



移动扫码阅读

向凤龄,谷小兵,张金瑶,等.低阻陶瓷膜组件回收烟气水热试验研究[J].能源环境保护,2020,34(5):23-29.

XIANG Fengling, GU Xiaobing, ZHANG Jinyao, et al. Experimental study on hydrothermal recovery from flue gas with low resistance ceramic membrane module[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(5):23-29.

# 低阻陶瓷膜组件回收烟气水热试验研究

向凤龄<sup>1</sup>,谷小兵<sup>2</sup>,张金瑶<sup>1</sup>,岳朴杰<sup>2</sup>,荆亚超<sup>2</sup>,王祖武<sup>1,\*</sup>,袁畅<sup>1</sup>

(1.武汉大学资源与环境科学学院环境科学与工程系,湖北武汉430000;

2.大唐环境产业集团股份有限公司,北京100000)

**摘要:**采用陶瓷膜组件进行了烟气水分及余热的回收实验,研究了膜间距(20、25、34 mm)、冷却水温度(15~35 ℃)、冷却水流量(50~170 L/h)和陶瓷膜平均孔径(50、100 nm)对膜组件水热回收性能的影响。结果表明:膜组件间距的减小、冷却水流量的提高和冷却水温度的降低均能有效提高陶瓷膜对烟气的水热回收性能;减小陶瓷膜的孔径能有效提高陶瓷膜的水通量和水回收效率,但对热通量的影响较小;在实验工况下,陶瓷膜的水、热通量以及水回收效率的最高值分别为 $29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $65 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和46%;与平直翅片换热器和螺旋板换热器相比,陶瓷膜组件的阻力因子较小,烟气在膜组件的阻力因子仅为0.005 9。

**关键词:**陶瓷膜;水热回收;阻力因子

中图分类号:X706

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)05-0023-07

## Experimental study on hydrothermal recovery from flue gas with low resistance ceramic membrane module

XIANG Fengling<sup>1</sup>, GU Xiaobing<sup>2</sup>, ZHANG Jinyao<sup>1</sup>, YUE Pujie<sup>2</sup>,  
JING Yachao<sup>2</sup>, WANG Zuwu<sup>1,\*</sup>, YUAN Chang<sup>1</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430000, China;

2.Datang Environmental Industry Group Co., Ltd., Beijing 100000, China)

**Abstract:** Experiments of water and waste heat recovery from flue gas were carried out with a ceramic membrane module, and the effects of membrane spacing (20, 25, 34 mm), cooling water temperature (15~35 ℃), cooling water flow rate (50~170 L/h) and average pore size (50, 100 nm) on water and heat recovery performance of membrane modules were studied. The results showed that reducing the distance between membrane components, increasing of cooling water flow rate or decreasing cooling water temperature could effectively improve the water and heat recovery of ceramic membrane from flue gas. Reducing the pore size of ceramic membrane could improve the water flux and water recovery efficiency of ceramic membrane effectively, but cause little effect on the heat flux. Under the experimental conditions, the maximum values of water flux, heat flux and water recovery efficiency were  $29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $65 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  and 46%, respectively. Compared with flat-finned heat exchanger and spiral plate heat exchanger, the resistance factor of the ceramic membrane module was smaller, and the resistance factor of flue gas in the membrane module was only 0.005 9.

**Key Words:** Ceramic membrane; Water and heat recovery; Resistance factor

收稿日期:2020-07-21

第一作者简介:向凤龄(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为大气复合污染控制。E-mail:xiangfengling1995@163.com

通信作者简介:王祖武(1962-),男,博士,教授,主要研究方向为大气复合污染控制。E-mail:zwwang@whu.edu.cn

## 0 引言

火电厂实施超低排放后,烟气污染物浓度大幅度降低,但是烟气水分含量增大。目前,火电厂普遍采用湿法烟气脱硫,脱硫后烟气温度为 50~55℃,烟气处于饱和或过饱和状态,水蒸气占烟气量的 12%~18%<sup>[1-3]</sup>。由于较高的含湿量,烟气在排出烟囱时往往会形成“白烟”“石膏雨”等现象,造成视觉污染;同时凝结水易与烟囱周围的细颗粒物粘附在一起,形成团状颗粒物后排入大气,是形成雾霾的主要原因之一<sup>[4-5]</sup>。若能将烟气中的水分和余热回收利用,不仅可以缓解“白烟”和大气污染等问题,还可以提高火电厂水资源利用率。

目前实现烟气水回收的技术主要有三种:冷凝法、吸收法以及膜法<sup>[6]</sup>。冷凝法回收的水质较差,具有一定的腐蚀性,后期处理工艺要求高;吸收法的系统较为简单,回收的水质较冷凝法好,但是吸收液有随烟气带出的风险;膜法回收技术具有回收水质较高、系统简单、处理工艺要求低等优点,是烟气水分余热回收的主流研究方向<sup>[7]</sup>。Bao 等对比了陶瓷膜管束与不锈钢管束对烟气水热回收的效果,发现陶瓷膜管束具有毛细冷凝现象,传质系数比不锈钢管束高 60%~80%<sup>[8]</sup>;曹语等采用三级陶瓷膜冷凝器,发现陶瓷膜的总传热系数为 415 W·m<sup>-2</sup>·℃<sup>-1</sup>,高于不锈钢、氟塑料换热器的总传热系数<sup>[9]</sup>,表明了陶瓷膜具有较好的传热性能。许多学者研究了不同孔径陶瓷膜的收水性能,如 Yang 等发现平均孔径为 10 nm 的陶瓷膜水热回收效果明显高于 50 nm<sup>[10]</sup>;Haiping Chen 等发现 20 nm 和 100 nm 陶瓷膜的水热回收效果比 30 nm 和 50 nm 高<sup>[11]</sup>。多篇文献报道了烟气运行参数对陶瓷膜水热回收性能的影响<sup>[12-15]</sup>。如陈海

平等通过单根管式陶瓷膜进行烟气水热回收实验,研究了冷却水参数和烟气参数对水热回收效果的影响<sup>[12]</sup>;Dan Gao 等采用多根陶瓷膜研究运行条件的影响,发现水通量和热通量最高分别可达 15.77 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 14.83 MJ·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup><sup>[15]</sup>。

上述论文采用的陶瓷膜均为管式,管式陶瓷膜管径较小,阻力比较大,能耗较高。本文采用低阻的陶瓷膜组件进行烟气水热回收,探讨其可行性及水热回收性能,为其工程应用提供基础数据。

## 1 实验装置

### 1.1 实验系统

陶瓷膜组件水热回收实验系统由配气单元、陶瓷膜组件单元、冷却水循环单元三部分组成,如图 1 所示。配气单元由风机、蒸汽发生器和加热器等组成,空气经风机送入加热器与蒸汽发生器产生的水蒸气混合后形成具有一定湿度和温度的模拟烟气。该模拟烟气进入陶瓷膜组件单元,烟气中的水热经陶瓷膜组件回收后从陶瓷膜组件出口排出。冷却水循环单元由制冷系统、电磁流量计、抽吸水泵、循环水箱、电子秤组成。抽吸水泵可为陶瓷膜组件提供冷却水并在水侧产生 -0.06 MPa 的真空度,以推动烟气侧的水分子穿过陶瓷膜进入循环冷却水被带走。由于烟气换热会导致冷却水温度升高,设置制冷系统,保证冷却水温度的稳定性。电子秤用于计量循环水箱的增重。实验参数设置如表 1 所示。

陶瓷膜的布置如图 1 所示。装置中共有 8 块陶瓷膜,陶瓷膜的主要参数如表 2 所示。8 块陶瓷膜分两组平行设置,每组 4 块陶瓷膜,通过调节两组陶瓷膜的距离来改变膜间距。采用螺母、玻璃胶等材料对陶瓷膜进行密封固定。整个装置由三层石棉保温,以避免外界环境引起的冷凝。

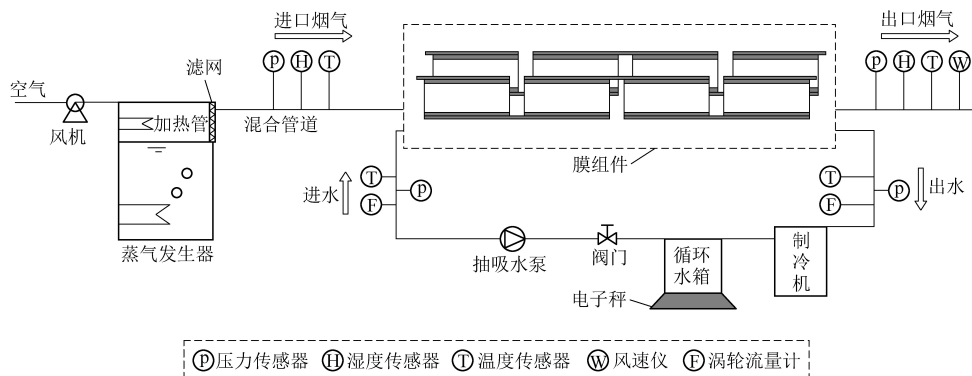


图 1 陶瓷膜组件水热回收实验系统图

表 1 实验参数设置

参数	范围
膜间距/mm	20、25、34
冷却水温度/°C	15~35
冷却水流量/(L·h <sup>-1</sup> )	50~170

表 2 陶瓷膜的主要参数

参数	数值
膜平均孔径/nm	50、100
膜长度/mm	250
膜高度/mm	90
有效膜面积/m <sup>2</sup>	0.18

## 1.2 陶瓷膜水热回收原理

亲水性陶瓷膜结构由外向内分别为选择层、分离层、支撑层,其孔径由外向内逐渐增大形成非对称形态,陶瓷膜内部结构图如图 2 所示。图 3

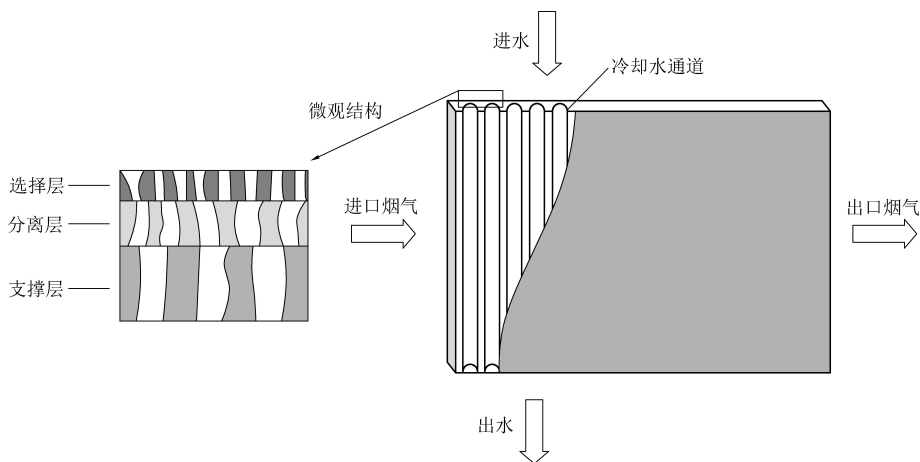


图 2 陶瓷膜内部结构图



图 3 陶瓷膜横截面扫描电镜 SEM 图

## 1.3 陶瓷膜水热回收性能评价指标

### (1) 水通量

通过计算陶瓷膜组件水通量,可对单位时间内陶瓷膜单位面积回收水的能力进行评价,计算公式为:

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

为陶瓷膜横截面扫描电镜 SEM 图。陶瓷膜内含有冷却水通道,冷却水流入陶瓷膜后造成壁表面温度低于烟气温度,烟气中水蒸气遇冷凝结到壁表面和孔隙内形成一层水膜,阻止不凝气体进入陶瓷膜孔隙,最后,凝结水在抽吸水泵形成的负压下进入冷却水通道被去除。陶瓷膜选择层的平均孔径直接影响着水分回收机制,陶瓷膜平均孔径在 2~50 nm 时,水分回收机制主要为毛细冷凝。范德瓦尔斯力使水蒸气在膜孔隙中进行多层吸附直至毛细孔充满液体,当填充空隙压力接近水汽饱和压力时,开始发生毛细冷凝;当平均孔径在 50~100 nm 时,气体分子的平均自由程远大于孔隙直径,气体分子与膜孔隙壁的碰撞概率大于分子之间碰撞的概率,水分回收机制主要是克努森扩散,扩散到孔隙内的水蒸气遇冷后发生冷凝。

式中: $J_w$  为水通量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\Delta m$  为循环水箱的重量变化,  $\text{kg}$ ;  $A$  是陶瓷膜组件全部接触烟气的表面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta t$  为试验时间,  $\text{h}$ 。

### (2) 水回收效率

水回收效率为实际回收的水量占入口烟气水分的比例。

$$\eta = \frac{\Delta m}{M_i \Delta t} \times 100\% \quad (2)$$

$$M_i = SvR_{H,i} V_{q,i} \times 3.6 \times 0.01 \quad (3)$$

式中: $\eta$  为水回收效率, %;  $M_i$  为入口烟气的水量,  $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $S$  为陶瓷膜组件截面积,  $\text{m}^2$ ;  $v$  为烟气流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $R_{H,i}$  为烟气进口相对湿度;  $V_{q,i}$  为进口烟气饱和蒸汽量(在相应温度下查表获得),  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

### (3) 热通量

为了解陶瓷膜组件的回收热效果,热通量定义为烟气在单位时间内经过单位膜面积前后热量

的减少。

$$q_w = \frac{Q_c}{1\ 000A} \times 100\% \quad (4)$$

$$Q_c = m_w C_{p,w} (t_2 - t_1) \quad (5)$$

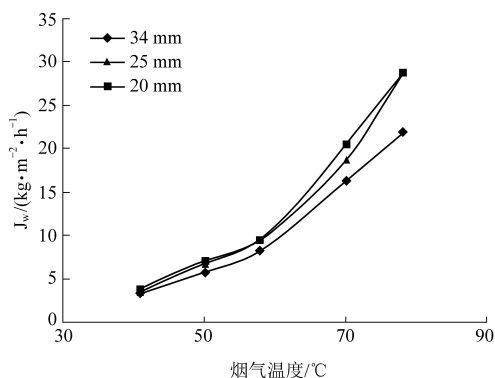
式中: $q_w$ 为回收水速率, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $Q_c$ 为单位时间内冷却水吸收的热量, $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $A$ 是陶瓷膜组件全部接触烟气的表面积, $\text{m}^2$ ;  $C_{p,w}$ 是冷却水的定压比热容, $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ;  $m_w$ 为冷却水质量流量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $t_1$ 为冷却水进口水温, $^\circ\text{C}$ ;  $t_2$ 为冷却水出口水温, $^\circ\text{C}$ 。

#### (4) 阻力因子

阻力因子是在计算流体沿组件流动的摩擦阻力时,所引入的一个无因次数群。计算公式为:

$$f = 2 \frac{\Delta p}{L} \frac{D}{\rho v^2} \quad (6)$$

式中: $f$ 为陶瓷膜阻力因子;  $\Delta p$ 为膜组件压力降,Pa;  $L$ 为膜组件长度,m;  $D$ 为特征长度,m;  $\rho$ 为烟气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

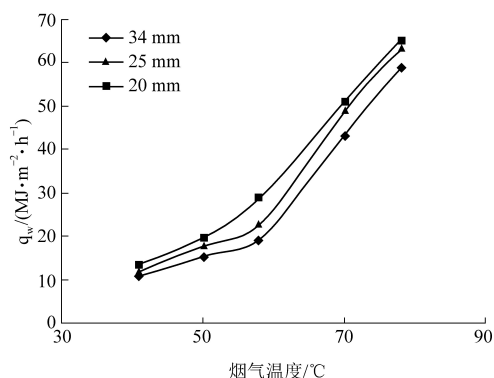


(a) 陶瓷膜间距对水通量的影响

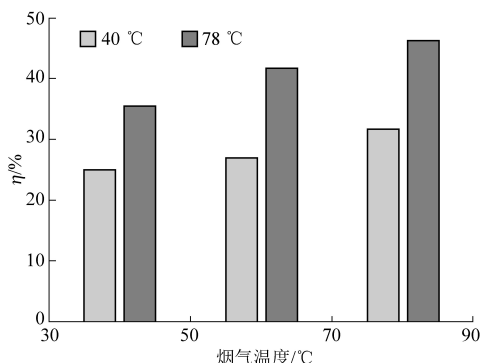
## 2 结果与讨论

### 2.1 陶瓷膜间距的影响

在陶瓷膜平均孔径 50  $\mu\text{m}$ 、烟气流量 42  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、冷却水流量 170  $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、冷却水温度 20  $^\circ\text{C}$  的条件下,陶瓷膜组件间距对水热回收的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出,回收的水、热通量和水回收效率随陶瓷膜组件间距的减小而增大。这是因为在烟气流量相同的情况下,不同间距的烟气风速不一样,间距 20、25、34 mm 的风速分别为 6.9、6.1、4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风速增大意味着烟气湍流程度增大,烟气侧不凝气边界层变薄,陶瓷膜水热回收的阻力变小。另一方面风速增大会导致烟气在陶瓷膜组件的停留时间变短,不能充分地进行传质传热过程。在这两因素的作用下,间距 20 mm 的烟气水热回收效果高于间距 25 mm 的膜组件,间距 34 mm 膜组件效果最差,最高的水热通量和水回收效率分别为 29  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、65  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  以及 46%。



(b) 陶瓷膜间距对热通量的影响



(c) 陶瓷膜间距对水回收效率的影响

图 4 陶瓷膜间距对水热回收的影响

### 2.2 冷却水参数的影响

在陶瓷膜间距 34 mm、陶瓷膜平均孔径 50  $\mu\text{m}$ 、烟气流量 42  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的条件下,冷却水流

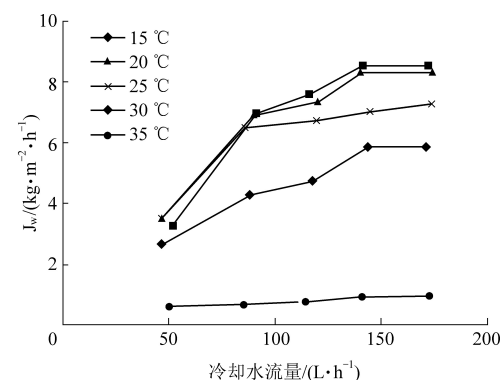
量对陶瓷膜水热回收的影响如图 5 所示。从图 5 可以看出,不同冷却水温度下的水、热通量和水回收效率均随着冷却水流量的升高而增大,在冷却

水流量  $170 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  时,水、热通量以及水回收效率最高,分别达到  $8.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $27.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  以及  $31.5\%$ 。这是因为冷却水流量偏小时,无法将回收的热量及时转走,导致冷却水出口温度升高,传热推动力减小,传热速率降低。因此陶瓷膜的水热回收效果随着冷却水流量升高而增大。当流量增加到一定程度后,冷却水回收的热量能快速转走,此时烟气还未与冷却水充分传质换热,便随气流出膜组件,再增加流量对水、热通量以及水回收效率的影响较小,曲线趋于平缓。

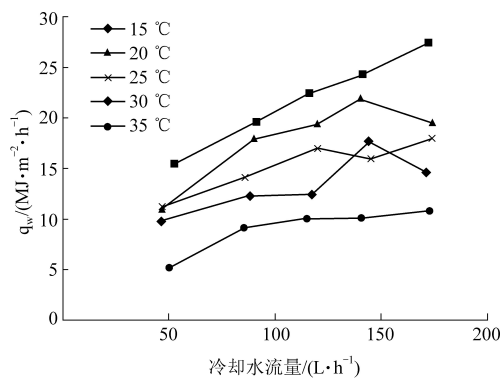
况下,冷却水温度越低,水热通量和水回收效率越高, $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  冷却水下烟气水热回收效果最差。这是因为冷却水温度越高,陶瓷膜表面温度与烟气温度之间的温差越小,推动力减小,导致对流换热效果降低,总传热量减小。

### 2.3 孔径的影响

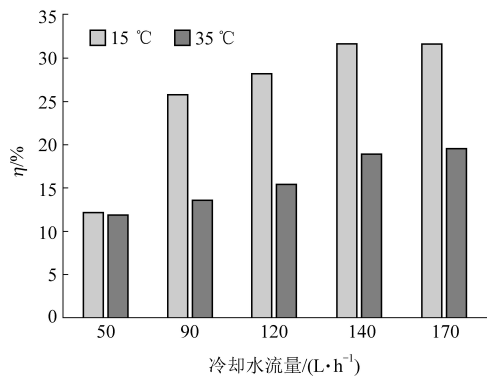
在陶瓷膜间距  $34 \text{ mm}$ 、烟气流量  $42 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、冷却水流量  $140 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  的条件下,不同孔径对膜组件水热回收的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出,平均孔径  $50 \text{ nm}$  陶瓷膜组件的水通量和水回



(a) 冷却水流量对水通量的影响



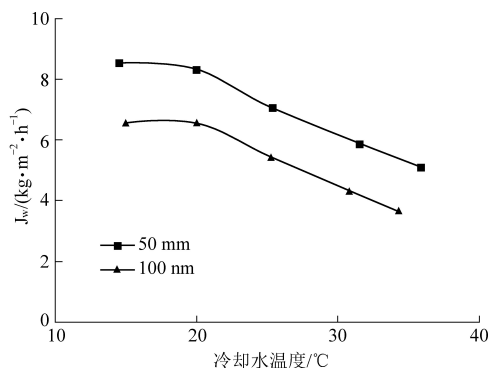
(b) 冷却水流量对热通量的影响



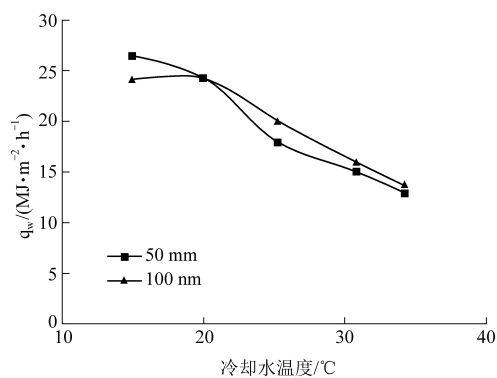
(c) 冷却水流量对水回收效率的影响

图 5 不同温度下冷却水流量对水热回收的影响

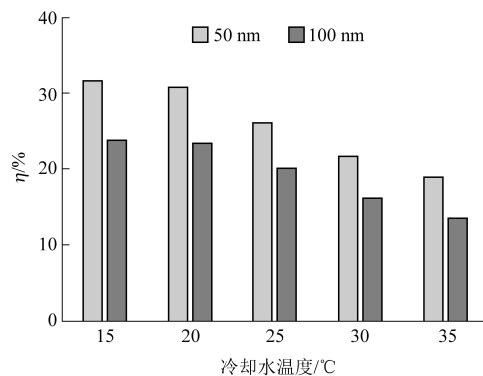
从图 5 还可以看出,在冷却水流量相同的情



(a) 陶瓷膜平均孔径对水通量的影响



(b) 陶瓷膜平均孔径对热通量的影响



(c) 陶瓷膜孔径对水回收效率的影响

图 6 陶瓷膜孔径对水热回收的影响

收效率明显高于平均孔径  $100 \text{ nm}$  的膜组件,在冷却水温度  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, $50 \text{ nm}$  陶瓷膜的水通量和水回

收效率分别为  $8.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $31.5\%$ ，比  $100 \text{ nm}$  的高出  $31\%$  和  $32\%$ 。这是因为陶瓷膜孔径在  $2 \sim 50 \text{ nm}$  时，膜法回收水分机制主要为毛细冷凝，此时陶瓷膜的平均孔径较小，孔内的饱和蒸气压低，烟气中的水蒸气在孔内容易形成毛细冷凝。当陶瓷膜孔径在  $100 \sim 200 \text{ nm}$  时，气体分子平均自由程远大于毛细孔道直径，水分回收机制以克努森扩散法为主。在本文实验条件下，平均孔径  $50 \text{ nm}$  的膜组件水通量和水回收效率高于平均孔径  $100 \text{ nm}$  的膜组件。从图 6(b) 看出陶瓷膜组件的平均孔径对热通量的影响不大。这可能是因为膜孔径在  $100 \text{ nm}$  时，不凝气体与水蒸气的分离性能变差，部分混合气进入冷却水通道，带走了一部分热量，故  $100 \text{ nm}$  膜组件的热通量与  $50 \text{ nm}$  膜组件热通量十分接近。

#### 2.4 陶瓷膜组件阻力特性

阻力特性是评价换热装置性能的关键指标之一，目前多数学者采用阻力因子对组件的阻力特性进行分析<sup>[16-17]</sup>。在膜组件间距  $34 \text{ mm}$ 、陶瓷膜孔径  $50 \text{ nm}$ 、烟气流量  $62 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ （即烟气风速  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）、冷却水温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，冷却水流量  $170 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  的条件下，记录了烟气通过膜组件前后的压力损失，压力降为  $10 \text{ Pa}$ ，根据式(6)算出本工程下阻力因子为  $0.0059$ 。并将其与文献<sup>[16-17]</sup>中不同类型的换热器的阻力因子对比，结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，烟气在膜组件中的阻力因子较小，明显低于平直翅片换热器和螺旋板换热器。这是因为陶瓷膜与气流方向平行设置，减少了膜组件对气流的扰动，阻力因子较小。

表 3 陶瓷膜组件与不同换热器的阻力因子对比

名称	烟气流速 $/( \text{m} \cdot \text{s}^{-1} )$	压力降/ $\text{Pa}$	阻力因子
平直翅片换热器 <sup>[16]</sup>	1.4	11.69	0.071
螺旋板换热器 <sup>[17]</sup>	-	<50	0.8~1.0
陶瓷膜组件	6	10	0.0059

### 3 结论

本文采用陶瓷膜组件回收烟气水热，考察了膜组件间距、陶瓷膜平均孔径、冷却水温度和冷却水流量对陶瓷膜水热回收的影响以及膜组件的阻力特性，结论如下：

(1) 本文采用的陶瓷膜组件的水、热通量以及

水回收效率最高分别可达  $29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $65 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  以及  $46\%$ ，说明本陶瓷膜组件具有良好的烟气水热回收性能；

(2) 在本文工况下，减小膜组件间距、冷却水温度和增加冷却水流量能提高水、热通量和水回收效率； $50 \text{ nm}$  膜组件的水通量和水回收效率比  $100 \text{ nm}$  的更高，膜孔径较大会导致混合气进入冷却水通道带走热量，因此两种孔径的热通量十分接近；

(3) 在设定工况下，烟气在陶瓷膜组件的阻力因子为  $0.0059$ ，明显低于平直翅片换热器和螺旋板换热器。

### 参考文献

- [1] 涂钊汀, 潘卫国, 冀思哲, 等. 燃煤烟气余热和水分综合利用技术研究 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35 (1): 36-42.
- [2] 熊英莹, 谭厚章, 许伟刚, 等. 火电厂烟气潜热和凝结水回收的试验研究 [J]. 热力发电, 2015, 44 (6): 77-81.
- [3] 李允超, 赵大周, 刘博, 等. 火电厂烟气余热利用现状与展望 [J]. 发电技术, 2019, 40 (3): 270-275.
- [4] 吕扬, 董勇, 田路泞, 等. 燃煤电厂湿烟气的除湿特性 [J]. 化工学报, 2017, 68 (9): 3558-3564.
- [5] 程胜明, 殷勇高. 一种基于溶液除湿的消除湿烟羽新系统 [J]. 东南大学学报, 2020, 50 (2): 334-341.
- [6] 马双忱, 别璇, 孙尧, 等. 湿法脱硫烟气水回收技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25 (1): 64-70.
- [7] 陈海平, 冯义钧, 杨博然, 等. 陶瓷膜组件回收烟气水分及余热性能实验研究 [J]. 热力发电, 2019, 48 (2): 45-52.
- [8] Bao A, Wang D, Lin C X. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 84: 456-462.
- [9] 曹语, 王乐, 季超, 等. 陶瓷膜冷凝器用于烟气脱白烟过程的中试研究 [J]. 化工学报, 2019, 70 (6): 2192-2201.
- [10] Yang B, Chen H P, Ye C, et al. Experimental study on differences of heat and mass flux between 10- and 50-nm pore-sized nanoporous ceramic membranes [J]. Journal of the Australian Ceramic Society, 2018, 57: 349-355.
- [11] Haiping Chen, Yanan Zhou, Xin Su, et al. Experimental study of water recovery from flue gas using hollow micro-nanoporous ceramic composite membranes [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018 (3): 1-12.
- [12] 陈海平, 谢天, 杨博然, 等. 火电厂烟气水分及余热陶瓷膜法回收实验 [J]. 热力发电, 2018, 47 (15): 46-52.
- [13] Tingting Wang, Maowen Yue, Hong Qi, et al. Transport membrane condenser for water and heat recovery from gaseous streams: Performance evaluation [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 484: 10-17.

- [14] Zhanhao Li, Heng Zhang, Haiping Chen, et al. Experimental research on the heat transfer and water recovery performance of transport membrane condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 1-9.
- [15] Dan Gao, Zhaohao Li, Heng Zhang, et al. Moisture recovery from gas-fired boiler exhaust using membrane module array [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1110-1121.
- [16] 丛晓春, 倪鹏飞, 王庆刚, 等. 平直翅片换热器空气侧换热与阻力特性研究 [J]. 热能动力工程, 2020, 35 (5): 78-86.
- [17] 董华东, 王鑫, 苗焕, 等. 螺旋板换热器流动传热特性得数值模拟 [J]. 轻工科技, 2020, 36 (1): 52-54.