



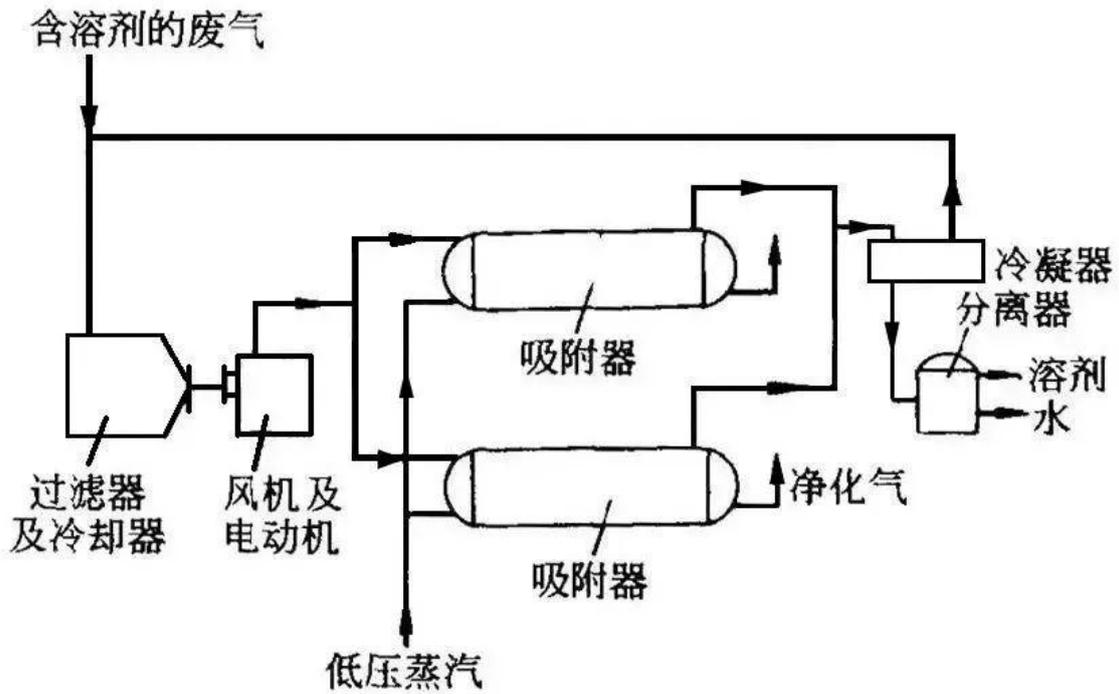
## 活性炭吸脱附 VOCs ——脱附温度的选择



在采用炭基吸附剂处理 VOCs 工艺中，不论采用低压水蒸汽脱附还是氮气脱附，都是将脱附介质加热到一定温度后，对吸附质进行脱附。采用水蒸汽脱附时，一般都是将水蒸汽加热到 100℃，主要是为了利用水的潜热，另外也不用考虑设备的承压问题；采用氮气脱附时，加热温度可选择，当温度超过 100℃时，也不必考虑设备的承压问题。目前在脱附温度的选择上，一般都是采用粗犷的方法：即不论脱附什么物质，水蒸汽温度一般都定在 100℃或略高；氮气则根据脱附物质的性质确定。因此，在脱附温度的选择上常出现误区：1) 对于一种挥发性有机物的脱附温度，一般认为：要想把这些物质从吸附剂上脱附下来，其脱附温度必须高于该物质的沸点；2) 由于认识上的误区，使得本不应该使用高温脱附时，却错误采用高温进行脱附，不仅收不到理想的效果，而且会造成能源浪费。



采用吸附法处理 VOCs 工艺流程如下图所示。



### 治理 VOCs 采用的一般脱附方法

#### 1. 升温脱附

采用升高温度的方法，使吸附质分子由固体吸附剂上逸出而脱附的方法，称为升温脱附。升温脱附采用水蒸汽、热惰性气体（如氮气）、热烟气或采用电感加热等方式。

#### 2. 降压脱附

降压脱附又称抽空脱附，是降低饱和吸附剂周围的压力，使其上的吸附质逸出的脱附方法。降压后气相中吸附质的分压随之降低，与之平衡的吸附量亦降低，吸附质即被脱附。

### 3. 置换脱附

采用在脱附条件下与吸附剂亲合能力比原吸附质更强的物质，将原吸附质置换下来的方法，称为置换脱附。

### 4. 吹扫脱附

采用不被该吸附剂吸附的气体（如惰性气体）对床层进行吹扫，将吸附质脱附下来，称为吹扫脱附。

实际应用中，往往是几种脱附方法结合，例如采用水蒸汽脱附，就同时具有加热和吹扫的作用。

## VOCs 脱附情况

在工程实践中可观察到部分挥发性有机物的脱附温度及效率见下表。

部分挥发性有机物的沸点、饱和蒸气压、脱附温度及脱附效率表

挥发性有机物	沸点 (°C)	饱和蒸气压 (kPa)	脱附温度 (°C)	脱附效率 (%)	备注
丙酮	56.12	371.86 (100°C)	100	100	水蒸汽脱附
乙酸乙酯	77.114	201.64 (100°C)	100	100	水蒸汽脱附
苯	80.10	199.98 (103.0°C)	100	99.80	水蒸汽脱附
丁酮	79.64	186.08 (100°C)	100	99.50	水蒸汽脱附
异丙醇	82.4	136.08 (90.00°C)	100	99.30	水蒸汽脱附
四氢呋喃	66	101.33 (66.0°C)	100	99.0	水蒸汽脱附
二氯甲烷	39.75	80.00 (35°C)	100	99.0	水蒸汽脱附
甲苯	110.6	80.00 (102.5°C)	100	99.0	水蒸汽脱附
四氯乙烯	121.20	58.46 (100°C)	100	98.0	水蒸汽脱附
乙酸丁酯	126.114	45.33 (100°C)	100	97.70	水蒸汽脱附
对二甲苯	138.4	33.33 (101.16°C)	100	97.30	水蒸汽脱附
三甲苯	164.7	13.33 (99.71°C)	100	97.01	水蒸汽脱附
二甲基甲酰胺	153.0	10.7 (96°C)	100	95.8	水蒸汽脱附
苯胺	184.7	8.00 (106°C)	100	82.0	水蒸汽脱附
苯乙烯	145.14	0.841 (25°C)	100	—	水蒸汽脱附
乙二醇	197.85	2.13 (100°C)	100	—	水蒸汽脱附
邻苯二甲酸二丁酯	339	0.13 (148.2°C)	100	—	水蒸汽脱附
丙烯酸	141	1.33 (39.9°C)	100	—	水蒸汽脱附
丙烯酸丁酯	145.7	0.53 (20°C)	100	—	水蒸汽脱附
甲基异丁酮	115.8	2.13 (20°C)	100	63.10	
			170	76.50	热氮气脱附
			110	99.20	
			100	—	
二甘醇二甲醚	159.76	0.45 (25°C)	180	66.00	热氮气脱附
			130	96.10	

由上表可以看出：

(1) 脱附温度与物质的沸点基本没有关系。以三甲苯为例，其沸点是 164.7°C，而采用 100°C 的水蒸汽，却能够将其很好地脱附下来（脱附率 97.01%）。而对于比它的沸点低得多的丙烯酸（沸点 141°C），采用 100°C 的水蒸汽进行脱附时，丝毫不起作用。

(2) 纵观上表中的各种物质，凡是饱和蒸气压在 10.0kPa 以上的物质，采用 100℃的水蒸汽都能够很好地脱附下来。而饱和蒸气压较低的物质，如苯乙烯(25℃时为 0.841)、邻苯二甲酸二丁酯(148.2℃时为 0.13)、丙烯酸丁酯(20℃时为 0.53)等，虽然沸点比三甲苯低得多，但由于它们的饱和蒸气压很低，采用 100℃的水蒸汽仍然无法将它们脱附下来。

**由此可得出结论：物质的脱附温度基本与沸点无关，而和它的饱和蒸气压有密切关系。**

(3) 一些物质之所以难以脱附，皆是因为它们的饱和蒸气压很低造成的。由此，也可纠正对苯乙烯难以脱附的原因归结到“苯乙烯在吸附剂表面发生了聚合反应”的错误认识。

(4) 对于难以脱附的物质，当采用热氮气脱附时，并不是温度越高脱附的越彻底，过高的脱附温度反而使其脱附效率下降。如表中所示，在采用热氮气对甲基异丁酮(沸点 115.8℃,20℃时的饱和蒸气压为 2.13kPa)进行脱附时发现，当温度升至 100℃时，脱附率只有 63.10%；为提高脱附率，将氮气温度的提高到 170℃，此时的脱附率达到 76.50%；这时考虑再升温已毫无意义，将温度试着下降，结果发现，脱附率反而逐渐上升。当温度降至 110℃时，脱附率达到了峰值 99.20%。

因此得出，对于难以脱附的物质进行脱附时，并不是温度越高，脱附越彻底，过高的脱附温度反而使其脱附效率下降。如遇此类问题时，应通过实验，慎重选择适当的脱附温度，以取得最佳的脱附效率。

### VOCs 脱附效果分析

(1) 脱附温度与饱和蒸气压的关系。从脱附原理上讲，吸附质从吸附剂表面脱附的根本原因是，吸附质分子必须克服吸附剂表面对它的引力，增大它脱离表面的推动力。

也就是说，要想使吸附质分子从吸附剂表面脱附下来，就必须给它能量或推动力，使其能够从吸附剂表面“蒸发”到吸附剂孔道中，从而进入气相主体。

而在通常采用的脱附方法中，加热脱附是给它提供能量，以增加分子的动能；吹扫脱附和降压（真空）脱附，都是为了降低吸附剂孔道中废气分子的分压，也就是蒸气压，给废气造成一个浓度差，从而给废气分子由吸附剂表面向气相转移提供一个推动力，这个推动力越大，废气分子的脱附速度就越快。所以，从这个理论出发就不难理解，吸附质的脱附温度是与其饱和蒸气压直接相关的，而与它的沸点无关。

(2) 一些饱和蒸气压较低的物质在脱附时，温度过高反而会使脱附率下降。从吸附的分类上说，可分为物理吸附和化学吸附。物理吸附，所形

成的键能只在范德华力的范围，即最大只有 80kJ/kmol 左右，而化学吸附的吸附键力可达到 400kJ/kmol 以上。

在物质的吸附上，往往存在一种现象：当温度低时是物理吸附，如果温度升高，则可能转变为化学吸附。也就是说，当脱附温度过高时，使本来存在的物理吸附状态可能转化成化学吸附状态，使得吸附键的键能大大增加，因而反而不易脱附下来。这就是为什么温度过高，反而使物质脱附率下降的原因。

当然，要想彻底搞清这个问题，只能对两种状态的吸附键的键能进行测定。但目前对吸附键键能的测定还较困难，虽然有人采用同步辐射光电离的方法，能够测定一些物质的化学键的键能，但采用此法能不能很好地测定吸附键的键能，目前还未见报道。

### 对脱附温度确定方法的建议

(1) 对于饱和蒸气压  $>10\text{kPa}$  的物质，原则上都可以采用  $100^\circ\text{C}$  的水蒸汽进行脱附；但从节约能源的角度讲，建议对饱和蒸气压较大且沸点较低（如  $<70^\circ\text{C}$ ）的物质，如：丙酮：沸点  $56.1^\circ\text{C}$ ，饱和蒸气压  $2371.86\text{kPa}$ （ $100^\circ\text{C}$ ）；四氢呋喃：沸点  $66^\circ\text{C}$ ，饱和蒸气压  $101.33\text{kPa}$ （ $66.0^\circ\text{C}$ ）；二氯甲烷：沸点  $39.75^\circ\text{C}$ ，饱和蒸气压  $80.00\text{kPa}$ （ $35^\circ\text{C}$ ）等，建议采用较低温度的氮气进行脱附，这样不仅可降低脱附剂的温度，同时在对脱附后混合气体冷凝时，也不用采用温度很低的冷凝水进行冷凝分离（如二氯甲烷

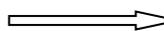
需要采用 7℃ 低温水进行冷凝分离)，就可以节约能源。由于采用了氮气脱附，也就省去了对冷凝水的处理问题。

(2) 对于饱和蒸气压较低的物质采用高温脱附时，也要采用适当的温度进行脱附，这样既能收到高的脱附效率，也能达到节能目的。

当然，对于各种物质脱附温度的选择，目前还没有现成的数据可以查询，还需要进行反复实验才能初步确定，然后再进行经济可行性分析，才能最后确定所选择的脱附温度是否合适。



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。



群聊：新华活性炭知识交流群

