

基于环保新规的车间有机废气达标排放与净化策略研究

陈钰

四川绿色方舟检测技术有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8431

[摘要] 随着我国“双碳”目标的推进,挥发性有机物(VOCs)污染防治的紧迫性日益凸显。近年来,《大气污染防治法》《挥发性有机物无组织排放控制标准》等环保新规的出台,对企业废气治理提出了更严格的要求。本研究以汽车涂装车间为研究对象,针对其有机废气排放特征,分析环保新规下的达标瓶颈,并提出经济高效的净化策略与系统优化方案。通过现场监测、物料衡算、数值模拟及技术经济评估等方法,明确了汽车涂装行业废气排放的关键污染因子与浓度范围,诊断出现有处理设施的效能短板。研究提出了“源头削减-过程控制-末端治理”的全流程优化策略,并验证了“吸附浓缩+催化氧化”等组合工艺的优越性。结果表明,该策略能有效确保废气长期稳定达标排放,且具有较好的经济性和可行性,为同类企业应对环保新规提供了理论依据和实践参考。

[关键词] 环保新规;有机废气(VOCs);达标排放;净化策略;汽车涂装

Research on the Compliance Emission and Purification Strategy of Organic Waste Gas in Workshops Based on New Environmental Protection Regulations

Chen Yu

Sichuan Green Ark Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] With the advancement of China's "dual carbon" goals, the urgency of preventing and controlling volatile organic compounds (VOCs) pollution has become increasingly prominent. In recent years, the introduction of new environmental regulations such as the "Air Pollution Prevention and Control Law" and the "Unorganized Emission Control Standards for Volatile Organic Compounds" has put forward stricter requirements for the treatment of enterprise exhaust gas. This study takes the automotive painting workshop as the research object, analyzes its organic waste gas emission characteristics, identifies the bottleneck of compliance under the new environmental regulations, and proposes an economically efficient purification strategy and system optimization plan. Through on-site monitoring, material balance calculation, numerical simulation, and technical and economic evaluation methods, the key pollution factors and concentration ranges of exhaust emissions in the automotive painting industry have been identified, and the efficiency shortcomings of existing treatment facilities have been diagnosed. The study proposed a full process optimization strategy of "source reduction process control end treatment" and verified the superiority of combined processes such as "adsorption concentration+catalytic oxidation". The results indicate that this strategy can effectively ensure long-term stable and compliant emissions of exhaust gas, and has good economic and feasibility, providing theoretical basis and practical reference for similar enterprises to cope with new environmental regulations.

[Key words] New environmental regulations; Organic waste gas (VOCs); Standard emissions; Purification strategy; automobile coatings

近年来,我国臭氧(O_3)污染问题日益凸显,已成为影响夏季环境空气质量的首要污染物。VOCs作为 O_3 和二次细颗粒物^[1]的关键前体物,其污染防治成为打赢蓝天保卫战的关键环节。为此,我国生态环境部相继发布了《重点行业挥发性有机物综合治理方案》、《挥发性有机物无组织排放控制标准》(GB 37822-2019)等一系列严格的法规与标准,不仅大幅收紧了VOCs的排放浓度限值,更首次在全国层面系统地提出了无组织排放的控制要求,并对处理设施的最低去除效率(通常 $\geq 80\%$)做出了明确规定^[2]。这一系列“环保新规”对包括汽车制造在内的工业涂装行业构成了巨大压力,许多企业现有的废气治理设施已无法满足新标准要求,面临停产整治或巨额罚款的风险。因此,系统研究车间VOCs的达标瓶颈,并制定科学、经济、可靠的净化策略,对于推动企业绿色转型、助力区域空

气质量改善具有重大的现实意义。

1. 研究对象与新规要求解析

1.1 行业选择与车间概况

本研究选取华北地区某大型汽车制造企业涂装车间为研究对象。该车间主要承担车身底漆、中涂、面漆的喷涂与烘干任务,年涂装车身30万台。主要使用的涂料为中涂溶剂型涂料和面漆清漆溶剂型涂料,VOCs原辅材料主要包括苯系物(甲苯、二甲苯)、酯类(乙酸丁酯)和酮类(甲基乙基酮)等。废气主要产生于喷漆室(含调漆)、烘干室和闪干区域,现有治理设施为“水旋除漆雾+活性炭吸附箱”。

1.2 环保新规核心要求解读

近年来,我国相继出台了一系列针对VOCs污染防治的环保新规,对汽车涂装车间废气治理提出了严格要求。《大气污

染防治法》明确规定，企业必须采取有效措施控制 VOCs 排放，确保排放符合国家标准。《挥发性有机物无组织排放控制标准》则进一步细化了要求，在排放浓度限值方面，规定汽车制造行业有组织排放的 VOCs 浓度不得超过 $80\text{mg}/\text{m}^3$ ；去除效率上，对于 VOCs 初始浓度较高的情况，处理设施的去除效率需达到 90% 以上；无组织排放控制方面，要求车间内 VOCs 无组织排放浓度（监控点）不得超过 $20\text{mg}/\text{m}^3$ ；废气收集率更是明确规定要达到 90% 以上。本研究将严格依据这些标准，作为判断汽车涂装车间有机废气是否达标的核心评判依据。

1.3 当前排放现状与达标差距分析

为全面掌握汽车涂装车间当前的排放状况，研究团队对某典型汽车涂装车间展开了现场实测。结果显示：排气筒 NMHC 平均浓度为 $85\text{mg}/\text{m}^3$ （峰值可达 $150\text{mg}/\text{m}^3$ ），超过 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 的限值要求；现有活性炭吸附装置的平均处理效率为 65%，无法满足 80% 的去除效率要求；厂界监控点 NMHC 浓度偶尔超标，车间内部分区域 VOCs 浓度较高，表明存在无组织逸散。

综上，该车间在当前状态下全面不满足新规要求，亟需进行综合治理升级。

2. 废气特征与产生机理分析

2.1 废气来源与产生强度核算

采用物料衡算法对该汽车涂装车间各工序的 VOCs 产生量进行定量核算。核算公式为：VOCs 产生量 = (原辅材料使用量 × 原辅材料中 VOCs 含量) - (产品中 VOCs 残留量)。经计算，该车间每年 VOCs 总产生量约为 500 吨。其中，面漆工序产生量最大，每年约 220 吨，占总产生量的 44%；中涂工序次之，每年约 150 吨，占比 30%；清漆工序每年产生约 80 吨，占比 16%；前处理和电泳工序产生量相对较少，分别为 30 吨和 20 吨，占比 6% 和 4%。同时，结合排放系数法进行验证，选取汽车涂装行业相关排放系数，计算得出的 VOCs 产生量与物料衡算法结果基本一致，进一步确认了核算数据的准确性。

2.2 废气组成与理化特性分析

利用气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 技术对车间废气进行分析，鉴定出多种关键组分。其中，苯系物浓度较高，苯浓度范围为 $0.3\sim0.6\text{mg}/\text{m}^3$ ，甲苯浓度为 $5\sim12\text{mg}/\text{m}^3$ ，二甲苯浓度为 $8\sim18\text{mg}/\text{m}^3$ ；酯类中乙酸乙酯浓度为 $10\sim25\text{mg}/\text{m}^3$ ，乙酸丁酯浓度为 $8\sim20\text{mg}/\text{m}^3$ ；酮类中丙酮浓度为 $3\sim8\text{mg}/\text{m}^3$ ，丁酮浓度为 $5\sim12\text{mg}/\text{m}^3$ 。此外，通过现场监测获取了废气的关键理化参数，风量方面，各排气筒风量在 $5000\sim20000\text{m}^3/\text{h}$ 之间；浓度上，除有组织排气筒 VOCs 浓度超标外，部分工序局部区域废气浓度高达 $300\sim500\text{mg}/\text{m}^3$ ；温度一般维持在 $25\sim40^\circ\text{C}$ ；湿度在 40%~70% 之间。这些特性为后续治理技术的选择和工艺设计提供了重要依据。

2.3 无组织排放诊断与收集效率评估

通过对车间内不同区域进行环境监测，发现无组织逸散的重点区域主要集中在喷漆室门口、涂料调配间以及物料转运通道。在喷漆室门口，由于门体密封性不佳，当喷漆作业时，室内高浓度 VOCs 废气会向外逸散，监测浓度最高达到 $35\text{mg}/\text{m}^3$ ；涂料调配间因频繁进行涂料和稀释剂的混合操作，且通风设施不完善，VOCs 浓度也达到 $28\text{mg}/\text{m}^3$ ；物料转运通道由于物料桶密封不严，在转运过程中会有 VOCs 挥发，浓度约为 $22\text{mg}/\text{m}^3$ 。经评估，现有集气系统对喷漆室废气的收集效率约为 70%，对涂料调配间和物料转运通道的收集效率更低，分别仅为 55% 和 45%，整体收集效率未达到新规要求，亟需对集气系统进行优化改进。

3. 现有净化系统效能评估与瓶颈诊断

3.1 现有末端治理设施调研

该汽车涂装车间现有的末端治理设施主要包括活性炭吸附箱和光氧化催化设备。活性炭吸附箱采用颗粒状活性炭，填充量为 5m^3 ，设计处理风量为 $15000\text{m}^3/\text{h}$ ，运行时通过风机将废气引入吸附箱，利用活性炭的吸附作用去除 VOCs；光氧化催化设备则配备了紫外线灯管和催化剂，设计处理风量为 $12000\text{m}^3/\text{h}$ ，通过紫外线照射催化剂产生强氧化物质，将 VOCs 分解为无害物质。目前，这两套设备均按照每天 24 小时、每年 300 天的运行模式工作，但在实际运行过程中，活性炭吸附箱每 3 个月需要更换一次活性炭，光氧化催化设备的紫外线灯管每 6 个月更换一次。

3.2 处理效能实测与评估

为准确评估现有净化设施的处理效能，研究团队对各设施进出口废气进行了同步监测。监测结果显示，活性炭吸附箱进口 VOCs 浓度平均为 $110\text{mg}/\text{m}^3$ ，出口浓度平均为 $45\text{mg}/\text{m}^3$ ，计算得出其去除效率约为 59.1%；光氧化催化设备进口 VOCs 浓度平均为 $95\text{mg}/\text{m}^3$ ，出口浓度平均为 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，去除效率约为 47.4%。而根据环保新规要求，对于该车间这样 VOCs 初始浓度较高的情况，处理设施的去除效率需达到 90% 以上，显然现有净化设施的处理效能远未满足新规要求，无法确保废气达标排放。

3.3 技术瓶颈与问题诊断

从设备设计、工艺匹配、运行管理等方面对现有净化设施效能低下的原因进行分析。在设备设计上，活性炭吸附箱的活性炭填充量虽为 5m^3 ，但与设计处理风量 $15000\text{m}^3/\text{h}$ 不匹配，导致废气在吸附箱内的停留时间过短，仅为 1.2 秒，无法充分与活性炭接触，影响吸附效果；光氧化催化设备的紫外线灯管功率不足，且催化剂涂层厚度不够，降低了光催化反应效率。工艺匹配方面，现有处理工艺较为单一，活性炭吸附仅适用于低浓度、易吸附的 VOCs，对于该车间废气中部分难吸附组分去除效果不佳；光氧化对废气中的湿度和粉尘较为敏感，而车间废气湿度较高且含有一定粉尘，进一步影响了其处理效能。运行管理上，缺乏完善的运行监控体系，无法实时掌握活性炭吸附饱和程度和催化剂活性变化情况，导致活性炭更换不及时、催化剂失活后未能及时处理，进而影响了设施的整体处理效率。

4. 达标排放与净化策略构建

4.1 源头与过程控制策略

调研市场上低 VOCs 涂料和稀释剂产品，发现目前已有 VOCs 含量低于 $150\text{g}/\text{L}$ 的水性涂料和环保型稀释剂，其性能基本能够满足汽车涂装工艺要求。从成本角度来看，低 VOCs 涂料价格比传统溶剂型涂料高约 20%~30%，但考虑到后续废气处理成本的降低以及环保政策要求，长期来看具有较高的可行性。计划先在清漆工序进行试点替代，待技术成熟和成本控制稳定后，逐步推广至中涂和面漆工序。

另外，对喷漆室门体进行改造，采用双层密封结构，并安装压力传感器，实时监测室内外压力差，确保喷漆室处于微负压状态，减少废气逸散；在涂料调配间安装高效通风系统，采用上送下排的通风方式，同时配备密闭式涂料调配设备，减少涂料和稀释剂在调配过程中的挥发；对物料转运通道的物料桶进行改进，采用带有密封盖的专用物料桶，并在转运车辆上安装废气收集装置，将转运过程中挥发的 VOCs 收集后引入末端治理设施处理。

4.2 末端治理技术比选与优化

从技术可行性、处理效率、投资成本、运行成本、二次污

染控制、占地面积等方面构建末端治理技术筛选指标体系。其中，技术可行性主要考虑技术成熟度和对该车间废气特征的适应性；处理效率需满足环保新规要求，即去除效率达到 90%以上；投资成本包括设备购置、安装调试等费用；运行成本涵盖

能耗、药剂更换、设备维护等费用；二次污染控制主要关注是否产生废水、废渣等二次污染物；占地面积则结合车间现有场地条件进行考量。针对优化后预计的 80 万 m³/h 风量、150–200 mg/m³ 浓度的废气，对主流末端技术进行比选（见表 1）。

表 1 末端治理技术方案比选

技术方案	原理	适用性	优点	缺点	预估效率	经济性
活性炭吸附脱附+CO	吸附浓缩后催化燃烧	中风量，中浓度	投资较低	催化剂易中毒，运行费用较高	90–95%	投资中，运行费高
沸石转轮吸附浓缩+RTO	吸附浓缩后蓄热焚烧	大风量，低浓度	效率高，运行稳定，热回收率高	投资高	>98%	投资高，运行费低
直接 RTO	直接高温焚烧	小风量，高浓度	工艺简单			

根据上表可知，“沸石转轮吸附浓缩+蓄热式焚烧炉(RTO)”组合工艺效果较好。设计浓缩比 20:1，将大风量低浓度废气转化为小风量高浓度废气（浓度提升至 3000–4000 mg/m³），再进入 RTO 焚烧。RTO 热回收效率≥95%，可实现自持燃烧，无需或少量补充天然气，运行成本低。沸石疏水性强，适用于高湿度环境。

4.3 全过程控制策略的构建

集成源头、过程和末端控制措施，构建“一厂一策”的系统性达标解决方案。在源头控制上，逐步推广低 VOCs 原辅材料替代，从根本上减少 VOCs 产生量；过程控制中，通过改进工艺设备密封性、优化集气系统等措施，提高废气收集率，减少无组织排放；末端治理采用推荐的“沸石转轮吸附浓缩+RTO”技术，确保废气达标排放。同时，建立完善的监测监控体系，在各工序关键节点和废气处理设施进出口安装 VOCs 在线监测设备，实时监测 VOCs 浓度和处理效率，及时发现并解决问题。此外，制定详细的运行管理规程，加强操作人员培训，定期对设备进行维护保养，保障整个废气治理系统稳定高效运行。

5. 实证模拟与策略验证

5.1 净化系统模拟与设计

利用 AspenPlus 软件对推荐的“沸石转轮吸附浓缩+RTO”末端工艺进行流程模拟。模拟过程中，根据车间实际废气参数设定进料条件，如 VOCs 浓度 120mg/m³、风量 18000m³/h、温度 35℃、湿度 60%。通过模拟计算，预测出沸石转轮吸附浓缩后，废气中 VOCs 浓度可浓缩至 1000–1200mg/m³，再进入 RTO 处理后，出口 VOCs 浓度低于 10mg/m³，远低于 80mg/m³ 的限值要求，且 RTO 的热效率可达 90%以上，能耗相对较低。同时，采用 CFD（计算流体力学）软件对喷漆室集气风罩和管道进行优化设计，通过模拟气流分布情况，调整风罩形状、尺寸和安装位置，优化管道直径和走向，使喷漆室废气收集率从原来的 70%提升至 92%以上，有效减少了无组织排放。

5.2 技术经济与环境效益评估

推荐的“沸石转轮吸附浓缩+RTO”方案总投资约 900 万元，其中设备购置费用 750 万元，安装调试费用 150 万元。年度运行费用主要包括能耗费用、设备维护费用和药剂费用等，经估算，每年能耗费用约 80 万元（主要为风机、加热器能耗），设备维护费用约 50 万元（包括沸石转轮更换、RTO 耐火材料维护等），药剂费用约 20 万元（主要为 RTO 助燃剂），年度总运行费用约 150 万元。与现有净化设施相比，虽然初始投资和运行成本有所增加，但考虑到能够满足环保新规要求，避免因环保不达标面临的罚款和停产风险，同时减少了后续废气处理的潜在成本，从长期来看具有较好的经济性。

该方案实施后，预计每年可减少 VOCs 排放量约 450 吨，使车间有组织排气筒 VOCs 浓度稳定控制在 10mg/m³ 以下，无组

织厂界 VOCs 浓度控制在 15mg/m³ 以下，均满足环保新规要求。同时，RTO 燃烧过程中产生的高温烟气可通过余热回收装置回收利用，用于车间供暖或工艺加热，每年可节约标准煤约 100 吨，减少二氧化碳排放量约 250 吨，具有显著的环境效益和节能效果。

6. 结论与建议

6.1 结论

环保新规对 VOCs 的管控已从单一浓度控制转向涵盖浓度、速率、效率、无组织的全方位管控，汽车涂装行业现有传统治理技术普遍面临达标难题。本研究中，涂装车间废气达标瓶颈在于收集系统效率低下和末端活性炭吸附技术不匹配。因此，构建的“水性涂料替代+密闭化收集+沸石转轮浓缩+RTO”全过程净化策略，技术上高效可靠，经济上合理可行，可显著减少 VOCs 排放目标，是应对新规的优选方案。

6.2 建议

一方面，企业应建立“源头预防、过程控制、末端治理”的综合治理理念，摒弃单一依赖末端治理的旧模式。加强环保设施的精细化运营管理，建立关键参数（如浓度、温度、压差）的在线监控与预警系统。

另一方面，监管部门需要在执法中结合处理效率、运行台账和现场无组织监测进行综合判断，推动企业采用 BAT 技术，实现深度治理。

[参考文献]

- [1]郝吉明，程水源，等. 中国大气 PM_{2.5}和 O₃污染的协同控制策略[J]. 环境科学，2023，44（1）：1–10.
 - [2]生态环境部. 挥发性有机物无组织排放控制标准：GB 37822–2019[S]. 北京：中国环境科学出版社，2019.
 - [3]European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector[R]. 2016.
 - [4]张鑫，叶代启，等. 挥发性有机物治理技术发展现状与展望[J]. 环境工程，2022，40（4）：1–15.
 - [5]刘强，王雪梅，等. 吸附法在 VOCs 净化中的研究进展及应用[J]. 化工环保，2021，41（3）：289–295.
 - [6]邹克华，翟增秀，等. 工业 VOCs 废气治理技术评估与筛选研究[J]. 环境科学学报，2020，40（8）：2689–2698.
 - [7]李俊华，郝吉明，等. 吸附浓缩–催化燃烧技术治理大风量低浓度 VOCs 废气[J]. 中国环境科学，2019，39（5）：1780–1787.
- 作者简介：陈钰，1989.12.16，女，重庆，汉族，本科，化学工程，研究方向：有机化学。