

大型煤制油项目空分装置技术特点分析

高 龙

国家能源集团宁夏煤业公司煤制油分公司空分厂, 宁夏 银川 750000

[摘要]在我国经济持续向上的推动下, 煤炭化工领域的投资项目不断扩大, 相伴而生的是对氧气的需求量水涨船高, 进而促使相关的空气分离设备技术迅速增加。面对当前经济形势, 把煤炭转化燃油的空气分离设备与新型工艺技术相结合显得尤为关键, 不仅与我国目前煤炭化工项目的实际需求相契合, 更是行业发展的必然趋势。文章选取一具体煤炭制油项目作为研究对象, 在对该项目工艺流程进行详细剖析的基础上, 进一步探讨了该设备的独特性能。

[关键词]煤制油项目; 空分装置; 技术特点

DOI: 10.33142/ec.v7i12.14535

中图分类号: TQ536

文献标识码: A

Analysis of Technical Characteristics of Air Separation Unit in Large Coal to Oil Projects

GAO Long

Air Separation Plant of Coal to Oil Branch of CHN Energy Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750000, China

Abstract: With the continuous upward push of Chinese economy, investment projects in the coal chemical industry continue to expand, accompanied by a rising demand for oxygen, which in turn promotes the rapid increase of related air separation equipment technology. In the face of the current economic situation, it is particularly crucial to combine air separation equipment for coal to fuel conversion with new process technologies. This not only meets the actual needs of Chinese current coal chemical projects, but also is an inevitable trend in the industry's development. The article selects a specific coal to oil project as the research object, and based on a detailed analysis of the project's process flow, further explores the unique performance of the equipment.

Keywords: coal to oil projects; air separation unit; technical characteristics

引言

煤炭液化核心在于运用特定的化学反应将固态煤炭转液态烃类及化工原料。按照工艺路径的差异, 煤制油分为直接液化和间接液化两大类。间接液化工艺涉及将煤炭与溶剂混合制成浆料, 在约 450℃ 的高温和 10 至 30 兆帕斯卡的压强条件下, 经过催化加氢反应, 产出液态烃, 进而可转化为汽油、柴油及多种化工产品。间接液化法的显著优势在于其具有较高的热效率和产物收益率, 这项技术的研发起始于 20 世纪 20 年代, 并在 30 至 40 年代在德国得到工业化应用。

1 煤制油概述

煤制油是指在高温、压力下, 利用加氢技术将煤炭中的 S、N、O 等原子进行加氢, 制备出液体碳氢燃料。由于其对煤种的适应能力不强, 且其反应和运行工况要求较高, 所生产的燃油中含有大量的芳烃、硫、氮等有害物质, 其十六烷值较低, 难以在内燃机中直接燃烧。费-托合成法是一种从合成气体中制取碳氢化合物的方法。其中有天然气, 煤, 轻烃等; 重油, 生物质等原料的精制。费托合成油按其来源可划分为: 以液化石油 (CTL)、以生物质制取石油 (BTL) 和以石油为主 (GTL) 为主。煤制油是将煤炭气化, 然后经费-托合成制得碳氢化合物。该产品的特点是: 十六烷值高, H/C 含量高, 硫含量低, 芳香度低, 与常规柴油无任何比例混溶性。同时, 该催化剂还表现为低

流动粘性、低密度和低体积热值。由于液化天然气资源丰富, 且价格较为平稳, 因此, 液化天然气厂已逐渐成为中国电力行业的优先选择。在未来的 50 年里, 中国的一次能源结构仍然以煤炭为主。从 1999 年的 67.8%, 到 2000 年的 63.8%, 2003 年的 67.8%, 2003 年的 67.8%, 到 2005 年的 67.8%。由于我国每年消耗的重质油大约有三千万吨, 由于石油的匮乏, “以油换油” 又被提到了日程, “以煤换油” 已经是国家的一项重大发展方向。

2 项目概况

该工程计划年产各类油品达到 405 万吨, 并且配备有年产合成气 275 万立方米的烯烃生产设施, 每年可处理转化煤炭总量为 2448 万吨 (包括原料煤和燃料煤)。工程涉及的主要工艺流程包括空气分离、煤炭准备、煤气化、一氧化碳转换、合成气净化、硫黄回收、油品合成、油品精炼及尾气处理等多个环节。此外, 项目还包括建设与工艺流程相匹配的储存运输系统、公共设施、辅助设施、服务设施以及场外相关工程。

在项目中, 空气分离装置是煤炭间接液化过程中的前端工艺单元, 主要负责向气化和油品合成单元供应氧气, 同时为整个工厂提供必要的氮气。12 套制氧单元 (包括液氧) 将具备 101500Nm³/h 的制氧能力, 这一规模在国内同类空分装置中居首位。具体每套制氧装置的方案和参数详见表 1。

表 1 单套产品方案、规格及数量

| 产品 | 液体工况/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 设计工况/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 最大工况/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 开车工况/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 纯度/(O_2 含量) | 出界区表压/MPa | 出界区温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|------|---|---|---|---|-------------------------|-----------|---------------------------|
| | 期望值 | 保证值 | 保证值 | 期望值 | 保证值 | 保证值 | 期望值 |
| 高压氧气 | — | 100500 | 106550 | — | $\geq 99.6\%$ | 5.9 | 常温 |
| 高压氮气 | — | 6850 | 9250 | 30000 | $\leq 10 \cdot 10^{-6}$ | 7.0 | 常温 |
| 低压氮气 | — | 69500 | 78500 | 70000 | $\leq 10 \cdot 10^{-6}$ | 1.0 | 常温 |
| 液氧 | 2500 | 1000 | 0 | — | $\geq 99.6\%$ | — | 饱和 |
| 液氮 | 2500 | 1500 | 0 | — | $\leq 10 \cdot 10^{-6}$ | — | 饱和 |

3 空分装置工艺流程

原料空气经自洁式过滤器过滤、空压机压缩、预冷系统降温、分子筛净化后分成两路。一路去增压机继续压缩，增压机一级及一段出口抽出仪表空气，增压机一段抽出压缩空气进入气体膨胀机制冷、增压机末级压缩空气进入液体膨胀机制冷，膨胀后空气进入下塔精馏；另一路直接进入下塔精馏。上下塔采用规整填料、设粗氩提效系统，高压氧、氮内压缩，下塔顶部抽取氮气，再通过氮压缩机增压。其中机组系统采用一拖二模式，即由一台汽轮机同时拖动空压机和增压机。设置液氧、液氮常压低温储槽和加压汽化输送系统（液氮系统配备 5000m^3 液氮罐及相应的加压汽化系统，液氧系统配 2000m^3 液氧罐及相应的加压汽化系统）。

4 空分装置技术特点分析

4.1 规模大

本装置区占地面积 31.24万 m^2 ，由 12 套 $101500\text{Nm}^3/\text{h}$ 的空分单元组成。氧气 (5.9MPa) 产量为 $1218000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，高压氮气 (7.0MPa) 产量为 $82200\text{Nm}^3/\text{h}$ ，低压氮气 (1.0MPa) 产量为 $834000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，年操作时间为 8000 小时。

本装置大型设备众多，大型塔类 60 个、换热类设备 417 个、大型压缩机 77 台、高压汽轮机 12 台；工艺管道和公用工程管道数量多、管径大、管线长，其中高压蒸汽母管 DN600，管线长度约 1 公里；氧气母管 DN600，管线长度约 2 公里；低压氮气管 DN1400，氮气、仪表空气、工厂空气管网遍布全厂。

4.2 工艺技术先进

采用立式径向流动的分子筛吸附装置，空气增压，内压缩工艺；空气增压透平膨胀机和电机驱动液体膨胀机制冷，上下塔均采用规整填料塔来分离空气。为保证空分设备在变载工况下的正常运转，在空压机进口加装了流量调整导叶。

4.3 能耗低

该设备机组为“一拖二”结构，一台机组带动一部空压机，一部增压机组。在空分设备中，空压机、增压机、汽轮机均采用进口压缩机，节能效果显著。一座空气分离设备均为国内生产工艺。汽轮机冷凝器是一种节约用水的直冷型空气冷却器。垂直放射状分子筛吸收剂，结构更简

单，阻力更小，占地少，无床层吹翻危险，节省能源。

空分设备的低压塔和压力塔均为填充塔，这样不仅节省了设备的投入，而且节约了能源。空气分离设备使用了多层浴槽技术，既保留了全浸泡蒸发的安全性能，又保留了薄膜凝结蒸发设备的节能特性。

4.4 自动化程度高

该空分设备应用 DCS 与 CCS 技术，对空分设备进行工艺控制与安全运行，主要是通过 DCS 来完成对三大设备的安全连锁保护及负载控制；同时还完成了空分设备的关键安全连锁。

4.5 安全性好

该设备采用内压缩流程取代了氧压机，减少了火灾和爆炸的危险。主冷抽出了足够多的液态氧，以确保烃类聚集的几率降低到最小。并且氧系统的阀门优先采用铜基合金材质，低压塔底部装有铜填充物，更能保证操作的安全。产品液氧在高压下蒸发，极大地减少了碳氢化合物积聚的几率。3 台液氧泵可以确保设备的持续氧气供应和安全生产。主冷凝蒸发器采用浴式多层结构，全浸式操作，增加主冷的循环倍率，防止碳氢化合物、 N_2O 在主冷换热表面析出。

4.6 空气过滤系统

鉴于空气中存在灰尘和机械杂质，为确保压缩机能够持久且稳定地工作，必须对进入的空气进行净化处理，故而配备了自动清洁型过滤系统。此系统具备低过滤阻力、高过滤效能、广泛的适用性、较少的反吹用气量、紧凑的空间占用、简易的结构设计、出色的防腐蚀特性以及低维护需求等诸多优势。

4.7 空气压缩系统

(1) 原材料空气压缩机采用进口的高效多级进口轴流式离心压缩机，每台机组采用进口的离心压缩机作为增压机。采用进口的全凝结涡轮作为动力。该机组以 1 套特高压全凝结机组为牵引，以“一拖二”的传动模式，节约了设备的投入和操作成本。

(2) 增压装置为多段式，低增压比，具有更合理的排气压力和安全性能。

(3) 空气压缩机、增压机和汽轮机三大单元分别使用 ITCC、单元状态监测系统 BENTLY3500 和单元速度防护

装置组合而成,从而完成了空压机组的生产控制与安全保障运行。在 DCS 屏幕上实现了对机组的实时监控。

(4) 原材料空压机设有一套叶轮联机洗涤装置,用于将日常运转过程中堆积于叶轮上的沉淀物进行冲刷和清除,从而改善了压气机的运转性能,缩短了停工期和维修周期。

4.8 空冷器

(1) 节能性:空冷器采用空气作为制冷介质,在散热片(又称散热翅片)管道外侧进行交叉流动,以此对管道内流体进行冷却或凝结的热交换装置。与水冷却系统相比,空气冷却系统具备多项优势:它不会对环境造成热能或化学污染;空气资源丰富,获取无需额外设备;空气的侵蚀性较弱,使用寿命较长;空气在流动过程中的压力损失较小,因此运行成本较低,通常其维护成本仅为水冷却系统的 20%到 30%;而且,即便风机电源断开,该系统仍具备 30%~40%的自然冷却功能。

(2) 配备冲管装置。

(3) 防冰措施:采用变频调速马达带动风扇,风扇转动最小区域为管束迎风口的 40%以上,在室内建立一个空气循环,以改善或维持冷凝水温度,避免结冰。具有抗冻性能的自动调节功能。安装挡风墙,旁通隔离阀,并在冬天开启旁路。

4.9 空气预冷系统

该系统在热质交换效能、操作灵活性、阻力损失降低及防止液泛与雾水携带方面表现出色,技术特点如下:

(1) 系统采纳开放式循环设计,减少了结垢现象,利用污氮作为预调冷系统的冷却介质。

(2) 空冷塔顶端配备了高效不锈钢丝网除雾器,能够捕捉超过 99%的游离水。

(3) 空气预冷系统通过水冷塔和冷冻机组协同工作,进一步降低塔出口空气的温度。

(4) 空冷塔和水冷塔均使用散装填料,确保了高效的热质交换和操作的灵活性,同时降低了阻力损失。塔底使用不锈钢填料以应对局部高温,塔顶则使用加强型鲍尔环,其余内部组件也均采用不锈钢材质制造。

4.10 空气净化系统

该系统拥有持久的运行周期、垂直径向流动布局、智能的吸附周期自动转换以及平稳的无冲击切换控制系统等显著优势。它的主要功能是清除空气中含有的水蒸气、二氧化碳、乙炔、丙烯、丙烷和 N_2O 等杂质。技术特点如下:

(1) 分子筛吸附装置设计为立式径向流形态,这样的设计使得其阻力更小、能耗更低、占用空间更少。

(2) 系统引入自动吸附周期切换技术,自动进行分子筛的切换周期调整,从而避免高浓度二氧化碳对空气分离设备造成的不利影响。

(3) 系统转换运用了平滑切换技术:转换装置配备

调速器,使得阀门启闭动作平缓,速度一致;均衡阀与污氮排放阀的实施分级序次调控,确保转换过程的稳定性;转换装置选用了适用于分子筛的三柱式阀门,有效维护分子筛层的安全。

4.11 低温冷箱系统

在空分设备中,以低温蒸馏的方式对氧气和氮气进行分离,是整个空分设备的关键。以下是一些技术特征:

(1) 对容器支架,阀门支架,管道支架进行了严密的力学分析,并对其进行了冷补。支撑体全部由不锈钢材料制成,不仅能确保其在较低温度下的力学性能(一般的碳素钢在较低温度下容易发生塑性变形),还能降低热传导损耗。

(2) 在冷箱中,全部蒸馏塔均为结构化的填充柱,具有低的阻力。该蒸馏柱上部的下部为铜质填充物,取代了普通的铝质填充物,具有较高的安全性和可靠性。使用专用的高效填充剂,具有较高的蒸馏效率和较低的塔板直径。

(3) 主要凝结气化器、粗氮冷凝器均为全浸结构,为铝合金板片换热装置,具有较高的传热效率。主要凝结气化器为全浸式主冷却系统,蒸发的液态氧柱较小,节能效果显著。全浸式作业,液态氧易流动,不留死角。

(4) 对于室温的高压氧调压阀,使用国外的材料,蒙乃尔材料,并设有阀腔。供氧阀配有可调旁路阀,由蒙乃尔材料制成,安装在阀室中。氧阀的门室内采用隔爆壁,按照密闭的环境进行控制。为避免因气流过快而损坏设备、阀门及管道,采用了低压差式大直径阀门旁通阀。

(5) 利用液体膨胀机发电,可以对高压液空进行有效的回收,具有较强的工作灵活性。

5 空分装置优势分析

5.1 设备配置佳

项目中的关键设施选用了全球知名品牌的高品质产品,旨在确保设备运行的稳定、安全与高效,进而提升整个项目的装备标准。通过借助科学的技术措施,预防项目运行中可能出现的问题,为油产量的提升奠定坚实的基石。

5.2 控制系统较为稳定

在设备的管理系统方面,引入了先进的控制系统,如 CCS 压缩机控制平台以及 DCS 分布式控制系统。这些先进系统的应用,显著增强了设备运行的稳健性和信赖度,有效实现了能源消耗的降低。

6 结束语

大型空气分离装置的设计与制造所面临的核心挑战涵盖了系统架构及运算优化、超大型低温装置的制造技术、创新的空气预调温系统、整体冷箱设计,以及超大型分子筛吸附器、高效率精馏塔、新型主冷却蒸发器的研发等方面。在本项目中,我们不仅引进了海外企业的空气分离技术与设备,也融合了国内企业的相关技术及装备。推进特大型空气分离装置的国产化进程,不仅显著减少了项目的

投资成本,降低了日常运营费用,而且对于提升我国关键设备的自主研发与制造能力,促进民族工业的繁荣发展起到了至关重要的作用。

[参考文献]

- [1]尚瑞祥,毛玉龙,郭候栓,等.煤化工行业空分装置阀门的故障预测与维护策略[J].石化技术,2024,31(10):48-50.
- [2]黄守斌.大型煤化工项目空分装置的总体安全设计剖析[J].内蒙古石油化工,2023,49(11):35-38.
- [3]高云见.现代煤化工中的煤气化技术与配套空分装置选型策略分析[J].天津化工,2023,37(5):59-61.
- [4]郭震.煤化工空分装置运行问题和建议[J].中国设备工程,2023(9):88-90.
- [5]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(7):155-157.

作者简介:高龙,学历:本科,宁夏大学化学化工学院,中级工程师,研究方向:化工生产,职位:班组长,职务:组长,学位:学士。