

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.06.008

文章编号:1672-3767(2020)06-0063-08

引用格式:郭亚逢. 炼化企业 VOCs 排放特征及处理现状研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(6):63-70.

GUO Yafeng. Research of VOCs emission characteristics and treatment status in refining and chemical enterprises [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(6): 63-70.

# 炼化企业 VOCs 排放特征及处理现状研究

郭亚逢

(中国石油化工股份有限公司 青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266000)

**摘要:**挥发性有机污染物(VOCs)被列为重点控制的大气污染防治重点污染物,而炼油化工企业是工业挥发性有机污染物排放的重要源头之一。了解典型炼化企业排放 VOCs 的情况和处理现状对控制工业企业 VOCs 的排放十分必要。本文针对炼化企业的特点,从不同排放环节出发,理清 VOCs 的排放方式和典型的排放污染物种类,进而深入分析炼化企业 VOCs 的排放特征,总结了当前不同排放环节 VOCs 的处理现状及各类技术的适用范围和优缺点,为炼化企业的 VOCs 管控提供参考。

**关键词:**炼化企业;挥发性有机污染物;排放特征;处理技术;源头管控

**中图分类号:**X511

**文献标志码:**A

## Research of VOCs emission characteristics and treatment status in refining and chemical enterprises

GUO Yafeng

(SINOPEC Safety Engineering Institute, Qingdao, Shandong 266000, China)

**Abstract:** Volatile organic compounds (VOCs) have been listed as the key prevention and control pollutants in air, while refining and chemical enterprises is considered to be one of the important sources of VOCs emission. To control VOCs emission from refining and chemical enterprises, it is necessary to understand the typical VOCs emission and the existing treatment status. In this paper, the emission methods of VOCs and the types of typical pollutants were first identified based on the characteristics of refining and chemical enterprises and the different emission links of VOCs. Then, the emission characteristics of refining and chemical enterprises were further analyzed. Finally, the current treatment status at different emission links of VOCs as well as the merits and demerits and application scope of various technologies were summarized. The present study can provide reference for the control of VOCs in refining and chemical enterprises.

**Key words:** refining and chemical enterprises; volatile organic compounds(VOCs); emission characteristics; treatment technology; source control

随着炼化企业生产规模不断扩大,加工油品种类越来越多,炼油和化工生产过程产生的各种污染物数量和种类日趋增多,炼化企业需要承担的社会责任和环保压力也越来越大。2010 年原国家环保部在《环境保护部门关于推进污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见的通知》中首次将挥发性有机污染物(volatile organic compounds, VOCs)列为重点控制的大气污染防治重点污染物<sup>[1]</sup>,而炼化企业作为 VOCs 重点

收稿日期:2019-04-01

基金项目:中国石油化工股份有限公司合同项目(318010-1)

作者简介:郭亚逢(1981—),男,陕西延安人,高级工程师,博士,主要从事 VOCs 废气治理技术及含油废水治理方面的研究。

E-mail:guoyf.qday@sinopec.com

排放的工业污染源之一<sup>[2-3]</sup>,其排放情况备受社会关注。

VOCs 是一类常压下沸点较低或者能够以气态分子的形态排放到空气中的有机化合物。VOCs 危害人体健康,损伤皮肤、呼吸系统、神经系统等,甚至诱发各种疾病<sup>[4]</sup>,且 VOCs 是二次有机气溶胶(secondary organic aerosols, SOA)和光化学烟雾的前驱体<sup>[5-6]</sup>。而在 VOCs 人为源排放清单中,化石燃料燃烧源占比很高<sup>[7]</sup>。因此,《“十三五”规划纲要》中明确提出石化行业是 VOCs 排放总量控制和治理的重点行业之一,要求 2020 年达到排放总量降低 10%<sup>[8]</sup>。因此,了解炼化企业 VOCs 的产生环节、产生的种类,调查和估算产生量以及处理方法是当前众多企业及研究者关注的重点。针对炼化企业的特点,分析当前炼化企业 VOCs 的排放特征和处理现状,总结各类治理技术的适用范围及其优缺点,为炼化企业控制 VOCs 排放提供一定的参考。

## 1 炼化企业 VOCs 的排放特征

国内对炼化企业 VOCs 的管控始于上世纪开展的炼油企业恶臭治理<sup>[9]</sup>。之后,逐步认识到炼化企业会产生含有众多种类的 VOCs 废气。《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570—2015)中明确规定,参与光化学反应的有机化合物或者根据规定方法测量或核算的有机化合物统称为 VOCs。由于炼化企业类型不同、生产工艺有差异、VOCs 产生环节众多等因素,VOCs 的分布特征也有所不同。例如,酸性水罐区是炼化企业常见的也是最主要的恶臭污染源<sup>[10]</sup>,生产工艺区、物料储存和装载作业等泄漏或者挥发的有机污染物都是 VOCs 的重要排放环节<sup>[11-12]</sup>。典型的炼化企业 VOCs 的排放环节如表 1 所示。

表 1 炼化企业主要的无组织排放 VOCs 环节

Tab. 1 Main unorganized emission sources of VOCs in refining and chemical enterprises

产生环节	举例
生产装置区散逸	装置内的储罐、生产过程等环节;中间产品罐、溶剂储罐、延迟焦化装置清焦过程、酸性水汽提装置内酸性水罐、芳烃回收装置排放口、脱硫醇过程、碱渣再生过程等;装置区内的设备及管线的跑、冒、滴、漏等环节;阀门、法兰、螺纹连接、开口管线、泵轴密封点等;装置区的非正常排放等环节;事故状态下的瓦斯放空排放(如装置安全阀事故等)、事故状态下的停车放空排放、生产装置系统不平稳超压排放;装置的停工检修排放,开车、取样等过程排放等
储运单元散逸	成品油储罐、中间产品储罐、高温重质油储罐等;原油及产品油装卸车、船等;各种储罐事故排放
废物处理及暂存单元散逸	污水收集过程、储存过程、污水处理场等;有机废渣运输、堆放区域等

由于炼化企业类型及生产工艺的差异,VOCs 的排放特征主要为:

1) 炼油企业 VOCs 排放以无组织方式为主,石油化工企业 VOCs 排放以有组织方式为主。炼油企业工艺复杂、储罐众多,VOCs 排放源多而分散。有组织排放一般发生在生产装置区,例如在常减压蒸馏塔的初顶、常顶、减顶会产生不凝气、催化裂化装置的泄压环节排放瓦斯气和氧化脱硫醇装置尾气等。炼化企业有完整的收集系统,有组织排放的 VOCs 能够较好地收集并处理,但有组织排放的占比相对较少,工艺尾气等有组织排放的 VOCs 仅占 5%左右<sup>[12]</sup>。无组织排放是炼化企业 VOCs 的主要排放方式,可以达到 90%以上。据统计,某些炼化企业生产过程无组织排放和储罐呼吸排放的 VOCs 是重要的排放源,在整个炼化企业 VOCs 排放过程中占到 30%以上<sup>[12]</sup>。设备及管线的跑冒滴漏也是重要排放源,美国 API 调查发现炼化企业 84%的泄漏来自设备及管线<sup>[13]</sup>,上世纪九十年代埃克森美孚公司的炼化企业 VOCs 排放的 40%~60%来自设备与管阀件泄漏<sup>[14]</sup>。在无组织排放中,非正常排放(如事故排放、检修等)也是不可忽视的环节,约占整个企业 VOCs 排放量的 10%。石油化工企业的 VOCs 排放以有组织方式排放为主,主要包括对二甲苯氧化生成对苯二甲酸产生的氧化尾气、橡胶生产尾气、环氧丙烷/苯乙烯单体生产尾气、苯甲酸生产尾气、

苯酚丙酮氧化尾气、苯胺生产废气、氯苯生产废气等。

2) 排放 VOCs 的种类众多,排放规律有差异。炼化企业由于原料油复杂、工艺众多、产品种类多等原因,产生的 VOCs 组成十分复杂,具体成分见表 2。另外,一些典型的炼化企业还会排放酚类、醚类、脂类、酸类等。《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570—2015)、《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571—2015)和《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)中给出了多种 VOCs 物质的监测范围和限值。同时,在《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)中明确指出的 8 种恶臭物质,大部分在炼化企业中能够监测到<sup>[15]</sup>。

炼化企业有组织排放主要集中在常减压装置、催化裂化等生产工艺中,这些工艺排放的 VOCs 种类由于企业工艺的不同而有差异,大部分有组织排放以烷烃、烯烃等为主,如天津临港的某石化企业是以环己烷及其同分异构体为主,另外的炼化企业则存在着丙烯、丙烯腈等物质<sup>[16]</sup>。李勤勤

等<sup>[17]</sup>发现装置区无组织排放的 VOCs 中烷烃浓度均占比最高。罐区无组织散逸出的 VOCs 则是以恶臭污染物为主,如 H<sub>2</sub>S、甲硫醇、乙硫醇、二甲二硫和非甲烷烃等<sup>[10]</sup>。酸性水罐区监测到的 H<sub>2</sub>S 和非甲烷总烃明显高于其他气体物质,而产品罐区以非甲烷总烃为主。大连某大石化储罐排放量可以占到总排放量的 35% 左右<sup>[17]</sup>。采集硫磺回收装置、生产对二甲苯化工的加热炉工艺、污水处理场、厂界环境样品,发现检出频率最高的物质为烷烃、苯系物、醛类和酮类<sup>[18-19]</sup>。VOCs 排放规律受到产生环节、物料性质、罐的压力、环境条件等因素影响而不同。华南某炼化企业表现出生产装置区的总挥发性有机物浓度早、晚高,污水处理场产生的 VOCs 则刚好相反<sup>[17]</sup>。罐区的 VOCs 的排放量与当天气温变化规律基本一致<sup>[10]</sup>。

3) 炼化行业 VOCs 的排放量大,是部分城市 VOCs 的重要排放源,是地区 VOCs 化学反应活性的主要贡献者。炼化企业无组织排放到大气中的 VOCs 体积大,约占人为排放总量的 7%~14.4%,甚至更高<sup>[17,19]</sup>,在整个工业排放源中所占的比重也很高<sup>[20]</sup>。王翠然等<sup>[12]</sup>、赵秋月等<sup>[21]</sup>均认为炼化企业污染排放是江苏省工业 VOCs 污染的重要来源,2010 年江苏省石化燃料燃烧源占人为源 VOCs 排放总量的 24.10%。赵锐等<sup>[22]</sup>则分析得到成都的化学原料和化学制品制造业排放 VOCs 可以占到 33.82%,而大连市的石化行业排放的 VOCs 则占到城市工业源 VOCs 的 79.6%<sup>[23]</sup>。

2 炼化企业 VOCs 处理现状

炼化企业产生 VOCs 的环节众多、生成的 VOCs 种类多、产生量差异较大,变化波动也较大,因此当前针对炼化企业 VOCs 的排放,除了推行完善的管理外,实施高效的控制十分必要。有效的 VOCs 源头管控措施能够大幅削减 VOCs 排放量,在此基础上针对浓度、性状差异较大的废气进行分类收集和处理。

2.1 炼化企业 VOCs 减排策略

源头控制是炼化企业 VOCs 减排的首要策略。需要针对炼化企业 VOCs 产生的不同环节采取针对性的措施。炼化企业 VOCs 源头减排的典型环节和其对应的措施总结如表 3 所示。

为深入推进 VOCs 防治,国家及省市在炼化企业中全面开展了泄漏检测与修复相关工作<sup>[26]</sup>。目前,炼化企业陆续开展了全厂定期检测及维修工作,发现储罐、设备、管线等泄漏点及确定监测组件,掌握泄漏浓度,进行泄漏组件修复,最终保留检测和维修的记录。通过检测与修复可以有效控制 VOCs 排放,减少物料损失进而提高效益,节能减排,也能一定程度地减少突发生产事故发生概率<sup>[27]</sup>。

表 2 炼化企业主要的 VOCs 具体成分类型

Tab. 2 Types of VOCs in refining and chemical enterprises

类型	具体成分
苯系物	苯、甲苯、二甲苯、对二乙基苯等
烯烃类	乙烯、丙烯、1,3-丁二烯、氯乙烯、丁二烯、反-2-戊烯、1-戊烯等
烷烃	甲烷、乙烷、丙烷、环氧乙烷、2-甲基戊烷、正己烷、2-甲基庚烷、等
卤代烃	1,2-二氯乙烷、氯甲烷等
醇类/硫醇类	丁醇、乙二醇、甲硫醇、乙硫醇等
酮类	丙酮、甲乙酮等

表 3 不同 VOCs 产生环节对应的减排措施汇总表

Tab. 3 Summary of reduction measures in different VOCs generation emission links

	影响原因	措施	举例
罐区 <sup>[10-11]</sup>	物料的温度影响有机物的挥发	降低物料进料流量和物料温度	控制罐的进料温度,减少污染物的排放量
	储存产品、中间产品的品质	改进炼油工艺路线,提高油品质量	调整工艺增加加氢类工艺比重,减少油品中硫的含量
	拱顶罐排放废气的量随呼吸阀排放压力的不同而变化。	根据呼吸阀工作压力在一定的压力范围内(如表压范围: - 250 ~ 2 600 kPa),每增加 1 kPa,废气排放减少 1% 的规律,提高呼吸阀的压力	储罐数量较多的的罐区,通过升高排放压力减少 VOCs 的排放
	储罐结构	根据油品物性选择合理的储罐结构	轻质油品(如汽油等)、含硫污水等选择内浮顶罐;重质油品选择外浮顶罐
	环境条件。例如,VOCs 排放与环境温度的变化呈现一定规律。	做好罐区的保温	罐体保温、粉刷白漆或隔热涂料等
固废、废水存储、处理过程 <sup>[9-11]</sup>	处理单元敞开体系,容易挥发	存储和处理设施采取密闭措施	隔油池、气浮池等加盖,含挥发性有机物废气经收集后进行净化处理
装卸过程 <sup>[17,21,23]</sup>	装卸油品过程没有做到或无法做到封闭操作导致有机物的挥发	装卸严禁喷溅式装载应采取全密闭、液下装载等方式,并配有高效油气回收系统	装卸汽油、石脑油、煤油等、以及苯、甲苯、二甲苯等危险化学品时配套高效油气回收措施
工艺的非正常排放 <sup>[17-18,23]</sup>	开停车过程中不正常工作排放 VOCs	根据工艺特点、环境因素和环境影响等,在开停工过程中优化停工退料工序、合理安排各装置的开停工及检修的时间和次序等	各类资源、能源,生产装置吹扫过程应优先采用密闭吹扫工艺
工艺、管线等设备泄漏 <sup>[24-25]</sup>	部件的腐蚀或老化、连接件的松动、压力控制装置失灵等	加强日常监测,并采用泄漏检测修复(leak detection and repair, LDAR)技术进行修复	采用 LDAR 技术监测各类管线、设备、阀门等易发生泄漏有机物的环节,并修复超过限值的泄漏处

## 2.2 VOCs 的管控策略

### 2.2.1 VOCs 的回收技术

典型的炼化企业有组织排放的 VOCs 浓度能达到几十到几千  $\text{mg}/\text{m}^3$ <sup>[28]</sup>。排放 VOCs 浓度较高的环节主要集中在工艺过程中和部分无组织排放,尤其是在轻质油品储存和装卸环节<sup>[29-30]</sup>。针对这些环节,通常会采用物理方法,富集分离部分有机物,实现资源化利用。主要的物理方法包括吸收法、吸附法、冷凝法、膜分离法等,其中低温冷凝技术和低温馏分油吸收技术是常用的回收技术。低温冷凝技术是将废气降温至 VOCs 组分的露点以下使之凝结为液态后加以回收的方法<sup>[31]</sup>,该方法适用于回收体积分数较大( $>5\%$ )、沸点较高的气体组分。卢辛成等<sup>[32]</sup>采用冷凝法回收沸点在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  以下的 VOCs 组分时回收率可以达到  $80\% \sim 90\%$ 。低温馏分油吸收技术是利用一定温度下烃类成分在柴油中具有良好的溶解性,从而吸收 VOCs 废气中的烃类<sup>[10]</sup>,此方法适合含硫较高的 VOCs 废气。炼化企业中比较常见的吸收剂是沸点较高、蒸气压较低的柴油和煤油<sup>[29]</sup>。这两种技术还可以和其他工艺结合得到组合技术,处理效果较为理想。例如,采用低温

差油吸收-吸附技术和吸附剂吸附-吸收技术回收油气中的石脑油、芳烃、烯烃等组分效果较好<sup>[30]</sup>。另外,膜分离法在炼化企业 VOCs 治理中的应用较为广泛,即利用天然膜或者人工膜分离气体组分<sup>[33]</sup>。施得志等<sup>[34]</sup>研究发现含有烯烃的废气经膜分离装置处理后,典型的烯烃组分回收率可以达到 70%左右。

2.2.2 VOCs 的处理技术

低浓度的 VOCs 多采用热力焚烧法<sup>[35]</sup>、催化燃烧法<sup>[36]</sup>、低温等离子体法<sup>[37]</sup>、光催化氧化法、臭氧催化氧化法、生物处理法<sup>[38]</sup>等方法进行处理。这几种技术的优缺点和适用范围见表 4。

表 4 其他典型的处理 VOCs 的技术  
Tab. 4 Other typical VOCs treatment technologies

技术	原理	分类	优点	缺点	适应范围
热力焚烧法	VOCs 直接作为燃料或助燃辅料在焚烧炉中进行焚烧	非蓄热式、蓄热式	方法简单,处理效率高于 99%;热量回收率达 95%以上;不会发生催化剂中毒	需补充燃料气,运行成本高;燃烧温度高(800~1000 ℃),存在 NO <sub>x</sub> 的二次污染	非蓄热式的适用于浓度较高的 VOCs 气体,蓄热式的适用于浓度在 3 000~6 000 mg/m <sup>3</sup> 的 VOCs
光催化氧化法	能量高于半导体催化剂禁带宽度的光子照射半导体后价带电子从价带跃迁到导带,从而产生带正电荷的光致空穴和带负电荷的光生电子。光致空穴的强氧化能力和光生电子的还原能力导致半导体光催化剂引发一系列光催化反应	紫外光催化、可见光催化	反应温和,安全性能高;方法简单,不产生二次污染;多用于空气净化,例如甲醛的去除	污染物与光致空穴难以高效接触;催化剂易失活,大多数光催化剂仅对紫外光有响应,光源利用率低	适用于流量小、浓度低、温度较低的废气处理,浓度小于 100 mg/m <sup>3</sup> 的 VOCs
臭氧催化氧化法	臭氧在催化剂作用下分解为活性氧原子和氧分子,活性氧原子具有比臭氧更高的氧化能力,提高臭氧的氧化效果	—	常温下可实现对有机物的去除,比单一臭氧氧化技术的去除效率明显提高	能耗高;催化剂容易失活;去除效率受 VOCs 种类等影响较大	适用于浓度低、温度较低的废气处理,浓度小于 100 mg/m <sup>3</sup> 的 VOCs
生物法	利用生物新陈代谢降解气体有机物	生物滴滤法、生物过滤法、生物洗涤法	投资与运行费用低;维护的要求较低,占地少,二次污染小	不适应难降解的污染物质,去除效率难高于 80%,运行易受来气冲击,去除率不稳定	适用于处理恶臭气体等,因工艺、菌等的差异,可以适应浓度范围 60~500 mg/m <sup>3</sup>
低温等离子法	利用外电场作用下产生高能离子不断攻击、破坏气体分子	电子束照射法、介质阻挡放电法、沿面放电法和电晕放电法	高能电子能够使稳定的苯和烷烃开键进而被去除,去除率高于 95%;能耗低、即开即停	电极易污染,需要定期清洗;要注意高压放电的安全性问题	适用于浓度低、不能自持燃烧的废气,浓度小于 2 000 mg/m <sup>3</sup> 的 VOCs

热力焚烧 VOCs 的方式是直接将 VOCs 作为燃料或助燃辅料在焚烧炉中进行焚烧。热力焚烧法处理效率高(>99%),且可以回收 95%的热量。但是,热力焚烧法工作温度高(800~1 000 ℃),需要补充燃料气,导致其运行成本高,且存在二次污染问题。热力焚烧法可以采用非蓄热式或者蓄热式来进行,非蓄热式适用于浓度较高的 VOCs 气体,蓄热式适用于浓度在 3 000~6 000 mg/m<sup>3</sup> 的 VOCs。

与热力焚烧法不同,催化氧化处理 VOCs 的技术是在较低温度下(200~400 ℃)进行,不需要消耗大量辅助燃料,借助催化剂的作用即可燃烧氧化分解 VOCs 的可燃组分,达到净化处理的目的。催化氧化法可以去除大部分的有机物且产生的 NO<sub>x</sub> 少,去除 VOCs 效果明显。常见的催化氧化处理有光催化氧化法、臭氧催化氧化法等。适用于处理浓度适中(2 000~3 000 mg/m<sup>3</sup>)、流量大的可燃或在高温下可分解的有机气体的 VOCs 废气。但是,催化处理要求的工艺条件更加严格,必须严格控制废气中的尘粒和雾滴等以避免

催化剂中毒。催化氧化处理不适合处理含有硫化物、卤代烃等引起催化剂中毒的 VOCs 废气;对于浓度波动大的 VOCs 废气也不适合,容易引起闪爆。

生物法是利用微生物的新陈代谢作用降解 VOCs 的过程。微生物通过自身的代谢作用将各种污染物降解、转化而不产生二次污染,具有处理效果好、投资及运行费用低、安全性好、易于管理等优点;常见的生物处理工艺包括生物过滤法、生物滴滤法、生物洗涤法、膜生物反应器和转盘式生物过滤反应器法<sup>[38-39]</sup>等。

低温等离子体处理 VOCs 是一种新型技术,其原理是电场能量使高能电子激发分子或原子获得活性基团(如 $\cdot\text{O}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{HO}_2\cdot$ 等),而废气中的 VOCs 分子受到高能电子碰撞后激发分解成小碎片基团甚至原子,这些活性基团与激发的有机分子或者破碎的基团发生反应,使绝大部分的 VOCs 分子被分解<sup>[37,40]</sup>。

尽管各种工艺有各自的优势,但是由于炼化企业的原料、加工工艺等不同,产生的 VOCs 的种类、浓度等也不尽相同,各地区对排放限值、对 VOCs 的管控要求也不相同。因此,应根据具体情况和要求来选择合适的工艺。

### 3 结语

石化行业作为国民经济的重要支柱,其中的炼化企业承担巨大的社会责任。随着大气污染日益严重,广受关注的一类大气污染物 VOCs 的管控已经在炼化企业中全面开展。目前,炼化企业由于加工原料、生产工艺等的差异,产生的 VOCs 更加复杂。针对当前的形势,炼化企业应加强源头控制、有针对性的对 VOCs 处理工艺进行研发和推广,有效降低 VOCs 的排放量。低成本、维护简单、操作安全、处理高效的 VOCs 源头管控技术是当前发展的方向。

#### 参考文献:

- [1]王铁宇,李奇锋,吕永龙.我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究[J].环境科学,2013,34(12):4756-4763.  
WANG Tieyu, LI Qifeng, LÜ Yonglong. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China[J]. Environmental Science, 2013, 34(12): 4756-4763.
- [2]陈颖,叶代启,刘秀珍,等.我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J].中国环境科学,2012,32(1):48-55.  
CHEN Ying, YE Daiqi, LIU Xiuzhen, et al. Source tracing and characteristics of industrial VOCs emissions in China[J]. China Environmental Science, 2012, 32(1): 48-55.
- [3]席劲瑛,武俊良,胡洪营,等.工业 VOCs 排放源废气排放特征调查与分析[J].中国环境科学,2010,30(11):1558-1562.  
XI Jinying, WU Junliang, HU Hongying, et al. Investigation of industrial VOCs emission sources and analysis for their emitting characteristics[J]. China Environmental Science, 2010, 30(11): 1558-1562.
- [4]DERWENT R G, JENKIN M E, UTEMBE S R, et al. Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(16): 3374-3381.
- [5]HUANG Y, HO S S H, HO K F, et al. Characteristics and health impacts of VOCs and carbonyls associated with residential cooking activities in Hong Kong[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 344-351.
- [6]王倩,陈长虹,王红丽,等.上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J].环境科学,2013,34(2):424-433.  
WANG Qian, CHEN Changhong, WANG Hongli, et al. Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 424-433.
- [7]白志鹏,李伟芳.二次有机气溶胶的特征和形成机制[J].过程工程学报,2008,8(1):202-208.  
BAI Zhipeng, LI Weifang. Characteristics and formation mechanism of secondary organic aerosols[J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(1): 202-208.
- [8]BO Y, CAI H, XIE S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2008, 8(23): 11519-11566.
- [9]王卉.基于涂料行业 VOC 污染控制政策法规研究[J].当代化工研究,2016(7):70-71.  
WANG Hui. Research on VOC pollution control policies and laws and regulations based on paint industry[J]. Modern Chemical Research, 2016(7): 70-71.
- [10]陈宏国.炼油厂恶臭污染防治对策的探讨[J].石油化工环境保护,1995,18(4):31-37.

- CHEN Hongguo. Probe of odor pollution and odor control in refinery[J]. Environmental Protection in Petrochemical Industry, 1995, 18(4): 31-37.
- [11] 郭兵兵, 刘忠生, 王海波, 等. 炼油厂恶臭废气综合治理技术的研究: I. 酸性水罐区和轻质油品中间罐区废气治理技术[J]. 石油炼制与化工, 2014, 45(9): 95-101.
- GUO Bingbing, LIU Zhongsheng, WANG Haibo, et al. Comprehensive treatment technology for odorous pollution of waste gas in refiner I. Study of treatment technology for waste gas from sour water tank area and light product tank[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2014, 45(9): 95-101.
- [12] 王翠然, 海婷婷, 田炯, 等. 江苏省石化行业 VOCs 排放特征、治理现状及对策探析[J]. 污染防治技术, 2015, 28(6): 17-22.
- WANG Cuiran, HAI Tingting, TIAN Jiong, et al. Analysis on the emissions, governance and countermeasures of VOCs of petrochemical industry in Jiangsu Province[J]. Pollution Control Technology, 2015, 28(6): 17-22.
- [13] 刘忠生, 王新, 王海波, 等. 炼化 VOCs 废气安全高效热氧化技术[J]. 炼油技术与工程, 2018, 48(12): 1-6.
- LIU Zhongsheng, WANG Xin, WANG Haibo, et al. Safe high-efficiency thermal oxidation technology for treatment of VOCs waste gas from refineries and chemical plants[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2018, 48(12): 1-6.
- [14] SIEGELL J H, TABACK H J, MCRAE T G, et al. Development of smart LDAR for fugitive emissions control[C]// NPRA 2000 Environmental Conference, San Antonio, Jun 10, 2000: 1-11.
- [15] SIEGELL J H. Improve VOC emission predictions[J]. Hydrocarbon Processing, 1997, 76(4): 119-121.
- [16] 周亚军. 炼油企业含恶臭物质的 VOCs 治理技术及应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2014: 55-67.
- ZHOU Yajun. Study on the treatment technology of VOCs odorous substances and its application in the refiner[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014: 55-67.
- [17] 李勤勤, 张志娟, 李杨, 等. 石油炼化无组织 VOCs 的排放特征及臭氧生成潜力分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1323-1331.
- LI Qinqin, ZHANG Zhijuan, LI Yang, et al. Characteristics and ozone formation potential of fugitive volatile organic compounds (VOCs) emitted from petrochemical industry in Pearl River Delta[J]. China Environmental Science, 2016, 36(5): 1323-1331.
- [18] 刘锦, 王秀艳, 杨文, 等. 天津临港石化企业 VOCs 排放特征及环境影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(2): 215-220.
- LIU Jin, WANG Xiuyan, YANG Wen, et al. Emission characteristics and environmental impact of VOCs in Tianjin Lingang petrochemical enterprises[J]. Environmental Science Research, 2018, 31(2): 215-220.
- [19] 展先辉. 天津市石化行业 VOCs 源排放成分谱及排放特征研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015: 41-63.
- ZHAN Xianhui. The investigation on chemical compositions and characteristics of petrochemical industrial VOCs emission sources in Tianjin city[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015: 41-63.
- [20] LYU X P, CHEN N, GUO H, et al. Ambient volatile organic compounds and their effect on ozone production in Wuhan, central China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 54(1): 200-209.
- [21] 赵秋月, 夏思佳, 李冰, 等. 江苏省工业 VOCs 排放现状与管理对策研究[J]. 环境监控与预警, 2010, 4(5): 41-44.
- ZHAO Qiuyue, XIA Sijia, LI Bing, et al. Study on emission situation and management for industrial VOCs in Jiangsu Province[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2010, 4(5): 41-44.
- [22] 赵锐, 黄络萍, 程军, 等. 成都市工业源重点 VOC 排放行业排放清单及空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1358-1367.
- ZHAO Rui, HUANG Luoping, CHENG Jun, et al. VOC emissions inventory from the key industries in Chengdu city and its associated spatial distribution[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(4): 1358-1367.
- [23] 苏静. 大连市石化企业挥发性有机物(VOCs)排放特点及防治对策[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2016, 26(5): 70-74.
- SU Jing. Emission characteristics and prevention and control countermeasures of VOCs of petrochemical industry in Dalian[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2016, 26(5): 70-74.
- [24] 杨利娟. 我国工业源 VOCs 排放时空分布特征与控制策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- YANG Lixian. Study on temporal-spatial characteristic and control strategy of industrial emissions of volatile organic compounds in China[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [25] 孔祥军, 王教凯, 谢源, 等. 泄漏检测与修复技术在某石化厂的应用研究[J]. 现代化工, 2018, 38(3): 210-213.
- KONG Xiangjun, WANG Jiaokai, XIE Yuan, et al. Application research of leak detection and repair technology in a petro-

- chemical plant[J].Modern Chemicals,2018,38(3):210-213.
- [26] 张晓燕,高飞,吕金雯.挥发性有机物泄漏检测与修复技术经验研究[J].环境科学与管理,2017,42(4):138-142.  
ZHANG Xiaoyan,GAO Fei,LÜ Jinwen.Empirical study on detection and repair technology of volatile organic compounds [J].Environmental Science and Management,2017,42(4):138-142.
- [27] 刘锦,王秀艳,杨文,等.天津临港石化企业 VOCs 排放特征及环境影响[J].环境科学研究,2018,31(2):215-220.  
LIU Jin,WANG Xiuyan,YANG Wen,et al.Emission characteristics and environmental impact of VOCs in Tianjin lingang petrochemical enterprises[J].Environmental Science Research,2018,31(2):215-220.
- [28] 张林,牛琳.无组织源 VOCs 排放及臭氧生成潜势分析[J].环境工程,2017,35(10):156-160.  
ZHANG Lin,NIU Lin.Analysis of emission and ozone generation potential of unorganized source VOCs[J].Environmental Engineering,2017,35(10):156-160.
- [29] 李明哲,黄正宏,康飞宇.挥发性有机物的控制技术进展[J].化学工业与工程,2015,32(3):2-9.  
LI Mingzhe,HUANG Zhenghong,KANG Feiyu.Progress in control technology of volatile organic compounds [J].Chemical Industry and Engineering,2015,32(3):2-9.
- [30] 缪志华,张林,王蒙,等.冷凝法油气回收技术与应用[J].低温与超导,2011,39(6):48-52.  
MIU Zhihua,ZHANG Lin,WANG Meng,et al.Technology and application of oil and gas recovery by condensation method [J].Cryogenics and Superconductivity,2011,39(6):48-52.
- [31] 梁文俊,李坚,李依丽,等.低温等离子体技术处理挥发性有机物的研究进展[J].电站系统工程,2005,21(3):7-9.  
LIANG Wenjun,LI Jian,LI Yili,et al.Research progress in the treatment of volatile organic compounds by low temperature plasma technology [J].Power System Engineering,2005,21(3):7-9.
- [32] 卢辛成,蒋剑春.挥发性有机物的治理以及活性炭的应用研究进展[J].生物质化学工程,2009(1):45-51.  
LU Xincheng,JIANG Jianchun.Progress in the treatment of volatile organic compounds and the application of activated carbon[J].Biomass Chemical Engineering,2009(1):45-51.
- [33] 朱玲,陈家庆,张宝生,等.膜分离法处理加油站油气研究[J].环境科学,2011(12):3704-3709.  
ZHU Ling,CHEN Jiaqing,ZHANG Baosheng,et al.Study on the treatment of oil and gas in gas stations by membrane separation method [J].Environmental Science,2011(12):3704-3709.
- [34] 施得志,董声雄.气体膜分离技术的应用及发展前景[J].河南化工,2001(3):4-7.  
SHI Dezhi,DONG Shengxiong.Application and development prospect of gas membrane separation technology[J].Henan Chemical Industry,2001(3):4-7.
- [35] 李春生.热力燃烧法处理电子元件厂 VOCs 研究[J].广州化工,2015,43(3):141-142.  
LI Chunsheng.Research on the thermal oxidation method dealing with electronic component factory VOCs[J].Guangzhou Chemical Industry,2015,43(3):141-142.
- [36] CORDI E M,FALCONER J L.Oxidation of volatile organic compounds on a Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst[J].Applied Catalysis B Environmental,1997,151(1):179-191.
- [37] 孙小亮,蔡忠林,胡真.低温等离子体催化治理气态污染物的研究进展[J].环境科技,2009,22(3):72-75.  
SUN Xiaoliang,CAI Zhonglin,HU Zhen.Research advances on catalytic treatment of gaseous pollutants by non-thermal plasma[J].Environmental Science and Technology,2009,22(3):72-75.
- [38] 杨显万,黄若华,张玲琪,等.生物法净化废气中低浓度挥发性有机物的过程机理研究[J].中国环境科学,1997,17(6):545-549.  
YANG Xianwan,HUANG Ruohua,ZHANG Lingqi,et al.Study on mechanism of purifying waste gases containing VOC in low concentration by biological method[J].China Environmental Science,1997,17(6):545-549.
- [39] 何泽,李桂英,安太成,等.生物滴滤塔中两种优势菌种对高浓度甲苯废气净化对比实验[J].环境工程,2007,25(2):39-42.  
HE Ze,LI Guiying,AN Taicheng,et al.Comparative experiments on biodegradation of high concentration toluene by two dominant bacteria in biotrickling filters[J].Environmental Engineering,2007,25(2):39-42.
- [40] 郭亚逢.低温等离子体技术在乙烯装置 VOCs 治理中的应用[J].安全、健康和环境,2019,19(1):36-42.  
GUO Yafeng.Application of low temperature plasma technology in the treatment of VOCs in ethylene plants[J].Safety Health and Environment,2019,19(1):36-42.