

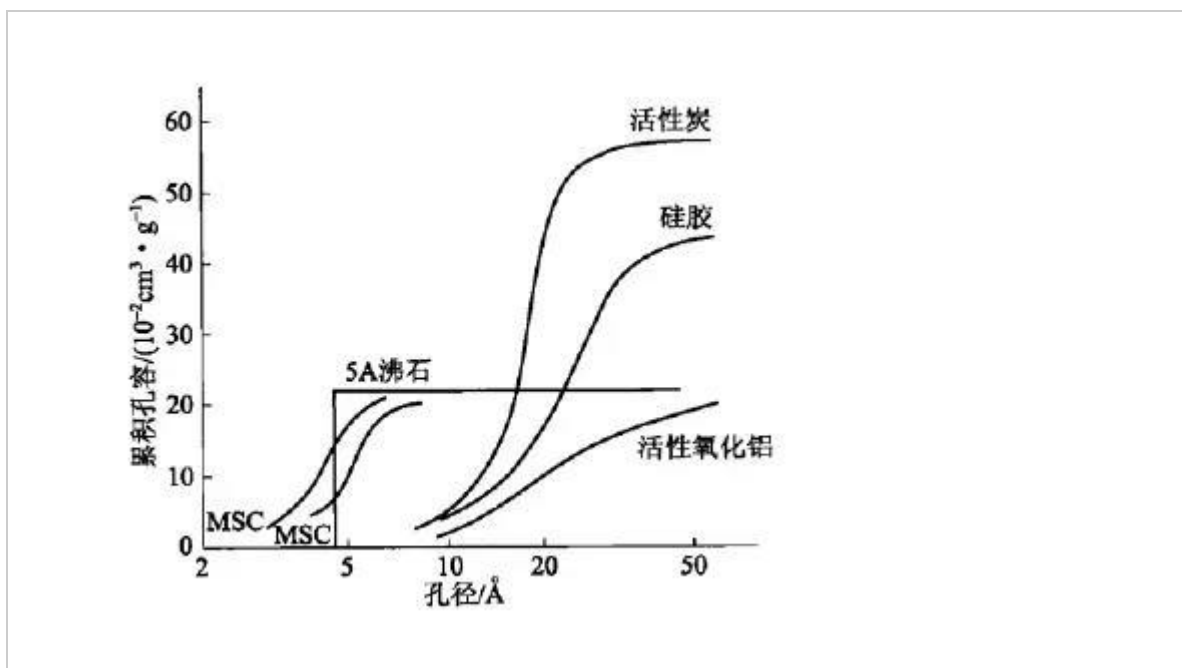


活性炭吸附法工艺流程、处理要求 及成本分析

当前我国 VOCs 排放涉及的行业广，且各行业排放的 VOCs 种类繁多、成分复杂，常见的有烃类、醇类、醚类、酯类等。加油站、装修、餐饮、干洗、喷涂、化工等生产或使用有机溶剂的行业都会产生 VOCs 排放。此外，VOCs 治理技术体系复杂，涉及十多种技术及组合技术，一般一个环保治理企业只能掌握一种或几种技术。

目前工业 VOCs 治理的主流技术之一：活性炭吸附技术！

活性炭是应用最广泛的吸附剂，其生产和使用可以追溯到 19 世纪。活性炭之所以被广泛使用主要是因其具有大量的微孔和中孔，且表面积巨大。典型活性炭的孔径分布及其与其他吸附剂的比较如下图所示。



图源《吸附剂原理与应用》，[美]Ralph T. Yang 著

据了解，活性炭吸附技术是 VOCs 治理的主流技术之一，技术成熟、简单易行、治理成本低、适应范围广，在所有的治理技术中占有非常大的市场份额，在涂装、包装印刷、石油化工、化学品制造、医药化工和异味治理等领域都得到了广泛的应用。

但由于业内人员对活性炭的基本性能、活性炭吸附技术的适用范围和使用条件等缺乏规律性认识，在活性炭选型、工艺设计和净化装备设计中存在较大随意性，造成净化设备效率低，存在安全隐患，活性炭再生更换困难等问题。市场上很多环保公司对活性炭吸附技术过于低估（简单误认为活性炭吸附技术无非就是简单的吸附—脱附）。

行业的种种不规范及工艺混乱，导致目前不少地方环保主管部门陷入了“闻炭色变”的误区。满足当前国内 VOCs 污染实际治理工程的实际需要，正确引导行业规范活性炭在挥发性有机物（VOCs）净化中的应用，显得至关重要。

吸附法主要适用于低浓度气态污染物的吸附分离与净化，对于高浓度的有机气体，一般情况下首先需要经过冷凝等工艺进行“降浓”处理，然后再进行吸附净化。对于“油气”等高浓度 VOCs 气体的净化，也可以采用吸附法（降压解吸再生），但对活性炭有一些特殊的要求。



废气的预处理

(一) 污染物浓度要求

除溶剂和油气储运销装置的有机废气吸附回收外，进入吸附装置的有机废气中有机物的浓度应低于其爆炸极限下限的 25%。当废气中有机物的浓度高于其爆炸极限下限的 25%时，应使其降低到其爆炸极限下限的 25%后方可进行吸附净化。

对于含有混合有机化合物的废气，其控制浓度 P 应低于最易爆炸组分或混合气体爆炸极限下限值的 25%，即 $P < \min(P_e, P_m) \times 25\%$ ， P_e 为最易爆组分爆炸极限下限值（%）， P_m 为混合气体爆炸极限下限值， P_m 按照下式进行计算：

$$P_m = (P_1 + P_2 + \dots + P_n) / (V_1/P_1 + V_2/P_2 + \dots + V_n/P_n) \quad \text{式中：}$$

P_m ——混合气体爆炸极限下限值，%

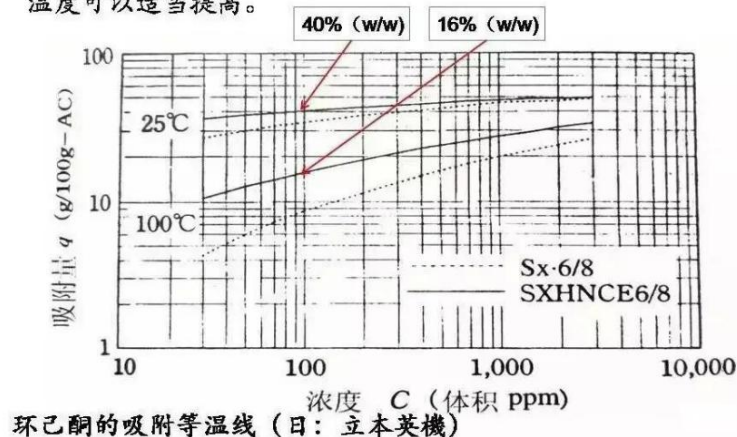
P_1, P_2, \dots, P_n ——混合有机废气中各组分的爆炸极限下限值，%

V_1, V_2, \dots, V_n ——混合有机废气中各组分所占的体积百分数，%

n ——混合有机废气中所含有机化合物的种数。

(二) 气体温度要求

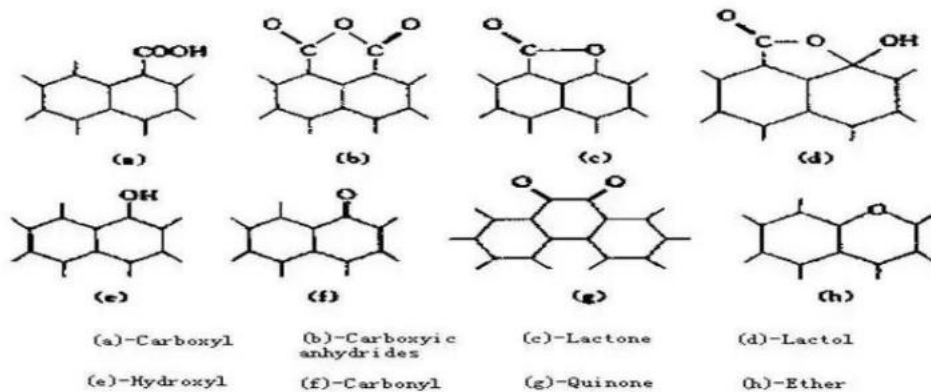
对于物理吸附，温度越低越有利于吸附！对于高沸点化合物温度可以适当提高。



进入吸附装置的废气温度宜低于 40℃。

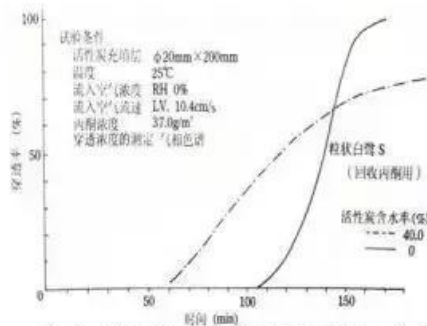
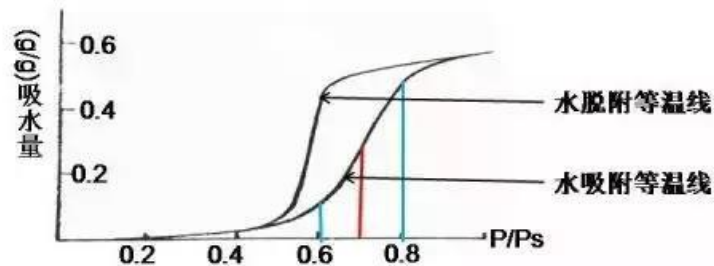
(三) 废气湿度对活性炭吸附性能的影响

1、由于活性炭表面通常含有大量的含氧基团，一般活性炭均具有较强的吸水能力，与有机物产生竞争吸附作用。



(活性炭中的含氧基团)

2、活性炭中含有灰分（金属氧化物），提高了其吸水能力。



水分对丙酮吸附能力的影响 (日: 立本英機)

如何提高活性炭的疏水性能

(1) 原材料的影响：如煤种的影响、沥青基球型活性炭具有较好的疏水能力；

(2) 高碘值活性炭（挥发份低）的疏水能力通常要优于低碘值的活性炭；

(3) 对活性炭进行表面疏水改性，去除或减少表面含氧基团、降低灰分（金属氧化物）。

(四) 颗粒物的含量要求

进入吸附装置的颗粒物含量宜低于 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 。

粉尘：细颗粒物（化工、家具等）

漆雾颗粒物（形成气溶胶）：影响最大

絮状颗粒物：印刷、橡胶、化纤等生产过程产生

(五) 废气成分的影响

1、活性炭的“中毒”（或劣化）：

高沸点（或“半挥发性”）物质再生困难，在活性炭上聚集，如硅烷、油脂等化合物，需要通过冷凝、过滤、吸附等预处理首先进行去除；

发生聚合反应，造成在活性炭上聚集，如甲醛、苯乙烯等；

二硫化碳（硫化氢）等吸附反应形成单质硫的聚集。

在吸附气体中即使含有微量的高分子物质或聚合性物质，在活性炭中聚集，也会很快引起活性炭吸附性能急剧下降。

2、活性炭的反应活性（催化性）：

活性炭表面具有催化活性，会与一些化合物部分进行氧化、水解等催化反应。

典型反应：

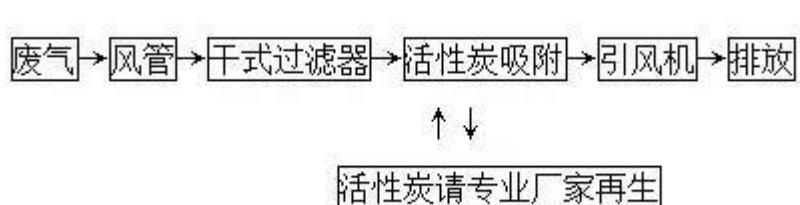
- (1) 乙酸乙酯、乙酸丙酯等易发生水解反应形成有机酸；
- (2) MEK（甲乙酮）、MIBK（甲基异丁基酮）易被氧化形成有机酸和丁二酮；环己酮氧化或聚合形成环亚己基环己酮；
- (3) 甲醛、苯乙烯等易发生聚合反应；
- (4) 其他：如树脂生产中的添加剂带入二甲基乙酰胺和二甲基甲酰胺在活性炭上会发生水解生产二甲胺，造成臭气排放问题。

造成的问题：

- (1) 回收的溶剂变色、发臭（如包装印刷废气）；
- (2) 聚合后难再生，造成活性炭中毒（劣化）
- (3) 反应放热，造成活性炭着火。

基本工艺流程

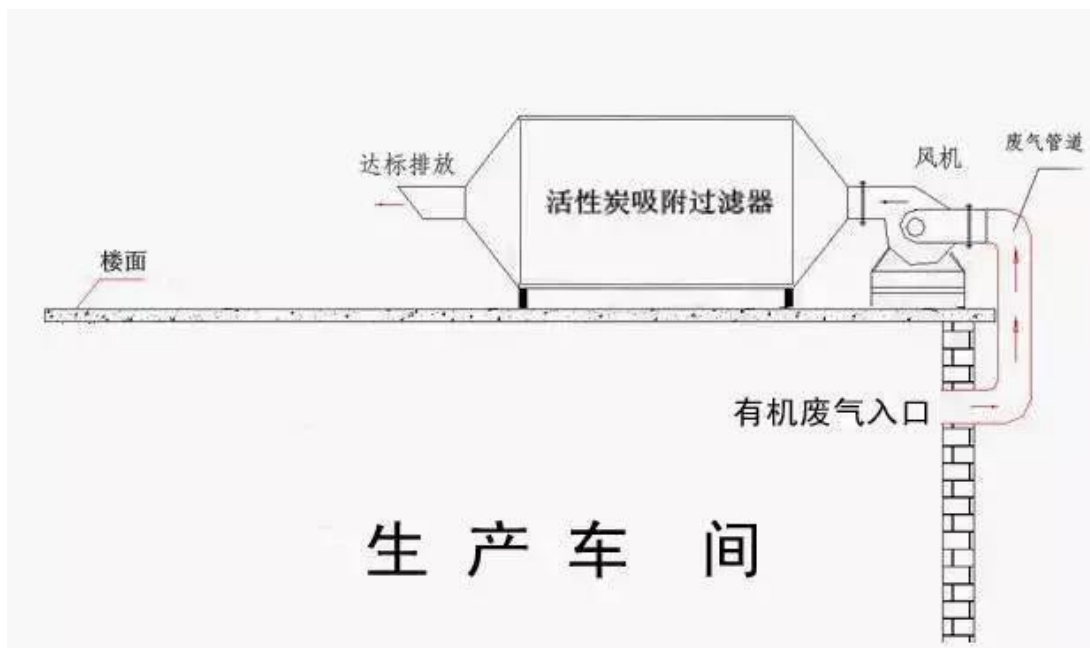
1、工艺流程图



2、工艺说明

车间有机废气通过吸气罩收集，在排风机作用下，经过管道输送进入干式过滤器，再进入活性炭吸附装置，有机污染物被活性炭

吸附，净化后的气体经风机增压后达标排放。活性炭吸附饱和后，请专业厂家再生后回用。



3、活性炭的吸附原理

a. 吸附现象是发生在两个不同的相界面的现象，吸附过程就是在界面上的扩散过程，是发生在固体表面的吸附，这是由于固体表面存在着剩余的吸引而引起的。

吸附可分为物理吸附和化学吸附；物理吸附亦称范德华吸附，是由于吸附剂与吸附质分子之间的静电力或范德华引力导致物理吸附引起的，当固体和气体之间的分子引力大于气体分子之间的引力时，即使气体的压力低于与操作温度相对应和饱和蒸气压，气体分子也会冷凝在固体表面上，物理吸附是一种吸热过程。

化学吸附亦称活性吸附，是由于吸附剂表面与吸附质分子间的化学反应力导致化学吸附，它涉及分子中化学键的破坏和重新结合，因此，化学吸附过程的吸附热较物理吸附过程大。

在吸附过程中，物理吸附和化学吸附之间没有严格的界限，同一物质在较低温度下往往是化学吸附。活性炭纤维吸附以物理吸附为主，但由于表面活性剂的存在，也有一定的化学吸附作用。

b. 活性炭对废气吸附的特点：

(1) 对于芳香族化合物的吸附优于对非芳香族化合物的吸附。

(2) 对带有支键的烃类物质优于对直链烃类物质的吸附。

(3) 对有机物中含有无机基团物质的吸附总是低于不含无机基团物质的吸附。

(4) 对分子量大和沸点高的化合物的吸附总是高于分子量小和沸点低的化合物的吸附。

(5) 吸附质浓度越高，吸附量也越高。

(6) 吸附剂内表面积越大。吸附量越高。

4、活性炭纤维

以新型吸附材料—活性炭纤维（ACF）为吸附剂的吸附法是近几年发展起来的一种新型的有机废气回收方法，被认为是最有效的回收净化有机废气的新方法，近年来已引起广大研究工作者和相关企业的极大关注。与传统的活性炭相比，活性炭纤维具有以下优异特性：

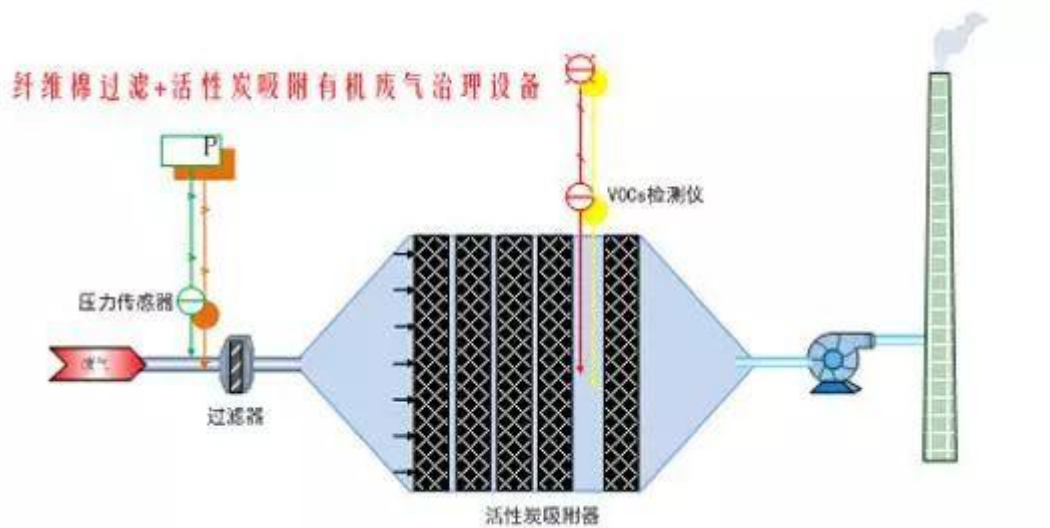
1) 比表面积大，有效吸附容量高；

2) 吸附、脱附快，能耗低，容易再生；

3) 强度高、寿命长；

4) 形状多样，便于工程应用；

- 5) 可吸附低浓度气体；
- 6) 吸附选择性强。



5、活性炭纤维有机废气回收装置

以活性炭纤维有机废气回收装置中典型的三箱吸附装置为例，分析其设备组成、工艺流程及技术特点。

设备组成

吸附设备由引风风机、表冷器、过滤器、吸附器、分层槽等组成，整个系统的运行由 PLC 程序控制，自动切换吸附器，使之交替进行吸附、解吸和干燥工艺过程的操作。

工艺流程

挥发性有机气体先经过一定的前处理装置，再经过过滤器进一步去除尾气中的杂质，以保证这些杂质不占用活性炭纤维的孔隙，影响活性炭纤维的吸附效率和使用寿命；过滤后的尾气经风机引入吸附设备。

吸附了一定数量有机溶剂的活性炭纤维，用饱和水蒸汽进行解吸，解吸完成后将通过过滤的外界空气送入吸附器由风机进行干燥，使活性炭纤维床层冷却并去除残留的蒸汽，使活性炭纤维保持较高的吸附效率。干燥好的吸附器进入下一工作程序循环进行吸附。

解吸出的含有机物的混合蒸汽进入冷凝器中进行一级冷凝，冷凝液再经板式冷凝器冷却，经过冷凝的有机物和冷凝水进入分层槽，经重力分层，上层的有机物自动溢流至储槽，然后经输送泵送到吸附回收设备；下层的冷凝水排入废水处理系统。

6、技术特点

(1) 结构合理

吸附芯为笼型结构，具有活性炭纤维用量少，处理风量大的特点，可大幅度降低有机废气处理成本。

(2) 吸附率高

由于活性炭纤维的比表面积特性，决定了其吸附率可高达 95% 以上。采用专利技术可以实现多级吸附，可以达到极高的吸附率，是目前国际上能够达到苛刻的环保排放要求的吸附装置。

(3) 运行能耗低、费用低

由于活性炭纤维的脱附、再生能耗低，再加上活性炭纤维缠绕芯的气流阻力小、风机功率小，所以在运行中活性炭纤维有机废气净化回收装置的气耗和电耗均比较低。

(4) 全自动控制、无人值守运行

采用可编程序控制器中央控制，集成电磁阀、托气缸执行动作，可靠性高。按照工艺流程设计的模拟盘显示，运行状况可以一目了然，并设计有故障检测及指示功能。可靠性强、操作简单、便于维护。

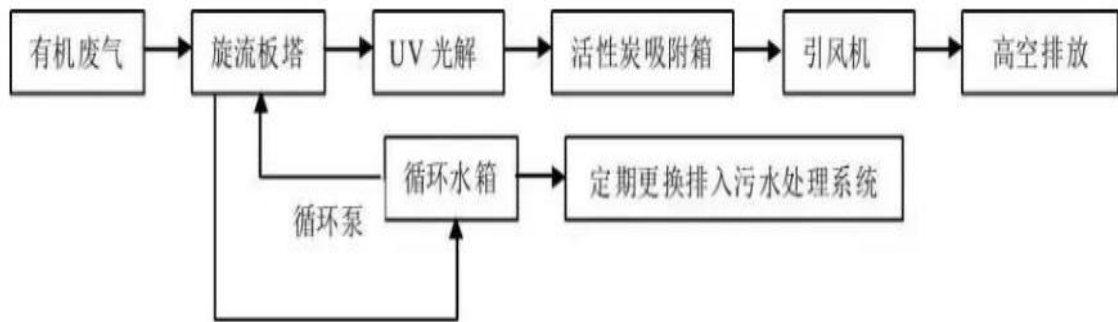
(5) 安全可靠、适用于有爆炸危险场所

采用防爆风机、防爆泵。控制柜、气动柜采用正压防爆技术，外部信号通过安全栅连接，系统接地，确保了装置的安全性。

组合工艺流程

实际的废气治理过程中，单一的活性炭吸附工艺会造成活性炭饱和速度过快，处理效果不稳定。因此大多数情况下都是与其他处理工艺组合使用。

1、旋流板塔+UV 光解+活性炭吸附工艺



此工艺多用于处理低浓度有机废气，在烘干固化炉产生的有机废气中应用较多。

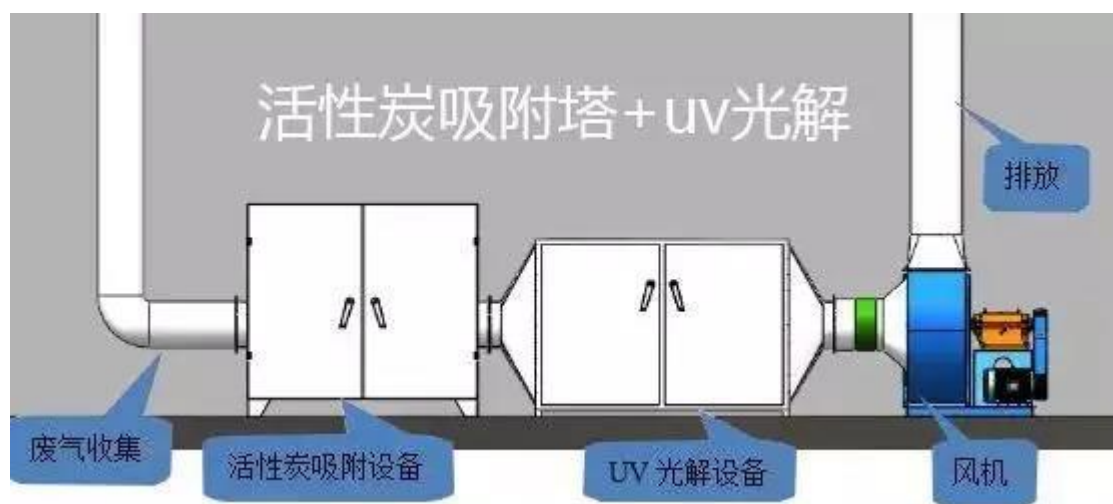
其主要工艺流程为：废气在引风机的作用下，通过管道输送，以切线从底部进入旋流板洗涤净化塔，在离心力的作用下，呈螺旋形气旋上升，达到旋流板时，由于受数量足够多的倾角为 25° 的旋流叶片的切割作用，产生更大的离心力，与从上向下喷成雾状的循

环液滴接触，气液得到充分的混合，气体中剩余的油雾颗粒物被循环液吸收，随水流进入循环水池。

经旋流板洗涤净化塔后的气体进入 UV 光解净化器。该设备以二氧化钛作为催化剂，与紫外线、空气接触反应产生臭氧，利用臭氧对有机物进行氧化分解；同时大分子有机物在紫外线作用下转化为小分子化合物或者发生反应，生成水和二氧化碳，污染物得到去除。

因 UV 光解净化效率相对较低，为了保证废气能稳定达标排放，在其后增加活性炭吸附器作为最终的把关处理，保证油雾颗粒物和总 VOCs 等长期稳定达标，最终净化气体。因经前处理后，废气中 VOCs 的浓度已很低，且颗粒活性炭在吸附有机物的同时吸附等离子体，被吸附的有机物在活性炭纤维的孔隙内被等离子体分解，一定程度上延长了活性炭吸附饱和的时间和使用寿命。

为保证处理效果，喷淋水循环使用一段时间后须更换，废水中含有污染物质，需配套污水处理设备进行处理。该工艺优点是操作简单，易于管理，投资造价较低。缺点是活性炭更换次数较频繁，运行费用较高。



2、水喷淋+干式过滤器+活性炭吸附+催化燃烧

此工艺多用于喷漆、烘漆 VOCs 废气，主要污染物为苯、甲苯与二甲苯、总 VOCs。

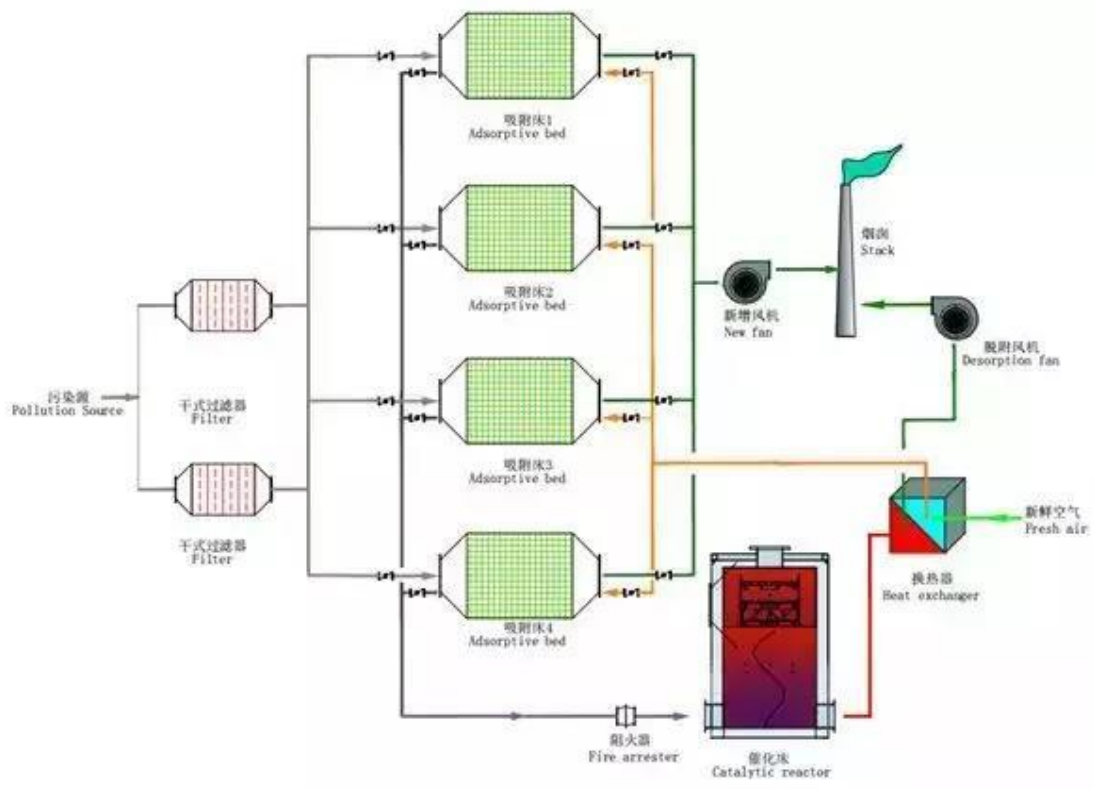
含有机物的废气经风机的作用，首先经过水喷淋将大部分漆雾去除后进入干式过滤器，干式过滤器一方面可以去除气体中的水分，另一方面可以进一步拦截部分颗粒物，保护后续活性炭处理设施。预处理后的气体进入活性炭吸附箱，通过吸附作用，有机物质被截留在其内部，处理达标的气体经烟囱高空排放。

运行一段时间后，活性炭达到饱和状态，吸附作用失效，此时有机物已被浓缩在活性炭内。按照 PLC 自动控制程序，

催化氧化设备自动升温将热空气通过风机送入活性炭床使碳层升温将有机物从活性炭中“蒸”出，脱附出来的废气属于高浓度、小风量、高温度的有机废气。该部分气体进入催化燃烧室，在催化剂作用下燃烧后彻底净化，完成脱附过程。再通过热交换器将净化后的气体降温，最后经风机引高空排放。

为了保证处理流程的连续性，该工艺中活性炭箱一般采用一用一备，当其中一个炭箱处于脱附状态时，另外一个处于吸附状态，通过控制程序自动切换，交替使用。值得注意的是，脱附过程中要严格按照操作规范进行，注意控制燃烧温度，避免因操作不当导致火灾或爆炸事故。

由于某些物质，如氯离子，对脱附所用催化剂具有毒害作用，会造成催化剂“中毒”而失去催化作用，因此活性炭吸附+催化燃烧工艺不适用于处理含氯离子等对催化剂有毒害作用成分的气体。



该工艺特点为：

(1)有机废气具有起燃温度低的特点，因此不需要大量的能耗。而且当催化燃烧达到一定的起燃温度后，依靠自身热量便可以满足要求，不再需要外界提供热源；

(2)应用的范围比较广泛，对多种成分的废气都具有良好的处理效果；

(3)处理效率与其他工艺相比较，净化效率可以达到 95%甚至以上，而且最终产物为二氧化碳和水，没有二次污染物产生；且由于燃烧温度低，能大量减少 NO_x 的生成，因此也大大减少了二次污染；

(4)活性炭可重复使用，延长换炭周期，即减少危险废物的产生量，对改善大气环境具有重要意义；

(5)自动化程度高，操作简单方便，运行安全稳定，有效减少了污染物对环境的影响。

(6)缺点是投资较大，对操作人员素质要求较高。

吸附成本分析

为方便操作，活性炭饱和期限定为一个月，按每天 8 小时工作制，减去 4 个星期天，则总时间为 208 小时。

假设：废气总流量 $Q=10000\text{m}^3/\text{h}$

污染物甲苯的质量流量为 $m=10000\text{m}^3/\text{h} \times 2 \times 10^{-5}=0.2\text{kg}/\text{h}$

则一个饱和期内所需吸附的甲苯量为： $m_1=208 \times 0.2=51.6(\text{kg})$

所需活性炭量为： $M \approx 0.14$ 吨

按上述公式，活性炭吸附装置所需的活性炭用量如下：Q 为废气处理总流量

- | | |
|---------------------------------|-------------|
| 1、 $Q=20000\text{m}^3/\text{h}$ | 约 0.28 吨活性炭 |
| 2、 $Q=30000\text{m}^3/\text{h}$ | 约 0.4 吨活性炭 |
| 3、 $Q=40000\text{m}^3/\text{h}$ | 约 0.56 吨活性炭 |
| 4、 $Q=50000\text{m}^3/\text{h}$ | 约 0.7 吨活性炭 |
| 5、 $Q=60000\text{m}^3/\text{h}$ | 约 0.84 吨活性炭 |
| 6、 $Q=70000\text{m}^3/\text{h}$ | 约 0.98 吨活性炭 |
| 7、 $Q=80000\text{m}^3/\text{h}$ | 约 1.12 吨活性炭 |

按一个月（208 小时）运行计算，每吨中等品质的活性炭以 6000 元/吨计，则活性炭吸附装置的运行费用为：

- | | |
|----------------------------|------------------|
| 1、Q=20000m ³ /h | 0.28×6000=1680 元 |
| 2、Q=30000m ³ /h | 0.4×6000=2400 元 |
| 3、Q=40000m ³ /h | 0.56×6000=3360 元 |
| 4、Q=50000m ³ /h | 0.7×6000=4200 元 |
| 5、Q=60000m ³ /h | 0.84×6000=5040 元 |
| 6、Q=70000m ³ /h | 0.98×6000=5880 元 |
| 7、Q=80000m ³ /h | 1.12×6000=6720 元 |

结 语：活性炭吸附工艺是一种传统的治理工艺，其因为投资小、处理效果稳定而被广泛应用。在使用过程当中需要注意的是废旧活性炭属于危险固体废物，应交由有资质的第三方公司回收处理。有机废气处理的治理工艺还有有很多种，应从使用的实际情况出发，选用合理的工艺，以保证有良好的处理效果。

群聊：新华活性炭知识交流群



有兴趣和学习意向的同学，可以扫右边二维码进知识交流群，方便沟通。

