

炼油厂油气回收工艺的优化研究

于恒 刘坤* 于小婷 王慧敏 宋子猛

山东石油化工学院 石油工程学院 山东东营 257061

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19745

[摘要] 针对炼油厂油品储存、运输及装卸过程中油气挥发量大、组分复杂、排放控制要求日益严格的实际问题,在对吸收法、吸附法、冷凝法及膜分离法等传统油气回收工艺对比分析的基础上,结合炼油厂油品装卸过程中挥发油气组分的沸点分布特性,提出并研究了一种以多级冷凝为主体、吸附工艺为补充的油气回收组合工艺。通过设置三级冷凝温度,对不同沸点范围的烃类组分进行分段回收,并在末端引入吸附与油气富集单元,实现对低浓度尾气的深度处理。该工艺在回收效率、能耗控制、运行安全性及工程适用性等方面具有明显综合优势,可为炼油厂油气回收装置的设计与改造提供参考。

[关键词] 油气回收; 多级冷凝; 吸附; 能耗优化

[中图分类号] TE89 **[文献标志码]** A

1. 引言

汽油等轻质油品具有显著的挥发特性,大量油蒸气逸散直接造成油品数量和质量的损失^[1]。汽油从炼油厂到中转油库到加油站到加给汽车油箱的储、运、销过程中,会有4~5次的装卸。每次装卸都有与汽油液体体积相等的饱和油蒸气排放^[2]。油气的挥发不仅会造成环境污染和能源浪费,而且对工人职业健康也会产生一定的威胁。

随着《储油库大气污染物排放标准》(GB 20950—2020)和《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570—2015)的实施,炼油厂油气回收系统不仅需满足较高的油气回收率要求,还需长期稳定控制非甲烷总烃排放浓度^[3]。现有研究表明,单一油气回收技术在能耗、安全性和运行稳定性方面均存在局限,多技术组合工艺已成为油气回收领域的重要发展方向^[3]。

2. 油气回收工艺技术的对比

在炼油厂油品储存、运输及装卸过程中,油气挥发不可避免。为减少挥发性有机物(VOCs)排放、提高油品回收率,目前工程中已形成多种油气回收技术路线。根据回收原理的不同,油气回收工艺主要包括吸收法、吸附法、冷凝法和膜分离法等。不同工艺在回收效率、能耗水平、运行安全性及经济性方面各具特点,需结合具体工况进行合理选择^[4]。

2.1 吸收法

吸收法利用油气中烃类组分在吸收剂中溶解度不同的原理,使油气与吸收剂充分接触,溶解并回收有机烃。常用吸收剂有贫汽油、轻柴油及部分专用有机溶剂。该工艺简单、设备投资低,在油库和部分炼油装置有应用基础^[4]。然而,

其回收效率低,难以满足现行排放标准;吸收剂消耗大,需配再生或回炼系统,运行能耗高^[4]。此外,吸收塔和解析塔体积大、占地大,限制其在大型炼油厂高标准油气回收系统的应用。因此,吸收法多作为辅助或预处理工艺,与其他回收技术组合使用^[5]。

2.2 吸附法

吸附法是利用活性炭、分子筛等多孔材料对烃类组分具有较强吸附能力的特点,实现油气与空气的分离^[4]。当吸附剂达到饱和后,通过减压、抽真空或加热方式进行脱附再生。吸附法在中低浓度油气回收中具有回收效率高、工艺成熟等优点,在油库及装车设施中应用较为广泛^[5]。

但吸附过程为放热反应,当处理高浓度油气或运行控制不当时,吸附床易出现温升,存在安全隐患;同时活性炭易受水蒸气影响而性能衰减,使用寿命有限,运行维护成本较高。因此,单独采用吸附法处理高浓度油气并不理想,更适合作为冷凝或吸收工艺后的深度净化单元。

2.3 冷凝法

冷凝法利用油气中不同烃类组分在不同温度下饱和蒸气压差异,降低温度使油气由气态变液态以回收油品。该工艺理论基础清晰、自动化程度高,可直接回收液态油品,在炼油厂油气回收装置适用性强^[4]。通常采用多级冷凝分级回收不同沸点范围烃类组分。冷凝法处理高浓度油气回收效果显著,但制冷系统能耗高,深冷工况下运行成本大增;且低温换热器易结霜,对设备运行稳定性要求高。因此,工程应用中冷凝法多与吸附等技术组合,以降低能耗、提高系统经济性^{[4][5]}。

2.4 膜分离法

膜分离法是利用聚合物膜对有机烃类分子与空气分子在溶解度和扩散速率上的差异,在一定压力条件下实现选择性分离^[4]。该工艺具有装置紧凑、自动化程度高、运行安全性好等优点,近年来在油气回收领域逐步得到关注。

但膜分离技术对膜材料性能要求较高,膜组件成本较高且易受油雾、水分等影响,长期运行稳定性仍有待进一步验证。目前该技术多与冷凝或吸附工艺联合使用,单独大规模应用仍受一定限制^[4]。

2.5 多级冷凝—吸附油气回收工艺

单一油气回收工艺在效率、能耗或安全性方面存在局限,

难以满足环保和经济性要求。吸收法投资低但效率有限;吸附法适用于中低浓度但有安全风险;冷凝法适合高浓度但能耗高;膜分离法先进但成本高。每种技术工艺都有其最佳应用范围、最优应用工况,也有自身难以克服的缺陷。利用不同技术的优点,进行多种技术的集成组合,以发挥优势、弥补不足。

在汽油装卸及储运过程中,挥发油气通常由多种烃类组分构成,其沸点跨度大,从高沸点重烃到低沸点轻烃均有分布。不同组分在相同温度条件下的冷凝特性差异显著,单一冷凝温度难以实现高效、经济的油气回收。因此,在工程实践中通常采用多级冷凝方式,对油气进行分段处理,以提高回收效率并降低系统能耗。

表1 汽油装卸过程挥发油气的基本组分

汽油油气组分	分子量	沸点℃ (常压)	对应处理温度的分段
甲烷 CH ₄	16	-161.5	国标规定不予以回收的组分
乙烷 C ₂ H ₆	30	-88.6	
乙烯 C ₂ H ₄	28	-103.7	
丙烯 C ₃ H ₆	42	-47.7	第3级, -110℃ (直接冷凝, 或先富集再冷凝)
丙烷 C ₃ H ₈	44	-42.1	
异丁烷 C ₄ H ₁₀	58	-11.72	第2级, -50℃
正丁烷 C ₄ H ₁₀	58	-0.5	
1-丁烯 C ₄ H ₈	56	-6.3	
环戊烷 C ₅ H ₁₀	70	71.8	
异戊烷 C ₅ H ₁₂	72	80.7	第1级, 3℃
正戊烷 C ₅ H ₁₂	72	36.04	
1-戊烯 C ₅ H ₁₀	70	94.0	
己烷 C ₆ H ₁₄	86	136.6	

根据表1汽油油气组分分段的数据,冷凝法设计为三级冷凝温度。各级冷凝温度点对应处理的组分如下:

(1) 一级冷凝段(约 3℃): 一级冷凝针对沸点高、常温或微低温可冷凝的重质烃类。油气冷却至约 3℃时,汽油蒸气中 C₆及以上烃类和部分高沸点组分冷凝回收。该阶段冷凝负荷大,能降低后续处理单元油气浓度和深冷系统处理量,有利于控制能耗。

(2) 二级冷凝段(约 -50℃): 一级冷凝后的油气含中等沸点烃类,常规低温很难充分冷凝。系统冷却至-50℃左右,油气中含 C₃到 C₅的烃类组分转变为液态回收。二级冷凝保证回收效率,避免过早深冷,对降低能耗具有重要意义。

3. 炼油厂油气回收处理工艺的优化

炼油厂油蒸气含多种烃类组分,沸点范围宽,具有浓度

波动大、组分复杂、易燃易爆等特点,实际应用中需根据油气浓度和组分选择处理工艺,单一技术难以同时满足环保与效益要求。

“多级冷凝+吸附”组合工艺先通过多级冷凝回收易凝组分,降低浓度与温度,再经吸附深度处理^[6],兼顾安全性与经济性。工程设计中需根据工况调整工艺参数,高浓度时强化冷凝,低浓度时增强吸附,并借助自动控制与在线监测实现稳定运行。

3.1 各级配电功率的配置情况

在“冷凝+吸附”组合油气回收工艺中,各级冷凝单元处理任务和负荷不同,配电功率需匹配。若配置不合理,尤其是深冷段功率偏高,会增加能耗、降低经济性,故合理分配功率是降低能耗的关键^[3]。冷凝法工艺中三级配置如

表2所示。

表2 冷凝法工艺中三级配置

配置级别	处理油气的比例	配置功率的比例
第一二级	80%以上	70%
第三级	10%左右	30%

一级和二级冷凝作为主体单元, 处理80%以上高浓度油气, 配置约70%总功率, 以满足制冷需求, 保证高效回收。

第三级冷凝处理前级未回收的10%低沸点组分, 在组合工艺中用于补充处理, 功率比例可控制在30%, 避免深冷系统低负荷运行。

这种配置实现能量合理分配: 一、二级高功率快速回收; 三级辅助, 避免高能耗, 改善能耗结构。

3.2 采取组合工艺改善第三级冷凝段的能耗状态

在多级冷凝油气回收系统中, 第三级冷凝段因深冷处理低沸点烃类而能耗高。单一冷凝法需制冷系统长期高负荷运行, 导致高能耗和经济性差, 因此降低第三级负荷是关键。采用“冷凝+吸附”组合工艺, 将第三级配置设计为“油气富集系统和小型深低温凝系统”的组合配置。“油气富集系统”由两个吸附罐和脱附真空泵组成。吸附剂采用硅胶加活性炭或优质活性炭。冷凝第二级-50℃左右处理之后, 剩余的碳氢化合物含量为70~80g/m³, 属于低温低浓度油气, 用吸附罐暂时吸附保存, 使之碳氢化合物含量富集, 让空气排放。两个吸附罐轮流承担吸附油气和脱附再生吸附剂的责任。脱附的富集油气为高浓度油气, 送入“小型深低温凝系统”冷凝液化, 得到回收的油品。

冷凝段中前两级冷凝回收高、中沸点烃类, 吸附处理中低浓度油气, 降低第三级的进气流量和浓度, 削减制冷负荷, 为节能提供技术基础。能耗对比如表3所示, 相同规模下组合工艺功率更低: 1000m³/h时, 单一法需225kW, 组合法降至165kW, 节能60kW; 800m³/h和500m³/h时分别节能39kW和28kW。但100m³/h时节能不明显, 因小规模负荷低, 组合优势未体现; 中大规模时组合工艺显著降低装机功率和能耗。

4. 结论

本文针对炼油厂油气挥发量大、组分复杂及排放控制要求严格的现状, 系统比较了多种油气回收工艺, 并开展优化研究, 得出以下结论:

(1) 常用油气回收技术各存局限, 难以同时满足高回收率、低能耗与安全稳定运行的要求。多技术组合与分级处理

是必然趋势。

(2) 提出多级冷凝-吸附组合工艺, 通过三级冷凝分段回收不同沸点烃类, 在保证效率的同时降低深冷规模与能耗。

(3) 在该组合工艺中, 一、二级冷凝为主处理单元, 吸附单元富集低浓度油气, 三级深冷作补充。通过合理配置冷凝比例与功率, 可降低运行负荷, 优化能耗。

(4) 组合工艺在中大规模工况下可比单一冷凝工艺显著降低能耗, 节能优势随规模增大而提升; 小规模工况下能耗差异不明显。

(5) 该工艺通过前级冷凝改善吸附条件、降低深冷负荷, 提升了安全性与对波动工况的适应性, 适用于多种炼油厂油气回收场景。

综上, 多级冷凝为主、吸附为辅的组合工艺在效率、能耗与安全性方面具综合优势, 可提升油气回收系统的技术水平和工程应用价值, 对同类装置设计与改造有参考意义。

[参考文献]

[1] Wenhan Yu, Jiachen Li, Chunxiao Hao, et al. VOC species emissions from gasoline direct injection (GDI) and port fuel injection (PFI) vehicles combusting different gasoline[J]. The Science of the total environment, 2024, 954.

[2] 方洁, 黄维秋, 吕爱华. 油罐承压能力对油品蒸发损耗的影响[J]. 油气储运, 2020, 39(12): 1422-1429.

[3] 朱梦琦, 邓宏波, 黄晓宇. 油气回收技术的研究进展[J]. 化工管理, 2023, (01): 97-99.

[4] 黄维秋, 王丹莉, 李峰, 等. 油气回收技术的研究进展与研究重点[J]. 油气储运, 2012, 31(9): 641-646.

[5] 王珊, 黄维秋, 董军波. 储运过程中的油品蒸发及回收[J]. 油气储运, 2008, 27(12): 56-60+75+62.

[6] 黄维秋, 彭群, 李贝贝. 利用 Aspen 模拟软件优化冷凝法油气回收工艺[J]. 石油与天然气化工, 2009, 38(04): 313-315+338+267.

第一作者简介: 于恒(2006-): 男, 山东菏泽人, 山东石油化工学院在校本科生, 主要研究方向为油气储运工程;

通讯作者简介: 刘坤(1986-), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要研究方向: 油气储存与输送技术。

基金项目: 山东石油化工学院大学生创新创业训练计划项目(DC2024018)。