

# 上海市工业固定源挥发性有机物治理 技术指引

A Guidance Note on Best VOCs Abatement Technologies  
for Industries Stationary Sources in Shanghai



上海市环境保护局  
上海市环境科学研究院

2013.07

## 前言

为深入贯彻落实国家《重点区域大气污染防治“十二五”规划》（环发[2012]130号文）要求，加强全市工业固定源挥发性有机物排放控制，切实改善全市环境空气质量，减少灰霾天气，上海市环境保护局于2012年08月开展了《典型行业挥发性有机物治理技术可行性研究》等科研工作，并基于科研成果编制《上海市工业固定源挥发性有机物治理技术指引》。

本指引根据上海经济技术发展水平，以及挥发性有机物排放控制要求，以防治结合、过程控制为依托，充分考虑资源回用和能源利用，提出了具有较大减排潜力的末端治理技术，为上海市工业固定源挥发性有机物减排工作提供技术支撑。

本指引在编制过程中，得到了环保管理者、企业业主和经营者、技术研发单位、设备制造商等各界人士的支持和帮助，在此表示衷心感谢。

## 目录

前言.....	I
1 概述.....	1
1.1 定义.....	1
1.2 来源.....	1
1.3 影响与危害.....	1
1.4 重点行业.....	2
1.5 国外经验.....	2
1.5.1 美国.....	2
1.5.2 日本.....	2
2 治理技术.....	3
2.1 吸附法.....	5
2.1.1 颗粒活性炭吸附装置.....	5
2.1.2 蜂窝活性炭吸附装置.....	7
2.1.3 活性碳纤维吸附装置.....	7
2.1.4 沸石转轮吸附装置.....	8
2.2 燃烧法.....	9
2.2.1 热氧化炉.....	9
2.2.2 催化氧化器.....	11
2.3 冷凝法.....	12
3 重点行业推荐技术.....	14
3.1 表面涂装.....	16
3.1.1 捕集.....	16
3.1.2 漆雾.....	16
3.1.3 喷涂和烘干废气.....	17
3.2 汽车涂装.....	18
3.2.1 喷漆废气.....	19
3.2.2 烘干废气.....	19
3.3 涂料生产.....	20
3.3.1 捕集.....	21
3.3.2 预处理.....	21
3.3.3 VOCs 净化.....	21

---

3.4 包装印刷 .....	21
3.4.1 捕集 .....	21
3.4.2 凹印废气 .....	22
3.4.3 干复废气 .....	22
3.4.4 轮转胶印废气 .....	22
3.5 工业涂布 .....	23
3.5.1 捕集 .....	23
3.5.2 涂布和烘干废气 .....	23
3.6 光电产品制造 .....	24
3.6.1 一次排风 .....	24
3.6.2 二次排风 .....	25
3.6.3 排放检测 .....	25
3.7 有机化学原料制造 .....	25
3.8 合成材料生产 .....	25
参考文献 .....	27

## 1 概述

### 1.1 定义

挥发性有机物（以下简称 VOCs）定义为满足以下任一条件的有机化合物：

- （1）在太阳紫外线存在下，可与氮氧化物发生反应产生光化学氧化物；
- （2）20℃下蒸汽压大于 10Pa；
- （3）标准大气压（101.3kPa）下沸点不高于 260℃。

### 1.2 来源

VOCs 排放来自于自然源和人为源。自然源主要为植被排放等；人为源又分为移动源和固定源，固定源中又包括生活源和工业源等。

工业固定源 VOCs 排放所涉及的工业行业按产品生命周期可划分为：

（1）有机溶剂产品的生产：包括炼油与石化、有机化工等溶剂提炼或有机物生产的行业；

（2）有机溶剂产品的储存、运输和营销：主要是油品、燃气、有机溶剂的储存、转运、配送和销售过程等储运和零售行业；

（3）以有机溶剂为原料的生产：包括涂料行业，合成材料行业，食品饮料行业，胶粘剂生产行业，日用品行业，农用化学品行业等；

（4）有机溶剂产品的使用：包括装备制造业涂装、半导体与电子设备制造、包装印刷、医药化工、塑料和橡胶制品生产、人造革生产、人造板生产、造纸行业、纺织行业等。其中，装备制造业涂装涵盖所有涉及到涂装工艺的行业，如机动车制造与维修、家具、家用电器、钢结构、金属制品、彩钢板、集装箱、造船、电器设备等众多行业。

由于工业固定源产生的 VOCs 占比较大，通过管控可以获得较明显成效，是重点减排对象。

### 1.3 影响与危害

在大气环境中，VOCs 发生光化学反应形成臭氧等光化学氧化物质，对环境空气质量产生影响。

以固态或液态形式排放的 VOCs 会直接形成（一次）PM<sub>2.5</sub>。以气态形式排放的，在大气环境温度下快速凝结成颗粒物，这些称之为可凝颗粒物大部分都是 PM<sub>2.5</sub>。VOCs 排放也是二次颗粒物的关键前驱物之一，它与硫酸盐、氮氧化物、氨等污染物在大气环境中通过复杂的化学反应生成细颗粒物，造成了大多数的 PM<sub>2.5</sub> 污染。

有些 VOCs 是有毒有害物，其具有挥发性、脂溶性及渗透性，呼吸等方式

进入人体，伤害人体健康。有些 VOCs 是恶臭气味，对人体生理及心理皆会造成一定的影响。

## 1.4 重点行业

根据统计，2012 年上海 VOCs 排放总量约为 48.6 万吨，其中工业生产排放量为 29.4 万吨，占到了 VOCs 排放总量的 60%，其中表面涂装、汽车制造、涂料生产、包装印刷、涂布、光电产品制造、有机化学原料制造和合成材料生产是上海 VOCs 排放控制的重点行业。

## 1.5 国外经验

### 1.5.1 美国

自七十年代开始，美国陆续颁布了系列工业行业 VOCs 排放控制法规，采取了严格的环境空气质量达标措施，经过 40 年的持续努力，取得了明显的成效。

根据美国有关统计资料，自 1990 年至 2010 年，美国在经济增长（国内生产总值 GDP）65%，人口增长 24%，能源消耗增加 15% 的形势下，SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>、VOCs 等污染物年排放量明显减少。其中 VOCs 总排放量下降 29.4%，工业行业 VOCs 排放总量下降 25.8%，其中化学工业、冶金工业和溶剂使用下降了 86.5% 至 43.1%，工业行业 VOCs 排放量占美国总排放量 39.3%。

与此同时，美国环境空气质量改善也取得了相应的成效，O<sub>3</sub> 浓度从 1990 年 89ppb（191μg/m<sup>3</sup>）下降到了 2010 年 73ppb（156μg/m<sup>3</sup>），降低 18.0%；PM<sub>2.5</sub> 浓度从 2000 年 13.22 μg/m<sup>3</sup> 下降到了 2010 年 9.99μg/m<sup>3</sup>，降低了 26.6%。

### 1.5.2 日本

日本自 2000 年开始实施 VOCs 强制减排计划，通过与自愿性减排相结合，至 2010 年实际减排率达到 44%，其中强制性减排的九大工业生产工艺过程平均减排率达 60%，见表 1-1。

表 1-1 日本强制性减排对象排放量统计（吨/年）

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合计
排放源	化学制品干燥	涂装	涂装干燥	粘合干燥	连接干燥	胶印	凹印	清洗	储藏	/
2000 年	14,589	88,230	62,345	137,192	29,986	4,536	93,614	662	1,025	432,180
2010 年	3,892	51,239	31,260	29,287	9,239	3,801	40,658	403	664	170,442
减排率	73.3%	41.9%	49.9%	78.7%	69.2%	16.2%	56.6%	39.1%	35.2%	60.6%

## 2 治理技术

污染控制通常可通过污染预防、过程控制和末端治理等三个层次来实施。由于污染预防和过程控制等措施与行业特性关系密切，宜分行业研究，故本指引仅限于末端治理技术。

VOCs 末端治理技术可以有多种选择，在工程实践中已有应用的方法汇总于表 2-1 和图 2-1。

表 2-1 常见 VOCs 末端治理技术汇总

技术方法	原理	技术关键	适用场合	应用效益	
冷凝法	利用气体组分的冷凝温度不同，将易凝结 VOCs 组分通过降温或加压凝结成液体而得到分离的方法。	冷凝温度/压缩压力	高浓度	溶剂回收	
吸附法	颗粒活性炭	利用多孔固体（吸附剂）将气体混合物中一种或多种组分积聚或凝聚在吸附剂表面，达到分离目的。	吸附温度或压力、过滤风速、穿透周期。	低浓度	浓缩回收 热量/溶剂
	碳纤维				
	沸石转轮				
燃烧法	热氧化炉	在高温下同时供给足够的氧气，将 VOCs 气体完全分解成二氧化碳和水等无机物。	燃烧温度、停留时间。	高浓度	热量回收
	催化氧化器	利用催化剂，在较低温度下将 VOCs 氧化分解。	空间速度、氧化温度。	中浓度	
其他	吸收法	利用 VOCs 各组分在选定的吸收剂中溶解度不同，或者其中某一种或多种组分与吸收剂中的活性组分发生化学反应，达到分离和净化的目的	低、中浓度	合成革 DMF 溶剂回收	
	膜法	利用固体膜作为一种渗透介质，废气中各组分由于分子量大小不同或核电、化学性质不同，通过膜的能力不同，从而达到分离或回收溶剂蒸汽的目的	高浓度	储运油气回收	
	静电法	利用高压电场使污染物带荷电，再利用电场力使其富集于极板上的方法	颗粒状	合成革增塑剂回收	
	火炬	在非正常生产情况下，将可燃、有毒或腐蚀性的 VOCs 气体燃烧转化成危害极小的化合物	高浓度	石化和有机化工应急排放处理和开停工排放处理	
	化学氧化法	将具有化学氧化性的吸收液洗涤 VOCs 气体，达到净化的目的	低浓度	特定的低浓度 VOCs 气体，但具有较严重气味污染的场所	
	等离子法	利用外加电压产生高能等离子体去激活、电离、裂解 VOCs 组分，使之发生分解、氧化等一系列复杂的化学反应。	低浓度		
	生物法	微生物以 VOCs 作为代谢底物，使其降解，转化为无害的、简单的物质。	低浓度		
	光催化氧化	利用光催化剂（如 TiO <sub>2</sub> ），氧化分解 VOCs 气体	低浓度		

从资源循环利用的角度，溶剂回收是最佳选择。溶剂回收最常用的方法是吸附法，其中颗粒活性炭吸附、碳纤维吸附等技术是经典的成熟技术代表；冷凝法是溶剂回收的最终手段，也是高浓度 VOCs、小风量气体预处理的常用方法，但冷凝后 VOCs 浓度仍难达到直接排放的要求，所以需要和其他方法组合使用。吸收法、膜过滤、静电法等技术特定的工业行业和 VOCs 组份情况下，也是溶剂回收的有效方法，如吸收法用于合成革 DMF 溶剂回收，膜过滤法用于储运油气回收，静电法用于合成革增塑剂回收等。

从资源综合利用的角度，热量回用也是一个好方法，即采用燃烧法氧化分解 VOCs，并回收利用有机物的分解热量。换热式热氧化是最经典的方法，但往往需要消耗不少燃料；通过蓄热式换热，可有效提高换热效率，减少能源消耗；采用催化氧化可以通过大幅降低氧化温度，减少能源消耗。如果 VOCs 浓度较低，可通过沸石转轮浓缩，将 VOCs 浓度浓缩提高后再采用热氧化方式进行净化处理。

火炬是石化和有机化工企业常用的 VOCs 治理方法，但主要用于应急排放处理和开停工排放处理。化学氧化、等离子氧化、光催化氧化、生物分解等 VOCs 治理技术正在不断发展中，特别是一些低浓度并具有明显气味污染的场合，这些技术已取得了较成功的工程应用。

为改善环境空气质量，降低 PM<sub>2.5</sub> 污染浓度，大幅减少 PM<sub>2.5</sub> 前体物——VOCs 排放量，是我们当前面临的紧迫任务。采用最先进的治理技术，最大限度减低 VOCs 排放浓度，是 VOCs 减排的重要措施之一。吸附、热氧化和冷凝等方法不仅技术成熟，净化率高，而且通过溶剂回收或热量回收还可获得相应的经济效益，是取得实质性减量排放的有效技术手段。

根据上海特点，本指引重点推荐的 VOCs 末端治理技术为：吸附、燃烧、冷凝等三大方法。

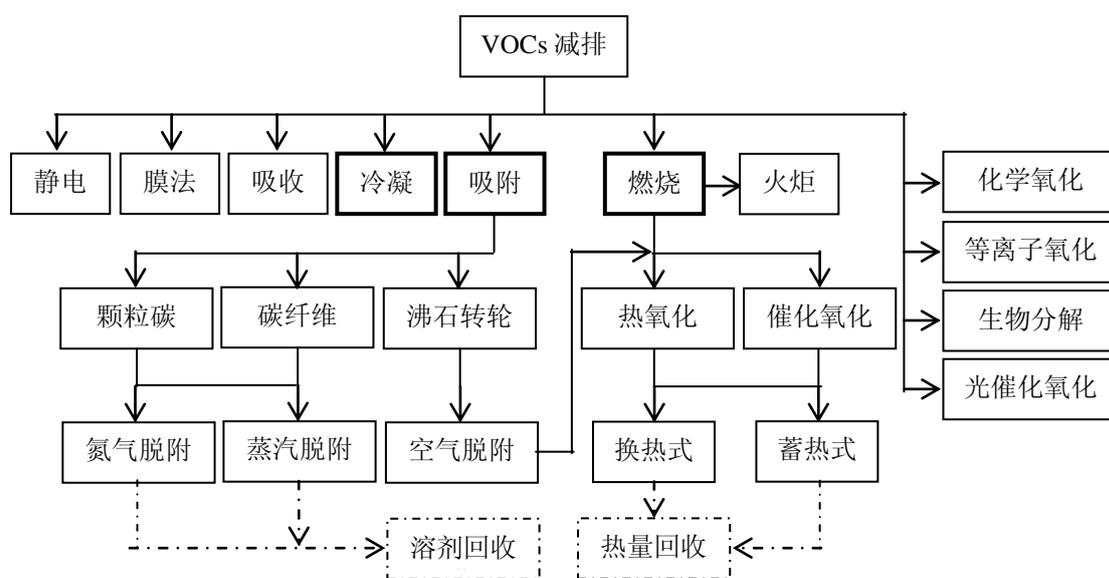


图 2-1 VOCs 末端治理技术汇总

## 2.1 吸附法

吸附（Adsorption）技术早在二十世纪五十年代就广泛用于 VOCs 的高效回收，随着吸附剂改良以及吸附系统改进，吸附技术在 VOCs 治理应用更加广泛、深入。

吸附原理为 VOCs 气体通过一多孔固体物质（吸附剂），使之附着于其固体表面上，从而达到去除的目的。

最常用的吸附剂是活性炭，其由煤、木材、果壳、石油焦等原材料制得，具有巨大表面积的内部孔结构。

吸附剂的有效性主要取决于吸附 VOCs 的表面积，一般来说表面积越大吸附能力越大。

吸附剂的吸附能力用吸附容量表征，其是重要的技术性能参数之一。活性炭吸附 VOCs 的饱和吸附容量约 20~40%wt；用于吸附装置中活性炭的实际有效吸附量约为饱和容量的 40% 以下。

吸附容量主要影响因素有：

- （1）温度——通常，适宜的吸附温度是不高于 40℃；
- （2）压力——压力高时，有利于吸附进行；
- （3）浓度——浓度高时，VOCs 容易被吸附；
- （4）分子量——当分子量较小时，通常不容易吸附；但当分子量大于 200 时，不容易脱附；
- （5）化学活性——有些 VOCs 分子会与活性炭表面发生反应，如有机酸、醛以及部分酮和某些单体；而酮类、酯类或卤素等溶剂时，易氧化分解或水解，产生腐蚀性；
- （6）湿度——气体中水分子会与 VOCs 分子竞争吸附，特别是当相对湿度大于 50% 时；
- （7）颗粒物——液状和颗粒态的污染物会积聚在吸附剂表面造成吸附失效以及流阻大幅增加。

### 2.1.1 颗粒活性炭吸附装置

一套完善的吸附装置可以长期保持 VOCs 去除率不低于 90%。

#### 2.1.1.1 更换式颗粒活性炭吸附装置

更换式颗粒活性炭吸附装置在活性炭吸附饱和后，需将碳床内失效活性炭全部重新更换。由于活性炭更换的成本较高，通常将这种装置用于去除气味和较低 VOCs 浓度（ $<40\sim 50\text{mg}/\text{m}^3$ ）的场合。一般认为当活性炭更换周期达 6 个月至 1 年时，更换式颗粒活性炭吸附装置才具有经济可行性。

在工程应用中，活性炭床空塔速度设计为 0.1~0.3m/s，活性炭的吸附容量约为碳装填量的 10% 以下，其受实际应用条件和要求影响，会有很大的变化，通常需要参照同类工程经验或通过试验确定。

更换下来的失效活性炭应合规处置。

### 2.1.1.2 再生式固定床颗粒活性炭吸附装置

再生式固定床颗粒活性炭吸附装置是实际应用中较有效 VOCs 治理装置。装置中至少有 2 个床体装填活性炭，其中 1 个可以离线脱附再生，而其余吸附床可以连续吸附，其处理流程示意图 2-2。

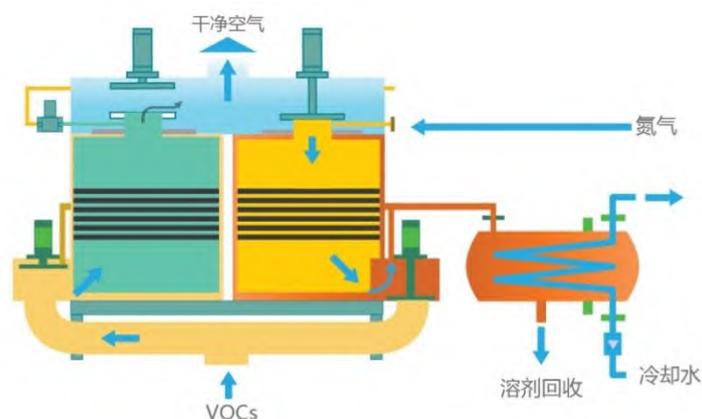


图 2-2 固定床颗粒活性炭吸附装置

吸附床的碳床厚度一般为 450~1200 mm，空塔风速通常取 0.1~0.5m/s，流程阻损约为 750~3750Pa。

碳床离线脱附再生时间确定有 2 种办法。最有效的办法是在碳床出口处设置 VOCs 浓度检测仪，根据实测浓度确定脱附再生时间；另一种办法是根据活性炭供货商提供的穿透曲线和 VOCs 产生量，估算吸附周期，定时离线脱附再生。吸附周期也可以利用便携式 VOCs 检测仪通过现场检测穿透时间来确定。但当气体流量和浓度不是均匀稳定的情况下，这种办法无实用意义。

常用的脱附再生工艺是热吹扫。如果吹扫流体是蒸汽，则再生凝结液是液态溶剂和水的混合物。

脱附再生开始后，蒸汽逆向（与吸附反向）送入碳床，待碳床和床体受热升温后，蒸汽将 VOCs 从活性炭中脱出并携带至冷凝器。冷凝液进入重力分离器，溶剂与水中分离得到回收。不凝性气体返回吸附床。但与溶剂分离后的水会成为二次污染。

常用脱附温度 110℃ 以上；脱附时间约 30~60 分钟；蒸汽用量可按 0.25~0.35 kg/kg 碳估算。

脱附完成后，需要引入处理后的干净气体对碳床进行冷却和干燥。整个脱附再生过程约需 1~1.5 小时。

脱附热吹扫也可以采用热气体，如氮气。脱附过程与蒸汽脱附相似，由于无需干燥，所以整个脱附周期约需 45~60min。

与传统的蒸汽脱附不同，由于采用氮气作为传热和脱附的介质，所以回收的溶剂液体中水的含量很低，对于水溶性较大的溶剂更具回收优势。同时由于不像传统的蒸汽再生系统那样需要较多的水蒸汽量作为动力输送蒸汽并在后续的冷凝器中被冷凝而消耗，系统的总体能耗相对较低。另外，由于采用热气体脱附回收，对于一些通常操作条件下易水解、水蒸气脱附较困难的沸点较高的组分也有良好的脱附回收效果。

### 2.1.2 蜂窝活性炭吸附装置

蜂窝活性炭以参照蜂窝陶瓷体制作方式，将粉末活性炭与无机化合物和粘结剂混合制成蜂窝状方孔的新型过滤材料，见右图。其最大的特点是利用蜂窝体直通通道，将吸附床空塔速度提高到 0.8~1.2m/s，流程阻力下降至 800~1200Pa。



蜂窝活性炭吸附净化装置处理流程见图 2-3。含有 VOCs 气体流经装填有活性炭的吸附床，VOCs 吸附于活性炭上，干净空气排出；蜂窝状活性炭吸附饱和后，热空气送入吸附床对活性炭进行脱附再生；脱附产生的高浓度 VOCs 气体，进入催化氧化床氧化分解，干净的热空气用于活性炭脱附再生。

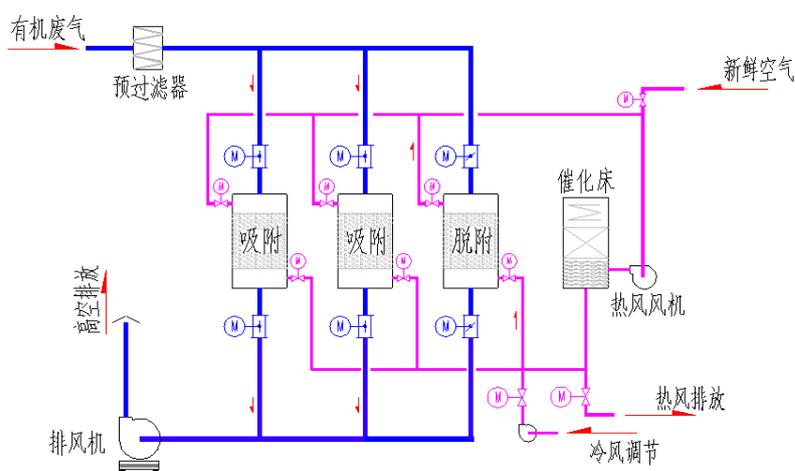


图 2-3 蜂窝活性炭吸附净化装置流程示意

蜂窝活性炭吸附净化装置具有：低能耗——直通式流道，空气流阻低；低成本——吸附材料国内自主生产；易维护——无复杂、精密的机械运转部件，运行维护简单方便等特点。

### 2.1.3 活性炭纤维吸附装置

活性炭纤维是性能优于颗粒活性炭的高效活性吸附材料。它由纤维状前驱体（纤维素基，PAN 基，酚醛基，沥青基等），经一定的程序炭化活化而成。

目前常见的活性炭纤维吸附装置采用碳纤维毡制成吸附滤筒，并组成吸附装置，脱附再生采用蒸汽完成，大多用于溶剂蒸气的回收。活性炭纤维吸附装置工作原理示意图 2-4。

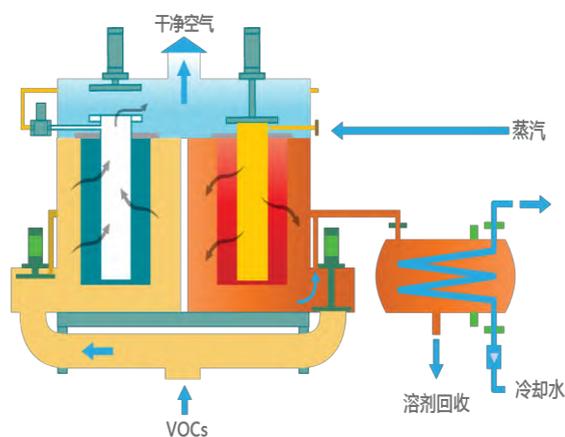


图 2-4 活性炭纤维吸附装置

活性炭纤维吸附装置与颗粒活性炭吸附装置相比，通过降低吸附、解吸的热分解，提高回收溶剂的品质；一些颗粒活性炭不能有效吸附的物质，也可有效使用。

#### 2.1.4 沸石转轮吸附装置

沸石也是应用较多的吸附剂。通过使用不同孔径的疏水性沸石混合物，可以使相应分子大小的 VOCs 得到有效吸附。

当含有 VOCs 的空气流过的沸石分子时，沸石起着分子筛的作用，捕获那些可以被吸附的 VOCs 分子，而那些大分子的物质则让它流过。VOCs 分子通过一个较弱的吸引力滞留在沸石的孔隙中，如果收到外界能量（如热能）影响，VOCs 分子就会挣脱沸石的吸引。

沸石转轮吸附装置中核心部件是沸石转轮，其是由沸石、粘结剂、助剂等材料烧结而成的一种蜂窝状圆盘型吸附部件，转轮上分为三个操作区间，即吸附区、脱附再生区及冷却区。

VOCs 气体进入沸石转轮的吸附区，VOCs 组份被吸附后，成为净化气体排放。当吸附区接近饱和时，即旋转至脱附再生区，以高温（180~220℃）空气，进行脱附再生，形成 VOCs 浓缩气体，并将高浓度气体送至氧化炉燃烧分解；经脱附再生处理后的转轮再旋转至冷却区降温后，继续进行吸附处理。沸石转轮的旋转速度一般为每分钟几转，脱附风量约为 5~10% 的吸附风量。沸石转轮吸附装置工作原理示意图 2-5。

沸石转轮吸附装置连续操作，稳定运行；VOCs 燃烧分解产生的热量二次回收利用，能源节省；高浓度 VOCs 气体也可以通过冷凝回收溶剂。

沸石转轮吸附装置使用效果的主要影响因素有：转轮转速、浓缩倍率、脱附

温度、气体组份、气体浓度、温度与湿度。

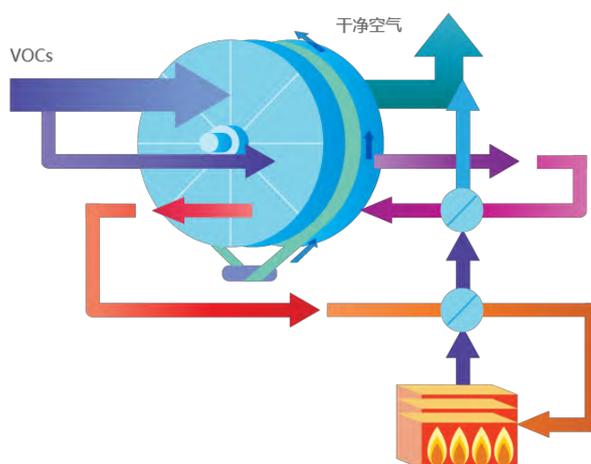


图 2-5 沸石转轮吸附装置

## 2.2 燃烧法

燃烧法是在一定温度下和有氧条件下，将 VOCs 燃烧分解为无害的二氧化碳和水的方法。燃烧法可用于各种有机化合物的分解，适当的温度和足够的滞留时间可使 VOCs 得到较完全的分解，通常氧化分解效率可达 95% 以上。

燃烧装置主要有三种形式：火炬、热氧化炉、催化氧化器。火炬通常用于浓度高于爆炸下限 2~3 倍の場合，如：石化和有机化工等企业的应急排放净化处理。热氧化炉用于浓度小于爆炸下限 50% 或 25%；而催化氧化器通常用于浓度小于爆炸下限 25% の場合。

如果有机物含有氯、氟、和硫，会产生 HCl, HF, Cl<sub>2</sub> 或 SO<sub>2</sub> 等酸性污染物，必须在氧化炉后设置洗涤塔将这些酸性污染物洗涤净化后才能排放。如果热氧化炉烟气中 NO<sub>x</sub> 浓度较高，还需脱销处理。

### 2.2.1 热氧化炉

热氧化炉（Thermal Oxidizers）由耐火材料衬里炉膛和若干个气或油燃烧器组成，燃烧器提供的热量用于加热 VOCs 气体，并升温至燃烧分解温度。

热氧化炉的工作原理是在高温下同时供给足够的氧气，将 VOCs 气体完全分解成二氧化碳和水等无机物。其适用于所有 VOCs 成份，且去除效率高，同时废热可回收再利用；但燃料消耗量大、操作成本及技术要求较高。

为达到 VOCs 完全燃烧分解的目的，必须具备下列四个要件：

(1) 空气条件：物质燃烧必须供应足够的空气量（或氧量）才可使氧化反应完成；

(2) 温度条件：通常燃烧最低温度需达 700℃，大多数热氧化的操作温度在 700~900℃；

(3) 时间条件：实际应用中需在 1 秒以上，2 秒左右的停留时间；

(4) 混合条件：即燃料与空气中的氧充分混合，这也是有效燃烧的要件之一。混合程度取决于气流的紊流强度。

### 2.2.1.1 直燃式热氧化炉

直燃式热氧化炉（Recuperative Thermal Oxidizers, TO）的特点是利用热交换器从烟气中回收热量用于预热废气或其他热能利用以节省能源。最常用的热交换器是管壳式换热器，如图 2-6 所示，约达 40-65% 的烟气热量可得到回用。

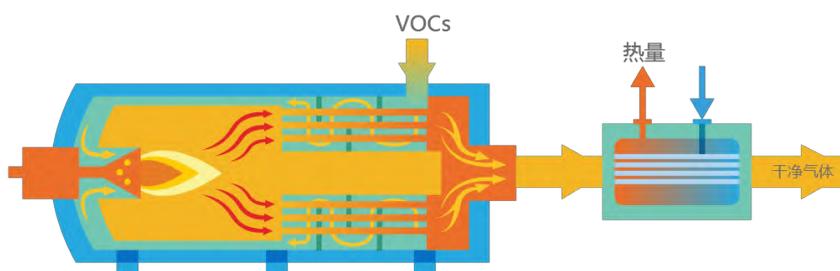


图 2-6 直燃式热氧化炉

在直燃式热氧化炉应用中，废气中的颗粒物浓度必须尽可能减少。因为，颗粒物会污染换热管内壁，降低换热效率，增加流阻。所以有些换热器配置清灰孔或检修门，用于定期清除管内积灰。废气中颗粒物还会涉及安全性问题，粉尘燃烧有爆炸可能，危险性较高。

### 2.2.1.2 蓄热式热氧化炉

蓄热式热氧化炉（Regenerative Thermal Oxidizers, RTO）的特点是换热器采用陶瓷蓄热床，氧化分解后气体将自身携带大量热量传递并储蓄在蓄热床中，然后让进入氧化器的气体从蓄热床中获得换取热量。RTO 的热回收效率比 TO 高很多，可高达 95%。

RTO 通常至少有 3 个蓄热床，其中一个用于预热进气，另一个用于蓄热降温排气，还有一个用于吹扫循环，吹扫循环可避免蓄热床换向时产生冲击排放。蓄热式氧化炉工作原理示意图 2-7。如果采用 2 床 RTO，在蓄热床换向时，会出现污染物未经有效处理直接排放的现象。这时可采用 VOCs 捕获器，即在 RTO 排放管道中设置一个活性炭床，将换向时产生的未经处理气体暂存在碳床内，然后通过切换阀门改变气流流向，将捕获的 VOCs 送回至 RTO 进口处。

RTO 可使用于最高 VOCs 浓度约  $10 \text{ g/Nm}^3$  场合，当 VOCs 浓度约为  $1.5 \text{ g/Nm}^3$  时，RTO 就可不需要补充燃料。如果 VOCs 氧化分解产生的热量无需回用于生产工艺，则 RTO 是最佳的选择之一。

VOCs 气体中的颗粒物会对蓄热床造成堵塞，从而导致流阻增大。一般要求颗粒物浓度不大于  $35 \text{ mg/m}^3$  或在检修期间可以安全地去除颗粒物。

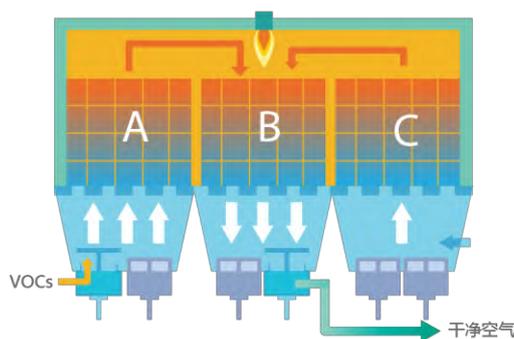


图 2-7 蓄热式热氧化炉

### 2.2.2 催化氧化器

在催化氧化炉（Catalytic Oxidizer, CO）中，VOCs 流经催化床，催化剂在 320℃~450℃ 温度下触发氧化分解反应，而催化剂本身并不参加反应。催化氧化器的特性是利用催化剂将 VOCs 燃烧分解温度大幅下降，甚至有可能在正常运行阶段不需要外部能耗（除启动阶段之外）。

典型的催化氧化器工作原理如图 2-8 所示。VOCs 气体通过间壁式热交换器预热后，如果温度还不够，再经过燃烧器加热达到反应温度，氧化放出热量将会使气体升温，高温气体通过换热器后排出。

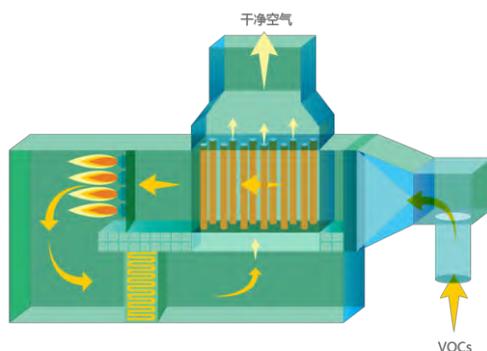


图 2-8 催化氧化器

催化氧化反应温度通常设定在最难分解有机物的催化起燃温度之上，一般在 260~350℃。由于催化氧化器运行前需要一段时间对催化床进行加热升温，所以当开/关车频繁时，会出现污染排放问题。

催化氧化器适宜处理浓度范围在 1000mg/m<sup>3</sup> 以上，上限浓度不宜达到爆炸极限下限（LEL）的 25%。

催化氧化器不能用于固体或液体颗粒物浓度较高的场合，这些颗粒物会使催化剂受到“污染”形成堵塞。

汞、磷、砷、锑和铋等金属会使催化剂急性中毒，铅、锌、锡等金属会使催化剂慢性中毒。铜和铁在 540℃ 高温下会与催化剂铂发生合金反应，使活性收到影响。硫和卤素化合物会因吸附在一些催化剂表面，使催化剂活性表面被“屏蔽”。

在一般使用状况下，催化剂每 1~3 年须更换或再生，以维持其处理功能。

### 2.3 冷凝法

冷凝（condensing）处理是利用废气成分中凝结温度的不同而将较易冷凝的成分分离出来。冷凝作用可包括两种方式：(1)在定压下，降低系统的温度；(2)在定温下，增加系统的压力。其中，由于加压所需设备较多且操作成本较贵，一般都使用降温方式以达到冷凝的目的。

在许多工业场合可以见到以冷凝器作为气状污染物控制与削减的设备，应用范围十分广泛。最常见到的就是应用于气态高沸点溶剂的回收，具有设备简单、操作容易、高浓缩回收率等优点，但应考虑冷凝后的液体二次水污染处理的问题。

VOCs 通过冷凝降低浓度的极限是冷凝温度下的饱和蒸汽压所对应的浓度。

VOCs 的饱和蒸汽压可以按照安托因（Antoine）方程计算：

$$\log(P) = A - \frac{B}{T + C}$$

式中：P 为饱和蒸汽压，mmHg；

T 为饱和蒸气温，℃；

A、B、C 为安托因系数，可从《Chemical Properties Handbook (1999)》，《Lange's Handbook(1956)》和《Hydrocarbon Processing》查取。

对应饱和蒸汽压的 VOCs 浓度可以按下式计算：

$$c = \frac{1000}{22.4} \times M \times \left(\frac{P}{760}\right) \times \left(\frac{273}{273+T}\right) = \frac{16MP}{273+T}$$

式中：c 为 VOCs 浓度，克/Nm<sup>3</sup>；

M 为 VOC 分子量，克；

其他参数意义同上。

以甲苯（Toluene）为例，冷凝可以达到的净化计算效果如表 2-2 所示，甲苯分子式 C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>，分子量 92 克，安托因系数 A=6.95464、B=1344.800、C=219.482。

表 2-2 冷凝净化效果分析

温度T, °C	20	4	-5	-53
饱和蒸汽压P, Pa	2910.4	1153.2	644.8	10.0
浓度c, mg/m <sup>3</sup>	109.7×10 <sup>3</sup>	46.0×10 <sup>3</sup>	26.6×10 <sup>3</sup>	0.5×10 <sup>3</sup>

由表可知，冷凝法处理出口的 VOCs 往往很难达到较低的排放限值，所以在实际工程应用中，需要与其他方法结合使用。

对确定的 VOCs，冷凝效果取决于冷凝温度。通过气-水换热获得冷却水温度约在 25℃左右，随季节而变化；采用制冷机可以获得更低的温度。

通过制冷可将冷凝温度降至 0℃以下，利用氮气或二氧化碳气化的深冷系统，可将冷凝温度降至 VOCs 的冰点，最低可达-70℃至-200℃。

较常见的冷凝设备是表冷器，也就是管壳式换热器。冷却介质走管程，VOCs 走壳程，与管子低温表面接触，产生凝结并得到收集。

### 3 重点行业推荐技术

上海市重点行业 VOCs 排放控制技术措施汇总于表 3-1。根据上海工业经济发展水平和污染控制技术应用现状，推荐各工业行业 VOCs 末端治理技术汇总图 3-1。

表 3-1 重点行业控制技术汇总

行业	排放源	控制技术	
表面涂装	喷漆、烘干	<b>源头控制：</b> 鼓励使用水性涂料、高固份涂料、粉末涂料、紫外光固化涂料等，限制使用溶剂型涂料；推广采用静电喷涂等涂装效率较高的涂装工艺。 <b>末端治理：</b> 吸附，燃烧，冷凝。	
涂料生产	涂料：搅拌、稀释作业；	<b>源头控制：</b> 鼓励扩大低溶剂含量、低毒、低挥发性涂料的生产规模；鼓励采用密闭一体化生产技术。 <b>末端治理：</b> 燃烧、冷凝和吸收、吸附。	
	油漆：调和、稀释作业；		
	油墨：调和。		
包装印刷	油墨、粘合剂、稀释剂的挥发	<b>源头控制：</b> 采用醇性（无苯、无酮）油墨和水性油墨替代溶剂型油墨，印制铁罐使用含固体份高的 UV 涂料，采用无溶剂复合工艺替代干式复合工艺。 <b>末端治理：</b> 吸附、燃烧、溶剂回收。	
光电产品制造	半导体集成电路：光刻、显影； TFT-LCD：阵列工程和彩膜工程； LED：基片处理和光刻；	吸收、吸附、燃烧	
	PCB：贴膜、烘干、沉铜、印刷；		
	电子终端产品：电路板清洗剂、电路板三防喷漆、机壳（机箱）喷漆、机壳注塑。	吸收、吸附、溶剂回收、燃烧	
有机化工	工艺排放口；	燃烧、洗涤、吸附、冷凝	
	冷却塔、阀门、法兰、泵和压缩机密封、泄压设备；	设备维护，快速泄漏修复；良好的管理，泄漏检测计划；	
	废水排水和处理系统；	减少水污染，密闭收集和集中处理；	
	储罐	固定罐（低挥发性液体）	高效密封的内（外）浮顶罐、密闭排气系统至蒸汽回收系统；
		储罐（中等挥发性液体）	密闭排气系统至蒸汽回收系统，增加罐内压力；
		储罐（高挥发性液体）	采用压力罐；
装卸	改善装卸方式，蒸汽平衡、蒸汽回收。		
合成材料	聚合物生产	同有机化工	
	橡胶和橡胶制品	合成橡胶：单体和溶剂回收，产品烘干；	燃烧，冷凝和吸收；
		橡胶产品：混合，提取，硫化；	冷凝，吸附，吸收，燃烧；
		再生橡胶：再生机，脱硫器。	再生机：冷凝、洗涤； 脱硫器：冷凝、洗涤。
纤维产品制造	熔融纺丝过程的加热和冷却，干湿纺纱过程的溶剂挥发损失	吸附、燃烧、溶剂吸收、冷凝。	

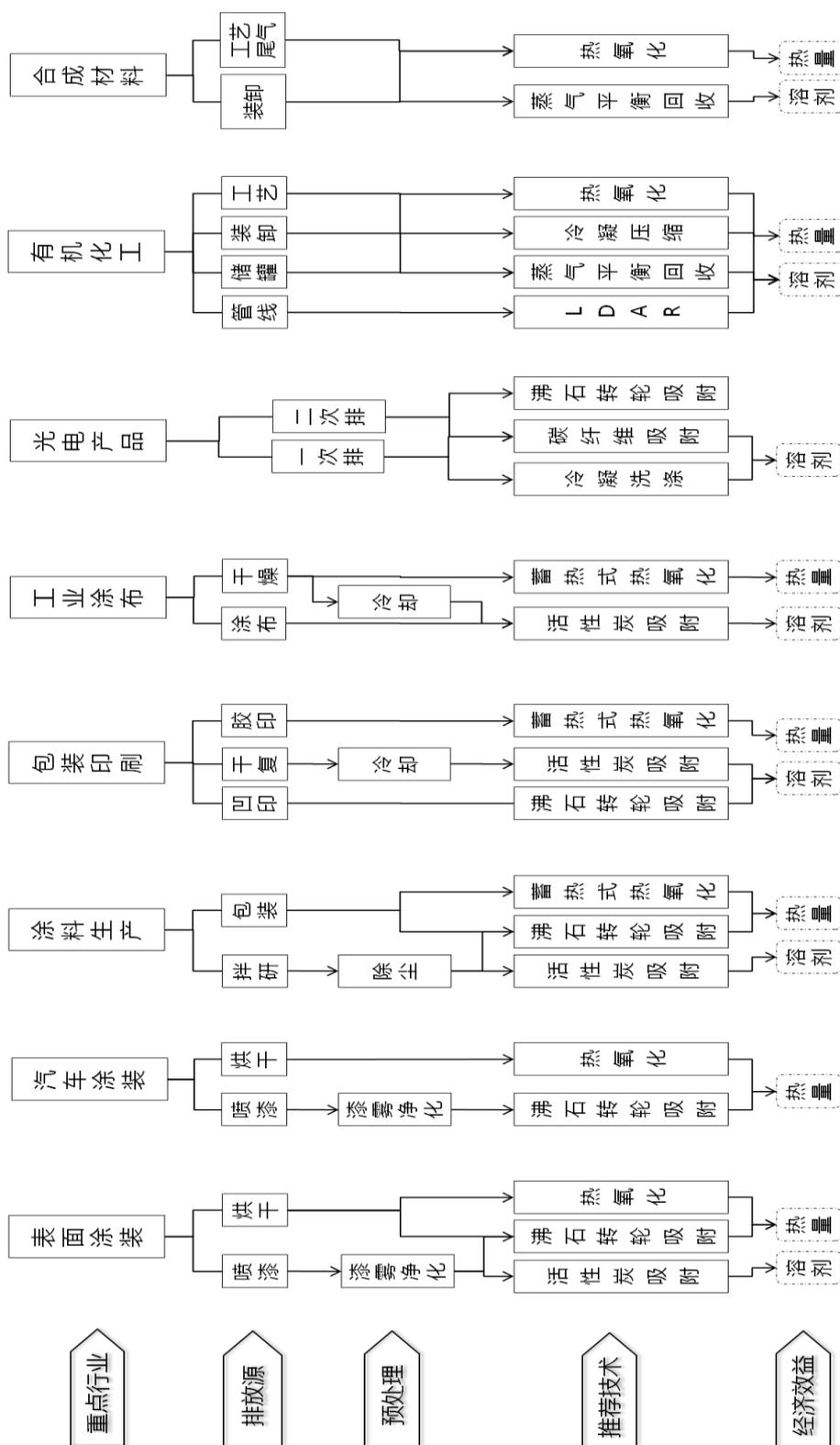


图 3-1 重点行业 VOCs 末端治理推荐技术汇总

### 3.1 表面涂装

表面涂装是指将液体或和固体涂料涂覆在基材表面并形成牢固附着的连续薄膜，起到装饰、防腐和某些特定功能等作用。

表面涂装的基材材质包括金属、木材、纸张、塑料和纤维等，基材形状从条状、片状，直至大型装备和交通运输设备等。

表面涂装作业工序主要有：表面预处理（除尘、脱脂、除锈、蚀刻等）、表面喷涂（喷涂、浸涂、滚涂、流涂、静电喷涂等）、固化干燥（室温下自然干燥、固化炉干燥或辐射固化等）。

表面涂装作业中，VOCs 排放来自于涂料和稀释剂中的溶剂挥发份，如：涂料和稀释剂的储存、输送和配制作业，使用溶剂型清洗剂的表面预处理作业，以及使用溶剂型清洗液清洗喷涂器具作业等，主要产生环节是：

（1）喷涂作业——过喷涂料以及工件表面附着涂料的部分溶剂挥发。喷涂废气具有风量较大、VOCs 浓度不高，并含有一定量的漆雾（喷漆过程产生的过喷涂料）等特性。

（2）固化干燥过程——涂膜中挥发性组份完全释放。固化废气具有风量较小、VOCs 浓度较高，可能会有一定的温度等特性。

表面涂装作业的 VOCs 产生量取决于涂料组份和涂料使用量，涂料使用量取决于涂布面积、涂层厚度和涂装作业效率。因此，减少涂料中挥发性溶剂含量（如鼓励使用水性涂料、高固份涂料、粉末涂料、紫外光固化涂料等环保型涂料，限制使用溶剂型涂料），提高喷涂作业效率（如推广采用静电喷涂、淋涂、辊涂、浸涂等涂装效率较高的涂装工艺），除工艺特殊要求外，取消露天喷涂作业是减少表面涂装作业 VOCs 产生的重要措施。

表面涂装作业的 VOCs 末端治理技术包括如下几个方面。

#### 3.1.1 捕集

表面涂装作业应在密闭的空间内进行，并采用适当的排风设施，使喷漆和固化作业产生的 VOCs 实施高效密闭捕集的目的。

如图 3-2 为上海某大型造船厂的密闭涂装房，将分段等部件放置在涂装房内进行喷漆和固化，可有效提高捕集效率，减少 VOCs 的无组织排放。

#### 3.1.2 漆雾

喷涂废气中含有的过喷涂料（漆雾）对后续处理是较大的障碍，需采用适当的方法给予去除。



图 3-2 密闭喷涂和固化在造船厂分段涂装中应用

湿法（水帘/膜/淋、旋压水洗等）是漆雾净化方法之一，利用惯性或离心力将颗粒状的漆雾携入水中，其具有经济、有效等特点，但也存在漆雾废水排放的二次污染问题。为减少废水排放，需要采用投加漆雾凝聚剂或电絮凝净化等方法，增加湿法洗涤用水的循环使用周期。喷涂废气采用湿法洗涤后，会造成废气含湿量较大，需考虑给后续净化处理（特别是吸附法）效果带来的影响。

干法（过滤）是利用惯性原理，将漆雾拦截在过滤材料上的净化方法，其具有设施简单，效果可靠的特点，但其滤料阻力变化会造成排风效果变化，以及滤料失效后产生危险废弃物。

### 3.1.3 喷涂和烘干废气

喷涂废气经过漆雾净化后，可视浓度和温度而确定是否与烘干废气合并处理。如果烘干废气温度高、浓度高则不应与喷涂废气合并处理。

针对低浓度的涂装废气（喷涂废气或/和烘干废气），可采用颗粒活性炭吸附装置（定期更换型）、蜂窝活性炭吸附装置（催化氧化器脱附再生型）、沸石转轮吸附装置（蓄热式氧化炉脱附再生型）等方法。

采用颗粒活性炭吸附装置（定期更换型）处理时，有效吸附容量应确保活性炭更换频率不超过 2 次/年，活性炭更换量不超过 10 吨/年。

采用蜂窝活性炭吸附装置（催化氧化器脱附再生型）处理时，吸附床过滤速度不宜高于 1.2m/s，吸附床装填高（厚）度不宜小于 600mm，涂料中不宜含有导致催化剂中毒的金属等成份。此外，应配置必要的安全运行防范设施，含氧等化学活性较大的有机化合物较易引起脱附自燃。

采用沸石转轮吸附装置（蓄热式氧化炉脱附再生型）处理是，VOCs 净化效率可以达到 90% 以上。图 3-3 为某工程机械喷涂废气应用案例，喷涂废气采用湿

法和多级干式过滤（G4+F5+F7+F9）后，使漆雾浓度低于  $2\text{mg}/\text{m}^3$ ，含水率低于 60% 后，进入沸石转轮吸附装置净化处理，非甲烷总烃排放浓度小于  $40\text{mg}/\text{m}^3$ 。

针对高浓度的烘干废气，可采用热氧化炉燃烧净化处理，或采用颗粒活性炭吸附装置（氮气脱附再生型）进行溶剂回收。



图 3-3 沸石转轮吸附装置在工程机械喷涂废气处理中应用

图 3-4 为某集装箱厂固化废气应采用颗粒活性炭吸附装置(氮气脱附再生型)工程案例。固化废气经换热降温后，经颗粒活性炭吸附，VOCs 净化效率达 90% 以上，VOCs 浓度小于  $40\text{mg}/\text{m}^3$ ，然后部分废气换热升温后回用于固化过程；吸附床根据在线检测的 VOCs 出口浓度交替脱附再生。根据经验，当 VOCs 原始浓度达到  $800\text{mg}/\text{m}^3$  以上时，溶剂回收效益可与运行成本达到平衡。



图 3-4 再生式颗粒活性炭吸附装置在集装箱厂固化废气中应用

### 3.2 汽车涂装

汽车制造中最重要的工艺之一是车身涂装作业，包括底漆、中间漆和面漆以及最后的烘干工序，见工艺流程图见 3-5。

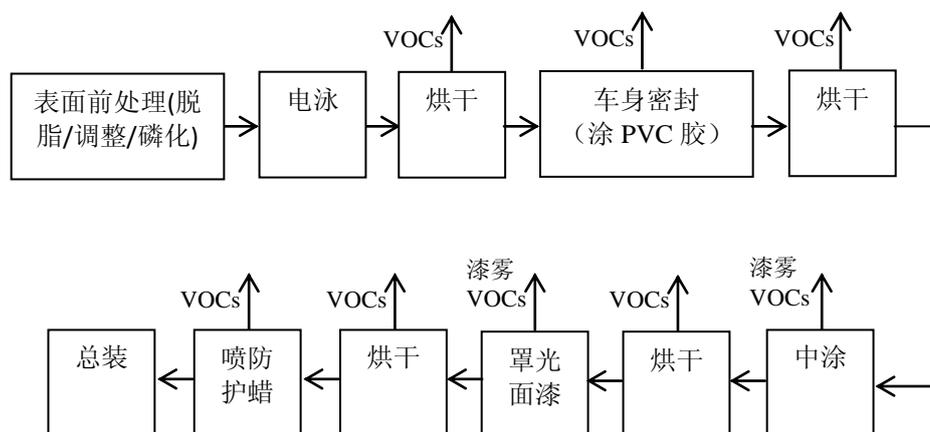


图 3-5 汽车车身涂装排污节点示意

汽车车身涂装工艺是汽车制造过程中最大的 VOCs 产污环节，其来自于涂料和稀释剂中的溶剂挥发份，如：喷漆和烘干，还包括涂料和稀释剂的储存、输送和配制作业，以及使用溶剂型清洗液清洗喷涂器具作业等。

采用水性涂料等环保型涂料可有效减少 VOCs 的产生。

汽车车身涂装作业的 VOCs 末端治理技术包括如下几个方面。

### 3.2.1 喷漆废气

喷漆废气采用沸石转轮吸附装置（蓄热式热氧化炉脱附再生型）处理时，VOCs 净化效率可达到 90% 以上，排放浓度可小于  $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。

图 3-6 为上海某汽车厂新建项目的喷漆废气处理流程示意图。喷漆废气中漆雾采用干式洗涤，即将石灰石粉包裹漆雾然后滤袋过滤，将漆雾浓度降低至  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，然后进入沸石转轮吸附装置净化处理。

如果喷漆作业采用机械人系统，净化后的喷漆废气大部分循环使用，废气排放量减少可达 80%，同时降低能耗近 60%。

沸石转轮吸附装置的脱附浓缩废气也可结合烘干废气的热氧化炉系统统筹净化处理。

### 3.2.2 烘干废气

烘干废气采用热氧化炉（直燃式或蓄热式）处理时，VOCs 净化效率可达 95% 以上，非甲烷总烃排放浓度小于  $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。

常用的直燃式热氧化炉具有多达 3-4 级热回收功能（参见图 3-7）和废气助燃功能，燃烧温度  $750-815^\circ\text{C}$ ，停留时间约 1 秒。

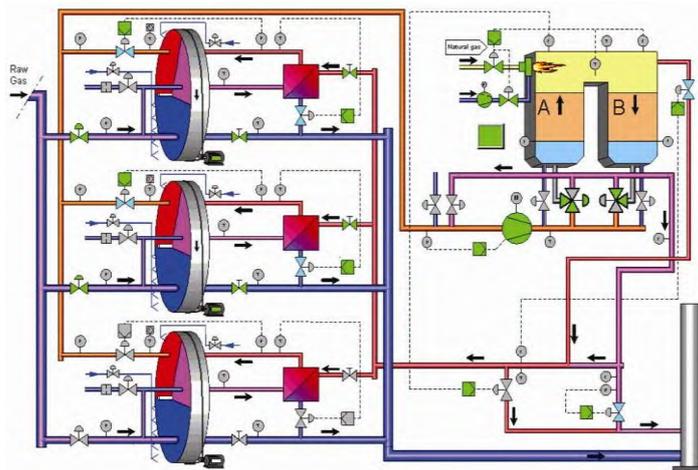


图 3-6 沸石转轮吸附装置在车身喷漆废气应用流程示意图

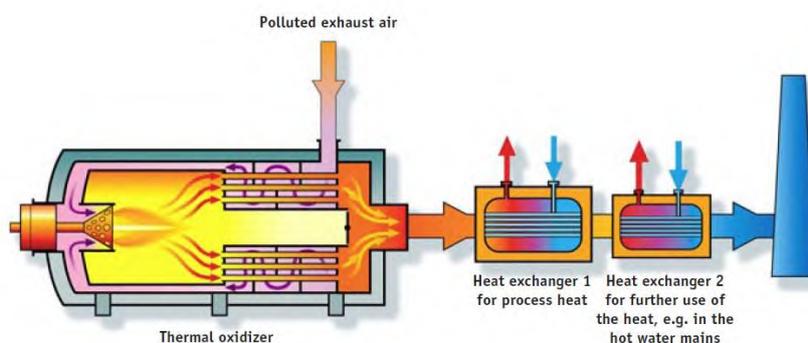


图 3-7 直燃式热氧化炉热回收示意图[摘自：www.asperenvi.cz]

直燃式热氧化炉适用于全厂热量统一配置，可获得较好的经济性；而 RTO 适用于单独设立，可获得较高的灵活性。

烘干废气中也可加入喷漆废气吸附浓缩气体，统一净化处理，以获得较佳的投资和运行的经济性。

### 3.3 涂料生产

涂料生产是把颜料固体粒子通过外力进行破碎并分散在合成树脂溶液或者乳液中，使之形成一个均匀微细的悬浮分散体，其生产过程为：拌合、研磨、调制和包装。

涂料生产过程中 VOCs 排放主要来源于涂料中树脂、溶剂和助剂等组份中有机挥发份的散发，其产生量取决于溶剂种类、生产设备和工艺等。溶剂沸点高、生产过程密闭性好、温度较低、时间短、自动化程度高，品种类型少（清洗频次少），则 VOCs 的产生量就少，反之则多。

因此，采用密闭化作业是减少 VOCs 排放最有效的方法，如自动化程度高、安全、环保和节能的溶剂型涂料全密闭式一体化生产工艺。

涂料生产的 VOCs 末端治理技术包括如下几个方面。

### 3.3.1 捕集

拌合、研磨作业应密闭化，并采用有效吸风措施，控制 VOCs 的排放；包装、储存和输送应密闭作业，抑制 VOCs 的逸散。

### 3.3.2 预处理

含有颗粒物的 VOCs 气体（如：投料排风）应设置独立排风系统，并采用袋式或滤筒除尘和高效过滤，使废气中颗粒物浓度小于  $2\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 3.3.3 VOCs 净化

通常，拌合、研磨和调制工艺排风风量大，VOCs 浓度低，可采用再生式固定床颗粒活性炭吸附装置、活性炭纤维吸附装置或沸石转轮吸附装置净化处理。

而包装废气具有风量小、浓度高特点，可单独采用蓄热式热氧化炉净化处理。

## 3.4 包装印刷

印刷是指在各种基材表面的图文印制及其后续加工，印刷基材可以是纸张、塑料、皮革、布料和金属等各种材料，印刷工艺有凸版印刷、平板印刷、凹版印刷、柔版印刷、孔印刷（丝网印刷）等。其中，VOCs 排放较多的主要凹印工艺及印制铁罐领域。

包装印刷行业包括了包装材料的制造（复合），即通过复合工艺将多种材料组合在一起，形成特定功能的包装材料，如塑料复合包装薄膜等。复合工艺有：干式、湿式、挤出、热熔、涂蜡和涂膜，其中干式复合是将溶剂型粘合剂溶液均匀地涂布于基材表面，然后经烘干另一种基材在热压状态下被粘合成平滑的复合材料，是 VOCs 排放较多的生产工艺之一。

包装印刷生产过程中 VOCs 排放来源于油墨、粘合剂、稀释剂的挥发，如：油墨配制和稀释等，以及原辅材料储存过程、故障或转换印版使用的有机清洗剂的挥发等。

采用醇性（无苯、无酮）油墨和水性油墨替代溶剂型油墨，印制铁罐使用含固体份高的 UV 涂料，采用无溶剂复合工艺替代干式复合工艺，是减少 VOCs 排放最根本的办法。

包装印刷行业的 VOCs 末端治理技术包括如下几个方面。

### 3.4.1 捕集

油墨、粘合剂、稀释剂、清洗剂应密闭储存。

印刷、涂布工序应密闭捕集溶剂挥发份并加以净化处理。

### 3.4.2 凹印废气

凹印废气可采用再生式固定床颗粒活性炭吸附装置、活性炭纤维吸附装置、或沸石转轮吸附装置进行溶剂回收净化处理，溶剂回收综合利用可获取相应的经济收益。

### 3.4.3 干复废气

干复废气可采用再生式固定床颗粒活性炭吸附装置进行溶剂回收净化处理，回收的溶剂直接回用，可获得较明显的经济效益。

图 3-8 为某彩印厂干式复合（溶剂成分以乙酸乙酯为主）排风采用再生式固定床颗粒活性炭吸附装置（氮气脱附再生型）回收溶剂，溶剂回用率大于 90%，非甲烷总烃排放浓度达  $40\text{mg}/\text{m}^3$ 。



图 3-8 某彩印厂干复废气溶剂回收应用

### 3.4.4 轮转胶印废气

轮转胶印废气可采用蓄热式热氧化炉净化处理。图 3-9 为某杂志印刷厂轮转胶印废气采用 RTO 应用，VOCs 净化效率达到 95% 以上，VOCs 排放浓度低于  $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。



图 3-9 某杂志印刷厂 RTO 应用

### 3.5 工业涂布

涂布工艺是指将流体状物料涂覆于基材上的方法。如将糊状聚合物、熔融态聚合物或聚合物熔液涂布于纸、布、塑料、金属、木材等基材上制得复合材料(膜)。

涂布工艺应用于许多工业行业的产品生产中，如：塑料制品中塑料卷材、合成革、木材加工中装饰板、胶粘带、电池极板等。

涂布作业中，VOCs 排放来自于涂料和稀释剂中的挥发性溶剂组份，主要产生节点是涂布和干燥。

工业涂布的 VOCs 末端治理技术包括如下几个方面。

#### 3.5.1 捕集

涂料、稀释剂应密闭储存；涂布工序应密闭捕集溶剂挥发份并加以净化处理。

#### 3.5.2 涂布和烘干废气

涂布和干燥废气可采用再生式固定床颗粒活性炭吸附装置、活性炭纤维吸附装置进行溶剂回收净化处理，也采用直燃式热氧化炉或蓄热式热氧化炉进行净化处理。

图 3-10 为某特种压敏胶干燥废气采用活性炭纤维吸附装置回收乙酸乙酯溶剂的应用，溶剂回收率可达 80%，乙酸乙酯净化效率可达 90%。



图 3-10 某特种压敏胶干燥废气活性炭纤维吸附装置应用

图 3-11 为某胶粘带烘干废气采用蓄热式热氧化炉回收热量的应用。VOCs 净化效率可达 98% 以上。



图 3-11 某胶粘带烘干废气蓄热式热氧化炉应用

### 3.6 光电产品制造

在光电产品制造行业中，产生废气污染的主要有五类产品的生产过工程：半导体集成电路、液晶显示器（LCD）、发光二极管（LED）、印制电路板（PCB）、电子终端产品。

半导体集成电路制造是由原料晶圆片，经由不断的重复光学显影、蚀刻、薄膜沉积等步骤，最后经由封装而成。使用有机溶剂的工序有显影、蚀刻、薄膜沉积等，其中光学显影工序使用量最大，光阻涂布、显影、去光阻及清洗等单元均大量使用有机溶剂，如光阻剂稀释剂、清洗剂、以及光阻剂自身含有的溶剂组份（通常达 30% 含量）。芯片封装工艺中上印区需用丙酮清洗以及调制印墨。

光电业的 LCD 和 LED 制造与半导体制造工艺类似，在显影工序与基板清洗工序均使用有机溶剂（如异丙醇，丙酮等），且显影过程使用的光阻剂及去光阻剂亦含有有机溶剂。

印制电路板（PCB），在贴膜、烘干、沉铜、印刷等工序，产生甲醛、醇类（乙醇、异丙醇、丁醇、丙醇）、酮类（丁酮）、酯类（乙酸乙酯、乙酸丁酯）、甲苯、二甲苯等。

在电子终端产品制造中，VOCs 的主要来源包括电路板清洗剂有机废气（使用有机溶剂型清洗剂）、电路板三防喷漆废气、机壳（机箱）喷漆废气、机壳注塑废气。

半导体和光电产品生产过程中，VOCs 排放来源于含溶剂的原辅材料使用。

光电产品制造的 VOCs 末端治理技术包括以下几个方面。

#### 3.6.1 一次排风

溶剂蒸汽收集排风（一次排风）应采用冷凝法或洗涤法对排气中溶剂进行回收，同时大幅降低汇入车间排风系统（二次排风）的 VOCs 浓度。

### 3.6.2 二次排风

含 VOCs 的二次排风系统应与其他排风（如：无机排风、室内排风）系统分置。

如果使用了高沸点光阻剂、去光阻剂与显影剂（多见于 TFT-LCD、STN/TN-LCD 与 LED 制造），还应将高沸点与低沸点溶剂排风系统分别收集和处理，增强高沸点溶剂回收率，避免其对后续净化系统的干扰。

含异丙醇、乙酸丁酯等的二次排风可采用活性炭纤维吸附装置进行溶剂回收净化处理，VOCs 净化可达 98% 以上，VOCs 排放浓度可低于  $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。如果 VOCs 组份中含有三氯乙烯、二氯甲烷等含氯化物，适宜于采用活性炭纤维吸附装置净化处理。

含硅烷、酮类和脂类的二次排风可采用沸石转轮吸附装置（直燃式热氧化炉脱附再生型）进行处理，VOCs 净化效率可 90% 以上。

### 3.6.3 排放检测

由于半导体和光电业的含 VOCs 二次排风成分复杂，变化多，净化效果易波动，宜采用傅氏转换红外线光谱分析仪（FTIR）连续监测 VOCs 排放组份和浓度。

## 3.7 有机化学原料制造

有机化学原料制造是通过物理操作和化学过程，制造各种有机化学原料，其主要生产工序有：原料储存、输送和投加；合成；粗品分离和精制；产品包装；主要生产设施（备）有：储罐、单元操作设备（精馏、吸收、萃取塔等）和单元过程设备（反应釜、塔、器等）、动力设备（压缩机、风机、泵等）。

有机化学原料制造生产中，VOCs 有组织排放来源于有机物料的装卸、储存和输送、包装，以及单元操作和单元过程的生产尾气等。

有机化学原料制造生产过程中，工艺设备组件采用设备泄漏检测与修复；储罐采用高密封的内（外）浮顶罐、固定罐采用密闭收集至蒸汽回收处理系统；装卸过程采用蒸汽平衡、蒸汽回收处理系统；有组织排放的 VOCs 尾气可采用冷凝法、热氧化法或吸附法回收有机物料或热量，VOCs 净化效率可达 90%~95% 以上，VOCs 排放浓度可达  $20\sim 50\text{mg}/\text{m}^3$ 。

## 3.8 合成材料生产

合成材料又称人造材料，是通过化学合成将小分子有机物合成具有特定结构和功能的大分子聚合物。合成塑料、合成纤维、合成橡胶是通常所说的三大合成材料。

有机合成材料生产中，VOCs 有组织排放来源于有机物料的装卸、储存和输送、包装，以及化工单元的生产尾气等。

装卸和储存可采用密闭、平衡回收等方法，控制 VOCs 排放。

化工单元的尾气可采用直燃式热氧化炉，见图 3-12，或催化氧化法净化处理，VOCs 净化效率可 95%。



图3-12某化工基地聚酯尾气直燃式热氧化炉应用

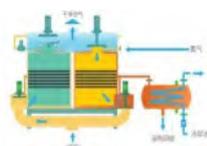
包装废气可单独采用蓄热式氧化炉净化处理。

## 参考文献

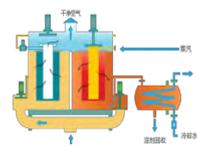
- [1]USEPA APTI Course 482 Sources and Control of Volatile Organic Air Pollutants, Nov2002
- [2]台湾经济部工业局《VOC 廢氣減量及处理技術手冊》，Dec2004
- [3]EUROPEAN COMMISSION IPPC Reference Document on BAT in the Large Volume Organic Chemical Industry, Feb2003
- [4]EUROPEAN COMMISSION IPPC Reference Document on BAT for the Manufacture of Organic Fine Chemical, Aug2006
- [5]USEPA APTI Course 415 Control of Gaseous Emissions, Jan2000
- [6]USEPA APTI Course 400 Introduction to Air Toxics, July2009
- [7]童志权《工业废气净化与利用》北京化学工业出版社，May2001
- [8]日本环境省《発性有機化合物（VOC）の排出抑制制度について（パンフレット）》[www.env.go.jp](http://www.env.go.jp)
- [9]吴伟玲等 TNV、RTO 在涂装线烘干室中的应用 [www.tzfh.org](http://www.tzfh.org)

## 上海市工业固定源挥发性有机物治理技术指引

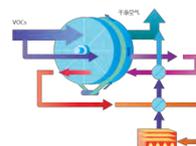
SEPB-VOCs/BAT-201307-001(R1)



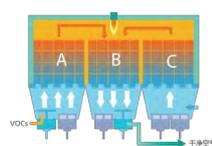
颗粒活性炭吸附



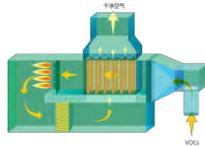
活性炭纤维吸附



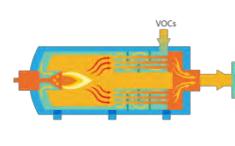
沸石转轮吸附



蓄热式氧化炉



催化氧化器



直燃式氧化炉

### 建议反馈:

上海市环境保护局  
上海市大沽路 100 号, 200003  
电话: 23115667 黄蕾  
电邮: huangl@sepb.gov.cn

上海市环境科学研究院  
上海市钦州路 508 号, 200233  
电话: 64085119 林立  
电邮: linl@saes.sh.cn