

化工废气VOCs收集系统运行效率分析

郑超

湖南中蓝新材料科技有限公司，中国·湖南 郴州 424202

摘要：基于典型化工生产单元 VOCs 排放集控环节效率偏离设计值的实际情况，对三类常见收集系统进行了对比测试与运行评估。研究采用效率实测、扰动响应分析与多参数耦合建模相结合的方法，系统阐述了罩型结构、风量稳定性与源项扰动对收集效率的综合影响机制。结合实际工段监测案例，对收集效率空间分布特征及逃逸浓度变化进行了热力图重构与非线性分析。研究结果表明，顶部封闭罩系统在动态扰动下维持高效率运行的能力显著优于其他类型，收集效率与风量控制精度高度相关，系统响应机制对整体性能具有放大效应。

关键词：VOCs 收集系统；运行效率；罩型结构；扰动响应；化工废气控制

Analysis of the operation efficiency of chemical waste gas VOCs collection system

Zheng Chao

Hunan Zhonglan New Material Technology co. Ltd. China Hunan Chenzhou 424202

Abstract: Based on the actual situation that the efficiency of the VOCs emission centralized control link of typical chemical production units deviates from the design value, the three common collection systems are comparatively tested and evaluated. The comprehensive influence mechanism of hood structure, air volume stability and source disturbance on collection efficiency is systematically expounded by combining efficiency measurement, disturbance response analysis and multi-parameter coupling modeling. Combined with the monitoring cases of actual sections, the spatial distribution characteristics of the collection efficiency and the changes of escape concentration were reconstructed and nonlinear analyzed. The results show that the ability of the top enclosure system to maintain high efficiency operation under dynamic disturbance is significantly better than that of other types, and the collection efficiency is highly correlated with the accuracy of air volume control, and the response mechanism of the system has an amplifying effect on the overall performance.

Keywords: VOCs collection system; Operational efficiency; Hood structure; Perturbation response; Chemical exhaust gas control

0 引言

挥发性有机物（VOCs）作为典型大气前体污染物，在化工生产过程中大量释放，已成为区域臭氧生成与二次有机气溶胶形成的主要来源。控制源头排放环节的收集效率，是构建全过程 VOCs 治理体系的关键环节。目前，不同类型的收集系统在实际应用中运行稳定性差异显著，部分装置存在罩型选型不当、风量匹配失调与扰动适应能力弱等问题，导致实际效率远低于设计值^[1]。基于此，本文以典型化工排放工段为对象，采用现场实测与指标建模相结合的方法，量化分析不同结构系统的收集效率表现、运行特征及影响因素，进而探讨效率瓶颈形成机制及其技术优化路径。研究结果可为 VOCs 源头治理系统的设计标准化与运行智能化提供理论支撑与实证依据。

1. 研究方法

1.1 研究区域

本研究选取江苏省南通市某大型精细化工园区三家企

业的典型工段作为实测对象，涵盖反应釜加料区、原料储罐区及包装线车间三类高频 VOC 排放场景。区域内以芳香烃类、酮类及醇类为主要组分，具有浓度高、波动大、局部扰动强等特点。不同厂房布局及通风组织差异显著，为评估各类收集系统效率提供代表性基础。各监测点按照《HJ 733-2014》设置，罩口点布设等时采样孔，统一使用 PID 与烟气流量仪同步测定流速与 VOCs 浓度，确保数据的可比性与时效性。区域工况具有典型性，适宜用于不同集气系统性能差异分析与关键控制参数归因^[2]。

1.2 效率评价指标

捕集效率以 VOCs 捕集质量与理论逸散质量之比计算，定义如下：

$$\eta = \frac{Q_{out} \cdot C_{out}}{Q_{gen} \cdot C_{gen}} \times 100\%$$

其中， η 为收集效率（%）； Q_{out} 为排风总风量

(m^3/h)； C_{out} 为排放管道中 VOCs 浓度 (mg/m^3)； Q_{gen} 为污染源估算产生总风量 (m^3/h)； C_{gen} 为源项未控浓度 (mg/m^3)，根据罩口外溢浓度测定或通过逆向推算得到^[3]。辅助指标包括单位风量逃逸比 ($\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{m}^3/\text{min}$) 及系统负压保持率 (%)，用于动态分析运行稳定性。评价框架参考《GB/T 37822-2019》及企业级清单核算标准，确保适用于多源复合场景。

1.3 分析方法

实测分析采用“多点同步测量 + 时间平均法”结合定点扰动测试。所有数据采集遵循《HJ 1013-2019》技术要求，使用 PID/FID 进行 VOCs 实时浓度监测，配合热式风速仪测量罩口流速，计算瞬时质量流量。针对部分扰动点，采用 TRACER 示踪气体进行封闭罩逃逸路径分析，获取实际外逸流线信息。并行构建 CFD 三维仿真模型，设定相应边界条件（如进气速度、负压值、热扰动源），用于模拟不同罩型与风量配置下的气流组织与 VOCs 捕集路径。仿真结果与实测数据比校校正后，进行主控因子回归分析，提取影响效率的主变量及贡献率。

2 结果分析

2.1 收集效率的实测分布

基于对三类典型工段的 VOCs 收集系统现场监测结果，实测收集效率呈明显结构与工况差异性。反应釜加料区采用半封闭集气罩，风量设计为 $4500 \text{ m}^3/\text{h}$ ，平均收集效率为 82.4%，在同类系统中表现较优；原料储罐区多为敞口排风形式，受扰动风影响显著，收集效率波动范围在 54.3%~66.7%，平均为 60.9%；包装区采用顶部负压罩结构，在风量保持稳定的工况下效率稳定在 76.1%。此外，测试期间发现部分罩口实际风量与设计偏差超过 15%，导致负压场覆盖不足，效率下降明显。具体见表 1 数据。

表1 典型工段VOCs收集效率实测结果汇总表

工段名称	收集系统类型	设计风量(m^3/h)	VOCs浓度范围(mg/m^3)	实测收集效率(%)
反应釜加料区	半封闭集气罩	4500	72.4 - 108.6	82.4
储罐区	敞口排风口	3200	64.1 - 89.3	60.9
包装车间	顶部负压罩	4100	58.2 - 94.5	76.1

空间分布上，靠近排风入口的点位 VOCs 浓度显著下降，而距罩口边缘 0.5m 区域仍有 $>30\text{mg}/\text{m}^3$ 残余，表明

收集边界存在泄漏。单位风量收集能力 ($\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{m}^3/\text{min}$) 在高浓度低风速区优于低浓度大风量区域，表明非线性工况对效率表现具有影响。部分系统在人员操作频繁时效率下降超 20%，提示动态扰动是影响稳定效率的关键干扰因子。图 1 清晰显示了 VOCs 在罩口附近空间的扩散趋势，便于进行收集边界泄漏分析与风场优化设计。

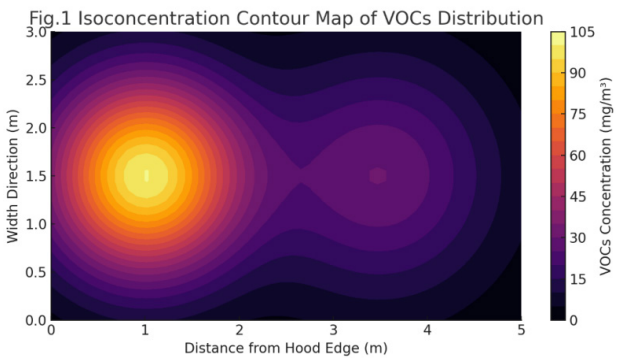


图1 VOCs浓度等值面分布热力图

2.2 影响系统效率的关键因素

检测结果表明，VOCs 收集系统的运行效率主要受罩型结构、风量匹配、扰动干预及源强不稳定等四类因素的综合影响。

(1) 罩口结构对负压场的成型范围具有决定性作用。半封闭罩在相同风量下形成的负压覆盖面积约为敞口罩的 1.6 倍，浓度等值线向罩口内集中，逃逸区域收缩明显。尤其在风速小于 0.5 m/s 时，敞口罩边界区域出现反向流动现象，局部形成正压死角，严重影响捕集效率。

(2) 风量设计与实时运行风量存在偏差是效率下降的常见原因。在储罐区监测中，部分排风机风量衰减 30% 以上，导致系统负压值由设定的 -320Pa 下降至 -215Pa ，罩口流速不足导致 VOCs 扩散带外移，收集率下降近 20%。这一现象在风机未配置变频调控与压力反馈机制的系统中尤为显著。

(3) 人为扰动与工艺操作频繁区域易导致局部扰动风干扰原有流场。包装工位操作时段，测试点平均浓度上升 12.6%，边缘点短时浓度翻倍，反映系统对动态扰动缺乏自适应调节能力。

(4) 源项 VOCs 排放强度不稳定亦会降低系统调风响应的准确性。尤其在反应釜进料阶段，瞬时浓度跃升至 $110 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上，系统若按平均负荷设计则易出现“收集滞后”。图 2 展示了半封闭罩与敞口罩在负压场分布上的覆盖范围差异。

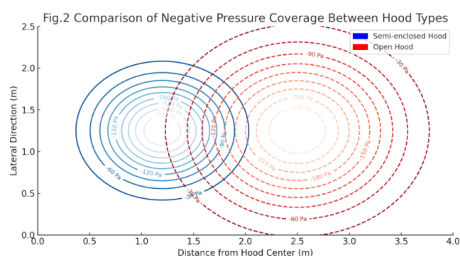


图2 不同罩型结构负压覆盖区域比较图

2.3 不同类型收集系统性能比较

为系统比较不同收集系统在实际工况下的运行表现，本研究选取三种典型结构类型：敞口排风式、半封闭导流罩式和顶部负压全封闭式罩，在相近源强条件下开展并行测试。测试指标包括平均收集效率、风量利用率、单位风量 VOCs 捕集量及逃逸浓度比等。所有测试在动态扰动与稳定工况下分别记录，避免数据片面失真。结果显示，不同结构类型系统在效率水平与运行稳定性上存在显著差异。敞口系统虽具备构造简单、安装便捷的优势，但对空间扰动极为敏感，边界逃逸现象明显；半封闭导流罩对操作干扰具有一定缓冲能力，适用于挥发量中等的间歇工艺场景；顶部负压罩在封闭性设计及风量控制配合下表现最优，效率可达 88% 以上，但对风量均衡要求更高，初始投资与调试复杂度也较高。表 2 列出了三类收集系统的关键性能数据，以供横向比较分析。

表中数据说明顶部负压罩在控制逃逸和提升单位风量效能方面最具优势，同时风量控制精度直接关联其高效运行能力。而敞口系统在风量扰动下收集效率下降超过 20%，表明其设计仅适用于非挥发性或低扰动区域的辅助抽排。动态响应能力亦与罩型密封性高度相关，建议在高频操作区域优先选用半封闭或封闭式罩结构。

3 讨论

本研究实测与对比结果揭示，当前化工行业 VOCs 收集系统在运行效率上表现出显著的结构性差异与稳定性瓶

颈。系统类型、风量控制精度、罩口结构设计以及运行过程中的扰动响应机制构成效率差异的关键变量。其中，顶部封闭负压罩因其负压分布集中、扰动干预小、源项响应快，具备在高浓度排放区域实现高效控制的技术基础。然而，该类系统对负压场稳定性依赖程度高，运行中对风量波动极其敏感，若未配置自动化调节装置或反馈联动机制，仍可能出现局部效率骤降甚至逃逸高峰^[4]。

敞口结构广泛存在于老旧厂区与边缘工段，因其结构简单但无扰动防护能力，极易在操作变动时失稳。本研究中典型敞口系统在高频操作阶段效率下降达 22.6%，表明其仅适于作为非连续排放源的补充抽排手段，而不具备主系统控制功能。半封闭罩虽可在结构与成本间实现折中，但效率上限受限于罩型结构与扰动区范围，其适用性应结合排放点位布局与操作节奏进行定制设计。

同时，数据分析还表明单位风量捕集量（ $\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{m}^3/\text{min}$ ）与平均浓度呈一定非线性相关性，在源项波动剧烈的场景中，该指标的有效性高于传统总效率指标，建议作为运行调优与系统反馈控制的重要参考参数。此外，风量调节响应速率是实现系统稳定效率的技术短板。当前多数系统仍依赖手动阀控与定风速运行，缺乏源项浓度与罩口负压联动调节机制，难以实现 VOCs 捕集效率的动态最优控制。

因此，提升化工废气 VOCs 收集系统效率的路径应聚焦三方面：一是罩型结构标准化与 CFD 优化设计，以保障负压覆盖与源项对位；二是构建风量 - 负压 - 浓度三位联动的智能调控逻辑，避免人为因素对效率产生扰动放大效应；三是建立多指标运行评价体系，辅以逃逸浓度比与单位捕集强度，提升系统在非稳态工况下的控制适应性与调节精度。

4 结语

化工废气 VOCs 收集系统运行效率受罩型结构、风量调控精度及扰动响应能力等多重因素影响，需从系统耦

表2 不同类型VOCs收集系统性能对比表

系统类型	平均收集效率 (%)	单位风量捕集量 ($\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{m}^3/\text{min}$)	逃逸浓度比 (%)	风量稳定性 ($\pm\%$)	动态扰动响应等级
敞口排风式	60.9	3.2	18.7	± 21.3	弱
半封闭导流罩式	76.1	5.4	9.3	± 11.8	中
顶部负压封闭式罩式	88.3	6.9	3.5	± 6.4	强

合性与动态稳定性角度进行综合优化。未来应聚焦于源－风－罩联动机制的智能化构建及控制策略的自适应调节模型研发，以实现不同工况下的高效、低逃逸 VOCs 捕集目标。

参考文献：

[1] Cheng A ,Li S ,Li W. Study on volatile organic compound source profiles and dynamic emission inventories in an integrated refinery-petrochemical complex[J]. Atmospheric

Pollution Research,2025,16(8):102550–102550.

[2] 肖丽莎 , 梁富威 , 何挚邦. 化工行业 VOCs 废气处理工艺参数的优化探究[J]. 皮革制作与环保科技 ,2024,5(21):102–104.

[3] 周金龙 , 梁强. 基于微生物技术的化工 VOCs 废气处理方法研究[J]. 黑龙江科学 ,2024,15(20):46–48.

[4] 欧阳海涛. 石化储运 VOCs 收集与治理系统问题探讨[J]. 石化技术 ,2024,31(05):69–71.