

# 燃煤电厂烟气余热回收工艺技术要点研究

朱磊

新疆天富环保科技有限公司 新疆 石河子 832000

**【摘要】**：在“双碳”战略目标驱动下，燃煤电厂节能降碳任务日益紧迫，烟气余热资源化利用成为关键突破口。本文以脱硫吸收塔浆液热源回收为研究对象，系统分析烟气与浆液的热力学特性，揭示热交换过程中的传热机理及热平衡规律，重点探讨换热设备选型、低温腐蚀防控及热力系统优化等核心技术问题，并通过经济性分析验证技术可行性。研究成果为提升余热回收效率、降低发电煤耗提供理论支撑，对推动燃煤电厂绿色转型具有重要实践价值。

**【关键词】**：燃煤电厂；烟气余热回收；脱硫吸收塔；浆液热源；换热器

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.083

## 引言

能源供给约束与生态环境保护的双重压力，促使燃煤电厂加快探索高效节能技术路径。烟气排放携带的大量余热长期未被有效利用，其中脱硫吸收塔浆液通过吸附烟气热量形成的低品位热源，展现出巨大的开发潜力。当前该领域存在传热效率不足、腐蚀结垢等问题，本文围绕热源特性、技术原理、关键工艺及经济性展开研究，为工程应用提供参考。

## 1 燃煤电厂烟气余热与脱硫吸收塔浆液热源特性分析

### 1.1 烟气余热特性

燃煤锅炉排放的烟气成分复杂，主要包含氮气、二氧化碳、水蒸气及微量二氧化硫等污染物。烟气温度场呈现显著梯度分布特征：脱硫塔入口烟温通常处于 100-150℃ 区间，经过脱硫反应后出口温度降至 50-60℃，此温度区间的余热虽品位较低，但排放量巨大，具备回收利用潜力。烟气的比热容受组分与温度影响，在常规工况下约为 1.05kJ/(kg·℃)，其携带的余热总量与燃煤热值、机组效率及烟气排放量直接相关。烟气中的水蒸气含量较高，露点温度通常在 45-55℃，回收过程中需避免烟气温度低于露点引发腐蚀问题。

### 1.2 脱硫吸收塔浆液热源特性

石灰石-石膏浆液作为脱硫吸收塔的核心传热介质，其物理性质直接影响热交换效率。浆液主要成分为碳酸钙、硫酸钙及未反应石灰石颗粒，浓度控制在 15%-25% 范围以兼顾流动性与脱硫效率。实验测定表明，浆液比热容为 3.2-3.6kJ/(kg·℃)，导热系数处于 0.5-0.8W/(m·℃) 区间，黏度随温度升高呈非线性下降趋势，在 40-60℃ 温度范围内保持良好流动性。浆液在脱硫反应中会释放一定的化学反应热，与烟气显热共同构成可回收的热源总量，其温度分布从塔底至塔顶逐渐降低，塔中部浆液温度通常维持在 50-65℃，是最优热源提取区域。

## 2 脱硫吸收塔浆液热源回收工艺技术原理

### 2.1 热交换原理

脱硫吸收塔浆液热源回收的核心机制在于热交换原理的应用，即通过换热设备实现浆液与热载体之间的热量转移。该过程遵循热力学第二定律中热量自发传递的基本规律：高温浆液携带的热能通过换热器壁面传导至低温热载体，升温后的热载体可用于区域供暖或工艺预热等场景，而降温后的浆液则返回脱硫系统继续参与化学反应<sup>[1]</sup>。热交换效率取决于传热系数、换热面积与传热温差三大关键因素，其中传热系数受流体流动状态、介质物理性质及换热器结构影响最为显著。

### 2.2 热量传递过程分析

浆液热回收的热量传递包含三个串联环节：浆液侧对流传热、壁面导热及热载体侧对流传热。浆液侧因含有固体颗粒且黏度较高，其流动状态呈现湍流特征，热量通过流体微团扰动传递至壁面，但颗粒沉积可能引发壁面结垢问题，需通过流速优化与材料防污处理加以控制<sup>[2]</sup>。壁面导热过程中，热量通过换热器材料的分子热运动传递，材料的导热系数直接决定导热效率，壁面厚度与表面状态也会导热过程产生影响<sup>[2]</sup>。换热介质侧的传热机制与浆液侧类似，湍流流动状态下的对流传热是主要方式，介质的流速、比热容等参数会影响传热速率快慢。整个传递过程中，各环节的传热阻力相互串联，总传热阻力为各环节阻力之和，减小任一环节阻力均可提升整体传热效率<sup>[3]</sup>。

### 2.3 热平衡计算

热平衡调控是保障浆液热回收系统稳定运行的核心手段，其本质是建立浆液放热量与热载体吸热量的动态平衡关系，同时将系统散热损失控制在合理范围。

热平衡方程可表示为： $Q_{\text{浆液释放}}=Q_{\text{介质吸收}}+Q_{\text{散热损失}}$ 。其中，浆液释放的热量通过浆液流量、比热容及进出口温度差计算，换热介质吸收的热量通过介质流量、比热容及进出口温度差计算，系统散热损失主要与换热器保温效果、环境温度相关，通常控制在较低水平<sup>[4]</sup>。通过热平衡计算可确定最佳的浆液流量与换热介质流量配比，避免因热量失衡导致系统运

行波动。

### 3 关键工艺技术要点

#### 3.1 换热器选型与布置

##### 3.1.1 换热器类型选择

换热器作为余热回收系统的核心设备，其选型需统筹考虑传热效率、运行稳定性及工艺适配性。不同类型换热器在结构特性与性能参数上存在显著差异，以天河热电分公司#3、#4机组浆液余热回收工程为例，其选型对比数据如表1所示：

表1 天河热电分公司不同机组换热器选型及性能对比

机组型号/编号	660MW#3 机	660MW#4 机
工艺类型	吸收塔浆液+换热塔	浆液直接翅片加热
换热器类型	管壳式	螺旋微通道式
结构特点	壳程走浆液管程走除盐水	微通道结构+滤网预处理
传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·°C)]	800-1200	2000-2300
抗结垢性	中等	中等偏优
运行稳定性	稳定（换热效率波动≤5%）	需定期维护滤网（每月1次）

由表1可知，管壳式换热器因结构可靠、压力损失小，适配#3机吸收塔浆液+换热塔的大规模余热回收需求；螺旋微通道式换热器传热效率最优，配合滤网预处理可满足#4机浆液直接加热工艺的需求，但需加强滤网维护。选型需结合机组容量、工艺路线与运行维护条件综合判定。

##### 3.1.2 换热器布置方式

换热器布置需以优化流场分布、强化传热效果为目标。在间接换热系统中，换热塔应靠近吸收塔布置，通过缩短浆液输送距离降低热损及流动阻力；在直接加热系统中，翅片换热器需合理布置于一二次风道内，确保风侧和浆液侧流场均匀，避免局部短路或死区。

##### 3.1.3 换热器性能参数确定

性能参数设计需基于余热回收目标及工况条件进行精准计算。其中传热面积应按最大热负荷设计并预留10%-15%冗余量，以应对机组负荷波动；传热系数需结合浆液特性、流速及结垢倾向确定。压力损失控制需平衡传热效率与泵耗，通过优化流道设计将其限制在合理范围。特别是对于直接利用浆液的系统，设计流速是关键参数，需像天河热电分公司#4机工艺那样，通过计算和运行经验确定一个足以防止固体沉积和结垢的临界流速，并选用合适的循环泵予以保证。

#### 3.2 低温腐蚀防护技术

##### 3.2.1 低温腐蚀机理

低温腐蚀的本质是酸性介质对金属表面的电化学侵蚀。烟气中的SO<sub>2</sub>与水蒸气反应生成亚硫酸/硫酸，当换热器表面温度低于烟气酸露点时，酸性物质凝结形成腐蚀性液膜。液膜中的酸性成分会破坏金属表面的氧化保护膜，引发持续腐蚀，同时浆液或烟气中的氯离子等杂质的存在会加速腐蚀进程。腐蚀程度与介质成分、表面温度、运行时间直接相关。

##### 3.2.2 防腐材料选择

防腐材料的选择需兼顾耐腐蚀性、机械性能与经济性。针对浆液侧，应根据浆液的pH值、氯离子浓度及温度选择耐蚀材料，如双相不锈钢、高等级奥氏体不锈钢或采用耐腐蚀涂层。对于直接接触浆液的翅片换热器，材料选择需更加谨慎。在实际运行中，如天河热电分公司#4机所采用的工艺，浆液直接进入换热器，材料需能耐受浆液的腐蚀和磨损，同时其表面特性应尽可能抑制石膏等物质的附着。

##### 3.2.3 防腐措施与工艺

除材料优化外，工艺控制是防腐关键：通过调节浆液温度避免金属壁温低于酸露点。严格控制浆液中Cl<sup>-</sup>等腐蚀性成分含量。建立定期的在线冲洗或化学清洗制度，及时清除附着物，避免垢下腐蚀。加强腐蚀监测，定期检查设备壁厚，及时评估防腐状态。

#### 3.3 热力系统优化

##### 3.3.1 与燃烧风系统集成

余热回收系统需与锅炉风系统深度耦合：间接加热模式（如#3机组）通过换热塔-除盐水-空气的多级换热，虽系统复杂但可降低换热器腐蚀风险；间接方式（如通过换热塔加热除盐水，再用除盐水加热空气）系统相对复杂，但可减轻对换热器的腐蚀和堵塞压力；直接方式（浆液直接加热空气）系统简洁，但对换热器材质、防堵设计和运行维护要求极高。集成时需确保余热回收系统的投运不影响原有风系统的稳定性和锅炉燃烧安全，需设计可靠的控制逻辑和旁路系统。

##### 3.3.2 参数优化与控制策略

参数优化以“安全约束下的最大热回收”为目标，根据机组负荷、浆液温度及风温需求，动态调节浆液抽取量、换热介质流量及风机频率。采用自动控制系统，实时监测关键参数如温度、压力、流量，并实现联锁调节。特别对于易结垢的系统，应设定合理的流速低报警和温差高报警，及时触发清洗程序或调整运行方式。

##### 3.3.3 系统节能效果评估

评估体系采用“等效节煤量”为核心指标，通过回收热量与标准煤热值（29.27GJ/t）换算得出。辅助评估指标包括机组供

电煤耗降低值、投资回收期等。评估需扣除系统自身能耗（如浆液循环泵、风机等增加的电耗），以计算净节能收益。不同工艺路线的节能效果和运行成本存在差异，需结合长期运行数据客观分析。

## 4 技术经济性分析

### 4.1 投资成本分析

技术投资成本大体上由设备购置、安装改造以及辅助系统建设这三个部分组成。其中，换热器及其配套的泵阀是核心设备投资项目。直接加热系统可能省去中间换热环节的设备，但其专用换热器（如耐腐蚀防堵塞型翅片管）的材料和制造成本可能更高。安装改造费用与现场施工条件及系统复杂性相关。辅助控制系统投资必不可少。总体而言，系统设计需在初投资与长期运行可靠性之间寻求平衡。

### 4.2 运行成本分析

运行成本主要涵盖电能消耗、维护费用以及可能产生的化学清洗费用。浆液循环泵是主要的耗电设备，其功率消耗与系统阻力、流量有着密切联系。直接加热系统为防止堵塞而采用的强制循环方式，可能会导致泵的耗电量增加。维护费用主要集中在换热器的定期清洗、防腐检查与修复，以及易损件更换上。直接接触浆液的工艺，如前言中提及的易堵案例，其冲洗、

机械清理或化学清洗的频率和成本会显著高于间接换热工艺，这是在评估运行经济性时必须重点考量的因素。

### 4.3 经济效益评估

经济效益主要体现在节约煤炭所带来的收益上，通过回收余热来加热燃烧风，进而提高锅炉效率，降低原煤的消耗量。收益的大小取决于年回收热量、机组年运行小时数以及煤炭价格。此外，系统还可能带来一定的环保效益。经济效益评估需全面对比不同工艺路线在特定电厂条件下的静态投资回收期或动态财务指标，选择技术经济综合最优的方案。

## 5 结语

本文对燃煤电厂以脱硫吸收塔浆液作为热源的烟气余热回收技术展开了系统性研究，分析了热源的特性以及技术原理，着重探讨了针对浆液特点的换热器选型与防堵设计、低温腐蚀防护以及热力系统集成优化等关键工艺要点。研究结果表明，该技术是有效利用低品位余热、降低机组煤耗的重要方法。在工程应用时，需要根据电厂的实际情况，在“间接换热”与“直接加热”等不同工艺路线中谨慎选择，充分评估其技术可行性与经济合理性，尤其要重视浆液结垢堵塞风险的防控，以此确保系统能够长期、稳定、高效地运行，从而为燃煤电厂的节能降碳与绿色转型提供切实可行的技术支持。

## 参考文献：

- [1] 苗瑞灿,高小荣,孙彩霞,卢星辰,任小庆,刘林,刘嘉.“双碳”目标下烟气余热回收技术的研究进展[J].化工管理,2023,(24):65-68.
- [2] 胡政.燃煤锅炉烟气余热回收利用研究[J].能源与环保,2023,45(01):221-227.
- [3] 朱军超.燃煤电厂烟气余热回收技术工程应用研究[J].机电信息,2022,(13):78-80.
- [4] 徐继松.燃煤电厂低品位烟气余热回收与排放物控制研究[D].广西大学,2022.