

浅析活性炭吸附-催化氧化装置设计及安全风险控制

寇耀天¹, 王荣辉², 李泮林³, 李俊波⁴

四川源之蓝环保科技有限公司, 四川 绵阳 621000

摘 要： 在有机废气^[1]治理工艺中, 活性炭吸附^[2] + 催化氧化脱附治理工艺是把两者的优点有效地结合起来, 即先利用活性炭进行吸附浓缩, 当活性炭吸附接近饱和时, 再通过催化氧化设备并利用其热空气加热活性炭吸附床进行脱附的工程。然而, 在现实工程中, 因温度控制不当、温度过高、加热速度过快或含大量杂质时, 活性炭中的 VOCS 可能迅速分解产生大量的高浓度气体, 一旦温度达到着火点, 便会引发燃, 造成事故或火灾。本文主要针对挥发性有机物污染控制工程^[3]中低浓度大风量 VOCS 治理: 活性炭吸附 + 催化氧化脱附工艺进行优化方案介绍与安全相关设计进行论述, 减小或避免运行的安全风险。

关 键 词： 活性炭; 吸附; 催化; 氧化; 安全

Design and Safety Risk Control of Activated Carbon Adsorption-Catalytic Oxidation Device

Kou Yaotian, Wang Ronghui, Li Fenglin, Li Junbo

Sichuan Yuanzhan Environmental Protection Technology Co., LTD. Mianyang, Sichuan 621000

Abstract： In the VOCS^[1] treatment process, activated carbon adsorption^[2] + catalytic oxidation desorption treatment process is to effectively combine the advantages of the two, that is, the activated carbon is first used for adsorption and concentration, when the activated carbon adsorption is close to saturation, and then through the catalytic oxidation equipment and the use of its hot air to heat the activated carbon adsorption bed for desorption engineering. However, in real engineering, due to improper temperature control, too high temperature, too fast heating speed or containing a large number of impurities, the VOCS in activated carbon may rapidly decompose and produce a large number of high concentration of gas, once the temperature reaches the ignition point, it will cause combustion, resulting in accidents or fires. This paper mainly focuses on VOCS treatment in volatile organic matter pollution control project^[3] with low concentration and high air volume: activated carbon adsorption + catalytic oxidation desorption process optimization scheme introduction and safety-related design were discussed to reduce or avoid the safety risk of operation.

Keywords： activated carbon; adsorption; catalysis; oxidation; secure

引言

近年来, 随着环境污染形式的日益严峻, 国家加快了大气污染防治措施及一系列相关的行业、地方治理标准的出台, 同时国家在环境改善方面的激励政策措施也推动了行业的发展。各地区纷纷出台包括“全面淘汰低效治理设施”, 全面淘汰低温等离子、光催化和光氧化或单一的活性炭等低效治理设施, 推进设施升级改造”^[4], 传统的有机废气治理技术已经无法满足当今高标准、低排放的环保要求。其有机废气有效治理工艺, 如: 活性炭吸附 + 催化氧化^[5]脱附; 沸石转轮 + 催化氧化 (CO) 脱附; 沸石转轮 + 蓄热催化氧化 (RCO) 脱附; 沸石转轮 + 蓄热热力氧化 (RTO) 等已成为 VOCS 治理工艺的主流。具体选择哪种治理工艺, 取决于废气的主要成分、浓度、风量以及废气的温度等主要参数。

活性炭吸附 + 催化氧化脱附工艺的特点就是将一定风量、较低浓度 (一般入口浓度 < 200mg/m³) 有机废气通入活性炭吸附床, 与蜂窝状活性炭充分接触净化, 再通过催化炉出来的 100° C 以上温度脱附活性炭, 再生后转换成小风量、较高浓度的有机废气被送往催化床进行催化氧化反应。在 300°C 以上时有机物通过催化剂作用被氧化分解成二氧化碳、水等无害气体。

但是市场上部分活性炭吸附 + 催化氧化脱附装置, 存在处理效率不达标且活性炭再生时, 活性炭箱温度升不到位、活性炭燃烧的事

作者简介:

寇耀天 (1995.10-), 男, 汉族, 四川绵阳, 本科, 研究方向: 环境工程项目管理及大气污染治理工艺研究;

王荣辉 (1973.08-), 女, 汉族, 四川三台, 中职/大专; 研究方向: 环境规划与管理、咨询及大气污染防治方向的研究;

李泮林 (1994-), 男, 汉族, 四川绵阳, 本科, 二级建造师/工程师, 主要从事大气污染与处理技术研究与工程应用;

李俊波 (1972-), 男, 汉族, 四川绵阳, 本科, 环境工程高级工程师, 研究方向: 大气污染控制研究与治理工程技术应用。

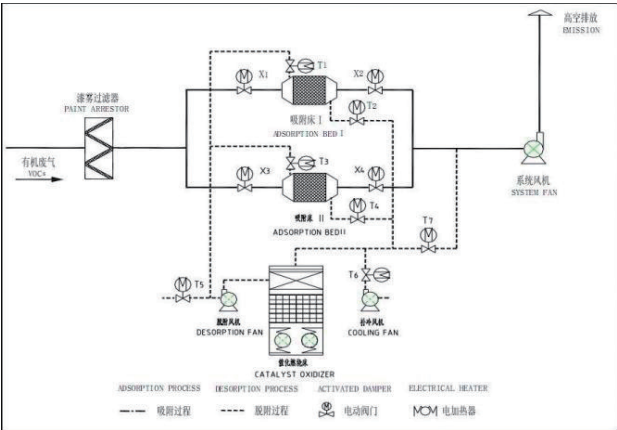
故，给企业造成了很大的困惑及一定的经济损失。事实证明，只要前期对工况进行有效的分析，合理地选择相关的治理工艺和标准设计方案，其活性炭吸附+催化氧化脱附工艺也是在低浓度、易脱附成分工况下一种有效的处理方式，相对投资成本较低。

文章通过实际工程案例介绍了活性炭吸附+催化氧化脱附工艺的工艺路径、结构设计及安全设计。通过应用对比，优化后设计使整个系统完全达标、节能、延长了活性炭的使用寿命，减少了活性炭的更换周期频率，设备安全可靠。

一、活性炭吸附+催化氧化脱附工艺原理

常见有机废气成分，如二甲苯、乙酸乙酯、异丙醇等 VOCs，属于挥发性有机废气^[6]。活性炭吸附+催化氧化脱附是把两者的优点有效地结合起来。先利用活性炭固定床进行吸附，当活性炭吸附到一定程度时，利用催化炉内的热空气置换至100° C左右，加热活性炭吸附床，均匀升温100 ~ 110℃时，脱附出来的高浓度废气就可在催化反应床中进行氧化分解。反应后的高温气体经高效换热器^[7]再预热进入的低温高浓废气，另一部分达标废气直接排放。催化 CO设备关键部件选用国际知名品牌，以确保设备的安全性、可靠性。

以两箱（1+1）活性炭吸附+催化氧化装置为例，其工作过程可分为二个阶段，即活性炭吸附阶段和活性炭脱附再生阶段，两个阶段的工作原理如下：



>（图一）

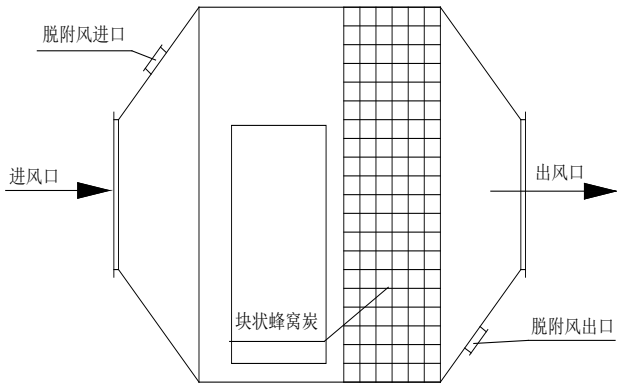
两箱（1+1）循环流程：废气送入活性炭箱 A 箱，当活性炭箱 A 接近饱和时，将处理气体自动切换到活性炭箱 B（活性炭箱 A 停止吸附操作，然后用热气流对活性炭箱 A 进行解吸脱附，将有机物从活性炭上脱附下来）。在脱附过程中，有机废气已被浓缩，浓度较原来提高几至十几倍，浓缩废气送到催化氧化装置分解，最后被成为 CO₂ 与 H₂O 排出。完成解吸脱附以后活性炭箱 A 进入待用状态，待活性炭箱 B 接近饱和时，系统再自动切换回来，同时对活性炭箱 B 进行解吸脱附，如此循环工作。（图一）

二、活性炭吸附固定床设计

（一）活性炭吸附单元

表 2-1 蜂窝活性炭的主要技术^[8]参数

规格	体密度	碘值	吸二甲苯	脱附温度
100×100×100mm	(380-450)kg/m ³	800mg/g	≥ 26%	<120℃



> 图 2-1 活性炭吸附器结构图

根据《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》^[2]（HJ/2026-2013），蜂窝活性炭过滤风速应≤1.25m/s，此次活性炭设计过滤风速为1.2m/s，对应过滤截面积为2.2*2.2m。同时，蜂窝活性炭装填厚度为500mm，考虑进出口大小头及检修空间，炭箱高度为2.3m，则单个活性炭箱外形尺寸为：L2.4*W2.4*H2.3m。以（4+1 为例）其设计及参数见下表

80000NCMH吸附床尺寸计算		
吸附床总数量	个	5
吸附数量	个	4
脱附数量	个	1
蜂窝活性炭空速	m/s	1.5
单个吸附床迎风面积计算值	m ²	4.07
吸附床规格计算值	长	2.02
	宽	2.02
吸附床规格实际取值	长	2.20
	宽	2.20
	高	0.60
单个吸附床迎风面积实际值	m ²	4.84
吸附床空塔速度实际值	m/s	1.26

80000NCMH蜂窝活性炭用量计算		
活性炭密度	kg/m ³	450
活性炭规格	长	100
	宽	100
	厚	100
活性炭吸附容量		8%
净化准效率		85%
单个吸附床活性炭体积	m ³	2.42
单个吸附床活性炭质量	kg	1089
活性炭总体积	m ³	12.10
活性炭总质量	kg	5445
单个吸附床吸附量	kg	87.12
吸附时间计算值	h	58.24
脱附时间计算值	h	14.56
吸附时间实际取值	h	15
脱附时间实际取值	h	3

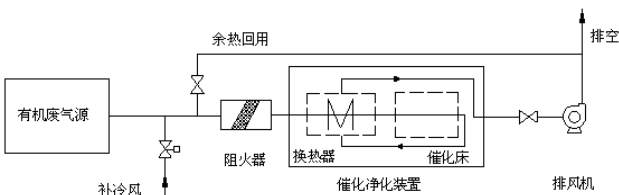
三、催化炉设计

催化氧化是典型的气-固相催化反应，其本质是活性氧参与的深度氧化作用。在催化氧化过程中，催化剂^[9]的作用是提高了VOCS的反应速率，加快了反应的进行。借助催化剂可使有机废气在较低的起燃温度条件下，发生无焰燃烧，并氧化分解为CO₂和H₂O，同时放出大量热能，其反应过程为：



催化作用机理：在一个化学反应过程中，催化剂的加入并不能改变原有的化学平衡，所改变的仅是化学反应的速率，而在反应前后，催化剂本身的性质并不发生变化。实际上，正是由于催化剂参与了反应，使反应改变了原有的途径，使反应的活化能降低，从而加速了反应速度。

通过加热装置，使气体达到氧化反应温度，再通过催化床催化剂的作用，使有机气体分解成二氧化碳和水，再进入换热器与低温气体进行热交换，使进入的气体温度升高达到反应温度。如达不到反应温度，这样加热系统就可以通过自控系统实现补偿加热，使它完全氧化，这样节省能源（图3-1）。



> (图3-1)

当催化床温度达到 280 ~ 350 °C时，催化氧化床开始反应，

利用废气氧化产生的热空气循环使用，浓度达到时电加热停止，不需要外加热，单床脱附，一般蜂窝活性炭脱附时间为 2-4 小时，设定时间活性炭吸附箱定时自动切换脱附，内部装填的贵金属催化剂使用寿命 > 10000 小时^[9]。整个脱附系统采用多点温度控制，保证脱附效果的稳定。

四、氮气保护系统

为了保证净化系统的运行安全，杜绝活性炭内部由于有机物蓄积同时温度的升高引起的起火隐患，采用氮气作为安全气体对活性炭箱进行保护。

当温度传感器检测到活性炭吸附床层内部温度超过临界点，则往活性炭吸附器内部注入氮气，杜绝活性炭与空气接触，当不具备燃烧三要素时，活性炭不会起火，保证运行系统的安全性。

五、结论

总之，固定床活性炭吸附^[10]+催化氧化脱附工艺在 VOCS 低浓度 VOCS 治理领域具有应用领域广等优点，对系统设计的关键还是在于前期工况（成分、浓度、温度条件）分析、预处理效果、结构设计、材料的选择等方面。系统除了要考虑其吸附与脱附效率、常规安全性外，还应考虑脱附易燃的低沸点物质、高沸点物质及聚合物、催化炉的安全爆炸下限的控制以及催化炉温度等因素，避免造成系统的不正常运行，甚至出现系统的燃爆风险。

参考文献

- [1] 有机废气的净化技术，作者陆震雄，化学工业出版社，2011 年 5 月
- [2] 吸附法工业有机废气治理工程技术规范（HJ2026-2013）.
- [3] 挥发性有机物污染控制工程，作者李守信、苏建华、马德刚，化学工业出版社出版，2017 年 8 月.
- [4] 《低效失效大气污染治理设施排查整治工作方案（征求意见稿）》环办便函〔2023〕400 号，2023 年 11 月.
- [5] 环境保护产品技术要求-工业有机废气催化净化装置（HJ-T-389-2007）.
- [6] 挥发性有机物治理实用手册（第二版），生态环境部编，中国环境出版集团出版，2021 年 10 月.
- [7] 换热器原理与设计（第 2 版），作者余建祖、谢永奇、高红霞，北京航空航天大学出版社出版，2019 年 10 月.
- [8] 工业有机废气治理用活性炭质量标准，2021 年 12 月.
- [9] 催化燃烧法工业有机废气治理工程技术规范（HJ 2027-2013）.
- [10] 固定床蜂窝状活性炭吸附浓缩装置技术要求，中国环境保护产业协会组织 / 团标 T.ACEPI34-2021.