

[节能降耗]

基于余热回收的火力发电厂热力系统节能设计

文/曹昊 高宇 彭彬彬 肖佳元

中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司

余热回收技术通过对排烟余热、冷却水余热及设备表面散热的高效回收利用，有效提升热力系统的能源利用率。文章聚焦于火力发电厂热力系统中的余热回收原理及其在节能设计中的应用，旨在运用先进的热能回收技术、热交换优化，提高系统的热效率，降低能耗，实现经济和环境效益的双赢。

在全球能源短缺和环境问题日益突出的背景下，火力发电厂的节能减排已成为热能工程领域的研究热点。余热回收作为提高热效率和减少废热排放的重要手段，通过高效热力系统集成技术，将锅炉、汽轮机和冷凝器等设备排放的废热进行再利用，实现能源的高效循环利用。本文旨在探讨火力发电厂热力系统中余热回收的设计与优化，通过对余热资源的深度挖掘，结合先进的热回收技术和智能控制手段，提出节能设计方案，以提升系统整体能效，减少能源消耗。

余热回收原理

余热回收是通过热力系统中的热能梯级利用，将火力发电厂中低温余热资源转化为可利用的热能形式，从而提高能源利用效率的关键技术。火力发电过程中，锅炉排烟、汽轮机排气和冷凝器冷却水中都蕴含大量余热，传统方式下这些热能大多未能充分利用^[1]。为提高系统的热效率，余热回收装置通过换热器等设备，将这些低品位热能回收，并重新引入热力循环或其他工艺过程。

具体而言，锅炉燃烧后产生的高温烟气，经过烟气余热回收装置，热量传递给水或空气等低温工质，从而降低排烟温度，减少热损失。回收的热量

可以用于加热给水、预热空气或其他需要热能的过程，进一步提升发电效率。在此过程中，增压泵将自来水利用换热器进行加热，并输送至保温水箱，确保热水在管网传输中保持较高温度，减少热量损失。通过截止阀对热水流量进行调节，将回收的余热供应至宿舍区等用户端，满足生活用热需求。同时，回收的低温余热可经过热泵或其他升温装置进一步提高温度，实现热能梯级利用。这种余热回收过程，可以减少燃料消耗，显著降低废气排放，提高火力发电厂的整体热效率。在系统设计中，优化的余热回收方案能够平衡系统稳定性与节能效果，进一步推动发电厂的能源利用率提升。火力发电厂烟气余热回收系统示意图如图1所示。

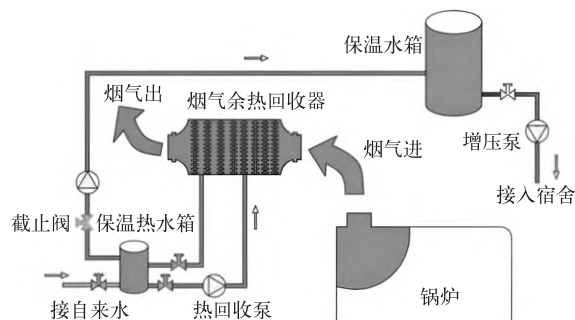


图1 火力发电厂烟气余热回收系统示意图

基于余热回收的火力发电厂热力系统节能设计方案

1. 余热回收潜力分析

火力发电厂在运行过程中，锅炉燃烧产生的高温烟气、汽轮机排气以及循环水冷却等环节都会释放出大量余热。传统的热力系统由于设计上的局限性，这部分余热未被充分利用，导致了系统整体热效率的下降^[2]。因此，分析各个环节的余热回收潜力，合理设计余热回收方案，有助于实现节能降耗。

以锅炉排烟系统为例，锅炉排放的烟气温度通常在150~200℃之间，其中蕴含着大量的显热和潜热。为量化余热回收潜力，首先对排烟中的显热进行分析。锅炉排烟的质量流量 $\dot{m}_g$ 、比热容 c_p 、初始温度 T_{in} 和最终温度 T_{out} 是影响显热回收的重要参数。假设烟气流量为100 t/h，比热容为1.005 kJ/(kg·K)，排烟初始温度为150℃，通过安装换热器将排烟温度降至90℃，显热回收量为

$$Q_g = \dot{m}_g \times c_p \times (T_{in} - T_{out}) = 100\,000 \times 1.005 \times (150 - 90) = 6\,030\,000 (\text{kJ/h}) \quad (1)$$

计算结果表明，在降温60℃的条件下，可以回收约6 030 000 kJ/h的显热，这部分热量可以用于预热空气或加热循环水，提高系统热效率。同时，排烟中的水蒸气含量也是潜热回收的关键。假设排烟中水蒸气的质量分数 x 为10%，水蒸气的凝结潜热 λ 为2 260 kJ/kg。经过冷凝换热器将排烟温度降至50℃以下，可以促使水蒸气冷凝并回收潜热。潜热回收量为

$$Q_{\text{latent}} = \dot{m}_g \times x \times \lambda = 100\,000 \times 0.1 \times 2\,260 = 22\,600\,000 (\text{kJ/h}) \quad (2)$$

通过计算可知，潜热回收量达22 600 000 kJ/h，表明通过有效回收排烟中的潜热，能够显著提升系统的热能利用率。通过对火力发电厂锅炉排烟系统中显热和潜热的详细计算分析，表明余热回收在提高热力系统整体效率方面具有巨大潜力。有效回收显热和潜热，可以减少热量损失，为系统提供额外的热能资源。合理配置换热器和冷凝设备能够进一步优化热能利用效率，显著提升系统性能，从而实现节能降耗的目标。

2. 过热蒸汽回收利用

基于余热回收潜力分析，过热蒸汽回收利用技术进一步挖掘系统中的热能利用潜力^[3]。首先，燃

气锅炉燃烧产生的高温烟气经过余热回收器，在温度为120~200℃的条件下进行热量回收，余热回收器将烟气中的热量传递给锅炉补水，生成高温水用于后续热能转换。高温烟气在余热回收后排放至外部环境。为计算余热回收的效率，设定进入余热回收器的烟气焓为 h_{in} ，排出的烟气焓为 h_{out} ，烟气质量流量为 $\dot{m}_{gas}$ ，热回收效率为

$$\eta_h = \frac{\dot{m}_{gas} \times (h_{in} - h_{out})}{\dot{m}_{water} \times (h_{water,out} - h_{water,in})} \quad (3)$$

式中， $\dot{m}_{water}$ 为水的质量流量， $h_{water,out}$ 和 $h_{water,in}$ 分别为补水进入和加热后的焓值。

该公式计算了余热回收器在烟气与水之间的热量转移效率。随后，经过加热的高温水通过水泵输送至分气缸，在此过程中，分气缸对水中的热量进行再次利用，产生的高温蒸汽可利用供气系统输送至工业用汽设备，实现热能的循环利用。为进一步评估蒸汽的能量利用，假设压缩后蒸汽的功率输出为 W_o ，可由以下公式推导

$$W_o = \dot{m}_{steam} \times (h_{steam,out} - h_{steam,in}) \times \eta_t \quad (4)$$

式中， $\dot{m}_{steam}$ 为蒸汽的质量流量， $h_{steam,out}$ 和 $h_{steam,in}$ 分别为压缩前后的焓值， η_t 为汽轮机的机械效率。

该公式反映了在对蒸汽进行压缩和热回收后，通过增大焓值差，能够显著提高汽轮机的输出功率，最大化余热回收的利用效率。同时，分气缸中多余的蒸汽可以进入热交换器，与冷水进行热交换，生成高温供热水用于厂区的生产或供暖^[4]。整个系统的运行由控制箱进行全面监控，通过对温度、压力和流量等参数的实时调节，确保余热回收和过热蒸汽利用的效率和安全性，最终实现系统的节能降耗和热能的最大化利用。过热蒸汽回收利用示意图如图2所示。

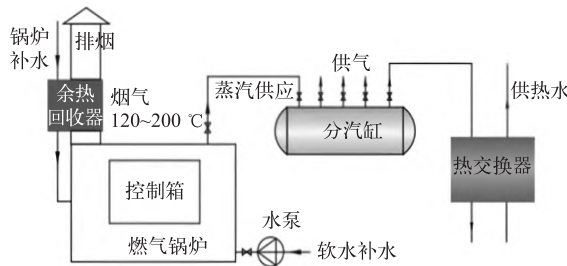


图2 过热蒸汽回收利用示意图

3. 高温烟气余热利用

在完成上述节能方案的基础上，“余热回收潜

力分析”模块通过热平衡计算和能量审计，确定了烟气在排烟温度区间内的高回收潜力，并优化了余热锅炉的换热面积和传热系数，确保热量回收的高效性；“过热蒸汽回收利用”模块通过中高压蒸汽驱动汽轮机和工艺加热，进一步回收高温烟气的剩余能量。在此基础上，高温烟气余热利用通过多级换热设计，实现烟气余热的梯级利用，以提升热力系统的整体能效。

首先，高温烟气从锅炉尾部排出时，温度在350~450℃之间，此时进入一级烟气余热锅炉^[5]。该设备主要由螺旋管束式换热器组成，能够在高温条件下实现烟气与给水的热量交换，将给水加热至接近饱和状态，生成压力约为2.5 MPa的中压蒸汽，用于驱动中压汽轮机发电。在一级换热完成后，烟气温度降低至约250~300℃，随后进入二级烟气换热器，该设备采用板式换热结构，利用高传热系数材料进一步降低烟气温度至150~200℃，同时将热量传递给工艺用水，使其温度提升至95℃，用于厂内供暖或其他低温热需求。接着，剩余的低温烟气通过余热蒸发器进行第三阶段的热量提取，蒸发器内置强化传热管道，能够高效回收剩余的低位热能，输出的热水温度控制在60~70℃，用于低温区域供热或循环水系统的补水预热。各阶段换热设备均配备流量调节阀和自动控制系统，根据烟气温度和流量的变化实时调整换热效率，确保余热回收的稳定性和经济性，同时利用温度传感器和热电偶监测各节点的温度变化，结合PLC控制系统动态优化运行参数，实现高温烟气余热的梯级利用。整个流程设计注重不同温度区间余热的分级回收和合理分配，通过科学配置余热锅炉、板式换热器和余热蒸发器等设备，实现了烟气余热的高效回收与再利用，大幅提高了火力发电厂热力系统的整体热效率。

案例分析

1. 工程概况

华东地区一座600 MW超临界燃煤火力发电厂，热力系统主要由锅炉、汽轮机和凝汽器组成。在发电过程中，锅炉燃烧产生的高温烟气和汽轮机排放的过热蒸汽未充分利用，导致热能浪费和环境热污染。为提升发电厂热效率，项目引入余热回收

系统，安装了余热锅炉、烟气冷凝换热器和蒸汽再热装置，对烟气和蒸汽余热进行回收再利用。通过优化烟气分级回收、循环水温度控制以及换热器布置，减少管道热损失，提升系统热平衡。该改造为火力发电厂节能降耗提供了有效技术支持，同时为同类项目实施提供了参考。

2. 设计方案

本设计方案针对火力发电厂余热回收与节能改造，整体优化余热回收系统，实现节能目标。首先，根据余热回收潜力分析，对厂区内高温烟气、过热蒸汽及冷却水等各主要热源进行评估，通过热力学参数分析确定最优回收点。基于分析结果，设计余热回收系统的整体布局，合理配置热交换设备，确保热源的梯级利用，最大化系统热效率；在过热蒸汽回收利用环节，采用双级蒸汽轮机系统，通过分级利用蒸汽热能，配置高压与中压蒸汽轮机实现多次膨胀发电，提升整体能量转化效率；对于高温烟气余热的利用，设计方案采用多级热换热器与余热锅炉的联合使用方式，利用逐级降温技术高效回收烟气热能。系统还集成了自动化调节装置，对热回收过程中的各项工艺参数进行智能控制，确保热交换设备的高效运行和能量利用的最大化。

3. 节能效果分析

在节能效果分析中，通过对火力发电厂实施余热回收系统前后的能效数据进行对比，评估其节能效果。选取综合热效率、单位发电煤耗、排烟温度和厂用电率作为节能性能指标，对系统优化前后的运行状态进行评估。节能优化效果对比见表1。

表1 节能优化效果对比

节能指标	优化后	优化前
综合热效率 (%)	44.31	30.75
单位发电煤耗[g/(kW·h)]	285.56	334.51
排烟温度/℃	102.58	172.32
厂用电率 (%)	5.69	8.97

由表1得知，在综合热效率方面，优化后的热效率由原来的30.75%大幅提升至44.31%。这一变化表明，通过引入余热回收技术，系统对燃料热能的利用率显著提高，达到了更高的节能水平。热效率的提升意味着同等燃料消耗下可以发出更多的电力，大幅降低了能源浪费；单位发电煤耗显著减少，从优化前的334.51g/(kW·h)降低至285.56 g/(kW·h)。

这表明在余热回收系统的作用下，单位发电量所需的煤耗减少了约15%，反映了燃料利用效率的提高，降低了燃料成本并减少了温室气体排放；在排烟温度方面，优化后的排烟温度从172.32℃降至102.58℃，显示出余热回收系统在降低烟气热损失方面的显著成效；厂用电率由8.97%下降至5.69%，说明在引入节能优化后，电厂内部设备的耗电量显著减少，提高了净发电量输出。

结束语

综上所述，基于余热回收的火力发电厂热力系统节能设计通过高效利用高温烟气、过热蒸汽等余热资源，显著提升了热力系统的能量利用率，降低了整体热损失。结合先进的热力循环优化技术与高效换热器的集成应用，有效减少了发电过程中的燃料消耗，实现了环境排放的显著减量。本研究提出的节能设计方案在提升热电联产系统的经济效益和

能源效率方面具有显著优势，为火力发电厂的节能改造提供了理论依据和实践指导。**EA**

(收稿日期：2024-10-15)

参考文献

[1] 申亚学，杭光飞，秦伟．火力发电锅炉节能降耗的问题分析及对策措施[J]．科技视界，2024，14(13)：63-66．

[2] 武鑫．火力发电厂热动力系统优化与节能改造研究[J]．自动化应用，2024，65(7)：233-235．

[3] 别倩雯，赵燕，欧阳松．火力发电厂燃煤发电机组烟气余热回收利用技术研究[J]．价值工程，2024，43(10)：131-133．

[4] 孟肖楠．火力发电厂电气节能降耗技术研究[J]．科技资讯，2024，22(2)：94-96．

[5] 梁少华．火电厂热力系统优化与节能改造分析[J]．中国战略新兴产业，2022(27)：29-31．

