

# 加湿热空气对流冷凝换热冷凝液量的实验研究

庄正宁<sup>1</sup>, 李江荣<sup>1</sup>, 车得福<sup>1</sup>, 刘卫东<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 三北·拉拉克锅炉有限公司, 河北 张家口 075000)

**摘 要:**以冷凝式燃气锅炉的冷凝受热面为原型,采用加湿热空气模拟燃气锅炉的尾部烟气,通过单列光管间壁式换热器进行冷凝换热,在较宽广的加湿热空气温度(100~200℃)和水蒸气体积分数(4%~16%)范围内研究了冷凝液量的生成规律。实验结果表明:水蒸气分压力、冷却水流量和加湿热空气流量是影响水蒸气冷凝液量的主要因素,水蒸气的凝结率为 40%~75%。由实验数据进行多元线性回归分析,提出了一个新的计算冷凝液量的经验关系式。

**关 键 词:** 冷凝式锅炉; 加湿热空气; 冷凝液; 对流冷凝换热

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 1 引 言

以天然气为燃料的锅炉,排放烟气具有相当高的温度(150~250℃)。由于天然气的主要成分是CH<sub>4</sub>,燃烧后会产生大量的水蒸气(占烟气容积的15%左右)。如果天然气燃烧后的烟气中的水蒸气被冷凝下来,可以回收这部分热量,提高热能的利用率;若对其冷凝液采取一定的处理后加以利用,对于日益缺水的环境,特别是干旱少雨的西部地区具有巨大的吸引力;凝结液还能吸收烟气中的部分酸性氧化物和其它污染物,起到了保护环境的作用。因此,对冷凝式锅炉的研究将会产生显著的社会效益和经济效益<sup>[1]</sup>。

冷凝式锅炉的研制开发工作始于 20 世纪 70 年代的欧美等国,现在已经在国外得到了广泛的应用,但我国仍处于起步阶段。天然气高水分烟气的对流冷凝换热是一种不凝性气体中含少量水蒸气的冷凝换热,其研究工作主要集中在冷凝换热方面,从换热角度提出了一些可供冷凝换热器设计的方法<sup>[2~3]</sup>。但对烟气冷凝液量的研究较少,Nusselt 对静止纯净蒸汽的冷凝做了早期的研究<sup>[4]</sup>,国内学者也得出了

燃气热水器和燃气锅炉高水分烟气的冷凝液量<sup>[5~9]</sup>,而关于较大型的燃气锅炉尾部烟气的对流冷凝换热的文献则非常少。因此,本文将对冷凝式锅炉尾部烟气的冷凝液量的生成规律进行模拟研究,通过实验讨论燃气锅炉尾部烟气对流冷凝换热时影响冷凝液量生成的因素,以及确定计算冷凝液量的经验表达式。

## 2 实验系统及实验方法

模拟冷凝式锅炉尾部受热面的对流冷凝换热实验系统如图 1 所示。实验系统由加湿热空气发生系统、冷却水系统、测量系统、冷凝换热器、冷凝液收集系统以及信号采集系统等组成。

湿空气产生及加热系统由风机、电加热器、水泵以及喷水雾化段组成。空气由风机送入,经过一级电加热器后形成约 300℃的高温空气,然后通过一级喷水雾化段使水蒸发形成水蒸气,降温后的气流再通过二级加热段和喷雾段,从而生成加湿热空气。

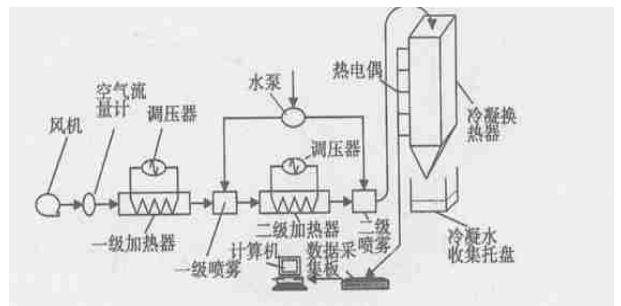


图 1 实验系统图

冷凝换热器由可以拆卸的 5 个管箱组成,总高度为 3 550 mm。冷凝管为  $\Phi 20 \times 2$  mm,单根长 500 mm。含湿气流在冷凝换热器内向下流动并排出,冷凝液通过冷凝换热器底部的汇集漏斗被收集到托盘

收稿日期: 2004-04-19; 修订日期: 2004-10-10

作者简介: 庄正宁(1952-),男,上海人,西安交通大学教授。

中,采用称重法对收集的冷凝液进行计量。管内冷却水从实验段下部进入向上流动,受热后不再循环使用,以保证实验段进口水温维持恒定。

实验的测量系统包括 85 个温度测点和 4 个流量测点。温度测点均采用灵敏度高和热电性能好的镍铬—镍硅热电偶,干空气流量由毕托管测压换算得到,冷却水和雾化水流量采用转子流量计进行计量。数据采集板采用的是 A900 采集系统。

实验中需要测量的量有:加湿热空气的进出口及沿程温度、管壁及冷却水的温度、室温、干空气流量、喷水流量、冷却水流量、冷凝液量以及实验工况运行时间。实验中通过调节阀对空气流量、喷水流量和冷却水流量以及通过调压器对输入热功率进行调控,从而获得实验所需要的工况。

实验之前分别对热电偶、流量计以及毕托管进行标定,并对没有加入雾化水的空气进行了实验,实验数据整理的对流放热系数与相应的准则方程式计算结果符合甚好。本文实验范围:加湿热空气的进口温度  $200 \sim 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;加湿热空气流量  $0.05 \sim 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ;水蒸气的体积分数  $4\% \sim 16\%$ ;冷却水流量  $400 \sim 1\,600 \text{ kg/h}$ 。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 水蒸气体积分数对冷凝效果的影响

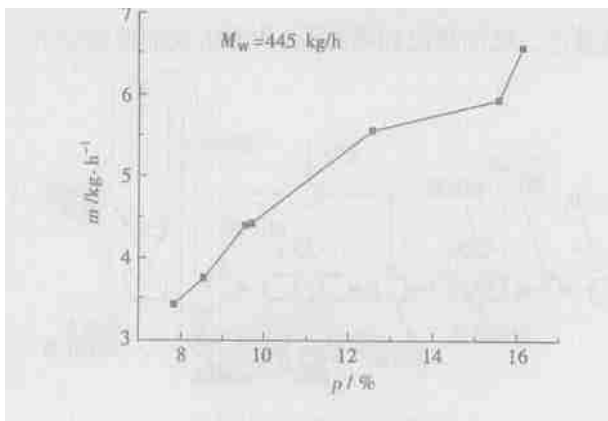


图2 水蒸气体积分数对冷凝液量的影响

图2和图3分别是冷凝液量  $m$  与凝结率  $w$  (冷凝液质量与换热面进口的水蒸气质量之比)随气流中水蒸气的体积分数  $p$  (即水蒸气分压力)的变化规律。从图中可知,随着水蒸气分压力的增大,冷凝液量与凝结率不断增大。与纯净蒸汽管外冷凝不同,当蒸汽含有不凝气体时,冷凝管外不仅存在液膜边

界层,液膜外还存在一个不凝气体积聚的气态传质边界层,水蒸气的凝结必须穿过该边界层。当水蒸气的分压力增加后,一方面使水蒸气分子的内能增加,即水蒸气冷凝的推动力增加,水蒸气分子可以更加有效地穿过气态传质边界层,从而有更多的蒸汽分子迅速抵达液膜表面参与凝结过程,在其它条件不变的情况下,使更多的水凝结下来;另一方面,导致水蒸气冷凝时的饱和温度提高,使水蒸气冷凝的进程提前,加大了冷凝换热强度,因此,冷凝液量和凝结率均增加。

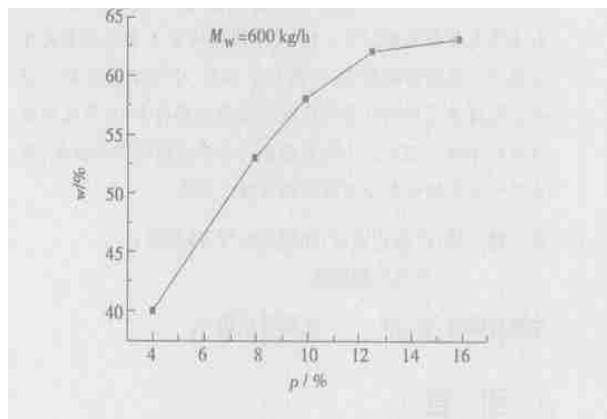


图3 水蒸气体积分数对凝结率的影响

#### 3.2 冷却水流量对冷凝效果的影响

图4和图5分别是冷凝液量与凝结率随冷凝换热器管内冷却水流量  $M_w$  的关系曲线。图中表明,随着冷却水量的增加(即传热量的增加),冷凝液量与凝结率也在增加。在其它条件不变的情况下,冷却水流量的增大降低了管内冷却水的平均温度,管壁温度及附着在管子外壁的液膜温度随之降低,对流冷凝换热增强,则液膜附近的水蒸气分压力迅速降低,增加了对流传质的动力,从而使更多的水蒸气向管壁聚积,强化了加湿热空气中水蒸气的凝结,导致冷凝液量与凝结率随之增大。

图4中还可以看出在冷却水流量较小的时候,冷凝液量的增加趋势比较剧烈,当冷却水流量增大到一定程度,冷凝液量的增大趋势却在逐渐变小。这是因为当冷却水流量较小时,管子外壁面温度较高,对流冷凝换热较弱,这时增大冷却水流量使得管子外壁面温度降低较快,水蒸气的凝结过程得到迅速强化,因而冷凝液量增加较快;随着壁面过冷度的增加,冷凝液量加大,换热器管外壁附着的冷凝液膜厚度将会增加,使液膜的热阻增加,减弱了对流冷凝换热,因而冷凝液量的增加趋势变缓。但水平管上

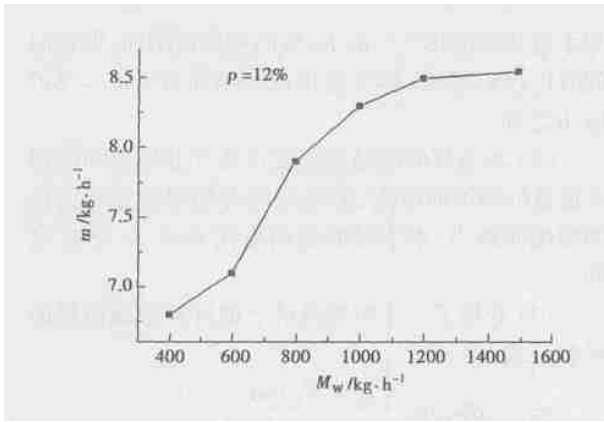


图 4 冷却水流量对冷凝液量的影响

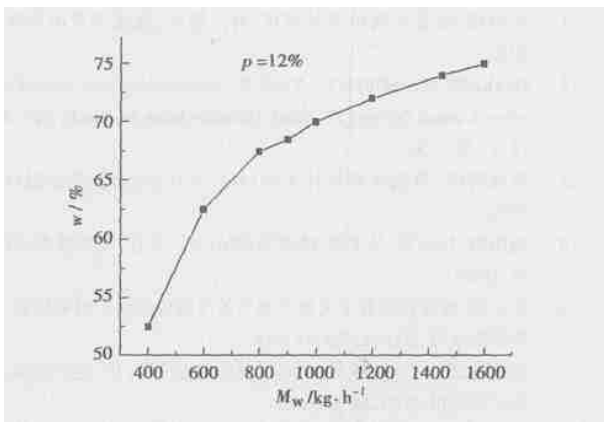


图 5 冷却水流量对凝结率的影响

的凝结液膜由于受到气流冲刷和自身重力的作用,液膜不断聚集成液滴滴落,液膜厚度不可能无限制增加,因此液膜的热阻随着冷却水流量的增加其变化有限。在一定条件下,当冷却水流量的增加到某一数值后,冷凝液量将趋于稳定状态,即冷却水流量的变化不再对冷凝液量产生明显的影响。

### 3.3 加湿热空气流量对冷凝效果的影响

冷凝液量与加湿热空气  $Re$  数的关系曲线如图 6 所示。随着  $Re$  数的增大,当其它条件一定时,即进入换热器中的湿空气流量增大,则单位时间进入换热器的水蒸气的含量也相应增多,因此更多的水蒸气参加冷凝换热而被冷凝下来。同时,随着  $Re$  数的增大,不但加剧了湿空气对换热器管束的冲刷,还能减薄管壁上的附着液膜,加速液滴的脱落,当湿空气流速增加到一定程度时,还有可能撕裂换热管外表面的液膜,从而减小对流冷凝换热的热阻,增加了换热强度,因此冷凝液量不断增加。

虽然冷凝液量随加湿热空气流量  $V$  的增加而

增大,但水蒸气的凝结率却随着加湿热空气流量的增大而减小,如图 7 所示。因为随着加湿热空气流量的增大,使其所携带的部分本可以在低流速下冷凝的水蒸气尚未冷凝就被带出了换热器,而且气流还可能卷吸携带已经凝结下来的细小液滴,出现冷凝液量增加而凝结率反而下降的结果。

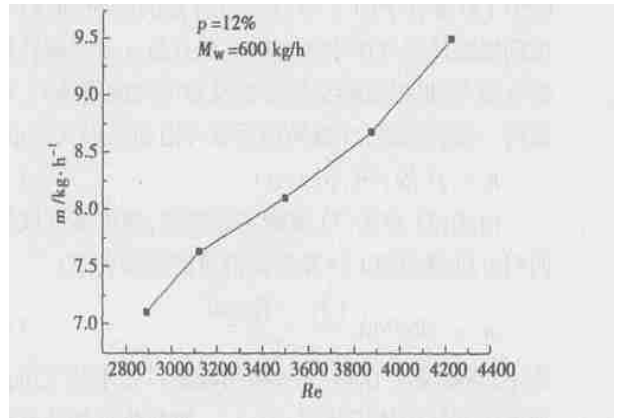
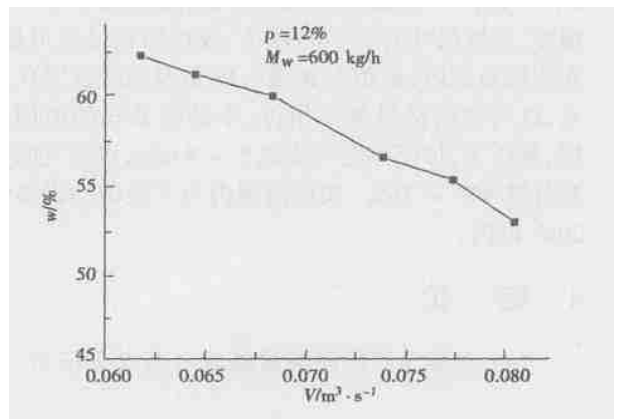
图 6 加湿热空气  $Re$  数对冷凝液量的影响

图 7 加湿热空气流量对凝结率的影响

### 3.4 冷凝液量经验公式的确立

加湿热空气与冷凝换热器的换热量由以对流方式进行的显热换热量和以凝结方式进行的潜热换热量两部分组成,而使水蒸气冷凝的热量仅为潜热换热量,由热平衡关系可得冷凝换热量:

$$Q_l = mr = hA(T_s - T_w) \quad (1)$$

则冷凝液量的一般表达式<sup>[4,7]</sup>为:

$$m = hA \frac{(T_s - T_w)}{r} \quad (2)$$

式中:  $m$ —单位时间产生的冷凝液量,  $\text{kg/s}$ ;  $T_s$ —水蒸气的平均饱和温度,  $^\circ\text{C}$ , 取换热器进口的水蒸气分压力对应的饱和温度和换热器出口的管壁温度的平

均值;  $T_w$ —换热器外壁温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $r$ —对应  $T_s$  的水蒸气的汽化潜热,  $\text{kJ/kg}$ ;  $A$ —换热器面积,  $\text{m}^2$ ;  $h$ —冷凝换热系数,  $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。由于冷凝是在对流条件下进行, 当凝结液顺次溅落在下一排冷却管外壁上时, 液膜滴落产生的扰动效应和高速气流的泼散作用<sup>[8-9]</sup>, 液膜热阻对换热系数的影响很小, 对于本实验中 130 根管子的  $h$  可以忽略管排的影响。同时考虑到加湿热空气中水蒸气的体积分数  $p$  对冷凝换热影响很大, 根据试验结果分析及参考对流换热时  $Nu$  数的一般表达式, 冷凝换热系数可由如下形式表示:

$$h = f(Re, Pr, p, \lambda/d) \quad (3)$$

由式(2)和式(3)整理实验数据, 通过多元线性回归分析得到如下计算冷凝液量的经验公式:

$$m = \alpha Re Pr p \lambda \frac{(T_s - T_w) nd}{r} \quad (4)$$

式中: 系数  $a = 0.11$ ;  $p$ —换热器进口处水蒸气所占加湿热空气的体积分数, %;  $\lambda$ —加湿热空气的导热系数,  $\text{kW}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $n$ —管排数;  $d$ —换热管外径,  $\text{m}$ ;  $Re$  和  $Pr$ —加湿热空气的参数, 定性温度取平均温度, 定性尺寸为管子的外径。线性回归结果可见, 在实验范围内,  $m$  值与  $Re$  数、 $Pr$  数及成线性变化关系, 这与实验结果基本相符。本经验公式的适用范围, 常压下, 加湿热空气流速  $5 \sim 8 \text{ m/s}$ ; 水蒸气的体积分数  $4\% \sim 16\%$ , 实验范围内与实验值的误差在  $20\%$  以内。

## 4 结 论

(1) 水蒸气的冷凝液量随着水蒸气分压力、冷

却水量及加湿热空气的  $Re$  数的增加而增加, 但它们的生长趋势不同。本实验中冷凝液量在  $1.2 \sim 8.7 \text{ kg/h}$  之间。

(2) 水蒸气的凝结率随着水蒸气分压力和冷却水流量的增加而增大, 但是它随着加湿热空气流量的增加而减小。本实验的凝结率在  $40\% \sim 75\%$  之间。

(3) 获得了一个实验条件下的计算冷凝液量的经验公式:

$$m = \alpha Re Pr p \lambda \frac{(T_s - T_w) nd}{r}$$

## 参考文献:

- [1] 车得福. 冷凝式锅炉及其系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] OSAKABE M, ISHIDA K, YAGI K. Condensation heat transfer on tubes in actual flue gas[J]. *Heat Transfer Asian Research*, 2001, 30(2): 139-151.
- [3] 尾花英朗. 热交换器设计手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1976.
- [4] 施明恒, 甘永平, 马重芳. 沸腾和凝结[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [5] 崔永章. 翅片换热器中天然气烟气的冷凝传热[J]. 山东建筑工程学院学报, 2000, 15(2): 41-45.
- [6] 孙金栋, 贾力, 陈铁兵. 烟气冷凝的环保分析[J]. 北京建筑工程学院学报, 2000, 16(3): 6-11.
- [7] 贾力, 彭晓峰, 孙金栋, 等. 烟道气的冷凝传热与脱硫的实验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(4): 387-393.
- [8] 庄正宁, 唐桂华, 朱长新. 不凝气体存在时水平管束冷凝换热特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(7): 34-38.
- [9] 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

## 新 产 品

# Rolls-Royce 公司的新型军用运输船

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2003 年 9 月号报道, 为了部署快速反应部队, 要求配以高速和低费用长距离运送大量车辆和人员的运输船。Rolls-Royce 公司提出了一个可供选择的方案——快速海军海洋运输船 FNSLV。

用于军用装备大规模调动的这一新型设计运输船能够以 40 节航速运送 4 000 t 有效载荷, 高功率密度的燃气轮机作为 FNSLV 的主发动机是满足上述要求的关键。

新研制的 MT30 航改型船舶燃气轮机是推进 FNSLV 的理想发动机。MT30 的双转子压气机设计使其运行灵活, 使用三台 MT30 推进 FNSLV 可使它在装运 4 000 t 有效载荷下达到 40 节航速。

(吉桂明 供稿)

verized coal a study was conducted of the operating characteristics of the MPS coal pulverizer. During a series of tests a study was conducted to mainly identify the impact of some major factors on the operating characteristics of the MPS coal pulverizer. Such factors include: the damper opening degree of a static classifier, the rotating speed of a dynamic classifier, the hydraulic loading force of a grinding roll, pulverizer inlet temperature and primary airflow rate. The above study can be helpful in providing design reference data for domestic manufacturers of the MPS coal pulverizer and offering operational guide for MPS coal pulverizers now in commission and also those soon to be put into operation. **Key words:** zero-pressure pendulum sampler, isokinetic sampling of pulverized coal, MPS coal pulverizer

加湿热空气对流冷凝换热冷凝液量的实验研究 = **Experimental Research of Condensate Flow Rate of Convection-condensation Heat Exchange of Humidified Hot Air Flow** [刊, 汉] / ZHUANG Zheng-ning, LI Jiang-rong, CHE De-fu, et al (College of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 69 ~ 72

The condensing heating surfaces of a condensing-type gas-fired boiler were used to serve as a prototype. On this basis a simulation of the flue gases in the above-mentioned boiler tail section was conducted by using humidified hot air. Through a single-row bare-tube recuperator a condensation heat exchange was carried out. Within a relatively wide range of humidified hot air temperature (100-200 °C) and vapor volumetric factor (4%-16%) a study was conducted of the generation law of condensate flow rate. The result of tests indicate that vapor partial pressure, cooling water flow rate and humidified hot airflow rate are major influencing factors of vapor condensate flow rate. Vapor condensation rate is 40% - 75%. After a multivariate linear regression analysis of experimental data a new empirical relation was proposed to calculate the condensate flow rate. **Key words:** condensation type boiler, humidified hot air, condensate, convection condensation heat exchange

非均等配风下的风水冷选择性冷渣器冷态排渣特性 = **Cold-state Slag Discharge Characteristics of an Air-water Cooled Selective Slag Cooler under a Non-uniform Air Distribution** [刊, 汉] / YE Xue-min, LI Chun-xi, FAN Xu, et al (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 73 ~ 75

With the air-water cooled selective slag cooler of a 450 t/h circulating fluidized bed boiler serving as a prototype and through a cold-state simulation test a study was conducted of the slag discharge characteristics in various chambers under a uniform and non-uniform air distribution. The impact of airflow ratios in various chambers on the slag discharge rate was analyzed. The results of the tests indicate that the lower limit of actual fluidized airflow of the slag cooler is higher than the design value. Under the condition of a basically unchanged total airflow rate of an air blower and even under a decreased airflow rate and through adjustment of airflow ratio in various chambers it is possible to significantly enhance the slag discharge speed of the slag cooler. The experimental data thus obtained can serve as a guide and reference for ensuring the safe operation of slag coolers. **Key words:** circulating fluidized bed, air-water cooled selective slag cooler, slag discharge characteristics, non-uniform air distribution

注汽涡轮增压柴油机的试验研究 = **Experimental Study of a Steam-injected Turbo-charged Diesel** [刊, 汉] / LU Ben (Key Laboratory of Thermal Power Engineering & Thermal Sciences under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), WEN Xue-you (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 76 ~ 79

Tests were conducted on a steam-injected turbo-charged diesel, a new type of power system. Under various diesel operat-