应用研究

面向医疗麻醉氙气在线回用的膜法脱碳实验研究与过程模拟

李立鑫[1]，马英超[1]，王常春[1]，任延波[2]，任晓光[3]，刘健辉[1]，
刘丹丹[1]，王丽娜[1]，于海军[1]，康国栋[1]，曹义鸣[1]，介兴明[1*]

（1. 中国科学院大连化学物理研究所，大连 116023；2. 大连医科大学第一附属医院，大连 116011；
3. 榆林中科洁净能源创新研究院，榆林 719111）

摘要： 医用氙气麻醉气经人体代谢循环后会混入一定浓度的CO_2，为满足回收利用要求，需将其中CO_2浓度降至0.50%以下。本研究采用商用聚醚酰亚胺(PEI)和聚砜(PSf)为原材料制备中空纤维膜，测试了O_2、N_2、Xe、CO_2在两种膜中的渗透速率；以5.0% CO_2/25.0% O_2/5.0% N_2/65.0% Xe(N_2替代)混合气为原料气，在室温下通过自制的PEI和PSf中空纤维膜组件，系统研究了放空比(渗余气与渗透气流量之比)、进气压力等参数对脱碳性能的影响，并基于实验数据，设计了两级膜分离模拟系统。实验结果表明，PEI膜的CO_2/N_2和CO_2/Xe分离系数高于PSf膜，但气体渗透速率低；增大放空比，在增加膜气体处理量的同时，却会导致渗余气中CO_2浓度变大；原料气压力的增加明显促进了以压力差为推动力的脱碳过程，生产出更多符合回用标准的气体；实际混合气脱碳过程的压力比较低，在两种膜分离系数都较高的前提下，膜组件的性能受其气体渗透速率的影响更为明显；基于实验数据所建立的两级膜分离模拟系统氙气回收率为98.90%，且再生的氙气麻醉混合气中CO_2浓度不高于0.50%，满足循环使用要求，大幅度降低了麻醉氙气的使用成本。

关键词： 氙气麻醉气；中空纤维膜；氙气回收；混合气脱碳

中图分类号： TQ028.8 **文献标志码：** A **文章编号：** 1007-8924(2025)06-0098-10

doi： 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.06.011

氙气(xenon，Xe)作为一种稀有惰性气体，在20世纪中期被首次应用于临床麻醉领域[1]。相较于传统吸入麻醉气(如异氟烷、七氟烷)，氙气具有诱导苏醒快、不参与体内代谢、稳定血流、保护神经及对臭氧层无破坏等特点，是兼顾高效性与安全性的理想麻醉气[2-5]。然而，氙气的天然含量极低，在大气中仅占0.467 mg/m^3，其工业化生产需依赖大型空分装置从液态空气中提取[6]。每年仅有6.7%的氙气

收稿日期：2025-06-19；修改稿收到日期：2025-08-26

基金项目：大医一院-大连化物所医工联合创新基金(DMU-1&DICP UN202305)；国家自然科学基金面上项目(22178333)；榆林中科洁净能源创新研究院能源革命科技专项联合基金项目(E411080316)；大连市科技创新基金重点学科重大课题项目(2022JJ11CG006)

第一作者简介：李立鑫(2000-)，男，辽宁大连人，硕士生，主要研究方向为膜分离技术. *通讯作者，E-mail：jiexm@dicp.ac.cn

引用本文：李立鑫，马英超，王常春，等. 面向医疗麻醉氙气在线回用的膜法脱碳实验研究与过程模拟[J]. 膜科学与技术，2025，45(6)：98-107.

Citation：Li L X，Ma Y C，Wang C C，et al. Experimental study and process simulation of CO_2 removal by membrane separation for online reuse of xenon in medical anesthesia[J]. Membrane Science and Technology(Chinese)，2025，45(6)：98-107.

可用于医疗领域，而氙气经人体循环后，其中约70%通过呼气直接排出，因混入人体代谢所产生的CO_2而无法循环使用，不仅增加医疗成本，还导致氙气资源的浪费[7]。因此，开发高效脱碳回收技术已成为推广氙气麻醉临床应用的关键突破口。

医用麻醉混合气成分一般为 67.0% Xe/30.0% O_2/3.0% N_2（均为体积分数，以下同），经人体循环后的麻醉混合气组成大致为 65.0% Xe/25.0% O_2/5.0% CO_2/5.0% N_2，为满足循环使用要求，一般需要将 CO_2 浓度控制到 0.50%以下[8]。目前，常用的氙气回收技术主要为低温精馏法和变温吸附法，但这两种方法在实际应用中均存在明显不足。低温精馏法需进行多级压缩和深度冷却，且能耗高、设备投资大；变温吸附法因吸附剂在变温循环中易失活老化需频繁更换，增加了运行成本，同时存在处理周期长、对低浓度或小规模气源回收效率低等问题[9-13]。相较于传统的回收工艺，膜分离法因工艺设备简单、可在高压条件下操作、投资少、占地面积小、可靠性高和气体富集效率高等优势，在麻醉气脱碳回收领域具有良好的应用前景[14-18]。

针对麻醉氙气混合气中 CO_2 的膜法脱除，已经有一些研究工作的报道。安少杭等[19]研究了分离膜自由体积对氙气渗透性能的影响，发现控制分离膜的自由体积微孔直径小于氙气而大于空气中氮气/氧气的动力学直径时，可实现对氙气的高效分离。Kozlova 等[20]研究了 0～50 ℃下聚苯醚膜（PPO）对氙气的分离性能，发现降低原料气的进气温度，可以增加氙气的回收率。陈占营等[21]研究了不同材料气体分离膜对空气中氙气的分离性能，结果表明 CO_2、O_2、N_2、Xe 四种气体在聚酰亚胺（PI）膜和聚砜（PSf）膜内的渗透速率依次减小，且 PI 膜对 CO_2 的脱除效果明显优于 PSf 膜。基于氙气资源的稀缺性、现有回收技术的局限性及膜分离技术的应用潜力，本研究以高效提纯医用麻醉氙气混合气为研究对象，研究了原料气压力、放空比等关键参数对膜组件脱碳性能的影响，并基于实验数据进行了两级膜分离模拟计算和结果分析，旨在开发一种高效、低耗、适配临床场景的在线脱碳回用技术，以期突破氙气麻醉成本瓶颈并推动其广泛应用。

1　实验部分

1.1　材料和仪器

聚醚酰亚胺（PEI），沙特基础工业公司；3500 型聚砜（PSf），美国苏威公司；*N*-甲基-2-吡咯烷酮（NMP），分析纯，天津大茂化学试剂厂；石油醚，分析纯，天津大茂化学试剂厂；乙醇，分析纯，天津富宇精细化工有限公司；正己烷，分析纯，天津大茂化学试剂厂；硅橡胶 Sylgard184（PDMS），化学纯，美国道康宁公司；环氧树脂，化学纯，天原树脂厂有限公司；环氧树脂固化剂，化学纯，天原树脂厂有限公司；气体采样袋，大连海得科技有限公司；配置体积比为 65.0% Xe/25.0% O_2/5.0% CO_2/5.0% N_2（实验所用气体浓度均指代体积分数）的人体呼出麻醉氙气混合气时，考虑到实验成本问题，采用 N_2 作为 Xe 的替代气，实际配置混合气组成为 5.0% CO_2/25.0% O_2/70.0% N_2，大连大特气体有限公司。因为 N_2 渗透速率快于 Xe，使得渗余气中 CO_2 浓度实际高于真实含 Xe 体系，故该替代不会对 Xe 回收率产生拔高性能的影响。

氧浓度分析仪（DL-1000），北京久兴隆自动化系统设备有限公司；智能数字压力表（YB-80A），陕西创威科技有限公司；气相色谱仪（GC-7980），上海天美科学仪器有限公司；扫描电子显微镜（JSM-7800F），日本电子株式会社。

1.2　中空纤维膜的制备

采用商用 PEI 和 PSf 为原材料，通过相转化法制备中空纤维膜，制膜流程如图 1 所示。将铸膜液（聚合物溶液）从喷头均匀挤出，同时引入芯液使膜

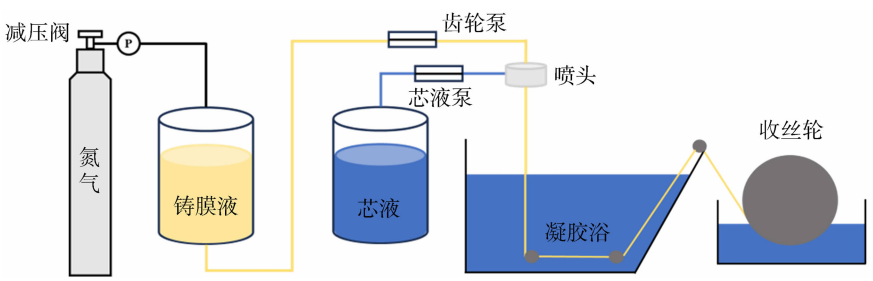


图 1　中空纤维膜制备流程

Fig. 1　Spining process of hollow fiber membranes

形成中空结构。初成膜在空气中暴露一段时间后，随即在收丝轮的牵引下进入凝胶浴(通常为水)中，形成初成中空纤维膜。由于初成中空纤维膜内残留的有机溶剂在膜干燥过程中会显著降低中空纤维膜的气体渗透分离性能，故需进行预处理[22-24]。将初成膜依次浸泡在无水乙醇和正己烷溶剂中各 2 h，以充分去除中空纤维膜内含有的有机溶剂，待溶剂挥发后放入 100 ℃的鼓风烘箱中干燥。最后使用一定浓度的硅橡胶涂层液(硅橡胶和固化剂的质量比为 10∶1)对膜表面的微孔缺陷进行涂覆处理，提高中空纤维膜的渗透分离性能[25-28]。

1.3　中空纤维膜分离器的制备

为了考察分离膜的脱碳性能，制备了如图 2 所示的膜分离器。膜组件由中空纤维膜平行排列组成，膜组件有效长度约为 20.0 cm，制备过程中采用环氧树脂对纤维束两端进行封装浇铸。

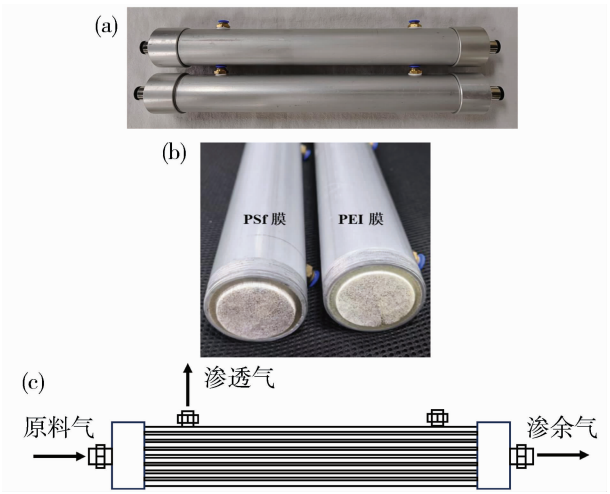


图 2　中空纤维膜分离器实物图(a)；中空纤维膜分离器端面(b)；中空纤维膜分离器结构图(c)

Fig. 2　Physical pictures of hollow fiber membrane separators (a); end face of hollow fiber membrane separators (b); structural pictures of hollow fiber membrane separators (c)

1.4　中空纤维膜性能测试

1.4.1　纯气分离性能测试

将膜组件连接到如图 3 所示的测试装置内，测试中空纤维膜的纯气渗透性能，实验开始前用待测气体以进气-放气的方式吹扫膜组件 4 次，以充分去除膜组件内原有的其他气体。持续通入气体使得膜组件高压侧压力达到并稳定在设定值后，用皂泡流量计测试渗透侧气体流量，气体的测试顺序为 O_2、N_2、Xe、CO_2，气体渗透速率及分离系数的计算公式如式(1)和式(2)所示[29]。

$$\frac{P}{l}=\frac{p_p V_p}{RT}\frac{V_m}{At\Delta p} \tag{1}$$

$$\alpha_{i/j}=\frac{(\frac{P}{l})_i}{(\frac{P}{l})_j} \tag{2}$$

式中：P 为气体渗透系数，Barrer[1 Barrer = 1×10^{-10} cm^3(STP)·cm/(cm^2·s·cmHg)]；l 为致密皮层厚度，cm；p_p 为渗透压力，Pa；V_p 为测试时间内渗透气的体积，m^3；V_m 为标况下理想气体摩尔体积，cm^3(STP)/mol；R 为标准气体常数，8.314 J/(mol·K)；T 为测试温度，K；A 为有效膜面积，cm^2；t 为测试时间，s；Δp 为膜两侧压差，cmHg；P/l 为渗透速率，GPU[1 GPU = 1×10^{-6} cm^3(STP)/(cm^2·s·cmHg)]；i 和 j 为不同气体；$\alpha_{i/j}$ 为气体分离系数。

1.4.2　混合气分离性能测试

实验采用的原料气组成为 5.0% CO_2/25.0% O_2/70.0% N_2。在混合气分离测试中，分别采用氧浓度分析仪和气相色谱分析仪来确定待测气体中 O_2 和 CO_2 浓度。实验流程如图 4 所示，调节气体减压阀控制原料气压力，使原料气从丝内进入膜组件，调节放空阀并用皂泡流量计测量气体流量，使渗余侧与渗透侧气体流量比达到设定值。持续通入气

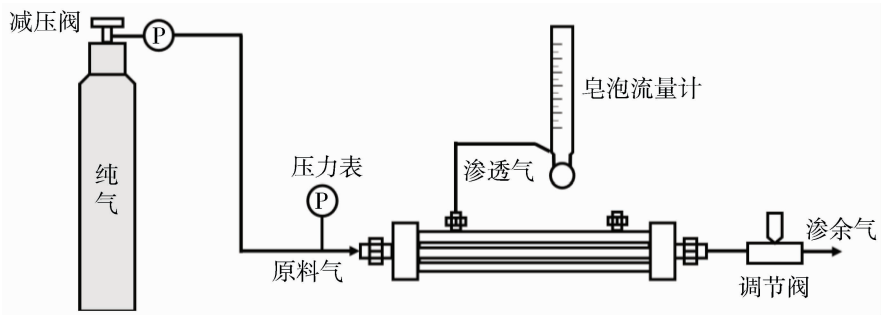


图 3　纯气测试装置流程图

Fig. 3　Flowchart of the pure gas testing device

体并稳定一段时间后,用气体采样袋分别收集渗透侧与渗余侧气体(收集过程中置换 3 次气体,保证采样袋中无其他气体),将待测气体通入气相色谱分析仪分析渗透气和渗余气中 CO_2 浓度,对同一组采样气体进行重复测试,以确保分离过程达到稳态并具备可重复性。

2　结果与讨论

2.1　膜的形貌

采用扫描电子显微镜对涂层前后 PSf 膜和 PEI 膜的断面、内表面、外表面进行表征,表征结果如图 5 所示。通过断面图,可以清楚地观察到 PSf 膜和 PEI 膜的断面圆整规则,其中 PSf 膜具有连续均匀的海绵状结构,PEI 膜则兼具海绵状和指状孔结构。膜内表面在涂层前后无明显变化,而膜外表面变得光滑平整,说明在涂层过程中硅橡胶溶液可有效涂覆底膜中原有的微孔缺陷,并在中空纤维膜外表面形成一层致密的硅橡胶薄层,提高了中空纤维膜的气体渗透分离性能[30]。

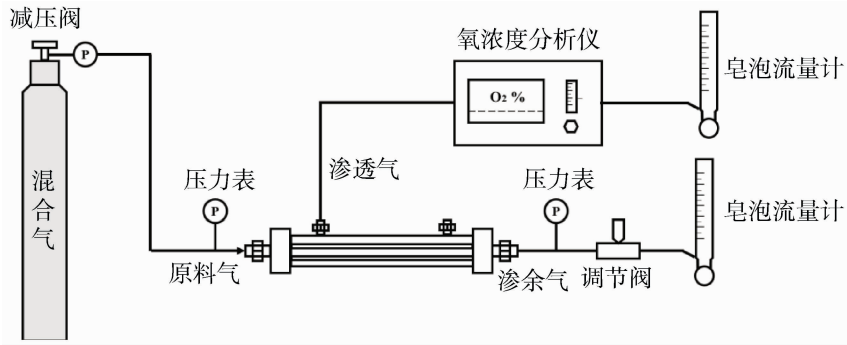


图 4　混合气测试装置流程图

Fig. 4　Flowchart of the mixed gas testing device

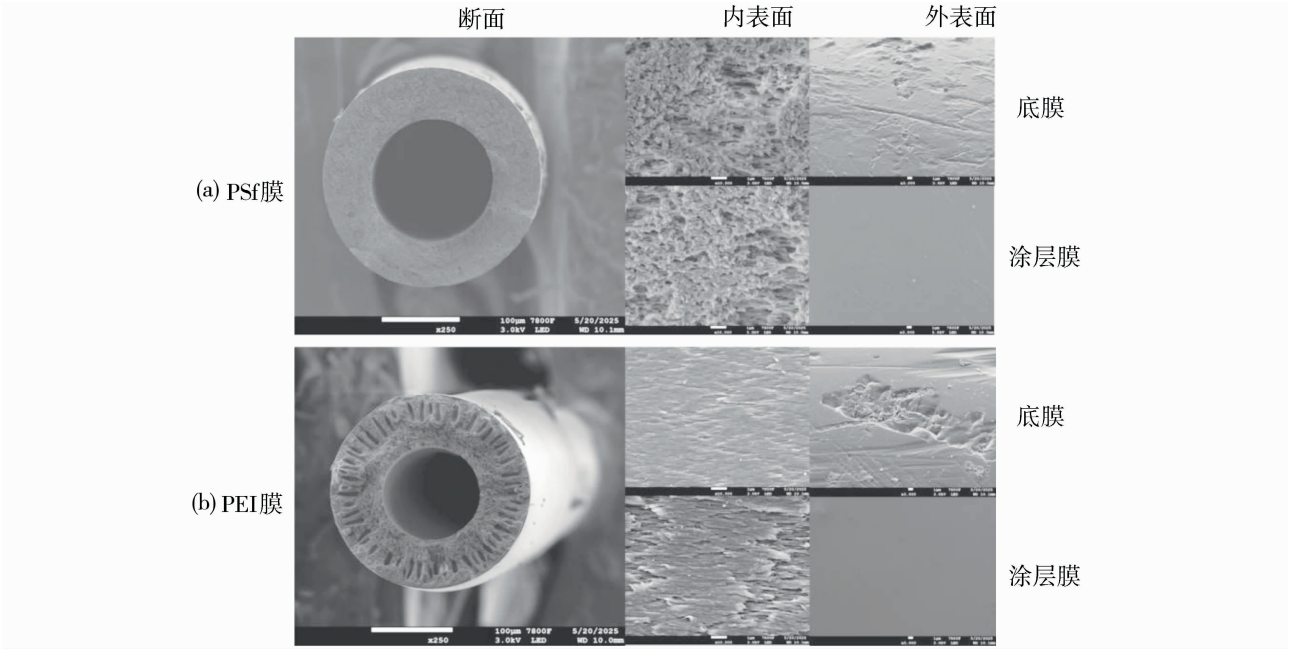


图 5　PSf 膜(a)和 PEI 膜(b)电镜图

Fig. 5　Electron micrograph of PSf membrane (a) and PEI membrane (b)

2.2　膜材料对分离性能的影响

如表 1 所示,涂层前 PSf 和 PEI 膜的 O_2/N_2 分离系数分别为 0.99、1.14,由于膜表面存在微孔缺陷,此时 PSf 和 PEI 膜没有分离性能,需对中空纤维膜进行涂层处理。涂层处理后在室温条件下,依次通入 O_2、N_2、Xe、CO_2,测试 PSf 和 PEI 膜组件的气体渗透性能,四种气体在 PSf 和 PEI 膜中的渗透速率均呈现 $CO_2 > O_2 > N_2 > Xe$ 的大小关系,且

CO_2 和 O_2 的渗透速率远高于 N_2 和 Xe；对于同种气体，其在 PSf 膜中的渗透速率始终高于 PEI；PSf 和 PEI 膜的 CO_2/O_2 分离系数无明显差别，但 PEI 膜组件的 CO_2/N_2、CO_2/Xe 和 O_2/N_2 分离系数均高于 PSf，这是因为 PEI 材料的本征气体渗透系数低于 PSf 材料，但却拥有更高的气体选择性。

表 1　不同膜材料所制分离膜的气体渗透分离性能

Table 1　Gas permeation and separation performance of membranes made of different materials

	膜类型	渗透速率(P/l)/GPU				选择性			
		CO_2	O_2	N_2	Xe	CO_2/O_2	CO_2/N_2	CO_2/Xe	O_2/N_2
涂层前	PSf	—	76.43	77.53	—	—	—	—	0.99
	PEI	—	25.49	22.35	—	—	—	—	1.14
涂层后	PSf	44.75	8.41	1.42	0.60	5.32	31.51	74.58	5.92
	PEI	16.42	3.09	0.40	0.13	5.31	41.05	126.30	7.73

注：测试条件为 0.50 MPa，20.0 ℃。

2.3　放空比对膜分离性能的影响

2.3.1　放空比对 PSf 膜分离性能的影响

实验采用 5.0% CO_2/25.0% O_2/70.0% N_2 混合气为原料气，在室温下考察原料气表压为 0.40、0.60、0.80 MPa 时，放空比对 PSf 膜组件分离性能的影响。如图 6～图 8 所示，随着放空比的增大，PSf 膜组件渗透气、渗余气中 CO_2 浓度逐渐变大，同时还会增加混合气的处理量。这是由于放空比的增大导致组件内气体流速变快，原料气在组件内停留时间变短，此时壳程混合气的浓度更趋近原料气的浓度，因而膜内外保持较高的浓度差即渗透推动力，有利于 CO_2 的渗透，提高了渗透侧 CO_2 的含量。虽然增大放空比提升了组件的混合气处理量，但是对放空气中 CO_2 浓度控制产生不利影响[31]。

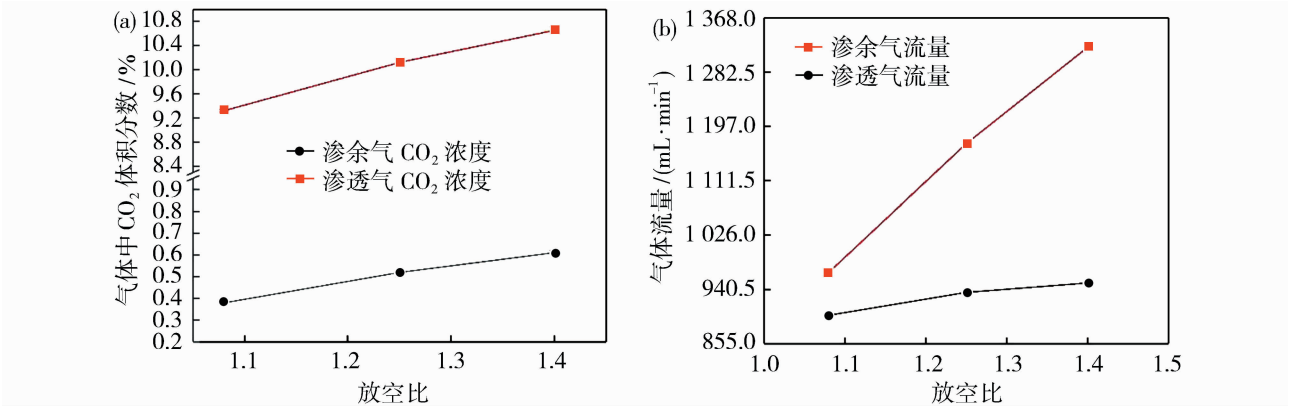


图 6　放空比对气体浓度、渗余气和渗透气流量的影响(0.40 MPa)

Fig. 6　Effects of vent ratio on gas concentration, retentate and permeate gas flow rate (0.40 MPa)

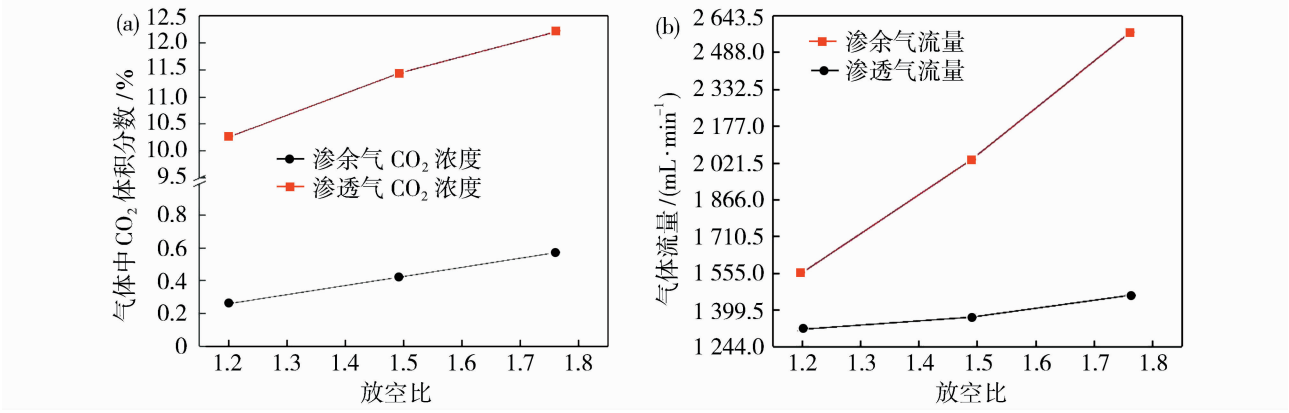


图 7　放空比对气体浓度、渗余气和渗透气流量的影响(0.60 MPa)

Fig. 7　Effects of vent ratio on gas concentration, retentate and permeate gas flow rate (0.60 MPa)

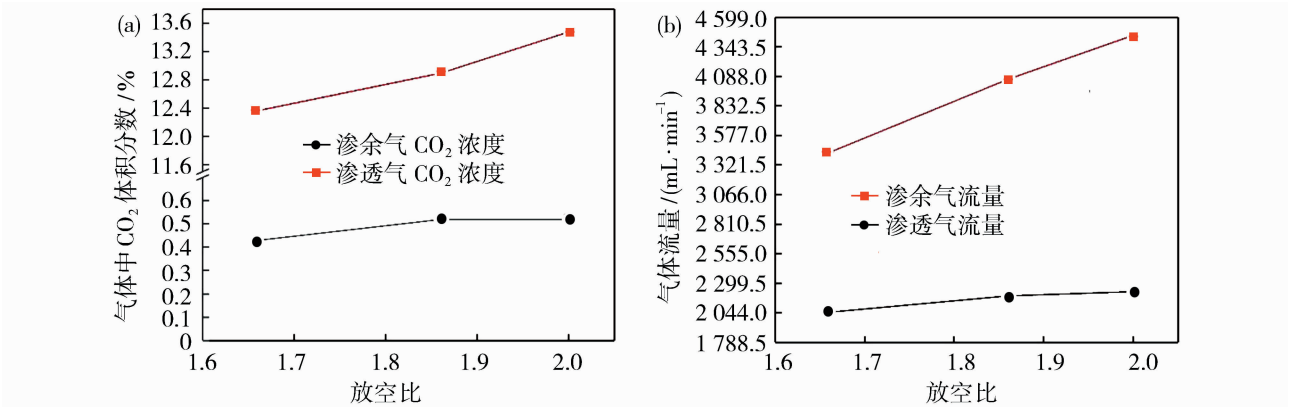


图 8　放空比对气体浓度、渗余气和渗透气流量的影响(0.80 MPa)

Fig. 8　Effects of vent ratio on gas concentration, retentate and permeate gas flow rate (0.80 MPa)

2.3.2　放空比对 PEI 膜分离性能的影响

实验采用 5.0% CO_2/25.0% O_2/70.0% N_2 混合气为原料气,在室温下考察原料气表压为 0.40、0.60、0.80 MPa 时,放空比对 PEI 膜组件分离性能的影响。如图 9～图 11 所示,与 PSf 膜相比,因为 PEI 膜的气体渗透速率较低,其气体处理量要明显少于 PSf 膜。在气体组成方面,放空比对 PEI 膜的影响规律与 PSf 膜相同,故不再进行赘述。

2.4　**原料气压力对膜分离性能的影响**

在室温下考察原料气压力对 PSf 和 PEI 膜组件分离性能的影响。如图 12 所示,以放空气中 CO_2 浓度低于 0.50%为标准,随着原料气压力的增加放空比也增加。具体而言,在原料气表压为 0.40、0.60、0.80 MPa 下,PSf 膜组件所需放空比分别为 1.25、1.76、2.0,PEI 膜组件所需放空比分别为 0.99、1.24、1.55。这是因为随着原料气压力的增加,混合气中的 CO_2 分压增大,增强了传质推动力,导致在恒定浓度下,渗透侧与渗余侧气体处理量随之增加,即能够产出更多满足回用标准的麻醉气体。两个规格膜组件的分离效果相比较可以看出,尽管 PEI 膜组件的气体分离系数更高,但是用于实际混合气脱除 CO_2 过程并没有表现出更好的效果。究其原因,要从膜分离混合气的控制参数分析。决定膜分离混合气效果的主控因素,一个是膜本身的气体分离系数,另外一个则是压力比,即高压侧与低压侧压力之比。考虑到医疗需求和现场条件,在进行模拟混合气分离时当压差设置为 0.80 MPa 时,其压力比较低,仅为 9.0,在这种情况下该混合气膜分离过程更多受压力比控制,即分离系数的差异(126.30 *vs* 74.58)在后者(74.58)已经相对较高的前提下,对整个分离过程并无决定性的影响,反而是渗透速率表现出了更为明显的影响。故在后续工作中不必追求更高的分离系数,而需重点强化分离膜的气体渗透速率。

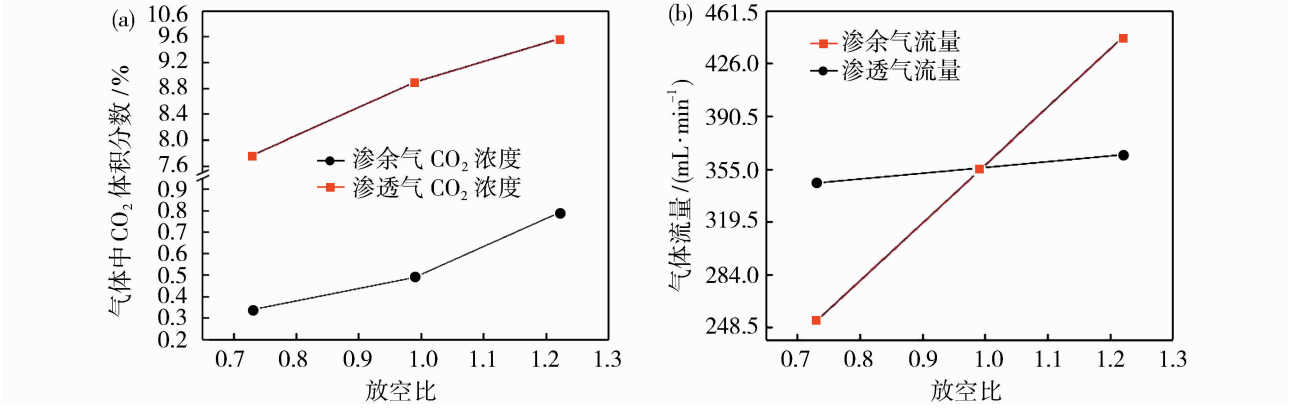


图 9　放空比对气体浓度、渗余气和渗透气流量的影响(0.40 MPa)

Fig. 9　Effects of vent ratio on gas concentration, retentate and permeate gas flow rate (0.40 MPa)

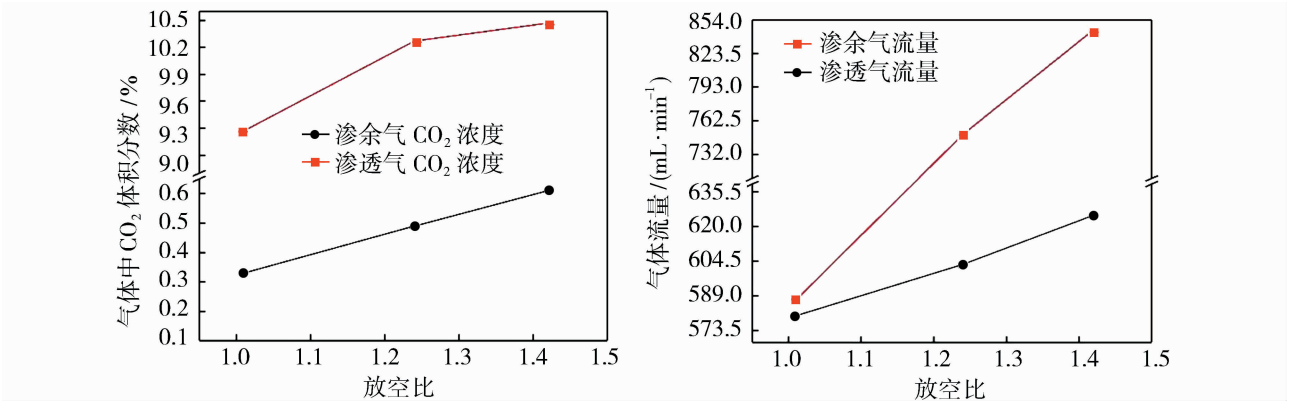


图 10 放空比对气体浓度、渗余气和渗透气流量的影响(0.60 MPa)

Fig. 10 Effects of vent ratio on gas concentration, retentate and permeate gas flow rate (0.60 MPa)

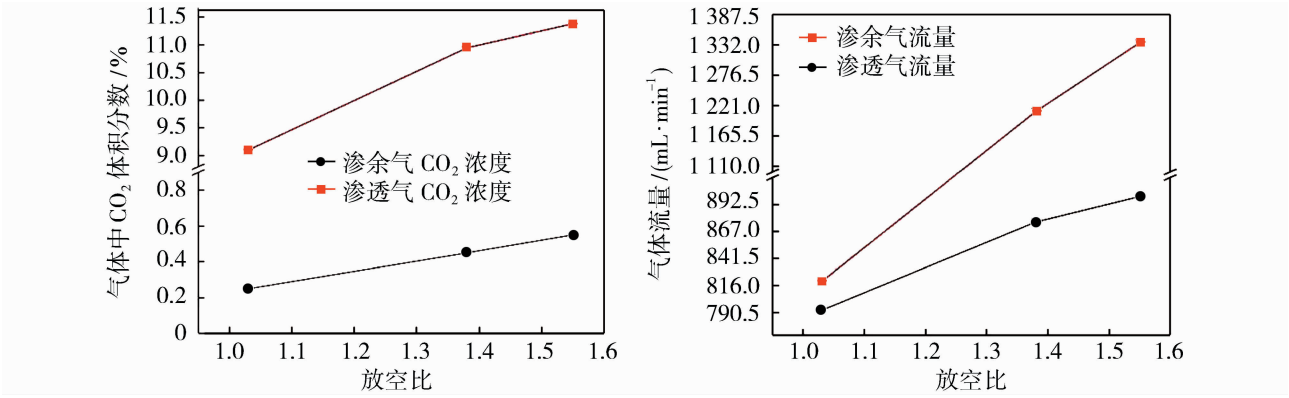


图 11 放空比对气体浓度、渗余气和渗透气流量的影响(0.80 MPa)

Fig. 11 Effects of vent ratio on gas concentration, retentate and permeate gas flow rate (0.80 MPa)

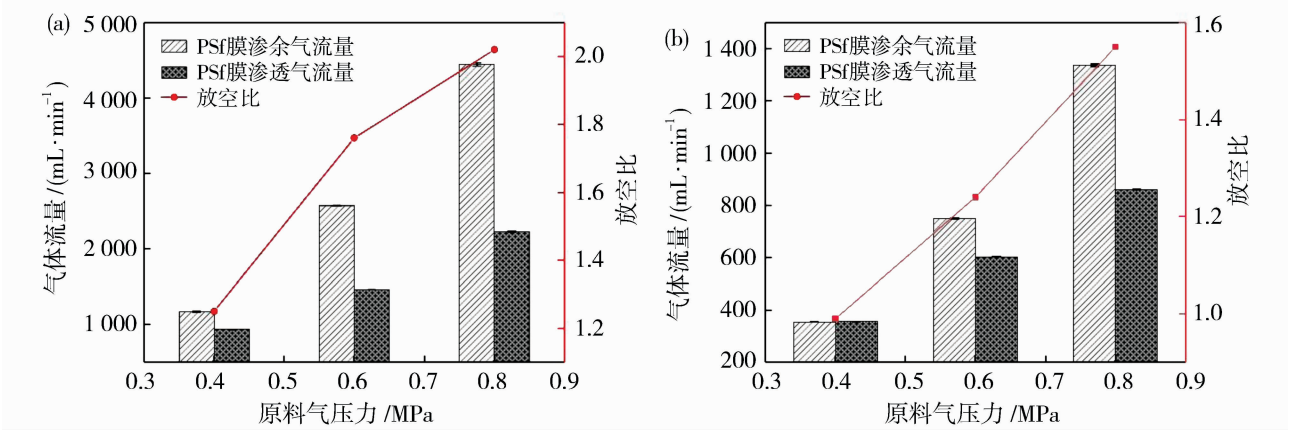


图 12 原料气表压对渗余气和渗透气流量的影响

Fig. 12 Effects of feed gauge pressure on the flow rate of retentate and permeate gas flow rate

2.5 膜循环系统设计与模拟

混合气在膜分离过程中各气体的渗透速率一般会与纯气渗透速率存在一定差异，为了考察二者间的差异会不会显著影响实际的膜分离结果，需要将模拟结果与实际结果进行比对，以确定是否可以采用纯气数据进行模拟。采用 PROII 模拟软件，对 PSf 膜组件在原料气压力 0.80 MPa、放空比 1.66 运行条件下的分离效果进行模拟分析。模拟流程见图 13，模拟结果如表 2 所示，模拟值中各气体浓度、渗余气和渗透气流量与实验值基本吻合，证明采用纯气数据进行模拟是可行的，从而获得该体系采用 PROII 模拟的基础数据。



图 13　PROII 模拟流程图

Fig. 13　PROII simulation flowchart

在上述模拟所确定的气体渗透参数的基础上,为了实现氙气较高的回收要求,采用对 Xe 回用过程脱碳效果更好的PSf膜组件,构建两级膜分离工艺,对人体呼出麻醉氙气进行模拟计算,如图 14 所示。混合气先进入一级 PSf 膜组件,一级渗余气即可以循环实验的氙气混合气(CO_2 浓度为 0.43%,控制在 0.50%以下);一级渗透气经压缩机增压后进入二级 PSf 膜组件,由二级膜组件对其中 CO_2 进行进一步脱除,二级渗透气为排空气;二级渗余气与原料气混合后进入一级膜组件,以大幅度提高氙气的回收率。模拟结果如表 3 所示,该系统的氙气回收率为 98.90%,且再生的氙气麻醉混合气中 CO_2 浓度不高于 0.50%,满足循环使用要求。

表 2　PROII 模拟值与实验值

Table 2　PROII simulative values and experimental values

测试项	模拟值			实验值		
	原料气	渗透气	渗余气	原料气	渗透气	渗余气
气体体积流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	0.329	0.126	0.203	0.329	0.123	0.206
CO_2/%	5.000	12.321	0.445	5.000	12.360	0.430
O_2/%	25.000	45.463	12.269	25.000	44.850	13.140
N_2/%	70.000	42.216	87.286	70.000	42.790	86.430

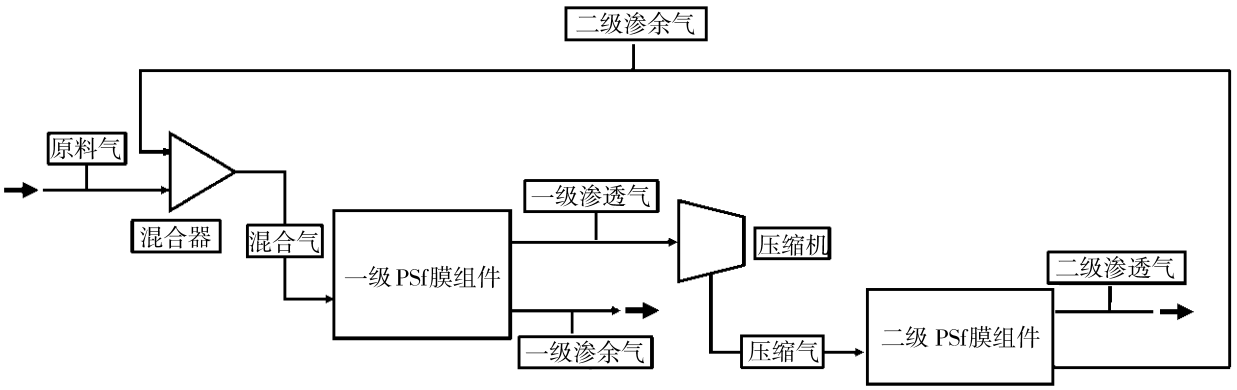


图 14　二级膜循环系统图

Fig. 14　System diagram of the two-stage membrane circulation

表 3　二级膜循环系统模拟值

Table 3　Simulative values of the two-stage membrane circulation system

测试项	原料气	一级渗透气	一级渗余气	二级渗透气	二级渗余气	混合气
气体体积流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	0.329	0.135	0.260	0.069	0.066	0.395
CO_2/%	5.000	11.931	0.430	22.196	1.125	4.355
O_2/%	25.000	61.059	12.256	73.063	48.421	28.912
N_2/%	5.000	4.118	5.969	1.348	7.035	5.337
Xe/%	65.000	22.892	81.345	3.393	43.419	61.396

3　结论

本研究系统探究了 PEI 和 PSf 中空纤维膜对医用氙气麻醉混合气中 CO_2 的脱除性能及其对氙气回收效率的影响。实验结果表明,CO_2 和 O_2 在两种膜材料中的渗透速率均显著高于 N_2 和 Xe,其中 PSf 膜的气体渗透速率更高,而 PEI 膜在 CO_2/N_2(41.05)和 CO_2/Xe(126.30)的分离系数上更具优势。通过调节放空比和原料气压力可提高膜组件

的脱碳性能：增大放空比可提升渗透气中 CO_2 的浓度和混合气处理量，但是会同时提升渗余气中 CO_2 的浓度；而提高原料气压力(0.40～0.80 MPa)可增强 CO_2 的传质推动力，从而获得更多满足 CO_2 浓度降至0.50%以下目标的麻醉氙气再生气。

基于实验数据构建的二级膜循环系统模拟表明，氙气回收率可达98.90%，再生麻醉混合气中 CO_2 浓度稳定在低于0.50%的水平，满足临床循环使用要求。该研究验证了膜分离技术在氙气回收中的可行性与高效性，通过优化工艺参数，在保证 CO_2 脱除效果的同时明显提升了Xe的回收率，为医用麻醉气体资源化利用提供了基础数据积累和可靠的技术路径。

参考文献：

[1] Stuart C, Cullen, Erwin G. The anesthetic properties of xenon in animals and human beings, with additional observations on krypton[J]. Science (New York, N. Y.), 1951, 113(2942): 580-582.

[2] Coburn M, Baumert J H, Roertgen D, *et al*. Emergence and early cognitive function in the elderly after xenon or desflurane anaesthesia: a double-blinded randomized controlled trial[J]. Br J Anaesth, 2007, 98(6): 756-762.

[3] Ishiguro Y. Cardiovascular effects of xenon[J]. Int Anesthesio Clin, 2001, 39(2): 77-84.

[4] Chakkarapani E, Thoresen M, Hobbs C E, *et al*. A closed-circuit neonatal xenon delivery system: a technical and practical neuroprotection feasibility study in newborn pigs[J]. Anesth Analg, 2009, 109(2): 451-460.

[5] 庞 萍. 氙气麻醉在体外循环手术中应用的研究进展[J]. 医学理论与实践, 2018, 31(10): 1431-1433.

[6] Zhu Q, Jung D Y, Oganov A R, *et al*. Stability of xenon oxides at high pressures[J]. Nat Chem, 2013, 5(1): 61-65.

[7] Bonhomme V, Staquet C, Montupil J, *et al*. General anesthesia: A probe to explore consciousness[J]. Front Syst Neurosci, 2019, 13: 36.

[8] Lagorsse S, Magalhães F D, Mendes A. Xenon recycling in an anaesthetic closed-system using carbon molecular sieve membranes[J]. J Membr Sci, 2007, 301(1/2): 29-38.

[9] Cheng M, Wang S, Zhang Z, *et al*. High-throughput virtual screening of metal-organic frameworks for xenon recovery from exhaled anesthetic gas mixture[J]. Chem Eng J, 2023, 451: 138218.

[10] Zeng J, Fu Y, Wu Y, *et al*. Absolute CO_2/Xenon separation in ultramicropore MOF for anesthetic gases regeneration[J]. Angew Chem Int Ed, 2023, 62(42): e202310235.

[11] Dingley J, Mason R S. A cryogenic machine for selective recovery of xenon from breathing system waste gases[J]. Anesth Analg, 2007, 105(5): 1312-1318.

[12] 苏 勇. 低温精馏法空气分离的能耗分析与节能对策[J]. 化工管理, 2019, (7): 43.

[13] 张文挺, 翟 璇, 周 嘉, 等. 二氧化碳捕集技术发展综述[J]. 南方能源建设, 2025, 6(6): 1-11.

[14] Baker R W, Low B T. Gas separation membrane materials: a perspective[J]. Macromolecules, 2014, 47(20): 6999-7013.

[15] Zhmakin V V, Markova S Y, Teplyakov V V, *et al*. Potential of polymer membranes for xenon recovery from medical waste gas mixtures[J]. Membr Membr Technol, 2023, 5(2): 107-114.

[16] Budd P M, Msayib K J, Tattershall C E, *et al*. Gas separation membranes from polymers of intrinsic microporosity[J]. J Membr Sci, 2005, 251(1/2): 263-269.

[17] 张成意. 膜分离技术在绿色产业发展方面的应用[J]. 天津化工, 2024, 38(1): 29-31.

[18] 杨 磊. 膜分离技术在重金属废水处理中的优化与应用[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(4): 120-128.

[19] 安少杭, 陈占营, 刘蜀疆, 等. 聚酰亚胺中空纤维膜材料自由体积与氙渗透性能相关性研究[J]. 现代应用物理, 2024, 15(6): 179-188.

[20] Kozlova A, Zhmakin V, Markova S, *et al*. Xenon recovery from medical gas mixtures by polymer membranes: Effect of temperature on Xe/O_2 selectivity[J]. J Membr Sci, 2024, 698: 122527.

[21] 陈占营, 刘蜀疆, 常印忠, 等. 气体分离膜材料从空气中分离氙气性能研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(1): 137-145.

[22] 祁娅婷. PVDF中空纤维膜的功能化改性及性能研究[D]. 贵阳：贵州大学, 2019.

[23] 杨 飞, 王 潮, 张园园, 等. PEI中空纤维膜的制备及其结构形态调控[J]. 合成纤维工业, 2024, 47(6): 14-19.

[24] 赵 帅. 聚酰亚胺中空纤维膜的制备与富氧性能的研究[D]. 大连：大连交通大学, 2023.

[25] 刘京京, 张亚彬, 杜雄飞. 硅橡胶-玻璃中空纤维富氧

膜的制备[J]. 玻璃, 2019, 46(1): 7-11.
[26] 张　旭, 孟令鹏, 李　培. 提高硅橡胶的粘附性制备多层复合膜[J]. 膜科学与技术, 2020, 40(6): 37-43.
[27] Dal-Cin M M, Darcovich K, Saimani S, *et al*. Gas separation transport modeling for PDMS coatings on PEI-PEG IPN membranes[J]. J Membr Sci, 2010, 361(1/2): 176-181.
[28] Roslan R A, Lau W J, Ismail A F, *et al*. Recent 10-year development on surface modification of polymeric hollow fiber membranes via surface coating approach for gas separation: A review[J]. J Mater Sci, 2024, 59(23): 10083-10118.
[29] 王常春, 赵　琦, 丛玉凤, 等. 天然气膜法脱碳过程中节流降温行为的研究[J]. 膜科学与技术, 2023, 43(3): 22-29.
[30] 张　旭. 中空纤维气体分离复合膜的涂覆工艺与性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2020.
[31] 李立鑫, 宋曦智, 王常春, 等. 天然气膜法脱碳中节流降温及重烃污染研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(1): 1-10.

Experimental study and process simulation of CO_2 removal by membrane separation for online reuse of xenon in medical anesthesia

LI Lixin[1], *MA Yingchao*[1], *WANG Changchun*[1], *REN Yanbo*[2], *REN Xiaoguang*[3], *LIU Jianhui*[1], *LIU Dandan*[1], *WANG Lina*[1], *YU Haijun*[1], *KANG Guodong*[1], *CAO Yiming*[1], *JIE Xingming*[1]

(1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Science, Dalian 116023, China;
2. The First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, China;
3. Yulin Zhongke Clean Energy Innovation Research Institute, Yulin 719111, China)

Abstract: Medical xenon anesthesia gas will be mixed with a certain concentration of CO_2 after human metabolic cycle. In order to meet the requirements of recycling, the CO_2 concentration should be reduced to less than 0.50%. Commercial polyetherimide (PEI) and polysulfone (PSf) were used as raw materials to prepare hollow fiber membranes. The permeation rates of O_2, N_2, Xe and CO_2 in the two membranes were measured. Using the volume fraction of 5.0% CO_2/25.0% O_2/5.0% N_2/65.0% Xe (surrogated by N_2) as the feed gas, the effects of vent ratio (ratio of retentate gas and permeate gas flow), inlet pressure and other parameters on the CO_2 removal performance were systematically studied through the self-made PEI and PSf hollow fiber membrane modules at room temperature. Based on the experimental data, a two-stage membrane separation simulation system was designed. The experimental results showed that the CO_2/N_2 and CO_2/Xe separation coefficients of PEI membrane were higher than that of PSf membrane with lower gas permeation rates. Increasing the vent ratio would increase the gas treatment capacity of membrane, but lead to the increase of CO_2 concentration in the retentate gas. The increase of feed gas pressure obviously promoted the CO_2 removal process driven by pressure difference, and produced more gas that met the reuse standard. The pressure of the actual mixed gas CO_2 removal process was relatively low, and the performance of the membrane module was more obviously affected by its gas permeation rate on the premise that the two membrane separation coefficients were both high. The xenon recovery rate of the two-stage membrane separation simulation system established based on the experimental data was 98.90%, and the CO_2 concentration in the regenerated xenon anesthesia mixture was not higher than 0.50%, which meets the requirements of recycling and greatly reduces the cost of anesthesia xenon.

Key words: xenon anesthesia gas; hollow fiber membrane; xenon recovery; CO_2 removal of mixed gas