

烟气加热器在石化领域节能环保中的优化设计与应用

李换利

洛阳瑞昌环境工程有限公司 河南 洛阳 471000

摘 要：文章以某石化公司1100万吨/年炼油项目为例，针对催化裂化装置低温湿烟气处理难题，提出基于多学科协同、数字孪生及模块化结构的烟气加热器优化方案。通过对其结构优化与智能管控，实现余热高效回收，能源消耗降低15%以上，减少烟囱腐蚀与污垢积聚。多场耦合驱动设计、智能感知技术及余热协同回收等创新，可显著提升设备能效与环保效益，实践表明烟气加热器在石化领域中具有广阔的应用前景。

关键词：烟气加热器；节能环保；多场耦合驱动；智能感知；余热协同回收

引言：随着石油石化行业快速发展，资源浪费、烟气排放超标及设备腐蚀等问题备受关注。为实现节能环保，生产设施升级改造成为研究重点。生产过程中产生的烟气若未经处理直接排放，不仅污染大气、危害民众健康，而且其水分凝结形成的“白烟”影响视觉效果、违背环保要求。因此，烟气处理相关设备节能环保改造，对石化行业绿色发展具有极其重要的意义。

1 研究案例阐述

文章以某石化公司1100万吨/年炼油及高端合成新材料项目300万吨/年深度催化裂化装置再生烟气经湿式钠法脱硫后的湿烟气为研究对象，结合原有烟气处理装置，提出节能环保改造方案。针对湿烟气含雾滴、催化剂颗粒及多种腐蚀性成分的特性，在综合塔塔顶出口与烟囱之间设置烟气加热器，并由塔体支撑，实现节能环保优化目标^[1]。其优点：换热芯体模块化、管束多流程柔性布置，便于更换且减少烟囱腐蚀；内部设置水冲洗系统，利用综合塔补水冲洗；多套换热芯体合理排布可确保烟气顺畅换热，实现设备高效运行。

2 增设烟气加热器后工作原理分析

催化再生烟气从主烟道接出后自上而下垂直进入除尘激冷塔，首先经过文式格栅段，随后进入逆喷段，与文式格栅段浆液和逆喷喷嘴喷淋的循环浆液逆向充分接触，烟气中的大部分SO₂、颗粒物以及其他酸性气体被吸收^[2]。经逆喷洗涤降温至饱和状态的烟气经过渡段进入综合塔，烟气上行进入消泡器组件，进一步洗涤后，去除烟气中剩余的SO₂、细微颗粒物以及其他酸性气体。经过消泡器洗涤后的烟气依次经折流板式除沫器、水洗段、高效递增除雾器进行深度除尘除雾后，送至烟气加热器赋热，最终净烟气经烟囱排入大气。其安装位置示意图如下图1所示。

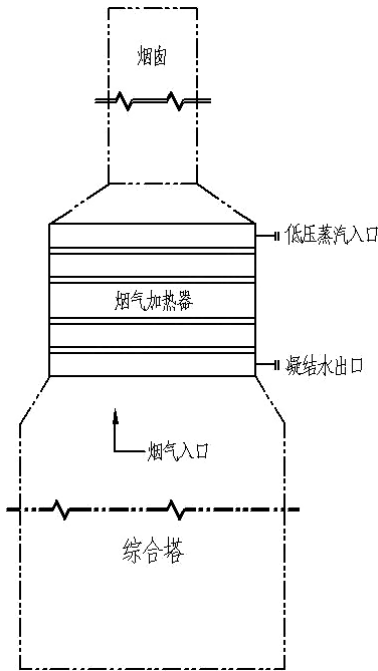


图1 改造后烟气加热器增设位置图示

3 烟气加热器仿真和应用效果分析

3.1 烟气加热器仿真分析

在深度催化裂化装置再生烟气净化单元综合塔顶部出口和烟囱之间增设烟气加热器来提高烟气温度，将促进烟气扩散、防止设备腐蚀，并达到节能降耗之目的、满足环保标准之要求^[3]。结合改造方案，文章在此，通过内部流场CFD（Computational Fluid Dynamics）仿真的方式对其改造效果进行分析。

3.1.1 仿真的目的

烟气加热器利用高温蒸汽加热烟气。本次仿真聚焦烟气流场，着重分析其在管道内的均匀性。鉴于换热管分布密集、计算性能受限，且设备对称性好，选取烟气加热器十二分之一部分开展简化流场分析。

3.1.2 仿真工况

结合上文阐述，主要对烟气加热器烟气流场进行分析，且为了估算其烟气侧压降，选取了较高温度烟气进行计算，计算过程按照烟气量为13.95kg/s，换热后烟气温度为70℃的标准进行分析。仿真采用Realizable k-ε湍流模型，网格采用poly-hexcore类型，网格数量约900万。

3.1.3 仿真结果分析

第一，烟气流场速度。经过仿真分析，烟气流场的整体流速分布情况，详见下图2所示。结合图2来看，烟气在换热管分布区域流速相对均匀，但因在左右两排换热管的中间区域未布置换热管，导致其阻力较小，在此出现高速流动区。同时，烟气加热器模块之间采用侧面封堵形式，为避免烟气短路提供一种实用、可靠的优选技术方案。

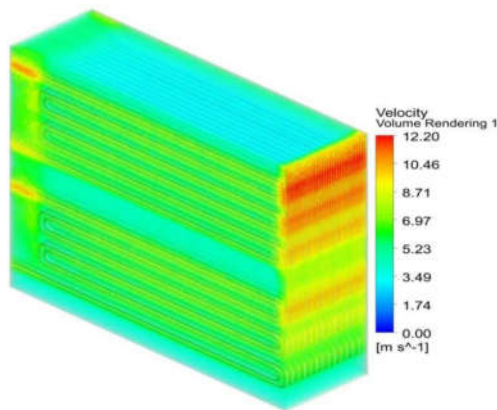


图2 烟气加热器烟气流场流速分布图示

第二，烟气流场流线分布。烟气加热器内换热管分布较为规则，因此，各级换热管之间不会出现明显的死区和回旋涡流，此时，烟气会呈现流畅地自下而上的流动态势，其流场流线分布情况，详见下图3所示。

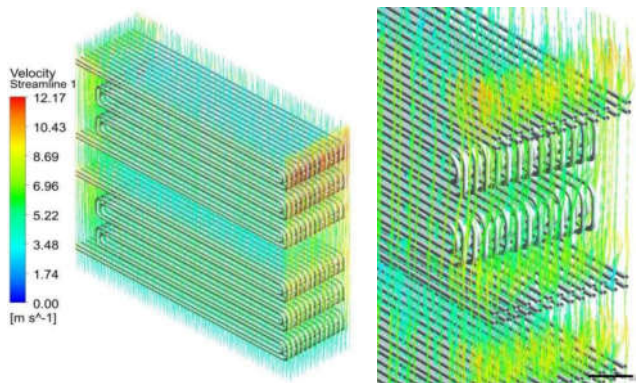


图3 烟气流经新增加部分时的流场流线分布图示

第三，烟气流场压降分析。仿真计算后，烟气加热器压降分布情况，详见下图4所示。结合图4来看，烟气加热器的整体压降约为105Pa。然而，上文按照预设

的实际换热后70℃进行计算，但实际上，换热时烟气温度是动态上升过程，预计从30℃升至70℃，实际整体压降低于105Pa，所以从这一方面来看，确保设计压力低于0.3kPa，该烟气加热器实际使用时压力损失满足客户要求。

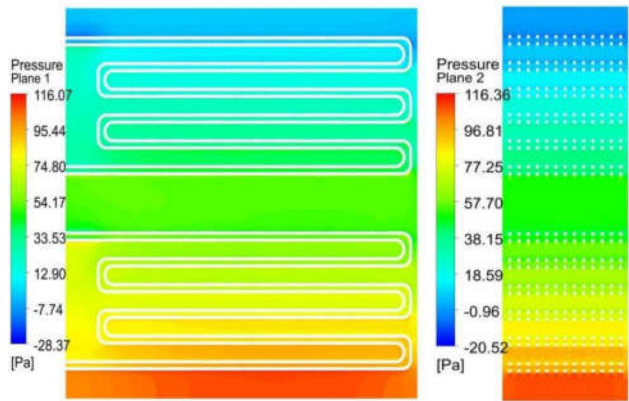


图4 烟气加热器压降分布图示

由上述仿真分析结果可知，烟气加热器内部烟气流场分布均匀，且内部无明显的死区和涡流区。同时，实际上整体压降低于105Pa，足以证明其可以满足设计需求。

3.2 烟气加热器应用效果分析

结合上文阐述，并结合实际案例，以某石化企业内部综合塔为研究对象，总结应用烟气加热器后的优势。其中，烟气加热器性能对比情况，详见下表1所示；其经济效益对比情况，详见下表2所示。

表1 烟气加热器性能对比汇总表

研究项目	增设烟气加热器前	增设烟气加热器后
响应速度	快	可以实现同步进行
温度床	不均匀	均匀
运行故障率	较低	极低
稳定性	好	很好
抗磨性	较好	很好
耗电量	较多	较少
检修维护量	较少	更少（重点关注换热元件和换热片）
可靠性	高	极高
运行监视工作量	多	相对较少
运行操作量	多	相对较少
自动控制	流程复杂	流程更为简单
烟气泄漏发生率	低于0.9%	低于0.4%
工作环境及耐腐蚀能力	差	好
维护	较为方便	基本无需维护

表2 烟气加热器经济效益对比汇总表

技术参数	增设烟气加热器前	增设烟气加热器后
厂用电率	低	增加约0.18%
耗水量	低	增加70t/h
烟道长度	按照正常标准设置烟道长度	增设烟气加热器前烟道长度的1倍
烟气加热器投资费用	无	约1500万元（包含数字化技术和先进元件）
烟气加热器支架费用	无	约200万元
吸收塔入口喷雾降温系统费用	约110万元	约130万元
年维护费用	无	增加约8万元

注：吸收塔入口喷雾降温系统耗水量增加70t/h；年维修费用按照4年一次大修进行计算，主要考虑增设烟气加热器后，换热元件和换热片维修更换的费用。

从上述表1和表2分析结果可知：增设烟气加热器虽使设备安装与维护成本增加，但从长期效益看，其实现了热量高效回收和充分利用，显著提升系统运行稳定性，降低维护难度。以某石化企业为例，该设备充分回收湿烟气余热加热脱硫后烟气，提升烟温、消除“白烟”并防止烟囱腐蚀^[4]。系统分析显示：石化装置能源消耗降低15%以上，节省燃料成本；同时，烟温升高增强污染物扩散能力，降低局部污染风险，提高环境质量。因此，科学增设烟气加热器实现了石油化工企业经济效益与环境效益双提升，并促进其可持续长期发展具有积极意义。

4 节能环保领域中烟气加热器的实践应用路径阐述

4.1 基于多场耦合驱动的结构强化设计，提升节能属性

针对石化领域烟气加热器能耗高、热效率低问题，引入仿生学设计理念合理优化烟气加热器换热管束结构。运用遗传算法迭代优化管束参数，使其换热面积提升40%，流动阻力降低25%。同时，集成智能调控系统，通过多类型传感器与机器学习算法，实现热交换动态调控^[5]。此外，搭建基于数字孪生的智能运维平台，实时复刻设备运行状态，支持远程诊断与维护。借助机器视觉技术识别换热管腐蚀情况，并结合专家库自动生成维护方案，有效减少设备非计划停机时间，降低运维成本。

4.2 借助智能感知技术，自适应调控烟气加热器的性能

将智能感知技术与烟气加热器改造方案融合，通过灵活运用智能感知技术，实现烟气换热器效能最大化发挥。例如，在关键区域增设智能传感器和温度变化响应元件，依托物联网、算法模型等构建自适应调控网络，一旦识别到温度异常等特殊情况时，系统的水冲洗装置等自动启动，并引导系统调整流体分配策略，将减少加热芯体烟气侧结垢堆灰，实现烟气加热器均匀换热^[6]。

4.3 增设多能互补的余热协同回收系统，实现能源集成

构建以烟气加热器为核心的多能互补分布式能源系统，实现石化装置能源自给。将烟气余热与太阳能光热、工业废热进行协同利用，通过相变储热材料（PCM）解决能量供需不匹配问题。同时，通过集成小型燃气轮机-余热锅炉联合循环系统，将低品位烟气余热转化为高品位电能与蒸汽，满足装置自身用电与供热需求。该系统实现能源自给率达70%以上，年减少CO₂排放12万吨，助力石化企业实现“双碳”目标。

结语

综上所述，文章通过对烟气加热器在石化领域节能环保中的应用，证明了技术创新在提升设备性能与环境效益中的关键作用。基于多学科协同设计与数字孪生技术的应用，实现了烟气加热器的结构强化与智能运维，有效解决了设备腐蚀、工况适应性差等难题；智能感知技术与多能互补系统的集成，显著提升了余热回收效率与能源自给率。结合文章分析可知，烟气加热器的创新应用不仅降低了企业生产成本，减少了污染物排放，还为石化行业节能减排提供了更多的参考，对持续助力石化行业实现绿色低碳转型提供更多支持。

参考文献

[1]王学聪.重整装置加热炉烟气余热回收系统节能改造[J].辽宁化工,2024,53(5):788-790+797.
[2]任李斌.自动设定烟气出口温度改善余热回收效率的方法[J].上海节能,2021,40(4):428-432.
[3]罗洪涛.烧结机、焦炉烟气治理中管式烟气加热器的选型分析与应用[J].锅炉制造,2021,43(3):43-45.
[4]黄刚华,陈世明,江晶晶,等.尾气处理装置烟气加热器腐蚀失效原因分析[J].石油与天然气化工,2024,53(3):8-13.
[5]金军,赵朝阳,王志刚,等.基于烟囱白烟临界温度探测技术的烟气余热深度回收[J].能源与节能,2021,26(9):2-4+118.
[6]任志宏.热电厂燃煤锅炉烟气脱硫脱硝的节能减排改造实践[J].资源节约与环保,2024,42(5):5-8.