

空分技术在化工生产与煤化工中的应用及发展趋势

徐世安 石 林 乐 凯
杭氧集团股份有限公司 浙江 杭州 310014

摘要: 空分技术以空气组分物理性质差异为基础,通过低温蒸馏等手段实现气体分离,在化工生产中有着广泛应用。本文阐述空分技术基础与工艺流程,分析其在基础化工原料制备、工艺过程支持及产品提纯加工等方面的应用,探讨空分设备在煤气化、煤液化及煤化工联产系统中的应用。同时,指出空分技术与设备在技术升级、煤化工适配性改进及绿色低碳转型方面的发展趋势。空分技术持续创新,为化工产业高质量发展提供有力支撑,推动行业向高效、绿色方向迈进。

关键词: 空分技术; 化工生产; 煤化工; 技术升级; 绿色低碳

引言: 化工生产对各类气体需求持续增长,空分技术作为气体分离与供应的核心手段,其重要性日益凸显。空气包含氧气、氮气、氩气等多种组分,各组分沸点差异为空分技术提供理论基础。低温蒸馏、变压吸附、膜分离等技术路线各有特点,共同构建现代空分技术体系。空分装置通过复杂工艺流程,将空气转化为高纯度气体或液态产品,广泛应用于化工生产各环节。在煤化工领域,空分设备广泛应用于煤气化、煤液化及联产系统等工艺,为生产稳定运行提供关键支撑。研究空分技术在化工生产中的应用、空分设备在煤化工中的应用及发展趋势,对提升化工产业竞争力具有重要意义。

1 空分技术基础

1.1 空分技术定义与原理

空气分离技术以空气中各组分物理性质的差异为理论基础,通过精确控制温度条件实现气体分离。该技术核心在于利用氧气、氮气、氩气等主要成分沸点的显著差异——氧气在 -183°C 液化,氮气在 -196°C 液化,氩气则在 -186°C 液化。基于这种特性,低温蒸馏成为实现空气组分分离的主流方法^[1]。从技术分类维度看,深冷法凭借成熟的工艺体系占据主导地位。该方法通过多级压缩与深度冷却,使空气达到液化临界点,进而在精馏塔内完成组分分离。变压吸附法则依托分子筛对不同气体的吸附选择性差异,通过周期性压力变化实现气体提纯,具有启动快、能耗低的特点。膜分离技术作为新兴方向,利用高分子膜对气体分子的渗透速率差异进行分离,在中小规模应用场景中展现出独特优势。三种技术路线形成互补格局,共同构建起现代空分技术的体系框架。

1.2 空分技术工艺流程

空分装置运行始于空气压缩阶段。原料空气经多级离心压缩机或螺杆压缩机增压,压力提升至 $0.5\text{--}1.0\text{MPa}$ 范

围,为后续冷凝分离提供动力基础。压缩后的空气进入净化单元,通过冷冻干燥、吸附剂吸附及催化氧化等组合工艺,彻底去除水分、二氧化碳及碳氢化合物等杂质。此步骤可防止杂质在低温工况下冻结堵塞设备,或引发化学反应破坏系统稳定性。净化后的空气进入换热器组,与返流低温气体进行多级逆流热交换,逐步降温至 -175°C 以下。随后进入主冷凝蒸发器,完成气液相变转化。液态空气进入精馏塔后,在塔内填料或塔板作用下形成温度梯度分布:氮气因沸点最低优先蒸发,在塔顶富集后经冷凝器液化作为回流液;氧气沸点较高,在塔底以液态形式存在;氩气作为中间组分,通过侧线抽出与精馏提纯获得。最终,不同组分经各自通道输出,形成高纯度气体产品或液态储运形态。整个分离过程依赖精密的温度-压力控制与物质平衡调节,确保各组分纯度与产率稳定。

2 空分技术在化工生产中的核心应用

2.1 基础化工原料制备

氧气在化工生产中承担着关键氧化剂角色。在合成氨工艺中,氧气与氢气在高温高压条件下反应生成氨,为化肥工业提供基础原料;甲醇合成过程中,氧气参与一氧化碳与氢气的催化反应,生成甲醇这一重要有机溶剂;乙烯氧化反应中,氧气作为氧化剂将乙烯转化为环氧乙烷,进而衍生出乙二醇、聚酯纤维等下游产品。氮气凭借化学惰性成为化工生产中不可或缺的保护介质^[2]。在易燃易爆物料处理环节,氮气置换可有效排除氧气,防止氧化反应引发燃烧或爆炸;在聚合反应体系中,氮气营造无氧环境可避免聚合物链断裂,保障产品质量稳定性。稀有气体提取进一步拓展了空分技术的应用边界。氩气因密度高、化学性质稳定,被广泛用于金属焊接过程的保护气,防止金属在高温下与氧气发生反应;氦气与氖

气因低电离能特性，成为电子工业中激光器、显像管等设备的核心工作气体，支撑半导体制造与显示技术发展。

2.2 化工工艺过程支持

空分技术通过气体供应优化显著提升化工反应效率。在氧化反应体系中，精准控制氧气流量可调节反应速率与选择性，避免过度氧化导致副产物生成，从而提高目标产物纯度；在催化反应过程中，氮气作为载气可均匀分散催化剂颗粒，增强反应物接触效率，缩短反应周期。惰性环境营造是保障复杂化工工艺稳定运行的关键。在聚合反应中，氮气隔绝氧气与水分可防止聚合物分子链降解，确保分子量分布均匀性；在催化加氢反应中，氮气保护可维持催化剂活性，延长使用寿命。气体置换与安全控制功能贯穿化工生产全流程。在设备检修阶段，氮气置换可燃气体可降低爆炸风险；在物料储存环节，氮气填充可防止氧化变质，保障存储安全性。

2.3 化工产品提纯与加工

高纯度气体供应是满足高端化工领域需求的基础。在半导体制造中，99.999%以上纯度的氮气用于芯片封装环节，防止杂质污染导致电路短路；在医药合成领域，高纯度氧气参与抗生素发酵过程，提升产物收率与质量稳定性。液态气体储存与运输技术突破了气体使用的时空限制。液态氮作为高效制冷剂，在食品冷冻、医疗冷链等领域实现快速降温；液态氧在钢铁冶炼中作为助燃剂，通过液态储运降低运输成本；液态氩在金属加工中作为冷却介质，提升切割精度与表面质量。这些液态气体产品通过低温储罐与专用运输设备，构建起覆盖全球的化工原料供应网络，支撑现代工业体系高效运转。

3 空分设备在煤化工中的应用

3.1 煤气化工艺中的应用

空分设备在煤气化工艺中发挥核心作用，为生产提供关键支撑。在煤炭部分氧化反应里，高纯度氧气作为关键气化剂，与煤炭在高温高压下剧烈反应，生成以一氧化碳和氢气为主的合成气^[1]。氧气的高反应活性确保煤炭分子链高效断裂并定向转化，其供应稳定性直接影响合成气产率与组分比例，进而决定后续化工流程原料质量。氮气在煤气化系统中主要用于安全保障。气化炉内可燃气体与空气混合易引发爆炸，持续注入氮气可稀释可燃组分浓度，使其维持在爆炸极限以下。设备停机检修时，氮气覆盖技术可在相关设备或区域形成一层惰性保护层，防止残留气体与氧气接触发生危险反应，这要求空分设备具备快速响应能力，根据炉内压力与气体成分变化实时调整氮气注入量。在工艺气体净化环节，空分设备与低温甲醇洗装置协同提升净化效率。经气化反

应生成的粗合成气含硫化氢、二氧化碳等酸性杂质，需通过低温甲醇洗工艺脱除。空分设备提供的低温冷量为甲醇洗装置创造适宜操作温度，其分离出的高纯度氮气还可作为再生气源，通过周期性置换维持甲醇溶液吸附容量，这种冷量与气体双重供给模式显著提升了净化系统运行效率。

3.2 煤液化工艺中的应用

空分设备在煤液化工艺中有着不可或缺的应用，为氢气生产、反应温度控制等关键环节提供支撑，构建完整的生产保障体系。氢气生产体系依赖空分设备构建完整制氢链条。通过提供高纯度氧气，空分设备支持蒸汽重整或部分氧化工艺将天然气或煤制气转化为氢气。氧气与碳氢化合物在催化剂作用下发生氧化还原反应，生成氢气与二氧化碳的混合气，经后续变压吸附或膜分离技术提纯后，获得满足煤液化工艺要求的氢气产品。这一过程对氧气纯度要求极高，杂质存在会导致催化剂中毒或反应选择性下降。直接液化工艺中，液氮的应用是维持煤浆稳定性的关键。煤炭在高压氢气氛围下与溶剂混合形成煤浆，需通过液氮冷却系统将反应温度控制在适宜范围，防止煤浆因温度升高发生结焦或热解。液氮的低温特性还能抑制溶剂挥发，减少工艺过程中的物料损失。液氮储罐与输送管道的设计需兼顾保温性能与操作安全性，确保低温介质稳定输送至反应釜，保障空分设备应用效果的稳定发挥。

3.3 煤化工联产系统中的应用

空分设备在煤化工联产系统中，于气体平衡调节、能量综合利用及副产品开发等方面发挥重要作用，实现系统整体优化升级。气体平衡调节方面，煤化工园区集成多条生产线，各单元对氧、氮气需求存在时空差异。空分设备通过智能控制系统，根据不同装置运行负荷动态分配气体流量，避免供应波动导致工艺中断，使园区能灵活调整产品结构，适应市场变化。能量综合利用上，依托空分设备构建冷量回收网络。低温精馏产生的冷量通过换热器传递给其他工艺单元，用于冷却反应物料或预冷进料空气，降低系统整体能耗。部分先进装置通过热泵技术将冷量升级为更高品位能量，实现能源利用效率最大化。副产品开发中，空气分离产生的氩气等稀有气体，经进一步提纯可应用于电子特气、焊接保护等领域。氩气提取装置通常与空分主设备集成设计，拓展了资源利用维度，提升原料空气综合利用率，为企业创造新利润增长点，推动产业向高附加值延伸。

4 空分技术与设备的发展趋势

4.1 技术升级方向

空分技术与设备的技术升级围绕效率提升与性能优化持续推进,相关发展方向在空分行业研究及工程实践中已形成明确导向^[4]。大型化与高效化是核心升级路径,随着工业生产规模扩大,单套空分设备产能不断提升,依托精馏塔结构优化、规整填料应用等技术改进,有效降低单位产品能耗,契合现代工业规模化生产的节能需求,这一趋势与深冷空分技术的演进逻辑高度一致。智能化控制成为技术升级的重要支撑,通过集成先进自动化系统与智能监测模块,实现空分工艺各环节参数的实时调控与动态优化,减少人工干预,提升设备运行稳定性,呼应现代工业智能化发展的整体方向。节能技术的深度应用进一步推动空分设备效能提升,新型高效换热器、透平膨胀机等设备的推广使用,有效减少冷量损失,优化制冷循环效率,结合空压机余热回收等新型节能方案,进一步降低设备运行能耗,符合空分技术节能化的发展共识。

4.2 煤化工领域适配性改进

针对煤化工生产的特殊工况,空分技术与设备的适配性改进持续深化,聚焦工况适应性与协同性提升。耐压与耐腐蚀设计不断优化,结合煤气化工艺高温高压的运行环境,通过材料性能升级与结构设计改进,增强设备抗高压、抗腐蚀能力,避免极端工况对设备运行造成影响,保障设备长期稳定运转,这一改进贴合煤化工空分设备的安全运行要求。快速变负荷能力逐步提升,通过优化设备控制逻辑与流程设计,使空分设备能够灵活适配煤化工装置柔性生产的需求,应对生产负荷的动态变化,避免负荷波动对分离效率与产品质量造成影响。模块化集成成为适配改进的重要方向,将空分设备拆解为标准化模块进行设计与制造,便于与大型煤气化炉、净化装置等煤化工核心设备进行协同布局,简化安装流程,提升系统整体运行协调性,适配大型煤化工项目的规模化布局需求。

4.3 绿色低碳转型

在双碳战略导向下,空分技术与设备朝着绿色低碳

方向稳步转型,相关技术路径已在行业标准与研究成果中得到明确体现。余热回收利用技术持续完善,通过专用换热设备将空分工艺过程中产生的废热进行回收转化,作为设备运行的辅助动力源,提高能源利用效率,减少能源浪费,契合工业余能回收利用的发展趋势^[5]。低排放技术不断优化,通过改进净化系统结构、优化吸附剂性能,减少空分设备废气中污染物含量,降低对周边环境的影响,符合工业生产绿色化的发展要求。碳捕集接口预留成为前瞻性设计重点,在空分设备研发与制造过程中预留碳捕集相关接口,为未来煤化工行业碳减排技术的集成应用提供技术空间,助力煤化工产业实现绿色低碳转型,呼应煤炭清洁高效利用的发展导向。

结束语

空分技术凭借其独特的气体分离能力,在化工生产与煤化工领域占据关键地位。从基础化工原料制备到工艺过程支持,再到产品提纯加工,空分技术均发挥着不可替代的作用;在煤化工的煤气化、煤液化及联产系统中,空分设备更是保障生产稳定运行的核心要素。随着技术不断升级,其在大型化、智能化、节能化等方面取得突破,同时针对煤化工特殊工况的适配性改进持续深化,绿色低碳转型稳步推进。这些发展成果将持续赋能化工及煤化工产业,推动其迈向更高效、更环保的新阶段。

参考文献

- [1]马倩.大型煤化工空分技术与设备发展现状分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(07):155-157.
- [2]吴艳东.现代煤化工空分装置噪声污染防治技术研究[J].中国煤炭,2022,48(8):98-103.
- [3]王婷.煤化工空分设备安全技术分析[J].广东安全生产技术,2025(12):109-111.
- [4]王大永.鄂尔多斯煤制油分公司空分装置低温液体膨胀机节能改造收益分析[J].内蒙古石油化工,2021,47(09):12-16.
- [5]张学亮.煤化工项目配套空分技术的选择[J].煤化工,2021,45(01):67-74.