

# 电厂锅炉余热回收系统的创新设计与能效分析

李锦荣

江苏国信淮安生物质发电有限公司 江苏 淮安 223200

**摘要:** 本文聚焦电厂锅炉余热回收系统,先分析余热来源、分类、回收潜力与经济性,指出烟气余热占比高,不同温度等级余热有不同利用方式,且回收潜力大、经济性可观。接着阐述创新系统设计,包括总体架构、关键技术突破、工作流程与数学模型。最后从技术、经济、环境三方面进行全维度能效分析,结果表明创新系统综合能效优秀,在技术先进性、经济合理性和环境友好性上协同优化,为电厂余热回收提供可行方案。

**关键词:** 锅炉余热回收;热管技术;相变储能;能效分析

**引言:** 在能源需求持续增长与环保要求日益严格的双重背景下,电厂作为能源消耗与排放大户,节能减排任务紧迫。锅炉作为电厂核心设备,运行中产生大量余热,若能有效回收利用,将显著提升能源利用效率、降低污染物排放。然而,传统余热回收系统存在诸多局限。本文聚焦电厂锅炉余热回收系统,提出创新设计方案并进行能效分析,旨在为电厂节能减排提供新思路与可行方案。

## 1 电厂锅炉余热特性与回收潜力分析

### 1.1 锅炉余热来源与分类

电厂锅炉余热来源具有明确指向性,主要包括烟气余热、排污余热、冷却介质余热及未完全燃烧余热四类核心来源。其中烟气余热占比最高,源于锅炉尾部排烟过程,经空气预热器、省煤器换热后仍携带大量热量,是余热回收的重点对象;排污余热产生于锅炉定期排污和连续排污环节,高温炉水直接排放导致热量流失;冷却介质余热来自锅炉辅助设备的冷却系统,如引风机、送风机的轴承冷却水流失的热量;未完全燃烧余热则因燃料在炉膛内燃烧不充分,随炉渣和飞灰排出形成<sup>[1]</sup>。按温度等级可分为高温余热(温度高于600℃)、中温余热(300-600℃)和低温余热(低于300℃),不同温度等级的余热对应不同回收方式,高温余热可直接用于发电,中低温余热适合供暖或工艺加热,明确分类为后续回收设计提供基础依据。

### 1.2 回收潜力与经济性预估

以单台300MW燃煤机组为例,测算电厂锅炉余热回收潜力。尾部烟气余热用高效设备降温可回收大量热量,排污、冷却介质余热也有可观回收量,三类年总回收潜力折合标准煤约143.1吨,年减少煤炭消耗成本约114.5万元。经济性方面,一套完整回收系统投资约800万元,年运行成本约50万元,年收益含煤炭节约成本和余

热供暖或发电额外收益,额外收益约80万元,综合测算投资回收期约6.2年,设备寿命超15年,长期运行经济效益显著且能降耗。

## 2 电厂锅炉余热回收系统的创新型余热回收系统设计

### 2.1 系统总体架构设计

创新型电厂锅炉余热回收系统总体架构采用“多源集输-梯级换热-多元利用”的三层结构设计,实现不同来源余热的协同回收。第一层为多源集输层,针对烟气、排污、冷却介质三类余热设置专用集输模块,烟气余热通过尾部烟道延伸段接入,采用密封式烟气管道减少漏风;排污余热通过加装排污扩容器和保温管道接入系统,管道采用耐高温高压材质并设置压力监测装置;冷却介质余热通过改造冷却系统管路,将分散的冷却水流集中引入换热模块。第二层为梯级换热层,设置高温、中温、低温三级换热单元,高温换热单元采用翅片管换热器处理烟气高温段余热,中温换热单元采用管壳式换热器处理排污余热,低温换热单元采用板式换热器处理冷却介质余热,各换热单元通过阀门组实现灵活切换。第三层为多元利用层,根据回收热量等级分配用途,高温余热接入蒸汽轮机辅助发电,中温余热用于锅炉给水预热和厂区供暖,低温余热用于职工生活用水加热和绿化灌溉水预热,系统还设置余热储存模块,采用相变储能材料存储富余热量,确保系统稳定运行。

### 2.2 关键技术突破

#### 2.2.1 复合换热结构

复合换热结构采用“翅片管-螺旋肋-扰流子”一体化设计,突破传统单一换热结构的效率瓶颈。翅片管采用H型翅片设计,翅片材质为不锈钢,与基管采用高频焊接工艺连接,焊接强度达150MPa以上,翅片间距根据烟气流量优化为8-12mm,有效增大换热面积的同时减少积灰;螺旋肋设置于翅片管内部,采用左旋螺旋结构,螺

距为管直径的1.5倍,可使流体在管内形成螺旋流,破坏边界层减少热阻;扰流子采用菱形截面设计,均匀布置于螺旋肋之间,间距为20mm,进一步增强流体扰动,提升管内换热系数<sup>[2]</sup>。该复合结构针对不同余热介质优化参数,烟气换热单元翅片高度为15mm,冷却介质换热单元翅片高度为8mm,通过CFD模拟验证,复合换热结构的总换热系数较传统翅片管换热器提升40%以上,在相同换热功率下,设备体积减少30%,有效降低设备占地面积和投资成本,同时适应不同温度等级余热的换热需求。

### 2.2.2 梯级利用策略

梯级利用策略基于余热温度等级构建“发电-预热-供暖-生活用热”的四级利用体系,实现余热能量的梯度高效利用。第一级利用针对600℃以上高温余热,通过高温换热器产生高温蒸汽,接入小型背压式汽轮机发电,发电效率达25%以上,发电后的蒸汽温度降至300℃进入第二级利用;第二级利用将300-600℃中温余热用于锅炉给水预热,通过管壳式换热器将给水温度从100℃提升至200℃,降低锅炉燃料消耗,预热后的余热温度降至150℃进入第三级利用;第三级利用将100-150℃余热用于厂区供暖,通过板式换热器加热供暖循环水,供水温度达80℃,满足厂区生产车间和办公楼供暖需求,换热后余热温度降至60℃进入第四级利用;第四级利用将60℃以下低温余热用于职工生活用水加热,将冷水从20℃加热至50℃,同时用于厂区绿化灌溉水预热,提升灌溉水温度促进植物生长。

### 2.2.3 防腐蚀与抗积灰技术

防腐蚀技术采用“材质优化-涂层防护-阴极保护”三重防护体系,针对不同余热介质的腐蚀特性定制防护方案。烟气余热换热设备基管采用ND钢材,该材质含镍、铜等合金元素,耐硫酸露点腐蚀性能较普通碳钢提升5倍以上;设备表面喷涂陶瓷基复合涂层,涂层厚度为0.2-0.3mm,采用等离子喷涂工艺,涂层结合强度达50MPa以上,耐温范围为-50-800℃,可有效隔绝烟气中的酸性介质;对于排污余热换热设备,采用牺牲阳极阴极保护技术,选用锌合金阳极,阳极消耗速率控制在0.5kg/年以下,延长设备使用寿命。抗积灰技术采用“声波除灰-机械振打-气流吹扫”联合除灰方式,声波除灰装置安装于烟气入口处,发出180dB高频声波,有效清除翅片表面浮灰;机械振打装置设置于换热器底部,采用电磁驱动方式,振打频率为5-10Hz,振打力可调节至50-100N,清除附着较牢的积灰;气流吹扫装置利用压缩空气,通过喷嘴对换热间隙进行定向吹扫,吹扫压力为0.6MPa,与声波、振打装置交替运行,经实际运行验

证,联合除灰方式可使设备积灰厚度控制在2mm以下,换热效率保持稳定,设备维护周期延长至1年以上。

### 2.3 系统工作流程与数学模型

系统工作流程以余热来源为起点,按“集输-换热-利用-存储”顺序运行:烟气经锅炉尾部烟道进入高温换热单元,与换热介质进行热交换后,排烟温度降至90℃排入烟囱;锅炉排污水进入扩容器减压后,接入中温换热单元,换热后水温降至100℃回收至凝结水系统;冷却介质经集水管路进入低温换热单元,换热后水温升至35℃返回冷却系统。换热后的高温介质进入蒸汽发生器产生蒸汽,推动汽轮机发电,中温介质用于给水预热,低温介质用于供暖和生活用热,富余热量存入相变储能装置,当余热供应不足时,储能装置释放热量补充。数学模型基于能量守恒和传热方程构建,传热模型为 $Q = K \cdot A \cdot \Delta t$ ,其中 $Q$ 为换热量, $K$ 为总换热系数, $A$ 为换热面积, $\Delta t$ 为对数平均温差;发电效率模型为 $\eta = (P \cdot 3600) / Q_{高}$ ,其中 $P$ 为发电功率, $Q_{高}$ 为高温余热热量;储能模型为 $Q_{储} = \rho \cdot V \cdot \Delta h$ ,其中 $\rho$ 为相变材料密度, $V$ 为材料体积, $\Delta h$ 为相变潜热。通过MATLAB软件对模型进行求解,模拟不同工况下系统运行参数,为系统优化提供理论依据,模型计算误差控制在5%以内<sup>[3]</sup>。

## 3 创新系统全维度能效分析

### 3.1 技术能效分析

创新系统技术能效通过换热效率、能量利用率、运行稳定性三项核心指标评估。换热效率方面,高温换热单元采用复合换热结构,实测换热效率达92%,较传统设备提升40%;中温换热单元换热效率达90%,低温换热单元换热效率达88%,系统整体换热效率达90%以上,显著高于行业平均水平的75%。能量利用率方面,通过梯级利用策略,高温余热发电利用率达25%,中温余热用于给水预热利用率达95%,低温余热供暖和生活用热利用率达98%,系统总能量利用率达90%,较传统单一回收系统提升30%。运行稳定性方面,通过防腐蚀与抗积灰技术,设备连续运行时间达8760小时/年,故障停机时间控制在24小时以内,停机率低于0.3%;系统采用智能控制系统,可根据锅炉负荷变化自动调节运行参数,当锅炉负荷在50%-100%范围内波动时,系统换热效率波动幅度小于5%,发电功率波动幅度小于3%,具备较强的负荷适应性,技术性能满足电厂连续运行需求。

### 3.2 经济能效分析

经济能效分析基于单台300MW机组实际运行数据,从三方面展开。投资成本上,创新系统总投资800万元,较传统系统1000万元降低20%,其中设备购置600万元、

安装调试120万元、控制系统80万元。运行收益可观，年回收标准煤143.1吨，按800元/吨算，年煤炭节约收益114.5万元；高温余热发电年发电量720万kWh，按0.3元/kWh算，年发电收益216万元；余热供暖年节约供暖成本80万元，三项合计年总收益410.5万元。运行成本方面，年总运行成本50万元，含维护、电费、人工费用。投资回报上，年净收益360.5万元，投资回收期约2.2年，较传统系统6年大幅缩短，设备15年寿命内累计净收益4607.5万元，优势显著，值得推广。

### 3.3 环境能效分析

环境能效分析从污染物减排、能源消耗降低、碳排放减少三方面评估。污染物减排方面，年回收标准煤143.1吨，按燃煤电厂污染物排放系数计算，可减少二氧化硫排放3.43吨（排放系数24kg/吨煤），氮氧化物排放2.57吨（排放系数18kg/吨煤），烟尘排放0.86吨（排放系数6kg/吨煤），三类污染物减排量分别较传统系统提升30%，有效降低对大气环境的污染。能源消耗降低方面，系统利用余热替代部分化石能源，年减少化石能源消耗143.1吨标准煤，按能源消耗强度计算，单位发电量的能源消耗降低8%，符合国家节能降耗政策要求。碳排放减少方面，按煤炭碳排放系数2.6吨CO<sub>2</sub>/吨煤计算，年减少碳排放372.06吨，同时余热发电替代火电，可减少发电过程中的碳排放，年额外减少碳排放504吨（按火电碳排放系数0.7kgCO<sub>2</sub>/kWh计算），年总碳减排量达876.06吨，碳减排效率达30%，助力电厂实现“双碳”目标，环境效益突出。

### 3.4 综合能效评价

综合能效评价采用层次分析法，构建“技术-经济-环境”三级评价指标体系，确定各指标权重并计算综合得分。一级指标中，技术能效权重0.4，经济能效权重

0.35，环境能效权重0.25；二级指标中，换热效率、投资回收期、碳减排量为核心指标，权重分别为0.15、0.12、0.1。通过指标量化评分，技术能效得分92分（满分100分），其中换热效率95分、能量利用率90分、运行稳定性91分；经济能效得分90分，其中投资成本85分、运行收益95分、投资回报90分；环境能效得分93分，其中污染物减排90分、能源消耗降低92分、碳排放减少96分<sup>[4]</sup>。综合计算得分为 $92 \times 0.4 + 90 \times 0.35 + 93 \times 0.25 = 91.45$ 分，达到优秀等级。与传统余热回收系统相比，综合得分提升20分，其中技术和环境维度提升最为显著，表明创新系统在技术先进性、经济合理性和环境友好性方面实现协同优化，综合能效处于行业领先水平，为电厂锅炉余热回收提供高效可行的技术方案。

### 结束语

电厂锅炉余热回收对于节能减排意义重大。本文提出的创新设计与能效分析，从多方面展现了该系统的优势。技术上，换热效率与能量利用率显著提升，运行稳定；经济上，投资回收期短，长期收益可观；环境上，污染物与碳排放大幅减少。综合能效处于行业领先，为电厂余热回收提供了高效可行的技术路径。未来可进一步优化系统，扩大应用范围，推动电力行业绿色发展。

### 参考文献

- [1]陈涛,张军.锅炉系统热效率提升的技术方案分析[J].节能与环保,2020,19(5):34-39.
- [2]吴丹.燃煤电厂低品位烟气余热回收及排放物控制的研究[J].自动化应用,2023,64(17):216-218+224.
- [3]丁慧芳,白洋,刘洪福,等.垃圾发电厂余热利用技术及其经济性分析[J].节能,2023,42(05):21-25.
- [4]张庆,徐逞祥,胡方,等.锅炉烟气余热回收系统主要技术分析[J].能源与环境,2023(02):71-73+81.