

燃气锅炉烟气余热深度回收

秦 柏¹, 吴 超¹, 隋广明²

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 黑龙江省机场管理集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150070)

摘 要: 随着能源消费结构和能源政策的改变, 天然气这种清洁能源将被广泛的开发和应用. 针对低温烟气利用率低的问题, 以热力学为指导, 通过利用高效的传热技术, 对低位烟气余热进行深度回收及冷凝液处理. 应用于水蒸气含量高的燃气设备的烟气余热回收, 在回收显热的同时还回收其潜热. 高效的传热技术是烟气余热与介质换热过程中最为核心的技术问题, 对其进行分析探讨, 为中国节能减排的发展提供新的契机.

关键词: 燃气锅炉; 烟气余热; 节能

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)05-0071-05

The Depth of Reclaiming the Residual Heat of the Flue Gas of Gas-fired Boiler

QIN Bai¹, WU Chao¹, SUI Guang-ming²

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
Heilongjiang Airports Management Group Company Limited, Harbin 150070, China)

Abstract: With the change of the energy consumption structure and energy policies, the natural gas, as a clean energy source, will be widely developed and applied. Aiming at the problem of low utilization of flue gas at low temperature, the thermodynamic methods as a guide, low quality waste heat is recovered and condensed in depth through efficient heat transfer technology, which applied in gas equipment with high water vapor content. It can not only recover the sensible heat but also the latent heat. The efficient heat transfer technology which is the most core technical problem in the process of flue gas waste heat and the media, provide new opportunities for the development of Chinese energy-saving emission reduction.

Key words: gas fired boiler; flue gas waste heat; energy conservation

0 引 言

随着人类社会的发展以及新的能源种类的不断出现, 能源的利用量及利用方式也随之发生了变化.

我国的能源结构的最大特点是以煤为主, 占到 3/4 以上^[1]. 其最大问题是给环境带来严重的污染. 随着西部气田的开发, 天然气这种绿色清洁能源将要被广泛应用^[2].

传统锅炉中, 排烟温度一般在 180 ℃^[3] 左右, 烟

收稿日期: 2013-11-25

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511086).

作者简介: 秦 柏(1974—), 男, 教授, 硕士生导师; E-mail: qinbai2006@163.com;

吴 超(1988—), 男, 硕士研究生;

隋广明(1987—), 男, 学士.

气中的水蒸气仍处于过热的状态,排烟还具有较高的热能.若降低烟气温度,回收烟气中的余热,是可以达到提高锅炉的热效率,减少燃料的消耗量的目的^[4].同时,对企业节约能源,提高经济效益具有重要的意义.

1 低位烟气余热深度回收策略

天然气,其主要成份是甲烷,含有大量的 H 元素,这样锅炉排烟中含有大量的水蒸气,导致排烟不仅带走一部分显热,而且带走更大量的水蒸气潜热^[5].烟气中还有少量的碳化物、氮化物、硫化物,燃烧后的排气腐蚀性最弱,深度回收利用最容易实现.烟气中含有大量水蒸气,可以深度回收水蒸气的潜热和烟气的显热,如果使其全部或部分冷凝,在天然气的利用率增加的同时锅炉效率也会提高.根据热力学第一定律的内容,能量是永恒的,不会被制造出来,也不会被消灭.但是热能可以给动能提供动力,而动能还能够再转化成热能.考虑到烟气在冷凝之前具有高品位的热量,故将高品位的烟气进行梯级回收利用.

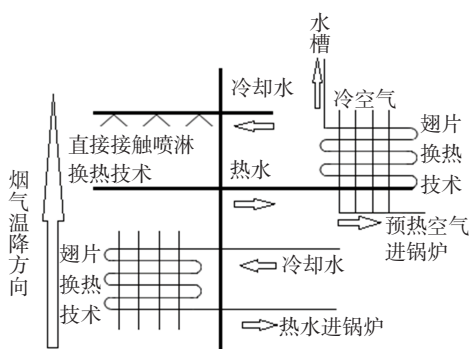


图1 天然气烟气余热回收至环境温度的过程与技术

图1是对上述理论的进一步细化,通过3个阶段的回收与利用将烟气降至环境温度.

第一阶段采用翅片管换热技术将烟气温降降至 $60\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,制取的热热水送入锅炉继续加热或作为采暖热水;

第二阶段采用直接接触喷淋换热技术,充分吸收剩余烟气的显热和潜热,同时,还将夹杂在烟气中的硫化物,氮化物等污染物溶于水,起到了高效环保的作用;

第三阶段采用翅片管换热技术,利用回收的余热,将进入锅炉的冷空气预热,升至一定温度,起到加热加湿的作用.

2 烟气回收技术

2.1 直接接触冷凝式

直接接触式冷凝换热的原理,一般以水作为热的载体.向烟气中直接喷入温度低于烟气中水蒸气露点温度的水,烟气与水直接接触换热,二者之间伴随着显热交换的同时还伴随着潜热交换;而且烟气中的各种组分在与水接触时被吸附吸收,对烟气起到清洗净化的目的.

张宏、高宏伟采用燃气锅炉烟气直接接触冷凝热量回收系统(简称DCC-HRS能源回收系统)对燃气锅炉排烟烟气进行换热^[6].实验表明,通过这种换热方式可使锅炉排放烟气中残余的可利用热能绝大部分被吸收到循环水中,同时洗涤过程溶解了烟气中的 SO_2 、 NO_x 、TSP,进而达到了烟气热量充分回收以及空气污染物零排放的效果.采用DCC-HRS能源回收系统直接加热冷水(自来水 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$),获得 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热水,热量不足部分仍用原蒸汽加热系统加热,从而达到在改造工作量小、使用方便的前提下,减少加热热水的蒸汽量.

刘武标、陈鹏飞研究开发了一种燃气锅炉尾部烟气余热回收冷凝型节能器^[7],该节能器采用水雾和烟气直接接触并逆向流动换热,传热效率高,无接触热阻和污垢热阻,可将烟气温度冷却到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,从而可以充分回收水蒸气凝结所释放的汽化潜热.实测表明,广州某冷轧带钢有限公司 4 t/h 燃气锅炉在应用燃气锅炉尾部烟气余热回收冷凝型节能器后,按照燃料低位发热值计算,锅炉热效率提高了14个百分点,节能效果非常明显.

文^[8]针对直接接触式换热器回收燃气余热进行了研究,指出直接接触式换热器的特点:增加系统热效率;降低初投资的费用;降低运营成本;系统回收周期短;容易安装;维护费用低;减少水蒸气的排放;减少颗粒和有害气体的排放;低背压;增加系统运行操作的灵活性并提到了系统运行的能力.同时,在直接接触式换热器内,可以使用大量的喷淋水来稀释酸的浓度.

文^[9]利用法国人R. Guilletde的专利技术,采用接触式喷淋填料塔的方式用水吸收 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烟气余热至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 排出.同时,利用循环泵将吸收了烟气余热的热水喷淋于填料塔,用于预热锅炉进风的加热加湿,并已将此技术实际应用于 200 MW 的热电厂^[10].

2.2 间接接触冷凝式

毕喜柱将涡街技术应用于翅片管换热^[1],在 SZS10-1.25-Q 型燃气锅炉排烟系统增设高效涡街换热器(即 QY-R-10 高效节能系统),同时指出翅片管高翅化与紊流换热相比,不增加烟气阻力,将烟气侧对流换热系数提高数倍,能在很小的传热温差下换热,从而使燃气锅炉达到高效节能.有实测数据得知,排烟温度由 190℃ 降到 35℃,锅炉效率由 85.94% 提高到 95.59%.

文 [2] 将热管换热器以组合式形式应用于工业锅炉中,组合后的换热器上一半热管用于加热空气,另一半热管用于加热热水,经验表明,采用热管空气预热器后,排烟温度由 250℃ 降到 150℃,锅炉效率提高 6% 左右.

李东等人将毛细泵环应用于燃气锅炉排烟热回收^[3],研究表明,毛细泵环(CPL)利用相变潜热的吸收与释放,在温差很小的情况下提供强大的传热能力,同时通过在蒸发器内加毛细芯的办法,使远距离传热仅需依靠毛细力就可实现^[4-13].CPL 具有如下优点:首先,借助相变潜热实现能量传输转移,换热能力强,传热系数高;其次,仅依靠毛细力就能实现远程传热;无运动部件,运行更为可靠;与传统应用的热管相比,大大提高了传热能力;最后,现场布置灵活而具有特色.

卓永冰等人针对某厂燃气锅炉排烟温度 220℃ 的问题^[4],提出来了改进措施,通过改变原有的闭式上水系统为开式系统,并制作一种冷凝型均匀换热常压节能器,替换原省煤器.均匀换热常压节能器换热机理:同一换热盘管的进、出水口对角设置,该换热盘管将覆盖均匀换热节能器的整个截面,同时,换热盘管组有多组,各换热盘管组的换热盘管在纵向上水平交替设置且在横向上交错设置,使得烟道内烟气流经上下交错排列的换热盘管时,烟气扰动,呈“S”形流出,增加烟气在节能器内的滞留时间.应用效果见表 1 和表 2.

表 1 该厂 3#燃气锅炉高温排烟余热回收节能技术应用运行统计表

燃烧器压力/kPa	电动调节阀开度/%	省煤器排烟口温度/℃	省煤器进口水温/出口水温/℃	电磁阀相应开启度对应流量/(m ³ ·h ⁻¹)
1.5	5	91	14/80	4
3.2	10	104	14/80	6
4.5	12	104	14/79	7.5
7.5	25	103	14/63	12

表 2 2007 年 3 号锅炉气汽比统计

	3 号燃气表(Nm ³)	3 号蒸汽表/t 气/汽/(t·N·m ⁻³)	
2007-11-1	128 190	1 965.7	—
2007-11-30	579 064	9 069.5	—
差数	450 874	710.38	63.5

表 3 2008 年 3 号锅炉气汽比统计

	3 号燃气表(Nm ³)	3 号蒸汽表/t 气/汽/(t·N·m ⁻³)	
2008-11-1	1 149 980	190	—
2008-11-30	120 057	1 150	—
差数	5 059	960	52.7

从表 1 可以看出,3 号锅炉用水从 14℃ 最低升高了 49℃,最高升高了 66℃,锅炉燃气消耗下降 5.1% 以上.2008 年 11 月,燃气锅炉高温排烟余热回收节能技术应用后,三号锅炉气汽比为 52.7.2007 年同期,燃气锅炉高温排烟余热回收节能技术未应用时,三号锅炉气汽比为 63.5.见表 3 气汽比下降了 10.8,节能效果显著.

史小军等人通过翅片管换热器对低位烟气进行余热回收指出^[7],由于低位烟气余热回收工况为:烟温高于 100℃,流速 4~8 m/s,水蒸气含量 5~15% 之间.因此,低位烟气余热回收常采用整体翅片管、高频焊翅片管和为冷凝回收烟气潜热而开发的抗腐蚀搪瓷整体翅片管以及聚丙烯塑料翅片管等.

2.3 供暖

邓新华针对燃气锅炉供热系统,总结出了一套主要的实用技术和产品^[8],实验主要步骤为:1)摸底调查,了解供暖情况.供暖系统运行期间,进行实际运行工况的测试;2)分析系统情况和存在的供暖问题;3)进行热力计算,水力计算,提出改造技术方案.首先是解决供暖问题;其次,应合理优化系统,进行必要的减阻降耗技术改造;4)科学地进行供热系统水力平衡的技术调试,实现热量、流量合理分配,达到科学节能减排的目的.节能技术应用实施的具体步骤如图 2.

通过节能技术的应用实施,改善燃气供热系统运行状况哈供暖质量,同时实现节能减排,把北京市总供热总用气量降低 6%~12%.

魏澄等人根据燃气锅炉供热现状^[9],总结出了供热存在的问题及原因,并提出了燃气锅炉供热节能也应遵循落实锅炉效率和管网输送效率这两个关键因素.在总结景泰嘉园小区节能技术的基础上结合国外的节能技术,完善了整套的节能系统.该系统由以下 6 部分组成:气候补偿系统、烟气冷凝热回收

系统、锅炉集控系统、变频风机系统、水力平衡系统、室温调控系统。该系统降低整个系统的能耗,提高系统的智能水平。

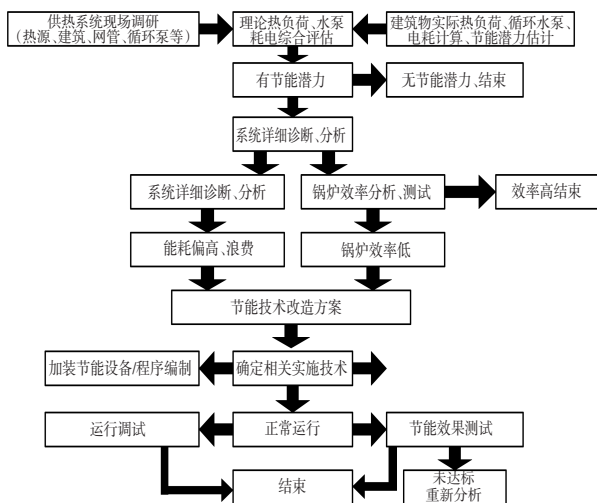


图2 供热系统节能技术应用实施的步骤

白春雷、张栋良针对燃气锅炉各项热损失^[20],提出了燃气锅炉节能器。燃气锅炉节能器主要由烟道换热器、保温调节水箱、循环水管路及热水循环泵、电磁阀、电气控制及监测、显示系统构成。主要热点:1)采用新型热管换热技术;2)采取较小的烟气阻力和不易积灰的技术参数选取;3)合理取用烟气流速;4)设计选取余热回收装置合理的排烟温度。通过实际运行燃气锅炉节能器,四川大学华西医院四台 WNS10t/h 锅炉单吨蒸汽耗天然气可降低 7%,一年可节约天然气 200 000 m³,以 2.6 元/m³ 计算即可节省经费 52 万元,一年就能收回全部成本。

2.4 冷凝式锅炉与热泵联合

叶勇军等人将冷凝式锅炉与热泵联合^[4],根据热泵的特点,可以给冷凝式锅炉提供一个比烟气露点温度低得多的冷却水系统,如图3所示。

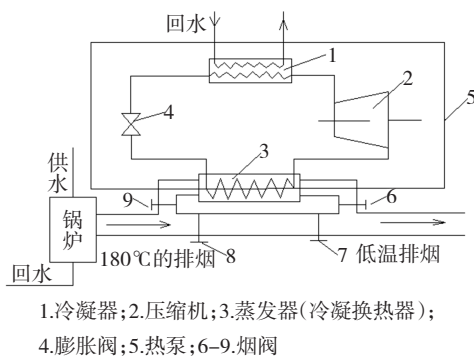


图3 冷凝式锅炉与热泵联合系统

并分析得知:1)在冷凝换热器端提供了平均温度在 30 ~ 40℃ 的冷却介质,从而使冷凝量达到较大(80%左右),基本上回收了烟气的余热,并且具有较大的传热温差,加强了换热,减少了冷凝换热面。2)通过热泵为桥梁,在热泵的冷凝端通过热泵冷凝介质的冷凝放热,起到了加热回水的作用,使烟气的潜热和显热得到利用。

吴华新以热力学为指导^[10],通过利用高效的传热技术与吸收式热泵技术的耦合,对低位烟气余热“质”和“量”分控回收,可实现低位烟气余热的深度回收与梯级利用。

2.5 其他应用

文[11]针对燃气锅炉排烟温度较高,热损失大的问题,设计一套余热回收节能系统进行改造。锅炉余热回收节能系统如图4所示。

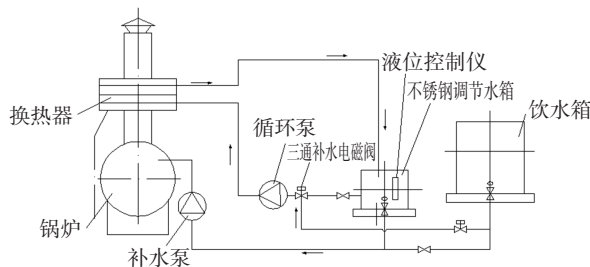


图4 锅炉余热回收节能系统

该系统从锅炉补水、保温水箱补水和保温调节水箱水(锅炉进水)温升 3 方面进行改造。该系统的特点:1)该余热回收节能系统控制简单,可很方便地通过 STEP7-200 编程器将其 PLC 控制与原锅炉控制系统有机结合而不会影响到原锅炉的控制程序。2)合理选用换热器保障了余热回收效率。实际表明,节能效果良好,同时,减少了高温烟气中大部分氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO₂)等污染物的排放。

罗健重新建立一套相对于锅炉原有的供水系统和排污系统而独立的余热综合回收系^[22],将锅炉排污时和尾烟排放时损失的余热进行综合回收,用于提高锅炉进水温度。针对漯河卷烟厂锅炉在正常运行产生蒸汽时的能源浪费主要集中在锅炉连续排污、定期排污时排放炉水(过热水)带走的热量和锅炉尾烟排放时带走的热量。提出了余热综合回收方案。该燃气锅炉余热综合回收系统构成如图5所示。

该系统成功应用于漯河卷烟厂,在正式投入使用一年多来节能效果显著,单台 10 t/h 燃气锅炉每

年可节约天然气 340 000 m³, 废热减排 1.256 04 × 10⁹ kJ.

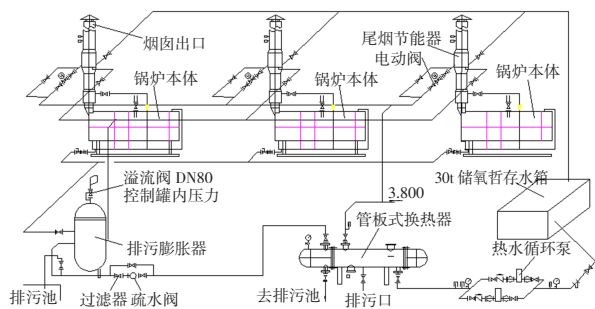


图5 燃气锅炉余热综合回收系统构成

3 结 语

通过采用翅片管换热技术和直接接触喷淋换热技术的梯级结合, 可实现低位烟气的显热和潜热的回收, 并使温度降至环境温度附近。高效的传热技术仍是烟气余热与介质换热过程中最为核心的技术问题, 需要进一步研究。

燃气锅炉烟气余热回收技术在工业和生活中广泛使用, 主要的回收技术分为: 直接接触式回收技术, 间接接触式回收技术和冷凝式锅炉与热泵联合技术等, 在实现烟气余热深度回收的同时提高锅炉效率, 兼顾环保节能, 并且, 随着我国油气资源的开拓, 建立与完善燃气锅炉供应链已成为节能减排的必要趋势。

参 考 文 献:

- [1] 吴学安. 北京供热能源结构分析 [J]. 北京节能, 1999(2): 3-6.
- [2] 李慧君, 王树众, 张斌, 等. 冷凝式燃气锅炉烟气余热回收可行性经济分析 [J]. 工业锅炉, 2003(2): 4-7, 17.
- [3] 车得福. 冷凝式锅炉及其系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 叶勇军, 寇广孝, 王汉青, 等. 冷凝式锅炉与热泵联合供热系统的经济性研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2005, 05: 68-69, 76.
- [5] CHE Defu, LIU Yanhua, GAO Chunyang. Evaluation of Retrofitting a Conventional Natural Gas Fired Boiler Into a Condensing

Boiler [J]. Energy Conversion and Management, December 2004, 45(20): 3251-3266.

- [6] 张宏, 高宏伟. 燃气锅炉烟气直接接触冷凝热量回收系统的方案设计及其经济性分析 [J]. 工业锅炉, 2009(3): 42-44.
- [7] 刘武标, 陈鹏飞. 燃气锅炉尾部烟气余热回收冷凝型节能器的实验研究 [J]. 工业锅炉, 2007, 04: 1-3.
- [8] THORN W F. Waste Heat Recovery From Stacks Using Direct-contact Condensing Heat Exchange [J]. Prentice-Hall Inc, 1987: 483-495.
- [9] KUCK J. Efficiency of Vapour-pump-equipped condensing Boilers [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16: 233-244.
- [10] 吴华新. 低位烟气余热深度回收利用状况述评(II)——传热过程与技术应用研究 [J]. 热能动力工程, 2012(4): 7-12, 23, 118.
- [11] 毕喜柱. 燃气锅炉排烟余热回收 [J]. 油气田地面工程, 2006(6): 20.
- [12] 黄坤荣, 王珏. 利用热管技术回收中小工业锅炉烟气余热 [J]. 广东化工, 2007(7): 96-98.
- [13] 李东, 马维伟, 张晓晖. 燃气锅炉排烟热回收技术探讨 [J]. 现代化工, 2007, S2: 466-469, 473.
- [14] 彭晓峰, 曲艺, 李智敏. 高性能工业余热利用方式的 CPL 技术 [J]. // 全国工业炉暨电热学术会议论文选登, 2000: 6-9.
- [15] 王金亮, 马同泽, 张正芳. 两相毛细泵环中反向式蒸发器传热性能的实验研究 [J]. // 中国工程热物理学会传热传质学术会议论文集, 1997: 733-736.
- [16] 卓永冰, 张振华, 马少军, 等. 一种燃气锅炉高温排烟余热回收节能技术应用一例 [J]. 科技风, 2009(1): 46.
- [17] SHI Xiaojun, CHE Defu, BRIAN agnew, et al. An Investigation of the Performance of Compact Heat Exchanger for Latent Heat Recovery From Exhaust Flue gases [J]. international journal of heat and mass transfer, 2011, 54: 606-615.
- [18] 邓新华. 燃气锅炉供热系统节能技术与应用 [J]. 节能技术, 2010, 02: 178-181.
- [19] 魏澄, 丁琦, 魏巍, 等. 燃气锅炉供热现存问题及节能技术应用实例分析 [J]. 暖通空调, 2005(10): 109-115.
- [20] 白春雷, 张栋良. 浅谈燃气锅炉节能器——烟气余热回收技术 [J]. 应用能源技术, 2012(7): 27-28.
- [21] 刘丽鹏, 胡小红, 张力. 燃气锅炉余热回收改造 [J]. 设备管理与维修, 2012(4): 57-58.
- [22] 罗健. 燃气锅炉余热综合回收节能改造 [J]. 设备管理与维修, 2010(10): 58-60.

(编辑: 关 毅)