

Analysis of the Front-End Collection, Pretreatment, and End-of-Pipe Treatment Pathways for Volatile Organic Compounds (VOCs) Emissions in Pharmaceutical and Chemical Enterprises

Jiejie Wang¹ Kang Zhang² Chaochao Zhou³

1. Taizhou Pollution Prevention and Control Technology Center Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang, 318000, China
2. Taizhou Ecological Environment Bureau Jiaojiang Branch, Taizhou, Zhejiang, 318000, China
3. Xianju County Environmental Protection Monitoring Station, Taizhou, Zhejiang, 318000, China

Abstract

The VOCs exhaust gas produced during the production process of pharmaceutical and chemical enterprises poses a threat to the environment and human health. Front-end collection, pre-treatment, and end-of-pipe treatment are the three key stages in VOCs exhaust gas management. Front-end collection must ensure that the exhaust gas can be efficiently gathered. Pre-treatment technology removes special substances from the exhaust gas, reducing the load on the end-of-pipe system. The end-of-pipe treatment section purifies the remaining pollutants to ensure that the exhaust gas meets standards. This paper explores the technical approaches for managing VOCs exhaust gas in pharmaceutical and chemical enterprises, providing companies with scientific and reasonable solutions to achieve environmental protection goals.

Keywords

pharmaceutical and chemical enterprises; volatile organic compounds; treatment strategies

医药化工企业含挥发性有机物 (VOCs) 废气前端收集、预处理以及末端治理路线的分析

王杰杰¹ 张康² 周超超³

1. 台州市污染防治技术中心有限公司, 中国·浙江台州 318000
2. 台州市生态环境局椒江分局, 中国·浙江台州 318000
3. 仙居县环境保护监测站, 中国·浙江台州 318000

摘要

医药化工企业的生产过程中所产生的VOCs废气, 会对环境以及人体健康造成威胁。前端收集、预处理以及末端治理, 是VOCs废气治理的三个关键环节, 前端收集要保证废气可被高效收集起来, 预处理技术将废气中的特殊物质去除, 降低末端系统的处理负荷, 末端治理部分将剩余污染物净化, 确保废气治理达标。本文探讨医药化工企业VOCs废气治理的技术路线, 给企业提供科学合理的治理方案, 达成环保目标。

关键词

医药化工企业; 挥发性有机物; 治理策略

1 引言

医药化工企业开展生产活动时会产生多种不同的挥发性有机物即 VOCs, 如果这些物质没有得到妥善的处理, 会给环境以及人体健康带来严重的不良影响。随着环保法规变得越来越严格, 企业要采取有效的 VOCs 治理措施。本文探讨医药化工企业 VOCs 的前端收集、预处理以及末端治理技术, 剖析不同技术的适用性以及优化策略, 为企业挑选经济

高效的 VOCs 治理方案给予指导。

2 医药化工企业 VOCs 前端收集、预处理技术分析

2.1 收集系统设计原则

医药化工企业 VOCs 收集系统设计要遵循“高效、安全、经济”这三大核心原则。高效性方面, 要依据生产工艺特点, 科学合理布局集气罩、管道以及风机, 保证废气收集率不低于 90%, 避免出现无组织逸散的情况; 安全性方面, 强调系统要配备防爆、防静电装置, 针对腐蚀性气体的输送, 管路材质需满足耐腐蚀, 避免 VOCs 泄漏引发爆炸或

【作者简介】王杰杰 (1992-), 女, 中国安徽萧县人, 硕士, 工程师, 研究方向: 环境污染治理工程。

者中毒风险^[1]；经济性方面，要综合考量设备投资、运行能耗以及维护成本，优先选择低能耗、长寿命的设备，同时预留出升级改造的空间，以适应环保标准的动态变化。系统设计还要契合操作便捷性，方便企业进行日常监测与维护，达成 VOCs 收集的可持续性^[1]。

2.2 常见的 VOCs 预处理技术

2.2.1 吸附法

吸附法借助吸附剂（大孔树脂、活性炭这类有多孔结构的物质），凭借物理或化学吸附作用来捕获 VOCs 分子。活性炭由于比表面积大且吸附容量高，在医药化工行业被广泛应用，当吸附达到饱和后，可借助热空气、蒸汽等方式进行脱附再生，实现吸附剂的循环使用。然而该技术存在吸附选择性受限、对于高沸点 VOCs 容易出现穿透等问题，需要搭配预处理设备来去除颗粒物和水分，以此延长吸附剂的使用寿命，近些年来，新型复合吸附材料的研发工作取得进展，使得吸附效率与抗干扰能力都有所提升^[2]。

2.2.2 冷凝法

冷凝法是依据物质的沸点差异来开展工作，借助降低温度或者增加压力的方式，让 VOCs 从气态转变为液态，以此实现污染物的分离。这项技术对于高浓度、高沸点的 VOCs 比如苯系物、卤代烃有着不错的回收成效，回收得到的有机溶剂可再次应用于生产过程。医药化工企业常将冷凝法和其他技术联合使用，以降低废气中的有机物浓度，不过冷凝法需要耗费大量的冷媒，运行成本相对较高，针对这种情况，多级冷凝与热泵技术相结合的应用方式，切实降低了能耗，还扩大了其适用的范围^[2]。

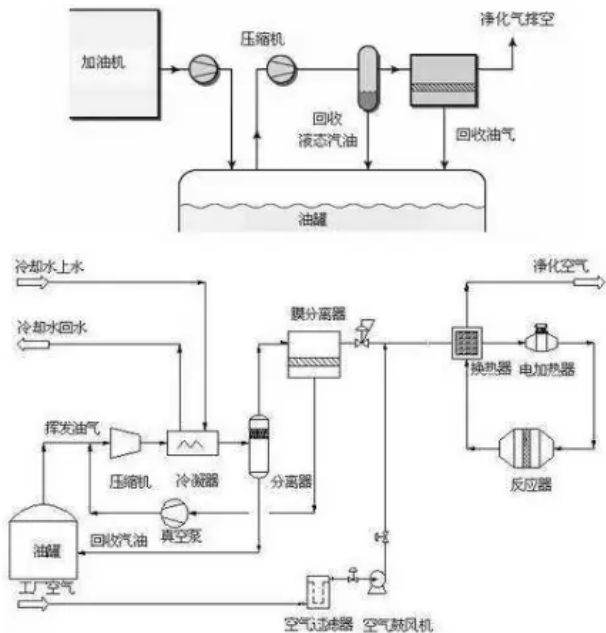


图 1 冷凝法

2.2.3 膜分离法

膜分离法借助高分子膜对于不同气体分子渗透速率方面存在的差异，实现了 VOCs 跟空气的分离。这项技术有着

分离效率高、能耗低以及不会产生二次污染等优点，可在常温的状态下开展操作，适用于多种复杂的工况环境，医药化工企业在溶剂回收这个领域广泛运用膜分离技术，凭借挑选渗透汽化膜或者气体分离膜，把废气里的有机溶剂浓缩到可以再次回用的浓度。但膜材料成本相对较高，容易受到杂质污染致使性能出现下降，需要定期进行维护以及更换，当前新型纳米复合膜的研发对膜的稳定性与选择性有了一定提升，促进了该技术朝着规模化应用方向发展^[3]。

2.3 适用性分析

不同挥发性有机化合物（VOCs）收集技术的适用性会受到废气浓度、流量、组分以及企业经济条件等多种因素的限制。吸附法适合用于沸点低、浓度高且成分复杂的废气，在医药中间体生产车间的预处理方面有着较好的效果，冷凝法对于高沸点、高浓度废气的回收效率比较突出，一般会被作为制药企业有机溶剂回收的首要选择，膜分离法在追求高回收率和低能耗的场景中更有优势，比如在精细化工产品生产过程中的 VOCs 治理。在实际应用里，企业需要全面评估技术的可行性以及经济成本，凭借技术组合（像是冷凝—吸附、膜分离—冷凝）来实现 VOCs 的高效收集以及资源化利用。

3 医药化工企业 VOCs 末端治理技术分析

3.1 常见末端治理技术

3.1.1 热氧化

热氧化技术是在高温环境下（700 - 1200℃），让 VOCs 与氧气发生化学反应，最终分解成二氧化碳和水。这种方法处理效率比较高，对于各类 VOCs 都有着不错的去除效果，适合用于处理高浓度废气，医药化工企业大多时候会采用蓄热燃烧（RTO）或者直接燃烧（TO）工艺，其中 RTO 可依靠蓄热体回收热量，把热效率提高到 90% 以上，很大程度降低了运行成本。不过对于废气中含 N、S 等元素多的有机物，其发生热氧化反应后，存在二氧化硫（SO₂）氮氧化物（NO_x）二次污染的风险，需要配备二次净化装置，且高温条件对设备材质的要求很严格，投资成本也比较高。

3.1.2 催化氧化

催化氧化依靠催化剂（一般为 Pt、Pd 贵金属）发挥作用，降低 VOCs 氧化反应的活化能，使得它可在相对较低的温度（200 - 450℃）下实现分解。这项技术有能耗低以及安全性高的特点，适用于处理中低浓度的废气，对于苯、甲苯等难以降解的有机物，去除效果颇为可观。医药化工企业大多时候采用固定床催化氧化（CO）或者蓄热催化氧化（RCO）工艺，并且结合蜂窝状催化剂来提高传质效率，然而催化剂容易受到废气中颗粒物、硫、氯等杂质的影响失去活性，需要定期进行更换，这无疑增加了运行成本^[4]。

3.2 技术选择依据与考量因素

选择 VOCs 处理技术时要全面考量废气特性、排放标准、处理规模以及企业经济承受能力等多方面因素。当废气浓度较高且成分复杂的情况下优先选用热氧化或者催化氧化，若废气有可生物降解性且浓度较低那么生物处理会更具经济

优势,地方环保法规针对NO_x、颗粒物等污染物所设定的排放限值也会直接对技术路线的选择产生影响。企业要对设备投资、能耗成本、维护周期以及二次污染控制措施展开评估,借助技术经济分析来确定最为合适的处理方案,此外,还需要考虑生产工况的波动性,挑选适应性良好的技术以此保证处理效果可稳定达到标准要求。

3.3 治理技术的优化策略

要提高VOCs废气预处理以及末端治理技术的效率以及经济性,可以从工艺优化、设备升级和智能化管理这三个方面着手。在工艺优化方面,运用组合工艺,例如催化氧化和生物处理相结合的方式,以此实现优势互补,减少单一技术存在的局限性,工艺升级包含了选用高效催化剂、优化蓄热体结构以及改进微生物填料性能等,凭借这些措施来提高处理效率,同时降低能耗。智能化管理借助安装在线监测系统,实时调整处理参数,并且结合人工智能算法来预测设备故障以及性能衰减,达成精准运维,另外强化废气源头控制,降低高浓度、难处理废气的产生,这同样是优化预处理技术的关键所在。

4 技术路线集成与优化

4.1 组合工艺设计

医药化工行业所产生的VOCs废气有组分复杂、浓度波动幅度较大、有可能含有卤素或者硫化物等特征,这致使单一治理技术大多时候难以达成严格的排放标准要求。在实际工程应用里,要依据废气特性来设计合理的组合工艺路线,对于高浓度有机废气,一般采用“回收+焚烧”的组合模式,先借助冷凝或吸附技术回收有价值的溶剂组分,接着凭借热力氧化技术处理剩余的低浓度废气。这种组合方式提高了资源利用效率,也降低了末端治理设施的运行能耗,对于含有卤素或硫元素的特殊组分废气,需考虑在预处理阶段增添碱洗或干式过滤等单元,防止对后续催化氧化单元造成催化剂中毒的风险。在工艺设计时,要关注各处理单元之间的匹配性,比如吸附浓缩后的高浓度废气要保证在燃烧装置的设计处理能力范围之内,同时要合理设计各单元之间的缓冲系统,以应对医药化工生产过程中常见的废气排放波动。而且组合工艺的设计还要考虑系统的稳定性与可操作性,保证在长期运行过程中能维持稳定的处理效果,同时方便操作人员的日常管理与维护。

4.2 能效与经济性分析

在医药化工企业VOCs治理系统开展设计与选型工作时,能效以及经济性属于重点需给予考量的关键要素。不同的治理技术在投资成本、运行费用以及处理效果方面存有差异,要开展全面的技术经济评估,销毁类技术像蓄热式热力氧化(RTO),虽处理效率较高,不过初期投资大并且运行能耗高,适用于连续稳定排放的高浓度废气,回收类技术例如活性炭吸附或者冷凝回收,尽管初期投资相对低些,然而运行期间需要定期更换吸附剂或者消耗制冷能源,且对废气

组分有较高要求。评估经济性时,除了考虑直接的设备投资与运行成本外,还需要关注潜在的溶剂回收价值、设备使用寿命、维护保养成本等间接因素。对医药化工企业来讲,因其生产一般有多品种、小批量的特性,废气排放大多时候呈现间歇性和波动性,这就促使治理系统拥有良好的负荷适应能力,防止因工况变化致使处理效率降低或能耗激增。随着环保要求持续提高,企业在技术选型时还需预留一定的处理能力余量,用以应对未来可能出现的排放标准提升或产能扩张需求,这种前瞻性考量虽可能增加初期投资,但从长远看往往能降低后续的改造或升级成本。

4.3 智能化控制

随着工业自动化技术迅速发展,智能化控制在VOCs治理系统里的运用变得日益普遍,对处理医药化工企业废气工况相当关键。智能化控制系统借助实时监测废气流量、浓度、温度等关键参数,可动态调节治理设备的运行状况,实现处理效率最大化以及能耗最小化。比如在蓄热式氧化系统中,智能控制系统依照废气浓度的进行温度控制和气阀切换频率,能保证污染物充分分解,又能避免不必要的能源浪费。在吸附-脱附系统中,智能控制可精准判断吸附饱和度并优化选择脱附时机,提高吸附剂使用效率,基于大数据分析的预测性维护功能可及时发觉设备潜在问题,如催化剂活性下降、蓄热体堵塞等,并提前安排维护计划,防止非计划停机造成生产损失。对于医药企业常见的多车间、多品种生产模式,智能化系统还可以实现不同排放源的分类管理与差异化控制,凭借构建历史数据库和运行模型,持续优化控制策略。智能化控制的实施要充分考量系统的可靠性与安全性,处理易燃易爆的有机废气时,务必保证控制系统的防爆等级和故障安全措施符合相关规范要求。

5 结语

通过对医药化工企业VOCs治理技术较为全面的剖析,本文呈现出前端收集、预处理以及末端治理这些方面的关键环节与技术选择。技术路线要优化,综合考量废气特性、排放标准、处理规模以及企业经济承受能力。未来,环保技术持续进步以及智能化管理逐渐普及,医药化工企业VOCs治理会变得日益高效且经济。企业需持续留意新技术发展动态,不断优化治理方案,实现可持续发展。

参考文献

- [1] 夏溶萃,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.
- [2] 陆芸,方方. 化工企业挥发性有机物泄漏检测及修复(LDAR)技术的研究及应用[J]. 大众标准化, 2024, (24): 153-155.
- [3] 程鹏. 医药化工行业溶剂废气治理实践[J]. 资源节约与环保, 2021, (11): 96-99. DOI:10.16317/j.cnki.12-1377/x.2021.11.031.
- [4] 刁秀蒙. 化工企业工艺废气排放特征与处理工艺适配选型研究[D]. 天津工业大学, 2023. DOI:10.27357/d.cnki.gtgyu.2023.000728.