

危废仓库采用沸石分子筛吸附苯条件探讨

唐红东

上海吾励环境技术有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i9.2885

[摘要] 苯(C₆H₆)是较为常见的化工原料,但由于其本身具有强烈的致癌性和致畸性,对苯的处理一直是行业关注的热点。本研究以存储含苯物料的危废仓库废气处理工程中,探究其中所应用的沸石分子筛的相关工况和条件对去除苯的影响。主要研究内容为:对某危废仓库的沸石分子筛吸附设备进出口苯浓度进行长期监测,并通过调节设备运行工况,如调节系统处理风量、系统进气浓度、不同季节湿度变化等来探究沸石分子筛对苯的吸附效果。同时对替换下来的沸石分子筛颗粒进行脱附浓度检测,总结出一般规律,为沸石分子筛高效去除苯提供更多的参考信息。

[关键词] 沸石分子筛; 吸附反应; 苯

中图分类号: O625.51+1 **文献标识码:** A

Discussion on the Conditions of Benzoic Acid Adsorption Using Zeolite Molecular Sieves in Hazardous Waste Warehouses

Hongdong Tang

Shanghai Wuli Environmental Technology Co., Ltd.

[Abstract] Benzene (C₆H₆) is a relatively common chemical raw material, but due to its strong carcinogenicity and teratogenicity, the treatment of benzene has always been a focal point in the industry. This study investigates the impact of operating conditions and parameters of zeolite molecular sieves on benzene removal in the exhaust gas treatment project of a hazardous waste warehouse storing benzene-containing materials. The main research content includes: long-term monitoring of benzene concentrations at the inlet and outlet of zeolite molecular sieve adsorption equipment in a hazardous waste warehouse, and exploring the adsorption efficiency of zeolite molecular sieves by adjusting operational conditions such as system airflow rate, inlet gas concentration, and seasonal humidity variations. Additionally, the desorption concentration of replaced zeolite molecular sieve particles was monitored to summarize general patterns, providing more reference information for the efficient removal of benzene using zeolite molecular sieves.

[Key words] Zeolite molecular sieve; Adsorption reaction; Benzene

随着工业化进程的加快,危险废物的产生量不断增加,其中苯作为一种常见的有机污染物,广泛存在于危废仓库中^[1]。苯不仅对人体健康有害,还可能通过挥发进入大气,造成环境污染^[2]。传统的苯处理方法如焚烧、催化氧化等存在能耗高、二次污染等问题^[3],因此开发高效、环保的吸附技术显得尤为重要^[4]。沸石分子筛作为一种多孔性、高比表面积的无机材料^[5],因其优异的吸附性能和稳定性^[6],逐渐成为吸附苯的研究热点^[7]。本文旨在通过实验研究,探讨沸石分子筛在危废仓库中吸附苯的条件,为实际应用提供参考。

1 实验方法

在该实验中,实验主体为某危废仓库一沸石分子筛吸附设备,设备主体尺寸为2000*3600*3760mm。装填有沸石分子筛的床

层尺寸为:400*3250*3250mm,所装载的沸石分子筛类型为ZSM-5型沸石,沸石采用粒径为 ϕ 3-5mm球状沸石分子筛颗粒,该型号沸石分子筛颗粒的堆重密度为1500kg/m³;沸石分子筛吸附床层与设备壳体间采用硅胶材质软胶垫进行二次密封。设备前后各设置600mm的检修空间,同时检修空间部分也作为设备前后端混风缓冲段;该沸石分子筛吸附设备进口风量为40000m³/h,废气经过沸石分子筛的空床停留时间(EBRT)为0.38s;危废仓库中含苯废气通过收集管道输送至沸石分子筛吸附设备中,废气中的苯通过床层时被沸石分子筛吸附,从而达到去除废气中的苯的目的。

该沸石分子筛吸附设备的运行情况为:以72h为一次更换周期,定时更换设备内沸石分子筛颗粒。在不同工况下利用便携式氢火焰离子化检测器(FID)和便携式温湿度测量仪在设备前后取样口

对设备进出口苯浓度及温湿度等数据进行检测并记录, 改变的条件变量分别为设备处理风量、进气废气温度和进气废气湿度。

为了具体量化沸石分子筛对苯的处理效率, 采用公式:

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{Q_1 \times C_1 - Q_2 \times C_2}{Q_1 \times C_1}$$

η —沸石分子筛处理效率;

m_1 —沸石分子筛进口苯物质总量, mg;

m_2 —沸石分子筛出口苯物质总量, mg;

Q_1 —沸石分子筛进口风量, Nm^3/h ;

C_1 —沸石分子筛进口苯浓度, mg/Nm^3 ;

Q_2 —沸石分子筛出口风量, Nm^3/h ;

C_2 —沸石分子筛出口苯浓度, mg/Nm^3 ;

通过调节离心风机频率改变进气风量, 进而调整废气经过沸石分子筛的空床停留时间 (EBRT), 以归纳不同风量情况下沸石分子筛对苯的影响, 改变风量及对应工况下空床停留时间如表1所示。

为进一步探究沸石分子筛是否对苯进行有效吸附, 选择同一批更换下来的沸石分子筛颗粒均匀混合后, 以5000mg为一组, 分出若干组分别采用一体智能马弗炉和刚玉坩埚, 对其进行不同脱附时间和不同温度梯度下的脱附实验。通过对比脱附前后沸石分子筛颗粒的质量变化, 判断沸石分子筛是否对苯进行有效的吸附。

表1 风量、空塔流速和停留时间关系表

风量 (Nm^3/h)	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
空塔流速 (m/s)	0.53	0.66	0.79	0.92	1.05	1.18	1.31
EBRT (s)	0.76	0.61	0.51	0.43	0.38	0.34	0.3

2 实验检测器材及工具

本实验使用的主要器材有风速仪、便携式氢火焰离子化检测器 (FID)、便携式温湿度测量仪、刚玉坩埚、一体智能马弗炉、电子天平等。

3 实验结果及数据分析

3.1 改变停留时间对吸附苯的影响

图2为进气苯浓度分别在50 mg/Nm^3 、100 mg/Nm^3 、150 mg/Nm^3 、200 mg/Nm^3 、250 mg/Nm^3 时, 通过调节处理风量 (30000~50000 Nm^3/h) 改变废气在沸石分子筛床层内的停留时间。

从图2中可观察到, 在任意固定苯浓度下, 处理效率均随处理风量的降低 (即停留时间延长) 而显著提升。例如, 当进气苯浓度为200 mg/Nm^3 时, 风量从50000 Nm^3/h 降至30000 Nm^3/h (停留时间由0.3秒增至0.51秒), 吸附效率从72%提升至89%。而这一现象本身也符合吸附动力学理论: 延长停留时间可增强气固二相间的传质过程, 使苯分子有更多机会扩散至沸石分子筛的微孔结

构内, 并与吸附微孔充分接触, 提高苯分子被沸石分子筛床内的微孔捕捉几率。

当进气浓度越高, 延长停留时间对沸石分子筛吸附效率的提升越明显, 例如250 mg/Nm^3 组中, 风量降低10%, 效率提升约20%; 而在50 mg/Nm^3 组中, 风量降低10%, 吸附效率提升约5%。这表明高浓度废气对停留时间更加敏感, 可能是高浓度下, 沸石分子筛床层表面颗粒快速饱和, 且由于停留时间不足, 部分高浓度废气直接穿透床层, 未形成有效吸附。

当风量低于35000 Nm^3/h 时, 效率曲线趋于平缓, 此时吸附过程已接近动态平衡。

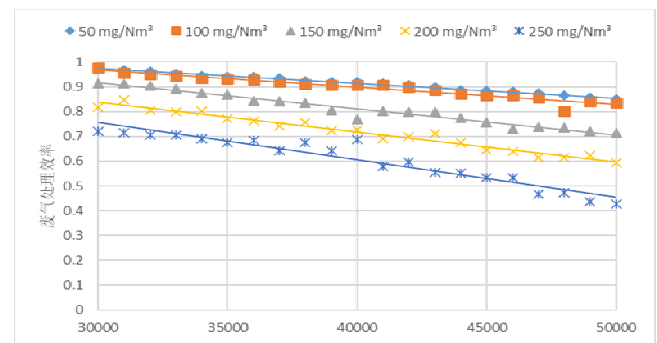


图2 不同风量条件下沸石分子筛对苯的处理效率关系图

3.2 改变进气浓度对吸附苯的影响

控制进气风量分别为30000 Nm^3/h 、35000 Nm^3/h 、40000 Nm^3/h 、45000 Nm^3/h 、50000 Nm^3/h 时, 不同苯浓度 (5~250 mg/Nm^3) 对沸石分子筛吸附效率的影响。

在相同风量下, 吸附效率随进气浓度的升高而降低。例如在40000 Nm^3/h 组中, 当浓度由50 mg/Nm^3 升至200 mg/Nm^3 时, 效率由72%降低至52%, 这一现象可能是因为高浓度废气中苯分子在单位时间内大量涌入, 导致沸石分子筛上部分微孔结构未被充分利用, 部分废气直接贯穿沸石吸附床层。同时, 浓度梯度的增大加速了传质阻力, 尤其在分子筛的中孔区域, 易形成局部浓度堆积, 导致吸附进程被进一步抑制。

当废气浓度低于30 mg/Nm^3 时, 废气对苯吸收效果受风量影响较小。例如10 mg/Nm^3 时, 30000 Nm^3/h 对苯处理效率约为98%, 而当风量上升至50000 Nm^3/h , 沸石分子筛对苯处理效率仍有97%, 此现象可说明沸石分子筛本身对苯具有优秀的吸附效果。

当进气风量越高, 沸石分子筛对苯吸附效率受浓度变化影响越明显。例如在35000 Nm^3/h 组中, 苯浓度由40 mg/Nm^3 上升至250 mg/Nm^3 , 处理效率由98%降低至82%, 吸附效率降低约16%。而相同苯浓度变化情况下, 在50000 Nm^3/h 组中, 沸石分子筛处理效率由80%降低至42%, 吸附效率降低约38%。这与 (一) 中所得出的“当进气浓度越高, 延长停留时间对沸石分子筛吸附效率的提升越明显”结论相符。原因可能是高浓度下, 沸石分子筛床层吸附面的沸石分子筛颗粒快速吸附至饱和, 而由于风量过大, 废气停留时间不足, 导致部分高浓度废气直接穿透床层, 未形成有效吸附。

3.3 改变温度、湿度对吸附苯的影响

由于废气相对湿度受废气本身温度影响,图3为不干扰废气本身绝对湿度的情况下,废气在不同季节中由于环境温度变化而导致的废气本身温度与相对湿度变化时同时对不同情况下效率的映射图。

由映射图可以看出,沸石分子筛对苯处理效率受湿度影响极大;比如当废气内相对湿度在40%时,沸石分子筛对苯吸附效率约在96%左右,而当废气内相对湿度达到55%时,吸附效率在92%左右。发生这种现象的原因可能是因为水分子与苯分子在沸石空隙中产生竞争吸附现象:当相对湿度上升时,水分子与微孔碰撞几率上升,吸附过程中水分子会优先占据吸附点位,导致苯的吸附容量下降。

当废气内相对湿度>70%后,沸石分子筛对苯吸附效率骤降;废气内相对湿度在60%时,吸附效率在90%左右,当废气内相对湿度达到80%时,吸附效率仅有70%,即相对湿度上升20%,沸石分子筛对苯的吸附效率下降20%。发生此种现象的原因可能是当湿度超过70%时,沸石空隙内的水蒸气发生凝结,形成水膜,导致沸石分子筛内部分吸附孔位被完全堵塞。

在相同湿度条件下,吸附反应受温度影响较为明显,如废气内湿度同处于70%时,18℃时沸石分子筛对苯吸附效率为90%左右,而当废气温度达到32℃时,吸附效率在82%左右;造成此种现象主要原因应该是吸附属于放热反应,而根据Le Chatelier原理,低温有利于平衡向吸附方向移动。

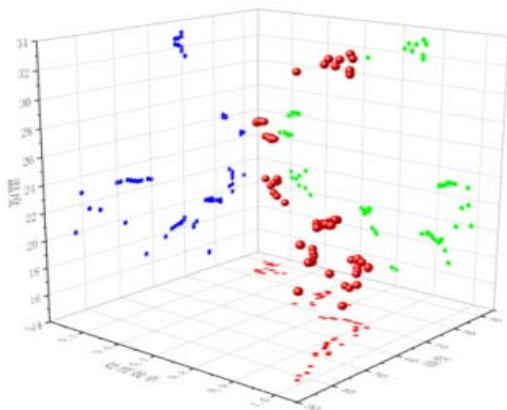


图3 沸石分子筛对不同温度、相对湿度废气中苯的吸附效率散点映射图

4 总结

通过上述实验分析,可得出以下几点结论:

(1)沸石分子筛对苯的吸附效果与停留时间有关,相同浓度条件下,停留时间越长,则对苯的处理效果越好;

(2)沸石分子筛对苯的吸附效果与进气浓度有关,相同风量条件下,进气浓度越高,则对苯的处理效果越差;

(3)由(1)和(2)可知,可通过精确控制停留时间与进气浓度,沸石分子筛可以实现对苯的高效去除;当废气浓度过高时,采用低风量长停留时间的方式进行处理,而低浓度场景下,则可适当提高风量以降低项目的投入及运维成本;

(4)在沸石分子筛吸附过程中,水分子与苯在吸附反应中存在竞争性现象,湿度越高则吸附效果越差,当废气相对湿度>70%时,沸石分子筛对苯的吸附效率将大幅度下降;在相同湿度条件下,环境温度越高,沸石分子筛对苯的吸附效果也会变低,但由于危废仓库本身内部温度变化不大,故在此种场景下,控制湿度是沸石分子筛吸附工艺的关键;

[参考文献]

[1]夏永娇.危废仓库VOCs废气处理设备的改造研究[J].清洗世界,2024,40(05):13-15.

[2]陈文剑.沸石吸附去除VOCs的研究进展及应用[J].石化技术,2024,31(09):18-19+14.

[3]马英,姚咏歌.沸石分子筛对工业涂装有机废气苯乙烯的动态吸附与再生实验研究[J].中国环保产业,2024,(11):66-69.

[4]苟东晓,孙佳星,苏宪章,等.VOCs吸附材料研究进展[J].山东化工,2024,53(08):114-116.

[5]唐子玉,赖世维,杨雪,等.吸附法处理苯系物的研究进展[J].当代化工,2022,51(03):732-735.

[6]袁艺,李泽晖,王亚玲.金属-有机骨架材料对环境典型苯系物的吸附研究进展[J].化工新型材料,2019,47(08):18-22.

[7]侯燕,龚越,朱玲,等.活性炭吸附苯过程工艺参数实验和数值模拟研究[J].工业安全与环保,2017,43(11):76-79+88.

作者简介:

唐红东(1998--),男,汉族,安徽六安人,本科,助理工程师,研究方向:生态环境工程。