

浅谈印刷行业挥发性有机物治理技术

徐章萍 吴建平*

云南科环环境工程咨询有限公司, 中国·云南 昆明 650217

摘要: 挥发性有机物 (VOCs) 是印刷过程中的重要污染物, 其产生的光化学反应可诱发雾霾等空气污染, 对人体呼吸和神经系统产生危害, 严重危害人类健康。论文简单分析了印刷行业挥发性有机物治理的重要性, 探讨了有效的治理技术, 旨在为相关工作提供帮助, 促进印刷行业的可持续健康发展。

关键词: 印刷行业; 挥发性有机物; 治理技术

A Brief Discussion on the Treatment Technologies of Volatile Organic Compounds in the Printing Industry

Zhangping Xu Jianping Wu*

Yunnan Kehuan Environmental Engineering Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650217, China

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) are important pollutants in the printing process. The photochemical reactions they generate can induce air pollution such as smog, and pose hazards to the human respiratory and nervous systems, seriously endangering human health. This paper briefly analyzes the importance of the treatment of volatile organic compounds in the printing industry, and explores effective treatment technologies, aiming to provide assistance for related work and promote the sustainable and healthy development of the printing industry.

Keywords: printing industry; volatile organic compounds; treatment technology

0 前言

印刷行业作为 VOCs (挥发性有机物) 的高排放领域, 其生产过程中油墨调配、印刷、烘干及设备清洗等环节释放的苯系物、酯类、酮类等污染物, 已成为大气臭氧和 PM_{2.5} 生成的重要前体物。据《2023 年中国工业源 VOCs 排放报告》显示, 印刷行业年 VOCs 排放量达 120 万吨, 约占工业总排放量的 8%, 其中溶剂型油墨贡献率超 70%。鉴于 VOCs 对人体 (致畸、致癌) 和环境的双重危害, 各国相继出台严苛标准 (如中国《挥发性有机物无组织排放控制标准》), 倒逼行业技术升级。论文聚焦印刷行业 VOCs 治理技术体系, 结合前沿研究与工程实践, 提出多维度解决方案。

1 印刷行业挥发性有机物治理的重要性

VOCs 是一种重要的空气污染物, 随着印刷行业的发展, 其排放量越来越大。大气中 VOCs 与 NO_x 等在太阳光作用下, 会生成臭氧、二次有机气溶胶, 是造成雾霾的主要原因之一。在印刷工业中, 使用的油墨、胶粘剂等原辅材料中含有的苯系物、酯、酮类等挥发性有机化合物, 它们不仅对空气造成了直接的污染, 而且还会在复杂的空气中产生二次污染物, 导致区域空气污染加重, 环境空气质量下降。VOCs 作为一种有毒有害物质, 可经呼吸道进入人体, 长期接触可引起呼吸道和神经系统的损伤, 引起咳嗽、头晕、呼吸道炎症, 甚至诱发癌症等疾病, 对公共卫生造成极大的危害^[1]。

2 印刷行业 VOCs 排放特征与治理难点

2.1 组分复杂性

凹印与复合工艺废气含甲苯、乙酸乙酯、丁酮等 10~20 种组分, 浓度范围跨度大 (200~5000mg/m³), 传统单一技术难以实现全组分净化。

2.2 排放波动性

印刷机启停阶段 VOCs 浓度可达正常运行时的 3~5 倍, 对治理设备的抗冲击能力提出挑战。

2.3 经济性约束

中小型印刷企业占行业总数 80%, 倾向选择低投资技术 (如活性炭吸附), 但面临运维成本高 (年更换费用超 10 万元/台) 与达标率低的矛盾。

3 印刷行业挥发性有机物治理技术

3.1 源头削减技术

3.1.1 使用低 VOCs 含量原辅材料

在油墨方面, 可以使用 VOCs 含量较低的水性油墨, VOCs 含量 < 5%, 较溶剂型油墨 (VOCs 含量 60%~70%) 减排 90%, 但干燥能耗增加 25%, 需配套红外或微波干燥设备。如在包装印刷方面, 部分食品包装企业使用水性油墨, 其挥发性有机化合物的排放可降低 80%。此外, 还可以使用辐射固化油墨 (如 UV 油墨和 EB 油墨)。UV 油墨是利用紫外光引发聚合, 不含任何挥发性的有机溶剂, 具有快速

固化、高光泽度和高耐磨性的特点,在标签印刷和数字印刷等方面的应用越来越多。EB 墨水是利用电子束辐照进行固化,其固化速度快,固化彻底,在高档打印领域显示了很好的发展前景。

3.1.2 改进优化清洁生产工艺

优化传统的柔版印刷和凹版印刷工艺^[2]。柔版印刷采用弹性印版,采用网纹辊转印油墨,其油墨厚度大,颜色鲜艳,印刷压力小,与普通胶版印刷比较,更适用于水性油墨及 UV 油墨,可有效减少挥发性有机物的释放。凹版印刷通过改善印刷工艺及油墨输送方法,可有效地降低油墨损耗及挥发性有机物的排放。采用 UV-LED 固化技术:通过紫外光引发油墨交联,实现零溶剂排放,适用于标签印刷,设备改造成本约 50 万元/台。

3.2 过程控制技术

3.2.1 密封管理设备与车间

为降低机器运转时挥发性有机物的泄露,对印刷机、输墨系统、烘干装置等进行改进。例如,使用具有较好密封性的管道接头、阀门以及密封剂,将设备的开孔和缝隙等部位严密地密封起来;在贮存及运输过程中,应采用密封的储墨容器及管路,以防止油墨与空气直接接触,减少挥发性有机物的挥发。例如,采用负压风幕(风速 $\geq 0.5\text{m/s}$)与局部包围罩,集气效率提升至 95%,减少无组织逸散。

3.2.2 优化通风与废气收集系统

第一,通风系统的设计应综合考虑车间布局、设备位置及 VOCs 产生源分布。确保送风或吸风口位置合理,避免正对墨盘等 VOCs 产生源,防止因气流扰动造成溶剂逸散速度增加。采用全面通风与局部通风相结合的方式,对于高浓度排放点,如烘干设备出口,设置局部集气罩,以高效捕捉废气。同时,对整个车间进行全面通风,保持空气的流通和更新。

第二,所有产生 VOCs 污染物的生产工艺装置或区域必须配备有效的废气收集系统。例如,在印刷机的烘干装置上,可以使用密闭的集气罩来收集烘干时所产生的 VOCs;在某些规模较大的印刷车间,可建立集中式废气收集系统,使各生产工序的废气都能得到统一的收集,方便以后的处理^[3]。废气收集系统的风量应根据实际生产情况进行精确计算,既要满足控制风速要求,确保有效收集废气,又要避免风量过大造成能源浪费。同时,废气收集系统正常运行时间应大于生产时间,且需安排专人管理,定期进行维护保养。

3.2.3 完善干燥过程

可以采用红外干燥、热风循环干燥、微波干燥等效率较高的干燥技术。例如采用智能干燥控制:基于实时温湿度传感调节烘干温度(误差 $\pm 2^\circ\text{C}$),使溶剂挥发量降低 30%。

3.3 末端治理技术

3.3.1 吸附技术

吸附技术是目前应用广泛的 VOCs 末端治理技术之一,

该技术主要是利用吸附剂对 VOCs 的吸附作用,将其从废气中分离出来。活性炭、分子筛等是常用的吸附剂。活性炭具有比表面积大、孔隙结构发达、吸附能力强等优点,对大多数 VOCs 都有良好的吸附效果,在印刷行业废气治理中应用最为普遍。例如,在小规模的印刷企业中,利用活性炭吸附技术对印刷废气进行治理,可对废气中的苯系物、酯类等挥发性有机物进行有效的脱除。吸附剂吸附饱和后要进行再生处理,热再生、降压再生和置换再生等是常用的再生方法。热再生是通过加热吸附剂,使吸附的 VOCs 脱附;降压再生是降低吸附体系的压力,促使 VOCs 解吸;置换再生是利用惰性气体或蒸汽等对吸附剂进行吹扫,将 VOCs 置换出来^[4]。

3.3.2 燃烧技术

燃烧技术是指将挥发性有机物氧化分解成 CO_2 和 H_2O ,从而达到对有机污染物的无害化处置。按燃烧方式可分为直接燃烧、催化燃烧和蓄热燃烧三种。

首先,直接燃烧(TO)是指将含 VOCs 的尾气直接送入燃烧室,在较高的温度($760^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$)下进行燃烧。本方法对高浓度、高热值挥发性有机物的处理效果高达 95%。但是这种方法不仅会耗费大量的燃料,而且操作费用很高,而且还会产生二次污染,如氮氧化物。

其次,催化燃烧(CO)是在催化剂的作用下,降低 VOCs 的燃烧温度,使其在较低温度(通常为 $250^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$)下发生氧化反应。目前最常见的是铂、钯等贵金属催化剂,以及锰、钴、铜等非贵金属催化剂。催化燃烧技术以其较低的燃烧温度、较低的能耗和无二次污染而成为一种理想的低浓度 VOCs 治理方法。比如,在部分印刷企业中,利用催化燃烧技术对印刷废气进行治理,不仅可以有效地降低操作费用,而且可以达到达标排放的目的。

最后,蓄热燃烧(RTO)是指通过对燃烧过程中的余热进行回收,以达到对废气进行预热和提高能量利用率的目的。RTO 系统通常由蓄热室、燃烧室和切换阀等组成,废气在蓄热室中被预热后进入燃烧室燃烧,燃烧后的高温气体再通过另一个蓄热室释放热量,使蓄热体升温,实现热量的循环利用。RTO 技术因其高效(98% 以上)和低能耗等优势,在印刷、涂装等领域的挥发性有机物治理中得到了广泛的应用。

3.3.3 生物处理技术

生物处理是指通过微生物的新陈代谢,把挥发性有机物分解成二氧化碳、水和生物质,是一种环境友好型的治理技术,常见的处理方法有生物过滤、生物滴滤和生物洗涤。

首先,生物过滤是将含有挥发性有机物的废气通过填充有土壤、堆肥、活性炭纤维等生物滤料的过滤床,利用滤料表面的微生物降解挥发性有机物。对于浓度较低、容易被生物降解的挥发性有机物废气而言,生物过滤的适用性较强。同时,该处理方法不需要太过复杂的设备,运行成本低廉,且不会产生二次污染。但是其处理效率相对较低,在废

气温度、湿度和酸碱值等方面有着严格的要求。

其次,生物滴滤是基于生物过滤的处理,通过向滤料表面喷淋营养液,为微生物提供充足的营养物质,维持微生物的活性,提高处理效率。对于负荷较高、成分复杂的 VOCs 废气,生物滴滤能够取得较好的处理效果。

最后,生物洗涤是在洗涤塔中使废气和微生物悬浮物相接触,挥发性有机物进入液相后,由微生物进行降解。生物洗涤具有处理效率高、操作灵活等优点,但为避免产生二次污染,需要对液相进行科学处理^[9]。

3.4 吸附—脱附—催化燃烧 (Ad-CO)

沸石转轮吸附浓缩(浓缩比 10:1)后,催化床在 280℃ 下分解 VOCs,非甲烷总烃(NMHC)去除率>97%,能耗较传统 RTO 降低 40%。

案例:某包装企业采用 Ad-CO 系统,年处理废气量 2.4 亿 m³,回收热能 1.2×10⁶kWh,运行成本节省 35 万元。

3.5 生物滴滤—等离子体耦合

前置生物滴滤塔(填料:聚氨酯—竹炭复合载体)降解易溶组分(酯类去除率>85%),后接等离子体分解难降解物质(苯系物去除率>70%),综合效率达 92%。

3.6 膜分离—冷凝回收

采用硅橡胶膜选择性渗透甲苯等有机物,结合两级冷凝(-25℃→-60℃),溶剂回收率>90%,纯度达 99.5%,适用于高浓度(>3000mg/m³)废气。

4 技术瓶颈与突破性进展

4.1 关键材料研发

高疏水分子筛:通过表面氟化改性,提升对乙酸乙酯的选择性吸附(穿透容量从 80mg/g 提高至 150mg/g),抗湿度干扰能力增强。

单原子催化剂:Pt/CeO₂ 单原子催化剂在 200℃ 下实现甲苯完全氧化,贵金属用量减少 90%,寿命延长至 8000 小时。

4.2 智能化运维系统

数字孪生平台:集成废气浓度、设备状态与气象数据,动态优化吸附剂再生周期(误差<5%),运维成本降低 18%。

AI 预警模型:基于 LSTM 算法预测催化剂失效节点,更换时机预测准确率>90%,避免非计划停机。

4.3 低碳工艺革新

光热催化氧化:MoS₂/碳纳米管复合材料利用太阳光(波长 400~800nm)驱动 VOCs 降解,较电加热节能 75%,

适用于日照充足地区。

微生物燃料电池(MFC):产电菌群分解 VOCs 同时发电(功率密度 0.8W/m³),实现“治污—产电—碳减排”三重效益。

5 政策驱动与产业转型路径

5.1 标准升级

欧盟《工业排放指令(IEI 2030)》要求印刷企业 NMHC 排放限值≤20mg/m³,推动企业采用 Ad-CO 或膜分离技术。

5.2 财政激励

中国“十四五”VOCs 治理补贴政策对更换水性油墨企业给予设备投资 30% 的税收抵扣。

5.3 产业集群升级

建立区域性集中喷涂中心,共享沸石转轮+RTO 设备,单个企业治理成本下降 40%~60%。

6 结语

印刷行业 VOCs 治理需构建“源头替代—过程阻断—末端协同—智慧管控”的全链条技术体系。当前 Ad-CO 与生物—等离子体耦合技术展现较高成熟度,但材料创新与智能化将成为破局关键。未来应强化政策—技术—资本协同,推动行业向绿色化、集约化、低碳化转型。

参考文献:

- [1] 蔡羽飞,丁红丹,马伯熙,等.四川省包装印刷行业挥发性有机物治理现状分析[J].广州化工,2024,52(22):127-130+134.
- [2] 陶伟良,李如朝,胡洁,等.印刷行业挥发性有机废气处理对策分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(11):129-131+137.
- [3] 贾晨霞.印刷行业挥发性有机物末端治理效果分析[J].山西化工,2024,44(3):266-269.
- [4] 郭送军,王俊辉,陈来国,等.印刷行业挥发性有机物深度治理对策建议[J].环境工程,2023,41(3):202-209+228.
- [5] 柳莹.印刷行业 VOC 治理研究[J].化工设计通讯,2021,47(11):175-176.

作者简介:徐章萍(1987-),女,中国云南昆明人,本科,工程师,从事大气污染控制工程研究。

通讯作者:吴建平(1989-),男,中国云南昆明人,本科,工程师,从事大气污染控制工程研究。