气输入到膜管的外侧,通过膜管内外两侧压力差的作用,氧气等渗透速率较快的气体优先透过膜管进入管内,收集后直接排往大气,而氮气等渗透速率较慢的气体则在管外富集,形成渗余富氮空气 (NEA) 被收集输出,用于惰化飞机燃油系统.

通常渗透系数 J 和分离系数 α 是表征膜气体分离性能的两个重要参数.就机载中空纤维膜分离富氮而言,实际表现为 NEA 中氧体积分数 X_{O_2} 与回收率 θ ($\theta = Q_{ne}/Q_{in}$, Q_{ne} , Q_{in} 分别为渗余富氮空气流量和输入空气流量) 之间的相互关系.所以研究各因素对 X_{O_2} 和 θ 的影响,无论对开发新的机载中空纤维膜,还是现有机载膜的合理使用,都十分重要.

2 实验系统介绍

2.1 丝材料与膜装置结构参数

图 2 为实验用机载中空纤维膜装置,是与国内某技术中心合作,按照某型号飞机的单根膜的要求,采用聚砜类材料制作而成的.丝材料和膜装置结构参数见表 1.



图 2 机载中空纤维膜装置图片

Fig. 2 Picture of on-board hollow fibre membrane

表 1 丝材料和膜装置结构参数

Table 1 Structure parameter of silk material and membrane module

丝材料结构参数		膜装置结构参数	
长度 l/mm	980	质量 M/kg	1.81
内径 d/mm	0.8	面积 A/m^2	0.76
外径 D/mm	1.2	外径 D_o/mm	81
丝数 n	600	长度 L/mm	1100

2.2 实验装置与方法

机载中空纤维膜分离富氮性能实验如图 3, 为使膜免受外界环境温度的影响, 将其置于保温箱内, 保温箱/高度舱的组合即可有效地模拟膜实验件的输入空气参数、输出渗余富氮空气流量 Q_{ne} 及海拔高度 h 对其分离富氮性能的影响。

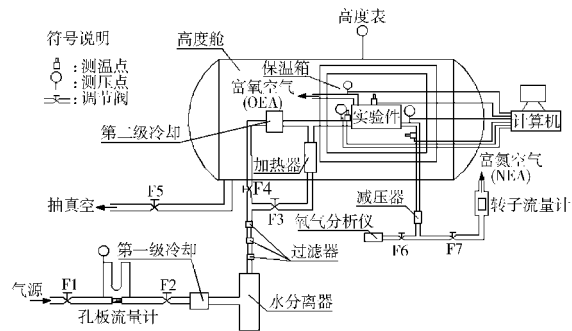


图 3 实验系统简图

Fig. 3 Experimental setup

输入空气系统由压缩机、储气罐、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、加热器等部件组成。调节阀 F1 和 F2 用于控制输入空气压力 p_{in} , Q_{in} 由孔板流量计测出; 调节阀 F3, F4 则用于调节输入空气温度 t , 其中, 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, 可有效调节高度舱内压力, 以模拟机载中空纤维膜工作海拔高度 h 。

输出渗余富氮空气的控制是经减压阀稳压后, 通过流量调节阀 F7 实现的, Q_{ne} 由转子流量计测出。同时, 打开调节阀 F6, 使少量 NEA 流过氧气分析仪, 以测出 NEA 的 X_{O_2} , 渗透富氧空气 (OEA) 则直接通入高度舱内, 由真空泵排出舱外。

通过温度、压力及流量传感器与计算机的配合工作, 对每次实验的输入空气参数、 Q_{ne} 及 h 进行自动测量和记录。在实验中, 应先使膜实验件温度 t 及 h 稳定并保持 2~3 min 后, 再观察 NEA 的

X_{O_2} 等参数, 待其读数稳定后, 方可记录实验数据。

3 实验结果与分析

3.1 输入空气参数对膜富氮性能的影响

实验分别研究了膜实验件在海拔 $h=0, 3, 8, 15\text{ km}$ 下的富氮性能。其中图 4~图 6 是实验件在海拔 $h=8\text{ km}$ 时, 输入空气参数对其富氮性能的影响。

图 4 是 $h=8\text{ km}, t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同 Q_{ne} 下, p_{in} 与 X_{O_2} 的关系。从图 4 中可以看出, 当 Q_{ne} 一定时, 随 p_{in} 的增加, X_{O_2} 下降, 且 p_{in} 较低或 Q_{ne} 较小时, 趋势更明显。原因是: 当 h 一定时, 随 p_{in} 的增加, 膜两侧压力差增大, 将使更多的氧透过膜管进入管内, 结果管外 NEA 的 X_{O_2} 下降; 而当 p_{in} 较低或 Q_{ne} 较小时, 因只需少量氧透入管内就显著影响管外 NEA 的 X_{O_2} , 所以在此两种情况下, p_{in} 对 X_{O_2} 影响明显。

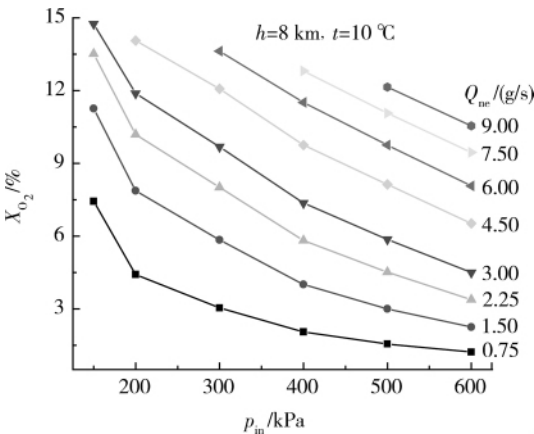


图 4 不同 Q_{ne} 下 p_{in} 与 X_{O_2} 的关系

Fig. 4 p_{in} vs. X_{O_2} under different Q_{ne}

图 5 是 $h=8\text{ km}, t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同 p_{in} 或 Q_{ne} 下, Q_{in} 与 X_{O_2} 的关系。从图 5 中可见, 当 p_{in} 一定时, Q_{in} 增加, X_{O_2} 上升; 而当 Q_{ne} 一定时, 情况恰相反, 但相同的是, p_{in} 较低或 Q_{ne} 较小时, 趋势均更明显。究其原因, 在一定 h 下, p_{in} 恒定, 那么膜两侧渗透压差自然恒定, 透入管内的氧也恒定, 这时如增加 Q_{in} , 结果只能管外 NEA 的 X_{O_2} 上升; 而 Q_{ne} 恒定时, 增加 Q_{in} , 那只能更多的氧等气体渗透入管内, 结果自然管外 NEA 的 X_{O_2} 下降。 p_{in} 较低或 Q_{ne} 较小时趋势明显, 是因为这时 Q_{ne} 中本来氧就少, 自然只要少量氧透入管内, 就显著影响管外 NEA 的 X_{O_2} 。

图 6 是 $h=8\text{ km}, p_{in}=400\text{ kPa}$ 时, 不同 X_{O_2} 下, t 对实验件富氮性能的影响。从图中可以发

现,在一定 X_{O_2} 下,随着 t 的上升, Q_{ne} 是先略有下降,后又缓慢上升,回收率 θ 的变化趋势与 Q_{ne} 基本一致. 其原因大致是,随 t 的上升,实验件工作温度也相应上升,使高分子材料制成的膜实验件的分子链运动加剧,渗透系数将增加,结果更多的氧渗透入管内,则留在管外的 NEA 的 Q_{ne} 将减少. 但当 t 高于 30°C 后,即实验膜组件工作温度升至 30°C 后,实验膜组件渗透出现浓度极化现象,氧不能及时有效的透入管内,所以管外 NEA 的 Q_{ne} 将稍有上升.

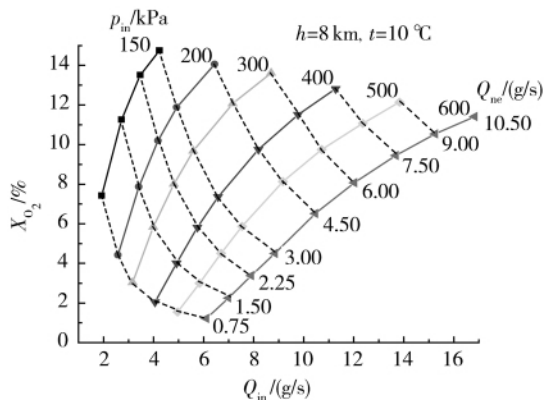


图 5 不同 p_{in} 或 Q_{ne} 下 Q_{in} 与 X_{O_2} 的关系

Fig. 5 Q_{in} vs. X_{O_2} under different p_{in} or Q_{ne}

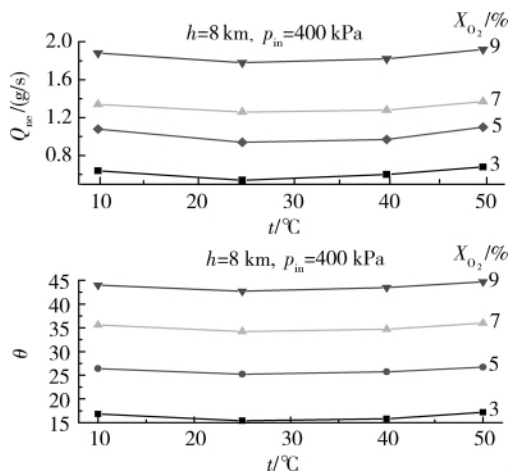


图 6 不同 X_{O_2} 下 t 对膜组件富氮性能的影响

Fig. 6 t vs. nitrogen-enriched performance of membrane under different X_{O_2}

综上所述,输入空气参数中 p_{in} 与 Q_{in} 对实验膜组件的富氮性能影响显著,即 X_{O_2} 随 p_{in} 增加下降,而随 Q_{in} 增加上升;但 t 对实验膜组件的富氮性能影响不大. 同样,在其他海拔高度下,输入空气参数对实验膜组件富氮性能的影响与上述 8 km 海拔时基本一致.

3.2 Q_{ne} 对膜富氮性能的影响

图 7 是实验件在海拔 $h=8\text{ km}$, $t=40^\circ\text{C}$ 时,不同 p_{in} 下, Q_{ne} 对实验件富氮性能的影响. 图 8 是海拔 $h=8\text{ km}$, $t=40^\circ\text{C}$ 时,不同 p_{in} 下,回收率 θ 与 X_{O_2} 的关系. 从图 7、图 8 中均可看出,在一定 p_{in} 下, Q_{ne} 增加,或 θ 增加, X_{O_2} 上升,且 p_{in} 低时趋势明显. 究其原因是显而易见的,因为在一定海拔高度下, p_{in} 又一定,要增加 Q_{ne} , 只有透入膜管内的氧减少,更多的氧留在管外的 NEA 中,所以管外 NEA 的 X_{O_2} 自然上升. p_{in} 低时明显是因为这时膜管内外两侧压差相对小,氧难以透入管内,所以 X_{O_2} 上升明显些.

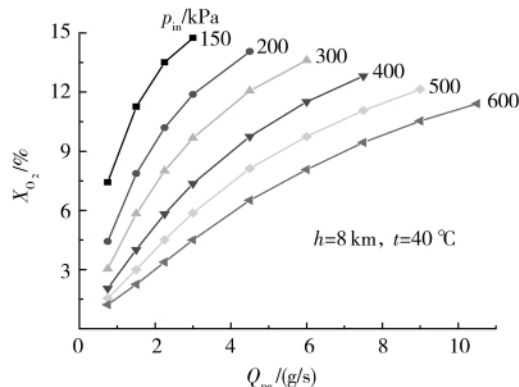


图 7 不同 p_{in} 下 Q_{ne} 与 X_{O_2} 的关系

Fig. 7 Q_{ne} vs. X_{O_2} under different p_{in}

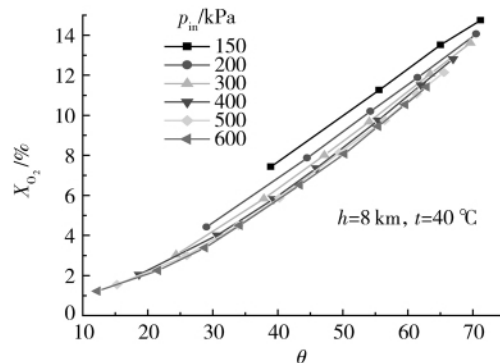


图 8 不同 p_{in} 下 θ 与 X_{O_2} 的关系

Fig. 8 θ vs. X_{O_2} under different p_{in}

3.3 h 对膜富氮性能的影响

图 9 是 $t=40^\circ\text{C}$, $p_{in}=400\text{ kPa}$ 时,在 Q_{ne} 或 X_{O_2} 分别恒定下, h 对实验件富氮性能的影响. 从图中可以看出, h 对膜性能影响不明显,当 Q_{ne} 恒定时, θ 基本不随 h 的增加变化, X_{O_2} 也只是刚开始随 h 的增加略有下降,后迅速稳定;当 X_{O_2} 恒定时, Q_{ne} 和 θ 起初随 h 增加稍有上升,后逐渐平稳.

原因是随 h 海拔高度从 0 km 开始上升,除初始膜管内外渗透压差略有增加外,后期影响可忽略,所以后来 θ 或 X_{O_2} 保持不变。

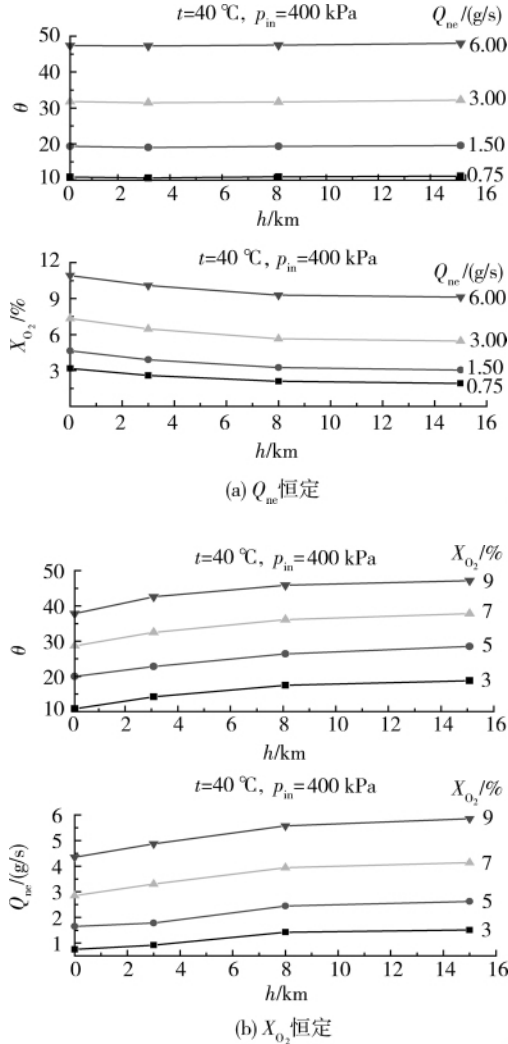


图9 h 对膜组件富氮性能的影响

Fig. 9 h vs. nitrogen-enriched performance of membrane

为从上述繁杂的实验数据中找到反映膜实验件富氮性能的普遍公式,采用最小二乘估计的多元回归方法(限于篇幅,具体过程在此不赘述),得到如下膜实验件富氮性能公式:

$$X_{O_2} = 207 \left(0.9 \frac{Q_{ne}^{0.6}}{p_{in}^{0.7}} + \frac{4}{p_{in}} \right) \left(\frac{528}{t-32} \right)^{1.7} - \frac{17(\Delta p_r^{-1.4}) - 1.5}{17(\Delta p_r^{-1.4}) - 1.5} \quad (1)$$

$$\theta = 4.7 \left\{ \left(X_{O_2} - \frac{98}{p_{in}} \right) + 84.2(\Delta p_r^{-1.4}) + 18.7 \left[1 - \left(\frac{t-32}{528} \right)^4 \right] \right\} + 5.0 \quad (2)$$

式中

$$\Delta p_r^{-1.4} = \left(1 + \frac{p_{in}}{14.7} \right)^{-1.4} - \left(1 + \frac{p}{p} \right)^{-1.4}$$

其中 Q_{ne} ——NEA 流量(g/s);

p_{in} ——输入空气压力(kPa);

t ——输入空气温度或膜温,认为两者始终一致($^{\circ}\text{C}$);

p ——膜所处海拔高度气压(kPa)。

表2是上述公式计算值与部分实验结果的对比,从表中可以看出,计算值和实测值基本一致。

表2 计算值与部分实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental part data with calculated results of the formulae

p_{in} / kPa	p / kPa	Q_{ne} / (g/s)	$X_{O_2}/\%$		θ	
			计算值	实测值	计算值	实测值
400	35.6	0.75	2.02	2.1	10.5	10.8
400	35.6	1.5	3.12	3.24	18.9	19.3
400	35.6	3	5.65	5.64	31.3	31.7
400	35.6	6	9.10	9.28	48.1	47.5

4 结 论

1) 输入空气参数对实验件富氮性能的影响是: X_{O_2} 随 p_{in} 增加而下降,随 Q_{ne} 增加而上升,且 p_{in} 较低或 Q_{ne} 较小时,趋势均更明显;而 t 对膜实验件富氮性能影响不大。

2) Q_{ne} 对实验件富氮性能影响显著, X_{O_2} 随 Q_{ne} 增加上升,且 p_{in} 低时明显。

3) h 对实验件富氮性能影响不明显, X_{O_2} 只启动时随 h 增加略有下降,后逐渐平稳。

4) 拟合回归得到了反映实验件富氮性能的普遍公式,并证明了其正确性。

参考文献:

- [1] 肖再华. 飞机燃油箱惰化[J]. 航空科学技术, 2005(1): 31-33.
XIAO Zaihua. Inerting aircraft fuel tanks[J]. Aviation Technology, 2005(1): 31-33. (in Chinese)
- [2] 田宏, 吴穹, 江平, 等. 网状聚氨酯泡沫材料的发展[J]. 航空材料学报, 2001, 21(2): 59-63.
TIAN Hong, WU Qiong, JIANG Ping, et al. The development of reticulated polyurethane foam[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(2): 59-63. (in Chinese)
- [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, 2007, 27(4): 1-5.
ZHANG Hui, LIU Yingshu, LI Yonglin, et al. Applications and development tendencies of on board oxygen generating

- systems in aviation field[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2009, 27(4): 1-5. (in Chinese)
- [4] Knight T C, Ritter J E. Nitrogen inerting of aircraft fuel tanks[R]. AIAA-1984-2480, 1984.
- [5] Desmarais L A, Yagle W J, Grenich A F. On-board inert gas generator system (OBIGGS) studies Part 3: aircraft OBIGGS designs[R]. AFWAL-TR-85-2060, 1984.
- [6] Cavage W M. The cost of implementing ground-based fuel tank inerting in the commercial fleet[R]. DOT/FAA/AR-00/19, 2000.
- [7] 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. On-board inert gas generation system[J]. Helicopter Technology, 2002, 130(2): 47-50. (in Chinese)
- [8] 杨琳. 如何防止飞机燃油油箱爆炸[J]. 新技术应用, 2003, 36(12): 56-57.
YANG Lin. New technology to prevent fuel tank explosion [J]. Application of New Technology, 2003, 36(12): 56-57. (in Chinese)
- [9] Burns M, Cavage W M, Hill R, et al. Flight -testing of the FAA onboard inert gas generation system on an airbus A320[R]. DOT/FAA/AR-03/58, 2004.
- [10] Cavage W M, Bownan T. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747 center wing fuel tank[R]. AIAA-2005-4906, 2005.
- [11] Baer M R, Gross R J. A combustion model for the TWA 800 center-wing fuel tank explosion[R]. SAND 98-2043, 1998.
- [12] Cavage W M, Summer S. A study of the flammability of commercial transport airplane wing fuel tanks[R]. DOT/FAA/AR-08/8, 2008.
- [13] Summer S. Cold ambient temperature effects on heated fuel tank vapor concentrations [R]. DOT/FAA/AR-TN99/93, 2000.
- [14] 陈勇, 王从厚, 吴鸣. 气体膜分离技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 118-119.
- [15] 王磊. 膜分离过程的优化与控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
WANG Lei. Study on optimization and control methods for membrane separation process[D]. Dalian: Dalian University of Science and Engineer, 2006. (in Chinese)