

DOI: 10.19666/j.rlfed.202211156

# 陶瓷膜法烟气水分回收数值与实验对比研究

程超<sup>1</sup>, 赵丰<sup>2</sup>, 黄吉光<sup>3</sup>, 高丹<sup>1</sup>, 张衡<sup>3</sup>, 陈海平<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学国家能源发展战略研究院, 北京 102206;

2. 河北建投宣化热电有限责任公司, 河北 张家口 075100;

3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

**[摘要]** 采用陶瓷膜进行烟气水分回收, 既可以实现资源化循环使用, 又能减缓环境污染。以双排陶瓷膜组件为研究对象, 首先理论分析了水蒸气跨膜传输传热传质过程, 构建了物理模型, 并根据实际工况下的边界参数开展了数值计算; 然后, 在某燃煤机组中试试验平台上, 针对湿法脱硫后的净烟气开展了试验研究。结果表明: 随冷却水温度由 25 °C 升至 36 °C, 回收水量由 29.45 kg/h 线性降低到 18.13 kg/h; 烟气流量增大, 回收水量逐渐增加, 但增长速率逐渐变小; 回收水量的计算结果与实验结果偏差均小于 7%。

**[关键词]** 陶瓷膜; 燃煤机组; 水分回收; 数值模拟

**[引用本文格式]** 程超, 赵丰, 黄吉光, 等. 陶瓷膜法烟气水分回收数值与实验对比研究[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 121-127. CHENG Chao, ZHAO Feng, HUANG Jiguang, et al. Numerical and experimental comparison research on moisture recovery from flue gas by ceramic membrane[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 121-127.

## Numerical and experimental comparison research on moisture recovery from flue gas by ceramic membrane

CHENG Chao<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>2</sup>, HUANG Jiguang<sup>3</sup>, GAO Dan<sup>1</sup>, ZHANG Heng<sup>3</sup>, CHEN Haiping<sup>3</sup>

(1. National Institute of Energy Development Strategy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Hebei Construction & Investment Group Xuanhua Thermal Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075100, China;

3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Using ceramic membrane to recover moisture from gas is a feasible way that not only can realize the recycling of resources, but also can alleviate environmental pollution. By taking double-row ceramic membrane module as the research object, the heat and mass transfer of water vapor transport was theoretically analyzed, the physical model was established, and numerical simulation was carried out according to the boundary parameters under actual conditions. Then, a pilot test platform was built on a coal-fired unit to carry out the experimental research on the purified flue gas after wet desulfurization. The results show that, the amount of recovered water decreased linearly from 29.45 kg/h to 18.13 kg/h by increasing the cooling water temperature from 25 °C to 36 °C. With the growing of flue gas flowrate, the recovered water gradually increased, but the growth rate gradually decreased. The deviations of the recovery water amount between the calculated results and the experimental data were less than 7%.

**Key words:** ceramic membrane; coal-fired unit; moisture recovery; numerical simulation

我国的能源消耗主要以煤炭为主, 2021 年燃煤机组发电量在总发电量中占比约 60%。燃煤发电行业用水量在工业行业中占比较大, 进行烟气水分回收及资源化利用可有效降低发电水耗<sup>[1]</sup>。降低燃煤机组的能耗和水耗, 促进煤电清洁高效低碳发展对于我国在“双碳”背景下实施节能减排战略有着

重要的意义。

近年来, 国内外学者针对烟气水分及余热回收工作开展了大量研究。烟气水分及余热回收主要有冷凝法<sup>[2-4]</sup>和膜方法<sup>[5-9]</sup>, 其他还有基于机械蒸汽再压缩系统回收烟气中的水分及余热系统<sup>[10]</sup>、烟气余热与凝结水协同回收装置<sup>[11]</sup>以及集成抽汽式空气

修回日期: 2022-11-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB0604302)

Supported by: National Key Research and Development Program (2018YFB0604302)

第一作者简介: 程超 (1990), 男, 博士后, 主要研究方向为烟气水分及余热回收, chengc@ncepu.edu.cn。

加热器型烟气余热利用系统<sup>[12]</sup>等。

在冷凝法中,通常采用氟塑料换热器或防腐处理的不锈钢管换热器构成的烟气冷凝器进行水分及余热回收。该法回收水中由于含有颗粒物及硫酸盐而水质较差。膜方法根据膜材质不同,多采用由陶瓷膜构成的运输膜冷凝器(TMC)和纤维膜构成的膜冷凝器进行研究及应用。

在烟气水分回收实验方面,Wang 等人<sup>[6]</sup>采用模拟烟气针对 6~8 nm 的单管 TMC 进行实验研究,分析了相关变量对水回收量、水回收率、热回收量和热回收率的影响。Kim 等人<sup>[13]</sup>采用自制陶瓷膜和商用陶瓷膜分别构建了膜组件并开展了烟气脱水实验研究。Gao 等人<sup>[4]</sup>针对燃气锅炉烟气,分析了烟气和冷却水相关参数对水分和热量回收及总换热系数的影响。上述实验研究多采用模拟烟气以及小型膜组件、燃气锅炉烟气进行烟气水分及余热回收,模拟烟气的组分、参数及烟道环境与燃煤烟气均具有较大差别,针对实际燃煤烟气的水分回收性能有待进一步研究。

在烟气水分回收数值模拟方面,王金平等<sup>[15]</sup>构建了烟气水分及余热回收系统的计算模型,分析了系统对机组系统运行性能的影响。Xiao 等人<sup>[16]</sup>建立了集中参数模型研究 TMC 的热质传递,并提出了熵产生模型来计算熵变和熵产生分量,研究发现增大填充率或减小膜内径能够提高回收性能。Zhang 等人<sup>[17]</sup>通过建立水分回收过程中传热传质数学模型,针对 330 MW 燃煤机组的陶瓷膜工程进行了预测分析。Soleimanikutanaei 等人<sup>[18]</sup>提出了一种基于膜壁冷凝和毛细管冷凝的混合冷凝模型,计算了入口烟气、冷却水流量以及管间距对 TMC 换热的影响。数值研究多为构建计算模型并分析变量及结构对机组运行与烟气水分回收性能的影响,缺乏与实验研究的对比分析。

本文以双排陶瓷膜组件为研究对象,首先构建烟气水分回收过程中传热传质数学模型,然后针对湿法脱硫后的净烟气开展实验研究,将计算结果与实验结果进行了比较。本文结论能够为陶瓷膜用于燃煤机组烟气水分及余热回收的理论研究及系统设计提供指导。

## 1 理论分析与建模

### 1.1 传热传质物理模型

对于孔径 1  $\mu\text{m}$  的多孔膜管,烟气横掠膜管束

时,水蒸气首先在膜管表面发生冷凝然后沿膜孔渗透进入管内,汇入膜内冷却介质。在冷凝、渗透过程中同时发生传热与传质,并且相互影响。陶瓷膜的轴向剖面传质与传热过程如图 1 所示。

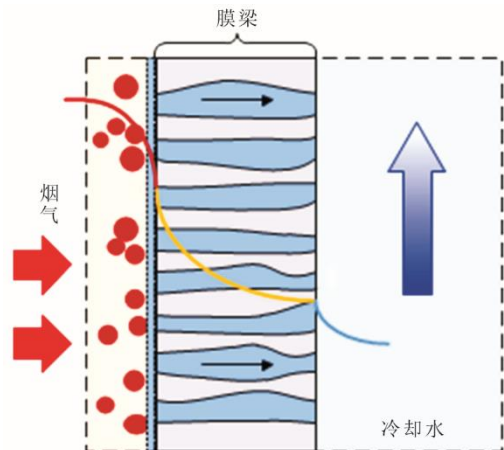


图 1 膜两侧传热传质模型

Fig.1 Heat and mass transfer model on both sides of the membrane

1) 传质过程 膜组件在水为冷源的运行中传质过程包括 3 部分: 1) 湿烟气侧的对流传质过程; 2) 液态水沿膜壁内的膜孔渗透传递过程; 3) 水侧对流传质过程。在冷却水作用下,烟气中的水蒸气在膜外壁发生冷凝,烟气流动区与膜外壁面之间的水蒸气存在浓度梯度,该浓度差即为烟气侧传质驱动力。运行过程中,膜内呈负压状态(驱动泵位于冷却水出口侧),冷凝的水蒸气在孔内依靠压差驱动进入膜内汇入冷却水中。

2) 传热过程 膜组件在水为冷源的运行中传热过程分为烟气侧对流换热、膜中导热和水侧对流换热。烟气横向冲刷膜管束过程中,温度较高的烟气与温度较低的膜外壁面发生对流换热,水蒸气发生冷凝并释放潜热,烟气释放的显热与水蒸气冷凝释放的潜热耦合通过膜壁进行导热;然后,膜壁内侧与更低温度的冷却水发生对流换热,同时膜孔中温度较高的水汇入冷却水中发生对流换热。

### 1.2 物理模型及网格划分

对原膜组件流动区域进行简化处理,去掉两端的水室,在两侧膜管外侧适当位置取计算外边界。假设:烟气自下而上横掠膜管;冷却水在管内匀速流动;烟气与冷却水形成交叉流动。膜组件物理模型如图 2 所示。

使用 ICEM CFD 软件对膜组件物理模型进行网格划分,具体采用六面体网格形式。水蒸气在膜管

壁面处发生冷凝,为提高模型准确性,膜管壁面处的网格划分较为稠密,具体如图3所示。

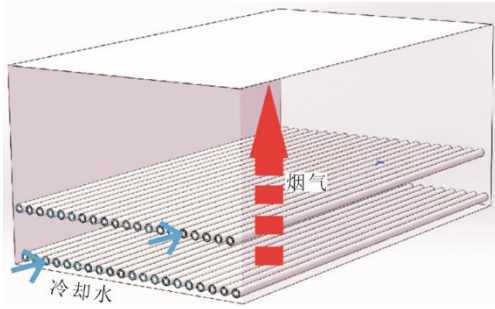


图2 膜组件物理模型

Fig.2 Physical model of the membrane module

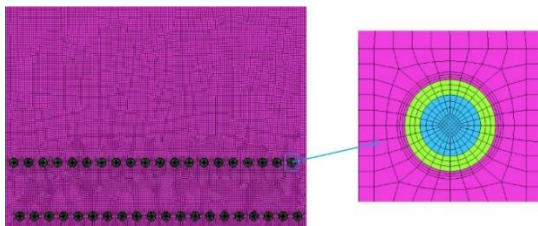


图3 网格划分示意

Fig.3 Schematic diagram of grid division

将网格划分为226万、285万、321万个,进行网格无关性验证,结果发现285万个网格能够获得稳定的结果。网格质量检查显示其质量度量标准值为0.4~1.0,说明网格质量较好。

### 1.3 模型计算方程

本文使用单相多组分输运模型描述计算域内的传热传质问题。连续性方程<sup>[19]</sup>为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[ (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

能量方程为:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( \lambda_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{u}) \right) + S_h \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\mathbf{u}$  为速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $S_m$  为质量源项;  $p$  为静压,  $\text{Pa}$ ;  $\boldsymbol{\tau}$  为应力张量;  $\rho \mathbf{g}$  为重力,  $\text{N}$ ;  $\mathbf{F}$  为体积力,  $\text{N}$ ;  $S_h$  为能量源项。

根据传质过程计算域分为烟气流动、陶瓷膜管

壁和冷却水流动3个区域。由烟气和冷却水雷诺数可知,烟气和冷却水的流动状态均为湍流,采用标准  $k-\varepsilon$  模型描述烟气的湍流热、流动状态和冷却水的流动状态。

湍流动能  $k$  的计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

耗散率  $\varepsilon$  的计算方程为:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中:  $G_k$  是由层流速度梯度而产生的湍流动能;  $G_b$  是由浮升力产生的湍流动能;  $Y_M$  是可压缩流中过度的扩散产生的波动;  $S_k$ 、 $S_\varepsilon$  是自定义的湍流源项;  $\sigma_k$  是  $k$  方程的湍流普朗特数;  $\sigma_\varepsilon$  是  $\varepsilon$  方程的湍流普朗特数;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  是常量,分别为1.44、1.92、0.99、1.00、1.30。

采用组分输运模型来描述烟气中的组分输运过程<sup>[21]</sup>:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (7)$$

式中:  $Y_i$  为组分  $i$  的质量分数, %;  $S_i$  为组分  $i$  发生化学反应的净生成率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $R_i$  为组分  $i$  发生其他化学反应的生成率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ , 本文中  $R_i=0$ 。

实验采用脱硫塔后的净烟气,温度约为  $50^\circ\text{C}$ ,相对湿度接近饱和态。湿饱和烟气流动过程中遇到温度相对较低的陶瓷膜壁面便发生冷凝。假设陶瓷膜外壁存在一层较薄的液层,冷凝发生界面为气-液界面。在数值计算过程中,通过在各计算域添加相应的源项来实现能量和质量的转移,本节采用传统冷凝模型<sup>[18]</sup>对烟气中水蒸气冷凝过程进行模拟计算。壁面上的冷凝速率用与壁面相邻单元连续性方程中的质量源项来表示:

$$m''' = \frac{1}{(W_s - 1)} \rho D \frac{\partial W_s}{\partial n} \frac{A_{\text{cell-wall}}}{V_{\text{cell}}} \quad (8)$$

$$m_s''' = m''' \quad (9)$$

式中:  $m'''$  为烟气侧与壁面相邻的单元中的连续性方程式中的源项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $m_s'''$  为烟气侧与壁面相邻单元中水蒸气传输方程式中的源项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $\rho$  为烟气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $A_{\text{cell-wall}}$  为与壁面相邻单元的面积,

$m^2$ ;  $V_{\text{cell}}$  为与壁面相邻单元的体积,  $m^3$ ;  $D$  为水蒸气扩散系数,  $m^2/s$ ;  $n$  为到固体壁面的法线;  $W_s$  为水蒸气质量分数, %。

与冷凝壁面相邻单元的动量源项、能量源项和湍流源项为:

$$S_{j-\text{mom}} = u_j m''' \quad (10)$$

$$S_{\text{hv}} = m''' \cdot \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,\text{vapor}} dT \quad (11)$$

$$S_k = km''' \quad (12)$$

$$S_e = \varepsilon m''' \quad (13)$$

式中:  $T_{\text{ref}}$  为 Fluent 软件中用于计算焓值的参考温度,  $T_{\text{ref}}=298.15 \text{ K}$ ;  $T$  为水蒸气凝结温度,  $\text{K}$ ;  $c_{p,\text{vapor}}$  为水蒸气比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

#### 1.4 计算流体动力学设置

通过 Fluent 17.0 软件对湿烟气流动过程中传热传质过程进行数值计算。在满足计算要求的前提下, 为了减轻计算负荷, 选择标准  $k-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数。将烟气定义为理想气体, 包含  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ 。由于进、出口烟温和进、出口冷却水温度的变化较小, 假设烟气的组分含量和水的相关物性参数为常数, 湿烟气的上述物性参数采用混合定律 (mixing-law) 进行计算。其他物性参数, 例如质量扩散系数和潜热等通过用户自定义函数 (User-defined functions, UDF) 进行定义。

流动边界条件采用速度入口和压力出口, 膜管内外壁面采用耦合热边界条件。压力-速度耦合方案选取解压力耦合方程的半隐式法 (semi-implicit method for pressure-linked equations, SIMPLE), 并空间离散化, 除了  $k-\varepsilon$  湍流方程采用一阶迎风格式外, 其它控制方程都采用二阶迎风格式。

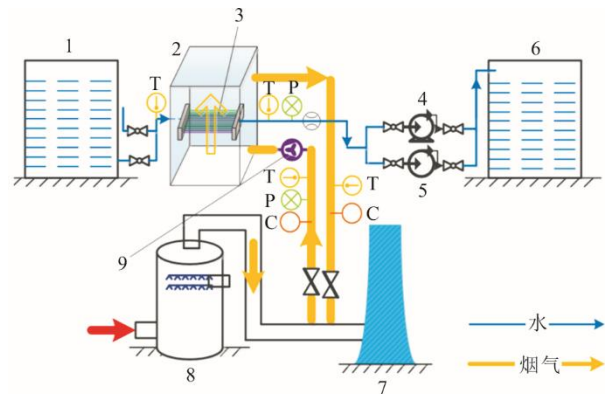
## 2 试验系统及计算方法

### 2.1 试验系统

中试试验平台位于某燃煤电厂 330 MW 机组上。烟气流量  $10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ , 从脱硫塔后烟道中抽取。试验系统包含冷却水系统、膜组件和烟气系统, 具体如图 4 所示。锅炉设计参数见表 1。

冷却水系统含有供水箱、回水箱、自吸泵、离心泵和超声波流量计等设备。在启动和运行过程中分别采用自吸泵和离心泵, 这 2 个泵并联安装在膜组件出口和回水箱之间, 为冷却水提供循环驱动力。在膜组件出口安装数显式流量计, 以实时显示

冷却水流量。冷却水管路上, 靠近膜组件进、出水口设有温度测点。打开注水阀对系统管道和膜组件进行注水, 待膜组件及整个管道内充满水后启动自吸泵, 冷却水自供水箱流向回水箱。建立水循环稳定后, 由自吸泵切换至离心泵工作。膜组件水侧出口靠近箱体处安装有真空压力表, 由于泵安装在膜组件出口, 所以运行过程中膜组件内部呈负压状态, 正常循环时管道中压力约  $-30 \text{ kPa}$ 。



1—供水箱; 2—箱体; 3—膜组件; 4—离心泵; 5—自吸泵; 6—回水箱; 7—烟囱; 8—脱硫塔; 9—引风机; T—温度测点; P—压力测点; C—组分测点。

图 4 中试试验系统流程示意

Fig.4 Schematic diagram of the pilot test system

表 1 锅炉设计参数

Tab.1 Design parameters of the boiler

项目	型号和数值
锅炉类型	B&WB-1100/17.5-M
燃烧方式	对冲燃烧
设计燃煤种类	无烟煤
过热蒸汽流量/( $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ )	1 100
过热蒸汽压力/MPa	17.5
过热蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	540
给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	279
再热蒸汽压力/MPa	3.8
再热蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	328
锅炉效率/%	93.8

膜组件由膜管和位于组件两端的水室组成, 水室及法兰采用 316L 不锈钢。膜组件水平安装在箱体中, 烟气在箱体中从下往上流动冲刷膜管。箱体底部设冷凝水排水管道, 管道上安装阀门, 可定时手动排放冷凝水。箱体外壳、冷却水管道、烟气管道均采用耐高温玻璃棉进行保温处理, 防止散热。

烟气系统的主要设备是引风机, 引风机安装在箱体烟气侧进口处, 可以通过调节引风机前端的阀门开度控制烟气流量。烟气抽取位置位于脱硫塔后和烟囱进口前的烟道, 烟气在箱体内从下到上垂直冲刷膜组件后送至抽取点后面烟道, 经烟囱排入大

气。打开阀门，启动引风机后即可将烟气抽至膜组件。在箱体烟道进/出口设有测量孔，以测量烟气成分、温度及压力。

### 2.2 计算方法

水回收量和总传热系数是输运膜冷凝器的2个主要评价参数，分别用来评价膜式冷凝器的回收水和传热性能。

采用烟气管道内的动压值计算烟气流速<sup>[22]</sup>：

$$v = \zeta_p \sqrt{\frac{2}{\rho_{f,in}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{p_d}}{n}} \quad (14)$$

式中： $v$ 为烟气速度，m/s； $\rho_{f,in}$ 为烟气密度，kg/m<sup>3</sup>； $\zeta_p$ 为皮托管标定系数，0.999； $p_d$ 为烟气管道内的动压值。

烟气分析仪通常测量的是干基状态下的体积分数，需要根据干基基准下的百分比计算湿基基准下的百分比进而计算湿基下的密度。烟气密度计算方程为：

$$\rho_f = \rho_N \frac{273.15}{273.15+t} \times \frac{B_a + P_s}{101325} \quad (15)$$

式中： $\rho_f$ 为烟气实际密度，kg/m<sup>3</sup>； $t$ 为烟气温度，℃； $\rho_N$ 为标准状态下烟气密度，kg/m<sup>3</sup>； $B_a$ 和 $P_s$ 分别为大气压和静压，Pa。

根据烟气流速计算烟气流量<sup>[23]</sup>：

$$Q_f = 3600 \cdot F \cdot v \quad (16)$$

式中： $Q_f$ 为烟气流量，m<sup>3</sup>/h； $F$ 为烟气通流面积。

烟气中水蒸气的质量分数 $\varphi$ 的计算方程为：

$$\varphi = \frac{M_{H_2O} \cdot X_{water}}{M_{H_2O} \cdot X_{water} + M_{O_2} \cdot X_{O_{2,w}} + M_{CO_2} \cdot X_{CO_{2,w}} + M_{N_2} \cdot X_{N_{2,w}}} \quad (17)$$

$$X_{water} = \frac{p_{bv} - 0.00067(t_c - t_b)(B_a + p_b)}{B_a + p_s} \times 100\% \quad (18)$$

式中： $M_{H_2O}$ 、 $M_{O_2}$ 、 $M_{CO_2}$ 、 $M_{N_2}$ 为H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>质量分数，%； $X_{water}$ 为水蒸气体积分数，%； $X_{O_{2,w}}$ 、 $X_{CO_{2,w}}$ 、 $X_{N_{2,w}}$ 为O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>的体积分数； $p_{bv}$ 为 $t_b$ 温度下饱和水蒸气压力，Pa； $t_b$ 和 $t_c$ 分别为湿球和干球温度，℃。

根据进口烟气中水蒸气与出口烟气中水蒸气减少量计算回收水量，分为箱体冷凝水和膜内回收水，计算表达式为：

$$J_{rec} = \frac{Q_{in} \rho_{in} \varphi_{in} - Q_{out} \rho_{out} \varphi_{out}}{A} \quad (19)$$

式中： $J_{rec}$ 为回收水量； $Q_{in}$ 、 $Q_{out}$ 为膜组件进、出口烟气流量； $\rho_{in}$ 、 $\rho_{out}$ 为膜组件进、出口烟气密度； $\varphi_{in}$ 、 $\varphi_{out}$ 为膜组件进、出口烟气中水蒸气质量分数； $A$ 为膜组件的有效膜面积，m<sup>2</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 冷却水温度

相关参数随冷却水温度升高的变化趋势计算结果如图5所示。由图5可知，冷却水温度由25℃升高至36℃，回收水量逐渐降低，由29.45 kg/h降低到18.13 kg/h。这是因为，此时膜组件类似于钢管换热器，冷却介质温度越高，膜管壁温度越高，烟气和管壁温度之间的温差减小，该温差是促使水蒸气凝结的主要因素，水蒸气凝结速率随温差的减小而降低。由于凝结水量降低，即水蒸气冷凝过程中释放的热量减少，导致出口水温与入口水温的差值

逐渐减小，相反，出口烟温则逐渐增大。

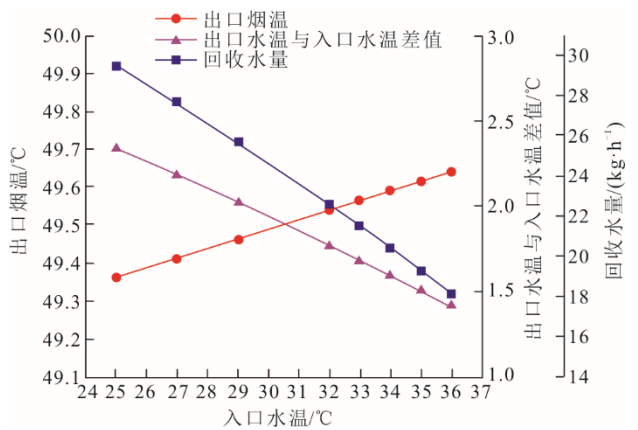
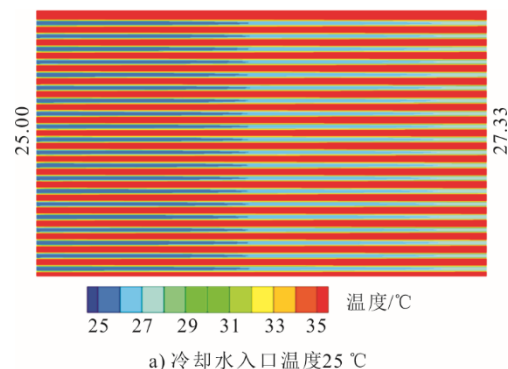


图5 相关参数随冷却水温度变化趋势  
Fig.5 The variation trends of relevant parameters with cooling water temperature

图6为陶瓷膜管排中心轴向切面冷却水温度分布。冷却水入口温度为25℃时温差最大，为2.33℃。随着冷却水温度升高，该差值逐渐减小，降低至36℃对应的差值为1.41℃。



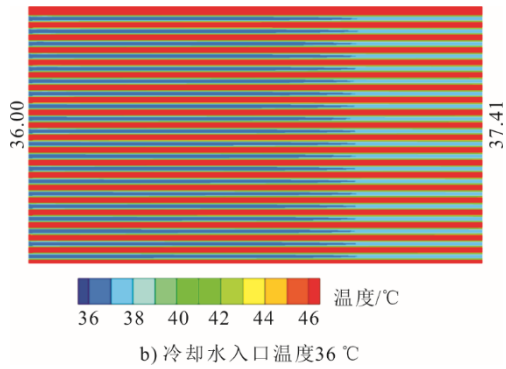


图6 陶瓷膜管排中心轴向切面冷却水温度分布  
Fig.6 Distribution of cooling water temperature in the central axial section of the ceramic membrane tube

### 3.2 烟气温度

回收水量随烟气温度变化趋势如图7所示。由图7可见,随烟气温度升高,回收水量线性增加,烟温从48℃升高到54℃过程中,回收水量从28.33 kg/h增长到31.31 kg/h,增长了10.5%。这是因为,饱和湿烟气中水蒸气含量随烟温的升高呈指数性增长,相同的冷却条件下,烟温越高,导致冷凝速率增加,冷凝的水量则越多。此外,随入口烟温的增大,进出口烟气温差 $\Delta T_g$ 降低,从0.69℃降低到0.55℃。这是因为在一定回收水量情况下,由于水蒸气含量随烟温指数增长,所以入口烟温与出口烟温较小的温差即可冷凝一定的水量。回收水量增加和烟气温度较高导致冷却水出口温度随烟温升高而升高。

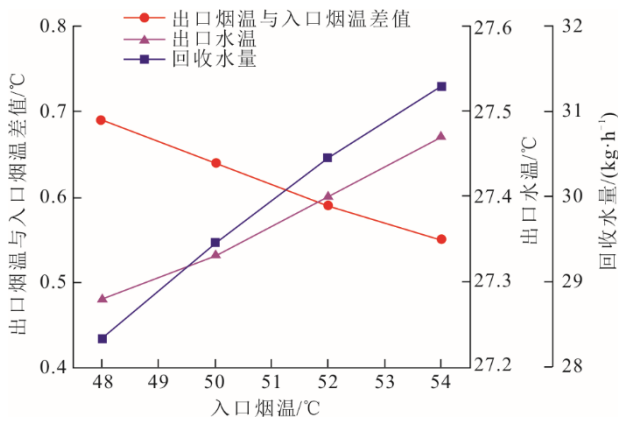


图7 回收水量随入口烟温变化

Fig.7 The variation trends of recovery water amount with inlet flue gas temperature

### 3.3 烟气流量

实验过程中设计流量为10000 m<sup>3</sup>/h。回收水量随烟气流量的变化趋势如图8所示。由图8可见,随着烟气流量增大,回收水量逐渐增加,增长趋势逐渐减缓。相同烟温下,水蒸气含量与烟气流量呈正比关系,因此回收水量逐渐增大,然而膜组件膜面积

有限,即回收能力有限,导致增长速率逐渐变小。

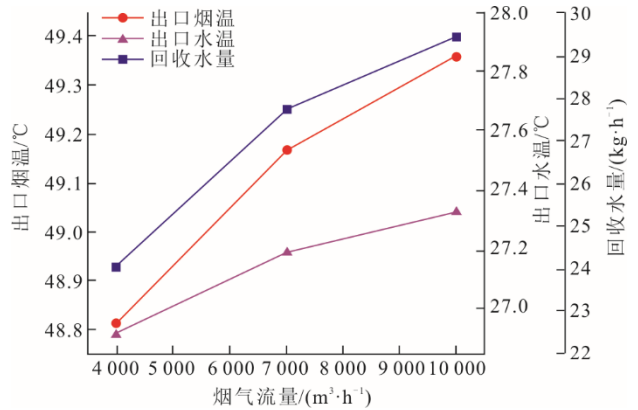


图8 回收水量随烟气流量变化

Fig.8 Change trends of recovery water amount with flue gas flowrate

### 3.4 验证分析

图9为回收水量计算结果与实验结果对比。由图9可见,计算值变化趋势与纵向间距5 cm膜组件的实验结果一致,5个冷却水温下回收水量的计算值与实验值分别相差6.23%、6.52%、6.14%、1.25%、0.70%,均小于7%,说明本文提出的计算模型能够比较准确地描述水蒸气的跨膜传输过程。计算值与实验值产生差异的原因主要包含:1)基于多孔陶瓷膜的烟气水分回收过程复杂,模拟研究中进行了必要的简化;2)烟气水分回收中试平台系统大、设备多,实验数据测量时存在测量装置误差、环境误差、测量方法误差等。

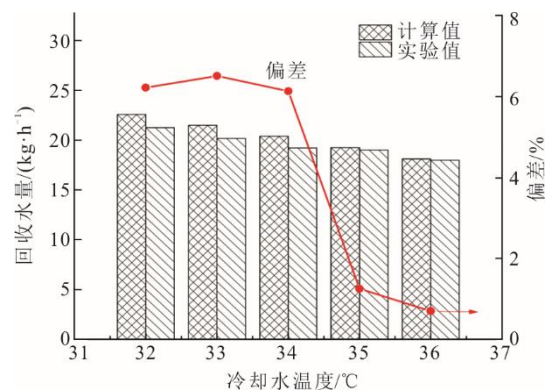


图9 回收水量计算结果与实验结果对比

Fig.9 Comparison of recovery water amount between the calculated results and experimental data

## 4 结论

本文通过构建烟气水分回收过程中传热传质数学模型,开展了数值模拟,并将数值结果与某燃煤机组中试平台的实验结果进行了比较。

1) 当冷却水温从25℃升高到36℃,回收水量从29.45 kg/h线性降低到18.13 kg/h,冷却水温对

回收水量的影响较大;随烟气温度升高,回收水量从 28.33 kg/h 略微升高至 31.31 kg/h;随入口烟温增大,进出口烟气温差降低。

2) 回收水量的数值模拟结果与实验数据偏差小于 7%,说明本文提出的计算模型可以较准确地描述陶瓷膜法烟气水分及余热回收的跨膜传热传质过程。

### [参考文献]

- [1] 米大斌, 郭江龙, 张衡. 陶瓷膜法的烟气水分及余热回收中试研究[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 199-206.  
MI Dabin, GUO Jianglong, ZHANG Heng. Pilot study of flue gas moisture and waste heat recovery based on ceramic membrane method[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 199-206.
- [2] 杨建国, 许明路, 陈永辉, 等. 燃煤电厂烟气冷凝法水回收试验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(4): 342-348.  
YANG Jianguo, XU Luming, CHEN Yonghui, et al. Experimental study on water recovery from flue gas condensation in coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(4): 342-348.
- [3] XIONG Y, TAN H, WANG Y, 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.
- [4] WANG E, LI K, HUSNAIN N, et al. Experimental study on flue gas condensate capture and heat transfer in staggered tube bundle heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 819-827.
- [5] ZHAO S, YAN S, WANG D K, et al. Simultaneous heat and water recovery from flue gas by membrane condensation: experimental investigation[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 843-850.
- [6] WANG T, YUE M, QI H, et al. Transport membrane condenser for water and heat recovery from gaseous streams: performance evaluation[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 484: 10-17.
- [7] WANG D, BAO A, KUNC W, et al. Coal power plant flue gas waste heat and water recovery[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 341-348.
- [8] 程超, 张衡, 陈海平. 陶瓷膜烟气余热回收性能实验研究[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 62-67.  
CHENG Chao, ZHANG Heng, CHEN Haiping. Experimental study on heat recovery performance from flue gas of ceramic membranes[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 62-67.
- [9] 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.  
CHEN Haiping, FENG Yijun, YANG Boran, et al. Experimental research on performance of ceramic membrane module for water and waste heat recovery from flue gas[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 45-52.
- [10] 闫敏, 李玉忠, 马春元. 基于机械蒸汽压缩的燃煤烟气余热及水回收系统[J]. 动力工程学报, 2018, 38(9): 755-762.  
YAN Min, LI Yuzhong, MA Chunyuan. A flue gas waste heat and water recovery system based on mechanical vapor recompression[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(9): 755-762.
- [11] 汪霞, 吴凯, 朱晓磊, 等. 烟气废热与水协同回收装置的实验与应用[J]. 动力工程学报, 2020, 40(1): 76-81.  
WANG Xia, WU Kai, ZHU Xiaolei, et al. Experimental study and application analysis of a device for synergetic recovery of flue gas waste heat and condensation water[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(1): 76-81.
- [12] 李沁伦, 王璐凯, 刘银河. 燃煤发电机组烟气余热利用系统改进研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(12): 1019-1026.  
LI Qinlun, WANG Lukai, LIU Yinhe. Study on a moisture flue gas waste heat utilization system for coal-fired power units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(12): 1019-1026.
- [13] KIM J F, PARK A, KIM S, et al. Harnessing clean water from power plant emissions using membrane condenser technology[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(5): 6425-6433.
- [14] GAO D, LI Z, ZHANG H, et al. Moisture recovery from gas-fired boiler exhaust using membrane module array[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1110-1121.
- [15] 王金平, 邓煜, 李斌, 等. 电站锅炉烟气余热及水分回收系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(7): 1553-1560.  
WANG Jinping, DENG Yu, LI Bin, et al. Simulation on Waste heat and water recovery system of flue gas in plant boiler[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1553-1560.
- [16] XIAO L, YANG M, ZHAO S, et al. Entropy generation analysis of heat and water recovery from flue gas by transport membrane condenser[J]. Energy, 2019, 174: 835-847.
- [17] ZHANG J, LI Z, ZHANG H, et al. Numerical study on recovering moisture and heat from flue gas by means of a macroporous ceramic membrane module[J]. Energy, 2020, 207: 118230.
- [18] SOLEIMANIKUTANA EI S, LIN C X, WANG D. Modeling and simulation of cross-flow transport membrane condenser heat exchangers[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 95: 92-97.
- [19] 温荣耀, 谭潇玲, 刘克俭, 等. 烧结烟气 SCR 脱硝系统流场数值模拟研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(5): 73-78.  
WEN Rongyao, TAN Xiaoling, LIU Kejian, et al. Numerical simulation research on flow field in a sintering gas SCR denitrification system[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 73-78.
- [20] 郭晨, 李慧梅, 董辉, 等. CCGP 余热锅炉入口烟道烟气流动的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 93-100.  
GUO Chen, LI Huimei, DONG Hui, et al. Numerical simulation of flue gas flow in inlet of CCGP HRSG[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 93-100.
- [21] ZHANG H, ZHANG J, LIU Z, et al. Study of using macroporous ceramic membrane to recover waste heat and water from flue gas[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 275: 119218.
- [22] 国家环境保护局. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 77-78.  
China State Environmental Protection Administration. Determination of particulate matter in exhaust gas of stationary pollution source and sampling method of gaseous pollutants[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 77-78.
- [23] 刘鹤年. 流体力学[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 73.  
LIU Henian. Fluid mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: China Construction Industry Press, 2004: 73.

(责任编辑 杨嘉蕾)