

空分装置氮气回收利用工艺优化与应用

刘 倩

大唐内蒙古多伦煤化工有限责任公司 内蒙古锡林郭勒盟 027300

摘 要: 氮气作为一种重要的工业气体,广泛应用于化工、冶金、电子、食品保鲜等多个领域。大型空分装置(ASU)在制氧的同时会副产大量氮气,其回收利用对于提高能源效率、降低生产成本、减少资源浪费具有重要意义。本文针对现有空分装置氮气回收利用中存在的能耗偏高、回收率有限、系统匹配性不足等问题,开展了工艺优化研究。通过分析氮气在空分装置中的产生流程、现有回收方式及其局限性,提出了基于变压吸附(PSA)技术或优化膨胀机制结合氮气液化/储存的改进工艺方案。研究重点探讨了优化氮气提取压力、改进分离纯化流程、优化储运方式等关键技术措施,旨在提高氮气回收效率,降低单位氮气生产能耗。结合某实际空分装置的应用案例分析,验证了优化工艺在提升氮气回收率、降低综合能耗方面的有效性和经济性。

关键词: 空分装置; 氮气回收; 工艺优化; 变压吸附(PSA); 能耗; 回收率

引言

空分装置是现代工业中用于分离空气获得氧气、氮气及氩气等气体产品的关键设备,广泛应用于钢铁、化工、医疗、能源等领域。在空分装置的生产过程中,根据产品需求(如内压缩流程制氧),通常会伴随产生大量副产氮气。氮气作为一种惰性气体,在工业上具有广泛的用途,例如用于设备保护、置换、气氛控制、食品包装、深冷冻结等。然而,许多空分装置在运行中,部分副产氮气未能得到有效回收利用,直接放空不仅造成了宝贵资源的浪费,也增加了生产过程中的能量损失和环境负担。特别是在能源价格波动、企业降本增效压力增大的背景下,如何提高空分装置副产氮气的回收利用率,降低综合生产成本,已成为业界关注的重要课题。

一、空分装置与氮气回收技术概述

(一) 空分装置基本原理与流程

空分装置(Air Separation Unit, ASU)是现代工业中用于分离空气以获取氧气、氮气及氩气等组分的关键设备,广泛应用于钢铁、化工、医疗、能源等领域。其基本原理是利用空气中各组分沸点不同的物理特性,通过深冷(低温)方法将空气液化,然后在精馏塔内进行多次部分汽化和部分液化的气液平衡过程,最终实现氧气、氮气、氩气等组分的有效分离。典型的空分装置流程主要包括空气压缩与净化、空气冷却与液化、精馏分离以及产品提取与气化四个核心步骤。首先,将吸入的

常温常压空气经多级压缩机增压,并通过分子筛等净化设备去除其中的水分、二氧化碳和烃类等杂质。随后,净化后的高压空气进入板式换热器被深度冷却,直至接近液化温度,部分或全部液化。接着,低温液空进入精馏塔系统(通常包括下塔、上塔和氩塔),利用氮(-195.8℃)和氧(-183℃)沸点差异,通过多次精馏过程实现高效分离。最后,分离得到的液氧、液氮、液氩等液态产品经过节流阀降压气化,成为气态产品输出,供用户使用。

(二) 副产氮气的产生与特性

在空分装置的精馏分离过程中,根据产品需求(例如采用内压缩流程制氧时),通常会产生大量副产氮气。副产氮气主要在上塔顶部富集并抽出,其产生量和组成与空分装置的流程设计、产品结构(如氧气产量、氩气产量)以及操作工况密切相关。例如,在内压缩流程中,由于氧气产品通过液氧泵输送,上塔压力相对较低,副产氮气的压力也较低;而在传统的常温精馏流程中,副产氮气压力可能相对较高。副产氮气的特性主要包括其压力、温度、纯度以及流量等方面。其压力通常取决于抽气点的位置和系统的操作压力,可能从低压(如几十kPa)到中压(如几百kPa)不等。温度一般在低温状态(如-180℃左右)抽出,需经过换热或气化后才能使用。纯度通常较高,一般能达到99.5%以上,甚至可达99.999%的纯度等级,但可能含有少量氩气、氦气等稀有气体杂质。流量则随空分装置的规模和产品结构变化,

对于大型空分装置，副产氮气的回收量可能非常可观，若不加以回收利用，直接放空将造成巨大的资源浪费。

（三）氮气回收利用的必要性与价值

空分装置副产氮气的回收利用具有显著的必要性和多方面的价值。首先，从资源利用角度看，氮气作为一种重要的工业基础气体，在化工合成（如合成氨、硝酸）、金属保护（如冶金行业的炉体保护、焊接保护）、食品保鲜（如食品包装、充氮防腐）、电子工业（如半导体制造过程中的气氛保护）、医疗领域（如呼吸混合气制备）以及能源存储（如压缩空气储能系统）等方面均有广泛应用。因此，有效回收利用空分装置产生的副产氮气，可以满足工业生产中对氮气的需求，减少对外部氮气供应商的依赖，变废为宝，避免宝贵资源的直接放空浪费。其次，从经济效益角度看，回收利用副产氮气可以替代从外部购买液氮或高压氮气的成本，直接降低企业运营费用，提高经济效益。通过优化回收工艺，提高回收率和纯度，企业可以获得额外的经济收益。再者，从能源效率和环境保护角度看，副产氮气的回收利用过程本身可能需要消耗一定的能量（如压缩、液化等），但如果能将其用于替代高能耗的制氮方式，或通过回收过程中的能量集成优化，可以提升整个空分装置乃至企业的综合能源利用效率。

二、空分装置氮气回收工艺优化研究

（一）现有氮气回收工艺分析

对现有空分装置氮气回收工艺进行全面深入的分析是进行优化的基础。目前，许多空分装置的副产氮气处理方式较为简单，部分装置直接将其放空，这不仅浪费了资源，也造成了冷量和能量损失。一些装置可能采用简单的低压氮气回收策略，通过管道输送给厂区内近距离用户，但这种方式受限于氮气压力低、纯度可能波动、输送距离短等问题，回收效率和应用范围有限。部分装置则采用了氮气液化技术，将副产氮气液化后储存或外运，虽然提高了氮气的储存和运输灵活性，但传统液化工艺往往能耗较高，设备投资较大，且低温操作对维护要求高，可能未能达到最优的经济性和能效水平。此外，虽然变压吸附（PSA）技术在氢气提纯等领域应用广泛，但在空分副产低压氮气回收中的规模化应用尚不普遍，现有若有应用，可能在吸附剂选择、工艺参数优化、系统匹配性等方面存在提升空间。分析发现，现有工艺普遍存在回收率不高、能耗偏高、产品纯度难以精确控制或系统复杂、投资成本较高等一个或多个问题，这些瓶

颈限制了氮气回收利用的经济效益，亟需通过工艺优化加以改进。

（二）基于PSA技术的氮气回收工艺优化方案

变压吸附（PSA）技术为空分装置副产低压氮气回收提供了一种有前景的优化路径。PSA技术利用特定吸附剂（如碳分子筛CMS）对混合气体中不同组分的吸附特性差异，在加压时吸附杂质气体（如氧气、氩气等），使氮气通过；在减压时脱附被吸附的杂质，使吸附剂再生，从而实现氮气的提纯回收。针对空分副产低压氮气（通常压力较低，如几十kPa至几百kPa）的特点，设计优化的PSA氮气回收方案时，需重点考虑：一是优化吸附剂的选择与改性，开发或选用对目标氮气具有高选择性、高吸附容量且成本低的吸附材料；二是优化工艺参数，如确定最佳的工作压力范围（利用现有副产压力或适度增压）、优化吸附与解吸时间、床层切换频率等，在保证产品纯度的前提下最大化回收率并降低能耗；三是优化系统配置，如采用多床交替运行以实现连续产气，设计高效的缓冲罐以稳定气流和压力，优化解吸再生方式（如采用真空解吸VSA或变压吸附PSA组合）提高效率。

（三）基于空分流程改进的氮气回收优化

优化空分装置本身的设计和运行参数，是提高氮气回收效率和降低回收过程能耗的源头性策略。通过对空分精馏系统的模拟与优化，可以调整关键操作参数，如优化上塔的回流比，在满足主要产品（氧气或液氧）需求的同时，可能更有利于氮气在上塔的富集和抽出，提高副产氮气的纯度和回收率。研究不同氮气抽出口的位置和压力设定，选择最优的抽气点，以获得所需纯度的氮气，同时尽量减少对主产品产量和能耗的影响。此外，考虑优化空分装置的膨胀机制，如采用更高效的膨胀机或优化膨胀过程，不仅有助于降低空分装置本身的能耗，也可能间接增加副产氮气的产量或提高其压力水平，为后续回收利用创造更有利的条件。

（四）氮气液化与储存工艺优化

对于需要长期储存或远距离运输的副产氮气，液化与储存是重要的回收利用方式，对其进行工艺优化至关重要。氮气液化工艺的优化主要聚焦于降低单位能耗和提高系统效率。这包括优化液化循环选择，例如比较节流循环、带膨胀机循环（如Brayton循环）或混合循环等在不同工况下的能效表现，选择最适合副产氮气压力和温度条件的循环类型。强化换热器网络的设计与优化是另一关键点，通过采用更高效的板式换热器、优化流道

布局 and 匹配, 最大限度地回收和利用低温冷量, 减少外部输入功的消耗。优化储罐设计也是降低成本和减少损失的重要环节, 采用先进的绝热技术 (如真空多层绝热、超级绝热等) 和优化储罐结构, 有效降低液氮的蒸发损失, 提高储存效率。

三、优化工艺的经济性评价与效益分析

(一) 经济性评价方法与指标

对空分装置氮气回收优化方案进行经济性评价, 是判断其可行性和效益高低的关键环节。科学合理的评价方法与指标体系是进行准确评估的基础。评价方法上, 应采用定量分析与定性分析相结合的方式。定量分析主要依托成本效益分析法, 详细核算方案的实施成本与预期效益, 常用的方法包括投资回收期法、净现值 (NPV) 法、内部收益率 (IRR) 法以及盈亏平衡分析法等, 这些方法能够从不同角度反映项目的经济效益。指标体系构建应全面覆盖投入与产出两个方面。投入指标主要包括: 初始投资成本 (设备购置费、安装调试费、土建费等)、运营成本 (电力消耗、维护保养费、人员工资、水费等)。产出指标则体现为回收的氮气产品价值, 其计算可基于市场售价、替代外部购买氮气的成本节约或应用带来的价值提升。此外, 还应引入反映能效水平的指标, 如单位产品能耗 (如生产单位氮气消耗的电能、冷量等), 以及反映资源利用效率的指标, 如氮气回收率。构建一个包含投资、成本、效益、能效等多维度的综合评价指标体系, 能够全面、客观地评估不同氮气回收优化方案的经济性表现, 为决策提供可靠依据。

(二) 优化方案的成本效益分析

对提出的各项氮气回收优化方案进行深入的成本效益分析, 是经济性评价的核心内容。首先, 需详细测算各优化方案的实施成本, 包括方案所需的设备投资费用 (如PSA吸附剂及设备、液化换热器、储罐等购置与建设费用)、安装调试费用以及运行维护费用 (如电费、备件消耗、人工成本等)。其次, 准确核算各方案带来的效益。主要效益来源是回收的氮气产品所带来的价值, 这可以体现为直接的销售收入 (如果氮气对外销售), 或替代购买外部氮气/液氮所节省的成本 (如果氮气用于企

业自身)。效益分析还应考虑方案可能带来的其他间接效益, 如通过系统优化实现的空分装置整体能效提升、减少温室气体排放带来的环境效益 (如果纳入碳市场, 可进一步折算为经济效益)、提升企业形象等。通过对比分析各方案的成本投入与预期效益, 计算关键经济指标 (如单位成本、投资回收期、净现值等), 并结合项目具体的经济承受能力和市场条件, 评估不同方案的经济可行性, 筛选出综合效益最优的方案。

结束语

综上所述, 对空分装置氮气回收利用工艺进行优化是提高资源利用率、降低生产成本、促进企业可持续发展的重要举措。本文通过分析现有氮气回收技术的局限性, 提出了包括采用变压吸附 (PSA) 技术、优化膨胀机制、改进氮气纯化与液化流程等在内的工艺优化方案, 并探讨了优化操作参数、改进系统匹配等具体措施。理论分析与实际应用案例表明, 经过优化后的氮气回收工艺, 能够有效提高氮气的回收率和纯度, 显著降低单位氮气产品的能耗, 为企业带来可观的经济效益和环境效益。然而, 氮气回收工艺的优化需要结合具体空分装置的工况、规模、产品结构以及氮气市场需求等因素进行综合评估和设计。未来, 随着材料科学、控制技术以及氢能等新能源领域的发展, 空分装置副产氮气的回收利用技术有望进一步创新, 例如开发更高效低能耗的分离材料、实现与氢能产业链的耦合利用等。

参考文献

- [1] 韩双玲. 基于数据挖掘的空分装置工艺仿真与工艺参数优化 [D]. 山东大学, 2019.
- [2] 党伟. 空分装置贫氮氩液氧系统工艺流程简述及调试总结 [J]. 低温与特气, 2024, 42 (05): 41-42+45.
- [3] 陆君君, 王永健. 空分装置的工艺路线及设备选型分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12 (02): 258-260.
- [4] 张小双, 姚雅诺. 空分装置工艺路线选择及设备选型 [J]. 化工管理, 2021, (21): 107-108.