

基于泡沫铜翅片换热器的烟气水分回收实验研究

杨亦擎,姜未汀,潘卫国,涂 钊

(上海电力大学 能源与机械工程学院,上海 200000)

摘要:搭建了以泡沫铜翅片换热器为核心的烟气水分回收实验台,研究了冷却水进口温度、烟气雷诺数及烟气中水蒸气体积分数对该换热器水回收特性和换热特性的影响,基于实验数据,利用多元回归拟合得到对流换热的关联式,其预测值与实验值误差在6%以内。结果表明:水蒸气体积分数增大可以显著提升水回收特性,而冷却水进口温度及烟气雷诺数对其影响很小;冷却水进口温度与烟气雷诺数对换热效率的影响较大,冷却水进口温度与换热效率成反比,烟气雷诺数与之成正比,而水蒸气体积分数对其影响较小;实验获得的最大冷凝水产率为7.68 kg/h,最大冷凝率为56.94%,最大换热效率为96.95%。

关键词:含湿气体;泡沫铜;水分回收;冷凝率;换热效率

中图分类号:TK2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.030

[引用本文格式]杨亦擎,姜未汀,潘卫国,等.基于泡沫铜翅片换热器的烟气水分回收实验研究[J].热能动力工程,2020,35(2):213-218. YANG Yi-qing,JIANG Wei-ting,PAN Wei-guo,et al. Experimental study on flue gas moisture recovery based on foamed copper fin heat exchanger[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(2):213-218.

Experimental Study on Flue Gas Moisture Recovery based on Foamed Copper Fin Heat Exchanger

YANG Yi-qing,JIANG Wei-ting,PAN Wei-guo,TU Zhao

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200000)

Abstract: A flue gas moisture recovery test bench with foam copper fin heat exchanger as the core was built. The influence of inlet temperature of cooling water, Reynolds number of flue gas and volume fraction of vapor in flue gas on the water recovery and heat transfer characteristics of the heat exchanger were studied. Finally, based on the experimental data, the correlation formula of convective heat transfer was obtained by using multiple regression fitting, and the deviation between the predicted value and the experimental value was within 6%. The results revealed that the increase in water vapor volume fraction could significantly improve the water recovery characteristics, while the inlet temperature of cooling water and flue gas Reynolds number had little effect on it. Cooling water inlet temperature and flue gas Reynolds number had a great influence on heat transfer efficiency. The cooling water inlet temperature was inversely proportional to the heat transfer efficiency. The Reynolds number of the flue gas was proportional to it, and the water vapor volume fraction had little effect on it. Based on the selected parameters, the maximum condensate collection rate was 7.68 kg/h, the maximum condensation rate was 56.94%, and the maximum heat transfer efficiency was 96.95%.

Key words: wet flue gas, bubble copper, water recovery, the condensation rate, heat transfer efficiency

收稿日期:2019-05-12; 修订日期:2019-06-14

基金项目:国家自然科学基金(21546014);上海市自然科学基金(14ZR1417800);上海市科委项目(18DZ1202004)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (21546014), Shanghai Natural Science Foundation (14ZR1417800), Shanghai Science and Technology Commission Project (18DZ1202004)

作者简介:杨亦擎(1995-),女,河南南召人,上海电力大学硕士研究生,E-mail:yangyiqing0808@163.com.

通讯作者:姜未汀(1979-),男,浙江余姚人,上海电力大学副教授,E-mail:jiangweiting618@163.com.

引言

20世纪70年代,冷凝式锅炉在欧洲得到研发,后来逐渐拓展到工业锅炉上使用^[1]。2006年美国能源部对该项目进行研发^[2],主要对烟气水分进行回收研究。褐煤经过燃烧后烟气中水含量可达16%,如果电厂可回收再利用这部分水,能减小对总冷却水量的需求。

Jeong等人^[3]研究使用冷凝式热交换器从煤电厂的煤气中回收水蒸气,进行中试实验并建立理论传热传质模型,估算可回收的水量。庄正宁等人^[4]在光管间壁式换热器实验台上研究影响烟气水分回收的因素,并总结了冷凝液量的关系式。雷承勇等人^[5]以燃煤电站烟气作为实验对象,研究烟气冷凝水的回收及影响因素,同时对抗腐蚀材料的选取进行了深入研究。甘露等人^[6]研究发现使用氟塑料作为换热器材料效果好,不易结垢且性能稳定。吴乃新等人^[7]利用翅片管换热器进行凝结换热,收集的水分处理后可补给冷却循环水。

已有的回收技术虽然已经得到工程应用,但为了在有限的烟道内尽量缩小换热器体积,降低换热器成本,需要寻找更加高效的烟气水分与余热回收手段。泡沫铜翅片换热器作为一种新的换热器,其具有比表面积大、导热性能好的特点,本文探讨泡沫铜翅片换热器在烟气水分与余热回收领域的应用,为多孔介质在电厂烟气水分回收应用中提供新的思路与解决手段。

1 烟气水分回收实验

1.1 实验装置

热空气与水蒸气混合作为模拟烟气,实验原理如图1所示。第一部分为烟气模拟系统,主要由工业热风机和蒸汽发生器组成。工业热风机和蒸汽发生器两者共同作用调节模拟烟气的温湿度。第二部分为烟气冷却系统,主要由加装泡沫铜肋片的冷凝式换热器、水泵和恒温水槽构成。恒温水槽调节冷却水入口温度,水泵驱动其从换热器底端入口进入,使用后直接排出,以免影响冷却水进口水温。第三部分为冷凝水收集系统,由疏水孔和冷凝水收集托盘组成,模拟烟气进入实验段与泡沫铜充分接触,冷

凝水聚集在换热器底部通过疏水孔流入收集托盘。实验选取的参数范围为:水蒸气体积分数为7%~25%,冷却水温度为 t_1 8~16℃,冷却水流速为0.3~1.3 m³/h。

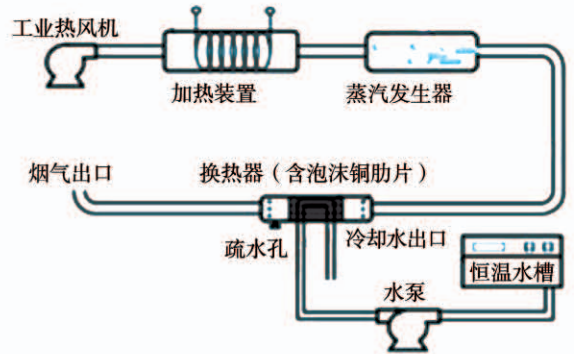


图1 实验原理图

Fig. 1 Diagram of a supercritical DC steam-water system

1.2 泡沫铜翅片换热器结构

实验采用平均孔径为1 mm、孔隙率为96%的泡沫铜作为翅片。该泡沫铜翅片换热器实验段的尺寸为1 000 mm × 219 mm × 219 mm,在实验段中部布置12根管径 d 为38 mm,管壁厚度为1 mm的铜管,每排4根,为顺排结构,如图2所示。泡沫铜作为肋片填充在冷却水管道与烟道之间,裸露在外的管道弯头部分另用保温材料进行保温。模拟烟气从烟道内横掠水平管束以及泡沫铜翅片,冷却水在水平管束内流动,两者进行热量交换。

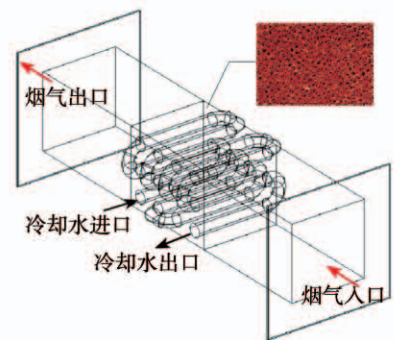


图2 泡沫铜翅片换热器结构

Fig. 2 Structure of foamed copper fin heat exchanger

泡沫铜是新型材料,在导热方面性质优良,但由于铜的耐腐蚀性一般,应用中还需再做研究,本文只研究其换热性能。

1.3 数据处理

烟气温度参考烟道烟温,用冷凝水产率、冷凝率表征该系统的水回收特性,用换热效率来表征换热特性。

冷凝水产率 q_m 指在实验时间内收集托盘中收集到的冷凝水量。

$$q_m = \frac{m_i}{\tau} \quad (1)$$

式中: m_i - 测试收集冷凝水量, kg; τ - 实验时间, h。

冷凝率 β 指一定时间内托盘收集的冷凝水量 m_i 与装置产生的水蒸气量 m 之比。

$$\beta = \frac{m_i}{m} \quad (2)$$

式中: m_i ——一定时间内收集的冷凝水量, kg/h; m ——一定时间内装置产生的水蒸气量, kg/h。

换热器效率 η_i 指冷凝器实际热负荷 Q_i 与理论热负荷 Q 之比^[8]。

$$\eta_i = \frac{Q_i}{Q} \times 100\% \quad (3)$$

$$Q = Q_x + Q_q \quad (4)$$

$$Q_x = c_p V_f \Delta t \quad (5)$$

$$Q_q = \frac{r}{1\ 000} \times \frac{d}{60} \quad (6)$$

式中: Q_x - 烟气显热量, W; c_p - 烟气混合比热容, J/(m³ · °C); V_f - 烟气体积流量, m³/s; Δt - 烟气温度降, °C; Q_q - 烟气潜热量, W; r - 冷凝水的汽化潜热, J/kg; d - 烟气含水量, g/min。

2 水分回收特性分析

2.1 水蒸气体积分数

图3为冷却水温度为8~16 °C时,水蒸气体积分数对冰凝水产率的影响。水蒸气体积分数 α 与冷凝水产率 q_m 近似呈一次函数关系,随着 α 的增大,冷凝水产率 q_m 增长迅速。在冷却水温度为16 °C时,水蒸气体积分数为7%、16%、25%的烟气的冷凝水产率分别为1.5、3.6和6.0 kg/h。

图4为不同冷却水温度下水蒸气体积分数对冷凝率的影响。随着 α 的增大,冷凝率随之增大,冷却水温度为10 °C时,水蒸气体积分数为7%、16%和25%的烟气冷凝率分别为25.0%、32.9%和44.4%。从工程热力学角度分析,较高的水蒸气体

积分数意味着更多的含水量,当烟温下降时,高含水量的烟气自然会凝结出更多水量。

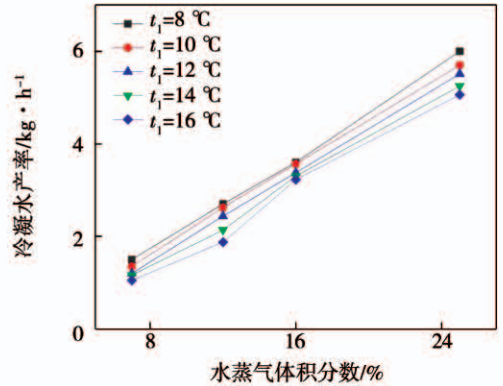


图3 不同冷却水温度下水蒸气体积分数对冷凝水产率的影响

Fig. 3 Effect of vapor volume fraction on condensate collection rate

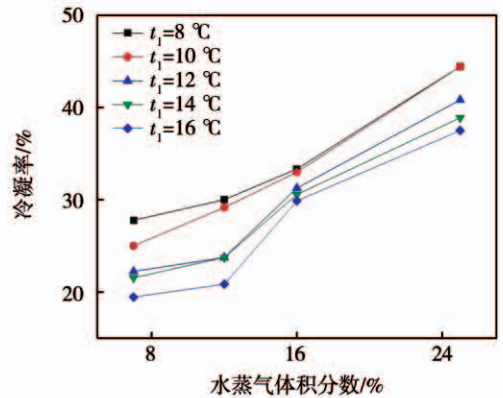


图4 不同冷却水温度下水蒸气体积分数对冷凝率的影响

Fig. 4 Influence of vapor volume fraction on condensation rate

2.2 烟气雷诺数 Re

图5为水蒸气体积分数 α 为7%~25%时 Re 对冷凝水产率的影响。 Re 增大,冷凝水产率 q_m 增大,但增幅较缓。对于水蒸气体积分数 α 为25%的烟气,随着 Re 从1 155.4增大到2 292.6,冷凝水产率从6.60 kg/h上升到7.69 kg/h。 Re 的增大使湿烟气对泡沫铜翅片的冲刷力度增大,液滴脱落速度加快,因此冷凝水产率增大。

图6为水蒸气体积分数不同时, Re 对冷凝率的影响。烟气凝结率随 Re 的增大而减小,对于水蒸气体积分数 α 为16%的烟气,随着 Re 从1 018.3增大到2 767.4,冷凝率从38.19%降到24.31%。随着

烟气流量的增大,热流量增大,烟气侧的平均温度随之升高,且换热器内模拟烟气的存留时间减少,故冷凝反应不易发生,冷凝率降低。

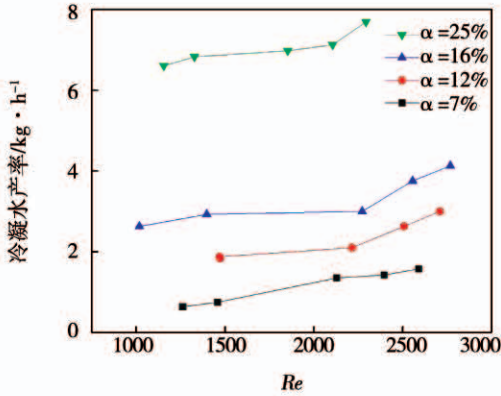


图 5 不同水蒸气体积分数下 Re 对冷凝水产率的影响

Fig. 5 Effect of Re on condensate collection rate

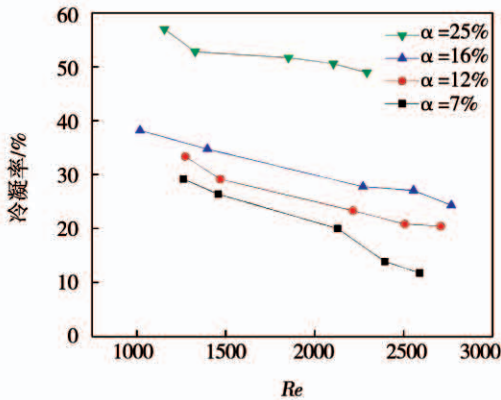


图 6 不同水蒸气体积分数下 Re 对冷凝率的影响

Fig. 6 Influence of Re on condensation rate

2.3 冷却水进口温度

图 7 为水蒸气体积分数不同时,冷却水进口温度对冷凝水产率的影响。随着冷却水进口温度 t_1 的上升,冷凝水产率 q_m 缓慢下降。对于水蒸气体积分数 α 为 7% 的烟气,设置 t_1 为 8、12 和 16 $^{\circ}\text{C}$,其冷凝水产率分别为 1.50、1.20 和 1.05 kg/h 。相同工况下冷凝率也呈现降低趋势,如图 8 所示。对于水蒸气体积分数 α 为 25% 的烟气,当 t_1 分别为 8 和 16 $^{\circ}\text{C}$ 时,冷凝率分别为 44.44% 和 37.50%。这是因为冷却水进口温度的上升导致泡沫铜表层附着液膜温度增长,烟气与泡沫铜表层液膜的温差减小,对流传质动力受到影响,导致冷凝水产率和冷凝率逐渐减小。但该因素对水分凝结的影响没有前两个因素剧烈,

因此冷却水进口温度对冷凝水产率与冷凝率的影响相对较小。

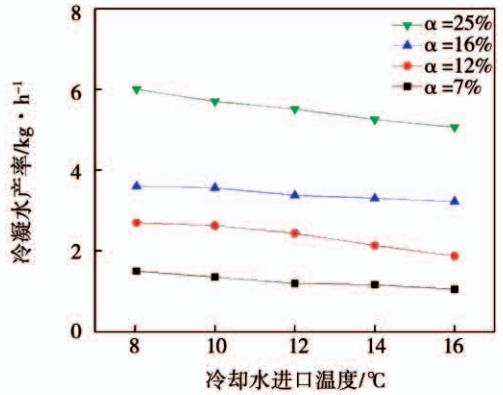


图 7 不同水蒸气体积分数下冷却水进口温度对冷凝水产率的影响

Fig. 7 Effect of cooling water inlet temperature on condensate collection rate

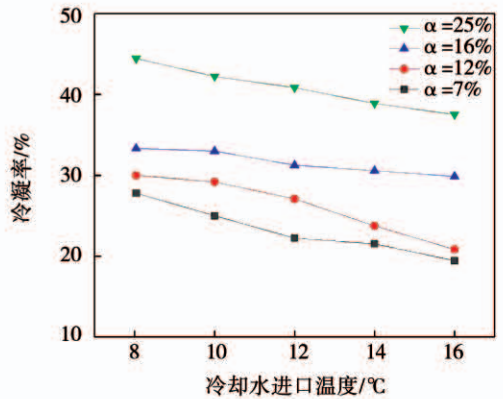


图 8 不同水蒸气体积分数下冷却水进口温度对冷凝率的影响

Fig. 8 Influence of cooling water inlet temperature on condensation rate

3 余热回收特性分析

3.1 冷却水进口温度

水蒸气体积分数为 7% ~ 25% 时,冷却水进口温度对换热效率的影响,如图 9 所示。冷却水进口温度 t_1 上升导致换热效率迅速减小,冷却水温度 t_1 从 8 $^{\circ}\text{C}$ 增加到 16 $^{\circ}\text{C}$,水蒸气体积分数 α 为 25% 的烟气的换热效率从 88.18% 降到 23.06%。 t_1 升高引起泡沫铜及其表面液膜温度的升高,减小了液膜与烟气间的温差及传质动力,水蒸气放热量减小,换热效率随之降低。

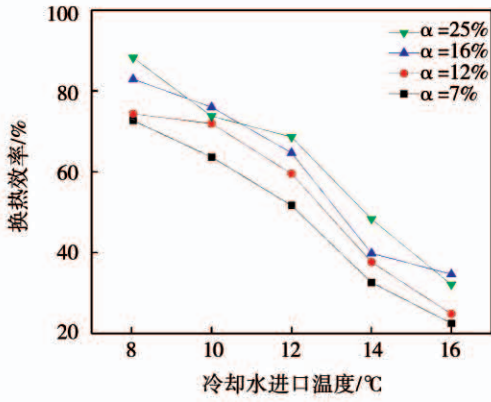


图9 不同水蒸气体积分数下冷却水进口温度对换热效率的影响

Fig. 9 Influence of cooling water inlet temperature on heat transfer efficiency

3.2 烟气雷诺数 Re

水蒸气体积分数不同时, Re 对换热效率的影响,如图10所示。 Re 从875.76增大到1797.19,水蒸气体积分数 α 为7% 换热效率从65.41%增大到88.71%。 Re 在2200左右换热效率剧增,这是由于烟气的流动从层流变为紊流,导致换热系数显著增加,从而使得换热效率剧增。

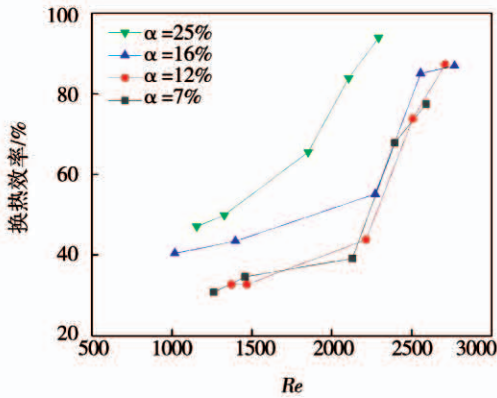


图10 不同水蒸气体积分数下 Re 对换热效率的影响

Fig. 10 Influence of Re on heat transfer efficiency

3.3 水蒸气体积分数

图11为冷却水温度为8~16℃时水蒸气体积分数对换热效率的影响。水蒸气体积分数 α 上升导致换热效率增长,但是增长趋势较为平缓。水蒸气体积分数 α 从7%增加到25%,换热效率从72.64%增大到88.18%,增加量为15.44%。在换热过程中,水蒸气分压正比于水蒸气体积分数, α 增大,有

利于传质的进行,因此更多的水蒸气凝结放热,由于凝结放热属于相变传热,换热系数较大,换热效率提高。

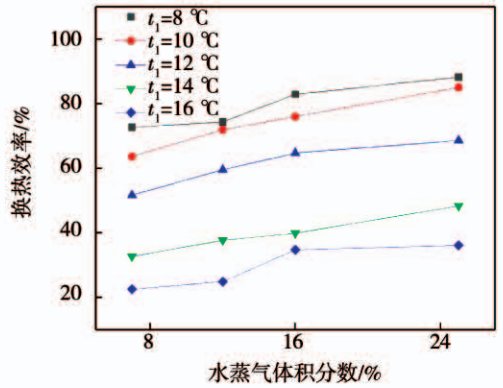


图11 冷却水温度不同时水蒸气体积分数对换热效率的影响

Fig. 11 Influence of vapor volume fraction on heat transfer efficiency

4 水平管束表面凝结对流换热系数的实验关联式

根据 Colburn-Hougen 建立的对流换热模型,引入冷凝因子 $Ln^{[9]}$ 为:

$$Ln = \frac{t_{\text{sat}(p_v)} - t_2}{t_1 - t_2} \quad (7)$$

式中: $t_{\text{sat}(p_v)}$ —水蒸气在该压力下的饱和温度,℃;
 t_1, t_2 —冷却水和烟气进口温度,℃。

水平管束外表面换热系数的无量纲准则方程式为:

$$Nu = a Re^b Pr^c Ln^d \quad (8)$$

根据管束外强制对流传热的关联式,取 $c = 1/3^{[10]}$,对实验数据分析计算,利用多元线性回归得到 $a = 0.5302, b = 0.6562, d = -0.0218$,于是关联式可表示为:

$$Nu = 0.5302 Re^{0.6562} Pr^{1/3} Ln^{-0.0218} \quad (9)$$

此关联式仅在本实验中含湿气体 Re 为1018~2781的情况下适用,定性温度为模拟烟气的进口温度。

图12表明实验关联式的预测值与实验值之间的误差在6%之内,误差最大仅为5.83%,最小为0.03%。

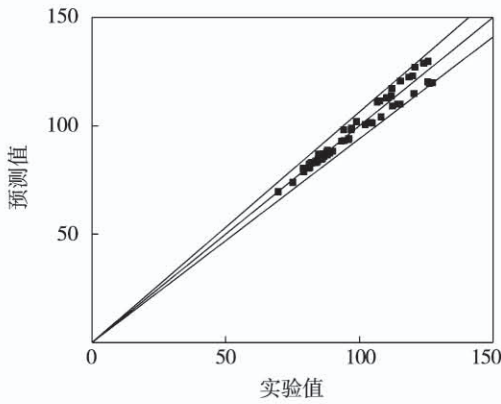


图 12 实验关联式的预测值与实验值的比较

Fig. 12 Comparison of experimental correlation formula predicted values and experimental values

5 结 论

(1) 对实验数据进行分析,水蒸气体积分数增大可以显著提升水分回收特性,而冷却水进口温度及 Re 对其影响较小。冷凝水产率为 0.63 ~ 7.68 kg/h,冷凝率为 11.81% ~ 56.94% 之间。

(2) 冷却水进口温度与 Re 对换热效率的影响较大,冷却水进口温度与换热效率成反比, Re 与之成正比,而水蒸气体积分数对其影响较小。换热效率为 23.32% ~ 96.95%。

(3) 基于对数据的计算分析,利用多元回归拟合得到新的对流冷凝换热的实验关联式,实验值与预测值误差在 6% 以内。

参 考 文 献:

[1] 裴光泰. 冷凝锅炉技术分析[J]. 工业锅炉,2009(2):29-31.
PEI Guang-tai. Technical analysis of condensing boiler[J]. Industrial boiler,2009(2):29-31

[2] JEONG K, KESSEN M, BILIRGEN H, LEVY EK. Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(11/12): 2361-2368.

[3] JEONG K. Condensation of water vapor and sulfuric acid in boiler flue gas [M]. Lehigh: ProQuest Dissertations Publishing, 2009: 11-75.

[4] 庄正宁, 李江荣, 车得福, 等. 加湿热空气对流冷凝换热冷凝液量的实验研究[J]. 热能动力工程, 2005(1): 69-72, 108.
ZHUANG Zheng-ning, LI Jiang-rong, CHE De-fu, et al. Experimental study on condensate volume by convection condensation with hot and humid air[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005(1): 69-72, 108.

[5] 雷承勇, 王恩禄, 黄晓宇, 等. 燃煤电站烟气水分回收技术试验研究[J]. 锅炉技术, 2011, 42(1): 5-8.
LEI Cheng-yong, WANG En-lu, HUANG Xiao-yu, et al. Experimental study on water recovery technology of flue gas in coal-fired power stations[J]. Boiler Technology, 2011, 42(1): 5-8.

[6] 甘露, 毛霖, 李红飞, 等. 燃煤烟气水分回收技术概述[J]. 资源节约与环保, 2017(8): 24-25.
GAN Lu, MAO Lin, LI Hong-fei, et al. Overview of water recovery technology of coal smoke[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2017(8): 24-25.

[7] 吴乃新, 宋治璐, 王恩禄, 等. 褐煤干燥提质技术比较与水分回收及余热利用方案[J]. 锅炉技术, 2012(4): 45-48, 58
WU Nai-xin, SONG Zhi-lu, WANG En-lu, et al. Comparison of lignite drying and quality improvement technology and scheme of water recovery and waste heat utilization[J]. Boiler Technology, 2012(4): 45-48, 58

[8] 陈杰, 张策茗. 冷凝式燃气热水器冷凝器性能研究[J]. 能源与环境, 2015(2): 6-7.
CHEN Jie, ZHANG Ce-ming. Study on condenser performance of condensing gas water heater[J]. Energy and Environment, 2015(2): 6-7

[9] 笪耀东, 车得福, 庄正宁, 等. 高水分烟气对流冷凝换热模拟实验研究[J]. 工业锅炉, 2003(1): 12-15.
DA Yao-dong, CHE De-fu, ZHUANG Zheng-ning, et al. Experimental study on high moisture flue gas convection condensation heat transfer simulation[J]. Industrial Boilers, 2003(1): 12-15

[10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer [M]. 4th Edition. Beijing: High Education Press, 2006.

(王治红 编辑)