

# 典型炼化企业污水处理厂 VOCs 治理技术改造及分析

郑家乐<sup>1,2\*</sup>, 蔡磊<sup>3</sup>, 崔柳华<sup>3</sup>, 薛明<sup>1,2</sup>, 崔翔宇<sup>1,2</sup>

(1. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室, 北京 102206;  
2. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206;  
3. 中国石油集团大港石化公司, 天津 300280)

**摘要:**研究了典型炼化企业污水处理厂 VOCs 排放现状及治理技术和改造状况, 针对 500 m<sup>3</sup>/h 炼化污水处理厂, VOCs 废气排放量约 35 000 m<sup>3</sup>/h, 不同装置 VOCs 排放浓度差别明显, 低浓度废气平均为 200 mg/m<sup>3</sup>, 高浓度废气平均为 2 600 mg/m<sup>3</sup>。针对此类 VOCs 排放, 采用吸附-冷凝预处理加生物氧化的治理工艺存在冷凝效率低、投资运行成本高等问题。结合炼化企业生产工艺特点, 将低浓度废气浓缩后与高浓度废气混合通入炼化装置加热炉进行焚烧处理具有可行性, 可显著降低设备投资及运行成本, 改造结果显示 VOCs 去除率大于 99%, 年节约成本 200 余万元。

**关键词:** VOCs; 治理技术; 炼化企业; 污水处理; 节能减排

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)08-0229-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.08.045

## Technical transformation and analysis of VOCs treatment in sewage treatment plants of typical refining and chemical company

ZHENG Jia-le<sup>1,2\*</sup>, CAI Lei<sup>3</sup>, CUI Liu-hua<sup>3</sup>, XUE Ming<sup>1,2</sup>, CUI Xiang-yu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum and Petrochemical Pollutants Control and Treatment, CNPC, Beijing 102206, China; 2. The Research Institute of Safety & Environment Technology, China National Petroleum Corporation, Beijing 102206, China; 3. Dagang Petrochemical Corporation, CNPC, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** Current situation of VOCs emissions, VOCs treatment technology and technology transformation in sewage treatment plant of typical refining and chemical company is studied. As for a 500 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> sewage treatment plant of a refining and chemical company, VOCs emission is about 35 000 Nm<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. VOCs emission characteristics of different plants are obviously different, the average concentration of VOCs in low-concentration waste gas is 200 mg·Nm<sup>-3</sup>, and that in high concentration waste gas is 2 600 mg·Nm<sup>-3</sup>. For such VOCs emissions, the treatment process employing adsorption-condensation pretreatment and biological treatment technology suffers problems of low condensation efficiency, and high investment and operation cost. Combined with the production process characteristics in refining and chemical company, it is feasible to pre-concentrate the low VOCs concentration waste gas, and then mix it with the high VOCs concentration waste gas together into the heating furnace for incineration treatment, which can significantly reduce the equipment investment and operation cost. Actual transformation results show that the removal rate of VOCs exceeds 99% and the annual cost is saved by more than RMB2 million.

**Key words:** VOCs; treatment technology; refining and chemical company; sewage treatment; energy conservation and emission reduction

国家环境保护部 2021 年 5 月发布的《中国生态环境状况公报》表明, 2020 年, 我国环境空气质量持续改善, 但是全国 337 个地级及以上城市中, 仍有 43.3% 的城市空气质量未达国家二级标准, 其中 PM<sub>2.5</sub> 是影响大气环境质量的首要污染物, 其次为 O<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub> 和 NO<sub>2</sub>。挥发性有机物 (VOCs) 通过光化学反应可生成大量二次有机气溶胶; 而二次气溶胶

特别是二次有机气溶胶是 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源<sup>[1]</sup>。此外, VOCs 作为氧化剂, 在氮氧化物向硝酸盐和二氧化硫向硫酸盐的转化过程中也起到了重要的推动作用<sup>[2-3]</sup>。VOCs 还是 O<sub>3</sub> 形成的关键前驱体, 和 NO<sub>x</sub> 一起在光照驱动下促进了 O<sub>3</sub> 的生成<sup>[4]</sup>。2015 年 8 月修订的《中华人民共和国大气污染防治法》将 VOCs 列入监管范围并列为重要污染物, 这意味

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2022-06-09

基金项目: 中国石油集团科技项目 (2021DJ6603)

作者简介: 郑家乐 (1992-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为石油石化行业废气处理与温室气体排放控制技术, 通讯联系人, 010-80166519, zhengjiale@cnpc.com.cn。

随着我国对 VOCs 污染治理工作的重视程度日益加重,控制 VOCs 的排放已刻不容缓。

大气中 VOCs 污染物的来源分为自然源和人为源,其中,自然源主要指动植物自身的排放、火灾等,人为源又可细分为工业源、交通源、生活源和农业源<sup>[5]</sup>。2015 年全国人为源 VOCs 排放量超过 3 000 万 t,其中,工业源占全部人为源排放的约 43%,是 VOCs 污染治理的重中之重,其次为交通、生活和农业源,占比依次为 28%、15% 和 14%<sup>[6]</sup>。石油炼制行业占工业源排放总量的 14.36%,是 VOCs 排放占比第二的行业<sup>[7]</sup>。为了控制石化企业的 VOCs 排放,2015 年颁布实施的《石油炼制工业污染物排放标准》和《石油化学工业污染物排放标准》中明确规定了 VOCs 的排放限值。2021 年 8 月,生态环境部印发《关于加快解决当前挥发性有机物治理突出问题的通知》,进一步指出应加快解决当前 VOCs 治理存在的突出问题,石油炼制工业 VOCs 治理技术升级改造已迫在眉睫。

VOCs 污染治理技术主要分为 2 大类,分别为回收技术和销毁技术,回收技术包括冷凝、吸收、膜分离技术等,销毁技术包括燃烧、光催化、生物技术等<sup>[8-10]</sup>。由于 VOCs 污染物排放特征复杂多样,单一的治理技术有时很难达到排放要求,合理的组合技术就成为了最佳选择,如在处理高浓度废气时采用冷凝与吸附组合技术,在处理大风量、低浓度废气时采用吸附浓缩与催化燃烧组合技术<sup>[11-13]</sup>。本文中研究了典型炼化企业污水处理厂 VOCs 排放现状及当前治理技术和改造状况,分析了技术改造前后的优缺点和经济性,以期为炼化企业 VOCs 治理工艺选择提供参考,减少不必要的投资,提高 VOCs 治理效率。

## 1 研究对象

### 1.1 污水处理厂基本信息

本研究选择的炼化企业位于天津东南渤海之滨,现拥有 500 万 t/a 原油加工能力,加工大港高凝混合原油、赵东原油和部分进口原油,主要生产装置有常减压蒸馏装置、延迟焦化装置、加氢裂化装置、催化裂化装置、MTBE 装置、连续重整装置、汽柴油加氢装置、硫磺回收装置、污水处理装置等。可生产汽油、柴油、苯、液化气、丙烯、低硫石油焦、MTBE、硫磺、燃料油等 40 余种产品。

本研究炼化企业内建有 1 座污水处理场,设计

处理能力为 500 m<sup>3</sup>/h,主要处理炼厂排放的含油、含盐、含硫污水。污水处理场主要构(建)筑物有调节罐、隔油池、浮选池、生化池、含油污水池、三泥罐区、离心机房等,在运行过程中会产生挥发性有机物,如果不加以治理,将会对周围的空气环境造成污染。

### 1.2 污水处理厂 VOCs 排放现状

目前污水处理厂所有构(建)筑物均进行了密封处理,并建设了废气收集管道系统。通过对污水处理场各单元气体检测数据分析,废气成分较为复杂,主要污染物以苯、甲苯、二甲苯、硫化氢及其他非甲烷总烃类成分为主。

对污水处理厂 VOCs 逸散进行治理的首要关键步骤是要合理设计各构(建)筑物的处理气量,当处理气量偏低时,会导致 VOCs 废气收集不完全,继续向环境中逸散,影响治理效果;当处理气量偏高时,会导致 VOCs 废气中混入大量空气,降低废气浓度,增加处理规模,造成能源浪费。

根据《石油化工污水处理设计规范》(GB 50747—2012)规定,对于生物反应池,处理气量可根据曝气量确定。对于已进行加盖处理的污水预处理装置,如隔油池、浮选池、油泥浮渣池、含油污水池等,可根据上方的气体空间设计一定的换气次数,换气次数宜为 1~4 次/h,则上述装置的处理气量可由公式计算:

$$Q_c = n \cdot L \cdot B \cdot H \quad (1)$$

对于调节罐、均质罐、污油脱水罐、三泥脱水罐、不合格罐等储罐装置,处理气量主要包括“大小呼吸”气量,其中,“小呼吸”气量是指因储罐温差变化而使液体蒸发排出储罐的气体流量,其值可按现行国家标准《石油化工储运系统罐区设计规范》(SH/T 3007—2014)有关储罐呼吸通量的规定计算。“大呼吸”气量指储罐进液时,由于罐内液体体积增加而排出储罐的气体流量,其值可由公式(2)计算:

$$Q_w = \eta \cdot K_N \quad (2)$$

式中, $n$  为换气次数, $L$  为装置长度,m; $B$  为装置宽度,m; $H$  为密闭空间高度,m; $K_N$  为进液流量,m<sup>3</sup>/h; $\eta$  为产品因子(液体闪点>45℃时取 1.07,液体闪点≤45℃时取 2.14)。

根据对本研究污水处理厂场内污水池、污水罐、开放式工艺设备集气空间的统计、计算以及气体检测分析结果,污水处理厂各构(建)筑物的 VOCs 排放情况如表 1 所示。

表1 污水处理厂 VOCs 排放情况

构筑物	尺寸/m				数量/ 座	密闭高度/ m	进液流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	曝气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	换气次数/ ( $\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$ )	气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	VOCs 浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
	长度	宽度	高度	直径							
隔油池	32.2	25.9	3.0	—	1	1	—	—	1	834	668
浮选池	32.3	19.5	3.1	—	2	2	—	—	1	2520	235
油泥浮渣池	6.8	5.1	5.7	—	1	1	—	—	2	70	3720
含油污水池	8.0	5.1	5.7	—	1	1	—	—	2	82	138
调节罐	—	—	16.1	20.0	4	—	500	—	—	7428	7005
均质罐	—	—	16.1	20.0	1	—	500	—	—	1857	1800
污油脱水罐	—	—	18.4	8.0	4	—	75	—	—	1318	6000
三泥脱水罐	—	—	9.3	5.0	8	—	150	—	—	2823	1800
新离心机房	6.0	6.0	6.0	—	2	—	—	—	6	2592	4080
旧离心机房	6.0	6.0	6.0	—	2	—	—	—	6	2592	4080
生化池	50.0	22.2	6.5	—	2	—	—	10800	1	10800	132
不合格罐	—	—	16.1	20.0	1	—	560	—	—	1985	180

从表1可以看出,隔油池、调节罐、均质罐等逸散的废气 VOCs 浓度相对较高( $>500 \text{ mg/m}^3$ ),而生化池、浮选池、含油污水池等逸散的废气 VOCs 浓度相对较低( $<500 \text{ mg/m}^3$ ),为取得良好的治理效果,将废气分为高浓度和低浓度分别进行处理,高浓度管道收集隔油池、油泥浮渣池、调节罐、均质罐、污油脱水罐、三泥脱水罐、离心机房等的 VOCs 逸散气,设计处理风量  $20\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ;低浓度管道收集生化池、浮选池、含油污水池、不合格罐等的 VOCs 逸散气,设计处理风量  $15\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,高低浓度 VOCs 废气排放情况如表2所示。

表2 废气收集管道 VOCs 排放情况

区域	VOCs 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	废气流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
高浓度废气	2600	20000
低浓度废气	200	15000

## 2 技术现状及改造方案

### 2.1 VOCs 治理技术现状

针对污水处理厂 VOCs 排放现状,目前选择的治理技术为“吸附冷凝预处理+两段滴滤式生物氧化”联合工艺,工艺流程如图1所示。

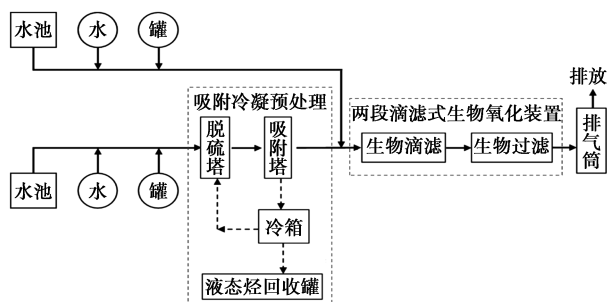


图1 VOCs 治理工艺流程

来自污水厂的高浓度 VOCs 废气,经由气体传输管道进入脱硫塔,脱硫后可去除废气中 90% 的硫化氢,之后废气进入吸附单元。吸附单元设置有 2 个吸附塔,循环对废气中的 VOCs 吸附富集,吸附后的废气由高浓度变为低浓度,与生化单元收集的废气一起进入后续生物滴滤及过滤单元。吸附塔中的吸附剂饱和后,对其进行解析,解析的含 VOCs 废气送入冷凝单元冷凝回收。

在生物滴滤单元,混合气体与循环喷淋的滴滤液进行充分的逆向接触,废气中的亲水性污染成分,部分被滴滤介质上固着的微生物群所捕获消化,另一部分则溶解于液相中,并随滴滤液落入单元底部的滤液池中,滤液池中含有大量浮游微生物将对捕捉到的污染物质进行彻底的生物降解。经生物滴滤单元处理后的气体进入“生物过滤单元”。

在生物过滤单元中,废气与生物填料进行充分接触,在此期间,废气中难溶性污染组分被吸附在生物填料的多孔表面,并被填料中的微生物所捕获和降解。在此过程,废气中残余的 VOCs 组分将得到有效去除。经生物过滤单元处理后的废气,经后置风机送入烟囱之后高空排放。

目前,污水处理厂 VOCs 治理设备整体运行状况良好,但是也存在一些亟需解决的问题。

#### (1) 冷凝回收设备 VOCs 回收率低

根据设计,理论上经吸附富集浓缩后的 VOCs 废气经过二级冷凝后,温度可降至  $-40^\circ\text{C}$  左右,此时大量 VOCs 组分将冷凝为液态并进入回收罐,当达到一定的量后由回收泵自动打入污水处理厂污油罐进行后续处理。但是在实际运行过程中,由于回收罐以及后续管线的保冷条件很难维持在  $-40^\circ\text{C}$  左

右,致使冷凝后的 VOCs 组分再次气化,并直接进入吸附工序,往复循环,导致冷凝设备的 VOCs 回收率低。

### (2) 生物氧化设备 VOCs 去除率低

由于冷凝装置的 VOCs 回收率低,导致吸附装置的运行负荷偏大,使得经吸附-冷凝预处理后的废气浓度周期性波动,并大部分时间超过设计值,此时浓度偏大的废气进入生物处理单元,严重影响微生物群的处理效果,降低 VOCs 去除率,目前生物氧化装置的 VOCs 去除率仅有 22.6%。

### (3) 设备运行维护成本高

吸附-冷凝模块整体运行功率高(>40 kW),且 VOCs 回收率低,造成能源浪费。此外,冷凝机组的运行维护和保养都要由厂家进行,费用昂贵。由于吸附装置的超负荷运转,吸附-脱附的循环周期变短,吸附剂的更换周期缩短,运行成本显著增加。

## 2.2 VOCs 治理技术改造

针对目前 VOCs 治理设备存在的问题,该炼化企业进行了技术升级改造,由于炼化企业有现成的加热炉,在不影响正常工作条件下,考虑将污水处理厂废气直接通入加热炉焚烧,彻底氧化分解废气中的 VOCs 组分。为了不影响加热炉的燃烧状态,必须保证废气进入加热炉后可以自持燃烧,则 VOCs 废气应满足的条件为:气体燃烧产生的热量减去反应器的散热量应大于等于将反应气体加热到反应温度所需的热量。由于不同加热炉设计及换热效率的差别,热回收效率和进气温度各不相同,表 3 为该炼化企业连续重整装置四合一加热炉的操作条件,在表中的反应条件和设备参数下,VOCs 废气自持燃烧浓度应大于 2 000 mg/m<sup>3</sup>。

表 3 四合一加热炉操作条件

参数	数值
反应温度/℃	>550
热回收效率/%	90
进气温度/℃	460
VOCs 热值(二甲苯为例)/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	4.3×10 <sup>4</sup>
空气等压热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	1.02

根据对该污水厂 VOCs 排放状况的分析结果,高浓度废气平均浓度为 2 600 mg/m<sup>3</sup>,可满足自持燃烧条件,可将其通入加热炉进行直接焚烧处理;而低浓度废气平均浓度较低(200 mg/m<sup>3</sup>),直接通入加热炉会影响燃烧状态,因此低浓度废气依然通入生物氧化装置进行处理,改造后的工艺流程如图 2 所示。

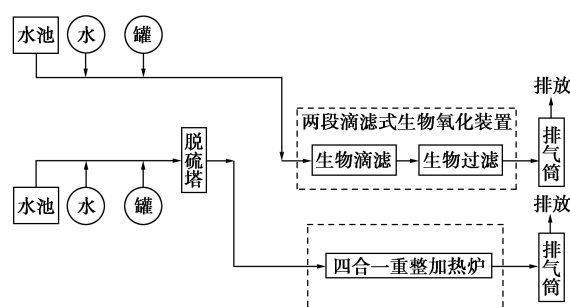


图 2 改造后 VOCs 治理工艺流程

来自污水处理厂的高浓度 VOCs 废气经脱硫塔处理后直接进入连续重整装置加热炉风烟换热系统进行预处理,达到反应温度后,进入加热炉直接焚烧,焚烧后的烟气达标后直接送入烟囱高空排放。来自污水处理厂的低浓度 VOCs 废气治理工艺不变,直接进入生物氧化装置处理。由于生物氧化装置不再需要处理经预处理(吸附-冷凝)后的高浓度废气,使得其处理的废气流量以及浓度显著下降,增加了废气中 VOCs 组分在生物氧化装置中的停留时间,使生物氧化装置的 VOCs 去除率由原来的 22.6% 提高到 77.5%。

目前 VOCs 治理装置改造后整体运行情况稳定,四合一加热炉排放口日平均 VOCs 浓度如表 4 所示,生物氧化装置排放口日平均 VOCs 浓度如表 5 所示。可以看出,来自污水处理厂的高低浓度废气经不同工艺处理后,均满足国家排放标准。但是通过对比可以发现,直接焚烧工艺排放口 VOCs 平均浓度 3 mg/m<sup>3</sup>,VOCs 去除率 99.8%,生物氧化装置排放口 VOCs 平均浓度 45 mg/m<sup>3</sup>,VOCs 去除率 77.5%,可见直接焚烧工艺 VOCs 治理更彻底,减排效果更明显。

表 4 四合一加热炉烟囱 VOCs 浓度

时间/d	1	2	3	4	5
VOCs 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	2.38	4.14	0.96	5.56	1.98
时间/d	6	7	8	9	10
VOCs 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	4.49	0.59	0.07	0.57	5.04

表 5 生物氧化装置烟囱 VOCs 浓度

时间/d	1	2	3	4	5
VOCs 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	61.6	45.6	62.4	29.9	36.5
时间/d	6	7	8	9	10
VOCs 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	33.5	40.7	55.2	43.7	43.8

### 2.3 安全性和经济性分析

为了安全生产,通入加热炉的 VOCs 废气浓度应小于爆炸下限的 1/4(即 25% \* LEL),表 6 为部

分 VOCs 的爆炸极限,可以看出,当 VOCs 废气浓度小于  $10\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$  时,不会存在爆炸风险,而本研究污水处理厂 VOCs 废气的最大浓度为  $7\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$  (调节罐),直接通入加热炉焚烧无安全隐患。

表 6 部分 VOCs 的爆炸范围

VOCs	苯	甲苯	二甲苯	乙酸乙酯
爆炸极限/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$4.2\times 10^4\sim$ $2.8\times 10^5$	$4.9\times 10^4\sim$ $2.9\times 10^5$	$4.7\times 10^4\sim$ $3.3\times 10^5$	$7.9\times 10^4\sim$ $4.5\times 10^5$

针对炼化企业污水处理厂高浓度 VOCs 废气,技术改造前后的基本投资及运行费用如表 7 所示,可以看出,由于炼化企业均存在烟气处理措施完善的加热炉,若选择直接焚烧工艺,无需另建焚烧炉,除铺设管道的基础费用外,几乎不增加额外运行成本。且当废气中的 VOCs 浓度超过一定数值时,燃烧产生的热量除维持自身燃烧外还可为加热炉提供额外热量,变废气为燃料,降低加热炉燃气用量,实现节能减排及资源再利用。相比于直接焚烧工艺,吸附-冷凝工艺初期投资巨大,运行成本高,以 80% 回收效率计算,本装置 VOCs 回收量为  $0.99\ \text{t}/\text{d}$ ,但以本处理装置投资及运行成本规模,只有当 VOCs 回收量大于  $3.5\ \text{t}/\text{d}$  时才会产生经济效益(假设设备折旧年限为 14 年,残值率为 3%,活性炭更换频率为 2 年 1 次,价值为 20 万元/t,电价为 0.7 元/kWh,回收 VOCs 价值为 2 000 元/t)。且吸附-冷凝预处理后的废气不能直接满足排放标准,还需进入生物氧化装置进行二次处理,增加了生物治理装置规模,进一步增加固定投资以及运行成本。

表 7 不同治理工艺投资及运行成本对比

设备投资及运行	吸附-冷凝工艺	直接焚烧工艺
吸附-冷凝设备/万元	700	无
冷凝机组功率/kW	40	无
吸附剂(活性炭)/t	18.5	无

综上所述,对于烟气处理措施完善的炼化企业,针对污水处理厂高浓度 VOCs 废气,经济有效的处理方式为直接将其通入就近炼化装置加热炉进行焚烧处理,相比于吸附-冷凝工艺,年节约投资运行成本 200 余万元。对于低浓度 VOCs 废气,生物治理装置可以满足处理需求,但是投资运行维护成本较高,VOCs 去除率偏低,针对新建 VOCs 处理装置,可对低浓度废气进行吸附浓缩预处理,提高 VOCs 浓度、降低处理气量(流量降低至 1/10 甚至更低),然后与高浓度废气混合通入就近炼化装置加热炉进行焚烧处理。

### 3 结论

研究了典型炼化企业污水处理厂 VOCs 排放现状及当前治理技术和改造状况,分析了技术改造前后的优缺点和经济性,得到如下结论。

(1) 炼化企业污水处理厂 VOCs 废气排放成分复杂,高低浓度差别明显,低浓度废气平均为  $200\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,高浓度废气平均为  $2\ 600\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,针对高低浓度 VOCs 废气,建议分流收集、处理。

(2) 针对高浓度 VOCs 废气排放,最佳的治理工艺为将其通入就近炼化装置加热炉进行焚烧处理,该工艺不仅可以显著减少设备投资及运行成本(年均 200 余万元),还可实现污染物减排及资源再利用。

(3) 针对低浓度 VOCs 废气排放,经济有效的治理工艺为先将其吸附浓缩,提高 VOCs 浓度、降低处理气量,然后与高浓度废气混合通入就近炼化装置加热炉进行焚烧处理。

### 参考文献

- [1] Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [2] Yuan B, Hu W W, Shao M, et al. VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(3): 6631-6679.
- [3] Sexton K, Westberg H. Ambient hydrocarbon and ozone measurements downwind of a large automotive painting plant [J]. *Environmental Science and Technology*, 1980, 14(3): 329-332.
- [4] 雷宇, 宁森. 对“十三五”时期挥发性有机物污染防治路径的系统思考 [J]. *环境保护*, 2017, 45(13): 13-17.
- [5] 王宁, 刘伟, 郑伟, 等. “十三五”重点行业 VOCs 污染防治思考 [J]. *环境影响评价*, 2018, 40(6): 6-8.
- [6] 席劲瑛, 胡洪营, 武俊良, 等. 不同行业点源产生 VOCs 气体的特征分析 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(2): 134-138.
- [7] Wu X, Huang W, Zhang Y, et al. Characteristics and uncertainty of industrial VOCs emissions in China [J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2015, 15(3): 1045-1058.
- [8] Hamad A, Fayed M E. Simulation-aided optimization of Volatile Organic Compounds recovery using condensation [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004, 82(7): 895-906.
- [9] 梁晶, 王世朋, 柯冬冬. VOCs 危害及其处理技术 [J]. *科技创新与应用*, 2018, (27): 148-149, 152.
- [10] Khan F I, Ghoshal A K. Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13(6): 527-545.
- [11] 朱琦, 覃茜, 计桂芳, 等. 典型行业 VOCs 排放特点及治理技术 [J]. *轻工科技*, 2017, 33(12): 81-83, 85.
- [12] Ruddy E N. Selected the best VOC control strategy [J]. *Chem Eng Prog*, 1993, 89: 7.
- [13] Chen H L. Removal of volatile organic compounds by single-stage and two-stage plasma catalysis systems: A review of the performance enhancement mechanisms, current status, and suitable applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(7): 2216-2227. ■