

锅炉烟气余热回收系统设计计算方法及应用

宁方华¹, 王 坤¹, 张怀全², 程 昆²

(1. 华中科技大学 能源与动力工程学院 湖北 武汉 430074; 2. 湖北国众科技股份有限公司 湖北 武汉 430074)

摘 要: 本研究给出锅炉烟气余热回收系统设计计算方法, 该计算方法可根据烟气的相关特性、燃料特性以及锅炉额定出力进行传热计算和热利用设计, 该方法应用于四川某钢铁有限公司, 根据该公司提供的设计基础数据和操作数据, 对蒸汽产量为 220 t/h 的锅炉设计两套锅炉烟气余热回收系统, 实际运行结果表明本计算方法有效可靠。

关 键 词: 烟气余热回收; 锅炉效率; 节能减排; 计算方法
中图分类号: TK115 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.025

引 言

为了提高锅炉运行的安全性, 许多锅炉的排烟温度设定值往往较高, 甚至远高于烟气的露点温度。文献[1]表明, 燃煤蒸汽锅炉的排烟温度一般为 220~250℃, 热水锅炉的排烟温度为 160~180℃, 一般工业锅炉的排烟温度为 170~350℃, 而导热油炉排烟温度更是达到 280℃^[1]。在排烟过程中增设一套烟气余热回收系统能够有效降低锅炉排烟温度, 并利用其热量, 从而显著提高锅炉效率^[2]。其工作原理为: 通过烟气换热器吸收烟气余热将热量传递给液态水, 液态水吸热变成饱和蒸汽; 在空气换热器中饱和蒸汽冷凝放出热量将空气预热, 同时自身凝结为饱和水。

本研究根据水热媒技术的基本结构和原理结合自己的研究成果和实践尝试对锅炉烟气余热回收系统的设计计算方法进行整理和总结, 可供相关行业应用设计参考。

1 锅炉烟气余热回收系统设计计算方法

锅炉烟气余热回收系统设计是一个在给定约束条件下的综合优化问题, 一般约束条件包括:

(1) 烟道和风道流动阻力增加量不超过原烟风系统的容限, 以避免额外的风机扩容投资;

(2) 锅炉烟气余热回收系统总投资与节能收益的比例不能过高, 以保证在规定的工作年限内能够收回投资成本。

(3) 系统运行约束。一些锅炉烟气余热回收系统采用自然循环方式, 不设循环水泵, 因此必须能适应不同的工况。

(4) 其它约束, 如多套锅炉烟气余热回收系统并联等。

与此同时, 锅炉烟气余热回收系统本质上也是一个传热设计与热平衡设计的过程。锅炉烟气余热回收系统主要由烟气换热器、空气换热器和相应的循环水管道以及阀门等组成, 如图1所示。

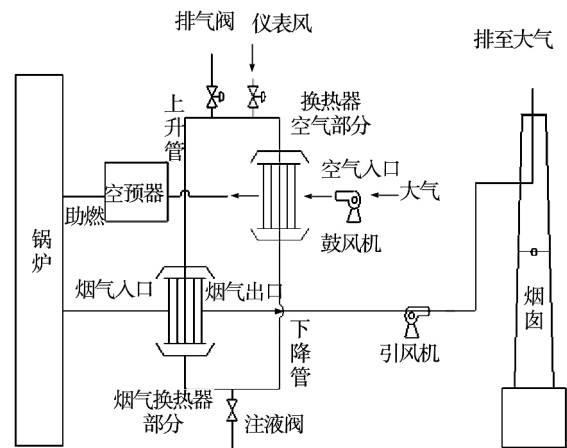


图1 锅炉烟气余热回收系统原理图

Fig.1 The schematic drawing of flue gas waste heat recycling system

1.1 设计步骤

锅炉烟气余热回收系统的设计过程包括:

(1) 烟气量和空气量计算

根据燃料成分、烟气成分以及额定出力确定烟气量和空气量。

收稿日期: 2014-07-18; 修订日期: 2014-08-18

作者简介: 宁方华(1989-), 女, 湖南邵阳人, 华中科技大学硕士研究生。

(2) 烟气的酸露点温度 T

根据烟气成分以及文献 [3] 给出的经验公式估算烟气的酸露点温度 T 。

(3) 换热量 Q

根据烟气的出口温度 t''_{gas} 可以根据文献 [4] 中提供的计算公式计算出烟气的出口焓 i''_{gas} , 并根据烟气的进口温度 t'_{gas} 计算出烟气的进口焓 i'_{gas} , 烟气量 V_{gas} 已知, 因此可由公式 $Q = V_{\text{gas}}(i'_{\text{gas}} - i''_{\text{gas}})$ 计算出换热量 Q 。

(4) 空气的出口温度 t''_k

根据步骤 (3) 计算得到的换热量 Q 、空气进口温度 t_k (可以计算出空气的比热容 C_k)、空气量 V_k 和公式 $t''_k = t_k + Q/(C_k \cdot V_k)$ 可计算空气的出口温度 t''_k 。

(5) 循环工质的工作温度 t_i

根据步骤 (2) 计算得到的烟气酸露点温度 T 选择循环工质的工作温度 t_i 。循环工质的工作温度 t_i 一般比烟气酸露点温度 T 高几摄氏度。

(6) 蒸汽量 D

根据步骤 (5) 获得循环工质温度 t_i 后, 可以确定此饱和温度下的饱和压力 p 以及汽化潜热 r , 进而根据换热量 Q 和公式 $D = Q/r$ 计算出蒸汽量 D 。

(7) 烟气侧的换热面积 A

根据换热器设计手册^[5] 和锅炉机组热力计算标准方法^[4], 选定翅片管的形式、翅片几何参数、通道排列以及烟气侧的流速, 根据相关经验公式可以得到烟气侧的换热面积 A 。

(8) 烟气侧的流动阻力 Δp

根据锅炉设备空气动力计算(标准方法) <第三版>、工业炉设计手册(第 2 版) 以及锅炉机组热力计算标准方法中的经验公式^[4 6-7], 可以计算出烟气侧的阻力 Δp 。

(9) 空气侧的换热面积 A

同步步骤 (7), 根据换热器设计手册和锅炉机组热力计算标准方法^[4-5], 选定翅片管的形式、翅片几何参数、通道排列以及空气侧的流速, 根据经验公式可以得到空气侧的换热面积 A 。

(10) 空气侧的流动阻力 Δp

同步步骤 (8) 根据锅炉设备空气动力计算(标准方法) <第三版>、工业炉设计手册(第 2 版) 以及锅炉机组热力计算标准方法中的经验公式^[4 6-7], 可

以计算出空气侧的阻力 Δp 。

(11) 循环工质的流动阻力

根据循环工质的流量以及管径可以确定循环工质的流速, 根据锅炉设备空气动力计算(标准方法) <第三版>、工业炉设计手册(第 2 版) 以及锅炉机组热力计算标准方法中的经验公式^[4 6-7] 可以计算出循环工质的阻力 Δp 。

(12) 不同工况

由计算知道, 烟气的排烟温度与循环工质的流量有关, 并且循环工质的流动阻力也与循环工质的流量有关, 因此计算了在不同流量下, 烟气的排气温度与循环工质的流动阻力, 从而找到最佳循环工质的流量。对于不同负荷和不同的燃料, 烟气量不同, 因此需要进行在不同负荷下(比如 100% 负荷、80% 负荷、60% 负荷) 进行计算。

工程实际应用时, 锅炉烟气余热回收系统的设计计算可利用程序自动进行, 设计的寻优过程可分别采用节能最大化、回收年限最少、工况适应性最广等要求进行, 或者按照不同要求的加权系数综合最优进行。程序的流程框图如图 2 所示。由图 2 可知, 换热面积越小、阻力降越低、回收热量越多, 回收年限越少。参数确定依据: (1) 实测的烟气量和烟气进口温度也随负荷的不同而不同, 一般 $V_{\text{gas}} = a_{\text{负荷}} \cdot V_{\text{全负荷}}$; (2) 烟气的酸露点温度根据燃料不同而不同, $T = 186 + 20 \times 1gV_{\text{H}_2\text{O}} + 26 \times 1gV_{\text{SO}_3}$; (3) 烟气出口温度根据酸露点温度确定 $\begin{cases} t''_{\text{gas}} = T + 10 & \mu_1 = 1 \\ t''_{\text{gas}} = T + 15 & \mu_1 \neq 1 \end{cases}$;

(4) $\Delta t_m = (\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}) / 2.3 \times 1g \frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}}$; (5) P_y 为

附加电耗, $P_y = \frac{\Delta h_y \cdot V_g}{3600 \cdot \eta_y}$ 。图中 a_1 、 a_2 和 a_3 为权重系数, β_1 、 β_2 和 β_3 为参数。

1.2 设计原则和运行参数控制

(1) 烟气侧的流动阻力的许可值由引风机的引力和原烟道确定, 确保不超过原烟道的容限。烟气侧的流动阻力可以通过改变烟气的流速大小来调节。

(2) 空气侧的流动阻力的许可值由鼓风机的压头和原风道确定, 确保不超过原风道的容限。空气侧的流动阻力可以通过改变空气的流速大小来调节。

(3) 循环工质的流动阻力则视循环工质的流量 量大小的改变则可以通过阀门来调节。而定,可以通过改变循环工质的流量大小来调节,流

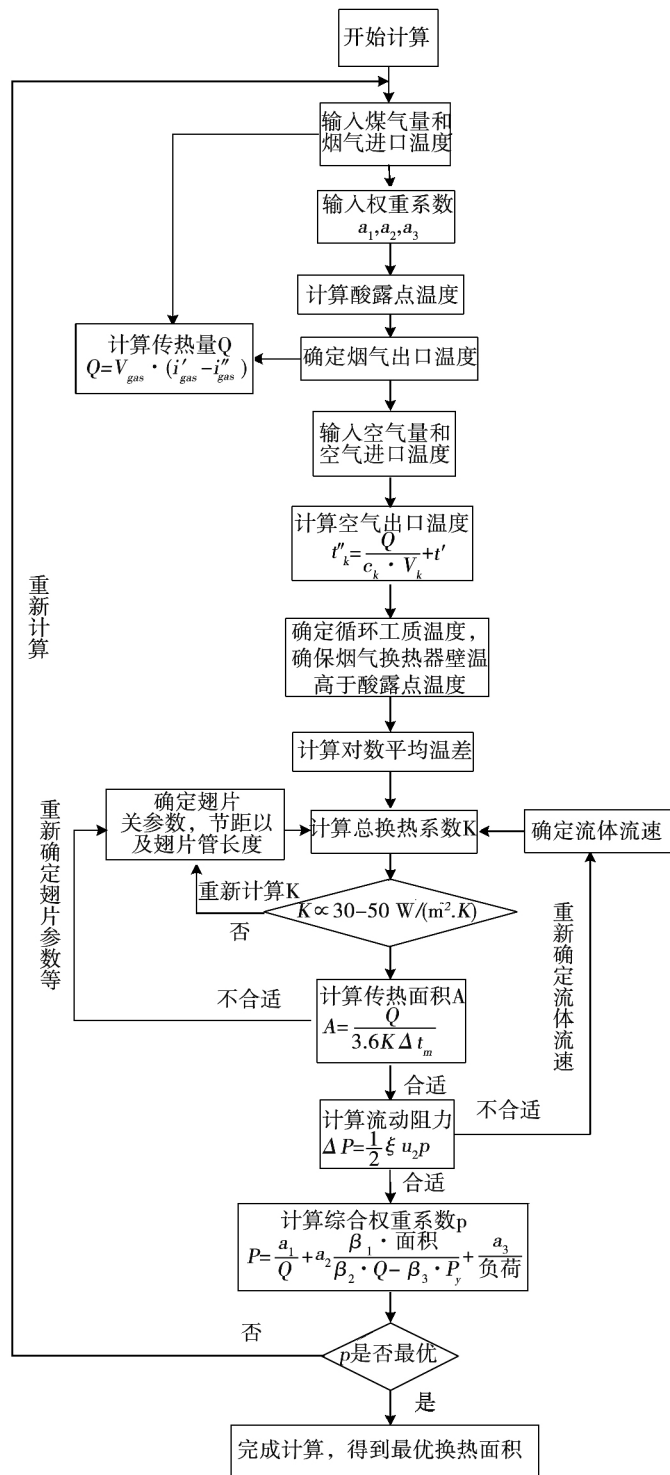


图2 锅炉烟气余热回收系统的设计计算流程图

Fig. 2 The flow chart of flue gas waste heat recycling system design calculation

1.3 设计优化

热回收系统设计是一个繁琐的试算、修正、核算

过程 特别是换热器的选型及设计。因为换热器结构和具体形式影响到流动的阻力和总的换热系数。

根据公式 $Q = KA\Delta t_m$,依据设计要求换热量 Q 可以根据烟气的流量以及烟气的进出口温度确定。换热面积 A 与总传热系数 K 和温压 Δt_m 有关。一般情况下,温压 Δt_m 保持不变,因此换热面积主要与总传热系数 K 有关,而传热系数 K 又与流体流速以及翅片管长度等有关,根据计算知道,流体流速越大,总传热系数 K 越大,而阻力降也将增大,翅片管越长,总传热系数 K 越大,阻力降也越小,因此选取合适的翅片管长很重要。当然,总传热系数 K 也不可以无限制的增大或者无限制的减少,应该选取在一定的范围,具体数值一方面应根据设计要求而定,但是丰富的经验可极大的减少试算的工作量。

经过研究和实践,根据传热学和换热器原理^[8-9],单规翅片管式换热器传热系数的数值以 $30 \sim 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 为宜,该范围可较好满足烟气阻力、换热面积投资等多方面的综合要求。

2 应用实例及效果

为了验证该计算方法的正确性,根据四川钢铁某有限公司提供的设计基础数据和操作数据,对蒸汽产量为 220 t/h 的锅炉设计了两套锅炉烟气余热回收系统,使锅炉排烟温度从 150.5°C 降低至 120°C ,达到节能减排的目的。

烟气换热器和空气换热器热力计算汇总如表 1 所示。

表 1 烟气换热器和空气换热器热力计算汇总

Tab. 1 The thermodynamic calculation
summary of gas heat exchanger and
air heat exchanger

参 数	烟气换热器	空气换热器
烟、空气量 $V/\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	185 000	74 000
烟、空气入口温度 $T_1/^\circ\text{C}$	150.5	20
烟、空气出口温度 $T_2/^\circ\text{C}$	120	103
烟、空气流体速度 $w/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	8.5	9
总传热系数 $\alpha/\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	30	34
换热面积 A/m^2	2 625	1 986
烟、空气阻力降 $\Delta P/\text{Pa}$	373	288
换热量 Q/kW	2 280	2 280

根据测试结果,加装了根据本方法设计的锅炉

烟气余热回收系统后烟气排烟温度由 154.45°C 降到 111.55°C ,比设计温度 120°C 降低 9°C 。改造前后锅炉效率测试结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,由于排烟温度的降低,烟气带走的显热减少,从而减少了排烟热损失,使加热炉的热效率提高,加热炉热效率从 90.42% 提高到 92.7% ,提高了 3% 左右。当加热炉在额定负荷下连续运行时,每小时可节约原煤 560.2 kg 。按每年运行 $8\,000 \text{ h}$,以 $1\,000 \text{ 元/t}$ 标煤计算可以得到年节能效益 448.16 万元 。

表 2 改造前后测试结果

Tab. 2 Test results before and after modified

参 数	改造前	改造后
发电功率 N/kW	50.0	47.76
给水压力 p_{gs}/MPa	10.8	10.61
给水温度 $t_{gs}/^\circ\text{C}$	131.8	125.47
蒸汽压力 p_{zq}/MPa	9.05	9.10
蒸汽温度 $t_{zq}/^\circ\text{C}$	542.8	534.7
排烟处过量空气系数 α_{py}	1.15	1.22
排烟热损失 $q_2/\%$	8.480 4	6.774 5
气体未完全燃烧损失 $q_3/\%$	0.595 5	0.002 0
散热损失 $q_5/\%$	0.500 0	0.523 5
锅炉热效率 $\eta/\%$	90.424 0	92.700 0
排烟温度 $t_{py}/^\circ\text{C}$	154.45	111.55

3 结 论

整理了一套锅炉余热回收系统的设计计算方法及传热系数选取的经验推荐范围。该方法应用于四川某钢铁有限公司。根据该公司提供的设计基础数据和操作数据,对其蒸汽产量为 220 t/h 的锅炉设计了两套锅炉烟气余热回收系统,锅炉排烟温度从 150°C 降低至 120°C ;加热炉热效率从 90.42% 提高到 92.7% 从而验证了本设计计算方法的可靠有效性。

参考文献:

- [1] 郭吉林,张岳良,程 林,等.烟气余热回收利用与节能分析[J].能源与环境,2010,6(24):26-27.
GUO Ji-lin, ZHANG Yue-liang, CHENG Lin, et al. Heat recovery and energy analysis of flue gas [J]. Energy and Environment,

- 2010 6(24): 26-27.
- [2] 熊亚东. 烟气余热回收[P]. 中国专利: CN 201715544 U, 2011-01-19.
- XIONG Ya-dong. flue gas heat recovery [P]. Chinese patent: . CN 201715544 U, 2011-01-19.
- [3] 谢泽民. 高炉热风炉水热媒余热回收[J]. 宝钢技术 1991, 9(4): 45-49.
- XIE Ze-min. Hot water heat recovery of hot blast furnace [J]. Baosteel 1991, 9(4): 45-49.
- [4] 谢泽民. 宝钢1号高炉热风炉水热媒余热回收装置设计[J]. 炼铁 1991, 10(4): 32-35.
- XIE Ze-min. Hydrothermal medium heat recovery unit design of baosteel No. 1 BF stove [J]. Iron 1991, 10(4): 32-35.
- [5] 黄虎城, 张可杨欣. 水热媒烟气换热装置在工业锅炉中的应用[J]. 石油和化工设备 2012(15): 82-84.
- HUANG Hu-cheng, ZHANG Ke-yangxin. Hydrothermal medium heat exchanger device in the application of industrial boiler [J]. Petroleum and Chemical Equipment 2012(15): 82-84.
- [6] 朱洪彬, 张文革, 于萧航 等. 水热媒空气预热器在延迟焦化装置加热炉的应用[J]. 工程技术 2012, 22(4): 87.
- ZHU Hong-bin, ZHANG Wen-ge, YU Xiao-hang, et al. Hydrothermal medium air preheater in delayed coker furnace applications [J]. Engineering and Technology, 2012, 22(4): 87.
- [7] 陈国平. 水热媒技术在连续重整装置加热炉烟气余热回收系统中的应用[J]. 中外能源 2009, 14: 78-81.
- CHENG Guo-ping. Hydrothermal media technology in the application of continuous reformer furnace flue gas heat recovery systems [J]. foreign energy 2009, 14: 78-81.
- [8] 马杰, 岑兆海, 袁焜 等. 天然气净化装置应用水热媒技术探讨[J]. 油气加工 2011, 29(5): 31-36.
- MA Jie, CENG Zhao-hai, YUAN Kun, et al. HTM technology of drinking water applied in natural gas purification device [J]. oil and gas processing 2011, 29(5): 31-36.
- [9] 刘雄, 李传凯, 郝军如 等. 水热媒技术在分散式余热回收系统上的应用[J]. 中外能源 2007, 12: 111-114.
- LIU Xiong, LI Chuan-kai, ZHENG Jun-ru, et al. Hydrothermal media technology applied in the distributed heat recovery system [J]. foreign energy 2007, 12: 111-114.
- [10] 陈文红. 水热媒技术在蒸馏装置加热炉上的应用及改进[J]. 石油化工腐蚀与防护 2009, 26(增刊): 134-138.
- CHEN Wen-hong. The application and improvement of hydrothermal media technology in the distillation unit furnace [J]. Petrochemical Corrosion and protection 2009, 26(Suppl): 134-138.
- [11] 刘志民, 侯京立. 水热媒空气预热器在CFB锅炉上的应用[J]. 工业锅炉 2012, 2(18): 18-20.
- LIU Zhi-min, HOU Jing-li. Water heat medium air preheater applied in CFB boiler [J]. industrial boilers, 2012, 2(18): 18-20.
- [12] 汪琦. 水热媒余热回收系统在歧化装置中的应用[J]. 石油炼制与化工 2011, 42(3): 80-83.
- WANG Qi. Hydrothermal medium heat recovery system applied in disproportionation device [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals 2011, 42(3): 80-83.
- [13] 李钧, 阎维平, 高宝桐 等. 烟气酸露点温度的计算分析[J]. 热力发电 2009, 36(4): 31-34.
- LI Jun, YAN Wei-ping, GAO Bao-tong, et al. Calculation analysis of the acid dew point temperature of the flue gas [J]. Thermal power generation 2009, 36(4): 31-34.
- [14] 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- Thermodynamic calculation standard method of boiler unit [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1976.
- [15] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- QIAN Song-wen. Heat Exchanger Design Handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [16] (苏) C. N. 莫强. 锅炉设备空气动力计算(标准方法) <第三版> [M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- (Su) CN Mo Q. Boiler equipment aerodynamic calculation (standard method) <Third Edition> [M]. Beijing: Electricity Industry Press, 1981.
- [17] 王秉铨. 工业炉设计手册(第2版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- WANG Bing-quan. Industrial Furnace Design Manual (2nd edition) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1996.
- [18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer (fourth edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [19] 刘纪福. 翅片管换热器的原理与设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
- LIU Ji-fu. Theory and design of finned tube heat exchanger [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013.

(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