

# ASU空分塔高效换热与节能技术解析

葛浩俊

杭州福斯达深冷装备股份有限公司 浙江杭州 310000

**摘要:** 本文基于CFD仿真分析,对ASU空分塔高效换热技术进行研究与优化,重点探讨了高效换热器设计与优化、换热器管道布局与热集成技术以及空分塔冷却系统的改进。在高效换热器设计中,通过优化换热器表面粗糙度和管道布局,换热效率提高了;在热集成技术的应用中,节能率提升了,CO<sub>2</sub>排放减少了;而在冷却系统的优化中,通过新型冷却管道设计能源消耗降低,这些技术改进有效提高了空分塔的运行效率和节能效果并减少了环境污染,为空分塔的节能和环保技术发展提供了重要参考。

**关键词:** ASU空分塔; 换热技术; 节能优化; CFD仿真

## 引言

在现代工业中,空气分离单元(ASU)作为重要的气体分离设备,广泛应用于液氧、液氮、液氩等气体的生产与供应<sup>[1]</sup>。随着能源消耗的增加与环保要求的提高,ASU空分塔的高效换热与节能技术成为提升其运行效率、降低能耗的重要研究方向,空分塔的换热效率直接影响到系统的总体能效,而节能技术的应用不仅能显著降低运营成本还能减少对环境的负担<sup>[2]</sup>。为了应对日益严格的节能要求,相关技术不断发展,尤其是高效换热技术、气体分配系统优化以及热集成技术的创新,这些技术的结合与应用为空分塔的运行带来了显著的性能提升,同时也推动了空分领域向着更高效、更环保的方向发展。本文将深入分析ASU空分塔高效换热与节能技术的原理、应用现状以及未来发展趋势。

## 一、ASU空分塔概况

### (一) ASU空分塔工作原理

ASU空分塔是一种通过低温分馏空气的过程,将空气中的氧气、氮气和稀有气体(如氩气)分离出来的设备,该系统的核心部分是空分塔,其工作原理基于空气的低温液化与蒸发。空气经过压缩机被压缩至较高的压力,随后通过预冷装置进行初步冷却;压缩空气进入空分塔,借助塔内不同温度区域的液化与蒸发过程,空气中的各组分被逐步分离。空分塔内的温度由上至下逐渐

降低,不同的气体成分在不同的温度下发生液化或蒸发,最终根据沸点的差异将氧气、氮气、氩气等分开,通过这一过程空分塔可以实现高效的空气分离并生产出符合工业需求的液态气体<sup>[3]</sup>。

### (二) 空分塔技术发展历程

空分塔技术的发展经历了多个阶段,从早期的简单的低温分离到现代复杂的高效节能系统。空分塔的设计较为简单,主要依赖物理压缩与冷却技术进行气体分离,随着工业化需求的增加对气体纯度和生产效率的要求也不断提高。20世纪初,随着低温技术的突破,空分塔技术得到了快速发展,尤其是分馏塔的引入使得气体分离过程更加精确。进入21世纪,随着环境保护和节能减排要求的提升,空分塔技术不断改进,高效换热技术、热集成技术、气体分配优化系统等逐步被引入,以降低能耗并提高分离效率<sup>[4]</sup>。现代空分塔系统更加注重节能、环境保护以及提高系统的经济性和可靠性,随着可再生能源的兴起,空分塔技术也逐渐向能源节约型和环境友好型发展。

### (三) 空分塔的应用领域和重要性

ASU空分塔广泛应用于多个领域,尤其是在钢铁、化肥、化工、电子等行业中,具有至关重要的地位。在钢铁生产过程中,氧气用于高炉炼铁,提高了炼钢过程的效率和质量;在化肥行业,氮气和氢气的分离用于合成氨生产,满足了农业生产对肥料的巨大需求;在电子产业,超高纯度的氮气和氧气被用于半导体生产过程中,保证了产品的质量和稳定性;空分塔还在医药、航空航天、液化天然气等领域发挥着重要作用<sup>[5]</sup>。

**作者简介:** 葛浩俊(1976-)男,汉族,浙江余杭人,本科学历,研究方向:深冷技术开发和实践应用。

## 二、影响因素与节能技术

### (一) 主要影响因素

空分塔的运行效率和节能效果受到进料气体温度、压力、换热器效率和气流分布的影响。进料气体的温度和压力直接影响液化和蒸发过程，进而决定分离效率；高温进气需要更多能量冷却，降低液化效率，增加能耗，而低温进气则减少能耗，提高效率；压力的变化影响气体沸点差异，进而影响分离效果。在设计空分塔时，合理选择进料气体的温度和压力至关重要；换热器效率则直接决定热能回收率，若设计不当，热损失大，导致系统能效低下；空分塔内气流分布的不均匀性也会影响换热效率，优化气流分布能有效提升能效。

### (二) 关键节能技术

高效换热技术通过使用先进设计和材料，如多管束换热器和高效换热表面，能够在较低温差条件下提高热交换效率，减少能量损失，提升设备稳定性和耐用性，降低运行成本，通过优化换热器结构，增大换热面积和流动速度，进一步提升换热效果，优化能耗。改进的气体分配系统能够确保进料气体均匀分布，避免气流不均和局部低流速现象，提升液化与蒸发效率。热集成优化技术通过回收和再利用废热，降低外部能源需求，减少能耗和环境影响，符合节能减排目标并通过优化模型精准调控热能流向，提升系统整体能效。

## 三、ASU空分塔高效换热技术模拟分析

### (一) 仿真模型

在空分塔高效换热技术的模拟分析中，CFD（计算流体动力学）模拟模型为研究提供了强大的支持，通过CFD仿真模型可以精确地分析和优化空分塔内的流体流动与热交换过程。换热器的性能优化模型着眼于通过控制塔内气流、温度分布和热交换效率，提升整体能效，在模型中考虑了空气的流动特性、塔内的温度梯度以及气体与换热器表面之间的热传导过程，能够模拟出不同设计方案下的换热性能。基于CFD仿真结果，研究进一步提出了一种优化方案，调整了流体流速、表面粗糙度及塔内气流分布，从而提升换热效率，降低能量损耗，确保在实际操作中实现最佳性能。

### (二) 数值模拟参数

本研究在进行空分塔的CFD仿真时，设定了多项关键参数以确保结果的可靠性与实际操作的符合度。进料气体的温度被设定为 $-40^{\circ}\text{C}$ ，压力为 $6\text{MPa}$ ，这些条件代表了空分塔在实际运行中的典型进气情况，能够模拟

出正常工况下的气流与热交换特性；换热器表面的粗糙度设置为 $0.05\text{mm}$ ，模拟了真实环境中换热器表面的摩擦与热传导影响。气流分布方面采用均匀气流假设，确保塔内气流稳定且不出现过冷或过热区域，从而保证热交换的高效性。选用了标准 $k-\epsilon$ 湍流模型，该模型适用于空分塔内复杂的湍流流动，能够准确捕捉气流变化对热交换的影响。采用三维热传导方程与能量方程对热交换进行计算，通过流体动力学与热传递的耦合，精准地模拟了气体与换热器表面之间的热交换过程。比热容（ $1005\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ）、密度（ $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ ）、导热系数（ $0.026\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）等空气的物性参数均采用常规标准值，以确保模拟结果的准确性和实际可操作性。

### (三) 技术阶段划分

在设计阶段，主要任务是基于CFD仿真进行空分塔换热器的初步设计与性能分析，该阶段的目标是通过调整塔内气流、换热器布局等因素，确保理论上达到最佳的换热效率，进一步优化换热器表面设计、气体分配和流动方式，减少热损失，提高系统效率。在实施阶段，重点监控空分塔在实际运行中的表现，对实际工况进行优化调整，实施阶段旨在根据实际监测结果，确保空分塔能够在不同工况下实现节能目标，确保长期高效稳定运行。

### (四) 数值模拟分析

表1 换热效率随时间变化表

时间 (小时)	进气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	出气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	换热效率 (%)
1	-40	-150	75.5
2	-42	-148	77.2
3	-43	-145	78.5
4	-41	-146	76.8

换热效率在初始阶段较高，随进气温度的变化稳定在75%以上，空分塔的换热效率保持了较为稳定的水平，且优化方案在实际应用中能够保持较好的换热效果。

表2 空分塔节能潜力评估表

运行工况	能耗 (kWh)	节能率 (%)	CO <sub>2</sub> 减排量 (kg)
标准工况	10000	0	0
优化工况	8500	15	500
高效优化工况	7500	25	800

在高效优化工况下，空分塔的能耗比标准工况降低了25%，实现了显著的节能效果，同时减少了800公斤的CO<sub>2</sub>排放，优化设计不仅提高了空分塔的能量利用效

率还为环境保护做出了积极贡献。

#### 四、关键施工与实施技术

##### (一) 高效换热器设计与优化

高效换热器设计与优化是提升空分塔能效的核心技术之一，通过优化换热器的设计可以显著提高热交换效率，并减少能量损耗。本研究在数值模拟中对换热器的几何结构进行了优化，包括换热器管道的布置、表面粗糙度的调整及流体流动特性的改善。优化后的换热器能够在相同工况下提高换热效率，这一优化措施不仅提升了空分塔的能效还为后续的节能改造奠定了基础。在换热器的设计过程中，特别注意了换热器表面的粗糙度与流体流速之间的关系，在较低的表面粗糙度下换热效率得到了显著提高，采用了新的管道设计方案，增加了换热表面的接触面积，使得热交换过程更加均匀。通过这些优化设计，换热器能够更好地适应空分塔的工作环境，提高热交换性能，同时减少了换热器的能耗，优化了整体的运行效率。

##### (二) 换热器管道布局与热集成技术

换热器管道的布局与热集成技术对空分塔的节能效果有着至关重要的影响，在空分塔的运行过程中如何有效利用现有的热源进行热集成，降低能耗，是节能技术优化的关键。合理安排管道布局，使气流能够更加均匀地分布在换热器内，从而提高换热效率；同时对换热器管道的优化设计，减少了流体的流动阻力，提升了流体的流速和换热性能，进一步减少了空分塔的整体能耗。在热集成技术方面，优化后的空分塔系统能够有效回收并重新利用废热，通过将冷却气体与排放气体进行热交换，能够减少外部能源输入的同时降低环境污染，进一步通过智能化控制系统调节热能流向，提升了热集成效率，减少了能源浪费。经过热集成优化后，系统的节能率提高了15%，有效减少了能源消耗和运行成本，通过结合换热器与其他系统的热集成进一步提高了空分塔的运行效率和环保性能，热集成技术的应用还使得空分塔能够更加灵活地适应不同负荷条件，进一步提高了整体系统的可持续性和稳定性。

##### (三) 空分塔的冷却系统改进技术

空分塔的冷却系统在节能与性能提升中起着至关重要的作用，冷却系统的改进有助于减少空分塔运行中的能源浪费并提升其稳定性与效率。与传统冷却系统相比，新系统采用了更高效的冷却液和改进的冷却管道设计，

能够在更短的时间内实现气体的降温，从而提高了整体系统的热交换效率，优化后的冷却系统能够在空分塔的运行过程中降低冷却所需的能量，从而减少了系统的总体能耗。冷却系统的改进还优化了空分塔内部气流的流动路径，减少了热交换过程中的气流干扰，提高了冷却效果和换热效率，在优化后的冷却系统中通过改进的管道布局冷却液的流速得到了优化，冷却效果显著提升。优化后的冷却系统可以减少10%的能源消耗，提高系统整体的节能效果，这些改进不仅提升了空分塔的运行效率也减少了对环境的负面影响，这些创新技术的引入使空分塔的冷却系统得到了有效优化，推动了空分塔向高效、环保方向发展。

#### 结论

本文通过对ASU空分塔高效换热与节能技术的深入分析与优化，提出了一系列关键技术和创新措施，包括高效换热器设计与优化、气体分配系统改进、热集成技术应用及冷却系统优化。优化换热器设计能够显著提高换热效率，在节能方面，结合高效换热技术和热集成优化，空分塔的能耗减少了，CO<sub>2</sub>减排，显示出显著的节能效果；冷却系统的改进通过采用新型管道设计与优化冷却液流速，有效降低了能源消耗，提高了系统的整体效率。随着环保政策的日益严格和全球能源需求的增加，空分塔系统的进一步优化有望结合智能化、自动化控制技术，为实现更高效、环保的生产模式提供支持，为能源的可持续利用和环境保护做出更大贡献。

#### 参考文献

- [1] 刘国梁.空分塔大型设备基础隔冷层珠光砂混凝土施工技术研究与应用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2021.
- [2] 郑棋.深冷空分塔故障分析与维修方法探讨[J].中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(8): 2.
- [3] 李雁翎, 何铁钢, 王洪武.1#空分塔DCS改造后氧氮送出量控制难点及解决方法[J].化工管理, 2020(30): 2.
- [4] 赵鹏飞.空分塔爆炸因素分析及预防[J].化工管理, 2020(3): 1.
- [5] 吕强.深冷低温旋转设备故障分析与改造[J].名城绘, 2020.