

大容量火电企业锅炉烟气余热利用技术介绍及分析

刘 勇¹ 邢希东²

(1.大唐国际发电股份有限公司福建分公司, 福建福州, 350003

2.天津大唐国际盘山发电有限责任公司, 天津蓟县, 301907)

摘 要: 利用新的节能技术充分挖掘大型火电厂锅炉排烟损失中的余热是锅炉节能挖潜的重要途径之一。通过对烟气余热利用领域的现状及存在的问题、余热利用技术适用范围、技术原理及具体内容的全面深入的介绍, 改造后能耗及经济效益的分析, 各种方案的优劣势对比, 提出了改造注意的事项。为火电行业锅炉烟气余热利用领域的节能改造提供了依据和经验。

关键词: 余热利用 换热器 相变 凝结水 经济效益

Large-capacity thermal power enterprises boiler flue gas waste heat utilization technology introduction and analysis

Liu Yong¹ Xing Xi dong²

(1. Datang International Power Generation Co., Ltd. Fujian Branch, Fuzhou, Fujian, 350003;

2. Tianjin Datang International Power Generation Co., Ltd., Tianjin, China, 301907)

Abstract: The use of new energy-efficient technology to fully tap the waste heat boiler flue loss of large thermal power plants is an important way of tapping the potential of boiler energy. Comprehensive and in-depth introduction to the technical scope of the technical principles and specific content by the current situation and problems in the field of flue gas waste heat utilization, waste heat, transformation analysis of energy consumption and economic benefits, the advantages and disadvantages of various options compared proposed transformation of attention to the matter. The field of energy-saving boiler flue gas waste heat of thermal power industry provides a basis and experience.

Keywords: waste heat utilization heat exchanger phase transition condensate economic benefits

1 现状和问题

为降低燃料成本, 各企业自 2010 年开始逐步进行非设计煤种尤其是褐煤的掺烧, 随着低热值煤种比例的增加, 锅炉排烟温度呈明显升高趋势, 部分锅炉排烟温度超过设计值 10-30℃。配合脱硝改造目前多台机组正在进行低氮燃烧器和空预器改造, 从部分改造后投运机组运行情况分析, 多台改造后机组排烟温度呈升高趋势。过高的排烟温度导致锅炉效率下降影响机组经济运行的同时对脱硫及电除尘的正常工作也产生了较大影响。由于排烟温度升高, 烟气的量随之增加, 粉尘比电阻升高, 电场的击穿电压降低, 导致电除尘器效率下降、除尘器滤袋的使用寿命缩短, 同时导致脱硫效率降低及脱硫耗水量增加。

2011 年 7 月 29 日国家环保部与国家质量监督检验检疫总局联合发布了新版《火电厂大气污染物排放标准》GB 13223-2011 代替 GB13223-2003, 并于 2012 年 1 月 1 日开始实施。标准中明确规定: 现有火力发电厂 2014 年 7 月 1 日前执行烟囱烟尘排放浓度限值为 30mg/m³(重点地区为 20mg/m³)。为达到国际最新火电厂污染物排放标准要求, 有效降低供电煤耗同时提高电除尘器

效率，提高机组运行经济性，技术改造势在必行。

2 适用范围

根据烟气余热利用的技术并不是适合任何火力发电机组，根据现实运行情况及改造必要性分析，主要适合以下两类机组：

- (1) 对于排烟温度超过设计值或高于烟气酸露点温度 30℃ 以上的机组。
- (2) 脱硫系统未安装 GGH 等烟气降温装置，脱硫塔入口烟温高于 90℃ 较多的机组。

3 烟气余热利用技术原理和内容

根据机组排烟温度、燃煤酸露点温度、除尘器方式和运行情况、烟气排放烟囱等结合尾部烟道实际改造安装空间，确定选择的烟气余热利用技术类型。

3.1 按安装位置分类原理介绍

烟气余热利用装置安装位置可分为电除尘前、脱硫塔前和电除尘前后分别安装 3 种情况介绍原理和内容。

3.1.1 安装在除尘器前的烟气余热利用装置

烟气降温换热装置可复合在电除尘进口烟箱内，此时换热面兼作气流均布装置使用，适用于新建或节能提效改造项目；也可将烟气换热装置独立布置在电除尘器进口烟道内，主要适用于节能提效改造项目

在电除尘器之前加装烟气冷却器除了余热利用功能及脱硫系统节水外还可以延长袋式除尘器的寿命，也是进行“电除尘器增效改造”最经济、最简便易行的措施，其可以提高电除尘器的效率，满足更高的排放指标要求。因为此处应确保不能出现烟气冷凝现象，所有不能对烟气余热达到最大化的利用。

对烟道进行适当扩容设计，同时配置相应的导流引流构件。由于烟气阻力与烟速的平方成正比，烟气流阻增加不明显。增设的烟气余热利用装置阻力不大（约为 300Pa），由于烟温降低，经过引风机的总体烟气体积流量得到降低，因此，增设烟气余热利用装置并不会影响引风机系统的正常运行出力。

电除尘前的烟气温度降低至后，此时烟气中的 SO_3 气体会与水气结合，生成稀硫酸雾气溶胶。由于烟温降低，烟气体积流量相应也降低，烟气含尘质量浓度提高，因而烟尘颗粒的总表面积更大，为硫酸雾的凝结附着提供了良好的条件。由于高质量浓度粉尘对 SO_3 具有良好的包裹吸附作用，烟气中绝大部分被飞灰颗粒吸附，然后被电除尘器捕捉后随飞灰排出，不仅保证了更高的除尘效率，还解决了下游设备（如，湿法脱硫工艺系统装备）防 SO_3 腐蚀的难题。

电除尘器之前加装烟气冷却器应配置电除尘烟温自适应调节系统，通过对烟尘特性变化、烟温变化、电除尘电场运行参数、伏安特性曲线族、反电晕指数、烟尘浊度变化及烟气酸露点等数据的引入及分析处理，与预先设定的基准数据等作出对比，根据对比结果自动调节电动调节阀的

开度来控制换热冷媒体流经换热管排的流量，实现动态调节烟气换热总量，改变换热后的烟气温度，使电除尘器工作在最佳状态，实现保效节能的目的。

针对除尘器前多灰烟气的特性，管束宜采用 H 型或双 H 型翅片管，对于高粘污系数灰分特性的烟气宜采用针翅管。

3.1.2 安装在脱硫塔前的烟气余热利用装置

由于换热器布置在除尘器后，布置在除尘器之后，烟气中 99.9% 灰分被分离，换热管束磨损和腐蚀程度和速度减缓，换热器寿命大大延长。

烟气冷却后直接进入脱硫塔，低温烟气不存在对后续设备造成低温腐蚀危害，可以最大程度的利用烟气余热。

除尘器之后的灰粒子较细，具有一定吸附能力

3.1.3 分二组布置在除尘器前、后烟气余热利用装置（即烟气深度冷却器技术）

综合了以上两种布置型式的优点，在除尘器之前加设的烟气冷却装置，将烟温降低至 120℃ 左右以利提高除尘器效率、降低除尘器能耗，对电袋组合式除尘方式则有利于提高布袋使用寿命、防止布袋高温损坏；除尘器后的烟气冷却器则进一步降低烟气温度，充分吸收利用烟气热能。

“烟气深度冷却器”在充分回收利用排烟余热的同时，又使烟温达到最佳脱硫效率状态，大大减少脱硫塔为降低烟温而进行的喷水冷却水耗。

3.2 按换热对象分类原理介绍

根据烟气余热利用装置冷却器换热对象，可分为加热凝结水和通过中间介质加热锅炉送风 2 种换热方式。

3.2.1 加热凝结水的低压省煤器技术

在锅炉空预器之后的烟道中增加低压省煤器，与凝结水主回路成并联布置，其进口水源取自低压加热器系统，电调阀配合实现低压省煤器进水量的切换与调整，保证受热面最低管壁温度高于烟气露点。进入低压省煤器的凝结水吸收排烟热量后，与温度匹配的低加出口主凝结水汇合。这种设计系统，低压省煤器的给水跨过若干级加热器，实现排烟余热的回用，同时减少了部分汽轮机低压抽汽，降低机组热耗率。

低压省煤器采用防磨耐腐蚀材质，总体采用错列逆流布置，实现介质和烟气逆向流动，一方面提高低压省煤器的传热系数，减少布置空间；另一方面，可使排烟温度的降低不受介质出口水温的限制，最大限度地降低排烟温度。低压省煤器现场布置及系统布置如图 1 图 2:

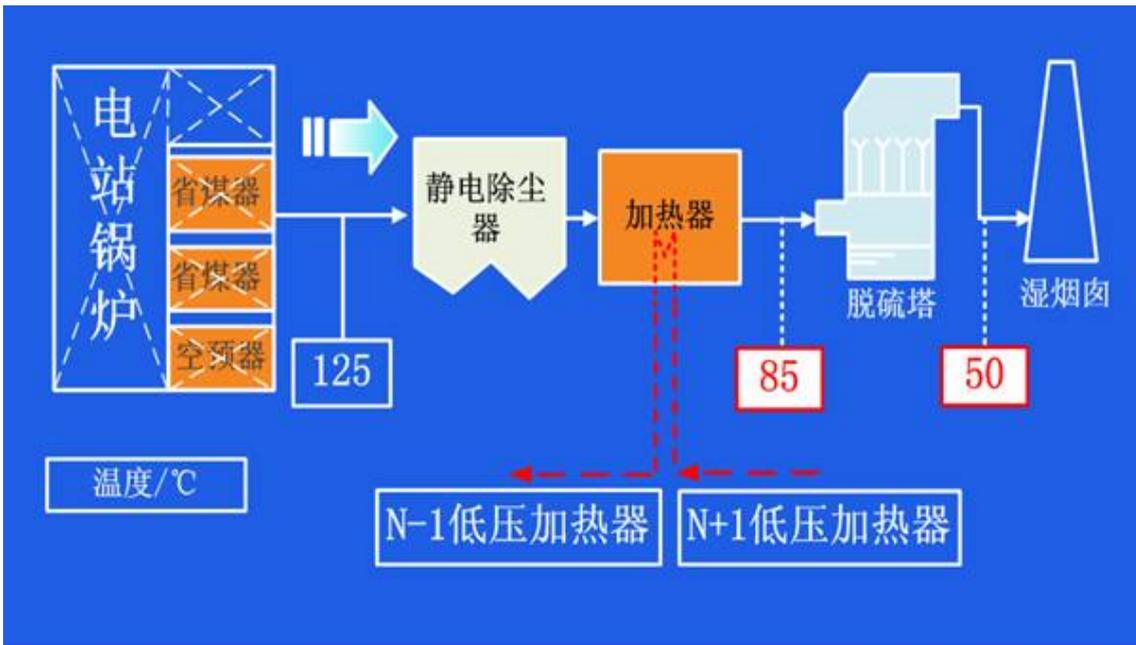


图1 低压省煤器现场布置示意图

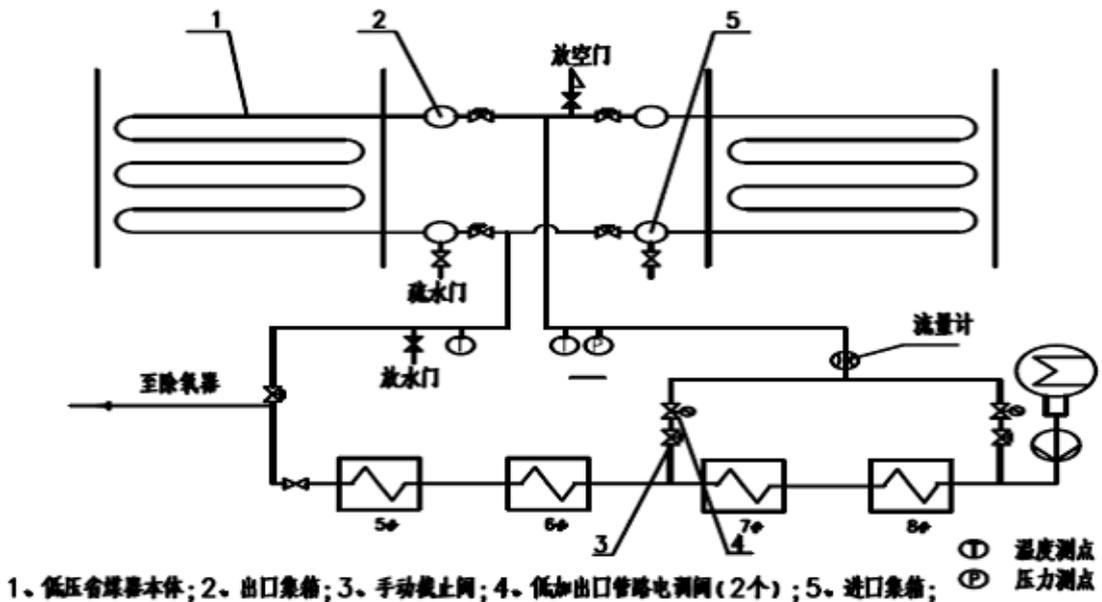


图2 低压省煤器系统布置示意图

3.2.2 加热送风的复合相变烟气余热换热器

加热送风的复合相变烟气余热换热器是在多根并联的密闭管束构件内利用工质相变传热，相变换热器下段吸收烟气热量汽化；由于比重差的原因，气态工质在相变换热器上段凝结放热加热送风机或一次风机出口空气；气态工质凝结变成液态重新回到相变换热器下段吸收烟气热量，这样往复循环，完成了把热量从高温热体向低温工质单向导热过程。复合相变烟气换热器工作原理如图3 如所示：

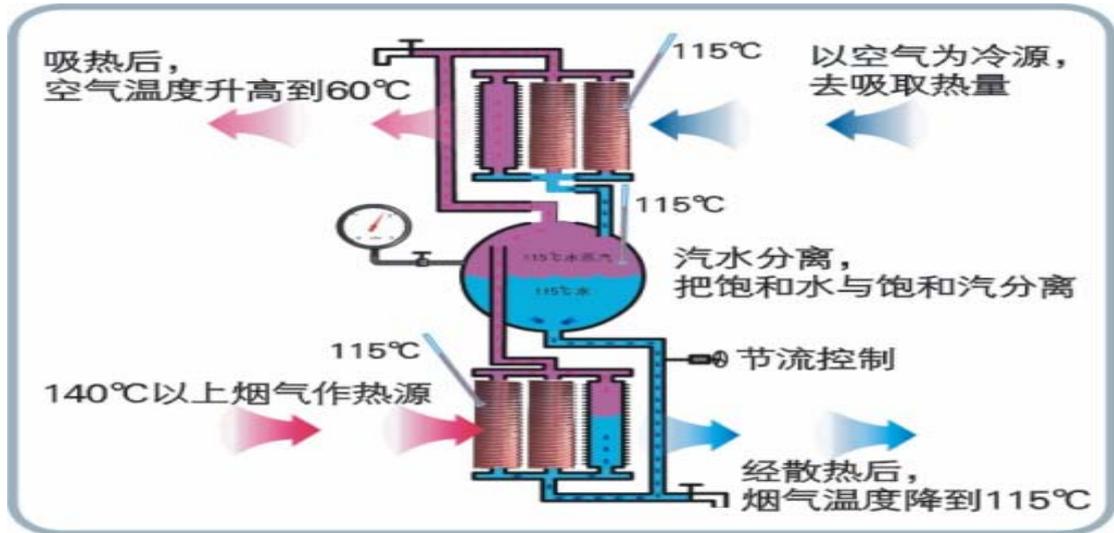


图3 复合相变烟气换热器工作原理如图2

换热器需安装于水平烟道，可安装于除尘器前或者除尘器后；如果安装在除尘器前，烟气入口段长度有一定要求，通过流场数值模拟设计导流板解决入口段烟气流场不均匀问题。其现场布置位置如图4所示。

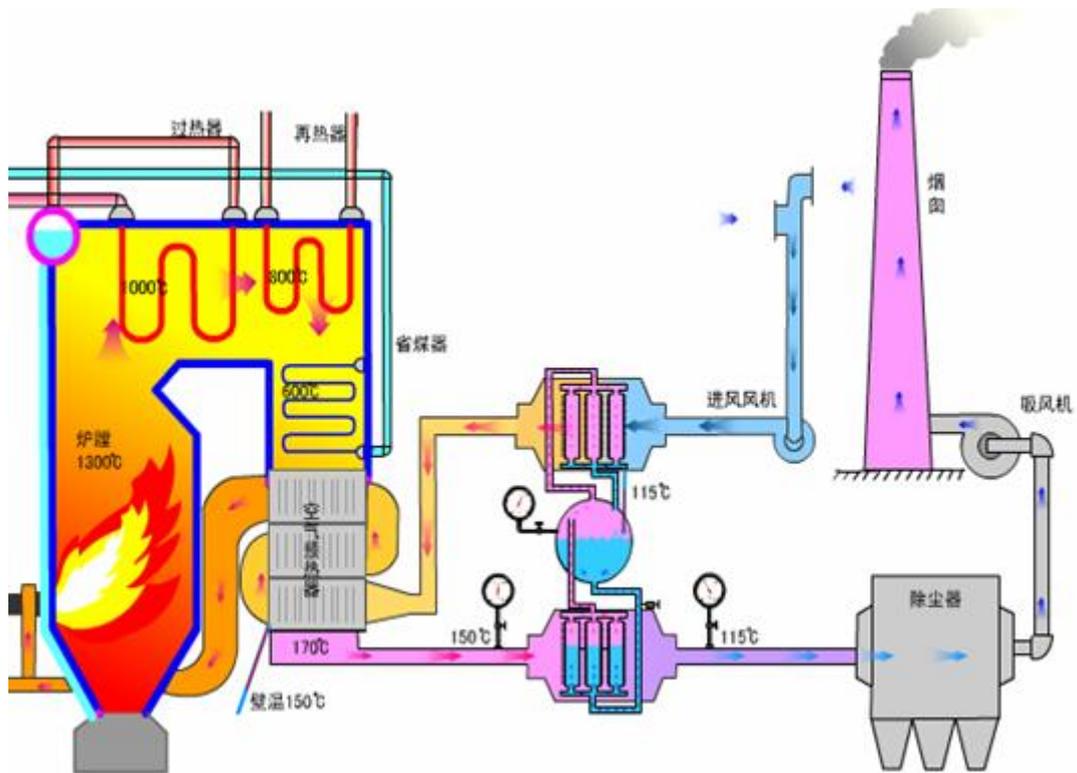


图4 复合相变烟气换热器现场布置位置示意图

换热器由于采用了二次换热的方式，相变介质的量有限，一旦由于磨损产生泄漏，不会危及除尘器的运行。气液混合物重量有限，一般800kg左右，一旦泄漏不会对后续设备造成毁灭性打

击。

该换热器可通过壁温智能调节，实现排烟温度仅比最低壁面温度高15℃左右，在确保换热器安全的基础上最大可能的提高了节能收益，并能自动适应锅炉的燃料品种以及负荷变化。从机理上解决了酸露腐蚀问题，最低壁面温度不随锅炉运行的工况发生变化，设备非常安全。

该换热器在保留热管换热器高效传热特性的同时，通过适时排出不凝气体有效解决壁温可调式智能换热器可能出现的老化问题，大大延长设备使用寿命。

4 项目投资和节能效益

4.1 加热凝结水的低压省煤器技术

(1) 项目投资

项目总投资包括设备本体费用、辅助设备费用、安装调试费用等，按 300MW 机组低压省煤器入口排烟温度 150℃，出口排烟温度 130℃，整个项目投资在 750 万元左右。

(2) 能耗分析

改造后锅炉排烟温度降低 20℃，将此热量回用至低压加热器，根据测算，折合降低供电煤耗 1.5g/kWh。

(3) 节能效益

改造后排烟温度降低 20℃，根据测算，则供电煤耗降低 1.5g/kWh。按机组年供电量 15 亿 kWh，标煤单价 800 元/吨计算，则每年节能收益 Q 为： $Q=15 \times 1.5 \times 800 / 100 = 180$ （万元），静态回收期约为：4.2 年。

4.2 加热送风的复合相变烟气余热换热器技术

(1) 项目投资

项目总投资包括设备本体费用、辅助设备费用、安装调试费用等，按 300MW 机组，烟气余热换热器入口烟气温度 150℃，排烟温度 138℃，整个改造项目投资费用在 850 万元左右。

(2) 能耗分析

改造后排烟温度降低 12℃，将此热量回用至锅炉热风系统，根据测算，折合降低供电煤耗 2.59g/kWh。

(3) 节能效益

改造后排烟温度降低 12℃，根据测算，则供电煤耗降低 2.59g/kWh。按机组年供电量 15 亿 kWh，标煤单价 800 元/吨计算，则每年节能收益 Q 为： $Q=15 \times 2.59 \times 800 / 100 = 310.8$ （万元），静态回收期约为：2.8 年。

5 改造注意事项

烟气余热利用技术原理相对简单，但是系统设计和实际应用比较复杂，从设计、安装、运行各方面都有很多重要的注意事项，总结如下：

(1) 设计过程应科学地计算酸露点，充分考虑受热面防结露腐蚀问题。确保受热面管壁温度可调，设计中要有可靠的受热面进水温度及进水流量调节手段，控制值选取合理以保证烟气侧

金属壁面温度高于烟气酸露点温度，防止结露腐蚀。

(2) 安装余热利用装置后会增加烟道（风道）阻力，系统改造前需对烟气系统阻力及风机压头进行核算。考虑装置停运时系统阻力增加值。

(3) 改造项目设计时应收集一定统计期内的实际燃煤种工业成分与热值分析结果。分析得出与本项目密切相关的收到基低位热值、收到基全硫、收到基全水、收到基灰分的分布状况。其中灰分关系到磨损与积灰，水分关系到低温腐蚀与飞灰粘结。根据上述煤质资料，组合出典型煤种用于改造项目的设计、计算与分析，得出排烟基准水露点的平均值和排烟基准酸露点的平均值的范围。

(4) 由于余热利用节能装置系统属于低品位余热动力回收利用，余热做功能力差，所回收的余热部分会以冷源损失形式排放，计算时应进行凝汽器变工况计算。计算改造项目凝汽器热负荷变化后对机组排汽压力的影响，进而根据汽轮机变工况计算，得出对机组出力等的影响。设计时应计算不同负荷分水率与煤耗变化关系，确定最佳分水率，对投运后运行调整提供依据。

(5) 应采取先进工艺和措施，采用耐磨、耐腐蚀材料制造低温（压）省煤器，满足低温（压）省煤器抗磨损、抗腐蚀的需求，保障低温（压）省煤器使用寿命。应充分考虑受热面腐蚀、磨损等因素，换热管管壁厚度不应小于 5mm，设计使用寿命不低于 6 年。为降低磨损应适当降低烟气流速（但只降低到不堵灰、不沉降、换热系数不减少为准），设计时增加防磨瓦、导流板或采取锰钢、镍钢等特殊防磨材料。对较为畸形的烟道内气固两相流进行数值模拟，优化导流板和均流板设计。

(6) 确保换热面在结构设计上不易积灰，并且在一定流速下可实现自清灰。优化横向节距和纵向节距，提高自清灰效果；非冷凝受热面可以选用燃气脉冲或压缩空气吹灰，冷凝受热面可以选择蒸汽或燃气脉冲吹灰。停炉时用水冲洗可以使积灰得到彻底的清除。

(7) 烟道内部的烟气动力场均应经过数值计算和优化处理，防止烟气偏流的发生；设计上避免出现烟气走廊、烟气偏流、局部漩涡；在所有弯头、烟气走廊部分，设计安装防磨设施，以及第一排管迎烟风侧布置防磨措施。

(8) 水侧阻力应合理设计，根据级间压差和设计方案，烟气余热利用节能装置换热系统水侧应预先考虑增压泵设计（一用一备），确保换热装置运行达到设计要求。

(9) 由于部分机组空预器实际运行中存在两列烟气温度和流量偏差较大现象，使得进入电除尘的烟气温度和流量不均匀，影响除尘效率。建议两列设计时能实现两列流量单独控制，主回路及各分组管路前后均应设置调节阀。

(10) 为确保低负荷时水动力安全性，设计时可考虑按前后分段设计，在低负荷、排烟温度较低时，部分换热装置工作，这样可确保低负荷时换热管内的水流速达到要求，而不会造成整个换热系统停用。

作者简介:

通讯作者（第二作者：邢希东）联系方式；

通讯地址：天津蓟县 天津大唐国际盘山发电有限责任公司 发电部 邮编：301907

电话：13370313730 E-mail: ps54321@189.cn