

了排放浓度。SCR技术的不足之处在于其设备投资较高，且需要精确控制还原剂的注入量，以确保最佳的反应效果。此外，SCR系统在高温环境下运行时，催化剂可能会受到污染或中毒，需要定期清理和更换催化剂。

5.2 废气脱硝技术的应用与效果分析

废气脱硝技术通过化学反应将NO_x转化为无害的氮气和水，广泛应用于水泥回转窑的高温气体排放控制中。常见的脱硝技术包括选择性非催化还原（SNCR）和选择性催化还原（SCR）两种。SNCR技术通过将还原剂如氨气或尿素喷入高温气体中，在无催化剂的情况下发生还原反应，而SCR技术则依赖催化剂来促进反应。研究表明，SNCR技术对于低浓度NO_x气体有较好的去除效果，但其去除率较低，通常为30%-50%，而SCR技术的去除率可达到90%以上。脱硝技术能够显著减少NO_x的排放，改善空气质量，但其高效实施需要严格的操作管理，且脱硝反应对于温度、压力等条件较为敏感，需要维持较为稳定的反应环境。

5.3 废气热回收与利用技术的作用

废气热回收与利用技术通过回收水泥回转窑产生的高温废气中的热能，将其用于预热原料或为生产过程提供能源，减少了能源的消耗。该技术不仅可以有效降低水泥生产过程中的能耗，还能减少高温气体排放对环境的污染。通过废气热回收技术，能够将废气温度降低至300℃以下，从而减少了废气中的有害气体的浓度，提高了后续排放控制技术的效果。在某些研究中，废气热回收系统可以使能效提升10%-15%。然而，废气热回收技术的实施需要大量的设备投资，并且需要对高温气体的流量和温度进行精准调控，确保回收系统的高效运行。

6 排放控制技术效果分析

6.1 高温气体排放控制技术对空气质量的改善

高温气体排放控制技术在在水泥回转窑中的应用显著改善了空气质量。通过采用先进的排放控制技术，如选择性催化还原（SCR）、废气脱硝技术等，水泥企业能够有效减少NO_x、SO₂等有害气体的排放。以某水泥厂为例，实施SCR技术后，NO_x的去除率达到90%以上，排放浓度从原来的400 mg/m³降低至50 mg/m³，符合国家环保标准。此外，SO₂排放量减少了约60%，颗粒物（PM）排放量也显著降低，达到了工业排放的最低要求。根据监测数据，空气中的NO_x浓度降低后，区域大气质量显著改善，尤其是PM2.5

浓度下降了约15%。这一变化不仅提高了空气的清新度，还对居民健康、生态环境的保护起到了积极作用。随着控制技术的不断优化，更多企业能够在减少污染的同时，提升整体环境质量，满足日益严格的环保法规要求。

6.2 高温气体排放控制技术的能效与经济效益

高温气体排放控制技术的应用不仅提升了水泥生产过程中的环保效益，还带来了显著的能效提升和经济效益。以废气热回收技术为例，该技术通过回收水泥回转窑的高温废气中的热能，将其用于预热入窑原料和提供工艺热源，从而显著减少了燃料消耗。据统计，通过废气热回收系统，企业能够节约约12%-15%的能源消耗，降低了能源成本。具体到某工厂，废气热回收系统的实施使得年节约能源费用达到了300万元人民币，显著提升了企业的整体经济效益。同时，采用高效排放控制技术后，企业的排放达标率大幅提高，避免了因超标排放而面临的罚款和监管压力。此外，通过引入废气脱硝和催化氧化技术，水泥厂的环保设备寿命得到了延长，维护成本降低，进一步提高了企业的生产效益。整体来看，排放控制技术的实施不仅实现了环保目标，还通过降低能源消耗和运营成本，带来了可观的经济回报。

7 结语

通过对水泥回转窑高温气体排放控制技术的研究与分析，可以看出，采用先进的排放控制技术如选择性催化还原（SCR）、废气脱硝技术和废气热回收技术，不仅能有效减少NO_x、SO₂等有害气体的排放，显著改善空气质量，还能显著提高能效，降低生产成本。这些技术的实施使得水泥行业在满足日益严格的环保标准的同时，获得了可观的经济效益和社会效益。未来，随着环保法规的不断升级和技术的进一步发展，水泥回转窑排放控制技术将进一步优化，推动行业向更加绿色、低碳的方向发展。企业在提升环保水平的同时，也将获得更加可持续的经济增长。

参考文献

- [1] 赵宇轩,何非,呼子博.水泥回转窑NO_x排放预测代理模型构建研究[J].机械设计与制造工程,2026,55(01):39-43.
- [2] 刘阳,舒银军,余祥忠,胡涛,刘钢.水泥回转窑振动的主要原因及解决措施[J].中国水泥,2025,(12):23-25.
- [3] 马汝普,刘翠翠,闫永,扈炳勇,鲍树涛,王同永,杨玉英,吴立剑.石膏制硫酸联产水泥回转窑高温窑气自动分析系统的应用[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(04):119-124.

Evaluation of the operating effect of activated carbon in treating organic waste gas under different working conditions

Jinjuan Wang Binbin Xia

Sichuan Rongchuang Dingfeng Environmental Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Activated carbon adsorption has been widely applied in the control of organic waste gases due to its strong adaptability and mature process technology. Different operating conditions directly affect the adsorption efficiency, operational stability, and service life of activated carbon for organic pollutants. Focusing on key operating factors such as organic waste gas concentration, variations in temperature and humidity, gas flow rate, and operating load, the operational performance of activated carbon in treating organic waste gases is systematically evaluated. The influence mechanisms of operating condition fluctuations on treatment performance are analyzed from the perspectives of changes in adsorption behavior, differences in removal efficiency, and characteristics of operational attenuation, thereby revealing the response characteristics and adaptability of the activated carbon adsorption process under different operating conditions. The results provide a technical basis for operational management, condition optimization, and stable compliance of activated carbon adsorption systems.

Keywords

Activated carbon adsorption; Organic waste gas; Operating conditions; Operational efficiency

不同工况条件下活性炭处理有机废气的运行效果评估

王金娟 夏彬斌

四川蓉创鼎锋环境科技有限公司, 中国 · 四川 成都 610000

摘 要

活性炭吸附法因适应性强、工艺成熟,在有机废气治理中得到广泛应用。不同工况条件直接影响活性炭对有机污染物的吸附效率、运行稳定性及使用寿命。围绕有机废气浓度水平、温度湿度变化、气体流量及运行负荷等关键工况因素,对活性炭处理有机废气的运行效果进行系统评估。从吸附性能变化、去除效率差异及运行衰减特征等方面分析工况波动对处理效果的影响规律,揭示不同工况条件下活性炭吸附过程的响应特征与适应能力。研究结果可为活性炭吸附装置的运行管理、工况优化及稳定达标排放提供技术依据。

关键词

活性炭吸附; 有机废气; 工况条件; 运行效果

1 引言

随着工业生产规模不断扩大,有机废气排放强度持续增加,其对大气环境质量和人体健康的影响日益突出。活性炭吸附技术凭借对多种有机污染物具有良好去除能力,在工业废气治理领域得到广泛应用。然而,在实际运行过程中,废气成分复杂多变,运行工况受生产负荷、环境条件及系统参数影响显著,导致处理效果存在较大波动。部分工程实践表明,在相同处理设施条件下,不同工况运行状态下的吸附效率和稳定性差异明显,甚至出现吸附性能快速衰减的问

题。因此,有必要从运行角度出发,系统分析不同工况条件对活性炭处理有机废气效果的影响机制。通过对典型工况变化特征及运行表现进行评估,可为合理确定运行参数、延长活性炭使用周期和提升整体治理效果提供科学支撑,对提高有机废气治理设施的工程适用性具有现实意义。

2 活性炭处理有机废气的工况条件构成与变化特征

2.1 有机废气浓度水平与组分差异特征

有机废气在不同生产环节中呈现出显著的浓度波动与组分差异特征。连续运行工况下,废气浓度整体变化相对平缓,而间歇式生产条件下,排放浓度易出现阶段性升高,导致进入活性炭装置的污染负荷不稳定。有机组分方面,芳

【作者简介】王金娟(1985—),女,中国内蒙古赤峰人,本科,工程师,从事废气治理研究。

香烃、酯类、酮类及醇类物质在废气中常呈混合状态存在，不同组分分子结构差异直接影响其在活性炭孔隙中的吸附行为。低分子量有机物在气相中迁移能力较强，易快速进入孔隙内部，而高沸点组分更易在床层前段富集，形成吸附梯度。这种浓度与组分的空间分布特征，使活性炭在运行过程中表现出明显的吸附前沿推进现象，对整体处理效果产生持续影响。

2.2 废气温度与湿度条件变化特征

废气温度和湿度是影响活性炭吸附性能的重要环境因素。在常规工况下，废气温度随生产设备运行状态发生波动，升温过程会改变有机物分子运动速率及其在活性炭表面的吸附平衡状态。温度升高时，部分已吸附的有机物易发生解吸现象，降低单位质量活性炭的有效吸附容量。湿度条件则受工艺用水、冷却过程及环境空气影响明显，水蒸气在废气中含量变化较大。水分子易优先占据活性炭表面活性位点，对疏水性较弱的有机物吸附形成竞争抑制作用，进而改变床层内部的传质过程，使吸附效率随湿度变化呈现波动特征^[1]。

3 不同工况条件下活性炭吸附运行参数表现

3.1 活性炭装填方式与床层结构参数

活性炭装填方式直接影响床层结构参数及气体分布状态。在常见装置中，床层高度设置在 800 mm 至 1200 mm 区间时，可形成较稳定的吸附区长度，床层空隙率一般控制在 0.35 至 0.45 范围内，有利于气体均匀通过。颗粒粒径多集中在 3 mm 至 5 mm 区间，过小粒径易导致压降升高，运行压差可由 1200 Pa 上升至 1800 Pa，影响系统稳定性。分层装填条件下，上层采用粒径 5 mm 活性炭、下层采用粒径 3 mm 活性炭，可在保证传质效率的同时降低整体阻力，使床层有效吸附时间延长约 20%。床层结构合理性对不同工况下吸附性能保持具有显著影响。

3.2 吸附风速与空速变化条件

吸附风速和空速是表征运行负荷的重要参数。在常规运行状态下，表观风速控制在 0.3 m/s 至 0.6 m/s 范围内，可兼顾吸附效率与运行阻力。当风速提升至 0.8 m/s 时，床层内有机物穿透时间明显提前，去除效率出现下降趋势。空速水平一般维持在 3000 h⁻¹ 至 6000 h⁻¹ 区间，低于 3000 h⁻¹ 时，单位时间处理量受限，高于 6000 h⁻¹ 则易造成吸附不充分现象。实际运行中，空速由 4000 h⁻¹ 提高至 7000 h⁻¹ 后，活性炭有效吸附周期缩短约 30%，表明风速与空速变化对吸附过程具有直接调控作用^[2]。

3.3 运行周期与吸附饱和过程特征

在连续运行条件下，活性炭吸附过程呈现出明显的阶段性变化特征。初始运行阶段内，床层出口有机物浓度保持在较低水平，运行时间约 20 d 后，吸附前沿逐步向床层末端推进。进入中期阶段，出口浓度开始上升，床层有效吸附区长度由原有的 70% 缩减至 40% 左右。运行至 40 d 至 50 d

区间时，活性炭逐渐接近饱和状态，出口浓度明显升高，突破时间提前出现。不同工况条件下，运行周期差异明显，高负荷工况下饱和时间可缩短至 30 d 左右，反映出工况变化对吸附寿命具有直接影响，详见表 1。

表 1 不同工况条件下活性炭吸附运行参数对比表

工况类型	床层高度/mm	活性炭粒径/mm	表观风速/(m·s ⁻¹)	空速/h ⁻¹	有效运行周期/d
低负荷工况	1200	5	0.30	3000	55
中低负荷工况	1000	4	0.40	4000	45
中等负荷工况	1000	3	0.50	5000	40
中高负荷工况	800	3	0.60	6000	35
高负荷工况	800	3	0.80	7000	30

4 不同工况条件下活性炭对有机废气的去除效果评估

4.1 低负荷工况下有机废气去除效果特征

在低负荷运行条件下，有机废气进入活性炭吸附装置的浓度水平保持在较低区间，进气浓度多集中于 80 ~ 150 mg/m³ 范围内，床层内传质过程较为充分。表观风速控制在 0.3 ~ 0.4 m/s 条件下，废气在床层中的停留时间维持在 2.5 ~ 3.5 s，使有机分子能够充分扩散进入活性炭微孔结构。运行初期 20 d 内，出口浓度稳定在 10 mg/m³ 以下，去除率长期保持在 90% 以上。床层吸附前沿推进速度较缓，有效吸附区长度可维持在床层总高度的 70% 左右。此类工况下，活性炭孔隙利用率较高，吸附容量释放过程平稳，系统运行表现出良好的连续性与可靠性，适宜作为稳定排放条件下的常规运行模式。

4.2 中等负荷工况下有机废气去除效果变化

中等负荷工况下，进气浓度通常提升至 200 ~ 350 mg/m³ 区间，废气中多种有机组分并存，对吸附过程形成叠加影响。表观风速提高至 0.5 m/s 左右，床层停留时间缩短至 1.8 ~ 2.2 s，部分高挥发性组分在床层后段出现穿透趋势。运行至 25 d 左右，出口浓度由 15 mg/m³ 逐步上升至 30 mg/m³，去除率下降至 80% ~ 85%。床层有效吸附区缩减至 50% 左右，吸附前沿推进速度明显加快。此阶段活性炭吸附能力受运行负荷影响显著，处理效果呈现随时间逐步衰减的特征，反映出中等负荷条件下系统对运行参数调控的敏感性增强。

4.3 高负荷工况下有机废气处理稳定性表现

高负荷运行状态下，进气浓度常处于 500 mg/m³ 以上，瞬时峰值可达到 800 mg/m³，吸附系统承受较大污染负荷。风速升高至 0.7 ~ 0.8 m/s 后，停留时间压缩至 1.2 ~ 1.5 s，床层传质阻力显著增大。运行 10 d 后，出口浓度即上升至 50 mg/m³ 以上，去除率下降至 70% 左右。吸附前沿在短时间内推进至床层末端，局部区域出现提前饱和现象。浓度波动叠加高空速条件，使床层内吸附状态频繁变化，运行稳定性明显降低，表明高负荷工况对活性炭处理系统的持续运行