某成品油库汽车装车系统高浓度油气回收工艺优化

赵伟刚[1] 刘 悦[1] 折艳兵[2]

1. 陕西宇阳石油科技工程有限公司， 陕西 西安 710021；

2. 陕西延长石油(集团)管道运输公司第五分公司， 陕西 西安 710600

摘 要：为解决某成品油库汽车装车系统高浓度油气排放污染、能源浪费及安全隐患问题，结合油库汽车装车挥发性有机物排放规模大、浓度高、场地有限等特点，对吸附法、吸收法、冷凝法、膜分离法及直接燃烧法等主流油气回收技术进行适用性分析，筛选出低温吸收＋吸附法的组合工艺路线。通过系统研究吸收油流量、吸收温度等关键参数对处理效果的影响，优化工艺操作条件，并对比常温吸收＋吸附与低温吸收＋吸附两种方案的技术经济性。结果表明，该油库应采用先吸收后吸附的工艺顺序，优选92#汽油作为吸收剂；低温法和常温法固定资产投资差别不大，虽然低温吸收＋吸附法运行费用较高，但由于油库所在地夏季温度偏高，若采用常温吸收法，影响吸附效果，因此推荐采用低温吸收＋吸附法的组合工艺路线。研究结果可为同类型高浓度油气回收项目的工艺选型与参数优化提供参考。

关键词：成品油库；油气回收；挥发性有机物治理；吸收＋吸附组合工艺；工艺优化

DOI：10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2026. 03. 003

Optimization of high-concentration oil vapor recovery process for truck loading at a refined oil depot

Zhao Weigang[1], Liu Yue[1], She Yanbing[2]

1. Shaanxi Yuyang Petroleum Technology Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China;

2. No. 5 Branch, Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Pipeline Transportation Company, Xi'an, Shaanxi, 710600, China

Abstract: To address pollution caused by high-concentration oil vapor emissions during vehicle loading at a refined oil depot, along with energy waste and safety hazards, this paper analyzed the applicability of mainstream oil vapor recovery technologies—including adsorption, absorption, condensation, membrane separation, and direct combustion—considering the depot's characteristics: large-scale volatile organic compound emissions, high concentration levels, and limited site space. A combined process of low-temperature absorption and adsorption was selected. Through systematic investigation of key parameters such as oil flow rate and absorption temperature, operational conditions were optimized, and the techno-economic performance of ambient-temperature versus low-temperature absorption combined with adsorption was compared. The results indicate that the depot should adopt an "absorption followed by adsorption" process sequence, with 92-octane gasoline as the preferred absorbent. Although fixed capital investment is similar for both low-temperature and ambient-temperature methods, the low-temperature absorption + adsorption process, despite higher operating costs, is recommended due to the

收稿日期：2025-12-05

作者简介：赵伟刚(1986-)，男，高级工程师，硕士，主要从事石油天然气地面工程设计工作。E-mail：464975499@ qq. com

depot's high summer temperatures that would otherwise impair adsorption efficiency in ambient-temperature absorption processes. The study provides useful references for process selection and parameter optimization in similar high-concentration oil vapor recovery projects.

Keywords: Refined oil depot; Oil vapor recovery; Volatile organic compounds treatment; Absorption-adsorption combined process; Process optimization

0　前言

储油库储存、收发油品过程中产生的挥发性有机物中含有大量烷烃、卤代烃、醚类、烯烃等有机物，GB 20950—2020《储油库大气污染物排放标准》[1]规定挥发性有机物排放控制指标应采用非甲烷总烃作为油气排放的控制项目。挥发性有机物作为油品储运、装卸过程中挥发产生的混合物，不仅造成严重的大气污染，还危害人体健康，存在重大安全隐患[2]。随着环保法规日益严格及资源回收利用需求的增加，油气回收技术已成为石化行业绿色发展的关键环节。目前，工业应用中的油气回收技术主要包括吸附法、吸收法、冷凝法、膜分离法及直接燃烧法等，实际工程中多采用多种技术组合的方式以兼顾处理效率与经济性[3-5]。

某成品油库总库容 28×10^4 m^3（一级油库），储存 0#柴油、-10#柴油、92#汽油、95#汽油，包含 22 座储罐（6 座 10 000 m^3 内浮顶汽油罐、4 座 20 000 m^3 内浮顶汽油罐、6 座 10 000 m^3 拱顶柴油罐、6 座 20 000 m^3 拱顶柴油罐），具有火车装车和汽车装车系统。其中汽车装车系统设置 10 个汽油装车车位，单个车位装车能力 100 m^3/h（可同时装车运行）。该油库汽车装车系统 2010 年建设 2 套汽车装车挥发性有机物回收装置，处理规模分别为 500 m^3/h 和 600 m^3/h，工艺为冷凝 + 吸收处理方法，由于 2 套装置处理能力不足，故障率很高，因此需要新建 1 套油气回收装置，以满足油气排放浓度要求和最大处理量要求。

该油库具有挥发性有机物排放规模大、浓度高、场地有限、操作人员适配简易流程等独特工况，难以直接套用常规油气回收工艺。因此，针对该油库具体工况筛选适宜的工艺路线，并优化关键操作参数，对实现油气高效回收、降低能耗及运行成本具有重要意义，可为同类油气回收工程提供技术参考。

1　油气回收技术

油气回收技术是利用物理、化学、燃烧等方法回收再利用油气储存过程中的挥发性有机物的技术。该技术应用可达到环保要求，减少油气资源的浪费及油气挥发过程中的安全隐患。储油库中常见的挥发性有机物处理技术有吸附法、吸收法、冷凝法、膜分离法、销毁法、等离子法等[6-8]。

1.1　吸附法

吸附法利用活性炭、硅胶或活性氧化铝等吸附剂对油气与空气的吸附选择性差异实现分离。油气组分被吸附剂表面吸附后，通过减压脱附或蒸汽脱附富集，再经真空泵抽吸液化回收。空气组分因吸附力极弱，经排气管排放。工艺流程见图 1。

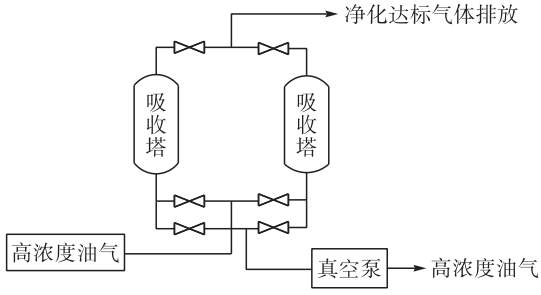

图 1　吸附法工艺流程图

Fig. 1　Process of adsorption method

吸附法处理效率高，是物理方法中唯一可将烃浓度控制在排放限值以下的技术；但频繁切换操作对设备及阀门要求较高。

1.2　吸收法

吸收法基于混合油气中各组分在吸收剂中的溶解度差异实现分离。采用汽油、柴油等作为吸收剂，油气与吸收剂在吸收塔内逆流接触，烃类组分被选择性吸收，未吸收气体从塔顶排出。工艺流程见图 2。

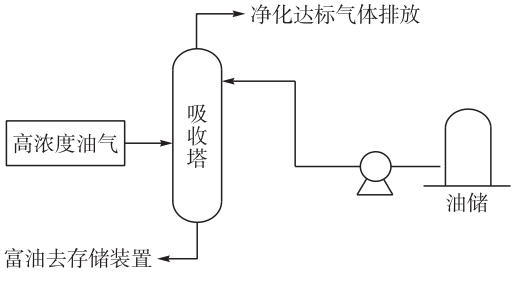

图 2　吸收法工艺流程图

Fig. 2　Process of absorption method

吸收法工艺及设备技术成熟，工业应用广泛；但高精度分离需高压、低温、高液气比等苛刻条件，能耗较高，单独使用无法满足排放要求，需与其他技术组合。

1.3 冷凝法

冷凝法利用制冷剂通过热交换器降低油气温度，基于烃类物质不同温度下的蒸汽压差异，使过饱和烃蒸汽冷凝为液体回收。工艺流程见图 3。

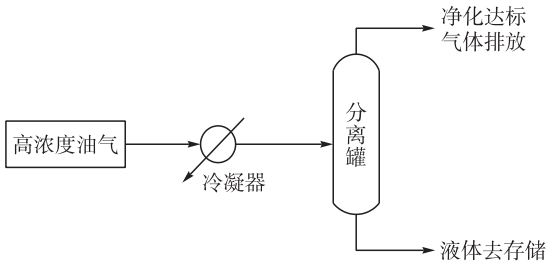

图 3 冷凝法工艺流程图

Fig. 3 Process of condensation method

冷凝法可直接获得液态油品；但能耗随温度降低呈指数级增加，单独达到排放限值需 -100 ℃以下低温，能效比极低，且负荷调节速度慢，需与其他技术组合使用。

1.4 膜分离法

膜分离法利用特殊有机膜的分子透过性差异，在压力推动下使油气分子优先透过膜，空气组分被截留排放，富集油气需进一步液化处理[9-11]。

膜分离法操作简单，无需复杂控制；但分离纯度低，仅适用于提浓，设备费用昂贵且易受固体颗粒、液滴损坏，需与其他技术组合使用[12]。

1.5 销毁法

销毁法主要包括催化氧化、蓄热氧化焚烧、直接焚烧[13]。通过辅助燃料燃烧氧化混合油气，产物直接排放。该方法仅能控制排放，可将排放挥发性有机物浓度降到极低，但无法回收烃类组分，无经济效益[14]。催化氧化工艺流程见图 4。

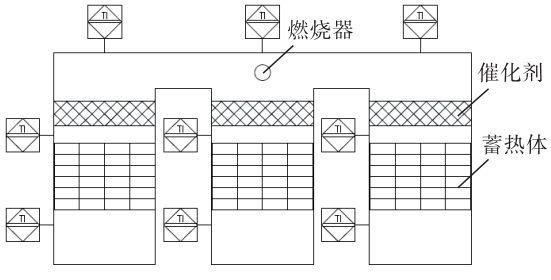

图 4 催化氧化工艺流程图

Fig. 4 Process of catalytic oxidation method

销毁法排放指标控制严格；但需精准调控燃料与氧气比例，流程长、操作要求高，能耗大，设备应力问题突出，防火规范需按照有明火及散发火点的设备设置安全间距，安全间距较大[15-18]。

1.6 等离子法

等离子法利用气体分子在电场作用下产生的激发态分子、电子、离子、原子和自由基等活性物种，降解废气中有机污染物分子。

使用等离子时，大部分挥发性有机物分子在低温等离子体场中降解矿化不完全；目前低温等离子体净化设施普遍存在装机功率不足、反应时间不充分、处理效率低等问题；分解产物不明、生成臭氧等二次污染物。

等离子法属于淘汰类工艺，被禁止使用，详见中华人民共和国生态环境部发布的《国家污染防治技术指导目录（2024 年，限制类和淘汰类）》，因此后续不再研究。

2 某油库可选工艺筛选

某油库挥发性有机物治理应执行 GB 20950—2020《储油库大气污染物排放标准》，根据该标准规定，油气处理装置污染物排放浓度≤25 g/m^3，处理效率≥95% 。

2.1 某油库工况特点

挥发性有机物排放规模大，属于全国范围内大型油气回收系统；油气浓度高，受装车形式及地域气候影响，浓度处于较高水平；场地有限，难以布置过多设备，受防火间距影响无法布置明火设备；油品以汽油为主，吸收剂仅可选汽油；无单独液体产品储存及装车设施；人员适配简易化操作流程。

2.2 挥发性有机物处理工艺筛选分析

2.2.1 直接燃烧法

直接燃烧法需按明火设备布置装置，某油库场地有限且不能新征地，现有场地无法满足防火距离要求。

该方法适应低浓度的排放指标，而油库排放指标并不严苛（油库排放指标 25 g/m^3）。因此，排除直接燃烧法。

2.2.2 膜分离法

膜分离法需与吸收法或冷凝法组合使用，仍无法满足排放要求，需进一步搭配吸附法，形成 3 种工艺组合，流程过长。该方法在实际工程应用中故障率较高且更换价格昂贵，故排除。

2.2.3 冷凝法

冷凝法回收液态烃需单独储存销售或混入现有油品，场站无相关处理设施。而冷凝出的液体混入油品不如直接采用吸收工艺吸收，故不推荐。

2.2.4 吸收法

油库有 92#汽油、95#汽油、柴油可选作吸收剂。95#汽油数量少，且吸收油气后可能影响质量；柴油吸收效果较好，但某油库柴油储存周转量不足，经常无柴油；92#汽油周转量大，吸收油气后对质量影响小，故选定 92#汽油作为吸收剂[19]。

2.2.5 吸附法

燃烧法已排除，虽然物理法（如吸收 + 膜分离）也能

达到排放要求,但是吸附法的工程适应性更强,故选择吸附法。

综上,该油库仅适用于低温吸收 + 吸附或常温吸收 + 吸附组合工艺,后续优化聚焦上述两种组合的流程顺序、吸收温度及吸收油流量等关键参数。

3　工艺路线优化研究

3.1　研究基础条件

挥发性有机物排放量:某油库 2 套汽车装车系统同时运行,最大装油量为 1 000 m^3 /h,因此,挥发性有机物排放量为 1 000 m^3 /h,为便于后续计算,所有研究均基于 1 000 m^3 /h 进行。

原料气浓度:为涵盖可能出现的油气浓度范围,从 400 g/m^3(空气含量约 90%)~2 600 g/m^3(空气含量约 4%),共设定了 11 种浓度情况,全部进行了计算比较[20]。

吸收油特性数据:吸收油特性数据取自 GB 17930—2016《车用汽油》中 92 号车用汽油(VIA),馏程温度数据普遍降低 3 ℃。

吸收油流量:研究了吸收油流量从 5 ~ 70 t/h 时在不同温度下的吸收效果,结果分析可知,选取的流量范围完全满足分析要求。

吸收油温度:研究过程先确定了温度的合理范围,再确定温度进行其他分析,未进行温度范围内的分段研究。

吸收压力:本次研究未进行压力研究。

研究目的:利用 Aspen Hysys 软件通过数据曲线对比、消耗对比,获得工艺流程顺序、合理的工艺数据区间。Hysys 流程模型见图 5。

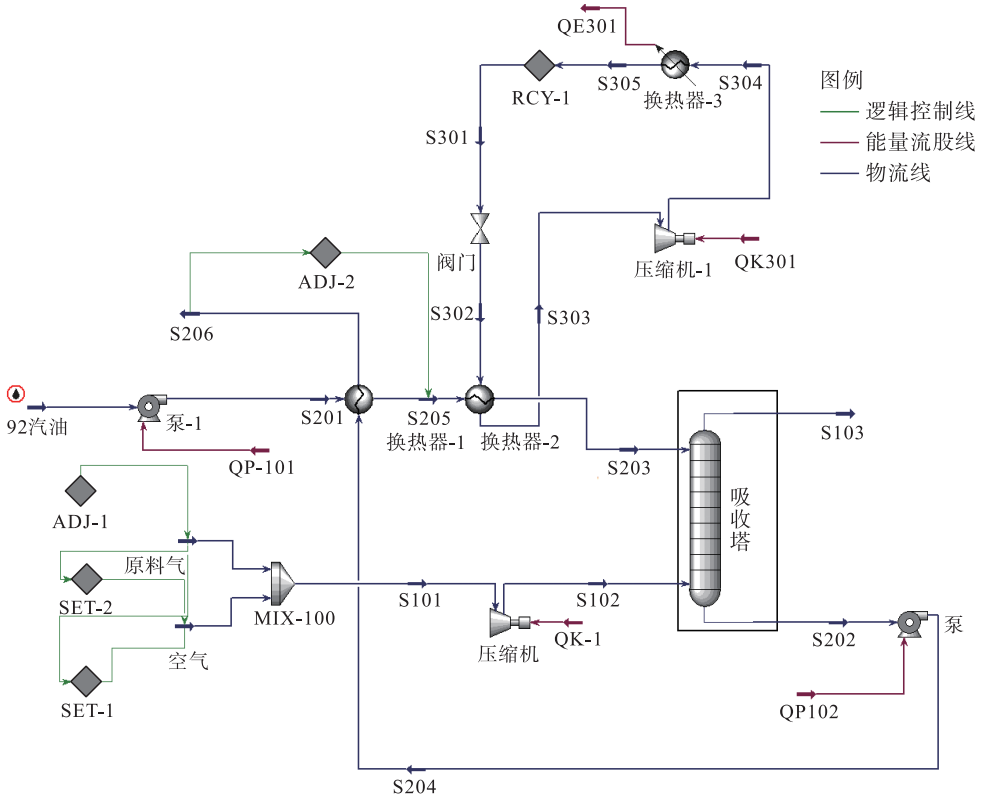

图 5　Hysys 流程模型示意图

Fig. 5　Hysys process model

注:QE、QK、QP 均为流股,ADJ、SET、RCY 为软件逻辑运算模块,MIX 为混合运算逻辑,S 为不同物流线。

3.2　吸收油流量与吸收后尾气烃浓度关系

3.2.1　常温吸收

25 ℃时,吸收油流量与吸收后尾气烃浓度关系见图 6。由图 6 可知,原料气浓度≤750 g/m^3 时,吸收后尾气烃浓度随吸收油流量增加而增加,此时发生的不是吸收,而是解吸,油气中的空气反而将吸收油中的烃带至气体中;原料气浓度 > 750 g/m^3 时,随着吸收油流量增加,吸收后尾气烃浓度降低;原料气浓度越高,吸收后尾气烃浓度降低得越明显;吸收油流量 < 30 000 kg/h 时,曲线变化明显,即吸收效果随吸收油流量的增加变敏感;吸收油流量 > 35 000 kg/h 后,吸收后尾气烃浓度变化微小。

综上,原料气浓度 > 750 g/m^3 时,先吸收后吸附更有利,可降低吸附负荷,原料气浓度 > 750 g/m^3 时烃会由吸收油吸收;原料气浓度≤750 g/m^3 时,先吸附后吸收更有利,根据检测数据该油库大部分时间原料气浓

度 >750 g /m^3,所以该油库应采用先吸收后吸附的工艺。吸收油流量上限为 35 000 kg /h。

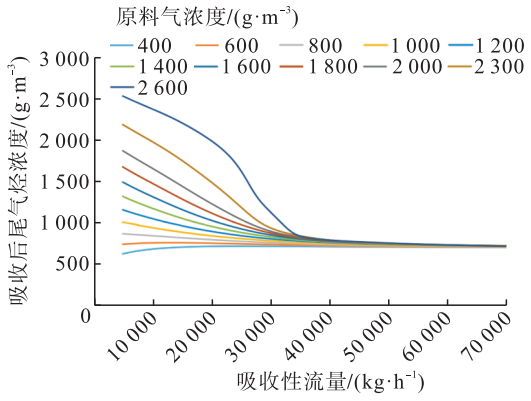

图 6 25 ℃时吸收油流量与吸收后尾气烃浓度关系曲线图

Fig. 6 Absorbent oil flow rate and post-absorption exhaust hydrocarbons concentration at 25 ℃

3.2.2 低温吸收

5 ℃时,吸收油流量与吸收后尾气烃浓度关系曲线见图 7。

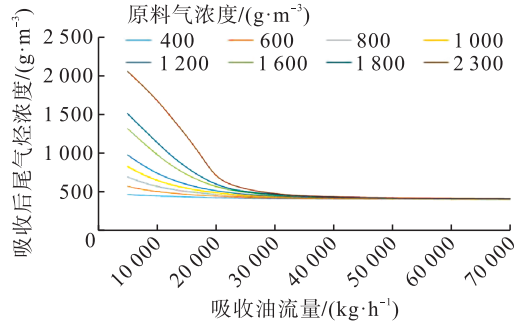

图 7 5 ℃时吸收油流量与吸收后尾气烃浓度关系曲线图

Fig. 7 Relationship between absorbent oil flow rate and post-absorption exhaust hydrocarbons concentration at 5 ℃

由图 7 可知,随着吸收油流量增加,吸收后尾气烃浓度降低;原料气浓度越高,吸收后尾气烃浓度降低得越明显;吸收油流量 <20 000 kg /h 时,曲线变化明显,即吸收效果随流量增加变敏感;吸收油流量 >25 000 kg /h 后,吸收后尾气烃浓度变化微小。

综上,对所有原料气浓度情况,吸收都可以起到一定效果,因此先吸收后吸附是有利的,这样可以降低吸附的负荷;低温吸收时,吸收油流量上限为 25 000 kg /h。

3.3 吸收油温度与吸收后尾气烃浓度关系

吸收油温度与吸收后尾气烃浓度关系曲线见图 8。由图 8 可见,吸收油温度≤35 ℃时,吸收后尾气烃浓度变化均匀,即随着吸收油温度降低,吸收后尾气烃浓度成比例降低;吸收油温度 >35 ℃时,吸收后尾气烃浓度曲线发散明显,原料气浓度越高的曲线变化得越明显,即在 35 ℃以上时降温产生的效果非常明显。因此,建议吸收油温度≤35 ℃,充分利用 35 ℃以上的敏感区。

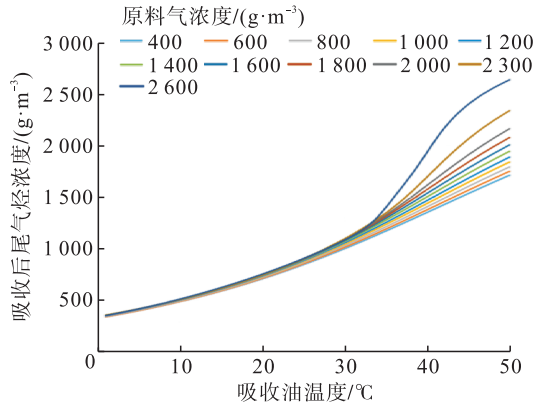

图 8 吸收油温度与吸收后尾气烃浓度关系曲线图

Fig. 8 Relationship between absorbent oil temperature and post-absorption exhaust hydrocarbons concentration

3.4 吸收油温度与制冷功率关系

吸收油温度与制冷功率关系曲线见图 9。

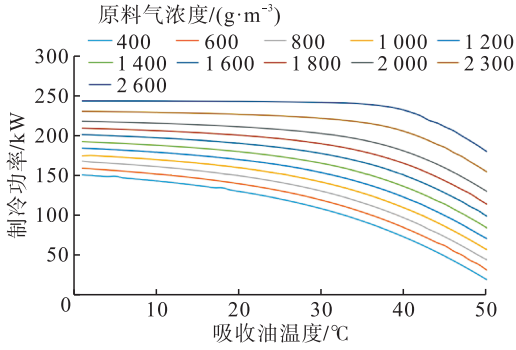

图 9 吸收油温度与制冷功率关系曲线图

Fig. 9 Relationship between absorbent oil temperature and refrigeration power

由图 9 可知,随着吸收油温度降低,制冷功率增加缓慢,对于高浓度原料气,电功率几乎不随温度变化。

综上,既然制冷功率随吸收油温度变化不大,因此应尽可能降低吸收油温度,以获取更好的吸收效果;因吸收油温度不能降到 0 ℃以下(油、气中的水可能结冰),因此确定当采取低温吸收方法时,吸收油温度为 5 ℃。

因此,最终优化结果为:原料气浓度 >750 g /m^3 时,采用先吸收后吸附工艺,反之采用先吸附后吸收工艺;该油库原料气浓度通常 >750 g /m^3,故应选用先吸收后吸附工艺;常温吸收时,吸收油流量最大 35 000 kg /h;低温吸收时,吸收油温度取 5 ℃,吸收油流量最大 25 000 kg /h。

4 方案对比

4.1 技术经济对比

两种方案技术经济对比见表 1。

表 1　常温吸收 + 吸附方案与低温吸收 + 吸附方案对比表

Tab. 1　Comparison of ambient temperature absorption + adsorption and low temperature absorption + adsorption

方案	92#汽油循环量 /（$t \cdot h^{-1}$）	吸收后尾气浓度 /（$g \cdot m^{-3}$）	吸附系统费用 /万元	低温系统费用 /万元	真空泵费用 /万元	能耗 / kW
低温吸收 + 吸附	25	450	30	50	50	210
常温吸收 + 吸附	35	900	40	0	80	86

对比可知，低温吸收 + 吸附方案比常温吸收 + 吸附方案的建设费用高 10 万元，年运行费用高 80 万元，年维护费用高 2 万元。两种方案初次建设费用差异较小，可忽略不计；由于油库当地夏季温度偏高，若采用常温吸收法，影响吸附效果，因此推荐采用低温吸收法。低温吸收 + 吸附方案工艺流程见图 10。

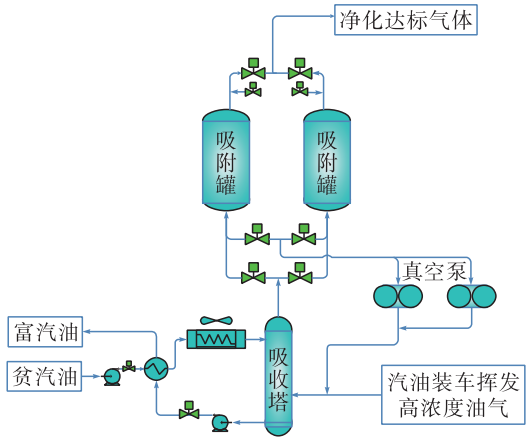

图 10　低温吸收 + 吸附方案工艺流程示意图

Fig. 10　Flowchart of ambient temperature absorption + adsorption process

5　吸附关键参数确定

5.1　吸附切换时间

吸附阀门切换执行需 1 ~ 2 min，且需预留再生时间，切换时间最小值为 10 min。场站 24 h 连续装车，阀门开关频次较高，需将阀门年开关次数控制在 5 000 次以内。不同切换时间对应的阀门年开关次数见表 2。

表 2　不同切换时间对应的阀门年开关次数表

Tab. 2　Annual valve switching times corresponding to different switching durations

切换时间 /min	年开关次数 /次
15	34 560
20	25 920
30	17 280
45	11 520
60	8 640
90	5 760
120	4 320

考虑设备寿命及未来调整能力，建议吸附切换时间设定为 60 min，远大于 GB 50759—2022《油气回收处理设施技术标准》规定的 20 min。

5.2　吸附富裕能力

建议吸附剂装填量预留 30% 以上富裕量，且吸附罐顶部保留 20% 的再装填空间，以确保处理效果稳定。

6　油气回收装置设计参数及方案

6.1　设计参数

油气回收装置基本设计参数见表 3。

表 3　油气回收装置基本设计参数表

Tab. 3　Basic design parameters of oil vapor recovery device

处理介质	额定处理量 /（$m^3 \cdot h^{-1}$）	操作范围	处理效率	排放指标 /（$g \cdot m^{-3}$）	防爆等级	放空口高度 /m	噪声等级 /dB	设计年限 /a	年运行时数 /h
汽油装车挥发高浓度油气	1 100	0 ~ 110%	>97%	非甲烷总烃浓度≤10	ⅡBT4	≥15	≤70	20	8 400

6.2　工艺流程

6.2.1　油气吸收过程

装车过程中挥发的高浓度油气经收集管网收集后由防爆引气风机送至油气回收单元。油气先由油气冷凝器冷凝至 5 ℃，冷凝后的油气进入吸收塔与 92#汽油进行逆流接触，气相部分被吸收，吸收塔排出的气相部分进入吸附罐后吸附净化。其中吸附能够定期通过真空泵抽真空再生。

6.2.2　活性炭解析过程

装车过程中挥发的高浓度油气与真空泵再生的高

浓度油气混合后一起进入吸收塔,高浓度油气与贫汽油在吸收塔内实现逆向接触,高浓度油气通过吸收塔喷淋吸收转化为汽油液体,从而实现油气的回收利用。吸收塔塔顶的低浓度油气则进入吸附单元,吸附单元由 2 组吸附罐组成,通过阀门控制分别实现解吸和吸附作业,低浓度油气经吸附后成为达标气体,排入大气。

6.3 控制联锁

本装置充分考虑安全性及自动稳定性,在此基础上为保证安全设置联锁值。油气装置前端设置压力变送器,实时监测油气管道内压力,与装车系统高度契合,保证装置及装车台稳定运行。由于管网系统压降为 1.0 kPa,根据 GB 20950—2020《储油库大气污染物排放标准》规定,向汽车罐车发油时,油气收集系统应为正压,且压力不应超过 6.0 kPa。因此,该装置压力设定值为:油气入口正常操作压力 1.5 kPa;油气入口高报警压力 3.0 kPa;油气入口联锁保护高压力 5.0 kPa;油气入口低报警压力 -1.0 kPa;油气入口联锁保护低压力 -3.0 kPa。

装置与装车泵信号联锁,装车泵信号启动时,装置运行,当未装车时,装置处于待运状态,实现自动化启停。

装置所有控制阀门设置故障联锁报警。

装置设置机泵故障联锁报警,现场防爆电控柜门设置相关旋钮,可实现远程、本地切换。

吸附剂吸附过程是放热过程,为保证吸附过程安全可控,吸附剂床层设置现场温度计及远传温度计,并接入自动控制系统,可实现高温报警、联锁;每床层设上、中、下 3 个测温点,测温点应靠近床层轴线。

吸收塔为防止淹塔及液位不平衡的工况,设置液位高、低报警及联锁;高、低液位报警仪表需单独设置。

为防止吸收油流量突然降低或其他工况,吸收油管线设置流量计,并参与控制联锁,一旦流量低于设定值,吸收油流量低报警、联锁。

装置尾气管道上设置浓度监测仪,报警值为 25% 爆炸下限(LEL)。

7 结论

1)根据某油库汽车装车挥发性有机物特点,最终选用低温吸收 + 吸附组合工艺,选择 92#汽油作为吸收剂,工艺顺序采用先吸收后吸附。

2)低温吸收工况下,吸收油流量控制在 25 000 kg /h 以内,吸附切换时间为 60 min,吸附剂装填量预留 30% 以上富裕量,可满足尾气排放要求。

3)某油库油气回收装置建成后,经过检测挥发性有机物排放浓度 < 10 g /m^3,远小于标准规定的 25 g /m^3,运行效果良好,此方法适合该类油库推广应用。

参考文献:

[1] GB 20950—2020 储油库大气污染物排放标准[S].
GB 20950—2020 Emission standard of air pollutant for bulk petroleum terminals [S].

[2] 苏鲁书. 新型油气回收技术在油品装车中的应用[J]. 炼油与化工,2021,32(3):36-40.
Su Lushu. Application of new oil and gas recovery technology in oil product loading [J]. Refining and Chemical Industry, 2021, 32 (3): 36-40.

[3] 胡晶莹. 石化行业挥发性有机废气治理技术现状和展望[J]. 石油化工技术与经济,2021,37(4):58-62.
Hu Jingying. Current status and prospects of volatile organic waste gas treatment technology in petrochemical industry [J]. Technology & Economics in Petrochemicals, 2021, 37 (4): 58-62.

[4] 梅舟营. 油气储运中油气回收技术的应用[J]. 化工设计通讯,2024,50(3):34-36.
Mei Zhouying. Application of oil and gas recovery technology in oil and gas storage and transportation [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50 (3): 34-36.

[5] 原佳甲. 石化行业 VOCs 治理技术[J]. 山东化工,2022,51(4):221-223.
Yuan Jiajia. VOCs control technology in petrochemical industry [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51 (4): 221-223.

[6] 邓 超. 油气储运系统中油气回收技术的应用[J]. 山东化工,2022,51(22):160-161.
Deng Chao. Application of oil and gas recovery technology in oil and gas storage and transportation system [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51 (22): 160-161.

[7] GB /T 50759—2022 油气回收处理设施技术标准[S].
GB /T 50759—2022 Technical standard for vapour recovery and treatment facilities [S].

[8] 刘 利,赵 洋,陈志强,等. 聚烯烃催化剂工艺尾气治理现状及工艺路径分析[J]. 辽宁大学学报(自然科学版),2023,50(1):59-65.
Liu Li, Zhao Yang, Chen Zhiqiang, et al. The governance situation of polyolefin catalyst process tail gas and the technology of path analysis [J]. Journal of Liaoning University(Natural Science Edition), 2023, 50 (1): 59-65.

[9] 汪 涵,郭桂悦,周玉莹,等. 挥发性有机废气治理技术的

现状与进展[J]. 化工进展,2009,28(10):1833-1841.
Wang Han, Guo Guiyue, Zhou Yuying, et al. Status and progress of treating volatile organic compounds [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28 (10): 1833-1841.

[10] 涂　睿,赵祥强,南江普,等. 膜技术在煤化工 VOCs 治理中的应用[J]. 广东化工,2023,50(9):147-149.
Tu Rui, Zhao Xiangqiang, Nan Jiangpu, et al. Application of membrane technology in the treatment of VOCs in coal chemical industry [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50 (9): 147-149.

[11] 贝鹏志,刘红晶,张　莹,等. 离子液体接枝型 PI/GO 膜的制备及 CO_2/N_2 分离的应用[J]. 化工进展,2020,39(11):4550-4556.
Bei Pengzhi, Liu Hongjing, Zhang Ying, et al. Preparation of ionic liquid-grafted PI/GO membranes and its application in CO_2/N_2 separation [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39 (11): 4550-4556.

[12] 项　林,陈珊珊,梅　杨. 双碳背景下膜分离技术在化工废气 VOCs 处理的技术应用与探讨[J]. 山东化工,2024,53(22):143-145.
Xiang Lin, Chen Shanshan, Mei Yang. Application and discussion of membrane separation technology in the treatment of VOCs in chemical waste gas under the dual carbon background [J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53 (22): 143-145.

[13] 孟建强,曹　枫. 蓄热焚烧/蓄热催化氧化焚烧双模式处理 VOCs 技术在工程实践中的应用研究[J]. 能源化工,2018,39(2):46-49.
Meng Jianqiang, Cao Feng. Application study of RTO/RCO dual mode technology for treating VOCs in engineering practice [J]. Energy Chemical Industry, 2018, 39 (2): 46-49.

[14] 曲建军,纪瑞军. 储油库 VOCs 治理技术分析和选择. 石油石化节能与计量[J]. 石油石化节能,2024,14(12):45-48.
Qu Jianjun, Ji Ruijun. Analysis and selection of VOCs treatment technology for oil storage depot [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2024, 14 (12): 45-48.

[15] GB 50160—2008　石油化工企业设计防火标准(2018 年版)[S].
GB 50160—2008　Fire prevention code of petrochemical enterprise design(2018 edition) [S].

[16] GB 50074—2014　石油库设计规范[S].
GB 50074—2014　Code for design of oil depot [S].

[17] GB 50183—2004　石油天然气工程设计防火规范[S].
GB 50183—2004　Code for fire protection design of petroleum and natural gas engineering [S].

[18] 罗　睿. 高压聚乙烯装置 VOCs 废气处理中热氧化工艺的应用及实例研究[J]. 化工与医药工程,2018,39(6):55-59.
Luo Rui. Application of thermal oxidation process in VOCs waste gas treatment used in high pressure polyethylene plant and study of practical instances [J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2018, 39 (6): 55-59.

[19] GB 17930—2016　车用汽油[S].
GB 17930—2016　Gasoline for motor vehicles [S].

[20] 陈增良,罗　晔,倪钱锋,等. 油库油气回收系统的优化模拟设计研究[J]. 安全、健康和环境,2025,25(9):34-40.
Chen Zengliang, Luo Ye, Ni Qianfeng, et al. Simulation design research on pre-coolers of the oil vapor recovery system in oil depots [J]. Safety Health & Environment, 2025, 25 (9): 34-40.