

沸石转轮+RTO 技术在喷漆有机废气处理中的应用研究

郝江华, 张政斌, 段党全

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

摘要: 为了实现喷漆废气的彻底净化处理, 本文针对蓄热式燃烧技术(RTO)原理、应用环境、系统构成、性能指标及处理效果等内容进行研究, 结合喷漆工艺、废气浓度及喷漆废气污染物种类等因素, 通过沸石转轮+蓄热式燃烧技术(RTO)的喷漆废气处理工艺的实践验证, 表明蓄热式燃烧技术(RTO)在喷漆废气处理中效果优良, 实现净化处理, 达到超低排放要求, 值得应用推广。

关键词: 喷漆; 挥发性有机物; 沸石转轮; RTO

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)03-0055-04

Research on the Application of Zeolite Wheel+RTO Technology in the Treatment of Organic Waste Gas from Spray Painting

HAO Jiang-hua, ZHANG ZHENG-bin, DUAN Dang-quan

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to achieve thorough purification of spray painting exhaust gas, this article focuses on the principle, application environment, system composition, performance indicators, and treatment effects of regenerative combustion technology (RTO). Combining factors such as spray painting process, exhaust gas concentration, and types of spray painting exhaust pollutants, the practical verification of the spray painting exhaust gas treatment process using zeolite wheel and regenerative combustion technology (RTO) shows that RTO has excellent effects in spray painting exhaust gas treatment, achieves purification treatment, and meets ultra-low emission requirements, which is worthy of application and promotion.

Key words: spray paint; VOC; zeolite wheel; RTO

0 引言

为了获得良好的漆层外观及相对稳定的喷漆质量, 航空产品使用的漆料以油性漆为主, 在喷漆过程需要将固化剂、漆料及稀释剂按比例混合, 在漆料调配、喷漆、流平、烘干固化等环节会产生大量挥发性有机物(VOC); 喷漆室中主要有苯系物、芳香烃、醇醚类、酯类等挥发性有机物; 流平阶段主要存在大量的稀释剂挥发; 在烘干固化阶段由于温度高, 伴随着固化剂的挥发, 而且会有一部分稀释剂挥发, 废气成分除包含少

量的醇醚类、苯系物外, 还包含固化过程中的热分解产物, 如醛、酮类小分子, 另外, 喷漆烘干固化废气中还含有封闭异氰酸酯类固化剂经过分解反应后产生的小分子物质, 如甲乙酮肟、乙酸丁酯、乙酸乙酯、环己烷和其他醇醚类混合物、脂类混合物等。在常温常压下喷漆有机挥发物可以形成蒸气有机物, 主要包括苯系物、有机氯化物、有机酮类、醚类及酯类等物质, 具有毒性、致癌性, 能产生光化学烟雾, 是空气污染的主要污染物之一^[1]; 此外, 喷漆过程中产生的废气会掺杂一定的喷料漆渣、颗粒物、漆雾等, 一旦吸入人体会导致肺部受损、皮肤疾病和其他中毒, 后果不堪设想。油性漆的主要挥发性物质如表 1 所列。

党的十八大以来, 党和国家要求我们要坚持“绿水青山就是金山银山”的环保发展理念, 明确指出实现持

收稿日期: 2024-11-05

作者简介: 郝江华(1984—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事绿色表面处理工艺技术研究及环保工艺装备技术应用工作。E-mail: haojianghua6625@163.com。

续发展和环境保护协同共生的新发展道路，坚决打赢蓝天保卫战，将废气治理作为国家发展的大事去办，喷漆有机废气作为大气污染的主要源头，需要在处理效率、处理效果及清洁节能上下功夫。近年来通过不断的探索实践及反复验证，表明“沸石转轮+RTO 技术”完全可以满足喷漆废气的处理要求，实现废弃物的彻底净化处理。

表 1 油性漆的主要挥发性物质

种类	化学物质
酮类	2-丁酮、丙酮、环己酮、2-庚酮、2 戊酮、二异丁基酮、4-甲基-2 戊酮、2-4 戊二酮
酯类	2-甲氧基-1-丙醇乙酸酯、2-甲氧基-1-丙酸乙酯、醋酸丁酯、乙酸-1-甲氧基-2-丙基酯、乙酸丁酯、2 4 6-三(2 甲氧基)甲基苯酯
醇类	丁醇、乙二醇、苯醇、1-甲氧基-2-丙醇
苯类	二甲苯、甲苯
烯类	过氯乙烯
胺类	三乙醇胺
醚类	乙醚
烷类	N-(3-(3 甲氧基)硅基)-1,2-已二烷
其他	松香水(200# 油)、乙基溶剂

1 沸石转轮的吸附过程及运行模式

沸石转轮(也叫分子筛)吸附浓缩装置的吸附材质

为沸石，沸石结构类似于晶体状，分子像搭架子似地连在一起，中间形成很多空腔，这便形成了很多的微孔，具有很强的吸附能力，由于多微孔结构促进了吸附能力，增长了吸附过程的物质同行形程，相比普通的吸附质分子吸附能力会更强，效果更好。

分子筛吸附浓缩沸石转轮分为吸附处理区域、冷却附着区域和脱附再生区域，面积比一般为 10:1:1，在吸附剂的实体上制造出很多密密麻麻的微小通道，废气经过缓慢旋转的沸石转轮时，废气通过沸石的微小通道，将废气中的有害成分通过吸附剂的连续吸附而去除；沸石转轮的缓慢旋转使得废气的吸附时间加长，不但保证了废气有害物质吸附的连续性，而且保证了吸附效果。当沸石转轮的吸附能力趋于饱和状态时，在脱附再生区域，通过加热设备加热，使得高温气流吹扫已经吸附饱和的沸石转轮，在高温气流的作用下，使得沸石转轮上吸附的有机挥发性物质升华成为气态脱附出来进入氧化燃烧系统。有害废气被吸附后，干净的气体就会在抽风机组的作用下进入冷却区域，当沸石转轮从再生区域转到冷却区域时，使用少量的常温废气对再生区域进行降温，使得沸石转轮再次恢复活性，具有吸附能力。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，沸石转轮吸附脱附过程原理如图 1 所示。

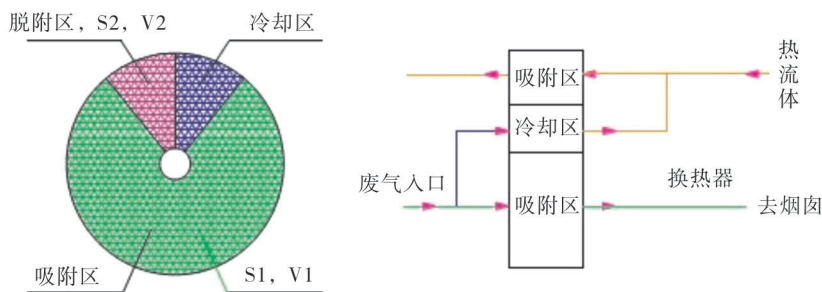


图 1 沸石转轮吸附脱附过程原理

旋转吸附沸石转轮在工作时，废气的吸附过程与脱附过程一直处于同时连续进行的状态，脱附出来的浓缩废气浓度比较稳定，避免了固定式吸附床在脱附时所形成的浓度波动，使得该系统具有良好的稳定性和可靠的安全性，且可保证后续处理单元输出热量的稳定性。沸石转轮运行过程如图 2 所示，沸石转轮技术参数如表 2 所列。

该系统设置有温度在线监测系统，能够实时监控废气的浓度与温度变化情况，实现废气浓度、燃烧温度与废气和燃烧物质天然气供给的连锁，当系统温度高于某一设定值时，就会发出声光报警信号，同时开启降

温设施，对系统进行降温；与此同时自动切断废气输入和焚烧系统所使用的天然气，打开焚烧系统自动泄气装置，进行排气，实现系统自动连锁停机，保证运行过程的安全性。

该系统设置有转轮速度在线监测装置，能够检测出实时转轮转动速度，并设有转轮限速器，确保转轮速度始终控制在一定的合理范围内，当转轮转动速度过大时，该系统发出报警信号，并切断废气供给，并且切断电源使得浓缩系统停止运行，打开自动泄气设备，对外排气，降低转轮速度；将该系统切换至故障模式，沸石转轮在线监测系统如图 3 所示。

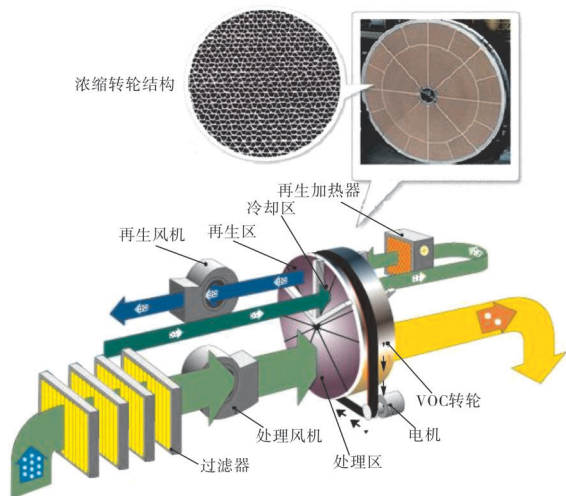


图2 沸石转轮运行过程

表2 沸石转轮技术参数

项目	技术参数
吸附剂	高性能分子筛(蜂窝结构)
浓缩倍数	10/15/20
吸附:脱附:冷却区	10:1:1
VOC处理效率/%	≥90
脱附温度/℃	180~220
再生温度/℃	300

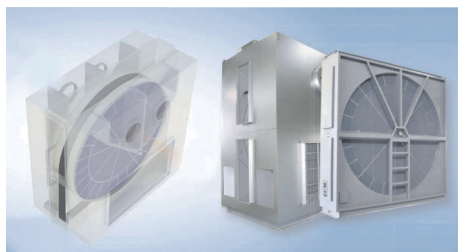


图3 沸石转轮在线监测系统

2 蓄热式燃烧技术(RTO)

蓄热式燃烧(RTO)技术处理废气是通过天然气燃烧及脱附热量将废气在蓄热体内进行预热到一定的温度,随着温度的升高,使得蓄热体内的温度到达800℃左右时,燃烧室内高浓度的气体会在高温及氧化剂同时作用下燃烧氧化分解成无毒无害的二氧化碳和水。燃烧过程大量的热能使其余废气温度升高,气流经过蓄热体会对蓄热体再次加热,进一步促使蓄热体温度升高,使用该热量去加热新进入燃烧室的废气,周而复始。蓄热体的进出气不断地被换向阀切换,形成周而复始的连续工作^[2-3]。沸石转轮脱附出来的高浓度气体在蓄热体中氧化分解为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99%以上,热回收效率达到95%以上^[4]。

蓄热式燃烧(RTO)技术不但具有节能功能,而且是当前最环保的装置;主要由燃烧器、氧化室、蓄热室、切换阀、安全装置等组成,分为多个蓄热室,每个蓄热室均由陶瓷材料制作,并设置温度传感器,进行进口废气温度检测和陶瓷换热后废气的温度检测,在废气管路的进口及出口处设置压力传感器,以检测管路中阻力的变化,当阻力超过所设定的阻力上限时,就会进行声光报警。

焚烧系统主要包括燃烧控制装置及燃气阀组、火焰探测器、冷却装置、燃烧机、压力监测系统、安全装置、声光报警、燃气泄漏自检等功能。设置有浓度在线监测仪、浓度报警仪、超温报警仪等装置,能够实现各系统的连锁、声光报警、自动切换、自动停机等功能,保障系统正常运行。

蓄热式燃烧(RTO)技术相关技术参数如表3所列。

表3 蓄热式燃烧(RTO)技术相关技术参数

项目	参数
蓄热室数	3
蓄热室切换时间/s	120
陶瓷床的热回收率/%	≥96
废气VOC净化率/%	≥98
装置压降/Pa	≤3 000
燃烧室氧化温度/℃	760~850
废气在燃烧室的最小停留时间/s	1.2

3 沸石转轮+催化燃烧(RTO)工艺技术应用

伴随着中国航空工业大发展的浪潮,航空零部件喷漆量不断增加,在一定程度上增加了污染源的数量,为了践行国家“蓝天、碧水、净土保卫战”的总体规划,按照GB 1621—1996《大气污染综合排放标准》及陕西省地方标准DB 61/T 1061—2017《挥发性有机物排放控制标准》的要求,对喷漆废气的收集、处理及排放等环节进行分析,通过对“沸石转轮+催化燃烧(RTO)”的工艺技术研究,并将废气处理装备升级与先进技术工艺相互融合,从而实现喷漆废气的彻底净化,从根本上治理喷漆有机废气污染现象。

按照航空喷漆过程中产生的(VOC)种类及性质,目前对其处理较为彻底的工艺为:除湿+四级过滤+分子筛吸附浓缩转轮+蓄热氧化法RTO+风机,其主要包括除湿系统、过滤系统、沸石转轮吸附系统、RTO燃烧

系统等系统及设备,沸石转轮+催化燃烧(RTO)的工作

原理如图4所示。

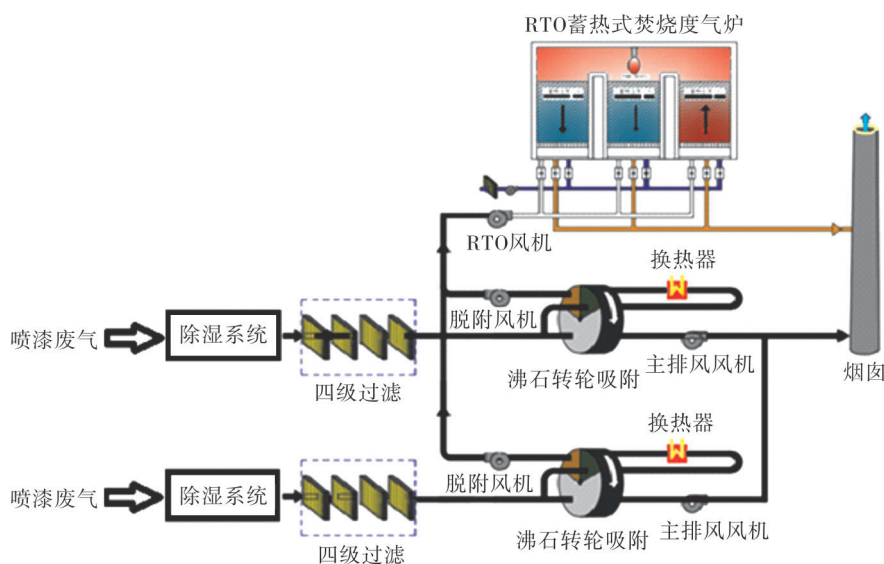


图4 沸石转轮+催化燃烧(RTO)的工作原理

在水流及文丘里喷漆过程中由于采用水雾除去喷漆产生的漆雾,使得喷漆废气的含水率很高,水蒸气会对过滤效率及沸石转轮产生不良影响,甚至导致沸石失效,按照实践经验需要进行设置除湿系统将喷漆废气的含水率降至60%以下。

经过除湿后的喷漆废气需要经过四级过滤(G3+G4+F7+F9)除去废气中的漆雾粉尘颗粒及杂质部分,避免漆雾、杂质及颗粒进入沸石的微细孔而堵塞沸石,导致沸石吸附能力丧失;经过四级过滤后“相对干净的废气”进入缓慢转动的沸石转轮内进行吸附,在沸石转轮中停留一定的时间,废气中的有害物质被沸石吸附后排空。吸附后的沸石在转轮的带动下,缓慢地进入冷却区,经风冷后进入下一个吸附、脱附、冷却循环周期,继续循环往复工作。冷却后的高温气体通过与炉膛高温烟气间接换热加热达到脱附所需温度,对转轮进行脱附再生。旋转吸附沸石转轮在工作时,吸附与脱附过程一直处于连续进行,并且脱附后的废气浓度较为稳定,避免了固定式吸附床在脱附时所形成的浓度波动,利于整个控制系统的稳定、安全运行,且可保证后续处理单元输出热量的稳定性。

沸石转轮的吸附能力达到饱和状态后,缓慢转动进入脱附区,在脱附区经过210℃的热气流高速吹扫,沸石上的吸附物在高温热气流的作用下活性增强,并在风机的抽力作用下从沸石转轮上脱附下来,并成为高浓度、小风量的VOC,通过抽风机组到达炉膛进行高温焚烧,直接进入RTO焚烧炉氧化后释放出大量热能,继续为氧化反应提供能量,RTO正常使用需要很

少的天然气,甚至不需要天然气燃烧加热;在燃烧室的高温气体与陶瓷体本身热量进行持续不断的热交换,使得热回收效率达到95%以上,整个系统实现了能源的循环使用,推动经济发展与环境治理的相同步的循环经济模式。

4 结语

综上所述,为了满足航空工业油性漆的喷漆需求,确保蓝天、白云的绿色化生态环境与工业发展的良性循环,践行绿色发展理念,按照节能高效、方便操作、净化彻底等原则,经过长期探索实践证明,“沸石转轮+RTO”技术工艺完全可以处理喷漆过程产生的有机废气,不但处理效率达到98%以上,而且能源回收率也达到了95%以上,最终处理为无毒无害的CO₂和H₂O,实现了喷漆废气的彻底净化。此工艺设备具有良好的安全性,较低的能源消耗,使用寿命较长,运营成本低,不会导致二次污染,落实了清洁生产及绿色发展理念,可以广泛推广使用。

参考文献:

- [1] 黎维彬, 莫浩. 催化燃烧去除VOCs污染物的最新进展[J]. 物理化学学报, 2010(4): 885-894.
- [2] 简力, 孙昆. 蓄热式氧化炉在处理SBS生产废气中的应用[J]. 节能技术, 2014, 32(2): 185-189.
- [3] 蓄热式氧化法顺酐尾气处理装置投运[J]. 石油炼制与化工, 2011, 42(2): 33.
- [4] 陆震维. 有机废气的净化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.