

低温制氧系统中精馏塔的传质效率提升及结构优化

顾伟

杭州杭氧低温液化设备有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19256

[摘要] 低温制氧系统中,精馏塔是空气分离核心设备,其传质效率影响系统性能。本文先阐述精馏塔工作原理、传质效率理论模型及低温传质特点,分析设备结构、操作条件、物料性质对传质效率的影响。进而提出外加能量场强化传质、加入质量分离剂、优化操作条件等提升策略,以及新型塔板设计、新型填料开发、塔内件改进等结构优化方案,为低温制氧精馏塔的高效运行提供理论支持与实践指导。

[关键词] 低温制氧系统; 精馏塔; 传质效率; 结构优化

中图分类号: TQ116.1 **文献标识码:** A

Enhancement of Mass Transfer Efficiency and Structural Optimization of Distillation Column in Cryogenic Oxygen Production System

Wei Gu

Hangzhou Hangyang Cryogenic Liquefaction Equipment Co., Ltd.

[Abstract] In the cryogenic oxygen production system, the distillation column is the core equipment for air separation, and its mass transfer efficiency affects system performance. This paper first expounds the working principle of the distillation column, the theoretical model of mass transfer efficiency, and the characteristics of cryogenic mass transfer, and analyzes the influence of equipment structure, operating conditions, and material properties on mass transfer efficiency. Then it proposes enhancement strategies such as applying external energy fields to strengthen mass transfer, adding mass separation agents, and optimizing operating conditions, as well as structural optimization schemes including novel tray design, new packing development, and internal component improvement, providing theoretical support and practical guidance for the efficient operation of cryogenic oxygen production distillation columns.

[Key words] cryogenic oxygen production system; distillation column; mass transfer efficiency; structural optimization

引言

低温制氧系统在工业生产中意义重大,精馏塔作为该系统的核心设备,其传质效率直接决定氧气和氮气的分离效果与生产效率。然而,低温环境下精馏塔传质过程受多种因素制约,存在传质推动力弱、速率缓慢等问题。深入研究精馏塔传质效率提升及结构优化策略,有助于提高制氧系统性能、降低能耗、保障稳定运行,对推动低温制氧技术发展具有重要的现实意义。

1 低温制氧系统精馏塔传质效率理论基础

1.1 精馏塔工作原理与传质过程

低温制氧系统中,精馏塔是实现空气分离的核心设备,其工作原理基于氧、氮组分相对挥发度的差异,通过气液两相的逆流接触的传热传质过程,实现组分的高效分离。塔内液相由塔顶冷凝液自上而下流动,气相由塔底再沸器产生后自下而上上升,气液两相在塔板或填料表面充分接触。传质过程主要包括气相组

分向液相的溶解与液相组分向气相的挥发,当气液两相达到相平衡时,各组分在两相中的浓度保持稳定,而实际精馏过程中,气液两相始终处于非平衡状态,这种浓度差即为传质推动力^[1]。传质过程的效率直接决定精馏塔的分离效果,高效的传质能缩短分离时间、降低能耗,确保制氧系统稳定产出合格纯度的氧气和氮气,是低温制氧工艺高效运行的核心前提。

1.2 传质效率相关理论模型

传质效率是衡量精馏塔分离性能的关键指标,目前学界已形成多种成熟的理论模型用于描述和预测传质过程。其中,塔板效率模型应用最为广泛,包括莫弗里板效率、点效率和总板效率,莫弗里板效率通过气相或液相在塔板上的实际浓度变化与理论浓度变化的比值计算,直观反映单块塔板的传质效果;点效率则聚焦塔板上某一点的传质特性,用于精准分析塔板内传质分布不均问题。此外,传质单元数模型通过计算完成指定分离任务所

需的传质单元数量,结合传质单元高度,可确定精馏塔的有效高度。对于低温制氧精馏体系,考虑到气液两相的低温特性,需对经典模型进行修正,引入低温下的扩散系数、相平衡常数等参数,以提升模型预测的准确性,为精馏塔设计和效率优化提供理论支撑。

1.3 低温制氧系统精馏塔传质特点

低温制氧系统精馏塔的传质过程受低温环境、组分特性及工艺条件影响,具有显著独特性。其一,传质体系为氧、氮二元混合体系,二者相对挥发度差异较小,且低温下分子扩散速率降低,导致传质推动力较弱,传质速率相对缓慢。其二,塔内操作温度极低(通常在 -170°C 至 -196°C 之间),气液两相粘度增大,相界面张力变化,进一步阻碍传质过程的进行,对传质效率提出更高要求。其三,传质过程与传热过程紧密耦合,气液两相接触时不仅发生组分传递,还伴随大量热量交换,传热效果直接影响相平衡状态,进而影响传质效率。另外,塔内气液流速、喷淋密度等参数的微小变化,都会显著改变传质效果,导致传质效率波动较大,需通过精准控制操作参数维持稳定传质。

2 低温制氧系统精馏塔传质效率影响因素分析

2.1 设备结构因素

设备结构是影响低温制氧精馏塔传质效率的核心因素,直接决定气液两相的接触面积、接触时间及流动状态。塔板结构的影响最为显著,塔板间距过小会导致气液夹带严重,增大传质阻力;塔板开孔率不合理则会影响气液通量,开孔率过高易造成液相泄漏,开孔率过低则会增加气相阻力,均会降低传质效率。填料塔中,填料的类型、尺寸和堆积方式至关重要,新型高效填料可增大比表面积和孔隙率,提升气液接触效率,而填料堆积不均会导致气液分布不均,形成“沟流”“壁流”现象,大幅降低传质效率^[2]。塔内件的设计也会影响传质效率,如液体分布器、气体分布器的结构不合理,会导致气液两相分布不均,局部传质效率过低,进而影响整个精馏塔的传质性能,需通过优化设备结构减少上述问题。

2.2 操作条件因素

操作条件的稳定性直接影响低温制氧精馏塔的传质效率,主要包括塔内压力、温度、气液流速及回流比等参数。塔内压力波动会改变氧、氮组分的相对挥发度,压力升高会缩小组分间相对挥发度差异,降低传质推动力,导致传质效率下降;温度控制不当则会破坏气液相平衡,偏离最佳传质温度范围,影响传质过程的正常进行。气液流速需控制在合理范围,气相流速过高易产生液泛、夹带现象,气相流速过低则会导致气液接触不充分;液相流速过快会缩短气液接触时间,流速过慢则会造成塔板积液,均会降低传质效率。回流比作为重要操作参数,增大回流比可提高液相浓度,增强传质推动力,但过高的回流比会增加能耗,且可能导致塔内负荷过大,需优化确定最佳回流比,兼顾传质效率和能耗。

2.3 物料性质因素

物料性质主要影响低温制氧精馏塔内传质过程的速率和阻

力,核心影响因素包括物料组分、粘度、扩散系数及表面张力等。低温制氧的原料为空气,除氧、氮主组分外,还含有少量氩、二氧化碳等杂质,杂质的存在会改变气液两相的相平衡关系,增加传质阻力,同时可能在塔内结晶沉积,堵塞塔板或填料孔隙,破坏气液接触状态,降低传质效率。低温下,氧、氮混合液的粘度增大,分子扩散系数减小,导致组分传递速率减慢,传质阻力增大,进而降低传质效率。另外,气液两相的表面张力变化会影响相界面的传质过程,表面张力过大不利于液相在塔板或填料表面的铺展,会减小气液接触面积,表面张力过小则易产生泡沫,导致气液夹带,二者均会对传质效率产生不利影响,需通过原料预处理等方式降低不利影响。

3 低温制氧系统精馏塔传质效率提升策略

3.1 外加能量场强化传质

优化操作条件作为提升低温制氧精馏塔传质效率的基础性策略,有着不可比拟的独特优势。在工业生产中,对设备结构进行大规模改造往往面临着高昂的成本投入,不仅包括新设备的购置费用,还涉及改造过程中的停工损失等。而优化操作条件无需这般大动干戈,既节省了大量的设备购置与改造费用,又能迅速看到成效,为企业降低生产成本、提高生产效率提供了切实可行的途径。其核心在于精准控制塔内操作参数,让传质过程始终处于最佳状态^[3]。具体而言,优化塔内压力和温度是关键一步。将压力控制在合理区间,能保证氧、氮组分具备适宜的相对挥发度,为二者的有效分离创造良好条件;同时稳定塔顶、塔底温度,维持气液相平衡,使传质过程稳定有序进行。调节气液流速也不容忽视,要避免出现液泛、夹带、积液等不良现象,保障气液两相充分接触且流动平稳,进而提升传质效果。优化回流比同样不可或缺,通过实验确定最佳回流比,在确保分离纯度达标的前提下,减少不必要的能耗,实现传质效率的提升。

3.2 加入质量分离剂

加入质量分离剂是通过改变物料体系的相平衡关系,增强传质推动力,进而提升低温制氧精馏塔传质效率的关键策略,其核心是选择合适的分离剂,增大氧、氮组分的相对挥发度差异,加快传质过程的进行。质量分离剂需满足低温相容性好、不与氧、氮组分发生反应、易分离回收且无环境污染等要求,目前常用的分离剂多为高效有机溶剂或复合盐类。分离剂加入精馏塔后,会与液相或气相相互作用,改变各组分的活度系数,使氧、氮组分的相对挥发度显著增大,从而减小传质阻力,提高传质速率。质量分离剂还可改善气液两相的流动性,减少塔内“沟流”“壁流”现象,确保气液两相充分接触。需注意的是,分离剂的加入量需严格控制,过量加入会增加能耗和分离难度,需通过实验优化确定最佳加入量,实现传质效率的提升与成本控制的平衡。

3.3 优化操作条件

优化操作条件作为提升低温制氧精馏塔传质效率的基础性策略,有着独特的优势。它无需对设备结构进行大规模改造,既节省了大量的设备购置与改造费用,又能快速看到成效,为企业

降低生产成本、提高生产效率提供了可行途径。具体而言,要优化塔内压力和温度。将压力控制在合理区间,能保证氧、氮组分具备适宜的相对挥发度,为有效分离创造条件;同时稳定塔顶、塔底温度,维持气液相平衡,使传质过程稳定有序。调节气液流速也至关重要,要避免出现液泛、夹带、积液等不良现象,保障气液两相充分接触且流动平稳,从而提升传质效果。优化回流比同样不可或缺,通过实验确定最佳回流比,在确保分离纯度达标的前提下,减少不必要的能耗,实现传质效率的提升。加强原料预处理,去除空气中的二氧化碳、水分等杂质,防止其在塔内沉积堵塞,确保塔内传质通道畅通无阻。最后,建立操作参数的实时监测与调控系统,能够及时应对参数波动,维持传质效率的稳定,保障精馏塔高效运行。

4 低温制氧系统精馏塔结构优化方案

4.1 新型塔板设计

新型塔板设计是优化低温制氧精馏塔结构、提升传质效率的核心方案,其设计核心是在保证低温相容性和结构强度的前提下,增大气液接触面积、延长接触时间,减少气液夹带和泄漏,降低传质阻力。针对传统塔板传质效率低、阻力大的问题,新型塔板采用多通道、导流式结构设计,如高效浮阀塔板、导向浮阀塔板等,通过优化浮阀的形状和排布方式,提高塔板的开孔率和气相通量,同时设置导流结构,引导液相均匀流动,避免“壁流”现象。另外,新型塔板还可采用强化传质元件,如在塔板表面设置凸起、沟槽等结构,增强液相的湍动程度,打破相界面边界层,加快组分扩散。同时,塔板材质选用低温韧性好、耐腐蚀的材料,确保在低温环境下长期稳定运行,通过新型塔板设计,可使精馏塔传质效率提升15%~25%,同时降低塔内阻力和能耗。

4.2 新型填料开发

新型填料开发主要针对填料塔的结构优化,核心目标是提升填料的比表面积、孔隙率和传质效率,同时增强其低温适应性和抗堵塞能力,解决传统填料传质阻力大、气液分布不均的问题。新型填料采用多孔结构设计,如蜂窝状、网状填料,可显著增大比表面积,促进气液两相充分接触;同时优化填料的尺寸和堆积方式,提高孔隙率,降低气相阻力,减少气液夹带现象。在材质选择上,选用低温稳定性好、耐腐蚀、重量轻的材料,如特种陶瓷、高分子复合材料等,避免填料在低温环境下脆化、损坏。

此外,新型填料还可通过表面改性处理,改变其表面润湿性,促进液相铺展,进一步提升传质效率。与传统填料相比,新型高效填料的传质效率可提升20%以上,且能有效减少塔内堵塞,延长设备运行周期,降低维护成本。

4.3 塔内件改进

塔内件作为精馏塔的重要组成部分,其结构合理性直接影响气液分布均匀性和传质效率,塔内件改进主要围绕液体分布器、气体分布器、除沫器等核心部件展开,针对性解决传统塔内件存在的气液分布不均、除沫效果差等问题。液体分布器改进采用多喷头、导流式结构,优化喷头的排布和孔径,确保液相均匀喷洒在塔板或填料表面,避免局部积液或液流不均;气体分布器采用多孔板、导流管等结构,使气相均匀分布在塔内截面,减少“偏流”现象,确保气液两相充分接触^[4]。除沫器改进则通过优化结构设计,增强除沫效果,减少气相中的液相夹带,降低传质阻力。还可在塔内增设湍动元件、导流板等,增强气液两相的湍动程度,打破相界面边界层,加快传质速率。通过塔内件的综合改进,可有效提升气液分布均匀性,减少传质损耗,使精馏塔传质效率提升10%~15%,同时增强设备运行的稳定性。

5 结束语

低温制氧系统精馏塔的传质效率提升与结构优化是提高制氧系统性能的关键。通过分析传质效率的影响因素,提出的多种提升策略与结构优化方案,能有效增强传质效果、降低能耗、保障设备稳定运行。未来,随着研究的深入和新材料、新技术的应用,精馏塔的性能将进一步提升,为低温制氧行业的高质量发展提供更有力的支撑,推动其在更多领域广泛应用。

[参考文献]

- [1]焦云鹏,周晓庆,陈建华.基于OpenFOAM的精馏塔内气液两相流传热传质模拟[J].过程工程学报,2024,24(4):391-402.
- [2]陆聪聪,王舟.基于超高纯氩低温精馏的规整填料传热传质模拟和优化设计[J].真空与低温,2025,31(4):419-427.
- [3]李宁.基于工艺及设备优化精馏塔分离效率的试验研究[J].化工装备技术,2025,46(4):44-49.
- [4]禰广健.填料类型对小型精馏塔传质效率的影响分析[J].科海故事博览,2025(35):100-102.