

# 脱碳吸收塔内高效喷淋装置设计与再生塔温度分段调控技术研究

任 绅

国家能源集团宁夏煤业煤制油分公司 宁夏回族自治区 银川 750004

**摘要：**本文针对脱碳系统中吸收塔传质效率不足与再生塔能耗过高的技术痛点，开展高效喷淋装置设计与再生塔温度分段调控技术研究。通过优化喷淋装置结构参数、强化气液接触效果，结合再生塔不同区域反应特性的温度精准调控，实现脱碳效率提升与能耗降低的协同优化。研究明确了喷淋装置关键结构参数与传质效率的关联规律，建立了再生塔分段温控的能量分配模型，通过实验验证了所提技术方案的可行性与优越性。

**关键词：**脱碳吸收塔；高效喷淋装置设计；再生塔温度分段；调控技术

## 引言

当前工业应用中的脱碳吸收塔普遍存在喷淋装置雾化效果差、气液接触不充分导致的传质效率偏低问题，再生塔则因温度调控粗放，无法匹配不同塔段溶液再生反应的能量需求，造成能源浪费与再生不彻底的双重弊端。基于此，开展吸收塔高效喷淋装置设计与再生塔温度分段调控技术研究，通过结构优化与精准调控策略的协同创新，解决现有技术瓶颈，提升脱碳系统整体性能，具有重要的工程应用价值。

## 1 高效喷淋装置的结构设计

### 1.1 喷淋头结构参数优化

喷淋头作为喷淋装置的核心执行部件，其结构参数直接决定喷淋雾化效果与气液接触面积，需结合吸收塔内径、气速分布及吸收剂物性进行精准设计。采用锥形雾化喷淋头结构，选取不锈钢材质以提升耐腐蚀性与结构稳定性，重点优化喷嘴孔径、雾化锥角与出口流速三个关键参数。喷嘴孔径的确定需平衡雾化粒径与喷淋流量，孔径过小易导致堵塞且流量不足，孔径过大则雾化粒径偏大，气液接触效率下降。通过流体力学分析，喷嘴孔径 $d$ 与吸收剂黏度 $\mu$ 、密度 $\rho$ 及喷淋压力 $P$ 的匹配关系需满足特定约束条件，基于动量守恒原理建立喷嘴孔径计算式如公式(1)所示。

$$d = k \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot \mu}{\rho \cdot P}}$$

公式(1)中， $d$ 为喷嘴孔径(mm)； $k$ 为结构系数，根据喷淋头材质与雾化形式确定，取值范围为0.08~0.12； $Q$ 为单喷嘴喷淋流量( $m^3/h$ )； $\mu$ 为吸收剂动力黏度( $Pa \cdot s$ )； $\rho$ 为吸收剂密度( $kg/m^3$ )； $P$ 为喷淋入口压力(MPa)。该公式通过量化关键物性参数与结构参数的关联，为喷嘴

孔径的精准设计提供理论依据，避免传统经验设计导致的雾化效果不佳问题。雾化锥角的设计需保证相邻喷淋头的喷雾区域完全覆盖吸收塔截面，无喷淋死角，结合吸收塔内径 $D$ 与喷淋头安装高度 $H$ ，确定雾化锥角 $\theta$ 的设计范围为 $60^\circ \sim 90^\circ$ ，确保喷雾覆盖面积与塔截面的匹配度达到98%以上<sup>[1]</sup>。

### 1.2 喷淋管网布局设计

喷淋管网布局需结合吸收塔结构与气速分布分层设计，采用环形-辐射形复合布局，分上、中、下三层并各设独立调节阀实现流量单独调控。上层对应塔上部1/3高浓度气体区需大流量，中层为传质强化区流量略低，下层捕捉残留气体流量为上层60%~70%。管网管径按流量流速计算选取，主管150~200mm、支管80~120mm，管内流速控制在1.5~2.5m/s避免沉积堵塞。节点采用圆弧过渡减少阻力损耗，确保喷嘴出口压力偏差 $\pm 5\%$ 以内，结合流体力学仿真优化布置参数，保障喷淋覆盖无重叠无死角。

### 1.3 喷淋腔室流场适配设计

喷淋腔室结构需适配喷淋与气体流场以提升传质效率，采用渐扩式设计，入口锥形收缩引导气体均匀进入，喷淋区内径恒定使气速控制在0.8~1.2m/s。腔室内壁设光滑耐磨涂层，减少液膜残留与结垢，降低吸收剂损耗并保障喷淋效果。腔室内设弧形导流板，与气流呈 $30^\circ \sim 45^\circ$ 安装以破碎气泡、引导气流，间距300~500mm适配雾化粒径与流速。经流场仿真与实验优化导流参数，流场均匀性提升25%以上，气液接触时间延长至12~15s，保障传质反应充分进行。

## 2 高效喷淋装置的性能优化

### 2.1 喷淋雾化粒径调控技术

喷淋雾化粒径是影响气液传质效率的关键参数，需

通过技术手段实现雾化粒径的精准调控,使液滴粒径分布在最优范围。基于前期结构设计的基础,采用变孔径喷嘴组合技术,根据吸收塔不同区域的传质需求,选取不同孔径的喷嘴进行组合安装,上层喷淋区域采用小孔径喷嘴,雾化粒径控制在50~80 $\mu\text{m}$ ,提升高浓度气体区域的传质效率;中层区域采用中孔径喷嘴,雾化粒径控制在80~120 $\mu\text{m}$ ,平衡传质效率与吸收剂用量;下层区域采用大孔径喷嘴,雾化粒径控制在120~150 $\mu\text{m}$ ,确保液滴有足够的下落时间捕捉残留气体<sup>[2]</sup>。

建立雾化粒径与喷淋压力、喷嘴孔径的关联模型,通过调节喷淋压力实现雾化粒径的动态调控,结合公式(2)计算不同工况下所需的喷淋压力,确保雾化粒径稳定在最优范围。

$$\delta = c \cdot \frac{d^{0.5} \cdot \mu^{0.3}}{\rho^{0.2} \cdot P^{0.4}}$$

公式(2)中, $\delta$ 为雾化液滴平均粒径( $\mu\text{m}$ ); $c$ 为雾化系数,与喷嘴结构相关,取值范围为1.2~1.5; $d$ 为喷嘴孔径(mm); $\mu$ 为吸收剂动力黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $\rho$ 为吸收剂密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $P$ 为喷淋压力(MPa)。该公式可实现不同工况下喷淋压力的精准计算,为雾化粒径的动态调控提供技术支撑。在喷淋系统中设置粒径在线监测装置,实时监测雾化粒径分布情况,确保雾化粒径始终处于最优传质范围,提升喷淋装置的适应能力与运行稳定性。

## 2.2 喷淋均匀性强化技术

喷淋均匀性直接影响吸收塔横截面上的传质效果,需通过多重技术手段强化喷淋均匀性,减少喷淋浓度偏差。采用流量分配器优化技术,在每层喷淋管网的入口处设置高精度流量分配器,根据各支管的流量需求,精准分配吸收剂流量,确保各支管流量偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内。流量分配器采用多孔板结构,通过调整孔板的孔径与数量,实现流量的精准分配,同时起到过滤吸收剂中杂质的作用,减少喷嘴堵塞风险<sup>[3]</sup>。结合喷淋头安装角度的精细化调节,通过实验测试确定各区域喷淋头的最优安装角度,上层喷淋头安装角度为 $80^\circ \sim 90^\circ$ ,中层为 $70^\circ \sim 80^\circ$ ,下层为 $60^\circ \sim 70^\circ$ ,确保相邻喷淋头的喷雾区域实现无缝衔接,喷淋覆盖均匀性达到95%以上。采用喷淋均匀性测试实验对优化后的喷淋系统进行验证,通过在吸收塔截面设置多个采样点,测量各采样点的喷淋量,计算喷淋量的变异系数,优化后的喷淋系统变异系数控制在0.08以内,显著提升了喷淋均匀性。同时,定期对喷淋系统进行清洗维护,清除喷嘴与管网内的结垢与杂质,确保喷淋均匀性长期稳定。

## 2.3 抗堵塞喷淋结构设计

吸收剂中含有的杂质易导致喷嘴堵塞,影响喷淋装置正常运行,因此需针对性设计抗堵塞结构以提升系统运行稳定性。采用自清洁喷嘴结构,在喷嘴内部设置旋转式清洗组件,借助吸收剂流动过程中产生的动能驱动组件旋转,实时清除内部附着的杂质与结垢。清洗组件选用不锈钢材质并进行表面抛光处理,有效减少杂质附着概率,其旋转速度与喷淋流量呈正相关,可确保在正常喷淋流量范围内稳定发挥清洗效能。同时在喷淋管网系统中配套设置前置两级过滤装置与反冲洗系统:一级采用100 $\mu\text{m}$ 粗滤网去除大尺寸杂质,二级采用50 $\mu\text{m}$ 细滤网进一步过滤小颗粒杂质,保障进入喷嘴的吸收剂纯度符合运行要求;反冲洗系统根据吸收剂杂质含量设定24~48h的定期反冲洗周期,反冲洗压力为正常喷淋压力的1.5倍,通过反向水流冲击清除滤网与管网内的沉积杂质。经优化设计后,喷淋系统堵塞率可降低至0.5%以下,运行稳定性显著提升,平均无故障运行时间延长至3000h以上。

## 3 再生塔温度分段调控技术

### 3.1 温度分段调控区域划分

再生塔内不同区域的溶液再生反应特性存在差异,所需的最优温度也不同,需根据再生反应进程划分调控区域,实现温度的精准分段调控。通过实验分析再生塔内溶液浓度、反应速率与温度的关联规律,将再生塔分为预热段、主再生段与深度再生段三个调控区域。预热段位于再生塔下部,该区域主要实现富液的预热升温,为后续再生反应提供温度基础,溶液温度需从入口温度提升至100~110 $^\circ\text{C}$ ,此温度范围可激活再生反应的初始阶段,同时避免温度过高导致的能源浪费<sup>[4]</sup>。主再生段位于再生塔中部,是再生反应的核心区域,溶液中大部分碳酸根与碳酸氢根在此区域分解,释放二氧化碳,所需温度较高,控制在110~125 $^\circ\text{C}$ ,该温度范围可使再生反应速率达到最大值,确保再生效率。深度再生段位于再生塔上部,用于处理主再生段未完全分解的残留溶液,进一步提升再生程度,所需温度略低于主再生段,控制在105~115 $^\circ\text{C}$ ,在保证再生效果的同时,降低顶部蒸汽能耗。各调控区域的划分通过设置温度监测点进行界定,每个区域设置3~5个温度监测点,实时监测区域内温度分布情况,为分段调控提供数据支撑。

### 3.2 分段温控执行机构设计

针对不同调控区域的温度需求,设计对应的温控执行机构,实现各区域温度的独立精准调控。预热段采用管壳式换热器作为温控执行机构,换热器布置在再生塔下部入口处,利用蒸汽作为加热介质,通过调节蒸汽流量控制加热功率,实现预热段温度的精准调控。换热器采

用高效传热管结构,提升传热效率,减少换热面积,降低设备成本,同时设置温度反馈调节模块,根据预热段出口温度监测值实时调节蒸汽流量,确保出口温度稳定在设定范围。主再生段采用多组电加热元件与蒸汽加热相结合的复合加热方式,电加热元件均匀布置在主再生段腔室内,蒸汽加热管环绕布置在腔室壁面,通过协同调节电加热功率与蒸汽流量,实现主再生段温度的精准控制。复合加热方式可兼顾加热效率与温度稳定性,在再生反应速率较高的阶段,增加加热功率确保温度稳定,在反应平缓阶段,降低加热功率节约能耗。深度再生段采用余热回收加热方式,利用主再生段排出的高温蒸汽余热作为加热介质,通过余热换热器加热深度再生段溶液,实现能源的循环利用,同时设置辅助电加热元件,在余热不足时补充加热,确保深度再生段温度稳定。

### 3.3 温控系统反馈调节机制

建立基于模糊控制算法的温控系统反馈调节机制,实现各分段区域温度的精准、快速调节,提升温控系统的自适应能力与稳定性。该机制以各区域设定温度与实际监测温度的偏差值及偏差变化率为输入参数,通过模糊控制算法计算得出最优调节量,驱动温控执行机构动作,实现温度的闭环调节<sup>[5]</sup>。模糊控制算法通过建立温度偏差与调节量的模糊规则库,无需建立精确的数学模型,能有效应对再生塔内温度变化的非线性与不确定性,提升调节精度。

为实现各区域温度的协同调控,建立区域间温度耦合调节模型,考虑各区域温度变化的相互影响,通过公式(3)计算相邻区域温度的耦合影响系数,根据耦合影响系数调整各区域的调节参数,避免因单一区域调节导致其他区域温度波动。

$$\eta_{ij} = \frac{\Delta T_j}{\Delta T_i}$$

公式(3)中, $\eta$ 为区域i对区域j的温度耦合影响系数; $\Delta T$ 为区域i温度调节变化量( $^{\circ}\text{C}$ ); $\Delta T$ 为区域j因区域i温度变化产生的温度变化量( $^{\circ}\text{C}$ )。通过该公式可量化各区域温度变化的相互影响程度,为协同调控提供量化依据。同时,在温控系统中设置温度异常预警模块,当某区域温度偏离设定范围超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时,及时发出预警信号,并自动启动应急调节措施,确保再生塔运行安全稳定。通过反馈调节机制的优化,各分段区域温度控制精度提升至 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,温度波动响应时间缩短至5~8s,显著提升了再生塔的再生效率与能耗经济性。

### 结束语

本文围绕脱碳吸收塔高效喷淋装置设计与再生塔温度分段调控技术开展系统研究,通过优化喷淋装置结构参数、强化喷淋性能与设计抗堵塞结构,提升了吸收塔气液传质效率;通过划分再生塔温度调控区域、设计专用温控执行机构与建立反馈调节机制,实现了再生温度的精准分段调控。实验验证表明,优化后的喷淋装置传质系数显著提升,再生塔分段温控技术可有效降低能耗。

### 参考文献

- [1]王朔,杨泽萌.熔融还原炉煤气脱碳技术分析与吸收塔设计研究[J].冶金动力,2025(3):57-60.
- [2]张天娇,刘永铎,刘欣,等.新型双塔吸收半贫液脱碳工艺模拟与分析[J].低碳化学与化工,2025,50(10):138-144.
- [3]崔吉宏,张建东,曹文全,等.天然气脱硫装置吸收塔模拟及增产措施[J].石油与天然气化工,2023,52(5):1-9.
- [4]毕逢东,王玉娟,唐建峰,等.工况突变下的天然气脱碳装置动态响应模拟[J].石油学报(石油加工),2022,38(5):1121-1134.
- [5]李斐,杨冬磊.SHD脱碳工艺特性分析及优化[J].能源化工,2024,45(6):58-63.