

机械废气处理中的催化燃烧技术研究

黄元君

山东泽轩环保科技有限公司 250000

DOI:10.12238/ems.v7i7.14284

[摘要] 催化燃烧技术作为机械废气处理的核心手段之一,通过催化剂降低有机污染物氧化分解的活化能,实现低温无焰燃烧,具有高效净化、低能耗、低二次污染等优势。本文从催化燃烧的基本原理出发,系统分析其在机械废气处理中的应用场景,包括有机废气、VOCs及氮硫化物的治理,并探讨技术优化方向,为工业废气治理提供理论支持与实践参考。

[关键词] 催化燃烧技术;机械废气处理;VOCs治理;催化剂优化;工艺集成

引言:

机械制造过程中产生的废气成分复杂,包含挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)、硫化物等污染物,对环境和人体健康构成威胁。传统处理技术如吸附法、吸收法存在效率低、能耗高、二次污染等问题。催化燃烧技术通过催化剂的作用,使有机污染物在200–500℃低温下完全氧化为 CO_2 和 H_2O ,具有高效、节能、适用范围广等优势,成为机械废气治理的重要技术手段。

1 催化燃烧技术的基本原理

1.1 催化燃烧的基本概念

催化燃烧技术是一种先进的气固相反应方法,它利用催化剂来实现有机污染物在低温下的高效氧化,它的核心是利用催化剂表面活性位点来降低反应活化能从而使得有机废气在不需要高温火焰的条件下就能与氧气深度氧化并直接被分解成无害二氧化碳及水。这个过程打破了传统燃烧对高温的依赖,在200–500℃的低温条件下实现了污染物的完全矿化,这不仅避免了高温燃烧导致的氮氧化物二次污染,而且显著减少了能源的消耗。该催化剂利用选择性催化作用实现了反应路径的定向调控,使得复杂的有机物分子能够在温和的环境中迅速发生化学键断裂,表现出对低浓度和大风量尾气的强适应性。

1.2 催化燃烧的物理与化学特性

从物理层面上看,催化剂以其多孔结构和高比表面积的特点为有机废气分子的吸附和反应提供了丰富的位点,从而实现了污染物在催化剂表面的有效富集,显著提高了反应的接触效率;它特殊的晶格结构和孔道分布能够调节反应物的扩散路径、优化传质过程、保证反应在较低温度下连续稳定地进行。从化学层面上看,催化剂利用电子转移和轨道杂化

作用,降低了反应的活化能,使得有机物分子中的化学键能够在温和的条件下发生断裂和重组,从而达到低温无焰氧化的目的;它的活性组分能够选择性地活化氧气分子形成高活性氧物种并准确地进攻有机物官能团以抑制副反应,从而避免氮氧化物的产生;同时催化剂表面的酸碱性和氧化还原性协同作用能够满足不同种类有机污染物转化的需要,不仅可以处理芳香烃和卤代烃这两种难降解物质,还可以高效地分解醇类,酯类和其他小分子化合物并表现出广谱性和高选择性共存的物理和化学特性。

1.3 催化燃烧技术的适用范围

催化燃烧技术适用范围广泛,在工业废气处理领域发挥着关键作用,可高效处理有机溶剂净化,涵盖苯类、醇类、酮类、酯类、酚类、醚类、烷类等混合有机废气,在化工、纤维、印刷等行业应用普遍。在工业生产废气净化方面,适用于电线、电缆、漆包线、机械、电机、汽车、自行车、摩托车、发动机、塑料、家用电器等行业,能有效控制有害物质排放^[1]。对于烘干流水线产生的废气,如烘道、印铁制罐、表面喷漆、印刷油墨、电机绝缘处理、皮鞋粘胶等工序,催化燃烧技术同样适用,可净化各环节废气。此外,对于同一生产线上因产品不同导致废气成分经常变化或废气浓度波动较大的场合,以及浓度在500–1000mg/立方之间的废气和臭气,催化燃烧技术也表现出良好的适应性,能充分分解恶臭气体中的污染因子,实现高效净化。

2 催化燃烧技术在机械废气处理中的应用

2.1 有机废气处理

催化燃烧技术对于有机废气的治理表现出了明显的优越性,它利用催化剂表面作用来达到污染物高效转化的目的。在如机械制造、涂装、印刷和化工等多个行业中,生产过程

释放的有机废气含有多种成分,如苯系物、醇类、酮类、酯类和醛类等挥发性有机物。传统的处理方式很难在净化效率和运营成本之间找到一个平衡点。催化燃烧技术由于具有低温起燃的特点,可以在 200–400 °C 的温度区间内活化有机物和氧发生氧化反应,从而将污染物分子中的化学键打破,转化成无害二氧化碳及水。本技术特别适合低浓度和大风量有机废气情景,如喷漆车间产生的含有甲苯和二甲苯的尾气,利用蜂窝状或者颗粒状催化剂吸附浓缩作用可以显著提高反应物的浓度和减少能耗^[2]。对于高湿度废气而言,该催化剂具有抗中毒性能,能够有效地避免水分竞争吸附造成的活性衰减问题,确保了系统的平稳运行。另外,还可以将催化燃烧技术与活性炭吸附和沸石转轮浓缩预处理过程相耦合,构成一个“吸附—脱附—催化燃烧”循环净化系统,不仅解决低浓度废气直接治理的经济性,而且利用燃烧热能经余热回收装置对废气进行预热或者工艺供热以达到能源梯级利用的目的。在对含有卤素、硫和磷的有机废气治理过程中,催化剂载体及活性组分的调节能够抑制二次污染物产生并保证排放合格。

2. VOCs 处理

催化燃烧技术在 VOCs 处理中展现了其独特的深度净化能力与工艺灵活性,挥发性有机物(VOCs)作为大气污染的重要源头,涵盖烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、含氧有机物等数百种化合物,其排放特性因行业而异,涉及低浓度大风量、高浓度小风量、成分复杂多变等复杂工况^[3]。催化燃烧技术通过催化剂的表面活性位点,将 VOCs 氧化分解的活化能降低至传统燃烧的 1/3 以下,使反应在 250–450 °C 的温和条件下即可高效进行,避免高温燃烧引发的氮氧化物二次污染与能源浪费。针对涂装、印刷、制药等行业的含醇、酯、酮类废气,贵金属或过渡金属氧化物催化剂可精准调控反应路径,使复杂分子在低温下快速裂解为 CO₂ 和 H₂O,净化效率稳定在 95% 以上。对于含氯、含硫 VOCs,通过载体改性与助剂掺杂可抑制卤素氢化物、二氧化硫等腐蚀性副产物的生成,延长催化剂寿命。此外,蓄热式催化燃烧(RCO)技术通过蓄热体回收燃烧热能,使系统热效率提升至 85% 以上,实现自供热运行,显著降低运行成本。面对间歇性排放或浓度波动的废气,模块化催化反应器可灵活调整处理单元数量,确保系统适应性与稳定性,为工业 VOCs 治理提供了高效、经济、可持续的技术路径。

2. 3NO_x 与硫化物的治理

催化燃烧技术在 NO_x 与硫化物治理中体现了其多污染物协同控制能力,为工业废气深度净化提供了创新路径,在氮氧化物(NO_x)处理方面,该技术通过选择性催化还原(SCR)机制,以氨气或尿素为还原剂,在 200–400 °C 的低温条件下将 NO_x 转化为无害的氮气与水,其核心在于催化剂对 NH₃ 吸附与 NO 解离的精准调控,避免副产物 N₂O 生成^[4]。针对含硫废气,催化氧化技术可将二氧化硫(SO₂)定向转化为三氧化硫(SO₃),后续通过湿法吸收实现硫资源化回收,这一过程依赖催化剂表面酸碱中心的协同作用,既强化了 SO₂ 的吸附活化,又抑制了硫酸盐沉积导致的活性衰减。在复杂烟气治理中,双功能催化剂通过分层结构设计,上层负载 SCR 活性组分处理 NO_x,下层集成氧化催化层降解有机硫与硫化氢,实现多污染物梯度净化。对于含氯、含氟等腐蚀性气氛,采用耐腐蚀载体与金属氧化物改性技术,可抵御卤素对催化剂的毒化作用,保障长期稳定性。此外,催化燃烧与低温等离子体、臭氧氧化等技术的耦合应用,通过高能粒子预处理提升难降解硫化物的反应活性,进一步拓宽了技术适用范围,为燃煤电厂、钢铁冶炼、垃圾焚烧等行业的超低排放改造提供了关键技术支撑。

2.4 催化燃烧技术的综合应用

催化燃烧技术的综合应用展现了其在工业废气治理中的多维度协同效应与系统集成优势,在复杂废气处理场景中,该技术常与吸附浓缩、生物降解、等离子体氧化等工艺深度耦合,形成梯度净化体系,如在针对低浓度 VOCs 废气时,采用沸石转轮吸附浓缩-催化燃烧组合工艺,通过转轮对有机物的高效富集,将原气体积浓缩 10–30 倍后引入催化反应器,既降低能耗又提升净化效率;对于含氮硫杂质的有机废气,则可通过催化氧化预处理单元分解硫化氢、氨等还原性物质,再经催化燃烧深度矿化碳氢污染物,避免催化剂中毒与二次污染。在工艺集成层面,蓄热式催化燃烧(RCO)技术通过陶瓷蓄热体回收燃烧热能,使系统热效率达 90% 以上,实现自供热运行,显著降低运行成本;而催化燃烧-热泵联用系统则进一步挖掘余热价值,将反应器出口高温气体中的显热与潜热转化为工艺用热或制冷动力,形成能源闭环^[5]。

3 技术优化方向

3.1 催化剂改进

催化燃烧技术要突破效能瓶颈,催化剂的改进是核心动

力,目前的相关研究主要集中在活性组分的创新和载体结构的优化两个大的方向,并通过纳米尺度调控和界面工程等手段实现催化剂性能的跃升。在活性组分设计上,贵金属催化剂(如铂、钯)通过单原子分散技术将金属活性位点锚定于载体表面,在降低用量的同时提升原子利用率,使低温起燃温度进一步降低至 180°C 以下;过渡金属氧化物(例如锰,钴,钨基等复合氧化物)则凭借多价态协同效应与氧空位调控,展现出媲美贵金属的催化活性与抗硫抗水性能,尤其适用于含氯、含硫复杂废气场景。在载体工程领域,三维有序大孔结构(3DOM)和分级多孔载体能够通过调整孔道的连通性和比表面积来加强反应物的扩散和产物的脱附,从而避免由于孔道堵塞导致的活性降低;核壳结构催化剂利用活性核外部包覆惰性壳层抑制高温烧结和毒物侵蚀使催化剂寿命提高到传统体系 2-3 倍。另外,表面酸碱性及氧化还原性的共同调节正逐渐成为一个新的研究方向。例如,通过加入碱金属或稀土元素优化载体表面的电荷分布,这不仅可以增强 VOCs 分子的吸附活性,还能有效地抑制氮氧化物的过度氧化,从而生成 N_2O 。

3.2 工艺优化

优化催化燃烧工艺是提高废气治理效能和资源利用效率的重要途径,核心是通过系统集成和过程调控达到能量和物质动态平衡。从反应器设计水平上看,微通道反应器以毫米级流道和高比表面积的特点显著增强了传质传热效率并将反应物在催化剂上的停留时间降低到毫秒量级,不仅抑制了副反应的进行而且促进了处理通量的提高;蓄热式催化燃烧(RCO)系统利用蜂窝陶瓷蓄热体实现热能的分级回收,利用出口高温烟气中的显热和潜热来预热入口废气,从而将系统的自持运行温度降低到 250°C 以下,实现了热效率超过 95% 的突破。对于操作参数调控,通过构建废气浓度-流速-温度动态耦合模型可以实现催化剂活性窗口和废气热值之间的准确匹配,如对于间歇排放涂装废气,通过智能变频风机和电加热补偿装置实现废气浓度在波动过程中的瞬态响应以避免催化剂在较低温度下失活或者温度过高发生烧结。另外多场耦合强化技术也成了人们关注的焦点,例如催化燃烧和等离子体预处理相结合,用高能电子轰击破裂 VOCs 分子内 C-H, C-C 键等,产生自由基中间体再通过催化反应深度矿化明显降低起燃温度,扩大了可处理污染物的范围;并在催化燃烧-

热泵联产系统中利用吸收式热泵对反应余热进行回收并转换为工艺用热或者低温制冷的动力,从而构成一个能源闭环,目标是降低单位污染物处理的能量消耗超过 40%,并促进催化燃烧技术向低碳和智能化的方向发展。

3.3 集成技术

催化燃烧集成技术通过多工艺耦合与系统协同,构建了高效、灵活、低碳的废气治理体系。在工艺耦合层面,催化燃烧常与吸附浓缩技术深度融合,例如沸石转轮-催化燃烧组合装置通过转轮对低浓度 VOCs 的高效富集,将原气体积浓缩 20 倍以上后引入催化反应器,使系统能耗降低 60% 的同时净化效率稳定在 98% 以上;对于含硫含氮复杂废气,则采用催化氧化预处理-催化燃烧联用工艺,先通过氧化单元分解硫化氢、氨等还原性物质,再经催化燃烧深度矿化碳氢污染物,避免催化剂中毒与二次污染。在系统协同层面,蓄热式催化燃烧(RCO)与热泵技术结合,将反应器出口余热转化为工艺用热或制冷动力,实现能源梯级利用;而数字化控制系统通过实时监测废气成分、流量与温度,动态调节催化反应参数,确保复杂工况下的稳定运行,为工业废气超低排放提供了技术支撑与经济可行性。

4 结论

催化燃烧技术凭借其高效净化、低能耗、低二次污染等优势,成为机械废气处理的核心技术之一。未来,随着催化剂材料、工艺设计及集成技术的不断优化,催化燃烧技术将在更广泛的工业领域发挥重要作用,助力实现绿色制造与可持续发展。

[参考文献]

- [1]陈东,陈军辉,姜涛,等.催化燃烧工艺在制药行业 VOCs 废气治理中的应用[J].浙江化工,2024,55(2):48-54.
- [2]潘浩鹏.沸石转轮+催化燃烧工艺在电子行业有机废气治理中的应用研究[J].中国资源综合利用,2024,42(10):73-75.
- [3]段党全,郝江华,张政斌.喷漆有机废气净化处理工艺方法应用研究[J].现代涂料与涂装,2023(3):36-38.
- [4]潘浩鹏.活性炭吸附脱附+催化燃烧工艺处理喷涂中的有机废气[J].安徽化工,2024,50(4):108-110.
- [5]黄玲."活性炭吸附+催化燃烧"工艺在 VOCs 治理中的联合应用研究[J].当代化工研究,2023(22):167-169.