

# 现代空气分离工艺中的能耗分析与节能技术研究

田松涛 徐卫东

浙江巴陵恒逸己内酰胺有限责任公司 浙江 杭州 311200

**摘要:** 现代空气分离工艺以低温精馏为核心, 能耗主要源于压缩、冷却、精馏等环节, 其中压缩能耗占比超60%。操作参数、设备性能及环境条件显著影响能耗水平。节能技术涵盖热力学优化、设备效率提升、智能控制及新型分离技术等方向。未来, 新型吸附剂与膜材料开发、低温泵与膨胀机超导技术应用、氢-氧混合工质精馏新工艺等将成为节能突破点, 推动空分工艺向高效、低碳方向发展。

**关键词:** 空气分离; 低温精馏; 能耗分析; 节能技术

**引言:** 空气分离是化工、冶金、医疗等领域的基础工艺, 其能耗占工业用能比重较高。随着“双碳”目标的提出, 降低空分工艺能耗成为行业迫切需求。现代空分工艺虽通过低温精馏实现了高效分离, 但高能耗问题仍制约其可持续发展。本文从能耗构成、影响因素出发, 系统分析节能技术体系, 并探讨未来发展方向, 旨在为空分工艺的节能优化提供理论支撑与技术参考。

## 1 现代空气分离工艺原理与能耗构成

### 1.1 空分工艺流程概述

现代空气分离工艺核心是基于空气各组分沸点差异的低温精馏技术, 辅以吸附预处理等环节构成完整流程。首先, 原料空气经空压机压缩至指定压力, 过程中伴随温度升高, 需通过预冷系统降温至常温; 随后进入分子筛纯化系统, 利用分子筛吸附去除水分、二氧化碳、碳氢化合物等杂质, 避免后续低温环节出现冻结堵塞。预处理后的洁净空气进入主换热器, 与精馏塔内返流产品进行换热, 冷却至接近饱和温度后进入下塔。在下塔中, 空气经精馏分离为富氧液空和纯氮, 富氧液空经节流阀降压后进入上塔, 在上塔进一步精馏得到高纯度氧气、氮气, 上塔下部氩馏分富集区抽出氩馏分气体, 进入氩系统, 经粗氩塔、精氩塔精馏得到质量合格的液氩产品。各气体产品经复热后输出<sup>[1]</sup>。整个流程通过多股物流的热量耦合与压力匹配, 实现空气组分的高效分离, 各单元设备协同运行保障工艺稳定性与产品质量。

### 1.2 能耗来源与热力学分析

空分工艺能耗主要来源于空气压缩、低温冷却、精馏分离及产品输送等核心环节, 其中空压机压缩能耗占比达60%以上, 是最主要的能耗单元。空气压缩过程遵循热力学第一定律, 压缩功转化为气体内能, 导致温度升高, 后续冷却环节需散失大量显热, 造成能量损失; 精馏分离过程中, 塔内气液两相传热传质存在不可逆温差与浓

度差, 引发有效能损失, 且回流比越大, 能耗越高。设备散热、管道阻力损失及节流降压过程中的能量损耗也不可忽视。通过热力学分析可知, 减少不可逆损失、优化能量梯级利用是降低空分能耗的核心方向, 为节能技术研发提供理论依据。

### 1.3 能效评价指标

空分工艺能效评价需采用多维度指标体系, 核心指标包括单位产品能耗、比电耗、有效能效率等。单位产品能耗是指生产单位体积或质量合格产品所消耗的总能量, 常用“kWh/Nm<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>)”表示, 直观反映工艺整体能耗水平, 是行业内最常用的对比指标。比电耗聚焦于电能消耗, 大型空分机组主要以汽机驱动, 但因基础条件不同, 蒸汽压力、温度等参数有一定差异, 为了量化能耗, 故转化为电耗指标, 该指标能精准体现电力资源利用效率, 受设备性能与操作参数影响显著。有效能效率基于热力学第二定律, 通过计算有效能输入与有效能产出的比值, 衡量能量利用的合理性, 规避了传统能耗指标无法反映能量品质的缺陷。另外, 产品回收率、设备负荷率等辅助指标也会影响能效评价, 通过多指标协同分析, 可全面评估空分工艺的节能潜力, 为工艺优化提供科学依据。

## 2 空分工艺能耗影响因素

### 2.1 操作参数影响

操作参数是影响空分工艺能耗的关键变量, 主要包括空压机出口压力、精馏塔操作压力、回流比、换热温差等。空压机出口压力直接决定压缩能耗, 压力过高会增加压缩功消耗, 过低则无法满足精馏分离需求, 需根据产品纯度要求精准匹配。精馏塔操作压力影响组分相对挥发度, 压力降低可增大相对挥发度, 减少回流比需求, 降低能耗, 但会导致塔内温度降低, 增加设备保冷难度。回流比与产品纯度正相关, 过大的回流比会提升

产品纯度，但会增加主冷凝蒸发器热负荷，显著升高能耗；过小则无法保证产品质量。换热温差是有效能损失的主要来源，温差越大，不可逆损失越大，需控制主换热器及精馏塔内传热温差在合理范围，通过优化操作参数组合，可实现能耗与产品质量的平衡。

## 2.2 设备性能影响

设备性能直接决定空分工艺的能耗水平，核心设备包括空压机组、膨胀机、精馏塔、换热器等。汽轮机作为驱动空压机等关键设备运转的动力源，其效率对空分工艺能耗有着重要影响，高效汽轮机能够将燃料燃烧产生的热能更有效地转化为机械能，减少能量在转换过程中的损失，从而降低驱动设备所需的能耗；反之，若汽轮机效率低下，会导致更多的能量以热能等形式散失，增加整体工艺的能源消耗。空压机的等温效率与绝热效率是关键指标，高效空压机可减少压缩过程中的能量损失，降低单位压缩功；若空压机出现泄漏、叶轮磨损等问题，会导致效率下降，能耗激增<sup>[2]</sup>。膨胀机作为空分工艺的冷量来源，其等熵效率直接影响制冷量产出，高效膨胀机可提升能量回收效率，减少额外制冷能耗。精馏塔的塔板效率或填料传质效率影响分离效果，高效塔内件可降低回流比需求，减少能耗；换热器的传热系数与换热面积决定换热效果，结垢、堵塞会降低传热效率，增加换热温差与能耗。设备保冷性能也会影响能耗，保冷层破损会导致冷量流失，需通过设备维护与升级提升性能。

## 2.3 环境与原料影响

环境与原料条件对空分工艺能耗具有显著影响，环境因素主要包括环境温度、湿度、大气压力，原料因素则聚焦于原料空气的组分与洁净度。环境温度升高会降低空压机吸气效率，增加压缩能耗，同时提升冷却器的冷却负荷，导致能耗上升；高湿度环境会增加预处理系统的分子筛吸附负荷，缩短吸附周期，增加再生能耗。大气压力降低会减少空压机吸气量，为保证产品产量需提升压缩压力，进而增加能耗。原料空气中杂质含量过高会加重预处理负担，增加吸附剂再生频率与能耗；若原料空气组分波动过大，会破坏精馏塔内的气液平衡，导致操作参数偏离最优值，能耗升高。自洁式过滤器需精准平衡压降与过滤精度，压降过大或过滤不足均会致使能耗攀升。

## 3 空分工艺节能技术体系与原理

### 3.1 热力学优化技术

热力学优化技术以减少不可逆损失、提升能量梯级利用效率为核心，通过工艺流程优化实现能耗降低，主

要包括夹点技术、能量集成优化、精馏塔压力优化等。夹点技术通过分析工艺系统的温焓图，确定冷热物流的换热匹配关系，最大化回收过程余热，减少外界冷量与热量输入，降低能耗。能量集成优化将空分工艺各单元的能量需求与供给进行统筹规划，实现多股物流的热量与冷量耦合利用，例如将空压机出口气体的显热用于分子筛再生，提升能量利用效率。精馏塔压力优化通过降低操作压力，增大组分相对挥发度，减少回流比，降低精馏能耗，同时结合多塔耦合技术，实现不同组分分离过程的能量共享。此类技术基于热力学第一、第二定律，从工艺本质层面减少能量损失，是空分节能的核心技术方向。

### 3.2 设备效率提升技术

设备效率提升技术通过优化核心设备结构、材料与运行状态，减少设备自身的能量损失，主要包括空压机高效叶轮技术、膨胀机高效轴承技术、精馏塔高效填料技术、换热器强化传热技术等。空压机高效叶轮采用空气动力学优化设计，减少气流扰动与摩擦损失，提升等温效率；膨胀机采用磁悬浮轴承或气浮轴承替代传统机械轴承，降低机械摩擦损失，提升等熵效率，增加冷量产出。精馏塔采用高效规整填料替代传统塔板，提升传质效率，降低回流比需求；换热器采用强化传热管、翅片结构或新型传热材料，提升传热系数，减少换热面积与换热温差，降低不可逆损失。此外，设备精准维护技术可避免因设备磨损、结垢导致的效率下降，保障设备长期高效运行，持续发挥节能效益。

### 3.3 智能控制技术

智能控制技术基于先进传感技术、大数据分析与人机智能算法，实现空分工艺操作参数的实时优化与精准调控，减少人为操作偏差与能耗浪费。通过在关键设备与物流节点安装高精度传感器，实时采集压力、温度、流量、组分等参数，构建工艺数据库；利用大数据分析技术挖掘参数间的关联规律，识别最优操作参数区间<sup>[3]</sup>。基于模型预测控制等人工智能算法，构建自适应控制系统，可根据原料条件、环境变化与产品需求，自动调整空压机转速、精馏塔回流比、换热器换热负荷等参数，实现工艺系统的动态优化。智能诊断技术可实时监测设备运行状态，提前预警设备故障与效率下降趋势，保障工艺稳定高效运行。智能控制技术通过提升操作精准度与响应速度，实现能耗与产品质量的动态平衡。

### 3.4 新型分离技术

在空气分离领域，新型分离技术成功突破了传统低温精馏技术的重重局限，它摒弃了低温精馏依赖低温环

境进行分离的原理,转而采用非低温分离原理,大幅降低了能耗,主要涵盖吸附分离技术、膜分离技术、低温等离子体分离技术等。吸附分离技术巧妙利用吸附剂对不同组分的吸附选择性差异,达成空气组分的有效分离。借助变压吸附(PSA)或变温吸附(TSA)工艺,避免传统低温精馏中大量的低温冷却与压缩操作,显著减少能耗,尤其适用于中小规模、对产品纯度要求相对不高的场景。膜分离技术则是基于不同气体组分在膜材料中渗透速率的不同来实现分离。它具有流程简洁、能耗低、设备紧凑等突出优势。通过不断研发高性能膜材料,能够进一步提升分离效率与产品纯度,从而拓展其应用范围。低温等离子体分离技术利用等离子体状态下组分的迁移差异进行分离,无需进行深度冷却,能耗相较于传统精馏技术明显降低。

#### 4 空分工艺节能未来发展方向

##### 4.1 新型吸附剂与膜材料开发(如金属有机框架材料 MOFs)

新型吸附剂与膜材料开发是提升空分分离效率、降低能耗的核心方向,其中金属有机框架材料(MOFs)因其独特的多孔结构与可调控性成为研究热点。MOFs由金属离子与有机配体构成,具有比表面积大、孔径可调、吸附选择性强等优势,可精准匹配空气组分的吸附需求,提升吸附分离效率,减少吸附剂用量与再生能耗。针对膜分离技术,研发高通量、高选择性的新型膜材料,如掺杂MOFs的复合膜、无机陶瓷膜等,可提升氧气、氮气的分离系数,降低膜组件的操作压力与能耗。通过材料改性技术优化吸附剂与膜材料的稳定性、抗污染能力,延长使用寿命,降低运维成本。

##### 4.2 低温泵与膨胀机超导技术应用

低温泵与膨胀机超导技术应用可大幅降低设备能耗,提升空分工艺的能量利用效率,是未来节能发展的重要方向。超导技术利用超导体在临界温度下的零电阻特性,减少设备的电能损耗,将其应用于低温泵可降低泵体的驱动能耗,同时提升低温流体的输送效率,减少冷量损失。对于膨胀机,采用超导轴承替代传统机械轴承,可彻底消除机械摩擦损失,显著提升膨胀机的等熵效率,增加冷量产出,减少额外制冷能耗;超导线圈在液体膨胀机发电环节的应用可提升能量回收效率,实现电能的高效回收与再利用。目前,超导技术面临临界温度提升、设备

制造成本降低等挑战,未来通过材料研发与工艺优化,超导技术将逐步实现产业化应用,推动空分设备向高效节能方向升级。

##### 4.3 氢-氧混合工质精馏节能新工艺

氢-氧混合工质精馏节能新工艺凭借创新工质体系,为精馏分离过程带来革新,有效降低能耗,为大规模空分工艺节能开辟了全新路径。传统精馏工艺仅以空气作为单一工质,由于空气各组分间相对挥发度较小,要实现有效分离,就必须采用较大的回流比以及较多的理论塔板数,这直接导致能耗居高不下。而氢-氧混合工质体系别出心裁,通过在原料空气中引入适量的氢-氧混合气体,巧妙地改变了原有组分的相平衡关系<sup>[4]</sup>。如此一来,目标组分(像氧气、氮气)间的相对挥发度显著增大,精馏分离的难度大幅降低。并且,氢-氧混合工质在精馏过程中还能释放少量热量,恰好可以补充精馏塔的热负荷需求,减少对外部能量的输入。不过,该工艺要实现稳定运行,还需攻克混合工质配比优化、塔内气液平衡精准调控以及产品纯度保障等关键难题。通过开展流程模拟与实验验证,不断优化混合工质配比与操作参数,展现出良好的节能效果,未来极有可能在大型空分装置中实现工业化应用。

#### 结束语

现代空气分离工艺的节能研究需兼顾技术突破与系统优化。当前,热力学优化、设备升级及智能控制等技术已显著降低能耗,但新型材料、超导技术及混合工质等前沿方向仍需持续探索。未来,随着跨学科技术的融合,空分工艺将实现更高效的能量利用与更低的碳排放,为工业绿色转型提供重要支撑。行业需加强产学研合作,加速节能技术的产业化应用,推动空分领域可持续发展。

#### 参考文献

- [1]金宗杰,孙吉水,刘鑫.化工工艺过程能耗管理与节能减排技术[J].化工管理,2024,(13):48-50.
- [2]张长德.化工工艺中节能降耗技术及应用[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(11):160-162.
- [3]曹红忠.甲烷液化深冷分离生产工艺的比较分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(16):255-256.
- [4]于飞.膜分离及深冷分离技术在聚丙烯装置的应用[J].现代化工,2020,40(03):217-220.