

活性炭吸附处理有机挥发性气体影响因素

蒙府君

四川全过程安全环保技术服务有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i3.2598

[摘要] 活性炭吸附法具有工艺简单、净化效率较高、环境风险低、经济可行、操作方便等优点,在有机挥发性气体治理行业得到广泛应用。但是在实际使用过程中活性炭对有机挥发性气体的吸附效率各有差异。基于此,本文主要从活性炭自身物理化学性质、有机挥发性气体特性、操作参数、环境因素四大方面,系统阐述影响活性炭吸附有机挥发性气体效率的主要因素。

[关键词] 活性炭; 有机挥发性气体; 效率; 影响因素

中图分类号: TQ424.1 **文献标识码:** A

Influencing Factors of Activated Carbon Adsorption in the Treatment of Organic Volatile Gases

Fujun Meng

Sichuan Whole-Process Safety and Environmental Protection Technology Service Co., Ltd.

[Abstract] Activated carbon adsorption method is widely applied in the organic waste gas treatment industry due to its advantages such as simple process, relatively high purification efficiency, low environmental risk, economic feasibility, and convenient operation. However, in actual use, the adsorption efficiency of activated carbon for organic waste gas varies. This paper systematically elaborates on the main factors affecting the efficiency of activated carbon in adsorbing organic waste gas from four major aspects: the physical and chemical properties of activated carbon itself, the characteristics of organic waste gas, operational parameters, and environmental factors.

[Key words] Activated carbon; Organic waste gas; Efficiency; Influencing factors

前言

随着环保法规的日趋严格和“双碳”战略的推进,高效稳定的VOCs治理技术需求愈发迫切。活性炭吸附技术凭借其独特的孔隙结构和表面化学特性,在工业废气净化中占据重要地位,尤其适用于中低浓度、非连续性排放场景。然而,在实际应用过程中,活性炭对有机挥发性气体的吸附效率存在显著差异,这直接影响了治理效果和经济性。因此,深入探究影响活性炭吸附有机挥发性气体效率的主要因素,对于优化吸附工艺、提升治理水平、降低运行成本具有重要的理论意义和实践价值。

1 活性炭物理化学性质的影响

1.1 碘值对吸附效率的影响

活性炭的吸附性能主要由自身内部孔隙结构决定,碘值是微孔结构最为重要的表征。从便于实际操作的角度出发,主要对活性炭碘值提出了明确要求^[1]。

研究表明,碘分子(直径约0.5nm)能够有效进入活性炭的微孔结构并被吸附,因此碘值高低直接反映了活性炭微孔的数量和质量。当活性炭微孔发达时,其比表面积通常较大,可提供更多的吸附位点,从而表现出更高的碘值和更强的吸附能力。

煤质颗粒活性炭碘值不宜低于800mg/g;蜂窝活性炭碘值不宜低于650mg/g^[2]。碘值越高吸附性能更好,当活性炭的碘值从800mg/g提升至1200mg/g时,其对苯、甲苯等挥发性有机物的吸附容量可增加40%~60%。

1.2 亚甲基蓝值对吸附效率的影响

亚甲基蓝值是评价活性炭中孔结构的重要指标。亚甲基蓝分子尺寸较大(约1.5nm),只能进入活性炭的中孔和部分大孔,因此亚甲基蓝值主要反映活性炭中孔结构的发达程度。微波辐照氯化锌法制备的杏核壳活性炭在碘值达到1670.25mg/g的同时,亚甲基蓝吸附值为200.0mL/g。因此,通过优化制备工艺,可以同时获得良好的微孔和中孔结构,使活性炭同时具有高碘值和高亚甲基蓝值。

1.3 四氯化碳值对吸附效率的影响

四氯化碳值是评价活性炭气相吸附性能的又一重要指标,与碘值存在一定正相关但又不完全一致。四氯化碳分子(直径约0.6nm)与碘分子尺寸相近,理论上两者吸附性能应高度相关。四氯化碳吸附测试通常在气相中进行,且涉及动态吸附过程,因此还受活性炭颗粒外扩散阻力和床层堆积密度等因素影响。研究

表明,两种活性炭可能具有相近的碘值但表现出不同的四氯化碳吸附率,这由于它们的颗粒形态和孔径分布差异。例如,蜂窝活性炭虽然碘值可能略低于粉末活性炭,但其独特的蜂窝结构提供了良好的气流分布和较低的压降,在实际废气处理中可能表现出更好的整体吸附性能。

1.4 抗压强度对吸附效率的影响

抗压强度是成型活性炭的主要机械性能指标。随着活性炭碘值升高,其骨架结构会逐渐变为脆弱,机械强度下降。研究数据显示,水蒸气活化制备的成型活性炭在碘值为820mg/g时,抗压强度为0.08MPa。当进一步延长活化时间或提高温度以增加碘值时,抗压强度通常会持续降低。这一现象在柱状、球形等成型活性炭中较为明显。因此需要在吸附性能和机械强度之间寻找平衡点。

1.5 孔隙结构对吸附性能影响

孔隙结构对活性炭吸附效率具有决定性影响。孔径 $<2\text{nm}$ 为微孔, $2\text{nm}\sim 50\text{nm}$ 为中孔, 大于 50nm 为大孔径。其中,微孔具有最大的比表面积占比,是吸附废气中小分子物质的主要部位,所以在生产活性炭产品时需要大量的微孔;中孔是有机挥发性气体较大分子的活性部位,也为废气小分子进入微孔提供通道。只有少部分微小孔与外表面相通,活性炭的孔隙结构排列方式如下:大孔径与活性炭外表面相通,中孔径是大孔径的分支,微孔径是中孔径的分支。吸附效果好的活性炭在孔结构上应有十分丰富的微孔径,同时需要一定规模的排列适宜的中孔径^[3]。大孔径对废气分子主要起储存和快速输送的作用。一定条件下,活性炭材料微孔径越多比表面积越大,对有机挥发性气体的吸附效果越好。

1.6 表面化学性质对吸附性能影响

表面化学性质是影响活性炭吸附能力的重要因素。活性炭表面含有大量的含氧官能团(如羧基、酚羟基、醌基等)和 π 电子体系,化学基团可通过静电作用、氢键或化学键与吸附质分子发生相互作用。研究发现,经过疏水改性的活性炭(接触角达 152°)在高湿环境下对气态碘的吸附量仅下降20.0%,而未改性活性炭的吸附量则下降了78.3%。因此,可以改善表面化学性质,优化活性炭与吸附质之间的作用力来提升吸附效率。

2 有机挥发性气体特性对吸附效率的影响

2.1 有机挥发性气体物理化学性质对活性炭吸附效率的影响

根据《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》(DB51/2377-2017)中关于挥发性有机物的定义为:在293.15K条件下蒸气压大于或等于10Pa,或者特定适用条件下具有相应挥发性的除 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 H_2CO_3 、金属碳化物、金属碳酸盐和碳酸铵外,任何参加大气光化学反应的含碳有机化合物。主要包括具有挥发性的非甲烷烃类(烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃)、含氧有机化合物(醛、酮、醇、醚等),卤代烃、含氮有机化合物、含硫有机化合物等^[4]。

由挥发性有机物定义可知,挥发性有机物的种类繁多,物理

化学性质各异。不同特性的有机挥发性气体对活性炭吸附效率影响程度不一样。

2.1.1 有机挥发性气体分子量影响。根据资料显示,在活性炭种类、吸附温度、气体流量等相同条件下,活性炭对不同分子量有机挥发性气体的吸附量存在明显差异。对于分子量小的废气(例如苯,分子量为78,动力学直径约为 0.58nm),很轻松进入活性炭微孔结构。通过与活性炭微孔的高比表面积充分接触,很容易被吸附。而对于分子量较大的废气(如正十六烷,分子量为226,动力学直径约为 0.8nm),只能进入中孔和大孔,或者在微孔入口处发生吸附,导致吸附位点减少,由此被吸附下来的效率降低。

2.1.2 有机挥发性气体沸点影响。有机挥发性气体的沸点与活性炭吸附效率密切相关。沸点越高的有机挥发性气体,其分子间作用力越强,在活性炭表面被吸附下来的效率更高。这是因为高沸点有机挥发性气体分子具有较低的蒸气压,容易从气相转移至固相表面;与活性炭表面产生更强的范德华力或化学键合作用,从而容易被吸附。例如,苯(沸点 80.1°C)与甲苯(沸点 110.6°C),甲苯在活性炭上的吸附容量更大。但当有机挥发性气体混合存在时,高沸点成分会优先占据活性炭活性位点,使低沸点废气吸附效率下降。

2.1.3 有机挥发性气体饱和蒸气压影响。饱和蒸气压高的有机挥发性气体分子,在气相中具有更高的热运动能量和扩散速率,能够更快到达活性炭表面,与活性炭吸附位点的接触概率更高,从而在吸附初始阶段表现出较快的吸附速率。例如,饱和蒸气压较高的丙酮(25°C 时饱和蒸气压约为 24.6kPa)和饱和蒸气压较低的甲苯(25°C 时饱和蒸气压约为 3.8kPa),在相同条件下,丙酮分子扩散至活性炭表面的速度更快,初期被吸附效率更高。

但是,较高的饱和蒸气压废气分子由于运动速率快也可能导致在活性炭表面的停留时间更短。当废气分子与活性炭吸附位点结合时,若热运动能量过高,可能会挣脱范德华力的束缚,形成脱附现象,从而影响吸附平衡的建立。因此,对于饱和蒸气压过高的废气,虽然初期吸附速率较快,但达到吸附平衡时的吸附量也可能存在不理想情况。

2.2 有机挥发性气体浓度对活性炭吸附效率的影响

2.2.1 浓度梯度驱动下的扩散速率。有机挥发性气体浓度的高低直接决定了气固两相界面的浓度梯度大小。浓度梯度是分子扩散的驱动力,浓度差越大,扩散速率越快。在低浓度废气中,分子分布较为稀疏,分子间碰撞概率低,扩散至活性炭表面的速率较慢,导致吸附初期的穿透时间较长,吸附速率相对平缓。而在较高浓度废气中,气相与活性炭表面的浓度梯度显著增大,分子扩散速率大幅提升。此时,吸附初期的速率可达到低浓度条件下的 $5\sim 10$ 倍。但是,高浓度下的快速扩散可能导致活性炭表面迅速被吸附质覆盖,缩短吸附剂的有效工作时间,尤其是当污染物分子尺寸较大或活性炭微孔结构较窄时,容易引发孔隙堵塞,进一步影响后续分子的扩散效率。

2.2.2 竞争吸附与解吸平衡的浓度效应。当废气中含有多种

污染物时,高浓度组分可能对低浓度组分产生竞争吸附作用。例如,在同时含有高浓度苯和低浓度二甲苯的废气中,苯分子因浓度优势会优先占据活性炭表面的活性位点,导致二甲苯的吸附容量显著下降。研究表明,当苯浓度从 $500\text{mg}/\text{m}^3$ 升至 $2000\text{mg}/\text{m}^3$ 时,二甲苯的平衡吸附量可降低30%~50%。

此外,高浓度废气可能导致吸附过程中的解吸现象加剧。根据热力学原理,吸附是放热过程,而解吸是吸热过程。当污染物浓度过高时,吸附质分子在活性炭表面的覆盖度增大,分子间作用力增强,可能引发部分分子因热运动能量超过吸附能而脱附,形成“吸附-脱附”动态平衡。因此,活性炭吸附装置适宜处理中低浓度有机挥发性气体。

3 操作条件对吸附效率的影响

3.1 温度

温度对活性炭吸附效率影响明显。根据勒夏特列原理,低温有利于物理吸附,温度升高将提高废气分子动能,打破“吸附-脱附”动态平衡,更有利于脱附,降低吸附容量。例如,在对丙酮废气的吸附实验中,当温度从 25°C 升高到 45°C 时,活性炭对丙酮的吸附容量下降了约20%。吸附塔的废气温度宜小于 40°C 。

3.2 流速

有机挥发性气体的流速直接影响与活性炭的接触时间。流速过慢,设备处理能力低,不经济;流速过快,有机挥发性气体分子与活性炭接触时间过短,来不及充分吸附就吹出吸附装置。一般来讲,固定床吸附装置中,气体流速需根据活性炭的种类、颗粒大小、床层高度等因素合理调整,以保证足够的接触时间和适宜的压力降。固定床吸附颗粒吸附剂的气体流速应小于 $0.6\text{m}/\text{s}$,纤维吸附剂气体流速应低于 $0.15\text{m}/\text{s}$,蜂窝吸附剂气体流速应低于 $1.2\text{m}/\text{s}$ ^[5]。

3.3 吸附时间

随着吸附时间的变长,活性炭对有机挥发性气体的吸附量逐渐增加,直至达到吸附饱和。在吸附初期,活性炭表面活性位点充足,吸附速率较快,吸附量迅速上升;随着时间推移,活性位点逐渐被占据,吸附速率减缓,当达到吸附平衡时,吸附量不再增加;因此活性炭需要及时更换或者再生^[6]。

3.4 其他操作因素

活性炭吸附装置的内部结构以及装置的密封性对活性炭吸附效率也存在一定影响。活性炭吸附装置内部结构应设计合理,气体流通顺畅,无短路(短路指进入活性炭箱的废气未经活性炭吸附直接排放)、无死角。活性炭吸附装置的门、焊缝、管道连接处等均应严密,不得漏气,所有螺栓、螺母均应经过表面处理,连接牢固^[6]。

4 环境因素对吸附效率的影响

4.1 湿度影响

环境湿度是影响活性炭吸附效率的重要因素。当有机挥发性气体湿度较大时,水分子会与有机挥发性气体分子竞争活性炭表面的活性位点。由于活性炭对水分子具有一定的亲和力,在高湿度环境下,大量水分子优先吸附在活性炭表面,占据活性

位点,导致有机挥发性气体分子的吸附量减少。例如,在相对湿度为60%的环境中,活性炭对甲苯的吸附容量相较于干燥环境下降了约30%。对于亲水性较强的活性炭,湿度的影响更为显著;而经过疏水改性的活性炭,在一定程度上能降低湿度对吸附性能的影响。在实际应用中,对于湿度较高的有机挥发性气体,常采用预处理除湿的方法,如设置冷凝器、干燥器等,以提高活性炭的吸附效率。使用颗粒状活性炭的废气湿度宜低于50%,使用蜂窝状活性炭的废气湿度宜低于60%^[6]。

4.2 杂质影响

有机挥发性气体中杂质也会影响活性炭吸附效率。废气中可能含有粉尘、酸性气体、碱性气体等杂质。其中粉尘颗粒会堵塞活性炭的孔隙,尤其是微孔,使活性炭的比表面积减小,吸附位点减少,导致吸附效率下降。酸性气体(如 NO_x 、 SO_2)和碱性气体(如 NH_3)会与活性炭表面的化学官能团发生化学反应,改变活性炭的表面性质,降低其对有机挥发性气体的吸附能力。此外,一些重金属离子(如 Pb^{2+} 、 Hg^{2+})也可能与活性炭发生作用,导致活性炭中毒,吸附性能丧失。因此,含有杂质的有机挥发性气体进入活性炭吸附前,需经喷淋洗涤器、旋风除尘器、袋式过滤器等方法降低颗粒物浓度;采用喷淋塔去除酸性或碱性气体;若废气中含漆雾、焦油等粘附物质时,需采用喷淋塔或过滤器进行前处理。有机挥发性气体颗粒物浓度低于 $1\text{mg}/\text{m}^3$,方能进入活性炭吸附装置处理^[6]。

5 结论

活性炭对有机挥发性气体的吸附效率受多种因素影响。活性炭自身性质决定了其基础能力;有机挥发性气体物理化学性质直接关联吸附效率;操作条件也会影响吸附效率;环境因素也干扰吸附进程。实际应用中,需全面考量各种因素,提升活性炭吸附有机挥发性气体的效率,实现有机挥发性气体的高效净化,推动工业生产与环境保护的协同发展。

[参考文献]

- [1]生态环境部.关于加快解决当前挥发性有机物治理突出问题的通知[Z].环大气〔2021〕65号,2021.
- [2]生态环境部.挥发性有机物治理实用手册[M].2版.北京:中国环境出版集团,2021.
- [3]解强.煤基活性炭定向制备的概念与原理[J].神华科技,2003(3):12-15.
- [4]四川省生态环境厅.四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准[S].DB51/2377-2017.成都:四川省质量技术监督局,2017.
- [5]生态环境部.吸附法工业有机挥发性气体治理工程技术规范[S].HJ 2026-2013.北京:中国环境科学出版社,2013:155-175.
- [6]四川省生态环境厅.四川省挥发性有机物治理之活性炭使用管理常见问题工具书[M].成都:四川环境出版社,2021.

作者简介:

蒙府君(1982--),男,汉族,四川成都人,本科,环境工程中级工程师,研究方向为环境保护咨询。