

# 挥发性有机废气净化工艺的选择

王金梅<sup>1,2</sup>, 任保增<sup>1\*</sup>, 陈革新<sup>2</sup>, 姚彩兰<sup>2</sup>, 苟明霞<sup>2</sup>, 赵培庆<sup>2</sup>

(1. 郑州大学化工与能源学院, 河南 郑州 450002;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**以废气排放量、污染物浓度、废气净化后排放指标等条件为依据, 分别采用吸附-脱附-溶剂回收和吸附-脱附-催化燃烧2种处理方案, 从设备投资、公用工程消耗、经济效益分析等对比, 确定某工况最佳净化工艺, 为下一步工业放大提供了依据。

**关键词:** VOCs; 净化工艺; 溶剂回收; 催化燃烧

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)02-0134-03

## Purification process selection of volatile organic compounds

WANG Jin-mei<sup>1,2</sup>, REN Bao-zeng<sup>1\*</sup>, CHEN Ge-xin<sup>2</sup>, YAO Cai-lan<sup>2</sup>,  
GOU Ming-xia<sup>2</sup>, ZHAO Pei-qing<sup>2</sup>

(1. School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. State Key Laboratory for Oxo Synthesis and Selective Oxidation, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the conditions of industrial exhaust, pollutant concentration and emission standards after purification, two kinds of purification processes, adsorption-desorption-solvent recovery and adsorption-desorption-catalytic combustion, are used to compare the equipment investment, utility consumption and economic benefit analysis. The obtained optimal purification process provides the basis for the further industrial scale-up in the future.

**Key words:** VOCs; purification process; solvent recovery; catalytic combustion

在我国环境污染中, 大气污染最为严重。大气污染中的污染物主要有颗粒污染物和气体污染物, 气体污染物又分为无机污染物和有机污染物。其中有机污染物主要就是挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs)。VOCs 是指在室温时饱和蒸气压大于 71 Pa 或常压下沸点低于 260℃ 的挥发性有机化合物, 一般是指在常温常压下饱和蒸气压 > 70 Pa、沸点 < 260℃ 的有机化合物的总称<sup>[1-2]</sup>。VOCs 主要来源于化学工业废气, 近来化学工业得到了飞速的发展, 主要包括氮肥、磷肥、有机原料合成、农药、燃料、涂料、炼焦等行业<sup>[1]</sup>。

污染物含量高、污染面广, 对大气环境造成 VOCs 废气排放量大、种类繁多、组成复杂、较严重的污染。VOCs 的毒性很大, 并有异味, 对人体感官具有刺激作用, 能引起人体的病变, 部分 VOCs 属于强致癌物或突变物, 有些 VOCs 达到一定浓度时, 可以引起致死性的急性中毒<sup>[3]</sup>。如芳香类和脂肪类碳氢化合物能损害人的神经系统; 人体肝肾损害多见于氯代烃类有机溶剂慢性中毒; 酮类和酯类有机溶剂, 可引起人体呼吸道炎症、支气管哮喘、过敏性皮炎、湿疹、结膜炎等<sup>[4]</sup>。因此, 控制 VOCs 产生的

大气污染和改善环境空气质量现状成为人类亟待解决的环境问题之一。

目前, VOCs 净化技术大体可分为回收和消除 2 类, 回收法主要有吸附法、冷凝法、吸收法及膜分离法; 消除法有热氧化催化燃烧和生物降解等技术。由于 VOCs 废气具有种类繁多、组成复杂、有机物含量时有波动、可燃、有一定的毒性等特点, 在进行 VOCs 废气净化时, 选择合适的净化工艺是关键。在进行净化工艺选择时, 首先考虑是否需要回收有机溶剂, 在这方面, 经济性的考虑会作为基础。其次要考虑有机废气中有机溶剂的类型、浓度、排放量、污染物控制标准等诸多因素<sup>[5-7]</sup>。

本研究首先对某企业产生的有机废气进行核算和分析, 并结合企业工况的一些特殊要求对治理方案加以选择, 取得了许多实验数据和经验。

## 1 实验内容

### 1.1 VOCs 基础数据

某企业产生有机废气风机排放量为 20 000 ~ 25 000 m<sup>3</sup>/h, 废气排放温度为 80 ~ 140℃, 废气中染污物主要是酯、酮、醇类等有机溶剂。废气中有机溶

剂质量浓度为  $2.0 \sim 2.5 \text{ g/m}^3$ , 其中(质量分数)酯 40%、酮 30%、醇 30%。基础数据见表 1。

表 1 基础数据

项目	指标
排风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	20000 ~ 25000
废气排放温度/ $^{\circ}\text{C}$	80 ~ 140
溶剂浓度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	2 ~ 2.5
净化目标	
溶剂回收率/%	$\geq 95$
装置出口 VOCs 排放浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\leq 150$

该工况属于中浓度、中流量的有机废气处理范围,若采用单一净化工艺,尾气中 VOCs 仍不能达到排放标准,要想达到彻底的净化,必须采用吸附-脱附-溶剂回收(简称溶剂回收工艺)或吸附-脱附-催化燃烧(简称催化燃烧工艺)等联用技术。

### 1.2 吸附-脱附-溶剂回收工艺

本工况废气中主要含有酯、酮等有机溶剂,对这类溶剂吸附,目前工业上比较成熟的做法是选用颗粒活性炭,一般采用水蒸汽低压脱附。回收 VOCs 溶剂不溶或微溶于水,则用气液分离器直接分离回收。工艺流程如图 1。

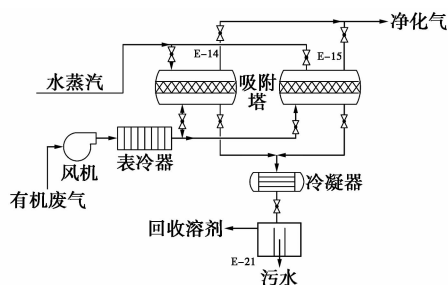


图 1 吸附-脱附-溶剂回收工艺

吸附-脱附-溶剂回收工艺是目前最为广泛使用的回收技术,其原理是利用颗粒状活性炭、活性炭纤维或沸石等吸附剂的多孔结构,将废气中的有机物捕获;当废气通过吸附床时,其中的有机溶剂被吸附剂吸附在床层中,废气得到净化;当吸附剂吸附达到饱和后,通入水蒸汽对吸附剂进行脱附再生,有机溶剂被吹脱放出,形成蒸汽与脱附气体一起离开吸附床。再经冷凝器冷却,使其冷凝为液体,最后用分离器直接分离回收 VOCs。

### 1.3 吸附-脱附-催化燃烧工艺

本工况废气中主要含有酯、酮等有机溶剂,属于比较干净的有机废气,催化剂采用非贵金属复合氧化物型催化剂,活性组分主要是 Cu、Mn、Co、Ce 等<sup>[8-9]</sup>。工艺流程如图 2。

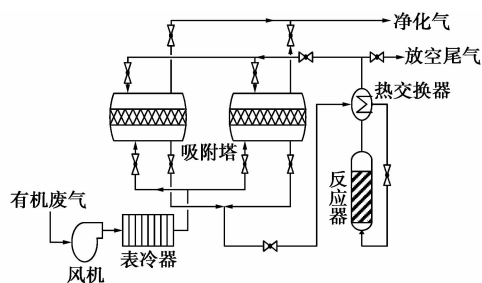


图 2 吸附-脱附-催化燃烧工艺

吸附-脱附-催化燃烧工艺是 20 世纪末发展起来的常规吸附方法与催化燃烧方法的组合工艺。有机废气经风机输送到表冷器冷却到  $40^{\circ}\text{C}$  左右,然后经管道输送至吸附塔,吸附后的尾气达到净化直接排空。当吸附剂吸附达到饱和后,用反应产生热气流将有机物从吸附剂上脱附下来,使其再生。再生后的气体含有高浓度 VOCs,先经热交换器预热后,送往催化器催化燃烧,燃烧过程中产生的热量,一部分用于热再生,另一部分用于反应气预热。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 主要设备投资对比分析

由图 1 和图 2 可知,在吸附-脱附工段中 2 种处理方案所用设备相同,主要设备有吸附塔、表冷器、风机、阀门、管件等。不同之处为溶剂回收和催化燃烧工段,溶剂回收工段主要设备有冷凝器、气液分离器、溶剂泵、回收槽、阀门、管件等;催化燃烧工段主要设备有反应器、催化剂、热交换器、耐高温阀门、管件等。主要设备报价委托浙江某设备加工企业最新报价。主要设备投资报价对比见表 2。

表 2 主要设备投资对比分析

主设备	溶剂回收工艺		催化燃烧工艺	
	材质	造价/元	材质	造价/元
吸附塔	304	270000	304	270000
表冷器	304	89000	304	89000
风机	304	18200	304	18200
冷凝器	304	210000	304	180000
分离器	304	24600		50000
溶剂泵	304	4700	304	200000
合计		616500		807200

由表 2 可知,主要设备投资价格,催化燃烧工艺比溶剂回收工艺高约 20 万元。主要是催化燃烧工艺使用条件是高温,因此,阀门、仪表、管件等都要耐高温。综合考虑,催化燃烧工艺设备投资价格将高于溶剂回收工艺。

## 2.2 公用工程运行成本对比

溶剂回收工艺用到的公用工程是电力、蒸汽、冷冻水、压缩空气等。电力主要用于吸附风机、泵、冷冻机组等,蒸汽主要用于溶剂脱附,冷冻水主要用于溶剂冷却回收,压缩空气主要用于表冷器冷却和仪表气等。催化燃烧工艺用到的公用工程是电力、冷却水、压缩空气等。电力主要用于吸附风机、反应器加热等,冷却水主要用于表冷器二级冷却,压缩空气主要用于表冷器冷却和仪表等。消耗数据见表 3。以下数据通过 Aspen Plus 流程模拟软件<sup>[10-11]</sup>得到。

表 3 公用工程消耗对比

公用工程项目		溶剂回收	催化燃烧
电力	规格	380 V/220 V	380 V/220 V
	容量/kW	37	105
蒸汽	压力/MPa	≥0.20	—
	用量/(kg·h <sup>-1</sup> )	平均 100	—
冷冻水	压力/MPa	≥0.25	≥0.25
	温度/°C	≤32	≤32
	水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	15	5
空气	压力/MPa	0.45~0.8	0.4~0.6
	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	5	1.2

通过表 3 数据,按年工作时间 300 d(7 200 h),进行了公用工程运行成本的计算,结果见表 4。

表 4 运行成本对比分析 万元/a

项目	溶剂回收	催化燃烧
用电成本(按 0.7 元/kWh)	16	53
蒸汽成本(按 250 元/t 计)	25	—
空气成本(按 1 元/m <sup>3</sup> 计)	3.6	0.86
吸附剂更换	10	10
催化剂消耗	—	5
设备折旧(10% 计)	10	10
合计	64.6	78.86

由表 4 可知,若采用溶剂回收工艺,本工况 1 年公用工程消耗 65 万元左右,主要是水蒸汽的消耗较大。若采用催化燃烧工艺,本工况 1 年公用工程消耗 78 万元左右,由于本工况的回收尾气中 VOCs 的浓度较低,无法进行能量的回收利用。因此电的消耗较大。

## 2.3 回收效益分析

回收效益分析主要以回收的溶剂的价格计算,回收的混合溶剂按平均价格 5 000 元/t 出售,年工作时间按 300 d(7 200 h)计,回收率按 90% 计算,年回收价值如表 5。

表 5 回收效益对比

项目	溶剂回收	催化燃烧
年回收量/(t·a <sup>-1</sup> )	377.80	0
年回收价值/(万元·a <sup>-1</sup> )	188.9	0
运行成本/(万元·a <sup>-1</sup> )	64.6	78.86
年收益为/(万元·a <sup>-1</sup> )	127.3	-78.86

由表 5 可知,若采用溶剂回收工艺,本工况年收益为 127 万元左右。催化燃烧工艺收益为负值。

## 3 结论

(1)关键设备投资费用对比,溶剂回收工艺低于催化燃烧工艺。

(2)公用消耗对比,通过 Aspen Plus 流程模拟软件详细计算分析,采用溶剂回收工艺公用工程运行成本约 65 万元/a;采用催化燃烧工艺公用工程运行成本约 78 万元/a。

(3)回收效益分析,若采用溶剂回收工艺,本工况年收益为 127 万元左右;催化燃烧工艺未进行溶剂回收。

(4)通过以上对比分析,本工况有机溶剂回收采用吸附-脱附-溶剂回收工艺比较经济。主要设备投资大约需要 80 万元,公用工程运行成本约 65 万元/a,本装置年收效益为 127 万元/a。

## 参考文献

- [1] 童志权. 工业废气净化与利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [2] Wallae L, Tai H, Lam S, et al. Personal exposures indoor-outdoor relationships and breath levels of toxic air Pollutants measured for 355 Persons in New Jersey[J]. Atmos Environ, 1985, 19(11): 652-661.
- [3] 鲁格什科 R M. 大气中工业排放有害有机化合物手册[M]. 张宏才, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [4] 依成武, 刘洋, 马丽, 等. 有机废气的危害及治理技术[J]. 安徽农业科学: 2009, 37(1): 351-352.
- [5] 栾志强, 郝郑平, 王喜芹. 工业固定源 VOCs 理技术分析评估[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3476-3486.
- [6] 乔惠贤, 尹维东, 栾志强, 等. 大风量 VOCs 废气治理[J]. 环境工程, 2004, 22(1): 36-38.
- [7] 李俊华, 陈建军, 郝吉明, 等. 控制大气污染化工技术的研究进展[J]. 化工进展, 2005, 24(7): 703-708.
- [8] 徐可荣, 梁继发. 催化燃烧在处理工业有机尾气上的应用[J]. 化工环保, 1982, 2(6): 34-36.
- [9] 杨玉霞, 徐贤伦. 负载铜锰复合氧化物催化剂上有机废气(VOCs)的催化燃烧性能[J]. 工业催化, 2005, 13(s1): 433-434.
- [10] Aspen Plus 10.01 用户指南[Z]. 大庆石化总厂计算机开发公司编印, 1999.
- [11] Aspen Plus 物性方法和模型[Z]. 大庆石化总厂计算机开发公司编印, 1999. ■