

碳四气体脱水冷凝精制装置 优化设计

黄勇 张铁兵

弘润石化（昌邑）有限责任公司

摘要：基于碳四气体在燃料和化工应用中对水分控制的严格要求，对碳四气体脱水冷凝精制装置进行了优化设计。阐述了冷凝板、制冷器、滑动横板及水收集系统等结构的优化思路，介绍了热力学、流体力学仿真与试验测试方法，分析了装置在冷凝效率、能耗与系统稳定性方面的改进效果。研究表明，优化设计可有效提升脱水效率与装置运行能效，具备良好的工业化应用前景与推广价值。

关键词：碳四气体；脱水；冷凝精制；优化设计

碳四气体在石油化工及燃料领域具有重要应用价值，其含水量直接影响产品质量和设备运行稳定性。为提高碳四气体纯度，工业上常采用冷凝法进行脱水处理。传统冷凝装置存在能效偏低、结构不合理等问题，亟需通过系统优化提升整体性能。本文围绕冷凝板结构、制冷系统与水收集装置等关键部位展开优化设计研究。

1 碳四气体脱水冷凝精制技术概述

1.1 碳四气体的性质与应用

碳四（C₄）化合物是由四个碳原子组成的烃类化合物，主要包括丁烷（C₄H₁₀）和丁烯（C₄H₈）等。碳四气体广泛应用于化工、燃料、合成材料等领域。例如，丁烷是重要的燃料和石油化工原料，丁烯则常用于合成聚合物，如聚丁烯。碳四的水分含量对其应用有重要影响。过高的水分会导致燃烧效率低下，减少燃料的热值，甚至在使用中引起设备腐蚀，降低系统的工作寿命。

而在有机合成中，水分的存在可能会影响反应的纯度和效率，因此，对

碳四气体中的水分去除是提高其应用效果的关键^[1]。

1.2 碳四气体制备与脱水需求

碳四气体主要通过高温裂解、蒸馏分离等工艺从石油和天然气中获得。制备过程中，裂解温度通常高达800 ~ 1 100 ℃，以裂解大分子烃为小分子烃，其中包括碳四气体。然而，裂解产物中往往含有较高的水分（可达1 600 ppm），这种水分若未有效去除，会影响碳四气体的后续应用，尤其是在作为燃料时，会降低燃烧效率。在有机合成过程中，水分还可能干扰反应和降低产物纯度。因此，脱水处理是碳四精制的必要步骤。

1.3 现有的冷凝精制技术

传统的碳四脱水方法包括吸附、膜分离和冷凝精制等。吸附技术通常采用分子筛、活性炭等材料吸附气体中的水分，适用于低浓度水分的去除，在大流量气体处理时效率较低。膜分离技术通过选择性透过膜材料来分离水和其他气体，能有效处理大流量的气体，但设备投资和膜的维护成本较高。冷凝精制技术通过冷却气体使水分凝结，简便且能

高效去除水分，但其能效和冷凝效率仍需通过优化设计来进一步提升。

2 碳四气体脱水冷凝精制装置设计原理

2.1 装置基本结构

碳四气体脱水冷凝精制装置由处理塔、冷凝板、制冷器以及散热片等组件构成，如图1所示。处理塔内安装冷凝板，冷凝板与制冷器相连接，制冷器通过散热片与防护盒相结合，起到冷却与散热的作用。处理塔的设计可通过滑动横板进行优化调整，确保碳四气体流动过程中的水分凝结与收集效率。整个系统设计注重提高制冷效率与能源利用，通过各个组件的协同作用，使得水分能有效冷凝并被回收，提高制备效率和气体的纯度。

2.2 冷凝原理

冷凝板与制冷器配合来降低碳四气体的温度，使水分在冷凝板表面形成水珠。冷凝过程是通过热交换完成的，气体通过冷凝板时，由于温差作用，气体中的水蒸气凝结成液态水。此过程可提高水分去除的效率，收集并回收冷凝



图1 碳四气体脱水冷凝精制装置组件图

水。冷凝板与制冷器之间的热交换机制优化了能量的利用，确保冷凝过程中的热量最大化回收，降低能耗并提高整体装置的效率^[2]。

2.3 滑动横板与水收集系统

滑动横板设计能有效地刮除冷凝板表面凝结的水珠。横板与活塞板配合工作，活塞板用于挤压水收集盒，将冷凝水从处理塔内顺利输送至储水区，处理塔结构如图2所示。滑动横板的设计原理能够确保水珠持续、均匀地从冷凝板表面被移除，避免水分在冷凝板上积聚，提高水的回收率。利用水收集系统，冷凝后的水能高效回收，加上设计合理的排水路径排出，可增强系统稳定性。

2.4 降温系统与散热设计

降温系统中的制冷器通过吸收外部热量，使冷凝板的温度降低，达到有效冷凝的温度要求。制冷器表面通过散热片进行热量释放，优化热量的散发和设备的散热效果。防护盒的设计在散热片外部提供额外的保护，避免热量外泄并保证设备稳定运行。优化散热片的数量和布局，可提高冷凝效率，减少能量的浪费。该设计提升了冷凝系统的综合效率，确保冷凝过程中水分去除的高效性

与装置的长时间稳定运行，降温系统设计如图3所示。

3 优化设计方案

3.1 冷凝板的优化设计

冷凝板材质为铜、铝合金等高热导率材料，可提高热交换性能，促进水分冷凝。表面微结构

接触面积，提升冷凝效果，减少水垢积累。表面涂层如抗水垢涂层，可以有效防止水垢形成，保持冷凝效率。冷凝板的排列方式和形状优化，如采用阶梯式设计，能有效增加冷凝面积并改善气流分布，提升冷凝效率。

优化冷凝板的形状和布局，能提高气流通道效率。通过多层结构或阶梯式排列，提高气体与冷凝板的接触面积，优化气流路径，有助于提高冷凝效果。合理间距和排列角度设计可减少冷凝水的滞留，增加冷凝水的流动速度，从而提高脱水效率和整体性能。

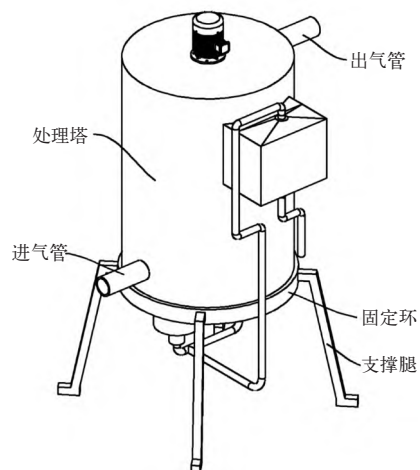


图2 碳四制备装置的处理塔整体结构图

3.2 制冷器与降温效果优化

制冷器的功率与效能需平衡，以提高冷却效率并降低能耗。优化制冷器的设计，选择高效的制冷循环方式，可以增强冷却能力并减少能量消耗。通过优化制冷剂选择和流动方式，进一步提高制冷效能，保证系统高效运行。合理配置制冷器的冷却能力和功率，确保系统节能与冷却效果的平衡。

散热片的数量和布局是提高制冷效率的关键。增加散热片数量并优化其布置能提升热交换能力，保证冷凝器表面均匀降温，降温结构如图4所示。选择高导热材料（如铝合金）能进一步提升散热效率。优化散热片的排列角度和间距能提高冷却效果，避免热量积聚，提高整体制冷效率和设备稳定性^[3]。

3.3 滑动横板与活塞板优化

滑动横板的设计影响水收集效率。优化滑动机制能减少滑动过程中的能耗和磨损，提升效率。调整横板滑动速度和频率，能提高冷凝水刮除效率，防止水珠积聚，保持冷凝效果。优化的滑动系统有助于稳定水的收集与排放，减少设备故障率。

活塞板的优化能有效提升水收集与压缩效率。通过增强活塞板的密封性和压力控制系统，提高水的压缩能力，减少水分泄漏。优化活塞板的结构与

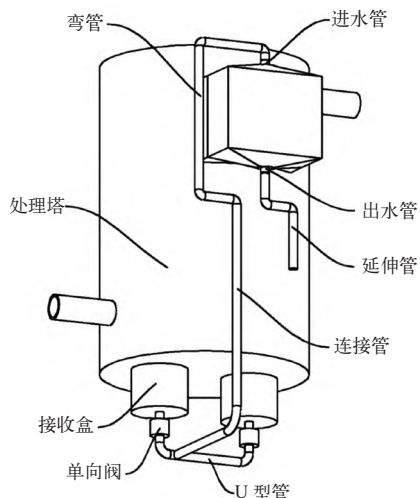


图3 碳四制备装置降温系统示意图

塞板运动幅度和压力控制,使水收集更精确、高效,提升整个装置的工作效率,确保水分顺畅排放。

3.4 水收集与输送系统优化

接收盒与U形管的设计优化能有效提升水收集和输送效率。通过调整接收盒的尺寸与形状,确保水珠顺畅聚集并迅速排放。优化U形管的流动性,采用光滑内壁与减阻设计,可以提高水流速度,减少水流阻力,避免堵塞。合理设计接收系统与管道布局,能够有效提升水的排放速率,保持系统高效运作。

水流输送与排放系统的优化需要提高水流的顺畅性和排放效率。通过改进管道的布置和流速控制,减少流体阻力,确保水能够顺利通过管道。引入自动化控制系统,如水位传感器与阀门调节,可精准控制水流量,避免水量过多积聚。优化排放系统的设计,能够确保水分及时排放,提升系统的稳定性与效率。

3.5 能效与节能设计

节能材料和热能回收设计能够显著提高装置的能效。采用高热导率材料(如铜、铝)提升热交换效果,并通过废热回收系统减少能耗。优化热管理设计,降低热损失,进一步提高冷凝效率与节能效果。除了材料选择外,合理配置冷凝板与制冷器、优化气流和热交换效率也能减少能源浪费。智能温控系统的应用能精准调节运行状态,进一步降低能耗,从而有效提升系统的节能性、

降低运行成本,并提高环保性能。

4 系统性能与仿真分析

4.1 冷凝效率仿真

冷凝效率仿真主要通过模拟碳四气体流经冷凝板后的水分去除过程来评估装置的性能。仿真模型考虑了气体流量、冷凝温度、冷凝板表面材质和几何结构等因素的影响,能够精确预测水分凝结的效率。通过调整冷凝板的温度、材质及排列方式,仿真结果为优化设计提供了重要的数据支持,能够在不同工况下实现水分去除效率的最大化,从而提高制备工艺的稳定性和产品的质量。

4.2 优化前后性能对比

优化设计与传统设计的性能对比分析,侧重于冷凝效率和能效的提升。通过仿真与试验数据的对比,优化方案在水分去除效率、气体冷凝效果及能耗方面均表现出显著优势。优化设计能够在更短的时间内实现更高效的冷凝,并通过智能控制系统降低能耗,提升系统整体的能效比。与传统设计相比,优化后的系统在降低能耗、提升冷凝效率和减少能源浪费方面具有明显的改进。

5 装置应用与工业化前景

优化后的冷凝精制装置在运行过程中表现出更高的能效比,单位气体处理的能耗大幅下降。根据试验测算,优化设计可节约约15%~20%的能源消耗,减少制冷系统运行负荷,延长设备使用寿命,降低维修频率,进一步控制了生产成本^[4]。高效的水分去除能力提高了碳四气体的产品附加值,减少因水分杂质带来的下游工艺损耗和质量波动,创造了良好的经济效益。

随着化工行业自动化、智能化程度的不断提升,装置集成了多种智能控制模块和优化运行策略,能够有效应对多变的工况环境,提升工艺响应速度和操作安全性。其稳定可靠的运行特性有助于推动行业技术水平提升,为相关企

业提供标准化、可复制的技术路径。该技术的推广应用将有力支持本地化设备制造和工程技术服务的发展,促进相关配套产业链的协同进步,提升区域产业竞争力。

随着大型炼化一体化项目的兴起,以及烯烃、芳烃等碳四衍生物产业链的快速扩张,市场对高纯度、低杂质碳四气体的需求日益增长。本装置设计紧凑、运行灵活、控制智能化程度高,适用于新建及技改项目中的多种气体处理场景,具备良好的通用性和适应性。未来通过模块化组装和标准化推广,可进一步降低设备制造成本和施工周期,推动其在国内外化工装置中的批量化、规模化应用。

6 结论

通过对碳四气体脱水冷凝精制装置的结构优化与系统分析,本文从热交换效率、水分收集路径、能效控制等方面提出了多项改进措施,并通过仿真模拟与实测数据验证了优化方案的有效性。结果表明,优化设计可显著提升冷凝效率与系统稳定性,降低运行能耗,满足高纯度碳四气体处理需求。该研究为相关工业装置的节能降耗及性能提升提供了切实可行的技术参考。

参考文献:

- [1] 王照曦. 烷烃气体在壁面上异相成核冷凝特性的分子动力学研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2024. DOI:10.27008/d.cnki.gdbdc.2024.000395.
- [2] 徐永上. 混合碳四分离工艺模拟与优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- [3] 赵保林, 王海, 王海波, 等. 丁烷全冷冻储罐蒸发气处理方案优化探讨[J]. 化肥设计, 2024, 62 (02): 24-26.
- [4] 徐海洋. 1, 4-丁二醇选择性催化脱水制备3-丁烯-1-醇研究[D]. 济南: 济南大学, 2023.

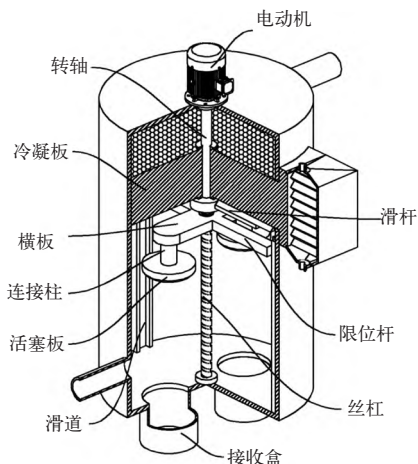


图4 碳四制备装置降温结构示意图