

沸石转轮-催化燃烧工艺在港机行业废气治理中的工程应用

宋莹¹, 曹伟², 张蓓³

(1.瑞清环境研究院(江苏)有限公司,南京 210093;2.南京大学环境规划设计研究院集团股份公司,南京 210093;

3.南大恩洁优环境技术(江苏)股份公司郎溪分公司,南京 210093)

摘要:为解决港机行业喷漆废气大风量、低浓度挥发性有机化合物(VOC)的治理难题,本文以某港机工厂新建喷漆厂房工程为例,该案例应用沸石转轮浓缩-催化燃烧联合工艺,实现了废气治理设施的高效净化与稳定运行,兼具显著的环境效益与经济效益。本研究验证了沸石转轮-催化燃烧工艺在港机行业废气治理中的可行性,为同类大风量低浓度VOC高效处理提供了工程参考。

关键词:沸石转轮;催化燃烧;VOC;废气治理;港机行业

中图分类号:TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2026)03-0052-05

Engineering Application of Zeolite Rotor-Catalytic Combustion Process in Exhaust Gas Treatment in the Port Machinery Industry

SONG Ying¹, CAO Wei², ZHANG Bei³

(1.Ruiqing Environmental Research Institute (Jiangsu) Co., Ltd., Nanjing 210093, China;

2.Academy of Environment planning & design, Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3.NJU Enjieyou Environmental Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Langxi Branch, Nanjing 210093, China)

Abstract: To address the challenge of treating high-volume, low-concentration volatile organic compounds (VOC) in the port machinery industry's spray painting exhaust, this paper uses a newly constructed spray painting facility at a port machinery factory as an engineering case study. It designs and applies a combined process of zeolite rotor concentration followed by direct catalytic combustion, achieving efficient purification and stable operation of exhaust gas treatment while delivering significant environmental and economic benefits. This study validated the feasibility of the zeolite rotor-catalytic combustion process in exhaust gas treatment for the port machinery industry, providing an engineering reference for similar high-volume, low-concentration VOC treatment applications.

Key words: zeolite rotor; catalytic combustion; VOC; exhaust gas treatment; port machinery industry

0 引言

喷漆行业作为制造业的重要组成部分,其生产过程中不可避免地会产生大量挥发性有机化合物(VOC),这些物质不仅对环境造成污染,还对人体健

康构成威胁^[1]。根据 DB 32/4147—2021 和 DB 32/4439—2022 等地方标准要求,喷漆企业必须对排放的 VOC 进行严格控制,以达到环保要求,其中苯、苯系物、非甲烷总烃、TVOC 的排放限值分别为 0.5、20、50、80 mg/m³。

然而,传统的废气处理技术如活性炭吸附、RTO(蓄热氧化器)和生物法等,在处理大风量、低浓度(小于 300 mg/m³)的喷漆废气时面临诸多挑战^[2]:活性炭吸

收稿日期:2025-09-08

作者简介:宋莹(1979—),女,硕士,工程师,主要从事废气治理和工程技术方向的研究工作。E-mail:ysong@njuae.cn.

附法需要频繁更换活性炭^[3],不仅成本高,而且处理效率随着时间降低,难以持续稳定运行;RTO 设备虽然能高效处理 VOC,但其能耗巨大,运行成本高昂^[4];生物法虽然运行成本较低,但其处理效率受环境因素影响(温度、湿度等)较大^[5],不稳定因素多,难以满足严格的环保要求。

针对上述问题,沸石转轮浓缩+催化燃烧技术提供了一种高效、节能且安全的解决方案,该技术利用沸石的吸附特性,将低浓度 VOC 废气浓缩成高浓度废气^[6],再通过催化燃烧进行无害化处理^[7]。与传统技术相比,沸石转轮浓缩技术具有能耗低、运行稳定、维护简单等优点,特别适合处理大风量、低浓度的喷漆废气^[8];催化燃烧技术则因其燃烧温度相对较低,能耗少,且产生的热量可回收利用,进一步降低了运行成本,大幅提高能源利用效率^[9]。本文以某港机工程喷漆厂房的实际项目为例,详细阐述了沸石转轮-催化燃烧工艺的设计、应用与运行效果。沸石转轮浓缩系统与催化燃烧装置相结合,不仅有效解决了喷漆废气处理的难题,还实现了废气排放的达标,为企业带来了显著的经济和环境效益。通过这一方案,喷漆行业能够有效应对环保政策的要求,同时降低运营成本,实现可持续发展。

1 工程概况与废气特征

某工厂是一家大型的港口机械设计、制造、安装、改造和维修的现代化工厂,拟在工厂内新建喷漆厂房,并对生产或储存过程中产生的废气进行处理,使其排放达到工艺设计要求。该车间的尺寸和功能设计需要充分考虑生产需求和环保要求,以确保在提供高效生产的同时,最大限度地减少对环境的影响。

新建的喷漆厂房,其主要功能包括实施喷漆、流平和调漆等工艺流程,这些流程是船舶和重型机械制造中不可或缺的部分,也是喷漆废气的主要来源。喷漆过程主要是指在金属表面上喷涂油漆,以提供美观和保护作用。喷涂过程中,油漆和稀释溶剂的挥发产生大量有机废气;流平使油漆表面平滑无瑕,提高油漆均匀性,调漆则是根据特定需求调配出所需的油漆颜色和性能,流平和调漆过程也会产生少量的 VOC 废气。

经实地检测,该喷漆厂房废气组分主要有 TVOC、二甲苯、乙苯、均三甲苯等苯系物,以及乙酸乙酯、乙酸丁酯、丁醇、乙醇、丙二醇甲醚醋酸酯等挥发性有机化合物。喷漆车间的废气总风量为 200 000 m³/h,各车间废气风量和浓度如表 1 所列。

由表 1 可以看出,该喷漆厂房的两套喷涂系统有机废气风量均为 100 000 m³/h,进口 VOC 浓度最大值分别为 64.34 mg/m³ 和 150.12 mg/m³。

表 1 喷漆厂房废气风量和浓度信息

车间名称	废气风量/(m ³ ·h ⁻¹)	污染物	废气浓度/(mg·m ⁻³)
喷漆间 1	100 000	二甲苯	10.81
		苯系物	14.63
		非甲烷总烃	49.71
		TVOC	64.34
喷漆间 2	100 000	二甲苯	25.22
		苯系物	34.14
		非甲烷总烃	115.99
		TVOC	150.12

2 废气治理工艺设计

本项目由于喷漆废气风量大、浓度低,且污染物种类复杂,不适合采用回收工艺。因此,在工艺设计过程中考虑采用吸附法、燃烧法或者联合工艺。

在当前环保法规和技术的推动下,VOC 的污染防控技术日益精进,已成为工业排放控制的重要环节。传统的活性炭吸附技术由于对小分子 VOC 的吸附效率低,已逐渐被淘汰;相比之下,RTO(Regenerative Thermal Oxidizer,再生热氧化装置)^[10]、RCO(Regenerative Catalytic Oxidizer,再生催化氧化装置)^[11]等技术,虽然热回收效率较高,但其投资和运行成本相对较高,且启动时间较长,适用于连续生产的工况,不适用于本项目。因此,出于对经济、高效、环保的考量,本项目设计了新的工艺路线:四级干式过滤+沸石转轮+直接催化燃烧联合工艺。

该工艺路线如图 1 所示,设计基于以下考虑:四级干式过滤器作为预处理设备,能有效去除废气中的漆雾颗粒和粉尘,确保进入沸石转轮的废气清洁,从而延长转轮的使用寿命并提高其效率。

沸石转轮技术利用沸石的吸附特性来净化废气,它分为 3 个主要区域:吸附单元、脱附单元和冷却单元,预处理后的废气首先进入吸附单元,其中沸石分子筛吸附废气中的污染物^[12];随后,转轮转动到脱附单元,在高温下废气中的有机污染物被脱附并浓缩至较高浓度^[13],这一过程可以根据实际工况调节废气浓缩倍数,提高整体工艺的处理净化效率。

针对本项目的废气工况,可达到不低于 90%的净化效率。

直接催化燃烧是处理浓缩废气的有效方法,在催化燃烧过程中,废气在贵金属催化剂的作用下充分燃烧^[14],将有机污染物分解为 CO₂ 和 H₂O,实现废气的无害化处理,这一过程不仅有效去除了污染物,而且产生的热量可以回收利用,进一步提高系统的能效和环保性能。

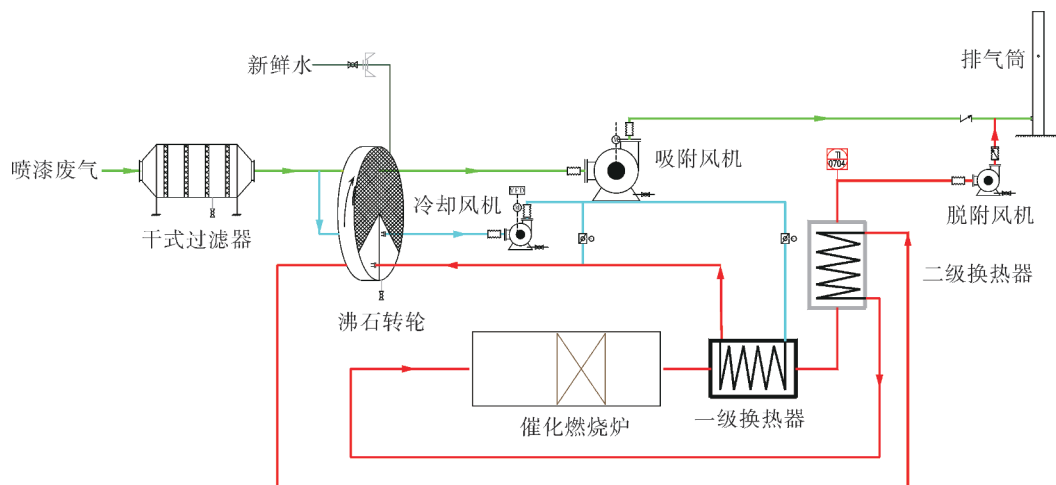


图1 工艺流程

核心工艺流程如下：废气首先通过底部侧抽风和顶部回风循环系统被收集，然后通过四级干式过滤器，逐级去除固体颗粒、漆雾和杂质，确保后续设备稳定运行；接着进入沸石转轮的吸附区进行吸附净化，达标尾气经烟囱排放；当沸石转轮吸附区饱和后，转轮转动进入脱附区，在此区域通过180~220℃的热风进行脱附，将吸附的VOC释放，随后浓缩后的废气通过换热后进入催化燃烧炉进行处理，在300~400℃下催化氧化分解为CO₂和H₂O，净化效率不低于95%；最终，催化燃烧后的洁净气体与吸附区尾气汇总，通过25m高烟囱稳定达标排放。此过程中，转轮的冷却余热回收利用是关键，通过引入小股废气对脱附区进行降温，不仅降低了能耗，还提高了系统的整体效率。

在安全设计方面，本项目特别设计了浓度监控与联锁、阻火防爆、系统联锁等多项安全措施。一是在沸石转轮脱附气和CO入口设置VOC浓度检测仪(LEL监测)，一旦检测到的浓度超过25%LEL，系统将自动开启新风稀释阀，以防范潜在的安全风险；二是在关键管道设置阻火器，CO炉设置泄爆片，以及风机和仪表的防爆设计，都是确保系统安全运行的重要措施。

综上所述，通过科学合理的工艺路线选择和严格的安全设计，本工艺不仅有效控制了VOC排放，还实现了经济和环境的三重效益。

3 废气处理系统及主要构筑物

3.1 干式过滤器

为防止被处理气体中的颗粒物、漆雾粉尘等杂质经由循环风机重新进入车间或者进入沸石转轮系统而影响吸附效率及使用寿命，需要在喷漆室地面沟槽以及喷漆室顶回风处进行漆雾过滤。废气进入沸石转轮前设置四级干式过滤，以确保吸附处理系统的气源洁净度；过滤器前后端设置压差表，用于监测滤材前后压

力差，当压力差超过一定值时，说明滤材堵塞严重，此时需对滤材进行更换。

3.2 沸石转轮

经除尘后的废气进入沸石转轮浓缩装置，沸石转轮浓缩装置主要由吸附转轮、配套的电动驱动设备以及配套脱附加热设备等组成，主要目的是将含VOC浓度较低的废气吸附浓缩成较高浓度的废气。

沸石转轮示意如图2所示，转轮被隔离成3个区域：吸附处理区、再生脱附区、冷却区，当废气进入沸石转轮后即被输入面积最大的吸附处理区，废气中的VOC在此被吸附，净化后的气体通过通风管与催化燃烧尾气混合后进入烟囱排放^[5]；随着驱动电机带动转轮的转动，吸附VOC的转轮被带入解吸区，来自一级换热器的解吸气体(热废气)被导入这一区域，转轮吸附的VOC随着通过的解吸气体被一起解吸出来，并使转轮材料得以再生，解吸气体离开转轮后，被送往二级换热器将温度进一步提升后被送往催化燃烧炉体内处理；随着转轮的继续转动，解吸后的转轮被带入冷却区，转轮入口的废气引一小股进入冷却区对解吸后的转轮进行冷却降温，冷却后的废气进入一级换热器换热后作为解吸气体导入转轮，冷却后的沸石转轮再次进入吸附区，形成一个周期。

沸石转轮基体为蜂窝陶瓷，具有较好的机械强度与结构稳定性，转轮的使用寿命也较长，通常认为沸石转轮的正常使用寿命为5~10年，具体时间取决于使用工况及前端废气的具体组分。

3.3 换热器

换热器通过换热加热沸石转轮脱附废气，将脱附废气温度抬升至起燃温度，然后进入催化燃烧炉体内进行催化燃烧反应，由于脱附后的废气浓度很高，高浓度有机废气进入催化燃烧炉体后，经过氧化反应提供

了大量热源,减少催化燃烧系统天然气的消耗^[6]。为提高进入催化燃烧炉体内的脱附废气温度至起燃温度,对燃烧后的废气热量进行充分利用,通过特殊结构设计提高气流扰动来提高换热效率。

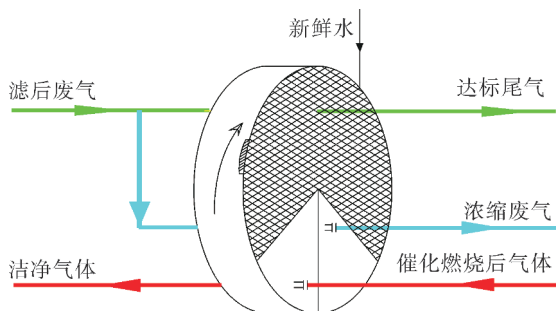


图2 沸石转轮示意

3.4 催化燃烧系统

催化燃烧系统(CO)冷机启动时间较长、运行周期长、能耗较高一直是业内普遍问题。本项目催化燃烧系统区别于传统电机热启动,配置用燃烧机头,利用天然气启动,冷机启动程序采用特有程序,有效缩短开机准备时间及冷启时的电耗,迅速进入生产状态。

为提高高浓废气在催化床层上的净化效率,本装置中选用的催化剂为处理各种不同类型有机废气的高效广谱型催化剂,催化剂蜂窝陶瓷做载体、内浸渍贵金属铂和钯,具有高活性、高净化效率、耐高温及长使用寿命等特点^[7]。另外,催化剂特有的填充方式及设计填充量,可有效避免废气短流、催化燃烧不充分而造成的废气排放不达标、大分子污染因子因催化燃烧不彻底而产生的异味等问题。

4 工程应用效果与分析

4.1 运行情况

处理工艺净化效率估算如表2所列。经检测,非甲烷总烃、二甲苯、苯系物、总挥发性有机化合物(TVOC)以及颗粒物的进口平均浓度分别为82.85、18.02、24.39、107.22和39.22 mg/m³,而出口平均浓度则大幅降低,去除效率均达到95%以上,远低于排放标准,确保了排放的环保合规性,在净化效率与排放水平方面,该工艺能够显著降低废气中的污染物含量。

4.2 投资和能耗分析

从运行经济性分析来看,该系统的总投资约为1150万元,年运行费用约为271.6万元,相较于传统的活性炭吸附方案,本工艺节省运行费用约130万元/a。此外,沸石方案相较于活性炭方案,在危废减量方面也有显著优势,沸石更换周期为5~10年,而活性炭仅为数月,因此危废产生量减少约86%。综上所述,采用

沸石分子筛转轮吸附浓缩与催化燃烧RTO相结合的系统,不仅能够有效提高净化效率,确保排放水平达标,还能从经济性和环保角度实现双重优势。该工艺在工业废气处理领域具有广泛的应用前景,是实现工业生产与环境保护协调发展的有效途径。

表2 处理工艺净化效率估算

车间名称	污染物	废气浓度/(mg·m ⁻³)	排放浓度/(mg·m ⁻³)
喷漆间1	二甲苯	10.81	0.90
	苯系物	14.63	1.22
	非甲烷总烃	49.71	4.14
	TVOC	64.34	5.36
喷漆间2	二甲苯	25.22	
	苯系物	34.14	
	非甲烷总烃	115.99	
	TVOC	150.12	

5 结语

在现代工业生产中,废气处理是一个重要环节,它直接关系到环境保护和企业的可持续发展。在涂装废气处理领域,传统的简单燃烧法由于其效率低下和可能产生的二次污染问题,已逐渐被淘汰。相比之下,沸石转轮-催化燃烧组合工艺以其高效、环保的特点,成为一种更为理想的处理方案。该技术通过沸石转轮的选择性吸附和浓缩,大幅提高了废气中有机化合物的浓度,再通过催化燃烧的方式,实现了废气的深度氧化分解,转化效率可达90%以上。这一过程不仅有效减少了废气排放,而且通过热量的回收与再利用,实现了能源的高效使用。在实际应用中,针对某港机重工喷漆车间的大风量(100 000 m³/h)、低浓度(VOC<150 mg/m³)废气特性,设计的“四级干式过滤+沸石转轮浓缩+催化燃烧(CO)”组合工艺,运行稳定,VOC综合去除效率达95.2%,各污染物排放浓度均满足DB 32/4439—2022《工业涂装工序大气污染物排放标准》要求。

这一成果的取得,得益于该工艺在处理大风量低浓度废气方面的核心优势,有效解决了传统活性炭吸附工艺高能耗和高成本的问题,年运行费用降低约35%,危废产生量显著减少约86%,显示出良好的经济效益和环境效益。此外,完善的安全设计,包括浓度监控联锁、阻火防爆、系统联锁等,是保障系统长期稳定运行的关键。通过实际工程的安全运行实践,为类似项目提供了宝贵的经验。

值得注意的是,沸石转轮-催化燃烧组合工艺不仅适用于某港机重工,其在大型装备制造行业,如工程

机械、钢结构等产生大风量低浓度喷漆废气的行业,也具有广阔的推广应用前景。

综上所述,沸石转轮-催化燃烧组合工艺以其高效、环保、节能的特点,在涂装废气处理领域展现出巨大的潜力和优势。通过不断的技术创新和优化,该工艺有望成为未来废气处理的主流技术,为实现工业生产的绿色升级和可持续发展提供强有力的支持。

参考文献:

- [1] 姚智.石化企业储运过程 VOCs 回收装置运行情况及技术改造[J].炼油技术与工程,2022,52(12):45-48.
- [2] 韦征.沸石转轮-催化氧化 VOCs 治理装置在包装印刷行业中的应用[J].上海化工,2019,44(9):22-26.
- [3] 马军,何旭.真空紫外光催化氧化去除空气中挥发性有机污染物的方法:CN111569642B[P].2025-08-20.
- [4] 胡岚,卞程,赵秋月,等.沸石转轮浓缩+RTO 树脂行业 VOCs 治理应用实例[J].广州化工,2025,53(2):129-131.
- [5] 冷星月,胡彩虹,王炜月,等.低浓度挥发性有机物吸附浓缩材料的研究进展[J].化工进展,2020,39(2):336-345.
- [6] 马红妍.沸石转轮+RTO 蓄热焚烧工艺治理涂装工业 VOCs 废气研究[J].皮革制作与环保科技,2022,3(13):124-126.
- [7] 栾志强,郝郑平,王喜芹.工业固定源 VOCs 治理技术分析评估[J].环境科学,2011,32(12):3476-3486.
- [8] 孟滔滔,周建国,詹建新,等.涂装车间喷漆室环保设备及其过滤材料优化使用简介[J].现代涂料与涂装,2019,22(2):47-49.

- [9] 潘浩鹏.沸石转轮+催化燃烧工艺在电子行业有机废气治理中的应用研究[J].中国资源综合利用,2024,42(10):73-75.
- [10] PARK M, JUNG M, LEE H, et al.Implementation of an improved 100 CMM regenerative thermal oxidizer to reduce VOCs gas[J].Processes,2024,12(12):2814-2814.
- [11] UKRIT C, PABLO M, FERNANDEZ C, et al.Assessment of an integrated adsorption-regenerative catalytic oxidation process for the harnessing of lean methane emissions[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2022,10(1):107013.
- [12] YANG J, CHEN Y, CAO L, et al.Development and field-scale optimization of a honeycomb zeolite rotor concentrator/recuperative oxidizer for the abatement of volatile organic carbons from semiconductor industry.[J].Environmental Science & Technology,2012,46(1):441-446.
- [13] 丁映春.沸石浓缩转轮系统在喷漆室废气治理中的应用[J].现代涂料与涂装,2015,18(8):70-72.
- [14] LI Z, MA C, QI M, et al.CeO₂ from pyrolysis of MOFs for efficient catalytic combustion of VOCs [J].Molecular Catalysis, 2023,535(15):112857
- [15] 沈斯易.沸石转筒+CO 技术在 VOCs 废气处理中的应用[J].设备管理与维修,2025(10):178-182.
- [16] 彭秀良.喷漆有机废气净化处理工艺方法应用研究[J].产品可靠性报告,2024(12):79-81.
- [17] 张艳艳.基于“沸石转轮浓缩+催化燃烧”技术联合的涂装喷漆有机废气处理研究[J].当代化工研究,2024(9):73-75.

(上接第 47 页)

3 结语

本文结合我公司轻客涂装车间出现的御风轻客车型左前车门靠轮罩弧度位置包边 PVC 焊缝密封胶宽胶条开裂问题,重点分析了作业人员、材料性能、输送及烘干设备和焊接钣金结构等方面因素,发现焊装工程左前车门外板结构胶涂抹长度短,结构胶缺失导致该处钣金强度不足,该处钣金在面漆烘烤冷却过程中释放应力大于焊缝密封胶的拉伸强度导致胶条撕裂为此问题的根本原因,有效消除了此问题,降低了返工成本,提高了生产效率。

参考文献:

- [1] 于虎,杨士勇,孟惠,等.车体涂装用 PVC 焊缝密封胶的研究及应用进展[J].中国胶粘剂,2024(5):19-24.
- [2] 章新国,邓烈雄,廖章龙,等.浅谈车身顶盖焊缝密封胶开裂问题的分析和解决[J].时代汽车,2021(12):140-141.

- [3] 程为华,朱国强,王义花,等.汽车涂装常用密封材料应用及缺陷防治[J].现代涂料与涂装,2015(11):8-10.
- [4] 张亚刚.车身焊缝密封胶施工工艺及常见弊病[J].现代涂料与涂装,2014(7):57-58.
- [5] 吴为,刘海军,张冬冬,等.车顶焊缝密封胶开裂问题分析与解决[J].现代涂料与涂装,2023(7):47-49.
- [6] 昂胜豪,赵雪萍,郭瑜.浅谈 PVC 焊缝胶起泡、开裂分析及其控制方法[J].汽车实用技术,2018(8):168-170.
- [7] 王帆,曹丽芳.涂装车间 PVC 胶泡问题解决[J].现代涂料与涂装,2024(9):56-58.
- [8] 赵晓峰.汽车 PVC 密封胶胶泡发生原因分析及优化方法[J].现代涂料与涂装,2023(10):65-67.
- [9] 高建军.涂装密封胶胶泡的产生与改善[J].现代涂料与涂装,2023(7):56-58.
- [10] 王官府,邸鹏伟,谷长志,等.PVC 焊缝密封胶开裂问题分析及对策[J].涂料工业,2015(11):77-80.