

基于吸附-催化燃烧耦合技术的挥发性有机物深度净化研究

雷 迅¹ 雷慧琳²

1. 浙江鼎旺国盛安环健科技咨询服务有限公司 浙江 宁波 315200

2. 浙江巴陵恒逸己内酰胺有限责任公司 浙江 杭州 310018

摘 要：本文聚焦基于吸附-催化燃烧耦合技术的挥发性有机物（VOCs）深度净化研究。阐述了该技术原理，包括吸附、催化燃烧及耦合协同机制。介绍了系统设计与优化要点，如吸附剂选择与改性、催化材料设计与制备、工艺参数优化。通过工业应用案例分析其效果，并展望了未来在新材料与新技术融合、智能化自动化发展、多领域拓展应用等方面的发展趋势，为VOCs深度净化提供参考。

关键词：挥发性有机物（VOCs）；吸附-催化燃烧耦合技术；吸附剂；催化材料

引言：挥发性有机物（VOCs）是大气污染的主要源头，对人体健康构成严重威胁，随着工业化和城市化进程的加速，其排放量持续增加，污染治理成为迫切的环境问题。传统VOCs处理技术如热氧化、吸收、冷凝等存在能耗高、处理效率低、易二次污染等缺陷，难以满足当前环保要求。吸附-催化燃烧耦合技术作为一种创新方法，结合了吸附技术的高效分离与催化燃烧的低温氧化优势，能有效富集低浓度VOCs并在低温下催化转化为无害的二氧化碳和水，降低了能耗并避免了二次污染，具有显著的环境与经济效益。

1 吸附-催化燃烧耦合技术原理与关键要素

1.1 吸附技术原理

吸附技术是利用多孔性固体吸附剂处理气体混合物，使其中所含的一种或数种组分吸附于固体表面，以达到分离目的的过程。其核心在于吸附剂与吸附质之间的相互作用。当气体混合物通过吸附剂床层时，由于吸附剂表面存在剩余的化学键力或范德华力，能够吸引并留住气体分子。物理吸附是常见的吸附类型，它基于分子间作用力，吸附过程可逆，吸附热较小，吸附速率较快。例化学吸附则是吸附剂与吸附质之间发生化学反应，形成化学键，吸附热较大，吸附过程不可逆或部分可逆。化学吸附具有选择性，通常在较高温度下进行^[1]。吸附过程通常分为三个阶段：外扩散阶段，气体分子从气相主体扩散到吸附剂颗粒的外表面；内扩散阶段，气体分子从吸附剂颗粒外表面扩散到颗粒内部微孔表面；吸附阶段，气体分子在微孔表面被吸附剂吸附。吸附剂的吸附容量受温度、压力、气体浓度等因素影响。一般来说，温度降低、压力升高、气体浓度增加，吸附容量

会增大。

1.2 催化燃烧技术原理

催化燃烧技术是在催化剂的作用下，使有机废气在较低的起燃温度下（200-400℃）发生无焰燃烧，分解为二氧化碳和水等无害物质。其反应本质是氧化反应，催化剂的存在降低了反应的活化能，使反应在较低温度下就能快速进行。催化燃烧过程一般包括吸附-脱附和燃烧两个主要环节。首先，有机废气被吸附剂吸附，当吸附剂达到饱和后，通过加热等方式使吸附的有机物脱附出来，形成高浓度的有机废气。然后，高浓度有机废气进入催化燃烧装置，在催化剂的作用下发生氧化反应。催化剂通常由活性组分、载体和助剂组成。活性组分是催化反应的核心，常见的有贵金属（如铂、钯）和过渡金属氧化物（如铜、锰、钴的氧化物）。载体提供较大的比表面积，使活性组分能够均匀分散，常见的载体有氧化铝、二氧化硅等。助剂则用于改善催化剂的性能，如提高活性、增强稳定性等。催化燃烧具有起燃温度低、能耗小、无二次污染等优点，但催化剂容易中毒失活，需要定期更换或再生。

1.3 耦合技术协同作用机制

吸附-催化燃烧耦合技术将吸附和催化燃烧两种技术有机结合，充分发挥了各自的优势，实现了协同增效。在耦合系统中，吸附阶段，吸附剂能够高效地吸附低浓度的有机废气，将废气中的有机物富集，使废气浓度大幅提高。当吸附剂饱和后，通过加热等方式使有机物脱附，形成高浓度的有机废气，然后进入催化燃烧装置进行处理。这种耦合技术具有多方面的协同作用。首先，在吸附阶段，吸附剂对有机废气的吸附降低了废气中有

机物的浓度,减少了后续催化燃烧的能耗。同时,吸附过程能够去除废气中的颗粒物和部分杂质,保护了催化剂,延长催化剂的使用寿命。其次,在催化燃烧阶段,高浓度的有机废气为催化燃烧提供充足的反应物,提高催化燃烧的效率。而且,催化燃烧产生的高温气体可以用于吸附剂的再生,实现能量的循环利用,降低系统的运行成本。另外,耦合技术能够处理不同浓度和成分的有机废气,具有广泛的适用性。

2 吸附-催化燃烧耦合系统设计与优化

2.1 吸附剂选择与改性

2.1.1 吸附剂类型

常见的吸附剂有活性炭、分子筛、硅胶等。活性炭具有丰富的微孔结构和较大的比表面积,对多种有机物具有良好的吸附性能,且价格相对较低,应用广泛。但活性炭易燃,在高温下可能发生自燃,存在安全隐患^[2]。分子筛具有规则的孔道结构和较高的选择性,能够根据分子大小和极性进行吸附分离,适用于处理特定成分的有机废气。然而,分子筛的价格较高,再生难度较大。硅胶具有良好的热稳定性和化学稳定性,吸湿性强,但对有机物的吸附能力相对较弱。在实际应用中,需要根据废气的成分、浓度、温度等因素选择合适的吸附剂。

2.1.2 吸附剂改性方法

为了提高吸附剂的吸附性能和选择性,常对吸附剂进行改性。物理改性方法包括改变吸附剂的孔径分布、比表面积等。例如,通过活化处理可以增加活性炭的孔隙率,提高其比表面积,从而增强吸附能力。化学改性则是通过引入特定的官能团或化学物质,改变吸附剂表面的化学性质。此外,还可以通过复合改性,将两种或多种吸附剂进行复合,发挥各自的优势,提高吸附性能。

2.2 催化材料设计与制备

2.2.1 催化剂类型

催化剂的类型对催化燃烧的效果起着关键作用。贵金属催化剂具有较高的活性和选择性,能够在较低温度下实现有机物的完全氧化,但价格昂贵,资源稀缺,且容易中毒失活。过渡金属氧化物催化剂价格相对较低,资源丰富,但活性和稳定性相对较差。近年来,复合催化剂受到了广泛关注,它将贵金属和过渡金属氧化物进行复合,既能降低成本,又能提高催化剂的活性和稳定性。另外,一些新型催化剂如钙钛矿型催化剂、尖晶石型催化剂等也展现出良好的应用前景。

2.2.2 催化剂制备方法

催化剂的制备方法会影响其结构和性能。常见的制

备方法有浸渍法、沉淀法、溶胶-凝胶法等。浸渍法是将载体浸入含有活性组分的溶液中,使活性组分负载在载体表面,该方法操作简单,但活性组分的分散性可能较差。沉淀法是通过加入沉淀剂使活性组分沉淀在载体上,能够获得较好的分散性,但制备过程较为复杂。溶胶-凝胶法是将金属醇盐或无机盐在溶剂中水解、缩合形成溶胶,再经过凝胶化、干燥、煅烧等过程制备催化剂,该方法能够制备出高比表面积、高活性的催化剂。在制备过程中,还需要控制反应条件,如温度、pH值、反应时间等,以获得性能优良的催化剂。

2.3 耦合工艺参数优化

耦合工艺参数的优化是提升吸附-催化燃烧耦合系统效能和成本控制的核心步骤。

2.3.1 吸附时间优化

吸附时间直接关联到吸附剂的利用率和处理效率。经过实验验证,当吸附时间控制在约30至60分钟范围内时,吸附效果达到最佳状态,此时吸附剂对VOCs的吸附率可稳定维持在90%以上。这一时间范围内,既能保证吸附剂充分捕获废气中的有机物,又能避免过早饱和导致的频繁再生问题。

2.3.2 脱附温度优化

脱附温度的选择对于确保有机物高效且安全地从吸附剂上释放至关重要。实验数据表明,在约100至150℃的温度区间内,脱附效率最高,可达到95%左右的脱附率。这一温度既不会损害吸附剂结构,又能有效克服有机物与吸附剂间的吸附力,确保脱附完全。

2.3.3 催化燃烧温度优化

催化燃烧温度的优化旨在实现低能耗与高净化效率的平衡。研究表明,催化燃烧温度在约250至350℃之间时,催化效率最优,能够将VOCs几乎完全转化为二氧化碳和水,转化效率接近100%。同时,这一温度范围能有效避免催化剂因过高温度而失活,保证催化剂的长期稳定性。

2.3.4 气体流量调节

气体流量的合理调控对于保证废气在系统中适当停留时间至关重要。在实际操作中,通过调整气体流量,确保废气在吸附剂和催化剂中的停留时间约为1至2秒,既能满足吸附和催化反应的动力学需求,又能保持较高的系统处理能力,适应不同排放量的需求变化^[3]。

3 吸附-催化燃烧耦合技术在工业中的应用案例分析

3.1 案例一:某塑胶玩具企业废气处理

某塑胶玩具企业在生产过程中会产生大量的有机废气,主要成分包括苯、甲苯、二甲苯等。该企业采用了

吸附-催化燃烧耦合技术进行废气处理。在吸附阶段,选用活性炭作为吸附剂,将废气中的有机物吸附。当活性炭饱和后,通过热空气进行脱附,形成高浓度的有机废气。然后,高浓度有机废气进入催化燃烧装置,在贵金属催化剂的作用下进行燃烧处理。经过处理后,废气中的有机物浓度大幅降低,达到了国家排放标准。同时该系统运行稳定,能耗较低,为企业节省了运行成本。

3.2 案例二:某汽车零部件喷涂企业废气治理

汽车零部件喷涂企业产生的废气中含有大量的挥发性有机物(VOCs),如漆雾、溶剂等。该企业采用了吸附-催化燃烧耦合技术进行废气治理。在吸附环节,使用分子筛作为吸附剂,对废气中的有机物进行高效吸附。分子筛的选择性吸附特性能够有效去除废气中的特定成分。当分子筛饱和后,通过蒸汽进行脱附,脱附后的有机废气进入催化燃烧装置进行处理。催化燃烧装置采用复合催化剂,提高了催化燃烧的效率和稳定性。经过处理后,废气中的VOCs去除率达到了95%以上,有效改善了企业的生产环境和周边空气质量。

4 吸附-催化燃烧耦合技术的未来发展趋势

4.1 新材料与新技术融合

未来,吸附-催化燃烧耦合技术将与新材料和新技术深度融合。新型吸附剂材料如金属-有机框架材料(MOFs)、共价有机框架材料(COFs)等具有高比表面积、可调控的孔道结构和良好的化学稳定性,有望在吸附-催化燃烧耦合系统中得到应用。同时纳米技术的发展将为催化剂的制备提供新的方法,制备出具有更高活性和稳定性的纳米催化剂。生物技术也可能与吸附-催化燃烧技术相结合,开发出具有生物活性的吸附剂和催化剂,提高系统的处理效率和环保性能。

4.2 智能化与自动化发展

随着信息技术的发展,吸附-催化燃烧耦合系统将朝着智能化和自动化方向发展。通过安装传感器和监控设备,实时监测系统的运行参数,如废气浓度、温度、压力等,并利用智能控制系统对系统进行自动调节和优

化。例如,根据废气浓度的变化自动调整吸附时间和催化燃烧温度,实现系统的稳定运行和高效处理。同时,智能化系统还能够实现远程监控和故障诊断,及时发现和解决问题,提高系统的可靠性和维护效率。

4.3 多领域拓展应用

吸附-催化燃烧耦合技术具有广泛的应用前景,未来将在更多领域得到拓展应用。除了传统的工业废气处理领域,该技术还可应用于室内空气净化、垃圾处理场恶臭气体治理、污水处理厂废气处理等领域^[4]。在室内空气净化方面,能够去除空气中的甲醛、苯等有害气体,改善室内空气质量。在垃圾处理场和污水处理厂,能够有效处理恶臭气体,减少对周边环境的影响。随着环保要求的不断提高,该技术还将在新能源、新材料等新兴产业中得到应用,为这些产业的发展提供环保支持。

结束语

吸附-催化燃烧耦合技术通过吸附富集与催化氧化的协同作用,在VOCs深度净化领域展现出显著优势。本文系统阐述了技术原理、系统设计及工业应用案例,证实其在降低能耗、避免二次污染及提升处理效率方面的有效性。未来,随着新材料开发、智能化控制及多领域拓展,为工业VOCs治理提供更高效、经济、可持续的解决方案,助力环境质量改善与绿色发展目标实现。

参考文献

- [1]徐艳萍.挥发性有机物(VOCs)排放控制技术策略分析[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(04):150-152. DOI:10.19307/j.cnki.ctr.2025.04.058.
- [2]夏溶苹,丁莹莹,崔浩.化工企业挥发性有机物(VOCs)排放问题及高效回收技术研究[J].流程工业,2025,(03):62-65.
- [3]陶红,唐子夏,史淦升.MOFs材料对室内挥发性有机物吸附和光催化降解的研究进展[J].上海理工大学学报,2022,44(01):62-68.
- [4]孟庆华.基于吸附技术的挥发性有机物治理研究进展[J].化工设计通讯,2023(1):45-47.