

# HAT 循环中关键部件—— 饱和器实验台的研制\*

靳海明 蔡颐年 (西安交通大学)

蔡睿贤 林汝谋 (中科院工程热物理所)

〔摘要〕本文指出了研究 HAT 循环中的饱和器性能的必要性,并初步建立了饱和器性能实验台,为掌握饱和器性能深入研究 HAT 循环作好了实验准备。

关键词 HAT 循环 饱和器 性能

分类号 TK123

## 0 引言

HAT 回热循环具有高效率、高比功、低污染及低成本等优点,被称为是跨世纪的热力循环。目前对 HAT 循环性能的研究主要限于理论分析方面<sup>[1,2,3]</sup>,而循环性能的优劣依赖于各部件的性能及整个系统优化。在 HAT 循环中,透平工质的增加是靠饱和器中的空气湿化来实现,也正是饱和器来吸收整个系统的各种低温热能,因此,饱和器的性能好坏对 HAT 整体性能有着至关重要和影响,无疑饱和器是该循环中的关键部件。在有关 HAT 循环的文献中,可以看到对饱和器的定性分析或简要的理论分析<sup>[3,4]</sup>。但是,饱和器中空气湿化受哪些参数影响,湿化程度如何,实现的可能性怎样,仅靠理论分析是不够的,还需要由实验来验证。本文即在此背景下建立了饱和器性能实验台。

## 1 HAT 循环及其关键部件 ——饱和器

图 1 为目前广泛使用的 HAT 循环热力学性质图,有关 HAT 循环流程描述可见文献<sup>[3]</sup>。

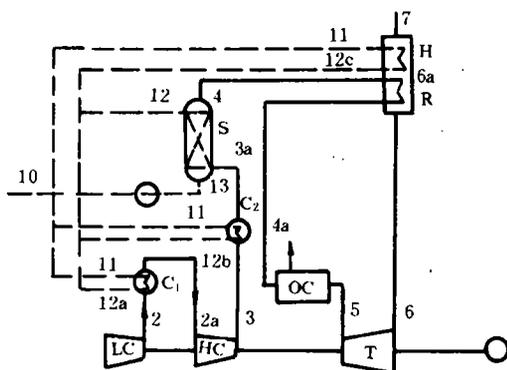


图 1 HAT 循环热力系统示意图

LC 低压压气机 HC 高压压气机  
C<sub>1</sub> 中间冷却器 C<sub>2</sub> 后冷器 S 饱和器  
OC 燃烧室 T 透平 R 回热器 H 热水器

\* 本文的工作受到国家动力工程多相流重点实验室开放基金资助,致谢。

收稿日期 1994-07-08

本文联系人 靳海明 男 27 博士研究生 710047 西安交大涡轮教研室

图1中,从高压压缩机排出的压缩空气经后冷器冷却进入饱和器下部,中冷器和后冷器的冷却水回水与热水器的出口热水混合从饱和器顶部喷入,在饱和器中与上升的空气逆流接触,空气被加热和湿化,水则被冷却及部分蒸发,从饱和器顶部出来的便是湿化空气。

## 2 饱和器的基本要求

HAT循环中饱和器和任务是:利用系统中的低温热能来加热和加湿压缩空气,增加透平工质,从整个循环出发,对饱和器有以下要求:

### 2.1 加湿效果好

出饱和器的空气湿化程度与饱和器内气流速度、进口空气温度、压力、湿化水温、水压、水流量及喷嘴的具体结构、饱和器本体结构等都有关系。但提高空气相对湿度同要求饱和压损小和尺寸小又有矛盾,如何合理设计饱和器和合理组织流体气动力学参数,显得格外重要。

同时,若饱和器出口湿化空气的相对湿度一样,即使饱和器的进口热力学参数相同,由于饱和器结构设计差异,也可能导致湿化空气的温度不同,从而使空气的绝对湿度不同。因此,由饱和器出口湿化空气的相对湿度和湿球温度两个参量来衡量饱和器中的空气加湿效果较为合理。

当然,为使气体加热和湿化,要求进出饱和器的热水温度之差至少维持一个最小值 $\Delta T_{124}$ ,一般为 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。即

$$T_{12} - T_4 \geq \Delta T_{124}$$

饱和器的出口空气状态要求其中水蒸汽的分压力低于同温度下的饱和压力,相对湿度 $\phi$ 应小于1。

$$\phi_4 \leq 1$$

另外,出饱和器液温与进饱和器空气的湿球温度之差高于设计可实现的温差 $\Delta T_w$ ,一般为 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

$$T_{13} \times T_{3a} \geq \Delta T_w$$

在饱和器中,存在一个最佳的水空气相对流速值,流速过高,则水雾在饱和器内逗留的时间过短,会影响空气加湿效果。

### 2.2 压损率小

由于饱和器的尺寸有限,饱和器内的加湿过程是在较高速度的气流中进行的,还要保证工作稳定及良好的掺混,因此压力损失较大。为了保证饱和器的性能,饱和器气流应合理组织,使饱和器压损率较小。

饱和器压损率表示为:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta P_s}{P_{3a}}$$

饱和器的压损也可用饱和器压力恢复系数来表示。

$$\phi_s = 1 - \varepsilon_s = P_1^*/P_{3a}$$

### 2.3 在各种工况下运行可靠

饱和器喷嘴工作稳定,热水雾化均匀,在各种工况下运行可靠,加湿效率在循环变工况时下降较少。

### 2.4 选材适当,便于维修

## 3 饱和器的结构

饱和器通常由以下部件构成

(1)外壳 设计的外壳要与热水喷嘴的结构相匹配,合理选择内径及筒高等尺寸。外壳一般是由钢板焊成的圆筒,外壳的支承与联接要考虑膨胀补偿。为了减少饱和器对外界的传热以提高饱和器内的工作温度,可以在外壳内衬一些遮热板或者在壳外附设保温层。

(2)热水喷嘴 由加热系统供应的热水通过喷嘴按所需的流量、匀细度及方向喷出,以便同上升的空气均匀混合。

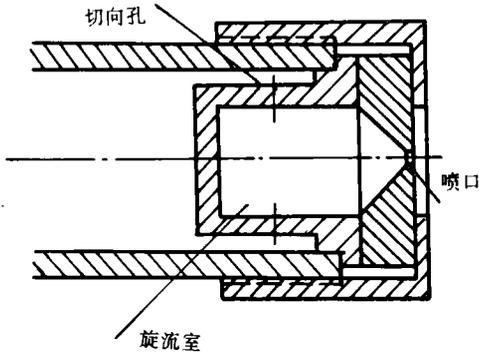


图 2 水喷嘴结构示意图

如图 2,简单的喷嘴由切向孔、旋流室和喷口组成。较高压力的热水经过切向孔进入旋流室中作旋转运动,最后以很高的旋转速度由旋流室中央的喷口喷出,将水碎裂成细雾,喷出的高速水滴与空气相摩擦而进一步碎裂雾化。由于水雾质点具有切向速度和轴向速度,在饱和器中形成轴对称的伞面状雾锥角  $\alpha$ 。对内径较小的饱和器,宜采用较小的喷雾锥角,以免把大量水喷到饱和器内壁上而影响空气的加湿效果。但如果喷雾锥角太小,水会过多地集中在中央部分,同样对空气加湿不利。

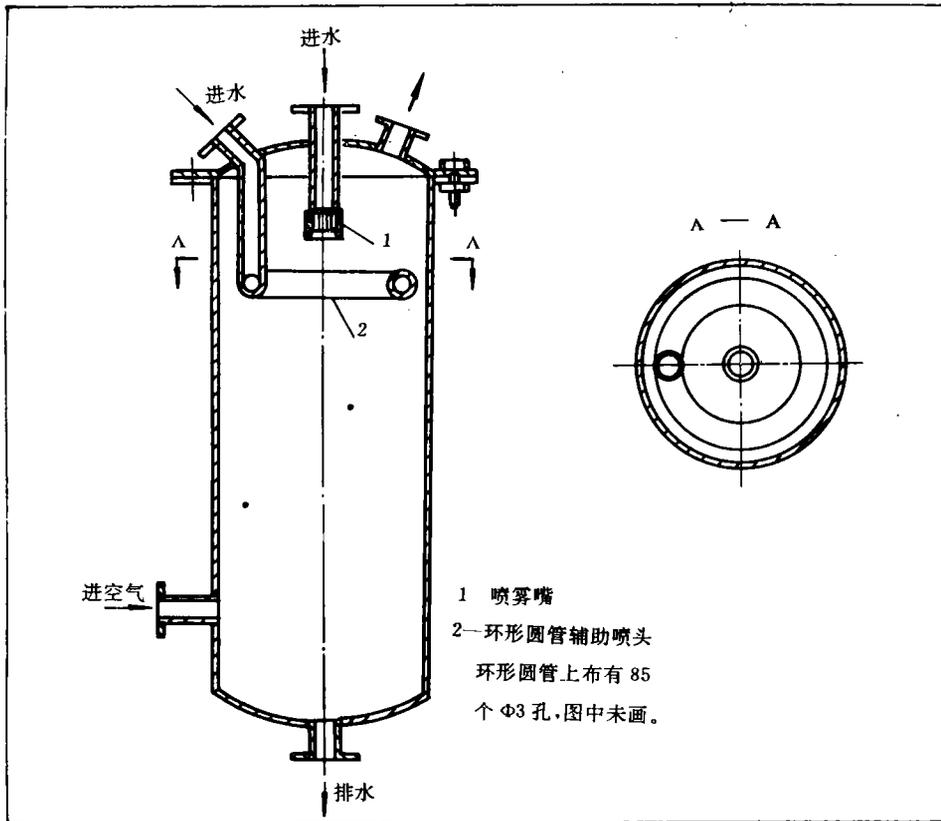


图 3 饱和器结构示意图

因通过小孔的水流量为

$$q = K\rho A \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho} \propto \sqrt{\Delta P}$$

可见,水流量与喷水压降的平方根成正比。因为喷水压降愈高,雾化则愈细。故满负荷时容易雾化好。而在部分负荷时会因喷水压降太低而雾化不良,严重影响湿化质量。因此,在最小水流量时保证雾化质量的前提下,简单的离心喷水嘴的流量调节范围,即最大水流量与最小水流量之比为(2~4):1。

另外,为了增大水空气流量比范围,除了靠喷嘴喷水来雾化空气外,还在饱和器内

设置了一环形管,管周围钻有 85 个  $\phi 3$  孔作为辅助喷头,必要时补充饱和器所需水量,同时增大了最大水流量与最小水流量之比的调节范围。

具体饱和器结构可见图 3。

#### 4 饱和器实验台的建立

鉴于上述工作原理及对饱和器的基本要求,我们建立了饱和器实验台。图 4 为饱和器试验台系统图。

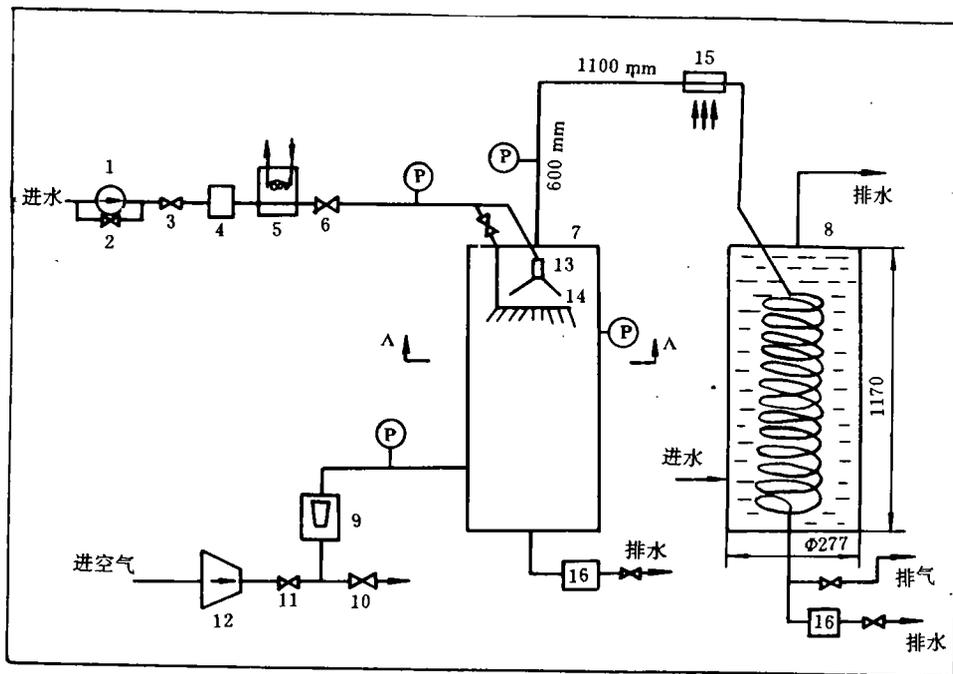


图 4 饱和器试验台系统图

- 1 水泵    2、3、6、10、11 阀门    4 涡轮流量计    5 水加热器    7 饱和器
- 8 湿化空气冷却器    9 浮子流量计    12 压气机    13 喷雾嘴
- 14 环形圆管辅助喷头    15 光学玻璃橱窗    16 浮筒式疏水器

空气经空气压缩机压缩至一定压力,其流量用浮子流量计来测量,尔后从饱和器下

部进入。空压机的排气额定压力为 7 ata(表压),必要时用阀门 10 来调整排气压力。进水

先经水泵 1 压缩,水压最高可达 16 ata(表压),水泵排水压力可利用阀门 2 的回水来调整,经涡轮流量计 4 后进入水加热器 5,加热到饱和器所要求的进水水温,加热器内的电热丝功率可在一定范围内调整。加热后的水分两路喷入饱和器的上部,一路是经过机械离心式喷水嘴,一路是经过设在饱和器上部的环形圆管从其上的 85 个  $\Phi 3$  孔喷入。这样,空气与热水在饱和器中逆流接触,湿化空气从饱和器顶部排出。

在饱和器中形成的回水从饱和器底部流向浮筒式疏水器,尔后排出。

从饱和器顶部出来的湿化空气经 600 mm 长的垂直管(以便其中的大颗粒液滴回流入饱和器)后,进入光学玻璃橱窗,用马尔文仪器透过光学玻璃橱窗来测量湿化空气中携带雾滴的粒度大小与粒度分布。

湿化空气然后进入湿化空气冷却器中的螺旋管内,管外的冷却水,湿化空气在管内不断冷却,其中的部分水蒸汽凝结成液滴,出湿化空气冷却器后其中的游离水经浮筒式疏水器排出,而不含游离水的湿空气在疏水器之前即被引出。

下一步工作首先是对饱和器性能实验台做冷态实验,即实验研究水加热器 5 不工作时饱和器的工作特性,然后在此基础上对饱和器实验台进行热态实验。由于空压机排气

额定压力为 8 ata,可分别实验研究不同压力下的饱和器性能,同时,所喷热水的压力与温度也可在一定范围内调整,当然还有其他可变参数,这样经整理分析即可获得饱和器的性能。

## 5 小结

本文简要介绍了 HAT 循环,指出了建立饱和器性能实验台的必要性。阐述了饱和器的工作原理及饱和器的基本要求,对饱和器的结构进行了详细介绍,并阐述了一些饱和器结构设计时需要注意的问题。在此基础上初步建立了饱和器性能实验台介绍了试验台系统的工作过程及下一步实验设想,为掌握饱和器性能进而深入研究 HAT 循环作好了实验准备。

## 参 考 文 献

- 1 Cook D T, Mc Daniel J E, Rao A D. HAT Cycle simplifies coal gasification power. 《MPS》, May. 1991
- 2 William H Day, Rao A D. FT4000 HAT with natural gas fuel. Turbomachinery International, 1993, (3/4)
- 3 林汝谋等. “HAT 循环性能分析研究”. 工程热物理学报. 1993, 14(2)
- 4 肖云汉, 林汝谋, 蔡睿贤. HAT 循环的系统优化. 工程热物理学报. 1994, 15(2)

## 龙潭水电站建设开始

据《Modern Power Systems》1994 年 4 月号报道,广西省红水河上的龙潭水电站建设工作已经开始。工程的第一阶段包括一座高度为 375 m 的大坝和总装机容量为 4200 MW 的 7 台发电机组。预期该电站每年发电 15.6 TW·h。

工程的第二阶段将加上另外 2 台单机功率为 600 MW 的发电机组,使得该水电站总装机容量达到 5400 MW。此项建设将花费 52.5 亿美元,其中约 10 亿美元将由世界银行提供。

该电站正由国家能源投资公司和广西、贵州、广东省的一些公司建造。广西省将提供该费用的 25%,并在电站竣工后使用其 50% 电力。

(学牛 供稿)

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1995 Vol. 10 No. 1

- △ **The Present status and Future Prospects of Nuclear Power Generation Technology**.....Ji Guiming, Li Jie(*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 1~7

This paper briefly describes the development and application of nuclear power generation both in China and around the world. Taking the former Soviet Union as an example, the authors list the main technico-economic characteristics of some major nuclear power plant equipment. In conclusion, a projection is given of the future advancement and potential development of nuclear power engineering projects. **Key words:** *nuclear power station, nuclear reactor, steam turbine, equipment*

- △ **The Development of the Test Stand of a Saturator, a Key Component in HAT Cycle**.....Jin Haiming(*Xi'an Jiaotong University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 8~12

The necessity of studying the properties of a saturator in HAT cycle has been pointed out by the author. The establishment of the saturator performance test stand at its preliminary stage created the experimental conditions for gaining an in-depth understanding of the saturator properties and undertaking the further study of the HAT cycle. **Key words:** *HAT cycle, saturator, Properties*

- △ **The Analysis of Factors Exercising an Influence on a Photoelectric Method Used for Measuring the Minute Solid Particle Concentration and Velocity in Gas-Solid Dual Phase Flows**.....Chen Yuandi, Wen Long(*Xi'an Jiaotong University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 13~18

A photoelectric detection method with the use of an optical fibre probe can be employed to measure the minute solid particle concentration and velocity in gas-solid dual phase flows, but both the construction of the optical fibre and the variation of the minute solid particle diameter may significantly affect the result of measurement and calculation. This paper gives a brief description of several types of optical fibre probes and their measurement performance and analyses the effect of minute solid particle on measurement outcome with an effective method for correcting invalid results being presented. **Key words:** *gas-solid dual phase flow, photoelectric detection, optical fibre probe construction, minute solid particle diameter*

- △ **Operating Characteristics of PFBC Pneumatically Controlled L Valve Slag Removal Mechanism**.....Rong Degang(*Thermal Energy Engineering Institute under South-Eastern University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 19~24

PFBC (pressurized fluidized bed combustion) combined gas-steam turbine plant power generation is a new type of coal-fired power generation system noted for its high efficiency and low environmental pollution. Against the background of the continuous slag removal version of a home-made PFBC-CC intermediate-test power station the author makes an exploratory study of the effect of system pressure, L valve inlet-outlet differential pressure, continuous and pulsating feeding of vibrating air