

文章编号:0253 - 4339(2017) 03 - 0101 - 07

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2017. 03. 101

# 严寒地区大型燃气锅炉排烟加热空气方式的优化与应用

肖慧鹏<sup>1</sup> 王随林<sup>1</sup> 穆连波<sup>1</sup> 翟慧星<sup>1</sup> 程冬冬<sup>1</sup> 马兆康<sup>1</sup>  
吴亚东<sup>2</sup> 寿德<sup>2</sup> 张伟<sup>3</sup> 陈玉平<sup>4</sup> 张彤<sup>4</sup> 王守金<sup>5</sup>

(1 北京建筑大学环境与能源工程学院 北京 100044; 2 乌鲁木齐市供热行业管理办公室 乌鲁木齐 830000;  
3 新疆维泰热力股份有限公司 乌鲁木齐 830000; 4 新疆骑马山热力有限公司 乌鲁木齐 830000;  
5 北京华远意通热力科技股份有限公司 北京 100160)

**摘要** 由于严寒地区冬季室外空气的温度低,助燃的空气进入锅炉会产生爆燃和震动,燃烧效率降低。同时大型供热系统回水温度高,燃气锅炉排烟温度较高,排烟余热深度利用中,烟温降低程度受到回水温度条件限制。本文提出了新的烟气加热空气方式,与常规烟气加热空气方式相比,减少了设备耗材、体积及阻力,应用于大型燃气供热锅炉烟气余热深度梯级利用的节能改造。工程实测表明,烟气余热回收和助燃空气加热系统,可将烟气温度降到锅炉回水温度及以下,锅炉燃气利用热效率提高了 13.2%,烟气余热回收率为 66.7%,实现了排烟余热深度利用,并解决了助燃空气进入锅炉产生爆燃和震动的问题,为严寒地区燃气锅炉烟气余热深度利用与助燃空气加热提供了参考。

**关键词** 严寒地区;大型燃气锅炉;排烟余热利用;空气加热;工程实测

中图分类号:TK115; TK229.8

文献标识码:A

## Optimization of Air Heating in Large Gas-fired Boiler by Flue Gas Waste Heat in Cold Areas

Xiao Huipeng<sup>1</sup> Wang Suilin<sup>1</sup> Mu Lianbo<sup>1</sup> Zhai Huixing<sup>1</sup> Cheng Dongdong<sup>1</sup> Ma Zhaokang<sup>1</sup>  
Wu Yadong<sup>2</sup> Shou De<sup>2</sup> Zhang Wei<sup>3</sup> Chen Yuping<sup>4</sup> Zhang Tong<sup>4</sup> Wang Shoujin<sup>5</sup>

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, China; 2. The Management Office of Urumqi's Heating Industry, Urumchi, 830000, China; 3. Xinjiang Weitai Heating Institute, Urumchi, 830000, China; 4. Xinjiang Qimashan Heating Institute, Urumchi, 830000, China; 5. Beijing Huayuanytong Thermal Technology Institute, Beijing, 100160, China)

**Abstract** Because the outdoor air temperature in cold regions is severely low in winter, the combustion-supporting air will cause deflagration and vibration while directly supplied to the boiler and the combustion efficiency is also decreased. At the same time, the temperature of the return water in a large heating system, and the exhaust gas from the gas boiler, are both high. Thus, the exhaust gas could not be cooled down to a relatively low temperature by the return water during the waste heat utilization process. This paper presents a new way to heat the air by using flue gas waste heat, which is smaller, requires less space, and has less resistance compared with conventional heat exchange equipment. The proposed method can be applied to the flue gas waste heat deep-utilization of a large gas heating boiler. Field test results show that the flue gas waste heat deep-utilization and the combustion-supporting air heating system can cool the flue gas temperature near to or even lower than the return water temperature of heating network. The utilization efficiency of gas combustion is increased by 13.2%, and the recovery rate of the flue gas waste heat is 66.7%. Then, flue gas waste heat deep recovery is realized, and the problem in which the combustion-supporting air causes deflagration and vibration while directly supplied to the boiler is solved. The paper provides a reference for flue gas waste heat deep-utilization in cold regions, and for combustion-supporting air heating system optimization.

**Keywords** cold regions; large gas-fired boiler; flue gas waste heat recovery; air heating; engineering test

基金项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFB0601100)资助。  
(The project was supported by State's Key Project of Research and development Plan in 13th Five-Year (No. 2016YFB0601100).)

收稿日期:2016年11月16日

我国严寒地区和寒冷地区室外温度低,如乌鲁木齐市的供暖室外计算温度为  $-19.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,供暖季平均温度为  $-7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,累年最冷月平均温度为  $-12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>,累年最冷日平均温度为  $-29.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>;哈尔滨市的供暖室外计算温度为  $-24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,供暖季平均温度为  $-9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,累年最冷月平均温度为  $-18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,累年最冷日平均温度为  $-32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在这些地区,由于室外空气温度低,作为助燃空气进入锅炉易产生爆燃和振动,使得锅炉燃烧效率降低,对空气进行加热是减少锅炉振动和噪声、提高燃烧效率的重要途径。常规空气加热设备采用烟气加热空气,由于空气和烟气均为气体,与液体相比,对流换热系数低,换热设备传热系数小<sup>[3]</sup>,需要的换热面积大,体积大,耗材多,设备阻力大<sup>[4]</sup>,烟气冷凝水还会对设备造成腐蚀<sup>[5-8]</sup>。

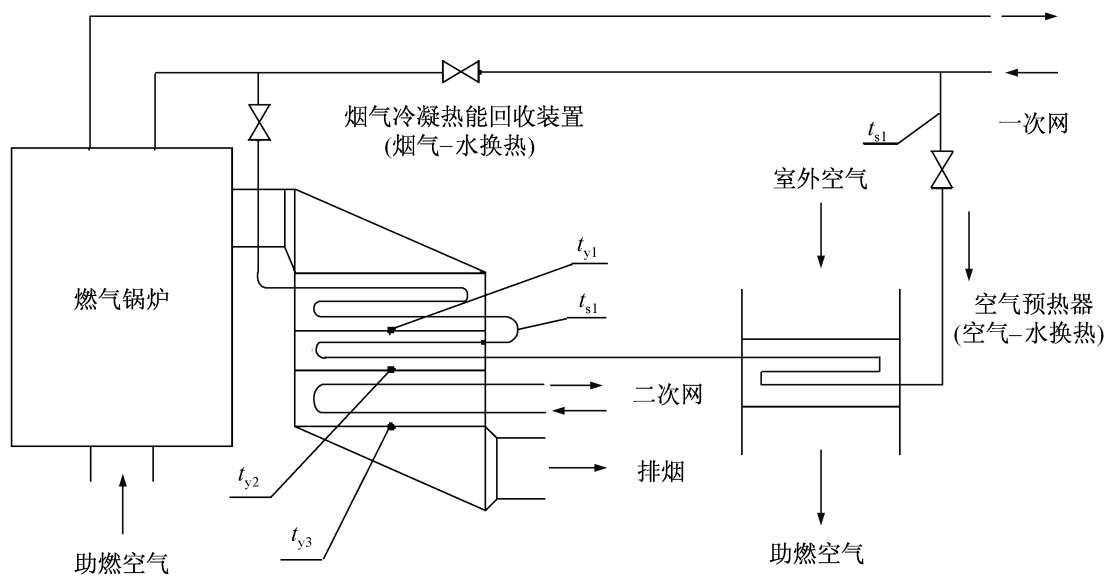
本文提出的基于空气-水-烟气换热的空气加热方式,与常规空气-烟气换热的空气加热方式相比,

大幅度减小体积和耗材,降低了空气和烟气阻力,同时可将排烟温度降到回水温度以下,深度回收烟气显热和水蒸气冷凝潜热<sup>[9-16]</sup>,实现烟气余热深度利用。将该空气加热方式应用于乌鲁木齐市某 70 MW 大型燃气供热锅炉排烟余热深度利用节能改造工程,进行跟踪检测与数据分析后发现:在空间小、投资低的条件下,显著改善了助燃空气进入锅炉产生爆燃、振动及燃烧效率降低的现象,同时实现排烟余热深度利用,提高锅炉系统效率,为严寒地区燃气锅炉烟气余热深度利用与助燃空气加热系统优化提供参考。

## 1 空气加热方式分析

### 1.1 空气-水-烟气换热的空气加热方式

结合空气-水-烟气换热的空气加热方式的燃气供热锅炉排烟余热深度利用系统原理见图 1。



$t_{s1}$  一次网回水温度;  $t_{y1}$  与  $t_{s1}$  对应的烟气温度;  $t_{y2}$  加热一次网回水后的烟气温度;  $t_{y3}$  最终排烟温度

图 1 空气-水-烟气换热的空气加热方式用于排烟余热深度利用系统原理图

Fig. 1 The principle diagram of the gas boiler smoke waste heat deep utilization system based on the air-water-flue gas pattern to heat the air

由图 1 可知,烟气用于加热一次网回水和二次网回水,锅炉助燃空气的加热方式,采用空气-水-烟气换热的方式,即由空气-水间壁式换热设备和烟气-水间壁式换热设备组成。一次网回水在空气预热器中加热助燃空气后,再进入烟气冷凝热能回收装置吸收烟气余热,当温度先回升到一次网回水温度  $t_{s1}$  后,进一步被烟气加热升温,最后进入锅炉;锅炉出口烟气加热一次网回水后温度降到  $t_{y2}$ ,进一步加热二次网回水,烟温最终降到  $t_{y3}$ 。

### 1.2 空气-水-烟气换热与空气-烟气换热的空气加热方式比较

常规空气加热方式为空气与烟气通过间壁式换热设备进行热量交换,为提高单位体积换热能力,通常采用板式换热方式,如图 2 所示。

空气-水-烟气换热的空气加热方式(如图 3 所示),即由空气-水间壁式换热设备和烟气-水间壁式换热设备组成,可通过在气侧加肋的方式强化传热<sup>[3,17-18]</sup>,大幅度减小设备体积和耗材,并通过优化

降低阻力,便于在空间小、投资低的条件下实施。

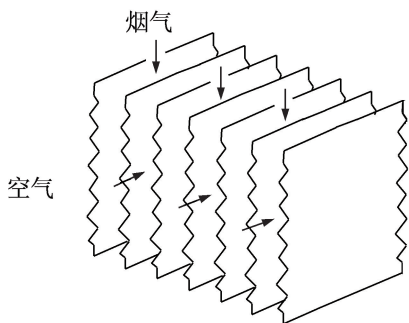


图 2 空气-烟气换热原理示意图

Fig. 2 The schematic diagram of heat transfer of air and flue gas

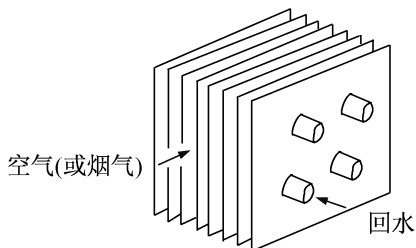


图 3 空气(或烟气)-水换热示意图

Fig. 3 The schematic diagram of heat transfer of air or flue gas-water

以某 70 MW 大型燃气供热锅炉烟气余热深度利用节能改造为例,设计条件为:锅炉回水温度 53 °C,在烟气加热空气系统中,在供暖季室外空气平均温度 -7.1 °C 条件下,空气被加热到 30 °C,烟气温度从 55.3 °C 降到 53 °C,空气与烟气总阻力为 200 Pa。对其分别采用空气-水-烟气换热的空气加热方式与空气-烟气换热的空气加热方式,且空气-水-烟气换热设备采用自主研发的防腐高效低阻换热设备,进行设备选型,比较结果见表 1。

由表 1 可知,在相同换热量及设计参数下,空气-水-烟气换热的空气加热方式采用自主研发的防腐高效低阻换热设备,其设备的换热面积与空气-烟气换热的空气加热方式相当。空气-烟气换热的空气加热方式的设备体积为空气-水-烟气换热设备体积的 6.8 倍,其设备净质量是空气-水-烟气换热设备的 2.8 倍。原因是气-气换热虽然传热温差较大,但两侧流体均为气体,传热系数小,空气-水-烟气换热的空气加热方式传热系数较大,且可通过气侧加肋的方式强化传热,大幅度减小设备体积和耗材。因此,气-气换热设备耗材多、体积大,若减小体积,则会造成设备烟风阻力大,影响锅炉等设备的正常运行。

表 1 两种烟气加热空气方式设备选型比较

Tab.1 The equipment selection of two types of flue gas heating the air

参数	空气-烟气	空气-水-烟
	换热的空气 加热方式	气换热的空气 加热方式
燃气体积/Nm <sup>3</sup>	7 300	7 300
过剩空气系数	1.1	1.1
热网回水温度/°C	53	53
室外空气温度/°C	-7.1	-7.1
空气出口温度/°C	30	30
烟气进口温度/°C	55.3	55.3
烟气出口温度/°C	53	53
换热量/kW	990	990
空气与烟气阻力/Pa	200	200
换热面积/m <sup>2</sup>	1 920	1 950
设备体积/m <sup>3</sup>	78	11.5
设备净质量/t	33	12
两种方式面积比	0.99	1
两种方式体积比	6.8	1
两种方式质量比	2.8	1

## 2 燃气供热锅炉烟气余热深度利用节能改造工程实测

### 2.1 工程概况

乌鲁木齐市某 70 MW 燃气热水锅炉,一次网回水温度为 51.8 ~ 52.5 °C,二次网回水温度为 32.6 ~ 32.7 °C。在安装空间及项目投资均有限的条件下,采用自主研发的防腐高效低阻烟气冷凝热能回收装置和空气-水换热设备,对锅炉进行排烟余热深度利用与助燃空气加热节能改造,加热空气采用空气-水-烟气换热的空气加热方式,原理如图 1 所示。

### 2.2 测试原理及数据整理依据

#### 1) 节能率 $\Delta\eta$

燃气锅炉排烟余热利用提高的燃气利用热效率,即节能率  $\Delta\eta$ ,为回收烟气热量与燃气锅炉燃气燃烧放热量之比:

$$\Delta\eta = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $Q_1$  为回收烟气热量, kW;  $Q_r$  为燃气锅炉燃气燃烧放热量, kW。

#### 2) 排烟余热回收率 $\Delta\eta'$

$\Delta \eta'$  为回收烟气热量与锅炉出口烟气携带的总余热量之比:

$$\Delta \eta' = \frac{Q_1}{Q_y} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $Q_y$  为锅炉出口烟气携带的总余热量, kW,

即烟气从锅炉出口温度降到标准状态(0 °C, 101.325 kPa)放出的总热量。

### 2.3 主要测试参数及仪器设备

主要测试参数及仪器设备见表 2。

表 2 主要测试参数及仪器设备  
Tab. 2 Main test parameters and instruments

测试仪器	测试参数	精度	型号
燃气流量表	燃气流量	0.01 m <sup>3</sup> /h	-
多功能烟气分析仪	烟气成分	$\pm 5 \times 10^{-6}$	Ecom-J2KN
数字微压计	空气和烟气流动阻力	0.1 Pa	Ecom-DPH
超声波流量计	循环水流量	0.1 m <sup>3</sup> /h	UltraFlux
铂电阻温度计	进、出口水温	0.01 °C	Siemens-Pt100
铠装热电偶	空气和烟气温度	0.01 °C	-
热线风速仪	空气流速	0.01 m/s	Kanomax-model 6036/6035
U 型管压力计	空气和烟气进、出口压差	0.01 kPa	-
安捷伦数据采集器	测量显示所连接测点温度	-	HP34970A

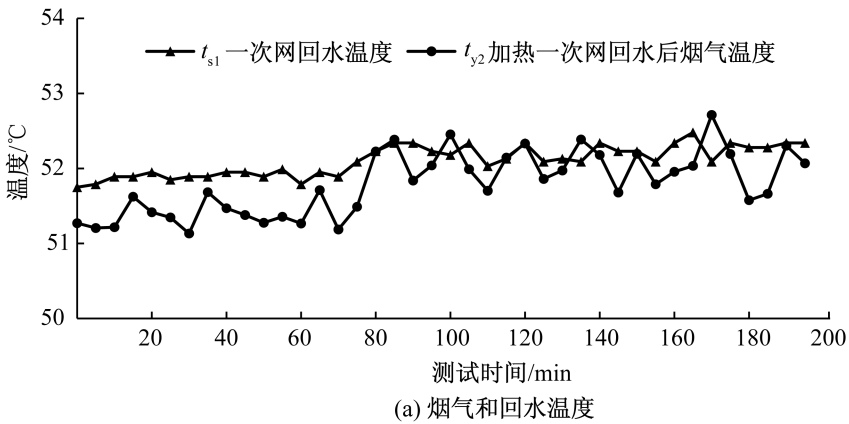
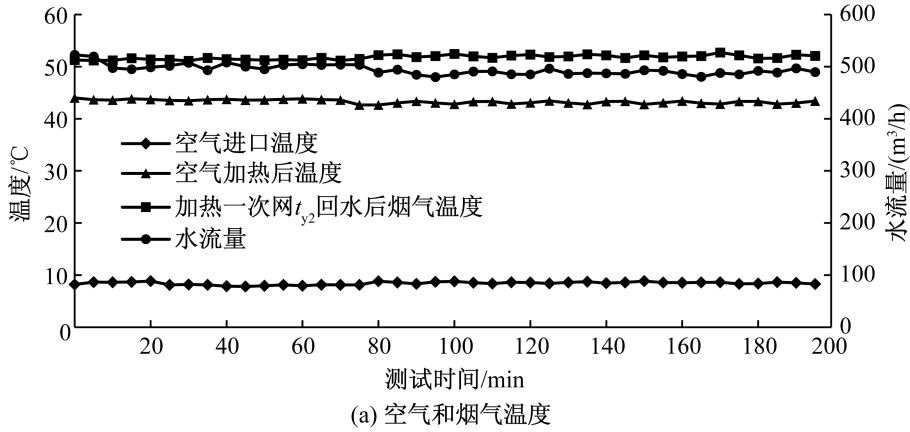


图 4 空气-水-烟气换热过程中空气和烟气及水温变化

Fig. 4 The temperature change of the air, flue gas and water in the process of heating in the pattern of air-water-flue gas

### 3 检测及计算结果与分析

检测时间为 2015/2016 年供暖季, 锅炉负荷率为 53.6% ~ 75.1%, 过剩空气系数为 1.3 ~ 1.4。

#### 3.1 空气-水-烟气加热过程中温度的变化

采用空气-水-烟气换热的空气加热方式的换热过程中空气、烟气及水温变化见图 4(a) 和 (b)。由图 4 可知, 换热过程中, 一次网回水温度为 51.8 ~

52.5 °C, 烟气温度由 53.3 ~ 62.7 °C 降至 51.1 ~ 52.7 °C, 烟气温度降到回水温度及以下。并将 7.8 ~ 8.9 °C 的助燃空气加热至 42.4 ~ 43.4 °C。

#### 3.2 空气-水-烟气加热过程中空气吸热量/烟气放热量

采用空气-水-烟气换热的空气加热方式的换热过程中, 空气吸热量/烟气放热量见图 5。

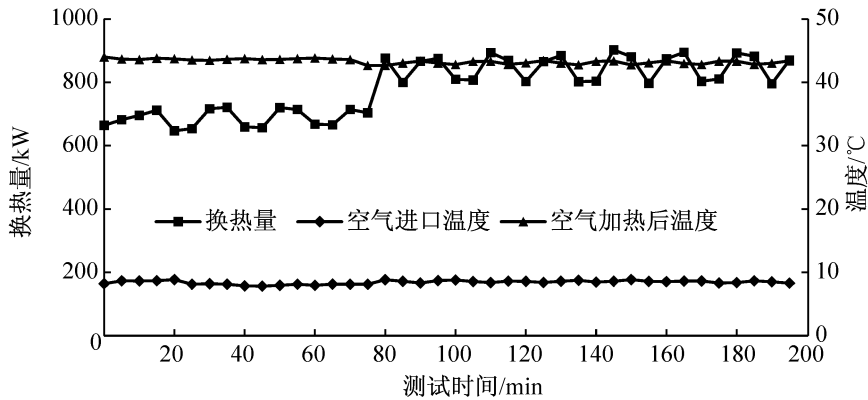


图 5 空气吸热量/烟气放热量

Fig. 5 The variation of the heat transferred from the gas to the air with time

由图 5 可知, 换热过程中, 助燃空气温度被加热为 42.4 ~ 43.4 °C, 避免严寒地区助燃空气进入锅炉产生爆燃和振动及噪声, 此过程空气吸热量或烟气放热量为 647 ~ 903 kW。

#### 3.4 燃气供热锅炉烟气余热深度利用节能改造工程效果

在燃气供热锅炉排烟余热深度利用节能改造工程中, 烟气加热一次网回水, 进而加热二次网回水。

#### 3.4.1 烟气加热一次网回水系统检测结果

在烟气加热一次网回水系统中, 结合了空气-水-烟气换热的空气加热方式, 将烟气温度进一步降低, 深度回收烟气显热和水蒸气冷凝潜热。检测结果见图 6。

由图 6 可知, 当回水温度 51.8 ~ 52.5 °C 时, 空气冷却后回水温度降至 50.4 ~ 50.7 °C, 使锅炉排烟温度由 124.6 ~ 157.8 °C 降至 51.1 ~ 52.7 °C, 将排烟温

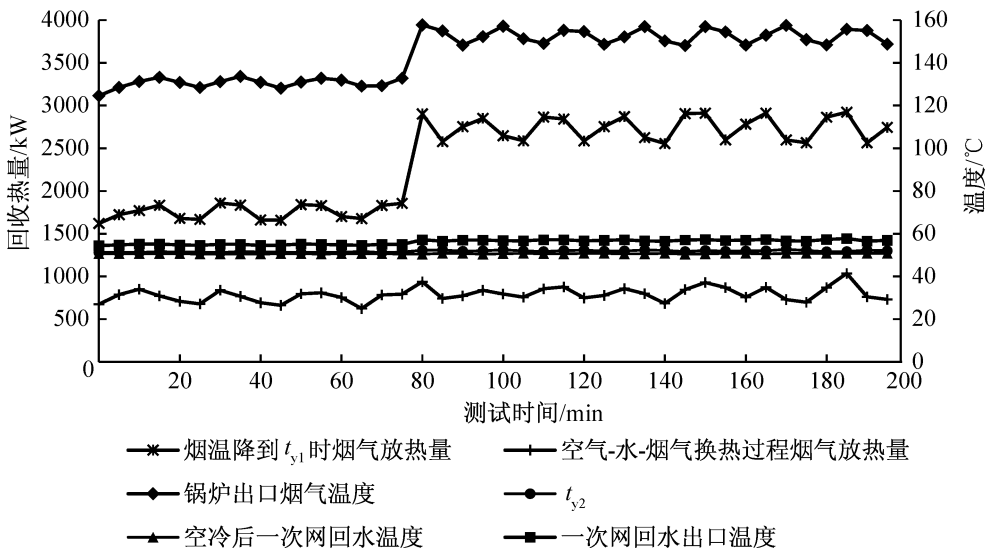


图 6 烟气加热一次网回水系统检测结果

Fig. 6 The testing results of primary network backwater system of flue gas heating

度降到回水温度及以下,在空间小、投资低的条件下,实现了排烟余热深度利用。

### 3.4.2 燃气供热锅炉排烟余热深度利用节能改造工程检测结果

在燃气供热锅炉排烟余热深度利用节能改造工程中,烟气加热一次网回水后,继而加热二次网回水,实现余热梯级利用,最终检测结果的平均值,见表 3。

表 3 燃气供热锅炉排烟余热深度利用节能改造工程检测结果  
Tab.3 The testing results of energy saving reconstruction project for gas heating boiler flue gas waste heat deep utilization

参数	数值	
锅炉出口烟温/℃	146	
一次网	进口回水温度/℃	50.6
	出口烟气温度/℃	51.8
二次网	进口回水温度/℃	32.6
	排烟温度/℃	37.5
	总显热量/kW	3 205
总回收余热量	总潜热量/kW	2 960
	总回收余热量/kW	6 165
总节能率/%	13.2	
总余热回收率/%	66.7	

由表 3 可知,锅炉平均出口烟温从 146 ℃降至平均排烟温度 37.5 ℃,其中回收的烟气显热和冷凝水潜热基本相当,总节能率 13.2%,总余热回收率 66.7%,实现了排烟余热深度回收利用。

## 4 结论

本文提出了空气-水-烟气换热的空气加热方式,并对采用该空气加热方式的大型燃气供热锅炉烟气余热深度利用节能改造系统的部分及整体进行跟踪实测,得到的结论如下:

1) 空气-水-烟气换热的空气加热方式与常规空气-烟气换热的空气加热方式相比,可大幅度减小设备体积和耗材,并可通过结构优化降低烟气和空气侧阻力,在相同换热量及设计参数下,空气-水-烟气换热的空气加热方式采用自主研发的防腐高效低阻换热设备,两种空气加热方式的换热面积相当,空气-烟气换热的空气加热方式设备体积为空气-水-烟气换热的空气加热方式的 6.8 倍,设备质量是空气-水-烟气换热的空气加热方式的 2.8 倍,便于在空间小、投资低的条件下应用。

2) 空气-水-烟气换热的空气加热方式采用自主研发的防腐高效低阻换热设备的工程实测表明,在被加热介质(一次网回水)温度 51.8 ~ 52.5 ℃ 条件下,将烟气温度降至 51.1 ~ 52.7 ℃,即降到了一次网回水温度及以下,助燃空气温度被加热至 42.4 ~ 43.4 ℃,避免了助燃空气进入锅炉产生爆燃、振动及噪声。

3) 结合空气-水-烟气换热的空气加热方式的燃气供热锅炉烟气冷凝余热深度利用节能改造工程应用表明,在一次网回水温度 51.8 ~ 52.5 ℃ 和二次网回水温度 32.6 ~ 32.7 ℃ 条件下,锅炉烟气温度由 124.6 ~ 157.8 ℃ 降至 37.0 ~ 38.0 ℃,提高锅炉燃气利用热效率,总节能率为 13.2%,总余热回收率为 66.7%,实现了排烟余热深度梯级利用。

本文受北京市教委创新能力提升计划(PXM2016\_014210\_000016)项目和北京学者计划项目资助。(The project was supported by the Innovation Ability Promoting Project of Municipal Education Commission in Beijing (No. PXM2016\_014210\_000016) and the Program of Beijing Scholar's Plan.)

### 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:174. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50736—2012 Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012:174.)

[2] 中国有色金属工业协会. GB50019—2015 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016:192. (China Nonferrous Metals Industry Association. GB50019—2015 Design code for heating ventilation and air conditioning of industrial buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016:192.)

[3] 章熙民,任泽霈,梅飞鸣. 传热学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007. (ZHANG Ximin, REN Zepei, MEI Feiming. Heat transfer [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.)

[4] 陈康,赵岩,王随林,等. 热电厂排烟余热深度回收利用模拟试验与节能分析[J]. 暖通空调,2013,43(3): 53-58. (CHEN Kang, ZHAO Yan, WANG Suilin, et al. Simulation test and energy efficiency analysis of flue gas heat deep recovery of thermal power plants[J]. Journal of HV&AC, 2013, 43(3): 53-58.)

[5] Damon G H. Acid corrosion of steel effect of carbon content on the corrodibility of steel in sulfuric acid[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1941, 33(1): 67-69.

[6] 孙传水. 12MnCuCr 耐钢硫酸露点腐蚀性能的研究[J]. 材料保护, 1998, 31(10): 10-12. (SUN Chuanshui. The study about sulfuric acid dew point corrosion resistance

- steel of 12MnCuCr [J]. *Material Protection*, 1998, 31 (10): 10-12. )
- [7] 曲遼, 刘丰. 热管换热器尾部受热面腐蚀分析及耐腐材料合理选用研究[J]. *能源研究与利用*, 2004(4): 9-10. (QU Kui, LIU Feng. The corrosion analysis and corrosion materials reasonable choice of heating surface for heat pipe heat exchanger[J]. *Energy Research and Utilization*, 2004(4):9-10. )
- [8] Hal T. An update on mechanical plating[J]. *Plating and Surface Finishing*, 1987(5): 24-27.
- [9] Lazzarin R M, Longo G A, Piccininni F, et al. Absorption dehumidification of natural gas exhaust[J]. *Heat Recovery System & CHP*, 1992, 12(5): 385-389.
- [10] 石书强, 王随林, 吴佳蕾, 等. 大型燃气锅炉排烟余热深度利用改造工程实测分析[J]. *暖通空调*, 2016, 46(2):74-77. (SHI Shuqiang, WANG Suilin, WU Jialei, et al. Measurement analysis of large gas fired boiler flue gas heat deep recovery reconstruction project[J]. *Journal of HV&AC*, 2016, 46(2): 74-77. )
- [11] 车得福, 刘艳华. 烟气热能梯级利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. (CHE Defu, LIU Yanhua. Gradient utilization of flue gas heat[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. )
- [12] 车得福. 冷凝式锅炉及其系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (CHE Defu. The condensing boiler and system[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. )
- [13] Kuck J. Efficiency of vapour-pump-equipped condensing boilers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1996, 16(3): 233-244.
- [14] Oskabe M. Thermal-hydraulic behavior and prediction of heat exchanger for latent heat recovery of exhaust flue gas [C]//Proceeding of ASME IMechE (Heat Transfer Division-II). U. S.: American Society of Mechanical Engineers, 1999: 43-50.
- [15] Wang S L, Yang D M, Ai X Y. Heat and mass transfer of flue gas in heat exchangers with anticorrosion platings [C]//Heat Transfer Science and Technology. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 2000: 731-736.
- [16] 刘民科. 烟气凝结换热器传热强化与工程应用研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012. (LIU Minke. Research on the intensification of transfer in flue gas condensing heat exchanger and engineering application [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012. )
- [17] Idem S A, Jacobi A M, Goldschmidt V M. Heat transfer characterization of a finned-tube heat exchanger (with and without condensation) [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1990, 112(1): 64-70.
- [18] Oskabe M, Itoh T. Thermal-hydraulic prediction for wet region of economizer using spirally finned tubes [C]//Proceeding of JSME. U. S.: American Society of Mechanical Engineers, 2000: 863-870.

**通信作者简介**

王随林, 女, 教授, 北京建筑大学环境与能源工程学院, 13911602617, E-mail: suilinwang@ bucea. edu. cn。研究方向: 供热节能和热能高效利用。

**About the corresponding author**

Wang Suilin, female, professor, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, + 86 13911602617, E-mail: suilinwang@ bucea. edu. cn. Research fields: heating saving and heat energy utilization efficiently.

(上接第 69 页)

- [10] Gan G. Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation[J]. *Energy and Buildings*, 2000, 31(1): 65-73.
- [11] Ghazi C J, Marshall J S. A CO<sub>2</sub> tracer-gas method for local air leakage detection and characterization[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 38: 72-81.
- [12] Chen Q Y. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 848-858.
- [13] Shafqat H, Patrick H O, Abdulrahim K. Evaluation of various turbulence models for the prediction of the airflow and temperature distributions in atria [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 48: 18-28.
- [14] ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Tutorial Guide [EB/OL]. (2013-11-20) [2016-08-23]. <http://www.ansys.com>, 2013.
- [15] Jiang Y, Chen Q Y. Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(6): 973-988.
- 通信作者简介**
- 邵双全, 男, 博士, 副研究员, 中国科学院理化技术研究所, (010)82543433-8, E-mail: shaoshq@mail. ipc. ac. cn。研究方向: 高效热湿环境控制、复杂制冷系统仿真与优化、数据中心与电子产品冷却、冷链技术与装备和气动噪音控制。
- About the corresponding author**
- Shao Shuangquan, male, Ph. D. associate professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, + 86 10-82543433-8, E-mail: shaoshq@mail. ipc. ac. cn. Research fields: efficient thermal and humidity control, simulation of complex refrigeration and air conditioning system, cooling of electronics and data center, cold chains and noise control.