

# 深冷空分设备节能优化设计与工程实践

陈达

浙江盛尔气体设备制造有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8706

**[摘要]** 深冷空分设备是工业气体制备的核心设备,它的能耗能占到生产总成本的 60%–75%。现在“双碳”目标越推越深,节能优化早已成了行业技术升级的核心。基于这一点,结合实际的工程经验,从工艺系统优化、能量梯级利用、智能控制升级三个方面,全面分析深冷空分设备的节能设计思路。依靠升级空气预处理系统、创新精馏塔结构、应用余热和冷量回收技术,再把智能控制算法落到实处,能让设备能耗明显降下来。结合新单塔流程、双塔优化这些创新工艺的实际案例,证明了这种节能设计在工程上能落地,还能创造经济价值,给深冷空分行业的绿色低碳发展,提供技术参考和实践经验。

**[关键词]** 深冷空分设备; 节能优化设计; 工艺创新

## Energy saving optimization design and engineering practice of cryogenic air separation equipment

Chen Da

Zhejiang Sheng'er Gas Equipment Manufacturing Co., Ltd.

**[Abstract]** Cryogenic air separation equipment is the core equipment for industrial gas preparation, and its energy consumption can account for 60%–75% of the total production cost. Nowadays, the "dual carbon" target is being pushed deeper and deeper, and energy-saving optimization has already become the core of industry technology upgrading. Based on this, combined with practical engineering experience, comprehensively analyze the energy-saving design ideas of cryogenic air separation equipment from three aspects: process system optimization, energy cascade utilization, and intelligent control upgrade. By upgrading the air pretreatment system, innovating the distillation tower structure, applying waste heat and cooling recovery technology, and implementing intelligent control algorithms, the energy consumption of the equipment can be significantly reduced. By combining practical cases of innovative processes such as new single tower processes and double tower optimization, it has been proven that this energy-saving design can be implemented in engineering and create economic value, providing technical reference and practical experience for the green and low-carbon development of the cryogenic air separation industry.

**[Key words]** cryogenic air separation equipment; Energy saving optimization design; Process innovation

深冷空分设备是工业生产版图中的“能源消耗大户”,从石化炼厂的催化反应到冶金车间的高炉炼铁,从电子产业的高纯气体制备到医疗领域的氧气供给,它的身影无处不在,却也伴随着巨大的能源消耗。数据显示,这类设备的能耗占生产总成本的六成以上,在能源约束日益收紧、“双碳”目标成为硬指标的今天,节能优化不再是“选择题”,而是关乎行业生存与发展的“必答题”。长期以来,行业内普遍存在工艺设计固

化、能量回收不充分、控制精度不足等问题,许多设备仍沿用传统定频压缩、常规塔板精馏等技术,造成了大量能源浪费。

随着工业智能化水平的提升和环保要求的升级,传统设计理念已经难以适应新时代的发展需求。如何在保证气体分离纯度与生产稳定性的前提下,通过系统性的设计优化实现能耗“瘦身”,成为广大工程师和企业共同面临的课题。本文基于多年工程实践经验,摒弃单纯追求设备参数指标的传统思维,

从工艺、能量、控制三个核心层面，解构深冷空分设备的节能优化路径。通过具体工程案例验证不同优化方案的实际效果，力求为行业提供兼具理论深度与实践价值的技术参考，推动深冷空分行业从“高耗低效”向“绿色高效”转型。

### 一、深冷空分设备节能设计的核心原则

深冷空分设备的节能优化，不是对某一项技术做局部改进，而是要贯穿设备设计、制造、运行的全生命周期，是个系统性的工作，要坚持四大核心原则。安全是前提，设备工作环境既低温（能到  $-170^{\circ}\text{C}$  以下）又高压，任何节能方案都不能拿安全防护换，不能牺牲安全，必须保证设备在极端工况下也能稳定可靠运行；核心是要高效，通过优化流程设计、提高部件效率，既能降低能耗，又得保证气体分离的纯度和提取率不下降；关键是要经济，节能改造和设计优化得兼顾前期投资和长期运行成本，不能盲目追求先进技术，最后导致投资回报率太低；保障是要适配，不同行业、不同工况对气体的纯度、压力、产量要求差别很大，节能设计得因地制宜，与实际生产需求精准适应。这四大原则是相互支撑的，少了哪个都不行。比如在冶金行业的深冷空分设备设计中，既得用余热回收技术降低能耗，又要保证氧气纯度能满足高炉炼铁的需求，同时还得控制设备投资成本，确保在生产周期内能收回节能改造的投入。只有把这四大原则融入设计的每个环节，才能让节能效果和生产需求真正结合起来，做到两全其美。

### 二、工艺系统节能优化设计与实践

#### （一）空气预处理系统升级优化

工艺系统是深冷空分设备的核心部分，它设计得合理与否，直接影响着设备的能耗高低。只要将空气预处理、精馏塔结构、膨胀机配置这些关键环节优化好，就能从根本上减少能耗。升级空气预处理系统，是节能的基础操作。传统的预处理系统用的是单层分子筛吸附，对水分和二氧化碳的吸附效果不佳，压缩空气中的杂质就比较多，这就使得压缩机得更费力地运行，负荷提高。换成分子筛双层床吸附技术后，吸附效率能达到 99.9%，这样一来，杂质对压缩机的磨损少了，能耗也跟着降下来了。另外，配上变频离心式空压机，它能跟着下游用气量的变化，灵活调整压缩比，比起传统的定频空压机，能耗能降低 10%-15%。一家石化企业的实际工程案例就证明，单单升级空气预处理系统，他们家深冷空分设备的单位能耗就降了 8%，一年下来能节省一百多万的电费。

#### （二）精馏塔结构创新与工艺改进

精馏塔结构创新是降低分离能耗的关键。传统筛板塔盘的等板高度较高，回流比偏大，导致单位氧提取能耗偏高。采用

高效规整填料替代传统筛板塔盘后，精馏段等板高度可降低至 150-180mm，回流比优化至理论值的 1.05-1.1 倍，显著提升了分离效率。在氩馏分提取环节，采用全精馏无氢制氩工艺，取消了催化脱氢单元，不仅简化了工艺流程，还降低了系统冷量损失。某冶金企业的精馏塔改造项目中，通过上述优化措施，氧气提取率提升了 3%，单位能耗降低了 12%，改造投资在 18 个月内全部收回。

#### （三）膨胀机配置优化与效率提升

膨胀机作为制冷系统的核心部件，其效率提升直接关系到制冷能耗。配置三元流叶轮增压透平膨胀机，等熵效率可提升至 88%-92%，相比传统膨胀机，单位制冷量能耗下降明显。同时，通过优化膨胀机进出口压差控制，使冷量利用率提高至 95% 以上。某电子材料企业在新上深冷空分项目中，选用高效膨胀机并优化控制策略，设备制冷系统能耗降低了 20%，为后续的冷量回收创造了有利条件。

### 三、能量梯级利用技术的设计与应用

#### （一）余热回收系统设计与应用

深冷空分设备在运行过程中会产生大量的余热和冷量，若能通过合理设计实现能量的梯级利用，可进一步降低能耗。余热回收系统的设计是能量利用的重要环节。空压机出口的高温空气蕴含大量热能，通过板式换热器将这部分热能用于预热原料空气，可使主换热器冷端温差缩小至 3-5 $^{\circ}\text{C}$ ，减少冷量损失。同时，氮气压缩机排气余热接入蒸汽发生器，能够满足装置 30%-40% 的蒸汽需求，降低外部蒸汽消耗。某化工园区的集中空分项目中，构建了完善的余热回收系统，年回收余热相当于节约标准煤 5000 余吨，减排二氧化碳 1.3 万吨，节能效果显著。

#### （二）冷量回收网络优化与集成

优化冷量回收网络，能更充分地利用制冷能量。深冷空分设备里的液氧、液氮，在过冷的时候会释放出不少冷量，搭配多级冷媒循环系统，将这部分冷量用来预冷分子筛的再生气体，就能减轻制冷机组的负担。采用冷箱集成设计，能减少冷量流失，让冷量回收效率达到 85% 以上，制冷机组的负荷也能降 25%。一家制药企业改造深冷空分设备时，就通过优化冷量回收网络，让制冷系统的能耗降了 18%，而且让制冷机组用得更久。

#### （三）压力能转换装置的创新应用

用压力能转换装置，为深冷空分设备的能量回收开辟了新道路。在高压氧气输送环节，40 到 60bar 的高压气体里藏着许多压力能，我们可以运用液压透平，把这些压力能转换成机械

能,就能带动循环水泵这类辅助设备运转,能量回收率能达到12%到15%。一家新能源企业的深冷空分项目中,安装了压力能转换装置之后,辅助设备的电耗直接降了22%,一年下来可以节约30万千瓦时的电,为企业带来了明显的经济利益。

#### 四、智能控制技术在节能设计中的融合实践

##### (一) 基于模糊PID算法的智能控制系统构建

随着工业智能化的发展,智能控制技术已成为深冷空分设备节能优化的重要支撑。通过构建智能控制系统、建立仿真模型、集成管理平台,能够实现设备的精准控制与高效运行。基于模糊PID算法的智能控制系统,能够有效应对用气量波动带来的工况变化。传统控制系统采用固定参数控制,当用气量在50%-110%负荷范围内波动时,设备难以保持最佳工况,导致能耗上升。而模糊PID算法能够根据实时负荷变化,自动调整膨胀机转速和阀门开度,使设备在不同负荷下均能运行在最优状态,综合能耗降低5%-8%。某钢铁企业的深冷空分设备采用该控制系统后,负荷波动适应性显著提升,年节能率达到7%。

##### (二) 三维热力学仿真模型的建立与应用

搭建三维热力学仿真模型,能给设备的优化运行提供数据支持。它能实时反映设备的运行情况,还能预测出最佳的启动曲线和变工况切换时机,这样避免了在启动过程中浪费能耗,变工况运行时也能避免不稳定的问题。实际工程应用显示,这项技术能让装置启动时间缩短30%,启动能耗减少15%到20%。有家天然气处理厂的新建深冷空分项目,就依靠这个三维热力学仿真模型做启动优化,第一次启动的能耗降了22%,启动时间也缩短了35%,帮助项目提前投产创造了条件。

##### (三) DCS与能源管理系统的集成优化

将DCS系统和能源管理系统整合到一起,能实现能耗的精细化管理。通过在线监测氧气提取率、单位电耗等12项关键指标,能及时找出能耗异常之处,还会自动生成能效优化建议,指导操作人员做调整。一家化工企业的深冷空分设备整合了这套系统之后,实现了每年3%-5%的持续节能提升,后续随着优化调整,设备的运行效率也在不断提高。

#### 五、创新工艺流程的节能潜力与工程案例

除了对传统工艺的优化,创新工艺流程的应用为深冷空分设备的节能提供了新的方向,其中新单塔流程和优化后的双塔流程最具代表性。新单塔流程以氮气为循环工质的开式热泵技术为核心,无需考虑提氦问题,将空气视为氧氮二元物系进行处理,特别适用于以制氮为主要目标的场景。该流程成功解决了氮气产品的内压缩问题,氮气提取率高达95%以上,远高于

传统制氮工艺的60%-75%。某电子企业需要高纯度氮气用于芯片制造,采用新单塔流程制氮设备后,氮气纯度达到99.999%,单位能耗降至0.07KWh/标准立方米,相比传统冷凝塔工艺,能耗降低了12.5%,年节约运行成本80余万元。同时,该流程的工程造价相比传统工艺降低了10%-15%,投资回报周期缩短了2年。

优化后的双塔流程通过在上塔增设深冷压缩开式热泵,将压力氮气冷凝器安置在上塔富氧液空入口处,突破了原双塔流程中下塔顶部液氮纯度对氮气产品纯度的限制。在某化肥企业的深冷空分项目中,采用该优化双塔流程后,氮气提取率保持在95%以上,单位氮产品能耗降低了10%,同时氮气产品纯度提升至99.99%,满足了化肥生产的高精度需求。此外,该流程还具备良好的灵活性,能够根据生产需求调整氮气纯度和产量,适应性更强。

#### 总结

综上所述,深冷空分设备的节能优化设计是一项系统性工程,需要从工艺系统、能量利用、智能控制等多个维度协同推进。工艺系统的优化为节能奠定基础,通过空气预处理升级、精馏塔结构创新、膨胀机效率提升,从源头降低能耗;能量梯级利用技术实现了余热、冷量、压力能的充分回收,进一步挖掘节能潜力;智能控制技术的融合应用,保证了设备在不同工况下的最优运行状态,实现了能耗的精细化管理。创新工艺流程的实践表明,新单塔流程和优化双塔流程在特定场景下具有显著的节能优势和经济价值,为行业提供了更多的节能选择。然而,深冷空分设备的节能优化并非一蹴而就,不同行业、不同工况的设备存在差异化需求,未来还需要结合材料技术、智能化技术的发展,持续探索更具针对性的节能方案。在“双碳”目标持续推进的背景下,深冷空分行业的节能升级势在必行。通过坚守安全、高效、经济、适配的核心原则,不断推动技术创新与工程实践的深度融合,必将实现深冷空分设备能耗的持续降低,为工业领域的绿色低碳发展贡献重要力量。

#### [参考文献]

- [1]曹宝喜.空分装置预冷系统改进及分析[J].冶金动力,2018(10):19-21.
- [2]高鹏,林涛,张佳岩.不同运行策略下中央空调冷却水系统节能潜力分析[J].中国住宅设施,2019(4):69-72.
- [3]胡然,阮治杰,孟献金.变频调速技术在风机、水泵节能改造中的应用[J].化工管理,2020(6):103-104.