

低温冷凝技术在油品储运系统 VOC 减排中的应用研究

孙健

大庆石化公司销售储运中心，黑龙江 大庆 163714

DOI: 10.61369/ME.2024090010

摘 要： 本文针对油品储运系统 VOCs 排放问题，研究了低温冷凝技术在减排中的应用。分析了油品储运过程中 VOCs 的产生机理和排放特点，阐述了低温冷凝技术的原理、工艺流程及关键设备。研究表明，低温冷凝技术通过降低温度使 VOCs 从气相转化为液相，具有回收效率高、能耗低、适应性强等优势。针对不同储运环节，提出了差异化的工艺方案，并通过工程实例验证了应用效果。采用优化后的系统，VOCs 减排率和油气转化率均较高，具有显著的环境效益和经济价值。本文还探讨了低温冷凝技术与其他处理技术的耦合应用，为油品储运系统 VOCs 综合治理提供了新思路。

关 键 词： 低温冷凝技术；油品储运系统；挥发性有机物 (VOCs)；减排

Research on the Application of Low-temperature Condensation Technology in VOC Reduction of Oil Storage and Transportation Systems

Sun Jian

Sales, Storage and Transportation Center of Daqing Petrochemical Company, Daqing, Heilongjiang 163714

Abstract： This paper studies the application of low-temperature condensation technology in reducing VOCs emissions from oil storage and transportation systems. The generation mechanism and emission characteristics of VOCs during the storage and transportation of oil products were analyzed, and the principle, process flow and key equipment of low-temperature condensation technology were expounded. Research shows that low-temperature condensation technology converts VOCs from the gas phase to the liquid phase by reducing the temperature, and it has advantages such as high recovery efficiency, low energy consumption and strong adaptability. Differentiated process schemes were proposed for different storage and transportation links, and the application effects were verified through engineering examples. By adopting the optimized system, both the VOCs reduction rate and the oil and gas conversion rate are relatively high, presenting significant environmental benefits and economic value. This article also explores the coupled application of low-temperature condensation technology and other treatment technologies, providing a new idea for the comprehensive management of VOCs in oil storage and transportation systems.

Keywords： low-temperature condensation technology; oil storage and transportation system; volatile organic compounds (vocs); emission reduction

一、油品储运系统 VOCs 排放特点及控制必要性

油品储运系统是石油化工行业 VOCs 排放的主要源头之一，包括储存、装卸、输送等环节。我国石油化工行业 VOCs 年排放量约占工业源排放总量的 15% 以上，其中储运系统贡献了约 40% 的排放量^[1]。

油品储运过程中 VOCs 排放具有以下特点：排放源分散，涉及储罐、装车台、铁路装卸站、码头等多个环节；排放具有间歇性和不稳定性，与气温、压力、操作频率等因素密切相关；组分复杂，主要包括烷烃、环烷烃、芳香烃等多种碳氢化合物。这些特点使得 VOCs 的控制和回收面临较大挑战。

随着环保法规日益严格，石油化工企业面临越来越大的减排

压力。《挥发性有机物无组织排放控制标准》等法规对油品储运系统 VOCs 排放提出了明确要求，研究高效、经济的 VOCs 减排技术具有重要意义。

二、低温冷凝技术基本原理

低温冷凝技术是一种基于相变原理的 VOCs 控制技术，利用温度降低使气态 VOCs 凝结为液态，实现分离和回收。当环境温度低于 VOCs 露点温度时，VOCs 会从气相转化为液相，分子量、沸点高的组分更易冷凝^[2]。

冷凝效率受多因素影响：冷凝温度越低，效率越高；VOCs 初始浓度越高，效率越高；组分沸点越高，越易冷凝；延长气体停

留时间可提高效率。

在油品储运系统中，低温冷凝技术采用机械制冷或液氮等低温介质提供冷量，可分为单级和多级制冷系统。单级制冷系统简单经济，适用于温度要求不高的场合；多级制冷系统可实现更低温度，适用于对回收率要求较高的场合^[3]。

三、低温冷凝技术工艺流程及关键设备

（一）工艺流程

低温冷凝技术在油品储运系统中的典型工艺流程包括以下几个步骤：

首先，含 VOCs 的废气经过预处理单元，去除其中的水分、颗粒物等杂质，避免这些物质在低温环境下结冰或堵塞设备。预处理通常采用除尘器、干燥器等设备，可将废气中的水分含量控制在 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，颗粒物浓度降至 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下^[4]。

其次，预处理后的废气进入冷凝单元。冷凝单元是整个系统的核心，通常采用多级冷凝方式，逐步降低温度。在第一级冷凝器中，温度通常控制在 -20°C 至 -40°C 之间，可回收约75%的高沸点 VOCs；在第二级冷凝器中，温度可降至 -60°C 至 -100°C ，进一步回收中低沸点 VOCs，总回收率可达85%以上^[5]。

然后，冷凝后的液体进入油气分离单元，将回收的油品与不凝气体分离。回收的油品纯度可达95%以上，可返回生产系统重新利用，提高资源利用效率，每年可回收油品数百吨至数千吨不等，具有显著的经济效益。

最后，处理后的尾气根据其浓度和组分，可直接排放或进入深度处理单元（如吸附、催化燃烧等）进行进一步处理，以满足排放标准。经低温冷凝处理后，尾气中 VOCs 浓度通常可降至 $1.5\text{g}/\text{m}^3$ 以下^[6]。

（二）关键设备

低温冷凝系统的关键设备主要包括冷凝器、制冷系统和油气分离装置。

冷凝器是实现 VOCs 相变的核心设备，其类型主要包括壳管式冷凝器、板式冷凝器和螺旋板式冷凝器等。壳管式冷凝器结构简单、易于清洗维护，但热交换效率相对较低，传热系数通常为 $800\text{--}1200\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；板式冷凝器热交换效率高，传热系数可达 $2000\text{--}4000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，但清洗维护相对困难；螺旋板式冷凝器兼具前两者优点，传热系数约为 $1500\text{--}2500\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，但成本较高^[7]。

制冷系统根据温度需求不同，可采用机械压缩制冷系统或液氮等低温介质直接冷却。机械压缩制冷系统能耗相对较高，单位制冷量电耗约为 $0.8\text{--}1.5\text{kWh}/\text{kW}$ ，但运行成本低；液氮直接冷却可实现更低温度（最低可达 -196°C ），但成本较高，液氮消耗量约为 $3\text{--}5\text{kg}/\text{kg}$ 回收 VOCs，适用于要求极低温度的场合^[8]。

油气分离装置主要包括气液分离器、储罐等，用于将冷凝后的液体与未冷凝的气体分离。分离效果直接影响系统的回收效率和产品质量，高效气液分离器可使分离效率达到99%以上，残留气体中的液滴含量低于 $0.01\text{g}/\text{m}^3$ 。

四、低温冷凝技术在油品储运不同环节的应用

（一）储罐呼吸过程中的应用

油品储罐在昼夜温差变化和装卸操作过程中会产生呼吸损失，是 VOCs 排放的重要来源。储罐呼吸气体特点是排放量大、浓度波动明显，VOCs 浓度在小呼吸时约为 $200\text{--}500\text{g}/\text{m}^3$ ，大呼吸时可达 $800\text{--}1500\text{g}/\text{m}^3$ ^[9]。针对这一特点，低温冷凝技术在储罐呼吸气体处理中的应用方案主要包括两种模式。

一种是集中式处理模式，将多个储罐的呼吸气体收集到中央处理装置进行冷凝回收。该模式适用于储罐群集中布置、排放量相对稳定的场合。以某石化企业储罐区为例，采用集中式低温冷凝系统处理10座储罐的呼吸气体，系统设计处理能力为 $200\text{m}^3/\text{h}$ ，冷凝温度为 -40°C ，年回收油品约320吨，VOCs 减排率达82%，投资回收期不到3年^[10]。集中式处理模式的主要优势在于规模效应明显，单位处理成本较低，设备利用率高。此外，由于集中处理，便于实施自动化控制和在线监测，提高了系统运行的安全性和可靠性。集中式系统通常配备完善的预处理单元，包括除雾器、气液分离器和加热器等，可有效防止因液滴夹带或结冰导致的设备故障，延长设备使用寿命。

另一种是分散式处理模式，在每个储罐或几个相邻储罐设置独立的冷凝回收装置。该模式适用于储罐分散布置或排放特性差异较大的场合。分散式系统设备规模小，投资较低，但运行管理成本相对较高。实践表明，单罐配套的小型低温冷凝装置，处理能力通常在 $20\text{--}50\text{m}^3/\text{h}$ ，冷凝温度为 -30°C 左右，VOCs 回收率可达75%以上。分散式处理模式的显著特点是灵活性强，可根据不同储罐的排放特性和油品种类进行针对性设计。这种模式特别适合于储存不同油品种类、排放特性差异明显的储罐区。分散式系统还具有模块化安装便捷、占地面积小的优势，对于改造现有储罐区尤为适用。随着小型制冷设备技术的进步，新型分散式低温冷凝装置的能效和自动化水平不断提高，进一步增强了其应用价值和市场竞争力。

（二）装车过程中的应用

油品装车过程是 VOCs 排放的另一重要环节，特点是排放集中、浓度高但时间短。装车过程中排放的 VOCs 浓度通常在 $1000\text{--}2000\text{g}/\text{m}^3$ ，气体流量与装载速度密切相关，一般为装载量的1.0–1.2倍体积。

针对装车过程的特点，低温冷凝技术采用两段式冷凝工艺：第一段采用常规制冷设备将温度降至约 -40°C ，可回收约70%的 VOCs；第二段采用液氮等深冷介质将温度进一步降至 -120°C 左右，总回收率可达90%以上。某石油企业汽油装车站采用这种两段式冷凝工艺，系统设计处理能力为 $600\text{m}^3/\text{h}$ ，年回收汽油约850吨，VOCs 排放浓度由原来的 $1500\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $120\text{g}/\text{m}^3$ 以下，达到国家排放标准，年经济效益超过600万元。两段式冷凝工艺的核心优势在于充分发挥了不同冷凝温度区间的特点，实现了能源的梯级利用，既保证了回收效率，又降低了运行成本。常规制冷设备适用于回收高沸点 VOCs 组分，投资相对较低；而深冷系统则针对性地回收低沸点组分。

此外，装车过程 VOCs 排放具有间歇性特点，为了提高系统稳定性和经济性，通常在冷凝系统前设置缓冲罐，平衡流量和浓度波动。实践证明，设置容积为最大排放量1.5~2倍的缓冲罐，可使系统负荷波动控制在 $\pm 15\%$ 以内，大幅提高设备利用率和能源效率。缓冲罐的合理配置不仅解决了装车过程中排放的间歇性问题，还起到了预冷和初步分离的作用，延长了后续设备的使用寿命。现代化的 VOCs 回收系统通常配备自动化控制装置，根据装车计划和实时监测数据动态调整系统参数，优化能耗和回收效率。

五、低温冷凝技术的节能优化与余热利用

（一）多级梯级利用技术

低温冷凝技术的能耗主要集中在制冷系统，如何提高能源利用效率是该技术应用和推广的关键。多级梯级利用技术是降低能耗的有效途径之一，其基本思路是根据不同组分 VOCs 的冷凝温度特性，采用分级冷凝方式，实现冷量的梯级利用。

多级梯级利用系统通常分为两到三级冷凝器。在第一级冷凝器中，温度控制在较高水平，用于冷凝高沸点组分；在后续级冷凝器中，温度逐级降低，用于冷凝中低沸点组分。这种分级冷凝方式可以根据不同组分的冷凝特性合理配置冷量，避免低品位冷量用于高温冷凝的能源浪费。研究表明，采用多级梯级利用技术可使系统能耗降低20%~30%。多级梯级利用技术的实施需要精确设计各级冷凝器的操作参数，包括温度、压力和流量等。通过合理的工艺布局，可实现冷量在系统内的循环利用，高温阶段冷凝产生的冷凝热可用于预热后级冷却介质，提高系统整体热效率。此外，不同级别的冷凝器可根据处理气体特性选择不同类型，如壳管式、板式或螺旋板式等，以获得最佳的传热效果和运行稳

定性。

（二）低温余热回收利用

炼油厂内部存在大量低温余热资源，如制氢装置的氢气冷却、催化裂化装置的烟气余热等。这些低温余热如果能够有效回收利用，可显著降低低温冷凝系统的运行成本。低温余热回收利用的关键是热能品位匹配和热量传递效率提升。

在实际应用中，低温余热回收主要通过以下方式实现：一是利用余热驱动吸收式制冷系统，为冷凝系统提供部分冷量；二是利用余热驱动有机朗肯循环发电，为制冷系统提供电能；三是采用热泵技术提升余热品位，扩大其应用范围。这些措施可使低温冷凝系统的综合能效显著提高，显著降低运行成本。

此外，低温冷凝过程本身也会产生大量冷凝热，对这部分热量进行回收利用也是降低系统能耗的重要途径。通过设置热回收换热器，可将冷凝热用于预热进入系统的冷空气或作为其他用热单元的热源，进一步提高系统的能源利用效率。

六、结束语

低温冷凝技术作为一种高效、经济的 VOCs 减排技术，在油品储运系统中具有广阔应用前景。通过对该技术在储罐呼吸、装车装卸等环节的应用分析可知，低温冷凝技术既能实现 VOCs 的有效减排，又能回收有价值的油品资源，实现环境效益与经济效益的统一。随着能源节约和环境保护要求日益提高，低温冷凝技术需在节能降耗、适应性增强和系统集成方面进一步优化。特别是低温余热回收利用、多级梯级冷凝等节能技术的应用，将提升该技术的经济性和可持续性。此外，低温冷凝技术与其他 VOCs 处理技术的组合应用也将成为未来发展重要方向。

参考文献

- [1] 杨春剑. 炼油装置低温余热在油品储运系统中的应用 [J]. 齐鲁石油化工, 2016, 44(3): 4.
- [2] 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): 5.
- [3] 杨叶, 王铁军, 王蒙, 等. 冷凝式油气回收系统设计研究 [J]. 低温与超导, 2012, 40(1): 6.
- [4] 王伟. 炼厂储运过程中 VOCs 治理技术应用与研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2017.
- [5] 赵志伟, 杜垵. 冷凝法油气回收工艺的能耗分析 [J]. 制冷技术, 2010(1): 4.
- [6] 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.
- [7] 徐强, 吴宝华. 油气回收技术在油品储运中的应用 [C]// 中国计量协会; 中国石油化工集团公司; 中国石油天然气集团公司. 中国计量协会; 中国石油化工集团公司; 中国石油天然气集团公司, 2014.
- [8] 刘野. 冷凝式油气回收技术在油品储运中的应用 [J]. 文摘版: 工程技术, 2016, 000(006): P.230-230.
- [9] 鲁清明, 杜垵. 冷凝法油气回收技术研究进展及现状 [C]// 江苏省暖通空调制冷2015年学术年会.; 中国勘探设计协会; ; 江苏省制冷学会; ; 江苏省土建学会, 2015.
- [10] 梁家联. 冷凝式油气回收技术在油品储运中的运用 [J]. 化工管理, 2015(28): 1.