

煤化工行业 RTO 炉在焦化企业 VOCs 治理的应用 及其成本控制分析

田顺良（灵石县中煤九鑫焦化有限责任公司，山西 晋中 032600）

摘要：煤化工行业焦化企业的 VOCs 治理，RTO 炉发挥着关键性的作用，能够有效提高 VOCs 治理效果，保障焦化生产的安全、环保，通过对能源的回收效率，有效降低运行成本。基于此，本文围绕着煤化工行业 RTO 炉在焦化企业 VOCs 治理的应用展开讨论，分析 VOCs 废气的特点与治理难度，明确 VOCs 废气的来源与成分，结合各种技术难点问题，探讨相关解决措施，充分利用 RTO 炉的技术优势，并针对 VOCs 特性进行优化设计以及全流程精细化管控，为 RTO 炉的高效、稳定运行提供支持，同时提高其经济性。

关键词：煤化工行业；RTO 炉；焦化企业；VOCs 治理；成本控制

中图分类号：X784

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）032-0076-03

Application of RTO Furnaces in the Coking Industry for VOCs Treatment and Associated Cost Control Analysis

TIAN Shunliang(Lingshi County China Coal Jiuxin Coking Co., Ltd., Jinzhong Shanxi 032600, China)

Abstract: In the treatment of volatile organic compounds (VOCs) within the coking sector of the coal chemical industry, Regenerative Thermal Oxidizer (RTO) furnaces play a pivotal role. They effectively enhance the efficiency of VOCs treatment, ensure safe and environmentally friendly coking production, and contribute to reduced operational costs through improved energy recovery efficiency. This paper centers on the application of RTO furnaces for VOCs treatment in coking enterprises of the coal chemical industry. It analyzes the characteristics and treatment challenges of VOCs-laden waste gas, identifies the sources and composition of these emissions, and discusses relevant solutions in light of various technical difficulties. By leveraging the technical advantages of RTO furnaces and implementing optimized designs tailored to VOCs characteristics, along with refined whole-process management and control, this study aims to support the efficient and stable operation of RTO systems while enhancing their economic viability.

Keywords: Coal chemical industry; RTO furnace; Coking enterprises; VOCs treatment; Cost control

焦化是煤化工生产的重要环节，针对煤炭进行高温干馏处理，使其转化为气体燃料和化工原料。焦化生产有着高能耗、高污染的特点，在环保标准日趋严格的情况下，应该积极推动生产工艺的绿色转型，进而加强污染治理。在焦化生产中，挥发性有机物化合物（VOCs）是主要的污染物，其成分复杂且危害性高，治理的难度较大。焦化企业在 VOCs 治理的过程中，应用蓄热式热氧化炉（RTO 炉）作为治理设备，可以高效、稳定的进行 VOCs 废气的处理。与此同时，在控制能源成本、减少物料消耗、创造附加收益等方面，RTO 炉具有显著的优势，能够提高焦化企业 VOCs 治理的经济性。针对 RTO 技术进行改进和优化，设计功能更加完善的 RTO 系统，能够有效提升 VOCs 治理的净化效率与稳定性，能够适应更多复杂、多样的工况。

1 VOCs 废气的特点与治理难度分析

1.1 VOCs 废气的来源与成分

VOCs 是焦化生产中的气态污染物，对于生态环境、人体健康均有着严重的危害性。在炼焦、煤气净化、化产品储运、废水处理等工艺环节，均会排放 VOCs

废气。在炼焦过程中，焦炉炉体因密封不严而发生泄漏，会导致 VOCs 的排放。装煤、推焦过程中的粗煤气和烟尘发生散逸，排放出的气体中的 VOCs 含量较高。焦炼环节产生的废气，有着温度高的特点，其中含有水蒸气和高沸点有机物，甲烷、轻质苯系物、多环芳烃、含硫化合物是主要的污染物。炼焦环节排放的 VOCs 混合有氢气时，在高温环境下存在燃烧、爆炸的风险。在煤气净化的过程中，焦油储槽、中间产品储槽的呼吸口是 VOCs 废气的重要来源。脱氨、脱硫后产生的尾气以及真空泵的排气，均混合有 VOCs 废气，废气中的主要成分以苯系物为主，同时混有萘、酚、喹啉、二氧化硫、噻吩、氰化氢等成分。在化工产品的储运环节，使用固定顶立式储罐对液体化工产品进行储存，其管道阀门是 VOCs 废气的排放源。在装卸化工产品的过程中，会产生温度变化、液位波动等情况，槽罐内的 VOCs 会发生逸散、泄漏。该环节出现 VOCs 废气排放的情况，多表现为瞬时浓度高，苯系物、多环芳烃、酚类是 VOCs 的主要成分。在焦化生产的废水处理环节，构筑物表面逸散是 VOCs 废

气的主要来源,苯系物、酚类、脂肪烃、硫化氢、氨气是 VOCs 废气的主要成分。该环节的 VOCs 废气排放量较大,有着浓度低、湿度高的特点,其中含有较多具有腐蚀性的物质,对于生产设备形成损害^[1]。

1.2 技术难点

VOCs 的成分较为复杂,在治理过程中存在着许多技术难点。在 VOCs 废气中,不同成分之间会相互影响,产生协同或拮抗的作用,导致治理难度的升高。在焦化生产的过程中,VOCs 的排放浓度具有较大的不确定性,其波动幅度较大,加上风量的不稳定,使得 VOCs 的治理更加复杂。VOCs 废气中不同物质的物理性质、化学性质存在差异性,需要运用不同的治理措施。VOCs 废气治理的技术难点主要体现为技术选择、保持稳定性、安全控制以及预防二次污染等多个方面。

1.2.1 技术选择

在技术选择方面,由于 VOCs 废气的成分复杂,单一的治理技术主要对某一种或某几种成分有效,往往需要同时运用多种治理技术。选择治理技术进行 VOCs 废气的处理时,需要对废气的特征进行精准诊断,根据废气中各种成分的浓度、物理和化学性质,匹配合适的技术^[2]。

1.2.2 保持稳定性

在 VOCs 废气的治理过程中,由于浓度、风量的波动,难以稳定的控制 VOCs 废气排放量。运用催化氧化技术的过程中,存在着催化剂失活的问题,难以使 VOCs 废气治理稳定达标。运用吸附技术的过程中,由于控制不精准,会出现吸附剂饱和的情况,促使 VOCs 废气的再生,不能在治理后稳定达标。

1.2.3 安全控制

在 VOCs 治理的过程中,安全控制是十分重要的环节,需要对 VOCs 废气浓度进行监测,评估其发生爆炸的风险,并需要采取各种安全防护措施。在此基础上,应该对各种潜在的点火源进行识别,检查相关设备的设计、操作情况,及时消除风险。

1.2.4 二次污染物

二次污染物的产生是 VOCs 废气治理过程中的常见难点问题。在 VOCs 治理环节,氧化温度不足、混合不充分的情况下,会导致燃烧不完全,不仅会出现治理效果不佳的情况,还会产生新的有毒、有害物质。VOCs 废气中的无机组分在高温氧化后转化为有害的污染物。另外,完成 VOCs 治理后,有固态或液态废物的产生,同样对环境、人体健康具有危害性,需要进行规范处置。在处置固态或液态废物时,需要额外增加治理成本^[3]。

2 RTO 炉在焦化 VOCs 治理中的技术优势

在焦化 VOCs 治理中,RTO 炉的应用,可以在高温条件下,对 VOCs 进行氧化处理,生成无毒无害产物的同时,对于氧化过程中产生的热量进行回收和重复利用,既可以降低污染、又能够节约能源,充分满足生产工艺绿色转型的需求。该技术具有净化效率高、成本控制、处理范围广、适应性好等优势。

2.1 净化效率高

RTO 炉在焦化 VOCs 治理中的应用,能够对废气进行高效的净化。在 RTO 炉中,VOCs 可在 800℃ 以上的高温环境下发生分解,各种有机物的分子链发生断裂后,促使其彻底分解,进而形成无害产物,以二氧化碳和水为主,其净化效率和净化效果显著优于吸附、吸收等手段,并可以降低二次污染发生风险。RTO 炉的应用,能够为 VOCs 的治理提供稳定的高温环境。在废气浓度发生波动后,可通过补充燃料的方式,对于氧化温度进行控制,满足高效净化的需求。结合指前因子(A)、活化能(E_a)、理想气体常数(R)、反应温度(T),按照公式 $k=A \cdot e^{-E_a/R}$ 进行反应速率常数(k)的计算。在 RTO 炉温升高后,有机物的分解速率会显著提升。在不同的工况条件下,RTO 炉可以保持较高的净化效率,进而提高 VOCs 治理的稳定性。

2.2 成本控制

RTO 炉的应用,不仅能够在净化 VOCs 方面发挥重要的作用,还能够对热能进行回收、利用,有效降低运行成本,提高焦化企业 VOCs 治理的经济性。RTO 中的陶瓷蓄热体,可以将高温烟气的热量吸收、储存。针对 VOCs 废气进行处理时,将内部储存的热量释放,对 VOCs 废气进行预热处理,使其在高温环境中发生氧化反应,将有害有机物转化为无害的二氧化碳和水。RTO 炉的热回收效率高,其运行过程中的能源消耗以电能为主,燃料的消耗量大幅减少。RTO 炉在焦化 VOCs 治理中的应用,能够实现对能源的综合利用。RTO 炉的系统稳定性高,可以减少 RTO 炉的运行维护方面的成本投入。在焦化生产中,应用 RTO 系统进行富余热量回收,回收的热能可运用于其他生产环节,既能够满足高效生产的需求,又能够减少能源消耗,并创造能源输出收益^[4]。

2.3 处理范围广

RTO 是具有高度包容性的治理技术,其处理范围广泛。在 RTO 炉中,通过高温氧化的方式,可以对 VOCs 中的烷烃、烯烃、芳香烃、多环芳烃等有机物进行高效处理。VOCs 废气处于中高浓度时,RTO 有着良好的处理效果。VOCs 中含有硫、氯等成分时,

会在高温氧化反应中生成有污染性的酸性气体 (SO_2 、 HCl)，可以在前期进行预处理或是在后期进行湿式洗涤，提高 VOCs 废气处理效果，避免酸性气体的超标。

2.4 适应性

RTO 炉在焦化 VOCs 治理中的应用，可在工况波动的情况下保持稳定的运行状态。在 RTO 系统中，利用监测仪器，持续监测废气浓度，及时了解浓度波动情况。根据废气的浓度波动情况，利用自动控制系统，通过掺混空气（浓度过高）、补燃量（浓度过低）等方式，对于废气浓度进行控制。在 RTO 中，为了应对风量的波动情况，可以利用变频风机进行调节，使整体运行状态保持稳定。基于负荷波动响应的动态模型进行分析，结合陶瓷质量 (m)、传热系数 (h)、换热面积 (A)、蓄热体的比热容 (c_p) 等条件，按照公式 $\tau = m \cdot c_p / h \cdot A$ 进行计算热惯性时间常数 (τ)，进而评估 RTO 系统的温度稳定性。通过应用高比热容陶瓷或增加填料量的方式（提高 $m \cdot c_p$ ），RTO 炉的稳定性能够显著增加。在焦化生产规模较大的情况下，多个单元并联运行，根据不同生产单元的需求进行调节，使相关操作更具弹性。RTO 系统的应用，能够在长周期的运行过程中保持稳定。

3 RTO 炉在焦化企业 VOCs 治理中的设计与应用

3.1 针对 VOCs 特性的设计

在焦化企业 VOCs 治理中，针对 RTO 炉的设计，应该对 VOCs 的特性进行全面的了解。该过程中，针对风量、VOCs 各成分的浓度范围、温度、湿度、含尘量等各项参数进行精准核算。其中，在核算风量的过程中，采取实测或理论计算方法，得出平均风量的最大值、最小值。在风量的设计中，应该留有 10~15% 左右的余量。明确 VOCs 各成分种类以及浓度范围后，确定氧化温度，进而合理选择预处理工艺。将焦化废气直接加入 RTO 系统中，存在着较高的风险，需要进行预处理。在预处理系统的设计中，需要将废气中的油、尘、酸性物质进行去除。使用具有除油、去尘装置，将废气中焦油雾、颗粒物清除，避免出现 RTO 蓄热体堵塞的情况。碱洗塔的应用，可用于处理无机酸性及碱性气体，减少废气的腐蚀性。在此基础上，利用具有除湿、降温装置，对于废气的温度、湿度进行控制，同时将高沸点物质清除。缓冲罐的应用，能够创造安全缓冲时间和空间，进而为 VOCs 治理创造良好的基础条件^[5]。

以某焦化企业的 VOCs 治理为例，在 RTO 系统的设计中，其 RTO 炉为三塔式氧化温度为 850℃ 左右，停留时间 $\geq 1.0\text{s}$ ，热回收效率 $\geq 95\%$ ，蓄热体为高性能陶瓷。RTO 炉中与废气接触的低温部分使用具有良

好抗酸碱腐蚀性能的玻璃钢，燃烧室、蓄热室的材料选用耐高温、耐腐蚀的不锈钢。在安全系统设计中，于进口处设置监测仪器，对于烟气浓度进行监测，并设定 VOCs 浓度的安全阈值（25%LEL）。VOCs 浓度达到阈值后进行自动报警，并进行联锁停机，避免引发安全事故。阻火器、爆破片的安装，对于主体设备具有良好的保护作用。配备应急电源，在主电源发生故障后启用。在 RTO 出口，余热锅炉的安装是用于热能回收，进行余热蒸汽产出，每小时可产出饱和蒸汽约 1.5t，蒸汽输送至厂区低压蒸汽管网，发挥工艺保温作用，其年创造收益接近 300 万元。

3.2 运行过程中的全流程精细化管理

RTO 炉在焦化企业 VOCs 治理中的应用，应该对整个流程进行精细化管理。针对 RTO 系统的启动、运行、停机进行规范化控制，对于温度、压力、压差、LEL 值、燃料消耗等参数值进行记录，分析各项参数的变化情况，对于异常情况进行识别。定期对 RTO 炉进行维护，定期对蓄热体进行清洗，防止其发生堵塞。检查蓄热体有无碎裂的情况，及时予以更换。检查切换阀门的密封性、让赛琪的稳定性，检验各个设备的运行性能。通过运行管理与维护，保障 RTO 炉安全稳定运行，为焦化企业 VOCs 治理创造良好的基础条件。

4 结论

综上所述，在 VOCs 治理的过程中，需要克服技术选择、保持稳定性、安全控制以及预防二次污染等方面的难点问题。RTO 炉在焦化 VOCs 治理中的应用，有着净化效率高、经济性好、处理范围广、适应性好等优势，能够更好的处理 VOCs 废气，保障生产安全，满足节能环保的需求。基于 VOCs 特性进行 RTO 炉的设计，同时进行全流程精细化管理，保障其高效、稳定运行，并加强成本控制，创造良好的经济效益。

参考文献：

- [1] 赵瑞娟. 基于工业生产 VOCs 的危害分析及治理方案研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(14): 153-155.
- [2] 田陆峰. 煤化工企业 VOCs 减排难题及对策措施 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2025(07): 63-66+69.
- [3] 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.
- [4] 吕义国. 焦化 VOCs 治理工艺的优化 [J]. 燃料与化工, 2025, 56(02): 54-55+60. = 59
- [5] 夏茂胜. RTO 蓄热式焚烧炉在 VOCs 治理中的应用 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47(12): 111-112.

作者简介：

田顺良 (1986-)，男，汉族，山西稷山人，大专，助理工程师，研究方向：焦化企业 VOCs 治理技术。