

活性炭在防治大气污染方面的应用研究与展望

张浩然

运城市生态环境保护综合行政执法队, 中国·山西 运城 044000

摘要: 近年来,全球工业化迅猛发展,能源消耗剧增,机动车保有量持续攀升,导致大量污染物如二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机化合物等被排入大气。大气污染引发的雾霾、酸雨等问题频发,严重威胁人类健康与生态平衡,在此背景下,活性炭的应用研究愈发关键。基于此,论文详细阐述了活性炭在防治大气污染方面的应用研究进展,旨在为大气污染治理技术的提升提供全面的理论依据与实践参考。

关键词: 活性炭; 大气污染; 吸附; 应用研究; 展望

Research and Prospect on the Application of Activated Carbon in Preventing and Controlling Air Pollution

Haoran Zhang

Yuncheng City Ecological Environment Protection Comprehensive Administrative Law Enforcement Team, Yuncheng, Shanxi, 044000, China

Abstract: In recent years, global industrialization has developed rapidly, energy consumption has increased dramatically, and the number of motor vehicles has continued to rise, resulting in a large amount of pollutants such as sulfur dioxide, nitrogen oxides, volatile organic compounds, etc. being discharged into the atmosphere. The frequent occurrence of haze, acid rain and other problems caused by air pollution seriously threatens human health and ecological balance. In this context, the application research of activated carbon is becoming increasingly crucial. Based on this, the paper elaborates on the research progress of the application of activated carbon in preventing and controlling air pollution, aiming to provide comprehensive theoretical basis and practical reference for the improvement of air pollution control technology.

Keywords: activated carbon; air pollution; adsorbent; applied research; expectation

0 前言

伴随着工业化和城市化进程加快,大气污染问题日趋严重,给人类健康、生态环境以及全球气候带来许多不利影响。传统大气污染防治方法面对复杂多样的污染物,逐渐表现出其局限性。活性炭由于具有特殊的物理化学性质,特别是高度发育的孔隙结构以及优良的吸附性能,而在大气污染治理领域中受到了广泛的重视。深入研究活性炭用于大气污染防治对发展高效可持续大气污染治理技术起着极其重要的作用,可望为提高空气质量和环境可持续发展提供新途径。

1 活性炭的性质

活性炭是一种经过特殊处理的含碳材料,具有高度发达的孔隙结构,包括微孔、中孔和大孔。微孔为活性炭对小分子污染物提供较大比表面积;中孔和大孔有助于大分子污染物的扩散和吸附,以及吸附质在孔隙内的传输,表面还有大量官能团如羟基、羧基和羰基,可以和一些污染物起化学反应,从而进一步提高活性炭对污染物的吸附和净化能力。例如,在对酸性气体的吸附过程中,碱性官能团可以与其进行中和反应以增强吸附效果^[1]。

2 活性炭在防治大气污染方面的应用方法

2.1 搭建并操作固定床吸附系统

固定床吸附系统广泛应用于活性炭治理大气污染,核心部件——吸附塔一般为立式圆筒形,材料多为碳钢或者不锈钢,其内活性炭填充层的高度根据处理气量和污染物浓度确定。作为一个例子,当处理某个小型化工厂排放的含有甲苯的废气时,吸附塔的直径被设计为 2m,而活性炭的填充层的高度达到了 3m。系统在工作过程中的关键参数为气体流速。通常来说,在处理常见的 VOCs 废气时,应确保气体的流速维持在 0.3~1m/s 的范围内。以该化工生产车间为研究对象,在气体流速达到 0.5m/s 的条件下,活性炭对甲苯的初步吸附效能能够超过 90%。而吸附容量则随吸附时间的延长而趋于饱和。测试结果显示,在连续工作 800h 之后,吸附的效率下降到大约 70%。这时可以采用热再生或者置换再生的方法使活性炭的活性得到恢复。在进行热再生过程中,通常将温度维持在 100℃~200℃ 的范围内,如在 150℃ 的温度下再生 2~3h,可以使活性炭的吸附能力恢复大约 80%。实际工业应用中常采用多塔切换的方式来保证连续运行。例如,一个大型的涂装厂建立了四座固定床吸附塔,

这些塔可以两两切换,每塔的活性炭填充量为 10m^3 ,成功地将废气中的 VOCs 浓度从 $800\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,本实用新型达到了环保排放要求,并且系统运行平稳,运行和维护都比较方便,是中小企业废气治理行之有效的方案之一^[2]。

2.2 活性炭在移动床吸附工艺中的运用

移动床吸附工艺对于活性炭治理大气污染显示出了独特的优越性,吸附塔构造比较复杂,内有活性炭连续进、出料装置和气固逆流专用通道。以火力发电厂烟气汞蒸气治理为例,活性炭颗粒由吸附塔上部不断添加并受重力影响慢慢向下运动。烟雾从塔的底部渗透进来,并以每秒 $2\sim 5\text{m}$ 的速度向上流动,与活性炭形成了充分的接触。该工艺条件下活性炭的汞吸附容量可达到 $0.5\sim 2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。根据某大型火电厂的实际操作数据,当活性炭的进料速度达到 $500\text{kg}/\text{h}$ 时,产生的烟气流速为 $100\text{万}\text{m}^3/\text{h}$,经移动床吸附处理汞排放浓度由最初的 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 显著下降到 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$,远远低于国家排放标准。相对于固定床,移动床吸附过程的活性炭可以不断再生或者替换,不需要经常停止^[3]。这种材料有多种再生方法,如在使用热再生技术时,可以将温度维持在 $300^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$,这样可以有效地去除汞和其他污染物,从而使活性炭得到循环使用,其利用效率可以超过 85% 。然而这种工艺设备的投资大,运行管理的技术要求也很高。而在大型燃煤电厂、垃圾焚烧厂等规模大、运行时间长的尾气治理场景下,移动床吸附工艺以其高效的治理能力及稳定的运行性能正在扮演着日益重要的角色。

2.3 活性炭纤维应用于气相净化

在气相净化技术中,活性炭纤维展现出了卓越的特性,拥有非常微小的纤维直径,通常范围在 $5\sim 20\mu\text{m}$,其比表面积可以达到 $1000\sim 3000\text{m}^2/\text{g}$ 。以室内空气中甲醛的处理为例,在一个 30m^3 、 3m 高的空间里,放置了 500g 的活性炭纤维。该物质对甲醛的吸附速度相当迅速,在初始阶段的 1h 内,其吸附量能够达到大约 30% 。当处于标准条件时,活性炭纤维对甲醛的吸附平衡可以达到 $50\sim 100\text{mg}/\text{g}$ 的范围。当甲醛在室内的初始浓度达到 $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 时,经过长达 6h 的吸附作用,其浓度能够下降到 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 或更低,从而达到室内空气质量的标准要求。对于工业废气的治理,如电子芯片生产车间有机废气的净化等,采用活性炭纤维做滤网安装于通风系统内。当废气以 $0.8\sim 1.2\text{m}/\text{s}$ 的速度流过滤网时,其对丙酮、苯乙烯等 VOCs 的清除效果可以达到 95% 以上。活性炭纤维再生也比较简单,可以在低温 ($80^\circ\text{C}\sim 120^\circ\text{C}$) 条件下真空脱附,再生大约需要 $30\sim 60\text{min}$,且经过多次再生后仍能保持较高的吸附性能,其吸附性能在 10 次再生循环后仍可保留 80% 以上,这使得它在气相净化领域具有广阔的应用前景,不管是小型的室内空气净化设备还是大型的工业废气处理系统都可以起到举足轻重的作用。

2.4 改性活性炭用于处理特殊气体

改性活性炭就是采用物理或者化学方法处理活性炭,

改变活性炭表面性质、孔隙结构等,以提高特殊气体吸附处理的能力。对于某些特殊气体,如强腐蚀性、低浓度却有高毒性或者普通活性炭很难吸附等,改性活性炭起到了至关重要的作用。

就含氟废气治理而言,氟气属于腐蚀性极强、毒性很大的气体,通过在活性炭表面添加特定种类的金属氧化物,例如氧化铝和氧化镁,进行一系列的改性处理。实验结果显示,未经改良的活性炭对氟气的吸附能力只有 $5\sim 10\text{mg}/\text{g}$,但经过一定的改进后,其吸附能力可以增加到 $30\sim 50\text{mg}/\text{g}$ 。在某氟化工公司进行废气处理时,选择了负载氧化镁的改性活性炭,并在 $0.2\sim 0.5\text{m}/\text{s}$ 的气体流速和 $25^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ 的温度范围内进行处理,氟气的清除效率已经从原先的不足 30% 增加到 80% 以上,这大大减少了氟气排放对附近环境和人类健康的潜在风险。

3 活性炭在防治大气污染方面的应用展望

3.1 新型活性炭材料的研究与开发取得突破性进展

随着科学技术的快速发展,研究和开发新型活性炭材料已成为活性炭防治大气污染领域进一步实现突破性进展的关键所在。尽管传统活性炭具有优异的吸附性能,但是仍然存在着吸附选择性不准确和对一些复杂污染物吸附受限等局限性。在未来的研究和开发中,一个重要的方向是研制出具有高度特定吸附能力的活性炭材料。在制备活性炭的过程中,我们精确地调整了其孔隙的结构和表面的化学特性,从而使其能够有效地吸附某些特定的大气污染物,例如难以分解的持久性有机污染物 (POPs) 或新型工业废气中的特定成分。例如,采用纳米技术制备的纳米结构活性炭材料具有非常小的粒径以及特殊的表面效应,可以显著增大与污染物之间的接触面积,提高反应活性,进而显著提高吸附效率。另外,复合活性炭材料的研究开发具有很大的潜力,活性炭与其他功能性材料,例如金属有机框架材料 (MOFs) 和石墨烯等,进行了复合处理。MOFs 由于其高孔隙率、孔径可调以及金属活性位点丰富等特点,将其与活性炭进行复合可以将二者的优点相结合,兼具活性炭高比表面积的特点和 MOFs 吸附特定气体分子、催化转化能力强的特点。通过加入石墨烯,活性炭的导电性和机械强度得到了增强,这有助于在吸附过程中实现电子的转移和提高材料的稳定性。该复合活性炭材料可望在多组分协同去除大气污染物中扮演重要角色,并可对各种复杂废气成分进行一次处理,简化了大气污染治理流程和改善了处理效果,对解决越来越复杂的大气污染问题提供了有力的物质支持。

3.2 智能化吸附系统的集成创新

智能化吸附系统集成创新,将使活性炭在大气污染防治中走向一个新台阶。未来传感器技术会和活性炭吸附系统进行深入的结合。高精度气体传感器可以对大气污染物类型、浓度和分布情况进行实时监测,并及时把数据传送到吸附系统控制系统。控制系统基于传感器反馈数据对活性炭吸附装置的吸附流速、吸附温度和再生周期进行智能化调整。

例如,在探测到某种污染物在大气中浓度骤升后,该系统就会自动提高吸附流速、延长活性炭和污染物接触的时间,从而保证对污染物进行高效脱除;在活性炭吸附达到近饱和状态后,该系统预先启动再生程序以确保吸附系统连续稳定地工作。

大数据与人工智能技术同样会对智能化吸附系统产生核心的影响。通过采集海量吸附系统操作数据、大气污染监测数据及活性炭性能数据,并采用人工智能算法对其进行深度分析与学习。人工智能系统可以在不同气象条件和污染源排放变化条件下对大气污染趋势进行预测,进而对吸附系统运行策略进行预先优化。同时,也能根据活性炭吸附性能衰减情况智能安排活性炭替换或再生方案,实现活性炭利用率最大化及吸附系统整体效能最大化。另外,该智能化吸附系统将具有远程监控、自动化运维等功能,操作人员可在手机或者电脑上对系统的工作情况进行远程监控,及时发现与处理故障,减少运维成本,增强系统可靠性与稳定性,使活性炭吸附技术应用于大气污染治理实现智能化、高效化与精准化。

3.3 再生技术的高效环保提升

活性炭再生技术能否高效环保升级,对活性炭可持续应用于大气污染防治具有重要意义。现有再生技术普遍存在能耗大、再生效率受限和可能造成二次污染的问题,今后的提升方向主要集中在发展更多绿色高效再生方法上。以微波再生技术为例,预计其将会得到进一步的优化。微波以其特有的加热特性可使活性炭中水分子与污染物分子在短期内发生强烈震动与摩擦而生热,以达到污染物迅速脱附的目的。通过对微波发生器功率调节及频率控制技术进行改进,实现了不同活性炭材料及污染物特性的精准匹配,可显著提升微波再生效率并降低能耗。同时配合新型尾气处理装置,实现了微波再生时尾气的高效净化和避免二次污染。另外,生物再生技术前景广阔,通过使用特定微生物菌群,使这些微生物在合适条件下能对吸附于活性炭表面的有机污染物进行分解,并转化成对人体无害的二氧化碳、水以及生物物质。相对于传统热再生或者化学再生方法,生物再生技术在环境友好和能耗等方面具有优势。通过对微生物-活性炭表面污染物作用机理进行深入研究,筛选并选育出高效降解微生物菌株并建立稳定生物再生体系,本实用新型能够对活性炭进行多次循环再生处理,提高活性炭使用寿命,降低活性炭废弃量及资源消耗。同时,研究开发生物再生技术配套活

性炭预处理及后处理工艺,以改善生物再生效果及稳定性,使得生物再生技术切实可行,成为大范围使用的活性炭再生手段,促进了活性炭在大气污染防治中的可持续发展。

3.4 多领域协同应用的扩展与加深

在今后大气污染防治过程中,扩大活性炭多领域协同应用的不断深入将是一个重要发展趋势。一方面,跨行业的协同应用会越来越显示出其价值。以工业和城市建设为例,活性炭可以协同处理工厂废气和城市道路扬尘。该厂排出的尾气用活性炭进行吸附净化,收集到的一部分饱和活性炭可以通过处理加工制成吸附性能良好的公路抑尘材料,本实用新型应用于城市道路铺设或者建筑工地周围,对空气中颗粒物和一些残留污染物进行高效吸附,使工业污染治理和城市环境改善无缝衔接,提高了资源循环利用率和降低了总体防治成本。另一方面,活性炭协同应用于能源和环境领域将面临新的机遇,在新能源汽车开发的大潮下,活性炭可以用于汽车电池废气处理系统和车内空气净化系统等。在对电池工作过程中所排放的废气进行治理时,活性炭可以对其有害气体进行有效的吸附,确保电池性能和安全性;同时,在车内空气净化领域,活性炭纤维等材料可有效去除车内异味、甲醛等挥发性有机化合物,提升车内空气质量。另外,在能源生产的过程当中,比如生物质能发电和垃圾焚烧发电等,活性炭在尾气处理部分既可以对酸性气体和其他污染物进行深度净化,也可以结合能源回收系统,利用吸附余热对能量进行二次利用,从而促进能源和环境效益共赢,并带动相关领域持续发展。

4 结语

综上所述,当今时代活性炭已显示出控制大气污染的巨大潜力和优越性,对许多大气污染物具有吸附和净化的重要功能。尽管目前面临着成本与再生技术等挑战,但随着材料科学与技术的不断进步,未来有望通过研发新型活性炭材料、优化生产工艺降低成本、发展高效环保再生技术等来进一步扩大活性炭在大气污染防治中的用途和成效。

参考文献:

- [1] 向如意.三叶草状活性炭对VOCs的动态吸脱附研究[D].武汉:中南民族大学,2022.
- [2] 白婷.活性碳纤维在治理水和大气污染中的应用[J].资源节约与环保,2020(3):99.
- [3] 赵修海,韩文静.大气环境污染成因及治理技术探究[J].冶金管理,2022(17):66-68.