 DOI: https://doi.org/10.12349/ees.v4i4.1587

Application of Catalytic Combustion Process in Treating Industrial Waste Gas

Hong Li[1] Huihong Wang[2]

1. Linyi Environmental Protection Science Research Institute Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276001, China
2. Linyi Hanhai Environmental Consulting Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276001, China

Abstract

Since the reform and opening up, China's industrialization process has made a breakthrough, after years of construction, China has gradually formed a systematic and huge industrial system, industrial production capacity ranks in the forefront of the world.While the huge industrial system drives the rapid development of China's economy, the pollution caused by industrial enterprises is becoming more and more serious.At present, the situation of air pollution prevention and control in China is extremely severe. $PM_{2.5}$ is also a hot word that has entered the public view in recent years. Another key word coexisting with $PM_{2.5}$ is PM_{10}. PM_{10} is mostly composed of industrial organic waste gas, and it is also one of the main sources of air pollution in China.As one of the methods of industrial waste gas treatment, it can guarantee the improvement of the efficiency and quality level of the catalytic combustion industry and its application.

Keywords

catalytic combustion process; industrial waste gas treatment; process application

试析催化燃烧工艺处理工业废气的工艺应用

李红[1] 王会红[2]

1. 临沂市环境保护科学研究所有限公司，中国 · 山东 临沂 276001
2. 临沂瀚海环境咨询有限公司，中国 · 山东 临沂 276001

摘 要

改革开放以来，中国的工业化进程有了突破性进展，经过多年的建设，中国逐步形成了系统而庞大的工业体系，工业生产制造能力位居世界前列。在庞大的工业体系拉动中国经济快速发展的同时，工业企业对自然环境造成的污染也越来越严重。当前，中国大气污染防治形势异常严峻，$PM_{2.5}$也是在近些年进入大众视野的热点词汇，与$PM_{2.5}$并存的另一个关键词便是PM_{10}。PM_{10}多由工业有机废气组成，同样也是中国大气主要污染源之一。作为工业废气处理的方法之一，通过深入了解催化燃烧工业及其应用的相关事项，能够为提升工业废气处理效率及质量水平提供保障。

关键词

催化燃烧工艺；工业废气处理；工艺应用

1 引言

进入 21 世纪以来，为了遏制空气质量不断恶化（如图 1 所示），国家陆续出台了众多法律和政策，政府采取根据不同行业特点，分类设定排放标准，加大环保督察力度，督促企业限期整改，将严重环保违规企业纳入失信企业名单，实行市场禁入和融资限制等多种措施加大对工业废气的治理力度，这给工业生产企业带来了巨大压力，也创造了加大治理投入的动力，并明确指出催化燃烧此类工艺技术运用的重要性与意义。在此背景下，开展催化燃烧工艺处理工业废气的工艺应用的研究能够为相关研究提供理论性参考依据，以此来使该项工艺技术在实际工业废气处理中得到更加合理的运用。

图 1 工业废气对空气质量的危害

2 催化燃烧工艺处理工业废气的研究进展

2.1 催化燃烧工艺的研究进展

催化燃烧法是基于直接燃烧法提出的，即在催化剂作

【作者简介】李红（1983–），女，中国山东临沂人，硕士，高级工程师，从事环境影响评价研究。

用下，将 VOCs 氧化为 CO_2 和 H_2O。与直接燃烧法相比，大大降低燃烧温度。催化燃烧是借助金属物质矿化有机物，加剧整个反应过程，在整个催化氧化反应中活化能低于氧气直接参与的氧化反应 [1]。

催化燃烧机理被认为是氧化 - 还原机理，整个反应过程中只涉及到氧气的变化，催化剂是不变的。氧气在整个过程中变化较为复杂，传统认为矿化反应只与催化剂表面晶格活性氧反应，为了进一步探讨催化剂表面吸附氧和气体中氧的贡献率，Gomez 采用同位素标定法和产物瞬时分析技术（TAP）测定了反应过程中吸附氧和表面氧的运动轨迹，结果表明吸附氧和表面氧均参加了氧化还原反应。通过前人研究，总结催化燃烧的机理如下：

$$C_nH_m+(n+\frac{m}{4})O_2\xrightarrow{\text{catalyst}}nCO_2+\frac{m}{2}H_2O+Q$$

2.2 催化剂制备的研究进展

催化剂制备方法影响催化剂性能，如化学组成、比表面积、孔径结构等，这些性质影响催化剂的催化活性。研究报道表明催化活性与活性组分之间的相互作用、负载晶型的分散度有关，这些特性与制备方法密切相关。因此，催化剂的制备方法在整个催化剂设计中十分重要。良好的催化剂除保持高分散性外，还应避免因活性组分团聚引起的烧结 [2]。常见负载型催化剂的制备方法有浸渍法、沉淀法和离子交换法等，不同制备方法的机理和工艺不尽相同，这造成了催化剂表面性能、催化性能和结构之间的差异，具体表现如下：

①浸渍法，通过活性组分借助分子间扩散力吸附于载体的表面和内部，通过一段时间后达到浸渍平衡。采用过滤、蒸发等方式去除表面及内部剩余液体，经干燥、烧结、活化得到最终催化剂产品。整个浸渍法制备催化剂的过程包括载体预处理、浸渍、去除过量液体、干燥、烧结和活化等工序，该法广泛适用于制备活性组分较低，机械强度高的催化剂，适合批量化生产（如图 2 所示）。

②沉淀法，沉淀法制备催化剂的影响因素较多，在实际应用过程中，应根据目标催化剂的要求，选择合适的沉淀条件，调节沉淀类型及晶粒形貌。实际应用中发现，共沉淀的优势在于可以将活性组分达到分子水平混合，尤其是对多组分活性成分而言，在控制良好的沉淀条件下，可有效地控制催化剂的大小和分布，是目前共沉淀法的研究热点。但共沉淀法的整个制备过程工序烦琐，由于制备过程中沉淀速率的差异，对最终催化剂结构有较大影响，且重现性较差，不适合大规模批量生产（如图 3 所示）。

③离子交换法，可将 0.5~3nm 的金属粒子负载至载体上，且分布均匀，特别适合高利用率、低含量的贵金属活性组分和酸碱催化剂。分子筛是离子交换法中常用的载体，分子筛中存在可逆的阳离子交换，自身存在大量 Na^+、Mg^{2+}、Al^{3+} 等金属离子，金属盐溶液与分子筛接触时，溶液的阳离子与分子筛阴离子交换，通过交换后所得的催化剂在吸附容量、催化活性及选择性方面有显著提升 [3]。离子交换法的优势在于同一催化剂可反复使用，适于气、液相，也适用于非水体系。与浸渍法相比，催化剂的活性较高。但该体系存在制备过程中热稳定性和耐磨性差，机械强度低的劣势，在温度高于 120℃时，极易发生分解。目前，该法仍处于实验室研究阶段，并未实现工业化生产。

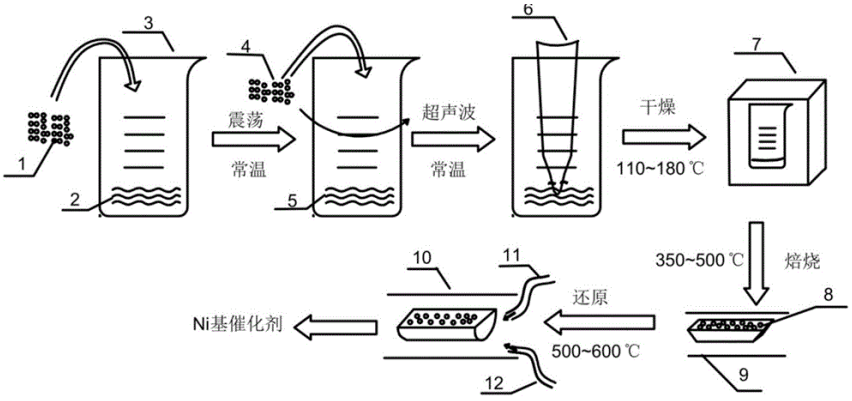

图 2 超声波辅助浸渍法制备 Ni 基催化剂的方法与流程

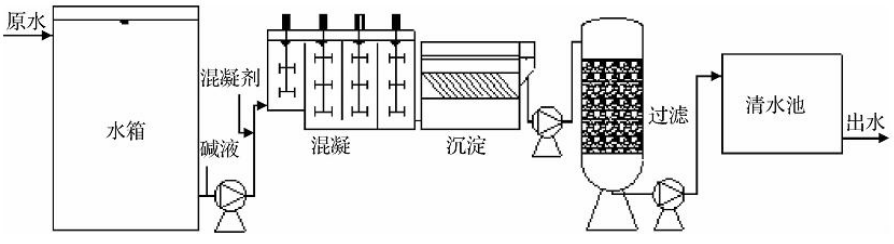

图 3 化学沉淀法强化常规工艺流程

2.3 催化剂的发展方向

负载型催化剂作为主体催化剂，市场占有率达到 70% 以上，适用于工业化、成本低的过渡金属催化剂替代贵金属日渐成为主流产品，催化剂的催化性能与活性组分负载量、活性组分在载体上的分散性及载体的结构等有关。寻求一种活性组分均一、负载量大、高分散性催化剂的简易制备方法是目前研究热点和方向。

3 催化燃烧工艺在工业废气处理中的应用实例

以某化工厂对二甲苯催化燃烧系统应用来看，VOCs 气体的燃烧放热量是影响系统自热运行的一个重要参数。VOCs 气体不同，燃烧热不同，系统的运行条件也不同。因此，接下来将在二甲苯催化燃烧系统模拟研究的基础上，通过改变传热方程中的反应热来模拟不同 VOCs 气体组分的催化燃烧反应 [4]。常见的 VOCs 气体组分有烷烃类、烯烃类、苯系物、醇类、酮类和有机硫类，以二甲苯的燃烧热值 4549.5kJ/mol 为参考基准，在燃烧热值 909.9~4094.6kJ/mol 范围内选择了 8 组不同燃烧热值的 VOCs。保持催化燃烧的操作条件与处理二甲苯时相同，在 VOCs 进气浓度为 10620mg/m^3 条件下，对这 8 组不同类型 VOCs 的催化燃烧反应进行了模拟计算，具体可见表 1。

表 1 不同燃烧热值 VOCs 的最佳进气浓度范围

燃烧热（KJ/mol）	VOCs 代表成分	最佳进气浓度范围（mg/m^3）
2729.8	正丁醇，正丁烷	12739~16986
1819.6	丙酮，二硫化碳	19107~26540
4094.5	甲苯，已正烷	8492~11678
1364.9	乙醇，乙烯	24415~35033
3639.5	戊醇、戊烷	9556~12739
4549.3	二甲苯	7430~10621
909.8	甲烷	37155~53081
3184.6	苯	10615~14862

根据催化燃烧反应器的操作特点，控制催化燃烧反应器的换向半周期为 30min、初始温度为 180℃，可以直接处理预热温度为 180℃、流量为 8L/min、浓度为 7430~10621mg/m^3 的二甲苯气体。在此条件下，设备可以自热运行，催化剂温度低于 600℃，VOCs 的去除率基本达到 95%。当反应器入口 VOCs 气体浓度较低时，提高 VOCs 气体的预热温度并增强系统的保温效果后，VOCs 去除率得到提高，系统也可以顺利运行 [5]。但是，提高预热温度，意味着能量的额外投入。因此，对于是直接处理低浓度的 VOCs 气体还是通过吸附浓缩设备提高其浓度后再进行处理，应该通过核算成本后选择一个相对经济的方式，目的就是在实效有效去除工业废气的同时，还能节省一定的成本费用，以此突显催化燃烧工艺应用的经济性与高效性。

4 结语

结合上述研究分析来看，在石油化工、煤化工、日常生活等领域在实际生产中产生的工业废气属于挥发性有机污染物，该物质对人类健康和生存环境造成严重危害，不仅对人身体产生不适症状，而且易参与化学反应产生烟雾及臭氧等二次污染。VOCs 的净化已经成为研究热点，与环境保护和安全稳定生产密切相关。生态环境日益恶劣、人们环保意识和要求提高、涂装汽车行业的快速发展、工业有机源的大量使用，都对 VOCs 净化提出更高的要求。催化燃烧因其净化度高、操作简单、投资和运行费用低、无二次污染等优点得到较为广泛的应用。制备催化剂性能好的装置与技术，对于延长吸附剂及催化剂使用寿命、提升 VOCs 净化率意义重大。这是催化燃烧工艺在工业废气处理方面效能及作用能否得到充分发挥的关键，也是其应用实效性的体现。

参考文献

[1] 吴举,陈强,蔡志辉,等.吸附+催化燃烧工艺在涂装行业废气治理中的问题和工艺优化[J].盐科学与化工,2020,49(12):3.

[2] 楚培齐,王赛飞,赵世广,等.甲烷催化燃烧反应机理及催化剂研究进展[J].燃料化学学报,2021(8):1-15.

[3] 江廷雪,漆渔江,杨振中,等.基于活性炭吸附浓缩-催化燃烧技术处理汽车行业喷涂有机废气的方法及系统,CN111467928A[P].2020.

[4] 杨勇,陈殿君.活性炭吸附浓缩+催化燃烧技术在喷涂有机废气行业的应用[J].电子技术(上海),2020(2):4.

[5] 何世磊,罗福坤,吴清阳.工业VOC废气催化燃烧处理用喷淋处理装置,CN212166938U[P].2020.