

Operation parameter optimization of RTO system in intermittent VOC waste gas treatment

Jie Liu

Lansheng Biological Technology Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 052263, China

Abstract

Intermittent operation conditions cause significant fluctuations in volatile organic compound (VOC) emissions, posing challenges to traditional Regenerative Thermal Oxidizers (RTOs) in terms of response speed and energy efficiency. To address this issue, this study analyzes the compositional characteristics and emission patterns of intermittent VOC emissions, investigates how key RTO operational parameters influence treatment efficiency, and proposes a dynamic optimization strategy integrating thermal balance regulation, air-fuel ratio optimization, and switching timing control. The proposed approach ensures high purification efficiency while achieving energy consumption control and enhanced heat recovery efficiency during system startup, shutdown, and load variations. Results demonstrate that parameter optimization tailored to different intermittent operating conditions effectively reduces operational costs, extends equipment lifespan, and improves overall treatment stability. The established operational parameter optimization framework provides a practical solution for RTO systems in addressing intermittent VOC emissions, contributing to the intelligent operation and green development of exhaust gas treatment equipment in industries such as chemical processing and coating manufacturing.

Keywords

RTO system; intermittent emission; VOC emissions; operational parameters; optimization control

RTO 系统在间歇性 VOC 废气处理中的运行参数优化

刘杰

兰升生物科技集团股份有限公司, 中国·河北 石家庄 052263

摘要

间歇性工况下挥发性有机化合物 (VOC) 排放波动剧烈, 传统RTO系统在响应速度与能效方面面临挑战。针对这一问题, 通过分析间歇性VOC废气的组成特性与释放规律, 研究RTO系统关键运行参数对处理效率的影响机制, 提出基于热平衡调节、空燃比优化及切换时序控制的运行策略。在保证高净化效率的前提下, 实现系统在启动、停歇、负荷变化等动态过程中的能耗控制与热回收效率提升。研究表明, 针对不同间歇工况进行参数动态优化, 能够有效降低系统运行成本、延长设备寿命并提升整体处理稳定性。本文所构建的运行参数优化体系为实际工程中RTO系统应对间歇性VOC排放提供了可行路径, 对促进化工、涂装等行业废气治理设备的智能化运行与绿色化发展具有积极意义。

关键词

RTO系统; 间歇性排放; VOC废气; 运行参数; 优化控制

1 引言

近年来, 随着大气污染防治力度的不断加大, 含挥发性有机物 (VOC) 的工业废气治理成为环保工程的关键环节。再生热氧化 (RTO) 技术因其高净化率与良好的热能回收能力被广泛应用于各类工业领域。然而, 在间歇性工况下排放的 VOC 废气存在流量不稳、成分波动及启动频繁等特点, 使得传统恒定运行模式的 RTO 系统难以适应复杂工况, 进而造成热能浪费、设备疲劳与净化效率下降。针对间歇性排放特性, 通过精准调整 RTO 系统关键运行参数, 实现系统

对排放变化的快速响应, 已成为当前技术优化的研究重点。

本文将围绕温度控制、空燃比调节、切换周期设定等关键参数, 深入探讨 RTO 系统在间歇性 VOC 废气处理中的运行机制与优化路径, 力求提升设备的能效水平与运行灵活性。

2 间歇性 VOC 废气排放特征

间歇性 VOC 废气排放多源于批量生产、周期性操作或阶段性反应过程, 排放频率受工艺环节和生产节奏影响显著, 排气体积流量在短时内呈现快速上升或骤降趋势。排放时间不均、持续时间短暂、峰值浓度波动剧烈是其显著特征, 导致废气浓度与风量之间的匹配关系高度不稳定。温度、湿度和废气压力等物理参数在不同排放周期中变化频繁, 增加了治理系统的运行不确定性。废气输送系统在启动、停顿、

【作者简介】刘杰 (1985-), 男, 中国河北衡水人, 本科, 工程师, 从事化工废气治理、废水处理研究。

再启之间频繁切换,造成 RTO 系统在升温、保温和热回收方面响应延迟。部分排放阶段存在无效气段,使系统空转时间增长,影响净化效率与能耗水平的同步控制,成为运行参数优化的关键难题。

3 RTO 系统核心运行参数构成及作用机制

3.1 温度控制参数对氧化效率的决定性作用

RTO 系统中反应室温度对有机组分的完全氧化起关键作用,不同 VOC 成分具有不同的燃点与裂解点,反应温度控制不当将直接影响净化效率。为确保有机物完全氧化,系统需将温度维持在 760℃ 以上,但温度过高则引发材料热疲劳与能耗上升。温控系统通过燃烧器输出调节与蓄热床热量回收共同作用,对反应室温度实施精准控制。在间歇排放初期,温度调节响应需快速跟进,以防止低温泄漏排放。在排放结束阶段,温度下降控制则有助于节能与设备保护。

3.2 切换周期与蓄热床结构对热回收性能的影响

RTO 系统的热效率高度依赖蓄热床的结构设计与切换周期设定,合理的气流切换不仅保障燃烧室温度稳定,还直接关系到系统的能源回收效率。蓄热床通过高热陶瓷材料储存与释放热能,使进气预热达到反应需求,但在间歇排放时若切换周期不合理,将导致热量回收不足或过热积蓄。频繁启停条件下,蓄热床热惯性变化剧烈,需通过调节切换间隔时间、优化进出气路径与减少死区面积来提升热传导效率。蓄热模块结构应根据风量波动特征进行分区设计,以增强系统在瞬态工况下的热适应性。

3.3 空燃比与助燃气控制对运行稳定性的调节效果

在 RTO 运行过程中,维持合理的空燃比是实现充分氧化与节能运行的核心要素。空气供应量不足将导致燃烧不完全,污染物未被彻底转化,过量空气则带走大量热量,降低系统热效率。间歇性排气造成废气浓度波动剧烈,需依据实时 VOC 浓度与氧含量动态调节燃气供给量与空气配比。助燃气流量调节机制应与风量反馈及蓄热床温度变化联动,以防止升温过快或反应迟滞。系统在低浓度阶段需提高助燃比例以维持温度,而在高浓度期间则应减少助燃气以降低过热风险。

4 间歇性工况下 RTO 运行参数优化路径

4.1 动态热平衡维持机制下的温控策略设计

间歇性排放条件下,RTO 系统运行面临频繁启停、气量骤变和热负荷不稳等复杂挑战,传统固定温控策略难以应对工况波动所带来的热平衡失调。为保持反应室内温度的稳定性,需要构建动态热平衡调节机制,以蓄热体状态感知、燃烧器输出调节和尾气温度反馈为核心参数,建立实时温度预测模型,通过温区分布算法判断当前热态演变趋势,实现温度控制策略的动态更新。升温阶段可采用预热提前干预方式缩短启动时延,高温保持阶段引入高频反馈控制防止局部过热,冷却阶段则结合排气预测调整燃气供应策略防止能耗

浪费。通过引入分布式传感系统与非线性温控算法,可实现废气不连续输入情况下的温度波动抑制,维持反应效率与设备安全的动态平衡,增强 RTO 系统适应复杂工况能力。

4.2 蓄热单元响应速度优化与切换时序调整

在处理间歇性 VOC 废气时,蓄热单元需要在短时间内完成热能的高效储存与释放,其热惯性与结构设计直接影响切换响应速度与系统热利用率。优化响应速度的关键在于减小热传导滞后与气流分布不均问题,可通过调整陶瓷材料排列密度、增强气流扰动强度和缩短热通道路径实现快速热交换。切换时序方面则应摒弃固定间隔逻辑,转而构建与废气流量、浓度和温度波动联动的动态切换模型,使系统根据废气状态变化及时调整气流通路,避免热量积压或散失。通过差压检测与床层温度分布分析判断切换最佳时机,提升蓄热体热能转换效率,降低启动和空转期间的能耗损失。引入同步调节策略使切换动作与温控、空燃比控制形成闭环反馈,确保蓄热单元在不同阶段保持良好热交换性能,支撑系统高效稳定运行。

4.3 基于流量变化的空燃比自适应调控方法

间歇性 VOC 废气排放所导致的进气流量频繁波动直接影响空燃比设定精度,固定比例模式难以适应不同负荷条件下的反应需求,需建立基于流量变化的自适应调控方法以实现动态调整。系统通过实时采集风量、压力、浓度及氧含量等参数,构建多变量控制模型,分析当前负荷状态并预测短周期内的流量变化趋势,从而动态调整助燃气体与补充空气比例,保障氧化反应稳定进行。在高浓度大流量阶段,系统自动降低助燃比例防止热值过高,在低浓度小流量阶段则增加燃气供给维持氧化温度,兼顾燃烧完整性与热能效率。控制逻辑采用模糊控制或神经网络算法提升调节响应速度,适应瞬变过程中的非线性行为。通过多点检测与控制阀协同联动,使空燃比调控与系统运行参数深度融合,提升 RTO 系统对间歇负荷下复杂气流状态的适应性及响应灵敏度,图 1 为可自适应调控的两塔式 RTO 构建分析。

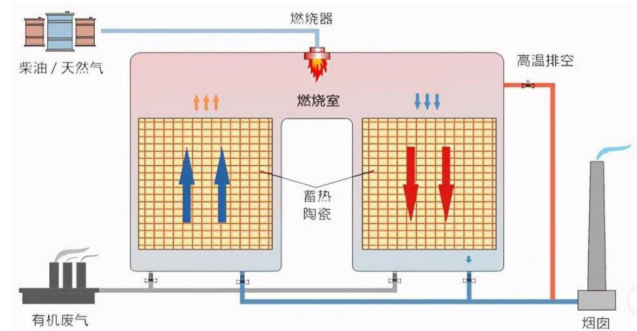


图 1 可自适应调控的两塔式 RTO 构建分析

5 运行参数优化的综合评价与实施建议

5.1 能耗效率、净化率与经济成本的多维权衡模型

RTO 系统运行参数优化需在多个目标之间寻求平衡,

涉及单位处理能耗、净化效率、运行维护成本和设备投资回报周期等多个维度。构建综合评价模型以支持运行决策优化成为关键路径。模型可基于热力学分析、气体反应动力学和设备工程经济学，量化不同运行参数下的能效比、VOC去除率和系统年化运行成本，通过加权评分法建立性能指标函数，实现对不同运行策略的优劣排序。考虑间歇排放带来的负荷波动影响，模型引入动态调整因子反映系统实际运行状态，并对温控策略、空燃比设定、切换频率等关键参数敏感性进行分析。在工程应用中结合仿真数据与运行实测数据进行模型修正与验证，提升模型预测精度。该评价模型可为企业提供优化路径选择依据，有效指导RTO系统在处理间歇性VOC废气时实现低碳、高效与经济运行目标。

5.2 智能控制系统对参数优化效果的支撑分析

运行参数的动态优化依赖于系统控制层的响应速度与精度水平，智能控制系统在多参数协调调节、故障诊断及能耗调优等方面提供关键支撑。现代RTO系统引入分布式控制架构与边缘计算单元，使数据采集、分析和控制响应更加快速精准。通过布设多点传感器网络实时监测温度、压力、浓度、流速等运行数据，控制系统可实时判断工况变化并同步调整燃气输入、切换节奏及排风风量。智能算法对历史运行数据进行学习和建模，预测系统即将面临的负荷波动，为参数预调提供依据。结合图形化人机界面与远程控制平台，运维人员可对系统状态进行实时干预与优化决策，实现从经验驱动向数据驱动的运维转型。智能控制系统提升了RTO设备对非稳态工况的快速适应能力，使运行参数优化策略具备更强的落地执行力与稳定运行保障能力。

5.3 工艺升级与设备选型对优化目标的保障作用

运行参数优化的最终实施效果受限于系统工艺路线与设备配置条件，需通过工艺环节调整与关键部件升级提升系统响应性能与操作灵活性。在处理间歇性VOC废气场景下，

优选具备快速升温能力的高效燃烧器与低热惰性的蓄热陶瓷填料，可缩短系统响应时间并降低热损耗。气流切换装置的选型应关注阀门动作频率、密封性能与耐热耐腐蚀能力，减少频繁操作下的故障率与漏气风险。控制系统升级方向应围绕多变量自适应控制逻辑、模糊调节算法和参数预测模型展开，使软硬件融合支撑动态优化策略的精准落地。在系统布局方面，通过模块化设计提升维修便利性与结构适应性，为后续运行策略微调提供空间。参数优化不能脱离设备条件而独立存在，只有将优化目标嵌入工艺系统与设备选型全周期中，才能实现RTO系统在间歇性负荷处理中的真正高效、安全与经济运行。

6 结语

RTO系统在间歇性VOC废气处理中的运行优化已成为推动清洁生产和节能减排的重要方向。通过对温度控制、蓄热切换、空燃比调节等核心参数的系统分析与动态优化，可以有效提升设备运行的适应性与稳定性。面对复杂多变的排放特征，运行参数的科学设定不仅关系到净化效率，也直接影响系统的经济性和可靠性。优化策略的实施需依托于先进的控制系统和合理的设备配置，构建多维协同的运行机制。今后，参数优化与工艺集成的深入融合将进一步推动RTO技术在间歇性排放治理中的广泛应用与持续进化。

参考文献

- [1] 陈育坤.蓄热式热氧化(RTO)工艺在VOCs治理中的应用与优化[J].化工安全与环境,2025,38(07):41-44.
- [2] 董志利.低温甲醇洗排放气RTO处理工艺及危害防范措施[J].山西化工,2025,45(06):214-216+236.
- [3] 杨罡.蓄热式氧化炉(RTO)优化改造及运行效果分析[J].精细石油化工进展,2025,26(03):49-53.
- [4] 陈殿君,吴晓伟.三塔式RTO工业有机废气处理系统设计与应用[J].环境科学导刊,2025,44(03):38-45.