

有机废气治理蓄热式焚烧炉工艺设计要点

孙得立

山东泽轩环保科技有限公司 250000

DOI:10.12238/ems.v7i7.14313

[摘 要] 文章重点探讨有机废气治理中蓄热式焚烧炉 (RTO) 工艺设计关键点, 通过剖析 RTO 技术原理与设备分类, 明确其高效处理 VOCs 的核心机制。从废气参数精准分析、预处理设施科学配置、炉体与换热器结构优化, 到安全防护体系构建及经济性综合考量, 系统阐述设计全流程。旨在为工业领域提供兼具高效净化、稳定运行与成本效益的 RTO 工艺设计方案, 助力企业实现环保达标与可持续发展, 推动有机废气治理技术向更节能、更智能方向迈进。

[关键词] 蓄热式焚烧炉 (RTO); 有机废气治理; 工艺设计; 安全设计; 热回收效率

引言:

在工业化快速发展的大背景下, 挥发性有机物 (VOCs) 的排放已经变成了大气污染的主要来源, 其复杂的成分和高度的毒性对生态环境和人们的健康构成了巨大的威胁。蓄热式焚烧炉 (RTO) 利用其高温氧化分解的先进技术, 能够使 VOCs 几乎达到完全矿化的状态, 并且通过陶瓷蓄热体实现了 95% 以上的热能循环再利用, 从而显著地减少了运营成本, 目前石油化工、涂装和制药行业对于废气处理的效率和合规性提出了越来越苛刻的要求, 迫切需要通过工艺设计来实现环保效益和经济性之间的优化平衡。本文结合技术原理与工程实践, 深入探讨 RTO 工艺设计核心要素, 为工业废气治理提供科学指导与可行方案。

1 蓄热式焚烧炉 (RTO) 技术原理与分类

1.1 工作原理

蓄热式焚烧炉 (RTO) 利用热氧化和蓄热的耦合作用, 达到了有机废气的高效净化效果。待处理废气经过预处理进入蓄热室与内填陶瓷蓄热体完全接触, 废气所带冷能由高温蓄热体迅速吸收加热, 接近燃烧室操作温度 (通常为 760°C 至 850°C), 此过程大幅减少燃料消耗。被加热的废气进入燃烧室内, 高温环境和足够氧气作用下尾气中 VOCs 分子无焰燃烧、化学键断裂、重新组合形成二氧化碳、水蒸气等污染物, 达到污染物完全矿化^[1]。高温净化气再通入另一个蓄热室并传递热能至蓄热体, 完成热量回收并在其本身温度明显下降后达到排放标准。蓄热体周期性的切换气流方向并交替完成“蓄热-放热”动作, 以保证系统持续稳定的运行。利用多个房间的协同作用和精确的气流方向控制, RTO 能够达到

95% 以上的热回收效率, 同时确保 VOCs 的去除率始终保持在 99% 以上, 实现了节能和高效的双重优点。

1.2 RTO 类型与结构特点

RTO (蓄热式焚烧炉) 种类繁多, 常用的有两室 RTO、三室 RTO、多室 RTO 和旋转式 RTO 等。两室 RTO 采用两蓄热室组成, 利用切换阀对废气交替预热和净化, 其结构简单, 但是有残留废气不能完全回收; 在三室 RTO 中加入蓄热室使得气流切换更加持续, 热量回收效率更高, 净化效果更加平稳。多室 RTO 是以三室为单位, 进一步加大蓄热室的个数, 适合大风量和高浓度废气的治理, 可以达到更高的热能利用效率。旋转式 RTO 利用旋转填料床来确保废气与蓄热体之间的持续接触和热量交换, 其设计结构紧凑、占地面积较小, 特别适用于空间受限的场所^[2]。不同型号 RTO 蓄热体采用高热容量陶瓷材料交替吸热放热, 燃烧室内设置燃烧器以保证尾气中有机物在氧气作用下完全氧化反应转化成二氧化碳及水蒸气。

2 有机废气治理蓄热式焚烧炉工艺设计要点

2.1 废气参数分析

废气参数分析为 RTO 工艺设计提供了基石, 深度解析则直接决定了系统的运行稳定性和治理效能, 为了精确地定量废气中的复杂成分, 需要采用气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 等技术, 以确定 VOCs 的种类、分布和浓度差异, 如烷烃和芳烃等、卤代烃和其他不同的组分在氧化特性上存在明显的差异, 一些含氯的有机物需要在 850°C 以上的高温下进行分解以防止二噁英的生成, 而醇类和酮类化合物可能会因为热解过程中的中间产物而导致催化剂的中毒^[3]。浓度的波动必须

严格限制在爆炸下限 (LEL) 的 25% 范围内。过高的浓度可能导致燃烧室温度无法控制, 而过低的浓度则需要额外添加燃料以维持持续燃烧, 从而影响燃烧的经济效益。蓄热体的选型和切换阀设计受到废气流量特性的直接影响, 如果瞬时流量峰值超出设计值的 10%, 可能会引发气流的偏流, 从而导致局部蓄热体的热应力超出限制; 但流量骤降会诱发燃烧室回火并对陶瓷蓄热体结构造成损伤。温度和湿度参数需要协同考虑, 进口尾气温度高于 40°C 会减弱蓄热体的热回收效率, 湿度较大的尾气需要经过冷凝除湿才能避免燃烧室内水蒸气的冷凝对装置的腐蚀, 同时需要对废气的露点温度进行监测, 以避免蓄热体的表面结露造成压降急剧增加。另外, 尾气中颗粒物浓度要求小于 $5\text{mg}/\text{m}^3$, 需要对硅氧烷等易聚物质进行预处理除去, 否则会造成蓄热体孔道的堵塞和热效率的衰减。采用多维度参数耦合分析的方法可以建立废气热值模型和燃烧动力学方程, 从而为之后的预处理工艺和燃烧室负荷的制定提供科学依据。

2.2 预处理设施设计

预处理设施设计是保障 RTO 系统长效运行的核心屏障, 需针对废气特性构建多层次防护体系, 在除尘环节, 需依据颗粒物粒径分布与浓度梯度精准匹配设备, 粒径 $>5\mu\text{m}$ 的粉尘优先采用干式过滤, 通过折叠滤筒或覆膜滤袋实现 99.9% 的拦截效率, 同时需设置压差传感器实时监测滤材堵塞状态; 而粒径 $<1\mu\text{m}$ 的油雾需配置静电除油器, 利用高压电场使微粒荷电后沉积于集尘极, 避免油膜覆盖蓄热体导致热效率衰减。脱酸单元需根据酸性气体成分定制工艺, HCl 、 SO_2 等水溶性酸气采用碱液喷淋塔, 通过填料层增大气液接触面积, 控制 pH 值在 6-9 范围内防止设备腐蚀; 对于 HF 等难溶性酸气, 则需引入氢氧化钙干法吸附, 通过流化床反应器实现深度净化。调质系统需集成浓度监测与稀释风阀联动控制, 当废气中 VOCs 浓度接近爆炸下限时, 自动引入洁净空气稀释至安全阈值以下, 同时需设置紧急旁通管道, 在仪表故障时 10 秒内切换至安全排放模式。此外, 预处理设备需采用防爆设计, 喷淋塔与风机选用 316L 不锈钢材质以抵御腐蚀, 电气元件达到 Ex d II CT4 防爆等级, 并配备氮气吹扫接口防止可燃气体积聚, 通过多层次冗余设计构建本质安全型预处理体系^[4]。

2.3 炉体结构设计

炉体结构设计是 RTO 热力学性能与安全性的关键载体, 需在高温氧化环境与热应力循环中实现能量转化与结构稳定的双重平衡。燃烧室作为核心反应区, 其容积设计需基于停留时间 ($\geq 0.75\text{s}$) 与湍流强度双重约束, 采用 CFD 数值模拟优化炉膛几何结构, 通过缩口扩张式流道强化气固传质, 使 VOCs 分子与氧气充分混合, 同时控制燃烧区温度场均匀性, 避免局部超温引发 NO_x 生成或蓄热体热震损伤。蓄热室结构设计需兼顾热回收效率与流体阻力, 陶瓷蓄热体床层高度依据热效率目标 (通常 $\geq 95\%$) 确定, 采用 MLM® 板式填料替代传统矩鞍环, 通过三维波纹结构将比表面积提升至 $300\text{m}^2/\text{m}^3$, 压降降低 40%, 同时需设置气流均布板与导流锥, 消除入口死区并抑制偏流现象。切换阀作为气流导向核心部件, 需选用气动双偏心蝶阀, 阀板采用 316L 不锈钢经激光熔覆硬质合金, 实现 10^6 次开闭周期无泄漏, 切换时间严格控制在 1 秒内以减少未处理废气逃逸。炉体壳体采用双层夹套结构, 内层为 12mm 厚 310S 耐热钢抵抗高温氧化, 外层为 Q345R 碳钢承受机械载荷, 中间填充硅酸铝纤维模块实现隔热, 表面温度 $\leq 60^{\circ}\text{C}$, 同时设置热电偶矩阵实时监测壳体热膨胀, 通过膨胀节补偿结构变形, 确保炉体在 1200°C 热冲击下仍能维持密封性。

2.4 换热器设计

换热器设计作为 RTO 热能利用效率和运行经济性的核心中枢, 需要在高温氧化和周期性热冲击过程中进行能量梯级回收和结构可靠性的协同。蓄热体为换热介质的选择需要兼顾热容, 阻力和抗热震性能; MLM 板式陶瓷采用微通道阵列结构, 比表面积拓展到 $350\text{m}^2/\text{m}^3$, 与传统蜂窝陶瓷相比, 热回收效率得到了提高, 而莫来石/堇青石复合基体的使用使得热震稳定性在 1250°C 冷热循环 1000 次后未出现裂纹, 床层的高度应根据热效率的目标进行动态调整, 95% 的热回收率需要配置 2.4-2.7m 的有效层厚, 并利用 CFD 模拟来消除气流短路和温度梯度。气流分配系统利用多孔介质均流板和导流翅片相结合的方式, 使得入口速度场的偏差 $\leq 1^{\circ}$, 出口温度的均匀性保持在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 范围内, 从而避免了因局部过热造成蓄热体烧结的问题。在切换阀与蓄热室的连接位置安装了柔性石墨盘根密封装置, 并配合氮气正压保护措施, 成功地将泄露率压降到了 0.05% 以下。换热器壳体的设计需要同时考虑承压和隔热两方面的因素, 使用 16MnDR 低合金钢进行应

力消除后,在内壁喷一层厚度为 0.5mm 的 A1203 陶瓷涂层以抵抗高温腐蚀,外层复合硅酸钙-纳米孔气凝胶双层保温,使表面热损失 $\leq 1.5\%$ 。另外还需要建立热电偶阵列和红外成像系统对蓄热体的温度场进行实时监控,并在局部热点大于 1100°C 时,自动启动切换程序,并通过压差传感器监测床层积灰情况,结合脉冲反吹装置实现在线清灰,确保换热器在 80000 小时连续运行中热效率衰减率 $<3\%$ 。

2.5 安全设计

安全设计作为 RTO 系统抗御极端工况,确保人员和设备安全最重要的一道防线,需要建立多层次防护体系来应对高温,爆炸和腐蚀复合风险^[5]。燃烧室需要配置双重超温保护、热电偶矩阵对温度场进行实时监控、当地温度超过 950°C 后主控系统会自动断开燃料供应,开始氮气吹扫,同时冗余布置的独立温控仪触发紧急泄压阀使主系统发生故障后高温烟气进入安全焚烧炉。防爆设计穿越了气流路径,切换阀组采用了双电磁阀联锁控制,阀体的泄漏率通过氦质谱检漏仪验证 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,在阀腔内嵌入压力传感器对气密性进行监控,在压差大于 500Pa 的情况下触发声光报警切换到旁通模式;在废气管道上安装阻火器和爆破片相结合的装置,阻火器波纹板之间的缝隙 $\leq 0.2\text{mm}$,可以阻隔火焰的传播,并将爆破片的爆破压力定为 0.1MPa,用于瞬态超压的释放。可燃气体探测系统覆盖预处理区与炉体周边,电化学传感器对 VOCs 的响应时间 <20 秒,浓度达到 LEL 的 25%时联动启动事故风机,浓度突破 50%则触发全厂 ESD 系统。消防设备运用了泡沫与水雾的联合技术,在炉体的顶部和切换阀组的周围设置了环形管道网络,雾化喷头的覆盖半径可达 3m,而水雾的粒径则被控制在 $100\text{--}300\mu\text{m}$ 范围内,以提高隔热和窒息的效能。另外电气系统贯彻 Ex d IICT4 的防爆标准,变频器和 PLC 控制柜均为正压通风型,仪表风管路中安装有露点检测仪,避免冷凝水造成短路,并通过多维度冗余设计搭建了本质安全型 RTO 系统。

2.6 经济性考量

经济性考量作为 RTO 系统全生命周期成本优化中的核心主张,需要在环保合规和投资回报之间找到一种动态平衡。在设备的初始投资阶段,需要将资金细分到各个子系统,其中蓄热体的成本大约占到 25%–30%,而使用 MLM®板片式陶瓷的单价比传统的蜂窝陶瓷高出 15%,但是它的热回收效率增

加多产生的燃料节省,可以用 1.8 年就可以抵销差价;将切换阀组和燃烧器作为高故障率的组件,选择进口品牌虽然会增加 15%的购买成本,但是 MTBF (平均无故障时间)可以延长到 8000 小时,从而使维护费用降低了 40%。运行成本中,燃料消耗占比达 60%–70%,需结合废气热值与浓度波动设计智能控制系统,当 VOCs 浓度 $>3\text{g}/\text{m}^3$ 时自动切换至自持燃烧模式,减少天然气补燃量;通过对变频风机和切换阀的优化,电力成本可以被压缩 25%。同时,采用了永磁同步电机和智能调度算法,可以根据实时的流量来调整转速,从而避免了大马拉小车的情况。维护的费用需要考虑到蓄热体的清灰周期和催化剂的更换费用。陶瓷填料每隔 3 年需要进行脉冲反吹再生,而每隔 5 年则需要对比表面积的衰减率进行抽样检测。当其低于 $180\text{m}^2/\text{m}^3$ 时,应进行整体替换;催化剂的使用寿命在很大程度上受到废气成分的影响,因此需要对含有硫氯的废气进行预处理,以便将其延长到 24000 小时,否则可能会急剧缩短到 8000 小时。某些地区为节能项目提供了 15%–20%的设备投资补助,同时,RTO 排放的 CO_2 在碳交易市场上可以转化为每吨 50–80 元的利润,对投资回收期进行全周期成本建模,可以将其压缩到 2.5 年之内。

3 结论

RTO 工艺设计需以废气特性为核心,通过精细化预处理、高效蓄热体选型、智能化安全控制及全生命周期成本分析,实现环保效益与经济效益的平衡。未来,随着新型蓄热材料(如金属泡沫)与 AI 优化算法的应用,RTO 技术将向更高热效率、更低能耗方向发展。

[参考文献]

- [1]李党勇,于伟锋,张召锋.有机废气治理蓄热式焚烧炉工艺设计[J].安装,2024(6):73–76.
- [2]蒋海涛,刘笑颖,何文婧,等.蓄热式热力焚烧炉(RTO)的发展趋势[J].河南科技,2024,51(24):85–89.
- [3]吕后斌.锅炉热力焚烧技术在有机废气处理工程中的应用[J].Engineering Science Research&Application,2025,6(3).
- [4]李得祥,黄斌.多床式 RTO 焚烧炉床层温度动态修正设计[J].山东化工,2023,52(2):217–218.
- [5]张天波.农化废气 RTO 腐蚀分析及材质选择[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2023.