

工业废气处理技术及流程分析

陆德生¹ 傅昂毅² 林安辉³

- (1. 杭州佳亿德环保科技有限公司, 浙江 杭州 310000;
2. 浙江聚创方舟科技有限公司, 浙江 杭州 310000;
3. 杭州宏顺环保科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

【摘要】工业化进程加速了工业废气的排放, 对环境和人类健康造成了显著影响。为了有效应对这一挑战, 深入了解废气的来源及特点以及探索有效的处理方法变得尤为重要。基于此, 本文全面分析了工业废气的主要来源和特性, 并细致评估了吸收法、吸附法、热破坏法、膜隔离法和生物处理法等多种工业废气处理技术。通过比较各技术的优势、局限和适用场景, 本研究旨在提供一套系统的解决方案框架, 帮助决策者和环境工程师制定更有效的废气治理策略。

【关键词】工业废气; 处理技术; 环境保护

引言

工业化带来的环境挑战, 尤其是工业废气排放问题, 已经成为全球关注的焦点。工业废气不仅包含有毒有害物质, 对大气层造成严重污染, 还直接威胁到人类健康和生态系统的稳定。面对这一问题, 开发和应用高效的工业废气处理技术成为了保护环境、促进可持续发展的必要手段。当前通过吸收法、吸附法、热破坏法、膜隔离法以及生物处理法等多种技术, 可以有效去除工业废气中的污染物。这些技术各有特点, 适用于处理不同类型的废气污染物。然而, 要实现最佳的处理效果, 不仅需要对这些技术有深入的理解, 还需要对废气的特性和排放源进行全面的分析。随着技术的不断进步和环保要求的日益严格, 工业废气处理技术和流程也在不断地演进和优化, 这要求相关领域的研究者和实践者持续关注最新的技术动态和政策法规, 以期达到更高的环境保护标准。

一、工业废气的来源及特点

(一) 产生废气的来源

产生废气的来源不仅多样而且复杂, 主要包括但不限于化工、钢铁、造纸、电力及石油化工等行业。这些行业在其生产和加工过程中, 依赖大量化学反应和物理变化, 导致各种有害气体和颗粒物的产生。化工行业在进行化学合成、原料加工过程中, 频繁使用有机溶剂、酸、碱等, 这些物质在反应过程中不可避免地生成挥发性有机化合物(VOCs)、酸性气体如氯气、硫化氢等有害气体。钢铁行业在高炉炼铁、转炉炼钢的过程中, 大量使用煤炭作为还原剂和能源, 这导致了烟尘、二氧化硫、氮氧化物等的排放。造纸行业在纸浆的制备、漂白、烘干过程中, 由于使用的化学品和高温作

业环境, 会排放大量的挥发性有机物和含硫污染物。电力行业尤其是燃煤电站, 在燃烧煤炭过程中产生的二氧化硫、氮氧化物及飞灰是主要的空气污染源^[1]。石油化工行业在原油的提炼、化学品的生产过程中, 不仅有挥发性有机物的排放, 还会排放苯、甲苯、二甲苯等有害物质及硫化氢。以上行业的废气排放不仅对大气环境造成严重污染, 而且多种污染物混合排放使得治理难度加大, 对环境保护和人体健康构成了巨大挑战。

(二) 排放的特点

工业废气展现出的周期性、间歇性和多变性特点, 对废气处理技术提出了更高的要求。周期性体现在工业生产活动往往按照一定的时间周期进行, 如一些批量生产的化工企业, 其生产线根据市场需求或原料供应情况, 会有规律的生产周期, 这就导致了废气排放量和成分的周期性变化。间歇性主要是由于生产过程中操作的不连续性或生产线的不稳定运行导致的, 例如, 在生产调整、设备维护或换班期间, 废气的排放量和成分可能会出现突然的变化。多变性则是由于不同工业生产其工艺流程、使用的原料和能源种类多样, 加之操作条件(如温度、压力、湿度等)的差异, 使得废气的成分和排放量存在极大的不确定性^[2]。环境条件的变化, 如季节性温差、湿度变化等也会对废气的物理和化学性质产生影响。这些特点要求在工业废气处理技术的选择和流程设计时, 必须考虑到废气排放的不确定性和多样性, 采取灵活多变、可调节的治理措施, 确保在不同条件下均能有效控制污染物排放, 满足环境保护的要求。

(三) 工业废气的危害

工业废气的危害表现在对大气环境的直接污染、

对人体健康的潜在威胁以及对生态系统的负面影响。大气环境受到的污染主要体现在温室气体的排放，如二氧化碳、甲烷等，加剧了全球变暖的趋势；挥发性有机化合物（VOCs）和氮氧化物在光化学反应中生成臭氧，形成光化学烟雾，严重影响空气质量；颗粒物如烟尘能够携带重金属和其他有害物质，导致大气污染加重。对人体健康的影响主要通过呼吸道、皮肤等途径，长期暴露在含有有害物质的环境中，会引发呼吸系统疾病、心血管疾病，甚至导致癌症等严重健康问题。特别是细颗粒物（PM_{2.5}）、苯和甲醛等物质，对人体健康危害极大。对生态系统的影响体现在酸雨的形成和土壤、水体的污染上，酸雨可导致森林破坏和水体酸化，破坏生态平衡，影响动植物生长；土壤和水体受到重金属和有害化学物质污染后，会影响农作物生长，进而影响食物链和生物多样性。因此，工业废气的危害是多方面的，不仅限于环境质量的直接下降，还涉及到人类健康和生态系统的长远影响，需要采取有效的控制和治理措施，减轻其带来的负面影响。

二、工业废气处理方法

（一）吸收法

吸收法作为工业废气处理中广泛应用的一种技术，主要依靠吸收剂与废气中的有害气体成分之间的物理或化学作用力进行分离，从而达到净化废气的目的。该方法的核心在于选择合适的吸收剂，根据废气成分的特性和处理要求，吸收剂可以是液体也可以是固体，如水、碱液、吸收油或专用化学溶剂等。在物理吸收过程中，废气中的污染物质通过分子间的范德华力被吸收剂吸收，此过程主要用于处理那些溶解度较高、易于被液体吸收的气体污染物；化学吸收则是通过吸收剂与污染物之间的化学反应，形成稳定的化合物或离子，从而将污染物从气相转移到液相中，适用于处理含有酸性或碱性气体的废气。吸收法在操作过程中需通过吸收塔等设备实现，废气与吸收剂在塔内进行充分接触，通过填料层或喷淋系统增加两者间的接触面积，以提高吸收效率^[3]。吸收完成后，吸收剂需要进行再生处理，以回收吸收的污染物并重新利用吸收剂，这一过程通常涉及蒸馏、加热或化学中和等方法。吸收法因其处理效率高、操作简便、适用范围广等优点，在工业废气处理中得到了广泛应用，尤其是在处理含硫化物、氯化氢、氨等特定污染物的废气时显示出了显著的处理效果。然而，该方法也存在着吸收剂消耗大、运行成本高、对吸收剂选择要求严格等缺点，需要在具体应用过程中综合考虑吸收效率与经济性，以达到最佳的废气处理效果。

（二）吸附法

吸附法在工业废气处理领域被广泛采用，其基

本原理是利用吸附剂的表面或内部孔隙对废气中特定污染物的物理或化学吸附能力，实现对有害气体的有效分离与富集。该技术通过提供大量具有选择性吸附性能的固态材料，如活性炭、沸石、硅胶、活性氧化铝等，对废气中的挥发性有机化合物（VOCs）、恶臭物质、有毒气体等进行捕获和去除。活性炭因其发达的孔结构和较高的表面积，尤其在吸附有机蒸汽方面展现出良好的性能；沸石等分子筛则因其独特的孔径选择性，在分离特定分子尺寸的污染物上具有优势。吸附过程通常在固定床、移动床或流化床吸附器中进行，废气在通过吸附剂床层时，污染物被有效吸附。为提高处理效率，常采用多床系统或轮式吸附器，以实现连续操作和吸附剂的再生。吸附剂的再生，即将吸附剂上的污染物去除，恢复其吸附能力，通常通过加热脱附、压力减小脱附或溶剂洗脱等方法实现。吸附法的优点包括操作简便、适用范围广、处理效果好、可以回收某些有价值的污染物，但其缺点也不可忽视，如吸附剂的选择和再生处理需考虑经济性和实用性，吸附容量受温度和压力的影响较大，且对高浓度污染物的处理能力有限。因此，在具体应用中需综合考量废气特性、处理目标和成本效益，合理选择吸附剂和工艺参数，确保吸附法在工业废气处理中的有效性和经济性。

（三）热破坏法

热破坏法，亦称为热氧化法或燃烧法，是一种通过高温将工业废气中的有机污染物质破坏转化为无害或低害物质的技术。该方法主要适用于处理含有挥发性有机化合物（VOCs）、恶臭气体及其他难以通过物理或化学方法去除的有害气体。热破坏法的核心在于将废气加热至一定温度（一般在760℃至1200℃之间），在这个温度范围内，大多数有机污染物会在氧气存在的条件下被完全氧化，转化为二氧化碳和水，从而达到净化废气的目的。该技术按照操作温度的不同，可分为直接燃烧法、催化燃烧法和再生式热氧化法等。直接燃烧法通过直接加热使废气在燃烧室内燃烧，需要较高的能耗，但处理效率高，适合处理高浓度有机废气。催化燃烧法则是在催化剂的作用下降低了有机物燃烧的起始温度，常见的催化剂包括贵金属催化剂（如铂、钯）和金属氧化物催化剂（如CuO、Cr₂O₃），该方法相比直接燃烧法能耗更低，但催化剂的选择和再生是其关键技术问题^[4]。再生式热氧化法利用特制的热交换器回收燃烧产生的热量，以减少能源消耗，适用于中低浓度有机废气的处理。热破坏法的设计和运营需考虑废气的组成、浓度及流量等因素，以确保燃烧过程的稳定性和处理效率。此外，该方法在处理过程中可能产生NO_x等二次污染物，因此需配备相应的脱硝装置或采用低NO_x燃烧技术，

以降低二次污染。热破坏法因其处理能力强、适用范围广被广泛应用于工业废气处理中，尤其对于那些生物降解性差、化学稳定性高的有机污染物具有明显的处理优势，但其较高的能耗和运行成本是需要优化和控制的关键因素。

（四）膜隔离法

膜隔离法，作为一种现代化的工业废气处理技术，通过利用特定材质的膜对废气中的组分进行选择分离，达到净化目的。该技术基于分子或离子的大小、溶解度、扩散率等物理化学特性差异，利用半透膜实现对废气中有害成分的回收或有害成分的去除。膜材料的选择至关重要，常见的膜材料包括聚合物膜、陶瓷膜、金属膜等，各种材料膜适用于不同类型的废气处理场景。在工业应用中，膜隔离技术根据作用机理可分为气体渗透、气体分离、逆渗透、纳滤等多种形式。气体渗透技术利用膜的孔隙率和孔径，通过物理过滤作用实现气体的分离；气体分离技术则侧重于利用膜对不同气体分子溶解度和扩散速率的差异，实现精细分离；逆渗透和纳滤技术则多应用于液相中的气体回收或有害物质去除。膜隔离过程中，影响分离效率和选择性的关键因素包括膜的材质、结构、操作条件（如温度、压力）以及废气中各组分的性质^[5]。膜隔离法在工业废气处理中的优势在于其操作条件温和、能耗相对较低、可实现连续操作和自动化控制，特别适合于低浓度有害气体的去除和贵重气体的回收。该技术能够在不改变化学组成的情况下实现气体的分离，对环境影响小。然而，膜的选择性、透过率以及长期稳定性是制约其广泛应用的关键因素，膜材料的抗化学腐蚀性、机械强度及抗污染能力需不断优化提高。因此，在实际应用中需根据具体废气成分、处理目标和成本效益综合评估，选择最合适的膜隔离技术和操作参数，以确保处理效果和经济合理性。

（五）生物处理法

生物处理法在工业废气处理中占据独特地位，通过微生物的代谢作用将污染物质转化为无害或低害的物质，主要应用于挥发性有机化合物（VOCs）、恶臭物质等的处理。该方法包括生物滤池、生物洗涤器和生物膜系统等技术路径，通过这些系统中的微生物群落对废气中的污染物进行吸附、吸收及生物降解作用，实现废气净化。生物滤池技术通过填充材料提供微生物生长的物理空间，废气在通过填充层时，污染物被微生物吸收并转化为二氧化碳和水，同时也产生少量生物质。生物洗涤器则利用液体介质中溶解的微生物来去除废气中的污染物，通过气液接触将污染物转移至液相，再由微生物进行代谢。生物膜系统依赖于固定化微生物膜对废气中的污染物进行直接生物降解，具有较高的空间利用

率和处理效率。这些技术的应用需要考虑微生物的选择、培养和控制，确保微生物的活性和降解能力。微生物的种类应根据待处理废气的具体成分进行精选，以保证对特定污染物的高效降解。系统的设计和运行条件（如 pH 值、温度、湿度、营养物质供应）需要精确控制，以维持微生物群落的稳定性和活性，保证长期连续的处理效果。生物处理法具有运行成本低、二次污染少、可持续性强等优点，特别适合处理低浓度、生物降解性好的有机废气。但其处理效率受微生物种类、环境条件和废气成分复杂度的限制，且系统启动和调试周期较长，需要针对具体的废气特性和处理目标进行详细的技术经济评估和系统设计，确保达到预期的净化效果。

结语

在探讨工业废气处理技术及其流程分析时，吸收法、吸附法、热破坏法、膜隔离法以及生物处理法各自展现出独特的处理机理和适用范围。这些技术从物理、化学和生物学角度出发，针对工业废气的多样性和复杂性提供了综合性的解决方案。通过对这些方法的深入分析，可以发现无论是针对特定污染物的选择性去除，还是对废气进行全面治理，都需细致考量各技术的优势与局限性，以及环境、经济因素，以实现高效、经济、环保的废气处理目标。

参考文献：

- [1] 张裴. 电子工业废气 VOCs 排放特征及防治对策探讨 [J]. 清洗世界, 2024, 40 (1): 111-113.
- [2] 范志强, 李国营. 浅析工业废气治理的现状问题与措施建议 [J]. 清洗世界, 2024, 40 (1): 70-72.
- [3] 贾唯策. 工业废气治理中的吸收和吸收塔工艺设计理论及其应用研究 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50 (1): 96-99, 111.
- [4] 李刚. 现代工业废气排放管理与大气环境质量评估模型的构建 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (1): 96-98.
- [5] 董磊. 浅谈工业废水处置中的废气治理技术 [J]. 清洗世界, 2023, 39 (12): 82-84.

作者简介：

1. 陆德生 (1989.12-), 男, 汉族, 浙江临海人, 大学本科, 工程师、二级建造师, 研究方向: 环保工程及咨询领域工作。
2. 傅昂毅 (1989.3-), 男, 汉族, 浙江杭州人, 研究生, 工程师, 研究方向: 环境管理、环境规划、环保智能化相关工作。
3. 林安辉 (1986.9-), 男, 汉族, 浙江杭州人, 大学本科, 工程师, 研究方向: 环保工程及咨询领域工作。