

氯化工艺尾气吸收系统优化与运行管理

黎海帆

湖北兴晨科技有限公司 湖北 宜都 443300

【摘要】：氯化工艺生产过程中尾气常含氯气、氯化氢等腐蚀性组分，吸收系统承担净化与达标排放关键环节。运行中易出现吸收效率波动、液气比失衡、传质受限及设备结垢等情况，导致排放稳定性下降。通过优化填料结构与比表面积分布，改进喷淋均匀性与循环回流方式，构建分级吸收与多点补液模式，并结合在线监测对 pH、流量及氧化还原参数进行动态调控，同时强化设备清洗与巡检维护，可提升系统适应性与稳定性。运行结果表明尾气排放浓度降低，系统能耗下降，达标排放稳定性提升运行更加稳定可靠。

【关键词】：氯化工艺尾气；吸收系统优化；运行管理；传质强化

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.008

引言

氯化工艺生产链中尾气吸收单元承担含氯腐蚀性气体净化任务，工业装置长期运行过程中普遍面临负荷波动与介质复杂化问题。吸收效率不均、喷淋分布失衡、传质阻力上升及结垢堵塞现象易导致排放稳定性下降与能耗增加。通过优化填料结构参数、提升气液接触效率、完善分级吸收流程、引入在线监测与动态调控机制并强化运维管理。运行状态趋于稳定，排放指标持续改善，系统综合能效提升达标排放能力增强运行更加平稳可靠综合表现良好稳定提升。

1 氯化尾气净化链路运行特性解析

1.1 尾气组分传递与反应特征分析

氯化工艺尾气体系呈现多组分共存与强腐蚀性特征，氯气与氯化氢在气相中以非理想混合状态存在，伴随微量副产氧化性气体与水汽形成复杂传递环境。气相组分在进入吸收单元前经历扩散与湍流耦合迁移过程，局部浓度梯度显著影响界面传质驱动力。液相吸收过程中氯化氢优先溶解并形成强酸环境，导致界面 pH 快速变化，进而影响氯气溶解平衡与反应速率。气液界面反应受温度场与流场共同约束，存在瞬时吸收与滞后扩散并存现象，使整体传质过程呈现非稳态特征，强化界面更新与微观混合效率成为关键控制方向。

1.2 吸收系统运行负荷变化规律识别

吸收系统运行负荷受上游反应强度与间歇性排放波动共同驱动，呈现周期性突变叠加的变化模式。气量增加时液气比偏离设计区间，导致气相停留时间缩短与传质不充分现象加剧，吸收效率随之下降^[1]。低负荷阶段循环液浓度累积提升，酸性增强对传质推动力产生抑制作用。负荷变化还会引发喷淋覆盖率不均与填料润湿状态波动，使局部通道化流动增强，降低整体接触效率。系统在动态负荷条件下表现出明显的滞后响应特征，参数调整存在时间延迟效应，使运行稳定性依赖于连续调节能力与缓冲结构配置。

1.3 设备运行状态与工况耦合关系

吸收塔及附属循环系统在长期运行中与工况参数形成高度耦合关系，填料层压降变化与液相黏度、固体沉积量之间存在直接关联。高浓度酸性环境加速金属部件腐蚀速率，影响喷淋系统均匀性与雾化效果稳定性。温度波动对气液相平衡常数产生影响，使传质系数呈现动态变化特征。循环泵运行曲线与系统阻力之间相互制约，负载上升导致能耗增加并反向影响液体分布均匀性。设备结垢与堵塞现象进一步改变流道结构，使局部气流分布偏移，强化局部传质同时削弱整体效率，形成多变量耦合反馈机制。

2 吸收单元负荷波动与效率衰减机理识别

2.1 气液接触不均对吸收效率影响路径

吸收单元内部气液两相分布不均会直接改变界面传质面积与有效接触时间，喷淋液滴粒径分布偏差导致局部润湿不足区域形成，气相沿低阻通道快速穿透填料层，使有效传质区域被压缩。填料表面液膜厚度不一致会削弱气体扩散阻力的均匀性，造成局部传质系数差异扩大。气流偏析现象使得高流速区域停留时间显著缩短，而低流速区域则出现液相过饱和状态，降低整体吸收驱动力。界面更新频率下降进一步限制气液接触效率，使反应界面处于非充分动态交换状态，导致整体吸收效率呈阶梯式衰减特征。

2.2 结垢与堵塞对传质过程限制机制

结垢与堵塞主要来源于酸性介质中固相析出与腐蚀产物沉积，在填料表面与喷淋系统内部逐步累积形成非均匀覆盖层。沉积物改变填料孔隙结构，使有效比表面积持续下降，同时增加气相流动阻力，引发局部压降升高与气流分配失衡。液相在受阻通道内形成滞流区，更新频率降低导致界面扩散层加厚，传质阻力显著增加^[2]。堵塞区域进一步诱发旁路流动增强，使部分气体绕过主要吸收区域，削弱整体反应深度。沉积层的热与质量传递性能较差，使系统在连续运行过程中呈现渐进式效率衰减特征，且恢复周期随运行时间延长而显著增加。

2.3 循环系统波动对排放稳定性影响

循环系统运行状态波动会直接改变液相供给连续性与分布均匀性,流量脉动使喷淋强度出现周期性变化,导致填料层润湿状态不稳定。泵运行参数偏移引起液体输送压力波动,使气液比在短时间内偏离设计区间,影响吸收反应的稳定推进。循环液浓度变化对传质驱动力产生双向影响,高浓度条件抑制进一步吸收速率,低浓度条件则降低反应推进能力。系统动态响应滞后使排放端浓度波动放大,形成输入扰动向输出端的传递增强效应。流体动力学不稳定还会改变界面更新频率,使尾气排放呈现间歇性波动特征,对稳定达标控制形成持续压力。

3 填料结构与气液传质强化路径设计

3.1 高比表面积填料优化配置方式

高比表面积填料的优化配置需围绕气液界面强化与阻力平衡展开,通过多尺度孔隙结构组合提升有效接触面积与润湿效率。填料层内部结构采用梯度化布置方式,在上部区域强化气液初始分散能力,在中部区域提升界面接触密度,在下部区域强化二次分配与再润湿能力,使气相在不同高度形成渐进式传质路径。填料单元的几何结构通过曲面化与开孔率调节实现气流扰动增强,同时降低局部短路流风险。材料表面亲水性调控提升液膜附着稳定性,使液体在重力作用下形成均匀薄膜扩展,提高界面更新频率。结构间隙通过优化填充密度控制压降水平,避免高阻力导致系统能耗上升。多层组合方式强化气液交错流动特征,使传质过程由单一扩散控制转向界面更新控制,提高整体反应速率稳定性。

3.2 喷淋系统均匀分布改进方案

喷淋系统均匀性提升依赖多点布液与流量均衡控制结构,通过分区供液与动态调节实现液相空间覆盖优化。喷嘴布置采用环形与网格复合结构,使液滴覆盖区域在横截面方向形成连续重叠分布,减少局部干区与过湿区并存现象。喷淋压力通过分级稳压装置进行控制,使不同喷嘴出口流量保持一致性,降低因压力衰减引起的分布偏差。液体在进入喷淋层前通过旋流分配结构实现初级均质化处理,削弱流量脉动对下游分布的影响^[3]。雾化粒径通过结构优化控制在稳定区间,使液滴沉降路径与气流扰动形成匹配关系,提高界面接触概率。喷淋系统与填料层之间的空间距离经过优化设计,使液滴在进入填料前完成充分扩散,减少局部冲刷效应,同时提升液膜形成均匀性,从而增强整体传质稳定性。

3.3 分级吸收与多级接触结构构建

分级吸收结构通过多段传质单元串联方式实现反应梯度化推进,使高浓度尾气在初级阶段完成快速吸收,在后续阶段实现深度净化。各级吸收单元之间设置缓冲与再分配结构,使气液相在不同阶段保持动态平衡,避免单级过载导致效率下

降。气相在多级结构中形成逐级递减浓度梯度,提高驱动力利用效率,同时降低末端吸收负荷。液相循环系统在各级之间形成独立与联动结合的流动路径,通过浓度分区控制实现吸收能力差异化配置。传质界面在不同级别中采用差异化填料结构,使高负荷区域强化气液接触强度,低负荷区域提升精细吸收能力。多级接触过程中引入回流与再分配机制,使未完全吸收组分在系统内部实现二次利用,提高整体利用效率并降低排放波动幅度,使吸收过程呈现连续梯度优化特征。

4 过程控制与运行参数协同调节策略

4.1 pH 与氧化还原参数动态调控机制

吸收系统内部 pH 值与氧化还原电位构成关键控制变量,直接影响氯化尾气中活性组分的溶解形态与反应路径。酸性环境下 pH 快速下降会抑制氯气水解平衡,使自由氯存在比例发生变化,进而影响吸收深度与反应速率。通过构建多点采样反馈结构,实现塔内不同高度 pH 梯度识别,使酸碱分布状态可视化表达。氧化还原电位与氯含量之间存在强关联性,通过电位变化可间接反映尾气净化程度与氧化能力变化趋势。调控过程中采用分段式加药与缓冲液协同机制,使局部极端酸性区域得到快速修正,避免传质界面失稳。电位控制结合液相循环路径优化,使反应区域保持稳定氧化能力输出,减少局部过氧化或还原不足现象,使吸收反应始终处于可控动力学区间。

4.2 流量与液气比实时匹配控制方法

流量与液气比的动态匹配依赖气相负荷与液相循环之间的实时耦合调节机制,通过多变量反馈实现运行参数同步调整。气相入口流量变化直接影响填料层停留时间与传质驱动力,液相供给不足时易产生接触不足与局部穿透现象。通过构建流量分级调节结构,使液相供应能够依据气相负荷变化实现阶梯式响应,提高系统适应性。液气比控制结合压降监测与流速反馈数据,实现供液量与气体处理能力之间的动态平衡^[4]。循环泵频率调节与喷淋分布联动,使液体在不同工况下保持均匀覆盖状态,减少流量波动对界面稳定性的影响。控制逻辑引入滞后补偿机制,使系统在负荷突变条件下仍能维持稳定传质效率,避免瞬时偏差引起的排放波动放大效应。

4.3 在线监测驱动的运行优化模型

在线监测体系通过多参数同步采集实现吸收系统运行状态的实时映射,包括气体浓度、压降变化、液相浓度及温度分布等关键指标。数据通过边缘计算模块进行初步筛选与异常识别,使系统状态变化趋势具备可追踪性。基于多变量耦合关系构建运行优化模型,将传质效率与运行参数之间的非线性关系进行动态拟合,实现运行窗口的自适应调整。模型通过历史数据与实时数据融合方式进行参数修正,使预测结果具备连续更新能力。异常状态识别机制可对局部结垢、流量失衡及吸收效率下降进行早期预警,并触发调节策略调整。优化路径通过反

馈闭环实现控制参数自动修正,使吸收系统在复杂工况下保持稳定输出能力,同时提升整体能耗利用效率与排放稳定性。

5 运行绩效评估与持续优化闭环体系

5.1 排放指标与能效综合评价体系

排放指标与能效评价体系以尾气中氯气、氯化氢残余浓度为核心约束条件,结合系统能耗构成实现多维度综合评估。通过建立浓度衰减曲线与单位处理能耗之间的映射关系,对吸收效率与能源消耗进行同步量化分析,使排放稳定性与运行成本形成统一评价尺度。评价体系引入时间序列波动分析,用于识别排放波动频率与幅度变化特征,强化对短时异常排放的敏感性。能效部分通过循环泵功耗、喷淋系统能量损耗及压降损失进行分项核算,形成结构化能耗分布模型。多指标加权机制用于反映不同运行阶段的性能差异,使系统整体表现具备可比性与可追踪性,为运行优化提供数据基础。

5.2 设备维护与清洗周期优化机制

设备维护与清洗周期优化基于运行阻力增长规律与传质效率衰减趋势建立动态判定模型。填料层压降变化速率与结垢沉积速率作为核心判断依据,通过趋势分析确定最佳清洗窗口,避免过早维护造成资源浪费或过晚清洗引发效率下降。喷淋系统堵塞概率通过流量分布偏差与喷嘴压力变化进行识别,使局部故障能够提前定位^[5]。腐蚀速率与介质浓度变化共同构

成设备寿命评估参数,用于优化检修周期安排。维护策略采用分区分级方式,对不同负荷区域实施差异化处理,提高整体维护效率。清洗过程通过控制冲洗强度与循环路径,实现沉积物逐层剥离,使系统恢复效率保持稳定水平。

5.3 运行数据反馈驱动优化调整路径

运行数据反馈机制以多源监测数据为基础,通过浓度、流量、压降及温度等参数的同步采集形成运行状态矩阵。数据在处理过程中进行去噪与特征提取,用于识别系统运行偏离程度与趋势变化方向。优化调整路径依托反馈闭环结构,将异常波动转化为参数修正信号,实现控制策略的动态更新。模型通过对历史运行规律的持续学习,提高对负荷变化与传质效率变化的响应精度。反馈机制强化局部与整体之间的联动关系,使单点异常能够快速扩展为系统级调控动作。调整策略在执行过程中持续修正参数权重,使系统运行逐步逼近最优稳定区间,从而提升长期运行一致性与净化效率稳定水平。

6 结语

氯化工艺尾气吸收系统在结构优化与运行调控协同作用下,实现传质效率提升与排放稳定控制,填料强化、喷淋均匀性改善及分级吸收构建形成关键支撑。动态调控与在线反馈机制强化运行适应能力,综合性能保持稳定状态,能效水平与净化能力同步提升。

参考文献:

- [1] 许坤,冯文旭,黄锦玉.煤焦化系统硫泡沫制粉尾气吸收工艺改造[J].山东工业技术,2025(4):86-90.
- [2] 杨大义.臭氧催化氧化工艺尾气处理系统的优化[J].云南化工,2024,51(6):110-112.
- [3] 张帅.火化机尾气系统换热单元设计优化探讨[J].广州化工,2023,51(15):100-102.
- [4] 赵乃伟.一种基于浊度测量的氯化法钛白粉工艺氯化尾气四氯化钛含量在线测量方法[J].仪器仪表用户,2020,27(12):1-4.
- [5] 张志刚.偏二氯乙烯生产氯化工艺过程控制系统的设计和仿真技术应用[D].浙江大学,2023.