

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20171295

过程参数对采用多孔陶瓷超滤膜回收烟气中余热和水性能的影响

孟庆莹¹, 曹语¹, 黄延召², 王乐³, 李丽¹, 牛淑锋¹, 漆虹¹

(¹南京工业大学膜科学技术研究所, 材料化学工程国家重点实验室, 江苏 南京 210009; ²中石化炼化工程(集团)股份有限公司洛阳技术研发中心, 河南 洛阳 471003; ³中国石油化工股份有限公司科技部, 北京 100728)

摘要: 将孔径为 20 nm 的陶瓷膜组装制成膜冷凝器, 在水蒸气-空气形成的模拟体系中, 采用去离子水作为冷却介质, 开展了传递膜冷凝技术在烟气除湿和工业余热综合应用方面的研究。考察了空气流量、冷却水流量、进气温度和冷却水温度对陶瓷内膜和外膜过程通量的影响, 并比较了两者水热回收性能。结果表明, 过程通量均随进气流量和进气温度的增大而增加。随着冷却水流量的增大, 过程通量也不断增加, 但是冷却水流量达到一定值后, 过程通量基本不再变化。冷却水温度对过程水通量的影响较小, 但是热通量对冷却水温度的改变较敏感。冷却水流量的变化对陶瓷外膜的过程通量影响更加显著, 表明陶瓷外膜水热回收过程更易受流体边界层的影响。在各实验工况范围内, 陶瓷内膜和外膜分别具有更高的热通量和水通量, 采用陶瓷膜过程的水通量和热通量最高分别可达到 $23.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $47.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。随着传递膜冷凝技术开发和研究的不断深入, 该技术在除湿和工业余热综合应用领域有着广阔的发展空间, 将为我国节水、节能以及环境保护等领域的发展提供新的解决思路。

关键词: 陶瓷膜; 烟气水分回收; 余热回收; 传递膜冷凝技术; 烟羽

中图分类号: TQ 174.9

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 06—2519—07

Effects of process parameters on water and waste heat recovery from flue gas using ceramic ultrafiltration membranes

MENG Qingying¹, CAO Yu¹, HUANG Yanzhao², WANG Le³, LI Li¹, NIU Shufeng¹, QI Hong¹

(¹Membrane Science and Technology Research Center, State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China; ²Luoyang R&D Center of Technology Sinopec Engineering (Group) Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; ³China Petroleum & Chemical Corporation Technology Department, Beijing 100728, China)

Abstract: A membrane condenser was established by using tubular ceramic membranes with a separation layer of 20 nm in pore size, which are coated on the inner/outer-side of the tube (IM/OM), respectively. Experiments of water and heat recovery from simulated flue gas were conducted using deionized water as coolant. Effects of air flow rate, cooling-water flow rate, inlet gas temperature and inlet water temperature on mass and heat transfer across the IM and OM were investigated. Results showed that both water and heat fluxes of IM and OM increased as the increment of the air flow rate and inlet gas temperature. Water and heat fluxes of both IM and OM increased as the cooling-water flow rate elevated, while this tendency of variation was not remarkable when the cooling-water flow rate reached a certain value. Reducing the inlet water temperature effectively enhanced heat

2017-09-27 收到初稿, 2018-02-05 收到修改稿。

联系人: 漆虹。第一作者: 孟庆莹 (1991—), 女, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21276123, 21490581); 国家高技术研究发展计划项目 (2012AA03A606); 中国石油化工股份有限公司资助项目。

Received date: 2017-09-27.

Corresponding author: Prof. QI Hong, hqi@njtech.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21276123, 21490581), the National High Technology Research and Development Program of China (2012AA03A606) and the China Petroleum & Chemical Corporation.

fluxes of IM and OM, but had little effect on water fluxes. The influence of coolant water flow rate on water and heat fluxes of OM is more significant, indicating that mass and heat transfer across the OM was more susceptible to the boundary layers effect. Compared with the IM, the OM exhibited much higher water fluxes and lower heat fluxes. In this work, water and heat fluxes of ceramic membranes were up to $23.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ and $47.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. With the development of the TMC, it has broad application in dehumidification and utilizing industrial waste heat. This technology will also bring new ideas in many fields such as energy and water conservation and environmental protection.

Key words: ceramic membranes; water recovery over flue gas; waste heat recovery; transport membrane condenser; smoke plume

引 言

近年来, 工业的迅速发展虽然在很大程度上促进了经济增长, 但由此引发的环境问题也是目前我国亟待解决的重点难题。化工、炼化以及电力等支柱性行业产生的工业排放严重制约了其自身发展, 对排放烟气的净化处理得到广泛关注。我国的脱硫系统主要为湿法脱硫工艺, 脱硫后的烟气含水量高。以燃煤电厂为例, 其排放的烟气中水蒸气含量高达 12%, 造成烟气在排放过程中难扩散, 易形成烟羽以及引发雾霾等环境问题^[1-4]。因此, 对烟气中的水蒸气进行回收再利用不仅能减轻我国工业用水压力, 还能缓解工业排放引发的环境问题。目前用于回收锅炉烟气中水蒸气和余热资源的技术主要有冷凝换热法和膜分离法。冷凝换热法相对简单、成本较低。但冷凝液水质差及设备腐蚀问题仍是传统换热器需克服的主要问题^[5-7]。膜分离法属于近年来迅速发展起来的除湿技术。膜材料可以选择性地分离烟气中的水蒸气, 从而得到高质量冷凝水, 同时其具有装置占地面积小, 膜组件易实现标准化制造及模块化安装等特点, 使该技术具有良好的工业化应用前景。Sijbesma 等^[8]采用膜层为 SPEEK 的中空纤维复合膜捕集烟气中的水蒸气, 该膜在实际烟气中连续运行了 5300 h, 水通量维持在 $0.2\sim 0.46 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 且回收水的水质较好。然而, 此类膜冷凝系统中, 膜两侧需维持较大压差以提供水蒸气渗透推动力, 导致水捕集过程能耗较高。Macedonio 等^[9]提出采用疏水膜材料回收工业废气中的水蒸气, 结果表明: 气体温度降低 5°C , 该类膜冷凝器即可实现 20% 的水回收率。ECTFE 膜和 PVDF 膜也被应用于膜冷凝系统^[10-13], 两者均可实现 35%~55% 的水回收率^[10]。美国天然气技术研究所于 2011 年首次提出传递膜冷凝 (transport membrane condenser, TMC) 概念, 即基于亲水陶瓷膜的烟

气余热和水回收再利用技术。在 TMC 过程中, 烟气中的水和热量通过陶瓷膜传递至冷却水侧, 并被直接循环至锅炉补给水系统^[14]。目前, TMC 技术在燃气锅炉上已实现商业化, 其水回收率在 40% 以上, 锅炉效率提升了 5%^[14]。基于多孔陶瓷膜的 TMC 技术不仅具有更高的过程通量, 而且材料本身具有优异的化学和热力学稳定性、较高的机械强度以及易于清洗等优势^[15-16], 因而表现出广阔的发展前景。

国外关于 TMC 技术的应用研究多采用孔径为 $6\sim 8 \text{ nm}$ 的管式陶瓷膜^[14, 17-18]。本课题组前期也开展了孔径为 $8\sim 10 \text{ nm}$ 的管式和 19 通道陶瓷膜的水热回收性能研究^[19-21], 结果表明: 管式膜具有更好的水和热量回收效果。在膜冷凝器中, 当膜孔径处在 $2\sim 50 \text{ nm}$ 范围时, 水蒸气的传质过程主要遵循毛细冷凝机理^[22], 因此孔径为 20 nm 的管式陶瓷膜也适用于 TMC 技术, 且具有更高过程通量。因此, 本文将孔径为 20 nm 的管式陶瓷膜组装制成膜冷凝器, 重点考察了空气流量、冷却水流量、进气温度以及冷却水温度对陶瓷内膜和外膜水通量和热通量的影响, 并比较了两者水热回收性能的差异。以期 TMC 技术的放大应用提供基础数据。

1 实验材料和方法

1.1 陶瓷膜结构

与管式陶瓷膜相比, 由于 19 通道陶瓷膜管壁较厚, 导致其传质传热阻力较大^[20], 故实验采用孔径为 20 nm 的管式陶瓷膜用于模拟体系中的水和热量回收。管式陶瓷膜均由南京工业大学膜科学技术研究所提供。陶瓷膜主要由三层结构组成: 支撑层, 过渡层和膜层。根据膜层的位置, 可将管式陶瓷膜分为陶瓷内膜 (IM) 和陶瓷外膜 (OM), 见图 1。

在陶瓷膜冷凝器中, 水的选择性回收遵循毛细冷凝机理, 热量回收则是通过热对流和热传导的方

式实现,以陶瓷外膜冷凝器为例,其 TMC 过程如图 2 所示^[14]。在陶瓷内膜冷凝器中,冷、热流体分别在壳层与管层流动。而在陶瓷外膜冷凝器中,冷、热流体流通位置恰好相反。利用毛细冷凝机理分离气体混合物时,可以得到远高于 Knudsen 扩散和表面扩散的分离因子^[22-24],因而 TMC 技术可以从烟气中回收得到高质量冷凝水。此外,在陶瓷膜冷凝器中,因传质和传热同时进行,故该过程可获得比传统换热器更高的热回收效率以及传热系数^[18, 25]。

1.2 实验装置

在水蒸气-空气形成的模拟体系中进行陶瓷膜水和热量回收实验。实验装置主要包括三部分:蒸汽发生系统、恒温冷却循环系统和膜组件。实验装置详见课题组前期文章^[19-20]。膜组件内分别装填四根呈正方形排列的管式内膜和外膜,管长 110 mm,

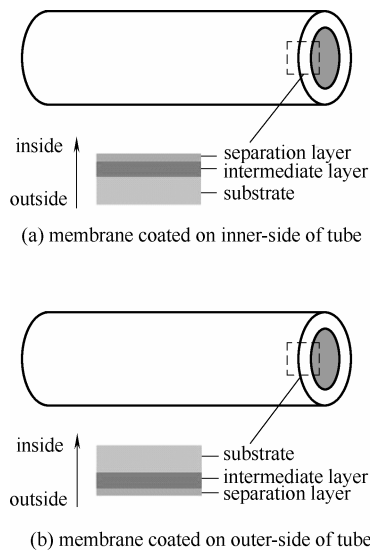


图 1 陶瓷膜结构

Fig.1 Ceramic ultrafiltration membranes with gradient structures

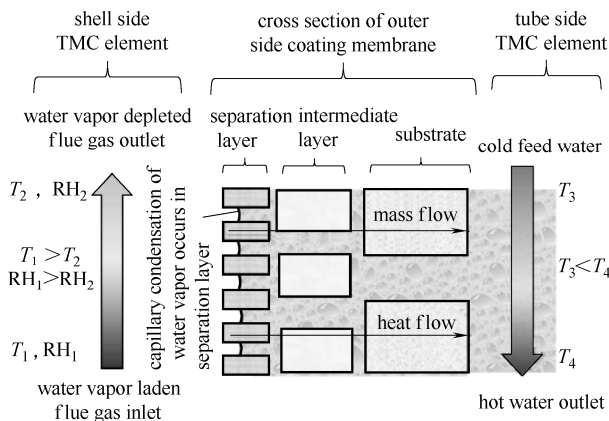


图 2 陶瓷外膜冷凝器的 TMC 过程

Fig.2 Schematic diagram of TMC process of OM condenser

内径 8 mm, 外径 12 mm, 有效膜面积分别为 9550 和 11300 mm²。

1.3 分析仪器及计算方法

使用场发射扫描电镜 (FESEM, S4800, Hitach, Japan) 表征膜的断面结构。

在陶瓷膜冷凝器中,水和热量可以同时进行传递,本文以水通量和热通量评价膜冷凝器的水和热量传递性能。

水通量和热通量分别由式(1)和式(2)进行计算

$$J_w = \frac{\Delta W}{A \Delta t} \quad (1)$$

$$q_w = \frac{C m_l \Delta T + C T_o W_l}{A} \quad (2)$$

式中, J_w 为水通量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; Δt 为时间, h; ΔW 为渗透侧得到的冷凝液在 Δt 时间内的质量变化, kg; A 为陶瓷膜有效膜面积, m^2 ; q_w 为热通量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; C 为水的比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$; m_l 为冷却水质量流量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; ΔT 为冷却水进出口的温度变化值, $^{\circ}\text{C}$; T_o 为冷却水出水口温度, $^{\circ}\text{C}$; W_l 为冷凝液质量流量, $\Delta W / \Delta t$, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

总传热系数通过式(3)进行计算^[26]

$$Q = K A \Delta t_m \quad (3)$$

式中, Q 为膜冷凝器的热负荷, W; K 为传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$; A 为有效换热面积, m^2 ; Δt_m 为对数平均温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 陶瓷膜的微观结构

图 3 是陶瓷膜断面的 SEM 图。可以看出,陶瓷内膜和外膜均具有明显的三层结构,且两者膜层厚度约为 8 μm 。

2.2 进气流量对陶瓷膜过程通量的影响

在进气温度 65 $^{\circ}\text{C}$ 、冷却水流量 15 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、冷却水温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、跨膜压差 0.02 MPa 的条件下,考察进气流量对陶瓷膜过程通量的影响,结果如图 4 所示。陶瓷膜的水通量和热通量均随进气流量的增大而增加。当进气流量从 12 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 30 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,陶瓷内膜的水通量从 9.52 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 17.9 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 外膜的水通量也从 14.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 升高至 21.7 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 热通量也表现出相同的变化趋势。这是由于进气流量越大,饱和体系的水蒸气量越多,单位时间内冷凝放热的水蒸气量增加;另外,随着进气流量的增加,膜冷凝器中的气相边界层减

薄, 气相传递阻力减小, 有利于水蒸气的扩散以及气体侧的对流传热过程, 这都会使得陶瓷膜过程通量增加。与 Chen 等^[27]报道的结果相比, 相似操作条件下, 本文中陶瓷外膜的水通量高出约 33.3%。

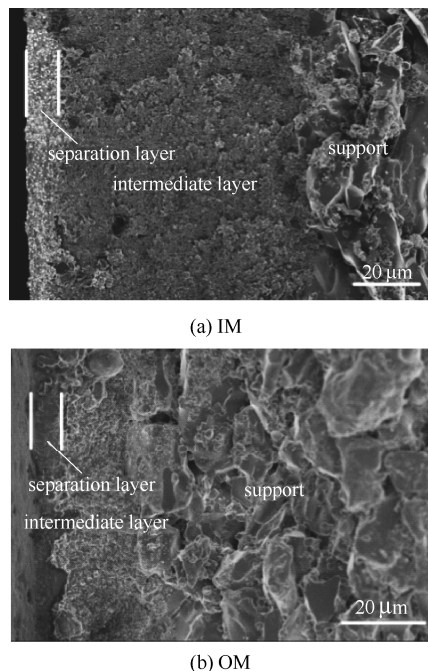


图 3 陶瓷膜断面的 SEM 图

Fig.3 Cross-section SEM images of ceramic membranes

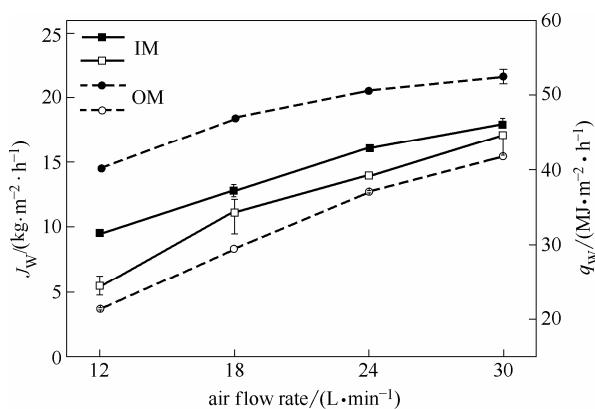


图 4 进气流量对水通量和热通量的影响

Fig.4 Effect of air flow rate on water and heat fluxes across membrane condenser

2.3 冷却水流量对陶瓷膜过程通量的影响

在进气流量 24 L·min⁻¹、进气温度 65℃、冷却水温度 25℃、跨膜压差 0.02 MPa 的条件下, 考察冷却水流量对陶瓷膜过程通量的影响, 结果如图 5 所示。陶瓷膜过程通量均随冷却水流量的增大而增加, 且热通量在一定冷却水流量范围内几乎呈线性增加。一方面是由于增大冷却水流量, 有利于将气

体侧传递出的热量及时带出膜冷凝器, 陶瓷膜两侧壁面间的温度梯度增大, 传热推动力增加。另一方面液相边界层厚度随着冷却水流量的增加而减薄, 液相传递阻力减小, 利于冷凝液的扩散以及冷却水与壁面间的对流传热, 从而提高了陶瓷膜的水通量和热通量。值得注意的是, 当冷却水流量分别高于 10 L·h⁻¹ 和 15 L·h⁻¹ 以后, 陶瓷内膜和外膜的过程通量曲线均趋于平缓, 基本不再增加, 文献中也有类似报道^[17, 27-28]。这是因为, 当液相阻力减小到一定程度后, 其对膜冷凝器传递过程的影响不断减弱, 导致气侧传递阻力起主导作用。因而, 在实际操作中, 冷却水流量并非越高越好, 冷却水流量和气体流量的比值也是影响膜冷凝器水热回收效果的关键因素^[29]。此外, 从图 5 还可以看出, 增大冷却水流量, 陶瓷外膜的过程通量上升更显著, 表现为冷却水流量从 5 L·h⁻¹ 增大到 20 L·h⁻¹ 时, 内膜水通量和热通量仅增加了 2.44 kg·m⁻²·h⁻¹ 和 10.3 MJ·m⁻²·h⁻¹, 而外膜则大幅提高了 5.83 kg·m⁻²·h⁻¹ 和 20.4 MJ·m⁻²·h⁻¹。这说明液相边界层对陶瓷外膜传递过程的影响更强, 因而当升高冷却水流量, 液相边界层减薄时, 外膜的过程通量出现了明显的升高。因此当采用不同结构的陶瓷膜用于膜冷凝器中时, 对过程优化的侧重点也不同。

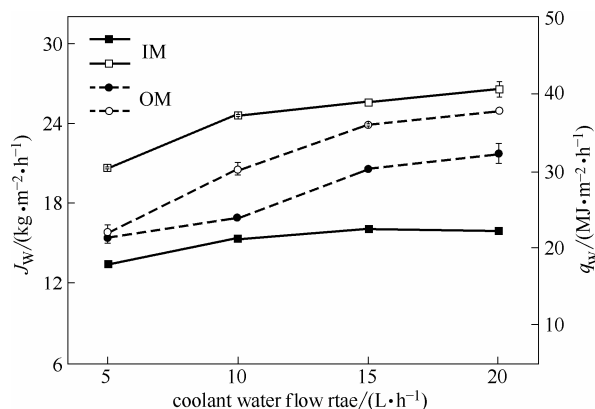


图 5 冷却水流量对水通量和热通量的影响

Fig.5 Effect of coolant water flow rate on water and heat fluxes across membrane condenser

2.4 进气温度对陶瓷膜过程通量的影响

在进气流量 24 L·min⁻¹、冷却水流量 5 L·h⁻¹、冷却水温度 25℃、跨膜压差 0.02 MPa 的条件下, 考察进气温度对陶瓷膜过程通量的影响, 结果如图 6 所示。陶瓷膜过程通量均随着进气温度的升高不断增加, 且温度越高, 过程通量增加越快。以陶瓷外膜为例, 进气温度 55℃ 时, 其水通量和热通量

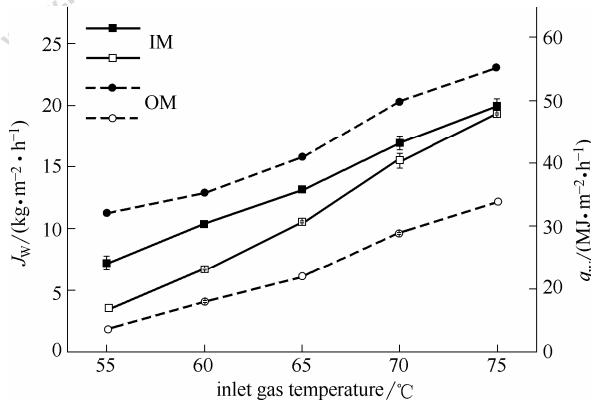


图 6 进气温度对水通量和热通量的影响

Fig. 6 Effect of gas mixture temperature on water and heat fluxes across membrane condenser

仅为 $11.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $13.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，当进气温度升至 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，过程通量则快速增至 $23.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $33.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。这是因为进气温度越高，饱和体系的含湿率和焓值越高，单位时间冷凝的水蒸气量和冷热流体间传递的热量增加；另外，随着进气温度的升高，冷、热流体间的温差变大，传热推动力增加，这同时也促进了传质过程的进行，因此过程通量均随着进气温度的升高而增加。

2.5 冷却水温度对陶瓷膜过程通量的影响

在进气流量 $24 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、进气温度 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 、冷却水流量 $15 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 、跨膜压差 0.02 MPa 的条件下，考察冷却水温度对陶瓷膜过程通量的影响，结果如图 7 所示。在实验工况范围内，陶瓷膜的水通量均随冷却水温度的增高缓慢降低。当冷却水温度从 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 增高至 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，陶瓷内膜的水通量从 $17.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 下降到 $15.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ；陶瓷外膜的水通量从 $22.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 下降到 $18.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。但是，

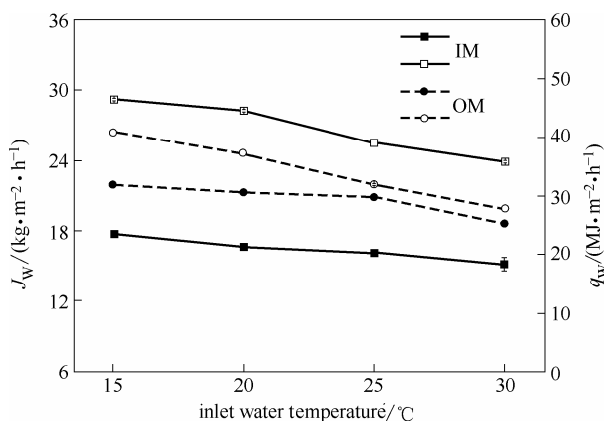


图 7 冷却水温度对水通量和热通量的影响

Fig.7 Effect of inlet water temperature on water and heat fluxes across membrane condenser

陶瓷膜热通量对冷却水温度的变化更加敏感。当冷却水温度从 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，陶瓷膜内膜的热通量从 $46.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 降低至 $35.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，而外膜则从 $40.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 快速降至 $27.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，下降幅度均超过了 21.7% 。本文的结果也证实了文献的结论：冷却水温度越高，则回收的热量下降速率越快^[30]。

上述研究结果表明，虽然陶瓷内膜和外膜的过程通量变化趋势相似，但是在各实验工况下，陶瓷内膜和外膜分别具有更高的热通量和水通量。以进气流量为例，在 $12\sim 30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 进气流量下，陶瓷外膜的水通量平均比内膜高出 36.4% ，而热通量则比内膜低 9.36% 。陶瓷外膜可实现较高水通量一方面是由于气体在壳层流动时，冷凝液不易积聚在陶瓷膜表面，有效降低了冷凝液液膜的传递阻力；另一方面则是由于当气体在不同位置流动时，其在膜冷凝器中的停留时间不同。以进气流量为 $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 为例，气体在管层和壳层的停留时间分别为 0.053 s 和 0.43 s ，故水蒸气在陶瓷外膜冷凝器中有较充分的时间吸附冷凝，两者共同作用使得陶瓷外膜具有较高水通量。然而，因冷却水在管层流动时的停留时间明显少于在壳层流动时的情况，故水蒸气虽然在陶瓷外膜冷凝器中释放出更多的潜热，但是因冷却水在组件中的停留时间较短，导致蒸汽释放的热量不能被及时回收。另外，各实验条件下，陶瓷内膜均具有更高的总传热系数，以 $12\sim 30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 进气流量下总传热系数为例，结果如图 8 所示。可以看出，该过程的总传热系数随着进气流量的增大而增加，且陶瓷内膜的总传热系数比外膜平均高出

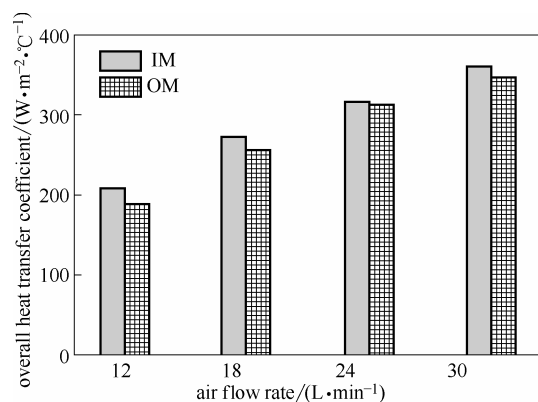


图 8 陶瓷内膜和外膜总传热系数的比较

Fig.8 Comparison of overall heat transfer coefficient of TMC process by using IM and OM, respectively

5.72%，故陶瓷外膜的热通量略低。综上所述，陶瓷内膜和外膜分别具有更高的热通量和水通量。根据课题组前期完成的 19 通道陶瓷膜的水和热量回收结果可知，因在多通道陶瓷膜中，水和热量从热流体侧传递至冷流体侧需经过较长距离，导致其传质传热阻力较大，故其过程通量远低于单通道陶瓷内膜^[20]。结合本文工作，三种不同结构的陶瓷膜的水通量大小排序为：单通道陶瓷外膜>单通道陶瓷内膜>19 通道陶瓷膜，热通量排序则为单通道陶瓷内膜>单通道陶瓷外膜>19 通道陶瓷膜。而就白烟治理问题上，因陶瓷外膜具有更高的过程水通量以及易于清洗等优势，故在实际应用中，宜选取管式外膜用于脱硫烟气的除湿和热量回收。此外，就组件制造和端头密封而言，陶瓷外膜与内膜相比仍存在一定困难，因此对膜冷凝器的专用膜组件实现标准化设计和制造也是今后该技术实现工业化应用的重要前提之一。

3 结 论

(1) 在陶瓷膜回收模拟体系的水和热量过程中，陶瓷内膜与陶瓷外膜的过程通量变化趋势一致；过程通量均随着进气流量和进气温度的增大而增加；在一定范围内，增加冷却水流量可以提高陶瓷膜过程通量，但当其增加到一定值后，其对膜过程通量的影响较小，故液气比也是影响膜冷凝器水热回收的关键因素；冷却水温度（15~30℃）对陶瓷膜水通量影响较小，但是热通量对冷却水温度的变化相对敏感。

(2) 与陶瓷内膜相比，改变冷却水流量时，陶瓷外膜的过程通量变化更加显著，这表明外膜水和热量回收过程更易受冷却水侧边界层的影响。

(3) 各实验工况范围内，陶瓷内膜和外膜分别具有更高的热通量和水通量，本文涉及的实验工况下，陶瓷外膜的水通量平均比内膜高出 27.3%，而热通量则比内膜低 17.1%；本文采用陶瓷膜过程的水通量和热通量最高可分别达到 23.1 kg·m⁻²·h⁻¹ 和 47.5 MJ·m⁻²·h⁻¹。

References

[1] 王贵彦, 黄素华. 湿法脱硫燃煤机组“白色烟羽”节能治理[J]. 华电技术, 2016, 38(11): 64-65.
WANG G Y, HUANG S H. Treatment of "smoke plume" in wet flue gas desulfurization system[J]. Huadian Technology, 2016, 38(11): 64-65.

[2] 曹晋宁. 湿法脱硫技术的应用及对雾霾的影响 [J]. 山西化工, 2017, (3): 56-58.
CAO J N. Application of wet desulfurization technology and its influence on fog and haze[J]. Shanxi Chemical Industry, 2017, (3): 56-58.

[3] 邓骥, 魏芳. 湿法烟气脱硫过程白烟成因及防治措施分析[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(2): 17-21.
DENG J, WEI F. Analysis on the causes and prevention measures of white mist in wet flue gas desulfurization[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(2): 17-21.

[4] 唐韵, 夏再忠, 王如竹. 冷却塔白烟防止技术[C]//东南大学, 江苏省制冷协会. 第四届全国制冷空调新技术研讨会论文集. 南京: 东南大学, 江苏省制冷协会, 2006: 480-483.
TANG Y, XIA Z Z, WANG R Z. Controlling of the vapor plume from wet cooling tower[C]//Southeast University, Jiangsu Province Institute of Refrigeration. The Fourth National Conference on Refrigeration Technology Symposium. Nanjing: Southeast University, Jiangsu Province Institute of Refrigeration, 2006: 480-483.

[5] 赵钦新, 苟远波. 凝结换热与冷凝式锅炉原理及应用(续完)[J]. 工业锅炉, 2013, (2): 1-7.
ZHAO Q X, GOU Y B. Principle and application of condensing boilers (the end)[J]. Industrial Boiler, 2013, (2): 1-7.

[6] 毛丽燕, 张荣华. 燃气锅炉烟气凝结水的回收与利用[J]. 中国特种设备安全, 2016, 32(10): 45-47.
MAO L Y, ZHANG R H. Recovery and utilization of flue gas condensate in gas fired boiler[J]. China Special Equipment Safety, 2016, 32(10): 45-47.

[7] XIONG Y Y, TAN H Z, WANG Y B, *et al.* Pilot-scale study on water and latent heat recovery from flue gas using fluorine plastic heat exchangers[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 1416-1422.

[8] SIJBESMA H, NYMEIJER K, VAN MARWIJK R, *et al.* Flue gas dehydration using polymer membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2008, 313(1/2): 263-276.

[9] MACEDONIO F, BRUNETTI A, BARBIERI G, *et al.* Membrane condenser as a new technology for water recovery from humidified "waste" gaseous streams[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(3): 1160-1167.

[10] DRIOLI E, SANTORO S, SIMONE S, *et al.* ECTFE membrane preparation for recovery of humidified gas streams using membrane condenser[J]. Reactive & Functional Polymers, 2014, 79(6): 1-7.

[11] MACEDONIO F, CERSOSIMO M, BRUNETTI A, *et al.* Water recovery from humidified waste gas streams: quality control using membrane condenser technology[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2014, 86: 196-203.

[12] MACEDONIO F, BRUNETTI A, BARBIERI G, *et al.* Membrane condenser configurations for water recovery from waste gases[J]. Separation & Purification Technology, 2017, 181: 60-68.

[13] BRUNETTI A, SANTORO S, MACEDONIO F, *et al.* Waste gaseous streams: from environmental issue to source of water by using membrane condensers[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2014, 42(8): 1145-1153.

[14] WANG D X, BAO A N, KUNC W, *et al.* Coal power plant flue gas waste heat and water recovery[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 341-348.

[15] 徐南平, 邢卫红, 赵宜江. 无机膜分离技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 144-145.
XU N P, XING W H, ZHAO Y J. Separation Technology and

- Application of Inorganic Membrane[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 144-145.
- [16] 范益群, 漆虹, 徐南平. 多孔陶瓷膜制备技术研究进展[J]. 化工学报, 2013, **64**(1): 107-115.
FAN Y Q, QI H, XU N P. Advance in preparation techniques of porous ceramic membranes[J]. CIESC Journal, 2013, **64**(1): 107-115.
- [17] WANG D X. Advanced energy and water recovery technology from low grade waste heat[R]. United States: Gas Technology Institute, 2011.
- [18] BAO A N, WANG D X, LIN C X. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **84**: 456-462.
- [19] WANG T T, YUE M W, QI H, *et al.* Transport membrane condenser for water and heat recovery from gaseous streams: performance evaluation[J]. Journal of Membrane Science, 2015, **484**(15): 10-17.
- [20] YUE M W, ZHAO S F, FERON P H M, *et al.* Multichannel tubular ceramic membrane for water and heat recovery from waste gas streams[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, **55**(9): 2615-2622.
- [21] 漆虹, 王婷婷. 一种发电厂烟气余热及水的陶瓷膜冷凝处理回收方法: 201310685026X[P]. 2016-04-13.
QI H, WANG T T. A method based on membrane condenser for waste heat and water recovery from power plant: 201310685026X[P]. 2016-04-13.
- [22] HORIKAWA T, DO D D, NICHOLSON D. Capillary condensation of adsorbates in porous materials[J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2011, **169**(1): 40-58.
- [23] UHLHORN R J R, KEIZER K, BURGGRAAF A J. Gas transport and separation with ceramic membranes(I). Multilayer diffusion and capillary condensation[J]. Journal of Membrane Science, 1992, **66**(2): 259-269.
- [24] ELKAMEL A, NOBLE R D. A statistical mechanics approach to the separation of methane and nitrogen using capillary condensation in a microporous membrane[J]. Journal of Membrane Science, 1992, **65**(1/2): 163-172.
- [25] SHI X, CHE D, AGNEW B, *et al.* An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2011, **54**(1/2/3): 606-615.
- [26] 管国锋, 赵汝溥. 化工原理[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 171-172.
GUAN G F, ZHAO R P. Unite Operation of Chemical Engineering[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 171-172.
- [27] CHEN H P, ZHOU Y N, CAO S T, *et al.* Heat exchange and water recovery experiments of flue gas with using nanoporous ceramic membranes[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **110**: 686-694.
- [28] HU H W, TANG G H, NIU D. Wettability modified nanoporous ceramic membrane for simultaneous residual heat and condensate recovery[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 27274.
- [29] JEONG K, KESSEN M J, BILIRGEN H, *et al.* Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2010, **53**(11): 2361-2368.
- [30] ZHAO S F, YAN S P, WANG D K, *et al.* Simultaneous heat and water recovery from flue gas by membrane condensation: experimental investigation[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **113**(25): 843-850.