

# 聚酰亚胺纤维膜分离特性试验研究



周宇<sup>1</sup>,王洋洋<sup>1</sup>,陈昂<sup>1</sup>,凡佳飞<sup>2</sup>

1.航空工业南京机电液压工程研究中心 航空机电系统综合航空科技重点实验室,江苏 南京 211106

2.空军装备部驻南京地区第三军事代表室,江苏 南京 211106

**摘要:**通过对不同膜材料的分离系数以及基本特性的比较,选择了耐高温、耐高压、分离系数高的聚酰亚胺作为膜材料。以某型国产聚酰亚胺中空纤维膜组件为研究对象,搭建中空纤维膜分离性能测试试验台,针对分离性能随引气压力、引气温度、飞行高度等因素的变化规律开展了试验研究。研究结果可以为后续聚酰亚胺纤维膜的试验设计、分离特性研究提供参考。

**关键词:**聚酰亚胺;分离性能;试验

中图分类号:V228

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.02.009

对于飞机设计而言,燃油系统对飞机易损性的影响最大,而在燃油系统故障中,最大的威胁来自于燃油箱的燃烧和爆炸<sup>[1]</sup>。燃油箱贮存了飞机飞行所需的所有燃油,目前飞机所用的燃料主要为航空燃油,具有易挥发、易燃烧的特性。由于在燃油箱的气相空间内聚集了大量的易燃易爆的燃油蒸气,当燃油蒸气和空气的混合气体处于易燃易爆极限范围以内时,在某些特定条件下(如油箱受到炮火攻击、雷电闪击、静电放电或发生电路短路等情况),这些燃油蒸气极易被点燃,并在油箱内迅速燃烧,最终导致燃油箱的燃爆,引起灾难性的后果。

为避免燃油箱气相空间内可燃气体被点燃后发生燃爆,一般采取有效的措施降低燃油箱气相空间内的氧浓度,从而减少燃油箱燃爆的概率。机载制氮惰化技术是目前实用的最为理想的燃油箱燃爆抑制技术<sup>[2]</sup>。机载制氮惰化技术<sup>[3-4]</sup>(OBIGGS)就是从飞机发动机或环控系统引气,通过机载空气分离装置制取富氮气体,并将富氮气体充入油箱完成惰化,使得飞机燃油箱上部空间中的氧浓度在飞行过程中始终保持低于支持燃油燃烧所需的氧浓度水平<sup>[5]</sup>。

目前,机载制氮惰化技术中应用最为广泛的是渗透膜制氮系统。渗透膜制氮系统通过中空纤维膜分离技术<sup>[6-7]</sup>,在压差作用下,利用中空纤维膜对 $N_2$ 和 $O_2$ 的选择透过性不同,将空气分离为富氮气体和富氧气体,渗透膜材料不同,对 $N_2$ 和 $O_2$ 的渗透速率不同,制氮效率也不一样。

针对中空纤维膜,国内外已开展了大量的理论与试验研究工作,并取得了较为丰硕的成果。刘猛等<sup>[8]</sup>对中空纤维膜组件的温度特性进行了分析;贺高红等<sup>[9]</sup>对中空纤维膜丝内压降规律进行了研究;刘小芳、冯诗愚等<sup>[10-11]</sup>对中空纤维膜分离性能进行了试验;Katoh等<sup>[12]</sup>、Rezazakemi等<sup>[13]</sup>、Miramini等<sup>[14]</sup>进行了中空纤维膜分离过程的仿真分析。

实际上,中空纤维膜组件是由上万根中空纤维膜丝在壳体内部沿轴线方向集成纤维束进行氧氮分离的,其模型较为复杂,计算量太大,一般都是对单根膜丝进行建模计算。理论上,中空纤维膜的分离性能可采用膜分离系数来描述,但上述研究均显示,中空纤维膜的非理想化现象极其严重,理论描述与实际情况差距较大,试验测试仍是获取其性能的最主要方式。

本文介绍了中空纤维膜的分离原理,通过搭建试验台,以某型国产聚酰亚胺中空纤维膜组件为研究对象,试验测试了引气压力、引气温度以及飞行高度等因素对中空纤维膜组件分离性能的影响。在此基础上,研究了聚酰亚胺纤维膜在不同工况下的分离性能。

## 1 纤维膜材料选择

中空纤维膜分离过程中传质驱动力是压力,在中空纤维膜两侧压差的推动下,气体各组分透过纤维膜的速率不

收稿日期: 2021-10-08; 退修日期: 2021-11-17; 录用日期: 2021-12-19

引用格式: Zhou Yu, Wang Yangyang, Chen Ang, et al. Experimental research on separation characteristics of polyimide fiber membrane[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(02): 59-64. 周宇, 王洋洋, 陈昂, 等. 聚酰亚胺纤维膜分离特性试验研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(02): 59-64.

同,从而达到分离<sup>[5]</sup>,其基本原理如图1所示。通常,将膜入口引气称为原料气,出口产气称为产品气,产品气又称为慢气、渗余气。渗余气因为透过纤维膜的速率较慢,通常沿纤维膜丝富集在纤维膜轴侧,而被膜排掉的气体称为渗透气,也称为快气。由于透过纤维膜的速率较快,通常沿纤维膜富集在径侧位置。

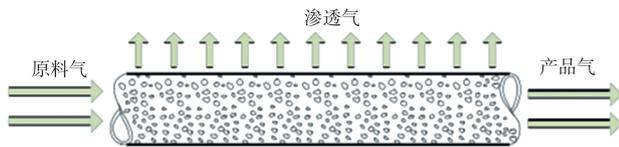


图1 中空纤维膜分离气体原理图

Fig.1 Schematic diagram of hollow fiber membrane separation of gas

通常,所有的高分子材料对任一种气体都是可以渗透的,但是不同气体的渗透速率不同,甚至相差特别大。渗余气和渗透气并不是绝对的,而是相对的,是针对不同的气体组成而言的<sup>[16]</sup>。对于中空纤维膜制氮来说,主要是针对氧气和氮气的分离,其中氧气透过纤维膜的速率大于氮气,所以氧气是渗透气,氮气是渗余气,分别沿纤维膜轴向和径向生成富氮气体(NEA)和富氧气体(OEA)。不同气体透过纤维膜的速率如图2所示。

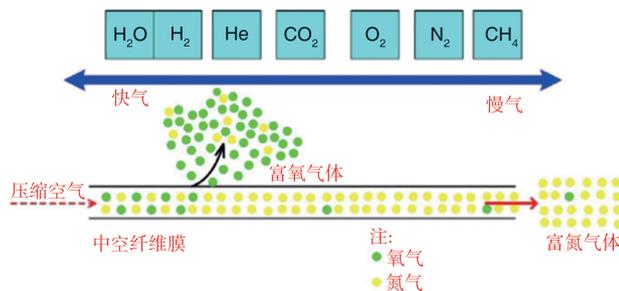


图2 不同气体在纤维膜中的渗透速率示意图

Fig.2 Schematic diagram of the permeation rate of different gases in the fiber membrane

不同纤维膜材料的分离系数不同,而分离系数是表征纤维膜对组分的选择分离性能,两组分的分离系数越大,表明分离效果越好。常见的膜材料包括聚酰亚胺(Matrimid)、纤维素乙酸酯(CA-2.45)、聚砜(PSF)、聚苯醚(PPO),改性聚碳酸酯(TB-BisA-PC)等,不同纤维膜材料对不同气体组分的分离系数见表1。

由表1可知,聚酰亚胺对氧氮组分的分离系数为6.6,高于聚砜和聚苯醚材料。此外,不同膜材料的基本特性比较见表2。

表1 不同气体组分在不同纤维膜材料下的分离系数

Table 1 Separation coefficients of different gas components under different fiber membrane materials

聚合物	H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>
聚酰亚胺	64	56	36
纤维素乙酸酯	80	80	32
聚砜	56	56	22.4
聚苯醚	14	15	14
改性聚碳酸酯	-	-	32
聚合物	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>
聚酰亚胺	31	0.56	6.6
纤维素乙酸酯	32	0.4	5.5
聚砜	22.4	0.4	5.6
聚苯醚	15	1	4.1
改性聚碳酸酯	23	-	7.8

表2 不同膜材料的基本特性比较

Table 2 Comparison between basic characteristics of different membrane materials

膜材料	Matrimid	PSF	PPO
膜结构	非对称膜	复合膜	复合膜
纤维特点	纤维内径约20μm;耐温200°C;强度、耐压高,膜组件最高工作压力2.4MPa	纤维内径20μm;耐温90°C;强度、耐压一般,工作压力1.6MPa	内径450μm;耐温80°C;强度、耐压一般,工作压力1.5MPa
氮气纯度	85%~99.9%	95%~99.9%	85%~99.5%

由表2可知,聚酰亚胺材料的纤维膜耐温好,可在更高的工作温度下工作,且强度高,能承受更高的工作压力。此外,聚酰亚胺化学稳定性好,具有较高熔点,即使被油类物质污染,也不容易溶胀,可通过高温再生,显著恢复性能,维修性更好。因此,选用聚酰亚胺材料的纤维膜进行分离特性试验研究。

## 2 试验台搭建

本文采用的试验台如图3所示。它由引气处理装置、三综合环境箱、NEA/OEA测试装置和测控台组成。通过引气处理装置完成对气源的过滤和干燥处理,并根据电器调压阀和电加热器的参数设置模拟不同的引气状态;通过真空泵组控制三综合环境箱的压力,实现对飞行高度的模拟;通过NEA/OEA测试装置和测控台实现富氮气体流量和浓度的控制。

气源经过过滤器、冷干机和干燥机预处理后,由电器调压阀调节气源压力、电加热器控制气源温度,然后进入空气分

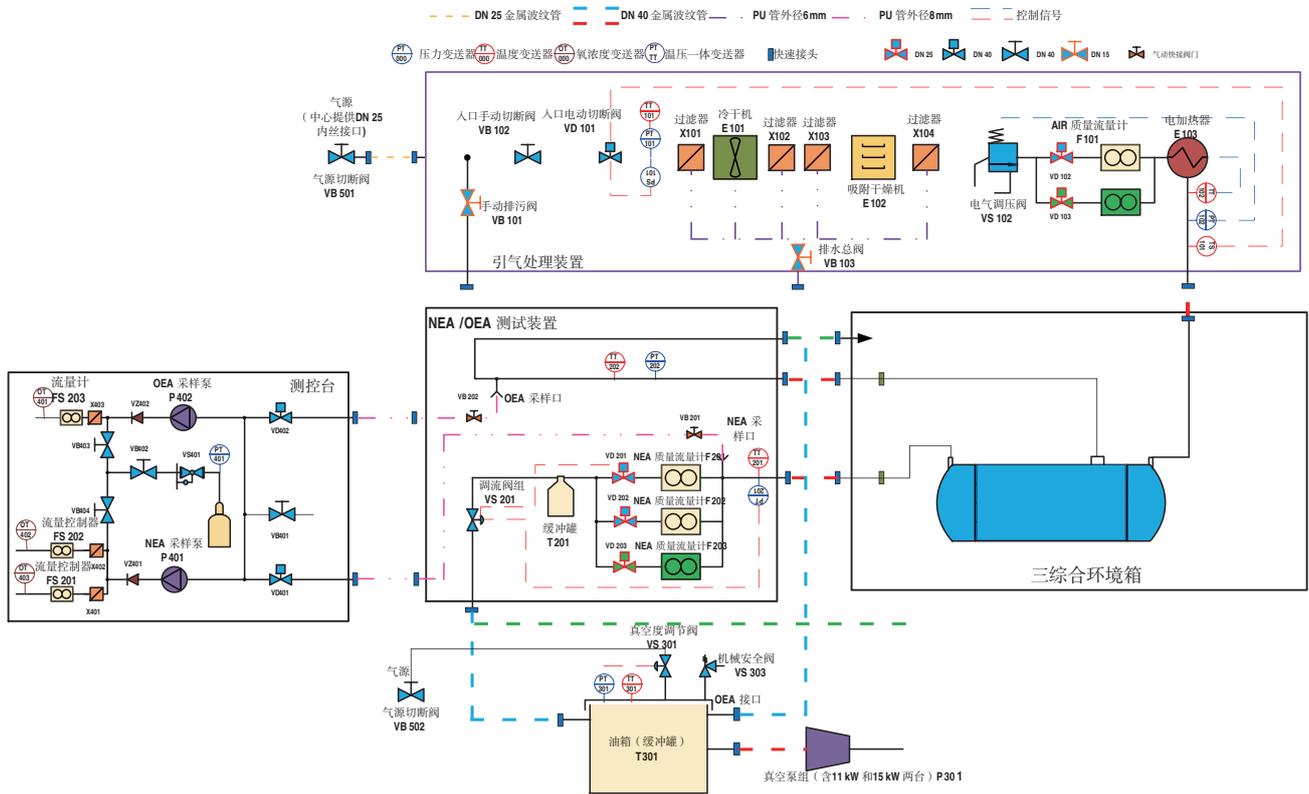


图3 试验台原理图

Fig.3 Schematic diagram of test bench

离装置入口。装置NEA出口与调流阀组连接,通过调节调流阀组的开度,控制出口的NEA流量,通过气体采样测量出口氧浓度。OEA出口通入油箱,油箱与真空泵组相连,通过调节真空度调节阀的开度,实现不同高度的模拟。试验台通过温度变送器、压力传感器和流量计与计算机配合工作,可对每次试验结果进行记录,将引气压力、引气温度、进气流量、OEA出口压力、NEA流量、NEA浓度、NEA温度等参数在测控台界面上按曲线形式显示出来。在试验过程中,输入参数设置完成后,观察NEA出口浓度、流量曲线,待曲线保持稳定并持续1~2min后,进行读数,并记录试验结果。

在试验中,引气压力(表压)分别控制为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5MPa;引气温度分别控制为60、70、80、90、110℃;背压(表压)分别为0、-0.015、-0.03、-0.04、-0.05、-0.06、-0.07、-0.08MPa,即飞行高度为0、1328、2859、4031、5370、6941、8856、11354m。

### 3 聚酰亚胺纤维膜分离性能与影响因素分析

气体渗透的快慢程度可以由渗透速率来表示,渗透速率与膜面积、膜两侧压力差、渗透系数成正比,与膜厚度成

反比。针对某型国产聚酰亚胺中空纤维膜组件,其膜厚度、膜面积是固定的,渗透系数随着温度的增加而增大,膜两侧压力差与引气压力和飞行高度有关。

#### 3.1 引气温度对聚酰亚胺中空纤维膜的性能影响

引气温度会影响纤维膜的渗透系数,从而影响气体的渗透速率,保证其他因素不变,改变引气温度。以引气压力(表压)为0.1MPa、飞行高度为0km为例,引气温度对NEA浓度、NEA流量的影响如图4所示。

由图4可见,在飞行高度和引气压力不变,NEA浓度一定的条件下,NEA流量随着温度的增加而增加;在低浓度时,温度对流量的影响较为明显,在高浓度时,流量变化不明显,但总体趋势一致。这是因为随着引气温度的上升,纤维膜的工作温度升高,分子链运动加剧,有利于增大膜的渗透系数,从而提高膜的渗透速率,以产生更多的氮气;在一定的高度和引气压力下,NEA流量会随着浓度的增加而逐渐减少。

#### 3.2 引气压力对聚酰亚胺中空纤维膜的性能影响

引气压力会影响纤维膜两侧压差,从而影响气体的渗透速率,保证其他因素不变,改变引气压力。以引气温度为

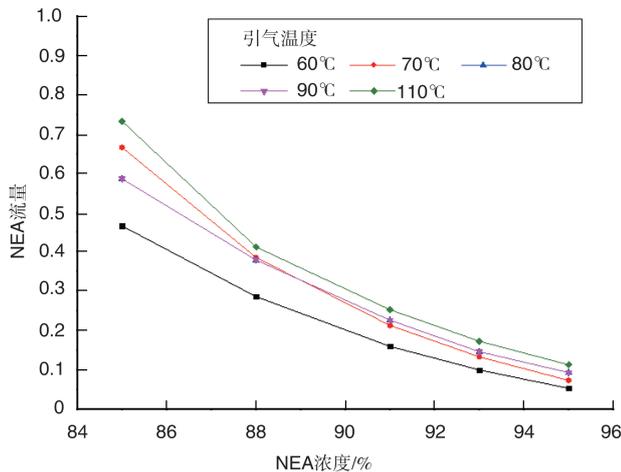


图4 引气温度与NEA浓度、NEA流量的关系

Fig.4 Relationship between bleed air temperature and NEA concentration, NEA flow

90°C、飞行高度为0km为例,引气压力对NEA浓度、NEA流量的影响如图5所示。

由图5可见,在飞行高度和引气温度不变,NEA浓度一定的条件下,NEA流量随着引气压力的增加而增加;NEA浓度越低,引气压力对NEA流量的影响越明显。这是因为引气温度和飞行高度一定时,随着引气压力的增加,聚酰亚胺纤维膜两侧压差增加,有利于提高聚酰亚胺膜的渗透速率,使更多的氧气渗透出去。

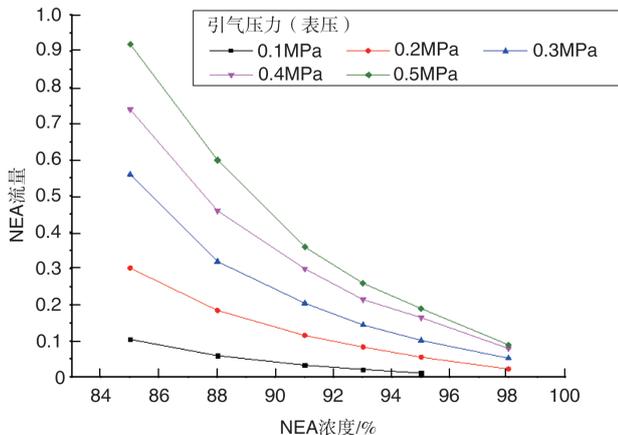


图5 引气压力与NEA浓度、NEA流量的关系

Fig.5 Relationship between bleed air pressure and NEA concentration, NEA flow

### 3.3 飞行高度对聚酰亚胺中空纤维膜的性能影响

飞行高度会影响纤维膜两侧压差,从而影响气体的渗透速率,保证其他因素不变,改变飞行高度。以引气温度为80°C、引气压力(表压)为0.1MPa为例,飞行高度对NEA浓度、NEA流量的影响如图6所示。

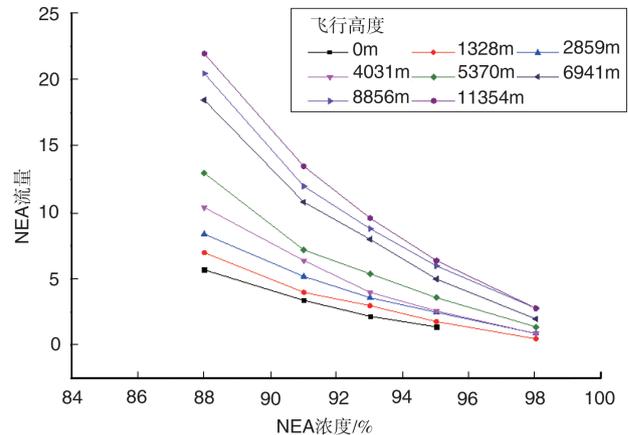


图6 飞行高度与NEA浓度、NEA流量关系

Fig.6 Relationship between flight altitude and NEA concentration, NEA flow

由图6可见,在引气温度和引气压力不变,NEA浓度一定的条件下,NEA流量随着飞行高度的增加而增加;飞行高度一定时,NEA流量随着NEA浓度的增加而减小。这是因为随着高度的增加,富氧口的背压越来越高,引气压力不变的条件下,中空纤维膜内外压差越来越大,有利于提高聚酰亚胺膜的渗透速率,NEA流量增加。

## 4 结论

本文通过设计搭建空气分离装置的试验台,对某型国产聚酰亚胺中空纤维膜的分离性能随引气压力、引气温度、飞行高度等因素的变化规律进行了试验研究,研究结果表明:

(1)在飞行高度和引气压力不变、NEA浓度一定的条件下,NEA流量随着温度的增加而增加。在低浓度时,温度对流量的影响较为明显;在高浓度时,流量变化不明显,但总体趋势一致。

(2)在飞行高度和引气温度不变、NEA浓度一定的条件下,NEA流量随着引气压力的增加而增加;NEA浓度越低,引气压力对NEA流量的影响越明显。

(3)在引气温度和引气压力不变,NEA浓度一定的条件下,NEA流量随着飞行高度的增加而增加;飞行高度一定时,NEA流量随着NEA浓度的增加而减小。

AST

## 参考文献

[1] 王盛园.基于国产燃油物理-化学特性的油箱可燃性评估技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.

Wang Shengyuan. Research on fuel tank flammability evaluation technology based on physical-chemical

- characteristics of domestic fuel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [2] 周宇,谷立新,陈广豪.耗氧惰化系统混合产气的油箱充填特性研究[J].航空科学技术,2019,30(11):48-52.  
Zhou Yu, Gu Lixin, Chen Guanghao. Study on filling characteristics of mixed gas produced by oxygen consumption inerting system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11):48-52. (in Chinese)
- [3] 邓景辉.直升机技术与展望[J].航空科学技术,2021,32(1):10-16.  
Deng Jinghui. Development and prospect of helicopter technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(1): 10-16.(in Chinese)
- [4] 于琦.国外直升机发展特点及市场态势分析[J].航空科学技术,2021,32(1):23-28.  
Yu Qi. Analysis on the development characteristics and market situation of foreign helicopters[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(1):23-28.(in Chinese)
- [5] Johnson R L, Joseph B G. Aircraft fuel tank inerting system[J]. Air Search Manufacturing Company, 1983(5): 154-176.
- [6] 韩光瑶.中空纤维膜分离制氮系统简介[J].橡塑技术与装备, 2001,27(6):32-34.  
Han Guangyao. Brief introduction of hollow fiber membrane separation nitrogen production system[J]. Rubber and Plastic Technology and Equipment, 2001, 27(6):32-34. (in Chinese)
- [7] 杜雄伟,刘应书.变压膜渗透空气分离制氮[J].北京科技大学学报,2007,29(26):617-621.  
Du Xiongwei, Liu Yingshu. Variable pressure membrane infiltration air separation for nitrogen production[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2007, 29(26): 617-621. (in Chinese)
- [8] 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 characteristics of an oxygen-enriched hollow fiber membrane module[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(3):280-282. (in Chinese)
- [9] 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, et al. Research on the law of pressure drop in hollow fiber gas separation membrane[J]. Membrane Science and Technology, 1993, 13(2):22-28. (in Chinese)
- [10] 刘小芳,刘卫华,钱国诚,等.机载中空纤维膜富氮性能试验[J].航空动力学报,2012,27(5):976-980.  
Liu Xiaofang, Liu Weihua, Qian Guocheng, et al. Experiment on nitrogen-enrichment performance of airborne hollow fiber membrane[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 976-980. (in Chinese)
- [11] 冯诗愚,卢吉,刘卫华,等.机载制氮系统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 characteristics of hollow fiber membrane in airborne nitrogen production system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1332-1339. (in Chinese)
- [12] Katoh T, Tokumura M, Yoshikawa R, et al. Dynamic simulation of multicomponent gas separation by hollow fiber membrane module: nonideal mixing flows in permeate and residue sides using the tanks-in-series model[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 76(3): 362-372.
- [13] Rezakazemi M, Niazi Z, Mirfendereski M, et al. CFD simulation of natural gas sweetening in a gas-liquid hollow fiber membrane contactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168(3): 1217-1226.
- [14] Miramini S A, Razavi S M R, Ghadiri M, et al. CFD simulation of acetone separation from an aqueous solution using supercritical fluid in a hollow-fiber membrane contactor [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 72: 130-136.
- [15] 苏毅,胡亮,刘谋盛.气体膜分离技术及应用[J].石油与天然气化工,2001,30(3):113-116.  
Su Yi, Hu Liang, Liu Mousheng. Gas separation membrane technology and application[J]. Oil and Gas Chemical Industry, 2001, 30(3):113-116. (in Chinese)
- [16] 周国庆.聚酰亚胺中空纤维膜对氙的富集和杂质气体去除性能研究[D].兰州:兰州大学,2016.  
Zhou Guoqing. Study on the performance of polyimide hollow fiber membrane for xenon enrichment and impurity gas removal[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)

## Experimental Research on Separation Characteristics of Polyimide Fiber Membrane

Zhou Yu<sup>1</sup>, Wang Yangyang<sup>1</sup>, Chen Ang<sup>1</sup>, Fan Jiafei<sup>2</sup>

*1. The Aviation Electromechanical System Integration of Aviation Science and Technology Key Laboratory, AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, China*

*2. The Third Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Nanjing, Nanjing 211106, China*

**Abstract:** By comparing the separation coefficient and basic characteristics of different membrane materials, polyimide with high temperature resistance, high pressure resistance and high separation coefficient is selected as the membrane material. Taking a certain type of domestic polyimide hollow fiber membrane module as the research object, a test bench for the separation performance of hollow fiber membrane is built, and experimental research is carried out on the variation law of separation performance with bleed air pressure, bleed air temperature, flight height and other factors. The results can provide a reference for the subsequent experimental design and separation characteristics of polyimide fiber membrane.

**Key Words:** polyimide; separation performance; experiment