

# 工艺限制下工业烟气余热回收利用的研究

毕吉星

山东吉星环保科技有限公司 山东 济南 250000

**摘要:** 随着全球能源危机日益严峻以及环保要求不断提高,工业领域的节能减排成为关键议题。本文聚焦工艺限制下工业烟气余热回收利用的研究。首先阐述工业烟气余热回收利用的重要性,包括节能降耗提升企业效益、减少碳排放助力“双碳”目标、拓展能源来源促进能源结构多元化。接着分析工艺限制带来的多方面影响,如烟气参数波动、腐蚀性与粉尘、生产工艺连续性及空间布局、余热供需不匹配等。最后提出优化策略,涵盖适应性技术与控制策略、材料与结构设计优化、余热回收系统集成设计、基于余热梯级利用的系统优化与能源匹配,以及智能化与数字化技术应用等,为工业烟气余热回收利用提供参考。

**关键词:** 工艺限制;工业烟气;余热回收;利用研究

引言:在工业生产中,工业烟气蕴含大量余热,合理回收利用这些余热对能源节约与环境保护意义重大。然而,实际工业生产过程复杂,存在诸多工艺限制因素,严重阻碍了工业烟气余热回收利用的广泛开展与高效实施。这些工艺限制不仅涉及烟气自身的特性,如参数波动、腐蚀性与粉尘问题,还与生产工艺的连续性、空间布局以及余热供需匹配等方面紧密相关。深入探究工艺限制对工业烟气余热回收利用的影响,并针对性地提出切实可行的优化策略,成为当前推动工业节能减排、实现可持续发展的关键课题。

## 1 工业烟气余热回收利用的重要性

### 1.1 节能降耗,提升企业经济效益

工业生产中,烟气余热往往被大量浪费。有效回收利用这些余热,可显著降低企业能源消耗。例如,在钢铁、化工等行业,将高温烟气余热用于预热原料或产生蒸汽,能减少对外部能源的采购。以一家中型钢铁厂为例,实施烟气余热回收后,每年可节省大量煤炭,降低生产成本。这不仅提高了企业能源利用效率,还增强了产品在市场上的价格竞争力。

### 1.2 减少碳排放,助力“双碳”目标实现

工业烟气余热回收利用对减少碳排放作用显著。传统工业生产依赖大量化石能源,燃烧过程中产生大量二氧化碳。而回收烟气余热,可降低对化石能源的依赖,从源头上减少碳排放。如电力行业,利用烟气余热发电,相比新建燃煤电厂,可大幅降低二氧化碳排放量。在全球积极应对气候变化、努力实现“双碳”目标的大背景下,工业烟气余热回收利用是各行业履行社会责任、推动绿色发展的重要举措,有助于构建低碳、环保的产业体系。

### 1.3 拓展能源来源,促进能源结构多元化

工业烟气余热作为一种二次能源,其回收利用拓展了能源来源渠道。在传统能源日益紧张的今天,充分挖掘和利用烟气余热,可减少对煤炭、石油等一次能源的过度依赖。例如,在一些工业园区,将不同企业的烟气余热集中回收利用,为周边区域供暖或供电,形成新的能源供应模式。这不仅丰富了能源供给结构,还提高了能源系统的稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。

## 2 工艺限制对工业烟气余热回收利用的影响

### 2.1 烟气参数波动的限制

工业生产中,烟气参数波动频繁且幅度较大。温度方面,不同生产阶段或工况下,烟气温度可能从几百摄氏度骤变至较低水平,这使得余热回收设备难以在稳定工况下运行,影响热交换效率。流量上,烟气流量会随生产负荷改变而大幅变化,导致回收系统无法精准匹配,可能出现流量过大设备超负荷,或流量过小回收不充分的情况。压力波动也会干扰系统稳定,影响余热回收装置的正常运作,增加设备故障风险,降低整个余热回收系统的可靠性和经济性。

### 2.2 烟气腐蚀性与粉尘的限制

工业烟气中常含有酸性气体,如二氧化硫、氯化氢等,在一定温度和湿度条件下,会对余热回收设备造成严重腐蚀。长期作用下,设备金属部件会逐渐变薄、穿孔,缩短设备使用寿命,增加维护成本和停机风险。同时,烟气中携带的大量粉尘会在余热回收设备表面沉积,形成污垢层。这不仅会降低热传导效率,使余热回收效果大打折扣,还可能堵塞设备通道,影响烟气流通,导致系统压力升高,进一步威胁设备的正常运行和安全生产。

### 2.3 生产工艺连续性与空间布局的限制

许多工业生产要求连续不间断运行,这使得余热回收设备的检修和维护面临巨大挑战。一旦设备出现故障,必须在短时间内修复,否则将影响整个生产流程,造成巨大经济损失。此外,工业厂房的空间布局往往较为紧凑,余热回收设备的安装位置受限。既要考虑与生产设备的连接便利性,又要兼顾设备自身的散热、维护空间等需求。不合理的空间布局可能导致设备运行效率低下,增加管道阻力,降低余热回收的能量传输效率,甚至无法实现预期的余热回收目标。

### 2.4 余热需求与供给不匹配的限制

在实际工业生产中,余热的产生和需求在时间和空间上往往存在不匹配的情况。从时间上看,某些生产环节在特定时段集中产生大量余热,但此时企业其他部门或工艺对该余热的需求可能较低;而在其他时段,余热供给不足,又无法满足生产需求。空间上,余热产生源与需求点可能相距较远,长距离输送余热会导致能量损耗增加,降低余热利用的经济性。这种供需不匹配的状况,使得余热回收系统难以高效运行,部分余热无法得到充分利用,造成能源浪费。

## 3 工艺限制下工业烟气余热回收利用的优化策略

### 3.1 针对烟气参数波动的适应性技术与控制策略

#### 3.1.1 开发宽工况适应设备

为应对工业烟气参数波动,开发宽工况适应设备至关重要。在换热器设计上,采用新型高效换热元件,如宽流道板式换热器,其独特的结构能增强流体湍流程度,提高换热效率,且可在较大流量和温度波动范围内稳定工作。同时,优化换热器材质,选用耐温、耐压、耐腐蚀的合金材料,确保设备在不同烟气温度和成分下都能正常运行。对于余热锅炉,设计可调节的过热器和再热器,通过改变蒸汽侧的流通面积和压力,实现对蒸汽温度和流量的灵活控制,以适应烟气温度和流量的变化。此外,采用模块化设计理念,将设备划分为多个独立模块,可根据实际工况灵活组合和调整,提高设备的适应性和可维护性,降低因烟气参数波动导致的设备故障率和停机时间。

#### 3.1.2 动态调控系统

构建动态调控系统能有效应对烟气参数波动对余热回收的影响。利用先进的传感器技术,实时监测烟气的温度、流量、压力等参数,并将数据传输至中央控制系统。中央控制系统根据预设的算法和模型,对采集的数据进行分析和处理,迅速判断烟气参数的变化趋势。基于此,动态调整余热回收设备的运行参数,如调节换热

器的阀门开度、改变风机转速等,以实现余热回收效率的最大化。同时,引入智能控制策略,如模糊控制、神经网络控制等,使系统能够自动学习和适应不同的工况变化,提高调控的准确性和及时性。

### 3.2 抗腐蚀、防磨损的材料与结构设计优化

#### 3.2.1 耐蚀材料应用

工业烟气中含有的酸性气体、硫化物等腐蚀性成分,对余热回收设备造成严重侵蚀。为应对这一问题,需合理应用耐蚀材料。在高温烟气环境下,可选用镍基合金,如Inconel 625等,其具有出色的耐高温氧化和耐腐蚀性能,能有效抵抗烟气中氯离子、硫化物等的侵蚀,延长设备在高温工况下的使用寿命。对于中低温烟气,搪瓷材料是不错的选择,它通过在金属基体表面涂覆一层搪瓷釉层,形成致密的保护膜,隔绝烟气与金属的接触,防止腐蚀发生。此外,非金属耐蚀材料如玻璃钢,具有良好的耐化学腐蚀性,且重量轻、强度高,可用于制作烟道、换热器外壳等部件。

#### 3.2.2 结构优化

除了选用耐蚀材料,对余热回收设备进行结构优化也能增强其抗腐蚀和防磨损性能。在换热器结构设计上,采用合理的流道布局,使烟气均匀分布,避免局部流速过高造成磨损,同时减少烟气死角,防止腐蚀性物质积聚。例如,采用螺旋流道设计,可增强烟气的湍流程度,提高换热效率的同时,使烟气对换热管的冲刷更均匀。对于易受磨损的部位,如换热管入口端,可设置防磨罩或采用加厚管壁等措施。在设备整体结构方面,优化设备的密封结构,防止烟气泄漏,减少腐蚀性气体对设备外部环境的污染,同时也避免外部杂质进入设备内部加剧磨损。通过这些结构优化措施,能有效提升余热回收设备在复杂工业环境下的可靠性和稳定性<sup>[2]</sup>。

### 3.3 与生产工艺协同的余热回收系统集成设计

#### 3.3.1 模块化与紧凑化设计

在工业烟气余热回收系统集成设计中,模块化与紧凑化设计意义重大。模块化设计将余热回收系统划分为多个独立的功能模块,如换热模块、输送模块、控制模块等。每个模块具有标准化的接口和独立的功能,便于在工厂内进行预制和调试,减少现场施工时间和难度。同时,当某个模块出现故障时,可快速更换,降低维修成本和停机时间。紧凑化设计则着重于优化设备布局,减少系统占地面积。通过采用高效紧凑的换热器,如板式换热器,其换热面积大、体积小,能有效节省空间。

#### 3.3.2 并行流程设计

并行流程设计是与生产工艺协同的余热回收系统集

成设计的关键策略。在工业生产中,不同工序对余热的需求时间和强度存在差异。并行流程设计通过设置多个并行的余热回收支路,根据各工序的实际需求,灵活调配余热。例如,在钢铁生产中,轧钢工序和加热工序对余热的需求不同,通过并行流程设计,可将余热同时分配给两个工序,并根据生产节奏动态调整分配比例。当某个工序暂停生产时,其对应的余热回收支路可自动关闭或调整至低负荷运行状态,避免余热浪费。这种设计方式能够充分利用余热资源,提高余热回收的针对性和有效性,使余热回收系统与生产工艺紧密结合,实现能源的高效利用和生产的稳定运行。

### 3.4 基于余热梯级利用的系统优化与能源匹配

#### 3.4.1 梯级利用模式

基于余热梯级利用的系统优化,核心在于依据余热温度和品质差异,按梯度进行多级利用。高温余热具有较高能量品质,优先用于产生高温蒸汽,驱动汽轮机发电,实现能量的大规模转化。中温余热可用于预热锅炉给水、加热工艺介质等,减少主能源在加热环节的消耗。低温余热则可应用于厂区供暖、干燥物料等对温度要求不高的场景。例如在化工行业,高温烟气先用于蒸汽发电,降温后的烟气再为反应釜预热原料,最后剩余的低温余热用于厂区冬季供暖。通过这种梯级利用模式,能充分挖掘余热在不同温度区间的利用价值,使能量得到合理分配和高效利用,大大提高整个工业系统的能源综合利用率,降低能源成本,减少对环境的污染<sup>[1]</sup>。

#### 3.4.2 储能耦合技术

储能耦合技术是解决余热供需不匹配问题的关键手段。在余热产生过剩时,利用储能装置将多余热量储存起来。常见的储能方式有显热储能,如使用热水罐、导热油罐等储存热量;潜热储能,利用相变材料在相变过程中吸收或释放大热量;还有化学储能,通过可逆化学反应储存和释放能量。当余热供给不足或生产需求增加时,储能装置释放储存的热量,满足生产用热需求。例如在钢铁企业,白天生产高峰时余热需求大,夜间生产低谷时余热产生多,通过储能系统将夜间多余余热储存,白天释放使用,实现余热的时空转移。储能耦合技术使余热回收系统更加灵活稳定,提高了能源利用的可靠性和经济性。

### 3.5 智能化与数字化技术在系统优化中的应用

#### 3.5.1 数字孪生建模

数字孪生建模为工业烟气余热回收系统优化提供了强大的虚拟支撑。通过构建与实际余热回收系统完全对应的数字模型,能实时映射系统的物理状态、运行参数等信息。在实际运行中,借助传感器收集烟气温度、流量、设备压力等数据,并传输至数字孪生模型。模型可对这些数据进行深度分析,精准模拟系统在不同工况下的运行情况,提前预测可能出现的故障和性能下降问题。例如,当模拟显示某换热器因积灰导致换热效率降低时,可及时安排清理维护。同时,利用数字孪生模型进行虚拟调试和优化,能在不干扰实际生产的情况下,探索最佳的运行参数和控制策略,为实际系统的优化调整提供科学依据,有效提升余热回收系统的稳定性和效率。

#### 3.5.2 AI算法优化

AI算法在工业烟气余热回收系统优化中发挥着关键作用。利用机器学习算法,可对大量历史运行数据进行分析学习,挖掘数据背后的规律和模式,从而实现余热回收系统的智能控制。例如,通过强化学习算法,让系统在不同工况下自动尝试各种控制策略,并根据实际效果不断调整优化,找到最优的控制方案,以实现余热回收效率的最大化。深度学习算法则可对复杂的非线性关系进行建模,准确预测烟气参数变化和余热需求,提前调整设备运行状态。

### 结束语

在工艺限制的复杂背景下,工业烟气余热回收利用研究意义重大且充满挑战。本研究围绕烟气参数波动、腐蚀磨损、工艺协同等诸多限制,探讨了适应性技术、材料结构优化、系统集成设计、梯级利用及智能化应用等优化策略。这些策略为提升余热回收效率、降低能源损耗提供了多元思路。然而,工业场景多样,余热回收仍需持续探索创新。

### 参考文献

- [1]李美军.燃煤工业锅炉余热利用技术及原则概述[J].工业炉,2021,43(01):6-10+16.
- [2]孙鹏.工业锅炉烟气余热回收技术及其节能应用研究[J].工业加热,2025(03)123-124
- [3]刘喜霞.工业节能技术与应用典型案例:可再生能源及余能利用[J].工业炉,2021,43(01):150-156