

油漆调漆间送排风系统设计方案优化及应用

卜荣飞, 钱路燕, 艾 婷

(中国联合工程有限公司, 杭州 310051)

摘要: 随着全球环保法规的日趋严格以及能源成本的持续攀升, 涂装工程领域的节能减排已成为行业发展的核心议题。油漆调漆间作为涂装生产线的关键环节, 其送排风系统的高能耗与低效问题亟待解决。本文从大型集装箱喷漆线设计优化出发, 探讨油漆调漆间送排风系统的节能减排方案及其实际应用。通过分析调漆间的工作特点和能耗现状, 提出针对性的送排风系统优化措施。同时, 结合实际应用案例, 评估方案的实施效果。结果表明, 该方案年节约电费约 5 万元, 天然气耗量减少 9 500 m³, 活性炭使用寿命延长 2 倍, 同时 VOC 去除率稳定在 98% 以上, 为涂装工程的节能减排提供新的思路和技术支持, 推动行业的可持续发展。

关键词: 涂装工程; 调漆间; 送排风系统; 节能减排; 沸石转轮+RTO

中图分类号: TQ639

文献标志码: A

文章编号: 1007-9548(2026)02-0043-04

Optimization and Application of Air Supply and Exhaust System Design for Paint Mixing Room

BU Rong-fei, QIAN Lu-yan, AI Ting

(China United Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: With the increasingly stringent global environmental regulations and rising energy costs, energy saving and emission reduction in the field of coating engineering has become a core issue in the development of the industry. As a key link in the coating production line, the high energy consumption and inefficiency of the air supply and exhaust system of the paint mixing room need to be solved. This paper discusses the energy saving and emission reduction of the air supply and exhaust system of the paint mixing room and its practical application from the design optimization of the large container spraying line. By analyzing the working characteristics and energy consumption of the paint mixing room, it proposes targeted optimization measures for the air supply and exhaust system. At the same time, the implementation effect of the program is evaluated with practical application cases. The result show that the program saves about 50 000 yuan of electricity costs annually, reduces natural gas consumption by 9 500 m³, extends the service life of activated carbon by two times, and at the same time, the removal rate of VOC is stable at more than 98%. It provides new ideas and technical support for energy saving and emission reduction in coating engineering and promotes the sustainable development of the industry.

Key words: painting project; paint mixing room; air supply and exhaust system; energy saving and emission reduction; zeolite rotor+RTO

收稿日期: 2025-04-29

作者简介: 卜荣飞(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事涂装工艺、涂装设备研究等相关工作。E-mail: burf@chinacuc.com。

0 引言

涂装工程作为制造业的重要环节, 其生产过程涉及大量挥发性有机化合物(VOC)的排放与能源消耗, 加之近年来我国《大气污染防治法》及《重点行业挥发性有机物综合治理方案》等政策的出台, 涂装工程中的

节能减排已成为行业发展的必然趋势。油漆调漆间作为涂装工艺中 VOC 的主要释放源之一,其送排风系统的设计直接关系到生产环境的安全性、能源利用效率及环保合规性。如何优化调漆间的送排风系统,减少能耗损失,对节能减排技术具有重要的现实意义。

本文以某大型集装箱涂装车间为研究对象,针对调漆间送排风系统存在的能耗高、废气处理效率波动大等问题,提出了一套油漆调漆间送排风系统的节能减排优化方案。同时,结合实际应用案例,系统评估了该方案的技术可行性与经济效益,为涂装工程的节能减排提供新的思路和技术支持,推动行业的可持续发展。

1 油漆调漆间送排风系统概述

1.1 调漆间的功能与工艺特点

油漆调漆间是涂装生产线中用于油漆调配、储存和临时中转的重要区域。其作业环境对送风温度、相对湿度及洁净度均有较高要求,通常需将送风温度维持在 20~25℃,相对湿度在 60%以下,洁净度为粒径大于 5 μm 的灰尘去除率 95%以上。加之油漆中含有挥发性有机化合物(VOC),调漆间需要配备高效的送排风系统将其及时排出,以保证室内空气质量和操作人员的安全健康。

1.2 调漆间送排风系统的组成与运行模式

典型的调漆间送排风系统由送风机组、排风机组、风管系统、过滤装置、废气处理系统和控制系统等组成。送风机组由新风过滤段、加热段(燃气或电加热)、风机等组成,负责向室内输送洁净空气。排风机组包括排风管道、废气处理装置(如活性炭吸附塔、沸石转轮等)及排放烟囱。控制系统主要通过 PLC 或 DCS 实现送排风量的动态调节与设备联动。

目前,大多数调漆间采用全新风系统,即全部采用室外新鲜空气,经处理后送入室内,再将室内污染空气经过活性炭吸附法废气处理后全部排出。这种方式虽然能有效控制室内空气质量,但仍存在以下问题:1)能耗较高,新风需加热至设定温度,尤其在冬季能耗剧增;2)废气处理效率低,活性炭吸附易受湿度影响,且需频繁更换增加运营成本;3)排风中的余热未回收,造成能源二次损失。

2 调漆间送排风系统优化设计方案

针对上述问题,提出 3 点优化设计要求:1)节能减排:通过多种废气处理技术集成,降低能耗;2)智能化控制:引入变频调速与远程监控系统,实现动态调节;3)模块化设计:确保系统在不同生产工况下灵活切换。

在设计要求的指导下,本文以大型集装箱喷漆线的调漆间送排风系统为研究对象,提出调漆间送排风优化设计方案,以达到节能减排效果。方案的核心是将

调漆间送排风与喷漆室的送排风联动,在涂装线生产时送排风系统与喷漆室的送排风系统连接,涂装线非生产时则采用独立的送风机组和单独活性炭净化装置处理,具体方案如下。

2.1 大型集装箱喷漆室的送排风系统及废气处理装置介绍

大型集装箱喷漆室采用上送下排干式喷漆室结构,其核心设计以工艺需求为导向,通过科学的空气动力学布局实现高效作业环境控制。送风系统配置风量为 180 000 m³/h 的超大处理量离心风机,新风处理单元集成两级过滤系统:首道 G3 初效过滤网拦截大颗粒物,第二级 F5 中效袋式过滤器捕集细微粉尘,整体过滤效率达到 98%以上。温控系统采用燃气直燃式热风机组,配备比例调节燃烧器,可实现±1℃精密温控,确保冬季作业温度维持在 18~25℃恒温区间,有效地保证了喷漆室内的作业温度和洁净度,特别适合大件的喷漆作业。排放废气通过漆雾过滤箱以及多道初中校过滤后,采用“沸石转轮+RTO”方式处理。废气排放净化系统采用“吸附+燃烧”的处理工艺。吸附工艺采用的是“漆雾过滤箱+四级干式过滤器+沸石转轮”的组合工艺。第一级在喷漆室室体下部采用可更换蜂窝纸漆雾过滤箱搭配 G4 袋式过滤器,漆雾收集效率≥98%。第二级沸石转轮的预处理配置 F5、F7 和 F9 级袋式过滤器,捕集细微粉尘,袋式过滤箱内配备压差计,当袋式过滤器达到更换条件,系统控制提前发出报警提示更换。核心净化单元采用直径 4.25 m 的沸石转轮,其蜂窝状基材表面负载高性能疏水性沸石分子筛,在 80℃脱附温度下可实现 VOC 浓缩比达 20:1,沸石转轮处理效率≥90%。在此过程不但能够连续去除喷漆废气中的有机物,还提高了废气中各成分的浓度,使得有机物的成分急剧上升,进一步促进浓缩废气的燃烧氧化分解能力。配套的蓄热式热氧化炉(RTO)采用三室结构设计,按照 HJ 2027—2013《催化燃烧法工艺有机废气治理工程技术规范》配备陶瓷蓄热体,维持 800℃高温环境,在此温度下沸石转轮脱附出来的高浓度气体被氧化分解为 CO₂ 和 H₂O,实现喷漆有机废气净化,并将分解释放出来的热量贮存至陶瓷蓄热体内,去预热新进入的有机废气,进行多次循环,使得 VOC 净化效率达到 98%以上。废气排放浓度及速率满足 GB 16297《大气污染物综合排放标准》和 DB 37 2801.1—2016《挥发性有机物排放标准 第 1 部分 汽车制造业》要求,VOC 排放浓度≤30 mg/m³,排放速率≤3 kg/h,排气筒高度≥15 m 且高于周围建筑物 5 m。沸石转轮吸附及 RTO 脱附电控系统 PLC 控制,PLC 控制系统实现对沸石转轮及 RTO 焚烧炉、燃烧器燃气

压力高低、烟气出口风门控制、天然气切断阀、风机、炉内温度、压力、紧急排放阀、风向切换阀信号连锁控制等，并对重要运行参数集中监测或控制。沸石转轮+RTO 的吸附风机、脱附风机均采用变频控制。

2.2 调漆间送排风系统初步设计方案

调漆间作为涂装车间的重要功能区域，其工艺布置与废气治理系统需遵循安全高效、环保达标的原则。根据 GB 6514—2008《涂装作业安全规程》要求，将调漆间布置在沸石转轮浓缩装置与 RTO 设备半径 15 m 范围内，形成有机废气治理工艺链的紧凑布局。

调漆间单独设置 1 台空调送风机组。采用全新风空调系统供风，换气次数 10 次/h，通过精确计算溶剂挥发速率与空间体积，确定总送排风量为 5 000 m³/h。空调机组仅考虑冬季热水加热，冬季 ≥20 ℃，确保调漆间维持微正压状态并符合工艺温度要求。空调机组采用组合式空调机组，主要由新风风段、初效过滤(G4)、加热段、风机段、均流段、中效段(F6)、送风段及适当数量的中间段组成，其中加热段内板采用 1.2 mm SUS304 不锈钢板，其余段采用镀锌板，各过滤段设置有压差计检测压差变化。在新风段配置电动风阀，在出风段配置手动调节风阀和防火阀。

排风系统配置双级活性炭吸附装置，两级吸附效率分别达到 65% 和 85%，总去除率可达 70%。处理后的排风通过风管与喷漆室废气汇流，经废气烟囱排放，排风口设置 VOC 在线监测系统，处理后废气浓度低于 30 mg/m³ 的排放标准。该排放系统需建立周期性维护制度，包括每月更换过滤棉、每季度检测活性炭吸附效

率、每年进行风量平衡测试等管理措施，增加了运营成本且 VOC 的去除率并不理想，于是本文提出了更节能减排的优化设计方案。

2.3 调漆间送排风系统优化设计方案

在初步设计方案的基础上，本系统创新性引入双模式动态切换机制，实现调漆间送排风系统的高效运行与能耗优化。该方案严格遵循 HJ 1163—2021《涂装行业挥发性有机物治理工程技术规范》及 GB 50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》，构建了适应生产节拍的智能化废气治理体系。

在设备生产期间，调漆间与喷漆室形成联动系统。调漆间送风可通过喷漆室送风机组统一供气，新风经初效过滤 G3 拦截大颗粒物，第二级 F5 中效袋式过滤器捕集细微粉尘，由喷漆室送风主管道分支接入调漆间，送风量动态调节范围为 2 000~3 000 m³/h，温度控制在 20 ℃左右。调漆间排风则是切换成经过“沸石转轮+RTO”处理后高空排风，与喷漆室共用一套排废气系统。此模式下，VOC 的去除率能达到 98% 以上，并且能充分利用 RTO 余热回收装置(热效率 ≥85%)，将燃烧尾气热量用于预热新风，较独立运行模式节能 35% 以上。

在非生产期间，即调漆间独立运行的工况，调漆间由独立配套的送风机组和两级活性炭净化装置送排风。此方案可以减少设备生产期间的能量消耗，同时大大提高了活性炭的使用寿命。送排风通过 PLC 控制气动开关阀自动切换，可以实现生产线关机联动，操作方便，同时系统具备远程监控和故障诊断功能，便于维护和管理。优化方案具体流程见图 1。

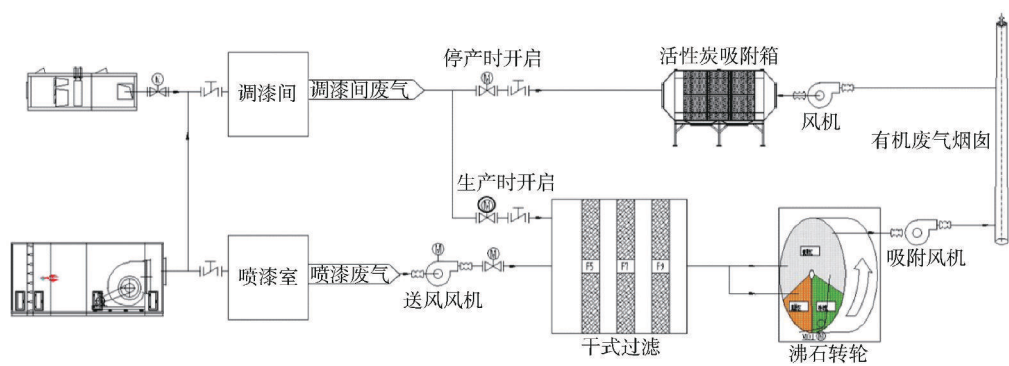


图 1 调漆间送排风系统优化流程

由图 1 可以看到，在生产期间，调漆间的风道路径如下：喷漆室送风机组→调漆间→三级干式过滤→沸石转轮→RTO 催化燃烧→烟囱排放；非生产期间：调漆间独立送风机组→调漆间→两级活性炭吸附→烟囱排放。

3 方案应用与效果评估

为验证该调漆间送排风系统优化设计方案的可行性及节能减排的实际效果，本研究在某大型集装箱制造厂的涂装车间进行了应用实践。该集装箱制造企业涂装车间年产能为 4.1 万标箱，调漆间面积 80 m²，此

规模的产能水平意味着调漆间的运作效率和能源消耗情况对整个企业的生产成本和环保成效有着重要影响。原调漆间送排风模式下:送排风机组全年无差别运行,全天 24 h 工作,年耗电量约 6.1 万 kW·h,天然气消耗量 14 040 m³,活性炭更换周期为 4 个月。为了准确计算优化系统所能节省的能源,研究人员进行了详细的分析和预测。考虑到企业的实际生产安排,全年工作天数设定 300 d,日工作 16 h 计。调漆间送风风机电机功率为 3 kW,排风风机为 5.5 kW。冬季由于气温较低,需要为调漆间送热风以保证调漆工作的正常进行,冬季送热风天数按 90 d 计,所使用的加热设备额定热量 55 kW。通过对这些基础数据的收集和分析,结合优化方案中对设备运行效率的提升、能源利用方式的改进等因素,能够科学地计算出该优化系统在电能、天然气等能源方面的节省情况,具体数据见表 1。

表 1 调漆间送排风系统经济效益

项目	原系统	优化系统	降幅/%
年电费/万元	8	3	62.5
天然气/m ³	14 040	4 680	67
活性炭成本/万元	1.2	0.4	67

从表 1 数据可以看出,该优化系统在能源节约与环保效益方面呈现出显著成效。年节约电费约 5 万元,节约天然气耗量约 9 500 m³,活性炭使用寿命增加 2 倍。同时沸石转轮浓缩系统中沸石填充为模块化沸石填充,当局部出现故障时,可对局部沸石模块进行更换,在满负荷生产时其使用寿命不低于 10 年,节省了设备维修成本;且有机废气的吸附率更加稳定,去除

率在 98%以上,有利于企业的绿色发展。

4 结语

在全球制造业向绿色低碳转型的背景下,涂装工程作为集装箱制造产业链中能源消耗与污染物排放的关键环节,其调漆间送排风系统的能效优化与环保升级成为行业亟待突破的技术瓶颈。针对传统调漆间存在的高能耗、高排放及运维成本高等问题,本文创新性提出一套融合智能控制、余热回收、高效净化技术于一体的综合设计方案,通过实际应用验证,该优化方案实现了节能减排与经济效益的双重提升,为涂装工程的可持续发展提供了可行的技术路径。

参考文献:

- [1] 郝江华,张政斌,段党全.沸石转轮+RTO 技术在喷漆有机废气处理中的应用研究[J].现代涂料与涂装,2025(3):55-58.
- [2] 曹伟.某工厂涂装车间调漆间的暖通设计分析[J].江西建材,2024(4):143-145.
- [3] 龚淑娟,刘凯冬.涂装车间系统化节能减排的探索与实践[J].汽车制造业,2023(4):39-41.
- [4] 佟志欣.汽车涂装车间调漆间精益生产[J].今日制造与升级,2023(6):38-40.
- [5] 简云久,林帆,郑敏.基于汽车涂装节能减排工艺研究[J].上海涂料,2021(5):47-49.
- [6] 王锡春,吴涛.涂装车间设计手册[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [7] 刘义坤.汽车涂装喷漆室送排风系统节能设计与应用[J].建筑热能通风空调,2017(11):81-83.
- [8] 许成伟.涂装车间喷漆室送排风系统的原理及应用[J].现代涂料与涂装,2014(9):65-68. ◆

(上接第 14 页)的协同屏蔽作用,以及交联结构对应力适应性和化学稳定性的影响机制,为防腐涂料的结构设计提供了理论指导。本研究成果对海洋工程、化工装备等领域的防腐应用具有重要参考价值。建议未来研究可探索多尺度交联网络设计、纳米粒子协同增强等策略,并建立交联结构—性能关联数据库,发展智能配方优化方法,推动高性能防腐涂料技术向更高水平发展。

参考文献:

- [1] 任国瑜,郑文杰,李世英,等.有机硅改性环氧树脂 E-51 涂层的制备及其性能[J].当代化工,2025,54(11):2526-2533.
- [2] 张荻,梅文勇,廖志泓,等.有机硅改性环氧树脂研究进展[J].山东化工,2025,54(21):81-84.
- [3] 张晓玲,程荣波,唐荣芳,等.物流包装用有机硅改性环氧树

- 脂封装胶制备与性能研究[J].粘接,2025,52(5):26-29.
- [4] 张子昂.有机硅改性环氧复合涂层及其摩擦腐蚀性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2025.
- [5] 马勇.改性耐温有机硅涂层的制备与防腐性能研究[J].材料保护,2023,56(11):36-44.
- [6] 王策,梁保权,史宏亮,等.耐高温环氧改性有机硅涂层的制备与性能研究[J].有机硅材料,2023,37(4):1-5.
- [7] 汤汉良,郭逍遥,马晓阳,等.高温烘烤对有机硅改性涂料性能的影响[J].现代涂料与涂装,2022,25(6):24-26.
- [8] 姚昕乐,周春宇,张仲晦,等.改性光固化涂料的研究进展及其应用[J].现代涂料与涂装,2020,23(7):29-31.
- [9] 石家烽,崔灿灿,郭晓军,等.双组分水性环氧涂料制备及性能研究[J].现代涂料与涂装,2019,22(6):12-15. ◆