

基于碳四丁烷异构化反应的热泵精馏工艺优化设计

侯晓洁

天津海成石化工程设计有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i2.7740

[摘要] 在石油化学工业里，丁烷异构化是提高汽油辛烷值的重要过程，其中脱异丁烷塔作为能耗最高的环节，存在显著的热能回收不足问题。通过引入热泵精馏技术，可以将低品位热能转化为高品位热能，实现热耦合，从而大幅降低能耗。优化策略包括选择合适的热泵系统（如蒸汽压缩式或吸收式），进行设备集成设计和控制系统调整，以确保系统的协调运行，并通过经济性评估确保方案的可行性。实际应用案例显示，通过热泵技术改造，某化工企业的异丁烷分离塔蒸汽消耗量显著下降，从 42.5 吨/时降至 12 吨/时，全年节省成本超过 5000 万元，同时减少了温室气体排放，增强了生产稳定性和产品质量，证明了该技术在提高能源效率和经济效益方面的潜力。

[关键词] 丁烷异构化；热泵技术；能源效率；工艺优化；环境影响

Optimization design of heat pump distillation process based on carbon tetradecane isomerization reaction

Hou Xiaojie

Tianjin Haicheng Petrochemical Engineering Design Co., Ltd.

[Abstract] In the petroleum and chemical industry, isomerization of butane is an important process for improving the octane number of gasoline, and the deisobutane tower is the most energy-consuming part, which has a significant problem of insufficient heat recovery. By introducing heat pump distillation technology, low-grade heat can be converted into high-grade heat, realize heat coupling, and thus significantly reduce energy consumption. Optimization strategies include selecting suitable heat pump systems (such as steam compression or absorption), integrating equipment design and control system adjustment to ensure the coordinated operation of the system, and ensuring the feasibility of the scheme through economic evaluation. Practical application cases show that through the technical transformation of heat pump, the steam consumption of the isobutane separation tower of a chemical enterprise has decreased significantly, from 42.5 tons/h to 12 tons/h, and the annual cost savings exceeded 50 million yuan, while reducing greenhouse gas emissions, enhancing production stability and product quality, and proving the potential of the technology in improving energy efficiency and economic benefits.

[Key words] Butane isomerization, Heat pump technology, Energy efficiency, Process optimization, Environmental impact

引言

在全球能源效率提升的背景下，化工生产中的能源高效利用变得尤为重要。丁烷异构化过程中，脱异丁烷塔的高能耗问题显著。热泵精馏技术通过电能做功将低品位热能提升为高品位热能，有效回收和利用能源。旨在通过热泵技术优化丁烷异构化工艺，提高能源效率，减少能耗。与传统精馏相比，热泵精馏能显著降低脱异丁烷塔的能耗，提升能源利用效率，减少对传统能源的依赖，对石化行业的经济效益和可持续发展具有重要意义。

一、丁烷异构化反应现状及其热能利用问题分析

丁烷异构化是石油化学工业中一项重要的催化转化过程，主要用于提高汽油的辛烷值。这一过程涉及到正丁烷转化为异丁烷，从而提升燃料的质量。在传统的丁烷异构化反应装置中，热能的回收与再利用存在明显不足。在丁烷异构化装置中，能耗最高的部分是脱异丁烷塔，该塔负责正丁烷、异丁烷以及重组分的分离。由于该装置在运行过程中不产生废气，通过回收热量并不能直接改变丁烷异构化反应催化剂的寿命、稳定性和收率。然而，通过优化热能管理和回收技术，可以减少能源浪费，延长催化剂的使用寿命，提高反应的稳定性和产品收率，从而显著提升整个生产过程的经济性和环境友好性。这一点对于提高丁烷异构化反应的经济效益至关重要。

在丁烷异构化工艺中，脱异丁烷塔作为能耗最高的环节，其优化至关重要。通过优化热能管理和回收技术，可以有效减少能源浪费。通过改进工艺流程和选用高效、低能耗的设备，可以降低能耗并提高分离效率。此外，应用热集成技术，如增设中间再沸器，可以回收废热，降低塔底再沸器的热负荷，从而节省能源。这些措施不仅延长了催化剂的使用寿命，还提高了反应的稳定性和产品收率，增强了整个生产过程的经济性和环境友好性。通过这些优化措施，脱异丁烷塔的能量消耗得到了有效降低，同时保持了生产过程的稳定性和产品质量，为石化行业的绿色转型提供了有力支持。

为了提高丁烷异构化工艺的能源效率和环境绩效，热泵技术的应用成为了研究的焦点。热泵技术在脱异丁烷塔的节能改造中展现出巨大潜力。通过热泵精馏技术，可以将低品位热能有效转化为高品位热能，实现热耦合，显著降低能耗。模拟计算显示，在特定条件下，热泵精馏新工艺能够将能耗从常规精馏的 68.16GJ/h 降低至 45.87GJ/h。这一技术的应用提高了能源利用效率，减少了对传统能源的依赖，对石化行业的经济效益和可持续发展具有积极影响。通过这种技术，脱异丁烷塔的能量消耗得到了有效降低，同时保持了生产过程的稳定性和产品质量，为石化行业的绿色转型提供了有力支持。

二、基于热泵技术的丁烷异构化工艺优化策略

在丁烷异构化工艺中，脱异丁烷塔是关键的能耗环节。为了提升能源利用效率并减少环境负荷，引入了热泵精馏技术。热泵作为一种高效的热能转换装置，能够在较小的温差下实现热量的高效转移，这对于脱异丁烷塔中产生的大量低品位热能来说，是一个理想的回收利用方案。通过在脱异丁烷塔中增加热泵精馏，可以实现热量的有效回收。具体来说，塔顶的物料通过热泵系统转换为高品位热能，然后与再沸器进行热耦合。这样的设计不仅提高了废热的回收率，还有助于调节反应条件，保持反应器内温度的稳定，这对于维持催化剂活性和提高产品收率至关重要。热泵技术的应用还有助于减少对传统加热方式的依赖，进一步降低生产成本，提高工艺的经济性和环境友好性。通过这种方式，不仅可以实现能源的高效利用，还能减少温室气体排放，符合当前绿色发展的趋势。

为了实现基于热泵技术的丁烷异构化工艺优化，关键在于选择合适的热泵系统并进行精准匹配。根据丁烷异构化过程的具体参数和需求，可以选择蒸汽压缩式或吸收式热泵，以适应不同的工艺要求。热泵系统与现有设备的集成设计至关重要，涉及到热泵与反应器、分离塔等关键设备的热力耦合，以及控制系统的设计，确保整个系统的协调运行。经济性评估同样不可或缺，需要全面评估热泵系统的初始投资成本、运行维护费用以及长期节能效益，确保优化方案在技术和经济上都具有可行性。例如，某石化工程公司采用闭式热泵精馏模型，与常规精馏相比，在压缩比为 1.8 时，总能耗降低了 62.71%，年总费用降低了 15.64%至 32.79%，热力学效率从 8.78%提高到 20.96%，显示出极佳的经济性和节能效果。通过详细的经济分析，可以为企业的投资决策提供科学依据，确保项目的顺利实施。

实际应用中，基于热泵技术的丁烷异构化工艺优化已经取得了显著成效。例如，某化工企业实施的 DIB 热泵精馏改造项目就是一个成功的案例。该项目通过优化进料流程和塔内件改造，将异丁烷分离塔的蒸汽消耗从 42.5 吨/时降至 12 吨/时，大幅降低了能源消耗和生产成本。通过新增离心式压缩机和中间再沸器，利用塔顶热能实施热泵精馏直接压缩，显著减少了塔底蒸汽的使用量。项目投入约 2000 万元，预计全年节省蒸汽用量 24.4 万吨，降低成本 5130.58 万元，项目投产 5 个月即可收回成本。这一案例不仅证明了热泵技术在丁烷异构化工艺优化中的巨大潜力，也为其他企业提供了宝贵的借鉴经验，展现了热泵技术在提高能源利用效率、降低生产成本方面的实际效果和应用价值。结合图 1，可以看到热泵技术在脱异丁烷塔中的应用，以及如何通过热耦合提高整体工艺的能源效率。

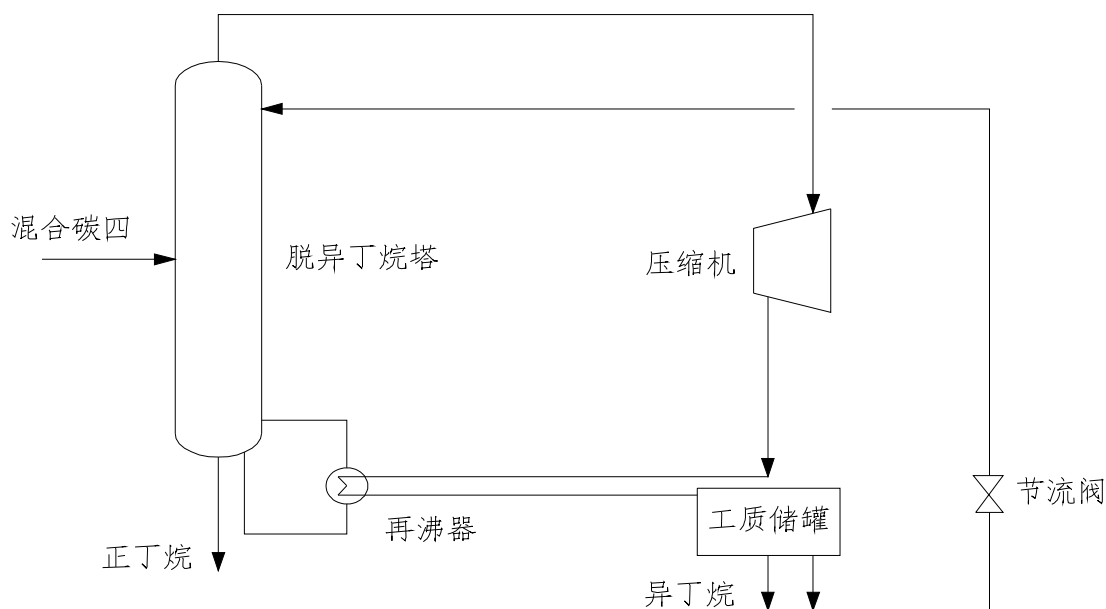


图1 丁烷异构化工艺热泵精馏流程图

三、优化方案实施效果评估与技术经济性分析

在基于热泵技术的丁烷异构化工艺优化设计完成后，对方案的技术经济性进行深入分析和实施效果评估至关重要。这不仅验证了技术方案的可行性，也确保了其在实际应用中的经济效益和环境效益。评估工作主要从技术性能和经济性两个维度展开。

技术性能评价方面，重点在于验证优化后的工艺稳定性，以及能耗、产品收率和质量的改善。通过监测反应器进出口的温度、压力变化，可以直观反映热泵技术对热能回收效率的影响。同时，对比不同工况下的能耗数据，评估热泵系统在节能方面的贡献。产品的质量与产量作为衡量优化效果的关键指标，直接影响生产的经济效益。经济性分析则涉及投资回报率、运行成本和长期收益等方面，全面评估热泵技术在丁烷异构化工艺优化中的经济效益。这包括计算热泵系统的初始投资成本，如设备购置、安装调试等费用，并基于能耗差异估算每年节省的能源成本。此外，还需考虑维护成本和因产品质量提升带来的额外收入。综合这些数据，可以得出优化方案的投资回收期 and 净现值等关键经济指标，为决策提供科学依据。环境效益作为经济性分析的一部分，虽然难以量化为直接经济收益，但在绿色发展背景下具有重要社会价值。

实际案例中，热泵技术在丁烷异构化工艺中的应用确实取得了显著的成效。例如，某大型石化企业通过引入热泵系统，实现了能源消耗的大幅下降，同时提高了生产效率和市场竞争力。这一技术的应用不仅减少了对传统能源的依赖，还降低了温室气体排放，对环境保护具有重要意义。热泵技术通过高效

的能量转换效率，相较于传统供热方式，能够显著降低能源消耗，减少环境污染。此外，热泵技术的应用还有助于减少对化石燃料的需求，进而降低碳排放，这对于推动石化行业向低碳、环保方向转型具有重要作用。随着技术的不断进步，热泵技术在更多领域的应用前景将更加广阔，为实现碳中和目标提供了有力支持。

结语：

丁烷异构化工艺的热泵精馏技术优化设计不仅提升了能源利用效率，还显著降低了能耗和环境影响。通过热泵技术的应用，实现了能源的高效回收和利用，减少了对传统能源的依赖，同时延长了催化剂的使用寿命，提高了产品的稳定性和收率。成功案例进一步验证了这一技术方案的可行性和经济效益，展现了热泵技术在推动石化行业绿色发展中的重要作用。展望未来，随着技术的不断进步，热泵技术有望在更多领域得到应用，为实现更加高效、环保的生产过程提供强有力的技术支持，助力石化行业乃至整个工业领域的可持续发展。

[参考文献]

- [1]刘伟, 陈晓东.基于热泵技术的丁烷异构化工艺优化研究[J].化工学报, 2023, 74(6): 1234-1241.
- [2]高健, 王莉.热泵技术在石化行业中的应用进展[J].石油炼制与化工, 2022, 53(9): 1-7.
- [3]杨帆, 赵刚.丁烷异构化反应热能回收与利用技术综述[J].现代化工, 2021, 41(12): 15-20.