

# 分离式热管换热器的工作原理及其在电厂余热回收中的应用

刘效洲<sup>1</sup>, 惠世恩<sup>1</sup>, 徐通模<sup>1</sup>, 史洪启<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 锅炉研究所, 陕西 西安 710049; 2. 双辽发电厂, 吉林 双辽 136400)

**摘 要:** 介绍了分离式热管换热器的工作原理及分离式热管低压经济器在 200 MW 电厂 670 t/h 锅炉上的应用。通过与普通低压经济器的比较, 展示说明分离式热管低压经济器在余热回收方面具有巨大的优越性。

**关 键 词:** 分离式热管; 工作原理; 低压经济器; 经济效益

中图分类号: TK223.3<sup>+</sup>3 文献标识码: A

## 1 前言

以单根热管做为传热元件的热管换热器已在工业上得到了广泛应用。但是, 在火力发电厂大型装置中, 排烟量每小时多达数十万立方米, 所用的热管长达 10~20 m, 单管传输功率高达 20 kW。这种热管元件的制造、运输安装及维修都十分困难。由于热管传输功率大, 根据热管的传输极限及刚度要求, 不得不加大管径, 结果使热管的紧凑性下降。另外, 对于一些绝对不允许泄露的换热流体, 单管热管换热器中的隔板还达不到绝对不泄露的要求。再者, 分离式热管换热器可以应用于两种换热流体相距较远的场合, 这一点是单管热管换热器所不能比拟的。所以, 近些年来, 分离式热管换热器在电厂热能回收中得到了广泛的应用。下面, 对分离式热管换热器的工作原理和实际应用做简要介绍。

## 2 工作原理

分离式热管换热器的工作原理如图 1 所示。

热流体在蒸发段受热上升, 经汽导管在冷凝段放热冷凝。冷凝液靠重力经液导管回流到蒸发段。在冷凝段下联箱上装有不凝结气体分离管, 上面装有排气阀, 可以随时排除不凝气体。凝结液的回流驱动力是凝结段高位布置造成的液位差。根据分离式热管换热器的工作原理, 不难看出, 分离式热管换

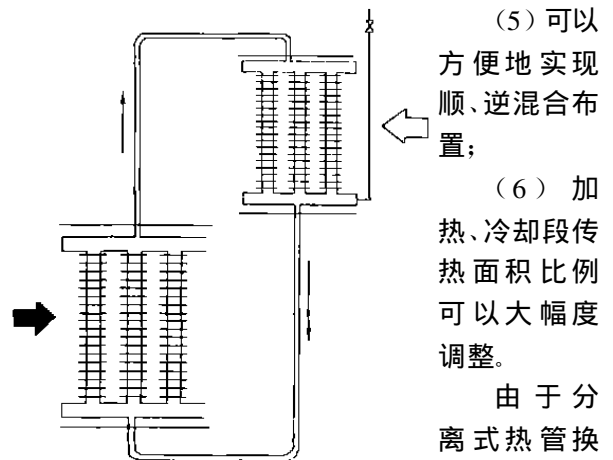
热器具有以下几大特点:

(1) 对换热装置大型化的适应性好。分离式热管的加热段和冷凝段分开, 可以避免制造很长的热管。又由于蒸汽在冷凝段中自上而下与液膜同向流动, 可以避免单管式长热管易于出现的携带极限。相应地也可以选择较小直径的管子做传热管, 保证其装置的紧凑性;

(2) 能实现冷、热两流体远程换热。利用分离式热管可以实现相距较远的两流体间的换热, 据有关文献报道, 两流体间的距离可达数十米乃至上百米。这一点在现场比较拥挤、难以布置常规余热回收装置的情况下具有更大的意义;

(3) 冷、热流体可以完全隔离。由于分离式热管换热器的加热段和冷却段分别布置在两个不同的通道内, 穿过墙壁的只有少数连接管, 极易密封, 所以可以彻底杜绝渗漏现象;

(4) 可以实现一种流体和多种流体之间的换热;



由于分离式热管换热器具有以上几大优点, 所以在实际工程中(在锅炉上)得到了广泛地应用。下面简要介绍分离式热管低压经济器在 200 MW 电厂 670 t/h 锅炉上的应用情况。

### 3 分离式热管低压经济器的实际应用

大型电站锅炉的设计排烟温度大约为 140 °C ~ 150 °C 左右,但是由于种种原因,实际排烟温度一般高出设计烟温 20 °C ~ 30 °C。如能将排烟温度降低 25 °C,对 200 MW 的锅炉机组而言,可回收烟气余热 3.0 × 10<sup>4</sup> MJ/h 左右,所以锅炉排烟是潜力很大的余热源。因此,在锅炉尾部烟道安装低压经济器是利用锅炉排烟余热,节约能源的有效措施之一。

#### 3.1 普通低压经济器

普通低压经济器安装在锅炉尾部烟道,结构与一般经济器相似,其水侧连接于汽轮机回热系统的低压凝结水,压力较低,故称低压经济器。由于内部流过的介质是凝结水泵供出的低压凝结水,压力较低,故称低压经济器。由于普通低压经济器水侧的放热系数大大高于烟气侧,因而普通低压经济器的壁温近似等于管内水温。当进口水温低于烟气露点时,将出现低温腐蚀和堵灰问题。为了解决这个问题,必须提高低压经济器的进口水温,使其高于烟气的酸露点。但是,这样一来就会大大降低低压经济器的节能效果。这是普通低压经济器无法解决的矛盾,也是影响其推广应用的主要原因。

#### 3.2 分离式热管低压经济器

应用分离式热管低压经济器可以巧妙地解决因进口水温低而产生的低温腐蚀和堵灰问题。分离式热管低压经济器的结构简图如图 2 所示。

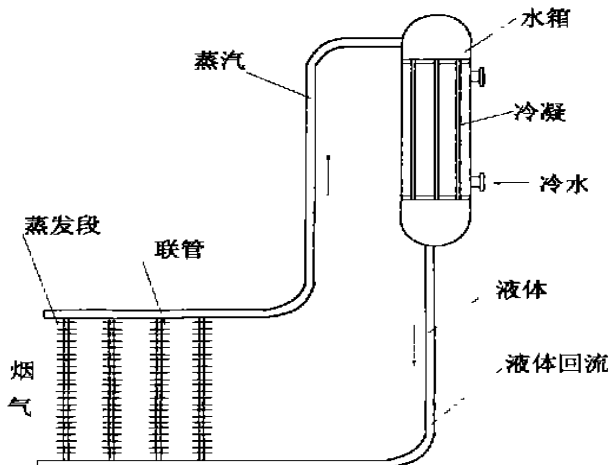


图 2 分离式热管低压经济器结构简图

工质(蒸馏水)在加热段受热蒸发,通过蒸汽联管进入冷凝管,被管外的凝结水冷却,冷凝成液态工

质,在重力作用下回到蒸发段继续蒸发吸热。如此循环往复,将烟气的热量传递给凝结水。下面对分离式热管低压经济器的温度可控性原理做详细讨论。

设烟温(热源)为  $T_1$ , 凝结水温(冷源)为  $T_2$ , 管内工质温度为  $T_3$ , 管壁温度为  $T_4$ 。根据传热学的有关知识,可以忽略蒸发段的管壁导热热阻和沸腾换热热阻。因此,可以认为管壁温度  $T_4$  近似等于工质温度  $T_3$ 。热管低压经济器的传热方程式可以表示为:

$$Q = (T_1 - T_4)/R_1 = (T_4 - T_2)/R_2 \quad (1)$$

式中:  $R_1$ —热管加热段的总热阻

$R_2$ —热管冷凝段的总热阻

因此,热管低压经济器的管壁温度可表示为:

$$T_4 = 0.5(T_1 + T_2) + 0.5Q \times (R_2 - R_1) \quad (2)$$

$$\Rightarrow T_4 = T_1 - (T_1 - T_2)/[1 + (R_2/R_1)] \quad (3)$$

式(1)中:  $R_1 = 1/(h_1 \cdot f_1)$ ,  $R_2 = A/(h_2 \cdot f_2)$

$h_1$ —烟气侧的对流放热系数

$h_2$ —凝结水侧的对流放热系数

$f_1$ —烟气侧的对流换热面积

$f_2$ —水侧的对流换热面积

$A$ —考虑到冷凝段的管壁导热热阻和冷凝换热热阻不可随便忽略而加的修正系数,可计算得出。

因此,

$$T_4 = T_1 - (T_1 - T_2)/[1 + A(h_1 \cdot f_1)/(h_2 \cdot f_2)]$$

由此可见,热管低压经济器的壁温可通过烟气侧、水侧的对流放热系数和换热面积在一定范围内调节。例如,可以采用在烟气侧的管外焊接螺旋肋片,适当减小水侧的换热面积等方法来提高壁温,以避免露点腐蚀和烟气堵塞。例如,当热管低压经济器的进口水温只有 50 °C 时,也可通过合理的设计使壁温保持在 100 °C,这是普通低压经济器无法做到的,也是热管低压经济器最主要的技术优势和特点。

某 200 kW 电厂利用小修机会安装了热管低压经济器,改造后效果显著、经济效益明显,值得大力推广,其运行结果如表 1 所示。

### 4 结论

(1) 热管经济器通过调整蒸发和冷凝段的面积比,可以在较大范围内调节壁温,使其高于烟气的酸露点温度,这是普通换热设备所无法比拟的。

(下转第 379 页)

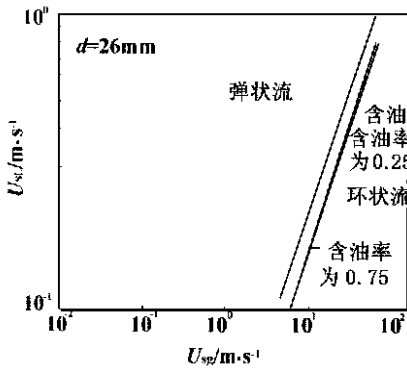


图 3 不同含油率下的间歇流向环状流的转变界限

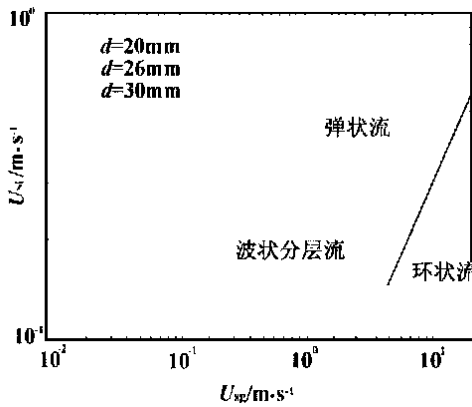


图 4 不同管径的间歇流向环状流转变的界限

率下的间歇流向环状流的转变界线。图 4 示出了在不同管径下的间歇流向环状流转变界线。从图中可以看出,含油率和管径对间歇流向环状流的转变影响不大。所以间歇流向环状流的转变的主要因素为气相折算速度和液相折

算速度。

### 5 结论

(1) 通过动力学分析,分别建立了间歇流向环状流转变的界限方程,计算结果与实验结果基本符合。

(2) 水平管内油气水三相泡状流向弹状流转变的主要因素是气相折算速度、液相折算速度,在间歇流向环状流转变过程中,含油率与管径的作用就不再明显了。

### 参考文献:

[1] BRAUNER N. Flow pattern transitions in two-phase liquid-liquid flow in horizontal tubes[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1992, 18(1): 123-140.

[2] JEPSON W P. Slug flow and its transitions in large-diameter horizontal pipes[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19(4): 411-420.

[3] 周云龙. 运用压差波动法测量气液两相流型[A]. 第四届全国多相流非牛顿流物理化学流学术会议论文集[C]. 西安: 中国力学学会, 1993.

[4] 蔡辉. 水平管内油气水三相流动特性研究[D]. 吉林市: 东北电力学院, 2000. 3.

[5] 陈宣政. 气液两相流垂直向上流动流型转变的机理与判据[J]. 西安交通大学学报, 1992, 26(增刊).

(复 编辑)

(上接第 376 页)

表 1 热管低压经济器运行结果

项 目	数据
入口烟温/℃	156.0
出口烟温/℃	118.1
进口水温/℃	68.0
出口水温/℃	104.0
通水流量/kg·s <sup>-1</sup>	76.8
热负荷/kW	11.55×10 <sup>3</sup>
煤耗降低/g·(kW·h) <sup>-1</sup>	3.73
热耗降低/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	78.6
发电功率增加/kW	1.714
投资回收年限/a	1.2
全厂热效率相对提高/%	0.85

(2) 生产工艺简单,可随时打开排气门放气,既免去了在出厂前抽真空的复杂工艺,又避免了热管在工作过程中由于不凝气体产生所导致的失效问

题。降低了生产成本,热管经济器的安全运行可靠性大大提高。

(3) 由于热管经济器的壁温可以远远高于烟气的酸露点和水蒸气露点,因此附着在管壁上的灰呈疏松状态,不但利于吹灰,而且还可通过设计适当的烟速使其具有自吹灰的能力,大大延长吹灰周期。

综上所述,热管式低压经济器克服了普通低压经济器无法弥补的缺点,可充分回收电厂的余热,极大地提高机组的热效率,值得大力推广。

### 参考文献:

[1] 庄俊. 热管及热管换热器[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989. 5.

[2] 李亭寒. 热管设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988. 6.

[3] 吴存真. 热管热能工程中的应用[M]. 北京: 水力电力出版社, 1993. 10.

(复 编辑)

presented is a relevant pyrolysis mechanism. **Key words:** refuse derived fuel, pyrolysis characteristics, kinetic parameter, thermogravimetric analysis

滑动轴承支撑转子系统混沌响应计算 = **The Calculation of Chaotic Response of a Journal Bearing-supported Rotor System** [刊, 汉] / WU Xin-hua, ZHANG Xin-jiang (Energy College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), YU Zeng-bo (Harbin Turbine Works, Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 371 ~ 374

On the basis of the theory of rotor dynamics and nonlinear dynamics and in the light of the specific features of a nonlinear rotor-bearing system set up was a model of elastic rotor-bearing system with the use of a short bearing model. Moreover, through the use of a numerical integration and Poincaré mapping method a nonlinear vibration study was conducted of the above rotor-bearing system in the domain of certain parameters. As a result, obtained for the system in the above domain were bifurcation diagrams, Poincaré mappings and speed-varied three-dimensional spectral diagram. The results of calculation indicate that the rotor-bearing system may be subject to chaotic motions. An analysis was conducted of the nonlinear behavior of the system dynamics characteristics, which may vary with the change of certain parameters. A visual display is thereby obtained of the influence of parameter variation on the system dynamics characteristics. The above work can provide some theoretical reference data for the design of elastic rotor-bearing systems. **Key words:** turbomachinery, rotor dynamics, rotor-bearing system, nonlinear vibration, chaotic response

分离式热管换热器的工作原理及其在电厂余热回收中的应用 = **Working Principle of a Separation-type Heat-Pipe Heat Exchanger and Its Use in the Heat Recovery System of a Power Plant** [刊, 汉] / LIU Xiao-zhou, HUI Shi-en, XU Tong-mo, et al (Boiler Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaaxi Province, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 375 ~ 376, 379

Described is the working principle of a separation-type heat-pipe heat exchanger along with its use in a separation-type heat-pipe economizer installed on a 670 t/h boiler of a 200 MW power plant. A comparison of the above-cited heat exchanger with a conventional low-pressure economizer shows that the recommended heat exchanger enjoys tremendous superiority in terms of heat recovery efficiency. **Key words:** separation type heat pipe, working principle, low-pressure economizer, economic benefit

水平管内油气水三相间歇流向环状流转换的研究 = **An Investigation on the Intermittent-to-Annular Flow Transition of Oil-gas-water Three-phase Flow in a Horizontal Tube** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, CAI Hui, HONG Wen-peng, LI Yan (Power Engineering Department, Northeastern Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 377 ~ 379

An experimental and theoretical study was conducted of the intermittent-to-annular flow transition of oil-gas-water three-phase flow in a horizontal tube. Proposed was a boundary equation featuring the transition of the intermittent-to-annular flow. The experimental study results show that the major factor governing the transition of the intermittent-to-annular flow is the gas-phase reduced speed and the liquid-phase reduced one with the effect of oil fraction and tube diameter playing an insignificant role. The results of calculation have been found to be basically in agreement with those of experiment. **Key words:** horizontal tube, oil-gas-water three-phase flow, flow pattern transition.

火床炉室内横向配风特性的理论分析 = **Theoretical Analysis of the Characteristics of Air Transverse Flow Distribution in a Stoker-boiler Air Compartment** [刊, 汉] / MIAO Zheng-qing, DOU Wen-yu, ZHOU Qu-lan, et al (Power and Energy College under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 380 ~ 382

Presented is an enclosed set of equations, which describes the air flow in a flow stabilized section of a stoker boiler dual lateral-side full-section air feed compartment and a full lateral-side air feed compartment. Through a theoretical deduction obtained was an analytical solution along with the deduction of a theoretical expression of the stoker surface flow-rate deviation. On this basis the limiting flow rate deviation location and the flow rate deviation limiting ratio were compared for the following cases: the dual lateral-side air feed mode and the single lateral-side air feed mode. Moreover, an analysis was performed of influence of air compartment construction and stoker grate layer structure on the flow rate deviation. **Key words:** stoker boiler, stoker air compartment, flow characteristics, flow distribution, flow deviation