

VOC 气体吸附与再生技术在工业废气治理中的应用研究

李 健

广州环境保护产业协会 广东广州

【摘要】 VOC 气体的吸附与再生技术对于我国工业废气治理有着重要影响，本文对 VOC 气体的吸附与再生技术分别针对其应用性进行了一般性阐述，并以某企业采用不同再生法中的效率影响因素进行了研究，并比较了其在工艺优化前和优化后的应用效果。

【关键词】 VOC 气体；吸附技术；再生技术；电化学再生

【收稿日期】 2025 年 5 月 8 日 **【出刊日期】** 2025 年 6 月 18 日 **【DOI】** 10.12208/j.aes.20250020

Research on the application of VOC gas adsorption and regeneration technology in industrial waste gas treatment

Jian Li

Guangzhou Environmental Protection Industry Association, Guangzhou, Guangdong

【Abstract】 The adsorption and regeneration technology for VOC gases significantly impacts the treatment of industrial waste gas in China. This paper provides a general overview of the applicability of VOC gas adsorption and regeneration technologies. It investigates the factors influencing the efficiency of different regeneration methods used by an enterprise and compares the application effects before and after process optimization.

【Keywords】 VOC gases; Adsorption technology; Regeneration technology; Electrochemical regeneration

引言：VOC（volatile organic compounds 挥发性有机化合物）的吸附与再生技术是控制当前工业废气污染的一个重要研究领域。传统的再生技术（如热再生法、溶剂再生法）等面临着燃料、吸附材料的成本问题，且其再生过程中又产生新的碳足迹或液体污染物排放，不符合当前对的环境保护的新型要求。电化学再生技术作为一种较为前沿的液相再生技术，其再生过程效率较高，工艺相对简单，已呈现未来工业废气治理应用热点方向的显著端倪。因此本文也将引用某企业在发展中对 VOC 气体吸附与再生技术的应用沿革为案例进行研究，以符合当前环保领域的发展趋势。

1 VOC 气体常用吸附技术

1.1 多孔材料吸附技术

多孔材料吸附技术利用 VOC 组分在多孔材料上产生吸附的特性，通过压力涨落的循环变化以实

现 VOC 气体在孔径中的分离、富集作用。按吸附材料分类主要可分为以下几种：①活性炭吸附技术。采用活性炭为吸附材料适用于低浓度、高进风量的工业废气处理环境，是目前相对主流的吸附技术，对苯系物及含苯环结构的 VOC 气体的吸附效率较高，但对醇类、烯烃类的吸附效率较低，且须定期对其进行更换或应用热解、蒸汽等脱附方法进行再生，同时防止活性炭温度、湿度过高影响其微孔结构穿透效率。②分子筛吸附技术。分子筛可选择性吸附特定 VOC 成分，其耐高温性能优异，吸附量较高，多与催化氧化技术进行联用，其再生能力相对活性炭吸附较强^[1]。③树脂吸附技术。采用氢键含量丰富的多孔结构树脂对 VOC 进行选择性的吸附，树脂孔径可人工控制，适用于浓度较高的 VOC 气体吸附与净化，且材料较易再生，但其成本相对高昂。④纳米材料吸附技术。纳米技术多以纳米 TiO₂ 为吸附材料，

对工业废气中的 VOC 在一定条件下进行吸附,该技术无二次污染影响,是一种较为清洁的吸附净化技术,但纳米吸附材料成本相对较高。

1.2 液体吸附技术

液体吸收法可分为物理法和化学法两种,其中物理法即萃取法,工业废气进入处理器时,VOC 与吸收剂接触后发生相融,转移至吸收剂内完成吸附作业,二者均不发生化学变化,可使用解析法实现 VOC 的再生与吸收剂的重复利用^[2]。化学法则主要应对一些不溶性的 VOC(例如苯),VOC 进入处理器后与溶剂发生化学反应,生成可溶性有机物质,再施以相应的措施进行去除或再生。

1.3 生物吸附技术

生物吸附技术是近年发展的前沿热点技术,其原理是利用微生物将工业废气中的有害物质进行氧化、分解,转化为 CO₂ 和水等简单无机物质。此方法要求 VOC 具备水溶性,从而使其可在处理器中被微生物的生物膜捕获,完成吸附作业,微生物则以 VOC 作为营养物质进行代谢活动,其代谢物中水融入液相主体中,而 CO₂ 则逆向排出生物膜进入气相主体中,实现再生过程^[3]。生物吸附技术主体建筑(通常为生物膜填料塔)所需求的占地面积较大,生物过滤反应器建造成本相对较高,目前在我国的的应用尚不多见。

1.4 冷凝吸附技术

冷凝回收法利用 VOC 中有机废气的有机质在不同温度下饱和度差这一特性为工作原理,通过调节处理器中的系统压力创造蒸汽环境,再通过冷凝方式将有机质提取,完成其再生过程。此方法在处理 VOC 含量较高(3%~5%)的工业废气时效率较高,但较为依赖冷凝剂、加压设备等设备及原料,成本相对较高,通常与其它技术相结合联用^[4]。

2 VOC 气体吸附材料再生方法

2.1 热再生方法

热再生方法是传统的再生技术之一,主要应用于活性炭、沸石分子筛、无机吸附材料等阻燃、不燃吸附材料的强吸附组分离脱附作业,通过施加氧化燃烧作用、调节压力促使吸附剂进行解吸,也可通过微波催化氧化等先进方法使吸附材料恢复工作能力,达到再生利用的目的。该方法解吸循环周期先对短,能够起到节约停工时间的作用。但热再生方法对部

分吸附材料如活性炭会产生一定的高温碳化现象,对其吸附容量产生损耗作用。而且存在耗能高的缺点,在当前碳中和、碳达峰总体目标约束下发展前景受到一定影响。

2.2 溶剂再生法

利用溶剂清晰多孔结构吸附材料,通过化学反应或萃取解析附着在多孔结构中的吸附质,使吸附材料的吸附孔道重新恢复吸附功能,实现循环利用^[5]。溶剂再生技术对吸附材料的化学结构影响较小且不损害其物理强度,且不需要对吸附材料进行拆卸、搬运等操作,工艺较为简单,在当前工业废气处理领域中应用较为普遍。

2.3 生物再生法

生物再生法通过在生物处理净化器滤料中培育的微生物在吸附饱和后,通过及时接种微生物,强化微生物在降解过程中的主导作用。但微生物培养周期较长,生化降解效率较低,且受外在环境影响较大,需建设多个生物净化器轮换使用,以保持净化器中液、固相主体对 VOC 的有效分离、吸附能力。

2.4 电化学再生法

电化学再生法主要原理是通过电化学反应器使吸附材料中的吸附质在外来电场作用下发生 PH 值、静电斥力、离子交换等物理、化学变化,达到去除吸附质、还原吸附材料性能的效果。该方法通过消耗电能形成电极体系,达到工作条件,与传统热再生法、溶剂再生法相比在环保适应力层面具有显著优势,成本也相对低廉,但目前在大规模集成应用方面仍然面临一定的阻碍^[6]。

3 VOC 气体吸附与再生技术在实际工业废气治理中的应用

3.1 某化工企业 VOC 气体吸附与再生技术应用原状

某企业为生产以油性漆为代表的有机涂料的化工企业,其生产一厂所排放工业废气中 VOC 类型为低浓度、高通量废气,所产生的 VOC 所含之主要污染物有苯、甲苯、二甲苯、酯类等。截止到 2018 年,该厂工业废气治理方法为在排气口末端安装废气净化装置,采用一套采用传统的吸附浓缩+催化燃烧联用设备,以沸石分子筛吸附设备为基础,设备总价值约为 86 万元,采用活性炭吸附法,燃烧设备为直

燃型，通过氧化燃烧在燃烧室内同步完成沸石分子筛吸附材料的再生过程，

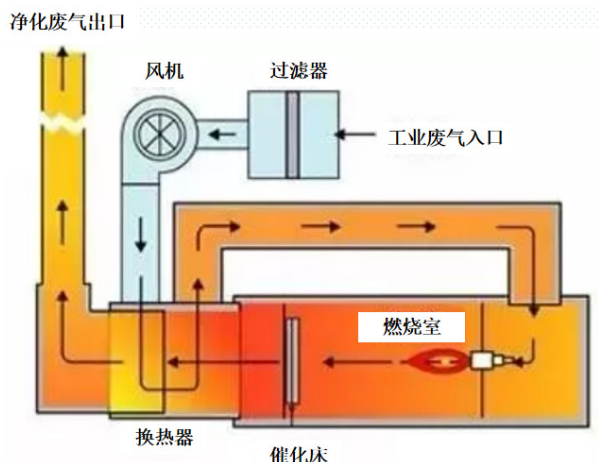


图1 某化工企业分厂 VOC 气体吸附与热再生技术系统原理

耗能相对较小且处理效率较高，但设备体积较大，对吸附材料的吸附能力也产生一定影响，VOC 处理能力呈逐年下降趋势^[7]。在 2024 年为符合省大气污染防治条例之规定，该企业计划对再生设备进行升级。

3.2 某化工企业 VOC 气体吸附与再生技术的应用沿革

2018 年该企业为与时俱进响应国家号召，计划为生产一厂引入一套价值 267 万元的催化燃烧设备，对原有设备的换热器进行可回收燃烧余热的优化设计，通过经济性与环保性的敏感性对比发现，虽然节能效率提升了 40% 左右，CO 转化率提高了 34%，但外部能源的持续需求导致运行成本降低比例不高，且该企业自身排放量较小，设计废气处理量仅为 3000m³/h，与设备效率上限差距较大。

该企业经过论证，认为生产一厂所产生的 VOC 气体在等有机溶剂中易于萃取回收，且该企业本身具备一定溶剂吸附材料库存，且企业上游供应商具备充足的供货能力，可应用溶剂再生法取代原设计方案。

该企业经论证决定，为生产一厂选购一套溶剂再生设备，设计要求该设备配置可串联使用的两个吸附床，在日常工作环境下，吸附床 A 持续工作至吸附容量饱和后进入停运-再生周期，通过换向阀使吸附床 B 进入工作状态，实现交替吸附，充分利用吸附剂、再生溶剂效率，实现分区再生以降本增效。

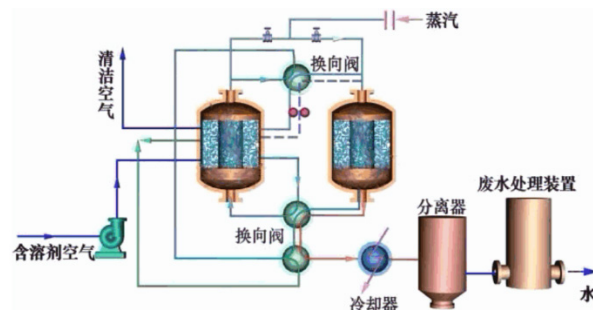


图2 某化工企业分厂 VOC 气体吸附与溶剂再生技术系统原理

生产一厂在应用该设备进行工业废气治理改造 3 年内，该厂的废气总 VOC 排放浓度从 2019 年的 13.34mg/m³ 降低至 2022 年的 10.17mg/m³，比较原来的热再生法工业废气治理效率显著提高，且吸附与再生设备连续工作现象得到了一定程度的缓解，吸附材料和设备的寿命均得到了显著的延长。

3.3 某化工企业 VOC 气体吸附与再生技术的应用现状

进入 2024 年后，该化工企业生产一厂的溶剂再生设备经回顾发现，虽然该设备具有系统运行稳定、材料成本稳定、碳排放量较低等比较优势，但在污水排放治理方面又产生了新的二次污染问题，随着当地水体治理政策的收紧，该企业只能通过控制生产一厂的生产规模来迎合新的污水排放标准。同时，溶剂再生效率虽然相比热再生对吸附材料的损耗较小，但其就单体效率而言，68% 的 VOC 净化效率也大大低于热再生效率（约为 83%），因此，该企业急需引入一种对 VOC 净化效率较高，且二次污染问题相对较小的再生方法^[8]。

经过市场查访，该企业认为，电化学再生法虽然是一种新兴的再生方法，但其设备管理便捷，且再生条件不依赖加温加压，仅需对电流电压进行控制，危险性相对热再生法、溶剂再生法更小，且基本上无二次污染问题，可以对溶剂再生法进行替代。

设备试运行后发现，电化学再生法在多次循环再生后，活性炭吸附材料再生效率保持在 86% 左右，远高于热再生法与溶剂再生法，且适应多次再生要求。且阳极材料为石墨，其电荷作用增强了苯酚溶液与活性炭表面的吸附能力，阴极材料为钢板，替换成本较低，综合成本较溶剂再生法降低了 40% 以上。

4 结语

VOC 气体的吸附与再生效率一直关系到我国

工业废气治理的重点,在实际应用当中,既要重视吸附剂吸附容量的高效利用,又要提高其再生效率,减少其再生频率,方能提高企业在工业废气治理中的经济效益。某化工企业通过历年来对 VOC 气体吸附与再生技术在工业废气治理中的应用沿革显示,对技术的革新需要与时代要求相适应,充分考量经济成本、节能要求与系统稳定三者之间的关系,化单体效率为综合效率,最终实现工业废气 VOC 的深度治理。

参考文献

- [1] 闵振华,曹敏,王永刚.炭分子筛的制备和应用[J].材料科学与工程学报,2011,29(4):592-595.
- [2] 刘晓咏,欧阳平,陈凌.吸附材料再生技术研究进展[J].现代化工,2015,35(11):37-40.
- [3] 余小颖,赵贤广,徐炎华.电化学原位再生活性炭的技术研究[J].环境科技,2013,26(3):14-17.
- [4] 刘红红,贺晓伟.基于碳减排的工业废气治理方法分析[J].皮革制作与环保科技,2025,6(11):110-112.
- [5] 于珍珍,阎莉.环境工程大气污染危害与治理技术研究[J].清洗世界,2025,41(02):91-93.
- [6] 吴蕃.工业废气治理技术效率及其影响因素探讨[J].黑龙江环境通报,2023,36(05):99-101.
- [7] 叶海平.工业废水处理装置中的废气治理技术分析[J].佛山陶瓷,2024,34(09):94-96.
- [8] 厉晓玲.工业有机废气治理技术的实践应用分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(17):47-49.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS