

# 装备制造产业集群 VOCs 废气末端治理措施常见问题及对策

赵会民<sup>1,2\*</sup>, 何硕<sup>2</sup>, 杜文文<sup>2</sup>, 孔祥启<sup>2</sup>, 刘乾坤<sup>2</sup>

(1.清华大学大气污染物与温室气体协同控制国家工程研究中心, 北京 100084;

2.江苏中创清源科技有限公司, 江苏 盐城 224001)

**摘要:**选取某装备制造产业集群开展了涂装工序末端治理措施调查研究, 评估了 VOCs 治理设备的治理效果, 阐述了治理设备应用过程中存在的突出问题, 并结合技术原理和工程经验, 提出了针对性的优化方向和措施。

**关键词:**装备制造; 工业涂装; VOCs 治理; 活性炭; 催化燃烧

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)09-0217-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.09.039

## Common problems and countermeasures of VOCs exhaust gas terminal treatment measures in equipment manufacturing industry clusters

ZHAO Hui-min<sup>1,2\*</sup>, HE Shuo<sup>2</sup>, DU Wen-wen<sup>2</sup>, KONG Xiang-qi<sup>2</sup>, LIU Qian-kun<sup>2</sup>

(1.National Engineering Research Center for Synergetic Control of Air Pollutants and Greenhouse Gases,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Jiangsu Zhongchuang Qingyuan Technology Co., Ltd.,

Yancheng 224001, China)

**Abstract:** An equipment manufacturing industrial cluster is selected to carry out an investigation and study on the treatment measures at the end of the painting process, and the governance effect of VOCs treatment equipment is evaluated. The outstanding problems in the application process of treatment equipment are expounded, and the targeted optimization directions and measures are proposed based on technical principles and engineering experiences.

**Key words:** equipment manufacture; industrial coating; VOCs treatment; activated carbon; catalytic combustion

装备制造过程中因表面防护的需要会使用大量的涂料, 尽管当前水性涂料和粉末涂料的推广取得了较大进展, 但因产品使用场景对表面涂层质量要求的差异性, 当前水性/粉末涂料产品的局限性, 溶剂型涂料的使用仍占据较大比例<sup>[1]</sup>。考虑技术发展水平和国家政策规划, 可以预见, 装备制造行业使用的涂料中, 溶剂型、水性及粉末 3 种涂料将共存一个较长的周期。由于涂料中含有大量的挥发性有机物(VOCs), 在涂装过程大多以气态形式挥发, 结合 VOCs 自身毒性和光化学活性, VOCs 的大量排放对周边大气环境和人体健康均会造成严重影响<sup>[2-4]</sup>。

为减少 VOCs 排放, 环保部门连续出台系列标准及多项政策, 指导企业由源头替代、过程控制、末端治理及监测监控等环节开展全过程治理, 产业集群因企业的高度聚集成为治理的重点。近年来, 为响应国家政策要求, 装备制造行业积极开展了环保治理改造, VOCs 的排放情况得到了相应的改善。

但同时也应看到, 由于环保设备厂家良莠不齐, 企业对治理技术认知有限, 加之部分企业对环保治理投入预算低等方面因素, 企业实际 VOCs 治理效果参差不齐, 普遍存在一定的问题。本文中以某市装备制造产业集群企业为研究对象, 结合不同涂料应用场景, 探讨集群 VOCs 废气末端治理措施常见问题及对策。

## 1 研究对象与方法

本研究选取了某市装备制造产业集群 50 余家企业开展调研工作, 涵盖工程机械、化工设备、游乐设备等产品制造。针对性地调查不同类型涂料涂装过程 VOCs 废气的治理工艺及其治理效果, 分析装备制造企业 VOCs 治理过程存在的常见问题。

本研究中, 治理设备进出口非甲烷总烃、气体流量指标检测分析方法参考 HJ 1012—2018、HJT 397—2007 等标准, 检测仪器为便携式 FID 检测器、

收稿日期: 2023-11-23; 修回日期: 2024-07-05

基金项目: 盐城市重点研发计划(工业)项目(BE2023019)

作者简介: 赵会民(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为有机废气治理, 通讯联系人, zhm2125@126.com。

热敏式风速仪。治理设备的净化效率通过进出口污染物质量流量进行计算,具体的计算公式如下:

$$\eta = [(Q_i C_i - Q_o C_o) / (Q_i C_i)] \times 100\%$$

式中, $\eta$  为治理设备的净化效率,%; $Q_i$  为治理设备进口排气量, $m^3/h$ ;  $Q_o$  为治理设备出口排气量, $m^3/h$ ;  $C_i$  为治理设备进口污染物浓度, $mg/m^3$ ;  $C_o$  为治理设备出口污染物浓度, $mg/m^3$ 。

## 2 治理措施与效果

通过统计各类型涂料涂装工序 VOCs 废气治理工艺可以发现,治理工艺以光氧化+活性炭、活性炭吸附+催化燃烧为主,不同类型涂料涂装工序 VOCs 治理设备存在差异,结果见表 1。活性炭吸附+催化燃烧设备的使用上溶剂型涂料涂装较水性涂料涂装占比更高,粉末涂料涂装 VOCs 废气治理全部采用光氧化+活性炭工艺。考虑到不同类型涂料使用过程废气性质的差异性,光氧化+活性炭设备在溶剂型涂料涂装废气治理中的高占比情况可能与企业涂料年消耗量低、企业对治理技术认知有限等因素有关。

表 1 调查装备制造集群企业涂装工序 VOCs

	治理设备		
	光氧化+ 活性炭	活性炭吸附+ 催化燃烧	单一活性炭
溶剂型涂料涂装	43	57	0
水性涂料涂装	35	49	16
粉末涂料涂装	100	0	0

根据各企业 VOCs 治理设施进口与出口的排气量、废气浓度的检测结果,结合净化效率计算方法,分析不同治理工艺对涂装废气的净化效果,结果如图 1 所示。同一类型治理工艺对水性涂料涂装废气净化效率好于溶剂型涂料涂装废气,可能归因于水性涂料涂装废气 VOCs 初始浓度相对较低。光氧化+活性炭工艺对粉末涂料涂装废气净化效率最差,可能与固化废气相对较高的温度有关。另外,分

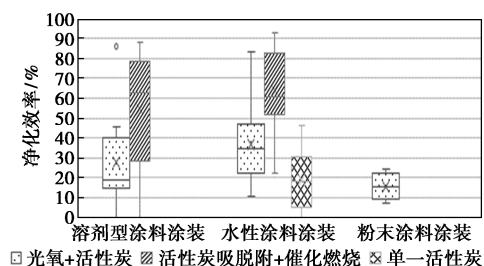


图 1 不同治理工艺对涂装 VOCs 废气净化效率

析治理设备在同一场景下的净化效率可知,同一类型治理设备之间净化效率差异显著,最高净化效率与最低净化效率差值大多在 70% 以上,设备质量参差不齐。为进一步剖析导致净化效率差异显著的原因,本文中在第三章就企业 VOCs 治理问题进行了归纳,并探讨了相应对策。

## 3 治理问题与对策

### 3.1 预处理单元

涂装废气中含有大量的漆雾、颗粒物,或具有一定的温度,为避免对后续治污设备产生不利影响,通常需要根据治理技术需求对废气进行预处理,常见的预处理技术包括干式过滤、水洗、换热降温等。从现场调查来看,装备制造企业涂装废气预处理单元存在以下几类问题。

(1) 干式过滤装置设计存在问题。诸如光氧化+活性炭等简易设备过滤模块过滤等级低或未设置过滤模块,无法有效过滤漆雾颗粒,漆雾侵入后续治理设备,导致治理设备性能下降或堵塞。活性炭吸附+催化燃烧设备过滤系统未配置压差指示仪器的情况普遍存在,过滤模块到达终阻力的时间无法有效判断,过滤材料更换不及时导致系统压损增高,严重时撕裂过滤模块,颗粒物侵入后续装置,不利于治理系统长期稳定运行。

(2) 水洗装置大多结构简易且未配置除雾模块,用于处理漆雾或降温时,因气流作用夹带大量水雾涌入后续装置导致电气安全隐患,同时造成活性炭等材料的性能下降,对 VOCs 的净化能力减弱或丧失。

(3) 粉末涂料涂装工序固化温度在 160~180℃,生产排气温度较高,未经降温直接通入治理设备特别是活性炭装置,因高温环境导致活性炭对 VOCs 的吸附容量急剧降低<sup>[5]</sup>,净化效率几近于无,严重时易造成活性炭阴燃等极端故障。

针对上述问题,提出如下优化措施。

(1) 为避免漆雾对治理设施的干扰,应合理配置、建设、维护干式过滤装置。建议根据治理设备颗粒物浓度限值,干式过滤装置梯度配置粗效、中效、高中效等过滤模块,延长中高效滤材使用寿命;过滤模块前后设置压差监测点位实时监测系统阻力,压差达到终阻力时及时更换过滤模块,以维持系统长效运行避免滤材撕裂风险。

(2) 考虑水雾对 VOCs 治理设备的性能和安全造成的不利影响,为减少液体的夹带并确保气体的

“纯度”,水洗装置配置除雾模块是十分必要的。建议用于预处理的水洗装置顶部配置除雾模块,型式考虑匹配系统阻力损失可选择丝网、折流板、旋流板或拉西环、鲍尔环等填料。

(3)固化废气的温度调整需结合治理技术适用条件考虑,若采用燃烧或催化燃烧技术治理可不考虑进行降温处理,若采用其他需求低温环境的 VOCs 治理技术,可选择气-水、气-气换热器等间接式降温措施或水洗等直接接触式的对流换热降温措施。

### 3.2 废气治理单元

涂装废气中 VOCs 主要组分通常包含苯系物、酯类、醇类等物质<sup>[6]</sup>,不同涂料涂装废气 VOCs 浓度具有一定的差异,集群常见的治理工艺为光氧化+活性炭、活性炭吸脱附+催化燃烧、单一活性炭 3 类。从现场调查来看,治理设备的设计建设大多较为简易,叠加运营管理不合理,多数设备治理效果并不理想,针对具体治污装置剖析如下。

#### 3.2.1 光氧化装置

在该集群 VOCs 废气治理装置中,光氧化装置存量较高,装置结构大多较为简易,基本未配置光催化剂模块,通常仅配置了波长为 185 nm 或 254 nm 的紫外灯管,且紫外灯管总功率较低,普遍低于 2 kW/(万 m<sup>3</sup>/h),叠加运维不当等因素,装置用于治理涂装废气实际性能极低。

考虑光氧化技术净化 VOCs 的原理,仅能将长链的 VOCs 断链氧化为短链的 VOCs,即使在最佳直接转化工况降解 VOCs 时,VOCs 的矿化率也普遍处于较低水平<sup>[7]</sup>。鉴于此,国家生态环境部门也将该技术界定为仅适用于恶臭废气治理的技术。因此,针对上述问题,建议企业调整治理工艺,结合排放废气的浓度、组分、风量、温度、湿度以及生产工况等,合理选择治理技术。

#### 3.2.2 一次性活性炭装置

该集群 VOCs 废气治理设备中,光氧化+活性炭、单一活性炭工艺的吸附模块均为一次性活性炭装置,活性炭吸附饱和后不进行脱附直接作为危废处置。现场调查装备制造产业集群企业此类装置普遍存在如下问题。

(1)活性炭材料的选用上大多为蜂窝活性炭,颗粒活性炭的选用极少。因自身特性及生产工艺上的差异,颗粒活性炭对 VOCs 的吸附容量通常高于蜂窝活性炭<sup>[8]</sup>,颗粒活性炭碘值通常高于 800 mg/g,相对的蜂窝活性炭碘值基本在 650 mg/g 左右。一次性活性炭装置中蜂窝活性炭的选用会导致更高的使

用成本和更大的危废处置压力。

(2)活性炭装置设计较为简易,多数活性炭装置吸附层气体流速设计值远高于规范要求。在一定吸附层厚度条件下,过高的气体流速会导致 VOCs 吸附效率的降低<sup>[9]</sup>。另外,部分装置内部气流隔板设计出现错误,导致气流短路的状态,治理设备形同虚设。

(3)因运行维护不规范等因素,活性炭装填量及更换频次不足,远低于企业涂装工序 VOCs 废气治理需求。在工况条件下,一定量的活性炭对 VOCs 的吸附容量有限,更换不足时会导致在已穿透的状况下运行,装置净化效率逐渐降低直至趋近于零。

针对上述问题,提出如下优化措施。

(1)对于一次性活性炭装置,颗粒活性炭具有更高的性价比,鼓励企业一次性活性炭装置采用颗粒活性炭。2021 年生态环境部印发的《关于加快解决当前挥发性有机物治理突出问题的通知》中也明确指出,一次性活性炭吸附工艺宜采用颗粒活性炭作为吸附剂。

(2)活性炭装置的设计应充分考虑技术条件需求,为保障废气去除效率及运行能耗,综合考量污染物浓度、气体流量、主要 VOCs 物种、系统压损等因素,确定吸附层高度、气体流速等指标,装置结构应保障气流分布均匀合理,避免因结构问题导致的气流短路状况。

(3)为维持系统的高效率运行,活性炭材料需要定期更换,更换时间可根据监测数据确定,或综合生产排放量、活性炭装填量及活性炭吸附容量进行核算确定。

#### 3.2.3 活性炭吸脱附+催化燃烧装置

一般认为活性炭吸脱附+催化燃烧工艺因吸附材料的动态再生和较高的催化氧化能力对 VOCs 废气具有较高的净化效率,实际调查净化效率差异显著,综合剖析装备制造产业集群企业此类装置情况,存在以下几类问题。

(1)活性炭脱附过程脱附温度、脱附时长不足,部分企业脱附温度低于 60℃,脱附时长低于 1 h。过低的脱附温度和过短的脱附时长无法有效脱除较高沸点的 VOCs 物种,活性炭中残留大量 VOCs 物质,脱附后的活性炭吸附容量明显降低<sup>[10]</sup>。装置多轮次吸附-脱附运行后,活性炭吸附性能严重降低,对 VOCs 的净化效果迅速下降。

(2)脱附系统工艺设计和控制逻辑错误,脱附系统无隔开活性炭装置的旁路,催化燃烧模块升温

气流由活性炭装置导入。催化剂适宜的起燃温度一般在 250℃ 以上,携带 VOCs 的气流由活性炭装置导入尚未升温至催化温度的催化燃烧模块时,易引发 VOCs 的不完全燃烧反应,严重时可导致催化剂表面积碳或沉积大分子物质直至催化剂失活<sup>[11]</sup>。

(3) 吸附/脱附阀门配置质量低,普遍采用电动式多叶阀,阀门泄漏率大、故障率高。系统在同时进行吸附与脱附操作时,阀门的泄漏会导致吸附与脱附气流的串气,严重影响系统净化效率<sup>[12]</sup>。

针对上述问题,提出如下优化措施。

(1) 吸附饱和的活性炭脱附过程应充分考虑 VOCs 物种及其吸脱附性能、系统的安全等因素,科学设置脱附温度、脱附时间等指标,确保脱除率在合理范围以避免 VOCs 残留过多引发的活性炭吸附性能的显著降低。

(2) 工艺流程及其控制逻辑的设计需要以满足各模块适用条件为基础,作为治理系统核心的催化燃烧装置催化室应预热至催化温度以上再引入含 VOCs 的脱附气体,可选择以配置隔开活性炭装置的旁路的方式循环空气加热催化剂至起燃温度。

(3) 阀门选型应考虑净化效率的需求把泄漏率控制在合理水平,可选择采用气动式提升阀等高密闭性、高可靠性、低泄漏率的阀门,阀门密封材料需要能长期耐受 120℃ 的温度。

## 4 结语

(1) 涂料的源头替代导致涂装工序 VOCs 废气特征的差异,治理设施对不同性质涂料涂装废气的治理效果需要评估。本文中结合对装备制造产业集群 VOCs 废气末端治理措施的调查,系统评估了光

氧化+活性炭、活性炭吸脱附+催化燃烧等治理工艺在不同涂装场景的净化效果。

(2) 基于治理设施净化效果参差不齐的现状,本文中着重梳理和探讨了装备制造产业集群 VOCs 废气治理设施在工艺设计、设备设计及运行维护等方面存在的问题,并针对问题提出了优化的方向和措施,旨在为装备制造企业涂装工序废气的治理提供参考。

## 参考文献

- [1] 王丽娟,邵霞,宁森,等.重点工业涂装行业 VOCs 减排路径与潜力评估[J].环境科学研究,2023,36(5):866-8774.
- [2] 滕富华,杨忠平,董事壁,等.浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数[J].环境科学,2020,41(3):1093-1098.
- [3] 王红丽.上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J].环境科学,2015,36(9):3159-3167.
- [4] 卢滨,黄成,卢清,等.杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征[J].环境科学,2018,39(2):533-542.
- [5] 袁晨阳,刘志庆,张文俊.活性炭对 VOCs 吸附效果影响因素及吸附机制研究[J].洁净与空调技术,2022,(3):44-46.
- [6] 王家德,金旦军,顾震宇,等.金属表面涂装行业 VOCs 排放特征及排放系数[J].中国环境科学,2020,40(5):1940-1945.
- [7] 李智,尹亮,段锋,等.羟基自由基与游离氧原子竞争作用下的光氧化降解苯反应路径[J].环境化学,2023,42(10):3590-3599.
- [8] 张吉祥.两种吸附床层对甲苯的吸附/脱附性能[D].广州:华南理工大学,2011.
- [9] 谢裕坛.活性炭吸附治理多组分有机废气的研究[D].杭州:浙江大学,2002.
- [10] 吴思聪.活性炭热氮气循环脱附涂装 VOCs 规律及其再生特性研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [11] 张润泽,戴洪兴,刘志明,等.典型化工有机废气催化净化基础与应用[M].北京:科学出版社,2016.
- [12] 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):7-9. ■

## 巴斯夫涂料业务部位于江门的的全新亚太应用中心开幕

8月23日,巴斯夫涂料业务部宣布其全新亚太应用中心正式开幕,该中心位于广东省江门市的巴斯夫涂料(广东)有限公司,标志着巴斯夫全球修补漆技术网络取得又一重要里程碑。

巴斯夫高级副总裁、全球汽车修补漆涂料解决方案负责人铁玛士(Chris Titmarsh)表示:“在亚太地区设立专门的应用中心将有助于新产品开发并提升效率,我们对此深感自豪。该中心毗邻我们在中国及其他地区的研发和生产设施,这确保了协同效应和对市场需求的实时响应。”

自2016年成立以来,巴斯夫涂料(广东)有限公司一直致力于提供全面的修补漆产品组合,包括高端、经济高效和商业运输解决方案。

为推动亚太地区汽车涂料行业的创新可持续发展,

巴斯夫涂料(广东)有限公司还大力支持了全涂层水性解决方案的推出,如诺缤® 66水性底色漆及巴斯夫鸚鵡®水性清漆。

巴斯夫副总裁、亚太区涂料解决方案汽车修补漆业务管理负责人顾舒善(Susann Kluge)表示:“新的亚太应用中心不仅仅是我们生产基地和创新中心的延伸,它更是专业技术的枢纽,旨在进行严格的产品和工艺流程测试、评估以及基准测试,以此确保我们向市场提供最高标准的产品,充分满足客户需求。”

该应用中心利用真实设备和条件,充分模拟客户环境,将在推动创新方面发挥关键作用。作为巴斯夫涂料(广东)有限公司的首个应用中心,该中心配备了两个大型组合喷房与全套产品开发设备,涵盖了从打磨、调色到喷涂后处理和测量的完整工艺流程。(王蔚楠)