

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2023.05.014

聚-4-甲基-1-戊烯中空纤维膜式人工肺膜组件的 氧气和二氧化碳传质性能研究

臧 慧¹, 樊文玲², 李 磊^{1*}

(1. 南京大学化学化工学院, 南京, 210023; 2. 南京中医药大学药学院, 南京, 210023)

摘 要:采用自制的聚-4-甲基-1-戊烯中空纤维膜式人工肺组件,进行了氧气和二氧化碳传质性能研究.实验采用自制的模拟液循环装置,模拟液在膜丝外部流动,在氧气通入之前,用驱氧装置实现氧气的排出和二氧化碳的吸收,模拟静脉血,从而达到循环的效果.氧气在膜丝内部流动,经过膜组件部分溶解在膜丝外的模拟液中后,剩余氧气排出.模拟液选用去离子水、PBS 缓冲溶液(78 v% PBS 缓冲溶液,22 v% 去离子水)、甘油-水溶液(50 wt% 甘油,50 wt% 去离子水)和亚硫酸钠水溶液(0.9 wt% 亚硫酸钠,99.1 wt% 去离子水).实验测定了在不同气-液流速、气相压力和气-液比下,氧气和二氧化碳的传质速率.实验测试表明,随着气-液流速增加,氧气和二氧化碳的传质效果明显增加,在去离子水中,在 300 mL·min⁻¹ 流速下,传质速率可达 57.11 mL·min⁻¹·m⁻² 和 103.59 mL·min⁻¹·m⁻².随着气相压力的增加,氧气传质效果增速先增后减,逐渐趋于平衡,而二氧化碳的传质效果有所下降.随着气-液比的增加,氧气传质效果有所增加,而二氧化碳传质效果保持不变.

关键词:聚-4-甲基-1-戊烯,膜式人工肺,氧气传质性能,二氧化碳传质性能,模拟液循环装置

中图分类号:TQ021.4

文献标志码:A

Study on mass transfer performance of oxygen and carbon dioxide through poly-4-methyl-1-pentene hollow fiber membrane artificial lung module

Zang Hui¹, Fan Wenling², Li Lei^{1*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China;

2. College of Pharmacy, Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing, 210023, China)

Abstract: In this paper, self-made poly-4-methyl-1-pentene hollow fiber membrane artificial lung components were used to study the mass transfer performance of oxygen and carbon dioxide. In this experiment, a self-made simulated liquid circulation device is used, which simulates the flow of liquid outside the membrane filament, and before oxygen is introduced, the oxygen displacement device is used to discharge oxygen and absorb carbon dioxide, simulating venous blood, so as to achieve the effect of circulation. Oxygen flows inside the membrane filament, passes through the simulated liquid dissolved outside the membrane filament by the membrane module, and the rest is discharged. The simulated solution was deionized water, PBS buffer solution (78 v% PBS buffer solution, 22 v% deionized water), glycerol-aqueous solution (50 wt% glycerol, 50 wt% deionized water) and sodium sulfite aqueous solution (0.9 wt% sodium sulfite, 99.1 wt% deionized water). In this experiment, the mass transfer rates of oxygen and carbon dioxide were determined under different gas-liquid flow rates, gas-phase pressures and gas-liquid ratios. Experimental tests show that with the increase of gas-liquid flow rate, the mass transfer effect of oxygen and carbon dioxide increases significantly, and the mass transfer rate can reach 57.11 mL·min⁻¹·m⁻² and 103.59 mL·min⁻¹·m⁻² at a flow rate of 300 mL·min⁻¹ in deionized water. With the increase of gas phase pressure, the growth rate of

收稿日期:2023-04-05

* 通讯联系人, E-mail: lilei@nju.edu.cn

oxygen mass transfer effect first increases and then decreases, and gradually tends to balance, while the mass transfer effect of carbon dioxide decreases. With the increase of the gas-liquid ratio, the oxygen mass transfer increases, while the carbon dioxide mass transfer effect remains unchanged.

Key words: poly-4-methyl-1-pentene, membrane artificial lung, oxygen mass transfer performance, carbon dioxide mass transfer performance, simulated liquid circulation device

人工肺是能通过膜进行气体交换的一种人工器官,具有肺的功能,能够吸收氧气和排出二氧化碳^[1-2]。1953年,人工肺首次在心脏手术中成功应用。此后,人工肺成为人们不断研究探索的领域^[3]。迄今,人工肺经历了四个发展阶段:生物肺氧合阶段^[4]、血膜式人工肺阶段^[5]、鼓泡式人工肺阶段^[6]和膜式人工肺阶段^[7]。膜式人工肺又称为膜式氧合器,目前已被广泛应用于临床上,用高分子材料制成的微孔膜形成纤维束,作为人体血液和气体交换的重要场所,用于完成人体的生理氧合过程^[8-10]。近年来,中空纤维膜已经成为膜式人工肺研究的主要方向,一是因其具有较大的接触面积,二是具有较好的氧合形态^[11-12],因此该技术优势非常明显。

对于膜式人工肺来说,最关键的部件是膜材料,膜材料的性能决定了氧合器的性能,而膜材料的氧气和二氧化碳的传质性能是评估氧合器性能的一个重要因素^[13-14]。从膜式人工肺的研究发展过程来看,重点是膜材料的氧气传质效率,但是对于人工肺来说,不仅要有氧气的有效吸收,而且要排出适量的二氧化碳,从而达到保护肺部的效果,所以二氧化碳的排出效率也是重要的考察因素之一^[15-17]。目前,同时进行人工肺中氧气和二氧化碳的传质效果的研究不多。张问等^[18]以生理盐水为介质,测试了氧气和二氧化碳的传质性能,也为后续的活体动物实验的分析评价奠定了基础。Hormes et al^[19]利用CFD (Computational Fluid Dynamics)建立了氧气和二氧化碳在中空纤维膜里的传质模型,并通过微膜氧合器进行了验证。Kaesler et al^[20]制作了小型实验室的氧合器并用猪血进行了气体转移的测试,还利用数学模型进行了实验验证。

本课题组已系统性地完成了模拟液单通氧气的传质效率测试。本文在此基础上,对传质装置

进行了修改,设计了模拟液的驱氧装置,可以排出氧气以及通入二氧化碳,实现可在膜组件中同时进行氧气进入模拟液和模拟液排出二氧化碳的传质研究。本文以不同的模拟液(去离子水、PBS (Phosphate Buffered Saline)缓冲溶液、甘油-水溶液和亚硫酸钠水溶液),测试了在不同气-液流速、不同气相压力、不同气-液比下的氧气和二氧化碳的传质性能,更好地为临床应用提供理论基础。

1 实验部分

1.1 原料 PMP (poly-4-methyl-1-pentene)中空纤维膜,实验室自制;去离子水,实验室自配;PBS缓冲溶液,实验室自配,78 v% PBS缓冲溶液,22 v%去离子水;甘油水溶液,实验室自配,50 wt%甘油,50 wt%去离子水;亚硫酸钠水溶液,实验室自配,0.9 wt%亚硫酸钠,99.1 wt%去离子水;膜式人工肺组件氧气和二氧化碳传质性能测试装置,实验室设计,艾生科化工科技有限公司制造;测氧仪,上海雷磁仪器厂;蠕动泵,上海卡默尔流体科技有限公司。

1.2 实验步骤

1.2.1 膜式人工肺组件的制备 PMP膜式人工肺膜组件为实验室自制,其特征参数如下表所示。

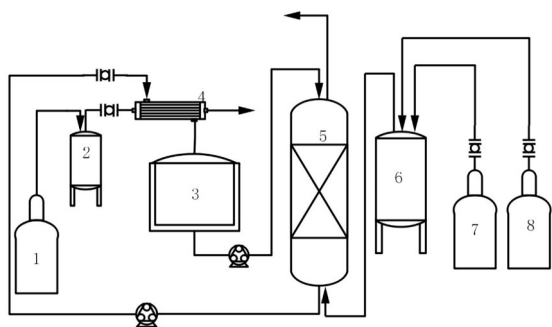
表 PMP膜式人工肺膜组件的特征参数

Table Characteristic parameters of membrane artificial lung membrane modules

参数	数值
膜组件内径(cm)	3
膜组件及中空纤维膜长度(cm)	20
中空纤维膜外径(μm)	972
中空纤维膜内径(μm)	440
中空纤维膜根数(根)	200
孔隙率	64.6%
出(入)液口内径 D_l (cm)	1
出(入)气口内径 D_g (cm)	1

1.2.2 膜式人工肺的氧气和二氧化碳传质性能

测试 膜式人工肺组件氧气和二氧化碳传质性能测试装置如图 1 所示. 该装置包括两个部分, 其一为气相部分, 钢瓶内氧气通过气相流量计后通入中空纤维膜组件膜丝内部, 溶解在膜丝外的模拟循环液内, 剩余气体通过管道排出; 其二为液相部分, 储液罐内模拟液经蠕动泵送入驱氧装置, 进行脱氧和补充二氧化碳(通入 $1.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的二氧化碳($20 \text{ v}\%$)和氮气($80 \text{ v}\%$)的混合气体), 经过蠕动泵和流量计送入中空纤维膜组件的膜丝外部.



1-氧气钢瓶;2-氧气缓冲罐;3-储液罐;4-中空纤维膜;5-驱氧装置;6-氮气、二氧化碳缓冲罐;7-氮气钢瓶;8-二氧化碳钢瓶

图 1 膜式人工肺膜组件传质性能测试装置图

Fig. 1 Test device for mass transfer performance of membrane-type artificial lung membrane module

本研究实验内容主要如下所述. (1)共选取了四种模拟液,分别为去离子水、PBS 缓冲溶液、甘油-水溶液和亚硫酸钠水溶液. 去离子水为参照模拟液, PBS 缓冲溶液保证盐平衡,维持环境 pH,甘油-水溶液模拟人体血液黏度,亚硫酸钠水溶液则通过氧气和亚硫酸钠反应来代替血红蛋白对氧气的运输. (2)维持气相压力为 0.2 MPa ,温度为 37°C ,气-液比为 $5:1$,测试液相流速为 $50 \sim 300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 实验条件下的模拟液中氧气和二氧化碳的进、出口浓度. (3)维持液相流速为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,温度为 37°C ,气-液比为 $5:1$,测试气相压力为 $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 条件下的模拟液中氧气和二氧化碳的进、出口浓度. (4)维持液相流速为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,温度为 37°C ,气相压力为 0.2 MPa ,测试气-液比为 $3 \sim 7$ 的条件下模拟液中氧气和二氧化碳的进、出口浓度. (5)由于二氧化碳对亚硫酸钠水溶液中亚硫酸根离子浓度的测定有较

大影响,实验中亚硫酸钠水溶液采取单程流动,不进入液相循环系统,不通入二氧化碳,只测试不同气-液相流速、不同气相压力、不同气-液比下的亚硫酸钠水溶液中氧气的进、出口浓度.

本实验中去离子水、PBS 缓冲溶液和甘油水溶液中的氧含量用测氧仪测定,亚硫酸钠水溶液的氧含量通过碘量法测定亚硫酸钠浓度获得,而去离子水、PBS 缓冲溶液和甘油水溶液中的二氧化碳含量则由 NaOH 滴定法测定^[21].

传质速率计算公式如下:

$$N = \frac{(C_{\text{出}} - C_{\text{入}}) \nu_{\text{液}}}{1000 \rho A}$$

其中, N 为传质速率, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; C 为浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\nu_{\text{液}}$ 为液体流速, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$; ρ 为密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; A 为膜面积, m^2 .

2 结果与讨论

2.1 不同气-液流速下氧气和二氧化碳传质速率

测定 当中空纤维膜根数为 200、气相压力为 0.2 MPa ,气-液比为 $5:1$ 时,不同气-液流速下膜组件的氧气和二氧化碳传质速率测定结果详见图 2 至图 4.

从图 2 和图 4 可以看出,氧气和二氧化碳传质速率最高的是去离子水,在最高流速下分别为 $57.11 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $103.59 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,然后是 PBS 缓冲溶液,在最高流速下分别为 $47.59 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $72.51 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,最低的是甘油-水溶液,在最高流速下分别为 $36.49 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $57.04 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. 去离子水是除去了离子型杂质后的纯水,故其溶氧量和溶二氧化碳量也较高. PBS 缓冲溶液为磷酸缓冲盐溶液,而盐度对溶氧和溶二氧化碳也有一定的影响^[22-23],故氧气和二氧化碳的传质效率较去离子水低. 甘油-水溶液的黏度较高,是另外两种溶液的五倍左右,其液相的黏度较大,扩散系数小,故其传质的阻力也较大,传质效率也较低. 同时,从图 2 和图 4 也可以看出氧气的传质速率增加较快,主要原因是在测试过程中,氧气通入量随液体流速有所增加,液相和气相传质阻力都有所下降,从而氧气扩散加快较多,且气相流速增加,相同时

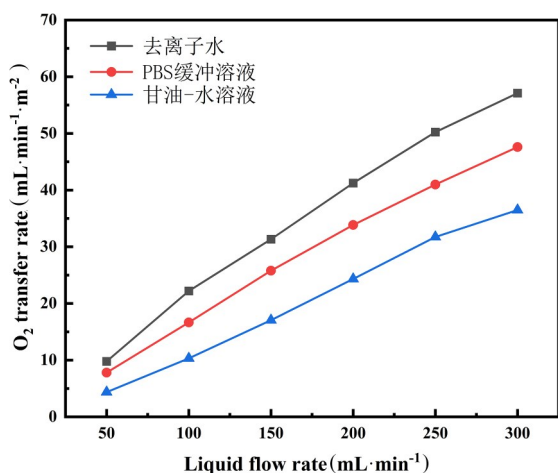


图2 不同气-液流速下氧气传质速率

Fig. 2 Oxygen mass transfer rate at different gas-liquid flow rates

间内,气-液接触量变多,所以增加趋势较明显。而二氧化碳的传质速率增加趋势有所减缓,主要原因是随着液体流速增加,液相传质阻力降低,使二氧化碳的扩散有一定增加,但同时液体与氧气的接触时间相对减少,所以增加趋势有所减缓。

从图3可以看出亚硫酸钠水溶液的氧气传质效率要比其他三个模拟液高很多,最高流速下达到 $238.04 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 主要是因为亚硫酸钠和氧气会进行氧化反应生成硫酸钠,有化学反应吸收的过程,而其他三种模拟液的传质则仅依靠氧气浓度差,故亚硫酸钠水溶液的氧气传质效率远高于其他三种模拟液。

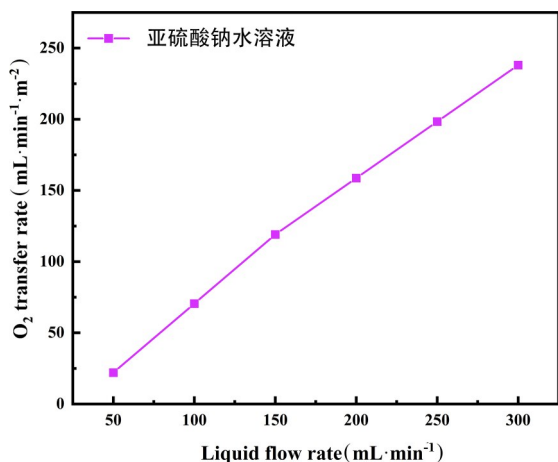


图3 不同气-液流速下氧气传质速率(亚硫酸钠水溶液)

Fig. 3 Oxygen mass transfer rate at different gas-liquid flow rates (sodium sulfite solution)

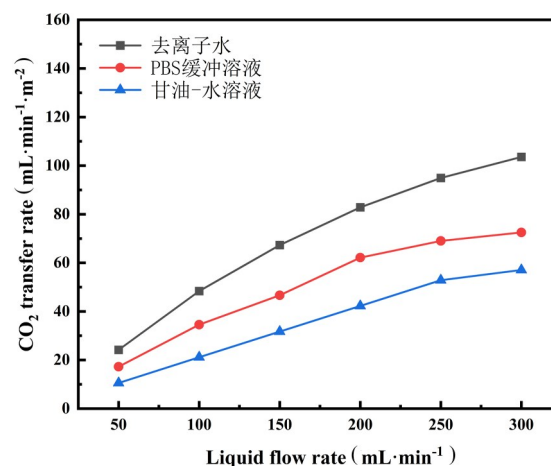


图4 不同气-液流速下二氧化碳传质速率

Fig. 4 Carbon dioxide mass transfer rate at different gas-liquid flow rates

2.2 不同气相压力下氧气和二氧化碳传质速率测定 当液相流速为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、气-液比为 5:1 时,不同气相压力下膜组件的氧气和二氧化碳传质速率测定结果详见图5至图7。

从图5和图6可以看出,当气相压力为 $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 时,去离子水、PBS缓冲溶液、甘油-水溶液和亚硫酸钠水溶液的氧气传输速率有明显增加,但随着压力的增加,其增加的趋势有明显下降。主要原因是氧气压力增加,增加了氧气浓度,所以扩散至气-液两相界面的氧气分子更多,从而产生更高的传质推动力。而随着气相压力增大,游离的气泡直径会明显增大,总比表面积会随之变小,氧气和模拟液的接触面会减少,因此随着气相压力增加,氧气传质速率的增幅会有所下降。

从图7可以看出二氧化碳的传质效率有所下降,这和氧气的传质理论相似,主要是因为二氧化碳的传质主要依靠的是液膜两侧的浓度差,而随着氧气压力有所增加,给二氧化碳的传质带来了阻力,从而导致二氧化碳的传质速率有所下降。

2.3 不同气-液比下氧气和二氧化碳传质速率测定 当液相流速为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、气相压力为 0.2 MPa 时,不同气-液比下膜组件的氧气和二氧化碳传质速率测定结果详见图8~10。

从图8和图9可以看出当气-液比从 3:1 增加到 7:1 时,去离子水、PBS缓冲溶液、甘油-水溶液和亚硫酸钠水溶液的氧气传输速率有明显的增

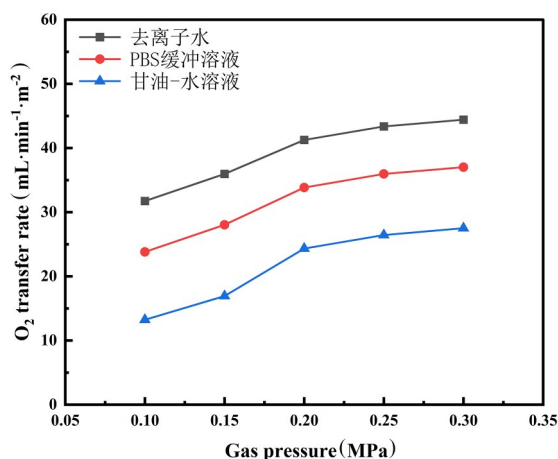


图5 不同气相压力下氧气传质速率

Fig. 5 Oxygen mass transfer rate under different gas pressures

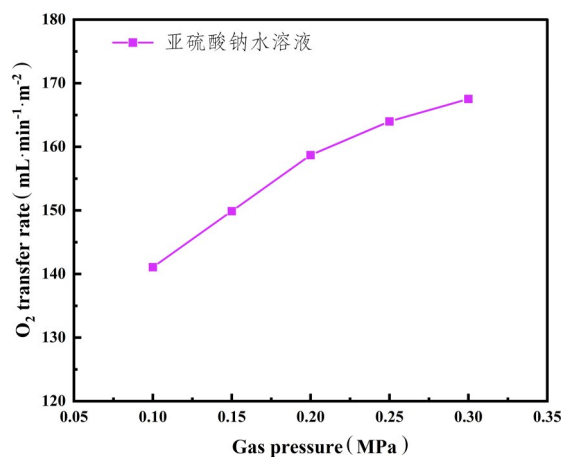


图6 不同气相压力下氧气传质速率(亚硫酸钠水溶液)

Fig. 6 Oxygen mass transfer rate under different gas pressures (sodium sulfite solution)

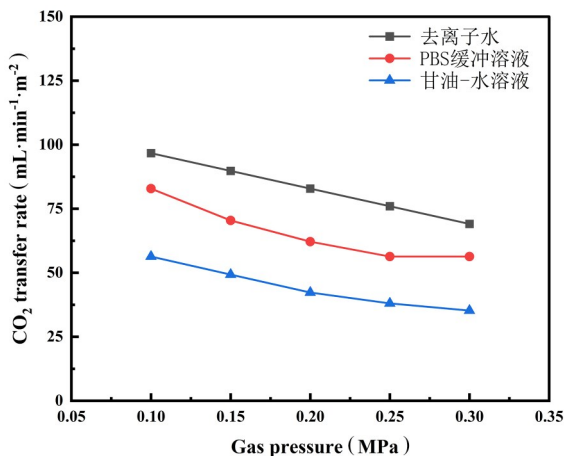


图7 不同气相压力下二氧化碳传质速率

Fig. 7 Carbon dioxide mass transfer rate under different gas pressure

加. 液相流速不变的情况下, 只改变气相流速, 气相流速从 $600 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 一直增加到 $1400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 气相侧气膜随之变小, 气相侧传质阻力下降, 传质系数提高. 同时氧气通过膜孔进入液相侧的量增加, 随着氧气流速增加, 相对时间内, 氧气和液体的接触量有所增加, 所以随着气体流速增加, 氧气传质速率有所提高.

从图 10 可以看出, 气相侧氧气速度增加, 对二氧化碳的传质效果并无明显影响, 从中也可以推测出, 只改变气相中的氧气流速而不改变压力, 此时二氧化碳从液相扩散到气相的阻力不发生变化, 二氧化碳传质效果在气相流速的变化下, 主要

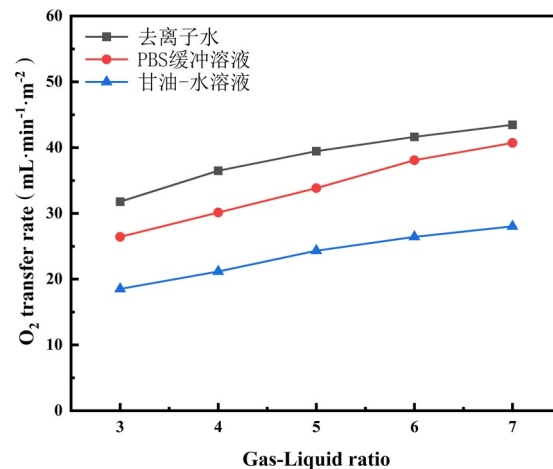


图8 不同气-液比下氧气传质速率

Fig. 8 Oxygen mass transfer rate at different gas-liquid ratios

依据浓度差, 在这项测试中二氧化碳浓度差不变, 所以氧气流速增加, 对二氧化碳的传质效率基本没有影响.

3 结论

本文利用四种不同模拟液(去离子水、PBS缓冲溶液、甘油-水溶液和亚硫酸钠水溶液), 通过自制的聚-4-甲基-1-戊烯中空纤维膜式人工肺组件对氧气进入模拟液和二氧化碳离开模拟液的传质性能进行系统研究. 研究结论如下: 在气-液比、气相压力一定下, 随着气-液流速的增加, 氧气和二氧化碳的传质速率都有明显的增加. 在气-

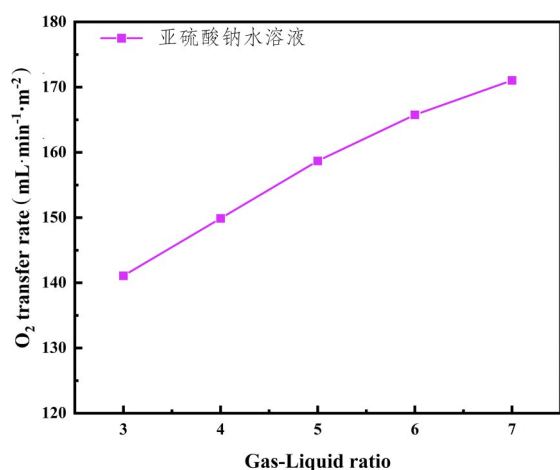


图9 不同气-液比下氧气传质速率(亚硫酸钠溶液)

Fig. 9 Oxygen mass transfer rate under different gas-liquid ratios (sodium sulfite solution)

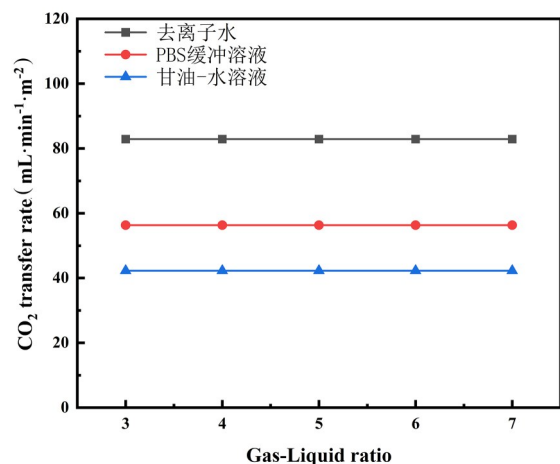


图10 不同气-液比下二氧化碳传质速率

Fig. 10 Carbon dioxide mass transfer rate at different gas-liquid ratios

液比、气-液流速一定下,随着气相压力的增加,氧气的传质速率刚开始增加速度较为明显,而后增速有明显的下降,二氧化碳的传质速率则逐渐降低. 在气-液流速、气相压力一定下,氧气的传质速率呈线性增加,而二氧化碳的传质速率基本保持不变. 在不同模拟液下,氧气传质最快的是亚硫酸钠水溶液,而后分别是去离子水、PBS缓冲溶液和甘油-水溶液. 二氧化碳的传质效果基本和氧气保持一致,由快到低分别是去离子水、PBS缓冲溶液和甘油-水溶液. 根据实验结果可知,在去离子水中,在 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 流速下,氧气和二氧化碳传质速率可达 $57.11 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和

$103.59 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. 而在亚硫酸钠水溶液中,氧合效果可达 $238.04 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. 上述研究结果充分表明本实验室自制的聚-4-甲基-1-戊烯中空纤维膜组件具有良好的氧气吸收和二氧化碳排出功能,有较好的临床应用前景和商业价值.

参考文献

- [1] Lautier A, Gille J P, Juvin A M, et al. Extracorporeal circulation in European economic community (EEC in EEC): 1979—1989. *International Journal of Artificial Organs*, 1993, 16(9): 670—676.
- [2] Kawak A M, Gaylor J D, Simpson K, et al. An in vitro technique to assess oxygenator potential for respiratory failure therapies. *The International Journal of Artificial Organs*, 1991, 14(4): 234—238.
- [3] Wendel H P, Ziemer G. Coating - techniques to improve the hemocompatibility of artificial devices used for extracorporeal circulation. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 1999, 16(3): 342—350.
- [4] Hammond G L, Poulain H. Pulmonary support using venovenous bypass and a biological oxygenator. *Thorax*, 1974, 29(1): 121—124.
- [5] Hattler B G, Reeder G D, Sawzik P J, et al. Development of an intravenous membrane oxygenator: enhanced intravenous gas exchange through convective mixing of blood around hollow fiber membranes. *Artificial Organs*, 1994, 18(11): 806—812.
- [6] 凤琪, 孙衍庆. 小型鼓泡型人工肺的研制. *北京生物医学工程*, 1988(Z1): 58—62. (Feng Q, Sun Y Q. Development of small bubbling artificial lung. *Beijing Biomedical Engineering*, 1988(Z1): 58—62.)
- [7] Dierickx P W, De Wachter D S, Verdonck P R. Two-dimensional finite element model for oxygen transfer in cross-flow hollow fiber membrane artificial lungs. *The International Journal of Artificial Organs*, 2001, 24(9): 628—635.
- [8] Huang X, Wang W, Zheng Z, et al. Dissipative particle dynamics study and experimental verification on the pore morphologies and diffusivity of the poly (4-methyl-1-pentene)-diluent system via thermally induced phase separation: The effect of diluent and polymer concentration. *Journal of Membrane Science*, 2016(514): 487—500.

- [9] 梁亚静, 臧慧, 樊文玲, 等. 聚甲基戊烯膜式人工肺的氧气传质测试及模型计算. 南京大学学报(自然科学), 2022, 58(4): 713—719. (Liang Y J, Zang H, Fan W L, et al. Oxygen mass transfer test and model calculation of polymethylpentene membrane artificial lung. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2022, 58(4): 713—719.)
- [10] 许梦菲, 梁亚静, 臧慧, 等. 聚-4-甲基-1-戊烯中空纤维膜式人工肺组件的氧气传质性能的研究. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(4): 641—647. (Xu M F, Liang Y J, Zang H, et al. Study on oxygen mass transfer performance of poly-4-methyl-1-pentene hollow fiber membrane artificial lung components. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2021, 57(4): 641—647.)
- [11] 孙俊芬, 王庆瑞. 新型膜式人工脏器的研究进展. 产业用纺织品, 2001(8): 9—13. (Sun J F, Wang Q R. Research progress of new membrane artificial organs. Industrial Textiles, 2001(8): 9—13.)
- [12] 叶非华, 廖虎, 易国斌. 基于多孔介质模型的膜式氧合器内部流场分析. 化工进展, 2020, 39(3): 898—905. (Ye F H, Liao H, Yi G B. Internal flow field analysis of membrane oxygenator based on porous media model. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(3): 898—905.)
- [13] Arazawa D T, et al. Kinetics of CO₂ exchange with carbonic anhydrase immobilized on fiber membranes in artificial lungs. Journal of Materials Science. Materials in Medicine, 2015, 26(6): 1—8.
- [14] Wickramasinghe S R, Garcia J D, Han B. Mass and momentum transfer in hollow fibre blood oxygenators. Journal of Membrane Science, 2002, 208(1—2): 247—256.
- [15] May A G, Omecinski K S, Frankowski B J, et al. Effect of hematocrit on the CO₂ removal rate of artificial lungs. ASAIO Journal, 2020, 66(10): 1161—1165.
- [16] 饶华新. 新型中空纤维膜式人工肺的设计与研究. 博士学位论文. 广州: 暨南大学, 2008. (Rao H X. Design and research of novel hollow fiber membrane artificial lung. Ph.D. Dissertation. Guangzhou: Ji'nan University, 2008.)
- [17] Bartlett R. Physiology of extracorporeal gas exchange. Compr Physiol, 2020, 10(3): 879—891.
- [18] 张问, 周津, 夏俊娣, 等. 血管内置入型人工肺的传质计算与 in vitro 模拟实验对比分析. 中国生物医学工程学报, 2001, 20(4): 346—350. (Zhang W, Zhou J, Xia J D, et al. Mass transfer calculation of vascular implanted artificial lung and comparative analysis of in vitro simulation experiment. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2001, 20(4): 346—350.)
- [19] Holmes M, Borchardt R, Mager I, et al. A validated CFD model to predict O₂ and CO₂ transfer within hollow fiber membrane oxygenators. The International Journal of Artificial Organs, 2011, 34(3): 317—325.
- [20] Kaesler A, Rosen M, Schlanstein P C, et al. How computational modeling can help to predict gas transfer in artificial lungs early during development. ASAIO Journal, 2020, 66(6): 683—690.
- [21] 郭伟强. 大学化学基础实验. 北京: 科学出版社, 2010.
- [22] 虞哲, 张燕, 姜茗馨, 等. 含盐度对溶解氧的影响. 科学咨询(科技·管理), 2014(3): 39—40. (Yu Z, Zhang Y, Jiang M X, et al. Effect of salinity on dissolved oxygen. Science Consulting(Science and Technology Management), 2014(3): 39—40.)
- [23] 杨盼瑞, 郭会荣, 周倩, 等. 广泛温度和盐度条件下二氧化碳在盐水中的扩散系数. 地质科技情报, 2018, 37(6): 252—257. (Yang P R, Guo H R, Zhou Q, et al. Diffusion coefficient of carbon dioxide in brine under wide temperature and salinity conditions. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(6): 252—257.)

(责任编辑 杨贞)