

石化 VOC 化学吸收工艺专用尾气收集装备制造集成技术研究

胡 聪, 张红伟, 严进军

(济南瑞东实业有限公司, 山东 济南 250013)

摘 要 为解决石化 VOC 化学吸收工艺尾气收集装备效率低、密封性差等问题, 实现 VOC 高效捕集与吸收工艺精准适配, 本文开展专用尾气收集装备制造集成技术研究。通过优化装备结构、筛选适配材料与加工工艺, 建立集成装配流程, 结合性能测试优化参数并与传统装备对比。结果表明, 装备采用模块化设计与耐腐复合材质, 最优集成参数为吸气口风速 1.8 m/s、收集罩覆盖率 95%、密封间隙 ≤ 0.5 mm, 此时 VOC 收集效率达 98.9%, 泄漏量 < 0.02 m³/h, 连续运行 72 h 无故障, 尾气处理达标率提升 13.6%。

关键词 石化 VOC; 化学吸收工艺; 尾气收集装备; 制造集成技术; 密封性

中图分类号: TQ051.6; X701

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.005

0 引言

石化行业生产会产生有毒易燃的 VOC, 其高效收集处理是石化环保治理的关键。化学吸收工艺是 VOC 处理主流技术, 其效果与尾气收集装备的制造精度、集成水平密切相关, 装备需适配石化工况实现无泄漏全覆盖收集, 为吸收工艺提供稳定进气^[1]。本文聚焦专用尾气收集装备制造集成技术, 优化结构与加工装配流程, 解决密封性、稳定性等核心问题, 建立成熟集成技术方案, 实现装备标准化高效生产应用。

1 尾气收集装备的设计、制造、集成及性能验证方法

1.1 实验材料与仪器

1. 实验材料。实验所用制造材料均适配石化 VOC 化学吸收工艺工况, 具体包括: 316L 耐腐蚀性不锈钢(抗拉强度 ≥ 515 MPa, 屈服强度 ≥ 205 MPa, 耐酸碱腐蚀等级达到 C2 级)、聚四氟乙烯 (PTFE) 板材(厚度 3 ~ 5 mm, 耐高温范围 -20 ~ 200 °C, 耐腐蚀性符合相关标准)、氟橡胶密封件(邵氏硬度 70 ~ 80, 耐 VOC 腐蚀性能优异)、高强度铝合金型材(6061-T6, 用于支撑结构); 辅助材料包括: 不锈钢焊丝(H0Cr21Ni10)、聚四氟乙烯粘合剂、密封胶(耐高温、耐腐蚀性, 适用温度 -40 ~ 250 °C); VOC 标准气体(组分: 苯 500 mg/m³、甲苯 800 mg/m³、乙酸乙酯 600 mg/m³, 纯度 $\geq 99.9\%$), 购自北京华元气体有限公司。

2. 实验仪器。实验所用仪器包括: 数控剪板机(型号 QC12Y-6×2500, 江苏亚威机床股份有限公司)、数控折弯机(型号 WC67Y-160T/4000, 南通锻压设备股份有限公司)、精密焊接机(型号 WS-400, 上海沪工焊接集团股份有限公司)、气密性检测仪(型号 ZKY-1000, 济南赛锐特检测仪器有限公司)、风速仪(型号 TESTO 416, 德图仪器国际贸易(上海)有限公司)、VOC 检测仪(型号 PGM-7340, 美国华瑞科学仪器公司)、电子万能试验机(型号 WDW-100, 济南试金集团有限公司)、恒温恒湿试验箱(型号 SH-261, 宁波海曙赛思仪器有限公司)。此外, 还包括卷尺、卡尺、扭矩扳手等常规检测工具, 所有仪器经校准合格后使用。

1.2 装备结构设计与制造工艺优化

1. 核心结构设计。结合石化 VOC 化学吸收工艺的尾气排放特点(排放点分散、尾气温度波动大、含腐蚀性组分), 设计模块化专用尾气收集装备, 核心结构包括: 收集罩模块、导流模块、连接管道模块、密封模块、支撑模块及控制系统模块。收集罩采用伞形结构设计, 适配不同尺寸的石化设备排放口, 罩口边缘设置柔性密封翻边, 提升密封性; 导流模块采用流线型设计, 减少尾气流动阻力, 避免局部涡流导致的收集死角; 连接管道采用变径结构, 适配不同流量的尾气排放, 管道内壁做防腐涂层处理; 密封模块采用双重密封结构(氟橡胶密封件+密封胶填充), 确保装备无泄漏; 支撑模块采用铝合金型材焊接结构, 具备足

作者简介: 胡聪(1982-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 化学工程。

够的承载能力与稳定性；控制系统模块可实时监测风速、压力、泄漏量等参数，实现装备的智能化运行^[2]。

2. 制造工艺优化。针对装备各组件的制造要求，优化加工工艺：收集罩采用数控剪板、折弯成型工艺，成型精度控制在 ± 0.2 mm，罩口边缘进行打磨、抛光处理，避免毛刺导致的密封不严；导流模块采用精密铸造工艺，铸造温度控制在 $1\ 500 \sim 1\ 550$ °C，成型后进行退火处理，消除内应力，确保结构强度；连接管道采用无缝焊接工艺，焊接电流控制在 $180 \sim 220$ A，焊接速度 $3 \sim 5$ mm/s，焊接后进行探伤检测，确保无焊接缺陷；密封模块采用模压成型工艺，氟橡胶密封件的成型温度控制在 $160 \sim 180$ °C，压力 $3 \sim 5$ MPa，成型后进行老化处理，提升密封性能；支撑模块采用组焊工艺，焊接后进行矫直处理，确保支撑精度。

1.3 装备集成装配流程与关键技术

1. 集成装配流程。建立专用尾气收集装备的标准化集成装配流程，具体步骤为：（1）组件预处理：对所有加工完成的组件进行清洗、除锈、防腐处理，去除表面油污与杂质，确保装配精度；（2）基础装配：先安装支撑模块，调整水平度与垂直度，固定牢固；（3）核心组件装配：依次安装连接管道、导流模块、收集罩，每安装一个组件进行精度检测，确保组件中心线对齐，偏差 ≤ 0.3 mm；（4）密封装配：在组件连接处安装氟橡胶密封件，填充密封胶，压实密封，确保密封间隙符合要求；（5）控制系统装配：安装风速、压力、泄漏量等检测传感器，连接控制系统，调试信号传输稳定性；（6）整体调试：对装备进行整体气密性、运行稳定性调试，排查装配缺陷，优化装配参数。

2. 集成关键技术。集成过程中的关键技术包括：（1）精密定位技术：采用激光定位仪对各组件进行定位，确保装配精度，减少组件偏移导致的密封性下降；（2）双重密封集成技术：通过密封件与密封胶的协同配合，优化密封结构，控制密封间隙 ≤ 0.5 mm，杜绝尾气泄漏；（3）协同适配技术：优化装备与石化生产设备、化学吸收装置的连接方式，确保尾气收集、输送与吸收工艺的协同运行，减少压力损失；（4）模块化集成技术：各组件采用模块化设计，可根据实际排放需求灵活组合，提升装备的兼容性与可维护性。

1.4 性能测试与验证方法

1. 收集效率测试。模拟石化VOC尾气排放工况，将VOC标准气体按设定流量（ $100 \sim 500$ m³/h）通入模拟排放装置，启动专用尾气收集装备，采用VOC检测仪分别测定排放口与收集装备出口的VOC浓度，计算

收集效率，公式为：收集效率（%）=（排放口VOC浓度 - 收集出口VOC浓度）/ 排放口VOC浓度 $\times 100\%$ 。分别改变吸气口风速、收集罩覆盖率，考察其对收集效率的影响。

2. 密封性测试。采用气密性检测仪对装备进行密封性测试，将装备密封后，通入压缩空气（压力 0.1 MPa），保持 30 min，检测装备各连接处的泄漏量，按照《工业阀门 压力试验》（GB/T 13927-2008）标准评价密封性等级，泄漏量 ≤ 0.02 m³/h为合格。同时，进行长期密封性测试，连续运行 72 h，监测泄漏量变化。

3. 运行稳定性测试。将装备置于模拟石化生产工况（温度 $25 \sim 80$ °C，湿度 $30\% \sim 80\%$ ，含微量腐蚀性气体）下，连续运行 72 h，监测装备的运行状态、风速稳定性、控制系统信号传输情况，记录故障次数，评价运行稳定性；采用电子万能试验机检测装备关键组件的结构强度，验证长期运行的可靠性。

4. 与化学吸收工艺的适配性测试。将专用尾气收集装备与化学吸收装置连接，通入实际石化VOC尾气，运行整套系统，监测收集装备的尾气输送稳定性、吸收装置的进气浓度均匀性，对比适配前后化学吸收工艺的VOC处理达标率，评价装备与化学吸收工艺的适配性。

1.5 质量控制措施

实验过程及装备制造集成过程中严格执行质量控制标准：（1）材料质量控制：所有制造材料进场前进行性能检测，不符合要求的材料严禁使用；（2）加工质量控制：每道加工工序完成后进行精度检测，加工偏差控制在允许范围内，焊接、铸造等关键工序进行无损检测；（3）集成装配质量控制：装配过程中实时监测装配精度，密封装配后进行密封性抽检，不合格品及时返工；（4）性能测试质量控制：性能测试过程中设置空白实验与平行实验，平行实验相对偏差 $\leq 3\%$ ，采用标准物质校准检测仪器，确保测试结果准确可靠。

2 专用尾气收集装备结构、参数及性能优化结果与讨论

2.1 装备结构与制造工艺优化结果

优化后的石化VOC化学吸收工艺专用尾气收集装备，模块化结构设计可灵活适配不同尺寸的石化设备排放口，兼容性显著提升；选用的316L不锈钢与聚四氟乙烯复合材质，经耐腐蚀性测试，在模拟石化工况下连续浸泡 30 d无腐蚀、无变形，满足长期运行需求。制造工艺优化后，各组件的加工精度均控制在 ± 0.2 mm以内，焊接合格率达到 99.5% ，密封件成型合格率达到

100%，有效解决了传统装备加工精度低、焊接缺陷多、密封件易老化等问题^[3]。

2.2 集成参数优化结果

以收集效率为核心指标，通过单因素实验考察吸气口风速、收集罩覆盖率、密封间隙对装备性能的影响，确定最优集成参数：（1）吸气口风速：当风速从 1.2 m/s 增加至 1.8 m/s 时，收集效率从 92.3% 提升至 98.9%，风速超过 1.8 m/s 后，收集效率无明显提升，且能耗增加，因此最优风速为 1.8 m/s；（2）收集罩覆盖率：覆盖率从 85% 提升至 95% 时，收集效率从 94.7% 提升至 98.9%，覆盖率超过 95% 后，收集死角无明显减少，且装备制造成本增加，因此最优覆盖率为 95%；（3）密封间隙：密封间隙从 1.0 mm 减小至 0.5 mm 时，泄漏量从 0.08 m³/h 降至 0.02 m³/h，密封间隙小于 0.5 mm 后，泄漏量无明显变化，因此最优密封间隙为 ≤ 0.5 mm。

2.3 装备性能测试结果

1. 收集效率测试结果。在最优集成参数下，对装备进行收集效率测试，结果显示：苯、甲苯、乙酸乙酯的收集效率分别为 99.1%、98.8%、98.9%，平均收集效率达到 98.9%，显著高于传统装备的 85.3%，表明优化后的专用装备可实现石化 VOC 尾气的高效捕集，有效减少 VOC 逃逸^[4]。

2. 密封性测试结果。密封性测试结果表明，装备各连接处的泄漏量为 0.012~0.018 m³/h，均 ≤ 0.02 m³/h，符合《工业阀门 压力试验》（GB/T 13927-2008）标准要求；连续运行 72 h 后，泄漏量无明显变化，最大值为 0.019 m³/h，表明装备的密封性良好，可有效杜绝尾气泄漏，避免二次污染。

3. 运行稳定性测试结果。模拟石化工况下连续运行 72 h，装备运行状态良好，无故障发生，风速波动范围为 1.75~1.85 m/s，波动幅度 ≤ 3%，控制系统信号传输稳定，关键组件的结构强度无明显下降，表明装备的运行稳定性强，可满足石化行业长期连续运行的需求。

4. 与化学吸收工艺的适配性测试结果。适配性测试结果显示，专用尾气收集装备可稳定输送尾气，进气浓度波动 ≤ 5%，确保化学吸收装置的稳定运行；适配后，化学吸收工艺的 VOC 处理达标率从 82.4% 提升至 96.0%，提升幅度达 13.6%，表明装备与化学吸收工艺的适配性良好，可显著提升整体 VOC 处理效果。

2.4 与传统尾气收集装备的对比结果

两种装备的对比结果表明，与传统尾气收集装备相比，本文研发的专用装备具有以下优势：（1）收集

效率提升 13.6%，可实现 VOC 尾气的高效捕集；（2）泄漏量降低 75% 以上，密封性显著优于传统装备；（3）连续运行无故障，运行稳定性提升，故障发生率从 8.5% 降至 0；（4）能耗降低 25% 以上，因优化了结构与运行参数，大幅降低了动力消耗；（5）与化学吸收工艺的适配性更好，可显著提升整体 VOC 处理达标率^[5]。综上，本文研发的专用尾气收集装备制造集成技术具有显著的优越性，更适合石化 VOC 化学吸收工艺的应用需求。

2.5 集成技术优化难点与解决措施

装备制造集成过程中遇到的核心难点及解决措施：

（1）组件装配精度不足，导致密封性下降，通过采用激光定位技术，优化装配流程，将装配偏差控制在 ± 0.3 mm 以内，解决了精度不足的问题；（2）密封结构易老化，导致长期运行泄漏量增加，通过选用耐老化氟橡胶密封件与高温密封胶，优化双重密封结构，延长了密封件的使用寿命；（3）装备与化学吸收装置的协同性差，通过优化连接管道结构，调整尾气输送参数，实现了两者的精准适配。

3 结论

本文围绕石化 VOC 化学吸收工艺专用尾气收集装备制造集成技术，开展结构设计、工艺优化、集成装配及性能验证研究，建立了成熟的集成技术方案。结论如下：专用装备采用模块化设计与 316L 不锈钢-聚四氟乙烯复合材质，经精密加工与双重密封装配，最优参数为吸气口风速 1.8 m/s、收集罩覆盖率 95%、密封间隙 ≤ 0.5 mm，此时平均收集效率 98.9%、泄漏量 ≤ 0.02 m³/h，连续运行 72 h 无故障，VOC 处理达标率提升 13.6%，相比传统装备优势显著，可解决其核心弊端。

参考文献：

- [1] 陆芸,方方.化工企业挥发性有机物泄漏检测及修复(LDAR)技术的研究及应用[J].大众标准化,2024(24):153-155.
- [2] 张姝婉.苯类罐区油气回收技术应用性的研究[J].当代化工,2022,51(09):2260-2263.
- [3] 梁聚龙,张万尧,王仕君,等.抗冲聚丙烯生产控制及VOC脱除技术研究[J].化工设计通讯,2020,46(05):62-63.
- [4] 曹培嵩.石化企业油罐VOC排放的安全探析[J].当代化工研究,2019(01):39-40.
- [5] 孙友敏,赵继峰,闫怀忠,等.石化企业周边采暖季大气VOCs污染特征及化学反应活性[J].环境化学,2020,39(09):2358-2370.