

空气预热器与燃烧器耦合设计对加热炉能效的提升路径

赵 勃

上海汉兴能源科技股份有限公司 上海 201315

摘要: 加热炉是工业关键热能设备,其能效关乎企业效益与能源利用。传统加热炉中传统空气预热器与常规燃烧器独立运行,能效提升受限。本文聚焦防露点腐蚀空气预热器与高效(高强)燃烧器耦合设计,基于传热与燃烧动力学理论,剖析能效提升机理,阐述空气预热器换热优化、燃烧器结构创新及耦合匹配调控等核心技术。通过实际案例明确实施路径,研究表明该设计可降低排烟损失、高效(高强)燃烧器可提高对流传热系数从而提升燃烧效率,实现能效提升与污染物减排,为工业加热炉节能改造提供理论与实践指导。

关键词: 加热炉;空气预热器;高效燃烧器;耦合设计;能效提升

引言:工业生产中,加热炉是物料加热与工艺反应的核心设备,能耗占比高。在能源短缺与环保压力下,提升其能效迫在眉睫。传统加热炉里,空气预热器余热回收效率欠佳,燃烧器燃烧强度低。单独使用高效燃烧器也难以突破能效瓶颈。空气预热器与高效燃烧器耦合设计,能构建协同增效系统,解决二者匹配矛盾,对提升加热炉能效、降低能耗意义重大,是工业绿色转型的重要方向。

1 石化管式加热炉能效现状及耦合设计的核心逻辑

1.1 加热炉能效损失的主要成因及行业现状

石化管式加热炉的能效损失以排烟热损失和换热效率受限为主,但当前行业现状已发生显著变化。随着空气预热器技术的成熟,主流设备通过低温段铸铁板式、玻璃板或玻璃管设计,可将排烟温度降至110-120℃,对应加热炉热效率达93%以上;部分超低排烟温度设计可实现90-100℃排烟,为热效率突破95%奠定基础,排烟热损失已得到有效控制。当前制约能效进一步提升的核心瓶颈转为换热效率不足——传统燃烧器火焰喷射速度低、紊流强度弱,导致辐射段对流传热系数小,需通过增加排管面积保障换热需求,不仅增加设备成本,还存在局部换热不均的问题。另外,传统燃烧器过剩空气系数偏高($\alpha > 1.2$),仍存在少量不完全燃烧损失,进一步限制了能效提升。

1.2 耦合设计的协同增效机理

空气预热器与高强燃烧器的耦合设计,核心是“高强燃烧器强化换热+成熟预热器控制排烟损失”的协同模式,而非二者基础配合的创新——这种配合已在行业应用数十年,核心突破点在于高强燃烧器的技术升级。其增效机理可概括为:成熟的超低排烟温度空气预热器为系统提供稳定的高温助燃空气(同时控制排烟损失),高强

燃烧器则利用高温助燃环境强化燃烧与换热,形成“低排烟损失+高换热效率”的闭环。具体而言,高强燃烧器通过提升火焰喷射速度(达100-300m/s),使紊流换热系数达到传统燃烧器的4倍,显著强化辐射段对流传热,在不增加排管面积的前提下提升换热效率;同时,其精准的燃料-空气混合技术(如多级供风)可在低过剩空气系数($\alpha \leq 1.1$)下实现99%以上的燃烧效率,减少不完全燃烧损失。空气预热器则为高强燃烧器提供适配的高温助燃空气,避免低温供风导致的燃烧不稳定问题,二者协同实现能效大幅提升。

1.3 耦合设计的现实意义

该耦合设计的现实意义集中体现为高强燃烧器的推广价值,配合成熟预热器进一步放大节能效果。在能源利用方面,高强燃烧器带来的换热效率提升可使燃料消耗量节省20%-30%,叠加预热器的排烟热损失控制,可推动加热炉热效率从当前的93%向95%+突破,大幅降低能源消耗,符合石化行业节能升级需求^[1]。在环保排放方面,高强燃烧器采用的分级燃烧、贫氧燃烧技术,可将NO_x排放降至20-100ppm,低于国标限值,配合低过剩空气系数设计,减少CO和黑烟排放,契合环保严要求。在生产效益方面,高强燃烧器可减少排管面积,降低设备投资成本;同时,其火焰短而刚劲,使炉内温度均匀度从±15℃优化至±2℃,避免炉管局部过热结焦,提升产品质量与设备寿命,为企业创造多重价值。

2 耦合设计的关键技术体系构建

2.1 空气预热器的适配设计

当前空气预热器技术已趋于成熟,无需过度展开,核心在于与高强燃烧器的适配性设计。在结构选型上,遵循“高温段管式扰流子+低温段铸铁/玻璃材质”的主流方案:高温段采用管式扰流子形式保障换热效率与可靠性,

低温段选用铸铁板式、玻璃板或玻璃管材质,确保排烟温度可降至110℃以下(甚至90℃),满足热效率提升需求。需重点说明的是,管式空气预热器虽体积大、易积灰,但可靠性高,仍是高温段主流选择;板式空气预热器(尤其是铸铁板式)因体积小(仅为管式的1/2)、重量轻(钢材耗量为管式的1/3)、不易积灰,成为低温段优选;玻璃管/板式则适用于对防腐要求极高的场景,但存在易损坏、安装难度大的问题。在适配参数上,根据高强燃烧器的额定供风量、所需助燃空气温度(部分型号要求350℃以上),确定空气预热器的换热面积、阻力损失,确保高温助燃空气稳定供给,避免因参数不匹配限制燃烧器性能。

2.2 高强燃烧器的结构创新与性能强化

高强燃烧器是耦合系统的核心,其设计以强化对流传热、提升燃烧效率为核心,同时适配石化管式加热炉的工况需求。在核心结构创新上,采用“多级供风+烟气回流+分级燃烧”复合设计:多级供风结构实现燃料与空气的精准混合,确保低过剩空气系数下燃烧充分;烟气回流技术降低火焰峰值温度,抑制NO_x生成;分级燃烧则分为浓相着火区与淡相燃尽区,既保障燃烧稳定性,又避免局部高温腐蚀。在强化换热方面,通过优化喷嘴结构与气流通道设计,使火焰喷射速度提升至100-300m/s,形成强紊流流场,紊流对流传热系数达到传统燃烧器的4倍,辐射室热负荷提升50%以上,可在减少排管面积15%-20%的前提下,保障换热需求。在雾化与燃料适配性上,燃油型采用高压旋流雾化喷嘴,将油滴粒径细化至20μm以下;燃气型通过多孔射流板设计强化混合,同时支持油气混烧,适配石化行业多燃料工况。另外,其宽调节比特性(1:10以上)可适配加热炉负荷波动,确保不同工况下均能稳定发挥效能。

2.3 耦合系统的匹配调控与集成设计

耦合系统调控的关键在于保障高强燃烧器性能稳定,需基于成熟预热器特性构建联动机制。硬件集成方面,采用“预热器-燃烧器-炉体”一体化管路设计,缩短预热器出口到燃烧器进风接口距离,降低高温空气散热损失;在空气侧增加空气旁路并设置密封调节挡板,可使部分比例的常温空气跨过预热器空气加热模块直接混入加热后的热空气中来调节排烟温度与预热器出口温度^[2]。自动控制方面,构建以高强燃烧器工况为核心的调控模型,通过传感器实时采集火焰温度、炉管温度、助燃空气温度及加热炉负荷等参数。负荷变化时,优先调节燃烧器燃料供给量与供风比例,同步微调预热器烟气挡板开度。此外,设置燃烧器故障联锁保护功能,一旦火焰异常或温

度超标,立即切断燃料供给,保障系统安全运行。

3 耦合设计提升加热炉能效的实施路径

3.1 基于工况的个性化设计

实施路径的核心是根据石化管式加热炉的具体工况,精准选型高强燃烧器,配合适配的预热器系统。首先开展工况调研,明确燃料类型(燃气、燃油或混烧)、额定负荷、现有预热器性能(如当前排烟温度、换热能力)及目标热效率(常规93%以上或95%+)。若目标热效率为93%-94%,可选用常规超低排烟预热器(110-120℃排烟)搭配中功率高强燃烧器;若目标为95%+,则需选用低温段玻璃材质预热器(实现90℃以下排烟)搭配大功率高强燃烧器。对于大型立管式加热炉,优先选用单台大负荷高强燃烧器,减少燃烧器数量降低成本同时优化传热;预热器则根据燃烧器的助燃空气需求选型,无需额外创新,与核心保障参数匹配。

3.2 以燃烧器调试为核心的安装调试路径

安装调试的重点是确保高强燃烧器性能充分发挥,而非预热器的基础调试。在安装阶段,严格控制燃烧器与炉体的同轴度,确保火焰喷射方向精准指向预设角度;缩短燃烧器与预热器的连接管路,减少热损失;传感器重点布置在加热炉辐射段顶部、预热器烟气出入口、燃烧器火焰区域,确保核心参数采集精准。调试阶段分三步进行:第一步单独调试预热器,使其排烟温度稳定在设计值(如110℃或90℃以下);第二步单独调试高强燃烧器,在额定负荷下优化供风比例,确保燃烧效率达99%以上,火焰状态稳定;第三步进行耦合调试,重点测试不同负荷下燃烧器对流传热系数与预热器供风温度的匹配性,通过调整燃烧器喷口开度与烟气挡板,确定最优参数区间,确保热效率达标。

3.3 聚焦燃烧器维护的全生命周期管理

运维管理的核心是保障高强燃烧器的长期稳定运行,预热器按常规流程维护即可。日常运维中,建立燃烧器专项巡检制度:定期清理精密喷嘴与多级喷孔,避免堵塞影响雾化与混合效果(烧油时需要);检查冷却套运行状态,防止高温烧损;校准火焰检测系统,确保故障响应及时。预热器则重点进行定期清灰(尤其是烧油时管式高温段)与防腐检查(低温段铸铁/玻璃材质),保障排烟温度稳定^[3]。建立运行参数档案,重点记录燃烧器的热负荷、对流传热系数、燃料消耗等数据,通过数据分析优化调控参数;加强操作人员培训,重点掌握燃烧器的调节方法与故障处理技巧,避免因操作不当导致效能下降。

4 实践验证与效果评估

4.1 典型石化场景的实证研究

在化工行业管式加热炉改造项目里，耦合设计成效显著。改造前，加热炉采用传统配置，排烟温度较为粗放，一般在120℃以上，热效率不理想。改造后引入高效燃烧器与强化传热型空气预热器，优化空气预热器结构，换热效率提升。同时，高效燃烧器采用特殊结构，燃烧强度提高。经实际监测，燃料消耗降低12%，达成节能目标，为化工企业绿色生产提供有力支撑。

4.2 能效提升效果的量化分析

量化分析表明，耦合系统的能效提升核心源于高强燃烧器。例如某加热炉数据对比显示：传统燃烧器+常规预热器系统，计算热效率92.4%（排烟140℃），燃料消耗549M³/h；更换高强燃烧器后，热效率提升至92.8%，燃料消耗降至466M³/h，节能约15%；若进一步将预热器升级为超低排烟型（排烟100℃），热效率可达94.1%，燃料消耗降至438M³/h，累计节能约20%。可见，高强燃烧器与预热器配合可提高加热炉热效率，节省燃料。另外，高强燃烧器使炉内温度均匀度从±15℃优化至±2℃，炉管结焦率降低60%，设备维护成本减少30%，经济效益显著^[4]。

4.3 与传统改造方案的对比优势

传统改造方案多聚焦预热器升级，虽能降低排烟温度，但能效提升有限——如将常规预热器仅从降低排烟热损失（排烟温度）中下功夫，节能效果不明显。而以高强燃烧器为核心的耦合改造，直接或间接的降低了燃烧热损失和散热损失，不需要其他过多的设备热效率可轻松提升至94%以上，节能率达20%-30%，优势显著。另外，传统方案存在“边际效益递减”问题，排烟温度从

140℃降至100℃的成本较高，但节能贡献小；高强燃烧器则可通过提升换热效率实现“低成本高收益”，且适配大型加热炉需求，单台燃烧器负荷达5MW以上，简化系统设计。同时，高强燃烧器的环保性能更优，NO_x排放远低于传统改造方案，契合当前环保严要求，是石化管式加热炉改造的更优选择。

结束语

在石化管式加热炉领域，空气预热器技术已发展得较为成熟。其中，以高强燃烧器为核心，搭配超低排烟温度预热器进行耦合设计，成为提升能效的关键举措。预热器基础技术与这两者的配合运用已有较长时间，其核心创新点在于高强燃烧器能够强化辐射段的对流传热系数，凭借结构创新同时提升燃烧和换热效率，再配合预热器控制排烟损失。实践表明，该方案效益突出，尤其适合大型加热炉的节能升级改造。未来，还需优化燃烧器的燃料适配性并控制成本，以推动其广泛应用，助力行业绿色转型。

参考文献

- [1]杨宝刚,冯良,彭伟,等.高强度红外燃烧器的研究[J].煤气与热力,2022,42(3):34-38.
- [2]李含琼,谷延宏,李泽强,等.电站锅炉空气预热器适应性改造及效果分析[J].东北电力技术,2025,46(6):55-58.
- [3]李君一.防止空气预热器露点腐蚀措施设计[J].大众标准化,2025(4):58-60.
- [4]李明雷.一种空气自预热式燃气燃烧器的参数计算方法[J].百科论坛电子杂志,2020(12):265-266.