

## 综述与专论

## 罐区油气挥发性有机物治理技术研究进展

冯健飞<sup>1,2</sup>,张杏锋<sup>1,2</sup>,高波<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

**摘要:**介绍了罐区油气挥发性有机物(VOCs)的来源和危害,分别针对浮顶储罐和固定顶储罐探讨了VOCs源头治理措施,阐述了冷凝-吸附、膜-吸附、吸收-吸附等VOCs回收工艺的原理、技术特征和潜在问题。对今后罐区VOCs治理的发展模式和攻关方向进行了展望,指出了源头治理的重要性,认为VOCs末端治理技术应向信息化、自动化、撬装化、小型化、集约化、节能化、全密闭的方向发展。

**关键词:**罐区;油气;VOCs;治理技术

**中图分类号:**X701      **文献标识码:**A      **文章编号:**1006-8759(2019)03-0010-05

### Research progress of the control technology of hydrocarbon volatile organic compounds (VOCs) in a tank farm

FENG Jian-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing-feng<sup>1,2</sup>, GAO Bo<sup>1,2</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The sources and hazard of hydrocarbon volatile organic compounds (VOCs) in tank farms were introduced. The source control technologies were discussed for floating-roof tank and fixed-roof tank. Several recovery technologies such as condensation-adsorption, membrane-adsorption and absorption-adsorption were analyzed from their principles, characteristics and potential problems. The future development modes and research directions of VOCs in tank farms were proposed and source treatment was emphasized. It was considered VOCs terminal treatment should develop toward to a direction of informatization, automation, skidding, miniaturization, intensification, energy saving and full sealing.

**Key words:** Tank farm; Hydrocarbon; VOCs; Control technology

## 0 引言

中国已经成为石油消费大国,油品储罐正走向大型化、规模化。石油及其产品是多种碳氢化合物的混合物,其中轻组分在常温下蒸汽压较高,极易挥发,故在油品储运过程中,储罐会因温度、压力波动等会产生大量高浓度挥发性有机物(VOCs),从而造成油品损耗,严重污染环境<sup>[1]</sup>。

## 1 罐区 VOCs 挥发现状及来源

2015年中国成品油表观消费量为3.18亿t,同比增长5.3%<sup>[2]</sup>,按照我国成品油储运过程中油气挥发系数约为0.8%计算<sup>[3]</sup>,我国每年的油气挥发损失约为 $25.44 \times 10^6$  t,折合人民币约127.2亿元。由此可见,油气回收拥有巨大的经济价值和潜在市场。

罐区VOCs主要来自于储罐的大小呼吸、清罐排空、罐区工作损耗、动静密封和开口管线泄

收稿日期:2018-12-22

第一作者简介:冯健飞(1992-),男,河南新乡人。E-mail: fjf5028@qq.com

引用格式:冯健飞,张杏锋,高波. 罐区油气挥发性有机物治理技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2019, 33(3):10-14.

露、非正常工况损耗等<sup>[4]</sup>。储罐作为罐区最主要的 VOCs 排放源之一,主要有固定顶储罐、内浮顶储罐和外浮顶储罐等<sup>[5]</sup>,详细介绍如表 1 所示。2015 年 4 月份我国环保部出台了《石油化学工业污染

物排放标准》(GB31571-2015)和《石油炼制工业污染物排放标准》(GB31570-2015)<sup>[6,7]</sup>。该标准对挥发性有机液体储罐选型要求如表 2 所示。

表 1 储罐分类信息

名称	结构	适用范围	优点	缺点
固定顶储罐	顶部结构与罐体采用焊接方式连接,顶部固定,分为拱顶罐和锥顶罐	小容量,蒸气压较低的稳定重质油品、废油废液、高温产品 <sup>[8]</sup>	能抵御风雪沙等环境破坏,工艺简单,造价低	挥发量大
内浮顶储罐	在固定顶罐的基础上罐内再加一个密封的平顶,一般与罐内液体相接触	大容量,储存成品油、蒸气压较高,挥发性较强的轻质油品,如汽油、石脑油、航空煤油和甲醇、芳烃类产品 <sup>[9]</sup>	挥发量最小 <sup>[9]</sup> ,能抵御风雪沙等环境破坏,防止空气氧化,保证油品质量,降低燃爆风险,不留气体空间,减少罐壁腐蚀,无需日常维护	造价高,内浮盘检修不便,浮盘易出现运行故障,边缘密封腐蚀严重 <sup>[10]</sup>
外浮顶储罐	外浮顶是指随液位的升降而上下移动、没有与罐壁相焊的罐顶	用作大型原油、重质油等高沸点常压油品储罐 <sup>[11]</sup>	节省空间,无气体空间,较之固定顶罐挥发量减少约 80%,降低燃爆风险	不能抵御风雪沙等环境破坏,油品易掺入杂质,损坏油品质量 <sup>[12]</sup>

表 2 挥发性有机液体储罐选型要求

真实蒸气压	储罐类型	密封要求
$P \geq 76.6 \text{ kPa}$	压力储罐	/
$5.2 \text{ kPa} \leq P < 27.6 \text{ kPa}$ ( $V \geq 150 \text{ m}^3$ )	内浮顶罐	液体镶嵌式 机械式鞋型 双封式
$27.6 \text{ kPa} \leq P < 76.6 \text{ kPa}$ ( $V \geq 75 \text{ m}^3$ )	外浮顶罐	双封式,且初级密封为液体镶嵌式、机械式鞋型
	固定顶罐	安装密闭排气系统和有机废气回收或处理装置

## 2 罐区 VOCs 挥发治理措施

罐区 VOCs 治理从切入点可分为源头治理和末端治理。

### 2.1 罐区 VOCs 源头治理

#### 2.1.1 浮顶储罐源头治理

在《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》中浮顶储罐 VOCs 排放主要分为四部分<sup>[13]</sup>:边缘密封损耗、浮盘附件损耗、挂壁损耗、浮盘接缝损耗。浮盘的选型和边缘密封均会显著影响储罐 VOCs 排放。浮盘一般分为浮筒式和浮箱式,由骨架、盖板、围板、量油导管护筒、防旋导管、自动通气孔、过渡护筒、浮力单元和密封装置等组成。浮筒式各部分独立性较强,但浮盘下油气空间较大,降低了储罐利用率;浮箱式以箱体作为浮力单元和密封装置,从根本上消除了油气空间,阻绝气液传质现象,其损耗系数仅为浮筒式浮盘的 1/6,且消除了浮力单元单一、粘结剂受浸润发生剥离的危险,但箱体为中空结构,箱体与箱体之间以连接板连接,整体强

度与刚度、抗冲击力较弱,密封较差<sup>[14]</sup>。

浮盘的边缘密封分为初级密封和二次密封。初级密封有泡沫镶式、液体镶嵌式、机械式和舌型密封四种。泡沫镶式密封将弹性泡沫装填在橡胶镶内,使橡胶囊充满环形间隙,从而达到密封效果,分为浸没式和非浸没式<sup>[15]</sup>,其优点是工艺简单、成本低、适应性强、对储罐形变要求不高、不易卡盘;但安装复杂、不耐磨、易开裂,使用温度为 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,是应用较广的密封方式<sup>[16]</sup>。液体镶嵌式密封与泡沫镶式相比,可减少 95 % VOCs 挥发量,但不耐高温、高寒,损坏后不易维修<sup>[17]</sup>。机械式维护成本低、防火性好、能适应各种比重油品<sup>[18]</sup>,但对储罐形变要求高、适应性差,目前已较少使用<sup>[19]</sup>。舌型密封属于弹性软密封,对材质要求高,工艺复杂,成本较高,但安装简便,密封效果较好,摩擦阻力也较小,对于要求高的场合,可以安装多层密封。对于大型浮顶储罐,为进一步减少油气挥发,会在初次密封上再加装一道密封装置,即二次密封。在初、二次密封之间会形成一定的空间,具

有对储罐内壁要求不高、防腐层无损害、保护初次密封免受阳光、风、雨雪、沙石的破坏等优点<sup>[20]</sup>。但长期服役后,初次密封效果变差,VOCs 逸散到初、二次密封之间,极易达到爆炸极限,而此处是雷击起火的主要部位,可用负压法和氮气法稀释<sup>[21]</sup>。胡海燕等认为浮顶储罐的液下刮蜡器通过与浮顶进行可靠电气连接可以替代现有导电片,避免了储罐二次密封放电发生,大大降低浮顶储罐雷击火灾事故,且便于检测和维护,更安全可靠<sup>[22]</sup>。刘铁川等人提出了罐区可燃气体无线检测设备的应用,检测准确率达 90%~95%,解决了储罐初、二次密封间油气监测的难题<sup>[20]</sup>。

### 2.1.2 固定顶储罐源头治理

在《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》中固定顶储罐 VOCs 排放量主要分为两部分:a)静止储存过程中的蒸发损失,即小呼吸损失;b)储罐进行收发物料过程中产生的工作损失,即大呼吸损失<sup>[13]</sup>。

储罐减排措施主要有加设呼吸阀挡板,控制

收料速度,以减缓收料时油品对浮盘的冲击,同时减轻油品扰动,减少呼吸损耗;内浮顶储罐避免发料液位低于 1.8 m,此时浮盘通气阀处于常开状态,增加呼吸损耗;小型固定顶储罐加装蒸气平衡系统;氮气惰化自动补气系统;将大型固定顶储罐改造为内浮顶储罐;进行密闭充装系统改造,将装车系统改为下装式,并安装油气回收鹤管;控制进料温度,避免夏季高温作业,可将工作时间调整为夜间;安装遮阳装置、喷淋水冷却系统或选用反射热效益大的浅色外涂料。改善储罐内涂层防腐性、疏油性,减少挂壁损失;完善 LDAR 技术,提高检修效率,落实检修责任;合理安排切水作业,保证油水分离<sup>[23-27]</sup>。

### 2.2 罐区 VOCs 末端治理技术

罐区 VOCs 末端治理技术尤以 VOCs 回收技术为主。VOCs 回收技术分为单一法和集成法。罐区回收 VOCs 常用单一法有吸收法、吸附法、冷凝法和膜分离法<sup>[28]</sup>,各单一法比较见表 3<sup>[29-45]</sup>。集成法有冷凝+吸附、膜+吸附、吸收+吸附等。

表 3 罐区 VOCs 回收单一法的比较

方法	原理	要求	优点	缺点
吸收法	吸收法是采用低挥发或者不挥发性有机溶剂对 VOCs 进行吸收,再利用 VOCs 分子和吸收剂物理性质的差异进行分离	VOCs 的要求:浓度高、温度低、流量大,需回收利用的 VOCs 与其他组分不互溶 吸收剂的要求:蒸气压低,对 VOCs 的溶解度高,无毒无害,化学稳定性好,气液接触吸收率高、压力损失小,吸收剂在向下流动过程中要防止产生静电及吸收剂发泡	可处理高湿度 VOCs,气液相接触面积大,气液湍流程度高,操作弹性较大,气液接触时间、气液比均可在较大的范围内调节,设备压力损失小,易于操作和维修,工艺简单,投资成本低	回收率太低,设备所占空间大,不适合撬装化、集成化、自动化,吸收剂回炼能耗高,吸收剂消耗量较大、自挥发损耗大、需不断补充,降低储罐利用率,不利于炼化行业生产物料平衡,轻烃(C3 以下)不易回收
常压低温吸收法	同上	需要增加制冷系统、低温钢材及保温处理,需要添加防冰剂防止塔内物料冷凝堵塞	粗柴油吸收剂下游加氢,无吸收剂再生问题,后加脱硫装置,可脱除恶臭气体	同上
冷凝法	利用物质在不同温度下具有不同的饱和蒸气压这一性质,采用降低温度、提高压力或两者兼具的方法,使 VOCs 冷凝并与废气分离	VOCs 的要求:浓度高、气流稳定、流量小 系统的要求:控制好初冷温度,防止霜冻,要求系统全密闭,压力可控,禁止使用聚合材料	工艺成熟、原理简单,回收率高,安全性好,可直接得到获得液体油品,回收的烃类液体不含杂质	冷却系统复杂,设备多,设备材质要求高,依赖进口,投资较大,需要保冷处理,能耗较高,除霜会产生废水,轻烃在低温下可能与水蒸汽形成固体水合物
活性炭吸附法	将含 VOCs 的气态混合物与多孔性固体接触,利用固体表面存在的未平衡的分子吸引力或化学键力,把混合气体中的 VOCs 组分吸附留在固体表面	VOCs 的要求:浓度低、温度低、流量大;大分子量、高沸点的烃类 吸附剂的要求:憎水性;孔隙率高、孔容结构丰富;热稳定性好,不易产生吸附热;压降小;裂化度小;使用寿命长	能耗低,回收效率高,操作弹性大、寿命长	当油气浓度过高,处理效率低,气阻大,易导致吸附床层温升,有爆炸危险,占地面积大,吸附剂需定期更换,工艺复杂;三苯易使活性炭失活,失活后的活性炭存在二次污染问题;废气中含颗粒物时需要进行预处理
膜分离法	利用溶解-扩散机理,以气体在膜两侧存在的压差为推动力,利用气体组分通过膜时的渗透率的不同进行气体分离	VOCs 的要求:浓度低,温度低,流量小;气体预压缩	操作简单、节能、不产生二次污染、可自动化;无相变,适合于热敏性、难分离物质,能分离有机溶剂;回收率高,适用性广泛,安全性高,占地面积小,无需专人维修保养	设备全部依赖进口,成本高,国产膜质量不达标,受温度、介质浓度影响大,易产生放电层,压缩油气易爆炸,高负压强制气化,造成液相损失

### 2.2.1 冷凝+吸附

冷凝+吸附工艺是将逸散油气通入冷凝装置中,经多级冷凝,系统分别达到 17 ℃(分离碳九)、13.5 ℃(分离对二甲苯)、6 ℃(防止苯结晶)、2 ℃~4 ℃(除水)、-23 ℃(分离邻二甲苯)、-35 ℃~-40 ℃、-70 ℃~-75 ℃<sup>[46]</sup>,得到的液体油品分离后,再将剩余气体依次回到前级冷凝装置进行热交换,复热至 10 ℃导入活性炭(钝化)吸附装置进行吸附,此时气体中的油气浓度较低,含有较长分子链的烃类较少,易解析干净,且吸附解吸次数较少,吸附系统运行压力小,吸附剂不易中毒,活性炭使用寿命较长,回收率≥97%,达标气体排放,并对接近饱和的吸附罐进行微热真空脱附(35 ℃)<sup>[46,47]</sup>。具体见图 1。该法可消除单一吸附法吸附剂床层温升隐患,系统独立性强,操作弹性大,且能耗与投资较单一冷凝法低,经济效益好,便于撬装化,运输及安装方便,占地面积小,适合高浓度、大流量挥发油气的处理<sup>[48,49]</sup>。



图 1 罐区 VOCs 回收的冷凝+吸附工艺

### 2.2.2 膜+吸附

膜+吸附技术工艺流程为:压缩-冷凝-吸收-膜分离-变压吸附。逸散油气与氮封装置中的氮气混合经压缩冷凝,分离得到液体油品,剩余气体依次通入吸收装置、膜分离装置,在膜渗透侧用真空泵抽真空以加速渗透,经富集后的轻烃气体继续进行压缩冷凝装置进行气液分离,剩余气体进入吸附装置进行吸附,尾气达标后排放。该法优于单一吸附法,便于撬装化,运输及安装方便,占地面积小,不引起活性炭热效应,但操作复杂,维护困难,经济效益低,可根据实际工况间断运行,适合芳烃储罐<sup>[32-49]</sup>。

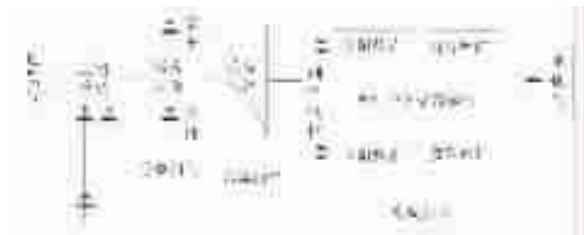


图 2 罐区 VOCs 回收的膜+吸附工艺

### 2.2.3 吸收+吸附

吸收+吸附技术是先将逸散油气收集进入吸附装置,经二级吸附后,尾气达标排放。再进行抽真空微热脱附,将解吸的富集油气通入后续吸收装置,与喷淋而下的贫油(来自发车管线)逆流接触而被吸收<sup>[50]</sup>,富油可直接回罐无须再次回炼或调和,剩余气相再返回吸附装置循环进行回收<sup>[51]</sup>。该工艺具有占地小、能耗低、流程简单、处理量大、处理效率高、对油品质量影响小的优点。苯及其他烃类的吸附效率可达到 99.5% 以上,满足排放要求,适合炼厂及大型油品储运企业<sup>[52]</sup>。

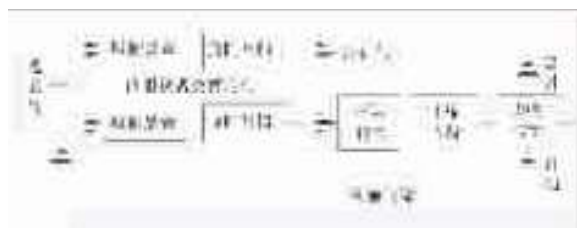


图 3 罐区 VOCs 回收的吸收+吸附工艺

## 3 展望

(1) 罐区 VOCs 的治理工作应从源头、过程和末端同步展开,以源头治理为主,最大限度的削减 VOCs 的排放,做好 LDAR 工作,及时发现并解决泄露问题,设计完善油品储运的全封闭系统。

(2) 对主流治理技术的吸附剂(吸附法)、吸收剂(吸收法)、制冷剂(冷凝法)、催化剂(燃烧法)等功能材料加大研发力度,优化工艺设计,提高制造水平。对新兴技术如生物法、低温等离子体法、光催化氧化法的反应机理、适用条件与范围,目标对象等进行研究。

(3) 对 VOCs 的末端治理技术应向信息化、自动化、撬装化、小型化、集约化、节能化、全密闭方向发展。

## 参考文献

- [1] 丁锋,李丛妮.VOCs 油气回收工艺探讨与分析[J].天然气与石油,2016,34(4):28-31.
- [2] 钱兴坤,姜学峰.2015 年国内外油气行业发展概述及 2016 年展望[J].国际石油经济,2016,(1):27-35.
- [3] 王炯.冷凝与吸附组合油气回收技术在油库中的应用[J].节能减排,2013,16(1):65-67.
- [4] 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.
- [5] 霍玉侠,李发荣,全纪龙,等.石化企业储罐区无组织排放大气环境影响及对策研究[J].环境科学与技术,2011,34(7):195-199.
- [6] 环境保护部.石油化学工业污染物排放标准:GB31571-2015[S].
- [7] 环境保护部.石油炼制工业污染物排放标准:GB31570-2015[S].

- [8] 李凌波,刘忠生,方向晨.炼油厂 VOC 排放控制策略—储运、废水处理、工艺尾气、冷却塔及火炬[J].当代石油石化,2013,(10):4-12.
- [9] Fares M,Howari. Evaporation losses and dispersion of volatile organic compounds from tank farms [J]. Environ Monit Assess, 2015, 187: 273.
- [10] 赵晨露,黄维秋,石莉,等.内浮顶罐中油气扩散运动的数值模拟[J].安全与环境学报,2015,15(3):72-77.
- [11] 赵金龙,唐卿,黄弘,等.基于数值模拟的大型外浮顶储罐区定量风险评估[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(10):1143-1149.
- [12] 李国新.浅谈大型储罐设计要点[J].中国工程设备,2017(7):173-174.
- [13] 石化行业 VOCs 污染源排查工作指南.
- [14] 胡宗柳,王笑静,王善强,等.油品储运系统挥发性有机物排放治理研究现状[J].当代化工,2016,45(12):2881-2883.
- [15] 卿建华,朱建华.黄岛油库油气挥发损耗分析及控制措施[J].油气储运,2004,23(7):20-22.
- [16] 詹昌利.石化行业浮顶罐密封不严的原因及密封方式分析[J].化学工程与设备,2012(4):50-51.
- [17] 李建军.管式密封技术在石油储罐中的应用[J].油气储运,2005,24(11):45-47.
- [18] 王伶俐,陈春梅.外浮顶油罐密封系统分析[J].油气田地面工程,2004,23(7):25-26.
- [19] 刘宝全,刘全桢,高鑫,等.浮顶储罐二次密封装置的雷击危险性[J].油气储运,2012,31(3):193-195.
- [20] 刘铁川,徐业蓬.无线技术在浮顶储罐一二次密封层间油气监测中的应用[J].石油化工自动化,2015,51(1):56-58.
- [21] 胡海燕,刘宝全,刘全桢,等.浮顶储罐二次密封油气空间放电分析[J].中国安全科学学报,2011,21(3):106-109.
- [22] 贾志慧.石油储运过程罐区风险分析与储罐油气蒸发损耗量估算研究[D].中国矿业大学,2014.
- [23] 常琳, к.т.н.ЛевитинР.Е. 固定顶储罐油品蒸发损耗几种不同计算方法的比较分析[J]. 化工管理, 2016(18):54-55.
- [24] 邓灵.北京销售公司油库油品损耗控制方法的研究与应用[D].西安石油大学,2012.
- [25] 储昭文.浮顶油罐储油下限定位分析[J].管道技术与设备,2002,(5):16-17,31.
- [26] 贾玮.原油储罐呼吸损耗研究[D].西安石油大学,2014.
- [27] 环境保护部办公厅.石化企业泄漏检测与修复工作指南[Z], 2015.
- [28] Maryam Tamaddoni,Rahmat Sotudeh-Gharebagh, Shunji Nario,et al.Experimental study of the VOC emitted from crude oil tankers[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, 92(6):929-937.
- [29] 宋生奎,齐永生.油气回收技术及其在加油站中的应用[J].安全、健康和环境,2007,7(2):2-4.
- [30] 许光.油气吸附工艺的实验研究与系统设计[D].青岛科技大学,2010.
- [31] 黄冬琳.膜分离回收挥发性有机气体[D].大连理工大学,2006.
- [32] 屈晓禾.芳烃储罐区油气回收方案的确定[J].石油石化节能, 2015,(3):47-49.
- [33] 郭兵兵,刘璐,刘忠生,等.炼油企业储罐排放气综合治理及回收技术[J].安全、健康和环境,2012,12(8):31-33.
- [34] 肖亦,黄志民.几种挥发性有机污染物控制措施适用范围比较研究[J].化工管理,2015,(5):124-125.
- [35] 曹东辉.冷凝法油气回收装置的研究及优化运行[D].山东科技大学,2009.
- [36] Faisal I. Khan, Alope Kr. Ghoshal. Removal of volatile organic compounds from polluted air [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13(6):527-545.
- [37] 梁伟.多级吸附法油气回收技术在炼制企业废气治理中的应用研究[J].化学工程与装备,2017(3):203-205.
- [38] K. Nikolajsen, L. Kiwi-Minsker, A. Renken. Structured fixed-Bed adsorber based on zeolite/sintered metal fibre for low concentration VOC removal [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2006, 84(7): 562-568.
- [39] 蒋伟宁,刘拉果,尹英焕.油气回收技术在铁路装车过程中的应用[J].当代化工,2010,39(1):45-48.
- [40] 王潇萌.罐区 VOCs 治理措施的应用[J].辽宁化工,2016,45(11):1456-1458.
- [41] 黄维秋,吕艳丽,白娟,等.树脂与活性炭吸附油气的实验研究[J].环境工程学报,2011,5(7):1586-1591.
- [42] 李辉,王树立,赵会军,等.膜分离技术在油气回收中的应用[J].污染防治技术,2007,20(2):61-63.
- [43] 黄伟良.膜分离技术在油气回收系统的工业应用[J].石油化工安全环保技术,2011,27(6):42-45.
- [44] 傅苏红,刘进立,张东生,等.加油站冷凝吸附法油气回收装置的研制[J].油气储运,2013,32(10):1107-1111.
- [45] 单晓雯.石化企业吸附冷凝法尾气处理装置研究与应用[J].安全、健康和环境,2015,15(7):30-33.
- [46] 黄维秋,石莉,胡志伦,等.冷凝和吸附集成技术回收有机废气[J].化学工程,2012,40(6):13-17.
- [47] 韩芳芳.油气回收的发展以及液氮冷凝的应用前景[J].科技创新与应用,2016,(22):92-93.
- [48] 李勇,呼延念超,常益民,等.内浮顶凝析油罐氮封系统工艺改造[J].石油与天然气化工,2009,38(5):406-408.
- [49] 李乐乐,李金峰,申中义,等.轻油储存及充装系统油气挥发的研究与治理[J].山东化工,2015,44(10):175-176.
- [50] 付恒谦.吸收与吸附组合油气回收技术在油库中的实际应用[J].山东化工,2016,45(3):71-75.
- [51] 黄维秋,徐效梅,林毅,等.基于吸收和吸附的油气回收集成工艺[J].石油化工高等学校学报,2009,22(1):56-60.
- [52] 宫中昊,于辉,张卫华.油气回收系统在芳烃罐区的应用[J].安全、健康和环境,2016,16(2):33-37.