

# 新型卧式相变换热烟气余热回收技术的分析及应用

孙少鹏 胡清 宁玉琴 蒋文  
(杭州华电能源工程有限公司 浙江 杭州 310030)

**摘要:**介绍了一种新型卧式相变换热烟气余热回收技术,阐述了该技术的原理及其主要特点,并将该技术在某135 MW机组上进行投运。应用该技术后,锅炉排烟温度由162℃降至130℃,机组标准煤耗降低3.44 g/(kW·h),年节水量30 140 t。

**关键词:**卧式相变;烟气余热回收;经济效益

中图分类号: TK115 文献标识码: B  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.024

## 引言

在火力发电机组中,锅炉效率是机组经济性运行的重要指标。锅炉排烟热损失占锅炉总体热损失的70%~80%,对锅炉效率具有重大影响。排烟温度每上升10~15℃,锅炉效率将下降1%,机组年平均标准煤耗随之上升3~4 g/(kW·h)<sup>[1]</sup>。锅炉排烟温度偏高导致机组年平均煤耗上升的同时,还会造成烟尘污染物排放量的增加,从而影响机组的经济性和污染物排放指标。

针对如何有效地回收利用锅炉尾部烟气余热,国内外的学者开展了大量的研究工作<sup>[2-8]</sup>。将烟气余热用来加热凝结水,余热转移到机组的回热系统中是回收烟气余热最为直接有效的方法途径之一。传统的低压省煤器烟气余热回收系统以其结构简单、节能效果显著的特点得到了广泛应用,但该系统具有以下不足:(1)在低负荷运行工况下,省煤器入口水温通常低于烟气的酸露点温度,造成换热器的低温腐蚀,影响到机组的稳定运行;(2)水侧换热形式为非相变的对流换热,且换热系数较低,在相同的换热量时,需要的金属耗材量更大。热管式低压省煤器余热回收系统有效地避开了低温腐蚀问题,然而该余热回收系统节能量有限,且热管换热易衰减,导致设备维护成本较高。结合分析现有烟气余热回

收技术利弊,本研究将论述一种新型卧式相变换热烟气余热回收技术,并将该技术成功进行电厂工程应用。

## 1 新型卧式相变换热烟气余热回收技术

### 1.1 技术原理

新型卧式相变烟气余热回收系统如图1所示。

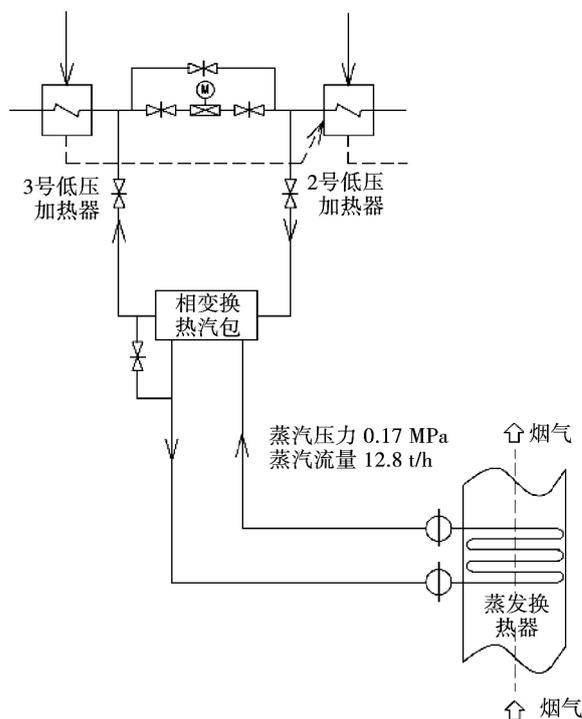


图1 卧式相变换热烟气余热回收系统

Fig. 1 The waste heat recovery system of horizontal phase-changing heat exchanger

该系统分为两大部分:一部分为蒸发换热器,布置在烟道内;另一部分为相变换热汽包,布置在烟道

收稿日期: 2014-07-16; 修订日期: 2014-09-20

作者简介: 孙少鹏(1982-),男,安徽合肥人,杭州华电能源工程有限公司工程师。

外部蒸发换热器上方,相变换热汽包与蒸发换热器之间一定的高度差,约3-5 m左右。蒸发换热器与相变换热汽包的壳程相连接,即为内循环。内循环以水为换热媒介,水在蒸发换热器内吸收烟气余热后发生相变形成水蒸气,水蒸气由上升管汇集到相变换热汽包内,对凝结水进行加热后水蒸气发生相变凝结成水,由下降管回流至蒸发换热器中继续加热,以此形成闭式自然循环。相变换热汽包的管程与凝结水主管道并联,为外循环。外循环的水为引自2号低压加热器的凝结水,吸收相变换热汽包壳程内水蒸气的汽化潜热,被加热后进入3号低压加热的入口。

### 1.2 技术特点

该新型卧式相变烟气余热回收系统相对其它烟气余热回收系统具有以下显著特点:

(1) 适用性强。该系统始终将最低壁面温度作为“第一”设计参数,保证了蒸发换热器壁面温度始终高于烟气酸露点温度,换热面不结露、不腐蚀。

(2) 适应性强。蒸发换热器水侧为相变换热,蒸发换热器壁面温度分布均匀、稳定;通过对外循环凝结水量的调节,可实现换热面最低壁温的“可控可调”,可适应各种锅炉燃煤和传热负荷的变化。

(3) 安全、可靠性高。布置在尾部烟道内的蒸发换热器只需要少量的循环介质水,避免了传统低压省煤器因凝结水泄漏影响机组安全稳定运行的问题。

(4) 高效性。该卧式蒸发换热器利用换热媒介水的相变原理实现传热,换热器的传热效率大大提高。在换热量相同时需要的传热面积更小,金属耗材量更少。

## 2 新型卧式相变换热烟气余热回收技术的工程应用及效果

针对某135 MW型号为SG-420/13.7-M417A型锅炉,应用该新型卧式相变烟气余热回收技术,回收锅炉尾部烟气余热加热凝结水。

### 2.1 主要设计参数

该新型卧式相变换热烟气余热回收技术采用螺旋翅片管结构,主要的结构及设计参数如表1所示。根据《锅炉原理及计算》(第三版)中的经验公式<sup>[9]</sup>,

烟气的低温酸腐蚀露点温度为94℃。为保证运行过程中换热面不受到低温腐蚀的影响,控制最低壁面温度在酸露点温度以上15-20℃,设计确定最低壁面温度小于115℃。通过对外循环凝结水流量的调节,控制换热器的壁面温度在115℃以上,彻底避免换热面的低温腐蚀。

表1 主要设计参数

Tab.1 The parameters of the main design

参数	设计值
发电功率/MW	135
烟气流/Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	586 360
管子外径/mm	32
管子壁厚/mm	3
凝结水流量/t·h <sup>-1</sup>	264
相变换热汽包内凝结水水流速/m·s <sup>-1</sup>	0.62
换热器最低壁面温度/℃	>115
换热面积/m <sup>2</sup>	894
蒸发换热器出口蒸汽流率/m·s <sup>-1</sup>	17

### 2.2 运行结果及经济性分析

该新型卧式相变烟气余热回收系统2013年11月30日开始投入运行,至今运行稳定可靠。2014年2月对该烟气余热回收系统进行了性能试验,性能试验在131 MW负荷下进行,试验结果显示各项指标均达到设计要求。

该新型卧式相变烟气余热回收系统运行的主要参数如表2所示。

表2 主要运行参数

Tab.2 The main operating parameters

参数	设计值	运行值
换热器进口烟温/℃	165	162
换热器出口烟温/℃	130	130
蒸发换热器工作压力/MPa	0.17	0.17
凝结水进口温度/℃	82.35	76.9
凝结水出口温度/℃	110	106.5
系统水侧阻力/MPa	0.1	0.09
换热器最低壁面温度/℃	>115	118
换热器烟气侧阻力/Pa	<300	220

在131 MW负荷下,卧式蒸发换热器投运后,烟气阻力增大220 Pa,系统水侧阻力增加0.09 MPa。

排烟温度由 162 ℃ 降至 130 ℃ ,回收的烟气余热将凝结水由 76.9 ℃ 加热至 106.5 ℃ 。

根据机组参数 ,依据等效焓降法原则 ,对该系统进行了经济性计算 ,计算结果如表 3 所示。

表 3 经济性计算

Tab.3 The economical calculations

参 数	设计值
机组热耗率/ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	8 294
发电功率/MW	131
机组汽耗率/ $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	2.977
汽轮机进汽量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	390
汽轮机机电效率/%	98
锅炉效率/%	90.18
管道效率/%	98
机组热耗率减少量/ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	92.4
节约标煤量/ $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	3.58
真空降低/kPa	0.046
真空降低多耗标煤量/ $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.14
总节煤量/ $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	3.44

此外 ,锅炉排烟温度的降低还减少了脱硫系统减温水的蒸发。对 135 MW 机组 ,投运卧式相变烟气余热回收系统后 ,排烟温度降低 32 ℃ ,按年运行 4 500 h ,负荷率 0.7 计算 ,年节水量 30 140 t。

### 3 结 论

(1) 新型卧式相变烟气余热回收系统具有无低温酸腐蚀、适用性强、适应性强、安全及可靠性高、换热效率高等特点;

(2) 新型卧式相变烟气余热回收系统经济效益显著 ,工程投入运行后 ,锅炉排烟温度由 162 ℃ 降至 130 ℃ ,机组年平均标煤耗降低 3.44  $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  ,年节水量 30 140 t。

#### 参考文献:

[1] 中国电力企业联合会. 中国燃煤电厂大气污染物控制现状 2009 [M]. 北京: 中国电力出版社 2009.  
Industrial Union of China Electricity. The controlling condition of

air pollution from the coal-fired power plant in 2009 [M]. Beijing: China Electric Power Press 2009.

[2] 陆万鹏,史月涛,孙奉仲. 分离式热管换热器与低压省煤器的性能分析[J]. 山东大学学报 2012 42(2): 102-106.  
LU Wan-peng, SHI Yue-tao, SUN Feng-zhong. Performance analyses of separated type heat pipe and low pressure economizer [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science) 2012 42(2): 102-106.

[3] 周武,向朝晟,李键. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热回收利用技术[J]. 东方电气评论 2012 26(101): 46-50.  
ZHOU Wu, XIANG Cao-sheng, LI Jian. Heat recovery technology of boiler flue gas of thermal power plant [J]. Dong Fang Electric Review 2012 26(101): 46-50.

[4] 仝庆居,王学敏. 锅炉烟气余热回收利用技术[J]. 科技创新导报 2009(18): 71.  
TONG Qing-ju, WANG Xue-min. Heat recovery technology of boiler flue gas [J]. Science and Technology Innovation Herald 2009, (18): 71.

[5] 邓健玲,黄圣伟. 电站锅炉高效烟气余热回收系统[J]. 华东电力 2013 41(1): 200-204.  
DENG Jian-ling, HUANG Sheng-wei. Efficient Waste Heat Recovery System Of Power Plant Boiler [J]. East China Electric Power, 2013 41(1): 200-204.

[6] 马晓辉. 低压省煤器在火电厂热系统中的应用及其节能分析[J]. 企业技术开发 2012 31(11): 160-161.  
MA Xiao-hui, the application and energy saving analysis of low pressure economizer in the coal-fired power plant [J]. Technological Development of enterprise 2012 31(11): 160-161.

[7] 黄新元,孙奉仲,史月涛. 火电厂热系统增设低压省煤器的节能效果[J]. 热力发电 2008 37(3): 56-58.  
HUANG Xin-yuan, SUN Feng-zhong, SHI Yue-tao. Energy-saving effect of additionally installed low-pressure economizer in thermal system of thermal power plant [J]. Thermal Power Generation, 2008 37(3): 56-58.

[8] Electric Power Research Institute. Retrofits for improved heat rate and availability (low-level heat recovery economizer retrofits) [R]. Reading: Electric Power Research Institute, 1992.

[9] 冯俊凯,沈幼庭,杨瑞昌. 锅炉原理及计算[M]. 北京: 科学出版社 2003: 372-373.  
FENG Jun-kai, SHEN You-tin, YANG Rui-chang. The theory and design of power plant boiler [M]. Beijing: Science Press 2003: 372-373.

(姜雪梅 编辑)

concentration distribution but the gravity has a relatively conspicuous influence on the particle phase concentration distribution. **Key words:** circulating fluidized bed , gas-solid two-phase flow , rolling , particle phase , concentration distribution

新型卧式相变换热烟气余热回收技术的分析及应用 = **Analysis of a Novel Type Horizontal Phase Change Heat Exchange Waste Heat Recovery Technology and Its Applications** [刊, 汉] SUN Shao-peng , HU Qing , NING Yu-qin , JIANG Wen ( Hangzhou Huadian Energy Source Engineering Co. Ltd. , Hangzhou , China , Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(5) . -742 -744

The authors described a novel type horizontal phase change heat exchange flue gas waste heat recovery technology and expounded its principles and main features. The technology was applied to a 135 MW unit. After the unit had been put into operation ,the flue gas temperature of the boiler declined from 162 °C to 130 °C ,the standard coal consumption of the unit decreased by 3.44 g/( kW • h) and the water quantity saved each year was 30140 tons.

**Key words:** horizontal phase change , flue gas waste heat recovery , economic benefit

锅炉烟气余热回收系统设计计算方法及应用 = **Method for Designing and Calculating a Boiler Flue Gas Waste Heat Recovery System and Its Applications** [刊, 汉] NING Fang-hua , WANG Kun ( College of Energy Source and Power Engineering , Central China University of Science and Technology , Wuhan , China , Post Code: 430074) , ZHANG Huai-quan , CHENG Kun ( Hubei Guozhong Science and Technology Stocks Co. Ltd. , Wuhan , China , Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(5) . -745 -749

A method for designing and calculating a boiler flue gas waste heat recovery system was given. The method in question can be used to conduct a heat transfer calculation and heat utilization design according to relevant characteristics of the flue gases , characteristics of the fuel and the rated capacity of the boiler. The method was applied to an iron and steel company limited in Sichuan Province. According to the design basic data and operating data provided by the company above mentioned , two sets of boiler flue gas waste heat recovery system were designed for a 220 t/h boiler and the actual operation results show that the method in question is effective and reliable. **Key words:** flue gas waste heat recovery , boiler efficiency , energy saving and emissions reduction , calculation method