

山东省挥发性有机物 (VOCs) 污染防治技术及典型案例汇编

山东省生态环境厅

山东环境科学学会

二〇二〇年六月

目 录

前言	1
一、VOCs 污染防治措施及技术.....	2
(一) 源头替代	2
(二) 过程控制	2
(三) 末端治理	4
二、重点行业 VOCs 产生及防治要点.....	17
(一) 炼油与石油化学行业	17
(二) 有机化工行业	19
(三) 表面涂装行业	22
(四) 印刷行业	24
(五) 油品储运销行业	27
三、典型案例	28
(一) 典型案例 1	28
(二) 典型案例 2	31
(三) 典型案例 3	31
(四) 典型案例 4	31
(五) 典型案例 5	32
(六) 典型案例 6	32
(七) 典型案例 7	33
(八) 典型案例 8	33
(九) 典型案例 9	34

(十) 典型案例 10	35
(十一) 典型案例 11	35
(十二) 典型案例 12	36
(十三) 典型案例 13	36

挥发性有机物（VOCs）污染防治技术及典型案例汇编

前言

挥发性有机物（VOCs）是指参与大气光化学反应的有机化合物，包括非甲烷烃类、含氧有机物、含氯有机物、含氮有机物、含硫有机物等，是形成臭氧（ O_3 ）和细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）污染的重要前体物，VOCs 排放会导致大气氧化性增强，且部分 VOCs 会产生恶臭异味。相对于颗粒物、二氧化硫、氮氧化物污染控制，VOCs 管理基础薄弱，已成为制约我省空气质量持续改善的瓶颈。石化、化工、工业涂装、包装印刷、油品储运销等行业（以下简称“重点行业”）是我国 VOCs 重点排放源。为打赢蓝天保卫战、进一步改善环境空气质量，迫切需要全面加强重点行业 VOCs 综合治理。

本汇编对 VOCs 污染防治措施及技术进行了整理，列举了 VOCs 典型治理技术及适用行业，针对石化、化工、工业涂装、包装印刷、油品储运销等重点行业 VOCs 产生及控制进行了分析，并结合各行业 VOCs 典型治理技术，筛选了部分 VOCs 污染防治技术典型应用案例。

一、VOCs 污染防治措施及技术

VOCs 污染防治措施涵盖源头替代、过程控制和末端治理三个方面。

（一）源头替代

源头替代是指通过调整或替代原辅材料配方，采用低 VOCs 含量的原辅材料，从而减少 VOCs 的产生。化工行业要推广使用低（无）VOCs 含量、低反应活性的原辅材料，加快对芳香烃、含卤素有机化合物的绿色替代；工业涂装、印刷等行业要加大源头替代力度，如通过使用水性、粉末、高固体分、无溶剂、辐射固化等低 VOCs 含量的涂料，水性、辐射固化、植物基等低 VOCs 含量的油墨，水基、热熔、无溶剂、辐射固化、改性、生物降解等低 VOCs 含量的胶粘剂，以及低 VOCs 含量、低反应活性的清洗剂等，替代溶剂型涂料、油墨、胶粘剂、清洗剂等，从源头减少 VOCs 产生。

（二）过程控制

VOCs 治理需要全面加强过程控制，实施精细化管理，加强无组织排放控制，重点对含 VOCs 物料储存、转移和输送、设备与管线组件泄漏、敞开液面逸散以及工艺过程等五类排放源实施管控，通过采取设备与场所密闭、工艺改进、废气有效收集等措施，削减 VOCs 无组织排放。

1、加强设备与场所密闭管理

含 VOCs 物料的储存、输送、投料、卸料，涉及 VOCs 物料的生产及含 VOCs 产品分装等过程应密闭操作。物料应储存于密闭容器、包装袋，高效密封储罐，封闭式储库、料仓等。物料转移和输送应采用密闭管道或密闭容器、罐车等。高 VOCs 含量废水（废水液面上方 100 mm 处 VOCs 检测浓度超过 200 ppm，其中，重点区域超过 100 ppm，以碳计）的集输、储存和处理过程，应加盖密闭。含 VOCs 物料生产和使用过程，应采取有效收集措施或在密闭空间中操作。

2、加强设备与管线组件泄漏控制

企业中载有气态、液态 VOCs 物料的设备与管线组件，包括泵、压缩机、搅拌器（机器）、阀门、开口阀或开口管线、法兰及其他连接件、泄压设备、取样连接系统以及其他密封设备，密封点数量大于等于 2000 个的，应按要求开展 LDAR 工作。石化企业按行业排放标准规定执行。

3、科学设计废气收集系统

提高废气收集率。遵循“应收尽收、分质收集”的原则，将无组织排放转变为有组织排放进行控制。采用全密闭集气罩或密闭空间的，除行业有特殊要求外，应保持微负压状态，并根据相关规范合理设置通风量。采用局部集气罩的，距集气罩开口面最远处的 VOCs 无组织排放位置，控制风速应不低于 0.3 米/秒，有行业要求的按相关规定执行。

4、推进使用先进生产工艺

通过采用全密闭、连续化、自动化等生产技术，以及高效工艺与设备等，减少工艺过程无组织排放。挥发性有机液体装载优先采用底部装载方式。石化、化工行业重点推进使用低（无）泄漏的泵、压缩机、过滤机、离心机、干燥设备等，推广采用油品在线调和技术、密闭式循环水冷却系统等。工业涂装行业重点推进使用紧凑式涂装工艺，推广采用辊涂、静电喷涂、高压无气喷涂、空气辅助无气喷涂、热喷涂等涂装技术，鼓励企业采用自动化、智能化喷涂设备替代人工喷涂，减少使用空气喷涂技术。印刷行业大力推广使用无溶剂复合、挤出复合、共挤出复合技术，鼓励采用水性凹印、醇水凹印、辐射固化凹印、柔版印刷、无水胶印等印刷工艺。

5、深入实施精细化管控

加强企业运行管理，企业应系统梳理 VOCs 排放主要环节和工序，包括启停机、检维修作业等，制定具体操作规程，落实到具体责任人。健全内部考核制度。加强人员能力培训和技术交流。建立管理台账，记录企业生产和治污设施运行的关键参数。推行“一厂一策”制度。明确原辅材料替代、工艺改进、无组织排放管控、废气收集、治污设施建设等全过程减排要求，测算投资成本和减排效益，为有效开展 VOCs 综合治理提供依据。

（三）末端治理

1、常用末端治理技术汇总

末端治理即建设高效治理设施，推进污染设施升级改造，实行重点排放源排放浓度与去除效率双重控制。一般优先选用回收技术，可通过冷凝、吸附再生等处理，进行回收利用；难以回收的，可采用燃烧、吸附浓缩+燃烧等技术进行销毁。表 1.1 汇总了常用 VOCs 末端治理技术。

表 1.1 常用 VOCs 末端治理技术一览表

主要技术	原理	适用范围	优点	缺点
回收利用技术				
冷凝法	根据物质在不同温度下具有不同饱和蒸汽压，借降温或升压，使废气中有机组分冷凝成液体而从气相中分离。	处理高浓度废气，特别是含有有害组分单一且回收价值高的 VOCs；处理含有大量水蒸气的高温废气。	工艺简单，易操作、运行成本低，并且可以回收有价值的 VOCs。	对低沸点气体效果不佳，能耗高，运行费用大，处理成本较高。
吸收法	废气和洗涤液接触将 VOCs 从废气中移走，之后再用化学药剂将 VOCs 中和、氧化或其它化学反应破坏。	处理高水溶性 VOCs。	占地空间小，可去除气态和颗粒物 VOCs，投资成本低，传质效率高，对酸性气体去除效率高。	去除效率不高，吸收液的净化效率下降较快，有后续废水处理问题；颗粒物浓度高会导致吸收剂堵塞，维护费用高。
吸附法	利用吸附剂与 VOCs 污染物进行物理结合或化学反应并将 VOCs 污染物成分去除。	处理中低浓度的 VOCs。	设备简单，技术成熟，易于自动化控制；投资较小，能耗低，去除效率高。	不适用高浓度、高温有机废气，一般处理设备庞大，吸附剂容量受限，其再生、运行成本高。

	膜分离法	用人工合成的膜分离 VOCs 物质。	处理高浓度 VOCs。	技术流程简单,投资成本低,分离效果好,能耗低。	受膜材料限制(膜污染、膜的稳定性、通量等),运行成本较高。
销毁技术					
燃烧法	直接燃烧	主要利用燃料对混合气体进行加热,高温环境下,将废气中污染物氧化分解。	处理高浓度 VOCs。	工艺简单,设备投资少。	技术使用范围小,能耗大,运行成本较高,工艺安全难以控制。可能产生二次污染
	催化燃烧	利用催化剂降低气体的活化能,使反应分子大量聚集在表面,降低气体燃点,让气体在低温条件下进行燃烧。	处理的 VOCs 浓度范围广,尤其适合处理低浓度 VOCs。	燃烧温度低,无明火,能耗低,净化率高,无二次污染。	操作条件严格,催化剂中毒会使效率降低,催化剂更换成本较高。
	蓄热式热力燃烧(RTO)	采用先进的热交换设计技术和新型陶瓷蓄热材料,保证燃烧热量的有效回收和连续进出气,从而有效保证净化效果和减低运行成本。	处理低浓度 VOCs。	系统弹性化,操作风量上下限范围大,热回收率高,固定结构式蓄热陶块,分解温度低,去除效率高。	投资成本高,装置体积、重量大。
	蓄热式催化燃烧(RCO)	建立在蓄热式热力燃烧基础上,将催化剂置于蓄热材料的顶部,来使 VOCs 废气净化达到最优。	处理中高浓度 VOCs。	能同时净化多种有机废气,流程简单、安全性高,运行成本低,热回收效率和处理效率高。	催化剂堵塞时会使催化活性下降,降低处理效率。催化剂更换成本较高。

生物降解法	利用微生物对废气中的污染物进行消化代谢，将污染物转化为无害的水、二氧化碳及其它无机盐类。	处理低浓度、微生物可分解的 VOCs。	设备简单，运行成本低，对臭味气体处理效果明显。	投资高，降解速度慢，效率偏低，占地面积大，有局限性，生物菌培养条件严格，不易控制。
光催化降解法	光催化剂纳米粒子受激产生活性极强的自由基，这些物质具有很强的氧化作用，从而使废气中一些难以发生反应的物质在温和的条件下进行反应，达到净化有机废气的作用。	处理高浓度 VOCs。	条件温和，常温常压，设备简单，维护方便。	需要紫外光源，对催化剂的要求较高，处理效率低，使用寿命短。
等离子体技术	利用等离子体场富集的大量活性物种，如离子、电子、激发态的原子、分子及自由基等将污染物分子离解为小分子物质。	处理低浓度 VOCs。	装置简单，维护方便，不需要预热，开启方便，能耗低。	技术不成熟，处理量小，对电源要求高，会产生有害副产物。

2、典型应用技术介绍

实际应用中，企业一般采用多种技术的组合工艺，提高 VOCs 治理效率。对低浓度、大风量废气，宜采用活性炭吸附、沸石转轮吸附、减风增浓等浓缩技术，提高 VOCs 浓度后净化处理；对高浓度废气，优先进行溶剂回收，难以回收的，宜采用高温焚烧、

催化燃烧等技术。油气（溶剂）回收宜采用冷凝+吸附、吸附+吸收、膜分离+吸附等技术。水溶性、酸碱 VOCs 废气一般选用多级化学吸收等处理技术，恶臭类废气还应进一步加强除臭处理。低温等离子、光催化、光氧化技术主要适用于恶臭异味等治理；生物法主要适用于低浓度 VOCs 废气治理和恶臭异味治理。采用一次性活性炭吸附技术的，应定期更换活性炭，废旧活性炭应再生或处理处置。另外，企业在进行技术选择时，应结合排放废气的浓度、组分、风量、温度、湿度、压力以及生产工况等，合理选择 VOCs 末端治理技术。下面对几种典型 VOCs 组合处理技术进行介绍。

（1）VOCs 循环脱附分流回收吸附技术

该技术是采用活性炭作为吸附剂，采用惰性气体循环加热脱附分流冷凝回收的工艺对有机气体进行净化和回收。回收液通过后续的精制工艺可实现有机物的循环利用。工艺原理示意图见图 1.1。

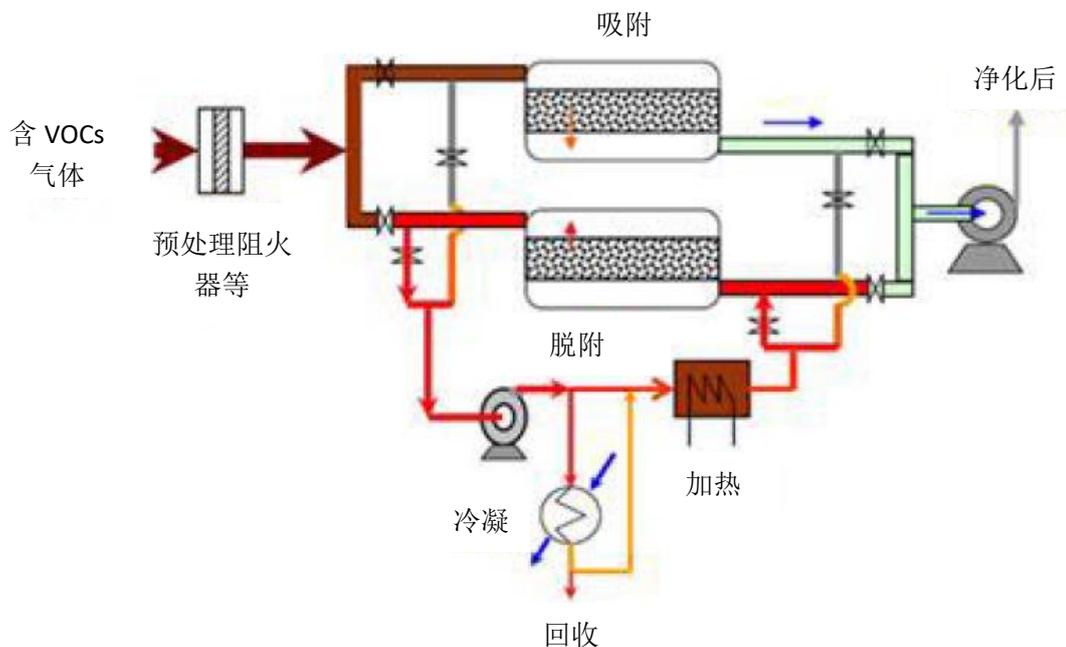


图 1.1 VOCs 循环脱附分流回收吸附工艺原理示意图

整个系统由来气预处理、吸附、循环加热脱附、冷凝回收和自动控制等主要部分构成。含 VOCs 的气体通过预处理后进入吸附段吸附后达标排放，吸附段通常并联设置有吸附罐并通过切换阀控制实现气体的连续吸附操作。吸附到设定程度的吸附罐通过切换阀切换形成再生循环回路。循环回路可通过充入惰性气体置换系统内气体的方式减少气相中的含氧量，从而减少再生过程中某些类型溶剂的氧化副产物的生成。通过循环风机和加热器可形成循环气流加热吸附罐进行脱附，同时通过分流冷凝系统冷凝回收溶剂。

目前该技术成熟、稳定，可实现自动化运行。单位投资大致为 9-24 万元/千 (m³/h)，回收的有机物成本 700-3000 元/t。对有机气体成分的净化回收效率一般大于 90%，也可达 95% 以上。适用于石油，化工及制药工业，涂装、印刷、涂布，漆包线、金属

及薄膜除油，食品，烟草，种子油萃取工业，及其他使用有机溶剂或 C⁴-C¹² 石油烃的工艺过程。

(2) 高效吸附-脱附-燃烧 VOCs 治理技术

该技术利用高吸附性能的活性碳纤维、颗粒炭、蜂窝炭和耐高温高湿整体式分子筛等固体吸附材料对工业废气中的 VOCs 进行富集，对吸附饱和的材料进行强化脱附工艺处理，脱附出的 VOCs 进入高效催化材料床层进行催化燃烧或蓄热催化燃烧工艺处理，进而降解 VOCs。

主要工艺流程包括预处理、吸附、脱附-燃烧三个阶段。

①预处理：含 VOCs 废气在吸附净化前一般先经高效纤维过滤器或高效干湿复合过滤器过滤，对废气粉尘等进行拦截净化。

②吸附阶段：去除尘杂后的废气，经合理布风，使其均匀地通过固定吸附床内的吸附材料层过流断面，在一定停留时间内，由于吸附材料表面与有机废气分子间相互作用发生物理吸附，废气中的有机成份吸附在活性炭表面积，使废气得到净化；实际应用中，净化装置一般设置两台以上吸附床，以确保一台处于脱附再生或备用，保证吸附过程连续性，不影响实际生产。

③脱附-燃烧：达到饱和状态的吸附床应停止吸附转入脱附再生，脱附后的废气进入燃烧阶段，即 RTO 或 RCO 废气处理工艺。工艺流程见图 1.2 和 1.3。

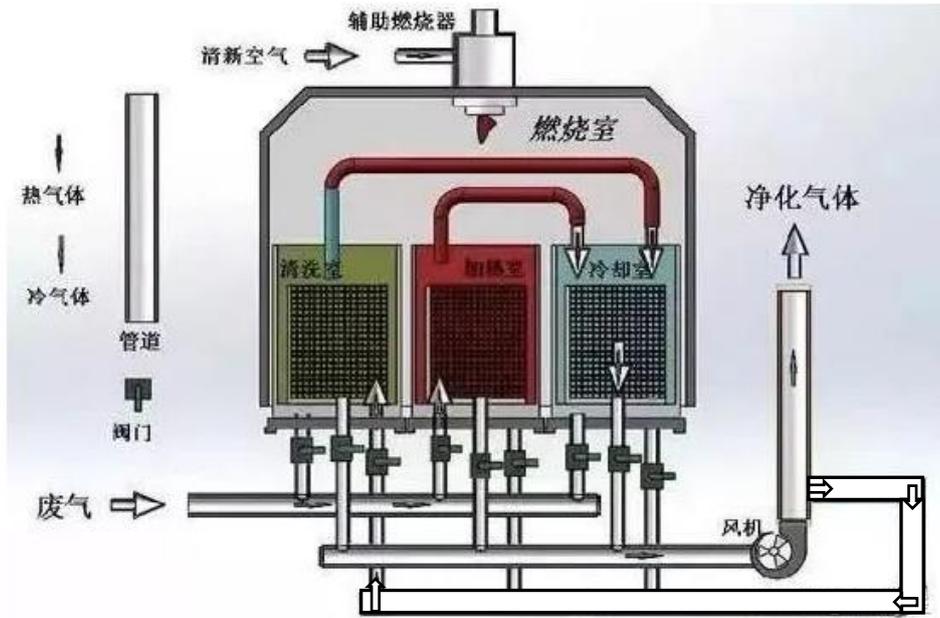


图 1.2 RTO 废气处理工艺原理示意图

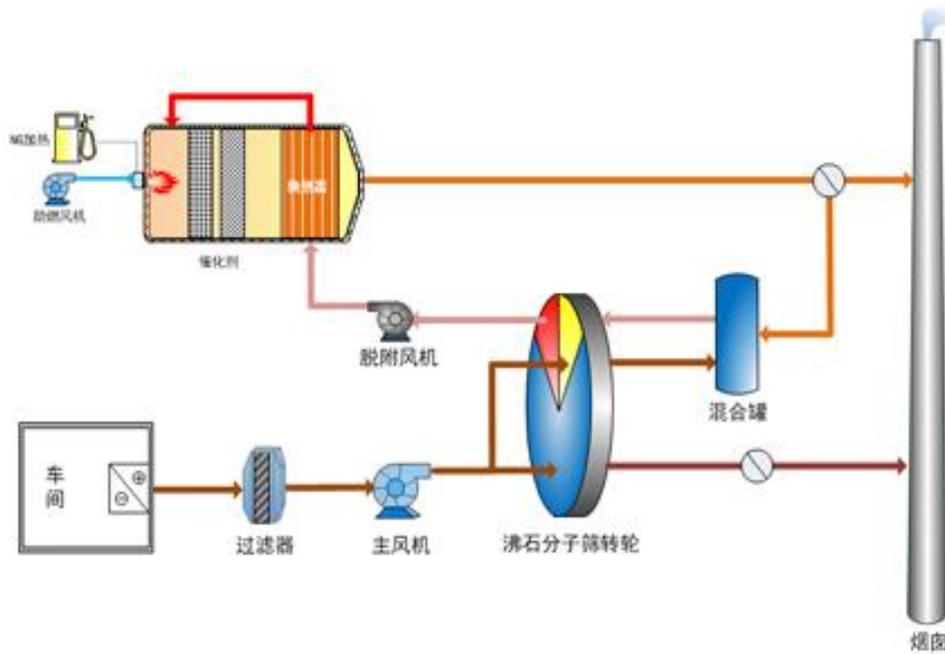
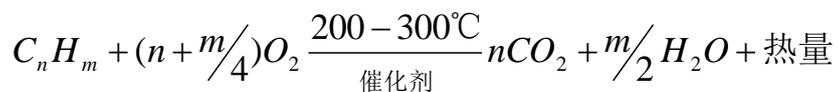


图 1.3 RCO 废气处理工艺原理示意图

催化燃烧技术（RCO）是利用催化剂做中间体，使有机气体在较低的温度下，变成无害的水和二氧化碳气体，即：



两种燃烧技术的去除率、达标能力是一致的，但也存在一些不同，见表 1.2。

表 1.2 RCO 与 RTO 技术对比

项目	蓄热式热力焚烧 RTO (Regenerative Thermal Oxidizer)	蓄热式催化氧化 RCO (Regeneration Catalytic Oxidizer)
反应温度	800~1000℃	300~500℃
是否产生 NOx	产生	不产生
是否产生二噁英	处理含氯废气时产生	不产生
技术投资	高	低
运行费用	高	低
反应停留时间	长	短

总的来说，RTO 技术会产生二次污染，同时存在投资大、运行费用高、风险高等问题。RCO 技术具有明显优势。

目前该技术成熟、稳定，可实现自动化运行。设备投资基本上是 200~300 万元（以处理风量为 50000 m³/h），运行费用 30~50 万元，主体设备寿命 10~15 年。VOCs 去除效率一般大于 95%，可达 98% 以上。在石油、化工、电子、机械、涂装等行业大风量、低浓度或浓度不稳定的有机废气治理中得到应用。

（3）冷凝与变压吸附联用 VOCs 治理技术

该技术采用多级冷凝技术，使废气的有机成分在常压下凝结成液体析出，经净化后的废气进入吸附器进一步吸附富集，同时确保达标排放。吸附饱和后的吸附剂（活性炭、沸石等）等采用负压脱附方式再生吸附剂，并将高浓度 VOCs 送回前端冷凝装置。工艺流程见图 1.4。

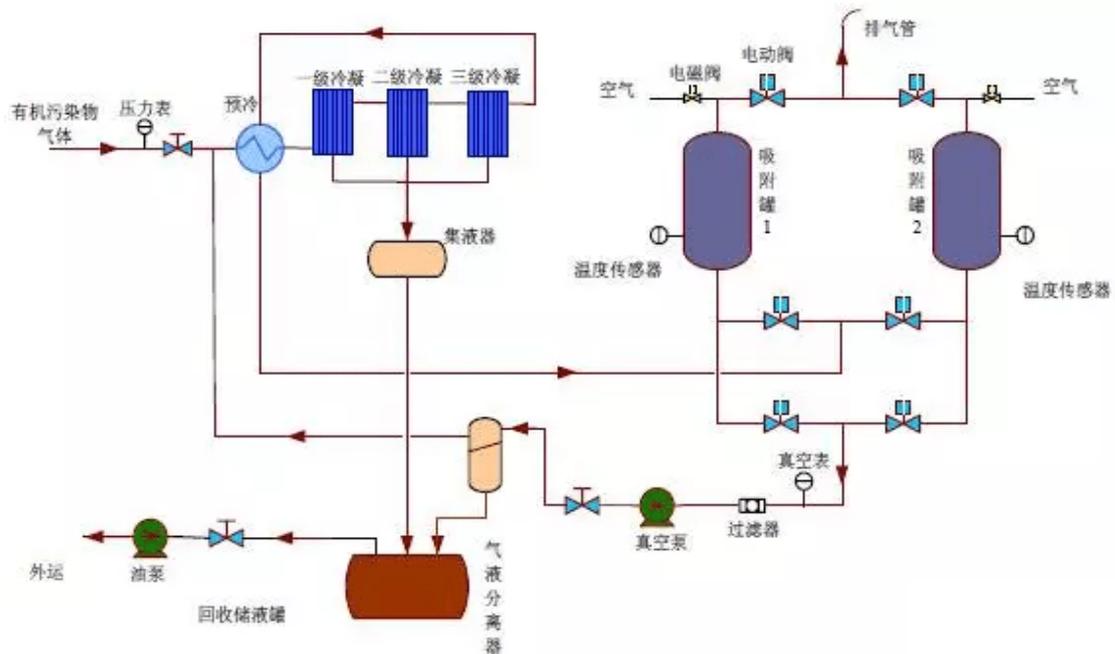


图 1.4 冷凝与变压吸附工艺原理示意图

工艺流程主要包括冷凝和吸附两大单元。冷凝单元一般设置三级冷凝，第一级从常温冷凝到 3℃、第二级从 3℃ 冷凝到 -35℃、第三级从 -35℃ 冷凝到 -70℃。第三级的冷凝余气返回第一级前面的前置换热器，冷量回用，将进入回收处理装置的含 VOCs 废气预冷，有节能效果。吸附单元一般配置吸附罐两只和脱附真空泵一台，以及用于切换吸附脱附的电动或气动阀门若干。真空泵还需要配备冷却系统。

冷凝与吸附联用技术能够克服单纯冷凝技术在应用过程中能耗大、运行成本高的现象，同时弥补单纯吸附技术在应用过程中，设备体积大、吸附温升对安全运行有影响、长期运行吸附材料易失活等问题。单位投资大致为 0.4-0.8 万/m³，单位小时运行成本为 0.08-0.2 元/m³。净化效率一般大于 98%。主要适用于石油化工、有机化工、油气储运等行业。主要适用于储油库、炼油厂、石油

化工厂等成品油/化工品装车油气回收；液体储罐呼吸气 VOCs 治理；油品、化工品码头装船油气回收。

（4）沸石转轮与蓄热燃烧 VOCs 治理技术

该技术采用高浓缩倍率沸石转轮设备将废气浓度浓缩 5-20 倍，富集的废气进入燃烧炉或催化炉（RTO/RCO）进行燃烧处理，VOCs 被彻底分解成 CO_2 和 H_2O 。同时反应后的高温烟气进入特殊结构的陶瓷蓄热体，80-95% 以上的热量被蓄热体吸收，使得出口气体温度降至接近进口温度。不同蓄热体通过切换阀或者旋转装置随时间进行转换，分别进行吸热和放热，对系统热量进行有效回收和利用。工艺流程见图 1.5。

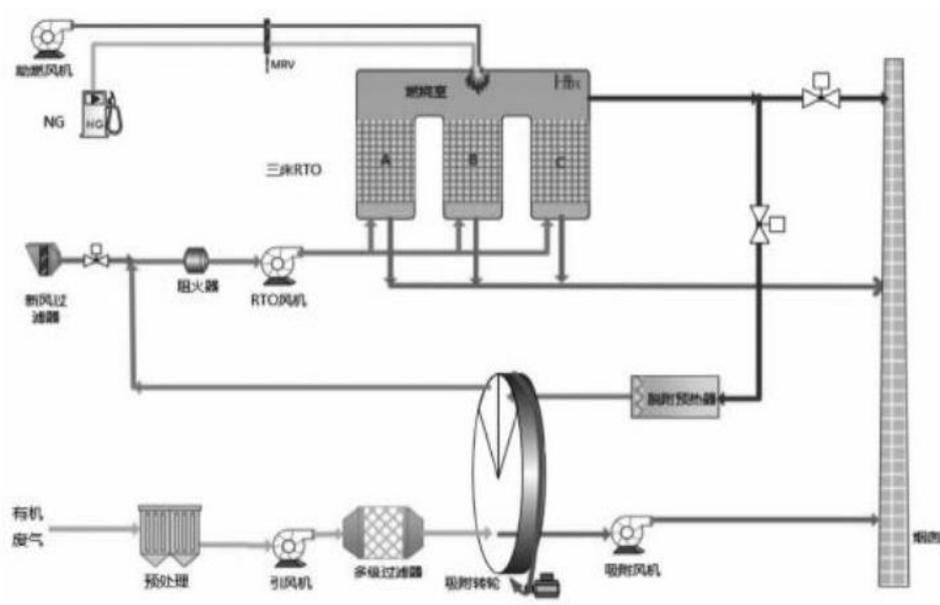


图 1.5 沸石转轮吸附浓缩+蓄热式燃烧工艺流程示意图

工艺流程主要由沸石转轮浓缩（吸附区域、脱附区域、冷却区域）、脱附系统、蓄热式燃烧系统（RTO 炉体、陶瓷蓄热体、燃烧系统等）及控制系统等部分组成。①吸附脱附：沸石分子筛转轮分为吸附区、脱附区和冷却区三个功能区域，沸石分子筛转

轮吸附浓缩系统利用吸附-脱附-冷却这一连续性过程,对 VOCs 废气进行吸附浓缩。首先,废气进入沸石分子筛转轮的吸附区,VOCs 被沸石分子筛吸附除去,被净化后排出。吸附在分子筛转轮中的 VOCs,在脱附区经过约 200℃小风量的热风处理而被脱附、浓缩。再生后的沸石分子筛转轮在冷却区被冷却,如此反复。

②蓄热式燃烧:脱附后的高浓度小风量废气进入蓄热式燃烧处理系统,首先进入蓄热室 A 的陶瓷介质层,陶瓷释放热量,温度降低,而有机废气吸收热量,温度升高,废气离开蓄热室后以较高的温度进入氧化室。在氧化室中,有机废气由燃烧器加热升温至设定的氧化温度 800℃以上,使其中的 VOCs 分解成二氧化碳和水后排放。

③废气流经蓄热室 A 升温后进入氧化室氧化,净化后的高温气体离开氧化室,进入蓄热室 B,释放热量,降温排出,而蓄热室 B 吸收大量热量后升温,同时清扫蓄热室 C。循环完成后,进气与出气阀门进行一次切换,进入下一个循环,废气由蓄热室 B 进入,蓄热室 C 排出,清扫蓄热室 A。如此交替。由于废气已在蓄热室内预热,燃料耗量大为减少,运行成本大大降低。

目前技术成熟、稳定,可实现自动化运行。单位投资大致为 9-24 万元/千 (m^3/h),回收的有机物成本 700-3000 元/t。热回收效率可达 90-95%,处理效率可达 95-99%。主要适用于有机化工、石油化工、涂装、印刷等行业及大风量低浓度行业。

(5) 低浓度多组分工业废气生物净化技术

该技术利用高效复合功能菌剂与扩培技术，强化废气生物净化的反应过程，针对不同类型废气应用新型的生物净化工艺，强化废气生物净化的传质过程，装填具有高比表面积和生物固着力的生物填料，解决微生物附着难、系统运行不稳定的问题。工艺流程见图 1.6。

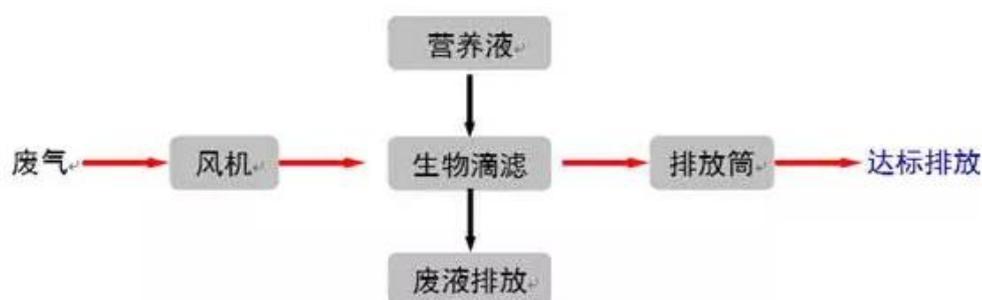


图 1.6 低浓度多组分工业废气生物净化技术

工艺流程以生物氧化为主、化学吸收为辅，主要通过生物处理去除废气中的绝大部分污染物，化学吸收单元则可在进气浓度发生异常时，为系统的稳定达标排放提供进一步保证。主体技术生物滴滤箱由滤床、营养液循环喷淋系统、参数控制系统等组成。废气进入生物箱体后，通过附着在填料上的微生物的代谢作用，废气中的污染物被降解为简单的无机物。其中，VOCs 分解为 CO_2 、 H_2O 以及其他简单的无机物；含氮污染物中的氮元素转化为硝酸盐或氮气；含硫恶臭污染物中的硫元素转化为硫酸盐。

此项技术适用范围广，适用于低浓度多组分工业废气排放控制，与传统生物技术相比，拓宽了生物处理法的应用范围。运行管理方便，二次污染少。工程主体设备投资约为 250 万元，年运

行费用约 35 万元。VOCs 的去除率可达 80-90%，对 H₂S 的去除率可达 95%以上。主要用于低浓度多组分工业废气的处理。

二、重点行业 VOCs 产生及防治要点

(一) 炼油与石油化学行业

炼油与石油化学行业 VOCs 主要来源于设备与管线组件、工艺排气、废气燃烧塔（火炬）、废水处理等环节，所产生的 VOCs 类型主要为苯、甲苯、二甲苯、甲醇、非甲烷总烃。炼油与石化行业典型生产设施及 VOCs 排放环节见图 2.1 和表 2.1。

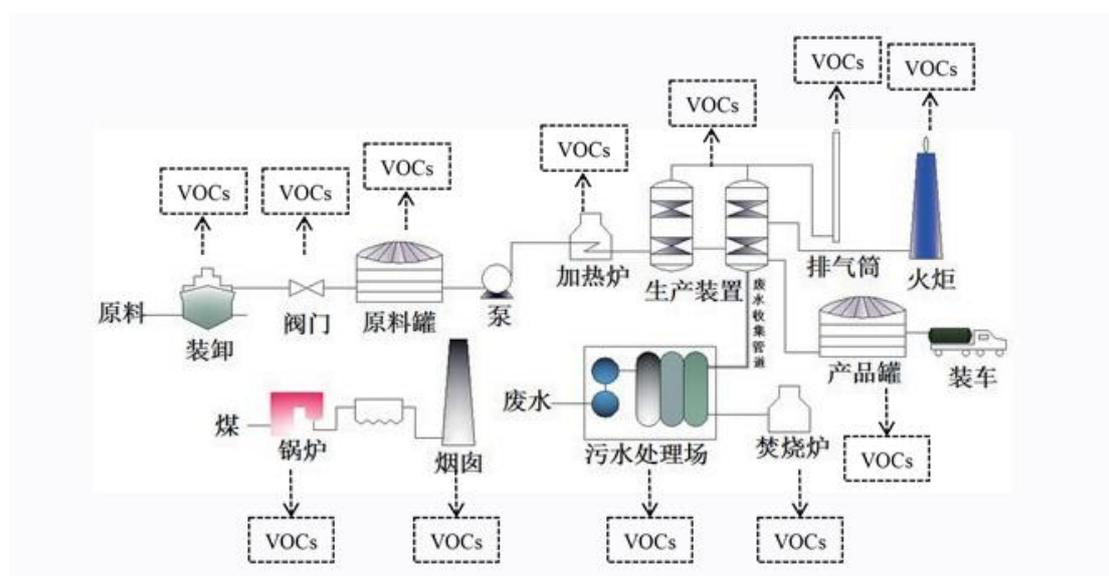


图 2.1 炼油与石化行业典型生产设施及 VOCs 排放环节示意图

表 2.1 炼油与石化行业典型生产工艺产污节点一览表

产污节点	排放形式
各生产装置的有组织废气	有组织
火炬气	有组织
废水处理废气	有组织/无组织
工艺无组织废气	无组织
物料储存设施	
装卸	
非正常工况排气	有组织

VOCs 主要防治措施：

(1) 开展泄漏检测与修复 (LDAR)。对泵、压缩机、阀门、法兰等易发生泄漏的设备与管线组件，制定泄漏检测与修复 (LDAR) 计划，定期检测、及时修复，注重管线、设备、阀门的材质要求和选型，防止或减少跑、冒、滴、漏现象。

(2) 生产工艺使用先进生产工艺。采用全密闭、连续化、自动化等生产技术，以及高效工艺与设备。催化重整装置采用清洁生产工艺。加强生产管理，避免误操作，加强对动静密封点的管理，达到零泄露。

(3) 严格控制储存、装卸损失。汽油等轻质油采用大容量浮顶罐，液化石油气采用全压力球形储罐，不易挥发的重质油品采用拱顶罐。采用固定顶罐的应安装顶空联通置换油气回收装置，苯、甲苯、二甲苯等危险化学品应在内浮顶罐基础上安装油气回收装置等处理设施；有机液体装卸必须采取全密闭底部装载、顶部浸没式装载等方式，严禁喷溅式装载；汽油、航空汽油、石脑油、煤油等高挥发性有机液体和苯、甲苯、二甲苯等危险化学品的装卸过程采取高效油气回收措施。运输相关产品应采用具有油气回收接口的车船。

(3) 强化废水处理系统等逸散废气收集治理。废水集输、储存、处理处置过程中的集水井（池）、调节池、隔油池、曝气池、气浮池、浓缩池等高浓度 VOCs 逸散环节应采用密闭收集措施，并回收利用，难以利用的应安装高效治理设施。

(4) 加强有组织工艺废气治理。对生产装置排放的含 VOCs 工艺排气宜优先回收利用，不能（或不能完全）回收利用的经处理后达标排放；应急情况下的泄放气可导入燃烧塔（火炬），经过充分燃烧后排放。

(5) 加强非正常工况排放控制。在确保安全前提下，非正常工况排放的有机废气严禁直接排放，有火炬系统的，送入火炬系统处理，禁止熄灭火炬长明灯；无火炬系统的，应采用冷凝、吸收、吸附等处理措施，降低排放。

(6) 加强操作管理，减少非计划停车及事故工况发生频次；对事故工况，企业应开展事后评估并及时向当地环境保护主管部门报告。

(二) 有机化工行业

有机化工涉及的行业众多，工业生产中所排放的 VOCs 种类多、组成繁杂、性质差异很大，不同行业、不同的生产工艺、同一行业中的不同工序所排放的 VOCs 也是复杂多样的。应加大制药、农药、煤化工（含现代煤化工、炼焦、合成氨等）、橡胶制品、涂料、油墨、胶粘剂、染料、化学助剂（塑料助剂和橡胶助剂）、日用化工等化工行业 VOCs 治理力度。

对于典型化学合成反应工艺中，VOCs 主要来源于设备与管线组件、工艺排气、废水处理等环节，常见的有苯类（苯、甲苯、二甲苯等）、烃类（烷烃、烯烃、卤代烃和芳香烃等）、酮类、

酯类、醇类、酚类醛类、胺类、腈（氰）类等有机化合物。化学合成典型工艺流程及 VOCs 产生环节见图 2.2 和表 2.2。

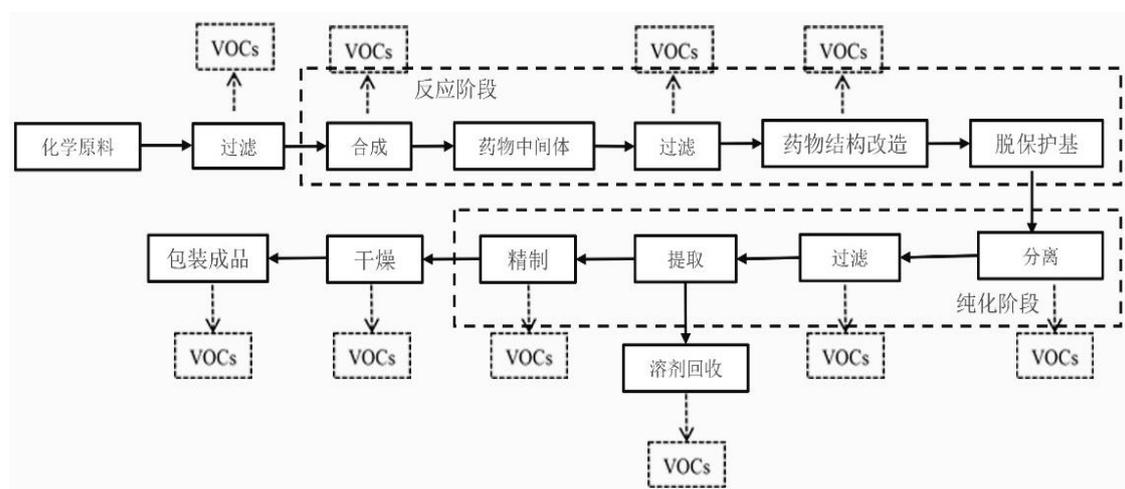


图 2.2 化学合成典型工艺流程及 VOCs 产生环节

表 2.2 化学合成典型生产工艺产污节点一览表

产污节点	排放形式
有机液体配料	有组织
发酵	有组织/无组织
反应	
分离	
提取	
精制	
干燥	
溶剂回收	
物料储存设施	无组织
装卸	
废水收集及处理	有组织/无组织
设备动静密封点泄露	无组织

VOCs 主要防治措施：

(1) 推广使用低（无）VOCs 含量、低反应活性的原辅材料和产品。农药行业要加快替代轻芳烃等溶剂，大力推广水基化类制剂；制药行业鼓励使用低（无）VOCs 含量或低反应活性的溶剂；橡胶制品行业推广使用新型偶联剂、粘合剂等产品，推广使用石蜡油等全面替代普通芳烃油、煤焦油等助剂。

(2) 原料储存过程采用压力储罐，对常压储罐在大小呼吸阀处安装废气收集措施，将收集的 VOCs 废气通过管道进入 VOCs 废气收集处理系统。对于储罐等排气的回收，一般可采用压缩+吸附法、冷凝+吸收法、吸收+冷凝法等。

(3) 逐步推广泄漏检测与修复（LDAR）。对泵、压缩机、阀门、法兰等易发生泄漏的设备与管线组件，制定泄漏检测与修复（LDAR）计划，定期检测、及时修复，注重管线、设备、阀门的材质要求和选型，防止或减少跑、冒、滴、漏现象。

(4) 优化生产工艺方案。农药行业加快水相法合成、生物酶法拆分等技术开发推广；制药行业加快生物酶合成法等技术开发推广；橡胶制品行业推广采用串联法混炼、常压连续脱硫工艺。全面推进化工企业设备动静密封点、储存、装卸、废水系统、有组织工艺废气和非正常工况等源项整治。加强无组织废气排放控制，含 VOCs 物料的储存、输送、投料、卸料，涉及 VOCs 物料的生产及含 VOCs 产品分装等过程应密闭操作。在生产过程中采用密闭设备或在密闭空间内操作，废气排至 VOCs 废气收集处理

系统；无法密闭的，采取局部气体收集措施，废气排至 VOCs 废气收集处理系统。

(5) 加强末端治理，反应尾气、蒸馏装置不凝尾气等工艺排气，工艺容器的置换气、吹扫气、抽真空排气等应进行收集治理。对于含高浓度 VOCs 的废气，优先采用冷凝回收、吸附回收技术进行回收利用，不能回收利用的，采用吸附冷凝结合燃烧法等工艺处理实现达标排放；对于含中等浓度 VOCs 的废气，采用吸附技术回收有机溶剂，或采用催化燃烧和热力焚烧技术净化后达标排放；对于含低浓度 VOCs 的废气，有回收价值时采用吸附技术、吸收技术对有机溶剂回收后达标排放；不宜回收时，采用吸附浓缩燃烧技术生物技术、吸收技术等净化后达标排放。

(6) 污水站调节、水解酸化、缺氧等工段产生的废气宜采用化学洗涤、纳米气泡氧化吸收法等预处理工艺，结合生物法、低温等离子等工艺进行处理后达标排放。

(三) 表面涂装行业

表面涂装行业主要应用领域有汽车制造、汽车修补、木器表面装饰、船舶及集装箱的工业防腐、道路移动设施、塑料产品、卷材、电子行业等。应全面推进集装箱、汽车、木质家具、船舶、工程机械、钢结构、卷材等制造行业工业涂装 VOCs 排放控制，加强其他交通设备、电子、家用电器制造等行业工业涂装 VOCs 排放控制。

涂装行业 VOCs 排放途径一般为储运过程排放、调漆过程排放、喷涂和干燥过程排放以及清洗过程排放。VOCs 类别主要是乙酸乙酯、乙苯、间对二甲苯等。以汽车制造表面涂装行业为例，涂装产生的有机废气的特点是大风量，中低浓度。VOCs 排放在中涂和面漆喷漆过程中，大约 80-90%的 VOCs 是在喷漆室和流平室排放，20-10%的 VOCs 随车身涂膜在烘干室中排放。汽车制造典型生产工艺及 VOCs 排放环节见图 2.3 和表 2.3。

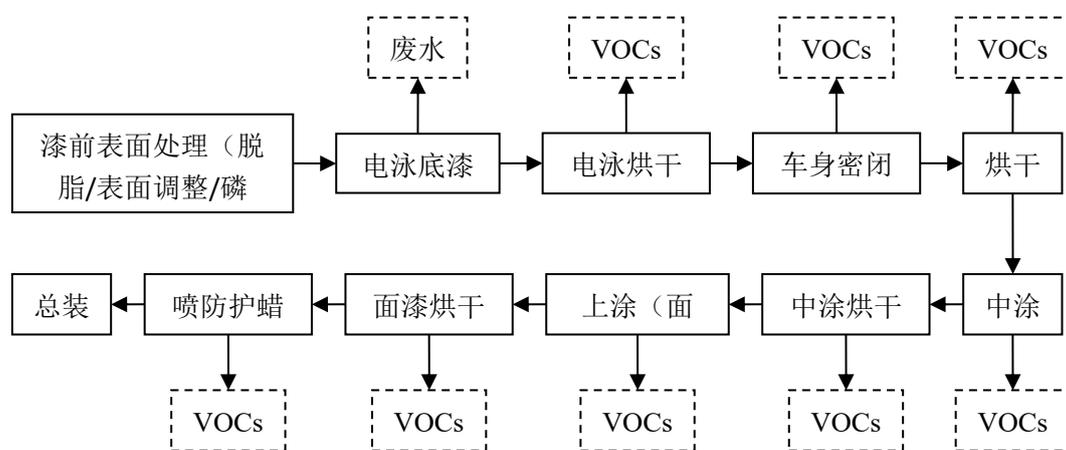


图 2.3 汽车制造典型生产工艺及 VOCs 排放环节

表 2.3 涂装工艺典型生产工艺产污节点一览表

产污节点	排放形式
调漆	有组织/无组织
供漆	
涂装	
干燥/烘干	
修补	

VOCs 主要防治措施：

(1) 提高低挥发性有机物含量的涂料使用比例。鼓励企业使用符合环保要求的水性、高固份、粉末、紫外光固化等低 VOCs 含量的涂料。

(2) 鼓励采用密闭一体化生产技术，降低单位产品的挥发性有机物排放量。鼓励企业采用静电喷涂、淋涂、辊涂、浸涂等涂装效率较高的涂装工艺，鼓励企业采用自动化、智能化喷涂设备替代人工喷涂，单位涂装面积的 VOCs 排放量应符合相关标准要求。

(3) 加强工艺废气的集中收集和治理。涂料、稀释剂、清洗剂等含 VOCs 的原辅材料应储存或设置于密封容器或密闭工作间内以减少 VOCs 的无组织排放。喷漆、流平和烘干等产生 VOCs 废气的生产工艺应设置于密闭工作间内，配备有机废气收集系统。除工艺有特殊要求外禁止露天和敞开式喷涂作业。因工艺要求无法设置密闭工作间的，VOCs 排放工段应设置集气罩、排风管道组成的排气收集系统。经收集的有机废气应采用催化燃烧、热力焚烧以及其它适用的新技术净化处理后达标排放。

(四) 印刷行业

包装印刷行业在生产过程中使用大量的溶剂型油墨，而这些溶剂型油墨含有 50%-60% 的挥发性组分，加上调整油墨粘度所需的稀释剂，在印刷品的生产和干燥过程中会排放大量的 VOCs 有机废气。印刷行业主要排放的有机挥发物特性是浓度低、风量大，

有机挥发物的主要成分为非甲烷总烃、油墨中的粉尘、洗车水、异丙醇、润版液，其他还有少量的酯类等。印刷普遍采用苯系溶剂，而苯系溶剂挥发量大，产生大量的 VOCs 有机废气，其中主要成分为苯、甲苯、二甲苯、非甲烷总烃等。印刷工艺主要包括平版印刷、凸版印刷、凹版印刷和丝网印刷，不同印刷工艺的 VOCs 来源和排放方式基本相同。印刷行业典型生产工艺及 VOCs 排放环节见图 2.4 和表 2.4。

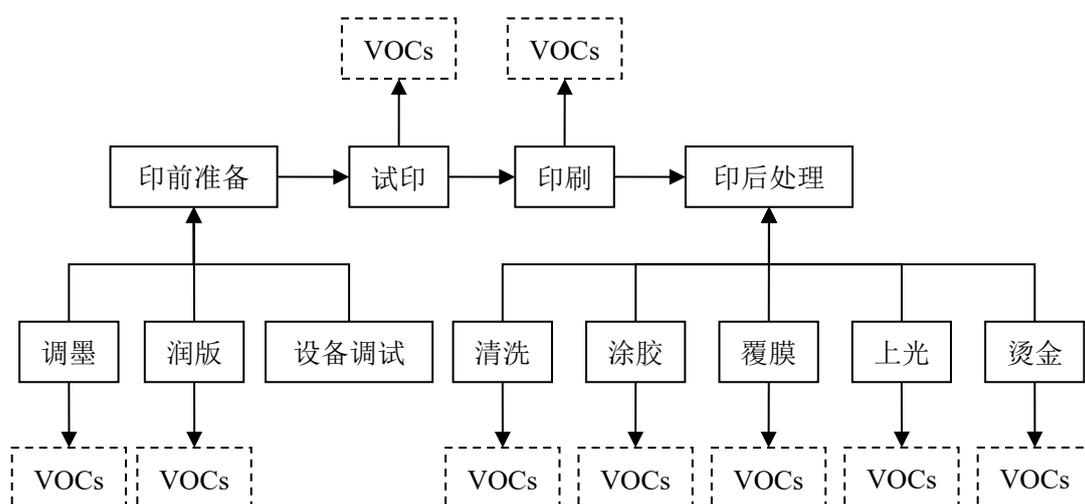


图 2.4 印刷行业典型生产工艺及 VOCs 排放环节

表 2.4 印刷行业典型生产工艺产污节点一览表

生产工艺	产排污节点	排放形式
印前	油墨调配	有组织/无组织
	制版	
印刷	供墨	
	印刷	
	润版	
	清洗	
	烘干	

印后	覆膜	
	复合	
	涂布	

VOCs 主要防治措施：

(1) 加大源头替代力度，提高环保型油墨、胶粘剂的使用比例。鼓励使用通过环境标志产品认证的环保型油墨、胶粘剂，禁止使用不符合环保要求的油墨、胶粘剂。印刷过程推广使用水性油墨、紫外光固化油墨（UV 油墨）、辐射固化油墨（EB 油墨）、醇溶性油墨、植物基油墨等低 VOCs 低毒的原辅材料，复合、包装过程逐渐使用水性胶粘剂替代溶剂型胶粘剂，推广无溶剂复合技术，书刊印刷行业推广使用预涂膜技术。

(2) 加强工艺废气的集中收集和治理。油墨、粘胶剂、有机溶剂等挥发性原辅材料应密封贮藏，沸点较低的有机物料应配置氮封装置。产生 VOCs 废气的工艺线应设置于密闭工作间内，配备有机废气收集系统。无法设置密闭工作间的生产线，VOCs 排放工段应设置集气罩、排风管道组成的排气收集系统。根据废气组成、浓度、风量等参数选择适宜的技术，对车间有机废气进行净化处理。对单一组分的高浓度有机废气，应优先考虑回收利用；对难以回收利用的有机废气，应采用催化燃烧、热力焚烧以及其它适用的新技术净化处理后达标排放。

（五）油品储运销行业

油品储运销行业 VOCs 主要来源于三方面，一是油品的装卸过程中，存在着不同程度的泄露和人为排放问题，二是工艺单元排放的油气无法彻底回收利用，三是设备或管线组件连接处（如泵、压缩机、释压装置、阀门、管线、及缝隙结合处等），存在一定呈上的油气的泄露。油品储运销行业典型流程见图 2.5



图 2.5 油品储运销行业典型流程图

在上图各环节中，储油罐的收发油作业、油罐的静置呼吸、中间罐车卸油、油罐汽车装油、管道输送等环节均存在不同程度的油品蒸发损耗。油品储运典型生产工艺产污节点见表 2.5。

表 2.5 油品储运典型生产工艺产污节点一览表

产污节点	排放形式
物料储存设施	无组织
装卸	

VOCs 主要防治措施：

（1）加强收发作业、呼吸作用管理，地下存储和降低温度；储油库、加油站和油罐车宜配备相应的油气收集系统，储油库、加油站宜配备相应的油气回收系统。

（2）油类（燃油、溶剂等）储罐宜采用高效密封的内（外）浮顶罐，当采用固定顶罐时，通过密闭排气系统将含 VOCs 气体输送至回收设备。

(3) 运输过程，应集中配送，防止油气蒸发，避免跑冒漏，避免事故排放。油类（燃油、溶剂等）运载工具（汽车油罐车、铁路油槽车、油轮等）在装载过程中排放的 VOCs 密闭收集输送至回收设备，也可返回储罐或送入气体管网。

(4) 装卸过程应强化管理，加强过程控制，提高回收利用率，进行集中处置。

三、典型案例

(一) 典型案例 1

某石化公司，集石油加工、石油化工、煤化工、天然气化工、盐化工为一体，配套大型炼油、化工和化纤厂。公司从深度治理涉 VOCs 有组织工艺废气、物料储罐呼吸气治理、油品装载过程治理、污水处理场 VOCs 治理和加强无组织排放管控等方面，有效提高 VOCs 综合治理水平。

(1) 深度治理涉 VOCs 有组织工艺废气

①完成橡胶厂顺丁、丁苯工艺废气治理。投资 4338 万元的顺丁橡胶废气处理装置投入运行，采用“冷凝-除雾-催化氧化”处理技术。装置设计处理能力为 70000Nm³/h，主要流程为：废气—水洗—除雾—换热—催化反应—排放。之后，投资 8843 万元的丁苯橡胶装置废气装置投入运行，采用蓄热式催化氧化（RCO）处理技术。装置设计处理能力为 240000 Nm³/h，主要流程为：废气—过滤—换热—催化反应—换热—排放。VOCs 处理装置建成投

用以来，运行稳定，处理效果显著，大大降低了工艺有组织 VOCs 排放量。

②建成投用丁辛醇装置 RTO 装置。设计处理能力为 15000Nm³/h，投资额 2400 万元，将生产装置工艺废气、VOCs 物料罐区无组织废气有效收集、处理达标后排放。

(2) VOCs 物料储罐呼吸气治理

包括氮封、内浮顶、活性炭吸附、低温柴油吸收、冷凝、膜分离、惰封循环、加热炉焚烧以及 RTO 焚烧等。典型治理工艺介绍如下：

①炼油厂油品车间轻污油罐恶臭气体处理装置。投资额为 877 万元，主要是对轻污油罐尾气进行治理，采用“低温柴油吸收+有机胺脱硫+加热炉焚烧”工艺技术。废气主要为非甲烷总烃（浓度为 $2.37 \times 10^5 \sim 9.09 \times 10^5 \text{ mg/m}^3$ ）和硫化氢（ $800 \sim 7800 \text{ mg/m}^3$ ），治理设施设计规模 150m³/h，之后增加加热炉焚烧流程。

②橡胶厂储运车间内浮顶罐区呼吸气治理。投资 2100 万元内浮顶罐区呼吸气回收装置建成投入运行。该装置采用“低温冷凝/水洗+回收”技术。处理后的废气经放空管网进入气柜，通过压缩机进行回收，压缩机不凝气作为燃料气送齐翔锅炉进行燃烧，成功解决了内浮顶储罐呼吸气的治理，实现了“零”排放。

(3) 油品装载过程 VOCs 治理

炼油厂 2 套成品油装车尾气均采用“低温柴油吸收+催化氧化”处理工艺，实现稳定达标排放。

（4）污水处理场 VOCs 治理

公司炼油、橡胶、乙烯等污水处理场均建成投用 VOCs 治理设施，曝气池等高浓度挥发气密闭收集、处理后达标排放。

（5）加强无组织排放管控

①规范开展 LDAR 工作。严格按照国家法律法规及排污许可技术规范要求，先后购置 27 台 VOCs 便携式监测仪、1 台红外热成像仪，全面开展泄漏检测与修复（LDAR）工作。

②实施工艺优化，减少无组织排放。2019 年炼油厂通过优化装置直供料，停用 17 台涉 VOCs 物料储罐；化肥厂丁辛醇车间罐区实施优化整合，停用 VOCs 物料储罐 13 个、机泵 14 台。

③实施屏蔽泵改造。化肥厂针对物料输送过程醇醛挥发性强、异味大的实际情况，实施屏蔽泵改造，将 129 台普通离心泵升级为密封效果好的屏蔽泵；橡胶厂共计投资 1422 万元，分阶段、分批次将装置现场的 96 台离心泵升级为屏蔽泵，以减少 VOCs 无组织排放。

④强化绿色检修、环保检修理念，进一步完善生产装置停、开工环保措施，控制 VOCs 排放。炼油厂使用异味治理一体化撬装设备，减少储罐蒸煮、重油加氢装置退油、系统吹扫期间的 VOCs 排放。

⑤通过使用水性漆替代传统油漆减少检维修刷漆防腐过程 VOCs 无组织排放。

（二）典型案例 2

某制药企业，工艺采用水洗塔+自动吸附/解析装置，两级吸附，可串联也可并联；当其中一塔吸附饱和时进入脱附状态，启用备用塔作为吸附塔；始终为在上一循环时解析完毕的吸附装置，吸附完毕后用蒸汽进行吹扫，经冷凝后溶剂回收用于生产工艺。内循环及干燥风回流采用“循环风”系统，避免排气筒出现“白汽”并保持系统风压平衡，进一步提升废气处理效果及回收效率，实现良性循环。装置系统设计有运行参数优化程序，降低蒸汽和用电耗量，大大降低了废气处理和运行成本，电费约 632 元/天，吸附材料可 1~2 年更换一次，约 82.2 元/天，蒸汽费用约 187.5 元/天，每年运行成本约 27 万元；经检测处理效率可达 95% 以上，削减 VOCs 200 t/年。

（三）典型案例 3

某化工企业，投资一千余万对甲醛生产线、吡啶生产线、双氧水生产线罐区呼吸废气、反应废气、精制废气、污水废气进行综合治理，建成一套 42900 风量的废气焚烧炉，焚烧后的废气经脱硝、脱硫、除尘后外排，各项污染物均能稳定达标，焚烧过程中产生的热量有效回用于各生产工艺环节，在保障外排大气污染物下降到最低状态的同时还能满足清洁生产的各项需求。

（四）典型案例 4

某汽车整车制造企业，公司设立 VOCs 提标改造项目，对车身涂装（大涂）和保险杠涂装（小涂）两个车间的废气处理设施

改造。大涂装 VOCs 治理项目改造包含内部循环风改造和处理设备改造。内部送风改造是指由原有的新风直送改为机器人站内循环供风，起到提高废气 VOCs 浓度减少送风量的作用；VOCs 处理设备改造为 KPR 浓缩沸石转轮和 RTO 蓄热式焚烧炉共同处置，可提高废气处理效率，且降低能耗。项目完成后，车间内喷漆室新风供应量降低 50% 以上，降低部分由循环风代替，极大地降低了能耗需求，预计可降低电能约 30%，冷量需求降低 50% 以上。小涂改造项目是在原有内循环及 RTO 蓄热式废气焚烧炉的基础上，增加了进口的沸石转轮吸附着设备。项目完成后，整体设备的废气处理能力将提升，同时自身能耗也会降低，排放浓度进一步降低，以达到节能降废的效果。

（五）典型案例 5

某汽车制造业，采用涉 VOCs 工艺全流程控制，原料贮存采用全密封措施，调漆车间在密闭空间内采用上进风、下吸风装置进行有效收集，涂装工艺全过程密闭微负压改造，沾染了有机溶剂的危险废物均采用全密封贮存措施，除调漆车间内有轻微异味之外，厂区与车间内其他点位均未嗅到涂装类异味，治污设施采用一套 100 万风量的沸石转轮+RTO 焚烧装置，在线数据显示该企业废气处理效率持续稳定在 90% 以上。

（六）典型案例 6

某木门制造企业，从源头控制，采用水性漆替代油性漆，在提升漆膜硬度、丰满度等性能的基础上，大大降低了 VOCs 的排

放量，VOCs 排放量从原来油性漆 0.307 t/年降低为水性漆 0.035 t/年，从源头上减少了 VOCs 产生；过程控制采用大规模自动化设备加工生产线技术，购置真空喷涂一体机，修色面漆机器人、木门加工中心等设备，实现木门油漆涂装工艺由机器设备代替人工操作，末端设置油漆回收装置，采用履带刮擦装置即时收集多余油漆，对油漆回收再利用，提高原材料的利用率。

（七）典型案例 7

某印刷包装企业，通过源头替代，凹版印刷使用乙醇基水性油墨替代原有的溶剂型油墨，凹版印刷车间油墨桶敞口位置基本无法嗅到异味；胶印车间使用植物基油墨替代溶剂型油墨，调色车间、胶印车间基本无法嗅到异味。

（八）典型案例 8

某包装材料企业，涂布车间独立密闭，离型、上色、上胶等工序均在涂布车间内进行，每台涂布机采用半包围集气方式，烘道与印刷机头相连且密闭；离型、上胶、上色工序废气收集引至 TNV 回收式热力焚烧系统。废气焚烧炉为卧式圆柱结构，内部设有扰动结构的花隔墙和衬有耐火材料及隔热材料。先启动废气风机在换热内通入冷流体，废气流量控制在 30%左右，天然气通过管路输送到燃烧器，点火由燃烧器自动点火系统点燃，使炉内温度缓慢升高，当控制柜上的炉温显示仪显示 750℃时，此时逐步加大废气流量通过废气分布器呈平推流状进入焚烧炉，达到操作流量之后，将燃烧机投入自动控制状态。废气在炉内被加热到 750℃

以上，经过蓄热墙，排出炉体，烟气经过与废气、空气换热降温到 120℃左右排入大气。废气经过加热，加热到 530℃后进入焚烧炉，有机物在炉内热分解；空气经过加热，加热到 300℃后进入烘箱。经整治提升后，通过优化环保措施，使得污染物排放减少，进一步在总量控制条件下使污染物达标排放。

（九）典型案例 9

某石油化工有限公司依据国家针对挥发性有机物十二源项排查，落实挥发性有机物治理任务，在 VOCs 减排方面完成以下几项工作：一是油气回收系统全面提升，将浓缩后的油气进行全面回收，最终不凝气与燃烧炉配风混匀后导入燃烧系统，在减少挥发性有机物产生量的同时贯彻了清洁生产理念；二是冷却塔系统采用全密闭措施，使用初盐水进行换热，有效提高换热效率的同时不提高挥发倍数；三是原料采购过程采用全密闭管路传输，有效避免了车辆转运时逸散的有机废气；四是生产过程多数点位调整为物料直供，通过管道方式直接传输，有效降低了中间槽、中间罐呼吸口有机废气外排；五是动静密封点采用无泄漏螺栓、无泄漏集风等先进工艺；六是塔器安全阀设置气柜，通过压缩机收集气柜废气后回用，尾气并入燃烧炉配风，有效降低火炬长明灯开启时长；七是针对 LDAR 数据进行综合分析，找出易泄漏的动静密封点，并通过工艺改进等方式进一步控制物料泄漏；八是采用密闭取样器对各小样取样口进行无组织排放控制。各项措

施从源头、过程、末端全面加强了挥发性有机物排放的控制，很大程度上削减了 VOCs 的产生量。

(十) 典型案例 10

2019 年中央环保督察回头看发现某玻璃钢制品加工企业管理混乱，无组织排放问题严重，省生态环境厅对该行业进行调研期间发现，玻璃钢制品行业主要产生的 VOCs 空气比重较高，逸散后下沉速度较快，通常车间地面 VOCs 浓度为房顶的 10-100 倍，当时该行业废气集气罩多设置在生产工序顶部，废气难以有效收集。经多次研究讨论后，该地区目前有十余家企业完成综合整改，采取全密闭生产线+底部收集措施对废气进行有效收集，大幅度降低了 VOCs 无组织排放量，同时将原有的光氧+活性炭、单一光氧、单一活性炭等低效处理装置更新为浓缩+热氧化装置，提高了废气处理效率，经非定量快速检测，个别企业废气去除率可达 95%。

(十一) 典型案例 11

某钢结构喷涂企业在大型喷涂车间内进行人工喷涂，车间内整体的密闭效果较差，车间采用板房结构，存在破损、密封不严的情况。所需喷涂的大型钢构件长度约 20 m，宽度与 8 m，企业设置了伸缩式喷漆房，但仅在喷漆房的一端集气，且无送风系统，废气收集口仅约 1.5 m×1.5 m，风量较小，收集效果较差。废气治理系统风量为 60000 m³/h，采用喷淋+UV 光氧+活性炭吸附工艺，喷淋塔循环液长期不更换，水泵已被损坏，无法达到去除漆渣的目的；UV 光氧设备整体停留时间不足 0.5 s，治理效果较差；末

端活性炭吸附装置采用蜂窝活性炭，活性炭吸附设备仅 2 m×2 m×1.5 m，装填厚度仅 3 层（即 0.3 m），装填量仅约 1.2 m³，停留时间短且长期不更换，VOCs 实际去除效率低。

（十二）典型案例 12

某印刷企业采用辊涂方式对塑料包装袋表面进行产品信息、商标等进行印刷，辊涂工位 VOCs 废气产生源面积约 1.2 m×1.5 m，采用顶部集气罩对废气进行收集。采用集气罩的面积约 1.2 m×1.0 m，末端抽风风机的风量为 2000 m³/h，其集气罩罩口面风速约 0.46 m/s，集气罩距离辊涂面源约 2 m。本案例集气罩面积设计较小，不能覆盖 VOCs 产生的面源；加之集气罩距离 VOCs 挥发面源较远，对 VOCs 的控制风速达不到 0.3 m/s 的无组织控制要求。因此，该案例 VOCs 废气不能有效收集，在车间内形成一定程度的无组织排放。同时，该车间整体未采用负压设计，且夏季有门窗敞开的现场，因此造成 VOCs 无组织排放至外环境。该案例末端采用活性炭吸脱附+催化燃烧的处理方式，催化氧化温度低于 150℃，该案例催化氧化温度较低，脱附后的废气处理效率较低。

（十三）典型案例 13

某塑料包装印刷公司，有三条流水印刷线，在印刷机头部设置顶部集气罩，集气后废气进入 RTO 装置进行焚烧。由于顶部集气罩未安装向下延伸的软帘延伸段，造成吸气的高度不足，只有 60 cm 左右，无法收集到下部的废气。经现场测试，顶部集气罩附近废气中 VOCs 浓度，约 2600 mg/m³，大部分进入 RTO 废气焚

烧系统；机头下部的废气处于无组织逸散状态，与环境空气自燃混合在一起，实测 VOCs 浓度约 1300 mg/m³；车间内 1.5 m 高度处实测 VOCs 浓度约 600 mg/m³。该案例中集气罩设计有问题，无法实现良好的集气效果。而且，RTO 装置未设置浓缩段，低浓度废气收集进入 RTO 焚烧装置后，也无法实现直接燃烧。