

某供热站烟气余热回收系统的应用

李亚 赵飞 杨翔宇 王振华 梁涛

东方绿色能源(河北)有限公司石家庄热力分公司, 河北 石家庄 050000

[摘要] 全球能源需求的持续增长对环境保护提出了严峻挑战。传统的化石能源,如煤、石油和天然气,虽然在短期内能够满足能源需求,但其长期使用带来的环境问题不容忽视。化石能源的燃烧会释放大量的二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫等有害气体,这些气体不仅会导致空气污染,还对全球气候变化产生深远影响。我国作为世界上最大的发展中国家,其经济的快速增长推动了能源需求的急剧上升。根据数据显示,中国的能源消费结构仍然以化石能源为主,尤其是煤炭在能源消费中的比重较高。这种能源结构不仅对环境造成了巨大压力,也使得中国在全球气候治理中的角色愈加重要。本文通过对某燃气锅炉供热站烟气中的余热进行分析计算,并对烟气余热回收的改造方案进行了阐述,提出了采用间壁式换热器和直燃溴化锂吸收式热泵的方式,将排烟温度降低到烟气露点温度以下,能够有效地吸收烟气中的显热与部分潜热用于供热,降低了排烟温度,节能效果明显,同时减少了污染物的排放,具有良好的经济效益和社会效益。

[关键词] 烟气余热回收; 吸收式热泵; 间壁式换热器; 露点温度; 经济效益; 社会效益

DOI: 10.33142/ect.v2i9.13472

中图分类号: TK115

文献标识码: A

Application of Flue Gas Waste Heat Recovery System in a Heating Station

LI Ya, ZHAO Fei, YANG Xiangyu, WANG Zhenhua, LIANG Tao

Shijiazhuang Thermal Branch of Dongfang Green Energy (Hebei) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The sustained growth of global energy demand poses a serious challenge to environmental protection. Although traditional fossil fuels such as coal, oil, and natural gas can meet energy demand in the short term, the environmental problems caused by their long-term use cannot be ignored. The combustion of fossil fuels releases large amounts of harmful gases such as carbon dioxide, nitrogen oxides, and sulfur dioxide, which not only cause air pollution but also have a profound impact on global climate change. As the world's largest developing country, Chinese rapid economic growth has driven a sharp increase in energy demand. According to data, Chinese energy consumption structure is still dominated by fossil fuels, especially coal, which has a relatively high proportion in energy consumption. This energy structure not only puts enormous pressure on the environment, but also makes Chinese role in global climate governance increasingly important. This article analyzes and calculates the residual heat in the flue gas of a gas boiler heating station, and elaborates on the renovation plan for flue gas waste heat recovery. It proposes the use of a partition wall heat exchanger and a direct fired lithium bromide absorption heat pump to reduce the exhaust gas temperature to below the dew point temperature of the flue gas, which can effectively absorb the sensible heat and some latent heat in the flue gas for heating, reduce the exhaust gas temperature, and have significant energy-saving effects. At the same time, it reduces the emission of pollutants, and has good economic and social benefits.

Keywords: flue gas waste heat recovery; absorption heat pump; wall mounted heat exchanger; dew point temperature; economic performance; social results

引言

随着我国经济的深入发展,对能源需求量日益增大。现如今,我国的主要能源类型为煤、石油、天然气等化石能源。化石能源的利用,会有二氧化硫、氮氧化物等增加环境污染的气体排放,同时会排放大量的二氧化碳、一氧化碳气体,影响全球气候变暖。2020年9月22日,中国在第75届联合国大会上正式提出2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和的目标。要想实现“双碳”目标,其中一个非常重要的途径就是“节能减排”,通过采取一定的节能技术措施,减少化石能源的利用。因此,调整能源结构,缓解能源紧缺成为目前急需解决的关键问题^[1]。由

于我国天然气人均储量不高,天然气消耗量显著增长,导致我国天然气对外依存度从2010年的15.8%上升到2017年的39.4%^[2]。特别是在冬季供热期间,天然气“气荒”现象时有发生。目前我国燃气锅炉大多采用常规省煤器,受供热管网回水温度的控制,排烟温度普遍在60~100℃,燃气锅炉的排烟温度较高,烟气中的热量损失特别是烟气中的潜热损失较大。如果排烟温度降到烟气露点温度以下,烟气中的水蒸气就会凝结,释放出汽化潜热。通过这种途径,可充分回收烟气中的显热和潜热,降低排烟温度,提高锅炉的热效率,减少化石能源的利用,有利于节能减排,有利于提高项目的经济效益^[3]和社会效益。利用直燃溴化

锂吸收式热泵对烟气进行深度冷凝,最大限度地降低排烟温度,是节能环保的重要措施,可以有效地减少化石能源的使用,减少碳排放,大幅度提高天然气能源的利用效率。烟气热损失中潜热占排烟热损失的比重很大。准确计算烟气中的汽化潜热,非常重要。汽化潜热的计算和烟气的露点温度关系密切,因此,烟气露点温度的准确计算,是设备选型的重要依据。

2 工程概况

本工程为某天然气锅炉供热站,现有总供热面积约100万m²(入网面积),供热站采用5台额定功率为17.5MW的燃气热水锅炉。

因环保政策的要求,对锅炉进行了低氮改造,由于改造以后,炉膛温度的降低,锅炉的出力减小,锅炉的低氮燃烧器功率改为了14MW。

2018年,供热站增加了1台直燃式溴化锂热泵吸收式热泵、喷淋塔、余热循环水泵及配套附属设施组成的烟气余热回收装置,余热回收装置总供热量为6827KW,其中回收烟气余热量为3000kW。由于环保监测的要求,这套余热回收装置于2022~2023年采暖季停止使用,当年燃气锅炉的排烟温度约65℃,存在很大的烟气余热能源的浪费。同时供热站内锅炉间北侧建设有换热站一座,承担供热站附近的小区的热,由于各种原因,换热站二次网系统补水量较大,每天补水量约为300~400吨,造成了很大水资源的浪费,同时,由于补进去的是冷水,损失的是热水,也造成了大量热量的损失。

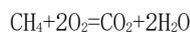
本次烟气余热回收系统的改造,重新启用了于2018年建设的烟气余热回收设施的部分设备,并考虑环保要求、现场条件以及其他各个方面的因素,根据原有余热回收设备的型号、烟气量、排烟温度等合理确定本次烟气余热回收系统,烟气余热回收量,以及余热回收系统的设备选型,确保达到良好的经济性、可靠性、稳定性。

3 设计参数

单台锅炉的烟气量:20000Nm³/h,锅炉排烟温度:65℃,溴化锂吸收式热泵额定供热量:6827KW,溴化锂吸收式热泵余热水温度:45/25℃,回收补燃机烟气热量:400KW,自来水温度:10℃,软水箱水的温度:35℃。

4 烟气露点温度计算

露点温度,指的是在空气中的水汽含量不变,保持气压一定的情况下,使空气冷却达到饱和时的温度。天然气主要成分烷烃,其中甲烷占绝大多数,另有少量的乙烷、丙烷和丁烷,此外一般有硫化氢、二氧化碳、氮和水汽和少量一氧化碳及微量的稀有气体,如氦和氩等。由于天然气成分中不含硫,因此烟气的露点温度为烟气中水露点的温度,天然气燃烧主要为甲烷,其他成分对燃烧影响较小。天然气完全燃烧化学方程式为:



根据天然气燃烧的化学方程式,天然气锅炉的烟气中含有大量的水蒸气,即蕴含大量的汽化潜热,若在回收天然气锅炉烟气余热过程中,使烟气中的水蒸气发生冷凝,不仅可以提高间壁式换热器的传热系数,还可以使烟气发生深度冷凝,更大限度地回收烟气中的余热^[4],降低排烟温度,提高燃料的利用效率。

空气中O₂的体积分数约为21%,锅炉燃烧的过量空气系数取1.2,则1Nm³天然气燃烧需要的空气量为11.42Nm³,天然气燃烧后生成1CO₂和2H₂O,根据天然气燃烧化学方程式,可以计算得出烟气中水的体积分数为16.1%,水的质量分数为9.99%。

标准状态下,空气密度为1.293kg/m³,则1Nm³烟气中含水的质量(含湿量)为129.17g。不同温度下,饱和水蒸气的含湿量见下表(单位:g/Kg干空气)。

表1 不同温度下,饱和水蒸气的含湿量

温度(℃)	34	35	36
含湿量(g)	34.971	37.087	39.315
温度(℃)	37	38	39
含湿量(g)	41.679	44.167	46.796
温度(℃)	40	41	42
含湿量(g)	49.568	52.503	55.597
温度(℃)	43	44	45
含湿量(g)	60.362	62.329	65.977
温度(℃)	46	48	50
含湿量(g)	69.803	78.214	87.56
温度(℃)	51	52	53
含湿量(g)	92.696	98.074	103.788
温度(℃)	54	55	56
含湿量(g)	109.851	116.279	123.089
温度(℃)	57	58	59
含湿量(g)	130.298	138.02	146.186
温度(℃)	60	65	70
含湿量(g)	154.82	207.555	281.807

因此,1Nm³烟气中含水的质量(含湿量)为129.17g,查询上表得出烟气的露点温度约为57℃。

5 改造工艺流程

(1) 烟气余热回收装置的设计与布置

在本项目中,改造工艺流程的核心是有效回收锅炉烟气中的余热。溴化锂吸收式热泵机组的烟气首先进入喷淋塔,这一过程是为了回收烟气中的热量。喷淋塔内部装置了喷淋系统,用于将烟气中的热量传递到水中。喷淋塔的设计考虑了烟气的温度、流量及水的流速,以确保有效的热交换。

(2) 余热水的处理与循环

为了提高系统的热回收效率,利用了现有设施将来自溴化锂吸收式热泵机组的25℃余热回水输送至喷淋塔。

这个过程分为两个主要步骤：①水流分配：余热回水分分为两路。一部分直接输送至喷淋塔，并设置了手动调节阀门，以便根据实际需要调节进入喷淋塔的水量。另一部分则通过间壁式换热器，进入3#和4#燃气锅炉，以吸收烟气中的热量。换热器的选择依据是其处理烟气流量和所需的热交换效率。②热水混合：从换热器中吸热后的余热水与喷淋塔内的余热水在塔内混合，通过循环水泵将混合后的水输送至溴化锂吸收式热泵机组，为其提供持续的热热水供应。喷淋塔内的混合水温度通过调节阀门进行控制，以确保热泵机组的热热水温度保持在最佳状态。

(3) 二网水的处理与分配

改造过程还包括了对换热站内二网系统的优化。以下是相关步骤：①回水处理：从换热站二网循环水泵后的二网回水管道中取水，输送至5#燃气锅炉的第一级间壁式换热器。这个换热器用于吸收烟气中的余热，从而提高水的温度。热水经过换热后，送至二网供水主管道，与来自板式换热器的二网热水进行混合。②供热管网：经过混合后的热水被送往室外供热管网，确保各个供热点能够接收到足够的热量，有效提升了供热效率，减少了能源的浪费，同时提高了系统的整体稳定性。

(4) 软化水系统的改造与节能措施

针对软化水系统，改造工艺还包括以下步骤：①保温处理：对换热站内的二网软化水箱进行保温处理，以减少水箱内水的热量流失。通过保温措施，能够有效减少能源消耗，保持水温稳定，提升系统的热效率。②节能循环水泵的安装：新建了两台节能循环水泵，负责从软化水箱中吸取水分，输送至5#锅炉的第二级间壁式换热器。该换热器进一步吸收烟气中的余热，然后将加热后的水送回至软化水箱内，不仅提高了水的温度，还减少了对额外热源的需求。③凝结水处理：在间壁式换热器中产生的凝结水被补入喷淋塔，不仅有效回收了热量，还将废水利用最大化，避免了资源浪费。

(5) 间壁式换热器产生的凝结水补进喷淋塔。系统改造流程图如图所示：

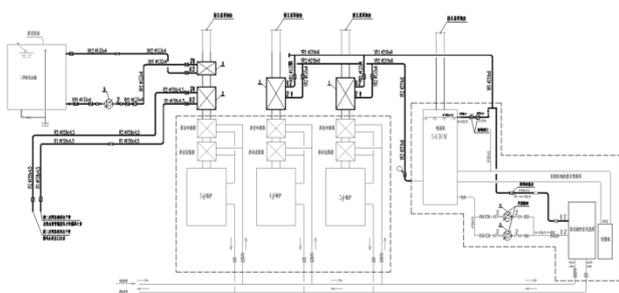


图1 系统改造流程图

6 节能效益分析

(1) 节能减排减碳效果

该烟气余热回收系统于2023年10月底竣工并调试完

成，并于2023年11月10日正式投入使用。在随后的一个采暖季中，该系统稳定运行，回收的热量达到了预期设计要求。系统设计计算表明，燃气锅炉排放的烟气经过间壁式换热器处理后，每小时最大可以回收4.38 MW的热量。按照120天的供暖季计算，天然气的热值为8400 kcal/Nm³，锅炉的负荷率为80%，每年可以减少天然气消耗约108.6万Nm³。在2023—2024供暖年度的实际运行中，根据锅炉的实际负荷率，系统回收的总热量约为2.4万GJ，相当于每小时回收8.33GJ的热量。通过该系统的优化，整个采暖季的天然气耗量减少了68.3万Nm³。根据计算，减少的天然气使用量相当于每个采暖季减少约1242.47吨的二氧化碳排放。这不仅提升了锅炉的热效率，还大幅度减少了化石能源的使用，从而有助于实现节能减排的目标。

(2) 经济效益

从经济效益的角度来看，该系统的实施带来了显著的成本节约。根据供热站每个采暖季燃气锅炉的实际负荷率，系统减少的天然气耗量为68.3万Nm³。按照2022年天然气的市场价格4.31元/Nm³计算，年度节约的天然气费用约为294.37万元。项目的总投资为208.88万元，而每年的运行成本约为66万元。考虑到项目的静态投资回收期为0.947年，这意味着该项目在不到一年内就可以收回投资成本。这一回收周期的短暂表明了项目的投资效益十分显著。

(3) 环境和社会效益

该烟气余热回收系统在节能和经济效益的基础上，带来了显著的环境和社会效益。系统通过高效回收和利用燃气锅炉排放的烟气余热，降低了燃气锅炉的废气温度，从而减少了燃烧过程中产生的有害气体和污染物的排放。特别是二氧化碳的排放量显著减少，这对减缓全球气候变暖具有重要意义。具体而言，系统每个采暖季节减少了约1242.47吨的二氧化碳排放，这不仅有助于应对全球变暖问题，还改善了局部空气质量。烟气余热回收系统通过减少对天然气的需求，系统降低了化石能源的消耗，减少了对有限资源的依赖。这种资源节约不仅减少了环境压力，也为未来能源的可持续使用提供了保障。更重要的是，通过提高能源利用效率，该系统降低了能源消耗带来的环境负担，促进了节能减排目标的实现。减少的污染物和二氧化碳排放，不仅改善了居民的生活环境，还提升了公众的环保意识。清洁空气和更低的排放量有助于减少因空气污染引发的健康问题，提高了社区居民的生活质量。

7 结语

本燃气锅炉供热站通过对燃气锅炉烟气余热回收改造流程的介绍，计算了烟气的露点温度，通过溴化锂吸收式热泵机组将烟气余热深度冷凝回收，将烟气温度由65℃降低到40℃，回收了65℃到40℃烟气中的显热，以及57℃到40℃烟气中的汽化潜热，降低了排烟温度，提高了燃

气锅炉的运行效率,吸收烟气中汽化潜热的同时,会产生大量的冷凝水,经过化验,此冷凝水完全满足《工业锅炉水质标准》GB 1576—2022 中有关供热系统补水的要求,产生的冷凝水可以作为二次网的补水,大大地节约了水资源。经过计算,本项目每个采暖季可减少天然气消耗 68.3 万 Nm^3 ,减少 CO_2 排放量 1242.47t,降低了运行费用,在实现经济效益的同时,降低了污染物的排放,改善了空气质量,项目具有良好的经济效益和社会效益。

[参考文献]

- [1]王丽丽.燃气锅炉烟气余热冷凝回收研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(14):3.
[2]钱兴坤,刘朝全,姜学峰,等.价格企稳回升行业全面回

暖—2017 年国内外油气行业发展概述及 2018 年展望[J].国际石油经济,2018,26(1):32-38.

[3]于晓娟,阚德民,顾吉浩.天津某燃气锅炉的烟气余热回收案例实测分析[J].河北工业大学学报,2019,48(2):56-61.

[4]时国华,刘彦琛,李晓静,等.天然气烟气余热高效回收技术研究进展[J].热力发电,2020,49(2):1-7.

作者简介:李亚(1967.6—),男,研究方向:企业管理,毕业院校:郑州大学工商管理专业本科毕业,职称:助理经济师,职务:东方绿色能源(河北)有限公司石家庄热力分公司党委书记、国电投峰和新能源科技(河北)有限公司董事长。