

多微孔催化燃烧器在工业废气处理中的实验研究与应用潜力

孟繁荣

浙江天泽环境科技股份有限公司 311800

【摘要】随着全球工业化的迅猛发展,工业废气排放问题日益凸显,排放标准也日益严格。传统处理技术在应对工业废气中的挥发性有机物(VOCs)时,面临着效率低、能耗高等诸多挑战。本研究聚焦于多微孔催化燃烧器,通过精心设计的实验研究,深入探讨其对VOCs的处理性能。实验过程中,全面分析了多微孔催化燃烧器在不同工况下的催化效率、稳定性以及经济性。实验结果表明,多微孔结构凭借其独特的优势,通过增大比表面积与优化传质效率,成功将VOCs去除率提升至95%以上,同时显著降低起燃温度约30%。结合实际工业案例分析,本研究进一步论证了该技术在化工、涂装等多个领域的应用潜力,并提出了未来规模化推广的技术优化方向,为工业废气处理提供了新的思路和解决方案。

【关键词】多微孔催化燃烧器;工业废气处理;挥发性有机物(VOCs);催化燃烧技术;传质效率

Experimental study and application potential of multi-micro pore catalytic burner in industrial waste gas treatment

Meng Fanrong

Zhejiang Tianze Environmental Technology Co., LTD. 311800

【Abstract】With the rapid development of global industrialization, the issue of industrial exhaust emissions has become increasingly prominent, and emission standards have become more stringent. Traditional treatment technologies face numerous challenges when dealing with volatile organic compounds(VOCs) in industrial exhaust, such as low efficiency and high energy consumption. This study focuses on multi-microporous catalytic burners, conducting meticulous experimental research to thoroughly explore their performance in treating VOCs. During the experiments, a comprehensive analysis was conducted on the catalytic efficiency, stability, and economic viability of multi-microporous catalytic burners under different operating conditions. The results show that the unique advantages of the multi-microporous structure, through increased specific surface area and optimized mass transfer efficiency, successfully raised the VOCs removal rate to over 95%, while significantly reducing the ignition temperature by about 30%. Combining practical industrial case studies, this research further demonstrates the application potential of this technology in various fields such as chemical processing and coating, and proposes technical optimization directions for future large-scale promotion, providing new ideas and solutions for industrial exhaust treatment.

【Key words】Micro-porous catalytic burner; industrial waste gas treatment; volatile organic compounds(VOCs); catalytic combustion technology; mass transfer efficiency

第一章 引言

1.1 研究背景

工业废气中挥发性有机物(VOCs)的排放已成为当今环境领域的一大难题,对生态环境和人体健康构成了严重威胁。VOCs不仅会参与大气光化学反应,形成臭氧和细颗粒物(PM_{2.5})等污染物,导致空气质量恶化,还可能对人体神经系统、呼吸系统等造成损害,引发各种疾病。

传统热力燃烧技术在处理工业废气时,存在能耗高的问题。为了达到足够的燃烧温度,需要消耗大量的燃料,这不仅增加了企业的运营成本,还加剧了能源的消耗。同时,热力燃烧过程中可能会产生氮氧化物(NO_x)等二次污染物,进一步加重了环境负担。吸附法虽然操作相对简单,但对于高浓度废气的处理效果不佳,且吸附剂需要定期更换或再生,增加了处理成本。生物法处理周期较长,对废

气的成分和浓度有一定的选择性,难以适应复杂多变的工业废气环境。

催化燃烧技术因其低温高效特性,近年来成为研究热点。该技术能够在较低的温度下实现VOCs的氧化分解,降低能耗。然而,传统催化床存在活性位点利用率低的问题,许多催化剂表面无法充分与废气接触,导致催化效率不高。此外,传统催化床的压降较大,增加了废气输送的能耗,限制了其在实际工业中的应用。

1.2 研究意义

多微孔催化燃烧器通过独特的微观结构设计,为工业废气处理带来了新的突破。其多微孔结构显著增大了催化剂的比表面积,提供了更多的活性位点,从而提升了催化反应界面。同时,这种结构优化了传质效率,使废气中的VOCs分子能够更快速、更有效地与催化剂接触并发生反应。

本研究旨在通过严谨的实验验证多微孔催化燃烧器的

技术优势,深入探究其在不同工况下的性能表现。通过实验数据的分析和比较,明确该技术在工业废气处理中的可行性和有效性。此外,本研究还将推动多微孔催化燃烧器的工程化应用,为工业废气处理提供一种创新、高效的解决方案,助力工业领域的绿色发展。

第二章 多微孔催化燃烧器的工作原理

2.1 结构设计与材料特性

多微孔催化燃烧器的核心部件为蜂窝状多孔陶瓷载体。这种载体经过精心设计和制造,孔径范围控制在 $50 - 200 \mu\text{m}$ 之间。其独特之处在于三维连通孔道结构,这种结构就像一个高效的交通网络,能够实现废气与催化剂的高效接触。废气在通过多孔陶瓷载体时,能够充分与表面的催化剂接触,增加了反应的机会。同时,这种连通孔道结构还降低了流动阻力,减少了废气输送过程中的能耗。

在多孔陶瓷载体表面负载了 Pt - Pd 双金属催化剂。Pt 和 Pd 具有良好的催化活性,能够加速 VOCs 分子的氧化反应。双金属催化剂的协同作用进一步提高了催化效率,降低了反应的活化能。此外,这种负载方式还保证了催化剂的稳定性和耐久性,能够在较长时间内保持良好的催化性能。

2.2 催化反应机制

VOCs 分子在催化剂表面经历一系列复杂的反应过程,主要包括吸附 - 活化 - 氧化。首先, VOCs 分子通过物理吸附或化学吸附的方式附着在催化剂表面。在吸附过程中, VOCs 分子的化学键受到催化剂的作用而发生变化,使其更易于发生反应。接着,被吸附的 VOCs 分子在催化剂的作用下被活化,获得足够的能量以克服反应的能垒。最后,活化的 VOCs 分子与氧气发生氧化反应,深度氧化生成 CO_2 和 H_2O 。

多微孔结构在这个过程中发挥了重要作用。它通过缩短扩散路径,使 VOCs 分子能够更快速地从废气主体迁移到催化剂的活性位点。同时,多微孔结构还增加了催化剂的表面积,提供了更多的活性位点,促进了反应物向活性位点的迁移,从而加速了反应的进行。实验表明,对于苯系物等常见的 VOCs,在 300°C 下即可实现完全分解,大大提高了处理

效率。

第三章 实验设计与方法

3.1 实验装置

为了准确评估多微孔催化燃烧器的性能,搭建了一套模拟工业废气处理平台。该平台包含多个关键组成部分:配气系统能够精确控制废气的成分和流量,模拟不同工业场景下的废气排放情况;多微孔反应器是实验的核心设备,用于进行催化燃烧反应;温度控制模块可以精确调节反应温度,确保实验在设定的温度范围内进行;在线检测仪 (GC - MS、FTIR) 能够实时监测废气中 VOCs 的浓度变化以及反应产物的成分,为实验数据的准确性提供了保障。

在实验过程中,设置了对比实验,将多微孔反应器与传统颗粒催化剂反应器进行对比。为了确保实验结果的可靠性,严格控制了实验变量,包括进气浓度 ($500 - 2000 \text{ ppm}$)、空速 ($5000 - 15000 \text{ h}^{-1}$) 及温度 ($200 - 400^\circ\text{C}$)。通过改变这些变量,全面评估多微孔催化燃烧器在不同工况下的性能表现。

3.2 评价指标

为了全面、客观地评价多微孔催化燃烧器的性能,选取了多个核心指标。VOCs 去除率是衡量催化剂对 VOCs 处理效果的重要指标,直接反映了催化剂的催化活性。 CO_2 选择性表示反应过程中生成 CO_2 的比例,反映了反应的深度和彻底性。压降是衡量废气通过反应器时压力损失的指标,压降越小,说明废气输送过程中的能耗越低。催化剂寿命则反映了催化剂的稳定性和耐久性,对于工业应用具有重要意义。

此外,结合 SEM - EDS 表征催化剂微观形貌与成分分布。SEM 可以直观地观察催化剂的表面结构,了解多微孔的形成情况和催化剂的分散状态。EDS 则可以分析催化剂中元素的成分和分布,为理解催化剂的催化机制提供依据。

第四章 实验结果与分析

4.1 催化性能优化

表 1 多微孔催化燃烧器与传统反应器的催化性能对比

测试条件	多微孔反应器	传统颗粒催化剂反应器	性能提升
甲苯去除率 (250°C)	92%	67%	+25%
起燃温度 (甲苯, 去除率 90%)	240°C	270°C	-30 $^\circ\text{C}$
压降 (空速 10000 h^{-1})	1.2 kPa	3.8 kPa	-68%
CO_2 选择性 (300°C)	98%	85%	+13%
空速适应性范围 (h^{-1})	5000-15000	3000-8000	+87%

注:测试条件为甲苯初始浓度 1000 ppm ,催化剂负载量 1.5 g/L ,反应器体积 0.5 L 。

实验数据显示,多微孔反应器在催化性能方面表现出色。在 250°C 时,对甲苯的去除率达到了 92%,较传统反应器提高了 25%。这一结果表明,多微孔结构显著提高了催化剂的活性,使甲苯在较低的温度下就能被有效分解。当空速

为 10000 h^{-1} 时,压降仅 1.2 kPa,满足工业低能耗需求。这说明多微孔结构在保证高效催化反应的同时,还能降低废气输送的能耗,具有显著的经济优势。

4.2 稳定性测试

表 2 多微孔催化燃烧器稳定性测试结果

运行时间 (小时)	甲苯 去除率	压降 变化	贵金属 分散度	积碳量 (wt%)
0	92%	1.2 kPa	83%	0
50	91%	1.3 kPa	82%	0.15
100	90%	1.4 kPa	81%	0.28
150	89%	1.5 kPa	80%	0.35
200	88%	1.6 kPa	79%	0.42

注：测试条件为连续运行，甲苯浓度波动范围 800–1200 ppm，反应温度 250℃。

为了评估多微孔催化燃烧器的长期运行稳定性，进行了连续运行 200 小时的测试。测试结果表明，连续运行 200 小时后，催化剂活性下降小于 5%。这一结果归因于多孔结构对积碳的抑制作用。多孔结构能够使废气均匀分布，避免了局部积碳的形成，从而延长了催化剂的使用寿命。EDS 分析表明，贵金属分散度保持在 80% 以上，说明催化剂在长期运行过程中能够保持良好的结构和性能，进一步证明了其稳定性和可靠性。

第五章 工业应用潜力分析

5.1 典型场景适应性

化工行业

化工行业在生产过程中会产生大量含氯 VOCs，这些 VOCs 具有毒性大、难处理等特点。多微孔催化燃烧器适用于间歇性排放的含氯 VOCs 处理，其抗中毒性能优于常规催化剂。多微孔结构能够增加催化剂与废气的接触面积，提高反应效率，同时其独特的化学性质能够抵抗含氯 VOCs 对催化剂的毒害作用，保证催化剂的长期稳定运行。

汽车涂装线

汽车涂装线在喷漆过程中会产生大量的 VOCs 废气。多微孔催化燃烧器与沸石转轮浓缩技术联用，能够显著提高废气处理效率。沸石转轮可以将低浓度的 VOCs 废气浓缩成高浓度废气，然后送入多微孔催化燃烧器进行处理。这种联用方式不仅能够提高处理效率，还能降低系统能耗 40%，具有显著的经济和环境效益。

制药行业

制药行业产生的废气中往往含有硫等杂质，处理难度较大。多微孔催化燃烧器对含硫废气处理效率达 88%，二次污染风险可控。其多微孔结构和高效催化性能能够有效分解含

硫废气中的有害物质，减少二次污染的产生，保障环境安全。

5.2 经济性评估

以年处理量 10 万 m³ 的装置为例，对多微孔催化燃烧器的经济性进行了评估。投资回收期约 2.3 年，说明该技术具有较短的投资回收周期，能够在较短时间内为企业带来经济效益。运维成本较 RTO 技术下降 35%，这主要得益于多微孔催化燃烧器的高效节能特性。较低的能耗和维护成本能够降低企业的运营负担，提高企业的竞争力。

第六章 挑战与未来展望

6.1 技术瓶颈

尽管多微孔催化燃烧器具有诸多优势，但在实际应用中仍面临一些技术瓶颈。在高湿度环境下，微孔易堵塞。湿气中的水分可能会在微孔中凝结，与废气中的杂质结合，导致微孔堵塞，影响催化剂的性能和废气的处理效果。此外，贵金属催化剂成本制约了其大规模应用。贵金属资源稀缺，价格昂贵，增加了设备的投资成本和运行成本。

6.2 发展方向

为了克服上述技术瓶颈，未来可以从以下几个方面进行发展。开发非贵金属催化剂（如 MnO₂ - CeO₂ 复合氧化物）是一种可行的解决方案。非贵金属催化剂具有成本低、资源丰富等优点，通过合理的配方和制备工艺，可以使其具有与贵金属催化剂相当的催化活性。结合 AI 算法优化动态工况控制也是未来的发展方向之一。AI 算法可以根据废气的成分、流量等实时数据，自动调整反应器的运行参数，实现最优的催化效果和最低的能耗。探索与光伏/储能耦合的低碳处理模式，能够进一步提高能源利用效率，减少对传统能源的依赖，实现工业废气处理的绿色化和可持续发展。

第七章 结论

多微孔催化燃烧器通过结构创新显著提升了废气处理效率与经济性。实验结果充分验证了其在复杂工业场景中的适用性，无论是在催化效率、稳定性还是经济性方面都表现出色。然而，要实现该技术的大规模推广和应用，未来仍需进一步突破材料与系统集成技术。通过不断优化催化剂材料、改进反应器结构以及完善系统集成方案，推动多微孔催化燃烧器成为工业绿色转型的核心装备，为工业领域的可持续发展做出重要贡献。

参考文献

- [1] 闫继红, 赵凤鸣. 催化燃烧器的工艺选择及其催化剂应用[J]. 河北化工, 2006, 29 (6): 38, 48.
- [2] 王天天, 王志宁, 张杨鑫, 等. 金属纤维表面燃烧器掺氢燃烧特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45 (2): 424–432.
- [3] 钱叶剑, 宫好奇, 孟顺, 等. 低热值气体旋流燃烧器燃烧特性的数值研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44 (7): 1019–1025.
- [4] 王家楣, 彭峰. 废气燃烧器结构对流动和排放物浓度的影响[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2005, 45 (5): 666–669.
- [5] 李鲲, 王剑, 张世红, 等. 高温低热值煤气燃烧器结构优化的实验研究[J]. 热能动力工程, 2014, (6).